

# 次世代再生可能エネルギーの動向

日経BPクリーンテック研究所 金子 憲治

## 抄録

福島第一原発事故によって再生可能エネルギーへの期待が急速に高まっている。だが、太陽光や風力発電など現在、実用化されている発電技術には3つの欠点がある。エネルギー密度が小さいため広大な面積を必要とし、自然破壊や景観への影響が無視できないこと。また、天候に左右される間欠性の電源のため送電電力の品質が悪影響を与えること。そして、石油を代替できる液体燃料に転換しにくいことだ。これらの欠点を克服できる可能性を秘めるのが次世代型の再生可能エネルギーだ。砂漠地帯での太陽熱発電、海洋での海洋温度差と洋上風力発電は、大規模に設置しても生態系や景観への影響が相対的に小さい。太陽熱発電は蓄熱できるので、安定電源にもなり得る。また、人工光合成と藻類は、太陽光を直接、炭化水素油に変換するので石油代替を担える可能性が大きく、自動車などの内燃エンジンに使えるとともに、長期の貯蓄性が飛躍的に増す。太陽熱と洋上風力の基本技術はすでに実用段階に達しており、進化形として太陽熱では集光度を高めた「蓄熱型」、洋上風力では水深50m超でも設置できる「浮体式」の実証が始まった。人工光合成と藻類による炭化水素油生産は、ここ数年、急速に注目され始め、世界的に研究開発が活発化している。

## 1.はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災、それに伴って起きた福島第一原子力発電所の事故によって、原子力発電の縮小方向が必至になってきた。そんななか、海外に頼らず温室効果ガスを出さない理想的なエネルギーとして、再生可能エネルギーへの期待が高まっている。

現在、再生可能エネルギーの電力供給に占める比率は、大規模な水力発電や地熱発電を含めても8~9%、太陽光や風力などのいわゆる新エネルギーに限れば1%に過ぎない。この比率を早急に高め、当面の原発代替である火力発電の増加を少しでも抑えることが社会的なコンセンサスになっている。そもそも福島第一原発事故の前から、先進各国は、2009年の先進国首脳会議（サミット）の場で、2050年までに温室効果ガス排出量を80%削減する目標に同意しており、長期的に再生可能エネルギーを大幅に拡大し、基幹エネルギーの1つに育てることが、各国政府のエネルギー政策における共通課題になっている。

とは言え、現在、普及している再生可能エネルギー、すなわち、大規模水力、地熱、バイオマス（生物資源）、風力、太陽光など——を闇雲に拡大していくと、新たな課題や問題が顕在化してくる可能性が高い。

再生可能エネルギーの欠点は、まず原子力や化石燃料に比べると、圧倒的にエネルギー密度が低いこと。太陽光発電で原発1基分の発電量を得るには、東京都の山の手線内側とほぼ同じ面積の敷地に太陽光パネルを敷きつめる必要

がある——などと例えられる。大きな電力を得ようとすると必然的に広大な面積が必要になり、未開地の場合は自然環境・生態系の破壊、居住地であれば景観への影響が問題になりやすい。大規模水力や地熱は、再生可能エネルギーの中では出力密度が高いが、水力や地熱の豊かな土地の多くが貴重な自然や地形に近いことが多く、電力開発の壁になってきた。より多くの面積を必要とする太陽光や風力では、水力や地熱以上に、自然保護、景観維持とのジレンマに陥る可能性がある。

再生可能エネルギーの2つめの欠点は、間欠性、つまり、風まかせ、お天気まかせであることだ。特に、今後“伸びしろ”の大きいとされる風力、太陽光で、これが顕著だ。電力会社の送電網に接続する場合、この出力変動が供給電力の品質に影響を与える。風力と太陽光の比率が高まってきたドイツやスペインの例を見ると、電力系統に流す風力や太陽光発電の電力が10%台までであれば、出力の変動分を吸収して電力品質を安定化できるものの、20%を超えると、電圧や周波数に影響すると言われる。このため、太陽光と風力の大量導入には、ICT（情報通信技術）を使った電力需要の抑制や、蓄電池を併設するなど出力変動を安定化する技術を備えたスマートグリッド（次世代電力網）が必要になってくる。

3つ目の欠点は、再生可能エネルギーは液体燃料に転換しにくいことだ。世界の一次エネルギーに占める石油の比率は依然として3分の1を占めており、そのほとんどが自動車や船舶、航空など運輸部門だ。サトウキビやトウモロ

コシ由来のバイオエタノールをガソリンエンジンに、また、パーム油やナタネ油など植物油をディーゼル燃料に使う試みが始まっているものの、大規模に生産しようとする、食料との競合やプランテーションの造成による森林破壊が問題になる。小型自動車は、電気自動車 (EV) に転換して、太陽光や風力の電気で充電するという選択肢もあるが、長距離トラックや航空、船舶は化石燃料に頼らざるを得ないのが現状だ。

こうした現在の再生可能エネルギーの課題を克服できる次世代再生可能エネルギーの研究・開発が進んでいる。新しい再生可能エネルギーは、安定的で生態系にとって収奪的でないものを志向し、電気に加え、液体燃料への転換も視野に入れる。

太陽光から、直接、液体燃料を生産することを旨とする人工光合成や藻類による炭化水素油の生産。洋上での風力発電と海洋温度差発電、砂漠地帯での太陽熱発電は、相対的に自然環境への影響は少ない。また、太陽熱発電は蓄熱することで安定的な電力供給も可能になる。

以下、人工光合成・藻類による炭化水素油生産、洋上風力、海洋温度差、太陽熱による発電の動向を解説する。

## 2. 人工光合成

植物は、葉緑体により光合成を通じて水と二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) から有機物を作る。エネルギーは太陽光、廃棄物は酸素だけというクリーンで持続可能な営みだ。

こうした植物が行っている CO<sub>2</sub> から有機物を作る化学反応を人の手で実現するのが「人工光合成」だ。

現在、実用化されている太陽電池は太陽エネルギーを電気に変換している。これに対し人工光合成は、太陽エネルギーを使って、まず水素、将来的にはメタノールや炭化水素など液体燃料を生産することを目指す。そのため欧米では人工光合成のことを「太陽燃料 (ソーラーフュエル)」とも呼んでいる。太陽エネルギーによって直接、液体の燃料を効率よく作れば、既存のガソリンや軽油の流通・供給インフラを使える利点がある。

太陽電池で発電した電気を使い、水を電気分解すれば水素は作れるし、その水素を使えば、CO<sub>2</sub> から工業的に確立した手法でメタノールを製造できる。だが、こうした高温を反応場とした化学プラントは、設備が大きいほど効率が高いため、低コストを追求すれば大規模な設備になる。植物が葉の中で営む低温で微細な反応を再現できれば、小さな設備で液体燃料が効率的に作れる。大規模な発電所や石油化学設備が不要になり、エネルギーの地産地消が実現する。産業・社会構造を劇的に変革する可能性を秘めている。

三菱ケミカルホールディングスは2009年に地球快適化インスティテュート (東京都港区) を設立した。20~30年先の人類のニーズを予測し、研究委託するのが役割だ。

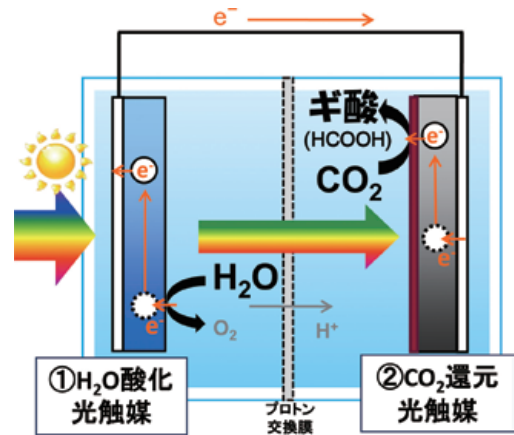
キーワードは、「太陽」「水」「生命」。最初に取り組む分野として、環境・資源・エネルギーなどを挙げた。

そして、目指すべき究極の技術として、CO<sub>2</sub> を原料にした炭素資源転換、つまり人工光合成を掲げた。

人工光合成は、太陽電池の後の再生可能エネルギーの本命として注目が集まり、国内外で研究が活発化している。だが、化学的に極めて安定した物質である水と CO<sub>2</sub> を太陽光だけで分解して有機物に変換するのは容易でなく、一連の反応を太陽光で実現した例はなかった。

こんななか、トヨタ自動車グループの豊田中央研究所は世界で初めて、水と CO<sub>2</sub> と太陽エネルギーだけで、有機物を合成することに成功した、と昨年9月に発表した。その仕組みを理解するには、植物による実際の光合成の仕組み知っておく必要がある。植物の光合成は、太陽光を使う「明反応」と光を使わない「暗反応」に分かれる。明反応では、水から電子を奪って分解 (酸化) し、エネルギーを蓄える物質 (ATP) と、後の還元反応を促進する物質 (NADPH) を作る。暗反応では、ATP と NADPH を使って、CO<sub>2</sub> を還元して炭水化物を作る。

豊田中研が開発した人工光合成システムでは、明反応に当たる部分に「光触媒」、暗反応部分には半導体と「金属錯



豊田中央研究所が実現した人工光合成システムの仕組み



光を照射して実験中の豊田中研の人工光合成システム

体」からなる触媒を使った。光触媒で励起した電子が銅線を通じて金属錯体に供給され、CO<sub>2</sub>を還元して一酸化炭素(CO)を生成するとともに、光触媒で発生し水素イオンと結びついてギ酸(HCOOH)ができた。

「光触媒反応」とは、酸化チタンに紫外光を当てると電子が励起(活性化)する現象で、日本人の藤嶋昭氏(現東京理科大学学長)などが1969年に発見、ホンダ・フジシマ効果とも呼ばれる。水中で光触媒に光を当てると水が酸化され水素と酸素が発生する。また、「金属錯体」とは、金属原子を中心に炭素や水素原子などが立体的につながっている分子で、金属原子の持つ触媒能力と分子の複雑な微細構造が作用し、化学変化を選択的に進める機能がある。金属錯体は、すでに工業的な化学反応プロセスに一般的に使われている。また、血液に含まれる赤血球は、鉄原子を中心に持つ一種の金属錯体で、その周辺をタンパク質が取り囲んでいる。

豊田中研の人工光合成システムでは、光励起する半導体を金属錯体と積層することで、光合成の暗反応に当たるCO<sub>2</sub>還元側でも太陽光を反応に使うのが特徴だ。それでも、太陽光を有機物に変換する効率は、まだ0.04%に過ぎない。一般的な植物の光合成では、好条件下で3%、通常でも1~0.1%の効率になる。まだまだ植物には敵わないものの、人工的に光合成を再現できた意義は大きい。

豊田中研は、既に実用化されていた光触媒と金属錯体などを組み合わせ、最適化することで実現した。企業の研究テーマらしい、システム化技術ともいえる。今後、光触媒や金属錯体などで、新たな革新があれば、それを取り込みつつ、効率を高めることも可能だ。

実際、人工光合成を巡る研究は、光触媒と金属錯体を両輪に、世界的に研究熱が高まっている。

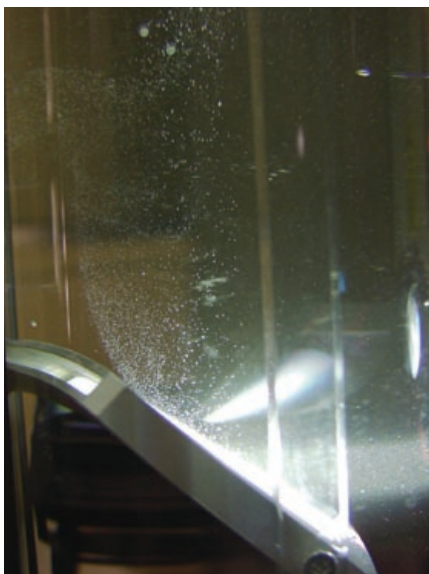
光触媒の課題は、紫外光しか使えないこと。そのため通

常の太陽光を使うと効率が極端に低くなる。だが、ここに来て東京大学の堂免一成教授、東京理科大学の工藤昭彦教授、そして産業技術総合研究機構の佐山和弘氏など、日本の複数の研究者が可視光でも水を酸化できる材料を見出した。太陽光だけで、水から水素を生み出せるという意味では、すでに明反応を実現したことになり、金属錯体よりもリードしている。水素があれば、それ自体、燃料になるし、工業的にメタノールなどが生成できるので、大きな意義がある。とはいえ、CO<sub>2</sub>を原料に直接、有機物(液体燃料)を製造するという人工光合成ならではの目標は実現していない。光触媒は選択的な反応が苦手なため、暗反応が担う有機物の合成は、金属錯体に期待することになりそうだ。実際、金属錯体の陣営では、ルテニウムやルテニウム原子を使った金属錯体などを使い、CO<sub>2</sub>をCOに還元することに成功している。だが、光触媒とは逆に水から電子を取り出す明反応に相当する触媒反応は実現してない。このため豊田中研はこの反応に光触媒を使った。

金属錯体の研究者は、明反応の実現も目指している。光触媒に比べ、金属錯体の方が可視光を利用でき、資源量の豊富な金属を使える可能性が高い。将来の実用化を念頭に置けば、希少金属を大量に使う光触媒より格段に低価格化できる利点もある。ルテニウム原子を使った金属錯体が2つ繋がった「複核錯体」が、水の酸化に適用できることが知られているが、反応に方向性を与える酸化剤を加える必要があり、光だけでは実現できなかった。分子科学研究所の正岡重行准教授は、ルテニウム原子の1つの金属錯体(単核錯体)でも水を酸化できることを見出し、その反応プロセスも世界で初めて解明した。プロセスがわかったことでルテニウム以外の金属の採用にもめどを付けた。ただ、やはり光による反応は未達成だ。

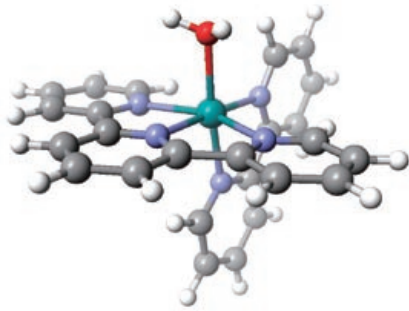
そんななか、首都大学東京・戦略研究センターの井上晴夫教授は、独自のルテニウム錯体を使い、可視光で水を酸化することに成功した。水以外に有機物を加えておき、それが酸化生成物(エポキシ化合物)になる反応を並行させることで光による反応を実現した。エポキシ化合物は工業原料として利用できるという。今後、CO<sub>2</sub>還元できるルテニウム錯体などと連結させ、世界初となる、金属錯体だけによる人工光合成の完結を目指す。とはいえ、やはり有機物を加えて反応を促進させていることを考えれば、太陽光だけによる本来の人工光合成を金属錯体だけで実現するという目標は道半ばだ。

金属錯体による反応は、光触媒に比べ、実際の光合成に近い。金属錯体の研究者は、実際の光合成の仕組みを解明し、人工光合成の研究に生かそうと考えている。植物の葉緑体では、金属分子の立体構造の周りをタンパク質が取り巻いている。これまで、水を酸化して電子を取り出す部分にはマンガン原子4個とカルシウム原子1個があることまで分かっていた。



水中の光触媒に紫外線を照射し、水素と酸素が発生している様子





ルテニウム金属錯体の分子構造の一例

大阪市立大学の神谷信夫教授らは、世界で初めて、この部分の立体構造を突き止めた。「ひしゃげた椅子」のような形の角にマンガン原子4つと酸素原子5つと、カルシウム原子1つが位置している。ひしゃげてしまうのは、カルシウム原子が1つだけ入っているからだ。「ひしゃげ」が水の酸化反応に方向性を与えているのではないかと、神谷教授は意気込む。

経済産業省は2012年度に太陽光で化学原料を製造する「革新的触媒」の研究開発に着手。16億5000万円の予算を計上した。民間ベースでも今年1月、首都大学東京の井上教授を中心に国内の研究者が参加し、人工光合成フォーラムを設立した。2020年頃にメタノールの試験生産、2030年ごろまでに商業生産するというロードマップを掲げた。

「人工光合成の基礎研究では複数の日本人研究者が世界をリードしている。ただ、日本を追い、米政府は122億円の研究プロジェクトを立ち上げリーディングサイエンスと位置づけた。日本もより戦略的に強化する必要がある」と井上教授は強調する。世界初の快挙が相次ぐいまのリードを保てるか。これからの日本の正念場だ。

### 3. 藻類

人工光合成の研究で大きな成果が相次いでいるとはいえ、まだ実験室の段階にあることは事実。そこで、もっと手っ取り早く植物そのものの営む光合成を活用し、植物内に蓄えられた有機物を活用しようとの動きも活発だ。

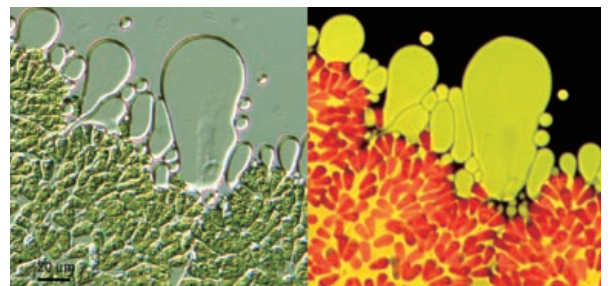
トウモロコシやサトウキビなど糖類を発酵させて生産するエタノールや、パームなどから油を生産する技術は確立されている。こうした食料と競合するバイオマス活用を第1世代とすれば、食料と競合しないバイオマスを第2世代と呼ぶ。繊維質のセルロースやヘミセルロースの糖化・発酵の研究が盛んになっているが、加えて、ここきて世界的に注目されるのが藻類による油生産だ。栽培地の単位面積当たりの収量を比べると、トウモロコシの700倍以上の潜在性があると分かったからだ。

地球最適化インスティテュートは、藻類を利用してCO<sub>2</sub>からアルコールを効率よく生産する研究開発をカリフォルニア大学ロサンゼルス校(UCLA)の研究者に委託した。委託した研究者は遺伝子を組み換えた藻類に新規のアルコールを生産させることに成功した実績がある。同社はまた、国内でも、「藻類産業創生コンソーシアム」にも名を連ねる。同コンソーシアムは、筑波大学の渡邊信教授が主宰し、藻による油生産の研究開発で連携する企業の集まりだ。同教授は「ボトリオコッカス」という藻類を使い、効率的に油を作らせる研究を続け成果を上げている。

ボトリオコッカスは淡水に生息する、緑や赤色の藻類で、30~500 μm(μ=マイクロは百万分の1)のコロニー(集合体)を形成する。特徴は、細胞内だけでなく、細胞外にも多くの油を出すこと。このため油を取り出す際に、その都度、細胞を破壊する必要がないので、効率的に生産できる。ボトリオコッカスの課題は、増殖の速度が遅いこと。細胞分裂して2倍になる時間は、早い藻類だと数時間なのに対し、約1週間もかかる。

渡邊教授らのチームは、まったく別の藻類を使い生産性を高めるめどをつけた。2010年に沖縄のマングローブ林で見出した「オーランチオキトリウム」という数μm程度の藻類が、油を作り出しつつ、ボトリオコッカスに比べて10倍以上の増殖速度を持つことがわかった。この藻類は、「従属栄養藻類」、つまり自らは光合成を行わず、周囲から有機物を吸収して増殖する。もともとはラン藻類だったが、進化の過程で光合成能力を失い、周囲の有機物を炭素源にするようになったとみられ、分類上は藻類になる。渡邊研究室では、工業や農業から出る有機排水の浄化プロセスにオーランチオキトリウムを組み込み、浄水しながら油を生産する構想を発表している。また、光合成藻類と組み合わせるなど、他の植物が生み出した糖類を原料にオーランチオキトリウムが油生産するなどの構想もある。

渡邊研究室では、ボトリオコッカスを使った油生産のコストを試算し、開放系の培養槽では1ℓ当たり155円、閉鎖系では同800円になると公表していた。事業化には、生産効率をもう一けた上げる必要があったが、増殖の速いオーランチオキトリウムをうまく活用することで、商用化に必要な生産性を確保できる可能性も出てきた。



筑波大学・渡邊教授のチームが研究するボトリオコッカス。右画像は油を黄色に染めたもの。油が細胞の外に染み出ている



東大発ベンチャーのユーグレナが大量培養に成功したユーグレナ (和名:ミドリムシ)

微細藻類による油生産の研究は米国を中心に世界的に活発化している。米エネルギー省 (DOE) は、2010年に大学と企業からなる「藻コンソーシアム」に約45億円を拠出する計画を発表。国防総省も藻など軍用ジェット燃料の研究に約3億円を投じる計画だ。民間でも米エクソンモービルが約540億円を藻類研究に投資すると公表している。日本でも、筑波大以外にも産官学で力を入れている。農林水産省は昨年5月、「シュドコリシストス」という藻から油を生産する研究プロジェクトを公表した。トヨタ自動車やデンソーなど9社が参加。2020年の実用化が目標だ。また、東京工業大学と日本プロジェクト産業協議会 (JAPIC) は、「沿岸漁業復活プロジェクト研究会」、「スマートグリーンオーシャン研究会」を発足し、藻の研究を続ける。前者は藻場再生による沿岸漁業の再生を、後者は海洋藻類のエネルギー利用の道を探るといふ。

油生産への期待が高まる藻類だが、早期の事業化を目指し、燃料よりも付加価値の高い機能性食品をまずターゲットにする動きもある。東京大学発のベンチャー、ユーグレナ (東京都文京区) だ。同社が目をつけたのはユーグレナ (ミドリムシ) だ。2005年に世界で初めてユーグレナを屋外で大量培養した。DHA (不飽和脂肪酸) など栄養豊富なため、機能性食品の原料として年間約3億円を販売、すでに利益も出している。ユーグレナの特徴はCO<sub>2</sub>が高濃度に含まれる環境下でも、生育すること。培養槽に実際の火力発電所の排ガスを送り込んで、成長を促進させる実証試験に成功した。「将来的には火力発電所から出るCO<sub>2</sub>を原料として使いつつ、バイオ燃料を製造したい」と、出雲充社長は言う。

期待が膨らむ藻による油生産だが、事業化には課題も多い。一般的に油を多く作る藻は増殖が遅い。繁殖力が弱い。開放系で育てると他の微生物に負けてしまう。生産性の高いオランチオキトリウムを見出したが、従属栄養藻類なので、大量の有機物を与える必要がある。遺伝子組み換え技術が突破口になるが、まだ社会的受容性に乏しい。渡邊教授は、まず突然変異体の探索を目指している。

## 4. 太陽熱発電

太陽光発電、太陽熱温水器、ソーラーシステム、太陽熱発電——4つの違いをお分かりだろうか？

太陽光発電は、半導体の一種である太陽電池で直接、太陽光を電気に変える。太陽熱温水器とソーラーシステムは、どちらも太陽光でお湯を作り給湯などに使う。ただ、前者は直接、水を太陽光で温めるのに対し、後者はまず太陽光で不凍液を温め、それを循環させて水と熱交換してお湯を作る。ここまでの3つは日本でも屋根の上に付いたパネルなど、すでにお馴染みだ。

一方、太陽熱発電は、太陽光で蒸気を作り、蒸気タービン発電機を回して電気を生み出す。

太陽熱温水器が数十度の温水しか生み出さないのに太陽熱発電で水が蒸気にまで高温になるのは、温水器では集熱パネル内の水にそのまま太陽光を当てるのに対し、太陽熱発電では、大きな複数の鏡を使って太陽光を反射させ、狭い箇所に集中的に当てるからだ。

太陽光から電気を得るのに、太陽電池がいいのか、太陽熱発電がいいのかは議論が分かれている。かつては、年間を通じて十分な日射が得られる砂漠地帯などで大規模に発電する場合、太陽電池より太陽熱発電の方が、発電コストは安くなる、といわれたが、ここ数年、太陽光パネルの急激な価格低下で、太陽電池の発電コストが大きく下がっている。北アフリカや中東の大規模再生可能エネルギー開発計画の多くでは、太陽熱発電が想定されていたが、見直しも検討されている。

太陽熱発電には、光を反射して集中させる方式の違いにより、「トラフ型」、「フラネルミラー型」、「タワー型」、「ビームダウン型」、「ディッシュ型」の5タイプがある。

オイル (合成油) の循環した管 (チューブ) に太陽光を当てる線集熱方式としては、「トラフ型」と「フラネルミラー型」がある。前者は曲面を持った鏡を使うのに対し、後者は平面で光を集められるフラネルミラーを集熱チューブの



砂漠地帯に設置したトラフ型の太陽熱発電設備。曲面鏡の上のパイプに集光して中のオイルを加熱する



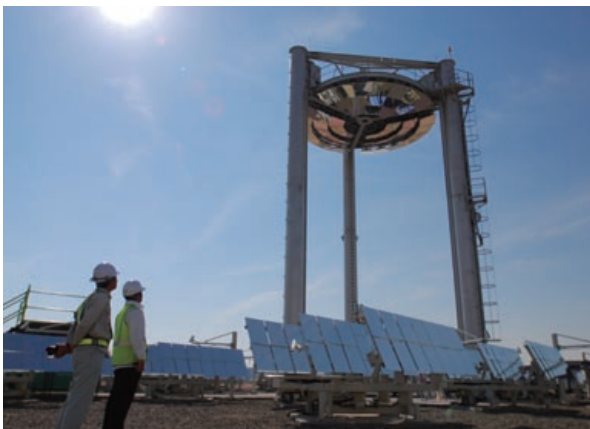


タワートップ型の太陽熱発電設備。ヘリオスタットで日光を反射させ、タワートップに集光する

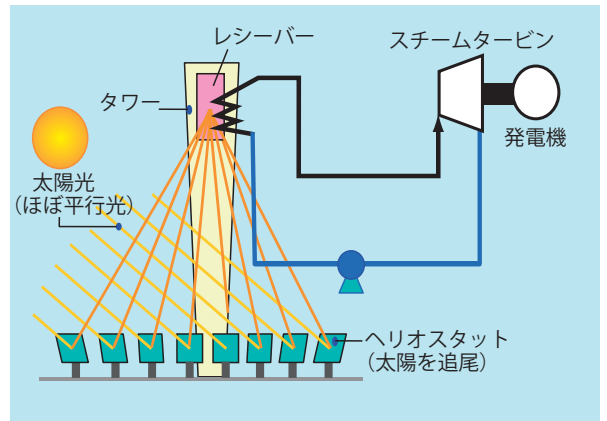
回りに配する。いずれも鏡は太陽の高度に合わせて東から西に自動的に向きを変え、オイルは400℃近い高温になる。このオイルと熱交換して蒸気を作り、タービン発電機を回す。太陽熱発電は石油危機を受け、1980年代に米国で商用化された。これまで10万kW以上の大規模な商用太陽熱発電で最も運用実績の多いのがトラフ型だ。

これに対し、次世代型との位置づけが「タワー型」だ。太陽光を「線」でなく「点」に集めるので、500℃以上の高温が得られ、発電効率も高くなる。「タワートップ型」は、鏡をタワーの北側に並べ、場所によっては100m以上離れたタワー上部北側に光を命中させる。焦点距離が数十cmの線集熱方式に比べ、鏡を載せたヘリオスタット（太陽光集光装置）が太陽を追尾する制御に高い精度が必要だ。現在、米国で出力100万kWを超えるタワートップ型の大規模発電が計画されており、これが成功すれば、今後、主流になる可能性もある。

タワートップ型の進化形が「ビームダウン型」だ。タワー上部にも鏡を設置してタワーの下に太陽光を集める。ヘリオスタットとタワー上部で2度反射して地上で受光するため、太陽を追尾する精度はさらに高度になる。ヘリオスタットのコストは上がるが、光の集中度が上がり600℃以



ビームダウン型の太陽熱発電の実証設備。アラブ首長国連邦での実証事業の様子



タワートップ型太陽熱発電プラントの仕組み

上の高温が得られる。ただ、受光部が地上のため、上部に熱交換器を付けるタワートップ型より建設費が安くなるとの見方もある。

また、パラボラアンテナのような鏡で集光する「ディッシュ型」も点集光の1つ。離島向けなどを想定し、コンパクトで高温蒸気を得られるシステムとして考案された。得られる蒸気量が少ないので、大規模に向く蒸気タービンは使えず、小型のスターリングエンジンとの組み合わせが一般的だ。

点集光で得た高温による発電方法には2つある。直接、水を加熱して蒸気を作り、蒸気タービン発電機を回す方法か、まず熔融塩に蓄熱し、高温の熔融塩で水を蒸気に変えタービンを回す方法だ。400℃以上の蓄熱媒体から蒸気を作れば、雨天や夜間でも発電できる。こうした蓄熱システムとの組み合わせを考えると、将来的にはより高温が得られるタワー型が有利との見方もある。

タワー型による蓄熱システムが軌道に乗れば、お天気次第の太陽光発電に比べ、天候により変動が少ない安定電源という利点が生まれる。太陽電池か太陽熱発電かという選択に、別の視点が加わることになる。

太陽熱発電設備の建設や発電事業では、米国のイーソーラー社やスペインのアベンゴア・ソーラー社などベンチャー企業が強く、ここ数年、独シーメンスや仏アルストムなど欧州重工大手が、企業買収により参入し始めた。日本勢では、設備全体の設計・建設で三井造船とJFEエンジニアリングが、ヘリオスタットの開発で三鷹光器（東京都三鷹市）が参入し、日揮が発電事業に資本参加する。

日揮が参画するのは、スペイン南部で計画が進む10万kWのトラフ型による太陽熱発電事業。スペインのアベンゴア・ソーラー社が74%、日揮が26%を出資する。2012年に操業する。予定通りに稼働すれば、日本企業による初の商用太陽熱発電事業になる。日揮では、「実績のあるトラフ型は事業リスクが小さい。ただ将来的にはタワー型への投資も関心がある」と言う。

三井造船はコスモ石油などとアラブ首長国連邦にビーム

ダウン型の実験施設を設置した実績がある。東京工業大学の玉浦裕教授が開発・設計したものだ。三井造船では、「最も難易度の高いビームダウン型を建設したことで、タワー型トップ型のノウハウも確立できた。事業化はまずタワー型トップ型で進め、欧米先行企業にキャッチアップしたい」としている。ビームダウン型はまだ実証段階で研究開発の余地が残っているため、商用化は先になるという。

JFEエンジニアリングと三鷹光器は、2010年から東京都三鷹市でタワー型の実証試験を始めた。三鷹光器は天体望遠鏡製作で培った技術で高度なヘリオスタットを開発、ビームダウン型への採用を目指す。

また、三菱重工業は、タービンで独自技術を確立した。太陽熱発電の適地は、砂漠など乾燥地帯に多いが、蒸気タービンを回すには大量の水が必要になる。そこで、同社は水を使わず、高圧空気を加熱して回すタービンを世界で初めて開発した。発電コストは2~3割下がる見込みだ。すでにオーストラリアの連邦科学産業研究機構と共同で、実証プラントを建設する計画が進んでいる。

## 5. 海洋温度差発電

海水は、約1000m下の深層では年間を通じて約4~5℃に保たれている。一方、表層は鹿児島沖で年間平均25℃、ハワイなど赤道近くでは年間平均で30℃前後にもなる。海洋温度差発電は、この温度差を利用する。

基本的な原理は、まず低沸点の作動流体を表層の25℃の海水で気化させ、その蒸気でタービンを回して発電し、蒸気を5℃の深海水で冷やして再び液体に戻し、それをまた海水面で気化させる——というサイクルだ。

蒸発器→媒体蒸気→凝集器というサイクルは一般的な蒸気タービンによる発電と同じだ。これを「ランキンサイクル」という。ランキンサイクルは化石燃料を燃やして数百度の高温高圧の蒸気を使えば、環境温度との差が大き

効率良く発電できるが、20~25℃の低温度差の場合、効率が低く実用にならない。実際、海洋温度差でランキンサイクルを回してみると、生み出した電力は、深層水をくみ上げるポンプの動力に使われてしまい、正味の電力はなかなか得られない。

1980年代にロシアのカリーナ博士が、作動媒体にアンモニアと水の混合媒体を使い、タービンを回した後の蒸気を作動媒体の予熱に使う再生サイクルを加えるサイクル（カリーナサイクル）を発明し、低い温度差での発電を可能にした。さらに佐賀大学元学長の上原春男氏は、カリーナサイクルを改良し、タービンを2つにして再生サイクルをさらに増やした「ウエハラサイクル」を開発し、さらに効率を上げるのに成功した。

上原氏は、ウエハラサイクルがスムーズに移働するように、専用の熱交換器も考案した。従来の熱交換器はパイプにフィンが付いている構造だったが、新型熱交換器は、チタン製のプレート式にして熱交換効率を上げた。佐賀大学の海洋エネルギー研究センターには、出力30kWの海洋温度差発電の基礎実験装置がある。経済産業省は、エネルギー関連の技術ロードマップのなかで、2015年までに1000kW規模の実証施設、2020年までに1万kW規模の商用プラントの稼働、2030年までに5万kW規模に大型化する、という目標を掲げている。

ウエハラサイクルの将来性に目をつけ、佐賀大学から技術ライセンスを取得して事業化に乗り出したのがゼネシス（東京都中央区）だ。同社は、これまでインド洋など、海外での複数の実証プロジェクトに参加し、技術指導してきたほか、仏領ポリネシアのタヒチ島近海における海洋温度差発電プロジェクトのFS（事業性）調査業務を受注するなど、海外での案件に携わっている。ただ、これまでのところ、商用化に成功した例はない。

海水温度差発電を研究する佐賀大学の門出正則教授は、「深層水と表面の温度差で正味の電気を生み出せることは



島しょのリゾート地に設置した海洋温度差発電設備のイメージ



确实だが、まだ効率が低くコストが高い。普及するにはさらに効率を上げる必要がある」と話す。

そこで、事業性を高めるために海洋温度差発電に付随して海水淡水化や海水からのリチウム回収、良好な漁業の提供なども視野に入れる構想もある。くみ上げた海水でまず発電し、その水を淡水化したり、リチウムを取り出したりすれば、システム全体のコストが下がる。実際、ゼネシスはアブダビで海洋温度差を活用した海水淡水化事業のFS調査を実施した実績もある。「電気より淡水の方が価値の高い国も多く、淡水化事業を主にするケースも増える」と同社では見る。また、深層水には植物プランクトンが生息しないため、栄養塩が消費されずに蓄積されている。くみ上げた深層水を表層に放水すればプランクトンが増え、豊かな漁場になる可能性が高い。

ウエハラサイクルは、海洋温度差に限らず、20℃以上の温度差があれば発電できる。例えば、温泉水や工場の排水などだ。温泉水なら60～100℃、工場廃水なら60～200℃の温度差があり、むしろ海洋温度差に比べ、環境温度との差は大きい。千葉県袖ヶ浦市の富士石油の製油所では、2006年に工場廃水の110℃の高温と海水との温度差を使いウエハラサイクルをやや簡素化した仕組みで最大で4000kW発電することに成功した。

温度差が100～200℃あれば、通常のランキンサイクルに低沸点媒体であるアンモニアやフロン、ペンタンを使うことで発電できる。こうした低沸点媒体を使って低温度差から電気を生み出すシステムを、「バイナリー発電」という。ここ数年、温泉や地熱を利用したバイナリー発電に取り組む動きが出てきた。ウエハラサイクルを使った海洋温度差発電は、より少ない温度差でも発電できる究極のバイナリー発電とも言える。

## 6. 洋上風力発電

スコットランド南西の海岸から14km離れた沖合。ここに60基もの風力発電設備が林立する世界最大級の洋上風力発電所がある。1基の高さは80m、長さ44mの3つのブレード（羽根）が回ると3000kWを発電する。60基全部がフル稼働すると18万kW、約17万世帯分の電力になる。

英国は2050年までにCO<sub>2</sub>排出を80%削減する目標をいち早く掲げた。20年までの削減目標は34%で、その手段として現在、6%の電力に占める再生可能エネルギーの比率を約30%に高める計画だ。そのけん引役が洋上風力だ。現在、約60万kWが稼働中で、約200万kWが建設中だ。14年までに800万kW、20年までに2500万kWの稼働を目指す。総投資額は約75億ポンド（約10兆円）に達する。この立ち上げは急激に見えるが、1970年以降の北海油田・ガス田の生産増強ペースと同じで、十分に可能だと英国政府は見ている。

英国は枯渇感の出してきた北海油田の代替として洋上風力を位置付ける。再生可能エネルギーを基幹にしようとの政策が明確だ。それは海上の油田掘削設備の建設ノウハウを生かせるという産業政策的な利点もある。

風力発電に熱心な欧州では、景観や自然保護の問題から陸上での風力発電設備の設置はそろそろ限界になりつつある。また、1kW当たりの発電コストを下げようとする、ブレードを長くして発電出力を大きくした方が有利。そこで、2000～3000kWまで大型化してきたが、3000kWともなるとブレード1本の長さは40～50mに達し、路上をトレーラーで運ぶ限界に近づいてきた。そこで出力4000～5000kW（ブレード長は60m前後）の設備を港近くの工場で作り、船で洋上に運んで設置するというアイデアが出てきた。1991年にデンマークのコペンハーゲン沖で初めて洋上風車の設置が始まり、2000年代から英国が洋上風車に乗り出している。これまでに設置された洋上風車は約150万kWに達するが、それでも風力発電全体の1.3%に過ぎない。

風力発電の経済性は、どれだけ風が吹くかに掛かっている。陸上では風況が良いといわれる場所でも、設備利用率（最大発電容量と比べて実際に発電した電力量の割合）は30%前後だ。一方、洋上風力の場合、設備利用率は40%前後まで上がる。ただ、設備コストは、陸上が1kW当たり25万円、洋上が30万円程度になるので、1kWh当たりの発電コストで見ると同等になる。

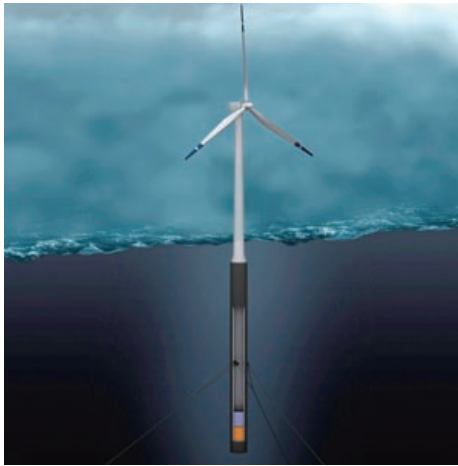
欧州で洋上風力が増加しているのは、陸上飽和しつつあることと、遠浅の沿岸が多く設置しやすいからだ。これまで建設された洋上風車はほとんど着床式、つまり海底に脚を固定して風車を支えている。着床式は水深50mまでが限界といわれ、それ以上深いと建設コストが高いくらい風が良くても経済性がなくなる。欧州は水深50m未満の遠浅の沿岸域が多く、洋上風車に適している。

これに対し、日本の近海は、離岸40kmで水深200mになることが多く、しかも海底地形が急峻だ。そこで、ここ数年、日本で注目され始めたのが浮体式風力だ。浮体式なら、水深50～200mでも設置できる。



英国の洋上に建設中の着床式の洋上風力発電設備





スパー型の浮体式洋上風力発電設備のイメージ

浮体式風力発電設備には大きく2タイプある。形状の工夫で浮力を安定化させる「スパー型」と、海底にケーブルで繋いでおく「TLP（緊張係留式プラットフォーム）」だ。さらにスパー型には、釣りの浮きのように細長い棒を低重心で浮かべる「柱状型」、そして平面の板を浮かべたような形の「平面型」がある。

日本では、東京電力が東京大学、鹿島建設、三菱重工業に委託する形で着床式の実証事業を千葉県銚子沖など3箇所で実施する。2013年から設置工事が完了し、稼働する計画だ。また、北九州沖では電源開発と日本製鋼所などが組み、2014年に着床式の稼働を予定している。

同時に、将来の洋上風力の大量設置を睨み、浮体式の研究も始まった。京都大学の宇都宮知昭准教授は、佐世保重工業などと共同してスパー型で2000kWの風車の設置に取り組んでいる。すでに10分の1の実証研究は進んでいる。また、九州大学の経塚雄策教授のグループは、六角形の浮体を複数連結させた構想を公表した。さらにTLPでは、三井造船が概念設計を進めている。

こうしたなか政府は、福島県沖に浮体式風力発電設備を稼働させる計画を決めた。丸紅がプロジェクトを統括し、三菱重工や三井造船、日立製作所などが設備の製造を担当する。浮体の方式はすべてスパー型で、柱状型と平面型の双方を試す予定だ。

浮体構造物は、海底油田の採掘で技術的に発展してきた経緯がある。欧州ではこうした技術を転用して、洋上浮体風力の実証試験が始まっている。日本でも三井造船など造船会社は石油掘削用の海洋構造物を受注・製造した経験もある。技術的には大きな壁はないと言われるが、課題は設置コストだ。欧州で実績のある着床式の場合、陸上の30%前後のコストアップで設置が可能になってきた。現在、浮体式の設置には陸上の3~4倍になるとの試算もある。これを1.5倍以内に下げないと経済性はない。資材の量産化や施工の工夫でどこまでコスト削減できるか、メーカーの技術力が問われている。

## profile

金子 憲治 (かねこ けんじ)

1964年12月14日生まれ。88年3月早稲田大学法学部卒業後、日本電信電話株式会社入社。

90年4月日経BP社入社、日本格付け投資情報センター出向・格付けアナリスト。

日経ビジネス編集部記者・電機、IT担当。米国サンノゼ支局、自動車、環境技術担当

2001年日経エコロジー編集部記者。同編集部副編集長

2012年4月日経BPクリーンテック研究所・研究員