

有機系太陽電池を利用した環境発電と蓄電の新技術

瀬川 浩司

1. はじめに

再生可能エネルギーの利用拡大は、新たな段階に進み始めている。日本では、既に導入された太陽光発電の総容量が2019年度末に5600万kW(56GW)を超え、これに未稼働分の設備認定容量を加えると約8000万kW(80GW)にもなり、設備容量だけを見れば石炭火力発電と原子力発電の設備容量の総和に匹敵する値となっている。当然、系統電力における再生可能エネルギー比率は上昇しているが、系統電力の周波数や電圧変動の抑制や系統未整備地域における容量制約など、これ以上の再生可能エネルギーの系統接続を阻む課題も顕在化し始めた。それでもなお、太陽光発電の年間総発電量は日本の総電力需要の7~8%程度であることを考えると、脱炭素社会の実現に向けて更なる再生可能エネルギーの導入拡大は必須である。

こうした中で注目されている新技術が、系統制約のない独立電源、いわゆる「環境発電」である。これは、次世代の化学プラントの構築に必要なIoT化にも必要な技術であり、その利用によって大幅な人件費削減や安全性向上、省エネルギーにも寄与するものである。しかしながら、これまで報告されてきた各種の環境発電デバイスは本質的に高コストであった。蓄電池の低コスト化や軽量化は進んでいるので、それらより高コストで重たいデバイスでは全く話にならない。そこで我々は、軽量・低コスト・メンテナンスフリーの環境発電デバイスとして有機系太陽電池の開発を進めてきた。環境中には沢山の光があふれているので、環境発電に用いるエネルギー源としては最も便利である。



New Technology for Environmental Generation and Storage of Electricity Using Organic Photovoltaics

Hiroshi SEGAWA

1989年 京都大学大学院博士課程修了(工学博士)

現在 東京大学大学院総合文化研究科広域科学専攻 教授

連絡先: 〒153-8902 東京都目黒区駒場3-8-1

E-mail csegawa@mail.ecc.u-tokyo.ac.jp

2020年3月12日受理

また、少し工夫すると、外部回路なしで太陽電池と蓄電池を組み合わせたハイブリッド電池も作ることができる。本稿では、それらの新技術について解説する。

2. エネルギーハーベストデバイスに求められるもの

環境発電の課題はいろいろあるが、やはり「低コスト化」と「信頼性確保」は避けて通れない。環境発電は、既存の一次電池や二次電池に比べるとやはり割高で、出力が環境中のエネルギー量に依存して変動する上、規格もまちまちなため使いにくい。これらの点は、既存の太陽光発電も同じ問題を抱えていて、太陽光発電の導入拡大の一丁目一番地は低コスト化と、変動する出力をどうするかだった。太陽電池の低コスト化には、①高効率化と長寿命化による発電コスト低減(セルコストは変えずに発電量を増やし結果的にコストを下げる)と、②安い素材と簡便な製造工程で作られる新型太陽電池の開発(セルコストを下げる)、という二つの方向がある。前者では、多接合型太陽電池に加え、量子ドットを用いた多励起子生成型や中間バンド型の太陽電池などが研究されている。一方後者では、安価な材料から簡単な製造プロセスで製作できる色素増感太陽電池と有機薄膜太陽電池が主に研究され、最近ではこれらの長所を合わせ持つハイブリッド太陽電池として有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池、いわゆる「ペロブスカイト太陽電池」が研究されている^{1,2)}。これは、材料コストが安く溶液塗布プロセスでも製造可能なことに加え、高いエネルギー変換効率(25%を超えている)がシリコン系太陽電池に匹敵するため、世界中の多くの研究者の注目を集めている。これが実用化すれば、材料費は1kWh当たり2円を切るだろうとの試算もある。

一方、実際の電力の使い方を見てみると、オフグリッドにしても構わない携帯機器などの電源用途もかなり多い。オフグリッド電源の割合が増えれば、系統にかかる変動負担を軽減することができ、総体としての再生可能エネルギーの導入量も増やすことができる。(国研)新エネルギー

ギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の研究開発のロードマップにもこのことが書かれている。今後発展が予想されるIoT（Internet of Things）の時代が到来すれば、ますますユビキタス電源としてのオフグリッド電力の需要は高まるだろう。ちなみに「ハーベスト」とは「収穫」の意味だが、環境中に存在する様々な自然エネルギーを発電に使うだけでは駄目で、「集めて溜める」ことこそがエネルギーハーベストであり、こうすることでエネルギーの価値は一気に高まる。太陽光発電はこのツールとしても重要なのだ。ただし、電卓や玩具などで使われている太陽電池は、シリコン系太陽電池の中でもあまり性能の高いものではなく、大きな市場を形成しているものでもない。どうしても補助的な電源としてしか見做されてこなかった。

3. 色素増感太陽電池による光エネルギー捕集

これに対し、有機系太陽電池の一つである色素増感太陽電池は、もともとは低コスト製造が可能である点から次世代太陽電池として注目されてきたのだが、小さいセルを作るのはシリコン系太陽電池よりも簡単で、比較的発電性能も良かった。特に、室内光などからの光エネルギー捕集には低照度環境下での高いエネルギー変換効率が求められるが、シリコン系太陽電池では光強度が落ちると電流も電圧も同時に低下しほとんど発電しないのに対し、色素増感太陽電池の場合は低照度下でも高い電圧が維持されるため光強度が弱い場所の方がむしろエネルギー変換効率が高くなることが知られていた。例えば、リコー（株）は2014年に低照度の室内光でエネルギー変換効率が26%になる全固体型の色素増感太陽電池を報告している³⁾。リコー（株）はその後も研究開発を進め、4V以上の出力を出せる指先サイズの6直列モジュールなどを発表している。2020年2月には、これらの量産化も発表している⁴⁾。同様の製品化は、フジクラ（株）やこの後に寄稿されているシャープ（株）でも進んでいる。これらの多くは、外部蓄電池との組み合わせで充電フリーを実現している。

ところで、色素増感太陽電池の場合には、その発電機構に酸化還元反応を含むため、内部に直接蓄電機能を組み込むこともできる。我々はこの点に着目し、蓄電機能を内蔵した太陽電池を開発した。蓄電材料には、還元されて電子が溜まると白色から青色に変わる酸化タンゲステンを用いている。この太陽電池の電極の製造には、スクリーン印刷（騰写版）工程を利用して様々な図柄を刷り込むこともできる。このような特徴を活かして作成した蓄電機能内蔵太陽電池デザインパネルが図1の「アナベル（Annabelle）」である。アナベルは白い花を付ける紫陽花の品種名で、開花後しばらくすると花が着色する。蓄電機能内蔵太陽電池のアナベ

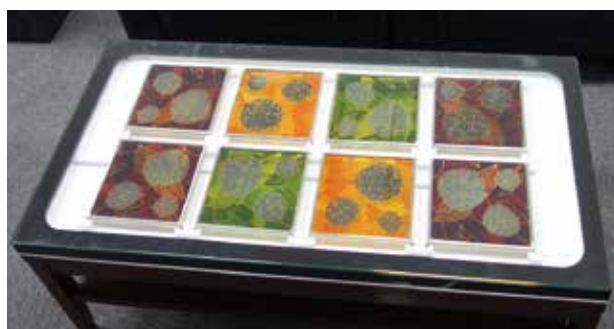


図1 紫陽花の花びらの色の変化をイメージしてデザインした蓄電機能内蔵太陽電池デザインパネル「アナベル」。葉は4色の色素を使っている。光が当たり電気が溜まると花びらが青く着色する。1枚のパネルの1辺は20 cm²

ルは、太陽光発電で得た電気をパネル自身に溜める際に花びらの色が青白色から青藍色に変わるので、良く似た紫陽花のアナベルから名前を頂いたものである。図1のテーブルには、色の違うアナベルを8枚組み込んであり、室内光のエネルギーを溜めて使うことができる⁵⁾。

この蓄電機能内蔵太陽電池では、太陽電池の原理的弱点であった光照射強度の急激な変化による急激な出力変動を抑制できるようになる。日照条件の急激な変化が起こっても、パソコン等の外部制御ではなく回路レスの内部制御で変動抑制することが可能である。また、この太陽電池は、弱い光量での発電特性に優れており、室内光や建物の窓や壁などに利用できる。このアナベルを3枚組み合わせて作製した「陽花灯（ひかり）」が図2である。これは室内の微弱光で発電と蓄電をおこない、必要に応じてUSBポートからの放電をおこなうコンセプトモデルである。自然界の植



図2 アナベルを3枚組み合わせて作成した陽花灯。スマートホンの充電器として使えるように設計してある

物が日陰や窓際でも光を集めて光合成をおこなうように、陽花灯は窓際で光を集め蓄電して、溜めた電気は夜間ランプやスマートホンの充電器用の電源として利用できる。現在、窓やテーブルなどへの応用も考えている。この太陽電池は、電気が溜まると花びらが青くなる。逆に、放電してしまうと花びらが白くなるのですぐわかる。そんな時には、窓辺に持って行って光を当ててやるとまた花びらが青くなって電気が溜まったことがわかる。まるで、鉢植えの植物を育てているようだ。これまでの太陽電池は黒い、重い、嵩張るといったイメージであったが、これなら楽しみながらエネルギーを作ることができる。「エネルギー」というと、何かと固いイメージが付きまとうものだが、このようなイメージを払拭して楽しみながらソフトにエネルギーを作り出すというコンセプトを提案したい。図3は、手のひらサイズの蓄電機能内蔵太陽電池である。デザインは自由自在だ。



図3 手のひらサイズの蓄電機能内蔵太陽電池。シースルーなので窓にはめ込むこともできる

4. 高性能ペロブスカイト太陽電池への期待

こうした有機系太陽電池の中でも、塗布製造できる高性能太陽電池として最も期待されるものが、有機金属ハライドペロブスカイト太陽電池 (PSC) である。世界中で多数の研究がおこなわれ、その変換効率も日々更新されている。ペロブスカイト組成に着目すると、高い変換効率を示すセルの多くは混合カチオン/混合ハロゲンのペロブスカイトを用いている。その中でもホルムアミジニウム (FA) 比率の高いもので、FA 比率95%のものが最高値の短絡電流密度 (J_{sc}) となっている。一方、開放電圧 (V_{oc}) はCs, Rbなどの無機カチオンを含むものが高い値を与えている。しかしながら、Cs, Rbなどは地殻中に存在する比率や年間産出量

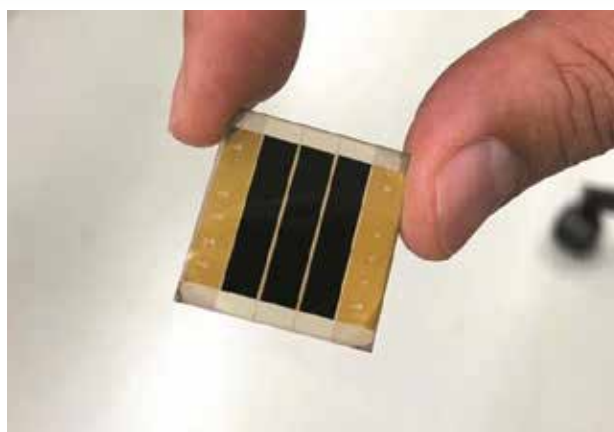


図4 3直列PSCミニモジュール。20%を超える変換効率を示す。電圧は3.4 V

が少ない希少金属であり価格も高い。我々はCs, Rbなどの代わりに汎用の金属であるKの陽イオンを使い2019年には小面積セルで23%, 3直列ミニモジュールで20%という高い変換効率を実現した(図4)。2020年1月にパナソニックは16%を超える変換効率を示すモジュールを報告している。基本的には高効率低コストという特長を競争力の源として開発が進められていくものと期待されるが、高性能小型軽量発電デバイスや、重量当たりの発電量が大きいフィルム型PSCなどの研究が今後進むであろう。また、PSCでは低照度1000 luxの条件で27.4%という変換効率も報告されている⁶⁾。これらの特徴は環境発電デバイスとしてはうってつけであり、今後もこの視点からの開発が進むと考えられる。

5. おわりに

イノベーションの実現には、技術と社会の共進化が必要だ。パソコンがようやくインターネットに繋がった時代から、全国民がスマートホンを持つ現代に変化する中で、技術と社会は明らかに共進化してきた。技術と社会の共進化のタイミングを合わせるのはなかなか難しいが、環境発電の利用を基軸とした広範囲のイノベーションに、この考え方は当てはまるのではないか。低炭素社会の実現と化学プラントの進化に寄与する環境発電をめざしたい。

参考文献

- 1) Nakazaki, J. et al. : *J. Photochem. Photobiol. C, Photochem. Rev.*, **35**, 74-107 (2018)
- 2) <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
- 3) https://jp.ricoh.com/release/2014/0611_1.html
- 4) https://jp.ricoh.com/release/2020/0115_1.html
- 5) Ogura, R. et al. : *Converttech & e-print*, **4**, 72-75 (2014)
- 6) Kawata, K. et al. : *J. Photopolymer Sci. Tech.*, **28**(3), 415-417 (2015)