

※ 本仮訳は、駐日英国大使館主催ウェビナーシリーズのために用意されたものです。
原文をご覧になりたい方は、royalsociety.org/climate-science-solutions をご参照ください。

THE ROYAL SOCIETY

気候変動：科学と解決策 | 報告 4

ネットゼロの課題に対処するために 水素とアンモニアが果たす役割

概要

使用する場所で炭素を排出しない水素とアンモニアは、ネットゼロ経済において重要な役割を担う可能性がある。どちらの燃料も用途が広く、多様な方法での生産と使用が可能である。例えば、再生可能な資源から生産し、重量物輸送・工業・熱・エネルギーの貯蔵と輸送といった困難な分野の脱炭素化に利用できる。どちらも工業と農業ですでに幅広く使われているが、現在の生産法は大きな温室効果ガスフットプリントを伴う。既存の用途と新たな用途の両方に関し

て生産の脱炭素化を行うことにより、大量の温室効果ガス排出削減が達成できる可能性があるが、現在はどちらの燃料も、生成・貯蔵・使用等において、技術の進歩を必要とする課題に直面している。特に、ライフサイクル排出ネットゼロの実現にかかるコストが課題である。水素とアンモニアが実用面で決定的な変化をもたらすことができる分野を明らかにするためには、さらなる研究開発、実証、導入が必要とされる。

知見

- 水素とアンモニアは、競争力のあるネットゼロ・エネルギー源、多数の用途を持つエネルギー担体になる可能性がある。この潜在的可能性をより正確に評価するためには、研究開発、実証、導入が必要である。
- 重工業、重量車、鉄道、貨物輸送、エネルギー貯蔵など、水素とアンモニアが費用対効果の高い有力な低炭素代替エネルギーになる可能性が高い部門では、この2つの実証を優先すべきである。
- 十分な規模での実証は、多数の工業パートナーが集団で行った場合、費用対効果が最大になるケースが多い。洋上風力発電との統合に関しては、特に港湾地区が往々にして実証に適した立地となる。
- インフラなどに関する国際協力は、現在のパイロットプロジェクトを足掛かりとして、本稿で示した結果を進展させる上で役立つ可能性がある。こうした国際協力を研究と組み合わせることにより、さらなるイノベーションを推進すべきである。

1. 水素とアンモニアの現況

1.1 背景

水素は宇宙に最も豊富に存在する元素であり、すでに確立されたエネルギー担体である。使用する場所で温室効果ガスを一切排出することなく、輸送、熱、発電、エネルギー貯蔵に使用できることから、ネットゼロ経済において大きな潜在的可能性を有している。水素と窒素の化合物であるアンモニアも有力なゼロカーボン燃料である。

1.2 水素とアンモニアの在来型生産法と用途

現時点で最もよく使われる水素生成プロセスは水蒸気メタン改質（SMR）である。これは「グレー」水素と呼ばれる¹。毎年、世界の天然ガスの約6%、石炭の2%がグレー水素生産に使用されている²。全世界で生産される純水素の約51%は、例えば、燃料から硫黄などの不純物を除去するために製油所で使われ、約43%はアンモニア合成のための原料として使われる³。その他の用途では、混合気体の一部として水素を用いる。工業用や化学薬品生産に使用されるメタノールの生産、電気炉で鉄鋼を生産するための鉄の還元といった用途が例として挙げられる。純水素の需要は年間約7,000万トンに達している。1970年代以降3倍の伸びである³。

最も軽い元素であり、容積エネルギー密度が低い水素は貯蔵と輸送が難しく、多くの実際利用では圧縮または液化が必要である。こうした必要条件により、現在、水素は使用場所の近くで生産されるのが一般的である。ただし、例えば、米国のメキシコ湾沿岸地域、ドイツ、ベネルクス諸国では、すでに水素専用の導管網が設けられている^{4,5}。

アンモニアはハーバー・ボッシュ法で生成される。この技術では、水素を窒素と混合し、触媒を使って混合気体を高温・高圧で処理してアンモニアを生産する⁶。アンモニアの最も一般的な用途は肥料の生産である。また、冷凍用冷媒として、あるいはプラスチックその他の製品の製造にも使用される。

アンモニア（NH₃）は水素より容積エネルギー密度が高いため、水素と比べて貯蔵と輸送

が容易である。世界のアンモニア生産量は年間約1億7,500万トンである⁶。

SMRもハーバー・ボッシュ法も現在のところ、天然ガスや石炭といった化石燃料の使用に頼っている。水素生産は年間8億3,000万トンのCO₂を排出する。また、アンモニア生産は約4億2,000万トンを排出しており、合わせて世界の温室効果ガス（GHG）年間排出量の約2%を占める^{7,8,9}。

1.3 水素とアンモニアの安全性と環境への配慮

水素とアンモニアはともに安全面での懸念があり、これらの懸念に対処する必要がある。水素は引火点が非常に低い。ガソリンよりはるかに低く、例えば-43°Cでも引火するが¹⁰、空気中で引火するには4%の濃度が必要である（ガソリンは1.6%）。また、水素は密度が低く、空気中での拡散性が高く急速に消散するため、リスクが低減される^{11,3}。水素システムの設計にあたっては、十分な換気と漏れ検出が重要となる。

アンモニアは腐食性で毒性を有する。標準状態でも蒸気圧が高いとリスクが上昇する。ただし、アンモニアは、長期的な健康への影響をもたらすレベルよりかなり低い濃度であっても、臭いで容易に探知できる⁶。水素もアンモニアも、何十年もの間、いくつもの産業で安全に使用されてきたが、新たな用途については改めてテストする必要がある。

環境保護の観点からも、アンモニアの新たな用途を評価する必要があるだろう。アンモニア由来肥料は亜酸化窒素によるGHG排出、過度の窒素による生物多様性の喪失、さらには他の汚染物質と反応して微粒子を形成することによる大気汚染に寄与しているからである。水素の研究により、水素が気候変動やオゾン層に与える影響はきわめて小さいことが判明している¹²。

人々の認識には実際に生じるリスクが必ずしも投影されていない場合があるとはいえ、いずれの場合も市民の受容が課題になるだろう。

2. 水素とアンモニアの低炭素生産法と用途

水素とアンモニアは低炭素エネルギーを提供する機会をもたらす、2050年までに排出ネットゼロを実現させるという目標の達成に貢献する。しかしながら、それには生産を脱炭素化することが基本となる。現在、水素とアンモニアは重工業部門で生産されているが、部門レベルのカーボンフットプリントは、現行の用途のためだけでも、一部のG7諸国一国のレベルを上回るほど大きいからである¹³。

2.1 水素の低炭素生産

水素を生産する方法はいくつかあり、それぞれカーボンフットプリントが異なる。低炭素の水素生産法を図1で検証した。

ブルー水素

「ブルー」水素は、CO₂回収・貯留（CCS）を併用し、化石燃料（一般に天然ガス）から作られる。従来の水蒸気改質法（SMR）が利用できるが、現在、自己熱改質法（ATR）などの新技術の開発も進められている。ATRでは、天然ガスを別途燃やすのではなく、酸素を投入して原料の一部を燃焼させることでエネルギーを得る¹⁴。完全なネットゼロ技術ではないものの、炭素排出の最大95%を回収可能と推定される¹⁵。もちろん、これはCCSの開発と導入にかかっている。新たな薄膜、溶剤、吸収材、触媒を取り入れた、さまざまなCCS技術が開発されている¹⁶。

メタンは影響の大きい温室効果ガスであるため、上流でのメタン漏洩の防止と回収に注意を払わなければならない。

ブルー水素はすでに規模を拡大して運用されている。例えば、Air Products社の水蒸気メタン改質装置（米国テキサス州）、Shell社のQuest CCS施設（カナダ、アルバータ州）¹⁷、Air Liquide社の施設（フランス、ポート・ジェローム）などである¹⁸。

グリーン水素

再生可能電力を使い、電気分解で水から水素を分離するという「グリーン水素」は、ゼロカーボンへの道筋を示す。アルカリ電解槽は最も成熟した技術だが、（天候次第という）間欠性のある再生可能エネルギー源ではうまく機能しない。最近の高分子電解質膜（PEM）電解槽は、再生可能電力の変動に速やかに反応する。この技術は導入の初期段階にある。高温で機能する固体酸化物形電解セル（SOEC）は成熟度が低いが、より高い効率が得られる可能性がある。グリーン水素は再生可能電力を必要とする。このため、再生可能エネルギー容量のレベルにより制約を受けることも考えられる。例えば、現在全世界で使用されている水素の全量を電気分解で生成するとすれば、年間3,600テラワット時（TWh）の再生可能電力が必要となり、EU³（英仏独）の総生産量を上回ることになる。

その他の水素生成法

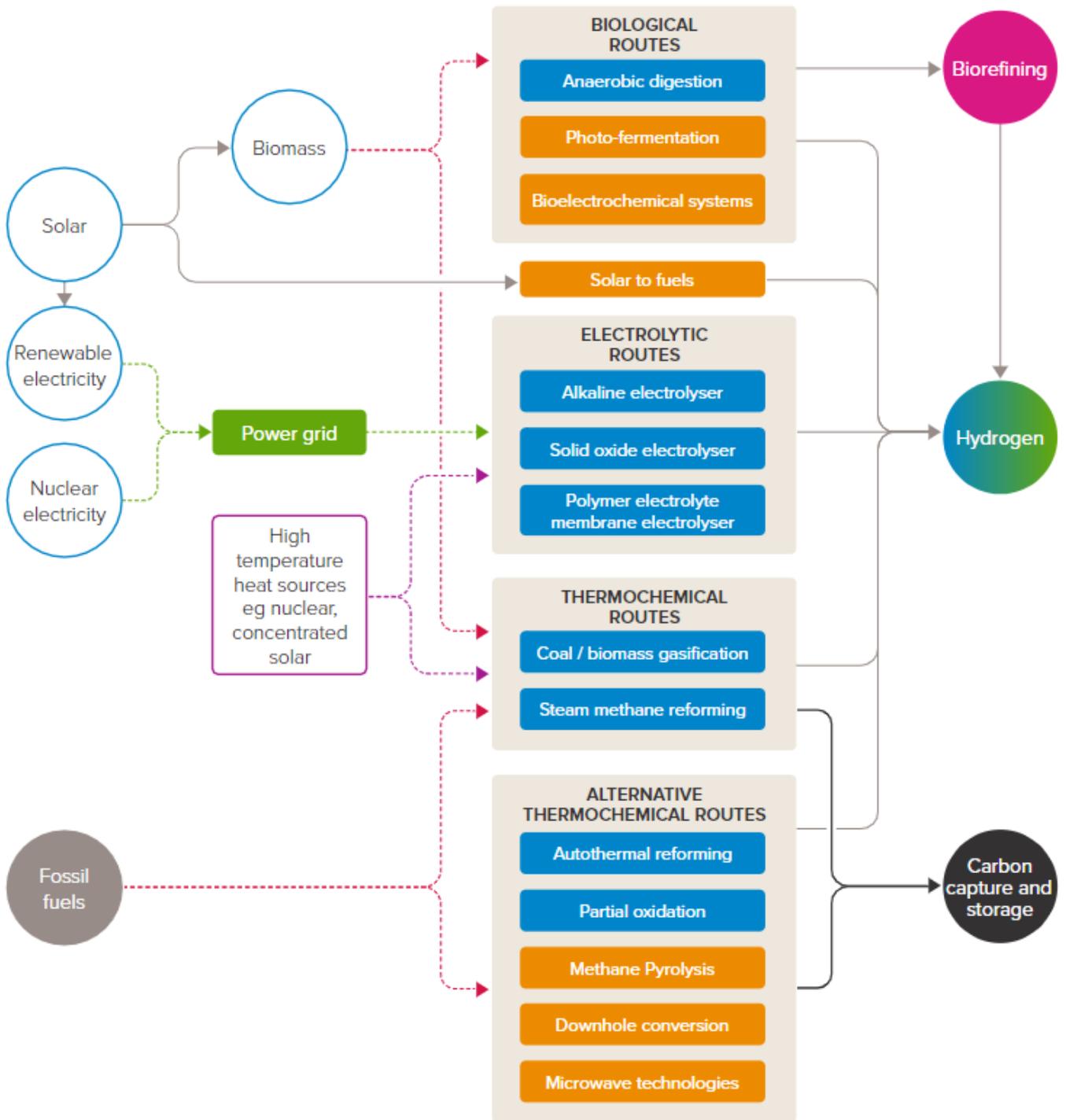
上記以外の可能性としては、まず「ターコイズ」水素が挙げられる。これは無酸素大気中でメタンを加熱する「メタン熱分解」で生成され、副産物としてCO₂ではなく固形炭素を生じる¹⁹。次に、電気分解に原子力を使用する「ピンク」水素が挙げられる。原子力によるゼロカーボンの熱を用いて、（熱効率が低い）高温水蒸気電解を行うことや、CCS併用型SMRの高温要件を満たすこともできる。

その他の選択肢には、さまざまな嫌気性消化法に基づく、動作温度の低い生物学的手段や、太陽エネルギーを直接使用して水を水素と酸素に分解する「太陽光燃料」などがある。

再生可能電力を使い、電気分解で水から水素を分離するという「グリーン水素」は、ゼロカーボンへの道筋を示す。

図 1

低炭素水素生産法の図解¹。



KEY
 ■ Current methods ■ Future methods - - - Feedstocks — Other pathways — Electrical pathways — Carbon pathways - - - Thermal pathways

2.2 低炭素アンモニアの生産

現在のハーバー・ボッシュ法で生成されるアンモニアは、石炭を使って生産される場合は「ブラウン・アンモニア」、天然ガスを使って生産される場合は「グレー・アンモニア」と呼ばれる。ブルー水素とグリーン水素から生成されるアンモニアは、ブルー・アンモニアまたはグリーンアンモニアと呼ばれる。ハーバー・ボッシュ法によるブルー・アンモニア、グリーンアンモニアの生産において排出を最小化するためには、いずれの場合も再生可能電力を用いる必要がある（図2）。

2.3 低炭素水素およびアンモニアの用途

水素とアンモニアは、発電、輸送、熱、エネルギー貯蔵の分野のネットゼロ目標達成に関してかなり大きな潜在的可能性を持つ。しかし実際には、例えば、軽量自動車用バッテリーや住宅暖房用ヒートポンプなど、時間の尺度が異なる一部の用途については、水素やアンモニアよりも適しているかもしれない廉価な代替技術が存在する。

例えば、英国の気候変動委員会の報告書「第6次炭素予算」の「バランスの取れたネット

ゼロ」シナリオでは、2035年までにグリーンまたはブルー水素を並行してスケールアップして、現在の電力部門のほぼ3分の1に相当する容量を持たせ、電化に不向きな分野（特に一部の工業と船舶輸送）で使用するという構想が示されている²⁰。

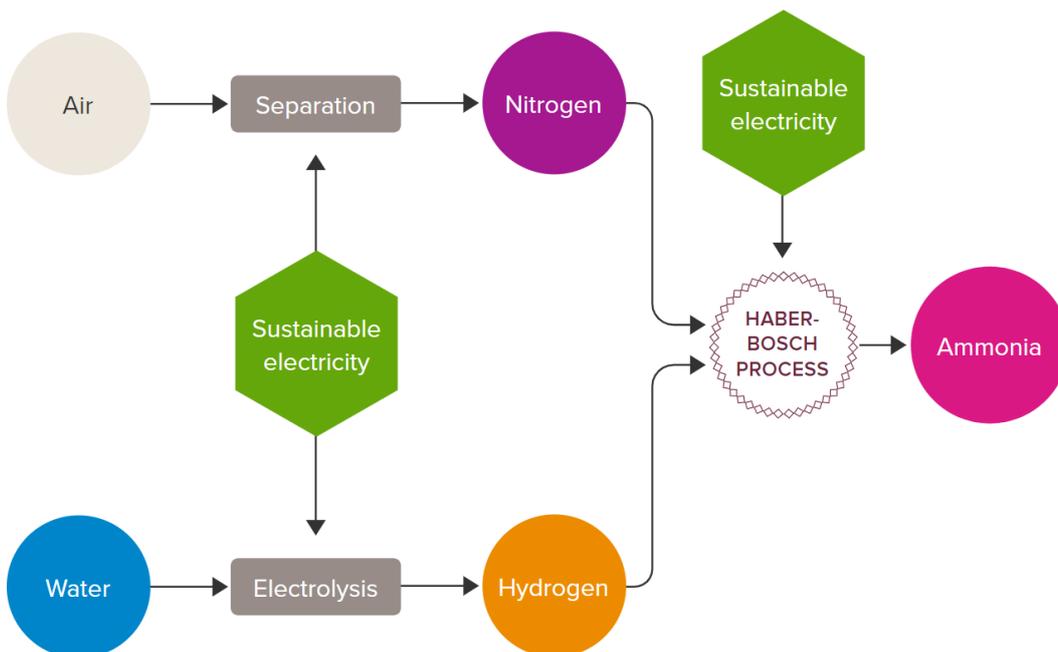
多くの用途は、水素と（大気からの）酸素を組み合わせ、燃焼を起こさずにクリーンな電力、熱、水を生成する燃料電池を必要とする。燃料電池生産は、2019年に1ギガワット（GW）の壁を打ち破った。今後はリチウムイオンバッテリーのように大量生産「ギガファクトリー」に移行することで、単位原価が大きく下がり続けることが期待されている^{21,22}。

アンモニアは水素より容積エネルギーが高いため、用途が限定されると考えられている（図3）。アンモニアは輸送後、必要に応じて水素またはアンモニア/水素混合物に再「分解」することができる。また、高温固体酸化物形燃料電池に直接使用し、電力を生産することも可能である。

水素とアンモニアは、発電、輸送、熱、エネルギー貯蔵の分野のネットゼロ目標達成に関してかなり大きな潜在的可能性を持つ。

図2

水電解による水素生成とハーバー・ボッシュ法の完全な脱炭素化に基づくグリーンアンモニア生産の図解⁶。



工業

水素は工業において多様な潜在的用途を持つ。まずは、アンモニア、メタノール、鉄鋼の精製・生産における既存の用途が挙げられる。グリーン水素またはブルー水素を使用した場合には、これらのプロセスのカーボンフットプリントを低減またはゼロにすることができる。

ゼロカーボン水素は既存の用途のほか、高温熱源としても使用可能であり、還元・反応プロセスでも使用することができる。英国のある報告書では、2040年までに製造業で使用される化石燃料の約40%を水素に置き換えることができる可能性が示されている²³。水素は、スウェーデンの商業製鉄所において初めて製鉄用高温熱の生成に使用された²⁴。工業においては、アンモニアも同じく燃焼させることにより、高い加工温度を得ることができる。すでに精製の分野で硫黄回収に使われている²⁵。

重荷重道路車両

水素燃料電池や水素由来燃料は、重荷重車両用の低炭素代替燃料である。現時点で、バッテリーには重荷重車両の長距離航続に対応できるエネルギー密度がない。水素駆動の自動

車に関しては、トヨタ、Cummins、Nikolaなどのメーカーがいくつかの構想を提案している^{26,27,28}。自動車メーカーのヒュンダイは、スイスの顧客向けに航続距離約400kmの一連の水素燃料電池トラックを製造した²⁹。

軽荷重道路車両

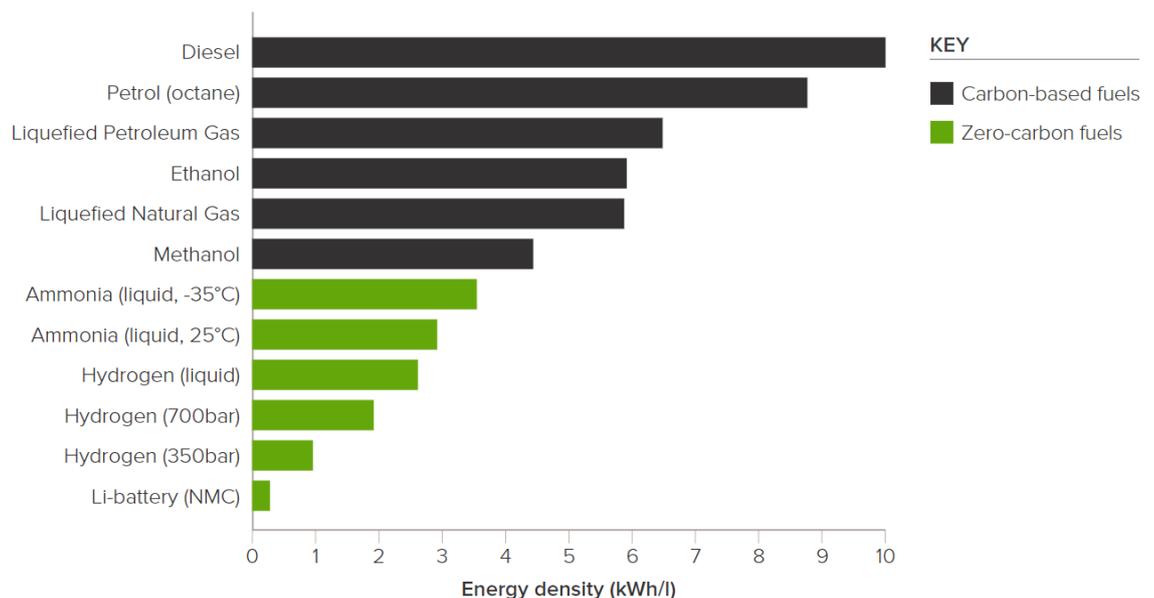
現時点において二次電池式電気自動車

(BEV)は燃料電池式電気自動車(FCEV)より経済的で、すでに確立された技術であるため、自動車市場における水素の未来は不確定である。世界の道路を走行しているFCEVは約2万5,000台と推定されるが、これに対してBEVは700万台強である^{30,31}。しかし、長期的にはFCEVにも成長しうる未来が開けるかもしれない。それは、ライフサイクル排出がBEVより少なくなった場合や、航続距離が長くなった場合、あるいはトラックやバスでの燃料電池の使用が大規模なサプライチェーンの確立につながった場合(またはこれらの条件の全てが実現した場合)である。

2020年現在、水素自動車が多いのは米国で、中国、韓国、日本がこれに続く²⁷。

図 3

各種燃料の容積エネルギー密度⁶。



水素燃料電池のニッチ市場の一つがフォークリフトである。水素燃料電池式フォークリフトは現在約 3 万台が使用されており、現時点では水素自動車より多い。燃料電池式フォークリフトは再充電が簡単のため、倉庫での使用に適している。また、この乗り物は大気汚染物質を排出しない³²。

船舶輸送

2030 年までに国際海運の炭素強度を少なくとも 40% 低減させるという国際海事機関の目標を後押しする燃料の有力候補である低炭素アンモニアは、全海洋国家の関心の的である³³。現在、アンモニアで稼働する大型燃料電池が船上システムに動力を安全かつ効率的に提供できるようにするためのプロジェクトが進められている。日本の大型貨物船にアンモニア燃料システムを装備させる計画や、ノルウェーのカラー・ファンタジー号（世界最大の RORO フェリー）でアンモニアを試験的に用いる計画などである^{34, 35}。

鉄道

水素燃料電池で走行する列車がドイツで運行中である。また、オランダやイギリスなどの国でテスト走行が行われている。水素燃料電池車両は、鉄道が電化されていない路線でゼロカーボンの選択肢になりうる³。課題としては、貯蔵（必要な燃料の体積がディーゼル燃料の約 8 倍になるため）と、電気分解による燃料を使用する場合に再生可能電力の必要性が高まることである³⁶。

航空輸送

航空業界も水素燃料とアンモニア燃料の使用を研究している。例えば、エアバス社は、改造型ガスタービンエンジンによる水素燃焼を動力とするハイブリッド水素旅客機の開発を計画している³⁷。

一方、英国を拠点とするあるプロジェクトでは、グリーンアンモニアを部分的に水素に分解し、安定的な燃焼という点でジェット燃料に類似した混合物を生成する技術を研究している。これにより、既存のエンジンと航空機をゼロエミッション燃料対応使用に改造することが可能となる³⁸。

合成燃料

回収した CO₂ をフィッシャー・トロプシュ法で水素と反応させることにより、多様な使い方のできるさまざまな合成燃料を生成することができる。これらの合成燃料は、トラックや船舶用の選択肢になるだけでなく、低炭素の航空機用ドロップイン燃料（代替燃料）になる可能性がある³⁹。

貯蔵と輸送

水素は地下空洞において気体状態で圧縮することができる。また、液化することも、（ドローンなど小型の用途では）金属水素化物などの固体材料の中に封じ込めることも可能である。水素を貯蔵する場合、気体の場合は大気圧の約 350~700 倍に圧縮しなければならない。また、液体の場合は -253°C まで低温冷却しなければならない⁴⁰。アンモニアは密度が高いため、大気圧の 10 倍に圧縮、または -33°C までの冷却でよい⁶。アンモニアは無機肥料の原料として幅広く利用されているため、アンモニアの貯蔵は十分に発達している。

水素とアンモニア（発電）はともに、電力需要の季節的変動に対応する手段として、あるいは再生可能エネルギーによる間欠的な発電の短期的なバックアップ電源として有力な候補である。水素またはアンモニアを使って、太陽エネルギーと風力エネルギーが豊富な地域で生産された再生可能エネルギーを、数千キロメートルも離れた需要の中心地まで運ぶことも可能かもしれない。

電力

燃料電池を使用する方法、またはタービンを駆動する方法で、水素またはアンモニアを発電に利用することもできる^{41, 42}。燃料電池を使用するギガワット級発電所が計画される一方で、例えばデータセンターなどで小規模な発電施設が試験的に使用されている⁴³。

さらに、天然ガスから CO₂ を回収し、残った水素をタービンで直接燃焼させて発電するという可能性も開かれているが、このプロセスは設備と工程の変更を必要とする。また、製造業者は水素に対応できるタービンを開発

水素とアンモニア（発電）はともに、電力需要の季節的変動に対応する手段として、あるいは再生可能エネルギーによる間欠的な発電の短期的なバックアップ電源として有力な候補である。

2021年現在、30か国以上が水素ロードマップを発表し、各国政府が700億ドル以上の公的資金拠出を約束している。

中だが、この技術はまだ大規模に導入されているわけではない^{44, 39}。

多くの低所得国を含め、太陽光が豊富で風が強い国が、生成されたエネルギーを水素またはアンモニアの形で貯蔵し、工業や輸送から緊急サービス用電力、辺鄙な地域でのエネルギー利用まで、多数の用途に利用することも可能である⁴⁵。

住宅用熱源

同時に、水素は天然ガスを全面的または部分的に代替するエネルギーとして、住宅に熱を供給する手段にもなりうるが、規模の拡大にはかなりの課題がある。ボイラーと調理器具の交換にかかる費用は一世帯あたり2,000～4,000ポンドと推定される⁴⁶。また、水素は鋼管・鉄管の脆化を招くおそれもあるが、英国などの国々では現在、導管を金属製からプラスチック製に交換しているところである⁴⁷。純水素の試験的利用としては、ロッテルダム（オランダ）のアパートやホルツヴィッケデー（ドイツ）の一般住宅で行われているプロジェクトが挙げられる^{48, 49}。このほか、水素を天然ガスと混合し家庭の暖房用に用いるプロジェクトも行われている。サレルノ（イタリア）では10%レベル、キール（英国）では20%レベルでの混合である^{50, 51}。英国では試験的利用の規模を広げ、2023年に一区域で、2025年までに村全体、2030年までに町全体で、暖房と調理に水素を使用する計画である⁵²。住宅用暖房の主たる競合技術はヒートポンプである。

2.4 現況

2015年のパリ協定以降、官民両部門で活動が活発化している。

政府の戦略

2021年現在、30か国以上が水素ロードマップを発表し、各国政府が700億ドル以上の公的資金拠出を約束している⁵³。例えば、EUは、2050年までにエネルギー需要の4分の1を水素で満たす戦略を立てている⁵⁴。英国とドイツの政府の計画には、2030年までに低炭素水素生産能力を5GWにスケールアップする案がともに盛り込まれている⁴⁹。

輸送に関しては、中国が2030年までに水素燃料車100万台を生産し、充填ステーション1,000カ所を設けることを目指している。これはカリフォルニア州と同じ目標である^{3, 55}。韓国のロードマップでは、2040年までにFCEVを600万台生産し、充填ステーションを1,200カ所稼働させることを目標としている⁵⁶。

民間部門の投資

実業界では、水素を巡り新たな関心の波が起きている。関連企業が集結し、2017年に設立された水素協議会（Hydrogen Council）の加盟企業は現在100社を超えている。

近年は民間部門の取引が相次いでいる。例えば、2019年にはCummins社が燃料電池大手のHydrogenics社（本社カナダ）を買収⁵⁷。大手電解槽メーカーのITM Power社（本社英国）は再生可能エネルギーから水素を開発するために1億7,200万ポンドを調達した⁵⁸。さらにBosch社とWeichai Power社は、燃料電池スタックを開発・生産するCeres Power社（本社英国）に投資した^{59, 60}。

大規模プロジェクト

計画中のブルー水素プロジェクトには、複数の企業のグループが公共部門の支援のもとで行う共同事業が含まれる。これは、産業クラスターが形成されており、海底貯蔵を利用しやすい港の周辺で行われることが多い。例としては、英国で計画中のネットゼロ・ティーズサイド（Net Zero Teesside）、ゼロカーボン・ハンバー（Zero Carbon Humber）、ハイネット（Hynet）の各プロジェクトが挙げられる。北海およびアイリッシュ海の海底貯蔵を利用し、最終的に3つのプロジェクト全体で英国の工業排出の50%近くを脱炭素化する計画である^{61, 62}。

オランダの投資総額8,800万ユーロのヒーベン（Heavenn）プロジェクト、英国のギガスタック（Gigastack）プロジェクト、オランダ-フランドル北海ポート・クラスターのためのシーH2ランド（SeaH2Land）プロジェクトなど、ギガワット級のグリーン水素プロジェクト数件が発表された^{63, 64, 65}。

このほか、輸出向けにグリーン水素のアンモニア変換を計画しているプロジェクトもある。オーストラリア西岸の投資総額 360 億ドルのアジア再生可能エネルギー・ハブ (Asian Renewable Energy Hub) プロジェクトでは、オーストラリアとアジアの輸出市場向けにグリーン水素とアンモニアを生産す

る予定である^{66,67}。紅海沿岸に位置するサウジアラビアの新都市ネオムで展開されるプロジェクト (50 億ドル) では、2GW のアルカリ電解槽プラントで水素を生産する。これを年間 120 万トンのグリーンアンモニアに変換し、輸出先で水素に戻す⁶⁸。

3. 進歩と導入の可能性

コストが下がり、効率が向上し、各部門に最適なソリューションが登場すれば、水素とアンモニアの可能性は高まるだろう。

3.1 コスト

CCS 技術と電解槽技術が進歩し、工業部門の学習速度が加速すれば、2030 年までにグリーン水素とブルー水素が競争力を持つ可能性があることがいくつかの予測によって示されている⁶⁹。グレー水素、ブルー水素、グリーン水素の現在の kg 当たり生産コストはそれぞれ 1.80 ドル、2.40 ドル、3.00~6.60 ドルと EU は見積もっている。ブルー水素がグレー水素に対して競争力を持つためには、炭素価格が CO₂ 換算トン当たり 55~90 ユーロの範囲にならなければならない^{65,70}。別の予測では、2030 年までに再生可能水素の kg 当たり生産コストが 1.40~2.30 ドルに下がる可能性があるという見積もられている。一部の地域では 2028 年頃にはグリーン水素とグレー水素のコストが同等になるという。ここでは、再生可能電力のコストが重要な要素となる⁵⁰。

トン当たり 280 ドル未満では、在来型の「ブラウン」アンモニア生産が最も経済的な方法だが、プロセスの排出だけを回収すればブルー・アンモニアもこれに近い競争力を持つ可能性がある。グリーンアンモニアのコストは、現地の再生可能電力のコストによって大きく変動する。太陽エネルギー資源と風力エネルギー資源が非常に豊富な地域ではブルー・アンモニアと競えるかもしれない。

3.2 実証と導入の戦略

再生可能電力は可能であれば直接使用するのが最善であることは広く認められているが、

電気の即時取り出し口がない場合には、水素への転換が最も効率的な方法かもしれない。

水素が生産される場所でも直接利用が最も有益だが、即時あるいは現地使用ができない場合には、電力に使用するために貯蔵する、導管で輸送する、液化する、船舶またはチューブトレーラーで輸送するなどの方法が考えられる。これらの方法が実用に不向きな場合は、アンモニアその他の担体に変換した上で輸送することができる。その後、水素に再変換することも可能である。アンモニアを再変換しない場合は、肥料や冷却といった従来の目的に直接使用できる。アンモニアの専門家は、アンモニアの密度と「分解できる」という性質により、輸送用燃料や貯蔵媒体として直接利用するのに適しているということも強調している。

低炭素水素の第一のメリットは、現在の用途 (アンモニアの生産、精製、化学製品) のカーボンフットプリントを低減できることである。次に最も可能性の高い用途は、発電および重荷重輸送用燃料電池、工業用熱を得るための水素の直接燃焼などである。続いて、長期エネルギー貯蔵、住宅暖房、合成液体燃料の生産などが考えられる。

水素またはアンモニアが最適な手段と考えられる場合、実証プロジェクトやインフラ試験プロジェクトを通じたスケールアップに短期投資を集中することが考えられる。これらのプロジェクトはコンペ方式の資金供給や補助金により奨励できる。工業港の近くや、多数のトラックが走行しているなど、成長の条件が整っている場合には、実証を短期間で構築することが可能である。ブルー水素は、特に

工業港の近くや、多数のトラックが走行しているなど、成長の条件が整っている場合には、実証を短期間で構築することが可能である。

複数企業のグループと公共部門が資金を分担する場合に短期的な前進の道筋になりうる。グリーン水素については、生産および電解槽システムの継続的開発の規模を拡大する必要がある。

3.3 研究開発の優先課題

ネットゼロ実現の重要な貢献要因として水素とアンモニアの潜在的可能性を開花させるためには、複数の研究課題をクリアした上で規模を拡大して開発と実証を行う必要がある。最も重要な課題としては以下の事項が挙げられる。

- 電解槽はグリーン水素に欠かすことができない構成要素である。よって、重要な優先的研究課題である。改良型電極と新たな触媒・薄膜の開発がコストを低減させる。
- 高温で機能する固体酸化物電解槽も、電圧効率が高いことから研究対象として特に注目されている。
- 太陽光燃料や、光子を用いた CO₂ の (CO への) 還元など、電力を必要としない、水の直接分解のための興味深い技術が多数存在する。
- 窒素を、例えば電気化学的にアンモニアに直接還元する技術は、ハーバー・ボッシュ

法に代わるプロセスであり、基礎研究の重要課題となっている。

- コストを抑え、再生可能な技術を開発するための燃料電池研究開発の拡充。
- 効率と寿命を最大限に高めるには、あらゆるエネルギー変換法の研究が必要である。触媒反応、電気触媒、薄膜、電気化学、電気化学工学などの分野において抜本的な進歩が起きる余地がある。
- 一部の燃料電池技術と電解槽技術におけるプラチナとイリジウム酸化物の現在の使用方法では、鉍物の可用性とコストの問題が生じる。
- ライフサイクル全体を考慮し、システムのさまざまな部分の相互作用を明らかにし、シナジー効果を活用するための総合的なアプローチが必要である。
- 同時に、これらの技術の開発、生産、設置および安全な維持のために、あらゆるレベルで技術的に有能な人材を確保する必要がある。政策立案者は、「STEM (科学・技術・工学・数学)」課題の一環として、こうした能力を後押しするための行動を今起こすことができる。

結論

水素とアンモニアは、特にエネルギー集約的な分野において、ネットゼロのエネルギーミックス (電源構成) の重要な要素になりうる可能性を秘めている。しかし、選択肢はこれだけではない。代替技術との比較でそれらの選択肢が持つ可能性の全貌を明らかにしたいと政策立案者が望むのであれば、研究開発プロジェクトと実証プロジェクトを加速させる必要がある。

この報告資料は、排出ネットゼロを実現させ、気候変動に適応するための世界的な取り組みを、科学と技術がいかに後押しできるかを検討する一連の資料の一つである。この報告資料集は、各国が 2050 年までのネットゼロに向けた自国のロードマップを策定するにあたり、科学的情報が状況の理解とアクションを助けることができる 12 の課題に関して全世界の政策決定者に情報を提供することを目的としている。

全資料をご覧になりたい方は、royalsociety.org/climate-science-solutions をご参照ください。

この著作物の文章は、クリエイティブ・コモンズ表示ライセンスの条件のもとで認可されています。原作者および出所のクレジットが表示される限り、無制限の使用が認められます。

ライセンス入手先：creativecommons.org/licenses/by/4.0

発行：2021 年 5 月 DES7287_5 © The Royal Society

参考文献

1. The Royal Society. 2018 Options for producing low-carbon hydrogen at scale. See <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/low-carbon-energy-programme/hydrogen-production/> (accessed 10 December 2020).
2. The International Energy Agency. Hydrogen See <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/hydrogen> (accessed 10 December 2020).
3. The International Energy Agency. 2019 The Future of Hydrogen. See <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (accessed 10 December 2020).
4. US Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Hydrogen Pipelines. See <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-pipelines> (accessed 12 December 2020).
5. Ausfelder F *et al.* 2017 Energy Storage as Part of a Secure Energy Supply. *ChemBioEng Reviews* **4**, 144–210. (doi:10.1002/cben.201700004)
6. The Royal Society. 2020 Ammonia: zero-carbon fertiliser, fuel and energy store. See <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/low-carbon-energy-programme/green-ammonia/> (accessed 12 December 2020).
7. Organisation for Economic Co-operation and Development. OECD Statistics Greenhouse gas emissions. See https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=AIR_GHG (accessed 12 December 2020).
8. Liu X, Elgowainy A, Wang M. 2020 Life cycle energy use and greenhouse gas emissions of ammonia production from renewable resources and industrial by-products. *Green Chem.* **22**, 5751–5761. (doi:10.1039/d0gc02301a)
9. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency. 2020 Trends in Global CO2 and Total Greenhouse Gas Emissions. See https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2020-trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2020-report_4331.pdf (accessed 12 December 2020).
10. Nazir H *et al.* 2020 Is the H2 economy realizable in the foreseeable future? Part III: H2 usage technologies, applications, and challenges and opportunities. *International Journal of Hydrogen Energy* **45**, 28217–28239. (doi:10.1016/j.ijhydene.2020.07.256)
11. World Economic Forum. 2019 Hydrogen power is safe and here to stay. See <https://www.weforum.org/agenda/2019/04/why-don-t-the-public-see-hydrogen-as-a-safe-energy-source/> (accessed 12 December 2020).
12. Department for Business, Energy & Industrial Strategy. 2018 Hydrogen for Heating: Atmospheric Impacts. See https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/760538/Hydrogen_atmospheric_impact_report.pdf (accessed 15 December 2020).
13. Union of Concerned Scientists. 2020 Each Country's Share of CO2 Emissions. See <https://www.ucsusa.org/resources/each-country-share-co2-emissions> (accessed 15 December 2020).
14. The Chemical Engineer. 2019 Clean Hydrogen Part 1: Hydrogen from Natural Gas through cost effective CO2 capture. See <https://www.thechemicalengineer.com/features/clean-hydrogen-part-1-hydrogen-from-natural-gas-through-cost-effective-co2-capture/> (accessed 15 December 2020).
15. Johnson Matthey. Blue Hydrogen <https://matthey.com/en/markets/energy-generation-and-storage/hydrogen/low-carbon-hydrogen> (accessed 15 December 2020).
16. Yan Y *et al.* 2020 Process simulations of blue hydrogen production by upgraded sorption enhanced steam methane reforming (SE-SMR) processes. *Energy Conversion and Management* **222**, 113144. (doi:10.1016/j.enconman.2020.113144)
17. Global CCS Institute. 2020 The Global Status of CCS Report 2020. See <https://www.globalccsinstitute.com/resources/global-status-report/> (accessed 15 December 2020).
18. Air Liquide. Cryocap CO2 cold capture system. See <https://www.airliquide.com/magazine/cryocap-co2-cold-capture-system-unlike-any-other-in-the-world> (accessed 15 December 2020).
19. Sánchez-Bastardo N, Schlögl R, Ruland H. 2020 Methane Pyrolysis for CO2-Free H2 Production: A Green Process to Overcome Renewable Energies Unsteadiness. *Chemie Ingenieur Technik* **92**, 1596–1609. (doi:10.1002/cite.202000029)
20. Climate Change Committee. 2020 Sixth Carbon Budget. See <https://www.theccc.org.uk/publication/sixth-carbon-budget/> (accessed 21 December 2020).
21. E4tech. 2020 Fuel Cell Industry Review 2019 – The Year of the Gigawatt. See <https://www.e4tech.com/news/2018-fuel-cell-industry-review-2019-the-year-of-the-gigawatt.php> (accessed 21 December 2020).
22. Green Car Congress. TECO 2030 aims to build hydrogen fuel cell Gigafactory in Norway. See <https://www.greencarcongress.com/2021/02/20210218-teco.html> (accessed 21 December 2020).
23. Element Energy. 2018 Industrial Fuel Switching Market Engagement Study. See https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/824592/industrial-fuel-switching.pdf (accessed 22 December 2020).
24. Recharge News. 2020 'World first' as hydrogen used to power commercial steel production. See <https://www.rechargenews.com/transition/world-first-as-hydrogen-used-to-power-commercial-steel-production/2-1-799308> (accessed 22 December 2020).
25. Duiker Combustion Engineers. Ammonia combustion equipment. See <https://duiker.com/solutions/renewable-fuels/ammonia-combustion-equipment/> (accessed 22 December 2020).
26. Toyota. 2020 Toyota moves closer to production with next generation fuel cell electric technology for zero-emissions heavy duty trucks. See <https://global.toyota/en/newsroom/corporate/34464066.html> (accessed 20 April 2021).
27. Cummins. Trucks: designed to deliver. See <https://www.cummins.com/new-power/applications/trucks> (accessed 20 April 2021).
28. Nikola. See <https://nikolamotor.com/about> (accessed 20 April 2021).
29. Reuters. 2020 Hyundai delivers first fuel cell trucks to Switzerland. See <https://www.reuters.com/article/hyundai-switzerland-hydrogen-trucks/hyundai-delivers-first-fuel-cell-trucks-to-switzerland-idINKBN26S1FM> (accessed 23 December 2020).

30. The International Energy Agency. 2020 Advanced Fuel Cells Technology Collaboration Programme. See https://www.ieafuelcell.com/fileadmin/publications/2020_AFCT_CP_Mobile_FC_Application_Tracking_Market_Trends_2020.pdf (accessed 23 December 2020).
31. The International Energy Agency. 2020 Global EV Outlook 2020. See <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020> (accessed 23 December 2020).
32. Autocar. 2020 Hydrogen cars explained: the technology targeting a fuel-cell future. See <https://www.autocar.co.uk/car-news/features/hydrogen-cars-explained-technology-targeting-fuel-cell-future#:~:text=It's%20estimated%20that%20there%20are,the%20next%20decade%20or%20two.> (accessed 23 December 2020).
33. International Maritime Organization. Reducing greenhouse gas emission from ships. See <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx> (accessed 23 December 2020).
34. NYK Line. 2020 Joint R&D Starts for Practical Application of Ammonia-fueled Tugboat. See https://www.nyk.com/english/news/2020/20200903_01.html (accessed 23 December 2020).
35. Ayvalı T, Edman Tsang SC, Van Vrijaldenhoven T. 2021 The Position of Ammonia in Decarbonising Maritime Industry: An Overview and Perspectives: Part I: Technological advantages and the momentum towards ammonia-propelled shipping. *Johnson Matthey Technology Review* **65**, 275–290. (doi:10.1595/205651321x16043240667033)
36. The Engineer. 2021 Comment: why hydrogen trains will be a rare sight in the UK. See <https://www.theengineer.co.uk/comment-hydrogen-trains-uk/> (accessed 20 April 2021).
37. Airbus. ZEROe Towards the world's first zero-emission commercial aircraft. See <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/hydrogen/zeroe.html> (accessed 05 January 2021).
38. Ammonia Energy Association. 2020 Zero emission aircraft: ammonia for aviation. See <https://www.ammoniaenergy.org/articles/zero-emission-aircraft-ammonia-for-aviation/> (accessed 05 January 2021).
39. The Royal Society. 2019 Sustainable synthetic carbon based fuels for transport. See <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/low-carbon-energy-programme/sustainable-synthetic-carbon-based-fuels-for-transport/> (accessed 05 January 2021).
40. US Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Hydrogen Storage. See <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-storage#:~:text=Hydrogen%20can%20be%20stored%20physically,pressure%20is%20%E2%88%92252.8%C2%B0C.> (accessed 05 January 2021).
41. US Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Hydrogen: A Clean, Flexible Energy Carrier. See <https://www.energy.gov/eere/articles/hydrogen-clean-flexible-energy-carrier> (accessed 05 January 2021).
42. GE Gas Power. Hydrogen fueled gas turbines. See <https://www.ge.com/power/gas/fuel-capability/hydrogen-fueled-gas-turbines> (accessed 07 January 2021).
43. Microsoft. 2020 Microsoft tests hydrogen fuel cells for backup power at datacenters. See <https://news.microsoft.com/innovation-stories/hydrogen-datacenters/> (accessed 07 January 2021).
44. Drax. 2020 Could hydrogen power stations offer flexible electricity for a net-zero future? See <https://www.drax.com/technology/could-hydrogen-power-stations-offer-flexible-electricity-for-a-net-zero-future/> (accessed 07 January 2021).
45. World Bank Group. 2020 Green Hydrogen in Developing Countries. See <http://documents1.worldbank.org/curated/en/953571597951239276/pdf/Green-Hydrogen-in-Developing-Countries.pdf> (accessed 07 January 2021).
46. Climate Change Committee. 2018 Hydrogen in a low-carbon economy. See <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/Hydrogen-in-a-low-carbon-economy-CCC-2018.pdf> (accessed 07 January 2021).
47. Energy Networks Association. 2020 Replacing Britain's old gas pipes and laying the foundations of a zero-carbon gas grid. See <https://www.energynetworks.org/newsroom/replacing-britains-old-gas-pipes-from-safeguarding-the-public-to-laying-the-foundations-of-a-zero-carbon-gas-grid> (accessed 07 January 2021).
48. DNV Oil and Gas. 2020 Heating Dutch homes with hydrogen. See <https://www.dnv.com/oilgas/perspectives/heating-dutch-homes-with-hydrogen.html?cookie-consent=1> (accessed 07 January 2021).
49. BDR Thermea Group. 2021 BDR Thermea joins pioneering test of hydrogen energy in Germany. See <https://www.bdrthermeagroup.com/en/stories/bdr-thermea-joins-pioneering-test-of-hydrogen-energy-in-germany> (accessed 12 April 2021).
50. Snam. Snam and Hydrogen. See https://www.snam.it/en/energy_transition/hydrogen/snam_and_hydrogen/ (accessed 07 January 2021).
51. HyDeploy. See <https://hydeploy.co.uk/> (accessed 07 January 2021).
52. UK Government. 2020 The Ten Point Plan for a Green Industrial Revolution. See <https://www.gov.uk/government/publications/the-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution/title> (accessed 07 January 2021).
53. Hydrogen Council. 2021 Hydrogen Insights: A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness. See <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021-Report.pdf> (accessed 04 March 2021).
54. European Commission. 2020 Hydrogen Roadmap Europe. See https://www.fch.europa.eu/sites/default/files/Hydrogen%20Roadmap%20Europe_Report.pdf (accessed 12 January 2021).
55. California Fuel Partnership. 2018 The California Fuel Cell Revolution. See <https://cafcp.org/sites/default/files/CAFCR.pdf> (accessed 12 January 2021).
56. The International Energy Agency. 2020 Korea Hydrogen Economy Roadmap 2040. See <https://www.iea.org/policies/6566-korea-hydrogen-economy-roadmap-2040> (accessed 12 January 2021).
57. Cummins. 2019 Cummins closes on its acquisition of Hydrogenics. See <https://www.cummins.com/news/releases/2019/09/09/cummins-closes-its-acquisition-hydrogenics> (accessed 15 January 2021).
58. Burges Salmon. 2020 ITM Power closes £172 million fundraise – the third largest raise on AIM in 2020. See <https://www.burges-salmon.com/news-and-insight/press->

- releases/itm-power-closes-172-million-fundraise-the-third-largest-raise-on-aim-in-2020/ (accessed 15 January 2021).
59. Bosch. 2020 Bosch to strengthen strategic collaboration with fuel cell expert Ceres Power by increasing its stake. See <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/press-release-206400.html> (accessed 15 January 2021).
 60. Ceres Power. 2018 Strategic Partnership with Weichai Power. See <https://www.ceres.tech/news/strategic-partnership-with-weichai-power/> (accessed 15 January 2021).
 61. Zero Carbon Humber. 2020 Leading energy companies form partnership to accelerate the development of offshore transport and storage infrastructure for carbon emissions in the UK North Sea. See <https://www.zerocarbonhumber.co.uk/news/northern-endurance-partnership/> (accessed 18 January 2021).
 62. HyNet North West. See <https://hynet.co.uk/> (accessed 18 January 2021).
 63. European Commission. 2020 Hydrogen Energy Applications for Valley Environments in Northern Netherlands. See <https://cordis.europa.eu/project/id/875090> (accessed 18 January 2021).
 64. Gigastack. 2020 Industrial Scale Renewable Hydrogen Project Advances to Next Phase. See <https://gigastack.co.uk/news/industrial-scale-renewable-hydrogen-project-advances-to-next-phase/> (accessed 18 January 2021).
 65. SeaH2Land. Summary. See <https://seah2land.nl/en/summary> (accessed 12 April 2021).
 66. Recharge News. 2020 Growing ambition: the world's 20 largest green-hydrogen projects. See <https://www.rechargenews.com/energy-transition/gigawatt-scale-the-worlds-13-largest-green-hydrogen-projects/2-1-933755> (accessed 18 January 2021).
 67. The Asian Renewable Energy Hub. See <https://asianrehub.com/about/> (accessed 18 January 2021).
 68. Air Products. 2020 Air Products, ACWA Power and NEOM Sign Agreement for \$5 billion Production Facility in NEOM Powered by Renewable Energy for Production and Export of Green Hydrogen to Global Markets. See <https://www.airproducts.com/company/news-center/2020/07/0707-air-products-agreement-for-green-ammonia-production-facility-for-export-to-hydrogen-market#/> (accessed 18 January 2021).
 69. European Commission. 2020 A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. See https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf (accessed 01 February 2021).
 70. Ember. Daily EU ETS carbon market price. See <https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/> (accessed 01 February 2021).