

2013

エネルギー問題を考える
スマートグリッドによる
次世代エネルギーシステム



GIFU UNIVERSITY

「エネルギー問題を考える」

－次世代エネルギーシステム 太陽光発電－

岐阜大学 大学院工学研究科 環境エネルギーシステム専攻 教授
岐阜大学 研究推進・社会連携機構
未来型太陽光発電システム研究センター センター長
野々村 修一

1. はじめに

近年、太陽光発電等の再生エネルギーに関する注目度は一段と大きくなりつつあります。2011年3月11日の東日本大震災以前は地球温暖化の影響が問題の焦点にあり、温室効果ガスを出さない原子力発電が有望なエネルギー源でした。再生エネルギーは次世代のエネルギーとして議論されてきました。現在では原子力発電のコストが議論の対象となり、除染、廃炉までの経費等を含めて本当に安いエネルギー源であるかが問われています。この様な状況に対応して、近々にできる対処法としての省エネルギーの実践、人間の住環境を汚さない観点から再生エネルギーシステム導入の期待が高まっています。

岐阜大学が地域にお届けする第26回岐阜シンポジウムでは、エネルギー問題を共に考えました。「いかにエネルギーを創出し、効率良く使用するか」が重要課題となります。再生エネルギーは環境に優しいのですが、分散型のエネルギー源です。このエネルギーを作り出す技術だけでなく普及させるための政策も重要となります。また、効率良くエネルギーを使用するための新しい社会的なインフラも必要となります。

岐阜大学には、エネルギーに関連した研究を行っている教員と学生が多数います。2006年には、国立大学法人では初めての太陽光発電関連の研究センターである未来型太陽光発電システム研究センターができました。可見市の花フェスタ記念公園内にあります太陽光発電、電気自動車等のミニスマートグリッドシステムは岐阜大学が岐阜県との連携で行った事業です。

今、政府の経済政策により石油価格が高騰し、一部の国内産業の成長を圧迫しています。さらに電気料金の値上げを招き、我々の生活にも大きな影響が出ています。人間らしい生活を維持するための新しいエネルギーシステムの構築が必要不可欠となってきています。日本では、地方自治体によるメガソーラーシステムの設置が盛んになりつつあります。しかしながら2013年6月の国会では発送電分離の議案が廃案となり、普及の速度を阻んでいる状況です。原子力発電の再稼働問題でもデモが起こっています。

次世代エネルギーシステムにおいて、エネルギーマネジメントの効率を上げるスマートグリッドシステム、大規模太陽光発電システムのメガソーラーファームが導入されつつあります。日本やタイの状況と政策、太陽光発電による不安定なエネルギーをどのようにマネジメントしたら良いかの指針を与える気象データを用いた太陽光発電量予測技術も重用となりつつあります。本パンフレットでは再生エネルギーシステムの代表として太陽光発電のエネルギーシステムに焦点を絞った内容を、太陽電池の発電原理、システムの構成等の基本からメガソーラー等の大規模施設までを解説しま

す。また、タイの情報を加えて、アジアへの進出を考えておられる企業の方に重要な情報を提供できる内容としました。

2. 太陽電池の発電原理

現在、住宅・工場等の屋根や大規模ソーラーシステムに使用されているのはシリコン系太陽電池である。化合物系太陽電池も増えてきているが、全体の80%以上を結晶シリコン太陽電池が占めているのが現状である。最初に太陽電池の発電原理を説明し、シリコン系太陽電池の作製方法を示す。

図1は結晶シリコンの構造を示している。結晶シリコンは半導体に分類される。電気抵抗の観点から分類したもので、電気を良く通す金属があり、その対局に電気を殆ど通さないガラス等の絶縁物があり、半導体は文字から分かるように金属と絶縁物の間の抵抗値をとる半導体と呼んでいる。シリコンはIV族元素で、最外殻に電子を4つ有しており、ダイヤモンドと同じ結晶構造を持っている。球がシリコンの原子、棒が電子の結合を表している。ドーピングという言葉

を良く聞く。オリンピックや陸上の世界選手権等で「ドーピング検査により失格した」という言葉を時々聞く。この場合は、体に筋肉増強剤等の薬品を入れることを意味している。半導体も「ドーピングする」という言葉が使われる。その場合はシリコンの結晶構造中にシリコンとは異なるリン(P)原子やホウ素(B)原子をいれる「不純物添加」を指している。何が生ずるか？ リンは5族の原子であり最外殻に5つの電子を有している。4族の結晶シリコン中に組み込まれたリン原子は隣の4つでシリコン原子と結合を作る。残りの1つの電子はリン原子に弱く束縛された状態となる。ちょうど、月が地球の周りを回っているような状態である。ここで、我々が生活している25℃程度の環境では、熱エネルギーをもらって周回軌道から離脱して、結晶シリコン中を自由に動くことができる自由電子となる。では、ホウ素原子を入れた場合にはどの様になるか。ホウ素は3族原子であり、最外殻に3つの電子を有している。結晶シリコン中に組み込まれると図に示されるように、周囲の4つのシリコンと結合する。もともとホウ素原子は電子を3つしか持たないので周囲から1つ電子を借りる。電子が抜けた状態は正の野電荷を持つ正孔と呼ばれる。電子の抜けた穴に、隣の電子が移動すると正の電荷が移動したことと同じ

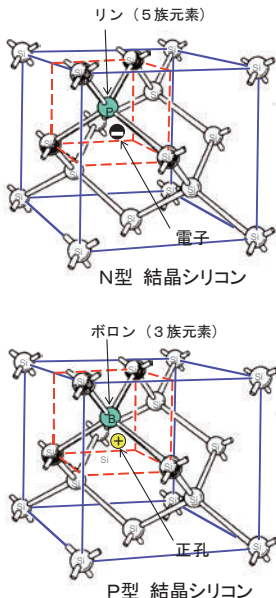


図1 結晶シリコンの構造と不純物添加

になる。したがって、正の電荷を持ち、自由に動ける正孔が誕生する。また、熱エネルギーや光エネルギーが与えられた際も自由に動ける電子や正孔が生成される。一方、リン原子は電子を1つ失っているので正の電荷を持つ。また、ホウ素原子は電子を1つ借りているので負に帯電する。リンもホウ素もシリコンの骨格の中に組み込まれているので動くことはできない。

今、このN型シリコンとP型シリコンを接触させるとどの様になるか？ 図2に示した接触した界面の近くでは、電子と正孔が動けるので消滅する。残ったリンの正電荷とホウ素の負電荷間で強い電界が発生することになる。これをPN接合と呼ぶ。このPN接合に光が照射されると、自由に動ける電子と正孔が生成する。内部の電界により電子と正孔は分離し、図3に示した様に、電子は右側の電極に移動する。また正孔は左側の電極に移動し、外部の回路を通じて流れてきた電子と衝突して消滅する。ここで、電子は外部回路を流れて電流となる。この際にPN接合には0.6V程度の電圧が発生するので、発熱体を暖めたりモータを回すことができる電力の発生となる。一般の発電機とは異なり、可動部分が無い無音の発電機となる。この事が20年程度の長寿命に繋がる長所となっている。

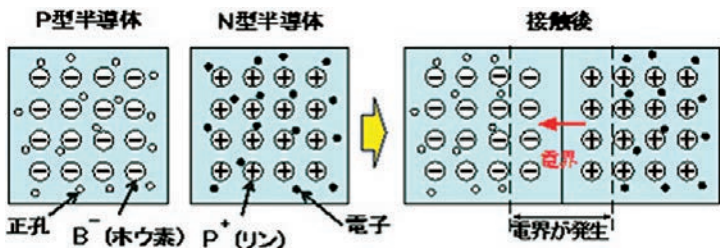


図2 PN接合と内部電界の発生

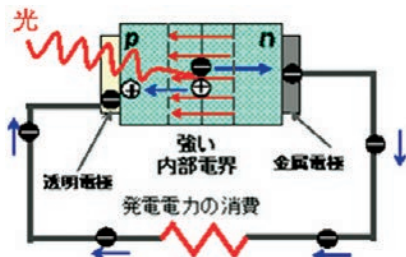


図3 PN接合への光照射と電子と正孔の動き

3. 太陽電池の作製方法とモジュールの構造

前節で説明したPN接合を作製する方法を紹介する。図4に作成工程を示した。まず、珪石 SiO_2 から還元により酸素を取り除き、金属シリコンを得る。さらに水素や塩素と反応させてシラン(SiH_4)等のガスを得る。この理由は、ガスの液化温度、気化温度は固有の値を持つので、金属シリコン中の不純物を分離する際に都合が良い。この方法によりシリコンの純度を上げる。その後水素を脱離して多結晶シリコンを得る。次に 1200°C 程度の温度に上げて熔融する。熔融面に単結晶シリコン面を接触させてゆっくりと引き上げると単結晶のシリコンインゴットが得られる。ダイヤモンドカッターによりスライスしてシリコンウエハーを得る。アルカリ処理等により数十ナノメートル程度のピラミッド構造を作製する。これにより、反射防止効果を上げて太陽電池への光の取り込み量を増やす。一般の結晶シリコン太陽電池にはP型のシリコンウエハーが用いられている。表面にリンの化合物を塗布し、 $500\sim 600^\circ\text{C}$ の温度で処理するとリン原子がドーピングされる。P型シリコン上に非常に薄いN型シリコンの層が形成されて、PN接合が完成する。光入射側の表面には、透明電極を作製した後に金属の幅が狭いフィンガー電極を形成し、電流を収集する。裏面には金属電極を形成して太陽電池が完成する。

上記の複数個の太陽電池を直列接続して、交流に変換するためのインバーターに必要な所望の電圧に上げる。図5に太陽電池パネルの断面図と図6に外観図を示した。

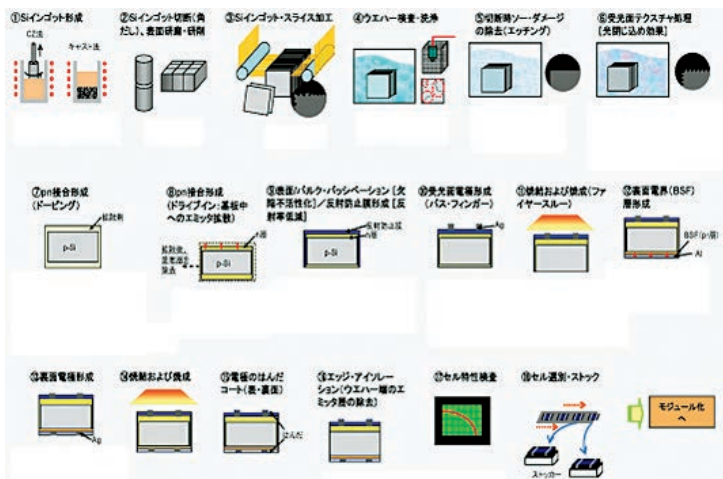


図4 結晶シリコン太陽電池の作製行程

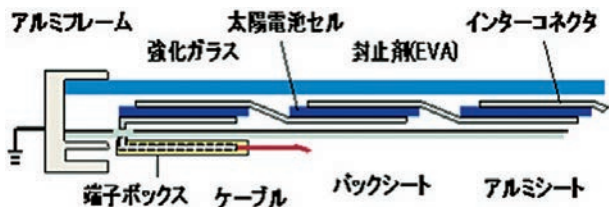


図5 太陽電池モジュール断面図



図6 太陽電池モジュール外観図

外観図から70枚程度の太陽電池が一つのパネル内に接続されていることがわかる。断面図から、光入射面上のフィンガー電極が裏面の金属電極に接続されており、直列接続となっていることがわかる。また、太陽電池は強化ガラス、アルミ枠、アルミシートとバックシート内にEVA樹脂（エチレン酢酸ブチル共重合体）に埋め込まれた形で固定される。水分や水蒸気の進入を防ぐことにより太陽電池の劣化を抑止して、長寿命化を実現している。

4. 太陽電池の種類とエネルギー変換効率

太陽電池の性能を評価する場合に使用されるエネルギー変換効率がある。この指標は、太陽光のエネルギーが $100\text{mW}/\text{cm}^2$ として太陽電池に垂直に照射された際に、電気エネルギーに変換される比率を表している。日本での太陽光スペクトルはAM1.5となる。AMはエアーマスを意味する。光が通過する空気が多いと水蒸気に太陽光が吸収されるので、地上に到達する太陽光スペクトルが緯度により異なるためである。快晴時に太陽から地上に約 $1\text{kW}/\text{m}^2$ の光エネルギーが到達している。面積が 1m^2 で、変換効率が20%の太陽電池ならば、1時間で200Whの電力が得られることになる。この太陽電池が5枚あれば、1kWhとなり、電気ストーブを1kWに設定して1時間使

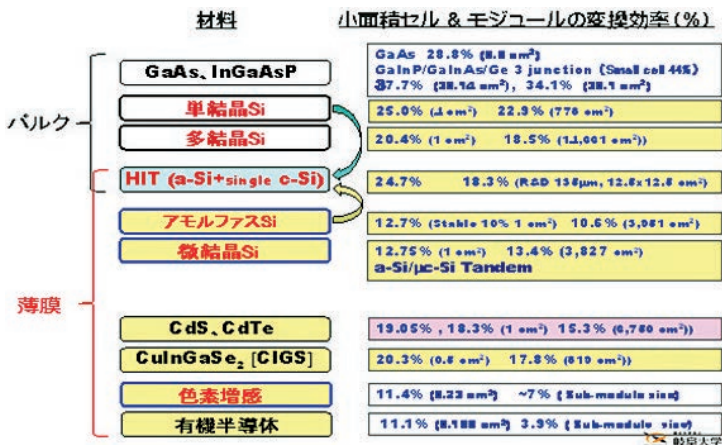


図7 各種太陽電池のエネルギー変換効率

用できる電力が得られることになる。

前節で説明したように、結晶シリコン太陽電池は現在の主流となっている。そのモジュールでの変換効率は単結晶シリコンで約18%、多結晶シリコンで約16%の変換効率が見られている。さらに効率が高い太陽電池として、ガリウムヒ素 (GaAs) 太陽電池が挙げられる。変換効率は25%程度と高いが、ヒ素が使用されているので一般に宇宙用の太陽電池として使用されてきた。さらにガリウム・インジウム・リン/ガリウム・インジウム・ヒ素/ゲルマニウム (GaInP/GaInAs/Ge) 3 接合太陽電池の変換効率は40%程度に達している。このようにヒ素等の環境負荷の大きな元素を使用した太陽電池は、それらの元素の使用量を減らすことができる集光型太陽電池に使用されている。

大面積化が容易で、低価格化が見込める薄膜シリコン太陽電池やカドニウム・テルル (CdTe) 太陽電池では8~11%程度の変換効率に達している。最近、銅・インジウム・ガリウム・セレン (CIGS, CuInGaSe) 太陽電池の変換効率が向上し、13%以上の変換効率が見られている。

最近、有機系太陽電池の研究も盛んに行われている。色素分子を利用した色素増感太陽電池、有機半導体太陽電池も小面積で8~15%の効率が見られるようになった。しかし、1年程度で効率が半減する等の劣化が大きく、実用化に向かった研究も盛んになっている。

5. エネルギーペイバックタイムとコストペイバックタイム

太陽電池は発電機の機能を有していることを述べた。また、燃料を使用しないのでCO₂等の温室効果ガスの排出はなく、環境に優しい発電機であることもわかる。しかしながら、太陽電池を作製するために使用したエネルギーが、太陽電池自身が発電する総エネルギーより小さい場合に環境効果が現れる。太陽電池自身を作製するために必要なエネルギーを、自身が発電するエネルギーにより何年で取り返すことができるかの目安をエネルギーペイバックタイムと呼ぶ。現在普及している多結晶シリコン太陽電池では1.5年、薄膜シリコン太陽電池では1.1年となる。これらの太陽電池の寿命は20年程度であるから、エネルギーペイバックタイムの1～1.5年以降は、環境に良いエネルギーが得られることになる。また、燃料代は無料である。環境に良いエネルギー源であることがわかる。

では、太陽電池が発生する電力を売電して得られる利益により、太陽電池を購入するための費用が何年で償還できるかの指標をコストペイバックタイムと呼ぶ。平成25年度の売電価格38円、太陽電池の価格43万円/kWを用いて得られる値は10～11年となる。数十kW等のシステムでは6～7年で償還できる場合もある。今後の電力買い取り価格は減少するが、太陽電池システムの価格も低価格化が進んでいるのが現状である。将来は一般の電力料金17円でも十分の価値があるシステム価格に推移させるためにもさらなる高効率化と低価格化が重要な要素となる。

タイのメガソーラー
ータイにおける太陽光発電市場の現状と投資最前ー
タイ国 太陽光発電企業組合 会長 Dr. Dusit Kruangam



図8 洪水の被害にあったアユタヤ県にあるBangchak Solar社の44MWシステム

タイ王国（タイ）のエネルギー省は、2006年に再生可能エネルギーの普及促進を図るために一般の電力買取制度であるタリフ（Tariff）による補助金に加えて、“アッダー（Adder）”という追加的な助成プログラムを発表した。そのプログラムに認可された太陽光発電（PV）システムで発電した電気は、タリフによる3-4 Baht/kWhでの買取価格に加えて、アッダーによる6.5-8 Baht/kWhを上乗せした合計9.5 Baht/kWh～12 Baht/kWhの買取価格にて使用者（電力会社；EGAT/PEA/MEA）が購入しなければならない。アッダーによる助成期間は10年間である。アッダーによる利益を得たい投資家は電力購入許可書（PPA；Power purchase Agreement）を持たなければならない。しかし、電力購入許可書の総電力量が目標値である2,000MWを超えたために2010年6月にエネルギー省は新規申請を打切った。タイにおけるメガソーラーファームの設置はシリコンウエファーの価格が低下した2010年から始まっている。2013年6



図9 ロップリー県にあるシャープ㈱が設置した84MWシステム

月までの積算設置量は450MWpに達している。2013年の終わりには700～800MWの積算設置量に達すると予想される。

2011年には、タイは未曾有の大洪水に見舞われた。タイ中部に位置する幾つかの30～40MWクラスのメガソーラーファームが被害を受けた。全ての太陽電池モジュール、インバーター、変圧器が交換されなければならない。また、将来的には万里の長城のような「より強く、より高い堤防」が建設される必要がある。

2013年の5月にマレーシアから輸入している天然ガスの供給が一時的に停止した。タイは火力発電が主であり、その燃料はタイ湾（シヤム湾）内で採掘される天然ガスの割合が2/3、ミャンマーから輸入される割合が1/3を占める。3月にミャンマーからガス田の定期点検のために天然ガスの供給を1週間程度停止するとの通告が入り、そのためにタイ国内への電力供給が20%減少した。タイ南部の14県が「一晩に2～3時間の真っ暗な夜」を経験した。これは、「タイは天然ガスによる火力発電（66%）にあまりにも頼りすぎている」という教訓をタイの人々に与えており、更に多くの再生エネルギーを導入すべきであると示唆していると考えられる。さらに、エネルギー省は、2013年の半ばにソーラールーフプログラムを発表した。このアナウンスは日本企業の事業展開にも魅力的な内容と考えられる。

気象データを用いた太陽光発電量予測技術

岐阜大学 研究推進・社会連携機構

未来型太陽光発電システム研究センター 副センター長

岐阜大学院 工学研究科 教授

小林 智尚

太陽光発電は一般の住宅にも設置でき、再生可能エネルギーの代表格として日本を始め世界で導入が進められている。太陽光発電は二酸化炭素を排出せずに発電し、地球温暖化抑制に貢献する発電システムです。しかし天気の変化で日射量が変わると発電量も変化してしまうという大きな欠点がある。図10に示すように、大型計算機を用いて天気の詳細な予測を行っている。そしてその結果から、太陽光発電システムの発電量を予測して、この欠点を補い、太陽光発電の普及に役立つ研究を行っている。太陽光発電の価格が下がっているが、まだ高価である。しかし、将来の太陽光発電システムの発電量がわかれば購入しやすくなり、システムも普及すると考えられる。この様な観点から、岐阜県・愛知県を対象に太陽光発電の期待発電量予測システムを開発した。図11に示すこのシステムでは、岐阜県・愛知県の年間の天気を元に、その地域の日射量を計算し、そして太陽光発電の年間の発電量を推定できる。それによると、図11の様に愛知県南部や岐阜県美濃地方などでは日射量が多く、多くの太陽光発電量が期待できる。より詳細に調べると、高山では6月に晴れの日が多くなるので、この月には多くの発電量が期待できることもわかった。この様に期待発電量予測システムでは、各地域の天気を考慮して太陽光発電の発電量を見積もることができる。

また太陽光発電の発電量予測は、電力会社から供給される電力の安定化にも役立てることができる。太陽光発電の発電量はお天気任せで、人間がコントロールできず、変動する

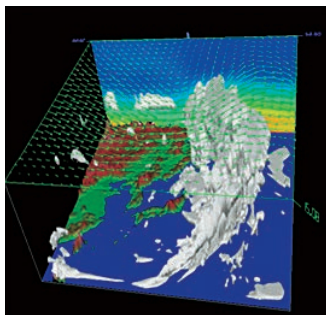


図10 開発した天気予報システムを用いて計算した雲の様子

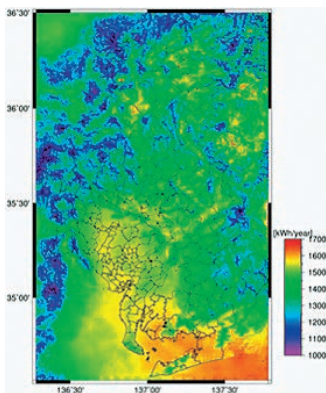


図11 岐阜県・愛知県の太陽光発電の期待発電量（赤い部分の発電量が多い）

ことが大きな欠点である。この様な変動する電力が送電網に大量に入ると、家庭などに供給する電力を安定に保つことが難しくなる。この様な状況では、天気予報を用いて太陽光発電システムの発電量を予測し、火力発電や水力発電などと組み合わせることで供給電力の安定に役立つ事ができる。図12は岐阜県御嵩町の太陽光発電システムの発電実測値（赤線、観測値）と天気予想技術を応用した発電量予測システムを用いて1日前に予測した予測値（青線）の比較をした。予測がはずれる時間帯もあるが、大まかには実測値に近い値を予測できていることがわかる。

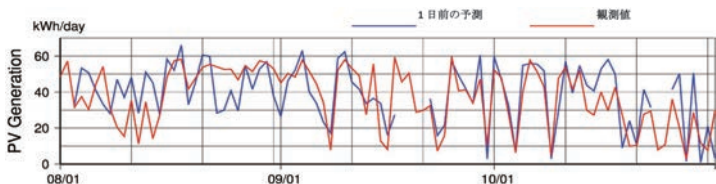


図12 岐阜県御嵩町の太陽光発電システムと、その発電量の1日前予測

太陽光発電システムはこれからもさらに普及してゆくと考えられる。「太陽光発電の天気予報」は発電システムの期待発電量の見積もりや、供給電力の安定化に役立つ技術となりつつある。太陽光発電システムの設置容量が全体の10%を超える量になると、非常に重要な技術となる。



- 岐阜大学局地気象予報
<http://net.cive.gifu-u.ac.jp/>
 岐阜県・愛知県のピンポイント天気予報です。
- 太陽光発電・年間発電量推定
<http://energy-met.cive.gifu-u.ac.jp/pv-map/gifu-aichi.html>
 岐阜県・愛知県で太陽光発電システムの期待発電量が求められます。