

# 循環型再生可能エネルギーシステム

Closed-loop Renewable Energy System

江守 肇

Emori Hajime

石川 敬郎

Ishikawa Takao

川村 徹

Kawamura Toru

高村 哲夫

Takamura Tetsuo

循環型再生可能エネルギーシステムは、取り扱いが難しい水素を安定した液体であるメチルシクロヘキサンの形態で貯蔵することで、エネルギー媒体である水素の長期備蓄、輸送を容易にするシステムである。これにより、エネルギーを水素に変換して備蓄、再利用することが容易になるため、風力発電など変動が大きい再生可能エネルギーの安定供給に貢献できる。再生可能エネルギーの利用拡大によるわが国のエネルギー自給率向上、低炭素社会・水素社会の実現を加速する手段として期待されている。

日立製作所は、2011年度に国立極地研究所との契約に基づき、秋田県にかほ市で将来の南極におけるエネルギー自給率向上のための基礎データを取得するなど、システムの実用化をめざしている。

## 1. はじめに

循環型再生可能エネルギーシステムは、変動が大きい風力・太陽光発電などの再生可能エネルギーの大規模備蓄、輸送を容易にするシステムである。再生可能エネルギーで得た電力を水素に変換し、さらにその水素をMCH (Methylcyclohexane: メチルシクロヘキサン) に変化させることで、エネルギー媒体である水素の取り扱いを容易にするものである。この結果、風力・太陽光発電など需要に合わせた供給が難しい再生可能エネルギーの余剰分を長期備蓄することが可能となり、安定したエネルギー供給を実現できる。

エネルギーの長期備蓄を可能とするこのシステムは、再生可能エネルギーの供給が負担となる地域のエネルギーの自給自足に貢献できる。例えば、現在南極の昭和基地で使用する燃料は南極観測船「しらせ」によって輸送されており、その割合は総輸送量の約半分を占めている。今後エネルギー需要が増大していく中で燃料輸送には限界があるため、風力発電や太陽光発電など南極で得られる再生可能エネルギーを利用することで、エネルギーの自給自足のサイ

クルを確立することが求められている。しかしながら、南極では冬季は太陽が出ない極夜になり、夏季は太陽が沈まない白夜になる。したがって、南極は夏季に太陽光発電で得たエネルギーを大量に備蓄し、冬季の利用に向けた大規模なエネルギー備蓄・再利用(回収)ができるこのシステムの最適な候補地域の一つである。

南極と同様に、エネルギー供給が不安定な離島、防衛省・自衛隊の海外派遣任務、さらには、災害によって孤立して外部からのエネルギー供給が断たれた被災地など、自給自足可能な再生可能エネルギーを安定的に継続供給できるシステムは、さまざまな場面での利用が期待できる。

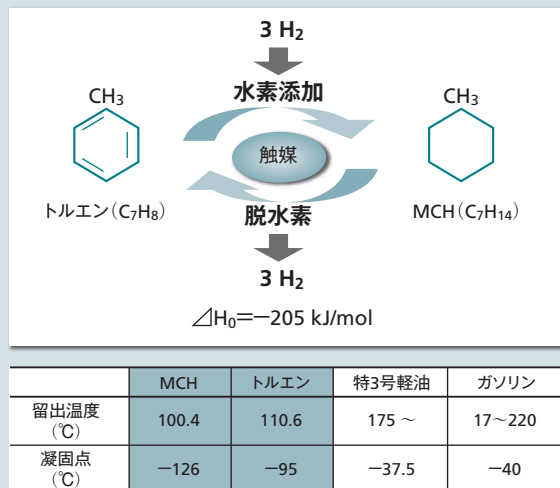
ここでは、日立グループが取り組んでいる循環型再生可能エネルギーシステムの概要と、2011年度に大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立極地研究所との契約に基づいて実施した秋田県にかほ市における実証実験について述べる。

## 2. 循環型再生可能エネルギーシステムの概要

効率的なエネルギー貯蔵手段として蓄電池利用の検討が進んでいる。しかしながら、蓄電池によるエネルギー貯蔵には長期間備蓄における自然放電、大量備蓄のための容積、輸送(重量)、コストなどの課題もあるため、短時間の電力貯蔵には適しているが、長期間・大量のエネルギー備蓄とその輸送には不向きである。循環型再生可能エネルギーシステムは、有機ハイドライドの一種であるMCHをエネルギーの貯蔵媒体とすることで、これらの課題に対応するものである。

### 2.1 MCHの特長

有機ハイドライドとは、芳香族化合物に水素を添加して得られる水素化芳香族化合物の総称である。有機ハイドラ



注：略語説明 MCH (Methylcyclohexane：メチルシクロヘキサン)

図1 MCHの水素添加・脱水素反応と温度特性

トルエン（ $C_7H_8$ ）は、3個の水素分子との水素添加反応（発熱反応）によってMCH（ $C_7H_{14}$ ）になる。MCHは脱水素反応（吸熱反応）により、トルエンと3個の水素分子を放出する。MCHとトルエンは共に常温では液体である。

イドは触媒を用いた可逆反応である水素添加反応と脱水素反応により、芳香族化合物との間で水素を出し入れできる。水素添加反応は発熱反応、脱水素反応は吸熱反応であり、この反応を用いて水素の貯蔵・供給の循環サイクルを構築することができる。

MCHはトルエンの水素添加反応によって得られる有機ハイドライドであり、トルエンとMCHは共に常温常圧では安定した液体である（図1参照）。

また、トルエン、MCHは、いずれもガソリンと同じ消防法の第4類危険物第1石油類に分類されるため、既設のガソリン用の貯蔵・運搬設備、施設をそのまま利用できる利点がある。

MCHによるエネルギーの備蓄密度は、脱水素反応で利用できる水素が持つエネルギー量に限定しても約1.58 kWh/Lであり、これはリチウムイオン電池の約8倍のエネルギー密度に相当する（図2参照）。また、備蓄に関してもMCHは常温では液体であり、かつガソリンと同様に扱えるため、備蓄可能規模も石油類と同様に大型のタンクで備蓄でき、小分けにして輸送することも可能である。

MCHの水素添加反応、脱水素反応による水素の出し入れは水素の貯蔵手段と考えることができる。現在主流となっている水素の貯蔵手段には、高圧水素や液体水素のほか水素吸蔵合金などがあるが、有機ハイドライドによる水素貯蔵は上述のように取り扱いの容易性、水素の貯蔵密度の観点から極めて有力な貯蔵手段である（図3参照）。

有機ハイドライドには、ベンゼン-シクロヘキサン、ナフタレン-デカリンなどの組み合わせがある。しかし、ベンゼン-シクロヘキサンはベンゼンに発がん

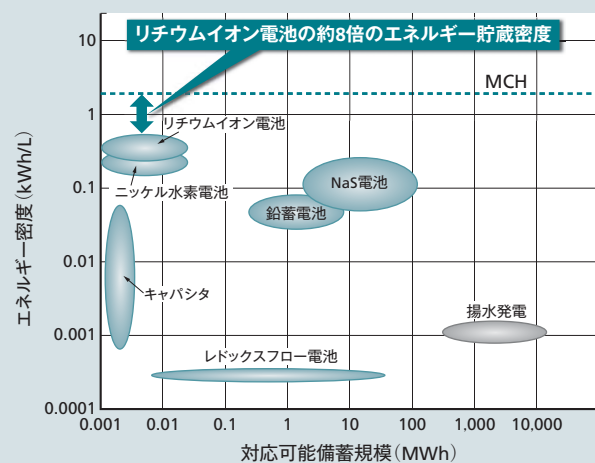
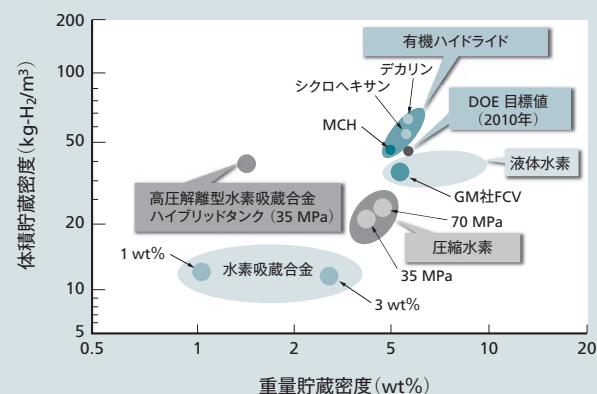


図2 各種エネルギー貯蔵方法のエネルギー密度と備蓄可能規模の比較

MCHのエネルギー密度は、リチウムイオン電池の約8倍である。備蓄可能量は他の石油類と同様に備蓄用タンクの容量による。



出典：日本工業出版編「よくわかる水素技術」（2008年）

注：略語説明 DOE (United States Department of Energy：米国エネルギー省)、GM社 (General Motors Corporation)、FCV (Fuel Cell Vehicle：燃料電池自動車)

図3 各種水素貯蔵方法の貯蔵効率の比較

各種水素貯蔵方法の貯蔵効率の比較を示す。有機ハイドライドは、水素の貯蔵密度の観点からも有力な手段である。

性があるため取り扱いに注意が必要であること、ナフタレン-デカリンの組み合わせはナフタレンの融点が80°Cであるため常温では固体であることから、いずれも実用性の面で問題がある。これに対し、トルエン-MCHは取り扱いの容易性、入手性、毒性などの観点から優れており、実用性が高い有機ハイドライドである。

## 2.2 循環型再生可能エネルギーシステムの原理と課題

循環型再生可能エネルギーシステムは、以下の三つのサブシステムで構成されている。（図4参照）。

### (1) 水素生成サブシステム

風力・太陽光発電などの再生可能エネルギー由来の電力、または余剰電力などにより水電解装置を利用して水を電気

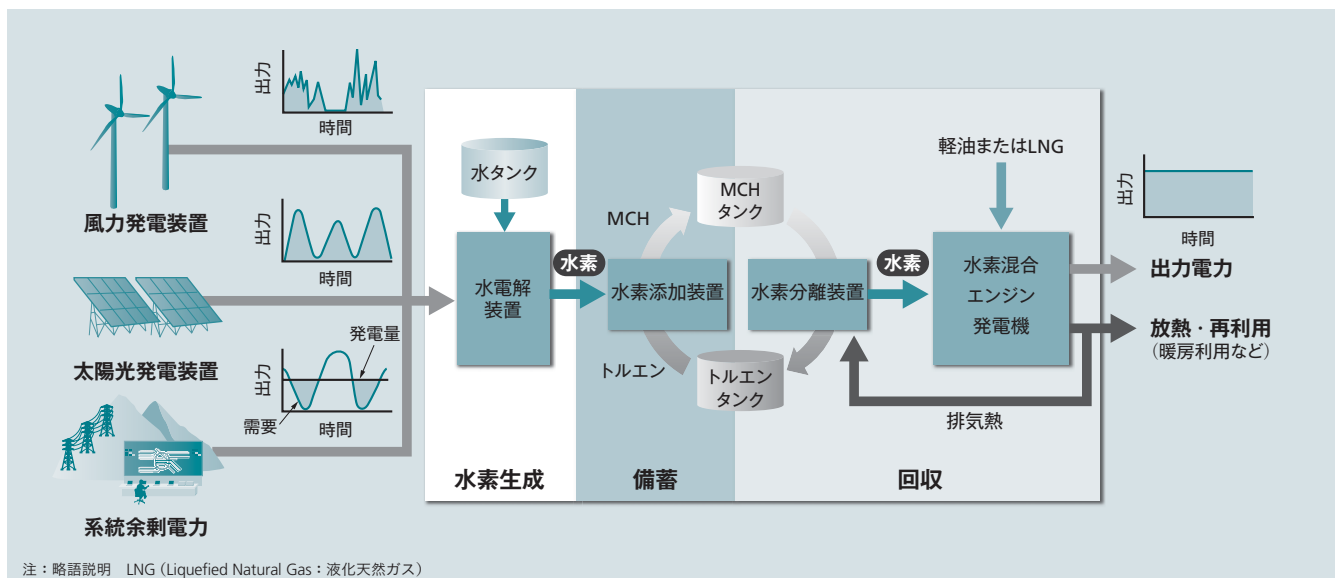


図4 | 循環型再生可能エネルギーシステムの構成  
水素生成、備蓄、回収の三つのサブシステムで構成される。

分解し、水素を生成するサブシステムである。

一般の水電解装置は定格運転をすることを想定しており、入力が大きく変動した場合にはそれに対する追従性に乏しい。そのため、変動が大きい再生可能エネルギーから効率よく水素を生成することが困難である。

発生した再生可能エネルギーを効率よく回収・備蓄して再利用するためには、入力電力の変動に応答できる水電解装置の開発が必要である。

## (2) 備蓄サブシステム

水素生成サブシステムで生成した水素とタンクに蓄えたトルエンを水素添加装置に送り、水素添加反応によりMCHを生成する。生成したMCHはタンクに蓄える。

水素添加反応を行う反応器は大型であり、分散電源システムなどに適用するためには反応器の小型化が課題であった。また、水素生成サブシステムから供給される水素量に応じてトルエン供給量を制御することも必要である。

## (3) 回収サブシステム

MCHタンクに蓄えたMCHを水素分離装置に送り、脱水素反応によって水素とトルエンを分離する。この脱水素反応に必要な反応熱は、水素混合燃焼エンジン発電機の排熱を利用して供給する。

分離した水素は、水素混合燃焼ディーゼルエンジン発電機または水素混合燃焼ガスエンジン発電機で電力と熱を取り出し、需要者に供給する。分離したトルエンはタンクに貯蔵し、MCHを作るために再利用する。

ここでは、水素混合エンジンの燃焼を最適化するためのエンジン制御技術が不可欠である。

また、発電に使用するディーゼルエンジン発電機の効率是一般的におおむね40%程度であり、その損失の大半は

排熱として捨てられていることが、このシステムのエネルギー効率悪化の最大の原因となっている。したがって、エネルギー効率向上のためには排熱の有効利用が課題である。

## 2.3 循環型再生可能エネルギーシステムの開発

日立製作所は、長年にわたり有機ハイドライドの利用システムに関する研究を進めている。すでに、前述した課題を解決し、高効率水電解装置、小型高効率水素添加／水素分離装置などを実装した40 kW級実証実験プラントを茨城県日立市に設置して、システムの実用化をめざしている（図5参照）。

この実証試験プラントは水素混合燃焼ディーゼルエンジン発電機を備えており、ディーゼル発電機に水素を混合して燃焼することで、約30%の軽油消費量を削減できることを確認した。また、この施設を設置した工場では風力発



図5 | 40 kW級循環型再生可能エネルギー実証実験プラント  
40 kW級の実証実験プラントを茨城県日立市に設置し、循環型再生可能エネルギーシステムの実用化に関する開発を進めてきた。



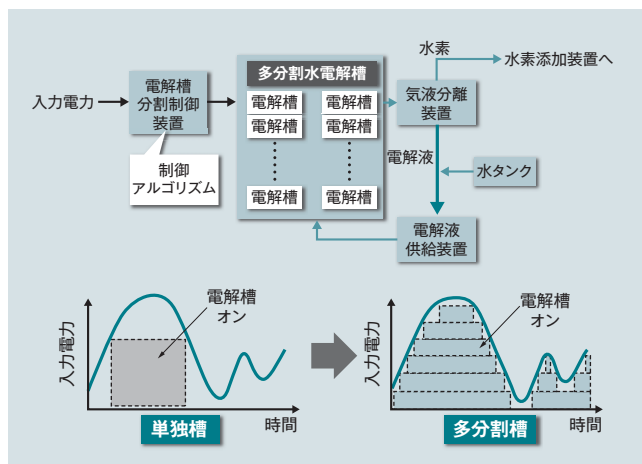


図6 | 水電解装置の特長

電解槽を多分割することで、入力電力の変動に追従して常に最適電圧で運転することができ、高効率電解を実現する。

電施設、太陽光発電施設、コージェネレーション発電施設、大容量鉛蓄電池などを備えて工場内マイクログリッド実証実験を実施しており、この設備との連携も計画している。

#### (1) 水素生成サブシステム用高効率水電解装置

水素生成サブシステムの課題であった、再生可能エネルギーによる入力電力の変動に追従するために、水電解装置には独自開発の耐食性、応答性に優れた電極材を採用した。さらに、電解槽を多分割し、入力電力に応じて運転する電解槽の数をリアルタイムで制御することにより、各電解槽を最も効率のよい条件で運転し、入力変動に追従した高電解効率を実現している（図6参照）。

#### (2) 小型高効率水素添加／水素分離装置

備蓄サブシステムおよび回収サブシステムで用いる水素添加／水素分離装置には、触媒表面の物性を最適化し、温度・圧力条件によって脱水素反応と水素添加反応のいずれにも対応できる触媒材料を開発した（図7参照）。

また、反応器の伝熱経路を最適化し、エンジンの排気管に装着してエンジンの高温排気ガスを利用できる小型高効率の熱交換型反応器を開発した。この反応器は、水素添加反応は約200℃、脱水素反応は約350℃で、いずれも高压ガス保安法の規制（0.2 MPa未満）以下の範囲で使用できる。この小型高効率の反応器を実現することにより、分散電源などへの適用といった実用化に際しての設置場所の制約を受けないシステムを実現した。

さらに、高温排気ガスの熱を回収・再利用することで、エンジン発電機の効率を実質5%程度向上させた。

### 2.4 循環型再生可能エネルギーシステムの課題と対応策

このシステムの課題は、エネルギー効率である。現在のシステムでは、入力電力に対する出力電力の比率はおおむね30%である。これは、入力から出力までの間、複数の

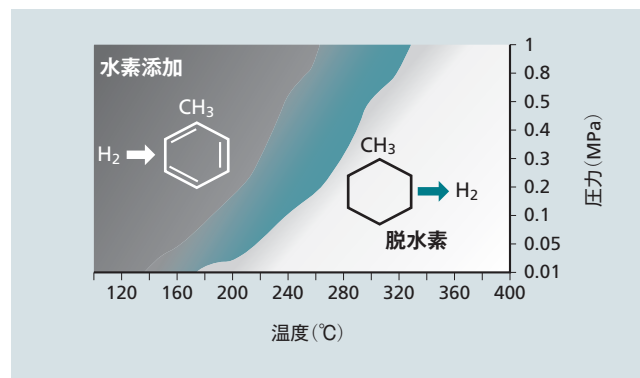


図7 | 水素添加／水素分離装置用触媒の特性

温度・圧力条件により、脱水素と水素添加を切り替える。また、高压ガス保安法の規制（0.2 MPa未満）以下で使用できる。

過程を経ることによりそれぞれの過程における損失が累積するためである。

中でもディーゼルエンジン発電機の排熱として捨てられている熱損失は最も大きく、これを回収・再利用することが効率改善の鍵となる。現在でも、水素分離装置の吸熱反応のために排熱の一部を回収し、ディーゼルエンジン発電機における効率を5%程度改善しているが、さらなるエネルギー効率向上のためには排熱利用が不可欠である。

エンジンの排熱供給、コージェネレーションによる熱電供給などにより、将来は入力エネルギーの60%以上を回収することが目標である。

### 3. にかほ市における実証実験

#### 3.1 目的、試験装置構成および実験内容

南極の昭和基地では、将来的に南極で自給できる再生可能エネルギーの大規模な利用が見込まれている。日立製作所は国立極地研究所との契約に基づき、将来の昭和基地におけるエネルギー自給率向上のための基礎データ収集を目的として、2011年11月から2012年3月まで秋田県にかほ市の仁賀保高原で実証実験を実施した（図8参照）。

実験機材のエンジン発電機容量は風力発電機の稼働率をおおむね10～15%と想定し、風力発電機の定格20 kWに対して3 kWの発電機を採用した。また、水電解装置は入力電力と装置規模のバランスを考慮し電解槽を16分割とした。

仁賀保高原は、風況が昭和基地と類似した寒冷地であり、ここで得られた循環型再生可能エネルギーシステムの特長や抽出された問題点の分析成果は将来の南極における実用システム開発のための貴重な情報となる。

具体的には、現地送付前の場合ならびに仁賀保高原において、電解層入力電力、温度、密度、水素発生量など、全16項目のデータを計測し、その結果を比較分析し、寒冷地固有の特性や課題などを抽出することができた。

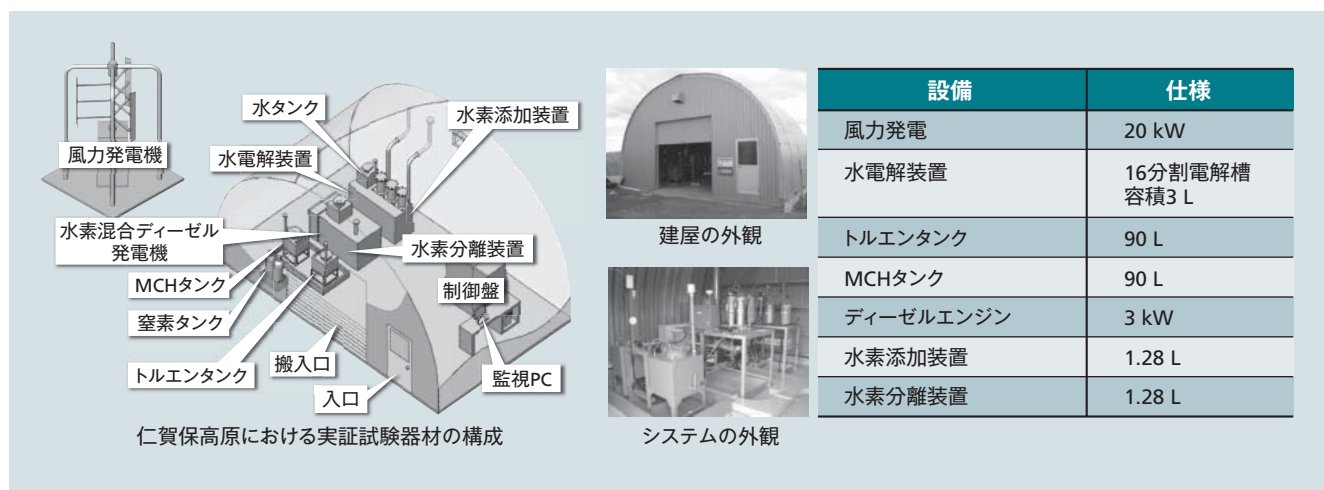


図8 | 秋田県にかほ市における実証実験

大学共同利用機関法人情報・システム研究機構国立極地研究所の風力発電機（既設）と接続して試験データを収集する。

これらの課題とその対策は、将来の南極向け実用化システムに反映していく。

### 3.2 実験結果と考察

実験の結果、軽油削減率約22%を達成した。また、トルエン回収率は低温になるほど気液分離には有利であり、現地のほうが高効率であった。一方、電解効率、MCH生成率、回生効率はいずれも現地のほうが僅かながら低下している（表1参照）。

また、水電解装置の入力電力と発生水素流量を比較すると、風力発電機の入力変動におおむね10秒程度のタイムラグで追従し、定格運転の場内試験に比べ、現地試験の変動電力に対しても極端に電解効率は低下してはいない。この遅延は、配管などのバッファ効果によるものと想定され、電解層を多分割することの効果が確認できた（図9参照）。

電解効率、MCH生成率、回生効率の低下は、低温環境によって電解槽および反応器の触媒の効率が低下したことが原因と推測される。したがって、将来の実用システムでは、保温、放熱の抑制などにより、各反応プロセスの温度環境を周囲温度に応じて改善するとともに、プロセスごとの効率向上を図るための施策を検討する。

表1 | 仁賀保高原における実証試験結果

現地では、トルエン回収率以外の結果はいずれも僅かずつ低下している。

| 試験項目         | 計測データ       | 場内試験結果    | 現地試験結果   |
|--------------|-------------|-----------|----------|
| 電解効率         | 水素発生効率 (%)  | 65%       | 61.4%    |
| MCH生成率       | MCH生成率 (%)  | 99%       | 94%      |
| 軽油削減量        | 軽油削減率 (%)   | 23%       | 22%      |
| 回生効率 (水素生成率) | 回生効率 (%)    | 85%       | 82%      |
| トルエン回収率      | トルエン回収率 (%) | 95%       | 99.6%    |
| —            | 外気温度 (°C)   | 14°C～23°C | 2°C～-3°C |

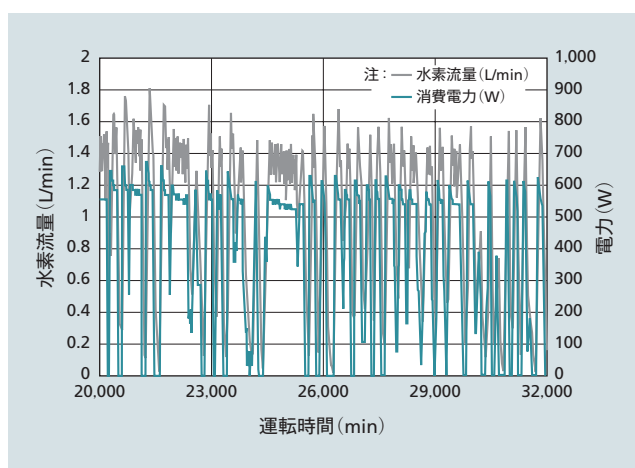


図9 | 水電解装置のレスポンス性

変動電力におおむね10秒程度のタイムラグで追従しており、配管などのバッファを考慮すると良好なレスポンス性を有していることを確認した。

### 4. おわりに

ここでは、日立グループが取り組んでいる循環型再生可能エネルギーシステムの概要と、2011年度に国立極地研究所との契約に基づいて実施した秋田県にかほ市における実証実験について述べた。

循環型再生可能エネルギーシステムは、南極で得られた再生可能エネルギーを長期間備蓄、再利用することで燃料消費を抑制できるため、南極のエネルギー問題の解決に貢献できるものとする。また、化石燃料消費量の抑制は、そのままCO<sub>2</sub>の削減にも貢献する。

「エネルギー白書2011」などによれば、わが国のエネルギー自給率は7%であり、原子力を加えても19%である。さらに、日本主導による資源開発成果を加えた自主エネルギー比率でも38%にとどまっており、日本のエネルギー基盤は脆（ぜい）弱であると言わざるを得ない。

エネルギー安全保障の観点からエネルギー自給率の向上は必須の課題であり、その対策として再生可能エネルギー利用率向上への期待は高い。このシステムは、変動が大きい

い再生可能エネルギーの備蓄，輸送を含めた取り扱いの容易性を提供することで，わが国のエネルギー自給率向上にも貢献できる技術である。

しかし，この技術がエネルギー自給率の向上に貢献するには，循環型再生可能エネルギーシステムが提供する水素エネルギーの利用が相応規模に拡大・多様化し，普及する必要がある。そのためには，火力発電における水素混合燃焼，燃料電池，バーナ，ボイラ，吸熱冷凍機などの燃料への適用，水素エンジンなど，さまざまな水素利用技術の開発と普及拡大が課題となる。

水素社会が提唱されて久しいが，残念ながらいまだ実現には至っていない。水素は取り扱いが難しく，水素利用技術が進展しないこともその一因であると考ええる。この技術の普及が水素の取り扱いが容易になる契機となることで，水素エネルギー利用技術の拡大が進み，低炭素社会・水素社会の扉を開く一助となることを願い，今後もこのシステムの研究開発を進めていく。

#### 参考文献など

- 1) 寺田，外：有機ハイドライド法による高温ガス炉ISプロセス水素貯蔵・供給システムの概念検討，日本原子力研究開発機構（2012.2）
- 2) 平田，外：よく分かる水素技術，日本工業出版（2008.1）
- 3) 石川，外：平成18年度将来型燃料高度利用研究開発報告書，有機ハイドライド方式オンボード水素発生システムの研究開発（2），財団法人石油産業活性化センター（2007.3）
- 4) 平成22年度エネルギーに関する年次報告（エネルギー白書2011），経済産業省資源エネルギー庁（2011.10）
- 5) 新たなエネルギー基本計画の策定について，報道発表，経済産業省（2010.6）  
<http://www.meti.go.jp/press/20100618004/20100618004.html>

#### 執筆者紹介



江守 肇

1982年日立製作所入社，ディフェンスシステム社 装備システム本部 エンジニアリング部 所属  
現在，エネルギー安全保障分野，重要施設防護分野のシステム事業化に従事



川村 徹

1991年日立製作所入社，ディフェンスシステム社 装備システム本部 電機システム設計部 所属  
現在，エネルギー安全保障分野，重要施設防護分野のシステム設計に従事



石川 敬郎

1992年日立製作所入社，中央研究所 エレクトロニクス研究センタ エネルギーエレクトロニクス研究部 所属  
現在，水素エネルギー，新エネルギー分野の開発に従事



高村 哲夫

1976年株式会社日立エンジニアリング・アンド・サービス入社，エネルギーネットワーク本部 所属  
現在，有機ハイドライドほかの新エネルギーシステムの事業化に従事  
技術士（機械／熱工学）  
日本冷凍空調学会会員