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CO₂を有用な化合物に変換する技術は「2.2.3 CO₂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]

太陽光や風力といった再エネは時間、天気、季節による変動が大きく、そこから得られる電力はそのままでは貯められないため、蓄電技術によるエネルギー供給の平準化、安定化と合わせ、水素エネルギーへ変換しての利用が有望視されている。また海外の再エネを輸送する手段として、安定な化学物資である水素や水素キャリアが期待されている。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(CO₂)を発生させない。化学、製鉄等の産業や運輸の分野でのCO₂の排出削減においても水素が重要な役割を果たすことが期待されている。人類はこれまで、広く社会で水素を活用した経験が無く、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かきわめて重要である。クリーン水素は再エネ電力のみならず化石資源含め多様な一次エネルギーからもCCUS(CO₂回収・貯留)技術と組み合わせて製造可能であり、エネルギー安全保障の観点からも多角的なサプライチェーンの構築が重要になると考えられる。

[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、便宜的な呼称として図表2.2.2-1のような分類がある。他に、水素のコストダウンを目指した廃棄物を原料とする水素製造技術の研究が米国、日本等で行われている。また先進的な技術として、光触媒により電力取り出しを介さず水の分解を行う研究開発も行われている。

これらのうち実用上最も注目されているのが再エネから得られるグリーン水素である。欧州の再エネ指令(REN:Renewable Energy Directive)では、クリーンな自動車燃料のうち、グリーン水素およびグリーン水素から得られる合成燃料をRFNBO(Renewable fuels of non-biological origin)と呼び重視している。製造時のCO₂排出量の定義として改定RED IIIでは73.4%減(従来の天然ガス改質時との比較)の3.0kg-CO₂/kg-H₂以下としている¹⁾。

図表 2.2.2-1 製造方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、プロトン交換膜形 (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 (AEM 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。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。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 CO₂ の電解還元、CO₂ 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 ⁻	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 ⁺	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 ₂
	アニオン交換膜形 (AEM)	OH ⁻	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 ²⁻	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。特に褐炭は石炭化度が進んでいない若い石炭であり自然発火しやすく流通が難しいため、水素への変換による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 CO₂ を CCS (CO₂ 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 CO₂ 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 CO₂ 削減対策として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グリーン水素と同様に研究開発が進められている。

・熱化学水分解反応²⁾

原子炉 (高温ガス炉) の熱や集光型の太陽熱、製鉄排熱、高温地熱など900°C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°C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°C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、大陸内ではエネルギーのロスが少なく好ましい。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。

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°C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°C、200気圧以上と高温高圧の反応 (Fe系触媒) であるため、低温低圧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³⁾。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ちがいに大きくなり、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利用することも想定されている点が、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⁴⁾ による貯蔵も選択肢となる。アンモニアを吸蔵・貯蔵する研究開発も行われている。

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°C)	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 ₂	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 ₃	N ₂ + 3H ₂ 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、我が国では「すいそふろんていあ」船の開発例があり⁵⁾、より大型の液体水素タンカーの技術開発も行われている⁶⁾。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や軽量水素タンク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、規格で区分される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⁷⁾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あるが、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。また水素保安の観点で、経済産業省を中心に水素保安戦略の策定を進めており、同省内に水素保安ポータルサイトを開設し情報の共有を図っている⁸⁾。またアンモニアを燃焼させて利用する場合は、炉内の鋼材の窒化の可能性があり、材料面からの研究開発が必要と考えられる。

④ 【水素利用技術】

水素、アンモニアの機能は、電力への変換、燃焼による熱エネルギー、還元剤としての利用、肥料原料等と多岐にわたる。

発電分野では、燃料電池での直接利用（定置用、移動体用（FCV））が進められている。水素の貯められる性質を生かし、様々な時間スケール（秒～日～季節）での電力需給調整が期待されている。高効率の大規模発電のIGCC（Integrated coal Gasification Combined Cycle）において、改質で得られた水素を燃料電池で発電するシステムの開発も行われている⁹⁾。

燃焼による熱エネルギー利用では火力発電（「2.2.1火力発電」参照）、船舶等の移動体燃料（内燃機関、ガスタービン）、工業用加熱炉などが挙げられる。現在の化石資源の燃焼に対し、電化あるいは水素やアンモニアへの燃料転換が検討されている。これらの用途においては、炭化水素系の燃料とは燃焼の挙動が異なるため、安定した燃焼のためのバーナーの開発、燃焼条件の検討が詳細に行われるとともに、CO₂を生成しない一方で窒素酸化物（NO_x）副生の課題があり、その削減技術の開発に取り組まれている。

CCU（Carbon Dioxide Capture and Utilization、「2.2.3CO₂利用」参照）においては、CO₂を化学品、合成燃料（e-fuel）、持続可能な航空機燃料（SAF）、合成天然ガスなどに変換する上で、還元剤として水素が不可欠となっている。

製鉄は産業分野からのCO₂排出の約4割を占めており新しい還元手法が求められている。現在の主たる製造プロセスである高炉法では、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CO₂が発生する。鉄鋼業界を中心としたCOURSE50¹⁰⁾（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CO₂を減少させ、さらに20%のCO₂の回収を目標としている。さらに高炉を用いない方法として、鉄鉱石直接還元法（DRI）により鉄濃度の高い原料に変換した後、電炉や高炉（還元エネルギー少）により鉄鋼製品に仕上げる方法が検討されている。直接還元法としては、天然ガス（メタン）等の改質で得られる合成ガス（CO/H₂）により熔融させずに還元するミドレックス法が開発されている^{11),12)}。この場合、CO₂が発生するため、CO₂の回収または回収CO₂を水素還元して炭化水素に戻す対応が求められる。還元剤として純粋な水素を用いることができればCO₂の生成がなく理想的である。直接還元法と電炉の組み合わせにおいては、鉄鋼の性質を左右する含有炭素量の制御が課題の一つであり、またクリーンで安価な水素、電力の大量調達が前提となる。

【論文・特許動向】

本研究開発領域の論文および特許動向を調査した結果、以下のポイントが明らかになった。なお、分析結果の詳細は「研究開発の俯瞰報告書 論文・特許データからみる研究開発動向（2024年）」の「3.1.E2.2

水素・アンモニア」にて報告している。

- ・論文数では中国が突出しているが、米国を除き各国とも増加傾向にある。中国、インド、韓国の増加率が高い。日本は5位となっている。
- ・相対被引用度ではオーストラリアが高い。
- ・論文の企業共著率は日本が最も高い。
- ・各国間の共著率では総数が多い中国、米国との共著が多く、日本との共著は相対的に低調である。
- ・特許ファミリー件数シェアは、日本は相対的に減少し2022年時点で中国に次ぐ2位となっている。
- ・Patent Asset Indexシェアは、2022年時点で日本は中国、米国に次ぐ3位となっている。日本企業含む複数の自動車メーカーがPatent Asset Index上位オーナーに現れている。

(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10MW級大型アルカリ水電解システムを設置、稼働を開始した¹³⁾。1モジュールとして世界最大規模であり、毎時1,200Nm³（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おいて、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（NafionTM）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10MWクラスのPEM形大型水電解装置の技術開発を目指す¹⁴⁾。
- ・株式会社東芝は、PEM形水電解の電極触媒に用いる高価なIrの使用量を1/10にする技術を開発した。IrO₂のスパッタ成膜と空隙とのナノスケールの交互構造により触媒表面積を増大させ効率化する¹⁵⁾。
- ・東京ガスはオンサイト型の水素ステーションにおいて、国内で初めてAEM（アニオン交換膜）形の水電解槽を導入したと発表した¹⁶⁾。
- ・人工光合成化学プロセス技術研究組合と共同実施先の研究機関は、STH（太陽光→水素変換効率）が初めて10%を超えたと報告した¹⁷⁾。CIS太陽電池とナノロッド状の構造を持つ窒化タンタル光触媒電極とをタンデムに接続し、光触媒電極の表面を高性能の酸素発生助触媒（鉄-ニッケル-コバルト系複合酸化物）で覆う構成を開発した。酸化と還元がスムーズに連動するためとしている。

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年より行われた。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CO₂は現地でメタノール合成（CCU）およびEOR（CO₂圧入による石油増産）に用いる¹⁸⁾。またサウジアラムコとSABICアグリ・ニュートリエント・カンパニーが、世界で初めてブルー水素とアンモニア製造の第三者認証を取得し、2022年11月に韓国へ商業輸送を行った¹⁹⁾。
- ・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、DirectMCH® 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。この方法を使い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²⁰⁾。

- 産総研は水素貯蔵物質としてのギ酸から、Ir錯体をポリエチレンイミンの上に固定化した固体触媒を用い連続的に水素を取り出す技術を開発した²¹⁾。ギ酸分解は圧縮行程を経なくても高圧の水素が得られやすいという特徴がある。
- 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活発に行われている。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²²⁾。東京工業大学は、鉄と水酸化バリウムからなる触媒で100°Cでのアンモニア合成を報告している²³⁾。理化学研究所、東京大学、北海道大学は、6つのMo原子からなるクラスターを多孔質担体に安定に保持した触媒を開発し、従来より低温、低圧でのアンモニア合成を報告している²⁴⁾。
- 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²⁵⁾。
- 理化学研究所はペロブスカイト化合物を用いアンモニアを化学的に貯蔵できることを見いだした。1次元柱状構造をもつペロブスカイトが、アンモニアと反応し2次元層状構造に変化し、化学変化を伴うため腐食性のアンモニアをより安全に貯蔵できる。反応は色変化を伴いアンモニアセンサーとしての可能性も期待されるとしている²⁶⁾。

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²⁷⁾。
- FCV向け水素ステーションは徐々に増え、2024年2月時点で日本全国で162箇所となっている²⁸⁾。2022年時点の日本国内のFCV保有台数は7310台で、自動車の全保有台数（約8,200万台）に対しまだ圧倒的に小さい。大型商用車への適用が今後期待されるが、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。
- 日本や欧州で水素燃焼エンジンの研究開発が増加している。2022年に開催されたパワートレイン国際会議の第43回ウィーンモーターシンポジウム²⁹⁾では、72件の講演中、水素燃焼エンジン関係の研究発表が12件と前年より急増した。欧州での水素燃焼エンジン関連の開発キーワードは、「大型商用向け」「熱効率改善技術」「耐久性向上」「排ガス後処理技術（NOx浄化）」「低コスト化」などである。日本では、市販化を見据えてモータースポーツ分野の耐久レースにトヨタ自動車³⁰⁾が、2021年から水素燃焼エンジン車で参戦している³⁰⁾。

[注目すべき国内外のプロジェクト]

■国内

• 水素基本戦略(2023年6月6日)³¹⁾

2020年のカーボンニュートラル宣言、2022年のウクライナ侵攻の状況変化を受けて戦略が改定された。水素は国内外での製造が可能であり供給ルートの多角化はエネルギー安全保障の強化に資するものであり、また水素製造技術（水電解装置等）を国内外に展開することでわが国の国際的な貢献を高めるとしている。

2.2

産業・運輸部門のゼロエミ化・炭素循環利用

水素の導入量目標を2030年300万トン、2040年1,200万トン、2050年2,000万トンとしている。水電解装置、燃料電池に必要な希少金属の安定確保、リサイクル、代替技術についても取り組む必要があるとしている。

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

- 「大規模水素サプライチェーンの構築」³²⁾：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/Nm³、2050年に20円/Nm³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。
- 「再生可能エネルギー由来の電力を活用した水電解による水素製造」³³⁾：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」³⁴⁾：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%混焼を進展させ、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」³⁵⁾：高炉において水素を活用してCO₂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」³⁶⁾ (2014～2025年度)

再生可能エネルギーからの水素製造、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」³⁷⁾ (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」³⁸⁾ (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。

• クリーン燃料アンモニア協会³⁹⁾ (旧グリーンアンモニアコンソーシアム)

SIP「エネルギーキャリア」(2019年3月、終了)の後継枠組み。2021年1月に名称を変更。アンモニアの供給から利用までのバリューチェーン構築を目指し、技術開発・国際連携などを実施している。

• 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」⁴⁰⁾ (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。

2.2

産業・運輸部門のゼロ
エミッション・炭素循環利用

- JST 革新的GX技術創出事業 (Gtex)「水素領域」⁴¹⁾ (2023年度～)

水素社会実現のための水電解による水素製造、貯蔵から利用に関わる先進的技術の開発を行う。アカデミア等のシーズを活かして、現状のボトルネック課題を打破するための技術開発、新概念の創出、およびこれら技術の実用化に向けた研究開発を対象とする。

- JST 戦略的創造研究推進事業 (ALCA-Next)「エネルギー変換領域」⁴²⁾ (2023年度～)

ALCA-NEXTはカーボンニュートラル技術に資する5つの領域からなり、ゲームチェンジャーとなりうる技術開発を目指す個人型の研究を支援。エネルギー変換領域からは2023年度は水素エネルギーキャリアに関する要素技術開発などを採択。

■ 国外

- Mission Innovation⁴³⁾

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、そのひとつにクリーン水素 (Clean Hydrogen) のミッションが設定されている。複数の水素アプリケーションを組み合わせて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。2023年3月時点ではグローバルで33カ国88プロジェクトが登録されており、日本では福島水素エネルギー研究フィールド (FH2R) が参加している。

[米国]

- H2@Scale Initiative⁴⁴⁾ (2019年～) および Hydrogen Program Plan⁴⁵⁾ (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。

- 米国エネルギー省 (DOE) Hydrogen shot⁴⁶⁾ (2021年6月)

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

- 超党派インフラ法 (2021年11月)

クリーンな水素関連プロジェクトに5年間で95億ドルを投資する。2023年10月にそのうちの70億ドルを投じる7つのクリーン水素地域ハブ (H2Hubs) を選定したと発表した⁴⁷⁾。

- インフレ削減法 (2022年8月)

3910億ドル(3690億の表記もあり)を気候変動分野に投じる。クリーン水素製造に対しては10年間の生産税控除が受けられる(0.45 kg-CO₂/kg-H₂以下の場合で水素1kgあたり最大3ドル)。

- 国家クリーン水素戦略 (2023年6月)

2030年1,000万トン/年、2040年2,000万トン/年、2050年5,000万トン/年のクリーン水素の製造を目指す。産業・輸送・電力の分野での水素利用、コスト削減、市場立ち上げを優先事項に挙げている。

[欧州]

- 欧州の気候中立に向けた水素戦略 (2020年7月)

グリーン水素の推進を明確にしたものであり、水電解槽の導入量を2024年までに6GW (水素100万トン)、2030年までに40GW (水素1,000万トン) を目標としている。これを受けてEU各国が水素戦略を策定している。

- 欧州共通利益に適合する重要プロジェクト (IPCEI)⁴⁸⁾

「Hy2Tech」(2022年7月)で水素の製造、貯蔵、利用技術に対して最大総額54億ユーロ、さらに「HyUSE」(2022年9月)で水素インフラ(水電解)、水素の産業利用に対して最大総額52億ユーロが助成される。

- Clean Hydrogen Partnership (Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking : FCH JU)⁴⁹⁾

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。

-H2Future⁵⁰⁾: 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。

-Djewels⁵¹⁾: 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。得られる水素からグリーン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
- CO₂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。また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。水素、アンモニアの受

け入れと、それを利用する産業を集約するカーボンニュートラルポート構想が検討されている⁵²⁾。

• 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、この見直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。また、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"> ● Hydrogenomics (科研費、2018～2022年)⁵³⁾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。 ● 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。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 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のプロジェクトなどが実施されている。
米国	基礎研究	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● 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。
	応用研究・開発	◎	↗	<ul style="list-style-type: none"> ● インフレ削減法、超党派インフラ法を通し、水素の社会実装に向けた取り組みが加速している。 ● 水素ショット (Hydrogen Shot) : 10年後に水素価格1\$/Kgの高い目標 (“111”) を掲げている。 ● 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。

欧州	基礎研究	○	↗	●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。
	応用研究・開発	◎	↗	<p>【欧州】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●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。 ●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。 <p>【ドイツ】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●国家水素戦略⁵⁴⁾(2023年7月)：国家水素戦略を改定、2030年までの目標が定められている。2030年の国内水素生産能力の目標値を10GWに倍増させている。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。 ●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。 <p>【英国】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●英国水素戦略⁵⁵⁾(2021年)：2030年水素製造設備5GWの目標(のちに10GWに引き上げ)。地域特性を生かし、風力発電からのグリーン水素製造、北海油田の天然ガスとCCSを活用したブルー水素、水素の流通に既設のガス管網の活用、を挙げている。 <p>【フランス】</p> <ul style="list-style-type: none"> ●国家水素戦略(2020年9月)：水電解装置を2030年までに6.5GW導入する。グリーン水素に加え、原子力由来水素も対象としている。
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	○	↗	<ul style="list-style-type: none"> ●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

参考・引用文献

- 1) B.A.U.M. Consult Japan 「欧州でグリーン水素の定義が決定。原産地と設備転換のグリーン水素認証サービスが開始」 <https://baumconsult.co.jp/2023/07/10/%E6%AC%A7%E5%B7%9E%E3%81%A7%E3%82%B0%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%83%B3%E6%B0%B4%E7%B4%A0%E3%81%AE%E5%AE%9A%E7%BE%A9%E3%81%8C%E6%B1%BA%E5%AE%9A%E3%80%82%E5%8E%9F%E7%94%A3%E5%9C%B0%E3%81%A8%E8%A8%AD%E5%82%99/>, 2024年2月25日アクセス)。
- 2) 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, (2024年2月21日アクセス) .
- 3) 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>.
 - 4) 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.
 - 5) 川崎重工業株式会社, 「Kawasaki Hydrogen Road」, <https://www.khi.co.jp/hydrogen/>, (2024年2月21日アクセス) .
 - 6) 川崎重工業株式会社, 「大型液化水素運搬船用貨物タンクの技術開発を完了」, https://www.khi.co.jp/pressrelease/detail/20230606_1.html, (2024年2月21日アクセス) .
 - 7) 株式会社巴商会「水素エネルギー事業：Type4容器」, <https://h2energy.tomoeshokai.co.jp/business/storage/type4.html>, (2024年2月21日アクセス) .
 - 8) 経済産業省, “水素保安ポータルサイトを開設しました”, <https://www.meti.go.jp/press/2023/06/20230630002/20230630002.html>
 - 9) 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)「石炭ガス化燃料電池複合発電 (IGFC) の実証試験を開始」, https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101534.html, (2024年2月21日アクセス) .
 - 10) COURSE50, 「テクノロジー：CO₂を減らす技術」, <https://www.course50.com/technology/technology01/>, (2024年2月21日アクセス) .
 - 11) 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, (2024年2月21日アクセス) .
 - 12) 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>, (2024年2月21日アクセス) .
 - 13) 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>, (2024年2月22日アクセス) .
 - 14) 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>, (2024年2月22日アクセス) .
 - 15) 株式会社東芝, 「再生可能エネルギーから水素をつくる電気分解で、希少なイリジウムを1/10に抑えた電極の大型製造技術を確立」, <https://www.global.toshiba/jp/technology/corporate/rdc/rd/topics/22/2210-01.html>, (2024年2月21日アクセス) .
 - 16) 東京ガス株式会社, 「国内初、水素ステーションへのAEM水電解装置導入と水素製造・販売の開始」, <https://www.tokyo-gas.co.jp/news/press/20230713-02.html>, (2024年2月21日アクセス) .
 - 17) 国立研究開発法人産業技術総合研究所, 「ナノロッド状の構造を持つ赤色透明な水分解用の窒化タンタル光電極を開発」, https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2023/pr20230818/pr20230818.html, (2024年2月21日アクセス) .
 - 18) 一般財団法人エネルギー経済研究所 (IEEJapan), 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」, IEEJapan, <https://eneken.ieej.or.jp/press/press200927.pdf>, (2024年2月22日アクセス) .
 - 19) 日本貿易振興機構 (JETRO)「第三者認証取得済み低炭素アンモニアを日本へ初輸送」 <https://www>

jetro.go.jp/biznews/2023/04/44c4d3d73a0ed817.html, (2024年2月25日アクセス) .

- 20) ENEOS株式会社, 千代田化工建設株式会社, クイーンズランド工科大学「低コスト型有機ハイドライド製法 (Direct MCH®) による豪州産CO₂フリー水素サプライチェーン実証の規模拡大に成功しました!」ENEOS株式会社, https://www.eneos.co.jp/newsrelease/20211102_01_03_1170836.pdf, (2024年2月22日アクセス) .
- 21) 国立研究開発法人産業技術総合研究所, 「フロー式によるギ酸からの発電システムの開発」, https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2023/pr20231020/pr20231020.html, (2024年2月22日アクセス) .
- 22) 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/>「世界で初めて窒素ガスと水からのアンモニア合/, (2024年2月22日アクセス) .
- 23) 東京工業大学, 「鉄はレアメタルより強し 100 °Cの低温でアンモニアを合成する鉄触媒の開発に成功」, <https://www.titech.ac.jp/news/2023/066470>, (2024年2月22日アクセス) .
- 24) 理化学研究所, 「アンモニアを合成する極微金属クラスター触媒 – 窒素分子の切断とアンモニアの持続的合成を温和な条件で実現」, https://www.riken.jp/press/2024/20240122_2/index.html, (2024年2月22日アクセス) .
- 25) 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°Cでのアンモニア電解合成」, <https://apchem.eng.hokudai.ac.jp/article/493/>, (2024年2月22日アクセス) .
- 26) 理化学研究所, 「アンモニアを貯蔵するペロブスカイト化合物 – アンモニアの化学貯蔵に成功、脱炭素社会の実現に期待 –」, https://www.riken.jp/press/2023/20230710_3/index.html, (2024年2月22日アクセス) .
- 27) 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, (2024年2月22日アクセス) .
- 28) 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/>, (2024年2月22日アクセス) .
- 29) Austrian Society of Automotive Engineers, “Vienna Motor Symposium 2022”, https://wiener-motorensymposium.at/fileadmin/Media/Motorensymposium/Symposien/43_Symposium_2022/Material_Temp/Programme_en_2022.pdf, (2024年2月22日アクセス) .
- 30) トヨタ自動車株式会社, 「トヨタ、モータースポーツを通じた「水素エンジン」技術開発に挑戦」, <https://global.toyota.jp/newsroom/corporate/35209944.html>, (2024年2月22日アクセス) .
- 31) 再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議, 「水素基本戦略」経済産業省, https://www.meti.go.jp/shingikai/enecho/shoene_shinene/suiso_seisaku/pdf/20230606_2.pdf, (2024年2月22日アクセス) .
- 32) 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/>, (2024年2月22日アクセス) .
- 33) 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/>, (2024年2月22日アクセス) .
- 34) 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ャー

2.2

産業・運輸部門のゼロ
エミ化・炭素循環利用

- の構築」 Green Japan, Green Innovation, <https://green-innovation.nedo.go.jp/project/building-fuel-ammonia-supply-chain/>, (2024年2月22日アクセス) .
- 35) 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/>, (2024年2月22日アクセス) .
- 36) 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, (2024年2月22日アクセス) .
- 37) 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, (2024年2月22日アクセス) .
- 38) 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, (2023年2月22日アクセス) .
- 39) クリーン燃料アンモニア協会, 「CO₂フリーアンモニアを活用し、低炭素社会実現を目指します。」, <https://greenammonia.org/>, (2024年2月22日アクセス) .
- 40) 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>, (2024年2月22日アクセス) .
- 41) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 革新的GX技術創出事業 (Gtex) 「水素領域」, <https://www.jst.go.jp/gtex/field/hydrogen.html>, (2024年2月22日アクセス) .
- 42) 国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) 戦略的創造研究推進事業 (ALCA-Next) 「エネルギー変換・蓄エネルギー領域」, <https://www.jst.go.jp/alca/field/field1.html> (2024年10月31日アクセス) .
- 43) Clean Hydrogen Partnership, <https://h2v.eu/>, (2024年2月22日アクセス) .
- 44) Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, “H2@Scale,” U.S. Department of Energy (DOE), <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/h2scale>, (2024年2月22日アクセス) .
- 45) U.S. Department of Energy (DOE), “Department of Energy Hydrogen Program Plan”, <https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/hydrogen-program-plan-2020.pdf>, (2024年2月22日アクセス) .
- 46) Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office, “Hydrogen Shot,” U.S. Department of Energy (DOE), <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot>, (2024年2月22日アクセス) .
- 47) Office of Clean Energy Demonstrations, ” Regional Clean Hydrogen Hubs Selections for Award Negotiations”, <https://www.energy.gov/oced/regional-clean-hydrogen-hubs-selections-award-negotiations>, (2024年2月22日アクセス) .
- 48) European Commission, ”State Aid: Commission approves up to €5.4 billion of public support by fifteen Member States for an Important Project of Common European Interest in the hydrogen technology value chain”, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_4544, (2024年2月22日アクセス) .
- 49) 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) .
- 50) H2FUTURE, <https://www.h2future-project.eu>, (2024年2月22日アクセス) .
- 51) Djewels, <https://djewels.eu>, (2024年2月22日アクセス) .
- 52) 国土交通省, 「カーボンニュートラルポート」, https://www.mlit.go.jp/kowan/kowan_tk4_000057.html, (2024年2月22日アクセス) .

- 53) Hydrogenomics, <https://www.hydrogenomics.jp>, (2024年2月22日アクセス) .
- 54) Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), ,“Fortschreibung der Nationalen Wasserstoffstrategie,” https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Publikationen/Energie/the-national-hydrogen-strategy.pdf?__blob=publicationFile&v=6, (2024年2月22日アクセス) .
- 55) Department for Business, Energy & Industrial Strategy, “Policy paper: UK hydrogen strategy,” GOV.UK, <https://www.gov.uk/government/publications/uk-hydrogen-strategy>, (2024年2月22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