

# 国立国会図書館 調査及び立法考査局

## Research and Legislative Reference Bureau National Diet Library

論題 Title	水素の関連技術と普及拡大のための諸課題
他言語論題 Title in other language	Hydrogen Technologies and Issues for Their Future Widespread Use
著者 / 所属 Author(s)	萩原 真由美 (HAGIWARA Mayumi) / 国立国会図書館調査及び立法考査局経済産業課
書名 Title of Book	脱炭素社会の技術と諸課題 科学技術に関する調査プロジェクト報告書 (Technologies for Decarbonized Society and Related Issues)
シリーズ Series	調査資料 2021-5 (Research Materials 2021-5)
編集 Editor	国立国会図書館 調査及び立法考査局
発行 Publisher	国立国会図書館
刊行日 Issue Date	2022-03-29
ページ Pages	89-109
ISBN	978-4-87582-892-1
本文の言語 Language	日本語 (Japanese)
摘要 Abstract	水素については、製造、貯蔵・輸送、利用等の各段階で多様な技術があり、ライフサイクル全体を通じた CO2 排出量削減が重要となる。脱炭素社会の実現に向け、水素の効果的な活用が望まれる。

\* この記事は、調査及び立法考査局内において、国政審議に係る有用性、記述の中立性、客観性及び正確性、論旨の明晰（めいせき）性等の観点からの審査を経たものです。

\* 本文中の意見にわたる部分は、筆者の個人的見解です。

# 水素の関連技術と普及拡大のための諸課題

国立国会図書館 調査及び立法考査局  
経済産業課 萩原 真由美

## 目 次

はじめに

- I 脱炭素化に向けた水素活用の意義
- II 水素関連技術の概要
  - 1 全体像とライフサイクルアセスメント（LCA）
  - 2 製造
  - 3 貯蔵
  - 4 輸送
  - 5 利用
  - 6 主な水素関連技術の成熟度評価
- III 近年の国内外の動向
  - 1 日本
  - 2 海外
- IV 日本における水素関連技術の普及拡大に向けた諸課題
  - 1 ライフサイクルを考慮したクリーンな水素の確保
  - 2 クリーンな水素のコスト低減
  - 3 エネルギー安全保障の強化
  - 4 技術開発の促進・国際連携の強化
  - 5 国際基準・ルール形成への参加
  - 6 国内の法整備・規制緩和
  - 7 社会受容性の向上

おわりに

## 【要 旨】

本稿では、脱炭素社会の実現に向けた次世代エネルギーとして近年注目を集めている水素について、関連技術や国内外の動向等の基本事項を概説し、今後の普及拡大に向けた課題を整理する。

水素は、製造・貯蔵・輸送・利用等の各段階で多様な技術が検討されている。水素は利用の際に温室効果ガスを排出しないという利点があるが、脱炭素化に向けては、利用時のみでなく、製造・貯蔵・輸送等を含めたライフサイクル全体を通じた温室効果ガスの排出量削減が求められる。

また、社会実装に至るまでには、技術の確立、コストの低減、制度の整備、国民の理解等の様々な課題を解決する必要がある。脱炭素化に向けては、水素に関する技術開発や普及策を進めると同時に、省エネや再エネ等の既存技術及び他の新規技術も含めた総合的な検討を通じて、水素の効果的な活用が望まれる。

## はじめに

利用時に二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）などの温室効果ガスを排出せず、貯蔵・輸送に適した形態にできる水素は、脱炭素社会の実現に向けた次世代エネルギーとして、近年、国内外で注目を集めている<sup>(1)</sup>。

我が国では、令和2（2020）年10月に「2050年カーボンニュートラル」が宣言され<sup>(2)</sup>、令和3（2021）年4月には、2030年度の新たな温室効果ガス削減目標として、平成25（2013）年度比で46%削減することを目指し、さらに50%の高みに向けて挑戦を続けるとの新たな方針が示された<sup>(3)</sup>。これらを踏まえて令和3（2021）年10月に閣議決定された「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」では、「水素は、発電・輸送・産業等、幅広い分野で活用が期待されるカーボンニュートラルのキーテクノロジーである」と位置付けられている<sup>(4)</sup>。

本稿では、燃料電池自動車等の一部の技術を除いて現状では一般的に馴染みが薄いと考えられる水素について、関連技術や国内外の動向等の基本事項を概説し、今後の普及拡大に向けた課題を整理する。

## I 脱炭素化に向けた水素活用の意義

水素（H<sub>2</sub>）は、地球上では主に水（H<sub>2</sub>O）など様々な化合物の構成要素として豊富に存在す

\* 本稿におけるインターネット情報の最終アクセス日は、令和3（2021）年12月22日である。

(1) 「水素エネルギー」という用語が使われることがあるが、この用語の学問的な定義は確立されていないとされる（戸田直樹ほか『カーボンニュートラル実行戦略：電化と水素、アンモニア』エネルギーフォーラム、2021、pp.129-130）。資源エネルギー庁は「水素エネルギー」を「一般に「水素」と呼ぶときは、水素ガス（H<sub>2</sub>）を指すことが多い」とした上で、「利用時にCO<sub>2</sub>を出さないエネルギー」としている（「水素エネルギーとは？」資源エネルギー庁ウェブサイト<[https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving\\_and\\_new/advanced\\_systems/hydrogen/about/](https://www.enecho.meti.go.jp/category/saving_and_new/advanced_systems/hydrogen/about/)>）。

(2) 菅義偉首相（当時）は、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「2050年カーボンニュートラル」、脱炭素社会の実現を目指すことを宣言した（第203回国会衆議院会議録第1号 令和2年10月26日 p.4）。

(3) 「令和3年4月22日 地球温暖化対策推進本部」首相官邸ウェブサイト<[https://www.kantei.go.jp/jp/99\\_suga/actions/202104/22ondanka.html](https://www.kantei.go.jp/jp/99_suga/actions/202104/22ondanka.html)>

(4) 「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」（令和3年10月22日閣議決定）p.75。環境省ウェブサイト<<http://www.env.go.jp/press/110060/117011.pdf>> なお、水素を含む重要分野に関するより詳細な内容・実行計画は、同戦略に先立つ「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（本文にて後述）に示されている（内閣官房ほか「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（本文）2021.6.18。経済産業省ウェブサイト<<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-3.pdf>>）。

る物質である。水素は、現在は主に、石油精製やアンモニア製造（肥料用途等）などの化学工業原料として用いられているが、酸素（ $O_2$ ）と反応させればエネルギーとして利用可能であり、その際に生じるのは水のみであることから、過去数十年にわたり、クリーンエネルギーとしての利用可能性が国内外で模索されてきた。

水素は、オイルショックや大気汚染などの問題が生じた1970年代以降、石油の代替となり得るクリーンエネルギーの1つとして繰り返し注目を集めてきた。特に近年は、2015年に採択され翌年に発効したパリ協定を機に、喫緊に求められる地球温暖化対策の一環として、水素利用はかつてないほどの機運の高まりを見せている。従来は、水素と酸素の化学反応によって発電する燃料電池を主に運輸部門で利用することに 관심이集中していたため、水素関連の研究・開発プロジェクトは原油価格や資源量の見通し等が安定するのに伴い下火となり、持続的な投資拡大に結び付かなかった。しかし、近年は、脱炭素社会実現に向けて、より広範な用途が分野横断的に検討され、また、各国でより強い政治的関心が集まっていることから、国際的に取組が強化されている<sup>(5)</sup>。

水素は、エネルギー資源の利用という観点からは、それ自体がエネルギーを生み出す一次エネルギーではなく、ガソリン等の石油製品や電気のように貯蔵や最終利用に適した形態に変換され、エネルギーを運ぶ媒体（エネルギーキャリア）となる二次エネルギーに区分される<sup>(6)</sup>。一方、エネルギー形態としては、石炭・石油・天然ガス等の化石燃料と同様に化学エネルギー<sup>(7)</sup>に区分され、原子や分子が化学反応を起こす際にエネルギーが発生又は吸収される。

脱炭素化に向けて、水素には、電気との協働・相互補完といった潜在的役割への期待が高まっている。水素は、多様な一次エネルギーから製造可能であり、用途が広く、利用の際に温室効果ガスを排出しないなど、電気との共通点が多い。一方で、水素は物質である分子によるエネルギーの運搬媒体であることから、電気のような電子のみによるエネルギーの運搬媒体とは異なる特徴を持つ。すなわち、分子であることから、水素は電気よりも安定して貯蔵・輸送することができ、化石燃料のように長距離の大規模エネルギー輸送を可能とする。さらに、燃焼して高温を生成することや、他の元素と結合して燃料を製造したり、工業原料として利用したりすることも可能である。このような特性が水素活用の意義につながる。例えば、再生可能エネルギー（以下「再エネ」）との関連では、水素は再エネを用いて発電された電気（以下「再エネ電気」）の月単位又は季節単位での需給調整（貯蔵・輸送）手段となり得ることから<sup>(8)</sup>、脱

(5) International Energy Agency, *The Future of Hydrogen: Seizing today's opportunities*, 2019.6, pp.18-19. <[https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The\\_Future\\_of\\_Hydrogen.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf)> なお、国内外の一部の科学者は、脱炭素化のために水素エネルギーを用いることについて、エネルギー効率の悪さや実現可能性等の課題を指摘した上で、政治的イデオロギーが科学的な知識より優先されているといった趣旨の懐疑的な見方を示している（「欧州の水素戦略の政策的意図と科学者による論争」2021.6.2. ブライトイノベーションウェブサイト <<https://brightinnovation.jp/carbon/information/欧州の水素戦略の政策的意図と科学者による論争/>>; 松田智「「実は環境に悪い」水素を次世代エネルギーとして礼賛するマスコミが報じない“不都合な真実”—精製過程のロスを無視している」『PRESIDENT Online』2021.10.15. <<https://president.jp/articles/-/50554>>）。

(6) 一次エネルギーは自然天然物として得ることができ、石炭・原油・天然ガス等の化石資源、ウラン、太陽・風力・水力等の再生可能エネルギーなどがある。これら一次エネルギーを輸送、貯蔵、最終利用に適した形態に変換したものを二次エネルギーと呼び、水素のほか、電気、各種温度の熱エネルギー、ガソリン・灯油・重油等の石油製品、都市ガス、コークスなどがある（茅陽一ほか編『エネルギーの百科事典』丸善, 2001, p.148; 「二次エネルギー」『原子力百科事典 ATOMICA』 <[https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/dic\\_detail\\_1892.html](https://atomica.jaea.go.jp/dic/detail/dic_detail_1892.html)> 等）。

(7) 原子が結合して分子が生成するときのエネルギーや、分子が互いに反応してほかの分子が生成する際のエネルギーを指す。代表的な例としては燃料の燃焼による発熱があり、暖房、加熱、機械力などに用いられる。電池では、化学エネルギーを電力に変換している（日本エネルギー学会編『エネルギー・環境キーワード辞典』コロナ社, 2005, p.60）。

炭素化に向けた再エネの導入拡大を後押しする効果が期待されている。このほか、産業部門やその他建築物における熱需要、航空・船舶・長距離陸上輸送の燃料、鉄鋼生産、化学工業など、電化が困難な領域における温室効果ガス削減について、水素が果たし得る役割はとりわけ大きいとされる<sup>(9)</sup>。

## Ⅱ 水素関連技術の概要

### 1 全体像とライフサイクルアセスメント (LCA)

水素は自然界から単体として採掘できる天然資源ではなく、常温常圧では極めて軽い気体でありエネルギー密度は低い。このような特性から、水素を利用するために、その製造、貯蔵・輸送、利用等の各段階で多岐にわたる技術が検討されており、最終的な利用までの過程は大規模で複雑なものとなる(図1)。本章では、水素に関する技術のうち、主なものを紹介する<sup>(10)</sup>。

なお、前述のとおり、水素はエネルギーとして利用する際に温室効果ガスを排出しないという利点がある。しかし、その製造、貯蔵・輸送等の過程においては、温室効果ガスの排出は避けられず、排出量は採用する方法や技術によって異なる。今後、脱炭素化に向けて実際に水素サプライチェーンを構築するに当たっては、利用時のみでなくライフサイクル全体を通じて排出量及び削減量を評価すること(ライフサイクルアセスメント(Life Cycle Assessment: LCA)<sup>(11)</sup>)が非常に重要となる。例えば、水素を製造する際に用いた一次エネルギー(化石資源/再エネ等)、技術(化石資源を用いた場合はCCS等<sup>(12)</sup>によるCO<sub>2</sub>回収の有無を含む)、利用設備(既設/新設等)、製造地から最終利用地までの輸送燃料(化石燃料/電力/水素等)や輸送距離(国内/海外等)など、考慮すべき点は細部に至る<sup>(13)</sup>。

(8) 再エネは地域格差や季節・時間変動が大きいと、リアルタイムでの需給一致を求められる電力としての利用には、需給調整が必要となる。再エネによる電力に余剰が生じた時に、水を電気分解して水素を生成し、電力が不足した時に、水素と酸素の化学反応から電力と水に変換すれば(詳細は次章)、再エネ電気の需給調整が可能となる。さらに、その貯蔵・輸送性を活かし、再エネ資源が豊富な地域から電力需要の多い他地域に対して、国家間を含む長距離・長時間でのエネルギー輸送を可能とする。なお、電力の需給調整(貯蔵)手段としては、水素のほかにも蓄電池や揚水発電などがあるが、次の文献ではこれらを比較の上、それぞれの特徴がまとめられている。国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術戦略研究センター(TSC)「電力貯蔵分野の技術戦略策定に向けて」(技術戦略研究センターレポート Vol.20) 2017.7. <<https://www.nedo.go.jp/content/100866310.pdf>>

(9) International Energy Agency, *op.cit.*(5), pp.22-27, 32-33; 水素エネルギー協会編『水素エネルギーの事典』朝倉書店, 2019, pp.2-3 等。

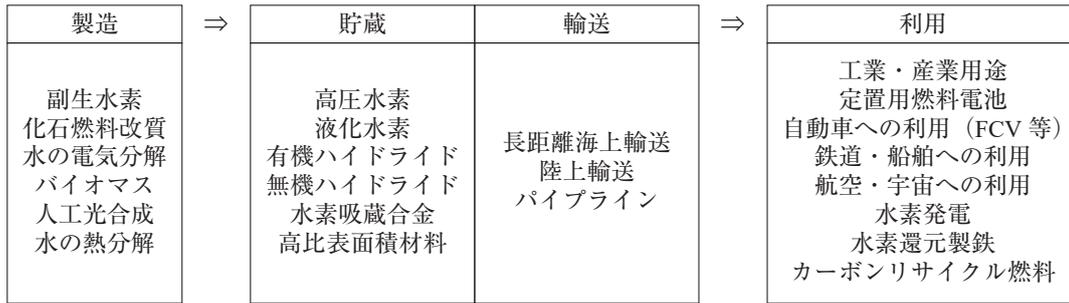
(10) 以下、本章の記述は、主に次の文献を参照した。水素エネルギー協会編 同上, pp.75-150; 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構『NEDO 水素エネルギー白書—イチから知る水素社会—』2015, pp.101-169. <<https://www.nedo.go.jp/content/100567362.pdf>>; 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構技術戦略研究センター(TSC)「水素分野の技術戦略策定に向けて」(技術戦略研究センターレポート Vol.3) 2015.10. <<https://www.nedo.go.jp/content/100763658.pdf>>; 水素エネルギー協会編『トコトンやさしい水素の本 第2版』日刊工業新聞社, 2017, pp.51-103, 122-151.

(11) LCAについては、本報告書の玄地裕「脱炭素技術のライフサイクルアセスメント」を参照。

(12) 「Carbon dioxide Capture and Storage」の略で、日本語では「二酸化炭素回収・貯留」技術と呼ばれており、排出されたCO<sub>2</sub>を回収して地中に埋める技術である。このほか、「CCUS」は、「Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage」の略で、分離・貯留したCO<sub>2</sub>を利用しようとする技術である。CCUSについては、本報告書の下田昭郎「二酸化炭素回収・利用・貯留(CCUS)」を参照。

(13) 例えば、次の文献では、海外(オーストラリア/ノルウェー)で再エネ発電(陸上風力/着床式洋上風力/浮体式洋上風力/太陽光)による水電解(固体高分子膜/アルカリ水電解)で水素を製造し、より取扱いが容易な水素エネルギーキャリア(液化水素/メチルシクロヘキサン/アンモニア)に変換して日本に輸入・貯蔵し、再変換によって水素を取り出すことを想定した場合の温室効果ガス排出量を算出の上、比較検討している。工藤祐揮「水素エネルギーをLCAの視点から俯瞰する」『日本LCA学会誌』12巻3号, 2016.7, pp.180-189. <[https://www.jstage.jst.go.jp/article/lca/12/3/12\\_180/pdf-char/ja](https://www.jstage.jst.go.jp/article/lca/12/3/12_180/pdf-char/ja)> また、環境省は、LCAを考慮した水素サプライチェーンの事業化支援ツールを整備している(「脱炭素化にむけた水素サプライチェーンを普及するための支援ツール」環境省ウェブサイト <[https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka\\_saisei/lowcarbon-h2-sc/support-tool/index.html](https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/support-tool/index.html)>)。

図1 主な水素関連技術



(出典) 水素エネルギー協会編『水素エネルギーの事典』朝倉書店, 2019, pp.75-150 等を基に筆者作成。

## 2 製造

水素は化石燃料や再エネなど多様な一次エネルギーから製造可能である。近年、CO<sub>2</sub> 排出量<sup>(14)</sup>に着目し、使用する一次エネルギー資源と水素製造技術の組合せに応じて、水素を色分けして呼ぶことがある。様々な色が用いられているが、一般的によく目にするものとしては、CCS 等を用いずに化石燃料から製造され大量の CO<sub>2</sub> を排出する「グレー水素」、化石燃料から製造されるが CCS 等を用いて排出された CO<sub>2</sub> を回収した「ブルー水素」、再エネ電力による水電解等で製造され CO<sub>2</sub> を排出しない「グリーン水素」がある<sup>(15)</sup>。現状では、世界で製造されている水素のほとんどはグレー水素とされており<sup>(16)</sup>、よりクリーンな水素への移行が課題となっている。以下、様々な水素の製造方法から、主なものを紹介する。

### (1) 副産物として発生（副生水素）

水素製造を目的として産出されたものではなく、様々な工業プロセスの中で副産物として得られる水素を、副生水素という。苛性ソーダ（水酸化ナトリウム）、鉄鋼、石油化学におけるエチレン等を製造する過程などで、水素が発生する。副次的に産出されるため経済的であり、追加的な CO<sub>2</sub> の排出はないが、水素の製造量は本来目的とする製品の生産状況に左右される。

### (2) 化石燃料から製造（化石燃料改質）

天然ガス（主成分はメタン）、ナフサ、石炭等の化石燃料を改質して水素を製造する方法で、化石燃料に水蒸気を反応させる水蒸気改質法、空気を混合して不完全燃焼させる部分酸化改質法、これらを組み合わせたオートサーマル改質法がある。現在世界で最も一般的なものは水蒸気改質法で、製油所やアンモニア製造所などで工業用に必要な水素を製造するためにも用いられている。技術的に確立しているが、製造時に CO<sub>2</sub> を排出するため、排出量削減のためには CCS 等を用いる必要がある。

### (3) 水の電気分解（水電解）

電気エネルギーを用いて水を分解して水素（と酸素）を製造する方法である<sup>(17)</sup>。実用技術

(14) 各技術の CO<sub>2</sub> 排出傾向を明確に示すため、以下本章では、関連サプライチェーンのライフサイクルで発生する CO<sub>2</sub> は考慮せずに記述する。

(15) エネルギー総合工学研究所編著『図解でわかるカーボンニュートラル：脱炭素を実現するクリーンエネルギーシステム』技術評論社, 2021, p.196.

(16) International Energy Agency, *op.cit.*(5), p.37.

としては、20世紀前半から工業的な水素生産手段として商用化されているアルカリ水電解法と、より高効率で小型化しやすく一部商用化されている固体高分子形（PEM形）水電解法がある。実証中の技術としては、分解に必要な電気エネルギーの一部を熱エネルギーで賄い効率性を高める（高温水蒸気を電気分解する）高温水蒸気電解法がある。電気分解の際はCO<sub>2</sub>を排出しないが、水分解に用いる電力の発電方法によってはCO<sub>2</sub>を排出することになり、火力発電の場合は排出量削減のためにCCS等の措置が求められる一方、近年は世界的に低コスト化が進む再エネ電気の活用への期待が高まっている。

#### (4) バイオマスから製造

再エネの一種であるバイオマス（化石燃料を除く、動植物に由来する有機物である資源）を原料として水素を製造する方法として、熱分解法と発酵法がある。熱分解法は、木質ペレットや間伐材等を加熱し、発生するガスから水素を分離精製するもので、技術的には確立している。発酵法は、ある種のバクテリアが無酸素環境下で有機物を分解する際に発生する水素を得るもので、日本では小規模実証段階まで開発が進んでいる。いずれも製造過程でCO<sub>2</sub>を排出するが、植物の成長過程における光合成によるCO<sub>2</sub>吸収量で相殺されるため、大気中で新たにCO<sub>2</sub>を増加させないカーボンニュートラルとみなされる。

#### (5) 光触媒による水分解（人工光合成）

水と接触させた光触媒に太陽光を当てることで水を分解し、水素を製造する方法である。日本が世界を牽引してきた将来技術であり、現在は研究段階であるが、実用化されればCO<sub>2</sub>を排出せずに水素を得られる。

#### (6) 水の熱分解

熱エネルギーを利用して水を分解し、水素を製造する方法である。熱のみで水を分解する熱化学分解法と、熱エネルギーと電気エネルギーを併用するハイブリッド熱化学分解法に大別され、欧米や日本で実証実験が行われている将来技術である。熱源としては、例えば次世代原子炉である高温ガス炉や太陽熱などが検討されている。

### 3 貯蔵

第Ⅰ章で述べたとおり、水素は有用なエネルギーキャリアであるが、常温では最も軽い気体であり、常圧では大きな体積を占有する。すなわち、体積当たりのエネルギー密度が低いといえ、効率的に貯蔵・輸送するためには、より取扱いが容易なエネルギーキャリアに変換して密度を高く保つ必要がある。水素の製造方法や利用方法、供給地と需要地の距離などによって様々な方法が考えられ、以下、主なものを挙げる。

#### (1) 高圧水素

高圧水素とは、貯蔵・輸送のため、水素ガスを圧縮機等で高圧にしたものである。例えば20MPa（メガパスカル）の加圧によって、水素を常圧の状態の約200分の1の体積に圧縮する

---

(17) この逆の反応、すなわち、水素と酸素を化学反応させて電気（と水）を生成するのが、後述の燃料電池である。

ことができる。高圧水素は、産業用・工業用として古くから一般的に用いられている。

## (2) 液化水素

液化水素とは、水素ガスを  $-253^{\circ}\text{C}$  まで冷却することにより液化したものである。液化によって、体積は約 800 分の 1 に圧縮されるため、大規模貯蔵輸送に適している。ただし、外部からの侵入熱で水素が気化しやすく、エネルギー損失を抑える工夫が求められる。液化水素は、従来は宇宙技術分野（ロケット燃料等）で用いられていたが、近年は産業用・工業用の水素供給に占める割合も高まってきている。

## (3) 有機ハイドライド (LOHC)

有機ハイドライド<sup>(18)</sup>とは、化学反応により、比較的容易に一定量の水素を可逆的に吸収・放出する有機化合物である。その形態で水素を貯蔵・輸送し、需要地で再び化学反応により水素を発生させて利用することが新規技術として期待されている。種類は複数あるが、安全性や利便性などの点から、水素とトルエンを化合したメチルシクロヘキサン ( $\text{C}_7\text{H}_{14}$ ) として貯蔵・輸送する方法の実用化が進められている。この場合、水素ガスは常温常圧で約 500 分の 1 の体積の液体として扱うことが可能となる。なお、この性質から、水素キャリアとしての有機ハイドライドは、近年は「LOHC」(Liquid Organic Hydrogen Carrier. 液体有機水素キャリアなどと訳される。) と称されることも多い<sup>(19)</sup>。

## (4) 無機ハイドライド

無機ハイドライドとは、有機ハイドライド以外の非金属水素化合物である。その形態で水素を貯蔵・輸送し、需要地で水素を取り出して利用することが将来技術として期待されている。例えば、無機ハイドライドの一種であるナトリウムアラネート ( $\text{NaAlH}_4$ ) にチタン触媒を加えると、水素が可逆的に出入りする。また、近年、日本を中心に水素キャリアとしての期待が高まるアンモニア ( $\text{NH}_3$ ) に水素を変換すると、常圧下で  $-33^{\circ}\text{C}$  (又は常温で 85 気圧) で液化し、その体積は同重量の気体水素の約 1350 分の 1 (加圧して液化した場合は 1200 分の 1) に圧縮される<sup>(20)</sup>。軽元素 (リチウム、窒素、ナトリウム等) を含む無機ハイドライドは水素を多く含み、貯蔵可能な質量当たりの水素量 (水素密度) は後述の水素吸蔵合金よりも大きい<sup>(21)</sup>。

## (5) 水素吸蔵合金

水素吸蔵合金とは、水素の吸蔵<sup>(22)</sup>と放出を繰り返し行うことができるある種の合金である。

(18) ハイドライドとは水素化合物のことであり、金属水素化合物と非金属水素化合物に分類される。金属水素化合物とは、水素吸蔵合金 (後述) が水素を吸蔵したときの生成物である。また、非金属水素化合物は、有機ハイドライド (有機化合物) と無機ハイドライド (無機化合物) に分類される (水素エネルギー協会編『水素の事典』朝倉書店, 2014, pp.392, 594)。

(19) 水素エネルギー協会編 前掲注(9), p.118.

(20) アンモニアを用いた場合、水素を取り出すことなくアンモニアのまま、燃焼時に  $\text{CO}_2$  を排出しない脱炭素燃料として利用することも模索されている。具体的には、火力発電 (石炭や天然ガスとの混焼、将来的には専焼) や工業炉、船舶用の燃料などとしての技術開発が進められている (戸田ほか 前掲注(1), pp.132-143)。日本政府の政策については、注(3)も参照のこと。

(21) 水素エネルギー協会編 前掲注(18) p.392.

(22) イメージとしては、金属の原子が格子状に組み立てられていて、隙間に水素原子が入り込んでいる状態を指す (西宮伸幸『カーボンニュートラル 水素社会入門』河出書房新社, 2021, p.78)。

水素貯蔵時は加圧する（又は温度を下げる）ことで吸蔵され、水素利用時は減圧する（又は温度を上げる）ことで放出される原理を用いる方法が将来技術として期待されている。水素を合金内部に取り込むことで常温常圧の固体として扱うことが可能となり、体積当たりの水素吸蔵量は非常に大きい（水素ガスを約 1000 分の 1 の体積に圧縮可）、合金自体の重量が重いため質量当たりの吸蔵量は小さい。

#### (6) 高比表面積材料

高比表面積材料とは、活性炭、ナノチューブ、グラファイトなど、微細な穴が開いていて比表面積（単位質量当たりの表面積又は単位体積当たりの表面積）が非常に大きい材料<sup>(23)</sup>である。水素が、これらの物質の表面に吸着したり、細孔内に凝縮したりして貯蔵されることが将来技術として期待されている。

### 4 輸送

#### (1) 長距離海上輸送

現在でもロケット燃料となる液化水素を比較的近距离で海上輸送することは国内外で行われているが、将来的に水素の需要量が増えた場合、海外で製造されたクリーンな水素の輸入手段としての利用が見込まれる。具体的には、体積エネルギー密度が高い液化水素、有機ハイドライド、無機ハイドライド等の形で、大型タンカー等で大量輸送するための研究開発・実証実験が進められている。

#### (2) 陸上輸送

現在既に普及している方法としては、高圧水素を、少量使用では鋼製容器（シリンダ）やそれを束ねたカードルに入れてトラックに載せて運搬したり、大量使用ではトレーラーを用いたりしている。さらに大量の場合は、液化水素を専用のローリーやコンテナ等で輸送する方法がある。このほか実用化には至っていないが、水素吸蔵合金、有機ハイドライド、アンモニア等を用いた輸送についても研究が進められている。

#### (3) パイプライン輸送

水素を気体のまま大量輸送する場合、都市ガスなどのように圧力をかけてパイプラインで送る方法がある。現在でも工業用水素の輸送を中心に用いられており、国内ではコンビナート等敷地内での低圧輸送、欧米では工場間での大規模・長距離輸送や高圧輸送用の水素パイプラインが敷設されている。なお、既存の天然ガス用のパイプラインを用いて、天然ガスに水素を一定割合混ぜて輸送する方法も検討されている。

### 5 利用

現在の水素の用途は、石油精製、石油製品製造、アンモニア製造等の化学工業原料としての利用が中心であり、このほか小規模ではあるが、半導体産業、ガラス産業、食品産業といった幅広い産業でも用いられている。以下では、新たに検討されている水素の利用方法の一部を紹

<sup>(23)</sup> 1g 当たり 1,000m<sup>2</sup> という値も珍しくない（水素エネルギー協会編 前掲注(10), p.86）。

介する。

なお、水素をエネルギーとして利用する方法は、燃料電池のように水素が有する化学エネルギーを直接利用する方法と、タービンやエンジン等の水素の燃焼による方法に大別される。

### (1) 定置用燃料電池

燃料電池は、水素と酸素を化学反応させて電気（と水）を生成する発電装置である<sup>(24)</sup>。定置用の家庭用燃料電池<sup>(25)</sup>は、発電とともに発生する熱を給湯で利用するコジェネレーションシステムであり、現在商用化されているものは、都市ガスやLPガス等から取り出した水素を用いる。発電出力がより大きく、店舗・オフィスビル・工場等で使用されるものとして、業務・産業用燃料電池がある。

### (2) 自動車への利用—燃料電池自動車（Fuel Cell Vehicle: FCV）等—

燃料電池自動車（FCV）は、燃料として搭載している水素と外気の空気中から取り入れた酸素を燃料電池で化学反応させて発電し、その電力を動力源としてモーターで走行する<sup>(26)</sup>。走行中は水しか排出しない。乗用車を中心に、既に複数のメーカーが生産・販売を行っている。商用車では、燃料電池バス（FCバス）や燃料電池フォークリフト（FCフォークリフト）<sup>(27)</sup>等が実用化されている。

燃料電池を用いるものとは別に、エンジンで従来の化石燃料の代わりに水素を燃焼させる水素エンジン自動車の開発も進められている。これは、低レベルの窒素酸化物を排出するが、基準値以下に抑える技術は既にあり、また、既存技術を活用できるという利点がある。

### (3) 鉄道・船舶への利用

水素は、自動車以外の乗り物でも活用が検討されている。

陸上交通における鉄道分野では、燃料電池列車の技術開発や実証実験が進められている。

海上交通においては、燃料電池船の技術開発や実証実験が進められているほか、水素を直接燃焼させることで動く水素エンジン船の開発も期待されている。

### (4) 航空・宇宙への利用

航空宇宙分野において、水素は、燃料（ロケット燃料等）、電力貯蔵（燃料電池<sup>(28)</sup>等）、人間が活動する宇宙閉鎖空間におけるCO<sub>2</sub>の還元除去等の様々な用途で利用されてきた。近年は環境対策として、航空機におけるCO<sub>2</sub>排出量規制が議論されるようになり、現在の石油系のジェット燃料に代わる水素を燃料とした航空機の検討が、日本を含む世界各国で進められつつある。

<sup>(24)</sup> すなわち、前述の水の電気分解による水素製造とは逆の反応を用いたものである。

<sup>(25)</sup> 日本では、平成20（2008）年6月、燃料電池実用化推進協議会が家庭用燃料電池の認知向上を推進する取組として、メーカーに関係なく統一名称を「エネファーム」と決定した。

<sup>(26)</sup> 電気モーターを駆動して走行するため電気自動車的一种とも考えられ、欧米ではFCEV（Fuel Cell Electric Vehicle）と呼ばれることも多い。

<sup>(27)</sup> フォークリフトとは、工場、倉庫、市場、空港、港湾などで荷物の積み下ろしや構内運搬作業に用いられる産業車両である。

<sup>(28)</sup> そもそも燃料電池は、電気と水が必要となる有人宇宙活動を支えるために技術開発が進められ、1960年代に実用化され、アポロ宇宙船やスペースシャトルなどの動力源として使用されたものである。その後、定置用燃料電池や燃料電池自動車等にも搭載されるようになった。

### (5) 水素発電

化石燃料の代わりに水素を燃料として燃焼させ、タービンにより動力を得て発電機で発電する。原理は従来の火力発電と同じであり、天然ガス等の他燃料に水素加えて使用する混焼発電は、実証実験や商用化が進められている。また、CO<sub>2</sub>削減効果がより大きい水素のみを燃焼する水素専焼発電は、世界的にも事例が少なく<sup>(29)</sup>、技術開発の余地は大きい。

### (6) 鉄鋼生産への利用（水素還元製鉄等）

製鉄プロセスで高炉法（高炉（溶鉱炉）において鉄鉱石の還元と溶解を一貫で行う。）を用いる場合、鉄鉱石の還元剤として、現在は石炭を原料とするコークスが使われている。この還元剤に水素を用いることで多量のCO<sub>2</sub>排出量を削減する将来技術の研究開発が、日本を含む世界各国で進められている。

このほか、直接還元法（鉄鉱石を固体のまま還元ガスを用いて還元する。）による場合は、現状では天然ガスや石炭ガスなどを用いている還元剤を、水素に置き換える技術開発も世界で行われている。

### (7) カーボンリサイクル燃料の原料

カーボンリサイクル（CO<sub>2</sub>の回収・再利用）との関連では、再エネを用いて水電解で得られるなどした水素と、何らかの方法で回収したCO<sub>2</sub>を化学反応させて燃料を合成する技術開発・実証が日本を含む世界各国で進められている。燃料利用時にはCO<sub>2</sub>を排出するが、燃料製造時に原料とするCO<sub>2</sub>は再利用によるため、排出量は一定程度相殺されるとみなされる。

具体的には、航空機、船舶、自動車等での利用が想定される「合成燃料（e-fuel）」（液体燃料）や、ガスに代わるエネルギーとして期待される「合成メタン<sup>(30)</sup>」（気体燃料。メタンは天然ガスの主成分）等がある。

## 6 主な水素関連技術の成熟度評価

水素関連技術の一部について、成熟度評価（Technology Readiness Level: TRL）<sup>(31)</sup>を図2に示す。これらの技術の中には、実用化に向けた研究・開発段階のものも少なくない。

## Ⅲ 近年の国内外の動向

### 1 日本

#### (1) 政府の政策

我が国は、平成29（2017）年12月、世界初の水素に関する国家戦略である「水素基本戦略」<sup>(32)</sup>を策定した。その後、2050年カーボンニュートラル実現という新たな目標の下で令和3（2021）年6月に策定された「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（以下「グリー

(29) 例えば、イタリアでは2009年にEnel社による実証がなされている（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構技術戦略研究センター（TSC）前掲注(10), p.7）。

(30) 水素とCO<sub>2</sub>から天然ガスの主成分であるメタンを人工的に合成する技術を「メタネーション」と呼ぶ。

(31) TRLは、米航空宇宙局（NASA）などが技術開発時に用いる指標として開発されたもので、実環境で利用（事業化・実用化）できる技術レベルをTRL9として、TRL1～9の9段階で表示することが多い。ここでは、普及も含めて11段階で整理した例を示している（エネルギー総合工学研究所編著 前掲注(15), pp.182-183）。

図2 主な水素関連技術の成熟度評価 (TRL)

プロセス	コンセプト			試作品	大型試作品		実証		普及初期		成熟	(参考) 本稿II章 関連項目	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
製造					5	石炭ガス化(CCUSあり)						2-(2)	
							7	改良型天然ガス自己熱改質(CCUSあり)					
							メタン水蒸気改質 (CCUSあり)		8-9				
							天然ガス自己熱改質 (CCUSあり)		8-9				
							メタン水蒸気改質・石炭ガス化		11				
	3			水電解 (海水)									
貯蔵・ 輸送							7	水電解 (高温水蒸気)				2-(3)	
							水電解 (固体高分子形)		9				
							水電解 (アルカリ)		9				
					5		バイオマス/廃棄物ガス化 (CCUSあり)						
					5		バイオマス/廃棄物ガス化 (CCUSなし)						
	3-4			光触媒								2-(5)	
利用	3			水の熱化学分解 (原子炉/太陽熱)								2-(6)	
							7	既存の天然ガスパイプラインに水素混入 水素パイプライン		11		3-(1) 4-(3)	
					5-7		液体水素タンカー				3-(2)(3)(4)		
					4-6		液体有機水素キャリア (LOHC) タンカー				4-(1)		
							アンモニア輸送タンカー		8-11				
							定置用燃料電池 (熱電併給)		9				5-(1)
製造							自動車用燃料電池 (乗用車、小型商用車、都市路線バス)		9				5-(2)
							自動車用燃料電池 (トラック)		7-8				
							燃料電池自動車用酸素タンク		8-9				
							6		自動車用酸素燃料エンジン (乗用車、小型商用車、トラック、都市路線バス)				
							自動車用酸素ステーション		9				
							8		燃料電池列車				
							6-7		船舶用燃料電池				5-(3)
	4-5			船舶用酸素燃料エンジン									
	3-4			航空用酸素燃料エンジン									
							水素発電 (天然ガスとの混焼)		9				5-(5)
貯蔵・ 輸送							水素発電 (専焼)		7				5-(6)
							高炉 (還元剤: 石炭の一部を水電解水素に置換)		7				
							直接還元鉄 (還元剤: 天然ガスに高レベルの水電解水素を混入)		7				
					5		直接還元鉄 (還元剤: 水電解水素 100%)						
					5		合成燃料 (水素と CO <sub>2</sub> による液体燃料)						
							6-7		合成メタン (水素と CO <sub>2</sub> を合成)				5-(7)

(注) TRL は、実環境で利用 (事業化・実用化) できる技術レベルを TRL9 として、TRL1~9 の 9 段階で表示することが多い。ここでは、普及も含めて 11 段階で整理している。

(出典) International Energy Agency, *ETP Clean Energy Technology Guide*, 2021.11.4. <<https://www.iea.org/articles/etp-clean-energy-technology-guide>>; エネルギー総合工学研究所編著『図解でわかるカーボンニュートラル: 脱炭素を実現するクリーンエネルギーシステム』技術評論社, 2021, pp.182-183 を基に筆者作成。

32) 「水素基本戦略」(平成 29 年 12 月 26 日再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議決定) 内閣官房ウェブサイト <[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei\\_energy/pdf/hydrogen\\_basic\\_strategy.pdf](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/saisei_energy/pdf/hydrogen_basic_strategy.pdf)> なお、同基本戦略は、世界各国でのカーボンニュートラル実現に向けた機運の高まりも背景に、改めてカーボンニュートラル時代における水素の役割を踏まえた上で、今後改訂される予定である (「第 6 次エネルギー基本計画」(令和 3 年 10 月 22 日閣議決定) p.81. 資源エネルギー庁ウェブサイト <[https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/pdf/20211022\\_01.pdf](https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf)>)。

ン成長戦略)は、成長が期待される14の重要分野の1つとして「水素・燃料アンモニア産業」を取り上げた<sup>(33)</sup>。グリーン成長戦略は水素を新たな資源と位置付けるとともに、用途を乗用車から拡大し、幅広いプレーヤーを巻き込んでいくとした。その上で、水素の利用・輸送・製造の各分野で各種措置を講ずることで(表1)、脱炭素化を促進しつつ、産業競争力を強化するとしている。具体的な数値目標としては、コスト面では、化石燃料に対して十分な競争力を有する水準、すなわち、2030年に供給コスト30円/Nm<sup>3</sup><sup>(34)</sup>(現在の販売価格の1/3以下)、2050年に水素発電<sup>(35)</sup>コストをガス火力以下(20円/Nm<sup>3</sup>程度以下)とすることを掲げた。また、水素供給量については、2030年に最大300万トン、2050年には2000万トン程度を目指すことを示した。なお、2030年については、内数としてクリーン水素(化石燃料+CCUS/カーボンリサイクル、再エネなどから製造された水素)供給量の目標も明示しており、具体的には、ドイツの再エネ由来水素供給量の2030年目標(約42万トン/年)を超える水準としている<sup>(36)</sup>。

予算措置としては、2050年カーボンニュートラル目標に向けて、令和2(2020)年度第3次補正予算において全体で2兆円の「グリーンイノベーション基金」が創設された。官民で野心的かつ具体的な目標を共有した上で、経営課題として取り組む企業等に対して、10年間、研究開発・実証から社会実装までを継続して支援していくとされる。このうち、水素関連のプロジェクトでは、「大規模水素サプライチェーンの構築」<sup>(37)</sup>に国費負担上限額3000億円<sup>(38)</sup>、「再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造」<sup>(39)</sup>に同700億円<sup>(40)</sup>が配分されている<sup>(41)</sup>。

なお、大量の水素需要が見込める発電部門について、令和3(2021)年10月に閣議決定さ

(33) 内閣官房ほか 前掲注(4), pp.28-29, 41-49. 水素は、グリーン成長戦略において「水素・燃料アンモニア産業」のほかにも、「原子力産業」(水素製造との関連で高温ガス炉)、「自動車・蓄電池産業」(水素ステーション、燃料電池等)、「船舶産業」(燃料電池船)、「航空機産業」(水素航空機)など複数の分野に記載されている。なお、同成長戦略では、「燃料アンモニア」を「燃焼してもCO<sub>2</sub>を排出しないアンモニアは、石炭火力での混焼等、水素社会への移行期では主力となる脱炭素燃料」と位置付け、混焼技術を早期に確立し東南アジア等への展開を図ることや、国際的なサプライチェーンをいち早く構築する旨の目標が掲げられている(同 p.46)。

(34) 「Nm<sup>3</sup>」は「ノルマル立方メートル」や「ノルマル・リューベ」などと読み、気体をノルマル状態と呼ばれる標準状態(0℃・1気圧)においた場合の体積の単位である。

(35) 日本では従来、燃料電池自動車を中心とした運輸部門や家庭用燃料電池など定置部門における水素利用が主に想定されていた。しかし、平成23(2011)年の東日本大震災とそれに伴う東京電力福島第一原子力発電所事故の影響により、日本における水素の位置付けが大きく変化し、発電部門で大規模に利用することも想定されるようになった(エネルギー総合工学研究所編著 前掲注(5), p.214)。例えば、事業用水素発電(出力100万kW、水素専焼)には年間水素使用量23.7億Nm<sup>3</sup>との試算があり、これは燃料電池自動車223万台(年間水素使用量1,060Nm<sup>3</sup>/台)に匹敵する規模である(資源エネルギー庁燃料電池推進室「水素発電について」(第4回水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ 資料2) 2014.3.26, p.5. <[https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso\\_nenryodenchi/suiso\\_nenryodenchi\\_wg/pdf/004\\_02\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/pdf/004_02_00.pdf)>)。水素発電によって大量かつ安定的な水素需要が生まれ、水素コスト低減に資することが期待される。

(36) 内閣官房ほか 前掲注(4), p.41. なお、令和3年10月に閣議決定された「第6次エネルギー基本計画」や「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」においても、同趣旨の目標が改めて掲げられている(「第6次エネルギー基本計画」前掲注(32), p.79;「パリ協定に基づく成長戦略としての長期戦略」前掲注(4), p.75)。

(37) 水素運搬船を含む輸送設備の大型化等とともに、水素発電の実機実証(混焼・専焼)等を実施することで、水素の大規模需要の創出とともに供給コスト低減を可能とする技術を確立し、2030年に水素供給コスト30円/Nm<sup>3</sup>、2050年20円/Nm<sup>3</sup>以下(化石燃料と同程度)の達成を目指すもの(「水素関連プロジェクトの研究開発・社会実装計画を策定しました」2021.5.18. 経済産業省ウェブサイト <<https://www.meti.go.jp/press/2021/05/20210518003/20210518003.html>>)。

(38) 「大規模水素サプライチェーンの構築(国費負担額:上限3,000億円)」同上 <<https://www.meti.go.jp/press/2021/05/20210518003/20210518003-1.pdf>>

(39) 余剰再エネ等を活用した国内水素製造基盤の確立や、先行する海外市場獲得を目指すべく、水電解装置の大型化やモジュール化、優れた要素技術の実装、基礎化学品や熱需要の脱炭素化実証といった技術開発等を支援し、水電解装置コストの一層の削減(現在の最大1/6程度)を目指すもの(「水素関連プロジェクトの研究開発・社会実装計画を策定しました」前掲注(37))。

(40) 「再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造(国費負担額:上限700億円)」経済産業省ウェブサイト <<https://www.meti.go.jp/press/2021/05/20210518003/20210518003-5.pdf>>

表1 グリーン成長戦略における水素産業の主な課題と対応

対象		現状と課題	今後の取組
利用	水素発電タービン	現状：実機での実証は未完了 課題：商用化 * 潜在国内水素需要：約 500～1000 万トン/年	先行して市場を立ち上げ、アジア等に輸出
	定置用燃料電池	現状：商用化済 課題：純水素燃料電池も含めた普及拡大	更なる価値の深掘りと生産設備への投資支援により、社会実装を推進
	FC（燃料電池）トラック	現状：実機実証中 課題：商用化 * 潜在国内水素需要：約 600 万トン/年	世界と同時に国内市場を立ち上げ、各国にも輸出
	水素還元製鉄	現状：技術未確立 課題：大量かつ安価な水素の調達 * 潜在国内水素需要：約 700 万トン/年	世界に先駆けて技術を確立
輸送等	液化水素運搬船等	課題：技術開発・実証を通じた大型化	世界に先駆け商用化し、機器・技術等を輸出
製造	水電解装置	現状：欧州企業が大型化技術などで先行	再エネが安い海外市場に輸出し、その後国内導入

(出典) 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」(概要資料) 2021.6.18, pp.36-37. 経済産業省ウェブサイト <<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-4.pdf>> を基に筆者作成。

れた「第6次エネルギー基本計画」では、2030年の電源構成において、水素・アンモニアで1%程度を賄うことを想定している。また、水素・アンモニア等の脱炭素燃料の火力発電への活用については、2030年までに、ガス火力への30%水素混焼、水素専焼、石炭火力への20%アンモニア混焼の導入・普及を目標として掲げている<sup>(42)</sup>。

## (2) 法規と規制緩和

水素をエネルギーとして利用する場合、水素エネルギーに特化した法律は体系的に整備されておらず、既存のガス事業や高圧ガス（高圧水素や液化水素が適用を受けることが多い。）の取扱い等に係る様々な法規が個別に存在している。現在、水素の製造、貯蔵・輸送、供給、利用に適用される法規の中では高圧ガス保安法（昭和26年法律第204号）が中心的な役割を果たし、ほかにもガス事業法、消防法、建築基準法、都市計画法、道路法、船舶安全法、石油コンビナート等災害防止法、労働安全衛生法等、多数の関連法規がある<sup>(43)</sup>。これに関して、水素に関わる国内法制の一元化を求める声がある<sup>(44)</sup>。

(41) ほかに本稿の内容に関連するプロジェクトとして、「製鉄プロセスにおける水素活用」「燃料アンモニアサプライチェーンの構築」「CO<sub>2</sub>等を用いた燃料製造技術開発」「次世代船舶の開発」「次世代航空機の開発」等がある（「グリーンイノベーション基金事業」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）ウェブサイト <<https://www.nedo.go.jp/activities/green-innovation.html>>）。

(42) 「第6次エネルギー基本計画」前掲注(32), p.77.

(43) 環境省「水素サプライチェーン事業化に関する調査・報告書」2020.3, pp.50-70. <[https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka\\_saisei/lowcarbon-h2-sc/support-tool/PDF\\_Excel/support-tool\\_report\\_202003\\_2.pdf](https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/support-tool/PDF_Excel/support-tool_report_202003_2.pdf)>; 水素エネルギー協会編前掲注(9), pp.154-155.

(44) カーボンリサイクル技術推進議員連盟「世界で加熱する脱炭素競争！日本のプライドをかけて技術開発を加速し日本経済を繁栄させる！脱炭素に向けたCO<sub>2</sub>リサイクル技術推進を緊急提言」2021.6.7. @Pressウェブサイト <<https://www.atpress.ne.jp/news/261859>>; 「Hを制する(3)水素阻む縦割り規制、新ルールで市場創造（第4の革命カーボンゼロ）」『日本経済新聞』2021.5.5.

規制緩和に関する近年の動向としては、燃料電池自動車用水素タンクや水素ステーション等について、平成25（2013）年5月、安倍晋三首相（当時）が成長戦略を発表する中でこれらに係る規制の一举見直しを発表して以降<sup>(45)</sup>、数次にわたる規制緩和が行われ、燃料電池自動車の普及を後押ししている<sup>(46)</sup>。

### (3) 民間（水素産業・技術開発等）の動向

産業振興に向けた民間主導の近年の動きとしては、令和2（2020）年の菅義偉首相（当時）による2050年カーボンニュートラル宣言に前後して、サプライチェーンの構築や水素利活用の社会実装などを目的とする民間協議会が相次いで設立されていることが挙げられる。エネルギー産業や製造業、金融業等の幅広い業種の企業等<sup>(47)</sup>が参加している全国組織の水素バリューチェーン推進協議会のほか、地域別の中部圏水素利用協議会、神戸・関西圏水素利活用協議会などがあり、水素産業育成に向けた連携協力の取組が活発化している。

民間の技術開発については、水素の製造から利用まで様々な領域で研究施設や企業等が取組を進めている<sup>(48)</sup>。政府資料によると、現状で日本が世界に先行しているとされる例として、利用面における水素発電、定置用燃料電池、燃料電池自動車のほか、海外からの水素輸入のための液化水素運搬船等の輸送・貯蔵技術が挙げられている<sup>(49)</sup>。

なお、特許と研究投資に関する調査結果の一例を紹介すると、2010～2019年の全世界の水素産業に関わる特許分析では、日本には高い競争力を有する企業が多数存在し、日本全体としての企業の競争力は世界でもトップクラスであるとされる。また、公募で決定される研究開発資金の分析では、研究投資の中心は燃料電池関連（搭載車両を含む。）と水素製造（特に水電解）であり、今後の技術開発の進展が期待される<sup>(50)</sup>。

### (4) 社会受容性

令和元（2019）年7月、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）の事業として、水素エネルギーに関するインターネット調査が実施された。全国の一般市民600名が対象とされ、調査の結果、水素エネルギーの認知度は57%と、ある程度は知られていた。しかし、内容まで知っている人は少なく、利用方法についての認知度は、燃料<sup>(51)</sup>

(45) 「平成25年5月17日 安倍総理「成長戦略第2弾スピーチ」（日本アカデメイア）」首相官邸ウェブサイト（国立国会図書館インターネット資料収集保存事業（WARP）で保存されたページ）<[https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/8218780/www.kantei.go.jp/jp/96\\_abe/statement/2013/0517speech.html](https://warp.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/8218780/www.kantei.go.jp/jp/96_abe/statement/2013/0517speech.html)>; 「日本再興戦略—JAPAN is BACK—」（平成25年6月14日閣議決定）p.75. 内閣官房ウェブサイト <[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/pdf/saikou\\_jpn.pdf](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/seicho/pdf/saikou_jpn.pdf)>

(46) 経済産業省産業保安グループ高圧ガス保安室「水素ステーション関連規制の見直し 進捗状況について」2019.5.17. <[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/suiso\\_nenryo\\_denchu\\_fukyu/pdf/006\\_02\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo_denchu_fukyu/pdf/006_02_00.pdf)>; 「水素供給網、整備進む、規制緩和でFCV後押し、ENEOS、給油所で来春併売、岩谷産業は全国に簡易型施設」『日本経済新聞』2021.2.17. 規制緩和により、例えば、ガソリンスタンドと水素ステーションの併設が許容されたり、水素ステーションの無人営業が可能となったりしている。

(47) 企業のほか、自治体、大学、研究所なども会員となっている。

(48) 「水素ビジネスの業界地図、「用途」と「サプライチェーン」の2軸で理解」『日経 XTECH』2021.9.10. <<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/01770/090300003/>>

(49) 「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」（概要資料）2021.6.18, pp.36-37. 経済産業省ウェブサイト <<https://www.meti.go.jp/press/2021/06/20210618005/20210618005-4.pdf>>

(50) 「水素産業分野で日本の技術力は世界イチ！研究投資の中心は水素製造と燃料電池 ～世界の有望企業 / 大学研究機関の技術資産スコアランキング～」2021.7.6. アスタミューゼ株式会社ウェブサイト <<https://www.astamuse.co.jp/information/2021/0706/>> なお、水素関連特許の総合力から見た世界ランキングは、1位日本、2位中国、3位米国、4位韓国、5位ドイツであり、日本が他を大きく引き離して独走、中米韓は2位集団、ドイツが後続という構図になっている。

21.0%、電気 20.5%、熱 11.2%にとどまった。関心が持てる新エネルギーとしては、例えば太陽光発電 44.2%、風力発電 26.5% に対して、水素エネルギーは 23.3% と低い認知状況である。また、水素エネルギーは環境に良い (34.3%) と認識されている一方で、高い技術力が必要 (30.7%)、料金が高そう (23.8%)、普及するのが難しそう (20.5%)、事故が起きやすそう・危険 (16.5%) といった消極的な印象も一定程度持たれている<sup>(52)</sup>。

新たなエネルギーを普及させるには、技術開発、経済性や安全性の向上といった課題の実質的な解決を進めると同時に、社会の理解を得ることも重要となろう。

## 2 海外

日本が 2017 年に世界初の国家レベルでの水素戦略を策定して以降、世界の主要国が相次いで水素戦略やロードマップを発表している。ここでは、欧州連合 (EU)、米国、中国、韓国、オーストラリア、チリを例として、その動向や特徴を紹介する。

### (1) 欧州連合 (EU)

EU の行政執行機関に当たる欧州委員会は、2020 年 7 月、それ以前に公表されていた民間の構想等も取り入れた「気候中立のための水素戦略」(A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe<sup>(53)</sup>。「欧州水素戦略」などとも呼ばれる。)を発表した。

EU は、水素が再エネの貯蔵や輸送を可能とする<sup>(54)</sup>ことや、産業部門や運輸部門の脱炭素化に資することなどを挙げ、高い気候変動目標を達成するための鍵であるとしている。また、クリーン水素とは再エネ由来の水素 (グリーン水素) であると定義づけ、主に風力や太陽光による電力によって水を電気分解して製造する水素を優先分野としている。ただし、短中期的には、CCS を用いた化石燃料由来の低炭素水素 (ブルー水素) 等の必要性も認めている。

製造面では、例えば水素戦略の第 2 フェーズである 2025~2030 年には、EU 域内で 40GW<sup>(55)</sup>以上の再エネ水電解装置を導入し、最大 1000 万トン<sup>(56)</sup>の再エネ水素を製造する目標を掲げている。さらに、第 3 フェーズの 2030~2050 年には、再エネ電力の 4 分の 1 を水素製造に用いることが想定されている。

利用面の特徴としては、船舶・航空など産業・自動車以外の利用も盛んに検討されていることや、電力部門で製造した水素を低炭素化が比較的困難とされる運輸や熱需要等の他部門で利用する、いわゆる「セクターカップリング」による CO<sub>2</sub> 削減を目指していることなどがある。

さらに、EU は、技術開発だけでなく、製造方法によって温室効果ガスの排出量が異なる水

(51) 「水素エネルギーは燃料として使われる」の意。次の電気、熱についても同様。

(52) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構・株式会社電通 (委託先)「水素社会構築技術開発事業／総合調査研究／水素に対する社会受容性向上に向けた調査」2020.2, pp.4-7. <<https://www.nedo.go.jp/content/100903959.pdf>> 調査方法は性年代別均等割付が用いられており、10代、20代、30代、40代、50代、60代の各世代の男女 50名づつ、合計 600名を対象としたアンケートである。

(53) European Commission, “A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe,” COM (2020) 301 final, 2020.7.8. <[https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen\\_strategy.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf)>

(54) 前掲注(8)を参照のこと。

(55) 「GW」は電力の単位で「ギガワット」と読み、1GW=100万kW(キロワット)である。

(56) 同戦略の構想は、EU域内に設置する水電解装置 40GWによるものに加え、豊富な再エネ資源に恵まれた EU域外の周辺諸国(ウクライナや北アフリカ諸国)にも 40GWの水電解装置を設置し、そこで製造した水素を輸入することが想定されている。この 1000万トンという製造量には、明示的ではないが、輸入分の水素も含まれると考えられるとの解釈がある(丸田昭輝「No.201 欧州連合の水素戦略と日本への影響」2020.9.10. 京都大学大学院経済学研究科再生可能エネルギー経済学講座ウェブサイト <[https://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable\\_energy/stage2/contents/column0201.html](https://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/stage2/contents/column0201.html)>)。

素のグリーン度合いを認証する制度や市場の整備にも力を入れている<sup>(57)</sup>。

なお、上述の EU 全体としての水素戦略のほか、多数の欧州諸国が個別に国家戦略等を策定している<sup>(58)</sup>。

## (2) 米国

米国は、本稿執筆時点では水素に関する国家戦略がなく、欧州や日本等と比べて水素への取組が遅れているとの指摘も見られるが<sup>(59)</sup>、米国エネルギー省は 2020 年 11 月、水素研究の開発・実証のための包括的な枠組みを示す「水素プログラム計画」(Hydrogen Program Plan<sup>(60)</sup>) を発表した。また、米国の水素に関わる業界団体である燃料電池・水素エネルギー協会 (Fuel Cell and Hydrogen Energy Association: FCHEA) が中心となって、2020 年 10 月に「米国水素経済へのロードマップ」(Road Map to a US Hydrogen Economy<sup>(61)</sup>) が作成されている。

2021 年 1 月にジョセフ・R・バイデン (Joseph R. Biden Jr.) 政権が発足して以降の動向としては、エネルギー省は同年 6 月に発表した「水素ショット」(Hydrogen Shot<sup>(62)</sup>) において、10 年以内にクリーンな水素の製造コストを 80% 削減し、1 ドル/kg の水準 (現在の再エネ由来の水素は 5 ドル/kg) を目指すとしている。

なお、米国では、水素製造に自国の一次エネルギー資源を用いることとし、輸入は想定していない。また、利用面では、フォークリフトやバックアップ電源用の燃料電池など、ニッチな分野であるが競争力のある機器の普及が進んでいる<sup>(63)</sup>。

## (3) 中国

中国<sup>(64)</sup>では、従来、政策における水素の位置付けは、燃料電池自動車等に重点を置いた産業育成を目的とする傾向が強かった。しかし、とりわけ、習近平国家主席が 2020 年 9 月、同国が CO<sub>2</sub> の排出について 2030 年までに減少に転じさせ、2060 年までに「炭素中立」(カーボンニュートラル) の実現を目指す旨を宣言<sup>(65)</sup>して以降、製造段階で CO<sub>2</sub> を排出しないグリーン水素が注目を集めるようになった。2020 年 12 月には、関係企業や研究機関等から成る中国水素エネルギー連盟 (China Hydrogen Alliance) が、中国初のグリーン水素等の規格及び認証

(57) エネルギー総合工学研究所編著 前掲注(15), p.218 等。

(58) 例えば、オランダ、ノルウェー、ドイツ、ポルトガル、フランス等。

(59) 浮田大・岡村智明「米国における水素の動向について—DOE「水素プログラム計画」、業界団体 FCHEA「米国水素経済へのロードマップ」の紹介—」『海外電力』670号, 2021.5, pp.50-51。

(60) U.S. Department of Energy, *Department of Energy Hydrogen Program Plan*, 2020.11. <<https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf>>

(61) Air Liquide et al., *Road Map to a US Hydrogen Economy*. <<https://static1.squarespace.com/static/53ab1f6ee4b0bef0179a1563/t/5e7ca9d6c8fb3629d399fe0c/1585228263363/Road+Map+to+a+US+Hydrogen+Economy+Full+Report.pdf>>

(62) “Hydrogen Shot.” U.S. Department of Energy website <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot>> これは、10 年以内に、より豊富で手頃な価格の信頼性の高いクリーンエネルギーの達成のためにブレークスルーを加速させることを目的とした「エネルギー・アースショット・イニシアチブ」(Energy Earthshots Initiative) の第一弾として、同時に発表されたものである。

(63) エネルギー総合工学研究所編著 前掲注(15), p.217。

(64) 以下、本項の記述は、主に次の文献を参照した。王婷「【北京便り】中国における水素エネルギーの発展」2021.6.8. 日本総研ウェブサイト <<https://www.jri.co.jp/page.jsp?id=39034>>; 王嘉陽「中国のグリーン水素発展戦略、2060 年カーボンニュートラルへ動き出す」2021.8.11. 自然エネルギー財団ウェブサイト <[https://www.renewable-ei.org/activities/column/REupdate/20210811\\_1.php](https://www.renewable-ei.org/activities/column/REupdate/20210811_1.php)>; 「中国における水素関連産業～最新動向と中長期的な発展要因を徹底分析」『MUFUバンク(中国)経済週報』2021.8.31. <[https://reports.mufgsha.com/File/pdf\\_file/info001/info001\\_20210831\\_001.pdf](https://reports.mufgsha.com/File/pdf_file/info001/info001_20210831_001.pdf)>

(65) 2020 年 9 月 22 日、第 75 期国連総会の一般討論において表明した (「習近平主席の国連総会一般討論演説全文」2020.9.22. 中華人民共和国駐日本国大使館ウェブサイト <<http://www.china-embassy.or.jp/jpn/zgyw/t1818353.htm>>)。同目標は、「3060 目標」と称されることもある。

制度を制定した<sup>(66)</sup>。さらに、2021年3月に採択された「国民経済・社会発展第十四次五カ年計画及び2035年までの長期目標綱要」では、水素エネルギーは未来の先端的技術の1つとして位置付けられた。国家レベルのほか、地方政府による水素・燃料電池関連産業の振興策も盛んに行われており、モデル事業も多く立ち上げられている。

中国では、これまで政策・制度面で多くの支援策が発表されており、水素製造、貯蔵・輸送、利用（水素ステーションの建設や燃料電池車の普及）の全工程において、補助金や奨励措置が講じられている。

#### (4) 韓国

韓国政府は、2019年1月、2040年までの目標を定めた「水素経済活性化ロードマップ」を策定した。さらに同年10月には、その基本方針を基礎としつつ、製造、貯蔵・輸送、利用（モビリティ）、利用（発電・産業）、安全・環境・インフラという5つの技術分野ごとの2040年までの目標を設けた「水素技術開発ロードマップ」を策定した。また、2020年7月には、水素に関する国の主な政策や計画を審議するための水素経済委員会を設立するなど<sup>(67)</sup>、水素政策に力を入れている。2022年からは、電力事業者に対して水素（燃料電池）で発電された電力を一定割合以上購入することを義務付ける「水素発電義務化制度」を世界で初めて導入する<sup>(68)</sup>。

韓国では、世界大手自動車メーカーである現代自動車が、日本のトヨタ自動車と並んで燃料電池自動車の技術開発を先導するなど、民間企業による水素事業への参入の動きが顕著である。

#### (5) その他（オーストラリア・チリ）

自国のエネルギー資源を活用して水素を大量製造し、将来的に水素輸出国を目指す国もある。

例えば、オーストラリアは、2019年11月に国家水素戦略（Australia's National Hydrogen Strategy<sup>(69)</sup>）を発表し、豊富な石炭や天然ガス等の化石燃料や太陽光・風力等の再エネ資源を用いてブルー水素やグリーン水素を製造し、国内需要を満たすほか、2030年までにアジア市場における水素供給国トップ3に入ることを成功指標として掲げている。

また、南米のチリは、2020年11月に「グリーン水素国家戦略」（Estrategia nacional de hidrógeno verde<sup>(70)</sup>）を発表した。同国は太陽光を中心とした再エネ資源に恵まれており、その

(66) ただし、この認証制度の利用を促進するためには、欧州のようなグリーン水素の取引市場を早急に整備することの必要性が指摘されている（王嘉陽 前掲注(64)）。

(67) 丸田昭輝「海外の取り組み」『特殊鋼』70巻2号, 2021.3, pp.6-10.

(68) 同制度は、太陽光、風力などを含む既存の「新再生エネルギー供給義務化制度（RPS: Renewable Energy Portfolio Standard）」から水素を用いた発電を切り離し、再エネとの競争をなくすことで安定した水素の普及促進を図るものである（「【国・地域別サマリー韓国】2019年1月に水素経済活性化ロードマップを策定、普及に向けた政府動向が活発化」環境省ウェブサイト <[https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka\\_saisei/lowcarbon-h2-sc/overseas-trend/PDF/overseas-trend\\_03\\_korea\\_202101.pdf](https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/overseas-trend/PDF/overseas-trend_03_korea_202101.pdf)> 等）。これに関連して、日本のグリーン成長戦略においては、「規制改革」として「小売電気事業者に一定比率以上のカーボンフリー電源の調達を義務付けた上で、カーボンフリー価値の取引市場を活用する。再生可能エネルギー、原子力と並んで、カーボンフリー電源としての水素・アンモニアを評価し、水素・アンモニアを活用すればインセンティブを受け取れる電力市場を整備する。」と記載されている（内閣官房ほか 前掲注(4), p.13）。

(69) COAG Energy Council, *Australia's National Hydrogen Strategy*, 2019. <<https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-11/australias-national-hydrogen-strategy.pdf>> 同戦略の概要については、日本語版（<<https://www.industry.gov.au/sites/default/files/2019-12/australias-national-hydrogen-strategy-overview-japanese.pdf>>）及び韓国語版が公開されている。

(70) 同戦略の英語版 *National Green Hydrogen Strategy* が、チリエネルギー省の公式ウェブサイト <[https://energia.gob.cl/sites/default/files/national\\_green\\_hydrogen\\_strategy\\_-\\_chile.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/national_green_hydrogen_strategy_-_chile.pdf)> から利用可能である。

再エネ発電のポテンシャルは1,800GW以上（同国の現在の総発電設備容量の70倍相当）と高い。同戦略は、これらを活用して地球上で最も安価なグリーン水素を生産し、海外（欧州、日本を含むアジア、米国、南米諸国等）への世界的な水素輸出国になる目標などを掲げている。

## Ⅳ 日本における水素関連技術の普及拡大に向けた諸課題

近年、水素をめぐる議論は多方面から行われており、枚挙にいとまがないが、以下ではその一部を紹介する。

### 1 ライフサイクルを考慮したクリーンな水素の確保

脱炭素化のために用いる水素は、前述のとおり、利用時に加え、製造、貯蔵・輸送等を含めたライフサイクル全体を通じて温室効果ガス排出量を抑制することが求められる。非常に大まかなイメージであるが、表2のような点を考慮しつつ温室効果ガスの排出量削減に資する対処がなされているか否かを確認し、よりクリーンな水素を確保する必要がある。

表2 ライフサイクルアセスメント（LCA）を実施するに当たり考慮すべき主な事項

プロセス	事項
共通	●各プロセスにおいて使用される全てのエネルギー（燃料、電力、熱等）、原材料、資本財（製造機器や建築物等の設備導入・運用）、廃棄プロセス
原料調達	●原料・部品・添加物等の採掘・製造 ●原料産地 ●原料がバイオマスの場合は栽培方法（回避される又は新たに発生する温室効果ガス排出量） ●輸送条件（原料の発生地点から水素の製造地点までの距離・積載量等）
製造	●製造・貯蔵技術（製造能力、一年の総製造量、製造工場の建築年・耐用年数） ●工場数、製造工場がある地域 ●使用する電力（又は該当する地域別電源構成と自家発電等の有無等） ●投入する副資材 ●原料の貯蔵、中間処理に要した化石燃料や電力、熱等 ●製造プロセスにおいて発生する副産物や廃棄物 ●製造した水素の回収に当たり回収ロスが発生する場合は、ロス分
貯蔵・輸送	●輸送条件（水素の製造地点から供給地点までの距離・積載量、他荷物との混載の有無等） ●製造設備から供給施設までの輸送に当たり圧縮又は液化等を行う場合は、それにかかるエネルギー投入量 ●輸送設備（トラック、コンテナ、ローリー等）への充填に当たり、充填ロスが発生する場合はロス分
供給	[供給施設への受入れから利用機器への充填までのプロセスを指す。具体的には、製品水素の貯蔵、加工（気化・冷却等）、供給（圧縮）、廃棄等が関連する。] ●利用機器への充填に当たり、充填ロスが発生する場合はロス分 ●供給施設で一時貯蔵する場合は、貯蔵にかかるエネルギー投入量
利用	●投入燃料、資本財、廃棄プロセス等

（出典）環境省「水素サプライチェーンにおける温室効果ガス削減効果に関する LCA ガイドライン Ver.2.1」2020.3.  
<[https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka\\_saisei/lowcarbon-h2-sc/support-tool/PDF\\_Excel/support-tool\\_lca-guide\\_ver2-1.pdf](https://www.env.go.jp/seisaku/list/ondanka_saisei/lowcarbon-h2-sc/support-tool/PDF_Excel/support-tool_lca-guide_ver2-1.pdf)>等を基に筆者作成。

## 2 クリーンな水素のコスト低減

水素普及のための最重要課題の1つとして、クリーンな水素のコストをいかに低減させるかが挙げられる。水素製造時のコストはもちろんのこと、最終利用までを考慮したライフサイクル全体のコストダウンを図る必要がある。欧州では、グリーン水素製造に用いる豊富な再エネ電力の賦存地域と水素需要地が比較的近接しており、域内にはガスパイプライン網等が構築されているなど、経済的・合理的に水素を利用できる環境が比較的整っている<sup>(71)</sup>。しかし、状況が異なる日本では、例えば新規のインフラ投資は行いつつも既存インフラを最大限活用するなど、ロジスティクスのコストダウン等も含めて工夫が求められる<sup>(72)</sup>。

なお、世界では、クリーンな水素をCO<sub>2</sub>削減手段の一部という環境政策として捉え始めており、市場に任せて民間企業の努力のみでコストダウンする段階を超えているとする見解がある。技術開発の促進にも関連するが、研究開発や設備投資を支援する補助金や投融資制度を従来以上に拡充するほか、カーボンプライシング<sup>(73)</sup>の強化により化石燃料価格を高く設定することで水素利用を促進するなど、制度的・政策的な支援が必要とされよう<sup>(74)</sup>。

## 3 エネルギー安全保障の強化

日本は水素の導入量拡大と低コスト化を図るため、海外の再エネや未利用化石資源等を用いて製造した安価な水素をオーストラリアや中東などから輸入することを模索している。しかし、世界的に水素利用が拡大することに伴い、他国との水素資源の獲得競争が激化するおそれがある。また、中東については、安全保障上の懸念が高い南シナ海や東シナ海を通過するシーレーンを確認する必要がある。エネルギー安全保障の観点からは、とりわけ初期は高コストになる可能性が高い国内での水素製造<sup>(75)</sup>も含めて、多様な選択肢を追求することが重要となろう<sup>(76)</sup>。

## 4 技術開発の促進・国際連携の強化

技術的な側面については、水素産業の特許の状況について前述したとおり、現状では日本全体での企業競争力は世界でも優位にあるとされる。その一方で、近年他国の追い上げは激しく、技術者からは、今後主導権を奪われることへの懸念が聞かれる<sup>(77)</sup>。また、特許を持っている

(71) 戸田ほか 前掲注(1), pp.127-128.

(72) 経済産業省 資源エネルギー庁新エネルギーシステム課 / 水素・燃料電池戦略室「今後の水素政策の課題と対応の方向性 中間整理 (案)」(第25回水素・燃料電池戦略協議会 資料1) 2021.3.22. <[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/suiso\\_nenryo/pdf/025\\_01\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/suiso_nenryo/pdf/025_01_00.pdf)>; 竹内純子「日本の水素戦略の展望と課題—2050年カーボンニュートラルの柱は電化・水素化」2021.4.14. 国際環境経済研究所ウェブサイト <<https://ieei.or.jp/2021/04/takeuchi210414/>>

(73) カーボンプライシングについては、本報告書の眞籠聖「(コラム)カーボンプライシング」を参照。

(74) 丸田昭輝「No.180 水素の真実と普及の意義(後編) ー来るべき黒船にそなえて~日本のとるべき道ー」2020.4.2. 京都大学大学院経済学研究科再生可能エネルギー経済学講座ウェブサイト <[https://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable\\_energy/stage2/contents/column0180.html](https://www.econ.kyoto-u.ac.jp/renewable_energy/stage2/contents/column0180.html)>; 柴田善朗「発電に大口需要期待 1基で燃料電池車200万台分」『エコノミスト』99巻9号, 2021.3.2, p.31. なお、補助金については、一部、多額の未執行の問題が指摘されており、「余るのに増額「水素予算」」『毎日新聞』2021.12.8)、施策の的確性を確保することも課題と言えよう。

(75) 令和2(2020)年3月に開所した福島県浪江町の「福島水素エネルギー研究フィールド(FH2R)」では、世界最大級となる10MW(メガワット)の水素製造装置を備え、再エネの導入拡大に伴って発生する余剰電力を水素に変え、貯蔵・利用する技術(Power-to-Gas)の実証が行われている。なお、ブルームバーグNEF社の試算によると、2050年時点では国内で製造した水素の方が海外からの輸入水素よりも安価になるとの予測も出ている(「水素戦略を聞く——ブルームバーグNEF マルティン・テングレル氏、長所生かす用途精査を(第4の革命カーボンゼロ)」『日本経済新聞』2021.5.13)。

(76) 「今井元補佐官、脱炭素の政府支援年2兆-3兆円規模にーインタビュー」『Bloomberg』2021.6.2. <<https://www.bloomberg.co.jp/news/articles/2021-06-01/QTY1ZYT0AFCF01>>; 市川眞一「日本におけるゼロエミッションの最適解」『原子力産業新聞』2021.4.16. <<https://www.jaif.or.jp/journal/study/shiseitsuten/7489.html>>

ことと、製品開発力があること、低コストで大量生産するグローバルなサプライチェーンを組めることとは全く別の話であり、これらを混同して慢心しないよう留意すべき旨の指摘もある<sup>(78)</sup>。

諸外国が急速に技術開発を進める中、世界との共同イニシアティブ・プロジェクトや共同研究を積極的に進めるなど、国際連携を強化する意義も増していると考えられる。さらに、人材育成や交流の観点からは、日本の若手研究者を海外の研究機関等に留学させて育成を図る一方で<sup>(79)</sup>、日本に優位性がある燃料電池等の分野では、日本人研究者の海外派遣や海外の若手研究者の日本招へいなどにより、日本の影響力を間接的に強めることに期待する見方もある<sup>(80)</sup>。

## 5 国際基準・ルール形成への参加

技術に関連して、国際的な基準やルール形成に積極的に携わっていくことも極めて重要となる。例えば、ルールメイキングを得意とする欧州は、域内の企業活動について環境適格性（何がグリーンで何がサステナブルなのか等）を判断するための基準となる「EUタクソノミー」<sup>(81)</sup>を策定し、そこには水素製造その他の水素関連活動に関する基準も示している<sup>(82)</sup>。今後、多国間での国際標準化の議論が本格化していく中、日本も要素技術の研究開発やエネルギーシステムの設計を進める一方で、これらを日本独自のものとせず、グローバルな場で採用されるよう努めることが強く求められよう<sup>(83)</sup>。

## 6 国内の法整備・規制緩和

従来の法規は、近年検討されている水素の新たな活用方法を想定して作成されたものではない。そのため、新規用途に必要な事項が明確に規定されていなかったり、過剰規制や非合理的であったりする場合などがあり得る。今後、水素がその潜在的役割を十分に果たし、ユーザーの利便性や企業の産業競争力の向上につなげるためには、引き続き、必要な法整備や規制の見直しを進めていくことが求められよう<sup>(84)</sup>。

## 7 社会受容性の向上

水素関連技術の社会実装を実現するには、国民の理解を得ることが不可欠である。現状では専門家や供給者側が議論の中心となっているが、地域住民や利用する企業といったエネルギーの消費者側が積極的に参加することで、よりニーズに合ったエネルギー供給を可能とすべき旨

(77) 「水素社会は本当に到来するか：実現を阻む技術面でのハードル」『EP report』2000号, 2020.11.21, pp.1-3.

(78) 湯田陽子「水素技術「総合的競争力ランキング」トップ10にトヨタほか日本4社。専門家は「特許数への慢心」に警鐘」『BUSINESS INSIDER』2021.7.29. <<https://www.businessinsider.jp/post-239338>>

(79) 「水素社会は本当に到来するか：実現を阻む技術面でのハードル」前掲注(77)

(80) 丸田 前掲注(74)

(81) “EU taxonomy for sustainable activities.” European Commission website <[https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/banking-and-finance/sustainable-finance/eu-taxonomy-sustainable-activities\\_en](https://ec.europa.eu/info/business-economy-euro/banking-and-finance/sustainable-finance/eu-taxonomy-sustainable-activities_en)>

(82) 例えば、水素の製造については、ライフサイクルでの温室効果ガス排出量が、化石燃料のそれ（94gCO<sub>2</sub>e/MJ、すなわち1メガジュール当たりCO<sub>2</sub>換算で94g）と比べて73.4%以上の削減（すなわち水素1トン当たりのCO<sub>2</sub>排出量が3トン未満）を達成することが基準として示されている（European Commission, “the EU Taxonomy Climate Delegated Act, Annex I.” <[https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI\\_COM:C\(2021\)2800](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=PI_COM:C(2021)2800)>）。

(83) 「EV時代の水素産業（下）梶川裕矢・東京工業大学教授—ルール形成の主導役目指せ（経済教室）」『日本経済新聞』2021.9.30; 「Interview 牧野明次 岩谷産業会長 日本こそが世界の水素の安全基準をリードすべし」『週刊ダイヤモンド』109(19), 2021.5.15, p.87.

(84) 「基礎研究、用途開発とも課題山積 水素・燃料電池に死角あり（水素、EVめぐり大乱戦 脱炭素サバイバル：脱炭素で変わる世界）」『週刊東洋経済』6968号, 2021.2.6, p.56; International Energy Agency, *op.cit.*(5), p.28.

の指摘がある<sup>(85)</sup>。さらに、安全確保面<sup>(86)</sup>や税負担面等については、広く社会全体で合意形成を図れるようなプロセスが求められる<sup>(87)</sup>。

## おわりに

水素には、その幅広い潜在力から、脱炭素社会実現に向けた活用への期待が高まっている。すなわち、水素は再エネを含め多種多様なエネルギー源から製造され、CCS等を併用すれば化石燃料を用いて製造することもできる。また、貯蔵・輸送性を活かし、国際間を含むエネルギーの長距離・大規模輸送を可能とする。利用の際は、クリーンエネルギーであるという利点に加え、産業部門など電化が困難とされる領域での活躍が特に期待される。このように、水素は、世界的に導入が進む再エネ電気を活用しつつも、その弱点を補完し得る特性を備えている。

しかし、今後の普及拡大に向けては課題も多い。日本がカーボンニュートラル実現の目標を掲げている2050年までという時間的な制約がある中で、クリーンな水素の技術は未確立のものも多く、またコストの問題も立ちはだかる。さらに、社会実装には、制度を整備し、国民から十分な理解を得ることなども必要となる。グリーン成長戦略等の政府計画が示す水素社会を実現するためには、このような様々な課題を克服することが前提にあり<sup>(88)</sup>、今後は計画の実行性が問われることになる。

なお、根本的な問題認識として、国際エネルギー機関（International Energy Agency: IEA）を含めた国際的なコンセンサスでは、脱炭素化実現のためのエネルギー技術の主力は省エネルギーと再エネであると一部の識者は指摘している<sup>(89)</sup>。水素の新規技術開発や普及策は必要であるとしても、それとは別に、既に確立している省エネや再エネの技術の普及促進を遅滞なく着実に進めていくことも忘れてはならない<sup>(90)</sup>。「水素のための水素戦略」や「燃料電池のための水素戦略」とならないよう<sup>(91)</sup>、既存・新規の双方を含めた競合技術の比較も可能な限り行い、脱炭素化という全体の目標の中で、水素が効果的な役割を果たし得る社会を模索することが肝要であろう。

(はぎわら まゆみ)

(85) 「「水素含む総合的な政策必要」末吉竹二郎氏 国連環境計画・金融イニシアティブ特別顧問」『日本経済新聞』（電子版）2021.5.17.

(86) 韓国では2019年5月に水素工場での爆発があり、死者が出たことなどから、水素ステーションの近隣住民による反対運動が起きた。また、ノルウェーでは2019年6月に水素ステーションで爆発事故（部品の製造ミスによるものと後日判明）が起こり、全ての水素ステーションが一時閉鎖され、FCVの販売も一時中止された（山本隆三「世界の水素ビジョンは日本と違う」『Wedge』32(4), 2020.4, p.31)。

(87) 橘川武郎『エネルギー・シフト—再生可能エネルギー主力電源化への道—』白桃書房, 2020, p.120.

(88) 吉岡七海ほか「「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」で示された水素の役割と課題」『電力中央研究所社会経済研究所ディスカッションペーパー』SERC20011, 2021.3.23. <<https://criepi.denken.or.jp/jp/serc/discussion/download/20011dp.pdf>>

(89) 安田陽「Interview「水素・CCUS 偏重に危うさ」」『週刊東洋経済』6968号, 2021.2.6, p.53.

(90) 同上; 伊与田昌慶「革新的技術は気候を救うか（特集 気候変動とエネルギー）」『世界』945号, 2021.6, p.170.

(91) 「水素戦略を聞く——ブルームバーグ NEF マルティン・テングレル氏、長所生かす用途精査を（第4の革命カーボンゼロ）」前掲注(75)