

水素エネルギーと地球温暖化対策



市村正也

地球温暖化防止策の一環として水素ガスが火力発電や自動車の燃料として用いられようとしており、日本政府もそれを後押ししている。たしかに水素ガス使用時には二酸化炭素 CO_2 は排出されない。しかし水素ガスは工業的に製造する必要がある、その製造過程での CO_2 排出を考慮する必要がある。本解説では、水素の利用法や製造法を概観したのち、水素利用が本当に温暖化対策として有効か否かを考察する。

はじめに

地球温暖化を防ぐために、脱炭素化すなわち二酸化炭素 CO_2 排出削減を進めなければならない。このことは、すでに世界共通の認識になったと言ってよい。 CO_2 をはじめとする温室効果ガスは、地表からの熱放射を吸収することで、宇宙への熱の放出を妨げ、地表面の温度を上げる働きがある。2015年の国連気候変動枠組条約締約国会議 (COP21) のパリ協定においては、温室効果ガス排出を削減し、平均気温の上昇を 1.5°C 以下に抑えるという努力目標が定められた。そのためには、遅くとも2050年ごろまでに、 CO_2 の排出量を実質ゼロにする (カーボンニュートラル) だけでなく、各国の CO_2 排出削減目標のさらなる引き上げが求められている¹⁾。

CO_2 排出量を実質ゼロにするとは、化石燃料を燃やして排出される CO_2 の量と、植林などによる人為的な CO_2 吸収の増加量が釣り合うという意味だが、吸収量増加には限界があるので、現状に比べ大幅な CO_2 排出削減が必要になる。欧州各国はいち早くカーボンニュートラルを目指すと宣言した。米国はトランプ政権のもとパリ協定から離脱していたが、政権交代に

伴い再びカーボンニュートラルを掲げるようになった。中国も2020年9月に、2060年までのカーボンニュートラルを宣言した。それに続いて日本も2020年10月、当時の菅首相が2050年までのカーボンニュートラルを目指すと表明した。

このような背景のもとに、水素ガス (以下水素) が燃料として用いられようとしている。水素を燃料として使ったシステムでは CO_2 は排出されないため、水素利用はカーボンニュートラルを達成するのに有効な技術の一つであると主張されている。また、窒素や硫黄を含む有害な化合物の排出もない。新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) は、グリーンイノベーション基金事業 / 大規模水素サプライチェーン構築プロジェクトを実施しており、電力会社などによる火力発電所における水素利用の事業が採択されている²⁾。また、トヨタ自動車は燃料電池車に加え、水素をエンジンで燃焼させる自動車を開発し、マスメディアでその広報を広く行っている。さらに、製鉄において、コークスに混ぜて水素を用いるプロセスも開発されており、経済産業省の基金から資金が配分されている³⁾。

キーワード：水素 (hydrogen), カーボンニュートラル (carbon neutral), 化石燃料 (fossil fuel), 水蒸気改質 (steam reforming)

著者連絡先：ichimura.masaya@nitech.ac.jp

ところで、水素Hという元素は自然界に無尽蔵に存在するが、水素ガスH₂(g)はほとんど存在しない。化石燃料である石油、石炭は自然界に存在し、人類はそれを採取してエネルギー資源として用いている。再生可能エネルギーによる発電の場合は、自然界に遍在する太陽光や風をエネルギー源として用いている。それに対し、水素は自然界から採取するのではなく、人類が何らかの手段で製造しなければならない。その製造には、必ず原料とエネルギーが必要である。つまり、水素は天然資源ではなく一つの工業生産物であり、エネルギー媒体(energy carrier)という位置付けになる。そのため、水素利用が本当にカーボンニュートラルに貢献できるかは、その製造過程を含め、エネルギー収支とCO₂排出量を考える必要がある。

以下では、水素ガスの製造工程におけるエネルギー消費やCO₂排出を考慮すると、水素利用はCO₂排出をむしろ増加させることを説明する。

1 水素の利用法

水素は燃料として使用できるほか、石油精製やアンモニア合成など様々な工業プロセスで用いられる。ここでは、CO₂排出削減に直接関係する3つの利用法を紹介する。

i) 燃焼：水素は燃える。つまり酸素O₂と反応して熱を出す。



この反応式からわかるように、生成物は水H₂Oのみであり、CO₂は発生しない。

水素は燃料として、化石燃料の代わりに利用することができる。火力発電所で、通常の化石燃料に混ぜて水素を燃やせば、その分化石燃料の消費量を抑えることができるので、発電所で発生するCO₂量は減る。また、自動車のエンジンで、ガソリンや天然ガスの代わりに水素を用いれば、排気されるのは水蒸気のみとなり、CO₂の排出はゼロになるし、有害な化合物の生

成もなくなる。

ii) 燃料電池：燃料電池では、水素と酸素の反応から直接電力を得ることができる。反応式は(1)と同じだが、燃焼において熱として放出されるエネルギーの一部が、燃料電池では電気エネルギーになる。水に電気を流して水素と酸素に分解することができるが(次節参照)、燃料電池はその逆の過程とみなすことができる。燃料電池にはいくつかのタイプがあり、自動車や家庭用に用いられているのは固体高分子型である。この型の燃料電池では、反応(1)のエネルギーのうち電気エネルギーに変換できるのは4～5割程度であり、残りは熱として放出される^{4,5)}。したがって、燃料電池は電気と熱の両方を生み出す装置と考えたほうがよい。

燃料電池で発電しモーターを駆動して走る自動車がすでに実用化され、少数ではあるが、燃料の水素を供給する水素ステーションが設置されている。また家庭用燃料電池システムも販売されている。発生した熱で温水供給することで、熱も有効に利用することができる。

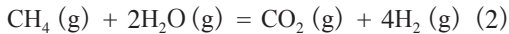
iii) 水素製鉄：鉄は地中では主に酸素と化合し酸化鉄の形で存在しており、酸化鉄を還元し、酸素を取り除いて金属の鉄を得る工程が製鉄である。通常のプロセスでは、高温で炭素から生成した一酸化炭素COと反応させる。COは酸素を酸化鉄から奪ってCO₂となり、酸化鉄は鉄になる。水素製鉄では、炭素に加え水素も用いる。酸化鉄の酸素の一部は、水素と反応して水H₂Oになり、その分CO₂の排出は減少する。燃焼や燃料電池では、水素が反応する相手は空気中の酸素だが、このプロセスでは、酸化鉄中の酸素と結合する。

2 水素の製造法

「はじめに」で述べたように、水素は天然資源ではなく工業的に製造されている。

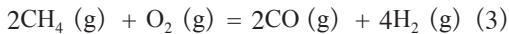
i) 化石燃料からの製造⁴⁾：天然ガスや石油を原料とし、水蒸気と反応させて水素を作るプ

プロセスを水蒸気改質と呼ぶ。天然ガスの主成分メタン CH_4 を例にとると、次のような反応で H_2 が生成する。



この反応は吸熱反応なので、熱を加える必要がある。その熱を得るため、原料である化石燃料の一部は燃やすことになる。

また、水蒸気ではなく、適量の酸素を供給して不完全燃焼させることでも水素を得ることができる。



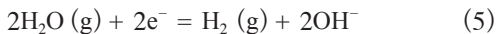
化石燃料に含まれる水素元素は、通常の燃焼では水になるが、燃焼雰囲気中の酸素が少なければ上式のように水素を生成する。

石炭からも、石炭ガス化プロセスで水素を作ることができる。石炭には水素元素も含まれており、高温に熱するとメタンなどのガスに加え、水素も生成する。また炭（炭素）を不完全燃焼させると一酸化炭素 CO が発生するが、 CO を水蒸気と反応させると水素が発生する。



以上の反応式からわかるように、これらの水素製造過程では、化石燃料に含まれていた炭素は結局すべて CO_2 となって排出される。

ii) 水の電気分解：適当なイオンを含み電気伝導性をもつ水溶液に電流を流すと、陰極（電源のマイナス極につないだ電極）から水素が発生する。これが水の電気分解による水素製造である。一般には、水酸化物イオン OH^- を多く含むアルカリ水が用いられ、次の反応で水素を得る。



この製造過程では、もちろん CO_2 の生成はない。

iii) 副産物としての水素製造^{4,5)}：上記二つは水素製造を目的とした工業プロセスだが、他の物質を作ることを目的とした工業プロセスで、副産物として水素（副生水素）が得られる場合がある。

先に述べたように、石炭には水素や酸素が含まれている。石炭を酸素の少ないところで加熱するとより純粋な炭素（コークス）が得られ、同時に水素が他のガスとともに生成する。従来の製鉄法では、そのようにして得たコークスを使って酸化鉄から鉄を得ている。つまり、製鉄の過程で水素が副産物として得られる。

石油コンビナートでは、原油からガソリン、灯油をはじめとして様々な製品を製造する過程で、種々のガスに混じって水素も生成する（ただし、石油精製には水素を消費する工程も多く、副生水素はすべてそれら工程で消費されている）。

また、苛性ソーダ（水酸化ナトリウム NaOH ）の製造過程でも水素が生成する。食塩水（ NaCl 水溶液）を電気分解すると陰極で OH^- イオンが生成し、水酸化ナトリウム NaOH が得られると同時に水素が生成する。

図1は、2018年における、製造法ごとの水素ガス製造量の割合を示したものである⁶⁾。「副産物」とあるのは石油精製およびコークス生成で生成する水素である。副産物としての製造量は、本来目的としている製造物の需要で決まる。「化石燃料」から作られる分も合わせ、現在水素ガスの約98%は化石燃料から作られている。また「電気分解」は、ほぼすべてが苛性ソーダ製造時の副産物であり、水素ガス製造自体を目

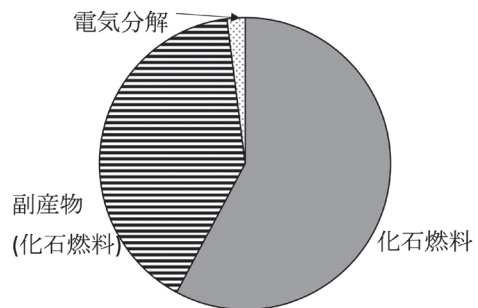


図1 2018年における世界の水素ガス製造の製造法ごとの割合
98%が化石燃料より作られている。年間に70 Mtが製造され、それに伴う CO_2 の排出量は830 Mtである。

的として電気分解で製造された量はそれに比べはるかに小さい。

3 水素利用のエネルギー収支と CO₂ 排出

2節で述べた化石燃料からの水素製造の代表例として、メタン CH₄ の水蒸気改質を考える。そのエネルギー効率は70%程度である⁵⁾。すなわち、仮に100単位のメタンがあるとする、それから得られる水素の燃焼熱は、70単位のメタンの燃焼熱と同じである。もし100単位のメタンと同じ量の熱を水素で得ようとする、その水素を作るために、およそ143単位のメタンが必要になる(図2参照)。

メタンの水蒸気改質以外の水素製造プロセスの変換効率はもっと悪いと考えられるが、以下簡単のために、化石燃料からの製造の効率は一律70%と仮定しよう。発電や自動車で、これまで使っていた化石燃料を、化石燃料から作った水素に替え燃焼させたとする。これまでと同じ量の発電あるいは動力を得ようと思うと、それに必要な水素を製造するために、これまで使っていた量の約1.4倍の化石燃料が必要になる。そして、2節で述べたように、化石燃料から水素を作る過程で燃料に含まれていた炭素はすべてCO₂になるので、CO₂の排出量も約1.4倍になる。

次に、化石燃料から製造した水素を燃料電池で使う場合を考えよう。上記のように、化石燃

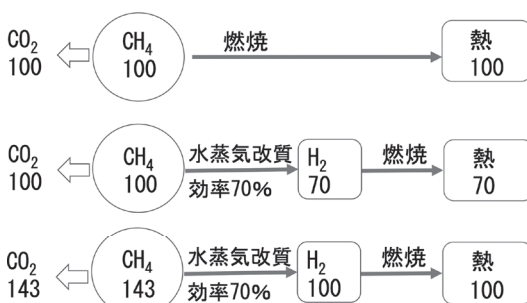


図2 メタン CH₄ を直接燃焼させた場合と、水素ガス H₂ に変換して使った場合の、得られる熱量と CO₂ 排出量の比較

料を水素に変える効率は70%とする。燃料電池の発電効率は40~50%であり、仮に50%とすると、化石燃料から出発して燃料電池で電力を得る総合的な効率はその掛け算で35%となる。一方、天然ガス火力発電の効率は60%程度である。つまり、ある量の化石燃料から水素を作り燃料電池で発電すると、火力発電所でその化石燃料をそのまま燃やして発電する場合と比べ、約半分(35/60)の電力量しか得られない。同じ電力量を得ようと思えば、直接燃やす場合より約2倍の化石燃料が必要になり、それだけより多量のCO₂を排出する。

太陽光や風力発電など再生可能エネルギーで発電した電力を使い水の電気分解をすれば、CO₂を排出せずに水素を生み出すことができる。しかし、太陽光・風力発電が電力供給の一部を担っている状況で、その電力を水素製造に使えば、それによって足りなくなる電力供給を補填するため、他の発電設備の出力を増やさざるを得ない(図3参照)。現在、日本では発電の主力は火力発電であるので、その追加の電力供給はほぼ火力発電に頼ることになるだろう。これでは結果的に火力発電の電力で水素を製造していることになり、CO₂の削減にはつながらない。それよりも、追加の電力供給に用いる分の化石燃料を直接用いたほうが効率的でありCO₂排出も少ない(図3中の破線)。また、太陽光・

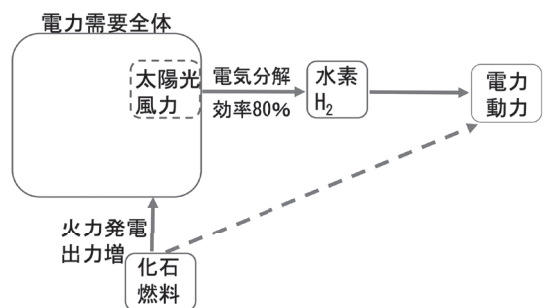


図3 水素製造の際の再生産可能エネルギーと火力発電の関係

破線で示すように、水素を経由せず、燃料を直接使った方が合理的である。

風力発電の電力は、水素製造に使うのではなく、電力需要を満たすために使い、その分火力発電の出力を減らした方が、有効に CO₂ 排出を削減することができる。

太陽光・風力による発電能力が電力需要を超過したときに、その超過分で水素を製造すれば、火力発電を増し焚きする必要もないので、CO₂ を発生させることはない。その水素を使って燃料電池または火力発電所で発電をすれば、余剰の電気エネルギーを水素の形で一時的に貯蔵していたことになる。しかしこの場合、いったん水素に変えることで、相当な量の電力が失われることに注意する必要がある。水の電気分解の効率はおよそ 80% とされている。その水素を火力発電所（効率 60%）に使うにしても燃料電池（効率 40～50%）で発電させるにしても、結局は電気分解に投入した電力の半分以下の電力しか得られない。したがって、水素製造は電力の貯蔵法としては放電/充電効率が悪い。再生可能エネルギーによる発電量が恒常的に電力需要を上回り、かつ二次電池や揚水発電など他の電力貯蔵の容量が不足するのでない限り、電気分解で発電用の水素を製造するのは得策ではない。

おわりに

水素利用は、理想的なケースでは CO₂ 排出削減に寄与できる。理想的なケースとは、再生可能エネルギー電力の余剰分を使い、電気分解で水素を製造する場合である。しかし、現状では水素はほとんどすべて化石燃料を使って作られている。その場合は、化石燃料を水素ガスに変換する過程でエネルギーの損失が生じるため、同じ仕事量を得ようと思えば化石燃料を直接使

うケースよりも、もっと大量の化石燃料を消費することになり、同時により多くの CO₂ を排出する。つまり、水素ガス利用は、CO₂ 排出を増加させる。

それにもかかわらず、日本政府や産業界は、水素利用を積極的に推し進めており、そこでは、技術的に未確立な CO₂ 回収・貯蔵を前提に、低品位で廉価な海外の褐炭が水素の主要な原料として想定されている⁷⁾。水素の最終的な消費の場にだけスポットライトを当てることで、CO₂ を排出しないエネルギー源であるかのように見せかけようとしている。そのため、水素ガスが温暖化対策の救世主だと誤解している人も、残念ながらいるだろう。そのような人々に対し、水素ガス利用に関する正確な知識を伝える努力が必要である。

注および参考文献 (URL 最終閲覧 2022 年 10 月 18 日)

- 1) 編集委員会：「差し迫る気候危機と国際社会の合意」『日本の科学者』58 (1), 4-10 (2023).
- 2) NEDO：「グリーンイノベーション基金事業 / 大規模水素サプライチェーン構築プロジェクト」
https://www.nedo.go.jp/koubo/SE3_100001_00002.html
- 3) 経済産業省：「製鉄プロセスにおける水素活用」プロジェクトの研究開発・社会実装計画」
<https://www.meti.go.jp/press/2021/09/20210914002/20210914002.html>
- 4) 水素エネルギー協会：『水素エネルギー読本』（オーム社, 2007).
- 5) 水素エネルギー協会：『トコトンやさしい水素の本』（日刊工業新聞, 2017).
- 6) The International Energy Agency (IEA) : The Future of Hydrogen, 2019 edition,
<https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- 7) 「エネルギー基本計画」(2021 年 10 月閣議決定).
再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議：「水素基本戦略」(2017).
J-Power Group：「CO₂ フリー水素とゼロエミッション」
<https://www.jpowers.co.jp/bluemission2050/hydrogen>

(いちむら・まさや：名古屋工業大学,
電子工学)