

## 2.2.2 水素・アンモニア

### （1）研究開発領域の定義

本領域ではエネルギー物質として注目される水素に関する科学、技術、研究開発を扱う。エネルギーシステムのゼロエミッション化に向けて再生可能エネルギー（以下、「再エネ」）が主要なエネルギー源となっていくが、変動が大きく長期保存が難しい課題がある。安定的な再エネ電力の利用のために、これを水素に変換する技術、輸送・貯蔵のための水素キャリア製造技術および水素利用技術を対象とする。本領域ではアンモニアは水素キャリアの一形態と捉えて記述する。なお、水素を用いてCO<sub>2</sub>を有用な化合物に変換する技術は「2.2.3 CO<sub>2</sub>利用」、水素・アンモニアを燃焼させ発電する技術は「2.1.1 火力発電」で扱う。

### （2）キーワード

グリーン水素、ブルー水素、水電解、改質反応、液体水素、有機ハイドライド、アンモニア、水素サプライチェーン、高圧タンク、水素吸蔵材料、燃料電池

### （3）研究開発領域の概要

#### 〔本領域の意義〕

再エネ電力は時間、天気、季節による変動が大きく、また長期貯蔵に向かないため、エネルギー供給の平準化、安定供給のために蓄電技術の活用と合わせて水素エネルギーへの変換技術が有望視されている。得られた水素は再び電力に変換でき、利用時に地球温暖化ガスである二酸化炭素（CO<sub>2</sub>）を発生させない。産業や運輸の分野でのCO<sub>2</sub>の排出削減でも水素が重要な役割を果たせる期待がもたれている。水素は還元性の物質であるため、CO<sub>2</sub>を有用物質に変換でき、製鉄の還元プロセスでも活用が検討されている。人類は広く社会で水素を活用した経験がこれまでに無く、水素社会の実現には、製造から利用に至るまで多くの技術開発がさらに必要である。社会受容には安全性やコストの観点が必要である。水素は化石資源含め多様な一次エネルギーからも製造可能であり、CCUS（CO<sub>2</sub>回収・有効利用・貯留）技術と組み合わせてエネルギー安全保障の面でも価値を有すると期待される。

#### 〔研究開発の動向〕

水素エネルギーシステムを構成する技術を、そのサプライチェーンにしたがって4つに分けて記載する。

#### ① 【水素製造】

- ・水素はその製造法によりカーボンフットプリントが変化するため、現在は便宜的に図表2.2.2-1のように分類されて技術的に議論される場面が増えている。
- ・水素のコストダウンを目指して、廃棄物を原料とする水素製造技術に関しても、米国、日本等で研究が行われている。これらのうち最も注目されているのがグリーン水素である。

なお欧州の再エネ指令（RED: Renewable Energy Directive）ではバイオマス以外のクリーンな水素や合成燃料をRFNBO（Renewable fuels of non-biological origin）と呼び、製造時のCO<sub>2</sub>排出量が既存の製法より70%減の3.4 kg-CO<sub>2</sub>/kg-H<sub>2</sub>以下と定義している（2022年6月のREDII）。既存の製法としてメタンの水蒸気改質反応は  $\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$  と表され、化学式上で7.3 kg-CO<sub>2</sub>/kg-H<sub>2</sub>、実際には12 kg-CO<sub>2</sub>/kg-H<sub>2</sub>程度である。

図表 2.2.2-1 製造法等による水素の便宜的な呼称

グリーン水素	再エネ電力を用いる電解により製造した水素
ブルー水素	天然ガス等化石資源の改質反応により製造した水素。CCSあり
グレイ水素	天然ガス等化石資源の改質反応により製造した水素。CCSなし
ターコイズ水素	メタンの熱分解で固形の炭素と水素を製造する。その水素
ピンク水素	原子力や高温地熱エネルギー由来の水分解により製造した水素

### ・グリーン水素

再エネ由来の電力を用い、水の電気分解により水素を製造する技術である。主な水電解の方式を図表 2.2.2-2 に示す。アルカリ水電解、PEM 形水電解が実用、実証段階にあり、近年アニオン交換膜形水電解も研究段階として注目を集めている。アルカリ水電解は、工業用途で大規模化の実績があり設備費用も低いが、運転停止時に電極が劣化を起しやすく、発電量の変動が大きい再エネ電力を利用する上での技術課題となっている。プロトン交換膜形（PEM 形）水電解は、固体高分子形燃料電池（PEFC）から派生した技術で、電力変動に強く、また電流密度を高くとれるため装置がコンパクトになるというメリットがあるが、電極に貴金属を使用しているためコスト低減が課題である。アニオン交換膜形は、起動・停止にも強く電極の選択幅が広く貴金属の使用を避けられる特徴があるが、十分な性能を有するアニオン交換膜がなく、開発途上である。高温水蒸気電解（SOEC）は、固体酸化物形燃料電池（SOFC）から派生した技術で、800℃程度の高温で電気分解を行い、電解効率が高い特徴がある。この電解方式については、近年 CO<sub>2</sub> の電解還元、CO<sub>2</sub> と水の共電解の研究開発も進められている。

図表 2.2.2-2 水電解の方式

	水電解の種類（略称）	移動イオン	電解質膜	電極の例
隔膜	アルカリ水電解（AWE）	OH <sup>-</sup>	なし（多孔質隔膜）	ステンレス／Ni系
固体電解質形	プロトン交換膜形（PEM）	H <sup>+</sup>	プロトン交換膜（スルホン酸基）	カソード：Pt/炭素 アノード：IrO <sub>2</sub>
	アニオン交換膜形（AEM）	OH <sup>-</sup>	アニオン交換膜（アミン）	貴金属→非貴金属の傾向
	高温水蒸気電解形（SOEC）	O <sup>2-</sup>	金属酸化物（安定化ジルコニア）	金属酸化物

### ・ブルー水素

石炭や天然ガス等の炭化水素原料の改質反応により水素を製造する技術である。特に褐炭は若い石炭であり自然発火しやすく流通が難しいため、水素に変換しての利用が検討されている。これら化石資源の改質反応で副生する CO<sub>2</sub> を CCS（CO<sub>2</sub> 回収・貯留）により地中に貯留すれば、得られた水素はクリーンとみなすことができる。ただし、副生したすべての CO<sub>2</sub> を回収・貯留することは現実的には難しく、また化石資源を使用することから疑問視する見方もある。しかしカーボンニュートラルに向けた移行期においては、グリーン水素だけでは十分な量の水素の確保が難しく、かつ高価となる可能性があり、当面は水素供給の一定割合を担うものとして研究開発を進める必要がある。

・熱化学水分解反応<sup>1)</sup>

原子炉（高温ガス炉）の熱、集光型の太陽熱、製鉄排熱、高温地熱など900℃程度の高温が利用できれば、水の熱分解による水素製造も選択肢になりうる。純粋な水の熱分解には4,000℃が必要だが、ヨウ素と硫黄の化学反応を組み合わせたブンゼン反応などを利用すれば、900℃という現実的な温度で水の熱分解により水素を得ることができる。

② 【水素貯蔵・輸送技術、水素キャリア技術】

- ・グリーン水素は再エネで作られるが、再エネ発電のポテンシャルは国や地域により格差が大きく、製造できる水素の量にも格差があるため、国際的な水素のネットワークを通しての連携が不可欠である。水素を輸送する方法の一つの選択肢はパイプラインであり、エネルギーのロスも少なくこれが最も好ましい。しかし距離が長くなる場合や、我が国のように海に囲まれている場合は海上輸送が選択肢となる。気体の水素は他の燃料に比較して、体積当たりのエネルギー密度が小さく、海上輸送のためにはLNG（液化天然ガス）の運搬と同様に液化する水素キャリア（エネルギーキャリア）の技術が必要になる。
- ・各水素キャリアの種類と特徴を表2.2.2-3に示す。液体水素は、マイナス253℃まで冷却する必要があり、運搬には専用船の開発が必要となる。有機ハイドライド方式は、トルエンを水素化してメチルシクロヘキサン（MCH）として運ぶ方式であり、常温で液体のため、通常の石油製品と同様に運搬が可能である。使用時にはMCHから水素を取り出すための脱水素触媒技術が必要となる。ドイツではトルエンの代わりにベンジルトルエンの使用も検討されている。アンモニアの合成はハーバー・ボッシュ法がすでに高度に確立している。ハーバー・ボッシュ法は400℃、200気圧以上と高温高压の反応（Fe系触媒）であるため、低温低压で機能する触媒の探索が精力的に行われている。例えば東京工業大学はRu系の触媒に注目して、その水素被毒の課題を克服するためにエレクトライドと呼ばれる特殊な電子構造を有する担体を開発している<sup>2)</sup>。アンモニアは化学肥料用途等ですでに運搬技術が確立されているが、エネルギー目的で利用するとなれば、その運搬量がこれまでと桁違いに大きくなり、新たな課題となる。アンモニアから再び水素を取り出すことができるが、そのままアンモニアを燃焼して発電する方式が想定されている点だが、他の水素キャリアと位置づけが異なっている。
- ・水素を貯蔵する方法として水素キャリアの形態の他、水素吸蔵合金<sup>3)</sup>による貯蔵も選択肢となる。

2.2  
産業・運輸部門のゼロ  
エミ化・炭素循環利用

図表 2.2.2-3      水素キャリアの種類

	輸送形態	水素取り出し	課題
液体水素	液化 (-253℃)	気化	専用輸送船の開発 輸送中のボイルオフ
有機ハイドライド	メチルシクロヘキサン (MCH)	トルエン + 3H <sub>2</sub>	水素取り出し時のエネルギーロス (吸熱反応)
アンモニア	液化NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> + 3H <sub>2</sub> または直接利用	アンモニア合成の効率 臭気・毒性

③ 【水素システム・インフラ技術】

- ・水素インフラとしては、液体水素輸送船、水素パイプライン、水素ステーション、蓄圧器等がある。液体水素輸送船としては、我が国では「すいそ ふろんていあ」船の開発例があり<sup>4)</sup>、より大型の液体水素タンカーも検討されている。水素パイプラインは我が国では一般化していないが、欧州や米国では実用に供されている。

- ・ 高圧による水素貯蔵技術は、水素ステーションや燃料電池自動車（FCV）で実用化されており、蓄圧器を構成する金属材料の開発や水素タンクの軽量化技術の開発が継続している。特にFCV用の水素タンクは軽量化のため、Type1の金属容器に始まり、Type2やType3では金属にCFRP（炭素繊維強化プラスチック）巻き付けによる補強、Type4ではプラスチックのライナーをCFRPで補強する形態<sup>5)</sup>へと進化している。
- ・ 水素は実在するもっとも小さな分子であり、金属材料をも透過して漏れ出したり金属自身の結晶構造を壊して強度を低下させる場合がある（水素脆化）。こういった現象の起こりにくい材料の研究開発が重要な課題で、水素のふるまいには未知の部分があり、水素の学理を深化させていく必要がある。

#### ④ 【水素利用技術】

- ・ 水素、アンモニアが利用可能な分野は発電、内燃機関用燃料、CO<sub>2</sub>利用（CCU）のための還元剤、工業用加熱炉燃料、肥料原料等と多岐にわたる。発電分野では水素発電、アンモニア発電（「2.2.1 火力発電」参照）、燃料電池（移動体用（FCV）、定置用）、電力需給調整等がある。CCUのための還元剤利用としては化学品合成、合成燃料、合成メタン、持続可能な航空機燃料（SAF）（「2.2.3 CO<sub>2</sub>利用」参照）等がある。
- ・ 産業からのCO<sub>2</sub>排出の約4割を製鉄が占めており対策が求められている。現在、高炉法が主たる製造プロセスだが、鉄鉱石の還元のために化石資源由来のコークスを使用（直接利用と一酸化炭素ガスの間接利用）するため多量のCO<sub>2</sub>が発生する。単純に水素に置き換えて還元するとすれば、吸熱反応であるため別途加熱手段が必要になる課題が生じる。鉄鋼業界を中心としたCOURSE50<sup>6)</sup>（NEDO委託事業「環境調和型プロセス技術の開発/水素還元等プロセス技術の開発」）プロジェクトでは部分的に水素を導入し還元することで10%のCO<sub>2</sub>を減少させ、さらに20%のCO<sub>2</sub>の回収を目標としている。この取り組みはグリーンイノベーション事業に引き継がれている。直接還元法（DRI）<sup>7), 8)</sup>は鉄鉱石を天然ガス（メタン）で直接還元する方法であり、この工程に続けて電炉で鉄を高純度化する。メタンは、回収CO<sub>2</sub>と水素からメタネーション反応によって得る方法が考えられる。メタンに代えて水素を還元剤として用いる手法も検討されている。

### (4) 注目動向

#### 【新展開・技術トピックス】

##### ① 【水素製造】

- ・ 旭化成株式会社は2020年に福島水素エネルギー研究フィールド（FH2R）に10 MW級大型アルカリ水電解システムを設置、稼働を開始した<sup>9)</sup>。1モジュールとして世界最大規模であり、毎時1,200 Nm<sup>3</sup>（定格運転時）の水素を製造できる。同社は2021年からのグリーンイノベーション事業に採択され、複数モジュールでの運転技術の確立を目指している。
- ・ 東レ株式会社は、PEM形水電解用の電解質膜として、従来のイオノマー（Nafion™）に代わるスルホン酸基を有する炭化水素系の高分子材料を開発している。この材料はガス透過性が低いため、電解で生成した水素や酸素が逆流せず安全性が高いといわれている。東レと装置メーカーのシーメンスエナジーAGはパートナーシップを結び、グリーンイノベーション基金の助成を受けて国内最大級10 MWクラスのPEM形大型水電解装置の技術開発を目指す<sup>10)</sup>。

##### ② 【水素貯蔵・輸送技術、水素キャリア技術】

- ・ 資源に恵まれ海外からの投資を得てクリーン水素輸出産業の拡大を目指すオーストラリアでは、水素の生産体制とサプライチェーン構築に向けて多くのプロジェクトが立ち上がっている。日本の企業・団体も数多くプロジェクトに参画している。オーストラリアは太陽光エネルギーに恵まれた環境（グリーン水素



の供給が可能)で、さらに褐炭も豊富に有している(ブルー水素の資源となる)。

- ・サウジアラビアのサウジアラムコと日本のエネルギー経済研究所が中心となり、ブルーアンモニア(ブルー水素から合成されたアンモニア)輸送の実証試験が2020年より行われている。天然ガスから改質反応で水素を製造し、ハーバーボッシュ法でアンモニア合成し日本に運ぶ構想である。副生したCO<sub>2</sub>は現地でメタノール合成(CCU)およびEOR(CO<sub>2</sub>圧入による石油増産)に用いる<sup>11)</sup>。
- ・有機ハイドライド方式の水素キャリアは、通常再エネ電力から水電解でグリーン水素を製造した後、トルエンを触媒反応で水素化してMCHを製造する二段階のプロセスを経るが、効率化・低コスト化する手法として、Direct MCH®プロセスが開発されている。この方法では、PEM形水電解セルと類似の原理のセルを用いトルエンを電気化学的に還元することで、水素製造工程を経由せずに水とトルエンからMCHを一段階で製造する<sup>12)</sup>。この方法でオーストラリアで製造したMCHを日本に輸送する実証試験も行われている。
- ・アンモニア合成については、ハーバーボッシュ法に代わる低温低圧のプロセスの研究開発が行われている。東京大学は、モリブデン系の錯体触媒を用い、還元剤のヨウ化サマリウム存在下、窒素と水から常温常圧でのアンモニア合成を報告している<sup>13)</sup>。アンモニア合成においても電力を直接利用する方法が検討されており、北海道大学は窒素と水から常圧で電解反応によりアンモニアが生成することを報告している<sup>14)</sup>。

### ③ 【水素利用技術】

- ・株式会社JERAと株式会社IHIはNEDOの助成を受け碧南火力発電所(愛知県)において、2021年から石炭と燃料アンモニアの大規模な混焼技術の確立を行うと発表した。同発電所5号機(発電出力:100万kW)での大規模混焼(20%混焼)の計画を当初よりも約1年前倒しで2023年度から開始する<sup>15)</sup>。
- ・FCV向け水素ステーションは徐々に増え、2022年12月時点で日本全国で164箇所となっている<sup>16)</sup>。2021年時点の日本国内のFCV保有台数は6981台で、自動車の全保有台数(約8,200万台)の約0.1%となっている。普及に向けて車両価格の低下、水素インフラの拡大などが課題と考えられる。大型商用車への適用が今後期待される。

#### [注目すべき国内外のプロジェクト]

##### ■国内

##### ・NEDO(グリーンイノベーション基金(GI基金))(2021~2030年度)

- 「大規模水素SPの構築」<sup>17)</sup>: 液化水素およびMCHによる大規模水素サプライチェーンの実証研究、液化水素関連機器の評価基盤の整備、直接MCH電解合成などの革新的技術を通して、水素供給コストを2030年に30円/Nm<sup>3</sup>、2050年に20円/Nm<sup>3</sup>以下まで低減させる技術開発を行う。水素ガスタービン発電技術(混焼、専焼)を実機で実証する。
- 「再エネ由来の電力を活用した水電解による水素製造」<sup>18)</sup>: 水電解装置の大型化技術等の開発、および再生可能エネルギーシステム環境下での水電解装置の性能評価技術の確立に取り組む。水電解設備コストは現在の6分の1程度を目指す。アルカリ水電解とPEM形水電解を中心に取り組む。
- 「燃料アンモニアサプライチェーンの構築」<sup>19)</sup>: ハーバー・ボッシュ法より優れる独自の触媒開発、さらには水素を用いない電解合成によるアンモニア合成法の開発を目指す。火力発電におけるアンモニアの20%混焼を発展させ、アンモニアの高混焼化・専焼化の技術開発を推進する。ガスタービンでのアンモニア専焼化に必要な技術開発も行う。
- 「製鉄プロセスにおける水素活用」<sup>20)</sup>: 高炉において水素を活用してCO<sub>2</sub>を50%削減する技術、および水素だけで低品位の鉄鉱石を還元する直接水素還元技術(高純度化は電炉を想定)の開発を行う。また電炉法において、不純物の濃度を高炉法並みに制御する技術を確立する。

• NEDO「水素社会構築技術開発事業」<sup>21)</sup> (2014～2025年度)

再エネ電力からの水素製造、水素サプライチェーン構築のための技術開発、ガスタービンを用いた水素発電システム、水素社会のモデル構築などの技術開発を行う。

• NEDO「燃料アンモニア利用・生産技術開発/工業炉における燃料アンモニアの燃焼技術開発」<sup>22)</sup> (2021～2025年度)

産業分野の脱炭素に貢献するため、アンモニア燃焼技術を開発し、アンモニアを工業炉における熱源とすることを目指している。

• NEDO「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業」<sup>23)</sup> (2020～2024年度)

2030年以降の高効率、高耐久、低コストの燃料電池車、産業・業務用燃料電池を見据えた、電池技術、システム技術、および水素貯蔵等水素関連技術を開発する。

• JST未来社会創造事業「地球規模課題である低炭素社会の実現」<sup>24)</sup> (2018年度～)

「実用的中温作動型水素膜燃料電池の開発」、「階層構造規制型触媒電極による革新的水電解プロセスの創出」、「電場中での低温オンデマンド省エネルギーアンモニア合成」、「グリーンアンモニアおよび尿素とその誘導体合成のための特異電子系触媒の開発」で水素、アンモニアに関連した探索研究を推進している。

## ■国外

• Mission Innovation<sup>25)</sup>

COP21で発表されたクリーンエネルギーイノベーション加速のための国際イニシアチブであり、複数の水素アプリケーションを組み合わせることで地産地消の水素エコシステムを推進すべく、各国の主要プロジェクトを“Hydrogen Valley”と位置付け、互いの国際協力や情報共有を推進している。2021年5月時点ではグローバルで36プロジェクトが発表されており、日本では福島水素エネルギー研究フィールド（FH2R）が該当する。

## [米国]

• 米国エネルギー省（DOE）Hydrogen shot<sup>26)</sup>

最初のEnergy Earthshot Initiativeで、クリーンな水素のコストを10年で80%の削減を目指すとしている。

自動車用クリーン水素価格：製造コスト\$2/kg、輸送・充填コスト\$2/kg

産業用および発電用水素コスト：\$1/kg

長距離トラック用燃料電池システム：\$80/kW、耐用時間25,000時間以上

車載水素貯蔵コスト：\$8/kWh、2.2 kWh/kg、1.7 kWh/L

電解槽の資本コスト：\$300/kW 耐久性80,000時間、システム効率65%

固定式の高圧燃料電池システムコスト：\$900/kW、耐久性時間40,000時間

• H2@Scale Initiative<sup>27)</sup> (2019年～) およびHydrogen Program Plan<sup>28)</sup> (2020年～)

2020年には前者でH2@Scaleの18プロジェクトに約\$640万ドル、後者では\$19,750万ドル（企業190社、大学16、国立研究所40）を投資し、水素サプライチェーン関連の課題に取り組む。とくに、コスト削減と製造や変換システムの性能と耐久性の向上、水素と従来のエネルギーシステムとの統合と、輸出障壁への対処、供給源の集約による大規模化、水素による統合エネルギーシステムの開発と検証、および革新的で新しい価値提案を行う。

## [欧州]

- 欧州燃料電池水素共同実施機構（Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking：FCH JU）<sup>29)</sup>

Horizon2020で2014～2020年にかけて13.3億ユーロの資金を得て227のプロジェクトが実施された。59件のプロジェクトが水素製造に関するもので、そのうち32件が水電解、なかでもPEM形電解の実証が多かった。2021年からはFCH-JUからClean Hydrogen Partnershipに名称を変更して引き継がれている。関連するプロジェクトの例を2つ以下に記載する。

-H2Future<sup>30)</sup>：大規模なPEM水電解装置（6 MW）を稼働させる。水素の電力・エネルギー市場との連携について検証する。

-Djewels<sup>31)</sup>：2020年にオランダにおいて20 MW級の水電解槽施設を立ちあげ、最終年の2025年には100 MWを目指す。得られる水素からメタノールやジェット燃料を製造する検討を行う。

## （5）科学技術的課題

- 水素コストの劇的な低減
  - 水電解：電極触媒（効率化、安価な入手容易な金属の利用）、電解質膜（イオン伝導性、耐久性）
  - 水素キャリア技術：合成技術。水素取り出し技術。電気化学的合成
  - アンモニア合成法：低温低圧で活性を持つ触媒。電気化学的合成
  - 貯蔵技術
- グリーン水素、ブルー水素、ピンク水素（原子力）、ターコイズ水素などの状況に応じた使い分けと、それぞれの水素製造技術の確立。
- 水素インフラ用の材料開発：水素脆化、漏れへの対策。金属材料（配管、容器）、ゴム材料（ホース、パッキン等）、耐圧容器等
- 燃料電池技術
- CO<sub>2</sub>と水素からの有用物質合成（CCU）
- 水素を用いた製鉄技術
- 水素、アンモニアの保安技術、環境影響評価

## （6）その他の課題

- 水素の製造と用途

水素は多様な用途への活用が期待されるが、製造から利用までの工程が多くなる懸念があり、効率的な運用が必要である。さもなくばエネルギーをロスし、水素のメリットが薄れる。水素製造場所と需要地との関係を適切に配置する必要がある。

- 巨額の研究開発費の確保

社会実装に至る過程では、研究開発・実証よりもさらに巨額の資金と体制が必要になる。水素の大量導入により実現する社会システムの変革を視野に入れる必要があるため、国家が主体性を発揮して、技術開発の枠を超えた政策ビジョンが必要になると考えられる。欧州、特にドイツでは、水素を産業の血液にする、水素で世界制覇する等の大きな戦略が示されている。

- 死の谷を越えるための開発費支援

商品化研究は、基盤研究に比較して桁違いの予算を必要とする。とくに、エネルギー分野では、社会実装を目指す際に、装置の容量や台数の大きさといった規模のメリットを生かしてコストダウンを図ることが多いが、この見通しを確認するためにはきわめて大きな研究開発投資が必要になる。米国のARPA-Eのような、死の谷を越える仕組みの強化も必要である。

## ・人材育成

水素エネルギーシステムは学際領域であるが、多方面に専門家が分散している。水素の観点から横串を通した研究開発の推進が必要であり、分野横断的人材の育成が必要である。システム評価やエネルギーモデル等の技術を俯瞰する研究開発も重要である。

## ・水素保安

これまで水素の大規模な利用は、石油精製における水素化精製、アンモニア合成、メタノール合成など一部の用途に留まっていた。カーボンニュートラルな社会を実現する上で水素の幅広い利用は不可欠と考えられるが、これまで行われてこなかった利用場面においても安全性を担保する必要がある、水素保安に関する研究開発が必要である。一方で水素を巡る内外環境が大きく変化する中で、水素保安の全体戦略とサプライチェーン全体を見渡した規制の在り方を検討する必要がある。検討内容として、円滑な水素利用を進めるためのシームレスな規制体系、技術的進展やリスクに見合った適正な規制、消費者・地域住民の安全を第一とした規制体制、国内で研究開発が完結できるようにするための環境整備等が挙げられる。

## (7) 国際比較

国・地域	フェーズ	現状	トレンド	各国の状況、評価の際に参考した根拠など
日本	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Hydrogenomics (科研費、2018～2022年)<sup>32)</sup> では、水素の学理に踏み込んだ基礎的な研究が行われている。</li> <li>● JSTのさきがけやCREST、未来社会創造事業でアンモニア合成などに関する基礎研究が推進されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● グリーン成長戦略 (2021年) に基づき創設された基金により、水素大規模サプライチェーンの構築、再エネ電力を活用した水電解による水素製造、燃料アンモニアサプライチェーンの構築、製鉄プロセスにおける水素活用プロジェクトなどが実施されている。</li> </ul>
米国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● DOEをはじめとする多く研究助成により基礎研究が精力的に展開されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 水素に対する取り組みは極めて積極的である。</li> <li>● 水素ショット (Hydrogen Shot) : 10年後に水素価格1\$/Kgの高い目標 (“1 1 1”) を掲げている。</li> <li>● Hydrogen Program PlanやH2@Scale Initiativeを通して、水素・燃料電池関連の研究開発・実証プロジェクトを推進している。</li> </ul>
欧州	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Horizon Europeをはじめとする多くのプロジェクトによって基礎研究が精力的に展開されている。</li> </ul>
	応用研究・開発	◎	↗	<p>【欧州】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● Hydrogen Roadmap Europe (2019年)、A hydrogen strategy for a climate neutral Europe (2020年) を策定し、水素が重要な役割を担うと位置付けている。</li> <li>● FCH JUで、2014～2020年に13.3億ユーロをHorizon2020から受け227のプロジェクトが行われた。</li> </ul> <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 国家水素戦略<sup>33)</sup> (2020年) : 2030年水素製造設備5～10GW。電力利用に加え、製鉄、化学産業での水素の活用や、国外との水素サプライチェーン構築を重要視している。</li> <li>● Power-to-Gas (水素、メタン) プロジェクトとして、40件以上が実施されている。例として、Hybrid power plant (Falkenhagen)、Wind Gas Hamburg (Hamburg)、Energie Park Mainz (Mainz) など。</li> </ul> <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 英国水素戦略<sup>34)</sup> (2021年) : 2030年水素製造設備5GW。風況を生かした風力発電によるグリーン水素製造や、水素の流通に既設のガス管網の活用、北海油田のCCS活用を重視している。</li> </ul>



中国	基礎研究	○	↗	●多数の国家プロジェクトによって水素・アンモニア合成の研究。
	応用研究・開発	○	↗	●中国科学技術部は、再生可能エネルギーおよび水素技術重要特別プロジェクト2019年度申請指南を発表している（期間は2018～2022年）。 ●産業からの副生水素が流通しており、水素利用のノウハウを蓄積している。
韓国	基礎研究	○	↗	●政府により大型基礎研究のファンディングが進められている。
	応用研究・開発	○	↗	●当初の燃料電池車の技術開発から発展させ、水素は「韓国がリードする初のエネルギー」をスローガンに掲げている。「水素先導国家ビジョン」を策定（2021年）。

(註1)「フェーズ」

「基礎研究」：大学・国研などでの基礎研究レベル。

「応用研究・開発」：技術開発（プロトタイプの開発含む）・量産技術のレベル。

(註2)「現状」 ※我が国の現状を基準にした評価ではなく、CRDSの調査・見解による評価。

◎：他国に比べて特に顕著な活動・成果が見えている      ○：ある程度の顕著な活動・成果が見えている

△：顕著な活動・成果が見えていない

×：特筆すべき活動・成果が見えていない

(註3)「トレンド」

↗：上昇傾向、→：現状維持、↘：下降傾向

関連する他の研究開発領域

・火力発電（環境・エネ分野 2.1.1）
・原子力発電（環境・エネ分野 2.1.2）
・太陽光発電（環境・エネ分野 2.1.3）
・風力発電（環境・エネ分野 2.1.4）
・蓄エネルギー技術（環境・エネ分野 2.2.1）
・CO <sub>2</sub> 利用（環境・エネ分野 2.2.3）
・再生可能エネルギーを利用した燃料・化成品合成技術（ナノテク・材料分野 2.1.4）

参考・引用文献

- 1) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 高温ガス炉研究開発センター「熱化学法ISプロセスとは」  
[https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/jp/faq/is\\_process.html](https://www.jaea.go.jp/04/o-arai/nhc/jp/faq/is_process.html), (2023年3月5日アクセス)。
- 2) Masaaki Kitano, et al., “Electride support boosts nitrogen dissociation over ruthenium catalyst and shifts the bottleneck in ammonia synthesis,” *Nature Communications* 6 (2015) : 6731., <https://doi.org/10.1038/ncomms7731>.
- 3) 前田哲彦「水素吸蔵合金を用いた定置用水素貯蔵」『水素エネルギーシステム』36 巻 1 号 (2011) : 35-41., [https://doi.org/10.50988/hess.36.1\\_35](https://doi.org/10.50988/hess.36.1_35).
- 4) 川崎重工業株式会社「Kawasaki Hydrogen Road」<https://www.khi.co.jp/hydrogen/>, (2023年3月5日アクセス)。
- 5) 株式会社巴商会「水素エネルギー事業：Type4容器」<http://www.tomoeshokai.co.jp/suiso/type4/>, (2023年3月5日アクセス)。
- 6) COURSE50「テクノロジー：CO<sub>2</sub>を減らす技術」<https://www.course50.com/technology/technology01/>, (2023年3月5日アクセス)。
- 7) 株式会社神戸製鋼所「Midrex社：水素を活用した直接還元製鉄法に関する共同開発契約をアルセロー

- ル・ミッタル社と締結」 [https://www.kobelco.co.jp/releases/files/20190917\\_1\\_01.pdf](https://www.kobelco.co.jp/releases/files/20190917_1_01.pdf), (2023年3月5日アクセス)。
- 8) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 低炭素社会戦略センター「LCS-FY2021-PP-13 水素直接還元製鉄法の評価と技術課題 (令和4年5月)」JST, <https://www.jst.go.jp/lcs/pdf/fy2021-pp-13.pdf>, (2023年3月5日アクセス)。
  - 9) 旭化成株式会社, 日揮ホールディングス株式会社「大規模水素製造システムを活用したグリーンケミカルプラント実証プロジェクトを開始」旭化成株式会社, <https://www.asahi-kasei.com/jp/news/2021/ze210826.html>, (2023年3月5日アクセス)。
  - 10) シーメンス・エナジー AG, 東レ株式会社「シーメンス・エナジーと東レ パートナーシップを締結: PEM型水電解を用いたグリーン水素製造により、カーボンニュートラル社会実現に貢献」東レ株式会社, <https://www.toray.co.jp/news/details/20210906111732.html>, (2023年3月5日アクセス)。
  - 11) 一般財団法人エネルギー経済研究所 (IEE Japan), サウジアラビアン・オイル・カンパニー, サウジ基礎産業公社「世界初のブルーアンモニアの輸送が開始される: 持続可能な社会に向けての新しい道」IEE Japan, <https://eneken.ieej.or.jp/press/press200927.pdf>, (2023年3月5日アクセス)。
  - 12) ENEOS 株式会社「低炭素技術研究: 水素キャリア製造技術 (Direct MCH®)」 [https://www.eneos.co.jp/company/rd/intro/low\\_carbon/dmch.html](https://www.eneos.co.jp/company/rd/intro/low_carbon/dmch.html), (2023年3月5日アクセス)。
  - 13) 東京大学大学院工学系研究科システム創成学専攻「【プレスリリース】「世界で初めて窒素ガスと水からのアンモニア合成に成功～常温常圧で世界最高の触媒活性、持続可能な社会へ～」: システム創成学専攻 芦田裕也 (D2)、西林仁昭教授ら」東京大学, <https://www.sys.t.u-tokyo.ac.jp/2019/04/%E3%80%8C%E4%B8%96%E7%95%8C%E3%81%A7%E5%88%9D%E3%82%81%E3%81%A6%E7%AA%92%E7%B4%A0%E3%82%AC%E3%82%B9%E3%81%A8%E6%B0%B4%E3%81%8B%E3%82%89%E3%81%AE%E3%82%A2%E3%83%B3%E3%83%A2%E3%83%8B%E3%82%A2%E5%90%88/>, (2023年3月5日アクセス)。
  - 14) 北海道大学工学部応用理工系学科 応用科学コース「応用化学のものづくり: 世界初! 常圧 220℃でのアンモニア電解合成」 <https://apchem.eng.hokudai.ac.jp/article/493/>, (2023年3月5日アクセス)。
  - 15) 株式会社 JERA「碧南火力発電所のアンモニア混焼実証事業における大規模混焼開始時期の前倒しについて」 [https://www.jera.co.jp/information/20220531\\_917](https://www.jera.co.jp/information/20220531_917), (2023年3月5日アクセス)。
  - 16) JHyM 日本水素ステーションネットワーク合同会社, <https://www.jhym.co.jp/>, (2023年3月9日アクセス)。
  - 17) 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)「大規模水素サプライチェーンの構築」Green Japan, Green Innovation, <https://green-innovation.nedo.go.jp/project/hydrogen-supply-chain/>, (2023年3月5日アクセス)。
  - 18) 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)「再エネ等由来の電力を活用した水電解による水素製造」Green Japan, Green Innovation, <https://green-innovation.nedo.go.jp/project/hydrogen-production-water-electrolysis-utilizing-electric-power-derived/>, (2023年3月5日アクセス)。
  - 19) 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)「燃料アンモニアサプライチェーンの構築」Green Japan, Green Innovation, <https://green-innovation.nedo.go.jp/project/building-fuel-ammonia-supply-chain/>, (2023年3月5日アクセス)。
  - 20) 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)「製鉄プロセスにおける水素活用」Green Japan, Green Innovation, <https://green-innovation.nedo.go.jp/project/utilization-hydrogen-steelmaking/>, (2023年3月5日アクセス)。
  - 21) 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)「水素社会構築技術開発事業」

[https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100096.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100096.html), (2023年3月5日アクセス)。

- 22) 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) 「燃料アンモニア利用・生産技術開発/工業炉における燃料アンモニアの燃焼技術開発」に係る実施体制の決定について」, [https://www.nedo.go.jp/koubo/AT523\\_100115.html](https://www.nedo.go.jp/koubo/AT523_100115.html), (2023年3月9日アクセス)。
- 23) 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) 「燃料電池等利用の飛躍的拡大に向けた共通課題解決型産学官連携研究開発事業」 [https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP\\_100182.html](https://www.nedo.go.jp/activities/ZZJP_100182.html), (2023年3月5日アクセス)。
- 24) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 未来社会創造事業「地球規模課題である低炭素社会の実現」領域」 JST, <https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/lowcarbon/index.html>, (2023年3月5日アクセス)。
- 25) Clean Hydrogen Partnership, <https://h2v.eu/>, (2023年3月5日アクセス)。
- 26) Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, “Hydrogen Shot,” U.S. Department of Energy (DOE), <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot>, (2023年3月5日アクセス)。
- 27) Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, “H2@Scale,” U.S. Department of Energy (DOE), <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/h2scale>, (2023年3月5日アクセス)。
- 28) U.S. Department of Energy (DOE), “Department of Energy Hydrogen Program Plan,” <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf>, (2023年3月5日アクセス)。
- 29) Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU), <https://wayback.archive-it.org/12090/20220602144358/https://www.fch.europa.eu/>, (2023年3月5日アクセス)。
- 30) H2Future, <https://www.h2future-project.eu>, (2023年3月5日アクセス)。
- 31) Djewels, <https://djewels.eu>, (2023年3月5日アクセス)。
- 32) Hydrogenomics, <https://www.hydrogenomics.jp>, (2023年3月5日アクセス)。
- 33) Federal Ministry for Economic Affairs and Energy, “The National Hydrogen Strategy,” Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz, [https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=6](https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?__blob=publicationFile&v=6), (2023年3月5日アクセス)。
- 34) Department for Business, Energy & Industrial Strategy, “Policy paper: UK hydrogen strategy,” GOV.UK, <https://www.gov.uk/government/publications/uk-hydrogen-strategy>, (2023年3月5日アクセス)。

## 2.2

産業・運輸部門のゼロ  
エミ化・炭素循環利用