

文責：
グローバルXチーム

日付：2021年7月14日
ピック：テーマ投資



GLOBAL X ETFリサーチ

クリーンエネルギー移行の鍵を握る水素

ネットゼロ・エミッションの達成は、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。そして、その鍵を握るのが水素です。

地球の気候は悪化の一途をたどっています。昨年秋、当社はレポートを発表し、気温がどれほど上昇しているか、また、それが海岸線の浸水被害、自然災害の多発、致命的な熱波、経済の崩壊など、世界の数十億人の人々にいかに存亡の危機をもたらしているかについて触れました。その後、2020年は2016年に並ぶ記録的な高温となり、2021年はすでにその記録を更新し、時には致命的なレベルにまで達しています^{1,2}。オレゴン州ポートランドでは、3日連続で、過去の6月の平均気温を華氏約40度上回る史上最高気温を記録し、116人の死者が報告されています^{3,4}。また、シベリア、モスクワ、中東欧など、世界各地でも同じような熱波が人々の生活を脅かしています⁵。しかし、こうした変化の根底にあるものは、これまでと何ら変わりありません。

温暖化の原因の75%前後は大気中の二酸化炭素（CO₂）であり、産業革命が始まって以来、私たち人類はこうしたCO₂の濃度を47%増加させています^{6,7}。世界的には、温暖化を産業革命前の水準から1.5°C以内に抑えることで気候変動リスクを抑制することができると考えられていますが、2030年までに排出量を2010年比で45%削減すれば、この水準の達成も可能になります⁸。そのためには、再生可能発電への移行と、化石燃料への依存度の高い経済分野の電化が重要です。しかし、電化ができないセクターもあり、多くの産業プロセスでは、エネルギーとは関係なしに二酸化炭素の排出が行われています。水素は、こうしたギャップを解決してくれます。

本稿では、ネットゼロ・エミッションの達成と気候変動の抑制のために水素が果たすべき重要な役割について明らかにします。

重要なポイント

- 水素は、運輸、建築、資本財など、電化が困難なセクターの脱炭素化に役立つ
- より安価で豊富な再生可能エネルギーにより、水素の製造コストは低下する
- 水素燃料電池はゼロカーボンの電気を生成し、自動車やビルの暖房などに利用可能
- 水素は、変動する再生可能エネルギー源の貯蔵ソリューションとして利用可能

次の段階への準備：再生可能エネルギーの限界

クリーンな電力への移行は順調に進んでいますが、これだけでは十分ではありません。2020年の世界の発電量に占める再生可能エネルギーの割合は、2019年比では2%、2010年比では10%近く上昇し、29%を占めるに至っています⁹。しかし、2019年の最終エネルギー消費全体に占める一般消費者の割合は17%と極めて低水準にとどまっており、残りは運輸、ビル、工業プロセスが占めています¹⁰。そのため、電力セクターでは再生可能エネルギーが引き続きシェアを拡大させていますが、脱炭素化のためには全セクターでのクリーンエネルギーへの移行が必要です。

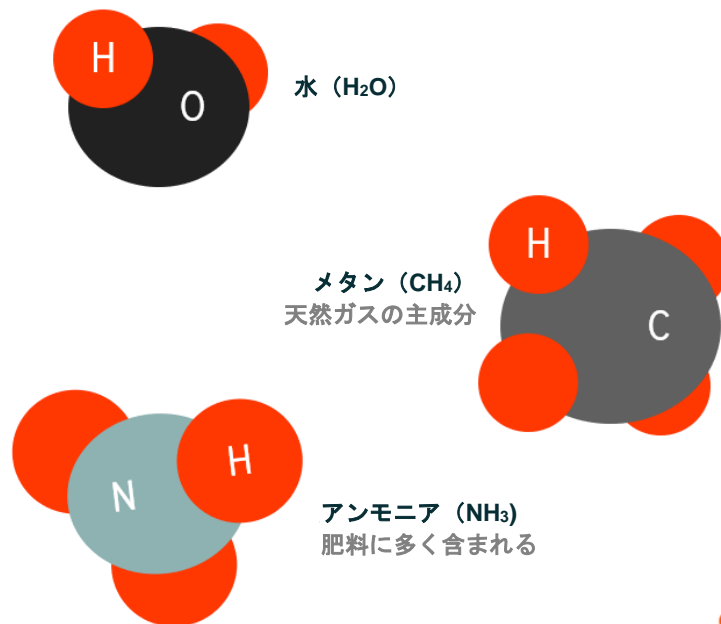


建築、運輸、資本財は依然、二酸化炭素排出量の多い化石燃料に大きく依存しています。2020年には、一次エネルギー消費量に占める再生可能エネルギーの割合はわずか12.6%にとどまっています¹¹。これらのセクターは、直接電化によってエネルギー消費の割合を再生可能エネルギーに大きくシフトさせることができますが、電化が常に可能であるかは明らかではありません。エネルギー消費の残りの部分は、他のゼロエミッション源から得なければなりません。そこで登場するのが水素です。

なぜ水素なのか？

水素は、宇宙で最も多く存在する最も軽い元素です。通常の状態では、水素はエネルギーキャリアとして無限の可能性を秘めた気体（ H_2 ）であり、重量比でガソリンの3倍のエネルギー含量を持っています¹²。しかし地球上では、水（ H_2O ）やメタン（ CH_4 ）のように、他の元素と結合した状態でしか存在しないため、単体で使用するためには水素として抽出しなければなりません（これを「水素の製造」と呼んでいます）。

水素は宇宙で最も豊富な元素だが、地球上においては自然な状態では他の元素と結合した分子の形でのみ存在する



GLOBAL X
by Mirae Asset

水素は、エネルギーとしての可能性を秘めているにもかかわらず、現時点では主として石油精製、金属加工、肥料製造などの原料として使われています。水素の大半は、化石燃料を大量に消費する水蒸気メタン改質法やガス化法を用いて製造されています（グレー水素）¹³。国際エネルギー機関（IEA）によると、水素の製造には世界の天然ガスの6%と世界の石炭の2%が使用されており、年間8億3,000万トン超の CO_2 が排出されています¹⁴。しかし、水素の製造は必ずしも排出量が多いわけではなく、エネルギーキャリアとしての可能性から脱炭素化に貢献することができます。実際、低炭素やゼロ炭素での製造が可能になれば、水素は2050年までに11兆ドル規模の市場になり、 $1.5^\circ C$ の温暖化シナリオでは、水素の年間需要量は現在の70メガトンから613メガトンに増加する可能性があります¹⁵。

現在の製造方法では、二酸化炭素回収・貯留（CCS）技術を用いることにより排出量を削減することができます。将来的には85~95%の排出削減も可能とされます¹⁶。この方法で製造した水素は「ブルー水素」と呼ばれています。しかし、さらに重要なことは、電気分解という別の水素製造方法を用いれば、排出物を一切放出することなく、水素を製造できる可能性があるということです。水の電気分解は、電流を用いて水を水素と酸素に分解するプロセスです。実際には、電解槽と呼ばれる装置で電気分解を行うものであり、外部エネルギー源からの電力を用いて水素（電解水素）を生成します¹⁷。



外部エネルギー源からの電力が風力や太陽光発電のようなクリーンエネルギーであれば、こうした水素の製造はゼロエミッションであり、生成された水素は「グリーン水素」と呼ばれます。

3種類の水素 (H₂)

色分け	プロセス	エネルギー源	炭素集約度
グレー水素	<ul style="list-style-type: none"> 水蒸気メタン改質 (SMR) ガス化 	<ul style="list-style-type: none"> メタン 石炭 	高
ブルー水素	<ul style="list-style-type: none"> 二酸化炭素回収・貯留 (CCS) 技術を用いた水蒸気メタン改質 CCSを用いたガス化 	<ul style="list-style-type: none"> メタン 石炭 	低
グリーン水素	<ul style="list-style-type: none"> (電解槽での) 電気分解 	<ul style="list-style-type: none"> 再生可能電気 	ゼロカーボン

出典：国際再生可能エネルギー機関 (IRENA、2020年)、Global X ETF、2021年7月

いずれの種類の水素にもエネルギーポテンシャルがあり、直接的に二酸化炭素を排出することなく、燃料電池で電気に変えることができますが、将来の水素経済への鍵を握るのは低炭素製造法です。低炭素水素は、すでに述べたように、電化が不可能なセクターにクリーンエネルギーをもたらすほか、無数の別の方法でも二酸化炭素排出量の削減を可能にします。しかし、これが現実のものとなるには、グリーン水素への移行が大幅に進む必要があります。

水素経済の実現

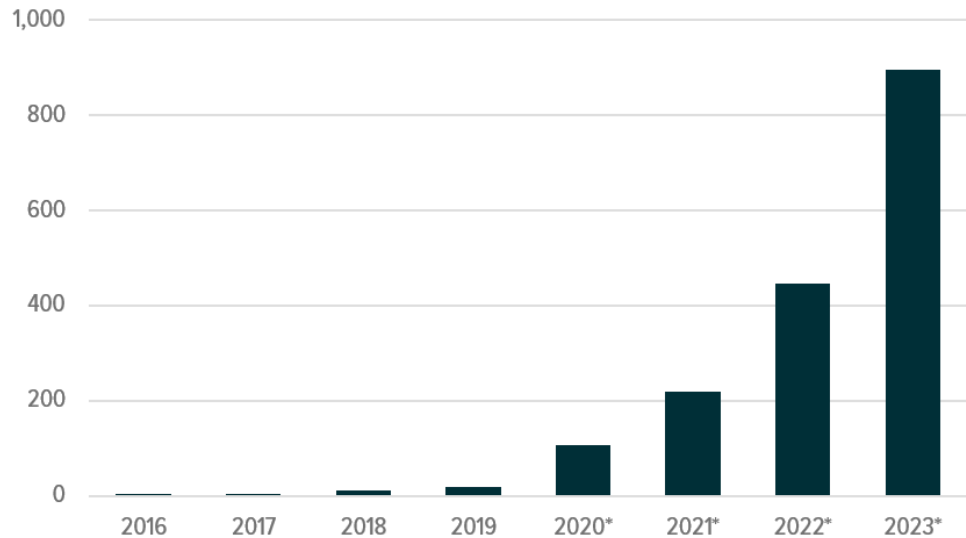
現時点では、水素製造に占める電気分解の割合は少なく、グリーン水素の割合もそれほど大きくありません¹⁸。なぜなら、グリーン水素の製造コストが割高だからです。2021年3月現在、グリーン水素の製造コストは3~6.5ドル/kgであるのに対し、グレー水素は1.80ドル/kg、ブルー水素は2.40ドル/kgとなっています¹⁹。しかし、これらの数字は業界の過去10年間の進歩を示すものではありません。2010年当時のグリーン水素の製造コストは10~15ドル/kgであり、現在の約2.6倍でした²⁰。

再生可能エネルギーのコストと入手のしやすさ、そして電解槽のコストは、これまで低価格のグリーン水素製造を阻害する主要な要因となっていました。しかし、こうした阻害要因は、今や解消しつつあります。再生可能エネルギーは、かつてないほど安価で、入手しやすくなっています。過去10年間で風力発電の総発電量は4倍、太陽光発電は17.5倍に増加しており、電力平準化コストは80%も低下しています^{21,22}。こうした傾向は今も続いているようで、水素協議会の2021年2月の報告によると、再生可能エネルギーのコストは、従来予想より15%も低下するなど、継続的に低下し続けているとのこと²³。電解槽のコスト低下もまた、低コスト生産を可能にしています。電解槽の2020年の資本コストは2010年比で60%低下していますが、水素協議会が2021年に発表した2030年の電解槽コスト予測は、2020年予測よりも30~50%低い水準になっています^{24,25}。



電解槽のコスト低下で今後数年間の電気分解装置の大幅増が見込まれる

電気分解装置の増設 (MW/y)



注：国際エネルギー機関（IEA）2020年6月データ。MW/y = メガワット/年。*計画
出典：IEA（2020年）。水素、IEA、パリ

GLOBAL X
by Mirae Asset

こうした動きから、とりわけ炭素税が賦課された場合、グリーン水素のコストは今後7～13年以内に、いくつかの地域でグレー水素並みになるというパラダイムシフトが生じると考えられます²⁶。これは楽観的な見方ではあるものの、非現実的ではありません。水素は近年、大きな注目を集めるとともに水素への投資も増えています。2021年初頭の段階で、75カ国以上がネットゼロ・エミッション達成の決意を示しており、30カ国が具体的な水素導入計画を発表し、世界中の政府が水素バリューチェーンに700億ドルを投資すると約束しています²⁷。民間セクターに目を転じると、数百件の水素関連プロジェクトが進行中または計画段階にあり、その規模は3,000億ドルにも達しています²⁸。しかし、エネルギー移行委員会によれば、本格的な水素経済を実現するためには多額の追加投資（現在から2050年までで総額15兆ドル）が必要になります。

グリーン水素の製造コストは今後も低下し続け、その利用が現実のものとなると期待されます²⁹。

燃料電池への水素の利用と脱炭素化への取り組み

「間接電化」とは、電気を化石燃料の代替物として直接的に使用するのではなく、産業プロセスへのインプットとして使用することを意味します³⁰。クリーンエネルギーの観点からは、間接電化は電気分解によって水素を生成するプロセスを意味します。燃料電池は、この間接電化を利用して、水素と酸素の電気化学反応（酸化還元反応）を起こして電流を発生させますが、その際に副生成物として唯一熱と水のみが排出されます。水素が化石燃料に対してコスト面での競争力を持つようになれば、水素燃料電池は運輸セクターや建築セクターのネットゼロ・エミッション達成に大きく貢献すると思われます。

燃料電池電気自動車（FCEV）では、バッテリー電気自動車（BEV）と同様、ゼロエミッションの電気モーターが推進力となります。BEVとは異なり、FCEVのモーターは、車載タンクに貯蔵された水素と空気中の酸素を燃料として使用して安定した電流を発生させる燃料電池で駆動します。FCEVは、BEVと同様、内燃機関（ICE）自動車に比べて、保守に手間がかからず、排出ガスもなく、静かな運転が可能など、多くの共通した利点があります。しかし、FCEVには独自の利点も多数あります。FCEVは電気を水素の形態で間接的に貯蔵していることから、電気を貯蔵するためにBEVで使用されている重いリチウムイオン電池の必要はありません。その結果、FCEVは大幅に軽量化され、航続距離が伸び、気温に関係なく動作し、

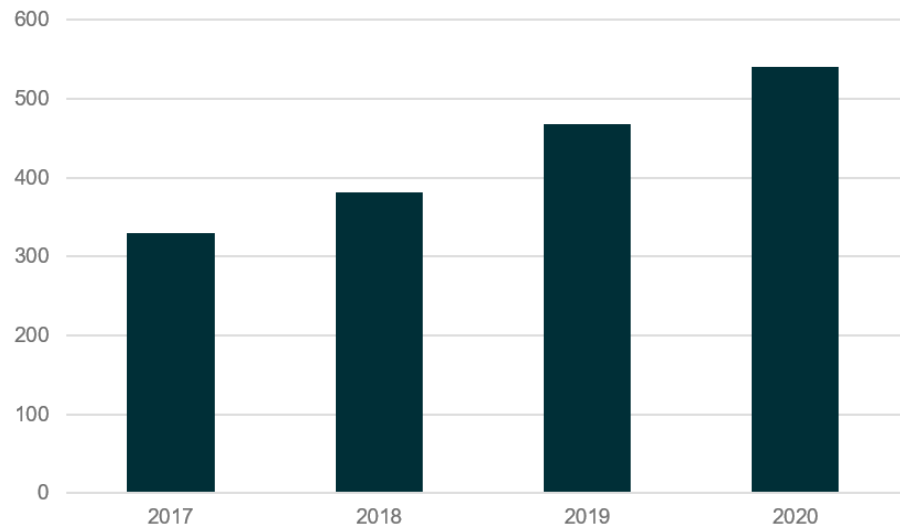


燃料補給時間も最低限に抑えられます³¹。欠点は、水素製造時に、電気分解に伴う熱としてエネルギーが間接的に失われるほか、燃料電池で発電する時点でも熱としてエネルギーが直接的に失われることであり、このためFCEVのエネルギー効率はBEVに比べて劣ります。

FCEVはまだ初期段階にあり、潜在的な消費者が利用できるFCEVの選択肢は限られています。FCEVが利用できる水素ステーションは、世界550カ所に満たないなど、さらなる課題も横たわっています³²。勇気づけられることは、FCEV向け水素ステーションが増加傾向にあり、およそ170カ所に新たな水素ステーションが建設中または計画段階にあることです（米国を除く）³³。グリーン水素の生産が拡大し、FCEVの導入が世界の脱炭素化計画において明確な位置づけを得られることにより、こうした施設の拡大はさらに加速すると思われます。しかし、これまでのEVは依然、全般的な電化に欠かすことのできない存在であり、FCEVに置き換えられるという計画もないことに留意することが重要です。前述の通り、FCEVとBEVには、それぞれに長所と短所があります。ICE自動車の代替としては、大きな航続距離を必要とせず、充電と充電の間に一貫して使用することでバッテリーの消耗を補うことができるBEVが最適であると私たちは考えています。一方、FCEVは、内燃機関を搭載したトラックやクロスカントリーバスなど、中・大型の長距離車両の代替に適しています。FCEVの航続距離はBEVに比べて大幅に長いほか、はるかに軽量であることから、重量物を輸送し、往々にして重量に応じた規制や料金が課せられる長距離車両にとっては重要な特徴を持った存在であると言えます。

水素ステーションの設置数は少ないが、その伸び率は FCEV に対する将来的な需要を示唆

年末時点の水素ステーション設置数



出典：Jülich Forschungszentrum、2021 年

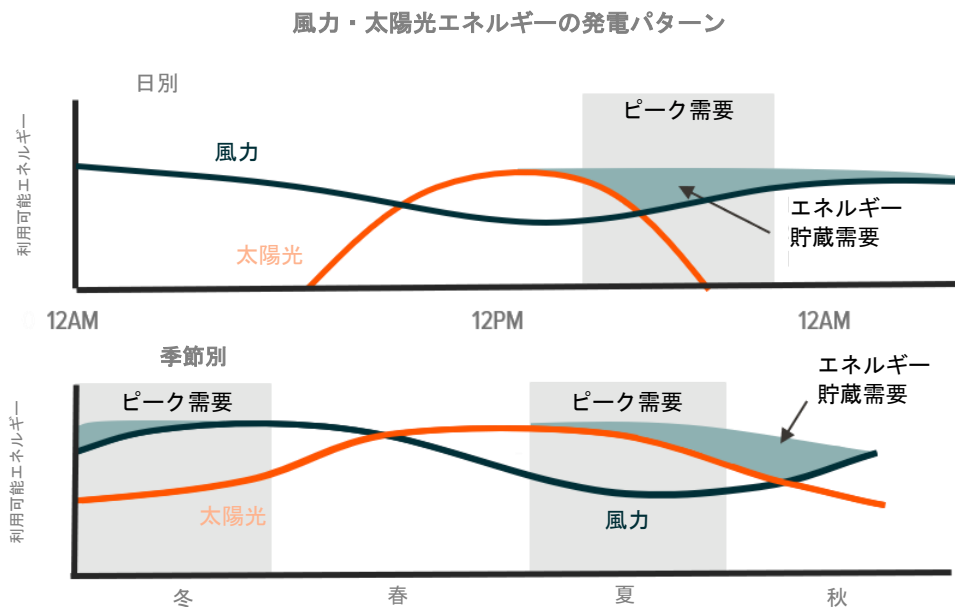
また、水素は、天然ガスや石油を熱源・電源とするビルの脱炭素化にも役立つ可能性があります。建築セクターの電化が他の分野に比べて遅れているのは、主に天然ガスに代わるコスト競争力のある選択肢が限られているためです。しかし、水素審議会によると、熱電併給型水素燃料電池（FC CHP）は、早ければ2030年には低炭素のエネルギー源になり得るとのことです³⁴。FC CHPは、FCEVに搭載されている燃料電池と同じ仕組みで発電しますが、燃料電池の副生成物である熱についても給湯や暖房に使用します。建築分野は世界のエネルギー需要の33%、世界の排出量の25%を占めることを踏まえると、FC CHPなどの水素を利用したエネルギー源は、このセグメントの脱炭素化への取り組みにおいて大きな役割を果たすことが期待されます³⁵。



変動電源とグリーン水素の関係は双方向

すでに述べたように、より安価で、いつでも利用可能な再生可能エネルギーの生産は、グリーン水素を実現させるための重要な鍵となりますが、両者の関係は双方向の関係でもあります。エネルギー貯蔵は、自然条件が発電に直接影響する風力や太陽光のような変動電源（VRE）を幅広く活用するための前提条件となります。VRE電源は、風の吹き具合や太陽光の強弱に応じて、需要を上回る電力を生み出すこともあれば、下回ることもあります³⁶。複数のVREを統合することで、日々の発電量や季節的な発電量の差異を埋めることができますが、生み出された再生可能エネルギーを効率的に貯蔵することにより、柔軟性が増し、余剰電力を従来とは異なる方法で利用することも可能になります。

長期的なエネルギー貯蔵により、変動する再生可能エネルギーの統合が可能に電池による貯蔵とは異なり、水素はこうしたニーズを充足



注：図は説明のためのものであり、正確な数値または概数を示すものではありません。
出典：議会調査局、Global X ETF、2021年7月

GLOBAL X
by Mirae Asset

電池の消耗で充電容量が徐々に減少するグリッドスケールのリチウムイオン電池とは異なり、グリーン水素は、季節的な発電量の増減に備えてエネルギーを蓄えることができるなど、とりわけ貯蔵面で優位性を持っています³⁷。電気分解の段階でエネルギーは熱として失われますが、水素は正しく貯蔵されている限り、エネルギーポテンシャルを維持します。こうしたユニークな特性は、単に必要時にエネルギーを供給できるだけでなく、電気料金を安定させることにより、原価の回収を加速させ、さらなる装置の増設を可能にするというメリットがあります³⁸。同時に、こうした相乗効果により、再生可能エネルギーの生産者が水素貯蔵容量を増やすために電解槽に投資することで、グリーン水素にさらなる規模の経済をもたらします。

水素への投資

水素は宇宙で最も豊富に存在する元素であり、水素を利用した化合物は私たちの日常生活の一部になっていると言っても過言ではありません。しかし、水素が政策の立案、プロジェクトの開発、そして投資の第一線に登場したのはごく最近のことです。水素は次世代型クリーンテクノロジーであり、電力セクターだけでなく、脱炭素化への道を開いてくれるものと私たちは確信しています。水素はまだ初期段階にありますが、水素をはじめとするクリーンテクノロジーへの投資は、私たちの世界を再構築する持続可能なイノベーションの追い風になると考えています。



水素に関するサブテーマ

- 水素の製造：産業用、商業用エネルギー源として利用できる水素（グリーン水素を含む）の製造、輸送、貯蔵、流通
- 水素燃料電池：水素燃料や改良型水素富化ガスを用いて化学エネルギーを電気と熱に変換する燃料電池（およびその部品）の開発、製造
- 水素技術：水素電解槽、タンク、パイプライン、商業用・住居用インフラ、発電機、エンジン、水素燃料電池車および水素供給ステーションの製造
- 水素のインテグレーション：住居、商業、産業レベルでの水素系燃料源の採用と利用のためのエンジニアリングおよびコンサルティング・サービス

Investing involves risk, including the possible loss of principal. Hydrogen companies typically face intense competition, short product lifecycles and potentially rapid product obsolescence. They may be significantly affected by fluctuations in energy prices and in the supply and demand of renewable energy, tax incentives, subsidies and other governmental regulations and policies. Investments in smaller companies typically exhibit higher volatility.



- ¹ NASA, "2020 Tied for Warmest Year on Record, NASA Analysis Shows," Jan 14, 2021.
- ² Financial Times, "Record June heat in North America and Europe linked to climate change," July 9, 2021.
- ³ USA Today, "The heat wave in the West 'virtually impossible' without climate change," July 7, 2021.
- ⁴ KATU ABC 2 Oregon, "Oregon's heat wave death toll hits 116 on Wednesday," July 7, 2021.
- ⁵ NADA, "A Scorcher in Siberia and Europe," July 2021.
- ⁶ Bloomberg, "Annual Greenhouse Gas Emissions," Accessed July 12, 2021.
- ⁷ NASA, "The Causes of Climate Change," Accessed July 12, 2021.
- ⁸ IRENA, "World Energy Transitions Outlook: 1.5°C Pathway," March 2021.
- ⁹ IEA, "Global Energy Review 2021," April 2021.
- ¹⁰ REN21, "Renewables 2021: Global Status Report,"
- ¹¹ BP, "Statistical Review of World Energy 2021," July 2021.
- ¹² Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, "Hydrogen explained," Accessed July 10, 2021.
- ¹³ IRENA, "Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs," 2021.
- ¹⁴ IEA, "The Future of Hydrogen," June 2019.
- ¹⁵ CNBC, "Hydrogen is at a 'tipping point' with \$11 trillion market set to explode, says Bank of America," September 27, 2020.
- ¹⁶ IRENA, "Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs," 2021.
- ¹⁷ Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, "Hydrogen Production: Electrolysis," Accessed July 10, 2021.
- ¹⁸ IEA, "The Future of Hydrogen," June 2019.
- ¹⁹ S&P Global, "Experts explain why green hydrogen costs have fallen and will keep falling," March 2021.
- ²⁰ IRENA, "Green Hydrogen Policy," November 2020.
- ²¹ IRENA, "Installed Capacity Trends," Accessed Jun 22, 2021.
- ²² Energy Transitions Commission, "Making Mission Possible: Delivering a Net-Zero Economy," Sep 2020.
- ²³ Hydrogen Council, "Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness," February 2021.
- ²⁴ IRENA, "Green Hydrogen Policy," November 2020.
- ²⁵ Hydrogen Council, "Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness," February 2021.
- ²⁶ Ibid.
- ²⁷ Ibid.
- ²⁸ Ibid.
- ²⁹ Reuters, "\$15 trillion global hydrogen investment needed to 2050-research," April 26, 2021.
- ³⁰ Vattenfall, "Electricity as an enabler," Accessed July 12, 2021.
- ³¹ BMW, "Hydrogen fuel cell cars: everything you need to know," September 22, 2020.
- ³² Jülich Forschungszentrum, "Deployment Status of Fuel Cells in Road Transport: 2021 Update," 2021.
- ³³ Hydrogen Tools, "International Hydrogen Fueling Stations," March 31, 2021.
- ³⁴ Hydrogen Council, "Path to Hydrogen Competitiveness: A Cost Perspective," January 2020.
- ³⁵ IEA, "Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector," May 2021.
- ³⁶ IRENA, "Global Renewables Outlook: Energy Transformation 2050," 2020.
- ³⁷ IRENA, "Making the breakthrough: Green hydrogen policies and technology costs," 2021.
- ³⁸ IRENA, "Green Hydrogen Policy," November 2020.
- ³⁹ Solactive Global Hydrogen Index Methodology. If there are fewer than 25 pure-play companies, the index will include companies that have primary business operations in Hydrogen Activities but do not currently generate revenues or generate revenues of less than 50

