

現在、全世界の1年間の発電量は1万8000テラワット時に達しており、人類が消費する総エネルギーの40%近くを占めている。発電の過程で排出される二酸化炭素の量は、毎年、10ギガトン以上に上り、化石燃料に由来する二酸化炭素のセクター別排出量の中で最も多い。しかし、二酸化炭素の正味の排出量がゼロになるような発電技術は既に存在しており、太陽光発電や風力発電から原子力発電や地熱発電まで、多岐にわたる。

発電に伴う二酸化炭素の排出量を削減する最も簡単な方法は、発電効率を高めることである。しかし、それにも限界があるうえ、発電効率が高まるほど電力消費量が増加するというおなじみのパラドックスもある。そこで、気候変動の阻止に向けた世界的な取り組みの一環として、二酸化炭素を排出しない発電へのシフトが必要になってくる。これは、二酸化炭素の価格についての新しい考え方や、場合によっては新しい技術も必要とする。新しい送電システムや、より効率的な送電網も必要である。とりわけ重要なのは、ますます増大する電力需要に応えるために、二酸化炭素を排出しない各種の発電システムの規模を大きくしていくことである。本特集では、最終的にはどの程度の発電量が期待できるか、そして、最も現実的なエネルギー源はなんであるか、Natureのニュースチームが検証する。

ELECTRICITY WITHOUT CARBON

二酸化炭素排出ゼロの発電所 —PART1

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



水力

世界には多くのダムがある。世界エネルギー会議によれば、大規模なダムは世界に4万5000か所あり、小規模なものももっと多いという。こうしたダムに併設されている水力発電所の発電能力は800ギガワットにもなり、現在、全世界で消費される電力の約5分の1を供給している。ダムが供給する電力は化石燃料に次いで多く、地熱、太陽光および風力を合わせたものの10倍に相当する。中国の三峡ダムの発電能力は18ギガワットとされているが、これは全世界の太陽電池の発電能力の約2倍に相当する。さらに現在、最大出力にして120ギガワット（1ギガワット=10⁹ワット）分の施設の建設が進められている。

水力発電がこれだけの成功をおさめた理由の1つは、「水」という資源が広範な地域で得られることにある。現在、

多少なりとも水力発電を行っている国は160か国に上る。いくつかの国々では、水力発電が送電網に最も多くの電力を供給している。発展途上国では、大きなダムが主要な電力源となっていることは珍しくない。にもかかわらず、水力発電が最も威力を発揮できるとされている大河は、大きな先進工業国にある。現時点では、ブラジル、カナダ、中国、ロシアおよび米国が、全世界の水力発電所による発電量の半分以上を占めている。

💰 コスト: 国際水力発電協会 (IHA) によると、発電所の建設地と規模に応じて、出力1メガワット（1メガワット=10⁶ワット）当たりの建設費は通常、100万~500万ドル（約1億1000万~5億4000万円）以上にもなる。低地に建設されたダムや、ダムの水位とタービンとの落差が小さいダムでは、より高額になる。大規模なダムの出力

ARTWORK BY J. TAYLOR

1 ワット当たりの発電コストは、同様の条件下にある小規模なダムに比べて低くなる。ダムの年間の運営コストは低く、資本コストは 0.8～2%、1 キロワット時当たりの電力コストは 0.03～0.10 ドル（約 3.2～11 円）であり、石炭やガスと十分に張り合える。

⚡ 発電能力：水力発電の絶対的な限界は、世界中の河川を流れ下る水の位置エネルギーを運動エネルギーに変換する効率である。全世界の地表を流れる雨水が海水面まで下りてくる間にタービンを回すようにできるなら、理論的には 10 テラワット（1 テラワット=10¹²ワット）以上の電力を発電できることになる。しかしながら、河川の水力の 50% を利用できることはまれであり、多くの場合、その数字は 30% 未満にとどまる。

IHA によれば、この数値でもまだ、新たにかんりの出力を可能にするという。現在、水力利用の基準となっているのはヨーロッパであり、理論的に利用可能とされている数値の 75% を既に利用している。アフリカで同じ水準を達成しようとする、水力発電所の発電能力を現在の 10 倍の 100 ギガワット以上に高める必要がある。アジアの設備容量は既に最大になっているが、最も成長する可能性があるのもこの地域である。アジアの水力発電所の発電能力を 3 倍にしてヨーロッパ並みに水力を利用できるようにすれば、全世界の水力発電所の発電能力は 2 倍になる。IHA は、十分な投資さえ行えば、全世界の水力発電所の発電能力は 3 倍になるとしている。

👍 長所：水力発電システムは燃料を必要としない。このことは、燃料を採取・精製するためのインフラも、その輸送も必要ないことを意味している。つまり、水力により 1 ギガワットの電力を発電することは、火力発電所で 1 ギガワットの電力を発電するために燃やされる石炭の節約になるだけでなく、その石炭を採掘して輸送するための炭素コストの節約にもなるのである。ダムの取水口は

簡単に開けることができるので、時刻にも天気にも関係なく、変化する電力需要にほとんど即座に対応することができる。このように容易に稼働が可能な水力発電所は、あまり当てにならないほかの再生可能エネルギー源のバックアップとして役に立つ。とはいえ、電力使用量には需要や季節に応じた変動があり、ダムは、定格出力の約半分しか発電していない。

また、水力発電システムには、適切に設計すれば、生成したエネルギーをどこかに蓄えておけるという、ほかにはない特徴がある。エネルギーが豊富にあるときに、水を汲み上げておくのである。汲み上げた水でできた貯水池は、かんがい灌漑だけでなく、洪水の防災にも役立つ、娯楽施設としても利用できる。

👎 短所：地球上のすべての地域に豊富な水力資源があるわけではない。例えば中東は、水力資源にはあまり恵まれていない。また、貯水池は多くの土地を必要とする。今日では全世界で、イタリア 2 個分の面積の土地が人工湖の底に沈んでおり、その面積のほとんどを大規模なダムや貯水池が占めている。また、全世界の水力発電による電力の 90% 以上は、計画と建設に長い時間と莫大な費用をかけ、水没する地域の住人を移住させてできた発電所で作られている。インドと中国では、この数十年間に数百万人もの人々が移住を余儀なくされた。さらに、ダムは、上流および下流の生態系に影響を及ぼし、回遊魚の行く手を阻む。堆積した土砂はダムの耐用年数を短縮し、下流の人々はダムにとらえられた土砂を利用することができない。貯水池で分解されるバイオマスはメタンと二酸化炭素を放出し、その放出量は、化石燃料を燃やさないことにより削減できる放出量と同程度になることもある。一部の地域では、気候変動のために水源（チベットの氷河など）から流れてくる水の量やパターンが変化し、ダムの発電能力が制限されることもある。

水力発電は成熟した技術であり、発電効率を改善する余地はほとんどない。また、発見しやすく、利用しやすい場所は既に開発されてしまっており、今後は、利用しにくい場所も開発していかなければならない。粉屋が 4000 年前から実践してきたように、自然な水の流れを利用して発電を行う小さな（発電電力 10 メガワット未満の）「流し込み式」水力発電所は、当然、環境に及ぼす影響が小さく、魅力的である。しかし、大規模な水力発電所に比べて約 5 倍のコストがかかり、拡大も困難である。

👁️ 総合評価：安価で成熟した技術であるが、環境コストがかなり大きい。発電容量をさらに約 1 テラワット増やすことができる。

バイオマス

バイオマスは人類が最初に利用するようになったエネルギー源であり、20 世紀まで、最大のエネルギー源であり続けた。今日でも、バイオエネルギー源は化石燃料に次いで多く利用されており、20 億人以上の人々が、樹木や作物残渣などを主たるエネルギー源にしている。ほとんどの場合、バイオマスは焚き火やかまど電で燃やされるが、近年、化石燃料を使わ



ない発電にも利用されるようになってきた。世界エネルギー会議は、2005年のバイオマス発電の発電容量を少なくとも40ギガワットと見積もっている。これは、再生可能エネルギー源の中では風力と水力に次いで大きい数字である。バイオマスは、従来の発電所で、石炭（場合によってはガス）を補う燃料として利用できるだけでなく、多くのコージェネレーション発電所でも利用できる。コージェネレーション発電所とは、電力を作り出すだけでなく、その過程で出る排熱も利用する発電所のことであり、総合エネルギー効率を85～90%まで高めることができる。

💰 コスト：バイオマス発電によって作られる電力の価格は、燃料の供給性と種類および輸送コストによって大きなばらつきがある。資本コストは、化石燃料を利用する発電所と同程度である。発電コストは、従来の発電所で石炭を使ってバイオマスを燃やす場合には1キロ

ワット時につきわずか0.02ドル（約2.2円）であるが、専用のバイオマス発電所では1キロワット時につき0.03～0.05ドル（約3.2～5.4円）まで上昇する。さらに、コージェネレーション発電所では、発電コストは0.04～0.09ドル（約4.3～9.7円）まで上昇するが、排熱の回収と利用により、その効率は格段によくなる。新しいバイオマス発電所を建設する際に最も問題になるのは、安定かつ集中的に生産される燃料を現地で入手することである。輸送コストを抑えるためには、バイオマス発電所を小規模に保ち、燃料は現地で調達しなければならない。その結果、1メガワット当たりの資本コストは高くなる。

🚀 発電能力：バイオマス発電の限界は、利用できる土地の広さ、光合成の効率および水の供給によって決まる。2007年のOECD円卓会議では、農業に使用されておらず、雨水のみを使ってバイオマスを生産できる土地が、約5

億ヘクタールあると推定された。そして、2050年までに、こうした土地と、作物残渣、森林残渣および有機廃棄物から、毎年6万8000テラワット時の発電量に相当する可燃性原料が供給されるだろうと見積もられた。これを40%の効率で電力に変換することができれば、最大で3テラワットの電力を供給できる計算になる。気候変動に関する政府間パネル（IPCC）は、より広い土地が利用できることと仮定したうえで、2050年にはバイオマス発電による発電量は約12万テラワット時になると予測している。これは、5テラワットよりもやや大きい電力に相当する。

こうした予測は、エネルギー作物の生産に利用できる土地について、かなり極端な仮定に基づいている。その仮定が妥当であったとしても、こうした土地で生産できるのは電力だけではない。太陽エネルギーを化学結合の形で蓄えるバイオマスは、輸送用燃料の生産に関して、ほかの再生可能エネルギー源よりもすぐれている（Nature 2008年8月14日号841ページ参照）。バイオマスをバイオ燃料へと転換することは、バイオマスの燃焼ほど効率はよくないが、より価値の高い製品を作り出すことができる。多くの場合、バイオマスの利用法として、バイオ燃料は発電よりもすぐれている。

👍 長所：植物は本来、カーボンニュートラル（二酸化炭素の排出量と吸収量が同じ）であり、再生可能である。けれども農業は、この資源を完全には使いきっていない。大量の肥料を必要とする場合は、特にそうである。バイオマスを燃やすために必要とされる技術は成熟しており、効率も良い。上述のとおり、コージェネレーションでは特に効率が高くなる。作物残渣を利用する小規模なシステムでは、輸送コストを最小限に抑えることができる。

二酸化炭素回収・貯留設備（CCS）のある発電所でバイオマスを燃やす場合には、バイオマスはカーボンニュート

数字でみる電力

2005年には1万8000テラワット（TW）時の電力が作られた。1年は約9000時間であるから、平均すると、2TW程度の電力がコンスタントに作り出されていた計算になる。発電容量は、この数字よりもはるかに大きい。電力需要には山と谷があり、常にフル稼働している発電所などないからである。

1TWの電力はなかなか想像しにくい。その1000分の1にあたる1ギガワット（GW）のほうが理解しやすい。1GWは、かなり大きな発電所の出力に相当する。英国で最大級の原子力発電所であるサイズウェルBの出力は約1.2GWである。米国コロラド川のフーバーダムは約1.8GWである。

1GWの1000分の1は1メガワット（MW）である。今日の電車のほとんどは3～5MWの電力を必要とする（こ

の例でピンとこないという方は、F1マシン2台分の出力と考えるとよいだろう）。1MWの1000分の1は1キロワット（kW）であり、電気ファンヒーターを想像すればよい。

各国のエネルギー消費量はキロワット時の単位で測定される。2004年の国民1人当たりの消費電力量が最も多かったアイスランドで、年間2万8200kW時だった。米国の1人当たりの年間消費電力量は約1万3300kW時であるから、3億人のアメリカ人は約400GWの電力を使っていることになる。チリの1人当たりの消費電力量は3100kW時、中国では1600kW時、インドでは460kW時である。ハイチは消費電力量が最も少ない国の1つであり、30kW時である。

ラルからカーボンネガティブとなり、空気中の二酸化炭素を吸収し、それを地中に貯蔵することができる。バイオマスは、この技術により、大気中の二酸化炭素濃度を低下させることができる唯一のエネルギー源となる。しかし、石炭の場合と同様、資本配置の点でも効率の点でも、二酸化炭素の回収に関連したコストがかかる。

短所：地球上には広大な土地があるが、その多くは、増加する人口に食料を供給するために必要とされる。燃料生産と食料生産のための土地の割り当ては市場メカニズムに任せるべきなのか、それとも政治的に決定するべきなのかはわからない。エネルギー作物の生産量を増やし、生産を集約化していくことには、反対の声が上がりそうである。また、気候変動は、それ自体が直接的に、適切な土地の供給を左右する。廃棄物と残渣の利用は、土壌を肥やすはずの炭素を土地から奪ってしまうおそれがあり、長期的な持続を不可能にするかもしれない。

さらに、バイオエネルギーへの依存は、干ばつや疫病によるエネルギー危機の懸念を生じるだけでなく、土地利用法の変化そのものが気候に影響を及ぼすおそれもある。エネルギー作物を生産するための開拓により、その作物では相殺できない量の二酸化炭素を放出してしまう可能性もある。

総合評価：エネルギー作物生産の大幅な増加が許容できるもので、かつ持続可能であることが明らかになれば、その大半は、バイオ燃料として消費されるかもしれない。けれども今後、さまざまな条件下で、小規模なバイオマス発電システムの価値が認められるようになるだろう。カーボンネガティブなシステムの実現可能性は、バイオマスだけがもつ魅力的な特性である（ただしこれは、バイオマス発電については可能かもしれないが、バイオ燃料については期待できない）。



風力

風力発電は、数年前にはその熱狂的な支持者たちでさえ期待していなかったほど早いペースで普及してきている。2007年に米国で設置された発電所により、風力発電の発電能力は5.3ギガワット増加したが、これは、米国が新たに確保した発電量の35%に相当する。米国ではさらに225ギガワット分の風力発電所の建設が計画されており、この数値は石炭火力発電所とガス発電所の合計よりも大きい。世界風力エネルギー協会によれば、この5年間、全世界の風力発電所の発電容量は毎年25%ずつ上昇しているという。

Wind Power Monthly は、2008年1月時点における全世界の風力発電所の設備容量は94ギガワットであったと推定している。21%の成長が続くなら、その数字は6年後には3倍になるだろう。

しかし、世界的にみればその数字はまだ小さい。特に、風力発電基地が歴史的にその発電容量の20%しか発電していないことを考えると、この数字は決して満足できるものではない。

コスト：風力発電所の建設費は、陸上に設立するなら1メガワット当たり約

180万ドル（約1億9000万円）、海上に設立するなら240万～300万ドル（約2億6000万～3億2000万円）である。これは、1キロワット時当たり0.05～0.09ドル（約5.4～9.7円）に相当し、少なく見積もるなら石炭火力発電にもひけを取らない。多くの国は助成金を出しているため、風力発電のコストは石炭火力発電よりもかなり低くなり、今日の風力発電ブームを引き起こした。現時点では、風力発電所の建設の主な足かせになっているのは、タービンの製造ペースである。

これだけの低コストは、技術の大幅な改良を抜きにして語ることはできない。1981年の風力発電基地には出力50キロワットのタービンが並んでいて、1キロワット時当たりの発電コストは約0.40ドル（約43円）だった。今日のタービンは、5分の1のコストで30倍の電力を作り出すことができ、風力不足による停止時間もはるかに短い。

発電能力：地球の大気の運動が作り出すエネルギー量は、数百テラワットという莫大な大きさに上る。スタンフォード大学の2人の研究者は、2005年の論文において、世界中の風

力発電に適した地点（風速が6.9メートル以上ある地点）の13%に、最新の大型タービンを250万台設置することができれば、少なくとも72テラワットの電力を効率よく作り出すことができると計算した（C. L. Archer and M. Z. Jacobson *J. Geophys. Res.* **110**, D12110; 2005）。

長所：風力発電の主な長所は、水力発電と同じく、燃料を必要としない点にある。必要なのは、タービンと送電線の建設コスト、維持費だけである。近年のタービンは大型化し、信頼度も高くなっている。高高度で風を捕える技術の開発は、狭い範囲にはるかに持続的な方法で電力を供給することを可能にする。

短所：風力発電の究極の弱点は、その断続性にあるといえるだろう。ある送電網の容量の20%を風力発電によってまかなうことは、さほど困難ではない。けれどもそれ以上を望むなら、

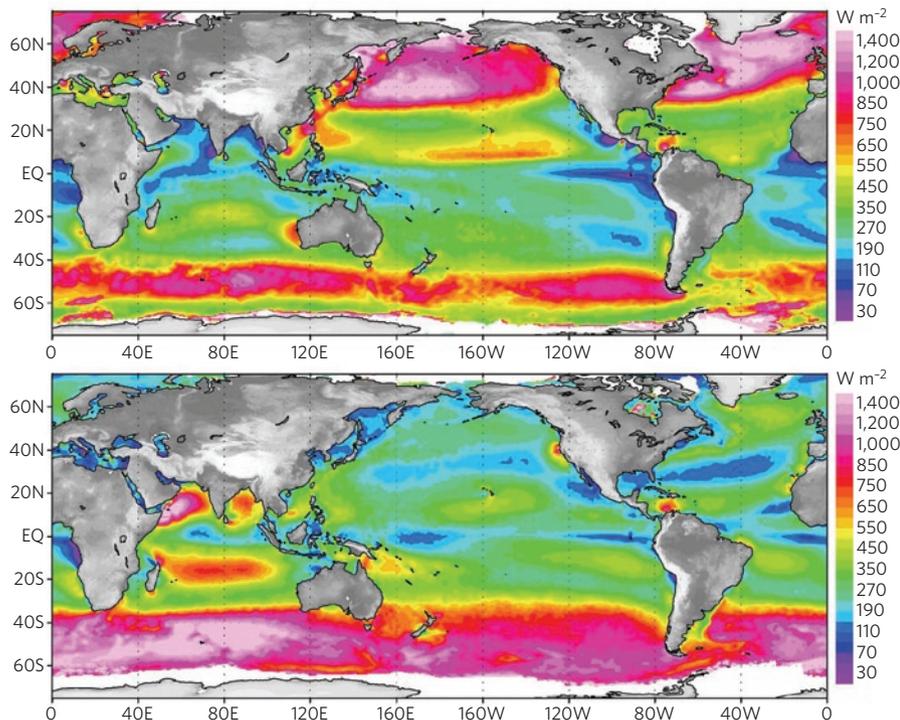
設備についても系統運用者にとっても、変動する電力に対処するための工夫が必要になる。送電網に関しては、もう1つ、まさしく絶対的な弱点ともいえる問題がある。それは、最も風の強い場所が最も人口が多い場所であることはめったになく、風力発電により電気をまかなうためにはインフラの整備が必要になるということである。これは特に、風力発電所を海上に建設する場合に重要である。

風は断続的であるだけでなく、ほかの再生可能エネルギー源と同じく、本質的に密度が極端に低い。大規模な風力発電基地が作り出す電力は、典型的には1平方メートル当たり数ワットで、10ワットあれば非常に高いのである。ゆえに、風力発電所を建設するには、安価な土地か、ほかの目的にも同時に利用できる土地か、その両方の性質を備えた土地を探す必要がある。タービンは景観を台無しにすると考える住民がいたなら、その土地に風力発電所を建設するのはむずかしい。

風は、空間的にも偏って分布している。風力発電は、風の強い海があり、海から陸に向かって風が吹いてくる国や、広大な平野のある国に適している。ドイツは、国内で最も強い風が吹く土地の多くをタービンで覆ったが、こうした先駆的な努力にもかかわらず、発電容量の合計は22ギガワットにしかならず、国内の電力需要の7%未滿しか供給できない。ドイツよりもずっと遅れて風力発電に取り組み始めた英国は、海上での風力発電に関して、明らかにヨーロッパで最大の可能性を秘めている。英国風力エネルギー協会の見積もりによれば、海上風力発電により国内の電力需要の3倍以上に相当する電力を供給できるという。また、産業界の見積もりによれば、欧州連合（EU）は北海の5%未滿を開発することで、現在の電力需要の25%を満たすことができるという。

カルガリー大学（カナダ）のエネルギー環境システムグループの長であるDavid Keithによると、こうした大規模な風力発電計画が現実のものになれば、風のパターンが変わって、その地域の気候に（もしかすると地球全体の気候にも）影響を及ぼす可能性があるという。風にはものを冷やす傾向があるため、タービンが風からエネルギーを抽出して風速を遅くする結果、広大な風力発電基地のまわりの気温が上昇する可能性があるのだ。Keithの研究チームは、発電能力2テラワットの風力発電所は、気温に0.5℃の影響を及ぼすと見積もった。しかし、中緯度では温暖化が起こり、極地方では寒冷化が起こるため、地球温暖化効果は相殺されるかもしれないという（D. W. Keith *et al. Proc. Natl Acad. Sci. USA* **101**, 16115-16120; 2004）。

総合評価：米国と中国の広大な平野を活用し、海上をより安価に利用できるようになれば、全世界の風力発電所の発電能力を1テラワット以上にするのも夢ではない。



北半球の冬（上）と夏（下）に地球上を吹く風の平均風力。タービンの間隔と技術的制約のため、取り出せるエネルギーは設計上の最大出力より2桁近く小さくなる。

地熱

地球の内部には膨大な量の熱がある。かつて微惑星が合体して地球が誕生したときの名残の熱もあれば、放射性元素の崩壊に伴って発生した熱もある。岩石は熱を伝えにくいので、地球の内部にある熱が表面に流れ出る速度は非常に遅い。もしこれがもっと速かったら、地球のコアは凍りつき、大陸の漂流はとっくの昔に終わっていただろう。

地熱の流れは遅く、この資源を発電に利用できるのは、温泉が豊富に湧き出ている場所など、特殊な土地に限られている。地熱発電を行っている国は20か国程度しかなく、国内の電力の15%以上をこの方法でまかなっている国は、コスタリカ、エルサルバドル、アイスランド、ケニア、フィリピンの5か国しかない。世界の地熱発電の設備容量は約10ギガワットであり、ゆっくりとした増加にすぎない。10年前からの5年間の増加分は、わずか3%程度である。10年前には、地熱発電の発電能力は風力発電よりも高かったが、現在ではその約10分の1にしかない。

地熱は、直接利用することもできる。実際、世界のエネルギー収支に対する地熱の最大の寄与は、住宅や商業施設を直接暖房する小型地熱ポンプによるものであるかもしれない。

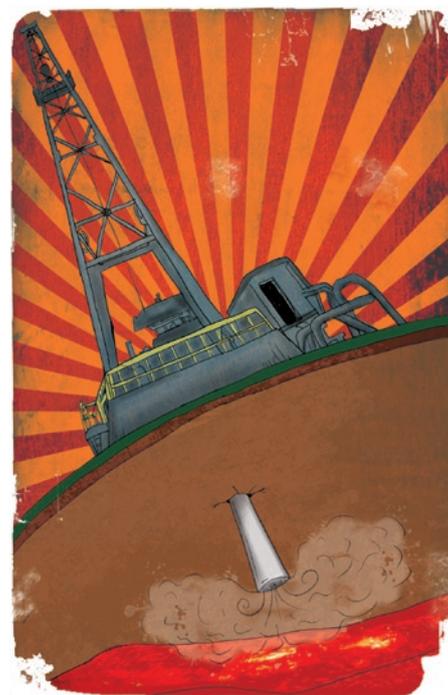
💰 コスト：地熱発電システムのコストは、地質学的条件によって決まってくる。地熱技術に関しては、マサチューセッツ工科大学（MIT）の研究チームが2006年に重要な報告書を発表している。そのメンバーだった化学工学者の Jefferson Tester は、「地熱資源は、鉱物資源に似た状況にあります」と説明する。「地熱資源は、質の高いものから低いものまで、連続的に存在しているのです。浅く、岩石の間隙率の高いところにある、高温の資源もあれば、深く、岩石の間隙率の低いところにある、利用が困難な資源もあるのです」。MITの報告書では、地熱発電に非常に適した場所（大量の熱水が地表の近くで循環している場所）な

ら、1キロワット時当たり0.05ドル（約5.4円）のコストで発電できると見積もられた。質の低い地熱資源ならもっとたくさんあるが、現在の技術で開発しようとすると、コストは格段に高くなる。

🔥 制約されない発電能力：地球は1年間に40～50テラワットの熱を失っており、1平方メートル当たり平均0.1ワット弱の熱が出ている計算になる。ちなみに、地球が受け取る太陽光は、1平方メートル当たり平均200ワットである。今日の技術では、地球の熱流束のうち70ギガワットを利用できると見積もられている。技術革新がもっと進めば、少なくともその2倍は利用できるようになるだろう。MITの研究チームは、高性能のボーリング装置を使って深部に水を注入する強力なシステムを用いれば、米国だけで100ギガワットの地熱発電が可能になると示唆した。これは、全世界では1テラワット前後の地熱発電が可能になる計算である。つまり、巨額の投資さえすれば、地熱発電は今日の水力発電と同程度の電力を供給できることになる。

👍 長所：地熱資源は燃料を必要としない。地熱は極めて安定に供給されるため、地熱発電は「ベースロード電力」（点検時以外、24時間一定の出力で供給される電力）を供給するのに理想的な性質を備えている。地熱発電所の設備利用率は75%であり、再生可能エネルギーを利用する発電所の中では最も高い。発電後に出る低温の排熱は、住宅の暖房や工業過程に利用できる。

これまで利用されていなかった地熱資源を調査し、ボーリングを行うことは、石油産業が生み出した地図作成技術とボーリング技術のおかげで、非常に容易になった。大規模な技術開発プログラム（Testerは、10年間に10億ドル（約1100億円）程度の規模を考えている）により、質の低い地熱資源も利用できるようになれば、発電能力は大幅に上昇するだろう。



👎 短所：質の高い地熱資源は極めてまれであり、質の低い地熱資源でさえ均一には分布していない。一部の地熱地帯からは二酸化炭素が漏れ出すことがあり、汚染問題が生じる可能性もある。また、地表に熱を運び上げる水は、帯水層に放出されるべきではない化合物も運んでしまうおそれがある。乾燥地帯では、水の確保がネックになるだろう。大規模な開発に必要なとされる技術は、理論的には運用可能に思えるが、強固で実用的なシステムの形では実証されていない。

👁️ 総合評価：発電能力は1桁以上大きくすることができるかもしれないが、劇的な改良がないかぎり、水力発電や風力発電を抜いて1テラワット台になる可能性は低い。 ■

報告および執筆は、Quirin Schiermeier, Jeff Tollefson, Tony Scully, Alexandra Witze および Oliver Morton による。

*次号掲載予定のPART2では、太陽エネルギー、原子力、海洋エネルギーについて検証します。