

再生可能エネルギーを支える蓄熱システム

東京海洋大学大学院 刑部真弘

Heat storage system supporting renewable energy

By Masahiro OSAKABE

1. 不安定な再生可能エネルギー

政府は再生可能エネルギーの主電源化を目指しているが、現状は太陽光発電の出力抑制が頻繁に行われている。我々の生活の中で、太陽光や風力等の不安定な出力を受け入れる態勢ができていないのが一因だと考えられる⁽¹⁾。これらは、火力や原子力のように単一の規格通りの出力をだすものではなく、一つ一つの出力が変動し個性を持っている。上手に使うには、最近の電気自動車に搭載されている高性能蓄電池⁽²⁾とともに、家庭の給湯器や工場のボイラ等で熱として蓄える蓄熱制御が重要である。さらに、熔融塩や水バイナリー発電等の新たな蓄熱利用技術の展開が期待される。



図1 海洋大の屋上に設置した太陽光発電パネル

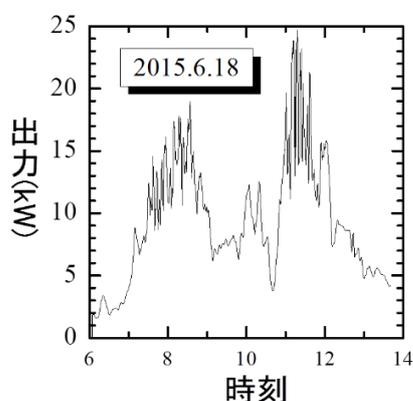


図2 変化する太陽光発電出力

図1は、1932年竣工の東京海洋大学1号館の屋上に設置した最大電力20kW（面積約100平方m）の太陽光発電パネルである⁽¹⁾。

梅雨時の天候が変わりやすい日に、パネルの1分おきの出力を示したのが図2である。朝6時ぐらいから出力が上がり始め、8時ごろに15kWを超えるが、強い雨が降って出力低下が起こった。再び日差しが戻り、昼前に瞬時値ではあるが25kWに届くくらいまで発電した。この変動する出力を1軒の家で使うためには、蓄電池がどうしても必要となる。我々の行動はお任せにはできないからである。

多数の太陽光パネルが地域に分散していると、例えば雲による発電出力の急激な低下等を緩和することも可能である。晴れている場所と雲がある場所の出力が合わさり平均化される。これは、家庭ごとに電気の使用量は大きく変動していても、300軒ぐらいの平均を取ると滑らかなカーブ⁽¹⁾になることと似ている。また、晴れて太陽光発電の出力が大きい場合には価格を下げ積極的に使ってもらうことも重要である。ドイツをはじめとした欧米ではマイナスの電気料金まで導入している。マイナス？すなわち電気を使うとお金が入ってくる仕組みなのである。

最近、日本生まれのペロブスカイト薄膜太陽電池⁽³⁾が登場し世界に広がりつつある。ペロブスカイトと呼ばれる結晶構造の材料を用いた新しいタイプの太陽電池であり、「シリコン系太陽電池」や「化合物系太陽電池」にも匹敵する高い変換効率を達成している。理論的には変換効率60%超の可能性もあり、現状パネルの3倍の効率になる。そしてインクジェット等の塗布技術で容易に作製できるので製造コストも安い。

風速の約3乗に比例する風力発電の出力も、風速が半分になると、理論的には出力は1/8になる。大気乱流である風の速度は常に変動しているので、風車出力は大きく変動する。ただし、太陽光発電と同じように

少し離れた風力発電の出力と足し合わせると、小さな変動が消え去ることが起こる。しかも風力は太陽光がない夜間等に強く吹くことが多く頼もしい。

一つ一つの出力が個性を持っている再生可能エネルギーを集めることによって、小さな変動が消えて滑らかな出力となる。また、一つ一つの出力自体が小さいので、従来の大規模発電所から送電線で都市部に送電するというよりも、地域で使っていくイメージとなると考えられる。地産地消であり、電力を必要とする企業や産業をエネルギー産地に移転させるのも重要である。

2. 増えていく再生可能エネルギー

不安定な出力にも関わらず、2020年までに、EUは総電力の13%を風力でまかなう計画がある。特に、2005年時点では風力全体に占める洋上の比率は3%弱に過ぎなかったが、2020年には27%まで上昇すると予測している。デンマークでは、2013年12月の1ヶ月平均で風力発電が全電力の55%を占めたのを皮切りに、2015年6月9日には46%、翌6月10日には56%を達成している。2017年デンマークでは、電力の43.4%が風力発電で賄われ、総発電量に対する風力発電の割合としては過去最高となった。2015年時点でのドイツ風力発電容量は、ヨーロッパ最大の33GW(大型原発33基分)であった。

中国も急速に風力発電を推進し、2015年時点で発電容量145GWもの風力発電所を建設している。同じ2015年、カナダの風力発電容量は、10GWを超えたと報告されている。2018年末には、米国の発電容量も100GWを超えた見込みだ。

日本でも東日本大震災後に行われた環境省による試算によると、国内で再生可能エネルギーを導入した場合には、風力発電を普及できる余地が最も大きく、低い稼働率を考慮しても、最大で40GWの発電量が見込めるとのことだった。風の強い東北地方では、3~11GWが風力でまかなえる計算になっている。この試算では、理論上可能な最大導入量から、土地利用や技術上の制約を差し引き、さらに事業として採算性を確保できることを条件に加えている。なお、2013年時点での我が国の風力発電容量は約2.7GWだった。

2018年3月末には、3.5GWに達したと考えられている。図3に示したのは2019年1月営業運転開始した銚子沖洋上風力発電であるが、今後の増設が計画されている。



図3 銚子沖洋上風力発電

2018年末、我が国の太陽光発電容量は既に50GWを超えたと考えられる。2030年には100GW、2050年には200GWまで増加する予想だ。なお、我が国の太陽光発電を設置している住宅は、2018年に322万戸もある。日本の全てのエネルギーをまかなうには、稼働率10%として計算すると、4000GWの太陽光発電容量が必要だ。これに必要な面積は、国土の5%、海も含めるなら0.4%程度である。ちなみにゴルフ場面積は国土の0.7%、欧州で道路自体を発電パネルにした例もあるので比較すると、公道は国土の2%もある。

2017年11月、国際エネルギー機関(IEA)は、太陽光発電が2040年までに多くの国や地域で最も低コストのエネルギー源となり、低炭素型電源の設備容量として最大になるとの見通しを発表している。

米国でも脱炭素化に否定的なトランプ大統領の意向とは関係なく、2017年の太陽光発電のコストが、エネルギー省の予測よりも3年早く約7円/kWhまで低下した。2018年3月5日昼頃カリフォルニアの太陽光発電電力が初めて大型原発10基分の出力を超えた。しかも、日曜日だった前日の4日は全需要の50%にも達した。2019年4月には120MWのアイダホの太陽光発電で2.4円/kWhの20年契約が結ばれた。

2017年にはEU総電力の約1/3が、再生可能エネルギーだったようである。デンマークの電力は、理論的には風力だけで賄えるとの予測も出ている。2018年のドイツ電力の4割は、再エネだった。ドイツは、原発大国フランスをはじめスイスやオーストリア等の多くの国に電気を売っている。少しだけチェコとスウェーデンから買っているだけだ。

2017年における英国の二酸化炭素排出量が、1890年を下回ったことも報告されている。最近の20年間は原発新設がないが、急激に低炭素化が進んでいる。我が国でも2018年5月20日昼頃に、四国電力管内の需要電力がすべて再生可能エネルギーで賄われた。2020年には、世界の風力が800GW、太陽光が600GWの発電容量となる予想がある。これらは不安定だが、それぞれの国の国産電力であることは疑う余地がない。

さらに、2050年までには北海に100GWの風力発電網が建設されるスケールの大きな計画もある⁽⁴⁾。図4に示したように小さな島が電力網の中心となる計画だ。エネルギーの世界は、急速に変わりつつあるのを実感する。戦略コンサルティングのマッキンゼーによるエネルギーの将来予測レポート⁽⁵⁾によると、2035年には世界の発電量の半分以上が再エネになるとされている。

3. スマートグリッドによる蓄熱制御

従来の電力グリッドは、図5のようにユーザーに一方的に電力を供給するだけだった。この場合、電力会社は、各ユーザーが使う電力の総量に、いつでも同量になるように供給しなければならない。これを「同時同容量」と呼んでおり、これが達成されないと周波数変動し、最悪の場合は停電となる。需要と供給が10%程度異なると、周波数が1Hz程度変動すると言われている。周波数がずれると機器保護のために発電機が次々と停止し、最終的には2018年に北海道胆振地震で派生したような大規模広域停電になる可能性がある。特に、晴れたら発電するが、曇ったら発電出力が激減する太陽光発電のような再生可能エネルギーを大量に導入すると、「同時同容量」が確保されるか心配になる。



図4 人工島と風力発電所の完成予想図

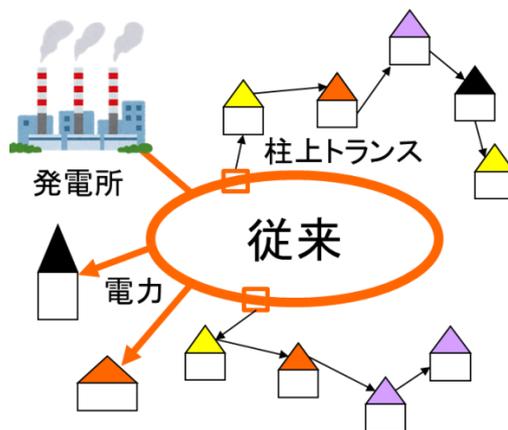


図5 従来の電力網

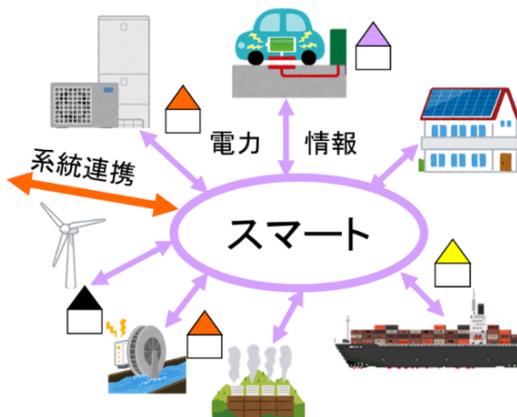


図6 スマートグリッド

ところで電柱に円柱状の機械が載っているのを見かけることが多いが、あれが柱上トランスである。トランスは、電線の電圧から家庭で使用できる100～200Vの電圧まで下げる役割をしている。柱上トランスから出た電線は、直列に5軒程度の家につながっている。もし、これらの家で太陽光発電を導入し売電をすると、発電量が多い場合には電力網へ電気が流れ込むことになるので、これらの5軒の家の電圧が基準よりも上がる問題が指摘されている。柱上トランスを用

いた従来のシステム自体が、再生可能エネルギーに対応していないと考えられる。

一方、スマートグリッドは、図6に示したようにICT（情報通信技術）やIoT（もののインターネット）技術で電源側と需要側が双方向に繋がり、各ユーザーと情報や電力のやりとりをし、ユーザーの電力使用を「見える化」したり抑制したりする。従来の電力システムが「同時同容量」で一方向的に電力を供給する「技術システム」であったのに対し、スマートグリッドは電力や情報をやりとりし、柔軟な電力供給を行う「社会システム」である。かつての下町で、夕食時に醤油や塩が足りなくなったときは気心の知れた隣家から借りるのが普通だったようだったが、このように地域社会で電力を融通し合う。なお、電力網とは1点で系統連系し、多様な地域間での電力融通を可能とする。

ユーザー側の電力には、太陽光や風力発電の他に電気自動車(EV)や燃料電池車(FCV)がある。車の95%は駐車場にあるというデータもあり、電力融通は実現可能と考えられている。特に最近、V2H（車から家へ）というシステムが安価に売り出され、車が災害時電源になるというキャッチフレーズで売れ始めている。現状では、家庭の端子と電線で接続する方法だが、すでに無接触で電力融通する方法も開発されつつある。後者が普及すると、家庭や会社の駐車場に置かれた車が、社会全体の蓄電池として簡単に機能することが可能になる^(1,2)。前述のマッキンゼー報告書によると、2035年にはEVの数は1億台突破が見込まれ、2050年にはEVが20億台に達する可能性もある。

また、家庭でお風呂を沸かすときに発電するエネファームやヒートポンプ式給湯器であるエコキュートを広域制御するのも重要だ。エコキュートやエネファームは一種の蓄熱装置である。再生可能エネルギーが豊富なときにエコキュートを作動させ、足りないときにエネファームを作動させることによって出力変動の大きな再生可能エネルギーを補うことができる。これらの蓄熱装置は、震災時等に水道が断たれた場合の給水源ともなる。保温タンク内の水は下が冷たく、上が熱い成層状態となっている。このため、タンク下部から水を排出し、利用することが可能だが広く知られていない。

例えば、少し大きめな出力8kWのエネファーム発電装置であれば、家庭で1日に必要とする90℃で200リッターのお湯を、1時間程度で沸かすことができる。発電装置としては小さなものであるが、これが12万5千台あると1GW（大型原発1基分）の電力を供給できる。このお湯を作るタイミングをいつにするかが重要となる。

逆に、エコキュートは電力を用いてお湯を沸かすが、これをいつ作動させるかだ。2018年にエコキュートは600万台普及していると考えられるが、これらは9GWの電力を使うが、再生可能エネルギーが豊富なお湯を沸かすのが好ましい。

さらに、全国に数多く存在する産業用ボイラ等に、再生可能エネルギーを熱として蓄えておくのも重要である。熱を貯めやすい炉筒煙管ボイラや図7のような蒸気アキュムレータ等を活用するのが望ましいと考えられる。蒸気アキュムレータは、蓄熱媒体として飽和熱水を使用しており、同じ容積の蒸気溜に比べて、例えば1MPa容器で47倍の蓄熱を可能としている。大きなものは、容積が250m³、設計圧力も20MPaにもなる。現状では、工場等のボイラの起動・停止回数が減少するためにプレパージやポストパージによる熱損失削減に貢献しているが、さらに再生可能エネルギーを有効利用することが期待されている。



図7 蒸気アキュムレータ

蓄熱のための加熱には、効率の良いヒートポンプを用いることが望ましいが、現状は165℃程度までしか昇温⁽⁵⁾できないので、それ以上の温度が必要なら単純

な投げ込みヒーター等を用いても良い。電力の余る休日等に予熱したボイラは、次の就業日に迅速かつ省エネで始動ができる。さらに、陶器や工業製品等の製作に熱容量の大きな電気炉を用い、再エネが豊富なときに加熱・昇温することも考えられる。

4. 今後の蓄熱技術の展開

現状で大規模蓄熱技術が活用されているのは太陽熱発電所である。図8は130MWもの発電が可能なカリフォルニア太陽熱発電所である⁽⁶⁾。約12万枚の鏡でタワー中央部ボイラに反射光を集め550℃の過熱蒸気を得ることができる。約140mのタワーの下部にある構造物は空冷復水器と蒸気タービンである。一般的に蓄熱設備はなくても、伝熱の時定数が大きいため太陽光発電よりも発電出力変動は少ない。

さらに蓄熱設備⁽⁷⁾を持つことにより、太陽が出ている昼間の熱エネルギーの一部を蓄え、夜間の発電もできるようになる。日没後に10時間程度の発電も可能との試算もある。この蓄熱材料として、単位重量当たりの比熱や融解潜熱が大きいアルカリ金属ハロゲン系やオキシ酸塩系の熔融塩が使用されている。熔融塩(molten salt)とは、食塩などの陽イオンと陰イオンからなる塩で熔融状態にあるものをいう。

太陽熱以外でも、再生可能エネルギーで発電した電力を熱として蓄える蓄熱技術が注目されている。従来技術を用いるので、蓄電池に比べて安価であるという特徴がある。

米グーグルの親会社であるアルファベットからスピンオフした会社マルタが開発するのは、高熱の塩と不凍液を利用したタービン発電システムである⁽⁸⁾。太陽光や風力などの再エネの電力でヒートポンプを動かし、高温と低温空気を作る。この高温空気です融融塩を加熱し液体にし、低温空気です不凍液を冷やす。電力を取り出す必要が生じると、ヒートポンプを逆に作動させ、両者の温度差を利用してタービンを駆動して発電する。図9に示した概念図のようなシステムは、従来技術を用いており40年もの長期間使える。蓄熱コストは電池の数十分の1程度であり、電力への最終的な変換効率の低さを踏まえても圧倒的に安いと考えられている。



図8 カリフォルニア太陽熱発電所

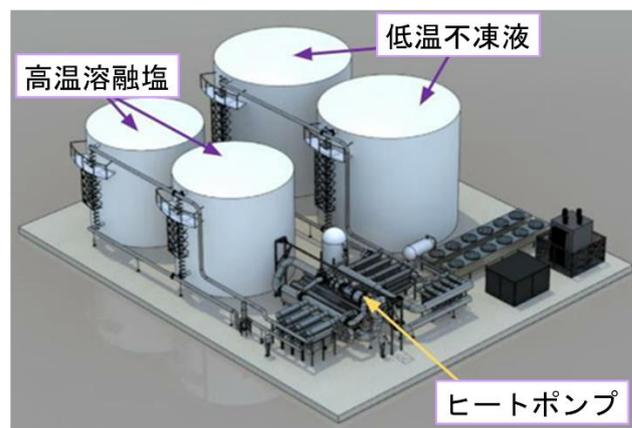


図9 グーグル蓄熱装置

日本でも、風力を利用して熱をため、後で電気に変換する「風力熱発電」の実証試験が行われている⁽⁹⁾。風車内部に大型の磁石を用いた発熱器を搭載し、発生した熱で熔融塩を循環させ、熱を地下タンクに蓄える。電力が必要な際に熱で蒸気をつくり、蒸気タービンを回してエネルギーを取り出す。このような熱貯蔵には、長年蓄積してきたボイラ技術が活用されることが期待されている。

熔融塩の研究は、当初は原子力で行われた歴史がある。熔融塩原子炉(MSR)ではフッ素系の熔融塩を一時冷却剤として用いると共にその中に核燃料を溶解して使用する。この型の原子炉はアメリカのオークリッジ国立研究所で1965年に実験炉が作られた。このため容器材料との適応性等の研究も精力的に行われてきた。熔融塩は、有機液体や液体金属と比較して、熱容量、化学的安定性、価格や容器特性等で、全般的に均衡のとれた物質であると報告されている⁽¹⁰⁾。

タンクに入った溶液等で蓄熱蓄冷を行うためには、図 10 のような相変化物質 (PCM) を含有する粒子径 10μ 程度のマイクロカプセル⁽¹¹⁾を混ぜると蓄熱容量が大きくなる。PCM としては潜熱量の大きなパラフィン類が使用されることが多い。マイクロカプセルの材質はメラミン樹脂タイプとノンホルマリンタイプがある。最近、 500°C を超えるような高温に対しても酸化アルミおよび合金 PCM⁽¹²⁾を用いたものが登場してきた。

蓄熱をした中低温熱等を用いて発電する方法の一つとして注目されるのは、低沸点媒体を用いたバイナリー発電である。図 11 は温水 80°C と冷水 20°C で発電をする水バイナリー発電装置⁽¹³⁾ ⁽¹⁴⁾である。外径 245 mm の小型ツインタービンに挟まれた真ん中が発電機であり、現状では 10kW 程度までの発電が可能となっている。現在、多くのバイナリー発電では、水ではなく高分子有機媒体を作動流体としているものが多い。一般的に、これらの有機媒体の温暖化係数 (二酸化炭素に比べて) は 1000 倍以上もあるため、温暖化に影響のない水を用いたバイナリー発電が望ましいと考えられる。

文献

- (1) 刑部真弘, [エネルギーと環境問題の疑問 55](#), 成山堂, (2018).
- (2) 刑部真弘, 再生可能エネルギーを支える交通系蓄電池, 船用工業会誌「舶」, 278, (2018).
- (3) 宮坂 力, ペロブスカイト型太陽電池の開発, <https://www.jst.go.jp/seika/bt107-108.html> (accessed on 13 January, 2019).
- (4) 神戸製鋼高温ヒートポンプ http://www.kobelco.co.jp/products/standard_compressors/heatpump/sgh/ (accessed on 13 January, 2019).
- (5) マッキンゼー報告書 <https://www.mckinsey.com/industries/oil-and-gas/our-insights/global-energy-perspective-2019> (accessed on 16 February, 2019).
- (6) スマートジャパン <http://www.itmedia.co.jp/smartjapan/articles/1402/17/news012.html> (accessed on 13 January, 2019).
- (7) 千代田化工 <https://www.chiyodacorp.com/jp/service/solar-energy/> (accessed on 13 January, 2019).
- (8) GIZMODE.

<https://www.gizmodo.jp/2018/12/malta-spin-off.html> (accessed on 13 January, 2019).

- (9) 日経メガソーラービジネス <https://tech.nikkeibp.co.jp/dm/atcl/news/16/100511560/?ST=msb> (accessed on 13 January, 2019)
- (10) 古川和男, 沼田博雄, 蓄熱用熔融塩と腐食, 防食技術, 29, pp.185-195, (1980).
- (11) 三木理研工業 <http://www.mikiriken.co.jp/products/pro3.html> (accessed on 13 January, 2019).
- (12) T. Nomura, J. Yoolerd, N. Sheng, H. Sakai, Y. Hasegawa, M. Haga, G. Saito, T. Akiyama, Microencapsulation of eutectic and hyper-eutectic Al-Si alloy as phase change materials for high-temperature thermal energy storage, Solar Energy Materials and Solar Cells, 187, pp. 255–262 (2018).
- (13) 刑部真弘, 水バイナリー温泉発電, ボイラ研究, 405, pp.16-21, (2017).
- (14) C.Demanou, E.Matsuo, S.Horiki and M.Osakabe, Water binary power generation for hot spring water, Proceedings of the GRE2018 International Conference, Yokohama, (2018).

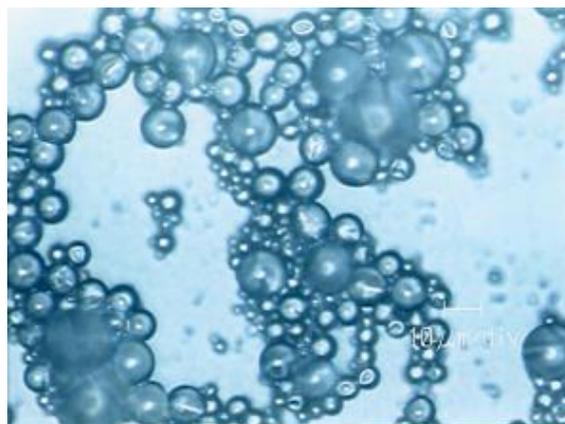


図 10 蓄熱マイクロカプセル

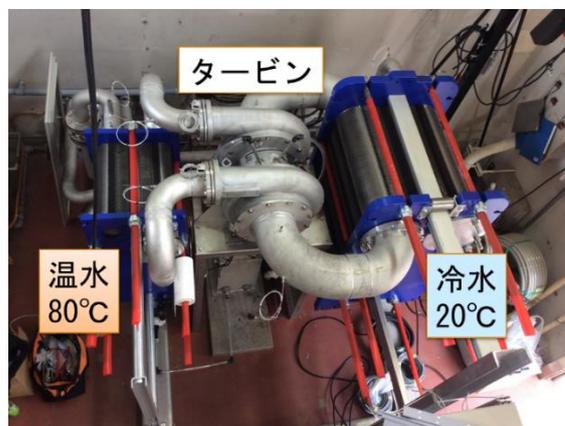


図 11 水バイナリー発電装置