



## 水素の輸送—水素容器と水素キャリア

水素を利活用するには、水素の製造拠点から利活用拠点まで効率的に運搬する必要があります。現在、水素は高圧ガスの状態で容器（ボンベ）に充填して、工場などに輸送されています。工場で良く利用されている内容積47Lの容器を図1に示します。水素が14.7MPaの圧力で充填されており、0℃、1気圧（=101,325Pa）の標準状態では7m<sup>3</sup>の水素ガス（0.6kg）になります。容器の重さは約53kgもあり、水素ガスの重さよりも極めて大きくて、容器を運搬している感があります。工場では、1本～10本程度並べて利用されており、使用量の比較的少ない（月間1,000m<sup>3</sup>程度まで）企業での利用方法です。県内では、北陸イワタニガスや宇野酸素などの産業ガスの販売企業がトラックで工場まで運搬しています。



図1 水素容器（47Lシームレス容器）  
<https://www.koatsugas.co.jp/product/gas/industrial04/>



図2 高圧水素カードル  
<https://www.koatsugas.co.jp/product/gas/industrial04/>



図3 水素輸送用トレーラー  
[https://shinko-airtech.com/gasliquid\\_H2.html](https://shinko-airtech.com/gasliquid_H2.html)

使用量が多くなると、図2に示すカードルが利用されます。小型容器を20本、30本とまとめて固定した集合容器をカードルと呼んでいます。この容器の充填圧力は14.7MPaと19.6MPaの両方があります。使用量が月間10,000m<sup>3</sup>程度までの企業向けの方法です。小型クレーンを装備したトラック（ユニック車）に積載して工場にまで運搬し、専用の接続口に繋いで使用します。

使用量がさらに多くなると、1本の長さが6m以上の長尺容器を20本程度集めた集合容器（ローダー）を利用する方法があります。これを牽引車の台車から引き離して工場の水素充填口に接続するタイプをセルフローダーと言います。これには車輪が付いており、台車から降ろした後、水素充填口まで自走させられます。長尺容器1本に60～140m<sup>3</sup>の水素を充填でき、それを10本、20本とまとめて最大約3,000m<sup>3</sup>の輸送が可能です。

集合容器を積載した台車ごと、牽引車から引き離すことができるトレーラー（図3）を用いる方法もあります。使用量が極めて大きな工場で多く利用されている方法です。台車ごと工場の水素充填口に接続することになります。同じ容量でできるだけ多量の水素ガスを輸送しようとするれば、圧力を大きくすればよいのですが、圧力を大きくすると、その圧力に耐える頑丈な容器を準備しなくてはなりません。図1に示した水素容器のように、鉄鋼材料製の容器では重量が大きくなってしまいますので、軽量で高耐圧の容器が開発されています。その例が、燃料電池自動車MIRAIの水素容器です。MIRAIでは、炭素繊維強化プラスチックとガラス繊維強化プラスチックを巻き付けた樹脂ライナが水素容器として利用されており、それに70MPaの高圧ガスが充填されます。このような繊維強化プラスチック水素容器は、トヨタ合成、JFEスチール、丸八などいくつかの企業で製造されていますが、現状では、高価です。

カードル、ローダー、トレーラーを用いて水素を運搬する場合でも水素よりも容器の方が重くて、水素の製造拠点から水素を利用する工場などに高圧ガスとして運搬するにはエネルギー効率的に限界があります。そこで、水素を気体でなく、より小さな体積となる液体にして運搬する方法が検討されています。

水素の臨界温度は-260℃で、臨界圧力は約1.3MPaです。そして、常温で1.3MPa以上の水素ガスは超臨界状態にあり、圧力を大きくしても液体には変化しません。LPガスのように、圧力を大きくして液化することはできません。水素を液化するには-253℃以下の超低温に冷却する必要があります。この冷却のために大きなエネルギーを必要とするという問題があります。

水素を他の元素と反応させて、水素の化合物（水素化物）に変えて体積を減らすという方法もあります。輸送が効率的で容易な水素化物の条件として、次が挙げられます：

- i) 室温で液体、または容易に液化可能な気体であること。
- ii) 水素化物に含まれる水素の質量%が大きいこと。
- iii) 輸送できる水素の体積当たりの質量（g/cm<sup>3</sup>）が大きいこと。

これらの条件を満たす水素化物は水素キャリアと呼ばれており、アンモニア（NH<sub>3</sub>）とメチルシクロヘキサン

(C<sub>7</sub>H<sub>14</sub>)が注目されています。これらの水素化物と、比較のためのメタン(CH<sub>4</sub>)、水(H<sub>2</sub>O)、液化した水素(H<sub>2</sub>)の室温での状態、沸点、水素化物に含まれる水素の濃度、輸送できる水素の体積当たりの質量を表1に示します。なお、メチルシクロヘキサン(C<sub>7</sub>H<sub>14</sub>)は水素を放出させるとトルエン(C<sub>7</sub>H<sub>8</sub>)に変化するとして輸送できる水素の質量を算出しています。この表における水素化物に含まれる水素の濃度と、輸送できる水素の体積当たりの質量の関係を図4に示します。

表1 液体水素、液化メタン、液化アンモニア、水、MCHの室温での状態、沸点、水素化物に含まれる水素の濃度、輸送できる水素の体積当たりの質量

水素キャリア	室温での状態	沸点(°C)	水素化物に含まれる水素の量(質量%)	輸送できる水素の体積当たりの質量(g/cm <sup>3</sup> )
液体水素	気体	-253	100.0	0.071
液化メタン	気体	-162	25.0	0.104
液化アンモニア	気体	-33	17.6	0.119
水	液体	100	11.1	0.111
メチルシクロヘキサン	液体	101	14.3	0.047

液化アンモニア、水、液化メタンは液体水素よりも水素化物に含まれる水素の質量%が小さいものの、単位体積あたりの水素の質量は大きく、効果的に水素を輸送できることが分かります。ここで、輸送可能な水素の質量がそれら水素化物よりも液体水素の方が小さいことに不思議さを感じる方もおられるのではないのでしょうか？これは液体水素の密度が小さいことに起因しています。

水は特に運搬しなくても各地に存在しますし、水素と酸素に分解するには多くのエネルギーを必要としますので、水素キャリアとしては用いられません。また、液化メタンから水素を製造する代表的な方法として、水蒸気改質法があり、工業的に利用されていますが、水素とともにCO<sub>2</sub>が発生するという問題があります。これらから、水と液化メタンは水素キャリアにはなりません。

メチルシクロヘキサン(MCH)は、室温、大気圧で液体であり、アンモニアのような「液化」が必要ではありません。トルエンに水素を反応させてMCHを製造し、これを輸送します。輸送先では、触媒を用いた脱水素反応によって、MCHから水素を分離し、利活用されます。水素の分離によってトルエンが生成されますので、これをMCH製造の原料として送り返せば、MCHを利用した水素の輸送システムが構築できます。

トルエンは、吸入するとすぐ体内に吸収され中枢神経系に作用し、疲労感、眠気、めまいなどを引き起こしますので、注意して取り扱う必要はありますが、室温、大気圧で液体の工業的に比較的取り扱いやすい化合物です。MCHも液体で、修正液、医薬品や農薬製造用の溶媒として用いられており、比較的取り扱い容易な化合物です。これらのように、MCHを利用した水素の輸送システムは、比較的安全性に優れ、扱いやすいことが分かります。高圧水素、液体水素、アンモニア、MCHの化学的性質・特徴を表2にまとめます。

表2 高圧水素、液体水素、アンモニア、MCHの特徴

	高圧水素(70MPa)	液体水素	アンモニア	MCH(メチルシクロヘキサン)
状態	無色の気体	無色の低温の液体	常温では無色透明の気体	無色の液体
モル質量(g/mol)	2	2	17.03	98.19
密度(g/cm <sup>3</sup> )	0.0629	70.8(-253°C)	0.694	0.77
融点(°C)	--	-259.14	-77.73	-126.3
沸点(°C)	--	-252.87	-33.34	101
特性	無臭	無臭	刺激臭	特異な臭い
危険性	強可燃性・強引火性・爆発性		可燃性・引火性	引火性
水素貯蔵密度(kg-H <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> )	63	70	107	47

水素キャリアとして、液体水素、MCH、アンモニアに注目が集まっています。液体水素は、岩谷産業が日本で唯一の液体水素サプライヤーとして培ったノウハウを活用し、液体水素荷役・大量貯蔵に取り組むとともに、川崎重工業がLNG運搬船やLNG貯蔵タンク、ロケット燃料用液体水素タンクなどで培った極低温技術を活用し、液体水素運搬船の建造ならびに液体水素荷役・大量貯蔵設備の建設に取り組んでいます。MCHについては、千代田化工建設が中心となって、ブルネイやオーストラリアで製造された水素をMCHに変えて日本に輸送する事業の実証試験が行われました。アンモニアについては、日揮ホールディングスが精力的に利活用の実証試験を行っており、アゼルバイジャンにおける太陽光発電、風力発電によるグリーン水素・グリーンアンモニア生産に向けた実現可能性調査が行われています。

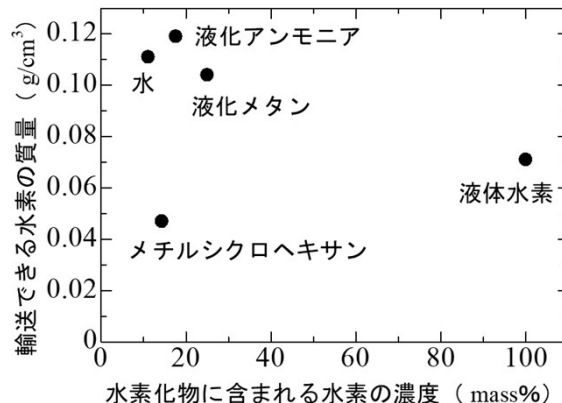


図4 水素化物に含まれる水素の濃度と、輸送できる水素の体積当たりの質量の関係

図4 水素化物に含まれる水素の濃度と、輸送できる水素の体積当たりの質量の関係

一般社団法人 ふくい水素エネルギー協議会  
〒919-0411 福井県坂井市春江町藤鷲塚37-9  
株式会社 ナカテック内 事務局 羽木  
TEL : 0776-58-3930 FAX : 0776-51-5144