

太陽光発電、蓄電池と水素製造/燃料電池によるエネルギー連系システムの試作

藤本正克*・阿野裕司*・山田誠治*²・佐々木謙一*³・山崎敏晴*³

Prototype of Energy Network System with Photovoltaics, Batterys and Water Electrolyzes/Fuel Cells

Masakatsu Fujimoto, Yuji Ano, Seiji Yamada, Kenich Sasaki, Toshiharu Yamazaki

1. 緒言

日本においては1970年代の石油危機、1990年代の気候変動問題、2000年代の新興国のエネルギー需要の急増を契機に再生可能エネルギーをはじめとした新エネルギーの技術開発が進んだ。しかしながら、原子力発電や火力発電による安定的な電力供給により、再生可能エネルギーの普及は限定的となっていた。ところが、2011年の東日本大震災以降、相次ぐ原子力発電所の稼働停止により、新たなエネルギー確保の必要性の高まりと共に、コスト以外にも環境に配慮した再生可能エネルギーが再び注目されるようになった。

一方、水素エネルギーは燃料電池の開発により注目され、現在は家庭用燃料電池や燃料電池自動車が普及している。特に2014年度には燃料電池自動車の販売が開始され、それにとまない水素供給のための水素ステーションが整備されつつある^{1,2)}。また、太陽光発電などの余剰電力を蓄電する方法として、水素発生装置と燃料電池を組み合わせた水素エネルギーシステムも多く報告されている³⁻⁵⁾。

また、山口県では瀬戸内海沿岸のコンビナート企業群から全国有数の水素が生産されている特徴に着目した「やまぐち産業戦略推進計画」⁶⁾が策定され、水素の利活用や環境・エネルギー産業クラスター形成を進め、水素等環境関連産業の集積に向けた取り組みが進められている。

このような背景において、我々は太陽光発電を活用した分散型エネルギー連系システムの試作開発を行った。このシステムはエネルギーの地産地消の観点から、全国でも有数の水素生産能力を保有する山口県に着目した燃料電池（水素エネルギー）と太陽光パネルを融合したシステムである。特徴として太陽光発電をはじめとした再生可能エネルギーの短所である発電変動とエネルギー貯蔵問題を水素エネルギー（水素発生装置と燃料電池）で補うことにある。

本報告では、具体的に太陽光発電装置、燃料電池と水素発生装置である水電解装置、水素ガスを貯蔵ための水素貯蔵タンク、蓄電池によるエネルギー連系システムを構築し、実際の負荷を接続した実験を行いその有効性の検討を行った。

2. システム構成

2・1 システム概要

エネルギー連系システム（以下システムと称す）は電力供給としての太陽光発電、燃料電池、電力貯蔵として水素貯蔵タンク

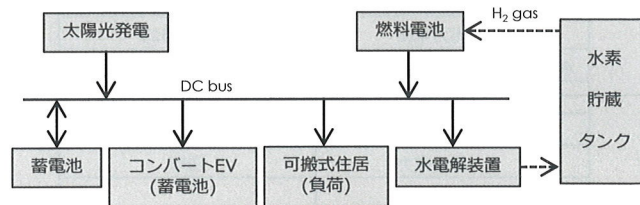


図1 エネルギー連系システム構成

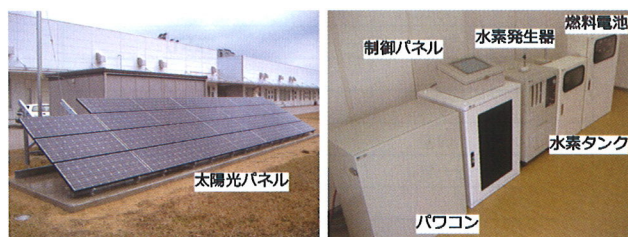


図2 エネルギー連系システム全景

クを有する水素発生装置と蓄電池で構成され、負荷として災害時に運用する可搬式住宅を用いた。構築したシステム構成を図1に示す。また、図2にシステム全景を示す。

システムは商用交流電源と接続しない自立型の電力供給システムとなっている。日中においては太陽光発電を主力としたシステムで、余剰電力は水電解装置により水素ガスに変換し、水素貯蔵タンクに貯蔵する。夜間においては蓄電池を主力としたシステムで、余剰電力で製造した水素を用いて燃料電池で補助発電することで、蓄電池の容量を少なくでき、かつ高効率で安定的なエネルギー供給が可能となる。また、蓄電池の補助としてコンバートEVを接続可能な構成とした。負荷としては被災等の際の可搬式住宅の利用を想定した。

構成される機器の入出力は蓄電池を除いて全て直流コンバータを介して接続されている。このコンバータの電圧は上下限值(48~60V)の間で可変可能である。これにより、発電量や需要量に応じて電圧の高い機器から電力供給が可能なシステムとなっている。例えば、日中において太陽光発電量が多いときは、太陽光発電の出力電圧を蓄電池の電圧より高くすることで蓄電池に充電することができる。さらに余剰がある場合は水素発生装置により水素製造を行う。また、太陽光発電量が少ないときは、基本的には蓄電池から電力供給するが、燃料電池から電力供給する際は、燃料電池の出力電圧を蓄電池電圧より高くすることで、燃料電池からの供給が可能となる。また、蓄電池は夜間の電力供給以外にも太陽光発電の急変や負荷の急変時等の電力変動吸収用に用いる。構成される各々の機器の主な仕様を表1に示す。

* 企業支援部電子応用グループ

*2 企業支援部設計制御グループ

*3 長州産業㈱

表 1 システム構成機器の仕様

太陽光発電	
パネル最大出力	4.2kW
パネル枚数	27枚(3直列3並列3段)
パネル	単結晶モジュール(155W)
パワーコンディショナー	4.5kW(1.5kW×3台)
出力電圧	DC60V
燃料電池	
方式	PEM型
最大出力	3.0kW(1.5kW×2台)
出力電圧	DC48~52V
水電解装置	
方式	PEM型
最大水素発生能力	3L/min
消費電力	1kW
水素貯蔵タンク	
方式	貯蔵合金
容量	4kNL
方式	高圧
容量	7kNL
蓄電池	
方式	鉛(ディープサイクル)
容量	14.4kW
出力電圧	DC48V
コンバートEV	
車体	エブリィワゴン(スズキ)
原動機	DCモーター(16.3kW)
鉛蓄電池容量	7.2kW
出力電圧	DC48V/AC100V
充電電圧	AC100V
走行距離	30~50km
可搬式住居	
用途(方式)	仮設住居(組立)
大きさ	3.4m×2.0m×2.2m
負荷	エアコン, 照明, 湯沸器

2・2 太陽光発電

太陽光パネルは単結晶モジュールを用い、155W出力のパネルを3直列3並列で3系統27枚使用し、パワーコンディショナー(以下、パワコンと称す)は系統毎に1台設置した。このパワコンはMPPT機能を有し、最大電力となるように自動制御される。また、蓄電池の充電機能も有し、直流系統電圧の状態により「全電力充電」、「定電圧充電」及び「浮動充電」の三段階充電制御が可能となっている。図3にパワコンを示す。

2・3 燃料電池

燃料電池は固体高分子(PEM)型で最大出力1.5kWを並列に2台使用した。燃料電池の電力は電圧調整用(DC/DC)コンバータを介して出力する。その際に電圧を3段階で調整可能とした。この調整により電力出力の調整が可能となる。図4に燃料電池とDC/DCコンバータを示す。

2・4 水電解装置及び水素貯蔵タンク

水電解装置は固体高分子(PEM)型で1kWの消費電力で毎分約3Lの水素が製造できる。水素製造量の調整は電圧調整用コンバータを用いて入力電圧を変化させることにより行う。入力電圧は3段階で調整可能となっており、余剰電力量により調整が可能となる。また、製造した水素は水分除去槽を通ることで十



図3 パワコン

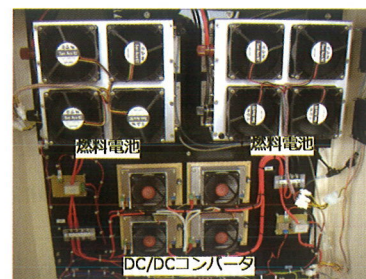


図4 燃料電池



図5 水電解装置



図6 水素タンク



図7 蓄電池



図8 コンバートEV



可搬式住居(入口)



ベット

可搬式住居(内部)

図9 可搬式住居

分に水分を除去し、水素貯蔵合金タンクで貯蔵する。タンクは1本で1000NL貯蔵でき、4本有する。また、貯蔵タンクからの供給能力が足りない場合のため高圧水素タンクも併設する。これにより満充填時には11kNLの水素供給が可能となる。図5に水電解装置を、図6に水素(吸蔵合金)タンク、高圧水素タンクを示す。

2・5 蓄電池

蓄電池は12V鉛蓄電池を4直列3並列、12個用いた。鉛蓄電池は短時間で大電流を放電させても、長時間で緩やかな放電を行っても比較的安定した性能となるが、過放電を繰り返すと容量が低下する欠点がある。システムにはこれを改良したディープサイクルバッテリーを用いた。これにより容量の50%以上を利用することが可能となる。図7に蓄電池を示す。

2・6 コンバートEV

コンバートEVは市販車のエンジンをモーターに載せ換える

ことで電気自動車に改造したものである。当初は AC100V で充電を行う仕様であったが、エネルギーシステムの蓄電池として、また、余剰電力による充電も可能になるように改造した。また、自動車内部で AC100V 利用ができるようにも改造した。図 8 にコンバート EV を示す。なお、コンバート EV は(株)TAMARU が改造し所有しているものを用いた。

2・5 可搬式住居

可搬式住居は災害等の緊急時における簡易組立式住居のことで、床面積 6.8m² 内に 4 名の居住スペースが確保されている。輸送時には 2.5m×2.2m×0.8m と小さくすることができるため、トラックで複数棟の輸送が可能となる。但し、電気と給水設備が確保されていない問題があった。そこで、構築するシステムから可搬式住居への電力供給としての有効性を検討することとした。可搬式住居へは DC/AC コンバータを介して AC100V で供給した。図 9 に可搬式住居を示す。なお、可搬式住居は岡村精工二建築設計事務所が開発されたものを用いた。

3. 実験結果

3・1 夏季の動作実験

構築したシステムの動作の有効性を確認するための実験を行った。太陽光発電及び蓄電池に関しては起動停止を行う必要がないため、発電量や負荷消費量に応じて手動で水電解装置と燃料電池の起動停止を行いシステムのエネルギー収支を実測した。また、負荷に関しては不定期に動作させた。各々の電力量はコンバータの入出力電流を電流センサにより計測し、DC 系統の電圧から電力量を計算した。なお、蓄電池の充放電損失、コンバータの変換損失及びケーブル損失は考慮していない。

夏季の動作実験結果を図 10 に示す。実験は 2013 年 8 月 21 日に実施した。当日の平均気温は日中が 30.8℃、夜間が 27.2℃で最高気温が 33.8℃、最低気温が 26.3℃だった。(天候は晴れ一部快晴)

負荷である可搬式住居では、エアコン(800W)、電気ポット(550W)、簡易冷蔵庫(200W)、照明(160W)を動作させ、エアコンについては日中においては 24℃設定、夜間は 26℃設定とした。電気ポットについては適宜水を沸騰させた。簡易冷蔵庫は常時稼働させ、照明については日中と夜 21:00 まで点灯した。また、コンバート EV については接続しない状態で実験を行った。また、前日の夕方からエアコンを動作させて蓄電池を 2kWh 程度使用し、充電可能な状態で実験を開始した。

日の出が 5:50 であるため、計測を開始した 8:00 の時点で既に太陽光発電を開始しており、エアコンの消費を除いた殆どが蓄電池の充電となっている。午前中は雲が若干出ていたため太陽光発電が安定しない結果となった。8:45 から電気ポットと水電解装置を動作させた。その際に日照量の増減により蓄電池からの放電を行う必要があったが、特に問題なくエアコン、電気ポット、水電解装置は動作した。日照量が少なかったため 10:00 に水電解装置を停止し、蓄電池に充電した。蓄電池は 11:00 には満充電に近くなり、かつ天候も快晴となったので 13:50 から水電解装置を再起

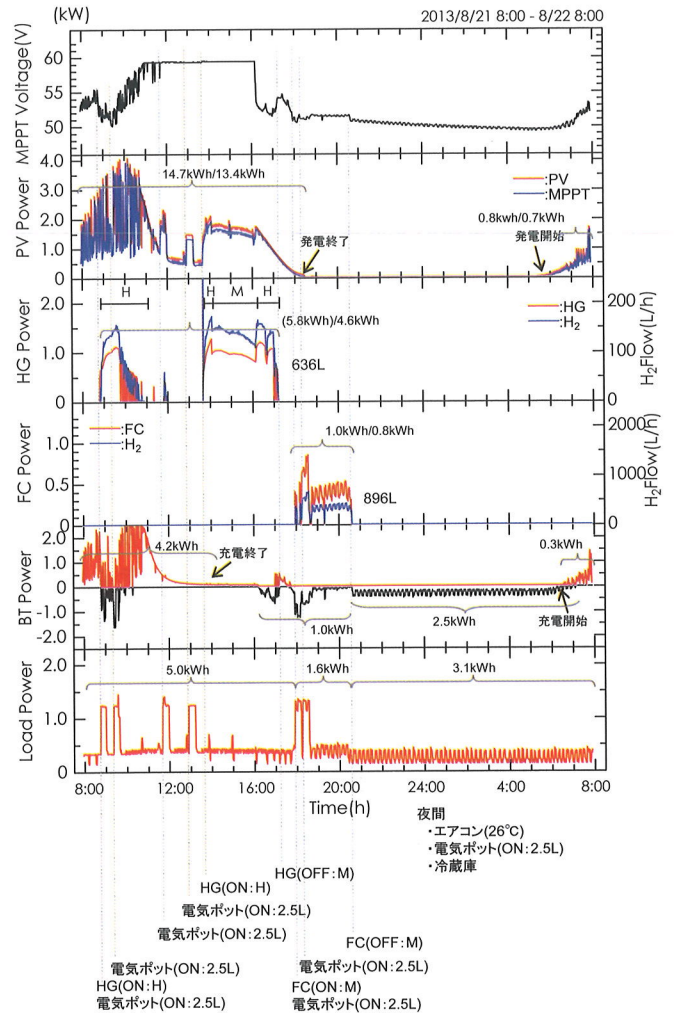


図 10 夏季におけるエネルギー収支

動させた。水素製造装置は日照量が少なくなる 17:00 まで動作させた。製造した水素は水素貯蔵タンクに貯蔵した。太陽光発電が少なくなった 18:00 から燃料電池による発電を開始した。その際に電気ポットを起動したが、その変動に対して蓄電池と同時に供給することで十分対応可能だった。燃料電池は 20:40 まで動作させた。燃料電池停止後は、エアコン等の電力は蓄電池により供給した。夜間については、エアコン、電気ポット(保温モード)及び簡易冷蔵庫を動作させた。夜間においても問題なく電源供給することを確認できた。

水電解装置に関しては動作による発熱量が多く、エネルギー効率の低下の原因となっている。また、製造した水素の水分除去にシリカゲル等を用いているが、今回の検証でかなりの水分を除去する必要があることが確認できた。燃料電池についても動作による発熱量が多く、エネルギー効率の低下の原因となっている。また、水素供給量が少ない場合は発電効率が低下するため、一定量以上の発電を継続的に行った方が高効率であることが確認できた。

エネルギー収支を供給側から算出すると、太陽光発電が 14.1kWh で、その内 5.8kWh が水素製造に利用され、640L の

水素を製造できた。また、4.6kWh が蓄電池に充電され、残りの 3.7kWh が直接可搬式住居で利用されたことになる。一方、利用側からエネルギー収支を算出すると、可搬式住居とシステムで利用された電力は 9.7kWh であり、0.8kWh を燃料電池から、4.1kWh を蓄電池からとすると、残りが 4.8kWh となり、先程の供給側から算出した値と 1.1kWh の誤差が生じた。これは蓄電池の充放電を同じ電流センサを用いて正負を計測しているためと、電流値のサンプリング間隔が 10sec と長く、急峻な変動を算出できなかったことによる誤差と考えられる。

以上のことから、太陽光発電の余剰電力を用いて水素製造を行い、その水素を用いて燃料電池で発電し夜間電力として利用することが可能であることが確認できた。但し、太陽光発電能力に比べて水素製造能力が低いため十分に水素を製造できないことや、夜間運転するための水素量を確保するためには燃料電池も安定発電可能なシステムにする必要があることがわかった。また、蓄電池により太陽光発電の変動や負荷の変動にも十分対応可能であることが確認できた。これらの制御については DC 系統の電圧を調整することで対応可能であることも確認できた。但し、電流センサを用いた際にはエネルギー収支の誤差が大きく、もう少し精度の高い計測システムを採用する必要があることがわかった。さらに、水素製造、水素吸蔵、燃料電池については発電や吸蔵する際に発熱を伴う。エネルギー効率を向上させるためにはこの発熱エネルギーを回収する必要がある。本システムでは熱エネルギーについては回収を行っていないため、今後のシステム改良には熱エネルギーを考慮したエネルギー連系システムにすることが必要となる。

3・2 冬季の動作実験

冬季の動作実験結果を図 11 に示す。実験は 2014 年 2 月 4 日に実施した。当日の平均気温は日中が 4.8℃、夜間が 1.4℃で最高気温が 8.1℃、最低気温が -0.1℃だった。(天候は晴れ一時曇り)

負荷である可搬式住居では、エアコン(800W)、電気ポット(550W)、簡易冷蔵庫(200W)、照明(160W)を動作させ、エアコンは日中においては 20℃設定、夜間は 19℃設定とした。電気ポットについては適宜水を沸騰させた。簡易冷蔵庫は常時稼働させ、照明については日中と夜 19:00 まで点灯した。また、コンパクト EV については夏季同様に接続しない状態で実験を行った。また、前日の夕方からエアコンを動作させて蓄電池を 5kWh 程度使用し、充電可能な状態で実験を開始した。

日の出が 7:20 であるため、計測を開始した 8:00 の時点で既に太陽光発電を開始していたが発電量も少なくエアコンの稼働時においても、発電量により蓄電池による充放電を繰り返す状態だった。その後、電気ポットの起動も行ったが、同じ状況となった。このような状態においても太陽光発電と蓄電池で対応ができていたことがわかった。その後、日照量が増加したため、水電解装置を起動させ水素の製造を開始した。日照量が天候により大きく変動したが、蓄電池からの放電により電気ポット等も問題なく動作する

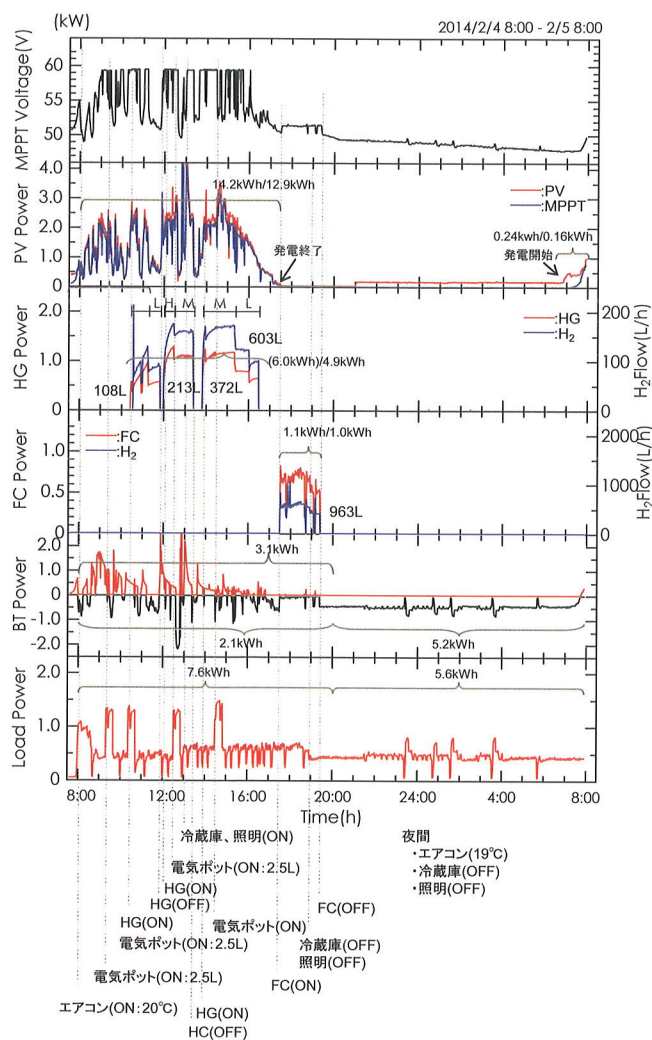


図 11 冬季におけるエネルギー収支

ことが確認できた。太陽光発電量が低下した 17:30 から燃料電池を起動させ、エネルギーの供給を行った。燃料電池の出力電圧を調整することで、消費量と同じ電力量を供給することができ、急峻な変動についても燃料電池のみで対応可能であった。夜間については、エアコンのみを動作させた。

エネルギー収支を供給側から算出すると、太陽光発電が 12.9kWh で、その内 6.5kWh が水素製造に利用され、700L の水素が製造できた。また、2.1kWh が蓄電池に充電され、残りの 4.3kWh が直接可搬式住居で利用されたことになる。一方、利用側からエネルギー収支を算出すると、可搬式住居とシステムで利用された電力は 13.2kWh であり、1.0kWh を燃料電池から、7.3kWh を蓄電池からとすると、残りが 4.9kWh となり、先程の供給から算出した値と 0.6kWh の誤差が生じた。誤差が生じた原因については夏季の場合と同様と考えられるが、夏季より少なかった。これは夏季の午前中の太陽光発電の変動が大きいことが一因であると考えられる。

以上のことから、日照量の少ない冬期でも太陽光発電の余剰電力を用いて水素によるエネルギー貯蔵が可能であることが確認できた。また、蓄電池でエネルギー収支を調整することも可能であることも確認できた。但し、冬季はエ

エアコン等のエネルギー消費も多く、太陽光発電量も少ないことから蓄電池の蓄電容量も少なくなる。そのため、長期のシステム運用を検討する際には、蓄電池の容量を多くするか、水素ガスの他からの供給も考慮するなどの検討が必要となると考えられる。

4. 結 言

エネルギーの地産地消の観点から、全国でも有数の水素生産能力を保有する山口県に着目した燃料電池（水素エネルギー）と太陽光パネルを融合した分散型エネルギー連系システムを構築した。具体的には太陽光発電装置、燃料電池と水電解装置、水素貯蔵合金ポンプによる水素貯蔵タンク、蓄電池によるエネルギー連系システムを構築し、実験的検討を行った。

その結果、構築したシステムは夏季及び冬季において、晴れもしくは曇りの状況でも日照量が確保できる状況では日中の余剰発電量を水素ガスに変換して貯蔵し、夜間に燃料電池により発電供給可能であることを確認できた。また、DCバスに蓄電池を接続し、直流電圧を調整することで電力供給元を調整することも可能であることがわかった。但し、太陽光発電の電力から水素を製造・貯蔵し、燃料電池で発電した場合にはエネルギー変換効率が約10%程度と非常に低くなるため、熱エネルギーの回収を実施して、エネルギー効率の向上が必要と考えられる。

本取組は、山口県産業技術センター新エネルギー研究会の中に設置した水素・再生可能エネルギー利用分科会活動を通じて行われたもので、分科会会員企業として長州産業㈱、新立電機㈱、㈱TAMARU、㈱特殊ガス商会、㈱YOODS、岡村精二建築設計事務所、㈱FC-R&D、オムロン㈱、山口大学が連携して実施したも

のの一部である。

また、試作は長州産業㈱が山口県産業技術センターの実施した「水素関連製品試作開発業務委託」により行った成果の一部であり、開発にご協力頂いた新立電機㈱ 御旗 寛氏、玉野 等氏、㈱TAMARU 横岡撰樹氏、㈱特殊ガス商会 後藤真也氏、藤田卓司氏、㈱YOODS 原田 寛氏、岡村精二建築設計事務所 岡村精二氏、㈱FC-R&D 中島 宏氏、オムロン㈱ 環境事業推進本部 ソリューション開発部 林田光紀氏、山口大学工学部 田中俊彦氏に感謝します。

参考文献

- 1) 尾上清明：「水素ステーション用高圧水素関連設備の動向」, OHM, No. 2013-08, pp. 46-47 (2013).
- 2) 小島 康一, 沼田 耕一, 渡部 麻美子：「トヨタ自動車における燃料電池自動車開発の課題と今後」, OHM, No. 2013-08, pp. 30-31 (2013).
- 3) 前田哲彦, 川上理亮, 岡本英之, 高橋惇, 伊藤博, 赤井誠：「自然エネルギーによる水素製造を取り込んだ水素統合システムの挙動」, 平成19年電気学会電力・エネルギー部門大会論文集, pp. 44-1-44-2 (2007).
- 4) 河崎橙, 山根浩二, 奥野泰徳：「ソーラー水素を利用したローカルエネルギー供給システム」, 第14回動力・エネルギー技術シンポジウム講演論文集, pp. 315-316 (2009).
- 5) 梅本奨平, 一柳勝宏, 雪田和人, 後藤泰之：「水素発生器/燃料電池発電を含む水素貯蔵によるマイクログリッドの実験的検討」, 電気学会電力技術研究会資料, pp. 23-28 (2014).
- 6) 山口県産業戦略本部：「やまぐち産業戦略推進計画」（第二次改訂版）, (2015).