

The Energy Storage Problem

電力エネルギーの貯蔵問題

David Lindley

Nature Vol. 463(18-20)/7 January 2010

再生可能エネルギーの普及は、大規模な電力エネルギー貯蔵が可能にならないかぎり、期待できない。そこで、カギを握る5つのエネルギー貯蔵技術について検証してみた。

2008年2月、突然の寒気が西テキサスを襲い、いつも吹いている風がやんでしまった。当然のことに、この地域に点在する数千基の風力タービンが回転スピードをゆるめ、やがて動きを止めた。地元の電力会社は、電力系統に接続されているほかの発電所から不足分の電力を調達することができなかったため、1時間半後に再び風が吹き出すまで、一部の利用者への電力供給を停止せざるをえなかった。

電力会社が数十万キロワット時 (kWh) のエネルギーを貯蔵し、非常時にそれを利用できるようなシステムをもっていたら、この程度の無風状態は、何の問題にもならなかったはずだ。けれども現実とは違っていた。電気エネルギーはたちまち失われてしまい、これを大量に貯蔵するのは困難で、コストも高い。

電気エネルギーを貯蔵する適当な方法がないことは、数十年にわたって電力会社を悩ませてきた。電力会社は電力の安定供給を義務付けられているが、電力需要はたえず変動している。そのため彼らは、石炭火力発電所の出力を調節したり、電力需要がピークに達する時間帯だけガスタービン発電を行ったりしてきたが、こうした方法はコストが高く、効率も悪かった。

けれども近年、電力需要に応じていく形の電力供給戦略が、通用しなくなってきている。これは、発電量を予測できない再生

可能エネルギー源の利用、特に太陽光発電と風力発電が増えてきたためである。テキサスの例が示すように、これらの技術による発電量は、人間の需要ではなく自然の気まぐれによって決まってしまう。米国オハイオ州コロンバスの American Electric Power (AEP) 社のエネルギー貯蔵技術部長であり、ワシントン DC の電力貯蔵協会の会長でもある Ali Nourai は、「私たちが使用するエネルギーのかなりの部分を再生可能エネルギー源から賄おうとするなら、エネルギー貯蔵の技術が絶対に必要になります」という。

エネルギー貯蔵の技術は既に何種類も開発されていて、なかには数十年の歴史をもつものもある。問題は、それぞれのエネルギー源や場所に最もよく合った技術を用いつつ、その技術を、耐久性があり、信頼が置け、経済的に競争力のあるものにしていくことにある。

オランダのアムステルダムにあるエネルギーコンサルティング会社 KEMA の Jillis Raadschelders は、「どの技術にも、それぞれほかにはない特徴があるのです」という。したがって、「どれか1つの技術が勝ち残るということにはならないでしょう」。最適な技術を選択するためには、個々の技術をもう少し詳しくみていく必要がある。

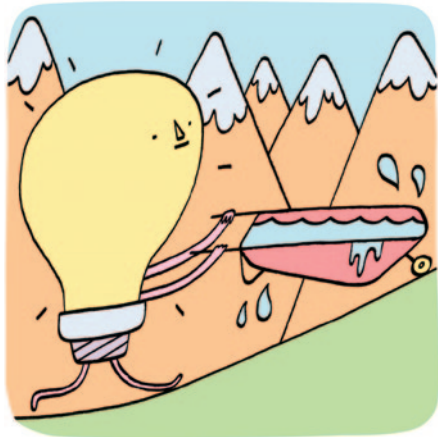
水を汲み上げる揚水発電技術

北ヨーロッパの人口密度が高い地域では、エネルギー貯蔵の必要性が特に高い。ここでは、沖合に風力タービンを建造して、北海から吹いてくる風を利用している。デンマークは既に陸上および海上の風力による発電量が全体の20パーセントを占めており、2025年までにこの数字を50パーセントに引き上げることを予定している。しかし、北海の風は数日間にわたって弱ま

ることがあるため、デンマークやオランダなどの電力系統は、ノルウェーの電力系統との接続を増やしている。ノルウェーは、電力の大半を水力発電によって賄っているからだ。

ノルウェーの山岳地帯の貯水池は、普通の水力発電所として予備的に利用されるだけでなく、揚水発電所としてかなりの量の電力を供給することができる。揚水発電所とは、余剰電力があるときに高

所の貯水池に水を汲み上げておき、電力が足りなくなったときには、この水を下に落とすことで発電機を回す施設である。揚水発電のエネルギー貯蔵効率は70～85パーセントで、現時点の大規模な電力貯蔵技術の中では、最も成熟し、最も普及したものになっている。例えば、中国、日本、米国には、数万～数百万キロワット (kW) の発電能力をもつ揚水発電所が多数建設されている。揚水発電はとりわ



け風力発電と相性がよい。上部貯水池に汲み上げられた水は長期にわたってそこにあるため、風力発電所の発電量が大きく変動するときにも、安定して電力を供給できるからだ。

とはいえ、従来型の揚水発電所は山がなければ建設できず、地理的条件に恵まれた地域でしかこの方法は利用できなかった。また、揚水発電用の貯水池の建設には多額の費用がかかり、環境破壊を引き起こす傾向もみられる。さらに、遠隔地の揚水発電所を送電網に接続するための高圧送電線の設置は、環境保護の観点から反対されることも多い。

揚水発電所の発電量を大幅に増やしたいなら、山を離れる必要がある。KEMAは、北海の浅瀬に「エネルギー島」を建設し、ここに風力タービンと上部貯水池の両方を設置するという革新的なシステムを提案している。このシステムでは60平方キロメートルほどの海域を堤防で囲い込み、人工湖をつくる。堤防の上には風力タービンを設置し、余剰電力があるときには、それを使って湖の水を海に汲み出す。電力が不足したときには、水を汲み出した湖に海水を流れ込ませて発電すれば、貯蔵しておいた余剰電力を使ったことになる。KEMAの見積もりによると、このエネルギー島は、風がなくなったときに、平均150万kWの電力を12時間にわたって供給できるという。

空気を地中に押し込める CAES 技術

ドイツのハンブルク南西100キロメートルほどのところにフントルフという町がある。このフントルフの近郊の農地に、一見、何の変哲もない産業施設がある。けれども実は、この施設は非常に変わった仕事をしている。地域の電力需要が少ないときに、余剰電力を使って空気を圧縮し、地中の岩塩層にあって2つの空洞に送り込んでいるのだ。2つの空洞を合わせると、その容積は30万立方メートル以上になる。電力需要が多くなってきたら、ここに貯蔵されている圧縮空気を解放し、膨張する空気地表のガスタービンを回して発電するという仕組みだ。

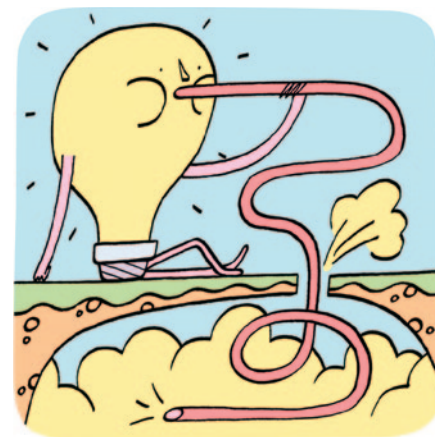
フントルフの施設は1978年から稼働しており、約30万kWの貯蔵電力を3時間近く供給することができる。稼働頻度は1年間に約100回だ。けれども、世界的にみても、これに類する施設は少ない。米国アラバマ州マッキントッシュには、同様の、より小規模な施設があり、1991年から稼働している。2002年にはアイオワ州に同じような施設を建設するプロジェクトが始まったが、現時点ではまだ試掘用の土地を取得するところまでしか来ていない。

このような圧縮空気貯蔵(CAES)施設は、原理は単純だが、実際に運用するとなるとはるかに複雑だ。まず、空気を圧縮すると温度が上昇するため、地中に安全に貯蔵できる空気の量には限界がある。また、空気を圧縮するために投入されるエネルギーのかなりの部分が温度上昇に使われているが、高温になった空気を長時間貯蔵していると、その熱は空洞の壁に逃げていってしまう。さらに、圧縮空気が解放されるときには、膨張して温度が下がる。そのため、フントルフやマッキントッシュの施設では、解放された空気は普通の天然ガスタービンに導かれており、その効率を上げるのに利用されている。つまり、CAESの役割は、どちらかといえば従来型の天然ガス発電所の効率を上げることにあるのだ。

米国カリフォルニア州パロアルトにあ

る電力研究所(EPRI)の研究者Haresh Kamathは、再生可能エネルギー源を利用して夜間により多くの電力を貯蔵できるようになってきた今、こうしたハイブリッド(混成)施設は、短期的には「極めて理にかなったもの」であるという。けれども彼らは、将来的には化石燃料を必要としない真のエネルギー貯蔵システムにすることをめざして、CAESの改良に取り組んでいる。こうした「先進の断熱システム」は、圧縮空気の熱を逃がさずに貯蔵し、この熱を使って解放された空気を再加熱することで、燃料を追加することなくタービンを直接回せるようになるはずだ。ドイツのオーベルハウゼンにあるMAN Turbo社の研究者Christoph Jakielは、昔から鋳物工場や高炉では耐火レンガなどに廃熱を捕らえてきたのだから、この技術を圧縮空気の貯蔵に応用するのは容易なはずだと指摘する。

Jakielは、そうしたシステムの効率は80パーセントをやや下回る程度で、揚水発電所の効率に匹敵すると見積もっている。建設と操業全般に関するコストも同程度であろう。世界中どこでも、建設に適した土地を見つけるのは困難ではないはずだとJakielはいう。空洞のある岩塩層は珍しくないし、アイオワ州貯蔵エネルギーパークが提案どおりに建設されるなら、圧縮空気は帯水層(地下水を含む地層)に送り込まれることになる。



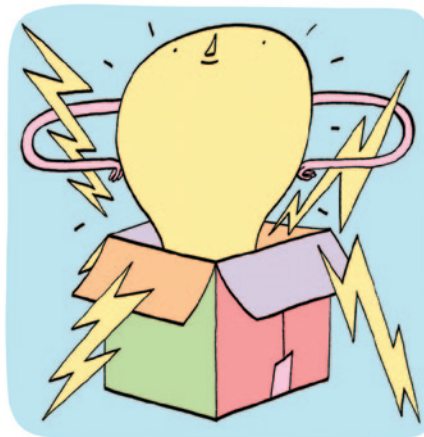
電気を容器に入れる蓄電池技術

1世紀近く前から自動車のバッテリーに用いられているのが鉛蓄電池で、このどこにもある技術を電力会社が利用していたら、大規模な電力貯蔵の問題は解決していたはずだ。ところが鉛蓄電池には、エネルギー密度が低いという欠点がある。つまり、貯蔵できるエネルギーの量に比べて、鉛蓄電池は大きすぎ、重すぎるのだ。そのうえ、あまり何度も充電と放電を繰り返すことができない。

電力の貯蔵に使うならナトリウム硫黄電池 (NaS 電池) のほうが優れている。NaS 電池は、多硫化ナトリウムをナトリウムと硫黄に化学分解することによってエネルギーを蓄え、2つの元素を再び反応させることによってエネルギーを放出する。NaS 電池のエネルギー密度は高く、充電と放電を数千回も繰り返すことができる。主な短所は、約 300℃の溶融したナトリウムと硫黄を別々に貯蔵しなければならないことである。また、この電池は、完全に放電して冷えてしまうと、回復不能なダメージを受けてしまう。

このように、NaS 電池にはさまざまな技術的要請のほかに頑丈な容器が必要とされるため、その発電コストは 1 kW 当たり約 3000 ドル (約 27 万円; 1 ドル = 90 円で換算、以下同様) にもなる。標準的なガス発電プラントの発電コストが 1 kW 当たり約 1000 ドル (約 9 万円) であることを考えると、コスト面では劣っている。それにもかかわらず、名古屋に本社を置く日本ガイシは市販用の NaS 電池を開発した。日本には現在、電力が不足したときに送電網に約 30 万 kW の電力を 6 時間にわたって供給できる施設がある。ほかの国々も開発を急いでいる。例えば、米国では、AEP や Xcel Energy 社 (ミネソタ州ミネアポリス) などの企業が先頭に立って約 1 万 kW の NaS 電池を設置したほか、同規模の施設の設置を進めている。

将来的には、リチウムイオン電池が、NaS 電池を利用した大規模な電力貯蔵技術のライバルになるかもしれない。リチウ



ムイオン電池は、既に携帯電話用やノートパソコン用のものが普及しており、電気自動車用のものも開発が進んでいる。そのエネルギー密度は高く、効率は 90 パーセント以上にもなる。大きな欠点はコストだが、これは安全性への配慮と関係している。リチウムイオン電池では有機溶媒中のリチウム塩が使われているが、これは可燃性であるため、構造を頑丈にして火災を防ぐ必要があるのだ。現段階では、家電用リチウムイオン電池の蓄電のコストは 1 kWh 当たり数百ドルである。しかし、自動車用の蓄電池を普及させるためには、このコストを 1 kWh 当たり 100 ドル (約 9000 円) 程度まで下げる必要があるし、送電網に電力を供給するためにはさらに下げる必要がある。

とはいえ、Nourai は依然として楽観的である。彼はその根拠として、厳重に格納され、固定された蓄電池施設は、携帯用蓄電池よりも容易かつ安価に安全を確保できることを挙げている。また、リチウムイオン技術はアジアでは特に手厚く支援されており、メーカー間の競争も激しいため、大幅なコスト削減が期待できるとも指摘する。最近、中国で貨物輸送用コンテナ大のリチウムイオン施設を見てきた彼は、数年後には 1000 kW 以上の出力を達成できるようになるだろうとみている。

米国マサチューセッツ州ケンブリッジのマサチューセッツ工科大学 (MIT) では、材料化学者 Donald Sadoway が、コス

ト削減に向けた、より急進的なアプローチに取り組んでいる。「私がめざしているのは格安の蓄電池です」と彼はいう。「そのためには、土を原料にすればよいのです」。つまり、地殻に豊富に含まれているケイ素、鉄、アルミニウムなどの元素を電池の原料にするのである。これらの元素の電気化学的性質について新たな発見がなされる余地はほとんどないが、電池を作るためには、2つの電極で1つずつ、合わせて2つの化学反応と、イオンがうまく移動できるようにするための電解質の組み合わせを決める必要がある。考えられる化合物と化学反応の組み合わせは膨大で、そのほとんどが検証されていない。Sadoway は、その中から最適な組み合わせを選び出すことは可能であると考えている。スーパーコンピューターを使って蓄電池の化学的性質を短時間で評価するにすれば、研究者がいちいち材料を合成し、検証を行う必要はなくなるというのだ。おそらく今後 10 年間で、「発見のペースは加速するでしょう」と彼はいう。

フライホイール技術

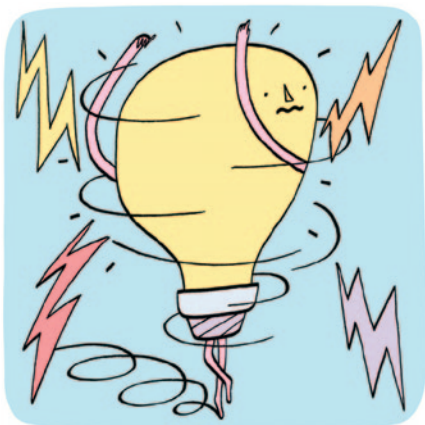
回転するフライホイール (はずみ車) にエネルギーを蓄えることは、少なくとも概念的には、最も単純なエネルギー貯蔵法の 1 つである。電力が余っているときには、モーターに電気を通してフライホイールを回転させ、電気エネルギーを運動エネルギーへと変換する。電力が不足したときには、回転しているフライホイールを発電機につなぐと、フライホイールが減速して運動エネルギーが取り出され、電気エネルギーが発生する。

この方法も、実際にはそう簡単にはいかない。フライホイールは非常に速く回転しなければならないが、飛び散ってしまうだけの強度も必要だ。フライホイールを使った電力貯蔵システムは、そこそこの量の電力を数秒間から数分間だけ供給できる無停電電源装置として市販されているが、電力会社が必要とするような長時間

にわたる電力貯蔵については、ほかの方法に比べて劣っている。

フライホイールの大きな長所の1つは、数秒あるいは数分以内にエネルギーを吸い上げ、同じくらい速やかにそれを戻せることにある。送電網の周波数の制御には、まさにこの性質が必要とされる。送電網の周波数は国ごとに決まっていますが、常に毎秒50サイクルか60サイクルに維持しなければならないが、瞬間的に大きな負荷がかかってタービンが減速すると、周波数が低下する傾向がある。どこの電力会社も、これを安定に保つのに苦労している。

この点に注目した米国マサチューセッツ州ティンズボロの Beacon Power 社は、10年前から周波数制御に最適化したハイテクフライホイールの開発に取り組んできた。このフライホイールの高さは約2メートル、直径は1メートルで、モーター兼発電機を格納する筒状のアルミニウムコアと、炭素繊維複合材のリムからできている。フライホイールは、磁気軸受を利用して真空密閉容器の中に浮かせてあり、最大で毎分1万6000回転することができる。Beacon社の最高技術責任者である Matthew Lazarewicz によると、この装置は20年以上メンテナンスなしで稼働するよう設計されているという。また、この装置は85パーセントの効率でエネルギーを蓄えることができ、耐用年数の間に、おそらく数百万回も加速と減速を繰り返すことができ、蓄電池よりはるかに長持ちするという。

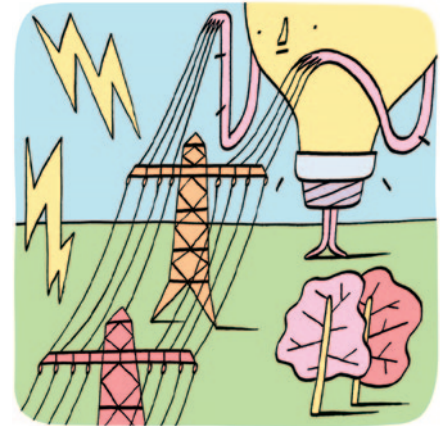


現在の課題はコストを下げることにある。Beacon社は、米国エネルギー省(DOE)による債務保証付きのプロジェクトを請け負ったおかげで、この課題を克服できそうである。同社がニューヨーク州ステューヴンタウンで建設に着手したフライホイール蓄電施設は、200個のフライホイールから構成されていて、出力は2万kW、建設費は7000万ドル(約63億円)である。この施設は、地域の送電網の周波数の制御を手伝うことになる。予算には、連邦債務保証を受ける資格の取得に関連した多くの一時的費用が含まれている。同社は、この規模の施設の建設費は、将来的には5000万ドル(約45億円)以下になると見積もっており、できれば3000万ドル(約27億円)程度にまで下げたいと考えている。2009年11月には、米国エネルギー省がBeacon社に、イリノイ州シカゴの郊外に新たに建設されることになった2万kW規模の蓄電施設の建設費の半額に当たる2400万ドル(約22億円)を提供した。

スマートグリッドとの組み合わせ

大規模なエネルギー貯蔵法の候補になりうる技術には、もっと風変わりなものもある。ただし、そのためには研究者の努力によりコストを引き下げ、競争力を付ける必要がある。こうした技術の例としては、電極のすぐ近くの原子数個分の厚みの層に膨大な量の電荷を貯蔵する「ウルトラキャパシター」や、永久に循環する電流を大量に貯蔵する超伝導コイルがある。

しかし、電気エネルギーの大規模貯蔵に関するアプローチの中で最も費用対効果に優れているのは、貯蔵の必要性を最小限に抑えることである。これは米国の景気刺激策が掲げる目標の1つであり、再生可能エネルギー源の利用、エネルギー効率、および「スマートグリッド」の研究開発のために43億ドル(約3兆9000万円)が割り当てられている。スマートグリッドは、電力需要の予測不能な変動に合わせて電力供給を調節するだけでなく、需要そのものも



調節するシステムである。例えば、電力需要がピークに達したときには、家庭用冷蔵庫やオフィスの空調システムやその他の急を要しないものの電力の使用量を減らすのだ。調節が行われるのは一瞬で、誰も気がつかないうちに元に戻るが、全体の負荷の変動を緩和するにはそれで十分である。

このようなシステムでは、エネルギー貯蔵技術とスマートグリッドの技術が協働するため、それぞれの技術を単独で用いる場合に比べて、送電網への負荷の変動の幅をさらに小さくすることができる。Nouraiはいう。「変動をなくすことは不可能ですが、エネルギーを貯蔵することで、変動の幅を小さくすることができるのです」。彼は、将来的にはかなり小さなコミュニティでも「ネットゼロ」、つまり、平均すると需要に見合った量の電力を作り出し、少量の電力を近隣のコミュニティと融通し合うことにより、電力の安定供給を実現できるようになるとみる。そうならば、狭い地域を相互に連結する送電線の電圧を低くし、遠隔地の太陽光発電所や風力発電所と人口密集地域を結ぶ長距離送電線だけを高圧にすればよくなるだろう。その変化は、エネルギー貯蔵に関する「我々の考え方や実際の運営方法や将来の計画を変えるでしょう」とNouraiはいう。(三枝小夜子 訳) ■

David Lindley は、米国ヴァージニア州アレキサンダリア在住のフリーランスのライター。