

# 太陽エネルギー利用効率向上のための 熱電供給型太陽光発電モジュールの設計および評価

地球温暖化やエネルギー枯渇が深刻化する中で、太陽光発電などの自然エネルギーを利用した発電装置の重要性が再認識されている。太陽光発電の普及の課題である、導入コストの削減やエネルギー変換効率の向上を目的とした、アモルファス太陽電池、反射フィルム、水で構成される界面反射集光を用いた熱電供給型太陽光発電モジュールを提案する。提案モジュールは、可視光を集光して発電効率を高めるとともに、赤外光を水で熱エネルギーとして回収することを特長とする。また、AM1.5の擬似太陽光を用いて、提案モジュールを検証する。

先進技術研究所 まつおか ほうせい たむら たかゆき  
松岡 保静 田村 隆幸

## 1. まえがき

地球温暖化問題やエネルギー枯渇問題が深刻化する中で、太陽光発電や風力発電などの自然エネルギーを利用した発電装置の重要性が再認識されている。太陽光発電の特長としては、設置やメンテナンスが容易であることや、発電効率が規模によって変わらないなどの利点があり、個人住宅や通信設備施設などを含めた施設屋上での利用が主流となっている。一方、太陽光発電には、エネルギー密度が低く設備コストが大きいという課題もあり、単位発電量当りのコストが大きくなってしまふことが普及の障害となっている。

太陽電池の種類とその特徴を図1

に示す。現在最も普及している太陽電池はシリコン系であり、その中でも結晶シリコン型<sup>\*1</sup>である。これに対し、アモルファスシリコン型<sup>\*2</sup>は、変換効率は劣るものの、シリコ

ン使用量や製造時に使用するエネルギーが少なく、コストを低減できるという利点がある。

本稿では、このアモルファスシリコン型の太陽電池に注目し、コスト

太陽電池の分類		特徴	
化合物系	単結晶 (GaAsなど)	変換効率の目安：20～30% 価格：非常に高価	
シリコン系	結晶系	単結晶	変換効率の目安：15～20% 価格：高価
		多結晶	変換効率の目安：12～15% 価格：普通
	アモルファス型		変換効率の目安：5～10% 価格：安価
有機系	色素増感型	変換効率の目安：3～6% 価格：非常に安価	
	有機薄膜型	変換効率の目安：3～6% 価格：非常に安価	

↑ 変換効率・コスト

図1 太陽電池の種類と特徴

\*1 結晶シリコン型：シリコン原子が規則正しく配列した結晶状態のシリコンを用いた太陽電池。

\*2 アモルファスシリコン型：結晶状態ではなく、無秩序な状態のシリコンを用いた、シリコン使用量が少ない太陽電池。

の低減を目指しつつ、エネルギー変換効率を向上させるモジュール構造について提案し、その有効性を検証する。

## 2. 集光型太陽光発電

太陽光発電の単位発電量当りのコストを下げるためには、同一面積の太陽光発電素子での発電量を増加させる必要がある。これは、太陽光発電素子自体のエネルギー変換効率を上げることにより実現できるが、太陽光発電素子の出力は、照射される太陽光量に比例して増加するため、太陽光を集光して太陽光発電素子に照射する方法も有効である。

集光型の太陽光発電に用いられる集光技術としては、太陽追尾を必要とする追尾型と、太陽追尾を必要としない据置型などに大別できる。

追尾型の特徴としては、集光率<sup>\*3</sup>が高いという利点があるが、追尾のための動力装置が必要となり、そのための導入コストが必要となるので、小規模な発電には、あまり適していない[1][2]。

据置型の代表例としては、CPC (Compound Parabolic Concentrator) がある。これは、2つのパラボラ鏡の中心軸を傾けて合わせたような構成となっており、2つの中心軸のなす角度が許容する入射角の範囲となる[3][4]。集光率は追尾型に比べて低いが、追尾のための動力装置が必要ないため、比較的小規模な発電装置にも適用可能である。

集光型の太陽光発電装置の場合、通常よりも太陽電池の温度上昇が高

くなるため、この温度上昇を抑えるべく、熱エネルギーを利用する研究も数多く報告されている[5]~[7]。

本稿では、変換効率の向上とコスト低減の観点から、アモルファス太陽電池の応用モジュールとして、据置型での集光および熱エネルギーの回収も可能な熱電供給型太陽光発電モジュール（以下、提案モジュール）を提案する。

## 3. 熱電供給型太陽光発電モジュールの提案

### 3.1 アモルファスシリコン型太陽電池の特徴

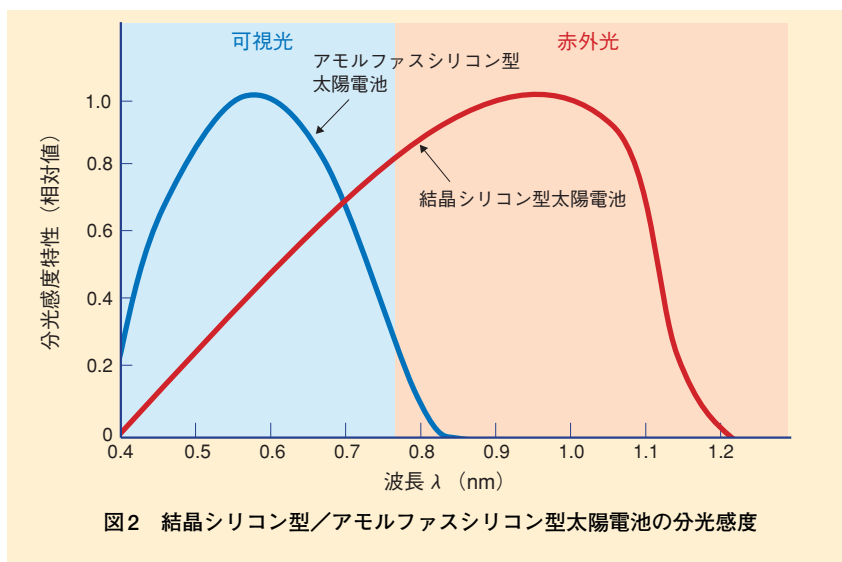
結晶シリコン型の太陽電池とアモルファスシリコン型の太陽電池の分光感度を図2に示す。結晶シリコン型の太陽電池は、可視光領域および赤外光領域の波長の光の双方が発電に寄与し、特に赤外光の寄与率が高いという特徴がある。一方、アモルファスシリコン型の太陽電池は、可

視光領域の波長の光で良く発電し、赤外光領域の波長ではほとんど発電しないという特徴をもっている。このため、屋外での利用に関しては、アモルファス太陽電池は太陽光に含まれる赤外光を発電に利用できない。そして、これが結晶シリコン型に比べてエネルギー変換効率が劣る原因の1つとなっている。

しかしながら、アモルファス太陽電池は、シリコンの使用量や製造時のエネルギーが少ないなどの特長があり、モジュールコストを下げられる可能性があるため、提案モジュールでは、アモルファス太陽電池を採用した。

### 3.2 提案モジュールの構造

提案モジュールの断面図と集光原理を図3に示す。透明ガラス（受光面）、アモルファス太陽電池、反射フィルムで三角形に構成され、その内部は水で充填される。実際には、太陽電池と反射フィルムは水に



\*3 集光率：受光面に対して、通常照射される太陽光の何倍の光を照射させることができるかを示す倍率。

直接接触しないようにアクリル成型板でシーリングする。基本的には、可視光はアモルファス太陽電池で発電させ、発電に寄与しない赤外光は水に吸収させて熱エネルギーとして回収する構造であるが、内部の水が集光の役割も果たす。図3で示すとおり、受光面に入った太陽光は、反射フィルムで反射され、さらにモジュールと外気との境界面で全反射し、アモルファス太陽電池に照射される。図3の例では、受光面に対して垂直よりも左側からの入射角であれば、受光面に入射したすべての太陽光がアモルファス太陽電池に集光される。例えば、東京の年間最高太陽高度は78度なので、太陽高度78度で垂直に光が入射するように、このモジュールを傾けて設置すれば、常時受光面に入射した太陽光を集光できることになる。

### 3.3 熱エネルギーの回収

モジュール内に充填されている水を循環させることによって、熱エネルギーの回収も可能になる。この水の循環を可能にするために、モジュールの両側に水路を備え、片側の下方ともう片側の上方に給水口と排水口を備える(図4)。これにより、赤外光によって取得した熱エネルギーを温水として回収できる。この温水の熱エネルギーは、家庭や施設に設置する場合は、給湯や暖房などに有効利用できる。また通信設備の場合は、温水をエネルギー源とする吸収式冷凍機<sup>\*4</sup>やデシカント空調機<sup>\*5</sup>などを用いることで、設備の冷却に利

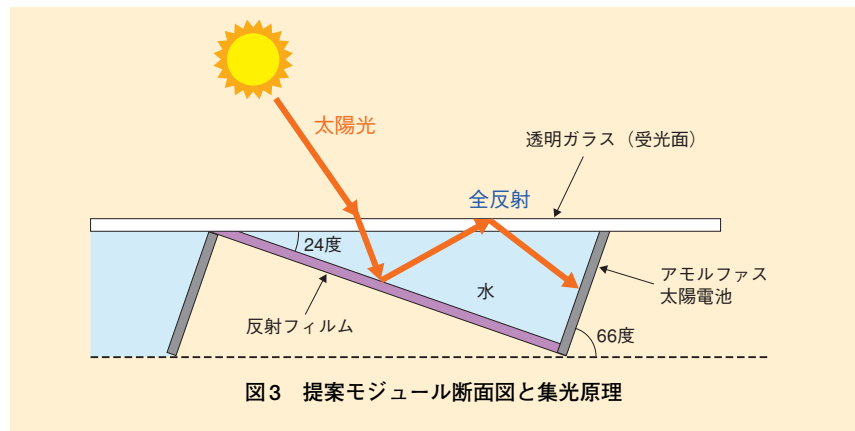


図3 提案モジュール断面図と集光原理

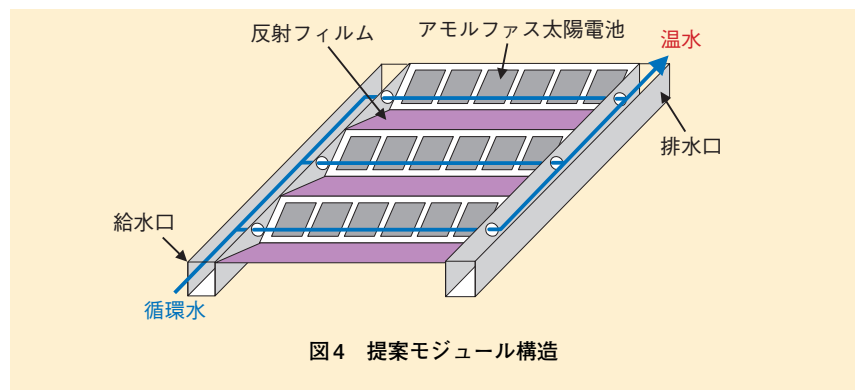


図4 提案モジュール構造

用できる可能性もある。一般的に、太陽熱温水器は太陽エネルギーの50%程度を熱エネルギーとして利用でき、太陽光発電のエネルギー変換効率よりも飛躍的に高い。この温水を有効利用できれば、アモルファス太陽電池の発電量と合わせて、総合エネルギー変換効率を数倍に向上させることが期待できる。また、提案モジュールでは、太陽電池の面積は受光面に対して約45%程度となり、太陽電池面積を削減できるため、モジュールのコスト低減も期待できる。

内部を水で満たしている状態の提案モジュールを写真1に示す。実在の太陽電池は横方向に4列配置して

いるだけであるが、モジュール内部での反射原理により12列の太陽電池に配置されているように見える。したがって、モジュールの受光面に入射した光はすべて実在の太陽電池に照射される。

## 4. モジュールの検証

提案モジュールの集光率を検証するため、検証用に通常モジュールと提案モジュールを作成し、AM (Air Mass) 1.5<sup>\*6</sup>の擬似太陽光を用いて比較検証を行った(図5)。通常モジュールは2cm×24cmのアモルファス太陽電池モジュールで、動作電圧を2.5Vに設計した。提案モジュールは、透明アクリル(厚さ3mm)で

\*4 吸収式冷凍機：低压で冷媒を気化させ、吸収力の高い液体に吸収させることによる気化熱冷却で低温を得る冷凍機。吸収液を再生させるために熱エネルギーが必要となる。

\*5 デシカント空調機：除湿材を用いて乾燥

空気を作り、水を気化させて冷却する空調機。除湿材の再生に熱エネルギーが必要となる。

\*6 AM1.5：地表面に届く太陽エネルギーの基準値であり、約1kW/m<sup>2</sup>である。

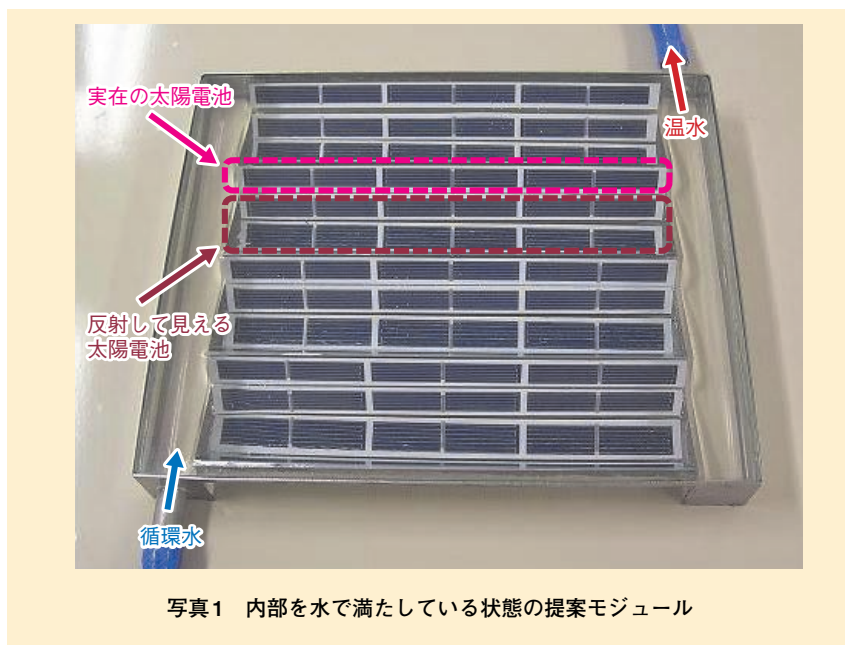


写真1 内部を水で満たしている状態の提案モジュール

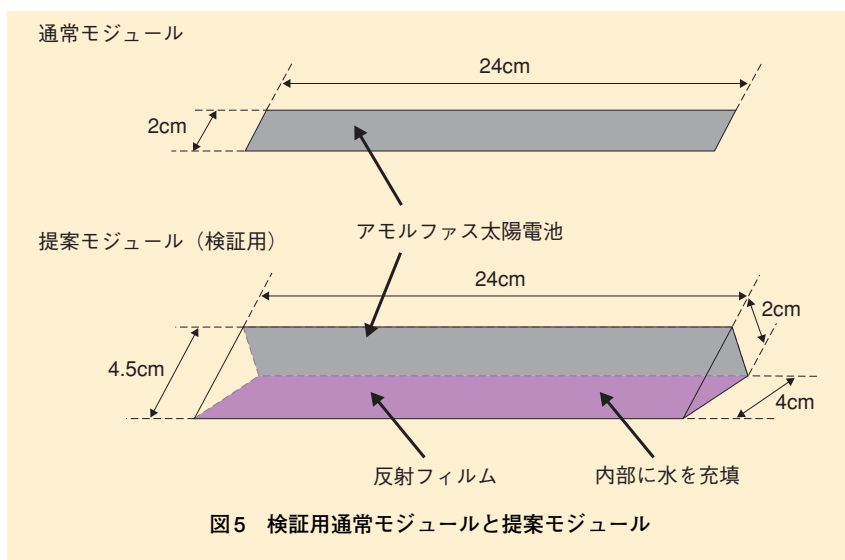


図5 検証用通常モジュールと提案モジュール

成型した三角柱形状の容器に、通常モジュールと同様の2cm×24cmのアモルファス太陽電池と、反射フィルムを接着し、容器内部に水を充填させた。通常モジュール、提案モジュール共に、受光面に対して垂直の角度からAM1.5の光を照射し、動作電圧2.5Vでの発電力を測定した。ま

た提案モジュールについては、内部の水の温度上昇も時系列に測定した。

#### 4.1 提案モジュールの発電力

発電力の検証結果を図6に示す。まず、同じ太陽電池面（2cm×24cm）当りの発電力を、通常モジ

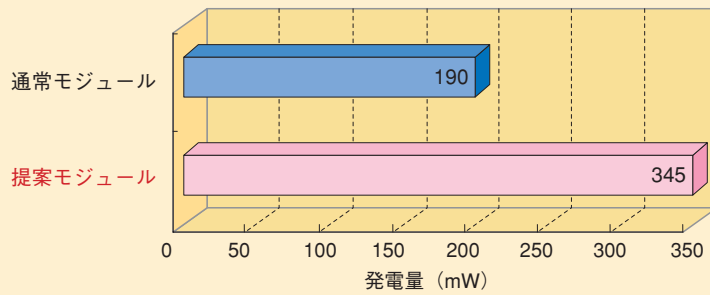
ジュールと提案モジュールで比較測定した。通常モジュールは190mWに対し、提案モジュールは345mWの発電力であり、通常モジュールと同様の太陽電池でありながら1.8倍の発電力があることを確認した。このことから、提案モジュールの集光率は、通常モジュールの約1.8倍程度であることが分かる。

次に受光面当りの発電力の比較であるが、通常モジュールの受光面は2cm×24cmであるのに対し、提案モジュールの受光面は4.5cm×24cmであるため、提案モジュールの発電力を2/4.5倍に算出し、同面積の受光面2cm×24cm当りの発電力として比較する。この場合、提案モジュールの発電力は155mWと算出されるため、通常モジュールの約80%程度の発電力となる。これは、入射光がアモルファス太陽電池に照射される前に水に吸収される分の損失であると考えられる。このように若干の損失はあるが、受光面に対して約45%の面積の太陽電池で80%の発電力を保持できることを確認できた。

#### 4.2 内部温水の温度上昇

提案モジュールの内部温水の温度上昇を時系列に表し、図7に示す。実験室内の温度は摂氏24度であり、内部の水の温度も摂氏24度の状態から測定を開始した。水温は60分で約18度上昇し、最終的には46度まで上昇した。この温度では、家庭の暖房や給湯への補助的な利用には有効であるが、吸収式冷凍機やデン

【太陽電池面（2cm×24cm）当りの発電力】



【受光面（2cm×24cm）当りの発電力】

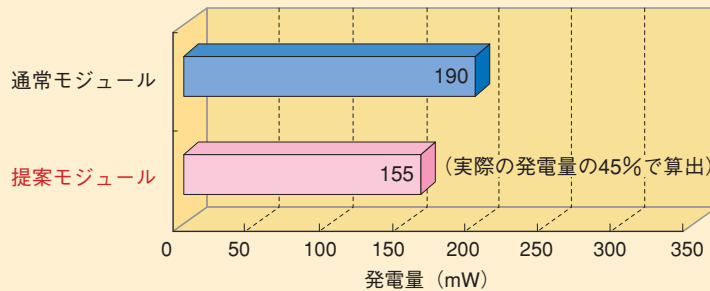


図6 発電力の検証結果

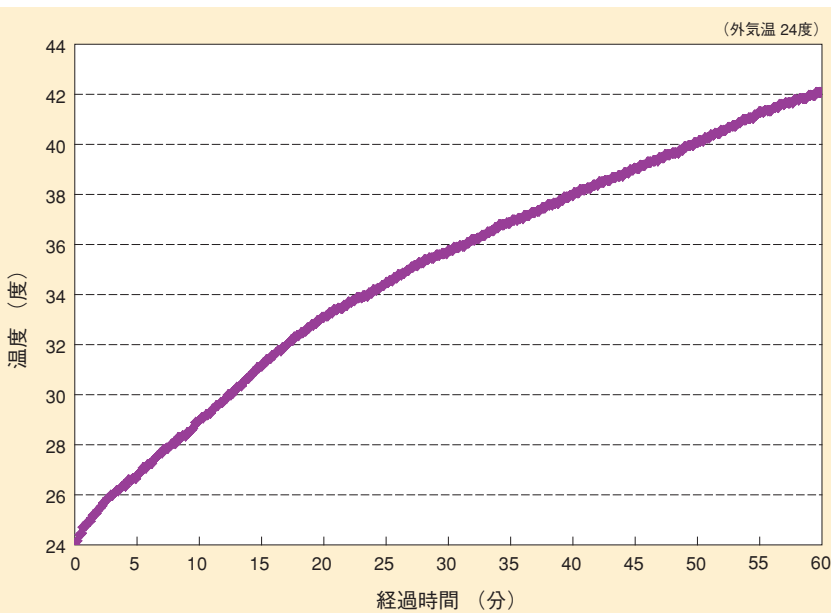


図7 内部温水の温度上昇

カント空調機などへは、60度以上の温水でないと有効に利用できない。

今回の検証結果は、内部の温水と外気との境界が厚さ3mmのアクリル

板であり、それ以外の断熱構造はない条件で得られた結果である。モジュールに断熱構造をもたせ、断熱性を向上させることができれば、より高温の温水を得られることが見込める。

## 5. 考察

太陽光発電の特徴の1つとして、前述したとおり、エネルギー変換効率が低いという点があり、単結晶シリコン型の太陽光発電モジュールでさえも、太陽エネルギーのうちの15～20%程度しか電気エネルギーに変換できない。一方、太陽エネルギーの有効利用法として太陽熱温水器もあるが、こちらは太陽光発電に比べてエネルギー変換効率が高く、製品によっては50～70%程度の太陽エネルギーを温水として利用できるものもある。しかしながら、温水よりも電気の方がエネルギーとして使いやすいという点や景観の観点から、太陽光発電のほうが注目されているのが現状である。

今回提案した熱電供給型太陽光発電方式は、太陽電池で発電をしながら電気エネルギーに変換できなかった太陽エネルギーを温水として回収する方式であり、いわゆる太陽エネルギーから電気と熱の両方のエネルギーを取得する熱電供給型の発電方式である。この熱エネルギーをオンタイムに有効利用できれば、通常の太陽光発電装置に対してコストパフォーマンスを大幅に向上できることが期待できる。

提案モジュールは、集光機能も備

えたモジュールであり、太陽電池面積も削減できる。また、太陽追尾方式やCPC装置などと比べると集光率は低い、フラットなパネル状のモジュールとして構成できるため、通常の太陽光発電装置とほぼ同様な景観で設置できる。

## 6. あとがき

近年、マイクログリッド<sup>\*7</sup>など、エネルギーの需要と供給を地域単位で制御し、地域単位でエネルギーを効率的に生成・利用しながら電力系統への負荷平準化にも貢献する取組みが検討されている。これらの構成要素として、オンサイト発電や、それに伴う熱も有効利用するコージェネレーションタイプの分散電源<sup>\*8</sup>が、重要な要素になり得ると考えられる。

本稿で提案した太陽熱複合型の発電方式も、太陽エネルギーを利用したコージェネレーションタイプの分

散電源として利用可能であると考えている。例えば、電源の設置場所で熱エネルギーが有効利用できない場合でも、近くの施設と共用することで自然エネルギーを効率的に利用できる可能性が増し、CO<sub>2</sub>排出量の削減やエネルギー枯渇問題に貢献できると考えている。

本稿では、太陽光発電モジュールの集光原理の有効性を主目的として検証を行ったが、今後は、断熱性も考慮したモジュールとしての熱エネルギーの変換効率および量産時のコスト低減も検討していく。

## 文 献

- [1] K. Araki, H.Uozumi and M.Yamaguchi : "A simple passive cooling structure and its heat analysis for 500x concentrator PV module," Photovoltaic Specialists Conference 2002, pp.1568-1571, May 2002.
- [2] A. Mohr, T.Roth, M.Epmeier and S.W.Glunz : "Silicon concentrator cells in an one-axis tracking concentrator system with a concentration ratio of 300x," Photovoltaic Specialists Conference 2005, pp.639-642, Jan. 2005.
- [3] M. Brogren, M.Ronelid and B.Karlsson : "PV-Thermal Hybrid Low Concentrating CPC Module," 16th European Photovoltaic Solar Energy Conference, pp. 2121-2124, May 2000.
- [4] A. Mohr, M.Steuder, A.W.Bett and S.W.Glunz : "Silicon concentrator cells designed for a direct mounting on compound parabolic concentrator," Photovoltaic Energy Conversion 2003, Vol. 1, pp.841-844, 2003.
- [5] J. S. Coventry : "Performance of a concentrating photovoltaic/ thermal solar collector," Solar Energy, Vol. 78, Issue 2, pp. 211-222, 2005.
- [6] A. Segal, M. Epstein and A. Yogevev : "Hybrid concentrated photovoltaic and thermal power conversion at different spectral bands," Solar Energy Vol.76, No.5, pp. 591-601, 2004.
- [7] Y. Vorobiev, J. Gonzales - Hernandez, P. Vorobiev and L. Bulat : "Thermal-photovoltaic solar hybrid system for efficient solar energy conversion," Solar Energy Vol. 80, Issue 2, pp.170-176, Feb. 2006.

\*7 マイクログリッド：従来の大規模な送電網に頼るのではなく、小型の分散型エネルギー（太陽光、風力発電など）を結び、地域内で効率的に運用して、電力や熱の需給バランスを調整する地域ネットワーク。

\*8 コージェネレーションタイプの分散電源：発電に伴う熱も有効利用できるように電気と熱の両方を供給する装置であり、一般的には、熱の需要がある施設での利用価値が高いため、施設ごとに設置される分散型の電源となる。