

太陽熱・光ハイブリッド太陽電池モジュール による太陽エネルギー有効利用技術

Effective utilization technology of solar energy by Photovoltaic
thermal collector module

飯田浩貴*

1. はじめに

わが国における太陽光発電産業は、平成 24 年 7 月 1 日からスタートした再生可能エネルギー固定価格買い取り制度（FIT 制度）により、導入量が急拡大し、太陽光産業としてのコストダウンが進んだ。一方で、売電価格は年々減額となっており、当初の 42 円 /kWh から平成 31 年度（2019 年度）は、14 円 /kWh まで下がった。このため、日本においての太陽光発電事業は、「補助金なしで独り立ちできるもの」を目指すことが急務となっている。

太陽電池モジュールのコストは、NEDO PV2030+ に従い、目標を達成し、その市場が拡大している。一方、太陽エネルギー変換の高効率化の観点からは、太陽光パネルが受ける「熱」をうまく活用できないか、という潜在的なニーズがある。

日本のエネルギー消費量の 4 分の 3 は、エネルギーが熱として使われており、この分野の低炭素・脱炭素化技術確立が急がれている。

このような状況の中、日清紡メカトロニクス(株)は、NEDO（国立研究開発法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構）との共同開発（太陽光発電多用途化実証プロジェクト：実施期間平成 26 年 8 月～平成 29 年 2 月）で、太陽エネルギーの高効率変換技術として、既存の太陽電池モジュールの受光面側で「発電」、裏面側で太陽熱による「温水」製造を行う、太陽熱・光ハイブリッド太陽電池モジュールの開発を進めた。本開発品は、太陽電池産業のサプライチェーンを有効活用することにより、「温水」製造機能を有する製品の導入コストをミニマム化することを狙い、既存の太陽電池モジュール生産ラインで製造可能である外観、形状の設計とした。

本報では、冷却による発電性能向上及び効果的な

温水製造能力を兼ね備えた太陽熱・光ハイブリッド太陽電池モジュールの構造や基本性能を紹介し、本モジュールが FIT に頼らない自立可能な新たな「太陽エネルギー」利用デバイスであるための実用化に向けた実証試験状況及び展望を記す。

2. 太陽熱・光ハイブリッド太陽電池モジュール技術

2.1 開発方針

1990 年から 2000 年にかけて、太陽熱・光ハイブリッド太陽電池モジュール（以下 PVT ハイブリッドモジュール）の開発が世界中で精力的に行われ、日本でも検討された結果、以下の課題が残った。

- (1) 水漏れしない製品信頼性の確保
- (2) 冷却による発電性能の向上
- (3) 「温水」器と同等以上の集熱性の確保

以上の課題を踏まえ、本 PVT ハイブリッドモジュールの開発の方針は以下とし、開発を進めた。

A：金属（銅管）を使用しない。

理由：従来の太陽熱温水器に多く採用されている銅管は、冷媒による腐食、および冬季の凍結による破裂での水漏れの懸念がある。

本開発では、住宅部材として実績にある架橋ポリエチレン管を適用する。

B：断熱材を使用しない。

理由：発電素子の下側に断熱材を適用することにより、モジュール躯体が高温となり、太陽電池パネルの発電性能低下の改善にならない。（一般的な結晶系太陽電池の出力の温度係数は、約 $-0.5\%/^{\circ}\text{C}$ で

*日清紡メカトロニクス（株）

あり、夏場はパネル温度が60℃を超え、基準の25℃時に比べ、出力が約20%低下する。)

C：集熱メカニズムの開発

太陽光受光時の太陽電池モジュールの表面温度は、40℃から70℃程であり、既存の「熱伝導」による集熱メカニズムのみでは、冬場に40℃以上の温度を得ることはできない。そこで、電磁波による水分子の吸収発熱による「温水」製造メカニズムを加える検討をする。

D：コストマネジメント

太陽電池モジュールメーカーの既存成型ラインを活用した製造方法で可能となるような構成部材を採用したPVTハイブリッドモジュールを検討する。

2.2 PVT ハイブリッドモジュールの構造と外観

開発したPVTハイブリッドモジュールの構造を図1に示し、外観を図2（表面）、図3（裏面）に示す。

外観は、太陽電池モジュールと同等であり、現場設置外観も同様である。「温水」ラインは、太陽電池モジュールの裏側で、架橋ポリエチレン管用金属タケノコ状ニップルで接続できる。この接続方法は、給水・給湯配管や床暖房で実績のある架橋ポリエチレン管接続技術の水平展開である。

発電部構造は、1,030mm角正方形の太陽電池モジュールで、セル変換効率19.8%の単結晶3本バスバーセルを6直×6列の36セル搭載した。温水部

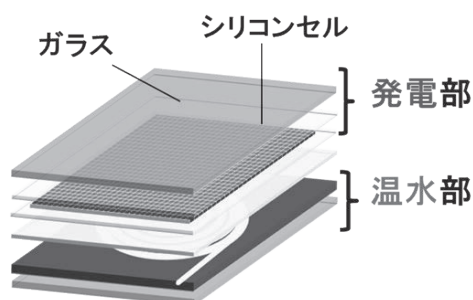


図1 PVT ハイブリッドモジュール構造

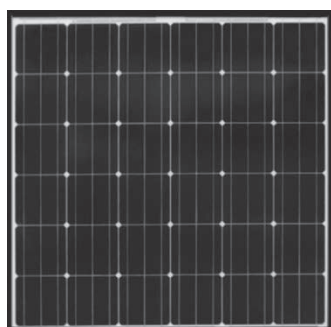


図2 PVT ハイブリッドモジュール外観（表面）

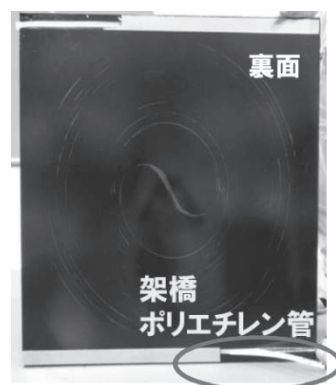


図3 PVT ハイブリッドモジュール外観（裏面）

構造は、架橋ポリエチレン管の周りを特殊配合ゴムで覆ってある。

これを既存の太陽電池用ラミネータで一体成型し、モジュール化した。

3. PVT ハイブリッドモジュールの集熱技術

3.1 集熱メカニズム

熱は「熱いもの」から「冷たいもの」に流れる。その伝達には、①熱伝導、②対流、③輻射の3通りあることが知られている（図4）。①と②は、「熱いもの」との接触により熱が伝搬する。

一方、③は、接触することなく、熱を伝えることができる。

太陽光線は、大きく分けて、紫外線、可視光線、赤外線からなる（図5）。その波長域は、0.25μm～

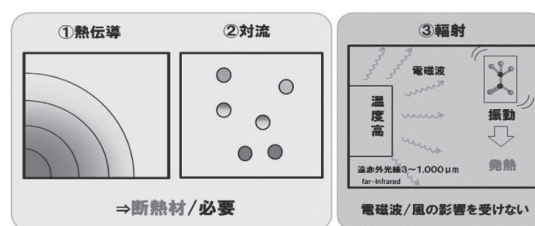


図4 熱伝達メカニズム

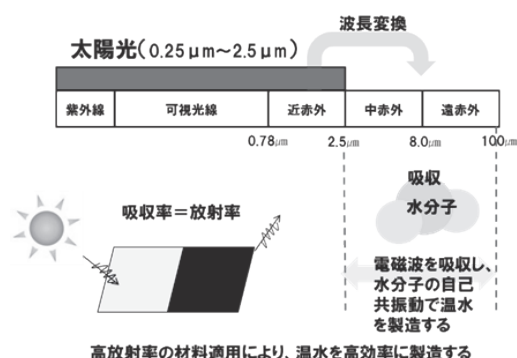


図5 太陽光スペクトル波長と水分子の共鳴

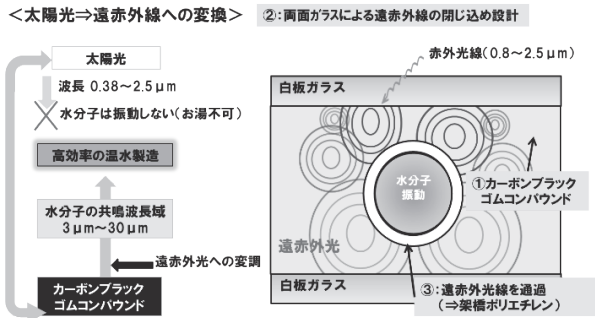


図6 PVT ハイブリッドモジュールの集熱メカニズム

2.5 μm であり、この内の赤外線：0.78～2.5 μm の波長は、水分子の固有振動数とは異なるため、水分子に吸収されず、「温水」にならない。水分子は、3～30 μm 波長の遠赤外線と共鳴し、自己発熱により「温水」となる。太陽光の赤外線の波長変換機能を有するカーボンブラックを配合した特殊ゴムコンパウンドを開発し、特殊ゴムシートとしてPVTハイブリッドモジュールに適用した。

PVTハイブリッドモジュールの集熱メカニズムを図6に示す。

架橋ポリエチレン管は、特殊配合ゴムコンパウンドで包み込まれ、両面ガラスに挟み込まれた構造である。この断面構造において、太陽光線の内、赤外線は、特殊配合ゴムコンパウンドに吸収され、遠赤外線を発する。この波長は、水分子に吸収され、「温水」となる。一方、遠赤外線は、ガラスを通過しないので、内部に閉じ込められ、効率よく、水分子に吸収される。

架橋ポリエチレン材料は、遠赤外線を通過させる素材である。PVTハイブリッドモジュールは、①両面ガラス構造で、②内部に高効率な放射材料を有し、③遠赤外線を通過させる架橋ポリエチレンを通水管として適用したことによって、太陽電池モジュール裏側で、高効率な「温水」を製造することができる。

3.2 遠赤外線効果の検証

遠赤外線カメラで、架橋ポリエチレン内部の状態を撮影した写真を図7に示す。

計測で使用した（株）ビジョンセンシング社製遠赤外線カメラは、8～15 μm 波長を撮影できる。架橋ポリエチレン直管の断面部を遠赤外線カメラで撮影した結果、その内部に遠赤外線を観測し、その部分の温度は、54.2℃を示した。その管の周辺部のゴム部材は47.5℃を示し、管の内部は、8℃ほど高温であった。

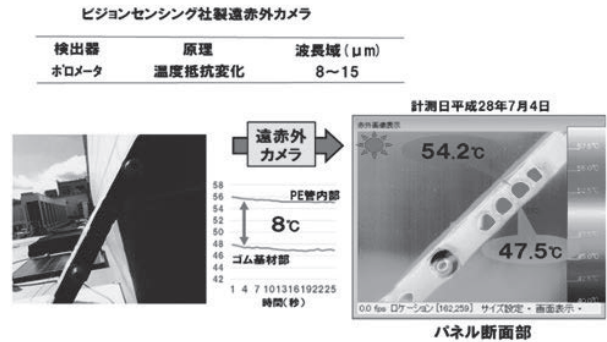


図7 プロトタイプモジュールの遠赤外線カメラ画像

遠赤外線カメラの画像は、カバーガラスを通過した太陽光（赤外線）により、シリコンセルおよび封止材が発熱し、ここから放射される電磁波はEPDMゴムコンパウンドに吸収され、上述の集熱メカニズムにより「温水」が製造されたことを裏づけるものである。

4. PVT ハイブリッドモジュールの性能評価

4.1 発電部

PVTハイブリッドモジュールのモジュール性能を社内評価したところ、発電性能160W、集熱性能は620Wとなり、合計780Wのモジュールが得られた。

また、PID試験（85℃×85%RH、－1000V、1000H）、温度サイクル試験（TC200回）、高温高湿試験（DH）後、機械的荷重試験（MLT）を第三者機関にて実施した。

評価結果を表1～3に示す。

以上の結果、PID試験、TC試験、DH試験に於いて、発電劣化率は、ほぼ「ゼロ」であった。また、荷重試験後のEL画像から、「シリコンセル割れ無し」

表1 PID試験（85℃×85%RH、－1000V、1000H）

状態	I _{sc} [A]	V _{oc} [V]	FF [%]	P _m [W]	P _m 劣化率 [%]
初期状態	9.06	23.05	76.05	158.8	－
PID試験後	9.14	23.02	75.94	159.8	－0.6

表2 温度サイクル試験（TC200回）

状態	I _{sc} [A]	V _{oc} [V]	FF [%]	P _m [W]	P _m 劣化率 [%]
初期状態	9.05	23.06	76.16	158.8	－
TC200後	9.03	22.93	75.26	155.8	1.9

表3 高温高湿試験（DH）後、機械的荷重試験

状態	I _{sc} [A]	V _{oc} [V]	FF [%]	P _m [W]	P _m 劣化率 [%]
初期状態	9.06	23.37	74.48	157.7	－
DH1000h後	9.02	23.42	75.43	159.4	－1.1
MLT後	9.01	23.29	75.20	157.8	－0.1

を確認した。特に、過酷な条件でのPID試験（85℃×85%RH、－1000V、1000H）での発電劣化率「ゼロ」は、実証試験場所が海岸線であるため、必要条件と考えている。

4.2 集熱部

集熱量及び集熱効率を第三者機関にてPVT運転条件にて評価を実施した。

評価結果を表4に示す。

試験環境：屋外環境シミュレータ人工太陽 2kW
メタルハライドランプ 24灯、照射距離 5m、架台
角度 15°、風速 3m/s、熱媒体：水、流量：300L/h

表4 集熱効率

季節	入り温度 ℃	日射強度 W/m ²	質量流量 kg/h	周囲温度 ℃	集熱効率 %
冬	11.2	719.2	289	12.2	55.4
春・秋	16.3	732.8	295	15.2	50.3
夏	23.8	711.3	300	24.6	62.9

集熱効率は、夏場の運転条件で63%が得られ、社内評価と同じ結果が得られた。

4.3 ミニ実証試験結果

NEDOとの共同開発である太陽光発電多用途実証プロジェクトにおいて、実証先である静岡県掛川市の大東温泉シートピアにて実証試験を行うにあたり、2015年9月から2016年6月まで同地でミニ実証試験として事前検証を行った。

大東温泉シートピアの敷地に既存太陽電池と本開発品であるPVTハイブリッドモジュールを設置し、発電性能の比較及び集熱性能の評価を行った。

PVTハイブリッドモジュールを7枚連結し、水道水を流量230L/hで供給し、1tタンクに貯蔵し、「温水」温度計測した。また、自動計測にて、入口出口温度、流量から集熱量を計算した。集熱性は、換算灯油量で月別の評価を行った。

a) 発電性能

既存太陽電池モジュールに比べ、9月は7%の向上、11月は3%の向上、3月は、2%の向上、5月は3%の向上となった。年平均4%の改善効果が認められた。

同場所は、海岸線に位置し、風力発電機が立ち並ぶ年間平均風速5m/sの強風地域である。冬場は特に強く、日平均風速10m/sを超える日が何日もあった。そのため、パネル表面温度が下がり、外気温の低下に従って発電性能の改善効果は、想定より減少

する結果となった。

b) 集熱性能

集熱性能は、外気温による集熱性能低下は少なく、月内の晴れ日数の割合が多いほど、集熱量が増加する結果であった。

集熱性は、外気温に影響されず、ミニ実証試験期間の総合集熱性能は43%となった。

冬・春・夏・秋の晴天時の時間別の出口温度変化を図8に示す。

太陽光により製造された「温水」の昇温度合いは、季節（外気温）に依存せず、ほぼ一定であることが分かった。つまり、出口「温水」温度は、入水温度（水道水温）に依存することが分かった。

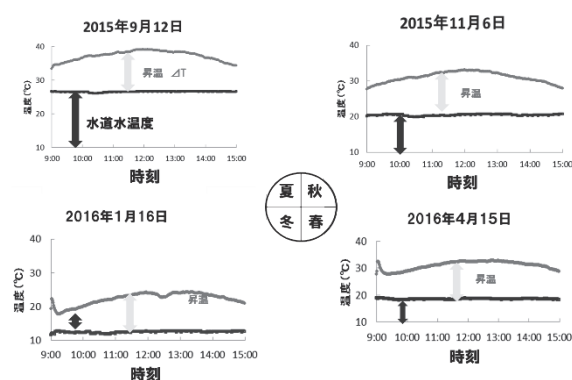


図8 季節毎の集熱性能

11:30における昇温： ΔT （出口温度 - 入水温度）の季節依存性と風の影響を検討した結果を図9に示す。

ΔT は、季節（外気温変化）及び風の影響をほとんど受けないことが分かった。

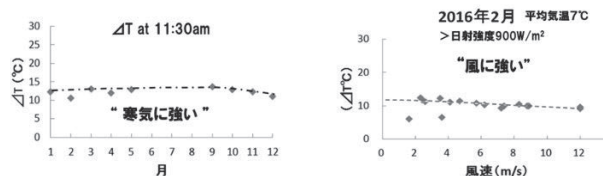


図9 ΔT の季節依存性と風の影響

出口温度に対するパネル連結枚数の影響と流量の関係を図10に示す。

パネル連結枚数に比例して出口温度が高くなり、流量は減少することが分かった。つまり、出口温度は、直列枚数により制御できる。また、流量は、並列数により制御できることが分かった。

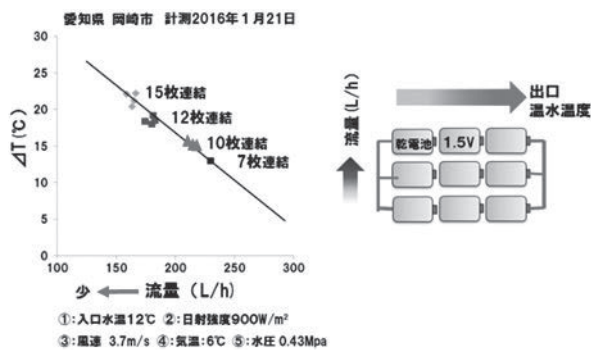


図10 出口温度と流量の制御

5. PVT ハイブリッドモジュールの実証試験

5.1 プラントレイアウト

実証試験として、大東温泉シートピアの駐車場および芝生部の約650m²にPVTハイブリッドモジュール140枚を設置した。その外観写真を図11に示す。

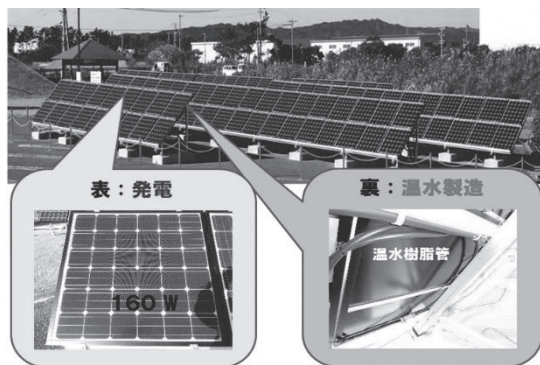


図11 実証プラントの外観

5.2 「温水」ライン

集熱管に樹脂管を採用したPVTハイブリッドモジュールプラントは、各パネル同士の連結にも架橋ポリエチレン管を用いた。樹脂管はフレキシブルであり、「温水」ライン構築が容易で、その外観はスマートである。

既存の太陽熱温水器は、集熱ポンプ停止時の空焚きにより、200℃程度まで高温化し、装置を破損する場合がある。

一方、PVTハイブリッドモジュールは、通常の太陽電池モジュールと同等の温度上昇であるため、「突沸弁」を必要とせず、安価な設置費用でプラント建設できる。

5.3 本実証プラントの集熱性能及び発電性能

日射強度に対する出口「温水」温度の関係を2017年2月3日に調査し、実証プラント内の7枚

パネル連結「温水」取出口からのパネル1枚あたりの温度上昇率は、 $\Delta T = 2.3^{\circ}\text{C}$ であった。ミニ実証プラントでは、 $\Delta T = 2.2^{\circ}\text{C}$ であったので、同等の性能を発揮していると判断した。

発電性能は、株式会社NTTスマイルエナジー「エコめがね」による遠隔監視システムにより、日々の発電量を計測している。

設置したパワーコンディショナー（PCS）は18kW容量であり、DC22.4kW/AC18kWの過積載率は、24%である。

5.4 本実証プラントの発電性能実績

2017年3月23日から、実用運転を開始した。

大東温泉シートピア実証試験（2017年4月～2018年3月）の発電量実績を表5に示す。

表5 発電量実績

	NEDO発電量 予測(kWh)	月発電量 実績(kWh)	実証/NEDO 予測 (比率)
4月	2,340	2,654	113%
5月	2,301	2,924	127%
6月	1,962	2,454	125%
7月	2,256	2,411	107%
8月	2,595	2,824	109%
9月	2,114	2,463	116%
10月	2,058	1,533	75%
11月	2,001	2,032	102%
12月	2,256	2,679	119%
1月	2,347	2,785	119%
2月	2,175	2,730	126%
3月	2,337	1,917	82%
合計	26,743	29,407	—
平均	2,229	2,451	110%

発電量は、2017年度の気象条件により、NEDO日射量データベース閲覧システムからの御前崎市の予測値に比べ、月毎で上下はしたが、年間平均10%UPであり、冷却による発電量向上が確認できた。また、年間売電概算金額（FIT：28円/kWh）を算出すると、82万円/年となる。

5.5 本実証プラントの集熱性能実績

運転条件として、8～17時まで毎日PVTハイブリッドモジュール112枚に水道水を1.15t/h通水し、温水を製造し、図12に示す75t温水タンクに供給している。尚、140枚中28枚は、別施設へ温水供給。

集熱実績は、遠隔監視システムの実発電量から月平均日射量を求め、同月のミニ実証試験結果より集熱量を算出した。

算出した2017年4月～2018年3月集熱量は、概算181GJであり、削減電気代は85万円/年となる。



図 12 75t 電気温水タンク

6. 実用化・事業化の見通し

事業化の方向性とその市場獲得のための key 技術開発のポイントを示す。現プラントのシステム価格は、少量生産のため高額となったが、一次目標として、50 万円 /kW、最終目標として、40 万円 /kW 以下へのコストダウンが普及の鍵と考えている。そのため、モジュール生産速度の向上化技術の確立や大量導入のビジネス構築を検討する必要がある。

また、PVT ハイブリッドモジュールに関し、現在明確な基準等が決まっていないため、普及のためには、下記の基準・規格等を決めていく必要があると考えている。

- ①集熱量及び発電量の評価方法及び基準
- ②信頼性試験方法及び基準
- ③型式検査項目及び基準
- ④製品表示方法

これにより、再生可能エネルギーを高効率で利用できる設備・システムとして、住宅向け ZEH（ネット・ゼロ・エネルギー・ハウス）等の設備認定基準が明確になり、国の補助金対象のシステムとして、普及が促進されると考えている。その際、電気エネルギーと熱エネルギーの通年の必要量に対してのバランスをどうコントロールするのが重要と考えており、各案件に対し、適切なシステム構成を提供できるかが、key 技術と考えている。そして、量産効果が高まることで、FIT に頼らない「自家消費モデル」としての期待が高まる。また、独立エネルギー源としての活用が期待され、「農業」や「漁業」等でも普及が進むものと考えている。

7. 波及効果

本モジュールは、太陽光を受けて、「電気」と「温水」を容易に得ることができるので、経済性が高く、太陽「熱」利用を躊躇していた市場が動き出すこと

が予想される。また、住宅用途では、日中の太陽エネルギーを貯める手段として、「温水」をタンクに、「電気」は蓄電池に仮置きし、夜間使用するライフスタイルが主流となり、温水機器ビジネス、蓄電池ビジネスが大きく伸長し、ZEH：自家消費モデルとして市場が拡大することが期待できる。

また、エネルギーの地産地消の拡がりにより、工場等で水道水と温水設備ラインの中間に本モジュールシステムを組み込むことで、省エネルギー化と炭酸ガス削減に大きく寄与し、市場が拡大することが期待される。

8. 結び

太陽光発電の高付加価値化の検討として、「温水」利用を可能とする PVT ハイブリッドモジュールの開発を行った。半導体素子は、温度上昇により機能低下することが弱点であり、その損失は、夏場では 20～30% にも及ぶ。ハイブリッド化の目的である、冷却による発電効果改善は、本実証の現場である静岡県掛川市の大東温泉シートピアの結果から、年間で約 10% の発電量向上となった。

PVT ハイブリッドモジュールの裏側で得た「温水」は、63% の集熱効率を示した。太陽光スペクトルの中で、可視光線を「発電」に、赤外光線を「温水」に変換することを可能とする PVT ハイブリッドモジュールは、太陽エネルギー変換効率の最大化の観点から、非常に優れたデバイスであることが確認できた。

日本の太陽熱利用は年々減少している。太陽熱温水器の熱エネルギー変換効率は高いが、実際に使用するまでに放熱し、加温が必要であり、そのためのシステム費が高価なため、経済性の改善が課題である。

開発した PVT ハイブリッドモジュールは、温水器製品側から見れば、発電機能を有すること、安価な太陽電池モジュールそのものが躯体であるため、温水器システムとして安価となる可能性が高く、普及のための重要な案件を満たしていると考えている。

世界では、風力と太陽光発電の再生可能エネルギーの設備容量は、原子力発電の 2 倍となっており、日本においても、2030 年に向けたエネルギー基本計画（2018 年 7 月資源エネルギー庁発表）で、再生可能エネルギーの電源構成比率が 22～24%（内太陽光発電 7%）となり、原子力発電の比率 20～22% を上回り、再生可能エネルギーを主力電源とす

るため、低コスト化、電力を電力系統に流す時に発生する「系統制約」の克服等への取り組みが今後強化される。

このような中、炭酸ガス削減・脱炭素化のため、今後、RE100 等に賛同するなどの団体が増え、グリーンエネルギー技術に関する注目が高まることが予想される。この際、本 PVT ハイブリッドモジュールが革新的な太陽エネルギーの高変換効率のデバイスとして活用できるよう、PVT ハイブリッドモジュールの実証試験で得られたノウハウや特許を活かし、本製品を世界中に普及させ、「環境・エネルギーカンパニー」グループの一員として、日本の「グリーンエネルギー」産業の発展に貢献していきたい。

略歴



飯田浩貴

1987 年名古屋工業大学工学部卒業

同年 日清紡績株式会社入社

主に環境・エネルギー関係の開

発業務に携わり、2009 年より太陽電池材料関係の開発に従事

2014 ～ 2017 年 NEDO との共同開発で太陽熱・光ハイブリッド太陽電池モジュールの開発に従事。

2018 年より、現職。日清紡メカトロニクス株式会社システム機事業部営業課。