

3.4.2 太陽光発電

太陽電池は、金属の表面に波長の短い光を当てると電子が飛び出す現象を利用しています。電池の材料には数種類があり、変換効率に差があります。太陽光発電の設備は、主に太陽電池を組み込んだモジュールと、直流を交流に変換するパワーコンディショナーで構成されています。建築物の屋根に設置する形態と地上設置があり、大規模な地上設置のメガソーラーが総出力の約7割を占めています。

オーストラリア内陸で日射量が多く、極地は少なくなっています。日本は南北に細長く四季の変化が大きいため、日射量は場所と季節により大きな差があります。日本の平均日射量は1日当たり2900kcal/m²で、最大日射量(5月)は4100kcal/m²、最小日射量(12月)は1500kcal/m²です。ちなみに、サハラの日射量は平均で約5800kcal/m²という報告があります。

2. 太陽光発電の原理

1. 日本の日射量

太陽と風と水の流れは、どこにでもある自然のエネルギーですから、人類は古くから生活に利用してきました。光は室内に取り入れて明かりにし、熱は農産物や水産物の乾燥に使ってきました。こうしたあるがままの利用ではなく、光を科学技術で電力に変換して利用するのが太陽光発電です。地球に到達した太陽エネルギーは、約3割が上空で宇宙空間に反射されてしまいます。しかし5割は直射光として地表に到達し、2割は散乱光として熱になります。人類が全世界で使用するエネルギーの量は、地球の陸地表面が太陽から受けるエネルギーの0.01%以下です。

太陽光は波長によりエネルギー強度が異なり、紫外線(波長が0.39μm以下)の強度が全強度の約8%、可視光線(波長が0.39~0.77μm)が約46%、赤外線(波長が0.77μm以上)が約46%です。太陽のエネルギーを利用するには、直射光の利用が最も高効率です。しかし、日本は直射光が少ないので、太陽エネルギーの利用に適している国とはいえません。世界的に見ると、沿岸地域より内陸に寄ったサハラ・コロラド砂漠、中央アジア、

太陽電池の原理は、金属の表面に波長の短い光を当てると電子が飛び出す光電効果で、太陽の光エネルギーを直接電気エネルギーに変換します。一般的な太陽電池は、図1のように電気的性質の異なるn型半導体と、p型半導体を貼り合わせた接合体です。n型半導体は電子が1個余剰の形をしており、p型半導体は電子が1個不足した形(正孔)をしています。表面に光が当たると、プラスとマイナスを持った粒子(正孔と電子)が発生し、マイナスの電気はn型半導体の方へ、プラスの電気はp型半導体の方に移動します。したがって、両

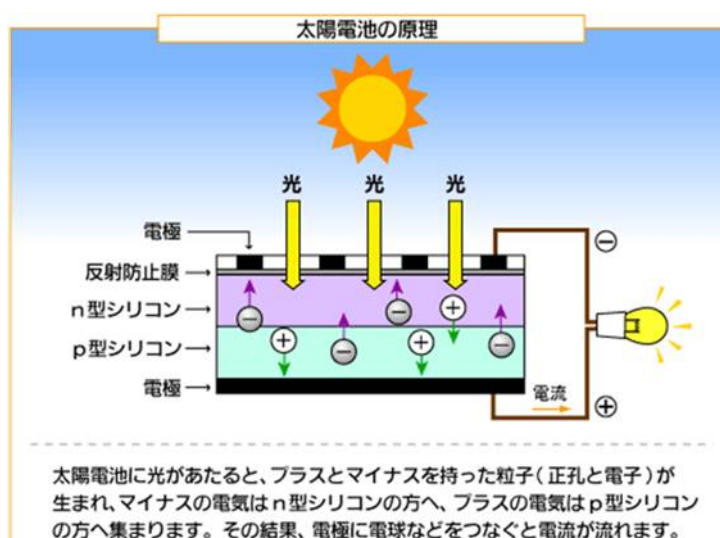


図1. 太陽電池の原理 出典: NEDO 再生可能エネルギー技術白書

電極を導線で接続すれば電流が流れます。発生した電流は直流なので、インバーターで交流電流に変換して利用します。

実用的な太陽電池は、1953年にアメリカのベル研究所で Pearson らが単結晶シリコンを使用した電池を開発したのが始まりです。太陽電池は使用原料の面から、大きくシリコン系、化合物系、有機物系に分けられます。主力はシリコン系で全体の90%を占めますが、シリコンは高価なので使用量をなるべく少なくした製法を採用しています。化合物や有機物など、シリコン以外の原料を使う開発も進められています。

3. 太陽電池の種類と製法および特徴

太陽電池を原料で分類すると表1になります。変換効率は太陽光エネルギーを電気エネルギーに変換できる割合で、容易に大きくできないのは太陽光が電池(セル)の表面で反射するだけでなく、セル内部でも十分に吸収されないからです。太陽電池のうち、一般的に使用されているシリコン系の製法と特徴は下記のようになります。

3.1 シリコン系単結晶

シリコン系単結晶は高純度のシリコンを使用し、変換効率が高いのですがコストも高いのが難点です。製法の第1段階では、軸方向が無秩序な多結晶のシリコンを、円筒形のルツボで約1420℃に加熱して溶融します。次に液面に種結晶シリコン棒をつけて回転させながら徐々に引き上げると、軸方向が均一な単結晶のインゴットが得られます。これを薄くスライスして、円盤状のウエハを作ります。このウエハを縦横10センチから15センチ程度にカットしたのが、太陽電池を構成する最小単位のセルになります。シリコンの純度は、11ナイン(電子機器グレード)は必要なく、6ナイン程度(ソーラーグレード)で十分です。6ナイン純度とは、99.9999%の意味です。シリカは地球上に豊富にありますが、純度の高いシリコンを得るのは必ずしも容易ではありません。電子機器用と競合し、品薄になると値段が高騰しやすいので、ウエハの厚さを薄くして(200~160 μ m)シリコン使用量を減らす努力が進められています。

3.2 シリコン系多結晶

表1. 太陽電池の種類

原料の系統		内容	変換効率	特徴
シリコン系	結晶系	単結晶	18~23%	高純度シリコン使用、豊富な使用実績
		多結晶	13~18%	単結晶より安価だが変換効率が低い
		ハイブリッドHIT	15~22%	高効率、高温時の効率低下少
注： シリコンはシリカから製造する。	薄膜系	アモルファス	5~11%	低温製造プロセス、原料制約が少ない
		タンデム型	10~12%	高効率で低コスト、原料使用量少ない
		トリプル型	11~13%	高効率・省原料・低コスト
化合物系	III-V族	GaAs型、InP型	~25%	高価・高効率、宇宙開発に使用
	II-VI族	CdTe型	13~16%	原料使用量が少ない、原料Cdに懸念
	カルコパイライト系	CI(G)S型	10~13%	製造工程が簡単、高性能が期待できる
有機系	色素増感		5~8%	発展性がある
	有機化合物		~5%	今後の課題である

多結晶のシリコン粒を粉砕して約 1400°Cで溶融し、再固化してインゴットを作り、ブロックに切断してからスライスしてウエハを作ります。電子機器用半導体の製造段階で発生する端材も原料に使えるので、不良品の再利用もできます。単結晶系よりは変換効率が低いですが、コストが安く原料の主力を占めています。

3.3 シリコン結晶系ハイブリッド HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer)

n 型の結晶シリコン基板の両面に数十 nm (ナノメートル：1000 分の 1 ミクロン) 厚のアモルファスシリコンを積層し、1 面に i 型半導体層と p 型半導体層、反対面に i 型半導体層と n 型半導体層を堆積させて接合します。電池表面の発電ロスを抑えて高出力、高変換効率を達成しています。

3.4 薄膜系アモルファス

基盤にアモルファス (非晶質) シリコンや結晶シリコンを蒸着させ、膜厚 1 μm 程度のシリコン薄膜を作ります。原料の制約は少ないのですが、短波長側にのみ感度があるので、結晶系のように変換効率を上げることができません。膜の条件によりアモルファスになったり、微結晶になったりします。基板の選択範囲が広く、薄いので半透明製品も作れます。温度による出力低下や、夏場での変換効率低下が少ないのが特徴です。

3.5 薄膜系タンデム

アモルファス型に微結晶シリコンを積層した 2 層構造です。アモルファスシリコンが太陽光の短波長側を吸収し、微結晶シリコンが長波長側を吸収して、両者を合わせて変換効率を上げています。シリコンの使用量が結晶系の約 1/100 なので、製造コストが安いのが特徴です。

3.6 薄膜系トリプル

アモルファスシリコン 2 層と微結晶シリコン 1

層の 3 層構造にし、変換効率を高めた製品です。シリコンの使用量が少なくコストが安いです。

4. 太陽光発電のパネル (モジュール)

太陽電池のセルは 10cm、12.5cm、15cm の角型または丸型の薄い板で、最小限の電池機能を持っています。このセルを図 2 のように接続して出力を高め、ガラスや樹脂の枠で強度を確保したのが電池モジュールで、設置の最小単位になります。太陽電池モジュールを直列に接続したものを太陽

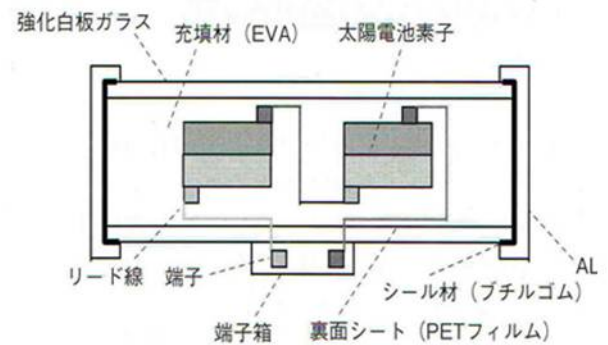


図 2. セルの接続形態

電池ストリングと呼びます。ストリングを並列に接続して大きな電力が得られるようにし、架台に並べたのが太陽電池アレイです。家庭用のアレイには平板状に並べた屋根置き型と、屋根の形状に加工した屋根材型があります。

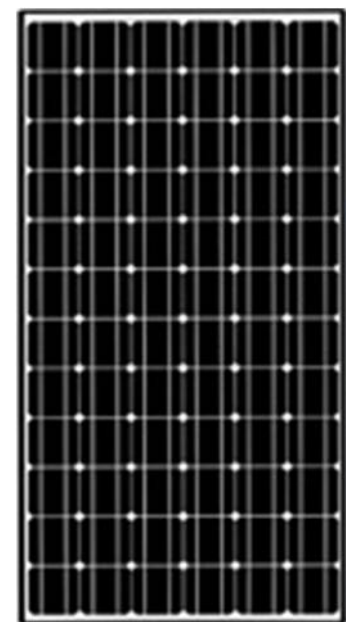


図 3. モジュールの外観

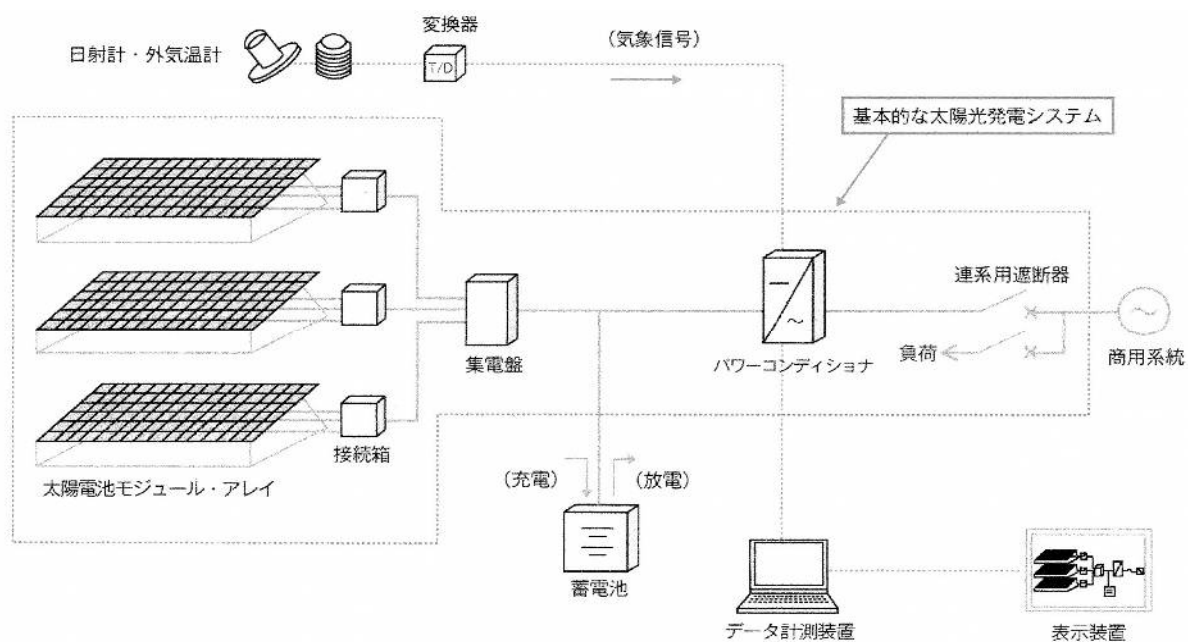


図 4. 太陽光発電設備の構成 出典：NEDO 再生可能エネルギー技術白書

5. 太陽光発電設備の構成

太陽光発電の設備構成を図 4 に示します。左に示すのが太陽光発電のアレイで、接続箱はアレイに必要な枚数の太陽電池モジュールをつなぐための機器です。ストリング間に電圧差が発生したときの逆流防止ダイオード、雷ノイズを吸収するためのサージアブソーバ、保守点検時の直流側開閉器などが内蔵されています。

パワーコンディショナーは、太陽電池で得られる直流電力を一般の電気器具で使用可能な交流電力に変換する機器です。外部の商用電源である系統側との連系運転や、自動運転に必要な保護と制御機能も備えています。外部電源が停電しても、スイッチの切り替で専用のコンセントから AC100V の電力が得られる自立運転機能もあります。パワーコンディショナーの出力は住宅用で 10kW 未満、産業施設や事業用は 1 ユニットが 10～100kW です。蓄電池は電力貯蔵装置ですから、

時間帯によって発電量が需要を上回る場合に蓄電し、下回る場合に使うことができます。停電時や災害時の電力確保にも有益ですが、現状では家庭用も産業用も費用が高いのが普及を妨げています。

6. 太陽光発電の系統連携形態

太陽電池の系統連携形態は表 2 に示す種類があります。独立型は送配電会社の配電網と接続せずに単独で運用する形態で、蓄電池と組み合わせて街路灯や道路標識に使われています。系統連携型は、送配電会社の配電網と接続して使用する形態です。電力が不足する時には購入し、余剰の場合には売電する常時連携方式と、不足する時に購入するだけで余剰でも売電しない方式があります。送配電会社に売電する場合の送電は、逆潮流といえます。

7. 太陽光発電の設置形態

太陽光発電の設置には、主に表 3 に示す 3 種類

表 2. 太陽光発電の系統連携形態

連系の方式タイプ		連系方式
独立型		送配電会社の系統と連系せず、太陽光発電で発電した電力のみ使用。安定した電力を確保するため、余剰時の電力を蓄電池に貯めて必要に応じて使用。 (適用例：街路灯、無線機、時計、道路標識)
系統 連 系 型	系統切り替え型	状況に応じて送配電会社の系統と接続したり、切り離したりして運転する。蓄電池と組み合わせると供給が安定する。(適用例：防災用)
	常時連系型 逆潮流あり	太陽光発電で発電した電力を負荷側に供給するとともに、余剰電力を送配電会社に売電する。(適用例：家庭用、業務用、産業用、公共施設用) 余剰電力ではなく、発生電力の全量を売電する場合もある(事業用)。
	常時連携型 逆潮流なし	太陽光発電で発電した電力を負荷側に供給するだけで、余剰電力は送配電会社の系統に逆潮流させない自家消費用。(適用例：家庭用、業務用)

表 3. 太陽光発電の設置形態

設置形態	特徴	電池の種類
屋根置き型	既設の住宅や建築物の屋根に設置する。屋根には太陽電池パネルの重量に耐えられる強度と、専用の架台が必要。モジュールには耐久性のあるガラス基板が使用される。設置面積が限られるので、高い変換効率(発電効率)が求められる。	結晶シリコン系
屋根材型	一戸建て住宅用の屋根材を兼ねて設置する。架台が不要なので屋根面積を無駄なく利用でき、デザイン性にも優れている。住宅の建設と同時に施工できるので、屋根置き型より低コスト。設置角度が屋根の角度と同じなので、変換効率が低くなる傾向がある。	
地上設置型	平地に設置する。発電規模の大きいメガソーラー(出力 1000kW 以上)に多い。設置面積の制約が緩いので、変換効率(発電効率)よりも費用対効果が重視される。ガラス基板が一般的。	結晶シリコン系 薄膜シリコン系
建物一体型	住宅の屋根や外壁材と一体化したモジュールを使用。デザインとの整合性が求められる。壁面設置の場合は曲面にも施工が可能なフレキシブルな基盤が使用される。採光性や遮光性も評価の対象。	薄膜シリコン系 化合物系

の形態があります。一戸建て住宅の屋根に設置する場合は、通常、「常時連系型・逆潮流あり」になります。典型的な形態は図 5 に示す方式で、太陽電池で発電した直流電力が接続箱に送られます。接続箱では直流電力を 1 本に集め、パワーコンディショナーに送って交流に変換します。パワーコ

ンディショナーを出た交流電力は、分電盤で宅内使用分が内部負荷に供給され、余剰分が売電用メーターを経て送配電会社の系統に送り出されます。図 6 には蓄電池が記載されていますが、必須ではありません。

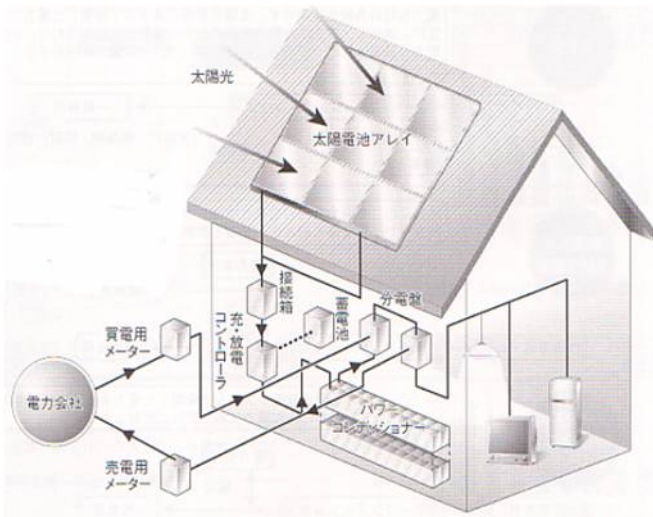


図5. 一戸建て住宅用の太陽光発電形態
出典：三菱電機PR資料

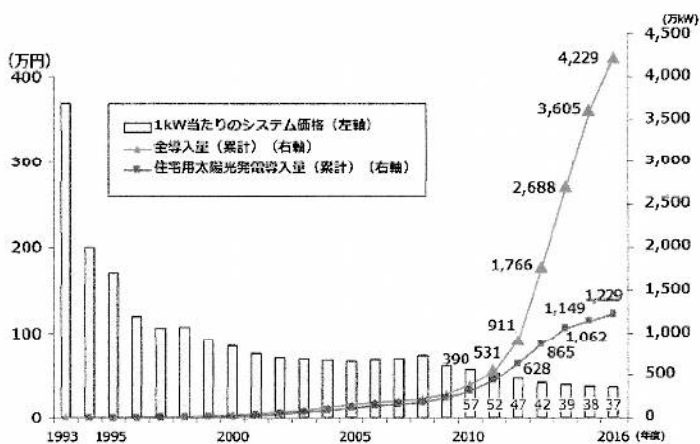
7. 太陽光発電の出力

太陽光発電には、個人が一戸建て住宅の屋根に設置する10kW未満と、事業者が地上に設置する10kW以上の2種類があります。1枚のモジュールは出力が約200~250W、面積は1.2~2㎡、重量は概ね15~18kgです。したがって、一戸建て住宅の太陽光発電は、屋根面積の制約から15~30枚のモジュールを使う3~6kWの出力が多いです。

一方、事業者が地上に設置する売電用の太陽光発電は、設置面積に応じて多様な規模が存在します。メガソーラーと呼ばれる1000kW以上の規模が多く、例えば東京電力が設置した扇島太陽光発電所は13,000kWの出力です。敷地は23ヘクタールで64,000枚のパネル(モジュール)を使用しています。

8. 太陽光発電の設置状況

図6に1993年から2016年までの、日本の太陽光発電設置状況を示します。2016年で出力の合計は4229万kW(42.3GW)で、このうちの約3割に相当する1229kWが一戸建て住宅の太陽光発電です。残る7割は、出力が10kW以上の主に事業用発電です。2012年以降に大幅に増加したのは、発生電力の固定価格買取制度が発足し、収益性が保証されたからです。2016年度の電力量の合計は320億kW時で、全電力需要の約3.3%を担っています。出力規模に比べて発電量が少ないのは、夜間には発電せず、雨天や曇天時には出力が大幅に低下するからです。設備利用率(稼働率に相当)は、火力発電が約60~80%に対して太陽光発電は12~14%です。



出典：エネルギー白書2018

図6. 日本の太陽光発電状況

海外の状況は、全出力が2016年の時点で303GWです。このうち中国が25.8%、ドイツが13.6%、アメリカが13.3%で、日本の比率は14.1%です。太陽光発電は、地球温暖化の抑制と原子力発電のリスク回避の両面から多くの国々が出力の増加を進めています。2030年頃には現状より大幅な拡大が実現しているでしょう。(おわり)

参考：再生可能エネルギー技術白書(NEDO)、他