

### 3.7 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)及び試運転・検査の概要を示す。

#### 3.7.1 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い、契約することが重要である。

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、工事請負業者及びメンテナンス・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3.8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となる保険の種類の確認

### 3.7.2 施工

洋上風力発電の施工は、基礎工事、風車設置工事及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・工程及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 3.7.2-1)。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。

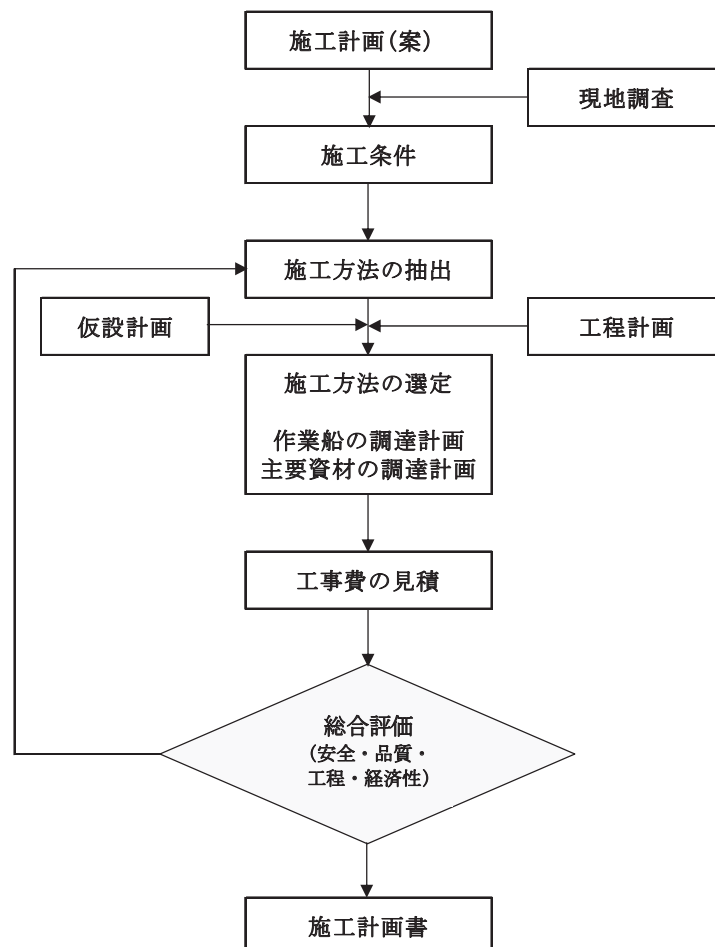


図 3.7.2-1 施工計画作成フロー

## (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」及び「ジャケット式」の3種類について施工方法を示す。

### 1) モノパイル式

図 3.7.2-2 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 300 トン程度で、パイルの厚みは種々異なるが平均して 60mm 程度、通常、水深と風力発電機の大形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 3.7.2-1 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無いが、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。

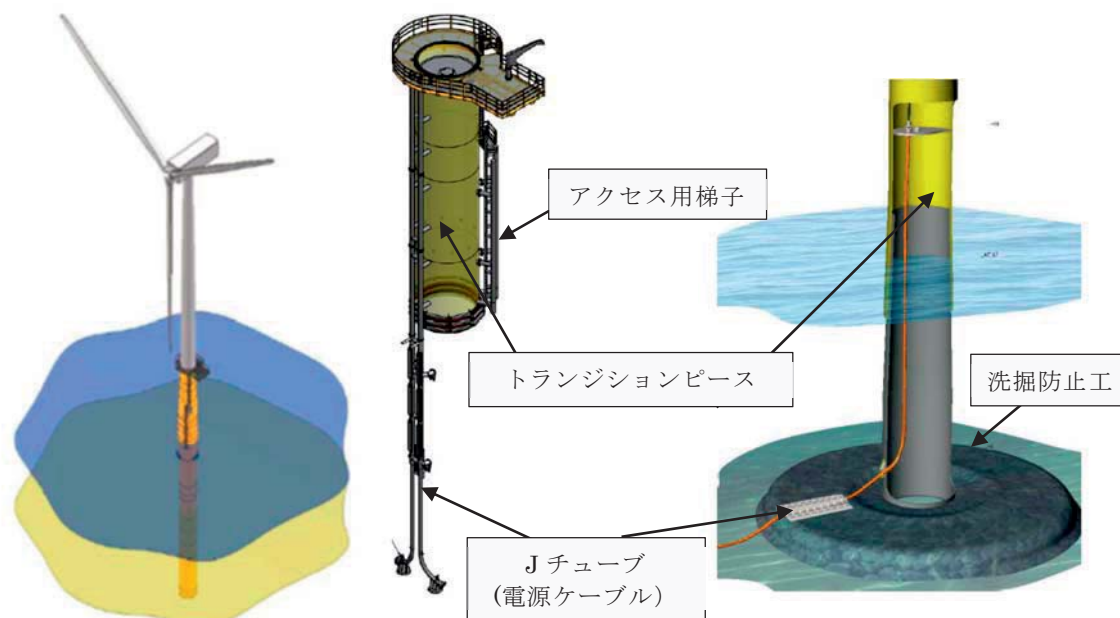


図 3.7.2-2 モノパイル式の洋上風力発電施設例 (Jakobsen and Davidson, 2012)

表 3.7.2-1 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	1100	
40	1400	

出典：MECAL (2014)

①施工方法

モノパイル式の施工の流れを図 3.7.2-3 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 日～3 日、5MW 機で 3 日～3.5 日としている。

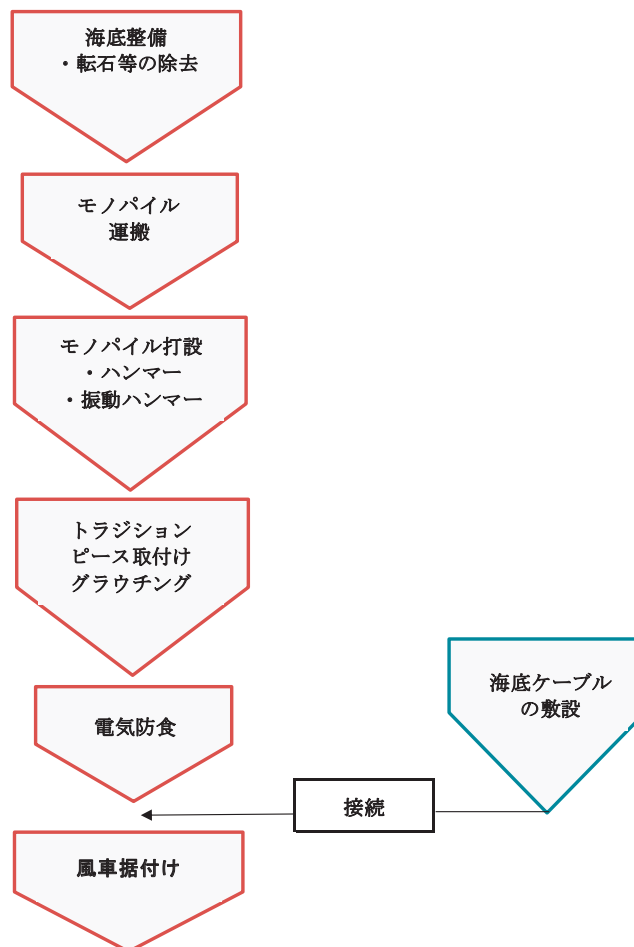


図 3.7.2-3 モノパイル式の施工の流れ

◆ ウィンド・パワーかみす洋上風力発電所

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2.3.2-2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)から以下引用して示す。図3.7.2-4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示すとともに、表3.7.2-2に工程表を掲げる。なお、本サイトの施工は、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ークレーンにより行われた。

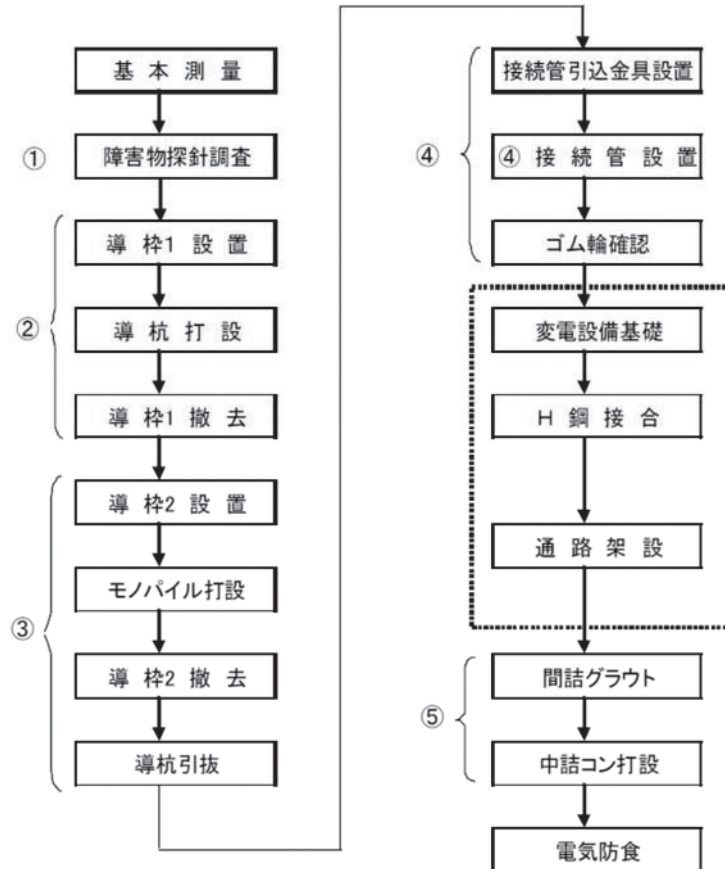


図 3.7.2-4 ウィンド・パワーかみす第1洋上風力発電所のモノパイル施工フロー  
(牛腸ら, 2010)

表 3.7.2-2 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、防食工を除いて、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、ここでは転石等の除去し、モノパイル打設の位置決めを行う工事である。

◆ 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鋼をパイプロハンマー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(潜水夫の確認作業も実施)、障害物マップを作成し、施工位置の検討が行われている。

障害物の撤去方法は、施工性及び確実性が高く、工期に与える影響の少ないダウンザホールハンマー工法が採用されている。ハンマーには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 3.7.2-5)、この回転により障害物を破砕するもので、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時間位を要している。



図 3.7.2-5 ダウンザホールハンマーの先端部(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 3.7.2-6)。



図 3.7.2-6 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及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(3.7.2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(図 3.7.2-7)、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、且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拵径ピース、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(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 3.7.2-7)。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、且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、バイブロハンマの方が油圧ハンマよりも騒音や振動による海生生物に与える影響が緩和されるため、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(図 3.7.2-8)、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ものである。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。
- ✓中掘り工法全旋回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、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。



- ・油圧ハンマ:左図(Ballast Nedam,2011)
- ・バイブロハンマ:右図(PTC Fayat Group <http://en.dmr.fayat.com/Job-reports/PTC-vibrodrivers-technology-in-offshore-wind-farms>)

図 3.7.2-7 油圧ハンマとバイブロハンマの外観





Lic Engineering:[http://www.licengineering.dk/LIC?PDFs/Blyth\\_lowers.pdf](http://www.licengineering.dk/LIC?PDFs/Blyth_lowers.pdf)

図 3.7.2-8 掘削機の外観

◆ ウィンド・パワーかみす洋上風力発電所

ウィンド・パワーかみす第1洋上風力発電所におけるモノパイルの概要図を図 3.7.2-9 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(所謂、トラ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(施能力 100t)に取り付けた 500tf・m 級の油圧ハンマー(S-500)により行われた(図 3.7.2-10)。

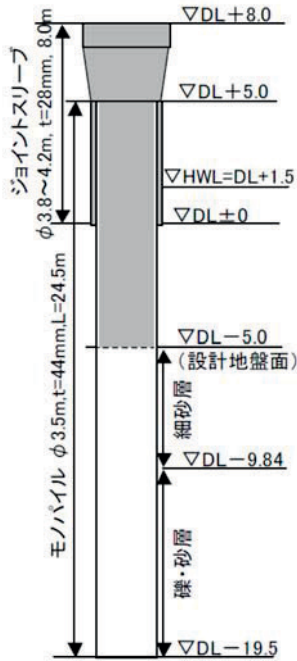


図 3.7.2-9 モノパイルの構造  
(吉田ら, 2010)



図 3.7.2-10 陸上から作業中のクローラクレーン  
(岡野, 2010)

施工方法は、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 3.7.2-11、図 3.7.2-12)。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 1500 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は短く済んでいる。

なお、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 3.7.2-11 導杭打設状況(岡野, 2010)



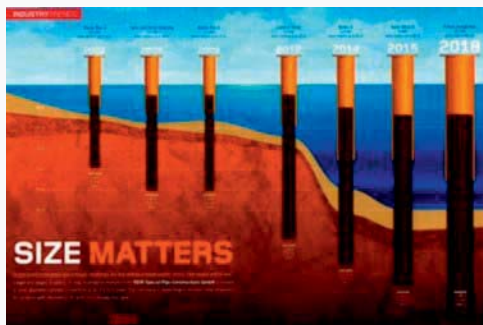
図 3.7.2-12 モノパイル打設状況(岡野, 2010)

**【豆知識 3.7.2-1】**

●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、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るが、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。

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	>9.0
	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 3.7.2-2】

#### ●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

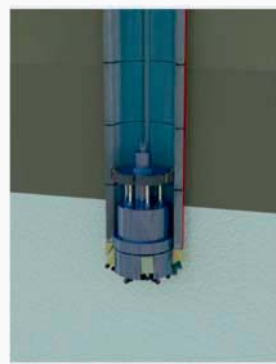
#### (2) 穿孔モノパイルの構造と設置方法

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、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:500,000Euro/MW(6,750 万円/MW)/5.0MW 機:400,000Euro/MW(5,400 万円/MW) (135 円/Euro)



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で、風車の高さや傾きを調整するためにアジャスタ機能もある(図 3.7.2-13)。



左図・中図:heavyliftspecialist com.、右図: Ballast Nedam(2011)

図 3.7.2-13 トランジションピースの運搬と設置

風車タワーとモノパイルを間の接続部分は、「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 3.7.2-14)。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 3.7.2-15)、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、水中不分離性高流動無収縮モルタル(マックス AZ)が 1 基当たり約 6m<sup>3</sup>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 3.7.2-16)。

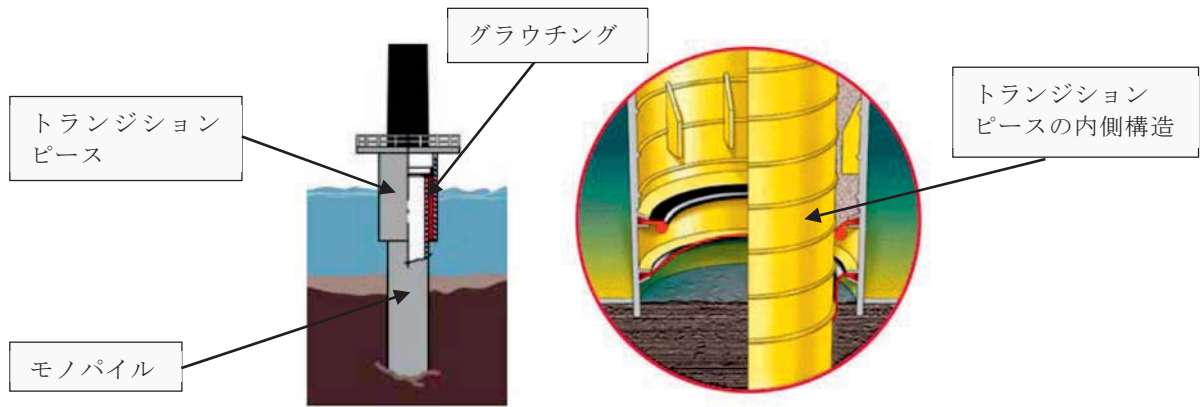


図 3.7.2-14 グラウチングとトランジションピースの構造 (Garrad Hassan, 2009)

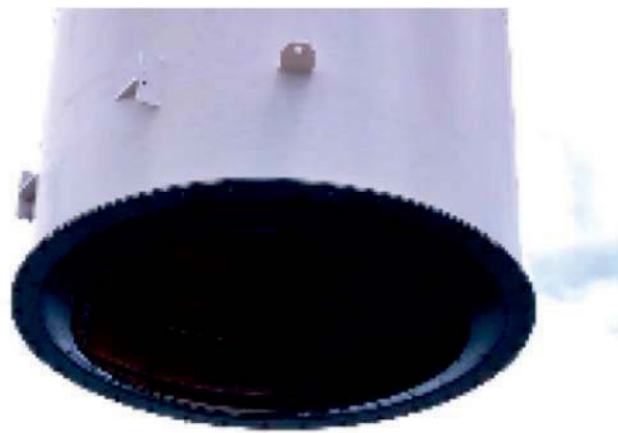


図 3.7.2-15 スリーブ先端のゴムリング (牛腸ら, 2010)

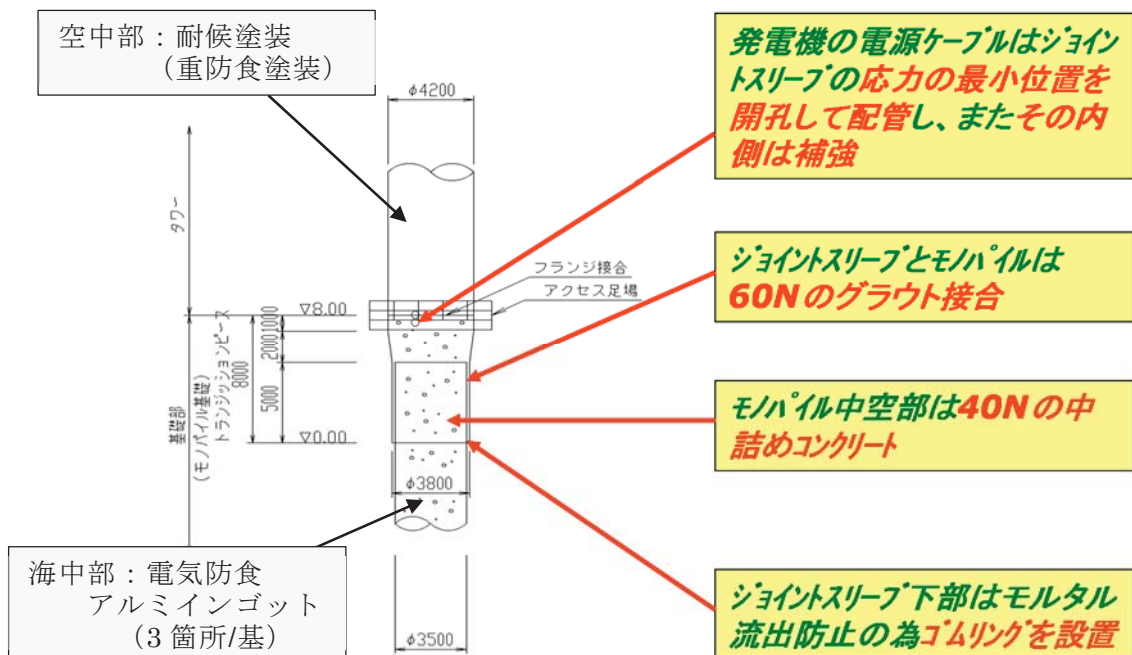


図 3.7.2-16 スリーブ先端のゴムリング (岡野, 2010 を一部改変)

## 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 3.7.2-3】

#### ●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。

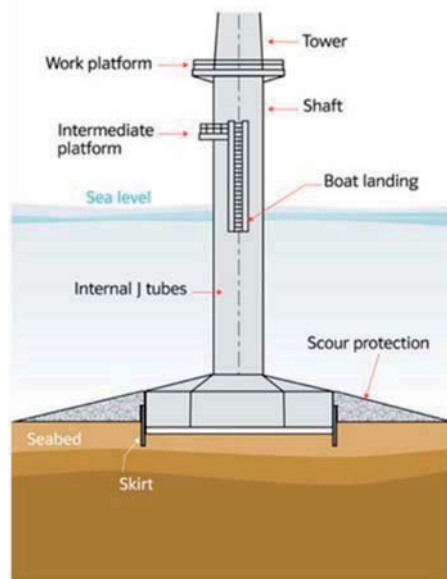


BARD HP  
<http://www.bard-offshore.de/en/concepts.html>  
<http://www.bard-offshore.de/en/concepts/wecs/foundation.html>  
<http://www.bing.com/images/search?q=BARD+offshore+&qvvt=BARD+offshore+&qvvt=BARD+offshore+&FORM=IGRE>

## 2) 重力式

図 3.7.2-17 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、欧州では施工実績の割合はモノパイル式に次ぐ順位にあるが、約 14%(2013 年末)と少ない。ただ、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(238 頁の上 2 図)。



<http://www.4coffshore.com/windfarms/gravity-based-support-structures-aid274.html>

図 3.7.2-17 重力式の外観図

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 3.7.2-3 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が、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、材料費は鋼材費に較べて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の低い場合が多い(The Crown Estate,2010)。

表 3.7.2-3 5MW 級の重力式支持構造物の諸元

水深 (m)	重量 (t)	寸法
≤40m	~2700-3000t (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 3.7.2-18 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→風車据付けとなる。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日～5.5日、5MW 機で3.5日～6日としている。

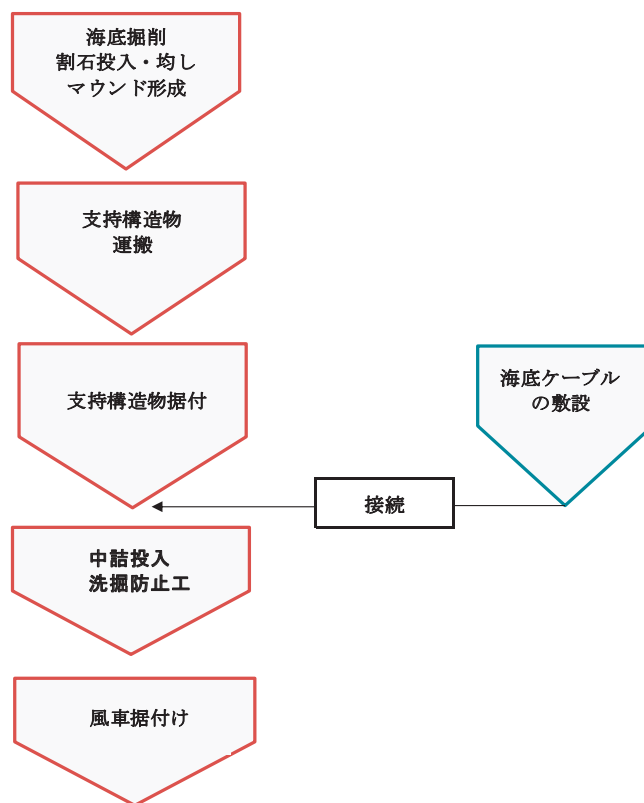


図 3.7.2-18 重力式の施工の流れ

NEDO 洋上風力実証研究の銚子沖と北九州市沖には洋上風況観測タワーと洋上風車が設置されている。これらの支持構造物の型式は両設備ともに、銚子沖で重力式、北九州市沖でハイブリッド重力式が採用されている。後者のハイブリッド重力式の施工方法は、重力式と変わらないので、ここに取りまとめて示す。

各支持構造物の採用理由は、以下の通りである。

#### 【銚子沖：重力式】

海底が比較的平坦で岩盤のため、杭を打設しない重力式が採用された。海上での工事期間の短縮化を図るため、支持構造物をクレーン船で設置できるように、プレストレスト鉄筋コンクリート構造(PC:引張応力によるひび割れ防止及び高い塩害耐久性を有する)の軽量でコンパクト、且つ波力の低減可能な三角ラスコ型ケーソン基礎が開発されている(図 3.7.2-19)。

左：洋上風車用  
(2,300t:ケーソンのみ)  
(5,400t:中詰後)



右：洋上観測タワー用  
(1,300t:ケーソンのみ)  
(3,500t:中詰後)

図 3.7.2-19 銚子沖の支持構造物東京電力・鹿島建設資料)

【北九州市沖：ハイブリッド重力式】

海底は、比較的平坦で、層厚約 12m の堆積層が岩盤を覆っているため、重力式の施工メソッドとジャケット式の主に構造特性の利点を活かしたハイブリッド重力式(底板コンクリートと一体化したジャケット構造)が採用された(図 3.7.2-20)。

- ・構造面：水中部を骨組部材で透過構造にすることにより、一般の重力式と比べて作用波力を大幅に低減することが可能。また、ハイブリッド構造により安定を保ち、ねばり強い構造にすることが可能。
- ・施工性：捨石マウンド築造後、プレキャスト化(底板コンクリートと一体化したジャケット構造を工場内で組立・製作)により海上作業を大幅に低減することが可能。



1. 洋上風車用  
(約 4,160t)
2. 洋上風況観測タワー用(左図)  
\*:支持構造物+観測塔(1)を接合したもの  
(支持構造物：約 2,750t)

図 3.7.2-20 北九州市沖の支持構造物(ハイブリッド重力式構造:電源開発資料)

◆銚子沖

洋上風力実証研究の建設工事に関する銚子沖の工程表を再掲して、表 3.7.2-4 に示す。銚子沖では、東日本大震災(2011(平成 23)年 3 月 11 日)による影響が大きく、基礎マウンド工事の一部は、震災前に行われていたが、震災後の 2012 年 1 月から新たに再開され、結局、準備期間も入

れて同年 6 月までの約 5.5 ヶ月を要している(基礎はフローティングドックで製作されていたが、コストダウンのため製作途中で陸揚げして行った)。その後、約 5 ヶ月間を掛けて支持構造物、洋上風況観測タワー、洋上風車等が設置された(洋上風況観測タワー設置完了日は 2012 年 8 月 18 日；洋上風車の設置完了日及び運転開始はそれぞれ 2012 年 10 月 6 日と 2013 年 1 月 29 日、図 3-2 を参照)。

なお、鹿島港で行われていた支持構造の製作が東日本大震災(2011(平成 23)年 3 月 11 日)により一時中断し、兵庫県東播磨港にて同年 8 月に製作が再開され、結果的には 2 基の支持構造の製作に、当初の計画よりも 5 ヶ月間遅く 10 ヶ月掛かっている。

表 3.7.2-4 洋上風力実証研究(銚子沖)の工程表(東京電力・鹿島建設資料)

(上段:震災前の旧計画,下段:震災後の新計画)



◆北九州市沖

洋上風力実証研究の建設工事に関する北九州市沖の工程表を再掲して、洋上風況観測タワーのそれを表 3.7.2-5、また洋上風車の工程表を表 3.7.2-6a,b に示す。

北九州市沖における洋上風況観測タワーの基礎マウンド工事は、2012(平成 24)年 4 月 18 日より同年 5 月 17 日まで行われた。その後、支持構造物と観測タワーの据付が 6 月 17 日から 6 月 30 日までの約 2 週間で据え付けられ(洋上風況観測タワー設置完了日は 2012 年 6 月 30 日、図 3-2 を参照)、連結固定、足場撤去等の附帯工が 7 月 28 日までに実施された(風向風速センサー等の観測装置は 8 月から 9 月までの 2 ヶ月間で取付け)。なお、観測タワーと支持構造物の製作は、少なくとも 8 ヶ月程度を要している(表 3.7.2-5)。

表 3.7.2-5 洋上風力実証研究(北九州市沖:洋上風況観測タワー)の工程表(電源開発資料)

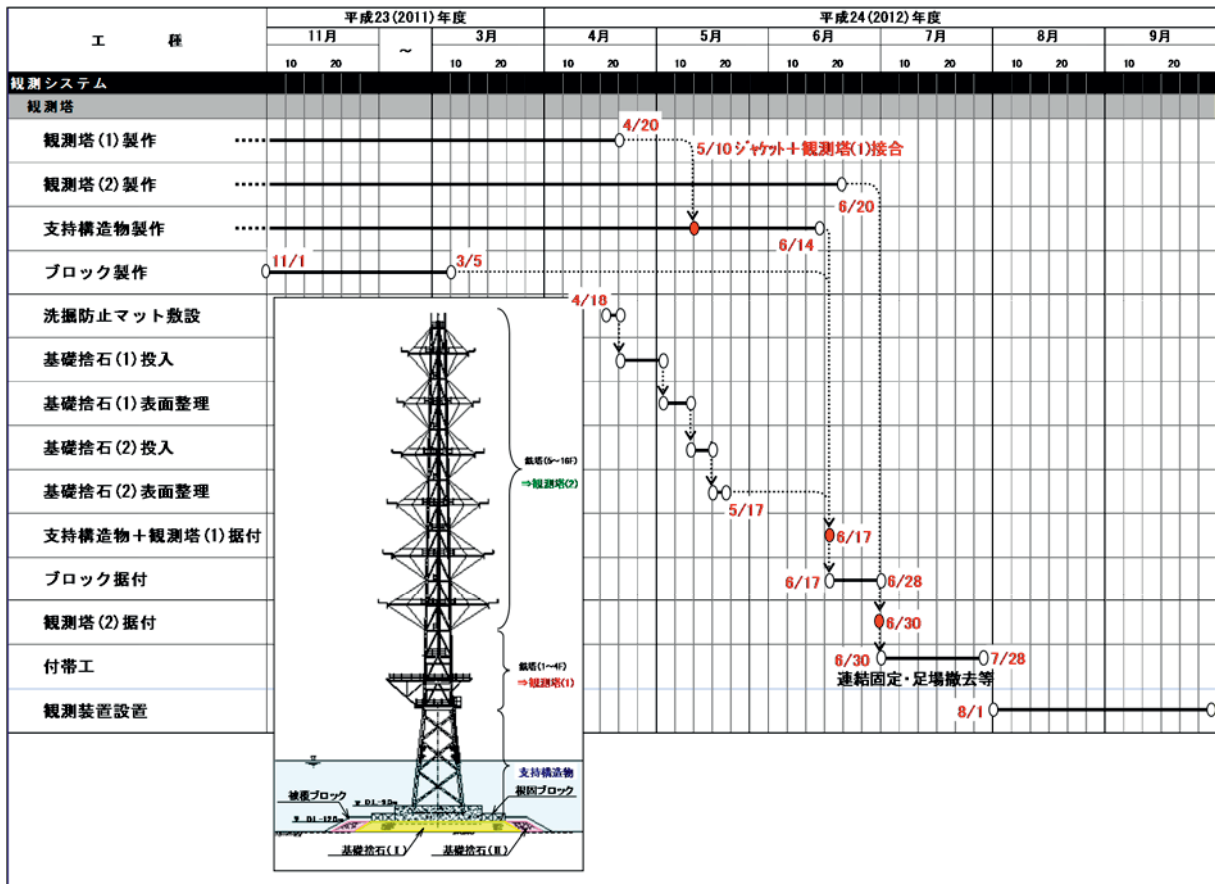


表 3.7.2-6a と表 3.7.2-6b に示しているように、北九州市沖における洋上風車の基礎マウンド工事は、2012(平成 24)年 7 月 9 日より同年 9 月 8 日までの約 2 ヶ月間で行われた。その後、支持構造物が 10 月の約 1 ヶ月で据え付けられるとともに、洋上風車の据付は翌年(2013 年)の 1 月末からの準備期間を入れて 2 ヶ月余りの 4 月初旬に行われた(洋上風車の設置完了日及び運転開始はそれぞれ 2013 年 3 月 23 日と 2013 年 6 月 24 日、図 3-2 を参照)。

表 3.7.2-6a には、海上鉄塔(護岸を超えて海底ケーブルを陸上開閉所に連結するための鉄柱)、海底ケーブル及び陸上開閉所の工事工程も併記されているように、これらの工事は洋上風車が設置される前までには完了する工程となっている。

表 3.7.2-6a 洋上風力実証研究(北九州市沖:洋上風車)の工程表(電源開発資料)

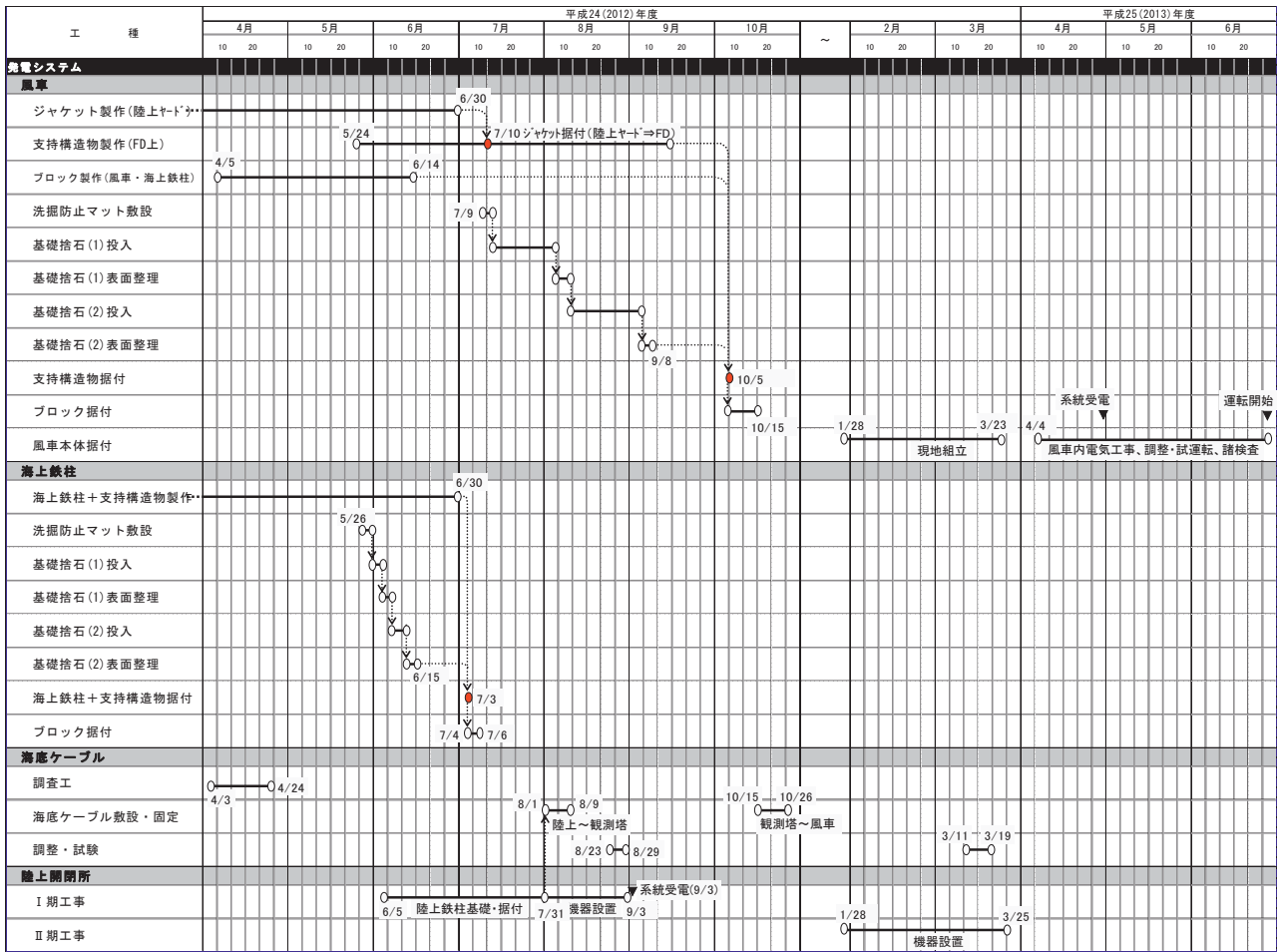
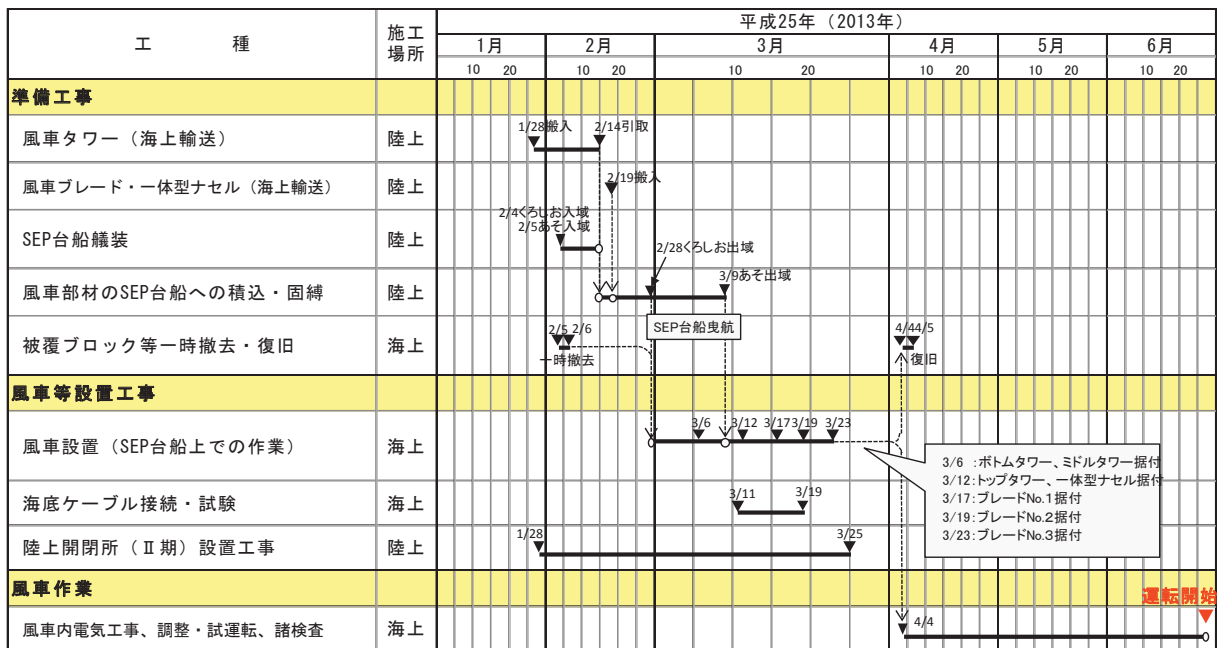


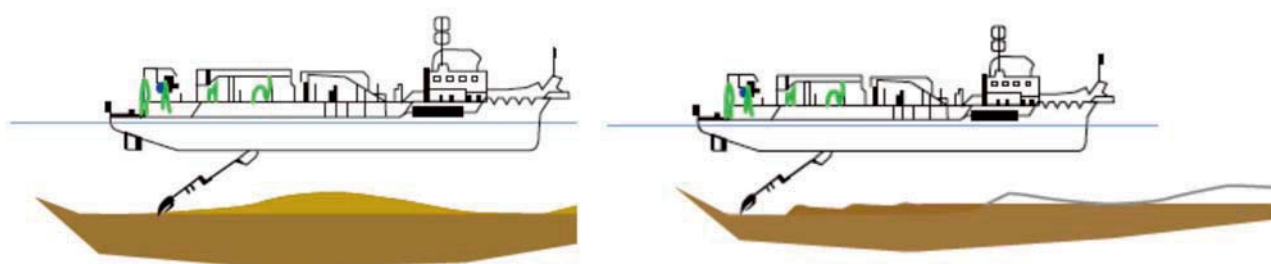
表 3.7.2-6b 洋上風力実証研究(北九州市沖:洋上風車)の工程表(電源開発資料)



### 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」及び「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)。

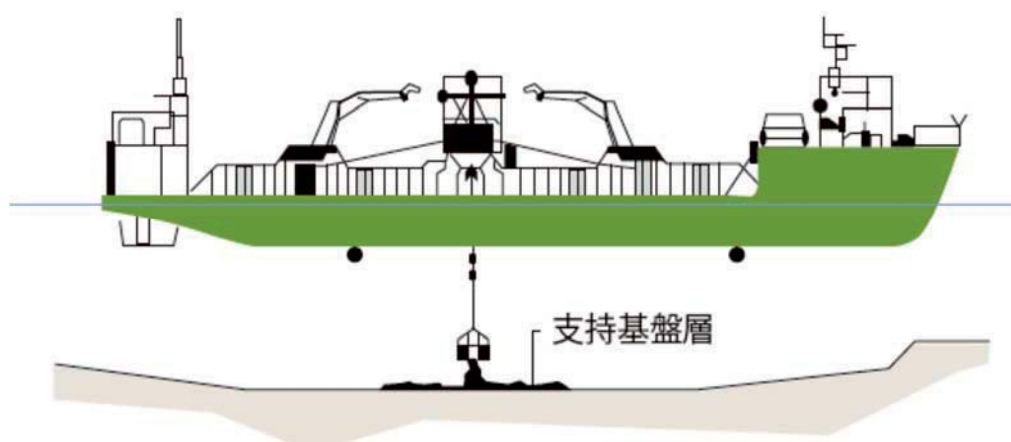
- ✓掘削：バージ船に載せたバックホウ掘削機やスリット式ホッパーバージ船により掘削が行われていたが、現在では比較的水深の深い海域でも適応可能なホッパードレッジャー(底開き浚渫船)が使用される(図 3.7.2-21)。掘削された土砂は、重力式構造物の中詰材料(充填物)として利用される場合がある。浚渫深度は、水深、岩石の性状、地質構造、地盤特性等によって異なるが、大体 0.5m～10m 以上の範囲である。



<http://www.c-power.be/construction>

図 3.7.2-21 海底の掘削(左:柔らかい表層砂泥, 右:締まった次表層砂泥) (図を一部改変)

- ✓マウンドの形成：浚渫後、マウンド作りとなる(図 3.7.2-22)。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、砕石等を投入する。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する場合もあ



<http://www.c-power.be/construction>

図 3.7.2-22 支持基盤層の整備 (図を一部改変)

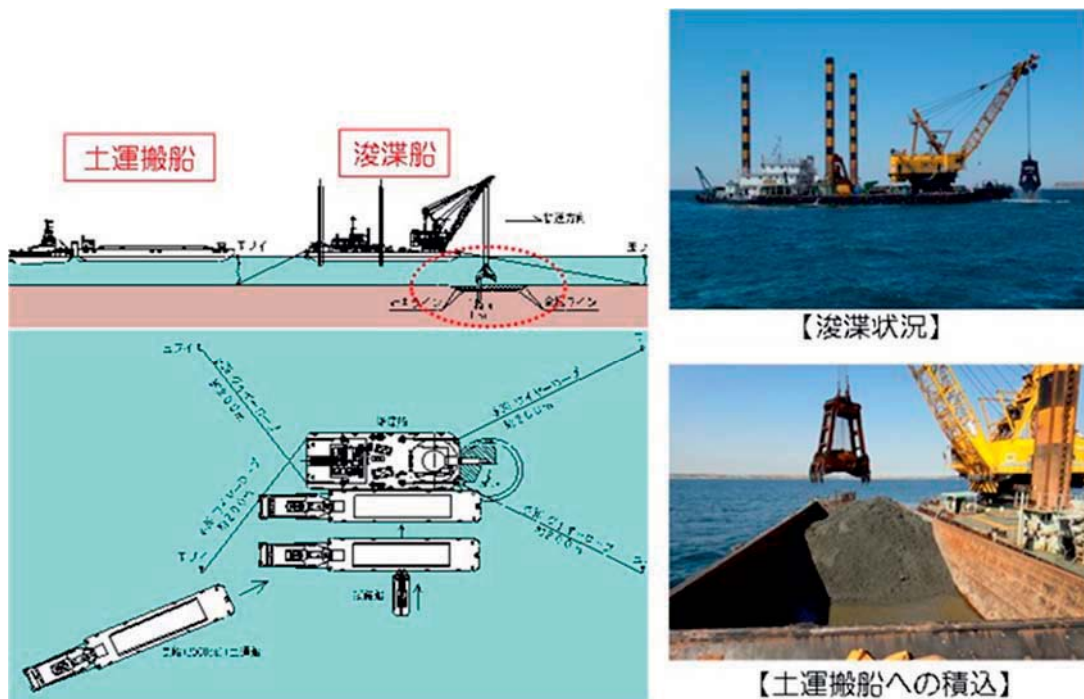
濾過層(Filter layer)と砂利層(Gravel layer)の粒径に関して、前者は 0-63mm、後者は 10-80mm と設定され、広く用いられている。ベルギーの洋上windファーム(Thornton Bank)では全層厚 2.2m の内、1.5m が濾過層、0.7m が砂利層となっている。マウンドの表面は、平均±3~5cm の誤差で水平度を保持することが重要である。なお、欧州ではマウンド工事は1基礎当たり 3 日間とされている(Danish Energy Agency,2013)。

◆銚子沖

支持構造物据付海域において不陸調整(窪みを埋めて平坦にすること)のため、2011年(平成23年)2月下旬から浚渫作業が開始されていたが、震災と津波の影響により作業が中断され、翌年の3月から浚渫作業が開始された。作業手順は、浚渫→捨石投入→均し作業(水平度を確保するために、水中バックホウと潜水士による作業)である(図 3.7.2-23 と図 3.7.2-24)。

✓洋上風況観測タワー・洋上風車

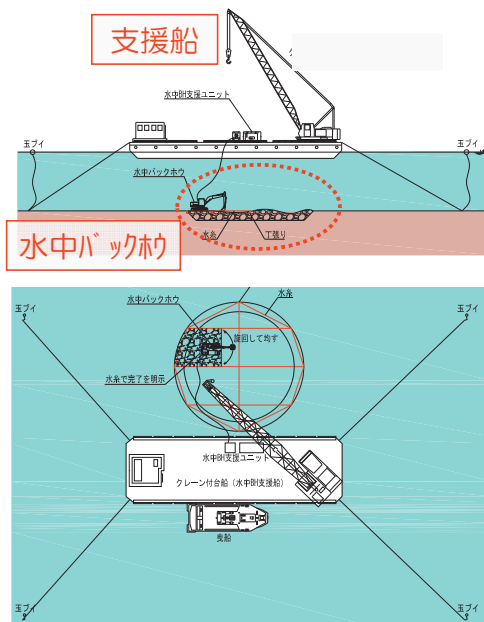
基礎マウンドの均し管理値(天端の高さ)±5cm に対して、工事後は洋上風況観測タワー及び洋上風車ともに±4cm の精度が認められている。



洋上風況観測タワーSiteの作業期間:2012年3月中旬~4月上旬,稼働率 15.0%(6日/40日)

洋上風車 Siteの作業期間:2012年3月中旬~4月上旬,稼働率 15.0%(6日/40日)

図 3.7.2-23 浚渫・土運搬作業(東京電力・鹿島建設資料)



水中バックホウによる  
均し作業のイメージ

洋上風況観測タワーSite の作業期間:2012年4月中旬～6月中旬,稼働率 46.4%(39日/84日)

洋上風車 Site の作業期間 : 2012年4月中旬～6月中旬,稼働率 46.4%(39日/84日)

図 3.7.2-24 均し作業(東京電力・鹿島建設資料)

#### ◆北九州市沖

基礎マウンドは、図 3.7.2-25 に示す構造形式となっており、工事は、洗掘防止マットの敷設→捨石の投入→均し作業→根固ブロック→被覆ブロックの順に行われる。なお、根固ブロック及び被覆ブロックは支持構造物の据付け後に合わせて実施されている。

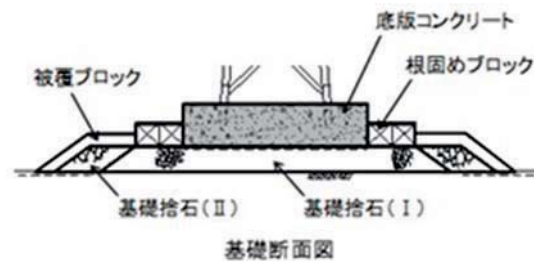


図 3.7.2-25 基礎マウンドの構造形式(電源開発資料)

#### ✓洋上風況観測タワー(基礎マウンド)

水平度は、南北方向の管理基準値  $0.3^\circ$  未満に対して  $\pm 0.06^\circ$ 、方向のズレの管理基準値  $1^\circ$  未満に対して  $0.6^\circ$  の精度が認められている。

#### ✓洋上風車(基礎マウンド)

水平度は、南北方向の管理基準値  $0.3^\circ$  未満に対して  $\pm 0.13^\circ$ 、南北方向の管理基準値  $0.3^\circ$  未満に対して  $\pm 0.13^\circ$  の精度が認められている。

図 3.7.2-26 に捨石投入と均し作業等の状況を示す。



捨石投入



捨石投入



重錘による基礎捨石均し



根固ブロック設置



洋上風況観測タワーSite の作業期間:2012年4月16日~5月17日,稼働率75.0%(24日/32日)

洋上風車 Site の作業期間: 2012年7月24日~9月8日,稼働率:41.3%(19日/46日)

図 3.7.2-26 捨石投入と均し作業等(電源開発資料)

b. 支持構造物の運搬と据付け

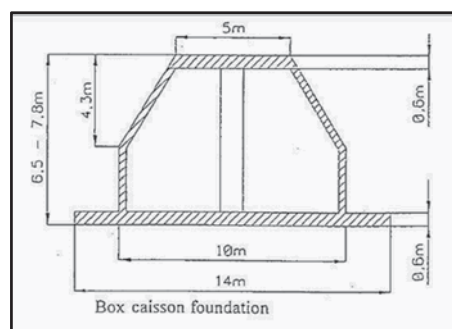
いくつかの重力式支持構造物について、主な寸法を以下に掲げる。支持構造物は風車の大型化、水深の増加に伴い巨大な構造物になっている。

✓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

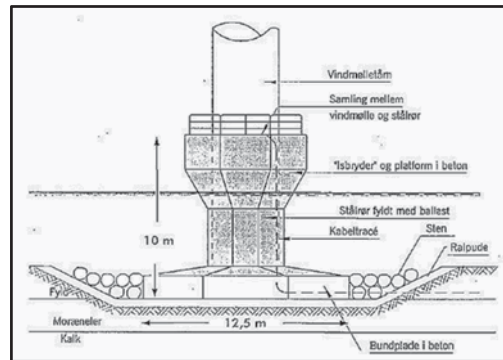
質量:約500t(充填砂込み:約1000t)



✓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

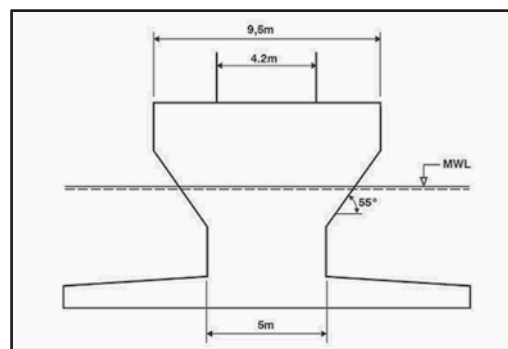
質量:約 1500t(充填砂込みか否か不明)



✓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 1200t(充填砂込み:約 2500t)

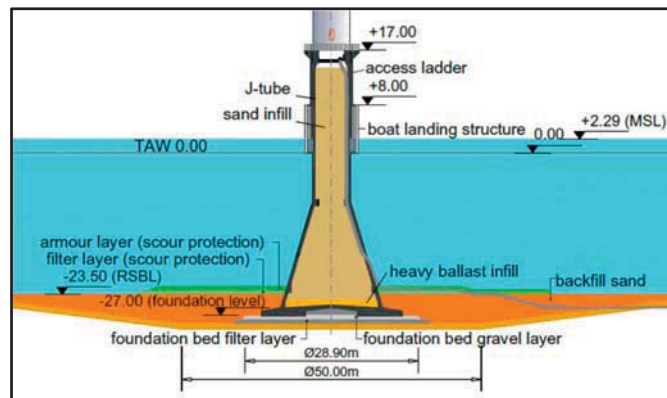


✓Thornton Bank I (ベルギー:30MW 5MW×6 基,平均水深 10.5m/2008 年設置)

底面径:23.5m 高さ:42m

質量:約 2700-3000t

(充填砂込みか否か不明)



3.4.5 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、質量が約 5400t(中詰材(銅水砕スラグ)を除くと、約 2300t)である(図 3.4.5-5 を参照)。上記のベルギー Thornton Bank I の重力式支持構造物は、水深の深い海域に設置されるため高さが高いが、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」及び「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 3.7.2-27 は、Middelgrunden のドライドックにおける製造例、図 3.7.2-28 は Lillgrund のポンツーンを使った製造例である。後者は、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)。



Middelgrunden  
[http://www.ontario-sea.org/Storage/29/2118\\_do1.pdf](http://www.ontario-sea.org/Storage/29/2118_do1.pdf)



Lillgrund  
[http://corporate.vattenfall.se/globalassets/sverige/verksamhet/vindkraft/lillgrund/technical\\_description\\_lillgrund\\_11336934.pdf](http://corporate.vattenfall.se/globalassets/sverige/verksamhet/vindkraft/lillgrund/technical_description_lillgrund_11336934.pdf)

図 3.7.2-27 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)

図 3.7.2-28 重力式構造物のポンツーン上における製造と運搬 (Vattenfall, 2008)

支持構造物の運搬として、図 3.7.2-29 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。



左図:[http://www.gl-group.com/pdf/06\\_2009.05.12\\_Hamburg\\_Offshore\\_Wind\\_2009.pdf](http://www.gl-group.com/pdf/06_2009.05.12_Hamburg_Offshore_Wind_2009.pdf)

右図:<http://www.skibstekniskelskab.dk/public/dokumenter/Skibsteknisk/Download%20materiale/2011/Offshore%20Wind%20Turbines/Kaj%20Lindvig%20A2SEA.pdf>

図 3.7.2-29 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

支持構造物の据付けは、フローティングクレーンや起重機船から図 3.7.2-30 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 3.7.2-31)。



<http://www.c-power.be/construction>

図 3.7.2-30 吊り下げフック



左図:Middelgrunden([http://www.ontario-sea.org/Storage/29/2118\\_doc1.pdf](http://www.ontario-sea.org/Storage/29/2118_doc1.pdf))  
(Copenhagen Environment and Energy Office,2003)

右図:Lillgrund([http://corporate.vattenfall.se/globalassets/sverige/verksamhet/vindkraft/lillgrund/technical\\_description\\_lillgrund\\_11336934.pdf](http://corporate.vattenfall.se/globalassets/sverige/verksamhet/vindkraft/lillgrund/technical_description_lillgrund_11336934.pdf))  
(Vattenfall,2008)

図 3.7.2-31 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け

#### ◆銚子沖

支持構造物は、東播磨港でフローティングドック(FD)に積み込み、鹿島港に回航された。鹿島港からは、全旋回式起重機船(日本最大級)を使って実証研究サイトまで運ばれているが、クレーン能力が 1600t であったため、起重機船の揺れの小さい中央部分に専用の架台を取り付けて支持構造物を固定して運搬し、吊り下げ着底させている(洋上風車の支持構造物の例:図 3.7.2-32)。鹿島港から実証研究サイトまでの運搬距離は 70km で、起重機船の往復航行時間と着底に要するサイクルタイムを計 36 時間とし、施工は鹿島港と銚子沖が同時に静穏になる気象・海象条件を予測して行われた。



洋上風況観測タワーSiteの作業期間:2012年6月28日~6月29日,稼働率36.0%(9日/25日)

洋上風車Siteの作業期間:2012年7月9日~7月10日,稼働率36.0%(9日/25日)

図 3.7.2-32 洋上風車の支持構造物の運搬・据付け(東京電力・鹿島建設資料)

#### ◆北九州市沖

支持構造物は、北九州市港のヤード(洋上風況観測タワー用)とフローティングドック(洋上風車用)で製作され、洋上風況観測タワー用支持構造物は大型クレーン船(武蔵 3700t)により運搬・据付、洋上風車用支持構造物はフローティングドックで運搬し、大型クレーン船(武蔵 3700t)により据付けられた(洋上風車の支持構造物の例: 図 3.7.2-33)。設置後に根固ブロックや被覆工事が行われ、洋上風況観測タワーの支持構造物は 2012 年 6 月末、洋上風車の支持構造物は 2012 年 10 月半ばに、それぞれ工事が完了している。

支持構造物の水平度は、以下の通り確認されている。

##### ✓洋上風況観測タワー(支持構造物+観測タワー天端の水平度)

水平度は、南北方向の管理基準値  $0.3^\circ$  未満に対して $-0.03^\circ$ 、東西方向の管理基準値  $0.3^\circ$  未満に対して $-0.02^\circ$  の精度が認められている。

##### ✓洋上風車(支持構造物 接合フランジ天端面の水平度)

水平度は、南北方向の管理基準値  $0.3^\circ$  未満に対して $-0.07^\circ$ 、南北方向の管理基準値  $0.3^\circ$  未満に対して $-0.07^\circ$  の精度が認められている。



- ①:支持構造物のフローティングドックによる運搬
- ②:支持構造物の係留(実証研究サイト)
- ③:支持構造物の据付け状況
- ④:支持構造物の据付け完了

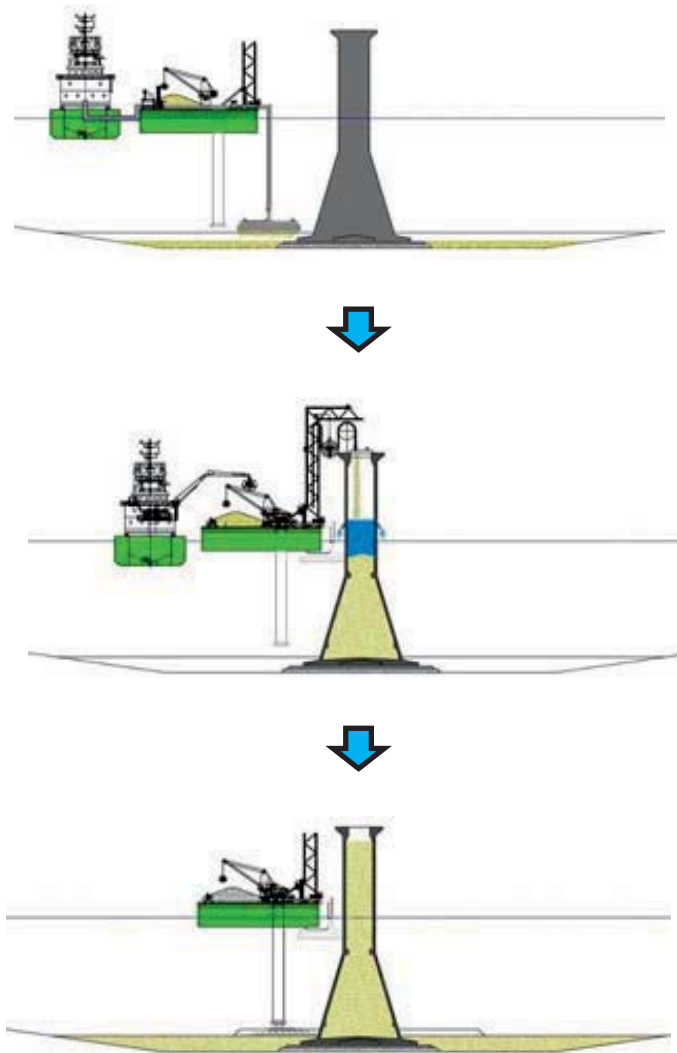
洋上風況観測タワーSite の作業期間:2012年6月15日～6月17日;稼働率 33.3%(1日/3日)

洋上風車 Site の作業期間 : 2012年9月28日～10月5日;稼働率: 25.0%(2日/8日)

図 3.7.2-33 北九州市沖における洋上風車の支持構造物の運搬・据付け(電源開発資料)

### c. 中詰投入・洗掘防止工

重力式支持構造物の据え付け後には、中詰として浚渫砂等を投入するが(図 3.7.2-34)、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け工事は完了となる(図 3.7.2-35)。



<http://www.c-power.be/construction>

図 3.7.2-34 重力式支持構造物の中詰作業手順

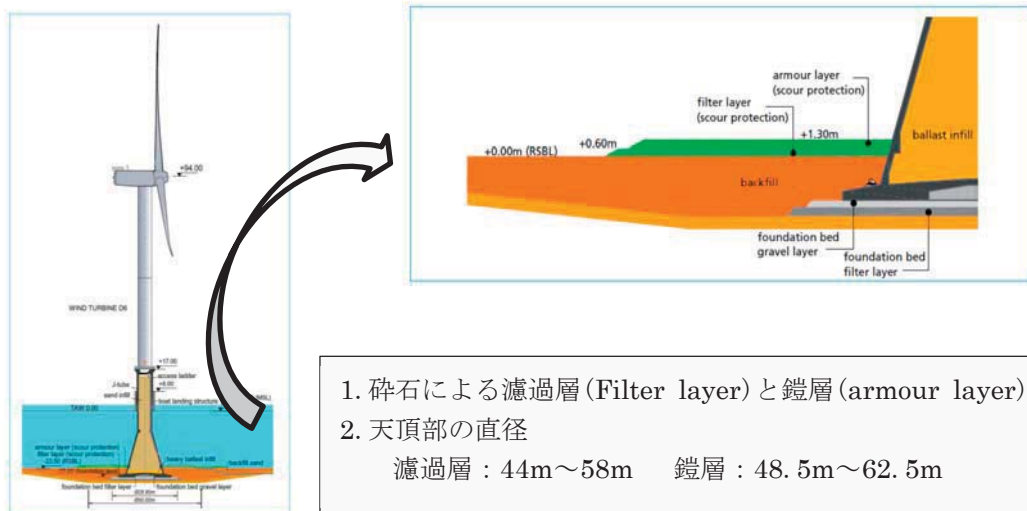
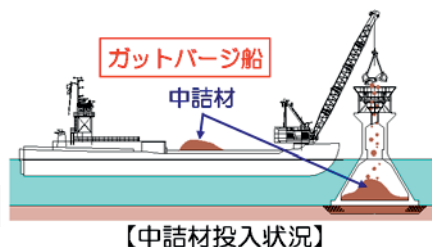


図 3.7.2-35 Thornton Bank I における洗掘防止工の例 (Peire *et al.*, 2009)

◆銚子沖

支持構造物の据付け後に、ガットバージ船により中詰材(銅水碎スラグ)が投入され、洋上風車用の支持構造物の完成重量は 5400t(中詰材:3100t)となった(図 3.7.2-36)。また、洗掘防止策として支持構造物周辺にフィルターユニットが据付けられ、基礎工事が完了した(図 3.7.2-37)。

銅水碎スラグの山



【中詰材投入状況】

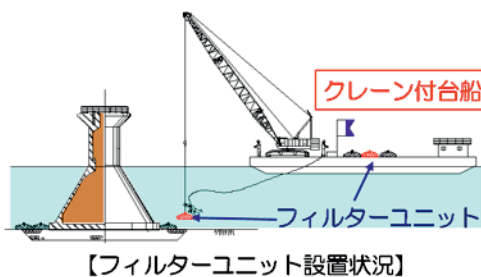


洋上風況観測タワーSite の作業期間:2012 年 7 月下旬,稼働率 30.0%(9 日/30 日)

洋上風車 Site の作業期間 : 2012 年 7 月下旬,稼働率 30.0%(9 日/30 日)

図 3.7.2-36 中詰材(銅水碎スラグ)の投入状況(東京電力・鹿島建設資料)

フィルターユニット保管状況(名洗港)



【フィルターユニット設置状況】



洋上風況観測タワーSite の作業期間:2012 年 7 月下旬,稼働率 39.4%(13 日/33 日)

洋上風車 Site の作業期間 : 2012 年 7 月下旬,稼働率: 39.4%(13 日/33 日)

図 3.7.2-37 フィルターユニットの据付け状況(東東京電力・鹿島建設資料)



## ②施工精度(管理値)

〈マウンド〉

- ・ ±3-5cm (Ismael,2013)。
- ・ ±5cm (東京電力:銚子沖)
- ・ 0.3° 未満、方向のズレ 1° 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° 以内、中心位置±3.3m (東京電力:銚子沖)
- ・ 観測タワー：傾斜 0.95° 以内、中心位置±3.3m (東京電力:銚子沖)
- ・ 洋上風車・観測タワー：0.3° 未満、方向のズレ 1° 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。

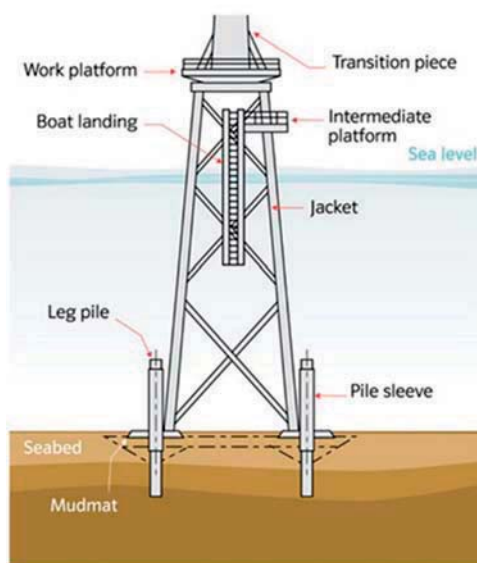
〈ケーソンの据付け〉

- \* 法線に対する出入：±20cm(<2000t)、±30cm(≥2000t)
- \* 目地間隔：±20cm(<2000t)、±30cm(≥2000t)

### 3) ジャケット式

図 3.7.2-38 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、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、欧州における施工実績の割合は約 4%(2013 年末)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。



<http://www.4coffshore.com/windfarms/jacket-or-lattice-structures-aid271.html>

図 3.7.2-38 ジャケット式の外観図

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 3.7.2-7 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、高コストの要因の一つであるが、水深 30m ではジャケットの重量は約 800 トンとなるものの、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 3.7.2-7 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	~550-1650t	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 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 3.7.2-39 に示す。図示しているように施工方法は、i 杭先行方式と ii ジャケット先行方式の 2 方式がある。両方式の違いは、本杭の打設をジャケットの据付け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→支持構造物の据付け→風車据付けとなる。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 日～6 日、5MW 機で 4.5 日～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。

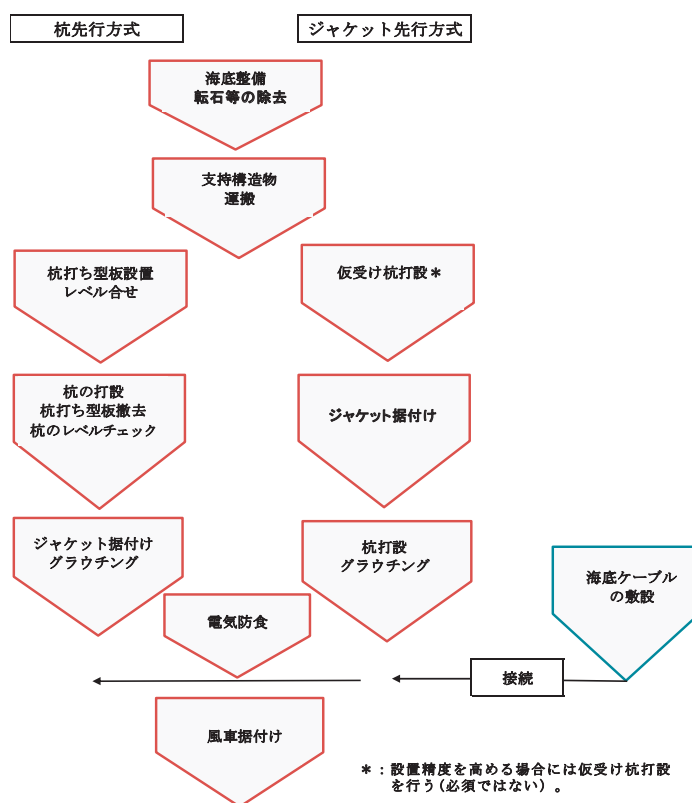


図 3.7.2-39 ジャケット式の施工の流れ

### 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、ここでは転石等の除去し、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 3.7.2-40 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 600 トン、トランジションピースが 150 トンとされている(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。2.1.2 項を参照)の鋼材量

の比較表を表 3.7.2-8 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 1000 トン程度であるが、トリポッドは約 1300 トンと、ジャケットよりも約 3 割も重い推計となっている。



図 3.7.2-40 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 3.7.2-8 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 3.7.2-41 に示す。ジャケットの運搬は、陸上クレーンあるいは起重機船により台船に積み込み曳航して設置海域に向かう。海上運搬は、気象・海象条件及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)。



左上図: <http://renews.biz/44456/rwe-port-tailored-for-jacket-loading/>

右上図: [http://www.windcomm.de/Downloads/Vortraege\\_Flyer\\_Infos/PresentationREpower.pdf](http://www.windcomm.de/Downloads/Vortraege_Flyer_Infos/PresentationREpower.pdf)

左下図: <http://www.bing.com/images/search?q=jacket+offshore+wind&view=detailv2&&qpvt=jacket+offshore+wind&id=80821928260AFE5354A375A79F6EC86D5EB0FD76&selectedIndex=8&ccid=Bw1T07vZ&simid=607994364093072983&thid=JN.d3oY238Y5Ld6dOsCTYkl3A&ajaxhist=0>

右下図: <http://www.bing.com/images/search?q=jacket+offshore+wind&view=detailv2&&id=98394F52E1A31D95FCC9898A7D4E7AB415BEE7AF&selectedIndex=392&ccid=nNMk1XgL&simid=608047333920211621&thid=JN.R33%2f1C%2biuThzAnRuABLddg&ajaxhist=0>

図 3.7.2-41 ジャケットの運搬状況

### 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. 支持構造物の据付け

ジャケットの据付けは、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け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付けて置き、

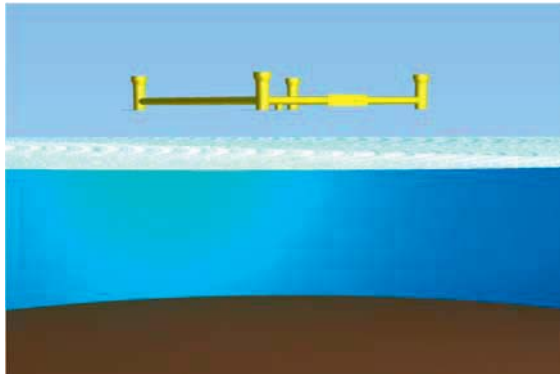
固縛解除後に吊りワイヤーの端部数ヶ所をシャックルにてジャケット本体の吊環に取り付ける。同時に、ジャケットの振止め用のタガーライン 2 本をジャケット上部に取付ける。起重機船のフックを巻き上げるが、この時、複数のフックを使用する場合には荷重負荷は同等となるように、吊り荷重を暫時増加して、最後に吊り上げる(図 3.7.2-42)。ジャケットを吊り上げ、旋回後に台船は離舷・出域させる。ジャケットを杭の上方まで吊り下ろしたら、潜水士等によりジャケットの位置を確認して杭頭に預ける。この時、荷重負荷をジャケット水中重量の 20%程度に残しておくが良い。そして、再度、杭との接触状況を確認して支障がなければ吊り荷重を完全に解放し、据付け位置(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 3.7.2-42)。なお、杭先行方式は杭の設置精度の影響が大きいので、事前に吊り上げ状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置く必要がある。

ジャケットと杭の接合は、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。

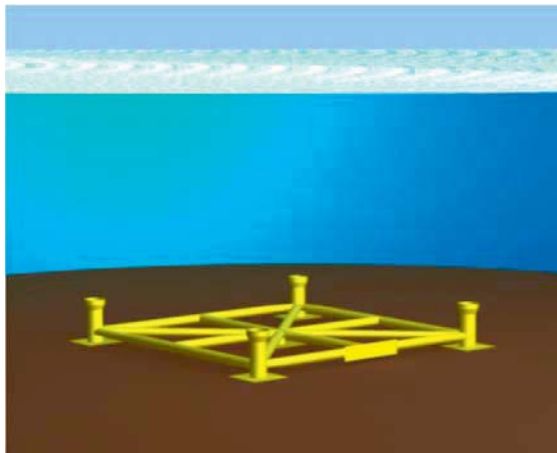
参考のために、杭先行方式によるジャケットの据付けの手順を図 3.7.2-43a,b に掲げる。



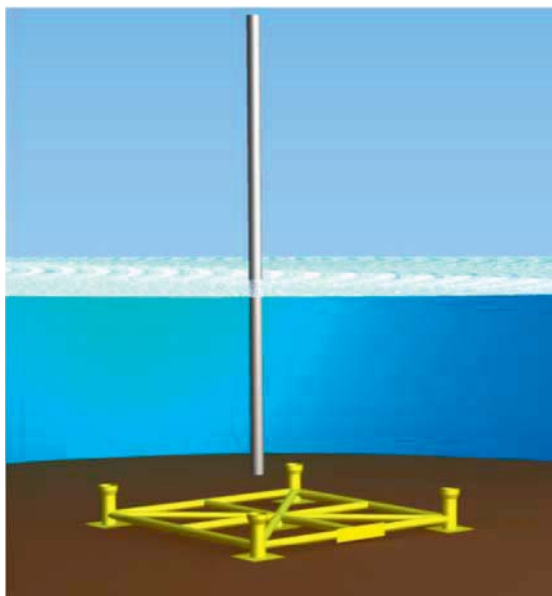
図 3.7.2-42 ジャケットの吊り上げ(左図 : Ballast Nedum, 2011)と据付け(右図 : Robertson, 2008) 状況



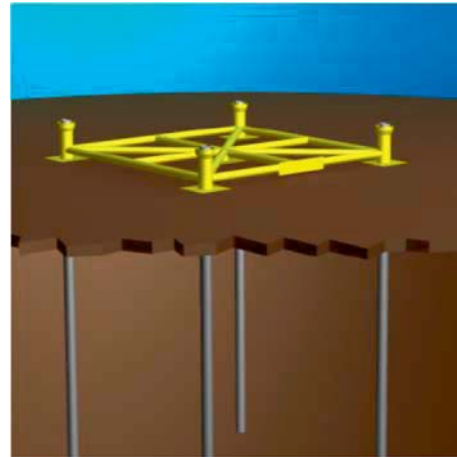
① 杭打ち型板(テンプレート)の位置決め



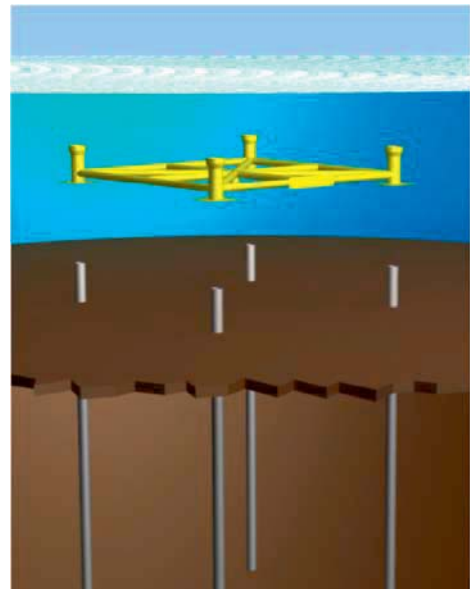
② 杭打ち型板の海底設置・レベル合せ



③ 最初の杭の位置決め

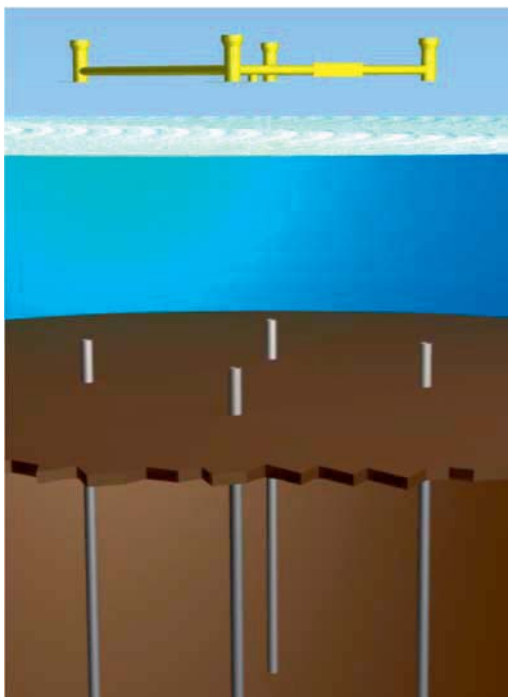


④ 全杭の打設

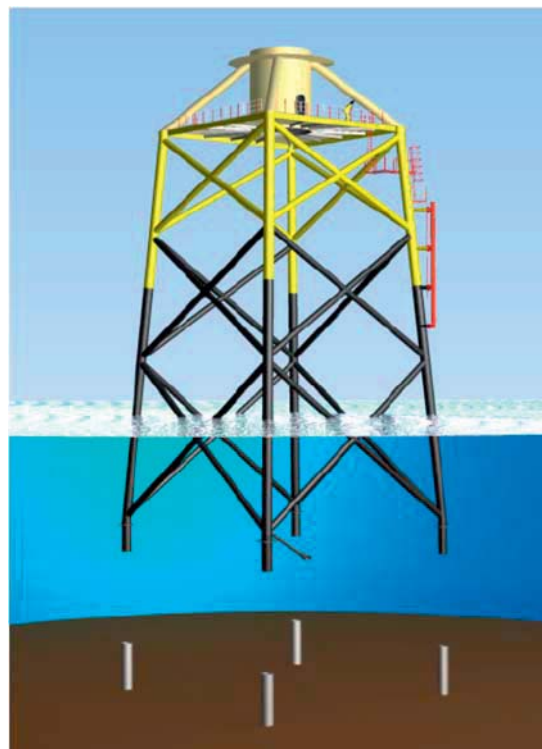


⑤ 杭のレベルチェック

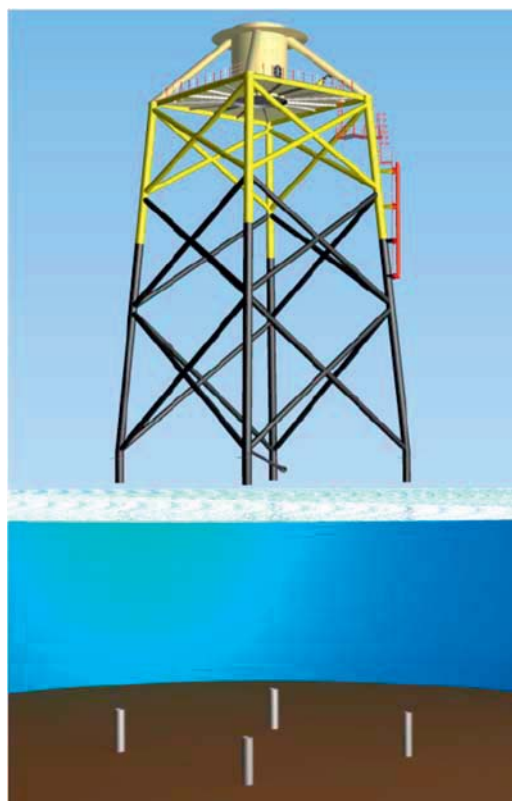
図 3.7.2-43a 先行杭方式によるジャケットの据付け工事のプロセス (Robertson, 2008)



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 3.7.2-43b 先行杭方式によるジャケットの据付け工事のプロセス (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及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

### 〈ジャケットの据付け〉

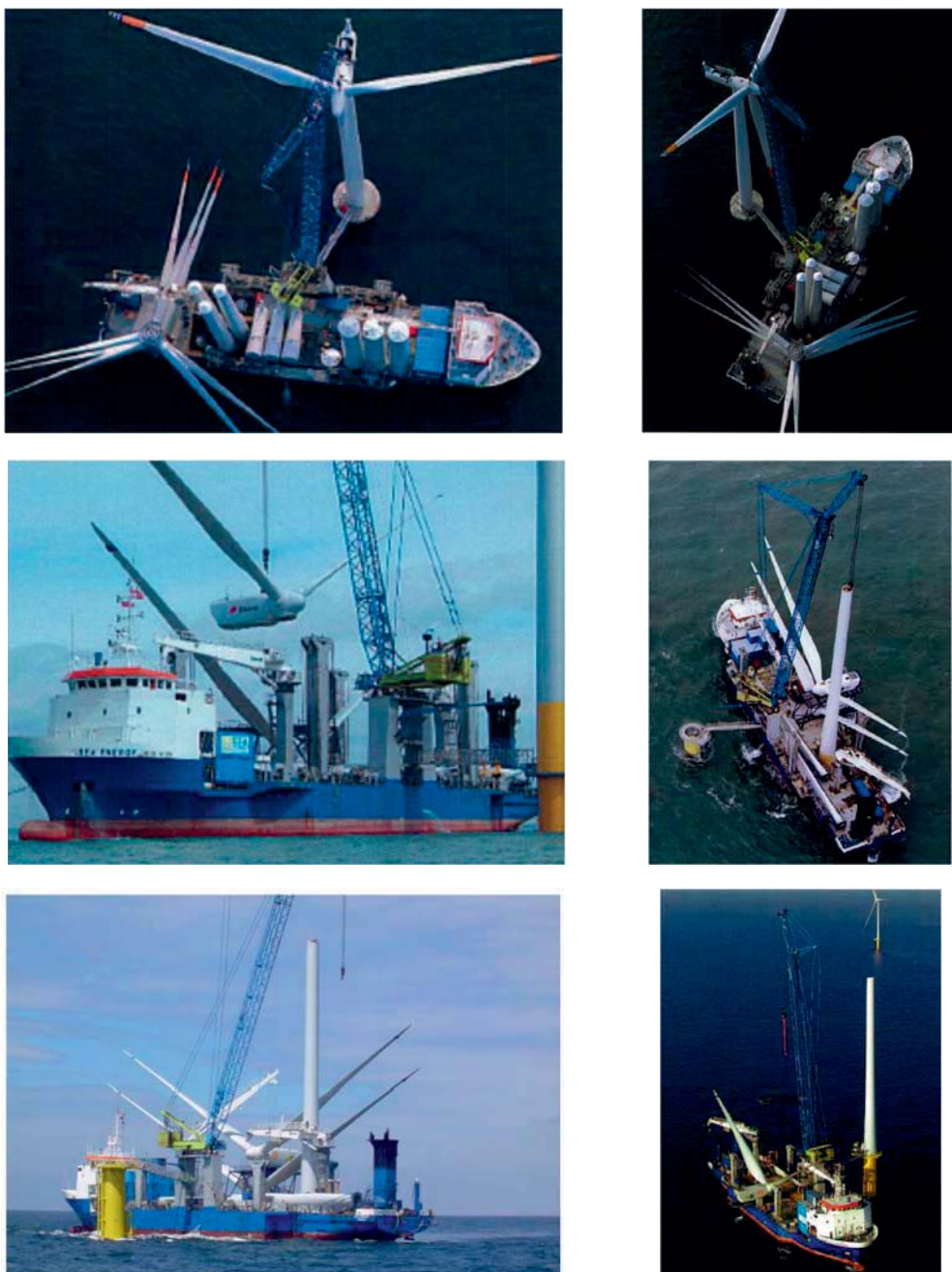
＊法線に対する出入：単体±30cm、複数 1 基目±30cm、複数 2 基目±10cm

＊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、ロータの順で組み立てられる。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 3.7.2-44 に洋上ウイ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)

中図：イギリスの Kentish Flat(90MW:3MW×30 基,2006 年稼働)

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

図 3.7.2-44 風車の運搬・設置状況

図 3.7.2-45 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おろし、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型船(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 3.7.2-9 に示す。

表 3.7.2-9 代表的な洋上風車の部位別重量

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

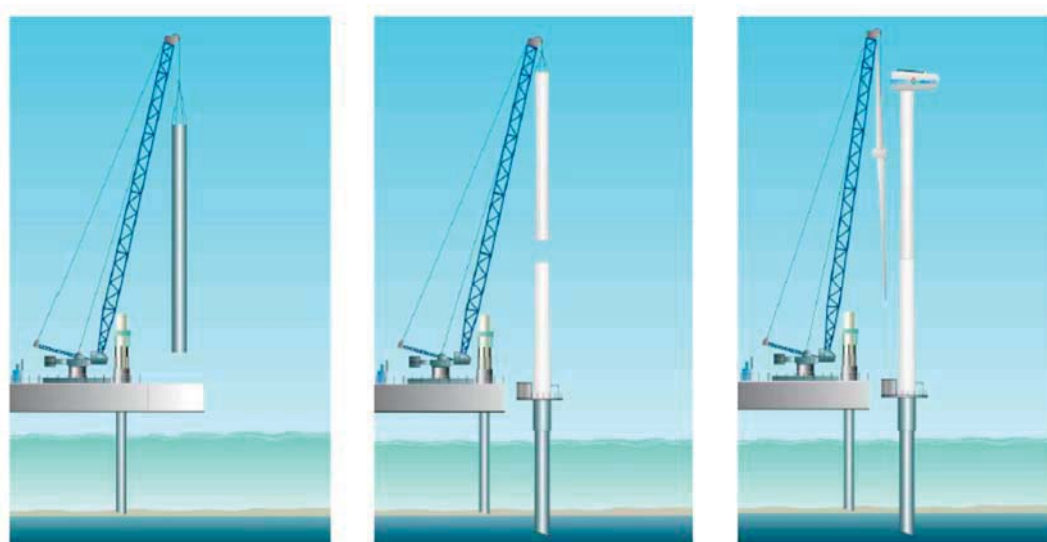


図 3.7.2-45 風車の設置工事の模式図 (Garrad Hassan, 2009)

デンマークの Horns Rev(160MW:1MW×80 基,2002 年稼働)、スウェーデンの Yttre Stengrund(10MW:2MW×5 基,2001 年稼働)及びベルギーの Thornton Bank I (30MW:5MW×6 基,2008 年稼働)における風車の設置工事の概要を、それぞれ図 3.7.2-46、図 3.7.2-47 及び図 3.7.2-48 に示す。



工事の順序:上左図→上右図→下左図→下右図

(Japan Ocean Development Constructio Association,2002; 下右図のみ Garrad Hassan,2009)

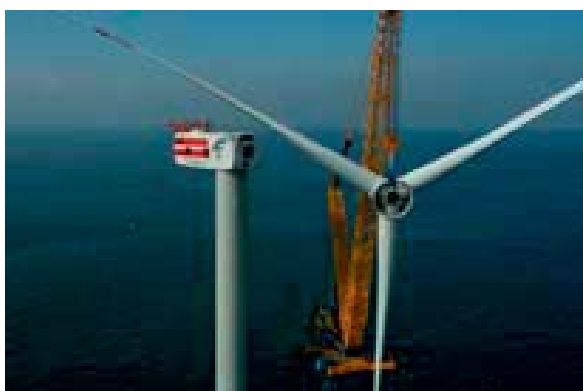
図 3. 7. 2-46 Horns Rev における風車の設置工事



工事の順序：左上図→右上図→右下図→右下図

<https://www.google.co.jp/search?q=yttre+stengrund+offshore+wind&biw=1536&bih=739&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ei=KWdJVbr6H-WxmAW-7oGABA&ved=0CFoQsAQ&dpr=1.25>

図 3. 7. 2-47 Yttre Stengrund における風車の設置工事 (Yttre Stengrund HP)



\* 工事の順序

左上図→左中図→左下図→右図

- ・ ナセルの取付け
- ・ ブレード(3枚組)の取付け
- ・ 設置完了

<http://www.c-power.be/construction>

図 3.7.2-48 Thornton Bank I における風車の設置工事

これまでに掲げた図にみられるように、ナセルに取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 3.7.2-49 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で行っている。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)にみられるが(図 3.7.2-50)、3.6MW の Siemens 社の風車はナセルをタワーに載せた後で、ブレードを 1 枚 1 枚取付ける方法が採用されている(図 3.7.2-51)。

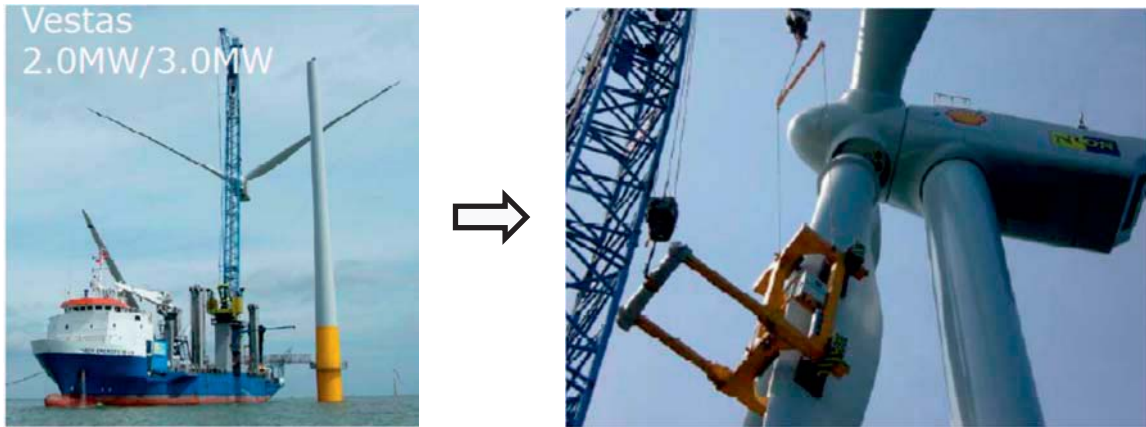


図 3. 7. 2-49 風車 (Vestas:2. 0MW/3. 0MW) のナセル設置工事 (Lindvig, 2011)



図 3. 7. 2-50 風車 (左図 Siemens2. 3MW/右図 REpower5. 0MW) のナセル設置工事 (Lindvig, 2011)



図 3. 7. 2-51 Siemens 風車 (3. 6MW) のナセル設置工事 (Lindvig, 2011)

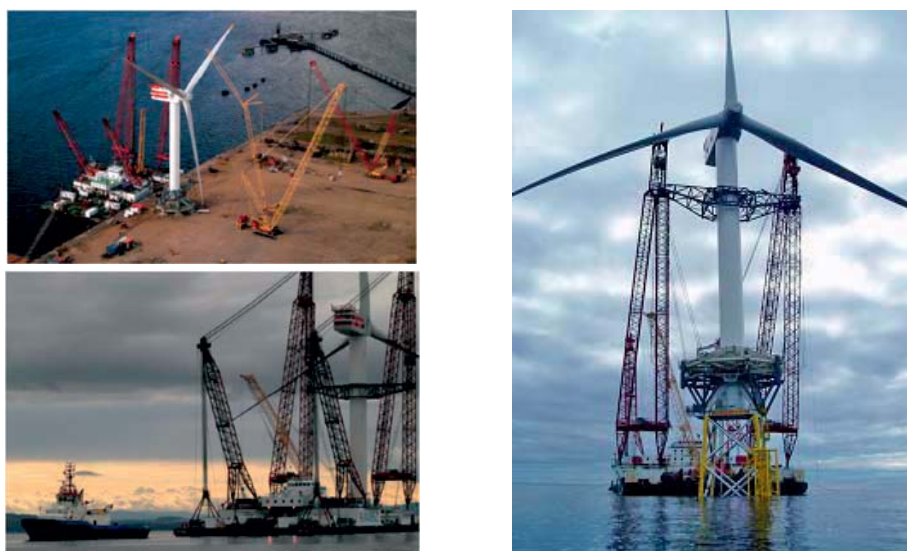
Mortensen *et al.*(2011)等により洋上において風車を安全に設置するための研究開発が行われている。これまで船上でロータを水平に置いて吊り上げてナセルに取り付けていた方法を、クレーンとマストを使って個々のロータとハブ、あるいはロータ・ナセルの一体型を吊り上げ

て作業を行う方法である(図 3.7.2-52)。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 3.7.2-52 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 3.7.2-53)。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は難しいけれども、建設コストを抑えることのできる工法のひとつである。



左図 : <http://sse.com/media/113127/AllBoards2010.pdf>

右図 <http://www.bing.com/images/search?q=Beatrice+offshorewind&view=detailv2&&qpvt=Beatrice+offshorewind&id=F3D10CB1EF6865E9AAE79480192923F205DAC0B2&selectedIndex=7&ccid=IqdfZ46R&simid=608041771940973553&thid=JN.UyyDACP3yIM2k00LTsS9Gg&ajaxhist=0>

図 3.7.2-53 Beatrice における風車の設置工事

### 1) 銚子沖

洋上風況観測タワー及び洋上風車の設置工事を紹介する。観測タワー、洋上風車ともに洋上での作業を少なくするために、予め陸上でモジュール化して設置する手法が取られている。

#### a. 洋上風況観測タワー

観測タワーは、工場においてブロック化(7分割)して地組されて搬出された。ただ、洋上では図 3.7.2-54 に示すように、SEP 船上で②と③及び⑤と⑥のブロック化が行われ、最終的には洋上において 5 つにブロック化されたタワーが組み立てられた。

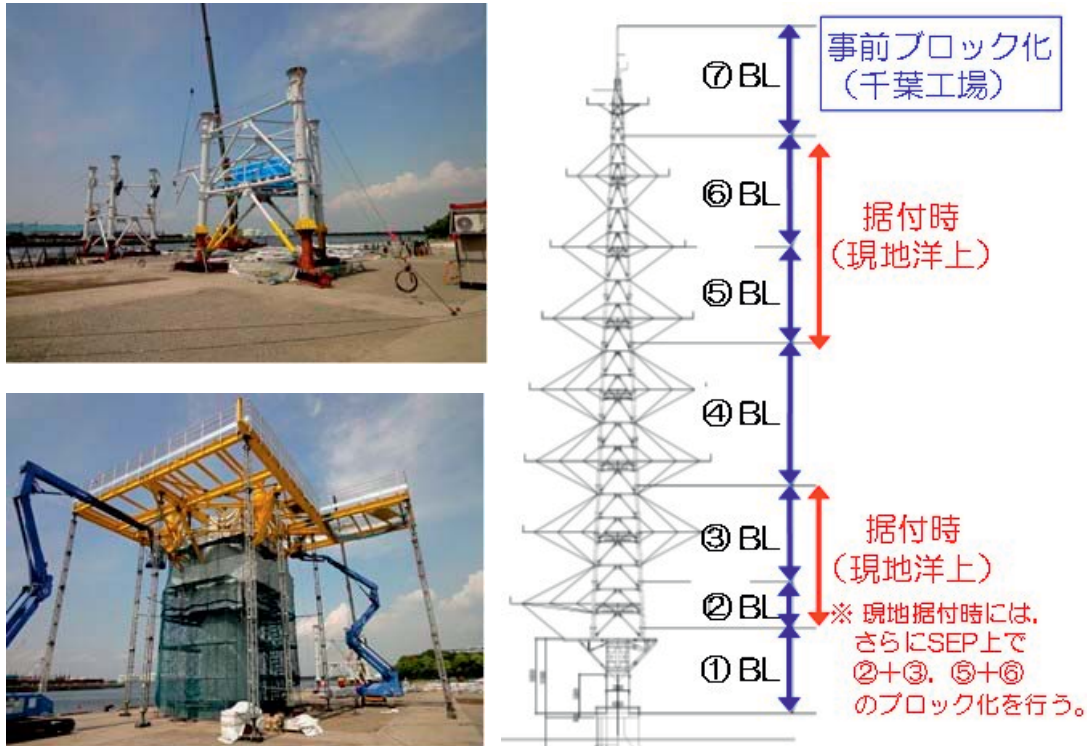


図 3.7.2-54 洋上風況観測タワーの地組状況(東京電力・鹿島建設資料)

据付けは、作業限界風速(10m/s 以下)の条件下において、「くろしお」と「あそ」の 2 隻の SEP 船が使われ、「くろしお」に搭載されたクローラークレーン(650t)により行われた(図 3.7.2-55)。観測タワー据付け状況と完成時の状況を図 3.7.2-56 と図 3.7.2-57 にそれぞれ示す。なお、観測タワーの鉛直度(タワーの軸からのズレ)は 5mm で、管理値(89mm 以内)を大きく下回っていた(管理値 :  $H/1000\text{mm}$ ,  $H$ =タワー本体高,電気通信設備施工管理の手引き, ㈱建設電気技術協会)。



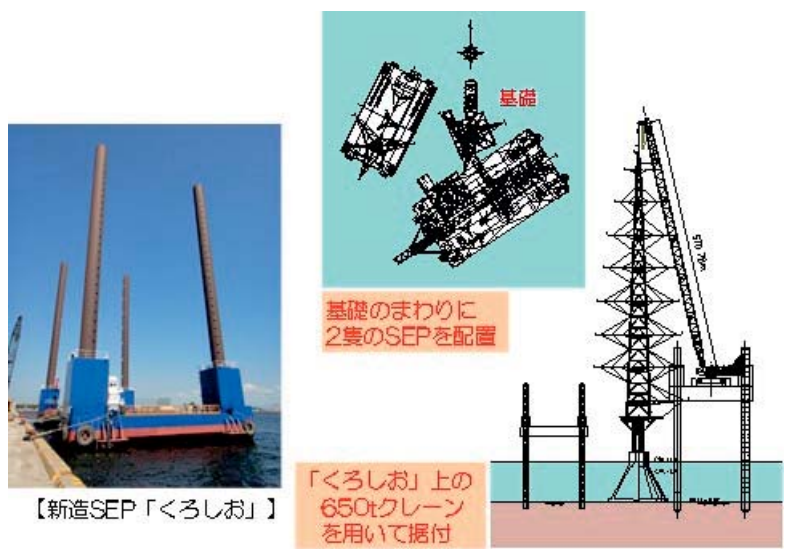
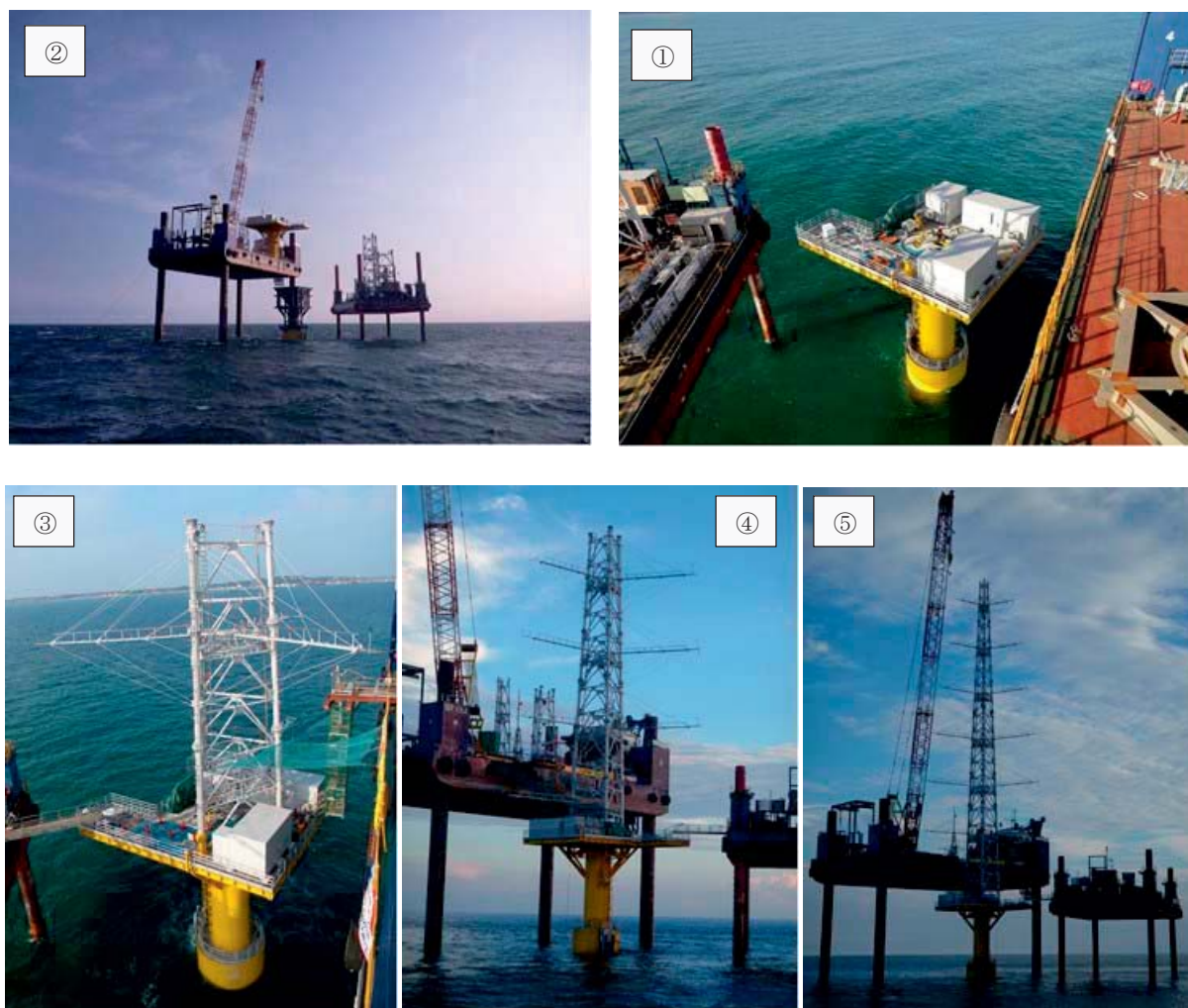


図 3. 7. 2-55 洋上風況観測タワーの据付け時における SEP 船の配置(東京電力・鹿島建設資料)



①SEP 船、設置完了 ②プラットフォーム設置完了、③タワー2,3 ブロックの設置  
④タワー5,6 ブロックの設置、⑤組立完了

図 3. 7. 2-56 洋上風況観測タワーの据付け状況(東京電力・鹿島建設資料)



作業期間：2012年7月25日～8月25日,稼働率87.5%(28日/32日)

図 3.7.2-57 洋上風況観測タワーの完成時の状況(東京電力・鹿島建設資料)

#### b. 洋上風車

据付けは、作業限界風速(10m/s以下,但しブレード組立て8m/s以下)の条件下において、洋上風況観測タワーと同様に「くろしお」と「あそ」の2隻のSEP船が使われた。「くろしお」にはクローラークレーン(650t)、1-3節タワー及びナセルが搭載され、「あそ」には4節タワー、ブレード3翼及びロータヘッドが積み込まれて作業が行われた。図3.7.2-58に「くろしお」と「あそ」の配置状況を示す。

据付けの手順は、タワー(1-4節)→ナセル・ロータヘッド→ブレード(3翼:1翼ずつ取付け)の順序で行われた(図3.7.2-59～図3.7.2-61)。完成時の状況を図3.7.2-62に示す。なお、洋上風車の鋼管タワー組立の管理値は、第1節トップフランジのレベル差(h)を4mm以内( $h_{max}=d/1000$ , d:トップフランジ外径,メーカー基準)に設定し、0mmの精度で据付けられた。



図 3.7.2-58 「くろしお(右)」と「あそ(左)」の配置状況(東京電力・鹿島建設資料)



【1節タワー据付】



【2節タワー据付】



【4節タワー据付】



【3節タワー据付】

図 3.7.2-59 タワーの据付け状況(東京電力・鹿島建設資料)



【据付作業状況全景】



【ナセル据付】



【ローターヘッド据付】

図 3.7.2-60 ナセル・ローターヘッドの据付け状況(東京電力・鹿島建設資料)



【ブレード吊り上げ】



【ブレード据付】



【風車部材据付完了】

図 3.7.2-61 ナセル・ロータヘッドの据付け状況(東京電力・鹿島建設資料)



作業期間：2012年9月9日～10月25日,稼働率63.8%(30日/47日)

図 3.7.2-62 洋上風車の完成時の状況(東京電力・鹿島建設資料)

#### 施工稼働率のまとめ

	工種	作業期間	稼働日/作業日	稼働率
①	浚渫・土運搬工	2月23日～4月6日	7日/44日	15.9%
②	砕石・均し工	4月7日～6月25日	37日/80日	46.3%
③	基礎据付工	6月12日～7月10日	8日/29日	27.6%
④	中詰材投入工	7月4日～8月11日	10日/39日	25.6%
⑤	FU設置工	6月25日～7月27日	11日/33日	33.3%
⑥	観測タワー据付工	7月25日～8月25日	28日/32日	87.5%
⑦	風車据付工	9月9日～10月25日	30日/47日	63.8%

※ ①～⑤工種での稼働率は、風車・観測タワーを合わせて算出。

## 2) 北九州市沖

洋上風況観測タワー及び洋上風車の設置工事を紹介する。観測タワー、洋上風車ともに洋上での作業を少なくするために、予め陸上でモジュール化して設置する手法が取られている。

### a. 洋上風況観測タワー

観測タワーは、ヤードにてブロック化(2 分割：観測塔(1)、観測塔(2))して製作されるとともに、搬出に際して観測塔(1)と支持構造物が一体化されて、洋上での据付けは「観測塔(1)+支持構造物」及び「観測塔(2)」の2ブロックである(図 3.7.2-63)。

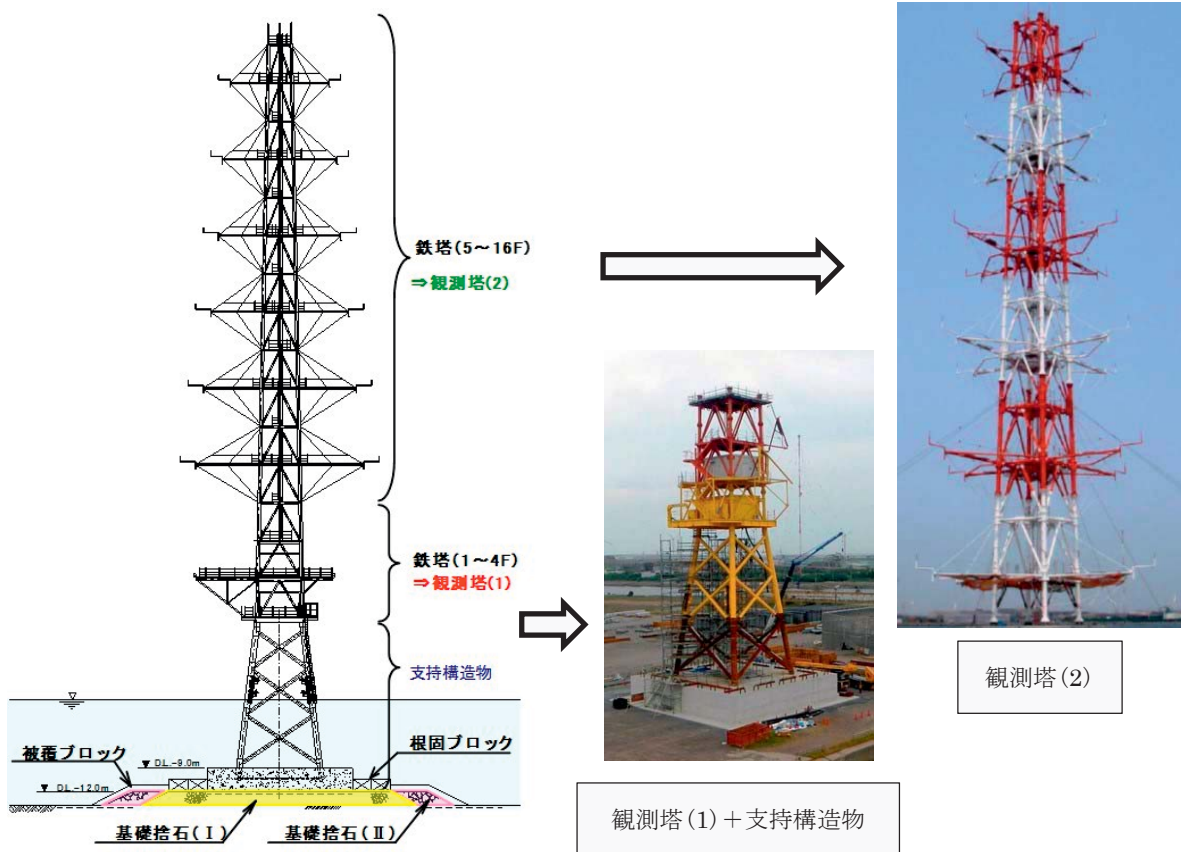


図 3.7.2-63 洋上風況観測タワーの地組状況(電源開発資料)

据付けには、「観測塔(1)+支持構造物」では「武蔵(定格荷重:3,700t)」、「観測塔(2)」では「駿河(定格荷重:2,200t)」の大型起重機船が使用された。観測タワー据付け状況と完成時の状況を図 3.7.2-64 と図 3.7.2-65 にそれぞれ示す。



上段：観測塔(1)+支持構造物 ①海上輸送 ②位置合せ・据付け  
 下段：観測塔(2) ③海上輸送 ④位置合せ・据付け

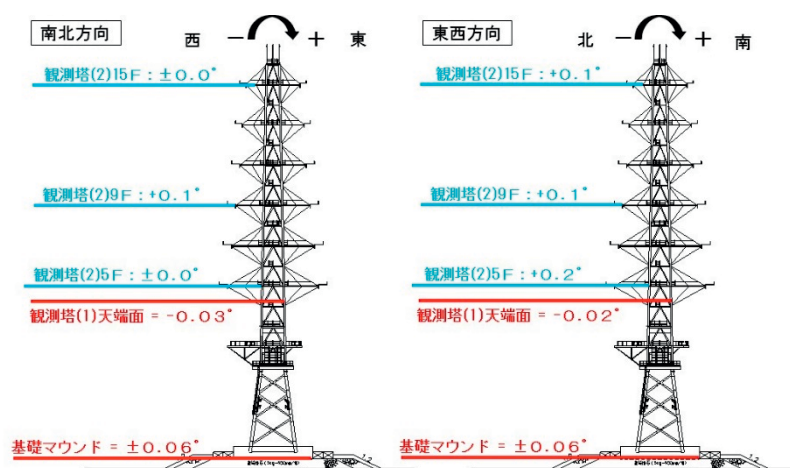
図 3.7.2-64 洋上風況観測タワーの据付け状況(電源開発資料)



観測塔(2)の作業期間：2012年6月28日～6月30日,稼働率 33.3%(1日/3日)

図 3.7.2-65 洋上風況観測タワーの完成時の状況(電源開発資料)

【洋上風況観測タワーの据付精度】



注) 観測塔(2)の、5F・9F・15F部分の値はグレーチング天端面でデジタル傾斜計により測定

\* 基礎捨石均し精度向上及び根固めにより観測タワーの鉛直精度を確保

\* 実施施工工数は5日(水中人力施工の1/4程度)

b. 洋上風車

据付は、「黒潮」と「阿曾」の2隻のSEP船が使われた。据付けの手順は、タワー(1-3節) → 一体型ナセル → ブレード(3翼: 1翼づつ取付け)の順序で行われた(図3.7.2-66a,b)。完成時の状況を図3.7.2-67に示す。



①ボトムタワー据付 ②ミドルタワー据付 ③トップタワー据付 ④一体型ナセル据付

図3.7.2-66a タワーと一体型ナセルの据付け状況(電源開発資料)



①ブレード No.1 据付 ②ブレード No.2 据付 ③ブレード No.3 据付 ④ブレード据付完了  
 図 3. 7. 2-66b ブレードの据付け状況 (電源開発資料)



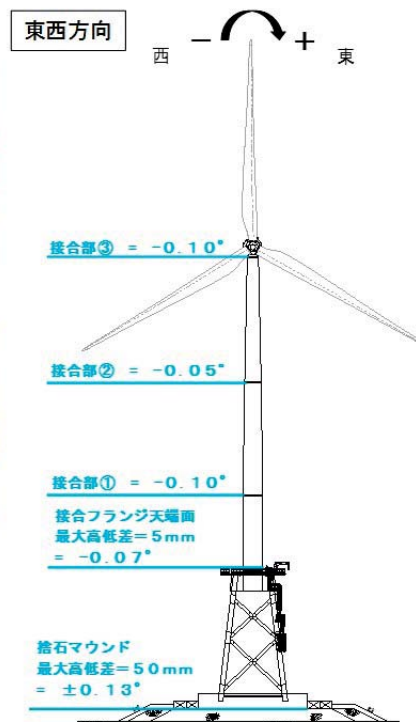
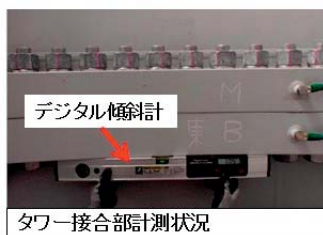
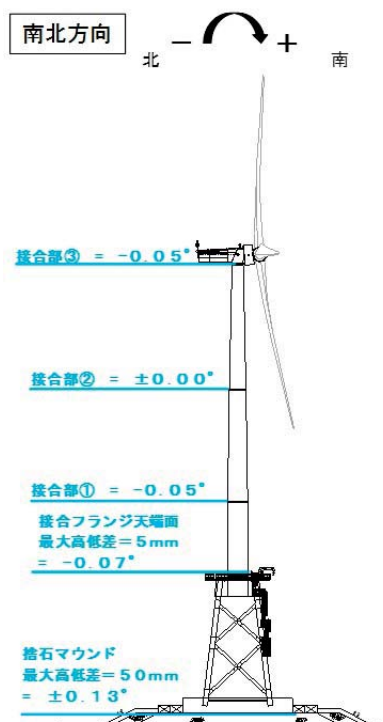
作業期間：2013年2月28日～3月28日,稼働率51.7%(15日/29日)

図 3. 7. 2-67 洋上風車の完成時の状況 (電源開発資料)



【洋上風車の据付精度】

管理基準値 = ±0.25°



施工稼働率のまとめ

＞観測塔建設工事

(工期: 2011年8月22日～2012年9月30日)

工種	作業期間	稼働日/作業日	稼働率 (実績)	稼働率 (計画)
①捨石工	4/16～ 5/17	24日/32日	75.0%	55.9%
②支持構造物据付工	6/15～ 6/17	1日/3日	33.3%	48.3%
③根固工	6/16～ 6/18	3日/3日	100%	48.3%
④被覆工	6/19～ 6/28	4日/10日	40.0%	48.3%
⑤観測鉄塔(2)据付工	6/28～ 6/30	1日/3日	33.3%	24.0%

＞風車建設工事

(工期: 2011年11月2日～2013年5月31日)

工種	作業期間	稼働日/作業日	稼働率 (実績)	稼働率 (計画)
①捨石工	7/24～ 9/8	19日/46日	41.3%	56.8%
②支持構造物据付工	9/28～ 10/5	2日/8日	25.0%	42.8%
③根固工	10/6～ 10/9	3日/4日	75.0%	44.4%
④被覆工	10/9～ 10/13	4日/5日	80.0%	42.6%
⑤風車据付工	2/28～ 3/28	15日/29日	51.7%	46.7%

### 3) 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の据付けは、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施工されている(図3.7.2-68)。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けには450tクローラークレーン(SHL型)が使用された。

ウィンド・パワーかみす第1洋上風力発電所及びウィンド・パワーかみす第2洋上風力発電所の完成時の状況をそれぞれ図3.7.2-69と図3.7.2-70に示す。



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け  
下中央図：ブレードの据付け

図3.7.2-68 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け状況

(小松崎都市開発資料)



図 3.7.2-69 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  
(小松崎都市開発資料)



図 3.7.2-70 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  
(小松崎都市開発資料)

### (3) 自己昇降式作業台船(SEP 船)

洋上風力発電施設の建設として、支持構造物や風車本体の据付けには起重機船や自己昇降作業台船(SEP:Self Elavating Platform)が使用される。自己昇降型とは、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、且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の称されるが、ここでは自己昇降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)、その内、日本では 7 隻で、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 3.7.2-10)。いずれも台船のような非自航船である。

表 3.7.2-10 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	ASO	SETO
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
	保持力/脚(t)	900	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 3.7.2-11a,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装置、作動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 3.7.2-11a SEP 船昇降装置の一覧表

区分	A リングバット方式	B キャッチビーム方式	C ビン挿入方式
機 構 概 要 図			
機 構 概 要 機 器 名 称	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	① レグ ② ホールディングキャッチャーフレーム ③ ホールディングキャッチャーフレーム ④ ホールディング昇降シリンダ ⑤ ワーキングキャッチャーフレーム ⑥ ホールディングキャッチャーフレーム	① レグ(ピン挿入口) ② ワーキングフレーム ③ ホールディングフレーム ④ 昇降油圧シリンダ ⑤ 張断材 ⑥ ホールディングピン ⑦ ピン挿入口
レグ固定方法	⑤ リング旋回 駆動シリンダ	レグの四角断面側の長さ方向に凸状の断面を設け、凹状の溝部にキャッチビ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フレームを交互に昇降保持し、油圧シリンダを伸縮操作し昇降する。	レグに設けたピン挿入口に、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位置と、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、船体昇降を行う。
昇降方法	変替式レグを船体装置にて固定→作動用装置にてレグを肥料→作動用装置にて肥料→作動用装置にてレグを固定位置にて船体装置固定→作動用装置にて肥料→作動用装置移動 このサイクルを繰り返す。		
通 用 例 概 要 図			
船 名	あそ	MPI Resolution	CUSTO NG-S300C
船 体 寸 法	34m(長)×20m(幅)×3m(深さ)	130m(長)×38m(幅)×6m(深さ)	81m(長)×41m(幅)×2m(深さ)
積 載 能 力	300t	4,375ton	3,000ton
レグ 形 状	円形断面φ1.2m×38m(長)	方形断面×71.5m(長)	円形断面φ4m×85m(長)
レグ 承 載	4	5	4
方 式	油圧ジャッキ	油圧ジャッキ	油圧ジャッキ
昇 降 能 力	昇降 400 ton/L <sup>1</sup>	昇降 2,850ton/L <sup>1</sup> 保持 5,700ton/L <sup>1</sup>	昇降 11,000ton/L <sup>1</sup> 保持 3,500ton/L <sup>1</sup>
昇 降 速 度	12m/H	上昇 30m/H	アフトキーム上昇速度: 24m/H アフトキーム下降速度: 30m/H

(注)上記方式以外に、「ワリング方式」「ワリング方式」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。

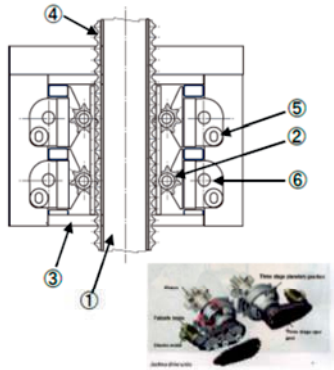
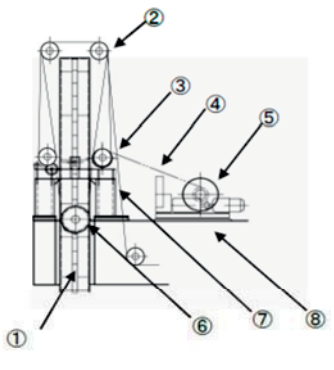


D ラック&ピニオン方式

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 3.7.2-11b 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リラック(線形歯車)を設置し、ポンツーン昇降フレームに取り付けされた円形歯車(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)	95.6m(長)×33.6m(幅)×7m(深さ)
		搭載能力	1,600ton	2,500ton
		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 ton/レグ	ウインチラインプル: 60ton 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	

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。

洋上風車が年々大型化していることは付属資料Ⅱに記載している通りであるが、それに伴い SEP 船も大型化し(表 3.7.2-12)、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 船は、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 3.7.2-12 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	1500	991	1500
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> )	2100	3600	3700	5000
船速(knots)	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みられる。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。

風車が 5MW 級ともなると、表 3.7.2-9 に示したように、ナセル+ロータで 200 トンを超える重量物となる。ここで風車の定格出力別に設置工事に必要なクレーンの能力を表 3.7.2-13 に示す。

表 3.7.2-13 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	800-1200
5	800-1000	使用不可能

以下、SEP 船の外観図を図 3.7.2-71～図 3.7.2-76 に示す。図 3.7.2-76 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)  
<http://www.dai1->

図 3.7.2-71 「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)  
<http://www.dai1->

図 3.7.2-72 「ASO」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:2000m<sup>2</sup>  
 クレーン能力:800t  
<http://www.seajacks.com/product/seajacks->

図 3.7.2-73 「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:3250m<sup>2</sup>  
 クレーン能力:800t  
<http://www.windcarrier.com/brave-tern>

図 3.7.2-74 「Bold Turn」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:3750m<sup>2</sup>  
 クレーン能力:1200t  
<http://www.workfox.com/en/news/Press>

図 3.7.2-75 「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:3350m<sup>2</sup>  
 クレーン能力:900t  
<http://www.a2sea.com/fleet/sea-installer/>

図 3.7.2-76 「Sea Installer」の外観図



船主: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:ワイヤーロープ  
 デッキスペース:1020m<sup>2</sup>  
 クレーン能力:230t  
<http://www.a2sea.com/fleet/sea-power/>

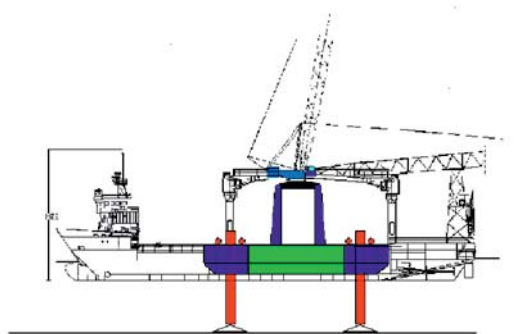
図 3.7.2-77 「Sea Power」の外観図

【豆知識 3.7.2-4】

●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を回避できないけれども、水平動揺(sway、surge、yaw)が小さくする効果があったと言われている。

洋上風車建設の初期の頃の作業船の数例を示す。



出典: Japan Ocean Development Construction Association(2002)

#### (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設定にあたっては、図 3.7.2-78 に示す検討を踏まえる必要がある。

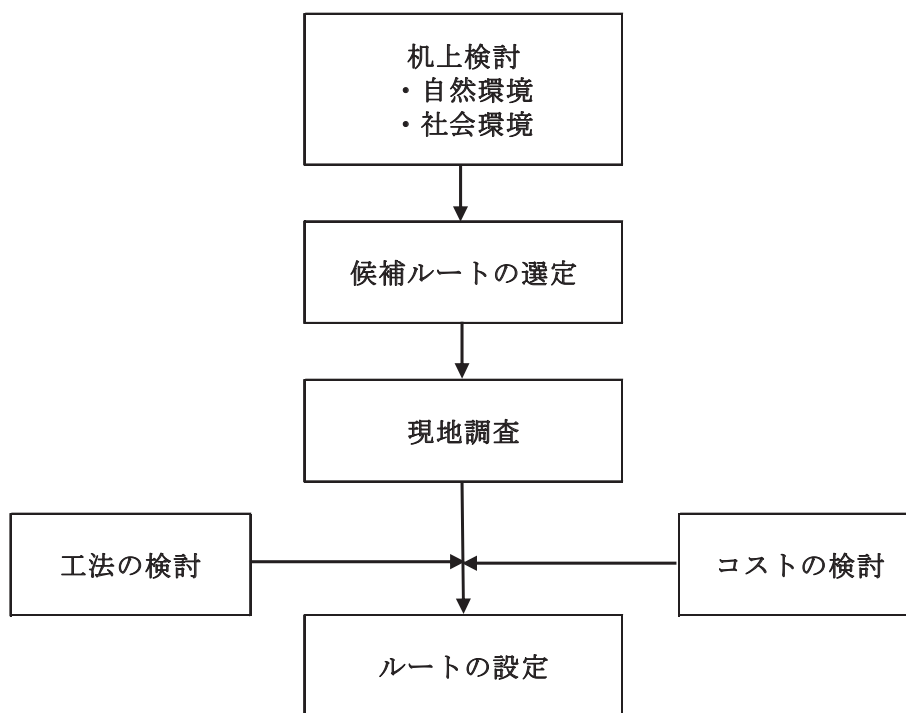


図 3.7.2-78 海底ケーブル・ルート選定の手順

##### 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、幾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、3.2.2 項で示した表 3.2.2-1～表 3.2.2-3 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

海底ケーブル・ルートは、現地調査結果を基に、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 3.7.2-14 に示すとともに、図 3.7.2-79 にケーブル断面図を掲げる。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 がい装、二重目は亜鉛メッキ鉄線がい装となっている(本図は通信線を複合したケーブルではない)。

図 3.7.2-79 に示しているように、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が海中敷設の場合、長期的には吸湿による絶縁劣化を招くので、3 芯コアの外部には鉛合金による押し被覆層を設け、十分に防湿する必要がある。鉛被の外部には更に防水、防食性に優れたポリエチレン被覆層を設ける。また、海底ケーブルは特に漁具や投錨による外傷事故が発生し易いため、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外装鉄線を設ける。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けれども、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 3.7.2-14 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)ン；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>
鉄線がい装	<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以上の鉄線鍍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>

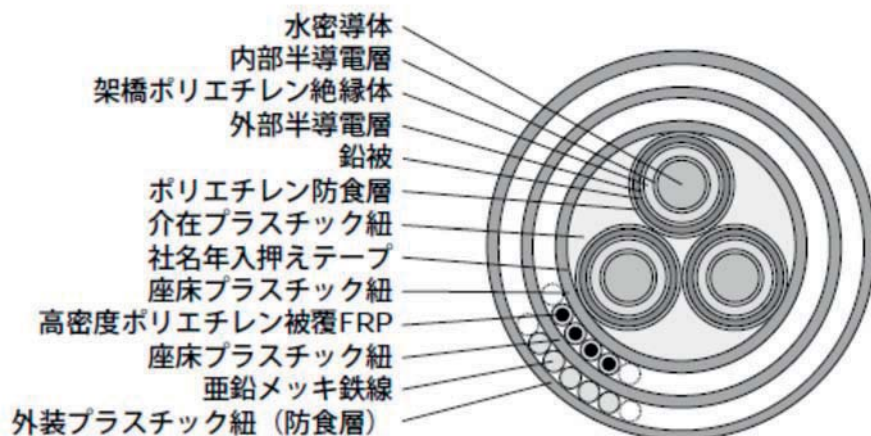


図 3.7.2-79 ケーブル断面図(古堅ら, 2002)

なお、図 3.7.2-80 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)に繋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繋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。

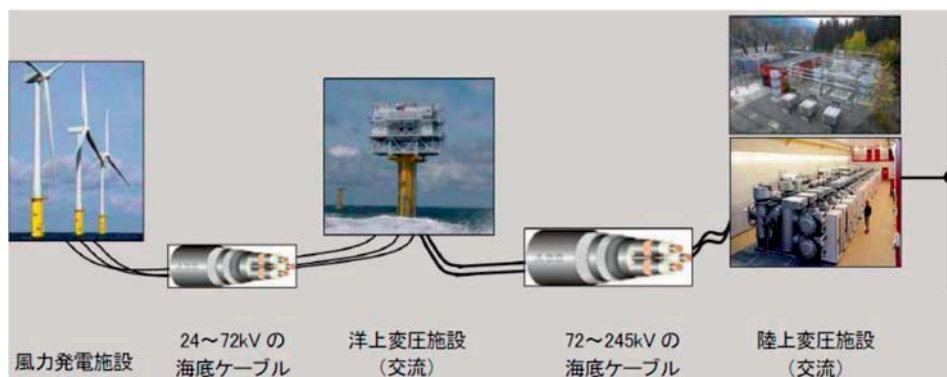


図 3.7.2-80 洋上風力発電施設における電力系統ライン(日本産業機械工業会, 2010)

### ①送電ケーブル

送電ケーブルは、大規模洋上風力発電施設の場合、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、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。ケーブルの送電電圧および導体断面積については集合した電力の総容量によって適正なレベルが決まる{表 3.7.2-15; 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、余裕線路を設けて置く。

表 3.7.2-15 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。風力発電機の単機容量が5~10MWの場合、電圧6.6kVの3芯ケーブルで送電が可能であり、ケーブル構造は送電用ケーブルと同一でコンパクトなサイズにできる。

なお、アレイケーブルは故障事故を考慮して、ループ状に配列するケースもある。

### 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 3.7.2-81 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、利用可能性を向上す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 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、留め金及び電気機器の保護用の支持



<http://www.bing.com/images/search?q=siemens%20offshore%20substation&qs=n&form=QBIRMH&pq=siemens%20offshore%20substation&sc=0-18&sp=-1&sk=>

図 3.7.2-81 洋上変電設備の例

変電設備の重量は、100MW 級(交流)で 1000 トン以下、200MW 級(交流)で 1500 トン、300MW 級(交流)で 2000 トン、400MW 級(高圧直流)で 3000 トン、1000MW 級(高圧直流)で 7000 トンと言われている(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、殆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 2.5 トン程度のクレーン)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(3.8.3 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 3.7.2-82)。敷設専用船には自航型と非自航型(曳航型)がある。



図 3.7.2-82 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 3.7.2-83)。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 3.7.2-83 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 3.7.2-84)。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 3.7.2-85)。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ーを巻き取りながら前進させ、更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 3.7.2-84 海底ケーブルの埋設機械 (日本産業機械工業会, 2010)

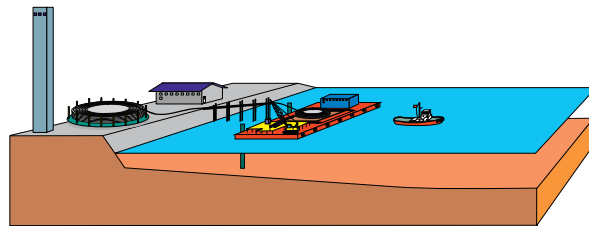


図 3.7.2-85 海底ケーブルの敷設状況 (日本産業機械工業会, 2010)

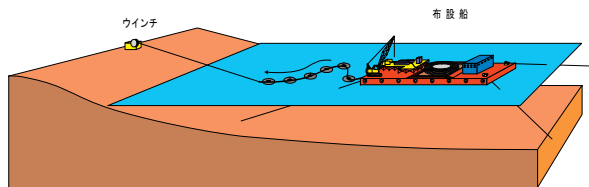
#### ④ケーブル立ち上げ

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。

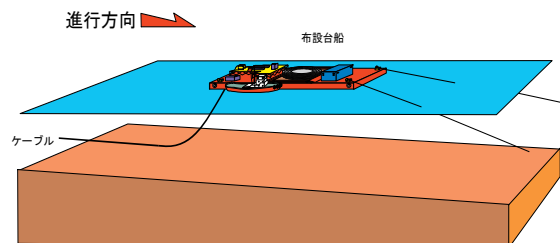
図 3.7.2-86 は、洋上風力発電機と陸上変電施設間の海底ケーブルの敷設に関する一連の作業の概念図である。



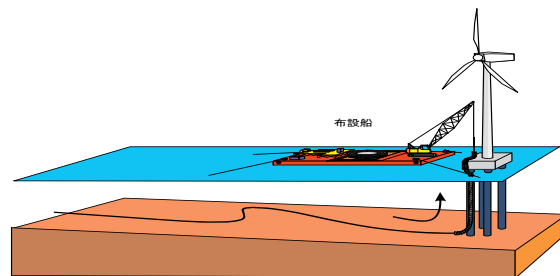
①船積み・回航



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 3.7.2-86 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 3.7.2-16 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(底曳網による引っ掻け・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 つの要因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 3.7.2-16 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 3.7.2-17a,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 3.7.2-17a 海底ケーブルの防護方法(NEDO ら, 2007b)

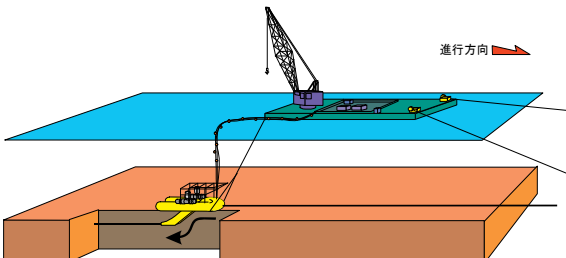
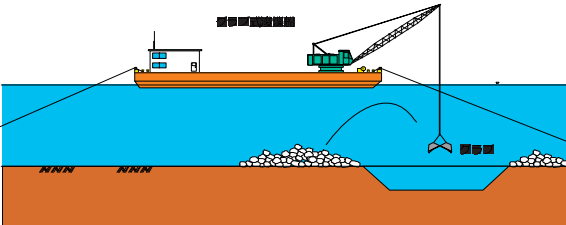
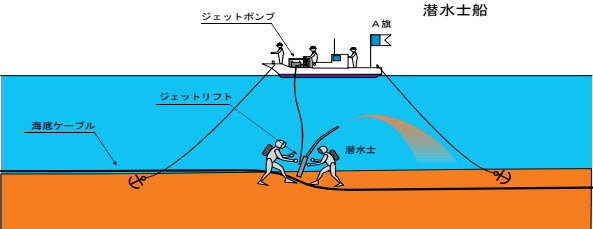
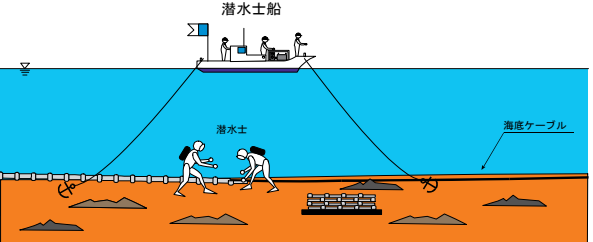
名称	工法の概要, 特徴
<p>機械埋設工法</p> 	<p>プロ式機械装置等(図 3.7.2-52, 参照)により埋設する方法でケーブル敷設時と同時に埋設する工法と後埋設工法がある。</p> <p>埋設深度が自由に設定でき, 大水深でも作業効率に優れる。</p>
<p>事前トレンチ工法</p> 	<p>ケーブル敷設前に海底にトレンチを掘削し, ケーブルを敷設した後, 埋め戻す方法で, 底質が岩盤で固い場合や, 深い埋設深度を要する場合に適用される。</p>

表 3.7.2-17b 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, 船舶による投錨に恐れが無い場合に適用可能である。</p>

① 銚子沖

洋上風況観測タワー及び洋上風車の支持構造物の据付け後、海底ケーブルの敷設が行われた(敷設工の稼働率 37.6%(77 日/205 日); 2012 年 8 月 7 日~2013 年 1 月 27 日)。水深 5m 以深の海域では、海底ケーブルを海底面に直置きするため、22kV 架橋ポリエチレン絶縁鉛被シース二重鉄線鎧装海底ケーブル(φ 109mm, 延長 4.1km)が採用されている。この海底ケーブルは敷設台船に積み込まれ、風車から陸上に向けて敷設が行われた(図 3.7.2-87)。洋上風況観測タワー及び洋上風車の支持構造物への海底ケーブルへの引き上げ後、構造物の側面に沿って、SUS 管を用いて固定された。



図 3.7.2-87 敷設台船による海底ケーブル敷設状況(東京電力資料)

なお、陸上部ではケーブルを防護管で防護し(図 3.7.2-88)、洋上風車で発電した電力を電圧 22kV で海底ケーブルにより送電し、銚子市内の 6.6kV 配電線網へ接続するための変電設備が設置されている。



図 3.7.2-88 陸上部のケーブルの防護状況(東京電力・鹿島建設資料)

## ② 北九州市沖

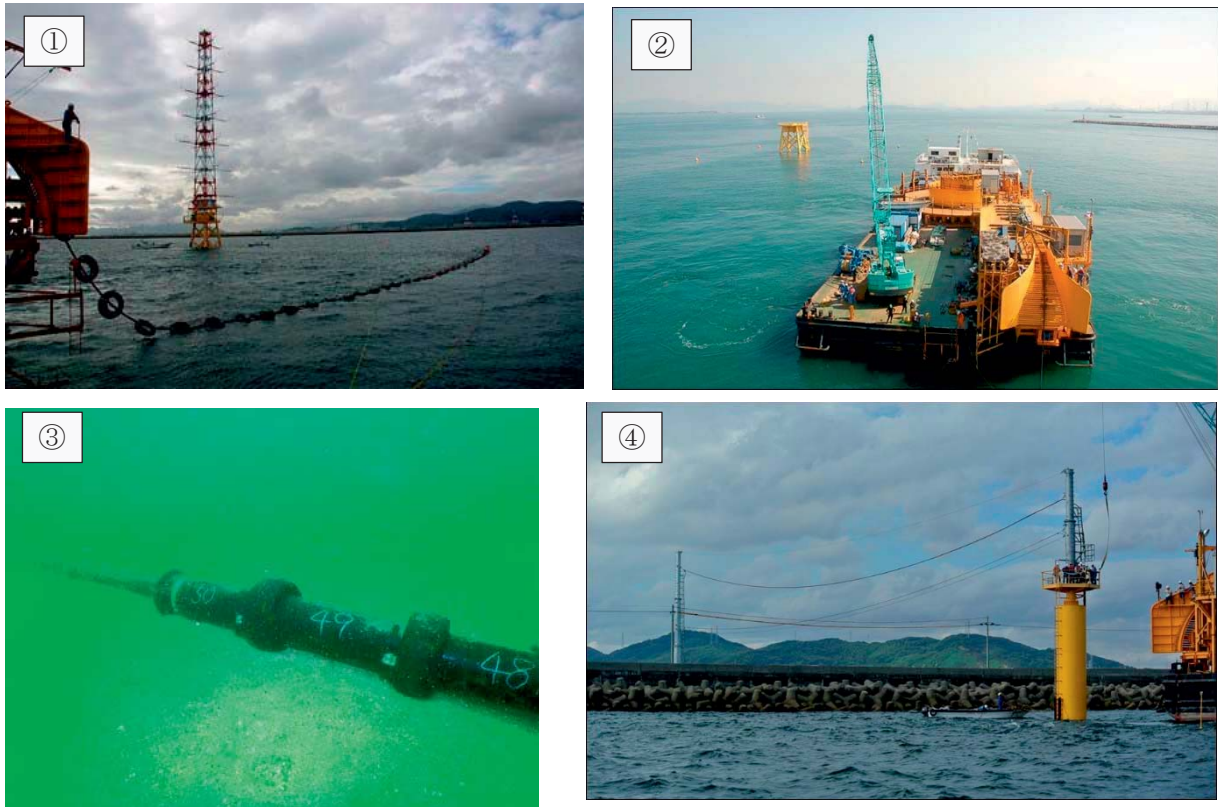
洋上風況観測タワーの据付け後、洋上から陸上の洋上から陸上の開閉設備の間には、消波ブロック被覆護岸があるためケーブルを架空で通す必要があり、海上鉄柱が設置された(図 3.7.2-89)。敷設工期は、2012年5月26日～7月6日であった。



上左図：海上鉄柱の外観  
上右図：海上輸送(駿河 2,200t)  
下左図：海上鉄柱の設置

図 3.7.2-89 海上鉄柱の施工状況(電源開発資料)

海上ケーブルは、三相一括二重鉄線鎧装鉛被層付 6.6kV 架橋ポリエチレン絶縁海底ケーブル(光ファイバー複合 6 芯,全長 1.77km)で、敷設工事は敷設作業台船(開洋)により行われた(図 3.7.2-90)。敷設工期は、2012 年 8 月 1 日-9 日、10 月 15 日-25 日及び 21013 年 3 月 1 日-15 日の 3 期に亘って行われている。



- ①:観測タワーの海底ケーブル敷設準備状況
- ②:観測タワーと洋上風車間の海底ケーブル敷設状況
- ③:海底防護部設置状況
- ④ :送電ケーブル(空中電力線)の据付け完了

図 3.7.2-90 海底ケーブルの敷設状況(電源開発資料)

### ③ 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 3.7.2-91)、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)に繋がっている。



図 3.7.2-91 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 3.7.2-5(1)】

● 銚子沖洋上風力発電実証研究施設の不具合の原因と対策

✓ 不具合の状況

- ・ 接地線の破断 (2014. 1. 8; 確認)
- ・ 海底ケーブル防護管及び海底ケーブル鉄線鎧装の一部断線 (2014. 2. 23; 確認)
- ・ 22kV 地絡事故 (2014. 10. 6; 確認)
- ・ ケーブル固定鋼材の一部損傷 (2014. 10. 9; 確認)
- ・ 海底ケーブルの損傷及び固定鋼材損傷の進行/接地線のたるみ/ビニール被覆の剥がれ (2014. 10. 17; 確認)
- ・ 風車-観測タワー側ケーブルは電力線導体の削れ (2014. 10. 27; 確認)
- ・ 風車-陸上側ケーブルは電力線の絶縁体の露出 (2014. 10. 27; 確認)
- ・ 観測タワーの鋳鉄管の消失 (2014. 10. 27; 確認)
- ・ 観測タワーのステンレス防護管出口で鉄線鎧装の損傷 (2014. 10. 27; 確認)

✓ 洋上風車の稼働状況

- ・ 停止 (2014. 1. 9; 接地線の切断, 電気保安上)
- ・ 再稼働 (2014. 6. 3; 海底ケーブルの応急措置が終了)
- ・ 停止 (2014. 6. 26; 海底ケーブルの仮防護の一部消失)
- ・ 再稼働 (2014. 7. 18; 海底ケーブルの仮防護の応急措置が終了)
- ・ 停止 (2014. 10. 6; 地絡事故, 風車/観測タワーの電源喪失)

✓ 事故時の気象状況

- ・ 台風 26 号 (最大波高 9.52m; 2013. 10. 16 接近) → 接地線の破断
- ・ 南岸低気圧 (最大波高 8.61m; 2014. 2. 9 発生/最大波高 9.16m; 2014. 2. 15 接近) → 海底ケーブル防護管及び海底ケーブル鉄線鎧装の一部断線
- ・ 台風 16 号 (2014. 9. 25 接近)/台風 17 号 (2014. 9. 28-29 接近)/台風 18 号 (2014. 10. 6 接近) → 地絡事故検出 (台風 18 号)
- ・ 台風 19 号 (2014. 10. 13-14 接近) → 接地線のたるみ/ビニール被覆の剥がれ、海底ケーブル損傷及びケーブル固定鋼材の損傷進行

**【豆知識 3.7.2-5(2)】**

✓不具合の原因

「接地線の破断(図1)」

海底ケーブルの可とう防護管接続用鋼材の羽根部分が波浪により動いて、接地線防護管(PVC管)に接触して損傷し、波浪により接地線防護管の損傷が拡大・破断に至った。

「海底ケーブル防護管・鉄線鎧装の損傷(図2)」

●損傷個所①

・鉄線鎧装損傷の原因は、ステンレス防護管(SUS防護管)、可とう防護管端部に海底ケーブルが繰り返し接触して損傷した。

●損傷個所②

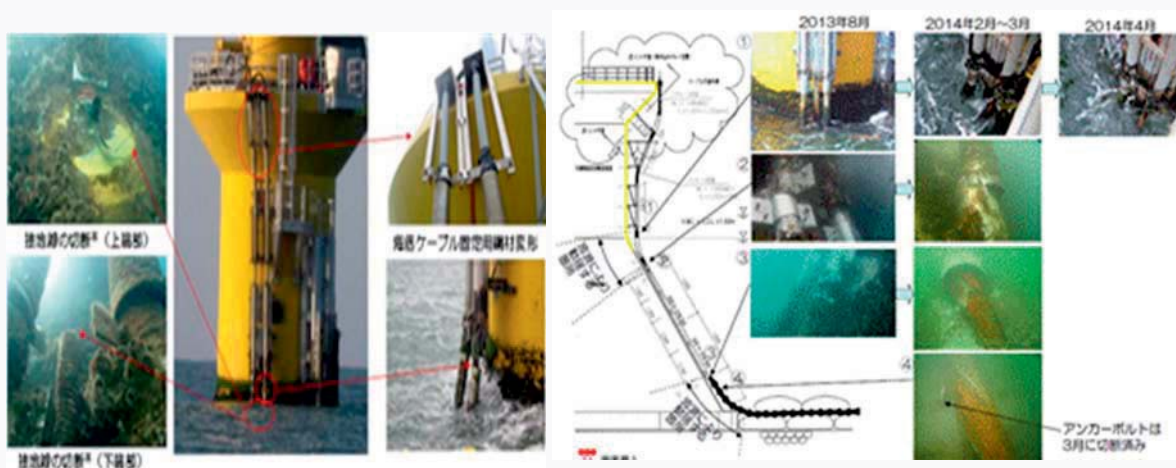
・可とう防護管ずれ落ちの原因は、波浪による動揺により下端部に繰り返し変形が生じたため端部より可とう部が損傷して、螺旋状にばらけてずれ落ちた。  
 ・鉄線鎧装損傷の原因は、SUS防護管、可とう防護管端部に海底ケーブルが繰り返し接触して損傷した。

●損傷個所③④

・鉄線鎧装損傷の原因は、海中浮遊部の海底ケーブル鋳鉄防護管が波浪の影響を受けて残置したアンカーボルトに衝突し破損した。  
 ・鉄線鎧装損傷の原因は、防護管が破損したことにより、海底ケーブルが SUS 防護管端部やアンカーボルトに接触し破損した。

✓復旧対策と課題

- ・海底ケーブルには、可とう防護管ではなく、固定式の防護管を使用する。防護管の固定には二重ナットを使用する(建築基準法で決められている)。
- ・接地線のチタンベルトの固定にあたっては、電飾防止措置を施すとともに、基礎との間に隙間がないようにする。
- ・洋上風況観測タワーには独立電源の設置等の対策を講じる。
- ・予備品の準備等、バックアップ体制を構築する。
- ・接地線、海底ケーブル防護に関する基準あるいは設計指針(海底ケーブルの摩擦・干渉作用が生じない設計等)の策定及び安全審査確認のルールづくりが必要である。



左上図：接地線の損傷状況

右上図：海底ケーブル防護管・鉄線鎧装損傷状況  
(東京電力資料)




【豆知識 3. 7. 2-6】

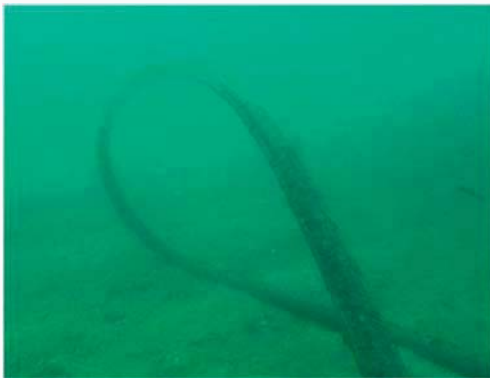

●北九州市沖洋上風力発電実証研究施設の不具合の原因と対策

- ✓不具合の状況
  - ・海底ケーブルの変位(ループ状にわん曲)と防食層の損傷(2014. 6. 10;確認)
- ✓不具合の原因
  - ・遊漁船のアンカーによる引っ掻けと推定
- ✓復旧対策と課題
  - ・海底ケーブルの曲がり直しに対して防食テープで補修(応急措置)
  - ・铸铁防護管の取り付け(恒久対策: 工事は2014年10月21日~11月5日に実施)
    - 洋上風車と洋上風況観測タワー間: 埋設区間を除いた全範囲
    - 洋上風況観測タワーと陸上の間: 観測タワー196.5mまでの区間
  - ・遊漁船に対する注意喚起看板の設置

**【推定原因】遊漁船アンカーによる**  
**【根拠1】**アンカーなどの重量物と船による引き回しによって引き起こされる異常に類似点多し。  
当該海域は、日常的に遊漁船が設備周辺にアンカーを落とし、レジャー釣りを実施している。



**【根拠2】**水中点検にて、毎回多くの放棄アンカーが設備周辺で回収されている



上左図:海底ケーブルの変位状況

上右図:防食層の損傷状況

下左図:注意喚起看板の設置例

(電源開発資料)

**高圧電流危険! 海底ケーブルがあります! 投錨危険!**  
**環境調査中につき周辺での釣りなどの遊漁行為はご遠慮ください**

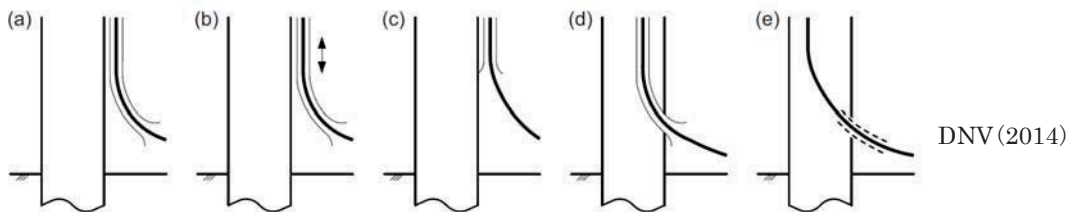
### 【豆知識 3.7.2-7】

#### ●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、これは外装(固定(a)/可動(b))及び内装(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 程度の鋼管を使い、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する。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。但し、シールは毎回使われることでは無い
- ✓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 3.7.2-8a】

#### ●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

(昭和 47 年 12 月 25 日通商産業省・運輸省・自治省令第二号)

(最終改正:平成 23 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 $0.6$ 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 $2.0$ で除した値（告示で定める場合にあつては、当該 $2.0$ 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 $0.6$ を乗じた値、「許容支圧応力度」とは許容引張応力度に $1.4$ を乗じた値をそれぞれいうものとする。

### 【豆知識 3.7.2-8b】

#### ●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必要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 3.7.2-8c】**

●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繋ぎこみ工事を行うことになる。系統連系の区分を表 3.7.2-17 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 3.7.2-17 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	有り・無し
	交流発電設備		無し
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	有り・無し
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	無し
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	有り・無し

\*) 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、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 条に準じ一定以上の間隔を設ける。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、たるみの無いように張線する。

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。

### 3.7.3 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 3.7.3-1 に掲げる検査及び試験を行う。

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く、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、風車の状態は、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 3.7.3-1 試運転時の検査・試験項目

番号	検査・試験項目	検査・試験目的	電気設備技術基準関連条項等
1	外観検査	電気工作物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の確認	第19条5項、第20～32条 第34条、第37～44条 第46条、第47条、第49条
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、必要な個所に所定の接地が行われていることの確認	第19～31条、第34条 第42条
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、規定値以上であることの確認	第14条
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印加し、絶縁に異常のないことの確認	第14～18条
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作動することの確認	第38条、第40条 第46条、第47条
6	遮断器関係試験	遮断器を手動開閉操作して動作に異常がないことの確認	—
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、関連機器が正常に動作することの確認	—
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、関連機器が正常に動作することの確認	—
9	負荷遮断試験	発電設備の出力の1/4、2/4、3/4、4/4負荷運転状態から負荷遮断し、異常のないことの確認	—
10	遠隔監視制御試験	運転に必要な制御開閉器類の制御操作を遠隔で行い、当該機器が動作することおよび発電制御所に状態変化が表示されることの確認	第51条
11	負荷試験 (出力試験)	発電設備を可能な限り定格運転を行い、発電機等の異常な温度上昇、異常振動、異音等がないことの確認	第29条
12	騒音測定	—	騒音規制法第2条第1項 騒音規制法第3条第1項
13	振動測定	—	振動規制法第2条第1項 振動規制法第3条第1項