

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（まとめ）

Effects of the operation planning and control on a photovoltaic-powered hydrogen generation system at a hydrogen refueling station

杉本 一郎 *・宮崎 佑亮 **・小林 将大 ***・安芸 裕久 ****
Ichiro Sugimoto Yusuke Miyazaki Masahiro Kobayashi Hirohisa Aki
・藤澤 彰利 *****・石田 政義 ****
Akitoshi Fujisawa Masayoshi Ishida

Renewable Power-to-Gas (PtG) has spread in the European Union (EU) since the early 2000s as penetrating variable renewable energies (VREs). As an aid for implementing the basic hydrogen strategy of Japan, the authors have developed a photovoltaic generation (PV)-powered hydrogen production system (EL-system) at a hydrogen refueling station since 2017, and have studied the operation policies and methods improving its capacity factor since then. In this paper, the past reports of operation planning and control on the PV-powered EL-system are summarized updating the last information. Weather forecast data and observation data for one year and the operation planning methods are shown, and the operation strategy, which is to maximize the capacity factor keeping carbon dioxide (CO₂) emission factor under a fixed value is set. Through four one-year operating simulations with PV capacity 100kW, 125kW and 150kW, on the basis of the PV-followed operation control with PV capacity 100kW, the increase of PV capacity from 100kW to 150kW expands its capacity factor about 38%, and the proposed operation planning and control increase it over 70% respectively.

Keywords : renewable Power-to-Gas, PEM electrolyzer, operation planning, operation control, solar radiation prediction

1. まえがき

欧州連合 (EU) では、2000 年代初めから再生可能エネルギー（以下、再エネと略す）を活用した Power-to-Gas (PtG と略す) 実証事業が始まり、2019 年時点では 95 プロジェクトが稼働している¹⁾、また EU は 2020 年 7 月に「Hydrogen Strategy（水素戦略）」を発表し、2030 年に向けて PtG 普及の具体的な目標を示している²⁾。

わが国でも 2017 年 12 月に水素基本戦略が策定され³⁾、2019 年 3 月に水素・燃料電池ロードマップを改訂し⁴⁾、2030 年に向けて、国際的な水素サプライチェーンを提言すると共に、燃料電池自動車 (FCV)、水素ステーション (HRS)、PtG 等の普及目標とコストダウン目標を示している。

これらの目標達成のための一助として、筆者らは、2016 – 2017 年度に環境省「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」事業に参画し、太陽光発電 (PV) を主な入力電源として、

水電解システムにより低炭素水素を製造し、併設する HRS (オフサイト型) に供給する、「太陽光発電 (PV) -水電解 (EL) 連系システム」の開発を行った⁵⁾。

図 1 に、太陽光発電 – 水電解連系システムと HRS のシステム構成を示す⁵⁾。ここで、水電解槽 (PEM-Electrolyzer) と連動する付帯設備 (圧縮機 (Compressor)、蓄圧器 (Pressure Accumulator) 等) を含めて「EL-system」と称す。

環境省事業終了後も、筆者らは継続して EL-system の補機動力 (待機電力含む) や付帯設備動力を計測し、その水素製造特性 (部分負荷特性) をモデル化した⁶⁾。

図 2 に、EL-system の水素製造特性モデルを示す⁶⁾。

さらに筆者らは、PV-EL 連系システムの運用方策に関する研究 (以下、本研究という) を継続している。

本稿では、運転戦略を「水素製造量 (設備利用率) の最大化」「製造水素の CO₂ 排出係数をナフサ改質水素の当該値以下に抑制」と設定し、これまでに提案した系統電力を利用した運用制御方式と予測情報 (天気予報) を用いた運転計画が、PV-EL 連系システム (PV 発電容量 = 100 / 125 / 150 kW と設定) の低炭素水素の製造に及ぼす影響を、1 年間の運用シミュレーションにより、定量的に把握する。

*株式会社エネルギー・生活科学研究所
〒563-0022 大阪府池田市旭丘 3-6-2

ichiro@energy-and-humanlife.com

**筑波大学 システム情報工学研究科 構造エネルギー工学専攻

*** 筑波大学 システム情報系 構造エネルギー工学域

**** 富士電機株式会社

*****株式会社神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所

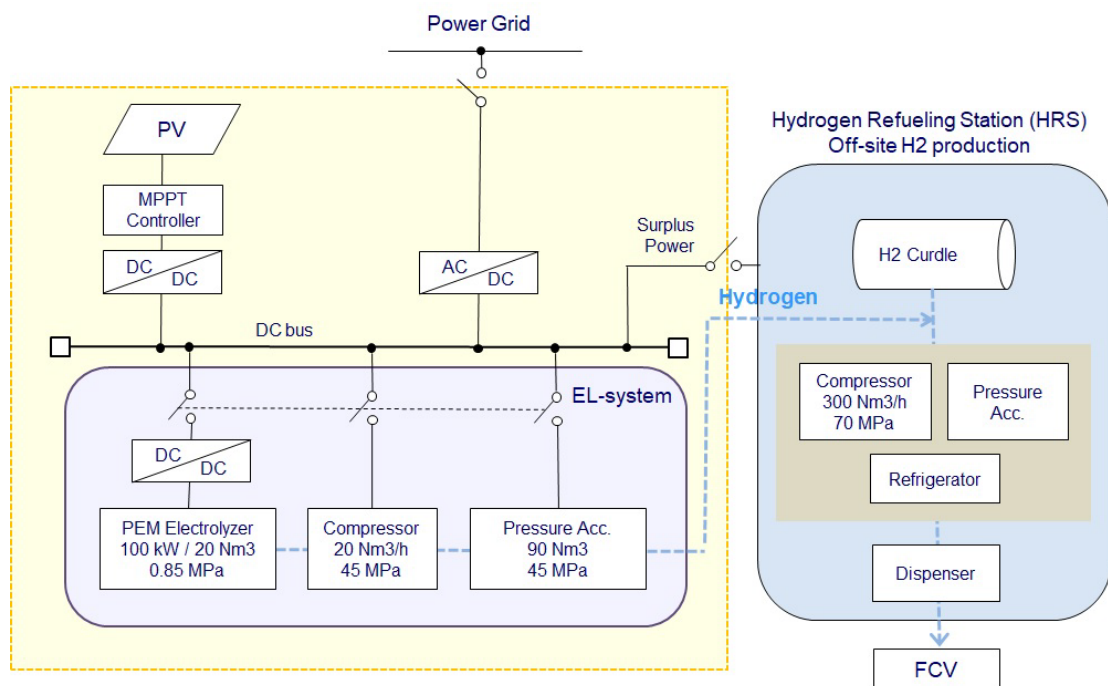


図 1 太陽光発電(PV)-水電解(EL)連系システムと水素ステーション(HRS)のシステム構成

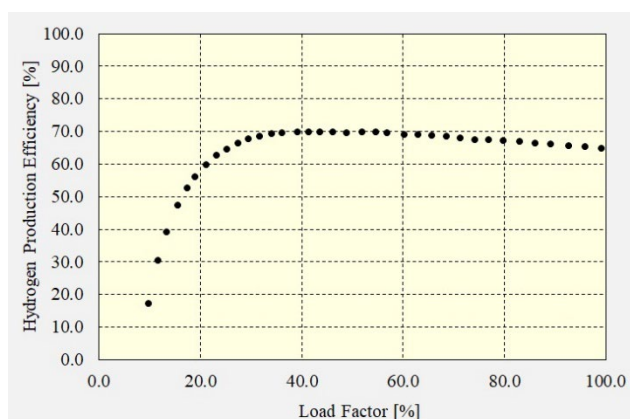


図 2 EL-system の水素製造特性モデル（部分負荷特性）

2. 運用制御方式と予測情報を用いた運転計画の策定方法

安芸ら⁷⁾により、PV-EL 連系システムの運用制御方式として、主たる入力電力に PV 発電電力を使用し、さらに系統電力によって補償を行うことで、EL-system への最小入力電力を平準化する運用制御方式（パワーレベリングと称す）が提案されている。

また、PV-EL 連系システムの運用において、設備利用率の最大化と同時に HRS 全体の CO₂ 排出量を低減させることが必須となり、CO₂ の排出を伴う系統電力の使用量は抑制する必要がある。そこで、須貝ら⁸⁾により、設備利用率最大化と CO₂ 排出係数低減を同時に満たす、入力電力の「パワーレベル値 (X_{day};%)」の適用が提案されている。この値を用いたパワーレベリングを式 (1) に示す。

$$EL_{in}(t, X_{day}) = X_{day} \cdot EL_{in_max} = PV_{out}(t) + Grid(t) \quad (1)$$

$EL_{in_max}[kW]$: EL-system 定格入力電力

式 (1) は、PV 発電電力 (PV_{out}(t); kW) がパワーレベル値 X_{day} で設定した EL-system の入力電力 (EL_{in}(t); kW) より小さい場合に、系統電力 (Grid(t); kW) を使用してその差を補償することを表している。

PV-EL 連系システムの運転計画において、1 日の水素製造量を規定した CO₂ 排出係数以下で最大化するために、

- 1) 日の出時刻以前に「当日の日射・気温プロファイル (= PV 発電プロファイル)」を予測し、
 - 2) 日の出時刻以降に、日射量が一定値以上になった場合に運転およびパワーレベリングを開始し、
 - 3) 日の入時刻直前に、日射量が一定値以下になった場合にパワーレベリングおよび運転を終了する
 - 4) ただし、パワーレベリングによる系統電力の使用量は CO₂ 排出係数（規定値）によって制限される
- これらの条件を満たす最大のパワーレベル値 X_{day}(%)を導出する手法が、杉本ら⁹⁾により提案されている。

つまり運転計画の策定に当たり、最も重要な予測情報は上記 1) の「当日の日射・気温プロファイル」であり、このプロファイルを基に PV 発電プロファイルが予測され、CO₂ 排出係数の制約から系統電力の使用量が決定される。

図 3 に、晴天日の場合のパワーレベル値 X_{day} による運転計画イメージを示す。

そこで小林ら¹⁰⁾は、過去の「天気 - 日射量実績対応データベース」を作成して、天気予報から日射プロファイルを推定する手法を提案し、1 日の積算日射量をベースに、その予測精度が「72% - 77%」（年平均）程度得られることが判明している。

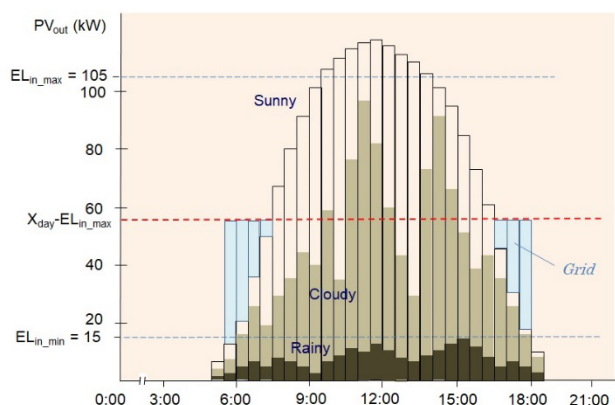


図3 パワーレベル値 X_{day} による運転計画
(晴天日の場合)

3. 運転戦略とシミュレーション種別

本稿では、運転戦略を目的関数と制約条件に分けて、以下のように設定する。

- ・ 目的関数：水素製造量（設備利用率; CF）の最大化
- ・ 制約条件：製造水素の CO2 排出係数（CO2EF）をナフサ改質水素の当該値以下に抑制

運転戦略等に係る具体的な設定値は表 1 に示す。ここで、PV-EL 連系システムは製造した低炭素水素を HRS に供給することから、低炭素水素の要件（制約条件）は、HRS が払い出すナフサ改質水素の CO2 排出係数以下とする。

また、筆者らが提案した系統電力を利用した運用制御方式（パワーレベリング）と天気予報を用いた運転計画が PV-EL 連系システムの水素製造に及ぼす効果を測るために、

- * 運転計画はなく、PV 発電出力に追従して水素製造を行う運転（ただし、運転中に最小の入力電力は維持）
- * 日射量実績を予測情報とした理想的な計画運転を比較対象とする。これらの運用シミュレーションの種別を表 2 に整理する。

さらに運用シミュレーションは、運用期間を 1 年間とし、以下のデータを使用する。

- 天文現象：日の出時刻・日の入時刻¹¹⁾（国立天文台）（@つくば, 2015.1.1 – 12.31）
- 府県天気予報：天気・気温 [3 時間値]（気象庁）（茨城県南部（土浦）, 2015.1.1 – 12.31）
- 日射量スペクトル：全日日射量・気温¹²⁾ [10 分値]（NEDO）（@つくば, 2015.1.1 – 12.31）

4. シミュレーション結果と考察

図 4 に、PV 発電容量 125kW の場合の計画運転（天気予報）と PV 出力に追従した運転の水素製造量と日射量（月平均・1 日当り）の推移を、図 5 と図 6 に、計画運転（天気予報）、計画運転（理想）および PV 追従運転の設備利用率（年平均）と CO2 排出係数（年平均）を示す。

表 1 運転戦略等の設定値

運転戦略	目的関数	Max CF(X_{day})
	制約条件	CO2EF(X_{day}) $\leq$ 1.13 kg/Nm ³
系統電力 CO2 排出係数		GridCO ₂ = 0.458 kg/kWh

表 2 シミュレーション種別

	名称	予測精度
提案方式	天気予報による計画運転	71.6 %
比較対象	PV 発電出力に追従運転	—
	理想的な計画運転	100 %

図 4 から、日射量と PV 追従運転による水素製造量は比例の相関があるが、計画運転（天気予報）では日射量の多い月（5-6 月）ほどパワーレベリングの効果が顕著で、さらに水素製造量が増加することがわかる。

図 5 から、計画運転（天気予報）による水素製造量は、PV 発電容量 100 - 150kW（EL-system との容量比 1.0 – 1.5）の範囲では、PV 追従運転に比して 1.7 倍程度の増加が可能となる。また計画運転（理想）による水素製造量と比べても、ほとんど差はなく（設備利用率の差は 1% 未満）、予測精度が一定値以上であれば、日射量の予測精度が水素製造に及ぼす影響は限定的と推定できる。

図 6 から、計画運転（天気予報）、計画運転（理想）共に、制約条件「CO2EF(X_{day}) $\leq$ 1.13 kg/Nm³」を満たし、系統電力をその範囲内で充分に利用していることがわかる。

システム合理化の観点から、EL-system の定格入力電力に対し、PV 発電容量を 1.0 倍から 1.5 倍に増加させると、設備利用率を 5 – 9%改善できることがわかる（図 5）。これは単純に PV 発電電力量が増加することに起因し、容量比 1.5 程度でほぼ飽和する。

運用合理化の観点からは、提案した系統電力を利用した運用制御と天気予報を用いた運転計画により、上述のシステム合理化とは別に、設備利用率を 9 – 13 %改善できることが分かる（図 5）。

5. まとめ

本研究のこれまでの報告⁸⁾では、運転計画を考慮しない運用制御のみを考慮した数値計算では、システム合理化（容量比 1.5）により設備利用率が 5 – 9 %改善でき、運用合理化では 7 – 11 %改善できることが判明している。本稿では、提案した運用制御方式（パワーレベリング）と天気予報による運転計画が、運用合理化の性能限界まで漸近する運用方策であることを示した。

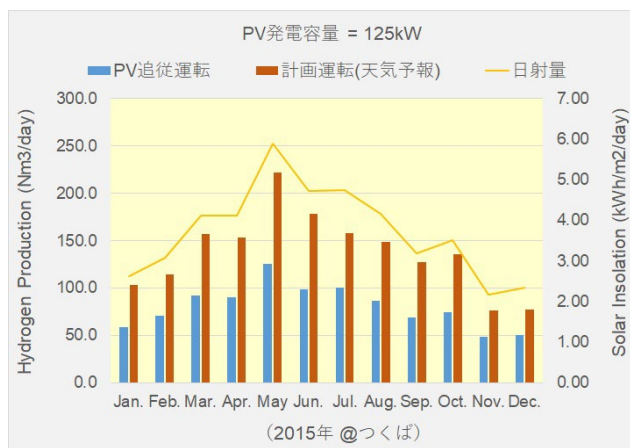


図4 水素製造量と日射量（計画運転 vs. PV 追従運転）

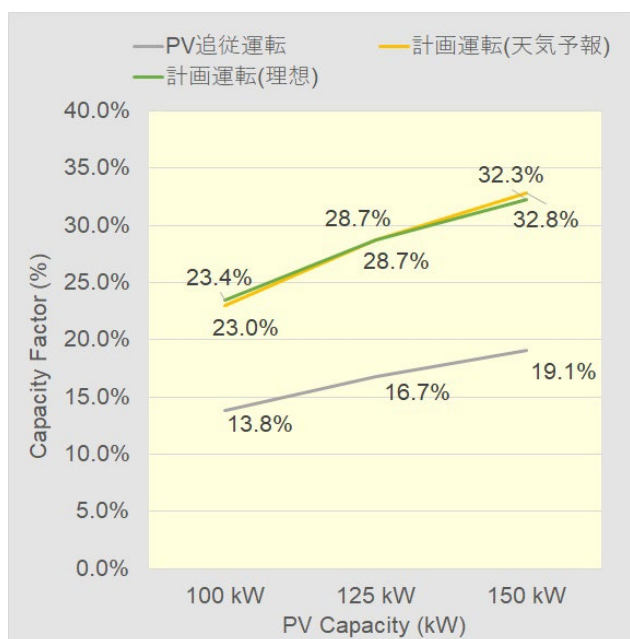


図5 設備利用率（計画運転（天気予報・理想） vs. PV 追従運転）

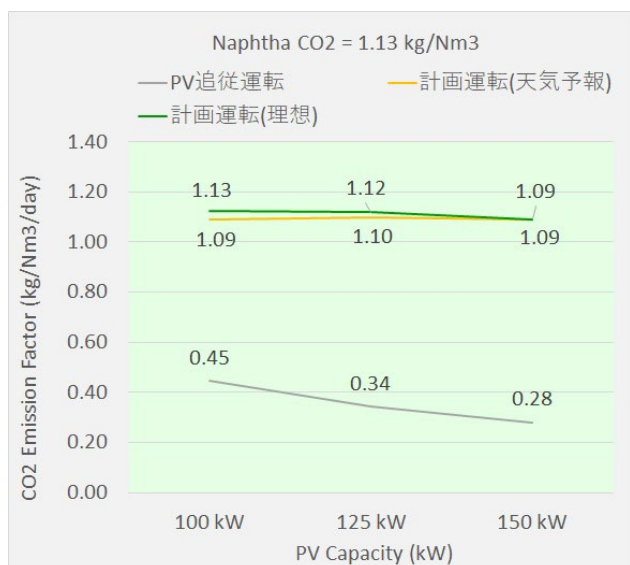


図6 CO2 排出係数（計画運転（天気予報・理想） vs. PV 追従運転）

参考文献

- 1) Thema M, Bauer F, Sterner M: Power-to-Gas; Electrolysis and methanation status review, Renew Sustain Energy Rev 2019; 112:775–87.
- 2) EC; Communication from the commission to the European parliament, the council, the European economic and social committee and the committee of the regions, A hydrogen strategy for a climate neutral Europe, Brussel, 8.7.2020.
- 3) 経済産業省; 水素基本戦略, 再生可能エネルギー・水素等関係関係会議, 2017 年 12 月 26 日.
- 4) 経済産業省; 水素・燃料電池戦略ロードマップ ～水素社会実現に向けた産学官のアクションプラン～, 水素・燃料電池戦略協議会, 2019 年 3 月 12 日
- 5) 石田政義, 杉本一郎; 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, 燃料電池, Vol. 19, No. 3, winter 2020, pp. 73-79.
- 6) Ishida M, Sugimoto I, Miyazaki Y, et al: A scheme for operating electrolysis system powered by a photovoltaic generation cooperated with a hydrogen refueling station, WHTC 2019, June, 2019, Tokyo, Japan.
- 7) 安芸, 杉本, 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 1）” 第 34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2018 年 1 月.
- 8) 須貝, 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 2）” 第 34 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2018 年 1 月.
- 9) 杉本, 安芸, 小林, 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 4)” 第 37 回エネルギーシステム・経済・環境コンファレンス, 2019 年 1 月
- 10) 小林, 宮崎, 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 5）, 第 38 回エネルギー・資源学会研究発表会, 2019 年 8 月.
- 11) 国立天文台 HP; こよみの計算データベース <https://eco.mtk.nao.ac.jp/koyomi/> (アクセス 2020. 11. 20)
- 12) NEDO HP; 日射に関するデータベース, <https://www.nedo.go.jp/library/nissharyou.html> (アクセス 2020. 11. 20)