

# 2015 年以降の中長期を睨んだ液化水素システム

神谷祥二

川崎重工業 (株)

兵庫県 明石市 川崎町 1 番 1 号

## Prospect of liquefied hydrogen system for middle and long term

Shoji kamiya

1-1, Kawasaki-cho, Akashi City, 673-8666

The plan of commercializing fuel cell vehicles and hydrogen stations from 2015 was announced by auto-makers and energy suppliers this year. The Tohoku earthquake crisis hit us and will change energy policy planned by the Japanese government. This energy surrounding will promote to structure the hydrogen energy system having safety and no environmental risk. Regarding the hydrogen system, transporting and storing hydrogen economically will be very important. Liquefied hydrogen (LH2) system, one of hydrogen carriers with liquid state, will be the promising medium for middle and long term goal. This paper describes the evolution of hydrogen energy system for future, comparison of LH2 and other hydrogen carriers with the liquid state, and features and issue of the LH2 system playing a big role in hydrogen economy.

Key words: Energy, Hydrogen carrier, Liquefied hydrogen system.

### 1. はじめに

今年初め、エネルギー関連会社と自動車メーカーにより燃料電池自動車 (FCV) の導入と水素供インフラ整備計画が共同発表され<sup>1)</sup>、2015 年よりユーザへの水素供給が始まる。また、今年 3 月 11 日の東日本大震災による福島第一原子力発電所の事故の影響で我が国のエネルギー基本政策が見直しされている。将来のエネルギー論議が混沌する中で、安全で環境負荷の小さい水素エネルギーの果たす役割は以前に増して大きくなりつつある。中・長期を視野にいたした水素エネルギーシステムを構築する上で、水素利用系が進展する共に、水素供給インフラ整備がとりわけ水素の輸送貯蔵方法が重要となる。ユーザへの水素輸送貯蔵方法は研究段階から実用レベルまで多様な方法が検討されているが、水素キャリアが石油等と同じ液体状態であれば、扱いが容易で経済性等の向上が期待できる。

本解説では、まず将来に向けた水素エネルギーシステムの姿を描き、液状水素キャリアの一つである液化水素 (LH2) を他の液体状キャリアと比較しながらその特徴

と今後の課題について述べる。

### 2. 将来に向けた水素エネルギーシステムの姿

水素エネルギーシステムは、地域の産業構造、地勢、及び水素需要の規模によりシステム構成が異なり、利用系の規模拡大に応じて変化すると予想される。図 1 は短中長期のシステムとその進展の姿を示す。国内エネルギーシステムに於いては、家庭用燃料電池、FCV 等の民生向け利用系が先行し、次に工業向け利用機器への拡大が予想され、その供給水素は製油所、製鉄所、カセイソーダ工場等の副産水素から製造される。その水素製造拠点はクラスター状に国内に点在し、それが核となり拡大していくであろう。化石燃料からの水素製造過程で発生する CO<sub>2</sub> の排出量削減が要求されると、二酸化炭素回収貯留 (CCS) 及び再生可能エネルギーの利用がシナジー的に水素システムの構築に貢献していく。また水素需要が増加していくと海外で製造した安価な水素を輸入する海外エネルギーシステムが構築されるであろう。以上は我が国の短・中・長期の水素エネルギーシステムを予想し

た姿であるが、水素エネルギーの国際化を考える上で、エネルギー事情、地勢学的に異なる米国、欧州での水素エネルギーシステムの動向も注視することも重要である。

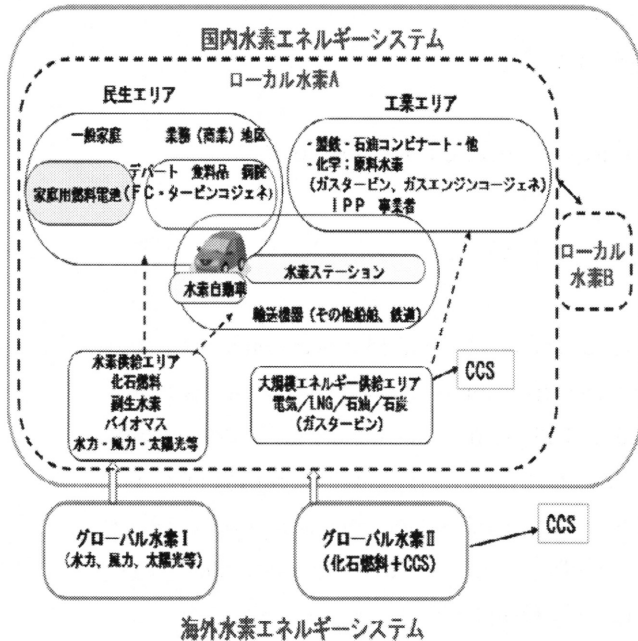


図1. 短中長期の水素エネルギーシステムの姿

我が国のFCVは、2015年から普及し2025年の自立拡大開始の時期には200万台に増大すると言われ<sup>1)</sup>、その時期のFCV向け水素供給量は16億Nm<sup>3</sup>/年(=200万台x約72kg/台・年)に想定される。その供給エネルギーは現在の輸送部門エネルギーの数%に相当する。同様な検討が独のプロジェクト「GemanHy」<sup>2)</sup>でも行われ、CO<sub>2</sub>削減量と原油価格を変えた3つのシナリオを描き、2050年までの輸送部門の水素導入量を予想している。その予想導入量の例を図2.に示す。この時の導入条

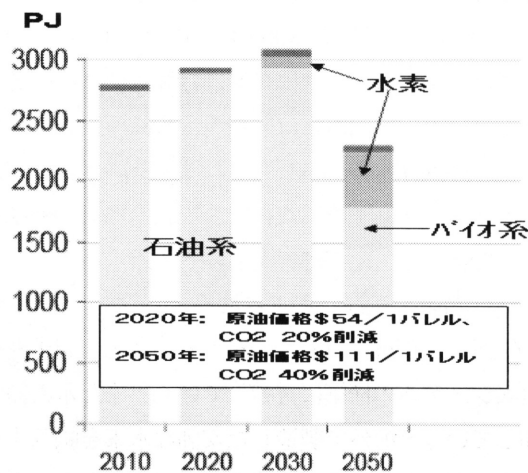


図2. 独における輸送部門の水素導入量予想<sup>2)</sup>

件は2020年と2050年でのCO<sub>2</sub>削減量が夫々20%、40%、原油価格が夫々\$54/バレル、\$111/バレルである。2030年の水素導入量(PJ換算)は約100PJ(約79億Nm<sup>3</sup>, HHV)に予想されており、水素導入量の増加は我が国と同じ傾向を示す。政策的にCO<sub>2</sub>削減が厳しくなると、FCV以外の他水素利用機器の普及も予想され水素導入量は更に増加するであろう。

### 3. 液化水素と他の液状水素キャリアの比較

水素ステーション等への輸送及び貯蔵の水素形態として各種検討されるが、中・大規模輸送に適した液状の水素キャリアに限定すると、LH2、アンモニア、メタノール、及び有機ヒドライド等がある。これら水素キャリアは化学工業製品として一般に流通している。表1.にLH2と他液状水素キャリアの比較を示す。LH2はガスから液に変化したエントロピーの低い状態であるが、アンモニア、メタノール、有機ヒドライド(メチルシクロヘキサン)は化学媒体で、ある割合で水素を含有する。化学媒体を介して水素の出し入れがあり製造側で水素添加、需要側で脱水素プロセスが必要となる。化学媒体は室温付近で取り扱いが可能で既存インフラを利用できる。LH2は製造側で液化し需要側でガス化する。この間、沸点が非常に小さく蒸発し易いため輸送貯蔵では特別な断熱技術が要求される。

LH2と他液状水素キャリアとの比較は、我が国の「WE-NET」、欧州の「EQHPP」プロジェクト等で行われLH2の優位性が検討されたが、現在の技術進展を考慮して再評価が必要であろう。

次に輸送用コンテナタンクを対象にしたLH2と有機ヒドライド(メチルシクロヘキサン)の輸送効率の比較を行う。図3.にコンテナの外観図を示す。タンク容積

表1. LH2と液状水素キャリアとの比較

	液化水素(LH2)	アモニア	メノール	有機ヒドライド
化学式	H <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> OH	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
密度(kg/m <sup>3</sup> )	70.8	680	800	770
沸点(°C)	-253	-33	65	101
製造プロセス	GH <sub>2</sub> ⇒ LH <sub>2</sub>	3H <sub>2</sub> +N <sub>2</sub> ⇒ 2NH <sub>3</sub>	2H <sub>2</sub> +CO ⇒ CH <sub>3</sub> OH	C <sub>7</sub> H <sub>8</sub> +3H <sub>2</sub> ⇒ C <sub>7</sub> H <sub>14</sub>
脱水素プロセス	LH <sub>2</sub> ⇒ GH <sub>2</sub>	2NH <sub>3</sub> ⇒ 3H <sub>2</sub> +N <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> OH+H <sub>2</sub> O ⇒ 3H <sub>2</sub>	C <sub>7</sub> H <sub>14</sub> ⇒ 3H <sub>2</sub> +C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>

は 41m<sup>3</sup>に仮定する。LH2 用は LH2 の蒸発を抑制する断熱層を有する内槽と外槽（真空層）の二重タンク構造となる。有機ハイドライド用タンクは、常温で液状であるから内槽のみとなる。表 2.に輸送効率比較の条件と結果を示す。表中の水素含有率は有効に水素を取り出す重量%を示す。

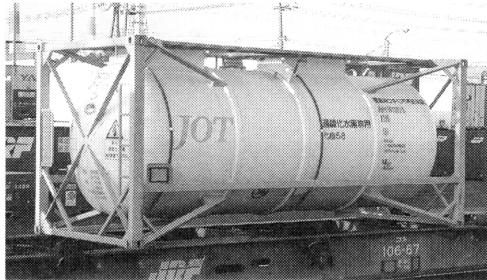


図 3. 輸送コンテナの外観図（参考図）

表 2. LH2 と有機ハイドライドの効率比較

		LH2	有機ハイドライド (メチルシロキサン)
コンテナタンク 容積 重量	内槽幾何容積 (m <sup>3</sup> )	41	41
	内槽重量 (ton)	8. 2	4. 4
	外槽幾何容積 (m <sup>3</sup> )	50	-
	外槽重量 (ton)	10. 6	-
液 重量 (ton)	2. 6	32	
水素 含有率 (%)	100	6. 16	
水素重量 (ton)	2. 6	1. 94	
タンク全体重量 (液込) (ton)	21. 4	36. 4	
システム重量効率 (%)	12. 2	5. 3	
システム容積効率 (kg/m <sup>3</sup> )	52. 3	47. 2	

備考:

- ・タンク全重量: 外槽と内槽の合計、その他機器は除く
- ・設計圧力、充填率は、LH2で0.7MPaG, 90%, 有機ハイドライドで0.1MPaG, 98%
- ・システム重量効率(%) = 水素重量(kg)/タンク全体重量(kg)
- ・システム容積効率(kg/m<sup>3</sup>) = 水素重量(kg)/タンク容積(m<sup>3</sup>)

LH2 は同容積条件で有機ハイドライドより多量の水素を輸送できる。LH2はタンク本体が二重になり重くなるが、密度が小さいため液を含んだタンク全体重量は有機ハイドライドより軽くなる。従ってシステム重量効率は有機ハイドライドより高く、システム容積効率はほぼ同じになる。

#### 4. 液化水素と LNG

LNG（液化天然ガス）は、LH2 と近い可燃性液化ガスであるが、約 40 年前より大規模に商用化され、その

間安全に運用されてきた。我が国の LNG の初導入は 1969 年で、その導入背景にはエネルギー問題、環境問題、及び当時の高度経済成長があった。LNG 海上輸送（容積 5100m<sup>3</sup>）は 1959 年に大西洋横断で初めて実証され、その後、1963 年から商業輸送が始まり商用まで期間は極めて短い<sup>3)</sup>。LH2 と LNG の物性比較を表 3.に示す。LH2 は沸点が LNG より約 90℃低く、容積当りの潜熱も約 1/3 であることから、同じ蒸発率（%/日）で約 10 倍の断熱性能が要求される。また容積当りの熱量が小さく、同熱量を輸送するには LNG より約 3 倍の容積が必要で輸送効率向上の技術が重要となる。

表 3. LH2 と LNG の物性比較

	LH2	LNG
液の沸点(K)(°C)	20.3(-253)	112(-161)
液の密度(kg/m <sup>3</sup> )	70.8	442.5
液の潜熱(kJ/L)(kJ/kg)	31.4 (444)	225.9(510.5)
容積あたりの低位発熱量(MJ/L)	8.50	22.1
重量あたりの低位発熱量(MJ/kg)	120.0	50.0

備考:

- ・天然ガスはメタン物性値を採用
- ・液は大気圧における物性値

次に LNG と LH2 の システムの比較と相互関係を図 4.に示す。LH2 と LNG のシステムともに液化⇒輸送（陸上、海上）・貯蔵⇒利用系のエネルギーチェーン構成は同じで、利用系に水素と天然ガスの混合、またガス化過程で冷熱を相互に利用できる等、相性が良い。高炭素系燃料から LNG に転換する政策と同調しながら水素導入することが期待でき、LNG との効率的なシステム結合が

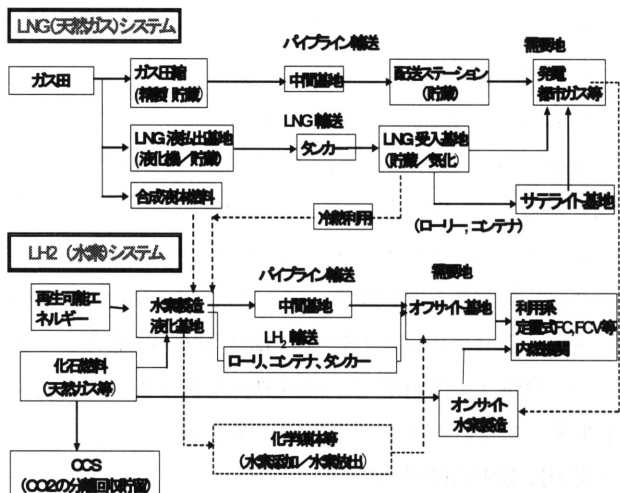


図 4. LNG システムと LH2 システム

可能である。システム規模から見ると小・中規模がLNG受入基地からサテライト基地、利用系までが国内チェーンに相当し、大規模が海外から大量輸入する国際チェーンに相当する。

## 5. 液化水素システムの課題

LH2はロケット燃料、化学製品原料として既に商業化されているが、エネルギー燃料としてLH2システムを導入していくために、経済性を高める必要がある。その対策として、・液化機の高効率化、・蒸発量の低減、・冷熱利用等の他システムとの融合、・安全に関する標準化等がある。

(液化機の高効率化)

LNGに比較し液化動力が大きく、水素供給コストにおける液化コストの占める割合が大きいため、液化効率を高めることが重要である。液化原単位は、現在約 $1\text{kWh}/\text{Nm}^3$ とされているが、構成機器(圧縮機、膨張タービン等)の効率向上と冷却媒体の改善等により50%低減する(約 $0.5\text{kWh}/\text{Nm}^3$ )可能性もある<sup>4)</sup>。欧米では液化効率向上に向けた国プロジェクトも進行しており、例えば欧州の第7次フレームプログラムのFCH-JU(燃料電池水素共同実施機構)の中で検討されている<sup>5)</sup>。

(蒸発量の低減)

LH2の蒸発を低減する断熱技術は重要である。LNGタンクは一般に固体断熱構造が採用されているが(例侵入熱 $20\text{W}/\text{m}^2$ )、LH2タンクは更に侵入熱を低減するため小・中型タンク向けに高真空断熱(例 $10^{-2}\text{Pa}$ 以下)、大型タンク向けの低真空断熱(例 $1\text{Pa}$ )が採用されている。その侵入熱レベルは高真空で約 $1\text{W}/\text{m}^2$ である。更に蒸発量を低減し輸送効率を左右する断熱層を薄くすることが課題である。

(冷熱利用等の他システムとの融合)

LH2は輸送効率が高いが、蒸発と液化動力が課題である。断熱向上と液化動力を低減する共に、蒸発ガスを有効に利用するシステム、また蒸発時の冷熱を利用するシステムとを融合し液化動力エネルギーを回収することが期待される。また将来の超電導機器(例超電導モータ等)の冷媒として有望で、超電導—水素(省エネと新エネルギー)とのシナジー効果が生まれる。

(安全に関する標準化)

水素ステーション関係では規制合理化が進んでいるが、

これは主に高圧水素ガスを対象にしている。低圧で運転するLH2はエネルギー的に見て高圧水素ガスより安全性が高い。万一、LH2が大気に放出される場合でもLNGより蒸発拡散が非常に大きく着火リスクが非常に小さくなる。蒸発直後でも密度は空気より軽くなり(水素ガス密度@23K=空気密度)、一方、LNGは約160K(沸点112K)で空気密度と同じなる。今後、LH2についても経済性を考慮した大量導入に向けた安全対策と標準化が望まれる。

## 6. 海外水素エネルギーシステム

海外の安価で豊富な再生可能エネルギー等を水素源とした国際的な水素エネルギーシステムの検討は、20年以上前から行われ、その代表プロジェクトは欧州の「EQHPP」、我が国の「WE-NET」である。図5は欧州で検討された欧州、米国、日本等へ水素輸入ルート<sup>5)</sup>を示す。水素源(水力、風力、太陽光等)は様々であるが、水素供給のポテンシャル地域としてグリーンランド、パタゴニア、サウジアラビア、ノルウェー、アイスランド等が、水素キャリアとしてメチルシクロヘキサン、アンモニア、LH2、水素パイプラインが検討された。

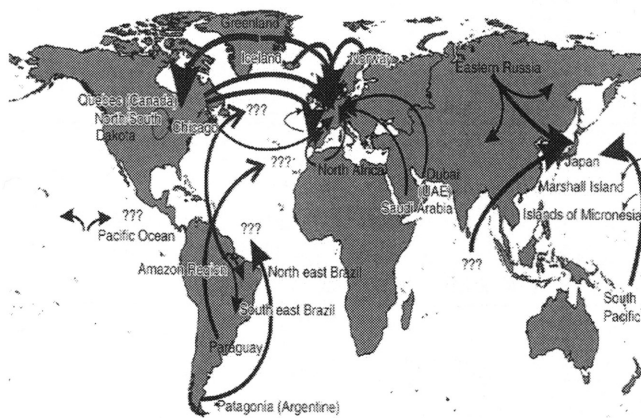


図5. 国際的な水素エネルギー経路

欧州 ENCOURAGED プロジェクトでは近隣諸国から欧州への水素輸入が検討された<sup>6)</sup>。表4は、欧州の各国と近隣国間の水素コスト(C/kWh H2)の比較である。図には参考としてガソリン価格(表上部)と化石燃料(天然ガス、褐炭)からの水素化経路が示されている。化石燃料経路の場合、水素価格に炭素排出量(20ユーロ/トン)が加算される。

水素製造⇒液化⇒LH2 船、トラック輸送のルートは水素源を太陽光、水力、地熱とした5 ケース (図中の点線部分) で検討された。一番安価なケースはアイスランドの地熱発電による水素製造、液化し LH2 輸送船で英国エジンバラに輸送するケースで約 7 セント/kWh (32 円/Nm<sup>3</sup>@ 130 円/ユーロ) である。

最近では豪州の未利用低品位炭 (褐炭) から水素を精製し、水素は液化して日本に輸送する計画が発表されている<sup>7)</sup>。

7. まとめ

本稿では、将来の水素エネルギーシステムを描き、LH2 と液体状の化学水素キャリアの比較と LH2 システムの特徴と課題を述べた。将来のエネルギー政策が混沌とする現状において、水素エネルギーへの期待は大きい。そのためには全ての水素利用機器を含めた短中長期の全体シナリオを、エネルギー安全保障、地球環境問題、及び経済の持続的成長の観点から再考するべきであろう。

液状水素の一つである LH2 を使用したシステム構築は、LNG エネルギーチェーンの延長上にあり、また国際産業競争力の向上と国内の新産業の創出に繋がり期待される。

参考文献

- 1) “水素エネルギー社会への取り組み 水素ステーション “ (JX 日鉱日石エネルギー) (2011)
- 2) “A study Addressing the questions: “Where Will the Hydrogen in Germany Come from by 2050”(GemanHy)(2008)  
[http://www.germanhy.de/page/fileadmin/germanhy/media/080716\\_GermanHy\\_Results](http://www.germanhy.de/page/fileadmin/germanhy/media/080716_GermanHy_Results)
- 3) 糸山直之“LNG 船開発 50 年史”成山堂 (2003)
- 4) Songwunt Krasase ,JacobH.Stang, Petter Neksa, ”Development of large scale hydrogen liquefaction processes from 1898 to 2009”Hydrogen energy 35(2010)
- 5) “Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking”  
[http://rp7.fhg.at/upload/medialibrary/y-aip-201105\\_en.pdf](http://rp7.fhg.at/upload/medialibrary/y-aip-201105_en.pdf)
- 6) Ball & Wietschel ” The Hydrogen Economy Opportunities and Challenge “ (Camb.)(2011)
- 7) ”EnergyCorridors”(2007)  
[http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/energy\\_corridors\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/energy_corridors_en.pdf)
- 8) “CO2 排出なし水素供給網を構築”日刊工業新聞 2011/09/01

表 4. 海外水素の水素コスト比較<sup>6)</sup>

