

液化水素による水素社会の展望

パブリックコンサルティング第二事業部 主席研究員 加納 達也

はじめに

2014年12月に、トヨタ自動車の燃料電池車「ミライ」(図表1)の一般販売が、世界に先駆けて開始された。次世代の自動車と期待される燃料電池車(FCV: Fuel Cell Vehicle)は、水素を燃料に走行する自動車であるため、水素を充填するための「水素スタンド」が不可欠であり、そのためには水素を製造するプラントから水素スタンドまで、水素を効率良く輸送するためのインフラが必要になる。水素需要が現在の都市ガスと同じようなレベルにまで達すれば、ガスパイプライン網による輸送が最も効率的であろうと想像できるが、過渡期においては水素の需要量が限定されているため、水素をローリーなどの移動体で輸送する方法が主流になると考えられる。常温・常圧でガス体である水素は、液体のガソリンと比べて同じ体積あたりの発熱量が0.04%(0℃1気圧)と低いいため、水素を効率良く運ぶためには高压に圧縮もしくは液化する等して、一度に輸送できる水素量を増やすというような工夫が必要になってくる。

図表1 トヨタFCV「MIRAI」



出所: トヨタ自動車ウェブサイトより引用

<http://toyota.jp/mirai/grade/>

ローリーなどによる水素の輸送方法としては、図表2に示すような方式が各界から提案されている。筆者はこれまでにいくつかの機会を頂き、水素輸送方法に関する効率性等の比較を行ってきた。輸送量や輸送距離等の条件によって好ましい輸送方法が決まるものであり、それぞれに一長一短の特徴はあるといえるが、液化水素にはいくつかの点で有力な輸送方法の一つになりうるものと

期待している。これまでに、圧縮水素(本誌13号等)や有機ハイドライド(本誌24号)について整理を行ってきたが、本稿では液化水素にフォーカスし、その特徴や期待される今後の展望などについて整理を行った。

図表2 代表的な水素の輸送方法

輸送方式	概要	一回の水素輸送量
圧縮水素	高压の水素ガスを製造し輸送する	2,800Nm ³ (20MPaローリー)
液化水素	水素を液化し輸送する	14,000Nm ³ (ローリー) 29,000Nm ³ (ISO40ftコンテナ)
有機ハイドライド	水素を吸着、放出する性質をもった有機化合物を媒体として輸送する	16,000Nm ³ (30kローリー) タルエン・メチルシクロヘキサン系

*一回の水素輸送量は車載量から筆者計算による

*Nm³(ノルマル立米)とは、0℃1気圧の「標準状態」における体積を示す

*0.1MPa(メガパスカル)=1気圧

液化水素の概要

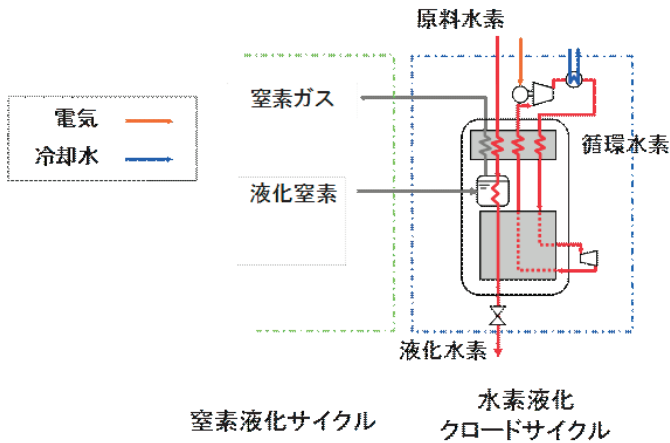
水素は液化すると体積が1/800に減少するので、20MPaで圧縮した水素ガスと比べて5~10倍輸送量が増える。液化水素は水素の輸送方式として既に技術が確立されており、最も液化水素が普及していると言われる米国では、工業用ガスの90%(配管輸送は除く)にあたる約9億m³の液化水素が供給されている。これは日本の液化水素供給量の実に20倍に相当する量である。

図表3に水素液化のプロセスフローを示す。液化水素は、圧縮されたガスが一気に膨張するときに、エネルギーを失い温度が下がる「断熱膨張」という原理を応用して製造する。圧縮水素ガスはマイナス193℃の液化窒素で予冷され、膨張タービンで膨張することによってマイナス253℃まで冷却し液化される。

これまで我が国では、外販用水素の輸送手段は圧縮水素が主流であり、液化水素はロケット燃料用途が主であったが、2006年に岩谷産業が関西電力と共同で堺市において、日本初の本格的な液化水素製造プラント「ハイドロエッジ」(図表4)を稼働させたことを契機に、液化水

素の市場規模が拡大してきている（図表 5）。なお、岩谷産業は、2009 年に千葉県市原市に 2 番目のプラントを、2013 年には山口県周南市に 3 番目のプラントを稼働させている。また、液化水素の輸送には、ローリー（図表 6）や、ISO40ft コンテナなどが使われている。

図表 3 水素液化のプロセスフロー



出所：参考文献 1 より

図表 4 ハイドロエッジ（堺市）

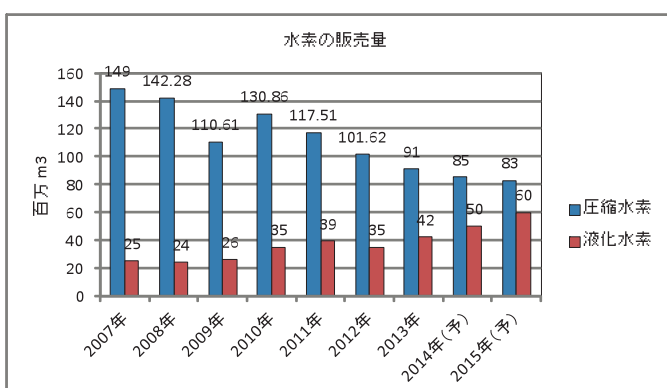


出所：岩谷産業ニュースリリースより

<http://www.iwatani.co.jp/jpn/newsrelease/detail.php?id=215>

敷地面積：約 32,000m²
液体水素製造設備：3,000L/h×2 系列

図表 5 圧縮水素と液化水素の販売量推移



出所：参考文献 2 より

図表 6 液化水素の輸送方法（ローリー）



出所：参考文献 7 より

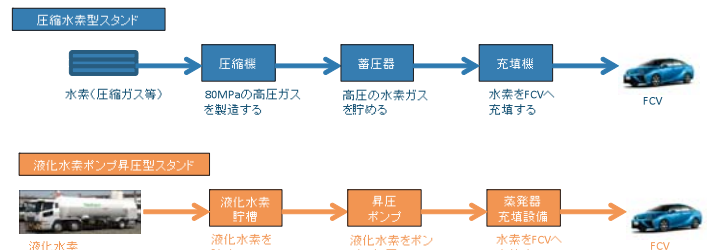
液化水素の特徴

液化水素は同じ体積の容器で、一度に運べる水素量が最も多い輸送手段である。これによって輸送効率が上がり、輸送コストの低減が期待できる。また、液化水素はマイナス 253 度という極低温であるため、この冷熱エネルギーを活用することで輸送から利用までのシステム全体の効率を上げることが期待できる。

水素スタンドでは、FCV 向けに 70MPa という高压の水素を充填するが、通常は急激な圧縮による熱の発生を防ぐために、水素をマイナス 40℃程度まで下げておく「プレクール工程」が必要であり、そのための設備が設置されている。液化水素の場合は、その冷熱を使うことでプレクール工程を省けることになり、プレクールの設置スペースやコストの低減に寄与すると期待されている。また、図表 7 に示すように、圧縮水素ガスを使った水素スタンドでは、70MPa まで圧力を高めるための圧縮機が必要になるが、液化水素を使った水素スタンドでは、液化水素をポンプで加圧し蒸発・充填するシステムによって圧縮機を不要とすることが可能であるので、圧縮に必要な電力などのランニングコストの削減ができる。

このように、液化水素は輸送効率が高いという特性に加えて、冷熱エネルギーを有効に利用することで水素スタンドの効率を高め、水素充填コストを下げるができるという優位性も持っている。

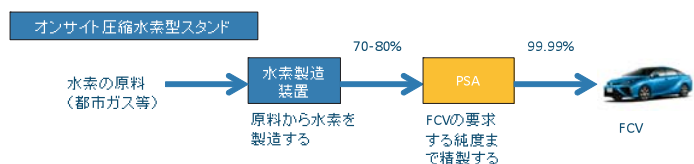
図表 7 水素の充填フロー



また、水素が液化するマイナス 253℃の極低温では、ヘリウム以外のガスは固化してしまうため、液化機の前段で水素純度を 99.999%程度まで高めておく必要がある。一方、水素を FCV で使用する場合、99.99%程度まで水

素純度を上げることが要求されており、図表 8 に示すように、FCV に充填する前に PSA (Pressure Swing Adsorption) などの精製装置が必要になるが、液化水素は極めて純度の高い水素であるため、このような水素精製装置は不要となり、水素スタンドの設置コスト等の低減に寄与できる。

図表 8 一般的なオンサイト型の水素スタンド

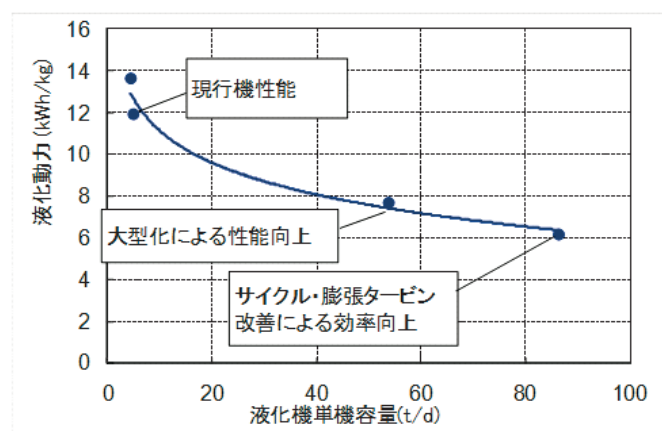


*液水スタンドでは PSA（オレンジ色）が不要

液化水素の課題

水素を液化する工程で動力を多く消費するため、これをより少なくすることが、液化水素の最大の課題であるとされている。液化水素の最小液化仕事（理論上の仕事）は 12.0kJ/g であり、これは水素が持つ発熱量の 10% に相当する量である。対して LNG は 2.2% であり、水素の液化に要するエネルギーは相対的に大きいと言える。参考文献 1 によると、現状の水素液化プラントでは、処理容量が 5~28t/日で、水素を 1kg 液化するために 12~14kWh の動力を消費している。将来的には、単機容量の大型化、冷凍サイクルの改善、膨張タービンの高効率化等により、これを 6.17kWh/kg まで低減できる見通しであるとされており、その早期の実現が望まれるところである（図表 9）。

図表 9 水素液化機の大型化と性能向上見通し



出所：参考資料 1 より

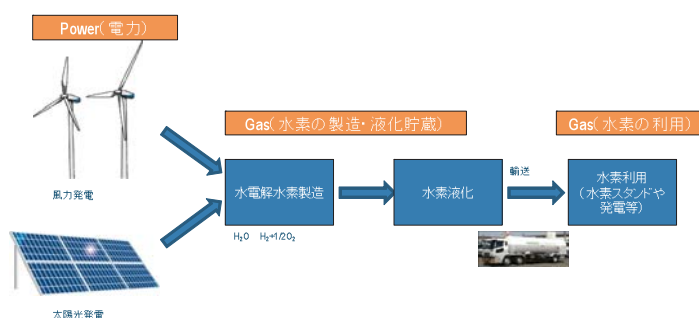
また、液化水素の容器は、真空断熱方式が採用されており輻射熱と熱伝導を最小化するよう設計されているが、侵入熱はゼロにすることが出来ないため時間とともに水

素が気化し、BOG (Boil Off Gas) が発生する。LNG 基地でも同様に BOG は発生するが、水素は体積あたりの潜熱（蒸発時に必要な熱）が LNG と比べ 1/7 であり、より蒸発しやすいという特性を持っている。BOG を回収し利用できる場合にはこれは大きな問題にならないが、水素需要とのミスマッチ等により廃棄せざるを得ない場合には BOG はロスとなってしまう。これについては、経済産業省と文部科学省の連携プロジェクトである未来開拓研究プロジェクトにおいて、2022 年度に BOG 発生量を 0.1%/日まで低下させるような液化水素タンクの開発を目指しているところである。

液化水素の今後の展望

水素は、二次エネルギーであり様々なものから製造することが出来る。現状では、天然ガスや石油などの化石燃料から触媒を用いて改質製造する水素や、鉄鋼業のコークス炉から副生的に製造される水素などが利用されている。これらの水素は、水素利用段階では水しか排出しないクリーンなエネルギーであるが、水素を製造する段階で CO_2 を排出している。将来的には、再生可能エネルギーで発電される電力から、水の電気分解によって水素を製造し、水素製造から利用段階まで CO_2 を全く排出しない「 CO_2 フリー水素」が期待されている。また、太陽光発電や風力発電などの再生可能エネルギーは、自然条件に発電量が大きく左右され、需要変動に応じた発電が出来ないことから電力系統に与える影響が指摘されている。このような需給調整の難しい再生可能エネルギーを一旦水素に変えて貯蔵し、水素スタンド等へ輸送して供給するという水素の「エネルギーキャリア」としての利用が検討できる。この場合、輸送量が大きい液化水素は有望で効率的なエネルギーキャリアの一つとして期待される。こうした取り組みは、再生可能エネルギーの普及が進むドイツでは「PtG : Power to Gas」（図表 10）として、既にいくつかのプロジェクトが進行中である。

図表 10 Power to Gas の流れ



*この場合の Gas は水素を意味する

平成 21 年度に石油産業活性化センター（現：石油エネ

ルギー技術センター)の委託により筆者等が調査(参考文献5)したところでは、炭素制約社会のもとでは、2040年の段階で、FCV及び発電用に466億Nm³の水素を海外から輸入する必要があるとされた。また、参考文献3によると、水素発電が最大限に普及した場合、2030年の段階で国内の供給能力だけでは水素需要を満たすことはできず、約90億Nm³の水素を海外から輸入する必要があるとされている。前提とする考え方は全く異なるものの、二つの文献で共通しているのは、将来は海外から大量に水素を輸入する必要があるだろうとしていることである。液化水素の最大の特徴は、一度に輸送できる量が多いという点にあった。この最大の特徴を活かして、液化水素船による水素輸入が、将来の水素大量消費社会の到来を睨んで、関係各社等で検討されている(図表11)。

図表11 液化水素船



出所：参考文献1より

タンク容量：160,000m³ (40,000m³×4 基)
 タンク方式：球形タンク (MOSS)
 タンク断熱方式：真空パネル方式
 BOR：0.2%/日
 推進機関：蒸発水素ガス利用ガスエンジン
 *液化水素 160,000m³で30MW(目安)の発電規模に相当する(筆者計算による)

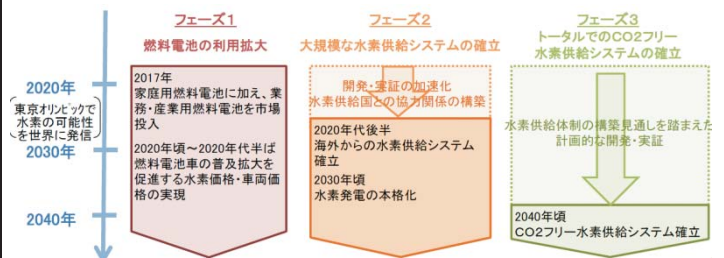
このようなプロジェクトは、世界でもこれまでに検討がされてきた経緯がある。古くは1986年にEU各国とカナダケベック州との共同プロジェクトではじまったEQHHPP(The Euro-Quebec Hydro-Hydrogen Pilot Project)がある。EQHHPPは、カナダにおいて水力発電による水素を製造し、ヨーロッパへ液化水素によって輸送することを目指した計画である。我が国でも、再生可能エネルギーによる水素を国際的に輸送利用していくために企画立案されたWE-NET(World Energy Network)が、平成5年度から当時の通商産業省工業技術院における「ニューサンシャイン計画」の一環として、

NEDOを実施主体として実施されている。また最近では、参考文献7によれば、ロシア・マガダン州内の水力発電所の余剰電力を使って水素を製造し、これを液化して我が国に輸送するというプロジェクトが、我が国企業とロシア水力発電大手のルスギドロ社等と共同で検討されていることが紹介されている。

2014年6月に経済産業省より「水素・燃料電池ロードマップ」(図表12)が示されているが、2020年代後半からのフェーズ2において海外からの水素の供給システムの確立が位置づけられており、今後は産学官が一丸となった取り組みが推進されていくものと思われる。このロードマップでは、海外からの水素輸送のプラント引き渡し価格(CIF)の目標を30円/Nm³としているが、参考資料7によれば、豪州において褐炭から水素を製造し日本まで輸送する場合のCIF価格が、2025年の段階で29.7円/Nm³程度になるという試算もあり、コスト面での一定の目処も立ってきた。

これまでにLNG輸入を通じて培った、我が国の船舶技術や液化技術等を応用して液化水素の普及を推進することは、来るべき水素社会の構築に貢献するばかりでなく、世界に競争力を有する分野として、我が国の産業振興に寄与するものであることを期待するところである。

図表12 水素・燃料電池ロードマップ



出所：参考資料6より

〔参考文献〕

- 1.NEDO「低品位炭起源の炭素フリー燃料による将来エネルギーシステム（水素チェーンモデル）の実現可能性に関する調査研究」2012年4月
- 2.岩谷産業「水素エネルギーハンドブック第4版」2015年2月
- 3.NEDO「水素需給の現状と将来見通しに関する検討」2013年2月
- 4.NEDO「水素エネルギー白書2014」
- 5.財団法人石油産業化センター「有機ハイドライドを用いた水素の大量輸送の可能性シナリオに係わる調査」2010年3月
- 6.経済産業省「燃料電池自動車等の普及促進に係る自治体連携会議」（第1回配布資料）
- 7.経済産業省「水素・燃料電池戦略協議会ワーキンググループ」（第5回配布資料）