

脱炭素社会実現のためのクリーンエネルギー ～水素と燃料電池～

Clean Energy for the Realization of a Decarbonized Society ～Hydrogen and Fuel Cell～

絹川 ゲニイ
Gheni KINUGAWA

要旨

エネルギーの利用と人類の文明が深い関係にあり、文明の発展と同時に使用するエネルギー源やその量が変わってきた。人間の社会経済活動において、電気エネルギーはもっとも欠かすことのできないものになっており、経済成長に沿ってその使用量が大幅に増え続けた。従来のエネルギー構成では、化石燃料が占める割合が非常に高く、日本の電源構成でも化石燃料は8割以上に上る。化石燃料の大量使用が大気中の二酸化炭素濃度を増加させ、地球温暖化を引き起こすとされている。現在では、地球温暖化への対応として二酸化炭素等の温室効果ガス排出を抑制することが世界規模で共通認識になってきた。経済活動や日常生活に大きな支障が生じるようなエネルギーの利用制限は現実的ではなく、環境保護の観点からエネルギー利用による環境汚染をなるべく低減していく努力が求められている。今後、経済と環境の好循環を作っていくためには、現在のエネルギー構成を変えて、化石エネルギーから非化石へシフトしていくことが鍵になる。非化石エネルギーの中で注目されているものとして水素エネルギーがある。水素をエネルギーとして利用する手段は燃料電池で、家庭用燃料電池、業務・産業用燃料電池、燃料電池自動車などがある。燃料電池では水素と酸素の化学反応を利用して電気をつくるため、生成物は水で、環境に優しく、発電効率も高い。水素エネルギー利用は、一次エネルギーのほとんどを海外の化石燃料に依存する日本のエネルギー供給構造を変え、大幅な低炭素化と政府が掲げる2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現に繋がる。

キーワード：次世代新エネルギー、水素、燃料電池、低炭素化、脱炭素社会

1. はじめに

人類のエネルギー利用は、約50万年前の薪などを使って火を利用したときから始まったといわれている。また、人類は生活スタイルの変化と発展に応じてエネルギー利用の用途を徐々に高度化・多様化させたともされる。時代に沿ってエネルギーの利用用途の拡大とともにエネルギー消費量も増え、その需要を賄うために石炭や石油、天然ガスなどの化石燃料を使用するエネルギーシステムの構成・運用が行われるようになった。特に、産業革命以降の化石燃料の大量使用による温室効果ガスの排出量の増加に伴う、地球環境の悪化が

進み、その影響は地上気温の上昇や海水温の上昇、生態系の変化、海面水位の上昇、雨の酸性化などで表面化してきている。地球温暖化への対応として二酸化炭素等の温室効果ガス排出を抑制することが世界規模で共通認識になっているが、経済活動や日常生活に大きな支障が生じるようなエネルギーの利用制限は現実的ではない。環境保護の観点からエネルギー利用による環境汚染をなるべく低減していく努力が求められている。今後、脱炭素社会実現へ向けた経済と環境の好循環を作っていくためには、現在の化石燃料が大半を占めるエネルギー構成を変えて、化石エネルギーから非化石へシフトしていくことが重要な鍵になる。非化

石エネルギーとしては原子力エネルギーと再生可能エネルギー・水素エネルギーがある。東日本大震災を機に、将来的には「脱原発」を掲げ、再生可能エネルギーの利用拡大と普及を目指した取り組みが始まっている。また、水素はカーボンニュートラル実現のための鍵となる次世代新エネルギーとして注目され、利活用やさらなる技術開発が進んできている。水素エネルギーの利活用においては、化学反応を利用して電気をつくる燃料電池と近年、話題になってきている水素を燃料として使う水素エンジンがある。本稿では、主に水素エネルギーの利活用で普及が進められている燃料電池に注目し、水素をエネルギーとして利用する意義や水素の作り方、燃料電池の仕組みやその現状と将来展望などについて検討する。

2. 水素

2.1 水素とはなにか

水素は、元素周期表で原子番号1の元素であり、元素記号はHで表す。通常水素と呼ぶ場合は、二つの水素原子が共有結合で結合した水素ガス(分子)の H_2 を指す。無色、無臭で地球上では最も軽い気体であり、水素ガスの重さは空気の平均重さ28.8の14分の1と大変軽く、大気中で漏れた場合はすぐに拡散するという性質を持っている。可燃性気体で着火性が高く、燃焼速度も速い。水素が燃えても火炎が見えにくく、火炎温度は $2,000^{\circ}C$ の高温に達し、また、水素は極低温の $-252.6^{\circ}C$ で液体になる。宇宙空間では星間ガスとして多量に漂っており、その総量は宇宙の質量の約70%を占めるとも言われている。太陽をはじめ、宇宙の星々のほとんどが水素の核融合反応によって光っているとされる。水素の存在状態として単体で存在することはほとんどなく、水や化石燃料や有機炭化水素などのように化合物として地球上に大量に存在する^{1,2)}。

水素は、現在でも産業用途として、肥料製造や半導体加工、石油化学工業などで広く使われている。具体的にいうと、アンモニア肥料、合成樹脂、メタノール、医薬品、過酸化水素水など化学製品の原料になる。脱硫、漂白殺菌、油脂硬化、半導体加工などで化学加工用として使用される。熱利用として石英ガラス溶融、合金の焼結、溶接に使用される。また、ガスクロマトグラフィー分析で

化学分析用や観測用気球、飛行船では浮力利用として使用される。液体ロケットの燃料としても使用される。最近では、燃料電池車・水素エンジン車の燃料として使用し始まっている³⁾。

2.2 水素エネルギーの意義

枯渇が心配される化石燃料については、いつまで使い続けられるのかという課題がある。一般的には、燃料の可採年数の推測は、エネルギー資源確認埋蔵量として報告されている。それは現時点で確認されている経済的、合理的な範囲で採掘可能なそれぞれの資源の埋蔵量を年間の生産量で割ったもので、「このまま使い続けるとあと何年資源を採取できるか」という数字である。このエネルギー資源確認埋蔵量は、石炭は130年とウランが100年ほど、石油、天然ガスは50年ほどと見られている⁴⁾。各種技術革新によってこの数字が変わっていく可能性はあるが、化石燃料がいつかは枯渇する有限な資源である。化石燃料とは違い、水素エネルギーを利用する意義は多く存在する。

- 1) 枯渇性の化石燃料とは違い、原料が豊富な水であり、種々の1次エネルギーを有効に使って作り出せるため、資源的な制約がない。また、副生水素、原油随伴ガス、褐炭といった未利用エネルギーや、再生可能エネルギーを含む多様な一次エネルギー源から様々な方法で製造も可能であり、地政学的リスクの低い地域からの調達や再生可能エネルギー活用によるエネルギー自給率向上に繋がる可能性がある。
- 2) 燃焼生成物が水だけであるため、化石燃料のように二酸化炭素や硫酸化物、窒素酸化物を排出しないので環境破壊の心配がなくクリーンであり、地球上の物質循環サイクルを乱さない。さらに、水素の製造時に二酸化炭素回収・貯留技術(CCS: Carbon Dioxide Capture and Storage)を組み合わせ、又は再生可能エネルギーを活用することで、トータルでの CO_2 フリー化が可能である。
- 3) 水素エネルギーは、燃料電池により直接発電に使用すれば、高効率に電気エネルギーに変換できるので省エネルギーに繋がる。
- 4) 電力は貯蔵が困難で輸送に伴うロスが大きいものに対して、水素エネルギーは貯蔵も輸送も容易であり、分散型電源にも向いている。

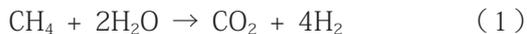
5) 日本は、燃料電池分野で優れた技術力を持っており、燃料電池関連発明での特許出願件数は世界第一になっているので、日本が強い競争力を持つ分野でもある。このような高い水準の技術力は、産業振興の戦略になる。

2.3 水素の作り方

水素は、単体の形では地球上に存在していないため、燃料電池に使うためには、何らかの方法で人工的に作り出さなければならない。水素の作り方には、以下のようなものがある。

1) 水蒸気改質法

天然ガス、LPG (Liquefied Petroleum Gas)、ナフサ、石油残渣といった炭化水素から水素を製造する方法としては、水蒸気改質法や部分酸化法などのプロセスが実用化されている。その反応式の例を以下の反応(1)と(2)に示す。



2) 水の電気分解と水の直接分解

水の電気分解法では、太陽光発電と組みあわせて、太陽光で発電を起し、その電気で水を分解する。これは再生可能エネルギーを利用して水を電気分解する方法である。水の直接分解法では、光触媒を使って水を直接分解する。その反応式は以下の反応(3)のとおりである。



3) 熱分解、水蒸気分解、微生物による分解

未利用有機資源(バイオマス)や有機性廃棄物から熱分解、水蒸気分解、微生物による分解により水素を生成することができる。

4) 食塩電気分解

ソーダ工場における食塩水の電解プロセスなどから副次的に水素が発生しており、この水素は主として工場内の他のプロセスの原料やエネルギー源として利用されている。

5) 製鉄からの副生

鉄鋼製造プロセスからは大量の副生ガスが発生する。特に、石炭を乾留し鉄鉱石の還元材として使用するコークスを製造する際に発生するコークス炉ガスの55%は水素であり、その水素を回収して使用する。

現在使用されている水素は、製造過程の違いによって、グリーン水素、ブルー水素、グレー水素に分類されている。

グリーン水素とは、水を電気分解し、水素と酸素に還元することで生産される水素のことで、この水素を利用し、酸素を大気中に放出することで、環境への悪影響を与えずに水素を利用することができる。また、電気分解を引き起こすためには電気が必要であるが、それには、風力や太陽光などの再生可能エネルギーを利用することで副産物としての二酸化炭素を排出させることはない水素である。

ブルー水素とは、天然ガスや石炭等の化石燃料を、蒸気メタン改質や自動熱分解などで水素と二酸化炭素に分解し、その時排出される二酸化炭素を大気中に排出する前に回収する方法でつくる水素である。二酸化炭素を回収することで、グリーン水素と同様に、温室効果をゼロにすることができる。

グレー水素とは、水素を生産するプロセスはブルー水素と同様であるが、製造過程で発生する二酸化炭素を回収せずそのまま大気中に放出する手法でつくる水素である。この方法では、水素の生産過程で二酸化炭素を大気中に放出するために、環境負荷が生じる方法である。

2020年現在で、全世界で生産・利用されている水素のうちグレー水素が約95%を占めているとされる。環境保全の観点から将来的には、グレー水素は禁止され、グリーン水素の製造・利用へ行く方向にある⁵⁾。

3. 燃料電池

3.1 燃料電池の仕組み

燃料電池は、水素と酸素を化学反応させて電気エネルギーを取り出す発電装置のことである。燃料電池の発電は、水蒸気で運動エネルギーを造って電気を起こす一般の火力発電や原子力発電とは異なる。また、光電効果にもとづく太陽光発電とも異なる。燃料電池の場合は、化学反応で移動する電子を電気エネルギーに変えるので、運動エネルギーにする過程はないということになる。燃料電池の化学反応は、化学反応として水の電気分解の逆反応と一般的に言われており、その反応式を次の図-1(上)のように書くことができる。水を電気分解すれば酸素と水素になるが、燃料電池の場合は、水素と酸素が反応して電気エネルギーが得られ、水ができ、熱も発生する。燃料電池の

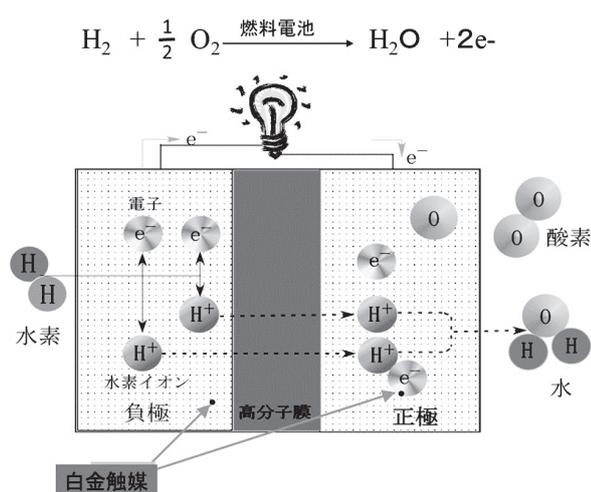


図-1 燃料電池の発電原理（固体高分子膜）

原理を模式的に図-1（下）に示す。図に描いた通りに、燃料電池は二つの電極とその間に挟まれる高分子膜からなる（固体高分子形燃料電池の場合）。また、各電極に白金触媒が組み込まれている。純水素を水素ボンベ等から電極に流すと負極で水素が白金触媒の影響を受け、水素イオンと電子に分かれる。水素イオンは高分子膜を通り抜け、電子は導線を通して正極へ移動する。また、燃料電池は大気中から酸素を自動的に取り込む仕様になっており、取り込まれる酸素は負の電極から移動してきた水素イオンと結びついて水になる（図-1を参照）。

3.2 燃料電池の種類

燃料電池は使用する電解質の種類によって、固体高分子形（PEFC）、りん酸形（PAFC）、熔融炭酸塩形（MCFC）、固体酸化物形（SOFC）の燃料電池に分類される。固体高分子形燃料電池では、電解質は固体高分子膜（イオン交換膜）、燃料は水素、作業温度は常温～約90℃、発電出力は～50kw、発電効率は30～40%などの特徴を有し、家庭用、自動車、携帯機器、自動販売機等に使用できる。りん酸形燃料電池では、電解質はりん酸（H₃PO₄）、燃料は水素、作業温度は約200℃、発電出力は～1000kw、発電効率は35～42%などの特徴を有し、業務用（病院、ホテル、ビル等）として使用できる。熔融炭酸塩形燃料電池では、電解質は炭酸リチウム等（Li₂CO₃）、燃料は水素、一酸化炭素、作業温度は約650℃、発電出力は1～10万kw、発電効率は40～60%などの特徴を有し、分散電源、工場、火力発電所の代替等に使用

できる。固体酸化物形燃料電池では、電解質は安定化ジルコニア（ZrO₂+Y₂O₃）、燃料は水素や一酸化炭素、作業温度は約1000℃、発電出力は1～10万kw、発電効率は40～65%などの特徴を有し、家庭用、業務用、分散電源、火力発電所の代替として使用できる⁶⁾。

上述の燃料電池の中で固体高分子形燃料電池の歴史は割に古く、それは燃料の供給法の違いにより、直接水素型、改質燃料型、ダイレクトメタノール型に区分される。直接水素型の燃料電池は、水素を燃料にする。水素の貯蔵方法は、高压ガス容器、吸蔵合金、液体水素などのスタックで、主な用途は自動車である。改質燃料型では、メタノールやガソリン、天然ガス、ジメチルエーテルなどを燃料にする。貯蔵方法は、改質から発生した水素をスタックにし、主な用途は自動車や定置型電源である。ダイレクトメタノール型ではメタノールを燃料にする。メタノールをスタックにし、ライブカメラ、無線基地局、信号機、LED標識、災害対応デジタルサイネージ、観測機器（火山、地震、気象）、災害時の停電対策や非常用電源などに使用される。携帯電話やパソコンの電源としても使用できる⁷⁾。

3.3 燃料電池の応用例

燃料電池を活用した用途の一つは運輸である。2015年トヨタが開発して販売を開始した燃料電池自動車「MIRAI」はその代表的な例である⁸⁾。「MIRAI」は、「究極のエコカー」と呼ばれていて注目されている。そのイメージを図-2に示す。車の基本構造は、水素タンク内の水素と空気中の酸素を化学反応させた時に生じる化学エネルギーで電気を起こす。発生した電気で自動車のモーターを回してその動力で自動車を走らせる。走行中に排出されるのは水だけになるので、環境にやさしくてクリーンである。燃料電池以外の部分は電気自動車と同じで、電気自動車のバッテリーの代わりに燃料電池を積んだことになっている。「MIRAI」は乗用車であるが、同様な原理で燃料電池を二輪車やバス、タクシー、船舶などでの用途に拡大できる。運輸部門は、最終エネルギー消費の約2割を占めており、現在使用している燃料の大半を石油製品に頼っているために、排出されるCO₂量も少なくない。2018年度の報告によれば、運輸部門からの排出量は約2.1億 [t-CO₂]



図-2 トヨタ燃料電池自動車「MIRAI」
出典：トヨタ自動車WEB

となっており、全体12.4億 [t-CO₂] の約2割を占める。運輸の内訳では、自家用乗用車が約半分、それ以外の業務用車両、船舶、鉄道等は全体の約半分を占めている⁹⁾。ガソリン車と同程度の実用化水準をほぼ達成して、自家用乗用車向けの燃料電池を転用することで、大量のCO₂削減に繋がる。バスやタクシーなどの業務用車両、フォークリフトなどの産業用車両をはじめとする様々な運輸用途に燃料電池の活用を拡大することで、その効果がさらに大きくなるだろう。

燃料電池のもう一つの用途は、定置用燃料電池システムである。そのイメージを図-3に示す。一般家庭で電気をつくり、お湯も同時につくり出すことができる家庭用燃料電池の「エネファーム」がその例である。「エネファーム」は、都市



東芝燃料電池システム(株)

図-3 エネファーム2016年モデル
出典：東芝エネルギーシステムズ(株)

ガスやLPガスから水素を取り出し、その水素と空気中の酸素を化学反応させて、電気をつくり出す。このとき発生する熱でお湯を沸かし、給湯などに利用が可能になる。エネルギーを有効活用するので省エネにも大きく貢献する。家庭用燃料電池「エネファーム」は、2009年に市販が始まっている。2015年12月に累積販売台数が15万台を超えた¹⁰⁾。発電もできて給湯器としても使用できるので利用拡大が進められている。政府が2030年には全世帯の1割に設置することを、国の目標に掲げている¹¹⁾。2017年からは、家庭用より大型の燃料電池発電システムの市販が予定されていて、商品化・実証・販売が進められてきた。大型の燃料電池は、りん酸形燃料電池(PAFC: Phosphoric Acid Fuel Cell) や固体酸化物形燃料電池(SOFC: Solid Oxide Fuel Cell) を



超小型携帯電源 MiniPak
出典：Space Device株式会社



高出力タイプ
出力：200W
用途：災害用非常電源等
出典：ローム

図-4 水素燃料電池を使用した超小型携帯電源

中心に商品化され、2017年10月に、京セラ、三浦工業、MHPSの3メーカーがSOFCの発売を開始した¹²⁾。近年は、業務用・産業用の数百kW出力を持つPAFCやSOFCが開発されている¹³⁾。これらの燃料電池は主に電気と熱を供給するオンサイト用コージェネレーション装置として利用できるようになっている。このようなシステムでは、災害時などの非常時には系統から独立運転に切り替え運転を継続することができる。また、都市ガスが停止しても備蓄LPガスに切り替えて運転を継続することも可能である。特に、固体酸化物形燃料電池SOFCは、次世代型燃料電池と呼ばれ、様々な実証研究が行われている。この種の燃料電池は発電効率が高く、事業所向けの革新的エネルギー源として注目されている。高い発電効率とともに、従来型のような高価な白金触媒を必要としないところも魅力の一つである。日本が今まで蓄積してきたセラミック技術を活用することで、大型化することも可能である。SOFC稼働中は、作動温度が高温の1000℃前後になるので、材料劣化の問題などの耐久性データの蓄積と課題解決のための実証が求められる。

上述の運輸用途や定置用燃料電池以外にも、燃料電池を様々な用途に活用していくことが検討され、商品開発と市販が進んでいる。述べてきたとおりに燃料電池で、発電中にCO₂等のガスが排出されないことや、発電中の音が静かであることから、室内の使用にも適しており、非常用発電機として有望である。実用化されている商品事例イメージを図-4に示す。このような商品の特徴としては、燃料を充填することにより、通常の二次電池に比べ長時間の発電が可能であることが挙げられる。そのために、小型の各種モバイル機器の充電器や高出力タイプの災害用非常電源、長時間利用できる地震・火山観測用観測機器の電源、停電時の交通信号機用の非常用電源等に活用できる。

4. 水素エネルギーの現状と課題

4.1 国外の動向

2015年12月にフランス・パリで開催された国連気候変動枠組条約第21回締約国会議(COP21)において、世界約200カ国が集まり、地球温暖化問題に関するパリ協定が採択された。この協定では、1997年に定まった「京都議定書」の後を継ぎ、

国際社会全体で温暖化対策を進めていくことが決まり、世界の平均気温上昇を産業革命前と比較して、2℃未満、できれば1.5℃に抑える努力を追求することが目的とされている¹⁴⁾。そのための挑戦は既に始まっており、目標達成のために政府および国際機関と民間セクターの協力によるエネルギー生産のイノベーションが最も重要と明記された。クリーンな水素エネルギーは、世界の主なエネルギーミックスの一端として、パリ協定の目標達成を促し、雇用創出と経済活性化を後押しすると期待されている。特に、水素が風力または太陽光などの再生可能エネルギー源または低炭素エネルギー源により生産された場合、水素の使用場所におけるCO₂排出がゼロになり、脱炭素社会形成に貢献できる。そのため世界的に再生可能エネルギーと並ぶ次世代新エネルギーとして注目を集めている。最近の動向では、世界の先進国が中心になって水素エネルギー普及に向けて動き出している。世界主要国の取り組みの概要は下記の通りである¹⁵⁾。

米国では、2000年代初めから政府がカリフォルニア州を中心に、FCVと水素エネルギーの普及に力を入れている。そのための様々な取り組みが進んでおり、2019年10月現在で41カ所の水素ステーションが稼働しているとされる。FCVの販売台数も2019年10月現在で7570台に上り、乗用車だけでなくトラックやフォークリフト、バスといった乗り物にも燃料電池(FC)を活用する動きが加速している。

ドイツもいち早く水素利用計画を推進しており、2004年からFCVと水素ステーションの実証関連プロジェクトを開始している。2007年からは「水素・燃料電池技術革新プログラム(NIP)」が始まり、技術開発への資金が投入され、2009年にはFCVと水素ステーションの全国的な普及を目指したインフラ整備を検討する官民一体の水素関連プロジェクト「H2 Mobility」が発足している。2019年11月時点で、水素ステーションの設置数は77カ所に上る。

オランダは、大規模水素発電計画を推進し、同国のマグナム(Magnum)発電所は、同発電所が所有する3基のガスタービンに順次水素発電に切り替えるという計画を発表している。100%水素を利用する「水素専焼発電」による発電所を実際

に運転する取り組みは、世界でも初である。この計画の実現によって、年間約400万トンのCO₂排出が削減できる見込みとされる。

オーストラリアは、水素エネルギーの輸出国を目指して動き出している。これは、国が掲げる、再生可能エネルギー輸出国を目指すという方針の一環であり、そのためのクリーンエネルギーの導入が進んでいるとされる。その中でも水素エネルギーを最上位に置き、再生可能エネルギー由来の水素の輸出も視野に入れ、「国家水素戦略」の策

定に取り組んでいる。首都のキャンベラでは1億8,000万ドルをかけて水素への投資を促進しているほか、ドイツのシーメンス社と進める水素発電の計画では、既存のプラントを活用した水素燃焼技術の導入が検討されている。

中国でも他の先進国と同様に、水素エネルギーに関する戦略的位置づけが、近年、さらに重要度を増している。2021年に採択された「中華人民共和国の国民経済と社会発展の第14次5カ年計画及び2035年長期目標綱要」において「水素エネルギーとエネルギー貯蔵などの最前線の科学技術と産業を起し、未来の産業インキュベーションを実施し、加速させ、未来の産業を計画する」と記述し、水素エネルギーを未来の先端的技術の一つとして位置付けている。燃料電池自動車・水素ステーション設置の実績と目標としては、2019年末までに累計約6200台の燃料電池自動車が販売され、水素ステーションの数も1000カ所以上に上る。中国製造2025のために工業信息化部が中国自動車工程学会などに依頼して策定した「省エネ・新エネ自動車技術ロードマップ」によれば、低温での起動温度など2020年に目指す目標はトヨタ・ミライの性能とほぼ同じであった¹⁵⁾。

図-5に水素エネルギー需要の現在と将来予測を示す¹⁶⁾。水素協議会データによれば、2020年現在の水素エネルギー需要は10EJ（Exajoule：エクサジュール）で、2030年には14EJ、2040年には28EJ、2050年ごろになると、世界水素エネルギー需要は2020年の10EJから約8倍増加し、78EJと予想されている。このエネルギー量は、世界の全エネルギー需要の18%を占める規模である¹⁷⁾。水素需要が増え、生産量も増加すれば、製造コストも低価格化に向かうとされている。図-6に、世界の水素価格の現在と将来予測を示す¹⁸⁾。水素協議会データによれば、2020年の水素価格は6USD/kgで、2030年には2.5USD/kg、2050年には、2020年の6USD/kgから25%程度の1.5USD/kgとなると予測される。

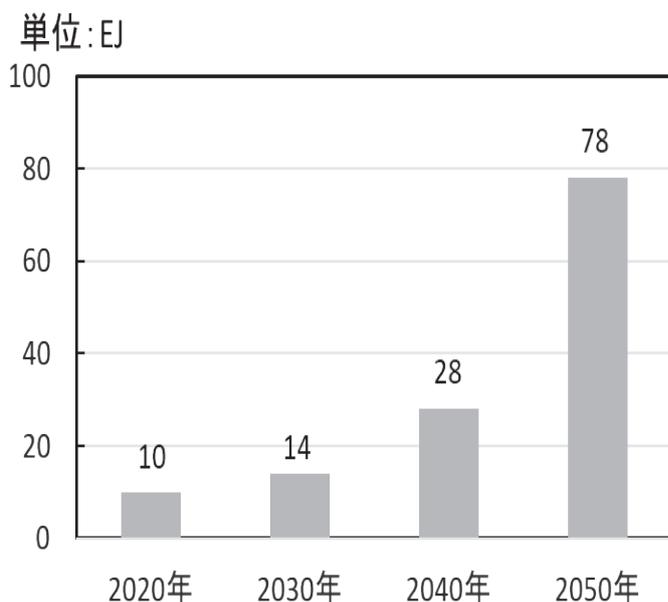


図-5 世界の水素需要の現在と将来予測
出典：水素エネルギー協議会データを基に作成

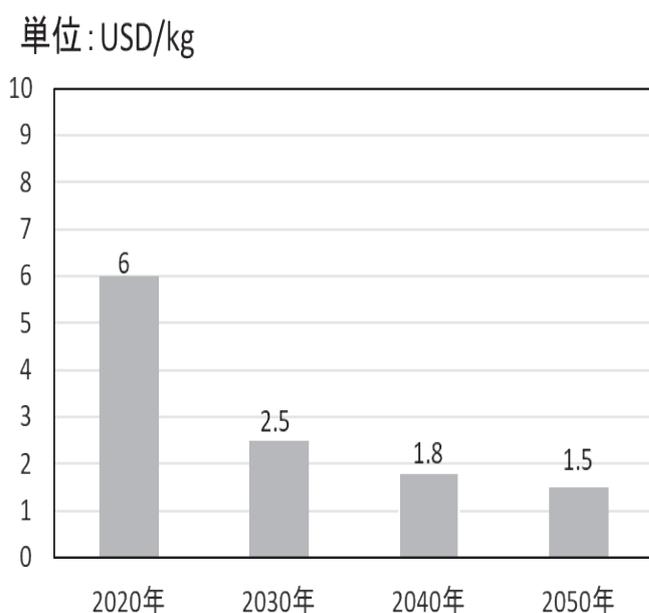


図-6 世界の水素価格の現在と将来予測
出典：水素エネルギー協議会データを基に作成

4.2 日本の動向

2014年4月に策定された第4次エネルギー基本計画では、「水素をエネルギーとして利用する“水素社会”についての包括的な検討を進めるべき時期に差し掛かっている」等の記載が盛り込まれた。同年6月には産学官の有識者検討会議である水素・燃料電池戦略協議会において、水素社会実現に向けた官民の関係者の取組を示した「水素・燃料電池戦略ロードマップ」がとりまとめられた¹⁹⁾。水素基本戦略は、世界に先駆けて水素社会を実現し日本がカーボンフリーを牽引していく存在となることを大きな目標とした。その目標を実現するための取り組みを示唆し、官民一緒になって取り組みを始めている。2018年7月3日に「第5次エネルギー基本計画」が閣議決定され、「東京電力福島第一原子力発電所事故の経験、反省を教訓に肝に銘じて取り組むこと」などを原点として2030年、2050年に向けた方針が示された。その中で、再生可能エネルギーの位置付け、脱炭素化エネルギーシステム間のコスト・リスク検証が指摘され、水素エネルギーに関しても、水素社会実現に向けた取組の抜本強化「水素基本戦略」に基づき、エネルギー安全保障と温暖化対策の切り札にすることが明記された²⁰⁾。2019年3月、ロードマップを改訂し、戦略の実現に向けて目指すべきコスト目標等の深堀を実施、同年9月に技術開発戦略を策定し、重点的に取り組むべき技術開発を特定した²¹⁾。

菅政権では、成長戦略の柱に経済と環境の好循環を掲げて、グリーン社会の実現に最大限注力していくことを目指して、国内においては、2050年までに、温室効果ガスの排出を全体として実質ゼロにする、2050年カーボンニュートラル、脱炭素社会の実現を目指すことを宣言した。カーボンニュートラルを実現するために、排出される温室効果ガスの8割以上を占めるとされるエネルギー分野の革新的な変化が重要である。電力需要を極端に減らすことは非現実的で、エネルギー構成を現在の化石燃

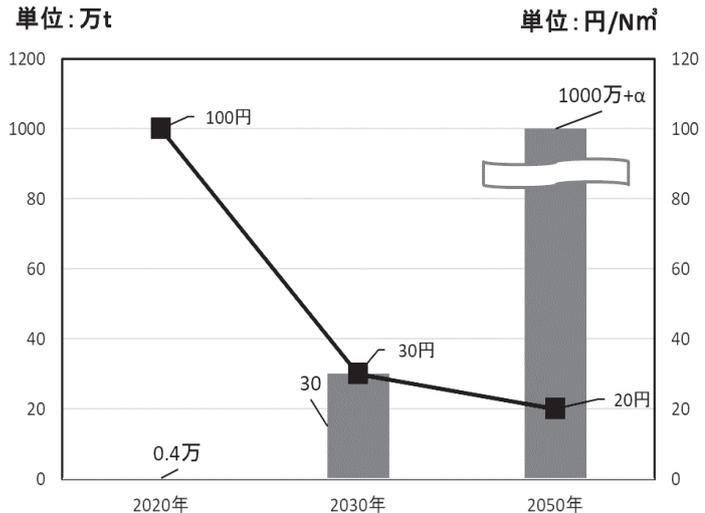


図-7 日本の水素需要と価格の現在と将来予測
出典：経済産業省データを基に作成

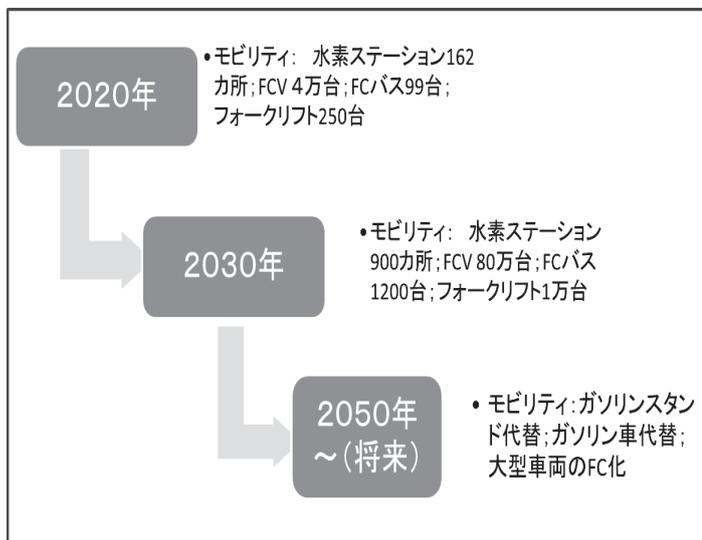


図-8 モビリティ分野の水素エネルギーの現状と将来予測
出典：経済産業省データを基に作成

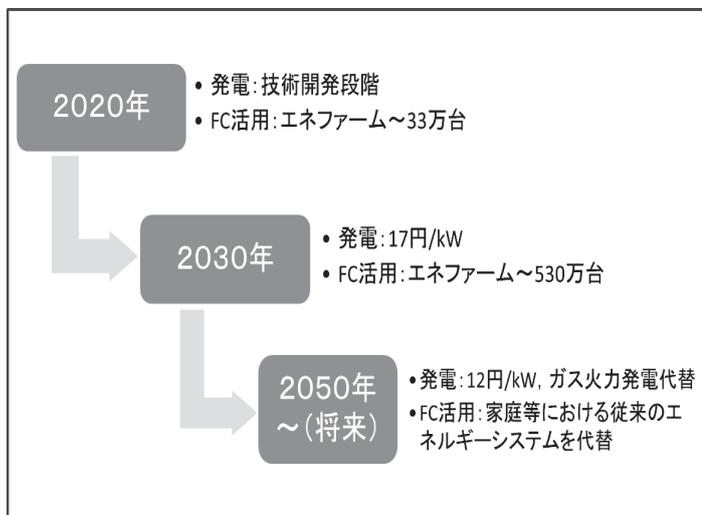


図-9 発電とFC活用における水素エネルギーの現状と将来予測
出典：経済産業省データを基に作成

料を主とする構成から非化石へとシフトさせて行くことが鍵になる。そのためには、再生可能エネルギーと並ぶ水素エネルギー利活用の拡大が求められている。なお、水素エネルギー普及には、水素の調達、製造、販売、消費などの一連の流れであるサプライチェーンを構築することも必要不可欠であり。このことから国内において、地域資源活用による低炭素な水素サプライチェーンの構築支援を行い、地域の水素需要拡大や需要最適化、設備や運用の低コスト化が促進されている。

図-7に日本の水素需要と価格の現在と将来予測を示す。図の横軸は年代を、左縦軸は水素需要量（単位：万t）、右縦軸は水素の価格（単位：円/Nm³）を示している。2020年現在の水素需要量は0.4万t、2030年は30万tに増加し、2050年以降になると「1000+ α 」万tになると予測されている。

図-8にモビリティ分野の水素エネルギーの現状と将来予測を示す。モビリティ分野においては、2020年現在の水素ステーションは162カ所、FCVは4万台、FCバス99台、フォークリフト250台のものを、2030年になると、水素ステーション900カ所、FCV80万台、FCバス1200台、フォークリフト1万台に、さらに2050年以降は、ガソリンスタンドがすべて水素に代替、ガソリン車も燃料電池車代替、大型車両のFC化が実現されると予測される。燃料電池車（FCV）は、水素基本戦略のなかでも特に注目されている分野であり、2020年代後半までに水素ステーション事業の自立化を目指し、2030年までにFCV80万台の普及を達成の目標とするとしている。このほか、FCバス、FCフォークリフト、FCトラックなど運送業用の商業車両や産業車両についても導入の目標を定めている。

図-9に発電とFC活用における水素エネルギーの現状と将来予測を示す。水素発電の利用を拡大させ2030年頃の商用化を実現、発電コストについては、17円/kWhのコストを目標としている。将来的に既存のLNG火力発電と同等のコストの12円/kWhを目指している。経済産業省資源エネルギー庁データによれば、2020年現在は発電における技術開発段階であり、サプライチェーン構築実証とスケールアップが行われている。FC活用においてはエネファーム～33万台が導入され

たとされる。2030年になると、エネファーム～530万台まで増加し、発電コストは17円/kWhまで低価格され、2050年以降は家庭等における従来のエネルギーシステムをエネファーム代替、水素発電コストも12円/kWhまで低価格して現在のガス火力発電の代替になると予測される。

燃料電池の活用範囲を拡大し、エネファームや集合住宅、寒冷地などでの燃料電池技術を活用し、水素社会へのシフトを加速させ、2030年以降はCO₂フリー水素を燃料として使う純水素燃料電池コージェネへシフトしていくこと、水素に関する革新的技術の開発で2050年には、高効率な水素製造技術とエネルギーキャリア等を目指している。

このような目標のためには、水素を大量調達するアプローチと国際サプライチェーンを構築していくことも重要であり、水素エネルギー関連分野において国際的な枠組みを活用し、国際標準化にも取り組んでいる。

4.3 水素エネルギーの課題

水素をエネルギー資源にする水素社会を実現するためには、解決すべき課題は複数あるが、その中でも最初に乗り越えないといけない大きなものは二つある。その第一番目は、どのようにして水素を、安価かつ大量で製造するかということである。第二番目は、超高压の水素技術を必要とする水素ステーションなどの水素インフラの普及である。

第一の課題については、水素ガスは2次エネルギーであり、地球上に大量に存在する水素は化合物状態しかなくて、エネルギーとして使用する水素ガス資源は単体では存在しないのである。そのために、水素を人工的に、水素の化合物から分解して取り出す必要性があり、電気エネルギー等のほかのエネルギーを使って、水素を取り出さなければならないという問題がある。水素の製造においては、資源的に制約のない水を分解して水素をつくるのが一番理想的である。しかし、化石燃料で電気を作って、その電気で水を電気分解して水素取り出し、それを燃料電池で使うというのは非現実的である。また、水素を化石燃料の改質で作る場合も、化石燃料を使用する火力発電と同様にCO₂が発生するし、発電効率を考えると化石燃料単体で使うよりも総合効率は低下するのでほとんど意味がないことになる。今後、太陽光や風力のような再生可能エネルギーを使って、安価な電

力が十分得られた場合、その電気で水を電気分解すれば、水素製造過程において二酸化炭素を排出しないので、いわゆるグリーン水素が得られることになる。このような方法で水素を製造することが、将来性が期待できるものであり、太陽光発電と水の電気分解を組み合わせた実証実験が始まっている。東日本大震災以降、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構等が構築した世界最大規模の再生可能エネルギーを利用した水素製造施設の福島水素エネルギー研究フィールド（Fukushima Hydrogen Energy Research Field：FH2R）がその事例である²²⁾。

第二の課題については、水素エネルギー普及拡大の鍵を握るのは、燃料となる水素を補充するための水素ステーションである。現状では、水素ステーションの数は少なく、燃料電池自動車などをどこでも使えるというわけではない。2019年末時点において、日本国内には112か所の水素ステーションが存在しているとされる。まだ、一か所も水素ステーションがない県が19もあり、水素を補給できないことで燃料電池自動車の普及が進まない要因の一つとなっている。その他にも、国内で販売されている燃料電池自動車の種類もトヨタが製造販売している燃料電池自動車未来「MIRAI」とホンダが製造販売している「クラリティフューエルセル」の2種類しかなく、値段も通常のガソリン自動車の倍ぐらいの700万円～という割高の価格設定になっているので高価格も普及が進まない理由の一つとして考えられている。経済産業省は水素ステーションの建造に関わる多くの規制緩和に着手しており、国内の水素ステーション数も増加を促進させるよう働きかけを続けている。各種補助金などもあり、今後水素インフラ問題が解決に向かうだろう。

上述の二つの課題以外にも水素エネルギーを世界規模で普及するためには、世界規模で協力して各国間で水素の取引ができるような国際水素サプライチェーンの構築を、どのようにして効率よく進めて行くべきかというのも今後の課題である。

5. 水素エネルギーの展望

水素エネルギーは、FCV、FCバス、FCトラック等のモビリティ分野で利用が拡大すると、現在主に化石エネルギーに頼っている運輸分野による

CO₂排出の大量削減が可能になる。また、電力分野で利用されることによって電力分野の脱炭素化にも貢献する。その他に、電化による脱炭素化が困難な産業部門等の脱炭素化にも貢献する。近年、水素エネルギーを利用する家庭用燃料電池エネファーム、業務・産業用の定置型燃料電池、燃料電池を駆動電源にする燃料電池自動車などや水素を供給する水素インフラ等に関する様々な研究開発が進められてきている。これらは、CO₂削減に貢献する他に、市場に対しても大きな影響を与えることは確実である。水素協議会（HYDROGEN COUNCIL）の2017年報告によれば、水素エネルギーの規模が拡大して行く場合、2050年には、世界のエネルギー需要の約18%を占め、3000万人の雇用創出と2.5兆ドルの売上げをもたらし、年間約6ギガトン（Gt）のCO₂の削減に繋がる可能性があるとされている²³⁾。水素協議会の2021年2月に発表した報告では、この10年間に世界で計画されている水素プロジェクトの大部分および関連投資のうち最も大きな割合を占めるのは欧州であり、世界中で発表されている水素プロジェクト228件のうち、55%に当たる126件を占めている。大半はこの10年間に開始される予定で、計画されているプロジェクトが全て実現すれば、そのグローバルな投資額は300億ドルを超え、これはエネルギーセクターの全投資額の約1.4%に当たり、欧州が全体の約45%を占めるといふ²⁴⁾。イギリスのエネルギー大手のNorthern Gas Networksがプロジェクト「H21 Leeds City Gate」において、自社のパイプライン網を100%水素使用に転換する計画である。H2 Mobilityが2023年までにドイツ首都圏の数百の水素ステーションを建設し運営することを計画している。また、大きなプロジェクトとして日豪協力して新エネルギー開発事業として行う世界初の褐炭水素プロジェクトがある。同プロジェクトにはオーストラリア連邦政府のほか、ビクトリア州政府から資金支援が約束されている。同プロジェクトにかかる総費用は、約416億6,400万円に上る。オーストラリアに埋蔵する褐炭の量は、日本のエネルギー需要240年分に相当するとされ、日本のエネルギーの安定供給を確保する上でも重要な役割を果たすものと期待される²⁵⁾。国内では、再生可能電力を使用してCO₂を排出しないでグリーン水素を生産

する電解工場を福島県に建設し、福島を水素の供給センターとすることを目指した「福島水素プロジェクト」があり、すでに始動し始めている。これらすべてのプロジェクトと、これから立ち上げられる数多くのプロジェクトにより、政府と業界の協力が未来のベンチャー開発をどのように導くかが実証される。日本の先端技術で高温などにも耐えられる安全性が非常に高い吸蔵合金が発明され、実証実験が始まっている。これは水素の安全的な貯蔵と輸送にさらなる利便性を提供し、水素エネルギー普及の加速化に貢献するに違いない。すでに、地域や政府レベルで調整の先導が始まっている。日本のエネルギー戦略には、クリーンエネルギーの未来を実現するための重要な戦略として水素がすでに盛り込まれている。JR東日本は2022年2月18日、神奈川県川崎市にある鎌倉車両センター中原支所にて、燃料電池をモーターの動力にするハイブリッド車、FV-E991系「HYBARI」の実証を報道陣に公開した²⁶⁾。この電車は、JR東と日立製作所、トヨタ自動車の3社が共同開発した国内初のものである。モーターを用いて走るところは普通の電車と同じであるが、発電所から供給された電力を使わず、車両に詰め込んだ水素で電気を造りながら走るという特徴を持っている。FC自動車の普及に時間がかかっている現状では、私たち一般人がFC自動車よりも先に、燃料電池電車に乗ることができる時代が近いかも知れない。日本以外でも、ドイツ、アメリカのカリフォルニア等のエネルギー戦略にも水素が盛り込まれている。このような事例が近い将来、他にも出現し、水素社会実現に大いに貢献できることが期待できる。

6. おわりに

現在でも進行中の地球温暖化を防止し、脱炭素社会を実現するためには、CO₂フリーエネルギーの導入と利用拡大が不可欠である。そのための選択肢の一つは、水素エネルギーの利用拡大であり、水素関連技術の開発・実証・応用を進めていくことが求められる。また、水素エネルギー普及のためには、一カ国の取り組みだけでなく、世界規模で協力して各国間で取引ができるような国際水素サプライチェーンの構築も重要であり、世界が動き出している。世界の動向と一緒に、日本は独自の技術力を活かして水素利用において世界を

リードしていくため、国を挙げて取り組み、世界に先駆けて水素社会の実現を目指している。水素をCO₂フリーなエネルギーの新たな選択肢として位置づけた水素基本戦略が策定されて個別技術の導入・普及に係る今後のロードマップの施行が行われている。政府全体として施策を展開し、基本戦略に基づき、エネルギー安全保障の確保と温室効果ガスの排出削減の課題を同時並行で解決するという挑戦が始まっている。近い将来官民学一体となって行っている様々な取り組みが実を結び、その効果が目に見える形で表れて来よう。

文献

1. 水素エネルギー白書, NEDO, 2015年2月.
2. 水素エネルギー協会, 水素エネルギー読本, 2007年, オーム社.
3. 水素とイワタニ, 岩谷産業株式会社, <http://www.iwatani.co.jp/>
4. 世界のエネルギー資源確認埋蔵量, 原子力・エネルギー図面集, 一般財団法人日本原子力文化財団, <https://www.ene100.jp/zumen/1-1-6>, 2021年8月閲覧.
5. 水素の種類, Sustainable Japan, <https://sustainable-japan.jp/>
6. 燃料電池の種類, 東北大学, 流体力学研究所, <https://www.ifs.tohoku.ac.jp/jpn/>, 2021年, 8月閲覧.
7. 燃料電池の種類, FC-R&D, <http://www.nenryouden-chi.co.jp/>, 2021年, 8月閲覧.
8. 新型燃料電池自動車MIRAI, トヨタ自動車HP, <https://toyota.jp/index.html>, 2021年, 8月閲覧.
9. 運輸部門における温室効果ガス排出状況, 環境省, <https://www.env.go.jp/council/38ghg-dcgl/y380-08/mat03.pdf>
10. 補助金交付決定ベース, エネファームパートナーズ, 日本ガス体エネルギー普及促進協議会, 2021年4月.
11. エネファーム普及拡大に向けた今後の展望, 第5回エネファームパートナーズ総会, 2018年6月.
12. 業務・産業用燃料電池システム, 一般社団法人日本ガス協会, <https://www.gas.or.jp/pdf/gijutsu/gyoumusangyouyou.pdf>.
13. 燃料電池発電システム, 各社の製品, 一般社団法人日本電機工業会 (JEMA), <https://www.jemanet.or.jp/Japanese/res/fuel/kaihatsu.html>, 2021年9月閲覧.
14. パリ協定の概要, 国連気候変動枠組条約第21回締約国会議 (COP21), 環境省, <http://www.env.go.jp/earth/cop/cop21/>.
15. 脱炭素化にむけた水素利活用に係る国内外の動向, 国・地域別サマリー, 環境省, <https://www.env.go.jp/>, 2021年8月閲覧.
16. Hydrogen scaling up, A sustainable pathway for the global energy transition, HYDROGEN COUNCIL (COP 23), 13 NOVEMBER, 2017.
17. Hydrogen Insights, A perspective on hydrogen investment, market development and cost competitiveness, HYDROGEN COUNCIL, February 2021.
18. 水素基本戦略, 再生可能エネルギー・水素等関係関係会議, 経済産業省, 平成29年12月.

19. 第5次エネルギー基本計画, 経済産業省, エネルギー資源庁, 平成30年7月.
20. 今後の水素政策の課題と対応の方向性中間整理(案), 経済産業省資源エネルギー庁, 2021年3月.
21. 「経済と環境の好循環」を成長戦略の柱に, 菅首相所信表明演説, 2020年10月. 動画, <https://www.youtube.com/>
22. 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO, https://www.nedo.go.jp/ugoki/ZZ_100957.html, 2021年8月閲覧.
23. 水素社会実現に向けた経済産業省の取組, 経済産業省資源エネルギー庁, 2020年11月. 経済産業省WEB <https://www.meti.go.jp/>, 2021年, 8月閲覧.
24. 世界の水素プロジェクト, 業界報告書, ロイター2021年2月17日報道, <https://jp.reuters.com/article/eu-energy-hydrogen-idJPKBN2AHOPC>, 2021年8月閲覧.
25. 世界初の褐炭水素プロジェクト, 施設の運転開始, JETRO 日本貿易振興機構 (ジェトロ), <https://www.jetro.go.jp/>, 2021年8月閲覧.
26. <https://travel.watch.impress.co.jp/docs/news/1389495.html>, 2022年2月閲覧.