

# “SPERA 水素<sup>®</sup>”システムによる国際間水素サプライチェーン実証

## International Hydrogen Supply Demonstration of “SPERA Hydrogen<sup>TM</sup>” System

岡田 佳巳

Yoshimi OKADA

技術開発部兼水素チェーン事業推進部 上席技師長

Principal Researcher, Technology Development Department

\*\*\*\*\*

### Abstract

Chiyoda has been continuously developing the technology for large-scale storage and transportation of hydrogen, employing liquid organic hydrogen carrier (LOHC). After completing the establishment of the technology through a pilot plant demonstration in 2014, Chiyoda participated in a project by NEDO to demonstrate a large-scale international hydrogen supply chain, and in 2020, the project was successfully completed across 5,000km, between the Kawasaki waterfront area in Japan and Brunei Darussalam in Southeast Asia. This paper introduces the features of the SPERA hydrogen system and the international hydrogen supply chain demonstration founded by NEDO.

\*\*\*\*\*

### 1. はじめに

地球温暖化の影響と考えられる異常気象は、猛暑、干ばつ、洪水など、種々の自然災害として世界各地で影響を増していると感じられるようになり、各国の地球温暖化防止対策の優先度は加速度的に増している。すなわち、2015年のパリ協定で約束されたCO<sub>2</sub>排出量の80%削減より踏み込んだ目標が掲げられるようになった。2050年までに炭素排出を実質的にゼロとする目標を掲げる国が出現し、我が国も昨年に宣言した2070年を目途にゼロとする方針を2050年に前倒す宣言がなされた。

地球温暖化防止対策には再生可能エネルギーの利用拡大が必須であり、中小規模の蓄エネを担う蓄電池とともに、石油や天然ガスのような燃料として大規模に「貯める」「運ぶ」役割を果たす水素を国際間で長距離輸送できる技術の実用化は、低炭素社会の構築に際して極めて重要な課題である。

当社では、2002年に水素を常温・常圧の液体化学品として既存のタンクやケミカルタンカーなどで大規模に貯蔵輸送でき、現状の化石燃料と同等の安全性を有する方法として有機ケミカルハイドライド法に着目して技術開発を行っており、実用化の鍵となる水素発生に必要な脱水素触媒の開発に成功、2014年にパイロットプラントによる実証試験を通じて技術確立を完了して“SPERA水素”システムと命名している。これらの開発の経緯は、昨年の千代田テクニカル・レビューで紹介させて頂いた(Vol.1 No.1 2020)。その後、世界で初めて国際間で水素を大規模輸送する国際間水素サプライチェーン実証が1年間にわたり順調に遂行されて完了している。本稿では、SPERA水素システムの概要と特長、および国際間水素サプライチェーン実証について紹介する。

## 2. SPERA 水素システム<sup>2-18)</sup>

### 2.1 システムの概要

図1に水素化反応と脱水素反応の反応式と本法の全体工程を示す。有機ケミカルハイドライド法は有機化合物の液体を水素キャリアに利用する方法であり、これらのキャリアは LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier) と呼ばれている。水素をトルエン(TOL)などの芳香族と水素化反応させ、メチルシクロヘキサン(MCH)のようなナフテン類を生成させることにより、分子内に水素を取り込んだ液体に転換する。これにより、常温・常圧の液体状態で水素を「貯める」「運ぶ」ことが可能となり、利用場所で必要量の水素を脱水素反応で取り出して利用することができる。このシステムは、水素とトルエンを反応させる水素化反応(水素貯蔵反応)とMCHから水素を発生させてトルエンを回収する脱水素反応(水素発生反応)の組み合わせからなり、水素を取り出した後に生成するTOLは水素の入れ物(キャリア)として回収、繰り返し利用する。

LOHC : Liquid Organic Hydrogen Carrier (液体有機化合物水素キャリア)

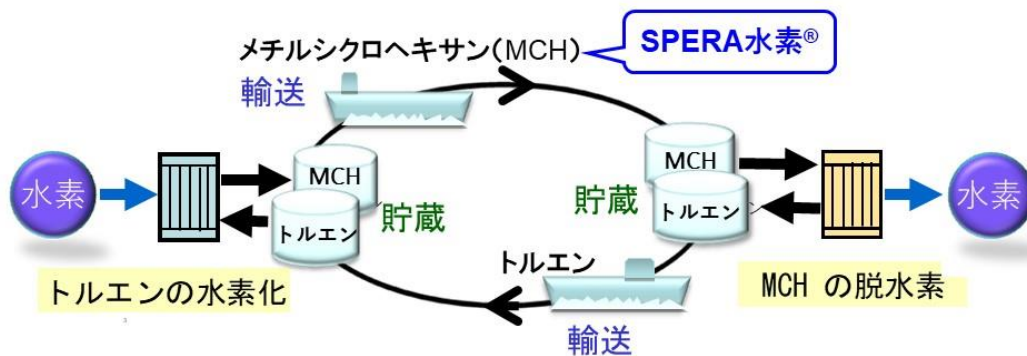


図1 SPERA水素システムの全体工程

### 2.2 SPERA 水素システムの特長

図2に SPERA 水素システムの特長を示す。このシステムでは、水素をそのまま貯蔵・輸送するのではなく MCH やトルエンのような液体化学品として行うことから、常温・常圧の条件下の液体状態で水素を貯蔵・輸送できるシステムである。また、MCH とトルエンはペンキや修正ペンにも使用されている安全な塗料用剤であり、素手で触れても問題なく腐食性もない。このため、毒性が比較的になく安全な液体であるとともにハンドリングが容易である。また、古くから工業用剤として大規模に利用されており、ケミカルタンカーで海上輸送が行えるほか、ISO タンクコンテナ (ISO 規格に則したタンクで貨物船/トラック/鉄道などに、そのまま積み替えてシームレスに輸送できるコンテナ用タンク、図9参照) やケミカルローリーでの陸上輸送も実用化されており、これらの既存インフラを最大限に転用す

1. 常温・常圧で液体 (ガソリンと同じ扱いができる)
  - ⇒ 貯蔵・輸送における**ハンドリングが容易**
  - ⇒ 石油流通の**既存インフラの活用が可能**
  - ⇒ 水素貯蔵・輸送のリスクを**石油製品並みに低減**
2. 化学的に安定
  - ⇒ 長期間の貯蔵や長距離の輸送に際して**ロスが極めて少ない**
3. 確立・実証された技術
  - ⇒ **早期の商用化が可能**

図2 SPERA水素システムの特長

ることができる。水素は爆発性の気体であり特殊な条件下での貯蔵や毒性の高い物質に変換しての貯蔵輸送は潜在的なリスクが非常に高い物質である。本システムでは既存の化石燃料と同等の取り扱い方法で水素を貯蔵・輸送できることから、安全性も既存の化石燃料と同等となり、事故に対する未知のリスクがほとんどないシステムと言える。本システムで扱う MCH とトルエンは化学的に非常に安定であることから、長期間、大規模にタンクに貯蔵する場合にもロスが極めて少なく、エネルギーの消費もほとんど無いことから、将来に再生可能エネルギーを水素として国家備蓄する際にも、既存の石油備蓄設備を転用して石油と同じように備蓄することが可能である<sup>19)</sup>。

本システムは、2014 年のパイロットプラントによる技術実証の完了によって、水素化と脱水素の両反応技術が確立され、後述する 2020 年の国際間水素サプライチェーン実証によって、輸送工程を含めた全工程の大規模輸送が国際間で大規模に実証されており、世界に先駆けて早期に商用化できるシステムである。さらに、我が国の水素基本戦略では、2030 年に 30\\$/Nm<sup>3</sup>、2050 年に 20\\$/Nm<sup>3</sup> の水素供給コストが目標となっている。本システムは化学的な方法のため工程の簡略化などの技術イノベーションが原理的に可能な方法であり、コストダウンのポテンシャルが高いシステムである。

### 3. 国際間水素サプライチェーン実証

#### 3.1 概要

図 3 にブルネイ・ダルサラーム国の位置を示す。また、図 4 に概要を示す。ブルネイ・ダルサラーム国は、日本から 5,000km 離れた東南アジアのボルネオ島北西部に位置する小さなイスラム教国であり、日本への天然ガス輸出国として知られている。

本実証は、このブルネイ・ダルサラーム国で水素を製造、SPERA 水素システムで日本の川崎臨海部に輸送するもので、装置規模はブルネイ側に建設された水素化装置、川崎側に建設された脱水素装置とともに 300Nm<sup>3</sup>/h で、1 年間に最大 210 トンの水素を製造して輸送できる規模で実施された。

この規模は燃料電池自動車 (FCV) の水素充填量に換算すると 4 万台に充填できる水素量に相当する。

ブルネイでは、隣接する LNG プラントのプロセス発生ガスを水素化プラントの敷地へ送り、水蒸気改質を通じた水素製造装置で製造された水素を利用してトルエンと水素化反応を行って MCH が製造された。MCH はタンクから ISO タンクコンテナに積み替えられて港から貨物船で川崎に海上輸送され、川崎港で ISO タンクコンテナをトレーラーに積み替えて、東



図 3 ブルネイ・ダルサラーム国

設備規模	フル稼働時 210 トン/年 (FCVフル充填4万台分相当)
チェーン運用期間	2020年3月 ~ 12月を予定
水素供給源	LNGプラントのプロセス発生ガスから水蒸気改質により水素製造 (ブルネイ・ダルサラーム国)
水素供給先	ガスタービン発電設備用燃料 (川崎市臨海部)
輸送方法	ISO タンクコンテナ (定期コンテナ船 / トレーラ輸送)

図 4 国際間水素サプライチェーン実証の概要

亜石油株式会社の製油所内に建設された脱水素プラントに陸上輸送された。脱水素反応で発生させた水素は、製油所に隣接している水江発電所に供給されている副生ガスに混合されてガスタービン発電に供された。水素発生後に生成するトルエンは再び ISO タンクコンテナで陸上輸送と海上輸送によってブルネイに輸送されて再び水素化反応により MCH に変換される。このサイクルを連続的に繰り返す実証が行われた。これらの工程を図5に示す。

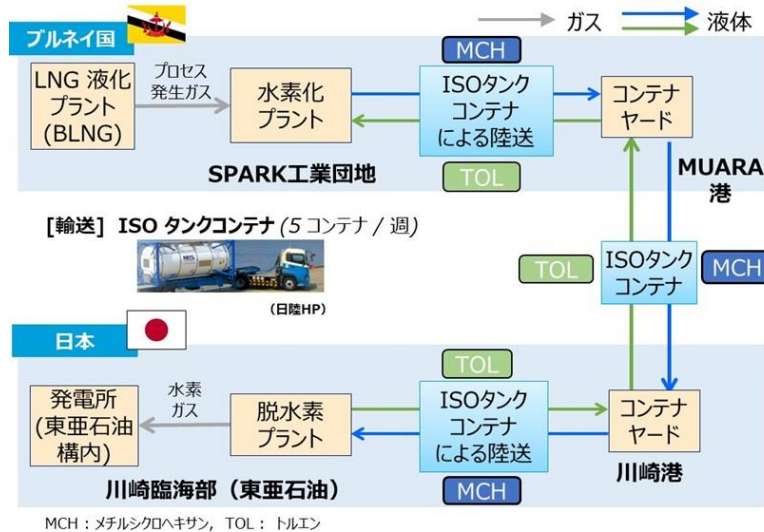


図5 国際間水素サプライチェーン実証の全工程

### 3.2 技術研究組合

図6に本実証の実施体制を示す。本実証は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）による助成事業（「有機ケミカルハイドライド法による未利用エネルギー由来水素サプライチェーン実証」（NEDO 助成事業：水素社会構築技術開発事業／大規模水素エネルギー利用技術開発））として、千代田化工建設、三菱商事株式会社、三井物産株式会社、日本郵船株式会社の4社が設立した技術研究組合、AHEAD（次世代エネルギーチェーン技術研究組合：Advanced Hydrogen Energy Chain Association for Technology Development）によって遂行されたプロジェクトである。AHEAD では上記の4社のほかに技術協力先として三菱パワー株式会社と株式会社日本政策投資銀行にもご協力を頂いたほか、ブルネイ政府、および川崎市にも多大なご協力を頂いている。

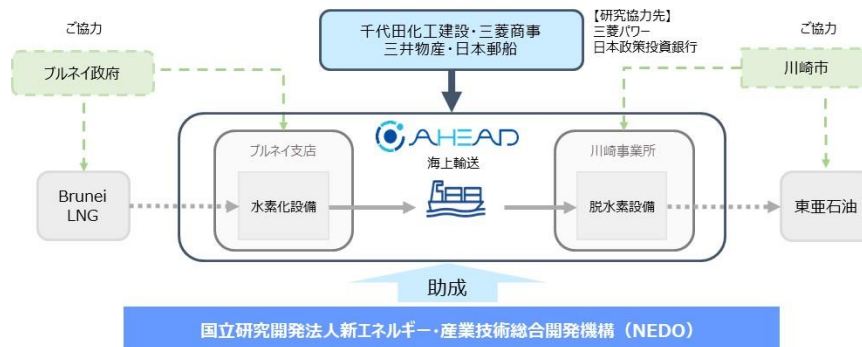


図6 国際間水素サプライチェーン実証の実施体制

### 3.3 国際間水素サプライチェーンの各工程

#### 3.3.1 水素貯蔵工程

図7にブルネイ・ダルサラーム国に建設された水素化プラントと製造された MCH を ISO タンクコンテナに充填した後に陸上輸送して貨物船で出荷される港の位置を示す。

水素化プラントはブルネイの南シナ海に面した工業団地 SPARK に建設された。天然ガスからメタノールを製造しているブルネイメタノールのプラントを挟んで隣接するブルネイ LNG の天然ガス工場で発生するプロセスガスを敷設した配管を通じて水素化エリアに送り、水蒸気改質による水素製造プロセスにて製造された水素をトルエンとの水素化反応の原料として利用した。2019年11月に稼働を開始、MCH を充填した ISO タンクコンテナとして MUARA 港から出荷された。

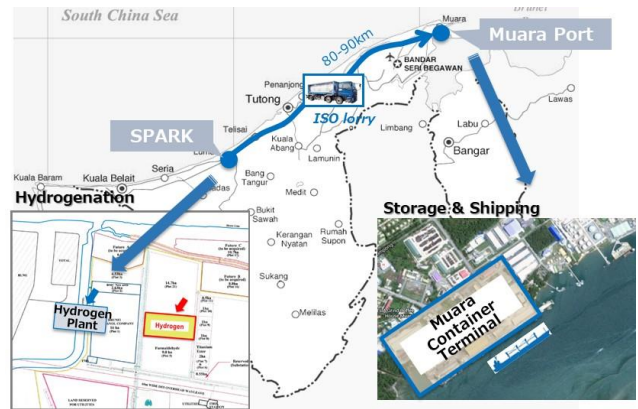


図7 水素化プラントと出荷港の位置



図8 水素化反応装置（ブルネイ国側）

#### 3.3.2 輸送工程

製造された MCH は常温・常圧のまま図8の写真で手前に設置されている横置き型のタンクに貯蔵され、図9に示す ISO タンクコンテナに移される。ISO タンクコンテナは写真のように鋼製の枠組みの中に固定されており、このままトレーラーの荷台に積載して陸上輸送できる。本実証では、SPARK 工業団地から約 90km 離れた MUARA 港に輸送され、図10に示した大型貨物船に枠組みごと積載されて日本に海上輸送された。



図9 MCHとトルエンを輸送するISOタンクコンテナ



図10 ISOタンクを輸送する大型貨物船

本実証のプラント規模は年間に最大 210 トンの水素を MCH として輸送する規模のため、今回の実証ではケミカルタンカーではなく ISO タンクコンテナを貨物船で輸送することとされた。商業

チェーンではケミカルタンカーで輸送することとなるが、標準クラスの 5 万トン級のケミカルタンカーの場合、一度に約 2,500 トンの水素を輸送することができる。本実証ではトルエンをリサイクルして再利用するサイクルを十分に繰り返す実証の観点から ISO タンクコンテナによる貨物船輸送を選択している。

### 3.3.3 水素発生工程

図 11 に川崎臨海部の東亜石油株式会社の京浜製油所に建設された脱水素装置の写真を示す。2020 年 3 月に稼働を開始、12 月までの 10 か月間に約 110 トンの水素を発生させて発電所燃料に混合供給を行った。奥に見える 6 本のタンクはトルエンと MCH のタンクである。タンクヤードのさらに奥に入出荷ヤードが設置されている。月曜日から金曜日の週 5 日の間、毎日 1 台のトラックが MCH を充填した ISO タンクコンテナを搬入するとともに、回収されたトルエンは ISO タンクコンテナに充填されて川崎港のコンテナヤードに輸送されて貨物船への積載を待つ形態で運用された。このようにして脱水素装置を連続的に稼働させる 24 時間運転体制で実証が進められた。

写真の手前に移っている部分が脱水素装置である。ブルネイ側の水素化装置の写真と比較すると小さく見えるが、ユーテリティーを東亜石油株式会社から融通頂いているため、これらの設備が不要であったことによる。ブルネイ側は、林を整地した更地に水素製造装置、水素化装置、及びユーテリティー設備をすべて建設しているために装置、敷地ともに大きくなっている。



図11 脱水素反応装置 (川崎側)

### 3.3.4 水素利用工程

図 12 に東亜石油株式会社の水江発電所の写真を示す。脱水素反応を通じて発生させた水素は水江発電所のガスタービン燃料に利用されている所内の副生ガスに混合されて利用された。水江発電所はガスタービンによるコンバインドサイクル発電を採用しており、製油所の電力を供給しているほか、東京電力エナジーパートナー株式会社を通じて一般にも利用されている。

本国際実証は、水素エネルギーキャリアを利用した国際間の大規模水素輸送を世界で初めて実証したほか、サプライチェーンの全工程の実証と輸送した水素を発電に利用する実証ともなった。



図12 東亜石油水江発電所

#### 4. 謝辞

本国際間水素サプライチェーン実証は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）による助成事業（「有機ケミカルハイドライド法による未利用エネルギー由来水素サプライチェーン実証」(NEDO 助成事業:水素社会構築技術開発事業／大規模水素エネルギー利用技術開発)）の遂行のために設立された技術研究組合である AHEAD に参画させて頂いて実施させて頂いた。ここに、NEDO およびお世話になった NEDO の方々に深く感謝の意を表す。また、ブルネイ政府、川崎市および東亜石油にも多大なご協力を頂き、深く感謝の意を表す。さらに、AHEAD に参画された各社、共同研究先として参画頂いた各社、および各社のご協力を頂いた方々に感謝の意を表す。

#### 5. まとめ

当社が本システムの基礎研究を開始した 2002 年から 18 年が経過した。この間にご協力を頂いた社内外の多くの皆様のご尽力によって、国際間で大規模に貯蔵輸送を行う水素エネルギーキャリアのシステムの全工程が、世界で初めて国際間水素サプライチェーン実証として無事に完了した次第である。2015 年のパリ協定以来、脱炭素化の潮流が加速されている。特に 2020 年は将来のカーボンゼロを目指す宣言が各国から相次ぎ、我が国も 2050 年を目標に実現を目指すことが宣言され、我が国の水素基本戦略の水素利用量目標も大幅に増大されることが予想される。

当社は、本システムの実用化を通じて大規模な水素燃料の火力発電燃料としての供給を早期に実現させるとともに、工業用水素やその他用途向けの水素供給、および水素ステーション等の中小型システムによる水素供給を実現し、さらにその CO<sub>2</sub> フリー化に取り組みたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 経済産業省 HP,  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo\\_gijutsu/chikyu\\_kankyo/ondanka\\_wg/pdf/002\\_03\\_00.pdf](https://www.meti.go.jp/shingikai/sankoshin/sangyo_gijutsu/chikyu_kankyo/ondanka_wg/pdf/002_03_00.pdf), (2020 年 12 月)
- 2) 岡田佳巳, 水素の大量・長距離輸送技術の開発, JETI, 56, 14, 12 (2008)
- 3) 岡田佳巳, 今川健一, 河合裕教, 三栗谷智之, 安井誠, 水素エネルギーの大量貯蔵輸送技術, 日本エネルギー学会誌, 93, 15-20 (2014)
- 4) 岡田佳巳, 今川健一, 志村光則, 水素の大量貯蔵輸送技術の開発, 燃料電池, 11,4, 56 (2012)
- 5) 岡田佳巳, 細野恭生; 有機ケミカルハイドライド法による水素エネルギーの大規模貯蔵輸送技術の安全性, 安全工学, 53, 6, 386 (2014)
- 6) 岡田佳巳, 齊藤政志, 坂口順一, グローバルな水素サプライチェーン構想と水素貯蔵・輸送システムの開発, 水素エネルギーシステム, 33, 4, 8 (2008)
- 7) 岡田佳巳, 有機ケミカルハイドライド法脱水素触媒の開発, 化学工学, 74, 9, 468 (2010)
- 8) 岡田佳巳, 有機ケミカルハイドライド法水素貯蔵輸送システムの開発, PETROTECH, 34, 2, 112 (2011)
- 9) 岡田佳巳, 今川健一, 安井誠, 水素の大量貯蔵輸送システム, 燃料電池, 14, 1 (2014)
- 10) 岡田佳巳, 東京都高圧ガス保安協会 会報, 2019 年 7,8 月号
- 11) 岡田佳巳, ニュートン, ニュートンプレス, 2014 年 8 月号

- 12) 岡田佳巳, 安井誠, 表面化学, vol.36. No.11, p.577 (2015)
- 13) 岡田佳巳, 安井誠, 水素の大規模貯蔵輸送技術と今後の展望, 日本機械学会誌, 119, 4 (1169), 12 (2016)
- 14) 岡田佳巳, 三栗谷智之, 安井誠, 水素エネルギーの大量貯蔵輸送技術-SPERA 水素システム-, ケミカルエンジニアリング, 2015年3月号, 23 (2016)
- 15) 岡田佳巳, 安井誠, 有機化合物をキャリアに用いた水素の大規模貯蔵・輸送技術, 化学と教育, 64, 2, 60 (2016)
- 16) 岡田佳巳, 水素エネルギーの大規模貯蔵輸送技術, 電気設備学会誌, 36, 4, 22 (2016)
- 17) 岡田佳巳, 安井誠, 有機ケミカルハイドライド法による水素の大規模貯蔵輸送技術, 計測技術, 2017年5月号, 20 (2017)
- 18) 岡田佳巳, エネルギーキャリアの開発動向と SPERA 水素システム, 防錆管理, 2017年12月号, 26 (2017)
- 19) 岡田佳巳, 水素の大量長距離輸送技術 SPERA 水素<sup>®</sup>システムの開発, 配管技術, 2019年12月号, 1 (2019)

以 上