

太陽光発電技術の現状と将来

拓殖大学工学部電子システム工学科 吉森 茂

1. はじめに

日本において太陽光発電に注目が集まったのは、1973年の第1次オイルショックが最初である。1973年10月に勃発した第4次中東戦争を受けて原油価格が高騰し、原油輸入を中東に頼る我が国は、インフレに見舞われることになった。なお、原油価格が高騰したといっても、1バレル3ドルから11ドル程度に値上がりしたのであり、2016年12月の時点で1バレル50ドル程度であるから、1ドル360円から110円への円高を考慮しても、現在の方が遙かに高い。しかし、現在はインフレどころかデフレであり、消費者物価は安定している。徹底した省エネ技術の進歩が大きく貢献している。

原油価格の高騰を受けて、当時の通商産業省（現在の経済産業省）はサンシャイン計画をスタートさせ、多くの企業や大学が参加して石油・天然ガスに頼らない発電方式として太陽光発電技術の研究開発が始まった。サンシャイン計画は1992年に終了したが、翌年には新サンシャイン計画がスタートし、2000年まで続いた。サンシャイン計画や新サンシャイン計画は

太陽光発電だけを研究開発の対象としていたわけではないが、国策として取り組んだ効果は大きく、日本の太陽光発電技術を世界一の水準に高めることに貢献した。

この報告では、太陽光発電技術の現状及び将来像について解説する。特に将来像では、他の技術との融合によって、太陽光発電の長所をより活かせることを指摘したい。

2. 様々な発電技術

電気は便利なエネルギーであり、日常生活や企業活動で欠くことのできないエネルギーである。ICT社会の発展やオール電化住宅の普及に伴い、電気エネルギーの用途は広がるばかりである。

発電技術には高い信頼性が求められるが、信頼性とは、

- (1) 年間を通じて停電が少ないこと
- (2) 電圧変動が小さいこと
- (3) 周波数変動が小さいこと

を指す。我が国の1年間の停電時間はわずか15分足らずで、先進国の中で最も短い。電圧は実効値100 [V]、周波数は50 [Hz]（東日本）、

60 [Hz] (西日本) で極めて変動が小さい。

高い信頼性を誇る日本の発電技術は、大別すると次のようになる。

- (1) 化石燃料 (天然ガス, 石炭, 石油) を使った火力発電
- (2) 原子力発電
- (3) 太陽光発電
- (4) 風力発電
- (5) 地熱発電

化石燃料を使った火力発電は、原油価格の影響を受けやすいだけでなく、地球温暖化と気候変動 (異常気象) の原因となる CO_2 を排出する。原子力発電は燃料であるウランの供給が安定しているが、地震や津波などの自然災害の多い日本では立地場所が限られ、建設コストに廃炉コストを加えると、必ずしも安価な発電方法とは言えない。

自然エネルギーあるいは再生可能エネルギーと呼ばれる太陽光や風力、地熱を利用した発電は環境汚染につながらない利点をもつ。太陽光発電設備は一般家庭や学校、工場等の屋根に取り付けられるだけでなく、休耕地に大規模設備 (メガソーラー) を展開することが可能であり、洋上風力発電は大規模化が可能で低コスト発電技術として将来有望である。地熱発電については温泉の枯渇につながるのではないかとの指摘もあり、再生可能エネルギーの中では太陽光と風力の利用が最も現実的かつ有力である。特に太陽光発電は日常生活でも目にする機会の多い発電技術であり、今後、益々、人々の関心を集めると思われる。

3. 太陽光発電

1954年にアメリカのベル研のグループが、半導体 pn 接合に光を照射すると起電力が生じることを発見した。いわゆる光起電力効果の発見である。

pn 接合の電流電圧特性は強い非線形性を示し、整流用素子として電子回路でよく利用されるが、それはホールを多数キャリアとする p 形半導体と電子を多数キャリアとする n 形半導体で接合を形成したとき、ホールと電子の相互拡散現象により、接合界面に空乏層と呼ばれる電荷の存在しない領域が生じるからである。空乏層の両端には電位差が生じ、Si でできた pn 接合の場合、p 形半導体を電位の基準とすると n 形半導体の電位は約 + 0.5 [V] になる。この電位差を拡散電位あるいは接触ポテンシャルと呼び、太陽光発電素子、いわゆる太陽電池として pn 接合を見做した場合、重要な役割を演じる。

pn 接合の電流電圧特性を記述する方程式として、次の式(1)が良く知られている。

$$I(V) = I_s \{ \exp(qV/kT) - 1 \} \quad (1)$$

ここで、 I_s は逆方向飽和電流、 q は電子電荷の絶対値 (1.6×10^{-19} [C]), k はボルツマン定数 (1.38×10^{-23} [J/K]), T は絶対温度であり、室温はおよそ 300 [K] である。逆方向飽和電流は暗電流とも呼ばれ、少数キャリア (p 形半導体中の電子および n 形半導体中のホール) の移動によって流れる電流であり、少数キャリア密度と接合面積に比例する。太陽光が太陽電池に照射されると、p 形半導体および n 形半導体の少数キャリアが増加するだけでなく、空乏層内にホール・電子対が生成される。太陽電池に負荷を接続すると、拡散電位が存在するので、ホールと電子対は負荷を流れることができる。

実用化されている太陽電池では 1 セルあたりの出力電圧は 0.5 [V] 程度と小さいが、接合面接を増やすことで取り出せる電流を稼ぐことができる。出力電圧を高くしたいときは、複数のセルを直列接続すれば良い。なお、雨天時および晴天時に太陽電池の内部抵抗を動作点における微分抵抗として測定すると、定格出力 50

[W]の太陽電池の場合、それぞれ1 [k Ω] とほぼ0 [Ω] になる。

家庭用に普及している太陽電池パネルには内部にショットキー・バリア・ダイオード (SBD) が並列接続されており、パネル表面が木の葉のような異物によって覆われたときに、当該パネルが高抵抗負荷として機能しないよう、SBD がバイパスとしての役割を果たしている。

太陽光エネルギー (電力密度) は地球の大気圏外では1.37 [kW/m²] に達し、この数値を太陽定数と呼ぶ。北緯36度付近にある日本列島では、大気による減衰の影響で1.0 [kW/m²] 程度の電力密度である。1坪 (3.3 [m²]) の太陽電池パネルで一般家庭1世帯の消費電力を賄うことができる計算になるが、実際には太陽電池の発電効率は高々20 [%] なので、一般家庭では3坪から5坪程度の面積が必要になる。

地球は自転しているので、世界中に太陽電池パネルを設置すれば、必ずどこかのパネルで発電でき、人類が必要とする電気エネルギーを全て賄うことができるとの試算がある。現在の太陽電池の効率を考慮しても、地球表面積の1%を覆えば足りるのである。地球の表面積は約 5×10^8 [km²] なので、 5×10^6 [km²] 分の太陽電池パネルを用意し、砂漠を中心に設置すれば良いことになる。遠く離れた電力消費地とは、後述の超伝導技術を利用して送電すれば良い。

比較的实现可能なアイデアと思われるかも知れないが、一番の課題は太陽電池パネルの価格である。現在のパネル価格1.0 [万円/m²] では、5京円もの巨費が必要になる。日本の国家予算の500年分に相当する。現在の太陽光発電技術の問題は、効率の低さと価格にあると言える。

なお、宇宙太陽光発電所と呼ばれる、静止衛星に広大な太陽電池パネルを取り付け、電気エネルギーをマイクロ波に変換して地球表面まで送電し、海洋上に展開したレクテナ (整流機能

を有するアンテナ) で受信し、電力消費地まで送電する研究でも日本は世界の最先端を進んでいる。

4. 主な太陽電池の発電効率

主な太陽電池の発電効率を表1 (次ページ) にまとめた。

単結晶Si太陽電池は発電効率に優れているが、製造コストが高く、一般家庭やメガソーラーには向かない。多結晶Si太陽電池は単結晶Siほどには製造コストがかかるわけではないので、一般家庭用途に普及している。一方、薄膜系は安価であることが特長で、発電効率も良くなっている。特に化合物半導体であるCuInSe₂ (CIS) は安価に大量生産可能で、近年、急速に普及している。

太陽電池の変換効率が20 [%] であるということは、残りの80 [%] もの太陽エネルギーが無駄になっているということである。無駄の要因は、パネル表面における反射、入射光波長とのミスマッチ、電気的要因の3つに分けられる。

多くの太陽電池パネルの表面は、ピカピカしている。すなわち太陽光を反射しているのであり、反射率は20 [%] 程度に達する。最も大きな無駄の要因は入射光とのミスマッチである。太陽光のスペクトルは紫外線から赤外線まで広がっているが、太陽電池で効率良く電気エネルギーに変換できる波長帯は赤外近辺にあり、それよりも短波長領域の光は電気エネルギーに変換されない。

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) が策定したPV2030+シナリオの概要を表2にまとめた。なお、PVとはPhoto Voltaics (光起電力) の略である。

2020年の目標である14 [円/kWh] という発電コストは、事務所などの事業用電力料金に

| 材 料 | 発電効率[%] | コスト |
|------------------------|---------|-------|
| 単結晶シリコン | 25 | 高い |
| 多結晶シリコン | 20 | 高い |
| 多結晶薄膜シリコン | 18 | 比較的安価 |
| CuInSe ₂ 薄膜 | 22 | 比較的安価 |

表 1 主な太陽電池の発電効率とコスト

| | 2020 年 | 2030 年 |
|--------------|---------|---------------|
| 発電効率 [%] | 20 | 25 |
| 発電コスト[円/kWh] | 14 | 7 |
| 主な用途 | 住宅、公共施設 | 住宅、公共施設、電気自動車 |

表 2 NEDO が策定した PV 2030 +シナリオの概要

相当し、2030 年目標の 7 [円/kWh] は工場などの事業用電力料金に相当する。太陽電池モジュール単位の発電効率を 25 [%] まで高くすることができれば、一般住宅だけでなく、学校や病院の屋上、休耕地に太陽電池パネルを展開し、今後、普及が見込まれる電気自動車の充電設備にも利用できるようになる。この目標は実現可能なレベルであり、太陽光発電がより身近で、欠くことのできない発電技術となる日は近い。

5. 太陽光発電技術の将来像

火力発電所で生まれる電気は交流であり、変圧トランスを使って容易に昇圧し送電することが可能である。一方、太陽光発電で生まれる電気は直流であるから、一般の電気製品を使用するためには交流に変換しなければならず、発電方式としては交流発電に劣ると考えられがちであるが、直流送電を発明し実用化に取り組んだのは、発明王エジソンであった。エジソンが活躍した 20 世紀初頭は、損失の多い直流送電

よりも昇圧によって電流を減らして同じ電気エネルギーを送電できる交流が大規模展開に適していたため、直流送電が実用化されないまま現在に至っている。しかし、現代では直流発電であることを最大限活用できる技術の開発が進んでいる。

それが超伝導技術である。超伝導の一番の特長は電気抵抗がゼロになることであり、損失のない送電や超強力電磁石の実現を可能にする。2027 年に東京・品川と名古屋を結ぶ予定のリニアモーターカーは、超伝導電磁石を使用した磁気浮上方式を採用している。

1911 年に発見された超伝導は高価な液体ヘリウムを使用しなければならなかったが、1987 年に銅酸化物超伝導体が発見されると、安価な液体窒素を使って超伝導を利用できるようになった。特に日本で発見された Bi 系と呼ばれる超伝導体は、既に線材が市販されている。市販されている Bi 系超伝導線材は使用目的にも依るが、液体窒素環境下において 1 本の電線（幅 4.0 [mm]、厚さ 0.2 [mm]）で 100 [A] 近い電流を流すことができる。メガソーラーの設置場

所は消費地から離れているのが一般的であるが、直流の電気を超伝導技術によって遠く離れた一般家庭や事業所、工場に送電するのである。

高度 ICT 社会に欠かせないサーバー用コンピュータを集積したデータセンターは大量の電気エネルギーを消費するので、サーバーの省エネ化が重要になっている。IoT の進歩とともにデータセンターは益々増える可能性があるが、メガソーラーの直流電力を超伝導送電技術でデータセンターのサーバーに直流給電するという大規模な実証実験が既に北海道・石狩において行われている。⁽¹⁾

一方、メガソーラーの直流電力を超伝導技術を利用して貯蔵する実証研究は、リニアモーターカー実験線のある山梨県で進められている。バッテリーの代わりに 25 トンもの重いフライホイールと呼ばれる円盤を高速で回転させて力学的回転エネルギーとして電気エネルギーを貯蔵するシステムである。超伝導技術は、フライホイールの回転を支持する軸受けに利用されている。⁽²⁾

一般家庭における消費電力の大きな部分を照明が占めていることは見落とされがちである。太陽電池の直流出力を照明用に利用するとパワーコンディショナー（パワーコン）を使って交流に変換する必要がないので効率が良い。日本で生まれた青色 LED を使った白色 LED 照明器具が普及しているが、LED 照明設備と太陽電池を一体とした HEMS（Home Energy Management System）が実現すれば、省エネをより一層進められると思われる。

6. まとめ

日本における太陽光発電技術開発の現状と将来像について述べた。

太陽光発電は直流発電であることから超伝導技術とも相性が良く、近い将来、メガソーラー

で発電した電気エネルギーを超伝導技術を利用して消費地まで送電し、電力貯蔵にも超伝導技術が利用される時が来るかも知れない。

一般家庭に太陽電池を設置した場合、エアコンや冷蔵庫などの電気製品を使うにはパワーコンを使って交流に変換しなければならないが、エアコンやパワーコンの省エネ化技術も進んでいる。

Si に比べて絶縁耐圧が 10 倍も高い SiC（炭化珪素）がパワーデバイス用半導体として優れていることは分かっていたが、単結晶化技術やデバイス化が困難であった。現在では SiC を使ったパワーデバイスが実用化され、エアコンやパワーコンだけでなく鉄道車両用インバータにも使われている。⁽³⁾ 最近では青色 LED の実現につながった GaN（窒化ガリウム）をパワーデバイスに応用する研究開発も活発になってきている。

今後太陽光発電技術と様々な省エネ技術が融合することによって、太陽光発電が我が国における基本的発電方式と位置付けられる日が来ることを期待したい。

参考文献

- (1) 「高温超伝導ケーブルの現状と将来」, 工業材料, 2016 年 1 月号, Vol.64, No.1, pp.38-42
- (2) 「超伝導技術を用いたフライホイールでエネルギーを貯める」, Rail Research Review, 2012 年 2 月号, pp.18-21
- (3) 「SiC パワーデバイスの実用化展開」, 応用物理 2016 年 11 月号, Vol.85, No.11, pp.941-946