

トピックス：風力熱蓄積発電

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
普及啓発部 兼 国際部
部長 岡崎 徹

風力発電に限らず多くの自然エネルギーには出力不安定性の課題がある。これを克服し、騒音問題なども解決できる可能性が示された風力熱蓄積発電（Wind Heat Power; WHP）について、電気学会の電力技術／電力系統技術合同研究会にて『風力熱発電』の題名にて発表し一定の評価を得たので紹介する。本技術に超電導を採用するとさらに大幅にコストが下がり、既存のあらゆる発電方式よりも安価に安定発電できる可能性がある。

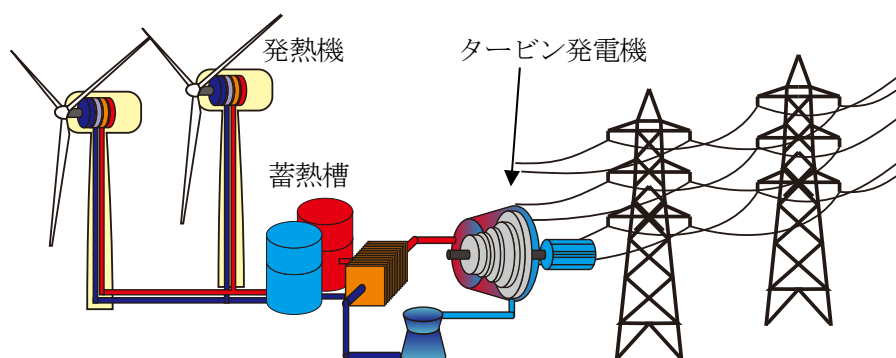


図1 風力熱蓄積発電の構成

風力熱蓄積発電の構成を図1に示す。風力タワーの上部に発熱機という渦電流を利用した電気ブレーキの一種を配置して回転エネルギーを熱エネルギーに直接変換する。電力の形態で出力しないので、発熱機は大幅な軽量化と低コスト化が可能である。発生した熱は熱媒油や熔融塩などにより地上の蓄熱槽に輸送して貯蔵され、必要時に取りだし蒸気タービンにて発電する。後半部分は近年太陽光発電より安定発電が可能なタワー型太陽熱発電と同じである。従来の風力と比べて効率が悪くメリットが無い様に見えるが、**効率と設備コストの観点で定量的に評価すると最も低エネルギーコストとなる**。その理由は、

1. 現状の自然エネルギーの導入は新鋭火力発電所の増設無しには成立しない。
2. 大量導入時には発電抑制も必要となる（全量引き取りは不可能）。
3. 風力に関しては発電機の高コスト化が課題。
4. 従来言われているような蓄電設備は、供給業者から見て導入の可能性は無い。

以上の根拠も含めて詳細は今後の Web21 にて解説していきたいが（2013 年隔月連載予定）、安定供給を前提とした場合の電力コストの比較グラフを図2に示す。風力熱蓄積発電のコストは WHP としており、現状技術の組み合わせの結果と、多少の開発要因を考慮した場合を Optimized として記載している。EU 実績ベースでの比較のため日本の現状より安い、中国の現状より高い。

風力熱蓄積発電で用いられる発熱機に超電導を採用すると、図2以上の低コスト化が期待できる。通常は、熱エネルギーを運動エネルギーに変換する際に大きなロスがある。しかし作動ガス温度が

高いほど効率は良くなる。発熱機は渦電流の原理で発熱するため金属が溶解する温度まで作動温度を上げられる。しかしその様な高温下で磁性を維持する金属は少なく、大きな起磁力が必要となる。そこで大磁場を大空間に形成する MRI に超電導が必要であるように、高温型の発熱機には超電導が必要となる。発熱機のシステム全体に対するコストは小さく超電導化してもさして全体コストアップが無いのに対して、効率は 1.5～2 倍になることが期待され、結果として大きなエネルギーコストの削減に繋がる。現時点で発熱機の実例は少なく常電導の高温発熱機を完全に否定は出来ないが、少なくとも現存する発熱機に応用できる高温発生装置は超電導しかない。

超電導を利用した発熱機は、導体が溶解する温度まで得られるため別の使い方も考えられる。例えば 1000℃ に近い温度になると、高温水蒸気電解も可能となり、水素の製造によるエネルギー蓄積や、石炭のガス化などのプロセスにも利用することが可能になるなど、**超電導化によって様々な技術への裾野も大きくなる。**

この風力熱蓄積発電の概念そのものが新規であるため色々な可能性を試みる事が重要であろう。特に注意すべき点として風力発電は総合技術であると言う点で、立地場所、方式、部材構成、調達、輸送、建設、運用など全てを考慮する必要がある。風力熱蓄積発電には実現そのものに大きな課題は見当たらないが、電気機器の側面と熱機械の側面がありこの両方に通暁しての最適化は簡単では無い。まずは幅広く検討し、試作・検討を通じて本格的開発に着手することが重要であろう。

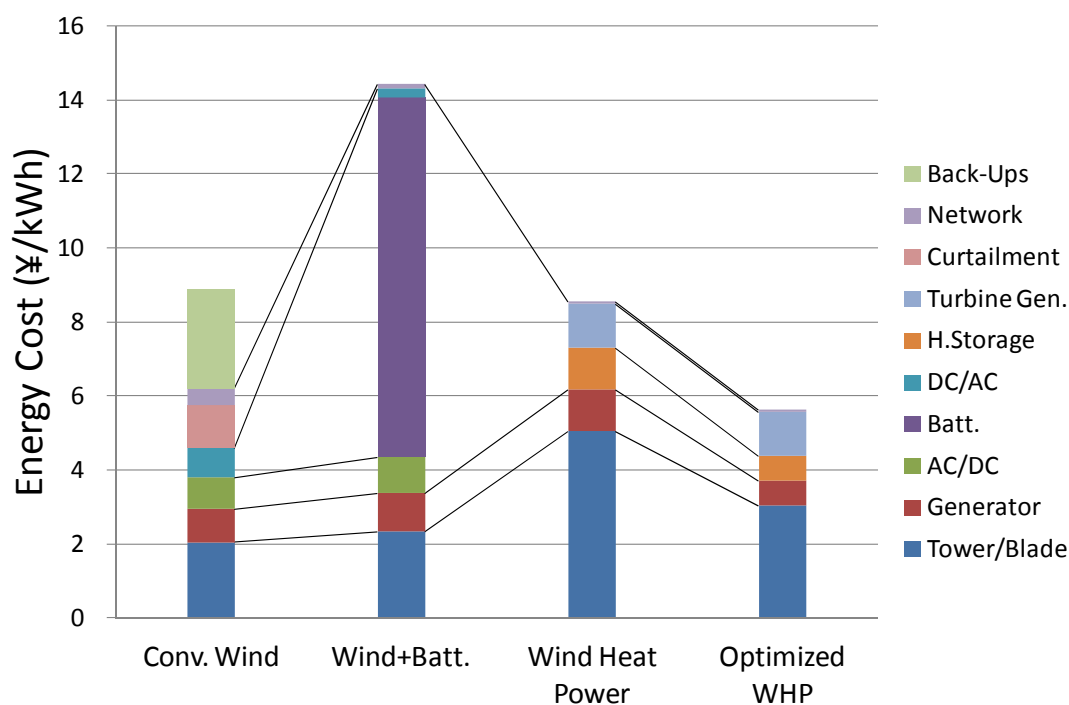


図 2 コスト試算結果（常電導の場合）

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

風力熱蓄積発電（その 1） - 「発熱機とその超電導化」

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
普及啓発／国際部長 岡崎 徹

1. 再生可能エネルギーの課題

再生可能（自然）エネルギーを本格的に導入するには、その不安定性対策も考慮した上でのエネルギーコストが重要である。この観点から風力熱蓄積発電という世界初のシステムへの期待が寄せられつつある¹⁾。まだ聞き慣れないシステムであるのでこれから 1 年間、隔月でこの風力熱蓄積発電について解説していく。今回はそのシステムコスト削減に大きく影響し開発要素のある発熱機について述べる。

2. 風力熱蓄積発電の概要²⁾

風力熱蓄積発電は近年創案された全く新しい自然エネルギーによる発電方式である。簡単には風力発電と太陽熱発電を複合化したシステムで、その構成を図 1 に示す。羽の回転力はタワー頂部で電力を経ることなく発熱機により熱に変換される。この熱は油や溶融塩などの熱媒体によってタワー下部にまで輸送され蓄熱槽に貯められる。その後、必要に応じて取り出され熱交換器で蒸気を発生し蒸気タービン発電機を駆動する。タワー上部で熱が発生した以降はタワー型太陽熱発電所と構成が同じで、蓄熱槽以降は火力発電所と同じである。構成としてはシンプルであるが世界的に調査しても先行検討例は一切無い。

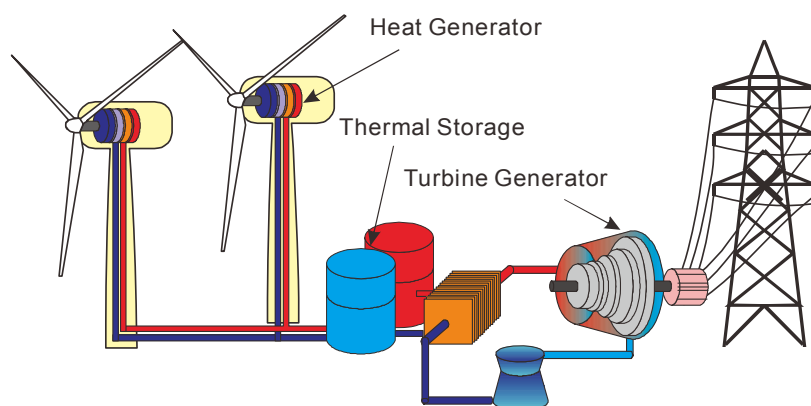


図 1 風力熱蓄積発電の構成

この構成では蒸気タービンを使用するため効率が悪い。しかし従来でも自然エネルギーには火力発電のバックアップが必須で同じ要素を含んでおり欠点とは言い切れない。さらに発電コストの観点で精査すると、規模が大きければ最も安価な発電システムになる可能性が示されている。

系統から見ると風力熱蓄積発電は従来の風力と補完関係になる。図 2 の様に風況が良い時には風力発電からの電力を直接送電する。風力の短時間変動には即応性のある電池や SMES（超電導エネルギー貯蔵装置）で補償する。風が止むと風力熱蓄積発電が送電する。長期の無風時にはボイラを

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

炊いて(図1では示さず)発電し続ける。再生可能エネルギーが増加すると設備容量も増加するため、系統の短絡容量も増加する。よってFCL(限流器)も必要となってくる。この組み合わせならば火力を廃止し、自然エネルギーによる電力供給を100%近くにすることも可能である。

一方、現状システムでは火力の廃止は不可能で、逆に風力大量導入国では火力発電所設備容量を相当量増加させている。電池などによるピークシフトも提案されているが、数時間にもわたる長時間のピークシフトに電池を適用する経済合理性を見つけることは、遠隔地や離島などを除き難しいであろう。電池は即応性を生かした短時間変動の補償が向いている。

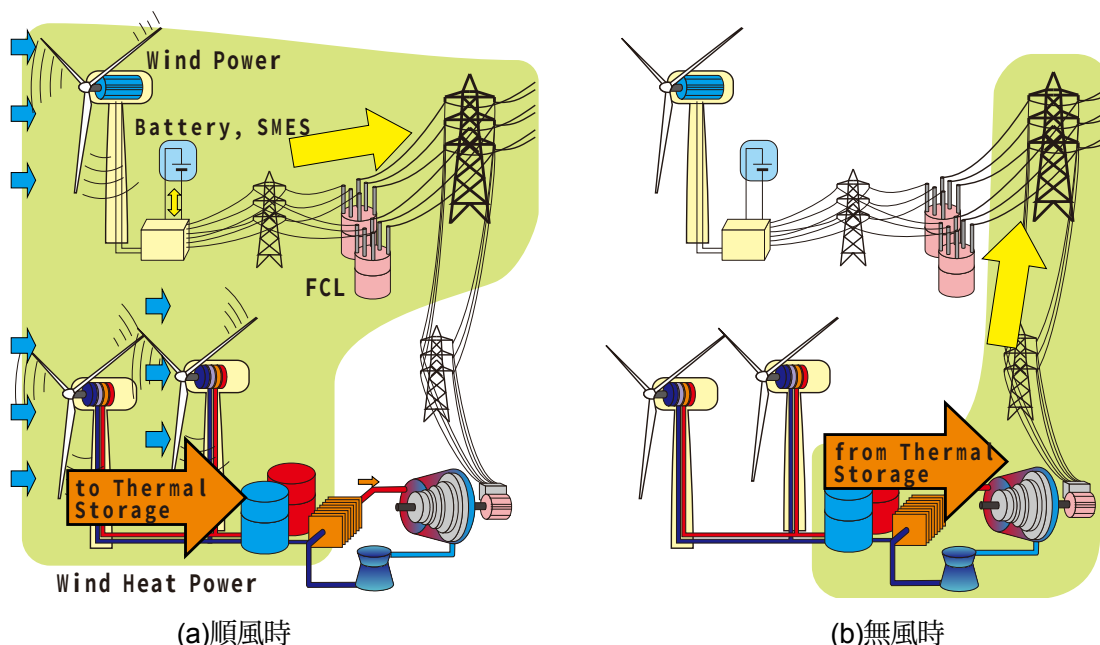


図2 風力発電との連携運転

3. 発熱機

3.1 簡単な渦電流発熱の原理紹介

発熱機は例えば電気鉄道やクレーンの電気ブレーキ、あるいはトラックの補助ブレーキなどの目的には実用化されており、渦電流現象を利用している。この渦電流を理解するための例を図3に示す。アルミ板に永久磁石を近づけても永久磁石はアルミ板に吸い付かない。しかし永久磁石をアルミ板と平行に動かすと、アルミ板には渦電流が流れ磁石の動きには抵抗力が発生しアルミ板が発熱する(図中のコロはアルミ板と永久磁石の摩擦抵抗を無くすための仮想的な物として描いた)。すなわち運動エネルギーが非接触で熱に変換される。発熱機ではこの永久磁石の動きを風車からの回転力により行う。例えば円筒状のアルミ板の中で永久磁石を回転させると渦電流による発熱が生じる。

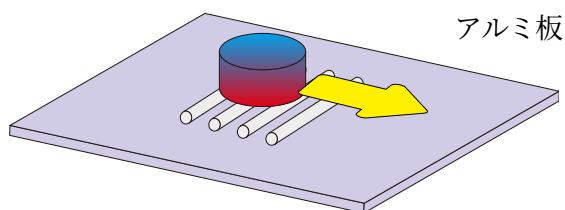


図3 渦電流発熱の一例

ほぼ同じ原理の加熱装置が家庭でも IH 調理器として利用されている。前記の例では磁場源を機械的に移動させることで渦電流を作るが、調理器ではコイルに流す電流を時間的に変化させることで渦電流を発生させ、熱を発生させる。以前の IH 調理器ではアルミフライパンなどは使用できなかった。これはアルミには磁性が無く磁場が弱くなるため渦電流が小さくなり発生熱も小さくなってしまったためである。図 3 でも実はアルミ板より鉄板を用いた方が渦電流は多く流れ発熱も大きくなるが、吸引力が働き渦電流の発生を体感しにくいのでアルミ板として説明した。

3.2 発熱機の発電機に対する特長

発熱機は回転エネルギーを熱に変換する装置で、ファラデーの法則に従う以上発電機と原理は同じである。これを発電機と比べて検討した場合の特長は、

1. 発電機ではロス低減のために導体は低電流密度とするが、発熱機はロスを得るのが目的であるため高電流密度に出来る。すると導体断面積の削減が可能となり磁路も短くなり、小型化が出来る。
2. 発熱機では冷媒（熱媒体）の入り口出口の温度差を大きく取れ、かつ電気絶縁を気にせず大きな熱容量の媒体を使用できるため、冷媒の流量あるいは冷媒通路を小さく出来る。
3. 熱絶縁は電気絶縁ほど厳密でなくとも良い。ただ熱絶縁は電気絶縁ほど完全な物は無い。
4. 導体としては安価な金属、また磁路にも加工性の良い普通の鉄を採用できる。
5. 結果として、同体積でも熱絶縁を除く材料費は 1/3 以下になる。

強調すべき点は、発熱機はこれまで存在しなかったため各種型式が考えられることである。モータ形状にラジアル型、アキシアル型があり、方式として誘導型、界磁型、誘導子型などがあるように発熱機も開発要素というよりは最適化の余地が非常に大きい。以下には誘導モータ型を紹介する

3.3 誘導型発熱機の概要

現在、高温液体ポンプ（通称キャンドポンプ）が市販されプラントなどで広く使われている。このポンプの駆動モータ構造がそのまま発熱機として使用できる。そのポンプ部を外した構成を図 4 に示す。本来は右端の軸にはポンプの羽がつき、流体を駆動するがここでは逆に風車の軸がつき強制的に回転させられる。作動流体はロータおよびステータ（この場合は電機子）に直接触れ、熱交換して外部に取り出される。ロータはアルミのかご形導体と鉄芯で構成されており特に絶縁なども無いため高温下での使用に問題はあまりない。しかしステータは通常銅線の分布巻き線であるため絶縁には 400 °C まで耐熱性の実績がある巻き線が電機子に採用される。その絶縁材料はセラミックであるため、さらに高温にしても使用可能であろうが、その様な用途の要求が無いため実績は無い。

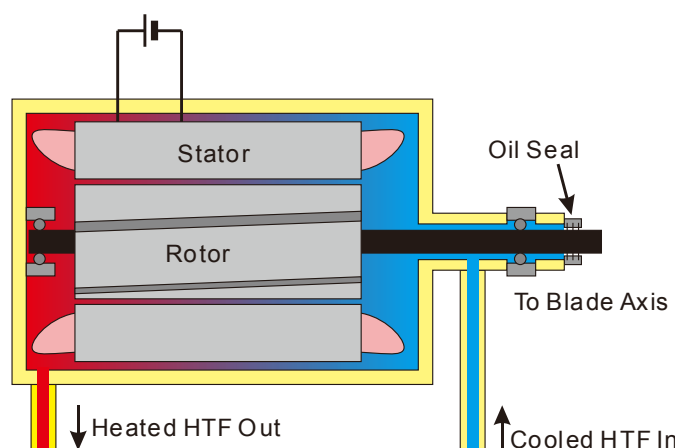


図 4 誘導モータを利用した発熱機の構造例

この電機子に直流を印加するとダイナミックブレーキとも言われる電気ブレーキの使用方法になる。外力によってモータを強制的に定格回転数で回転させ電機子に直流を印加すると、始動トルクと同じだけのトルクが現れ、その仕事はほぼ全てかご形巻き線での発熱となる。図 5 に一般的な誘導モータの特性曲線の例を上げる。始動トルクはモータの定格トルクより大きく、その程度は設計にも依存するが発電機（モータ）と比べて同じ kW 容量の発熱機は小さく軽く構成できることになる。この構造では熱媒体に対して軸シールが必要となるが、熱媒体の入り口温度は常温程度とできるので技術的な問題は無い。ただし、より高温を狙う場合には溶融塩の採用が必要となり、この場合には構造も含めて検討が必要である。また、界磁巻き線については三相交流でなく単相であり、正弦波での電流取り出しも必要無いため安価に製造出来る集中巻き線が採用できる。

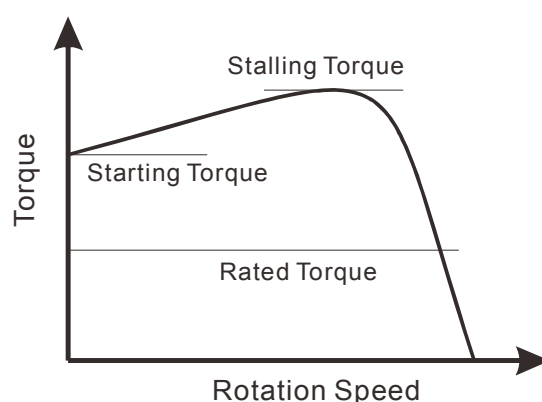


図 5 誘導モータの特性曲線例。発熱機動作では定格の数倍で使用できる。

4. 超電導による発熱機高温化

一般に熱機械は効率が悪いが、これは作動温度の高温化によって改善できる。蒸気タービンの場合、温度上限は開発段階では 700 °C の物もあるが、おおよそ 600 °C であり効率も 40 % 程度である。これに対してガスコンバインドなど高温に対応したシステムを採用すると 60 % の効率をも達成するなど、熱システムの高温化は効率向上に直結する。よって風力熱蓄積発電でも高温化することが望ましい。しかし図 4 で示したような発熱機は鉄を磁路として採用しており、高温化に伴って温度が鉄のキュリー点を超えると十分な磁場が得られなくなり発熱機として動作しなくなる。その状況下で強力な磁場を生成するためには界磁の超電導化が必要である。



図 6 実用化された超電導加熱炉。実験のため銅を赤熱するまで加熱した。
この時、超電導部分と赤熱部の温度差は 1000 °C 程度と推定される。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

この構成は発熱機ではなく超電導炉にも見られる³⁾。図 6 は世界で初めて産業化された超電導アルミ加熱炉である。非磁性体であるアルミ全体に強力な磁場を印加するため超電導が採用されており、誘導加熱炉としての効率が従来の 50 % 以下から 90 % 程度と大きく向上している。この炉では超電導コイルはマイナス 250 °C 近くで運転され、一方でアルミ塊は連続定格でプラス 520 °C まで熱せられる。実験的には 900 °C 近くでも運転された様子である。高温側の断熱を強化すれば非加熱物の温度はもっと高くとも運用できる。

発熱機の超電導化、さらに熱媒体の高温化は設備コストの増大も招く。発熱機のコスト、配管コストと全体コストとシステム効率のバランスが重要である。

参考文献:

- 1) 牛山泉「風力発電が世界を救う」日本経済新聞出版社、日経プレミアシリーズ、pp.37-38
- 2) 岡崎徹「風力熱発電」電気学会 電力技術電力系統技術合同研究会、PE-12-156, PSE-12-172 (2012-8)
- 3) <http://zenergypower.net/images/Presse/MBH/2008-09-Industrial-Heating-MBH.pdf>

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

風力熱蓄積発電（その 2） - 「再生可能エネルギーの実態」

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
普及啓発／国際部長 岡崎 徹

1. はじめに

再生可能エネルギーの大量導入には、その出力不安定性対策が重要である。これの具体的対策については意図する・しないに関わらず推定や誤解、誇張に基づく資料も多く、現実が見え難くなっている。本稿では恣意が入りづらい実績資料を元に、再生可能エネルギーを電力系統に大量導入する場合の姿を明らかにする。その中で図 1 に示す風力熱蓄積発電（WHP; Wind Heat Power）の役割を述べたい。

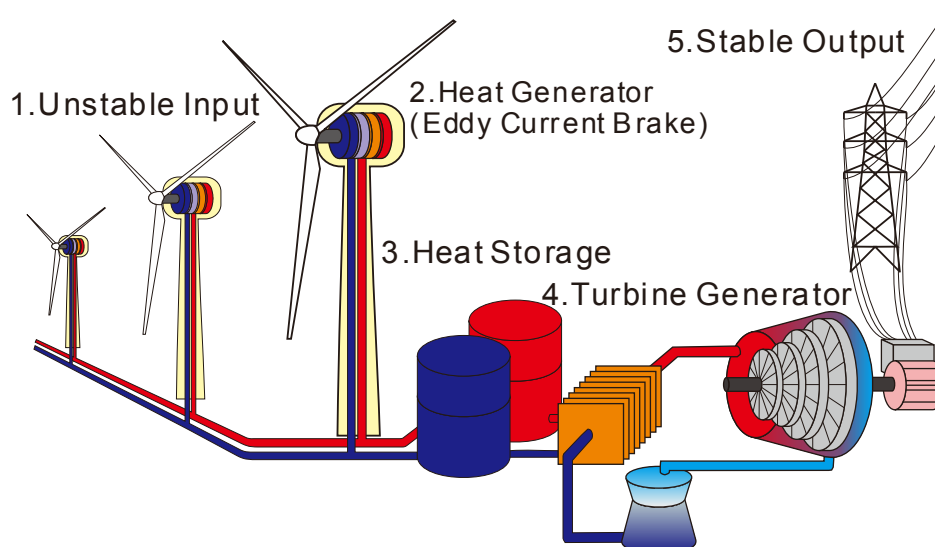


図 1 風力熱蓄積発電の構成

2. 再生可能エネルギー導入先進国の実例

2.1 デンマーク

デンマークでは風力で総発電量（kWh ベース）の 20 %を風力で賄っていると言われている（図 2）。これを詳しく Danish Energy Agency 発行の Energy Statistics 2010 から調べると、まず図 3 の様に 1980 年比 2010 年まで電力消費量はほぼ増加していない。同時期の電力設備容量の変遷を調べると図 4 の様に風力が大量に導入されると同時に大型火力設備は維持したまま小型火力を増強している。結果として電力消費が一定なのに従来型発電設備を 25 %増加させている。

またデンマークは北欧諸国と海底ケーブルで強力に相互接続され活発な取引が行われている。この取引状況と風力の発電量について CEPOS（デンマークの政府系シンクタンク）が詳しく分析している。これによると風力か火力か電力の由来判別は難しいものの、最初に述べたような総発電量

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

の 20 % を風力で賄っているとは到底言えず、4 % ぐらいが自国消費で残りは輸出している、と分析されている。理由は、風力は需要に合わせた発電が出来ないため電力取引価格が安価な時間帯に輸出せざるを得ない事が多く、逆に必要時に輸入する場合には取引価格が高いからである。結果としてデンマークは世界一とも言われる電力コストになっている。

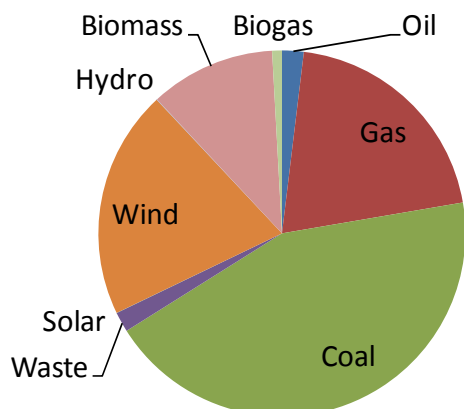


図2 デンマークのエネルギー源別発電シェア（出典：Danish Energy Agency “Energy Statistics 2010” より作成）

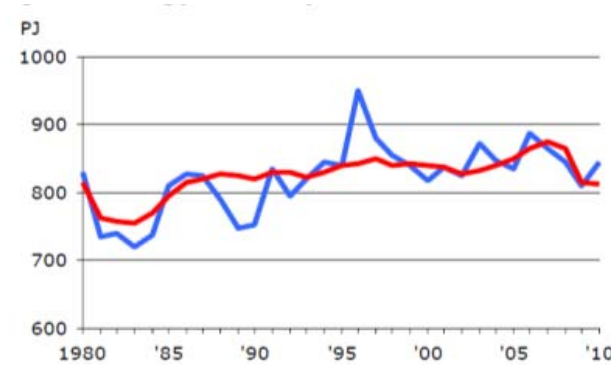


図3 エネルギー使用量の変化。赤色は年ごとの気象要素を加味した場合で、30 年間でほとんどエネルギー消費量が一定である事を示す。縦軸が拡大されていることに注意。（出典：Danish Energy Agency）

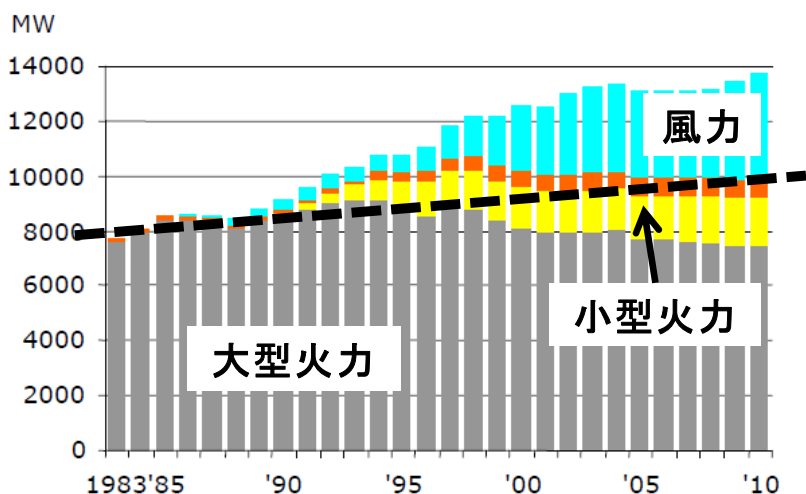


図4 デンマーク発電設備容量の変遷（出典：Danish Energy Agency）

2.2 スペインの実績

スペインもデンマークと同様に自然エネルギーを大量に導入した。スペインはピレネー山脈を越える送電線建設が景観問題から難しいために、電力系統的には孤島に近い。この点で周辺国と繋がっているデンマークとは様相が異なる。

スペインは 2000 年から 2010 年にかけて主に風力を 2.4 GW から 24.8 GW へと 2010 年の全体

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

設備容量 97 GW の中で大きく増加させている。その際に即応答性のあるガス火力を 0 から 25.2 GW まで新規導入した (図 5)。この間の電力消費は 35 % 増のため、電力消費量の増分よりも火力の設備容量増分の方が多い。結果として 70 % を超えることが珍しくない火力の設備稼働率は 30 % を切っている。

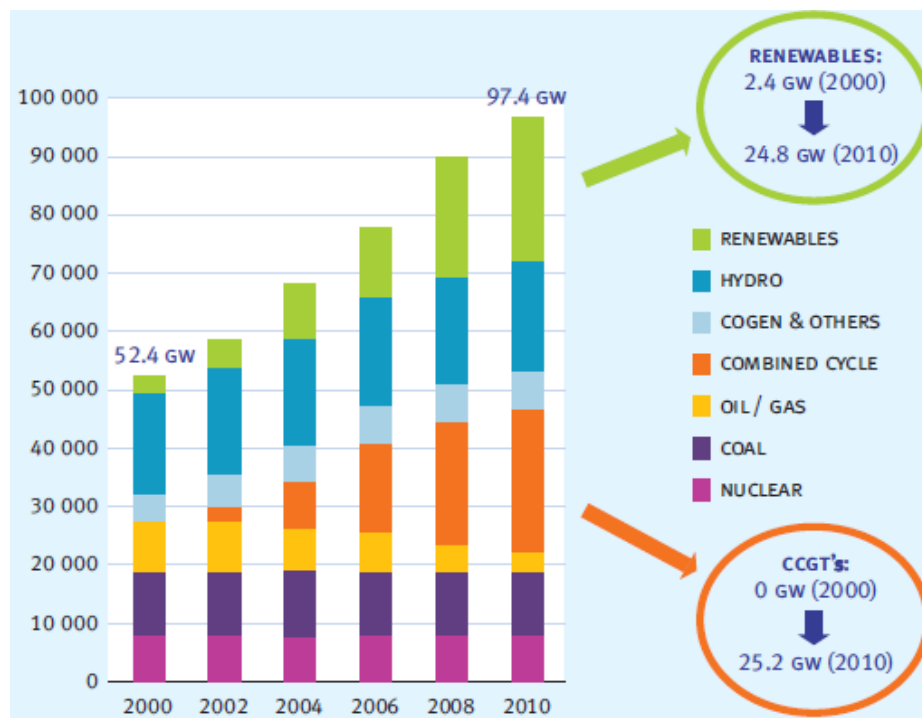


図 5 スペイン発電設備量の変遷。この間に電力消費量は 35 % 増加。この増加以上の従来型発電設備の増加を行った (出展 RED Electrica de Espania)

以上のようにデンマークもスペインも風力の大量導入によって従来型発電設備を削減せず、逆に増加させていることがわかる。

さて、次の項目以降はその他の国の計画を紹介する。計画で有り実績ではないため、将来推計への不確実性がある事を予め述べておく。

2.3 ドイツの計画

欧州の中で大きな電力需要を持ち、2011 年には kWh ベース で 10 % 程度の再生可能エネルギー導入を達成したドイツはどうであろうか。その将来像は German Energy Agency、通称 dena の Grid Study II(2010) に詳しい。計画では 2008 年比 2020 年には全体の電力消費を 8 % 削減し、一方風力の導入量を 30 % とし、原発は 20 % から 7 % に順次削減する。原子力を含む従来型発電設備量は 14 % を削減しているため、デンマークやスペインほどの設備冗長性増大にはなっていない。設備冗長性をあまり大きくしなくとも良い計画の根拠は、デマンドサイドマネージメントなどの開発要素を考慮したためであり、この開発が進まなければデンマークやスペインと同様な設備構成になるであろう。

現在、ドイツでは太陽光が非常に大きな比重を占めるようになってきた。しかしあまりに電力費が高騰したため見直しが行われ、今後の太陽光導入は大幅に減る見込みである。図 6 には再生可能

エネルギーの中での設備容量 (kW) とその発電量 (kWh) を示す。太陽光 (PV) は設備容量に比べて発電量が少ないことが明らかで、元々の設備コストの高さもあり、この大量導入は電力コストを大幅に押し上げる結果となっている。また火力発電所と同様の運用が可能なバイオマスが占める割合が多い。この中身については精査が必要であろう。

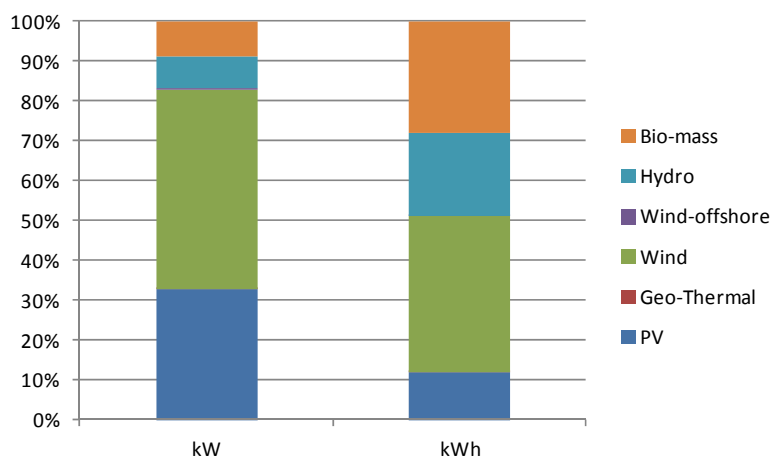


図6 ドイツ再生可能エネルギーの容量 (kW) と発電量 (kW-h) (2010, 出展 : BDEW)

2.4 アメリカの実績・計画

アメリカはまだ 2010 年において再生可能エネルギーのシェアは水力を除くと 3.5 %と欧州より遙かに小さい上に、地域ごとに小さな電力会社が存在するため、なかなか全体像として確度の高い資料・計画が得られにくい、例を示す。図 7 に米国 NREL/DOE 資料”20 % Wind Energy by 2030”(DOE/GO-102008-2567 2008/07) のミネソタ州における数日間の運転状況を示す。

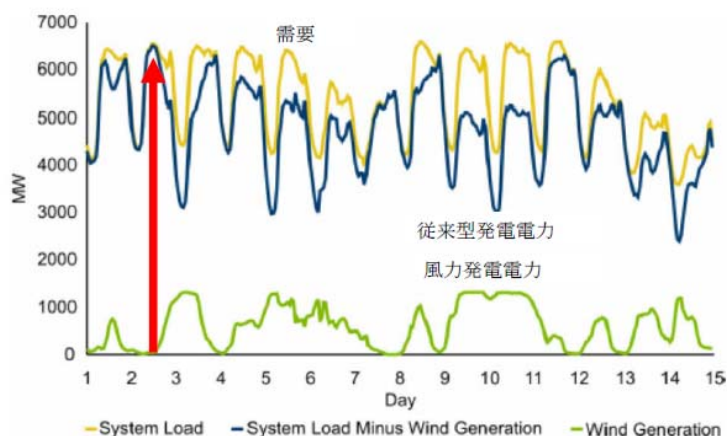


図7 アメリカ・ミネソタ州における電力需要と風力発電量の関係

2 日目 (矢印) には風力の出力がゼロの時間帯に最大需要が発生している。すなわち従来型発電設備は風力の導入に関係無く維持する必要があることがわかる。一方で需要が少ない時間帯に風力が最大出力となり、従来型発電の出力を大きく下げることが必要となっている。すなわち系統を安定運用するためには従来の設備容量を維持しつつ、出力調整が容易な発電設備、すなわちガス火力が必要となる。最新の情報としてフォーブス電子版記事”Why It's The End Of The Line For Wind Power”(2012/12)でも火力の維持が必須であると紹介されている。

2.5 広域連携による平準化

再生可能エネルギーに関しては広域連携することでその出力不安定性は平準化される、との主張もある。これについては図 7 のデータも広域連携した結果の風力出力であり、平準化は必ずしも行っていない事がわかる。さらに広域なドイツのデータを図 8 に示す(German Wind Energy Report 2010)。ここでもドイツ全土の風力出力は緩やかではあるが変動し、需要が大きい時に風力から必要な電力の供給が難しい期間があることがわかる。年間を通じてみればほぼゼロになる時間帯も有り得る。

それでも少しは発電しているので、非常に大量の風力を導入すれば、との議論も生じるが、すると良風時には電力が余り発電停止をせざるを得ず、稼働率の低下に繋がり、発電コストが上昇する結果となる。

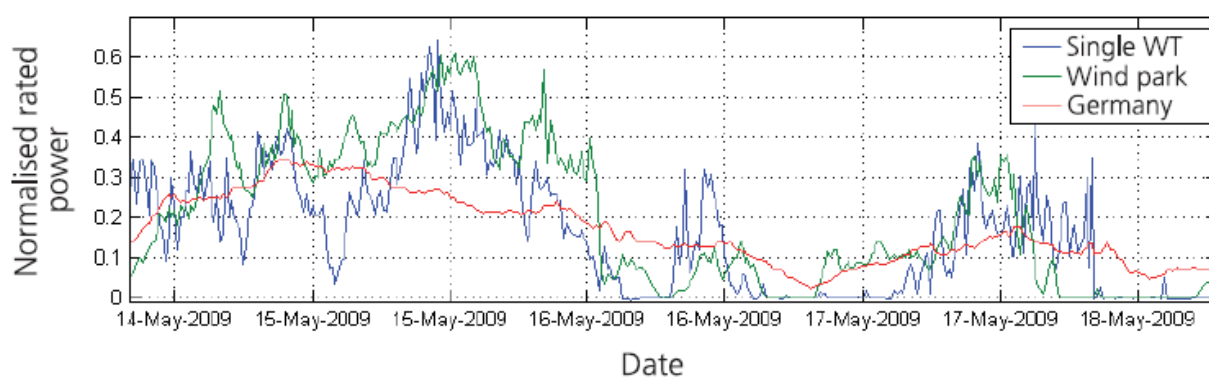


図 8 ドイツの風力出力変化図。風車一基(Single WT)の場合と、複数台(Wind park)の合算出力、そしてドイツ全土の風力出力を相対比で表している。

なお、ここまでで風力の導入は二酸化炭素排出量削減に効果が無い、というイメージを持たれかねない。世の中の風力導入反対意見資料には、風力導入は火力の稼働率低下・間歇運転を招き燃料消費量は逆に増えている、との主張も散見される。しかし前述の米国 DOE 資料では図 9 の様に風力を 20 % 導入した際には電力コストをほとんど上げずに燃料の炊き減らしが実現できることが示されている。

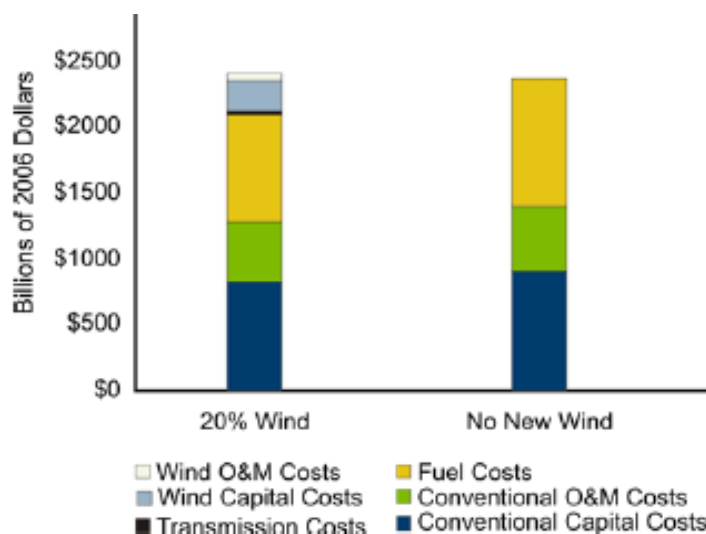


図 9 アメリカの 20 % 風力導入計画による燃料炊き減らし(▲16%)効果予測

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

風力の不安定出力に対する対策として蓄電池や圧縮空気蓄積が良く引き合いにだされる。同じ DOE 資料の 80 ページには、強固な送電網を構築できればこれらの技術導入の経済合理性は無い、と記されている。Dena の Grid Study II にも同様な記載がある。ただこれは数時間単位での出力平準化を念頭においており、短時間の急激な変動には電池などが有効である事は忘れてはならない。

以上の様に従来型風力（あるいは太陽光）を大量に系統に導入するには

- (1) 最低限、等量の待機火力が必須
- (2) 送電網が弱いと不安定性は拡大する。その対策に火力がさらに必要。

ということが実績から明らかであろう。特に(2)については重要で、ヨーロッパの送電系統運用者連絡会 (entso-e; European network of transmission system operators for electricity) はその 10 年開発計画の中で早急な国家主導による送電網増強に着手しなければ電力の安定供給は難しくなると警告している。

3. 日本の現状

日本の状況はどうであろうか。まず既に北海道や東北での風力発電導入はほぼ上限に達しており、これ以上の風力増設は系統の安定に悪影響を及ぼす、という事が知られている。これに対して、電力会社間にて相互電力融通を強化すれば十分であり、火力の増強などに言及した資料は少ない。この点を調査した。

図 10 は日本の電力会社の設備容量 (kW) を示した物であるが、これを見ると風力の導入が限界に達している北海道、東北を東京とが強固に接続されれば数倍の容量となるため、あと数倍の風力導入は問題なく可能となることが推定できる。2013 年 2 月時点の政府方針は、今後の 10 年で風力を 3 倍に増やすとなっている。すなわち 2010 年時点で 1 %の導入量を 3 %にするだけである。この程度であれば各電力会社間の調整力融通を可能とすれば良いことがわかる。ただし送電網の増強が重要であろう。

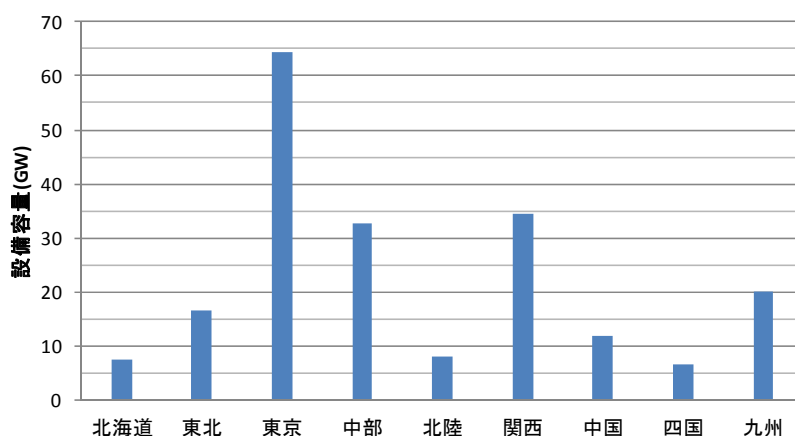


図 10 日本の各電力会社の設備容量(2009)

しかし、この風力導入量が数%（太陽光など他の再生可能エネルギーも含む）よりも多く導入する場合には、前項で述べたデンマークやスペイン、ドイツなどと同じ状況になるであろう。いずれにしても風力の導入によって従来型発電設備の削減は難しいと言わざるを得ないため、日本では『まだ』課題とはなっていないのが実情であろう。

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

4. 現状の再生可能エネルギーを導入したシステムの姿

ネット百科事典 Wiki ペディアで風力発電について調べると 2013 年 2 月現在で下記のような記述があり、これが風力に関する現時点での一般認識であろう。

『火力発電を減らして風力発電で代替するにあたっては、・・・』

しかし上記の実態を踏まえると正確には、

『火力発電の燃料消費量を減らし二酸化炭素排出量を削減するために風力発電を導入するにあたっては、火力発電設備の維持、場合によっては増強および・・・』
 となることが明らかになったかと思う。

5. 風力熱蓄積発電による安価で効果的な二酸化炭素排出量削減

風力熱蓄積発電を導入すれば上記 Wiki ペディア原文のままの状態を実現出来る。理由は、風力熱蓄積発電は太陽熱発電と同じく、安価で資源的にも不安が無く安心な蓄熱を利用できるためである。ただ風力熱蓄積発電は本質的に熱機械であるためある程度、例えば設備容量が 10 MW を超えないと経済性が出てこない。そのため従来型風力との組み合わせも有効であろう (図 11)。

小型、例えば数百 kW 程度であっても熱需要が旺盛な地域であれば発電後の排熱も利用出来る。例えば寒冷地に導入することで石炭暖房などを廃止して PM2.5 の削減にも貢献出来る。離島などでは真水を作るための熱源としても利用出来る。

蓄熱槽を大きくすればほぼ 100 % の再生可能エネルギー発電システムが実現できるが、長期の無風時にはボイラを追加し燃料を炊いて発電し続ける、という手段も取れる。また同じ熱エネルギーを取り扱う太陽熱発電と併設すれば、設備利用率が上がりさらなるエネルギーコストの削減も可能となる。

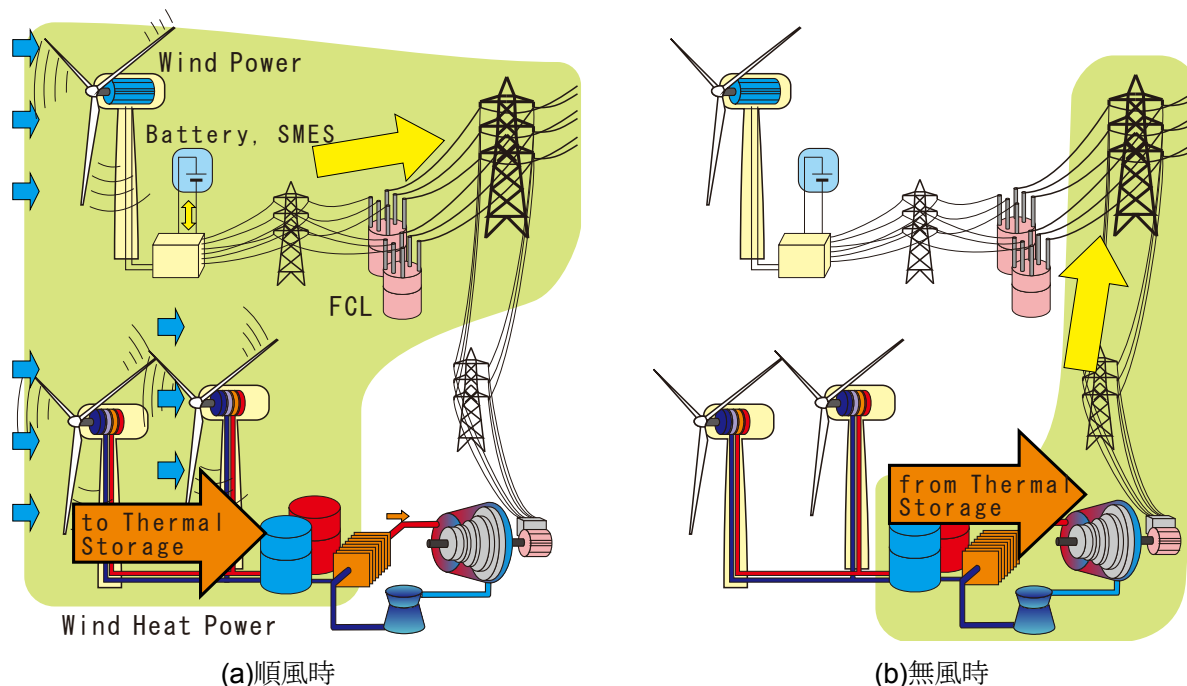


図 11 風力発電との連携運転

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

風力熱蓄積発電（その 3） - 「太陽熱発電」

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
普及啓発／国際部長 岡崎 徹

1. はじめに：色々な熱システム

風力熱蓄積発電は従来風力よりも安価に安定出力を実現可能で、再生可能エネルギーの大量導入に最適なシステムとなる可能性を秘めている。風力熱蓄積発電は、外観的には風力発電と同じで、構成要素はタワー型太陽熱発電と多くが共通であり、いわば風力発電と太陽熱発電のハイブリッドとも言える。風力発電については次回述べるとして、本項では主に太陽熱発電（英語名 CSP: Concentrated Solar Power）について解説する。

2. 太陽熱発電の概要

2.1 概要

太陽熱発電¹⁾は、基本構造や動作原理は簡単である。太陽光を集光すれば高温が得られる。その高温で蒸気を作り蒸気タービンなどを回して発電する。

一方、そのプロセスに使用する材料や機構は様々でバリエーションは幅広い。例えば集光のやり方では主な物でも 3 つ、熱を輸送する方法も気体（空気）、液体（多種）、まれに固体との混合、と多様な物が提案されて試験されている。蓄エネルギー方式も媒体を上記の何にするか、潜熱を利用するのか顕熱だけ利用するのか、化学変化も導入するのか、などなど多彩なものが提案され試験されている。言い方を変えれば最良システムはまだ無く一長一短があるものと思われる。風力発電や太陽光発電（PV）が、エネルギー伝達の方法として銅ケーブルしか使用しておらず、使用機器も太陽熱と比べてバリエーションが少ないのと対照的である。

2.2 メリット・デメリット²⁾

熱システムのメリットは、スケールメリットが出しやすいという点である。電気の場合、基本的には 1 のエネルギーを扱うには 1 の材料が必要で、スケールメリットは量産効果にある。例えば電池の場合には電気化学反応を利用するが、それに採用する化学変化を決めた瞬間に単位体積あたりに貯蔵可能なエネルギー量の理論最大値は定まり必要化学物質の量も決まる。よってある時点でそのコストは材料コストによって支配される。その使用材料が稀少材料であれば大量生産するほどに高コストになる可能性もある。さらに大型化すればするほど多種多様な監視装置や個々の部品のばらつきを平均化するための付加装置、さらには冷却装置や防災装置も必要となり、大型化はなかなか単位エネルギーあたりの低コスト化に繋がりにくい。

一方、熱によるエネルギー蓄積では蓄熱材以外の容器や循環系の数量は蓄積エネルギー量に比例しない。蓄熱材は安価なのでエネルギーコストにはあまり響かない。体積は長さの 3 乗、面積は 2 乗に比例するのも一因である。これは言い方を変えると小型には向かないことにもなる。これらをイメージ化したものを図 1 に示す。

熱システムは即応性が悪い、という課題がある。電池は立ち上がりが速いが、熱は一旦機械的な運動に変える必要があり、その機械部品も慣性や熱膨張の問題があるため急激な変化をさせることは難しい。おおまかには電池は変化（kW）が大きくかつ総量（kw-h）が小さい場合が得意で、

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

逆に熱蓄積は変化が小さく長い周期の変化に対応させることに向いている。

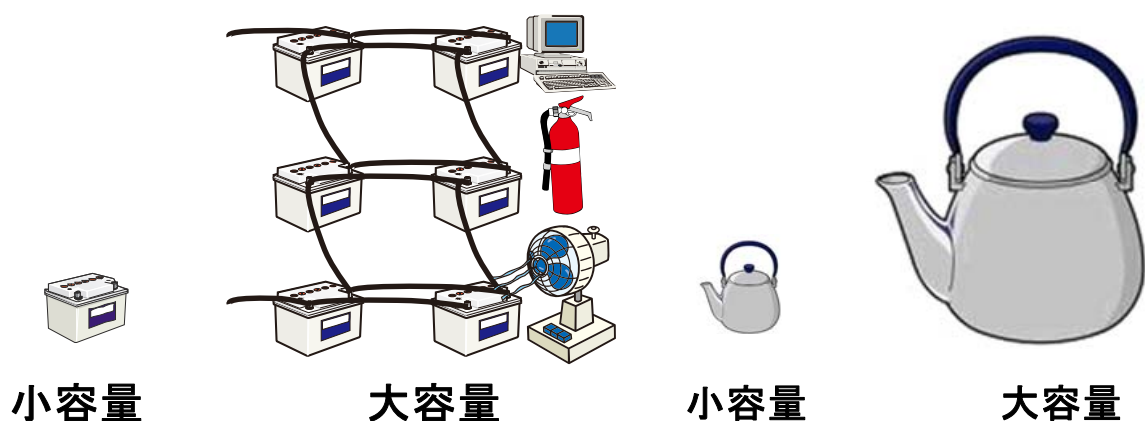


図1 化学的エネルギー蓄積（蓄電池）と熱エネルギー蓄積の違い

2.3 事故時対応、保守など

熱エネルギー蓄積は事故時に自身が貯蔵する以上のエネルギーを放出しない。溶けた塩などがタンクから液体として流出する場合も有り得るが、防液堤など目に見える安全対策が可能である。海に流れ込んだ場合でも、例えばハワイの溶岩流が海に流れ込むようなイメージで大爆発する様な事態は発生しがたいと思われる。煉瓦蓄熱に至っては事故時にはひたすら冷えるのを待てば良い。

一方で物理的に物体が循環するため保守管理が必要であるが適切な保守管理を行えばコスト的にも大きな課題となることは無いであろう。特に太陽熱発電は化石燃料をほとんど使用しないので集光部以外の保守管理は一般の火力より容易になる。

3. 集光方式

太陽熱発電は集光のやり方で、タワー型、トラフ型、フレネル型の大きく3つに分類される（図2）。他にディッシュ型等もあるがここでは割愛する。

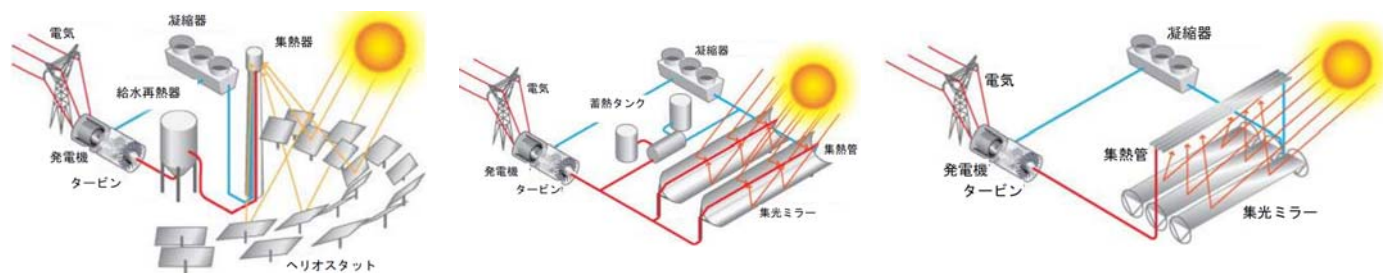


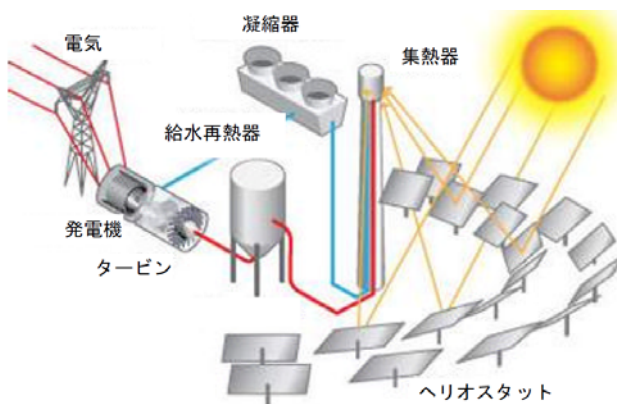
図2 タワー型(左)、トラフ型(中央)、フレネル型(右)太陽熱発電システム(1)

超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

3.1 タワー型

中央のタワー（数十～百数十 m）の周囲に鏡（ヘリオスタットとも呼ばれる）を配置し、タワー上部に集光する。太陽を追いかけるため反射鏡に 2 軸追尾装置が必須で後述のトラフ型などよりも複雑になるというデメリットがある。しかし高温が得られやすく、蒸気タービンの効率向上が望める。また鏡の直前に受熱装置がないため鏡の洗浄が容易である。集熱部が小さくそこからの放熱も小さいため熔融塩など高温使用可能だが常温では固体の熱媒体を採用しやすい。24 時間発電を実証している試験プラントの例を図 3 に示す。



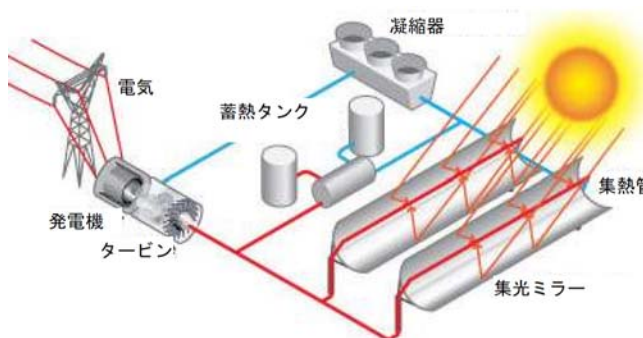
このタワー型に限らず太陽熱発電を効率良く成立させるためには直達日射と呼ばれる、散乱されないまっすぐな光が必要である。そのため砂漠地帯など立地が限られてしまうという制限がある。



図 3 24 時間発電実証中の太陽熱発電所（スペイン、トレソル社）

3.2 トラフ型

溝状の凹面鏡の焦点に直線的な集熱器を備え、1 軸のみの追尾で太陽光を集光する方式である。メリットは、構造が簡単な点である。しかし集熱管(Absorber Tube)の表面積が大きく、太陽熱を集熱すると同時に自分自身からも放熱してしまうという欠点があり、また長い集熱管の昼夜における熱膨張・収縮を吸収するための構造を実現するのが難しかった。そのため長らく熱媒体としては常温でも液体である熱媒油しか採用されてこなかったが、近年の大型 PJ では熔融塩が採用され、高温化への試行が行われている。トラフ型の場合広大な受光フィールドで受熱するため km 単位の熱媒循環を行う場合もある。



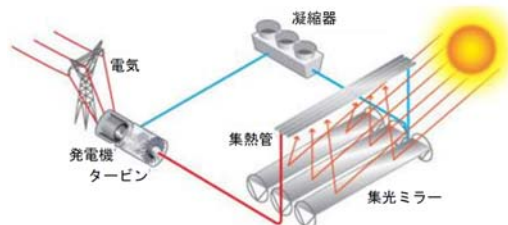
超電導 Web21

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

3.3 フレネル型

トラフ型は大きなまとまった面積の鏡が必要であり、耐風性能を維持するために強い構造物が必要である。その欠点を補うのがフレネル型で、細長い短冊状の鏡を水平に多数配置し、高い位置に固定された集熱器に集光するシステムである。この方式は集熱管の位置が固定されるため、熱媒体を使用せずに直接蒸気を発生させる DSG(Direct Steam Generation)と呼ばれるシステムを実現しやすい。DSG を採用すると熱交換器を削減することが可能となり、システムコストの削減が期待出来る。

上記いずれのシステムにも共通するが、鏡で太陽光を集光するため全体システムは光学系となり、そのシステム全体が風などの影響で動かないよう、鏡の基礎は丈夫に作る必要がある。



4. 蓄熱、熱の輸送³⁾

4.1 ダブルタンクシステム

蓄熱方式で現在実用化されているシステムである。低温タンクと高温タンクの二つを使いエネルギー蓄積時には低温側から高温側に熱媒を加熱して移動させ、放出時には逆を行う。熱の輸送に使う熱媒としては熱媒油または熔融塩を用いる。蓄熱タンク内の液体と循環する熱媒の種類を同一としているシステムと異なる物としている物がある。

熱の輸送について必要なパイプ太さについては図 4 に示すテストプラントのタワーがスケルトンになっており見やすい。受光器およびタワーと比べてさして断面積を必要としていないことが見て取れる。トラフ型の場合はタワー型よりも長距離の熱輸送が必要になるが、それでも図 5 に示される程度の配管である。

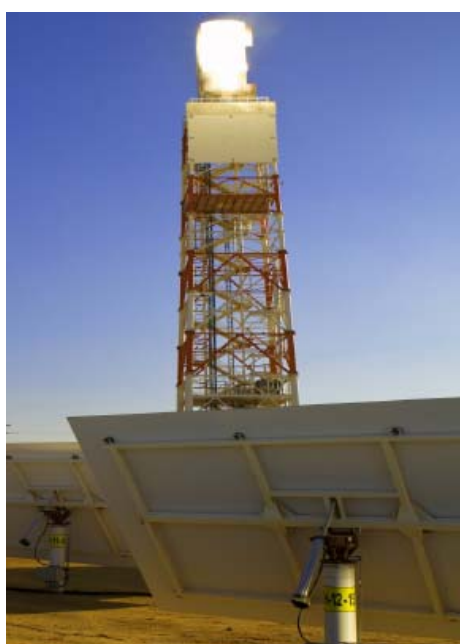


図 4 米国 Bright Source 社のタワーを望む⁴⁾



図 5 Siemens 社太陽熱プラントの熱媒配管⁵⁾

4.2 シングルタンクシステム

これは一つのタンク内に熱勾配を設けるシステムである。同じタンク内に高温部と低温部が存在し、両者の熱絶縁も 2 タンクシステムほど完全では無いので長期エネルギー保存には向かない。しかしタンク内の液体総量はエネルギー蓄積量に関わらず一定でトータル設備コストも安くなると見込まれている。

4.3 固体蓄熱

熱媒体とは別に固体の顕熱を利用して蓄熱する物である。蓄熱材料として検討されている物は、煉瓦や耐熱コンクリート、グラファイト、砂などがある。煉瓦の場合には鉄鋼の高炉において同種の物が既に操業しており、長い稼働実績がある。一方で熱媒体として今のところ空気という比較的熱容量の小さな媒体しか熱輸送に使えないという制限がある。コンクリートの場合は金属パイプをコンクリート中を通して熔融塩などを循環させる方法もある。

4.4 その他の蓄熱方法

その他、物質の凝固・融解の際の潜熱を利用する相変化システムも提案されている。蓄熱と言うよりもエネルギーの蓄積になるがスチームアキュムレータという蒸気を貯蔵するシステムは以前から実用化されている。ただ圧力容器となるためかエネルギーあたりのコストはあまり安くない。

4.5 蓄エネルギーコスト

大型プラントでの蓄エネルギーコストについては $25\$/\text{kWh-t}$ が見込まれている (『t』は熱エネルギーを示す)³⁾。日本の家庭用蓄熱暖房機等でもこれに近い実績はある。熱エネルギーを電気エネルギーに変換する際の効率を少なめに見て 25 % (最大では 45 %) とすると、蓄電エネルギーコストは $100\$/\text{kWh}$ に相当し、日本円に直すと 10 千円/kWh となる。これは政府が 2012 年に発表したグリーン成長戦略の目標蓄電池コスト 23 千円/kWh⁶⁾と比べて半分以下である。

5. 発電部

発電部分は火力発電所と同じで、温度、規模により熱電気変換効率は大きく代わり数%~45 % である。コンバインドサイクルになると最大 60 % となる。太陽熱からの入力を通常の火力発電所の補助的な熱源として利用し、余熱や再熱課程などに用いている例もある。

日本の火力発電所は燃料を輸入に頼るため海岸沿いにしか立地していない。そのため火力発電所には豊富な冷却水が必要との印象がある。しかし水を使わないドライシステム、セミドライシステムなどが実用化されており総計 100 GW の設備が世界で稼働している。クーリングタワーなど設備コストが増加するが、水利権や水処理費用が不要となるため発電コストとしては同等になるとの試算もある⁷⁾。

近年は kW オーダーに近い小型・低温においてバイナリ発電を採用し廃熱も利用するコージェネレーションに似たシステムも提案されている⁸⁾。小型のため発電効率は低いが発電機周囲の工場や民家への熱輸送も簡単であり、一つの応用として有望である。

参考文献：

- (1) <http://www.nedo.go.jp/content/100107273.pdf>
- (2) http://www.dlr.de/tt/en/desktopdefault.aspx/tabid-4727/7819_read-12192/
- (3) <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2011/119320.pdf>
- (4) <http://www.brightsourceenergy.com/>
- (5) <http://www.energy.siemens.com/hq/en/renewable-energy/solar-power/>

超電導 **Web21**

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283

- (6) <http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/kihonmondai/28th/28sankou2-1.pdf>
- (7) <http://www.spx.com/en/search-results/?q=dry%20system>
- (8) http://www.riken.jp/pr/press/2013/20130110_1/

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

風力熱蓄積発電（その 4） - 「風力発電」

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
普及啓発／国際部長 岡崎 徹

1. 再生可能エネルギーの課題

風力に代表される再生可能エネルギー（以下、再エネと略称）を大量に導入することが期待されているが、再エネには系統側から見て様々な課題がある¹⁾。図 1 は特に顕著な課題を絵にした物で導入の主役となっている風力と太陽光には不安定出力の課題があるが、多くの例ではそれに目をつぶっているのが現状であろう。安定出力が可能な水力、地熱、太陽熱発電は立地の問題があり、異論もあろうが現実には主力になり難いと思われる（余談であるがダチョウが危険を感じたときに頭を隠す習性は無いそうである）。

風力熱蓄積発電は極めて安い熱エネルギー蓄積技術を利用するため再エネの最大課題の出力平準化、すなわち不安定出力に対する対策を安価に実現可能であることは Web21 の 2012 年 11 月号トピックスで述べた。このコスト計算についての詳細は最新情報も加えて 2013 年 9 月号で紹介する。今月は不安定出力以外の風力の課題を述べ、それに対する対策および風力熱蓄積発電のメリットを述べる。さらに発電機の超電導化効果についても述べる。



図 1 現在の再エネの多くが直面する重要な課題

2. 不安定性以外の風力発電の課題

風力発電は現状で最も安い再エネとして期待されている。そのため欧州を始め相当な設備が建設され運用されている。そしてその不安定性以外の課題も顕在化してきている。その課題は立場によって異なり、主な物として以下の物が挙げられる。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

- 地域住民から見て
 - a)振動・騒音、フリッカー（影の明滅）
 - b)バー ドストライク
 - c)景観（主観による）
- 事業者から見て
 - d)稼働率向上
 - e)長寿命化
 - f)発電量あたり設備コスト削減（建設・輸送込み）
 - g)系統までの接続
 - h)落雷対策（日本で突出した課題）

これらの多くは風車の低速回転化とタワー頂部の発電機軽量化という実は背反する対策によって軽減が可能である。これを以下に説明する。

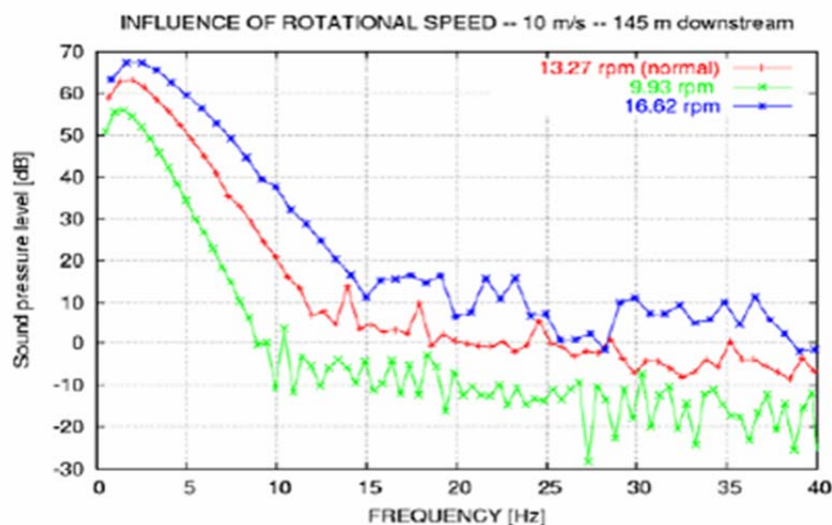
3. 風車の低速回転化による効果

3.1 地域住民から見て

これは、a)～c)の、主に風車設置地域周辺への効果が高い。回転数を遅くすることで周辺への騒音は削減できる事が報告されている²⁾。立木などは騒音と認識される音を発生しない。ゆっくりと影が変化してもさほど気にならない。また鳥類もゆっくりとした回転で有れば衝突する事もない。ただ鳥類の人為的死亡数のほとんどは建物やその窓に起因しており、風車による死亡事例はわずかである³⁾。問題はその事故が衆人環視の元で発生してしまう点であろう。景観および近傍での羽通過に感じる恐怖感も、回転速度が遅くなれば軽減される物と思われる。古典的な映画にチキチキバンバンというミュージカルがある。これに出てくる風車などはゆっくり回転しているためか、生活に違和感なく溶け込んでいる様子で有った。景観問題は主観が大きいものの、こういう所にも解決のヒントが有るかもしれない。



図 2 映画チキチキバンバンで撮影に使われたロンドン近郊の Turville 村にある風車

図3 風車回転速度による騒音変化程度²⁾

3.2 事業者から見て

この場合は d) e) の稼働率向上・長寿命化に効果があるが、後述の様に f) にはあまり好ましくない影響がある。風車の羽は 1 回転する度にタワー全面の影響による乱流によって疲労を受け、その積算が寿命に影響する。また回転系は一般に総回転数によって寿命が決まる。そのため概ね回転数が少ないほど寿命は長くなる。15 rpm の回転数で 20 年間、稼働率 30 % で運用すると 5 千万回の応力を受けることになる。この回転数が半分になれば単純には羽寿命や回転系の寿命は倍になる。現実にはもっと複雑であるが影響は大きいと言えよう。

g) の系統への接続は、その送電線を風力最大容量で建設するのに対して実際には風力の稼働率に倣って低い稼働率になってしまうのが課題で有る。風力熱蓄積発電では電力に返還後の稼働率は蓄熱の効果により高くすることが出来るのでこの部分の課題も緩和される。e) の課題については日本の、特に日本海側に顕著な問題である。

4. 低速回転化に伴う課題

4.1 低速回転化した際に必要な変更項目

以上の様に低速回転化は様々なメリットをもたらすが、同時に色々な課題も出てくる。発電出力(パワー、W)は

$$\text{出力(W)} = 2\pi \times \text{風車回転数} \times \text{増速比} \times \text{発電機トルク} \quad \dots (1)$$

で表される。そのため風車回転数を半分にすると増速比を大きくするか、発電機トルクを大きくするしかない。すると、それぞれ次の問題点が生じる。

4.2 増速比増加の問題点

現状で最も風車の稼働率に影響を与えるのは増速ギアである。風車にも色々な種類があるが、一部の風車ではゆっくりとした回転数を 100 倍程度増速し、高速回転する小型の発電機を駆動している。ギアは定常的な回転なら比較的壊れにくい、風力の場合は回転数やトルクにムラがある。す

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

ると、微妙なしなりにより本来は点接触しているギアの歯同士がずれて微少な焼き付きを起こしてしまう。これを繰り返すことでやがては故障をしてしまう。

このギアはかなりの重量物で、一端故障すると大型クレーンでの全体交換しかない。そのためギアの故障率そのものは低くても稼働率低下には非常に大きな影響がある。図 4 に故障による停止時間の統計データを示すが、ギアの故障が安定稼働に与える影響が大きいことがわかる。この統計は少し古く現在は風車が大型化し、ギアも大型化している。そのため作業に必要なクレーンも特殊な大型機に限られてくるため、事態は深刻化している。例えば洋上風力でギアに故障が発生した場合、修理作業は海が穏やかな季節しかできずクレーン船の数も限られているため非常に長期に渡って停止することがある。

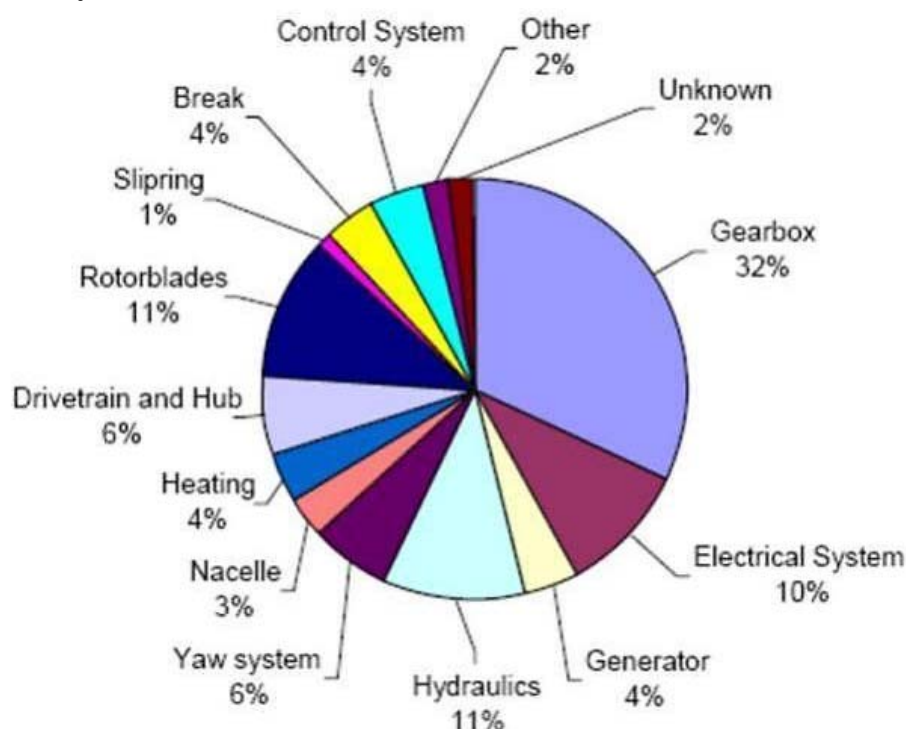


図4 風車停止時間に対する各種要因の割合⁴⁾

この問題を解決するために MW 以上の大型機ではダイレクトドライブ発電機を採用する例が増えている。しかし (1) 式からもわかるように、増速比を 1 にして出力を維持しようとすると発電機トルクを大きくするしかない。この発電機トルクは発電機の体格に依存するため発電機は大きく重くなり 5 MW で数百トンもの重さになるものもある⁵⁾。これを運搬し、高く持ち上げ据え付けるのは発電機そのもののコストもかかる上に相当な運送・建設コストが追加される事になる。例えば風力発電の建設では輸送・建設費が全コストの 30 % を超える場合もあり、その中のかなりの部分が重量物の運搬やクレーンなどに依存する。なお風車タワーの構造については、風に対抗するための要因が大きくタワー上部のナセル重量が変わってもほとんど必要強度は変わらない。

以上を考慮すると、低速回転化はメリットがあるものの、設備費の高騰を招き初期投資が増えるため、両者を勘案して適切な設計にする必要がある。その他、風のエネルギーを効率良く回転力に変換する空力を考慮すると、現状の三枚翼を多翼化する必要があり、翼のコストアップに繋がる可能性がある。一方遠心力も小さくなるため羽を分割構造とすることや、観覧車構造を採用することもある。この場合は陸上輸送の課題が解消するので陸上での限界とされている 2 MW 機以上の大型機でも無理なく建設できる。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

5. 小型・軽量を実現できる発熱機

超電導 Web21 の 1 月号 (連載-その 1) で述べたように、発熱機は同容量の発電機と比べてはるかに軽量化が見込める。簡単な発熱機の構造としては誘導モータの流用がある。誘導モータに直流を印加することで風車回転時には誘導モータの始動状態となる。このため同じ体格でも数倍のトルクを発生することが可能で有る。すると、(1) 式からわかるように設備費や建設費の高騰無しに風車の回転数を数分の 1 とする事が可能となる。

6. 発熱機の超電導化

この発熱機を超電導化すると、主に 3 つのメリットがある。

1) さらに軽量化・低速回転化

超電導は、常電導と比べて遙かに大きな磁場を小電力で発生させられる。発熱機は渦電流の原理で発熱させるため、その発熱量は磁場の二乗、回転数 (極数) の $3/2$ 乗に比例する。例えば仮に磁場を 10 倍にすれば、同じ発熱量を得るための回転数は 100 の $2/3$ 乗倍、すなわち $1/20$ の回転数で良いことになる。すると低公害化および設備費の低減に寄与する。この程度の強磁場は超電導を採用すれば楽に実現できる。

2) 高効率化

風力熱蓄積発電では熱から電力に変換するプロセスが有り、蒸気タービン等を使用する。この蒸気タービン等は作動温度が高ければ高いほど効率が良くタービン耐熱温度の高温化開発が競われている。昨今では 700°C にも迫る勢いである。これにより蒸気タービン効率は 45 % にも達し、以前の『蒸気タービンは効率が悪い』という常識はかなり改善されつつある。よって発熱機からは出来るだけ高い温度の熱媒体を出力する事が望ましい。しかし一方、温度を高くすると磁性体は磁性を失うため常電導界磁では磁場が消失し、渦電流発熱をしなくなるという問題が有る。

超電導は、非磁性の大空間に強磁場を小電力で発生させることも得意である。この様な使い方をしている例としてシリコン単結晶引き上げ炉の対流抑制用超電導マグネットがある⁶⁾。実は昨今のデジタル製品の低コスト化には超電導が裏方として活躍している。また Web21 の 1 月号で紹介したように超電導炉にも使用されている⁷⁾。



図 5 非磁性体でも渦電流加熱を容易にした超電導炉。金属を赤熱させることも可能。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

3) 銅資源枯渇対策

発電機は構造材は別としておおよそ半分の重量を銅にするため、相当な重量の銅を使うことになる。そして 2020 年に 1000 GW 近い全世界の風力発電導入目標と現状の銅生産量とを比べると、風力発電機に数%以上の銅が消費されることになり、銅資源の高騰を招く。そのため超電導採用は重要である。

なお冒頭でも述べたが昨年度 11 月のトピックスで紹介した風力熱蓄積発電のコスト計算は、他方式との比較や過去の技術などと併せて 9 月号にて紹介する。

参考文献：

- (1) 横山明彦、“電力系統から見た大容量風力発電”，pp.299-302, 電学誌 129 巻 5 号,2009
- (2) H.A.Madsen “Low frequency noise from MW wind turbines – mechanisms of generation and its modeling”Riso-R-1637(EN)
- (3) http://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw_gtr191/Asilomar/pdfs/1029-1042.pdf
- (4) Johan Ribrant and Lina Margareta Bertling, “Survey of Failures in Wind Power Systems With Focus on Swedish Wind Power Plants During 1997-2005” IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 22, No.1, march 2007
- (5) 木村守、“大容量風力発電用発電機の特長比較”，pp.288-290, 電学誌 129 巻 5 号,2009
- (6) http://www.istec.or.jp/web21/past-j/06_03_all.pdf pp.1
- (7) http://www.istec.or.jp/web21/pdf/13_01/all.pdf pp.22-26

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

風力熱蓄積発電（その 5） - 「風力熱蓄積発電のコスト計算」

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
普及啓発／国際部長 岡崎 徹

1. はじめに

不安定な風力など再生可能エネルギーを大量導入しても電力系統の安定性は保たねばならない。近年はこの観点から風力導入に関する議論が盛んになっているが、経済性を無視しては進められない。今回は両方の観点から従来型風力、電池付き風力、風力熱蓄積発電について検討した結果を紹介する。

2. 経済性検討のための前提条件

2.1 風力発電の系統導入に関する実態

風力のコスト要因を述べる前に現状を明らかにする。不安定な風力発電を系統に大量導入する場合の先行例を海外の公的機関の統計データ、という確実なデータを元にして電気学会にて報告し、Web21 の 3 月号でも紹介した。一部再掲するとデンマークでは風力発電が必要電力量の 20 % を賄うと言われる。しかし火力発電所は減るどころか 20 % も増強している¹⁾。一方この期間における電力需要はほとんど変わっていない。同様にスペインは 10 年間に 25 GW の風力発電を導入したが同時に 25GW の新鋭火力を稼働させた²⁾。この期間に電力需要は 35 % 増加したが、この伸びは火力の増設分と同じで、再エネも含めた全発電設備は 70 % 増加した。

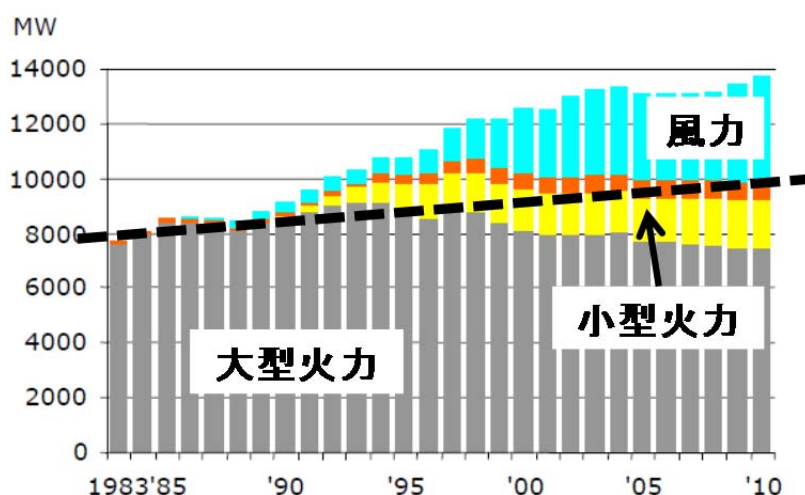


図 1 デンマークの発電設備推移¹⁾。この間に電力消費量はほとんど増加していない。

2.2 従来型風力の系統導入コスト要因

以上の様に風力を大量導入するためには火力の増強が必要である。風力がほとんどの電力需要を賄っている時間もあるが、ほぼゼロになり既存発電設備で全ての電力需要を賄っている時間もある。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

急には起動できない火力など既存発電設備は常に待機し、火力の設備償却は進み化石燃料も消費し発電コストに追加される。また頻繁な起動/停止/待機運転は燃費の悪化を招く。さらに広域での発電量平準化を狙い系統の強化も必要になる。よって風力発電のコストは次も考慮に入れるべきである。

- (1) 火力発電の設備償却 (風力の稼働中)
- (2) 火力発電の燃費悪化 (8 %程度、Hoogwijk M らの報告³⁾)
- (3) 系統強化 (風力発電コストの 6 %程度、DENA⁴⁾)
- (4) 発電停止 (20~30 %、Hoogwijk M ら³⁾)

この内(4) の発電停止については、全国的に風況が良く、需要が少ない場合には電力を『出荷できない』ためである。深夜に強風が吹いても需要が無ければ捨てざるを得ない。この発電停止は 20~30 %程度となると推定されている^{3),5)}。火力不規則運転に伴う保守費の増加については情報が得られなかった。また短時間変動に対して SVC (Static Var Compensator) 等が必要になる場合もあるが、その程度は不明であった。これら不明点は経済性検討に算入しなかった。

風力発電本体については、基本データは施工実績が多く公開資料も得やすい欧州の資料を元にし、故障停止時間が短く投資回収の見通しが付けやすいダイレクトドライブ型を想定した。土地代は考慮していないが輸送・建設費は含まれている。

2.3 風力+電池導入の場合のコスト要因

前記の様に風力発電所だけでは火力発電所を減らすことは出来ず、ある意味で二酸化炭素削減には逆行する部分もある。これに対して電池設備を導入し、風力発電の出口で安定化して火力増設などを不要とする案がある。電池には将来的に革新的な低コスト化の期待があるので、実勢コストより安い 4 万円/kWh を仮定した。システムのには風力に電池とインバータなどを装備する電池盤を併設するだけの至極シンプルな構成になる。

2.4 風力熱蓄積発電のコスト要因

このシステムではタワー頂部に発電機ではなく発熱機を設置する。Web21 の 1 月号「発熱機」でも述べたように発熱機は単なる電磁ブレーキで、誘導モータ構造を流用しても発電機より使用材料が数分の 1 と少なくなる。一方で保温や放熱構造が必要となるため発電機比 1/2 のコストになるとした。軽量化に伴う建設費・輸送費削減も期待出来るが今回は考慮していない。熱蓄積に関しては電池に比べて 1/20 の 2 千円/kWh とした⁶⁾。蒸気タービン発電コストには一般的な数値を採用した。この中にはボイラ、排煙処理など風力熱蓄積発電では不要なコストも含まれているが、これらは熱媒循環システムと等価とした。タービン効率については海外社の熱媒油循環式太陽熱発電所 (運転温度 370°C) の 38 %を参考に決定した。従来型風力、電池付き風力も含めて用いた数値のまとめを表 1 に示す。表中、kW-t は熱の状態であることを示す。

表 1 試算に用いた数値

	Component	Cost	Efficiency
	Tower / Blade	90M¥/2 MW	-
Wind	Electric Generator - 15rpm	40M¥/2 MW	93%
	AC/DC, DC/AC	20k¥/kW	95%
	Battery	40k¥/kWh	83%
WHP	Heat Generator	20M¥/2 MW	96%
	Thermal Storage	2k¥/kWh-t	93%
	Steam Turbine	100k¥/kW	38%
	Electric Generator - 3600rpm		96%

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

2.5 風入力の変定

風況と需要は一致せず、また地域・季節によっても異なる。そのため安定化出力に必要な蓄電量、あるいは蓄熱量の算出は難しい。そこで 1 日の内 30 % 時間だけ定格発電を行い、残りの時間は全く稼働しない状況で系統に 24 時間一定出力する、という条件を設定した。火力併設の場合と風力熱蓄積発電のエネルギー流れと計算式を図 2 に示す。電池付き風力の場合は風力熱蓄積発電と若干異なる計算式となる。

重要な点は、それぞれのエネルギー変換の際の効率に加えて設備コストを考慮し、最終的なエネルギーコスト (¥/kWh) を計算した点である。いかに効率が良い装置であっても高価な設備であれば意味が無い。

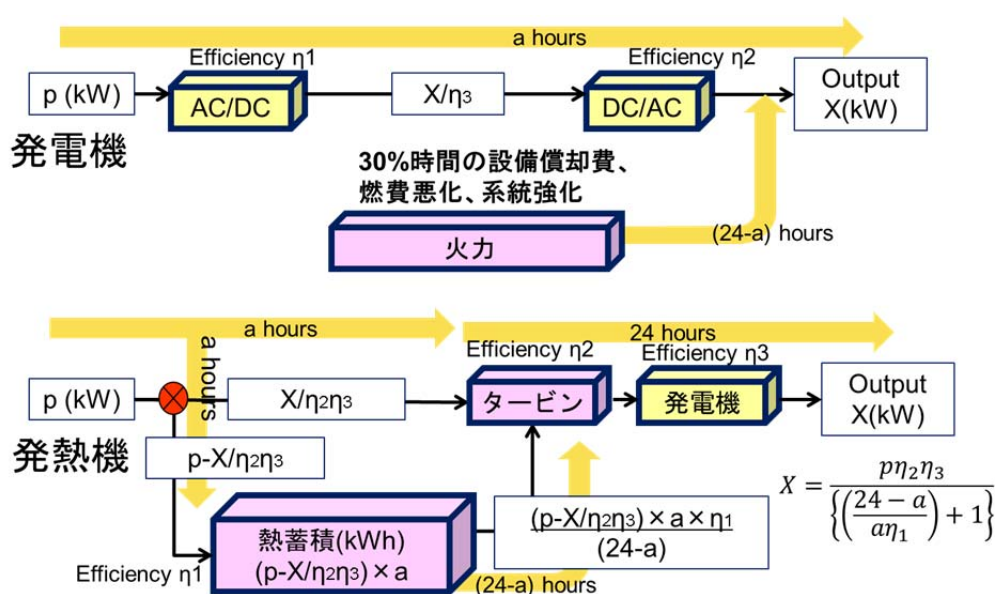


図 2 エネルギーの流れ。設備コストも考慮して発電コストを計算

3. 発電コスト計算結果

計算結果を図 3 に示す。左端の風力発電基本データは円高の際に換算したので日本の通念よりかなり安い発電コストになっている。ただそれでも中国の実勢コストより高い⁷⁾。

この風力発電コストに潜在コスト (Hidden Cost) を加えると、ほぼ元の発電コストの倍になる。米国 NPO でも同様な結果の試算を行っている⁸⁾。右端の風力熱蓄積発電コストと比べると同等で有るが、さらに二酸化炭素税や将来の燃料調達リスクを加えると風力熱蓄積発電の方が安価なエネルギー源となる。さらに風力熱蓄積発電は種々の最適化余地が有る。必要エネルギー蓄積時間が倍になったとしても熱蓄積コストが小さいため総コストに影響が少ない。

電池付きシステムは 3 つの中で最も高価なエネルギーコストになった。電池コストが政府のグリーン成長戦略での目標値 23,000 円/kWh となると、奇しくも風力や風力熱蓄積発電の発電コストと同等になるが、さらなる長時間蓄積には難がありそうである。電池の大量導入を行うにはこの目標値を達成できるかどうかの一つの指標であろう。ただし電池には瞬発力があるため、kWh が要求される使用目的でなく、kW が要求される瞬時電力系統安定性 (アンシラリーサービス) などの目的にも期待される。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

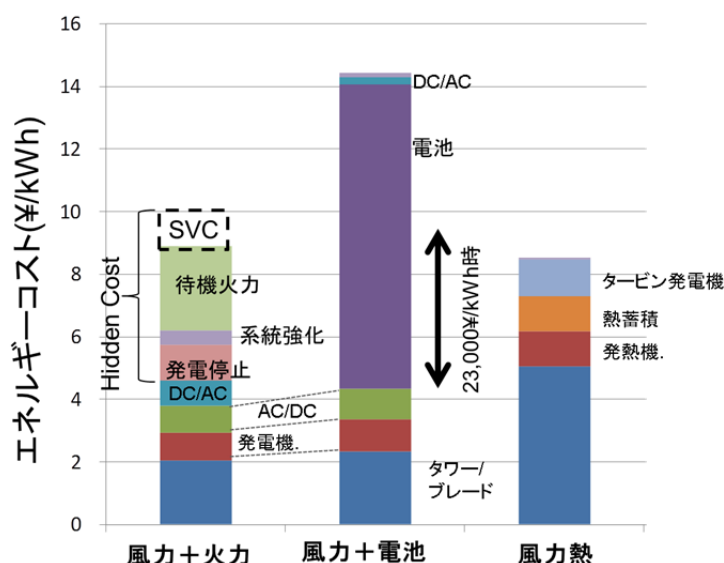


図3 安定電力供給する際の発電コスト

4. 風力発電にヒータを組み合わせたシステムとの比較

4.1 ヒータ式との差異

以上の様に風力熱蓄積発電は安い熱蓄積を利用することで安定発電を経済的に実現できる。熱蓄積を採用するアイデアは近年増加しており、例えば発電機とヒータ・熱蓄積を組み合わせた国際特許が ABB 社から出願されている⁹⁾。他にも東芝社は太陽熱発電と組み合わせた開発案件（7 億円弱）を淡路島で進めており¹⁰⁾、アップル社はデータセンター向けに特許出願をしている¹¹⁾。ここでは ABB 社のヒータ式との差異を検討した。

ヒータ式のエネルギーの流れは図 4 の上、風力熱蓄積発電は図 4 の下の様になる。配管・断熱コストが 52 千円/kW 以下であればヒータ式風力発電より風力熱蓄積発電の方が有利になることがわかる。参考までに 200 kW のヒータでは図 5 の様な物が市販されている¹²⁾。

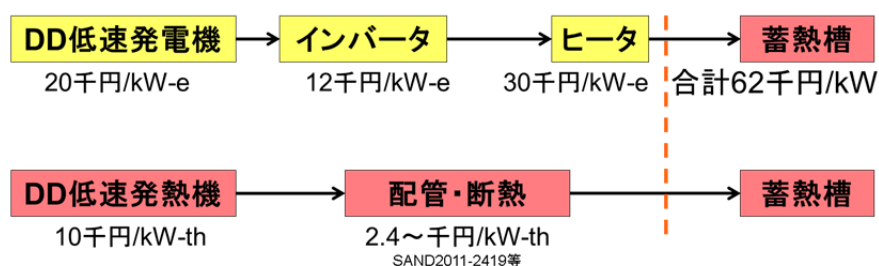


図4 ヒータ式（上段）と風力熱蓄積発電（下段）のエネルギー流れ（DD はダイレクトドライブを表す）

次にこの配管・断熱・循環系のコストを推定した。タワー型太陽熱発電所の解析例では 470 MW（熱）級にて 2.4 千円/kW⁶⁾である。一方風力はタワーあたり最大でも 5 MW 程度であるのでこの数

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

値はそのまま引用できない。熱機械の経験則として同じ構成であれば容量に対して設備コストは 0.6 乗～0.7 乗、単位出力では-0.4 乗～-0.3 乗で変化する。これをグラフ化すると図 6 の様になる。

風力タワーあたり 1 MW より大きくなると風力熱蓄積発電が有利になる。太陽熱発電との組み合わせや火力のプレヒート、再加熱に用いる等を考えると風力熱蓄積発電の方がもっと小さなレベルでも有利になる可能性はある。一方、ヒータ式は発電部と発熱部の距離を大きく取りやすいので様々な状況にも対応できる。



図 5 200 kW ヒータの例

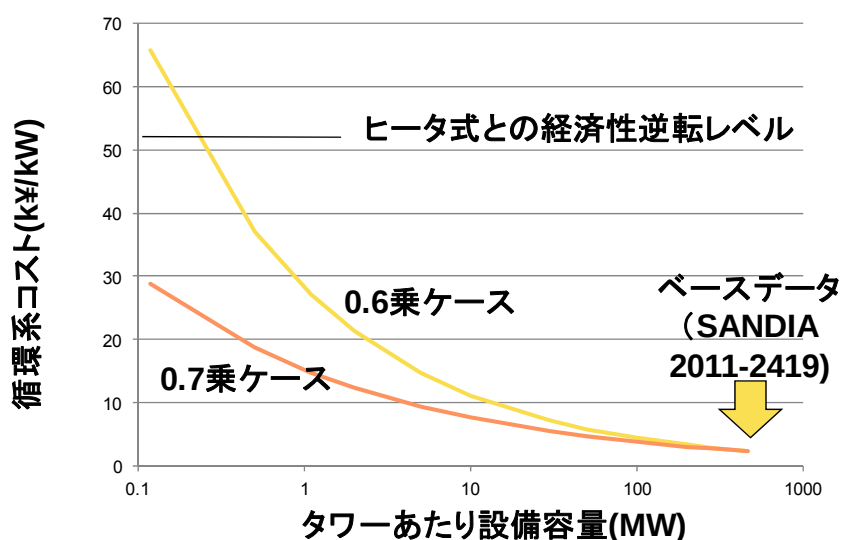


図 6 風力熱蓄積発電の循環系コスト推定

4.2 風力発熱発電

風力熱蓄積発電ではエネルギーを熱に変換するため、効率が良くないという欠点がある（が設備コストは安い）。しかし発熱機に誘導発電機を採用すると、ベクトル制御により発熱機にも発電機にも無段階で調整できるため電力も取り出せる（図 7）。ただし従来の誘導発電機の構造を維持する必要があり単純構造化できず、双方向インバータも必要となる。発電機のジュール損は熱エネルギーとして回収できるため高電流密度化による小型軽量化は可能である。設備費増と売電収入増とのバランスを検討する必要がある。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

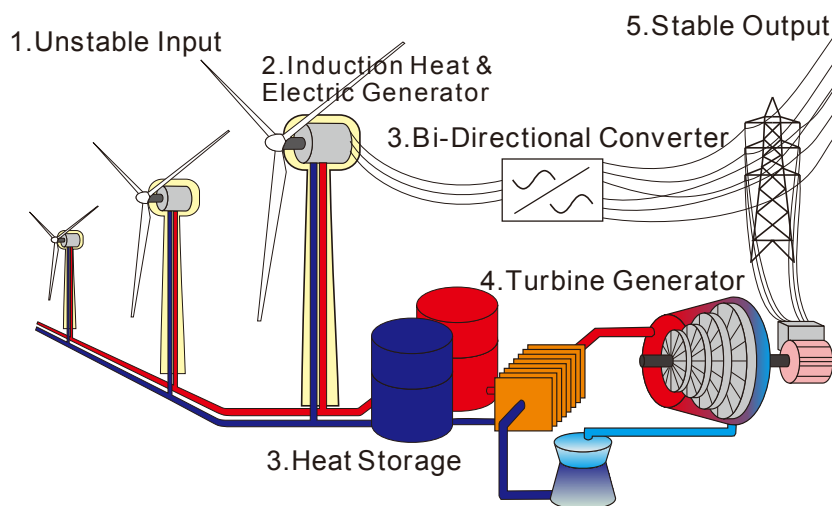


図 7 誘導発電機を制御により発熱/発電の両方に使うシステム

参考文献：

- (1) <http://www.ens.dk/en>
- (2) http://www.ree.es/ingles/sistema_electrico/series_estadisticas.asp
- (3) Hoogwijk M, Detlef Vuuren, Bert Vries. Wim Turkenburg: “Exploring the impact on cost and electricity production of high penetration levels of intermittent electricity in OECD Europe and the USA, results for wind energy.”, Energy (2006-9)
- (4) dena: “dena Grid Study II – Integration of Renewable Energy Sources in the German Power Supply System from 2015–2020 with an Outlook to 2025”, German Energy Agency (2011-4)
- (5) Lisa Göransson and Filip Johnsson: “Large Scale Integration of Wind Power in Thermal Power Systems”, Wind Power, ISBN 978-953-7619-81-7, pp.479-498 (2010-6)
- <http://www.ishihara-heater.com>
- (6) SANDIA REPORT “SAND2011-2419”, Printed April 2011
- (7) <http://time-az.com/main/detail/34635>
- (8) <http://www.atinstitute.org/wp-content/uploads/2012/12/Hidden-Cost.pdf>
- (9) ABB 社国際出願 EP1 577 548 A1, 2007
- (10) US2012/0326445 A1, Dec.27, 2012
- (11) http://www.toshiba.co.jp/about/press/2012_09/pr_j1102.htm
- (12) <http://www.ishihara-heater.com>

超電導 Web2.1 トップページ

【隔月連載記事】

風力熱蓄積発電（その 6） - 「総括」

公益財団法人 国際超電導産業技術研究センター
普及啓発・国際部 部長 岡崎 徹

1. 電力系統に大量の風力を導入するために

風力発電は出力が不安定であるために、安定供給が責務の電力系統に大量に導入するためには何らかの対策が必須である。これを包括的に検討した場合に最も経済的なエネルギー源となり得る風力熱蓄積発電についてこれまで説明してきた。各月の内容は以下の通りである。

1 月号：発熱機とその超電導化

システム中、唯一要素部品に開発要素がある発熱機について解説

3 月号：自然エネルギーの実態

自然エネルギーを大量に導入する場合の実態を統計から解説

5 月号：太陽熱発電

近年 PV よりも伸びが著しい太陽熱発電について解説。

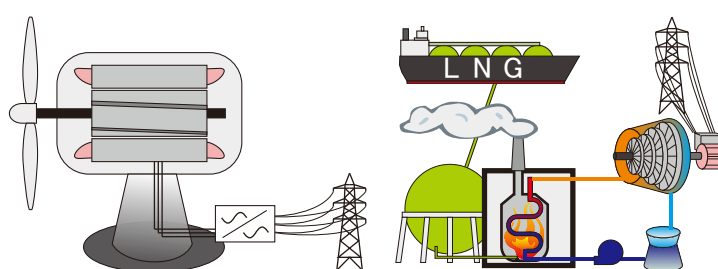
7 月号：風力発電

風力発電の経済性以外の課題を解説

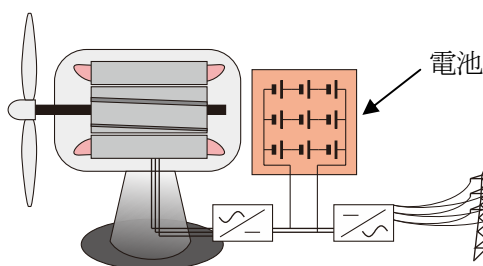
9 月号：系統安定化条件での風力発電経済性検討

風力熱蓄積発電のコスト計算を紹介。大量導入するためには系統全体で考えることが重要。

この風力熱蓄積発電は、電力系統、風力発電、太陽熱発電、回転機など多くの分野に跨る技術であり、全体を見通し難い。今回は図 1 の(a)～(e)に現時点の風力安定化手法、電池による安定化手法、風力熱蓄積発電について並べて比較し、その得失を述べたい。



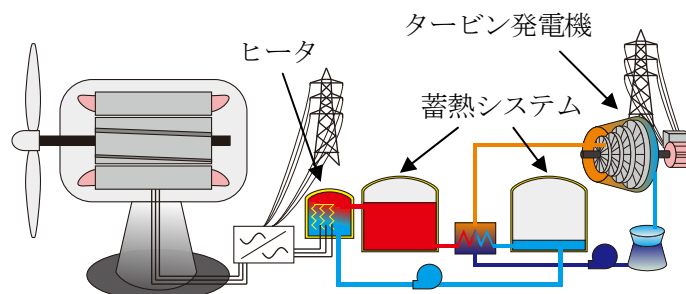
(a) 現状の風力安定化。火力の補助と系統の強化が必須。



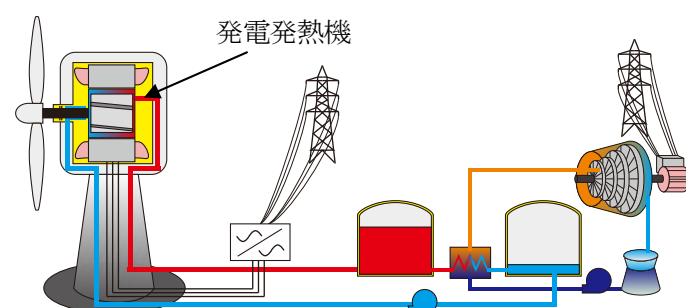
(b) 蓄電池を用いた安定化。電池の低コスト化が課題。

超電導 Web2.1

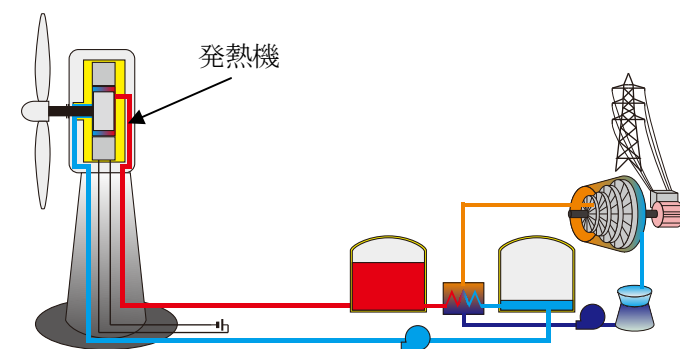
(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612



(c) 熱エネルギー蓄積を用いた安定化。電池より安価に安定化が可能。



(d) 発電発熱機を導入しての安定化。発電発熱機が軽量なため経済的。



(e) 熱エネルギー蓄積に特化した安定化。
超電導を採用して高温化すればタービン効率が 60 % に近づく。

図 1 様々な風力発電の安定化手法

(a) 現状の風力安定化

超電導 Web21 の 3 月号で詳しく説明したが、現状の風力導入によって火力発電所を削減する事は不可能で、逆に増設が必要である。そのため図 1(a)が実態である。豊富な水力を持つノルウェーなどとの電力融通が容易なデンマークでさえ火力発電所が削減できていない。スペインも同様である。欧州は電力市場が発達し市場取引などの情報が多く、一方で国毎の補助金制度も異なり実態が見え難くなっているが、経済性を維持しつつ大量に風力を導入するには火力発電所、それも出力調整が容易な最新型火力を維持し続けないと系統として運用できないというのが統計から推定される。よって現状のままではいくら風力を（太陽光も）導入しても化石燃料の使用を止めることは出来な

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

い。さらに既存の火力発電所の燃費悪化や稼働率低下、系統強化の費用を加えると必ずしも言われているようなコストにはならない事を超電導 Web の 3 月号と 9 月号で示した。

(b) 電池を用いた安定化

これに対して図 1(b)に示すような電池を利用するシステムも幾つか試行されている。最大のメリットは誰にでもわかりやすいシステムである点であろう。ただ現状では kWh あたり 4 万～10 万円超と高価な点が課題である。既に開発の歴史が長い電池システムを、実用的な揚水発電所並のコストである 23,000 円程度に下げるまでには様々な課題が有り、画期的な技術開発が必要であろう。太陽電池のように面積で瞬間的パワー(kW)が決まる物は比較的成本ダウンが容易であったが、蓄電池などはエネルギー(kW-h)を貯えるため体積が必要で、太陽電池のようなドラスティックなコストダウンを実現するためには新しい電気化学反応の発見など革新的技術が必要であろう。太陽電池の様な二次元製品は薄膜化など材料を限りなくゼロに近づけることも可能であるが、体積あたりエネルギー蓄積量の理論上限があり、かつ材料コストに制限される蓄電池の改良には限界がある。ただカリフォルニアなどでは電池の導入への大きな補助金導入が実行に移されるようである。

(c) 熱エネルギー蓄積を用いた安定化

風力から一端離れるが、熱エネルギー蓄積を採用できる太陽熱発電が近年大きく伸び始めている(超電導 Web2.1 の 5 月号)。太陽電池は安定化のために高価な電池が必要であるが、太陽熱発電は電池と比べて 1/20 コストの熱エネルギー蓄積を利用することで経済的に安定発電できるためである。

この安価な熱エネルギー蓄積を風力にも利用するのがこのシステムで、風力で発電された電力を低需要時にヒータによって熱エネルギーに変換して熱媒に蓄積し、必要時に火力発電と同じシステムを用いて発電する。熱エネルギーは電力に変換する際に半分以上はロスとなり効率が良くないため、長らく実用には適さないと考えられてきた。しかし 1990 年代に入り風力の不安定性が大きな問題となる一方、電池の低コスト化課題が大きいことから安価な熱蓄積を利用したシステムの可能性が検討されるようになってきている。効率が悪くとも設備コストが安価であれば、燃料費のかからない再エネを安価に電力系統に導入できる、という考え方である。

熱エネルギーから電力に変換するには温度が高いほど効率も上がる。よって高温での熱蓄積が望ましい。現状では図の高温側タンクは最高 550 C° 程度、低温側は 200 C° 程度となっている。また蒸気タービンによる熱電エネルギー変換は規模が大きい方が有利である。太陽熱発電所の前例から見ると複数の風車をまとめたファーム全体として数十 MW 程度の規模が必要であろう。複数本の風車に対して蓄熱/タービン発電設備は 1 基で済むため大型化は経済性に直結する。

(d) 発電発熱機を導入しての熱エネルギー蓄積

上記熱エネルギー蓄積の一つの課題は、電気ヒータが必要な点である。電気ヒータは例えば 550 C° にて電気絶縁を保つ必要がある。また、室温から高温まで熱の良導体でもある導体で接続するため、この導体を伝っての熱ロスもある(話は逸れるがこの室温から高温/低温へと接続する部分はパワーリードとも呼ばれ、一つの技術分野である)。さらにはタワー頂部の発電機では熱損失もあり、全体として見た場合に効率を落とす要因を持っている。

そこで発想を変えて、タワー頂部で発電もしくは発熱を同じ回転機で実現するアイデアが図 1(d)である。この発電発熱機は超電導 Web2.1 の 9 月号で少し説明したが、基本は 1 月号で紹介した発熱機と同じで誘導通常風力と同じ双方向インバータを備えるだけである。具体的には一般の発電機では避ける「焼ける」制御(停動トルクでの運転)を行い、かご形回転子に発生する熱(発電機ではロス)に熱媒体を循環させ抜熱する。固定子側界磁巻線は 450 C° までメーカにて標準化さ

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

れているため熱媒の低温側を循環させることで定格温度以下に抑え、同時にこの界磁巻き線で発生する熱も回収する。

この誘導型発電機を発電発熱機として利用すると、次のようなメリットが生じる。

- 1) 誘導発電機の定格より遙かに大きい停動トルクで運転するため、5 倍のエネルギーを吸収できる
- 2) 熱も回収するので銅損もロスにならないので高電流密度化でき、さらに軽量・コンパクトになる
- 3) よって回転機でのエネルギー変換効率が 100 % に極めて近づく (ただし熱は後段の変換時にロスが出る)

この 1) 2) のコンパクト化は大きなインパクトがある。現行の風力発電機は故障確率を下げるためにギアレシ化を指向していたが、ダイレクトドライブ低速発電機は高価で効率が悪く一方で数百トンにもなりタワーを高く出来ず、良い風を捕まえられない。そのためダブルフェッドという少しギアを用いる中間的なシステムが主流となりつつある。しかし軽く・エネルギー回収効率が高い回転機が得られればダイレクトドライブでかつ、高タワーが実現できる。また体格を少し大きくすれば低速回転化も可能となり、振動・騒音・バードストライク・フリッカーなどといった公害問題も軽減できる (超電導 Web21 の 9 月号)。

一方デメリットは

- 4) 回転機に熱媒循環システムの追加が必要
- 5) 断熱・保温構造が必要
- 6) 電力ケーブルと熱媒輸送管の二系統が必要でタワー内に収納が難しくなる可能性がある
- 7) サブ MW 以上の規模が必要

であろう。この内、発電機にも水冷機構を有する物もあるため 4) の項目は特に大きな課題では無い。発電機の水冷は入り口出口の温度差が小さいため循環系の設計に苦労しているが、発熱機では大きな温度差を取れるため比較的容易になるであろう。5) の断熱・保温については現地施工も可能なので大きなデメリットでは無い。6) については太陽熱発電所の実績からみて現行の風力タワーに十分収まるサイズであるので問題では無い。7) については 9 月号でも紹介したように熱機械はある程度の規模が無いと割高になる。(c) の電気ヒータ式と比べて単一タワーで数百 kW 以上の規模において熱媒循環式の方が電気ヒータ式より有利になると推定される (Web21 の 9 月号)。

(e) 熱エネルギー蓄積に特化した安定化

前述の(c)(d)は、ピーク需要時かつ順風時には回転エネルギーを直接電力に変換し、深夜など需要が小さい場合にはヒータ駆動あるいは発熱機モードにして熱貯蔵し需要期に備える、という運用が可能である。しかし回転機が誘導発電機と同じ構造を取るため構造が複雑である。また、良風時とピーク需要時が重なる期間がどの程度あるか、も地域により異なる。そのため別の可能性として究極の単純化を狙ったものがこの(e)である。Web21 の 11 月号のトピックスにて紹介した物がこのタイプである。タワー頂部には発熱機を配置し、直接電力は作らない。すると電気ブレーキと同じになり究極の小型軽量化・単純化ができる。電気的にはごく小さな直流界磁だけ必要である。軽いためより高いタワーが可能となり、回転機のコストも下がり、公害も軽減出来る。ただし最大需要時でもエネルギーは一旦熱システムを通過するため従来風力より効率は落ちる。

この効率が良くないというデメリットは超電導を採用することで改善できる。電気ブレーキの原理は渦電流であるため、磁場が必要不可欠である。しかし発熱機の温度が 800 C° などという高温になると鉄などは磁性を失い、常電導コイルでは磁場を作れなくなる。超電導ならば非磁性体にも強力な磁場を印加することが可能となり、さらに温度を上げることが可能となる。1000 C° を越えると熱電変換の効率は 60 % に近づき、直接発電する場合と比べて効率の遜色もなくなる。

超電導 Web2.1

(公財) 国際超電導産業技術研究センター 〒213-0012 神奈川県川崎市高津区坂戸 3-2-1 KSP Tel: 044-850-1612

さらに別の方法として、熱化学反応の適用も考えられる。おおよそ 800 C° を越えた温度が得られると水素製造や石炭液化その他様々な化学反応を生じさせることができるため、現在太陽熱の分野で研究が進められている。これも超電導発熱機が実現できれば適用可能となる。

(f)その他の安定化手段

図 1 には無いがその他の安定化手段について簡単に紹介する。揚水は風力の安定化に有効であるが、既に適地は少なく採用できない。この揚水発電に近い能力を持つ物として圧縮空気発電 (CAES; Compressed Air Energy Storage) がある。これは適切な岩塩ドームが等があれば有効であろうが、日本では中々に難しそうである。その他、超電導エネルギー貯蔵 (SMES; Superconducting Magnetic Energy Storage) やフライホイールは短時間の補償に向いており、24 時間単位でのエネルギー平準化にはあまり向かないと言われている。

2. まとめ

本稿では様々な風力の安定化手段のまとめを示した。(a)(b)は現在適用されている、あるいは開発が進められているシステムであるがそれぞれに課題が有り、より良い安定化手段が望まれる。これらに対して安価な熱エネルギー蓄積システムを利用する(c)～(e)を示した。これらの間で有効なシステムは規模・地域によって異なると考えている。また今回は熱機械部分について単純化した例で説明したが、さらなる発展として

- 1) 太陽熱発電、地熱発電、バイオマス発電などとの併設
- 2) 火力発電所のプレヒート利用
- 3) 熱供給も考えた CHP (Combined Heat Power)
- 4) 低温でのバイナリ発電
- 5) 離島・沿岸部などでの真水製造(造水)
- 6) 水素製造、液体燃料製造

など多種多様なバリエーションが考えられる。今後はこの風力熱蓄積発電をより深く検討し、試作機の製作を通じて実現に向かって行きたいと考えている。

[超電導 Web2.1 トップページ](#)