

は、これから具体的にいろいろなことを考えて議論を進めていかなければいけない問題であります。あとは洋上風のエネルギーを、洋上風力発電により電気を使うのか、電気以外に実際に産業等を含めていろいろな形のエネルギーが使われていることから、電気以外の形で使うのかの検討が必要です。化石燃料が将来使えなくなると、電気以外の動力源も新しい再エネで作っ

ていかなければいけません。それを実現するためのシステム、どうやってエネルギーを製造し輸送するかについて、洋上風力発電の活用を含めて、今後検討を進めていかなければいけないと思います。今後の課題としては、いろいろなことが考えられると思います。

これで私からの発表を終わりにしたいと思います。ご清聴、ありがとうございました。

4 第3回「モノパイル構造の計画・設計・施工」

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)

本日は会場ならびに WEB でご参加いただきまして、ありがとうございます。白石です。これより着席して説明させていただきます。

前2回は洋上風力発電を取り巻く背景的なお話をさせていただきましたが、今回より洋上風力発電の各構造形式について具体的な事例紹介、設計の考え方、施工の考え方等について説明をさせていただきたいと思います。早速ですが、進めさせていただきます。

これは前回も示したスライドですが、今、カーボンニュートラルということで、脱炭素のために様々な再生可能エネルギーが注目されています。とりわけ洋上風力発電について注目が高

まっております (図-4.1)。

再生可能エネルギーの導入につきましては、もちろん地球温暖化防止のための CO₂ 削減という効果もごさいますが、我が国においてはエネルギー自給率が低いという現状で、原油や LNG や石炭という二酸化炭素を排出するエネルギー資源を大量に輸入しています。こういったものの消費を削減することにより、エネルギー自給率の向上にも繋がります。再生可能エネルギーの導入拡大は我が国にとって今後益々重要な位置付けになると考えています (図-4.2)。

最近の話題について、前2回会以降のお話をさせていただきます。まず排他的経済水域 (EEZ) における国際法上の諸課題に関する検討会の第1回が今年の10月6日に開催され、

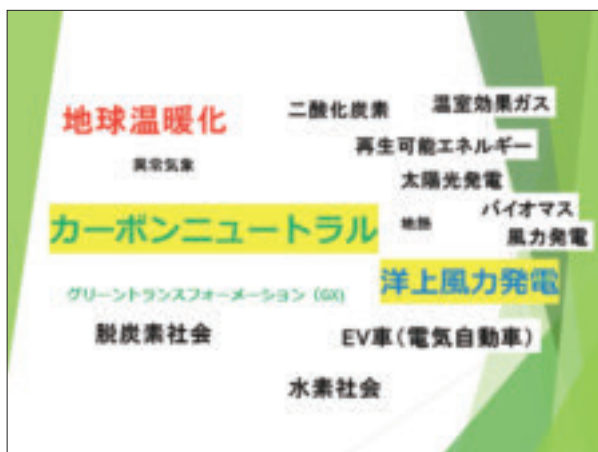


図-4.1

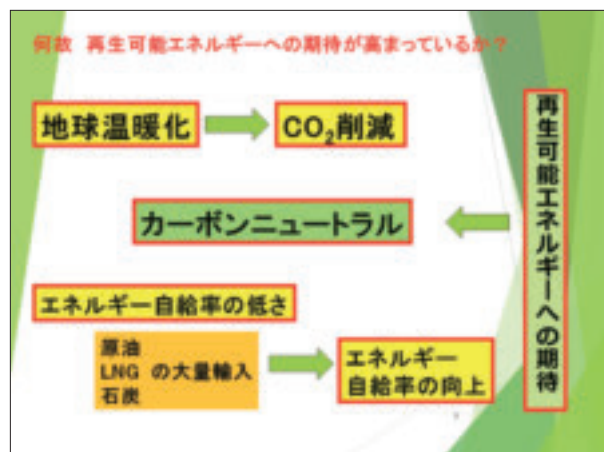


図-4.2

これまでに5回開催され最終的な報告書がまとめられております(図-4.3、図-4.4)。

我が国の場合、洋上風力発電が設置される海域は、欧州に比べて水深が急に深くなるという事で、EEZに建設される事例は今後浮体構造が主になることがまとめられています。

それから昨年(2022年)の12月22日に港湾区域の洋上風力ですが、秋田港・能代港で商業運転が開始されました。我が国においても本格的に洋上風力発電が実用化の段階に進む状況にあります(図-4.5)。

これも昨年末ですが、再エネ海域利用法に基づく洋上風力発電事業者の公募が開始されました。募集された地域はここに示す4カ所です。去年の12月28日～今年の6月30日まで公募占用計画が受付されるスケジュールで進んでい

ます。昨年度指定された海域に加えて新たな海域への展開が始まっています(図-4.6)。

それから洋上風力発電に関しては、国が主体的に事前の調査区域を選定して調査を行う取り組みも始まりました。これはセントラル方式と呼ばれる方式として一般的に知られております。その中で北海道では、ここに示す3海域が調査海域として選定され、将来の事業化に向けて国費を使った調査が進められています(図-4.7)。

先程も申し上げました排他的経済水域(EEZ)における国際法上の諸課題に関する検討会の取りまとめが出て参りました。EEZにおける洋上風力発電にどのような課題があるかですが、ここに示しますように、重大な環境リスクを伴う活動に該当するような場合には、国際法上の

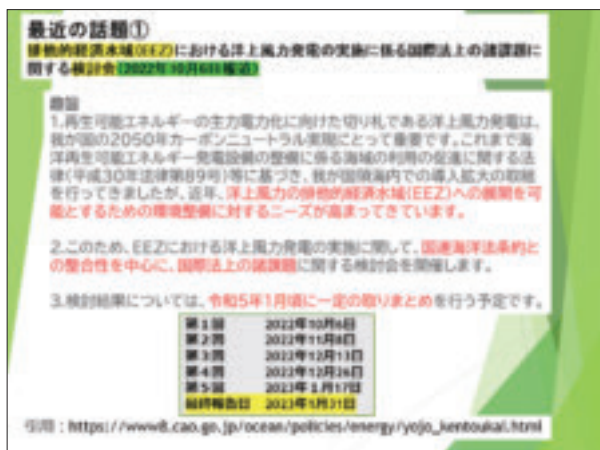


図-4.3



図-4.5

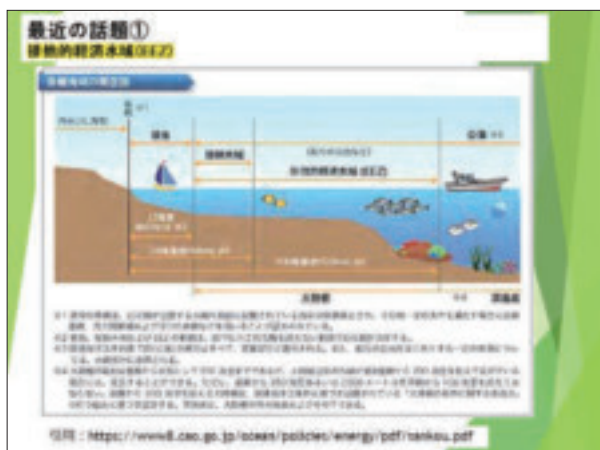


図-4.4



図-4.6

義務が生じる可能性があるということです。具体的にどのようなことが関係するかというと、考えられるのは例えば浮体式のチェーンが切れて流失して第三国に影響を与えることがこれに該当するものではないかと思えます。具体的にはこのようにEEZにおける開発に対する考え方も示されつつあります (図-4.8)。

今日はモノパイル構造に特化して洋上風力発電の説明をしていきたいと思えます (図-4.9)。

これは風車の構造ですが、風車は風を受けるブレード、そして回転の中心となるハブ、そして発電機を格納しているナセル、そしてタワーによって構成されております (図-4.10)。洋上風力発電については、海洋基礎が必要だということで、海の中に造るためにタワーと発電機を支える海洋基礎が構造としては必要になるのが

特徴的です。今日お話しする中でいろいろと出力の単位が出て参りますが、1kWの1,000倍が1MW、その1,000倍が1GWです (図-4.11)。この出力量に時間を掛けたものがkWhという単位で、発電電力量になります。現在、

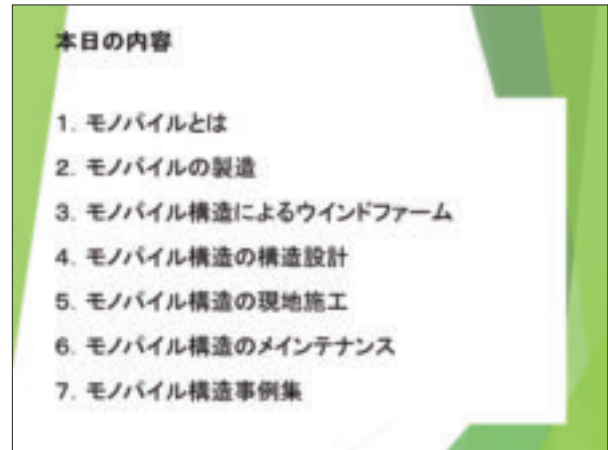


図-4.9

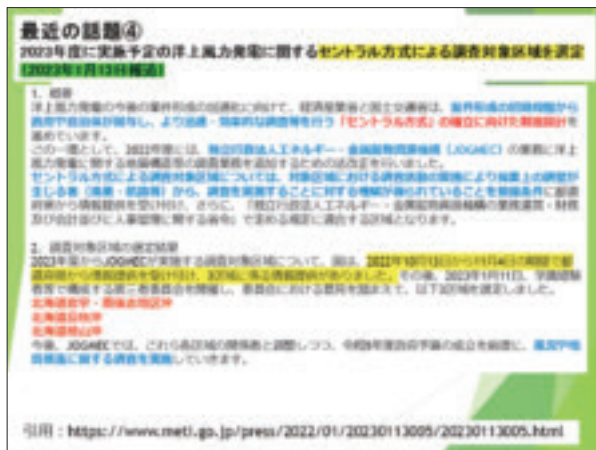


図-4.7

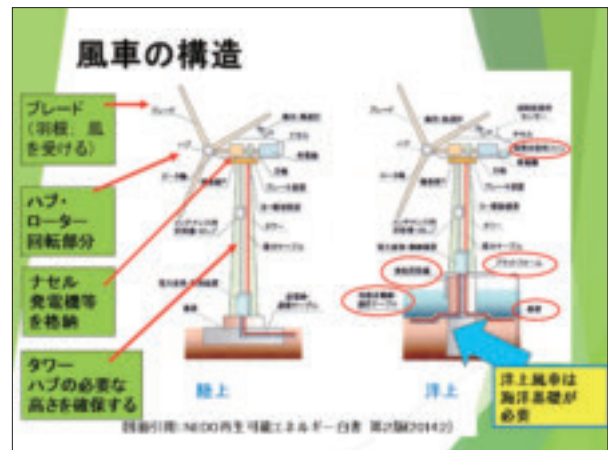


図-4.10

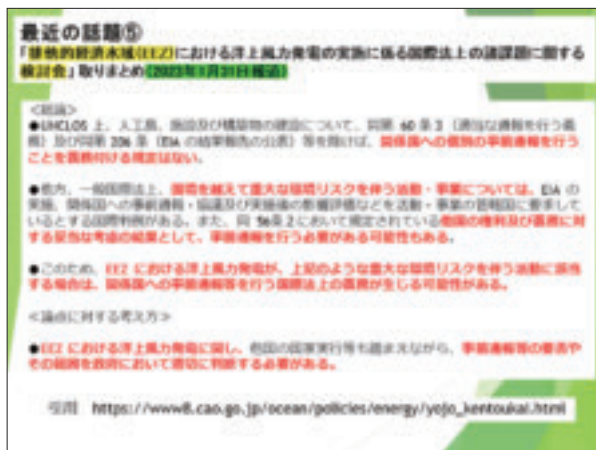


図-4.8

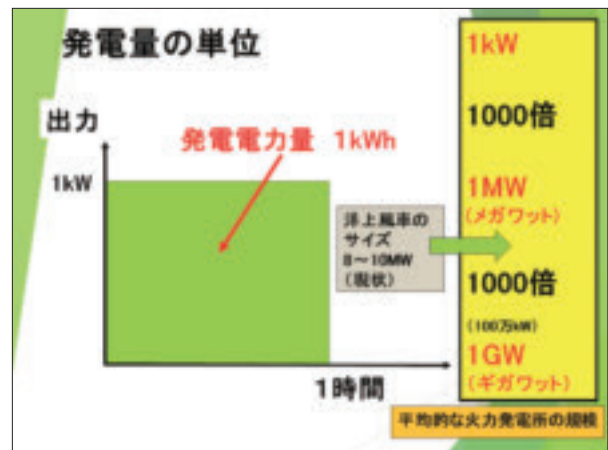


図-4.11

建設されている洋上風車は8~10 MW ぐらいが中心のサイズになります。今年5月より石狩湾新港の港湾区域の中で建設される洋上風車も8 MWです。ウインドファームにおける発電出力は大きな規模になりますが、GW という単位です。これは100万 kW で、平均的な火力発電所・原子力発電所の規模に相当します。今、欧州で開発されている大規模な洋上風力発電所は、一つのウインドファームでGW という単位の発電をしています。このような設備容量を持つものが建設されています。

モノパイルについて説明させていただきます。これは風車の構造を示しています。陸上の場合には地面に直接タワーを建てれば良いわけですが、洋上の場合には水深に応じて様々な構造により海中で支える構造が必要になってきます。今日お話をするのはこのモノパイルという構造です。これは1本の杭で支持する構造で、特にヨーロッパにおいては遠浅の海域が広がっておりますから、これまで建設された洋上風力発電はこのモノパイル構造が主流になっていきます(図-4.12)。水深が深くなりますと、ジャケット構造であるとか、浮体式構造になると思います。

これはモノパイル基礎の模型です。これは私が2019年9月に、ヨーロッパの洋上風車の基礎メーカーである EEW 社の事務所の玄関に

あったものを写してきたものです(図-4.13)。風車の基礎以下の構造がどうなっているかを見やすく示しているもので、紹介させていただきました。ここの部分が海底面です。この杭がモノパイルという基礎杭になっています。この上にタワーと風車が載るわけですが、それを繋ぐ部分というのがトランジションピースという構造になります。これを図面で示したものがこちらの図になります(図-4.14)。海底面下に設置されるモノパイル、風車を支えるタワーの上に風車が載ります。その間に介在するのがトランジションピースで、ここの部分で海底のモノパイルとタワー以上の構造物を繋げる形になります。

モノパイルの製造について説明をさせていただきます。これは私が訪問した EEW 社という



図-4.13

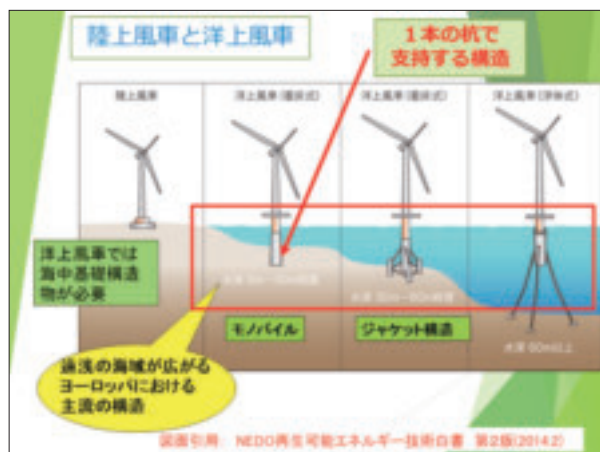


図-4.12

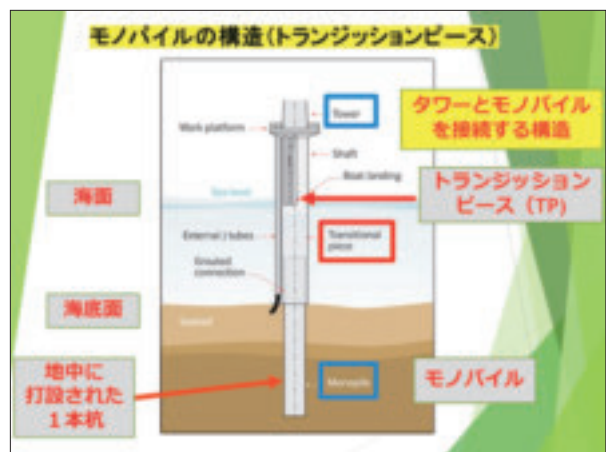


図-4.14

事務所のゲート前のモニュメントでありまして、これはモノパイルの部分セクションですが、このような非常に大口径の杭を海中に打ち込んで風車の基礎とするのが、モノパイル構造になります（図-4.15）。

私が訪問した EEW という会社の工場は、旧東ドイツの領域になりますロストック港にありました。そこで実際の製造工場を見学させていただきました。これは訪問した EEW 社の 2018 年当時の写真です（図-4.16）。訪問したのが 2019 年ですから、その前年のデータということで、データとしては古いのですが、この会社ではモノパイル構造とジャケッ構造を製造しております。欧州では、実際にどのぐらいの構造種別ごとのシェアがあるかということ、モノパイルがだいたい全体の 80% で、ジャケッが

約 10% ぐらいです。モノパイルは 2018 年当時において主流の構造形式であると言えます（図-4.17、図-4.18）。

EEW 社ですが、創業が 1936 年で訪問した当時の従業員は約 2,000 人、工場が世界で 9 カ所あって、年間の鋼材生産量が約 80 万 t でモノパイルやジャケッを製造している状況でした（図-4.19）。実際に世界のいろいろな場所に工場を展開していますが、訪問したのは、ロストック工場です（図-4.20）。当時、この会社でどのようなものを造っていたかということ、モノパイル、トランジションピース、それからジャケッです。このジャケッ構造については次回説明させていただきます。それからサブステーションといって洋上風力発電の変電所、これは主にジャケッ構造で造られます。このように洋上



図-4.15



図-4.17



図-4.16



図-4.18

風力発電に必要な設備全般を製造しています (図-4.21)。

この会社の製造実績ですが、これはドイツ沖合海域に建設されている Baltic I & II という洋上風力発電所の事例です (図-4.22)。次が

Beatrice で、これはイギリスの沖合洋上に設置されています (図-4.23)。スコットランドの北側海域にある Offshore Wind Farm で、ジャケッット構造です (図-4.24)。それからもう一つの事例が英国の Gwynt y Mor という洋上風力



図-4.19



図-4.22



図-4.20



図-4.23



図-4.21



図-4.24

発電所です (図-4.25)。こちらは Sandbank 洋上風力発電所で、これはデンマークの西側に位置しています (図-4.26)。これは確か北ドイツ沖合だったと思いますが、Veja Mate という洋上風力発電所です (図-4.27)。次は Walney I-IV 発電所で、これはイギリスの西海岸だったと思います (図-4.28)。ここの設備容量は 1,026 MW で、だいたい 1 GW です。180 基の洋上風車が並んでいます、ここ 1カ所で火力発電所 1カ所あるいは原子力発電所 1カ所ぐらいの設備容量を持つウインドファームです。ヨーロッパでは近年 GW 規模のウインドファームが建設されている状況になっています。

それからジャケットによる建造実績もありまして、これは Wikinger というジャケット構造

の洋上風力発電所になります (図-4.29)。

次に紹介するのは Sif 社です。これはオランダに本社があるメーカーです。ここは 1948 年に創業して、先程の EEW 社よりも規模は小さく、約 600 人の従業員でオランダに 2カ所の製



図-4.27



図-4.25



図-4.28



図-4.26



図-4.29

造工場があります。Sif社の年間鋼材生産量は33万tで、先程のEEW社に比べると約半分以下になります(図-4.30)。ここでもいろいろなモノパイルの構造が製造されており、これは比較的沿岸域に近いところに建設されている



図-4.30

事例です(図-4.31)。この図はオランダの西海岸の開発状況を示していますが、GWには達していないのですが、それに近いクラスのウインドファームが建設されており、今年運用が開始されます(図-4.32)。

それから英国のDogger Bank Cです(図-4.33)。これも1,200 MW (1.2 GW)です。これは少し先の計画になっていまして、建設開始が2025年、運用開始が2026年です。先行するDogger Bank A、Dogger Bank Bを加えると全体で3.6 GWで、世界最大規模のウインドファームです。さらにDogger Bank D計画もあり、この地帯でかなりの規模のウインドファームが形成されます。

それからもう一つの例として、Hollandse Kust Zuidを紹介します。これはオランダの沖



図-4.31



図-4.33

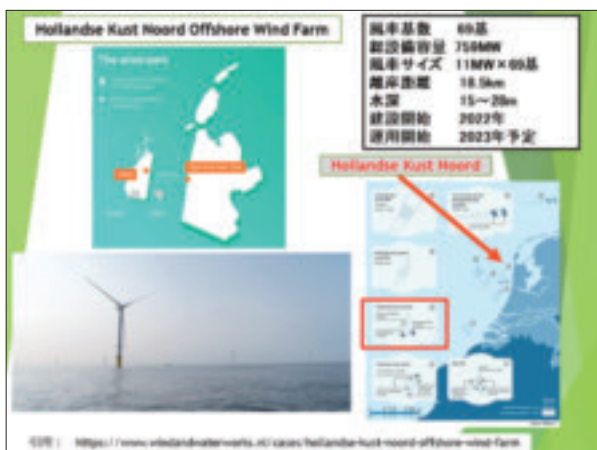


図-4.32



図-4.34

合の海域に建設され、全体として1.5 GW 規模で、11 MW の洋上風車 140 基で構成されます(図-4.34)。ここでは風車サイズも 11 MW とかなり大型化しています。

モノパイルの製造について概要を示します。直径が大きなものから小さなものまで造れます。これは訪問した当時の EEW 社のパンフレットからの引用ですが、406 mm~10 m までとかなり広範囲の直径で最大重量も 1,500 t ぐらいまで製造可能です。実績値では 1,302.5 t が最大重量です(図-4.35)。

モノパイルをどうやって製造するかというと、肉厚の板を円筒加工して、それを溶接接合して必要長まで拡張します。実際に製造している工場では、平板から円筒の構造体にまず加工します。そしてその丸く加工した接合部を溶接

していきます。溶接して円筒状の 1 m ないし 2 m ぐらいのパイルを造っていきます。それを溶接で繋げていきます。これは連結前の部材が並んでいるところを示していますが、こういう形でモノパイルを製造していきます(図-4.36)。

これは 2019 年 9 月に訪問した工場の写真です。まず厚板を丸く加工していきます(図-4.37)。丸く加工し、それを連結して繋げていきます。こういうところに繋ぎ目らしきものが見えると思います。このように円筒形に加工したものを繋げて連結していきます。次に丸く加工した断面を溶接する工程に入り、このようにして接合していきます(図-4.38、図-4.39、図-4.40)。

世界最大のモノパイル構造は、ホームページ

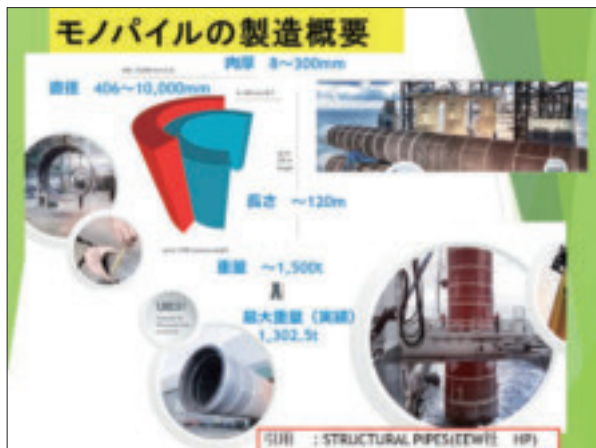


図-4.35



図-4.37

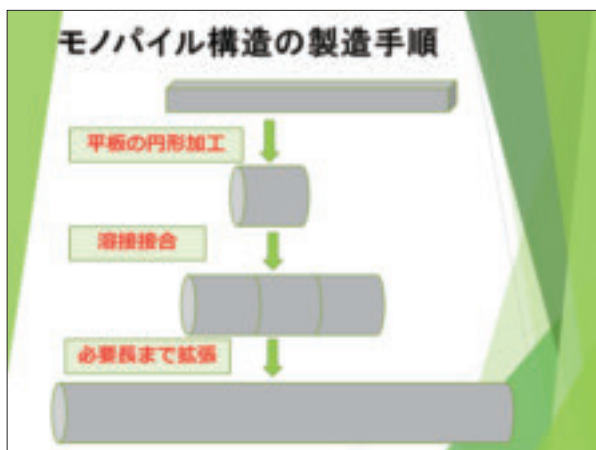


図-4.36



図-4.38

の情報によると、今年の4月から施工が始まり、来年に運用開始予定の Baltic Eagle Offshore Wind Farm です。9.5 MW の洋上風車が50基建設されます。モノパイルの直径が約9m、長さが90m、重量が1,421tで、これまで計画されているモノパイル構造の中では最大重量です(図-4.41)。これが建設基地となる港湾で、これが実際の施工海域です。この写真は実際にヤードの中で部材が並べられている様子を示しており、これが完成予想図になります(図-4.42)。非常に水深も深くなって、設置海域の水深は40~45mです。モノパイル構造としてはかなり大水深の構造になります。水深40~45mになると、どちらかと言うとジャケット構造が選ばれるのですが、モノパイル構造による大規模なものを打設して建設するという事

例も出てきております。それによってモノパイルの需要が非常に大きなものに繋がってくると思います。

モノパイル構造によるウインドファームについて、若干幾つかの事例を紹介させていただきます。事例は1番から22番までなのですが、設備容量の大きな順番に並べております(図-4.43)。昨年までに稼働が開始された最大規模のウインドファームは1,386 MW の Hornsea Project Two というイギリスのプロジェクトです。水深が25~30m、離岸距離が89km、最大水深が30m、こういう海域に設置されています。以下、設備容量の大きい順番に並べるとこの表になります。

海域の占有面積と設備容量の関係を示します。当然ながら設備容量が大きければ風車がた



図-4.39



図-4.41



図-4.40



図-4.42

くさん並ぶわけですから、海域の占有面積も大きくなります。大きなものになると 600 km²です。このぐらいの海域を一つのウインドファームで要している状況です (図-4.44)。

それから水深ですが、モノパイルでも最近では 40 m が最大水深です。従来だとジャケット構造になっていた水深ですが、40 m というかなり深い水深にもモノパイル構造で建設される事例があります (図-4.45)。

次は離岸距離と設備容量の関係を示します。最近の事例では、設備容量が大きく離岸距離が非常に大きいものが造られています。大規模なウインドファームを造ろうと思うと、ある程度距離が離れたところに建設する傾向があります (図-4.46)。

次に最大水深と風車サイズの関係について示

します。これはあまりはっきりした関係はないのですが、最近建設されたものについては、風車サイズは小さなものから大きなものへと移っていく傾向です (図-4.47)。これは稼働開始年と風車のサイズの関係です (図-4.48)。この関

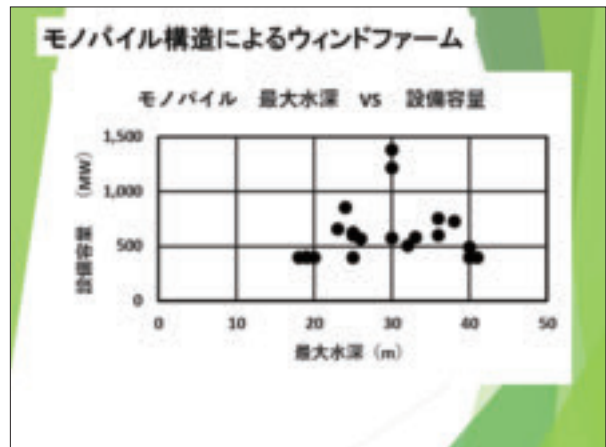


図-4.45

名称	国	稼働開始年	容量 (MW)	サイズ (m)	稼働開始年	構造形式	設置年	設置年	設置年	
1. Humbly Grove	英国	1,384	305	8	2003	モノパイル	25-30	30	402	30
2. Humbly Grove	英国	1,330	374	7	2009	モノパイル	25-30	30	428.4	30
3. Humbly Grove	英国	497	39	8.5	2003	モノパイル	18-24	25	288.4	24
4. Humbly Grove	英国	752	38	8	2007	モノパイル	18-24	25	128.2	24
5. Humbly Grove	英国	752.3	37	8.5	2003	モノパイル	18-24	25	146	28
6. Humbly Grove	英国	450	40	8.25	2008	モノパイル	18-21	19	145	23
7. Humbly Grove	英国	450	37	7	2003	モノパイル	18-21	25	152	25
8. Humbly Grove	英国	450	37	8.4	2007	モノパイル	18-20	19	159	25
9. Humbly Grove	英国	400	37	8	2007	モノパイル	28-30	30	85	30
10. Humbly Grove	英国	382	37	8	2007	モノパイル	32	40	79	32
11. Humbly Grove	英国	374	30	3.8	2003	モノパイル	18-20	14	79	20
12. Humbly Grove	英国	374	31	4	2008	モノパイル	8-20	27	75	28
13. Humbly Grove	英国	308	340	3.8	2003	モノパイル	28-32	21	147	32
14. Humbly Grove	英国	305	34	4	2003	モノパイル	32	40	114.5	32
15. Humbly Grove	英国	487	31	7	2009	モノパイル	40	40	40	40
16. Humbly Grove	英国	487	48	8.4	2009	モノパイル	31-38	38	73	38
17. Humbly Grove	英国	405	47	8	2007	モノパイル	18-25	32	35	25
18. Humbly Grove	英国	405	47	8	2007	モノパイル	30-41	39	51	40
19. Humbly Grove	英国	400	111	3.8	2003	モノパイル	35-39	19	80	19
20. Humbly Grove	英国	400	116	3.45	2008	モノパイル	39-40	13	73	40
21. Humbly Grove	英国	400	100	4	2008	モノパイル	38-39	22	118	39
22. Humbly Grove	英国	400	100	4	2008	モノパイル	40-40	30	40	39

図-4.43

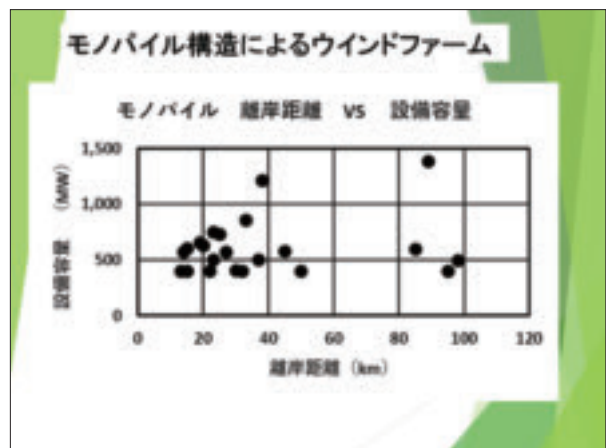


図-4.46

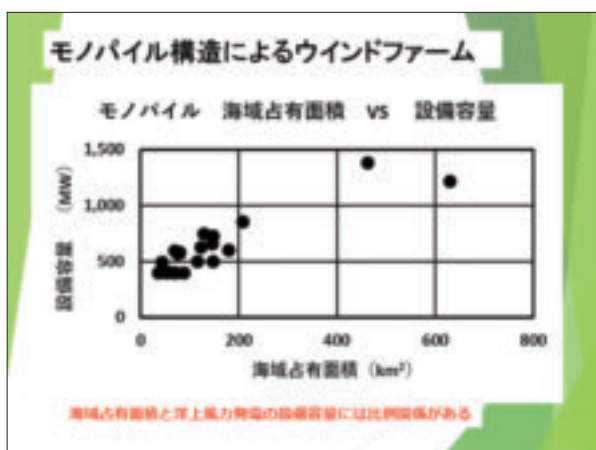


図-4.44

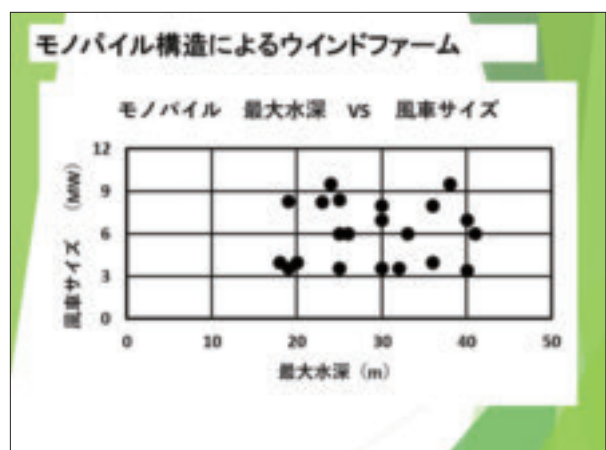


図-4.47

係を見ると、だいたい右肩上がりに風車のサイズが大きくなっている傾向が見られます。近年建設されている風車は、9 MW とか 10 MW などの 8 MW 以上で、風車サイズも大型化が進んでいることがこの図からわかるかと思えます。

それから設備容量です。1カ所当たりの風車のウインドファームの容量も非常に大きなものになっています(図-4.49)。図よりはっきりした傾向は見えないのですが、近年設備容量の大きなものが建設される傾向にあります。

次に稼働開始年と最大水深の関係を示します。これもあまり明確な傾向はないのですが、10年ぐらい前に比べると、最近では水深が40mの海域にも建設されており、40mぐらいにジャケット構造とするかモノパイル構造とするのか、構造選定の境界ラインがこの辺りにあると

思います。実際には30m~40mが両構造形式の境界ラインであると思えます(図-4.50)。

新規風車の将来動向について説明します。2020年~2026年にヨーロッパではどのような将来動向があるか予測的なことの説明をさせていただきます。

Wind Europe というヨーロッパの風力発電組織の中でレポートが出ています。この図は2021年までの統計と2022~2026年の予想です。濃い青が陸上風車で、水色が洋上風車です。このラインはこのように将来的に伸びて行くだろうという一般的な予想になります。別のラインは低く見積もったらこうなるだろうという予想です。いずれにしても3~4年の間に風車の総量は増えて行くだろうと推定されています(図-4.51)。陸上風車と洋上風車でどのようになっ



図-4.48

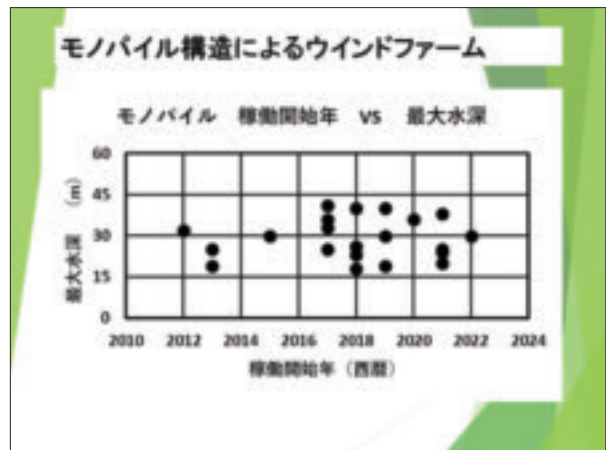


図-4.50

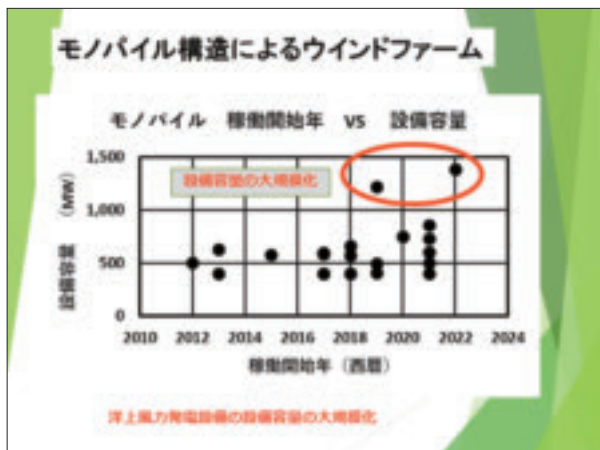


図-4.49

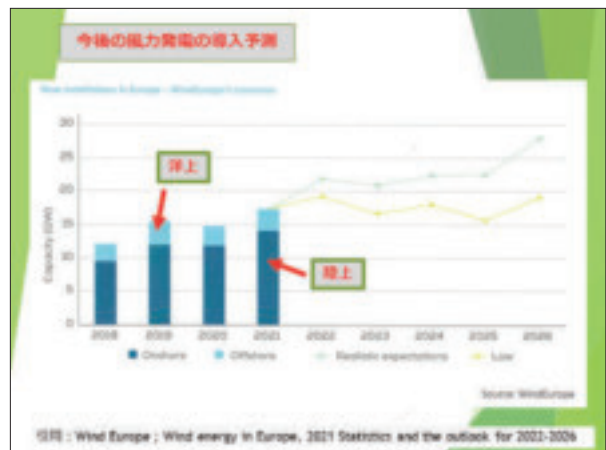


図-4.51

ていくかという点、濃い青が陸上の新規の建設で、水色が洋上の新規の建設を示しています。今後についても陸上風車の新規容量の方が多いのですが、イギリスで見ると洋上も比率的には多くなっています。例えば2026年の見込みでは洋上も陸上と肩を並べるぐらいに増えるのではないかと予測ができております(図-4.52)。

新規に建設予定されている量を、国ごとに示したものがこの図です。図からわかりにくいところがあるかと思いますが、特徴的にはドイツと英国の2カ国が、特に2026年を見ると導入量が大きくなること示されています。この2カ国で今後導入が大きく進んでいくと予測されております(図-4.53)。

これは国ごとの導入量の予測で、2022年～2026年まで陸上と洋上でどのぐらいの容量

が新しく建設されるかを示しています。陸上の新規についてはドイツが圧倒的に多い予測です。それから洋上新規では英国が10.8GWで最大です。英国はドイツを引き離して洋上の方が多い予測になっています。累積導入量になると、陸上風力ではドイツが群を抜いて多いのですが、洋上では英国が他の国を圧倒する形になっています。英国の洋上風力発電は今後の累積容量でも見られるように大きな伸びが予測されています(図-4.54)。

新規洋上風車の国別の導入予測を示します。これは2022年～2026年の導入量の予測です。イギリス、ドイツ、オランダ、これらの国での洋上風車の導入が今後大きく見込まれている状況です(図-4.55)。これは年度別の洋上風車の導入予測で、ここに示しているように英国、ド



図-4.52



図-4.54

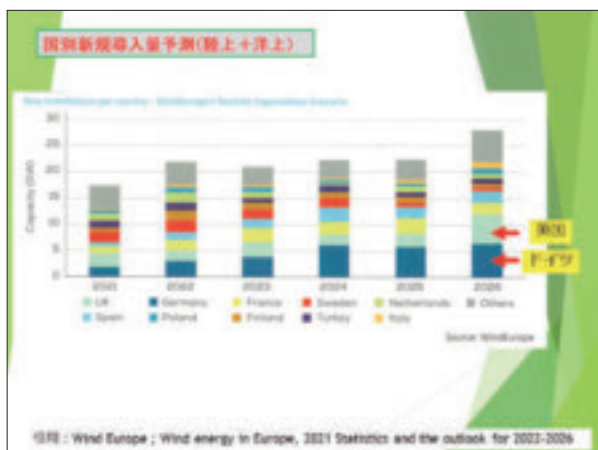


図-4.53

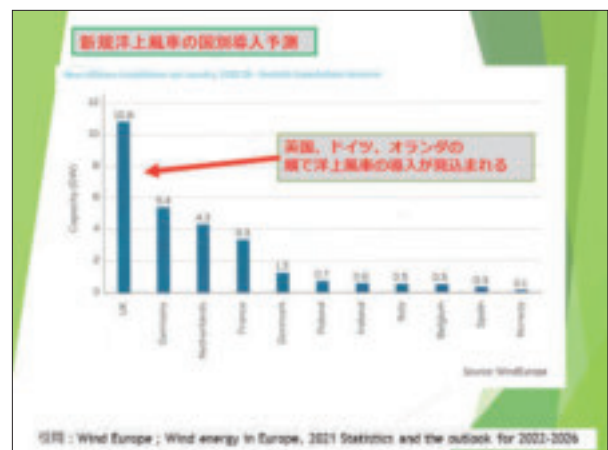


図-4.55

イツの伸びが大きく、特に洋上では英国の導入量が大きいという傾向になっています(図-4.56)。陸上と洋上を足した風力発電全体が今後どのように推移していくかを示します。これは2021年の段階での導入量で、GWという単位です。これが今後約5年間で増えて行く予測です。陸上と洋上を足したものではドイツが多くて、その次に英国が多いという予測になります。スペインが今のところ導入量としてはヨーロッパの中で第2位ですが、新規が少ないので、おそらく陸上と洋上のトータルの容量はイギリスに抜かれるだろうという予測になっています(図-4.57)。

モノパイル構造の構造設計ということで説明をさせていただきます。

これは洋上風車の審査の手順を表したもので

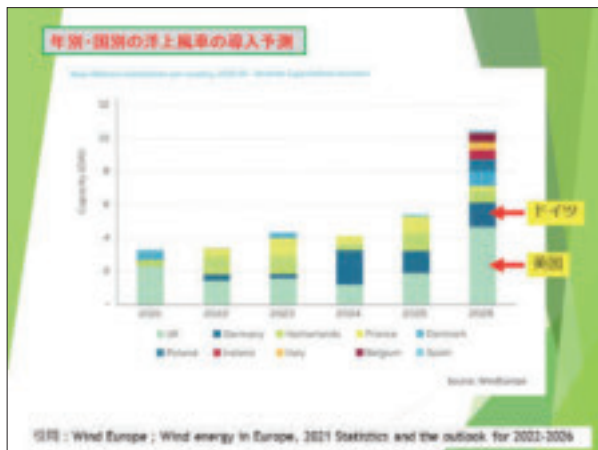


図-4.56



図-4.57

す。洋上風車をどこに造るかにより審査が異なってきます。港湾区域に造る場合には港湾法の適用を受けます。それから公募に関するプロセスです。もう一つは技術基準に適合しているか確認をするプロセスがあります。併せて電気事業法をクリアしていなくてはなりませんから、電気事業法に基づくものにも適合していることを確認することが必要になります。二重の審査を受けるわけですが、このように重複して審査を受けるとなると、基準が違うために構造自体が異なるものになってしまう可能性があります。これについてはここに示しているように、洋上風力発電設備に関する技術基準の統一解説という形で、いわゆる技術基準が共通化されており、統一解説に基づく方法で設計すれば、それぞれの審査が通るという形になっています。令和2年3月に洋上風力発電設備に関する技術基準の統一解説が公表されて、統一的に扱えるようになっております(図-4.58)。

先程は港湾施設の例を示したわけですが、次は海洋再生エネルギー発電設備整備促進区域、いわゆる一般海域の事例です。一般海域でも、洋上風力発電設備に関する技術基準の統一解説を使って設計することになります。再エネ海域利用法に基づき、技術基準の統一的な評価によって設計されたものが審査を受けて新設されていく形になっています(図-4.59)。



図-4.58

港湾における洋上風力発電施設等のガイドライン(案)が平成27年3月に国土交通省の港湾局で案が作成されました。港湾区域に加えて一般海域への適用を加えた統一化が図られ、さらに浮体式洋上風力発電設備への適用も含める形で、令和2年3月に洋上風力発電施設に関する技術基準の統一解説が出ました。いわゆる電気事業法によるものと港湾法によるもの、こういったものが技術基準について統一解説が出され、併せて浮体構造も加わった体系になっております(図-4.60)。

それではそういった体系がどのようなものをベースに基準化されているかを説明します。電気的なものについては電気事業法に基づくもので、省令やその解釈、さらに逐条解説があって、これらが体系に取り込まれています。港湾法では港湾の技術基準を定める省令、基準・同解説があって、さらにそれに基づいて港湾における洋上風力発電等の技術ガイドライン(案)があって、こういったものが統一解説に反映されています。浮体の場合は船舶安全法に基づいて、浮体式洋上風力発電施設の技術基準があって、これをベースに浮体式洋上風力発電施設設計技術安全ガイドライン、それらがこの洋上風力発電施設に対する技術基準の統一解説の中に取り込まれています。このベースになる風車自体の基準、これはIECの基準、それから日本の

JISです。これはIEC等にも関連しているのですが、関連するJISの基準類、こういった基準類による設計手法をベースに、技術基準類に基づき法律的に担保ができるということです。それらを支えるものとしては、ISOやAPIとかいろいろな基準類が引用され、いわゆる要素として入って、このような技術体系・基準体系が構築されています(図-4.61)。

実際に洋上風車も陸上風車も含めてなのですが、これらを設計する時に、非常にたくさんのイベントを考慮する必要があります。これら荷重について組み合わせるとものすごく膨大な荷重ケースになります。発電中のイベント、この中でもイベントが細かく分かれております。それから発電中の故障に対する荷重、発電開始時、発電の停止時、緊急停止、停止時、故障の時、



図-4.60



図-4.59



図-4.61

輸送・設置・メンテナンス・修理時、さらに海水作用時などです。この様に非常にたくさんの荷重の組み合わせに対して、設計しなければならないことが、風車の設計で大きな課題となっております。これら全部の事例を確認しなければいけないので、膨大な検討ケースが実際に必要となっているのが現状です。設計上ではこれらの支配的な項目に対してまず設計して、それが他の条件に対してパスしているかどうかという繋がり確認していくことになります。いずれにしても非常に多くの検討ケースを検討していかなければいけない現状にあります(図-4.62)。

それから、地震の扱いです。この地震の扱いについては、建築基準法に由来する地震動ということで、稀に発生する地震動、極めて稀に発

生する地震動(極稀地震動)を検討することが必要です。港湾の基準では、港湾レベル1地震動、港湾レベル2地震動です。ただし港湾レベル2地震動については、風車が港湾の耐震強化岸壁の利用に支障を及ぼす恐れがある場合についてのみ設計するという事で、通常の場合は設計しなくていいということです。いずれにしろ建築基準法に由来するものと港湾法に由来するものの両方を検討しなければいけないことになっています。併せて設計津波作用時の検討も必要です(図-4.63)。

荷重効果の計算方法ですが、荷重の特性値をどう評価していくか方法が二つ、統一的解説の中に示されております。方法1は風車のタワーを含めて全体で構造解析するという考え方で、風車やタワー部に風荷重を受ける場合、風

短期荷重及び疲労荷重に関する荷重組み合わせ
(JRC61400-3-Iに準拠)

発電中	DLC 1.1	DLC 1.2	DLC 1.3	DLC 1.4	DLC 1.5	DLC 1.6
発電中の故障	DLC 2.1	DLC 2.2	DLC 2.3	DLC 2.4	DLC 2.5	
発電開始時	DLC 3.1	DLC 3.2	DLC 3.3			
過速発電停止	DLC 4.1	DLC 4.2				
緊急停止	DLC 5.1					
停止時	DLC 6.1	DLC 6.2	DLC 6.3	DLC 6.4		
停止時+故障	DLC 7.1	DLC 7.2				
輸送・設置・メンテナンス・修理時	DLC 8.1	DLC 8.2	DLC 8.3	DLC 8.4		
海水発生時	DLC D.1	DLC D.2	DLC D.3	DLC D.4	DLC D.5	DLC D.6
	DLC D.7	DLC D.8				

引用：海上風力発電施設に関する技術標準の統一解説(令和2年3月版)

図-4.62

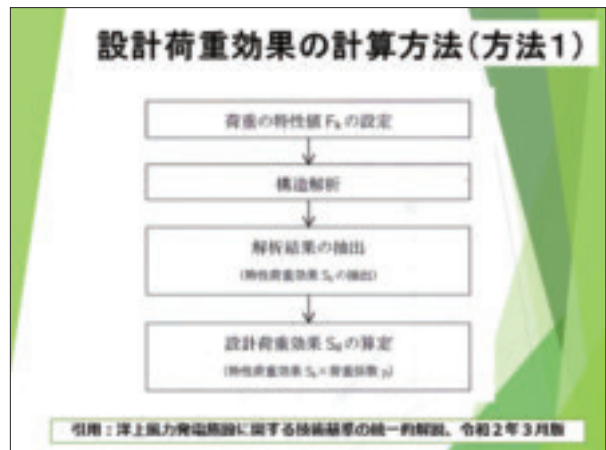


図-4.64

長期荷重、地震荷重、津波荷重の作用時の荷重組み合わせの概要
(本基準解説で独自に設定)

長期荷重
稀に発生する地震動の作用時
極めて稀に発生する地震動の作用時
港湾レベル1地震動の作用時
港湾レベル2地震動の作用時 (状況により、港湾に存在する耐震強化施設の利用等に支障を及ぼすおそれのある海上風力発電設備を設計する際にのみ採用するものとする)
設計津波作用時

図-4.63

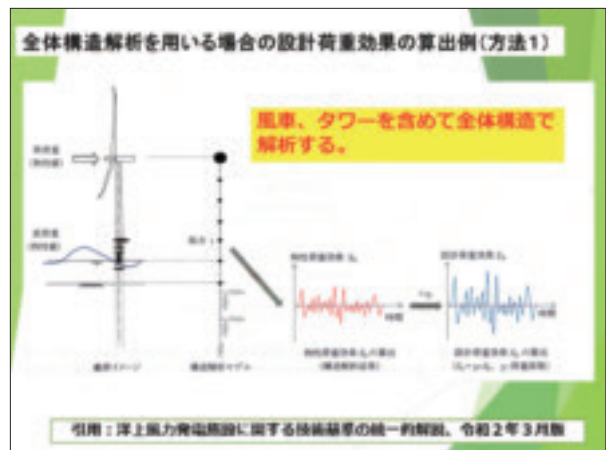


図-4.65

車全体を解析して荷重効果を求めて風車基礎構造を設計するという考え方が方法1であります(図-4.64、図-4.65)。

それからもう一つは方法2です。方法2については、風車のタワーより下の部分、モノパイルの部分とトランジションピースの上側のつなぎ目のところ、ちょうどトランジションピースと風車のタワーのつなぎ目の基部のところに、上からの荷重を荷重とモーメント荷重として求めて、モーメント、せん断力、軸力に荷重係数を掛け算するような形で荷重作用を求めて、その荷重作用に対して下の部分を構造解析モデルで構造解析を行います。こういう方法2の考え方もあります(図-4.66、図-4.67)。

それから波ですが、波はいろいろな海象条件があります。例えば ESS という極値海況や

SSS という高波浪時海況などの波浪条件を組み合わせ、荷重作用を計算します。ESS、SSS の波を算定する手法も具体的な方法として提案されています(図-4.68)。それから、NSS という通常波浪海況です。こういったものも計算する方法が提案されております(図-4.69)。荷重作用に対して、それぞれ要求性能を定めて、安全性を照査します。要求性能に対して、短期荷重であるとか疲労荷重とかの条件が設定されて、これらの荷重条件に対して要求性能を満足するかどうかの検討が必要です。具体的にはこのような照査項目を設定しています(図-4.70)。この手順は複雑で、計算ケース数としては結構な数になります。

それから長期荷重については、破損せず、発電施設として機能を満足するという要求性能に

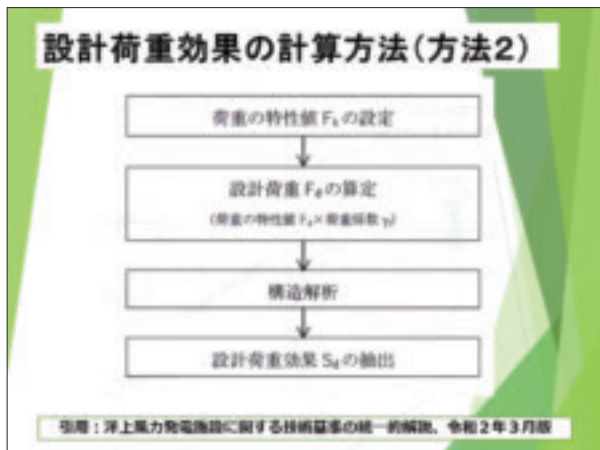


図-4.66

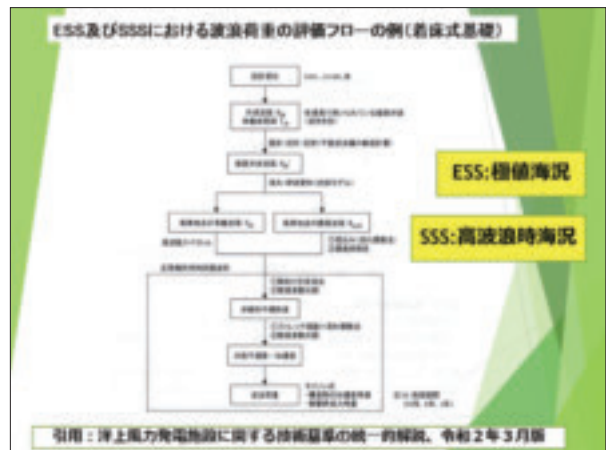


図-4.68

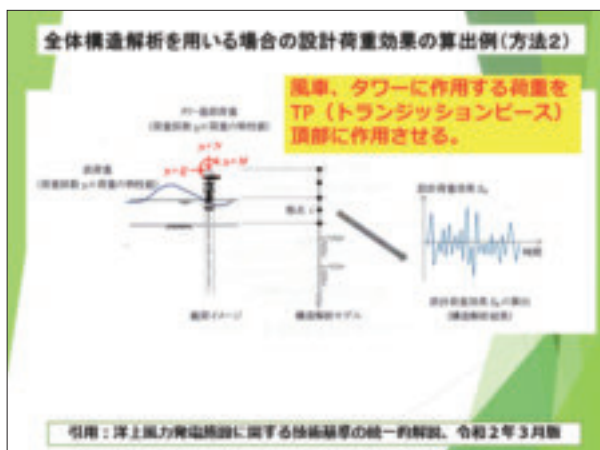


図-4.67



図-4.69

対して、具体的に示されている照査項目に対して照査していくことになります。統一的解説では、こういったものを参考にしながら設計を進めていく手順が示されています(図-4.71)。

それから稀に発生する地震動です。これはいわゆる建築基準法に基づく地震動であります。それに対して適応基準はこういったものを参考にして施設が損傷しないことを確認する手順で、照査項目はここで示したものが対象となります(図-4.72)。それから港湾のレベル1地震動についても、必要に応じてチェックしておくことが必要です(図-4.73)。この極稀地震動は、建設基準法に基づきます(図-4.74)。津波についても津波が作用した時に、倒壊・崩壊しないことが要求されています(図-4.75)。

それからレベル2の地震動については、これ

は先程も述べたように、港湾区域の中でその風車が倒れることによって、港湾の耐震強化施設に影響がある場合に検討する必要があります。海洋再生エネルギー発電設備の一般海域の場合には、港湾レベル2地震動の照査は必要ないと

荷重組み合わせ、適用基準、要求性能、照査項目の組み合わせ

【稀に発生する地震動】

荷重組み合わせ (本基準解説で指定) (注)	適用基準	適用基準	要求性能	照査項目
稀に発生する地震動	ナター	電力発電設備 及び附属設備設計 規程・同解説*	耐震です。地震 施設としての機能 を満足する**	構造的安全性 ① 倒壊応力係
	下部構造			構造的安全性** ① 支保力 ② 湧動 ③ 崩壊
	基礎			

引用：洋上風力発電施設に関する技術基準の統一的解説、令和2年3月版

図-4.72

荷重組み合わせ、適用基準、要求性能、照査項目の組み合わせ

【期間超過及び想定超過】

荷重組み合わせ (注) (1800-1**の地震)	適用基準	適用基準	要求性能	照査項目
期間超過及び想定超過 ・地震動 ・津波 ・波浪 ・風力 ・浮力 ・浮力(浮力) ・偏流、波浪、浮力、風力、 ・風力(浮力)	ナター	電力発電設備 及び附属設備設計 規程・同解説*	耐震です。地震 施設としての機能 を満足する**	構造的安全性 ① 倒壊応力係 ② 倒壊応力係
	下部構造			構造的安全性** ① 支保力 ② 湧動 ③ 崩壊
	基礎			

引用：洋上風力発電施設に関する技術基準の統一的解説、令和2年3月版

図-4.70

荷重組み合わせ、適用基準、要求性能、照査項目の組み合わせ

【港湾レベル1地震動】

荷重組み合わせ (本基準解説で指定) (注)	適用基準	適用基準	要求性能	照査項目
港湾レベル1地震動	ナター	電力発電設備 及び附属設備設計 規程・同解説*	耐震です。地震 施設としての機能 を満足する**	構造的安全性 ① 倒壊応力係
	下部構造			構造的安全性** ① 支保力 ② 湧動 ③ 崩壊
	基礎			

引用：洋上風力発電施設に関する技術基準の統一的解説、令和2年3月版

図-4.73

荷重組み合わせ、適用基準、要求性能、照査項目の組み合わせ

【長期荷重】

荷重組み合わせ (本基準解説で指定) (注)	適用基準	適用基準	要求性能	照査項目
長期荷重	ナター	電力発電設備 及び附属設備設計 規程・同解説*	耐震です。地震 施設としての機能 を満足する**	構造的安全性 ① 倒壊応力係
	下部構造			構造的安全性** ① 支保力 ② 湧動 ③ 崩壊
	基礎			

引用：洋上風力発電施設に関する技術基準の統一的解説、令和2年3月版

図-4.71

荷重組み合わせ、適用基準、要求性能、照査項目の組み合わせ

【極めて稀に発生する地震動】

荷重組み合わせ (本基準解説で指定) (注)	適用基準	適用基準	要求性能	照査項目
極めて稀に発生する地震動	ナター	電力発電設備 及び附属設備設計 規程・同解説*	耐震です。地震 施設としての機能 を満足する**	構造的安全性 ① 倒壊応力係
	下部構造			構造的安全性** ① 支保力 ② 湧動 ③ 崩壊
	基礎			

引用：洋上風力発電施設に関する技術基準の統一的解説、令和2年3月版

図-4.74

ということです (図-4.76)。

具体的にはそういった要求性能を満足するかを確認する流れの中で実際に設計していきます。実際に荷重を定めて、構造解析をやって、モノパイルの時はどうするか、ジャケットの時はどうするか、重力式の時はどうするか、支持構造物別の設計手順が示されております (図-4.77)。

また、設計に際して注意しなければいけないのは、モノパイルの場合は洗堀の影響です。洗堀によりどのような問題があるかと言うと、まず風車基礎周辺の海底面が洗堀されることによって、風車自体が傾斜してしまう可能性があります (図-4.78)。それから洗堀されると、支持構造物を支える有効な根入長が短くなるので、強度、いわゆる杭の耐力が落ちてしまうことが

考えられます。このようにモノパイル構造では洗堀対策が重要になります (図-4.79)。

洗堀すると深掘れして杭根入長が短くなるので、それを抑えるために、根固めの材料を風車の基礎のモノパイルの周辺に洗堀防止工として



図-4.77

荷重組み合わせ、適用基準、要求性能、照査項目の組み合わせ

照査項目	荷重状態	適用基準	要求性能	照査項目
設計荷重	ブロー	構造の設計が適用上の基準に一致しない	照査対象なし	傾斜し、支持構造物の性能低下
	下流構造			
	基礎			

引用：洋上風力発電施設に関する技術基準の統一の解説、令和2年3月版

図-4.75

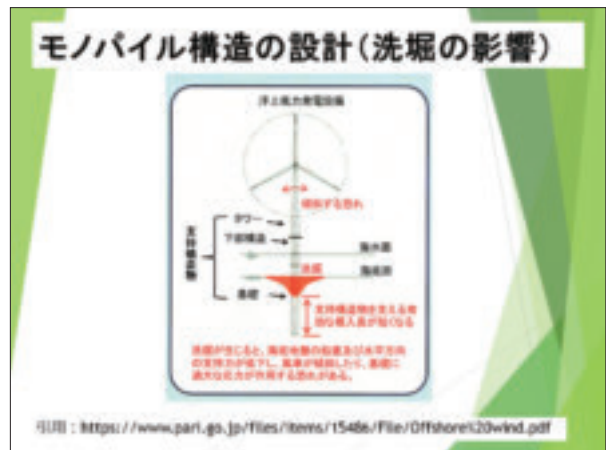


図-4.78

荷重組み合わせ、適用基準、要求性能、照査項目の組み合わせ

照査項目	荷重状態	適用基準	要求性能	照査項目
設計荷重	ブロー	構造の設計が適用上の基準に一致しない	照査対象なし	傾斜し、支持構造物の性能低下
	下流構造			
	基礎			

引用：洋上風力発電施設に関する技術基準の統一の解説、令和2年3月版

図-4.76

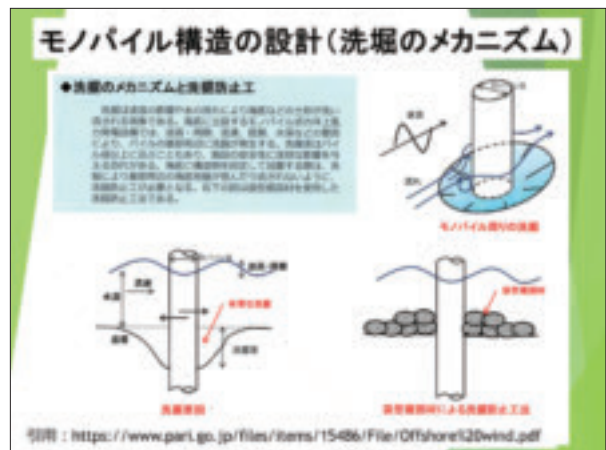


図-4.79

設置することが考えられます。これは実際に対策工について、実験でその効果を確かめている事例です。こういうふうにモノパイルの洗堀についても条件に応じて考えていく必要があります（図-4.80）。

次にモノパイルの現地施工について説明します。

基本的には風車のタワーを港湾岸壁に設置しておいて、クレーンを用いて SEP 船に載せ、港湾から搬出する形をとります。設置海域では、まずモノパイル基礎を海中に打ち込み、その後風車タワーを設置し、風車本体のナセルやブレードを付けて、建設していく形になります（図-4.81）。実際にどのように施工しているかについて、私が 2019 年に訪問したエスビアウ港の例で説明します（図-4.82）。これがデン

マークのエトランド半島で、こちらがドイツです。これはデンマークの首都コペンハーゲンのある島です。エトランド半島にはエスビアウ港があって、洋上風車の積み出し基地となっています。私が訪問した時には SIMENS Gamesa 社と MHI Vestas 社の製作ヤードがありました。MHI Vestas 社については、その後 MHI 社が風車の製造から外れて、現在は Vestas 社になっています。エスビアウ港には二社のプレアッセンブル工場が進出しているということで、その状況を説明します。

作業ヤードで使用されていたクレーンは 1,350t 吊りのクレーンで風車のタワー部分を吊り上げて繋げて行きます（図-4.83）。ブレードは羽根状のもので、保管架台を設けてブレードを保管しています。この写真は風車の

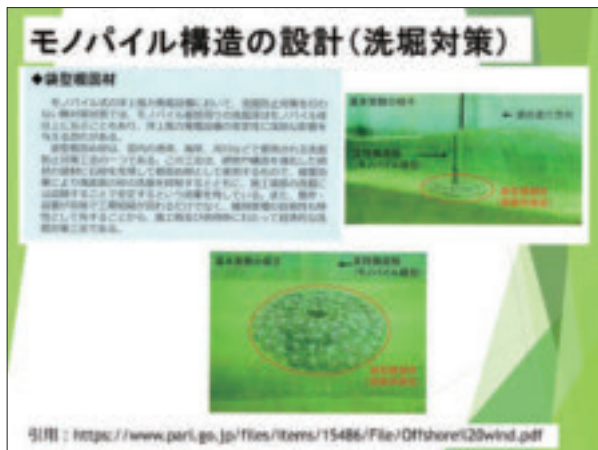


図-4.80



図-4.82



図-4.81



図-4.83

ブレードを保管している状況です (図-4.84)。次の写真はタワーの基部です。数段連結 (この場合は3段組) の風車タワーの一番下の部分です。ここにはPCM (Pulse Code Modulation) という装置が組み込まれます。風車の電気信号 (風車の発電機の部分で発電された信号) は、パルス状の信号であることから、この装置で電流信号に変換しています。この装置はタワーの一番下の部分に格納されます (図-4.85)。

タワー基部は岸壁前面で固定します。その上にタワーを繋いでいきます。工場の中は基本的には碎石敷きで舗装がされていません。使用中にはこういう穴が出きますから、ヤード内には表面補修に使用する砂や砂利が置かれておりました (図-4.86)。これはドーリーとって、タワーを立ち上げて行く時に使う装置です。タ

ワーは鉛直に立てていかなければならないので、この装置とクレーンを使って風車タワーを縦に立ち上げて繋いでいく作業に使います。また、ドーリーは工場内でのタワーの輸送にも使われています (図-4.87)。

風車のプレアッセンブルの港として、オランダのフリッシンゲン港について説明します。風車を組み立てヤードは、この港のちょっと奥まった部分です (図-4.88)。これはタワーの仮置き状況です (図-4.89)。先程説明したドーリーでこの位置まで持って来て、クレーンを用いてタワーを吊り上げて立てて行く形で、さらに2段、3段と繋いでいきます。8 MW サイズ風車では3段組でタワーを繋げる作業をしていました (図-4.90)。

標準的な作業のスケジュールとしては、タ



図-4.84



図-4.86



図-4.85



図-4.87

ワーの組み立てに約1日を要します。このように最初の段から2段、3段と繋いでいきます。これはちょうど3段目を繋いでいるところです(図-4.91)。この繋ぐ作業は約1日ででき、ボルトで連結部を締めていきます。内部に12本の

ケーブルが設置され、4本束のケーブルがタワー中に設置されます。ケーブル束は風車タワー内の3カ所に分けて設置されます。ケーブルの整線には約3日掛かるということです。この一番下タワーには先程説明したPCMというモジュレーターが収納されます(図-4.92)。

このように、タワーは3段重ねで据え付けて積み上げて行って、岸壁に立ち上げて行くという形になります。この写真はタワーを支える基礎部分で、治具を用いて転倒ないように支えています(図-4.93)。

このタワー基部周辺をどのように保護しているかについて説明します。この場合は木材を並べて、周辺を保護しています。16cmの角材6本をボルトで繋いで接合し、角材で面を造って、その上に風車のタワー部分を載せていくこ



図-4.88



図-4.89



図-4.91



図-4.90



図-4.92

とを行っています（図-4.94）。

ナセルの保管状況を説明します。これは風車のナセルの部分です。ここの部分も舗装はされていなく、砂利敷きのヤード上に架台を置き、その上にナセルを載せます。ブレードも同じように治具を置いて、ブレードが変形しない形をとって保管しています（図-4.95）。

次にモノパイルの施工について具体的に説明します（図-4.96）。この図はモノパイルの施工の手順を示しています。モノパイルを海底に打ちこみ、その上に風車を立てて、送電ケーブルを繋げます。また、プラットフォーム構造で、洋上変電所が建設されます。このようにしてウインドファームを建設し、海底送電線を陸上の変電所に繋げて行きます（図-4.97）。

モノパイルの施工・打設について説明します。

これはモンマーでモノパイルを打ち込んでいる状況です。モノパイルを打設している時の写真です。SEP 船を使って直立させるためにガイドで保持しながらモノパイルを打ち込んでいきます（図-4.98）。この写真は実際に打設ハンマー

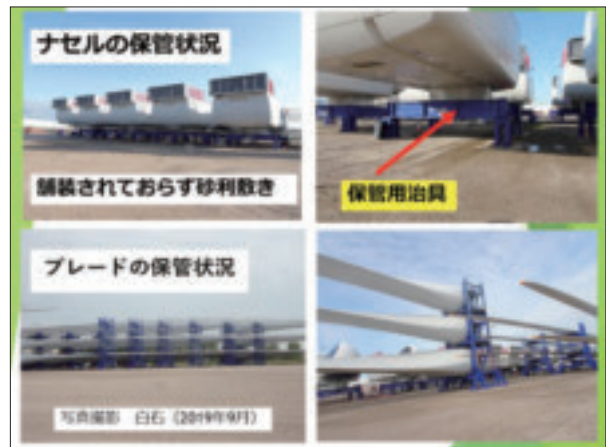


図-4.95



図-4.93

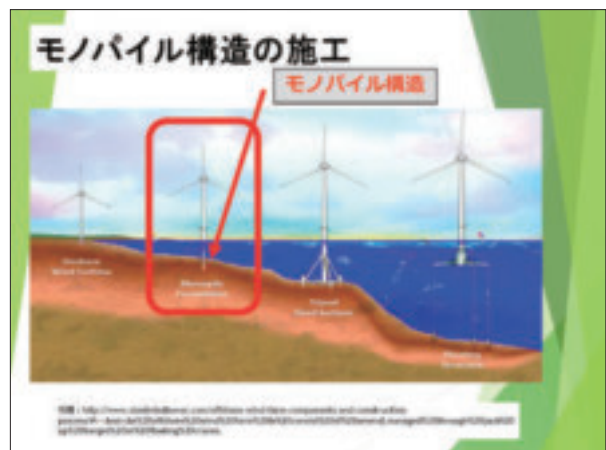


図-4.96

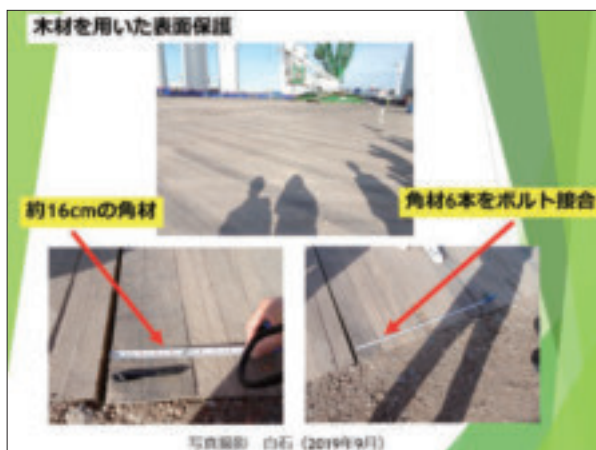


図-4.94

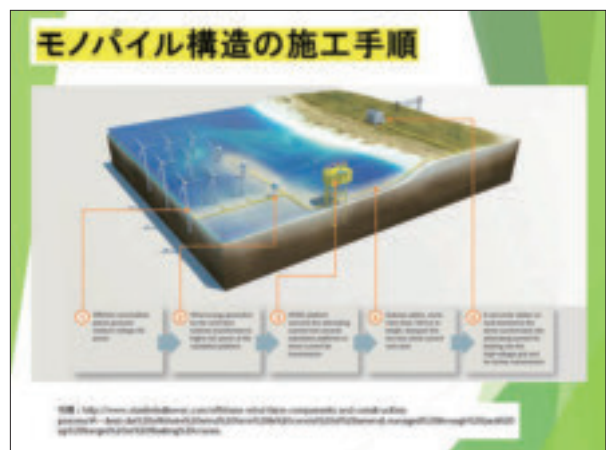


図-4.97

で海中にモノパイルを打ち込んでいる状況です(図-4.99)。モノパイルをこのようにどんどん打設していくと、水中の衝撃波によってこのような海面の状況になります(図-4.100)。

次にモノパイルの打設後、その上にトラン

ジッションピース (TP) を設置します。TP を設置した上に SEP 船に載せたタワーを繋いでいきます。この事例では、写真の奥の方から順番に SEP 船が移動しながら洋上風車を設置しています(図-4.101)。その後設置されたタワーの上にナセルやブレードを据え付ける作業順序になっています。これはタワーの上にナセルを付けて、ローターとブレードをナセルに取り付ける状況の写真です(図-4.102)。タワーの内部については、岸壁の前面において内部配線を行っています。電力や通信ケーブルについては、岸壁にタワーを設置した段階で内部にあらかじめ配線していく形になります(図-4.103)。

モノパイル構造のメンテナンスについて説明します。O & M の基地港湾ということで、私



図-4.98



図-4.99



図-4.101



図-4.100



図-4.102

が2019年9月、新型コロナの感染拡大が始まる前年の視察の状況です（図-4.104）。

ドイツのムクラン港の状況をお話します。このムクラン港の沖にはアルコナウインドファームという洋上風力発電所があります。この地域は旧東ドイツ領になります。ここがO & Mの基地です。ウインドファームまでだいたい20 km ぐらい離れていますが、このムクラン港がO & Mの基地になります。風車を建設する時もここが基地港湾として機能していました（図-4.105）。

その時に訪れたのがe-on社という風力発電事業者が管理している事務所です。このe-on社がどのぐらいのシェアを示しているかというところ、2018年の新規設置分と累積設置量では、ヨーロッパの洋上風力発電事業者の中では2番

目です（図-4.106）。

アルコナウインドファームは2018年に建設され、2019年から稼働開始しています。どの時期から計画があったかについて説明します。これは2006年当時の資料です。私が2006年にインドで開催された世界風力発電会議に出席した時に、ドイツの人とお話をして、その後に送付していただいた資料のコピーです。2006年当時の資料ですが、その中に既にアルコナウインドファームが記載されておりました。その当時の資料では、連邦海洋水理庁（BSH）という組織がドイツの中では洋上風力発電の建設稼働に対する認可の省庁ということで、2006年当時、北海海域では13海域、それからバルト海海域では2海域が認可を受けております。2006年にこのアルコナウインドファームについても認



図-4.103



図-4.105



図-4.104

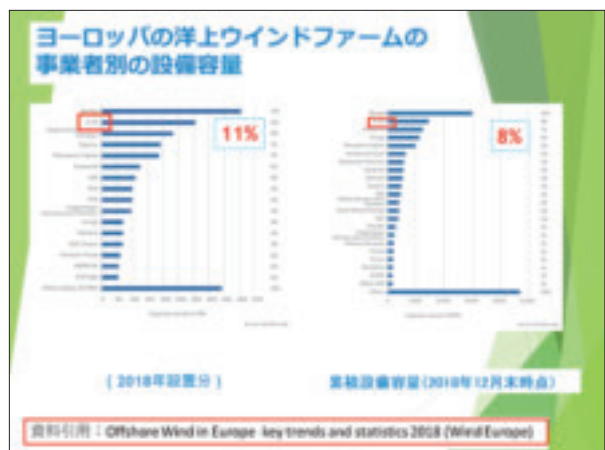


図-4.106

可を受けていたということです (図-4.107)。

どのような経緯をへてアルコナウインドファームが建設されたかを説明します。2006年に先程説明した BSH という組織より一次認可が下りて、観測塔を設置して洋上風速の観測を開始しました。ここからいろいろな事前調査があり、時間がかかっています。2015 年になり、ようやく地盤調査、三次元の音波調査が実施されて、系統容量が確保されました。2016 年になって事業への投資が決まったので、そこから Cone Penetration Test (CPT) という調査方法で海底地盤の調査が開始されました。海底地盤にコーンを刺し込んでそれで地盤の強度を調べるという方法です。そこから先は建設が一気に進んでいき、モノパイル打設、サブステーション・ジャケット設置という形で基礎工事が進み、



図-4.107

2018 年には風車上物や海底送電ケーブルが設置されました。同ウインドファームは 2019 年に O & M が開始されました。私が訪問したのは 2019 年 9 月で、O & M が開始された直後の時期でした (図-4.108)。ここの洋上風車の規模は 6 MW です。現状では 6 MW は決して大きな風車ではないのですが、計画段階から時間をかけて建設が進んだこともあるので、6 MW というのは当時建設された中ではちょっと小ぶりではありますが、一般的な風車規模になります。建設にはここで示す重量の構造物が使われています。× 60 というのは 60 基あることを示しています。モノパイルは 800~1,200t の範囲です。水深や地盤条件により風車ごとに異なっています。風車のサイズがどのくらいかと言うと、飛行機の A380 と並べるとこんな感じのサイズ比較になります (図-4.109)。

実際のメンテナンス作業では沖合の海域に行く必要があります。風が強い時や波が高い時は現場まで行けないので、作業可否を判断するために予測が行われ、風速・波浪の予測値がメンテナンス基地のモニターに表示されています。私が行った時はギリギリ現地に行ける状況だったので、船で現地を見学することができました。O & M 基地の保管庫にはメンテナンスのためのいろいろな資機材が置かれていました (図-4.110)。



図-4.108

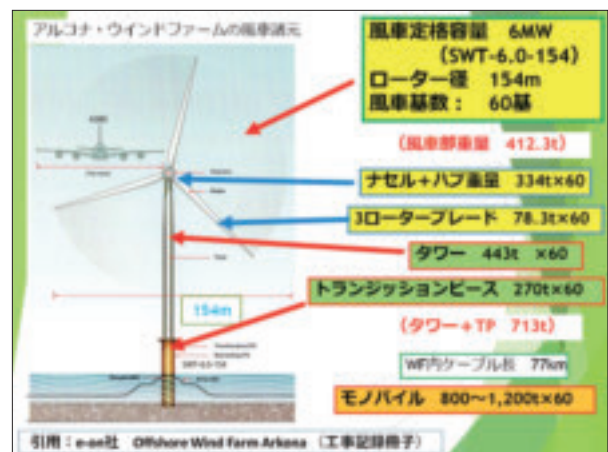


図-4.109

実際に海域まで船で行った状況を説明します。メンテナンス作業では、洋上風車に近づき、トランジションピースの部分の着床施設に船を着け、梯子を上って、タワー基部のハッチから風車内部に入って保守点検する構造になっています(図-4.111)。このウインドファームでは60本の風車が並んでいるのですが、そこを縫うように海底送電ケーブルが敷設されています。まず風車と風車の間は33,000ボルトの海底送電ケーブルで繋がっています。それをサブステーション(洋上変電所)の中で22万ボルトに昇圧して、陸上に図に示す形で電気を送っています。ウインドファームの真ん中辺りに、洋上変電所が設置されているということです(図-4.112)。

洋上変電所については重量構造物になりま

す。サブステーションは約4,000tになるので、ここの支えはモノパイルでは無理なので、通常はジャケット基礎が使われています。この4,000tの施設を支えるためには、約1,000tのジャケット基礎になります。そしてこのジャケットの4本の脚を留めるためにスカートパイルが海底地盤に打ち込まれています(図-4.113)。

ここからは残りの時間になりますので、モノパイルの建設事例を紹介します。

最初に建設されたスウェーデンの洋上風車というのは、0.22 MW (220 kW) の風車で、組杭で支持された風車です。既に撤去されてありません。こういう小さな風車で試験的に開始されました。

デンマークでは1991年に11基の洋上風車が



図-4.110

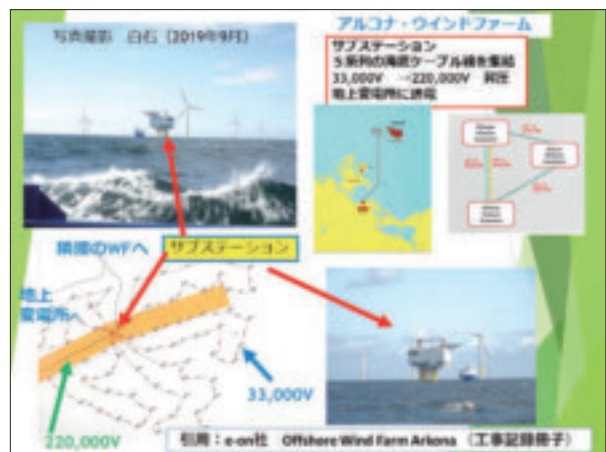


図-4.112



図-4.111



図-4.113

建設されました。これも 0.45 MW というこ
 で、1 MW もない小さな風車です。

オランダでは 0.5 MW が 4 基建設されまし
 た。これは 1994 年にオランダの淡水湖に建設
 された、この国の最初の事例です。

スウェーデンでは Bockstigen というところ
 に、0.55 MW 風車が 5 基建設されました。
 2018 年に更新されて 5 MW が 10 基という新し
 い風車に変わっています。このように当初は 1
 MW 未満という小さな風車で洋上風車の開発
 が進められてきました。

2000 年には英国で 2 MW の風車 2 基の研究
 開発が始まりました (図-4.114)。

その後、どんどん風車のサイズが大きくなり、
 最初は 2 MW ぐらいの風車で、ウインドファーム
 が建設されるようになりました。有名なもの

初期のモノパイル構造事例① (モノパイル以外の構造形式も併記)	
スウェーデン Swante 1 Offshore Wind Farm (Hogeland)	〔組立式〕 運用開始 1990年 0.22MW (0.22MW×1基) 2014年撤去
デンマーク Vindby Offshore Wind Farm	〔モノパイル〕 運用開始 1991年 4.95MW (0.45MW×11基) 2017年撤去
オランダ Lely Wind Farm (淡水湖に建設)	〔組立式〕 運用開始 1994年 200W (0.34MW×4基) 2014年撤去
スウェーデン Bockstigen Offshore Wind Farm	〔組立式〕 運用開始 1994年 2.75MW (0.55MW×5基) 塔高さ 〔モノパイル〕 2018年風車更新 500kW (3.00MW×10基)
英国 Blyth Offshore Wind Farm	〔モノパイル〕 運用開始 2000年 40W (20W×2基) 2017年撤去

図-4.114

初期のモノパイル構造事例② (モノパイル以外の構造形式も併記)	
スウェーデン Skarviken Offshore Wind Farm	〔モノパイル〕 運用開始 2000年 110MW (1.3MW×7基) 2018年撤去
スウェーデン Yttre Stengrund Offshore Wind Farm	〔モノパイル〕 運用開始 2001年 10MW (2MW×5基) 2015年撤去
デンマーク Middelgrunden Offshore Wind Farm	〔重力式〕 運用開始 2001年 40MW (2MW×20基)
デンマーク Horns REV Offshore Wind Farm	〔モノパイル〕 運用開始 2002年 160MW (2MW×80基)
デンマーク Nysted Offshore Wind Farm	〔モノパイル〕 運用開始 2003年 383MW (2.3MW×162基)
ドイツ Dollart Emden Offshore Wind Farm	〔モノパイル〕 運用開始 2004年 4.5MW (4.5MW×1基) パイロット試験
英国 Barrow Offshore Wind Farm	〔モノパイル〕 運用開始 2004年 90MW (3MW×30基)

図-4.115

はデンマークの Middelgrunden-Offshore
 Wind Farm です。ここではモノパイルではな
 くて水深が浅いことから、重力式の構造をとっ
 ています。円弧状に風車が 20 基配置されてい
 ます。今から 20 年前にいろいろな方がヨー
 ロッパの風車事情を説明する時にスライドでよ
 く使われていたのが、この Middelgrunden-
 Offshore Wind Farm です。

そして 2002 年・2003 年になると、デンマ
 クで、80 基あるいは 160 基のかなり大規模・本
 格的なウインドファームが建設されるようにな
 りました。今から 20 年前のことです (図-
 4.115)。

ドイツでもパイロット試験で大きな風車が建
 設され、英国でも、2 MW とか 3 MW の風車が
 建設されるようになって、洋上風車の大型化が
 進んできたということです。さらに水深が深い
 場所では、ジャケット構造のものがパイロット
 試験で実施されるようになりました。また、ノ
 ルウェーでは世界で初めての浮体式の洋上風車
 の試験研究が行われました。

その後、年を経るに従って、5 MW、6 MW と
 いう大型の風車が建設されるようになりました
 (図-4.116)。

浮体式については Hywind Scotland におい
 て、6 MW 風車 5 基の商用運転が開始されるよ
 うになりました。それから 2018 年にはジャ

初期のモノパイル構造事例③ (モノパイル以外の構造形式も併記)	
英国 Beatrice Offshore Wind Farm	〔ジャケット式〕 運用開始 2007年 100MW (3MW×2基) パイロット試験
ノルウェー Hywind Offshore Wind Farm	〔浮体式〕 運用開始 2009年 2.3MW (2.3MW×1基) パイロット試験
デンマーク Horns REV2 Offshore Wind Farm	〔モノパイル〕 運用開始 2009年 201MW (2.3MW×91基)
ヘルシー Thorntonbank Offshore Wind Farm (Phase-1)	〔モノパイル〕 運用開始 2009年 300MW (3MW×60基)
ヘルシー Thorntonbank Offshore Wind Farm (Phase-2)	〔モノパイル〕 運用開始 2012年 184MW (6.15MW×30基)
ヘルシー Thorntonbank Offshore Wind Farm (Phase-3)	〔モノパイル〕 運用開始 2013年 110MW (6.15MW×18基)

図-4.116

ケット式でもかなり大型なプロジェクトが進み7 MW 風車 84 基が商用運転され、洋上風車の大型化が進んでいきました (図-4.117)。

これから、初期の事例を含めて若干紹介させていただきます。

これはスウェーデンの初期のものです。トリポットという形式で3本の足を岩盤の上につけ、水深もまだ浅く規模も小さい0.22 MW の風車が造られました。(図-4.118)。

それからオランダの淡水湖に建設された風車です。これも0.45 MW が4基ということで、淡水湖の中に風車が建てられました。これは2014年に撤去されました (図-4.119)。洋上風車の撤去については講演会の第6回でもう少し詳しく説明します。初期のものについては、このように撤去される事例も出てきています(図-

4.120)。

それからデンマークの Vindeby という地点の風車、これもまだ小さく0.45 MW の風車です。1991年に建設されて、2017年に撤去されています (図-4.121)。撤去の内容については



図-4.117



図-4.120

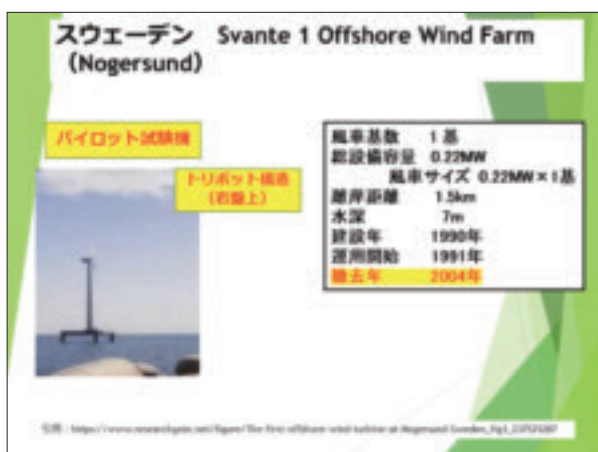


図-4.118



図-4.121

第6回で説明させていただきます(図-4.122)。次はスウェーデンのBockstigenです。1998年に建設された当時は0.55 MWが5基ということで、初期としては比較的大きかったのですが、最近5 MWの大きな風車に更新されています(図-4.123、図-4.124)。

これは英国で比較的初期の段階の風車です。これも水深がまだ6m~11mと浅く、2 MWが2基ということで、パイロット試験的な開発になります(図-4.125)。

それからUtgrunden Offshore Wind Farmです。これは少し大型化してきました。2000年運用開始ということで1.5 MW風車が7基というものです。これも2018年に撤去されています(図-4.126、図-4.127)。

Yttre Stengrund Offshore Wind Farm これ

も初期の洋上風車の中では大きくて2 MWが5基です。これも撤去されています。撤去についてはまた8月頃に第6回で詳しく説明させていただきます(図-4.128、図-4.129)。

これはMiddelgrunden Offshore Wind Farm



図-4.124



図-4.122



図-4.125



図-4.123



図-4.126

で、この風車はコペンハーゲン空港の沖合に建設されています。この辺に空港があるはずで、陸上からも見ることができるのですが、風車は円弧状に並んでいます。先程も申し上げましたように、今から20年ぐらい前の欧州の風車の運用状況を紹介するスライドの中には必ず登場していた風車です。現在も運用されています (図-4.130)。

洋上ウインドファームの大型化が進んだのは、Horns REV Offshore Wind Farm で、2002年に2 MW の風車 80 基が並びました。Horns REV2 では2009年に2.3 MW 風車 91 基が建設されました。この2つのプロジェクトの間では風車はあまり大型化していません。最近建設された Horns REV3 は風車のサイズが8.3 MW です。風車が2.3 MW の配置と8.3 MW

の配置を比較すると、8.3 MW では、風車間隔が非常にまばらになってきています。風車の大型化によって配置間隔も大きくなっています (図-4.131)。これは、Horns REV の写真です (図-4.132)。



図-4.129



図-4.127



図-4.130



図-4.128

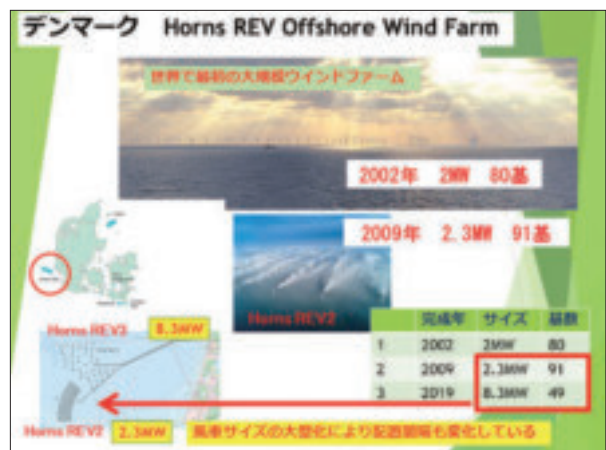


図-4.131

同じ時期の2003年に運用開始された、デンマークのNysted Offshore Wind Farmです(図-4.133)。この辺りになると現在のものに比べると風車サイズは小さいのですが基数が多いウインドファームが本格的に建設されるようになりました。今から20年ぐらい前の状況です。

これはドイツのパイロット試験機です(図-4.134)。

次はイギリスのウインドファームです。2006年ぐらいになると3MWサイズとなりました。2001年・2002年では2MWだったものが3MWに大きくなっています(図-4.135)。

Horns REV2です。運用開始は2009年ですが、風車サイズはそんなに大きくなっていないのですが、基数が多くなって、2.3MW風車が91基です(図-4.136)。さらに2010年以降にな

ると、5MW・6MWが出て来て、洋上風車の大型化が進んでいます。

この表には代表的な洋上ウインドファームを示しています。設備容量の大きなものから小さなものへ順番に並べています(図-4.137)。残



図-4.134



図-4.132



図-4.135



図-4.133



図-4.136

り時間でこれらについて少しだけ紹介させていただきます。これは去年までの時点で稼働している風車の中で一番大きなものです。8 MW 風車が 165 基、1,386 MW (約 1.4 GW) ということで、この 1 カ所のウインドファームだけで火力発電所 1 カ所あるいは原子力発電所 1 カ所に匹敵するぐらいの設備容量があります (図-4.138)。それから Hornsea Project One、これは 7 MW 風車が 174 基、これも運用開始は 2019 年からです (図-4.139)。それから Triton Knoll、これは 9.5 MW 風車が 90 基です。2021 年になると 9.5 MW の洋上風車が建設され、10 MW に近い大型洋上風車が実用化されてきました (図-4.140)。次はオランダの事例で、ここは 8 MW 風車が 94 基ということで、これも運用開始が 2020 年です (図-4.141)。先程の

Triton Knoll も運用開始が 2021 年ということで、最近できた大型ウインドファームです。2020 年ぐらいになると 8・9・10 MW の洋上風車がヨーロッパの中では数多く建設される状況になっています。この表は設備容量の大きな



図-4.139

モノパイル構造による主要なウインドファーム

名称	国	総容量 (MW)	風車数	サイズ (MW)	稼働開始年	構造形式	水深 (m)	離岸距離 (km)	水深 (m)	水深 (m)
London Array	英国	1,200	103	7	2012	モノパイル	25-30	80	402	30
London Array 2	英国	1,210	174	7	2019	モノパイル	25-30	38	409.4	30
London Array 3	英国	802	90	9.5	2021	モノパイル	18-24	32	286.8	34
Humbly Grove	英国	750	94	8	2019	モノパイル	14-26	25	126.3	38
Humbly Grove 2	英国	753.3	97	8.5	2021	モノパイル	14-26	25	146	38
Humbly Grove 3	英国	630	60	8.25	2018	モノパイル	14-21	19	145	21
Humbly Grove 4	英国	630	97.5	3.6	2019	モノパイル	25	28	133	25
Humbly Grove 5	英国	630	70	8.4	2021	モノパイル	16-21	15	179	25
Humbly Grove 6	英国	630	100	6	2017	モノパイル	28-36	85	48	36
Humbly Grove 7	英国	180	37	6	2017	モノパイル	32	45	79	31
Humbly Grove 8	英国	576	140	3.6	2019	モノパイル	19-30	14	79	36
Humbly Grove 9	英国	576	91	6	2018	モノパイル	6-26	27	75	26
Humbly Grove 10	英国	576	140	3.6	2019	モノパイル	20-32	27	147	32
Humbly Grove 11	英国	576	84	6	2021	モノパイル	37	114.5		
Humbly Grove 12	英国	480	71	7	2018	モノパイル	40	80	40	40
Humbly Grove 13	英国	480	49	8.3	2018	モノパイル	11-19	30	30	18
Humbly Grove 14	英国	480	47	6	2017	モノパイル	18-21	32	70	21
Humbly Grove 15	英国	480	47	6	2017	モノパイル	20-40	80	51	41
Humbly Grove 16	英国	480	110	3.6	2019	モノパイル	15-19	15	40	16
Humbly Grove 17	英国	480	110	3.6	2018	モノパイル	15-40	17	31	40
Humbly Grove 18	英国	480	100	4	2018	モノパイル	14-18	22	10	10
Humbly Grove 19	英国	480	100	4	2021	モノパイル	6-27	50	38	32

図-4.137



図-4.140

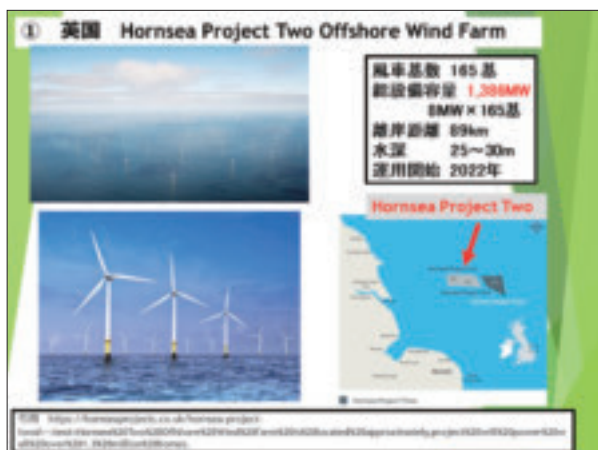


図-4.138



図-4.141

順番に並べています。少し年代が戻ってしましますが、2013年には3.6MWで最近のものよりは風車サイズが小さいのですが、台数で稼いでいる London Array という有名なウインドファームが、ロンドンの沖合に建設されていま

す(図-4.142)。その他、いろいろな風車を紹介しております。表はウインドファームの規模順に並べておりますので、お手元の資料で詳しく見ていただければと思います(図-4.143~図-4.159)。



図-4.142



図-4.145



図-4.143



図-4.146



図-4.144



図-4.147

以上説明したように世界の洋上風車の大規模化が進んでいます。日本では規模の大きなウインドファームを直ぐに実現するのは難しい状況ですが、ヨーロッパでは遠浅の海域という特徴を生かして、規模の大きいものが建設されてい

ます。日本の場合は遠浅の海域がないので、同じような規模感の洋上風車やウインドファームを建設するのは難しい状況になっています。それでも昨年は港湾区域の中で能代港・秋田港、今年は同じく港湾区域で石狩湾新港、こういっ



図-4.148



図-4.151



図-4.149

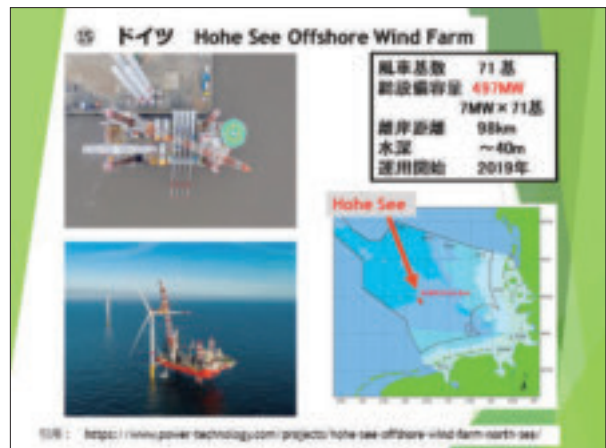


図-4.152



図-4.150



図-4.153

たところで洋上風車が建設され、今後は一般海域にも建設されていきます。ヨーロッパの規模感とは少し違うかもしれませんが、ここ数年の間に、我が国の洋上風車も新たな展開を見せて

くれるのではないかと思います。

だいたい予定の時間となりましたので、これで説明を終わらせていただきます。ご清聴、ありがとうございました。



図-4.154

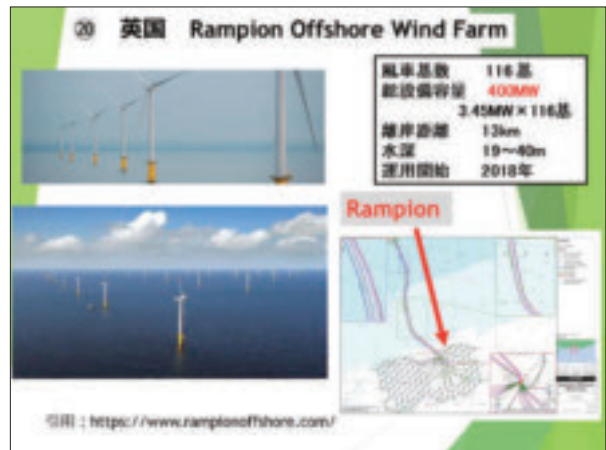


図-4.157



図-4.155



図-4.158



図-4.156

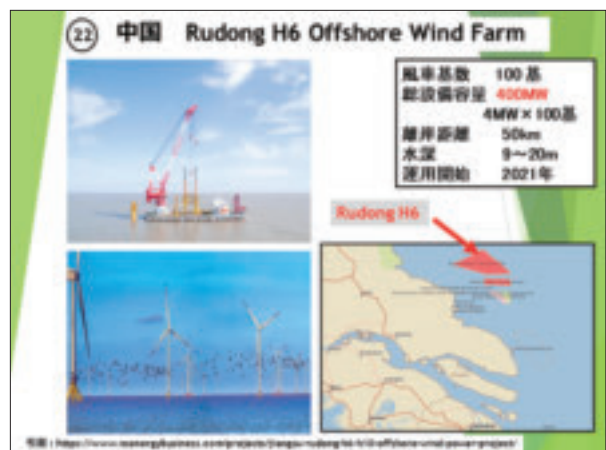


図-4.159

付録 D 洋上風力発電技術セミナー 写真



主催者挨拶

(一社)寒地港湾空港技術研究センター 理事長 ^{きなだ} 眞田 ^{ひとし} 仁 氏



講師

北海道科学大学 名誉教授 ^{しらいし} 白石 ^{さとる} 悟 氏
(一社)寒地港湾空港技術研究センター 審議役



会場の様子①



会場の様子②

※令和5年度に実施した洋上風力発電技術セミナー（第4回～第6回）は、次号での掲載を予定しています。