



<Techno Scope 連動記事>

地球温暖化防止のための水素技術に関する今後の展望

Hydrogen Technology for Sustainable Society -Current Status and Future Perspectives-

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
エネルギーシステム・水素ユニット フェロー

矢部 彰
Akira Yabe

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
エネルギーシステム・水素ユニット ユニット長

仁木 栄
Shigeru Niki

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
エネルギーシステム・水素ユニット 研究員

佐伯祐志
Hiroshi Saeki

1 地球温暖化対策技術としての水素技術と水素技術の全体俯瞰

水素の持つ地球温暖化対策技術としての特徴は、利用時にCO₂を出さないこと。つまり、水素発電など燃焼時にCO₂を出さないこと。燃料電池など、酸素と反応してCO₂を出さずに電力を発生できること。また、還元剤として水素を利用するなど、産業利用においてもCO₂排出削減が可能であることが挙げられる。また、製造する時にCO₂フリーで製造可能であることも重要である。つまり、再生可能エネルギーから水

電解で水素発生が出来ること。また、化石燃料から水素を取り出し、出てくるCO₂を地中貯留や化成品の合成に利用して固定化することにより、CO₂フリーで製造可能であることも特徴となる。さらに長距離大量輸送・貯蔵が可能であることも大きな特徴である。つまり、パイプラインや高压タンクで、また、液化水素として長距離大量輸送・長期間貯蔵が可能であること。また、アンモニアや有機ハイドライドなどの他物質に変換して輸送・貯蔵が可能であることも特徴として挙げられる。図1に地球温暖化対策技術としての全体像を示すが、2050年にカーボンニュートラルの実現という、温暖化効

CO₂フリーで水素は製造可能

- 再生エネルギーで水電解して水素発生
- 化石燃料から水素を取り出し、出てくるCO₂を固定化（地中貯留・利用）

水素は輸送・貯蔵ができる

- 水素として長距離大量輸送・長期間貯蔵が可能（パイプライン、高压タンク、液化輸送）
- 他物質に変換して長距離大量輸送・長期間貯蔵が可能（アンモニア、有機ハイドライド）

水素は利用時にCO₂を出さない

- 燃焼時にCO₂を出さない（水素発電など）
- 酸素と反応して電力を発生（燃料電池など）
- 還元剤として水素を利用するなど、産業利用においてもCO₂排出削減が可能。

CO₂排出をゼロにするためには、水素は重要技術の一つ。

図1 地球温暖化対策としての水素技術

果ガスの実質排出量をゼロにするためには、水素は最も重要な技術の一つである。

水素技術を全体俯瞰してみると、図2のように、大きく製造技術、輸送・貯蔵技術、利用技術の3つの技術分野に分けられる。CO₂フリー水素製造は、CO₂回収・利用・貯蔵技術(CCUS)を活用して化石燃料から製造する技術と、水電解等を使用し、再生可能エネルギーから製造する技術からなる。また、輸送・貯蔵技術は、パイプラインや圧縮空気や液体水素の形での輸送・貯蔵と、水素を有機ハイドライド、アンモニア等の他物質の形に変換して、輸送・貯蔵する技術がある。CO₂フリー水素のコスト低減には、この水素製造技術と水素輸送・貯蔵技術の両方が重要である。さらに、水素利用技術は、水素発電等のエネルギー転換技術、燃料電池自動車等の運輸技術、製鉄、燃料・化学品製造、石油精製などの産業技術、また、業務・家庭用の定置用燃料電池技術などがある。水素利用技術は、従来の技術を水素の利用で代替する技術であり、従来の技術のコストから、求められる水素のコストが決められる。水素発電の場合は、LNG発電を代替する技術、水素還元製鉄の場合は、コークスやCOガスによる鉄鉱石の還元代替技術である。

図3に、水素コスト低減に向けた方向性を示す。国の水素基本戦略では、水素でLNG火力発電を代替することを目指して、将来の目指すべき姿として、20円/Nm³のコストを目標としている。また、その途中の2030年には、30円/Nm³を目指しており、現状100円/Nm³である水素コストを、将来

的には1/5以下にすることを目指している。さらに、水素製造方法によるコストの違いも大きく、水素製造コストの低減が重要な課題となる。副生水素や化石燃料改質は確立された技術であり、目標達成には低コストCCSの実現が必要である。また、再エネ+水電解は、CCSによらずコスト削減が可能であるが、革新的技術開発が必要である。他の方法としては、海外の低コスト水素の輸入があり、そのためには、低コスト輸送技術開発が必要である。

2 水素に関する各国の政策

各国の政策は、図4に示すように、日本が世界初の水素国家戦略として「水素基本戦略」を2017年に策定した。日本に続く形で、フランス・韓国が、また、2020年に入ってドイツ、EU等でも前倒して戦略が発表されている。コロナウィルスの影響もあり、大幅な経済活動の低下が生じているが、その回復を、「グリーンリカバリー」と呼ばれる環境問題の回復を目指す投資を促進する方法で実現しようとしており、水素への積極的な投資も含まれており、活発な最新動向となっている。

また、IEAによる水素レポートが、日本で開催されたG20(2019年6月)にあわせて、水素の規模拡大に向けた7つの重要なレコメンデーションを含んだ「The Future of Hydrogen」として発表された。

具体的な推奨される方策として、(1) 長期のエネルギー戦略における水素の役割を確立すること。(2) クリーン水素に

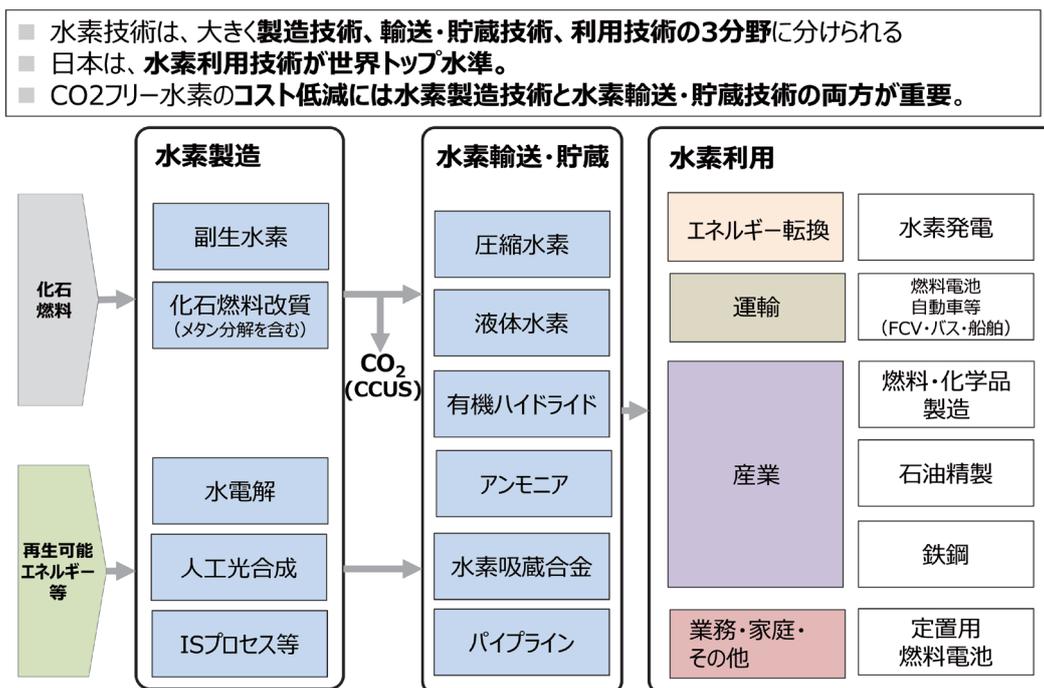


図2 水素技術の全体俯瞰

- ① 副生水素や化石燃料改質は**確立された技術**であり、目標達成には**低コストCCS実現が必要**
- ② **再エネ+水電解**は、CCSによらず**コスト削減が可能** → **革新的技術開発が必要**
- ③ 他の道としては、**海外の低コスト水素の輸入**（**低コスト輸送技術開発が必要**）がある

水素基本戦略のシナリオ 1)

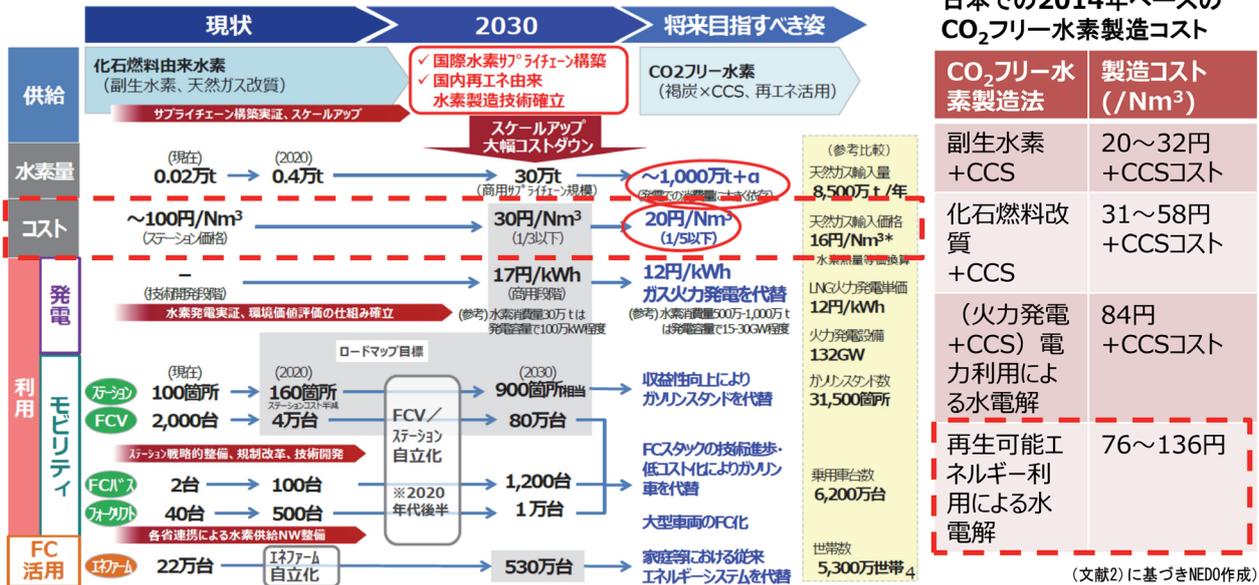


図3 水素コスト低減に向けた方向性



図4 水素に関する各国政策

対する商業的な需要を喚起すること。(3) 先発者の投資リスクへの対応をすること。(4) コスト削減をもたらすR&Dを支援すること。(5) 不必要な規制上の障壁の撤廃および基準の整合化をすること。(6) 国際的な連携と進捗の把握を行うこと。(7) 今後10年にわたって、機運をさらに盛り上げてい

くための4つの機会へのフォーカス。つまり、既存の多くの港を低コストで低炭素な水素のハブに変化させること。クリーンな水素供給を促進するため既存のガスインフラを活用すること。燃料電池車により競争力を持たせるため、輸送手段、貨物運送、輸送経路への支援をすること。さらに、国際的

な水素貿易を始動させるための航路を確立することである。

3 CO₂フリー水素製造技術の概要

CO₂フリー水素製造技術の概要を図5に示す。再エネ電力を用いた水電解等によるCO₂排出量が少ない水素製造技術の開発・実証が国内外で精力的に推進されている。

水電解水素製造技術の概要を図6に示すが、水電解水素製造には、現状5kWh/Nm³の電力が必要であり、運転費に相当している。理論値3.5 kWh/Nm³に向け、必要電力量を低減する技術開発が行われている。また、水電解装置のシステムコストの開発目標値は、固定費として8.5円/Nm³である。これは、水素燃料電池・戦略ロードマップ³⁾より、水電解装置が22万円/Nm³/hで、設備利用率30%、稼働年数10年を仮

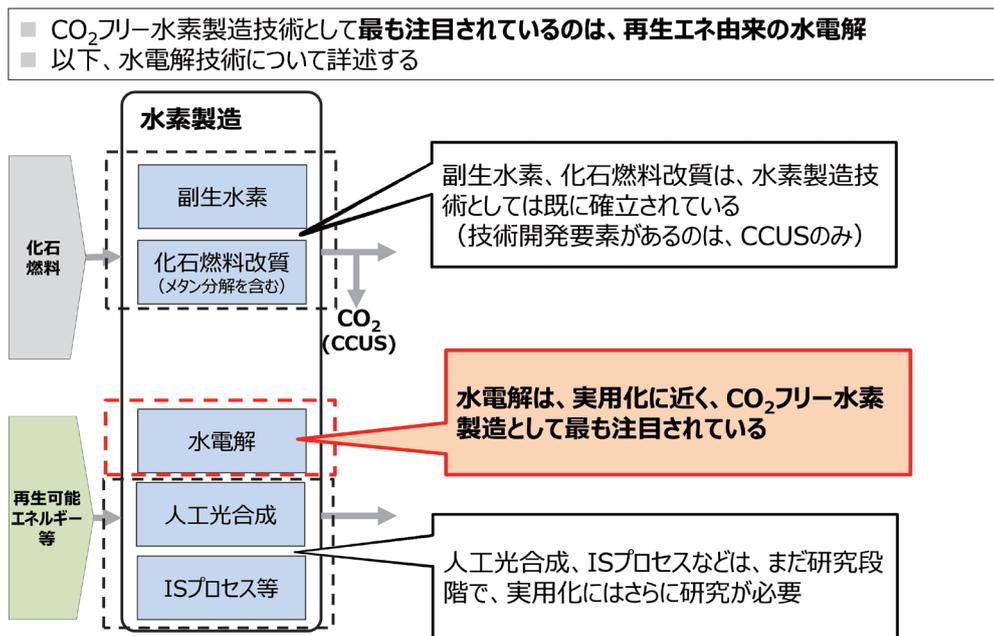


図5 CO₂フリー水素製造技術の概要

- 再生可能エネルギー由来電力を用いた水電解等による、CO₂フリー水素製造技術の開発・実証が国内外で推進されている
- 水電解水素製造には、**現状5kWh/ Nm³の電力が必要(運転費に相当)**。理論値3.5 kWh/ Nm³に向け、**必要電力量を低減する技術開発**が行われている。
- 水電解装置のシステムコストの開発目標値は、**固定費は8.5円/ Nm³***であるが、**現状は約2倍。触媒の改善、高圧化、高安定性能化などで、コスト低減を図る技術開発**が行われている。
※ 22万円/Nm³/h³⁾で、設備利用率30%、稼働年数10年を仮定し試算。
- CO₂フリー電力のコストに大きく影響を受けるため、**水素コストには、大きな地域差が生じる**
 - 例えば、安い再生可能エネルギー由来電力のもと、中東では16~41円/Nm³、欧州では30~39円/Nm³という水素製造コスト試算⁴⁾もなされている



再生可能エネルギーを利用した世界最大級の水素製造施設「FH2R」完成⁵⁾
 ※1スタックサイズで10MW=世界最大規模
 2000Nm³/h規模で、高稼働率と低電力化を目指す

図6 水電解技術開発の概要

定し試算したものである。しかしながら、現状は約2倍であり、触媒の改善、高圧化、高安定性能化などで、コスト低減を図る技術開発が行われている。

CO₂フリー電力のコストに大きく影響を受けるため、水素コストには、大きな地域差が生じる。例えば、安い再生可能エネルギー由来電力のもと、中東では16~41円/Nm³、欧州では30~39円/Nm³という水素製造コスト試算も、最近、IEA等でなされている⁶⁾。

また、アルカリ型水電解、固体高分子型水電解が大規模実証され、福島に、再生可能エネルギーを利用した世界最大級の水素製造施設「FH2R」が完成している。この水電解装置は、アルカリ型水電解装置で、1スタックサイズで10MWと世界最大規模であり、2000Nm³/h規模で、高稼働率と低電力化を目指している。さらに、革新型水電解として、固体酸化物型水電解やアニオン交換膜型水電解なども研究されている。

4 水素の輸送・貯蔵技術の概要

水素輸送・貯蔵技術の概要を、図7に示す。水素発電などのように大量に水素を利用するためには、国内の再生可能エネルギーによる水素製造だけではまかないきれないことから、海外の低コストなCO₂フリー水素を大量に輸送してることが重要になる。また、クリーン水素の国際的なサプライチェーンを構築するには、水素の長距離輸送技術が極めて重要である。日本は、長距離海上輸送に係る技術開発・実証を

世界に先駆けて実施しており、国際水素サプライチェーン構築を先導していると言うことが出来る。また、そのための水素キャリアとして、液体水素、有機ヒドライド、アンモニアを活用する方法が、積極的に研究開発されている。

図8に、水素の輸送・貯蔵に関する取り組みと水素キャリアの特徴を示すが、液体水素、有機ヒドライド、アンモニアの3種類の水素キャリアは、それぞれ、特徴と課題がある。具体的には、液体水素は、従来、輸出することが出来なかった豪州の粉状の褐炭を改質し、CO₂はCCSで地中貯留し、生じた水素を液化して、輸送する技術開発を行っている。また、有機ヒドライドは、ブルネイでガス改質水素を製造し、CO₂はCCSで地中貯留し、生じた水素を有機ヒドライドであるメチルシクロヘキサンに変換して、長距離輸送し、利用地で熱を供給することにより、水素とトルエンに分離し、利用する研究開発が行われている。さらに、アンモニアは、サウジアラビア等の油田地帯で、改質して水素を製造し、CO₂は地中貯留し、水素をアンモニアの形に変換して、長距離輸送し、アンモニアの形で燃焼させて、CO₂を排出しないエネルギーシステムを実現する研究開発が行われている。

いずれの水素キャリア技術も、輸送効率の向上と輸送コストの低減という大きな課題を抱えており、積極的な技術開発がなされている。さらに、ノルウェーなどの再生可能エネルギーの多い国、また、地盤が強固でCCSを積極的に推進している国も、水素輸出に対する関心が高まっている。

- 海外の低コストなCO₂フリー水素の輸入のため、**長距離大量輸送技術**が注目されている
- 以下、主として水素の長距離大量輸送技術について詳述する

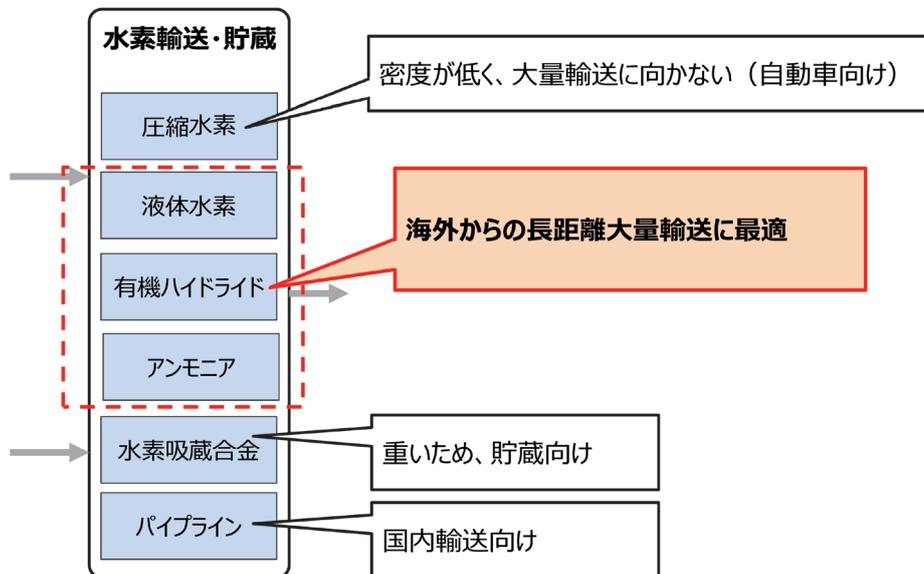


図7 水素の輸送・貯蔵技術概要

5 水素利用技術の概要と全体動向

水素利用技術の概要を図9に示すが、水素需要は2050年までに、エネルギー転換、運輸、産業、業務・家庭・その他の4分野で大幅な需要拡大が見込まれている。具体的には、水素発電などのエネルギー転換分野、燃料電池を活用する乗用

車、バス、トラック、船舶などの運輸分野、また、製鉄や石油精製、燃料・化学品製造などの産業利用分野、さらには、業務・家庭用の発電装置、熱供給装置としての役割を果たす定置用燃料電池分野である。なお、水素利用技術に関しては、需要の拡大が見込まれる4分野それぞれに関連する日本のプレイヤーも多く、日本がリーディングポジションにあると考える

- クリーン水素（CO₂フリー水素）の国際的なサプライチェーンを構築するには、水素長距離輸送技術が極めて重要。日本は、長距離海上輸送に係る技術開発・実証を世界に先駆けて実施
- サウジ、ノルウェー、豪州など資源国において水素輸出に対する関心が高まっている。

水素キャリアの特徴

水素	キャリア	特徴と課題	プレイヤー
液化水素		圧縮水素の1/800の体積。高純度水素の供給に適する 液化効率の向上とボイルオフガスの低減が課題	川崎重工、岩谷産業、他
有機 ハイドライド		常温・常圧の液体化学品として、ケミカルタンカーによる輸送が可能 脱水素時の熱の確保が必要	千代田化工建設、ENEOS、他
アンモニア		他のキャリアと比較して体積水素密度が高い 臭気、急性毒性があり取扱に留意	日揮HD、産総研、他

資源国の水素輸出への関心

資源国	水素輸出への関心	関連する日本プレイヤー
サウジアラビア	原油からの水素製造（EOR+CCS）、再エネ利用+水電解を用いたCO ₂ フリー水素の輸出	日揮HD
ノルウェー	水電解や天然ガス改質等で製造した水素をパイプラインや船舶で輸出する可能性に言及	
豪州	褐炭の改質+CCS利用の水素を液化して輸送	川崎重工
ブルネイ	ブルネイでガス改質水素を製造し、有機ハイドライドであるメチルシクロヘキサンに変換して輸送し、日本で水素とトルエンに分離	千代田化工

図8 水素の輸送・貯蔵に関する取り組み、キャリアの特徴⁶⁾

- 水素需要は2050年までに、エネルギー転換、運輸、産業、業務・家庭・その他の4分野で大幅な拡大が見込まれる。
- 水素利用技術は、日本がリーディングポジションにあり、需要の拡大が見込まれる4分野それぞれでプレイヤーが存在。

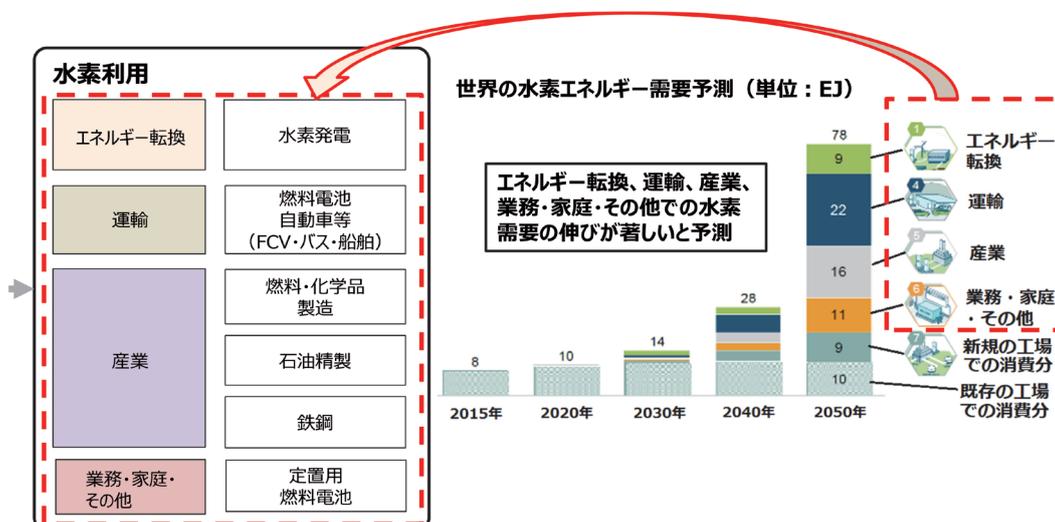


図9 水素利用技術の概要⁷⁾

ことが出来る。

水素利用技術の全体動向を、図10に示すが、水素利用技術に関して重要な点は、水素を導入して、他の手段の代替を図り、CO₂の排出削減を目指すので、どの技術を代替するかで、水素に求められるコストが異なってくる点である⁸⁾。現在の水素基本戦略の目標コストである20円/Nm³は、水素発電の場合を対象に、LNG火力発電を水素発電で代替する技術に対して、LNGと同じ発電量を、同じコストで、水素により実現するために必要となる、水素に求められるコストである。同じように考えれば、水素還元製鉄の場合には、コークスやCOガスによる鉄鉱石の還元の代替技術として水素による還元を使うことを考えれば、求められる水素のコストは、一例として、8.5円/Nm³と試算されている。これは、水素発電に比べて、一層低コストの水素が求められることになり、水素のコスト低減をより一層推し進める技術開発が求められることになる。ただし、水素製造技術で説明したように、再生可能エネルギーを活用し、水電解装置で水素製造する方法で、将来、水素製造コストが大幅に低下する可能性のある地域が存在することが指摘されている。これは、再生可能エネルギー活用による水素製造で、低コスト水素を製造できる地政学的に有利な地域が世界に存在することを意味しており、世界的な視野で、世界の各地域の水素製造コストを考えながら、技術開発の将来を検討することが重要となる。

エネルギー転換技術である水素発電技術は、NEDOプロジェクトで水素ガスタービンに係る技術開発、実証を実施中である。三菱パワーは、オランダのヌオン・マグナム発電所(1系列440MW)で、水素専焼転換へのフィージビリティスタディを実施し良好な結果を得ている。また、課題としては、

燃焼振動対策・低NO_x・高効率化が挙げられる。さらに、米国から水素ガスタービンを受注しており、将来は水素100%での運転を目指して技術開発を進めている。また、Siemens, 川崎重工業等も技術開発中である。

また、運輸技術である燃料電池自動車技術では、日本は、世界に先駆け量産型FCVを2014年に市販し、信頼性と生産性の向上を目指した技術開発を行っている。燃料電池に関して、日本の強みは、高度な解析技術と、世界に先駆け量産型FCVを販売し社会実装で培った「技術課題」を把握していることである。産学官が連携し、「協調領域」の技術課題を広く産業界やアカデミアと共有し、燃料電池解析評価プラットフォーム構築などで技術開発を推進している点、また、技術開発を担う人材を育成している点が特徴である。なお、日本を含む欧米、中国等の世界では、FCトラック、FC鉄道車両、FC船、FCフォークリフトを含む多用途展開が加速している。

水素還元製鉄を含む革新製鉄技術としては、製鉄プロセスでの水素利用等の産業利用を見据えたプロジェクトも国内外で開始されている。NEDOプロジェクトであるCOURSE50プロジェクトにおいて、高炉をベースとする水素還元製鉄技術の開発及びCO₂分離回収技術の開発が進行中であり、鉄鉱石の水素活用還元技術の試験高炉(実炉の1/500のスケール)による水素還元製鉄の実証試験にてCO₂排出の10%削減を確認し、高炉ガスに適したCO₂分離回収技術の開発により、実炉へ適用することでCO₂排出量30%低減を目指している。また、将来的に製鉄プロセスからCO₂発生をゼロにするための調査研究に着手している。なお、アルセロールミタルを中心とした欧州では、高炉利用、ガスによる直接還元、電解還元等の複数のアプローチを検討している。

水素利用技術		国内外の動向	国内プレーヤー
工社 ギ- 転換	水素発電	NEDOプロジェクトで水素ガスタービンに係る技術開発、実証を実施中。 三菱パワーは、オランダのヌオン・マグナム発電所(1系列440MW)で、水素専焼転換へのフィージビリティスタディを実施し良好な結果を得る。(課題:燃焼振動対策・低NO _x ・高効率化) また米国から水素ガスタービンを受注。将来は水素100%での運転を目指す。Siemens, 川崎重工業等も開発。	三菱パワー、 川崎重工
運輸	燃料電池自動車等	日本は、世界に先駆け量産型FCVを販売し、社会実装で培った技術課題を把握。更に、燃料電池反応機構を研究するための高度計測技術、解析技術を有する。日本を含む世界(欧米、中国)では、大型商用車を含む多用途展開が加速。	トヨタ自動車、 本田技研工業
産業	石油・化学	石油の脱硫、アンモニア製造などに水素を使用。昭和電工は、使用済みプラスチックから水素を製造し、アンモニア製造や、ホテル設置の業務用燃料電池への供給に使用。	昭和電工、 他
	鉄鋼	NEDOプロジェクトであるCOURSE50プロジェクトにおいて、鉄鉱石の水素活用還元技術の試験高炉での実証試験を終了、実炉への適用が進行中。 欧州でも、アルセロールミタルが複数のアプローチを検討中。	日本製鉄、 JFEスチール、 他
業務・ 家庭・ 他	定置用燃料電池	日本は、世界に先駆けて家庭用燃料電池「エネファーム」を市場投入。 業務用は米国(Bloom Energy)が先行するが、日本でも本格普及が始まる。 今後は発電効率が高く、コストダウンの可能性が高いSOFC型が主流に。	富士電機、 三菱パワー、 他

図10 水素利用技術の全体動向

産業用の石油・化学分野に対しては、石油の脱硫、アンモニア製造などに水素を使用している。昭和電工は、使用済みプラスチックから水素を製造し、アンモニア製造や、ホテル設置の業務用燃料電池への供給に使用しており、15年以上の運転実績を有する世界で唯一のプラントである。

業務・定置用の燃料電池に関しては、日本は、世界に先駆けて家庭用燃料電池「エネファーム」を、2009年に市場投入した。業務用は米国のBloom Energyが先行するが、日本でも本格普及が始まる状況で、富士電機、三菱パワーなどで中大型機の開発が進んでいる。定置用燃料電池では、発電効率が高く、非白金触媒でコストダウンも可能なSOFC型が主流と考えられる。また、開発ターゲットは、2040年以降の次世代に、発電効率65%以上であり、業務用では中大型機の開発や、複合システムの開発が進むと考えられる。

6 水素技術に関する今後の展望のまとめ

地球温暖化防止のための水素技術に関する今後の展望をまとめると以下のようになる。

- 水素は、運輸、電力、産業分野など、多くの分野の脱炭素化に貢献可能である。
- 社会実装に向けては、CO₂フリー水素の低コスト化が重要であり、日本は世界に先立って「水素基本戦略」を打ち出した。
- 再エネ由来のCO₂フリー水素のコストは、CO₂フリー電力のコストに大きく影響を受けるため、大きな地域差が生じる点に留意する必要がある。
- 日本は、水素輸入時に必要となる長距離輸送等の要素技術を開発し、国際水素サプライチェーンを構築することを目指しつつ、多くの水素輸送技術に注力している。
- 水素利用技術においては、水素発電で日本企業の技術が海外プロジェクトで活用されている例もあるなど、リーディングポジションにいる。

■ 日本には、水素技術にかかる代表的な企業や研究者が多く、カーボンニュートラルの実現に向けた様々な水素技術の開発においてリーダーシップを発揮することが期待されている。

参考文献

- 1) 水素基本戦略, 経済産業省, (2017), <https://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002.html>
- 2) 水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ第5回資料, 経済産業省, (2014), https://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/suiso_nenryodenchi_wg/005_haifu.html
- 3) 水素燃料電池戦略ロードマップ, 経済産業省, (2019), <https://www.meti.go.jp/press/2018/03/20190312001/20190312001.html>
- 4) The Future of Hydrogen, IEA, (2019), [1USD = 110円で換算]
- 5) NEDO HP URL : https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_101293.html, (アクセス日: 2020年3月7日)
- 6) グリーンイノベーション戦略推進会議第2回ワーキンググループ, 資料4-1技術開発に関する説明, NEDO, (2020年8月21日), https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/green_innovation/002.html
- 7) Hydrogen Scaling Up, Hydrogen Council, (2017), <https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-scaling-up-Hydrogen-Council.pdf>
- 8) エネルギー・環境技術のポテンシャル・実用化評価検討会報告書, 経済産業省・文部科学省, (2019年6月), <https://www.meti.go.jp/press/2019/06/20190610002/20190610002-1.pdf>

(2021年3月2日受付)