

地球温暖化と温室効果ガスの検証（13）＜脱炭素とエネルギー資源（続1）＞

新型コロナウイルス緊急事態宣言が3月7日まで再延長されました。現在、首都圏の感染者は徐々に減ってきているようですが、緊急事態宣言が解除された後がまた心配です。すでに医療従事者へのワクチン接種が始まっていますが、国民全体への接種の体制を早く整えていただきたいものです。

菅政権の成長戦略会議で決めた「カーボンニュートラル宣言」は、電力事業の重要な技術として**洋上風力、燃料アンモニア、水素、原子力**を挙げています。しかしながら、先月号でもお話をしましたように、燃料アンモニア、水素は大きな問題を含む不確実な技術であり、2050 年までの全面的な実用化はむずかしいと言わざるをえません。そこで再エネ（再生可能エネルギー）のエース洋上風力発電と原子力発電が残るわけですが、ご存じのように原子力発電に大幅に頼るわけには行かない国内事情があります。結局、最後の砦は、四方を海に囲まれた日本が有利といわれている「洋上風力発電」ということになるようです。果たして洋上風力発電は大丈夫なのでしょうか？

今月はこの「洋上風力発電」について調べてみました。

【脱炭素とエネルギー資源-6】ドイツのグリーン（再エネ）電力の実情

日本の「グリーン成長戦略」の目玉の一つである「風力発電」も難しい課題を有していることをドイツのグリーン電力の問題を通して検証してみましょう。



ドイツの陸上風力発電



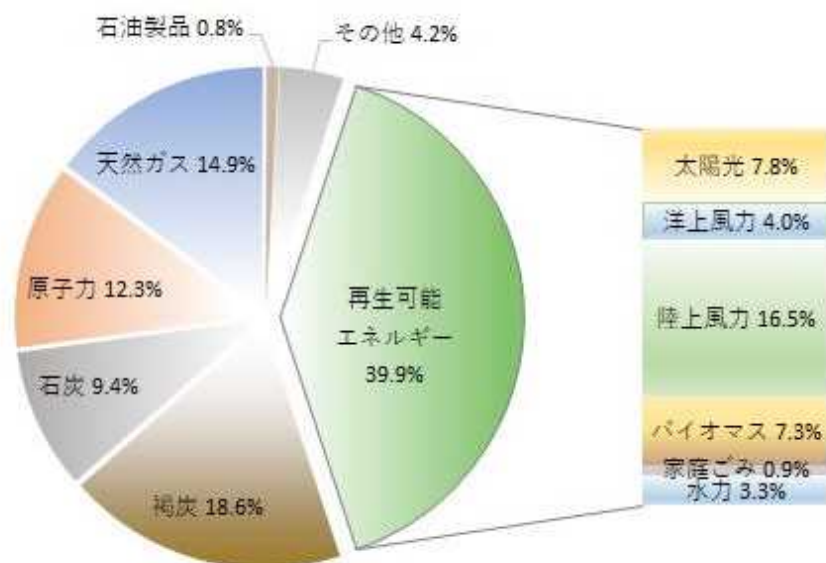
ドイツの洋上風力発電

＜他国の原子力で支えるドイツの再エネ＞

ドイツは 2010 年、今世紀半ばまでに電力の 80%を再生可能エネルギーで賄うという野心的な目標を掲げ、さらに翌年には日本の福島第一原子力発電所の事故を受け、2022 年までに「脱原発」を達成すると発表しました。そして、2019 年には運転中の原子炉は 7 基のみとなり、水力を含む再生可能エネルギーが全体の 4 割近くになりました。

「脱原子力+再エネ拡大」と「電力の安定供給」は両立するののかという問いに対し、両立するという回答に決まって引き合いに出されるのがドイツです。また、ドイツが年間ベースで電力輸出超過であることも事実です。しかしそこで忘れてはいけない別の事実が、2点あります。

まずドイツではこれまで、再エネ増加の一方で、石炭火力発電がベース電源として供給力を支え、天候や季節で大きく変動する再エネのバックアップの役割を果たしてきたことです（次図）。これは、ドイツの二酸化炭素排出量削減にとって大きなブレーキとなりました。さらに、CO₂発生が比較的少ない天然ガス発電を増やそうとするとロシアのパイプラインに頼ることになり、これも国家間の力学上、限度があります。



ドイツの発電資源比率(2019年)

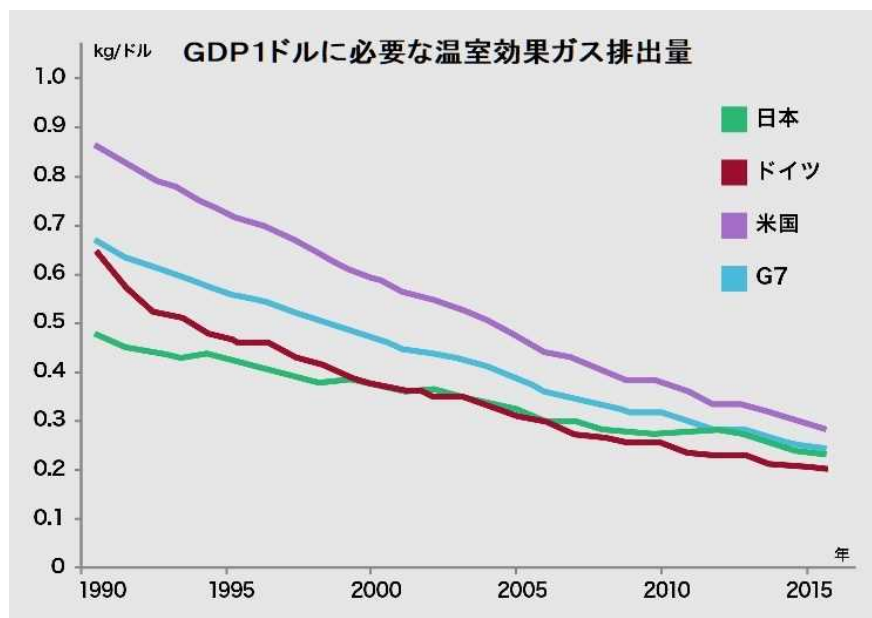
もう一つは、ドイツでは年間ベースで輸出超過といっても、電力需要のピーク期（冬季）に再エネの出力（特に北部沿岸部の風力発電）が下がった場合には、供給力が需要を下回る時間帯が発生します。この状態で大停電が起きないのは、ひとえにこのギャップを国外からの電力輸入で埋めることができるからです。その電力は主にフランスやスイス、チェコ、デンマークから来ています。デンマークを除き、これらの国々は全て原子力国です。ドイツが変動の大きい再エネを増やしてこられたのは、国内の石炭火力と、近隣の原子力国からの電力輸入によって需給のバランスを取ることが可能だからということになります。

<ドイツと日本のCO₂排出量は拮抗>

世界最大の環境NGOである気候行動ネットワーク(CAN)は、気候変動枠組み条約第25回締約国会議(COP25)がマドリードで開催されていた昨年12月3日、地球温暖化対策に消極的な姿勢を示した国に贈る「化石賞」に、ブラジル、オーストラリアと並んで日本を選出しました。日本が石炭火力発電に依存していることにに対し、「パリ協定を軽視している」ことが理由らしいのです。

しかしながら、原単位当たりの温室効果ガス(CO₂)排出量を調べると、CANの評価が必ずしも正しくないことが浮き彫りになります。この排出量原単位について、ここでは購買力平価で調整した1ド

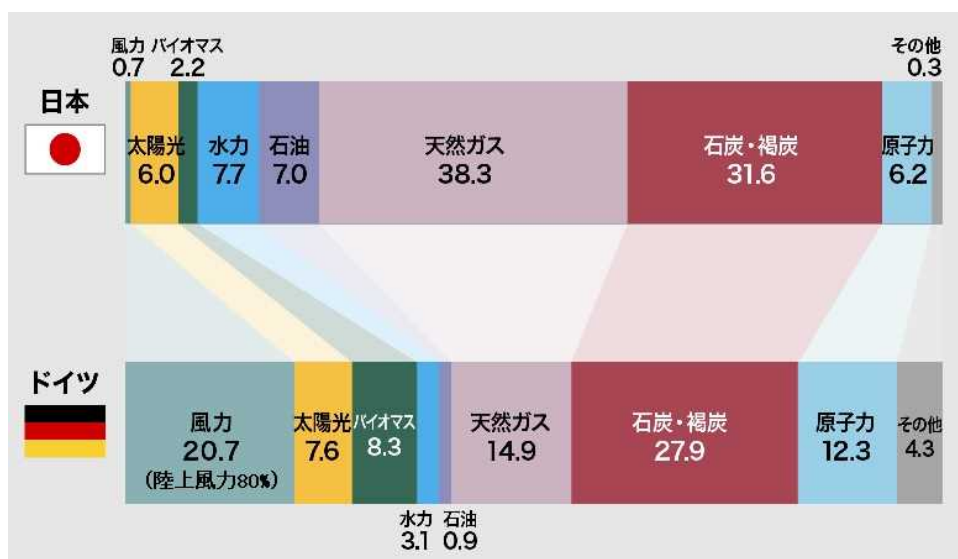
ルの GDP を稼ぎだす上で排出している温室効果ガスの量と定義しました。国連及び IMF の統計を活用して排出量原単位を算出すると（次図）、2010 年まで日本とドイツの排出量原単位はほぼ拮抗していました。その後 2011 年 3 月の東日本大震災以降、国内の原子力発電所が止まり、ドイツにやや遅れを取るようになりましたが、2017 年の時点で日本は 0.219kg で、これは、G7 の平均である 0.229kg を下回る水準です。一方、ドイツは 0.191kg で日本を下回るものの、大きな差があるわけではありません。



CO₂排出量の推移（国連・IMF統計）

＜ドイツと日本の石炭火力比率は拮抗＞

菅政権の「カーボンニュートラル宣言」では 2030 年までに石炭火力発電所の 70%を廃炉・休止することを決定、ドイツ連邦議会も 2038 年までに石炭火力発電所を全廃する「脱石炭法案」を成立させています。ここで気を付けることは、第 1 に再エネ大国ドイツも現時点では石炭火力を利用していること、そして第 2 に、全廃を目指すとは言え 18 年間の途中で方向転換できる仕組みを入れたことです。



ドイツ（2019 年）と日本（2018 年）の電源構成比較（経済産業省資料）

ちなみに、2019 年におけるドイツの電源構成を見ると、石炭火力は 27.9%に達していました（前図）。日本の 31.6%（2018 年度）をやや下回りますが、この 3.7 ポイントが「化石賞」に値するとは思えない小さな差に留まっています。

総発電量に占める再エネ比率の高さから、ドイツが温室効果ガス排出量の少なさで圧倒的に日本を凌駕しているとのイメージを持つ日本人、そして外国人は少なくないでしょう。しかし、CAN の日本に対する厳しい姿勢は明らかに的外れです。前述のように実際のデータを見る限り、優等生のドイツに対して、「化石賞」に値するほど日本の温暖化対策が劣っているわけではありません。日本で毎時 100 万 kW 級（1GW 級）の原子力発電所を 20 基程度稼働させ、その発電量に見合う石炭火力発電所を停止すれば、再びドイツに拮抗することは理論的には直ぐにでも十分に可能です。

残念ながら、日本のメディアの一部は、そうした実情を正確に報道せず、有識者の一部も明らかに偏った情報を発信しています。また、日本政府は広報戦略が拙劣なため、世界に誤ったイメージが拡散するのを防げていません。

＜ドイツの風力発電の危機＞

前図でも示したように、ドイツの再エネの主力は「陸上風力発電」です。しかし今ドイツでは北部を中心に陸上風力発電装置の建設に対する住民の反対運動が強まっています。反対の理由は、家の近くに風力発電プロペラが建設されると、景観が損なわれて不動産価格が下がると考える人、巨大なローターの回転音が気になるという人、ローターがさえぎる太陽光がストロボのようだと苦情を訴える人などがいます。

さらに野鳥がローターにぶつかって死ぬのを防ぐために、自然保護団体が風力発電装置の設置差し止めを求める例も増えています。自然保護団体は政府の再生可能エネルギー拡大政策・CO₂削減路線には原則として賛成していますが、野鳥の生息圏が風力プロペラの建設によって脅かされることについては、断固反対しています。

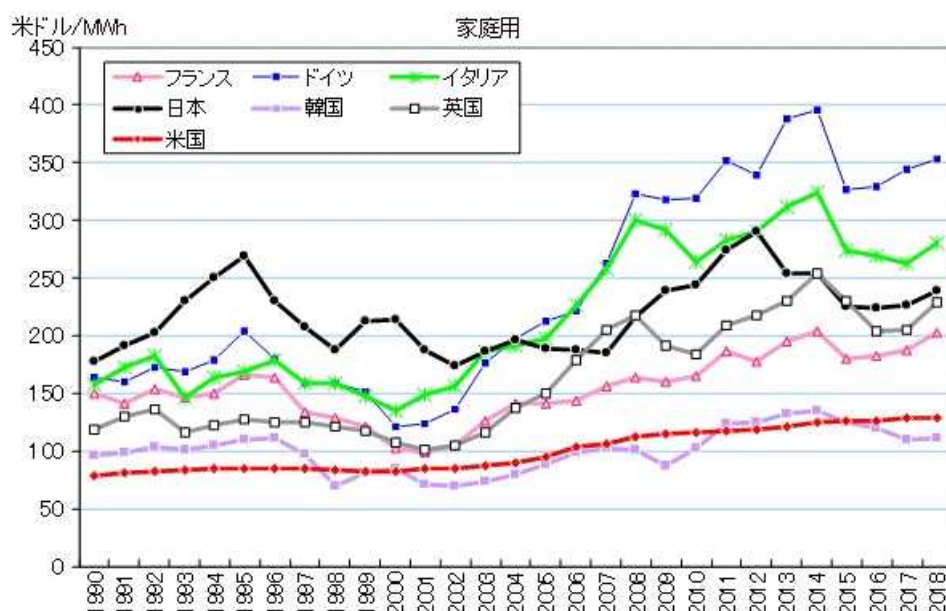


ドイツの風力発電所と野鳥の群れ

そして数多くの陸上風力発電所建設差し止め訴訟が起こされ、新規の建設が難しくなってきました。実際、2019 年の新規設備実績は目標のわずか 20%にとどまってしまいました。そればかりか、風力発電関連企業の経営難も出始めたようです。ドイツが 2030 年までに電力消費量の 65%を再生可能エネルギーでまかなうという国家目標を達成するには、陸上風力発電所の大幅な増強が不可欠であったのが、今大きな危機を迎えています。このことは、陸上風力発電の世界的な限界を暗示しているのかもしれない。

＜世界一高いドイツの電力料金＞

さらにつけ加えると、現在ドイツの電力料金は世界一高く、ドイツ国内の大きな政治問題にもなっています。当然ですが、理由は再エネのための設備投資や維持コストが異常に高いためです。メルケル政権も再エネ拡大と原子力発電の縮小には二の足を踏み始めていて、「脱炭素」は頭が痛い問題になっています。これからドイツが「脱・脱原子力発電」へ進むか否かはまだ分かりません。ただし、仮に脱原子力を予定通り進めるのであれば、温室効果ガス排出削減の公約は看板を降ろさざるを得ないでしょう。ドイツにとっては、極めて難しい判断をすることになります。



主要各国の家庭用電気料金の推移（OECD/IEA 資料）

【脱炭素とエネルギー資源-7】 再エネのエース・洋上風力発電

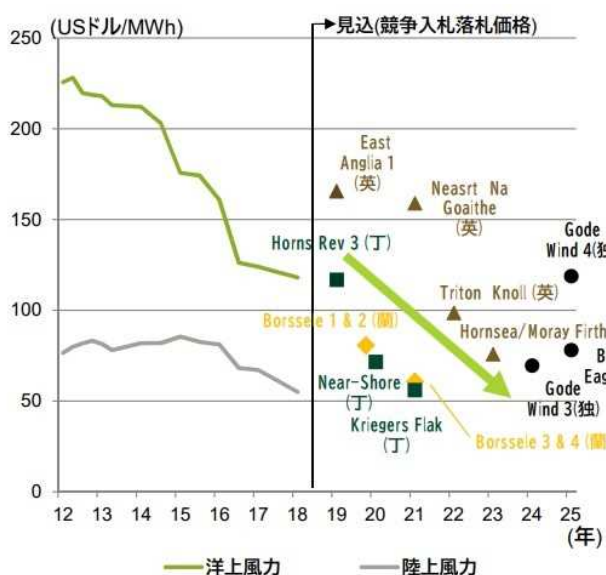
＜洋上風力発電の目標コスト＞

菅政権が脱炭素政策を打ち出したことを受けて、洋上風力発電を本格導入する準備が政府内部で進められています。経済産業省と関連団体は「洋上風力産業ビジョン」を策定し、その中で洋上風力発電のコストを1キロワット時あたり8～9円にするという目標を設定しました。この金額は既存の火力発電（同約10円）よりも安い水準です。

これまで政府は、風力発電のコストについて最大で1キロワット時あたり20円以上かかると試算。火力発電など既存の電源と比較して採算が合わないと考えてきました。日本は安倍政権が脱石油に消極的だったことから、メーカー各社も積極的な投資を行っていませんでしたが、この間に諸外国は次々と新技

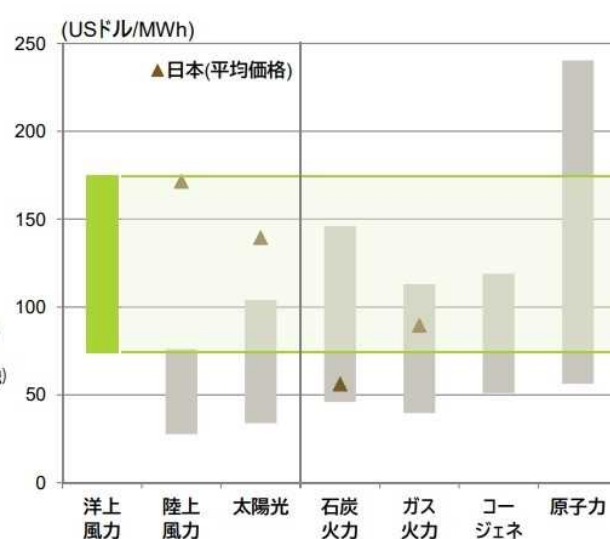
術を開発し、風力発電のコストは徐々に下がってきています。今回、菅政権による方針転換を受けて、経済産業省が日本でも再生可能エネルギーが高コストであるというイメージを払拭したいために海外並みのコスト目標を公式に打ち出しました。

政府は海洋国家日本の主力電源の1つとして洋上風力発電を位置付ける方針で、2040年までに大型の火力発電所または原子力発電所30基分（毎時30～45GW：総発電量の約30%）の電力を洋上風力で賄いたいとしています。この目標を達成するには、今後、大量の洋上風力発電システムを急ピッチで構築する必要がありますが、日本企業は当該分野で完全に出遅れており、現時点では欧米企業の独壇場となっています。政府は2040年までに国内調達比率を60%にしたいとしています。当面はほぼすべてを輸入に頼らざるを得ないでしょう。海外ではさらに低コスト化が進んでいますから、今から日本企業が追いつくのは至難の業です。



欧州の洋上風力における発電コスト推移

(Bloomberg New Energy Finance 2018)



発電コストの比較

(Bloomberg New Energy Finance 2018)

<洋上風力発電の仕組み>

洋上風力発電は文字通り海上で風力発電を行う仕組みですが、そのシステムには、大きく分けて二通りの工法があります。一つは、洋上といっても、陸地に近い、水深60m以下の比較的遠浅の海岸あるいは港湾などで風力発電プラントを建設する工法です。工法の特徴は、プラントの基礎を海底に固定して建設するやり方で、「**着床式工法**」といわれます。

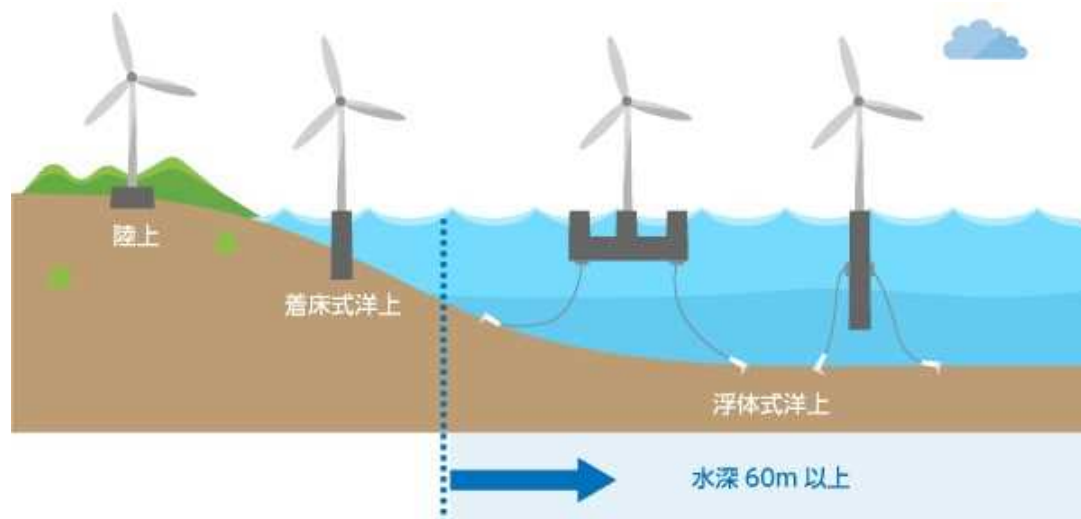
それに対して、水深60m以上の場合、海上に船を浮かべるようにしてプラントを建設する「**浮体式工法**」というシステムがあります。このシステムは、設備を浮体として海に浮かべますが、あちこちに移動しないよう、ワイヤーで海底に固定します。

いずれの工法も、現在、各国で実用化、あるいは研究中の工法で、それぞれの国、海域や風況などによって、採用する工法が違ってきます。

洋上風力発電は、陸上と違って、年間を通して比較的強い、しかも安定した風況を得られるのが特徴です。ヨーロッパ各国で早くから洋上風力発電プラントの建設が進んだのも、そうした海上の利点

に着目したためです。とくにヨーロッパの場合、年間を通して偏西風が吹き、しかも遠浅の海岸の多いことが特徴としてあげられます。そのため、イギリスをはじめとしてヨーロッパ各国で普及している洋上風力発電プラントのほとんどが着床式のプラントです。浮体式は一部の国で研究がなされていますが、まだ研究・開発段階です。

日本の場合、現在、着床式の実験プラントも稼働していますが、周辺海洋のほとんどが陸地からすぐ水深が深くなるため、将来の大規模洋上風力発電は浮体式プラントにならざるをえません。



主な洋上風力発電の種類

<洋上風力発電の課題>

(1) 建設コスト

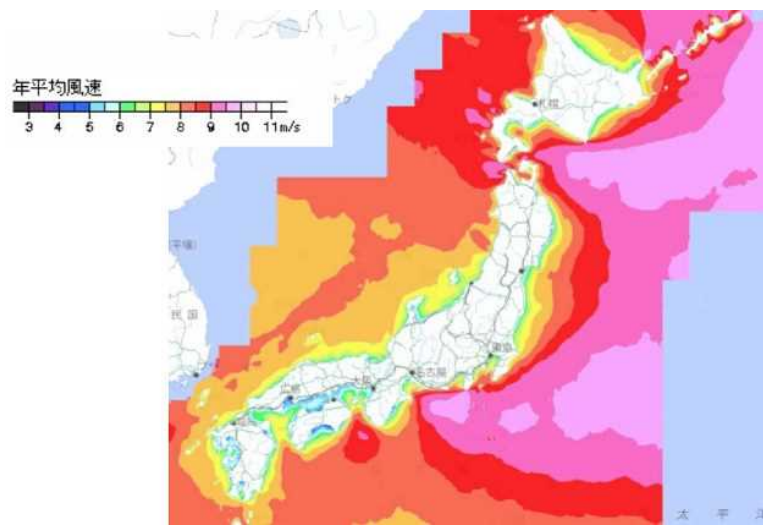
洋上風力発電の最大のデメリットは、建設コストです。一般的には陸上風力発電に比べ、着床式が1.5倍、浮体式が2倍程度高くなるとされています。というのも、発電プラントを洋上で建設、設置することは難しいので、部材を一つずつ陸上で製造、ある程度組み立てをし、洋上に運んで、実際のプラントの建設をしなければならないからです。資機材の輸送コストは、船で一度に大量に運べるため、陸上に比べると安いとされていますが、洋上では、組み立てのためのクレーンや付属設備の設置が必要になります。風車だけでなく、変電設備などの施設設置が欠かせません。それと、コストを押し上げる要因として、陸上に電気を送る海底ケーブルの敷設があります。陸地に近い沿岸部や、港湾などに建設する場合は、送電線コストはそれほどかかりませんが、陸地から距離のある洋上では、海底ケーブル敷設には、大きなコストがかかることが予想されます。また、浮体式の場合は波や潮による揺れの影響を抑える対策にも大きなコストがかかります。

(2) メンテナンスコスト

洋上風力発電の場合、建設コストと同時に、メンテナンス費用を無視できません。陸上風力発電の場合は、風車や発電設備などにトラブルがあった場合は、補修要員が駆けつけて対応することが可能ですが、洋上では、そんなに簡単にはいきません。船で要員が向かうとしても、海上が荒れている場合などはそれも不可能になってしまいます。一部には、洋上風力発電が数多く設置されるウインドファーム（風力発電基地）などには、メンテナンス要員が滞在できるスペースも必要です。

(3) 変化する風況

コストと同時に、日本周辺海域における詳細な風況データを収集することが大きな課題となっています。洋上風力発電は、陸上に比べて風況が安定していることは確かですが、海域や季節によって、風況には大きな変化があることも見逃せません。洋上風力発電はヨーロッパ諸国で普及していますが、それというの、大西洋や北海の沿岸部は、季節を通して気象が安定しており、風況にも変化の少ないことが立地上のメリットとされています。それに対して日本の場合は、日本海側と太平洋側では、気象環境が大きく変わるという特徴があります。とくに冬の場合、西高東低の気圧配置が続き、日本海側は、大陸からの季節風が非常に強まります。夏は、太平洋高気圧の影響で、日本海、太平洋側ともに気象は比較的安定しますが、**夏は台風の襲来があります**。こうした日本周辺海域の気象、風況を正確に把握することが洋上風力発電の建設に不可欠の条件となります。



日本全国の海域の風況 (NeoWins 高度 100m) (資源エネルギー庁資料)

(4) 漁業への影響

海外における洋上風力発電の立地例を見ると、生物・生態系への悪影響は報告されていないようです。この点は陸上風力発電より有利になります。しかし、大きな産業である漁業への影響は避けられません。

漁業は、日本では、海域の先行利用者でもあり、漁業権が既得権益として、長く定着しています。そのため、洋上風力発電を推進する場合、漁業関係者との調整が重要課題となっています。従来、発電所などが海域周辺に立地して漁業関係者との調整が必要となる場合、漁業補償金という形で折り合いをつける方式が一般的でした。しかし、そうした旧来型の調整方式では、長期にわたって、双方の利益を維持することが困難であるとの認識も高まっています。そうしたことから、最近では、発電事業者も漁業関係者も相互に利益を得ることのできるような方式に改める必要があるという考え方が多くなっています。

(5) 設備利用率

発電容量をフルに稼働した場合に比べて、実際に発電できた割合を「**設備利用率**」と言いますが、

洋上風力発電もメンテナンスによる停止時間や風が十分に吹かない時間も考慮すると利用率は低くなります。海外などの実績からも、洋上風力発電の設備利用率は一般的に 30%程度です。原発 1 基の設備利用率は実績で 60～85%ですから、同じ毎時 30GW の発電容量を設けても、洋上風力は原発 30 基分の半分以下の電力しか生み出せないというのが実情なのです。つまり、**目標の発電電力を得るためには総発電容量の 2 倍以上の設備が必要になるわけです。**

(6) 技術課題

洋上風力発電の運転コストは、建設コスト、メンテナンスコスト以外にも風車の停止に伴う発電の損失による費用も含まれます。この問題の解決策の一つとして、風車の大型化が挙げられます。そのためには 1 基毎時 7,000kW (7MW) 級以上の発電所が望まれます。しかしながら、**毎時 7,000kW の洋上風車は風車ローターの直径は約 165m、タワーは 105m、海面から風車ブレードの先端の高さは約 200m、東京・新宿の高層ビルの高さにもなります。**風車の大型化によりコストを低減するためには、構造の比強度（同じ重さで比べた時の強度）を向上させ重量を低減させることや、風車を制御することにより風荷重を低減させるなどの技術開発が必要です。

近年、この課題に対しては、炭素繊維を使ったブレード重量（風車の翼）の低減やブレードのピッチ制御による風荷重の低減によりある程度クリアしてきています。風車の大型化によって、風車を支える支持構造物、建設、送電ケーブル、メンテナンスのコストを大きく低減できるため、発電単価を低減させることができます。

一方、浮体式洋上風力発電の場合には**毎時 7,000kW の風車を支える浮体に使う鋼材は 5,000t、東京・新宿の高層ビルに使う鋼材とほぼ同じになります。**そのため、溶接時間や建設時間の短縮および建設コストの削減が必要であり、溶接性能の高い鋼材開発が必須です。また洋上の自然環境は複雑であり、特に洋上の腐食環境では材料の疲労強度が低下するため強力な腐食対策が必要です。

風車タワーと増速機の 98%、架構・機械 部品の 85%、ナセルの 80%、発電機 の 65%は鋼構造であり、それらの新たな技術開発は風車や支持構造物の軽量化やコスト低減のためには避けて通れません。



洋上風力発電所の建設（英国 Marine Power Systems 提供）

<洋上風力発電の可能性>

洋上風力発電、特に浮体式は日本の将来の再エネにとっては重要な技術であり、大きな希望となるでしょう。しかし、世界でもまだ研究開発・試験段階であり、技術的にも難しい浮体式風力発電を実用化して、2030年までに大型の火力または原子力発電所10基分毎時10GW（例えば、技術課題で取り上げた7,000kW風力発電所300基：総発電量の約10%）、2040年までに30基分毎時30GW（7,000kW風力発電所900基：総発電量の約30%）の電力を賄いたいとする日本国政府の計画は実現できるのでしょうか？

また、発電コストもイギリスなど欧州の着床式洋上風力発電コストを参考・目標にしているように見えますが、果たして大丈夫なのでしょう吗？

今のところ、これらの洋上風力発電電力事業計画に対して疑問を呈するマスメディアの論評は目にしていません。日頃、政権の失態に噛みつくマスメディアも「脱炭素・CO₂排出削減」の錦の御旗の前では何の疑問も沸かないようです。

菅政権の「脱炭素・カーボンニュートラル」の目標を何とか達成しようという表向きのアピールはわかりますが、これからの10～20年間で前記の難しい各課題をクリアして、洋上風力発電で国全体の電力の10～30%を賄い、そのバックアップ電源のCO₂も何とかできるとはとても考えられません。永久に不可能ということはありませんが、この計画はまさに「机上の空論」に近く、群がる企業、各種機関に短期間に税金をばらまくだけになる可能性があります。

官僚主導で数字を一人歩きさせ、当面は、国連を舞台にした「温室効果ガスCO₂の排出削減競争」、すなわち「国際政治の権力争い」に落ちこぼれないようにしているだけではないかと心配になります。また、ドイツも悩んでいるように、いざとなれば原発の再稼働が切り札となると考えているのでしょうか。

以上で今月のお話は終了いたします。

今月は本テーマ「地球温暖化と温室効果ガスの検証」の最終回の予定でしたが、最終回は来月に延ばしました。来月は<脱炭素とエネルギー資源（続2）>で“国際送電網構想”、“超高压送電”を予定しています。

<参考・引用資料>

「新法施行後、「洋上風力発電」に向けた動きは今どうなっている？」資源エネルギー庁

「日本でも、海の上の風力発電を拡大するために」資源エネルギー庁

「洋上風力発電のメリット・デメリット」洋上風力発電ナビ

「洋上風力発電の動向と技術課題」石原 猛（東京大学）JSSC 2013. JURY No. 14-5

「電気料金の国際比較」社会実情データ図録

「陸上から洋上へ・洋上風力発電の可能性」建職バンク

「東洋経済オンライン・ビジネス」2021 年 1 月 23 日号

「東洋経済オンライン・政治経済」2018 年 10 月 27 日号

「ドイツの再生可能エネルギーを支える他国の原子力」三菱総合研究所 2019 年 12 月 24 日

「ドレスデン情報ファイル」ドイツのエネルギー関連データ

「世界の電力料金国別ランキング・推移」GLOBAL NOTE 2020 年 9 月 25 日

「菅首相が掲げる「脱炭素社会の実現」カギとなる洋上風力発電は、日本で広まるのか」YAHOO ニュース 1 月 22 日

「洋上風力発電が火力発電より安く？政府が衝撃的な発電コスト目標を打ち出す」YAHOO ニュース 2020 年 12 月 23 日

「洋上風力発電拡大へ “2040 年までに大型火力発電所 30 基分以上”」NHK NEWS WEB 2020 年 12 月 15 日

「老獪なドイツに学ぶべき日本のエネルギー戦略 前編」原子力産業新聞 2020 年 8 月 31 日

「老獪なドイツに学ぶべき日本のエネルギー戦略 後編」原子力産業新聞 2020 年 9 月 15 日