

ISSN 0387-7906

# 川崎重工技報

水素サプライチェーン特集号



TECHNICAL REVIEW

**No.182**

September 2020



水素社会の未来を切り拓く。川崎重工





■ 巻頭インタビュー	社会課題の解決に向けた技術開発の取組み	1
■ 総括説明	脱炭素社会構築に不可欠な水素エネルギー導入に向けた開発と実証	2

技術解説

■ 国際液化水素サプライチェーン構築への取組み	Activities for Realization of International Liquefied Hydrogen Energy Supply Chain	6
■ 水素をつくる –水素製造技術の開発–	Hydrogen Production – Development of Hydrogen Production Technologies	12
■ 水素をつくる –水素液化システムの開発–	Hydrogen Production – Development of Hydrogen Liquefaction Systems	16
■ 水素をためる –液化水素基地の開発–	Hydrogen Storage – Development of Liquefied Hydrogen Terminal	20
■ 水素をはこぶ –液化水素運搬船の開発–	Hydrogen Transportation – Development of Liquefied Hydrogen Carrier	24
■ 水素をつかう –水素発電技術の開発–	Hydrogen Utilization – Development of Hydrogen Fueled Power Generation Technologies	28
■ 水素社会の実現に向けた製品安全性評価の取組み	Product Safety Assessment Initiatives for Achieving a Hydrogen-based Society	32

特許紹介

■ 液化ガス保持タンクおよび液化ガス運搬船	–安全運航を可能とする貨物タンクシステム–	36
■ 液化システム	–水素の大量輸送を支える–	36

## 【中谷技術開発本部長に聞く】 社会課題の解決に向けた 技術開発の取組み

### 技術開発の方針について教えてください

当社グループは目指す将来像を“つぎの社会へ、信頼のこたえを”という「グループビジョン2030」として制定し、刻々と変わる社会に、革新的なソリューションをタイムリーに提供し続けていこうとしています。このビジョンの下、さまざまな社会課題の解決をテーマに、市場開発やサービスビジネスなど付加価値の高い領域への事業伸展のための技術開発に積極的に取り組んでいます。

### 技術開発本部の役割について教えてください

技術開発本部は、本社の研究開発部門として事業部門と一体となり製品やサービスの開発を進めています。技術開発本部のスペシャリストが事業部門の技術者と構想段階から協業して、複数の要因が関係し合う課題の全体最適化を図ります。このマトリクス運営により、過去のプロジェクトの知見を別のプロジェクトに生かすことができ、ガスタービン技術を融合したモータサイクルなど事業の垣根を越えた総合重工業メーカーとしてのシナジー効果を発揮しています。

さらに、事業部門の少し先の未来を構想し社会の課題を解決する製品やサービスを提案して、「これから」を担う技術を生み出すことにも取り組んでいます。

### 将来に向けた注目分野はどこでしょうか

少子高齢化や労働人口の減少といった社会課題に向けたビジネスチャンスとして、ロボットビジネスにおける新分野の市場開発に着目しています。高齢化社会では、高度な医療を多くの患者に提供するため医療用ロボットを他社と協業して開発し社会的な要請に応じていきます。また、人との協働作業を可能としたロボットである「duAro」や人間の技能を学習し再現する「Successor」など、幅広い分野でのロボットの利活用を可能とする技術開発を行うことで労働人口の減少に対応しています。



中谷 浩 取締役常務執行役員  
技術開発本部長

また、サービスビジネスに向けた取組みとして、運用やメンテナンスなどを効率化して付加価値を高めるサービスを提供しようとしています。事業化開発を進めている鉄道軌道の遠隔監視サービスやガスタービン・ガスエンジンの遠隔監視システムはこういった取組みの例であり、ハードウェアの知見とデジタル技術を組み合わせることで人手不足や環境問題などの課題解決につなげていきます。

さらに、将来の地球温暖化や資源枯渇という二つの社会課題を解決するための水素社会の実現に向けた取組みも新たなビジネスチャンスと捉え強力で推し進めています。

### 水素社会の実現に向けた取組みについて教えてください

水素を液化して大量輸送を可能とする当社保有の極低温技術を活用し、10年ほど前から他社に先駆けて水素社会の実現に向けた取組みを始めました。具体的には、水素サプライチェーンの「つくる」、「はこぶ」、「ためる」、「つかう」にわたる各分野の技術や製品の開発を進めてきました。水素社会の実現にはそれらに加え、水素をだれもが広く使うことができる環境も必要です。これには、水素を扱うための規格やルールを整備することが重要であり、当社はトップランナーとしてこの策定に関与しています。ルールが整備されることで、世界的に水素が使いやすくなるとともに、当社が手掛ける製品・サービスが世の中に広まるきっかけや市場が生まれると考えています。

### 最後に

社会課題の解決を目指した各種の技術開発の取組みは、当社の持続可能な経営に貢献する事業へと成長していくと考えており、今後も全力で取り組んでいきます。

# 脱炭素社会構築に不可欠な 水素エネルギー導入に向けた開発と実証

原田 英一

執行役員 技術開発本部 副本部長



## まえがき

当社は、水素を「つくる」「はこぶ」「ためる」「つかう」ためのサプライチェーンの上流から下流に至るまでのコア技術を一社で保有する世界唯一の企業である。また、そのコア技術の歴史はLNGに端を発しており、半世紀におよぶ多くの実績を持つ。

この総合重工ならではの技術が、地球環境と人類の未来のために大きく役立つ機運とニーズが急速に高まっている。水素は使用時にCO<sub>2</sub>を一切出さないクリーンエネルギーであり、CO<sub>2</sub>の排出を今世紀中に実質ゼロとするパリ協定の目標を達成する上で不可欠となることが認識された。これを受け、多くの国が水素の利用・供給を政策に組み込み始めた。

当社は2010年度より水素サプライチェーンの構築に向けた研究開発に取り組み、2020年度にはいよいよ世界初となる実証が運用フェーズに入る。さらには、2030年代初頭の商用化実現に向けた技術開発および事業体の形成に取り組んでいる。

## 1 環境変化と社会変化

2005年に「低炭素社会」の実現を目指して京都議定書が発効された。2015年にはパリ協定が採択され、それ以降「脱炭素社会」達成への目標を世界187の国と地域が提出した。しかしながら、このような社会環境の変革よりも速く地球環境の変化が進んでおり、今やCO<sub>2</sub>削減は環境問題から待ったなしの社会問題に発展している。

パリ協定に署名した国々はCO<sub>2</sub>の削減目標を掲げており、ノルウェー・スウェーデン・フランス・英国ほかは2050年までに実質排出量ゼロを法制化した。日本は2050年までに80%削減し、その後すみやかにゼロを目指すとしている。この目標達成は省エネのみでは不可能なことは自明であり、再生可能エネルギーの導入促進が必須となる。

しかし、日本は再生可能エネルギー導入密度ではすでに世界トップとなっており、一層の導入には立地やコスト低減の課題がある。図1は再生可能エネルギーの発電量を国土面積から森林面積を差し引いた可住面積で除した再生可

能エネルギー密度を示しており、日本は再生可能エネルギーの導入が進んでいると言われてきたドイツよりも高く、世界一のレベルにある。また、図2に示すエネルギー消費密度も日本は世界のトップクラスであり、限られた国土に再生可能エネルギーを大きく導入・拡大してこれだけのエネルギーを賄うには制約が大きい。

このような背景から、将来のエネルギーの選択基準と言われる、エネルギー安全保障・経済性・環境性および安全性(3E+S)を満たしつつ、脱炭素社会を実現するための、安価で大量に導入可能な新しいゼロエミッションエネルギー

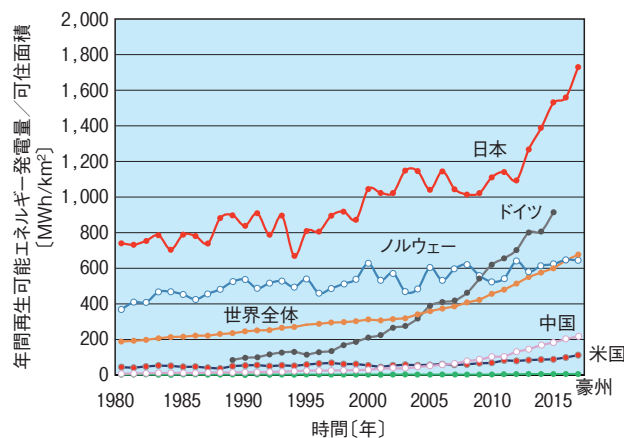


図1 再生可能エネルギー密度\*

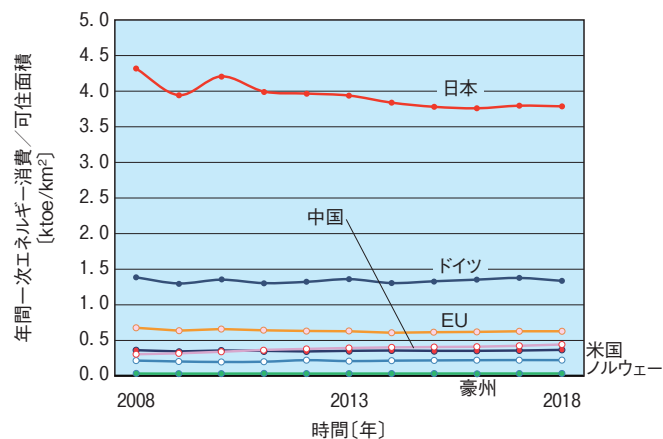


図2 エネルギー消費密度\*

ーが求められてきた。そこで注目されたのが、海外の安価な未利用資源や再生可能エネルギーを水素に変換して日本に輸入し、利活用するコンセプトである。

## 2 日本の水素戦略

水素・燃料電池戦略協議会が、経済産業省の声掛けにより産官学の専門家を集めて2013年12月に設置された。協議会の成果は、「水素・燃料電池戦略ロードマップ」として2014年6月に公開された。その後、ロードマップは2016年および2019年に改訂され、後者では水素・燃料電池を社会実装するための水素のコストおよび主要機器・システムの性能目標が明記されるとともに、目標達成のためのアクションプランが示された。

日本のエネルギー政策の根幹を成す「エネルギー基本計画」においては、2014年4月の第四次から水素が取り上げられている。このように水素は国の政策に組み込まれ、2017年12月には「水素基本戦略」が省庁連携で策定・公開された。その中で、2030年代初頭の水素発電と水素サプライチェーンの商用化を目指し、将来の水素発電容量が30GWに達するとのビジョンが示された。

このように、日本は世界に先駆けて水素政策を推進しており、2018年および2019年の9月の2回にわたって各国の関係閣僚を東京に集めて、水素閣僚会議が開催された。

## 3 世界の水素利用への動き

水素エネルギー利用を目指す動きは日本が世界をリードしてきたが、近年は洋の東西を問わず一斉に水素利用を目指し始めた。そのきっかけが、Hydrogen Council（水素協議会）である。このHydrogen Councilは、脱炭素社会に向けた水素利用を促進するために、エネルギー・資源、プラント、産業ガス、輸送機器など、各国の大手民間企業13社が集まり、2017年1月に設立されたものである。当社は設立当初からのメンバーとして参加しており、2020年7月末では、燃料電池、商社、銀行などの企業も加わり92社に規模を拡大している。

Hydrogen Councilが2017年11月に発行したレポート「Hydrogen Scaling Up」では、水素がCO<sub>2</sub>削減の面で担う7つの役割を以下の通り定義している

- ① 再生可能エネルギーの大規模導入と水素発電を可能にする
- ② セクター間・地域間のエネルギー融通/輸送
- ③ バッファとしてエネルギーシステムの柔軟性を高める
- ④ 輸送の低炭素化
- ⑤ 産業用エネルギーの低炭素化
- ⑥ 建物の熱・電力の低炭素化
- ⑦ 低炭素な産業用原料の供給

ここで重要なことは、水素は二次電池と比較して貯蔵規模・期間や輸送距離およびセクター間の融通性において優位であること、供給・利用などビジネスに関与できるプレーヤーが圧倒的に多いことである。このように、水素固有の特性はエネルギー移行を進める強力な推進力となり、エネルギーシステムと最終利用の双方においてメリットをもたらす。レポートでは、2050年における水素の経済効果は2.5兆ドル、3千万人（現在の自動車産業規模）の雇用を生むとしている。また各国に対して、日本の「水素・燃料電池戦略ロードマップ」に倣い、国状に合わせたロードマップの策定を推奨している。その結果、米国、EU、豪州、ニュージーランド、フランス、ドイツ、オランダ、ノルウェー、サウジアラビア、UAE、中国、韓国などがロードマップを公開あるいは策定中である。

このような世界各国の動きにより、水素社会は従来の予想よりも早く実現されるとの予測が出ている。

## 4 水素サプライチェーンの構築

水素エネルギー導入の最大の課題は、コストと安全性と言われている。コスト低減には安価な原料から大量調達することが有効かつ必要なことから、豪州に大量にある未利用資源の褐炭に着目した。海外取引のないこの安価な資源は、現地での発電のみに使われており、コストは石炭よりも一桁低い。

この褐炭からガス化技術で大量・安価・安定に水素を製造し、副生するCO<sub>2</sub>は分離・回収して現地で地中に貯留する（CCS: CO<sub>2</sub> Capture Storage）。これにより、大規模水素供給インフラの導入が可能となる。将来は、安価な海外の再生可能エネルギー由来水素に切り替えていくことで、持続可能なエネルギー社会への転換も可能である。

海外から日本へは、液化水素として長距離大量輸送を行う。液化水素は産業用およびロケット燃料として半世紀以上にわたって利活用されてきた実績があり、毒性・臭気・温暖化効果の無い持続可能社会の要件に則したエネルギーキャリアである。この点で液化水素は、同じく水素キャリアとして検討されている劇物のアンモニアや水素を取り出す際にエネルギーを消費する有機ハイドライドに比べて持続可能性に優れると考えている。

水素導入のもう一つの課題である安全確保については、これまでH<sub>2</sub>ロケット・産業利用・燃料電池自動車・水素ステーション・家庭用燃料電池などで長年かつ多数の安全運用実績があるように、水素の特性を理解して適切に運用すれば既存の燃料と同様に安全に使うことができる。さらに万全を期すべく、実証事業を通して大量利用に向けた実績を構築して、水素が身近に安全に使えるものであることを実証していく。

商用化への入り口として、図3に示す実証のための一気



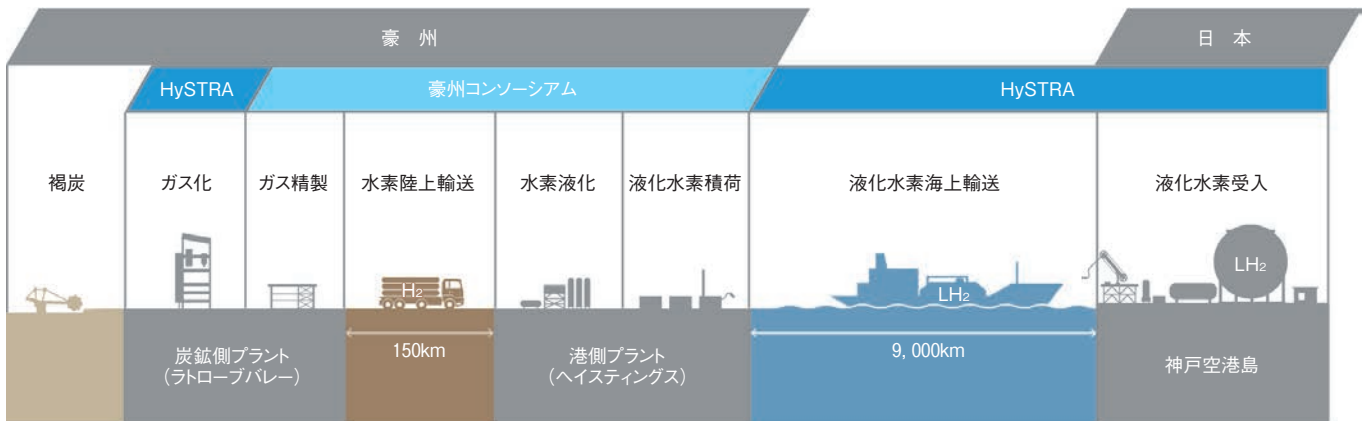


図3 日豪パイロットチェーンの実証構成

通貫の日豪パイロットチェーンの構築に取り組んでいる。当社は、2016年に岩谷産業(株)、シェルジャパン(株)、電源開発(株)と、技術研究組合CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン推進機構HySTRAを結成し（その後、丸紅(株)、ENEOS(株)および川崎汽船(株)が加入）、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の支援（助成事業「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」）の下、経済的かつ安定的に大量の水素を調達するための水素サプライチェーンの構築に向けた技術開発を進めてきた。現在、液化水素運搬船のほか、液化水素の受入基地を神戸市に、褐炭ガス化設備を豪州に建設している。

また2018年から、当社、岩谷産業(株)、電源開発(株)、丸紅(株)、AGL Loy Yang Pty Ltdでコンソーシアムを組み、豪州連邦政府およびヴィクトリア州政府より補助を受けてガス精製設備および水素液化・積荷基地を建設している。

これまで液化水素運搬船の建造および各サイトの建設は順調に進んでいる。液化水素運搬船については2019年12月

に命名・進水式を執り行い（図4）、4,000名の来賓の下「すいそふろんていあ」と名づけられた。

日豪両政府は協力して褐炭由来水素のサプライチェーン構築を支援しており、年末年始に例年開催される日豪両首脳会談では公式文書に本件に対する協力が表明されている。豪州連邦政府およびヴィクトリア州政府からの当コンソーシアムへの大きな支援もこの一環である。2018年4月には当プロジェクトの補助事業決定式典が褐炭炭田のあるラトロープバレーで開催され、豪州でも建設工事が進められている。これらの日豪パイロット実証は、2020年度から運用フェーズに入っている。

これに先んじて2018年度に当社は、NEDO助成事業「水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」として、大林組とりまとめの下、神戸市、関西電力(株)、岩谷産業(株)ほかと協力して、水素利用の要となるガスタービンコージェネレーションの市街地における技術実証に成功している。図5に示す当社製1MW級ガスタービンを神戸市ポー



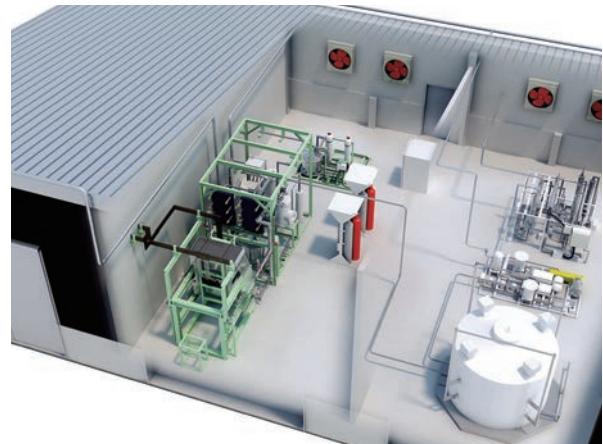
図4 液化水素運搬船「すいそふろんていあ」進水式



図5 水素ガスタービンコージェネレーション実証設備（神戸市）



(a) 外観



(b) 機器レイアウト

図6 風力由来水素製造実証設備（2018年 北海道 苫前町）

トアイランドに設置し、近隣の公共設備に熱と電気を供給した。市街地での純水素を燃料としたガスタービンの利用では世界初の実績である。

将来、再生可能エネルギー比率が高まるにつれ、変動電源であるための不安定性や供給と需要のミスマッチが顕在化する。このミスマッチを解消する方法として、再生可能エネルギー余剰時の電力を水の電解槽に供給して水素を製造・貯蔵し、エネルギーとして有効利用する発案がPower to Gasである。

豊田通商㈱とりまとめの下、当社は、NEDOの委託事業「北海道に於ける再生可能エネルギー由来不安定電力の水素変換等による安定化・貯蔵・利用技術の研究開発」によりPower to Gasの実証として、2018年に北海道 苫前町の風力発電設備に電解槽を接続し、水素製造に成功した。図6にその設備を示す。このような、再生可能エネルギー由来の水素は、持続可能なエネルギー社会の構築に不可欠な存在であり、エネルギー自給率の観点からも一定量必要であ

る。また、将来、海外の安価な再生可能エネルギーから水素を製造する際にも重要な技術であり、大きな市場が期待できる。

#### あ と が き

当社は、持続可能な開発目標（SDGs）の取組みとして、水素社会の実現に向けた「つくる」「はこぶ」「ためる」「つかう」のすべてのフェーズで開発プロジェクトを進めている。褐炭由来の経済的な水素でインフラを導入し、これに将来はコストが下がり生産量も増える再生可能エネルギー由来の水素を導入して切り替えていくことで、持続可能なエネルギー社会への転換が可能となる。

商用化に向けて、安全かつ着実に実証を進めることで当社グループの技術シナジーを生かした、「カワ重、サキへ。」を体現すべき水素関連製品の開発と事業化を推進して「水素のトップメーカー」を目指していく。



# 国際液化水素サプライチェーン構築への取組み

## Activities for Realization of International Liquefied Hydrogen Energy Supply Chain



西村元彦①※	Motohiko Nishimura
新道憲二郎②	Kenjiro Shindo
吉村健二③	Kenji Yoshimura
吉野泰④	Yasushi Yoshino

脱炭素社会に向けて、水素エネルギーの社会実装が主要先進国で進められている。日本はそのトップランナーとしてCO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーンの商用化を目指しており、2020年にそのパイロット実証の運用を開始する。

具体的には、豪州での褐炭からの水素製造・現地の陸上輸送・液化水素運搬船への積荷・世界初となる液化水素の長距離海上大量輸送および神戸での荷役技術の実証に向けたプロジェクトが進行している。この成果は、将来の世界各地と日本を結ぶ水素供給の礎となる。

Major advanced countries have been implementing hydrogen energy to achieve a decarbonized society. Japan, as the top runner, aims to commercialize a CO<sub>2</sub>-free hydrogen energy supply chain, and starts operation of pilot demonstration project in 2020.

In the pilot project, the following technical demonstrations are making progress: hydrogen production from brown coal in Australia, hydrogen land transportation from the production site, loading onto liquefied hydrogen carrier, the world's first long-distance marine transportation of large-volume liquefied hydrogen and liquefied hydrogen loading/unloading technology at the Port Terminal in Kobe. Outcomes of the present project will be a basis for future hydrogen supply that can link every corner of the world to Japan.

### まえがき

近年、日本をはじめ世界各国で異常気象による災害が頻発しており、CO<sub>2</sub>排出削減は人類共通の待った無しの課題となっている。世界では、パリ協定発効を期に今世紀中にCO<sub>2</sub>排出を実質ゼロにすることを目指す中で、その実現に向けた具体的な計画策定と実行が急務となっている。具体策に欠かせない技術として、再生可能エネルギーが脚光を浴び続けてきたが、導入量が増すにつれて電力の安定供給が困難となることが明らかとなってきた。水素はこの欠点を補い、エネルギーセキュリティーと環境問題に貢献しつつ化石燃料とほぼ同じ利便性を同時に達成できるクリーンエネルギーとして注目されている。

### 1 背景

#### (1) 日本の水素戦略

パリ協定が提案されたCOP21よりも早く、日本では資源エネルギー庁より産学官の知見を集約した「水素・燃料電池戦略ロードマップ<sup>1)</sup>」が2014年に策定・公開された。さらには省庁連携の下、より具体化した「水素基本戦略<sup>2)</sup>」

が2017年12月に再生可能エネルギー・水素等関係閣僚会議で承認された。2018年7月に公開された第五次エネルギー基本計画においても、水素エネルギーの活用について具体的に記載されている<sup>3)</sup>。

CO<sub>2</sub>排出量の削減目標としては、2030年度の排出を2013年度の水準から26%削減するとし、さらに長期目標として2050年に80%削減し、その後できるだけ早期に100%削減することが閣議決定されている。このような野心的な目標を達成するためには、低炭素エネルギーへの移行を進める必要があり、特に水素がエネルギー移行に重要な役割を担うと考えられている。

日本の水素基本戦略では、水素を再生可能エネルギーと並ぶ将来の重要なエネルギーの選択肢と位置付けており、輸送・発電・産業およびビルや家庭などすべてのセクターでの水素利用推進を掲げている。また、水素発電とこれを支える液化水素サプライチェーンの商用化を2030年代初頭に開始するとしており、当社はこれを念頭に技術開発および実証を進めている。

このように、水素エネルギー利用を目指す動きは日本が世界をリードしてきたが、近年では洋の東西を問わず一斉に水素利用を目指し始めている。

## (2) 世界の追随

水素エネルギー利用の機運は、世界中で高まりを見せている。エネルギー・資源、プラント、産業ガス、輸送機器などのグローバル企業13社が集まり、水素社会の早期実現に向け活動するHydrogen Council（水素協議会）<sup>4)</sup>は2017年1月の発足後、3年間で参画企業数が約6倍拡大して2020年7月末時点で92社に増加している。さらに、G20の7割の国が政策に水素利用を組み込んでおり、水素の利用および市場拡大の蓋然性は急速に高まっている。



図2 豪州ラトローブバレーロイヤン炭田  
Fig. 2 Loy Yang Coalfield in Latrobe Valley, Australia

## 2 CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーンのコンセプト

当社は、2010年の中期経営計画で「CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン（CO<sub>2</sub>フリー水素チェーン）構想」を公表し、以来その実現に向けた技術と製品の開発にとどまらず、商用化を目指した技術実証と協業コンソーシアムの構築に取り組んできた。

CO<sub>2</sub>フリー水素チェーンの構想は図1に示すように、豪州ビクトリア州ラトローブバレーの褐炭をガス化・精製して製造した水素を液化し、液化水素運搬船で日本に海上輸送するものである。褐炭は、水分が多いため輸送効率が低く、乾燥すると自然発火し易いため、採掘地の近傍で発電に利用されるに留まっている。世界に賦存する石炭の半分は褐炭であるが、特にビクトリア州には莫大の量が存在し、ラトローブバレー地区だけで日本の総発電量で240年分に相当する褐炭が賦存する。図2に示す南半球最大と言われているロイヤン炭田では、露天掘りの周長が14kmにも達しており圧倒的なスケールである。

褐炭に限らず化石燃料をガス化・精製すると水素が得られるが、精製過程でCO<sub>2</sub>を副生する。このCO<sub>2</sub>を現地で回

収して地中に貯蔵するCCS（Carbon Dioxide Capture Storage）処理を行うことで、CO<sub>2</sub>の大気排出を伴わない水素（CO<sub>2</sub>フリー水素）が得られる。豪州連邦政府およびビクトリア州政府は共同してCCSプロジェクト「CarbonNet」を推進しており、ビクトリア州は褐炭とCCSを同時に利用できる適地となっている<sup>5)</sup>。ラトローブバレーで製造した水素は、ガスパイプラインで圧送され、港近くに設置された水素液化機で液化水素に変換される。そして一旦貯蔵タンクで保管された後、液化水素運搬船に積み込んで日本に運搬される。この規模は1960年代に商業化したLNGのチェーンに匹敵する。

この構想の基本的な事業性を評価するために、表1に示す主要目および図3のコア設備による商用化を想定して、概念設計を行い、設備費や運営経費を見積もって経済性評価を実施した。商用での水素供給規模は、燃料電池自動車300万台あるいは水素ガスタービンコンバインドサイクル発電所100万kW 1基が消費する量に相当する。図4に示すように、日本到着のCIF（Cost Insurance and Freight：運賃・



図1 CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン構想  
Fig. 1 Concept of CO<sub>2</sub>-free Hydrogen Energy Supply Chains



表1 CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーンの主要目  
Table 1 Specifications of the CO<sub>2</sub>-free Hydrogen Energy Supply Chain

褐炭消費量 [Mton/年]	4.74	
水素製造量	石油換算 [Mtoe/年]	0.764
	体積 [GNm <sup>3</sup> /年]	2.51
	重量 [ton/年]	225,500
CO <sub>2</sub> 貯留量 [Mton/年]	4.39	
液化水素運搬船	160,000m <sup>3</sup> ×2隻	

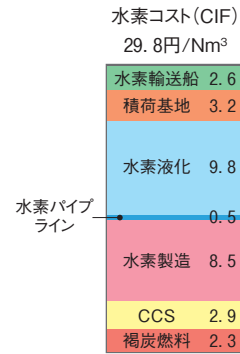
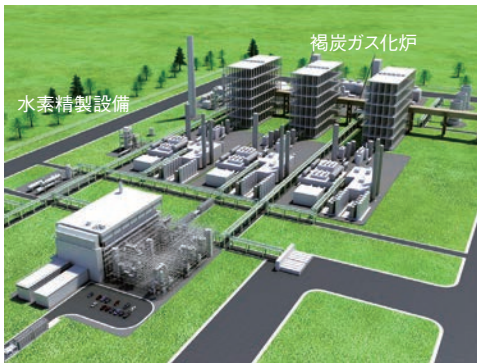
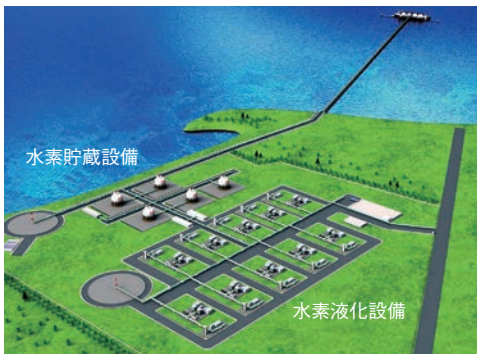


図4 CO<sub>2</sub>フリー水素のコスト構造  
Fig. 4 Cost structure of CO<sub>2</sub>-free hydrogen



(a) 水素製造サイト



(b) 水素液化・積荷サイト



(c) 液化水素運搬船 (容量16万m<sup>3</sup>)

図3 CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーンのコア設備  
Fig. 3 Core facilities of CO<sub>2</sub>-free Hydrogen Energy Supply Chains

保険料込み渡し) は約30円/ Nm<sup>3</sup> (334円/kg) との試算を得ており、褐炭原料とCCS処理費はCIFの約17%である。

CO<sub>2</sub>フリー水素チェーン構想の特長を以下に示す。

- ・大量・安定確保が可能：未利用資源から水素製造
- ・環境性良好：水素製造時のCO<sub>2</sub>は現地で回収・貯留

- ・産業競争力が向上：水素を扱う技術・産業力が必要
  - ・国富流出を抑制：高価な資源の単なる購買ではない
- このように、CO<sub>2</sub>フリー水素は将来のエネルギーに求められる条件であるエネルギー安全保障・経済性・環境性および安全性(3E+S)に適合している。

この経済性評価はNEDO国際プロジェクトとして実施したもので、日豪両政府からその成果を認められている。

### 3 当社のコア技術・製品の開発

CO<sub>2</sub>フリー水素チェーンを実現するためには、サプライチェーンの上流から下流に至る水素を「つくる」「はこぶ」「ためる」「つかう」ためのコア技術・製品をシームレスに“利用できる状況”を整える必要がある。コア製品が一つでも欠ければサプライチェーンは分断され実用化は成立しない。また、海外の製品が間に入ると、規格や仕様などを適合させるための余分な労力やコストが発生する。

“利用できる状況”とは、技術・製品が存在するのみならず、運用や安全確保のためのルールおよび法規などが整備されている状態を指す。このように世界初のCO<sub>2</sub>フリー水素チェーンを実現するためには、技術開発とルール整備を両輪で進める必要がある。加えて、ビジネスを優位に進めるために知的財産の獲得も同時に行わなければならない。このため、関係各所と連携して技術開発および液化水素運搬船や液化水素用ローディングアームシステムなどに関わるルールや規格整備に取り組んでいる。

水素サプライチェーンを実現する上での当社の強みは、長年培ってきた極低温液化ガスの関連技術であり、LNG運搬船や種子島宇宙基地の液化水素貯蔵タンクおよび供給設備が該当する。水素キャリアとして液化水素・圧縮水素ガス・吸蔵合金・化学媒体があるが、商用レベルにある液化水素は大量輸送・貯蔵に適しているととも水素ガスとして利用できる状態にするためのエネルギーを必要としない。液化水素の密度は70.8kg/m<sup>3</sup>と443kg/m<sup>3</sup>のLNGより小さいが、大気圧水素ガスの約800倍で容積効率が高い。液

化水素の沸点は20.3Kと112KのLNGより約90K低く、容積当りの潜熱が小さいので高効率な液化技術と高度な断熱技術が必要となる。

液化水素の主な利点は次の通りである。

- ・ 輸送媒体として産業利用やロケット燃料に実用化済
- ・ 金属や有機溶剤などの輸送用媒体と吸着/結合させないので重量が増えず、輸送効率が高い
- ・ 需要地では常温でガス化可能（エネルギー不要）
- ・ 高純度なので精製が不要であり、ガス化させて燃料電池にそのまま供給可能
- ・ 供給地が海外の場合は現地の安いエネルギーで液化可能
- ・ 液化するためのエネルギーは消失せず冷熱（-253℃）に変換され、需要地で冷熱発電などの利用が可能
- ・ 毒性が無く、温暖化係数ゼロでクリーンかつ持続可能性が高い

極低温技術を進化させながら、水素の製造・液化・輸送・貯蔵および利用について技術・製品の開発に取り組んでいる。

#### 4 プロジェクトの進展

水素エネルギーを社会実装する上で、今日のLNGと同じように、水素の供給元から需要先まですべてのコア技術をシームレスに開発して繋げていくことが必須となる。このため、海外からの水素供給については「日豪パイロット実証」、水素利用として「水素ガスタービンコジェネレーション実証」に取り組んでいる。

##### (1) 日豪パイロット実証

水素エネルギーの社会実装に向けて、世界初となる褐炭由来水素による液化水素の長距離大量海上輸送を含むパイロット規模（運搬船容量で商用の約1/120）の水素サプライチェーンの技術実証（日豪パイロット実証）を2020年度より開始する。パイロット実証は、図5に示すようにラト

ローブバレーの褐炭ガス化水素製造設備から神戸空港島の液化水素荷役基地に至る一気通貫の水素サプライチェーンであり、技術・安全・運用および社会受容性に関わる課題摘出を行う。新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」で実施しているNEDOポーションと、豪州政府の補助金を得て実施している豪州ポーションがある。

NEDOポーションは、当社のリードにより2016年に設立した技術研究組合 CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン推進機構（HySTRA）を推進母体としている。加入企業は、川崎重工業(株)、岩谷産業(株)、電源開発(株)、シェルジャパン(株)、丸紅(株)、ENEOS(株)および川崎汽船(株)である。

豪州ポーションは、当社現地法人 Hydrogen Engineering Australia Pty Ltd（HEA）が豪州政府補助の窓口となっている。参画企業は、川崎重工業(株)、岩谷産業(株)、電源開発(株)とその現地法人 J-Power Latrobe Valley Pty Ltd（JPLV）、丸紅(株)、AGL Loy Yang Pty Ltdおよび住友商事(株)である。

日豪パイロット実証における当社の役割は、プロジェクトのコーディネートおよび各工程での技術・機器システムの開発・供与である。

##### (i) ガス化・ガス精製

褐炭ガス化水素製造設備を図6に示す。褐炭の湿分を除去して粉碎してガス化炉へ供給できるように前処理を行う設備、および精製されたガス水素を圧縮して搬送用トレーラーに供給・出荷する設備をJPLVに納入した。

##### (ii) 水素液化・液水積荷

ヘイスティングス港には、高圧ガス水素を液化するためのサイトを建設している。液化水素は当社製コンテナトレーラーに積載されて棧橋まで運び液化水素運搬船に荷揚げする。水素液化基地を図7に示す。

##### (iii) 液化水素運搬船

液化水素運搬船は、これまで世界に例がなく、LNG船



図5 日豪パイロット実証の全体構成  
Fig. 5 The whole structure of Japan-Australia pilot demonstration projects





図6 褐炭ガス化水素製造設備 (2020年2月)  
Fig. 6 Brown coal gasification and hydrogen refining facility (February 2020)



図7 ヘイスティングス港の水素液化基地  
Fig. 7 Hydrogen liquefaction terminal at the Port of Hastings

に適用される国際海事機関 (IMO) のIGCコード「液化ガスのばら積み輸送のための船舶の構造および設備に関する国際規格」をベースに設計した。

日本海事協会 (NK) から日豪パイロット実証向け液化水素運搬船 (パイロット実証船) に搭載する貨物格納設備の基本認証を2013年末に取得した。取得にあたり、IGCコードに加え液化水素物性を考慮した船型・材料・安全基準などの要件の提案およびHAZID解析を用いたリスク評価を行った。

本船の運航のため、2014年より日豪両海事当局で安全基準の協議を進め、2016年11月にIMOにおいて両国が共同提案した安全要件の暫定勧告が承認された<sup>6)</sup>。これは、液化水素海上大量輸送を実現する上で着実な一歩となった。

パイロット実証船は、LNG内航船と同じく蒸発ガスをタンク内に留めおく蓄圧式シリンダー型を採用し、真空断熱方式タンク (容量1,250m<sup>3</sup>) を1基搭載している。2016年度に基本設計を完了し、詳細設計および建造を進め、2019年12月に神戸工場で命名・進水式を迎えた。2020年3月にはタンクを船体に搭載し、2020年秋からの運航を目指して図8に示すように艤装工事を急ピッチで進めている。

(iv) 神戸荷役基地

液化水素運搬船と同じく、バラ積み船を対象とした液化水素の荷役基地の建設・運用も世界初の試みとなる。神戸空港島北東部に約100haの土地を神戸市から借り受けて揚げ荷基地を設置しており、図9にその建設状況を示す。

地上用液化水素貯蔵タンクは国内最大の容量2,500m<sup>3</sup>を持つ。世界初の液化水素用ローディングアームシステム (LAS) は、ステンレス製真空二重フレキシブルホースをトリスフレームに懸架する方式を採用しており、その先端には、緊急時に船が離岸した際に液化水素の漏洩を安全に遮断するための緊急離脱機構を備えている。



図8 艤装工事中の液化水素運搬船 (2020年5月)  
Fig. 8 Liquefied hydrogen carrier under outfitting (May 2020)



図9 神戸空港島の液化水素揚げ荷基地  
Fig. 9 Liquefied hydrogen unloading terminal on the Kobe Airport Island



図10 水素-天然ガス燃料混合比自在型の熱電併給設備  
Fig.10 Cogeneration facility with flexibility in the fuel mixing ratio of hydrogen to natural gas

荷役基地は2020年5月に完工し、試運転を経て2020年秋から本格運用に入る。

## (2) 水素ガスタービンコージェネレーション実証

水素と天然ガスを燃料とする1MW級ガスタービンを核とする熱電併給設備(水素コージェネレーションシステム)を用いて、地域レベルでの「電気」「熱」「水素」エネルギーの効率的な利用を目指す新たなエネルギーマネジメントシステム(EMS: Energy Management System)の技術開発・実証を、神戸市ポートアイランドにおいて実施した。NEDO助成事業「水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」として、大林組が幹事を担い統合型EMSおよび熱供給システムを設置・運用し、当社が水素コージェネレーションシステムを供給した。当事業には、神戸市・関西電力(株)・岩谷産業(株)・㈱関電エネルギーソリューション・大阪大学の協力を得ている。

当技術実証設備を図10に示す。実証設備は市街地に設置されており、近隣の公共設備である国際展示場・スポーツセンター・中央市民病院・下水処理場が供給先である。このように、市街地において水素100%の燃料を使用したガスタービンによる熱電供給は世界初の試みであり、2018年4月19日と20日の運転において実証に成功した。水素と天然ガスの混合比の切替えは運転を継続しながら5分以内に可能で、性能については発電端効率を含め天然ガス仕様の当社同一機種と同等である。

## 5 商用化に向けて

日豪パイロット実証は、商用化との比較では液化水素運搬船の容量を例にとると約1/120である。よって、パイロット実証後は、その成果を反映しつつ商用化に向けた各種技術・機器システムの大型化が必須となる。

当社は、2019年7月より、商用化を目指した液化水素サプライチェーン機器システムの大型化開発を、東京貿易エンジニアリング(株)・㈱荏原製作所・IHI回転機械エンジニ

アリング(株)ほかと協力して進めており、2022年度末までの技術開発完了を目指している。

## あとがき

水素エネルギーは、脱炭素のみならずエネルギー安全保障や経済・雇用にも貢献することから、多くの国々が実証に着手している。その動きをリードしてきた日本の政策に沿って、当社はいち早く開発・実証に取り組んで、着実に進めてきた。今後、予想よりも早まると言われている水素経済の実現に向けたビジネス展開に繋げていきたい。

当社の取り組みに協力頂いた関係各社およびプロジェクトへの助成・支援ならびにルール整備を進めてきた監督官庁・自治体に深く謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 水素・燃料電池戦略ロードマップ  
[http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso\\_nenryodenchi/report\\_001.html](http://www.meti.go.jp/committee/kenkyukai/energy/suiso_nenryodenchi/report_001.html), (2014.6.24)
- 2) 水素基本戦略  
<http://www.meti.go.jp/press/2017/12/20171226002/20171226002.html>, (2017.12.26)
- 3) 第五次エネルギー基本計画  
[http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic\\_plan/pdf/180703.pdf](http://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/180703.pdf), (2018.7)
- 4) Hydrogen Council  
<https://hydrogencouncil.com/en/>
- 5) Victoria州 CarbonNet Projectホームページ  
<https://earthresources.vic.gov.au/projects/carbonnet-project>
- 6) 国土交通省ホームページ  
[http://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji06\\_hh\\_000128.html](http://www.mlit.go.jp/report/press/kaiji06_hh_000128.html)



西村 元彦



新道憲二郎



吉村 健二



吉野 泰



# 水素をつくる – 水素製造技術の開発 –

## Hydrogen Production – Development of Hydrogen Production Technologies



足利貢①	Mitsugu Ashikaga
熊田憲彦②	Norihiko Kumada
村岡利紀③	Toshinori Muraoka
大畑祐吾④	Yuugo Ohhata
谷口達也⑤	Tatsuya Taniguchi
石川七彩⑥	Nanase Ishikawa

水素サプライチェーンを実現するためにはその入口となる水素を「つくる」技術の確立が不可欠である。水素製造の方法はいくつかあるが、大量に安価な水素を製造する方法として未利用資源である褐炭からの水素製造および再生可能エネルギーからの水素製造に着目して、それらの技術確立に向けた開発に取り組んでいる。

To realize a hydrogen energy supply chain, hydrogen production technologies, which are needed at the initial stage of the supply chain, should be established. There are several methods for producing hydrogen, but as a method for producing a large amount of inexpensive hydrogen, we have focused on hydrogen production from brown-coal, which is an unutilized resource, and renewable energy. We are now working on developing and establishing the technologies necessary for these hydrogen production methods.

### まえがき

水素サプライチェーンの入口となる「つくる」のフェーズでは、大量の水素をいかに安価に製造するかということが主要な命題となるが、製造過程においてCO<sub>2</sub>を排出しない“CO<sub>2</sub>フリー水素”の製造技術が重要となる。

### 1 背景

現状の産業界での水素製造は、石油・化学工場や製鉄工場などからの副生水素および天然ガス改質が主流である。また、規模は大きくないもののバイオマスガス改質なども行われている。

副生水素は、製造過程によっては不純物も混在しており、純度を上げるための追加設備が必要になる場合もある。何よりも製造量が主生産物に左右されることから、安定的に大量の水素を製造するという面では不向きである。また、天然ガス改質は、1次エネルギーである天然ガスの生産量やコストの影響を受けることから、エネルギー資源の多様化するなかでエネルギーセキュリティを考慮すると、他の原料・エネルギー資源からの水素製造が望ましい。

当社では水素製造の方法として、オーストラリアをはじめ世界中に広く大量に分布しながらもエネルギー資源として有効活用されていない褐炭に着目し、この褐炭から安価に大量の水素を製造する技術の確立を進めてきた。また、近年は風力や太陽光などの再生可能エネルギーの導入拡大

が進んでおり、将来的にはCO<sub>2</sub>フリーの電力を安価に入手できるようになることも見込まれることから、この電力を利用して水電解により水素を製造する技術の確立にも取り組んできた。

### 2 開発概要

褐炭は若い石炭であり、水分を多く含むため輸送効率が悪く、また乾燥させると自然発火しやすい。そのため、これまでは採掘地近傍での発電に利用されるのみに留まっていたが、さらに有効活用するためにこの褐炭に着目して水素を製造する技術の開発に取り組んだ。図1に示すようにガス化炉で褐炭を燃焼させ、発生したガスから水素ガスのみを取り出すという方法がある。当社では、このガス化技術および高純度の水素ガスを取り出すガス精製技術を開発し、社内に建設したベンチ試験設備にて検証をすることと

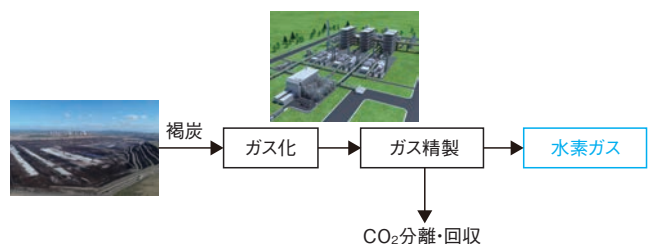


図1 褐炭からの水素製造プロセス  
Fig. 1 Process of producing hydrogen from brown-coal

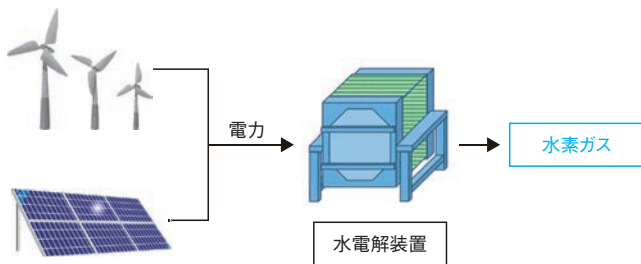


図2 水電解による水素製造プロセス  
Fig.2 Process of producing hydrogen by water electrolysis

した。

また、再生可能エネルギーからの水素製造では、図2のように、風力や太陽光などで発電された電力を使って、水電解により水素ガスを発生させる。高効率な水素製造を実現できる独自技術を開発するとともに、その検証のため小型試験機を製作し北海道の風力発電設備に併設して実証試験を実施することとした。

### 3 褐炭からの水素製造技術

#### (1) 褐炭ガス化水素製造

褐炭から水素を製造するプロセスは、図3に示すように大きく2つのプロセスに分けられる。ひとつは、原料となる褐炭から水素・一酸化炭素・二酸化炭素を主成分とする生成ガスを製造するガス化プロセス。もうひとつは、生成ガス中の二酸化炭素や微量な不純物を除去して水素を取り出すガス精製プロセスである。

##### (i) ガス化プロセス

ガス化プロセスは褐炭前処理とガス化により実施する。

##### ① 褐炭前処理

加圧ガス化炉への褐炭供給方法は、褐炭を粉碎後に分散剤と水を混ぜて図4のようなスラリーと呼ばれる液体状態にしてポンプで供給する湿式供給方式とした。

##### ② ガス化

ガス化では、スラリー化した褐炭を酸化剤により部分

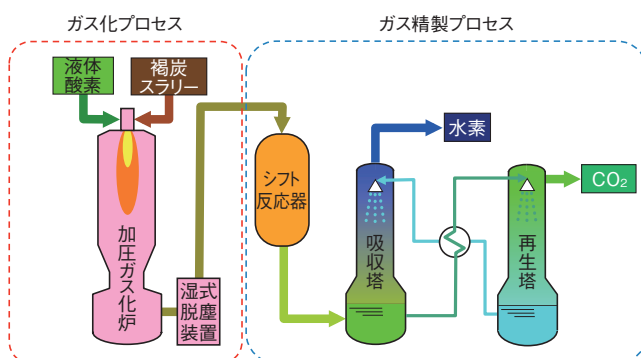


図3 褐炭ガス化水素製造プロセス  
Fig.3 Process of producing hydrogen by brown-coal gasification

燃焼させることで熱分解して、水素・一酸化炭素・二酸化炭素を主成分とするガスに変換する。

##### (ii) ガス精製プロセス

ガス精製プロセスは、シフト反応と二酸化炭素の分離・回収により実施する。

##### ① シフト反応

シフト反応は、触媒を用いて生成ガス中に10~20%程度含まれる一酸化炭素を水蒸気と反応させ、水素と二酸化炭素に変えて水素の収率を向上させる。シフト反応には、硫黄分を必要とするサワーシフト方式と硫黄分を必要としないスイートシフト方式の2つがある。

##### ② 二酸化炭素の分離・回収

二酸化炭素の分離・回収方法は、燃焼排ガスやガス化ガスなど、対象となるガスの種類・供給ガス圧力・処理量・ガス純度などに応じて使い分けられる。主な方法として、吸収液と化学反応させる化学吸収法、高压・低温下で溶解させる物理吸収法、活性炭やゼオライトに吸着させる吸着法、高分子膜を用いる膜分離法がある<sup>1)</sup>。

#### (2) 技術開発の取組み

##### (i) ガス化プロセス

##### ① 褐炭前処理

褐炭の水分は約60%と非常に高いが、商用規模での経済性の観点から、スラリー中の褐炭濃度は53%以上(水分47%以下)を目標とした。採掘時の粉状から水分を減少させて高濃度かつ低粘度な液状にするためには、乾燥後の褐炭が水分を再吸収しないように褐炭の表面構造を変えて再吸収を防ぐ、いわゆる改質処理が必要であった。本開発では乾燥と同時に改質する褐炭前処理技術を開発し、湿式供給方式の採用にめどをつけた。

##### ② ガス化

褐炭のガス化特性の把握と後流のガス精製プロセスに最適化するためガス化炉を自社開発した。ガス化炉は頂部に褐炭スラリーをガス化するスラリーバーナを備え、炉壁は断熱耐火構造とし、炉下部は生成ガスを直接冷却できるようにした。運転圧力0.4MPaの加圧条件下で純酸素吹きガス化が可能で、高濃度水素製造のために各部をガス(二酸化炭素)によりシールしている。

##### (ii) ガス精製プロセス

##### ① シフト反応

褐炭には硫黄分が含まれているので、ガス化によって得られる生成ガスには不純物として硫化水素などの硫黄分を含むガスが含まれる。そこで、この硫黄分を除去する必要がなく触媒活性として有効活用でき、システムが簡便なサワーシフト方式を採用した。

##### ② 二酸化炭素の分離・回収

商用ではガス化炉からの高压ガスの圧力を活用する物理吸収法が実績豊富で有利であるが、ベンチ試験ではガ





(a) 褐炭原炭 (b) 褐炭スラリー

図4 褐炭前処理  
Fig. 4 Raw brown-coal and brown-coal slurry

ス化炉から供給される生成ガスの圧力が0.3MPaとあまり高くないことから化学吸収法を用いた。また新技術として、担体に化学吸収液を担持させた吸着剤による吸着法を開発した。この吸着法では化学吸収法よりも低温で二酸化炭素の分離・回収ができるようになる。

(3) ベンチ試験による技術検証

図5のように明石工場の加圧ガス化炉にガス精製設備を設置し、2012年9月から2013年2月にかけてベンチスケールでの水素製造の実証試験を行った。

(i) 試験目的

シフト反応装置や二酸化炭素分離・回収装置などは複数段組み合わせることで商用的に成立するプロセスとなる。ベンチ実証試験ではそれぞれの装置が単段で必要とされる性能を満足することを検証することで褐炭からの水素製造を実証した。

(ii) 試験結果

加圧ガス化炉で得られた褐炭からの生成ガスを、シフト反応と化学吸収法で精製した試験結果を図6に示す。シフト反応器出口でガス量が増加しているのは水蒸気を加えているためであり、吸収塔出口でガス量が減少しているのは二酸化炭素が除去されたためである。試験の結果、シフト反応器による一酸化炭素の転換率は約83% / 吸収塔によ



図5 ベンチ試験装置全景  
Fig. 5 Overall view of bench scale test facility

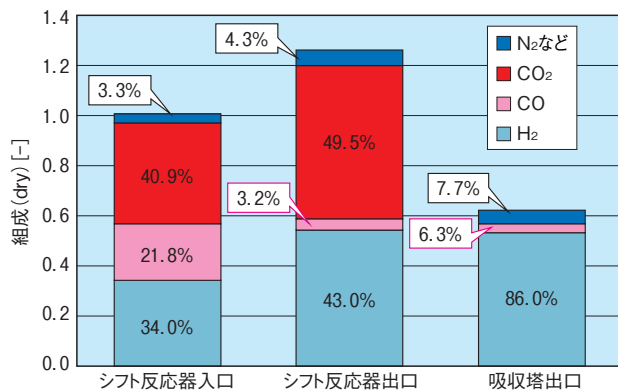


図6 ベンチ実証試験結果 —化学吸収法—  
Fig. 6 Results of bench scale test — chemical absorption method

る二酸化炭素回収率はほぼ100% / 得られた水素濃度は約86%と設計値をクリアした。

また、新技術として開発したシフト反応と吸着法で精製した場合においても、吸着側出口での水素濃度は80%以上であり、両方式において設計値をクリアし、褐炭からの水素製造を実証することができた。

4 水電解による水素製造技術

(1) アルカリ水電解水素製造

水電解による水素製造方式には大きく分けて、アルカリ水電解・固体高分子形水電解・高温水蒸気電解の3つがある<sup>2)</sup>。前2つは実用化レベルにあり、当社としては将来的な大型化およびコストメリットの面で有利なアルカリ水電解方式に着目して研究開発を行ってきた。

アルカリ水電解では、水酸化カリウム水溶液の電解液と電極（陽極・陰極）および隔膜で構成された図7に示す電解セルを用いる。電極間に電流を流すことで、陰極側では水素ガスが、陽極側では酸素ガスが発生する。

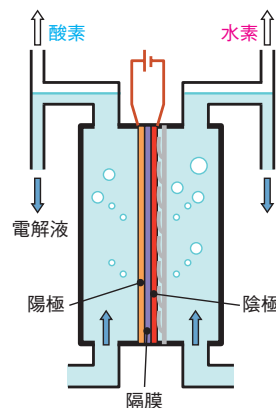


図7 アルカリ水電解セル模式図  
Fig. 7 Schematic diagram of alkaline water electrolysis cell

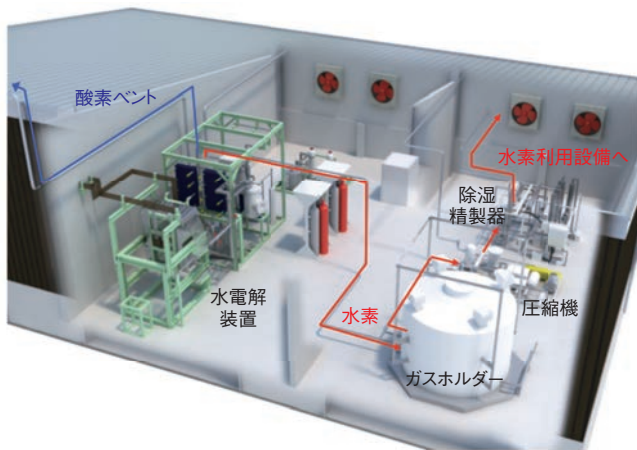


図8 実証設備概要図 (川崎重工業所掌範囲)  
 Fig. 8 Schematic image of demonstration plant  
 (only within the scope of Kawasaki Heavy Industries, Ltd.)

## (2) 技術開発の取組み

アルカリ水電解における技術的な課題として、高い安全性の確保と電解効率の向上がある。特に、微量の酸素ガスが水素ガスライン側へ混入するクロスオーバーという現象が発生する。このクロスオーバーをいかに低減するかが、安全性の向上および生成水素ガスの純度確保の観点から重要な課題となる。

電極は電解効率に大きく寄与し、特に酸素が発生する陽極の触媒活性反応の向上がキーポイントとなる。耐久性を維持したまま陽極の活性を向上させるために、電極メーカーおよび大学研究機関と共同で、触媒の構成元素や層構造の最適化などの高耐久・高性能化に向けた研究を進めてきた。

さらに、隔膜についても自社で研究開発を行ってきた。生成水素ガスのクロスオーバー抑制には隔膜のガス分離性能が寄与するが、電解効率向上の観点からはガス分離性能と相反する性質であるイオン透過性も同時に要求される。そこで、構成材料や膜厚・層構造を最適化することで、優れたイオン透過性とガス分離性能を両立した高性能隔膜の開発に成功した。

## (3) 北海道での実証事業

前述の技術を実装したアルカリ水電解設備の実証運転を、新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）委託事業「北海道に於ける再生可能エネルギー由来不安定電力の水素変換等による安定化・貯蔵・利用技術の研究開発」にて実施した<sup>3)</sup>。再生可能エネルギーである風力発電設備に水電解装置を併設して、発電された電力の一部を使って水素を製造し、需要に合わせて電力と水素を最適に供給するシステムの実証を行うものである。

当社は主にアルカリ水電解装置を担当し、図8に示すように生成した水素ガスを圧縮機によって0.9MPaGまで昇圧して、除湿精製器にて精製した後に他社所掌の利用系設

備に供給した。

アルカリ水電解装置に投入する電流の電流密度が6.4kA/m<sup>2</sup>という厳しい運転条件においても、最高で84%以上の非常に高い電解効率（高位発熱量換算）を達成することができた。生成した水素ガスの純度についても水素ガス中の酸素濃度が0.1vol%未満（ドライベース）と非常に良好な結果が得られ、開発した隔膜の高いガス分離性能が確認された。

さらに、再生可能エネルギーの普及や将来の水素社会の構築において、水電解技術の重要性はますます高くなっている。当社では今後も、キーコンポーネントである電極や隔膜のさらなる耐久性向上・低コスト化とともに、商用化へ向けた検討を進めていく。

## あ と が き

これらの技術開発を通して、安価な水素を大量に「つくる」ための技術にめどをつけ、将来的な水素サプライチェーン構築に対する基盤技術を確立することができたと考えている。

なお、水電解による水素製造技術に関しては、北海道での実証事業において、事業を委託頂いたNEDO、および豊田通商株式会社をはじめとする共同事業者に多大なるご支援をいただいた。ここに謝意を表する。

## 参 考 文 献

- 1) 高木：“CO<sub>2</sub>を分ける - CO<sub>2</sub>分離回収の原理と技術動向 -”，生産と技術，第64巻，第1号，pp.25-29（2012）
- 2) 光島，松澤：“水電解の現状と課題”，水素エネルギーシステム，Vol.36，No.1，pp.11-16（2011）
- 3) 豊田通商，他：“北海道に於ける再生可能エネルギー由来不安定電力の水素変換等による安定化・貯蔵・利用技術の研究開発”，2019年度NEDO次世代電池・水素成果報告会，発表No.H2-1（2019）



足利 貢



熊田 憲彦



村岡 利紀



大畑 祐吾



谷口 達也



石川 七彩



# 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、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。

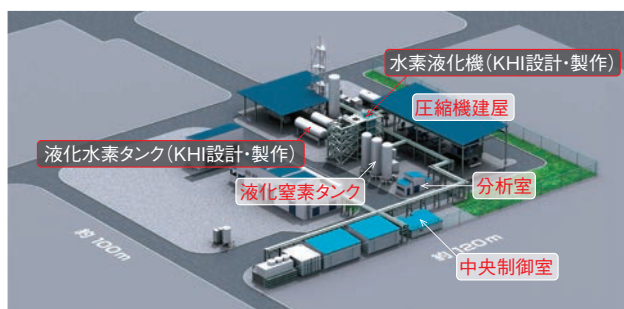


図1 水素液化システムの模式図（播磨工場実証設備）  
Fig. 1 Schematic diagram of hydrogen liquefaction system (demonstration facility in Harima Works)

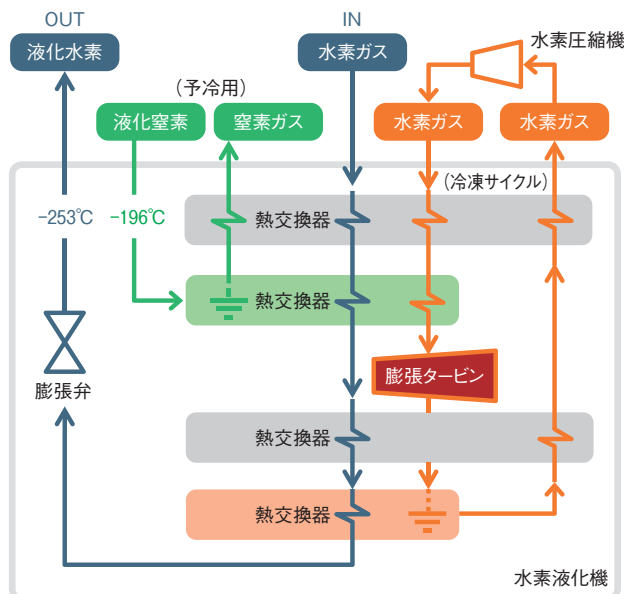


図2 液化システムの概略処理フロー  
Fig. 2 Schematic process flow diagram of hydrogen liquefaction system

#### (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、



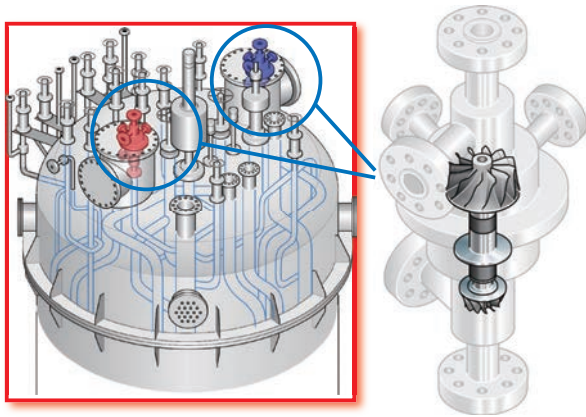


図3 水素液化機上部と膨張タービン  
Fig. 3 Hydrogen liquefier (upper part) and expansion turbine

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

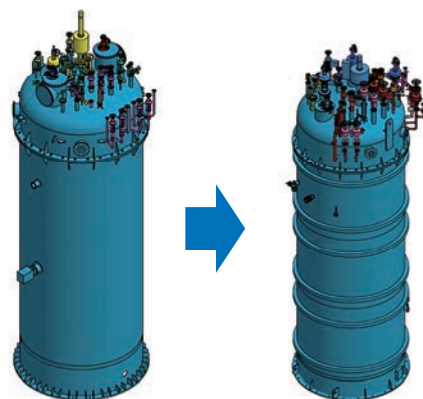


図4 プロトタイプ液化機（左）と新型液化機（右）  
Fig. 4 Prototype liquefier (left) and new liquefier (right)



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



# 水素をためる – 液化水素基地の開発 –

## Hydrogen Storage – Development of Liquefied Hydrogen Terminal



猪股 昭彦①※ Akihiko Inomata  
橋本 成樹② Seiki Hashimoto  
山之内 耕一郎③ Koichiro Yamanouchi  
山本 哲夫④ Tetsuo Yamamoto

水素サプライチェーンの構成要素である液化水素を貯蔵する液化水素基地については、2020年度に実証試験を行うためにパイロットスケールの荷役基地を建設した。さらに、商用化を見据えた大型化開発や国際規格化にも取り組んでいる。

Regarding a liquefied hydrogen terminal, which as an element of a hydrogen energy supply chain stores liquefied hydrogen, we constructed a pilot-scale loading/unloading terminal for verification testing in fiscal 2020. And looking to future commercialization, we have been working on increasing the scale of development and international standardization.

### まえがき

水素サプライチェーン実現のためには、海外から船などで輸送した液化水素を、荷揚げ・貯蔵して発電設備や水素ステーションなどに供給する液化水素基地が必要となる。

### 1 背景

これまで世界で建設されてきた大規模な液化水素基地の多くは、ロケット射点設備に関するものである。貯蔵タンクとして、それぞれ容量3,218m<sup>3</sup>と540m<sup>3</sup>の球形タンクを持つNASAのケネディ宇宙センターや当社がタンクを納入した種子島宇宙センターなどがあるが、いずれも船との荷役設備はない。また近年、大型貯蔵タンクの検討や建設が行われており、ケネディ宇宙センターでは約4,700m<sup>3</sup>の液化水素タンクの建設が2018年より開始されている。また、トーヨーカネツでは10,000m<sup>3</sup>の液化水素タンクの開発が進められている<sup>1)</sup>。

船と接続して基地側に液化水素を移送するためのローディングアームシステムLASについては、現在のところLNG用の製品はあるが、適用温度が-160℃程度であり、液化水素温度である-253℃に適用できる製品は存在しない。

このように、船からの荷役を伴う液化水素基地は未だ存在しておらず、各種の機器開発が必要となる。また、液化水素基地に関する国際規格は現在のところ存在しておらず、将来の水素社会に向けて機器開発を行うだけでなく国際ルールを整備する必要もある。これにより開発機器の世

界市場への参入を円滑に行うのみならず、国独自の基準・規格を策定するのが困難な途上国において、製造した水素を安全に貯蔵・移送する設備を建設・運営するためにも有用となる。とりわけ、LASについては、方式が基地ごとに異なると船側での接続や荷役作業が困難となるため、規格整備は重要なものとなる。

### 2 開発計画

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO) 助成事業「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」(パイロット実証)として、液化水素運搬船の輸送容量が商用の1/100程度のスケールの水素サプライチェーンの構築に、2015年度より着手している<sup>2)</sup>。

パイロット実証事業において、特に技術開発要素の高い、船舶のカーゴタンクと陸上タンクとの間の液化水素の荷役(積荷/揚荷)に関する技術を実証する。また、種子島宇宙センターの液化水素タンクからスケールアップし、国内最大となる公称幾何容積2,500m<sup>3</sup>のタンクを製作・設置の上、液化水素運搬船が輸送する液化水素を貯蔵する。

荷役技術を実証する、神戸液化水素荷役実証基地の完成イメージを図1に示す。当基地は、神戸空港島の北東沿岸に建設し、2017年度の神戸市による敷地造成、係留施設整備に引き続き、2018年4月より建設工事に着手、2020年5月末までに試運転を行い、2020年度内に液化水素の日豪間輸送実証を完了する予定である。



図1 神戸液化水素荷役実証基地の完成イメージ  
Fig. 1 Rendering image of liquefied hydrogen loading/unloading demonstration terminal in Kobe



図3 液化水素タンク  
Fig. 3 Liquefied hydrogen storage tank

### 3 液化水素基地

液化水素基地は、液化水素の貯蔵を行う液化水素タンク、液化水素の船陸間荷役を行うLAS、および付帯設備から構成される。水素ガスを取り扱う付帯設備として、液化水素タンクから蒸発する水素ガス（BOG：ボイルオフガス）を圧縮するBOG圧縮機、圧縮した水素ガスを貯蔵するBOGホルダー（図2）、および液化水素荷役中に発生する水素ガスを処理するベントスタックを備えている。BOGホルダーに貯蔵した水素ガスは、基地内設備のガス置換や、液化水素を船から揚荷する際のバックアップなどに使用される。また、液化水素タンクへの液化水素充填のため、液化水素ローリーの受入設備も有している。

#### (1) 液化水素タンク

図3に示す液化水素タンクは、公称幾何容積2,500m<sup>3</sup>の球形真空二重殻貯槽としている。豪州から輸送されてくる液化水素の受入・貯蔵を行うとともに、液化水素運搬船への積荷に対応するため、日本国内から陸送された液化水素の貯蔵を行う。

液化水素を長期間に渡り蒸発損失を抑えて貯蔵するために、LNGタンクなどと比較してより高い断熱性能が液化

水素タンクには要求される。そのため、真空断熱方式を採用した。日本国内の液化水素用タンクとしては種子島宇宙センターの容量540m<sup>3</sup>が従来の最大サイズであり、本基地のタンクは容量にしてその4倍以上と国内最大の液化水素タンクとなる。図4に示すように断熱構造にはパーライト真空断熱方式を採用しており、球形の外槽と内槽の間に断熱材であるパーライトを充填の上、真空引きを行って断熱性能を高めている。

大型化を実現するために、肉厚の大きな板材を工場ではなく建設現場で溶接するための適切な施工方法、および作業効率を高めるための最適な板割などの検討を行い、将来の大型タンク製作に向けたノウハウを蓄積している。また、大型タンクの運用に向け、液化水素充填前の水素ガス置換手法や、タンク冷却手順の最適化といった運用面の検討を行っており、2020年度の実証に臨む。

#### (2) ローディングアームシステム

LASは海上に係留される液化水素運搬船と接続して荷



図2 BOGホルダー  
Fig. 2 BOG holder

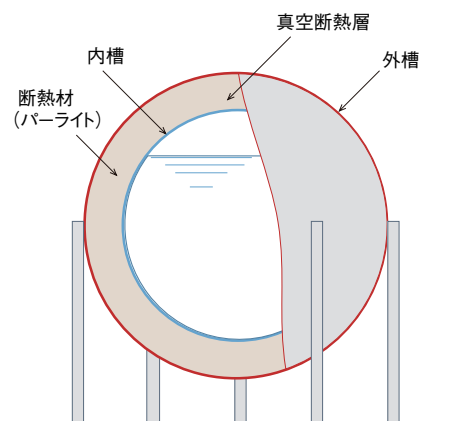


図4 真空断熱構造の概念図  
Fig. 4 Conceptual diagram of vacuum thermal insulation structure



役を行うために陸上側に設置される設備である。対象船舶の着岸後、LASを操作して船側の配管マニホールドと接続し、液化水素運搬船の海上揺動に追従しながら液化水素を移送する。

液化水素用のLASには既存LNG用よりも高い断熱性能が求められるため、真空断熱構造とすることが望まれる。同時に海上の揺動に追従する柔軟性あるいは可動性が必要となる。これらのことから、LASには真空二重フレキシブルホースを採用した。

液化水素運搬船の揺動に対応するために、真空二重フレキシブルホースをクレーン状のアームでつり下げる構造とした。図5に船との接続状態イメージを、図6に工場製作中の実証用LASを示す。フレキシブルホースをつり下げるアーム構造はLNG用でも実績がないため、さまざまなアーム姿勢での構造解析を行った。さらに極低温状態での繰り返し変位への耐久性を確認するために、プロトタイプを製作して液化水素を使用した各種性能試験を実施した。

LASは、海上揺動への追従機能だけでなく、緊急事態発生時に安全かつ速やかに離岸するための緊急離脱機構(ERS: Emergency Release System)を備える。緊急離脱機構は許容範囲を超えて船舶が変位したときには自動的に作動し、離脱時の液化水素の外部漏洩を最小限に抑えるものである。また、火災などの緊急事態発生時には、離脱スイッチにより手動で作動させることも可能である。緊急離脱機構はLNG用LASにも備わっているが、フレキシブルホースと同じく、高い断熱性能を得るため真空断熱構造を

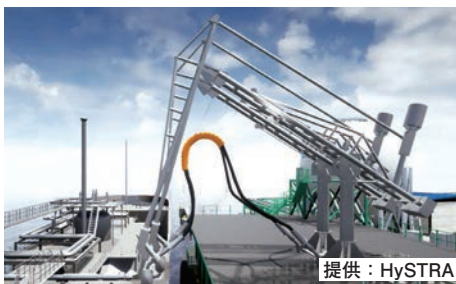


図5 船陸接続状態イメージ  
Fig. 5 Image of a ship connecting to terminal



図6 実証用ローディングアームシステム  
Fig. 6 Loading arm systems for demonstration project

適用し、かつ緊急時に閉止するバルブからの入熱を抑制する構造とした点がLNG用と異なっている。構造開発に際しては、当社の有する極低温条件での熱応力解析技術を駆使した<sup>3)</sup>。本機器は、内閣府の「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)」にて製品開発を行い、プロトタイプを製作の上、液化水素充填状態での離脱試験や離脱後の閉止性能試験などを実施した<sup>4)</sup>。

これらの真空二重フレキシブルホース、クレーン状のアーム、緊急離脱機構および油圧機構の制御装置などを合わせてLASと称している。

## 4 今後の取組み

### (1) 液化水素タンクの大型化

パイロット実証で建設する球形の真空断熱構造の液化水素タンクは、内部の真空圧による座屈を避けるために、タンク外槽の肉厚を大きくする必要がある。商用段階で必要となる数万 $m^3$ 級のタンクになると、外槽は相当な厚みを要求されることから、板材の入手性や加工性が困難となる。

このため、当社は商用化に向けた新たな構造の大型液化水素タンクの開発をNEDO助成事業「液化水素の輸送貯蔵機器大型化および受入基地機器に関する開発」で行っている。検討している構造の一つに図7のようなLNG大型タンクと同様の球形より容積効率の高い平底円筒形がある。内外槽間に常圧の水素ガスを供給した非真空構造とすることで、真空断熱構造で課題となる真空圧による座屈を防ぐ。また、発泡断熱材の内部に水素ガスが浸透して断熱性能が低下することを避けるため、断熱材の表面にガスバリア材を適用することを検討している。本構造は、既存のLNGタンクを改造して適用することをコンセプトとしており、水素社会の導入段階でLNGから水素に段階的に移行する際に有効となる。

### (2) 液化水素LASの大型化

商用段階では、大口径のLASが必要となるが、設置スペースや重量を考慮すると、LNG基地で適用されている回転式の継手(スィベルジョイント)を適用して、接続時の船の揺動に適應する形式が主流になると考えられる。そこ

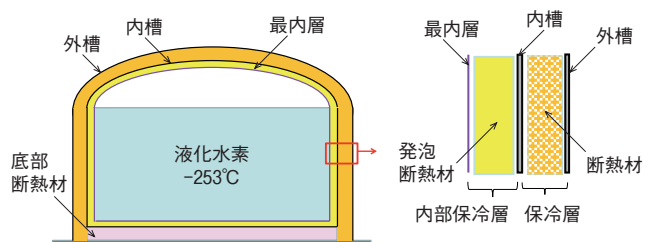


図7 大型タンクの構造図案  
Fig. 7 Structural design of a large-scale tank



図8 商用液化水素ローディングアームシステム  
Fig. 8 Liquefied hydrogen loading arm systems for commercial use

で、LNG用LASで世界トップクラスのシェアを有する東京貿易エンジニアリング株式会社とのSIPでの共同開発において、図8に示す本形式のLASを試作し、正常に作動することを確認した。引き続き、液化水素を用いた実証試験を行うことにより、本開発を完了させる予定である。

### (3) 国際標準化

現在、LASの低温用の国際規格は、LNG用については、ISOの規格が制定されているが、液化水素用は存在していない。そのため、液化水素用LASの国際規格化に向けた取組みを進めている。ISO内にワーキンググループを設置し、定期的に開催する国内外での会議などにより、各国のエキスパートと議論を行っている。これまで、石油・ガス関連の基準・規格化は欧米のエネルギー会社が主体となっていたが、本ワーキンググループは、日本船舶技術研究協会が議長となり、当社がプロジェクトリーダーを務めて主導的に議論を進めている。今後も各国との議論を継続し、2022年のISO規格制定を目指している。

将来的には、LASのみならず、他の液化水素機器についても国際規格化に取り組み、安全な液化水素サプライチェーンの構築に貢献していく。

### あ と が き

2030年の液化水素基地の商用化に向けて、小規模の実証

設備を建設し、荷役の実証に向けた準備を着々と進めるとともに、商用スケールの機器開発を行っている。今後はこれらの実証・開発を完遂し、商用仕様に準じた施設の実証を通して、商用規模の液化水素サプライチェーンの実現を目指す。

### 参 考 文 献

- 1) 大江, 藤極, :“大型液化水素タンクの開発”, 産業機械, No.830, pp.23-25 (2019)
- 2) H. Suzuki, T. Yoshiyama, K. Shindo, and M. Nishimura, “International Liquefied Hydrogen Supply Chain”, International Conference on Power Engineering-2019
- 3) 猪股昭彦, 梅村友章, 河合務, 成尾芳博, 丸祐介, 武田実, 千田哲也:”液化水素用緊急離脱機構の熱応力特性”, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第54巻, pp97-102 (2019)
- 4) A. Inomata, T. Umemura, J. Kawaguchi, T. Kawai, Y. Naruo, Y. Maru, T. Senda and M. Takeda, “Performance test and analysis of the developed emergency release system for liquefied hydrogen installed in loading systems”, Materials Science and Engineering, 502 (2019)



猪股 昭彦



橋本 成樹



山之内 耕一郎



山本 哲夫



# 水素をはこぶ – 液化水素運搬船の開発 –

## Hydrogen Transportation – Development of Liquefied Hydrogen Carrier



村岸	治①**	Osamu Muragishi
稲津	晶平②	Shohei Inatsu
浦口	良介③	Ryosuke Uraguchi
山城	一藤④	Kazuto Yamashiro
今井	達也⑤**	Tatsuya Imai
大橋	徹也⑥	Tetsuya Ohashi
下垣	貴志⑦	Takashi Shimogaki
吉田	巧⑧	Takumi Yoshida
河本	孝⑨	Takashi Koumoto

水素サプライチェーンにおいて、水素を大量に輸送するための液化水素運搬船を開発・建造した。液化水素用大型タンクは真空断熱方式を採用し、世界最高レベルの断熱性能の実現に取り組んでいる。2020年度より日本と豪州間の輸送航行実証を行い、安全性を確保した大量輸送を目指す。

Kawasaki has developed and built a liquefied hydrogen carrier to transport a large volume of hydrogen in the hydrogen energy supply chain. The carrier's large-sized tank for liquefied hydrogen employs a vacuum insulation system and will have come to realize the world's best level of thermal insulation performance. Through the demonstration of marine transportation between Japan and Australia starting in fiscal 2020, we aim to achieve large-volume transportation while ensuring safety.

### まえがき

水素サプライチェーンの実現のため、海外で豊富な資源から製造された水素を安全かつ効率的に日本へ大量輸送することが水素流通に不可欠な基礎基盤となる。

### 1 背景

水素の輸送形態には高压ガスや液体などがある。高压ガスは燃料電池車用の水素ステーションなどに、比較的少量を運ぶ場合に用いられる。圧縮した状態の水素ガスを安全に貯槽する上で高压化には限度があるものの、需要サイトでは比較的簡単な装置と操作で利用できるというメリットがある。一方、大量輸送には液体が有利である。水素は液化すると大気圧で体積が気体の800分の1と非常にコンパクトになる。しかし、液化水素はLNGよりも低い-253度となり、貯蔵や取扱いには特殊な装置や対策が必要となる。そのため、液化水素の海上輸送はこれまでほとんど行われていなかった。また水素を輸送する方法として、アンモニアやメチルシクロヘキサンなどの有機化合物に変換する手法も研究や検討がなされている。化合物の状態であれば極低温での取扱いは不要になるが、毒物としての取扱いや水素を取り出す際にエネルギーが必要になるなどの課題がある。

当社はこれまでに、水素を陸上輸送するための高压ガス水素輸送トレーラや液化水素輸送コンテナを開発・実用化

している。トレーラは45MPaの耐圧複合容器を採用して、燃料電池車72台分となる360kgの高压水素ガスを運搬することができる。コンテナはISO40フィート規格の真空積層断熱方式の容器により、2.8トンの液化水素を運搬することができる。

当社が保有するLNG運搬船および陸上用液化水素貯蔵タンクの設計製造技術を基盤に、現在、CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン構想での「はこぶ」を担う、世界で初となる液化水素運搬船の設計・製造技術の構築を目指している。2016年度までのFEEDフェーズにおいて要素試験と仕様検討を行い、2017年度からの建造フェーズにおいて設計・製作を実施してきた。2020年度には、豪州の褐炭由来の液化水素を日本へ輸送する荷役・輸送技術の実証を目的としてパイロット実証船の建造を進めている。

### 2 パイロット実証船の課題

液化ガスを輸送する船舶の設計製造には、国際海事機関IMO (International Maritime Organization) により採択された「液化ガスのばら積運送のための船舶の構造および設備に関する国際規則 (通称IGCコード<sup>1)</sup>)」に準拠することが要求されている。しかし、現用のIGCコードはLPGやLNGなどを対象としており、液化水素は対象とされていない。このため、IMOでは日豪による共同提案を承認する形で日豪間の液化水素の海上輸送に対する「暫定勧告<sup>2)</sup>」

を発行した。さらに、(財)日本海事協会 (ClassNK) がIMO 暫定勧告をベースに、各項目をより具体的な要件として規定して、思想および事故シナリオからの要件を補完した「液化水素運搬船ガイドライン<sup>3)</sup>」を発行しており、これにも準拠することで高い安全性を確保する。

パイロット実証船の完成イメージを図1に示す。建造実績のある内航用LNG運搬船をベースに船型を設計し、液化水素専用の貨物タンクを搭載する。液化水素はLNGに比べ侵入熱により気化しやすく、極低温のため構造に大きな熱収縮を発生させるなど、液化水素運搬船の実用化には解決すべき課題がある。

### (1) 貨物タンクCCS (Cargo Containment System)

規則要件により、侵入熱に対してCCSの圧力や温度を制御する必要がある。侵入熱によるボイルオフガスをCCS外に放出せずに蓄圧する場合、圧力を安全に保持して目的地までの航海が可能でなければならない。タンク壁およびCCSを支持する構造や配管などへの外部からの侵入熱を最小限に抑制する必要がある。

また、波浪航行中の船体の動揺に対してCCSは構造上健全である必要がある。

### (2) 貨物配管

液化水素移送中の気化による荷役効率低下の抑制、配管表面の液化空気生成による高濃度酸素雰囲気形成の排除、液化空気の滴下による船体構造の損傷危険の排除のために、貨物配管には高い断熱性が必要である。

また、液化水素荷役中の熱伸縮による大きな内力および陸上用配管とは異なる船体変形による強制変位が配管に作用するため、それらから保護する必要がある。

### (3) 貨物機器

液化水素はLNGに比べ90度も低温であるため、貨物機器はLNGに使用される機器よりもさらに高い断熱性能が要求される。水素物性への耐性と高い断熱性や水素の漏洩対策など、適切な材料選定と耐久性の確認が必要である。

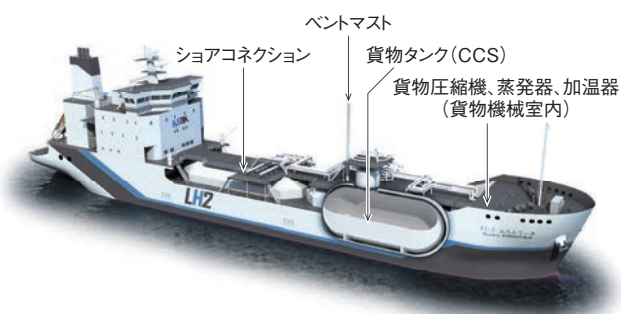


図1 パイロット実証船  
Fig. 1 Pilot demonstration carrier

## 3 開発設計と要素技術

### (1) CCS

CCSは船体構造と独立した蓄圧式横置円筒型タンクとした。これはIGCコードおよびClassNK鋼船規則<sup>4)</sup>で定義されている圧力容器の基準に適合するタンクタイプCに相当している。パイロット実証船は容積1,250m<sup>3</sup>のCCS2基を搭載可能な船型で、船首側にCCS1基を搭載している。

#### (i) CCS防熱システム

液化水素用CCSではLNG用よりも約10倍高い断熱性能が必要である。熱の伝わり方には、対流・熱伝導・ふく射の3種類がある。対流と熱伝導によるCCSの表面からの侵入熱を抑制するため、図2に示すような内外槽からなる真空二重殻構造を採用している。

内外槽間を連結する支持構造・配管・計器類は熱伝導による侵入熱経路となる。これを低減する対策として、熱伝導率の低い材料を使う、構造材料の断面積を小さくする、伝達経路を長くするなどの措置を講じた。ふく射による熱伝達を軽減する方法として、二重殻の真空槽内に反射率の高い金属蒸着フィルム積層した積層真空断熱材を採用した。CCSは通常航海中に内部で生じる温度と圧力の上昇に対して十分な余裕を見込んだ設計とし、発生するボイルオフガスをCCS外に放出することなく豪州と日本間の航海を可能とした。また、CCS内槽内に液化水素を充填しても外槽表面では常温が維持され、液化空気や液化窒素などは生成されない。

さらに、運搬中の安全な航行を保証するためのツールとして「真空防熱性能劣化監視システムVIPDM (Vacuum Insulation Performance Deterioration Monitoring System)」を搭載している。これは真空劣化速度を常に監視して断熱性能が悪化するリスクを十分に早い段階で予知することで、断熱性能の持続と航海の安全を確認するものである。

#### (ii) CCS支持構造

CCSの内外槽には、極低温環境での使用に適した材料と

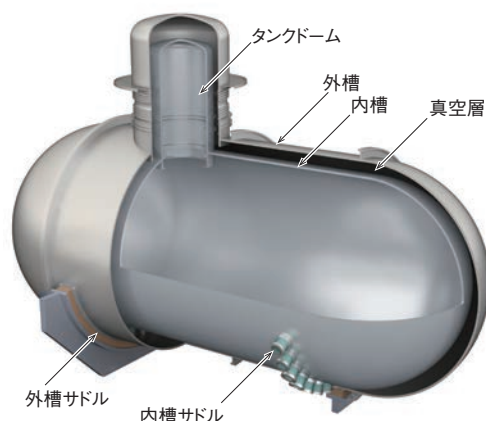


図2 CCSの二重殻構造  
Fig. 2 CCS's double-shell structure



してオーステナイト系ステンレス鋼を採用した。航行中動揺する船体内で内槽を外槽内に接触させずに安定して保持する支持構造では、特に熱伝導による侵入熱量が大きくなる。このため、CCS内槽の支持には断熱性能および強度に優れたガラス繊維強化プラスチックGFRP製サドル構造を採用した。真空状態および極低温状態でのGFRP支持構造の強度・熱伝導・アウトガスなどの諸特性を取得して、運用年数を耐用する設計とした。

CCS内部は建造中や定期検査時は常温であるが、満載状態では極低温になる。また、バラスト航海時や荷役中の液位の状態によってもCCS内の温度分布が変化する。このように内槽は温度変化に対して伸縮するのにに対し、外槽は常温を維持するため内外槽間での温度差による相対変位が生じる。そこで、内槽を前後2カ所の円弧状サドル構造で支持し、サドルが外槽内面上をスライドすることで相対変位を吸収する構造とした。

(iii) タンクドーム

温度差による内外槽間の相対変位が大きいため、CCSを貫通する配管類をCCSの頂部に設けたタンクドームに集約した。タンクドームには貨物配管・電線管・アクセス用マンホールを配置している。

(iv) CCS製造技術

当社は、ロケット射点設備の球形液化水素タンクを始め、陸上用液化水素タンクやトレラなどの二重構造真空断熱タンクを製造してきた。また、船用LNG大型タンクも製造しており、これらの技術シナジーによりCCSを製造した。

(2) 真空二重配管

貨物配管では高い断熱性能を確保するためCCSと同様に二重構造の真空断熱方式を採用した。内管は外管に接触させずに安定して保持させる必要がある。また、内管と外管には熱伸縮による長さの差が発生する。そこで、陸上用の水素設備で実績のある真空二重管の仕様を基に、荷役中の熱伸縮や船体の静的および動的な変位を考慮し、船用真空二重管を開発した。低温用弁についても断熱性能の高い真空ジャケット付ロングボンネット型の弁を採用した。

(3) 貨物機器

貨物機器の水素物性への耐性については、LNG船で実績がある船用機器や陸上で水素用として実績のある機器を基本に、水素の特性や船上での使用環境に対応すべく材料や仕様をすべて見直した。主要な機器については開発段階において液化水素を使用した試験を実施し、操作上のリスクアセスメントを行い課題の洗い出しと対策を施した。

高い断熱性や漏洩のリスク低減への対応として、荷役基地のローディングアームシステムLASとの接続部となるショアコネクション部には、液化水素用の断熱継手として多くの実績がある図3に示すバイヨネット継手を採用し

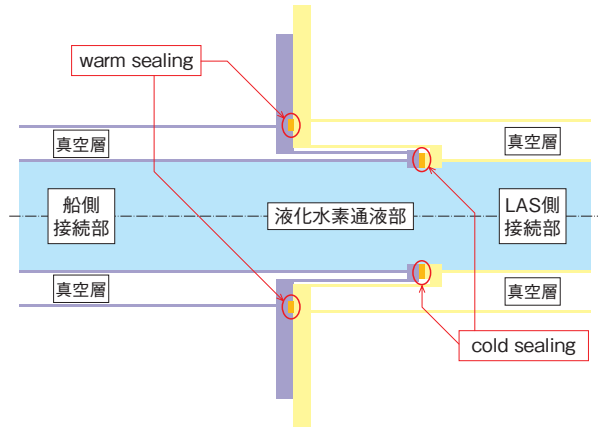


図3 バイヨネット継手  
Fig.3 Bayonet joint

た。その他の貨物ハンドリング用機器としては、水素ガスを加圧するための圧縮機・液化水素を気化させる蒸発器・極低温の水素ガスを温める加温器などがある。

4 建造および実証

2017年度にCCSの設計製造に着手し、2019年1月に船体の起工、12月に進水した(図4)。

(1) 船体

パイロット実証船の主要寸法などの概要を表1に示す。蓄圧式CCSを採用しているため航海中に船内でボイルオフガスを処理する必要がない。推進方式として3台の主ディーゼル発電機から2台の推進モータに電力を供給し減速機を介してプロペラを駆動するディーゼル電気推進を採用した。船体には、バウスラスタ、シリング舵(高揚力・大舵角舵)および4翼可変ピッチプロペラを装備し、離着岸時における操船性の向上を図っている。



図4 パイロット実証船の進水式  
Fig.4 Launching ceremony of pilot demonstration carrier

表1 実証船の概要  
Table 1 Outline of pilot demonstration carrier

主要寸法	全長 [m]	116
	型幅 [m]	19
	型深さ [m]	10.6
総トン数		約8,000
推進方式		ディーゼル電気推進
航海速度 [ノット]		約13
航続距離 [海里]		約11,300
最大乗船定員 [名]		25
船籍/船級		日本/日本海事協会



図5 貨物タンク (CCS)  
Fig. 5 Cargo containment system (CCS)

## (2) CCS

2020年3月に完成したCCS (図5) の内部には、サブマージ型モータ駆動ポンプ、配管系を固定するパイプサポーター、CCS内部を効率的に冷却するための装備がある。

## (3) 実証試験

2020年の液化水素運搬船完成後に実証フェーズに移行する。実証フェーズIでは、液化水素運搬船のCCSや配管および貨物機器の機能・性能・安全性を確認することを目的として、神戸市沖合の神戸空港島北東部に建設中の貯蔵・荷役基地において以下の試験項目を順次実施する。

- ・ CCS内ガス置換 (効率的なガス置換法)
- ・ CCSのクールダウン (効率的なCCS冷却法)
- ・ 貨物液の積み込み (基地からの液化水素充填)
- ・ 貨物ポンプの作動 (極低温環境下での作動)
- ・ その他貨物装置の作動 (機能・性能)
- ・ 防熱性能確認 (CCSおよび配管の断熱性)
- ・ 貨物満載試験 (近海満載航行と揚荷手順)

続く実証フェーズIIでは、日本と豪州間の満載航行試験を実施する。

## あとがき

パイロット実証では、液化水素の荷役操作の実証および実海域でのCCSの防熱貯蔵性能の確認を行い、将来の大量輸送技術の構築を目指す。さらに、今後は液化水素運搬船のさらなる大型化に向け開発を進める。

最後に、当実証事業は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 助成事業「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」の一環として実施しており、ここに感謝の意を表する。

## 参考文献

- 1) Resolution MSC.370 (93) Amendments to the International Code for the Construction and Equipment of Ships Carrying Liquefied Gases in Bulk, IMO (IGC Code) (2014)
- 2) Resolution MSC.420 (97) Interim Recommendations for Carriage of Liquefied Hydrogen in Bulk, IMO (2016)
- 3) 液化水素運搬船ガイドライン, 日本海事協会 (2017)
- 4) 鋼船規則 N編 液化ガスばら積船, 日本海事協会 (2019)



村岸 治



稲津 晶平



浦口 良介



山城 一藤



今井 達也



大橋 徹也



下垣 貴志



吉田 巧



河本 孝



# 水素をつかう – 水素発電技術の開発 –

## Hydrogen Utilization – Development of Hydrogen Fueled Power Generation Technologies



Hydrogen is used as fuel for transport machinery such as rockets and FCV (fuel cell vehicles/buses).

To realize low carbonization and a future hydrogen-based society, Kawasaki is developing hydrogen combustion technology and power generation technologies for gas turbine engine, which is excellent in fuel flexibility. In 2018, we successfully operated the world's first hydrogen fueled power generation in an urban area, and we have been improving such technologies to achieve higher performance and cleaner power generation.

堀川 敦 史①	Atsushi Horikawa
岡田 邦 夫②	Kunio Okada
足利 貢③	Mitsugu Ashikaga
山口 正 人④	Masato Yamaguchi
堂浦 康 司⑤	Yasushi Douura
明日 芳 浩⑥	Yoshihiro Akebi

水素は、ロケットやFCV（燃料電池自動車・バス）などの輸送機器の燃料として利用されている。

当社は、低炭素化ならびに将来の水素社会の実現に向け、燃料多様性に優れたガスタービンエンジンの特長を生かし、純水素に対応する燃焼技術や発電技術の開発を進めている。2018年に世界で初めて市街地での水素発電に成功し、さらなる高性能・クリーン発電を目指して改良を重ねている。

### まえがき

水素サプライチェーンの実現には、水素をより安く、現在の石油や天然ガスなどの化石燃料と同程度のコストにしていくことが重要である。そのためには、水素の需要を大幅に増加させて、スケールメリットにより水素のコストを削減する必要がある。

### 1 背景

従来より、水素はロケットの推進用燃料やFCV（燃料電池自動車・バス）の燃料あるいはガスタービン発電装置やボイラの燃料として利用されている。水素・燃料電池戦略ロードマップでは、2030年ごろから本格的な水素発電が始まるとされており、水素を天然ガスに替わる発電用燃料として活用できれば、水素の大量利用により水素サプライチェーンの実現に大きく貢献できる。

各ガスタービンメーカーとも水素の利用推進に対応するため、燃料多様性に優れたガスタービンエンジンの特長を生かし、天然ガスと水素の混合燃料および純水素燃料に対応する燃焼技術の開発やガスタービン発電装置の実用化に向けたプロジェクトを推進している。

当社では、中小型ガスタービン発電装置による純水素発電に向け、クリーンな水素燃焼技術の開発や水素発電実証

を進めている。

### 2 ガスタービンでの水素利用と課題

小型ガスタービンの構造を図1に示す。圧縮機で高圧にした空気に燃焼器で燃料を投入して高温・高圧の燃焼ガスを生成する。この燃焼ガスの流れによりタービンを回転させて出力を取り出す。燃焼器は、金属部品の融点を超える燃焼ガスを安定かつクリーンに生成する役割を担う。

ガスタービンは多様な燃料に対応できることから水素を燃料ガスとすることが可能であるが、水素特有の燃焼特性に適合する燃焼技術が必要となる。水素の安定燃焼と大気汚染物質である窒素酸化物NO<sub>x</sub>の低排出性を兼ね備えた燃焼技術と燃焼器部品の開発が水素発電を実現するための鍵となる<sup>1)</sup>。

#### (1) 水素の安定燃焼

水素は天然ガスに比べて反応性が高く、燃焼時の火炎が燃焼器部品に接近するため、部品の高温化や燃焼不安定を起こす可能性が高くなる。天然ガス焼き用の燃料ノズルで天然ガスと水素を燃焼試験した際の、燃焼器内部での火炎の状態を図2に示す。水素燃焼時には、燃料ノズル部品に水素の火炎や燃焼ガスが近づき、温度が非常に高いことを示す赤熱を起こしている。

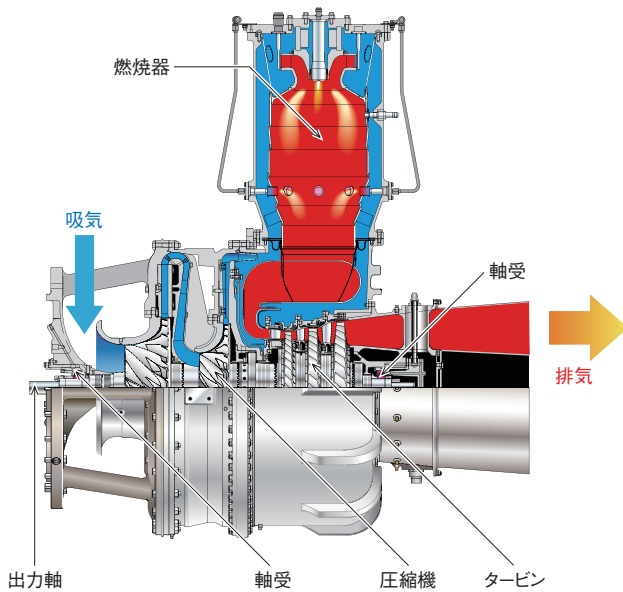


図1 小型ガスタービン「M1A-17D」  
Fig. 1 Small-scale gas turbine (M1A-17D)

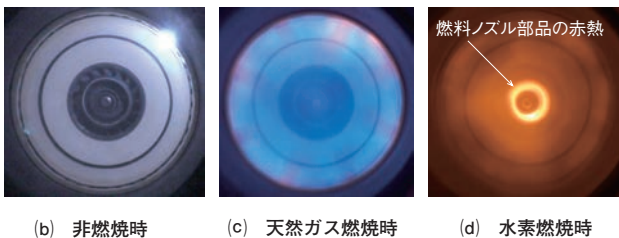
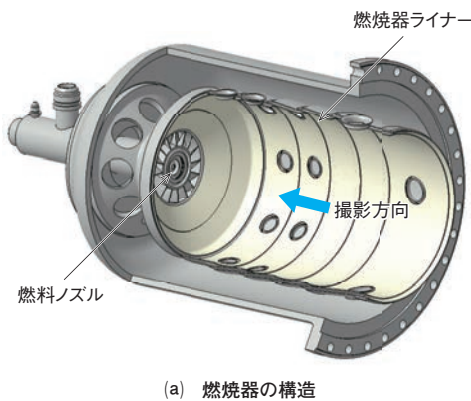
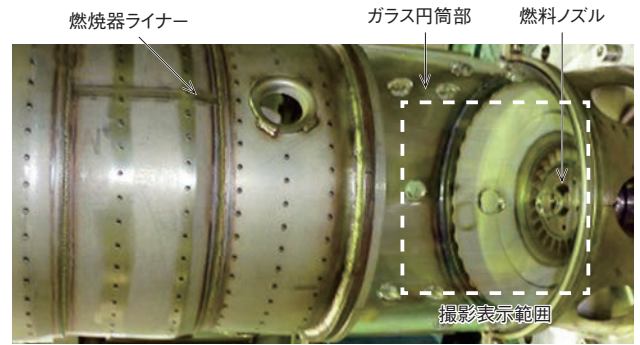


図2 燃焼器の構造と燃焼状態  
Fig. 2 Combustor structure and combustion state

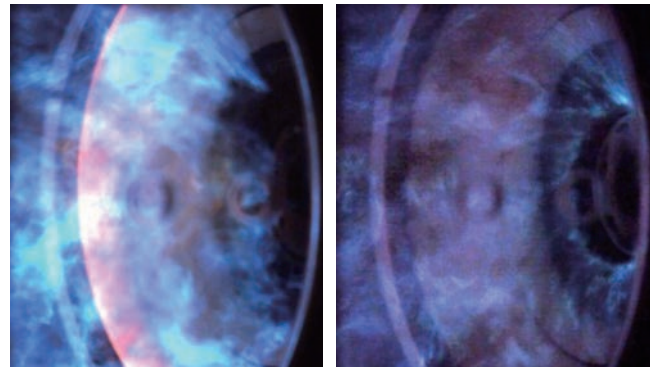
ガスタービンでは燃焼器の後段に高速で回転するタービンがあることから、燃焼器部品が下流へ脱落するような損傷が生じるとタービン部品を破壊してエンジンを停止させる事態となる。このため、水素でも異常な燃焼状態を発生させず安定した燃焼状態を維持できるように、燃焼器の部品形状などを工夫することが重要となる。

## (2) 窒素酸化物の抑制

燃焼器内で形成される天然ガスと水素の混合気の火炎を調査するため、燃焼器部品の一部をガラス円筒に置き換え



(a) 可視化燃焼器



(b) 天然ガス 80vol%-水素 20vol% (c) 天然ガス 5vol%-水素 95vol%

図3 可視化燃焼器と火炎の様子  
Fig. 3 Visualization combustor and flame behavior

た可視化燃焼器と高速度カメラを用いて撮影した火炎の様子を図3に示す。同図(b)のように天然ガスの割合が多いときは火炎が燃料ノズルから離れた場所で形成されるのに対し、同図(c)のように水素の割合が多いと燃料ノズルの直近で火炎が形成されるようになる。このような反応域の変化および局所的な火炎温度の上昇により、ガスタービン燃焼器条件における水素燃焼時には、NO<sub>x</sub>の発生量が天然ガスに比べて2から2.5倍近くになることから、その発生量抑制も大きな課題である。

## 3 水素焼きガスタービンの開発状況

ガスタービンで用いられる燃焼方式およびNO<sub>x</sub>抑制方式には、燃焼安定性に優れた拡散燃焼に水や蒸気を燃焼器内に噴射してNO<sub>x</sub>を抑制する「ウエット方式」と、空気と燃料の混合方法などを工夫することによりNO<sub>x</sub>を抑制する「ドライ低NO<sub>x</sub>方式」がある。

空気内に燃料ガスを送り込んで燃やす拡散燃焼では、燃焼器部品の高温化への対策により水素燃焼にも対応できる。当社は水素ガスタービン発電装置全体の技術の確立のためにこのウエット方式を採用した。

しかしながら、ウエット方式では、水や蒸気を供給する純水製造設備の導入が必要になるとともにランニングコストが増加する。このため、水素の燃焼特性に適合する新た



なドライ低NO<sub>x</sub>方式を採用した燃焼器についても研究開発を実施している。

(1) 水素ガスタービン発電技術の実証

新エネルギー・産業技術総合開発機構 NEDO助成事業「水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」において、当社は水素専焼／混焼ガスタービン開発を核とした水素コージェネレーションシステムを担当した<sup>1),2)</sup>。

本事業では、水素燃料対応燃焼器を搭載した当社製「M1A-17型ガスタービンエンジン」を装備する定格発電出力1 MW級の「PUC17型常用発電装置」を使用した。燃料ガスの組成変化に柔軟に対応し、水素ガス専焼（純水素100%）、都市ガス専焼、水素と都市ガスを任意の割合で混合した混合ガスによる混焼運転を可能としている。

神戸市のポートアイランドに設置した水素コージェネレーションシステム実証設備の全景を図4に示す。2017年12月の設備完成以降、ガスタービン発電装置単独での試運転や天然ガスによる運転試験を経たうえで、水素と天然ガスの混焼および水素専焼による熱電供給の実証試験を実施した。

2018年4月19日と20日に実施した実証試験において、流量約2,200Nm<sup>3</sup>/hの水素のみを燃料として、近隣の2施設に2,800kWの熱（蒸気）と4施設に1,100kWの電力を同時に供給し、市街地における水素ガス専焼のガスタービン発電による熱電供給を世界で初めて達成した。その際の運転監視装置のモニタ画像を図5に示す。また、水噴射により

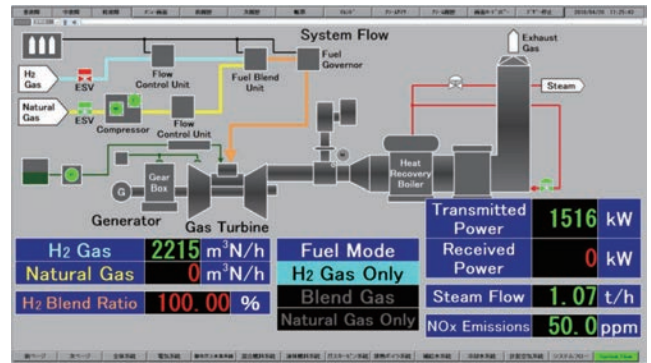


図5 運転監視装置（水素ガス専焼運転時）  
Fig. 5 Operation monitoring system (when operating on 100% hydrogen gas)

NO<sub>x</sub>値を50ppm（O<sub>2</sub>=16%換算）とし、国内の大気汚染防止用で定められているNO<sub>x</sub>規制値70ppm（O<sub>2</sub>=16%換算）を満足した。

(2) 水素専焼ドライ低NO<sub>x</sub>燃焼技術の開発

天然ガスでは、空気と天然ガスを予め混合してから燃焼させる希薄予混合燃焼によりドライ低NO<sub>x</sub>燃焼を達成している。一方、水素は反応性が高く逆火などの燃焼不安定が生じるため、ドライ低NO<sub>x</sub>燃焼は非常に難しい。

そこで、微小な水素火炎を用いた水素専焼ドライ低NO<sub>x</sub>燃焼方式であるマイクロミックス水素燃焼技術の産業用ガスタービンへの適用について研究してきた。図6に示すように、直径1 mm以下の微小な水素噴射孔から水素を噴射し、直行する空気噴流と急速に混合することで、燃焼安定に優れる微小な水素火炎を形成し、かつ反応時間を短くすることでNO<sub>x</sub>の発生を抑制している。

2 MW級ガスタービン用水素専焼ドライ低NO<sub>x</sub>燃焼器を図7に示す。水素バーナ部はリング形状としており、水素の焚き量（運転負荷）に応じて使用するリング数を変更する<sup>3),4)</sup>。これにより、エンジン起動時から低負荷時における高い燃焼効率と高負荷時の低NO<sub>x</sub>燃焼の両立を可能としている。



(a) 設備外観



(b) 「PUC17型常用発電装置」

図4 水素コージェネレーションシステム実証設備  
Fig. 4 Hydrogen gas turbine co-generation system demonstration plant

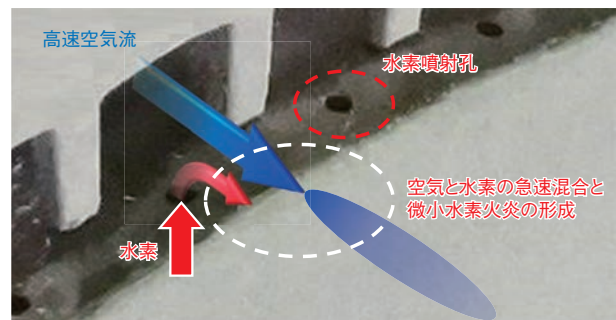


図6 マイクロミックス水素燃焼技術  
Fig. 6 Micro-mix hydrogen combustion technology

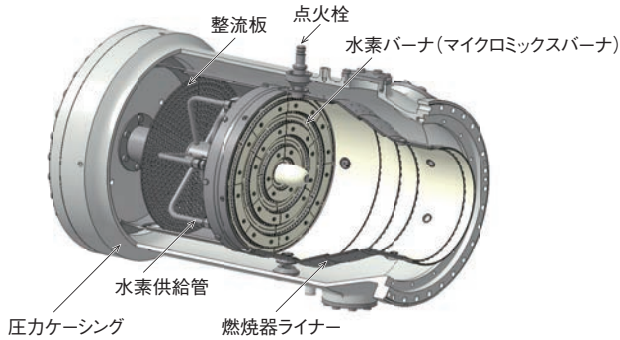
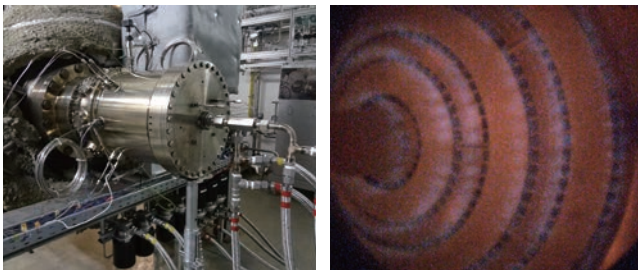


図7 2MW級ガスタービン用水素専焼ドライ低NOx燃焼器  
Fig.7 Hydrogen dry low NOx combustor for 2MW class gas turbine



(a) 試作燃焼器 (b) 定格条件相当時の燃焼器内部

図8 水素専焼燃焼器試験  
Fig.8 Tests of hydrogen combustor

試作燃焼器部品を用いて、着火・保炎性能や高負荷燃焼状態でのNOx性能などを取得した。ガスタービンと同様の高温・高圧環境を再現できる試験設備に搭載した試作燃焼器ならびに100%定格負荷相当時の燃焼器内部での水素火炎の様子をそれぞれ図8 (a), (b) に示す。

本試験により、安定した水素の燃焼を確認するとともに、50%負荷から定格100%負荷相当の範囲で、規制値の半分となるNOx値 35ppm (O<sub>2</sub>=16%換算) 以下を得た。

2020年5月より図4に示した水素コージェネレーションシステム実証設備にて、この燃焼器を実装したエンジン実証運転を開始し、水素専焼ドライ低NOx発電に世界で初めて成功した。

今後、この水素発電の安定運用・発電効率・環境負荷低減効果などの性能を検証を進めていく。

## あ と が き

水素サプライチェーン実現の一環として、水素燃焼技術の開発ならびに水素燃焼ガスタービンを開発している。これらの技術により水素を天然ガスと同様にガスタービンの燃料として使用することが可能となり、将来の低炭素社会および水素社会の実現に大きく貢献できるものと考えます。

本内容の一部は、NEDO助成事業「未利用褐炭由来水素大規模海上輸送サプライチェーン構築実証事業」、 「水素CGS活用スマートコミュニティ技術開発事業」およびNEDO委託事業「水素ガスタービン燃焼技術の研究開発」にてご支援を頂き、その成果を得たものであり、深く謝意を示す。

## 参 考 文 献

- 堀川敦史：川崎重工における水素焼きガスタービンの開発状況，火力原子力発電，Vol.70，No.757（2019）
- NEDOホームページ [https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5\\_100945.html](https://www.nedo.go.jp/news/press/AA5_100945.html)
- 特許 第6285081号，“ガスタービンエンジンの燃焼装置”
- A. Horikawa, K. Okada, M. Wirsum, H. Funke, K. Kusterer：“Application of Low NOx Micro-Mix Hydrogen Combustion to 2MW Class Industrial Gas Turbine Combustor”，IGTC2019 Tokyo（2019）



堀川 敦史



岡田 邦夫



足利 貢



山口 正人



堂浦 康司



明日 芳浩



# 水素社会の実現に向けた製品安全性評価の取組み

## Product Safety Assessment Initiatives for Achieving a Hydrogen-based Society



神戸 勝 啓①# Katsuhiro Kanbe  
 神谷 祥 二②\*\* Shoji Kamiya  
 小村 淳③ Atsushi Komura  
 石垣 寿 久④ Toshihisa Ishigaki

水素製品を安全に運用できるようにするために、水素サプライチェーンパイロットプロジェクトにおいて、水素挙動の特性把握試験や数値解析技術の適用を行っている。また、製品に内在する危険性を分析するリスクアセスメントおよび安全衛生や環境配慮を考慮したマネジメントシステムの運用を進めている。

In our hydrogen supply chain pilot project, for safer use of hydrogen products, we had many phenomenological experiments and numerical analysis based on risk assessments to clarify the hydrogen behavior. And we are also developing management systems for health, safety, and environment in our project.

### まえがき

水素社会の実現を支える水素サプライチェーンの構築に向けて、技術面に加え製品のライフサイクル全体における安全性に対する評価技術を確立するとともに、水素製品が安全に運用できることを広く社会に示す必要がある。

### 1 背景

クリーンなエネルギーとして利用されているLNGは、1950年代以降、輸送・貯蔵・利用に関するさまざまな技術開発が進展し、広く社会で活用されるようになった。

水素は、1970年代に当社が開発したJAXA（宇宙航空研究開発機構）種子島宇宙センターの液化水素タンクのような特殊用途への適用以降、燃料電池自動車向けの水素ステーションの運用が広まるなど、本格的な水素活用に向けた動きが活発化しつつある。

水素を安全に取り扱うためには、実験を通して得られる現象論や数値解析を用いた各種検討および適切な安全性評価を経た開発と検証といった包括的な取組みが必要である。さらに、初期の構想段階から運用にわたるすべての製品ライフサイクルにおいて、製品を提供する企業として組織的な安全活動を推進する必要がある。

### 2 水素とは<sup>1)</sup>

#### (1) 水素の特性

水素の物性値をLNGの主成分であるメタンと対比して

表1に示す。輸送効率向上のために水素を液化するが、液化水素の沸点はLNGより約90℃低く、体積当たりの潜熱が小さいため、LNGより高度な断熱技術が必要となる。ガス化した水素はメタンに比べ着火しやすく、また着火した後の燃焼速度も非常に速いため、漏洩防止だけでなく着火防止に対する配慮も必要となる。したがって、水素ガスを漏洩させないこと、燃焼範囲内の可燃性雰囲気を作らないこと、着火源を排除するといった基本対策が重要となる。

#### (2) 水素事業に適用される法規・ガイドライン

陸上の設備は建設場所の国内法に従って建造される。水素供給設備に適用される高圧ガス保安法などがそれに該当し、陸上設備についての法規整備が進んでいる。

一方で液化水素運搬船は、船籍国および寄港国の法規とともに国際海事機関（IMO）で定められた国際条約に適合する必要がある。しかし、液化ガスばら積み輸送に対する現行規則のIGCコードでは液化水素に適合する規定は存在していない。このため、2013年に国土交通省が国内有識者によるワーキンググループを設立して安全基準の検討を

表1 液化水素とLNGの物性比較

Table 1 Physical properties between liquefied hydrogen and LNG

物性	水素	LNG (メタン)
沸点 [°C]	-252.85	-161.45
ガス密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	0.0899	0.717
液密度 [kg/m <sup>3</sup> ]	70.8	422.4
潜熱 [kJ/L]	31.4	246
燃焼濃度 (空気中) [vol%]	4-75	5-15
最小着火エネルギー [10 <sup>3</sup> J]	1.6	28

表2 参考規格およびガイドライン  
Table 2 Standards and guide lines for hydrogen safety

適用	参考規格・ガイドライン
液化水素運搬船全般	日本海事協会、液化水素運搬船ガイドライン (2017)
水素安全	ISO/TR 15916 : Basic considerations for the safety of hydrogen system (2016)
水素安全	AIAA G-095 : Guide to Safety and Hydrogen and Hydrogen Systems (2014)
水素設備	NFPA 2 : Hydrogen Technologies Code (2016)

開始し、IMOへの日本提案を経て2016年に液化水素の輸送を対象としたIMO暫定勧告が採択された<sup>2)</sup>。この暫定勧告では、リスク評価による安全対策の検討が要求されており、当社の設計するパイロット船の基本設計について実施した結果はIMOから公開されている<sup>3)</sup>。その後、暫定勧告に対応する液化水素運搬船のガイドラインが日本海事協会から制定されるなど、安全基準の整備が進みつつある。主要な参考規格・ガイドラインを表2に示す。

### 3 安全性を確保するために

システムの複雑化が加速している現在、過去の経験や設計実績あるいは既存の法規に適合することだけでは製品の安全性を確保することが困難になってきている。

欧米を中心とするエネルギー・化学プラント業界では、法規や業界基準に適合することに加え、それらを上回る自主基準を設定するとともに、製造者または運用者が自主的に行うリスクアセスメントに基づく製品開発を行う仕組みが定着している。また国内の法規においても、クリアすべき具体的な数値を示す仕様規定の考え方から、達成すべき性能のみを規定して実現手法は製造者に任せる性能規定の考えが広まっており、説明責任を果たすための手段としてリスクアセスメントは有効な手段となる。リスクアセスメントは、システムに内在するリスクを抽出・評価し、結果に応じて適切な対策を立案するための一連の手続きを指す。

安全性が確保された水素製品を提供するためには、技術面では適切なリスクアセスメント結果に基づく設計を行う必要があり、それを支える挙動確認試験や検証された手法による数値解析技術の適用が求められる。また実体制面では組織として労働安全衛生や環境配慮の考えを統合した取組みが必要となる。

### 4 取組事例

リスクアセスメントの実施に当たり、最も重要なポイントの1つはリスクの抽出漏れを無くすことである。リスクアセスメントには複数の手法があるが、それぞれの特徴を踏まえて適用している。水素サプライチェーンパイロットプロジェクトで採用している主要な評価手法を表3に示す。

表3 採用した主要なリスクアセスメント手法  
Table 3 Risk assessment methods in our pilot project

評価手法	特徴
HAZID (Hazard Identification)	対象に内在する重大ハザードを包括的に評価
HAZOP (Hazard and Operability Studies)	配管系統図を用い、運用に潜在するハザードを抽出
FMEA (Failure Modes and Effects Analysis)	機器の故障とその影響および検出方法を評価
Bowtie Analysis	想定事象を中心に原因と結果および安全対策を評価

多様な視点から対象を捉えるため社外の有識者に参加いただくとともに、液化水素運搬船と荷役基地の設計者が互いのアセスメントに参加することでインターフェース部分の検討漏れを無くすようにした。本プロジェクトに対して社外で実施された主要な安全審査の状況を表4に、アセスメント手法であるHAZOPスタディの様子を図1に示す。

#### (1) 水素挙動確認試験

事故に起因して生じるさまざまな水素の挙動を把握するため、外部機関と連携して各種の試験を実施している。2013年に実施した液化水素とLNGの蒸発・拡散試験の結果を図2に示す。ここでは、約0.9mの高さから約6リットルの液化水素とLNGをステンレス鋼材の上に放出した後蒸発・拡散する現象について、漏洩速度や漏洩面の材

表4 パイロット実証に対する主要な安全審査状況  
Table 4 Safety review in our pilot project

名称	対象	実施年	社外有識者
ばら積み液体危険物運送要件検討WG	液化水素運搬船	2013年～2019年	東京大学、海洋技術安全研究所、国土交通省ほか
海上防災委員会	神戸荷役基地、液化水素運搬船	～2019年	東京大学、海上保安大学校、国土交通省、海上災害防止センターほか
航行安全委員会	神戸荷役基地、液化水素運搬船	2018年	東京海洋大学、神戸大学、総務省、国土交通省、日本海洋科学ほか



図1 HAZOPスタディの様子  
Fig. 1 HAZOP study meeting



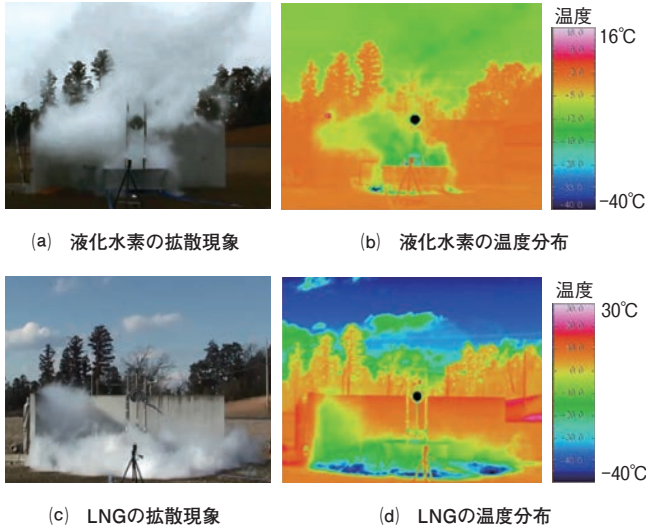


図2 蒸発・拡散試験  
Fig.2 Dispersion tests

質による影響を評価した。蒸発の過程でそれぞれの低温流体は周囲の空気を冷却して蒸気雲を形成しているが、その上昇速度は水素ガスの方が早く、水平方向の拡散範囲も小さくなっている様子を確認した。またLNGは地表部分に低温状態の気体が存在しているが、水素漏洩時にはそれがないことを温度分布から確認した。

(2) 数値解析による分析

(i) 水素漏洩解析

機器が搭載できる空間や環境に制約のある船上では、一部の水素貨物配管や貨物機器を閉囲区画に配置せざるを得ない状況がある。このような状況では、万一水素漏洩事象が発生した際に、速やかな漏洩検知と漏洩気体の排気を可能とする閉囲区画内の換気流れを形成する必要がある。

そこで、想定される漏洩シナリオに基づいて漏洩部位やそれに対応する物性値・漏洩面積・方向などの漏洩条件を設定した後、CFD解析を活用した閉囲区画換気の設計を行っている。貨物機器室の常温空気の流れ場解析と極低温の水素ガスが5mm<sup>2</sup>の微小孔から漏洩した場合の挙動解析例をそれぞれ図3、図4に示す。図3に示す線色は吸気口から取り込まれた空気が排気口から排出されるまでの時間を示しており、吸気口から取り入れられた空気がよどみなく排出されている。また、図4では様子や配管接続部から漏洩した水素（水色部分）が速やかに排気口に到達している様子が確認できる。

(ii) 液化水素貯蔵タンクの急減圧時の挙動分析

液化水素貯蔵タンクは最新の断熱技術を採用して設計しているが、運用中のタンクへの入熱による液化水素のガス化を完全に避けることはできない。入熱によるガス化でタンク内圧は上昇するが、荷役基地の液化水素タンクはボイロフガスを排気設備から放出することで内圧が一定値以

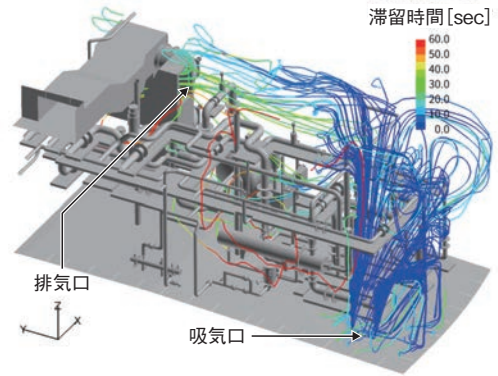


図3 貨物機器室における換気の流れ場解析  
Fig.3 Ventilation flow analysis for cargo machinery room

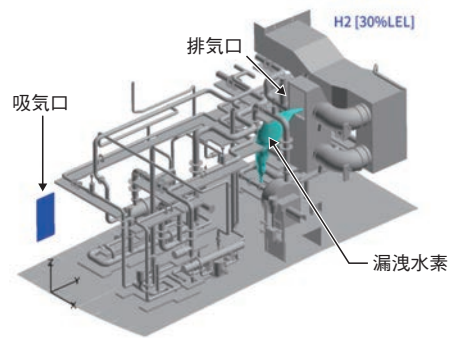


図4 貨物機器室における水素の漏洩挙動解析  
Fig.4 Hydrogen leaking behavior analysis for cargo machinery room

上に上がらないようにしている。一方パイロットプロジェクトの液化水素運搬船は、航海中にはボイロフガスを排出せず、圧力上昇を許容する蓄圧式タンクを採用している。そのため、航海後に荷役操作を行う前には加圧状態にあるタンク圧力を常圧まで下げる必要がある。このとき、急激な減圧操作を行うと気液の熱的平衡状態が崩れ加熱液状態が発生するため、液化水素が急激にガス化する事象が発生する可能性がある。

このような複雑なタンク内の水素挙動を把握するため東京大学とともに、宇宙航空研究開発機構（JAXA）の容積30m<sup>3</sup>の円筒型液化水素実験タンクを対象としたタンク内圧力急減圧試験とその現象解析を実施して、タンク内の圧力や温度変化の検証および液相部分からガスが生成される様子の分析を進めている<sup>4)</sup>。試験対象のタンクと急減圧時のタンク内の圧力変化の実験および解析例をそれぞれ図5、図6に示す。これらの結果から減圧操作後にタンク内圧力が下降した後圧力上昇する現象が確認できたが、ここでの操作ではその変化は比較的穏やかであることがわかった。この圧力変化は液相内に発生する気相の挙動に深く関連するため、同図に示すような泡の発生モデルの高度化に取り組んでいる。ここで得られた成果は、実証の運用方法に反映していく予定である。



図5 解析対象とした液化水素タンク (JAXA)  
Fig. 5 Liquefied hydrogen storage tank (JAXA)

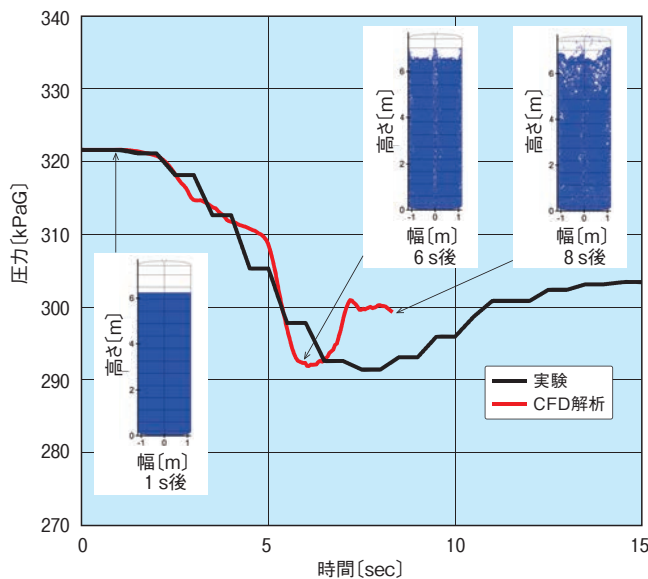


図6 急減圧時のタンク内圧力変化の実験、解析  
Fig. 6 Pressure behavior in the tank by rapid pressure releasing

### (3) HSEマネジメントシステム

海外のエネルギー・化学プラント業界では、労働安全衛生や環境配慮の考えを統合したHSE (Health, Safety and Environment) と呼ばれる体系的なマネジメントシステムに基づいて製品開発を行うことが標準となってきた。HSEでは、製造者の自主的なリスクアセスメントの実施とそれを効果的に運用するためのマネジメント体系の構築が求められている。HSEを適用する業界は増えており、発注時の仕様でその適用が求められるなど、HSEに基づくマネジメントはグローバル標準となってきた。

日豪パイロットプロジェクトを推進している技術研究組合CO<sub>2</sub>フリー水素サプライチェーン推進機構HySTRAは、その設立に際してHSEの概念に保安 (Security) の視点を加えたHSSE方針 (Policy on Health, Safety, Security and Environment) を掲げている。当社はこのポリシーに

基づき、液化水素運搬船と液化水素用タンクを設計製造する当社の神戸工場と播磨工場を対象に、その活動を具体的に記したHSSEプランを作成して、PDCAサイクルに基づく運用を実施中である。

また本プロジェクトで運用しているプランをベースに、水素以外のプロジェクトでも適用可能なHSEプランとそのマネジメントシステムの構築を進めている。ここでは共通部分と対象プロジェクト固有の部分を分けることで汎用性と拡張の柔軟性を持たせた標準体系を目指しており、実プロジェクトへの適用結果を踏まえながら、継続的改善を進めていくこととしている。

### あ と が き

2020年には神戸荷役基地や液化水素運搬船および豪州荷役基地の実証が順次実施される予定であり、すべての試験を無事故・無災害で終わるために、対応を進めている。

最後に、本プロジェクトの安全性評価の取組みに多大な貢献をいただいたシェルジャパン(株)のテクニカルチームに感謝の意を示す。

### 参 考 文 献

- 1) S. Unno, Y. Takaoka, S. Kamiya, A study on dispersion resulting from liquefied hydrogen spilling, IHCS 2015
- 2) IMO MSC.420 (97), Interim recommendations for carriage of liquefied hydrogen in bulk
- 3) IMO CCC3/INF.20, Safety requirements for carriage of liquefied hydrogen in bulk
- 4) K. Tani, T. Himeno et.al, Prediction of pressure reduction rate in 30m3 liquid hydrogen tank based on experimental and numerical analysis, IHCS 2019



神戸 勝啓



神谷 祥二



小村 淳



石垣 寿久



特許 第6405420号

発明の名称：液化ガス保持タンクおよび液化ガス運搬船

発明者：浦口 良介, 孝岡 祐吉, 本井 達哉, 村岸 治

—安全運航を可能とする貨物タンクシステム—

当社が建造を進めている図1に示す液化水素運搬船は、真空防熱式の貨物タンクを採用し、液化水素を極低温に保持することで大量の輸送を可能としている。このタンクは内槽と外槽の二重構造となっており、その間を真空槽とすることで防熱性能を高めている。真空槽の真空度が劣化して防熱性能が低下すると、タンク内の温度が上昇して液化水素の蒸発によるタンク内圧の上昇が起こる。このため、安全運航の観点から、液化水素運搬船には運航中に真空度やタンク内圧を適切に管理すること



図1 液化水素運搬船「すいそ ふろんていあ」

が求められる。

本発明は、この液化水素運搬船の貨物タンクの真空防熱性能劣化監視システム（VIPDM: Vacuum Insulation Performance Deterioration Monitoring system）に関するものである。

本発明は、図2に示すように運航中の真空槽の真空度を真空計で監視して、検知された真空度劣化の予兆を早期に乗組員に通知するシステムを備えている。さらに、気化ガス燃焼ユニットを備えており、液化水素が気化してタンク内圧が一定以上となった場合に、タンク内の水素を取り出して燃焼させることでタンク内圧を制御する。これらのシステムにより、当社の液化水素運搬船は、貨物タンクの真空度や内圧を適切に管理することで安全運航を可能としている。

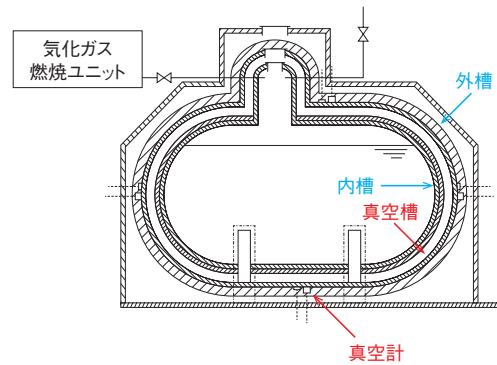


図2 真空二重タンク

特許 第5824229号

発明の名称：液化システム

発明者：石丸 英嗣, 小宮 俊博, 森 芳信, 山下 誠二, 仮屋 大祐

—水素の大量輸送を支える—

当社は、海外から水素を大量輸送するために液化する水素液化機の実証を進めている。水素液化機では、原料となる水素ガスを窒素と水素で冷却することで、水素ガスを液化する。

水素液化機は冷却用の水素を循環させており、この冷却用の水素を液化温度付近まで下げるために図1に示す膨張タービンを

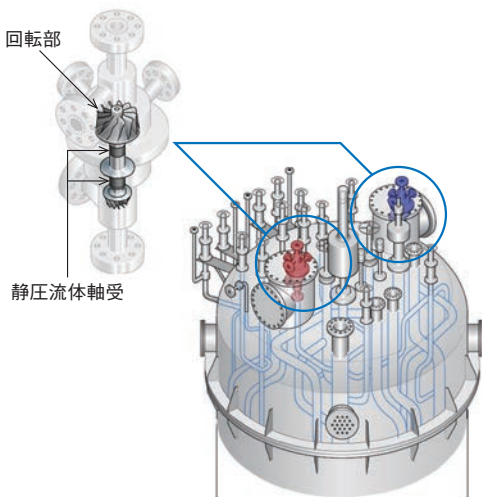


図1 膨張タービン

を設けている。この膨張タービンは、水素ガスで回転軸を浮上させる静圧気体軸受を採用しており、冷却用水素を高純度に保つことができる。

本発明は、図2に示すように、原料となる水素ラインから静圧気体軸受に水素ガスを供給するシステム構成としている。このような構成とすることで、静圧気体軸受に供給する水素ガス専用の圧縮機が不用となる。また、冷却用の水素ライン圧力に関係なく所定圧以上の水素ガスを安定的に静圧気体軸受に供給することができる。これにより、膨張タービンの回転軸を安定的に支持することができ、水素ガスを安定して液化することができる。

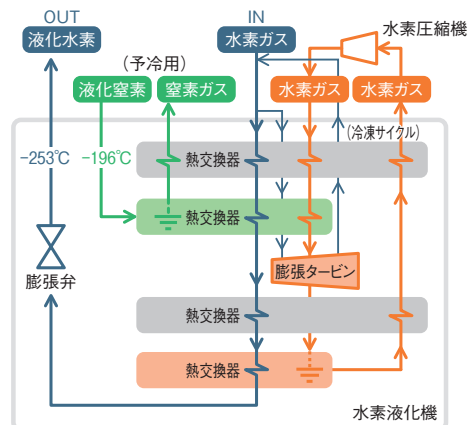


図2 水素液化システムの概略

## 事業セグメント別主要製品／生産拠点

事業セグメント	主要製品	主要製品拠点
船舶海洋	・LNG 運搬船, LPG 運搬船, 油槽船, ばら積み船, コンテナ船, 自動車運搬船, 超高速船, 艦艇, 官公庁船	神戸工場 坂出工場 Kawasaki Subsea (UK) Limited (イギリス) 南通中遠海運川崎船舶工程有限公司 (中国)* 大連中遠海運川崎船舶工程有限公司 (中国)*
車 両	・鉄道車両, 新交通システム, 貨車	兵庫工場 播磨工場 Kawasaki Motors Manufacturing Corp., U.S.A. (アメリカ) Kawasaki Rail Car, Inc. (アメリカ)
	・ロータリー除雪車, 凍結防止剤散布車 ・軌道モーターカー, 重量物運搬車	(株)NICHIGO・曙工場 (株)NICHIGO・稲穂工場
航空宇宙システム	・航空機 (固定翼機, ヘリコプター), 誘導機器, 電子機器, 宇宙関連機器, シミュレータ	岐阜工場 名古屋第一工場 名古屋第二工場 Kawasaki Motors Manufacturing Corp., U.S.A. (アメリカ)
	・航空機部分品, 標的システム, ロケット部分品, 宇宙機器, 航空機整備・改造	日本飛行機(株)・横浜工場 日本飛行機(株)・厚木工場
	・航空機用エンジン, 航空機ギアボックス	明石工場 西神工場
エネルギー・環境プラント	・各種産業用プラント (セメント, 化学, 搬送プラント) ・各種陸船用ボイラ (発電事業用ボイラ, 産業用ボイラなど) ・ごみ処理設備 ・各種低温貯蔵設備 (LNG タンク) ・シールド掘進機, トンネル掘削機	播磨工場 安徽海螺川崎節能設備製造有限公司 (中国)* 安徽海螺川崎裝備製造有限公司 (中国)* 上海海螺川崎節能環保工程有限公司 (中国)*
	・船用ガスタービンエンジン ・ガスタービン発電設備, コージェネレーションシステム	明石工場 西神工場
	・蒸気タービン, ディーゼル機関, ガスエンジン, 大型減速装置 ・船用推進装置 (サイドスラスト, 旋回式スラストなど) ・各種空力機械 (天然ガス圧送設備, 送風機など)	神戸工場 播磨工場 武漢川崎船用機械有限公司 (中国)
	・空調機器, 汎用ボイラ	川重冷熱工業(株)・滋賀工場
	・破砕機, 環境関連機器	(株)アーステクニカ・八千代工場
	・モーターサイクル, ATV (四輪バギー車), レクリエーションユティリティビークル, 多用途四輪車, パーソナルウォータークラフト「ジェットスキー®」 ・汎用ガソリンエンジン	明石工場 加古川工場 Kawasaki Motors Manufacturing Corp., U.S.A. (アメリカ) Kawasaki Motores do Brasil Ltda. (ブラジル) India Kawasaki Motors Pvt. Ltd. (インド) Kawasaki Motors Enterprise (Thailand) Co., Ltd. (タイ) P.T. Kawasaki Motor Indonesia (インドネシア) Kawasaki Motors (Phils.) Corporation (フィリピン) 常州川崎光陽発動機有限公司 (中国)* Kawasaki Motores de Mexico S.A. de C.V. (メキシコ) Bimota S.p.A. (イタリア)*
精密機械・ロボット	・建設機械用油圧機器, 産業機械用油圧機器・装置 ・船用舵取機, 船用各種甲板機械 ・産業用ロボット ・医薬・医療ロボット	明石工場 西神戸工場 Kawasaki Precision Machinery (U.K.) Ltd. (イギリス) Kawasaki Precision Machinery (U.S.A.), Inc. (アメリカ) Wipro Kawasaki Precision Machinery Private Limited (インド) 川崎精密機械(蘇州)有限公司 (中国) 川崎春暉精密機械(浙江)有限公司 (中国) 川崎(重慶)機器人工程有限公司 (中国) Flutek, Ltd. (韓国)
	・油圧プレス	川崎油工(株)



- 「duAro」, 「duAro」 ロゴ, 「Successor」, 「VIPDM」 は、川崎重工業株式会社の登録商標です。

**duAro**

- 「HEA」 ロゴは、Hydrogen Engineering Australia Pty Ltdの登録商標です。



- 本誌に記載されている社名、商品名、サービス名などは、それぞれ各社が商標として使用している場合があります。

## 川崎重工技報 第182号

2020年9月1日

<b>編集・発行</b>	兵庫県明石市川崎町1番1号 川崎重工業株式会社 技術開発本部
<b>発行責任者</b>	技術開発本部長 中谷 浩
<b>発行人</b>	技術開発本部 技術企画推進センター長 占部 博信
<b>印刷</b>	広島県広島市中区中島町9番6号 株式会社 秀巧堂クリエイト

禁無断転載

## 事業所・生産拠点・研究開発拠点

### 東京本社

〒105-8315 東京都港区海岸1丁目14番5号  
Tel. 03-3435-2111 / Fax. 03-3436-3037

### 神戸本社

〒650-8680 兵庫県神戸市中央区東川崎町1丁目1番3号  
(神戸クリスタルタワー)  
Tel. 078-371-9530 / Fax. 078-371-9568

### 技術開発本部

〒673-8666 兵庫県明石市川崎町1番1号(明石工場内)  
Tel. 078-921-1611 / Fax. 078-921-1867

### 北海道支社

〒060-0005 北海道札幌市中央区北5条西2丁目5番  
(JRタワーオフィスプラザさっぽろ14階)  
Tel. 011-281-3500 / Fax. 011-281-3507

### 東北支社

〒980-0021 宮城県仙台市青葉区中央1丁目6番35号(東京建物仙台ビル16階)  
Tel. 022-261-3611 / Fax. 022-265-2736

### 中部支社

〒450-6041 愛知県名古屋市中村区名駅1丁目1番4号  
(JRセントラルタワーズ41階)  
Tel. 052-388-2211 / Fax. 052-388-2210

### 関西支社

〒530-0057 大阪府大阪市北区曾根崎2丁目12番7号(清和梅田ビル16F)  
Tel. 06-6484-9310 / Fax. 06-6484-9330

### 中国支社

〒730-0013 広島県広島市中区八丁堀14番4号(JEI広島八丁堀ビル6階)  
Tel. 082-222-3668 / Fax. 082-222-2229

### 九州支社

〒812-0011 福岡県福岡市博多区博多駅前1丁目4番1号  
(博多駅前第一生命ビル)  
Tel. 092-432-9550 / Fax. 092-432-9566

### 沖縄支社

〒900-0015 沖縄県那覇市久茂地3丁目21番1号(國場ビル)  
Tel. 098-867-0252 / Fax. 098-864-2606

### 岐阜工場

〒504-8710 岐阜県各務原市川崎町1番地  
Tel. 058-382-5712 / Fax. 058-382-2981

### 名古屋第一工場

〒498-0066 愛知県弥富市楠3丁目20番地3  
Tel. 0567-68-5117 / Fax. 0567-68-5161

### 名古屋第二工場

〒490-1445 愛知県海部郡飛鳥村金岡7番地4  
Tel. 0567-68-5117 / Fax. 0567-68-5161

### 神戸工場

〒650-8670 兵庫県神戸市中央区東川崎町3丁目1番1号  
Tel. 078-682-5001 / Fax. 078-682-5503

### 兵庫工場

〒652-0884 兵庫県神戸市兵庫区和田山通2丁目1番18号  
Tel. 078-682-3111 / Fax. 078-671-5784

### 西神工場

〒651-2271 兵庫県神戸市西区高塚台2丁目8番1号  
Tel. 078-992-1911 / Fax. 078-992-1910

### 西神戸工場

〒651-2239 兵庫県神戸市西区榎谷町松本234番地  
Tel. 078-991-1133 / Fax. 078-991-3186

### 明石工場

〒673-8666 兵庫県明石市川崎町1番1号  
Tel. 078-921-1301 / Fax. 078-924-8654

### 加古川工場

〒675-0112 兵庫県加古川市平岡町山之上新原170番地  
Tel. 079-427-0292 / Fax. 079-427-0556

### 播磨工場

〒675-0180 兵庫県加古郡播磨町新島8番地  
Tel. 079-435-2131 / Fax. 079-435-2132

### 坂出工場

〒762-8507 香川県坂出市川崎町1番地  
Tel. 0877-46-1111 / Fax. 0877-46-7006

## 海外事務所

### 台北事務所

15F, Fu-key Bldg., 99 Jen-Ai Road, Section 2, Taipei, Taiwan  
Tel. +886-2-2322-1752 / Fax. +886-2-2322-5009

## 現地法人事務所

### Kawasaki Heavy Industries (U.S.A.), Inc.

60 East 42nd Street, Suite 2501, New York, NY 10165 U.S.A  
Tel. +1-917-475-1195 / Fax. +1-917-475-1392

### Kawasaki do Brasil Indústria e Comércio Ltda.

Avenida Paulista, 542-6 Andar, Bela Vista, 01310-000, São Paulo, S.P., Brazil  
Tel. +55-11-3289-2388 / Fax. +55-11-3289-2788

### Kawasaki Trading do Brasil Ltda.

Avenida Paulista, 542-6 Andar, Cj. 61D, Bela Vista, 01310-000, São Paulo, S.P., Brazil  
Tel. +55-11-3266-2790 / Fax. +55-11-3266-2853

### Kawasaki Heavy Industries (U.K.) Ltd.

Office 106, New Broad Street House  
35 New Broad Street, London EC2M 1NH, United Kingdom  
Tel. +44-20-7417-1750

### Kawasaki Heavy Industries Middle East FZE

Dubai Airport Free Zone, Bldg. W6, Block-A, Office No.709,  
P.O. Box 54878, Dubai, UAE  
Tel. +971-4-214-6730 / Fax. +971-4-214-6729

### Kawasaki Heavy Industries (India) Pvt. Ltd.

Room No: 1777, ITC Maurya, Sardar Patel Marg, Diplomatic Enclave,  
New Delhi - 110021, India  
Tel. +91-11-4358-3531 / Fax. +91-11-4358-3532

### Kawasaki Heavy Industries (Singapore) Pte. Ltd.

6 Battery Road, #23-01, 049909 Singapore  
Tel. +65-6225-5133 / Fax. +65-6224-9029

### Kawasaki Trading (Thailand) Co., Ltd.

12Ath Floor, Unit B, Kamolsukosol BLDG, 317 Silom Road,  
Bangrak, Bangkok 10500, Thailand  
Tel. +66-0-2631-1151 / Fax. +66-0-2234-4756

### Kawasaki Heavy Industries Management (Shanghai), Ltd.

10F, Chong Hing Finance Center, 288 Nanjing Road West,  
Huangpu District, Shanghai 200003 China  
Tel. +86-21-3366-3100 / Fax. +86-21-3366-3108

### Kawasaki Trading (Shanghai) Co., Ltd.

10F, Chong Hing Finance Center 288 Nanjing Road West,  
Huangpu District, Shanghai 200003, People's Republic of China  
Tel. +86-21-3366-3700 / Fax. +86-21-3366-3701

### KHI (Dalian) Computer Technology Co., Ltd.

Room 205, International Software Service Center, Dalian Software Park, 18  
Software Park Road, Dalian, China  
Tel. +86-411-8474-8270 / Fax. +86-411-8474-8275

### Hydrogen Engineering Australia Pty Ltd

Level 6, Suite 6.09, 2 Queen Street, Melbourne, VIC 3000, Australia  
Tel. +61-404-809-288

### Kawasaki Heavy Industries Russia LLC

Office 1803 (18th Floor), Entrance 3, Krasnopresnenskaya nab. 12, 123610,  
Moscow, Russian Federation  
Tel. +7-495-258-2115 / Fax. +7-495-258-2116

### Kawasaki Heavy Industries (Thailand) Co., Ltd.

28th Floor, Sathorn Square Office Tower 98 North Sathorn Road, Silom,  
Bangrak, Bangkok 10500, Thailand  
Tel. +66-2-163-2839 / Fax. +66-2-163-2841



