

# 水素液化・液化水素輸送貯蔵 — 来るべき水素社会に向けて —

## Technologies of Hydrogen Liquefaction, Transport and Storage — Paving the Way to a Hydrogen Fueled Future



神谷 祥二①※*	Shoji Kamiya
砂野 耕三②	Kozo Isano
飯屋 大祐③	Daisuke Kariya
小宮 俊博④	Toshihiro Komiya
山口 哲⑤	Akira Yamaguchi
孝岡 祐吉⑥※	Yukichi Takaoka

将来の水素社会に向け水素需要拡大が予想される中で、豪州で製造した水素を輸入する「水素エネルギーサプライチェーン」構想の実現を目指して、当社は関連機器の開発に取り組んでいる。チェーン商業化までに、2020年頃の小規模パイロットチェーン、2025～2030年大規模実証チェーンを計画している。水素ガスは大規模輸送貯蔵に適した液化水素に変換されて輸入されるが、その液化、輸送貯蔵技術は当社のロケット射点設備、LNG船などで蓄積されてきた極低温技術が活用される。

チェーン構築に向け液化技術では国産初の大型液化機での水素液化に成功し、また輸送技術では世界初となる液化水素運搬船の貨物格納設備の基本認証を得るなど、技術開発が着実に進行している。

Demand for hydrogen is expected to increase as we head toward becoming a hydrogen economy. With a view to realizing the Hydrogen Energy Supply Chain Initiative, which envisions importing hydrogen produced in Australia, Kawasaki is developing related equipment. Before commercial operation of the hydrogen energy chain, Kawasaki is planning to implement a small-scale pilot chain around 2020, and a large-scale demonstration chain between 2025 and 2030. When importing hydrogen gas, it will be converted into liquefied hydrogen suitable for large-scale transport and storage. The technology used for liquefaction, transport, and storage is derived from the cryogenic technology Kawasaki has built up through the development of rocket launch complexes and LNG carries.

Technological development to realize the chain concept is steadily progressing. In terms of liquefaction technology, Kawasaki has succeeded in hydrogen liquefaction using Japan's first large-scale hydrogen liquefier. In terms of transport technology, Kawasaki has obtained approval in principle for the cargo containment system to be installed on the world's first liquefied hydrogen carrier.

### まえがき

地球温暖化の環境問題、資源枯渇問題を解決する水素社会の実現に向けた水素利用系の商業化、インフラ関連の技術開発が国内外で加速されている。当社は「水素エネルギーサプライチェーン」構想を2010年に提案し、その実現に取り組んできた。本稿では、当社のチェーン構想の背景、将来の水素需要量の拡大予想、およびチェーンを構成する水素液化、液化水素（LH<sub>2</sub>）輸送貯蔵技術に関連する当社実績と技術開発の状況について述べる。

### 1 背景

我が国では2014年4月に閣議決定された「エネルギー基本計画」<sup>1)</sup>の中で「水素社会」の実現に向けた取り組みが明記された。水素ビジネスとして燃料電池自動車（FCV）が1年前倒しの2014年末に販売された。さらに、欧州連合（EU）は、今年末のCOP21（気候変動枠組条約締結国会議）に向けて、2050年までに世界全体の温室効果ガスの排出量を2010年に比べて60%以上削減する長期目標を2015年2月に掲げた。このような状況から水素社会への期待はますます高まっている。

水素社会は、1874年フランスSF作家ジュール・ベルヌが、「ミステリアス・アイランド」で予言したことが始まりと

される。その100年後、第1回 世界水素エネルギー会議 (WHEC: World Hydrogen Energy Conference) が1976年に開催され、科学的検討が本格的に行われるようになり、電力システムと相互に補完するエネルギーシステムとして国内外で提唱されてきた。

当社は、来るべき水素社会での水素需要増大に備えて、豪州で褐炭から水素を製造し、発生するCO<sub>2</sub>を豪州で回収貯留してわが国にCO<sub>2</sub>フリーの水素を輸入する「水素エネルギーサプライチェーン」構想を提案して、その実現に取り組んでいる。

## 2 将来の水素需要の拡大

水素社会においては、水素の利用が、すでに商用段階にある定置式燃料電池や燃料電池自動車から、水素エンジンおよび発電用水素ガスタービンなどに拡大するため、水素需要は急激に増大していく。国内の研究機関<sup>2), 3)</sup>が、各CO<sub>2</sub>制約条件とエネルギー技術評価モデルで水素需要を予測している。例えばエネルギー総合工学研究所は、2020年、2050年のCO<sub>2</sub>削減排出量をそれぞれ1990年比の5%、80%削減として、また海外の褐炭、天然ガス、風力由来水素を想定した水素需要量を予想した<sup>2)</sup>。その予想需要量は、2030年で2.5 MTOE (石油換算百万トン) (水素量 約97億Nm<sup>3</sup>/y)、2050年で57 MTOE (水素量 約2,198億Nm<sup>3</sup>/y)に達する。

## 3 海外からの水素輸入

海外から水素を輸入する構想は、国内外で20年以上前から検討されている<sup>4)</sup>。各プロジェクトの水素の輸送区間、水素源、および水素の輸送形態を表1に示す。表に示すように水素輸送形態はほとんどがLH<sub>2</sub>である。その代表プロジェクトは、水素源を再生可能エネルギーとした欧州のEQHHPP (ユーロケベックプロジェクト、1986~1998年)と日本のWE-NET (水素利用国際クリーンエネルギーシステム、1993~2003年)である。EQHHPPは、カナダケベックの水力発電 (100MW) で水分解して、製造液化したLH<sub>2</sub>をドイツのハンブルクまで海上輸送し、その水素輸送量は1.5×10<sup>4</sup>t/y (1.67億Nm<sup>3</sup>/y)である。WE-NETは、水素は媒体にEQHHPPと同じLH<sub>2</sub>を採用し、その規模は、約10倍程度である。

表1 海外水素輸入のプロジェクト

Table 1 Overseas hydrogen import projects

プロジェクト	輸送区間	水素源	水素輸送形態
EQHHPP	カナダ→欧州	水力	LH <sub>2</sub> , MCH, NH <sub>3</sub>
NHGE	ノルウェー→欧州	水力	LH <sub>2</sub>
EURO-HYPORT	アイスランド→欧州	水力地熱	LH <sub>2</sub>
HYSOLAR	独→サウジアラビア	太陽光	LH <sub>2</sub>
HIHEPP	ハワイ→他国	潮流	-
風力利用	アルゼンチン→他国	風力	LH <sub>2</sub>
氷河利用	グリーンランド	水力, 氷河	LH <sub>2</sub>
WE-NET	カナダ→日本	水力	LH <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , CH <sub>3</sub> OH

備考: LH<sub>2</sub>: 液化水素, MCH: 有機ヒドライド, NH<sub>3</sub>: アンモニア  
CH<sub>3</sub>OH: メタノール

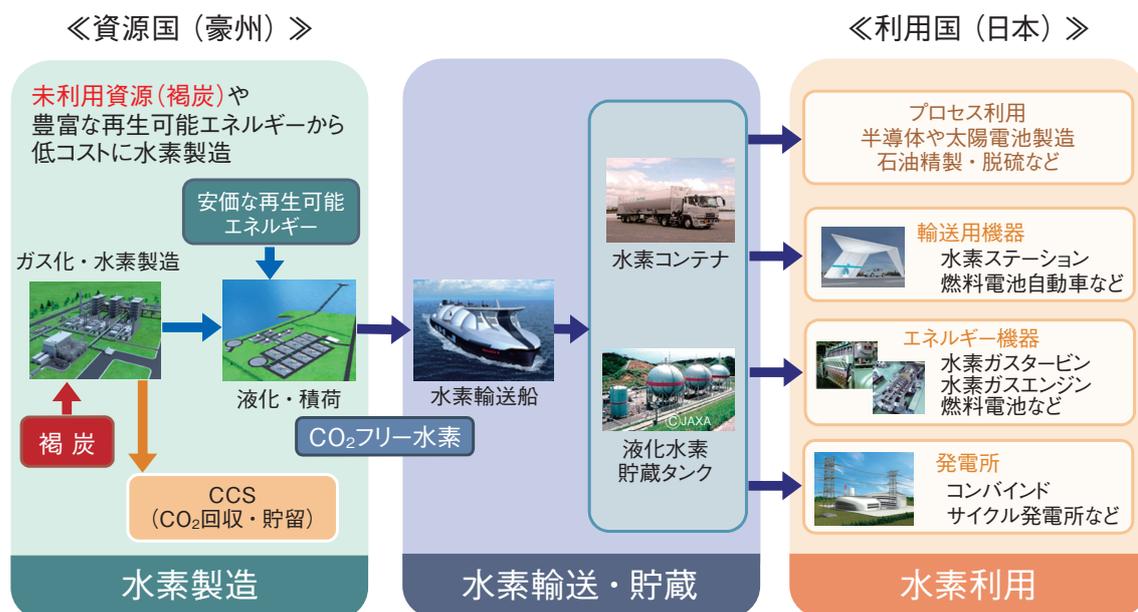


図1 水素エネルギーサプライチェーン構想<sup>5)</sup>

Fig. 1 Hydrogen Energy Supply Chain Initiative<sup>5)</sup>

#### 4 当社の「水素エネルギーサプライチェーン」構想

当社は豪州（ビクトリア州）で褐炭から安価な水素を製造し、その水素を日本に輸送して利用するCO<sub>2</sub>フリー「水素エネルギーサプライチェーン」構想を2010年に発表した。本構想は、2014年6月に公開された経済産業省の「水素・燃料電池戦略ロードマップ」でも将来の水素エネルギーチェーンとして明記されている。そのシステム概念図を図1に示す。豪州の褐炭からガス化・精製し水素を製造、液化した水素を運搬船で日本に海上輸送する。ガス化過程で発生するCO<sub>2</sub>（炭酸ガス）は、豪州でCCS（CO<sub>2</sub> Capture and Storage, CO<sub>2</sub>回収貯留）処理するため、CO<sub>2</sub>の排出を伴わない安価なCO<sub>2</sub>フリーの水素が輸入される。輸入されたLH<sub>2</sub>は受入基地近隣の水素発電所の燃料として、また各地域の燃料電池車用水素ステーションや水素エンジンなどのエネルギー機器に輸送される。

褐炭は、一般のれき青炭に比較して水分が多く（約60%）輸送効率が低い、また乾燥すると自然発火しやすいなどの理由から、採掘地近傍での発電利用に限定される未利用炭である。豪州のビクトリア州には莫大な量が存在しており、非常に安価な水素製造が可能となる。

#### 5 水素インフラ設備

当社は、水素社会の実現に向けた水素インフラ設備の開発を進めている。具体的には、気体の水素を液体に変換する水素液化システム、液化水素を貯蓄するタンク、液化水素を輸送するためのコンテナや輸送船などである。

これらのインフラ設備は、LNG船やJAXA（航空宇宙研究開発機構）種子島宇宙センターの液化水素タンクなど、これまで当社が培ってきたLNG技術・極低温技術・大型構造物建造技術などを発展させることにより実現できるものであり、当社の現ビジネスとの親和性の高いものである。

これらの中でも、産業用では初となる純国産独自技術の水素液化システムを中心に述べる。

#### 6 水素液化システム

褐炭から製造した水素ガスは高純度に精製されパイプラインで水素液化システムに圧送供給される。水素液化機で水素ガスは、約20K（-253℃）まで冷却液化される。LH<sub>2</sub>は、断熱タンクを搭載したローリ、コンテナに充填されて港の出荷基地まで輸送される。大規模チェーンでは、水素ガスをパイプラインで出荷基地まで圧送し、出荷基地に建設された水素液化機で液化する。出荷基地では、LH<sub>2</sub>は一時的にLH<sub>2</sub>タンクに貯蔵し、液ポンプにてタンクからLH<sub>2</sub>運搬船に積荷され、日本まで海上輸送される。日本到着後、受入基地のLH<sub>2</sub>タンクに貯蔵され、タンクから各地の水素

利用系に配送・供給される。液化から貯蔵輸送までの水素液化システムの規模は、水素需要・供給量、海上輸送日数などにより決まる。以下にLH<sub>2</sub>の特徴、水素液化システム中の水素ガス液化、LH<sub>2</sub>の貯蔵輸送機器について述べる。

##### (1) LH<sub>2</sub>の特徴

水素の輸送貯蔵媒体として、LH<sub>2</sub>、圧縮水素ガス、水素吸蔵合金、化学媒体などがあるが、商用化レベルにある媒体は圧縮水素ガスとLH<sub>2</sub>のみである。水素吸蔵合金、化学媒体は水素を取り出す脱水素プロセスにおいて外部からエネルギーを必要とするが、LH<sub>2</sub>は液化時のエネルギー投入のみで、水素利用系においてガス化に新たなエネルギーを必要としない。

LH<sub>2</sub>の技術開発は、1950年代の高エネルギー物理分野の泡箱実験から始まり、米国NASAのロケット燃料技術開発で飛躍的に進展し、1950年後期に約30t/dの水素液化機が、1960年代には、世界最大の約60t/dの水素液化機と貯蔵容量3,200m<sup>3</sup>のLH<sub>2</sub>貯蔵タンクが建設された。国内では1980年代頃から、主にロケット燃料に使用され始め、現在は半導体などの産業分野に拡大している。

水素社会においては大規模にLH<sub>2</sub>が導入されることから、同じ可燃性液化ガスで1960年代から商業化レベルにあるLNG（液化天然ガス、主成分メタン）技術が活用される。LH<sub>2</sub>とLNGの物性比較を表2に示す。LH<sub>2</sub>の飽和液密度（70.8kg/m<sup>3</sup>）は、大気圧、温度0℃でのガス密度（0.0899kg/Nm<sup>3</sup>）の約790倍、70MPa、温度0℃での圧縮ガス密度（42.1kg/m<sup>3</sup>）の約1.7倍であり、LH<sub>2</sub>は非常に容積効率が高い。また、LH<sub>2</sub>の沸点（20.3K）はLNG（112K）より約90℃低く、体積当りの潜熱が小さくなり、LNGよりさらに高度な断熱技術と液化動力を小さくする液化技術が必要となる。

水素の大きな特徴として、核スピンの方向によりエネルギー準位の高いオルソ水素と低いパラ水素がある。室温状態の水素ガスは25%パラ水素と75%オルソ水素から成るノーマル水素、LH<sub>2</sub>では99.8%パラ水素となる。ノーマル水

表2 LH<sub>2</sub>とLNGの物性比較  
Table 2 Comparison of LH<sub>2</sub> and LNG

		LH <sub>2</sub>	LNG (CH <sub>4</sub> )
沸点 (K)		20.3 (-253℃)	112 (-162℃)
ガス密度 (kg/Nm <sup>3</sup> )		0.0899	0.717
飽和液密度 (kg/m <sup>3</sup> )		70.8	442.5
飽和ガス密度 (kg/m <sup>3</sup> )		1.34	1.82
臨界温度 (K)		32.9	190
臨界圧力 (MPa)		1.26	4.6
潜熱	体積当たり (kJ/L)	31.4	226
	重量当たり (kJ/kg)	444	510
低位発熱量	体積当たり (MJ/L)	8.5	22.1
	重量当たり (MJ/kg)	120	50

備考：・天然ガスはメタン物性値を採用  
・飽和液、飽和ガスは大気圧における物性値

素からLH<sub>2</sub>までの液化プロセスでは、予冷過程で温度と平衡状態にあるオルソ・パラ組成比に維持することが重要となる。また、LH<sub>2</sub>の臨界圧(1.28MPa)はLNG臨界圧(4.6MPa)より小さく、機器設計では温度、圧力に対する大きな物性変化を考慮することも重要である。

## (2) 水素ガスの液化

水素ガスの液化に要する最小液化仕事(エクセルギ)は、液化プロセスの始点と終点の状態量から熱力学的に決まり、始点を大気圧、300K、終点を大気圧の飽和LH<sub>2</sub>に仮定すると最小液化仕事は約3.90kWh/kg(0.35kWh/Nm<sup>3</sup>)で、LNG(メタン)液化仕事より約10倍大きい。

水素ガスの最小液化仕事の内訳は、以下の通りである。

- ① 常温水素ガス(300K)を飽和水素ガス(20K)に予冷するための仕事
- ② 飽和ガスを飽和液に凝縮するための仕事
- ③ 室温ノーマル水素をLH<sub>2</sub>(パラ水素99.8%)に変換するためのオルソ/パラ変換のための仕事

その内訳は、予冷仕事は41%、凝縮仕事は44%、オルソ/パラ変換仕事は15%<sup>7)</sup>である。LNGの液化仕事に比較して予冷仕事の割合が大きく、オルソ/パラ変換仕事が余分となる。

液化機の液化システム構成例(クロードサイクル)を図2に示す。プロセスは、冷熱を発生する冷凍サイクルと冷熱により常温水素ガスを冷却液化する水素ガス供給系から構成される。冷凍サイクルの冷熱は、圧縮機で圧縮された高圧冷媒ガス(水素、ヘリウムなど)が膨張タービンで膨張(等エントロピ膨張)することで発生する。

水素ガス供給系では、高純度に精製された製品水素ガスは圧縮機で圧縮され、熱交換器を介して冷凍サイクルの冷熱により常温から徐々に液化水素温度近くまで冷却される。冷却された圧縮ガスは、膨張弁でほぼ大気圧状態まで

膨張(等エントロピ膨張)し液化する。熱交換器、膨張弁、膨張タービンなどは外部からの入熱を遮断するためコールドボックス(真空容器)内に収納されている。

実際の液化仕事は、約1kWh/Nm<sup>3</sup>程度で、その液化効率(最小液化仕事/実際の液化仕事)は約30%程度ある。この場合、原料水素状態が大気圧、300Kをベースとしているが、高い圧力の原料水素ガスが供給されると最小液化仕事も小さくなり、実際の液化仕事も小さくなる。

当社が開発した国産初の大型5t/dクラスの水素液化機の外観を図3に示す。本液化機は、膨張機にガス軸受膨張タービンを採用し、当社が1980年代に開発したヘリウム(沸点4.3K)液化機の技術を活用した。ガス軸受膨張タービンの採用により、高速回転、高膨張比が達成できるため高液化効率が可能となり、また油軸受膨張タービンで問題と

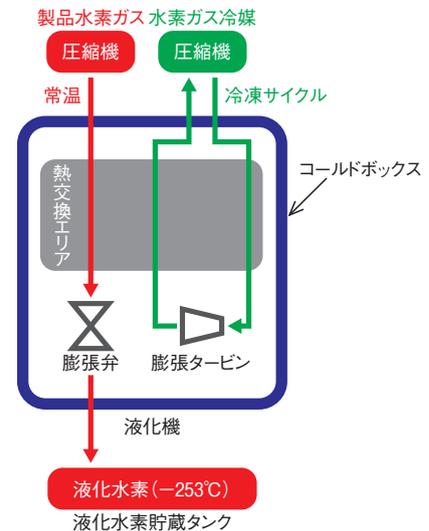


図2 水素液化システムの構成  
Fig. 2 Composition of hydrogen liquefaction system



図3 国産初の大型水素液化機  
Fig. 3 Japan's first-large scale hydrogen liquefier



図4 国内最大のLH<sub>2</sub>タンクの外観  
Fig. 4 Japan's largest LH<sub>2</sub> tank

なる系内の汚染，再起動の煩雑さが無い。現在，試運転を行いながら構成機器の評価試験を行っている。

### (3) LH<sub>2</sub>の貯蔵

低沸点・低潜熱のLH<sub>2</sub>貯蔵輸送において，蒸発を低減する断熱技術は特に重要である。LNGタンクの断熱は常圧の固体断熱構造（ウレタンフォームなど）を適用するが，LH<sub>2</sub>タンクでは，侵入熱を大幅に低減するために，小・中型タンク（例 容積20～300m<sup>3</sup>）向けに高真空断熱（真空度10<sup>-2</sup>Pa以下），大型タンク向けに低真空断熱（真空度1 Pa以下）を採用するケースが多い。その侵入熱流束は約1 W/m<sup>2</sup>であるが，同じ侵入熱流束でもタンクが大型化すると体積に対する表面積の割合が小さくなり液の蒸発率（%/d）は低減する。当社が建設した JAXA（宇宙航空研

究開発機構）種子島宇宙センター向けの国内最大LH<sub>2</sub>タンク（容積600m<sup>3</sup>）の外観を図4に示す。本LH<sub>2</sub>タンクは低真空断熱のパーライト真空断熱を採用した二重殻式球形タンク形式で，蒸発率は0.18%/d以下である。米国NASAの世界最大3,200m<sup>3</sup>のLH<sub>2</sub>タンクも同断熱方法を採用した二重殻式球形タンクである。

CO<sub>2</sub>フリー水素チェーンのパイロット，実証チェーンでの陸上LH<sub>2</sub>タンクの容積はそれぞれ，約3,400m<sup>3</sup>，約5万m<sup>3</sup>クラスを計画しており，当社が建設したLH<sub>2</sub>タンク技術が活用される。

現在，播磨工場にて図5のような陸上用のLH<sub>2</sub>タンクを試作しており，当社がこれまで蓄積してきた極低温技術とものづくり力を結集し，早期の実用化を目指している。

### (4) LH<sub>2</sub>の輸送

LH<sub>2</sub>の輸送は陸上と海上輸送に分類され，陸上輸送では，トラックとタンクが一体になったローリ，またはトラックとタンクが分離するコンテナで輸送するのが一般的である。輸送用のLH<sub>2</sub>タンクは，定置式と異なり容積効率を最大限に上げるため内槽と外槽間の断熱層を薄くし，かつ大きな負荷荷重に耐え侵入熱を低減する特殊な支持構造が必要となる。

#### (i) 陸上輸送

当社が開発した40フィートコンテナの外観を図6に示す。本コンテナはコンテナ枠（幅2.4m×高さ2.6m×長さ12m）に内槽（容積46m<sup>3</sup>）と外槽から構成されるタンクが収納され，積層断熱材を使用した高真空断熱が採用されている。蒸発率は1.0%/d以下である。コンテナは国内液化基地から半導体工場，JAXA種子島宇宙センターなどまでのLH<sub>2</sub>陸上輸送に使用されている。



図5 試作中の陸上用LH<sub>2</sub>タンク  
Fig. 5 Trial manufacture of aboveground LH<sub>2</sub> tank



図6 LH<sub>2</sub>コンテナ  
Fig. 6 LH<sub>2</sub> container

## (ii) 海上輸送

LH<sub>2</sub>の海上輸送の実績例は少ない。欧州では大型コンテナを使用して米国ルイジアナから南米ギアナのロケット射点基地まで海上輸送された。また米国NASAでは、LH<sub>2</sub>バージン船（容積約1,000m<sup>3</sup>）でルイジアナからロケットエンジン試験場まで輸送されている<sup>6)</sup>。将来必要となる豪州からLH<sub>2</sub>を大量でかつ長距離海上輸送できるLH<sub>2</sub>運搬船の建造実績は世界にない。

当社は、「水素エネルギーサプライチェーン」構築に向けてパイロットチェーン用小型LH<sub>2</sub>運搬船と実証チェーン用大型LH<sub>2</sub>運搬船（容積16万m<sup>3</sup>）の開発を進めている。

## あとがき

水素社会の実現に向けて、燃料電池自動車用水素ステーションのインフラ整備と規制見直し、短中期の水素ロードマップ策定を目的とした「水素・燃料電池戦略協議会」の設立などによる官民の取り組みが加速されている。将来の大量水素の導入に対応した当社の「水素エネルギーサプライチェーン」構想の根幹をなす水素液化、LH<sub>2</sub>輸送貯蔵技術は、来るべき水素社会の実現に大きく貢献する。経済性と安全性の高い水素液化システム、輸送貯蔵システムの実現に向けて、当社が長年蓄積したLNG技術、LH<sub>2</sub>技術を活用しながら、関連機器の技術開発を推進していく。

## 参考文献

- 1) 経済産業省，“エネルギー基本計画”（2014）
- 2) 石本，黒沢，笹倉，坂田：“世界及び日本におけるCO<sub>2</sub>フリー水素の導入量の検討”，日本エネルギー学会誌，Vol. 92, No. 2（2015）
- 3) 山地，笹倉：“将来エネルギーとしての水素の可能性”，エネルギー・資源，Vol. 35, No.1（2014）
- 4) Ball & Wietschel：“The Hydrogen Economy Opportunities and Challenges”，Cambridge Univ. press（2011）
- 5) 洲河，神谷：“CO<sub>2</sub>フリー水素チェーン～褐炭から始まる水素エネルギーチェーン～”，OHM，8月号（2013）
- 6) Karl Verfondern：“Safety Consideration on Liquid hydrogen”，Forshungszentrum Jülich（2008）



神谷 祥二



砂野 耕三



飯屋 大祐



小宮 俊博



山口 哲



孝岡 祐吉