

## 4 基本設計

風況調査、経済性検討、地域住民との調整等を踏まえ、候補海域において風車の導入を計画した場合、事前調査として風車設置点の決定や施設規模の設定等の基本設計を行う。基本設計の手順は以下の通りである。

1. 風車設置点の決定
2. 風力発電施設規模の設定
3. 風車の機種選定
4. 支持構造物の選定
5. 経済性の検討

なお、系統連系については、導入の可否および経済性に大きく影響する可能性があるため、設置点、機種、施設規模等がある程度固まった段階で、電力会社へ系統連系について事前協議の依頼および相談を行っておく必要がある。

### 4.1 風車設置点の決定

風車設置点については、風況調査結果、海底地形・土壌条件、海底ケーブルの経路・距離、系統連系する陸上変電所の位置・距離、海生生物の生息状況、漁業従事者の意見等を考慮して、経済性も含めて最適な位置を決定する。

### 4.2 風力発電施設規模の設定

以下の手順により、最適な風車を設定して風車配置計画を立てる。

#### a. 風車設置基数の想定

候補海域における設置可能面積、風車の定格出力に基づき風車の設置基数の想定を行う（Ⅲ.4.6(2)1a.ウエイクの影響、参照）。

#### b. 総出力規模（容量）の想定

調達可能予算、系統連系容量等を基に風車の総出力規模を想定する。

#### c. 概略の経済性評価

b.の想定、輸送・設置費、系統連系および環境影響調査等の諸費用に基づき概略コストを算出するとともに、発電量を推定し、これより発電原価を算出して概略の経済性評価を行う。

#### d. 最適施設規模の設定および風車配置

概略の経済性評価が満足できる結果となるよう a.～c.を繰り返すことにより、最適な風力発電施設規模を設定し、風車配置計画を立てる。

また、「港湾における洋上風力発電施設等の技術ガイドライン【案】」では、港湾管理者が設定した「再生可能エネルギー源を利活用する区域」において事業者が洋上風力発電事業の計画

を立案する上での留意事項を整理している。この内容は港湾での洋上風力発電事業を対象としているが、一般海域において事業規模や配置計画を検討する際にも参考になる。その概要をまとめたものを表Ⅲ.4.2-1に示す。

表Ⅲ.4.2-1 「再生可能エネルギー源を活用する区域」において事業者が洋上風力発電事業を計画する際の留意事項（国土交通省, 2015 より作成）

項目		内容
洋上風力発電施設の配置	「再生可能エネルギー源を活用する区域」と洋上風車	洋上風車のロータの範囲が「再生可能エネルギー源を活用する区域」の外側に突出することがないようにする。 【解説】 洋上風車のロータは風向に合わせてその向きを変えるため、ロータの向きが変わっても稼働中の洋上風車の範囲が「再生可能エネルギー源を活用する区域」の外側に突出することがないようにする必要がある。そのため、区域境界からタワー中心までの距離R（ヨー旋回範囲の半径）以上を離して計画する。
	洋上風力発電施設と港湾施設等との離隔	航路や泊地、防波堤などの港湾施設等と十分な離隔距離をとって配置する。 【解説】 洋上風力発電施設の事故や被災に起因する港湾施設等の被害を軽減するため、洋上風力発電施設と港湾施設等は十分に離隔をとる必要がある。
	水域施設等との離隔	航路等の水域施設等に対して、洋上風力発電施設が倒壊した場合でも水域施設等には直接の影響が及ばない離隔及び風車後方の乱流範囲の影響を考慮した離隔の両者を満足するよう、離隔距離を確保する。 【解説】 洋上風力発電施設と水域施設等との離隔は、洋上風力発電施設の破壊モードを考慮した倒壊影響距離Hf及び風車後方の乱流範囲2D（D＝ロータ径）の離隔のうち、洋上風力発電施設が水域施設等からより遠くに設置されるものを設定する。
	外郭施設等との離隔	防波堤等の外郭施設、あるいは離岸堤や潜堤などの海岸保全施設に対して、洋上風力発電施設が倒壊しても直接の影響が及ばない離隔距離を確保する。 【解説】 洋上風力発電施設と防波堤等の外郭施設との離隔距離は、洋上風力発電施設が倒壊した場合でも、基礎マウンドを含む外郭施設に、直接の影響が及ばないよう、洋上風力発電施設の破壊モードを考慮した倒壊影響距離Hf以上を確保する。
施工中の安全確保	施工中の事故を防止するよう適切に対策をとる。洋上風力発電施設等の設置工事やその他の関連工事に使用する水域が周辺の航路等の水域施設等を超え、船舶の航行安全に著しい影響を及ぼさないよう、あらかじめ工事区域も考慮した配置計画及び施工計画を策定する。	
船舶交通への配慮	船舶交通に与える影響の評価	具体的な配置計画の策定に際して、船舶交通に影響を及ぼすと懸念される場合は、その影響の度合いを評価し、必要に応じて影響を軽減する措置を講じる。
	洋上風力発電施設が操船者の視覚等に及ぼす影響	洋上風力発電施設が船舶操船時において他の船舶、地形、航行援助施設、その他の物標等の捕捉・識別を阻害する可能性に配慮して配置する。
	船舶用レーダー等の機器に及ぼす影響	洋上風力発電施設の設置及び運用が船用レーダーその他の電子航海機器に支障を与える可能性に配慮して計画する。

#### 4.3 風車の機種選定

風車の機種選定は、想定している定格出力の発電機を販売しているメーカー数社の見積書、風力発電システムの仕様および年間発電電力量等を参考に行う。見積仕様書には実測（予測）した1年間の風況データを提出して年間発電電力量の提示を受けるようにするのが望ましい。

機種を選定にあたって比較表を作成して数値評価する方法もあるので、その項目と留意点の一例を以下に示す。

- a. 見積金額：資金調達と返済方法を考慮して、経済性を評価する。

- b. 風車の仕様と諸元：定格出力、発電機形式、出力制御方式、ハブ高さ、ブレード直径等の仕様と諸元。
- c. 風車の出力特性：提示した風況データに基づく発電電力量と調達価格から、経済性を評価する。発電電力量には h. に示す利用可能率、出力補正係数等の性能保証項目を考慮する。
- d. 自然条件への対策：洋上風車においては、パワートレインの塩害・湿度対策、ブレードの過回転・着氷対策、制御機器・電装品の落雷対策、停電時対策、強風対策等の仕様。参考までに、NEDO 洋上風力発電実証研究で使用されている風車の、塩害等の対策の概要を示す。

「銚子沖：三菱重工製 MWT92/2.4, 2.4MW」

- ・ 除塩対策：ナセルの密閉化および除塩フィルターの設置
- ・ 漏油対策：LO 熱交換器および水冷クーラー
- ・ 翼の劣化対策：翼材エロージョン材 (No.1, フッ素系塗料；No.2, ポリウレタン系塗料 A；No.3, ポリウレタン系テープ+ポリウレタン系塗料 B)

「北九州市沖：日本製鋼所製 J82-2.0, 2.0MW」

- ・ 除塩対策：給気口の装備（防塵・塩害フィルター）、タワーマンドアの気密性向上、開閉可能型発電機冷却排気口、ナセル内/タワーベースへの除湿器設置
- ・ 温度対策：冷却ファン容量アップ、ラジエター熱交換効率の向上、排気口カバー形状の変更
- ・ 錆対策：重耐塩塗装
- ・ 湿度対策：発電機の耐吸湿レベルの向上
- ・ 漏油対策：生分解性グリスの採用

- e. 系統連系：系統連系に伴う電力会社の工事金額は機種によらず同額と仮定するが、系統の容量、発電機型式によっては電圧調整用の機器等が必要になることもあり、その場合は経済性の項で考慮する。
- f. 記録・計測監視設備：運転監視（CMS：Condition Monitoring Systems/SHM Structural Health Monitoring）に必要な記録・計測設備の他に、メーカーまたはメンテナンス会社で遠隔監視が可能な装置を販売している（利用可能率の向上等）。
- g. メンテナンス：年間の交換部品を含む定期修理費用や故障時の対応体制の他に、例えばおおよそ 10 年目のブレードの簡易補修、塗装費用等の大掛かりなメンテナンス費用。
- h. 機械保証・性能保証：機械保証の期間および性能に係る検証の方法と性能保証内容（検証は利用可能率と出力補正係数を考慮して発電電力量を算定）。

正味年間発電電力量 (kWh) = 年間発電電力量 × 利用可能率 × 出力補正係数

$$\text{利用可能率 (\%)} = \frac{\text{年間暦時間} - (\text{故障時間} + \text{点検時間})}{\text{年間暦時間}} \times 100$$

出力補正係数：洋上 95%、陸上平坦地形 95%、陸上複雑地形 90%

- i. 販売実績：同一機種の国内外実績（特に洋上風力発電）。実績が多いほどメンテナンスに習熟し、予備品等の在庫が充実している。

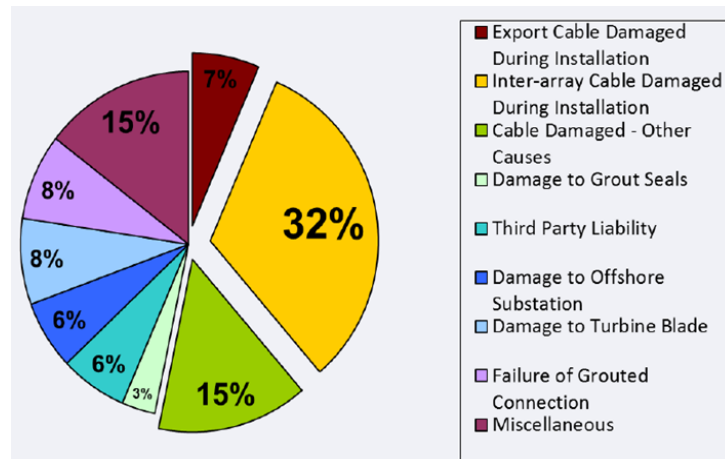
j. 故障・事件事例：同一機種の国内外における故障・事故および対策に係る事例を参考にす  
 る（洋上風力発電に関する主要な故障・事件事例を表Ⅲ.4.3-1に示す）。風車メーカーによる既  
 往の故障・事故内容等に関する情報の開示が必要である。

表Ⅲ.4.3-1 洋上風力発電に関する主要な故障・事件事例

洋上風力発電施設 (国名)	風車/定格出力	発生/修繕 年	故障事故内容
Middelgrunden(DK)	BONUS/2,000kW	2001	変圧器の絶縁不良
		2002	増速機にクラック発生
Yttre Stengrund(SE)	NEG-Micon/2,000kW	2002	ナセル焼損（配線ミス（変圧器⇄発電機））
Tjareborg(DK)	VESTAS/2,000kW (試験機)	2002	ブレードの崩壊（配線ミス）
Blyth(UK)	VESTAS/2,000kW	2003	ブレードの折損
Nysted(DK)	BONUS/2,300kW	2004	高速および中間速シャフトベアリングの交換（72機全てのタービン）
Horns Rev(DK)	VESTAS/2,000kW	2004	発電機の故障/変圧器の絶縁不良
Middelgrunden(DK)	BONUS/2,000kW	2004	増速機にクラック発生（20基中の14基）
Scroby Sands(UK)	VESTAS/2,000kW	2005	増速機（ベアリング；30基全ての風車）、発電機（4基）の不具合
Kentish Flats(UK)	VESTAS/3,000kW	2006	増速機の不具合（30基中12基の風車）
Egmond Aan Zee(NL)	VESTAS/3,000kW	2009	増速機の不具合（36基中36基の風車）
Egmond Aan Zee(NL)	VESTAS/3,000kW	2009	グラウト接合（トランジションピースと支持構造物の接続部）の不具合 (36基中36基の風車)
Burob Bank(UK)	Siemens/3,600kW	2010	翼旋回輪軸受ボルト穴の腐食（全25基の軸受交換：予防保全）
Inner Dowsing(UK)	Siemens/3,600kW	2010	翼旋回輪軸受ボルト穴の腐食（全27基の軸受交換：予防保全）
Lynn(UK)	Siemens/3,600kW	2010	翼旋回輪軸受ボルト穴の腐食（全27基の軸受交換：予防保全）
Gunfleet Sands(UK)	Siemens/3,600kW	2011	翼旋回輪軸受ボルト穴の腐食（全48基の軸受交換：予防保全）
Rhyl Flats(UK)	Siemens/3,600kW	2011	翼旋回輪軸受ボルト穴の腐食（全25基の軸受交換：予防保全）
Alpha Ventus(DE)	AREVA/5,000kW	2011	滑り軸受の温度上昇(全6基の風車)
Teesside(UK)	Siemens/2,300kW	2013	タワーの振動(全27基)
Bard1(DE)	BARD/5,000kW	2014	送変電トラブル(全80基,長期停止)
Kentish Flats(UK)	VESTAS/3,000kW	2014	雷撃によるブレードの損傷
Horns Rev1(DK)	VESTAS/2,000kW	2016	風車ナセル焼損（80基中2基）
Tanet(UK)	VESTAS/3,000kW	2016	エクスポートケーブルの送電不良（ケーブル内部での短絡発生）

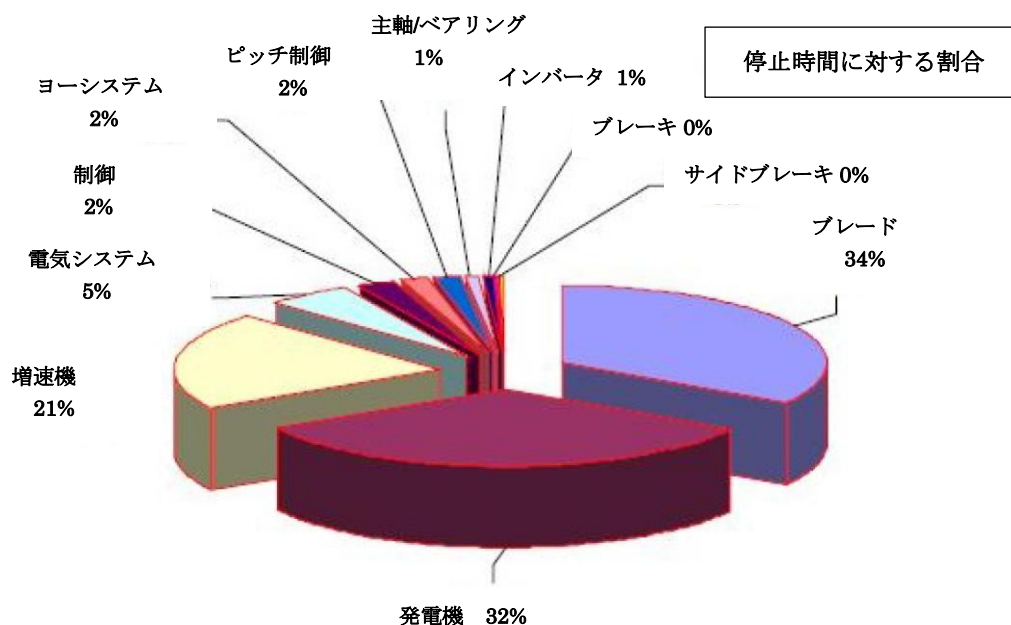
注) DK:デンマーク、SE:スウェーデン、UK:イギリス、NL:オランダ、DE:ドイツ

- 洋上風力発電に係る故障事故の発生部位：海底ケーブル関係の事故が 54%を占め、その中でも建設時のアレイケーブル\*事故（32%）が最も多く、それ以外の部位ではブレードの故障事故とグラウチング\*の接続欠陥が同じ 8%、その他 15%とある（図Ⅲ.4.3-1:Sharma,2011）。



図Ⅲ. 4. 3-1 洋上風力発電に係る故障事故の部位別発生割合（Sharama, 2011）

- パワートレイン関連の故障事故：オランダの洋上風力発電機の故障事故に関する停止時間の集計では、ブレード（34%）、発電機（32%）、増速機（21%）が主なもので、この3種類の部位で停止時間は全体の 87%に達する（図Ⅲ.4.3-2:Dewan,2014）。



図Ⅲ. 4. 3-2 オランダの洋上風力発電機の故障事故の部位別発生割合（Dewan, 2014）

\* アレイケーブル：風力発電機間あるいは風力発電機と洋上変電所を結ぶ海底ケーブル。  
 \* グ라우チング：トランジションピースとパイルの隙間に充填剤を注入・充填すること。

- k. 納品時期：風車、風車タワー、ナセル、ブレード、ボルト、吊治具等の納品時期。
- l. 経済性：見積金額に対する借入金の返済方法、年間発電電力量と調達価格。メンテナンス費用の他に電気主任技術者の委託費用、損害保険費用、各種税金、撤去費用等を考慮して事業期間を通じた収益等で比較する。

なお、自治体等が機種選定を行う際に、機種選定委員会を開催し、評価項目に重みを付け（例えば、経済性は40点、メンテナンスは20点等）、評価項目ごとに機種別に採点（優=5、良=4、可=3、不可=1等）を行い、重み付けと採点を乗じて機種ごとに合計する方法があり、定量的な評価例である。採点方法は、機種選定委員会全体として項目ごとに委員の意見を聴取して一つにまとめる方法と、委員各位が採点して合計する方法等が考えられる。また、採点と内容の確認を行うために、選定委員会を開催して総得点の高い上位数社に対しヒアリングを行い、さらに最終評価上位の2社に対して詳細ヒアリング等を実施し、不明な点を確認し更なる提案を受け、最終的に機種を選定する方法もある。

#### 4.4 支持構造物の選定

海底地形・土質調査結果を踏まえて、候補海域における水深、海底地形、底質・土質等から着床式洋上風力発電の支持構造物を選定する。コストの観点から着床式の限界水深は 50-60m と言われていることから (Dolan,2004 ; 図 II.1.2-2 参照)、ここでは限界水深を 60m として、水深 (30m 以浅/30-60m)、海底地盤 (軟弱地盤:泥,砂泥/硬質地盤:固い砂,礫,岩)、海底地形 (傾斜/平坦) の 3つの要素から支持構造物を選定するフローを図 III.4.4-1 に示す。図中の番号は支持構造物を表しており、以下に選定結果の概要を示すとともに、それぞれの特徴を表 III.4.4-1 に示す。

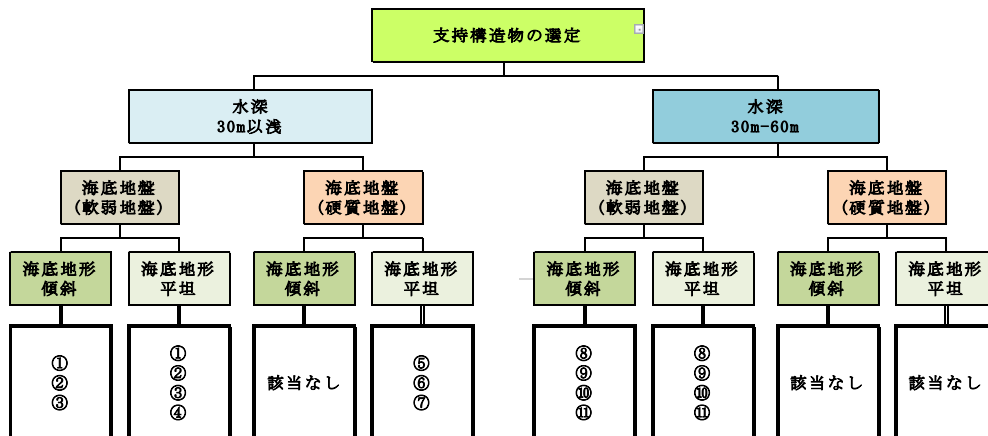


図 III.4.4-1 支持構造物を選定するフロー

##### 【水深：30m 以浅】

1. 海底地盤 (軟弱地盤) /海底地形 (傾斜)
  - ①モノパイル、②ドルフィン、③小型ジャケット
2. 海底地盤 (軟弱地盤) /海底地形 (平坦)
  - ①モノパイル、②ドルフィン、③小型ジャケット、④サクシオン
3. 海底地盤 (硬質地盤) /海底地形 (傾斜)
 

該当なし (掘削し平坦化やならしが考えられるが、コスト増)
4. 海底地盤 (硬質地盤) /海底地形 (平坦)
  - ⑤重力、⑥PC 重力、⑦ハイブリッド (重力+ジャケット/モノパイル)

##### 【水深：30-60m】

1. 海底地盤 (軟弱地盤) /海底地形 (傾斜)
  - ⑧ジャケット、⑨トリポッド、⑩トリパイル、⑪Twisted Jacket
2. 海底地盤 (軟弱地盤) /海底地形 (平坦)
  - ⑧ジャケット、⑨トリポッド、⑩トリパイル、⑪Twisted Jacket
3. 海底地盤 (硬質地盤) /海底地形 (傾斜)
 

該当なし
4. 海底地盤 (硬質地盤) /海底地形 (平坦)
 

該当なし

表Ⅲ. 4. 4-1a 支持構造物の特徴

支持物構造物	特 徴		備 考
	プラス面	マイナス面	
①モノパイル (1本の杭を支持層に設置して外力に抵抗する形式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原則的に建設時に海底の整備が不要である。</li> <li>・構造的にシンプルでコスト(製作, 建設)も安価である。</li> <li>・支持物に使用される鋼材量が少なく、重量が小さい。</li> <li>・海上での施工期間は短い。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大径パイルの打ち込みに大型油圧ハンマ/パイプロハンマが必要である。</li> <li>・油圧ハンマによるパイル打ち込み時に海洋生物に一時的に影響する騒音問題が発生する。</li> <li>・グラウト接合あり。</li> <li>・海潮流流速が速い海域では洗掘対策が必要である。</li> <li>・撤去(土中のパイル)が困難である。</li> <li>・支持構造物の固有振動数は、発電時のロータ回転との共振を避けるため、種々の外部条件を踏まえ、ある範囲に収める必要がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・60mを超える水深に設置可能なモノパイルが開発中である。</li> <li>長さ:&gt;80m</li> <li>直径:&gt;9m</li> <li>重量:&gt;1,050t</li> <li>(EEW Special Pipe Construction GmbH)</li> </ul>
②ドルフィン (複数の直杭または斜杭を支持層に設置し、杭上部の天端(コンクリート)で一体化した形式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原則的に建設時に海底の整備が不要である。</li> <li>・日本では瀬棚港/酒田港で実績があり、構造的にシンプルでコスト(製作, 建設)も安価である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造的に上部のコンクリートのプレキャスト化はタワーの設置精度上、困難である。</li> <li>・突出性の高い杭基礎の場合には、直杭のみでは水平変位量が大きく、斜杭を採用するケースもある。その場合、全方向の作用力に対応するため杭の数が増える(海上での施工期間が長くなりコスト増)。</li> <li>・大径パイルの打ち込みに大型油圧ハンマ/パイプロハンマが必要である。</li> <li>・油圧ハンマによるパイル打ち込み時に海洋生物に一時的に影響する騒音問題が発生する(打ち込みパイル数 4本または8本)。</li> <li>・海潮流流速が速い海域では洗掘対策が必要である。</li> <li>・撤去(土中のパイル)が困難である。</li> </ul>	
③小型ジャケット (ジャケットと基本的には同じ形式であるが、より小型化された形式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モノパイルに比して剛構造であり、地盤からの影響や波浪等の外力を受けにくい。</li> <li>・風や波がもたらす水平荷重や曲げモーメントに効果的に抗する。</li> <li>・軽量化が可能である。</li> <li>・主要な鋼構造部は陸上で製作できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造が複雑で、特殊な施工技術が必要である。</li> <li>・テンプレートを要する先行杭方式等を考慮すると施工期間は比較的長い。</li> </ul>	
④サクシオン (底板のない鋼製またはRCの円筒状のケーソン内の海水を強制排出することにより発生する基礎内外の水圧差を利用して、海底地盤中に根入れする形式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・基本的には建設時の海底整備が不要である。</li> <li>・騒音問題は少ない。</li> <li>・基本的には保守点検作業が少ない。</li> <li>・モノパイルに比較して鋼材量が25%減となる。</li> <li>・捨石マウンド, 床掘・置換が不必要なため構造断面が小さくでき工期が短縮化される。</li> <li>・根入れにより基礎座面の地盤の摩擦力と基礎背面の土圧が抵抗力となって、滑動に対する抵抗力が十分に確保可能である。</li> <li>・グラウト接合なし。</li> <li>・設置作業はリフト1基あるいは台船により可能である。</li> <li>・撤去は比較的容易である。</li> <li>・打ち込み用パイルは不要である。</li> <li>・洗掘の問題はほとんどない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・海底地盤の制約を受ける(岩質は不向き)。</li> <li>・洋上風力発電の建設工法としては実績が少ない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Fred Olsen &amp; Co (ノルウェー)</li> </ul>



表Ⅲ. 4. 4-1b 支持構造物の特徴

支持物構造物	特 徴		備 考
	プラス面	マイナス面	
⑤重力 (構造物を支持層へ沈設することにより、上部の構造物に作用する外力を地盤に伝える形式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・支持構造は陸上で製作されるので、設置期間が短い(海底面の前準備は時間を要す)。</li> <li>・保守点検作業が少ない。</li> <li>・材料の利用可能な範囲が広い。</li> <li>・撤去が可能である。</li> <li>・適切なかぶり厚等を設計し施工すれば海洋におけるコンクリートの耐久性は高いので、長寿命である。</li> <li>・水深の深い場所や大型風車の利用に適している。</li> <li>・岩の多い海底や砂地や泥などの海底にも設置が可能である。</li> <li>・地震に対する耐久性が強い。</li> <li>・コンクリートの世界市場が鉄鋼の世界市場と比べ安定しているため、価格が比較的安定している。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・海底の平坦度を確認するための調査・整備が必要である。</li> <li>・浚渫、捨石、根固等による海底マウンドの製作が必要である。</li> <li>・マウンド製作のために陸上ヤードが必要となる。</li> <li>・重量/大きさが大のため輸送が困難である。</li> <li>・油圧ハンマと比較して騒音問題は少ないが、海底面のマウンド製作時には騒音がある。</li> <li>・設計のコンセプトにばらつきがあり、標準化が遅れている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・深海用(水深50m)の重力式(バラストチャンパー付)が研究されている。(Mathis, 2006/2007)</li> </ul>
⑥PC重力 (重力式と基本的には同じ形式であるが、コンクリートが引張力の大きいPC構造である形式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・支持構造は陸上で製作されるので、設置期間が短い(海底面の前準備は時間を要する)。</li> <li>・保守点検作業が少ない。</li> <li>・材料の利用可能な範囲が広い。</li> <li>・PC重力はRC重力に比し、引張力が大きい。</li> <li>・撤去は可能である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・海底の平坦度を確認するための調査・整備が必要である。</li> <li>・浚渫、捨石、根固等による海底マウンドの製作が必要である。</li> <li>・マウンド製作のために陸上ヤードが必要となる。</li> <li>・重量/大きさが大のため輸送が困難である。</li> <li>・油圧ハンマと比較して騒音問題は少ないが、海底面のマウンド製作時には騒音がある。</li> </ul>	
⑦ハイブリッド重力 (重力式のマウンド構造物上にジャケットを固定した組み合わせ形式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・剛構造であり、地盤からの影響や波浪等の外力を受けにくい。</li> <li>・重力式に比較して軽量化が可能である。</li> <li>・重力とジャケット一体支持構造は陸上で製作されるので、設置期間が短い(海底面の前準備は時間を要す)。</li> <li>・陸上でのプレキャスト化による海上作業の短縮化が可能な重力式と波荷重の低減が期待できる。</li> <li>・撤去は比較的容易である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・海底の平坦度を確認するための調査・整備が必要である。</li> <li>・浚渫、捨石、根固等による海底マウンドの製作が必要である。</li> <li>・マウンド製作のために陸上ヤードが必要となる。</li> <li>・重量/大きさが大のため輸送が困難である。</li> <li>・油圧ハンマと比較して騒音問題は少ないが、海底面のマウンド製作時には騒音がある。</li> </ul>	重力とジャケットのハイブリッド
⑧ジャケット (鋼管トラスを鋼管杭で海底に固定する形式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モノパイルに比して剛構造であり、地盤からの影響や波浪等の外力を受けにくい。</li> <li>・風や波がもたらす水平荷重や曲げモーメントに効果的に抗する。</li> <li>・主要な鋼構造部は陸上で製作できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造が複雑で、特殊な施工技術が必要である。</li> <li>・製造コストは比較的高い。</li> <li>・テンプレートを要する先行杭方式等を考慮すると施工期間は比較的に長い。</li> </ul>	
⑨トリポッド (モノパイルとジャケットのハイブリッド形式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モノパイルと比べて、部材の直径が小さく済む。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・海底の整備が必要である。</li> <li>・構造が複雑である。</li> <li>・製造コストが比較的高い。</li> <li>・施工期間が長い。</li> </ul>	
⑩トリパイル (モノパイルの発展形で、3本の杭を支持層に設置する形式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原則的に、建設時に海底の整備が不要である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大径パイルの打ち込みに大型油圧ハンマ/パイプロハンマが必要である。</li> <li>・支持物に使用される鋼材量が多く、重量が大きい。</li> <li>・油圧ハンマによるパイル打ち込み時に海洋生物に一時的に影響する騒音問題が発生する(打ち込みパイル数 3本)。</li> <li>・グラウト接合あり。</li> <li>・海潮流流速が速い海域では洗掘対策が必要である。</li> <li>・撤去(土中のパイル)が困難である。</li> </ul>	
⑪Twisted Jacket (ジャケットの発展形で、3本の斜杭を支持層に設置する形式)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・モノパイルに比して剛構造であり、地盤からの影響や波浪等の外力を受けにくい。</li> <li>・風や波がもたらす水平荷重や曲げモーメントに効果的に抗する。</li> <li>・軽量化が可能である。</li> <li>・コストとリスクの低減化が図られる。</li> <li>・施工期間が短い(作業員が少ない、テンプレートが不要)。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・構造が複雑で、特殊な施工技術が必要である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Keystone Engineering Inc. (アメリカ)</li> </ul>

我が国における着床式洋上風力発電施設は、2017年2月現在、6箇所存在するが、支持構造は4種類である。すなわち、北海道瀬棚港（風海鳥）と山形県酒田港（JRE 酒田風力発電所、旧サミットウィンドパワー酒田発電所）の「ドルフィン式」、茨城県鹿島港（ウィンド・パワーかみす第1洋上発電所/ウィンド・パワーかみす第1洋上発電所）の「モノパイル式」、NEDO 洋上風力発電実証研究の銚子沖の「重力式」および北九州市の「ハイブリッド重力式」である。ここでは、これら支持構造の概要を示す。

### 「ドルフィン式」

ドルフィン式は、北海道瀬棚港（風海鳥）と山形県酒田港（JRE 酒田風力発電所）に建設されている洋上風力発電施設の支持構造である。ここで設置されたドルフィン式支持構造物の特徴を以下に掲げるとともに、その概観図を図Ⅲ.4.4-2 に示す。

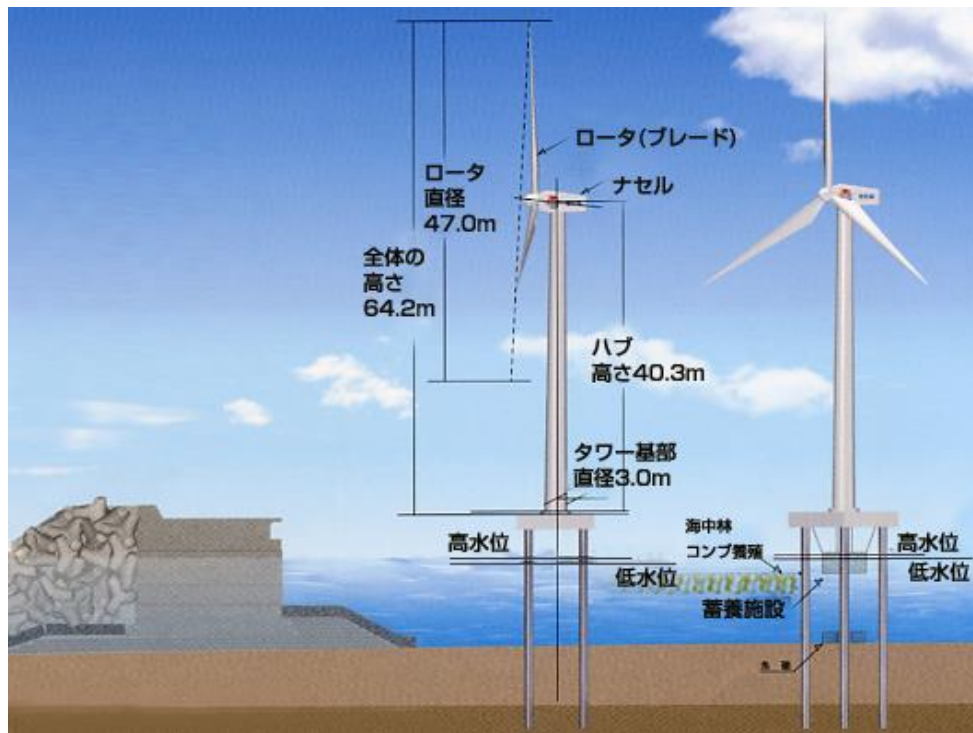
#### 「支持構造物の特徴」

##### ✓ 瀬棚港

- ・ 直杭は4本（長さ27m、直径1.1m、肉厚14mm）
- ・ 上部コンクリート（幅または径10m、厚さ2m）

##### ✓ 酒田港

- ・ 直杭は8本（長さ27m、直径1.0m、肉厚14mm）
- ・ 上部コンクリート（幅または径12m（八角形）、厚さ2.5m）



図Ⅲ.4.4-2 ドルフィン式支持構物

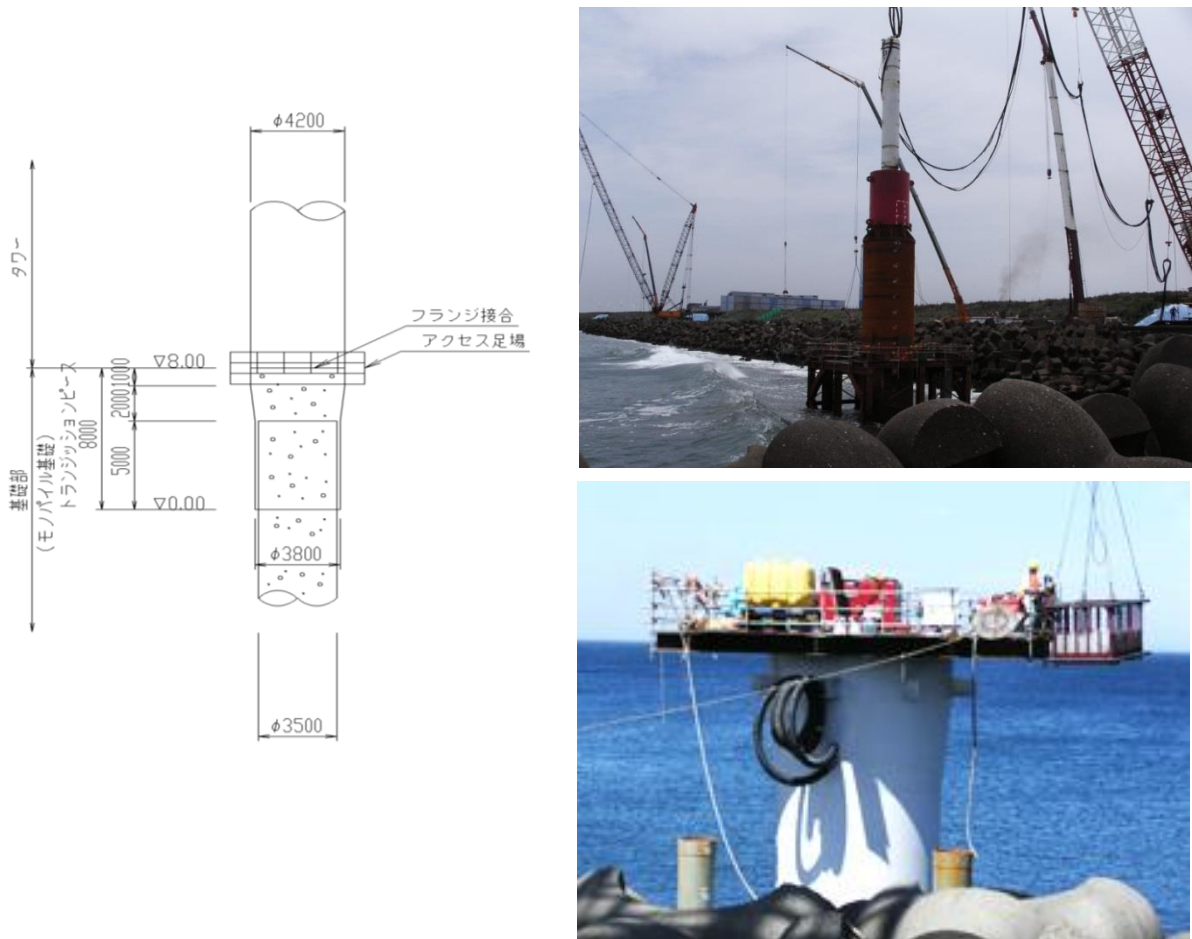
(せたな町 HP : <http://www.town.setana.lg.jp/kazamidori/article30.html>)

### 「モノパイル式」

モノパイル式は、茨城県鹿島港（ウィンド・パワーかみす第1洋上発電所/ウィンド・パワーかみす第2洋上発電所）に建設されている洋上風力発電施設の支持構造である。ここで設置されたモノパイル式支持構造物の特徴を以下に掲げるとともに、その概観図を図Ⅲ.4.4-3に示す。

#### 「支持構造物の特徴」

- ・モノパイルの仕様は直径 3.5m、肉厚 44mm、長さ 24.5m（重量:約 100t）。
- ・ジョイントスリーブ（トランジションピース）の長さは 8m で、タワー（直径 4.2m）と 60 N のグラウド接合。
- ・ジョイントスリーブ上部の応力の最小位置に電源ケーブル用の開孔。
- ・ジョイントスリーブ下部はモルタル流出防止のためのゴムリングを設置。



図Ⅲ.4.4-3 モノパイル式の概念図（青木, 2009）と写真（小松崎都市開発, 提供）

## 「重力式」

重力式は、NEDO 洋上風力発電実証研究の銚子沖に建設されている洋上風力発電施設の支持構造である（本方式の採用理由はⅢ.6.2 節（1）基礎工事 2）重力式を参照）。ここで設置された重力式支持構造物の特徴を以下に掲げるとともに、その概観図を図Ⅲ.4.4-4 と図Ⅲ.4.4-5 に示す。

### 「支持構造物の特徴」

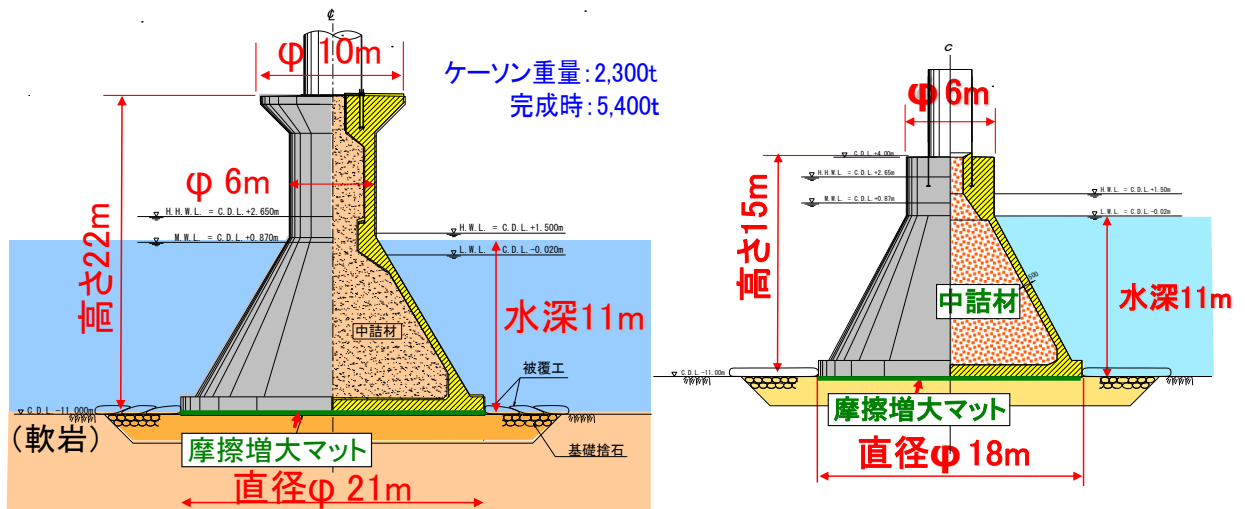
- ・三角フラスコ形状による波力の低減
- ・プレストレスト鉄筋コンクリート壁によるひび割れ防止と耐久性向上
- ・躯体の軽量化による起重機船を用いた急速施工

### 「使用材料の特徴」

- ・高比重中詰材（銅水砕スラグ： $23\text{kN/m}^3$ ）
- ・摩擦増大マット（アスファルトマット  $\mu=0.75$ ）



図Ⅲ.4.4-4 銚子沖サイトにおける重力式支持構造物



図Ⅲ.4.4-5 銚子沖サイトの風車（左図）および観測タワー（右図）の重力式支持構造物

### 「ハイブリッド重力式」

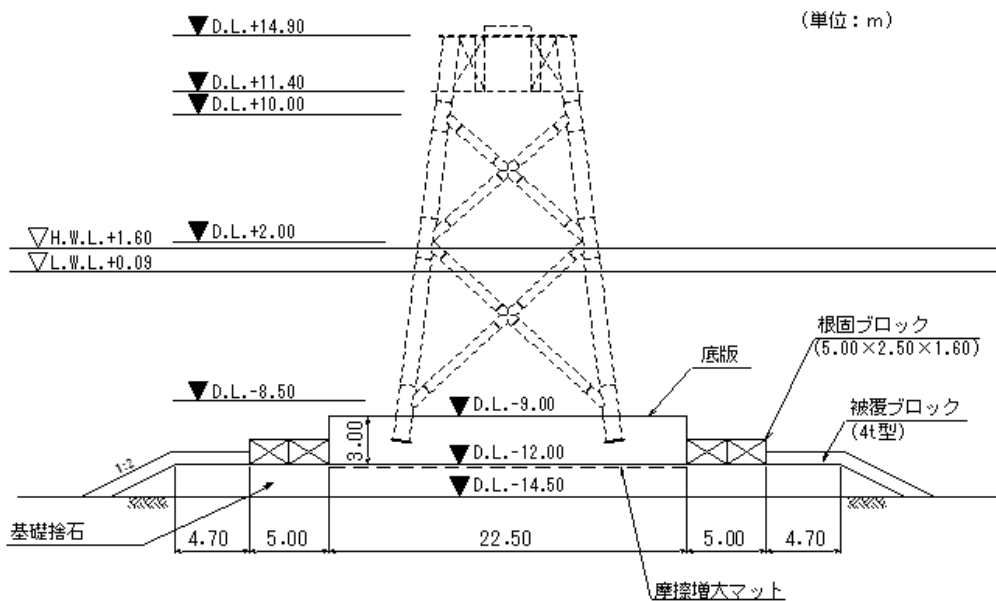
ハイブリッド重力式は、重力式とジャケット式を組み合わせたもので、NEDO 洋上風力発電実証研究の北九州市沖に建設されている洋上風力発電施設の支持構造である（本方式の採用理由はⅢ.6.2 節（1）基礎工事 2）重力式を参照）。ここで設置されたハイブリッド重力式支持構造の特徴を以下に掲げるとともにその概観図を図Ⅲ.4.4-6 と図Ⅲ.4.4-7 に示す。なお、風車用と観測タワー用の支持構造の仕様は同一である。

#### 「支持構造物の特徴」

- ・波荷重の低減、設置にあたっての海上作業の縮小化および構造の靱性の確保  
 （陸上でのプレキャスト化による海上作業の短縮化が可能な重力式と波荷重の低減、構造の靱性の向上が可能なレグ材を CFT 構造（コンクリート充填鋼管構造）としたジャケット構造の採用）
- ・施工方法は、重力式と変わらない。



図Ⅲ.4.4-6 北九州市沖サイトにおけるハイブリッド重力式支持構造物  
 右図は底板コンクリートの打設状況



図Ⅲ.4.4-7 北九州市沖サイトにおけるハイブリッド重力式支持構造物設置断面図

## 4.5 経済性の検討

建設コスト、運転保守費等から発電原価を算出し、概略の経済性評価を行う。

### (1) 建設コストと運転保守費

#### 1) 建設コスト

洋上風力発電システムの建設に必要なコストは、風車本体、電気設備、土木工事（海底地盤の造成、支持構造物等）、風車据付工事、電気工事の費用等から構成される。また、連系する系統の状況によっては、別途、電力会社への工事費負担金が必要となる。

ヨーロッパでは、洋上風力発電の建設コストは陸上のそれと平均しておおよそ2倍であるが（Duwind,2001）、近年、施設の大規模化、遠距離化により建設コストは上昇傾向にある。建設コストには一般的にかなりの幅があるが、その原因としては、以下の項目等があげられる。

- ・導入規模の違い
- ・設置海域の立地条件（水深,離岸距離）の違い
- ・支持構造物の違い
- ・インフラ設備（特殊作業船,港湾等）の違い

今後、市場の拡大、設計ツールの整備、情報の普及等により競争原理が働く環境が整い、導入規模が拡大すれば、建設費のコストダウンは可能と考えられる。

#### 2) 運転保守費

運転保守にかかる費用としては、風車本体の点検費用、電気設備関係の点検費用、損害保険料、税金等がある。風車本体の点検費用はメーカー（設置業者）あるいはメンテナンス会社等との保守契約の費用で、設置台数、立地条件によっても大きく異なる。我が国では沖合での洋上ウィンドファームの実績がないことから運転保守費を示すことは難しいが、一つの参考例として、2014年3月7日に行われた調達価格等算定委員会で示された運転管理費（運転維持費）は2.25万円/kW/年となっている。

### (2) 発電原価と経済性

#### 1) 発電原価の算出法

キャッシュフローにより詳細に検討する必要があるが、基本設計の段階では発電原価により洋上風力発電の概略の経済性評価を行う（キャッシュフローによる評価はIII.10.1項を参照）。

一般的に、発電原価は年間経常費を年間発電量で割ったもので算出される。年間経常費は、固定費と運転保守費等の変動費とから成り、固定費の算出方法には、資本回収法によるものと、減価償却費および平均金利等の和として求める方法とがある。以下では、資本回収法による算出方法について述べる。

資本回収法では、固定費は建設コストと年経費率の積で表され、発電原価は次式で計算される（税金は考慮していない）。

$$\text{発電原価 (円/kWh)} = \frac{\text{建設コスト} \times \text{年経費率} + \text{運転保守費}}{\text{正味の年間発電電力量}}$$

$$\text{年経費率} = \frac{r}{1 - (1 + r)^{-n}} \quad r: \text{金利}, \quad n: \text{耐用年数}$$

Ⅲ.4.3 項に示しているように、上式の「正味の年間発電電力量」は、年間発電電力量、利用可能率 (Availability) および出力補正係数 (発電電力量のロス割合) から導かれる。年間発電電力量は、1年間の特別風速データと風車のパワーカーブ (性能曲線) から算出されるもので、いわゆる理論発電電力量である。利用可能率と出力補正係数もⅢ.4.3 項の通りであるが、利用可能率は風車メーカーから提示があるもので、洋上風力発電の場合の実績値は 80-95%の間にあると言われている (Becki,2011;Tavner,2014)。また、出力補正係数は、以下の a.から i まで掲げた発電量の損失項目を勘案した係数で、洋上の出力補正係数が陸上の平坦地形のそれと同じとみなせば、0.95 となる (NEDO,2008)。

なお、洋上風力発電事業者においては、風車の故障・事故による停止時間に対して、当該海域の波浪、風速等の条件を踏まえた作業船や大型起重機船等の稼働率について十分に検討・精査し、適正な利用可能率を設定することが重要である。

#### a. ウェイクの影響

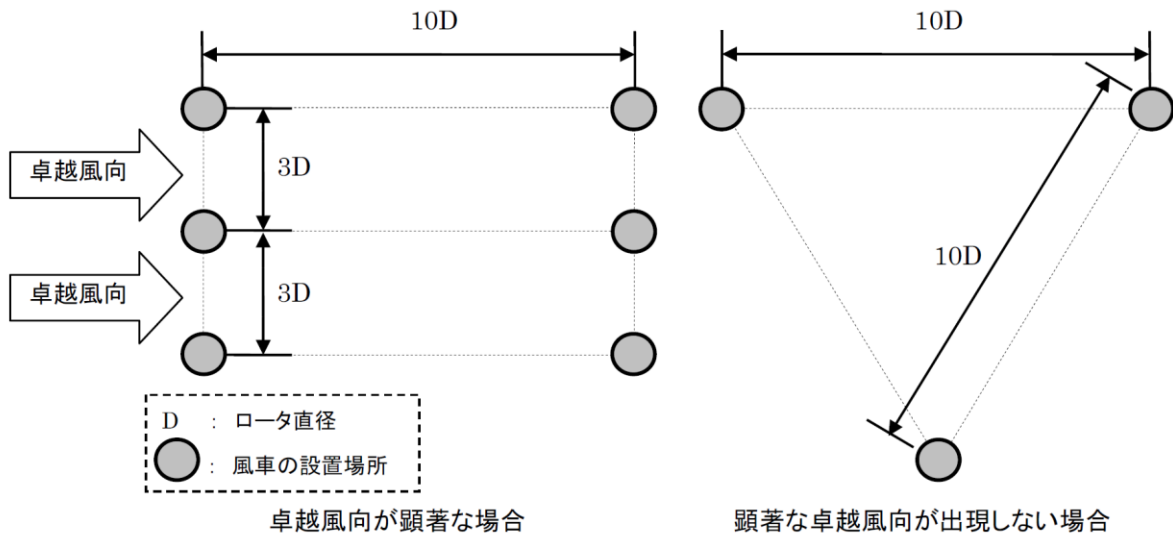
風車の風下に形成される風況の乱れをウェイクという。風車を複数台設置する場合には、風況観測で得られた卓越風向や方位別エネルギー取得率を考慮し、ウェイクの影響が少なくなるような配置をベースとする。ウェイク領域に風車を設置した場合、エネルギー取得量は大きく減少する。風車で生じるウェイク効果を総合的に理解しておくことが、以下にあげる点において極めて重要である。

◎アレイ内の風車のレイアウトを最適化し、アレイからのエネルギー収率を最大化する。

◎ウィンドファームの事業者によるエネルギー出力の予想精度を高め、それによって事業のリスクを減らし、バンカビリティを高める。

NEDO風力発電導入ガイドブック (2008年2月改訂第9版) では、ウェイク領域を勘案して、卓越風が顕著に出現する地域に対して10D (風下方向) × 3D (風向と直角方向) の風力発電施設間隔を目安に配置することが多いとしている (図Ⅲ.4.5-1) (D:ロータ直径)。洋上風車の最適配置を最終決定する際には風況シミュレーションを実施することが多いが、上記の目安は概略の配置計画を検討する上で有効である。

ウェイク効果のモデリングは複雑であり、正確にモデリングを行うことは難しい。ウェイク効果の様々な側面を計算するために、多数の流れモデルがある。わずか数秒で実行できる単純な分析モデルから、実行に数週間を要し大変高額な費用がかかるモデルまで、その複雑さにはかなりの幅がある。



図Ⅲ. 4. 5-1 風車の配置方法の例 (NEDO, 2008)

b. 風速の推定誤差

候補海域において、洋上風況観測タワーを設置し、海上風速の実測値をもとに発電電力量を推定することが望ましいが、それには大きなコストがかかる。そのため、浮体式の観測施設や風況シミュレーションにより海上風速を求めた場合には、推定誤差を検討する必要がある。

c. 風速の経年変動

風速は経年変化するため、1年間だけの風況観測データに基づいて推定される年間発電電力量は、近傍気象官署等の10年以上の長期データから推定される年平均風速からの発電量とは異なる。そこで、近傍の気象官署等の風況観測を行った年の風況と長期データとを比較して、風況観測データを事業期間を通じた準平年風速に換算して、年間発電電力量を推定するのが望ましい。さらに、予測誤差や近傍の気象官署等との相関が低い場合等は、気象官署等の年平均風速の標準偏差から超過確率<sup>1</sup>を設定して事業性を評価することもある。

d. ハブ高の風速への換算誤差

ハブ高よりも低い高度で計測された風況データは、ハブ高への換算のために複層観測に基づくn値で換算する方法やシミュレーションを行って考慮する必要があるが、誤差が含まれるので注意を要する。

<sup>1</sup> 超過確率 50%の風速とは、その地点で将来 50%の確率でその値以上になる風速で、準平年風速がその風速となる。例えば、超過確率 75%の年平均風速は将来 4年に3回(確率 75%)は上回るが1回は下回る風速で、準平年風速と標準偏差から求めることができ、準平年風速より低い風速となる



e. 発電ロス・所内ロス・送電ロス

風力発電システムのヨー制御やピッチ制御機器の運転や系統連系の電気設備、送・配電線のロスにより、発電量は低減する。制御設備のモータの容量や変圧器の仕様、送・配電線のケーブル太さや距離等の設備仕様により、ロスを推定する必要がある。

f. 風向変動に伴うヨー制御

風向変動はヨー制御を行う時間間隔より短周期で起こることもあるので、ブレードが風向に対して最適な方向に向いていないときには、発電量は低下する。

g. ブレードの劣化やキズ・汚れ

塩分等の付着によるブレードの経年劣化やキズ・汚れに伴い、ブレード表面に風の乱れが生じるために発電量が低減するので、考慮する必要がある。

h. 強風の発生

カットアウト風速以上の強風の出現に伴い風車の運転は停止するので、発電量が低減する。出力曲線ではカットアウト風速として考慮されるが、風車によってはカットアウトの条件が短期間の突風等による場合や、停止頻度を抑えるために復帰風速を低く設定している場合もある。そのため、仕様上のカットアウト風速より低い10分平均風速でも停止していることがある。

i. 電力会社からの解並列依頼

電力会社の送・配電線および変電所等の工事に伴う電力会社からの系統連系の解・並列依頼や系統の事故により発電できない期間が発生するので、電力会社に工事実績や今後の工事計画等を確認して、年間の停止時間として考慮するのが望ましい。

なお、本損失項目は風車メーカーから提示される利用可能率に織り込まれている場合がある。

## 2) 経済性

経済性試算の検討条件の一例を表Ⅲ.4.5-1に、また、本条件で計算した年平均風速と発電原価の関係を図Ⅲ.4.5-2と図Ⅲ.4.5-3にそれぞれ示す。この仮定の場合、調達価格(売電単価)を36円/kWhとすれば、洋上風力発電の損益分岐点としては、建設コスト50万円/kWで年平均風速約6.7m/s、建設コスト70万円/kWで年平均風速約7.7m/sが一つの目安と言えるが、風車の出力特性、風速出現率分布、金利等の条件で採算性は変わるため、個別に詳細な検討が必要となる。

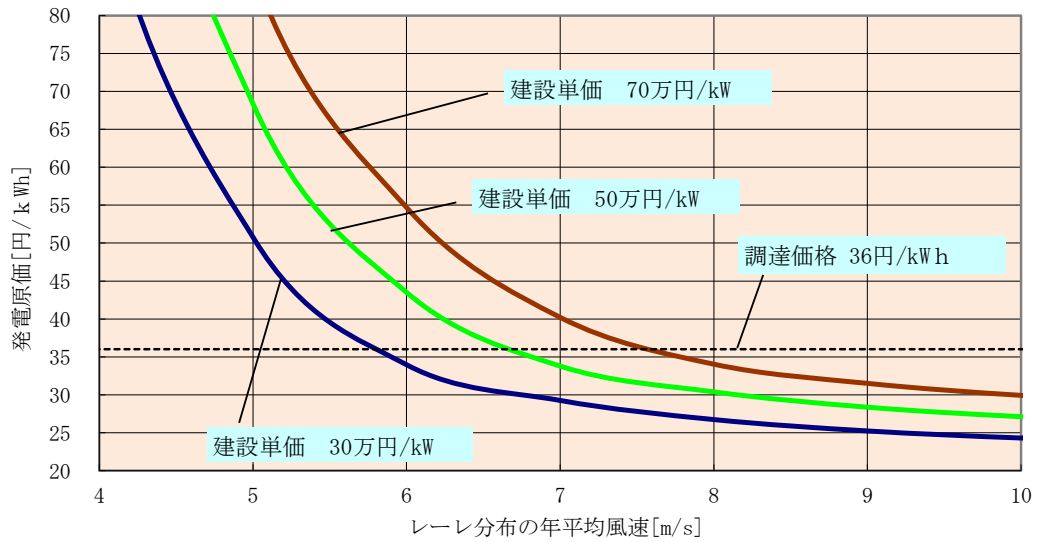
上述のように、洋上風力発電の導入の目安として、年平均風速が概ね7m/sの海域では建設コストが50万円/kWと試算されたが、そのためには欧州のような洋上風力発電のコスト低減に向けた様々な方策を参考に、我が国でも洋上風力発電の経済性が成り立つよう官民をあげて取り組む必要がある<sup>※1</sup>。

---

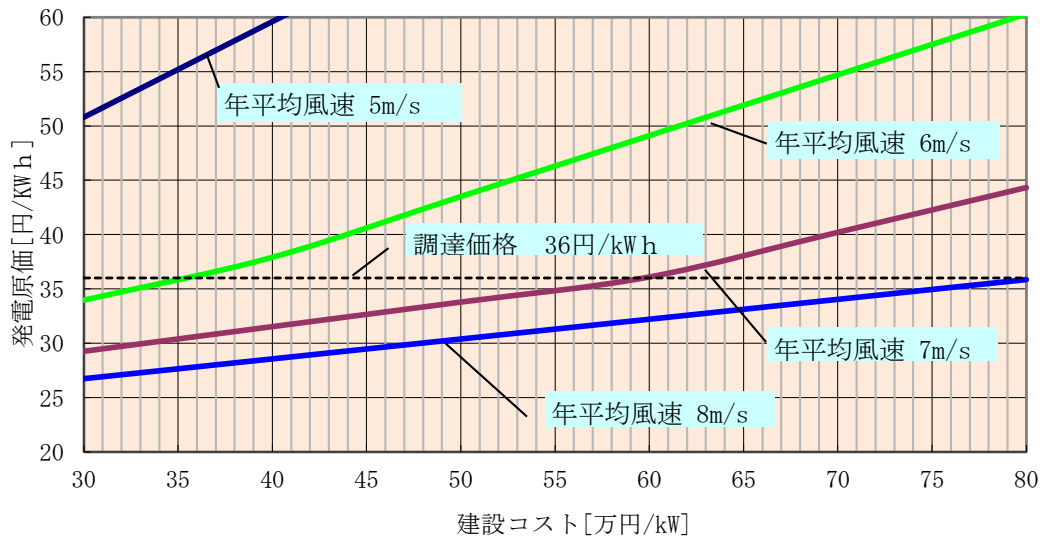
<sup>※1</sup> Ⅱ.3.1項(2)で記したように、イギリスの2010年時点における洋上風力発電の発電原価は149～191£/MWh(19.4～24.8円/kWh;130円/£(2016年11月のレート))で、我が国の洋上風力発電の調達価格を下回っている。しかしイギリスでは、今後、洋上風力発電の導入海域はさらに沖合に展開する計画となっているため、発電原価の低減が大きな課題となっている。その対策として、「技術革新の加速」および「サプライチェーンの構築」が掲げられている。菊地・石原(2014)によれば、我が国でのコスト低減に寄与する大きな要因は、建設船及び港湾の整備とともに、風車の大型化、支持構造物の最適化、運転維持管理費の低減であるとされているが、最も基本的な条件は風況の良好な導入サイトの選定である。

表Ⅲ. 4. 5-1 経済性の試算条件

項目	試算条件
風車(定格出力)	2,500kW
年平均風速	4m/s~10m/s (1m/s間隔)
建設コスト	30万円/kW、50万円/kW、70万円/kW
運転保守費 (撤去・解体費を含む)	6,250万円/年
金利	4%
耐用年数	17年
利用可能率	90%
出力補正係数	90%



図Ⅲ. 4. 5-2 年平均風速と発電原価の関係 (例)



図Ⅲ. 4. 5-3 建設コストと発電原価の関係 (例)

## 5 実施設計

洋上風力発電に係る設備設計、工事設計および工事計画の概要を示す。なお、実施設計にあたっては、洋上風力発電事業期間における地球温暖化による気象・海象条件の変化や地震も考慮した検討が必要である。

### 5.1 設備設計

#### (1) 洋上風力発電システム設計

導入風車の仕様に対して、国内の法的基準を満たすように、材料の強度や許容範囲、電力会社との系統連系、必要な設備に関する以下の事項について照査、検討を行う必要がある。

- ・一般仕様に関する事項：風力発電システム仕様、規格摘要、環境条件
- ・運用計画に関する事項
- ・運用・保守・管理に関する事項：遠隔監視制御装置・表示盤仕様
- ・安全装置に関する事項
- ・保証に関する事項

従来、発電用風力発電設備のうち、高さが15mを超える風車を支持する工作物については、建築基準法および電気事業法それぞれにおいて安全規制が課されていた。しかし風力発電の導入促進を図るために、建築基準法令と同等の規制が課されることを前提に、2014年4月に建築基準法の規制対象から除外され、電気事業法での安全規制に一本化されることとなった。それに伴い、発電用風力設備の技術基準の解釈が改正され、建築基準法の安全規制が取り込まれた。そのため、それ以降に設置する風車は電気事業法における構造安全性確保に関する審査を受ける必要がある。

なお、建築基準法に基づく特定支持物に対する構造強度に係る基準を満足する民間規格である土木学会「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」（2010年版）の規定についても取り込まれており、当土木学会指針に基づき適切に施設される一般的なものについては、構造上安全であるとみなされている。

概要は本節(4)項「省令で定める技術基準」を参照のこと。

#### (2) 電気設備設計

洋上風力発電設備工作物の電気設備は、陸上風力発電と同様に以下の法規や基準が適用される。

- ・電気事業法
- ・電気事業法施行令
- ・電気事業法施行規則
- ・電気設備に関する技術基準
- ・発電用風力設備に関する技術基準
- ・電気設備に関する技術基準の解釈
- ・発電用風力設備に関する技術基準の解釈
- ・電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン
- ・その他関係法令、条例および規格

風力発電システムの電気設備には、電気事業法の定めにより電気設備の保安確保のため、最低限の維持基準として「電気設備に関する技術基準」、「発電用風力設備に関する技術基準」等の省令が公布されている。なお、系統に連系することを可能とするために必要となる要件のうち保安確保に係る部分は、「電気設備の技術基準の解釈」に盛り込まれている。また電圧、周波数等の電力品質を確保していくための事項および連絡体制等についての考え方は、「電力品質確保に係る系統連系技術要件ガイドライン（平成 25 年改訂）」にて整理されている。上記の法令や基準を補足するものとして以下の規程や指針があり、これらについても十分配慮して設備設計を進めることが重要である。

- ・ 発電規程（JESC E0003（2017））
- ・ 風力発電規程（JESC V0001（2011））
- ・ 高圧受変電設備規程（JESC E0013（2014））
- ・ 系統連系規程（JESC E0019（2016））および追補版（2017 年、2018 年）
- ・ 変電所等における電気設備の耐震設計指針（JESC E0001（2010））

### (3) 電気事業法

洋上風力発電システムは発電設備となるので、陸上風力発電と同様に、発電事業・電気事業に係る規制や電気工作物（一般用および事業用）の定義や保安規程を定めている電気事業法に基づかななくてはならない。また、風力発電設備建設に必要な手続きについても「電気事業法」、「電気事業法施行令」および「電気事業法施行規則」に定められている。条文の概要および許認可について表Ⅲ.5.1-1 に示す。なお、電力システム改革の 3 本柱（①広域系統運用の拡大/広域的運営推進機関の設立、②小売及び発電の全面自由化、③法的分離の方式による送配電部門の中立性の一層の確保）それぞれに係る電気事業法改正法案が成立している（2013 年 11 月 13 日、2014 年 6 月 11 日および 2015 年 6 月 17 日）。

表Ⅲ.5.1-1 電気事業法の関連条文と許認可に関する一覧

電気事業法（及び電気事業法施行規則）		許認可申請/届出	許認可権者	備考
法第3条 事業の許可	一般送配電事業を営もうとする者は、経済産業大臣の許可を受けなければならない。	○	○ (経済産業大臣)	当該経済産業局に申請/届出
法第28条の11 加入義務等	電気事業者は、電力広域的運営推進機関（以下、推進機関という）にその会員として加入しなければならない。 第2条の2の登録を受けて小売電気事業を営もうとする者、第3条の許可を受けて一般送配電事業を営もうとする者、第27条の4の許可を受けて、送電事業を営もうとする者、第27条の13条第1項の届出をして特定送配電事業を営もうとする者及び第27条の27第1項の届出をして発電事業を営もうとする者は、その登録、許可の申請または届出に先立って、推進機関に加入する手続きをとらなければならない。			電力広域的運営推進機関への加入手続き
法第38条 則第48条 電気工作物の区分	一般用電気工作物…他の者から電気供給を受ける需要設備で受電電圧が600V以下のもの 事業用電気工作物…一般用電気工作物以外の電気工作物 自家用電気工作物…電気事業の用に供する電気工作物及び一般用電気工作物以外の電気工作物			
法第39条 事業用電気工作物の維持	事業用電気工作物を設置する者は、事業用電気工作物を主務省令で定める技術基準（電気設備、発電用風力設備）に適合するように維持しなければならない。			
法第42条 則第50条、第51条 保安規程	事業用電気工作物を設置する者は、工事、維持及び運用に関する保安を確保するため、保安規程を定め、事業用電気工作物の使用の開始前に、主務大臣に届け出なければならない。	○	○ (経済産業大臣)	当該経済産業局に申請/届出
法第43条 則第52条～第55条 主任技術者	・事業用電気工作物及び2,000kW以上の自家用電気工作物である風力発電所の工事、維持及び運用に関する保安の監督をさせるため、電気主任技術者の選任の届け出が必要となる（2,000kW未満でも可）。 ・20kW以上2,000kW未満の自家用電気工作物である風力発電所の工事、維持及び運用に関する保安の監督をさせるため、経済産業大臣（事業場が一の産業保安監督部の管轄区域内のみにある場合は、その所在地を管轄する産業保安監督部長）による電気技術者の外部委託承認を行うべきである。	○	○ (経済産業大臣)	当該経済産業局に申請/届出
法第47条、第48条 則第62条、第65条 工事計画	500kW以上の風力発電所の設置又は変更の工事をしようとする者は、工事の計画を主務大臣に届け出なければならない。	○	○ (経済産業大臣)	当該経済産業局に申請/届出
法第51条 則第73条の2～9 使用前安全管理検査	500kW以上の風力発電所を設置する者は、その使用の開始前に当該事業用電気工作物について自主検査を行い、その結果を記録し、これを保存しなければならない。使用前自主検査を行う時期に、使用前自主検査の実施に係る体制について、経済産業大臣の登録を受けた者が行う審査を受けなければならない。	○	○ (経済産業大臣)	当該経済産業局に申請/届出
法第53条 則第87条・第88条 自家用電気工作物の使用の開始	自家用電気工作物を設置する者は、使用開始後遅滞なく、主務大臣に届け出なければならない。（工事計画を届けた場合は不要）	○	○ (経済産業大臣)	当該経済産業局に申請/届出

注) 着床式：建築基準法における安全性確保に関する審査は「発電用風力設備の技術基準の解釈」に取り込まれ、電気事業法上の審査に一本化されたが、内容的には従来通りのものが網羅されている。

浮体式：支持構造物である浮体施設及びタワーについては、船舶安全法における「浮体式洋上風力発電施設技術基準」により安全性を確保する。

#### (4) 省令で定める技術基準

電気事業法（昭和39年法律第170号）第39条第1項および第56条第1項に規定された技術基準には以下のものがあり、事業用電気工作物の設置者は技術基準に適合するように維持する義務がある（一般用電気工作物については、使用する電気を供給する電気供給者に、一般用電気工作物が技術基準に適合しているかどうかの調査を義務づけている）。発電用風力設備に関する技術基準に定める省令と解釈の概要を、表Ⅲ.5.1-2に示す。

- ・発電用風力設備に関する技術基準を定める省令（電気設備は対象外）
- ・発電用風力設備に関する技術基準の解釈
- ・電気設備に関する技術基準を定める省令
- ・電気設備に関する技術基準の解釈

これらの技術基準は、主に陸上風力発電システムを前提に規定されているが、洋上風力発電システムについても基本的には、これらの技術基準を遵守することが求められる。「電気設備に

関する技術基準」については洋上風力発電システムにも適用できるよう、経済産業省（電力安全課）において見直し・検討が進められている。

表Ⅲ. 5. 1-2a 発電用風力設備に関する技術基準に定める省令と解釈の概要

発電用風力設備に関する技術基準に定める省令		発電用風力設備の技術基準の解釈	
条 項	概 要	条 項	概 要
第一条 適用範囲	風力を原動力として電気を発生するために施設する電気工作物（一般用電気工作物及び事業用電気工作物）について適用する。	—	—
第三条 取扱者以外のものに対する危険防止措置	風力発電所を施設するに当たっては、取扱者以外の者に風車が危険である旨を表示するとともに、当該者が容易に接近するおそれがないように適切な措置を講じなければならない。	第2条 取扱者以外の者に対する侵入防止措置	発電用風力設備に設置する場所には、当該場所に取扱者以外の者が立ち入らないように、「柵、塀、立入禁止表示板、施錠装置」等いずれかの措置を講じること。ただし、人が立ち入るおそれのない箇所は、この限りではない。
	発電用風力設備が一般用電気工作物である場合には、前項の規定の内、「風力発電所」は「発電用風力設備」、「当該者が容易に」は「当該者が容易に風車に」と読み替えて適用する。		一般用電気工作物である発電用風力設備を設置する場所には、取扱者以外の者が容易に風車に接近しないように、「風車を接近のおそれない場所に設置、接触防止カバー、柵、塀」等いずれかの措置を講じること。
第四条 風車	風車は次の各号により施設しなければならない。 1. 負荷を遮断した時の最大速度に対し構造上安全であること。 2. 風圧に対して構造上安全であること。 3. 運転中に風車に損傷を与えるような振動がない様に設置すること。 4. 通常想定される最大風速においても取扱者の意図に反して風車が起動することのないように施設すること。 5. 運転中に他の工作物、植物等に接触しないように施設すること。	第3条 風車の構造	令第4条第1号の「負荷を遮断したときの最大速度」とは、非常調速装置が作動した時点より風車がさらに昇速した場合も回転速度を含むものをいう。
		第4条 風車の構造	令第4条第2号の「風圧」とは、発電用風力設備を設置する場所の風車ハブ高さにおける現地風条件（極値風及び三方向（主方向、横方向、上方向）の乱流を含む）による風圧が考慮されたもので、「風車の受風面の垂直投影面積が最大の状態下の最大風圧」、「風速・風向の時間的変化による風圧」をいう。 発電用風力設備が一般用電気工作物である場合の「風圧」とは、風車の制御の方法に応じて風車の受風面の垂直投影面積が最大となる状態において、風車が受ける最大風速を含むものをいい、前項の規定は適用しない。
		第5条 風車の構造	省令第4条第三号に規定する「風車に損傷を与えるような振動がないように施設する」とは、風車の回転部を自動的に停止する装置を施設することを含むものをいう。
		第6条 風車の構造	省令第4条第四号に規定する「取扱者の意図に反して風車が起動することのないように施設する」とは、風車の回転部を固定できるよう施設することを含むものをいう。

注）詳細は以下を参照（表Ⅲ. 5. 1-2b、表Ⅲ. 5. 1-2cも同様）

- ・ 発電用風力設備に関する技術基準を定める省令  
([http://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws\\_search/lsg0500/detail?lawId=409M50000400053](http://elaws.e-gov.go.jp/search/elawsSearch/elaws_search/lsg0500/detail?lawId=409M50000400053))
- ・ 発電用風力設備の技術基準の解釈について  
([http://www.meti.go.jp/policy/safety\\_security/industrial\\_safety/law/files/fuugikaishaku2.pdf](http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/files/fuugikaishaku2.pdf))
- ・ 発電用風力設備に関する技術基準を定める省令及びその解釈に関する逐条解説  
([http://www.meti.go.jp/policy/safety\\_security/industrial\\_safety/law/files/fuugikaishakukaisetsu.pdf](http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/law/files/fuugikaishakukaisetsu.pdf))

表Ⅲ. 5. 1-2b 発電用風力設備に関する技術基準に定める省令と解釈の概要

発電用風力設備に関する技術基準に定める省令		発電用風力設備の技術基準の解釈	
条 項	概 要	条 項	概 要
<p>第五条 風車の安全な状態の確保</p>	<p>風車は、次の各号の場合に安全かつ自動的に停止するような措置を講じなければならない。</p> <p>1. 回転速度が著しく上昇した場合 2. 風車の制御装置の機能が著しく低下した場合</p>	<p>第七条 風車の安全な状態の確保</p>	<p>令第5条第1項に規定する「安全かつ自動的に停止するような措置」及び「安全な状態を確保するような措置」とは、次の各号に掲げる措置を含むものをいう。</p> <p>一 単一故障（従属要因による多重故障を含む。）が発生した場合においても、風車を制御可能な状態が確保できるような措置 二 常用電源が停電した場合においても、非常用電源の保持等により、風車を制御可能な状態が確保できるような措置 三 調速装置及び非常調速装置が繰り返し作動した場合においても、耐久性を有する適切な材料を調速装置及び非常調速装置に使用することにより、風車を制御可能な状態が確保できるような措置</p>
			<p>令第5条第1項第一号に規定する「回転が著しく上昇した場合」とは、非常調速装置が作動する回転速度に達した場合をいう。</p>
			<p>令第5条第1項第二号に規定する「風車の制御装置の機能が著しく低下した場合」とは、風車の制御用圧油装置の油圧、圧縮空気装置の空気圧又は電動式制御装置の電源電圧が著しく低下した場合をいう。</p>
	<p>発電用風力設備が一般用電気工作物である場合には、前項の「安全かつ自動的に停止するような措置」は「安全な状態を確保するような措置」と読み替えて適用する。</p>		<p>令第5条第2項に規定する「安全な状態」とは、風車の構造に応じて停止または回転速度の減速その他の措置を行い、人体に危害を及ぼしまたは物件に損傷を与えない状態をいい、「安全状態を確保するような措置」とは、機械的及び電気的な保護機能の双方又は一方を用いて風車を安全な状態に維持することをいう。</p>
	<p>最高部の地表からの高さが20mを超える発電用風力設備には、雷撃から風車を保護するような装置を講じなければならない。ただし、周囲の状況によって雷撃が風車を損傷するおそれがない場合において、この限りでない。</p>		<p>令第5条第2項において適用する同条第1項第二号に規定する「風車の制御装置の機能が著しく低下した場合」とは、風車の制御用圧油装置の油圧、圧縮空気装置の空気圧又は電動式制御装置の電源電圧が著しく低下した場合その他制御装置の機能が著しく低下した場合をいう。</p>
			<p>令第5条第3項に規定する「雷撃から風車を保護するような措置」とは、次に掲げる要件のすべてを満たすものをいう。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・発電用風力設備を設置する場所の落雷条件を考慮し、次に掲げる地域の区分に応じ、次に定める要件を満たすこと。 (イ～ハ/詳細は省略)</li> <li>・風車を支持する工作物の高さが20mを超える部分を雷撃から保護するように、次のイ、ロの要件のすべてを満たすこと。</li> <li>イ. 雷撃によって生ずる電流を風車を支持する工作物に被害を及ぼすことなく安全に地中に流すことができる避雷設備として、日本工業規格A4201-2003に規定する外部雷保護システムに適合する構造であること。</li> <li>ロ. 避雷設備の雨水等により腐食の恐れのある部分にあっては、腐食しにくい材料を用いるか、又は有効な腐食防止のための措置を講じたものであること。</li> </ul> <p>・令第5条第3項に規定する「周囲の状況によって雷撃が風車を損傷するおそれがない場合」とは、当該風車を保護するように避雷塔、避雷針その他の避雷設備がある場合を含むものをいう。</p>
<p>第六条 圧油装置及び圧縮空気装置の危険の防止</p>	<p>発電用風力装置として使用する圧油装置及び圧縮空気装置は次の各号により施設しなければならない。</p> <p>1. 圧油タンク及び空気タンクの材料及び構造は、最高使用圧力に対して十分に耐え、かつ安全なものであること。 2. 圧油タンク及び空気タンクは耐食性を有すること。 3. 圧力が上昇する場合において、当該圧力が最高使用圧力に到達する以前に当該圧力を低下させる機能を有すること。 4. 圧油タンクの油圧又は空気タンクの空気圧が低下した場合に圧力を自動的に回復させる機能を有すること。 5. 異常な圧力を早期に検知できる機能を有すること。</p>	<p>第八条 圧油装置及び圧縮空気装置の施設</p>	<p>電気設備の技術基準の解釈について（平成25年3月14日制定）第40条第2項（第二号ロを除く）及び第3項の規定は、発電用風力設備として使用する圧縮装置及び圧縮空気装置にて準用する。</p> <p>この場合において、同条第2項中「開閉器及び遮断器に使用する圧縮空気装置」とあるのは「発電用風力設備として使用する圧縮装置及び圧縮空気装置」と、「空気圧縮機」とあるのは「油ポンプ及び空気圧縮機」と、「空気タンク」とあるのは「圧油タンク及び空気タンク」と、「圧縮空気を通ずる管」とあるのは「圧油及び圧縮空気を通ずる管」と読み替える。</p>

表Ⅲ.5.1-2c 発電用風力設備に関する技術基準に定める省令と解釈の概要

発電用風力設備に関する技術基準に定める省令		発電用風力設備の技術基準の解釈	
条 項	概 要	条 項	概 要
第七条 風車を支持する 工作物	風車を支持する工作物は、自重、積載荷重、積雪及び風圧並びに地震その他の振動及び衝撃に対して構造上安全でなければならない。	第9条 風車を支持する工作物の構造耐力	令第7条第1項に規定する「自重、積載荷重、積雪及び風圧並びに地震その他の振動及び衝撃」とは、風車を支持する工作物に作用する自重。積載荷重、積雪荷重、風圧、土圧及び水圧並びに風車の運転による振動並びに当該設置場所において通常想定される地震その他自然の要因により風車を支持する工作物に作用する振動及び衝撃（次項において「外力」という）をいう。 令第7条第1項に規定する「構造上安全」とは、風車を支持する工作物のタワー、基礎及びタワーと基礎の定着部が、工作物に作用する外力に対して安全であることを含むものをいう。 発電用風力設備であって最高部の地表からの高さ（以下「風力設備全体高」という）が15mを超える発電用風力設備を支持する工作物（以下「特定支持物」という）について、第8条及び第9条に掲げる全ての要件の全てを満たす場合であって、次に掲げる要件のいずれかに該当するときは、当該特定支持物については、令第7条第1項に規定する「構造上安全」であるものとみなす。 ・第10条に掲げる要件の全てを満たすものであること ・風力設備全体高が60m以下の特定支持物であって、第11条から第13条に掲げる要件の全てを満たすものであること。
		第10条 特定支持物の構造等	・特定支持物の構造等に係る要件（一～九／詳細は省略）
		第11条 特定支持物の基礎	・特定支持物の基礎（鉄筋コンクリート造のものに限る）に係る要件（一～九／詳細は省略）
	風車を支持する工作物は、自重、積載荷重、積雪及び風圧並びに地震その他の振動及び衝撃に対して構造上安全でなければならない。（表Ⅲ.5.1-2bの続き）	第12条 特定支持物に係る構造計算（風力設備全体高が60mを超える特定支持物に対する規定）	・特定支持物の構造計算に係る要件（一～六／詳細は省略） ただし、次条から第13条に掲げる要件の全てを満たす場合はこの限りでない。 ・前項各号の構造計算及び確認を行うに当たっては、構造上主要な部分の断面に生ずる長期、短期及び極めて稀に発生する地震時の各応力度を別表第3に掲げる式によって計算すること。 第1項各号の構造計算及び確認を行うに当たっては、次に掲げる許容応力度、許容せん断応力度及び材料強度を用いること。（一～十三／詳細は省略）
		第13条 風力発電設備全体高が60m以下の特定支持物に係る構造計算	・特定支持物（風力発電設備全体高が60m以下の場合に限る。以下この条から第13条までにおいて同じ）の構造計算に係る要件（一～三／詳細は省略）
		第14条 風力発電設備全体高が60m以下の特定支持物の構造上主要な部分	・特定支持物（鉄骨造のものに限る）の構造上主要な部分に係る要件（一～八／詳細は省略）
		第15条 風力発電設備全体高が60m以下の特定支持物の基礎	・特定支持物の基礎に係る要件（一～四／詳細は省略）
		第16条 風力発電設備全体高が60m以下の特定支持物の基礎	・第7条3項の規定にかかわらず、特定支持物は建築基準法の工作物に適用される同法に基づく構造強度に係る各規定に適合するものであること。 ・風車を支持する工作物（船舶安全法第2条第1項の規定を受けるものに限る）は、同項の規定に適合するものであること。
		第17条 風車を支持する工作物の施設制限	・風車を支持する工作物は、支線をを用いてその強度を分担させないこと。 ・発電用風力設備が一般用電気工作物である場合には、前項の規定は適用しない。
		—	—
発電用風力設備が一般電気工作物である場合には、風車を支持する工作物に取扱者以外の者が容易に登ることができないように適切な措置を講ずること。	—		
第八条 公害等の防止	・電気設備に関する技術基準を定める省令（平成9年通商産業省令第52号）第19条第8項及び第10項の規定は、風力発電所に設置する発電用風力設備について準用する。 ・発電用風力設備が一般電気工作物である場合には、前項の規定は、同項中「第19条第8項及び第10項」とあるのは「第19条第10項」と、「風力発電所に設置する発電用風力設備」とあるのは「発電用風力設備」と読み替えて適用する。	—	—



## 5.2 工事設計

### (1) 電気工事設計

洋上風力発電システムの電気工事には、陸上風力発電と重複するものが多く、本ガイドブックⅢ.5.1(2)および(3)項で述べた法令・規程類の他に、以下の法規や基準が適用される。

- ・電気工事業法
- ・建設業法
- ・その他関係法令、条例および規格

### (2) 土木・建築工事設計

洋上風力発電システムの土木・建築工事には、以下の法規や基準等が適用される（本ガイドブックⅢ.2.2項の社会条件に関する記述を参照）。

- ・海岸法
- ・海洋汚染等および海上災害の防止に関する法律
- ・港湾法
- ・海上交通安全法
- ・港則法
- ・航路標識法
- ・水路業務法
- ・自然環境保全法
- ・船舶安全法
- ・自然公園法
- ・漁業法
- ・水産資源保護法
- ・海洋水産資源開発促進法
- ・漁港漁場整備法
- ・排他的経済水域および大陸棚の保全および利用の促進のための低潮線の保全および拠点施設の整備等に関する法律
- ・各港湾管理者が定める条例
- ・道路法\*
- ・道路交通法\*
- ・航空法
- ・コンクリート標準示方書（土木学会）
- ・共通仕様書（土木工事共通仕様書）
- ・電気事業法・同施行令
- ・建築基礎構造設計指針（日本建築学会）
- ・鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説（日本建築学会）
- ・建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事（日本建築学会）

## 5.3 工事計画

### (1) 一般論

洋上風力発電設備の建設に関連する海底地盤整備、支持構造物の設置、風車の据付、海底の送電ケーブル、アレイケーブル、洋上変電所等の諸工事が工期内に支障なく安全に行われるように、工事計画、工事工程表を立案・策定する必要がある。

表Ⅲ.5.3-1 には、洋上風力発電施設の設置以外の段階における使用船舶も示しているが、設置段階においては種々の船舶が必要となる。したがって、建設工事の母港となる港湾における

---

\* 陸上で工事車両を通行させる場合に限る（建設場所付近の港湾または沿岸まで）。

様々な作業船、クレーン、資材置き場等の利用ができるように、利用岸壁の長さ・水深、ストックヤードのスペース、岸壁、荷捌き地等の地耐力確保等に関する港湾管理者との協議を早目に終えておくことが重要である。また、洋上風力発電建設海域の近傍港湾であれば、施設稼働後も風車や支持構造物の維持管理のために継続して港湾を利用することも考えられることから、入念な検討を要する。

表Ⅲ.5.3-1 着床式洋上風力発電に関連する船舶（日本船舶技術研究会, 2013 を一部改変）

船種	設置	試運転	維持管理	撤去
はしけ	○			○
重量物運搬船	○		△	○
クレーン船/SEP船（自己昇降式作業台船）	○		△	○
タグボート	○			○
アクセス船	○	○	○	○
ケーブル敷設船	○			○
ROV（遠隔無人探査機）搭載船	○			○
潜水作業支援船	○			○
監視・警戒船	○			○
保守管理作業船			○	
沖合移住施設（母船）			△	
風車撤去作業船				○

風車や支持構造物の設置には、主として SEP 船（自己昇降式作業台船）が使用されるが、近年、洋上風力発電の風車は大型化し、5,000kW（5MW）クラスの超大型風車が設置される事例が増え、今後もさらに大型化する傾向にある（付属資料Ⅱを参照；SEP 船についてはⅢ.6.2 項（3）および付属資料Ⅳを参照）。参考までに、風車と支持構造物の概略の諸元を、表Ⅲ.5.3-2 と表Ⅲ.5.3-3 にそれぞれ示す。支持構造物も大型構造物となっている。日本船舶技術研究会（2013）は、7MW クラスの風車を視野に入れて、将来の SEP 船の概略スペックを以下のように取りまとめている。

- ◎対応水深：最低でも 60m（望ましくは 80-100m）
- ◎運航速度：7-8kt
- ◎デッキ面積：3,000m<sup>2</sup> 前後
- ◎最大有義波高：最低でも 2m、できれば 2.5m  
(うねり (Tp : ≥10sec) への対応も必須)
- ◎クレーン能力：1,000t 超
- ◎クレーン吊り高さ：150m 以上

我が国における SEP 船には、現在、「くろしお」、「むつ」、「あそ」等が存在するが、一番大きい「くろしお」でもクレーン能力（積載可能なクローラークレーン）は 750t である。例えば 5MW 風車（海面からハブ高までの高さ：105-110m）を設置する場合、この高さに吊り揚げるためには SEP 船の甲板を海面から 20m 高にセットする必要があり、そのときのクロー

ラークレーン 97m ブーム、R（作業半径）=20m の吊荷重性能は 187t が限度となる。表 III.5.3-2 に示すように 5MW 風車のナセル重量は 200t を超えると見込まれるため、この吊荷重性能では 5MW 風車の設置は難しい。

表 III. 5. 3-2 5MW 風車の概略諸元

項目	諸元	
定格出力	5,000kW	
ロータ直径	116m-139m	
ブレード長	55m-67m	
ブレード数	3枚	
ハブ高	90m-120m	
タワー外径	5.3m	
質量	ブレード(1枚)	約16t
	ロータ(含む,ハブ)	約112t
	ナセル(除く,ロータ+ハブ)	約235t
	タワー(3-4分割可)	約355t

注) 仕様は複数の風車の概算値

表 III. 5. 3-3 5MW 機対応の支持構造物の概略諸元 (MECAL, 2013)

支持構造物	水深	諸元	重量
モノパイル	20-40m	直径: 6.5-8.0m	~550t-1,400t
		板厚: ≤150mm	
		長さ1: 44m-82m	
重力	≤40m	直径(天端): ~6m	~2,700t-3,400t (水深:27-30m)
		直径(底面): ~25m	
		厚み: ≤300mm	
		長さ: ≤40m	
ジャケット	20-60m	天端断面幅(長さ): ~6m	~550t-1,650t
		底面断面幅(長さ): ~19m	
		鋼管肉厚: ≤30mm	
		長さ2: ~30m-70m	

長さ1: 海底下のパイルおよびトランジションピースの長さを含む  
長さ2: 海面上の長さを含む

洋上風力発電施設工事の計画策定にあたっては、事前に次のことに留意しなければならない。

- ・前述のように、港湾管理者とは十分な協議を行って協力を得ておくこと。特に、岸壁、荷捌き地等の地耐力確保については、留意しなければならない。
- ・工事の開始前には各種許認可（開発許可、建築確認申請、工事計画届他）があり、関係する法律により提出時期、取得までの期間が異なるため、工事工程に組み込んでおくこと。
- ・SEP 船、ケーブル敷設船、ハンマー、クレーン等の手配をしておくこと。
- ・支持構造物、風車、ケーブル等の各サプライヤーとは供給契約を締結しておくこと。
- ・施設の撤去計画も併せて検討しておくことが必要である。詳細は「III.8 撤去」に記載している。

主要な建設工事の概要は以下の通りである。

#### ◎支持構造物（基本形はモノパイル、重力、ジャケット）の設置

事前に海底地盤の整備を行い、その後、SEP 船等により海底に支持構造物を据え付ける（支持構造物の種類により工事内容は異なる。III.6 節を参照）。

#### ◎系統連系

風車を支持構造物に据え付ける前に送電ケーブル（洋上変電所と陸上変電所間の送電線）および陸上変電所の工事を完工させ、陸上から洋上変電所まで送電線を繋いでおく。

#### ◎風車

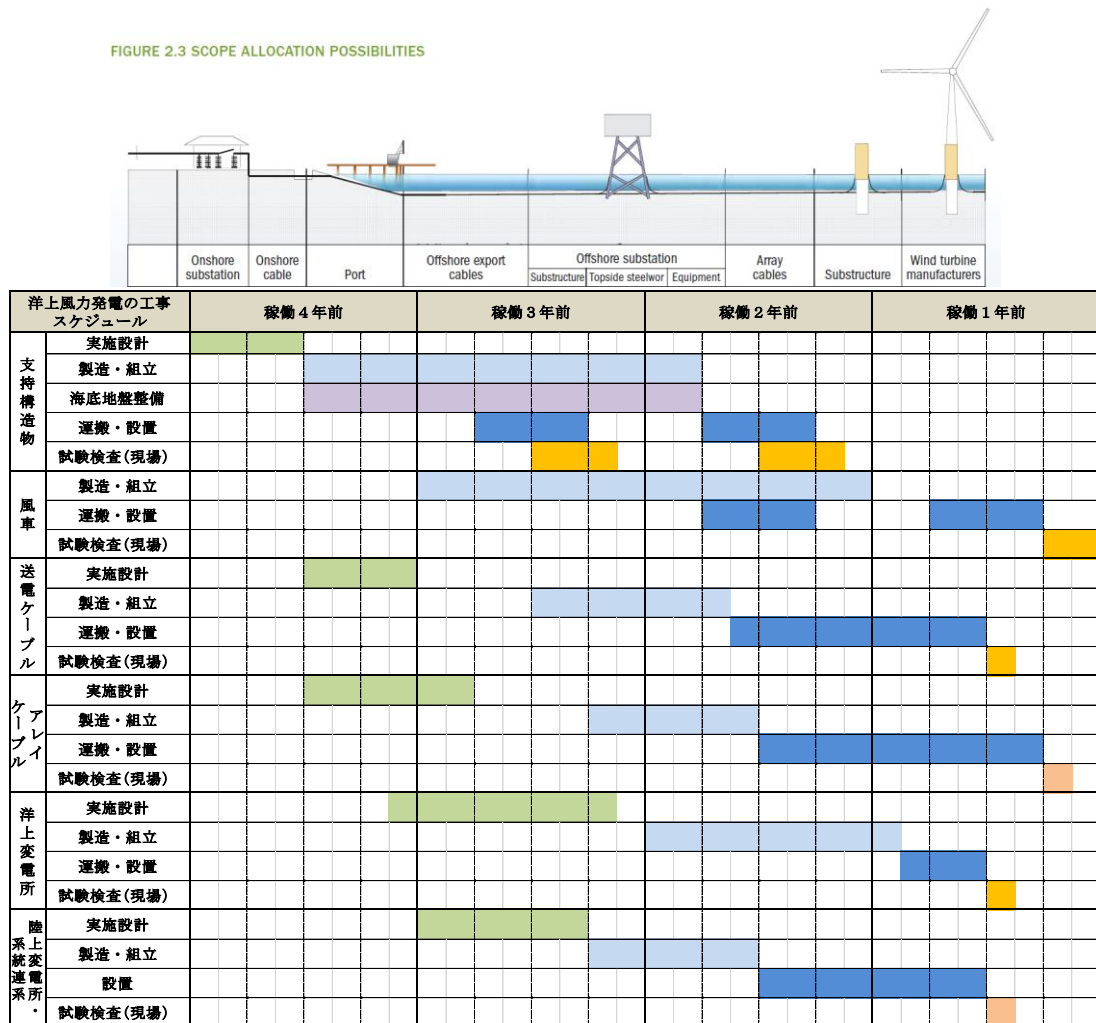
支持構造物、送電ケーブルおよび陸上変電所の完工前から SEP 船を使用して風車を支持構造物に据え付ける工事を行う。別途、並行して行っていたアレイケーブル（洋上変電所と風車間の送電線）の敷設工事を完工させ、風車に送電線を連系して最終的な試験検査を実施して工事を完了する。

このように、複数の工事がある程度並行して進むために、他の工事のスケジュールを十分考慮する必要がある。また、工事ごとに仕様書で示されている事項についても十分に留意する。

GL Garrad Hassan (2010) を参考に、洋上ウィンドファームの建設工事の工程を検討した(図Ⅲ.5.3-1)。設置海域を太平洋側と想定し、100-200MW (5MW 風車×20-40 基) 程度のウィンドファームを建設する概略のスケジュールである。作業船の稼働率を考慮し、海洋工事期間は春季から夏季の間と仮定し、全体の工期を概ね3年間としている。

実際の施工においては作業限界値以下の気象・海象条件が数時間以上継続することが求められる。菊地ら (2015) は、気象・海象シミュレーションを利用して施工稼働率を算定し、銚子沖洋上風力発電所の施工稼働率の実績と比較してその予測精度を検証した。風速の時系列データを得るためにメソスケールモデル WRF (Weather Research and Forecasting) Ver3.4.1 を、波高および波周期の時系列データを得るために WW3 (Wave Watch III) Ver3.4.1 を用いている。気象データの観測値から予測された施工稼働率は実績値とおよそ一致し、また気象・海象シミュレーションによる予測値を用いて評価した施工稼働率は観測値を用いて評価した施工稼働率をよく再現したことから、銚子沖洋上風力発電所の施工稼働率を精度よく評価することができたとしている。当シミュレーションはメンテナンスの際に用いるアクセス船の稼働率を評価する際にも有用であると考えられる。

FIGURE 2.3 SCOPE ALLOCATION POSSIBILITIES



注) 送電ケーブル：洋上変電所と陸上変電所間の送電線      アレイケーブル：洋上変電所と風車間の送電線

図Ⅲ.5.3-1 洋上ウィンドファームの工事工程の例—最上図はEWEA (2011) から引用—

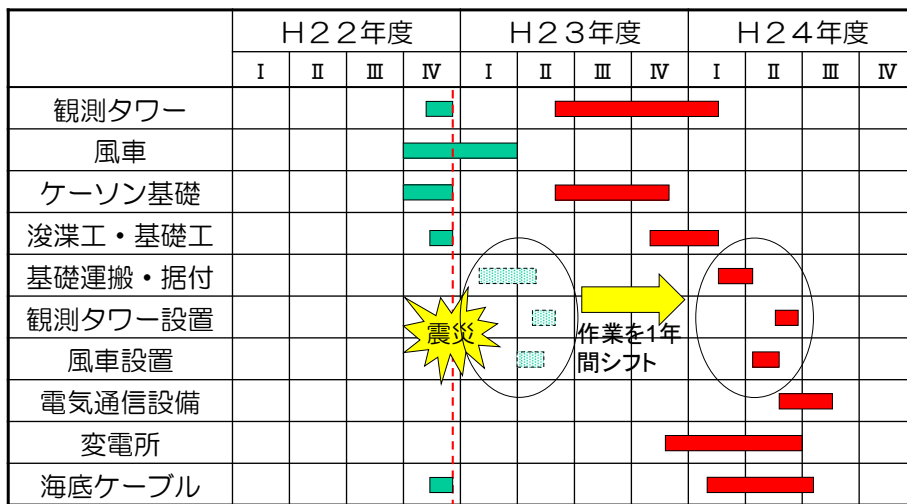
(2) NEDO 洋上風力発電実証研究事例（工事計画）

1) 銚子沖

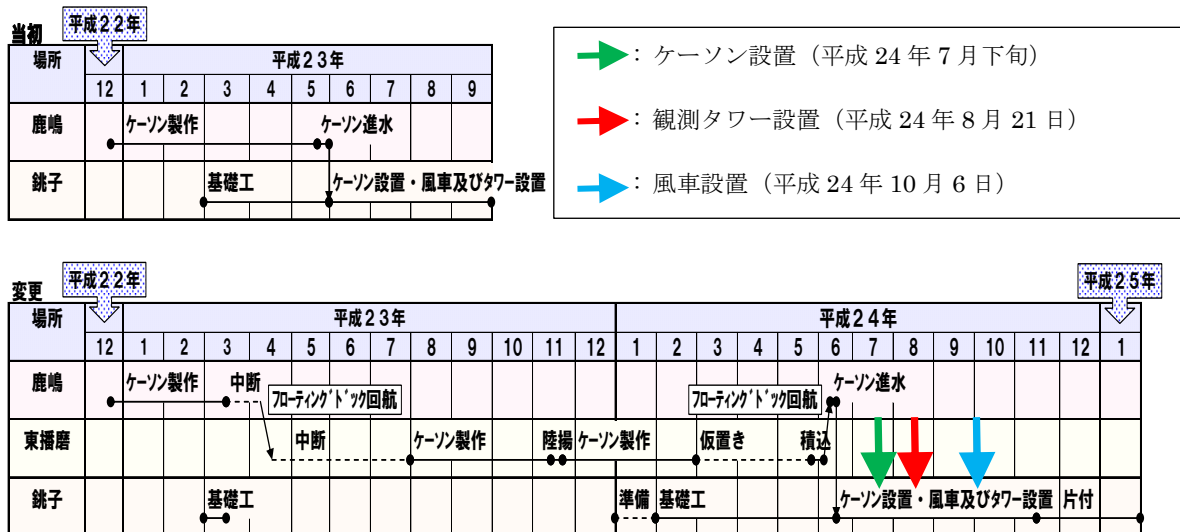
銚子沖における工事の全体工程を表Ⅲ.5.3-4 に示す。表に示されているように、2010 年度の第 4 四半期から観測タワー、風車、ケーソン基礎等の製作を開始したが、2011 年 3 月 11 日の東日本大震災の影響により現場作業は 1 年間延期された。

表Ⅲ.5.3-5 はケーソンの製作から設置までの概略の工事工程である。震災後、ケーソンの製作は兵庫県東播磨で行われたため、運搬にも時間を要し、東播磨でのケーソンの製作から銚子沖に設置されるまで約 1 年間かかっている。観測タワー用および風車用のケーソンの設置は同時期に行われ、観測タワーは 2012 年 8 月 21 日、風車は 2012 年 10 月 6 日に設置されている。

表Ⅲ.5.3-4 銚子沖における工事の全体工程



表Ⅲ.5.3-5 銚子沖におけるケーソン工事の工程



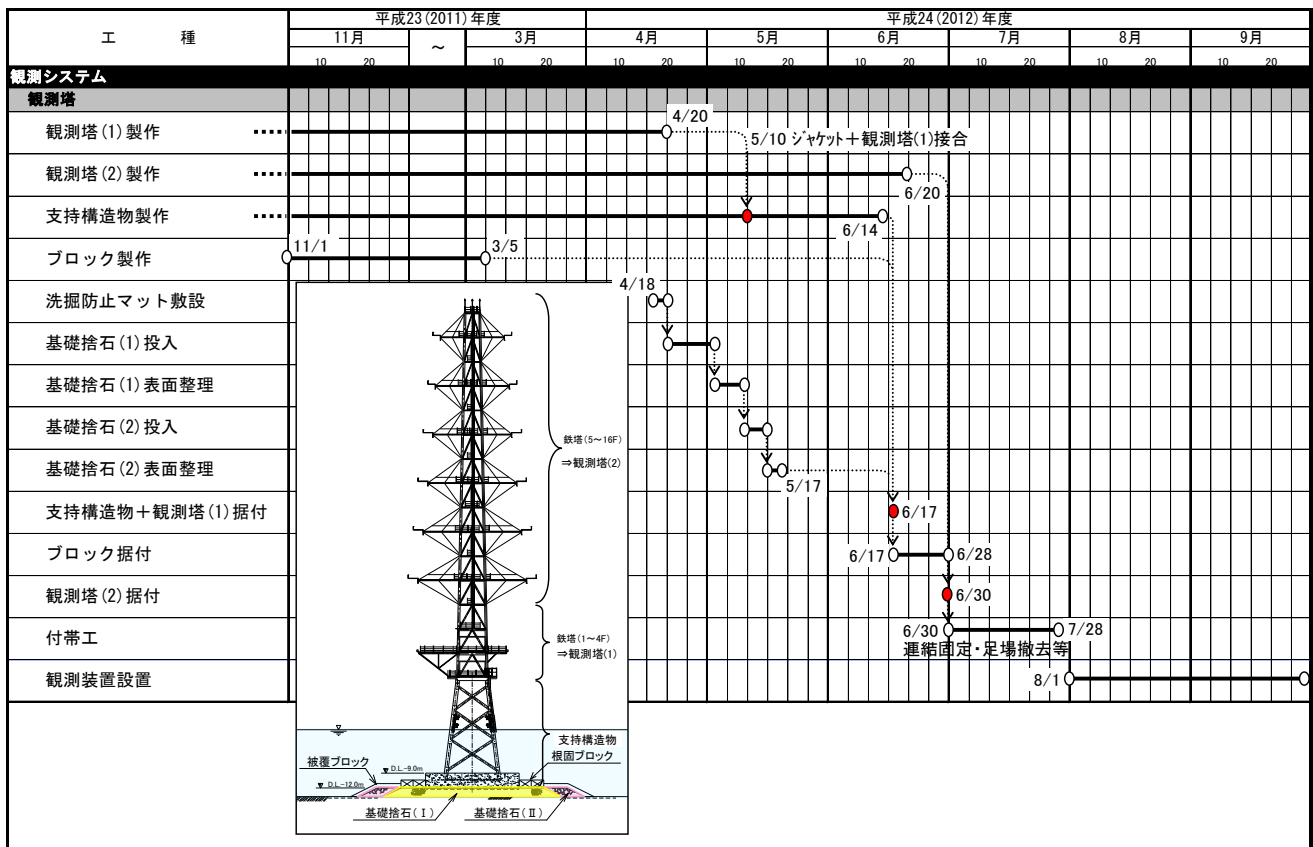
## 2) 北九州市沖

北九州市における観測タワーと風車の工事工程を表Ⅲ.5.3-6 と表Ⅲ.5.3-7 に、それぞれ示す。

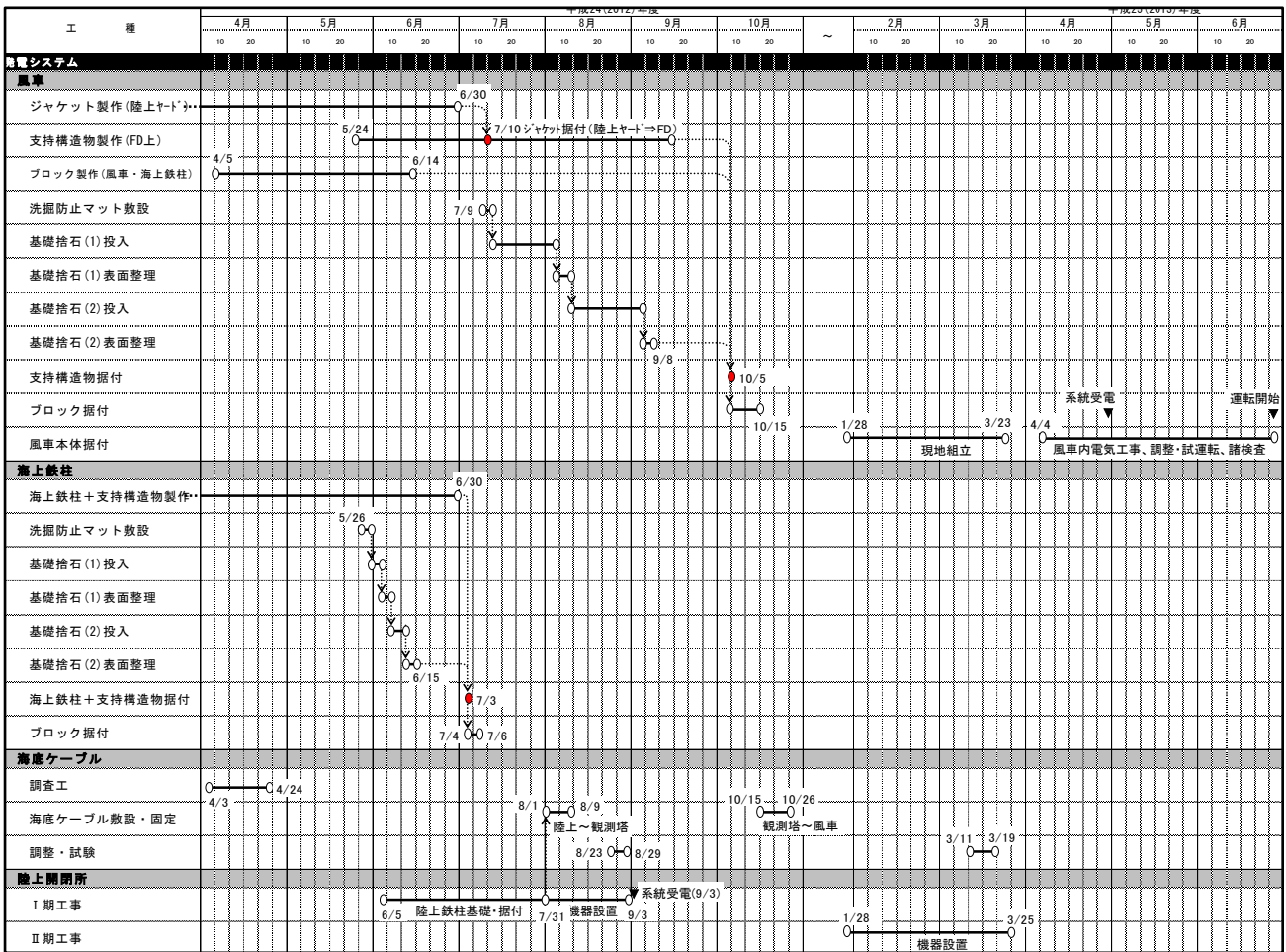
観測タワーおよび支持構造物の製作後、約 2 週間経った 2012 年 6 月 30 日に観測タワーが設置されている。なお、海底ケーブルが敷設され、観測タワーと陸上間に送電されたのは 2012 年 8 月 9 日であった。

風車用の支持構造物は 2012 年 9 月中旬に完成し、支持構造物の据付は 10 月 5 日（完成から据付まで約 20 日間）で、その後、ブロック据付工事があり 10 月 15 日に設置が完了している（風車への通電工事が完了したのは 10 月 26 日）。表Ⅲ.5.3-6 中に示す海上鉄塔は、海底ケーブルを陸上の変電所に系統接続するために護岸前面に設置された施設である。本工事は海底工事から鉄塔据付まで約 1 ヶ月間で完了している。

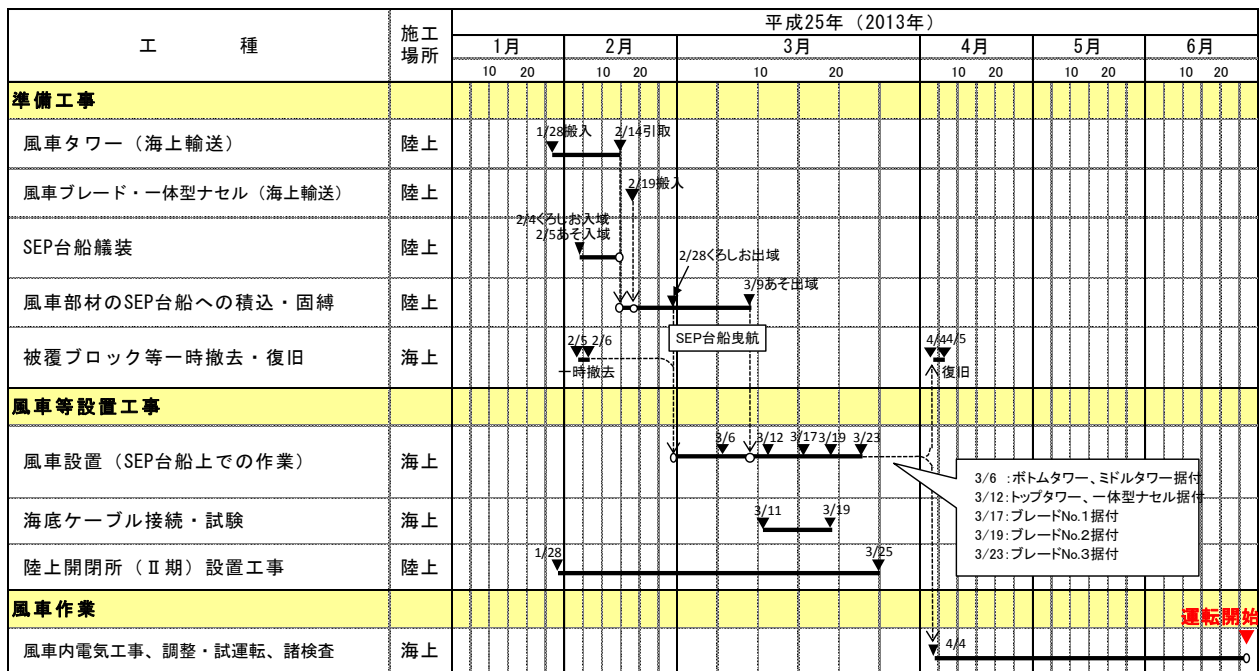
表Ⅲ.5.3-6 北九州市沖における観測タワーの工事工程



表Ⅲ. 5. 3-7a 北九州市沖における風車の工事工程



表Ⅲ. 5. 3-7b 北九州市沖における風車の工事工程



## 6 建設工事

洋上風力発電に係る建設工事について、契約、施工（基礎工事、風車設置工事、電気工事）および試運転・検査の概要を示す。

### 6.1 契約

洋上風力発電事業を計画する事業者にとって風況はもちろんであるが、20年の長期にわたり洋上風力発電システムを維持・管理することが前提であり、そのためには建設の契約段階から風車メーカーと十分打合せを行うことが重要である。

ここでは、洋上風車の故障や事故・定期点検に伴うリスクを低減するために、発注段階における契約書に対して考慮すべき項目と留意点を記す。

契約書には、従来の商習慣によって名称は異なるが建設から試運転・引渡しまでを規定した「建設請負契約書（通称 EPC 契約書）」と、事業期間を通じた「運転・保守、補修契約書（通称 O&M 契約書）」がある。各契約時に事業者が機器供給者、工事請負業者およびメンテナンス・サービス業者等と契約を締結する際には、以下のような点に注意して契約交渉を実施することが望ましい。

「運転・保守、補修契約書（通称 O&M 契約書）」に関してはⅢ.7 節の「運転・保守」の中で留意点を示すが、建設請負契約時に取り決めておくことが望ましい。

#### 「建設請負契約」

- ・ EPC 契約書にて、工事請負会社、機器供給会社と事業者間の作業範囲、責任範囲の明確化
- ・ 保証期間の明示、保証内容の確認、保証期間開始日の確認、残工事の評価
- ・ 準拠すべき国内法の確認（海外法規との整合性、差異の把握と対応）
- ・ 保証期間中の保証内容、保証範囲、保証のための条件設定（利用可能率保証の有無、性能確認方法の有無）、遺失利益補償の有無とその条件の明確化
- ・ 保証期間中に補修作業を実施した場合の再保証期間の設定方法（瑕疵担保期間）
- ・ 保証期間中の定期点検の有無、定期点検中の機器供給者と事業者の業務・費用分担の明確化

#### 「費用の支払い」

- ・ EPC 契約書で明記、為替変動による価格変動の取り扱いの明確化（為替変動を反映または反映しない契約等）
- ・ 輸入品の場合の公租公課、手数料の支払い分担

#### 「保険」

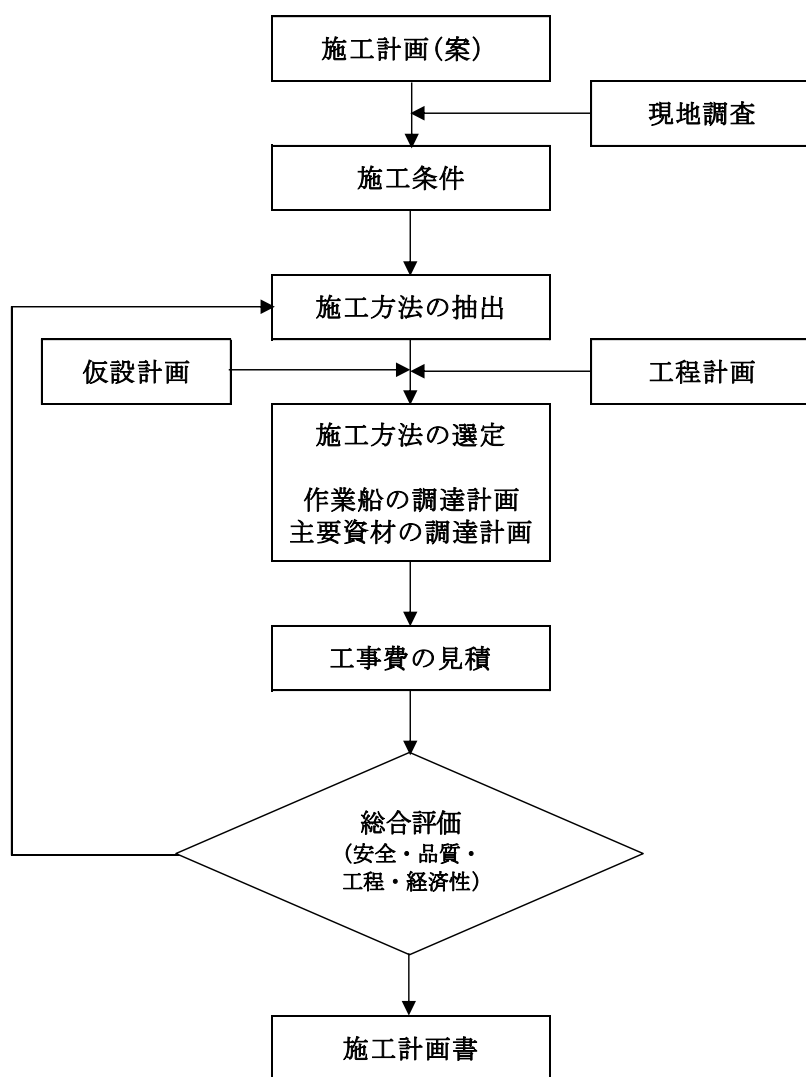
- ・ 火災保険、工事組立保険、請負業者賠償責任保険、企業賠償責任保険、供給部品に対する期限、費用負担者、保険の範囲
- ・ 外航貨物海上保険（FOB/CFR/CIF）、内航貨物海上保険、運送保険
- ・ 一般的に風力発電所建設に必要な保険の種類の確認



## 6.2 施工

洋上風力発電の施工は、基礎工事、風車設置工事および電気工事に大別される。これらの施工に際して、安全・品質・工程および経済性を十分に検討し、施工計画を立てることが重要である（図Ⅲ.6.2-1）。施工計画の主な要点は以下の通りである。

- ✓施工条件：気象・海象条件を踏まえた施工計画（案）の設計書と現地調査結果の確認・照合をするとともに、現地調査においては一般船舶航行安全対策に配慮した運搬経路や避難港、支障物等についても最終確認をしておく。また、これらの検討結果を踏まえて、施工条件として材料仕様、施工時荷重、工程等を設定する。
- ✓施工方法の選定：施工条件を満たす、複数の安全・確実な施工方法を抽出し、作業船の調達、仮設計画、工程計画の検討と併せて、施工方法を選定する。
- ✓総合評価：選定された工法について工事費を見積もるとともに、安全・品質・工程・経済性等を総合的に評価する。



図Ⅲ.6.2-1 施工計画作成フロー

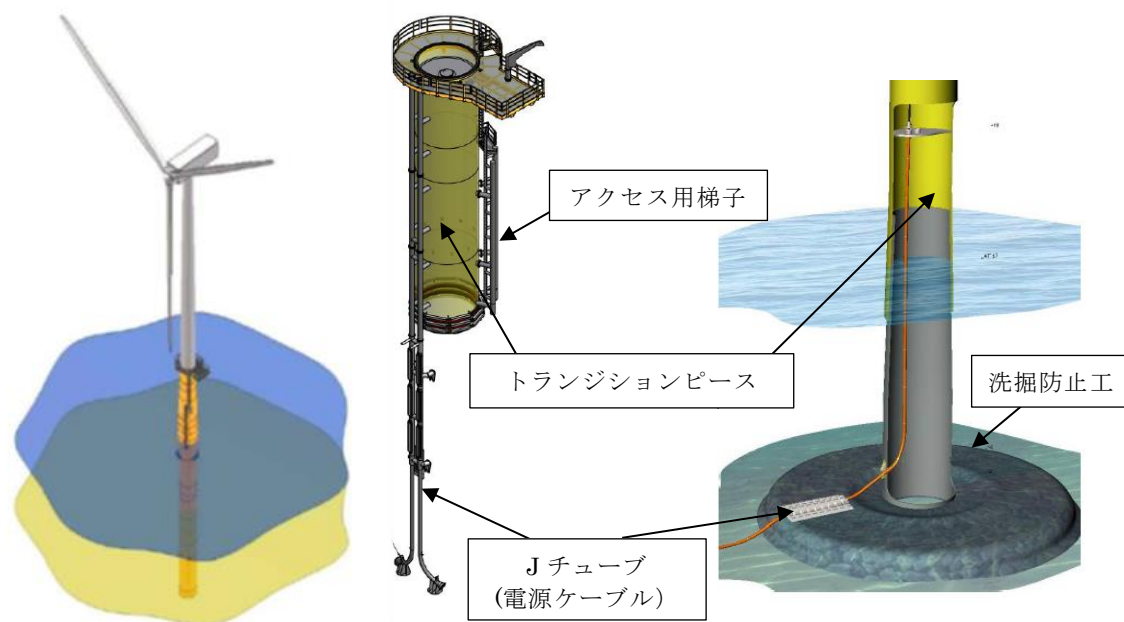
## (1) 基礎工事

支持構造物の基本形である「モノパイル式」、「重力式」および「ジャケット式」の3種類の施工方法を示す。

### 1) モノパイル式

図Ⅲ.6.2-2 にモノパイル式の洋上風力発電施設例を示す。モノパイル式は、単杭を海底支持層に設置して、外力に抵抗する基礎形式である（港湾・沿岸域における風力発電推進研究会,2005）。一般的には水深30m以浅で比較的堅牢な傾斜地形に適用されるもので、欧州では施工実績が最も大きな割合（約74%；2013年末）を占めている。

定格出力3-4MW級の風車のモノパイルは、一般的に長さ45m、直径4.5m、重量300t程度である。パイルの厚みは、種々異なるが平均して60mm程度であり、通常、水深と風力発電機の大型化に伴いこれらの寸法も増加する（The Crown Estate,2010）。5MW級風車を対象とした水深別のトランジションピースを含むモノパイルの質量とともに、口径等の寸法を表Ⅲ.6.2-1に示す。製造は簡単で、圧延加工と管の溶接以外にはほとんどないが、より大きなモノパイルの設計では、風力発電機構造全体の固有振動数を波の周波数より高く維持するため、剛性が重要となる。トランジションピースは、ガードレール付きプラットフォームともなり、人員のタワーへのアクセス、Jチューブ等の支持構造となる。また、直径6mのモノパイルでは、洗掘防止材（一般的には岩石）の範囲は直径25mに及ぶ。



図Ⅲ.6.2-2 モノパイル式の洋上風力発電施設例（Jakobsen and Davidson, 2012）

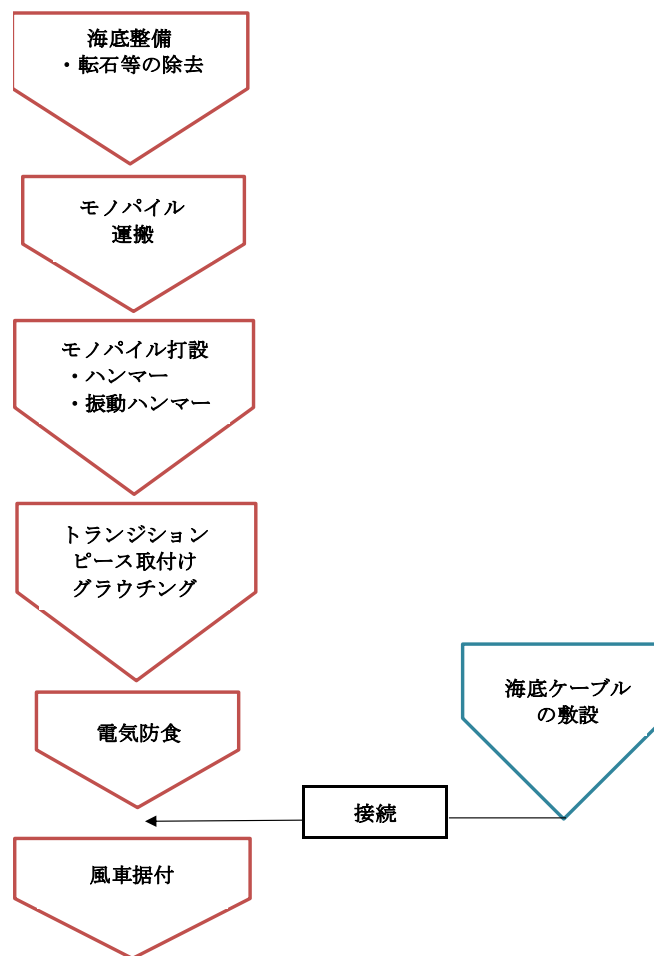
表Ⅲ. 6. 2-1 5MW級のモノパイルの諸元

水深 (m)	モノパイル+トラジションピース 重量 (t)	寸法
20	550	口径：～4.5-8.0m 肉厚：≤150mm 長さ：～44-82m(土 中+トラジション・ ピースを含む長さ)
25	750	
30	900	
35	1,100	
40	1,400	

出典：MECAL(2014)

①施工方法

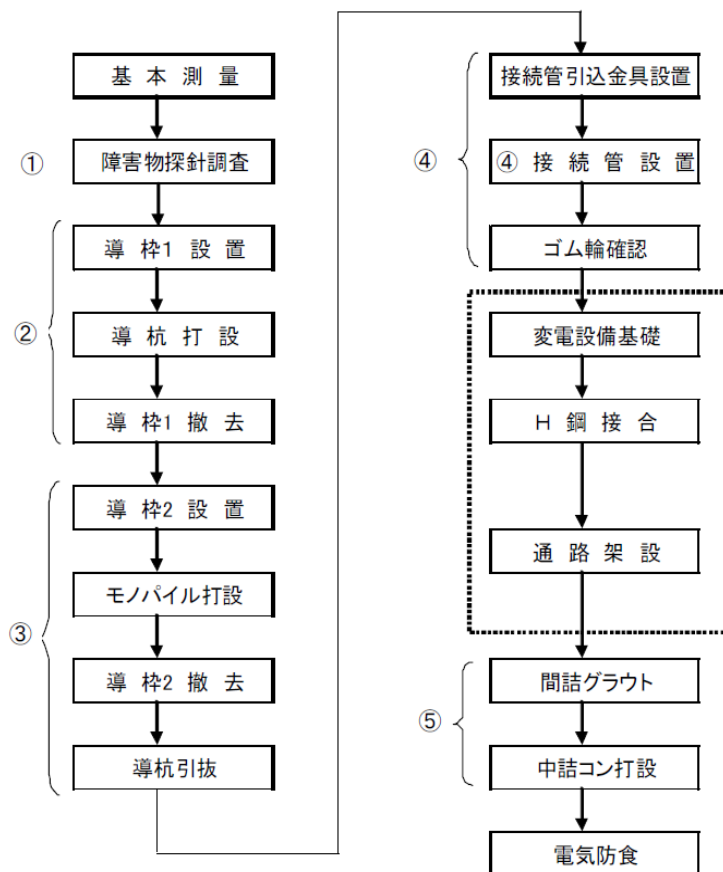
モノパイル式の施工の流れを図Ⅲ.6.2-3に示す。図示しているように概略の工程は、海底の整備→モノパイルの運搬→モノパイルの打設→トランジションピースの取付け・グラウチング→風車取付けとなる。日本船舶技術研究協会（2013）では、欧州におけるモノパイルの実勢設置所要日数として、3.6MW機で2.5-3日、5MW機で3-3.5日としている。



図Ⅲ. 6. 2-3 モノパイル式の施工の流れ

◆ ウィンド・パワーかみす洋上風力発電所における実例

ウィンド・パワーかみす第1洋上風力発電所（2010年稼働、2MW×7基、水深3-5m、離岸距離40-60m；表Ⅱ.3.2-2を参照）におけるモノパイルの施工例を、牛腸ら（2010）、吉田ら（2010）から引用して以下に示す。図Ⅲ.6.2-4にウィンド・パワーかみす第1洋上風力発電所の施工フローを、表Ⅲ.6.2-2に工程表をそれぞれ示す。なお、波浪が高く杭打ちの施工可能日数が年間9日程度しか確保できないため、工事は陸上に設置したクローラレーンにより行われた。



図Ⅲ.6.2-4 ウィンド・パワーかみす第1洋上風力発電所のモノパイル施工フロー  
（牛腸ら, 2010）

表Ⅲ.6.2-2 工程表（牛腸ら,2010）

	単位	数量	2月			3月			4月			5月			6月			7月			8月			9月			10月		
			10	20	28	10	20	31	10	20	30	10	20	31	10	20	30	10	20	31	10	20	31	10	20	30	10	20	30
準備工	式	1	—————																										
風車位置調査	箇所	7						———	———	———																			
導杭打設	箇所	7									———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	
導枠設置	箇所	7						———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	
基礎杭打設	基	7									———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	
導枠撤去	箇所	7						———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	
導杭撤去	箇所	7									———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	———	
接続管設置	基	7																											
継目グラウト	箇所	7																											
中詰コンクリート	m3	892																											
防食工	箇所	7																											
片付工	式	1																											

注)破線:計画、実線:実績

工程表に示すように、海域工事は2009年4月から10月までの約7ヶ月間行われた。防食工、片付工を除いて、いずれの工事期間も実績の方が計画よりも短い結果となっている。

#### a. 海底整備

基本設計の段階で海底土質調査を実施しているが、ここでは転石等を除去し、モノパイル打設の位置決めを行う工事のことを説明する。

#### ◆ ウィンド・パワーかみす洋上風力発電所における実例

ウィンド・パワーかみす第1洋上風力発電所では、モノパイル打設前に、地盤中に存在する消波ブロック片や玉石等の障害物に関する探針調査が行われた。探針とは、H鋼をバイプロハンマで打設することにより障害物の有無を確認することで、導枠の設置による詳細な探針とともに、導坑を利用した面的な探針も行われた。その結果障害物が確認された（潜水夫の確認作業も実施）ため、障害物マップを作成し、施工位置の検討が行われている。

障害物の撤去方法として、施工性および確実性が高く、工期に与える影響の少ないダウンザホールハンマ工法が採用されている。ハンマのケーシング内部のシャフト先端にビットが取り付けられており（図Ⅲ.6.2-5）、この回転により障害物を破砕する。消波ブロック片は30分以内の時間で処理できたものの、玉石類は硬質のため撤去に2時間程度を要している。



図Ⅲ.6.2-5 ダウンザホールハンマの先端部（牛腸ら, 2010）

#### b. モノパイルの運搬

モノパイルは、製造工場専用港湾もしくは洋上風力発電設置海域の最寄りの港湾から海上運搬される（図Ⅲ.6.2-6）。



図Ⅲ.6.2-6 モノパイルの運搬状況（Ballast Nedam, 2011）

#### c. モノパイルの打設

港湾・沿岸域における風力発電推進研究会（2005）によれば、打設方法には、油圧ハンマ打撃工法、振動式杭打ち工法、プレボーリング工法リーバス式および中掘り工法全旋回式がある。以下、同報告書から各工法の使用上の留意点を要約して示す。なお、これらの工事は SEP 船を用いて行われる（Ⅲ.6.2 項の(3)を参照）。

- ✓油圧ハンマ打撃工法は、油圧ハンマを用いて鋼管杭を直接打撃する工法である（図Ⅲ.6.2-7）。ハンマの選定は鋼管杭の形状、寸法、重量、根入れの長さ、土質、気象・海象を十分に考慮し、かつハンマの特性を把握した上で行う。大口径（ $\geq 5.2\text{m}$ ）のモノパイルの打設には拡径ピース、あるいは大口径打込み可能なハンマを用意する必要がある。

ある（プレボーリング工法/中掘り工法も同様）。なお、ハンマの能力が過大であると、杭の頭部が座屈を起こす原因となるので留意が必要である。

- ✓振動式杭打ち工法は、バイブロハンマ（複数軸にそれぞれ偏心重錘が取り付けられている）により鋼管杭に振動（偏心重錘が互いに同位相で反対方向に回転して、杭に10-40サイクル/秒の上下振動）を与えて打設する工法である（図Ⅲ.6.2-7）。バイブロハンマは地盤と杭に発生する動的摩擦力に対して十分な起振力を有し、かつ杭先端での抵抗力に対して杭とバイブロハンマの全装備質量が上回らなければならない。なお、油圧ハンマよりも騒音や振動による海生物に与える影響が緩和されるため、バイブロハンマの方が推奨されている。
- ✓プレボーリング工法リーバス式は、硬質地盤の場合に事前にボーリングを行い、鋼管杭を建て込む工法である（図Ⅲ.6.2-8）。掘削時に静水圧を加えることにより孔壁を保護するとともに、泥水中の粘土・シルトの微粒子を壁面に浸透付着（マッドフィルム）させることにより崩壊を防ぐ。なお、作業中が最も不安定な状態になるため、荒天対策に十分に留意する。
- ✓中掘り工法全回転式も硬質地盤の場合に適用されるケースで、鋼管杭本体に先端ビットを取付け、ケーシングパイプとして内部を掘削しながら回転圧入する工法である。本体杭をケーシングパイプに使用するため、杭長によっては継ぎ杭になる場合もある。なお、作業中が最も不安定な状態になるため、荒天対策に十分に留意する。



図Ⅲ.6.2-7 油圧ハンマとバイブロハンマの外観

- ・油圧ハンマ：左図（Ballast Nedam,2011）
- ・バイブロハンマ：右図（Dieseko Group,2016）



図Ⅲ.6.2-8 掘削機の外観

Lic Engineering A/S 資料

Carbon Trust (2018) によれば、最近の技術革新では、モノパイル方式の基礎設置に、ハンマ杭打ちではなくバイブロドライビングを用いる設置方法の開発が中心となっている。この手法には、次の利点が考えられる。

- ✓設置時間の短縮：槌打ち\*と比べて設置が 3-4 倍早い (Carbon Trust, 2014)。ダイレクト・クランピングを用いれば杭の処理が容易になり、ハンマのプレーシング/位置合わせの手順を設置プロセスから省くことができる。
  - ✓コスト削減：杭の設置にバイブロハンマを使うと、エネルギーと時間を節約でき、コストを約半分にカットできる (Carbon Trust, 2014)。
  - ✓撤去が容易：インパクトハンマとは異なり、バイブロハンマは杭を完全に撤去することが可能である。
  - ✓生物多様性に与える影響の緩和：杭打ち中に発生する騒音が大幅に低減される。300-1,250Hz の音が低減するので、バイブロハンマを使用すると、海棲哺乳類の可聴領域に含まれる騒音が大幅に低減する。
  - ✓大型のモノパイルを設置可能：バイブロハンマには、複数機を連結することで打設力が大きくなるというユニークな特性がある。この特性により、大口径モノパイルの設置を可能とする。
- ※槌打ち：ハンマ内を落下させるラムの質量を利用して杭を打撃すること。

#### ◆ ウィンド・パワーかみす洋上風力発電所における実例

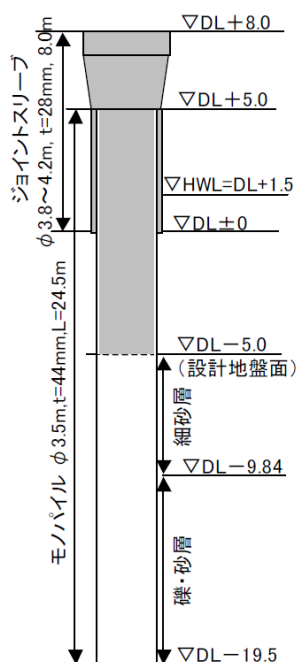
ウィンド・パワーかみす第 1 洋上風力発電所におけるモノパイルの概要図を図Ⅲ.6.2-9 に示す。支持構造物は、直径 3.5m、厚さ 44mm、長さ 24.5m のモノパイルと、タワー本体と接続するための直径 3.8-4.2m、厚さ 28mm、長さ 8.0m のジョイントスリーブ（いわゆる、トランジションピースのこと）から構成されている。

設計は、「建築基礎構造設計指針」等の建築基準に準拠するとともに、波力の算定は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」に従って実施されている。また、グラウト接合は「DNV-



OS-J101 (Design of Offshore Wind Turbine Structures, Oct. 2007)」に準拠した設計が行われている。

モノパイルの打設は、陸上に設置された 750t のクローラクレーン (施工能力 100t) に取り付けられた 500tf・m 級の油圧ハンマー (S-500) により行われた (図Ⅲ.6.2-10)。



図Ⅲ.6.2-9 モノパイルの構造  
(吉田ら, 2010)

図Ⅲ.6.2-10 陸上から作業中のクローラクレーン  
(岡野, 2010)

施工は、モノパイルの鉛直精度を確保するために、導杭を打設し架台を取り付けてモノパイルを固定し、ヤットコ (モノパイルの径と S-500 のスリーブ部分の径を合わせる調整治具) をモノパイルの上に乗せて打設するやり方で行われている (騒音防止の観点から土曜日と日曜日の打設は行っていない) (図Ⅲ.6.2-11、図Ⅲ.6.2-12)。打設精度 (鉛直度) は、管理値 $\pm 1.5^\circ$  に対して、最大  $1.2^\circ$ 、平均  $0.6^\circ$  であった。

打設回数は一基当たり約 1,500 回 (3-4 時間)、準備・打撃・移動等のサイクルとしては 1 基当たり 5 日を要している。なお、かみす第 1 洋上風力発電所の工事は、前述のように陸上に設置されたクレーンにより行われているものの、ヨーロッパにおけるモノパイルの洋上施工日数は 2.5-3.0 日 (風車: 3.6MW) と 3.0-3.5 日 (風車: 5MW) とされており (日本船舶技術研究協会, 2013)、SEP 船を使用した施工であってもヨーロッパの方が施工に要する所要日数が短く済んでいる。

また、ウィンド・パワーかみす第 2 洋上風力発電所の基礎工事の一部では、SEP 船 (くろしお、あそ) を使用してモノパイルの打設が行われている。



図Ⅲ.6.2-11 導杭打設状況（岡野, 2010）



図Ⅲ.6.2-12 モノパイル打設状況（岡野, 2010）

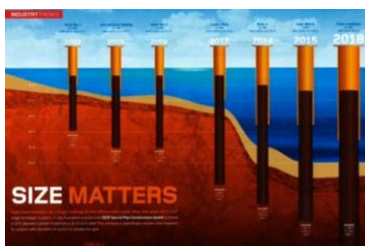
**【豆知識Ⅲ.6.2-1】**

●モノパイルの技術開発

洋上風力発電設備支持構造物の中で、モノパイルは最も多く導入されている構造形式である。これは製造・運搬が容易で、コストも安価なことによる。本方式は、これまで水深 30m 程度までが適用水深とされていたが、EEW Special Pipe Construction GmbH（ドイツ）は直径 9m 超のパイルの製造に成功し、数年後には水深 60m 超の海域へ適用できるとされている。

Carbon Trust（2018）によれば、洋上風力発電の技術革新で欧州において最近焦点となっているのは、設計基準、製造能力、および設置設備の開発を通じてモノパイル方式の最適化を図ることである。これにより非常に大きな直径を持つモノパイル方式の構造物の設置が可能になり、水深の深いサイトにも適用できる。業界は直径 10m のモノパイルの実現が近いとみている。

年	2002	2008	2009	2012	2014	2015	2018?
洋上ウィンドファーム	Horns Rev 1	Lynn, Inner Dowsing	Horns Rev 2	London Array	Baltic 2	Gode Wind II	?
風車の定格出力(MW)	2.0	3.6	2.3	3.6	3.6	5.0	8.0
水深(m)	<14	<18	<17	<25	<50	<60	<60+
モノパイル	長さ(m)	34	45	45	68	74	80
	直径(m)	4.0	4.7	3.9	5.7	6.5	8.5
	重量(tons)	160	350	210	650	930	1050



出典：EEW Special Pipe Construction GmbH：  
<http://a2seanews.editionmanager.com/2013/11/11/size-matters/>

### 【豆知識Ⅲ.6.2-2】

#### ●穿孔モノパイル (Drilled Monopile) の概要

穿孔モノパイルは、コンクリート製のパイルを使用する。その利点は以下の通り。

- ✓コンクリートは、鋼鉄と比較して安価で、価格変動も小さい。
- ✓コンクリート市場においては、産業基盤が広く製造会社が多い。
- ✓コンクリートを使用した穿孔モノパイルでは、鋼鉄製の打込みモノパイルよりも水中騒音の低減が図られる。
- ✓本工法は、様々な海底土質に適用可能である。

##### (1) 穿孔モノパイルの仕様

「3.6MW 機」 外径 6.5m、層厚 50cm、パイル長 61m、質量 1,450t

「5.0MW 機」 外径 6.9m、層厚 70cm、パイル長 64m、質量 2,200t

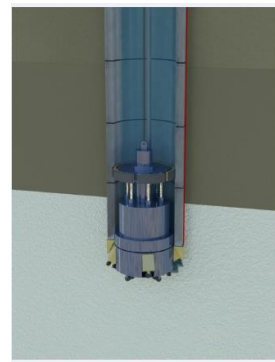
##### (2) 穿孔モノパイルの構造と設置方法

穿孔モノパイルは、プレキャスト強化コンクリートリングを繋ぎ合わせたものである。中には鋼鉄製の掘削機が入っており、先端は固化剤（液体）で満たされている。穿孔モノパイルは洋上風力発電施設の建設サイトまで浮かべて運搬され、ガイド枠内の海底に置かれた後に、モノパイル内に掘削機（径は伸縮可能で、丸石を砕くことができるように2方法に掘削できる）が挿入され、所定の海底土壌深度まで掘削・設置される。そして、最後にコンクリート製（アイスコーン形状）もしくはモノパイル形状の風車接続部（トランジションピース）が据え付けられる。

##### (3) コスト

128 基の洋上ウィンドファームを想定した場合のコスト

- ・ 3.6MW 機:500,000€/MW (5,750 万円/MW) /5.0MW 機:400,000€/MW (4,600 万円/MW) (115 円/€)



出典：von der Veen *et al.* (2011)

#### d. トランジションピースの取付け・グラウチング

モノパイルと風車の接続装置（トランジションピース）を取付け、モノパイルに対する垂直性を確保するためにグラウチング（セメントミルク、モルタルを空隙に充填）を行う。本装置は、風車の荷重をモノパイルに伝達するための十分な強度と剛性を有する構造となっており、風車の高さや傾きを調整するためのアジャスタ機能もある（図Ⅲ.6.2-13）。

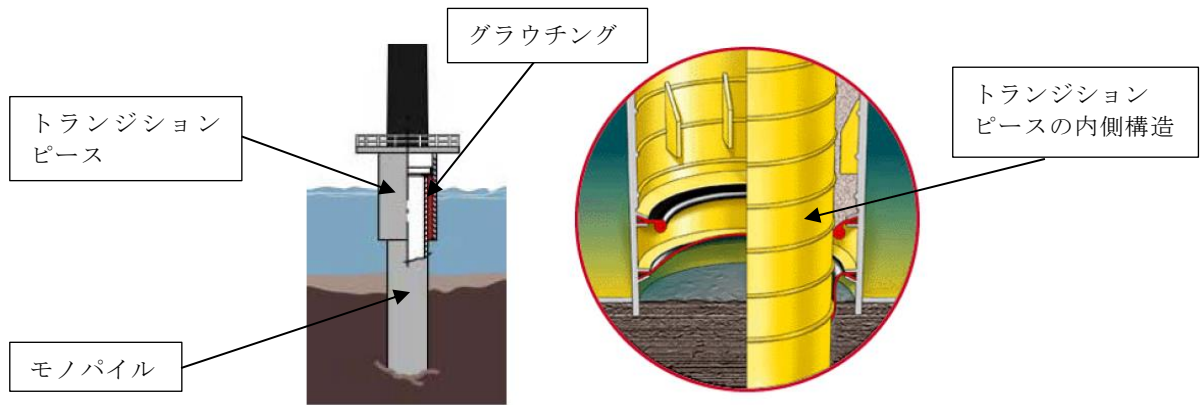


図Ⅲ.6.2-13 トランジションピースの運搬と設置

左図・中図：JUMBO HP (<https://www.jumbomaritime.nl/en/offshore/trackrecord/2014-butendiek/>)、右図：Ballast Nedam (2011)

風車タワーとモノパイルの間の接続部分は、「トランジションピース（前記のかみす第1の例ではジョイントスリーブと称されている）」と呼ばれている（上図のオレンジ色の部分）。トランジションピースとモノパイルの固定は、構造物の隙間にセメント等を注入する方法（グラウチング）によっている。2006年に設置されたオランダの Egmond aan Zee ウィンドファームにおいて、トランジションピースとモノパイルの接続に不具合が生じ、風車の傾斜あるいは沈下の現象が起こった。その対応策として、隙間に剪断キーを取り付けることや円錐形のトランジションピースにして、グラウチングすることがあげられている（図Ⅲ.6.2-14）。後者の方法は London Array ウィンドファームで採用され、DNVによって認可されている。

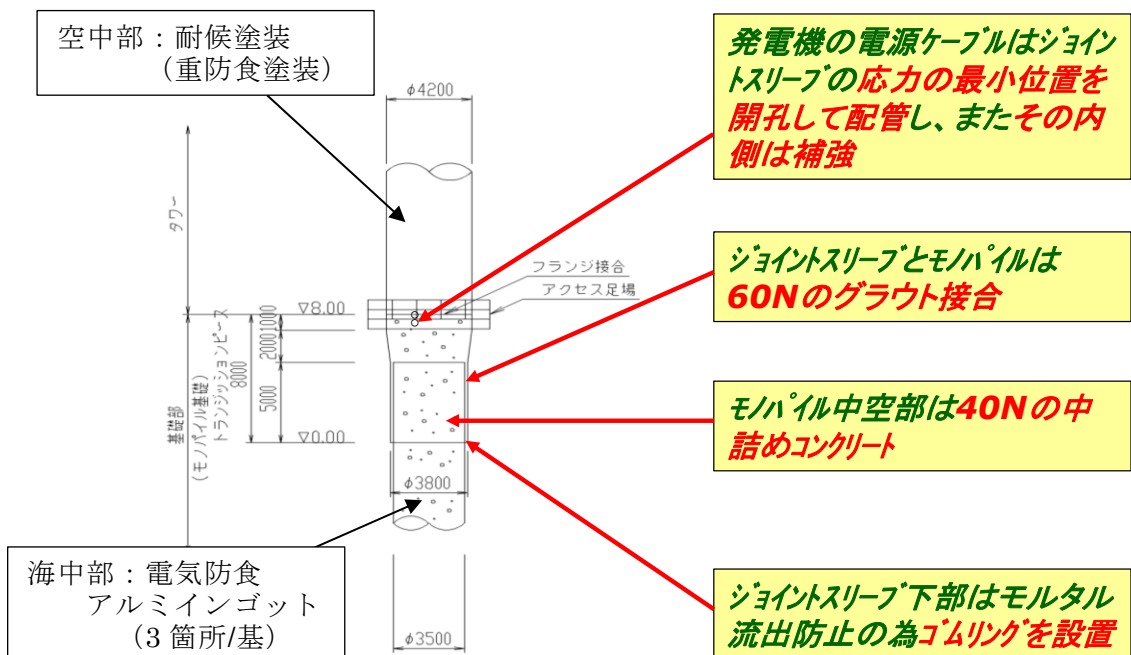
ウィンド・パワーかみす第1洋上風力発電所で使用されたジョイントスリーブでは、グラウト材の漏れ防止として、スリーブ先端にゴムリングが取り付けられており（図Ⅲ.6.2-15）、モノパイルには鉛直精度 1/1000 以下で設置されている。グラウト材には、1基当たり約 6m<sup>3</sup> の水中不分離性高流動無収縮モルタル（マックス AZ）が注入されている。また、中詰めコンクリートは、配合 40-18-20BB のレディミクスコンクリートにより打設されている（図Ⅲ.6.2-16）。



図Ⅲ. 6. 2-14 グラウチングとトランジションピースの構造 (Garrad Hassan, 2009)



図Ⅲ. 6. 2-15 スリーブ先端のゴムリング (牛腸ら, 2010)



図Ⅲ. 6. 2-16 スリーブ先端のゴムリング (岡野, 2010 を一部改変)

## ②施工精度

港湾・沿岸域における風力発電推進研究会（2005）は、モノパイルの施工精度に関して港湾施設における出来形基準を参考に、以下のように取りまとめている。

＊杭頭中心位置：10cm 以下

＊天端高：±5cm

＊傾斜：直杭 2 度以下

（打設精度（鉛直度）の管理値±1.5°（かみす第 1 洋上風力発電所）

### 【豆知識Ⅲ.6.2-3】

#### ●トリパイル式

トリパイルは、モノパイルの発展形と言われている支持構造物である。本支持構造物は、2008 年に BARD 社の 5MW 機の実証研究で採用された。その後、ドイツの北海における水深 40m、離岸距離 99km の海域に、2012 年から 2013 年にかけて建設された BARD Offshore I-IV の洋上ウィンドファーム（400MW：5MW×80 基）で採用されている。

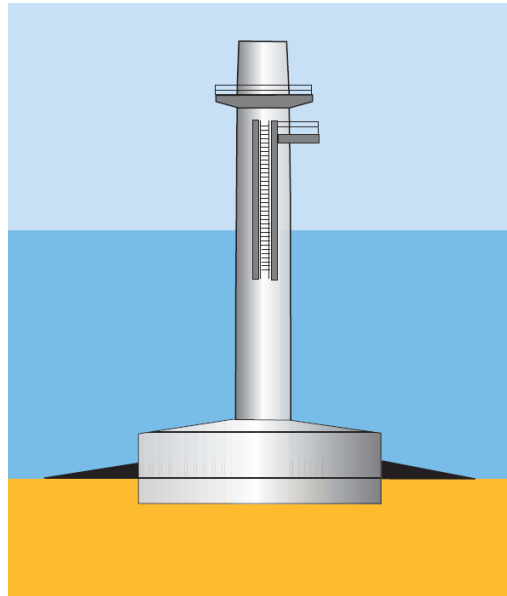


youris.com HP : <http://www.youris.com/Energy/Gallery/Gone-With-The-Wind-Farms--Six-Of-The-WorldS-Top-Offshore-Arrays.kl>

## 2) 重力式

図Ⅲ.6.2-17に重力式の洋上風力発電施設例を示す。重力式は、円錐状、箱状等の構造物を支持層に沈設させ、上部の構造物に作用する外力（波、風等）を地盤（支持層）に伝える支持構造物である（港湾・沿岸域における風力発電推進研究会,2005）。

一般的には、水深 30m 以浅で比較的堅牢な地盤の平坦地形に適用されるもので、欧州では施工実績はモノパイル式に次ぐ順位にあるが、その割合は約 14% (2013 年末) と少ない。ただし、結氷するデンマーク等では耐氷性能の点でアイスコーン型が採用されるケースもある。



図Ⅲ.6.2-17 重力式の外觀図（EWEA, 2011）

5MW 級風車を対象とした重力式構造物の重量とともに、直径等の寸法を表Ⅲ.6.2-3 に示す。欧州では、浅海で海況がそれほど厳しくない場合にコンクリート製の重力式が使用されている。コンクリートとバラストの使用によりコストは高くなるものの、鋼材費に比べて材料費の流動性がかなり低いため、鋼価格が高い時はコンクリート価格が低い場合が多い（The Crown Estate,2010）。

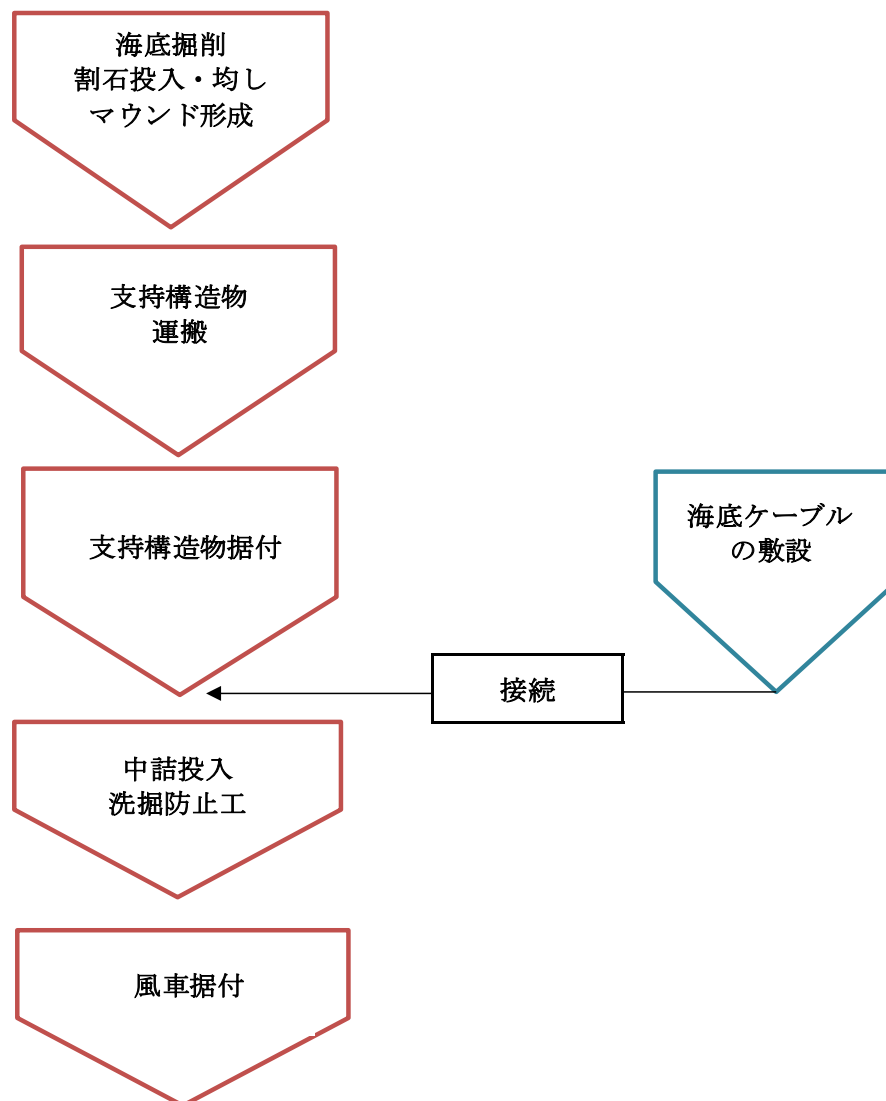
表Ⅲ.6.2-3 5MW 級の重力式支持構造物の諸元

水深 (m)	重量 (t)	寸法
≤40m	~2,700-3,000t (水深:27-30m)	直径(天端): ~6m 直径(底面): ~25m 厚み: ≤300mm 長さ: ≤40m

出典：MECAL (2014)

### ① 施工方法

重力式の施工の流れを図Ⅲ.6.2-18に示す。図示しているように概略の工程は、海底掘削・マウンド形成→支持構造物の運搬→支持構造物の設置・中詰投入→支持構造物の上部工→風車据付となる。日本船舶技術研究協会（2013）では、欧州における重力式の実勢設置所要日数として、3.6MW機で3-5.5日、5MW機で3.5-6日としている。



図Ⅲ.6.2-18 重力式の施工の流れ

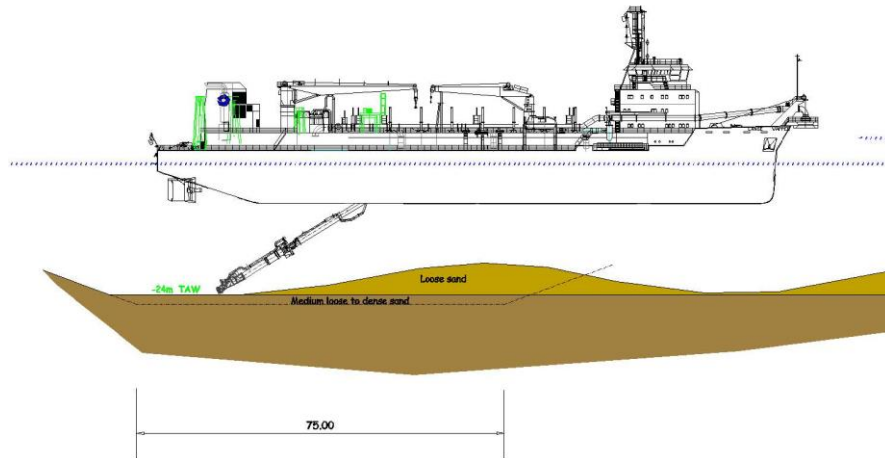
#### a. 海底掘削・マウンド形成

マウンドの形成は、海底掘削、割石投入、敷き均し等を通して地盤を改良し、重力式支持構造物を設置する重要な工程である。本工程の主目的は、「海底の十分な支圧強度を得ること」および「風車を垂直に建てるために海底の水平度を確保すること」である（Ismael Ruiz de T.Alonso,2013）。

- ✓掘削：バージ船に載せたバックホウ掘削機やスリット式ホッパーバージ船により掘削が行われていたが、現在では比較的水深の深い海域でも適応可能なホッパードレッジャー（底開き浚渫船）が使用される（図Ⅲ.6.2-19）。掘削された土砂は、重力式構造物の中詰材料（充

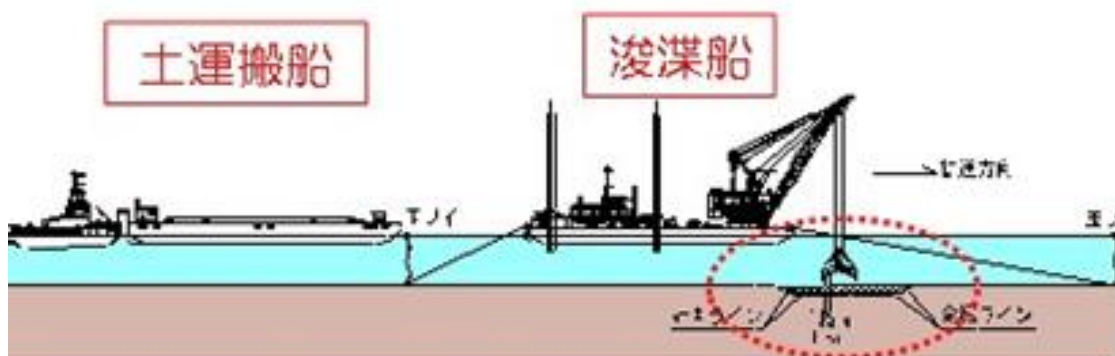


填物)として利用される場合がある。浚渫深度は、水深、岩石の性状、地質構造、地盤特性等によって異なるが、大体 0.5-10m 以上の範囲である。



図Ⅲ.6.2-19 海底の掘削 (Patrick Mengé, Nathalie Gunst, 2008)

- ✓マウンドの形成：浚渫後、マウンド作りとなる (図Ⅲ.6.2-20)。その方法は、
- i) 鋼鉄製の枠を沈め、ダイバや GPS を使って中心の位置決めを行う。
  - ii) 海底面の清掃
  - iii) 枠内に砂利、碎石等を投入する。
  - iv) ダイバが鋼鉄製の枠の上部に付いている可動ブームにより海底部を水平にする。
  - v) フレームの回収
- である。もしマウンドを固めるのであれば、セメントグラウト注入を行う場合もある。



図Ⅲ.6.2-20 支持基盤層の整備

濾過層 (Filter layer) と砂利層 (Gravel layer) の粒径に関して、前者は 0-63mm、後者は 10-80mm と設定され、広く用いられている。ベルギーの洋上ウィンドファーム (Thornton Bank) では全層厚 2.2m のうち、1.5m が濾過層、0.7m が砂利層となっている。マウンドの表面は、平均±3-5cm の誤差で水平度を保持することが重要である。なお、欧州ではマウンド工事は 1 基礎当たり 3 日間とされている (Danish Energy Agency, 2013)。

b. 支持構造物の運搬と据付

いくつかの重力式支持構造物の主な寸法を、以下に示す。支持構造物は風車の大型化、水深の増加に伴い巨大な構造物になっている。

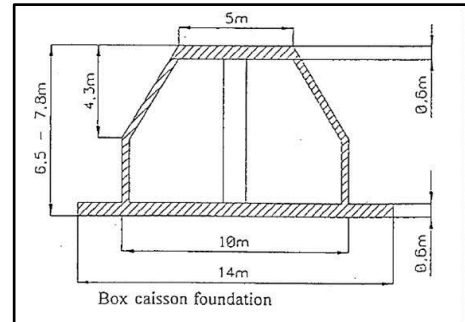
✓Tunoe knob (デンマーク:5MW 0.5MW×10 基,平均水深 5m/1995 年設置)

底面径:14m

高さ:6.5-7.8m

質量:約 500t (充填砂込み:約 1,000t)

(Madsen,1996)

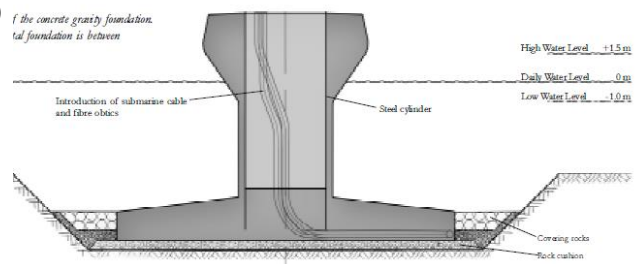


✓Middelgrunden (デンマーク:40MW 2MW×20 基,平均水深 4m/2000 年設置)

底面径:12.5m 高さ:10m

質量:約 1,500t (充填砂込みか否か不明)

(Copenhagen Environment and Energy Office,2003)

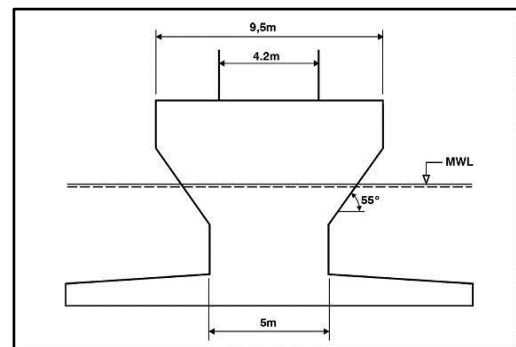


✓Lillgrund (スウェーデン:110.4MW 2.3MW×48 基,平均水深 4m/2007 年設置)

底面径:17m 高さ:8.6m

質量:約 1,200t (充填砂込み:約 2,500t)

(Vattenfall,2008)



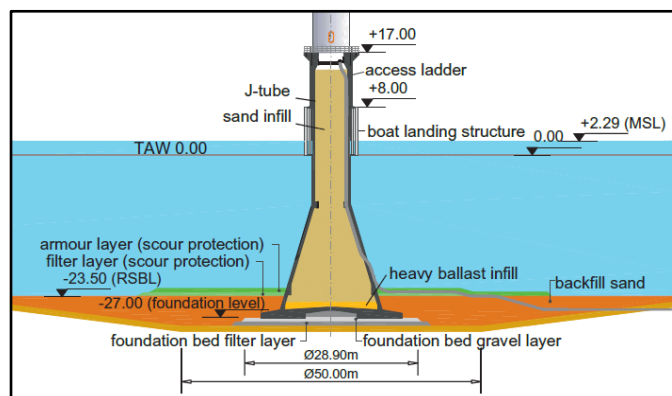
✓Thornton Bank I (ベルギー:30MW 5MW×6 基,平均水深 10.5m/2008 年設置)

底面径:23.5m 高さ:42m

質量:約 2,700-3,000t

(充填砂込みか否か不明)

(Peire et al.,2009)



本ガイドブックⅢ.4.4節に記したように、銚子沖の洋上風車用の重力式の仕様は、底面径 21m、高さ 22m、質量約 5,400t（中詰材（銅水砕スラグ）を除くと約 2,300t）である（図Ⅲ.4.4-5を参照）。上記のベルギーThornton Bank I の重力式支持構造物の高さは、水深の深い海域に設置されるため高いが、その底面径は銚子沖のそれとほぼ同じようなスケールとなっている。この相違は、主に波力の違いによるものと考えられ、銚子沖の波荷重は Thornton Bank のそれと比べて厳しいものと推察される。

重力式構造物は、「陸上」、「ドライドック」および「フローティングドック」で製造し、現地に運搬する方法がある。図Ⅲ.6.2-21 は、Middelgrunden のドライドックにおける製造例、図Ⅲ.6.2-22 は Lillgrund のポンツーンを使った製造例である。後者では、7-8 ヶ月で 49 基の支持構造物を製作し、コスト削減が図られたとの報告がある（Mathis,2006）。



図Ⅲ.6.2-21 重力式構造物のドライドックにおける製造（Copenhagen Environment and Energy Office, 2003）  
Middelgrunden



図Ⅲ.6.2-22 重力式構造物のポンツーン上における製造と運搬（Vattenfall, 2008）  
Lillgrund

支持構造物の運搬方法として、図Ⅲ.6.2-23 に示すようにバージやポンツーンに数基の支持構造物を載せて運搬する方法や、クレーン船（起重機船）により運搬する方法がある。



図Ⅲ. 6. 2-23 重力式構造物のバージ（左図:Lindvig, 2009）と起重機船（右図:Lindvig, 2011）による運搬

支持構造物の据付では、フローティングクレーンや起重機船から図Ⅲ.6.2-24 に示すような専用の吊り下げフックを用いて着底させる（図Ⅲ.6.2-25）。



図Ⅲ. 6. 2-24 吊り下げフック（Lindvig, 2010）



図Ⅲ.6.2-25 フローティングクレーンによる重力式支持構造物の据付

左図：Middelgrundten (Copenhagen Environment and Energy Office,2003)

右図：Lillgrund (Vattenfall,2008)

Carbon Trust (2018) によれば、重力式は基礎構造の設置場所への輸送方法によって 2 種類に分けられる。

✓浮沈構造方式：この技術は、大きな容積で浮力のある構造物を使うものである。つまり、比較的安価なタグボートを使って洋上のサイトまで基礎を運ぶことができ、大型運搬船を必要としない。サイトまで運ばれれば、水を注入して構造物を海底にバラストで安定させ、砂か砂利で恒久型バラストにして据え付ける。

✓リフティング方式：このシステムは、サイズが比較的コンパクトで済むというメリットがある（通常、必要なコンクリートの量が少ない）。しかしながらこの方法は、重量物吊上げクレーンやバージを組み合わせたような輸送船に多額の投資が必要となる。

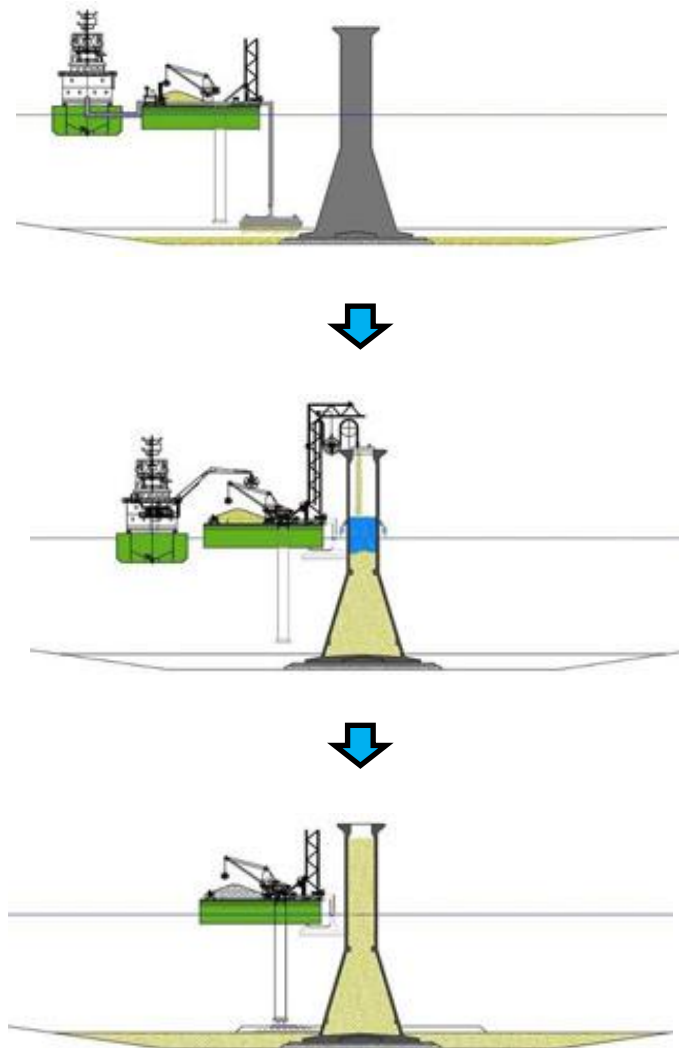
また、基礎構造が洋上ウィンドファームで単独で設置されるか、陸上で風力発電機と一緒に設置されるかによっても分類される。

✓基礎構造単独：基礎構造のみを洋上ウィンドファームまで輸送する。

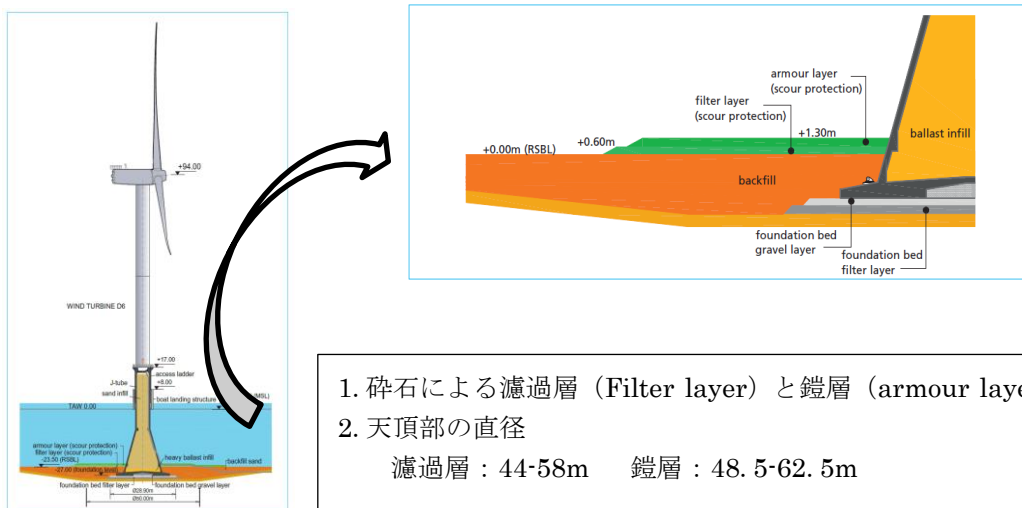
✓統合輸送：基礎構造、タワー、およびローター・ナセル・アセンブリ (RNA) を陸上で組み立て、一緒に洋上ウィンドファームまで輸送する。

### c. 中詰投入・洗掘防止工

重力式支持構造物の据付後には、中詰として浚渫砂等を投入するが (図Ⅲ.6.2-26)、構造物の不等沈下を起こさないように十分に注意して行う。そして、構造物の周囲には洗掘防止工を施して据付工事は完了となる (図Ⅲ.6.2-27)。



図Ⅲ. 6. 2-26 重力式支持構造物の中詰作業手順 (Patrick Mengé, Nathalie Gunst, 2008)



図Ⅲ. 6. 2-27 Thornton Bank Iにおける洗掘防止工の例 (Peire *et al.*, 2009)

## ② 施工精度（管理値）

〈マウンド〉

- ・  $\pm 3\text{-}5\text{cm}$  （Ismael,2013）
- ・  $\pm 5\text{cm}$  （東京電力:銚子沖）
- ・  $0.3^\circ$  未満、方向のズレ  $1^\circ$  未満 （電源開発:北九州市沖）

〈重力式支持構造物〉

- ・ 洋上風車：傾斜  $0.82^\circ$  以内、中心位置  $\pm 3.3\text{m}$  （東京電力:銚子沖）
- ・ 観測タワー：傾斜  $0.95^\circ$  以内、中心位置  $\pm 3.3\text{m}$  （東京電力:銚子沖）
- ・ 洋上風車・観測タワー： $0.3^\circ$  未満、方向のズレ  $1^\circ$  未満（電源開発:北九州市沖）

なお、港湾・沿岸域における風力発電推進研究会（2005）は、ケーソンの施工精度に関して港湾施設における出来形基準を参考に、以下のように取りまとめている。

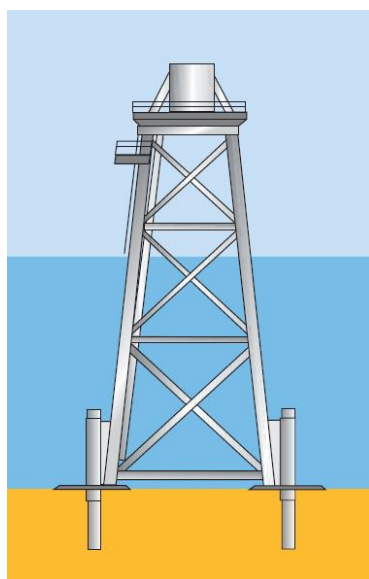
〈ケーソンの据付〉

- \* 法線に対する出入： $\pm 20\text{cm}$  ( $< 2,000\text{t}$ )、 $\pm 30\text{cm}$  ( $\geq 2,000\text{t}$ )
- \* 目地間隔： $\pm 20\text{cm}$  ( $< 2,000\text{t}$ )、 $\pm 30\text{cm}$  ( $\geq 2,000\text{t}$ )

### 3) ジャケット式

図Ⅲ.6.2-28 にジャケット式の洋上風力発電施設例を示す。ジャケット式は、鋼管トラスを鋼管杭で海底に固定する構造形式である。鋼管トラスにより下部構造の水平剛性を高めるとともに、上部の構造物に作用する外力をトラス骨組により杭を介して地盤（支持層）に伝える支持構造物である（港湾・沿岸域における風力発電推進研究会,2005）。

一般的には、水深 60m 以浅で比較的軟弱な地盤の傾斜地形に適用されるものである。世界における施工実績の割合は約 5%（2015 年）と少ないが、今後、洋上風力発電施設の建設が水深の深い海域に計画されていることや、我が国のように地震の多い所ではその粘り強さのために、ジャケット式の施工数は増加するものと考えられる。



図Ⅲ. 6. 2-28 ジャケット式の外觀図（EWEA, 2011）

5MW 級風車を対象としたジャケット式構造物の重量とともに、直径等の寸法を表Ⅲ.6.2-4 に示す。ジャケット式の製造工程は、モノパイルに比較して非常に多く、それが高コストの要因の一つとなっている。水深 30m ではジャケットの重量は約 800t となるものの、モノパイルはそれよりもはるかに重いことから、水深がそれ以上になるとジャケット式がモノパイル式に代わってコスト競争力に優れることとなる（The Crown Estate,2010）。

表Ⅲ. 6. 2-4 5MW 級のジャケット式支持構造物の諸元

水深 (m)	重量 (t)	寸法
20-60m	~550-1,650t	天端断面幅(長さ) : ~6m 底面断面幅(長さ) : ~19m 鋼管肉厚 : ≤30mm 長さ : ~30-70m(海面上のトランジション・ピースを含む長さ)

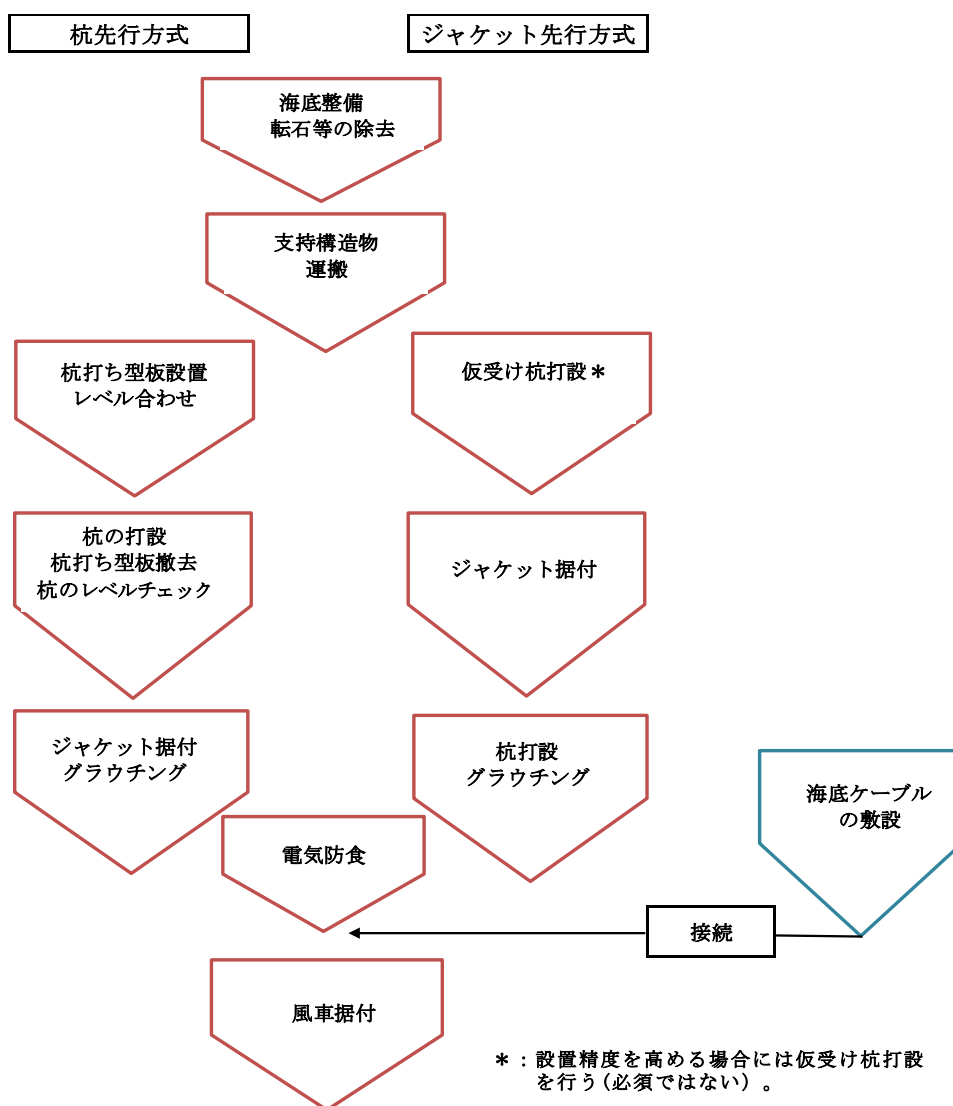
出典 : MECAL (2014)



## ① 施工方法

ジャケット式の施工の流れを図Ⅲ.6.2-29に示す。図示しているように施工方法には、杭先行方式およびジャケット先行方式の2方式がある。両方法の違いは、本杭の打設をジャケットの据付の前後に行うか否かである。杭先行方式における概略の工程は、海底整備→支持構造物の運搬→杭打ち型板設置→杭の打設→支持構造物の据付→風車据付となる。日本船舶技術研究協会（2013）では、欧州における重力式の実勢設置所要日数として、3.6MW機で4-6日、5MW機で4.5-6.5日としている。

以下、杭先行方式を取り上げて、その施工方法の概要を示す。



図Ⅲ.6.2-29 ジャケット式の施工の流れ

### a. 海底整備

基本設計の段階で海底土質調査を実施しているが、ここでは転石等を除去し、ジャケット設置の位置決めを行う。

## b. 支持構造物の運搬

ジャケットの構造材は鋼管製で、工場内で製作される。図Ⅲ.6.2-30 は、2006 年に英国北部スコットランドのモレー湾（水深 45m）に設置された Beatrice 洋上風力発電施設（10MW；5MW×2 基）のジャケットと天頂部のトランジションピースの製作状況である。重量は、ジャケットが 600t、トランジションピースが 150t とされている（MacLeny,2006）。ジャケットとトリポッド（モノパイルとジャケットのハイブリッド形と位置づけられている。本ガイドブックⅡ.1.2 項を参照）の鋼材量の比較表を表Ⅲ.6.2-5 に示す。ジャケットの重量は、5MW 機、水深 40m の場合、杭用の鋼材を含めて 1,000t 程度であるが、トリポッドは約 1,300t と、ジャケットよりも約 3 割も重い推計となっている。



図Ⅲ.6.2-30 ジャケット（左図）とトランジションピース（右図）の製作状況  
(Robertson, 2008)

表Ⅲ.6.2-5 ジャケットとトリポッドの鋼材量の比較表

水深 (m)	鋼材重量 (t) ジャケット式(上段)/トリポッド式(下段)			杭用鋼材重量 (t) ジャケット式(上段)/トリポッド式(下段)			総鋼材重量 (t) ジャケット式(上段)/トリポッド式(下段)		
	風車の定格出力 (MW)			風車の定格出力 (MW)			風車の定格出力 (MW)		
	3.0-3.5	3.6-4.4	4.5-6.0	3.0-3.5	3.6-4.4	4.5-6.0	3.0-3.5	3.6-4.4	4.5-6.0
20	360	420	550	110	120	140	470	540	690
	350	480	640	160	210	260	510	690	900
30	450	520	780	130	140	160	580	660	940
	470	665	920	200	240	280	670	905	1,200
40	—	650	880	—	160	180	—	810	1,060
	—	815	1,090	—	270	300	—	1,085	1,390
50	—	—	960	—	—	200	—	—	1,160
	—	—	1,230	—	—	320	—	—	1,550

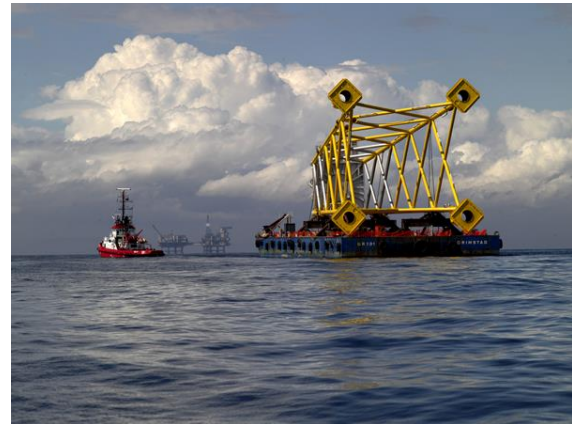
注) 基礎構造：ジャケット式(上段)、トリポッド式(下段)  
出典) Mitzlaff and Kahle(2007)

ジャケットの運搬状況の例として、工場の岸壁に集められたジャケット、単機の運搬（横置き、縦置き）、複数機の運搬を図Ⅲ.6.2-31 に示す。陸上クレーンあるいは起重機船によりジャケットを台船に積み込み、曳航して設置海域に向かう。海上運搬にあたっては、気象・海象条

件および現場条件を考慮して、台船の安定、引き船の所要馬力等を検討し、適切な船団を選定する必要がある（港湾・沿岸域における風力発電推進研究会,2005）。



トリポット



ジャケット



トリパイル

図Ⅲ.6.2-31 ジャケットの運搬状況(Lindvig, 2010)

#### c. 杭打ち型板設置・杭の打設

杭打ちは、杭打ち専用船、起重機船、クレーン船等を用いて行うが、杭先行方式では杭打ち精度を確保するために杭打ち型版を使って行う。打設には、打込み・引抜き可能なバイプロハンマーの使用や導材を設置する方法が有効である（港湾・沿岸域における風力発電推進研究会,2005）。

#### d. 支持構造物の据付

ジャケットは、起重機船あるいは SEP 船（本節の(3)を参照）で吊り上げて据え付ける。以下、港湾・沿岸域における風力発電推進研究会（2005）の報告書に起重機船による据付作業の詳細が掲載されているので、その主要な部分を引用する。

起重機船シフトを行った後に、台船を起重機船に接舷してジャケットレグの固縛材をガス切断により外す。あらかじめ起重機船の主フックに吊りワイヤーを所定本数分だけ取り付けておき、固縛解除後に吊りワイヤーの端部数箇所をシャックルにてジャケット本体の吊環に取り付ける。同時に、ジャケットの振止め用のタガーライン 2 本をジャケット上部に取り付ける。次

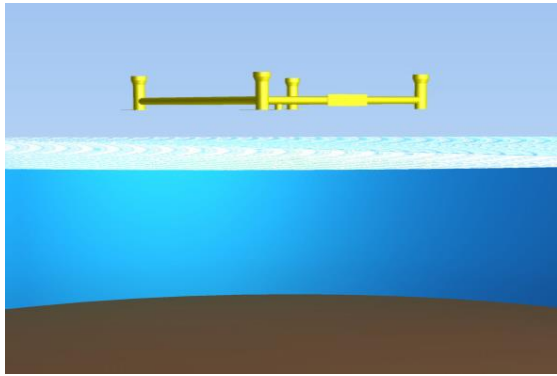
に、起重機船のフックを巻き上げるが、このとき、複数のフックを使用する場合には荷重負荷が同等となるように、吊り荷重を暫時増加して、最後に吊り上げる（図Ⅲ.6.2-32（左図））。そして、ジャケットを吊り上げ、旋回後に台船を離舷・出域させる。ジャケットを杭の上方まで吊り下ろしたら、潜水土等によりジャケットの位置を確認して杭頭に預ける。このとき、荷重負荷をジャケット水中重量の20%程度に残しておくが良い。再度杭との接触状況を確認して、支障がなければ吊り荷重を完全に解放し、据付位置（平面位置、高さ）の計測結果が許容値の範囲内であれば、吊り具を解除する（図Ⅲ.6.2-32（右図））。なお、杭先行方式では杭の設置精度の影響が大きいため、事前に吊り上げ状態でのジャケットの変位を計算し、吊り治具の調整方法を確認しておく必要がある。

ジャケットと杭の接合には、グラウト結合と溶接接合の2つの方法があるが、洋上風力発電の場合には、前者のジャケットレグと杭の空隙にグラウト剤（セメント、モルタル等）を充填するケースが多い。

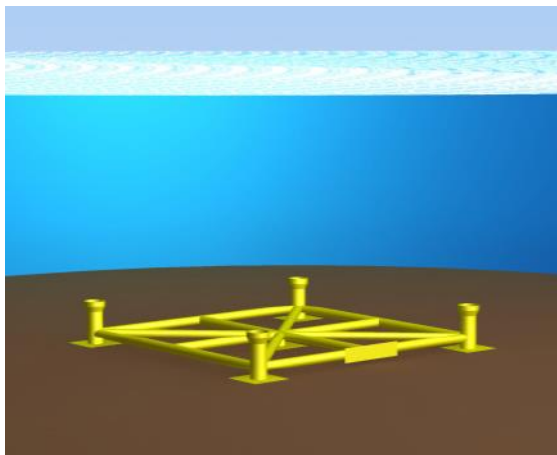
参考のために、杭先行方式によるジャケットの据付の手順を図Ⅲ.6.2-33a,bに示す。



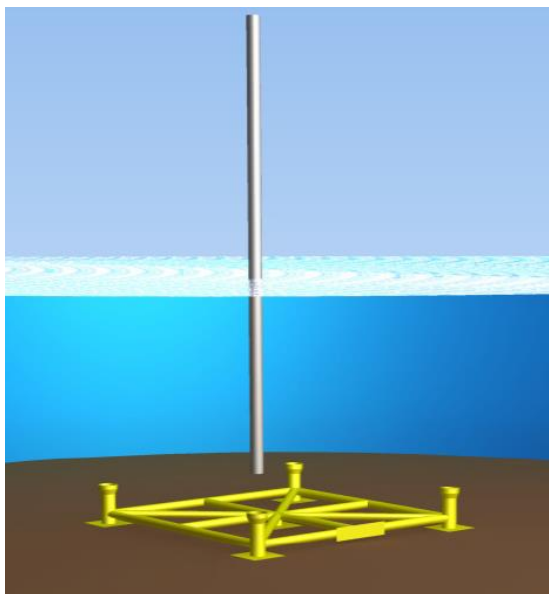
図Ⅲ.6.2-32 ジャケットの吊り上げ（左図：Ballast Nedum, 2011）と据付（右図：Robertson, 2008）状況



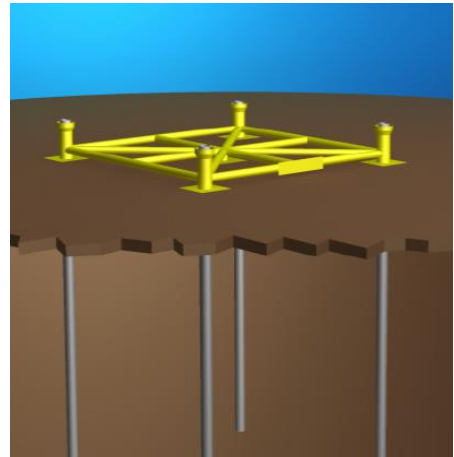
① 杭打ち型板（テンプレート）の位置決め



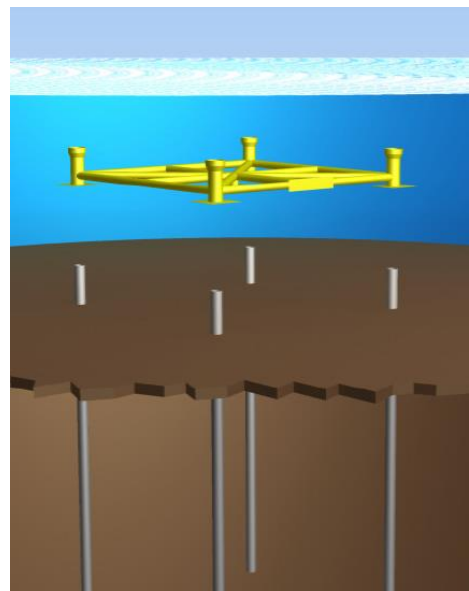
② 杭打ち型板の海底設置・レベル合わせ



③ 最初の杭の位置決め

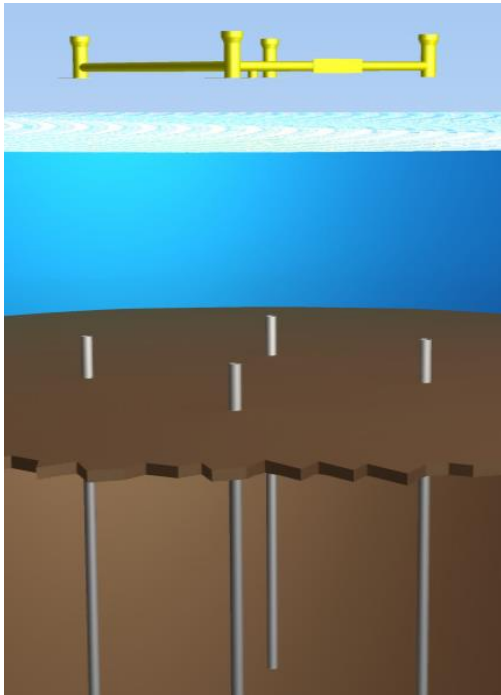


④ 全杭の打設

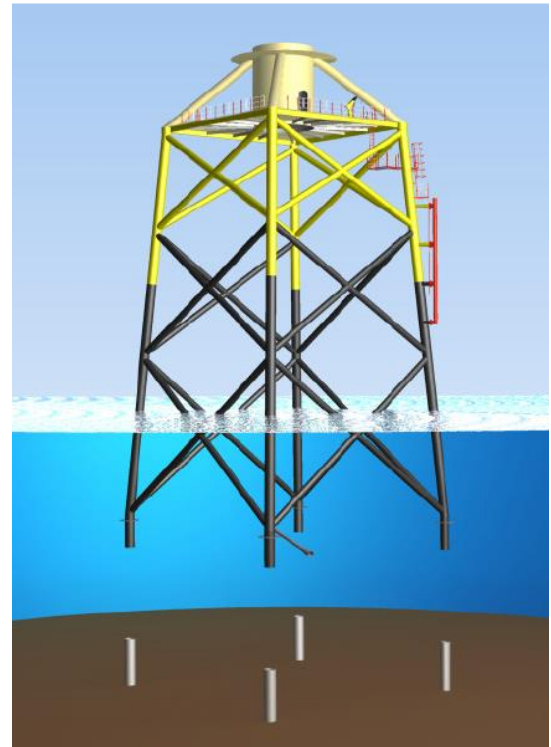


⑤ 杭のレベルチェック

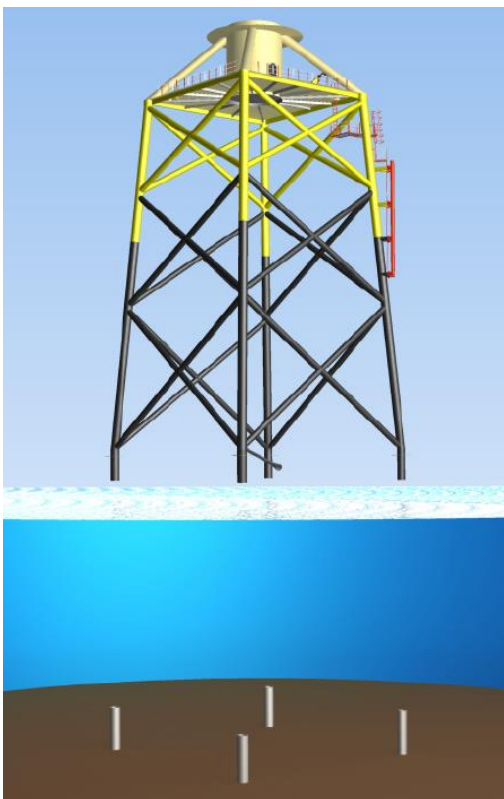
図Ⅲ. 6. 2-33a 先行杭方式によるジャケットの据付工事のプロセス (Robertson, 2008)



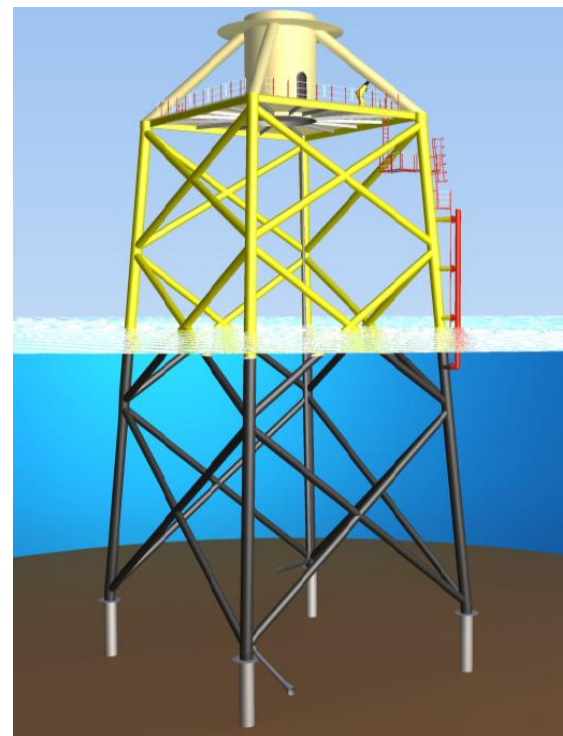
⑥ 杭打ち型板の撤去・杭の  
レベルチェック



⑧ 杭上のジャケットレグの位置決め



⑦ 杭打ち型板の撤去・杭の  
レベルチェック



⑨ ジャケット設置完了  
(グラウト工完了)

図Ⅲ. 6. 2-33b 先行杭方式によるジャケットの据付工事のプロセス (Robertson, 2008)

## ② 施工精度

港湾・沿岸域における風力発電推進研究会（2005）は、ジャケットの施工精度に関して港湾施設における出来形基準およびジャケット工法技術マニュアルを参考に、以下のように取りまとめている。

### 〈杭の打設〉

＊杭頭中心位置：10cm 以下

＊天端高：±5cm

＊傾斜：直杭 2 度以下

### 〈ジャケットの据付〉

＊法線に対する出入：単体±30cm、複数 1 基目±30cm、複数 2 基目±10cm

＊天端高：±15cm

＊傾斜：±1/50

## (2) 風車の設置工事

風車本体の支持構造物への取付けは、タワー、ナセル、ロータの順で行われる。取付け工事は現場の気象・海象条件に制約されるため、計画時に稼働率を推定するとともに、備船の可能性や回航費を勘案し、クレーン船や建機を選定する。一例として、図Ⅲ.6.2-34 に洋上ウィンドファーム建設時の風車の運搬・設置状況を示す。



上図：デンマークの Nysted (165.6MW:2.3MW×72 基,2003 年稼働)

(Dong Energy et al.,2006)

中図：イギリスの Beatrice Demonstraion (10MW:5MW×2 基,2006 年稼働)

(MacAskill,2007)

下図：オランダの Egmond aan Zee (108MW:3MW×36 基,2006 年稼働)

(van Kuik et al.,2006)

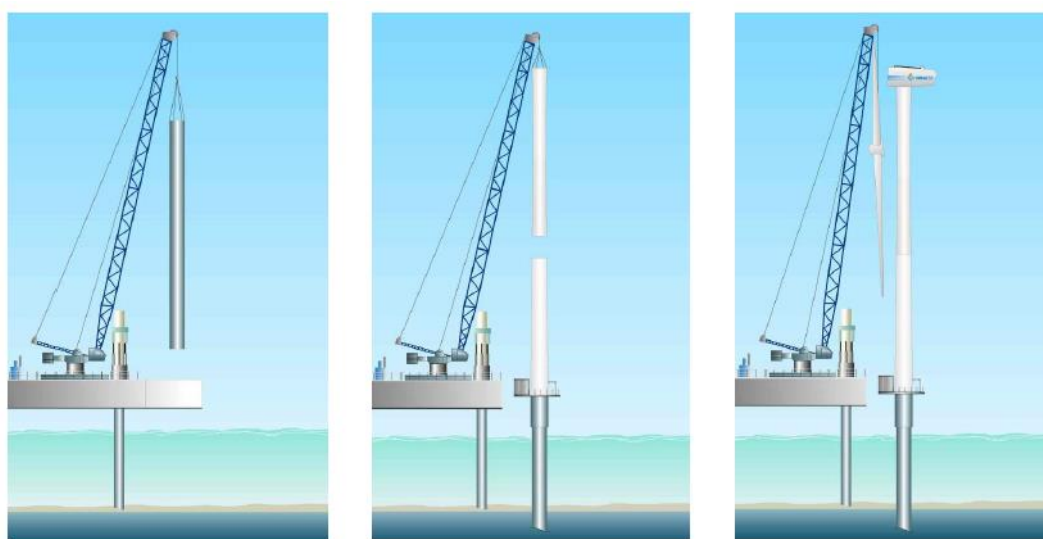
図Ⅲ.6.2-34 風車の運搬・設置状況



図Ⅲ.6.2-35 は、モノパイル式の支持構造物に風車を設置する模式図で、左図はモノパイルの吊り下ろし、中図はタワーの組み立て、右図はブレードの取付けである。支持構造物や風車本体の取付けには、全旋回デリックバージ等が使われていたが、最近では波浪の影響の少ない自己昇降式作業台船（SEP 船：本項の(3)を参照）が用いられることが多い。参考までに、近年洋上風車として導入実績の多い代表的なメーカーのカタログから、風車の部位別重量を表Ⅲ.6.2-6に示す。

表Ⅲ. 6. 2-6 代表的な洋上風車の部位別重量 (Lindvig, 2010 より作成)

風車	部位	重量(t)	風車	部位	重量(t)	風車	部位	重量(t)
Siemens 2.3MW	ハブ	32.3	Vestas V90, 3MW	ハブ	40	Multibrid 5M	ハブ	62
	ブレード	9.2		ブレード	9+		ブレード	49.5
	ハブ+ブレード	60		ハブ+ブレード	67+		ハブ+ブレード	111.5
	ナセル	82		ナセル	70		ナセル	233
	タワー	130		タワー	110		タワー	200
	全体	246		全体	247+		全体	544
Siemens 3.6MW	ハブ	42.4	Vestas V112, 3MW	ハブ	45	REpower 6M	ハブ	84
	ブレード	17.2		ブレード	11		ブレード	72
	ハブ+ブレード	95		ハブ+ブレード	78		ハブ+ブレード	156
	ナセル	125		ナセル	80+		ナセル	316
	タワー	180		タワー	130		タワー	285
	全体	400		全体	288+		全体	757



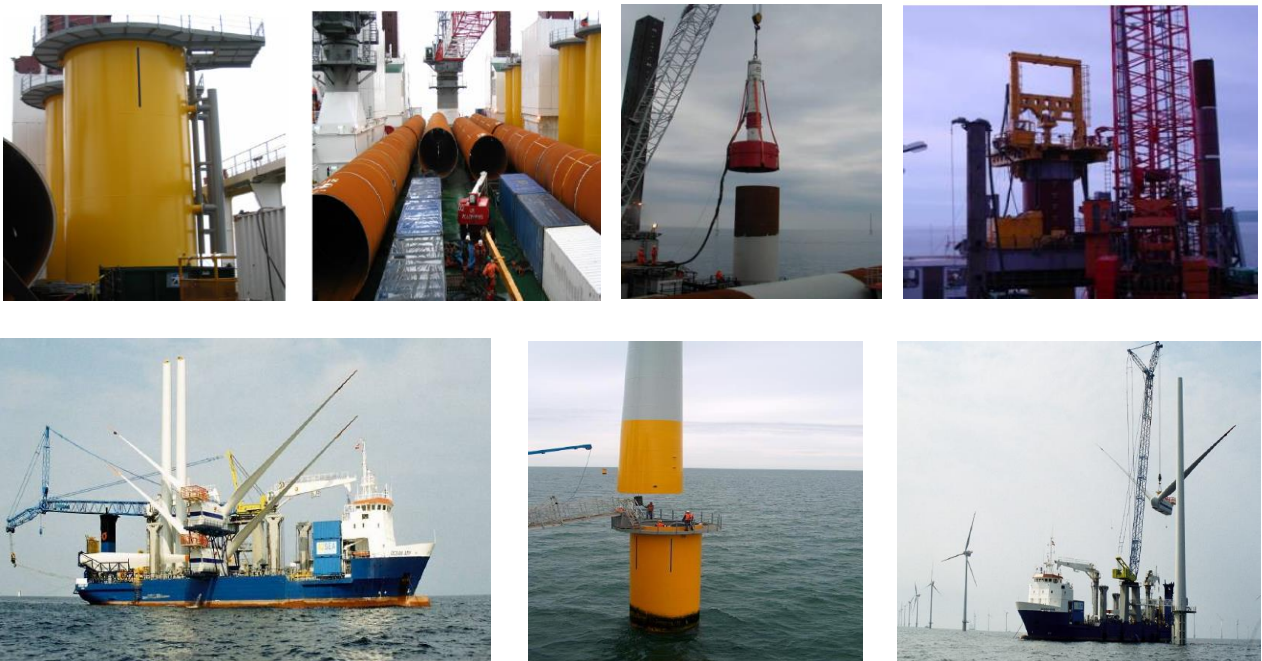
図Ⅲ. 6. 2-35 風車の設置工事の模式図 (Garrad Hassan, 2009)

デンマークの Horns Rev (160MW:2MW×80 基,2002 年稼働)、イギリスの Robin Rigg (174MW:3MW×58 基,2010 年稼働) およびデンマークの Middelgrunden (40MW:2MW×20 基,2000 年稼働) における風車の設置工事の概要を、それぞれ図Ⅲ.6.2-36、図Ⅲ.6.2-37 および図Ⅲ.6.2-38 に示す。



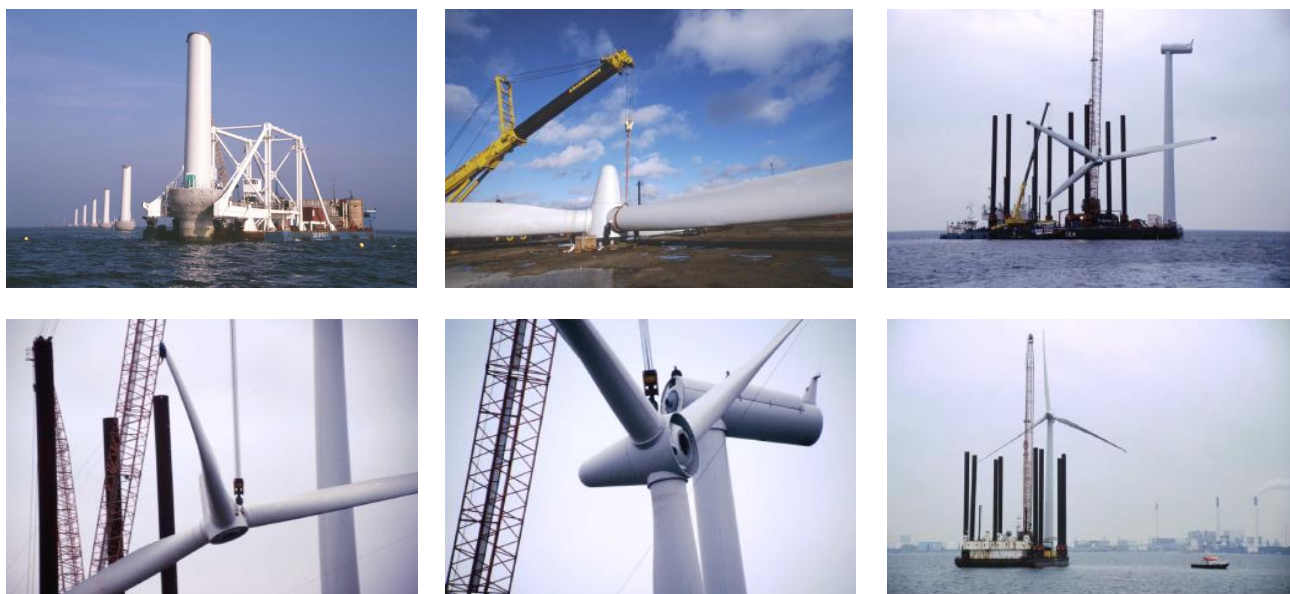
工事の順序:上左図→上右図→下左図→下右図

図Ⅲ. 6. 2-36 Horns Rev における風車の設置工事 (Japan Ocean Development Construction Association, 2002; 下右図のみ Garrad Hassan, 2009)



工事の順序:上左図→上右図→下左図→下右図

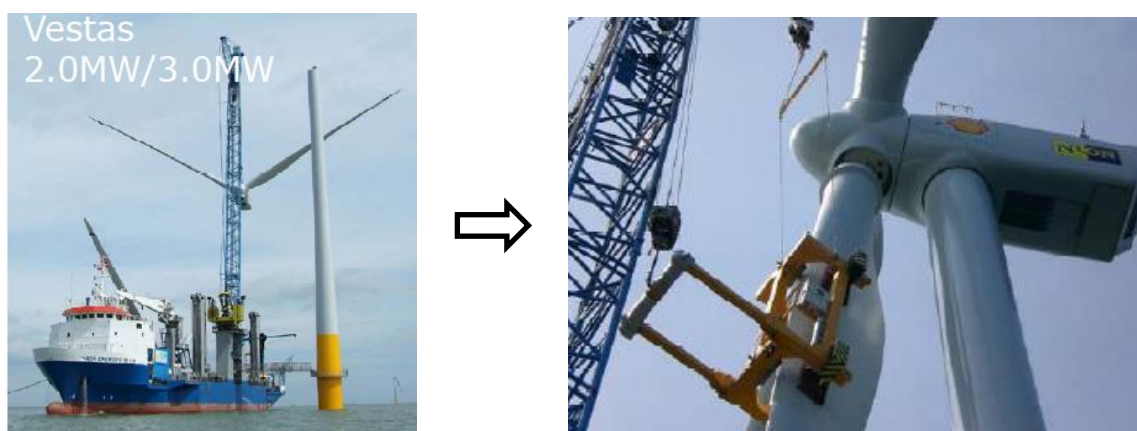
図Ⅲ. 6. 2-37 Robin Rigg における風車の設置工事 (Vestas Wind Systems A/S, 2007)



工事の順序：上左図→上右図→下左図→下右図

図Ⅲ.6.2-38 Middelgrunden における風車の設置工事 (Copenhagen Environment and Energy Office, 2003)

これまでに示した図に見られるように、ナセルに取り付けるブレードの本数は風車メーカーあるいは風車の大きさによって異なっている。図Ⅲ.6.2-39 に示すように、風車メーカーの Vestas は安定度の高いブレード 2 枚付きのナセルをタワーの上部に取り付けた後で、残りの 1 枚を現場で装着する方法を採用している。また、3 枚のブレードをナセルに装着して吊り上げる風車メーカーは Siemens (2.3MW) と REpower (5.0MW) であるが (図Ⅲ.6.2-40)、3.6MW の Siemens 社の風車についてはナセルをタワーに載せた後で、ブレードを 1 枚 1 枚取り付ける方法が採用されている (図Ⅲ.6.2-41)。



図Ⅲ.6.2-39 風車 (Vestas:2.0MW/3.0MW) のナセル設置工事 (Lindvig, 2011)

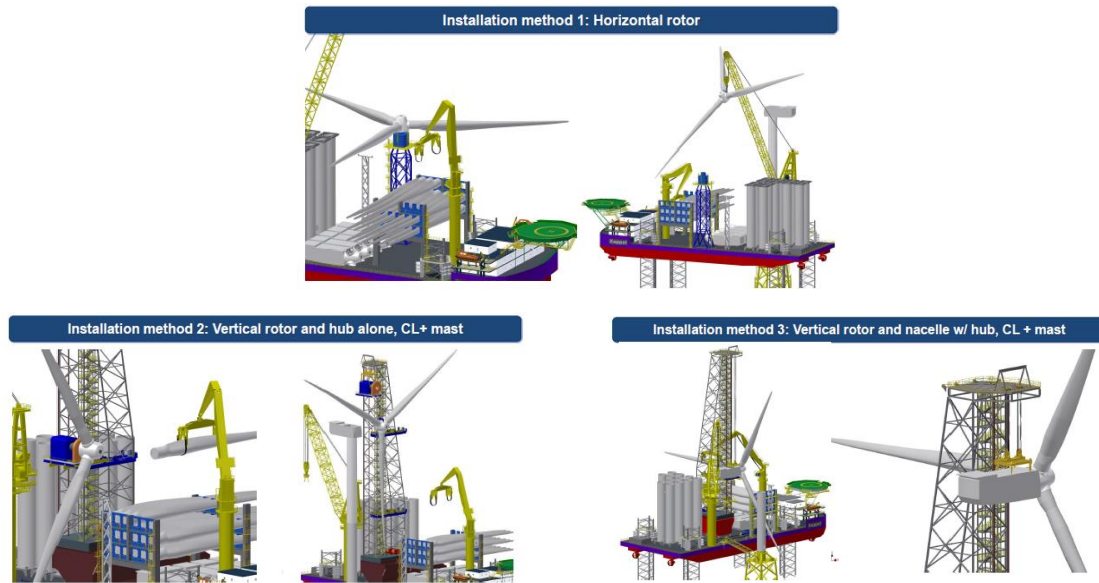


図Ⅲ. 6. 2-40 風車（左図 Siemens2. 3MW/右図 REpower5. 0MW）のナセル設置工事  
(Lindvig, 2011)



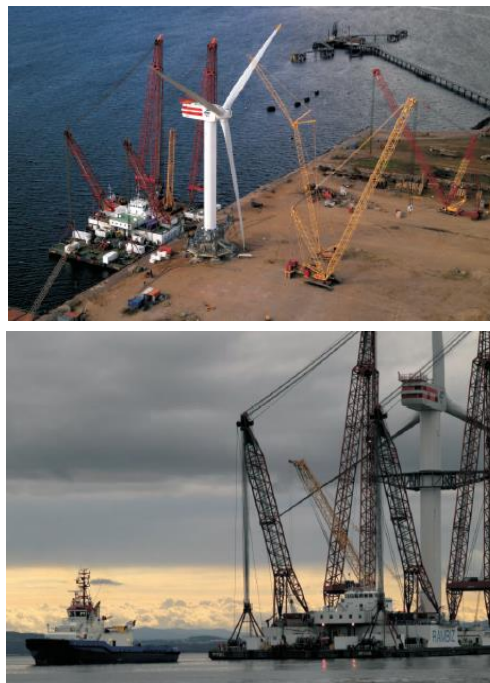
図Ⅲ. 6. 2-41 Siemens 風車（3. 6MW）のナセル設置工事 (Lindvig, 2011)

Mortensen *et al.* (2011) 等により、洋上において風車を安全に設置するための研究開発が行われている。これまでは、船上でロータを水平に置いて吊り上げてナセルに取り付けていた方法であったが、新しい方法ではクレーンとマストを使って個々のロータとハブ、あるいはロータ・ナセルの一体型を吊り上げて作業を行う（図Ⅲ.6.2-42）。本方式により、作業時の限界風速が 8-10m/s から 15m/s にまで引き上げられ、稼働率の増加が見込まれるとしている。



図Ⅲ. 6. 2-42 従来型（上図）と新提案（下図）の風車設置方法（Mortensen *et al.*, 2011）

一方、海上での作業時間を短縮するため、陸上で風車を組み立て一体化して起重機船を使用して運搬・設置する方法がイギリスの Beatrice（5MW 機）で試みられている（図Ⅲ.6.2-43）。風車一体型の運搬・設置方法は、気象・海象条件の悪い海域での適用が難しいが、建設コストを抑えることのできる工法のひとつである。



図Ⅲ. 6. 2-43 Beatrice における風車の設置工事  
 sse HP : <http://sse.com/media/113127/AllBoards2010.pdf>

### 〈参考〉 ウィンド・パワーかみす洋上風力発電所

ウィンド・パワーかみす洋上風力発電所における洋上風車は、第1洋上風力発電所、第2洋上風力発電所ともに陸上から重機を使って据え付けられている(図Ⅲ.6.2-44)。なお、ウィンド・パワーかみす第1洋上風力発電所における洋上風車の据付には、450t クローラクレーン(SHL型)が使用された。

ウィンド・パワーかみす第1洋上風力発電所およびウィンド・パワーかみす第2洋上風力発電所の完成時の状況を、図Ⅲ.6.2-45と図Ⅲ.6.2-46にそれぞれ示す。



上左図：モノパイルへのボルトタワーの接続 上右図：ナセルへのハブの据付  
下中央図：ブレードの据付

図Ⅲ.6.2-44 ウィンド・パワーかみす第1洋上風力発電所における洋上風車の据付状況  
(ウィンド・パワーいばらき資料)



図Ⅲ. 6. 2-45 ウィンド・パワーかみす第1洋上風力発電所の完成時の状況  
(ウィンド・パワーいばらき資料：  
<http://www.komatsuzaki.co.jp/windpower/kamisu1.php>)



図Ⅲ. 6. 2-46 ウィンド・パワーかみす第2洋上風力発電所の完成時の状況  
(ウィンド・パワー資料：<http://www.komatsuzaki.co.jp/windpower/kamisu2.php>)

### (3) 自己昇降式作業台船 (SEP 船)

洋上風力発電施設の建設にあたって、支持構造物や風車本体の据付には起重機船や自己昇降式作業台 (SEP : Self Elevating Platform) 船が使用される。自己昇降式とは、昇降可能な脚によって着底し、作業台本体を海面に持ち上げて高波浪域での作業を容易に、かつ精度よく行うことができる装置である。なお、SEP 船は自昇式ジャッキアップとも称されるが、ここでは自己昇降式作業台船と称することとする。世界には洋上風力発電施設の建設用として 50 隻以上の SEP 船が存在しているが (付属資料Ⅳを参照)、そのうち日本には 7 隻あり、洋上風力発電施設の建設工事に使用可能な船舶は 4 隻である (表Ⅲ.6.2-7)。いずれも台船のような非自航船である。

最近の情報として、五洋建設が自社の HP で、5-6MW 級の風車の設置が可能な 800t 吊全旋回式クレーンを搭載し、水深 50m 程度における建設作業も可能な自己昇降式作業台船の建造計画 (2018 年 9 月頃に完成・引渡し) を発表している。

表Ⅲ.6.2-7 日本における洋上風力発電施設建設に使用可能な SEP 船

SEP船		くろしお	むつ	あそ	星都
船主		第一建設機工	第一建設機工	第一建設機工	横山基礎工業
種別 (船級)		外洋型SEP (NK)	通常型SEP (JG)	通常型SEP (NK)	通常型SEP (NK)
建造年		2012	2010	1992	1993
船体寸法 (m)		48×25×4.2	35×22×3.2	34×22×3.0	33×22×3
ジャッキアップ装置	形式	リングパット方式	リングパット方式	リングパット方式	リングパット方式
	保持力/脚 (t)	900	400	400	400
昇降水深 (m)		30	20	20	20
作業限界波高 (m)		1.25	0.75	0.75	0.75

SEP 船の昇降機構は、昇降方法によって「盛替式」と「連続式」に大別されるとともに、レグの固定方法によりそれぞれ細分化され、計 5 種類に区分される (表Ⅲ.6.2-8a,b)。同表に取りまとめている方式が代表的なもので、ここで取り上げた以外に「デロング方式」、「フリクションリング方式」等があるが、適用例は少ない。

#### 「盛替式」

レグを保持装置から作動用装置、作動用装置から保持装置とサイクルを繰り返して昇降させる方法。

##### A リングパット方式

レグの円形断面の凸部に、リング状の固定フレームを固定し昇降。

##### B キャッチビーム方式

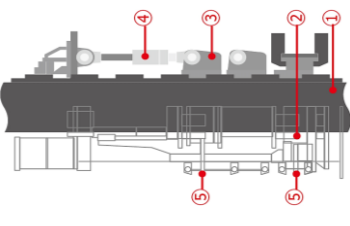
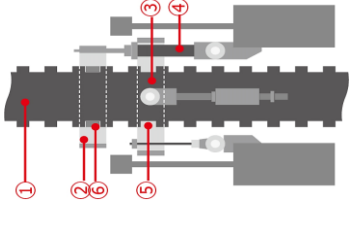
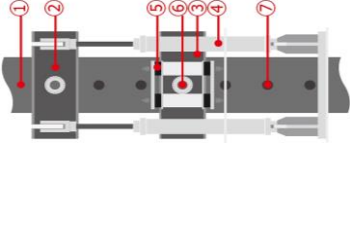



レグの四角断面の凸凹部を設け、凹部にキャッチバーをはめ込み固定し昇降。

##### C ピン挿入方式

レグに設けた穴に固定ピンを挿入して固定し昇降。



表Ⅲ. 6. 2-8a SEP 船昇降装置の一覧表

区分	A リングハット方式	B キャッチピーム方式	C ピン挿入方式
<p>機 構 機 要 図</p>			
<p>機構構成 機 器 名 称</p>	<p>① レグ ② 固定リングフレーム ③ 可動リングフレーム ④ 昇降シリンダ ⑤ リング旋回駆動シリンダ</p>	<p>① レグ ② ホールディングキャッチャーフレーム ③ ワーキングキャッチャーフレーム ④ ホールディング油圧シリンダ ⑤ ワーキングキャッチャーピーム ⑥ ホールディングキャッチャーピーム ⑦ ピン挿入口</p>	<p>⑤ 機骨材 ⑥ ホールディングピン ⑦ ピン挿入口</p>
<p>レグ固定方法</p>	<p>円形断面レグの長さ方向表面にバット凸部を設け、リング状の固定フレームを旋回レグの凸部に嵌合する。固定リングフレームを脱着し、可動フレームにピン嵌合した油圧シリンダを伸縮操作し昇降する。</p>	<p>レグの四角断面外側の長さ方向に凸凹状の構造を設け、凹状の溝部にキャッチピームをはめ込みホールディングシリンダにて支持させる。昇降時はホールディング・ワーキングキャッチャーピームを交互に脱着保持し、油圧シリンダを伸縮操作し昇降する。</p>	<p>レグに配けたピン挿入口に、ホールディングピンを挿入しフレームに固定する。ワーキング・ホールディングフレームに設置されたピンの脱着と、ワーキング・ホールディングフレーム間に設置された昇降油圧シリンダの操作によりレグ昇降を行う。</p>
<p>昇降方法</p>	<p>機骨式：レグを保持装置にて固定→作動用装置にてレグを把持→作動用装置にてレグ荷重支持→保持装置解除→伸縮装置の伸縮(レグ昇降)→次ステップ固定位置にて保持装置固定→作動用装置固定解除→伸縮装置の伸縮→作動用装置移動 このサイクルを繰り返す。</p>		
<p>運用例概要図</p>			
<p>船 名</p>	あそ	MPI Resolution	GUSTO NG-5500C
<p>船体寸法</p>	34m(長さ) × 20m(幅) × 3m(深さ)	130m(長さ) × 38m(幅) × 8m(深さ)	81m(長さ) × 41m(幅) × 7m(深さ)
<p>積載能力</p>	500t	4,975t	3,000t
<p>レグ形状</p>	円形断面φ1.2m × 55m(長さ)(2015年基準)	方形断面 × 71.6m(長さ)	円形断面φ4m × 85m(長さ)
<p>レグ本数</p>	4	6	4
<p>方式</p>	油圧ジャッキ	油圧ジャッキ	油圧ジャッキ
<p>昇降能力</p>	昇降 400t/レグ	昇降 2,850t/レグ 保持 5,700t/レグ	昇降 11,000t/レグ 保持 5,500t/レグ
<p>昇降速度</p>	12m/H	上昇 30m/H	プラットフォーム上昇速度: 24m/H プラットフォーム下降速度: 30m/H
<p>画像の出典</p>	第一建設機工HP: <a href="http://www.dai-1-sep.com/pdf/dai1ch05_aseo.pdf">http://www.dai-1-sep.com/pdf/dai1ch05_aseo.pdf</a>	Navingo BV(2013)	GustoMSC提供

注)上記方式以外に、「チロンク方式」「フリクションリング方式」等が開発・運用されている。

「連続式」

レグを連続的に昇降させる方法。

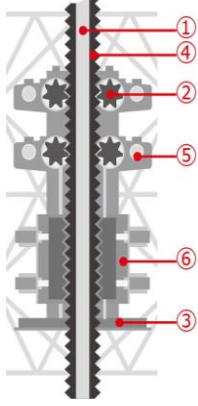
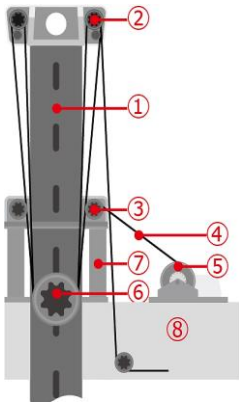


D ラック&ピニオン方式

レグに設置したラック（線形歯車）をピニオン（円形歯車）に噛み合わせて昇降。

E ワイヤロープ方式

レグに設置したシーブとポンツーンに固定設置されたウインチによりワイヤロープを使って昇降。

表Ⅲ. 6. 2-8b SEP 船昇降装置の一覧表

区分		D ラック&ピニオン方式	E ワイヤロープ昇降方式	
昇降機構概要	機構概要図			
	機構構成機器名称	① レグ ② 上下駆動ピニオン ③ 昇降フレーム	④ レグ固定ラック ⑤ 駆動モータ ⑥ 減速機	
	レグ固定方法	レグの長さ方向に昇降範囲にわたりラック（線形歯車）を設置し、ポンツーン昇降フレームに取り付けられた円形歯車（ピニオン）と噛み合わせ回転させ、船体荷重の支持およびレグの昇降を行う。	レグのトップに設置したシーブと、ポンツーンに設置されたウインチによりワイヤロープを巻き上げ下げすることによってレグを支持・昇降させる。レグの支持重量によりロープ本数を決定。	
	昇降方法	連続式：「ラック&ピニオン方式」「ワイヤロープ吊り上げ方式」等により、レグを支持するとともに、連続してレグの昇降を行う。保持は使用される昇降装置に内蔵するブレーキによる。		
搭載SEP例	適用例概要図			
	船名	GUSTO NG-2500X	SEA JACK	
	船体・レグ	船体寸法	61m(長)×36m(幅)×6m(深さ)	91.2m(長)×33m(幅)×5.5m(深さ)
		搭載能力	1,600t	2,500t
		レグ形状	三角断面×84.8m	長方断面8.3×7.7×49m(長)
		レグ本数	4	4
	昇降装置	方式	ラックアンドピニオン	ウインチ・ワイヤ
昇降能力		昇降 2,750 t/レグ	ウインチライフル: 80t ウインチ台数: 8(ジャッキング)	
昇降速度		0.8m/min	0.5~1.0m/min	
画像の出典	GustoMSC提供		A2SEA HP: <a href="http://www.a2sea.com/wp-content/uploads/2013/04/Techsheet_SEA_JACK.pdf">http://www.a2sea.com/wp-content/uploads/2013/04/Techsheet_SEA_JACK.pdf</a>	

注) 上記方式以外に、「デロング方式」「フリクションリング方式」等が開発・適用されている。

付属資料Ⅱに記載している通り洋上風車は年々大型化しており、それに伴い SEP 船も大型化し（表Ⅲ.6.2-9）、自航（DP）船も増加している。2013 年以降に建造された、あるいは建造中の SEP 船の中で、イギリスの ROUND3 の候補海域（水深の深い沖合海域）においても建設可能な最大水深で 65m、最大有義波高で 2.5m の能力を保有する船も出現している。

表Ⅲ. 6. 2-9 2003 年から 2012 年までの建造船と 2013 年以降（建造中を含む）に建造された SEP 船

仕 様	2003年-2012年		2013年以降 (建造中を含む)	
	平均	最大	平均	最大
クレーン最大吊上げ重量(t)	702	1,500	991	1,500
最大水深(m)	44	65	53	65
最大有義波高(m)	1.9	2.5	2.1	2.5
船長×船幅(m)	97×36	148×42	129×43	156×50
デッキ面積(m <sup>2</sup> )	2,100	3,600	3,700	5,000
船速(kt)	9.3	12.5	11.3	13.0

出典:DNV GL ASら (2014)

SEP 船から支持構造物に風車を設置する場合、既に(2)で述べたように風車の組立てには種々のケースが見られる。例えば i 「ナセル+ロータ+ハブ」と「ブレード」、ii 「ナセル+ロータ」と「ハブ+ブレード 3 枚」、iii 「ナセル+ロータ+ハブ+ブレード 2 枚」等である。

表Ⅲ.6.2-6 に示したように、風車が 5MW 級になるとナセル+ロータで 200t を超える重量物となる。ここで風車の定格出力別の、設置工事に必要なクレーンの能力を表Ⅲ.6.2-10 に示す。

表Ⅲ. 6. 2-10 洋上風車の設置工事に必要なクレーンの能力

風車の定格出力 (MW)	SEP船搭載クレーン (t)	クローラークレーン(CR) 搭載ケース (t)
2	300	650
3-4	400-600	800-1,200
5	800-1,000	使用不可能

以下、SEP 船の外観図を図Ⅲ.6.2-47～図Ⅲ.6.2-53 に示す。図Ⅲ.6.2-53 は 2001 年に建造された SEP 船で、ジャッキアップ装置はワイヤロープ昇降方式となっており、セミジャッキアップ船と呼ばれている。



船主：第一建設機工（日本） 建造年：2012 年  
 寸法：48m×25m×4.2m  
 ジャッキアップ装置の形式：リングパット方式  
 デッキスペース：－  
 クレーン能力：900t（搭載可能な CR）  
 出典：第一建設機工 HP [http://www.dai1-sep.com/marine.html#sep\\_kuroshio](http://www.dai1-sep.com/marine.html#sep_kuroshio)

図Ⅲ.6.2-47 「くろしお」の外観図



船主：第一建設機工（日本） 建造年：1992 年  
 寸法：34m×20m×3.0m  
 ジャッキアップ装置の形式：リングパット方式  
 デッキスペース：－  
 クレーン能力：400t（搭載可能な CR）  
 出典：第一建設機工 HP [http://www.dai1-sep.com/pdf/daiichi05\\_aso.pdf](http://www.dai1-sep.com/pdf/daiichi05_aso.pdf)

図Ⅲ.6.2-48 「あそ」の外観図



船主：Seajacks International（イギリス/日本）  
 建造年：2012 年 寸法：81m×41m×7m  
 ジャッキアップ装置の形式：ピン挿入方式  
 デッキスペース：2,000m<sup>2</sup>  
 クレーン能力：800t  
 出典：Seajacks 提供

図Ⅲ.6.2-49 「Zaratan」の外観図



船主：Fred Olsen Windcarrier（ノルウェー）  
 建造年：2012 年 寸法：132m×39m×9m  
 ジャッキアップ装置の形式：ピン挿入方式  
 デッキスペース：3,250m<sup>2</sup>  
 クレーン能力：800t  
 出典：GustoMSC 提供

図Ⅲ.6.2-50 「Bold Tern」の外観図



船主：Workfox BV (オランダ) 建造年：2012年  
 寸法：115m×50m×9.75m  
 ジャッキアップ装置の形式：ラック&ピニオン方式  
 デッキスペース：3,750m<sup>2</sup>  
 クレーン能力：1,200t  
 出典：Seafox HP <http://www.seafox.com/en/webfolio/fleet/Seafox-5/e/pm/76/>

図Ⅲ.6.2-51 「Seafox5」の外観図



船主：A2SEA (デンマーク) 建造年：2012年  
 寸法：132m×39m×5.3m  
 ジャッキアップ装置の形式：ピン挿入方式  
 デッキスペース：3,350m<sup>2</sup>  
 クレーン能力：900t  
 出典：A2SEA 提供

図Ⅲ.6.2-52 「Sea Installer」の外観図



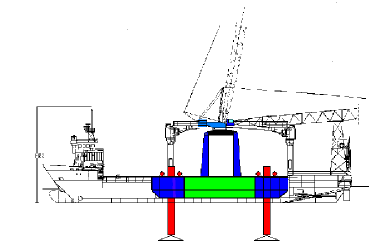
船主：Karadeniz Holding (トルコ) (以前はA2SEA (デンマーク)) 建造年：2001年  
 寸法：91.76m×21.6m×4.25m  
 ジャッキアップ装置の形式：ワイヤロープ  
 デッキスペース：1,020m<sup>2</sup>  
 クレーン能力：230t  
 出典：A2SEA 提供

図Ⅲ.6.2-53 「Sea Power」の外観図

### 【豆知識Ⅲ.6.2-4】

#### ●洋上風車建設の黎明期

初期の頃は、SEP 船が少なかったことにより、台船をセミフロートの状態にするため、アンカーを併用した作業船が使われた。SEP 船のように波浪による動揺は回避できないけれども、水平動揺（sway、surge、yaw）を小さくする効果があったと言われている。洋上風車建設初期の作業船の数例を示す。



出典：Japan Ocean Development Construction Association (2002)

#### ●SEP 船を使わない設置方法の開発

欧州委員会（Horizon2020 の研究プログラム）

「SEP 船不要の自己据付型の重力式基礎の実証研究」

スペインカナリア諸島で 5MW 機の据付を実証（中空のドーナツ状のコンクリ浮体で風車を浮かせて運搬・現地で注水して着底。低重心化のためタワーは折畳式）

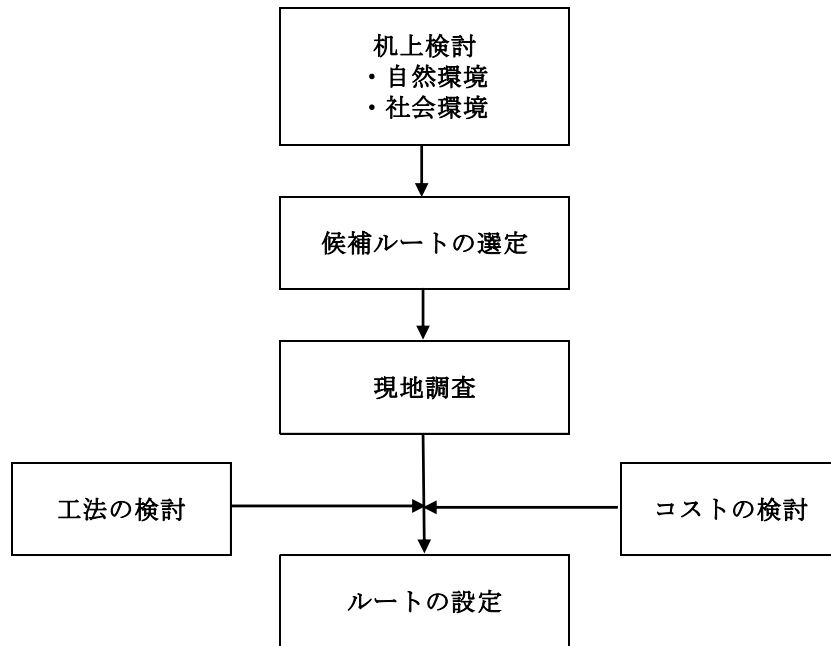
([http://cordis.europa.eu/news/rcn/126526\\_en.html](http://cordis.europa.eu/news/rcn/126526_en.html))

#### (4) 海底ケーブルの敷設

洋上風力発電施設における海底ケーブルの敷設に関して取りまとめた。

##### 1) 敷設ルートの設定方法

通常、海底ケーブルの敷設ルートの設定にあたっては、図Ⅲ.6.2-54 に示す検討を踏まえる必要がある。



図Ⅲ.6.2-54 海底ケーブル・ルート選定の手順

##### ①候補ルートの選定

机上検討による予備調査では、海図、水路誌、地図等の既往調査資料を基に、海底地形、水深、水温、海潮流、潮汐等の自然条件、船舶航行、漁業実態、自然公園等の社会条件について、ケーブルの敷設・埋設を考慮して、以下の観点から検討し、いくつかの敷設候補ルートを選定する。なお、海底ケーブルの計画・施工に係る許認可手続きは、Ⅲ.2.2 項で示した表Ⅲ.2.2-1～表Ⅲ.2.2-3 に掲げた該当する法律に基づき行う。

###### ✓自然条件

- ・海底地形：平坦で急傾斜や起伏の少ない海域であることが望ましい（漂砂による地形変化の少ないこと）。
- ・底質：低N値地層であることや埋設深さ以上に安定して堆積していることが望ましい（岩盤・転石が少ないこと）。
- ・水深：ケーブルの保守作業の点から浅海が望ましい。
- ・水温：月別・水深別水温の年変化を把握し、送電容量を検討資料とする。
- ・海潮流：ケーブルの施工、管理等の面から低流速で、流向変化の少ない海域が望ましい。

- ・波浪：海岸部のケーブルの立ち上がり部分の設計資料となる。
- ・潮汐：海岸部のケーブルの立ち上がり部分の設計資料となる。

#### ✓社会条件

- ・船舶の航行：投錨等の少ない海域が望ましい。
- ・漁業活動：特に網漁業の少ない海域が望ましい。
- ・自然公園指定地域等：国立公園、国定公園等の指定海域は避けることが望ましい。
- ・障害物：既設の海底ケーブル・海洋構造物、沈船等が存在しない海域が望ましい。
- ・将来計画：埋立て・浚渫等の計画がある海域は避けることが望ましい。

### ②現地調査

敷設ルート選定後に、主として海底の測量調査を行い、線路長はできるだけ短く、水深は浅く、海底起伏の少ない良質な土質のルートを選定する。なお、洋上風力発電施設の基本設計段階における海底地形・土質調査で敷設ルートにおけるデータがあれば、本調査は省略される場合もある。以下、参考までに主要な調査内容を示す。

- ✓水深：音響測深器による水深図の作成。
- ✓地層：音波探査機による堆積層厚図の作成。
- ✓底質：採泥器、ドレッジ等による底質（泥、砂、礫、岩等）分布図の作成。
- ✓障害物：サイドスキャナー、磁気探査機等による表層・土中の障害物の把握。

### ③ルートの設定

現地調査結果を基に、海底ケーブルの敷設工法、埋設工法、防護工法を検討するとともに、経済性を考慮してルートを設定する。

#### 2) 海底ケーブル構造の検討

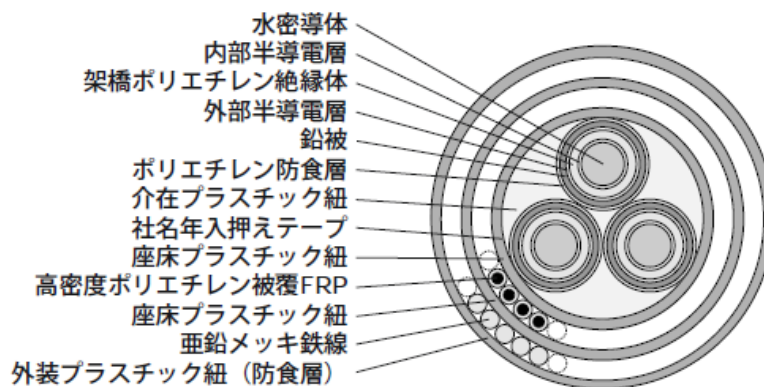
海底ケーブルの種類を表Ⅲ.6.2-11 に示すとともに、図Ⅲ.6.2-55 にケーブル断面図を示す。図示しているケーブルは、3 芯架橋ポリエチレン絶縁ケーブル（CV ケーブル）で、電食による損傷を考慮して一重目は FRP 鎧装、二重目は亜鉛メッキ鉄線鎧装となっている（本図は通信線を複合したケーブルではない）。

図Ⅲ.6.2-55 に示すように、架橋ポリエチレンの絶縁層は薄肉厚でも高電圧に耐え、優れた絶縁性能を有する。しかし海中敷設の場合、長期的には吸湿による絶縁劣化を招くので、3 芯コアの外には鉛合金による押出し被覆層を設け、十分に防湿する必要がある。鉛被の外にはさらに防水、防食性に優れたポリエチレン被覆層を設ける。また、海底ケーブルには特に漁具や投錨による外傷事故が発生しやすいため、通常、ケーブルの最外部には鉄線を円周方向に密に配し、これを長手方向にロングピッチに螺旋巻きした鎧装鉄線を設ける。それでも耐外傷性は十分とは言えないため、通常は海底部に埋設する工法が広く採用されている。また、直流ケーブルは同じ容量の交流ケーブルと比べて軽重量で敷設費が安価となり、長距離送電の場合に無効電力がないため電力の損失が小さい。しかし 80km 以上の送電距離がなければコストメリットはないと言われている（The Crown Estate,2010）。



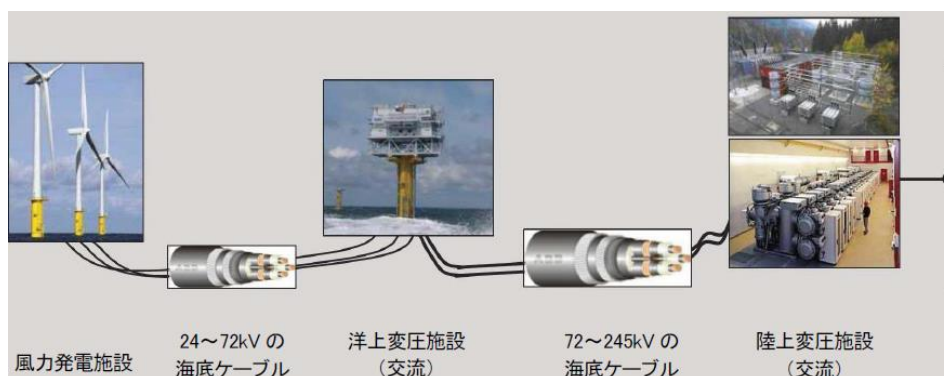
表Ⅲ. 6. 2-11 海底ケーブルの種類

規格	種類	備考
線芯数	<ul style="list-style-type: none"> <li>・単芯</li> <li>・3芯</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・線芯数は電圧、送電容量、慧座性等を考慮して決定</li> <li>・製造上の制約から送電容量の小さい系統では3芯ケーブル、容量の大きい系統では単芯ケーブルが選定される。</li> <li>・直流ケーブルは一般的には単芯ケーブルである。</li> </ul>
絶縁	<ul style="list-style-type: none"> <li>・架橋ポリエチレン (クロスリンクポリエチレン (XLPE) ; CV)</li> <li>・エチレンプロピレンゴム (EPR)</li> <li>・高粘度絶縁油</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・導体は水密構造となっている。</li> </ul>
鉄線鎧装	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一重</li> <li>・二重</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・岩盤部では、一重と防護管、あるいは二重を使う場合がある。</li> <li>・電気設備基準では6mm以上の鉄線鎧装の使用が規定されている。</li> <li>・電食による腐食防止のために、鉄線をFRPや亜鉛メッキ鉄線とする例もある。</li> </ul>



図Ⅲ. 6. 2-55 ケーブル断面図 (古堅ら, 2002)

なお、図Ⅲ.6.2-56 に示すように、洋上変圧施設 (洋上変電設備) から陸上変圧施設 (陸上変電設備) につながっている海底ケーブル (図では 72~245kV のケーブル) が送電ケーブル (Export cable)、個々の風車から洋上変圧施設につながっている海底ケーブル (図では 24~72kV のケーブル) がアレイケーブル (Array cable) と区分される。



図Ⅲ. 6. 2-56 洋上風力発電施設における電力系統ライン (日本産業機械工業会, 2010)

## ①送電ケーブル

大規模洋上風力発電施設の場合、送電ケーブルは、洋上変電設備から陸揚げ点までの長距離海底ルートに敷設するケーブルである。多数の風力発電機からアレイケーブルで洋上変電設備に集合した電力を昇圧し、1回線ないし2回線で送電する基幹線路となる。集合した電力の総容量によって、ケーブルの送電電圧および導体断面積の適正なレベルが決まる（表Ⅲ.6.2-12；系統アクセスルール（東京電力））。例えば、5万kW以上10万kW未満の洋上風力発電所の場合、66kV送電線2回線か、154kV送電線1回線による接続となる。なお、送電ケーブルは事故等で海上に引き揚げて修理を行うこともあるので、余裕線路を設けておく。

表Ⅲ.6.2-12 契約受電電力・発電機容量と公称電圧との関係

契約受電電力・発電機容量	公称電圧	ケーブルサイズ
2,000kW未満	6.6kV	3芯（外径：約81mm，重量：約16kg/m）
2,000kW以上10,000kW未満	22kV	3芯（外径：約119mm，重量：約30kg/m）
10,000kW以上50,000kW未満	66kV	3芯（外径：約159mm，重量：約60kg/m）
50,000kW以上	154kV	—

注) ケーブルサイズはメーカ、仕様によって異なる。

## ②アレイケーブル

アレイケーブルは、個々の風力発電機からの出力を洋上変電設備まで送電する比較的短距離の海底ケーブルで、風車タワー上の発電機から引き出し線でタワー下部の変圧器まで送られた低圧電力を昇圧し、ここから変電設備までの送電に用いる。Carbon Trust（2018）によれば、商用事業用アレイケーブル・システムの定格は通常33kVであるが、欧州のR&Dでは、コスト削減のためにアレイ間電圧を66kVに上げることに集中的に取り組んでいる。

いくつかの研究では、アレイ間のケーブル電圧を66kVに上げることの有効性が確認されている。電圧を66kVに上げたケーブルでは、従来使用されてきた33kVのケーブルと比べて、小さな横断面と低い電流で大きな電力容量が可能になる。

Carbon Trust（2018）によれば、高圧ケーブルに切り替えることで、コスト削減につながる以下のような利点が得られるとしている。

- ✓ケーブル長の短縮：66kVのケーブルは、33kVのケーブルと比べてケーブルの数量が3分の1で済む（DNV-GL,2015）。著名なケーブル製造業者からの情報によると、66kV湿式ケーブルの価格は種類と直径が等しい33kVケーブルよりも10～20%高いが、送電容量が倍になる。さらに66kVケーブルを使用すると、総ケーブル長が短くて済む（DNV-GL,2015）。
- ✓アレイケーブルの電気損失の低減：アレイケーブルの数量が低減することで、送電ケーブルの無効電力（電気消失）が低減し、送電損失も低減する。また、変電所周围のケーブルの数量が低減することで、その場所での送電損失が低減する。また、ケーブルの数量が低減することで、損傷するリスクも低減し、電気インフラの信頼性を高め、減収の可能性を最小化してくれる。

✓風車のレイアウトの最適化：アレイシステムの電圧を 66kV に高めることで、アレイ内の風車の放射状配置ではなく、リング状配置が可能になる。

✓施工性の向上：ケーブルの数量が低減することで、施工時間が短縮される。

### ③洋上変電設備

風力発電機から出力される送電電圧は、陸上まで送電するには低くて送電ロスが大きい。このため、図Ⅲ.6.2-57 のようにヨーロッパの既設の洋上風力発電施設では、洋上変電設備を 1 箇所設けて、ここに各風車の電力を集めて昇圧し、陸上まで送電する方法が取られている。したがって、風車の配置に際しては、海底地形や主風向等の他に、洋上変電設備の位置や各風車から洋上変電設備までのアレイケーブルの敷設ルート等を考慮した検討が必要と思われる。なお、The Crown Estate (2010) によれば、一つの変電設備で 500MW 規模のウィンドファームからの入力を処理できるが、送電の安全性を高めるため、二つ以上の変電設備が設置される場合もあるという。

洋上変電設備の主な構成要素は、以下の通りである (The Crown Estate,2010)。

- ・ 定格 300kW 程度の補助ディーゼル発電機：送電ケーブルからの電圧損失時に変電所へ電力を供給する。また、ウィンドファームの試運転時にも使われる。
- ・ スイッチギア：変電所に接続されるアレイケーブルと送電ケーブルをそれぞれ絶縁する。
- ・ 変圧器 (AC の場合)：送電に備え昇圧する。通常の洋上変電設備は、利用可能率を向上させるため複数の変圧器を備えている。変圧器は油冷却され、防火・防爆装置を備えている。
- ・ コンバータ (DC の場合)：送電に備え DC に変換する。
- ・ リアクトル：系統安定性を向上する。
- ・ 接地材：電気機器と変電設備構造体を電氣的に接続する。
- ・ その他：パネル、ケーブルトレイ、通路、留め金および電気機器の保護用の支持。



図Ⅲ.6.2-57 洋上変電設備の例

Siemens HP : [http://www.siemens.co.uk/en/news\\_press/index/news\\_archive/2013/greater-gabbard-offshore-wind-farm-opened-by-michael-fallon.htm](http://www.siemens.co.uk/en/news_press/index/news_archive/2013/greater-gabbard-offshore-wind-farm-opened-by-michael-fallon.htm)

変電設備の重量は、100MW 級（交流）で 1,000t 以下、200MW 級（交流）で 1,500t、300MW 級（交流）で 2,000t、400MW 級（高圧直流）で 3,000t、1,000MW 級（高圧直流）で 7,000t と言われている（日本産業機械工業会,2010）。300MW 級の設備は、プラットフォームの高さ海面上約 25m、面積は約 800m<sup>2</sup> の規模で、ほとんどの変電設備はヘリポートを備えているものの、現場作業用の主たるプラットフォームになる場合は少ない（通常、僅かに機器（物品昇降用に 2.5t 程度のクレーン）を備えつけた作業場は存在する）。なお、海岸から遠く離れた地点に変電設備が建設される場合、避難所や、デンマークの Horns Rev2 ウィンドファームのように（Ⅲ.7.3 項を参照）、滞在型居住区等の追加機能を備える場合がある（The Crown Estate,2010）。

参考までに、我が国の「浮体式洋上ウィンドファーム実証研究事業」において、福島沖の水深約 120m、離岸距離約 22km の海域に世界初の浮体式洋上変電設備（ふくしま絆）が設置されている。

### 3) 海底ケーブルの敷設方法

海底ケーブルの敷設は、一般的には以下の手順により行われる。

#### ①船積み・回航

ケーブル製造工場に近接する出荷用バースからケーブルを敷設専用船に積み込み、所定海域まで回航する（図Ⅲ.6.2-58）。敷設専用船には自航型と非自航型（曳航型）がある。



図Ⅲ.6.2-58 海底ケーブルの積み出し状況（日本産業機械工業会, 2010）

#### ②揚陸部敷設

現場海域では、まず敷設船を揚陸地点沖に係留し、ケーブルにブイを取り付けながら揚陸部まで牽引する（図Ⅲ.6.2-59）。陸上の終端地点までケーブルを敷設した後、海上部のケーブルはブイを切り離して沈設する。



図Ⅲ. 6. 2-59 沿岸部における海底ケーブル敷設状況（日本産業機械工業会, 2010）

### ③海底ケーブル敷設

海底ケーブルの敷設あるいは埋設は、砂泥質等の比較的柔らかい地盤においてプローやジェット水流機により海底を掘削し、予めトレンチを造成しておく（図Ⅲ.6.2-60）。その後、敷設専用船をケーブル敷設ルートに沿って走行させ、船上のケーブルの巻き取り設備（ターンテーブル）を回転させてケーブルを巻き戻しながら海底に落とし込む（図Ⅲ.6.2-61）。敷設船が自航型でない場合は、予め船の前方から海底にアンカリングしたワイヤを巻き取りながら前進させ、さらにアンカーを打ち直しては船の前進を繰り返す。



プロー式機械装置



ジェット水流機の噴出孔

図Ⅲ. 6. 2-60 海底ケーブルの埋設機械（日本産業機械工業会, 2010）

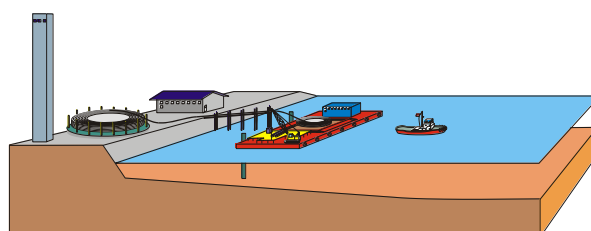


図Ⅲ. 6. 2-61 海底ケーブルの敷設状況（日本産業機械工業会, 2010）

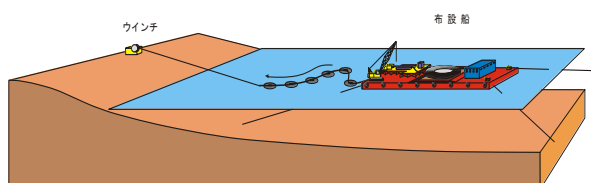
#### ④ケーブル立ち上げ

風力発電機に先の揚陸方法と同様の作業で送電用海底ケーブルを敷設し、現地で終端部を組み立て、変電機器に接続する。各洋上発電機間を結ぶアレイケーブルも同様の手順で敷設作業を行う。

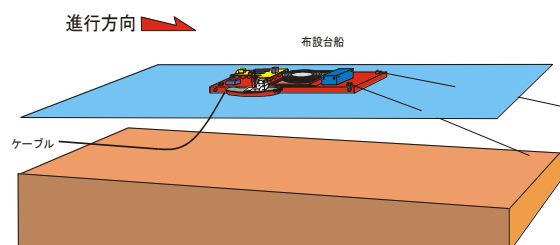
図Ⅲ.6.2-62 は、洋上風力発電機と陸上変電施設間の海底ケーブルの敷設に関する一連の作業の概念図である。



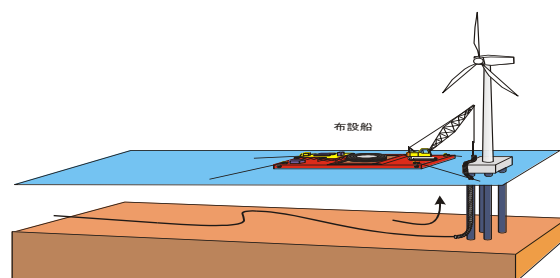
①船積み・回航



②揚陸部敷設



③海底ケーブル敷設



④ケーブル立ち上げ

図Ⅲ.6.2-62 海底ケーブル敷設概念図 (NEDO ら, 2007b)

#### 4) 海底ケーブルの防護方法

ケーブルの損傷に係る主要因を表Ⅲ.6.2-13に示す。陸上部では、ネズミ、白蟻等による生物的損傷も大きな要因であるが、海域では船舶の投錨、漁具（底曳網による引っ掛け・断線）等の他、浅海部では潮流以外に砕波、“うねり”による損傷（潮流、波浪等によりケーブルが振動・移動し、摩耗現象を引き起こす）、水深 30m 以深の海域では潮流による損傷があげられる。海外における洋上風力発電に係る海底ケーブルの損傷は、漁業活動が全体の 52%、次いで錨による損傷が 18%で、この 2 つが海底ケーブル損傷の主たる要因となっている（日本産業機械工業会,2010）。

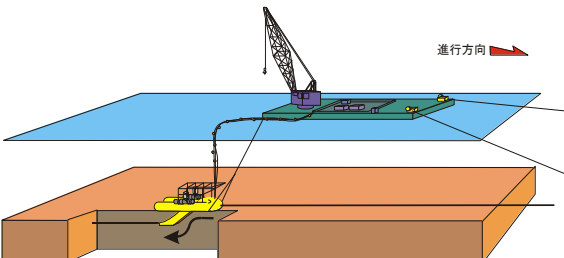
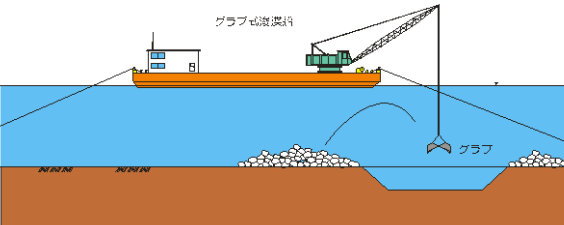
表Ⅲ. 6. 2-13 区域別のケーブル損傷要因

区域	損傷要因						
	人為的な掘削	生物 (ネズミ, 白蟻等)	塩害	船舶の 投錨・走錨	漁具	潮流	砕波, ウネリ, 潮流
陸上部	○	○	○				
汀線～浅海 (0-30m)	○			○	○		○
深海 (30m以深)				○	○	○	

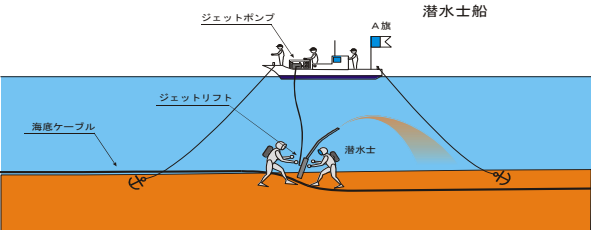
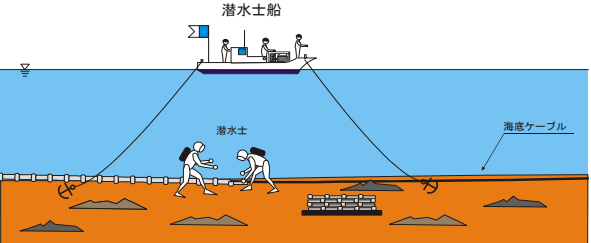
出典) 港湾・沿岸域における風力発電推進研究会(2005)を改変

これらの損傷要因から、ケーブルを防護する基本は埋設である。埋設方法には表Ⅲ.6.2-14a,bに示す各方法があり、通常はこれらを組み合わせた工法が採用されている。なお、ケーブルのメンテナンス方法の例として、3年に1回程度の潜水士による埋設深度調査の実施事例がある。

表Ⅲ. 6. 2-14a 海底ケーブルの防護方法 (NEDO ら, 2007b)

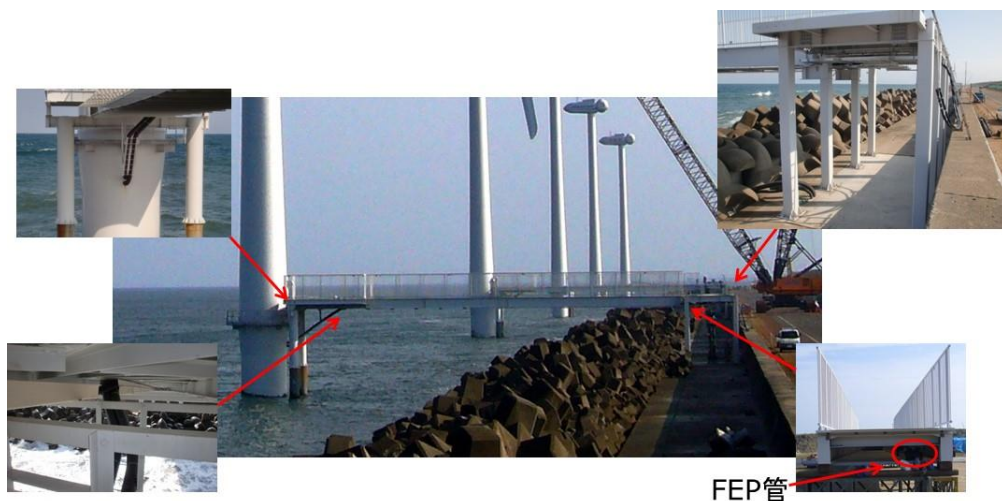
名称	工法の概要, 特徴
<p>機械埋設工法</p> 	<p>プロー式機械装置等(図Ⅲ.6.2-52、参照)により埋設する方法で、ケーブル敷設時と同時に埋設する工法と後埋設工法がある。</p> <p>埋設深度を自由に設定でき、大水深でも作業効率に優れる。</p>
<p>事前トレンチ工法</p> 	<p>ケーブル敷設前に海底にトレンチを掘削し、ケーブルを敷設した後埋め戻す方法で、底質が岩盤で固い場合や深い埋設深度を要する場合に適用される。</p>

表Ⅲ. 6. 2-14b 海底ケーブルの防護方法 (NEDO ら, 2007b)

名 称	工法の概要, 特徴
<p style="text-align: center;">ダイバー埋設工法</p> 	<p>海底にケーブルを沈設した後、潜水士によりジェット水流で埋設する方法で、海底が砂質で 30m 以下の浅い水深に適用可能である。</p>
<p style="text-align: center;">防護管防護工法</p> 	<p>海底にケーブルを沈設した後、潜水士により铸铁製の防護管をケーブル上に取り付ける。30m 以下の浅い水深で埋設が困難な岩礁地帯や、船舶による投錨の恐れがない場合に適用可能である。</p>

〈参考〉 ウィンド・パワーかみす洋上風力発電所

ウィンド・パワーかみす洋上風力発電所は、第 1 洋上発電所、第 2 洋上発電所ともに、離岸距離 40-60m の汀線近傍に設置されており、洋上風車には護岸から管理橋が渡されている。電力ケーブルは、各風車のジョイントスリーブから連絡橋下部に設けられたケーブル収納箱に FEP 管を通して配置され (図Ⅲ.6.2-63)、連絡橋の陸上側の架台に設置された変電設備で 22kV に昇圧されて (第 2 洋上発電所の変電設備は風車タワー内に設置)、内陸部の連系変電所 (66kV に昇圧) につながっている。



図Ⅲ. 6. 2-63 ウィンド・パワーかみす第 1 洋上風力発電所の電気設備 (岡野, 2010)



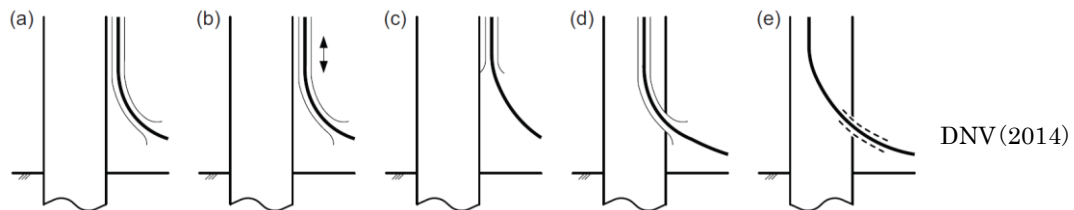
### 【豆知識Ⅲ. 6. 2-5】

#### ●海底ケーブルと洋上風車のインターフェイス（Jチューブ/Iチューブ）

チューブは、その中にアレイケーブルを通して、支持構造物、風車へとケーブルを導くもので、波と潮流による作用から脆弱な場所に敷設されたケーブルを保護するものである。

ケーブルの取り入れには、下図に示すように何種類かの方法がある。(e)はチューブの取付けがないケース、他は(c)のIチューブを除いてJチューブで、これらは外装(固定(a)/可動(b))および内装(d)で区分される。

最適な引き込み方策は、「風・流れ・波の荷重」、「船舶着岸時の保護」、「チューブとケーブルの位置関係」、「局所的な応力集中の位置」、「チューブ内の空気・水交換と関連する腐食率」等を考慮して選定される。



Jチューブの海底に対する角度と海底からの高さの関係 (DNV, 2014)

45° → 2.5m ± 0.5m      30° → 2.0m ± 0.3m      45° → 1.2m ± 0.2m

以下、The Crown Estate (2010) からJチューブに関する記述を取りまとめる。

- ✓ 一般に直径 300mm 程度の鋼管を使う。その長さはトランジションピースのプラットフォーム取付け位置から海底上 2m 程度まで及ぶ。通常、ケーブル引入れ後にシールされる。
- ✓ Jチューブ両端のJチューブシールは、Jチューブ内への海水浸入を防ぐ。受動的シールは、Jチューブ内へ引き上げられる一連のディスクで構成される。能動的シールは、Jチューブ内へ引き入れた後に膨張させる必要があり、遠隔操作ビークル (ROV) が必要となる。シールしたJチューブは、侵食抑制剤で満たす場合がある。ただし、シールは毎回使われることはない。
- ✓ 曲がり止めは、過度の曲がりによる損傷を防ぐ。
- ✓ ケーブル補強材も防護目的に使う。鋼製ならば、送電ケーブルへの効果的な重しとなる。
- ✓ ケーブル同士が交差し埋設できないようなケーブル露出部では、ケーブルマットを使う。マットは通常コンクリート製かポリウレタン製である。
- ✓ ある供給業者は、モノパイル基礎の場合、Jチューブを使わずにクランプによりケーブルをモノパイルの引込穴へ導く。

### 【豆知識Ⅲ. 6. 2-6a】

#### ●石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準を定める省令

(1972年12月25日通商産業省・運輸省・自治省令第二号)

(最終改正:2011年12月21日総務省・経済産業省・国土交通省第一号)

石油パイプライン事業用施設の技術上の基準に関して、洋上風力発電の海底パイプラインの敷設に参考となる部分を示す。

#### 第二章 導管等 第一節 導管等の材料、構造等

(材料)

**第四条** 導管、管継手および弁（以下「導管等」という。）の材料は、告示で定める規格に適合するものまたはこれと同等以上の機械的性質を有するものでなければならない。

(導管等の構造)

**第五条** 導管等の構造は、輸送される石油の重量、導管等の内圧、導管等およびその附属設備の自重、土圧、水圧、列車荷重、自動車荷重、浮力等の主荷重ならびに風荷重、雪荷重、温度変化の影響、振動の影響、地震の影響、投錨による衝撃の影響、波浪および潮流の影響、設置時における荷重の影響、他工事による影響等の従荷重（以下この条において「主荷重等」という。）によつて生ずる応力に対して安全なものでなければならない。

**2** 導管は、次の各号に定める基準に適合するものでなければならない。

一 主荷重等によつて生ずる導管（鋼製のものに限る。以下この項において同じ。）の円周方向応力度および軸方向応力度が当該導管の許容応力度をこえるものでないこと。

二 導管の内圧によつて生じる当該導管の円周方向応力度が当該導管の規格最小降伏点（導管の規格に最小降伏点の定めがないものにあつては、材料試験成績等により保証される降伏点とする。ただし、当該降伏点が、当該導管の材料の規格に定める引張強さの最小の値に〇・六を乗じた値を超える場合にあつては、当該値とする。以下この条において同じ。）の四十パーセント以下であること。

三 主荷重等によつて生じる導管の円周方向応力度、軸方向応力度および管軸に垂直方向のせん断応力度を合成した応力度が当該導管の規格最小降伏点の九十パーセント以下であること。

四 橋に設置する導管は、橋のたわみ、伸縮、振動等に対し安全な構造であること。

五 導管の最小厚さは、告示で定める基準に適合するものであること。ただし、告示で定める方法により破損試験を行なつたとき破損しないものは、この限りでない。

**3** 前項第一号の「許容応力度」とは、許容引張応力度、許容圧縮応力度、許容せん断応力度および許容支圧応力度をいう。この場合において、「許容引張応力度」および「許容圧縮応力度」とは導管の規格最小降伏点に告示で定める長手継手の継手効率を乗じた値を二・〇で除した値（告示で定める場合にあつては、当該二・〇で除した値に告示で定める割増係数を乗じた値）、「許容せん断応力度」とは許容引張応力度に〇・六を乗じた値、「許容支圧応力度」とは許容引張応力度に一・四を乗じた値をそれぞれいうものとする。

### 【豆知識Ⅲ. 6. 2-6b】

#### ●石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準を定める省令

4 前三項に規定するもののほか、導管等の構造に関し必要な事項は、告示で定める。

(伸縮吸収措置)

**第六条** 導管の有害な伸縮が生じるおそれのある箇所には、告示で定めるところにより当該有害な伸縮を吸収する措置を講じなければならない。

(防しよく被覆)

**第九条** 地下または海底に設置する導管等には、告示で定めるところにより、耐久性があり、かつ、電気絶縁抵抗の大きい塗覆装材により外面腐しよくを防止するための措置を講じなければならない。

**2** 地上または海上に設置する導管等には、外面腐しよくを防止するための塗装を施さなければならない。

(電気防しよく)

**第十条** 地下または海底に設置する導管等には、告示で定めるところにより電気防しよく措置を講じなければならない。

#### 第二節 導管の設置方法

(海底設置)

**第十八条** 導管を海底に設置する場合は、次の各号に掲げるところによらなければならない。

- 一 導管は、埋設すること。ただし、投錨等により導管が損傷を受けるおそれのない場合その他やむをえない場合は、この限りでない。
- 二 導管は、原則として既設の導管と交差しないこと。
- 三 導管は、原則として既設の導管に対し三十メートル以上の水平距離を有すること。
- 四 二本以上の導管を同時に設置する場合は、当該導管が相互に接触することのないような措置を講ずること。
- 五 導管の立上り部には、告示で定める防護工を設けること。ただし、けい船浮標にいたる立上り部の導管に鋼製以外のものを使用する場合は、この限りでない。
- 六 導管を埋設する場合は、導管の外面と海底面との距離は、投錨試験の結果、土質、埋めもどしの材料、船舶交通事情等を勘案して安全な距離とすること。この場合において、当該導管を埋設する海底についてしゅんせつ計画がある場合は、しゅんせつ計画面（当該しゅんせつ計画において計画されているしゅんせつ後の海底面をいう。）下〇・六メートルを海底面とみなすものとする。
- 七 洗掘のおそれがある場所に埋設する導管には、当該洗掘を防止するための措置を講ずること。
- 八 掘さくおよび埋めもどしは、告示で定める方法によつて行なうこと。
- 九 導管を埋設しないで設置する場合は、導管が連続して支持されるよう当該設置に係る海底面をならすこと。

**【豆知識Ⅲ. 6. 2-6c】**

●石油パイプライン事業の事業用施設の技術上の基準を定める省令

十 導管が浮揚または移動するおそれがある場合は、当該導管に当該浮揚または移動を防止するための措置を講ずること。

(道路横断設置)

**第二十条** 道路を横断して導管を設置する場合は、道路下に埋設しなければならない。ただし、地形の状況その他特別の理由により道路の上空以外に適当な場所がなく、かつ、保安上適切な措置を講じた場合は、道路上を架空横断して設置することができる。

2 道路を横断して導管を埋設する場合は、導管をさや管その他の告示で定める構造物の中に設置しなければならない。ただし、支持条件の急変に対し適切な措置が講じられ、かつ、当該導管に係る工事の実施によつて交通に著しい支障が生じるおそれのない場合は、この限りでない。

3 道路上を架空横断して導管を設置する場合は、当該導管および当該導管に係るその他の工作物ならびにこれらの附属設備の地表面と接しない部分の最下部と路面との垂直距離は、五メートル以上としなければならない。

4 道路を横断して導管を設置する場合は、前三項の規定によるほか、第十四条（第一号および第二号を除く。）および第十七条（第一号を除く。）の規定を準用する。

## (5) 電気工事

洋上風力発電所は、事業化の観点からも大規模施設が想定され、特別高圧にて連系する場合が多いと考えられる。特別高圧と連系する場合は、電力会社に事前検討の申込みを行い、十分な協議を経て電力会社の停電工事に合わせてつなぎこみ工事を行うことになる。系統連系の区分を表Ⅲ.6.2-15 に示すが、特別高圧連系の引込工事について以下に記す。

表Ⅲ.6.2-15 系統連系の区分

連系の区分	発電機の種類	1需要家当たりの電力容量	逆潮流有無
低圧配電線	逆変換装置を用いた発電設備	原則として、50kW未満	あり・なし
	交流発電設備		なし
高圧配電線	逆変換装置を用いた発電設備、 又は、交流発電設備	原則として、2,000kW未満	あり・なし
スポットネットワーク 配電線	逆変換装置を用いた発電設備、 又は、交流発電設備	原則として、10,000kW未満	なし
特別高圧電線路*)	逆変換装置を用いた発電設備、 又は、交流発電設備	原則として、2,000kW以上	あり・なし

\*) 35kV以下の配電線に連系する場合、高圧配電線への連系技術要件に準拠可能。

特別高圧連系の場合は、風車発電機と連系点の距離が離れる。変電所と発電所間の電力ケーブルの事故検出を行うため、洋上に変電設備を設けるか、陸上の連系点近傍に変電所を設置するケースが多い。この場合、高圧連系の電柱と同様に施工が必要であるが、22kV (33kV) 以上の配電規定に従い施工を行う。

支線は「電気設備の技術基準」解釈第 63 条に準じて必ず施設する。特別高圧架空電線路のケーブル間隔は、電気施設の技術基準第 128 条に準じ一定以上設ける。また、ケーブルと他の電線路は「電気設備の技術基準」第 127 条に準じて一定の間隔を確保し、通信経路等へのノイズ障害対策にも留意する。架線する際には、電線にキンク（折り曲げ）、ねじれ等のくせを作らないように延線し、張線器を用いて、たるみのないように張線する。

特別高圧連系の配線工事は、タワー内発電機、電力変換器盤より風車発電機内に設置している変圧器に配線接続を行う。変圧器にて特別高圧電圧に昇圧し、変電所まで配線し、変電所機器である変圧器、GIS へ配線接続を行う。配線は電線接続図に従い、特別高圧ケーブル、電線の端末処理を行う。

### 6.3 試運転・検査

全ての工事完了の目処が付いたら、正常に作動し十分な性能を発揮するか、表Ⅲ.6.3-1 に掲げる検査および試験（電気事業法に基づく使用前自主検査）を行う。

試運転に際しては、風力発電システムの営業運転開始後の運転資料として運転データの収集を行うことが望ましい。収集データ項目は、風車の状態、風速、風向、発電電力量、積算電力量、系統電流、系統電圧、系統力率、故障発生時の故障原因等で、サンプリング周期を 10 秒以下とし、10 分間平均値に加工して評価する。さらに、風車の状態を、待機・運転・停止・カットアウト停止・故障状況・系統遮断状況等にまとめておくと有効に活用できる。

表Ⅲ.6.3-1 試運転時の検査・試験項目

番号	項目	検査方法等
1	外観検査	電気工作物の設置状況について、工事計画に従って工事が行われ基準に適合していることを目視で確認。
2	接地抵抗測定	風力発電所各サイトの接地抵抗値が規定値以下で、必要な箇所に所定の接地が行われていることを確認。
3	絶縁抵抗測定	電路の絶縁抵抗測定を JIS で定められた絶縁抵抗計で行い、大地及び他の電路と絶縁されていることを確認。
4	絶縁耐力試験	電力回路や機器の使用電圧に応じた試験電圧を 10 分間加え、絶縁に異常のないことを確認。
5	保護装置試験	電気設備技術基準で規定される保護装置ごとに、関連継電器を動作して正常に動作することを確認。
6	遮断器関係試験	①操作用駆動源の付属タンクの容量試験、②駆動力発生装置自動始動停止試験、③駆動力発生装置付属タンク安全弁動作試験を実施して動作に異常がないことを確認。
7	総合インターロック試験	発電設備を負荷運転し、総合インターロックが作動する電気的および機械的要素のそれぞれについて事故を模擬し、保護継電装置を動作させ、プラントが自動的かつ安全に停止すること、関連する警報・表示等が正常に動作することを確認。
8	制御電源喪失試験	発電設備を運転中に制御電源を喪失させたときに、過渡変化する主要のパラメーターを測定し、異常がないこと、遮断機、開閉器が正常に動作すること、警報・表示が正常に出ることを確認。
9	負荷遮断試験	発電設備の出力の 1/4 負荷運転状態から負荷遮断し、異常のないことの確認したあと、4/4 負荷運転で試験をし、負荷遮断時に過渡変化するパラメーターの変動が制限値内にあり、プラントが安全に規定の状態へ移行することを確認。
10	遠隔監視制御試験	発電制御所にて、主機の自動始動停止操作、必要な遮断器等の開閉操作や運転に必要な制御開閉器類の制御操作を遠隔で行い、当該機器が正常に動作すること、および主機の状態変化が発電制御所または技術員駐在所に表示されることを確認。
11	負荷試験（出力試験）	発電設備を可能な限り定格運転を保持して、機器各部の温度上昇が飽和状態になるまで連続運転し、変圧器等の異常な温度上昇、異常振動、異音等がないこと、高調波の測定機器の警報がないこと等、各装置の定格が工事計画書どおりであり、異常が認められないことを確認。
12	騒音測定	騒音規制法にて規定された特定施設をもつ発電所を指定地域内に設置する場合、JIS で定められた方法で騒音を測定し、規制基準に適合していることを確認。
13	振動測定	振動規制法にて規定された特定施設をもつ発電所を指定地域内に設置する場合、特定工場等において発生する振動に関する基準に規定する方法で測定し、規制基準に適合していることを確認。

出典：電気事業法施行規則第 73 条の 4 に定める使用前自主検査の方法の解釈より作成