

令和 4 年 6 月 10 日現在

機関番号：17601
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2018～2021
課題番号：18K05015
研究課題名（和文）システム最適化した高効率集光型太陽電池水素生成機構の高精度コスト試算モデルの構築

研究課題名（英文）System optimization and cost estimation of high-efficiency solar to hydrogen system consisting of concentrator photovoltaic modules and electrolyzers

研究代表者
太田 靖之（Yasuyuki, Ota）

宮崎大学・工学部・准教授

研究者番号：10518450
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：太陽光エネルギーから直接電気エネルギーに変換する太陽電池と水電解との組み合わせは、クリーンな水素を生成する方法の一つとして期待できる。集光型太陽電池と水電解装置により構成された水素製造装置は、屋外での実動作において太陽光の18%以上を水素エネルギーに変換できることを実証した。また、太陽光をもとにした水素と二酸化炭素との触媒反応により連続的にメタン合成できることを屋外実証システムより明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽電池と水電解から得られるCO₂フリー水素の社会実装のために、本屋外実証システムから得られた実稼働データは、太陽光水素生成効率の向上のほか、システムの耐久性向上や水素生成コスト試算モデルの構築を可能とする。実際の太陽光をもとにした水素もしくはメタン生成は、貯蔵可能なエネルギーを地域で生成することが可能となり、エネルギーの地産地消が実現できる。

研究成果の概要（英文）：The combination of photovoltaics, which can be directly converted from sunlight to electricity, and water electrolysis is expected for producing hydrogen. We demonstrated more than 18% in solar to hydrogen conversion efficiency of the solar to hydrogen system consisting of concentrator photovoltaics and electrolyzer under actual outdoor operations. In addition, it was clarified that methane could be continuously synthesized by the catalytic reaction of hydrogen, which was produced by sunlight, and carbon dioxide.

研究分野：太陽光エネルギー

キーワード：集光型太陽電池 固体高分子型水電解 Power to Gass

1. 研究開始当初の背景

京都議定書の採択以降、全世界において温室効果ガスの排出量削減が進められている。CO₂を排出しない新たなエネルギーキャリアとして水素エネルギーの利用が期待されている。現在、主な水素生成方法の一つである化石燃料改質技術は、技術的には確立されているが、水素生成過程において CO₂ が排出される。究極にクリーンな水素を得る方法の一つとして、再生可能エネルギーと水電解の組み合わせが挙げられる。再生可能エネルギーの中で、太陽光エネルギーは地球上に豊富に存在する。太陽光エネルギーから直接電気エネルギーに変換する太陽電池と水電解との組み合わせは、クリーンな水素を生成する方法の一つとして期待できる。太陽電池 + 水電解から得られる CO₂ フリー水素の社会実装のためには、太陽光水素生成効率の向上のほか、システムの耐久性向上による長寿命化や天日下での実稼働データから求めたシステム稼働率による水素生成コスト試算モデルの構築が必要になる。

2. 研究の目的

本研究では、集光型多接合太陽電池と固体高分子型水電解装置による天日下で長期間連続動作が可能な太陽光水素生成装置を構築する。実稼働データによる精度の高い水素生成コスト試算モデル構築およびシステム最適化設計による集光型太陽電池水素生成装置の効率化・長寿命化を実施し、CO₂ フリー水素の社会実装の可能性を明らかにすることを目的とする。本研究の最大の特徴は、水素生成における水分解の駆動力として高い光電変換効率を有する集光型多接合太陽電池を用い、太陽光から水素までのエネルギー変換効率を高める点にある。集光型太陽電池は、集光用レンズと太陽電池部に超高効率 III-V 族化合物太陽電池を組み合わせた太陽電池である。

3. 研究の方法

連続動作可能な太陽光水素生成装置から得られた天日下での年間実稼働データから精度の高いコスト試算を行う。スペクトルを含む日照データや気温データの実測値から水素生成量・コスト予測モデルを構築する。太陽光水素生成装置を構成する集光型太陽電池と水電解装置のシステム最適化設計を行う。集光型太陽電池の出力と動作温度の関係を詳細に解析することで、外気温や太陽光が集光型太陽電池の出力へ与える影響について明らかにする。集光型太陽電池のモジュール構造と外気温および太陽光の影響を考慮した伝熱解析モデルを構築し、集光型太陽電池の動作温度の上昇を抑制する構造を明らかにする。水電解装置の動作を詳細に測定し、効率よく水素生成が行われる動作条件を明らかにする。外部から直流安定化電源により水電解装置に電力を供給し、水電解装置の電極形状や陽極と陰極の電極間の構造が直流抵抗成分に対してどのように影響するかを明らかにする。

4. 研究成果

(1) サブキロワット太陽光水素生成システムの屋外評価

最適化設計したサブキロワット規模の太陽光水素生成システムを新たに構築し、屋外での太陽光水素生成を行った。太陽光水素生成システムは、集光型太陽電池モジュールと水電解セルで構成された。集光型太陽電池モジュールと水電解セルの電気的動作点を最適化するために、DC/DC コンバータを導入した。水素生成量(GR_{H_2})は、マスフローメータを用いて測定した。直達日射量(DNI)は、直達日射計を用いて測定した。太陽光水素変換効率(Solar to hydrogen: STH)は以下の式より求めた。

$$STH = \left(\frac{E_m}{E_{sun}} \right) \cdot \left(\frac{E_{DCDC}}{E_m} \right) \cdot \left(\frac{E_{H_2}}{E_{DCDC}} \right) = \eta_{CPV} \cdot \eta_{DCDC} \cdot \eta_{EC} \quad (1)$$

ここで、 E_{sun} は積算直達日射量、 E_m は集光型太陽電池発電量(DC/DC コンバータの入力電力量)、 E_{DCDC} は DC/DC コンバータの出力電力量(水電解セルの入力電力量)、 E_{H_2} は水素によって得られたエネルギー量である。したがって、システムを構成する集光型太陽電池、DC/DC コンバータ、水電解セルの効率により表すことができる。図 1 に、晴天日における DNI と GR_{H_2} を示す。 GR_{H_2} は、DNI の変化に対応して変動した。1 日積算の DNI と GR_{H_2} から求めた水素エネルギー量は、それぞれ 9.38 kWh、1.67 kWh となり、1 日連続動作における太陽光エネルギーから水素エネルギーへの変換効率(Solar to Hydrogen: STH)は屋外でのサブキロワットシステム規模では最高記録である 18.8% を達成した。図 2 に、太陽光水素生成システムを構成する集光型太陽電池(η_{CPV})、DC/DC コンバータ(η_{DCDC})、水電解セルの効率(η_{EC})および STH の 1 日の変化を示す。図 2 に示すように、DC/DC コンバータ(1 日平均効率: 90.0%) および集光型太陽電池モジュール(1 日平均効率: 27.2%) が期間内において高効率で動作したことが、STH 最高効率達成に寄与した。

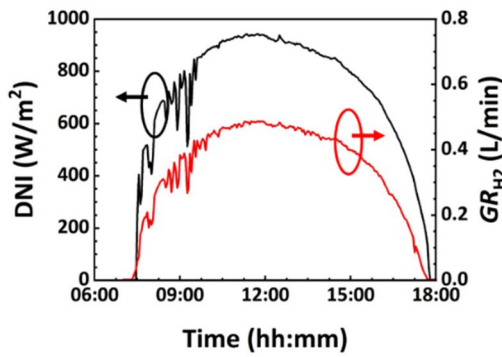


図 1. 晴天日における DNI と GR_{H_2}

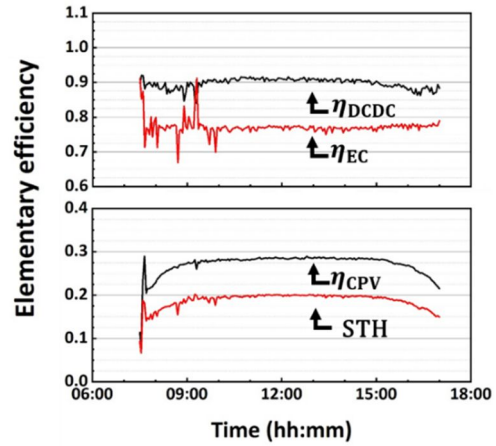


図 2. η_{CPV} 、 η_{DCDC} 、 η_{EC} および STH の 1 日の変化

(2) 太陽光をもとに生成された水素によるメタン合成の屋外実証

開発したサブキロワット規模の太陽光水素生成システムから生成する水素の利用拡大のため、水素を用いた二酸化炭素のメタネーションを行った。水素を用いて二酸化炭素をメタンに変換することにより、既存のインフラ設備を利用することができる。生成した水素と二酸化炭素の混合ガスを触媒が充填された反応管に供給することでメタンが合成される。水素と二酸化炭素の混合比は、マスフローメータおよびマスフローコントローラにより制御した。四重極型質量分析計を用いて反応管を通過した混合ガスの組成を測定した。反応管は外部電力より加熱した。メタン化プロセスは発熱反応のため、メタン化プロセスが行われると外部電力に頼らず反応温度を維持することができる。メタン化プロセス中に反応管の加熱に用いられる消費電力を電力計により測定した。水素・二酸化炭素混合ガス供給量に対するメタン変換率を明らかにした。メタン変換率は、式(2)より求めた。

$$CO_2 \text{ conversion} = \frac{V_{CH_4 \text{ output}} \times 100\%}{V_{CH_4 \text{ output}} + V_{CO_2 \text{ output}}} \quad (2)$$

ここで、 $V_{CH_4 \text{ output}}$ および $V_{CO_2 \text{ output}}$ は、測定したガス中のメタンおよび二酸化炭素の体積である。図 3 に、反応管温度とメタン変換率を示す。メタン化プロセスは発熱反応のため、反応管 1 の反応温度が設定温度より上昇した。反応管 2 では、反応管 1 で二酸化炭素の約 70% がメタン化させるため、反応管 2 での反応量が少なく反応温度が設定温度を超えることはなかった。最終的なメタン変換率は、最高で 97.6% のであり、稼働時間に影響しなかった。

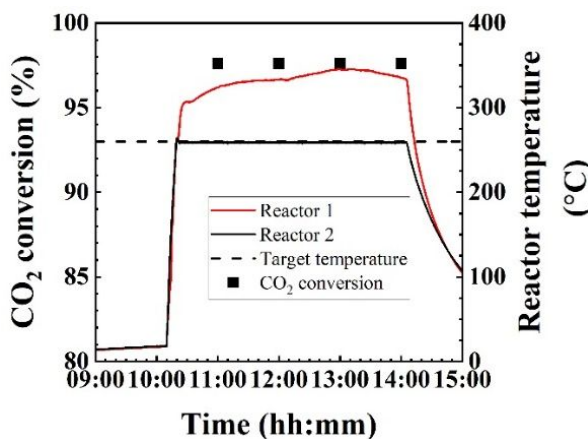


図3. 反応管温度とメタン変換率

測定した日射量と水素生成量および二酸化炭素からメタンへの変換率(メタン変換率)からエネルギー変換効率を求めた。表 1 に、入力エネルギー(日射量(E_{sun}))、反応管消費電力量($E_{reactors}$)と出力エネルギー(水素生成量、メタン生成量)を示す。メタン生成量は、水素生成量から求めた二酸化炭素供給量とメタン変換率から求め、メタンの燃焼エネルギー(802 kJ/mol)とメタン生成量から貯蔵されるエネルギー量を求めた。その結果、日射量からメタンへのエネルギー変換効率は 13.8%であった。反応管の消費電力は、反応管に供給される水素・二酸化炭素混合ガスの供給量に依存すること、混合ガス供給方法を最適化することで反応管の消費電力を低減させエネルギー変換効率を向上させられることを明らかにした。

表 1. 入力エネルギー(日射量、反応管消費電力量)、出力エネルギー(水素生成量、メタン生成量)

およびエネルギー変換効率。

Input energies		Produced gases (output)			η_{SIM}
E_{sun} (kWh)	E_{reactors} (kWh)	Amount of H ₂ (mol)	Amount of CH ₄ (mol)	Stored energy of produced methane(kWh)	
4.584	0.145	11.985	2.996	0.652	0.138 (13.8%)

(3) 集光型太陽電池モジュールの動作温度解析および動作温度削減

新規集光型太陽電池(CPV)モジュールの太陽電池セル・モジュール裏面間の熱抵抗(R_{th})を算出し、動作温度を低下させる方法を検討した。CPV モジュールは屋外に設置された。CPV モジュールの IV 特性から求めた開放端電圧(V_{oc})から太陽電池セル温度を見積もった。日射量および CPV モジュール裏面温度を測定した。太陽電池セルの発熱量は、CPV モジュールに入射する日射量から発電量を差し引き、下記式より太陽電池セル・モジュール裏面間の熱抵抗(R_{th})を算出した。

$$R_{\text{th}} = \frac{T_{\text{cell}} - T_{\text{mod}}}{P_{\text{heat}}} \quad (2)$$

ここで、 T_{cell} は CPV モジュールの V_{oc} から見積もった太陽電池温度、 T_{mod} は測定された CPV モジュール裏面温度、 P_{heat} は、太陽電池の発熱に寄与した発熱量とした。測定の結果、CPV モジュールの太陽電池セルからモジュール裏面までの熱抵抗 R_{th} は、約 128 K/W と見積もられた。CPV モジュール構造から熱伝導モデルを構築し、モジュール構造が太陽電池セル温度に与える影響を解析した。その結果、太陽電池セルとモジュール裏面筐体との絶縁体層が大きな熱抵抗であることを明らかにした。また、絶縁体層の厚さを 1/10 に薄くすることで熱抵抗が小さくなり、太陽電池セル温度を約 4 度低下させることが予想された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Wai SoeHtet, Ota Yasuyuki, Sugiyama Masakazu, Nishioka Kensuke	4. 巻 10
2. 論文標題 Evaluation of a Sabatier Reaction Utilizing Hydrogen Produced by Concentrator Photovoltaic Modules under Outdoor Conditions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 3144 ~ 3144
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/app10093144	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Ota Yasuyuki, Yamashita Daiji, Nakao Hiroshi, Yonezawa Yu, Nakashima Yoshiyasu, Ebe Hiroji, Inagaki Makoto, Mikami Rui, Abiko Yoshiya, Iwasaki Takashi, Sugiyama Masakazu, Nishioka Kensuke	4. 巻 11
2. 論文標題 Highly efficient 470 W solar-to-hydrogen conversion system based on concentrator photovoltaic modules with dynamic control of operating point	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 077101 ~ 077101
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7567/APEX.11.077101	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 3件）

1. 発表者名 渡邊 将貴, 太田 靖之, 西岡 賢祐
2. 発表標題 太陽光発電を用いた水電解電気化学セルの水素変換効率評価および全国における水素発生ポテンシャル予測
3. 学会等名 第17回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Hiromu Saiki, Hiroki Tawa, Kenji Araki, Yasuyuki Ota, Kensuke Nishioka
2. 発表標題 Verification of Accuracy in Spectrum-energy Model for Tandem Solar Cell
3. 学会等名 The 29th International Photovoltaic Science and Engineering Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuyuki Ota, Soe Htet Wai, Daisuke Yugoshi, Kensuke Nishioka
2. 発表標題 High Efficiency Solar to Chemical Conversion System based on Sub-kilowatt-scale Concentrator Photovoltaic Modules under Outdoor Operation
3. 学会等名 The 7th Korea - Japan Joint Seminar on PV (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Daisuke Yugoshi, Soe Htet Wai, Yasuyuki Ota, Yoshihiro Suzuki, Kensuke Nishioka
2. 発表標題 Effect of Water Quality on Hydrogen Production for Solar to Hydrogen System Combining Photovoltaic Module and Electrochemical Cell
3. 学会等名 The 7th Korea - Japan Joint Seminar on PV (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 太田 靖之, 杉山 正和, 西岡 賢祐
2. 発表標題 サブキロワットスケール太陽光水素生成システムの高効率屋外動作
3. 学会等名 第15回「次世代の太陽光発電システム」シンポジウム
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------