

水素社会を拓くエネルギー・キャリア（8）

エネルギー・キャリア各論：メチルシクロヘキサン（MCH）

2015/02/06

解説
所説

塩沢 文朗

国際環境経済研究所主席研究員



これまで何回かにわたって、「水素社会」に至るシナリオについてご紹介してきた。「水素社会」においては、CO₂フリー水素エネルギーの供給チェーンが構築されていることが必要である。その供給チェーンにおいて大きな役割を担うことが期待されているエネルギー・キャリアとして、SIP「エネルギー・キャリア」では、メチルシクロヘキサン（MCH）、液体水素、アンモニアの3つを候補として取り上げ【表1】、それらの開発、利用のための研究開発から実用化に至るまでの取組みを支援している。

【表1】 エネルギー・キャリアの物性値

		重量当たり 水素含有率 (重量%)	体積当たり 水素含有量 (kg-H ₂ /m ³)	沸点 (°C)	燃焼時の CO ₂ 排出量 (g-CO ₂ /MJ)	その他の特性***
SIP の 対象	液体水素	100	70.8	-253	0	強引火性、強可燃性、 爆発性
	メチルシクロヘキサン	6.16	47.3	101	**	引火性、刺激性
	アンモニア	17.8	121.0	-33.4 (*)	0	急性毒性、腐食性
(参考)	圧縮水素 (350気圧)	100	23.2	-	0	強引火性、強可燃性、 爆発性
	圧縮水素 (700気圧)	100	39.6	-	0	

* アンモニアは大気圧の下では-33.4℃、または、20℃、約8気圧の圧力の下で液化する。

** メチルシクロヘキサンは利用時には水素に戻して使用するため、使用時のCO₂排出量は0。

*** 「その他の特性」の記載事項は、MSDSの「危険有害性情報」のサマリーから引用。各物質の正確な特性については、それぞれの物質のMSDSを参照のこと。

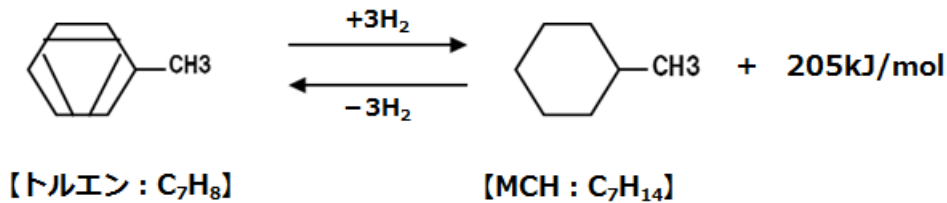
いずれのキャリアについても、その供給チェーンを構築していくためには、利用技術やコストダウンのための研究開発、規制、制度の見直し、社会の受容性の獲得等が必要である。私は、そういった取り組みの成果をもとに、おそらく、どれか一つの物質だけが選択され、導入されるという形ではなく、用途毎に異なる要求性能、コスト要件に対して最も良く応えることのできるキャリアが、それぞれ選択されるという形で導入されていくのではないかと考えている。

それではこれから、それぞれの物質の特徴について説明しよう^{注1)}。まず、供給チェーン全体が実証段階に入り

つつある MCH から始めたい。

【MCH】

MCH をエネルギー・キャリアとして利用するというのは、MCH とトルエンという 2 つの物質間の水素の数の差を利用して水素を運ぶというアイデアである。【図 1】 のとおり、トルエンを水素化することによって水素を環状飽和炭化水素化合物である MCH として固定し、利用する際には MCH から脱水素反応により水素を取り出して利用する。脱水素の後、生成するトルエンは、回収、リサイクルして再使用する。ここでは MCH は文字通り、水素を運ぶ「水素キャリア」としての役割を果たす。



【図1】 MCH－トルエンによる水素の輸送

MCH だけでなく環状飽和炭化水素化合物の水素化と脱水素によって水素を運ぶというアイデアは有機ハイドライド法と呼ばれ、このアイデア自体は 1980 年代から知られていたが、脱水素反応に用いる触媒の劣化が激しく、実用化が困難であった。最近になって千代田化工建設（株）（以下、千代田化工）が触媒の長寿命化に成功し、工業化に目処を付けたことから、有機ハイドライド法の中でも MCH－トルエン系の実用化に向けた取組みが加速した^{注2)}。

この方式の優れているところは、MCH、トルエンがともに常温、常圧で液体であることから、この系を利用することによって、水素ガスを常温、常圧で約 1/500 の体積の液体として輸送することが可能となることである。それによって水素を長期間、大量貯蔵することも可能となる。さらに、MCH もトルエンもガソリンの成分であることから、その輸送、貯蔵では既存のガソリン流通インフラを使うことができる。例えば、商業化されている 5 万トンのケミカルタンカーで MCH を運べば、1 回に約 3,000 トンの水素が輸送できる。（これは 60 万台の FCV を満タンにできる量に相当する。）長期間、大量貯蔵することができるので、備蓄により供給セキュリティの確保を図ることも可能である。

この系では、トルエンへの水素添加、MCH からの脱水素といった 2 つの化学反応を効率よく、安定的に進めるための工業的プロセスの開発が必要となるが、先の触媒の開発の成功によって、この反応系に係る未解決の大きな技術開発課題はないと考えられている。

注1) 繰り返しになるが、以下の説明は、基本的に、科学的事実及び公開情報をもとに記したものであるが、説明内容は、あくまでも筆者の個人の責任でまとめたものである。

注2) 有機ハイドライド方には MCH－トルエン系のほか、シクロヘキサン (C₆H₁₂)－ベンゼン (C₆H₆) 系、デカリン (C₁₀H₁₈)－ナフ

タレン (C₁₀H₈) 系が知られているが、ベンゼンは発がん性物質であること、ナフタレンは常温では固体であることから、MCH-トルエン系の開発が最も進んでいる。

MCH の脱水素によって取り出される水素には、若干の不純物が含まれるが、既存の発電タービンで LNG 等の化石燃料との混焼を行うことに関しては、そのまま使用することが可能である。(水素専焼に係る技術開発課題については、次回の液体水素に関する解説の際に説明する。) 他方、水素の純度に関する要求水準が高い用途、例えば FCV 用の燃料向けには、製造された水素を PSA (圧力変動吸着法) 等によって精製する必要がある。

MCH の利用は、一部、実証研究段階に入っている。千代田化工は、【図 1】の反応系の工業的プロセスの実証のための 50Nm³-H₂/hr 規模のデモンストレーション・プラントを建設して 2013 年 4 月から運転実証を行い、所期の成果をあげたと報告されている。これに続き 2015 年以降、MCH から生産した水素を利用して、小規模な水素発電所 (9 万 kW の設備容量 : 70% 水素混焼を予定) の実証を行うことなどを計画していると報道されている^{注3)}。これは水素を年間 6.3 億 Nm³ 使用する規模の実証試験となる。

水素 ST 向けの水素供給チェーンについては、水素の製造場所から水素 ST まで高圧水素または液体水素の形で水素 ST に水素を運ぶ方法^{注4)}に加え、水素 ST まで輸送しやすい MCH で運び、オンサイトで MCH を脱水素して水素を得る方法など複数のアプローチが考えられている。それぞれ一長一短があり、コスト競争力の面でもその優劣は簡単には付け難い。最終的にも水素 ST の立地条件や操業条件次第で、これらの方法が並行して導入される可能性も十分にある。後者の方法については、水素 ST の限られたスペースに MCH の脱水素設備、FCV 用燃料グレードまで純度を高めるための水素精製設備、そして一定量の MCH とトルエンの貯蔵設備を置く必要があることから、脱水素触媒の高性能化、水素精製技術の研究開発、同システムを水素 ST に組み込むための基準整備、安全性検証などに関する研究開発が、2014 年度から SIP「エネルギー・キャリア」の中で JX 日鉱日石エネルギー (株) (以下、JX) により進められている。

このようにエネルギー・キャリアの中で MCH は実用化に向けた取組みが最も進んでいると言えるが、この反応系自体にはいくつかの問題もある。

その一つは、MCH の脱水素反応が吸熱反応であることから、この反応により水素を得るためには、MCH が水素の形で運ぶことのできる熱量の 28.2% に当たるエネルギーが必要となるという問題と、約 400℃ の熱源が必要という問題である。この問題は、この反応系を使う限りは避けがたい。この問題を克服するため、他のプロセスから発生する熱源との組み合わせや熱マネジメントによって、この問題から生じる制約を軽減するためのさまざまな工夫が検討されている。

このエネルギー・キャリア系では、分子量 98 の MCH と 92 のトルエンを用いて、3 つの水素分子 (分子量 6) を運ぶので、水素を 1kg 得るために、その約 16 倍の重量の MCH を運搬することが必要となる。実際的には、輸送、貯蔵においては体積がより重要であり 1L (リットル) の MCH に含まれる水素量は 47g であることから、輸送、貯蔵の際の効率性の問題はやや緩和されるが、MCH ではガソリンと同じ輸送、貯蔵インフラが利用可能とは言っても、ガソリン用の大型タンクローリー (容量 20kL) 一台で運べる燃料の量は、MCH の場合、FCV 約 180

台分の水素となり、ガソリンの場合（ガソリン車約 330 台分）に比べて輸送効率は落ちる。発電に関して言えば、設備容量が 100 万 kW の発電所に必要な MCH 量は年間約 700 万 kL となり、これだけの MCH と MCH から脱水素したのちに生成するトルエンをハンドリングするために小さな備蓄基地ほど（約 160 万 kL の規模）のタンクヤードが必要となる。

また、この系では大量のトルエンが必要となる。但し、トルエンは繰り返し使用ができることから、いったん必要量のトルエンを確保してしまえば、その後は反応サイクルの中で若干失われるトルエン分を除いて、補充の必要はほとんどないと言われている。なお、このトルエンに関しては、トルエンを製造する際に発生する CO₂ 量及び最終的にトルエンを処理する際に発生する CO₂ 量を、この系に係るライフサイクルの CO₂ 排出量としてどのように評価するかということも考える必要がある。

規制改革面での取り組みも必要となる。MCH の利用にあたっては、その輸送、貯蔵面での特長を生かす観点からは水素エネルギーを利用するサイト（例えば水素 ST）で MCH から水素を製造することが合理的だが、MCH からの水素の製造（＝トルエンの製造）については、高圧ガス保安法、消防法、建築基準法、労働安全衛生法など多くの法令で規制が存在しており、街中あるいは都市近郊に設置される水素 ST におけるこれらの規制の緩和には、かなりの安全性データの蓄積や水素 ST の構造上の工夫が必要になるものと思われる。

このほか、この系で用いられるトルエン、MCH に関する重篤な長期毒性は知られていないものの、これらの物質には短期毒性があり、ガソリンと同様の引火性がある物質であるため、安全対策を十分に講じる必要がある。特に MCH の安全性に係る情報は、必ずしも十分に存在しているという状況にはないため、MCH を大量に利用する場合には追加的な安全性データの収集分析が必要になると思われる。

以上のように、エネルギー・キャリアとしての MCH にはいくつかの解決すべき課題は残っているが、MCH の輸送、貯蔵、利用に関連する技術の熟度は他のエネルギー・キャリアに比べても高いレベルに達している。技術の実証とコストダウンのための一層の努力を行いながら、このエネルギー・キャリアに適した用途と役割を見定めていくことが必要と考えられる。

注3) [スマートジャパン](#)（2014.7.15）

注4) この場合、水素の製造方法としては、製油所等において化石燃料を改質して水素を製造する方法と、MCH で運んできた CO₂ フリー水素を港近くで脱水素し、精製して製造する方法の 2 つの方法がある。