

# 水素をつくる – 水素液化システムの開発 –

## Hydrogen Production – Development of Hydrogen Liquefaction Systems



砂野耕三①	Kozo Isano
小宮俊博②	Toshihiro Komiya
松田吉洋③	Yoshihiro Matsuda
仮屋大祐④	Daisuke Kariya
神谷祥二⑤**	Shoji Kamiya

液化水素の国際的なサプライチェーンにおいて、高度な極低温技術が必要な水素液化システムは重要な要素の一つである。当社は商用規模で国産初となる日量約5トンの水素液化システムを開発してきた。2014年に初液化に成功後、改良を加えた新型液化機は液化効率を約20%改善するとともに、長時間運転により信頼性も実証した。さらなる大型化および高効率化に向けた技術検討も始めている。

Hydrogen liquefaction systems, which require advanced cryogenic technology, are an important factor in the global supply chain of liquefied hydrogen. Kawasaki has built the Japan's first domestically developed commercial-scale liquefaction system that can liquefy approximately five tons of hydrogen per day. Since the first successful liquefaction in 2014, Kawasaki has improved liquefaction efficiency by approximately 20% with its new liquefier, and has also demonstrated the reliability of the liquefier through long-term operation. Kawasaki has begun technical studies aimed at further increasing the size and efficiency of liquefiers.

### まえがき

大量の水素を効率よく貯蔵および輸送するための手段の一つに液化水素がある。水素は-253度で液化することで体積が800分の1になるため、極めてコンパクトに貯蔵・輸送が可能になる。また、液化水素をガスに戻す際は大気との熱交換だけでよく、新たなエネルギーを消費しない。加えて液化水素は純度が極めて高いため、気化させるだけで燃料電池に投入できるなどのメリットももつ。

### 1 背景

水素エネルギーを普及させていくためには水素の調達・供給コストの低減が不可欠である。液化水素を媒体とする国際的な水素サプライチェーンでは、水素コストのおよそ3割を液化コストが占めるとされており<sup>1)</sup>、水素液化システムのコストダウンや高効率化によるコスト低減の効果は大きい。

商用規模の水素液化システムには、液化水素のハンドリングや極低温技術に関する知見やノウハウが要求される。このため同システムの設計・製造技術をもつ企業は世界でも3社ほどしかなく、いずれも欧米の大手産業ガス会社である。日本国内にも商用規模の水素液化プラントは3カ所あるが、水素液化システムの本体である液化機はいずれも

海外製となっている。海外でも燃料電池車の増大に伴って、水素液化プラントの建設が進められているが、いずれも前述の欧米の大手産業ガス会社の設備である。また、新規エネルギー事業者の参入による水素液化機市場の形成はこれからである。

当社は水素社会の実現に向けて、サプライチェーンの上流から下流まで一貫した技術開発および商用化を進めている。水素液化システムはその実現において重要な要素であるため、自社技術による初の国産化を目指して開発を進めることとした。

### 2 開発計画

水素の液化には極めて高度な極低温技術が必要になる。当社は30年ほど前、極低温の研究機関向けにヘリウム液化機を開発している<sup>2)</sup>。そのときの設計資料や経験者のアドバイスを心得て、2010年ごろから水素液化技術の研究開発に取り組んできた。

2011年、プロトタイプ液化機とその実証プラントを当社播磨工場内に建設し、国内初となる水素液化機の実証運転を行うプロジェクトをスタートさせた。

一方、プロトタイプ液化機の実証終盤から、そこで得られた知見やノウハウを活用しながら、商用機のベースとなる新型液化機の開発を開始することとした。

### 3 水素液化システムと当社の開発課題

#### (1) 水素液化システム

水素液化システムの実証設備の模式図を図1に示す。本設備は水素液化機、他、液化水素タンク・予冷用液化窒素タンク・水素圧縮機などの機器からなる。

水素液化システムの概略処理フローを図2に示す。水素圧縮機にて昇圧された原料の水素ガスは、予冷用の液化窒素で $-200^{\circ}\text{C}$ 付近まで冷却された後、冷凍サイクルからの冷熱でさらに数 $10^{\circ}\text{C}$ 冷却され、膨張弁における断熱膨張を通じて液化される。冷凍サイクルには水素クロードサイクル（膨張タービンと膨張弁を組み合わせた冷凍サイクル）を採用しており、いわば水素で水素を冷却するシステムとなっている。

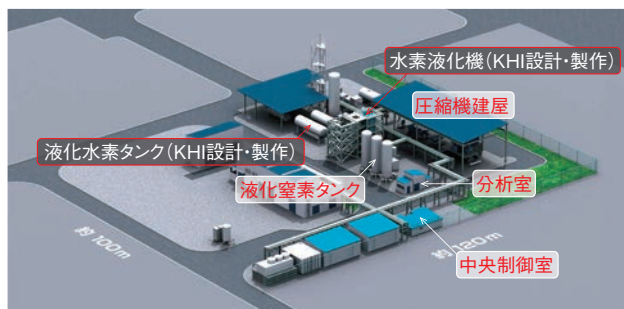


図1 水素液化システムの模式図（播磨工場実証設備）  
Fig. 1 Schematic diagram of hydrogen liquefaction system (demonstration facility in Harima Works)

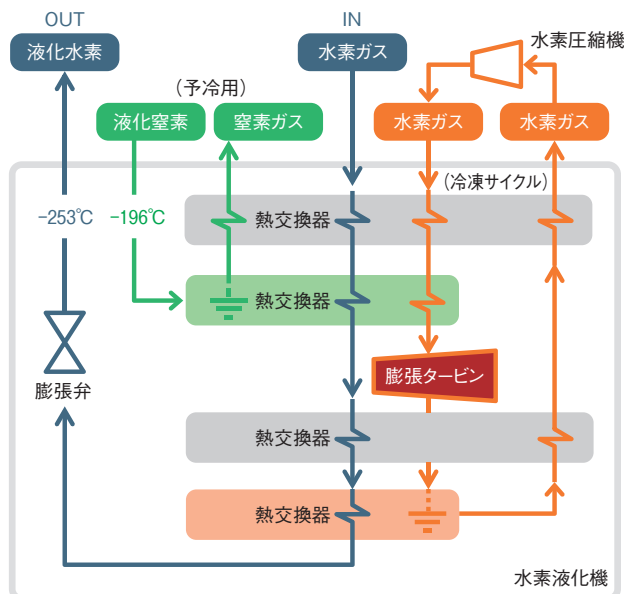


図2 液化システムの概略処理フロー  
Fig. 2 Schematic process flow diagram of hydrogen liquefaction system

#### (2) 開発課題

水素液化機は当社としても初めての開発であり、また設備規模も大きいことから、開発課題も多岐にわたった。以下に主な項目を示す。

- ① プロセス設計
- ② 水素液化機の構造・断熱・気密
- ③ 膨張タービン
- ④ 起動停止や負荷変更などの運転制御
- ⑤ ガスの純度管理
- ⑥ 設備上および運転上の安全確保

新型液化機では、商用化に向けてさらなる高効率化および信頼性の実証なども課題となる。

また、当社は機器メーカーであり、設備の運用や保全などの液化プラントのオペレーションに関する知見や体制が十分ではなかったため、実証運転に向けてこれらを確立していくことも大きな課題であった。

### 4 プロトタイプ液化機

#### (1) 設計・製造

プロトタイプ液化機とその周辺の様子を代表図に示す。当社は大型構造物やLNGタンクなど極低温関連機器を製造してきており、今回開発した水素液化機および液化水素タンクも新しいインフラを整えることなく製造することができた。

本システムは技術開発を目的としながらも、商用規模の液化技術の獲得とその実証のため、液化能力は日量約5トンと商用機並みの規模とした。

##### (i) プロセス設計

プロセスは自社設計とし、圧縮機の構成・膨張タービンの段数および負荷配分・各系統の圧力などを最適化した。また、不純物を吸着する吸着塔の圧損特性などの要素試験を行った上で、設計に反映した。

##### (ii) 構造・断熱・気密

水素液化機の構造は、過去に開発したヘリウム液化機を参考にしつつ、法規上の耐震設計基準も考慮して設計した。水素液化機の外表面からの入熱を抑えるため、内部機器の支持構造にも断熱を考慮した。

水素液化機は真空断熱とするため内部を高真空に保つ必要があり、溶接部やフランジのシール部などには非常に高い気密性が要求される。これについては、高い製造精度を実現し気密性を非常に高く保つことでヘリウムリーク試験をクリアしている。また、内部機器表面に施される断熱材においても、これまで蓄積した設計・施工ノウハウを生かした。

##### (iii) 膨張タービン

図3に示す膨張タービンは液化に必要な冷熱を生成するキーハードである。プロセスに合わせて最適設計すると、

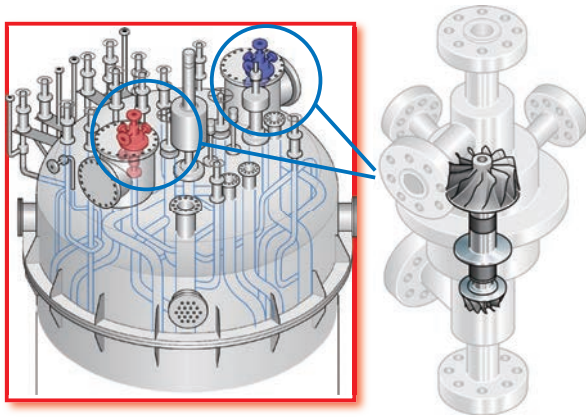


図3 水素液化機上部と膨張タービン  
Fig. 3 Hydrogen liquefier (upper part) and expansion turbine

水素液化機のサイズ（直径約4m、高さ約12m）に比べて大幅に小さく、かつ十数万回転／分以上と高速回転が必要となる。そこで、回転軸を支える軸受には、一般的な油軸受や玉軸受でなく、水素ガスを用いるガス軸受を新たに開発した。これにより、軸受の摩擦損失を大きく低減できるほか、油による系内の汚染が回避できるメリットがある。このほか、空力や軸系などの設計においても、ガスタービンやジェットエンジンなど当社的高速回転機械の技術を適用している。

(iv) 運転制御

水素液化システムの挙動は非常に複雑であるため、シミュレーションなどを用いつつ制御ロジックを設計した。実際の運転の中で徐々にすり合わせていく部分もあり、実証運転で得られたデータを基に少しずつ改良していった。

(v) 純度管理

-253℃である水素の液化温度ともなると、ヘリウムと水素を除くあらゆる物質が凍結して固体となるため、水素ガス中の不純物は系内閉塞の原因となる。したがって、水素ガスの純度管理は極めて重要であり、不純物がppmオーダーであることを分析計で監視している。これにより製品の液化水素は99.999%以上と高い純度となり、前述のように気化するだけで燃料電池に投入することが可能となる。

(vi) 安全

設備設計上の安全については、プラント設備の信頼性・安全性を解析するためのシステム工学的手法であるHAZOPやFMEAを自社で実施するとともに、複数の第三者機関とレビューを実施した。また、設備の実証運転においては、社内に運転や保全のための組織と体制を新設して、官庁の所管部署とも密な連絡をとりながら、安全上の問題が無いようにオペレーションを進めた。

(2) 実証運転

プラントの立上げに時間を要したが、2014年9月に初の

液化を達成した。その後、プロトタイプ液化機としてプロセス設計の妥当性チェックや、膨張タービン・制御性・吸着塔などの性能確認を行った。また、運転中に内部配管の振動や応力の計測を行い、それらの健全性も確認した。

その後も、膨張タービンの性能や信頼性向上およびプラントの制御性向上に向けた設備およびロジック改良などを継続して、自動で膨張タービンの起動・停止および液化運転の自動制御（一定負荷および負荷変更）などが可能となった。また、複数回実施したインターロック停止試験においても設備に異常なく停止できており、安全性についても十分確認できた。これらのプロトタイプ液化機の実証運転は2016年度末で完了した。

5 新型液化機

(1) 設計・製造

新型液化機では、液化効率の改善を目的にプロセスの改良を行ったほか、プロトタイプ液化機のデータを反映して設計精度を向上させた。さらに効率を向上させるため、液化水素タンクのボイルオフガスを冷熱ごと回収するエジェクタを追加した。膨張タービンは実績を重視してプロトタイプ液化機とほぼ同じ構造とした。小型化するため、水素液化機内部の機器配置を見直し、図4に示すようにプロトタイプ液化機に比べて胴体径・全高とも0.5m減となった。この結果、水素液化機重量も同30%減となり、コストダウンに貢献している。

プロトタイプ液化機の実証運転終了後から新型液化機の設計および製造を進め、2019年3月に図5のようにプロトタイプ液化機と入れ替えた。その後、新型液化機に合わせて周辺設備を改造し、プラント試運転を同年8月に開始している。

(2) 新型液化機の実証運転

新型液化機の本格的な実証運転は2019年10月に開始し

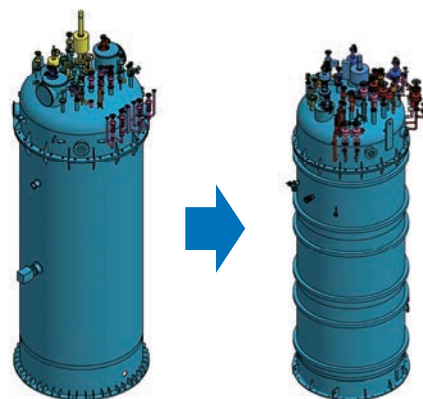


図4 プロトタイプ液化機（左）と新型液化機（右）  
Fig. 4 Prototype liquefier (left) and new liquefier (right)



図5 新型液化機の据え付け  
Fig. 5 Installation of new liquefier

た。プロトタイプ液化機の実績と経験があるため、初運転でも特にトラブルなく液化を達成した。その後の性能試験で、液化効率がプロトタイプ液化機よりも約20%改善していることを確認した。また新型液化機で追加したエジェクタも所定の性能が確認できた。

新型液化機は商用機のベースとなるため、長時間運転においても安定した性能や制御性および設備の耐久性などを実証する必要がある。そこで、2019年12月から2020年4月にかけて3,000時間の連続運転を実施した。ここでは負荷一定の運転の他に、負荷変更時の制御性の確認や原料ガス中に含まれる不純物の吸着塔性能試験などを実施し、いずれも問題ないことを確認した。

### あとがき

当社は新型液化機で実証した技術をベースに、液化量が日量5～25トンまでの水素液化システムを製品としてラインアップする予定である。さらに、来る水素社会を見据えると、液化水素のさらなるコストダウンが必要になること

から、液化効率を大幅に向上させる新しいプロセスおよびシステムのさらなる大型化が必要になると考え、それに向けた検討も始めている。

なお、プロトタイプ液化機の時代を通じ、実証運転を行った約6年間、無事故無災害を継続できたことも、関係者の高い安全意識と安全を十分考慮したシステム設計の賜物と考えている。

これまで述べた水素液化システムの開発は自社事業として実施してきたが、水素液化機の周辺設備の整備において一部経済産業省の補助を受けた。ここに厚くお礼申し上げる。

### 参考文献

- 1) 水素・燃料電池戦略ロードマップ，経済産業省（2019）
- 2) 吉川，中川，黒崎 ほか：“全自動ヘリウム液化装置の開発”，川崎重工技報，No.101，pp.1-8（1988）
- 3) 神谷，砂野，仮屋 ほか：“水素液化・液化水素輸送貯蔵－来るべき水素社会に向けて－”，川崎重工技報，No.176，pp.34-39（2015）



砂野 耕三



小宮 俊博



松田 吉洋



仮屋 大祐



神谷 祥二