

重力エネルギーを利用した新しい蓄電技術の開発について

大阪大学名誉教授 塩澤 俊之

クリーンなエネルギーである太陽光や風力などの再生可能エネルギーを利用した発電システムには、よく知られているように、これらの発電量が天候に大きく依存するという欠点があります。もし、余剰の電力が得られるときには、これを一時的に貯蔵し、電力が不足するときには蓄えた電力を放出することができれば、送電網への出力は平準化され、このシステムへの期待はさらに高まるでしょう。現在、大規模な蓄電システムの代表例としては、リチウムイオン2次電池を利用したシステムと揚水蓄電システムがあります。ここで、揚水蓄電システムという用語は、我が国では、従来、揚水発電と呼ばれてきたものです。本稿では、以下の議論の趣旨に照らして、発電よりも蓄電という用語が適当であると考えられますので、この用語を使わせて頂きます。因みに、英語では、“pumped hydro storage”という用語が使われています。上に挙げた二つの蓄電システムのうち、特に、後者は、世界の蓄電システムの約90%を占めています。

まず、リチウムイオン2次電池を用いたシステムについて考えてみましょう。これは、大規模なシステムになると、大変高価なものとなり、また環境への負荷が大きく、廃棄物のリサイクルには多額のコストがかかります。特に、現在、米国カリフォルニアでは、電池の発熱による異常な温度上昇が問題になっているようです。一方、揚水蓄電システムには、広大な山岳地帯の土地と、落差が数百メートルにも及ぶ二つの貯水池が必要となり、新たな施設を建設するためには、莫大な開発費用がかかります。このシステムでは、余剰の電力があると、この電力によってポンプを回して下部の貯水池の水を上部の貯水池に汲み上げ、電気エネルギーを重力の位置エネルギーに変換してエネルギーを蓄えます。外部で電力が必要になると、上部の貯水池に蓄えられた水を下部の貯水池に流し、タービンを回して、水力発電によって重力の位置エネルギーを再び電気エネルギーに戻します。揚水蓄電システムの原理は至って簡単であり、高校の物理で習う古典物理学(力学と電磁気学)の知識があれば十分理解できます。揚水蓄電システムは、歴史的には、1909年にスイスで最初に開発され、現在でも世界で広く利用され

ているシステムです。特に、我が国には、約40か所の揚水蓄電システムがありますが、これらの稼働率は僅か3%にすぎません。これは、米国やドイツの稼働率に比べて低く、それらの1/10にとどまっています。このことから、揚水蓄電システムには、まだまだ、利用できる余地が残されていることが分かります。

最近、揚水蓄電システムからヒントを得て、重力エネルギーを利用した新たな蓄電システムを開発する、いくつかのスタートアップが立ち上がりました^[1]。本稿では、その中で、すでに2020年に実証実験を終え、2021年から、順次、世界で20数か所の太陽光および風力発電施設に実際に配備されようとしている蓄電システムについてご紹介したいと思います。これは、スイスにあるスタートアップ Energy Vaultによって開発されたもので、その基本動作としては、十分重いコンクリートブロック(重量35トン)を、発電機とモーターの役割を兼ね備えた発電電動機を用いて、100メートルを超える高さを上下させます。すなわち、外部から余剰の電力が供給されると、発電電動機はモーターとして働き、このコンクリートブロックを、100メートルを超える高さまでケーブルによって持ち上げ、電気エネルギーを重力の位置エネルギーに変換して蓄えます。逆に、コンクリートブロックを地上まで、ケーブルで支えながら下ろす場合には、発電電動機は発電機として働き、蓄えられた重力の位置エネルギーは元の電気エネルギーに戻されます。それでは、この単純なシステムによって、どれ位のエネルギーが蓄えられるかを検討して見ましょう。古典力学の教えるところによると、地上からの高さ h (m)にある、質量が m (kg)の物体に蓄えられる位置エネルギー E (J)および仕事率(電力) P (W)は次式で表されます。

$$E = mgh \text{ (J)}, \quad P = dE/dt \text{ (W)}$$

ここで、J(ジュール)はエネルギー(仕事)の単位、W(ワット)は電力の単位、sは秒、 g は重力加速度($g = 9.8 \text{ m/s}^2$)を表します。上の E の式に、上記の数値を当てはめて見ますと、

$$E = 3.5 \times 10^4 \times 9.8 \times 100 \text{ J} = 3.4 \times 10^7 \text{ J}$$

となります。ただし、高さは100mとしています。上の例

では、一つのコンクリートブロックの蓄電容量は34MJとなります。また、この場合、例えば、10秒掛けて、一つのコンクリートブロックを上から下まで等速度で移動させるとすると、そのとき発生する電力は3.4MWとなります。

それでは、スタートアップEnergy Vaultによって開発された実際の蓄電システムについて、簡単にご紹介しましょう。まず、このシステムの中心部分は、高さが100メートル前後の格子状の鉄塔と、その上に、中心軸の周りに水平に、それぞれ独立に、自由に回転できる三段に重ねられたクレーンから構成されています。また、それぞれのクレーンの中心部分には、2台の発電電動機が設置され、クレーンの両翼が、それぞれ、コンクリートブロックを、任意の位置で発電電動機から延長されたケーブルによって、上下させられるようになっており、合計で6個のコンクリートブロックを同時に操作できます。さらに、格子状の鉄塔の周りには、同軸円筒状に何重にも積み重ねられたコンクリートブロックが配置されています

(このようにしてコンクリートブロックの数を自由に変えることによって、顧客の要求に合った蓄電容量が実現できます)。このシステムにおいて、同軸円筒状に積み上げられたコンクリートブロックの一つ一つを、六つのクレーンの腕によって、すでに積み上げられたコンクリートブロックの外側に移動し、外部に積み上がったコンクリートブロックの高さが、元の内部の同軸円筒状の分布と同じ高さになったら、今度は、外部のコンクリートブロックを一つずつ、内部の位置に戻します。実際には、AI(人工知能)の助けを借りて、スマートソフトウェアによるコンピュータ制御によって作動させます。このとき、突風の影響、コンクリートブロックの上げ下げによるクレーンのたわみ、およびケーブルの伸びなども同時に監視されます。Energy Vaultによって開発されたシステムの特徴は、平地であれば設置場所を選ばず、環境にやさしく、また、初期コストおよびランニングコストなどを含めた全体のコストについては、長期的に考えると、同じ蓄電容量を持つリチウムイオン2次電池を用いたシステムに比べて約半分になると試算されています。その特徴を示す一例として挙げられるのは、コンクリートブロックの製法にあります。すなわち、コンクリートブロックの材料の96%は、産業廃棄物などから作られるリサイクル素材からできており、その密度は普通のコンクリートの4倍になります。ご参考までに、米国カリフォルニアでは、すでに、リチウムイオン2次電池を用いたシステムとしては、蓄電容量が世界最大の1.2GWhのシステムが稼働しています。蓄電容量1.2GWhというのは、米国最大の揚水蓄電システムの容量の1/20に当たります。

最後に、重力エネルギーを利用した新しい蓄電システ

ムが開発された意義を、特に我が国の場合について考えて見ましょう。まず、第一に、我が国のエネルギー自給率は極めて低く、その大きな原因は、国内にエネルギー資源が乏しいことにあります。エネルギー源として使われる石油・石炭・液化天然ガス(LNG)などの化石燃料は、海外からの輸入に大きく依存しています。また、エネルギー源の化石燃料への依存率は85.5%にもなっています。従って、我が国のエネルギー自給率を高めるためには、早急に、エネルギー源を、化石燃料から、クリーンな再生可能エネルギーへ転換することが望まれます。そのためには、本稿でご紹介した、太陽光や風力などの再生可能エネルギーの利用を促進する蓄電システムは極めて有用であると考えられます。次に、地球温暖化に対処するために、世界の多くの国々では、2050年までに、カーボンニュートラルを実現するという努力目標を掲げています。ここで、カーボンニュートラルというのは、温室効果ガス(二酸化炭素、メタン、一酸化二窒素、フロンガス)の排出を全体として実質的にゼロにするということです。ただし、我が国の定義では、温室効果ガスとして、二酸化炭素以外のガスも含まれていますが、実際には、エネルギー起源の二酸化炭素の割合は、温室効果ガス全体の85%を占めています。カーボンニュートラルという目標において、「排出を全体として実質的にゼロにする」というのは、「排出量から吸収量と除去量を差し引いた合計をゼロにする」ということです。ここで、吸収量というのは、例えば、植物の光合成に使われる大気中における二酸化炭素の吸収量を意味します。これは、植林によって増加させることができます。また、除去というのは、大気中に存在する二酸化炭素を回収して貯留することが考えられています。つまり、排出を完全にゼロに抑え込むことは現実的に難しいため、排出せざるを得なかった分については、同じ量を吸収または除去によって、差し引きゼロ、正味ゼロを目指しましょう、ということです。大変難しそうな課題ですが、再生可能エネルギーの普及によって、是非とも、2050年までに、カーボンニュートラルの目標を達成したいものです。一旦、方向性が決まれば、我が国の多数の優秀な科学者と技術者の協力を得ながら、社会が一体となって努力すれば、目標達成に近づくことは、決して不可能なことではないでしょう。

参考文献

- (1) S. K. Moore, "The ups and downs of gravity energy storage: Startups are pioneering a radical new alternative to batteries for grid storage", IEEE Spectrum **58**, 1, 38 (2021).

(通信 昭和39年卒 41年修士 44年博士)