



# 期待される水素エネルギーの活用

水素は今、クリーンなエネルギー源として大きな注目を集めている。水素を製造し、輸送し、活用するために、これまでのエネルギーと異なる様々な技術の開発が進められている。

普及が進む水素ステーション。燃料電池自動車および燃料電池バスに対応するステーションの建設も進んでいる(写真は東京ガス豊洲水素ステーション)。  
写真提供：東京ガス(株)

## CO<sub>2</sub>排出ゼロのキーテクノロジー

2020年12月、政府は「2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」を発表した。これは、2050年にカーボンニュートラルにする、との方向性を明らかにしたものであり、これを実現するための具体的な目標として、水素活用を進め、運輸や産業部門での利用を加速させ、化石燃料に匹敵する水準までコストを下げ、化石燃料をやむなく使う場合はCO<sub>2</sub>の回収・再利用を促す、とされている(図1)。

そこで今、水素を活用する「水素社会」への期待が高まっている。水素の最も大きな特徴は、エネルギーとして利用してもCO<sub>2</sub>を排出しないことである。水素を燃焼してエネルギーを得る時、排出されるのは水のみなので環境負荷が低くて済む。

水素製造時にCO<sub>2</sub>が排出されては水素燃焼時にCO<sub>2</sub>を排出しない特徴があまり活かされないが、例えば、再生可能エネルギーを使って水素を製造すればCO<sub>2</sub>の排出を抑制できるし、化石燃料から水素を製造する場合でも、その際発生するCO<sub>2</sub>を分離、回収し地中に貯留するCCS(Carbon Capture and Storage)を活用すれば、CO<sub>2</sub>排出量を少なく抑えられる。

また水素は、さまざまな資源を原料として作ることができることも、大きな特徴である。水を電気分解する方法だけでなく、石油や天然ガスなどの化石燃料、メタノールやエタノール、バイオマス、下水汚泥、廃プラスチックなどから作ることができる。また製鉄所や化学工場の副生ガスとしても得られる。海外の未利用エネルギーや豊富な再生可能エネルギーを利用して、安価な資源から水素を

作り利用することができれば、低コスト化が図れるとともに、エネルギー調達先の多角化が図れる。しかしながら、世界的に見ても水素を化石燃料などに替わるエネルギーとして本格利用した実績はまだない。

現在、水素の利用として期待されている分野の一つは、燃料電池自動車(FCV)や燃料電池バス(FCバス)の燃料である。FCVなどに搭載されている「燃料電池」に水素を供給して電気をつくり、自動車の動力に利用する。乗用車やバスだけでなく、フォークリフトなどの産業用車両での水素利用もすでに始まっている。

このほか、家庭用燃料電池の「エネファーム」も水素を利用している。都市ガスなどから水素を取り出し、空気中の酸素と化学反応させて発電し、同時に発生する熱を給湯などに利用する。

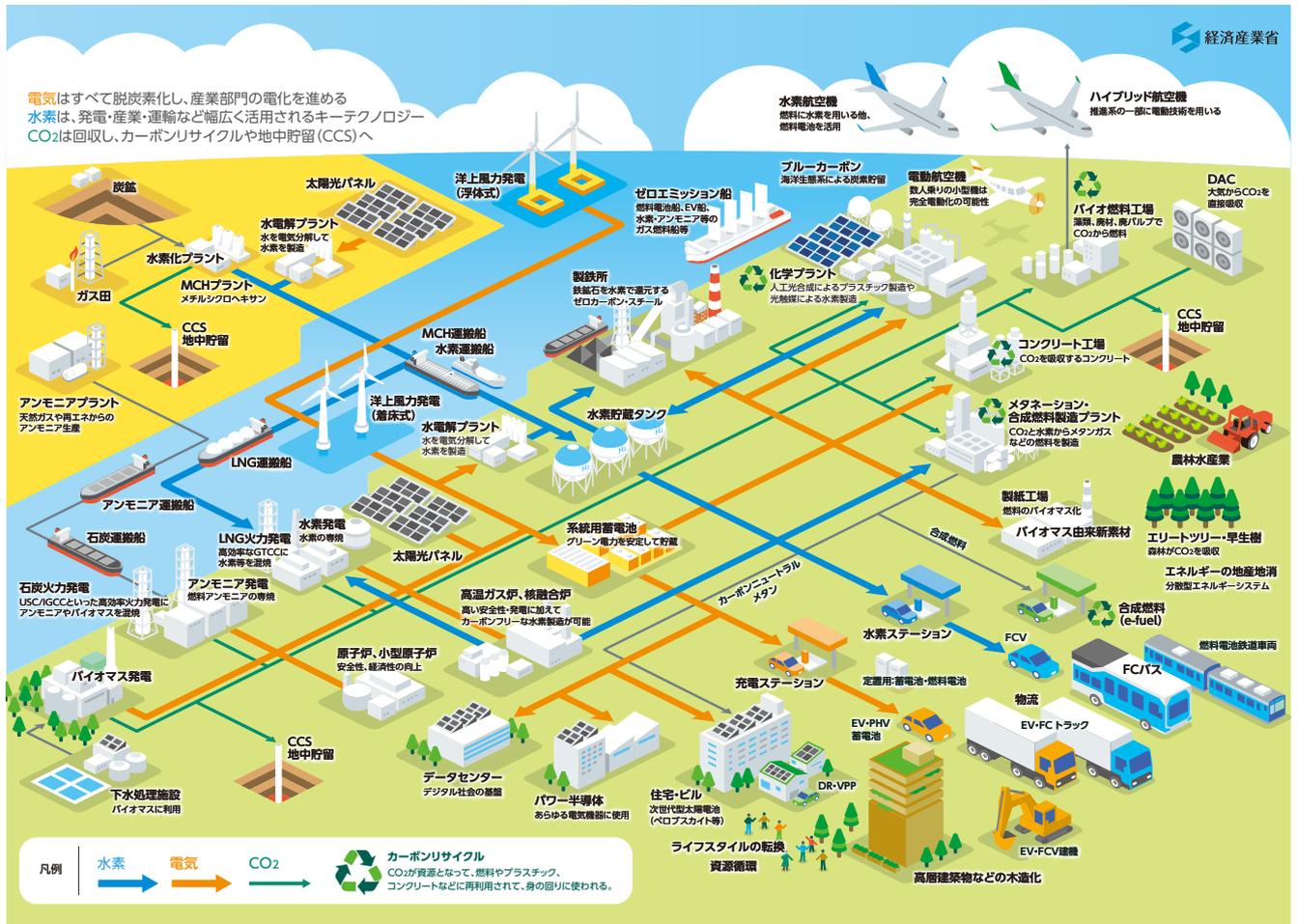
## 水素をコンパクトに貯蔵、輸送

水素は密度が低い気体なので、製造後に常温、常圧の状態のまま保管するには非常に大きなスペースが必要となる。そこで、水素を貯蔵するためには、いかにコンパクトにできるかが重要となる。代表的な方法としては、高圧で圧縮して貯蔵する、低温で液化して貯蔵する、金属などに吸蔵・吸着させて貯蔵する、他の分子に変換して貯蔵する、などがある。

このうち、広く使われているのが、気体のまま高圧で貯蔵する方法である。一般に高圧容器には鉄鋼材料が使われるが、高圧水素の場合には、容器材料の鉄の原子半径に比べ水

■ カーボンニュートラルの産業イメージ (図1)

2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指して、水素は幅広く活用されるキーテクノロジーに位置付けられている。(図中の青矢印が水素活用のルートを示す)



経済産業省資料を元に作成

素の原子半径がたいへん小さいため、鉄鋼材料の粒界等に水素原子が集積して脆くなるという、水素脆性の問題がある。そこで高圧水素容器には、特殊なステンレス鋼や高分子複合材などが使われる。

水素は、-253℃以下に冷却すると液化して体積が約800分の1になる。液化して貯蔵する場合は、中空部を真空にした断熱容器に入れて貯蔵する。しかし貯蔵中に外部から侵入する熱によりわずかに気化するの、気化した水素ガスを安全に取り除く技術などが必要となる。

また、水素を吸収、放出する特性を持つ水素吸蔵合金を使用する方法もある。水素吸蔵合金は、身近なところではニッケル水素電池の負極材として利用されている。金属以外では、カーボンナノチューブなどでも水素を吸着させて貯蔵する方法が研究されている。

貯蔵した水素を運ぶ手段としていろいろな方法が検討されている。高圧水素や液化水素の場合、一般には特殊な設

備を備えた専用車や専用運搬船で輸送される。都市ガスのように水素専用のパイプラインを使う方法は設置コストがかかるため、現在は化学工場敷地内で輸送する、などの近距離利用に限定して利用されている。

さらに、製造した水素を、他の物質と化学反応させて化合物に変えて貯蔵、輸送し、利用先で再び水素へ戻すという方法も開発されている(詳しくは後述)。

国際連携による水素のサプライチェーン

日本では、世界に先駆けて「水素社会」を実現するべく、国やさまざまな企業が実証実験などを進めている。ここでは新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の水素エネルギー利活用の実証事業を紹介する。

●世界初の「液化水素運搬船」が水素を日本へ

水素を、品質が低いなどの理由で利用されていないエネルギー源から作ることができれば、低コストでエネルギーを安定的に確保することができる。

技術研究組合CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン推進機構(HySTRA)では、低品質であり、揮発ガス分の多い石炭である「褐炭」を活用し、オーストラリアで水素を製造し、日本へ運ぶことを目指した「褐炭水素プロジェクト」(未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業\*)が進められている(図2)。褐炭は、空気に触れると自然発火するおそれがあるため輸送が困難で、これまで利用先が限定されてきた。オーストラリアに埋蔵されている褐炭の量は日本の総電力量の240年分を発電できる量に相当する。発生するCO<sub>2</sub>は分離・回収し、海底下の帯水層などの深さ1,000 m以上の地層に貯留する。

製造した水素を日本へ輸送する実証実験も進められている。-253℃に冷却して液化した大量の水素を長距離輸送するために開発が進められてきたのが液化水素運搬船であり、2019年、世界初の液化水素運搬船「すいそ ふろんていあ」が進水した。2020年には液化水素運搬船向け「海上輸送用

液化水素タンク」の搭載が完了し、近くオーストラリアから日本に水素を運んでくる予定である。

●ブルネイで水素化プラントを開設し日本へ輸送

ブルネイ・ダルサラーム国(以下、ブルネイ)と日本を結んで、次世代水素エネルギーチェーン技術研究組合(AHEAD)による、「有機ケミカルハイドライド法による未利用エネルギー由来水素サプライチェーン実証事業\*」が行われた(図3)。

この事業では、水素を芳香族化合物と化学反応させることにより、取り扱いやすい常温で液体の脂環化合物にして貯蔵や輸送を行う「有機ケミカルハイドライド法」を用いた実証実験を行った。具体的には、気体の水素と液体のトルエンを化学反応させ、メチルシクロヘキサン(MCH)という液体の化合物にする。MCHは、水素ガスに比べ体積が約500分の1になり、常温・常圧のままガソリンなどの石油製品と同様に、安定的に既存インフラを利用して輸送することができる。

2019年11月には、ブルネイでトルエン「水素化プラント」を稼働し、製造したMCHを日本に向けて輸出した。また、日本に輸送されたMCHから水素を分離する「脱水素プラント」は2020年4月に本格稼働し、世界初の国際間水素サプライチェーンを実現して、2020年12月末に運用を完了した。実証事業実績としては、約100 tの水素を貯蔵、輸送、供給した。これは燃料電池車約2万台に充填できる量に相当する。

\*新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の助成事業

■海外から液化水素を日本へ運ぶ  
褐炭水素プロジェクト(図2)

オーストラリアの褐炭から水素を製造し、液化水素として日本に運ぶことを目指す。褐炭のガス化技術、液化水素の長距離大量輸送技術、液化水素の荷役・貯蔵技術などの実証を進めている。



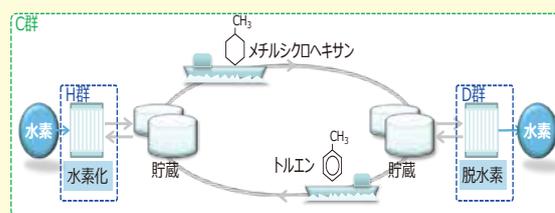
液化水素運搬船への液化水素タンク搭載



神戸空港島液化水素受入基地

資料提供：技術研究組合CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン推進機構(HySTRA)

■有機ケミカルハイドライド法で  
水素を貯蔵・輸送(図3)



有機ケミカルハイドライド法によるサプライチェーン

ブルネイにおいて天然ガスからの改質水素を、トルエンに化合しMCHとして、常温・常圧で輸送する。水素化・脱水素化プラント及び輸送チェーンの運用技術などの実証を実施した。



脱水素プラント(川崎市)

資料提供：次世代水素エネルギーチェーン技術研究組合(AHEAD)

## 鉄鋼業が注目する水素利用

鉄鋼業にとって、水素利用はCO<sub>2</sub>排出削減を進めるためのキーワードとなっている。

CO<sub>2</sub>排出削減は世界共通の目標である。日本でも産業部門、運輸部門など各方面でCO<sub>2</sub>排出削減の取り組みが進んでおり、鉄鋼業でもCO<sub>2</sub>排出削減に取り組んでいる。

高炉で鉄を製造する際には、還元材としてコークス(炭素)を用いるため、製造時にCO<sub>2</sub>を排出することは避けられない。また今後、少なくとも2050年までの鉄鉱石から製造する鉄鋼の世界での需要は、現在とほぼ同程度と見込まれているため、CO<sub>2</sub>排出が低い方法で鉄鉱石還元を進めていく必要がある。

鉄鉱石からの鉄鋼製造においてCO<sub>2</sub>排出低減をする手段として、CCSがある。また、CO<sub>2</sub>を化学品や燃料に変換して再利用するCCU(Carbon Capture and Utilization)もある。

他に有力視されている手段として、水素による鉄鉱石還元がある。これは現在のコークスや天然ガスといった炭素主体の還元によって水素を還元材として利用するもので、排出されるのはCO<sub>2</sub>ではなく水である。

しかし水素の利用には、解決すべき課題がある。まず水素の

価格である。国内の水素の価格は現状では100円/Nm<sup>3</sup>-水素(1,000円/kg-水素)程度だが、日本鉄鋼連盟の試算(長期温暖化対策ビジョン2018年による)では8円/Nm<sup>3</sup>-水素(80円/kg-水素)程度でないと、現在の原料炭を用いた鉄鋼生産と同等の経済性が実現できない、と試算されている。

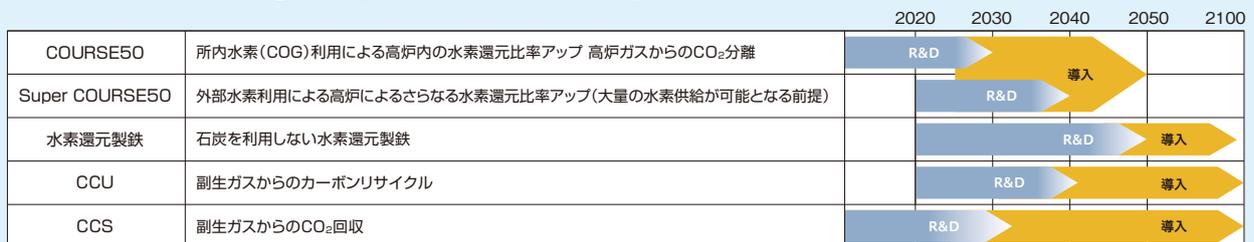
また水素の供給量にも問題がある。国内の標準的な製鉄所で600万t/年の鉄を製造する場合、水素による還元では約60万t-水素/年が必要と言われるが、現在日本国内で生産されている水素量は150万t-水素/年でしかない。つまり、現在の国内の全製造水素量を合わせても製鉄所2~3箇所しか賅えないことになる。

量の問題だけでなく、炭素による還元とは異なり、水素還元は吸熱反応であるため、いかに熱補償するか等の技術開発も求められる。

すでにヨーロッパでは、水素還元製鉄の開発が着手されているが、実現までには長い時間がかかると見られる。水素を利用したゼロカーボン・スチールの実現を目指して、世界の鉄鋼業が新たな取組を始めている。

### ● 長期温暖化対策となる超革新技術開発

日本鉄鋼連盟発表の長期温暖化対策ビジョン「ゼロカーボン・スチールへの挑戦」では、2100年までに鉄鋼業のCO<sub>2</sub>排出量をゼロにするための方向性が示されている。



(日本鉄鋼連盟長期温暖化対策ビジョン「ゼロカーボン・スチールへの挑戦」2020年6月修正版を元に作成)

## 水素ステーションの普及を目指す

政府は、水素エネルギーの利活用を支援するため、「水素基本戦略」や「水素・燃料電池戦略ロードマップ」など、将来目指すべきビジョンと行動計画を示している。こうした取り組みの一つに、水素ステーションの普及・整備支援がある。水素ステーションの普及は着実に進んでおり、2020年1月には、FCVだけでなくFCバスにも対応する「東京ガス豊洲水素ステーション」が開所し、東京都が普及を推進しているFCバスへの水素の供給が見込まれている。

また、遠隔監視された水素ステーションで、セルフでの充填を可能とする「セルフ化」の検討も行われている。水素ステーションには、水素を昇圧するコンプレッサー、水素を蓄えておく蓄圧器、水素を冷却するプレクーラー、水素を車に充填するためのノズルを備えた

ディスペンサーなどが設置されている。日本では作業の安全性の点から、水素の充填作業は従業員が行うのが原則だが、ヨーロッパなどではセルフの水素ステーションが普及しつつあり、日本でも「セルフ化」に向けた安全対策の検討が進められている。

水素ステーションの設備に使われる金属材料は高圧の水素ガスに接するため、耐水素脆化性および引張強さにすぐれていることが求められ、オーステナイト系ステンレス鋼を始め各種の鉄鋼材料の検討が進められている(詳細は連携記事参照)。これからの普及が見込まれる水素ステーションでは、今後もさまざまな技術開発が期待されている。

日本は、水素エネルギーに関連する高度な技術を蓄積してきた。クリーンな水素社会を実現するため、日本の鉄鋼材料技術の果たすべき役割は大きい。

●取材協力 日本製鉄(株) ●文 杉山 香里