

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420883

研究課題名(和文) エクセルギー最大化を目指したハイブリッドソーラーコレクタに関する研究

研究課題名(英文) A study on hybrid solar collector for maximizing exergy

研究代表者

松尾 廣伸 (MATSUO, Hironobu)

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：70293610

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：樹脂製の集熱器を既存のPVパネルに後設したハイブリッドソーラーコレクタ(HSC)、ヒートポンプ(HP)、井水熱交換器(GS)、貯湯槽を組み合わせた住宅用の電熱併給エネルギーシステムを作成し、実験によるその基本性能の把握とシミュレーションによる通年評価を行った。その結果、GSの場合と比べ、HSCを熱源とすることでHPのCOPが2.5から4.6へと80%以上向上すること、通年の取得エネルギー量も多くなることを示した。また、シミュレーションにより運転方法の違いでエネルギー効率に大きな差が生じることを示した。

研究成果の概要(英文)：A combined heat and power system for residential use combining a hybrid solar collector (HSC), which is equipped with a resin thermal collector to an existing PV panel, a heat pump (HP), a well water heat exchanger (GS), and a hot water storage tank was built. We conducted experiments to grasp the basic performance and conducted an annual evaluation by simulation. As a result, it showed that by using HSC as a heat source, HP COP improves by more than 80% from 2.5 to 4.6 compared to GS, and the amount of acquired energy for the whole year also increases. In addition, the simulation shows that a large difference in energy efficiency occurs due to the difference in operation method.

研究分野：再生エネルギー利用小規模エネルギーシステムの開発・効率化

キーワード：太陽エネルギー ハイブリッドソーラーコレクタ PV/T 電熱併給 ヒートポンプ 井水熱利用 実験  
シミュレーション

### 1. 研究開始当初の背景

東日本大地震を受けて、エネルギーのパラダイムシフトが求められている。また、地球温暖化防止のための CO<sub>2</sub> 排出量の削減やエネルギーセキュリティの観点からエネルギー自給率の向上が望まれる。家庭におけるエネルギー使用量は 90 年度比で約 40% 増加しており、その削減は急務である。特に住宅における消費エネルギー量の約 6 割を占める<sup>①</sup> 給湯および暖房エネルギーの大幅な削減が必要である。

PV システムは、余剰電力買い取り制度の後押しもあり、一般住宅への普及が拡大している。しかしながら、エネルギー変換率は最大でも 20% 程度であり、太陽エネルギーの多くは熱として捨てられている。この熱を回収し活用することを考える。かつて、電熱ハイブリッドソーラーコレクタは市販されたことがあり、また研究もなされているが、従来のパネルは集熱優先だったために、熱余り、高温化による PV 発電量の低下や、熱応力による剥離・破壊などの問題を生じていた。

そこで、これらの問題を解決し、既存の PV システムに後付け設置可能で、エネルギー効率を大幅に向上させる取得エクセルギーを最大化するハイブリッドソーラーコレクタを設計・製作し、実証実験および理論的な検討を行い、太陽エネルギー利用率の向上と最適運用への知見を得たい。

### 2. 研究の目的

太陽光からの取得エクセルギーの最大化を目指して、太陽光発電パネルに水式集熱パネルを後付けし、電熱ハイブリッドソーラーコレクタを作成し、発電量・効率の向上と集熱に関する実証実験と理論的検討を行うことを目的とする。電気のエクセルギーと低温熱熱のエクセルギーには圧倒的な差があり、このことはすなわち発電電力の最大化に加えて集熱を行うことを意味する。そこで、ヒートポンプを用いてパネルを積極的に冷却可能な構成とし、単なるソーラーシステムではなく、パネル温度の制御と蓄熱が可能な構造とする。その際、冷却及び採熱のために土壌熱源も組み合わせる。開発システムのご概念

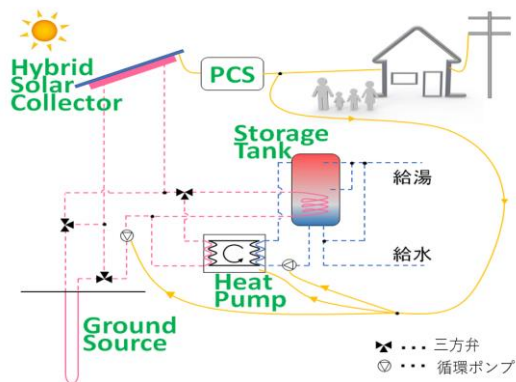


図1 開発システムのご概念図

図を図1に示す。桃色の線がブラインの流れ、水色の線が水(お湯も含む)の流れ、黄色の線が電気の流れを表している。給湯動作は一般住宅給湯負荷を想定した、太陽熱の利用率およびエネルギー効率の検証を行うとともに効率向上のための理論的検討を行う。一方で、エネルギー取得シミュレーションを行い、本システムの運用方法や導入効果について検討する。

以上のように、本研究の目的は、(1)樹脂密着型低温集熱ハイブリッドソーラーコレクタの開発、(2)ヒートポンプを組み合わせた住宅用システムの開発、(3)開発システムの評価、(4)同システムのシミュレーションモデルの開発とそれを用いた検討・評価を行うことである。

### 3. 研究の方法

(1) 樹脂密着型低温集熱ハイブリッドソーラーコレクタの開発 構造設計・小型モデル試作・室内耐圧実験後に、単体で屋外対照実験を行い、集熱の有無による PV 発電量の違いを日射量・温度と共に計測し、その基礎特性を把握する。それと共に次項に使用するパネルの制作を行う。

(2) 1.5kW 級の実用可能な小規模なハイブリッドソーラーシステムの構築 ハイブリッドソーラーコレクタ(HSC)、土壌熱源(GS)、ヒートポンプ(HP)、貯湯槽(ST)、パワーコンディショナー(PCS)からなる住宅用エネルギーシステムを構築する。

(3) システムの性能評価 前節のシステムを種々の熱源・モードにおいて沸き上げ実験を行い、日射量、温度、流量および消費電力などの計測を詳細に行う。加えて、ヒートポンプで温度制御を行い、冷却時の特性を把握する。計測結果から、太陽エネルギー利用率、給湯熱供給量、集熱効率、実効 COP を求め、ハイブリッドコレクタの効果を定量化し、更なる効率改善方法の検討を行う。

(4) シミュレーションの開発とそれを用いた評価 太陽熱集熱量、沸上げ効率、外気温、貯湯槽温度、蓄熱温度、ヒートポンプ動作等の実験結果を利用して、全天日射量から指定方位角・傾斜角に設置されたハイブリッドソーラーコレクタの動作を模擬できるようなシミュレーションモデルを作成する。その上で、効率的運用のための制御方法に関する検討を行う。

### 4. 研究成果

(1) 樹脂密着型ハイブリッドソーラーコレクタの開発 PV 裏面に取り付けが可能な集熱器を開発し、パネル温度の低下と PV からの集熱を試みた。筆者が以前に作成した塩化ビニル製の 0 型の集熱器<sup>②</sup>をベースにしたが、この型は密着性が高く集熱効率が高いもの

の水圧の影響が強く、PVを破損することがあることが判明したため、それらの問題点を解決したポリカーボネート製のD型集熱器の開発を進めた。試作・改修を繰り返し第三世代に達した。主な改良点は、複数枚接続時の耐水圧の改善とパネルに対する密着性の改善であった。第三世代のD型集熱器は集熱器自体に撓みをつけ、さらに集熱器裏側の調整用ボルトを締めることによって局部的に集熱器をPVへ密着させることができるようにした。この集熱器の熱画像を観測した結果、PVは十分に冷却されていることがわかり、集熱特性試験の結果、集熱効率線図の傾きは-10.787、切片が0.3383となった。また、2015.11/3における実験ではHSCの電力はPV単体と比較し最大で5.2[W]高くなり、集熱量と変集熱効率はそれぞれ458[W]、32.4[%]となった。また、この時の太陽エネルギー利用率は46.2[%]となった。しかしながら、この集熱器は熱応力により集熱器にヒビが入り液漏れにつながるということが判明したため、開発を諦めた。

そこで樹脂製というコンセプトは残しつつ上記の問題を解決できる集熱器を考え、ビニルチューブ集熱器を製作した。市販のビニルチューブ(内径10[mm]、厚さ1[mm]、長さ100[m])を蝸局状にポリカーボネート板の上に固定しPV裏面に取付けた。ブラインはホースの中を流れ集熱を行う。この集熱器で集熱特性試験をした結果、集熱効率線図の傾きは-21.261となり切片が0.4011となった。この数値は集熱効率変数が小さい領域では第三世代のD型集熱器よりも集熱効率が優れることを示している。しかし、全体としては傾きが大きく集熱効率は良いとは言えない。集熱効率線図を図2にまとめて示す。集熱効率が市販の製品と比較すると低くなるが、これはPV発電量確保のため低温大面積集熱を目指しているためである。

PVの裏面に取付けが可能な集熱器を開発する上では、集熱器が破損しないことを前提とし、集熱効率を上げるために集熱器に用いる熱抵抗の小さい材料をバックシートに密着できるかが重要であり、残念ながら集熱器の材質及び構造を再考する必要がある。

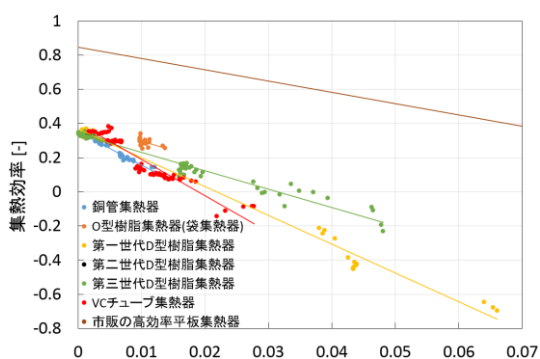


図2 試作パネルの集熱効率線図

(2) ハイブリッドソーラーヒートポンプシステムの構築 前述のビニルチューブ集熱器を用いたHSCに、GS、HP、ST、およびPCSを組み合わせて住宅用エネルギーシステムを構築した。全体像を図3に示す。通常の住宅に設置される程度の4.8kWのPVパネルの1/3の裏面に集熱器を設置してHSCとした。また、土壌採熱は既存の深井戸にUチューブを設置することで模擬した。HPは地元の企業の協力を仰ぎ試作機を提供頂いた。STとPCSは既存のものを用いた。通常時の動作は2通りを想定している。1つは、HPを補助的に用いる方法であり、HSCで得た熱量は熱交換器を介してST内に貯湯することを主とするものである。HSCとSTの動作としては旧来のものと変わらないが、熱余りが生じる際にはGSへ放熱することでパネルの温度上昇を抑え、その結果発電効率の向上が見込まれる。逆に給湯に対して熱量が不足する際には太陽熱もしくは土壌熱を熱源としてHPで沸き上げるようにする。この運転ではタンク内が中温水となることが予想され、その状態からの沸き上げはHPの稼働時間が少なく済む。もう1つはHPを積極的に用いる方法であり、原則としてHSCを熱源としてHPで沸き上げを行い、冷却されたブラインをHSCへ流すことで発電効率の向上を図る。この運転ではタンク内に温度成層をつくり適切な貯湯温度管理ができるとともに熱の両面利用が可能であり、HPシステム効率の向上が見込まれる。

(3) システムの性能評価 HPには都合により当初R410A冷媒を用いたが、高温領域による効率が上がらず、冷媒をR32とし、それに合わせてコンプレッサも変更を行った。本節にはその両者の結果を示す。

① HSC熱源動作 太陽熱(HSC)を熱源とした場合のHP沸き上げ性能を評価する。改造前の実験の一例として2016.4.19の測定データを使用し、改造後の実験の一例としては2016.9.2のものを採用した。どちらも快晴であり、安定した日射が得られた日であった。実験は、ブライン流量:7~8[L/min]、沸き上げ温度:50~70[°C]、温水流量:1~2[L/min]をパラメータとして行い、日射量、消費電力および各部の温度・流量を測定した。



図3 HSHPシステムの全景

図4に、改造前後のHSC熱源HP沸き上げ実験の結果をもとに熱量およびCOPを算出した結果を示す。改造前に比べて改造後の供給熱量が少ない。これは実験の時期が異なるために給水温度に10 [°C]程度の差が生じているためである。しかしながら、給水温度の差に対して集熱量の変化は小さく、HSCからの集熱割合は増加していることがわかる。改造前後の消費電力を比較すると、改造前に比べて改造後の半分程度に抑えられており、それに伴いCOPも向上している。特に、沸き上げ温度が50 [°C]の条件で比較すると、HPCOPが3.1から4.7となり、53%向上した。沸き上げ熱量が近いという観点から見ると、改造前の沸き上げ温度が50 [°C]の条件と改造後の沸き上げ温度が60 [°C]の条件での供給熱量を比較しても、COPが3.1から4.6となり51%向上しており性能が大きく改善されていることが読み取れる。また次項の井水採熱動作時に比べ80%性能向上が図られている。システムCOPとしても3を上回っており、実用レベルに近づいてきている。

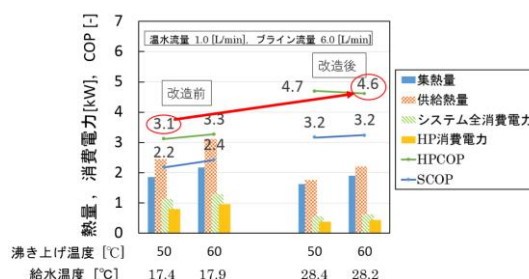


図4 HSC熱源での熱量と消費電力

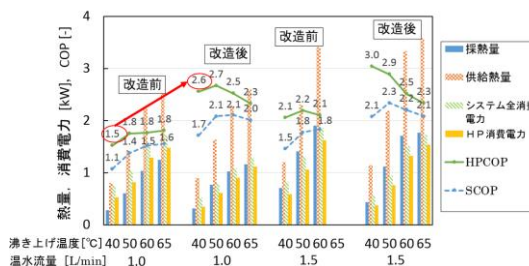


図5 井水熱源での熱量と消費電力

② 井水採熱動作GSを熱源とするHPの沸き上げ性能を評価する。改造前の実験結果の一例として、2015.8.26に行われた採熱実験の測定データを使用し、改造後の実験結果には2016.8.29に行われた実験の結果採用した。実験は、ブライン流量:6[L/min]固定とし、沸き上げ温度:40~65 [°C]、温水流量:1.0, 1.5 [L/min]をパラメータとして行った。図5に、各条件で採熱量が安定している区間の10分間平均値を算出し、棒グラフに示す。改造前後において、消費電力が減少する一方で供給熱量はほとんど変化していないことがわかる。改造前に比べて改造後のCOPは全条件において向上がみられた。特に、温水流量が1.0 [L/min]および設定温度40 [°C]の条件でのHPCOPは1.5から2.6となり、73%向上した。また、同図の改造後の温水流量1.0 [L/min]の条件において、COPは、沸き上げ温度が40 [°C]から50 [°C]に上昇するにつれて上昇している。ところが、それ以降は沸き上げ温度の上昇に反してCOPは低下している。このことから、システムで消費される電力に対して、取得できる熱量が沸き上げ温度50 [°C]の条件で飽和していることが読み取れる。改造後の温水流量1.5 [L/min]の条件のHPCOPの変化にも同様の変化がみられる。このことから、温水流量を調整することで、任意の設定温度に対してCOPを高い状態を維持したHPの運転が可能であると考えられる。

③ HPCOPのモデル化 得られた測定データを用いて、HPの運転条件である沸き上げ温度、給水温度、温水流量、ブラインHP入口温度、ブライン流量から、重相関関係より一次多項式を求めた。推定式を式を下記に示す。

$$HPCOP = -0.0457 \cdot T_{out} - 0.0155 \cdot T_{in} + 0.541 \cdot F_w + 0.0798 \cdot \theta_{in} + 0.197 \cdot F_b + 2.51$$

ここで、HPCOP: ヒートポンプのCOP[-]、Tout: 沸き上げ温度[°C]、Tin: 給水温度[°C]、Fw: 温水流量[L/min]、θin: HP入口でのブライン温度[°C]、Fb: ブライン流量[L/min]である。

この式は、R<sup>2</sup>値=0.952と非常に高い相関を示した。解析に採用したデータはいずれも沸き上げに成功した条件のみを使用している。そのため、温水流量を高く設定したことにより必要熱量に対して沸き上げ熱量が不足し、沸き上げに失敗することを考慮されていない。実際はHPで供給可能な熱量を見極め、その範囲内でできるだけ大きい温水流量で運転することが好ましいと考える。

④ 電熱総合性能試験 図6に、PV単体、HSC熱源HP沸き上げ運転時、直接貯湯時およびHSC非集熱時の取得エネルギー量とエネルギー収支の計測結果例を示す。気象条件ができるだけ近い2016.2/11~3/11の結果で日射が安定している時間のものを採用した。直接貯湯運転はブライン流量6 [L/min]、HSC熱源HP沸き上げ運転は、ブライン流量8 [L/min]、温水流量1 [L/min]、沸き上げ温度60 [°C]とした。直接貯湯運転時の変換効率および集熱効率はPV単体が13.8 [%]、HSCが13.9 [%]で、集熱効率は15.1 [%]であった。HSC熱源HP沸き上げ運転の変換効率および集熱効率はPV単体が13.7 [%]、HSCが13.6 [%]で大差なく、集熱効率はHPでブラインが冷やされるため直接貯湯よりも上昇し、22.3 [%]であった。得られたエネルギー収支の結果は、大きい順に「HP沸き上げ運転」、「直接貯湯運転」、「PV単体」、「HSC非送水」となった。エネルギー収支をPV単体と比較するとHP沸き上げ運転時は2.23倍、直接貯湯運転時は1.93倍となった。HP等での消費電力を差し引いて

も実利用可能エネルギー量が増加している。HSC非送水時は集熱器がPV裏面からの放熱が妨げるためパネルが高温化し、僅かながら発電電力が減少した。また、太陽エネルギー利用率は、PV単体が13.7 [%]、HP沸き上げ運転が35.7 [%]、直接貯湯時が28.5 [%]となった。

次に直接貯湯運転とHP沸き上げ運転の取得エネルギー量の季節変化(2016.2/18~7.4)を図7に示す。直接貯湯運転(ブライン流量8 [L/min])では冬季と夏季を比較した際に、夏(7/4)の方が冬(2/18)よりも集熱量とSCOPが増加している。これは外気温が高いため、HSCからの放熱損失が減少したためである。次に、春から夏にかけてのHSC熱源HP沸き上げ運転時(ブライン流量8 [L/min]、温水流量1.5 [L/min]、沸き上げ温度50 [°C]、ただし6/27は温水流量2 [L/min])では、夏季に向かってSCOPが上昇した。これは、タンク内水温が上昇することでHPでの沸き上げに必要な熱量が減少したことにより、コンプレッサの消費電力が減少したためである。

(4) シミュレーション シミュレーション精度の向上には、配管損失の考慮と熱交換器伝熱係数の関数化が特に重要であることが明らかとなった。この補正の結果、直接貯湯時の集熱器出入口温度とタンク熱交換器出入口温度は全てにおいて実験値との温度差が1.1 [°C]以内に、タンク温度は1.8 [°C]以内に収まった。また、積算集熱量は実験データに対して集熱器集熱量が+2.4 [%]、貯湯熱量が+3.5 [%]と非常に再現性の高いシミュ

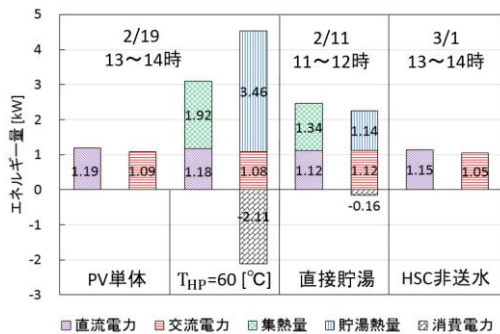


図6 動作条件によるエネルギー量の比較

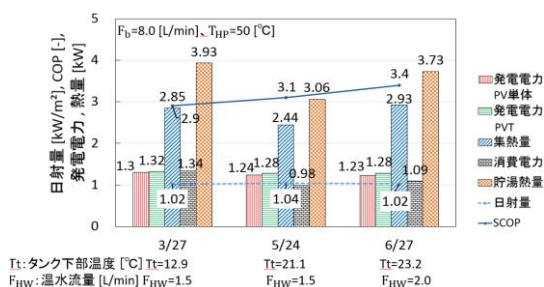


図7 季節による違い

レーションが行えるようになった。

このシミュレーションに開発したヒートポンプを組み合わせ、運転パターンを変えて、通年のエネルギー収支を求めた。運転パターンは、HSCの低温を維持するために朝6時からHPで沸き上げ不要時にはHSCを井水で冷却する「HSC熱源HP沸き上げ運転」、これにHSCと井水の熱源切替を加えた「熱源自動選択型」、沸き上げ時間を変更した「日中沸き上げ型」、両者を行う「熱源自動選択+日中沸き上げ型」とした。シミュレーションの条件は静岡県浜松市の一般住宅を想定し、PVには全てビニルチューブ集熱器が設置されているものとした。結果を図8に示す。「熱源自動選択型」は冬季のCOPが「HSC熱源HP沸き上げ運転」に比べ上昇した。「日中沸き上げ型」はブライン温度が高くなる日中に沸き上げ運転を行ったためコンプレッサの消費電力が1年を通して減少した。そのため、通年のCOPも向上した。「熱源自動選択+日中沸き上げ型」は、冬季の集熱器集熱量が低下した。これは冬季の日中でもパネル温度が土壤温度よりも低いためGSを熱源として選択したためである。エネルギー収支とCOP共に「熱源自動選択+日中沸き上げ型」が最も高く、その値は「HSC熱源HP沸き上げ運転」と比べてそれぞれ約4.9 [%]、約27.5 [%]向上した。通年シミュレーションの結果から、日中の日射量が多い時間帯にHSC熱源で沸き上げ運転をすることが望ましいことを示した。

この結果を既存の組合せと比較したところ、PV+エコキュートの方が現時点では勝っている。これはエコキュートの性能(COPが1.5倍異なる)によるもので、本システムにおいてもそのような高性能なコンプレッサを用いることができれば大幅な削減が見込める。本システムの更なる効率向上のためには、ハード的にはHP(コンプレッサ)とブライン循環ポンプの消費電力の低減が、ソフト的には運転モードと運転条件のさらなるマッチングが必要である。また、集熱効率の良い集熱器を用いることでHPのCOPの向上と発電電力の向上が期待できる。

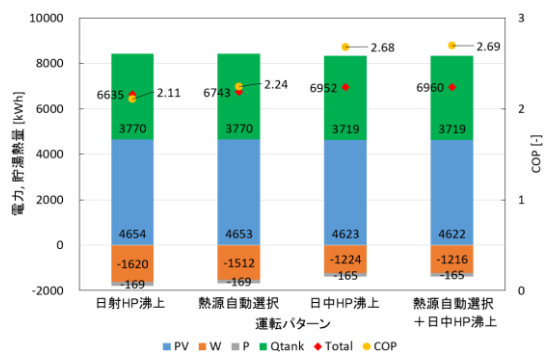


図8 通年シミュレーション結果

<引用文献>

- ① 経済産業省資源エネルギー庁:エネルギー白書 2016
- ② 松尾 廣伸、大井智晴:「電主熱従型ハイブリッドソーラーコレクタの試作と冬季における性能評価」、平成 24 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、pp. 241-244 (2012)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 12 件)

- ① 山下 大輔, 松尾 廣伸, 野田 淳、ヒートパイプを用いたハイブリッドソーラーコレクタの製作・評価および電熱解析、平成 28 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、2016. 11. 24-25、松山市総合コミュニティセンター (愛媛県松山市)
- ② 野田 淳, 松尾 廣伸, 永末 達郎, 望月 一樹、ビニルチューブ集熱器を用いたハイブリッドソーラーヒートポンプシステムの実験、平成 28 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、2016. 11. 24-25、松山市総合コミュニティセンター(愛媛県松山市)
- ③ 松尾 廣伸, 高久 貴文, 大形 智彦, 松本 紘輔, 宮田 景介、ハイブリッドソーラーヒートポンプシステムにおけるヒートポンプ改造と性能評価、平成 28 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、2016. 11. 24-25、松山市総合コミュニティセンター(愛媛県松山市)
- ④ 松尾 廣伸、これからの太陽熱利活用～100%RE に向けて～、日本太陽エネルギー学会 100%再生可能エネルギー研究部会第 1 回セミナー 100%再生可能エネルギーを利用する社会に向けた可能性を考える、2016. 6. 9、首都大学東京 秋葉原サテライトキャンパス(東京都港区)
- ⑤ 松尾 廣伸、ハイブリッドソーラーヒートポンプシステムの構築、日本太陽エネルギー学会太陽熱部会講演会「太陽熱利用の普及拡大のシナリオ～電熱ハイブリッド特集～」、2016. 3. 2、芝浦工業大学(東京都港区)
- ⑥ 小松 拓海, 松尾 廣伸, 宮田 景介, 大形 智彦、ハイブリッドソーラーヒートポンプシステムの井水採熱特性、平成 27 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、2015. 11. 26-27、ニューウェルシティ宮崎(宮崎県宮崎市)
- ⑦ 望月 一樹, 松尾 廣伸, 野田 淳, 永末 達郎、発電出力 1.5kW 級電熱ハイブリッドソーラーヒートポンプシステムの構築、平成 27 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、2015. 11. 26-27、ニューウェルシティ宮崎(宮崎県宮崎市)
- ⑧ 野田 淳, 永末 達郎, 松尾 廣伸、樹脂密着型ハイブリッドソーラーコレクタの構造と改良、平成 27 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、2015. 11. 26-27、ニューウェルシティ宮崎(宮崎県宮崎市)
- ⑨ 永末 達郎, 松尾 廣伸、日射熱取得シミュレーションのための日射補間方法の検討、平成 27 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、2015. 11. 26-27、ニューウェルシティ宮崎(宮崎県宮崎市)
- ⑩ 永末 達郎, 松尾 廣伸、ハイブリッドソーラーシステムの評価方法の検討、平成 27 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会、2015. 9. 28-29、名古屋工業大学(愛知県名古屋市)
- ⑪ 松尾 廣伸、食住環境への HP 導入によるエネルギー効率向上への試み ～メロン温室と土壤熱活用ハイブリッドソーラーコレクタ～、日本冷凍空調学会第 8 回中部地区技術交流会、2014. 11. 28、三菱電機静岡製作所(静岡県静岡市)
- ⑫ 永末 達郎, 梅原 直己, 松尾 廣伸、一般住宅においてハイブリッドソーラーコレクタ設置割合が取得エネルギー量に及ぼす影響、平成 26 年度日本太陽エネルギー学会・日本風力エネルギー学会合同研究発表会、2014. 11. 13-14、いわき市文化センター(福島県いわき市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾 廣伸 (MATSUO, Hironobu)  
静岡大学・工学部・助教  
研究者番号: 70293610