

執筆者：  
グローバルXチーム

日付：2021年9月9日  
トピック：Thematic



## GLOBAL X ETFsリサーチ

# 太陽光発電の導入が拓く未来

地球の気候は悪化の一途をたどっています。人間が排出する炭素によって発生した大気中の二酸化炭素濃度の増加は、長期的な気温上昇をもたらしています。その結果、環境に悪影響を与え、その環境の変化が人間活動を脅かす環境汚染を引き起こしています。しかしながら、人間の活動が現在の気候問題に対する責任を負っているのと同様に、人間のイノベーションと投資によって気候の悪化を食い止めることが可能かもしれません。脱炭素化は、21世紀最大の喫緊の課題であり、世界共通の目標であると言えます。これを達成するには、化石燃料を段階的に廃止し、風力発電のようなクリーンで再生可能なエネルギー源の導入を加速するしか方法がありません。このような移行を実現するには、太陽光発電をはじめとする代替エネルギー源の基礎技術を向上させ、クリーンエネルギーの未来を支える経済的な基盤を確固たるものにするため、今後数十年間で数十兆ドル規模の投資が必要となるでしょう。

本稿では、世界的な気候変動による危機について掘り下げ、解決するうえで太陽光発電をはじめとするクリーンで再生可能なエネルギー源が果たすべき役割について考察します。

### 重要なポイント

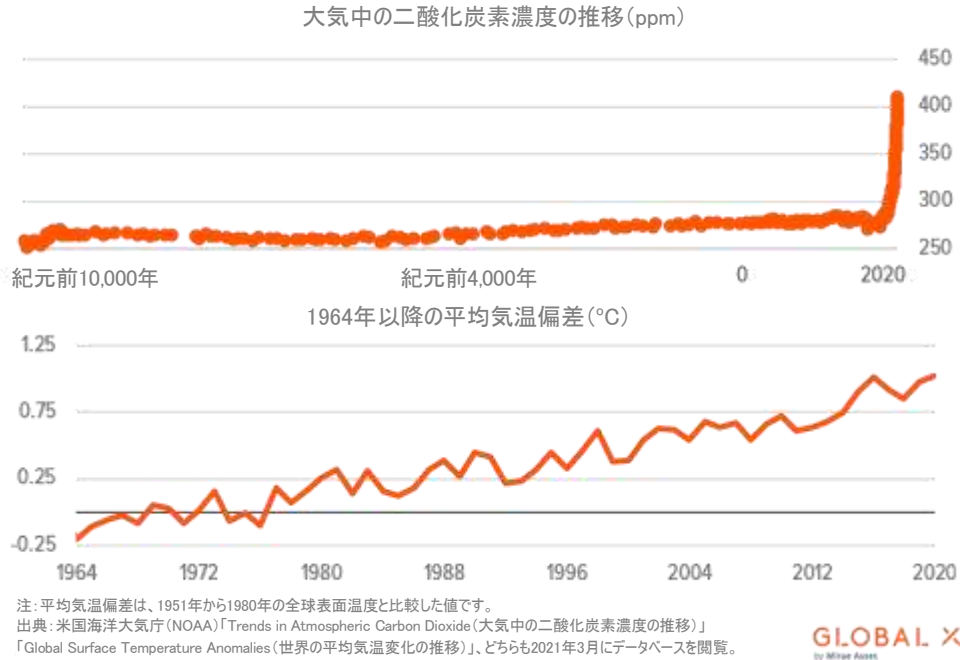
- 大気中の二酸化炭素濃度の上昇とそれに伴う気温の上昇は、人命や生活、そして地球の自然環境を脅かします。炭素排出量削減により、気温を産業革命以前と比べて1.5°Cの上昇に抑えることで、気候変動による悪影響の多くを緩和することが可能です。<sup>1</sup>
- 脱炭素化と炭素を大量に排出する化石燃料の利用から段階的に脱却することは、太陽光発電のようなクリーンで再生可能なエネルギー源に移行することで実現可能です。そのためには、基盤となる技術の向上や開発、インセンティブ、コスト削減、および普及促進に、数十兆ドル規模の投資を行う必要があります。
- 太陽光発電をはじめとする再生可能でクリーンなエネルギー源は、関連技術がより安価になるにつれて、化石燃料ベースのエネルギー源からの乗り換えによるシェア拡大が進んでいます。電化、規模の経済、気候変動対策などを背景に、今後も普及が進むと予想されます。

### 舞台裏：地球温暖化の危機

地球の気温は上昇し続けており、過去最高記録を塗り替えています。過去40年間の気温は、少なくとも1850年以降、すべての期間で上昇し続けており、2011年から2020年までの平均気温は1850年から1900年（産業革命前）の気温よりも約1.09°C高くなっています。<sup>2</sup>この温暖化のほぼすべてが、人為的なものか否かにかかわらず、二酸化炭素を中心とする大気中の温室効果ガス（GHG）濃度の上昇による直接的な結果です。<sup>3,4</sup>「気候変動に関する政府間パネル（IPCC）」は、2021年に発表した画期的な報告書（AR6）において、史上初めてこの因果関係を「明白」と断じました。<sup>5</sup>温室効果ガスは大気中で断熱材として機能し、地表から熱を吸収し、時間をかけてそれを放出します。自然に発生する温室効果ガスは、地球上に人が住める暖かさを保つ役割を果たしており、海による吸収や植物による光合成によってその濃度が調節されて来ましたが、しかし今日の温室効果ガスのレベルは自然な水準からかけ離れており、地球はその処理に追いつくことができません。



世界の平均気温は上昇し続けており、炭素排出量の抑制が急務となっている



大気に関するデータによると、2010年から2019年までの二酸化炭素の平均濃度は産業革命前の平均より43%高く、289.3ppmから410ppmに増加しています。<sup>6</sup>この増加は、直近の氷河期が終わったあとの数千年の期間を含め、分かっている期間についてだけでも自然増加の100倍の速さです。<sup>7</sup>そして2019年には、二酸化炭素濃度が過去200万年の間で最も高い水準に達しました。<sup>8</sup>二酸化炭素濃度の上昇が20世紀の産業革命の直後に始まったことは、決して偶然ではありません。<sup>9</sup>人為的な(人間による)炭素排出は、温室効果ガス排出量の上昇とその結果としての気温上昇(自然のGHGの増減を考慮して±0.1°C)のほぼ唯一の原因となっています。この問題の一番の犯人は、化石燃料をエネルギー源として燃やすことです。1990年以降、二酸化炭素の年間平均排出量の74%が、化石燃料をエネルギー源とすることにより生み出されています。<sup>9,10</sup>

二酸化炭素排出と温暖化の影響は、すでに、しかも同時に発現しています。<sup>11</sup>

- 陸上での異常な気温や熱波の強さと頻度は1950年代から上昇していますが、海洋での熱波も1980年代から倍増しています。
- 1950年代以降、豪雨被害もより頻繁に、より深刻になっています。一方で、やや矛盾していますが、気温上昇の結果、同時期から農業や生態系を脅かす干ばつも増加しています。
- 過去100年の間に、海洋はそれ以前の1万1千年よりも急速に温暖化し、結果として氷河が後退し、海氷融解が進みました。これに関連して、過去3,000年間の比較可能な期間において、海面上昇が最も速く進行しています。また、二酸化炭素吸収量の増加により、海洋酸性化が進んでいます。
- ハリケーンは、自然変動で説明できる範疇を超えるほど、過去40年間でその頻度が増えています。海洋の温暖化と海面上昇によってこれらの暴風雨の威力が増し、より大きな被害をもたらすとともに、気温の上昇によって発生地域が増え、これまでより北で発生するようになってきました。

これらの影響は、地球における水の循環(水循環)などのシステムを介して伝播し、自然災害から水不足や食糧不足にいたるまで、生命・生活・世界規模の経済に対するあらゆる脅威を引き起こしています



(関連する分析については、[清潔な水とアグテックと食のイノベーション](#)に関するリサーチを参照)。<sup>12</sup>なおかつこれらは、たった約1.1°Cの温暖化で発生しているのです。2021年時点で実施されている炭素排出政策に沿って推移した場合、2100年の気温は産業革命前より2.1~3.9°C上昇すると予想されています。<sup>13</sup>たった2°Cの温暖化で、「10年に1度」の異常気象の威力と頻度が大幅に増します。極端な熱波が5.6倍の頻度で発生するとともにその温度が2.6°C上昇し、豪雨被害が1.7倍の頻度で発生して降雨量が14%増加し、極端な干ばつが2.4倍の頻度で発生し、標準偏差0.6でより乾燥する(土壌水分量の観点から)可能性があります。<sup>14</sup>人類の生命に与える影響は計り知れません。明らかに、現在の対策では不十分です。

\*本稿で言及している「IPCC AR6報告書」とは、AR6の最初の発行物である「IPCC第1作業部会による報告書」を指しています。AR6とは、気候変動の科学的根拠に関するIPCCの第6次評価報告書です。当該報告書は234人の科学者(国連加盟国195か国すべてが科学者を推挙可能)に執筆されたもので、2021年1月までに発表されたすべての査読済み気候科学研究(14,000件)が要約され、分析されています。この報告書は、発行に至る前に、関係する科学者と政府双方の査読を受け、公平性と正確性が確保されています。

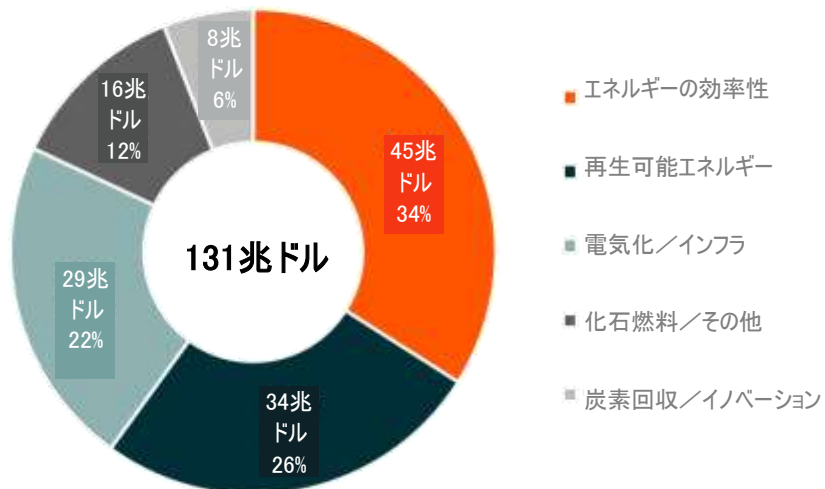
### 気候変動の解決策としてのクリーンな再生可能エネルギー

2016年のパリ協定では、温暖化を産業革命前と比べて2°Cよりはるかに低い温度に抑えるという法的拘束力のある目標が正式に採択されました。前述のような気候変動の影響を大幅に抑制するための達成可能な目標として、1.5°Cの気温上昇が強調されています。AR6によると、2016年以降、気候変動が急速に進んでおり、1.5°Cの気温上昇を可能にする炭素排出の選択肢はこれまで以上に狭くなっています。しかし、AR6は依然として、2020年代の炭素排出量をピークとして、2050年までに炭素排出量がネットゼロになれば、1.5°Cのシナリオを達成できるとしています。ただし、このネットゼロを達成するには、炭素回収技術による二酸化炭素回収・除去が必須です。<sup>15</sup>再生可能エネルギー生産とクリーンテクノロジーの積極的な採用は、この道筋のすべてのステップに不可欠です。

既存の法律、公約、目標を達成するには、2021年から2050年の間に総額98兆米ドルの投資が必要とされています。その内訳は、再生可能エネルギーに10兆米ドル、再生可能エネルギーに対応した交通および熱供給向けの電気インフラ(詳細については後述)に13兆米ドル、エネルギー効率化技術に32兆米ドル、そして残りが化石燃料に對するものとなっています。<sup>16</sup>これはかなりの額であり、再生可能エネルギー生成やクリーンテクノロジーに携わる企業が短期的にも長期的にも恩恵を受けますが、許容できる温暖化対策にはこれよりも格段に大きな投資が必要になるでしょう。

### 気候変動の抑制を進めるうえでは、クリーンエネルギー&テクノロジーへの大規模投資が必要となる見通し

2021年から2050年までの期間において必要な投資の合計額(単位:兆ドル)



注: 投資額は、IRENAが作成した1.5°Cシナリオを達成するのに必要とされる額に基づくものである。同シナリオは、気温上昇を産業革命前の水準から1.5°C以下に抑えることを目標としている。  
出典: 出典: IRENA, 「World Energy Transitions Outlook (世界のエネルギーの見通し: 1.5°C)」2021年6月



IRENAによる実現性重視の1.5°Cのシナリオでは、同期間における投資総額を131兆米ドルに拡大するとともに、再生可能エネルギーと電化に対する投資割合を大幅に引き上げる必要があると試算しています(図参照)。<sup>17</sup>このような投資と堅実な実施により、2050年までに二酸化炭素の年間純排出量を-0.4ギガトン(GtCO<sub>2</sub>/年)に抑え、現在の目標で予想される36.5GtCO<sub>2</sub>/年から大幅に改善することが可能になると見込まれています。<sup>18</sup>

パリ協定の採択以降、6か国でカーボンニュートラル目標が法制化されたほか、EU、カナダ、韓国など5つの国・地域では同趣旨の法案の検討が始まっています。一方、合わせて世界の炭素排出量の36.8%を占める米国と中国をはじめとする24か国は、公式な政策として気候目標を設定しているものの、より意味のある措置については足踏み状態にあります。<sup>19</sup>しかしながら、今後の政府の動きにかかわらず、再生可能エネルギーやクリーンテクノロジーへの投資は、現在の政策で示されているもの以上になると私たちは考えています。また、拘束力のある法律や即効性のある行動を私たちは望んでいますが、一方でこれらの技術は経済的およびビジネス的な観点からも意味があります。

- 特に、未だ新型コロナウイルスのパンデミックによる影響から抜け出せない状況下で、再生可能エネルギーセクターの雇用が急速に拡大しており、化石燃料からの脱却が進むにつれて今後も増加していくものと思われます(次のセクション参照)。
- 世界人口の75%以上が、化石燃料の純輸入国に住んでいます。これらの人々や国にとって、再生可能エネルギーはエネルギーの自立を可能にします。<sup>20</sup>
- 再生可能エネルギー電力は、化石燃料から作られた電気よりも価格が低下してきています(次のセクション参照)。このことから、Amazonやウォルマートなどといった企業は、すでに再生可能エネルギーやクリーンテクノロジーを使った脱炭素化計画を発表しています。<sup>21</sup>

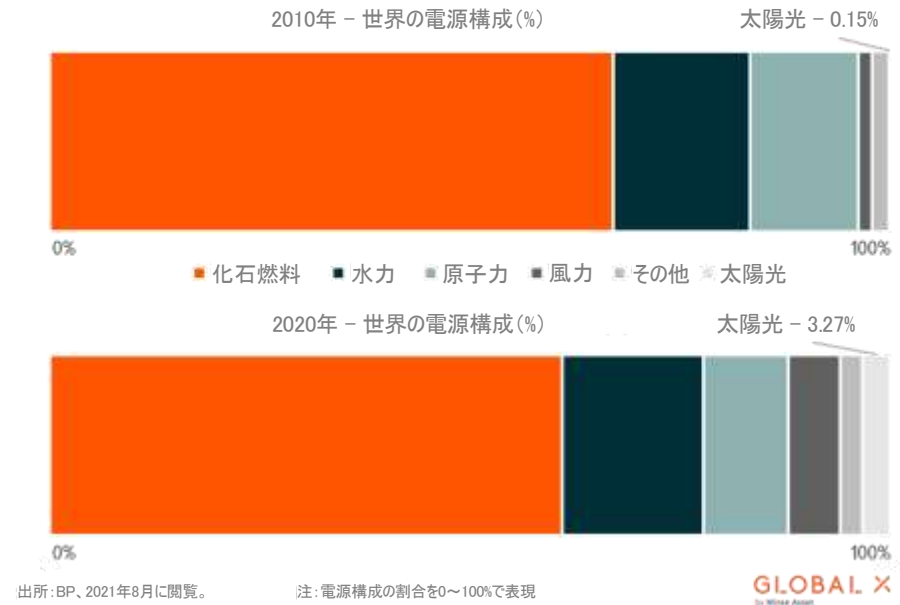
## 太陽光発電: 過去と現在

実用規模の太陽光発電所(ファームと呼ばれる場合もある)や住宅設置型その他を構成する太陽光発電パネル(モジュールと呼ばれる場合もある)には、半導体材料を用いた太陽電池(PV)セルが使用されています。この材料は、一般的には多結晶シリコンで、太陽からの光、あるいは光の粒子がシリコン上の電子を弾き飛ばして電流を発生させる「光起電力効果」によって電流を生成します。ほとんどのエンドユーザーは、この電気を使用する前に、ソーラーインバーターと呼ばれる交流電力に変換する装置を通す必要があります。

たった10年前には、電源構成に占めるクリーンエネルギーの割合は10%に過ぎなかったうえ、再生可能エネルギー発電量の大半をダムや流れ込み式水力発電などの水力発電が占めており、2010年における再生可能エネルギー発電量における水力発電の割合が82%でした。一方で、風力発電は8.3%、太陽光発電は0.8%に過ぎませんでした。<sup>22</sup>しかし、水力発電だけがクリーンエネルギーの未来を担う唯一の礎となることはあり得ません。水力発電源は立地に制限があるうえ、すでに水力発電への依存度が高く、その成長には限界があるからです。2010年から2019年にかけて、水力発電は23%成長しエネルギー消費全体の成長を8%上回りましたが、単独で従来のエネルギー源の市場シェアの大半を占めるほどには成長していません。<sup>23</sup>

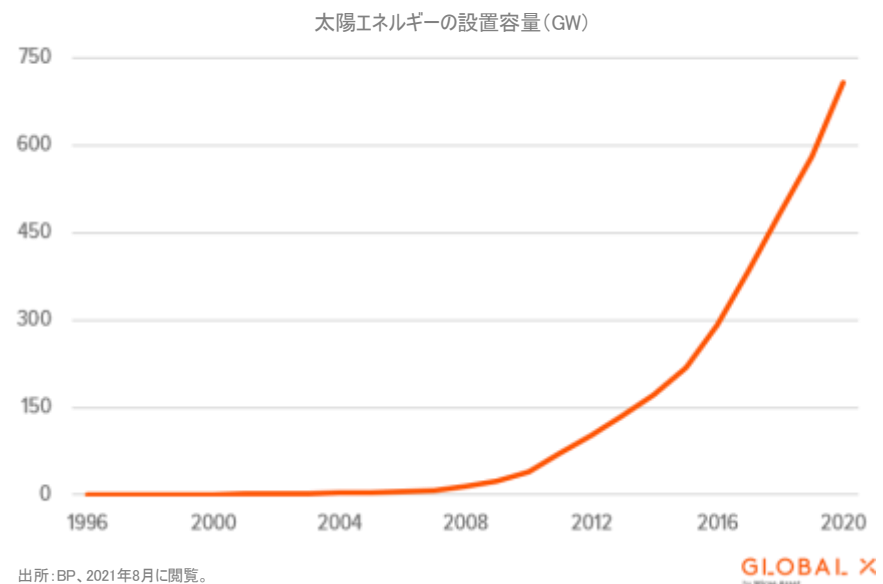


世界の電源構成に占める太陽PVの割合は、2010年から2020年末までの間で22倍に成長し3.3%に達した



しかし、2010年以降は大きく変化し、電力セクターが世界の発電量で占めるクリーンエネルギーの割合は大幅に増加して2020年には29%に達し、2019年末比で2%、2010年末比で約10%上昇しました。<sup>24</sup>この結果は、風力発電と太陽光発電が、世界の再生可能エネルギーへの移行というパズルにおいて、これまで欠けていたピースであることを証明しています。太陽光発電に目を向けると、2010年から2020年の間に、太陽エネルギーの設備容量は40.1ギガワット(GW)から707.5GWへと17.6倍(1,763%)に上昇しました。<sup>25</sup>そして現在、太陽エネルギーは全世界の電力の3.3%を占めており、再生可能エネルギー発電の11.5%を占めるまでになっています。<sup>26</sup>

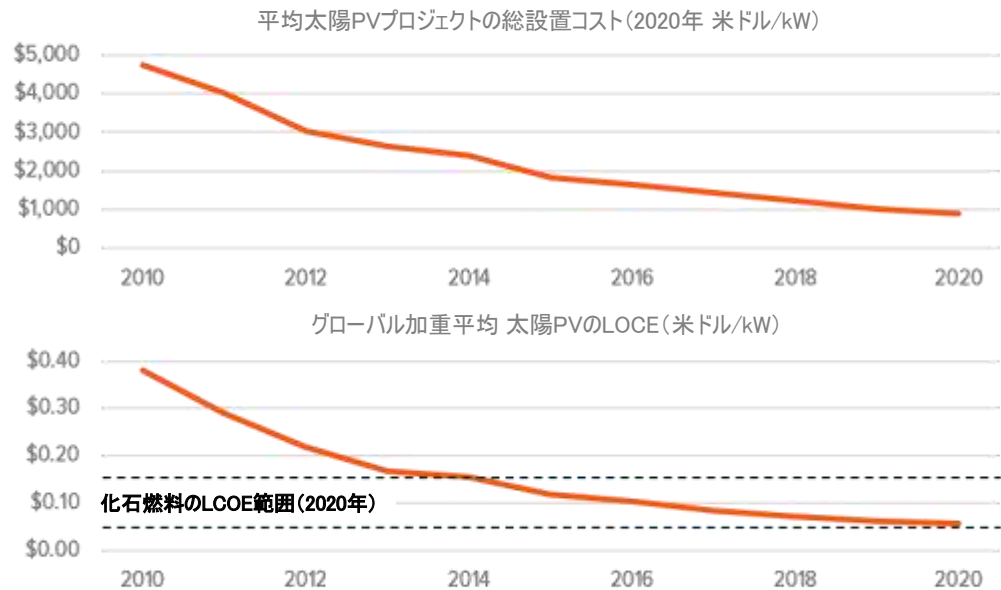
過去10年間で飛躍的に成長した太陽エネルギーの設備容量





この最近の成長に主に寄与した要因は、基礎技術の革新と急速なコスト低下です。太陽光発電のコストは、設置工事を除けば、太陽PVとソーラーインバーターが主な構成要素ですが、時間の経過とともに価格が低下しています。太陽PVモジュールの平均価格は、2010年末時点で2.73ドル/kWだったのに対し、2020年末時点では0.301ドル/kWになっています。<sup>27</sup>この改善は、これらの技術による規模の経済とイノベーションの結果であり、太陽光発電プロジェクトの総設置コストは同期間で81%低下しています。<sup>28</sup>これについては、太陽PVの均等化発電原価(LCOE)に注目することで理解できます。LCOEとは、特定のコスト回収期間中に電源を建設し運用するために必要な収益のことです。過去10年間で太陽PVのLCOEは85%低下し、世界のほとんどの地域で化石燃料よりも安価になっています。<sup>29</sup>

### 部品コストの低下と効率性の向上により、太陽PVの総コストは低下している



出所:IRENA、Pvxchange、Global X ETFs、2021年6月

注:化石燃料の範囲は\$0.055~\$0.148

### 太陽光発電の未来像

規模の経済、投資の拡大、支援政策、そして市場の流れにより、太陽光発電の部品、設置、運用コストがさらに削減されることを背景に、今後も太陽光発電は成長していくと私たちは予想しています。太陽発電モジュールのライフサイクルコストは、PVセルの技術革新による効率の向上に伴い低下し続けています。1954年に誕生した最初の太陽電池パネルの効率は4%でした。つまり、吸収した太陽光の25分の1が電気になり、残りは熱として放出されていたということです。<sup>30</sup>それから70年近く経った現在、効率は約20%となり、コスト削減という点では大きく前進しましたが、単接合太陽電池の理論的限界である約30%にはまだ及びません。<sup>31</sup>一方で、多接合太陽電池、あるいは複数の半導体材料で構成される電池には、さらなる低コスト化の可能性が見込まれています。この種の太陽電池は、理論上の最大効率が87%ですが、現時点では開発初期段階にあります。<sup>32</sup>

さらに、実現技術への投資が、すべての再生可能でクリーンなエネルギー源の成長を促進するはずですが、電力が占めるのは最終エネルギー消費量(TFEC)の37%に過ぎず、その大部分は電力セクターが直接生産しています。TFECの残りの63%は、輸送、建築、産業で化石燃料を直接燃焼したことで発生したエネルギーです。<sup>33</sup>電化された最終用途は、電力セクターを再生可能エネルギーに移行することで脱炭素化が可能ですが、上述のような非電化の最終用途については、直接または間接的な電化によってのみ脱炭素化が可能ということになります。直接電化によって、化石燃料をエネルギーとする自動車や建物の暖房システムは必然的に電動システムに

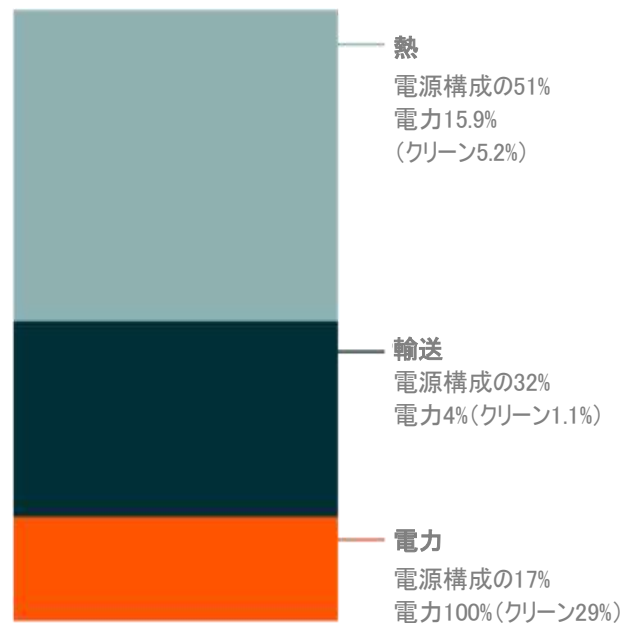


移行するでしょう。この点を念頭に、再生エネルギーと電化は補完関係にあると考えるべきです。

再生可能エネルギーの完全普及は電化によってのみ達成されますが、一方でさらなる電化は再生可能電力に大きく依存します。つまり、電化や再生可能エネルギーの生産をさらに拡大することは、グローバルなカーボンニュートラル目標の達成に大きな役割を果たすこととなります。一部の推定によれば、石炭、石油、および天然ガスといった化石燃料をクリーンな代替エネルギーで置き換えることにより、温暖化を適切に抑制するのに必要な排出量削減の52%が達成できます。<sup>34</sup>

### 電力セクターは電源構成全体の中の一部に過ぎない

総エネルギー使用量に占めるセクターの割合 (%)  
セクターのエネルギー使用量に占める電気/クリーンパワーの割合 (%)



注: 熱とは、産業や建物の中での暖房・冷房を指す。  
出所: REN21、IEA、Global X ETF、2021年7月

### 太陽光発電への投資

脱炭素化による気候変動への対応は、我々が取り組んでいる現代の重要な課題です。人間の活動と気候変動との関連性には反論の余地はなく、風力や太陽光などといった再生可能エネルギーへの移行が、その達成に向けた最大の希望です。近年、これらのエネルギー源の採用が進んでいることは心強いことであり、技術革新とコスト低下が移行をさらに加速する中、化石燃料源の市場シェアを今後も奪っていくと私たちは期待しています。私たちは、破壊的(ディスラプティブ)技術やそれらの技術を提供する企業の成長を捉える可能性に加え、上述のようなエネルギー源への移行に投資家が参加することができると思っています。

#### 太陽光発電のサブテーマ

- 太陽エネルギー関連材料: 主に太陽電池や集光型太陽熱ミラー/レンズに使用される原材料の生産企業。
- 太陽エネルギーシステムおよび部品: 光起電力効果あるいは太陽光から得られるエネルギーを利用して発電する太陽エネルギーシステムの開発/製造に携わる企業。
- 太陽光発電: 光エネルギーを利用した発電・配電を行う企業。

- 太陽光発電技術: 太陽エネルギーを動力源とする商業用および住宅用のインフラ、発電機、エンジン、および太陽エネルギーで発電した電気のための住宅用および商業用規模の電池、電気自動車やその他の電気機器のための太陽エネルギーによる充電システムを開発する企業。
- 太陽光発電の設置、統合、保守: 住宅用、商業用、産業用レベルの太陽光発電の設置、統合、保守、および継続的な利用に関するエンジニアリングおよび/またはアドバイザリーサービスを提供する企業。

- 
1. IRENA, "World Energy Transitions Outlook: 1.5oC Pathway," June 2021.
  2. IPCC, "AR6 - Climate Change 2021: The Physical Science Basis," August 2021.
  3. Ibid.
  4. Bloomberg, "Annual Greenhouse Gas Emissions," Accessed July 12, 2021.
  5. IPCC, "AR6 - Climate Change 2021: The Physical Science Basis," August 2021.
  6. NOAA Global Monitoring Laboratory, Atmospheric Carbon Dioxide Database; Global X Analysis
  7. NOAA, "Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide," August 2020.
  8. IPCC, "AR6 - Climate Change 2021: The Physical Science Basis," August 2021.
  9. Ibid.
  10. Climate Watch, "Historical GHG Emissions," 2021; Global X Analysis
  11. IPCC, "AR6 - Climate Change 2021: The Physical Science Basis," August 2021.
  12. Ibid.
  13. Climate Action Tracker, "Global Update: Climate Summit Momentum," May 2021.
  14. IPCC, "AR6 - Climate Change 2021: The Physical Science Basis," August 2021.
  15. Ibid.
  16. IRENA, "World Energy Transitions Outlook: 1.5 °C," June 2021.
  17. Ibid.
  18. Ibid.
  19. Visual Capitalist, "Race to Net Zero: Carbon Neutral Goals by Country," June 2021.
  20. IRENA, "World Energy Transitions Outlook: 1.5 °C," June 2021.
  21. Bloomberg, "Amazon Tries to Make the Climate Its Prime Directive," Sep 21, 2020.
  22. BP, "Statistical Review of World Energy 2021," 2021.
  23. Ibid; Global X Analysis
  24. IEA, "Global Energy Review 2021," April 2021.
  25. Ibid; Global X Analysis
  26. BP, "Statistical Review of World Energy 2021," 2021.
  27. IRENA Renewable Cost Database, 2021
  28. IRENA, "Renewable Power Generation Costs In 2020," 2021.
  29. Energy Transitions Commission, "Making Mission Possible: Delivering a Net-Zero Economy," Sep 2020.
  30. US Department of Energy, "The History of Solar," 2002.
  31. The Science Times, "Solar Energy: Identifying the Efficiency of Solar Panels, and What are the Best Solar Panels to Get," June 23, 2021.
  32. Phys.org, "Multijunction solar cell could exceed 50% efficiency goal," February 2013.
  33. REN21, "Renewables 2021: Global Status Report," 2021.
  34. IRENA, "Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050," 2020.
  35. Solactive Solar Index Methodology. If there are fewer than 50 pure-play companies, the index provider selects all eligible companies and the index consists of less than 50 constituents





投資には元本が毀損する可能性などのリスクが伴います。絞り込んだ投資は、当該セクターに作用する要因の影響をより大きく受け、変動性が高まることとなります。太陽光関連企業は一般に、非常に激しい競争、製品ライフサイクルの短さ、および潜在的に製品の陳腐化が急速に進むという特性を持ちます。これらの企業は、(太陽エネルギーおよび従来型エネルギーの両方の)エネルギー価格の変動、再生可能エネルギーの需給関係、税制度によるインセンティブ、助成金、およびその他の政府による規制および政策により大きな影響を受ける可能性があります。太陽光関連企業は、コモディティ価格の変動、為替レートの変動、輸入規制の導入、生産に必要な特定の投入物や材料の入手可能性、資源の枯渇、技術開発、および労使関係などから悪影響を受ける可能性があります。国際投資には、通貨価値の不利な変動、一般に公正妥当と認められる会計原則の相違、または他国の社会的、経済的もしくは政治的不安定性を原因とする元本毀損リスクが伴う場合があります。

新興国市場については上記と同一の要因ならびに高い変動性および低い流動性に関する他市場より高いリスクが伴います。

