

|              |   |
|--------------|---|
| Title        | 成熟技術の復権：単結晶Si 太陽電池が復権できた理由は？：脱炭素に向けた太陽電池のイノベーション・プロセスの分析と展望   |
| Author(s)    | 中田，行彦   |
| Citation     | 年次学術大会講演要旨集，37：710-713  |
| Issue Date   | 2022-10-29  |
| Type         | Conference Paper  |
| Text version | publisher   |
| URL          | <a href="http://hdl.handle.net/10119/18595">http://hdl.handle.net/10119/18595</a>   |
| Rights       | 本著作物は研究・イノベーション学会の許可のもとに掲載するものです。This material is posted here with permission of the Japan Society for Research Policy and Innovation Management. |
| Description  | 一般講演要旨  |

## 2 C 1 0

# 成熟技術の復権：単結晶 Si 太陽電池が復権できた理由は？ 脱炭素に向けた太陽電池のイノベーション・プロセスの分析と展望

○中田行彦（立命館アジア太平洋大学） nakata@apu.ac.jp

### 1. はじめに

脱炭素に、日本は光発電で大きな貢献をしてきた。日本の国家政策のサンシャイン計画が、太陽電池価格を100～200分の1にするのを目標に、1974年7月に発足した。その中で多結晶Si太陽電池が技術開発され主流となった。そして日本の太陽電池の世界生産シェアは、2018年まで約50%を占めていた。その後、固定価格買取制度（FIT）の導入により市場は急拡大した。中国がシェアを急拡大し17年の太陽電池生産トップ10社のほとんどを中国企業が占めた。技術視点では、多結晶Si太陽電池の生産シェアは2018年から急落し2021年には0%まで低下。単結晶Si太陽電池のシェアは96%まで急増した、成熟技術は、通常衰退していく。しかし、脱炭素に効果が大きい光発電で、単結晶Si太陽電池は復権できた。なぜ復権できたのか？また日本は太陽電池で復活する可能性はあるのか？本報告の目的は、上記問題意識を踏まえて、脱炭素に向けた太陽電池のイノベーション・プロセスの分析と展望を行うことにある。

### 2. 先行研究

渡邊（2008）は、シャープを中心に太陽電池と発電システムの開発経過を示している。島本（2014）は、サンシャイン計画を事例として、政府の意思決定過程、産官学連携活動、企業の技術戦略決定過程を総合的に研究している。著者は、中国の太陽電池産業の分析（中田2012）、シリコンバレーの太陽電池ベンチャー（中田2013）、FITの分析（Nakata2014）、脱炭素に過去の教訓に学べとの提言（中田2021a）、ペロブスカイト太陽電池の展望（中田2021b）等多岐に研究してきた。これらを踏まえ、脱炭素に向けた太陽電池のイノベーション・プロセスの分析と展望を行った

### 3. 光発電産業の現状と研究課題

米国の国立再生可能エネルギー研究所（NREL）によると、世界の年間太陽電池出荷は、2021年に中国がトップで69%である（NREL2022a）。また、技術別の年間出荷量の推移は、図1の様に、多結晶Si太陽電池の生産シェアは2018年から急落し2021年には0%まで低下した（NREL2022a）。代わって単結晶Si太陽電池のシェアが96%まで急増した。その技術は、後述するPERC構造を採用しp型単結晶Si材料を用いた太陽電池が76%のシェアを占めている（NREL2022a）。

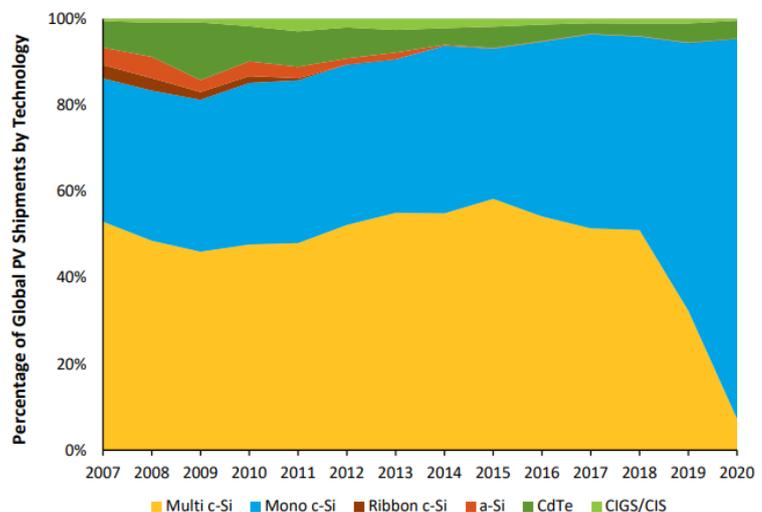


図1 太陽電池の技術別出荷シェア推移(出典:NREL2022a)

成熟技術は、通常衰退していく。しかし、脱炭素に効果が大きい光発電で、単結晶Si太陽電池は復権できた。なぜ復権できたのか？また日本は太陽電池で復活する可能性はあるのか？これが本報告の問題意識である。

### 4. 太陽電池技術の発展軌跡

#### 4.1 単結晶Si太陽電池の誕生

シリコンを使った太陽電池は1954年にベル研究所から発表された（渡邊2008）。発明者はフラー、ピアソン、チャピンの3名である。変換効率は1953年9～10月に4%達成、1954年に6%に改良された。

#### 4.2 単結晶Si太陽電池の孵化・事業化

##### 1) シャープの世界初の単結晶Si太陽電池量産化

シャープは、1963年世界で始めて太陽電池モジュールを量産化した（渡邊2008）。このモジュール「S224」は、アクリルケースの中に1インチの半円形単結晶Si太陽電池が10直列2並列に並べられ、出力360mWであり、灯浮標用や灯台用に用いられた。当時のシステム価格は出力1Wあたり4～5万円であり、商用電源から1km以上離れていれば、太陽電池を採用した方が有利と考えられていた。

1978年に直径2インチのセルを使った「S225」が開発された。表両側に強化ガラスを使い、シリコン樹脂で封止し、出力1W、変換効率10%であった。これらでシャープはシェア世界首位となった。

## 2) シャープが世界首位陥落

シャープは、2000年には世界シェア17%と世界首位であった。しかし、2007年、シャープは首位から陥落した（小笠原等、2008）。その原因は、太陽電池のSi原料の調達に失敗したことだ。欧州などでの市場拡大で太陽電池の生産量が急増したため需要が逼迫し、価格は約2倍に高騰した。このため、シャープは、2007年1月に富山事業所で太陽電池用Siの生産を開始した。また、シリコン材料メーカーとポリシリコンの長期調達契約を結んだ。しかし価格を高く設定することを余儀なくされた。

## 4.3 多結晶Si太陽電池の誕生・事業化

多結晶Si太陽電池は、単結晶型より変換効率は低いが、製造コストが低く安価にできる。単結晶Siは結晶の規則性を維持しながら塊を作るため厳密な工程が必要となる。熔融シリコンの表面に単結晶Siの種結晶を浸しゆっくり回しながら引き上げて単結晶の塊を作ることからコストが高く生産性も悪い。これに対し多結晶Siは、るつぼで多結晶を固まらせて塊として引き抜くキャスト法などの製造法がある（桜庭1991）。京セラは、サンシャイン計画で多結晶Si太陽電池を研究開発し、1990年には10cm角で変換効率14.2%の太陽電池を量産した。世界では、米国ソーラーレックス等が生産していた。多結晶Si太陽電池は、安価であることから、2007年には約半分のシェアを占めるようになった。

## 4.4 薄膜Si太陽電池の孵化・事業化

### 1) 薄膜Si太陽電池の誕生・事業化

1976年、米RCA社カールソン博士がアモルファス太陽電池を提案し、翌年には変換効率5.5%のアモルファスSi太陽電池が開発された。シャープは、1979年にアモルファス太陽電池の研究開発に着手し、1982年にはロール状のステンレス基板上に2層積層型のセルが量産しカード型電卓に搭載した。

シャープは、Si原料の調達に失敗したので、Si材料を必要としない薄膜太陽電池へ舵を切った。片山幹雄社長（当時）が、2007年7月31日に、堺工場で液晶パネルと薄膜太陽電池を生産すると発表した。

### 2) 薄膜Si太陽電池の衰退

2015年7月31日に、シャープはメガソーラー向けの薄膜太陽電池の生産を停止すると発表した。薄膜太陽電池は、結晶型に比べ変換効率が低いと共に、価格競争が激しかった。堺工場で生産してもアジア企業に対抗できないと判断し生産を停止した。つまりコスト・パフォーマンスで勝てなかった。

## 5. 中国が世界1位に躍進

FITの導入により太陽電池市場は急拡大した。太陽電池生産シェアは、日本は2004年の50%から2010年の9%に急落し、中国は2010年に43%と急速に拡大した。中国が世界1位に躍進できた理由は、1) 半導体技術と類似性があり転用した、2) 太陽電池技術は単純で新規参入し易い、3) 海亀（海外学習人材）が起業・活躍した、4) 起業家精神が旺盛である、等があげられる（中田2012）。

## 6. 単結晶Si太陽電池が復権できた理由

標準型の単結晶Si太陽電池（図2a）は、吸収した太陽光エネルギーが大きいと、電子が自由に動ける自由電子となり、電子が抜けた穴は正孔となる。この電子と正孔がSi内を拡散して、pn接合に到達すると分離され電極から電流が取り出せる。p型Si基板の場合、裏面付近で発生した自由電子は、裏面電極を通じて再結合してしまい、表面近くのpn接合まで拡散できない。この裏面電極付近の自由電子をpn接合に移動させようと電界（Back Surface Field：BSF）を設けるが、その効果は限定的である。

このため、図2bに示すPERC構造太陽電池（Passivated Emitter and Rear Cell）が開発された（田口2017）。p型Si基板の裏面に絶縁物の層（Passivation層）を形成し、裏面電極を通じての再結

合を大幅に減少させ、自由電子が pn 接合に到達する確率を向上させ、変換効率を上げる構造だ。もちろん電流を取り出す裏面電極は必要であり、電極面積の最適化が必要である。

この構造を工業的に実現するため、Passivation 層への穴あけ工程を、フォトリソグラフからレーザー加工に置き換える、ペースト技術で行う等が実施されている（田口 2017）。PERC 構造は、従来の標準型単結晶 Si 太陽電池に 3 ないし 4 工程を加えることで実現でき、加工処理の高速化と製造装置の開発と相まって、量産レベルで PERC 構造への移行が加速的に進んだ。この PERC 構造において、粒界における欠陥により再結合が生じる多結晶 Si よりも、単結晶 Si の方が改善効果を発揮しやすい。

単結晶 Si 太陽電池が復権できた理由は、従来技術へ少しの工程追加により高効率化できるため、単結晶 Si と PERC 構造の両方が加速的に採用された。日本は、既に太陽電池の生産シェアを落としており、生産ラインへの追加投資を要する PERC 構造の導入に乗り遅れてしまったと考えられる。

太陽電池のイノベーション・プロセスで見れば、図3に示すように、先に単結晶Si太陽電池が研究開発され、その後多結晶Si太陽電池が、発電量あたりの価格という製品パフォーマンスで追い抜いて交代が起こった。

しかし、従来の多結晶 Si 太陽電池へ少しの工程を追加することにより高効率化できるため、単結晶 Si と PERC 構造の両方が加速的に採用されたため、単結晶 Si 太陽電池が復権できた、稀有な事例と言える。

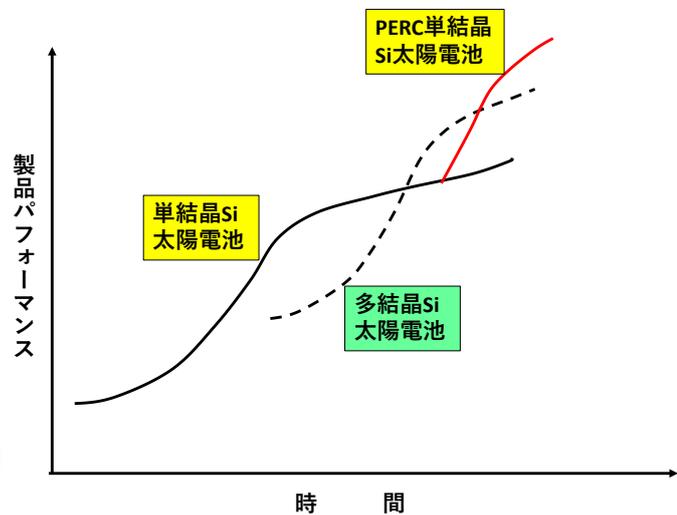
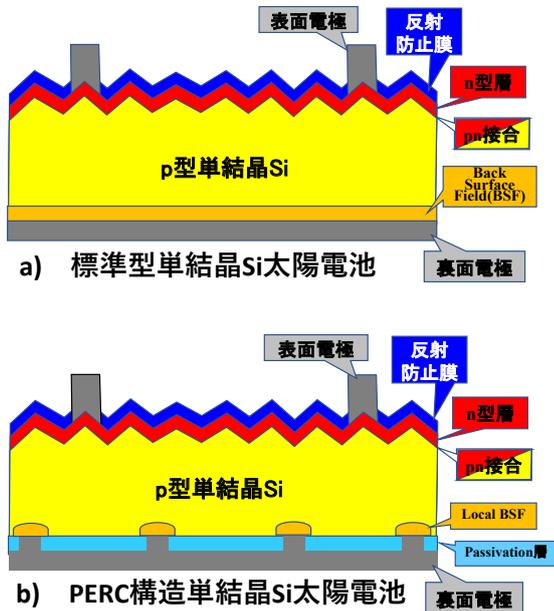


図2 標準型とPERC構造太陽電池（著者作成） 図3 イノベーション：成熟技術の復権（著者作成）

## 7. 超高効率太陽電池の衰退

### 1) パナソニックのHIT太陽電池の撤退

PERC 構造単結晶Si太陽電池以外に、超高効率太陽電池はどの様になったのか？

三洋電機は、変換効率を高めるため HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin-layer) 太陽電池を開発した。n 型単結晶 Si の両面にアモルファスシリコン Si 膜が形成することで、接合面での欠陥の発生を減少できる、光の吸収を改善できる。その後、パナソニックが三洋を吸収合併した。パナソニックは、HIT 太陽電池で、量産モジュール変換効率 18.7%、研究レベルで実用サイズ (100cm<sup>2</sup>以上) の変換効率 24.7% を達成した。

パナソニックは 21 年 2 月、太陽電池の生産撤退を発表した。HIT 太陽電池は超高効率だが、単結晶 Si の両面に 2 種類のアモルファス Si 膜を形成し、製造工程が複雑で製造コストも高くなる欠点を持っていたためだ。

### 2) サンパワーのバックコンタクト型太陽電池の工場売却

超高効率太陽電池のバックコンタクト型太陽電池を考案して SunPower 社を起業した Richard Swanson 氏に、SunPower 社本社において 2009 年 12 月 4 日にインタビューを行った。

Swanson 氏「私は Stanford 大学で工学博士号を取得しました。スタンフォード大学の教員になり、バックコンタクト型太陽電池を研究して、大面積で 23% の変換効率を得ることができました。そして、サンパワー社を設立しました。1991 年、私はスタンフォード大学の教授を辞めサンパワー社に専従することにしました。これは難しい決断だった。ベンチャーキャピタルからの要請もあった。しかし、これは高効率の太陽電池を商業規模にするための良いアイデアだ。それで専念することにしたのです」。

バックコンタクト型太陽電池は、電極を裏面に集約し受光面の電極を無くすることができるため、

変換効率を高められる。市販品で、セル効率 24.2%、モジュール効率 22.1%の高効率を出した。しかし裏面に n+ と p+ の拡散層を分離して形成するため、製造工程が長く製造コストが高い欠点がある。

前トランプ政権は 2018 年 1 月に、国内製造業を保護するため結晶 Si 太陽電池の輸入製品に対して 4 年間関税を課すことを決定し実施した。関税の発表に伴い、サンパワーは、独ソーラーワールドの子会社ソーラーワールド・アメリカズを買収し、米国で唯一の単結晶 Si 太陽電池の製造会社となる計画だった (Movellan 2021)。

しかし、生産までに至らず、サンパワーはこの工場を売却してしまった。バックコンタクト型太陽電池の製造コストが高いために、計画が頓挫したのだ。サンパワーはエネルギーサービス会社へ、パネル製造はマキシオン・ソーラー社に 2020 年分離された (Movellan 2019)。

## 8. 日本発ペロブスカイト太陽電池への期待 (中田2021b)

ペロブスカイト太陽電池の研究は、桐蔭横浜大学の宮坂力教授が、2005 年から取り組まれた (宮坂 2019)。しかし、湿式の色素増感太陽電池であり、ペロブスカイトが一部溶解して寿命が短くて、変換効率も 2~3% と低い状態であった、2009 年に論文が出されたが、反響は乏しかった。

そんな中、2 つのグループが研究していた (OpulsE 編集部 2016)。その一つ、韓国のパク・ナムギョ氏が、宮坂先生たちの実験を追試して、安定性を改善して、変換効率を 2 倍以上に高めた。

ヘンリー・スネイスは、色素増感太陽電池の固体化を研究し、オックスフォード大学に戻ると宮坂研と共同研究し、2012 年に変換効率 10.9% を達成した (OpulsE 編集部 2016)。これで世界の研究に火が付いた。

その後、急速に変換効率が向上した。NREL 最新の最高変換効率のデータによると、ペロブスカイト太陽電池は 25.7% に達し、単結晶 Si 太陽電池の 26.1% に近づいている (NREL 2022b)。薄膜太陽電池では、アモルファスの 14.0%、CIGS の 23.4% を抜きさっている。製造方法は、真空装置を必要としない塗布法を適用できるため、製造コストを低下できる。また低温で処理できるため、フレキシブル基板上に形成することも可能で、新しい市場展開も期待できる。低温で処理できるため、脱炭素効果も期待できる (中田 2021b)。

## 9. おわりに

本報告は、脱炭素に向けた太陽電池のイノベーション・プロセスの分析と展望を行った

脱炭素に、日本は光発電で大きな貢献をしてきた。日本の太陽電池の世界生産シェアは、2018 年まで約 50% を占めていた。その後 FIT の導入で市場は急拡大したが、中国がシェアを急拡大し、日本は衰退した。

技術の視点からは、太陽電池は単結晶から誕生し事業化された。しかし、多結晶 Si 太陽電池は、安価であることから、2007 年には約半分のシェアを占めるようになった。

成熟技術は、通常衰退していく。しかし、光発電では、単結晶 Si 太陽電池は復権できた。なぜ復権できたのか？ 従来の多結晶 Si 太陽電池へ少しの工程を追加することより高効率化できるため、単結晶 Si と PERC 構造が加速的に採用され、単結晶 Si 太陽電池が復権できた。日本は PERC 構造に乗り遅れた。

また日本は太陽電池で復活する可能性はあるのか？ 日本発のペロブスカイト太陽電池は、変換効率 25.7% と、単結晶 Si 太陽電池に近づき、今までの薄膜太陽電池を凌駕する変換効率である。また、低温で処理できることから、脱炭素にペロブスカイト太陽電池は期待できる。

## 参考文献

- 小笠原啓、大西孝弘 (2008) 「太陽電池の痛恨 シャープが世界首位陥落」 日経ビジネス 2008 年 2 月 18 日
- OpulsE 編集部 (2016) 「ペロブスカイトの成功は人のつながりがなければ成し得なかった」 OpulsE 2016 年 11 月
- 桜庭 薫 (1991) 「太陽、多結晶型シリコン電池」 日経産業新聞 1991 年 11 月 7 日
- 島本 実 (2014) 「計画の創発 サンシャイン計画と太陽光発電」 有斐閣 2014 年
- 田口幹朗 (2017) 「シリコン太陽電池—歴史;高性能化技術と展望」 日本エネルギー学会「えねるみくす」 Vol.96, No.2, 2017
- 中田行彦 (2012) 「なぜ中国は太陽電池で世界 1 位になれたのか? 太陽電池, 液晶, 半導体の比較」 経営情報学会 2012 年 5 月 12 日
- 中田行彦 (2013) 「多層トリプルヘリックスモデルの提案—シリコンバレーにおけるスタンフォード大学と太陽電池ベンチャーの事例研究から—」 日本ベンチャー学会 VENTURE REVIEW No.21 March 2013, p75-80.
- 中田行彦 (2021a) 「脱炭素、過去の教訓に学べ 電機業界生き残りの条件⑥」 日本経済新聞 2021 年 3 月 3 日
- 中田行彦 (2021b) 「脱炭素の挑む大学発太陽電池ベンチャーの挑戦: 京都大学若宮淳志教授と (株) エネコートテクノロジーが次世代太陽電池を目指す」 日本ベンチャー学会 2021 年 12 月 3, 4 日
- Nakata, Yukihiro (2014) "Trajectory of Renewable Energy Policies Depends on Price Gap" PICMET14 Kanazawa, July, 2014
- NREL (2022a) "Spring 2022 Solar Industry Update <https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/82854.pdf> (2022 年 9 月 7 日参照)
- NREL (2022b) "Best Research-Cell Efficiencies" <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html> (2022 年 9 月 7 日参照)
- 宮坂力 (2019)、「ペロブスカイト太陽電池の発見の背景と学際研究の推進」 応用物理 88 巻 7 号, pp. 432-436
- Movellan, Junko (2021) 「2020 年の世界太陽電池市場、シェアトップ 5 社は？」 日経 BP 社「メガソーラービジネス」 2021 年 5 月 24 日 (2022 年 9 月 4 日参照) <https://project.nikkeibp.co.jp/ms/atcl/19/feature/00003/052100062/?ST=msb&P=1>
- Movellan, Junko (2019) 「米サンパワーが「太陽電池メーカー」ではなくなる!？」 日経 BP 社「メガソーラービジネス」 2019 年 11 月 13 日 (2022 年 9 月 4 日参照) <https://project.nikkeibp.co.jp/ms/atcl/19/feature/00003/111200011/?ST=msb>
- 渡邊百樹 (2008) 「太陽光発電システム開発物語」 シャープ技報 第 98 号 2008 年 11 月