

再生可能エネルギーを利用した 水素製造施設FH2Rの実証運用

Demonstration Operation of FH2R Hydrogen Production Facility Using Renewable Energy

中嶋 啓太 NAKAJIMA Keita 馬場 隼祐 BABA Junsuke

東芝エネルギーシステムズ(株)は、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)の委託により、世界有数規模の10 MWの水素製造装置及び20 MWの太陽光発電(PV)設備を備えた水素製造施設(福島水素エネルギー研究フィールド(FH2R))の開発・実証運用事業を、福島県浪江町で2016年に開始した。

2019年までに水素プラントの建設工事と試運転を完了し、制御システムの開発及びFH2Rへの実装後、2020年から制御システムを用いてデマンドレスポンス(DR)機能の確認などを目的とした実証運用を進めている。

Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation has been participating in the construction and demonstration operation of a hydrogen production facility equipped with a 10 MW-class hydrogen production unit and a 20 MW solar photovoltaic power generation facility in Namie, Fukushima Prefecture, since 2016, through the Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R) project commissioned by the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO).

In 2019, we completed the construction and commissioning run of the hydrogen production facility as well as the development, evaluation, and implementation of the control system. Since 2020, we have been conducting demonstration operation using this control system aimed at confirming its functions including a demand response (DR) function for maintaining the balance of electricity supply and demand.

1. まえがき

国内のエネルギーの現状は、エネルギー安全保障や、化石燃料への依存、温室効果ガスの排出増加など、様々な問題を抱えており、安定した供給や経済性の向上と同時に、環境への適合を図るための取り組みが進められている⁽¹⁾。その一つとして、PVや風力発電などの再生可能エネルギー(以下、再エネと略記)の導入・普及が進んでいるが、気象状況による変動が大きく、コントロールが困難で、急激な出力変動により電力の需給バランスが不均衡になるなど、系統安定化の面での問題がある。

現在、国内の電力系統における需給バランス調整を行う“調整力”は、主に火力発電が役割を担っているが、将来、カーボンニュートラル化が進むとともに、これに代わるクリーンなエネルギーによる調整力が必要となる。水素エネルギーシステムは、この課題を解決する一つとして注目されており、中でも余剰電力を水素などのガスに変換するPower to Gas(P2G)は、調整力不足を解消するための技術の一つとして期待されている。

近年、水素を用いた様々な実証実験が欧州をはじめとした各地で行われているが、国内ではP2Gを含む実証実験は小規模なものから進められており、大規模なものは行われていない。その中で、東芝エネルギーシステムズ(株)

は、10 MWの水素製造装置と20 MWのPV設備を備えたFH2Rの開発・実証運用を行うNEDO委託事業を2016年から開始した。

NEDO委託事業では、2016年から2017年にかけてFS(フィジビリティースタディー)フェーズを行い、電力系統における需給バランス調整に貢献する水素活用事業モデルと、水素需要に応じた水素製造を行う水素販売事業モデルを同時に確立する事業モデルが選定された。また、電力系統で見込まれる調整力、水素販売事業のポテンシャルの観点、及び将来の実用可能性から、実証のために適切なシステム構成が決定された。2017年に福島県浪江町で実証フェーズが開始され、2019年にはFH2Rの建設工事、試運転が完了し、2020年から実証実験が行われている。

この論文では、FH2Rのシステム構成の概要を述べるとともに、これまでに行ってきた実証実験やFH2Rで取り組んでいる安全対策について述べる。

2. FH2Rシステム構成

FH2Rの全景、構成要素を図1に示す。

水素製造装置は、最大入力電力10 MWまでの可変運転が可能で、出力変動の大きい再エネを最大限活用できる。また、20 MWのPV設備で発電した電力を用いて製造される水素は、二酸化炭素(CO₂)フリー水素であり、CO₂



図1. FH2Rの全景

PV 設備、水素製造装置などを備え、出力変動の大きい再エネを最大限活用できる水素製造システムである。

Overview of FH2R

排出削減に貢献する。更に、受変電設備を介してDRを行う機能を備えており、電力システムの安定運用と再エネの利用拡大にも貢献する⁽²⁾。製造された水素は、水素貯蔵供給装置からトレーラー又はカードルに充填され、各地へ輸送される。これらの施設は、管理棟で集中的に管理される。

FH2Rのシステム構成を図2に示す。FH2Rでは水素の製造、貯蔵、充填が一貫して行われ、これらの運用は、FH2R内設備の監視・制御を統括する制御システムである水素エネルギー運用システムによって実現される。水素エネルギー運用システムは、ほかの制御システムとも連携しており、電力系統側制御システムはDR実施要否の判定とDR指令を、水素需要予測システムは水素需要予測結果を水素エネルギー運用システムに送信する。

水素エネルギー運用システムは、計画機能、制御機能、プラント保護機能などの機能を備える。

計画機能は、水素製造コストを最小化する最適化問題を解くことで、最適な運転計画を作成する。DR可能な電力量と水素製造装置の入力電力や、状態遷移、水素貯蔵供給装置のバッファタンク内水素残量などを数理モデル化し、混合整数線形計画問題としてソルバーで最適化する。これにより、再エネを有効利用しながら、DR要求と水素需要の両方に対応した最も水素製造コストが小さくなるプラント運転計画の立案を実現した。

制御機能は、計画機能で求めた運転計画に基づいて、水素製造装置とPV用パワーコンディショナー(PV-PCS)の制御を実施する。DRの時間帯は、30分間隔ごとに受電電力量の目標値を計画して実際の受電電力量を一致させ、DR以外の時間帯は、運転計画に含まれている水素製造量を目標値として実際の水素製造量を一致させる。従来手法

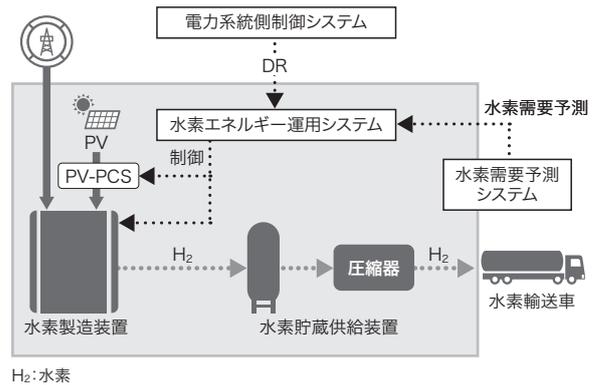


図2. FH2Rのシステム構成

水素の製造、貯蔵、充填が一貫して行われ、エネルギー運用システムが設備を監視・制御している。

Systems constituting FH2R

では、目標値を受電電力量とした場合、受電電力量の誤差が積算誤差として大きく発生する問題があった。そこで、誤差を小さくするために、積分型PI(比例、積分)コントローラーを採用した。これにより積算誤差が補正され、誤差を減少させることができた。また、従来手法では、水素製造量が目標値を達成できない問題があったが、この点も同時に解消された。

プラント保護機能は、再エネ発電やプラントの状況が計画時と大きく変化した場合に、プラントを保護するための運転を実施する。このような場合でも、計画機能や制御機能により適切に制御することで、再エネ発電電力の有効利用や受電電力量と水素製造量の目標値は達成可能である。

3. FH2R実証運用

実証実験として、FH2Rの各設備の機能を確認するための試験を実施した。ここでは、制御機能確認試験と再エネ有効利用率のシミュレーション結果について述べる。

制御機能確認試験として、FH2Rを稼働させた実機試験を実施した。DRの時間帯の試験結果を図3に示す。

13:30から15:30まで30分ごとに目標受電電力を変えて試験を実施した。最初の30分間(時間帯①)は、目標受電電力が高いため、水素製造装置の入力電力を最大にしなが、PV-PCSでPVの出力電力を抑制することで目標受電電力と受電電力実績値を一致させている。

14:00から15:00の間(時間帯②)は、目標受電電力が下がった分、PV-PCSの出力電力実績値を上げている。最後の30分間(時間帯③)は、目標受電電力が低いため、PV-PCSではPVを抑制する必要はなく、水素製造装置の入力電力をPV電力実績値に追従させている。

次に、再エネ有効利用率のシミュレーション結果について述べる。再エネ有効利用率とは、再エネをどれだけ有効利用できたかを示す指標として独自に定義したもので、水素製造装置が利用した再エネ発電電力を水素製造装置が利用してきたであろう再エネ発電電力で除した値である。

結果として、再エネ有効利用率は80.2%と算出された。シミュレーション結果を図4に示す。4, 5, 8月はPV電力実績値が多く、水素を多く製造しようとするが、再エネ有効利用率が低くなっている。この原因の一つとして、バッファータンク内の水素残量が貯蔵可能な上限値に達するのを避けるために水素製造量を抑える制御をしている点が挙げ

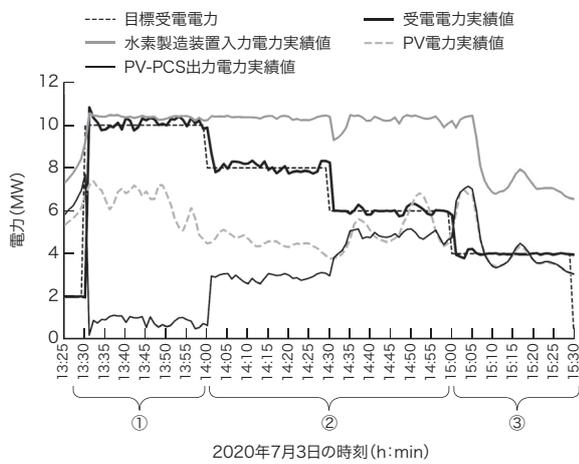


図3. 制御機能確認試験結果

①, ②, ③それぞれのDR時間帯において、目標受電電力を満たすように水素製造装置とPV-PCSの制御を行った。

Results of system tests on control functions for hydrogen production unit and photovoltaic power conditioning system (PV-PCS)

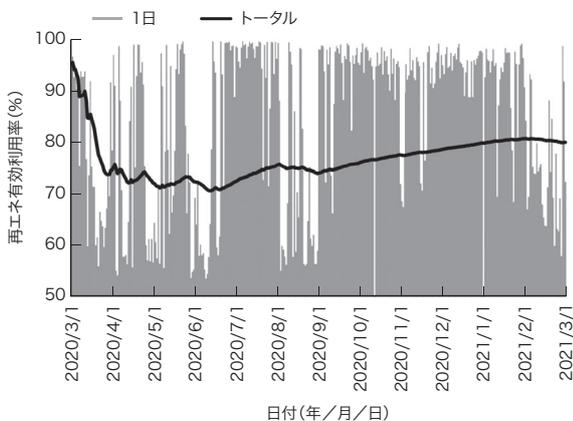


図4. 再エネ有効利用率のシミュレーション結果

2020年3月から2021年2月までの1年間のデータを用いてシミュレーションを実施した。

Results of simulation of effective utilization rate of renewable energy

られる。今後、水素需要が拡大し、1日における水素貯蔵供給装置の稼働時間が長くなることで、バッファータンク内の水素の流動性が上がり、再エネ有効利用率を向上させることができると考えられる。

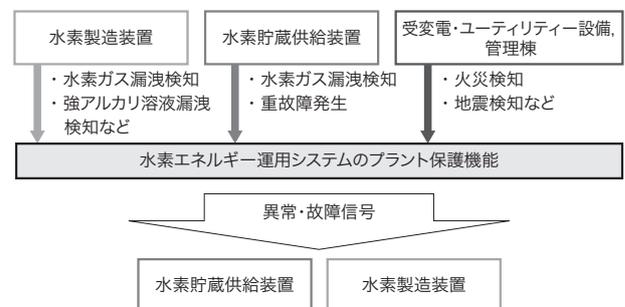
4. FH2Rにおける安全対策

水素は、可燃濃度範囲が広く、最小着火エネルギーが低いと、広く流通している天然ガスなどと比較して、爆発事故や火災が発生しやすいことが懸念される。したがって、取り扱う上では、物性を理解し、安全対策を講じて利用することが重要である⁽³⁾。

また、FH2Rにおける水素製造では、アルカリ水電解法を採用し、電解液として強アルカリ溶液を利用しているため、取り扱いには十分に留意しなければならない。これらの物質の性質を踏まえ、当初のFH2Rにおけるプラント設計の中で行った、安全対策の一例を以下に述べる。

(1) プラント保護機能 水素エネルギー運用システムのプラント保護機能の概要を図5に示す。

水素製造装置、水素貯蔵供給装置、管理棟、受変電設備、及びユーティリティ設備に関する機器の数値データや、状態信号、故障信号などを監視し、異常を検知した場合、プラント保護機能から水素製造装置及び水素貯蔵供給装置へ異常・故障信号を出力する。プラント保護機能が働く異常・故障信号は、火災・地震の発生や、水素ガス漏洩(ろうえい)検知、強アルカリ溶液漏洩検知などがあり、現場作業員の安全に直結するものである。水素製造装置及び水素貯蔵供給装置は、入力された異常・故障信号を受け、各装置の制御装置で設備停止を行い、安全な状態へと移行される。その後、故障の発生要因、箇所、影響の特定を



*運転停止は各装置で実施

図5. プラント保護機能の概要

プラント内の機器の状態を監視し、異常を検知した場合には、異常・故障信号を出力し、プラントを保護する。

Outline of protective functions for systems constituting FH2R

行った上で、各装置を順次復旧させる。

- (2) 水素漏洩対策 水素を安全に利用するため、FH2Rでは、(i)漏洩防止、(ii)漏洩の早期検知・拡大防止、(iii)滞留防止、(iv)引火防止を設計の基本方針とした。各設備では、(i)に関係する設計をしているが、ここでは、水素製造装置を設置している建屋における、特に(ii)、(iii)、(iv)に関係する安全対策について述べる。

水素漏洩の早期検知のため、水素が滞留しやすい建屋上部及び漏洩源となる可能性が高い水素製造装置近傍に、水素ガス検知器を設置している。また、滞留防止対策として、建屋天井の屋根構造を片勾配とすることで、滞留した水素が建屋外部へ放出されやすいようにした。

更に、万が一水素が漏洩して滞留した場合にも、引火しないように、建屋内機器は防爆対応品を採用し、着火源を排除している。

- (3) 強アルカリ溶液漏洩対策 強アルカリ溶液の安全対策として、水素製造装置内の強アルカリ溶液が漏洩した場合にも、建屋外への流出を防ぐ防液堤を設置している。

また、水素製造装置外にアルカリ成分が排出されることはないが、万が一流出した場合に備え、排水の水素イオン指数(pH)の監視を行い、異常が検知された場合、プラント保護機能が働く設計としている。

5. あとがき

カーボンニュートラル化に向けたエネルギー転換が進む中で、水素エネルギーを用いたP2Gは、電力系統の安定化に大きく貢献すると考えられる。

FH2Rの実機を運転し、系統電力の需給バランス調整と水素製造の両立に関する実証実験を行っているが、2022年には、電力システム改革や電力市場制度の動向を踏まえ、PV設備由来の電力の逆潮流機能を追加することなどで、需給調整リソースとしての水素エネルギーシステムの機能向上を目指した実証実験も行う予定である。

更に、将来は、図6に示すような、NEDO委託事業の10倍、100倍以上の規模のP2Gから、電力市場や、プラント外の再エネ、蓄電池などを利用し、様々な水素利活用地点へ水素を供給する事業モデルを目指していく。そのため、当社はFH2Rを最大限活用し、世界を代表するP2G事業モデルを確立していく。

この実証実験の成果の一部は、NEDOの技術開発事業「水素社会構築技術開発事業」(JPNP14026)で実施し

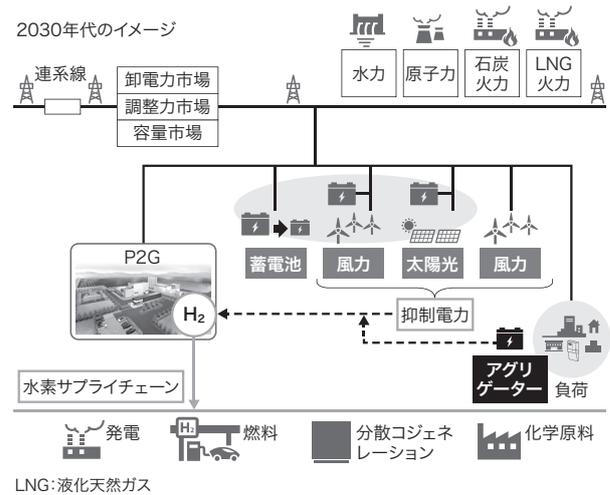


図6. 将来のP2G事業の例

100 MW超級のP2Gプラントから水素を供給する事業モデルで、更なる再エネ利用と系統安定化に貢献することを目指す。

Example of prospective power-to-gas (P2G) business

たものである。

文 献

- (1) 資源エネルギー庁. エネルギー基本計画. 2021, 128p. <https://www.enecho.meti.go.jp/category/others/basic_plan/pdf/20211022_01.pdf>, (参照 2022-03-09).
- (2) 秋葉剛史. 再生可能エネルギーを利用した大規模エネルギーシステム. 電気学会誌. 2020, 140, 8, p.520-525.
- (3) 佐藤保和. 安全に関わる水素の性質. 安全工学. 2005, 44, 6, p.378-385.



中嶋 啓太 NAKAJIMA Keita, Ph.D.
東芝エネルギーシステムズ(株)
エネルギーアグリゲーション事業部 水素エネルギー技術部
博士(学術)
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.



馬場 隼祐 BABA Junsuke
東芝エネルギーシステムズ(株)
エネルギーアグリゲーション事業部 水素エネルギー技術部
Toshiba Energy Systems & Solutions Corp.