

第2回液化水素技術国際ワークショップ

(The 2nd International Workshop
on Liquefied Hydrogen Technology)

報 告 書

2018年10月

一般財団法人日本船舶技術研究協会

目次

1	はじめに	1
2	プログラム	2
3	開会挨拶	6
4	基調講演(国内外の液化水素に関するプロジェクト・技術動向)	8
5	セッション 世界の R&D(液化水素関連技術の開発状況)	14
6	セッション 液化水素の海上輸送	18
7	閉会挨拶	22

1 はじめに

将来の大規模水素利用社会を実現するためには、効率的な水素の製造、輸送・貯蔵、利用に係る技術の確立が望まれ、液化水素はそのための重要な輸送・貯蔵技術の一つとして期待されている。

液化水素技術における産学連携の強化と研究開発加速のために、2015年3月に「液化水素技術国際ワークショップ」を開催し、研究者・技術者の技術交流を実施した。その後、液化水素サプライチェーンの実証が開始され、また昨年末に日本政府から発表された「水素基本戦略」でも水素の低コスト化と国際水素サプライチェーンの確立が謳われるなど、大規模水素利用社会の実現に向けた取り組みが加速している。

このような中、改めて国内外の主要な企業や研究者の方々を招き、「第2回液化水素技術国際ワークショップ」を開催した。液化水素分野に関して包括的に議論や意見交換を行う機会となり、多くの知見と最新情報を関係者間で共有する場になった。

ワークショップの詳細

名称:	第2回液化水素技術国際ワークショップ (The 2 nd International Workshop on Liquefied Hydrogen Technology)
日時:	2018年10月24日(水) 9:30~17:00
場所:	ホテルクラウンパレス神戸
主催:	一般財団法人 日本船舶技術研究協会
共催:	国立研究開発法人 科学技術振興機構

2 プログラム

開会挨拶	
9:30 -9:45	<p>戦略的イノベーション創造プログラム(エネルギーキャリア) サブ・プログラムディレクター 塩沢 文朗</p> <p>『水素スマートシティ神戸構想』 神戸市副市長 岡口 憲義</p>
Keynote (国内外の液化水素に関するプロジェクト・技術動向)	
9:50 -10:15	<p>『水素市場の拡大』 Hydrogen Council 株式会社本田技術研究所 四輪 R&D センター 主任研究員 小谷 保紀 (講演代理:三宅 葵)</p>
10:15 -10:40	<p>『日本の水素戦略と NEDO の関連事業の紹介』 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) 次世代電池・水素部 燃料電池・水素グループ 主任研究員 横本 克巳</p>
10:40 -11:05	<p>『米国の液化水素の動向』 ゼロ・カーボン・エナジー・ソリューションズ 代表取締役社長 Jay Keller (米国サンディア国立研究所 前水素調査開発部長)</p>
11:05 -11:30	<p>『水素経済に向けたトレンドと動向 - ヨーロッパとノルウェーの可能性と展望』 ノルウェー産業科学技術研究所(SINTEF) マーケティング副部長 Steffen Møller-Holst (ノルウェー水素フォーラム水素協議会議長)</p>
11:30 -11:55	<p>『中国の液化水素活用の進捗状況』 北京航天試験技術研究所 常務副所長 Sifeng Yang (講演代理: Yaozhong Zhao)</p>
Lunch Break (11:55-13:30)	
Session on R&D in the world (液化水素関連技術の開発状況)	
13:30 -13:55	<p>水素エネルギー - エネルギー革新の中心』 エア・リキード 水素エネルギービジネスユニット 部長 Jean-Claude Joyeux</p>
13:55 -14:20	<p>『水素エネルギー社会の実現 - 液化水素における岩谷産業の取り組み』 岩谷産業株式会社 技術・エンジニアリング本部 プロジェクト部 部長 中島 康広</p>
14:20 -14:45	<p>『大規模水素液化技術 - 水素モビリティの可能性』 リンデ・クライオテクニク プロセスエンジニアリング Umberto Cardella</p>
Coffee Break (14:45-15:15)	
Session on marine transportation of liquefied hydrogen (液化水素の海上輸送)	
15:15 -15:40	<p>『国際液化水素サプライチェーン』 技術研究組合 CO₂フリー水素サプライチェーン推進機構(HySTRA) 事務局長 (兼)技術開発部長 西村 元彦</p>
15:40 -16:05	<p>『液化水素の海上輸送に係る国際基準について』 国土交通省 海事局 検査測度課 危険物輸送対策室長 臼井 謙彰</p>
16:05 -16:30	<p>『液化水素船舶輸送用アームの開発』 川崎重工業株式会社 技術開発本部 技術研究所 環境システム研究部 研究一課 課長 猪股 昭彦</p>
16:30 -16:55	<p>『液化水素タンカー運航における安全性評価』 株式会社日本海洋科学, コンサルタントグループ 主任コンサルタント 青山 憲之</p>
閉会挨拶	
16:55 -17:00	<p>一般財団法人日本船舶技術研究協会 理事長 神林 伸光</p>



会場写真①: 開会挨拶『戦略的イノベーション創造プログラム(エネルギーキャリア)』
SIPプログラムディレクター 塩沢 文朗



会場写真②: 開会挨拶『水素スマートシティ神戸構想』
神戸市 副市長 岡口 憲義



会場写真③

講演者



戦略的イノベーション創造プログラム
塩沢 文朗



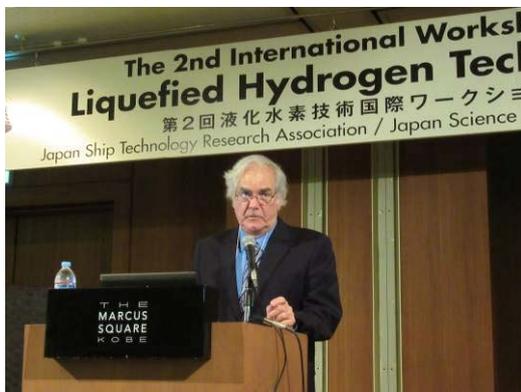
神戸市副市長
岡口 憲義



Hydrogen Council
三宅 葵



NEDO
横本 克巳



ゼロ・カーボン・エネルギー・ソリューションズ
Jay Keller



SINTEF
Steffen Møller-Holst



北京航天試験技術研究所
Yaozhong Zhao



エア・リキード
Jean-Claude Joyeux



岩谷産業(株)
中島 康広



リンデ・クライオテクニク
Umberto Cardella



HySTRA
西村 元彦



国土交通省
臼井 謙彰



川崎重工業(株)
猪股 昭彦



(株)日本海洋科学
青山 憲之



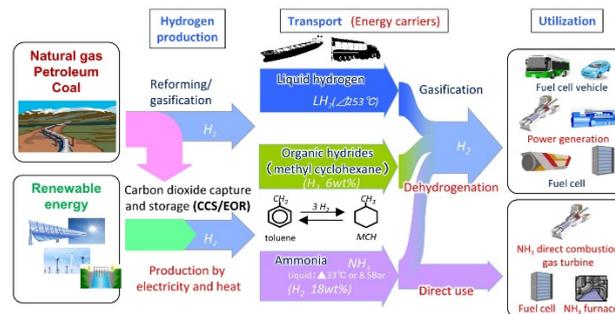
(一財)日本船舶技術研究協会
神林 伸光

3 開会挨拶

3-1 『戦略的イノベーション創造プログラム(エネルギーキャリア)』

戦略的イノベーション創造プログラム(エネルギーキャリア) サブ・プログラムディレクター
塩沢 文朗

- ・ 安倍首相は気候変動枠組条約第 21 回締約国会議(COP21)において、CO₂フリー社会に向けた水素の製造・貯蔵・輸送技術を重要技術として取り上げた。さらに日本は、2017 年 12 月には世界最初の「水素基本戦略」を発表した。この 7 月に改訂された「エネルギー基本計画」でも水素基本戦略を踏まえ、水素の輸送と水素発電・水素の産業利用に言及している。
- ・ 「総合科学技術・イノベーション会議」が立ち上げた「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)」では、重要技術 10 テーマを選定しているが、そのうちの 하나가「エネルギーキャリア」であり、水素関連技術開発全体をカバーしている。基本方針として、「CO₂フリー水素チェーン」の構築を目指している。CO₂フリー水素チェーンでは、海外で褐炭や天然ガスなど化石燃料を原料として、CCS(二酸化炭素貯留)を適用して CO₂フリー水素としたり、再生可能エネルギーで水素を製造する。日本への輸送には、液化水素、有機ハイドライド、アンモニアを活用する。アンモニアの場合は、直接燃焼やアンモニア FC での直接利用を想定している。



日本の「CO₂フリー水素チェーン」の構築

- ・ テーマの一つが液化水素運搬船への積み込みや積降ろし用のローディングアームの開発である。水素ローディングアームは、液化天然ガス(LNG)ローディングアームの技術を活用し、さらに低温である液化水素での取り扱いを安全に行えるように工夫している。この開発は一般財団法人日本船舶技術研究協会を中心に行われており、国際規格化にも取り組んでいる。

【Purpose】

- to develop a loading/ unloading system for liquefied hydrogen (LH₂) transfer between LH₂ carrier and storage tanks ; and
- to establish relevant rules for safe operation of the system.

【Research outline and results】

- Based on the LNG technologies.
- Develop Swivel joints and Emergency Release System.
- Tested by applying newly-developed heat insulating technologies to prevent the generation of LO₂ (liquefied oxygen)
- Develop operational safety measures, and rules and standards, to be internationalized as necessary.



「エネルギーキャリア」プログラムにおける液化水素ローディングアームの開発

3-2 『水素スマートシティ神戸構想』

神戸市 副市長 岡口 憲義

- ・ 神戸市の 2030 年の CO₂ 削減目標は、日本政府目標(2013 年比 26%)より高い 34%である。神戸市の 3 つの柱は、①省エネルギー推進、②再生可能エネルギー推進、③水素エネルギーの利活用社会の構築を目指す「水素スマートシティ神戸構想」を中心とした革新的技術開発推進である。
- ・ 神戸市は、かねてより「水素スマートシティ神戸構想」を推進してきた。水素は、早い段階から地元企業が注力してきており、市も支援を進めている。2 つの事業に対する支援としては、場所の提供、供給先との調整、社会的受容性向上のための普及活動、がある。
- ・ 「水素サプライチェーン構築実証事業」では、豪州褐炭から水素を製造、海上輸送して神戸空港島の北東部に荷揚げする。世界初の液化水素の長距離大量輸送と荷役システムの構築を目指している。
- ・ 「水素エネルギー利用システム開発実証事業」では、ポートアイランドに水素と天然ガスを燃料とするガスタービン発電による電気・熱を、周辺の病院等の公共施設に供給するエネルギーシステムの構築を目指している。2018 年 4 月には、世界初の水素 100%での運転による電気・熱の供給に成功した。
- ・ 神戸市の水素クラスター研究会では、情報収集から試作品開発まで行うなど、水素関連産業への参入の動きが活発化している。水素関連産業を含む環境・エネルギー分野を成長産業の一つとして位置づけ、勉強会の運営、試作品づくり支援、新規参入・受注拡大への支援を行っている。
- ・ 水素の利活用によって、環境に優しいまちになるだけでなく、エネルギーセキュリティの向上、地元中小企業のビジネスチャンスの拡大、新たな雇用創出等、神戸経済の活性化、安全安心で快適なまちづくりに大きく貢献するものと考えている。神戸市のこれらの取り組みを国内外に広く PR し、選ばれる都市、世界に誇れる夢のあるまち神戸を目指していきたい。

4 基調講演(国内外の液化水素に関するプロジェクト・技術動向)

4-1 『水素市場の拡大』

Hydrogen Council

株式会社本田技術研究所 四輪 R&D センター 主任研究員 小谷 保紀

(講演代理: 三宅 葵)

- Hydrogen Council は、2017 年 1 月の世界経済フォーラム(ダボス会議)で設立された、水素の利活用による CO₂ 削減を目指すイニシアティブである。設立メンバーは 13 社(日本企業:トヨタ、ホンダ、川崎重工業)であったが、現在はメンバーも拡大し、ステアリング・メンバーは 33 社(新規参加日本企業: 岩谷産業、JXTG エネルギー)、サポーターメンバーは 20 社(新規参加日本企業: 豊田通商、丸紅、三菱商事、三菱重工、三井物産、三井住友銀行、住友商事)である。
- Hydrogen Council は 2017 年 11 月に、水素の本格的な普及とエネルギー移行についてのロードマップ「Hydrogen, Scaling up」を発表した。水素の大量導入により、2050 年までに、水素利用はエネルギー消費量全体の約 1/5 を担い、CO₂ 排出量を年間約 60 億トン(現状比)削減することができる。水素の市場規模は 2.5 兆ドルとなり、3,000 万人の雇用を創出する。



2050 年の水素ビジョン(Hydrogen, Scaling up)

- 現状で水素の需要は年間 8EJ(エクサジュール)程度だが、2050 年には 10 倍の 78EJ となり、発電部門、運輸部門、産業用燃料部門、ビル用熱・発電部門、基礎化学品部門で活用される。



2050 年における水素の需要(Hydrogen, Scaling up)

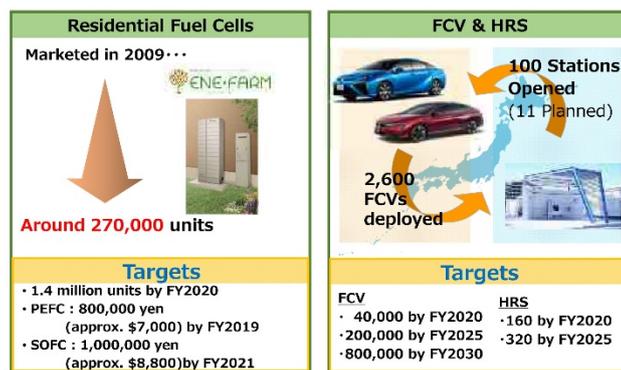
- 水素の 2050 年における CO₂ 削減への貢献は 60 億トン/年であるが、部門別では運輸部門が最も大きく、32 億トン/年である。そのうち乗用車が 17 億トン/年、トラックが 8 億トン/年である。
- 運輸部門では、ICE、BEV と比較し、FCEV は航続距離や燃料供給時間で優位性を有する。
- 水素技術は、FCV やコージェネレーションでは普及が始まっており、運輸部門では 2030 年頃に大型車両や船舶にも拡大する。水素発電は 2025 年以降で普及開始、水素製鉄は 2030 年以降に普及開始する。

4-2 『日本の水素戦略と NEDO の関連事業の紹介』

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)

次世代電池・水素部 燃料電池・水素グループ 主任研究員 横本 克巳

- ・ 昨日(10月23日)、世界最初の水素閣僚会議が東京で開催され、合計31の国・地域・国際組織が水素の利活用を議論し、水素の利活用を謳った東京宣言が発表された。
- ・ 日本が2017年12月に発表した「水素基本計画」では2050年のビジョンを示している。特に水素コストに関しては、2030年には3ドル/kg、2050年には2ドル/kgを目指している。
- ・ 経済産業省が発表した水素・燃料電池戦略ロードマップのフェーズ1では水素利用の飛躍的拡大を、フェーズ2では水素発電の本格導入と大規模な水素供給システムの確立を、フェーズ3ではトータルでのCO₂フリー水素供給システムの確立を目指している。現在はフェーズ1であり、定置用燃料電池はすでに27万台が普及している。2020年の普及目標は140万台である。FCVは現在2,600台で、目標は2020年に4万台、2025年に20万台、2030年に80万台である。一方水素ステーションは、現在111か所(うち計画中11か所)で、同様に2020年に160か所、2025年で320か所である。なお、定置用FCでは商用SOFCが実用化され、移動体でもFCバスが2台(2020年目標100台)やFCフォークリフトが80台普及している。



水素・燃料電池戦略ロードマップにおけるフェーズ1での展開

- ・ NEDO は、PEFC では革新的技術の開発(耐久性5万時間、非白金触媒)を、SOFC では発電効率60%以上、耐久性9万時間を目指している。水素ステーションでは2020年にコストを半減させることを目指した研究開発を2018年度から開始した。また水素ガスタービン開発や水素サプライチェーン開発(液化水素、有機ハイドライド)を支援している。

Developing combustor for H₂ gas turbine



Demonstration project / H₂ gas turbine



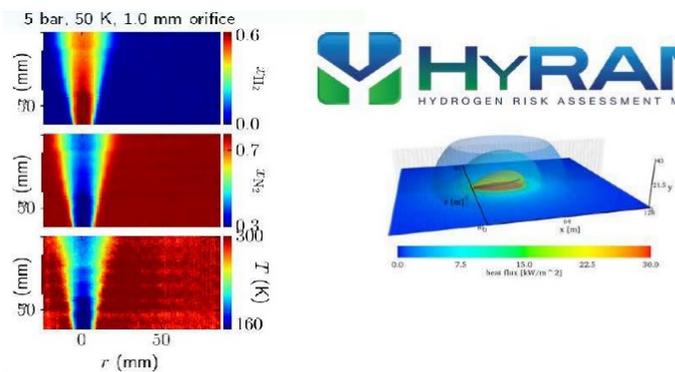
NEDO による水素ガスタービンの開発

- ・ また、NEDO はいわゆる Power-to-Gas プロジェクトを実施している。福島のプロジェクトは水電解装置規模10MWで、東京オリンピック・パラリンピックに水素を供給することを目指している。

4-3 『米国の液化水素の動向』

ゼロ・カーボン・エネルギー・ソリューションズ 代表取締役社長 Jay Keller
(米国サンディア国立研究所 前水素調査開発部長)

- ・ 液化水素は、大型水素ステーションには有望な技術であるが、安全距離が 75 フィート(23m)あり、敷地面積が大きくなるという課題がある。サンディア国立研究所(SNL)を中心とする米国水素安全パネルは、科学的知見に基づき、液化水素ステーションでも圧縮水素ステーション並みに小規模化できると結論している。
- ・ SNL は、科学的知見に基づいた水素の定量的リスク分析のツールとして HyRAM(Hydrogen Risk Assessment Model)を開発した。実際の基準標準作りに生かされている。



HyRAM(サンディア国立研究所)

- ・ 液化水素の放出挙動の実験は不確実性が高く、まだ十分にモデルに取り込めていない。DOEでは 2018 年度に、液化水素放出で生じるガスプルーム(低温の雲)の挙動について、ラマン分光法を用いた観測でラボスケールモデル(ColdPLUME)を完成、さらに実証フィールドに応用すべく、液化水素トラックからの液化水素放出を想定したプルーム観測装置を開発している。このプルーム観測装置は、米国再生可能エネルギー研究所(NREL)にて開発されている。
- ・ 現在、米国防火協会(NFPA)の水素貯蔵タスクグループでは液化水素放出に関し、液化水素輸送トラックからの放出と、水素ステーション等のパイプや気化器からの放出という 2 つのシナリオで挙動を分析している。
- ・ このような実証と分析の結果として、HyRAM が圧縮水素と液化水素の両方をシミュレーションでできるようになり、また最適なベントラインのデザインのための知見を得ることができた。



米国再生可能エネルギー研究所(NREL)のプルーム観測装置

- ・ 米国 SNL や NREL に加え、ローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)、英国労働安全衛生研究所(HSL)、米国 Chart Industries(低温タンクメーカー)などが連携し、さらに液化水素の挙動解析やモデリングを実施している。

Q&A

Q: リスクアセスメントのクライテリアは何か。

A: 紹介したツールでは定量的リスク評価(QRA)に基づき、リスク値を算出している。その意味では明確なクライテリアというものはないが、標準的なガソリンスタンドのリスク分析を参考にしている。なお、リスクのクライテリアというものは、本来的には社会の受容度によって決まり、国や地域で異なる。個々の社会でクライテリアを決定すべきと考えている。

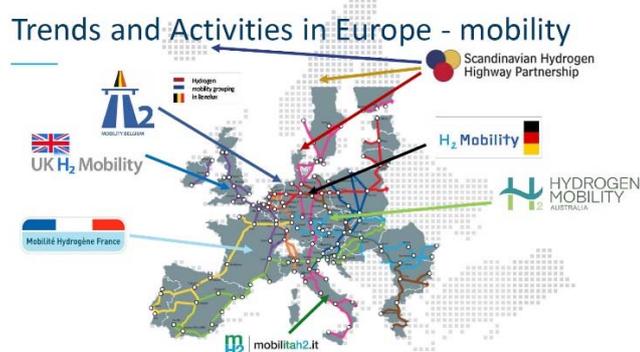
Q: 低温水素の放出に関して、引火の検討は行っているのか。

A: SNL では低温水素の放出と引火についての研究も行っており、その挙動は理解している。

4-4 『水素経済に向けたトレンドと動向ー ヨーロッパとノルウェーの可能性と展望』

ノルウェー産業科学技術研究所(SINTEF) マーケティング副部長 Steffen Møller-Holst
(ノルウェー水素フォーラム水素協議会議長)

- ・ 欧州連合は、2020 年には CO₂ 排出量を 20%、2030 年には同 40%、2050 年には同 80~95% を削減することを宣言している。2018 年 9 月には、欧州の多くのエネルギー大臣がオーストリアに集まり、CO₂ 削減のために水素を活用していくという合意文書にサインした。
- ・ 欧州で水素・燃料電池の R&D を担っているのは、官民パートナーシップである欧州燃料電池水素共同実施機構(FCH JU)である。FCH JU は、企業連合である Hydrogen Europe、研究機関連合である Hydrogen Europe Research、欧州委員会から構成される。
- ・ 欧州では FCV と水素ステーション普及のために、複数の国別のパートナーシップが設立されている。さらに欧州では、FC バスや FC 列車の実運用も始まっている。このような水素アプリケーションの展開で大規模な水素需要が生まれ、液化水素の展開の必要性が高まる。



欧州各国の FCV と水素ステーション普及のためのパートナーシップ

- ・ ノルウェーはエネルギーの輸出国であり、再生可能エネルギー由来電力に加え、将来は CO₂ フリー水素の輸出も目指している。風力発電・水力発電による電力余剰は年間で 15TWh あり、電力コストを押し下げるとともに、水素製造コストも押し下げることになる。
- ・ ノルウェーでは、水力発電、太陽光発電、風力発電、天然ガス改質などによる目的水素生産に加え、副生水素が得られている。



ノルウェーの水素生産拠点

- ・ ノルウェーでは、運輸部門が CO₂ 排出量の 30%を占めている。この部門の排出量低減のために、FCV や FC バス、FCトラック、FC 列車が期待される。さらにノルウェーでは、水素を燃料とする船(漁船、高速ボート、フェリー、クルーズ船など)の開発が期待されている。

4-5 『中国の液化水素活用の進捗状況』

北京航天試験技術研究所 常務副所長 Sifeng Yang

(講演代理: Yaozhong Zhao)

- ・ 2017 年末で、中国では 1,000 台以上の FCV(FC バス含む)が普及しており、さらに約 1,300 台が生産されている。一方、水素インフラは課題である。
- ・ 北京航天試験技術研究所(BIAT)は、液化水素製造・貯蔵能力では中国最大の研究機関である。中国には 8 つの液化水素設備があるが、うち 4 つが BIAT にある。なお、中国の液化水素の総生産能力は 80m³/日以上である。
- ・ BIAT は 3.5~25m³ 規模の液化水素輸送トレーラーを開発した。なお、中国最大の輸送用液化水素タンクは 300m³ 超である。また BIAT は長距離輸送のため、40~100m³ 規模の液化水素を輸送できる車両も所有している。



BIAT の液化水素輸送トレーラーと液化水素輸送用車両

- ・ BIAT は液化水素安全に関する研究も多く行っている。また BIAT は、様々な条件下で水素関連装置を試験する能力を有しており、液化水素用の密度計、液面計、温度計も開発している。また液化水素の製造・輸送・貯蔵・充填・利用に関する国内規格も作成している。
- ・ BIAT は、北京に中国初の液化水素充填ステーションを建設している。水素供給能力は 1,500kg/日以上で、液化水素ポンプで 35MPa 充填、70MPa 充填、液化水素充填が可能である。
- ・ BIAT は、500~1,000L の車載液化水素タンクを開発している。FC 商用車、FC バス、FC 大型トラックに特に適している。
- ・ 将来的に中国において、水素製造・貯蔵・供給には大きな需要が見込める。中国航空宇宙産業と BIAT はオープンな姿勢を維持し、「水素エネルギーの中国」および「水素エネルギーの世界」という我々の夢の貢献のため、すべての国と協力することを期待する。



BIAT の液化水素関連設備

Q&A

Q: 中国の再生可能エネルギーの普及の現状はどうか。

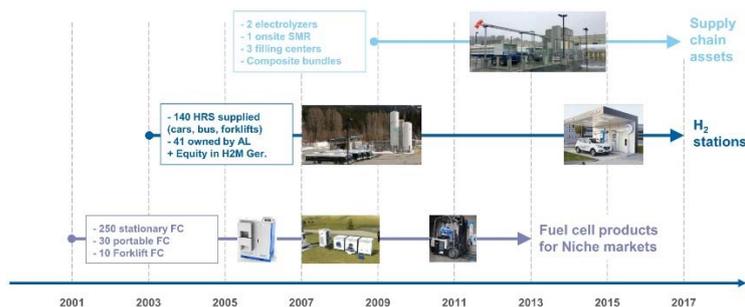
A: 太陽光と風力発電が急速に拡大している。石炭火力発電を代替していくことを期待している。

5 セッション 世界の R&D(液化水素関連技術の開発状況)

5-1 『水素エネルギー:エネルギー革新の中心』

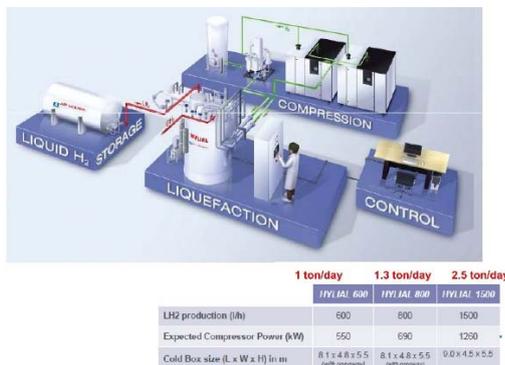
エア・リキード 水素エネルギービジネスユニット 部長 Jean-Claude Joyeux

- エア・リキードは総売上 200 億ユーロ、純利益 20 億ユーロ、世界で 6.5 万人の従業員を有する産業ガスのリーダー企業である。エア・リキードの水素製造量は 140 億 m³/年、所有するパイプラインは 1,850 km 長、年間水素売上は 20 億ユーロである。
- FC 開発や水素ステーション展開に関しては、15 年以上の実績がある。これまでに FC フォークリフト用充填設備 9 か所、FCV 用水素ステーションは世界で 100 か所以上を展開している。



エア・リキードの FC 開発・水素ステーション展開の実績

- 水素モビリティの水素需要では、FC バスは 20kg/日、FCトラックは 100kg/日、FC 列車は 150kg/日、水素フェリーは 1 トン/日、大型客船は 10 トン/日である。また FCV 用水素ステーションは 100~200kg/日、FC フォークリフト用水素充填装置は 100kg/日である。
- 液化水素製造装置を総所有コストで比較した場合、1~5 トン/日ではヘリウムリサイクル式、5~25 トン/日では混合ガスリサイクル式、25 トン/日以上では水素リサイクル式が好ましい。
- エア・リキードが特許を有するヘリウム・ターボ・ブレイトンサイクルを用いた液化装置のシステムを下図に示す。このシステムは 25 トン/日までの大規模化も可能である。また高効率であり、コンパクトに設計することも可能なので、ボイルオフガスの再液化にも使用できる。



エア・リキードのヘリウム・ターボ・ブレイトンサイクルを用いた液化装置

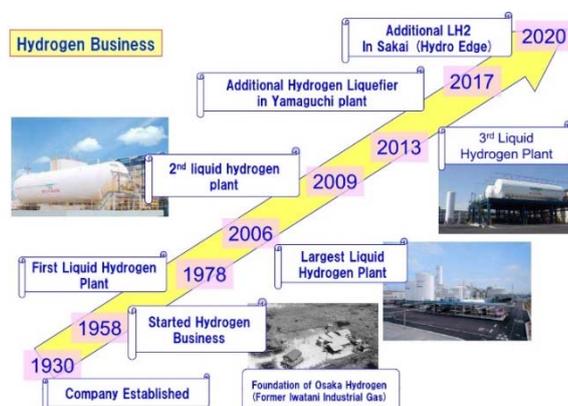
Q&A

- Q: 液化水素ステーションの事業化においては、水素漏洩などの安全性はどう考えているのか。
 A: 液化水素の拡散挙動の分析は難しい。数年かけてデータを収集する必要がある。

5-2 『水素エネルギー社会の実現－ 液化水素における岩谷産業の取り組み』

岩谷産業株式会社 技術・エンジニアリング本部 プロジェクト部長 中島 康広

- ・ 現在の日本の水素市場は 150m³/年であり、99%は製油所やアンモニア生産工場で使用されている。岩谷産業は水素市場の 70%のシェアを有している。
- ・ 岩谷産業は 1930 年に設立、1958 年には水素ビジネスを開始している。



岩谷産業の水素ビジネスの展開

- ・ 岩谷産業は国内に3か所の液化水素プラントを有し、供給では日本全国をカバーしている。液化水素製造能力では、 hidroエッジ(大阪府堺市)が 3,000L/h 製造装置 2 基(2020 年には 4 基運用に拡大)、岩谷瓦斯千葉工場(千葉県市原市)は 3,000L/h 製造装置 1 基、山口リキッドハイドロジェン(山口県周南市)は 3,000L/h 製造装置 2 基である。
- ・ 岩谷産業の水素ステーションは現在 23 か所である(うち 6 か所は移動式)。2018 年 2 月に設立された水素ステーションネットワーク構築のための共同運営会社「日本水素ステーションネットワーク合同会社(JHyM)」にも参画している。
- ・ 岩谷産業は、豪州褐炭からの液化水素サプライチェーン実証に、川崎重工業、シェルジャパン、電源開発とともに参画している。



豪州褐炭からの液化水素サプライチェーン実証

Q&A

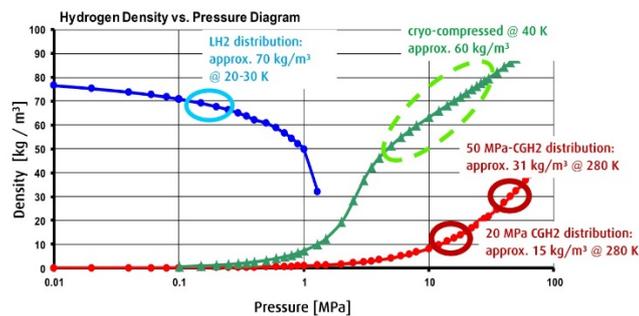
Q: リスクアセスメントのクライテリアは何か。

A: 水素ステーションは、いわゆる一般高圧ガス保安規則第 7 条の 3 に従った設計をしている。現在、液化水素の昇圧ポンプに関する法整備を進めているところで、高圧水素が漏洩した場合の拡散と火炎について実験をしており、それを基に安全距離等の安全の目安を検討している。

5-3 『大規模水素液化技術 –水素モビリティの可能性』

リンデ・クライオテクニク プロセスエンジニアリング Umberto Cardella

- ・ Linde グループは大きくガス部門とエンジニアリング部門に分かれている。合計の売上は 171 億ユーロ、営業利益は 42 億ユーロ、従業員数は 57,600 人である。
- ・ リンデ・クライオテクニクは、ヘリウム、水素、ネオンなどを扱う部門である。液化技術、貯蔵・輸送技術を開発しており、航空宇宙産業へのガス供給の他に、加速器や核融合等の国プロジェクトに参画したり、基礎研究を行っている。
- ・ 水素の貯蔵形態における水素密度比較では、圧縮水素(50MPa)は常温で 31kg/m³、液化水素は 20~30K で 70kg/m³、低温高圧水素は 40K、10MPa で 60kg/m³ である。液化水素が最も水素密度が高い。



水素の貯蔵形態における水素密度比較

- ・ 液化水素の用途は、ロケット燃料(プラント容量~20 トン/日)、半導体(同~5 トン/日)であるが、将来有望なのはモビリティ(同 50 トン/日)である。モビリティの水素需要は、FCV が 0.4kg/日、FC バスが 30kg/日、FCトラックが 100kg/日、FC 列車が 250kg/日、水素船が 1~10 トン/日と想定される。



リンデが想定する水素バリューチェーン

- ・ 水素の液化技術の比較では、小規模需要(~3 トン/日)はヘリウム・ブレイトンサイクルが、中・大規模需要(4~100 トン/日)は水素クロードサイクルが適していると考えている。

- リンデは、クライオポンプを圧縮機に用いた液化水素ステーションを開発している。2010 年では吐出量 100kg/h(10 台/h)、必要電力 160kW、敷地面積 52m²であったが、2016 年では吐出量 50~80kg/h(6 台/h)、必要電力 45kW、敷地面積 20m²とコンパクト化に成功した。

	- Cryopump 1.0 - 2010	- Cryopump 2.0 - 2014	- Cryopump 3.0 - 2016
Throughput	100 kg/h	100 kg/h	50 - 80 kg/h
Power	160 kW	110 kW	45 kW
# FCV/hr	10	6	6
Footprint	52 m ²	43 m ²	20 m ²
Boil-off usage	Recompression	Recompression	Energy Recovery 100 %

リンデのクライオポンプ式液化水素ステーション

Q&A

- Q: 現状で、システム当たりの液化能力を決める要因は何か。コールドボックスや熱交換機のサイズなのか。
- A: 水素需要、つまりマーケットである。システムでは、コールドボックスや熱交換機がサイズの大半を占める。大型プラントでは、複数のコールドボックスを並列に設置している。
- Q: 投資面から考えた場合、徐々に液化プラントの数を増やすのがよいのか、それとも 5 年くらい将来を見据えて、大型液化プラントを設置すべきなのか。
- A: 顧客要望に応じてプラントを設計する。確かにオーバーキャパシティになると利益的には厳しくなる。液化水素の経済性の点から、最適な供給能力を判断することが重要。

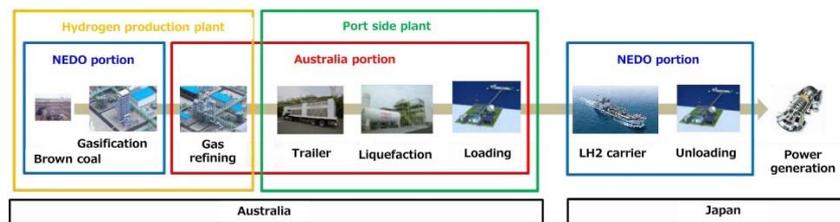
6 セッション 液化水素の海上輸送

6-1 『国際液化水素サプライチェーン』

技術研究組合 CO₂フリー水素サプライチェーン機構(HySTRA)

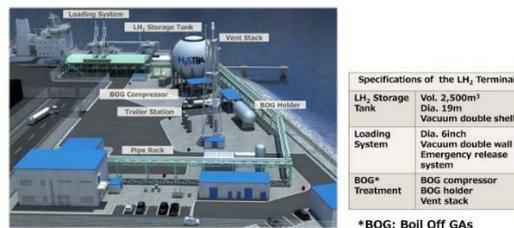
事務局長(兼)技術開発部長 西村 元彦

- 液化水素の国際サプライチェーンのパイロット実証では、2020年の日本への輸入を目指している。NEDO ポーションとして豪州での褐炭ガス化装置開発、水素輸送船開発、水素受入基地開発を行い、豪州ポーションとしてガス精製装置開発、水素液化装置開発を行う。HySTRA は NEDO ポーション実施のために設立された研究組合であり、川崎重工業の他に、岩谷産業、シエルジャパン、電源開発が参画している。なお 2030 年には商用チェーンに移行する計画である。



液化水素の国際サプライチェーンのパイロット実証の構成

- LCA 分析でも、CCS を適用した褐炭由来水素は、再生可能エネルギー水素と同程度の低 CO₂ 排出量であることが示されている。
- 液化水素輸送船は基本設計を完了、2019 年に建設を始める。2016 年には、国際海事機関(IMO)に提案していた液化水素運搬船の安全基準が暫定基準として採択された。
- 水素受入基地を神戸空港島の湾岸に建設中である。液化水素貯蔵タンクは 2,500m³ で、BOG 処理設備も備えている。



神戸空港島の液化水素受入基地

- 大林組、川崎重工業、神戸市、関西電力、岩谷産業、大阪大学は純水素コージェネレーションシステムプラント(1MW)の NEDO 実証に参画している。このプラントは 2017 年 12 月に神戸市ポートアイランドに設置されたもので、純水素のガスタービン発電による熱電供給は世界初である。
- 川崎重工業が開発した水素ガスタービンは、燃焼ガスを天然ガス 100%から水素 100%までのあらゆる組成に対応できるシステムである。蒸気噴霧によって、NO_xレベルを規制値以下にすることに成功した。なおドライブプロセスも開発中である。

Q&A

Q: 実証する液化水素運搬船はディーゼル駆動とのことだが、水素を駆動に用いる計画はあるか。

A: 商用化段階では水素駆動は必要になると思っている。

6-2 『液化水素の海上輸送に係る国際基準について』

国土交通省 海事局 検査測度課 危険物輸送対策室長 臼井 謙彰

- ・ IGC コードとは、船舶による液化ガスの輸送に関する国際規則で、国際海事機関(IMO)にて定められている。この IGC コードは、海上における人命の安全のための国際条約(SOLAS)に基づく強制コードである。
- ・ 国土交通省は、液化水素輸送のための安全基準作りを IMO に提案、日本リードのもとで 2016 年 11 月に暫定基準化することができた(液化水素運搬船ガイドライン)。
- ・ ガイドラインによると、液化水素に対する最低要件は以下のとおり。

液化水素に対する最低要件

a	物質名	水素
c	船型要件	2G(非毒性・引火性ガス)
d	独立方形タンクタイプ C (蒸気比重が空気より重い貨物用)	不要
e	貨物タンク内気相部の制御	不要
f	貨物蒸気の検知	必要
g	計測装置	引火性のため密閉型(C)必要
i	29 の特別要件(低温性、水素脆化、透過性、水素火災、可燃限界の広さ、高圧、静電気、危険なパージの防止、水素火災の特徴、低密度と高拡散性、火災に起因)	必要

- ・ 液化水素輸送に関わる今後の予定は以下のとおり。

液化水素輸送に関わる今後の予定

2020 年度	パイロット船による実証
20XX 年度	実証から得られた知見を IGC コードに反映させるための改定
20XX 年度	商用液化水素輸送船の建設・運用

6-3 『液化水素船舶輸送用アームの開発』

川崎重工業株式会社 技術開発本部 技術研究所

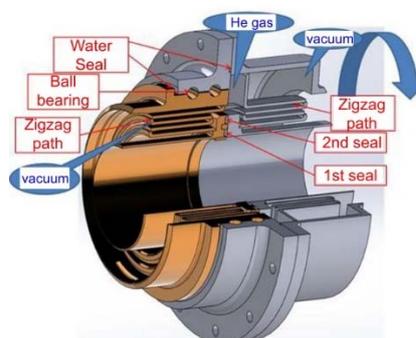
環境システム研究部 研究一課長 猪股 昭彦

- ・ 液化水素国際サプライチェーン実証の一環として、液化水素運搬船への積み込みや積降ろし用のローディングアームを SIP にて開発している。
- ・ ローディングアームの構成は基本的に LNG のローディングアームとほぼ同じである。ただし、LNG は -162°C であるのに対し、液化水素は極低温の -253°C であるので真空断熱が必要である。
- ・ ローディングアームの重要なパートは、液化水素の安全運用のための ERS(緊急離脱システム)と液化水素用に設計したスイベルジョイント(可動継手)である。



SIP で開発中の液化水素用ローディングアーム

- ・ ERS にはボール弁とチェック弁の比較の上でチェック弁を採用、圧力損失をシミュレーションして開発を行った。開発品の試験は、宇宙航空研究開発機構(JAXA)の能代ロケット実験場で、ISO 16904(液化天然ガス用のローディングアーム)に基づいて実施した。液化水素での ERS は、1.3 秒で切離しを完了することが確認できた。
- ・ スイベルジョイントは、通常ローディングアームの 6 か所に設置されている。非常に高い断熱性が求められる。プロトタイプの確認試験は、ERS と同様に JAXA 能代ロケット実験場で行った。水素漏洩はなく、40 万回の回転にも耐えることが確認できた。



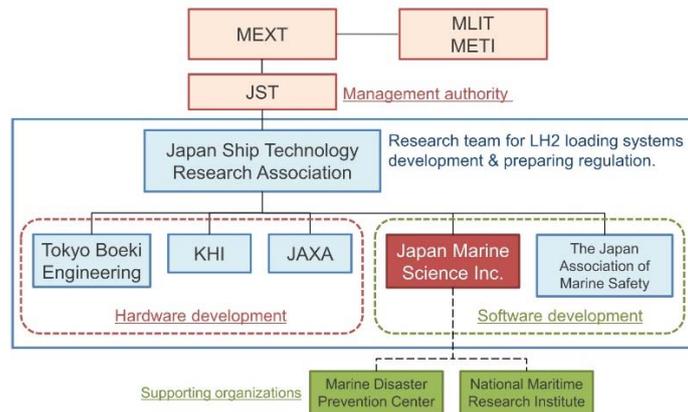
スイベルジョイントの構造

- ・ ERS が作動した時の液化水素の状態を調べるために、Phast(移流拡散シミュレーションソフト)にて確認を行った。

6-4 『液化水素タンカー運航における安全性評価』

株式会社日本海洋科学 コンサルタントグループ 主任コンサルタント 青山 憲之

- SIP の水素ローディングアーム開発では、日本船舶技術研究協会の下で、ハードウェア開発を川崎重工業、東京貿易エンジニアリング、宇宙航空研究開発機構が、ソフトウェア開発を日本海洋科学、日本海難防止協会が行っている。ソフトウェア開発の最終目標は液化水素輸送やバースからの移送、リスクアセスメント(HAZID)に関する国のガイドラインを策定することである。



SIP におけるプロジェクト実施体制

- 水素火炎(0.4MPa、ピンホール 0.2mm / 1.5 mm)の消火に関する実験では、炭酸水素ナトリウムで容易に消火ができた。水は有効ではなかった。水素火炎の対策としては、バルブを閉じた後は、そのまま自然に火炎が収まるのを待つのがよい。
- 液化水素とLNGのカーゴ(格納設備)移送における挙動の違いを整理した。

液化水素とLNGのカーゴ(格納設備)移送における挙動の違い

	LH ₂	LNG
Preparation	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Connect liquid and return gas line ✓ Connect seal gas line for cargo compressor ✓ O₂ purge by GN₂ ✓ N₂ purge by GH₂ at ambient temp. ✓ Measure of tank level of LH₂ ✓ ESDS test ✓ Prepare seal gas for cargo compressor ✓ Line cool down ✓ Tank cool down 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Connect liquid and return gas line ✓ O₂ purge by GN₂ ✓ Measure of tank level of LH₂ ✓ ESDS test ✓ Prepare for cargo compressor ✓ Line cool down
LH ₂ transfer	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Start loading operation ✓ Rate-up ✓ Full rate cargo transfer ✓ Rate-down ✓ Complete cargo transfer 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Start loading operation ✓ Rate-up ✓ High rate cargo transfer ✓ Rate-down ✓ Complete cargo transfer
Finish up	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Draining of LH₂ line ✓ H₂ purge by GH₂ at ambient temp. ✓ H₂ purge by GN₂ ✓ Measure of tank level of LH₂ ✓ Disconnect liquid and return gas line ✓ Disconnect seal gas line 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Draining of LH₂ line ✓ H₂ purge by GN₂ ✓ Measure of tank level of LH₂ ✓ Disconnect liquid and return gas line

- 日本の港則法では、引火性危険物の荷役時の船間保安距離は 30m としているが、高圧水素ガスの放出における安全距離が、30m 以下であることをシミュレーションで確認した。
- 液化水素運搬船の接岸における安全なナビゲーションの方法を確認した。
- 液化水素運搬船の実運用に向けて、ナビゲーションと緊急対応(台風、地震、津波等)を検討した。

7 閉会挨拶

一般財団法人 日本船舶技術研究協会 理事長 神林 伸光

- ・ 自分も 2 年前まで民間企業にて水素技術の事業化を進めてきた。当時から、水素の研究者、特に水素エネルギー分野の研究者の拡大が必要と思っていた。
- ・ 今日の講演を聴き、水素社会はすぐそこまで来ていると感じた。「水素社会の実現」という共通の目標に向かって、全地球的に、一緒に協力を続けていきたい。
- ・ ご講演者の皆様、ご来場の皆様、本日は誠にありがとうございました。

以上