

水素社会を拓くエネルギー・キャリア（9）

エネルギー・キャリア各論：液体水素

2015/02/18

解説

塩沢 文朗

国際環境経済研究所主席研究員



【液体水素】

液体水素は水素には違いがないので、液体水素をエネルギー・キャリアというのはおかしいと思われるかもしれない。しかし、水素自体は常温常圧では体積エネルギー密度がとても小さいガス状のエネルギーであり、そのままの形でエネルギーとして輸送、貯蔵、利用するには適していない^{注1)}。それで、水素を液化して水素のエネルギー密度を上げて輸送するという方法が考えられた。そういった意味で、液体水素も水素エネルギーを取り扱い易くするための一つの方法として、エネルギー・キャリアに含めている。

しかし、水素は常温ではいくら圧力をかけても液化しない。700 気圧という高圧をかけても水素はガス状で存在し、0℃、1 気圧で 0.09 kg/m³ ほどの密度が 700 気圧の下ではその 460 倍ほどの 42 kg/m³ なる程度である^{注2)}。水素を液化するためには、-253℃（絶対温度 20°K）という超低温まで冷却する必要がある。液体にすることによって水素の体積はガスに比べて約 800 分の 1 となり、体積当たりの燃焼熱はガソリンの約 1/4 まで高まる。なお、この-253℃という超低温下では、ヘリウム以外のガスは全て固化するため、液体水素の製造プロセスの中で不純物は除去され、液体水素は超高純度の水素となる。

水素ガスに比べて体積が約 800 分の 1 になることから、水素を輸送、貯蔵する効率は大幅に高まるが、液体水素を安全に取り扱うためには、爆発しやすい、金属を脆化するなどの水素自体が持つ取扱いの難しさを克服するための対策（輸送、貯蔵容器に特殊合金や炭素繊維強化樹脂などの使用することなど）に加え、液体水素は超低温でも気化しやすいために、高度な断熱技術、ボイル・オフ対策などの特別な設備、機器や技術が必要となる。（水素の取扱いの難しさについては、[連載の第 4 回](#)に詳しく記したので、それを参照下さい。）

日本では 1974 年に岩谷産業（株）（以下、岩谷）が「サンシャイン計画」の中で日本初の液体水素製造プラントを建設し、その後しばらくの間は、液体水素の利用の主たる用途はロケット用の燃料であった^{注3)}。その後、岩谷の関係会社、ハイドロエッジ（株）が 2006 年に大型の液体水素プラントを建設してから、産業向けの利用が進展した。このようにして液体水素の利用が進む中で、液体水素を運搬するための小型の容器、輸送機器も開発されてきた。2014 年には、ロケット燃料や電子産業などの産業用途向けに年間約 5,000 万 Nm³ の液体水素が販売され、供給されている。

こうした実績をもとに、水素 ST に水素を供給する手段として液体水素を用いることが有力な手段の一つと考えられており、実際、東京の有明水素 ST など、既に設置された水素 ST の一部では液体水素をオフサイトで製造

し、水素 ST に液体水素ローリーなどで供給する方式が採用されている。

しかし、「水素社会」の構築に必要な大量の液体水素の輸送や、海外から CO₂ フリー水素の利用を図るための供給チェーンに必要な設備、機器や技術は、現在も開発中である。川崎重工業（株）（以下、川崎重工）が液体水素用の大規模タンク、水素輸送船等の開発に取り組んでいるほか^{注4)}、2014 年からは SIP「エネルギー・キャリア」において、（財）日本船舶技術研究協会等が中心となり、海外から輸送されてくる液体水素を、超低温を維持したまま陸揚げするためのローディング・システムの開発と、液体水素の国際間での海上輸送を可能とするための国際輸送ルール整備に向けた取組みを開始している。

水素の利用技術面では、発電タービンに水素を導入し、水素の混焼率を 70%程度まで高めて利用することについては、この連載の第 5 回でも述べたように既に商用化のレベルまで達していると言われている。しかし、水素を 90%以上混焼するためには、水素の燃焼特性：①着火速度が極めて早いために逆火などの不安定な燃焼状態が起きやすい、②燃焼時には極めて高温となる、という特性に対応した発電タービンが開発される必要がある。これまでは燃焼器内に水蒸気を噴霧することなどによって温度と燃焼速度を下げ、これらの問題を緩和してきたが、そのためにエネルギー効率が下がり、燃料コストの増加を招いていた^{注5)}。このため、そうした方法によらない水素専焼発電タービンの高効率燃焼技術の開発が、2014 年度から SIP「エネルギー・キャリア」において川崎重工などにより行われている。具体的には、燃焼不安定性の制御を可能とする燃焼器の開発、高温燃焼環境下で多量に発生する NO_x の低減等を目指した技術開発である。

注1) ガス状態の水素は、体積当たりの水素含有量が常温（25℃）で 1L（リットル）中 82g ほどしかないため、例えば FCV の場合、通常のガソリン車のタンクの満タン量（約 50L）の水素を積んでも、約 10km 程度しか走れない。

注2) この状態の水素から得られるエネルギー量は、同じ体積のガソリンから得られるエネルギー量の 1/7 程度。

注3) 岩谷産業（株）HP、[「水素とイワタニ」](#)

注4) 日経エコロジー、日経クリーンテック研究所共催「水素社会の到来とビジネスチャンス」第 5 回「進化する水素の貯蔵と輸送」における川崎重工の発表資料：「水素サプライチェーン構想への取り組みと輸送・貯蔵技術の開発」（2014.6.24）から。

注5) 発電効率が 1%低下すると年間の燃料代が億円単位で増加すると言われている。

一方、FCV の燃料向けには、液体水素は、先にも述べたとおり極めて高純度であることから、水素 ST において再圧縮、蓄圧、プレクール等は必要であるものの、精製する必要はなく、FCV の燃料として供給することが可能である。

川崎重工は、国からの研究開発面での支援を受けつつ、海外の CO₂ フリー水素を日本に輸送してくるための供給チェーンづくりにも取り組んでいる。オーストラリアに大量に賦存する安価な未利用褐炭を原料として、その改質による水素製造と CCS（二酸化炭素の回収、貯留）を組み合わせることにより CO₂ フリー水素を生産し、それを液体水素にして専用の水素輸送船で日本に運び、発電燃料、FCV 燃料などに用いるという構想を描き、その実現を目指した取組みである。その構想の全体像は、「将来的に水素輸送量を 770 トン/日（22.5 万トン/年、水素輸送船 2 隻、65MW の発電）、15,400 トン/日（450 万トン/年、同 40 隻、13,000MW の発電）、30,800 トン/日（900 万トン/日、同 80 隻、26,000MW の発電）と徐々にスケールアップしていく」というものであり、

最終段階の規模になると水素は 18 円/Nm³で供給することが可能となり、その際の発電単価は 11 円/kWh と、現在の LNG 発電と遜色のないコストで発電することが可能になると説明されている^{注6)}。

この構想の実現に向けて、現在川崎重工は、オーストラリアで褐炭から 10 トン/日の水素を生産、2,000 トン/年の水素を日本に運び、7MW の発電を行うという規模の水素の供給、利用チェーンのパイロット・モデルを動かすための取組み（先述の水素輸送船、液体水素貯蔵タンクの開発等）を行っている。

液体水素にも、その物性に起因するいくつかの問題がある。それらは、液体水素というエネルギー・キャリアのコストを高める要因となる。

その一つは、液化に要するエネルギーが大きいことである。水素の液化には最低でも 0.35kWh/Nm³ のエネルギーを要する（水素の理論液化仕事量）ことから、液化により 10% 程度のエネルギー損失が生じることは避けがたい。現状の技術では、液化の際に水素のもつエネルギー量の約 30% が失われてしまう^{注7)}。今後、新たな冷凍サイクルの採用や液化機の大形化等により、損失量は 15% 程度まで下げられると見られている^{注8)} が、この水準を実現するためには、今後さらなる技術開発が必要である。

液化に要するエネルギーが大きいこと、液化のための冷熱源が必要となること等から、液体水素の製造場所に建設される水素液化プラントの規模は大きなものになる。これは設備コストの上昇につながる。

気化熱の非常に小さい液体水素の取り扱いで、避けることのできない液体水素のボイル・オフの問題は、技術進歩によりかなり抑えられるようになった。これまでの開発成果によりボイル・オフ率として 0.1%/日のレベルを目指せるようになったと言われている。液体水素輸送船で長距離輸送中に蒸発する水素は船の燃料として活用するというようなアイデアも出されている。それでも輸送、貯蔵中及び輸送、貯蔵施設への受入れ、払出し時に数% 程度のロスが発生することは避けられない。特にエネルギー・セキュリティ対策として必要となる備蓄など、大量、長期間の貯蔵が必要となるケースでは、このボイル・オフの問題は、それが仮に 0.1%/日のレベルで抑えられたとしても、その影響は決して小さいとは言えない。

液体水素の輸送、貯蔵施設は、一部で既に実用に供されているものがあるとは言っても、それらは大量の液体水素を扱えるものではない。液体水素が「水素社会」を支えるエネルギー・キャリアとしての役割を果たせるようになるためには、既存の輸送インフラとは別に新たなものを建設、整備する必要がある。また、それらは、先にも述べたように特殊な材料を用い、高度の断熱構造をもったものとする必要があるために、その施設の建設コストは従来のもよりも高額にならざるを得ないだろう。

規制との関係でも、多くの取組みを必要とする。液体水素は、法令上は「高圧ガス」に該当するため、高圧ガス保安法等の法規への多くの対応が必要となっている。このほか水素については、人の健康や環境に対する毒性面の懸念は恐らくないと考えられるものの、着火しやすく、爆発しやすい、また、漏洩が分かりにくく、気がついて漏えい個所の特定が難しいといった水素のリスクに対する懸念は小さくないことから、水素についての社会からの受容を得ることも大きな今後の課題である。

液体水素が「水素社会」において主要なエネルギー・キャリア、供給チェーンとしての役割を果たすためには、上述のようにいくつかの技術開発課題や社会インフラを構築していく上での解決すべき問題がある。しかし、液体水素は、一部で既に実際の供給チェーンが構築され、実用化されている。こうしたことから、「水素社会」を担うエネルギー供給チェーンの中で、特に水素 ST 周りでは一定の役割を果たしていくことになるだろう。加えて液体水素の持つ、高純度、超低温といった特性の活用^{注9)}が実現すれば、その魅力は、より高まっていく可能性があると期待されている。

注6) 日経エコロジー、日経クリーンテック研究所共催「水素社会の到来とビジネスチャンス」第5回「進化する水素の貯蔵と輸送」における川崎重工業（株）の発表資料：「水素サプライチェーン構想への取り組みと輸送・貯蔵技術の開発」（2014.6.24）から。

注7) 1Nm³の室温の水素を液化するために必要となる理論液化仕事量は 0.35kWh/Nm³ だが、液化機の現状のプロセス効率（＝最小液化仕事量／実際の仕事量）が 30～35%であるため、液化に際し実際に消費されるエネルギー量は約 1kWh/Nm³ となる。一方、1Nm³の水素ガスから得られるエネルギー量は 3.54kWh（LHV）。

注8) 窒素水素二段冷凍サイクルの冷凍サイクルの採用や大型化等により、実際に要する仕事量は 0.55kWh/Nm³ まで低下（効率は 65%程度まで上昇すると考えられている。（「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」、p84、NEDO（委託先：川崎重工業（株））2012年4月）ので、それが実現した場合には、液化の際に消費されるエネルギー量は、水素のもつエネルギーの 15%程度となる。

注9) 超伝導を利用した電力変換システムへの活用など。（「液化水素市場の現状とエネルギーとしての可能性」、宮崎淳ほか。水素エネルギーシステム Vol.36、No.4（2011））