

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CO₂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 CO₂-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、CO₂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CO₂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¹⁾」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²⁾」

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³⁾。

CO₂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）⁴⁾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 CO₂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「CO₂フリー水素サプライチェーン（CO₂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。

CO₂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な量が存在し、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CO₂を副生する。このCO₂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、CO₂の大気排出を伴わない水素（CO₂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⁵⁾。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 CO₂フリー水素サプライチェーン構想
Fig. 1 Concept of CO₂-free Hydrogen Energy Supply Chains

表1 CO₂フリー水素サプライチェーンの主要目
Table 1 Specifications of the CO₂-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 ³ /年〕 | 2.51 |
| | 重量〔ton/年〕 | 225,500 |
| CO ₂ 貯留量〔Mton/年〕 | | 4.39 |
| 液化水素運搬船 | | 160,000m ³ ×2隻 |

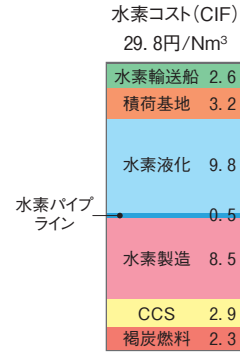
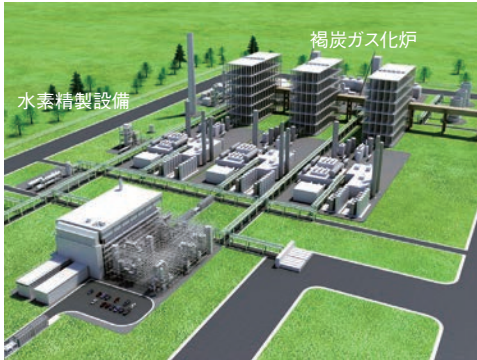
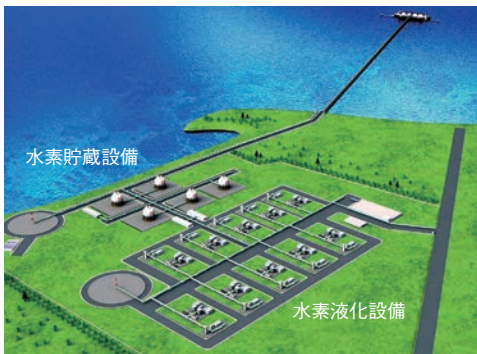


図4 CO₂フリー水素のコスト構造
Fig. 4 Cost structure of CO₂-free hydrogen



(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m³)

図3 CO₂フリー水素サプライチェーンのコア設備
Fig. 3 Core facilities of CO₂-free Hydrogen Energy Supply Chains

保険料込み渡し)は約30円/ Nm³ (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。

CO₂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CO₂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、CO₂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

CO₂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CO₂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/m³と443kg/m³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

ロープ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 CO₂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(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(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⁶⁾。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1,250m³) 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2,500m³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分以内が可能で、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, (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, (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



西村 元彦



新道憲二郎



吉村 健二



吉野 泰