



脱炭素社会に向けた水素の活用 ～その必要性と普及に向けた課題

元北陸経済研究所 地域開発調査部 担当部長
富山県交通政策局 地域交通・新幹線政策室
主幹 青井 健祐

1 はじめに

脱炭素社会とは、地球温暖化の原因となる温室効果ガスの実質的な排出量ゼロを実現する社会のことである。温室効果ガスの多くを占める二酸化炭素(以下「CO₂」)の排出を可能な限り抑え、それでも排出される分を大気中から回収するなどして、CO₂排出量を実質ゼロ(＝中立)にすることを「カーボンニュートラル」という。

この脱炭素社会の実現に向けて、エネルギー源などとして水素に注目が集まっている。本稿では脱炭素において水素が注目される理由や課題、北陸での取り組みについて紹介する。

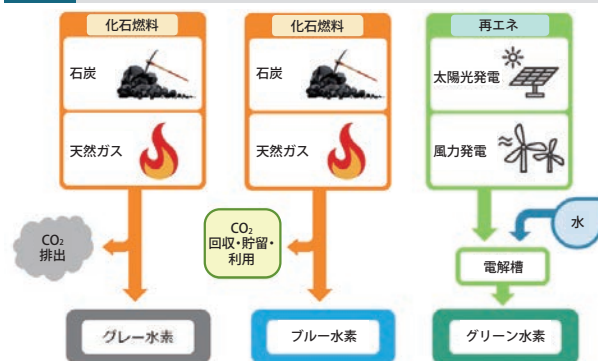
2 水素の性質と製造工程による種類

水素は燃焼すると酸素と結びつくことで熱エネルギーを発生させて水を排出するが、CO₂は排出しない(2H₂+O₂→2H₂O)^{※1}。また、水素と酸素を化学反応(水の電気分解の逆反応)させることで、電気(燃料電池)を作り出すことも可能だ(2H₂+O₂→2H₂O)^{※1}。このように、水素と酸素を活用することで、CO₂を排出することなく熱エネルギーや電気エネルギーを生み出すことが可能となるが、水素を製造するにはどうしたらよいか。

主な製法は図1のとおり。「グレー水素」や「ブルー水素」^{※2}のように化石燃料から水素を製造する場合には、化石燃料を燃焼させてガスにし、そのガスの中から水素を取り出す「改質」と呼ばれる製造方法がとられるが、この場合化石燃料を燃焼するため、水素を製造する過程でCO₂を排出してしまう。

一方、水を風力・水力・太陽光等の再生可能エネルギー

図1 製造工程による水素の種類



出典：資源エネルギー庁 Web サイト

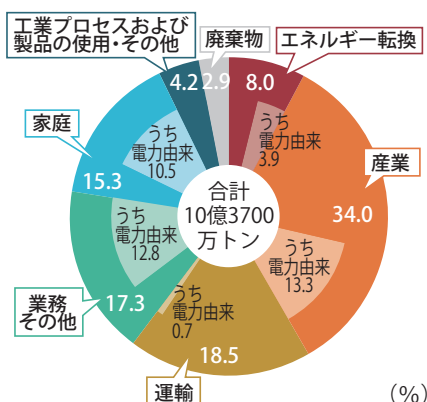
ギー(以下「再エネ」)で電気分解(以下「電解」)することで水素を製造することができるが、炭素を燃やさないためCO₂が発生することはない。これを「グリーン水素」^{※2}といい、脱炭素を促進するエネルギーとして注目されている。

3 水素利用が検討されている分野

(1) 熱需要への対応「ガスのカーボンニュートラル化」

エネルギーの最終利用目的を部門別に見ると、主に「産業」「運輸」「業務その他」「家庭」などに分けられるが、利用形態としては「運輸」「熱」「電力」の3つに分類され、このうちの約6割を熱需要が占めている。

図2 排出部門別の二酸化炭素排出量の内訳(電気・熱配分後)



出典：2022年度の温室効果ガス排出・吸収量(環境省)

※1 「水素の燃焼」と「水素と酸素の化学反応」は、化学式は同じだがプロセスが異なり、前者は熱エネルギーを、後者は電気を生み出す。

※2 「グレー水素」とは水素を作る際にCO₂の排出を伴うもの。「ブルー水素」とは発生したCO₂を何らかの方法で回収・貯蔵・利用することでCO₂の大気中への排出を抑えるもの。「グリーン水素」とはCO₂を発生させることなく製造する水素をいう。

熱需要には、産業部門(工場等)における蒸気加熱や、民生部門(業務・家庭等)における給湯や暖房などさまざまなものがあるが、特に産業部門では加熱炉や溶解炉など高温帯の加熱エネルギーを必要とするものが多く、また、低温帯であっても蒸気ボイラーや大型食品加工機などは大容量のエネルギーが必要となる。このため、産業部門では主に天然ガスをはじめとした化石燃料が使われているが、ここで求められているのがガスのカーボンニュートラル化である。

ガスのカーボンニュートラル化には複数の選択肢があるが、期待されているのは、水素とCO₂を反応させ、天然ガスの主な成分であるメタンを合成する「メタネーション」(4H₂+CO₂→CH₄<メタン>+2H₂O)だ。メタネーションによって合成したメタンを「カーボンニュートラルメタン」または「合成メタン」と呼ぶ。

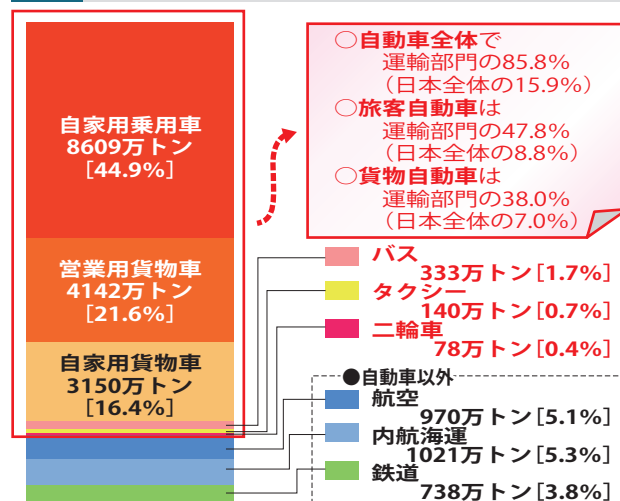
カーボンニュートラルメタンを燃焼するとCO₂が排出されるが、当該メタン製造時に同量のCO₂が回収されているため、大気中のCO₂は増加しない。また、都市ガス導管等の既存インフラを活用できるため、社会コストを抑制できることもメリットとなる。

(2) 運輸部門での水素の利用

図2のとおり、2022年度における日本のCO₂排出量10億3700万トンのうち運輸部門からの排出量が18.5%を占めており、そのうち貨物自動車は38.0%(日本全体の7.0%)のCO₂を排出している(図3)。貨物自動車の脱炭素化が求められているが、乗用車で普及しつつあるEVをトラックに導入する場合は、①大容量のバッテリーが必要、②大型バッテリーを搭載するため貨物の積載量が制限される、③充電1回当たりの走行距離が短い、④充電時間が長いなどの理由から、長距離貨物輸送には適さないと言われている。そのため、特に長距離トラックでは、水素を燃焼させる「水素エンジン」や、水素と酸素の化学反応で発電した電力でモーターを回す「燃料電池自動車(FCV)」など、水素の活用が期待されている。

他にも、脱炭素社会の実現に向けて、アンモニア(水素と窒素から製造)や合成燃料(e-fuel:水素とCO₂から製造)を利用した動力が研究されているが、合成燃料は従来のガソリンやジェット燃料の代替としての使用が可能であり、既存の設備をそのまま利用できる

図3 運輸部門におけるCO₂排出量



出典：運輸部門における二酸化炭素排出量(2022年度国土交通省)

ものとして、期待が寄せられている。

なお欧州連合(EU)は、エンジン車の新車販売を2035年から禁止するとしていたが、合成燃料の使用を条件に販売継続を認める方針に転換している。

(3) 製鉄における水素の利用

2022年度における鉄鋼業のCO₂排出量は、産業部門全体の38.1%(1億3400万トン)を占めるが、これは「高炉」により「炭素還元法」で製鉄を行っているためだ。炭素還元法とは、コークス(石炭を蒸し焼きにしたもの)を燃焼させることで発生する一酸化炭素を利用して鉄鉱石(酸化鉄)から酸素を取り除き(還元)、「鉄」を取り出すもので、この過程で炭素と酸素が結合し、大量のCO₂が発生する(Fe₂O₃+3CO→2Fe+3CO₂)。

図4 業種別二酸化炭素排出量(産業部門) (%)

	2022年度 (百万トン)	シェア	変化率	
			2013年度比	前年度比
食品飲料	19	5.3	▲25.0	▲7.1
パルプ・紙・紙加工品	18	5.2	▲27.9	▲5.7
化学工業	56	15.8	▲19.8	▲3.6
窯業・土石製品	26	7.5	▲24.2	▲4.3
鉄鋼	134	38.1	▲26.3	▲7.1
機械	45	12.8	▲25.9	▲3.3
その他製造業	31	8.8	▲22.2	▲0.3
非製造業	23	6.5	▲11.4	▲8.6
計	352	100	▲24.0	▲5.3

※機械は金属製品製造業を含む。

※化学工業は石油石炭製品を含む。

出典：2022年度の温室効果ガス排出・吸収量(環境省)

「電炉」では鉄スクラップを電気エネルギーで溶解して鉄を製造することができるが、回収量が限定されるスクラップに依存しているため、生産能力は日本の年間粗鋼生産量約1億トンのうちの4分の1に過ぎない。不足する分は鉄鉱石の還元により新たな鉄源を生み出す必要があるが、炭素の代わりに水素を活用することで、CO₂を排出することなく酸化鉄を還元する研究が進められている（ $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{Fe} + 3\text{H}_2\text{O}$ ）。

(4) 余剰電力の有効活用

電気は、使う量と発電する量（需要と供給）のバランスが崩れると周波数に乱れが生じ、最悪の場合は大規模停電が発生する。また、送電線や変圧器には流すことのできる電気の量に上限がある。そのため「需給バランス制約」と「送電容量制約」による出力制御（再エネ発電の受け入れ抑制）が行われており、2022年度には全国で約6億kWhが制御されている。再エネ設備による昼間発電量の増加や電力価格高騰による省エネ志向もあり、資源エネルギー庁は2025年度の出力制御が約20億kWhに増加すると見通している。

ここで再エネ余剰電力の貯蔵が課題となるが、現在の蓄電池では十分な電力貯蔵が難しいため、余剰電力を（グリーン）水素に転換して貯蔵するP2G（Power to Gas）の実証実験が山梨県などで実施されている。エネルギー資源の乏しい日本では、水素の活用により国内の余剰電力を有効に利用することは、エネルギー自給率向上の観点からも非常に重要である。

ここで紹介したもののほかにも、水素を燃やしてタービンを回す水素発電等も検討されている。脱炭素に向けては、需要側の省エネ徹底と電化の推進、供給側の（再エネ等による）電源の脱炭素化が重要となるが、電化が困難な分野や余剰電力の課題等があり、ここでも水素が注目されている。

4 水素利用の課題

(1) 価格と供給

前述した水素の活用にはそれぞれ課題があるが、共

通するのは水素の価格と供給だ。

エネルギーコストは産業、家計に大きな影響を及ぼす重要な要因であるが、現状水素の製造コストは100円/Nm³^{※3}と化石燃料と比べて非常に高い。2023年に策定された水素基本戦略では、水素製造コストを2030年に30円/Nm³、2050年に20円/Nm³以下（化石燃料と同等程度）に下げることを目指している。

水素の低コスト化の条件として資源エネルギー庁は、①安価な原料、②大量製造・大量輸送を可能にするサプライチェーンの構築、③燃料電池自動車（FCV）・発電・産業利用等での大量活用をあげている。また、水素製造コストのうち電気代が相当程度を占めるため、「安価な電力調達の水素製造コスト低下に重要」と指摘しており、グリーン水素の観点からも「再エネ発電単価の低下」と「発電量の増加」が求められる。

水を電解する設備のコストも重要だ。水電解装置として現在主流である「PEM型（固体高分子型）」^{※4}は、起動・停止がしやすいため再エネの出力調整に適しており、欧州を中心にニーズが高いが、陽極の触媒には耐腐食性の高い希少金属イリジウムが必要であり、設備が高額となるため、イリジウムの使用量削減や資源量の多い材料への転換が求められる。

ほかにも「水電解装置の高効率化」や、電力を安価に活用する手段として「水電解装置と余剰電力を接続する仕組み」の構築も求められる。

(2) 貯蔵・輸送

水素は常温・常圧で保管しようとすると非常に大きなスペースが必要となるため、水素の貯蔵方法として主に、①「高圧」、②「液化」、③「他の物質への変換」、④「金属への吸蔵・吸着」が用いられている。

①の「高圧」は現在最も利用されている方法だが、鋼鉄等の金属を脆くする性質があるため、高圧水素タンクには特殊ステンレス鋼やアルミニウム合金、高分子複合材料が使われる。

②の「液化」は、水素を液化することで体積が約1/800に圧縮されるため、輸送効率・エネルギー密度などの点でメリットがある。半面、融点がマイナス

※3 空気量の単位で、1気圧・0℃の時の体積（立法メートル）のこと。ノルマルリューベともいう。

※4 水電解装置には、プロトン交換膜を用いたPEM（固体高分子）型のほか、AWE（アルカリ水電解）型、AEM（アニオン交換膜）型、SOEC（固体酸化物形電解セル）型などがある。

253℃と極低温であるため、液化を維持するために大量のエネルギーが必要となることに加え、「ボイルオフガス（太陽等外部からの熱による気化）」という課題もある。

③の「他の物質への変換」の方法としては、アンモニアやメチルシクロヘキサン等がある。アンモニアは燃焼時にCO₂を排出せず、マイナス33℃で液化する性質をもつ。すでに肥料や化学品の原料として多く利用されており、また輸送・貯蔵技術が確立されているため、水素キャリアとして期待されている。メチルシクロヘキサンは、トルエンに水素を付加させて作る液体で、常温・常圧で液体であり、水素ガスと比べると体積当たり500倍以上の水素を含んでいることから、効率よく水素を運ぶことができる。また、これは修正液の溶剤等身近なところで使用されており、化学物質としてのリスクも低い。

④の「金属への吸蔵・吸着」の方法は、金属内に水素が入り込む現象を利用して水素を金属中に保存するもので、「水素吸蔵合金」と呼ばれる。例えば、日中太陽光発電で生み出した電力から水素を生成して水素吸蔵合金に貯蔵し、夜間に電力として使用することもできる。長期間、大容量の貯蔵ができ、水素を生成した場所で使用すれば合金の移動も不要なため、集合住宅や事業所等での利用が期待されている。

5 北陸での活用例

北陸では、アルハイテック株式会社による廃アルミからの水素製造や、富山水素エネルギー促進協議会による北陸初の商用水素ステーションの運営のほか、次のような水素エネルギーの利活用が進められている。

(1) 再エネと水素を活用したまちづくり

YKK不動産株式会社では、グループ社員や一般市民向けの集合住宅として、再生可能エネルギーと水素を活用した「パッシブタウン」（富山県黒部市）を形成している。3月に竣工した第5街区では、春から秋にかけて太陽光発電で得られた余剰電力を水素吸蔵合金に貯蔵し、発電量が減少する冬場に使用することを想定しており、カーボンニュートラルを目指すまちづくりや、エネルギーの地産地消の観点からも取り組みが

進められている。

(2) オフィス・ビルでの活用

清水建設北陸支店は、中規模オフィスでは北陸初のネットZEB（ゼロ・エネルギー・ビル）を実現している。太陽光発電に加え、産業技術総合研究所と共同開発した建物付帯型水素エネルギー利用システム「Hydro Q-BiC」が社屋内に実装されており、他の省エネ技術と併せて、エネルギー収支ゼロが達成されている。非常時にはBCP（事業継続計画）電源として72時間分の電力が供給される。

(3) 大学・行政による取り組み

富山県・富山大学・富山県立大学・富山水素エネルギー促進協議会の4者が、「燃料水素・アンモニアサプライチェーン構築に向けた連携協力協定」を2023年に締結し、実用化に向けた取り組みが進められている。富山大学水素同位体科学研究センターの阿部教授の研究グループでは、高活性メタネーション触媒の開発を行っており、富山県立大学工学部の脇坂研究室では、燃料電池・水電解用電極触媒の高性能化に向けた基礎研究を行っている。また、北陸地方整備局では、伏木富山港・七尾港・金沢港・敦賀港等での「カーボンニュートラルポート」形成や、管内港湾の水素・燃料アンモニア等の効率的な海上輸送ネットワーク構築に向けた検討が進められている。

6 さいごに

水素エネルギーの社会実装にあたっては、供給源の確保、輸送方法の確立、コスト低減、需要の開拓と、課題は多岐にわたり、サプライチェーン全体で最適解を導き出すことが必要となる。熱需要・動力・発電・電力貯蔵に加え、エネルギー自給率向上の観点からも水素の活用は有効な手段と考えられる。今後研究開発や実証実験が進むとともに、産官学金など関連各方面との連携により、需要増加、供給増加とコスト低下の好循環が生まれ、化石燃料に依存しない水素社会の構築が進んでいくことを期待したい。