

再生可能エネルギーを活用した水素ステーション向け 水電解システムの設計と運用方策に関する研究

Rational System Design and Adaptive Operation Strategy for a Renewable Power-to-Gas System at a Hydrogen Refueling Station

石田 政義*¹, 杉本 一郎*²

Masayoshi Ishida

Ichiro Sugimoto

Abstract : University of Tsukuba and Kobe Steel Group developed a middle-scale (1.5 kg-H₂/hour) proton exchange membrane (PEM)-type electrolysis system (EL-System) powered by a photovoltaic generation (PV) incorporated with a hydrogen refueling station (HRS) in 2017. This article focused on the work of University of Tsukuba ; a rational system design and an adaptive operation strategy on the PV-powered EL-System at a HRS. The system design was to explore a better capacity assignment between nominal input power of the EL-System and rated PV output power to increase utilization factor of that system. The operation strategy was to keep input power of the EL-System above a fixed level in a day by the grid restricting carbon dioxide emissions of the whole HRS-supply hydrogen below a pre-specified value. Our simulation results proved that utilization factor of the PV-powered EL-System was possible to increase more than twice compared to that of the off-grid reference system.

Key Words: Water electrolysis system, PEM electrolyzer, Photovoltaic generation, Hydrogen refueling station

1. はじめに

欧州諸国では、2000年代初頭から再生可能エネルギー (RES : Renewable Energy Sources) を活用した、Power-to-Gas (P2G) 実証事業が始まり、特に2012年から2015年にかけて水素製造プラントの規模が大型化し (平均容量が118kW_{el}から390kW_{el}に)、2019年1月時点では56プロジェクト (合計容量 = 38.6MW_{el} ; 平均容量689kW_{el}) が稼働している¹⁾。また欧州連合 (EU) は「パリ協定」に基づき、温室効果ガス (GHG) の排出を2030年までに40%削減 (1990年比) することを掲げているが、さらに欧州委員会 (EC) は2018年11月28日、2050年までに80%以上削減 (1990年比) して「気候中立 (climate neutral; 実質排出ゼロ)」を実現する長期戦略を発表した²⁾。この戦略ではP2Gによるカーボンフリー水素とCO₂吸着

による合成メタンが、従来の天然ガスやオイルに替わる主力のエネルギーとして位置付けられている³⁾。

わが国でも、政府において2017年12月に水素基本戦略が策定され、2030年までに従来のエネルギー (ガソリン、LNG等) と同等程度のコストを達成して、水素社会を実現する目標を掲げている⁴⁾。この戦略では、2020年までに160ヵ所、2030年までに約900ヵ所の水素ステーション (HRS : Hydrogen Refueling Station) の整備が計画されており、2019年11月時点では、110ヵ所が開所済みで24ヵ所が建設中の段階にある⁵⁾。

神戸製鋼グループ (株神戸製鋼所、(株)神戸環境ソリューション、(株)神戸エンジニアリング&メンテナンス) と筑波大学は、2016年度～2017年度に環境省委託・補助事業「中規模 (1.5kg/h程度) の高圧水素を製造する再エネ由来水素ステーション関連技術開発・実証」 (以下、環境省事業) を実施し、太陽光発電と系統電力を入力電源としてP2Gにより製造したローカーボン水素を併設する水素ステーションに供給する、水電解システム (EL-System) の開発・実証を行った。その後も両者は当該システムの運用方策に関する研究を継続している。

*¹ 筑波大学 システム情報系 構造エネルギー工学域 教授
University of Tsukuba, Faculty of Engineering, Information and Systems Professor

*² (株)エネルギー・生活科学研究所 所長
Laboratory of Energy & Human Life Science Inc. CEO

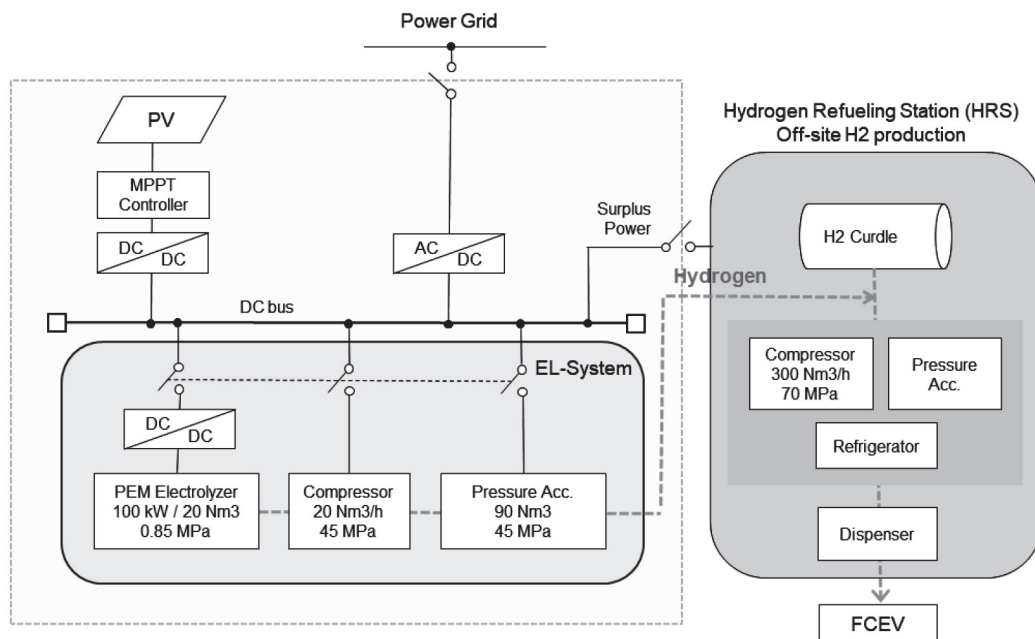


図1 太陽光発電－水電解システム－水素ステーション：連系システムの構成⁶⁾
Fig. 1 System configuration of PV – EL-System – HRS.

本稿では、上述の環境省事業で実施した、主に筑波大学側の内容、「太陽光発電を活用した水素ステーション向け水電解システムの設計と運用方策の検討」（以下、本研究）について述べる。

2. 水素ステーション向け水電解システムの概要

まず、本研究において検討対象とした「太陽光発電－水電解システム－水素ステーション」連系システムの構成を図1に示す。

水電解システム（EL-System）は、PEM 水電解槽（PEM Electrolyzer；定格入力 100kW_{el}、定格出力 20Nm³-H₂/h）、圧縮機（compressor；45MPa）、蓄圧器（pressure accumulator；90Nm³-H₂、45MPa）から構成される。ここで水電解システムは、電気的には一体として稼働するサブシステムと捉えることができ、DC バスライン（DC48V）上で太陽光発電（PV）と常時接続され、必要に応じて系統電力（Power Grid）と連系する仕組みを有している。また水電解システムで製造された水素は、優先的に水素ステーション（HRS）から燃料電池自動車（FCEV）に払い出され、不足分は水素ステーション内のカードル充填水素（H₂ Curdle；ナフサ改質水素を想定）で補填される。水素供給能力の観点では、水電解システムは水素ステーション容量（300Nm³/h）の 1/10 程度を担い、水素ステーションと連携稼働して、ローカーボン水素を払い出す仕組みに



図2 水電解システムの外観（神戸製鋼所 高砂製作所内）⁷⁾
Fig.2 Outlook of EL-System (in Kobe Steel Takasago Works).

なっている。

図2に、神戸製鋼所高砂製作所内の水電解システム（EL-System；本機という）の外観を示す。水電解システム本機については、神戸製鋼グループによって開発および運転実証、仕様検証、水素ステーションと連携した実証運転、耐久試験等が行われたが、本稿ではその内容は割愛する。

図3に、筑波大学藻類バイオマス・エネルギーシステム開発研究センター内に設置された、スモール・スケールの水電解システム（以下、実験システムという）を示す。開発研究センター屋上には、太陽光発電パネルが設置され（定格出力 1.44KW）、最大電力点追従装置（MPPT：Maximum Power Point Tracing）を介して実験システムに接続されている。

実験システムは、DC バスライン（DC48V）上に、本機と同仕様の PEM 水電解スタック（2セル×3直列；定格入

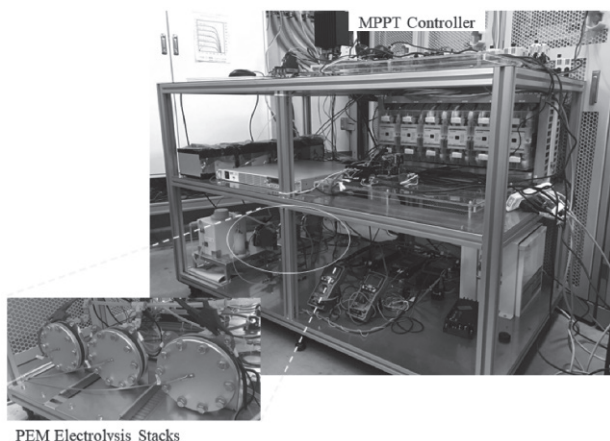


図3 実験システム（筑波大学 藻類バイオマス・エネルギーシステム開発研究センター内）⁶⁾

Fig.3 Small-scale experimental system and PEM electrolysis stacks (at University of Tsukuba).

力 = Max 21V × 36A、定格出力 = Max 1.5L-H₂/min)、安定化電源、電流センサ、マスフローメータ、DC/DCコンバータ等を搭載し、水電解システムの基本的な特性を把握するために試作された。

本研究では、実験システムにより PEM 水電解スタックの静特性（e.g. 電流－電圧特性、ヒステリシス）および過渡特性（e.g. 入力変動に伴う追従特性）を詳細に計測し、水電解システムの静特性と動特性をモデル化する。一方本機で計測したポイントデータ（入出力値）、起動時間等を基に、当該モデルを補正する。更に、得られた静特性・動特性モデルを計算機に実装し、水電解システムの容量設計および運用方策の検討のためのシミュレーションを行う。

3. 水電解システムの計測とモデル化

実験システムは本機と同仕様の PEM 水電解スタックを搭載しているが、補機（ヒータ・冷却ポンプ等）や付属設備（圧縮機・蓄圧器等）に相当する負荷は未搭載のため、まず水電解スタックの「電流－電圧特性」（以下、I－V特性）を、昇順（up）・降順（down）に出力（水素製造量）の安定を確認して計測した。

図4に、PEM 水電解スタックの I－V 特性の計測値（昇順・降順）を示す。ここで、I－V 特性の昇順（○値）と降順（●値）に僅かにヒステリシスがあることがわかる。

次に PEM 水電解スタックのモデル化について検討する。本機の PEM 水電解スタックの I－V 特性は、実験システムの計測値（図4参照）と同様の特性を示すが、水電解システム（EL-System）が自然変動電源（PV）に追従して部分負荷運転を行う限り、入力電力の昇順（立ち上がり）

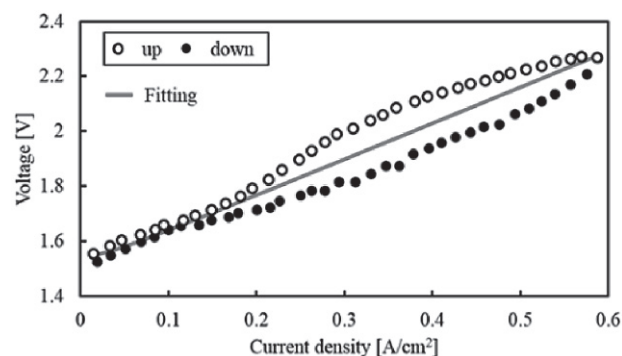


図4 PEM 水電解スタックの電流－電圧特性の計測値とモデル化⁸⁾

Fig.4 Current-voltage characteristics of the PEM electrolysis stack (Measurements and modeling).

りと降順（立ち下がり）の生起確率は等しくなり、一日の運転を通してヒステリシスを考慮する必要がなくなる。よって、昇順・降順の計測値を回帰式でフィッティングすると、図4に示す“Fitting”のようになり、PEM 水電解スタックの I－V 特性が数式モデルで記述される（数式は省略する）。

水電解システムは、PEM 水電解槽（PEM-Electrolyzer）と圧縮機・蓄圧器といった付属設備から構成され（図1参照）、また PEM 水電解槽には、PEM 水電解スタックに加えてヒータ・冷却用ポンプといった補機が装備されている。つまり、水電解システムの入力電力は「PEM 水電解槽と付属設備の消費電力の合計」となり、また PEM 水電解槽の消費電力は「PEM 水電解スタックの消費電力と補機電力に内訳」られる。

よってこれらのシステム構成・機器構成から、水電解システムのエネルギー変換効率（ $\eta_{EL-System}$ ）は（Eq.1）のように定義される。

$$\eta_{EL-System}(LoadFactor) = \frac{H_{2EL-System}(t)}{Power_{PEM-EL}(t) + Power_{aux}} \quad (Eq.1)$$

ここで、 $H_{2EL-System}$ ：水電解システムで製造した水素の燃焼エネルギー（ W_{h2} ）、 $Power_{PEM-EL}$ ：PEM 水電解槽の消費電力（補機電力含む）（ W_{el} ）、 $Power_{aux}$ ：付属設備の消費電力（定数）（ W_{el} ）を表す。

付属設備と補機の消費電力については、カタログ仕様値や本機によるポイント計測データ等から推定し（i.e. $Power_{PEM-EL}(定格) = 100kW$, $Power_{aux} = 10kW$ ）、水電解システムのエネルギー変換効率として図5に示す効率特性（モデル）を導出した（2018年3月時点）。これ以降も、効率特性は本機の運転データ計測等により随時改善が行われている。

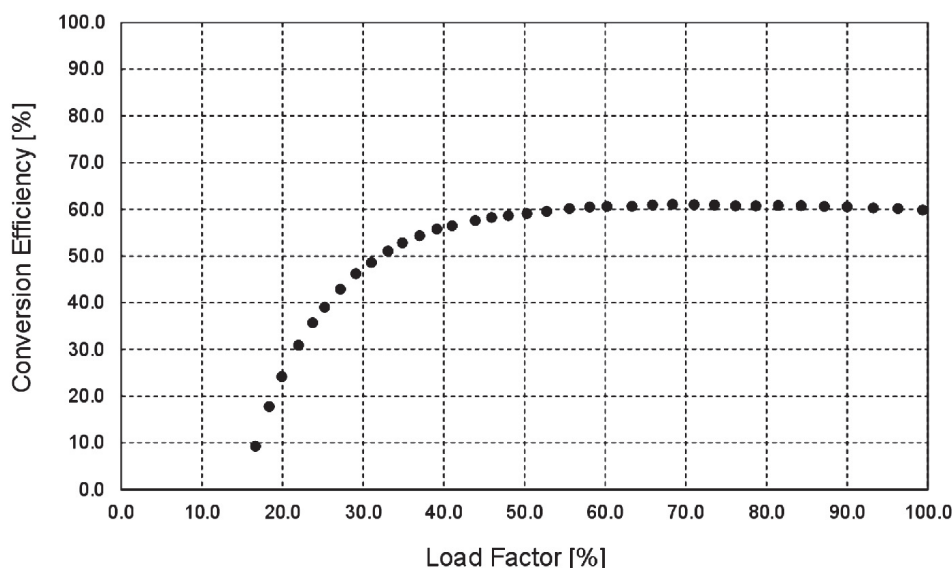


図5 水電解システム (EL-System) のエネルギー変換効率⁹⁾
Fig.5 Energy conversion efficiency of the EL-System (estimated).

4. 太陽光発電－水電解システムの設計と運用方策

本研究ではまず、「太陽光発電システム (PV)－水電解システム (EL-System)」の連系システムを対象に、太陽光発電の定格発電出力 (発電容量) と水電解システムの定格負荷 (入力電力容量) の相対的な容量の合理化設計について検討した。

- ・分散型電源 (DG: Distributed Generation) と負荷を連系する場合、通常分散型電源の性能・効率を十分に引き出すために「定格発電出力 ≤ 最大負荷」で設計するが、分散型電源が自然変動電源 (i.e. PV) の場合には、その電源の特性・仕様・設置環境と連系する負荷 (i.e. 水電解システム) の仕様・運用形態等を勘案して、当該電源の容量設計を行う必要がある。
- ・太陽光発電システムは、日本国内では2012年7月からの固定価格買い取り制度 (FIT) の施行により急速に普及し、システム価格が年率6%程度の低下傾向にあり (2012年42.1万円/kW, 2016年31.4万円/kW)、それに伴い太陽光パネルの積載率を上げて (2013年110%、2016年118%)、発電電力量を高める方向にある¹¹⁾。しかし水電解システムは、2000年代初期から導入・普及が進む欧州においても未だ実証試験の段階であり、設備コスト (CAPEX: Capital expenditure) の低減が最も大きな課題となっている¹⁾。

そこで本研究では、連系システムの合理化設計と運転計画の策定において、目的関数を「水電解システムの設備利

用率の最大化」、制約条件を「水素ステーションの払い出し水素のCO₂排出係数の低減」と設定した。

連系システムの合理化設計では、FIT期間終了後の太陽光発電を継続して活用する観点から、水電解システムの入力電力 (定格 = 110kW) に対し、設備利用率 (i.e. 水素製造量) を適正な範囲で最大化する、太陽光発電の発電容量 (相対比) をシミュレーションにより導出した。シミュレーションでは、2012年つくば市における日射スペクトルデータ (10分値1年間)¹²⁾ と気温データ (10分値1年間)¹³⁾ を使用した。

図7「off-Grid」(破線) に、太陽光発電の発電容量の増加 (相対比 100% - 150%) による水電解システムの設備利用率の改善効果を示す。ここで、相対比 100% (PV = 110kW, EL-System = 110kW) で設備利用率 = 15.3%、相対比 150% (PV = 165kW, EL-System = 110kW) で設備利用率 = 20.8% まで改善する。

この結果から、つくば市の日射量では、太陽光発電の発電容量を水電解システムの入力電力容量の1.5倍程度でシステム設計を行うと、年間の太陽光発電の発電電力量が増加するのに伴い、水電解システムの設備利用率を5%以上改善できることがわかる。また、つくば市よりも日射量の多い地域では、相対比が1.5倍よりも少ない発電容量でも設備利用率を5%以上アップできる。

次に、「太陽光発電システム (PV)－水電解システム (EL-System)－系統電力 (Grid)」の連系システム (図1参照) を対象に、水電解システムが太陽光発電に追従して部分負荷運転を効果的に行うために、系統電力を活用した

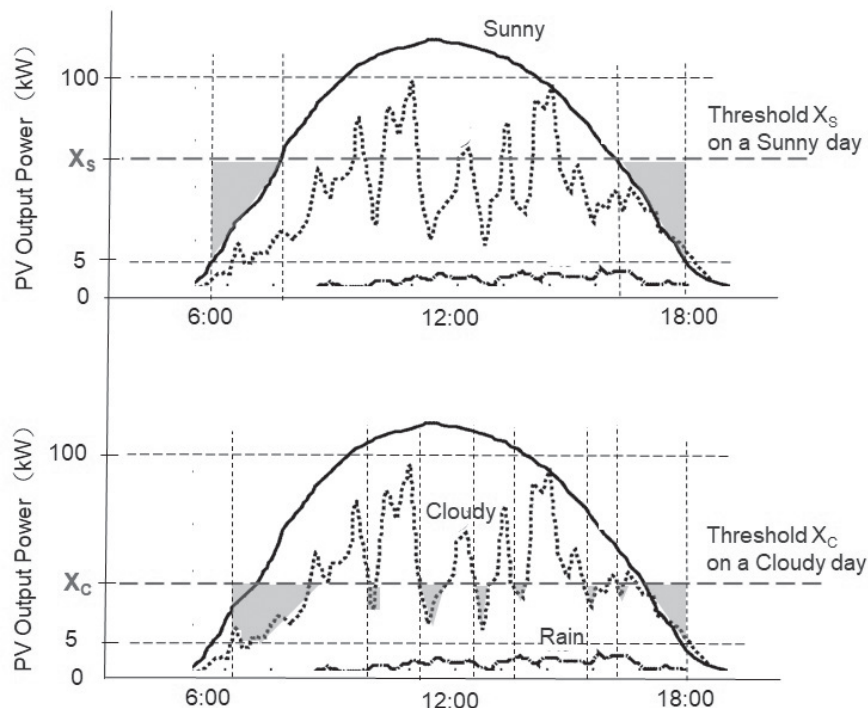


図6 系統電力による太陽光発電出力の補完イメージ⁶⁾

上図 晴れの日 (閾値 X_s)、下図 曇りの日 (閾値 X_c)

Fig. 6 Power leveling with a threshold by the grid, on a sunny day (upper) and on a cloudy day (lower).

基本的な運用方策について検討した。

水電解システムは、そのエネルギー変換効率が低負荷領域 (30–50%) でも高い効率を示し (図5 参照)、部分負荷運転を行うことに適している。しかし、太陽光発電出力の自然変動による水電解システムの入力電力の不安定性、その極低負荷領域 (20%以下) での稼働による PEM 水電解スタックの耐久性等に課題が残る。そこで、本研究ではこれらの課題に対処するために、水電解システムの基本的な運用方策として「系統電力による太陽光発電出力の補完手法」(パワーレベリングという) を提案した。

図6に、晴れの日(の系統電力による太陽光発電出力の補完イメージ(上図 閾値 X_s)と曇りの日の補完イメージ(下図 閾値 X_c)を示す。パワーレベリングの本来の目的は、太陽光発電出力が閾値 X 以下の場合でも系統電力で補完して閾値 X まで引き上げて、水電解システムを“エネルギー変換効率の良い領域”で安定的に稼働させることにある (図5 参照)。この手法により、水電解システムの設備利用率を改善し一日の水素製造量を増加させること (i.e. P2G 製造水素のコストを低減すること) が可能となる。

しかしパワーレベリングによる系統電力の使用で、水電解システムが製造する水素の CO_2 排出係数が増加して、水素ステーションの払い出し水素の CO_2 排出係数を低減するためには、おのずと系統電力の使用量を制限すること

が必要となる。具体的には、水電解システムが一日単位で製造する水素の CO_2 排出係数を「ナフサ改質水素の CO_2 排出係数 (= $1.13 \text{ kg-CO}_2/\text{Nm}^3\text{-H}_2$) 以下に抑える」ことが制約条件となる。つまり、晴れの日(日射量の多い日)は太陽光発電の発電量が多くなるため、パワーレベリングの閾値 X を高く設定して (X_s) 系統電力使用量を増加し早朝・夕方時間帯の太陽光発電出力を補完する (図6 上図)、また曇りの日(日射量が変動する日)は太陽光発電出力も変動するため、閾値 X をやや低く設定して (X_c) 系統電力の使用量を抑制すると共に、閾値 X 以下の太陽光発電出力の変動を補償する (図6 下図)。このように太陽光発電出力に応じて系統電力の使用量を調整して、一日の CO_2 排出係数をナフサ改質水素未満に抑える。

パワーレベリングによる当該連系システムの運用では、上記のシステム合理化設計(太陽光発電の発電容量の相対比)のそれぞれについて、制約条件の範囲内で最も高い閾値 X が設定され、DSS 運転 (Daily Start and Stop) により水素を製造する。なお、水素製造量はパワーレベリングによる入力電力 (= 太陽光発電出力 + 系統電力) にエネルギー変換効率 (η : Eq. 1) を乗じて算出され、 CO_2 排出量は系統電力使用量に該当地域・時期の送配電事業者の CO_2 排出係数を乗じて算定される。シミュレーションはシステム合理化設計と同様の日射量・気温データ (2012 年

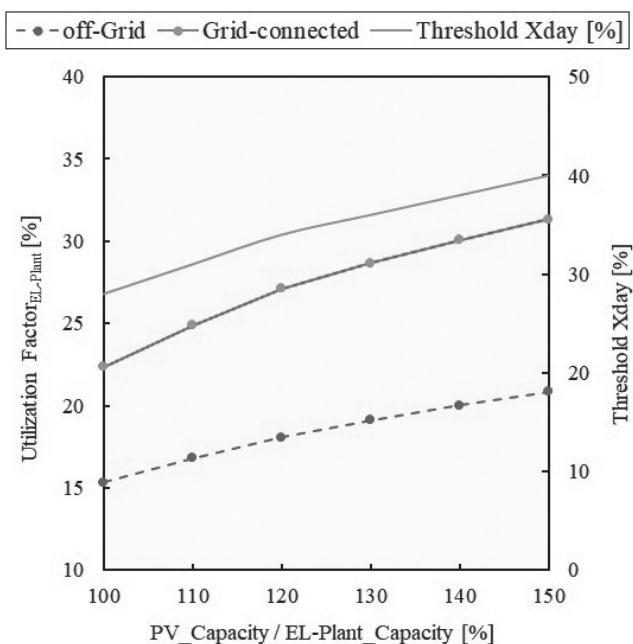


図7 太陽光発電-水電解システムの容量設計およびパワーレベリングによる設備利用率の改善効果¹⁰⁾。

下から、太陽光発電の発電容量の増加による効果、系統電力の補完による効果、パワーレベル閾値Xの変化

Fig.7 Utilization factor : effects of capacity planning and power leveling.

つくば市)を使用した。

図7「Grid-connected」および「Threshold Xday」に、太陽光発電の発電容量（相対比 100%–150%）について、パワーレベリングによる水電解システムの設備利用率の改善効果と対応する閾値Xを示す。ここで、相対比 100%で設備利用率 = 22.4%（閾値 X = 28%）、相対比 150%で設備利用率 = 31.4%（閾値 X = 40%）となる。

つまり太陽光発電の発電容量が同じ場合には、パワーレベリングにより水電解システムの設備利用率（水素製造量）を7–10%アップすることができる。更に、システム合理化設計とパワーレベリングを組み合わせることにより、水電解システムの設備利用率を2倍以上（15.3%から31.4%へ）改善することが可能となる。

環境省事業（2016–2017年度）以降もFIT制度で導入される太陽光発電のシステム価格は低下し（2018年28.6万円/kW）、太陽光パネルの積載率も上昇している（同年128%）ため¹¹⁾、FIT期間終了後の太陽光発電システムを継続使用して水電解システムにより水素製造を行うことは、「太陽光発電システム–水電解システム」連系システムの設計上および再生可能エネルギーの普及施策上からも合理的と考えられる。

系統電力を用いた「太陽光発電システム–水電解システム」連系システムの運用方策として提案した、パワーレベリングについては、本研究では当日の日射量・気温が既

知として、連系システムの設備利用率の改善効果の上限を示したのみで、具体的にこの方策を活用した運転計画の策定や運転制御ロジックの開発は、この事業以降の研究テーマとなっている。

5. まとめ

本稿では、水素ステーションに併設され当該ステーションにローカーボン水素を製造・供給する「太陽光発電–水電解システム」連系システムについて、

- 太陽光発電の発電容量と水電解システムの入力電力容量の相対的な容量の合理化設計
- 系統電力を活用した連系システムの運用方策：パワーレベリングによる太陽光発電出力の補完

を組み合わせることによって、水電解システムの設備利用率（水素製造量）を「発電容量の相対比 100% & 系統電力を活用しない」標準ケースと比べて、2倍以上向上できることを示した。但し、この値は日射量・気温が既知の場合の上限値（理想値）であり、具体的な運転計画の作成方法や運転制御ロジックの開発は今後の課題となっている。

最後に、本研究は平成28–29年度環境省委託事業「中規模（1.5hg/h程度）の高圧水素を製造する再エネ由来水素ステーション関連技術の開発・実証」の一部として実施され、本稿で記載した成果は、神戸製鋼グループ（㈱神戸製鋼所、㈱神鋼環境ソリューション、㈱神鋼エンジニアリング&メンテナンス）との共同実施に依るものである。

参考文献

- 1) M. Thema, F. Bauer, M. Sterner : Power-to-Gas : Electrolysis and methanation status review, J. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 112, 775–787 (2019)
- 2) EC Press release : The European Commission calls for a climate-neutral Europe by 2050, 28 Nov. (2018)
https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en (アクセス 2019.10.2)
- 3) EC COM (2018) 773 final : A Clean Planet for all, A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, Brussels, 28.11 (2018)
- 4) Ministerial Council on Renewable Energy, Hydrogen and Related Issues : Basic Hydrogen Strategy (水素基本戦略), 26 December (2017)
- 5) FCCJ HP : 商用水素ステーション情報 水素ステー

-
- ショナー覧 <http://fccj.jp/hystation/> (アクセス 2019.11.29)
- 6) H. Aki, I. Sugimoto, M. Ishida, et al. : Electrolysis System Operation Strategies for a Hydrogen Refueling Station using Renewable Energy Sources, Ground Renewable Energy (GRE) 2018, Proceedings, June, 2018, Yokohama, Japan.
- 7) Leaflet of Kobe Steel Group : Kobe Steel Ltd. Proposes Hydrogen Refueling Station using Renewable Energy Resources (2017) (一部筆者加筆)
- 8) 安芸、戸田、石田、他 : 再生可能エネルギー由来水素ステーションの運用方策に関する検討(その3)、第37回エネルギー・資源学会研究発表会、12-4、2018年6月
- 9) H. Aki, I. Sugimoto, M. Ishida, et al. : Optimal operation of a photovoltaic generation-powered hydrogen production system at a hydrogen refueling station, Int. J. Hydrogen Energy Volume 43, Issue 32, 9 August 2018, Pages 14892-14904.
- 10) M. Ishida, I. Sugimoto, et.al : A scheme for operating electrolysis system powered by a photovoltaic generation cooperated with a hydrogen refueling station, World Hydrogen Technologies Convention (WHTC) 2019, June, 2019, Tokyo, Japan.
- 11) 経済産業省 調達価格等算定委員会 : 平成31年度以降の調達価格等に関する意見、2019年1月9日
- 12) 国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 HP : 日射スペクトルデータベース <http://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html> (アクセス 2019.10.10)
- 13) 気象庁 HP : 過去の気象データ検索 / 各地の気温、降水量、風など / 10分ごとの値を表示 <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php> (アクセス 2019.10.10)