現在、全世界では発電により、毎年 10 ギガトン以上の二酸化炭素を排出している。既に我々は、二酸化炭素を排出しない発電技術を手に入れている。こうした発電を広く安価に利用できるようにするためには、発電規模の拡大、送電システムや送電網の開発・改良など、多くの課題がある。しかし、年々深刻化する気候変動を阻止するには、こうした課題を乗り越え、二酸化炭素を排出しない発電へシフトしなければならない。Nature のニュースチームは、最も現実的な二酸化炭素排出ゼロのエネルギー源について、さまざまな側面から検証をした。今月号では、前月号（水力、バイオマス、風力、地熱）に続き、原子力、太陽エネルギー、海洋エネルギーについて述べる。

ELECTRICITY WITHOUT CARBON

二酸化炭素排出ゼロの発電所 — PART 2

Nature Vol.454 (816-823) / 14 August 2008

原子力（核分裂発電）

1986 年 4 月 26 日に旧ソ連（現ウクライナ）のチェルノブイリ原子力発電所の 4 号炉が炉心熔融を起こして、ヨーロッパの多くの地域が放射性降下物により汚染された。この事故と、その前に起きた米国ペンシルバニア州スリーマイル島の原子力発電所事故のため、欧米の原子力産業は 1 世代にわたって停滞した。しかし、世界的にみれば、情勢はこれほど劇的には変わっていない。

2007 年には、アジアのほぼ全域で、35 基の原子力発電所が建設中だった。世界の原子力利用を監視している国際原子力機関（IAEA）の最新の数字によると、現在運転中の 439 基の原子炉の出力は合計 370 ギガワットに達しており、全世界で発電される電気の約 15% を占めているという。

💰 コスト：世界の原子力発電所の出力の大半を担っている軽水炉の発電コストは、原子炉の設計、必要とする用地および減価償却に応じて、1 キロワット時当たり 0.025 ～ 0.07 ドル（約 2.7 ～ 7.6 円）である。この技術は、政府からの助成金を受けて数十年かけて行われる費用のかかる研究、開発および買い

付けの上に成り立っている。政府からの支援がなかったら、原子力が今日のように利用されることはなかっただろう。

⚡ 発電能力：原子力発電には燃料（ウラン）が必要であるため、その埋蔵量による制約を受ける。原子力発電を採算ラインに乗せるためには、1 キログラム当たり 130 ドル（約 1 万 4000 円）のコストでウランを抽出する必要がある。IAEA と経済協力開発機構（OECD）がウラン資源を評価した『レッドブック』の最新版では、このコストで抽出可能とされているウランは約 550 万トンあるという。年間 6 万 6500 トンのウランを消費する現在のペースで行けば、これは約 80 年分の燃料に相当する。しかし、ウランの時価は 130 ドルのラインを超えている。

地質学的にはウラン鉱床によく似ているが、現時点ではまだ立証されていない鉱床の大きさ（いわゆる「未発見埋蔵量」）は、確定埋蔵量の約 2 倍はあると考えられており、これよりも等級の低い鉱石ははるかに多く存在していると考えられている。ウランはとりたてて珍しい元素ではなく、地殻中に亜鉛と同程度の割合で存在している。最終的に

回収可能なウラン資源の見積もりには大きなばらつきがあるものの、3500 万トンはあると考えられている。また、核燃料になりうる天然放射性元素はウランだけではない。まだ開発はされていないが、トリウムを燃料とする原子炉も可能である。トリウムを利用できるようになれば、燃料の埋蔵量は 2 倍になる。

さらに、現在の原子炉の設計では燃料を一度しか利用することができないが、この点を変えることもできる。原子力発電に利用できない種類のウラン同位体からプルトニウムを作り出す増殖炉は、使用するウランよりも多くのプルトニウム燃料を効率よく作り出すことができる。このような原子炉に基づいて構築されるシステムは、投入した 1 キログラムの天然ウランから 60 倍ものエネルギーを生み出せるとされているが、現実にはこれほどではないかもしれない。

増殖炉は、まだ商業ベースでは実証されていないものの、理論的には、全世界で必要とされる電力のすべてを原子力発電でまかなうこともできる。増殖炉を実現することができなくても、原子力発電所の発電能力を 2 ～ 3 倍に高めて、1 世紀以上にわたり、同じレベルで運転できる可能性も高い。

夢の発電技術

核融合発電が可能になれば、地球上の電力需要のすべてをまかなうことができる。核融合発電に必要なのは、水素の2種類の同位体（重水素と三重水素）と、これらを利用するための技術だけである。核融合炉からは低レベルの放射性廃棄物が出るが、核分裂発電に比べれば微々たる量である。問題は技術であり、2040年よりも早く、商業炉が実現する可能性は低い。

もう1つの夢は、宇宙太陽光発電である。軌道上の太陽電池パネルなら常時太陽光を浴びることができ、作られた電力は、マイクロ波のビームの形で地球に送ればよい。けれどもそのためには、重さ数千トンの太陽電池を、格安のコストで宇宙に運ぶ必要がある。残念ながら、現在の宇宙旅行の料金は非常に高い。

長所：原子力発電は、燃料コストが比較的安く、ほとんど休むことなくフル稼働することができる。米国の原子力発電所は、定格出力の90%で稼働している。そのため、送電線網に常時ベースロードの電力（点検時以外、24時間一定の出力で供給される電力）を提供するのに適している。また、ウランは地球上の広い範囲に分布しており、世界の核燃料供給が政治的要因によって脅かされる心配はない。

短所：原子力発電所から出る核廃棄物の処理については50年前から問題になっているが、いまだに合意は得られていない。これは、技術的というよりは政治的に困難な問題であり、長期的な解決策がないまま原子力発電を普及させようとするのは、どう考えても無理がある。さらに大きな問題は、原子力発電の普及が核兵器の拡散と切り離せないことである。リサイクルを含む核燃料サイクルでは、必然的にプルトニウムが生成されるため、特に不安視されている。仮に核兵器の拡散への懸念がないとしても、原子力発電所は、テロリストや敵対勢力の格好の標的となりうる（この懸念は、水力発電所にも当てはまる）。

また、原子力の利用を長期的に大幅に増やしていくためには、既存の技術のみならず、トリウムや増殖炉などの新

しい技術についても、市民の理解を得る必要がある。これらの技術は、投資家や監督機関も味方につけていかなければならない。

原子力発電は、極めて資本集約的な発電方法である。原子力発電所の耐用年数に対する発電コストが比較的低いのは、原子炉の耐用年数が長いからにすぎない。原子力は、短期的には高くつく発電方法なのである。もう1つの制約は、熟練労働者が不足する可能性である。原子力発電所を建設し、運転するためには、高度な技術をもつ専門家が大量必要となる。こうした専門家を増やして、新しい原子力発電所を稼働させるペースを2倍にするのは、極めてむずかしいだろう。また、重要な部品を製造する工場の生産能力も高めていかなければならない。

これらの問題を考慮すると、原子力発電の未来の予測にはばらつきが出る。欧州委員会の『2050年の世界エネルギー技術展望』では、原子力発電に市民の理解が得られるようになり、新しい原子炉技術が開発されれば、2050年には約1.7テラワットの電力を供給できるようになるという強気のシナリオが展開されている。IAEAの分析者は、もっと慎重だ。IAEAの計画および経済研究部門の長であるHans-Holger Rogerは、2050年の発電能

力は1200ギガワット程度にしかならないだろうと予測している。マサチューセッツ工科大学が2003年に実施した学際的な研究では、発電能力を2050年までに現在の3倍である1000ギガワットに増やすための具体的なシナリオが作成された。このシナリオは、米国がリーダーシップをとり、日本が努力を続け、ヨーロッパが研究開発を再開することを前提としている。また、今日の原子炉とはまったく異なる設計や劇的な改良は期待せず、今日の技術の延長線上で議論をしている。

総合評価：今後数十年のうちにテラワットレベルの出力を実現することは、技術的には可能であるが、政治的にむずかしい可能性がある。原子力を受け入れようとする風潮は、チェルノブイリのような事故やテロ攻撃が1回起こるだけで揺らいでしまうおそれがある。

太陽エネルギー

光合成の奇跡をおとしめるつもりはさらさらないが、植物は、理想的な条件下でさえ、その表面で受け止める太陽光のわずか1%程度しか、誰にでも利用できるエネルギーに変換することができない。これに対して、市販の標準的な太陽電池パネルは、太陽光のエネルギーの12~18%を人間が利用できる

ARTWORK BY J. TAYLOR

電気へと変換することができる。高級モデルの効率は20%台に達している。この5年間に太陽電池の製造能力が向上し、コストが低下したことで、この業界は急成長した。2002年に全世界で出荷された太陽電池は550メガワット分であったが、2007年にはその6倍になった。設置された太陽電池の発電能力は、9ギガワット前後になると見積もられている。しかし、発電できるのは日中だけであり、曇りの日もあるため、実際の発電量はこれよりもかなり少ない。現在、太陽光発電の設備利用率は約14%であり、あらゆる種類の再生可能エネルギー源の中で最低である。

太陽光を電気に変換する技術は太陽電池だけではない。集光型太陽熱発電システムでは、鏡を使って太陽光を集め、典型的にはその熱で液体を加熱してタービン^{とい}を回す。集光の方法には、鏡を樋のように並べるトラフ式、太陽の動きを追跡するパラボラ型の鏡を用いるディッシュ式、中央部のタワーに太陽光を集中させるタワー式などがある。現時点では、設備容量は極めて小さい。将来的にも、この技術は晴天の日が多い地域でしか利用できないだろう。太陽電池は拡散した光でも発電できるが、集光型太陽熱発電システムは太陽光が直接照射することを必要とするからである。

💰 コスト：現在の太陽電池の製造コストは1ワット当たり1.50～2.50ドル（約160～270円）であり、その価格は1ワット当たり2.50～3.50ドル（約270～380円）と幅がある。設置コストは別料金である。全システムの価格は、通常、太陽電池の価格の約2倍である。その結果、太陽電池の耐用年数内の1キロワット時当たりの発電コストは、場所によって異なるものの、0.25～0.40ドル（約27～43円）程度になる。しかし太陽電池の製造コストは低下してきており、独立型の太陽電池パネルに代わって、住宅用建材に組み込まれた太陽電池が普及するようになれば、設置コストも低下するだろう。現在の技術があれば、数年以内に1ワット当たり1ドル（約108円）未満のコストで製造できるようになるはずである（*Nature* 2008年8月14日号558ページ参照）。

米国再生可能エネルギー研究所（NREL、米国コロラド州ゴールデン）の見積もりによれば、集光型太陽熱発電システムの1キロワット時当たりの発電コストは約0.17ドル（18円）である。

🌞 発電能力：地球の表面には、約10万テラワットの太陽エネルギーが降り注いでいる。これは、1時間で全人類の1年分のエネルギー需要を満たせる

量である。今日の太陽電池でも、サハラ砂漠、中央アジアのゴビ砂漠、チリのアタカマ砂漠、米国のグレートベースンなどに7～8キロメートル四方にわたって設置すれば、1ギガワットの電力を作り出すことができる。理論的には、サハラ砂漠の10分の1程度を確保できれば、全世界の基本的なエネルギー需要をまかなえるはずである。

太陽光発電の推進派は、太陽光発電に利用できる住宅や商業施設の屋根のすべてに太陽電池パネルを設置すれば、米国が2004年に使用したのと同じ量の電力を供給できるというNRELの計算を引き合いに出している。ただし、日射量がもっと少ない国では、太陽光発電にはあまり期待できない。英国では、緯度を考慮した傾斜をつけた南向きの太陽電池パネルを設置すれば、1平方メートル当たり約1000キロワット時に相当する日射が期待できるが、その効率を10%として英国の現在の電力消費量を考えると、1人当たり60平方メートル以上の太陽電池パネルが必要であると計算される。

👍 長所：太陽エネルギーは無料で、広い範囲に分布し、事実上無制限に供給されており、発電に伴って廃棄物が出ることもない。太陽光発電技術は人々に受け入れられており、ほとんどの地域で支持されている。原子力、風力、水力発電に比べて地政学的問題が少なく、環境や美観を損なうおそれも小さい。とはいえ、砂漠に巨大な発電所を建設したら、抗議の声が上がるかもしれない。

現在、太陽電池は、住宅ごとや事業所ごとにばらばらに設置されることが多い。こうした条件下での太陽光発電のコストは、ほかの方法での発電コストではなく電力小売価格と競争しなければならぬため、太陽光発電技術を大幅に進歩させた。太陽光発電は、送電網外で独立に行う発電に適しており、ゆえに、インフラが整備されていない地域に適している。

太陽電池にも集光型太陽熱発電システムにも、まだ改良の余地はある。10年か20年後に新しい技術が開発されて太陽電池の1ワット当たりのコストが10分の1になり、二酸化炭素を排出しない発電方法としては想像もできないような水準に達する可能性さえある。

短所：太陽光発電の最大の敵は「暗闇」である。太陽電池は夜間には発電することができず、曇りがちの場所や、厚い雲がかかりやすい場所では、発電量は日中でも予測がつかない変動を示す。一部の集光型太陽熱発電システムでは、日中に集めた熱を蓄えて夜間に使用することにより、こうした短所を克服している（蓄熱媒体には融解塩などがある）。大規模な施設には、太陽電池よりも集光型太陽熱発電システムのほうが適しているとされているが、その理由の1つはこの点にある。もう1つの方法は分散型蓄電であり、電気自動車やハイブリッドカーのバッテリーなどに利用できる（Nature 2008年8月14日号810ページ参照）。

また、大規模な太陽光発電所の多くは砂漠に建設されることになるため、発電された電力をどのように分配するかが問題となる。ドイツ航空宇宙センターが2006年に行った研究では、2050年までにヨーロッパは、中東と北アフリカの全域に建設された太陽光発電所と太陽熱発電所から100ギガワットの電力を輸入することになるだろうと提示されている。ただし、そのためには新しい直流高電圧送電システムを整備する必要があることも強調されている。

一部の進んだ太陽電池は希少金属を使用しているため、コストが上昇し、供給が制限される心配もある。しかしながら、こうした金属が本当に希少なのかどうかは不明であり、需要が高まれば、現在は経済的理由から採掘されていない鉱山も採算が合うようになるかもしれないし、さらには、別の物質で代用できるようになる可能性もある。

総合評価：太陽エネルギー資源の量と今後の技術開発の可能性を考えると、中長期的には、二酸化炭素を排出しない発電方法の中で最も有望であると評価しないわけにはいかないだろう。しかし、蓄電技術を大幅に強化しないかぎり、問題を完全に解決することはできない。

海洋エネルギー

海は、人間が利用できる2種類の運動エネルギーを与えてくれる。それは、潮力と波力である。現時点では、どちらもそれほど大きな電力を作り出していないが、その推進派たちは、海洋エネルギーを利用する計画を次から次へと提案している。確かに地球上には、潮力が強力な資源になるような地理学的特徴を備えた場所がある。いくつかの場所では、河口堰を作って貯水池に水をためて発電する方式が適している。こうした貯水池は水力発電所のダムに似ていなくもないが、流れ込んでくる雨水が徐々にたまっていくのではなく、月と太陽の引力により定期的に海水が補充されるという点で異なっている。今日、世界各地で潮力発電所の建設が検討されている。代表的なものは、英国のイングランドとウェールズの間を流れるセヴァーン川河口に潮力発電所を建設し

ようとする計画であり、推進派によると、8ギガワットもの電力を提供できるはずであるという。しかし、現時点で世界最大の潮力発電所は、40年以上も昔にフランス・ブルターニュ地方のランス川河口に建設された、定格出力240メガワットのランス潮力発電所である。

干満差ではなく潮流を利用した発電に適している土地もある。これは、空中の風車のように水流の中でタービンを回すシステムである。この夏、北アイルランドのストラングフォード湖に設置された出力1.2メガワットのタービンは、これまでで最大のものである。

一方、波力を利用する技術の大半はまだテスト段階にとどまっており、それぞれの企業が一連のデザインを検証している。これらは、波の上でヘビのように身をくねらせる装置や、水をかぶりながら上下に動く装置、海岸に横たえられた装置の上を、波が規則的に乗り越えていき、水が引く際にタービンを回す仕組みになっている。研究の中心地となっている欧州海洋エネルギーセンターは、英国のオークニー諸島沖に試験場をもっており、企業はそこで自社の試作機を海を送電網に接続し、打ち寄せる波に試作機がどれだけ耐えられるかを検証することができる。英国エンジンバラのPelamis Wave Power社は、ここ

でのテストを終えて、既にポルトガル沖に3台の発電装置を設置した。将来的には、この3台で合計2.25メガワットの電力を作り出すことになる。

💰 コスト：河口堰の建設コストは場所ごとにかなり違いがあるものの、だいたい水力発電所の建設コストと同程度である。セヴァーン川河口の潮力発電所の資本コストは150億ポンド以上と見積もられており、1メガワット当たり約400万ドル（約4億3000万円）という計算になる。二酸化炭素を排出しないエネルギーへの投資を促進する英国の政府系企業、カーボントラストが2006年に

発表した報告書によれば、潮流発電のコストが1キロワット時当たり0.20～0.40ドル（約22～43円）、波力発電のコストは0.90ドル（約97円）近くになるという。これらのコストを大幅に下げるためには発電量の規模を大きくする必要があるが、どちらの技術も、それが可能になる気配はまったくない。

🌊 発電能力：地球の質量と、月と太陽の重力場との相互作用からは、約3テラワットの潮力エネルギーが発生すると見積もられているが、天体エネルギー源にしては、これはかなり小さい数字である（しかし、海水の混ぜ合わせに

主要な役割を果たすには、これで十分である。Nature 2007年5月31日号522ページ参照）。このうち、おそらく1テラワットは容易に利用できる深さにあるものの、現実に利用できるのはさらにその一部だけだと考えられている。ブルターニュ沖で潮力発電所の開発に従事しているフランスの電力会社EDFによれば、フランス沖の潮力エネルギーはヨーロッパ全体で利用できる潮力エネルギーの80%を占めているが、それでも1ギガワット強にしかならないという。

一方、波力エネルギーは100テラワット以上になると推定されている。欧州海洋エネルギー協会は、全世界で利

二酸化炭素の回収と貯留

化石燃料の利用をやめるわけにはいかないのなら、その利用に伴って発生するCO₂を空气中に排出しないようにするという手もある。二酸化炭素回収・貯留（CCS）技術は、排ガスからCO₂を除去して、それを地下に貯留する技術である。この技術を用いれば、発電所から排出される二酸化炭素の量を80～90%も削減できるはずであるが、寿命要因を考慮に入れると、最終的には67%まで低下する。CCS技術の導入に伴う追加コストの見積もりは、技術と場所によって大きなばらつきがあるものの、1キロワット時当たりの発電コストは0.01～0.05ドル（約1.1～5.4円）高くなるとされている。CO₂の価格が1トン当たり50ドル（約5400円）程度になるなら、石炭火力発電所にこの技術を導入しても、ほかの技術と競争することができる。

CCS技術の導入に伴う追加コストは、新しい発電所に投

資される資本や、二酸化炭素を除去するためのエネルギーコストによる効率の低下に起因している。従来式の石炭火力発電所なら、その効率の低下は40%にもなりうる。資本コストの高い新式の石炭ガス化複合（IGCC）発電所では、気化の過程で、より扱いやすいCO₂流を発生させる。CCS技術はIGCC発電所の効率を20%近く低下させるが、もとの効率が高いので、さほど問題にはならない。現時点では、IGCC発電所は極めて少ない。しかし、炭素税導入の可能性や石炭価格の高騰を考えると、市場が向かうべき道は明らかだろう。

おそらく、初期に導入されるCCS技術は、もっぱら廃油田に高圧のCO₂を注入するものになるだろうが（この技術は既に、老朽化した油田に残っている原油の回収率を高めるために利用されている）、最終的には、CO₂貯留容量が格段に大きい、塩分を含ん

だ帯水層に注入することになるだろう。帯水層は地球上に均一には分布していないものの、全世界には2000～1万1000ギガトンのCO₂を貯留できるだけの帯水層があると見積もられている。メリーランド大学カレッジパーク校（米国メリーランド州）の研究者たちが率いる世界エネルギー技術戦略プログラムでは、CCS技術導入の候補となる全世界の8100か所の大規模な発電所は、毎年約15ギガトンのCO₂を排出していると見積もっている。ゆえに、帯水層は現在の排出レベルのCO₂を数世紀にわたって貯留だけでなく、よりクリーンなベースロード技術が実現するまでの間、石炭を使い続けることを可能にするといえる。

これは巨大プロジェクトであり、産業界によるCCS技術の実現可能性の検討はようやく始まったばかりである。もっと積極的にCCS技術を推進していかないかぎり、10年後、あ

るいは20年後になっても、この技術が普及している可能性は極めて低い。最大の問題は規模である。マサチューセッツ工科大学の2007年の研究によると、米国の石炭火力発電所から排出されるCO₂の60%を回収することは、石油産業が動かしている2000万バレルの石油に相当する量のCO₂を毎日処理することを意味する。そのためのインフラを整備するのは不可能ではないが、10年や20年でというのは無理な注文である。

用可能な波力エネルギー資源は1～10テラワットに上るが、現在の技術ではかなり少ない量しか回収できないとみている。MRS Bulletin 2008年4月号で発表された分析によると、効率40%の波力発電装置で技術的に約500ギガワットの発電が可能とされているエネルギー密度は1メートル当たり30キロワットであるが、世界の海岸線のうち、これだけのエネルギー密度の波がある場所は約2%しかないという。そのため、今後、どんなに開発に力を入れても、波力発電の発電能力は現在の水力発電には遠く及ばないと考えられる。

長所：潮の干満は正確に予測することができる。一部の場所では、河口堰を利用して大規模に潮力発電を行い、国内電力需要のかなりの部分をまかなえる可能性がある。河口堰では、ある

程度の貯水も可能である。また、波力は一定ではないものの、風力よりは当てになる。

短所：利用できる海洋エネルギー資源の量は、各国の地理学的特徴によって大幅に異なる。すべての国に海岸線があるわけではないし、すべての海岸線で大きな干満差や潮流がみられるわけでもすばらしく大きな波が打ち寄せるわけでもないからである。高い波が生じるのは、オーストラリアの西海岸、南アフリカ、北米の西海岸および西ヨーロッパの海岸である。また、海上の厳しい条件にさらされながら何十年も稼働できるタービンを製造するのはむずかしい。河口堰は、典型的には潮間帯の湿地を浸水させるなど、環境に影響を及ぼす。長く美しい海岸線の側面に波力発電装置を設置することは、人々に受け入れら

れないかもしれない。さらに、潮力エネルギーも波力エネルギーも、本質的に送電網の末端にあるため、これを送電網に乗せるという手間もかかる。サーファーチも反対している。

総合評価：地球規模では、たいした貢献をすることはできない。 ■

報告および執筆は、Quirin Schiermeier, Jeff Tollefson, Tony Scully, Alexandra Witze および Oliver Morton による。なお、本文中の円換算レートは、PART1 に合わせて1ドル=108円としている。

1. Key World Energy Statistics 2007 (International Energy Agency, 2007).
2. Hohmeyer, O. & Trittin, T. (eds) Proc. IPCC Scoping Meeting on Renewable Energy Sources 20-25 January 2008, Lubeck, Germany (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008).
3. Smil, V. Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems (MIT Press, 2008).
4. Metz, B., Davidson, O., Bosch, P., Dave, R. & Meyer, L. (eds) Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change (Cambridge Univ. Press, 2007).