

strategy&

Part of the PwC Network

Strategy& Foresight vol.24
2022

特集 水素

巻頭言

水素がもたらす新たな事業機会

脱炭素社会に向けた水素の可能性と役割

グリーン水素普及に向けた展望

モビリティ領域の水素・燃料電池普及シナリオ
～アプリケーション側から見た水素の有用性～

欧州の低炭素水素市場の
確立に向けて
エネルギー転換を支える水素

Strategy& Foresight

ストラテジーアンド・フォーサイトは、
PwCネットワークの
戦略コンサルティングチーム
Strategy&が、
経営戦略についての
さまざまな課題をテーマに、
経営の基幹を担われている皆様に
向けて発行する定期刊行物です。

Contents

特集 **水素**

巻頭言

水素がもたらす新たな事業機会

服部 真

3

脱炭素社会に向けた水素の可能性と役割

磯貝 友紀

4

グリーン水素普及に向けた展望

板橋 辰昌

11

モビリティ領域の水素・燃料電池普及シナリオ

～アプリケーション側から見た水素の有用性～

室井 浩気

16

欧州の低炭素水素市場の確立に向けて

エネルギー転換を支える水素

Laurent Saint Martin、Dr. Matthias Witzemann、
Adrian Del Maestro、Guillaume Jean、
Frederic Delannoy、Simon Betz

[監訳] 桑原 永尚

26

巻頭言

水素がもたらす新たな事業機会

服部 真

服部 真 (はっとり・まこと)

PwCコンサルティング、Strategy&のパートナー。約15年にわたり、総合商社、産業材メーカー、エネルギー企業、建設企業などに対し、全社戦略、事業戦略、M&A戦略立案および実行支援のプロジェクトを手がけてきた。近年は、全社レベルでのサステナビリティ方針の導出や水素などのカーボンニュートラルに関わる事業戦略といったテーマに取り組んでいる。

この数年の動きを振り返ると、2020年10月の日本政府の2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするという「2050年カーボンニュートラル宣言」に始まり、2021年4月には政府による温室効果ガス削減目標の発表など、カーボンニュートラルに関わる大きな転換が進んだ年であると言える。コンサルタントとしてさまざまな企業と接する中でも、数年前まではカーボンニュートラルに関わる取り組みは各企業の中で「コスト」と見なされ、消極的に対応がされていたが、この1年間で各企業の姿勢は大きく転換し、積極的にカーボンニュートラルを推進し始めているように感じる。

特徴的なのは、各社がカーボンニュートラルの取り組みを単なる「コスト」ではなく、「事業機会」として見始めている点にある。従来、環境価値の社会への提供と経済価値の実現（自社の収益獲得）はトレードオフの関係であると見られていたが、この1年では多くの企業が環境価値と経済価値を同時に実現するトレードオンの事業戦略が存在し得ることに気づき、その可能性を追求している。

今回のテーマである「水素」はまさにCO2削減と同時に事業収益を生み出すトレードオンのビジネスとなり得る。水素の本格普及は長期的に捉える必要があるが、普及まで待たずに自社の事業戦略を検討し、実際に手を打ち始めていくことが肝要である。ただし、電力やガスといったエネルギーが溢れている2021年現在の検討にあたっては、事業セグメントを細分化して見る必要がある。例えば北米で進んでいる水素フォークリフトの導入は、「室内の大規模で高稼働（24時間稼働）な倉庫」という限定的な事業セグメントで進んでいる。

本特集号では、脱炭素における水素の役割に始まり、欧州での状況、グリーン水素についての供給側の可能性、需要側（アプリケーション）の可能性などを、具体例を紹介しながら解説する。

今後さらに急速にカーボンニュートラルが進む世界の中でトレードオンの事業を構築し、推進していくために、本特集号が貴社の検討の一助となれば幸いである。

脱炭素社会に向けた 水素の可能性と役割

気候変動対策は、世界全体で取り組むべき喫緊の課題である。今、各国はカーボンニュートラルの実現に向けて動き出している。しかし、これまで多くを依存してきた化石燃料から完全に脱却するには、さまざまなハードルがあり、エネルギーシフトは一筋縄ではいかない。そのような状況で注目されているのが「水素」だ。本稿では日本企業がカーボンニュートラルを実現する一部として水素を活用するうえでの課題とそのアプローチを考察する。水素を次世代エネルギーとして活用するために、経営者が着眼すべき動向についてご紹介したい。

著者：磯貝 友紀

「逆算方式」で打ち出した46%削減目標

日本政府は2021年4月22日、閣僚が参加する地球温暖化対策推進本部で、2030年時点での温室効果ガス（二酸化炭素：以下、CO₂）削減目標を2013年度基準で46%とする中間目標を発表した。これまで日本政府は中期目標として2030年に26%減という数字を提示していただけに、産業界からは驚きの声があがったと同時に、日本の産業競争力を落とすものだとの批判も相次いだ。

しかし、日本政府の方針発表は必ずしも唐突だったわけではない。2015年開催の第21回国連気候変動枠組み条約締約国会議（COP21）で採択されたパリ協定では、世界の平均気温上昇を産業革命以前に比べて2℃より十分低く保ち、1.5℃に抑える努力をすることを求めており、その時点から世界各国は「カーボンニュートラル（脱炭素社会）」の実現を目指し、CO₂排出量ゼロに向けて動き出していたのである。この時点で、どこかの段階で日本政府が規制を強化することは明白だったと言えるだろう。日本政府にとってのオプションは、規制を強化するか、もしくは、パリ宣言での約束を破棄するか、の二択しかなかったのだ。厳しい言い方だが、46%削減目標を驚きをもって受け止めた日本企業の経営者は、カーボンニュートラルに対する予測が甘かったと言わざるを得ない。世界に目を向けてみると、2015年より以前から各国でESG投資（社会的責任投資）が大幅に増加している。パリ協定の締結以降、脱炭素に向けた規制強化が進むことを投

資家たちは予想していたのだ。

日本は2020年10月に「2050年までにCO₂の排出量を実質ゼロにする」という削減目標を打ち出し、12月には、脱炭素に向けた研究・開発を支援する2兆円の基金を創設するとともに「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を公表した。さらに2021年3月に地球温暖化対策推進法改正でネットゼロを踏まえた基本理念を加えたが、これらの一連の動きはG7の中でネットゼロに対し積極的とはいえなかった日本が、国際社会の動き、特に米国が2020年11月の大統領選挙の結果パリ協定に復帰するという動きを想定しての対応との見方がされている。そのためこのネットゼロ目標は削減の道筋を国内で検討した上で設定されたものではなく、ネットゼロを巡る動向に歩調をあわせることで設定された点に留意が必要である。したがって、従来政策の延長で目標を設定すれば、各国が法制化して取り組んでいる「2050年までにCO₂排出ゼロ」は、到底達成できるものではない。

一般的に目標の立て方は2パターンある。1つは「積み上げ方式」だ。これまでの実績や見通しを基に、「このくらいまでなら達成できる」という数値を掲げるアプローチである。もう1つは「逆算方式」だ。最初に達成が難しい目標を掲げ、それを達成するには何をすべきかを逆算して行動を促す。高い目標を達成するためには、当然、現状のままでは難しいこともあるため、新技術の開発や新たなアプローチを模索する必要がある。その結果、イノベーションが起こることも期待できる。日本政府が今回打ち出したのは「逆算方式」だ。米国の

磯貝 友紀 (いそがい・ゆき)

PwC Japanグループ、サステナビリティ・センター・オブ・エクセレンス、テクニカルリード。日本企業のサステナビリティビジョン・戦略策定、サステナビリティ・ビジネス・トランスフォーメーションの推進、サステナビリティリスク管理の仕組み構築、途上国における社会課題解決型ビジネスなどを支援。

バイデン政権とともに、中国に対し、気候変動対策で足並みをそろえる、というような政治的背景に加え、目標達成に向けて新たな技術に目を向けるよう、日本政府が大舵を振ったと見るのが妥当だろう。他方で、2030年まで、9年しか残されていないことから、イノベーションが生まれ、エネルギーシフトを行うには時間軸が短すぎるという批判は妥当である。政府目標が非現実的、という批判は、その限りにおいて正しいとも言える。逆に、政府も日本企業も2015年の時点で早急に動き始めるべきだった、と言えるのかもしれない。

2030年、46%目標を達成するのにグリーン水素は魔法の杖となるのか？

カーボンニュートラルを実現するうえで有力視されている技術はいくつかある。その1つが水素を用いた方法だ。

水素は、宇宙でもっとも多く存在する物質であり、燃焼させることで熱エネルギーを発生させる。石炭や石油といった化石燃料は燃焼するとCO₂を排出するが、水素は燃焼してもCO₂を排出しない。水素は生成方法によって以下の3つに分類される。なお、燃料としての水素はCO₂を排出しないが、水素自体の生成過程でCO₂を排出する場合があります、その過程におけるCO₂排出によって、グリーン、グレー、ブルーの3種類に分けられる。

■ **グリーン水素**……太陽光や風力などの再生可能エネルギーを用いて水の電気分解によって生成する。CO₂排出ゼロ。

■ **グレー水素**……化石燃料(主に天然ガス)を分解して生成する。生成過程でCO₂を大気中に放出する。

■ **ブルー水素**……化石燃料を分解して生成する。製造過

程で発生するCO₂を抽出し、濃縮して地中に貯蔵するCCUS (Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage: 二酸化炭素回収・有効利用・貯留) 技術を用いる。結果としてCO₂排出を大幅に(90%程度)低減できる。

この中でCO₂削減効果の観点から大規模な実用化がもっとも期待されているのは、グリーン水素である。電力会社など、エネルギーを供給する側ではオーストラリアや欧州、チリなどの水素エネルギー牽引国が2030年までにグリーン水素製造の実証段階を終えてコスト削減段階に突入し、大規模商用化を加速させる見通しだ。一方、製鉄や化学、運輸などのエネルギーを大量に消費する需要側も、2030年には天然ガスによる熱供給代替の大規模実証から、グリーン水素の導入を拡大する段階に入ると見られている。

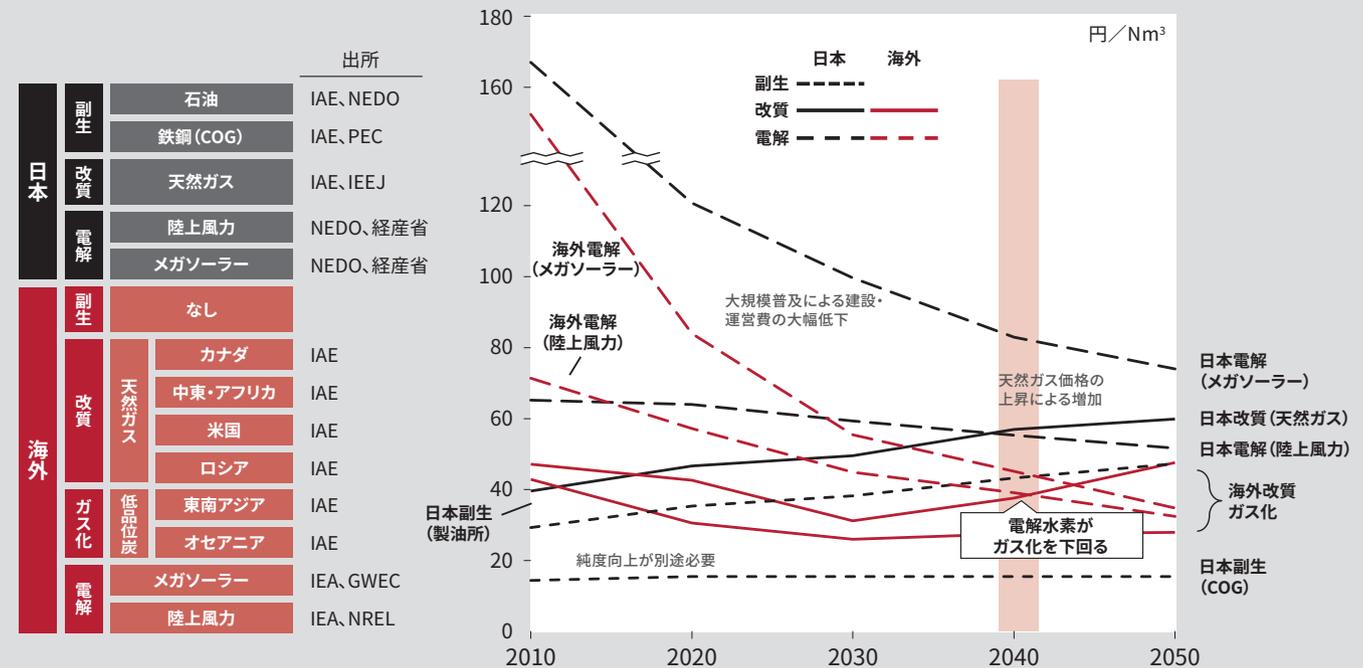
一方、日本に目を向けるとグリーン水素の製造には大きなハードルがある。それは「再生可能エネルギーのコストが高い」ことだ。世界的に見ると再生可能エネルギーの価格は徐々に下がっているものの、日本は再生可能エネルギーに携わる人件費やソーラーパネルなどを設置する土地代が高いため、各国と比較して再生可能エネルギーのコスト削減ができない。当然、化石エネルギーから再生可能エネルギーへの転換が進まないと、国内でのグリーン水素生成はコスト高になる。そのため、グリーン水素を輸入することになるが、こちらもコスト高になってしまう。各国がパイプラインでつながっている欧州と、船舶で輸入をしなければならない日本では、事情が異なるのだ。

こうした背景から日本でグリーン水素のコストが下がり、大規模商用化の段階に入るのは、2040年ごろだと予測されている(図表1参照)。つまり、日本はグリーン水素牽引国と比較し、大規模商用化が10年後以降になると予想されているのだ。グリーン水素の世界でのコスト動向についてはPwCの

図表1

日本国内の水素製造コストとCIFコストの将来予測

グリーン水素が競争力を有する電源となるのは、電解による製造コストが改質を下回る2040年頃とされる



出所：文献調査などを基にStrategy&作成

レポート『グリーン水素経済*1』を参照いただきたい。

水素への注目が集まっているものの、このような状況から、2030年、46%目標達成への魔法の杖とはならない可能性が高い。

日本企業を直撃する炭素税のインパクト

とはいえ、再生可能エネルギーのコストが高いからといって、カーボンニュートラルに消極的な姿勢であれば、企業はさまざまなリスクを負うことになる。1つ目が企業に対するマイナスの評価・評判が広まることによる経営リスク、「レピュテーションリスク」だ。ESG投資に代表されるように、市場は企業が環境・社会面でどれだけ責任を果たしているかに注目するようになった。例えば大量にCO2を排出しているにも関わらず将来にわたって対策を講じていない企業は市場からの評価が下がる。結果、投資が引き上げられて株価が下

落するリスクを抱えることになる。すでに欧州では「カーボンニュートラルに消極的な企業とは取引しない」と宣言をしている企業もあるほどだ。

2つ目が「炭素税」である。これは、炭素含有量に基づいて化石燃料の消費に課す税金で、環境コストを経済的に内部化するものだ。今後、炭素税は世界的に上昇することが予想されている。2021年7月現在、日本の炭素税はCO2 1トン当たり289円と世界的に「最安値」になっているが、2025年には欧州を中心とした先進国でCO2 1トン当たり63米ドルに、2040年には同140米ドルにまで引き上げられると予測されている(図表2参照)。

脱炭素に向けた技術

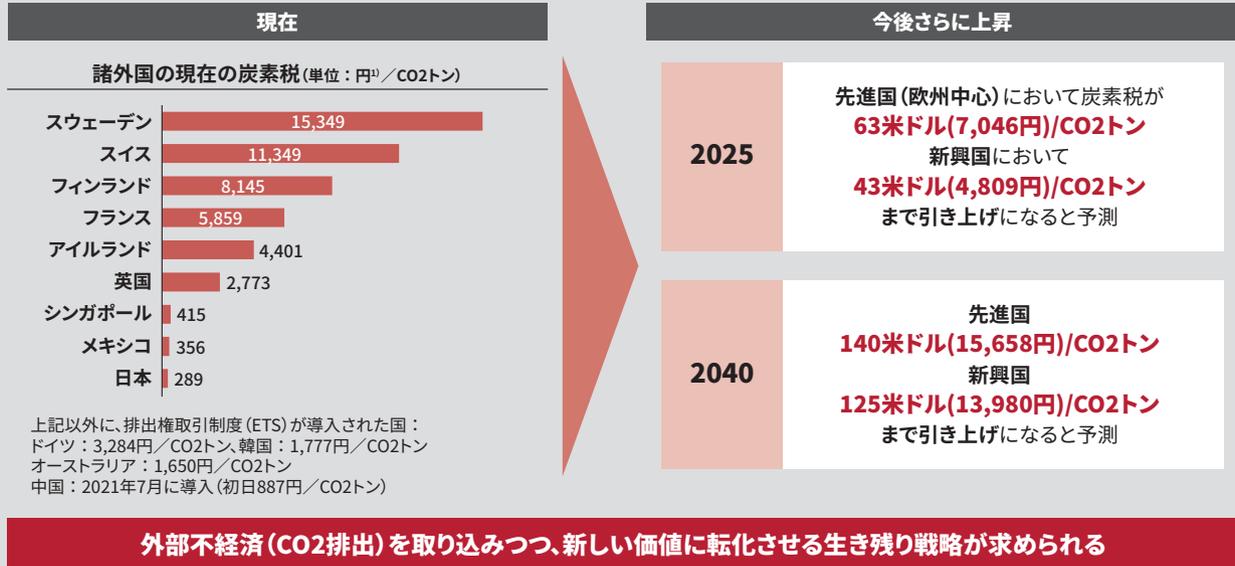
この炭素税は、日本企業の経営に大きな影響を与えるリスクと考えられており、多くの企業が対応を検討している。具体

*1：PwC, 2021.『グリーン水素経済 今後の「脱炭素」の重要市場を予測する』

図表2

脱炭素化にむけた世界・日本の動向 - 炭素税導入・増加

2°C以下の世界実現に向けて、今後世界的に炭素税がさらに上昇することが予想され、企業の事業コストは増加の見通し



1): 換算レート: 1USD=111.84円で計算(MUFG、2021年4月1日TTSLレート)。ETS部分: 1AUD = 約82.5円、1CNY = 17.31円
 出所: The World Bank, Carbon Pricing Dashboard, IEA, World Energy Outlook 2020

的な対応策は以下の3つが考えられる。

- 化石燃料から再生可能エネルギーに転換する
- 既存資産(設備)を活用しつつ、CO2の発生を抑制する
- 排出したCO2を回収して貯蔵する

これら3案は、どれも一長一短がある。先述したとおり、再生可能エネルギー転換への課題はコスト増だ。再生可能エネルギーには太陽光・風力・水力発電といった自然エネルギーと、木質、トウモロコシ、藻類などを原料にしたバイオマスがある。自然エネルギーの場合、原材料費はゼロだが天候に左右されたり、設備の刷新に莫大な初期導入コストがかかったりする。バイオマスも、一部を除き、コスト減が見込めないうえに、例えばトウモロコシの場合は食料問題にも影響を及ぼし得ることから、再生可能エネルギーの原料として十分な量を確保できないという課題を抱えている。また、水素は2040年まで実用化が難しいことは上述の通りだ。

既存設備を活用しつつCO2の発生を抑制する方法では、

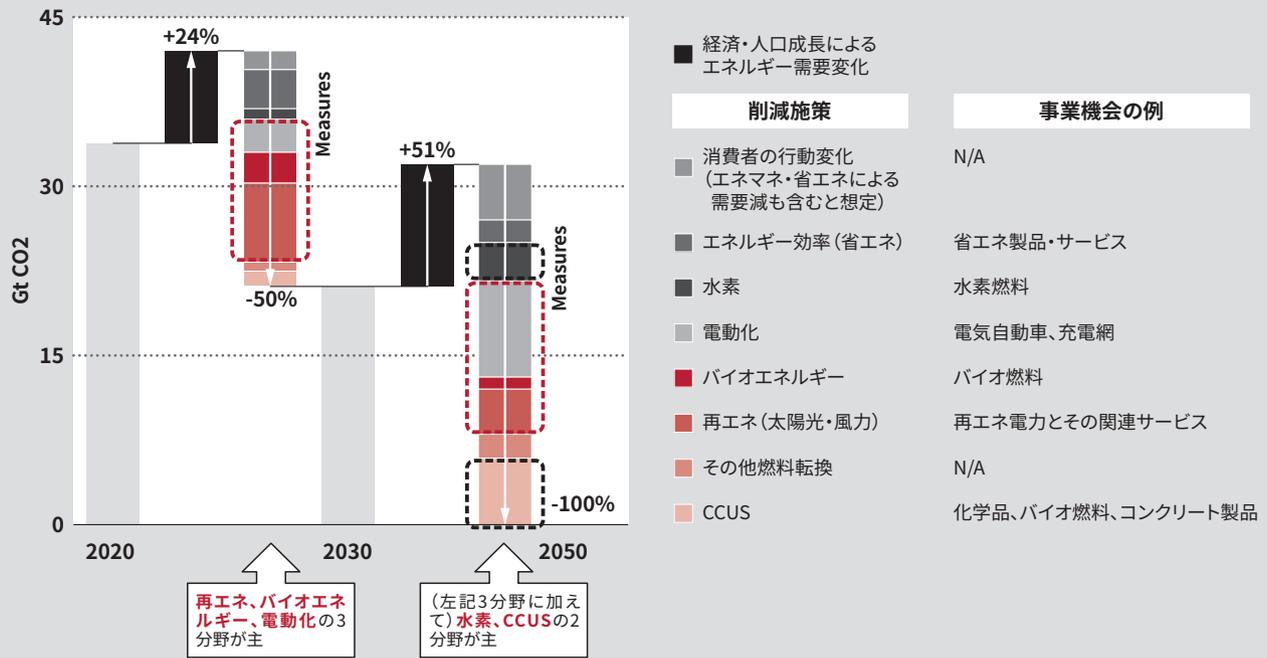
「アンモニア混焼」がある。アンモニアは燃やしてもCO2を排出しない。そのため、既存の発電施設で化石燃料と混焼させることで、エネルギー効率を保ったままCO2の発生を抑制できると期待されている。

しかし、アンモニアは生産時のCO2排出の課題を解決する必要があり、コスト面での課題がある。アンモニアの構成成分は窒素と水素だが、窒素の固定化にはコストがかかる。さらに、窒素はたんぱく質の基になる成分であり、トウモロコシと同様に、食料問題の解決に向けて取り合いが生じ得るという課題もある。

では、排出したCO2を回収して貯蔵・有効活用するCCUSはどうか。CCUSには大規模な設備投資が必要だ。2030年時点で商用化が始まると見込まれるものの、普及に至らない見通しだ。

以上より、水素やCCUSの商用化は2030年時点では困難であり、また一部、日本特有の問題から再生可能エネルギーは十分に供給されないうえに、コスト減の見込みは薄いと考えられる。2030年時点での「46%削減達成(2013年

図表3
施策別の排出削減量 (1.5°Cシナリオ, 2020-2050年)



出所：IEA, Net Zero by 2050

度基準)」はかなり険しい道のりだ。個人的な見解だが、短期的に、既存設備を活用するアンモニア混焼などを用いながら、中期的には炭素税導入に伴い相対的コスト優位性を獲得する再エネ転換を進め、長期的に、水素やCCUSの技術開発を待つというのが現実解の1つではないだろうか (図表3参照)。

自社の状況を客観的に分析する

ではこうした状況下、経営者はどのようにCO2削減の道筋を立てるべきか。

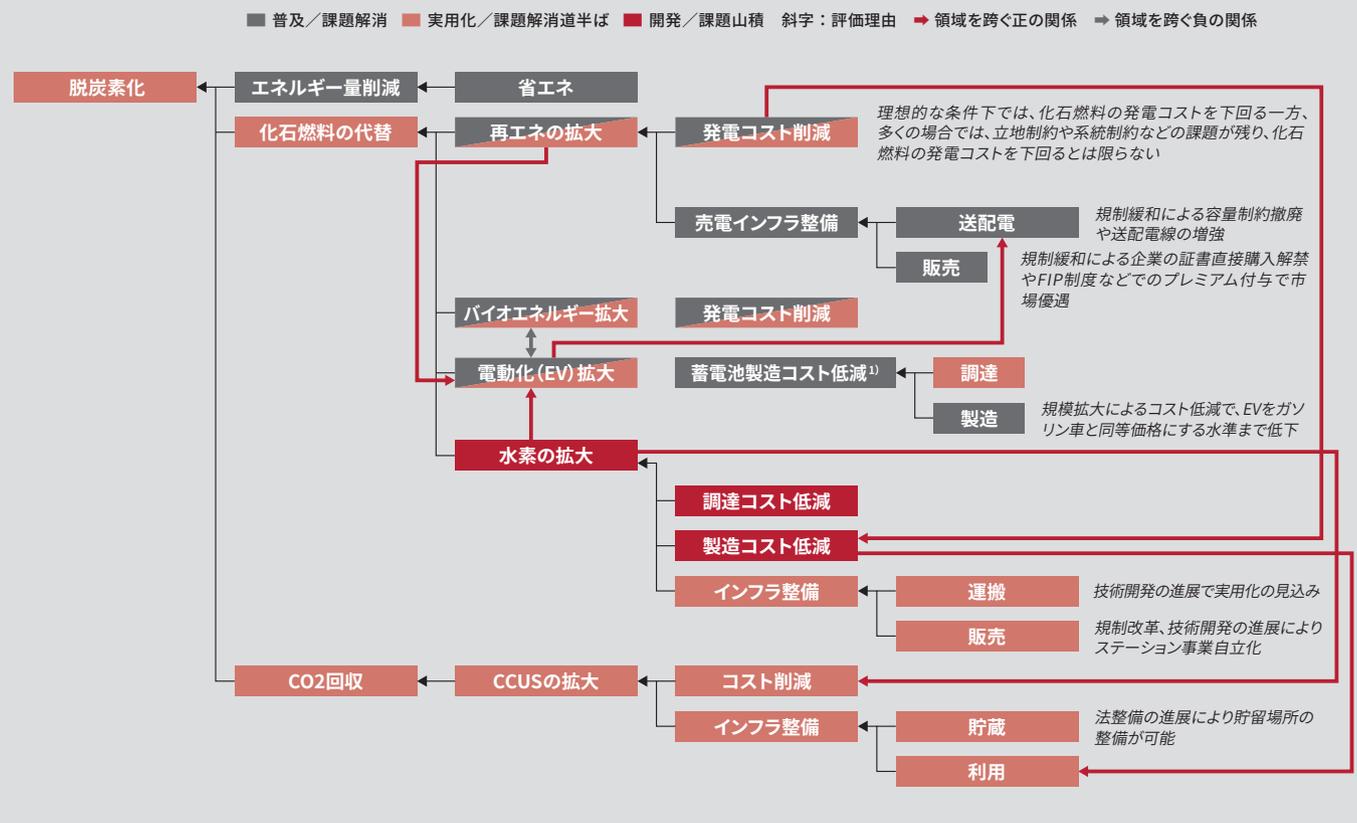
最初に行うのは自社設備・資産の棚卸だ。「どの設備で」「どのくらいのCO2を排出しているのか」、現状を可視化したうえで、「どのような技術を用いて」「どのくらいのCO2削減を実現するのか」といった大枠の戦略を検討しなければならない。その際には、まずは、費用対CO2削減効果の高い、いわゆるハンギングフルーツを特定することが重要だ。高額の設備投資は、今後の技術開発によって、コスト減になるタイミングを見極める必要がある。

大枠の戦略を決定したら、次は具体的な施策に落とし込む。その際には、「その施策によってどれだけCO2が削減できるのか」だけでなく、「その施策によって炭素税がいくら節約できるのか」「化石燃料から脱却することで、得る市場と失う市場はどこののか」までを分析し、どの施策がコスト的にもCO2削減の観点からも有用なのかを見極めなければならない (図表3参照)。そのためにはグローバル動向の情報収集や、自社が置かれている状況の分析が必要だ。こうした取り組みを自社で実施するのが難しい場合には、外部の専門家を活用するのも有効な手段だろう。

施策の落とし込みで大切なのは、前述した技術だけにとらわれず、これから伸びそうな技術にも目を配ることだ。日本ではベンチャー企業や大手企業など、さまざまな企業が新技術開発に取り組んでいたり、再生可能エネルギーや代替エネルギーの普及促進を下支えする技術を持っているケースがある。

例えば、藻類の研究開発を手掛けるベンチャー企業ユーグレナでは、使用済みの食用油と微細藻類から抽出した油脂を燃料にしたバイオ燃料を開発・販売している。同社は2020年にバイオディーゼル燃料を、2021年にはバイオジェット燃料の

図表4
脱炭素化を実現する仕組みと進捗予想(2030年時点)



1) ただし、燃料電池については「水素の拡大」と同レベルを想定
出所：経済産業省、各種公開情報よりStrategy&作成

供給を開始。現在は車両・船舶・航空機でバイオ燃料が使用されている。

また、清水建設では、20年以上前から「月太陽光発電」の技術開発を進めている。月の赤道上に太陽電池を敷き詰めて発電し、月に設置したエネルギー伝送施設でマイクロ波レーザー光に変換する。そのうえで地球に向けてエネルギーを伝送するという技術である。

さらに、プラントの設計・調達・建設を中心に世界60カ国以上でプロジェクトを展開する千代田化工建設は、有機ケミカルハイドライド(OCH)法によって、安定輸送が難しい水素の安全かつ容易な大量輸送を可能にした。また、大手重工企業も、液化水素の長距離大量輸送や荷役技術の開発を進めており、水素のサプライチェーン構築を目指している。

藻類を原料にするバイオマスは、エネルギー密度の改善が進み、すでに実用化が進んでいるが、その他の技術は、どのタイミングでブレイクスルーするか明確には特定できない。ま

た、炭素税が導入されれば、化石燃料との相対的コスト優位性も高まるだろう。次項でも述べるが、欧米大手企業は、脱炭素施策の落とし込みに必要な技術開発を行うベンチャーとの協働を積極的に進めている。脱炭素、特に、Scope3を含む脱炭素は、1社で実現することは難しい。ベンチャーを含む他社との協働が重要となるだろう。

テックジャイアントの動向を「センサー」に

今後の動向を把握し、適切な判断を下せるようにしていくためには、顧客、規制、技術といった3つの変数に留意しなければならない。

顧客動向や規制動向は、欧州の動向に注目したい。日本よりも約10年先を行くと言われる各国の動きを把握することで、将来的に日本で起こりうる程度予見できる。一方、技術動向は不確実性が高い。例えば、再生可能エネ

ルギー技術のコストは、以前の予想よりも圧倒的なスピードで削減が実現している。つまり、専門家であっても今後の技術動向の予測は難しいのだ。そう考えると、2040年と予測されている日本におけるグリーン水素の大規模商用化は、もっと早い時期に到来する可能性もある。

ただし、技術動向を注目するうえで1つ注意すべきことがある。それは、「希望的観測を盛り込まない」ことだ。特定技術に肩入れするあまり、客観的な視点が失われてしまうことがある。「水素エンジン自動車が登場すれば、電気自動車は一掃される」と主張する専門家もいるが、その論拠となるデータは水素エンジンのメリットばかりが書かれた報告書だったりする。技術動向を見るうえでは、自分の考えにバイアスがかかっていないかを常に自問自答しなければならない。

さらに大局的な視点で動向を予測するには、「テックジャイアントがどの企業・どの技術に投資をしているか」を「センサー」とするのも一案だ。例えば、大手米国IT企業の多くは、自社で巨大なデータセンターを運用している。彼らにとってエネルギー問題は企業の存続を左右する重要な課題だ。当然、再生可能エネルギーや次世代エネルギー技術には莫大な投資をしている。あるIT企業は、気候変動対策技術のVC（ベンチャーキャピタル）を創設し、CO2削減に取り組むスタートアップに投資をしている。こうした大手IT企業から投資を受けているスタートアップのビジネス領域や、その企業にはだれが投資をしているのかを見れば、ある程度の動向は把握できるだろう。

* * *

カーボンニュートラルの実現は10年スパンのトランジションであり、現時点で決定的となる技術は確立していない。そのような状況で特定の技術に的を絞り、大規模投資をすることはリスクが高すぎるだろう。経営者は技術が成熟するまでの期間は、顧客や規制、技術動向という「変数」にアンテナを張り、十分な情報収集・分析をもとに、いつでもトランジションプランを変更できる柔軟性を持たせておくことも必要であろう。

グリーン水素普及に向けた展望

著者：板橋 辰昌

2050年のカーボンニュートラル実現に向けては、グリーン水素*¹やグリーンアンモニア、e-fuelなどのグリーン燃料が注目されているが、グリーン水素製造コストの大半を占める再生可能エネルギー（再エネ）の価格がグリーン水素パリティには達せず、2030年の普及は限定的という風潮が強い。しかし、足元でのスタートアップの技術開発動向や欧州、特にドイツでのPower to Gas実証を踏まえると2030年に向けたグリーン水素普及の展望は予想よりも明るく、多くの企業は速やかに対応しなければ事業機会を逸する可能性が高い。

そこで本章では、カーボンニュートラルの実現に向けてグリーン水素に期待される役割を改めて確認した上で、現状の実証や技術開発動向を踏まえたグリーン水素普及の展望と、日本企業の取るべきアクションについて考察したい。

1. カーボンニュートラル実現に必須となるグリーン水素の役割

(グリーン水素がなぜ必要なのか)

2. グリーン水素の経済性

(日本は水素製造国となり得るのか、またスタートアップの動向は)

3. 欧州におけるPower to Gas実証の動向

(早期に水素の経済性が成立しうる条件は何か)

4. 日本企業が足元で取り組むべきこと

カーボンニュートラル実現に必須となるグリーン水素の役割

カーボンニュートラルの実現には、グリーン水素の普及が非常に重要なカギとなるが、なぜグリーン水素の普及が必要となるのか、2050年の最終エネルギー消費の分析を基に考察したい。

日本の2019年度における最終エネルギー消費内訳(図表1)は、水素の電力としての利用は約26%程度であり、残る74%は石油精製や化学原料利用などの産業用およびモビリティ、航空・船舶の用途での利用が大半となる。CO2削減に向けた取り組みは、当然、経済性が成立し、かつ成熟した技術から導入が進んでいるため、電力分野での太陽光発電や風力発電などの発電技術が先行している。しかしながら、当該領域の寄与だけでは、化石燃料消費の大半を満たせないため、水素を含めたグリーン燃料の利用がカギとなる。

再生可能エネルギーの普及が今後も進むとされるなか、グリーン化が容易な家庭部門での電化やモビリティのEV化も加速することが予想され、次に述べるとおり、需要側の各領域の動向を踏まえても、電力分野の脱炭素化だけでは、カーボンニュートラルは達成できないことが分かる。

■家庭、業務用途では電化と自家消費が進む

家庭用途は、戸建・低層集合住宅の新築でZEH化が進み、省エネ・創エネが進展する。直近でも、家庭用は自家消費型での太陽光発電の導入が進んでいるが、2050年に向けては、太陽光発電機器のコスト低減に伴い、導入がさらに加速する。また、熱需要も電力価格の低下に伴い、ヒートポンプの導入が進む。

業務用途では、新築、既築ともにZEB化が拡大し、省エネ・創エネが進むことで一定の電化が進行する。地域熱供給やコジェネによる熱需要は、業務用施設を中心にメタネーションが適用される。

■運輸用途ではEV化が一定程度進むが、水素自動車やe-fuelとの棲み分けが進む

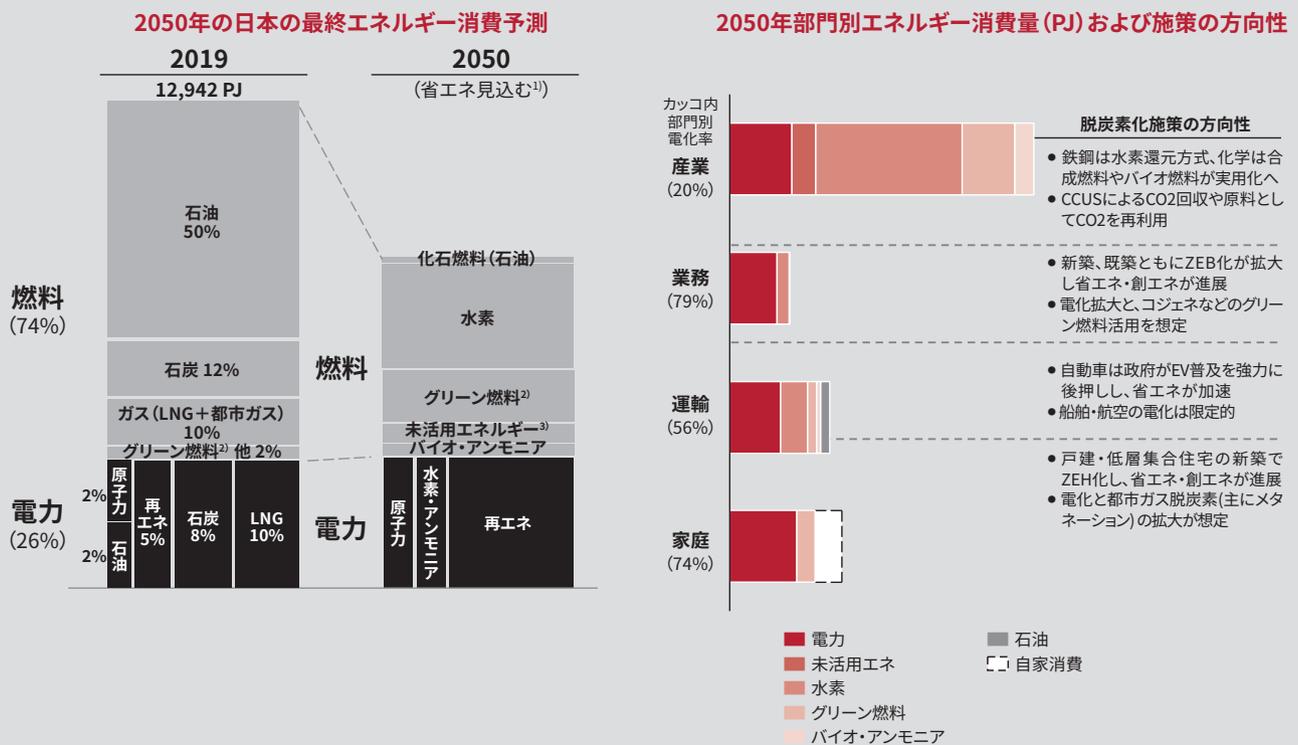
乗用車、商用車セグメントではEVおよびFCVが普及。他方で、船舶・航空の電化は限定的となり、SAFなどのグリーン燃

*1: グリーン水素と限定しているが、地域によってはCCSなどを組み合わせた電力を利用したブルー水素も普及する可能性は高いが、時期は現時点で明確ではないため、本章では特段区分していない。

板橋 辰昌 (いたはし・たつまさ)

PwCコンサルティング、Energy Utility and Miningチームのディレクター。電力・ガス、石油元売りや総合商社向けの脱炭素対応に向けた戦略策定、新規事業開発支援を多く手掛ける。

図表1
2050年の日本の最終エネルギー消費と水素・グリーン燃料が果たす役割



1) 省エネ技術の普及に加え、人口減少などの自然減少分や家庭部門は創エネ分(自家消費)も反映
2) e-fuelやメタネーションによる合成メタンなどが該当
3) 廃棄物エネルギー利用などが該当
出所：PwC分析

料利用が進む。詳細は次章「モビリティ領域の水素・燃料電池普及シナリオ」を参照頂きたい。

■産業用途では製鉄などでグリーン燃料利用に向けた技術開発が進む

燃料消費が大きい産業用途では電化技術だけではカーボンニュートラルへの対応が難しく、水素やバイオ燃料、CCUSの利用が加速する。

これら需要側のカーボンニュートラル実現に向けた取り組みは、現時点での各業界団体の現実解を踏まえた方針や、技術開発および政策動向を踏まえた試算となり、将来的に変わり得る不確実性のあるシナリオとなる。また、最終エネルギー消費の形態として一定の燃料需要が2050年時点で残ることは自明であり、水素やe-fuel、バイオ燃料を含めたグリーン燃料がカーボンニュートラルの実現には必須となる。

グリーン水素は、グリーンアンモニア、e-fuelなどの

グリーン燃料の原料となる

このように、グリーン燃料の利用に対して複数のオプションが模索されている。既存のサプライチェーンやインフラを活用できるグリーンアンモニアやメタネーションにも期待が高まるが、どの燃料の製造工程においてもグリーン水素が必要となり、2050年カーボンニュートラルに向けてはグリーン水素の低コスト化が重要なカギとなる。

グリーン水素の経済性

では、グリーン水素が普及のコスト水準を迎える時期はいつ頃になるのか。その経済性は、「再生可能エネルギーのコスト」と「効率性を含めた水電解装置のコスト」の2つの主要な要素により決定される。

再生可能エネルギー資源が豊富かつ低コストである地域での水素製造が進む

▶ 化石燃料資源と異なり、水素が地域性をもちにくいとはいえ、低コストかつ豊富な再生可能エネルギー資源が得られる地域は限定的となる。そのため、例えば、中東の一部地域、アフリカ、ロシア、米国、オーストラリアなどが水素製造の有力地とされており、これらの地域では2050年時点で1~1.5ユーロ^{*2}/kg-H₂(約12~17円/Nm³-H₂)になることが見込まれ、2030年時点でも2ユーロ/kg-H₂(約23.4円/Nm³-H₂)前後のコスト水準がいくつかの地域で見られるようになる^{*3}。

▶ 日本国内に関しては、再生可能エネルギーの開発は途上段階にあり、安価な再生可能エネルギーを水素製造に利用することは一部地域を除いて見込めず、中長期的には水素の輸入が主流となる。

① 第6次のエネルギー基本計画では、2030年の再生可能エネルギーの導入目標が、従来の22-24%から36-38%に更新され、引き続き導入が加速する。ただ、国内の再生可能エネルギーは需要に対して不足するため、水素製造向けの利用は限定的となる。

② 原子力発電の再稼働が継続すると、北海道や東北、九州の離島など国内の再生可能エネルギー適地かつ連系線容量の制約が起り得る地域では、余剰電力の発

生が見込まれる。一方で国内の主なエネルギー需要地に対しての水素輸送方式が限定的となるため、国内の水素製造は地産地消などの一部地域に限られる可能性が高い。

水電解装置のコスト低減は新たな技術開発により加速が進む

▶ コスト低減のもう1つのカギとなる水電解装置に関しては、特にスタートアップが中心となって新たな技術開発を進め、さらなるコスト低減が加速する可能性が高い。有望なスタートアップは多く存在するが、本章では書面の都合上、特色ある2社を紹介したい。

① H2PRO社は、2019年に設立されたばかりのイスラエルに本社を置く企業であるが、ビルゲイツ財団であるBreakthrough Energy Ventureや住友商事など多くの企業からの資金調達に成功している。同社の特徴としては、E-TACという隔離膜が不要な新たな水電解製法により、製造コストの大幅削減と3.8kWh/Nm³という高効率性を実現することで、2030年までに1米ドル/kg(9.9円/Nm³-H₂^{*4})以下を目指している。

② Enapter社は、ドイツに本社を置く企業である。同社の特徴は、AEMという独自の陰イオン交換膜を利用した方式により、水素製造装置のモジュール化と量産化に成功しており、2030年時点で足元のコストの10分の1にすることを目標に生産を進めている。この目標は日本が2040年頃に目標とするコスト水準であり、グリーン水素普及の加速を後押しする可能性が高い。

以上を踏まえると、再生可能エネルギーが安価である地域で新たな技術開発が成功した場合には、水素が普及可能なコスト水準を2030年までに達成する可能性は充分にあり得る。

欧州におけるPower to Gas実証の動向

水素の普及は再生可能エネルギーの価格の低減とスタートアップの技術開発頼みで、実際の実証では普及する水準のコストには程遠いという声も多く聞かれる。しかし、本当に水素の普及が2030年以降になるのか、検証の必要があるだろう。

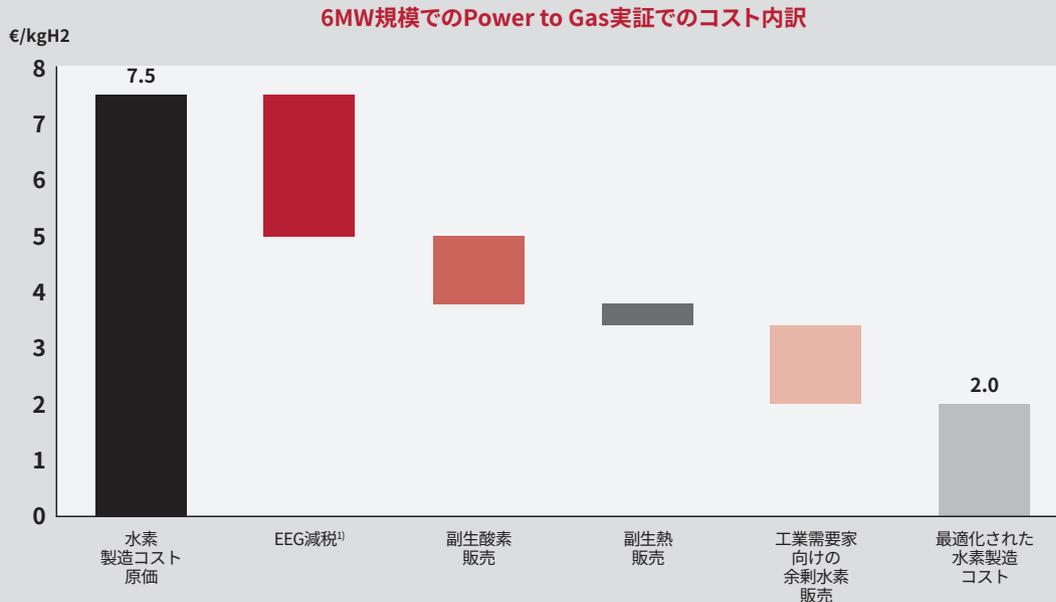
*2：本章では1ユーロ=130円で換算

*3：PwC、「グリーン水素経済～今後の「脱炭素」の重要市場を予測する」参照

*4：本章では1米ドル=110円で換算

図表2

欧州でのPower to Gas実証での水素製造コスト内訳



1) EEG Exemptionとは、日本における再生可能エネルギー発電促進賦課金を指し、ドイツではグリーン水素の製造時に使用される電力販売に対して賦課金の免除対象外となる法改正が実施され、2030年1月以前に稼働したすべてのプラントに適用される。

出所：Strategy&分析

前述の通り、コストのカギを握る再生可能エネルギーについて、欧州では経済性を成立させるための政策的な支援やサプライチェーン構築の条件などの具体的な検証が進んでおり、これらは日本における地産地消型での水素製造や、水素製造国での事業性成立に向けた取り組みとして参考となる。PwCでは具体的なPower to Gas実証のアドバイザーを努める経験も有しており、本節ではその取り組みの概要について紹介したい。

▶ 図表2は、6メガワット規模の水電解装置を用いたドイツでのPower to Gas実証のコスト内訳を示したグラフである。政策的支援による減税と副生成物の販売により、需要家が許容する水素製造コスト水準が低下し、2ユーロ/kg-H₂(約23.4円/Nm³-H₂)と日本が2030年に政策的に目標とする30円/Nm³の経済性が成立する兆しが見えてきている。

- ① 政策的支援として水電解装置に関する補助金に加え、水素製造に利用するグリーン電力調達に対しては、再生可能エネルギー発電促進賦課金が免除される。
- ② 水電解装置を利用した水素製造における副生物である

酸素や副生熱の利用により、複数の収益源を確保することで収益性が向上する。

▶ なお、日本で議論されるような短期的な電力需給調整用途に対しては、水素製造効率低下を招き、結果として経済性が成立しにくくなるため、利用されていない。

これらの実証結果は、日本や水素製造適地となる海外諸国における水素普及に向けた法整備化や実証が進む中で非常に参考となる。例えば日本においても、カーボンニュートラルポート構想として注目が集まる港湾周辺地域において、需要家向けや工業地帯向けなどの一定の条件を満たし、なおかつ自営線供給などにより安価な水素製造が可能な場合、副生成物である酸素や廃熱を供給することで、経済合理性が成立する可能性が高まると言える。

日本企業が足元で取り組むべきこと

グリーン水素は2030年の時点では経済性が成立せず時期尚早といった意見もあるが、海外スタートアップの動向やPower to Gas実証ですでに日本が政策的に目標とする価

格水準を実現できる兆しや条件が見え始めている。日本においても国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)にグリーンイノベーション基金が造成され、クリーンテック領域での技術開発を支援しており、セクターカップリングを通じた新たなバリューチェーンの構築が加速すると言えるだろう。

- 水素は、これまでのエネルギーバリューチェーンを変える大きな起爆剤となる。例えば、電力会社が水素という新たな燃料を自動車などのモビリティ向けに販売することが可能となったり、ガス会社や産業ガス会社が水素の製造、供給販売に参画可能となったり、既存バリューチェーンの近接領域に事業を拡大する契機となる。これらのバリューチェーン再構築の過程においては、自社の積極的な関与がないと既存のバリューチェーン上におけるポジションが陳腐化するリスクが高くなる。
- 国内の余剰再生可能エネルギーの供給量が足元では限定的な可能性が高く、また、海外からの水素輸入向けのサプライチェーンが構築されるまで一定の時間を要するため、フォークリフトなどのアプリケーション向けのビジネス構築を小規模で始め、早期に日本国内で水素事業パターン・事業網を構築することが重要となる。他社が水素事業パターンや事業網を構築した後からの参入では、厳しい展開が予想される。

将来的な技術開発動向により、今後もシナリオが大きく変わる可能性が存在するが、日本企業が自社ポジションを確保するためにも、遅れずにアクションを取ることが重要である。

モビリティ領域の水素・燃料電池 普及シナリオ

～アプリケーション側から見た水素の有用性～

著者：室井 浩気

割高になる水素がそれでも持つ有用性とは

これまで有望視されては尻すぼみになってきた水素エネルギーの実用化は、安価な再エネ由来の電気の普及に一定の目途がつき、気候変動対応も急務の中、いよいよ「いつ、どこから普及するか」が課題になりつつある。

他方、水素を活用する上で乗り越えるべき根本的な課題として、「(水電解水素などを前提に)一度作った電気を、ロスを出してまで、さらに割高な水素に変換する合理性は?」という宿命的な問いがある。また、近年では、この水素をさらに大気から吸収したCO₂と人工的に合成し、「e-fuel」と呼ばれる低炭素燃料を製造する試みも進むが、この燃料は水素以上に変換ロスを出してしまう。この問いに答えるカギは、(再エネ由来電気の長期貯蓄などサプライ側の都合もあるが)最終的に、より具体的なアプリケーション側(利用者側)から見た「水素の便益・有用性」が、どこにどこまであるか、であろう。

そのような視座のもと、本章では、燃料特性や政策といった技術論・枠組み論ではなく、アプリケーション側から見た水素・FC^{*1}、e-fuelの便益・有用性と有望な適用範囲を、現実に普及しつつある用途・事例をもとに考察したい。なお、水素の用途は大きく以下に大別できる(図表1参照)。

普及の仕方としてA)のようにバッテリー^{*2}との相对比较の中で利便性から普及するものと、B)のように、水素それ自体が化学反応や燃焼に必要であるため普及する用途がある。今後の普及の焦点で言えば、A)はフォークリフトに見られるように用途が適合すれば普及が進む一方で、B)の発電や製鉄は、脱炭素の必要性和コストとの兼ね合いで中長期的な政

策判断に左右される部分が大きいため、本稿では、A) の特にモビリティ領域に焦点を当てて以下の問いについて考察を進める。

1. 期待されつつ普及に至らない水素モビリティ。その本質的課題は?

(何が課題か。“いま”普及するならば、過去とは何が違うのか)

2. 現時点で水素・燃料電池が実用化されている用途・領域は? (フォークリフトなどの用途で水素・FC適用が進むのはなぜか)

3. 水素・燃料電池普及の条件は?

(2.考察から、水素・FCが普及し得る条件はどのように整理されるか)

4. 今後、水素・燃料電池が普及する用途・領域は? 電池・e-fuelとのすみ分けは?

(3.考察から、電池、水素、e-fuelは、どのような用途・領域で使われるか)

5. 利用者にとって、水素・e-fuelを使う意義は?

(変換ロスを出してまで水素やe-fuelを作る意義は何か)

1. 期待されつつ普及に至らない水素モビリティ。その本質的課題は?

2021年8月にIPCC(国連の気候変動に関する政府間パネル)で示された最新の第6次報告は、温暖化の原因について「人間の活動による影響は疑いの余地がない」として、初めてその人為性を断定した。近年、温暖化影響と思われる異常

*1: FC: Fuel Cell。燃料電池。FCと燃料電池は区別なく用いている

*2: 電池、バッテリー: 充電式の蓄電池の意味で区別なく用いている

室井 浩気 (むろい・こうき)

PwCコンサルティング、Strategy&のシニアマネージャー。自動車・産業材向けのデジタル化、脱炭素対応に向けた戦略策定支援を多く手掛ける

図表1
水素の主な用途

区分	用途(用途例)
A) 燃料電池利用	モビリティ用(フォークリフト、トラックなど)
	定置用(民生燃料電池、補助電源など)
B) 燃料・工業プロセス利用	発電用(水素タービン発電)
	都市ガス等混入
	石油精製
	製鉄
	その他(ロケット燃料など)

赤字：普及・実用化済みのもの

出所：公開情報、Strategy&分析

気象などが頻発する中、いよいよ、「人類が当事者として課題に取り組む」必要性が、科学的根拠、切迫感を持って示されたわけである。また、太陽光発電や風力発電など再生可能エネルギー価格の低下が進み、将来的にグリーン水素が一定の競争力のあるコストで確保できる可能性が高まってきた。今回は、需要と供給の両面で普及の素地が整いつつあるという点で、過去の水素へのHype(過度なパブリス期待)とは一線を画していると言えるだろう。

一方で、水素には依然(水電解をベースにすると)「一度作った電気を変換するロスが出て非効率」という宿命的な問題がある。水素は、宇宙に広く遍く存在するが、その意味するところとして、それ自体がエネルギー源として使える形で自然界に存在しておらず、何等かの形で、別のエネルギー源から変換・転換して水素を取り出す必要がある。さらに、欧州中心に開発が進む水素とCO2を合成した「e-fuel」と呼ばれる

合成燃料は、水素からさらに変換ロスが出る点で、課題はより深刻だと言える。

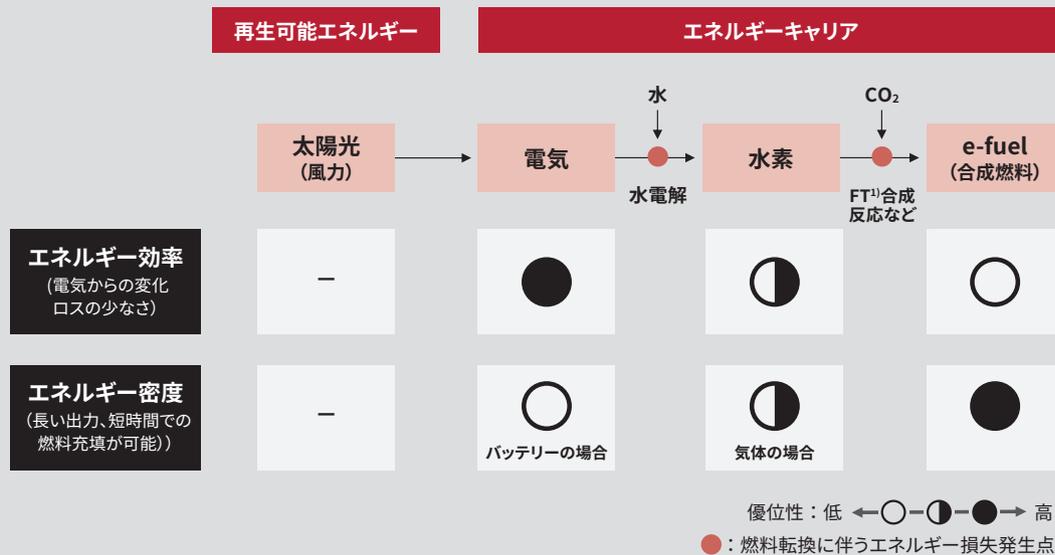
では、そこまで手間・コストをかけて、水素・e-fuelを製造する利点は何か。それは電気よりも、エネルギー密度が高まり、燃料としての利便性(航続距離・充填時間)が圧倒的に高くなることにある。電気は貯蔵性や可搬性が低いフローのエネルギーだが、それを天然ガスや石油などのストックの化石燃料に近いエネルギーに変換していると捉えると理解しやすい(図表2参照)。

2. 現時点で水素・FCが実用化されている用途・領域は？

上述の通り、水素は、現時点で製造に手間・コストがかかり、用途・領域を選ぶ燃料である。一方、モビリティ領域では、

図表2

再エネ由来水素・e-fuelのエネルギー転換フロー例とエネルギーキャリアとしての評価



1) Fischer-Tropsch process
出所: 公開情報、Strategy&分析

屋内フォークリフト (Industrial Truck) 向け燃料電池の導入が商業ベースでの成功を収めていることに加え、小型トラックの都市内配送や、大型幹線輸送トラックにも導入検討が進む。産業材として経済合理性を強く問われるトラックは、「リアリティのある」「ユーザー目線も押さえた」水素・FCの有用性を突き詰めて考える際に、特に最適な題材と言える。以下、実装の事例を具体的に見ていく。

フォークリフト

すでに北米中心に累計3万台以上の燃料電池フォークリフトが導入・運用されている。その大半は、AmazonやWalmartなどの24時間稼働の大型物流倉庫向けである。

フォークリフトは、元々、電池 (バッテリー) 式と内燃エンジン式の2タイプがあったが、密閉された屋内ではゼロエミッション化が必須のため、電池式フォークリフトが使用されていた。この電池 (バッテリー) 式では、充電に8~10時間と長くかかるため、24時間稼働の倉庫では、交換用バッテリーを持ち、シフトごとに電池を物理的に交換 (メカニカルチャージ) しなければならない。そのため、バッテリーの必須保有数も

多く、充電・交換の手間やそのためのスペースもかさみ、全体としてコストを圧迫していた。

こうした課題に対し、米PlugPower社は、電池の代わりに後付けのFCユニットを収め、3分で燃料充填できるFCフォークリフトを展開している。その他にも、電池式フォークリフトは、電池の特性上、冷凍倉庫など寒冷場所での出力低下や、特に鉛電池ではシフト後半にパワーが落ちて作業効率が低下するなどの問題もあった (特に、北米では人件費が高いため、産業機器全般について、高いパワーを維持し短時間で効率的に仕事を終わらせることを優先する傾向がある)。また、数年経つとバッテリー自体の交換が必要になるため、メーカーにとっては儲かる商売である一方、利用者のTCO*3観点では不利益があった。

同社は、既存フォークリフトに対するTCO削減をうたっており、実際にコストに厳しいAmazonやWalmartが大規模に導入していることから、商業ベースの経済合理性を伴って水素モビリティが導入されている有力事例と言えるだろう。

なお、FCフォークリフトは、郊外平屋建ての大規模倉庫でフォークリフト中心にマテリアルハンドリングを行う際に適し

*3: Total cost of ownership : 保有・稼働にかかるコストも含めた総コスト

ている一方、欧州・日本のように比較的小さい倉庫(変わりに縦方向に高くなる)で、短いシフト時間(欧州の一部では都市部の24時間稼働は一般的でない)の場合には適合せず、普及が進んでこなかった。しかしながら、欧州・日本も、今後、ECのさらなる拡大などにより倉庫の大型化が進めば、導入が進んでいくだろう。

小型トラック

中国STNE社は、PlugPower社同様に、後付けのFCユニットを用いたFC小型トラックのリースを行い、上海中心にすでに500台以上の導入実績*4がある。このケースでは、排ガス規制が強い都市部での運行において、高稼働を維持するという、フォークリフトと同様の理由でFCトラックの導入が進んでいる。

同様に、日本のコンビニ各社も、店舗配送にFCトラックを導入する実証を進めている。コンビニ店舗への配送では、夜間も含めた都市・住宅地走行が少なくないため、ゼロエミッションで静粛性の高い電動トラックの社会的要請が強くなったことに加え、コンビニ各社にとっても、環境対応を消費者にアピールできるメリットがある。

さらに、高頻度配送の場合には、バッテリー充電時間の確保が難しく、「充電時間の確保」=「稼働時間の低下」となるため、短時間で燃料充填できるFCに、コスト優位性が生じやすい(他方、宅配便のように、夜間の住宅配送を行わない用途では、理屈としては夜間に充電を組み込むことが可能で事情が異なる)。

また、コンビニ店舗配送においては、弁当など数時間ごとに補充が必要となる冷蔵品の高頻度配送が多いこともFCが適している理由である。さらに、冷蔵車両は、車両(エンジン)から冷却用電源を取っているケースも多いが、消費電力が大きいため、BEVトラックでは対応が難しいことも理由として挙げられる。

なお、配送用の小型トラックにおいては、電動化をてこに、EC普及などにより物流量が大幅に増え、配送員の負荷が高まっている「ラストワンマイル物流」を効率化する取り組みも進んでいる。具体的には、モーターを横置きして前輪と後輪、またはそのいずれかを直接駆動させることで、ドライブシャフトなどを無くし、荷台部分を低床化・フラット化することで、荷積み・荷下ろしの負荷を減らす新しい電動トラックの構想も出されている。単純に内燃機関をモーター・バッテリーに置き換えるのではなく、新しい付加価値をつける試みであり、そ

れらも電動トラック普及を後押ししていく。

大型トラック・バス

大型トラックは、運輸部門の中でもとりわけCO2排出量が多く、CO2低減を進める際のインパクトも大きい。屋内(フォークリフト)や都市部(小型トラック)とは異なり、ゼロエミッション(排気ガスを出さない)の観点よりも、実効的な「脱炭素」を進める目的での取り組みが重要になる。

具体的には、目的や取り組み主体は少しずつ異なるが、主要国全体で大型の燃料電池トラックの実証・導入が進められている。

- 欧州：VW社など大手OEMが、燃料電池トラックの開発・導入を進めている
- 米国：ベンチャー企業であるNikola社が、資金調達・外部提携を行いながら、大型燃料電池トラックの導入を推進している
- 日本：トヨタの燃料電池バスに加え、日野やいすゞが、それぞれ提携先のトヨタやホンダのFC技術を活用した大型トラックの導入に向けた取り組みを推進している
- 中国：古いディーゼル車が多いため、排ガス浄化を目的として、以前より燃料電池バス・トラックの導入が進められている

また、ゼロエミッション性や脱炭素に加え、走行性能の面でも、電動化(モーター駆動化)のニーズは強い。低速でも強いトルクを最初から出せるモーターは、実は大型モビリティにこそ相性が良く、実際に鉱山向けの超大型ダンプは古くから電動化がなされている(ディーゼルエンジンを発電用途に用いてモーターを駆動)。超大型トラックをエンジンで直接駆動させるには、必要なトルクを出すための多段トランスミッションが必要だが、一定以上の大きさになると、メカニカルな機構での対応が困難になるためである。なお、BEVのスポーツカーやセダンの一部が、走行性能(0-100km/h 加速タイムなど)の面で、従来の内燃エンジンのスポーツカーを凌駕するのは、この発進時から最大トルクを発生させられるモーターの出力性能の効果が大きい。

次に、モーターに電気を供給する電池を考えると、車両が大型化すればするほど、バッテリーよりも、燃料電池の優位性が出る。バッテリーはエネルギー密度が低いため、トラック

*4: Ballard, 2021. Case Study Fuel Cell Zero-Emission Trucks in Shanghai

に求められる航続距離を出そうとすると、多くのバッテリーを積まなければならない。すると車両が重くなるうえに燃費が悪くなり、航続距離も出ない、という負のスパイラルに陥ってしまう。トラックにおいては、車両が重くなることは、積載量が確保できない(=仕事にならない)ことを意味する。また、車両が重くなるほど、シャシや足回りもより重く頑丈なものにする必要があり、重量・コストともにさらに上がってしまい、結果、バッテリー(と自重)を運ぶためのトラックになってしまう。

なお、EV大型トラックのスペックを、現状の技術を前提にして実現しようとする、バッテリーだけで数トンの大きさが必要となり、充電時間も既存の急速充電では数時間以上かかる、という見解がある。そのため、航続距離を十分とれるBEV大型トラック導入の実現は、現時点では電池の大革新がないと厳しいと言わざるを得ない。

実際にDaimler Truck社は、2010年代から、いち早く大型領域も含むBEVトラック導入を構想として掲げてきたが、2020年には欧州でVolvo Groupと大型トラック向けのFC製造JV設立に合意^{*5}しており、大型では燃料電池が現実解(の少なくとも1つ)とみなし始めた証左だと捉えられる。

また、トヨタやホンダなどこれまでFCに大規模開発投資を行ってきたメーカーも、トラックを1つの突破口にFC普及を図る狙いがあると考えられる。特に大型トラックはバッテリー対応が困難で、FCを導入する必要性が高い。1台当たりの水素消費量も多い一方で、運行ルートに限られるため必要な燃料充填インフラは少なく済む。トラックで水素普及を進めれば、その燃料充填インフラを活用して、乗用車へのFC普及加速を進める道も拓けてくるだろう。

なお、欧州では、2021年にOEM各社が大型BEVトラック向けの高速充電ネットワークの敷設に向けたアライアンス締結を行うなど、依然、大型トラックでもBEV導入の動きがある。では、前述の航続距離と重量の問題を、欧州ではどのように乗り越えようとしているのか。業界関係者によると、電池性能を上げて使いやすいBEVトラックを目指すのは諦めて、新しい道を模索する動きが出てきているという。

欧州でも当初、「現行トラック同等の航続距離を持つ実用BEVトラックを開発するため、バッテリーを含む技術革新を目指す」という方向性を模索していたが、直近では、このアプローチの実現性は低いと判断して方針転換し、短い航続距離かつ少ないバッテリーで済む運行にBEVトラックを導入する構想を進めているようである。ただし、単純に短距離という

ニッチな用途にのみに入れるのではなく、欧州で義務付けられている「4時間半に一度、45分間のドライバーの休憩」の時間を充電時間にあてる形態の運行を、業界全体で確立していく方向を模索している。しかしながら、休憩先に充電設備があるのか、あっても他のトラックが使っている場合はどうか、また渋滞発生時はどうするかなど、課題は多く、一筋縄にはいかないだろう。なお、欧州では、物流パレット自体を規格統一し、混載リレー輸送を効率的に行う「フィジカルインターネット」構想が示されており、超長期的には、この構想の実装に伴い、短距離BEV大型トラックの適用範囲が広がる可能性はあるが、その場合でも一定量残るであろう長距離幹線輸送には、FCが併用されると考えられる。

加えて、長距離の大型幹線輸送は、ユーザー目線で電動化メリットが非常に大きい点がポイントになる。これまで長時間運行は、トラックの室内振動や騒音が運転手の負担になっていたが、電動化やメカレス化により低振動・低騒音化が実現できれば、運転手の負担が大幅に減り、高齢者や女性でも運転しやすいトラックを実現できる(現行のトラックでは、エンジンの真上にキャブがあり、乗降も一苦労なうえに、振動や騒音がダイレクトに運転手に伝わる構造になっている)。先進国ではトラック運転手の不足が顕著で社会課題となっているが、特に日本では2024年に残業規制が導入され、運転手不足がさらに深刻化すると見込まれる。車内で快適に過ごせる長距離輸送トラックが実現できれば、物流会社などは運転手の採用・育成・定着のコストや、庸車代などのコスト低減が可能となり、具体的な経済メリットを見込むことができる。

3. 水素・燃料電池普及の条件は?

水素・FCが適合する領域の条件について、前節の事例をもとに、アプリケーションおよび利用者目線で考えると、下記のように整理できる。

1. 電動化・脱炭素に必然性・有用性がある

水素・FCが導入されるか否かの前に、まず、電動化することの必然性・合理性があるか、が大きなハードルになる。具体的には下記の4点が大きなポイントである。

- ①ゼロエミッション性能の必要性(室内・都市利用であること)

*5: DaimlerおよびVolvoのプレスリリース参照

- ②脱炭素の必要性 (CO2排出量が多いセクターであること)
- ③トルク性能の必要性 (ある程度の重量のあるモビリティであること)
- ④メカレス化でレイアウトの自由度が上がることの有用性 (低床化によるエルゴノミクスの改善などの具体的メリットがあること)

2. 電池 (バッテリー) では対応できない理由・要件がある:

- ①性能として電池での対応に限界がある: 重いものを遠くへ運ぶことは、エネルギー密度の低い電池では難しい。特に以下に該当する場合、バッテリー対応が難しくなるケースが多い。
 1. 長距離輸送 (航続距離)
 2. 重量品輸送 (積載量)
 3. 冷蔵・冷凍輸送 (高い電力消費)
- ②電池だと稼働率が下がりコストが高つく: 稼働率が高く、その維持が収益に直結する業態では、電池の充電時間の分稼働率が下がり、交換バッテリーを持つことなどが高コストになるケース。具体的には、24時間稼働の

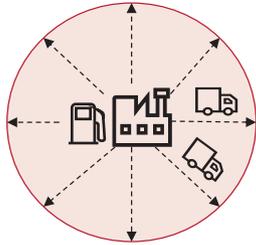
物流倉庫やコンビニなどの高頻度配送トラックが該当する。反対に、宅配など夜間に非稼働時間が発生する業態は、稼働ロスなく充電時間をオペレーションに組み込むことができるため、該当しない。

3. インフラ・車両同時立ち上げで「鶏が先か卵が先か問題」を乗り越えられる:

これまで水素含む代替燃料導入時は常に、「インフラがないので車両が導入されない」「車両が導入されないので、需要が見込めずインフラも設置されない」という課題があった。この「鶏が先か卵が先か」の問題をクリアするためには、初手で需要と供給をセットで解決する必要がある。そのためには1つの体系として機能する規模が小さいほど望ましい。大きくは拠点型、拠点往復型の2つの物流パターンが有力である (図表3参照)。

以上をまとめると、電動化に必然性と合理性はあるが、バッテリーでは対応できない用途で、FCを導入しやすいものは何か、を論点として、考えるのが基本ステップとなる。

図表3
インフラと車両の同時立ち上げを行いやすい物流パターン

パターン	概要	イメージ (例)
1 拠点型	<ul style="list-style-type: none"> • 1つの水素供給ステーションに紐づく形で、複数の車両が運行される運用形態 • 屋内倉庫やコンビニの地域配送拠点が該当し、あらかじめ稼働台数や必要水素量の見通しを立てやすく、設置インフラ数も1つで済む 	<p>屋内フォークリフト、小型コンビニトラックなど</p> 
2 拠点往復型	<ul style="list-style-type: none"> • 2地点間を往復する幹線輸送向けに、両地点に水素供給ステーションを設置する運用形態 • 大手食品・飲料メーカーなどの工場-配送拠点間の定期物流や、物流会社の東京-大阪間などの幹線輸送が該当する 	<p>幹線輸送、工場-配送拠点間配送など</p> 

図表4
主なモビリティの例

用途	場所				
	陸			海	空
	屋内	オンハイウェイ	オフハイウェイ		
「重く・大きい」モノの輸送  「軽く・小さい」モノの輸送			鉄道 大型鉱山トラック	中大型船舶 小型船舶	中大型旅客機 (ジェット機) 小型旅客機 (プロペラ機)
	倉庫用フォークリフト	大型トラック 小型トラック 乗用車	港湾トラック・フォークリフト		

出所：Strategy&分析

4. 今後、水素・燃料電池が普及する用途・領域は？

電池・e-fuelとのすみ分けは？

前節の考え方をより広くモビリティ領域全体に拡張して適用範囲を考えてみたい。まず、モビリティの全体像は、輸送の用途や場所によって倉庫用のフォークリフトからジェット機まで大別できる(図表4参照)。

次に、各モビリティ用途について、前節の考え方のステップに沿って、FC適合性が高いものを検討していく(図表5参照)。

- 1) **電動化の必要性があるもの**：ゼロエミッション・脱炭素の必要性の観点では、地下採掘があり、CO2排出が多い鉱山トラックや、特定エリア内で従業員が近接して働く港湾トラックなどの電動化が挙げられる。また、トルク性能の面では鉱山トラックや鉄道、船舶など大型の機器は電動化のニーズがあり、すでにディーゼルエレクトリック型(ディーゼルエンジンを発電に用いてモーターで駆動)

での電動化が行われている。メカレス化の有用性については、例えば船舶は、電動化を行いバッテリーやFCをバランスよく船底に配置することで、大きな駆動機構が船底を占有することなく、荷積みスペースの確保や船体バランス確保ができるといった具体的なメリットがある。

- 2) **電池では対応に限界があるもの**：性能的に電池対応が難しいものとしては、航続距離が必要な中大型船舶や、積載量が大きい鉱山トラック、鉄道などが考えられる。また、船舶、鉄道などは、貨物や客車において冷房などによる電力消費が大きく、その点でも電池対応には限界がある。

- 3) **インフラ・車両の同時立ち上げで「鶏が先か卵が先か問題」を乗り越えられるもの**：鉱山や港湾は1拠点型に当てはまる。特に港湾は、欧州において、洋上風力発電で生成した電力を港湾に直接送電し、港湾で水素製造を行い、水素として内陸に供給するなど、港湾を水素のハブ拠点にする構想が動き出している。2地点往復型は、地方鉄道や中大型船舶が該当する。

図表5
主なモビリティの水素・FC適合性

用途		水素・FCの普及条件への適合性								総合評価		
		電動化の必要性があるもの				電池では対応できない理由・要件があるもの					インフラ・車両同時立ち上げができるもの	
		性能の必要性 ゼロエミッション	必要性 脱炭素の	必要性 トルク性能の	有用性 アウト自由度の	メカレシ化レイ アウト自由度の	長距離輸送 (航続距離)	重量品輸送 (積載量)	高い電力消費 冷蔵・冷房など		燃料充填時間 高稼働率(短い)	1拠点型
陸	倉庫用フォークリフト	✓			✓				✓	✓		一定用途で適合性あり (24時間・大型倉庫)
	大型トラック		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	適合性が高い
	小型トラック	✓			✓				✓	✓		一定用途で適合性あり (24時間・都市内配送)
	乗用車	✓				✓						一部の長距離輸送以外は 適合性少ない
	鉄道(未電化路線)		✓	✓		✓	✓	✓			✓	適合性が高い
	鉱山トラック	✓	✓	✓			✓		✓	✓		適合性が高い
	港湾トラック・フォークリフト	✓	✓	✓			✓		✓	✓		適合性が高い
海	中大型船舶		✓	✓	✓	✓	✓				✓	適合性が高い
	小型船舶											適合性が低い
空	中大型旅客機(ジェット機)	電動化(モーター)では、推力の要件を満たさない										-
	小型旅客機(プロペラ機)		✓				✓				✓	適合性が低い

✓：適合性あり 適合性(総合評価)：低 < 中 < 高 ※4~5個該当を中、6個以上を高とした

出所：Strategy&分析

以上を俯瞰してみると、鉱山トラックや港湾トラック・フォークリフト、鉄道(未電化路線)、中大型船舶など、大型かつ特定エリア・ルートを運行する産業機器において、水素・FC導入が進む可能性が高い。

なお、ジェット機など中・大型旅客機については、モーター推力では要件を満たさず、バッテリーや水素・FCでの電動化が難しいと見込まれる。将来的にはジェットエンジン向けに、e-fuelなどの液体燃料や、燃焼用水素、バイオ燃料などの導入が進む可能性がある。

水素・FCの適用用途も踏まえて、最後にバッテリー、水素・FC、e-fuelのすみ分けについて整理する。まず、一旦、再生可能エネルギー由来の電気が活用可能になった状態を起点に考えると、電気を電気のまま使う形がもっとも効率性が高い。また、陸上の車輪駆動を使った輸送に関して言えば、モーターでの制御がもっとも効率が良く性能も高い。よって、大き

くは図表6が示すようなすみ分け・併用が予測される(図表6参照)。

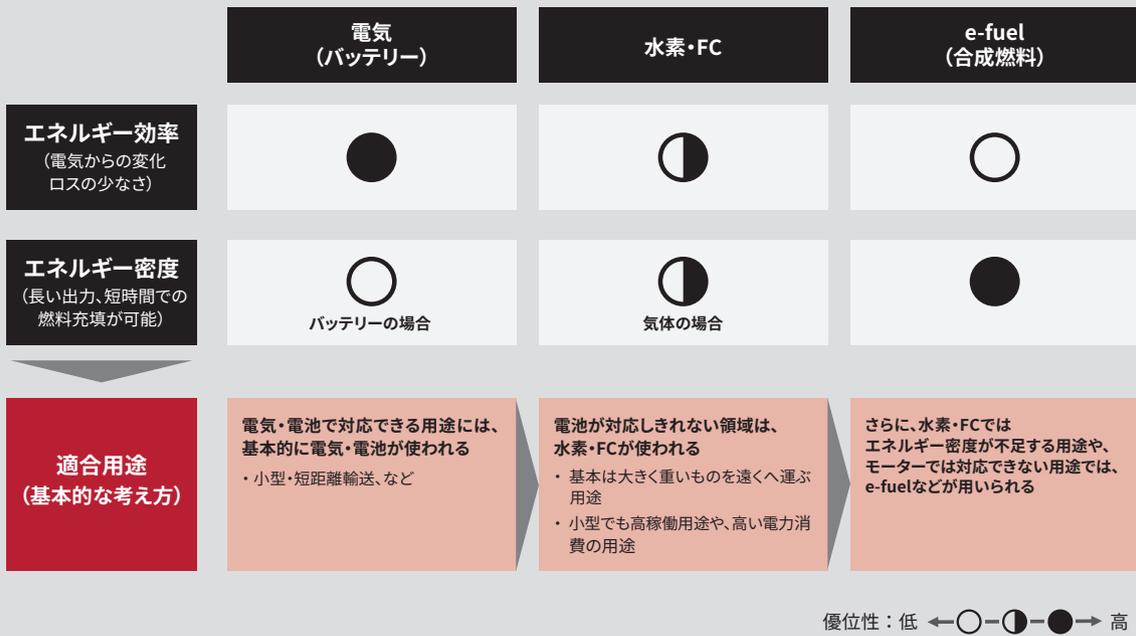
5. 利用者にとって、水素・e-fuelを使う意義は？

化石燃料は、過去の太陽エネルギーのフローが、生物活動を通じて高密度なエネルギーに集積された(ストックされた)ものであり、人類はこれを掘り出して使うことで、現代の大量エネルギー消費社会を実現してきた。振り返ると、風車や水車など人類は太古より再生可能エネルギーを使ってきたが、時代を画したのは、石炭・石油という安価で(投入コストに対して多くのエネルギーが取れる)、常温でも安定し、高いエネルギー密度を持つ燃料源の確保である。

換言すると、本来再生可能エネルギーとは、その語義からして、フローとして絶え間なく地上に注ぐ(=再生可能)エネ

図表6

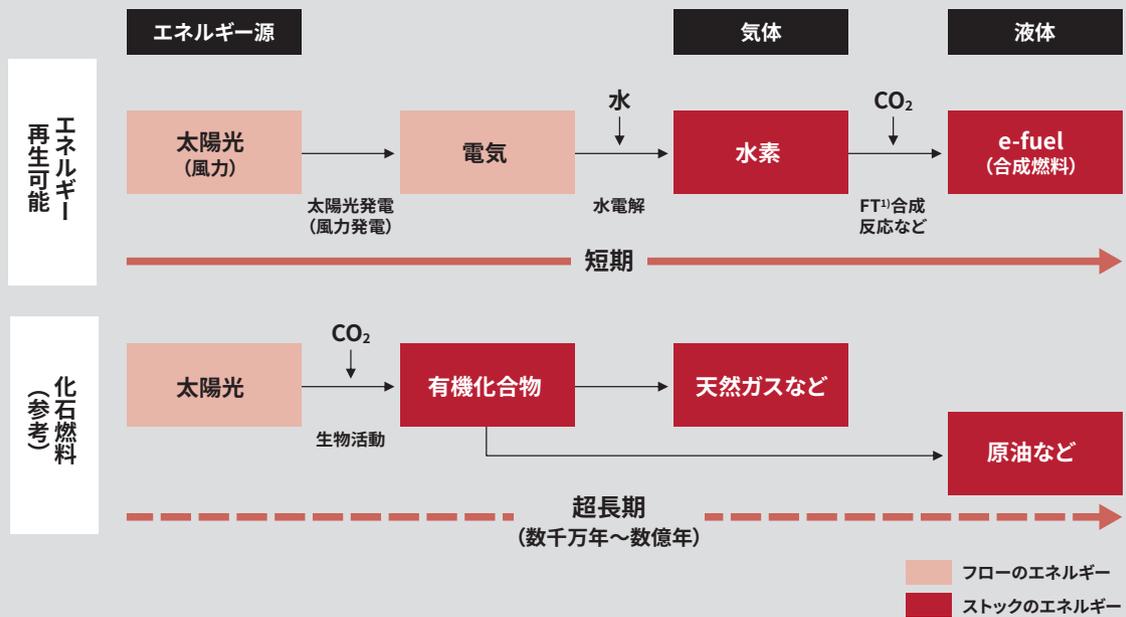
バッテリー、水素・FC、e-fuelの基本的な適用・すみ分けの考え方



出所：Strategy&分析

図表7

再生エネ由来電気、水素、e-fuelの化石燃料との比較



1) Fischer-Tropsch process
出所：公開情報、Strategy&

ルギーであり、それゆえ、ストック的なエネルギーと比較すると、エネルギー密度が低く、風任せ、お天気任せとなり使い勝手が悪い。蛮勇を持って現状を整理すれば、いま、人類が取り組んでいるのは、圧倒的に低コスト化した太陽光パネルと、高効率の巨大風車などの工業的成果をもとに、限りなく安価にフローの太陽エネルギー（風力も含む）から電気を作り、それを大きな変換ロスを出しながら、ストック的なエネルギーである水素、そして最終的には化石燃料と同等のエネルギー密度を持つ合成燃料（e-fuelなど）に変化させるということである。膨大なエネルギーを投入して、かつて地上であった化石燃料生成と同等のことを、人工的に早回しで行うような壮大な取り組みとも取れる（図表7参照）。

それゆえ、変換ロス発生を踏まえつつ、それでも普及する大義がある用途は何かを具体的に見定める必要がある。本章では、モビリティ領域において電動化の必然性があり、かつ、電池では対応しきれないが、FCでは対応できる領域として、「小型トラックの高密度冷蔵・冷凍配送」や「大型の幹線物流輸送」、さらには「鉱山トラック」や「未電化の地方鉄道路線」、「大型港湾トラック・フォークリフト」などへの水素の導入が有望であることを示した。

また、実際の導入に当たって、改めて利用者（ユーザー）の目線で考えれば、電動化により、脱炭素や環境価値以外の価値をいかに訴求できるかも重要になる。具体的には、電動化・メカレス化で、レイアウトを変えて低床化し、物流効率化を図ることも必要だろう。さらに、幹線輸送用の大型トラックに、女性や高齢ドライバーも運転しやすい、静粛性が高く乗り心地の良いFCトラックを導入することで、慢性化・深刻化する運転手不足の解消に繋げることも急務だと思われる。

水素は、まだ「遠い未来の技術」という受け取られ方も強いが、上述の通り、現在でもすでに事業機会が生まれつつあり、先行者利益の獲得も狙えるため、OEMやモビリティサービス事業者は、積極的に取り組みを進めるべきである。その際、単に従来のパワートレインを水素・FCに置き換えるだけでなく、上記で例示した「物流効率化」のような環境価値以外のユーザーや社会にとっての本質的な価値をどれだけセットで具体化して訴求できるかが、今後の普及スピードを決める。

欧州の低炭素水素市場の 確立に向けて

エネルギー転換を支える水素

著者：Laurent Saint Martin, Dr. Matthias Witzemann, Adrian Del Maestro,
Guillaume Jean, Frederic Delannoy, Simon Betz

監訳：桑原 永尚

エグゼクティブサマリー

2020年代は、気候変動に取り組むにあたって非常に重要な10年になるだろう。気温上昇を1.5°C以下に抑え、二酸化炭素排出量ネットゼロを実現するというパリ協定の目標を達成するためには、2030年まで毎年、世界の脱炭素化率を5倍（約12%）ずつ引き上げる必要がある*1。この脱炭素化を加速するうえで、低炭素水素（生産過程の炭素排出量を最小限に抑えた水素。一般的にはグリーン水素、ブルー水素と呼ばれるものの総称）経済の構築は重要な役割を果たすことができる。

水素は、炭素排出を減らすことが難しい多くの機器や産業において、炭化水素（石油や天然ガスの主成分。大気汚染物質であり、燃焼の際に二酸化炭素の排出を伴う）の代わりになる可能性があるため、グリーンエネルギーの未来にとっての万能エネルギーと見る向きが多い。水素分子は再生可能エネルギーの断続的な電力を貯蔵するのに役立ち、電化が困難で費用対効果が成立しづらい熱供給に対し、代替熱源の役割を果たすこともできる。また、発電や、高温を必要とする工業プロセス（例えば鉄鋼生産）の燃料にもなりうる。

しかし、このグリーンエネルギー燃料の持つ大きな可能性を現実のものとするにはどうすればいいのだろうか。結局のところ、技術は成熟していても（燃料電池は人間を初めて月へ送るのに役立った）、産業やサプライチェーンはまだ初期段階にあり、成熟しているとはいえない。低炭素水素経済を

構築するには、ターゲット産業の需要を刺激することや、LNG（液化天然ガス）の成長と同じように、水素のグローバル取引市場を設立するなど、いくつかの要素を組み上げる必要がある*2。そして、EUが目標とする低炭素水素経済を実現するには、強力かつ有効な規制枠組を各国政府が定め、こうした構成要素を下支えする必要がある。

水素市場の現状およびポテンシャルの概観

低炭素水素は自然界に豊富にあり、クリーンで用途が広い。また、便利なエネルギー媒体として広く認識されており、現在、エネルギー転換に重要な役割を果たすものと見なされている。水素を燃料源として活用する可能性については、この数十年間、折にふれて検討されてきたものの、それほど進展しなかった。しかし、炭素排出量を抑制し、ネットゼロを実現しようとする各国および国際機関による最近の取り組みや、再生可能エネルギー容量の着実な拡大、さらにはコスト低下が進んだことで、ようやく水素利用の条件が整ってきた。特に顕著なのが、天然ガス代替となりうる低炭素水素である（図表1参照）。

国際エネルギー機関（IEA）の持続可能な開発シナリオ（SDS）の予測によると、世界の水素需要は、2019年には約7,000万トンだったが、2070年までに約7.4倍の5億2,000万トンに増加すると見られている（図表2参照）。それに伴って化石燃料の消費量が減り、水素の低炭素生産が進むと仮定す

*1: PwC Net Zero Economy Index 2020参照

*2: Liquefied Natural Gas

図表1

水素は天然ガスと特性が似ており、二酸化炭素排出量が少なく、自然界に豊富に存在するため、天然ガスに置き換わる可能性がある

水素の特性



水素の特徴

炭素を含まないため、水素を使用しても二酸化炭素や汚染物質を排出しない。生成方法によっては、炭素ゼロの解決策になりうる



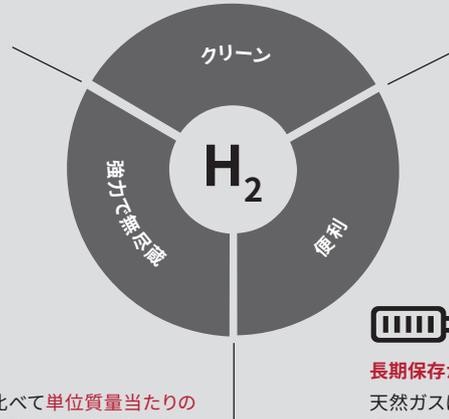
エネルギー消費の脱炭素化方法

水素を化石燃料の代わりに使用するか、またはガス導管へ注入して天然ガスに混入することで、二酸化炭素排出量を削減し得る



無尽蔵

水素は宇宙空間に最も多く存在する元素である



複数の輸送形態

純粋な水素の輸送は難しいが、混合や液化により大量輸送が容易になる



高エネルギー密度

水素は他のガスや燃料に比べて単位質量当たりのエネルギーがはるかに多く、ガソリンの約3倍である



長期保存が可能

天然ガスは採取された後、液状で輸送され、保存することが可能

天然ガスの特性



温室効果ガスの排出

天然ガスの掘削と採取、そしてパイプラインによる輸送の際に、天然ガスの主成分であるメタンが漏出してしまふ。メタンの温室効果は強く、100年間で比較すると二酸化炭素の34倍に上る



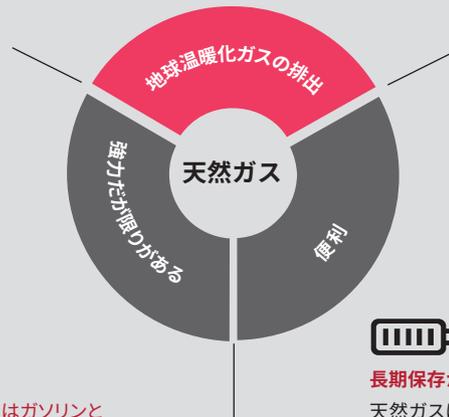
クリーン発電

ガス火力発電所は高いエネルギー効率(60%以上)を達成するものの、大量の二酸化炭素排出を伴う



限られた資源

現在の生産速度と、現在判明している天然ガスの埋蔵量を考えると、残りの埋蔵量は約52.8年分相当である



大量輸送が容易

天然ガスは世界中に張りめぐらされた大規模輸送ネットワークを利用可能



高エネルギー密度

天然ガスのエネルギー密度はガソリンと同程度



長期保存が可能

天然ガスは採取された後、液状で輸送され、保存することが可能

■ 利点
■ 欠点

出所：PwC Strategy&分析

Laurent Saint Martin

Strategy&のパートナーで、フランスに拠点を置く。エネルギー業界・公共事業の役員層に助言を行う。戦略的トランスフォーメーションプランニング、B2Bデジタルサービス開発、低炭素ソリューションを軸とする成長・商品戦略を専門とする。

Dr. Matthias Witzemann

Strategy&のパートナーで、オーストリアを拠点とする。再生可能エネルギーや水素技術を含めた世界のエネルギー部門に、戦略主導型トランスフォーメーションについて助言を行う。トランスフォーメーション、オペレーション、デジタル化プロジェクトで、特に重要なオペレーション・エクセレンス・プログラムやバリューチェーン全体にわたるプロジェクトを専門とする。

Adrian Del Maestro

PwCのディレクターで、英国を拠点とする。石油・ガス、および低炭素産業全般に関するStrategy&の専門家として、エネルギー転換を円滑に行い、M&Aによって成長を実現する戦略について企業に助言を行う英国のグローバルエネルギー分野のソートリーダーシップを牽引している。

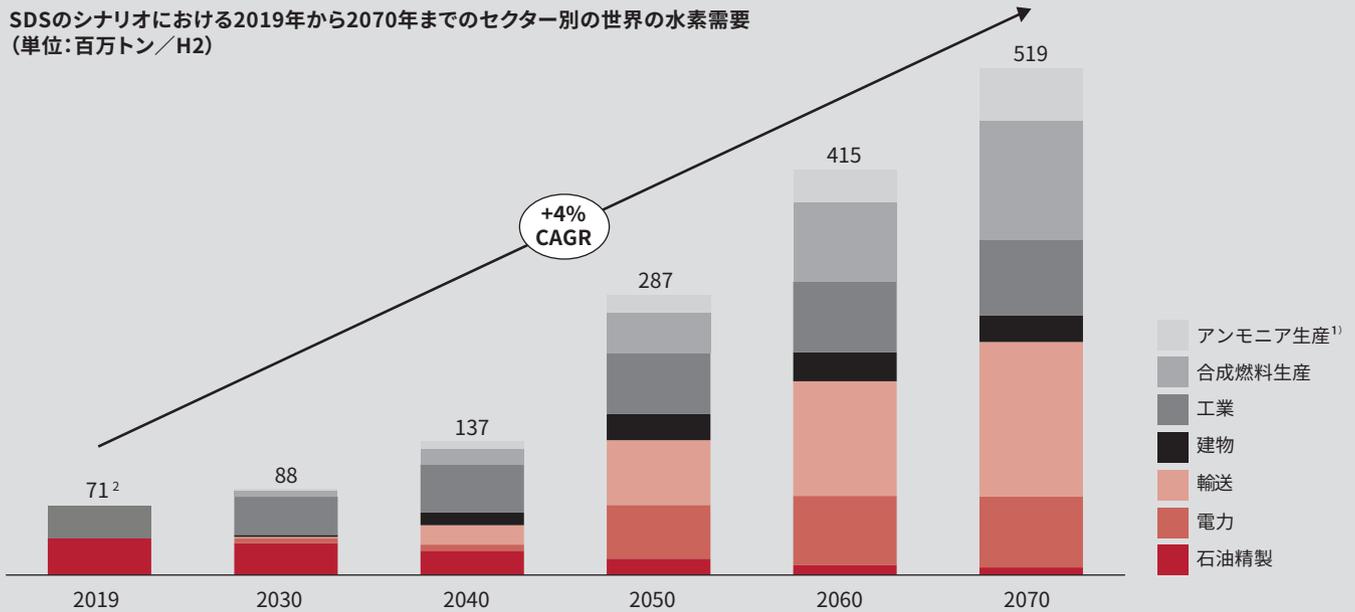
Guillaume Jean

Strategy&のディレクターで、フランスを拠点とする。R&Dとイノベーションのスペシャリストで、エネルギー業界・公共事業向けの企業成長戦略の専門家。M&Aのスクリーニング、業務改善、リストラクチャリング、コスト最適化に関するプロジェクトの知識も豊富に有する。

図表2

SDSのシナリオでは、世界の水素需要が2070年までに7倍の5億2,000万トン/H2に増加すると予測されている

SDSのシナリオにおける2019年から2070年までのセクター別の世界の水素需要 (単位:百万トン/H2)



2070年におけるセクター別水素利用量

・持続可能な開発のシナリオでは、世界の水素需要は2070年までに7倍の5億2,000万トンに増加する

- 輸送(自動車、トラック、船舶) 30%
- 航空機用の合成ケロシン生産 20%
- 工業(鉄鋼、化学薬品) 15%
- 発電 15%
- アンモニア生産 10%
- 建物(暖房と温水) 5%
- その他の用途(石油精製) 5%未満

・あらゆる主要経済国は二酸化炭素排出量の削減目標を掲げているため、水素需要が増加する

1: アンモニア生産とは海運セクター用の燃料生産のことである。工業用アンモニア生産に用いる水素は工業用水素に含まれる

2: さらに4,500万トンが他のガスから事前に分離されずに工業に使用されている

出所: IEA、PwC Strategy&分析

Frederic Delannoy

Strategy&のシニアアソシエイトで、フランスを拠点とする。電力部門で8年余り経営に携わった経験を有し、主に業務オペレーション上の戦略的課題や大規模トランスフォーメーションプログラムについて助言を行う。低炭素水素イニシアチブ、エネルギー転換関連のテーマに造詣が深い。

Simon Betz

Strategy&の元マネージャー。エネルギーおよび低炭素産業全般のスペシャリスト。戦略と大規模トランスフォーメーションプログラムを専門としている。サステナビリティ、脱炭素化・水素戦略、およびオペレーション化の分野で豊富な経験を有する。

桑原 永尚 (くわはら・ながひさ)

PwCコンサルティング、Strategy&のマネージャー。エネルギー業界における事業戦略、新規事業開発、構造改革に関する豊富な経験を有する。近年は水素エネルギートランスフォーメーションをテーマに、モビリティから産業向けFC・熱供給・水素発電までさまざまな水素アプリケーションについて、地域ごとの需要ポテンシャル評価、展開アプローチの策定を手掛けている。

ると、2070年までに世界のエネルギー産業と工業プロセスからの二酸化炭素排出量をゼロ(カーボンニュートラル)にすることに貢献できる。

もちろん、水素は発見されたばかりのものではない。年間7,000万トンが生産されており、その市場規模は約1,000億米ドルに相当する(図表3参照)。需要は主に産業部門で、その最大の市場はアジア(48%)であり、米国(22%)、欧州(18%)が続く。また、石油精製・化学工業が水素需要の

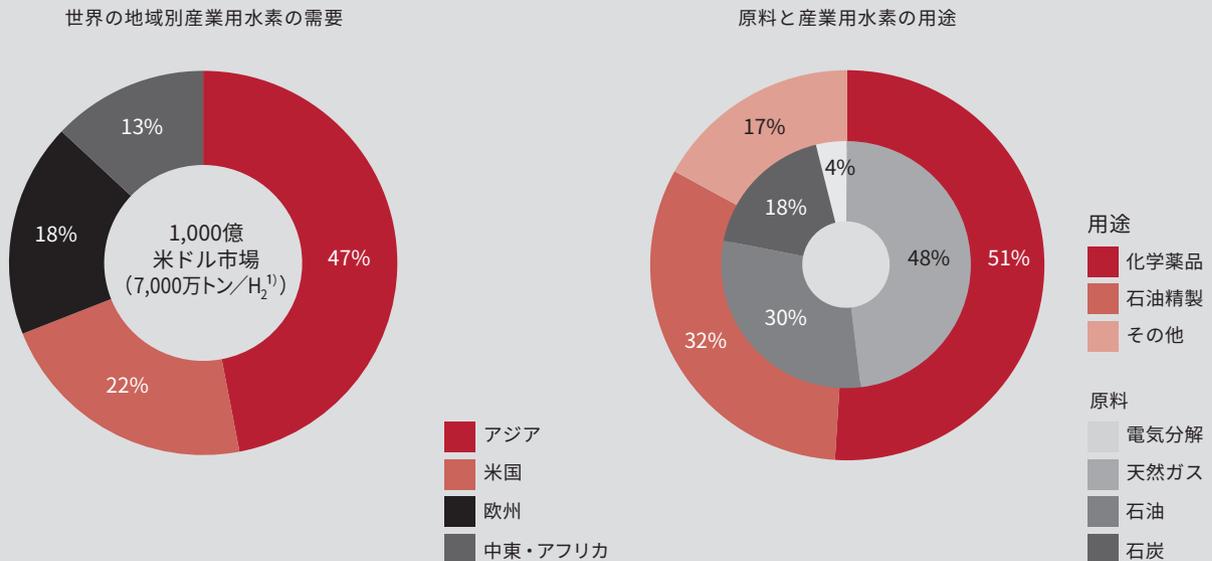
80%以上を占めている。製油所では、水素を用いてディーゼル燃料の脱硫処理をしているため、世界的なディーゼル消費と硫黄含有量規制の強化によって、需要は支えられている。

化学工業では、水素はアンモニアとメタノールという、広く使用されている重要な2つの化合物の製造に使用されている。また、アンモニアは肥料産業の主原料である。

問題は、今日消費される水素の約95%が化石燃料から生成されていることで、その最も一般的な生成方法は石炭ガス

図表3
2020年の世界の水素需要の取引高は約1,000億米ドル

世界の地域別の水素需要および水素生成源と産業用途



1) 7,000万トン/H₂は約2億TOE(石油換算トン)に相当
出所: IRENA 2018, Bloomberg, Afhyac, CNCCEF.org, IEA, PwC Strategy&分析

化と水蒸気メタン改質である。これらのプロセスでは、化石燃料、すなわち石炭またはガスを投入すると、蒸気と反応して一酸化炭素、二酸化炭素、水素が生成される。二酸化炭素を回収、使用、または貯留しない限り、こうした従来の水素製造方法は環境に対して有害であり、水素1kgを精製するに際して約10kgの二酸化炭素を放出することになってしまう。

そのため、水素が世界経済の持続的な脱炭素化を実現するには、生産プロセスにおける炭素排出量が最小限に抑えられることが条件となる。そのためにはいくつかの方法がある。低炭素水素は、風力、太陽光、水力などの再生可能エネルギーや、バイオガス、原子力の力を借りることで、大規模に生産することが可能である。また従来の化石燃料エネルギー源と炭素回収・貯留（CCS）の方法を組み合わせることで低炭素水素を生産することもできる。これらのテーマについては、「構成要素2」のセクションで詳しく検討している。しかし、まず需要を喚起することが、水素経済を発展させるための重要な構成要素のひとつである。

低炭素水素の需要を喚起する

国や産業が、燃料源や原料として低炭素水素にますます注目するようになると、水素の顧客基盤も一層多様化することが予想される。さまざまなセクターごとに、低炭素水素製造技術の成熟度、既存プロセスへの適応にあたっての複雑さ、規

制や経済インセンティブの有無、といった状況が異なるため、それぞれ固有の脱炭素化に向けた道筋と時間軸に従うことになる。代替技術や競合技術が利用できるかどうか、ひとつの要因になる（小型乗用車の電動化がその好例である）。

しかし、低炭素水素経済を目指す政府は、多くのセクターを対象とするより、むしろ次のような大まかな原則をもとに、集中的な取り組みを行う必要があるだろう。

- 脱炭素化が難しく、規模の大きい産業クラスター（大規模で多様な各種産業プレイヤー）や、利用可能な既存インフラ（パイプラインなど）に焦点を当てる
- こうしたクラスターが港や海岸線近くにある場合、それは拡大しつつある水素のグローバル取引市場にアクセスする上でも重要になる
- パートナーシップモデルは水素ソリューションを展開する土台となる。これらのパートナーシップは、水素分野におけるケイパビリティ構築や、投資コスト・リスクを分担し合うシンジケートを検討する企業間で結ばれることが多い。現地政府もアライアンスに参加することができる

多くのセクターが低炭素水素の未来を目指すことができる。しかし、優先されるべきセクターもいくつかあり、脱炭素化促進のための有効な代替技術がないセクターは特に優先されなければならない。こうしたことを考慮に入れると、優先されるべきセクターは以下を考慮したものになるだろう。



喫緊の大きな課題は、ターゲット産業に対するグリーン水素への切り替えを、強制するのではなく補助金により促進し、需要を喚起することである

欧州の業界関係者

1



石油精製業

この業界は、石炭やガスから生成される通常の水素の代わりに低炭素水素を使うようになる可能性が高い。次の段階として、低炭素水素を使用し、回収した炭素と合わせて合成燃料を製造するなどの活用計画を立てている。既存の再生可能エネルギー規制(再生可能エネルギー指令II)の遵守と経済インセンティブが、こうした変化を加速させる可能性がある。

2



鉄鋼業

世界鉄鋼協会によると、現在、鉄鋼1トンを製造する際に1.85トンの二酸化炭素が発生しているが、鉄鉱石を高炉で溶かさず個体の状態のまま、水素を使って酸素を除去する鉄の直接還元技術が、脱炭素化に向けた有望な道筋となる。この技術はすでに鉄鋼メーカーによる実証プロジェクト内で検討されており、2020年代半ばには実用化可能な段階に達し、その後の規模拡大が見込まれている(図表5参照)。

3



発電セクター

天然ガス混焼、または純水素燃料によるガスタービン発電で、このセクターにおける脱炭素化を図ることができる。ガスタービンメーカーは現在、業界団体EUTurbinesの目標に沿って、2030年までに純水素対応タービンの設計に向けて、火炎伝播速度の速さや二酸化窒素の排出といった、水素燃焼によって生じる技術的課題の解決に取り組んでいる。こうした動きは、発電会社が事業の脱炭素化を進め、排出ガス規制の強化に伴う座礁資産リスクを軽減する上で、新たな道を拓くことになる(図表4参照)。

4



セメント産業

セメント産業は興味深いケースである。なぜならこの業界が排出する二酸化炭素の3分の1は、加熱プロセスと、焼成反応を引き起こすのに必要な燃料源に起因するからである。このケースでは、水素を主要な燃料源として代わりに使うことができる。この業界の二酸化炭素排出量の残りの3分の2は、焼成のプロセスそのものに直接関係している。セメント業界では、排出削減義務を果たすためにエネルギー効率の向上、クリンカ対セメントの比率の低減、代替結合材の使用、長期貯蔵・利用に向けた炭素回収など、いくつかの二酸化炭素削減方法が認定されている。そしてこの最後の方法は、このセクターにとって特に大きなチャンスになる。セメントメーカーが回収した炭素とグリーン水素を組み合わせると、アンモニアやメタノールなどの化合物を生成することができる。これは、低炭素水素市場にはセクターを超えたコラボレーションの可能性があることを明示している。

5



輸送セクター

貨物トラック輸送などの大型輸送は、一定の規模の経済を生み出すのに十分な量の水素を燃料として消費する可能性がある。大型車両が多く、ルートも事前に決まっているため、広範囲の水素ステーション網を急いで構築する必要もあまりない。一部の自動車メーカーは小型自動車に多額の投資を行っているが、より安価で低炭素なEVがすでに普及しているため、自家用車の開発も含めて苦戦を強いられている。水素は輸送セクターにおいて、他セクターに先駆けてコスト競争力をもちうる。なぜならディーゼルやガソリンのコストは、他の産業で使われている天然ガスのコストより一般的に高いからだ。各国政府はいずれ、車両燃料としての水素や合成燃料の利用増加に応じて、今日のガソリン・ディーゼル販売への課税を置き換える必要が出てくる。今後、水素への課税により、そのコスト競争力が損なわれる恐れがあるが、各国政府は輸送セクターにおける低炭素化の進歩を妨げないためにも、水素燃料への切り替えが十分に確立されるまでは課税を控え、そのため鈍化リスクは避けられると思われる。

図表4

エネルギーセクターでは、発電や熱源用の燃料として使う水素の量を増やすための準備が進んでいる

エネルギー：発電・熱源としての選択肢となることで、水素ケイパビリティが拡大している（主要な例）

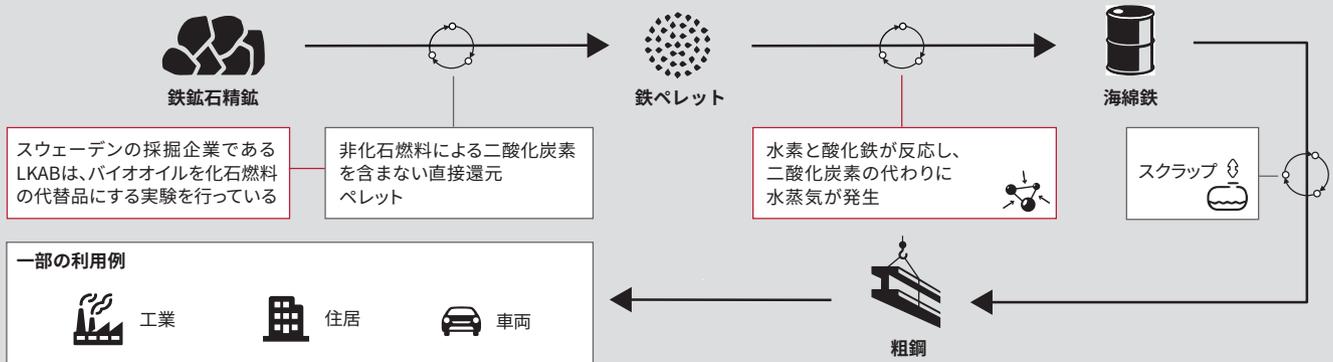
<p>天然ガス</p> <p>H₂ 0→100%</p>	<p>ガスTSO – 水素混入</p>	<p>ガス導管システムオペレーター (TSOs) は作業部会を設置し、2030年までに10%、その後最大20%を目標に、天然ガスに含まれる水素の量を増やす実験を行っている</p> <p>この目的は、機器メーカーとその川下のユーザーを巻き込み、水素の導管ネットワークへの注入に関する外的な影響要因を洗い出し、インフラ開発のニーズを集約し、水素クラスターの試験運用に向けた枠組を定義・実装することである</p> <p>フランスでは、GRYDHとJupiterの2つの実証実験プロジェクトが、こうしたコンセプトの検証を進めている</p>
<p>天然ガス</p> <p>H₂ 0→100%</p>	<p>GTメーカー – 水素混焼</p>	<p>ガスタービン (GT) メーカー (例: GE、シーメンス) は、新しい低炭素エネルギーミックスを実現するため、また炭素フリーエネルギーエコシステムにおける持続可能なビジネスを確立するために、フレキシブルに燃料選択が可能なユニットを新たに開発している</p> <p>水素特有の性質により、GTのハードウェアには改修が必要になる。例えば、天然ガスと同じ量のエネルギーを供給するには、水素では3倍の体積流量が必要になる。また、水素の火炎速度は天然ガスの約10倍である</p> <p>業界団体EUTurbinsのメンバーは、GTの水素混焼を、2020年までに20%以上に高め、2030年までに100%に高めるという誓約に署名している</p>
<p>電気分解</p> <p>燃料電池</p> <p>天然ガス</p>	<p>フェアブントー 「ホットフレックス」 パイロットプラント</p>	<p>オーストリアのMellachパイロットプラントでは、系統上の風力や太陽光の余剰電力を、高温電気分解によって水素に変換することができる。そして、この「グリーン」水素 (40Nm³/時) を天然ガスと混合し、2基のガスタービンを動かしている</p> <p>このプラントの特徴は、燃料電池として反転モードの運転ができることである。そのため、このプラントは電気と熱を生成することができる</p> <p>Verbundは、この燃料電池運転モードを、主に自家消費、または発電所の非常用電源の可能性について検証する予定である</p>

出所：GRTGaz, Siemens-energy.com, ge.com, PwC Strategy&分析

図表5

鉄鋼業の脱炭素化のために、グリーン水素をコークスや石炭の代替品として使う実験が行われている

鉄鋼業—プロセス例とユースケース



アルセロール・ミタルのユースケース

多国籍鉄鋼メーカーのアルセロール・ミタルは、水素を使って鉄鉱石を還元する生産プラント開発に向けてフライベルク大学(ドイツ)と提携している

実験はグレー水素とブルー水素を使うが行うが、グリーン水素がより広く利用可能になれば、同社はグリーン水素への切り替えを検討している

「圧カスイング吸着法」を用いることで、**既存するプラントの排気ガスから97%以上の純度の水素を分離することを目指している**

水素を使った鉄鉱石還元の実証規模は約**11万トン**を見込んでいる

水素技術は、同社の**二酸化炭素抑制に向けた2億5,000万ユーロの投資**のほんの一部にすぎない

実験は**2023年に開始の見込み**



HYBRIT イニシアチブ: 水素による画期的な製鉄技術

HYBRITは、鉄鋼メーカーのSSAB、採掘企業のLKAB、エネルギー企業のVattenfallというスウェーデンの3社が設立したイニシアチブである

このイニシアチブは、再生可能エネルギー由来の電力から生成される水素を、鉄鋼生産に利用する調査を目的としている。**脱炭素化した水素はコークス¹⁾や石炭の代替品として使用され、酸化鉄と反応する**

HYBRIT Development ABパイロットプラントは、スウェーデンのエネルギー庁から**4,400万ユーロ**の資金援助を受け、2018年夏、スウェーデンのルレオにあるSSABの敷地内で建設が開始された

試験フェーズは2024年まで行われ、**2025年から2035年まで実証フェーズ**が実施される予定である

1) コークスは、空気のない状態で石炭を加熱して作られる、硬くて多孔質のほぼ純粋な炭素製品である。コークスは高炉の中で燃料と還元剤の両方の役割を果たし、燃焼すると一酸化炭素になる
出所：Company website; PwC Strategy&分析

低炭素水素の供給を拡大する

低炭素水素の開発を加速し、エネルギー集約型産業において炭化水素の置き換えを推進するためには、炭素排出を伴う成熟技術と、クリーンな水素を活用する新技術との価格差を埋めることが最優先課題となる。電気料金コストは、グリーン水素の変動費の60～70%を占めるため、水電解装置を稼働させるには安価で豊富な再生可能エネルギーが手に入ることが何より重要になる。Strategy&がインタビューした専門家によると、再生可能エネルギーの均等化発電原価(LCOE)が1MWhあたり20米ドルを下回ると、グリーン水素はコスト競争力を持てる規模感になるという。そうすると、世界中の国々が再生可能エネルギーに多額の投資を行い、LCOEを下げていけば、2030年までにその規模感が出てくる可能性がある。

一方、水電解装置OEMは、電解効率を高め、変動費削減にも寄与する規模の経済を実現しようと懸命に取り組んでいる。また、高分子電解質膜(PEM)技術は、アルカリ(ALK)を使った場合より効率的であり、コスト削減につながると期待されている。

今日、1kgの水素を生成するには約55kWhの電力量が必要である。電気分解技術がさらに向上すれば、CAPEX(資本的支出)の改善が期待される。しかし、アジアで生産された比較的安価な水電解装置(1kW当たり500米ドル未満)と、欧州で生産された水電解装置では、CAPEXに大きな差がある場合もある。この差は使用されている技術も反映しており、PEM電解装置はALK電解装置より多くのCAPEXが必要になる(図表6参照)。

しかし、予想されるグリーン水素需要の急増は、再生可能エネルギー導入容量に対するニーズを大幅に拡大する。この点を解説すると、EUが2030年に電気分解で1,000万トンの水素を生成するには、約550TWhの再生可能エネルギーを消費することになる(1kgの水素生成に約55kWhの電力量が必要であることを前提とした場合)。これはフランスの2020年の年間電力消費量(460TWh)を上回っている。

再生可能エネルギー導入のポテンシャルが高く、欧州の一部地域に水電解装置向けのグリーンエネルギーを供給できる国もある。これらの国は、グリーン水素を生成し、他国へ輸出することもできる(今後のグローバル水素取引市場の主な潜在輸出国および輸入国の概要については、図表7を参照)。

水電解装置に必要なもうひとつの重要資源は、水である。水素1kgを生成するには、約22リットルの水が必要になるため、その量は膨大なものになる。工業集積地域では、水電解装置と工業ニーズを満たす十分な量の水を確保する上で、一定の制限がかけられる場合もあり得る。

最後に、水素供給における「ブルー」水素、すなわち炭素回収技術を使ってガスから生成したものの役割について少し考えてみよう。水素供給の最終目標はクリーンで再生可能なエネルギー源から生成した水素でなければならないが、「グリーン」水素の生産が大規模に行われるようになるまで、十分な量の低炭素水素を生成するつなぎの技術として、「ブルー」水素は重要な役割を果たすことになる。こうした例はオランダに多く見られるが、英国でも、例えばEquinorと



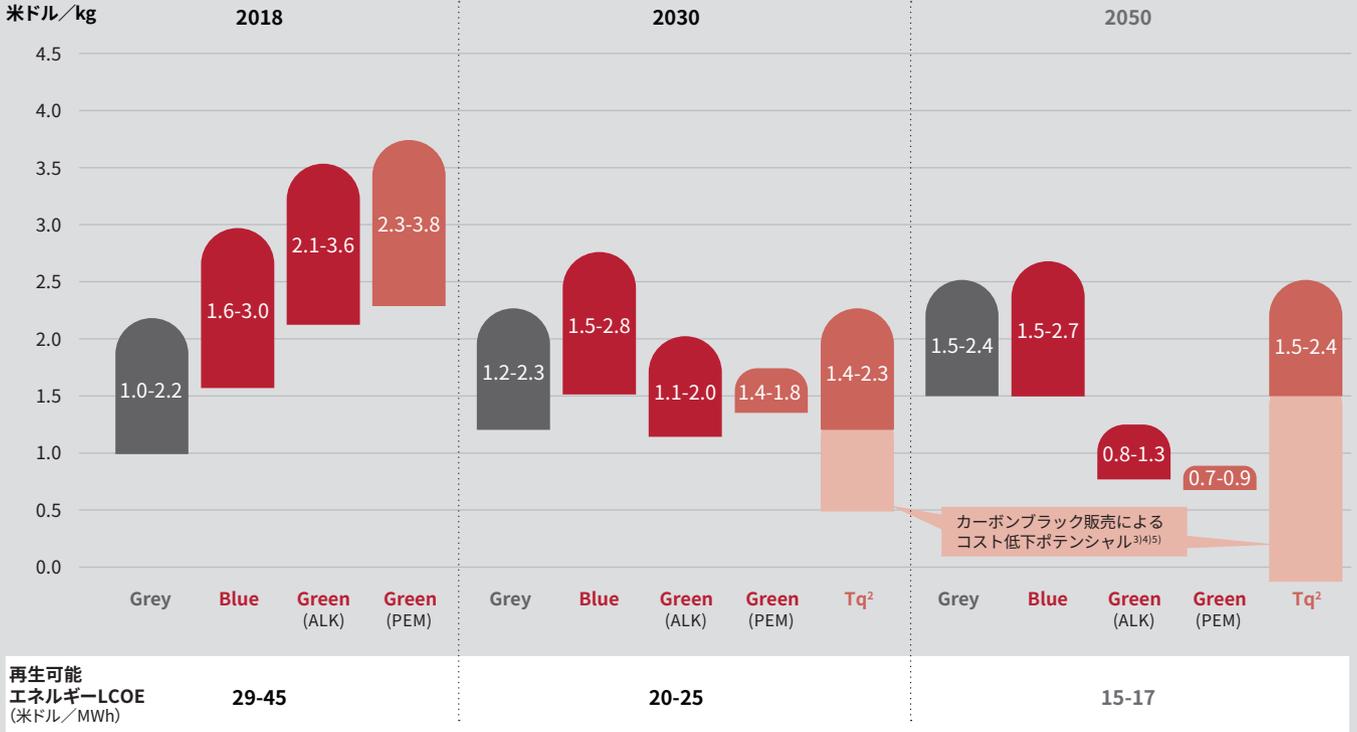
水素の変動費は、主な原材料である電気のコストによってほぼ決まってくる

水電解装置メーカー

図表6

今後予測されるコストの最適化と二酸化炭素価格の上昇によって、グリーン水素は2030年までにコスト競争力を持てるようになる

Strategy&が捉える技術別のグローバル水素コスト推移に関する市場モデル¹⁾



コスト面での
おもな
インサイト

- グリーン水素:**
 - コスト構造は主に水電解装置のOPEX (地域ごとに異なる電気料金) によって決まる。グリーン電気の価格が下がり (約33米ドル/MWh)、水電解装置の効率が高まると (約50kWh/kg H₂)、OPEXの低下が予想される
 - 累積生産量は約2年ごとに倍増しており、最大70%のコスト削減 (CAPEXの改善) につながる可能性がある
 - 二酸化炭素 (天然ガスの場合) の価格は1トン当たり約50米ドルまで上昇し (少なくとも7米ドル/GJに達する)、グリーン水素の競争力を高めると予想される
- ブルー水素:**
 - 天然ガスの脱炭素化にはさらに55~80米ドル/トンCO₂の追加コストがかかる
- ターコイズ水素:**
 - 熔融金属熱分解技術を用いて天然ガスから生成された水素
 - CCUS (二酸化炭素の回収・利用・貯留に係る技術) が政治的または地理的な理由により適用できない地域で比較優位性を示すが、現在は開発の初期段階にある (BASF社のパイロットなど)

1) グリーンフィールドプロジェクトに基づくコストの想定 (水電解装置と建物の冷却要件にかかるコストを除く)
 2) ターコイズ水素のコストは主に天然ガス価格によって決まる
 3) カーボンブラックの現在の価格は1トン当たり400~2000ユーロである
 4) カーボンブラックの収益を1トン当たり500~700ユーロとすると、ターコイズ水素はゼロコストで生成可能である
 5) カーボンブラックの使用例: タイヤ、ゴム、建設資材
 出所: BNEF (2019), IEA (2019), Energy Conversion and Management: X (2020), PwC Strategy&調査 (2020)

Uniperが10社以上のパートナーと共同で、炭素回収技術を使ってガスから水素を生成する「ゼロカーボン・ハンバー・コンソーシアム (Zero Carbon Humber consortium)」を立ち上げている。二酸化炭素は北海に運ばれ、海底に貯蔵されることになっている。

供給と需要を結び付ける－輸送と貯蔵

水素の輸送は需要と供給を結ぶカギである。

既存のガスインフラを通じて水素輸送するのは、選択肢のひとつである。すでに述べたように、欧州のガス導管システム事業者は、最大10%程度の水素なら天然ガスに混入しても、さしたる技術上の問題はないと見ている。ガスのネットワークを少し調整すれば、最大20%の混入も可能と思われるが、それ以上は水素専用インフラを設置するほうが、費用対効果が高いだろう。

しかし、天然ガスへの水素混入に関する経済モデルはまだ

明確になっていない。高価な水素分子を安価な天然ガスに注入することは、価格崩壊につながる仕組みと見なされることが多い。また、水素を暖房に使用することが技術的に可能であることを示すプロジェクトもある。例えば、英国のガス会社数社が開始した、2030年までに英国初の水素タウンを実現するという計画もそのひとつである。

天然ガスの量が減ると予想される一方、ガス導管は水素輸送にも活用できるため、TSOは座礁資産を抱えこむ心配がなくなる。欧州のガスTSO11社は、水素輸送のインフラ開発を想定した、欧州の水素「バックボーン」研究を発表した*3。これは水素ハブを中心とする地域ネットワークから、欧州全体を網羅する相互接続型のネットワーク(そのうち約75%はガスの既存のインフラを改修したもので、25%は新しい水素導管)まで、2040年までに全長約23,000kmを整備するというものである。このインフラ開発の費用は640億ユーロと見積もられている(図表8参照)。

パイプラインで接続できない地域については、別の選択肢が

*3: European Hydrogen Backbone参照

図表7

GCC¹⁾、オーストラリア、カナダ、モロッコは、アジアおよび欧州諸国に大量の水素を輸出できる高いポテンシャルがある

国別に示したグリーン水素の生産・消費ポテンシャル



1) GCC: 湾岸アラブ諸国協理理事会は、ペルシャ湾岸の全アラブ諸国(バーレーン、クウェート、オマーン、カタール、サウジアラビア、アラブ首長国連邦)からなる、地域政府間政治経済同盟である。
出所: PwC Strategy&分析

ある。ひとつは圧縮水素をガス体輸送することで、モビリティ市場のニーズに対応することである。しかし、水素のエネルギー体積密度は低いため、この方法では比較的少量のエネルギーしか輸送できず、産業界全体で期待される大量のエネルギーに応えることは難しい。

水素を短期間で輸送・貯蔵するもうひとつの選択肢は、液化水素である。しかし、コストが高く、マイナス235℃で保管する必要があるため、利用されるとすれば航空・宇宙用の燃料としての可能性が高い(短・中距離飛行やロケット推進など)。メチルシクロヘキサンやメタノールなどの液体有機水素担体(LOHC)も、水素を長距離輸送する方法のひとつである。LOHCは既存の輸送手段がそのまま使えて、再利用ができ、また常温下および大気圧環境下での取り扱いが可能である。欠点としては、消費地点で水素を分離するのに熱が必要なことや、化学反応を起こすのに時間がかかることなどが挙げられる。

アンモニアも水素を長期間、大量に貯蔵する便利な方法である。エネルギー密度が高く、幅広い産業分野で、そのままの形で使うことができる。また、ガスタービンや船舶を動かす燃料として直接使用することもできる。さらに、アンモニアには成熟した供給ネットワークと輸送インフラが存在する。欠点としては、毒性が強く、窒素酸化物が排出されることなどが挙げられる。今日、LOHCに比べると、アンモニアの方がわずかながらコスト優位性が高いようである。

輸送と同じく、工業ユーザーに大量の水素を供給し続けるには、水素を貯蔵する必要がある。水素はアンモニア、LOHC、または液体水素などの液体として貯蔵することができるが、気体として貯蔵するよりはるかにコストがかかる。岩塩層空洞や枯渇したガス田は、それぞれコストが1kg当たり0.30米ドルと2米ドル未満で、大量の水素を貯蔵するには最良の候補である。こうした貯蔵地は地理的に遠く、需要に合わせて供給するには最も効率的な方法とはいえないかもしれない。しかし、帯水層貯留などの代替案もまだ調査中である。技術面、そして運用面の課題としては、気体量の損失、細菌との化学反応や微生物反応によって掘削孔内が腐食することなどが挙げられる。

市場を支える規制枠組を整備する

需要、供給、輸送・貯蔵は水素経済の核となる柱だが、こうした柱は強固な規制枠組の上に築かれる必要がある。各国政府は水素戦略を打ち立てる重要な役割を担っており、明確な目標を掲げて、戦略的投資と財政的なインセンティブにより補完していくことが求められる。それが確立されれば、民間セクターの参加を促す正しいシグナルを市場に発信できるだろう。例えば、英国では洋上風力発電を促進するため、まさにこのような取り組みが行われている。英国政府は世界のリーダーになるという明確なビジョンを掲げ、目



2025年からは、水素クラスターとエコシステムを結ぶために、国内および国境を越えたインフラが必要になるだろう

大手導管メーカー

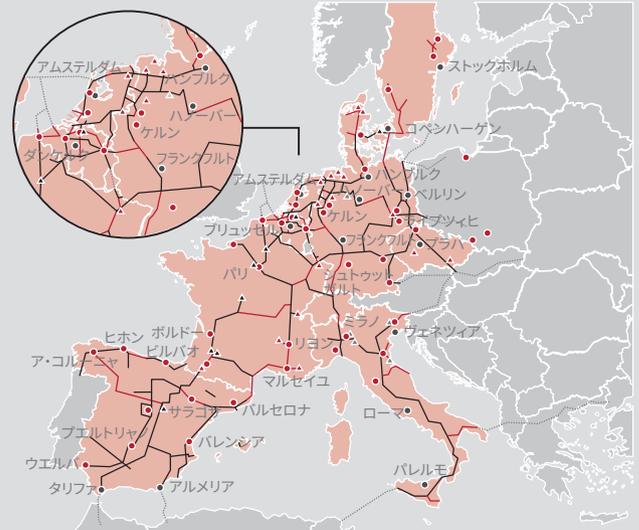
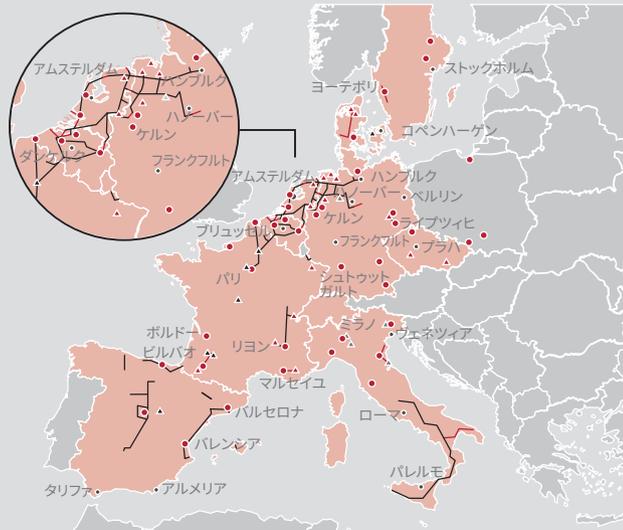
図表8

水素市場の成長を支えるためにインフラは非常に重要であり、2040年までに640億ユーロもの投資が予定されている

供給と需要を結ぶ欧州水素バックボーン開発

2030年には約6,800km

2040年には約23,000km



- 既存の天然ガスパイプラインを転用した水素パイプライン
- 新設の水素パイプライン
- - - 予定される追加ルート
- 研究範囲に含まれている国
- 研究範囲に含まれていない国

- ▲ 水素貯蔵所候補：既存・新規の岩塩層空洞
- ▲ 水素貯蔵所候補：帯水層
- ▲ 水素貯蔵所候補：枯渇ガス田
- 工業クラスター
- 都市、位置確認用(クラスター印がないもの)

- 地域バックボーンは、先行する水素需給のハブ、すなわち「水素バレー」の内側または周囲に形成される予定である(工業クラスター、港、都市、パイロットプロジェクト、商業用水素開発など)
- 今日、欧州には全長1,600km程度の小規模な水素専用ネットワークがあり、化石燃料で生成された「グレー」水素を工業クラスター間で輸送している

- 2040年までに、水素バックボーンは全長約23,000kmにまで及ぶ可能性がある。そのうち約75%は既存のガスのインフラを改修したもので、25%は新しい水素パイプラインである
- このネットワークで、2040年までに、欧州の年間水素需要量である1,130TWhを十分満たすことができる予定である

2040年までに必要なCAPEX(設備投資)とOPEX(運営費)

CAPEX(単位:億ユーロ)	低い ¹⁾	高い ¹⁾
パイプライン費用	170	280
圧縮費用	100	360
投資総額	270	640

OPEX(単位:年間億ユーロ)	低い ¹⁾	高い ¹⁾
運用と保守	7	11
電気代	9	24
運用費総額	16	35

- 270億~640億ユーロの投資規模であれば、天然ガスパイプラインの建設と改修の全設備コストをまかなうことができる。この金額はグリーン水素生産への数千億ユーロ規模の投資のうち、ごく一部である
- ネットワーク全体の75%は既存インフラを改修したもので、CAPEX総額の50%を占める
- OPEXには、年間5000時間の負荷率を想定したパイプラインと圧縮ステーションの保守・運用費、および電気代が含まれる

1) 低/高の範囲は、天然ガス導管への投資と保守に関するガスTSOの経験を水素に当てはめて決定
出所：PwC Strategy&分析

図表9

ケーススタディ：2020年9月20日、世界で初めてブルーアンモニアがサウジアラビアから日本へ出荷

エネルギーキャリアと循環型炭素経済を用いた持続可能な水素利用

プロジェクト名	サウジアラビア・日本間のブルーアンモニア供給実例		
年	2017年 協力開始 2020年 第1回出荷		
関係者	サウジ・アラムコ	サウジアラビア	経済産業省
	社団法人電気学会	SABIC	
説明	ハイグレード・ブルーアンモニア40トン、ゼロカーボン発電用に出荷		
目的	<ul style="list-style-type: none"> 炭化水素から水素へ、さらにアンモニアへ変換 排出される二酸化炭素の回収： <ul style="list-style-type: none"> 30トンの二酸化炭素を後日SABIC社のイブン＝シーナ工場においてメタノールの生産に使用 20トンの二酸化炭素をアラムコ社のウスマニヤ油田の石油増進回収プロセス(EOR)に使用 日本のゼロカーボン発電所でアンモニアを使用 炭素循環型経済の一環として多国籍・多業種のパートナーシップを成功させる 		
最終利用	 エネルギー使用		

出所：Project website; PwC Strategy&分析

標を定め、差額契約(CfD)による投資を可能にした。英国は2000年代初頭にこの取り組みを初め、2020年には洋上風力発電容量が約10GWに達している。現在、英国政府は、2030年までに40GWを達成することを目指している。

水素については、欧州各地で同様の取り組みが行われている。EU全体の水素ロードマップ(図表10参照)といくつかの国が先般策定した国家水素戦略(図表11参照)は、グリーン水素の潜在市場を隔々まで掘り越していくうえで重要なステップと捉えられる。このように長期的な見通しを公開することで、需要側、供給側双方のステークホルダーが等しく必要な投資を行えるようになる。欧州の内部および周辺国において、公平な条件と公正な競争を保証するためには、国家間の協力と調整が重要になる。

初期段階のグリーン水素市場では、生産者と消費者が低炭素水素技術に切り替えられるように適切なインセンティブを設けるべく、政府による財政支援も必要になる。CAPEXまたはOPEXへの直接の補助金、あるいは補償の仕組みなど、支援にはさまざまな形があり、欧州では、2020年12月に

「欧州共通利益に適合する重要プロジェクト(IPCEI)」の設立が合意された。これは、EU水素戦略が定める水電解装置容量導入に係る野心的な目標を達成するための、真の促進剤となるだろう。

国家レベルでは、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)収束後の経済刺激策に割当てられている資金が、実証プロジェクトや水素技術開発を支え、財政インセンティブを通じて需要側・供給側を促す強力なツールになるだろう。この支援は、グリーン水素が他のエネルギー源に対してコスト競争力を持つようになるまで必要だが、先述したように、早くても2030年ごろに達成される見通しだ。

規制もグリーン水素への移行を促進するためのカギとなる。炭素税の増税、欧州国境税、あるいは工業プロセスにおける水素の使用に際して拘束力のある目標や義務的な割り当てを課すといった措置は、EUや欧州諸国が大量の水素需要を生み出すという目標を達成し、市場の好調な滑り出しを支えるだろう。

図表10

2020年のEUの水素戦略は、2050年までに野心的な目標を達成するため水素開発と協力を促すというものである

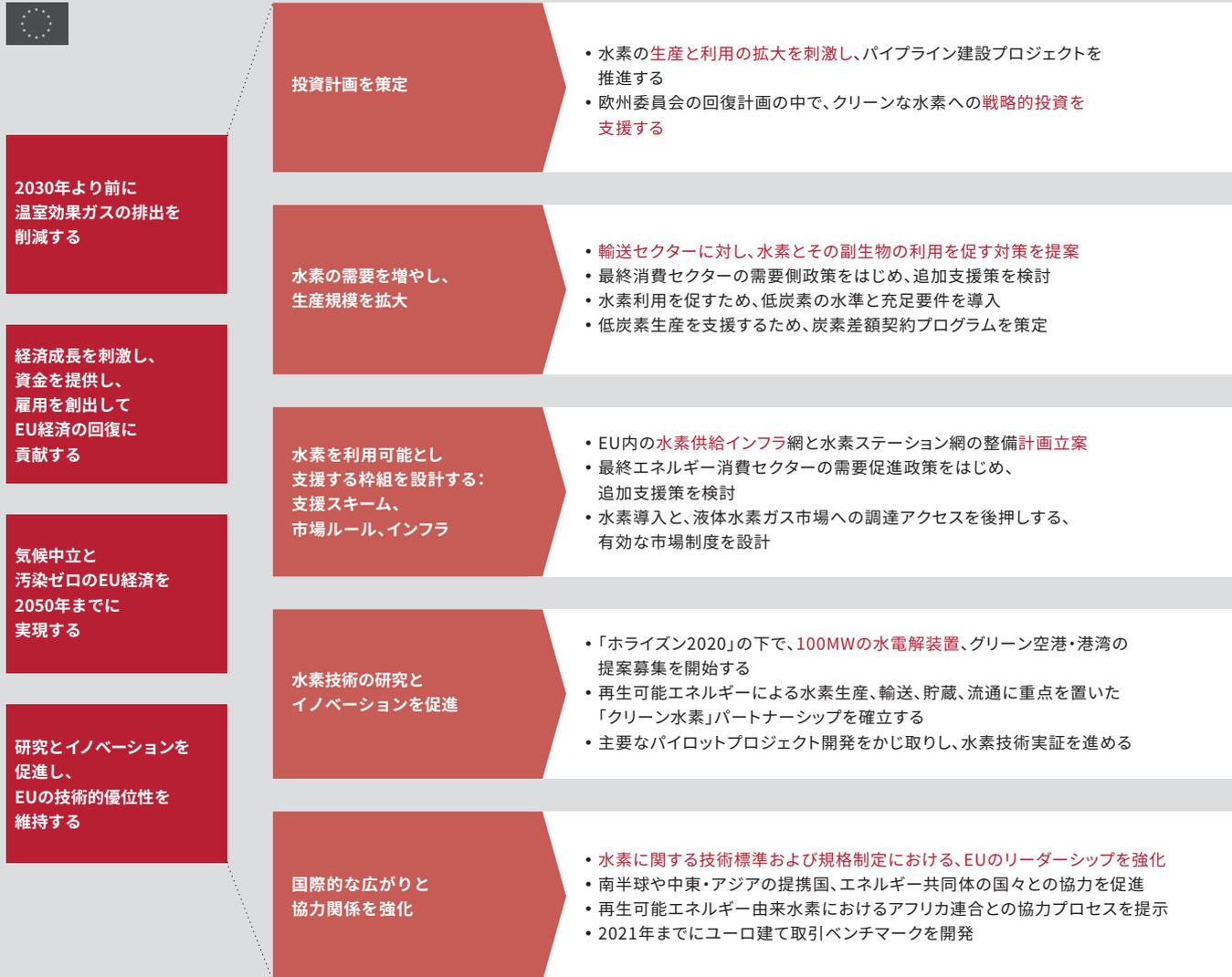
2050年に向けたEU水素戦略ロードマップ

主要な目標



主要な重点領域

主な活動



出所：A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, PwC Strategy&分析

図表11

欧州諸国の多くが国家水素戦略を発表しており、水素への注目度は高まっている(主な欧州諸国)

	 ドイツ	 英国	 イタリア	 トルコ	 フランス	 オランダ	 スペイン	 ポーランド	 ベルギー	 オーストリア	 ポルトガル
天然ガス消費量 (単位:TWh)、 2018年	950	880	769	530	475	399	350	208	193	96	65
水素に対する各国の注目度											
国が約束した支援金	2030年 までに 90億 ユーロ	N/A	N/A	N/A	2030年 までに 70億 ユーロ	2050年 までの 定性計画 を策定	2030年 までに 90億 ¹⁾ ユーロ	N/A	N/A	N/A	2030年 までに 70億 ユーロ
国家戦略の発表年	2020	策定中	N/A	N/A	2020	2020	2020	策定中	N/A	策定中	2020
脱炭素化の 主な重点分野	エネルギー			✓				✓			
	工業	✓			✓	✓	✓	✓		✓	✓
	建物		✓								
	モビリティ	✓			✓	✓	✓	✓		✓	✓
主な目標	2030年 までに 水分 解装置 容量を 5GW、 2035年 までに 10GWに 増やす 予定	COP26 (2021年 11月) 前に 国家戦略 を発表。 ブルー 水素と グリーン 水素に 焦点	生産、 貯蔵、 パワー・ トゥ・ ガス、 規制制度 に焦点。 多くの 水素関連 プロ ジェクト	国内の 石炭資源 を活用 したいと 考えて いるため、 ブルー 水素の 生産に 注力	2030年 までに 水分 解装置 容量を 6.5GWに	2030年 までに 水分 解装置 容量を 3-4GWに	2030年 までに 水分 解装置 容量を 4GWに	2030年 までに 水分 解装置 容量を 2-4GWに	包括的な 国家 戦略に 先んじて、 地方 政府が 水素 開発を リード	国家 水素 戦略を まもなく 発表する 予定	2030年 までに 水電乾燥 地容量を 最低 1GWに。 ポルトガル の既存の パイプ ラインの 70%が すでに 水素を 供給 できる 状態



1) 官民混合ファンドだが、大半は民間セクターが負担
出所：Government and local associations' websites; PwC Strategy&分析

図表12

フランスの水素戦略は、工業と大型輸送の脱炭素化および技術面におけるリーダーシップ獲得に重点を置いている

フランスの国家グリーン水素戦略

主要な目標



フランスの水電解装置クラスターにより工業を脱炭素化

大型輸送の脱炭素化に注力

雇用の創出と技術力の向上

Strategy&が見るフランスの水素戦略
この国家プランは非常に野心的であり、市場創造に向けた需要喚起、水素生産、インフラ、技術開発という4つのレベルでサポートが必要になるだろう

主要な手段

水素の脱炭素化	フランスの水電解セクターを進展	<ul style="list-style-type: none"> 水の電気分解による炭素を含まない水素の生産開発を目指す 2030年に6.5GWの水電解装置を導入するため15億ユーロを充てる
	グレー水素を低炭素水素に置き換えることで工業を脱炭素化	<p>特に以下のセクターが対象：</p> <ul style="list-style-type: none"> 石油精製 化学、特にアンモニア、メタノールの生産分野 その他、2030年に導入される小型水電解装置の水素を使用する電子機器や食品などのセクター
大型輸送の脱炭素化	水素大型輸送モデルの開発を促進	<ul style="list-style-type: none"> 2023年までに10億ユーロを投じ、複数の公募プロジェクトを通じて水素大型輸送モデルの開発を促進 デモ製品開発企業に3億5,000万ユーロ 地域実証に2億7,500万ユーロ
	ユーザー企業の集約・集積を進め、大規模な地域プロジェクトを開発	地域社会と産業界との強力なパートナーシップを促進し、新製品の開発と使いやすさの向上を同時進行させる
研究支援	研究開発を支援	ANRが運営する優先的研究プログラム「Hydrogen applications (水素の応用)」には6,500万ユーロが投じられる
	スキル開発	車両に関わる技術者、品質・安全・環境担当マネージャー、消防士、エンジニア、研究者のために、水素に関する研修プログラムを策定する

予想される影響

7 GW	2030年までに導入される水電解装置
21 百万トン	2030年までに削減される二酸化炭素排出量
135 万トン	2030年までに現地生産される水素の量
70 万トン	2030年までに現地生産されるグリーン水素の量
20%	2050年までに生じる最終エネルギー需要
12万～25万人	2050年までに創出される直接的・間接的雇用
+	大気質の改善

出所：www.ecologie.gouv.fr, PwC Strategy&分析

図表13

ドイツの水素戦略はインフラ開発、コスト競争力の向上、パートナー国からの輸入に重点を置いている

ドイツの国家水素戦略

主要な目標



水素にコスト競争力を
持たせる

国内水素生産体制の構築と、
輸入水素受け入れ準備の
バランスを取る

インフラ構築と需要開発を
整合させる

**Strategy&が見る
ドイツの水素戦略**

- 複数の水素利用セクター（モビリティ、鉄鋼など）に適用可能な、全体的なバリューチェーン横断アプローチ
- 大型の資金提供
- 精緻なガバナンスの仕組み整備（年次進捗報告書など）

主要な手段

- 明快だが現実的なタイプを優先
 - 主にグリーン水素を推進するが、移行段階ではクリーンさに劣る水素も容認
- 応用セクターを幅広く定義
 - 主要な応用分野は工業セクター（特に化学、石油化学、鉄鋼）、モビリティセクター、熱供給セクター
- 既存インフラの再利用
 - 天然ガスのパイプラインを水素輸送用に改修し再利用する
 - 必要に応じて、水素専用のパイプラインを建設し、延伸する
- 輸入水素受け入れ準備
 - 国内の生産能力を向上させるが、同時に再生可能エネルギー開発がより進んでいる他国とのパートナーシップに基づいて、水素輸入条件を策定する
- 大規模な資金提供
 - 2016年から2026年の間に132億ユーロ以上を提供し、そのうち2020年からの戦略に90億ユーロを提供
 - COVID-19拡大の影響を受けて停滞した経済の浮揚策を水素プロジェクトに向ける
- 具体的でインパクトのある政策を積極的に取り込み
 - 水素応用を促進するため、明確な導入義務の設定を検討する
例えば、航空業界におけるe燃料の導入義務量、水素ベースのクリーン鉄鋼の製造義務量など

予想される影響

90-110 TWh	2030年に予想される水素の需要
~14 TWh	2030年に予想される水素の国内製造
2%	航空業界におけるe燃料の導入義務規制予想
5 GW	2030年の水電解装置容量の目標量
65 TWh	2030年までの産業界における水素消費量の最低目標
2030年までの間に需要が最も成長するのは工業セクター、次にモビリティと熱供給のセクターと予想される	

出所：German government; World Energy Council; PwC Strategy&分析

明確な国家水素戦略

各国が水素経済の構築を加速させるにあたり、政府による詳細な国家水素戦略の策定が不可欠となる。欧州では、フランスとドイツがすでにそれぞれのアプローチを明確に示している(図表12、13参照)。他の欧州各国政府も両国の例に倣う必要があり、そうすることで水素を促進するための規制枠組が強化されることになる。

注意点としては、これらの国家戦略に沿う一方で、特定の需要セクターを他のセクターより不利に扱うような反競争的な運用を発生させないことが重要である。図表10で示したように、EUは加盟国間の取り組みの調整と協調に向け、いくつかの大きな目標と重点分野の設定を進めている。

次のステップ

この報告書でインタビューした専門家の1人は「水素の10年がついに始まったと言ってもいいだろう」と述べている。今後10年間で水素市場が本格的に拡大していくには、カギとなる重要な行動がいくつかある。

1. 明確にビジネスが成立する分野においては、エネルギー生成や工業プロセス変革の両面で低炭素水素を燃料や原料として用い、イノベーションを通じて需要を喚起する。石油精製業と鉄鋼業が主要な対象セグメントとなり、業界の垣根を超えた協力関係を促進することが、脱炭素化を進める上で必要になる。
2. グレー水素(天然ガスからの水素)と低炭素水素との供給におけるコストの差を埋める。そのため、OPEXについては低炭素電力供給を増やし、コストを削減する。CAPEXについては、水素プラントで必要な水電解装置やその他

の機器コストを削減する。同様に「ブルー」水素は、よりクリーンなエネルギー源によるビジネスが成立し、かつ利用可能になるまで、十分な量の水素を供給するための過渡期対応としての役割を担う。

3. 水素サプライチェーンのうち、特に輸送と貯蔵について開発する。発展するグローバル取引市場に需要と供給を呼び込むには、整備されたサプライチェーンの存在はその大前提となる。
4. 一部の水素輸出国の安価なグリーン電力を利用し、グローバル水素取引市場を活性化させる。輸送コストを加えても水素単価を競争力のある水準に維持できれば、水素輸入国にコスト差を解消した必要な量のグリーン水素を供給することもできる。
5. 規制、認証、公的補助金制度を利用し、水素市場の立ち上げを支える。とりわけEUレベルでは、初期段階の低炭素水素市場を活性化させ、EU内およびその周辺国における不当競争を防ぐために、加盟国同士の戦略の協調をはかることが何より重要になる。

今、適切に支援策を打てば、この生まれたばかりの低炭素水素市場は2030年までに成長・急拡大し、今後10年でコスト競争力を持つようになる。欧州で水素経済を実現するためには、政府、都市、企業のすべてがパートナーシップを通じてそれぞれの役割を果たすことが求められるであろう。

原文 : [Laying the foundations of a low carbon hydrogen market in Europe ~ Hydrogen as the cornerstone of energy transition](#)

MEDIA HIGHLIGHTS

Strategy& 最新レポートのご案内

◆「ゼロエミッショントラック輸送を実現する：トラックスタディ2020 商用車の脱炭素化への道筋」

(2021年7月発行)

商用車メーカー(OEM)や関連業界は、環境規制に準拠するためにトラックのポートフォリオ全体の電動化を迫られています。欧州では、OEM各社は2030年までに新車販売車両のCO2排出量を少なくとも30%削減することが、規制により義務付けられています。そのため全てのステークホルダーは、パワートレイン技術と必要となる燃料・充電インフラの決定に着手していかなければなりません。

本レポートでは、大型トラックの脱炭素化のためのグリーン技術として、「合成燃料トラック(SYT)」、「バッテリー式電気トラック(BET)」、「水素駆動燃料電池トラック(FCT)」、「架線式ハイブリッドトラック(CAT)」の4つのパワートレイン技術を挙げ、それぞれの経済・技術・環境面などについて分析を行っています。

本レポートは下記URLよりご覧いただけます。

<https://www.strategyand.pwc.com/jp/ja/publications/green-trucking.html>

◆自動車産業シナリオ2050 ライフサイクル・カーボンニュートラル 日本の自動車産業の存続に向けて」

(2021年2月発行)

2020年10月、当時の菅政権が国内の温室効果ガスの排出を2050年までに「実質ゼロ」とする「カーボンニュートラル宣言」を行い、脱炭素に向けた動きが加速しています。日本の自動車産業は、この宣言の数十年前より車両の排出ガス削減に取り組んできましたが、従来よりも規制を強化すべくLCA(Life Cycle Assessment)導入の検討を進めています。今後実際にLCAが導入された場合、資源の採掘からリサイクルに至るまでのプロダクトライフサイクル全体にわたりCO2排出量が評価されるため、自動車産業の2050年カーボンニュートラル実現は、自動車産業だけではなく、エネルギー産業を含む産業界全体、そして国をも巻き込む必要のある総力戦になると言えます。

本レポートではまず、Strategy&が日本の自動車および関連産業に向けて検討した「2050年のシナリオ」を提示しています。加えて、同シナリオを踏まえて想定される日本の自動車産業が直近取り組むべき重要な経営アジェンダについて「エネルギーを含むライフサイクル全体でのカーボンニュートラルの実現」「適切な移行計画の策定を含む事業再編」「主要技術の開発」などの項目別に解説を行っています。

次に、車両・部品生産、BEV、FCV、パワートレイン、水素などについても、2050年に向けた過渡期に取り組むべき課題や留意点などを挙げ、欧州、米国、中国企業などの先行事例も紹介しながら課題解決への示唆を提示しています。

本レポートは下記URLよりご覧いただけます。

<https://www.strategyand.pwc.com/jp/ja/publications/powertrain-study-jp.html>

Strategy&について

Strategy&は、他にはないポジションから、クライアントにとって最適な将来を実現するための支援を行う、グローバルな戦略コンサルティングチームです。そのポジションは他社にはない差別化の上に成り立っており、支援内容はクライアントのニーズに応じたテ일러メイドなものです。PwCの一員として、私たちは日々、成長の中核である、勝つための仕組みを提供しています。圧倒的な先見力と、具体性の高いノウハウ、テクノロジー、そしてグローバルな規模を融合させ、クライアントが、これまで以上に変革力に富み、即座に実行に移せる戦略を策定できるよう支援しています。

経営課題に関するご相談はこちらまで

jp_cons_sstrategy-info-mbx@pwc.com

問い合わせ先

PwCコンサルティング合同会社 ストラテジーコンサルティング(Strategy&)

〒100-0004

東京都千代田区大手町1丁目2-1 Otemachi One タワー

代表 Tel : 03-6257-0700 Fax : 03-6257-0701

jp_cons_sstrategy-info-mbx@pwc.com

<http://www.strategyand.pwc.com/jp>

strategy&

Part of the PwC Network

www.strategyand.pwc.com/jp/



© 2022 PwC. All rights reserved. PwC refers to the PwC network and/or one or more of its member firms, each of which is a separate legal entity. Please see www.pwc.com/structure for further details. Mentions of Strategy& refer to the global team of practical strategists that is integrated within the PwC network of firms. For more about Strategy&, see www.strategyand.pwc.com. No reproduction is permitted in whole or part without written permission of PwC. Disclaimer: This content is for general purposes only, and should not be used as a substitute for consultation with professional advisors.