

建物及び街区における水素普及展開を目指した 低圧水素配送システム実証事業

環境省委託事業 地域連携・低炭素水素技術実証事業

酒井 佳人

環境省では来るべき水素社会に向けて「地域連携・低炭素水素技術実証事業」を平成 27 年度から推進している。この事業では全国 8 ヶ所でプロジェクトが進められており、我々が推進している室蘭市でのプロジェクトは平成 30 年度に 8 番目に採択されたものである。室蘭市の実証事業は水素吸蔵合金を使って貯蔵や運搬を行うことにより、水素の製造から貯蔵、運搬、利用までの全てのフェーズで低圧で水素を扱うサプライチェーンの実証を行なうものである。本稿ではサプライチェーンシステムの概要と要素技術及び各プロセスでの重要ポイントについて紹介する。

キーワード：水素、サプライチェーン、水素吸蔵合金 (MH)、熱のカスケード利用、水素無人製造、MH タンク間の水素移送

1. はじめに

深刻化する地球温暖化の主な原因と言われている CO₂ の排出は現在も増え続けている。一方、わが国は 2011 年以降、一次エネルギーのほぼ全量を海外の化石燃料に依存している。そのため、CO₂ 排出削減とエネルギーの安全保障を同時並行で解決していくことが極めて重要な課題となっている。

水素は利用時に CO₂ を排出せず、温暖化対策の上で重要なエネルギーである。また、電力と相互変換が可能であることから、再生可能エネルギー等のキャリアとして活用することができる。これらの水素エネルギーの特徴は、低炭素社会の実現とエネルギー安全保障の両面で切り札と考えられている。

わが国では、2017 年 12 月の「水素基本戦略」において、官民が共有すべき大きな方向性・ビジョンが示された。また、2020 年 10 月に「2050 年カーボンニュートラル」を宣言し、2020 年 12 月には「2050 年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略」が策定され、その中で水素産業はキーテクノロジーとして位置付けられている。

これらの背景の基、本事業では環境省の委託事業である「地域連携・低炭素水素技術実証事業」において、北海道室蘭市を実証フィールドとし低炭素な水素サプライチェーンの実証を行うプロジェクトに取り組んでいる。本実証事業のコンセプトは「水素の製造から運搬、貯蔵、利用までの全てのフェーズにおいて低圧で

水素を扱うサプライチェーンの構築」である。

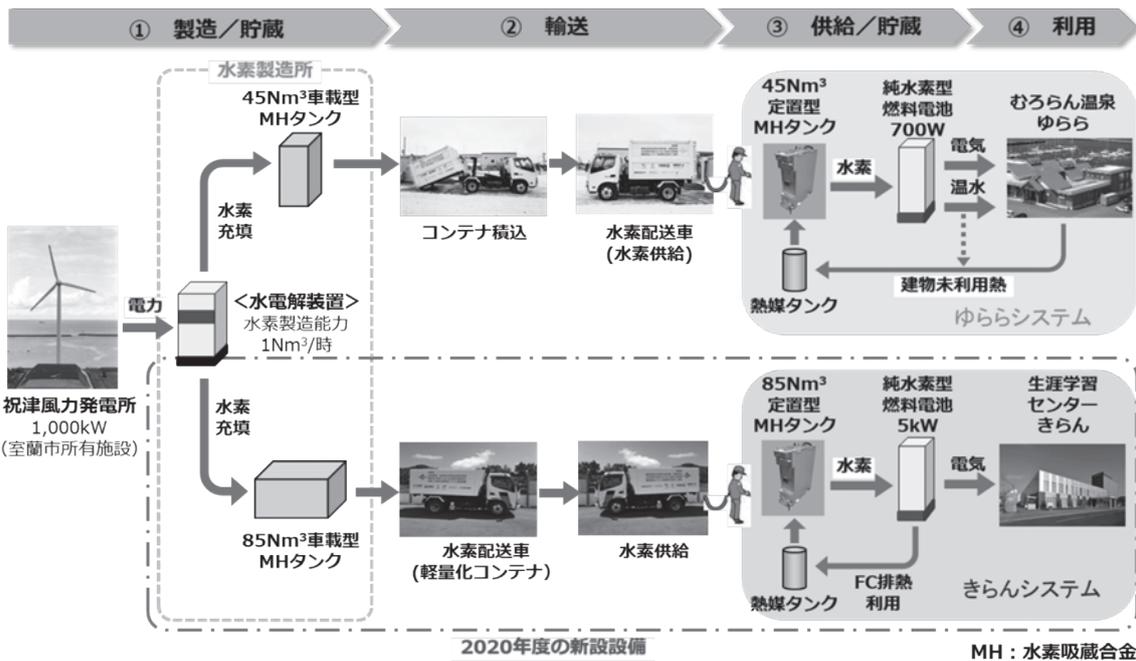
2. 事業概要

本事業で構築した水素配送システムの全体概要図を図-1 に示す。

サプライチェーンの主な流れを説明する。

- (1) 室蘭市所有の祝津風力発電所 (1,000 kW) の電力の一部を使って水電解装置で水素を製造する。
- (2) 製造した水素は水素吸蔵合金 (以下 MH = Metal Hydride と呼ぶ) タンクに貯蔵する。
- (3) MH タンクはコンテナ脱着式車両のコンテナ内に格納されており (車載型 MH タンクと呼ぶ)、コンテナごと水素利用施設まで運搬する。
- (4) 水素利用施設には定置型 MH タンクを設置し、車載型 MH タンクから定置型 MH タンクへ水素のみ移送する。
- (5) 水素利用施設 (むろらん温泉ゆらら) では、温浴施設の温排熱を使って MH タンクを加熱して水素を放出させ、燃料電池を稼働して、電気と温水を「ゆらら」に供給している。
- (6) 水素利用施設 (室蘭市生涯学習センター・きらん) では、燃料電池の温排熱を熱媒タンクに貯蔵し、その熱で MH タンクを加熱し水素を放出させ燃料電池を稼働して電気のみを「きらん」に供給している。

本システムの最も大きな特徴は、水素の貯蔵と運搬に MH を採用したことである。MH は水素と金属が



図一 水素配送システム全体概要図

原子レベルで結合するため、ガス状態では貯蔵しない。したがって、高圧ガス保安法などの法的規制から外れるため無人で水素製造・貯蔵が可能となり、夜間でも水素製造を行うことが可能である。

MHの取扱上、水素の吸放出に熱を必要とするが、これについては「熱のカスケード利用」を行って省エネルギーを行っている。「熱のカスケード利用」については後段で説明する。

3. 要素技術

本実証システムに使われている要素技術として「水素吸蔵合金 (MH)」と「熱のカスケード利用」の2点について詳細を説明する。

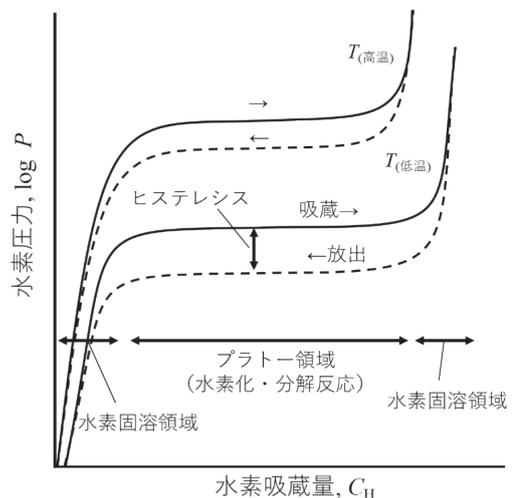
(1) 水素吸蔵合金 (MH)

MHは水素を加圧又は合金を冷却することにより水素を吸収し、減圧または加熱することにより水素を放出する。水素の吸放出に高い圧力や温度を必要とせず大量の水素（合金の体積の1,000倍以上）を吸放出することができる。今回は水素の吸放出に必要な圧力差が小さく、実用的で使いやすいAB5型を使用している。表一にMHの種類と比較表を示す。

水素吸蔵合金の特性を論じるうえで欠かせないのが圧力-組成等温線図 (PCT線図) である。模式的なPCT線図を図二に示す。合金の水素吸蔵量 C_H を横軸に、平衡水素圧力 P の常用対数を縦軸にとったグラフ上に等温線を描いたものであり、合金の水素吸

表一 水素吸蔵合金の種類と特性

合金タイプ	AB5	AB2	AB	BCC
合金の例	LaNi ₅	ZrMn ₂	TiFe	Ti-V-Cr
耐久性	○	○	△	△
圧力設計のしやすさ	○	○	×	△
MH容器のコンパクト性	○	△	△	○
安全性の確保	○	△	△	△



図二 水素吸蔵合金の模式的なPCT線図

収・放出挙動を示している。合金に水素ガス圧力を印加していくと、その初期において水素吸蔵量は圧力の上昇とともにわずかに増加し、この領域では水素原子の金属結晶格子内への固溶が生じている。さらに圧力を上昇させると圧力がほとんど上昇せずに吸蔵量だけが增加するプラトー領域が現れる。この領域は合金と

金属水素化物との二相共存領域に相当する。すべての合金が金属水素化物を生成すると、金属水素化物中への水素原子の固溶により、再び圧力の増加とともに水素吸蔵量がわずかに増加する領域に入る。水素の放出はこの逆の過程をたどるが、実在合金の場合は吸蔵曲線よりも放出曲線が低圧側にシフトするヒステリシスが存在する。

(2) 熱のカスケード利用

水素の移送を行う時、水素を放出する車上のMHタンクでは吸熱反応が起きるため加熱する必要がある。一方、水素を受け入れる施設側のMHタンクでは発熱反応であるため冷却する必要がある。これらの反応熱は車載タンクと定置型タンクの合金が同じ場合、それぞれの発熱量と吸熱量はほぼ同じである。そこで施設側MHタンクで発生する反応熱を、車上のMHタンクで必要とする反応熱として使うことにより、エネルギーの有効利用を行っている。理論的には外部からの熱の供給は不要であるが、系内の配管などからの放熱分の熱の補給は必要となる。図-3に熱のカスケード利用の模式図を示す。

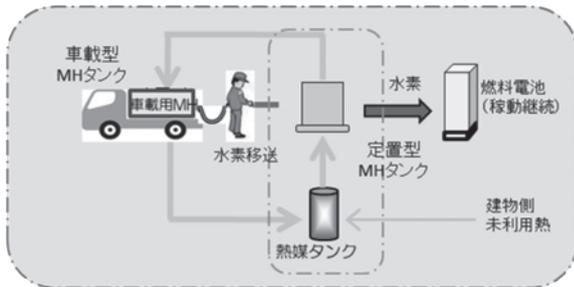


図-3 熱のカスケード利用の模式図

以降、60 Nm³/hの水素移送に必要な熱媒温度ならびに媒体流量の検討結果を記載する。

(a) MHタンクの必要熱量

MHタンクの反応熱は水素流量と合金のエンタルピー(ΔH)の積であり、それに容器の顕熱と熱ロスを合計したものがMHタンクの必要熱量(Q)となる。表-2にMHタンクの移送に必要な熱量を記載する。

表-2 MHタンクの移送に必要な熱量

	車載型MHタンク	定置型MHタンク
ΔH (kJ/mol)	28	31
反応熱 (kW)	20.8	23.1
顕熱 (kW)	9.8	0
熱ロス (kW)	1.0	1.2
Q 合計 (kW)	31.7	24.2

(b) カスケードシステム構築時の必要加熱量

図-4に熱のカスケード利用時の温度レベルを示す。この温度レベルを維持するために、外部から約8.4kWの熱を供給する必要がある。下記に媒体タンクの出入口の温度差から必要熱量を算定する式を示す(式1)。

$$Q = F \times \rho \times C \times \Delta T = 80 \times 1 \times 4.186 \times 1.5/60 \approx 8.4 \text{ (kW)} \dots\dots \text{(式1)}$$

- Q : 必要熱量 (kW = kJ/sec)
- F : 熱媒体流量 (L/min)
- ρ : 熱媒体の密度 (kg/L)
- C : 熱媒体の比熱 (J/g・K)
- ΔT : 熱媒体タンク出入口の温度差 (K)

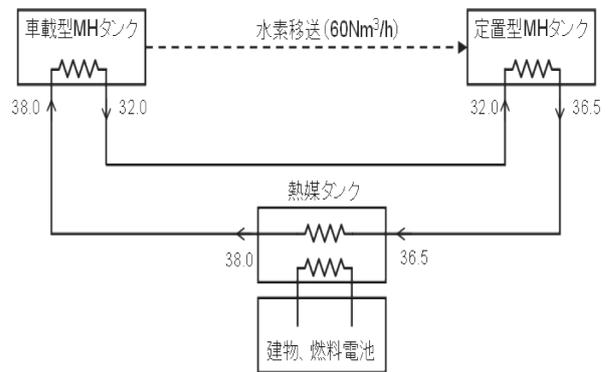


図-4 熱のカスケード利用の温度レベル

4. 各プロセス技術

本実証システムは下記のような4つのプロセスから構成されている。

- (1) 水素製造・充填プロセス
- (2) 水素運搬プロセス
- (3) 水素移送プロセス
- (4) 水素利用プロセス

各プロセスのポイントとなる技術について述べる。

(1) 水素製造・充填プロセス

このプロセスでは将来の分散化電源の普及を想定して、水素製造・貯蔵の無人化および施設のコスト低減を目指している。

MHは水素原子と金属原子が化学結合をして水素を吸蔵するため、低圧で水素を貯蔵することができる。高圧ガスの場合、有資格者の常駐が法律で定められているが、MHで水素を貯蔵することにより無人での水素製造と貯蔵が可能となった。

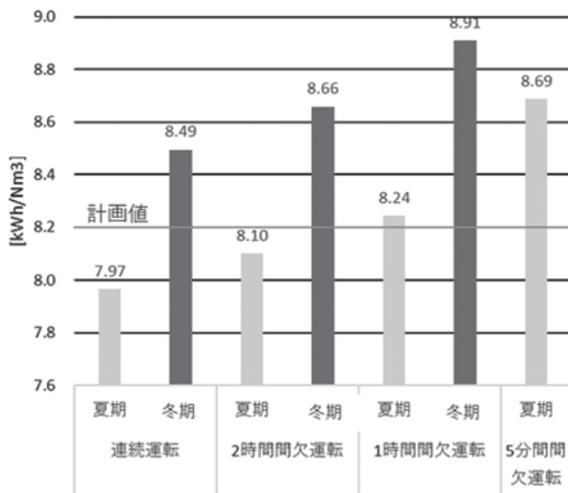
また、設備コスト低減のため風力発電と水電解装置の間に蓄電池を介さず直結させ、発電電力が50kW以上(水電解装置が稼働可能な電力)の時だけ水電解

装置を稼働させている。そのため水電解装置は間欠運転を行う。そこで間欠運転が水電解装置に与える影響の確認を行った。水電解装置に与える影響として消費電力が考えられる。そのため疑似的に複数の条件で間欠運転を行いそれぞれの消費電力を測定した。表一3に間欠運転の時間配分を示し、図一5に連続運転との消費電力の比較を示した。

表一3 間欠運転の時間配分

	時間配分		水素製造量比※
	運転	停止	
連続運転	連続	無	100%
2時間間欠運転	2時間	1時間	66%
1時間間欠運転	1時間	1時間	50%
5分間欠運転	5分	5分	50%

※：連続運転時の水素製造量を基準とする



図一5 間欠運転の消費電力比較

上記のグラフから水電解装置の発停の頻度が高い間欠運転ほど消費電力が増加することがわかる。また、発停頻度が多くなると、水電解装置の除湿器の劣化が進むという現象も見られた。

(2) 水素運搬プロセス

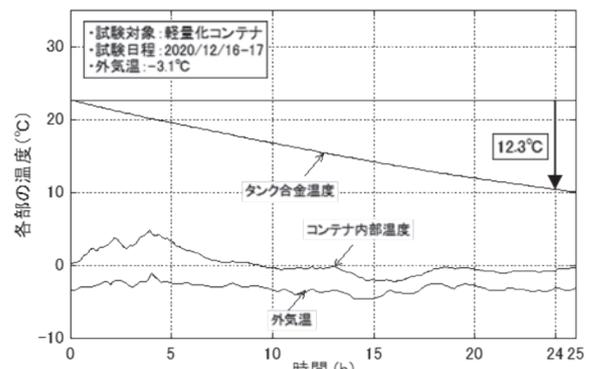
このプロセスのポイントはMHタンクの温度管理と運搬時の振動の影響である。

(a) MHタンクの温度管理

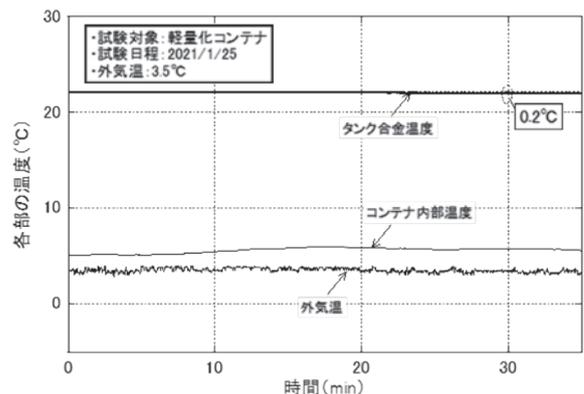
MHタンクを運搬中にMHタンクの温度が下がると水素を移送する時、タンクを加熱するエネルギーと時間が必要となる。つまりMHタンクの温度を下げないことが重要である。前述したように水素の運搬はコンテナ脱着式車両のコンテナの中にMHタンクを内蔵しコンテナごとMHタンクを運搬する。2018年度に製作したコンテナは鋼製のコンテナで内

面に厚さ20mmの断熱材を設置している。またMHタンクの外部も50mmの断熱材で覆っている。この鋼製コンテナで待機時と運搬時のMHタンクの温度変化を測定した結果、冬期の外気温1.1℃で24時間待機した場合約10℃低下した。また、外気温0.9℃で運搬距離約10km、運搬時間30分では0.3℃低下した。しかし、鋼製コンテナは自重が重く、一度に運ぶ水素量が少ないため2020年度に側壁と天井をアルミパネルと木材で作成し、幌で覆い内面に断熱材を張っていない軽量化コンテナを製作した。軽量化コンテナにおける冬期の24時間待機時と10kmの運搬時の合金の温度変化を図一6及び図一7に示す。

これらを見ると軽量化コンテナに変更しても待機時及び運搬時の合金の温度変化は鋼製コンテナと大差がないことが分かった。



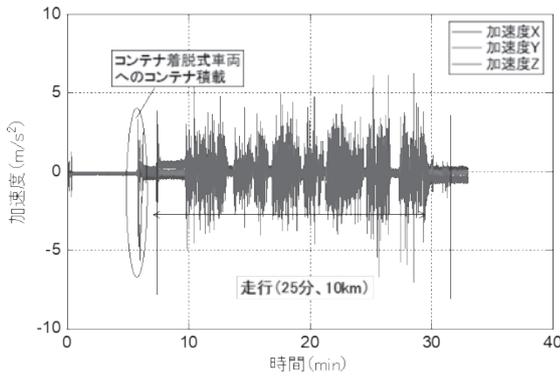
図一6 軽量化コンテナの待機時の合金温度変化



図一7 軽量化コンテナの運搬時の合金温度変化

(b) MHタンクへの振動の影響

MHは水素の貯蔵としての実績はあるが、水素を吸蔵した状態で運搬する事例は少ない。そこで走行時の振動などがMHに与える影響を確認する必要がある。運搬は水素製造所から室蘭市役所を経由し水素利用場所までの約10km、走行時間は約30分である。運搬時のタンクの振動を加速度センサーにより計測した。図一8に振動の計測結果を示す。



図一8 コンテナ脱着式車両の振動計測結果

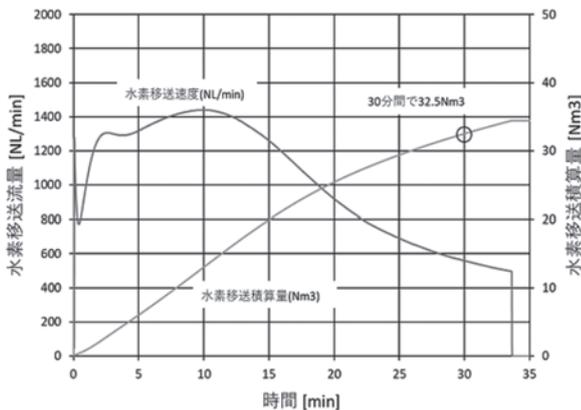
運搬中に MH タンクにかかる振動は 1G 以下であり、MH タンクの振動試験で使用するピーク加速度 8G に対して十分小さな値であることが確認できた。

(3) 水素移送プロセス

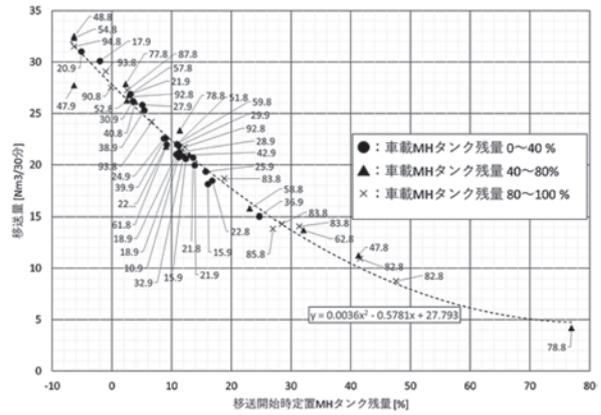
本実証システムにおける移送に係る時間は水素サプライチェーンの所要時間に影響し、ひいては水素の供給価格にも影響するため重要な要素である。

45 Nm³ の車載型 MH タンクから 45 Nm³ の定置型 MH タンクに移送する場合の移送速度の目標を 30 分で 30 Nm³ と設定した。水素移送流量と移送積算量の時刻変化の例（初期条件：車載型 MH タンク残量：約 50%，定置型 MH タンク残量：空）を図一 9 に示す。移送流量は移送開始から約 10 分後に最大値 1,440 NL/min（86.4 Nm³/h）に達し、その後、徐々に低下する。移送積算量は 30 分後に 32.5 Nm³ に達しており、30 分間の平均移送流量は 32.5 Nm³/30 min（= 65 Nm³/h）と目標を達成することができた。

ただし、この速度は複数のパラメータに影響されている。図一 10 に移送量と定置型 MH タンクの移送前の残量のグラフを表しており、また図中の●▲×の点は車載型 MH タンクの移送前の残量を 3 つのグループに分けて表している。



図一 9 水素移送流量と移送積算量の変化



図一 10 MH タンク残量と移送速度の関係

これを見ると水素の移送速度は定置型 MH タンクの移送前の残量と非常に明確な相関関係にあるが、車載型 MH タンクの残量とはあまり相関関係はないことがわかる。つまり移送速度は水素の受け入れ側のタンクの残量が少なければ速くなる。また、定置型 MH タンクの残量ほど顕著な相関性ではないが、車載型タンクの移送前の温度も移送速度に影響することがわかっている。移送前の温度が高いほど移送速度は速くなる傾向がある。

(4) 水素利用プロセス

水素利用プロセスでは需要家が MH タンクの残量を確認して水素を発注する必要がある。そのため残量計は、タンク残量が少ない場合に正確な機能が必要とされる。そこで FC で発電した時の定置型 MH タンクの残量計の挙動を確認し、残量計が定置型タンクの残量を正確に計測できるか否かを検証した。

(a) 試験条件

表一 4 に残量計の試験条件を示す。試験には「ゆらら」に設置した 45 Nm³ の MH タンクと 700 W の燃料電池を使用し、水素移送後、実際の運用条件で運用した時の水素残量計指示値と水素流量計から計算した水素貯蔵量の関係の評価した。なお、水素貯蔵量は燃料電池が供給下限圧力で停止した時の値をゼロと仮定し、水素流量計の積算値を足すことにより算出した。

(b) 試験結果

残量計の試験は 4 回行った。各試験の初期値は異なったが、残量計指示値が 20% 以下では概ね同じよ

表一 4 残量計の試験条件

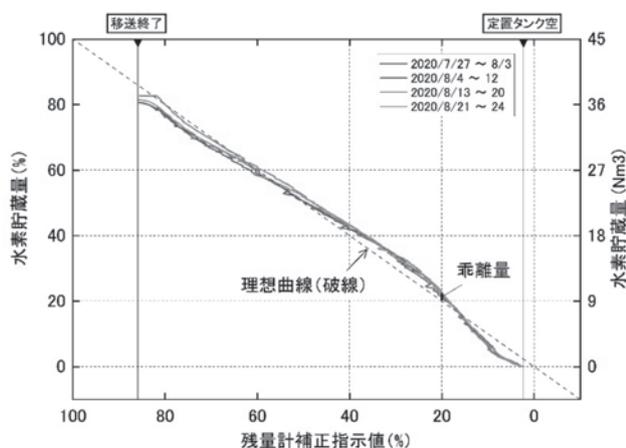
項目	仕様
使用タンク	45 Nm ³
使用 FC	700 W
運用条件	水素移送後から FC が停止するまで

うな挙動を示した。一方で理想曲線とは乖離が大きく、水素充填が必要な目安となる残量計指示値：20%のポイントでは水素全貯蔵量の40%以上の乖離があった。そこで、残量計指示値：20%のポイントで誤差が少なくなるような補正曲線（式2）を算出した。なお、計測装置の仕様上、補正曲線はxの3次式までの範囲での補正曲線とした。

$$y = 74.133x^3 - 163.37x^2 + 122.71x + 6.637 \dots\dots (式2)$$

y：水素貯蔵量, x：残量計指示値

PLCに補正式を入力し、水素残量計指示値と水素



図— 11 残量計指示値と水素貯蔵量の関係（補正後）

貯蔵量の関係を測定した。図— 11に試験結果を示す。

残量計出力に補正を実施し、補正出力を計測することにより、全領域にわたって乖離が少なくなり、水素充填が必要な目安となる低残量領域における指示精度も向上することが確認された。

5. おわりに

近い将来に構築される水素社会において、水素を一般ビルや一般家庭などの需要家に配送するシステムが必要不可欠となる。室蘭の実証事業はこの末端配送に焦点を当てた事業である。環境省の委託事業は本年度で終了となるが、この事業で取得した技術および成果を基に水素社会の実現に向けて、水素配送システムの構築の取り組みを継続したいと考えている。

J|C|M|A

[筆者紹介]

酒井 佳人（さかい よしひと）
大成建設㈱
エンジニアリング本部
産業施設プロジェクト部
エネルギー・インフラプロジェクト室
専任部長代理

