

2 第1回「カーボンニュートラルと洋上風力発電」



北海道科学大学 名誉教授
白石 悟 氏
((一社)寒地港湾空港技術
研究センター 審議役)

それでは、全6回のCPC洋上風力発電技術セミナーの第1回として、「カーボンニュートラルと洋上風力発電」と題し、さっそく説明に入らせていただきたいと思います。申し訳ございませんが、着席で説明をしたいと思っております。

現在、地球温暖化の問題が非常に重要な課題になっております。2050年にはカーボンニュートラル達成ということが目標とされています。そのためにはグリーントランスフォーメーションという形で、再生可能エネルギーの利用が促進されているということです。その中で、いろいろな再生可能エネルギーがありますが、洋上風力発電に関する関心が高まっております(図-2.1)。

地球温暖化防止のためにCO₂を削減すること、もう一つは、我が国はエネルギー自給率が極めて低いことで、LNGや石炭を現在大量に輸入しています。こういった現状から再生可能エネルギーを導入することにより、エネルギー

の自給率の向上が図られる、これも非常に重要な課題となっております(図-2.2)。

本日はここに示す、脱炭素時代、カーボンニュートラル、洋上風力発電、風力発電・洋上風力発電に対する市民意識、洋上風力発電のメリット・デメリット、持続ある社会の形成へ向けて、という内容で洋上風力発電の取り組みに向けた基本的な考え方について説明させていただきます(図-2.3)。

まず脱炭素時代であります。20世紀は炭素社会ということで、石炭や石油、天然ガスも含め、二酸化炭素を発生するものを使い、産業・経済の成長が進められました(図-2.4)。一方、21世紀におきましては、脱炭素社会が求められ

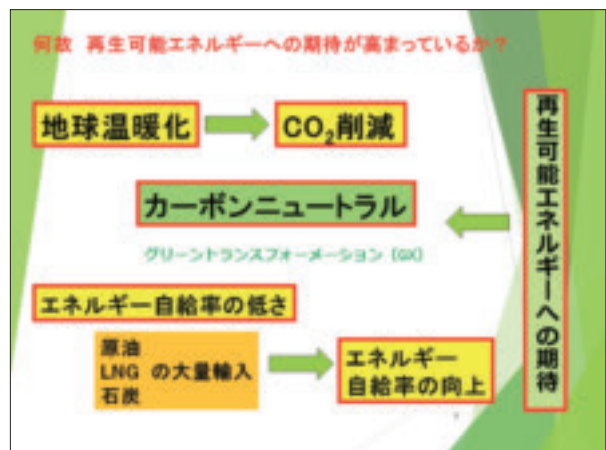


図-2.2

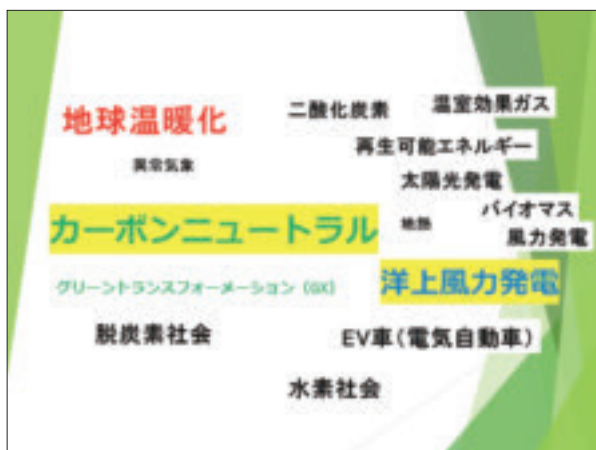


図-2.1

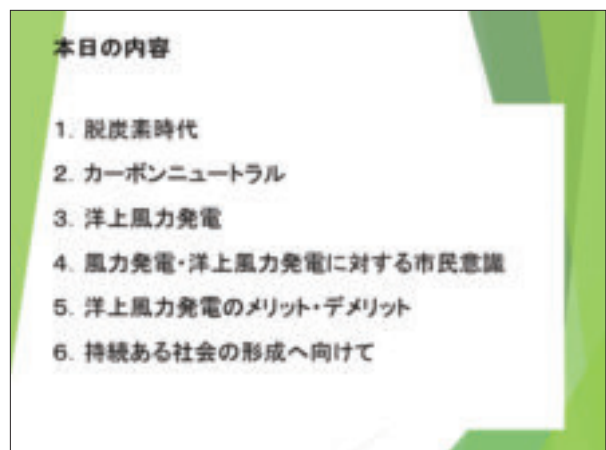


図-2.3

ております。なるべく炭素から脱した再生可能エネルギー社会へと変革が求められています。20世紀では代表的な交通輸送手段としては、自動車や航空機などが利用されておりました。特に自動車については1908年にT型フォードが発表されて、1915年には累積生産台数が100万台になりました。私が以前勤務しておりました北海道科学大学には、今から100年近く前に実際の自動車教習車に使われていたT型フォードやフォードセダンが保管展示されております(図-2.5)。

21世紀においては、持続可能で多様性と包括性のある社会の社会の実現(SDGs)のために17の目標が掲げられています。このうち、エネルギーや気候変動の問題に関しては、特に再生可能エネルギーの利用が大きく関わってくるか

と思います(図-2.6)。

太陽と地球の運動による、太陽からの日射量の変化がございます。歳差運動の変化、これが1.9万年、2.2万年、2.4万年周期、地軸の傾きの影響が4.1万年周期、離心率の変動ですが、これは地球が太陽を周回する軌道が楕円軌道なのか真円軌道に近づくのかという変化で、9.5万年、12.5万年、40万年の周期変動があり、これらの運動変化が重なった形で太陽からの日射量が変わります。それに伴って地球のCO₂濃度も変化しています。最終氷期、最寒冷期は約2.1万年前ですが、その時の海面は現在よりも120m下がっていました。現在はCO₂の濃度が、人類が過去に経験したことのないほど急激に上昇しています。これは二酸化炭素の人為的な排出が大きな原因となっております(図-2.7)。



図-2.4



図-2.6



図-2.5

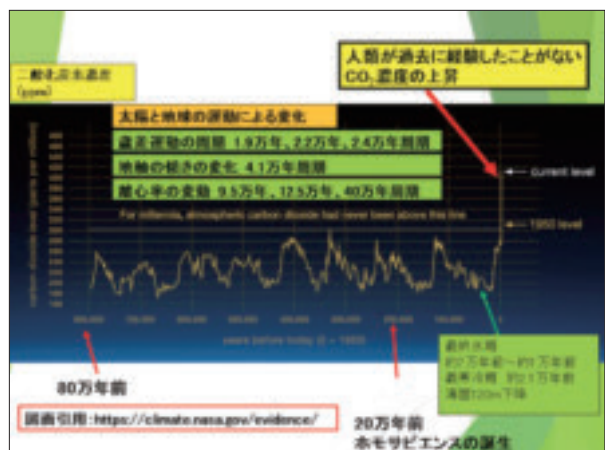


図-2.7

約国会議がありまして、現在 26 回まで開催が進んでおります。昨年の英国グラスゴーでの気候合意においては、気候上昇を 1.5 度に抑える努力を追及すること、排出削減対策のない石炭火力発電の削減への努力を加速すること、が合意されております。この合意ですが、なかなか国際間の共通目標とするところで難しい問題があり、「努力」という文言が記述されている、まだそういう段階です。今年第 27 回の会議 COP27 が、来月、エジプトのシャルム・エル・シェイクで開催される予定になっております (図-2.12)。

気候の現状ではどういう表現があるかと言いますと、第 4 次報告書では温暖化の可能性が高い (90%以上)、第 5 次報告書では可能性が極めて高い (95%以上) という確率値の表現であり

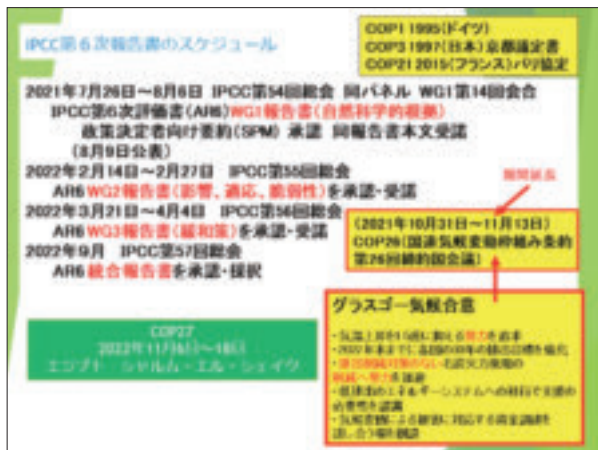


図-2.12

ました。最新の報告書では、人間の影響が大気・海洋及び陸域を温暖化させたことには疑う余地がないという、より高い確率表現になっております。また人為起源の気候変動は世界中の全ての地域で、多くの気象及び気候の極端現象について、既に影響を及ぼしているという表現になっております (図-2.13)。

また将来の気候変動の抑制については、人為的な地球温暖化を特定の水準に制限するには、CO₂の累積排出量を制限し、少なくともCO₂正味ゼロ排出を達成し、他の温室効果ガスも大幅に削減する必要があり、カーボンニュートラルの必要性について言及しております (図-2.14)。

この 2050 年に正味ゼロというモデルにおいて、他の温室効果ガスがどのように変化するかを図の右側に示しています (図-2.15)。そして

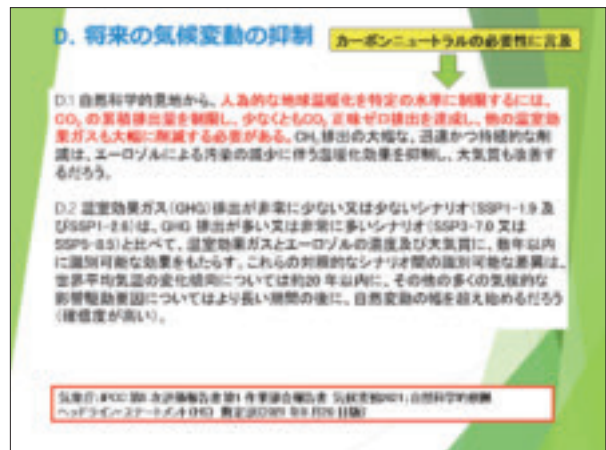


図-2.14

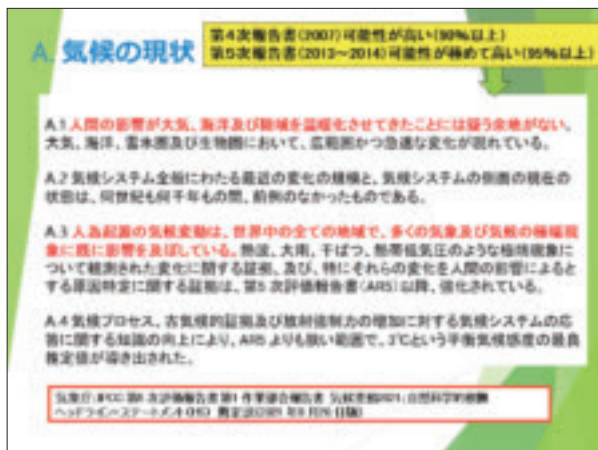


図-2.13

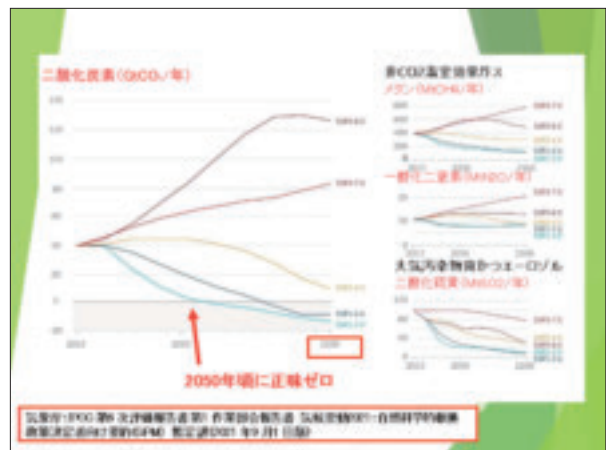


図-2.15

2050年排出ゼロという状況が達成できると、2100年の段階で気温上昇を目標の1.5度によりやく抑えられる計算結果となっております(図-2.16)。一方、脱炭素が求められていますが、現実には化石燃料の消費が増大しています。年々このように増えています(図-2.17)。一方で再生可能エネルギーの導入も少しずつ増えています。まだまだこのような状況で、石炭・石油・ガスといった化石燃料の消費減が今後大幅に必要になります。

化石燃料がどの地域で大幅に排出されているのかについては、ここに示しているように、ヨーロッパと北米の消費は、ほぼ一定水準で増加していないという状況です。アジア大洋州での消費の伸びが大きく、先進国と経済成長が著しい地域との協調が今後必要になります(図-2.18)。

次に、カーボンニュートラルについてご説明します。いろいろなところで石炭・石油・天然ガスを使うことによってCO₂が発生するので、そのCO₂のトータル排出量と森林によるCO₂吸収量をバランスさせて実質的に排出量をゼロとする、これがカーボンニュートラルということです。CO₂は例えば風力発電、電気自動車、あるいは太陽光発電の利用拡大によって、CO₂の発生量を大幅に減少させます。一方、再エネの利用拡大により発電時にCO₂の排出が減少したとしても、装置を製造する段階でCO₂が発生しますので、それとバランスさせた森林による吸収、あるいは海においてCO₂を吸収し、実質排出量ゼロとするのがカーボンニュートラルの考え方です(図-2.19)。

電源別のライフサイクルCO₂排出量を比較



図-2.16

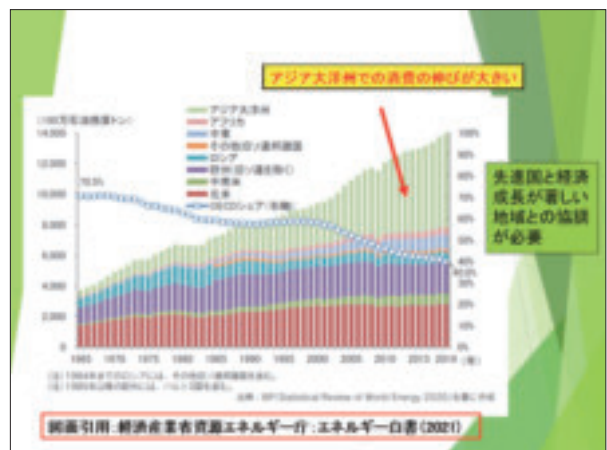


図-2.18

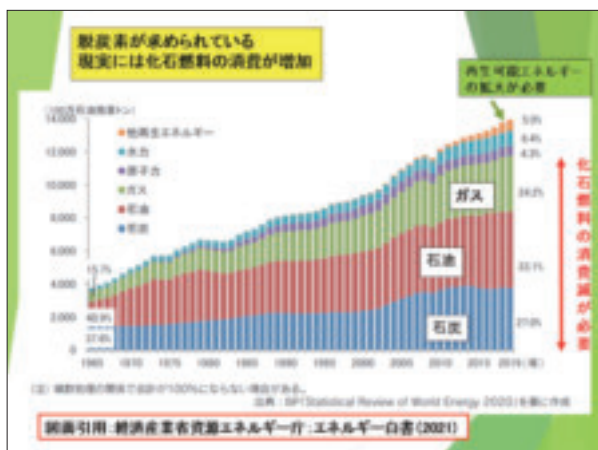


図-2.17

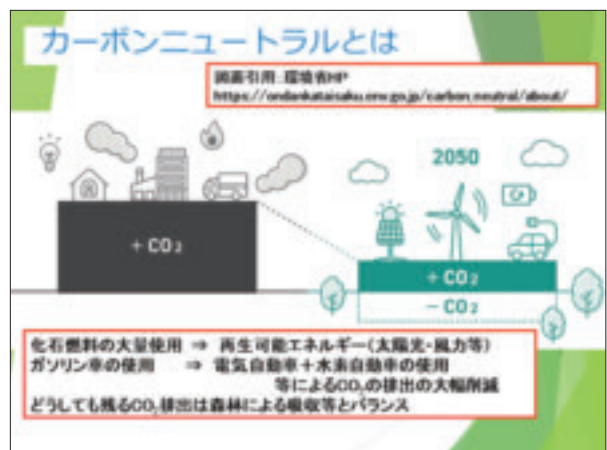


図-2.19

します。石炭火力が最も CO₂ の排出が高く、石油火力、LNG 火力が CO₂ の排出量の順になります (図-2.20)。この中で、設備を造る時の排出量があることと、化石燃料を使うものについては発電燃料を燃焼することによる CO₂ の排出があります。それから再生可能エネルギーは発電過程の中では CO₂ は排出しませんが、設備を設置する段階、すなわち設備を造る上での排出量があります。太陽光、風力、地熱、中小火力、これらは発電時に CO₂ を排出しない発電方法です。

カーボンニュートラル宣言は世界的に広がりを見せています。データが古く 2020 年のものですが、日本では 2020 年 10 月 26 日によりやくカーボンニュートラル宣言が行われました。全世界では 120 数番目の宣言です。また日本の

地域自治体については 749 自治体がカーボンニュートラル宣言をしており、これは 6 月 30 日現在の数字になります。それから昨年(2021)の 12 月 31 日時点ですが、RE100、再生可能エネルギー 100 宣言企業については、世界 346 社中、日本企業は 63 社がカーボンニュートラル宣言を行っています (図-2.21)。

カーボンニュートラルについて、各国は基本的には 2050 年、中国では 2060 年が目標年になっております (図-2.22)。この図は 2050 年の二酸化炭素排出実質ゼロ表明の自治体です。字が小さくなっておりませんが、人口としては約 1 億 1,852 万人の関連する自治体が二酸化炭素排出実質ゼロを宣言しています (図-2.23)。また、脱炭素経営に向けた取り組みが世界で進められており、こういう形で取り組みが進められ

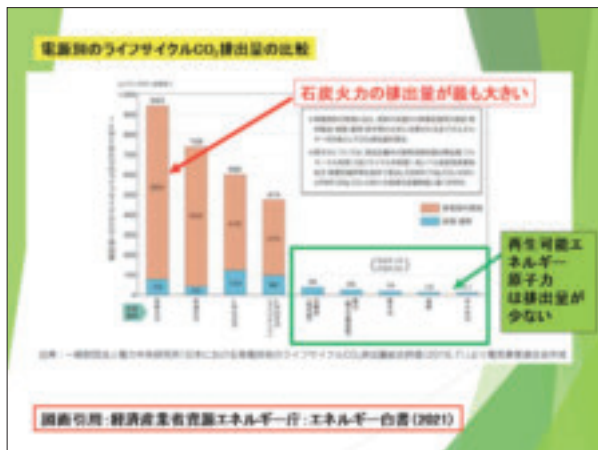


図-2.20



図-2.22

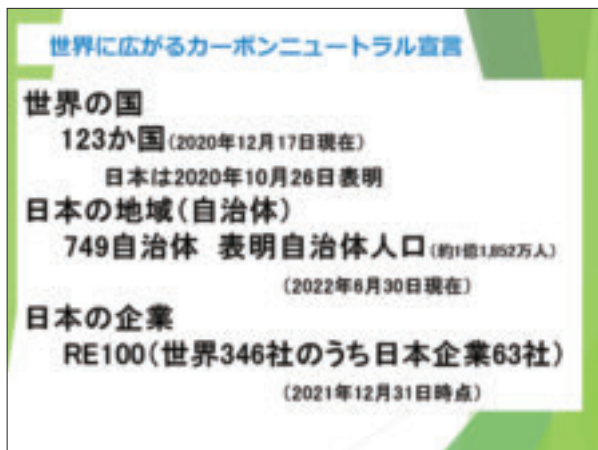


図-2.21



図-2.23

ております。RE100の企業数については、日本がアメリカに次いで2番目の数です(図-2.24)。それから脱炭素を目指すということで、これはなかなか全国一律には進めることはできません。例えば大都市では脱炭素ゼロを目標としても、実質的になかなか難しいということで、それを達成できる地域から順に脱炭素を達成していくのが脱炭素を成功させる考え方になります。当初の目標としては、目標が達成できる地域をまず指定し、そこから脱炭素を行い、全国でどんどん脱炭素社会を形成していくことで、2050年の目標に向かって脱炭素を図っていく考え方です。

では北海道はどうでしょうか。北海道の二酸化炭素の排出量は、少し古いデータで2016年度のデータですが、全国で一人当たり9.5tの

ところ、北海道は11.5tです。北海道における二酸化炭素の排出量は全国平均と比べ多いのが現状です。この内訳を見ると、家庭部門の排出量の占める割合が全国平均と比べて多い状況です。これは、北海道は寒冷地であるため暖房用のエネルギー消費が多く、灯油をたくさん使うなど、CO₂の発生が多くなってしまいう北海道の状況がござります(図-2.25)。

北海道は再生可能エネルギーの導入率は、14.6%で都道府県別で35位です。2019年と20年も含めて30数位という状況から脱出することができていません。また再生可能エネルギーの利用率は15%程度で、北海道の食料自給率が205%で200%を上回っているのに対し、エネルギーの自給率は極めて低いというのが現状です。こうしたことから、例えば洋上風力発電の導入を進めていくことは、北海道におけるエネルギー自給率を高めていく手段の一つになるかと思えます(図-2.26)。

北海道における脱炭素ですが、発電部門で再生可能エネルギーの導入を促進していくというのが一つの鍵です。これらを支えるために地域内の送電線や地域間連系線の拡大を、今以上に進める必要があります。その他いろいろな製品の製造過程において、例えば製鉄、セメント製造における脱炭素、農業・漁業を含めたいろいろな分野での脱炭素も必要です。それか



図-2.24

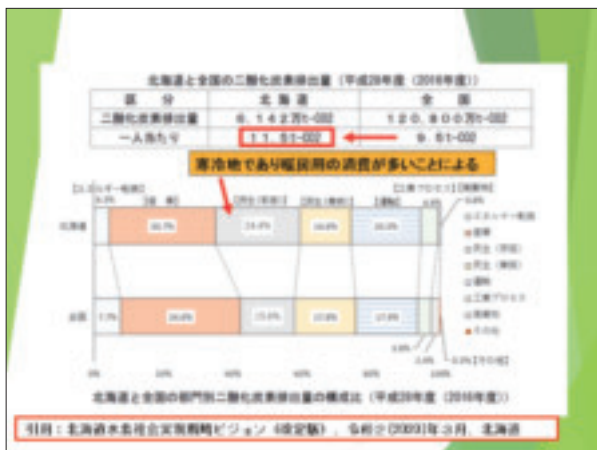


図-2.25

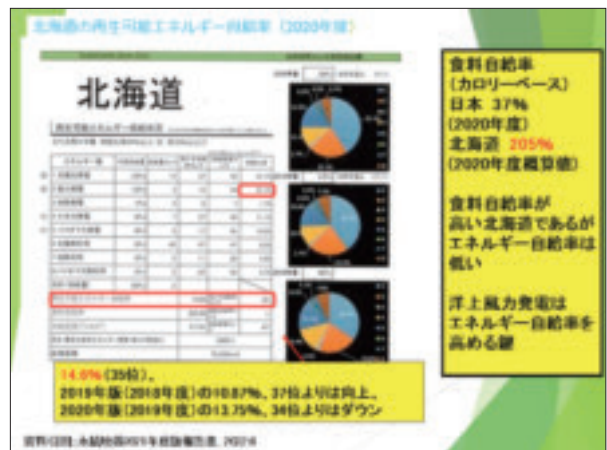


図-2.26

ら民生部門では住宅のゼロ・エネルギー・ハウス、ZEHですね。それからオフィス・公共部門ではゼロ・エネルギー・ビルディングということで、ZEBですね。こういったものにより、脱炭素を図っていくことが必要です。それから地域内の熱供給施設ですね。これらの導入も必要になります。それから運輸部門について、二酸化炭素を排出する交通機関から二酸化炭素を排出しない交通システムに変えていくということが必要になります。様々な運輸部門において脱炭素を図っていくことが必要になってくると思います（図-2.27）。

燃料電池車と電気自動車は、一つはEV という Electric Vehicle、そしてFCV ですね。燃料電池自動車の利用が高まってくると思います。電気自動車については短期的な変動の調整に使

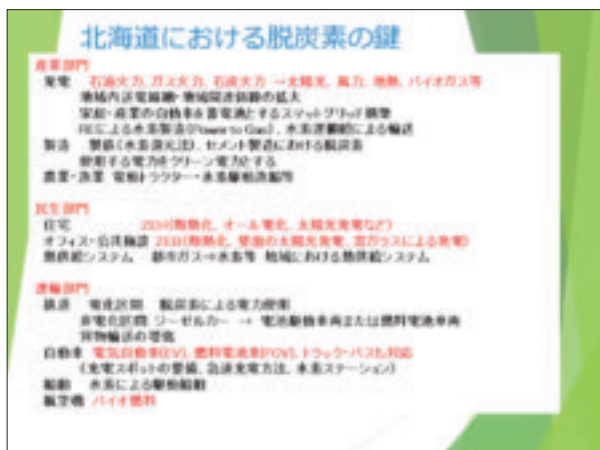


図-2.27

えると思いますが、水素 FCV を利用することにより、長期的な変動の調整もできるかと思っています。それから将来的には、電気自動車は電力系統と繋げることによって、蓄電池としての機能、現在ではそういう状況になっていませんが、将来的に電力系統と接続した蓄電池としての利用を図っていけば、再生可能エネルギーの利用拡大に繋がるとかと思っています（図-2.28）。

カーボンニュートラルのイメージ図ということで、これは北海道のホームページからの引用です（図-2.29）。様々な分野で再生可能エネルギーを利用することによる、カーボンニュートラル社会の形成イメージが示されています。2050年カーボンニュートラル社会に向けた、いろいろな分野での取り組みが必要になるとかと思っています。

その中で港湾は貿易量において重量ベースで99.6%は海上から入っています。CO₂の排出も非常に大きくなっています。港湾における脱二酸化炭素が必要になってくると思います（図-2.30）。

こちらは、カーボンニュートラルポートの形成をイメージで示しており、カーボンニュートラルを達成するための様々な輸送システム、あるいは港湾での脱二酸化炭素のシステムの構築が非常に期待されているという絵です（図-2.31）。

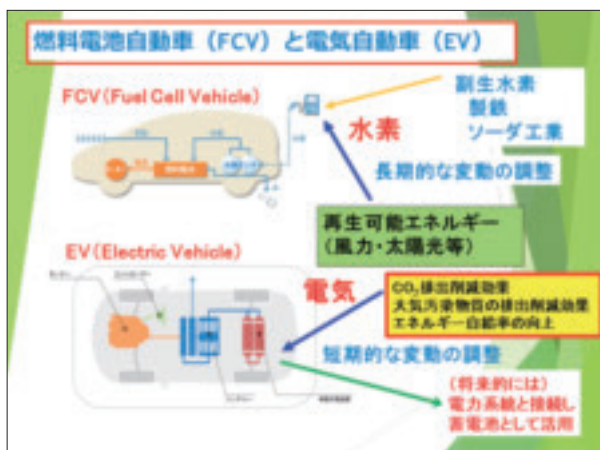


図-2.28



図-2.29

次に、洋上風力発電について説明させていただきます。これは風車の構造です。陸上と洋上の風車の違いを示しております。風車は風を受けるブレードと、その回転を伝えるハブ、発電機を格納するナセル、それを支えるタワーが必要になります。洋上風力発電については、これに対し海の中に造るために海洋基礎が追加が必要になります。また、海洋環境では塩害対策をするなど特殊な対策が必要になります (図-2.32)。

発電量は、1 kW が出力単位です。それを時間で積分したものが発電電力となります。1 kW の 1,000 倍が 1 MW、その 1,000 倍が 1 GW です。1 GW は平均的な火力発電所の規模相当になります。また一つの風力発電機が現在、陸上では 3~4 MW が標準的になっていま

すが、洋上ではさらに大きな発電機が使えるということで、8~10 MW です。そういった規模が標準となります。ウインドファームは、大型化しており GW サイズが出現しつつあります (図-2.33)。

陸上風車と洋上風車の違いですが、陸上風車に比べて海の中に設置するので、海洋基礎が必要になります。水深の浅いところではモノパイルという 1 本の杭を建て、その上に風車を建てるものが、水深 30 m ぐらいまでは一般的な構造形式になります。ところが水深 30 m より深くなると、そういった構造ではなかなか対応できなくなりますので、ジャケット構造が取り入れられます。またさらに深くなると、浮体式構造が必要になってきます (図-2.34)。

モノパイル構造の例を示します。

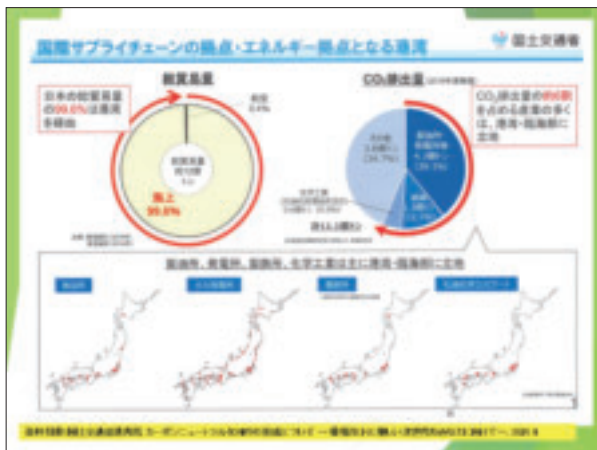


図-2.30

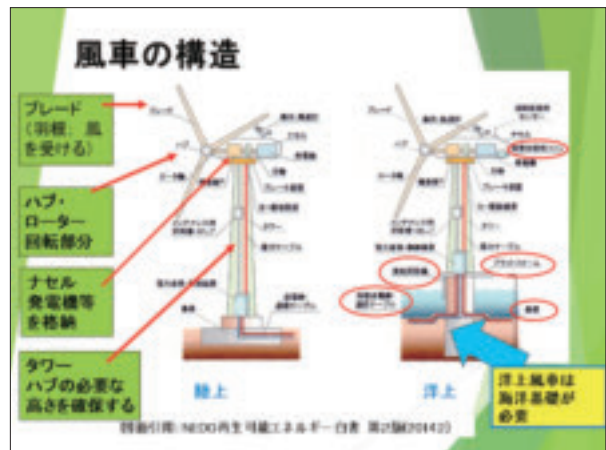


図-2.32



図-2.31

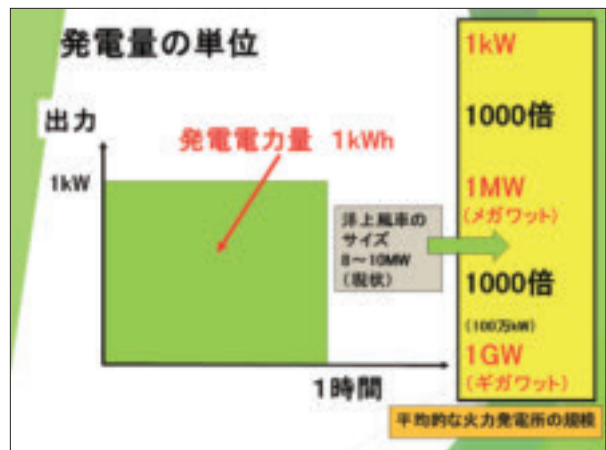


図-2.33

Middelgrunden Wind Farm は、デンマークの首都コペンハーゲンの沖合に設置された洋上風力発電所です。風車はカーブ配置構造となっています。こういった配置が景観上の対応として考慮され、曲線状となっております (図-2.35)。ジャケット構造の例としては、2007年英国に設置された Beatrice Offshore Wind Farm を示します。スコットランドの沖合海域に、ジャケット構造の基礎の上に風車が設置されています。こういった構造が実証試験として実施され、この海域において適用可能であることが確認されました。7 MW の風車 84 基が建設認証され、2017年から工事が着工されました (図-2.36)。それから浮体構造としては、Hywind という実験機について、ノルウェーで研究が進められ、水深 220 m の海域に 2.3 MW の試験機が設置

されました。2017年には、6 MW の 5 基の風車がスコットランドの沖合に建設されています。この風車を開発した母体は元々 Statoil という石油会社でしたが、これは現在社名が Equinor に変更されてヨーロッパでも有力な洋上風力の開発会社となっております (図-2.37)。

これがヨーロッパ諸国の初期の洋上風力発電の建設事例です。スウェーデン、デンマーク、オランダの非常に浅い海域で、1 MW 以下、数百 kW クラスの風車として、開発が進んできました。基礎構造はモノパイルやケーソン、杭などで非常に浅い海域に造られました。2000年以降になると、洋上で 2 MW とか 4.5 MW という大きな実証プロジェクトの洋上風車が建設されました。先程説明したようにノルウェーでは Hywind という構造型式で 2.3 MW の風車

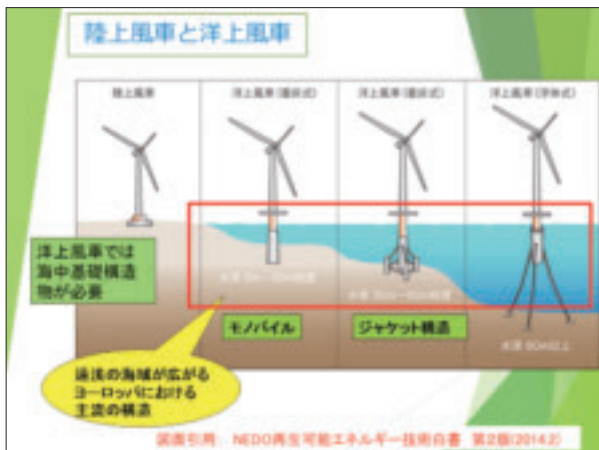


図-2.34



図-2.36



図-2.35

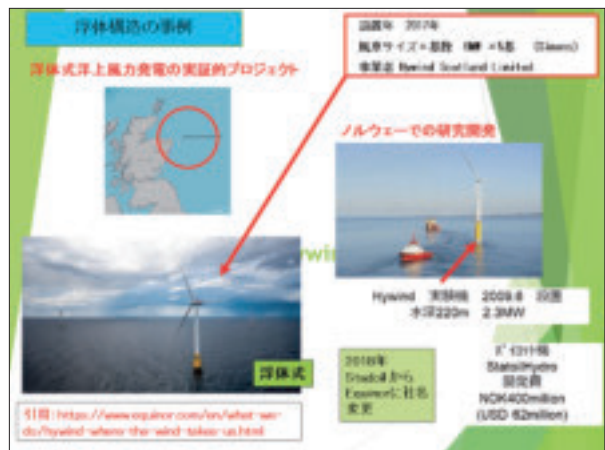


図-2.37

が浮体式で試験研究されることになり、洋上風車の実用化へ向けた取り組みが進められております（図-2.38）。

現在の世界の風力発電の導入実績を示します。これは陸上と洋上の新規ですが、そのうち洋上の新規はこのように伸びており、特に2021年については世界の新しいプロジェクトの約1/4は洋上に建設されている状況となっています。累積の中ではまだまだ少ないですが、徐々に洋上の実績の比率が高まっています（図-2.39）。

これが国別の新規と累積の陸上と洋上の割合です。例えば新設では、陸上は中国と米国が非常に多いです。また洋上は中国と英国が多くて、特に2021年は、中国での導入量が非常に大きくなっています。また累積では中国、英国、

ドイツの順で、中国がそれまで首位だった英国を超えて導入量が増えているというのが現状です（図-2.40）。

米国は図で見ると、洋上はまだまだシェアとして小さいわけですが、ここで示すように2020年、2022年、2023年、2024年、と順次新しいプロジェクトが完成していくことが想定されています。アメリカの洋上風力発電もこれから増えていきます（図-2.41）。

それから洋上風車の規模ですが、10年前は4MWが主流でした。現在は8~10MWが主流になり、例えば国内で検討されているものは、当初の計画では4MWという小さなものでした。現在では8MWや10MW風車が、大規模プロジェクトで採用されております。ヨーロッパの風力発電においては洋上風車の大型化が顕

ヨーロッパ諸国の初期の洋上風力発電の建設事例

国名	名称	建設年	出力 基礎	設置海域	水深(m)	基礎構造
スウェーデン	Nagerand	1990	220kW × 1	沖合25km	-	モノパイル
デンマーク	Vindby	1991	450kW × 11	沖合1.3~2.4km	2.5~5	ケーソン
オランダ	Lely	1994	500kW × 4	淡水湖	5~9	軌式
英国	Blyth	2000	2000kW × 2	沖合1km	6~11	モノパイル
ドイツ	Delfant Emden	2004	4500kW × 1	沖合10km	3	-
ノルウェー	Hywind	2009	2300kW × 1	沖合10km	220	浮体式

1990年代に洋上における試験が始まる
2000年代には大型洋上風車による実証試験が開始される

図-2.38

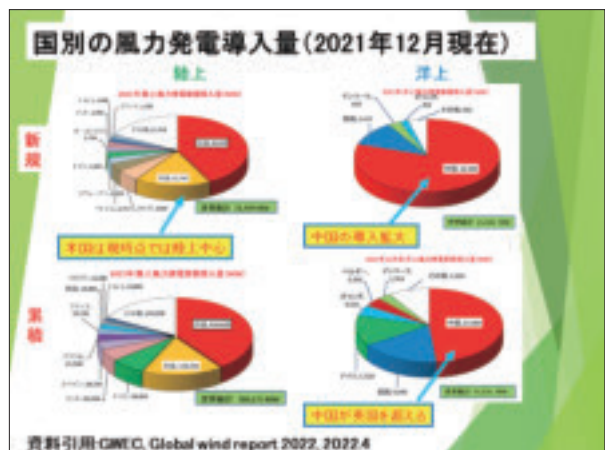


図-2.40

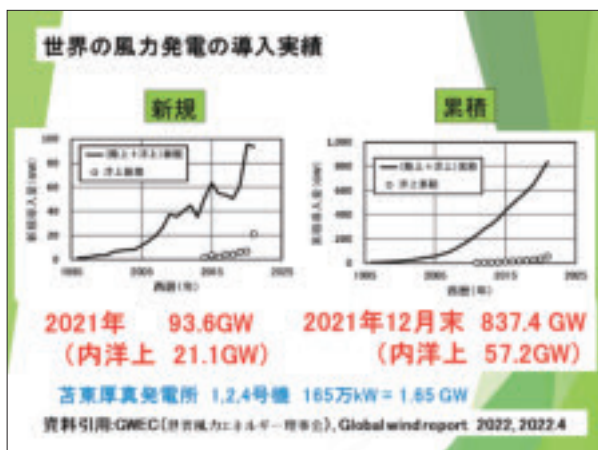


図-2.39



図-2.41

著になっていることが背景にあります(図-2.42)。

これは洋上風力発電機の供給サイズの変遷です。特にヨーロッパ、アメリカのメーカーの状況はどんどん大型化が進み、10 MW を超える風車が提案されているのが現状です(図-2.43)。この図は GWEC という機関で出されている Global Offshore Wind Report から引用させていただきました。

洋上風力発電の供給状況をメーカー別に示しております。風車メーカーは SIEMENS Gamesa、Vestas、それからアメリカの GE です。2024 年頃、各社とも 14 MW、15 MW、14 MW と非常に大きなサイズの風車の供給が開始される予定になっております。14~15 MW は風車規模としては非常に大きいです。現在日本で進められている石狩湾新港では SIEMENS の 8

MW 風車、それから北九州港では Vestas の 9.5 MW 風車が予定されております。秋田港のプロジェクトは、計画が古かったということで 4.2 MW と規模は小さいですが、今後 2022 年以降に設置されるものについては大型の風車が導入されます。風車の大型化に向けた港の整備や施工体制の充実が必要になってきます(図-2.44)。

これは世界の主要な洋上ウインドファームの規模を示したものです。1,000 MW (1 GW) を超える洋上ウインドファームが現実として出現しています。建設コストの縮減のためにウインドファームの大規模化が顕著になっています。ウインドファーム 1 カ所当たりの規模が非常に大きくなっているということです(図-2.45、図-2.46)。



図-2.42

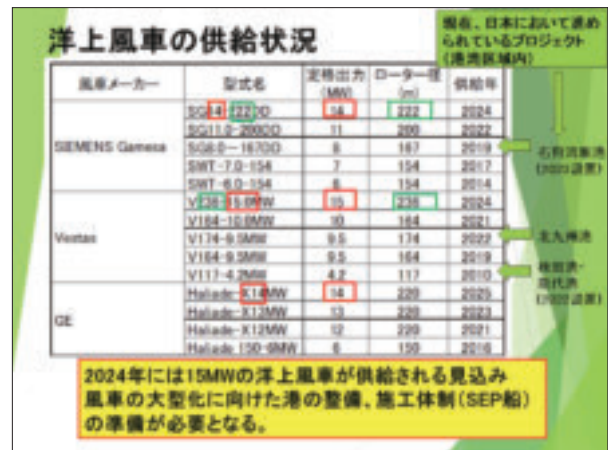


図-2.44



図-2.43



図-2.45

洋上風力発電施設の建設コストですが、これは GWEC の Global Offshore Wind Report に示されているものです。発電機のコストが約 1/3、それから建設費、タワーと基礎あるいは電気設備、組み立てと設置、これらが 30~40% で発電の建設コストになります。もちろんこういったものは規模によります。ここでの算定は 8 MW の風車が 75 基、600 MW のウインドファームを 25 年稼働する前提で建設コストを試算したものです (図-2.47)。

世界の大きなプロジェクトをいくつか紹介させていただきます。今年の前半、一応上半期までに建設されたものの中で最も大きいものは、Hornsea Project Two です。8 MW 風車が 165 基ということで、全体としては 1.386 GW になります。火力発電所や原子力発電所 1 カ所当た

りの設備容量に匹敵するものが洋上風力発電所として建設されていることになります (図-2.48)。

これは Hornsea Project One の方ですが、1,218 MW (1.22 GW) ということで、7 MW の風車が 174 基設置されています。洋上風力発電の変電所が海域の中に設置され、ここで変圧されて陸上まで海底送電線で送電するという形になります (図-2.49)。

スコットランドの Moray East Offshore Wind Farm は、ジャケット構造を基礎に据えて、その上に風車を設置するという建設事例です (図-2.50)。9.5 MW の風車 100 基からなる 0.95 GW のウインドファームです。ここでは設置水深が 33~55 m とやや深くなっています。



図-2.46



図-2.48

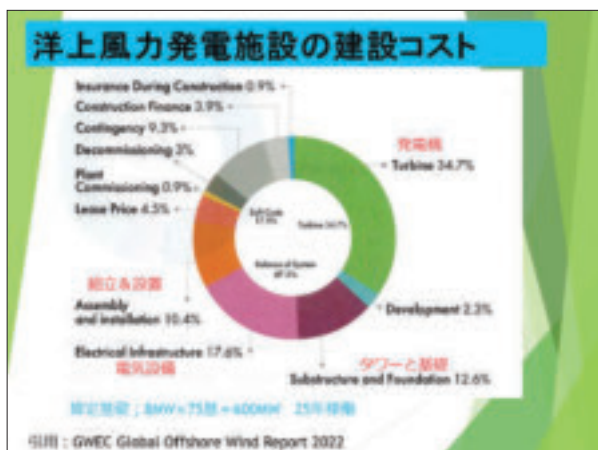


図-2.47



図-2.49

私は、新型コロナが流行する前の2019年9月にヨーロッパの建設状況を視察させていただきました(図-2.51)。洋上風力発電もいろいろな構造型式があり、これらについては順次報告させていただきたいと思っております。

アルコナ・ウインドファーム、これは2019年9月に視察させていただきました。離岸距離35km、水深23~37mのところ建設されたウインドファームです。2006年BSHというドイツの機関から認証され、そこからいろいろな調査を進めることにより、10年ぐらいかけてFIDという形で投資が決定され、そこから先2年ぐらいで建設されました。投資の決定後は、建設されるまでの期間は非常に短いのですが、投資が決まるまでは時間が非常に長く掛かっているのが現状です(図-2.52)。風車は6MW風

車で、重量としては1基あたりの風車の部分が412t、それから基礎が800~1,200t、1基あたり非常に重量が大きいということです(図-2.53)。風車規模としては6MWで、最近計画されているものと比較するとそんなに大きなものでありません。さらに大きな風車が欧州において計画・建設されているのが現状です。

これは現地海域の状況です。風車のタワーを建てるためのトランジションンピース(TP)がこの写真になります。モノパイルの基礎の上にTPが着けられ、その上に風車のタワーが建設され、このような状況の風車になります(図-2.54)。

こちらはサブステーションです。33,000Vの5系列の送電ケーブルを風車群の中に敷設し、洋上変電所(サブステーション)において



図-2.50



図-2.52



図-2.51

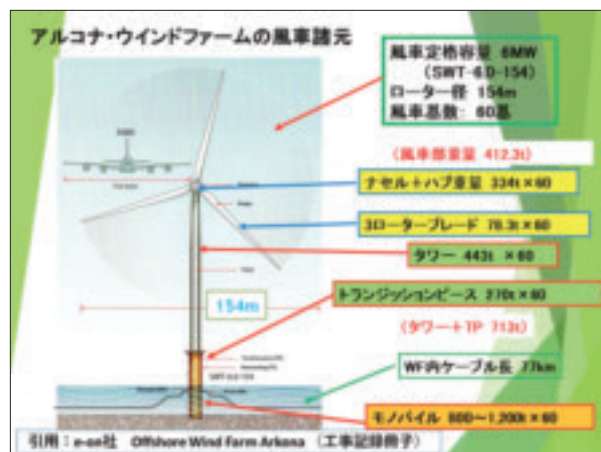


図-2.53

220,000 V に昇圧し地上変電所に送電しています (図-2.55)。このサブステーションは非常に重量の大きなもので、4,000 t ぐらいあり、ジャケット基礎はそれを支えるための 1,000 t という重量で、スカートパイルも 212 t が 4 本という非常に大きな構造になります (図-2.56)。

ヨーロッパにおいて洋上風力発電が伸びた理由は、再生可能エネルギー導入拡大の国家目標があったこと、国が洋上風力発電の開発区域を指定したこと、それから北海の石油開発の経験があり洋上工事の既存インフラ・技術の蓄積がそれまであったこと、が主な理由になります (図-2.57)。英国のクラウンエステートは 2001 年と 2003 年、それから 2010 年に認可海域を決定しています (図-2.58)。Round4 として 2022 年に向けて新しい沖合の海域指定が進められて

います。こういった海域指定が英国での洋上風力発電の伸びに繋がっております (図-2.59)。

それからドイツです。ドイツでは連邦海洋水理庁 (BSH) が一元的に管理をしており、EEZ 内における洋上風力発電の建設、稼働、これに

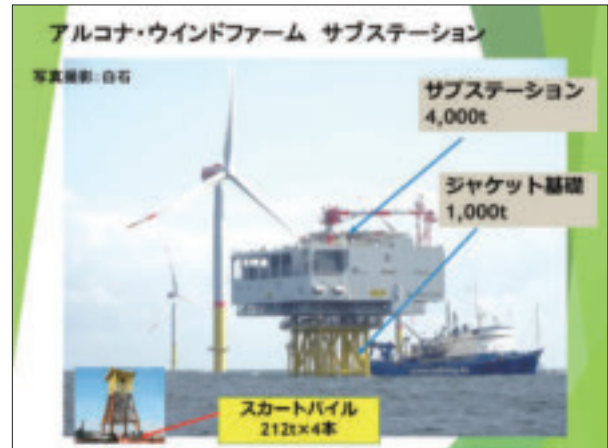


図-2.56



図-2.54

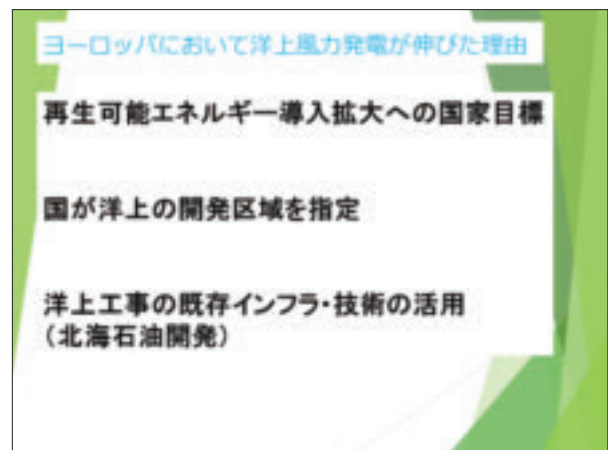


図-2.57



図-2.55

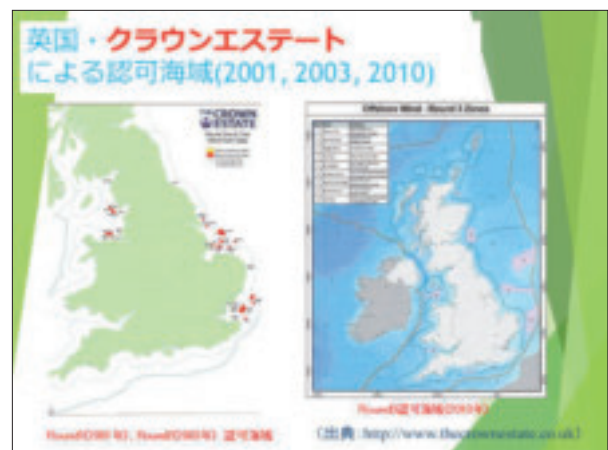


図-2.58

かったのですが、2011年FIT制度が導入されました。施行が2012年です。これはドイツや英国から非常に大きく遅れました。これも洋上風力発電の導入が大きく遅れた原因でもありますし、海域指定がさらに遅れました。日本ではFITが導入されても、洋上風力発電の導入が進まず太陽光発電が中心となっておりました。2020年にカーボンニュートラル宣言、これによって順次高い目標値が定められるようになり、今後は洋上風力発電も導入が進むことが期待されます(図-2.63)。

国内の洋上風力発電施設の設置状況です(図-2.64)。瀬棚、酒田、鹿島、これが日本の洋上風力発電の引き金となった、フロンティア事業であります。これらはいずれも海岸線付近ということで、本格的な洋上風力発電ではありません。

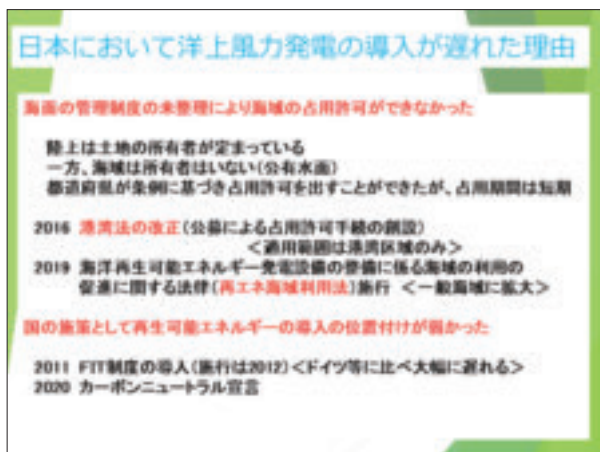


図-2.63

そのため、日本では様々なところで洋上風力発電の研究開発が進められました。固定式では北九州と銚子、浮体式では福島と五島列島と北九州で、幾つかの洋上風力発電の研究開発が進められました(図-2.65)。それから、港湾のマニュアルで港湾区域内の洋上風力発電を進めるということが先行的に行われました。北海道の石狩湾新港、秋田の能代港、北九州港、むつ小川原港、鹿島港において港湾区域の中で先行的に検討が進められました。それらについて紹介します(図-2.66)。

次に再エネ海域利用法、これが2018年12月に公布、2019年に施行され、この法律により、ここで示す手順で検討が進められております(図-2.67)。この図に示した海域が促進区域として指定されている海域です。今年の5月に新



図-2.65



図-2.64



図-2.66

たに新潟県村上市、それから長崎県西海市、秋田県男鹿・胎内市、これらの海域が新しく促進地域に追加されました（図-2.68）。

事業者の指定状況ですが、最初に指定された五島、秋田能代と由利本荘、千葉県銚子は去年の12月に事業者が選定公表されました。秋田県八峰町と能代市沖が今後、選定結果が公表される予定です（図-2.69）。それから今年新たに促進区域に新規指定された海域において新たに公募の取り組みが進められています。促進区域に指定されると指定海域の緯度・経度が告知されて、こういった形で具体的に場所が指定されます。だいたい促進区域に指定されて6カ月ぐらいで公募されます。公募期間が6カ月、審査期間が6カ月、それらの手続きによって事業者が告知されます。こういう流れが一般的です

（図-2.70、図-2.71）。

それから有望な区域として指定されている区域がここに示した区域です。有望な区域に指定されますと、地元協議会が開催され、国や自治体、海域先行利用者である漁協や海運、さらに

地域	指定区域の緯度・経度	公募期間	選定	選定結果の公表済み
五島市沖	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日
秋田県八峰町	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日
秋田県能代市沖	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日
秋田県胎内市	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日
秋田県男鹿市	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日
千葉県銚子	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日
新潟県村上市	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日
長崎県西海市	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日
秋田県八峰町	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日
秋田県能代市沖	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日
秋田県胎内市	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日
秋田県男鹿市	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日
千葉県銚子	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日
新潟県村上市	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日
長崎県西海市	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日	2020年12月27日

図-2.69



図-2.67



図-2.70



図-2.68

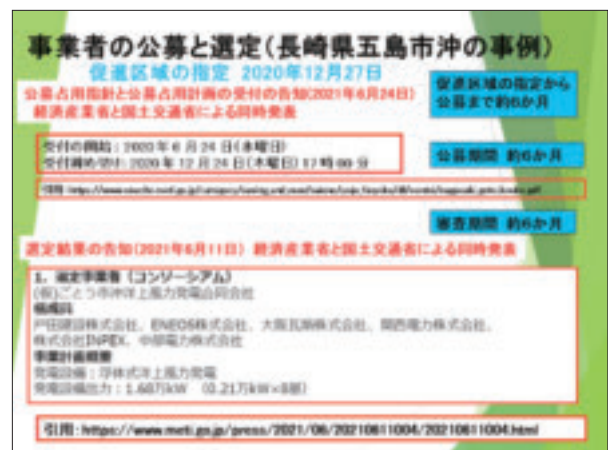


図-2.71

学識経験者を加えて協議が始まり、その結果を受けて促進地域に指定されます。だいたい協議会が2～3回、もう少し多い場合もありますが、回数を経て促進区域に指定されます(図-2.72)。それに至る前の状態としては、一定の準備段階に進んでいる区域が指定されており、これは現在ここに示す区域が一定の準備段階にあるということで、今後地元と調整をし、有望な区域として指定されるに先立ち協議会を開催していきます。有望な区域から促進区域に指定されるまでは、幾つかのプロセスがありますが、このような流れで検討が進められます。中には今年9月に新しく指定された海域もあります(図-2.73)。

次に風力発電・洋上風力発電に関する市民のアンケート調査結果ということで、認知度につ

いて示します。これは学生と市民に対してアンケートを北海道科学大学で行ったものですが、この結果を説明させていただきます(図-2.74)。

風力発電の認知度ですが、いずれの属性においても非常に認知している人が多いという状況でした(図-2.75)。陸上風力発電に対してはプラス面のイメージとしてCO₂の削減とか新エネルギーとしての期待が高いことが挙げられています。一方マイナス面のイメージとしては、供給が不安定、高発電コスト、バードストライクが項目として挙げられています(図-2.76)。一方洋上風力発電の認知度は非常に低い状況であり、「よく知っている」と「だいたい知っている」を含めても20～30%でした。その中でも女性では10%前後で、非常に認知度が低い状況です(図-2.77)。これは洋上風力発電というのが



図-2.72

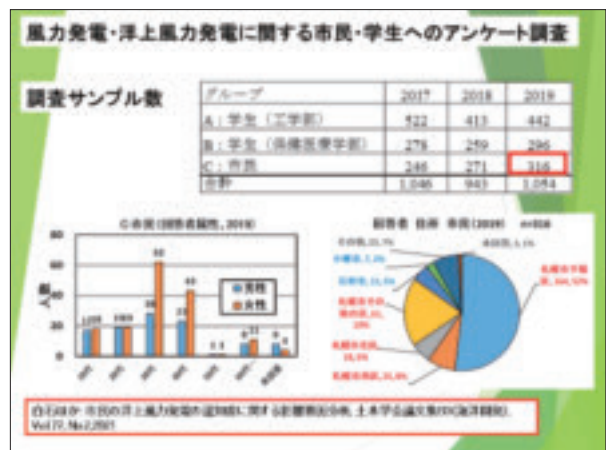


図-2.74



図-2.73

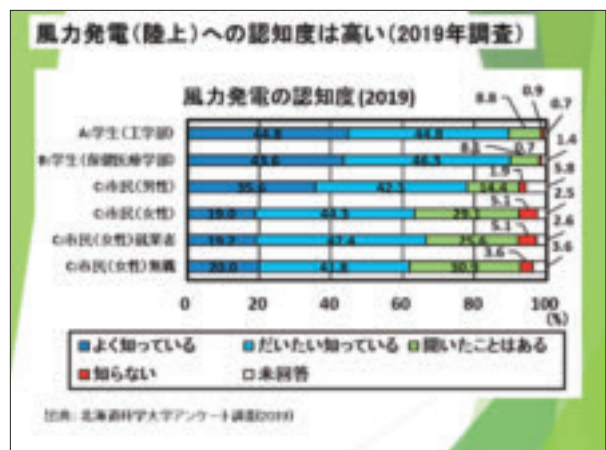


図-2.75

現実に日本ではほとんど存在していないため、見る機会もないことによります。また洋上風力発電に対しては、騒音の影響が少ない、建設コストがかかるというイメージが陸上風力発電に比べて同意の回答が多かった。洋上風力発電を認知している人が少ないにもかかわらず、洋上にあることで陸上よりも騒音の影響が少ないだろうというイメージは持たれていました(図-2.78)。

エネルギーに対する考え方として、省エネ対策やエネルギー利用でどのように考えているかを示します。エネルギーの節約について、市民の関心が高い状況です(図-2.79)。

今後必要と思う発電方式ですが、再エネ全般が今後必要と思う方式で上位でした。洋上風力発電は認知度が低かったために、他の再エネに

比べてまだランクの低い状況に留まっています(図-2.80)。

認知度を高めるためには、例えば洋上風力発電所を開設した時に、環境教育の場としての活用が重要ではないかと考えます。これは2000

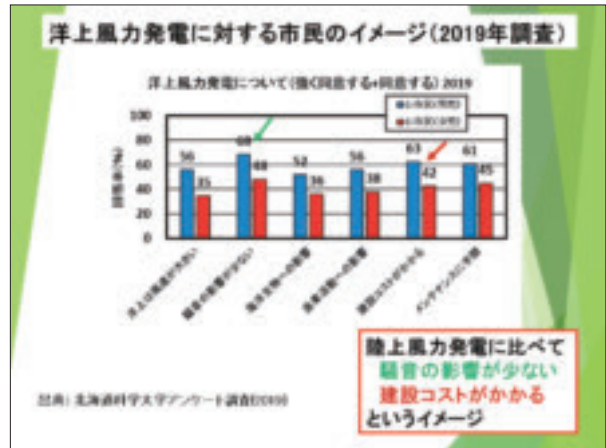


図-2.78



図-2.76

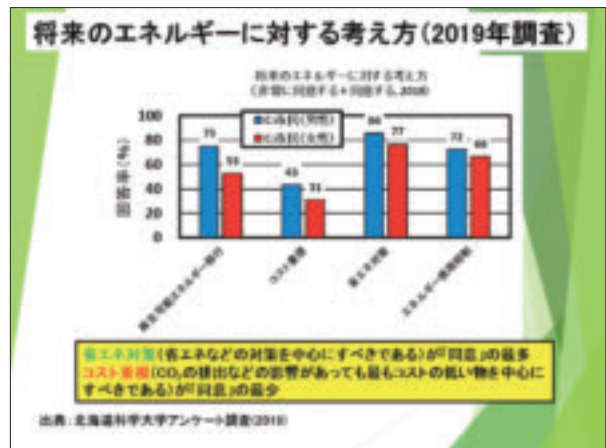


図-2.79

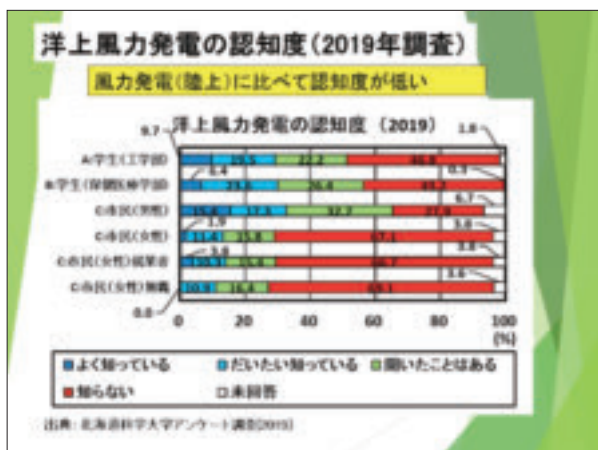


図-2.77

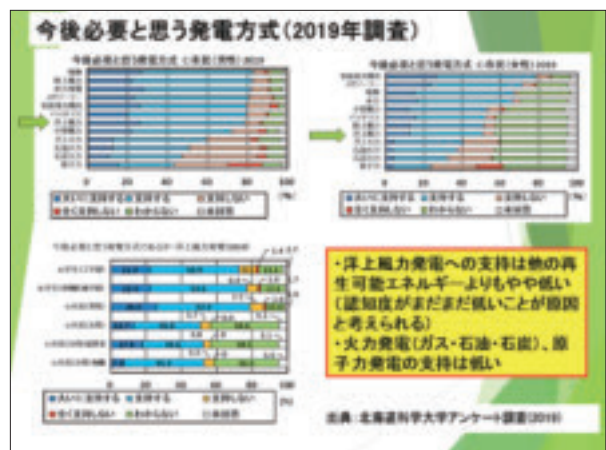


図-2.80

年にスウェーデンに設置された Utgrunden Wind Farm の事例です。バルト海の島の間の浅瀬に設置された風車です。その建設時には、陸上に展示施設が建設されました。パネル展示や洋上風力発電を実際に望遠カメラで眺めたりすることができます。展示施設には風洞模型があり、風の体験などを通して、付近の小中学生に対し教育の場として活用されています(図-2.81)。このような展示施設は、洋上風力発電を造った際にできると非常に良いと思います。このウインドファームは2018年に撤去されました。展示施設もそれに伴って撤去されているかもしれませんが、こういった施設は市民へのアピールや小中学生の教育の場として非常に良いものだと思います。

次に洋上風力発電のメリット・デメリットに

ついて示します。地球規模の非常に大きな広がりから、その地域の小さな部分まで、いろいろな視点があります。メリットの部分はそれを伸ばし、デメリットの場合はそれをできるだけ除去することで、広い視野で俯瞰し調整していくということが重要になります(図-2.82)。メリットとして、洋上は風の乱れが少ない、発電量に有利、騒音・超低周波音が相対的に少ない、洋上は陸上に比べて大型化ができる等が挙げられます。洋上では非常に大きな風車が造れることから、発電量を期待できることもメリットです(図-2.83)。デメリットとしては水産業へ影響、海洋生物への影響、それから建設コストなどといった問題があります。デメリットは事業を行う方が、丁寧に地元へ説明していただくということが、重要だと考えます(図-2.84)。



図-2.81

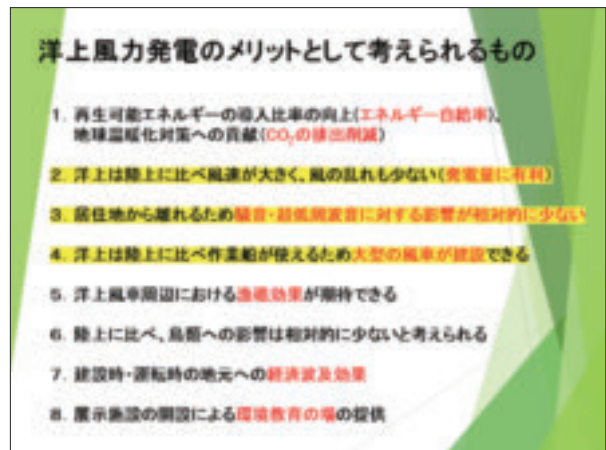


図-2.83

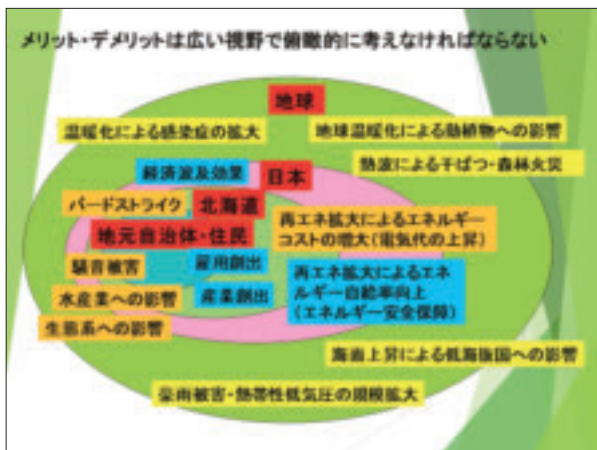


図-2.82

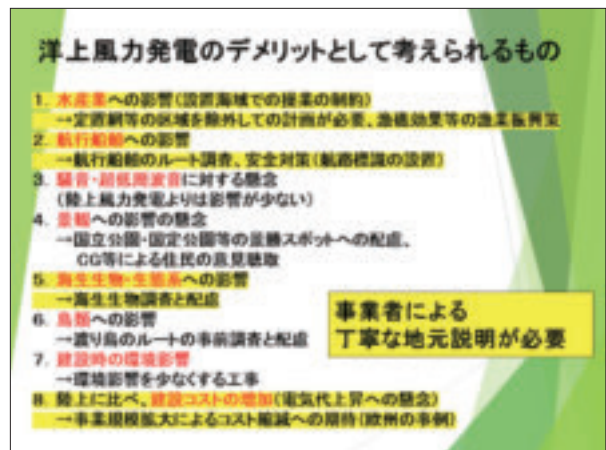


図-2.84

これは先程と重複しますが、比較して優位な点、それから少し配慮した方が良いという点、それを私なりに評価したものです（図-2.85）。

実際にプロジェクトを進める上で、環境影響評価を行う必要が行あります。配慮書、方法書、準備書、評価書、報告書という段階で、これらを作成し様々な方の意見を取り入れながら行って合意を図っていくというプロセスがあります。これを着実に実施することが非常に重要なこととなります（図-2.86）。

メリットとしては、洋上風力発電は大型の作業船で施工ができる点があげられます。風車の大型化が可能で陸上より高い出力の発電ができることに繋がります（図-2.87）。港湾で風車の基礎を積み出し、海上でSEP船等を使って施工することで大型の風車が建設できるという大

きなメリットがあります（図-2.88）。それから洋上では住宅地から離れて立地することにより。陸上風力発電に比べて騒音影響が大幅に減少します（図-2.89）。

騒音の発生部位としては、ブレードの風切り

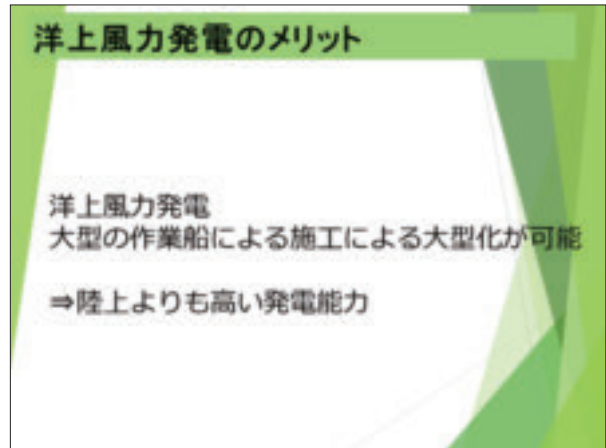


図-2.87

項目	洋上	陸上
基礎工の施工	既設の基礎を活用して「既設基礎型」	地盤の軟弱を避け、掘削が必要
基礎工の工期	洋上での施工は、天候に左右されず、24時間施工可能	天候に左右され、工期が長くなる
設置・撤去	洋上での設置・撤去は、天候に左右されず、24時間施工可能	天候に左右され、工期が長くなる
メンテナンス	洋上でのメンテナンスは、天候に左右されず、24時間施工可能	天候に左右され、工期が長くなる
土地の有効活用	洋上での設置・撤去は、天候に左右されず、24時間施工可能	天候に左右され、工期が長くなる
騒音	洋上での設置・撤去は、天候に左右されず、24時間施工可能	天候に左右され、工期が長くなる
環境への影響	洋上での設置・撤去は、天候に左右されず、24時間施工可能	天候に左右され、工期が長くなる
建設コスト	洋上での設置・撤去は、天候に左右されず、24時間施工可能	天候に左右され、工期が長くなる
発電コスト	洋上での設置・撤去は、天候に左右されず、24時間施工可能	天候に左右され、工期が長くなる
メンテナンスコスト	洋上での設置・撤去は、天候に左右されず、24時間施工可能	天候に左右され、工期が長くなる
設置・撤去の期間	洋上での設置・撤去は、天候に左右されず、24時間施工可能	天候に左右され、工期が長くなる

図-2.85



図-2.88



図-2.86

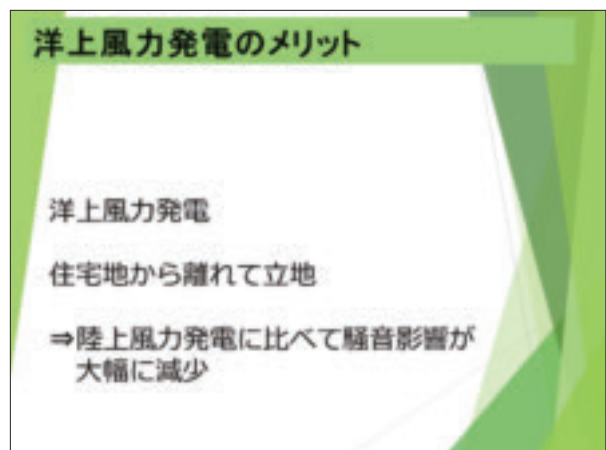


図-2.89

音とナセル部分の機械音があります。ブレードの風切り音は、風がブレードという風車の羽根に当たり、そこから剥離流ができることにより音が発生します（図-2.90）。ナセルの部分からはギア音が、発電機からはモーター音が騒音として発生します（図-2.91）。

騒音に関する指針については、平成 29 年に環境省から、風力発電施設から発生する騒音に関する指針が出ております（図-2.92、図-2.93）。

騒音レベルというのは、例えば自動車が通過した時に一時的に大きくなるのですが、そうではない時の騒音を残留騒音と言います。5 dB 以内のところになんとか収めようというのが評価手法の考え方になります。人がどのぐらいの周波数の範囲が聞こえるかということですが、100 Hz 以下が低周波、20 Hz 以下が超低周波、

そういう分け方になります。この残留騒音と 5 dB の評価位置、これを下限として設定するということになります。これは各国の基準値の規格を示しています。地域によって違いますが、配慮を要する地域では 35 dB 前後、それ以外の地域では 40 dB が一般的で、国によって若干違いますが、これらが騒音レベルの設定値になります（図-2.94、図-2.95、図-2.96）。

風車から離れると当然、騒音が分散され小さくなります。これは陸上の例ですが、南あわじ CEF ウインドファーム、これは 2.5 MW 風車 15 基で構成されています。このウインドファームから距離が離れたところ所でどれぐらい騒音レベルの差があるかを示しています。どの測定値を見ても、だいたい 1,000 m くらい離れると騒音レベルが基準以下になっています。距離減

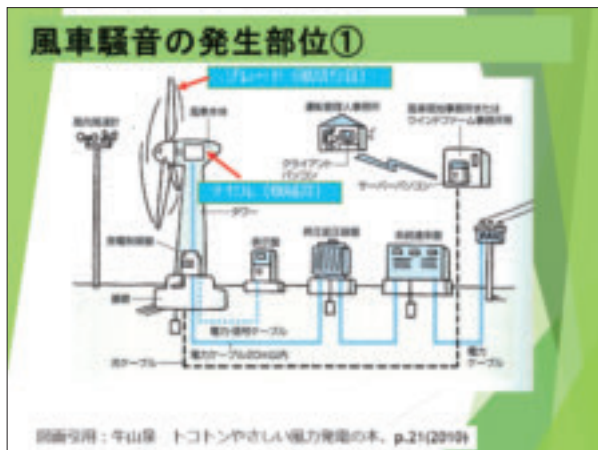


図-2.90

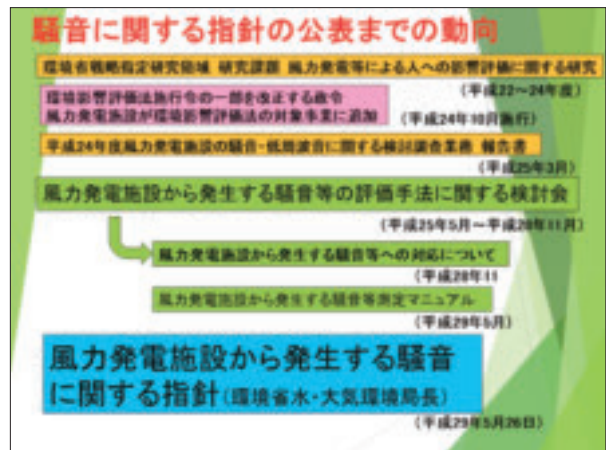


図-2.92



図-2.91

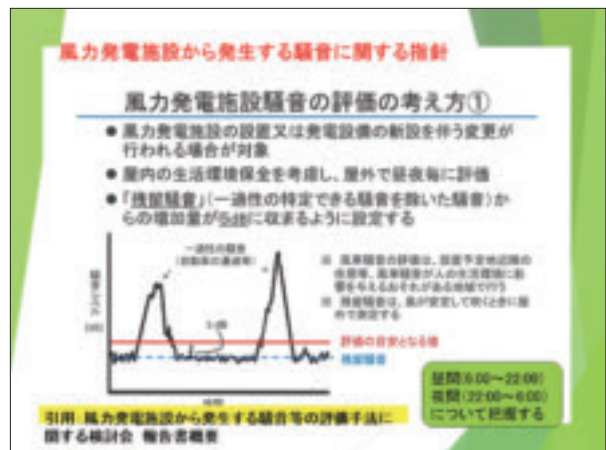


図-2.93

衰は風車を設置する時の一つの大きな指標となります（図-2.97）。

陸上風車と洋上風車を比べると、洋上風車は風の乱れが小さいのと陸上からの距離が大きいということで、騒音影響が小さい。陸上風車は

地形影響による乱れが大きい、そして距離が小さいことから、住宅地での騒音影響も大きくなります。洋上風車の場合は騒音の影響が陸上風車に比べて相対的に小さくなると言えます（図-2.98）。

それから超低周波音への見解ですけれども、これは風力発電から発生する騒音に関する指針の中では、人間の知覚閾値を下回ることで、健康影響との明らかな関連を示す知見は確認されなかったというのが、環境省の見解であります。またこれに対しては騒音の影響があると述べている人達も結構いますので、現実には即して影響がないということを確認していく必要があります（図-2.99）。

洋上風力電力のメリットとしましては、漁礁効果を考えています。洋上風力発電施設の基礎

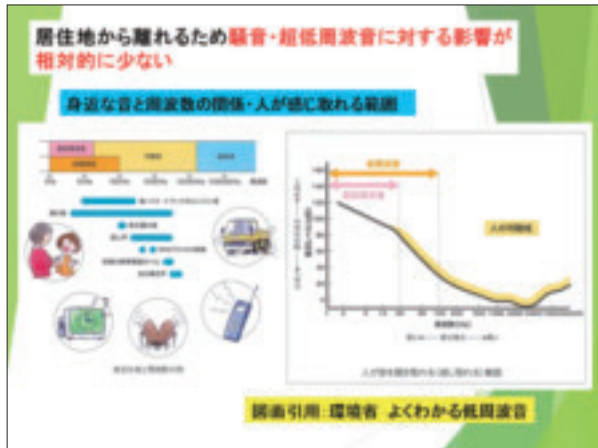


図-2.94

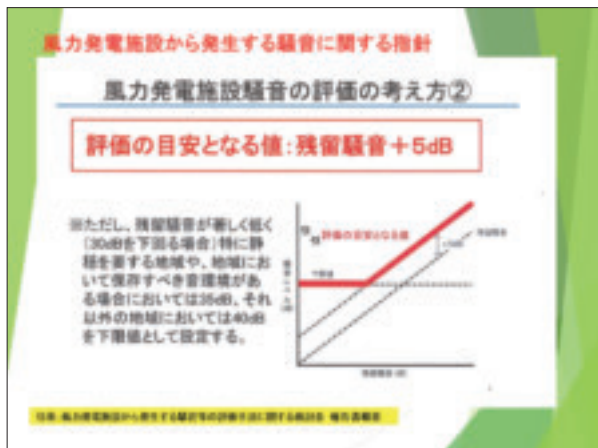


図-2.95

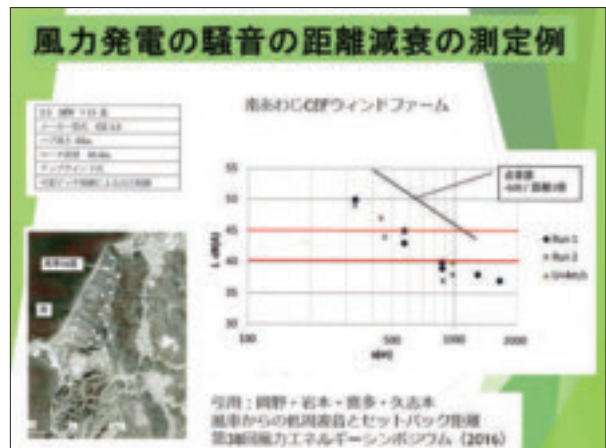


図-2.97

Figure 2.96 is a slide titled "(参考) 風車騒音に関する諸外国の基準等" (Reference: Standards for wind turbine noise in various countries). It contains a table with the following columns: 国名 (Country), 騒音レベル (Noise level), 騒音レベル (Noise level), 騒音レベル (Noise level), 騒音レベル (Noise level), 騒音レベル (Noise level). The table lists various countries and their respective noise standards for wind turbines. At the bottom, it says "引用: 風力発電施設から発生する騒音等の評価手法に関する検討会 報告書第2号" (Citation: Report No. 2 of the Study Group on Evaluation Methods for Noise Generated by Wind Power Facilities).

図-2.96



図-2.98

を使い、様々な漁礁対策ができると思います(図-2.100)。現実はどう造れるかは、これから工夫が必要だと思います。

実際の漁礁効果の例として、この図は2002年に設置され、2003年に基礎が、2004年に風車

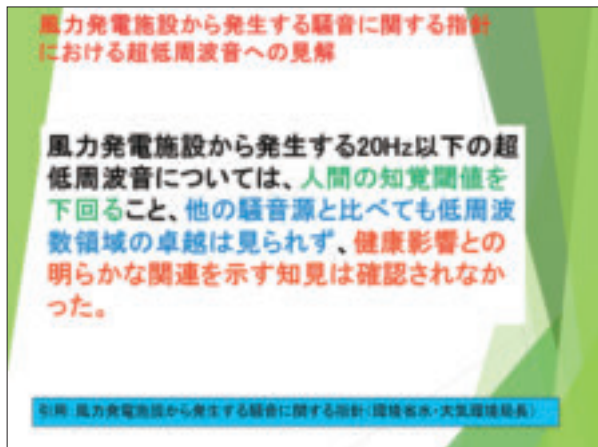


図-2.99

が建てられた瀬棚港で調査したものです(図-2.101)。基礎のパイルには、いろいろな生物が付着します(図-2.102)。このようにウニが付いています。これも風車の基礎部分の写真です。こうした基礎への生物付着に伴って、杭基礎周辺で建設直後に魚が確認されました。建設して1年後には、先程示したように杭に海藻やウニが着いていました。少なくとも風車が稼働したから魚が減っているという事例はありませんでした(図-2.103、図-2.104、図-2.105)。ただ、この調査は港湾内の防波堤背後の風車ということで、そういう限られた条件であります。魚やウニへの影響はあまりなかったと考えております(図-2.106)。

それから洋上風力発電のメリットとして、地域への経済波及効果があります(図-2.107)。

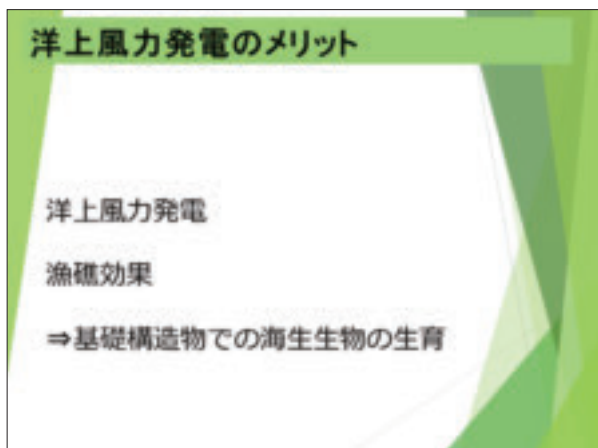


図-2.100



図-2.102

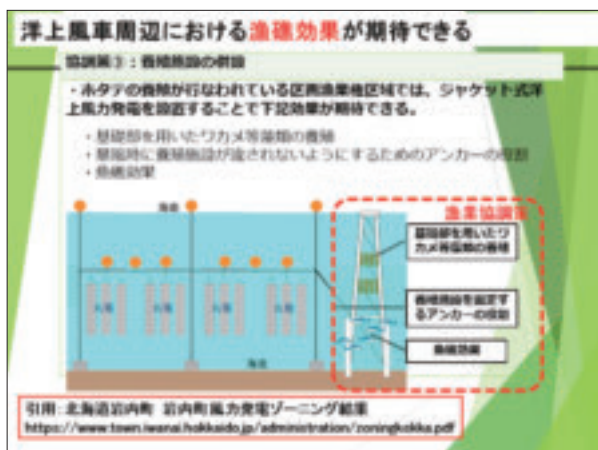


図-2.101

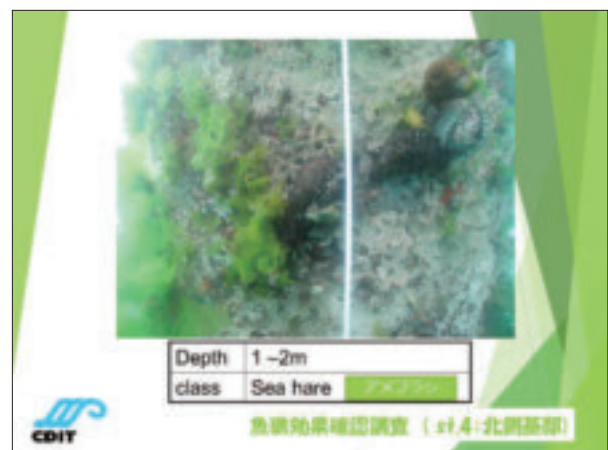


図-2.103

これは 2019 年のベルギーのオーステンデのターミナルですが、この海域で風車を建設して基地港湾として機能しています。こちらの部分が O & M 基地です。風車が完成した後にオペレーションやメンテナンスをする基地です(図-2.108)。このようにオペレーションやメンテナンスをすることは、風車の建設後の長期に渡って経済波及効果があります。風車の稼働中は、実際そこにメンテナンスの基地があることで、地域への経済波及効果があるという事例です。

ドイツのムクラン港、これは先程紹介したアルコナ・ウインドファームの現地サポート基地になっています。これは O & M の事務所です。洋上ウインドファームでは、数十 km は離れたところまで出かけて、メンテナンスしないといけません。実際に船が現地海域まで行ける

かどうかという判断が非常に重要です。メンテナンス基地では波と風の予測モニターがあって、それを見ながら行けるか行けないという判断をします。私が訪問した時もなんとかギリギリ行ける範囲の波浪条件だったので、現地まで

調査結果(水生物調査) 漁獲量における調査結果

●風車稼働前(平成15年度)と風車稼働後(平成16年度)と比較すると、風車基礎部近傍の魚種の生息状況に変化はみられず、魚種の生息への悪影響は確認されなかった。

稼働前と稼働後の風車基礎部の魚種確認状況

種名	H15年3月		H16年3月	
	南側基礎	北側基礎	南側基礎	北側基礎
アサギ	5	7	8	4
イシダイ				8
ウスハル			40	
ウシサコ			30	10
キンカサ	7		3	
ホレイ	1	7	1	
クロハシ		1		
カマノキ			1	1

資料提供: 国立水産研究センター

図-2.106

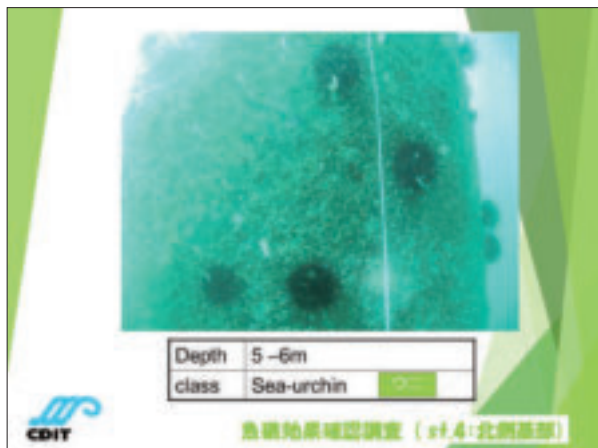


図-2.104

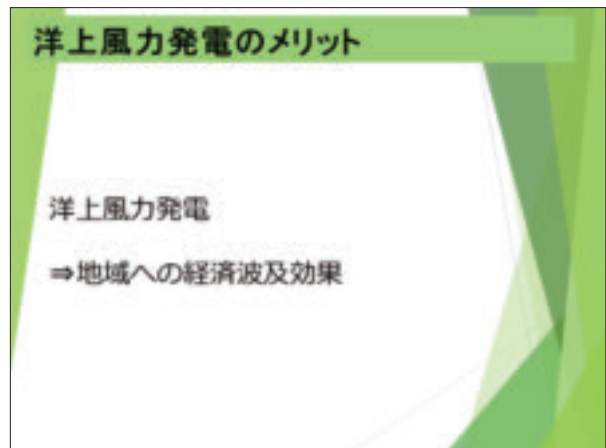


図-2.107

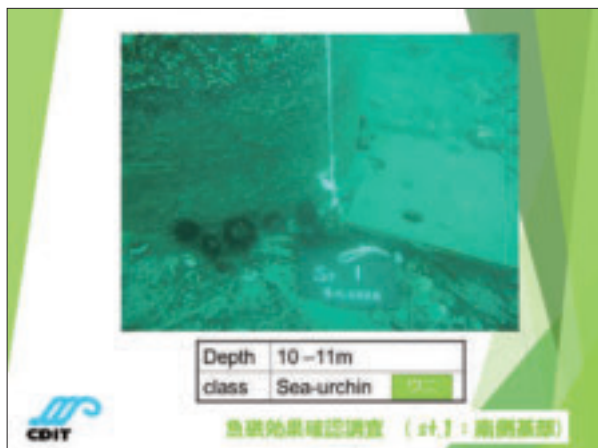


図-2.105



図-2.108

視察に行きました。メンテナンス基地では、メンテナンス用の部品が保管されていて、必要なものを現地へ持って行きメンテナンスをするという形になります(図-2.109)。通常のメンテナンス体制は20人程度です。夏場に行く大規模メンテナンスの時はさらに動員されて40~50人ぐらいが、メンテナンス要員として従事していると聞きました。

持続ある社会の形成に向けてということで、北海道とデンマークを比較してみました。だいたい北海道とデンマーク、面積は北海道の方が倍ぐらい大きいです。ただ北海道は内陸に山岳地帯があります。デンマークは平坦で最高標高が確か173mぐらいです。人口はだいたい500万を少し超えています。デンマークは年ごとに人口が増えていますが、北海道は年ごとに減少しています。陸上風車の規模、これは古いデータですが、導入量に10倍ぐらい差があります。洋上については極めて大きな差があります。電力需要は人口がだいたい同じことから、5,000MWぐらいが電力需要の最大値です。これはだいたい類似しています。ただ域外系統容量は6倍ぐらい違っており、デンマークの場合はデンマーク国外との系統容量が非常に大きいということです。それに伴いエネルギー自給率は、この比較データでは、北海道は10%、デンマークは90%ということで大きな違いがあります



図-2.109

(図-2.110)。

デンマークでは、なぜこんなに再生可能エネルギーが伸びたかと言うと、1973年のオイルショックで石油を節約しなければいけないということになりました。今後の電力をどうしようかということで、再生可能エネルギー導入か原子力導入かということで議論になりました。最終的にはデンマーク国会が1985年に原子力は使わないという決定をし、再生可能エネルギーの利用に大きくシフトしました。そしてVestas社、当時は主に農業機械を中心とする機械メーカーでしたが、1978年に風車の試作を始めます。1980年には試作機40kWという小さな風車しか造れないメーカーでしたが、2024年には15,000kWの洋上風車を供給する予定の会社に大きく成長しました。デンマークでは国家目標が再生可能エネルギーの導入に大きくシフトしたことで、その国のメーカーも成長していったということです。それからオーステッドという会社です。これは1972年に国営石油・ガス会社のDansk Naturgas A/Sで発足しました。A/Sというのはデンマーク語で株式会社を意味するaktieselskapの略になります(図-2.111)。2017年にオーステッドという名前になりましたが、世界最大の洋上風力発電事業会社ということで大きく成長しています。

それからデンマークの洋上風力発電の拠点港



図-2.110

としてエスピアウ港、ここでは大きな風車のプレアセンブル基地やO & M基地があって、非常に産業が栄えています。もともと漁業と造船業の街だったのですが、そういった産業が衰退していききましたが、一方こういった新しい産業で港や街が発展している状況です。

風車の前史ということで、古い資料になりますが、北海道には山田風車という有名な風車がありました。小さなプロペラ風車ですが、数千台規模で、北海道の特に電気の供給が乏しい遠隔地に風車を提供していました。この山田風車というのは非常に発電性能の良い風車でした。しかし、実際は大きく成長することはありませんでした。その間に何があったかと言うと、日本では新たな電気の供給源を原子力発電に頼っていったということになります。

一方デンマークでは、昔から4枚羽根の風車が穀物をひくのに利用されていました。風の力を使った風車が多数あり、電力網が未整備の時代には16,000台以上の風車が稼働し、農家に対して電力を供給していました。一方、石炭等が輸入されるようになると一時的に風車は減少しました。第二次世界大戦中に小型風車が発展し、そしてオイルショックの後、原子力の不採択を決定し、Vestas社が風力発電の機械試作を開始し、現在では非常に大きな風力発電産業に繋がっているという状況です。

この図の左側、これが山田風車で、北海道の農村部にたくさん導入されていました。右側はVestas社で、1978年に事業に風力発電を加え、40kWの小型風車から研究開発をスタートさせました(図-2.112)。

日本の洋上風力発電のポテンシャルをみますと、北海道・東北・九州が、非常にポテンシャルが高い。一方、電力をたくさん使う首都圏や関西圏はポテンシャルが小さい(図-2.113)。大消費地へ電気を送るためには送電線網が非常に不足しています。今考えられているのは、広域連系システムの形成で、北海道の豊富な電力を首都圏に海底直流送電線で送る構想です。これが再生可能エネルギーの利用、風力発電の導入、洋上風力発電の導入のために、必要な大きな鍵になるわけです(図-2.114)。



図-2.112

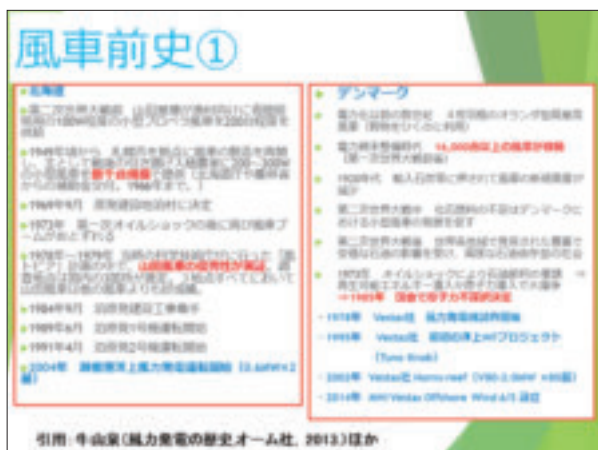


図-2.111



図-2.113

海底直流送電計画、現在の予定では200万kWの送電容量のものを2030年代半ばまでに実現することで検討が進められております。この送電容量については十分なのかということですが、200万kWでは北海道・東北の発電容量を十分にカバーできないと考えます。もう少し大きな送電容量が必要ではないかということと、これとは別に再生可能エネルギー由来の電力を用いて別の形でエネルギーとして利用することです。例えば水素なら保管できるし、エネルギーに変えて活用することもできるので、こういった形の利用も必要と考えます(図-2.115)。ただ、これについてはコスト的な問題もありますので、今後のコスト縮減ということが必要になります。発電、あるいは長期的なエネルギー源として水素がある、こういったこと

が北海道や東北の洋上風力エネルギーを発展させる大きな道に繋がるのではないかと考えております。

このスライドは2015年10月頃から使っているのですが、現状では海外からエネルギーを輸入しています。石油・石炭・LNGを北海道でも非常に大量に入れています(図-2.116)。北海道のエネルギー自給率はかなり低いのが現状です。系統連系の問題、送電線、需給ギャップというものを解消して、風力エネルギーの変動性を解消するためには、再生可能エネルギー、特に洋上風力発電でできた電気、水素等に変化したもの、これらを首都圏へ送るシステムを作っていくことが必要です。海外からのエネルギー輸入に頼らない、新しい国産エネルギー源を創出することが重要かと思います。



図-2.114



図-2.116



図-2.115



図-2.117

これは北海道の2050年までのゼロカーボン北海道の実現を図で示したものです。2030年までに35%削減の目標が当初示されていましたが、これが改定され、48%になっています。徐々にゼロカーボンを進めていく流れの中で、洋上風力発電の重要性が益々高まると考えてい

ます(図-2.117)。

本日の説明は以上になります。どうもご清聴ありがとうございました。拙い説明になりましたが、もし何か質問等ございましたらお受けいたしますので、よろしくお願いいたします。

3 第2回「日本および道内における計画」

北海道科学大学 名誉教授 白石 悟 氏
(一社)寒地港湾空港技術研究センター 審議役

こんにちは。一般社団法人寒地港湾空港技術研究センターの白石と申します。マイクと椅子の関係で着席して説明させていただきます。

最近の話題ですが、これは10月下旬に国連の関連団体から、COP27に向けてのメッセージということで出されたものです。現状のCO₂削減状態について、今世紀末までに1.5℃以内に気温上昇を抑えるという目標なのですが、それを制限するにはまだまだ不十分であるというメッセージが出されています。現状の削減状態のままでは今世紀末までに2.5℃上昇ということで、目標値の1.5℃を上回る2.5℃まで気温上昇してしまう可能性があるという指摘しております。これはCOP27に向けた強いメッセージが事前に出されたことになると思います(図-

3.1)。

今年の11月にエジプトでCOP27が開催されました(図-3.2)。COPにはいろいろな会議の名称として使われているのですが、ここではCOPというのは地球温暖化防止条約に基づく会議のことを指しています。会議はエジプトのシャルムエルシェイクで開催されました(図-3.3)。



図-3.2



図-3.1



図-3.3