

## 日本が提案する沙漠における太陽光発電プロジェクト

下山 淳一

## 1. はじめに

太陽光発電はクリーンエネルギーとして注目され、太陽電池の生産量はこの10年間に急上昇、市場は巨大化してきた。太陽電池の主役は数kW級の建物設置型のものであり、今後もこれの普及による発電量の増加が見込まれている。一方、世界各地の都市部やその近郊でメガソーラーと呼ばれる文字どおり発電能力がMW級以上の大規模太陽光発電設備が近年、続々と建設されている。大規模とはいえ最大出力は数十MW台で、実際の発電率を考慮するとかなり小規模の水力発電所相当である。

ところで、有名な沙漠としてアフリカのサハラや中国のゴビなどが知られている。これらサハラ、ゴビそれぞれが沙漠を意味する現地語である。沙漠とは少雨のため植物がほとんど生育しない地域を指す。別の言い方をすれば水分の供給量が少なく、水分の蒸発量がそれをはるかに上回る地域である。沙漠地域の特徴は単なる少雨だけでなく、上昇気流による雲の生成がなく、乾燥した下降気流に覆われていることで、結果として晴天率が高い。よって沙漠に置いた太陽電池は一年中ほぼ毎日発電し、時間ごとの発電量もかなり高い精度で予測できる。さらに、低緯度帯の沙漠では日射量も大きい。沙漠の地形はさまざまであるが、ほとんど開拓されていない広大な土地が大きな割合を占める。平坦な地形であれば、樹木などが無いのでそれほど整地しなくても太陽光パネルを置くことができ、岩盤が浅いところであればその固定も容易である。このように沙漠は生物にとっては厳しい環境であるが、大規模太陽光発電に

とって気候や土地の点でまさに適地でありユートピアといえる。

以上の背景のもと、沙漠における太陽光発電が本格的に検討されはじめている。アラブの複数の産油国ではポスト石油時代を睨み、太陽光発電などによる電力大国になることを目指した調査がはじまっている。この規模の発電になるとメガソーラー以上のレベルになる。

本稿では以下に二つの少し変わったタイプの沙漠における太陽光発電計画を述べる。一つは南米チリ、アタカマ沙漠を舞台とするSolar TAO計画<sup>1)</sup>で、もう一つは、アフリカ北部、アルジェリアのサハラ砂漠北辺におけるSahara Solar Breeder(SSB)計画<sup>2)</sup>である。これらは、現地調査や基盤技術開発がおこなわれはじめた段階であるが、太陽光発電が計画のメインではないところ、つまり単なる発電プロジェクトではない点で共通しており、それぞれ地球の未来に役立つ効果を狙っている。

## 2. Solar TAO 計画

南米チリの北部のアタカマ沙漠は、世界の沙漠のなかでも最も少雨であり、観測所によっては何十年間も降水の記録がないところもある。太平洋岸に平行に連なる山地とアンデス山脈にはさまれたところに位置するアタカマ沙漠は南北1000 km以上、東西160 km程度の南北に長い形をした盆地である。標高は低いところでも2000 m以上という高地であるこの沙漠には海底だった時代があり、最近ではアタカマ塩湖におけるリチウムの採掘が注目されている。このほか、北部にあるチュキカマタは古くから有名な銅山で今なお世界2位の銅の産出量を誇っている。図1は東側にそびえるアンデス山脈の中腹から西を向いて撮影したアタカマ沙漠の一部の写真である。写真の左右方向、すなわち南北方向に沙漠が広がっており、約200 km向こうに見える山地まで目立った起伏もないことがよくわかる。中央から左側に広がる白い部分がアタカマ塩湖である。

夜のアタカマ沙漠一帯では、オアシス周辺の小さな街や、鉱山の照明のほかは地上に輝くものがほとんどなく、その代わりほぼ毎日快晴の満天の星空が驚くほど明るい。この



Photovoltaic Projects in Deserts Proposed by Japanese Groups

Jun-ichi SHIMOYAMA

1988年 東京大学大学院工学系研究科修士課程修了

1998年 博士(工学)(東京大学)

現在 東京大学大学院工学系研究科応用化学専攻 総合研究機構 准教授

連絡先; 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

E-mail shimo@sogo.t.u-tokyo.ac.jp

2010年11月4日受理



図1 アンデス山脈中腹(標高約4000 m)より望むアタカマ沙漠

地域は天体観測の世界でも屈指の適地としても知られており、とくにアンデス山脈のチャナントール山(標高5640 m)およびその周囲には多くの天体観測施設がある。標高が高い、つまり空気が薄く、さらに水蒸気も少ないこと、そして周囲が暗いことが天体観測に好適な場所の条件であり、言い換えると沙漠地帯の高所で人里離れた場所、すなわちひどい僻地である。ここではALMAという66台もの電波望遠鏡を標高約5000 mの高原に置く巨大プロジェクトが進行中であり、チャナントール山の山頂ではTAO赤外線望遠鏡が観測をはじめている。TAO(University of Tokyo Atakama Observatory)は、世界一高い場所に作られた天体観測施設で、直径1 mのレンズを持つmini-TAOと呼ばれる望遠鏡が2010年に稼働をはじめた。TAOは東京大学天文センターの吉井譲氏らによって推進されているもので、後述する大型望遠鏡の新設プランにおいてSolar TAO計画<sup>1)</sup>が創案された。当然ではあるが、TAOやALMAの望遠鏡の近くに街はない。最も近い街サンペドロは約50 km離れたところの標高約2400 mのオアシスにあり、図1では右端の方向に在る。サンペドロ自体、女性最古のミイラの発掘によって最近、考古学的にも注目されており、多くの外来者を受け入れており観光地化していることを付しておこう。

さて、赤外線望遠鏡や電波望遠鏡は光っている星を見ているわけではない。目に見えない(=温度が低い)暗い星や星間物質からの電磁波の放射を観測し、宇宙の起源を探っているのである。さらに赤外線望遠鏡による観測は、上空のCO<sub>2</sub>濃度の情報を与える。アタカマは人間や森林の活動によらない定量的なCO<sub>2</sub>濃度の定点計測値としても適している。また、このような定点観測点は南半球には少なく、地球規模のCO<sub>2</sub>濃度変動を知る上で貴重なデータが得られる施設ともいえる。

ところで、先鋭的な天体観測には電力が必要になる。大きな望遠鏡を動かすこと、得られた情報を低所にある観測所に送ること、さらにALMAでは電波を受信する超伝導ミキサを冷却する冷凍機などにも電気の力を借りなければならない。しかし、前述のように僻地であるので近くに既設の送電線はない。アタカマ一帯は電力需要が小さくそれも局所的なため送電網そのものがなく、日本の離島と同様に

### Solar TAO – CONCEPT -

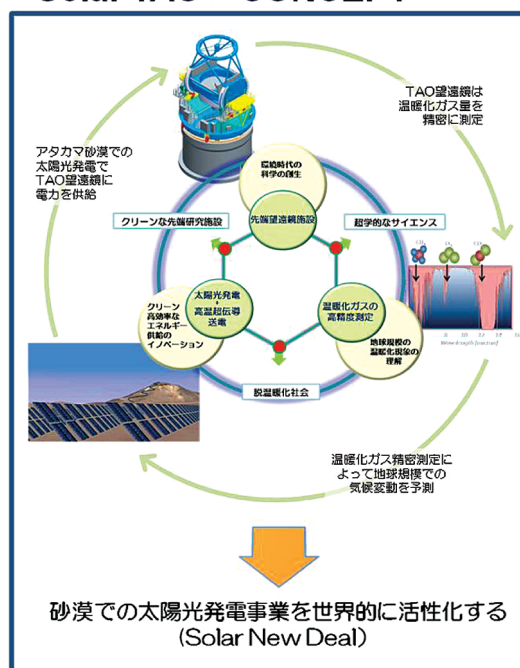


図2 Solar-TAO計画のコンセプト

ディーゼル発電がそれぞれの消費地でおこなわれているだけである。

mini TAO望遠鏡は小型なので電力は山頂に置いた小型の発電機で十分賄える。しかし、次のフェーズでは口径6.5 mの大型の赤外線望遠鏡を導入する計画<sup>3)</sup>があり、この運転には1 MWの電力が必要になる。1 MWは日本では大した電力ではないが、サンペドロ市で必要とされる電力が3 MW程度であるため、その地域に必要な電力がいさなり3割も増えることになってしまう。Solar TAO計画ではその名のとおり、この大型望遠鏡を備えた天文台用の電力を太陽電池によって作りだすこと、さらに電力事情の不安定なサンペドロ市への電力供給を目指している。

Solar TAO計画のコンセプトを図2に示した。この計画だけを考えれば晴天率が高いこともあり太陽電池自体の最大発電能力は5 MWもあれば十分で、図1に表したようなアタカマの広大な平原のごく片隅に設置するだけで済む。太陽電池は直流電流を生じるので、直列につないで電圧を高めて1 kmほど送電し、蓄電池にいったん貯め、インバー

タを介してサンパドロ市の交流電力網に繋いで、一部をチャナントール山頂に送る、といった構想である。5 MWの太陽電池は僻地での設置費用などを考えれば10億円規模の大変な買い物となる。一つの望遠鏡を1 MWの電力で動かすのが主目的であり、ディーゼル発電機であれば0.5億円以下で設置できるところを敢えて太陽電池を置くことは経済的に全く見合わない。さらに、この計画には高温超伝導ケーブルを直流送電に使う、という新しい試みが含まれている。超伝導ケーブルを敢えて用いる狙いは何か、以下に、高温超伝導ケーブルの現状を記したい。

高温超伝導体とは一般に銅酸化物超伝導体を指し、百種以上ある化合物のなかで液体窒素の沸点(77K)を超える臨界温度  $T_c$  を持つ希土類 123 系超伝導体(代表物質:  $YBa_2Cu_3O_{7-\delta}$ ) とビスマス系超伝導体(同:  $(Bi, Pb)_2Sr_2Ca_2Cu_3O_{10+\delta}$ ) の材料化が進められている。これらの物質群はそれぞれ 1987 年、1988 年に発見されたもので、すでに 20 年以上の年月が経過しているが、この数年、ようやく実用的なサイズおよび電流容量の線材が開発、量産されるようになってきた。超伝導線材の特長は、高電流密度、低損失で通電できることであり、これらの線材の77 Kにおける線材断面積あたりの臨界電流密度( $J_c$ )は約2万A/cm<sup>2</sup>であり、銅ケーブルの電流密度の200倍に相当する。超伝導体は $J_c$ より低い電流密度の直流電流に対して抵抗ゼロである一方、交流電流に対しては線材の形状、コイルの構成や、電流密度と $J_c$ の比に依存する交流損失を生じるが、銅ケーブルの損失よりもかなり低いレベルに抑えられる。高温超伝導線材を用いた交流ケーブルの電力系統における試験は5年前の米国オルバニーを皮切りに世界各所ではじまっている。これらのケーブルは断熱管のなかにフォーマと呼ばれる円柱状の型に数十本の超伝導線材をらせん状に巻きつけた導体と冷媒である液体窒素が循環する構成となっている<sup>4)</sup>。図3には参考のため3相交流超伝導ケーブルを示した。断熱管内に3本のケーブルが入っているが、直流ケーブルでは1本の構成になる。超伝導ケーブルを用いるエネルギー的なメリットはもちろん低損失であり、直流送電において超伝導線材自体は全く発熱しない。しかし、外部からの侵入熱による冷媒温度の上昇を抑えるための冷却設備が消費するエネルギーやその設備維持のコストよりも低損失のメリットが大きくなければ、超伝導ケーブルは選ばれない。ちなみに、東京都心の電力幹線については今後の電力需要増に対して新たに送電ケーブル用の洞道を作る費用が莫大でありまた物理的にも困難であることから、超伝導ケーブルへの置き換えが検討されている。その実証試験が現在NEDOプロジェクトによって進められており、2011年11月ころより横浜市の東京電力旭変電所にて実系統に接続される予定になっている<sup>5)</sup>。一方、直流超伝導ケーブルについては中部大学、



図3 3相交流用ビスマス系高温超伝導ケーブル(提供:住友電気工業株)

山口作太郎氏らのグループによって200 m級ケーブルの試験がおこなわれているところで、順調な動作が確認されている。このように高温超伝導ケーブルは機能面では実用可能なレベルに達している。

超伝導送電を Solar TAO 計画や後に紹介する Sahara Solar Breeder計画で敢えて用いる狙いは、1989年に三洋電機の桑野幸徳氏によって提案された GENESIS(Global Energy Network Equipped with Solar cells and International Superconductor grids) 計画<sup>6)</sup>の実現にある。これは世界各地における太陽光発電による電力を地球規模の超伝導ケーブル網で運び利用する、という壮大な計画で、昼夜、季節の電力需要の変化を地球全体として平準化できる特徴をもつ。発電方法は太陽光だけでなく、太陽熱や風力など他の自然エネルギーによる方法を加えても構わないが、世界を繋ぐ長距離ケーブルには損失がなく電気を貯めることもできる超伝導が断然適しており、この計画が成就すれば世界は巨大な電池で覆われると考えて良い。Solar TAO 計画や Sahara Solar Breeder 計画は、地球規模に超伝導送電をはじめの第一歩となることを目指しており、その背景には高温超伝導材料がその期待に応えられるような性能に至ったことがある。

Solar TAO 計画については、2011年度まで基盤技術の検討を進めているところであり、現地の状態や、二酸化炭素計測技術、太陽電池や高温超伝導ケーブルの仕様および総合的なシステムの最適化を目指している。本計画では6.5 m級の望遠鏡が主役であり、この設置予定がはっきりした時点で、電力供給の方法を具体的に検討することになる。太陽電池は、Si系を想定しており、結晶、多結晶、アモルファス薄膜のなかから適切なものが選択される予定である。何しろ面積が広いので変換効率よりもコストや沙漠地帯特有の毎日の大きな寒暖差、そしてアタカマ沙漠では塩害対策も考慮に入れなければならない。

### 3. Sahara Solar Breeder(SSB)計画

アフリカ北部に広がるサハラ沙漠は世界最大の沙漠であ



図4 Sahara Solar Breeder 計画の概念図。右下は沙漠における潜在的太陽光発電エネルギーの大きさを表したものである

り、大規模な太陽熱発電、太陽光発電の適地としてとくに元々植民地として支配していた欧州がその活用に注目している。1年前ごろに発表されたDESERTECと呼ばれるドイツの企業を中心とした巨大(4000億ユーロ)プロジェクトでは、サハラ沙漠で集光型太陽熱発電(CSP)をおこない、電力を太い銅ケーブルを用いた高压直流送電によって欧州に運ぶことによって、2050年までに欧州の電力需要の15%を賄うことを目指している。

さて、物質・材料研究機構の鯉沼秀臣氏らによって推進されているSSB計画<sup>2)</sup>はこれとは少し異なった視点からの戦略を持つ。結晶Si, 多結晶Siの太陽電池に用いられるSiは、もともと半導体素子用の単結晶Si (SEG-Si) 製造におけるスクラップであり、太陽電池用に生産量を調整しているわけではないため、太陽電池生産量の急速な伸びに供給が追従できなくなっていた。SEG-Siは純度10~11N(nine)と高品質なものであるが、太陽電池用のSiの場合、純度6~7Nで十分な性能が得られる。そこで、太陽電池に適した純度のSi(SOG-Si)の生産がさまざまなプロセスによってはじまっており、量産化、低コスト化が図られているが、工程、コスト面において課題が多く、今後予測される劇的なSi需要の伸びに対応するためにも、画期的な新製造プロセスの開発が期待されている。このような背景のもとで立案されたSSB計画は、沙漠の砂、つまりSiO<sub>2</sub>からのSi生産を起点としたものである。SSB計画のコンセプトを図4に示した。その右下には沙漠における太陽光発電の潜在的エネルギーを表した。これは1998年以来、国際エネルギー機関(IEA)における太陽光発電国際共同研究の分科会Task 8でリーダーの黒川浩介氏(東京農工大(当時))を中心に検討されてきたもので、試算例に挙げられたゴビ砂漠より6倍以

上も広いサハラ沙漠ではその一部を活用するだけで莫大な太陽光発電エネルギーが得られることがよくわかる。ちなみに、前節で紹介したアタカマ沙漠はサハラ沙漠の50分の1程度の面積しかなく潜在的なエネルギーの点では見劣りするが、先述したように日照率の高さと平坦な土地、そして砂嵐がないことが魅力的なのである。

SSB計画ではまず、最初にある程度大規模な太陽光発電システムをサハラ砂漠北部に導入し、その電力を高温超伝導送電によって太陽電池増殖プラントに送りSiO<sub>2</sub>から太陽電池用Siを製造する。次にそのSiを用いて太陽電池を製造、設置することによって発電規模を拡大する。これによってSiの生産量が増し、太陽電池の製造量もアップするとともに、電力網への電力供給ができるようになる。要するにSiと太陽電池の生産を組み合わせるとネズミ算的にSi生産量と発電量を増大させるわけである。試算によれば、最初に2MWクラスの太陽電池を設置し、増殖サイクルを繰り返すことによって20年後には500倍の1GW級発電所に成長することが可能で、この新しい構想は世界的に注目されている。太陽電池についてはその製造工程におけるエネルギー消費を問題視する意見もあるが、自然エネルギーでSiを得るこの計画が実現すればそのような懸念も封印できる。この計画は最近、アルジェリアのオラン科学技術大学、Saida大学と日本側(物質・材料研究機構、東京大学、弘前大学、東京工業大学、中部大学、国立情報学研究所)をメンバーとして、JST/JICA 連携の地球規模課題対応国際共同研究事業にSahara Solar Energy Research Center(SSERC)プロジェクトとして採択され、オラン科学技術大学を基点とした活動をはじめようとしているところである。

SSB計画において、根幹となる技術はSiの製造であり、

このプロセスが確立すれば一気に増殖プロセスが現実のものとなる。この計画では二つの方法が提案されており、一つは従来のシーメンス法における生産速度や収率を向上させるために  $\text{SiHCl}_3$  を水素ラジカルによって  $\text{SiCl}_4$  の生成なく全て  $\text{Si}$  に転換する新しい CVD プロセスである。もう一つは先述の沙漠の砂と炭 (C) から  $\text{Si}$  を製造するもので、具体的にはアーク放電によって  $\text{SiO}_2$  粒子と C 粒子を反応させてまず 3N 程度の  $\text{Si}$  を生産し、これを Al 共存下での低温凝固精製によって SOG-Si レベルまで純度を高める方法が検討されている。前者は SEG-Si の生産も可能なプロセスで約 5 倍の生産性向上が期待されており、後者は SOG-Si 量産の大ブレークスルーになる可能性を秘めている。なお、図 4 の下部には沙漠緑化の構想も描かれているが、炭はここで育てる木材から調達することができる。

2009 年の多結晶 SOG-Si の生産量は 8 万 t を超えたことが報告されており、これは太陽電池に換算すると 8 GW に相当する。そして 2010 年にはおよそ 12 万 t に達すると予測されているが、これらは主に電力料金が安い中国など新興国で莫大な電力を消費して製造される  $\text{Si}$  であり、大量の石炭などの化石燃料消費と  $\text{CO}_2$  発生をとまなう。遠未来に世界中が積極的に太陽光発電を導入する際には、これまでの SEG-Si, SOG-Si の累計生産量の 100 倍以上の SOG-Si が必要となろう。これを、いかに資源、環境に負担をかけずに実現していくか、その具体的な方法を提案しているのが SSB 計画であり、この方式こそ世界の沙漠で展開されるべきと考える。そのためにも早期の計画実施による増殖サイクルの実証が期待される。

#### 4. おわりに

本稿では、沙漠で展開する太陽光発電プロジェクトについて、日本における Solar TAO 計画と Sahara Solar Breeder 計画を紹介した。前者は、赤外線望遠鏡の大型化にともな

う電力調達という動機に、太陽光発電の世界の最適地アタカマという立地がマッチして生まれた構想であり、定点  $\text{CO}_2$  観測という地球環境監視の役割も併せ持つ。後者は太陽電池用の SOG-Si の生産を太陽光発電でおこない、 $\text{Si}$  生産や発電の規模を年々指数関数的に大きくするという壮大な構想に基づいたものである。また、両計画とも発電した電力を直流超伝導ケーブルによって送ることによって、GENESIS 計画をアタカマ、北アフリカで芽生えさせることを狙っている。ただし、両計画とも第一歩を踏み出そうとしているところで、本格的な実施には資金の獲得が必要である。これらの計画は“遠未来の夢の計画”と扱われやすいが、地球規模のエネルギー・環境問題はもはや待ったなしの状態にある。実現可能な技術に支えられた計画であることの実証を経て、これらが一日でも早く本格的な実行段階に進められることを期待している。たとえば、現在、 $\text{Si}$  以外の多種の太陽電池材料が研究・開発されているが、資源的に数 100 GW 級の発電が可能なのは  $\text{Si}$  のみである。よって今こそ SOG-Si 製造プロセス開発に研究開発費が投じられるべきであり、これが 10 年後であれば手遅れの愚策となろう。また、アタカマやサハラに限らず、世界中の沙漠で太陽エネルギーを利用した数多くの大規模発電計画が検討されており、これらの計画はそれぞれ独立な戦略のもと進められている。しかし、共通する技術や課題が多いことから、沙漠のエネルギー利用に関わる世界的な枠組みを互いの利益の意識を超えて構築することが、これらの早期の実現に不可欠と考える。

#### 引用文献

- 1) Solar TAO 計画, <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/SolarTAO/index.html>
- 2) たとえば, 鯉沼秀臣; 化学と工業, **62**, 904-905 (2009)
- 3) <http://www.youtube.com/watch?v=nGnmCICvU>,  
<英語版> [http://www.diginfo.tv/2010/preview/ssbPreview\\_EN.wmv](http://www.diginfo.tv/2010/preview/ssbPreview_EN.wmv)
- 4) TAO 計画, <http://www.ioa.s.u-tokyo.ac.jp/TAO/index.html>
- 5) 住友電工の超電導ケーブル, <http://www.sei.co.jp/super/cable/index.html>
- 6) 高温超電導ケーブル実証試験, <http://www.sei.co.jp/super/cable/touden2.html>
- 7) Kuwano, Y.; Proc. 4th Int. Photovol. Science and Engineering Conf., Sydney (1989)