

## 北海道における水素エネルギーについて ～各種脱炭素燃料における 水素の優位性と利用形態～



近久 武美 (ちかひさ たけみ)

北海道職業能力開発大学校 校長  
北海道大学 名誉教授

1980年 米国ウィスコンシン大学修士課程機械工学専攻修了  
1982年 北海道大学大学院博士後期課程機械工学専攻修了  
1982年～2019年 北海道大学工学部・講師・助教授・教授  
2019年～2024年 北海道職業能力開発大学校・校長  
各種委員：日本機械学会・熱工学部門長、日本伝熱学会・会長、  
経産省・NEDO研究審査委員長、国交省/経産省・自動車燃費基  
準委員等。専門分野：機械工学、内燃機関、燃料電池、社会エネ  
ルギーシステム

特に風力や太陽光の利用を加速的に推進することが重要なことを先月号で示しました。そうした変化の最終的な投入料金構成は、図1に示すようになるでしょう。石炭、天然ガス、石油、原子力関連の投入料金が大幅に減少し、風力や太陽光およびバイオマス関連に対する料金が格段に増大します。全体コストは現在よりも若干大きくなりますが、海外に流出しているコストが大幅に減少し、国内で循環するお金が顕著に増大します。その結果、日本経済は明らかに活性化するのです<sup>(1)</sup>。ただし、このように大きな変化が生じますので、考慮すべき重要なことがいくつかあります。

まず、既存の電力会社やガス会社が再生可能エネルギー推進の中心となるような仕組みの導入です。現在の仕組みでは、これらの企業の売上が単に縮小するだけで、とても積極的にはなれません。これに対して、既存エネルギー会社が儲かるような仕組みを新たに導入したならば、システムを利用して大規模に再生可能エネルギーが拡大するほか、大型蓄電システムや水素利用技術が合理的に導入されるはずで

す。また、再生可能エネルギーの加速的な導入には大きなカーボン税が最も効果的ですが、その影響が産業や生活弱者に大きな負担とならないような配慮が必要です。そのためには産業部門における税制や補助金の仕

### 1 まえがき

先月号において、地球温暖化の深刻な状況と、日本経済の活性化に及ぼす再生可能エネルギーの効果について説明しました。本号では、再生可能エネルギー導入促進に際する留意点を述べた後、各種脱炭素燃料と比較した水素の優位性、水素の製造・供給の望ましい形態、ならびに産業や運輸部門における水素利用について解説いたします。

### 2 脱炭素社会形成における留意点

脱炭素を推進するには再生可能エネルギーの中でも

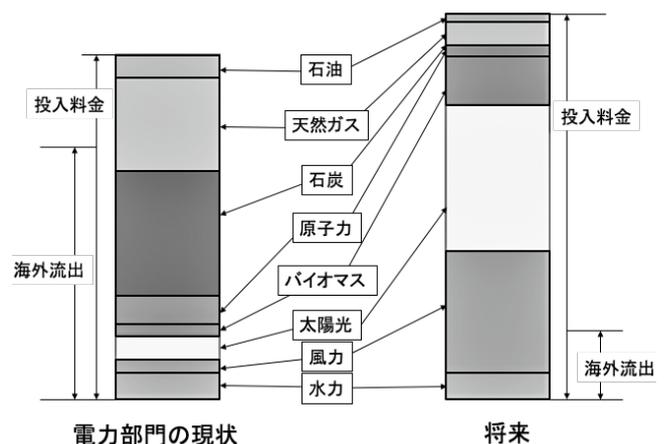


図1 各種エネルギーに対する投入料金 (イメージ図)

組みを考慮するほか、高収入の人達から大きなエネルギー使用料を取るような仕組みが必要です。そもそもGDPは増加しているのですから、偏在している収入に応じて負担を大きくし、その税収を生活弱者や産業に回すようにすれば良いのです。これは先月号で説明した貧富分布曲線に対する対応概念に通じます。

次に、市町村による再生可能エネルギー導入に関する都市計画立案と、近隣住民参加の重要性です。風車や太陽電池の配置はしっかりとした都市計画の元でなされなければなりません。現状のように企業の申請を受動的に許認可する体制では、災害に弱い都市構造になりかねません。私有地を含めてしっかりとした配置計画が必要でしょう。一方、風車や太陽パネルの近隣住民に対して、優先的に有利な条件で出資者になってもらうような仕組みの導入も重要です。そうすると、これらの施設はむしろ近隣住民に喜ばれるはずで、現在はこのような仕組みや配慮が全くなく、それでは再生可能エネルギーの導入は進まないでしょう。

### 3 各種脱炭素燃料の比較

さて、本章から水素に関する議論をしましょう。脱炭素燃料には水素の他に、アンモニア、e-Fuel、メタノールなどがあります。いずれも、将来社会では風力や太陽電池から作られた電気、言い換えるならば水素がスタートになっています。水素がスタートであるにもかかわらず、わざわざこのような燃料が話題となるのは、燃料タンクの容易性によるものです。

まず、e-Fuelは水素と二酸化炭素を原料として、液体の炭化水素系燃料を合成するものです。これは炭化水素系燃料を燃焼したガスを回収して、電気エネルギーを投入し、最終的に元の燃料に戻すのと同じことです。明らかに膨大なエネルギーが必要であり、効率的に成立しないことは明白です<sup>(2)</sup>。メタノールも回収した二酸化炭素と水素から合成する点で、e-Fuelとほぼ同様です。したがってこれらの燃料は高コストが許容される特殊な用途に限定されます。ただし、家畜糞

尿や廃棄バイオマス等から合成されたエタノールは自然エネルギーサイクルの利用であるため、成立します。

次に、アンモニアは世界動向と異なって、日本でのみ燃焼研究が盛んになされており、ここで、将来のアンモニアは再生可能エネルギー由来の水素から合成されますので、水素との優位性比較が重要となります。水素からアンモニアを製造する際に必要なエネルギー量にはさまざまな情報があり、仮にそれが比較的わずかである場合には液体水素に比べて有利になる可能性があります。ただし、アンモニアには毒性があるために一般自動車等で利用することはできず、管理の十分な発電所での利用に限定されることになります。将来の発電所は再生可能エネルギーの補完をする役割となり、変動や部分負荷の多い運転となります。それを考慮しながら圧縮水素、液体水素、アンモニアの選択が行われることになるでしょう。

以上を総合しますと、風車や太陽電池の余剰電力をスタートとする将来社会では、水素と比べてe-Fuel、メタノールの可能性は低く、図2に示すように水素ならびにバイオマスを利用する社会になろうと考えられます。また、アンモニアは変動が大きく稼働率の低い火力発電所において、水素と比べた優位性が比較されることになるでしょう。

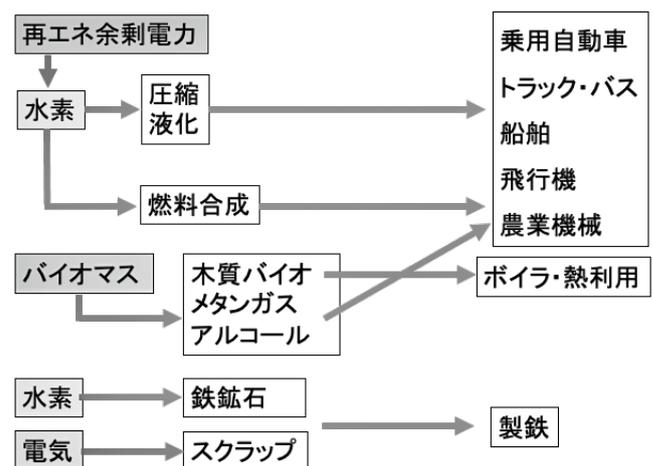


図2 エネルギーフロー図

#### 4 水素の製造・供給形態

水素製造には主として2つの形態があり、アルカリ水電解とPEM型水電解があります。アルカリ水電解は古くからの技術であり、大型化ならびに高効率化の研究が熱心に行われています。一方、PEM型は燃料電池の電流方向を逆にしたような電解装置であり、現在は若干コスト高ですが、高効率です。

図3は道央および道北の再生可能エネルギーから作られた水素を道央で消費する場合、液化水素と圧縮水素の優位性を比較したものです。水素製造と消費地がおおよそ70km以内であれば圧縮水素、それ以上の距離では液化水素で輸送するのが有利となり、液化水素では輸送距離の影響が少なくなることがわかります。

さて、風車や太陽電池の電力から水素を製造する将来は、発電装置の近くで水素を製造する必要はなく、システムを利用して消費地の近くで大規模な水素製造を行うことが可能です。その場合、系統負荷を少なくするために、発電側の変動に同期した水素製造を行うことになるでしょう。図4は変動の大きな再生可能エネルギーを電源として水電解を行った場合の結果であり、コスト最適条件で導入した水電解装置容量を100として、運用期間中の平均電解負荷率を示したものです。通常、水電解装置は100%負荷率で一定運転することを想定しますが、再生可能エネルギーが主体となる将来社会では約35%程度の運転負荷率になることを理解

する必要があります。ただし、電池等と組み合わせて平均運転負荷率を上げることは今後の検討課題です。

図5は水素製造が成立するための水素価格と用いる電力単価を示したものです。利用できる電力単価が4～5円/kWhであれば、水素単価は50円/Nm<sup>3</sup>以上でなければ成立しないことがわかります。これはオーストラリアから水素を輸入する際の価格目標と概ね同程度か、若干割高です。しかし、水素を国内で生産することは関連産業が国内で形成され、しかもお金が国内で循環することの意義を認識しなければなりません。

次に水素利用時の形態について考えましょう。水素は既に燃料電池自動車で利用されており、この場合、700気圧の高圧タンクに封入されます。これだけの高圧タンク技術は既に確立されており、安全性も問題ありません。しかし、長距離バスやトラックなど運行形態が概ね決まっているものに関しては、液体水素を搭

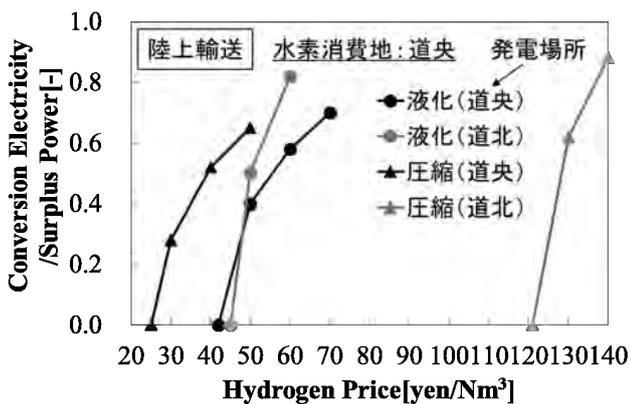


図3 水素料金に対する余剰電力利用割合（輸送距離影響）<sup>(3)</sup>

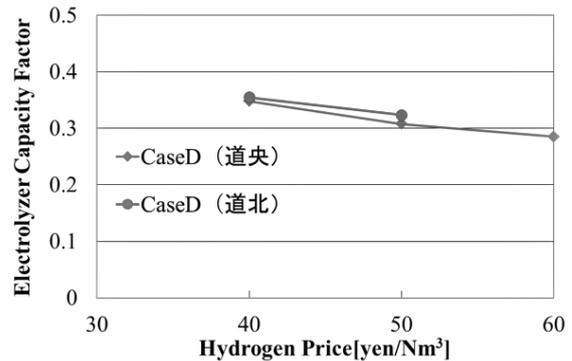


図4 水素料金に対する水電解装置の平均稼働率<sup>(4)</sup>

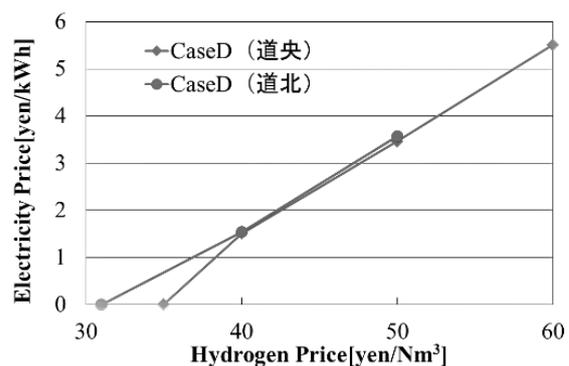


図5 水素料金と許容電力単価の関係<sup>(4)</sup>

載する方が有利となるでしょう。その場合には燃料タンクや搭載エネルギー量ならびに水素ステーションの簡素化の点からも非常に有利となります。また、船用や航空機でも圧縮水素に比べて液体水素の方が有利になります。運行ならびに利用形態に応じて液体および圧縮水素を使い分けることになるでしょう。

このほかに有機ハイドレードを利用する技術があります。これはトルエンとメチルシクロヘキサン(MCH)の間で水素を出し入れするものであり、液体燃料の形で大量の水素を運ぶことができます。ただし、水素反応時に300℃くらいの熱のやりとりが必要となります。水素発生時に必要な熱は動力装置の排熱を利用できますので、特に水素を添加する際に生じる熱の有効利用が重要です。例えばMCH製造ステーションで生じる熱をコジェネレーションと組み合わせられるのであれば、極めて有望な技術になる可能性があります。

## 5 産業、民生、運輸部門のエネルギー利用形態

いずれの分野も主として再生可能エネルギーから生成された電力がスタートになります。そのほかに、バイオマスから生成された燃料が利用されます。バイオマスの中で木材等は定地式の発電や熱供給に利用される一方、廃油やエタノールは貴重な航空機燃料の原料になるでしょう。

再生可能エネルギー由来の電力はそのまま用いるのが最も効率が良く、特に産業や民生では電力利用が主体となるでしょう。例えば暖房では主としてヒートポンプが用いられます。ここで利用しきれなかった電力は水素に変換され、特に製鉄、セメントおよび運輸部門で多く利用されることとなります。

運輸部門において、電気自動車は再生可能エネルギーの効率の良い利用方法になりますが、車両重量、走行距離、充電時間およびバッテリー資源量が課題で、自動車部門における利用には限界があります。したがって、残りは水素燃料電池や水素エンジンで動く自動車になるでしょう。効率は水素燃料電池の方が良い

ですが、水素エンジンの方が安上がりで耐久性があるために、自動車以外には草刈機やブルドーザーなどで用いられるものと思います。

船用のように大きなエンジンになると燃料電池と内燃機関の効率はほぼ同程度になります。したがって、液体水素を燃料としながら、燃料電池や大型内燃機関を動力装置とする船が走るようになるでしょう。有機ハイドレードが社会エネルギーシステムの中で無駄なく利用できる場合には、船用の有望な燃料となります。

一方、航空機には液体水素のほか、バイオマス由来の液体燃料が用いられるでしょう。水素燃料電池とモータの組み合わせによるプロペラ機のほか、ターボプロップエンジンが主要な動力装置になります。

## 6 まとめ

以上、再生可能エネルギー導入促進に際する留意点を解説したほか、各種脱炭素燃料と比較した水素の優位性、水素の製造・供給の望ましい形態、ならびに産業や運輸部門における水素利用について将来像を説明しました。カーボンニュートラルな将来社会では、主として風力や太陽光から作られた変動の大きな電力がスタートとなり、それを極力電気のまま利用するほか、余剰分を水素に変換し、産業や運輸部門でそれらを用いる社会になるものと思います。この場合の大きなポイントは電力の供給と利用のバランス調整であり、需要側の安定電力要求度に応じて異なった電力単価社会になるものと考えられます。

### 参考文献

- (1) 近久 武美, 幸せになるためのエネルギー論: 持続可能な社会への挑戦, 22世紀アート (2022), 電子書籍
- (2) Severin Hänggi, et al., Energy Reports 5, (2019) 555-569
- (3) 岡田, 近久, 田部, 第35回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス講演論文集, 16-5, (2019)
- (4) 岡田, 近久, 田部, (3)と同一条件での解析結果, 未発表