

水素社会にむけた有機ハイドライドへの期待

～取り扱い容易な水素輸送媒体～

チーフコンサルタント 加納 達也

はじめに ～水素エネルギー社会の到来～

地球温暖化問題に対する国際社会の取り組みにおいては、京都議定書の第一約束期間が終了する 2013 年以降の中期目標の成り行きに関心が移っている。鳩山総理は、就任間もない昨年 9 月 21 日の国連気候変動サミットにおいて、1990 年度比で▲25%（2005 年度比▲30%）という国際公約を掲げた。さらに、昨年 11 月 13 日のオバマ米国大統領訪日の際には、2050 年までに日米双方の排出量の 80%削減を目指すことで合意している。これらの中長期目標の達成に向けては、化石燃料の使用を大幅に抑制した低炭素社会の実現が不可欠なものとなるが、低炭素社会では、使用時に炭酸ガスを全く排出しない「水素エネルギー」を有効に利用していくことが欠かせないといわれている。

水素は常温ではガス体のエネルギーであり、体積あたりの発熱量は 12.8MJ-HHV/m³ と、都市ガス（13A）の 1/3 以下である。また反応性が高く、最小着火エネルギーが小さいこと、爆発限界が広いこと、燃焼速度が高いことなどから安全性に関しては十分な注意が必要となるエネルギーである。水素エネルギー社会を実現するためには、いかにして水素を効率的にしかも安全に貯蔵・輸送するかが重要な課題の一つとなる。本稿では、この課題解決の一つの手段として「有機ケミカルハイドライド法：Organic Chemical Hydride Method」に着目し、その特性と適用性について概略を報告する。

有機ハイドライド法について

水素の輸送手段としては、我が国が世界に誇る「水素・燃料電池実証プロジェクト（JHFC：The Japan Hydrogen & Fuel Cell Demonstration Project）」において、圧縮水素と液化水素が既に実用化されている。それぞれに特長があるが、圧縮水素は貯蔵密度を高めるためには更なる高圧化が求められるが、高圧貯蔵タンクの耐圧性を高めるため、タンク重量が重くなるなどの課題が

ある。液化水素は、低沸点・低潜熱で蒸発しやすいことから損失が多く、高いレベルでの容器の断熱貯蔵技術が要求される。また、最小液化仕事（=12.0kJ/g）が大きく、これが自己の発熱量の 10%を占める。

有機ケミカルハイドライド法（OCH）は、トルエンなどの芳香族炭化水素に水素化反応（水添）させて、メチルシクロヘキサン（MCH）などの飽和環状化合物に転換し、これを水素貯蔵媒体として常温・常圧の液体状態で貯蔵・輸送を行い、使用場所において水素発生反応（脱水素）を行って水素を利用するというものである。ここでは使用する OCH として、反応性の高い代表的な 3 つの物性を比較した（図表 1）。水素貯蔵量の観点からは、ベンゼン-シクロヘキサン系とナフタレン-デカリン系が良い値を示す。しかし、ベンゼン-シクロヘキサン系は、5.5℃で閉塞してしまう恐れがある上に、発がん性を有している。ベンゼンはガソリンにも微量に含まれるが、強い毒性から 1%未満に規定されている。また、ナフタレン-デカリン系は、常温（80.5℃以下）で閉塞してしまうという問題点がある。現状では、閉塞性や毒性といった致命的な問題点がなく、汎用的な化学製品で大量に入手することも容易なトルエン-メチルシクロヘキサン系が最も有望であるとみられている。

有機ハイドライドの応用法

有機ハイドライドは、貯蔵密度で 6.16wt%と、米国エネルギー省（DOE）の 2010 年の水素貯蔵媒体の目標¹を物性の上ではクリアしている。

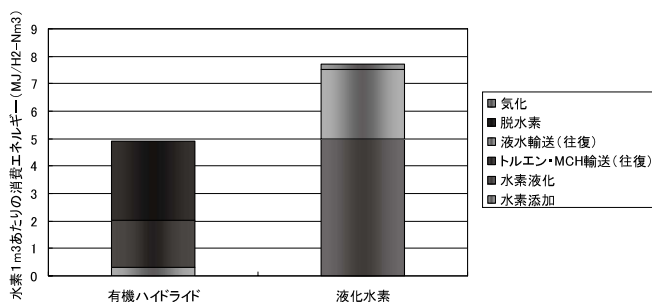
貯蔵密度が高い上に、常温常圧で液体であるという点が、この有機ハイドライドの最大の特徴である。ガソリンや軽油等の石油系燃料が、永らく輸送用燃料の主役の座を占めてきた理由として、石油のエネルギー密度が高く、常温で液体であるため取扱いが容易であるという点あげられる。水素燃料（特に自動車向け）が市場において支持されるためには、取扱いが容易であるという条件を

¹ DOE target (2010) →6wt%,45kg-H₂/m³

満たすことは、非常に重要なポイントとなる。

有機ハイドライドは、脱水時は吸熱反応であるため、外部からエネルギーを与える必要がある。この脱水時におけるエネルギー消費が有機ハイドライドの課題の一つであり、有効な触媒の開発が望まれている。図-1 に、有機ハイドライドの水添～長距離輸送～脱水時のエネルギー損失を、液化水素と比較した結果を示す。この前提条件の下では、有機ハイドライドは、脱水素時のロスが大きいものの、輸送時全体のエネルギーロスが液化水素輸送と比べて全体で 2/3 程度に留まる。

図表1 有機ハイドライドと液化水素のエネルギー消費



*水素 1Nm³ (LHV 基準) 輸送する際に損失するエネルギー量を示す。有機ハイドライドの水添・脱水素の効率は NEDO「水素供給価格シナリオ分析等に関する研究」(平成 19 年 3 月)、それ以外の効率は「JHFC 総合効率検討結果」(平成 18 年 3 月)をもとに筆者が計算した。
*上記前提条件での効率性であり、今後の容器等の技術開発によって大きく変わる可能性のあるものである。

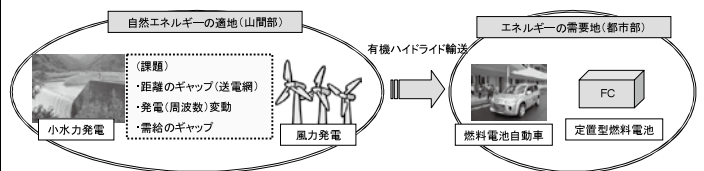
有機ハイドライドの貯蔵媒体としての主な優位点を、以下に列挙する。

- ・ 常温常圧で液体であることから、取扱いが容易であり、石油等の輸送貯蔵設備の転用が可能である。

- ・ 貯蔵密度が比較的高い。
- ・ 有機ハイドライドは高圧ガスの規制の扱いは受けない (=ガソリンと同じように危険物の扱い)。
- ・ 芳香族炭化水素は汎用品であり、繰り返し再生して使用できる。

こうした有機ハイドライドの特性は、例えば送電インフラが脆弱な山間地域における小水力発電の、都市部への電力輸送媒体として利用することができる。また、風力発電は、瞬時変動などから系統連系には問題が多いといわれている。都市部から離れた場所に適地があり、需要地への送電インフラの整備に課題があった小規模な自然エネルギーについて、発電地で水添し都市部まで輸送し、需要地で脱水素することで再生可能エネルギーを簡易に輸送することができる。

図表2 再生可能エネルギーの輸送媒体としての応用



おわりに ～将来の姿～

将来は、こうした有機ハイドライドの特性を活かして、大規模な太陽光発電や風力発電の可能な諸外国から、水素を媒体にして再生可能エネルギーを大量に輸入するということも考えられる。このような、海外からの再生可能エネルギーの大量輸送については、財団法人石油産業活性化センター (JPEC) が、可能性調査に今年度着手したところである。低炭素社会の実現に向けたこれらの取組みに、夢と期待を大いに寄せるところである。

表-1 有機ハイドライド媒体の比較

芳香族化合物	水素化物	化学式	質量貯蔵密度	容積貯蔵密度	毒性	融点	入手容易性	評価
ベンゼン	シクロヘキサン	$C_6H_{12}=C_6H_6+3H_2-205.9kJ$	7.19wt%	55.9kg-H ₂ /m ³	× 発ガン性	△ (5.53℃)	○ 化学製品あり	×
トルエン	メチルシクロヘキサン (MCH)	$C_6H_{11}CH_3=C_6H_5CH_3+3H_2-204.8kJ$	6.16wt%	47.4kg-H ₂ /m ³	○	○ (-95.0℃)	○ 化学製品あり	○
ナフタレン	デカリン	$C_{10}H_{18}=C_{10}H_8+5H_2-333.4kJ$	7.29wt%	64.2kg-H ₂ /m ³	○	× (80.5℃)	○ 化学製品あり	×