脱炭素社会移行への鍵を握る水素

―独・英の事例を参考に―

株式会社H&Sエナジー・コンサルタンツ パートナー
石丸　美奈

目　次

1．はじめに
2．水素と再生可能エネルギーの親和性
3．脱炭素化で増す水素の重要性
4．セクターカップリングとPower to Gas（P２G）
5．ドイツでの取組み
6．英国での取組み
7．広がる国際的な連携

1．はじめに

水素社会の実現を2020年の東京オリンピック・パラリンピックのレガシーにという表明[1]もあり、日本では水素エネルギー普及に向けて官民の取組みが急ピッチで進んでいる。

その一方で、過去何回かの「水素ブーム[2]」でも課題となった、水素利用の拡大、調達・供給方法の高効率化、コスト低減、法規制の壁など、水素のサプライチェーン構築には依然として大きなハードルがある。電気自動車（ＥＶ）の急速な普及に比べて、燃料電池自動車は燃料電池バスや燃料電池フォークリフトを含めても3,200台程度（2018年度末）にとどまっていることなどから、水素社会の展望については懐疑的な見方も多い。

しかし、近年は欧州も、再生可能エネルギー（再エネ）の導入拡大を背景に、水素を社会の多様な分野で利用する試みに注力しており、一過性のブームを越えた動きが生じている。

2．水素と再生可能エネルギーの親和性

水素は地球のみならず宇宙を含めて大量に存在して地域的な偏在がなく、様々な原料から生成できる[3]。単体で燃焼させた場合には酸素と反応して水となり二酸化炭素（CO_2）を排出せず、大気汚染の原因となる硫黄酸化物（SOx）や微小粒子状物質（ＰＭ2.5）等も出さないため、環境負荷が非常に小さい[4]。また、圧縮、液化、化学反応の利用等[5]により、比較的大容量を季節をまたぐような長期間、ロスなく貯蔵しておくことができる。

何よりもこの貯蔵が可能であるという特性は、太陽光や風力のような変動性再エネとの

1　2014年の舛添東京都知事（当時）の発言。
2　1973年のオイルショックを契機に、翌年には新エネルギー開発のための「サンシャイン計画」で水素エネルギー技術が重点技術のひとつとなり、次いで1978年には省エネルギーを主眼とした「ムーンライト計画」で燃料電池発電技術の研究が進んだ。1993年からは新エネルギー、省エネルギー、そして地球環境技術開発が「ニューサンシャイン計画」に一本化された。この計画実施のための機関として設立されたのが新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）。
3　現在、利用されている水素はそのほとんどが、産業分野の製造プロセスから生じる副生水素か化石燃料等の水蒸気改質で製造されたもので、CO_2フリーではない。
4　但し、窒素酸化物（NOx）は排出される。
5　水素をトルエン等の有機物と化合させて有機ハイドライド（メチルシクロヘキサン（MCH）など）にする方法、アンモニアを利用する方法、メタン化する方法、合金に水素原子を吸蔵させる方法などが検討されている。

親和性が高い。変動性再エネによる発電は比較的どこででも可能で、CO_2を排出しない上に、燃料コストがかからず、エネルギー供給の大きなポテンシャルがあるものの、安定性の観点から従来の中央集中型エネルギーシステムへの大量導入が難しかった。しかし、このグリーン電力を使い水電解によって水素を取り出せば、水素を媒介にした再エネの柔軟な利活用が可能になる。

３．脱炭素化で増す水素の重要性

今後、脱炭素化のペースを速める必要性が高まっていることは世界的なコンセンサスになりつつある。

気候変動対策の新たな枠組であるパリ協定が2016年11月に発効し、世界の平均気温上昇を産業革命前と比較して「２℃よりも十分に低く」できれば「1.5℃に抑える」ことが目標となったが、昨年に発表された気候変動に関する政府間パネル（IPCC）の「1.5℃特別報告書」は、温暖化が現在のままで進むと、2030年から2052年の間に気温上昇が1.5℃に達する可能性が高い（確信度が高い[6]）と警鐘をならした。国連は２℃未満目標を実現するために、2070年までに温室効果ガス（GHG）の排出を正味ゼロとする必要がある旨を提言しているが、本報告書が公になって以降、国際的な温暖化議論のベースはよりハードルの高い1.5℃目標へとシフトしている。

さらに、本年９月に公表されたIPPCの最新報告である「変化する気候下での海洋・雪氷圏に関する特別報告書（SROCC)」では、温暖化による氷河・氷床の融解や海水温の上昇で海面水位が上がり、異常気象の深刻度が増していることが明らかにされた。SROCCは温暖化が１℃進むことにより、過去１世紀に１回のペースで起きていた極端現象が、多くの地域で今世紀半ばまでに毎年１回生じることになると予測している。

この夏に欧州を苦しめた40℃を超える記録的熱波、アメリカを襲った巨大ハリケーン・ドリアン、日本が経験した集中豪雨と台風15号や19号の猛威などにより、こうした科学的分析結果への信頼性が高まっており、各地で気候変動の緩和につながる行動を後押しする原動力となっている。省エネやエネルギー利用の効率化、資源のリサイクルなどと並んで、CO_2フリーである再エネ電力の導入を最大限可能にする水素の役割は、今後ますます重要になる。

４．セクターカップリングとPower to Gas（Ｐ２Ｇ）

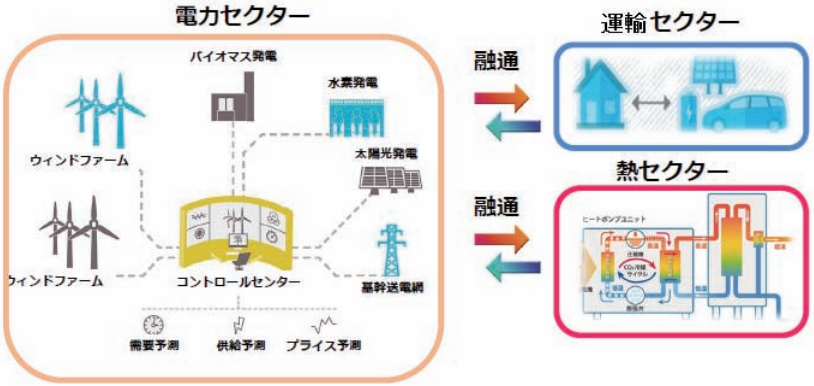
水素の利活用に関して、技術開発の視点が先行してきた日本に対して、欧州では近年、ドイツを中心に、温暖化防止のために再エネ導入を促進させるという観点からの検討が進んでいる。

ドイツは、2050年に1990年比でGHGの80％削減という高い目標値を掲げるが、2022年末までの原子力発電所全廃を決定しており、一方、地熱、水力、バイオマスといった安定したエネルギー供給が可能な再エネの利用には地理的、物理的（資源量）制約がある。そのため、変動性再エネからの大量供給に依存せざるを得ない。しかし、送電網の制約で、風力発電が盛んなドイツ北部から産業が集積する南部へ送電ができないという問題を抱えている。

こうした中で生まれてきたのが自立分散型のエネルギーシステムにおける「セクターカップリング」という考え方で、従来は電力、

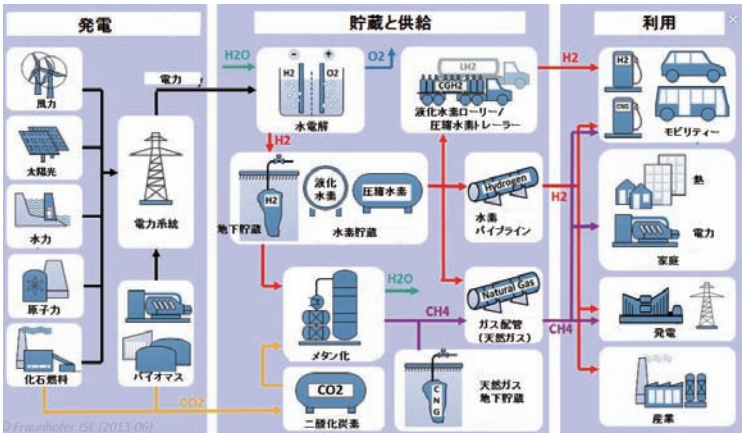
6　確信度の尺度は５段階で、非常に高い、高い、中程度、低い、非常に低いとなっている。

（図表１）セクターカップリングの概念図



（出所）環境省資料「地球循環共生圏の創造－日本発の脱炭素化・SDGs構想」2019年9月３日・４日を筆者加工
https://www.pref.ehime.jp/h15600/energy/documents/5kankyou.pdf

（図表２）Power to Gasの概念



（出所）Fraunhofer Institute for Solar Systems ISE Webサイトを筆者加工
https://www.ise.fraunhofer.de/en/business-areas/hydrogen-technologies-and-electrical-energy-storage/electrolysis-and-power-to-gas/power-to-gas.html

熱、運輸といったエネルギーの利用形態により区別されていた部門（セクター）を連携させて、再エネ由来の電力を最大限活用しながら、エネルギーの需要と供給を全体として最適化できる柔軟なシステムを構築するアプローチを取っている（**図表１**）。

ここでキーとなるプレーヤーが水素で、余剰電力をガス（水素等）として活用するPower to Gas（Ｐ２Ｇ）[7]の技術により各セクターをつなぐ役割を果たしている（**図表２**）。日本とは違って欧州では天然ガスのパイプライン網が発達しており、ドイツではその密度が日本の10倍にも及ぶ。そのため水素をある一定の割合まで天然ガスに混入し、既存

7　Ｐ２Ｇのガスには水素だけでなくメタン（CH_4）もあるが本稿では触れない。また、電力をメチルアルコールなどの液体燃料化するPower to Fuel（Ｐ２Ｆ）ないしはPower to Liquids（Ｐ２Ｌ）技術もある。

のインフラ経由で需要者に送り届けることが可能となり、低コストでCO_2を削減できるという事情もあり、水素利用が進みつつある[8]。

５．ドイツでの取組み

運輸部門では自動車に関してＥＶ化をはじめとする低・脱炭素化が進んでいる。しかし、大きなパワーを必要とし、航続距離が長く、エネルギー大量消費型である鉄道や船舶の場合、重量あたりのエネルギー密度が低い蓄電池[9]では大量搭載が必要となり、充電時間も長いため、内燃機関を代替するのが難しい。こうした中、ドイツでは世界初となる燃料電池列車が導入された[10]。

2018年９月から、鉄道車両製造大手の仏アルストム社[11]製「コラディア・アイリント（Coradia iLint)」が、ドイツ北西部ニーダーザクセン州のブクステフーデ駅とクックスハーフェン[12]駅の約124km区間を、それまでのディーゼル動車にかわって商用運行している。最大で300名が乗車でき、最高時速は140kmで、屋根には水素燃料タンクと燃料電池が積まれている。１回の燃料供給で最大1,000kmの走行が可能で、航続距離はディーゼル燃料を使用した場合と変わらない。床下にはリチウムイオン蓄電池が設置されており、電車の減速時にエネルギーを回収するとともに、燃料電池からの余剰電力も貯蔵され、走行中や加速時に利用される。

現在使用されている燃料は再エネ由来の水素ではないが、将来的なグリーン水素[13]への移行が計画されている[14]。

Coradia iLintは2021年に現在の２台を含め合計14台がニーダーザクセン州の同じ路線に、また2022年には27台がフランクフルト・ライン・マイン地域の公共交通機関（RMV）[15]に導入されることが決まっている。欧州における鉄道の電化率はＥＵ平均で53.71％となっており、ドイツでは52.8％、フランスでは56.75％であるが、英国やデンマークではそれぞれ33.74％と24.46％とかなり低い（いずれも2016年）[16]。従って、今後は欧州で燃料電池列車への需要が高まると期待される。

また、ドイツはCO_2排出削減の困難な産業部門の製造プロセス等で原材料として水素を活用し、脱炭素化を図ることにも注力している。

今年３月に、世界最大の鉄鋼メーカーであるアルセロールミタル（本社：ルクセンブルク）は、製鉄の過程で発生するCO_2を削減するために水素を活用するプロジェクト（費用は約6,500万ユーロ（78億円））に着手する旨を発表した。ハンブルクの拠点に年間10万ト

8　そのため電気を高価な蓄電池に貯めるという発想になりにくい。
9　蓄電池は重量あたりのエネルギー密度が燃料電池との比較で２桁も小さい。
10　日本ではＪＲ東日本が本年６月４日のプレスリリースで、ハイブリッドＦＣ車両の実証試験を川崎、横浜市内を走るＪＲ鶴見線などで2021年度に始める予定と発表している。https://www.jreast.co.jp/press/2019/20190603.pdf
11　仏高速鉄道TGVの車両は同社製。
12　クックスハーフェンは北海に面した港湾都市で洋上風力発電の一大拠点港。
13　ＥＵの低炭素水素認証スキーム“CertiHy”プロジェクトでは、水素製造時のCO_2排出量が天然ガス改質による製造時の排出量の６割減である36.4ｇ・CO_2／MJ未満のものを「プレミアム水素」とし、そのうち再エネ由来のものを「グリーン水素」、非再エネ由来のものを「低炭素水素」と定義している。
14　本プロジェクトは水素と燃料電池技術の研究開発を促進するための「水素・燃料電池技術革新国家プログラム（NIP)」から800万ユーロ（約９億6,000万円）の支援を受けている。
15　Rhein-Main-Verkehrsverbund
16　https://ec.europa.eu/transport/facts-fundings/scoreboard/compare/energy-union-innovation/share-electrified-railway_en。なお、日本の電化率（2016年度）はおよそ63％（運輸総合研究所「数字でみる鉄道2018」2019年２月)。

ンを生産する実証プラントを新たに建設する。

同社のハンブルク工場は直接還元鉄（Direct Reduced Iron（DRI））プラントで、通常、高炉[17]で使われる炭素の塊であるコークスではなく、天然ガスで鉄鉱石（Fe_2O_3）を還元している。天然ガスを水素に替えると、鉄鉱石に含まれる酸素は水素と反応して水だけを排出することになり、還元プロセスから発生するCO_2はゼロとなる。

実証プラントでは既設DRIプラントでの製造プロセスから得られる副生水素（純度95％以上）を使うが、将来的にはグリーン水素利用も視野に入れている[18]。

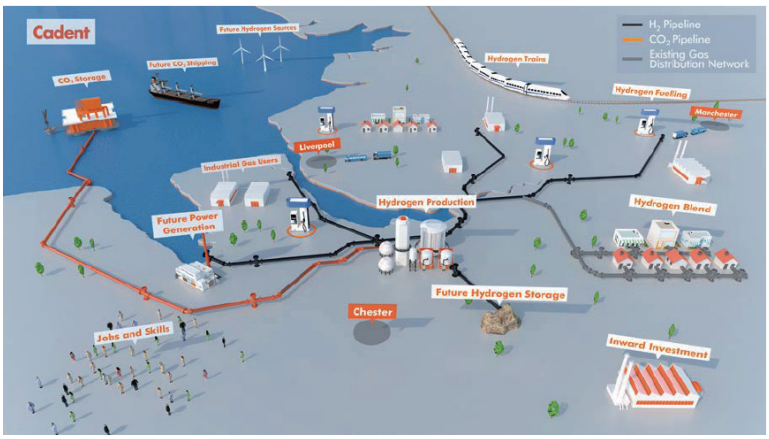
6．英国での取組み

英国は本年６月27日にGHG排出量を2050年までに実質ゼロとする新たな目標を立法化した。排出ゼロ目標の立法化は主要７か国（G７）で初めてとなり、極めて意欲的なものだ。

同国の水素・燃料電池に関する長期戦略[19]ではCO_2回収・利用・貯留（CCUS）を脱炭素社会実現の柱のひとつと位置付けている。８月には英国北西部のリバプールやマンチェスター地域の産業部門、家庭の熱利用、運輸部門から排出されるCO_2を、天然ガスから製造した水素燃料の使用により削減するとともに地域産業を振興するCCUSプロジェクト“HyNet NW”（2018年に開始）への政府による支援、約30万ポンド（4,200万円）が決まった（**図表３**）。

“HyNet NW”は2035年までの15年以上にわたる長期計画で、今後、廃田となることが決まっているリバプール湾の石油・ガス田インフラを、水素製造の際に排出されるCO_2の貯留サイトとして再利用する。また、新設する水素供給パイプラインを通じて主要な産業ガスユーザーへの供給をおこなうとともに、既存の家庭や商業施設への天然ガス供給網に

（図表３）HyNet North Westプロジェクトの概要



（出所）Cadent Gas Ltd., Progressive Energy Ltd. “HyNet North West, Vision to Reality”2018年５月　https://hynet.co.uk/

17　高炉では鉄鋼石とともにコークスなどの燃料兼還元剤を投入する。高温な内部で、コークスの炭素が鉄鉱石から酸素を奪い、鉄（銑鉄）と熱、CO、CO_2が生じる。なお、日本ではNEDOの支援の下で「COURSE50」と呼ばれる高炉における水素活用還元プロセス技術の開発が進められている。

18　本プロジェクトの技術サプライヤーとして採用され、実証プラントの設計も手掛けるミドレックステクノロジーズInc.は、米国の神戸製鋼所グループの100％子会社である。https://www.kobelco.co.jp/releases/1201993_15541.html

19　“The Clean Growth Strategy”（2018年４月改定）

水素を混入（最大20％）しCO_2の排出を削減する。将来的には水素ステーション整備、燃料電池列車（“HyNet NW”とは別のプロジェクト）の導入、再エネ余剰電力によるグリーン水素供給、水素発電、岩塩抗を利用した水素貯留設備などが計画されており、他の地域から船舶でCO_2を搬入することも想定されている。政府は英国初となるこのCCUSプロジェクトがモデル事業として横展開してゆくことを期待している[20]。

なお、プロジェクトに必要となる投資額については、新設することになる水素製造、パイプライン、CCUSの設備全体で９億ポンド（1,260億円）、運営費8,200万ポンド（114億8,000万円）／年と、大規模なCO_2削減を行おうとした場合、既存インフラを活用せず、電化等を進めるプロジェクトなどに比べて低コストになっていることが強調されている。

こうした産業都市向けの水素社会モデルを推進する一方で、同国では地域再エネ資源とグリーン水素を有効活用し、自立したローカルコミュニティを構築するための試みも進行中だ。

“Surf ‘n’ Turf”[21]と称されるプロジェクト（**図表４**）では、スコットランドの北東の沖合に位置し、約70の島で構成されるオークニー諸島のエディー島（人口およそ130人）で、スコットランド政府や地元自治体が中心となり、送電線の制約から生じる風力発電と潮力発電[22]からの余剰電力で水素を取り出し、高圧水素タンクトレーラに貯蔵の上、貨客フェリーでメインランド島に位置する州都カークウォール（人口およそ１万人）に運んでいる。

カークウォール港には燃料電池システムが設置されており、水素で発電された電気は港内に停泊するフェリーや港湾施設用の電源と

（図表４）エディー島での“Surf ‘n’ Turf”（図内上）とシャピンセイ島での“BIGHIT”（図内中央）の概略

（出所）欧州海洋エネルギーセンター（EMEC）Webページ
https://www.bighit.eu/about

20　産業政策として、2030年までに少なくとも英国で一か所の低炭素クラスター構築、2040年までには世界初となるCO_2排出ネットゼロ産業クラスターづくりを目指している。

21　通常は海の幸（ロブスター）と山の幸（ビーフステーキ）の盛り合わせのようなメニューをさすが、ここでは海の幸である潮力エネルギーと、山の幸である陸上風力エネルギーとの組み合わせを暗示している。

22　オークニー諸島にはスコットランド政府、英国政府、ＥＵなどにより2003年に設立された海洋エネルギー（波力・潮力）専門の「欧州海洋エネルギーセンター（European Marine Energy Center, EMEC）」があり、世界各国からの発電機や関連設備の実証実験受け入れ、認証、調査研究、コンサルティング等をおこなっている。エディー島などでのプロジェクトに使われている潮力発電による余剰電力は、EMECの実験サイトから供給されるもの。

して使われ、発電時に発生する熱はパイプラインを通して港にある船員用のホールに供給されている。さらに、地元で水素の取扱いに習熟した人材を育成できるよう、自治体と地元カレッジ[23]がタイアップして認定資格コースを設けており、地域雇用機会の拡大に努めている。

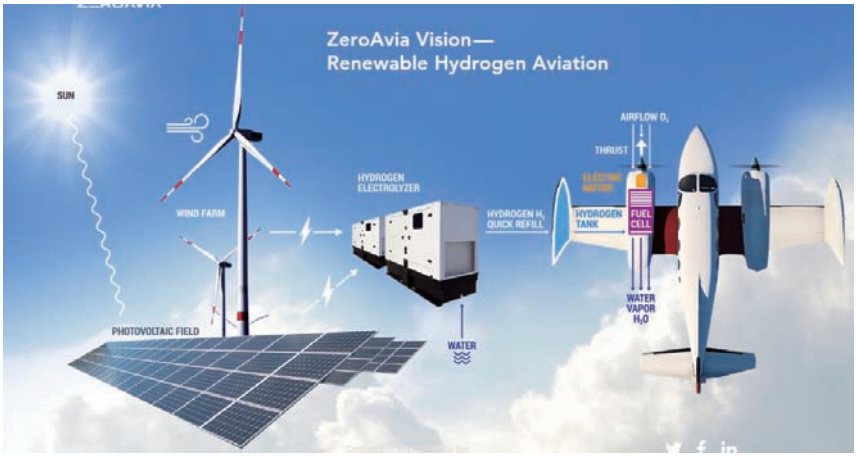
本プロジェクトの成功に続いて、現在は人口約300人のシャピンセイ島で“BIGHIT”[24]プロジェクト（図表４）が進行中だ。同島の風力発電の余剰電力で生成された水素もカークウォールまで運ばれるが、シャピンセイ島には新たに地元学校への熱供給用として水素ボイラー（30kW）が設置された。また、カークウォールには水素充填ステーションが整備され、ＥＶを改造した自治体用の燃料電池バン５台に利用されている。これに加えて貨客フェリーも2021年には燃料電池船となる予定で開発が進んでいる。

将来的にはこうした取組みをオークニー諸島全域に拡大してゆくとともに、他地域の離島や送電網の整備が不十分なエリアで導入可能な、水素を媒介に再エネを最大限活用する脱炭素地域モデルを展開をしていく予定である。

加えてオークニーは、燃料電池旅客機の実用に向けた取組みの舞台にもなっている。本年９月に英国政府から270万ポンド（３億7,800万円）の助成金[25]を受けることになった“HyFlyer”プロジェクトは、米カリフォルニア州ホリスターに根拠地を置くZeroAvia社が中心となり推進しており、2022年に10～20席の旅客機で、飛行距離最大500マイル（約800km）程度の民間による地域便の就航を目指している（**図表５**）。

すでに米国でプロトタイプの試験飛行に成功している同社は、世界有数の航空宇宙大学のひとつである英クランフィールド大学と技術提携し、クランフィールドにも本拠を置いて研究開発を続けている。近い将来、オー

（図表５）ZeroAviaのグリーン水素航空機ビジョン



（出所）ZeroAvia社Webサイト　https://www.zeroavia.com/

23　University of Highlands and Islandsはスコットランド高地と島嶼部の僻地に存在する13の職業専門カレッジと研究機関が形成したコンソーシアムで、外部機関から学位を取得できる。

24　Building Innovative Green Hydrogen Systems in an Isolated Territory（離島での革新的なグリーン水素システム構築）の略。

25　補助金はATI（Aerospace Technology Institute、航空宇宙技術研究所）プログラムの一部で、ビジネス・エネルギー・産業戦略省（BEIS）、ATI、Innovate ＵＫが支援している。

クニー諸島でパイパー（Piper）Mクラスの６人乗り航空機[26]で、250－300海里（約460－560km）[27]の試験飛行を行う予定になっている。

オークニーの欧州海洋エネルギーセンター（EMEC）では、離島などで航空機用のグリーン水素を供給するために必要となるインフラのモデルについての研究調査をおこなっている。

米国に本拠を置くThe International Council on Clean Transportation（ICCT）の調査[28]によると、民間の航空機が世界で排出するCO_2の量は2013年から2018年にかけて32％増加し、国連の予測を最大で70％も上回る速度で増加しているという。現在、航空部門からのCO_2排出量が世界の排出量に占める割合は2.4％であるが、他部門の脱炭素化が急速に進展すれば、その割合は増加すると予測されており、地域間のモビリティ確保に不可欠なこうした小型機の水素によるグリーン化の試みには大きな意義がある。

７．広がる国際的な連携

水素の利活用をめぐる国際的な連携として、2017年１月にはスイスのダボスで、脱炭素社会実現に向け、水素関連技術の普及活動を目的とした民間企業のCEOによる国際的なイニシアチブである「水素協議会（Hydrogen Council)」が発足し、翌2018年10月には東京で、水素社会の実現のための国際連携強化を目的とする「水素閣僚会議」が初めて開催された。

本年６月には長野県軽井沢町で「G20持続可能な成長のためのエネルギー転換と地球環境に関する関係閣僚会合」[29]が持たれ、水素・燃料電池分野における日米欧の協力関係を強化する共同宣言が行われている。閣僚会合に合わせて国際エネルギー機関（IEA）により公表された水素に関する包括的なレポート“The Future of Hydrogen（水素の未来)”[30]は、政策と技術革新がもたらした近年の太陽光発電や風力発電、蓄電池、ＥＶなど世界のクリーンエネルギー産業の成功体験から、水素にも広範な利活用が可能となる時期が到来しているとしている。

気候変動に対する危機意識がこれまでにないほど高まり、国際的な連携が強まる中、拡大する再エネ利用と歩調を合わせる形で、日本でも世界でも、水素の利活用の普及は着実に進むのではないか。

26　軽飛行機メーカー大手の米パイパー・エアクラフト社の機種。
27　300海里はほぼロンドンからエジンバラまでの距離に匹敵する。
28　ICCT“CO_2 Emissions from Commercial Aviation, 2018”, September 2019
https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_CO2-commercl-aviation-2018_20190918.pdf
29　G20で初めて、エネルギー大臣と環境大臣が一堂に会する閣僚会合として開催され、「環境と成長の好循環」の実現に向けたイノベーションの促進などについて議論が行われた。
30　日本政府の依頼を受けて作成された。