調査レポート

水電解技術によるグリーン水素製造に関する最近の世界動向

デジタルエンジニアリングチーム
主任コンサルタント
仮屋夏樹
デジタルエンジニアリングチーム
コンサルタント
松田彩
サイエンスソリューション部長
米田雅一

気候候変動対策への注目は世界的に高まる一方であり，各国がカーボンニュートラルの宣言を行う中，その実現に向けて「水素」が新たなエネルギーの一つとして近年著しい注目を集めている．

水素の活用が期待されている領域は多岐にわたるが，今後世界的な変動再生可能エネルギー導入拡大が予想される中，いわゆる「セクターカップリング」の手段として水電解によるグリーン水素製造が非電化領域の脱炭素化のための鍵となる．近年は特に欧米が将来の水電解市場に注目し，主導権を握るべく意欲的な投資計画を発表しており，技術開発競争は激化の様相を呈している．

本稿では，近年の劇的な環境変化の中で注目を集める「水電解でのグリーン水素製造」について国内外の動向を概観すると共に，今後の普及に向けた課題と展望について概観したい．本稿はエネルギー・資源学会誌「エネルギー・資源」2022 年 5 月号の特集への投稿内容に一部追記修正をしたものである．

1 はじめに

気候変動対策への注目は世界的に高まる一方であり，年限目標付きでカーボンニュートラルを目指す旨を発表した国は 2021 年 11 月の COP26 終了時点で 154 国に至った．日本でも 2020 年 10 月に菅総理（当時）が「2050 年カーボンニュートラル」宣言を行ったのは記憶に新しい．

各国が目指すカーボンニュートラルという高い目標に向けては，電力部門のみならず非電力部門においても脱炭素化が必須となる．そのためには，今後の再生可能エネルギー導入拡大に伴う時間的・空間的なエネルギーの偏在を，非電力部門へ結びつけ制御・活用していくセクターカップリングが重要になると考えられる．

なかでも直接電化が難しい領域で脱炭素化を図るための有力な手段として，再生可能エネルギーから水電解でグリーン水素を製造し，派生体への変換を含め原料や燃料として活用していく「Power-to-X」が挙げられる．水電解は，この Power-to-X のコア技術である．

本稿では現在注目を集める水電解及びグリーン水素製造に関する諸外国の動向を概観したい．

2 諸外国の政策動向 —カーボンニュートラルへ向けたグリーン水素への注目の高まり

2.1 主要国の動向

「はじめに」で触れた通り，カーボンニュートラルに向けてはエネルギー貯蔵・変換手段としての水素や派生体の活用が重要になると予想される．将来の水素利用の姿として，たとえば国際エネルギー機

関（IEA）の Net Zero シナリオでは 2050 年ネットゼロ実現時にクリーン水素の活用が大きく進展し，世界の水素利用量は 2020 年比約 6 倍の 500Mt に至ると予想されている [1].

日本は早くから水素エネルギーの活用を推進してきており, 2017年12月には国家戦略「水素基本戦略」を世界にさきがけ発表した．一方で同様の動きが諸外国で直ちに見られた訳ではなく，2019 年まで水素戦略を策定した国は日本, 韓国, オーストラリアに限られていた.

だがコロナ禍を経て，グリーンリカバリーの一環として 2020 年 7 月に発表された「欧州水素戦略」をはじめ，カーボンニュートラルへの注目を背景に各国が競うように水素戦略を策定しており，2021 年 10 月時点で 17 カ国が戦略策定済, 20 カ国が策定に取り組み中という状況に至った [2].

特に最近は 2050 年時点等の長期目標に留まらず，より早期の目標を掲げる例も複数見られ，クリーン水素の社会実装への各国の動きは過去に例を見ないほど活発化している.

表 1 に日欧米中のクリーン水素導入に関する目標設定の状況を示す．いずれの国も水電解やクリーン水素導入に関して 2030 年頃，あるいはそれよりも短期の具体的数値目標を設定して取り組みを進めていることが見て取れる.

表 1　各国の 2030 年までのクリーン水素関連目標の例.

国	水電解・クリーン水素導入目標
日本 [3]	**クリーン水素供給量**： 2030 年に 42 万トンを超える量 **コスト目標：** CIF 価格 30 円/Nm3
欧州 [4]	**水電解導入量**： 2024 年迄に 6GW，2030 年迄に域内外で各 40GW **グリーン水素導入量**： 2024 年迄に 100 万トン，2030 年迄に 1000 万トン [4] 2022 年 5 月に 2030 年 2,000 万トン導入に上方修正 [5] **コスト目標：※** 2030 年€1.8/kg（※2021 年 11 月に追加発表）
米国 [6]	**クリーン水素導入量**： 2030 年迄に 1000 万トン※2022 年 9 月発表 **コスト目標：** 2030 年$1/kg-H2
中国 [7]	**グリーン水素導入量：** 2025 年頃迄に年 10 万トン-20 万トン

特に目を引くのは欧州の一連の意欲的な目標設定である.「欧州水素戦略」は 2030 年に域内外それぞれで 40GW の水電解装置とグリーン水素 1000 万トン導入を掲げている.

これらの目標設定に加え，欧州では利用側でのグリーン水素活用促進のための制度設計も推進している．2021 年 7 月発表の政策パッケージ”Fit for 55”では，再生可能エネルギー司令改正案として 2030 年に産業部門での水素利用量の半分をグリーン水素とする目標や，運輸部門での非バイオ由来再生可能燃料（RFNBO）導入目標が追加された.

直近では, 5 月に発表された”REPowerEU”において, ロシアのウクライナ侵攻を背景にエネルギー安全保障の観点からロシアからのガス輸入を段階的に削減する計画が発表され，代替手段の一つとしてグリーン水素の製造・輸入を加速，域外からの輸入・域内での製造合わせて 2000 万トンのグリーン水素を導入するという新目標が提示された [5]. 化石資源高騰による不安定なエネルギー情勢のなかだが，欧州は依然グリーン水素への意欲的な姿勢を示している.

水電解やグリーン水素製造に関しては，再生可能エネルギーの導入状況などを背景に従来欧州の政策・取り組みが目立つ状況であったが，ここ 1 年程度で米国・中国といった国々もグリーン水素への強い関心を示している.

米国は従来エネルギー政策において自国の資源活用という観点から水素エネルギーを一つのオプションとしてきた. だが 2020 年の”Hydrogen program plan”策定を皮切りに，近年急速に水素エネルギーへの取り組みを強化している.

2021 年に発表された“Hydrogen Shot”プロジェクト [6]では「今後 10 年で（従来の天然ガス改質での水素製造相当の）クリーン水素製造コスト$1/kg を実現する」という意欲的目標を設定, 実現に向け水電解はじめ水素製造技術の開発を強く推進する姿勢を打ち出した.

2022 年 9 月に発表した，“National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap”では，「2030 年 1000 万トン，2040 年 2000 万トン，2050 年 5000 万トン」のクリー

ン水素需要シナリオを含むものであり，この実現に向けたキー戦略の一つにクリーン水素のコスト低減を位置付けて，R&D や大規模実証，制度整備を推進する方針を明らかにしている．

中国も近年水素・燃料電池分野の進展が著しい国だが，当初は 2016 年発表の「新エネルギー車技術発展ロードマップ」に代表されるように，自国の産業振興の観点から車載用燃料電池技術の開発に注力していた．

だがその後 2021 年には同国も「2030 年カーボンピークアウト・2060 年カーボンニュートラル」の目標を発表し，2022 年 3 月には，「水素産業発展中長期計画（2021-2035 年）」を発表，2025 年までにグリーン水素を年間 10 万トン～20 万トン導入するという具体的目標を発表するに至った [7]．

中国は特に西部・北部において太陽光や風力などの再生可能エネルギーポテンシャルを豊富に有する国である．

一方でこれらの地域は主要なエネルギー需要地と距離があり，結果「捨電」が発生している．同計画では再生可能エネルギーに富んだ地域で水素製造モデルを展開し，モデル規模を拡大しながら季節レベルでの長期エネルギー貯蔵と電力網のピーク調整を図ることを想定している．

以上をまとめる．水電解やグリーン水素に関しては従来欧州勢の動きが専ら目立つところだったが，ここ数年で欧州に限らず世界各国が自国の政策において，グリーン水素導入に強く取り組む姿勢を打ち出している．

この背景には，将来のカーボンニュートラル下でのグリーン水素の役割への一定の期待があると考えられるが，理由はそれだけではない．特に欧米の取り組みからは，彼らがグリーン水素の大量製造には不可欠な水電解をキー技術とみなし，戦略的に自国の技術を育成し産業を振興することで，将来期待される新たな市場で主導権を握ろうとする姿勢がうかがえる．

これらの目標実現に向けた具体的な取り組みで特に近年動きの目覚ましいのがグローバルなグリーン水素サプライチェーン構築に向けた取り組みと，コアとなる水電解技術の研究開発である．次章以降でこれらについて紹介したい．

3 「再エネ資源国」の動向 —水素貿易の萌芽

水電解によるグリーン水素製造の大きな特長は水素の製造に伴う CO_2 排出量を化石資源由来の水素に比べて大幅に低減できることだが，一方でその製造コストは化石資源由来水素に比べてコスト高なのが現状である．

水電解での水素製造コストにおいては電力コストが占める割合が特に大きく，安価な電力の調達が水素製造コストの低減には必須と言える．また，現状水電解市場は黎明期にあり，設備コストは十分廉価とは言い難い．そのため水素製造コストへの設備コストの寄与抑制には設備コストの低減に加え，設備利用率を高くすることが必要である．

設備利用率を高く保ちつつ，投入する電力を安価に調達できることが水電解水素製造に好ましい条件といえるが，特に再生可能エネルギーによるグリーン水素製造を考えた場合，これらの条件を満たす地域は自然条件から限られる．

IEA は一定の仮定のもとで将来のグリーン水素製造コストを地域別に試算しているが，$2/kg を下回る水素製造コストを実現できる地域は世界的にも中東，アフリカ，南米，オーストラリア，中国，インド，南欧等に偏在している [8]．

電化の難しい産業用途，あるいは火力発電の燃料用等に水素を本格利用するには大量かつ安定な水素供給を安価に実現することが必要と考えられるが，特に経済面ではパリティ条件として日本の水素基本戦略の長期目標である 20 円/Nm3 を下回る水準を必要とする業種も複数存在する [9]．

そのため，脱炭素化に向けてこれらの領域でグリーン水素の大量利用を図る場合には，安価な再生可能エネルギー電力を有する「再エネ資源国」へのアクセスが非常に重要と考えられる．前節で見たような各国のグリーン水素導入の活発化に伴って，こうした「再エネ資源国」からの水素調達に向けた各国の競争が既に始まりつつある．

図 1 に国際再生可能エネルギー機関（IRENA）による，現在（2021 年 5 月）までに発表されている計画に基づいた世界の水素貿易ルートを示す．既に前述の再エネ資源国が水素輸出国（地図中白丸）としてさまざまな国へ水素輸出を計画しており，同時に日本に限らず，ドイツ，オランダ，韓国，シンガポール

など様々な国が水素輸入を検討していることが見て取れる（地図中二重黒丸が輸入国）．表 2 には「再エネ資源国」のグリーン水素関連目標例を示した．各国が新たな輸出資源としてのグリーン水素に着目し，強力に推進していることが見て取れる．

表 2　各国の 2030 年までのクリーン水素関連目標の例

国	水電解・クリーン水素導入目標
オーストラリア [11]	**コスト目標：** A$2/kg
チリ [12]	**水電解導入量**： 2025 年までに 5GW，2030 年までに 25GW 導入 **コスト目標**： 2030 年$1.5/kg-H2
アラブ首長国連邦 [13]	**輸出目標：** 日本を含む主要な輸出市場で 25%の市場シェア

水素の国際的な大規模調達を推進するため，輸入国側が政策的に導入支援や補助スキーム構築を進める例も現れている．たとえば欧州では水素戦略を受けて EU・ノルウェーでのクリーン水素バリューチェーンを構築すべく，欧州共通のプロジェクト集合体「IPCEI」の枠組みにおいて水素を支援することを 2020 年 12 月に決定した．IPCEI プロジェクトでは，EU 共通の利益・経済振興にかなう複数国の取り組みへの公的支援がなされており，各国の協調を促している．プロジェクトではたとえば北海の 10GW 級の洋上風力発電から水電解で製造した水素をパイプラインでドイツの需要地へ供給する AquaVentus プロジェクトや，太陽光・風力に富むスペインやイタリアで製造したグリーン水素を有機ハイドライド化してオランダ，ドイツ，フランスへ供給する Green Crane プロジェクトなどが計画されている．

また，ドイツは 2021 年に，9 億€を投入して官民一体での水素輸入への支援スキーム「H2Global」の構築を発表した [14]．同スキームでは，新たに設立する Hint.co（Hydrogen Intermediary Network Company）が国外で製造されたグリーン水素（アンモニアやメタノール等の派生体も対象）を固定価格で買い取り，需要家に販売する．供給側から 10 年固定価格で買取り，需要側への販売は 1 年契約とするルールで，供給側・需要側双方でオークションを行い買取額・販売額を決定し，その差額を補填する．これにより公的支援での補填額を抑制可能とし，今後は特に水電解装置容量が 100MW 程度の大型プロジェクトを複数支援する計画である．

以上をまとめる．グリーン水素の大量・安価な製造が可能な地域は世界的に見ても偏在するため，各国が将来の水素貿易に向けた「資源」確保を急速に進めており，新たな資源獲得競争とでも言うべき状況が生まれつつある．域内でグリーン水素製造を推進してきた欧州も例外でなく，最近は水素輸入も積極的に支援して，導入加速を図っている．

日本は国際サプライチェーン構築にいち早く取り組んできたが，今後カーボンニュートラルに向けて世界的に多様な分野での水素利用が必要となった場合は，水素を他国に劣後せずに安価に調達することが重要になる．今後は国としての調達戦略が一層重要さを増すと考えられる．

4　諸外国の水電解技術の研究開発動向

グリーン水素の大幅コスト低減に向けては安価な電力の調達がきわめて重要であるが，同時に設備に起因するコストの抑制も求められる．前節の通り，そのためには「水電解装置自体のコスト低減」と合わせて「高い設備利用率」が必要であり，これらを実現していくための技術開発が今後一層必要になると予想される．本節では，これらの課題に対する最近の各国・企業の取り組み事例を挙げながら，水電解技術に関する研究開発の動向を紹介したい．

装置のコスト低減のためには，心臓部分にあたるセルスタックと，整流器やポンプなどの周辺設備の双方において改良を進める必要がある．近年は特に，主要国・プレーヤーの戦略において「量産化によるセルスタックのコスト低減」と「水電解装置のモジュール化，及びモジュールの結合による大容量化を通じた周辺設備のコスト低減」という，スケールの拡大によってコストダウンを図る方向性が強まってきている [15]．

「量産化」については，各国が国家プロジェクトを立ち上げ技術開発を推進する姿勢を見せている．たとえばドイツは自国の水素戦略で 2030 年までに国内

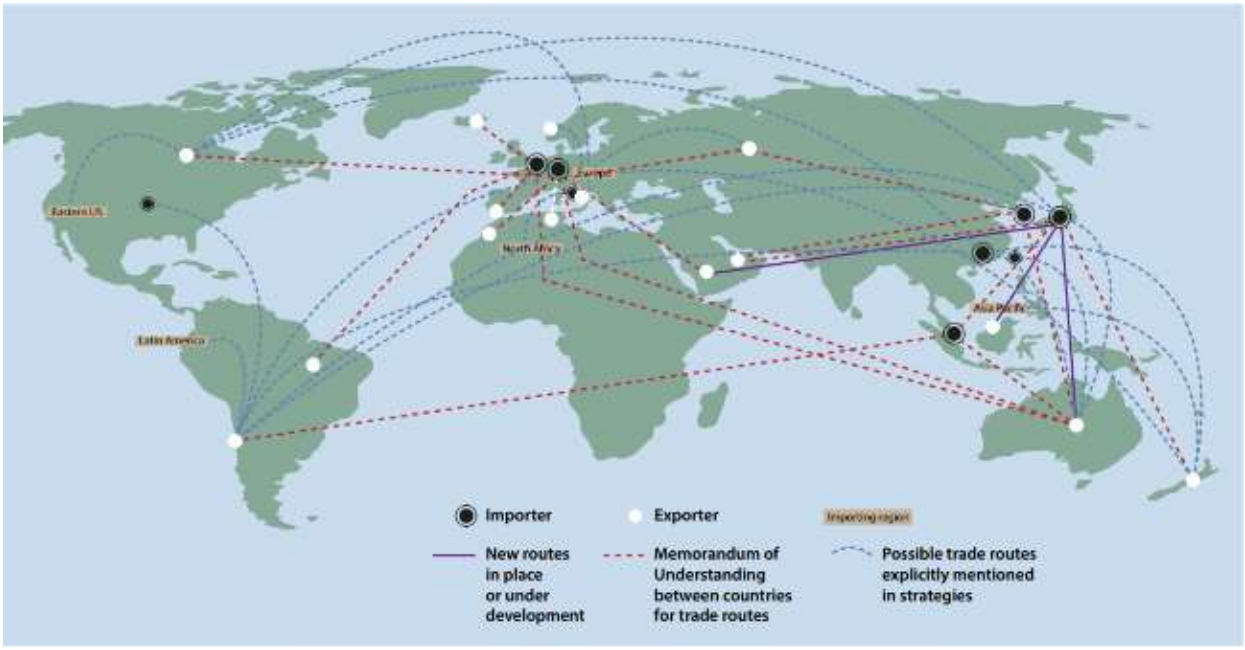

図 1　想定される世界の水素貿易ルート（2021 年 5 月）[10)]

で 5GW，2040 年 10GW 規模の水電解装置導入を目指す目標を掲げているが，この実現に向けて 2021 年にドイツ教育・研究省（BMBF）が量産技術開発プロジェクト「H2Giga」の立ち上げを発表した [16)]．個のプロジェクトには主要水電解装置メーカーである Thyssenkrupp（アルカリ形）や Siemens（PEM 形）などをはじめ，112 の企業・研究機関が参画して自動化による GW 級の年間生産能力を持った水電解装置工場の実現を目指す．

前々章で触れた欧州の「REPowerEU」ではグリーン水素導入量を 2000 万トンとする目標を掲げているが，このうち半分の 1000 万トンを生きないで製造する計画である．しかしこの実現には 90～100GW の水電解装置が必要とされる．欧州委員会は 5 月に 20 社の民間企業と共同で，域内の水電解装置生産能力を 2025 年までに現在の 10 倍程度（約 17.5GW/年）にするという，共同声明を発表している．

米国でも国立研究所合同での水電解の R&D コンソーシアム「H2NEW」が 2020 年に立ち上がり，Hydrogen shot で掲げられた水素製造コスト目標 2030 年$1/kg と，中間目標である 2025 年$2/kg という目標の達成に向けた研究開発が行われている．特に，耐久性や性能の向上，評価・解析といったテーマに加え，「製造技術・スケールアップ・インテグレーション」がテーマアップされており，Roll to Roll プロセスによる PEM 形水電解装置の電極大量製造技術などの研究開発がなされている点は注目される．関連して，DOE プロジェクトでは既に水電解装置の大量製造に向けて 3M が同社のナノ構造触媒を大量製造する技術を開発しており，GW/年の量産規模を実現する計画である．3M は燃料電池向けに触媒・アイオノマー等の材料を開発してきたが近年水電解への取り組みも進めている．

「モジュール化」に関しても主要メーカーは着実に取り組みを進め，システムのスケールアップを図っている．ドイツの Thyssenkrupp は，標準化された複数のスタックからなる 20MW のモジュールを既に開発しており，これを組み合わせて数百 MW-GW のシステムを提供する計画である．モジュール化により補機を簡略化，コストダウン効果が得られるとする．既にドイツや中東での複数のプロジェクトで数百 MW-GW のシステム導入が発表されており，これらは 2025 年頃には運転開始する予定である．量産技術に関しても同社は重要視しており，2021 年 10 月には生産規模を 5GW/年に拡大する意欲的な計画を発表した．

Siemens も既に開発済みの 17.5MW のモジュールを基本単位として，2023 年以降の大量生産を計画する．特に同社が強みを持つデジタルエンジニアリング技術を活用して，プラント設計の標準化やモジュール化を進めている．また，装置の導入に関しても 20 年代前半には欧州や中東で数 MW から数百 MW，

2020 年代後半から 30 年頃にかけてチリやオーストラリアで GW 級の装置導入の計画がある．量産技術についても前述の H2Giga に参画し，今後は数 GW/年規模の自動化された「Gigafactory」建設を計画する．

特にグリーン水素製造において設備利用率の向上を図るには，従来の定常的な負荷下での水電解装置の利用とは異なる新たな運用形式も生じうる．これらに対応するため，現実的に想定される投入電力の時間変動を念頭に置いての装置の負荷追従性や耐久性の向上，部分負荷時の効率向上などの技術開発が更に重要となると考えられる．

そのためには材料の開発，運転時の内部現象のメカニズム解明といった基礎研究から，セルスタックでの性能評価や解析，実条件下での装置の実証などを一体的に進める枠組みも効果的だと考えられる．実際，たとえばオランダでは研究開発コーディネートを行う機関である ISPT，化学メーカーの Nouryon，大学らが協力しながら，電極の気泡制御やセル設計の改良といった基礎研究から MW レベルの実証研究，GW スケールの装置のコンセプト設計といった多様なテーマで複数のプロジェクトを有機的に推進する一気通貫の取り組みを行っている点は興味深い．

以上をまとめる．水電解装置のコスト低減に向けて各国・企業が技術開発に精力的に取り組んでいる．グリーン水素の利用拡大期を見据えると，鍵となるのはセルスタック量産技術の構築とモジュール化による規模の拡大を通じた水電解装置のコスト低減，また変動再生可能エネルギーの活用下での設備利用率向上を実現するための要素技術開発とシステム検討と考えられる．

5 おわりに

本稿では近年注目を集める水電解及びグリーン水素製造に関する諸外国の動向を概観した．

各章・節の末尾にその要約は記したので，紙幅の関係で十分に触れられなかった論点について最後に簡単に触れることとする．

① サプライチェーンとしての最適システム構築

今回水素製造部分を中心に諸外国の動向を紹介したが，実際にサプライチェーンを構築する際には製造部分の他，その後の輸送・貯蔵から利用まで含めて最適な姿を模索する必要がある．特に日本国内の再生可能エネルギー導入量拡大には，再エネ資源国での大規模製造の姿とは異なる分散型エネルギーシステムによる地産地消も必要と考えられ，エネルギー事情に応じた最適システムの検討が必要である．

② 蓄積された技術・ノウハウの活用

各国で激化する水電解技術開発の競争において日本が今後も競争力を保つには，既に日本が持つ強みの活用が重要だと考えられる．とりわけ燃料電池技術・関連素材技術には，日本は定置用・車載用とも世界にさきがけ燃料電池を市場投入した実績があり，世界的に見て優れた技術がある．燃料電池での発電と水電解での水素製造は反応として対の関係にあり，部材・セルスタック・製造などで技術・ノウハウの活用が可能とも期待される．一層のシナジー発揮とその機能的推進のための枠組みが必要と考えられる．

③ グリーン水素の普及に向けたルール作り

水素は利用時に CO_2 を排出しないが，脱炭素化に向けては製造から輸送・貯蔵等も含め，水素導入による削減効果の適切な把握が必要である．そのための国際基準・ルール整備は水素の社会的受容性において決定的に重要である．

現在国際的な枠組下で CO_2 排出量評価のための方法論が議論されている [17]ところだが，とりわけ欧州は世界に先行して低排出なクリーン水素の「定義・認証」について検討を深めており，議論をリードする構えである．将来の水素輸入国である日本にとって一連の議論は大きな意味を持つ．引き続き議論への参加・適切な情報発信が求められる．

最後に，脱炭素化への世界的な目まぐるしい動きの中で，我が国がその状況を冷静に見据えながらも後れを取ることなく，低炭素エネルギーの確保と自国技術の輸出促進の双方に向けた取り組みが一層加速されることを期待したい．

謝辞

図 1 は国際再生可能エネルギー機関（IRENA）の文献 [10]から引用した．IRENA の第三者利用許可に謝意を示す．

引 用 文 献

1) IEA, “Net zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector”.
2) IEA, “Global Hydrogen Review 2021”.
3) 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」（令和 3 年 6 月 18 日
4) European Commission, “A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe”. (8.7.2020)
5) European Commission, “REPowerEU: A plan to rapidly reduce dependence on Russian fossil fuels and fast forward the green transition”. (18.5.2022)
6) Department of Energy “Hydrogen shot”. https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-shot
7)国家発展改革委員会「氢能产业发展中长期规（2021-2035 年）
8) IEA, “The Future of Hydrogen”
9) 経済産業省「今後の水素政策の課題と対応の方向性中間整理（案）」（2021 年 3 月 25 日）
10) IRENA, “Green Hydrogen Supply: A Guide to Policy Making”.
11) COAG Energy Council “Australia’s National Hydrogen Strategy”.(Nov 2019)
12) Ministerio de Energia “ESTRATEGIA NACIONAL DE HIDRÓGENO VERDE”.(Nov 2020)
13) Emirates News Agency http://www.wam.ae/en/details/1395302988986
14) H2Global “H2Global Shaping the global energy transition
15) IRENA, “Green Hydrogen Cost Reduction: SCALING UP ELECTROLYSERS TO MEET THE 1.5°C CLIMATE GOAL”.
16) BMBF, “H2Giga: Serienfertigung”. https://www.wasserstoffleitprojekte.de/leitprojekte/h2giga
17) IPHE, “Methodology for Determining the Greenhouse Gas Emissions Associated With the Production of Hydrogen”