洋上風力発電の計画・建設・運開・メンテナンスに係る費用等
（洋上風力発電ガイド：ＵＫラウンド３）

1．はじめに

本稿は,イギリスの政府系特殊法人である THE CROWN ESTATE がラウンド3の開発を控え,洋上風力発電への理解を促進するために,2010 年に発行した「An Guide to an Offshore Wind Farm(洋上風力発電ガイド)」[(1)]を翻訳したものである.

洋上風力発電の技術革新は,現在も急ペースで進行中であり,本稿で示した内容が今後必ずしも採用される訳では無いが,2010 年時点での技術とラウンド2までの経験に基づき,最新の技術を示すことを目的としている.なお,コストや開発方法の推定は,ラウンド3における容量 500MW(ロータ直径:120m 以上),離岸距離 80kmのウィンドファームが想定された.

供給業者の例は,イギリスを中心とする欧州に拠点を持ち,実績のある企業のみ掲載しており,参考情報に過ぎない.よって,ここに記載されていない業者が,供給能力が無いことの証明には決してならない.

本稿の構成は,2章に事業コストの総括,それ以降,3章は事前開発と許認可,4章は風力発電機本体,5章はその他設備,6章は建設と試運転,7章は運転とメンテナンスと,要素毎に内容、コスト等について詳細に取りまとめている.なお,原文の通貨には￡が使われているが,翻訳に伴い￥130.00/￡の為替レートを使用した.

2．事業コストの総括

総計(500MW ウィンドファーム:D0 + T0 + B0 + I0 + O0) (計画から運転・メンテナンスまで) 約2000 億円(100%)(ca.￡1600million:解体費含まず)

【D0．開発と許認可】 500MW ≒78.0 億円(￡60million:4%)	
D1	環境調査 500MW ≒5.2 億円(￡4million)
D2	海岸線調査 調査船 ≒50～80 万円/日(￡4-6k/day) (装備,人員込み) + 移動費 + 輸送費 + 天候調整費 + 報告書作成費
D3	気象観測調査 タワー建設費 ≒3.9～6.5 億円/塔 (￡3-5million/single met station) (水深と離岸距離に応じて変動)
D4	海底調査 500MW ≒11.7 億円(￡9million)
D5	エンジニアリング関連調査 500MW ≒約 1.3 億円(￡1million)
D6	社会受容関連調査 ≒1,300 万円(￡100k)

【T0．風力発電機】 5MW 基 ≒7.8 億円 (￡6million/turbine) x 100 基 ＝780 億円(￡600million :39%)	
T1	ナセル 5MW 基 ≒3.3 億円(￡2.5million/turbine)
T2	ロータ 5MW 基 ≒1.6～2.0 億円(￡1.2-1.5 million)
T3	タワー 5MW 基 ≒約 1.3 億円(￡1million) (ハブ高による)

【B0．その他設備】 500MW ≒520.0～650.0 億円(￡400-500million:30%)	
B1	ケーブル 500MW ≒104.0 億円(￡80million)
B2	風力発電機基礎 500MW ≒390.0 億円(￡300million) (100 基.水深により変動)
B3	洋上変電所 ≒65.0 億円/変電所(￡50million/substation)
B4	陸上変電所 ≒52.0 億円/変電所(￡40million/substation)

【I0．建設と試運転】 500MW ≒520.0 億円(￡400million:26%)	
I1	海底送電ケーブル敷設 500MW ≒104.0 億円(￡80million) (離岸距離と海底地質による)
I2	基礎設置 500MW ≒130.0 億円(￡100million)
I3	インターアレイケーブル敷設 500MW ≒78.0 億円(￡60million)
I4	港湾施設 ▪ 500MW ≒13.0～19.5 億円(￡10-15million) ▪ 設備投資費(CAPEX の約 1%)
I5	洋上変電所建設 ≒13.0 億円/変電所(￡10million)

	（容量と場所により変動）
I6	海上サポート 船舶チャーター費 （サイズ,装備,船員熟練度により変動）
I7	風力発電機設置 500MW ≒182.0 億円（£140million）
I8	試運転 風力発電機設置費に含まれる

【O0. 運転とメンテナンス】 500MW ≒32.5～52.0 億円（£25-40million :2%）	
O1	運転 500MW ≒32.5～52.0 億円（£25-40million）
O2	メンテナンス 通常 5 年間の保証

3. 開発と許認可

【D0. 開発と許認可】	
概要	開発と許認可には,ウィンドファーム建設の確定注文を得るまでの業務範囲が含まれる.
コスト	500MW ≒78.0 億円（£60million:4%）
業者例	開発と許認可は,事業者が管理して行う.UK ラウンド 3 は,ゾーン毎に大企業のコンソーシアムと,THE CROWN ESTATE が共同事業者として開発を行っている.
要点	イギリスのエネルギー・気候変動省は,ラウンド 3 の詳細決定に際して SEA(戦略的環境アセスメント)を実施した.この結果は The Crown Estate による洋上風力開発のゾーニングに活用され,またそのデータは許認可プロセスの加速化に役立てられる.
要素	開発業務（例: F/S,認可,計画,観測） ▪ 環境調査［D1］ ▪ 海岸線調査［D2］ ▪ 気象観測タワー調査［D3］ ▪ 海底調査［D4］ ▪ エンジニアリング関連調査［D5］ ▪ 社会受容関連調査［D6］

D1. 環境調査	
概要	環境調査は, ウィンドファームの開発予定海域とその空域に生息または飛翔する生物に対する影響を予測評価する.
コスト	500MW ≒5.2 億円（£4million）
業者例	環境調査は,調査管理者と実施者の2つに分けられる. ▪ 管理者: AECOM, ERM, Garrad Hassan, Natural Power, Noble Denton, Motto Macdonald, PMSS, Royal Haskoning, RPS, SeaRoc ▪ 実施者は D1.1～D1.6 の各調査項目を参照. ▪ 小規模な専門業者は,環境調査の一部を実施する特別な専門技術を有しており,実施に当たり下請負となる場合が多い.
要点	▪ 環境調査は,許認可に必要となる十分なデータを集めるのに,2 年以上かかることもある. ▪ 調査には船舶に加え,航空機の使用も増えている. ▪ 生物調査では,まず生息分布,密度,多様性,生物種数を調べる. ▪ 環境調査（特に初期の地域評価（REA））に基づき環境影響評価（EIA）を作成する. ▪ UK 領海の洋上風力開発による潜在的環境影響の理解と知識の促進・発展に貢献するため,COWRIE(Collaborative Offshore Wind farm Research Into the Environment）が設立された.
要素	▪ 底生生物調査［D1.1］ ▪ 魚類調査［D1.2］ ▪ 鳥類調査［D1.3］ ▪ 海産哺乳類調査［D1.4］ ▪ 鳥類,海産哺乳類調査用船舶・航空機［D1.5］ ▪ 陸上生物調査［D1.6］

D1.1 底生生物調査	
概要	開発予定海域の海底に生息する底生生物種を調査する.
コスト	500MW ≒6,500 万円（£500k）
業者例	ABP MER, EMU, Gardline Marine Sciences, Institute of Estuarine and Coastal Studies
要点	▪ 標本採取地点は,海域全体の特徴を,効率よく且つ広範囲に反映するように選定され,また珊瑚礁のような小規模な特徴の調査も試みる. ▪ 珊瑚礁のような脆弱な生態系には特別な注意を払う. ▪ 調査内容には,採泥器,曳網等による標本採集,海底のビデオ分析,音響探査等による解析がある. ▪ 調査船には,調査・航海システムを搭載した現地の漁船がよく使われる.漁業組合との連携が必要となる可能性がある. ▪ 通常,魚類調査[D1.2]と同時に実施される.
要素	海底から採取した動物相の標本分析は研究所で行う.

D1.2 魚類調査	
概要	開発予定海域に生息する種,とりわけ魚類を調査する.
コスト	500MW ≒6,500 万円(£500k)
業者例	EMU, CEFAS, Gardline Marine Sciences
要点	▪ 標本採取にはビームトロール網もしくはオッタートロール網(海底上を曳く網)が使われる. ▪ 魚類の産卵場調査には特に焦点を当てる.魚類調査の計画には地元漁船のルートを辿ることが役立つ. ▪ 調査船には,調査・航海システムを搭載した現地の漁船がよく使われる.漁業組合との連携が必要となる可能性がある. ▪ 通常,底生生物調査[D1.1]と同時に実施する.

D1.3 鳥類調査	
概要	ウィンドファームが鳥類に与える影響(例: 生息地の変化,飛翔経路への障害,衝突死等)を調べる.
コスト	▪ 500MW ≒1.8 億円(£1.4million).船舶・航空の両調査を実施することが多い. ▪ 航空調査費は,必要な装備を備える航空機が利用できるか否かに依存する. ▪ 船舶調査費は,一般的な船舶で 100-130 万円/日(£8-10k/day)程度で、その他 移動費, 天候待機費 ,報告書作成費が掛る.
業者例	APEM, the British Trust for Ornithology, ECON, ESS Ecology, HiDef Aerial Surveying, Institute of Estuarine and Coastal Studies, RPS, Wildfowl and Wetlands Trust
要点	▪ 生息数や飛翔パターンの結論を得るには,少なくとも 2 年間の調査が必要であり,初期に行われるべきタスクの一つである.鳥類調査は,ウィンドファームの設計に大きな影響力を持つ. ▪ 海域に生息する全ての海鳥や渡り鳥を調査し,その海域をどのように利用しているか,すなわちウィンドファームによる影響の有無を明らかにする. ▪ 設置海域が渡り鳥の主要ルート上に位置していないか調べる. ▪ 種と飛翔パターンの調査には,航空・船舶による目視調査や無線標識調査を活用する. ▪ 飛行高度は衝突リスクの評価に重要である. ▪ 無線標識を取り付けた鳥が,既設ウィンドファームを通過する時の飛行データは,回避方法の理解に役立つ.
要素	鳥類,海産哺乳類調査用船舶・航空機 [D1.5]

D1.4 海産哺乳類調査	
概要	洋上ウィンドファームがクジラ目(クジラ,イルカ)や鰭脚類(アザラシ,アシカ,オットセイ)に与える影響の可能性について調べる.
業者例	ESS Ecology, Gardline Marine Sciences, RPS, SMRU
コスト	▪ 500MW ≒1.8 億円(£1.4million) ▪ 物理探査[D4.1]と同時に行うこともある.
要点	▪ 船舶・航空機による目視調査や無線標識調査等がある. ▪ 地震探査等の洋上作業による音響影響評価には,専門監視員を配置しクジラ目への影響を最小化する. ▪ 調査には適切な海洋生物学者を必要とする.
要素	鳥類,海産哺乳類調査用船舶・航空機 [D1.5]

D1.5 鳥類,海産哺乳類調査用船舶・航空機	
概要	環境調査の実施時にプラットフォームとなる.
コスト	▪ 調査船チャーター費 ≒130 万円/日 (£10k/day) ▪ 調査航空機チャーター費 ≒16 万円/3 時間 (£1.2k/3hours)
業者例	▪ 船舶: Bay Marine, Gardline Marines Services, Fugro, Ocean Marine Services ▪ 航空機: APEM, HiDef Surveying
要点	▪ 一般的な調査船の全長は 30m 程度. ▪ 費用節約のため鳥類調査と海産哺乳類調査は同時に行うことが多い. ▪ 調査計画時には悪天候や厳しい海況となる場合も考慮する. ▪ 乗組員は,複数人用意する(観察,記録,休憩をシフト交代しながら行う生態調査者を含む). ▪ 調査期間を最大現に有効とするため,パッシブ音響観測技術と適切な海洋生物学者による補完観測を実施する. ▪ 調査船舶の仕様で最も重要なのは,調査時の安定したプラットフォームである. ▪ 海面よりなるべく高い船舶は,良い観測視界を提供する. ▪ 航空機は,様々なリモートセンシング機器を搭載する(例: 高解像度デジタルカメラ,LiDAR,ビデオ撮影,画像分光計等).長距離飛行用燃料タンクや自動航行能力を備える双発機の使用により,生態調査者の搭乗を必要とし

	ないで洋上での広範囲な調査が可能となる.

D1.6 陸上生物調査	
概要	ケーブル工事や陸上変電所が,陸上の生態系に及ぼす影響に関して,その可能性を調査する.
コスト	500MW ≒6,500 万円(£500k)
業者例	Andrew McCarthy Associates, APEM, BCM Environs, ESS Ecology, RSK Environment, Thomson Ecology
要点	▪ 野生生物調査は,特定の種別に専門家が実施することが多い. ▪ 調査は生息範囲,密度,種族数に重点を置く. ▪ 野生生物の対象種の範囲は,計画地域によりアナグマから小さい爬虫類まで及ぶ. ▪ 特に海岸の生態系は脆弱なため,最も重要である.

D2. 海岸線調査	
概要	ウィンドファームの建設が海岸の堆積作用と浸食作用へ及ぼす影響を調べる.
コスト	調査船舶チャーター費(装備,人員込) ≒50～80 万円/日(£4-6k/day) で、その他 移動費・輸送費,天候待機費 ,及び報告書作成費が掛る.
業者例	▪ HR Wallingford, Gardline Marine Sciences, ABP MER 等が調査及び数理・物理モデリングを実施できる. ▪ 沿岸船舶を使う調査時間は日,中の 12 時間に限られ,また潮汐・潮位の影響を受ける.
要点	▪ 海岸線調査は電力ケーブルのルート選定に際して,上陸地点の決定に必須である. ▪ また製造,建設,運転に活用する拠点港の開発にも役立つことがある.

D3. 気象観測調査	
概要	開発予定海域に気象観測タワーを建設し,気象,海象観測を行う.
コスト	タワー建設費 ≒3.9～6.5 億円／タワー (£3-5million/single met station) (水深と離岸距離に応じて変動)
業者例	Fugro-Seacore, MT Højgaard, SLP Energy
要点	▪ これまでに建設された気象マストの高さは,洋上風力発電機のロータ高さと同程度の,海面上 100m 程度のものが多い. ▪ 設置場所は, 開発予定海域内,もしくはその風上方向の海域である. ▪ 海岸に近い観測タワーは,不正侵入を予防する必要がある. ▪ 海象データ収集のみを目的とする場合,より安価な方法は関連機器を装備したブイの設置である.
要素	▪ 気象観測タワー構造 [D3.1] ▪ 気象観測タワー取付センサ [D3.2] ▪ 気象観測タワー付帯設備 [D3.3]

D3.1 気象観測タワー構造	
概要	タワーは,センサや付帯設備及び人員にとって安全な安定したアクセス用の土台となる
コスト	≒1.3～3.9 億円/タワー (£1-3million/single met station)
業者例	▪ 基礎,プラットフォーム: BiFab, Bladt, MT Højgaard, SIF-Smulder, SLP Energy ▪ 観測タワー: Carl C, Francis & Lewis
要点	▪ 気象観測タワーの基礎は,通常モノパイルで,結合部分は,風力発電機のそれと比較して似てはいるが非常に軽い.水深が深い所ではジャケット基礎を使う場合がある. ▪ プラットフォームは通路を含み,3 つの梁で構成される.人員のアクセスや避難用のヘリポートを付帯する場合がある. ▪ プラットフォームの外側へ伸びる支持物に波浪と潮流の観測センサを取り付ける. ▪ 気象マストは,メッキ鋼材を格子状に組立て,人間が上へ昇るための設備と落下防止設備を付帯する.Lidar 等の風況観測機器を使う場合は小さいマスト(10m 程度)で十分である. ▪ プラットフォームへの人員用のアクセスは風力発電機のものと同じである.
要素	▪ 基礎 ▪ プラットフォーム ▪ 気象マスト ▪ 人員用アクセス設備

D3.2 気象観測タワー取付センサ	
概要	観測地点の気象,海象データを取得する
コスト	≒ 最大 0.5 億円程度(観測項目による) (£400k)
業者例	▪ 気象センサ: FT Technologies, Gill Instruments, Kipp & Zonen, Orga Natural Power, NRG Systems, Sgurr, Thies, Vector Instruments ▪ 海象センサ: Nortek UK, Planet Ocean
要点	▪ センサは,気象観測タワーの全周に設置される.気象センサには,風速(複数高度に観測機器を設置もしくは Lidar を一台設置),風向,温

	度,気圧,湿度,入射量,視程センサ等がある. ▪ 複数高度で風速を測定することで,観測地点の風速鉛直プロファイルが分かり,風力発電機の最適ハブ高の決定に役立つ. ▪ 海象センサには,波高・潮流センサ(例: ドップラー式流向・流速計(ADCP))があり,場合によっては海底に設置する. ▪ データ損失を防ぐため複数のセンサを使用する. ▪ 鳥類レーダと海産哺乳類の行動を検知するハイドロフォンは,環境調査に資する補完データを提供する.

D3.3 気象観測タワー付帯設備	
概要	付帯設備には電源,航海支援機器,記録計,遠隔測定システム等がある.
コスト	≒1,300 万円(£100k)
業者例	▪ 航海支援機器: Obelux, Orga, Tideland ▪ 記録計,遠隔測定システム: Fugro Geos, PowerPoint Technical Services, VHF Teknik, XL Systems
要点	▪ 通常,太陽光パネル,小型風力発電機及び蓄電バッテリーで独立電源を構成する. ▪ 航海支援機器には,ハザード照明,濃霧号笛,識別番号を彩色して発する自動船舶識別装置等を含む. ▪ 記録計は,全データを保存,処理すると同時に陸上へ転送する. ▪ 遠隔測定システムは,無線 GSM,もしくは衛星によるリアルタイムデータ転送を行う.

D4. 海底調査	
概要	海底調査は,開発予定海域における海底の状態と特徴を調査する.
コスト	500MW ≒11.7 億円(£9million)
業者例	EMU, Fugro, Gardline Marine Sciences, GEMS, RPS, Ramboll
要点	▪ 海底調査は,主に次の 2 項目から構成される. ・ 海底地形,深浅測量 ・ 地盤調査 ▪ 海底調査は,開発プロセスの中でも重要な要素であり,基礎設計,ウィンドファーム配置,建設時のリスク最小化方法の決定等,多くの段階で役立つ情報を提供する. ▪ 調査には専用船が使われる.
要素	▪ 物理探査 [D4.1] ▪ 物理探査船 [D4.2] ▪ 地盤調査 [D4.3] ▪ 地盤調査船 [D4.4]

D4.1 物理探査	
概要	海底の海底地形,特徴,水深,地層を調査し,同時に危険と見なされる海底域も特定する.
コスト	500MW ≒2.0 億円(£1.5million)
業者例	ABP MER, EMU, Fugro, Gardline Marine Sciences, GEMS, Ramboll, Wessex Archaeology, Titan Environmental Surveys
要点	▪ 以下の測定技術がある. ・従来の単・複音響測深機やスワス測深機によるバシメトリーマッピング(深浅測量図) ・サイドスキャンソナーによる海底マッピング ・磁場探査 ・エアガンによる地震探査等 ▪ 測定では開発予定海域を横切るトランセクト調査を行う. ▪ 海底堆積物の移動範囲の観察には「スナップショット」データを使用する. ▪ 物理探査から得た情報は,底生環境調査と地盤調査の設計と実施に役立てるため,開発プロセスの初期段階で行われる. ▪ 物理探査データは,以後作成する図や地図の GIS データに使われ,サイトレイアウトの設計に使われる. ▪ 物理探査は,海底不発弾の特定にも役立てることができる. ▪ 物理探査は,開発予定海域に存在する可能性のある,海底遺跡の特定にも役立てることができる.この場合,通常は海底考古学調査の専門企業が,物理探査に付随するサービスとして行う.

D4.2 物理探査船	
概要	海底の物理探査には専門の船舶を使う.
コスト	▪ 調査内容にもよるが,ラウンド3の調査には,完全な装備を搭載し 24 時間作業できる船舶が必須と思われる. ▪ 調査船舶チャーター費(装備,人員込) ≒180～210 万円/日(£14-16k/day)で、その他 移動費・撤去費, 天候待機費 ,報告書作成費が掛る.
業者例	EMU, Gardline Marine Sciences, GEMS, Fugro
要点	▪ 船の全長は通常 50m 程度. ▪ 船舶は,時化の海象においても安定したプラットフォームを提供しなければならない. ▪ 特殊機器のオペレータを含め,複数の乗組員が乗船する.また 1 ヶ月程度の操業が可能な

	寝室と居住区域を備える. ▪ 月毎に乗組員をローテーションすることで,データ観測,処理,解析を一連の流れで行うことが可能となる.

D4.3 地盤調査	
概要	地盤調査は,物理探査のデータを参考にして目標とする地層変化や海底の特徴を把握した後に実施する.
コスト	500MW ≒9.8 億円(£7.5million)
業者例	Fugro Seacore, Gardline Marine Sciences, GEMS
要点	▪ 専門装備とスキルを備えた人員を必要とする.調査内容は,基礎工の種類と海底の特徴によって決まる. ▪ 海底の物理特性調査のため,複数の深さ 50～70m 程度のボーリング孔を堀り,コーン慣入試験を行う. ▪ 採取したサンプルの検査のため,しばしば洋上に検査室を設ける. ▪ 基礎の設計・製造・建設以前に,地盤調査結果と物理探査結果を組合せ,計画海域の地質モデルを向上させる.

D4.4 地盤調査船	
概要	海底の地盤調査には専門の船舶を使う.
コスト	▪ 調査船舶チャーター費(装備,人員込) ▪ ≒520～910 万円/日(£40-70k/day)で、その他 移動費・撤去費, 天候待機費 ,及び報告書作成費が掛る 500MW ≒6.5 億円(£5million:総コスト)
業者例	Fugro, Gardline Marine Sciences, GEMS
要点	▪ 船の全長は通常 90m を超える. ▪ ドリルリグやクレーン等の大きな装備を搭載し,且つ遠隔地で操業するため,大きな船舶が必要となる. ▪ ジャッキアップ船が使われることもある(基礎や風力発電機の設置船よりは小さい). ▪ 船舶は,ボーリング孔の標本採取に際し,安定したプラットフォームを提供しなければならない.すなわち,船舶を指定地点に移動,または定位置に維持する必要があり,また厳しい海況や天候にも耐える必要がある. ▪ 特殊機器のオペレータを含め,複数の乗組員が乗船する.また 1 ヶ月程度の操業が可能な寝室と居住区域を備える.検査室を備えていれば,データ収集と処理を船上で行うことができる.

	▪ 月毎に乗組員を交代することで,データ観測,処理,解析を一連の流れで行うことが可能となる.

D5. エンジニアリング関連調査	
概要	エンジニアリング関連 (Front-end engineering and design;FEED)調査を行い,契約に先立って技術的な不確実性の洗い出しと,ウィンドファームの全体構想を発展させる.
コスト	500MW ≒1.3 億円(£1million)
業者例	Garrad Hassan, KBR, Noble Denton, ODE, Ramboll, RES, Sgurr Energy
要点	▪ 経済的最適化のため,風力発電機容量,基礎タイプ,ウィンドファームレイアウトや系統連系方法といった主要事項を検討する. ▪ また洋上・陸上作業の計画,契約方法の決定,リスク管理と健康・安全管理ポリシーの作成を行う. ▪ 調査結果は,建設管理部門によりウィンドファーム建設に使われる.
要素	初期の基礎設計を含む特別な作業は,専門の下請が行う場合がある.

D6. 社会受容関連調査	
概要	計画するウィンドファームが,その周辺海岸や海岸近くに住むコミュニティーに与える影響を評価する.調査内容は,景観評価,騒音評価や,港湾等への社会インフラへ与える社会経済評価を含む.
コスト	≒1,300 万円(£100k)
業者例	Ecogen, Entec, Garrad Hassan, Pegasus Planning Group, RPS, Sgurr Energy
要点	▪ 景観評価では,特定地点からどのように計画ウィンドファームが視認できるかを示す,フォトモンタージュを使う. ▪ 騒音評価では,計画ウィンドファームによる騒音レベルが,ETSU R97 ガイダンスに定める基準以下であるか評価する. ▪ 社会経済調査では,計画ウィンドファームが港湾等の海岸インフラへ与える影響を評価する(例: 雇用・輸送・娯楽の変化,また景観への美的価値の変化等).この評価は地元社会への影響を推定するため,社会経済的変化だけではなく,生物的・地質的・物理的影響も含む. ▪ 社会経済調査には,客観・主観両データを含む.客観的データは,年齢,性別,所得配分,民族起源,死亡率,住居タイプ,職業,教育等の統

	計から構成される.主観的データは,調査と観察から得られる.これらのデータは,様々なグループが彼らの社会経済環境をどのように認識し,推測される変化に対応するかを推定するために使われる. ▪ 調査では,陸上ケーブルルートと陸上変電所を考慮する. ▪ 通常，社会受容関連調査は環境影響評価の一部となる.

4. 風力発電機

【T0. 風力発電機】	
概要	風力発電機は,風の運動エネルギーを 3 相 AC の電気エネルギーに変換する.
コスト	5MW 基 ≒7.8 億円（£6million）
業者例	▪ 風力発電機メーカー:現在のところ Siemens と Vestas 社製の風力発電機が最も多く設置されている(両社とも本社はデンマーク). ▪ その他に商業規模で設置されているのは Repower と Areva-Multibrid 社製である(両社とも本社はドイツ). ▪ その他にもヨーロッパ,中国,アメリカ企業を含む陸上風力発電機メーカーのトップ 10 企業の殆どが洋上用製品の開発を進めている. ▪ 幾つもの新規参入業者が洋上風力に特化した革新的風力発電機の開発を進めている.
要点	▪ 初期の洋上ウィンドファームでは,陸上で使われていた風力発電機を転用していた.その後,大容量で洋上設置に特化して設計された風力発電機が徐々に増えている(陸上の最大 3MW 程度に対して 5MW 以上). ▪ 技術革新の余地は非常に多く,その焦点は信頼性やメンテナンス性の向上に当てられ,また騒音・景観影響や輸送制約も少ない ▪ 2009 年末時点では,UK 内に主要製造拠点を持つ洋上風力発電機メーカーは無いが,多くの企業が膨大な設備投資を検討している.
要素	▪ ナセル［T1］ ▪ ロータ［T2］ ▪ タワー［T3］

T1. ナセル	
概要	ナセルは,ロータを支持し,ロータの回転エネルギーを 3 相 AC の電気エネルギーに変換する.
コスト	洋上 5MW 基 ≒3.3 億円 （£2.5million/turbine）
業者例	ナセルは,一般に多くの外部業者から供給される部品を使って,風力発電機メーカーが組立てる.
要点	▪ 標準的寸法: 10～15m x 4m x 4m,質量: 150～300 トン ▪ 大サイズナセルの組立は,10～20 人日かかる.組立場所は,市場よりもサプライチェーンの近くが好まれる.ある市場において,ナセルを地元で組立てる仕組みを確立できれば,重要な地元供給の可能性が開ける. ▪ ナセルは納品前及び輸送・保管準備前に機能試験を受ける.
要素	▪ ナセル台板［T1.1］ ▪ 主軸受［T1.2］ ▪ 主軸［T1.3］ ▪ 増速機［T1.4］ ▪ 発電機［T1.5］ ▪ 電力変換器［T1.6］ ▪ 制御システム［T1.7］ ▪ ヨーシステム［T1.8］ ▪ ヨー軸受［T1.9］ ▪ ナセル付属システム［T1.10］ ▪ ナセルカバー［T1.11］ ▪ その他エンジニアリング部品［T1.12］ ▪ 留め具［T1.13］ ▪ 状態監視システム［T1.14］

T1.1 ナセル台板	
概要	ナセル台板は,ドライブトレインとナセルのその他部品を支え,また荷重をロータからタワーへ伝達する.
コスト	5MW 基 ≒1,300～1,600 万円（£100-120k）
業者例	ナセル台板は,球状黒鉛鋳鉄の鋳造か,鋼材の成形加工により製造される. ▪ 鋳造： Eisengiesserei Torgelow, Felguera Melt, Fonderia Vigevanese, Gusstec, Metso, MeuselWitz, Rolls Royce, Sakana, Siempelkamp, Vestas（この内,数社のみが洋上風力発電機用の大サイズナセル台板を製造できる.） ▪ 成形加工： 多くの供給業者が存在する.
要点	▪ 多くの場合,ナセル台板は二つに分けて製造される.増速機を支え,荷重をロータからタワーへ伝達する重量部分は鋳物が多い.発電機やその他部品を支える,ナセル後部の軽量部は成形加工鋼が一般的である. ▪ 重量部は,通常ヨーシステムも支える. ▪ 設計は,風力発電機メーカーが行い,一般に製造は外注される.設計時の考慮事項は,疲労荷重,終局荷重,剛性,組立て,重要部品へ

	のアクセスといったメンテナンス性,である. ▪ 製造後,風力発電機メーカーへの納入前に機械加工,ショットブラスト,金属溶射,エポキシ塗布が行われる. ▪ 通常の 5MW 風力発電機用ナセル台板の質量は 80 トン程度,寸法は 4m x 3m x 10m 程度である.材質は,一般に EN-GJS-400-18U-LT 球状黒鉛鋳鉄(重量部)及び 355 鋼材(軽量部)が使われる.
要素	▪ 球状黒鉛鋳鉄または成形加工鋼材 ▪ 機械加工と塗装

T1.2 主軸受	
概要	主軸受は,ロータを支え,ロータ荷重の一部をナセル台板へ伝達する.
コスト	5MW 基用 ≒800～1000 万円(£60-80k) (ハウジング含む一式)
業者例	FAG (Schaeffler), Kaydon, Liebherr, Rollix, Rothe Erde, SKF
要点	▪ 軸受の配置方法は何通りもある.一般に,洋上風力発電機に使われる方法は,主軸の両端を軸受で支える(Siemens 3.6MW,Repower 5/6MW). ▪ 上記の場合,軸合わせ用の球面ころ軸受と自動調心ころ軸受を組み合わせることもある. ▪ 軸受は,応力集中が起こらないように,通常主軸への取付け前に熱してから結合される. ▪ 鋳鉄製の軸受ハウジングは,軸受を強固に支え,またナセル台板と接続する. ▪ 5MW 風力発電機用の軸受とハウジングの質量は,合わせて 25 トン程度になる.
要素	▪ 機械加工,熱処理した鍛造圧延リング ▪ 転動体(球状,円筒クラウニング形状,円錐クラウニング形状) ▪ 転動体支持(枠組み) ▪ 潤滑剤,シール材 ▪ 球状黒鉛鋳鉄 軸受ハウジング

T1.3 主軸	
概要	主軸は,ロータトルクを増速機へ伝達する.ロータ側主軸は主軸受により支持され,反対側は増速機もしくは別の軸受により支えられる.
コスト	5MW 基 ≒1,300 万円(£100k)
業者例	Brück, Euskal, Skoda, Thyssen
要点	▪ 一般にロータは,単列か複列の留め具により主軸とフランジ結合される.また通常メンテナンス時にロータをポジティブロッキングするため,主軸には環状に穴がある. ▪ 通常主軸は,中心に貫通穴があり,これを通ってピッチ制御用の制御信号や電動・油圧動力がハブへ伝えられる. ▪ 5MW 風力発電機用主軸の質量は 30 トン程度になる.製造方法は,42CrMo4 等の高級鋼を鍛造し機械加工,もしくは EN-GJS-400-18U-LT 鋳鉄を中空鋳造する. ▪ 回転する主軸は,ロータ重量に加え空力トルクと推力荷重も支えるため,疲労荷重も重要であり,応力集中の最小化が必須である.
要素	▪ 鍛造シャフト ▪ 機械加工,非破壊試験,塗装

T1.4 増速機	
概要	増速機は,発電機の電力変換効率向上のため,5～15rpm で回転するロータを 1500rpm 程度まで加速する.
コスト	5MW 基 ≒0.9～1.3 億円(£700k-1million)
業者例	Bosch Rexroth, Eickhoff, Hansen, Moventas, Renk, Winergy
要点	▪ 増速機は,風力発電機の重要部品であり,長期運転の信頼性に主眼が置かれる. ▪ 通常の設計では,まず遊星歯車が検討され,次により高速の並列歯車(斜歯)が検討される.一般にブレーキディスクが後方(高速側)に配置される. ▪ 駆動部の設計では,暴風やブレーキ,その他異常といった様々な荷重ケースでのピークトルクを検討する. ▪ 風力発電機は,その寿命期間内に停止や低負荷運転を含め様々な荷重状態で運転され,軸受内部で横滑りの可能性もあるため,軸受と歯車の接触点は注意深く検討される. ▪ 設計方法は,経験則,詳細な挙動解析,及び試作検証を組み合わせる. ▪ 通常,冷温状態での再起動前には自動過熱し,また冷却機能により運転温度を 70℃以下に抑えるように設計される.発電機の冷却機構と組み合わせることもある. ▪ 風力発電機増速機用の専門潤滑剤が開発されており,最近のものは環境影響も配慮されている. ▪ 通常,主軸の同軸線上の増速機シャフトは,主軸と同様に中心に貫通穴(例えば径 100mm)があり,これを通ってピッチ制御用の制御信号や電動・油圧動力がハブへ伝えられる ▪ 5MW 風力発電機用増速機の質量は 65 トン程度.内蔵部品はナセル内クレーンにより現

	場修理ができるサイズとなっている. ▪ 増速機と高速発電機の代わりに,低速ダイレクトドライブ発電機が使われることもある.歴史的に,この発電機はより重く,より高価であるが,この技術は急速に発達している.近いうちに,より高い信頼性を持つことを証明する可能性がある.
要素	▪ 球状黒鉛鋳鉄の鋳物(EN-CJS-700-2U 等の高級鋳鉄を含む)や鋼鍛造品 ▪ 円筒・円錐・球状ころ軸受や滑り軸受 ▪ 歯車

T1.5 発電機	
概要	発電機は,機械エネルギーを電気エネルギーに変換する.
コスト	5MW 基 ≒2,600～3,300 万円(£200-250k) (発電機タイプによる)
業者例	ABB, Elin, Ingeteam, Leroy Somer, VEM, Winergy
要点	▪ 過去 10 年間で最も採用された発電機は,高速スリップリングを有する二次巻線型誘導発電機(DFIG)である.その他には永久磁石同期発電機もしくは電磁石同期発電機が使われている. ▪ ほぼ全ての発電機は,AC-DC-AC 変換機を介して系統連系され,可変速運転が可能である.これによりドライブトレインにかかる荷重をスムーズにし,様々のギア比を有する変速装置無しに空力性能を最適化する. ▪ 風力発電機は,平均して低～中風速における,定格の 20～80%の発電時間が最も多いため,特に部分負荷時の変換効率が重要となる. ▪ 冷却には水冷却が一般に使われ,変換効率の最適化,小型化,騒音抑制に役立っている. ▪ 5MW 風力発電機用発電機の質量は 20 トン程度である. ▪ 発電機軸受の設計では,特に潤滑剤に焦点を当て,電流経路とならないようにする.通常使われるのは専門の深溝軸受で,転動体には時にセラミック製のものが使われる. ▪ 発電機の供給範囲ではないが,発電機と増速機を接続するカップリングも重要である.風力発電機の構成部品は,受ける負荷に対して比較的フレキシブルに対応するため,通常これらのカップリングはかなりの偏心許容誤差を有する.
要素	▪ 鋳造品 ▪ 巻線 ▪ 軸受 ▪ センサ ▪ スリップリング(DFIG の場合) ▪ カップリング

T1.6 電力変換器	
概要	発電機から電気エネルギーを受け取り,電圧や周波数を調整してウィンドファーム系統へ送る.
コスト	≒5,200 万円(£400k) (コンバータ,変圧器,スイッチギア,ケーブル一式)
業者例	▪ コンバータ: ABB, AMSC, Converteam, IDS, Ingeteam, The Switch, SEG, Winergy ▪ 変圧器: ABB, GE, CG (Pauwels), Schneider, Siemens, SGB ▪ スイッチギア: Areva T&D, CG (Pauwels), S&C, Siemens ▪ ケーブル: Draka, Nexans, Prysmian
要点	▪ 殆どの風力発電機は,可変速運転を行うため AC-DC-AC コンバータを介して系統に接続される.発電機とコンバータの構成は,多岐に渡る.昨今の IGBT を用いたコンバータは,その高い電力密度のため水冷式が多い. ▪ コンバータの設計要求は,系統運営者により課せられ,系統事故時に風力発電機による系統安定化や必要に応じた無効電力消費を支援する. ▪ 変圧器は,ナセル内,もしくはタワー下部に設置される.通常,ウィンドファーム周辺の系統に合わせて数 kV から 33kV へ昇圧する.耐侵食性や環境・燃焼への要求事項を満たすモールド変圧器が使われ,これらは通常,強制空冷式である. ▪ スイッチギアは,風力発電機用に特別に設計され,例えば小型且つウィンドファーム系統電圧までの絶縁を目的とするガス絶縁式等がある. ▪ 他産業と比較したケーブル仕様の違いとして,ケーブル捻れの許容範囲が大きく,ヨーシステムによりナセルが最大2回転できる.
要素	▪ コンバータ ▪ 変圧器 ▪ 開閉装置 ▪ ケーブル

T1.7 制御システム	
概要	監視制御機能を提供し,外部要求事項を達成

	させつつ風力発電機の寿命と発電収入の最適化のため,発電量と負荷のアクティブ制御を行う.
コスト	5MW 基 ≒900 万円(£70k)
業者例	Bachmann, DEIF, Garrad Hassan, KK-Electronic, Mita Teknik
要点	▪ 制御ソフトは通常,機械・電気部分の動的要素を反映させるため,風力発電機メーカーにより内作される. ▪ 各風力発電機は,風況変化に対応して,起動や停止等独立運転ができる. ▪ 制御システムは,主要部品と副システムを監視する 100 単位のセンサにより定期的にヘルスチェックを行う. ▪ 制御システムは,SCADA システムの信号も制御し,例えば電気事業者の要求に従い風力発電機の定格出力を下げて運転を行う. ▪ 電力と負荷制御に関する主要制御パラメータは,ロータ回転速度,出力そして各ブレードのピッチ角度である. ▪ 制御パネルは,プログラマブルコントローラとパネル躯体を含み,質量はおよそ 500kg に及ぶ.制御機器とセンサ間は,光ケーブル接続を含む CAN (Controller Area Network) bus や同様のシステム等により接続されている. ▪ 制御システムに並び安全システムは,風力発電機を制御システムエラーまたは誤操作から保護する.この安全優先システムに関わる主要センサは速度,振動センサ等がある. ▪ 直接ボタン操作やコード入力による非常時システムも装備され,保守要員が危険にさらされる場合にロータを停止する.
要素	▪ 制御パネル ▪ 制御機器とソフト ▪ センサ ▪ 安全,非常時システム

T1.8 ヨーシステム	
概要	ヨーシステムは,運転中にナセルを風上方向に向ける装置である.
コスト	5MW 基 ≒1,300 万円(£100k)
業者例	ABB, Bonfiglioli, Bosch Rexroth, VEM
要点	▪ 一般に,大型風力発電機のヨーシステムは,ナセル台板上[T1.1]に設置された 6-8 個のギアモータで構成され,ヨー軸受[T1.9]の歯状の内輪に作用する.それぞれのモータ質量は,1 トンに及び,一般的なギア比は 200～300:1 である. ▪ 駆動装置への継続的な変動負荷を避けるため,約 10 個の油圧式キャリパーブレーキ(各 150kg 程度)によりヨー軸受を定位置に維持する(ヨー運動中は除く).ヨー運動中では(およそ数度/数分),ヨーブレーキはダンピングとして作用する. ▪ センサによりナセル位置を測定し,タワー内ケーブルの過度のねじれを防ぐ. ▪ 幾つかの風力発電機では,油圧式ヨーモータを採用し,タワー頂部の負荷を緩和する.
要素	▪ ヨーモータと,付随ギアボックス ▪ ヨーブレーキ ▪ センサ

T1.9 ヨー軸受	
概要	ヨー軸受は,ナセルとタワーを接続し,ヨーシステムによりナセルを風向へ向けることを可能にする.
コスト	5MW 基 ≒500～650 万円(£40-50k)
業者例	IMO, Liebherr, Rollix, Rothe Erde
要点	▪ 5MW 基用の軸受は,通常 42CrMo4 鋼を鍛造し急冷後に焼き戻して製造され,直径 5～5.5m 程度のリングからなる単列 4 点接触玉軸受である.玉の材質は通常 100Cr6 で,軸受の総質量は 6 トンに及ぶ. ▪ ヨー軸受のレースウエイは,高周波焼入れ後,急回転加工か研磨加工を施す. ▪ ヨー軸受は,複雑なパターンの負荷を受け,長時間の間,一回転中の僅かな範囲で時折動くか全く動かない.長期間の性能で重要となるのは水平設置性である(即ちタワーフランジ溶接後の機械加工). ▪ ヨー軸受は,ヨーモータとかみ合わせるため,歯を持つ. ▪ ヨー軸受は,通常金属溶射および/または金属塗装される. ▪ ヨー軸受は,一般にブレード軸受[T2.3]に比べて運転中の問題は少ない. ▪ 幾つかの風力発電機メーカーは,転動体の代わりに低摩擦パッドを持つ滑り軸受を採用している.
要素	▪ 鍛造リング,機械加工,熱処理,表面処理 ▪ 転動体(ボール) ▪ シール材 ▪ 潤滑剤

T1.10 ナセル付属システム	
概要	幾つもの付属システムのおかげで,殆どの時間

	で風力発電機の無人運転が容易になり,またメンテナンス時にも役立つ。
コスト	≒大サイズ部品の数%(全付属システム一式)
業者例	▪ ブレーキ: Siegerland, Stromag, Svendborg ▪ 冷却装置: Hydac, Windsyn ▪ 空調: Cotes ▪ 風向風速計: Climatronics, Gill Instruments, FT Technologies, NRG Systems, Vector Instruments ▪ 防火装置: Danfoss, Firetrace, Minimax ▪ UPS: AKI Power Systems ▪ 内臓クレーン: Effer, Hiab, Liftra, Palginger Marine
要点	▪ 機械ブレーキは,通常増速機[T1.4]後部に設置される.非常時のメインブレーキは,ブレードのピッチ制御により行う.電動ブレーキが採用されることもあるが,直径 700mm 程度の円盤に作用する油圧式キャリパーの機械ブレーキも存在する. ▪ ロータロックは,メンテナンス時にロータを定位置にロックする時に使われる.大型風力発電機用では,手動または自動油圧式動作により一つか二つ以上のペグを主軸[T1.3]のフランジに設けられた穴に差し込みロックする. ▪ 大型洋上風力発電機による,ロータの機械エネルギーから電気エネルギーへの変換効率は約 92～94%であり,時に 300kW もの熱を増速機や発電機,電気システムから放散する必要がある. ▪ 全てのナセル部品を侵食から保護するため,一般にナセルは良く密封され,空調を全範囲に行き届かせる. ▪ ナセル頂部には風向風速計が設置される.従来のカップ式風速計と風見式風向計に代わって,超音波風向風速計が頻繁に採用される. ▪ 火災検知や鎮火のための防火装置がしばしば備えられる.電気制御盤には窒素が使われる.ナセル等の開放空間では,微水粒子噴霧消化設備が採用される.防火装置は風力発電機の制御装置とは別の制御及び監視系統を持つ. ▪ 系統損失時に風力発電機をしっかりと運転停止するため,UPS システムから制御,安全,非常時システムに給電し,避難用の非常照明も備える.UPS 電力は,翼端の警告灯を,ある設定した時間点灯させるのに使われる場合もある.

	▪ 大型風力発電機のナセル内臓クレーンは,メンテ時に 6 トン程度までの部品を吊り上げられるように設計される.クレーンは無線で操作され,ナセルカバー開口部の内外へ部品を移動させる.
要素	▪ ブレーキ ▪ ロータロック ▪ 冷却装置 ▪ 風向風速計 ▪ 防火装置 ▪ UPS ▪ 内臓クレーン

T1.11 ナセルカバー	
概要	ナセルカバーの役割は,ナセル部品の防水と,空調装置のような外部部品や,風況測定装置,雷保護装置の支持である.
コスト	5MW 基 ≒800～1,200 万円(£60-90k)
業者例	ガラス繊維製ナセルカバー: Bach Composites Industry, Eikboom
要点	▪ ナセルカバーは,外部環境からの保護に加え,照明やその他付属機器を支持し,また雷被害からナセル部品を防護するファラデーケージとなる. ▪ ナセルカバーは,ナセルの最終テストの前後何れかの段階で取り付けられ,ウィンドファームへの輸送時にはナセル内の機器を防護する役割を担う. ▪ ナセルカバーは,風荷重に耐えるように設計され,また輸送や設置時に使用されるナセルの台座には吊り上げ支持点が設けられている. ▪ ハッチやヒンジ式の開口部を天井部や側壁,床に設け,ナセル部品の交換を容易にする. ▪ ナセルカバーは,通常幾つものガラス繊維または鋼材によって製作され,質量は 20 トン程度に及ぶ.
要素	▪ ガラス繊維または鋼材 ▪ 備え付けまたは後付付属システム(例:照明) ▪ メンテ補助機構

T1.12 その他エンジニアリング部品	
概要	その他の標準エンジニアリング部品がナセル内部品の残りを占める.
コスト	通常低コスト
業者例	殆どの部品は,市販品または多くの金属加工業者が製造できる.
要点	耐振動架台は,発電機の支持に使われ,時にそ

	の他の重要部品にも使われる.
要素	▪ 手すり,床材,その他メンテ補助材 ▪ 耐振動架台 ▪ 照明 ▪ ナセル組立用の小さい留め具やその他付属品,消耗品

T1.13 留め具	
概要	留め具(ボルトまたはスタッド)は,種々の重要なボルト接続部に使われる(例えばロータと主軸接続部,主軸受ハウジングとナセル台板接続部,ヨー軸受とナセル台版下部の接続部等).
コスト	5MW 基 ≒130～200 万円(£10-15k)
業者例	August Friedberg, Cooper & Turner, Fuchs & Sanders, Gexpro Services, Wind-Fix
要点	▪ 大型風力発電機の主要接続部に使われる留め具は,通常 M30 または M36 の 10.9 グレード品である. ▪ 留め具は,しばしば疲労特性改善のため,熱処理後のねじ山転造を要求される. ▪ 標準仕様として,塗装により侵食防止作用及び繰り返し可能なトルク特性を持つ. ▪ 全ての重要留め具は,油圧式トルク負荷器,スタッドの場合は油圧式張力負荷器により予備負荷がかけられている.

T1.14 状態監視システム	
概要	殆どの風力発電機メーカーは,追加の状態監視と故障予測を行うためのアドオンの状態監視装置を提供している.
コスト	≒130～260 万円(£10-20k)(複雑性による)
業者例	風力発電機メーカー, Brüel & Kajær Vibro, Gram & Juhl, SKF, SecondWind
要点	▪ 昨今の殆どの状態監視システムは,それぞれの部品(例えば増速機)を監視する個別のセンサにより状態判断を下している.この状況は変わりつつあり,最新のシステムでは広範囲のセンサと測定項目により,全ドライブトレイン部品の全体的状態判断を下す. ▪ ロータ[T2]の状態監視システムは,翼状態だけでなく制御時の挙動も査定する. ▪ 各風力発電機データは,中央データ記憶装置に集め,多数の風力発電機の状態分析に役立てる場合もある.
要素	▪ センサ ▪ 状態監視装置とソフト ▪ 遠隔通信インターフェース

T2. ロータ	
概要	ロータは,空気の運動エネルギーをドライブトレインの回転エネルギーに変換する.
コスト	5MW 基 ≒1.6～2.0 億円(£1.2-1.5million)
業者例	ロータは,常に風力発電機メーカーによって設計・供給される.
要点	▪ 現世代の水平軸風力発電機は,3 枚翼であるが,より洋上に適している可能性がある 2 枚翼も現在開発中である. ▪ ブレード[T2.1]は,ハブを介してドライブトレインと接続されている.全ての洋上風力発電機において,ブレードはピッチ制御を行うため軸受に接続される. ▪ ブレードとブレード軸受,そしてブレード軸受とハブの接続には留め具が使われており,それらは,通常 M30 または M36 の 10.9 グレード品のボルトかスタッドである[T1.13]. ▪ 一般的な 5MW ロータの質量は,90～150 トンに及び,直系は 120～140m である. ▪ 洋上風力発電機のロータサイズに限界は無いが,同じ設計の延長では質量増加率は発電エネルギー増加率よりも大きい.
要素	▪ ブレード [T2.1] ▪ ハブ [T2.2] ▪ ブレード軸受 [T2.3] ▪ ピッチシステム [T2.4] ▪ スピナ [T2.5] ▪ ロータ付属システム [T2.6] ▪ 成形加工鋼材 [T2.7] ▪ 留め具 [T1.13]

T2.1 ブレード	
概要	ブレードは,風のエネルギーを捕らえ,トルクやその他好ましくない負荷をドライブトレインやそれ以外の部分へ伝達する.
コスト	5MW 基 ≒3,300～4,600 万円(£250-350k)
業者例	▪ ブレードの約 2／3 が風力発電機メーカーにより内製される. ▪ LM Glassfiber は,ブレードの主な専門供給業者であり,ポーランド沿岸に製造施設を持つ.
要点	▪ ブレードは,通常ガラス繊維とエポキシ樹脂から製造されるが,様々な設計があり,炭素繊維やポリエステル樹脂が使われる場合もある. ▪ ブレード各部位の設計には,周期的に変動する空力及び重力負荷の両方から発生する疲労や終局荷重を考慮する.終局荷重の発生ケースは,暴風時荷重,制御システム故障によるシャットダウン,または乱流風況下での長時

	間運転等がある.他の重要な設計考慮事項は,ロータ回転により発生する広範囲の駆動周波数に対する固有振動数であり,たわみ剛性も同様に考慮して,タワーへの衝突回避が重要となる. ▪ 5MW 用ブレードは,一般に長さ 60m 以上,最大翼弦長は 5m 以上,質量は 15～25 トンになる. ▪ ブレード基部[T2.1.2]でブレード軸受と接続する. ▪ 雷保護システム[2.1.3]は,ブレード内部及び接続部に設計され,雷の電流をナセルそしてタワーへ安全に通す. ▪ 翼端に航空灯を備える場合もある.これらはブレードが垂直上方にきた時のみ点灯する.
要素	▪ 複合材 [T2.1.1] ▪ ブレード基部[T2.1.2] ▪ 雷保護 [T2.1.3] ▪ 航空灯

T2.1.1 複合材	
概要	複合材は,効率が良く,強度があり,比較的軽いブレード構造を達成するため使われる.
コスト	≒ブレード最終コストの半分 (材料費)
業者例	Airtech, Alcan, Diab, Gurit, Hexel, Owens Corning, PPG, SGL, Zoltek
要点	▪ ブレードの一般的な製造方法は,まず翼幅全長に渡る二つの骨組みを真空バッグと樹脂注入により製造する.これらの枠組みは翼幅中央の荷重支持スパー周りに接着され,また時にこの骨組み間にガラス繊維 Shear web を組み込み,荷重支持を強化する. ▪ 理想的な空力形状(通常,薄肉)と理想的な構造形状(通常,厚肉)の間で最適形状が選ばれる. ▪ ブレード形状の主要パラメータは,弦長(翼断面長),翼厚,ねじり,空力中心である.翼設計時にこれらの最適値を採用する. ▪ 翼設計には,段階的手法が取られる.即ち翼材料,構造サンプル,翼断面,一体翼に対して,それぞれ順番に疲労・終極両方の荷重試験を行い,設計の妥当性及び十分な強度を備えているかを確認する. ▪ 翼製造時の重要な検討事項は,翼品質の再現性と製造時間の二つである.
要素	▪ ガラス繊維(マット及びまたはプリプレグ) ▪ 炭素繊維(通常プリプレグ) ▪ 樹脂(エポキシまたはポリエステル) ▪ 接着剤 ▪ 独立気泡フォームまたはバルサ材のバルクフィル ▪ 消耗品

T2.1.2 ブレード基部	
概要	ブレード基部は,ブレードの複合材主要部分と鋼製軸受との接続点となる.
コスト	≒ブレードコストの 20%
業者例	ブレード基部は,ブレードの一部としてブレード供給者により設計・製造される.
要点	▪ ブレード軸受接続部の設計は,比較的軟らかい複合材が硬いボルト及び軸受に取り付けられるため,重要である. ▪ 留め具によるブレード軸受へのねじ式接続には,幾つもの異なる設計が存在する.ある設計では, ブレード基部にリングが配置されている.他のケースでは留め具取付け補強材をブレード基部に空けた穴に接着,または製造時に充填補強する.更には,スタッドの向きに対して直角に単列または二列の"IKEA-type"ねじ棒を使う設計もある. ▪ ブレード基部近くの複合材は,荷重が基部周りに均一にかかり,且つ取り付け補強材に滑らかに伝達されるように設計する. ▪ ブレード基部は,過剰且つ不均一な荷重がかからないように,十分に平坦である必要がある. ▪ ブレード基部と留め具の設計は,特に荷重時のハブと軸受けの,複雑な幾何学的形状のため重要である.開発時にブレード基部強度の試験を行うことが一般的である.
要素	▪ 金属製の留め具取付け補強材 ▪ 複合材

T2.1.3 雷保護	
概要	雷保護システムは,ブレードとその他風力発電機部品に対して,あるレベルの保護を提供する.
コスト	≒比較的低コスト (翼設計時の重要な検討事項)
要点	▪ 被雷部からのハブ及びその他部品への高電圧且つ大電流の伝達には,各製造業者が異なるブレード材質と設計方法を採用している. ▪ 通常,レセプタは,ブレード翼端とその他の位置に取付ける.導電メッシュをブレード構造に組み込む場合もある. ▪ 保護システムは,雷撃強度のデータ収集にも

	使われる.こうしたデータの収集には,記録媒体から手動で読み込むケースもある.
要素	▪ レセプタ ▪ 導体配列 ▪ データ収集

T2.2 ハブ	
概要	ハブは,ブレードを主軸へ接続する.
コスト	5MW 基 ≒1,000 万円(£80k)
業者例	Felguera Melt, Fonderia Vigevanese, Metso, MeuselWitz, Rolls Royce, Sakana, Siempelkamp, Vestas, Eisengiesserei Torgelow, Gusstec (但し大サイズハブの製造はこの中で数社のみ)
要点	▪ ハブは,球状黒鉛鋳鉄で作られ,その質量はおよそ 30～40 トンになる.内部にピッチシステムを収納し,またブレード軸受の強固な支持構造となる. ▪ 通常,ハブは内外表面に偏りがある,球状に近い形で,主軸接続部周りのハブ後部に付加的な強度を持たしている. ▪ 開口部は,人員アクセス用に使われる.その他必要になる設計事項は,設置時の吊上げ部,ピッチシステム部品の支持部,その他付帯システム,そしてねじ状の非貫通穴がある. ▪ 球状黒鉛鋳鉄のグレードは,通常 EN-GJS-400-18ULT であり,鋳造後に熱処理を必要としない.鋳鋼より球状黒鉛鋳鉄が採用される理由は,より優れた鋳込みと収縮特性にある.押湯システム,鋳物砂,中子の入念な設計が,品質の再現性のため重要となる.企業独自の品質基準が一般に課される.
要素	▪ 鋳造 ▪ 非破壊試験 ▪ 機械加工 ▪ 塗装

T2.3 ブレード軸受	
概要	ブレード軸受は,ピッチ角調整による出力制御,荷重抑制,起動停止を可能にする.
コスト	5MW 基 ≒500～650 万円(£40-50k)
業者例	IMO, Liebherr, Rollix, Rothe Erde, SKF
要点	▪ 一般的なブレード軸受は,42CrMo4 鋼を鍛造,急冷後に焼き戻して製造した直径 3～3.5m 程度のリングからなる二列の 4 点接触玉軸受である.玉の材質は通常 100Cr6 で,軸受の総質量は 5 トン程度に及ぶ. ▪ 玉の代わりにコロを使う場合もある. ▪ レースウエイは高周波焼入れ後,急回転加工か研磨加工を施す. ▪ ブレード軸受にかかる負荷は,複雑なパターン且つ正負両回転方向にかかり,長時間の間,わずか数度の範囲で行ったり来たりする. ▪ 最近のピッチ制御アルゴリズムの発達は,ブレード軸受が担う責任を著しく増す場合がある. ▪ 如何なる状況においても,90 度のピッチ動作により風力発電機を安全に停止するため,低摩擦トルクである必要がある. ▪ ブレード軸受は,ピッチ駆動装置とかみ合わせるため,歯を持つ場合がある. ▪ ブレード軸受は,通常,金属溶射および/または金属塗装される. ▪ ブレード軸受は,その比較的柔構造と高荷重のため,運転中に著しい偏向を受ける. ▪ ブレード軸受が受ける高荷重且つ断続的な挙動に対応する特別な潤滑剤が開発されている. ▪ 摩擦を最小限に抑えつつ潤滑剤を維持するため,シール材には複雑な断面形状を持つ押出し成形ゴムが使われる.
要素	▪ 鍛造リング,機械加工,熱処理,表面処理 ▪ 転動体(ボール) ▪ シール材 ▪ 潤滑剤

T2.4 ピッチシステム	
概要	ピッチシステムは,ブレードのピッチ角を調整し,出力制御,荷重抑制,起動停止を行う.
コスト	5MW 基 ≒1,300～2,000 万円(£100-150k)
業者例	[T2.4.1]油圧式ピッチシステムと[T2.4.2]電動式ピッチシステムを参照
要点	▪ ピッチシステムには,油圧式と電動式があるが,機能性は殆ど変わらない. ▪ 一般に中～高風速では,ピッチ角をほぼ常時調整して,風力発電機が最大(定格)出力を得るようにロータ速度を制御する.調整角度の範囲は,およそ 20 度で,その速度は数度/秒程度である. ▪ 低風速では,ピッチシステムは空力効率を最大化するように制御され,その挙動は著しく少ない. ▪ ピッチシステムは,フェイルセイフ機能を持ち,必要時には各ブレードを即座に 90 度に動かし,ブレーキをかける.この機能は,単翼の故障時でも甚大な被害を避けるため,各ブレードで独立してなければならず,またその電力源

	を系統電力に頼ってはならない. ▪ ブレードピッチ角は,時にブレード毎に異なった角度に調整され,風力発電機のその他部分への空力荷重を最小化する場合がある. ▪ ピッチシステムの電源と制御信号は,増速機[T1.4]と主軸[T1.3]の中空穴を通って伝達される.
要素	油圧式ピッチシステム[T2.4.1] または 電動式ピッチシステム[T2.4.2]

T2.4.1 油圧式ピッチシステム	
概要	油圧式駆動装置によりブレードのピッチ角を調整する.
業者例	AVN Hydraulic, Bosch Rexroth, Fritz Schur, MOOG, Parker
要点	▪ 駆動装置に油圧式リニアシリンダを使い,通常比例弁により制御する.これらの駆動装置は,ハブに耳軸を介して据え付けられ,またブレード軸受の(回転)内輪にプレートにより据え付けられる. ▪ 最大圧力は,250bar 程度でシステムの総質量は 3 トンに及ぶ. ▪ 系統電力が無くても安全停止が出来るように,蓄電池を補助電源として備える. ▪ メイン油圧タンクは,通常ナセル[T1]内に配置され,圧力管路は,制御信号と制御電源と共に増速機[T1.4]と主軸[T1.3]の中空穴を通る.
要素	▪ 油圧ユニット ▪ 油圧アクチュエータ ▪ 回転ユニオン ▪ 分岐管 ▪ 蓄電池 ▪ ホース ▪ 電気スリップリング

T2.4.2 電動式ピッチシステム	
概要	電動ギアモータによりブレードのピッチ角を調整する.
業者例	SSB, MOOG, MLS
要点	▪ 5MW 基用には,最大出力 100kW 程度の高速 DC 電動モータが使われる. ▪ このモータは,減速ギアボックスを介して,小歯車がブレード軸受の内輪または外輪とかみ合って,ブレード軸受を操作する. ▪ 系統電力が無くても安全停止が出来るように,単純な安全機構では,DC モータに接続されたバッテリーを補助電源に使う. ▪ ブレードピッチ角は,ピッチ駆動モータに搭載されたアブソリュートエンコーダにより測定する. ▪ ピッチシステムの電気部品は,盤上に配置するか,直接ハブ上に設置する. ▪ 5MW 基用の総質量はおよそ 5 トンに及ぶ.
要素	▪ モータ ▪ ギアボックス ▪ 電気盤 ▪ バッテリー ▪ バッテリー充電器 ▪ 位置センサ

T2.5 スピナ	
概要	スピナは,ハブを外部環境から保護し,メンテ時にはハブとブレードへのアクセスを提供する.
コスト	5MW 基 ≒260～390 万円(£20-30k) (サイズと設計による)
業者例	ガラス繊維製スピナ: Bach Composites Industry, Eikboom
要点	▪ 一般に,スピナはセクション分けしたガラス繊維を,メッキ鋼材を使ってボルト結合するが,鋼材製のスピナもある. ▪ ブレード軸受を外部環境から保護するため,ブレード周りにガラス繊維製の裾をつけることがよくある. ▪ スピナとハブの間に,人員アクセス用のスペースが必要となる場合がある. ▪ スピナ設計時には,ハブ内と周りのメンテ作業を考慮する. ▪ 大型風力発電機の場合,スピナ直径は 6m 程度にも及ぶ.
要素	▪ ガラス繊維成形 ▪ 成形加工鋼材フレーム

T2.6 ロータ付属システム	
概要	付属システムには軸受への自動潤滑剤供給等を含み,状態監視や制御を行う.
コスト	≒40～130 万円(£3-10k) (スコープによる)
業者例	▪ 自動潤滑システム: Lincoln, SKF ▪ ブレード負荷測定システム: Insensys
要点	▪ 過去 10 年間で多くの風力発電機メーカーが,ブレード軸受[T2.3]の自動潤滑を採用しいている.中央潤滑ポンプから計量分配システムを通して,軸受円周上へ毎日一定量の潤滑剤が送られるようになっている.システムから分離した潤滑剤は,排出口から回収されシールの過圧を防ぐ.

	▪ 最新の風力発電機では,ブレード負荷を測定し,ピッチ制御により負荷制御を行う付属システムもある. ▪ ハブ内には照明やその他メンテ補助機能も備え付けることがある.
要素	▪ 自動潤滑システム ▪ ブレード負荷測定システム ▪ メンテ補助機能

T2.7 成形加工鋼材	
概要	▪ 成形加工材はブレード軸受の補強と,油圧式ピッチシステムとの接続に使われる. ▪ その他にもメンテ作業時の防護用途やブレードからナセルまでの照明路としても使われる.
コスト	≒26～260 万円(£2000-20k) (設計による)
業者例	多くの加工業者が存在する.
要点	▪ 補強プレートは,円周上にボルト穴を有するブレード軸受と同じ直径の円盤で,中央は中空となっていてハブから翼根[T2.1.2]へのアクセスを提供する.これら鋼材には溶射と塗装が施されている. ▪ その他の用途は,侵食防止用にメッキ塗装された成形鋼材が使われる場合がある.
要素	▪ 成形鋼材 ▪ 表面処理

T3. タワー	
概要	タワーは,一般に管状鋼材の構造体で,ナセルを支持する.また,ナセルへのアクセスとなり,電気・制御機器を収納する.
コスト	5MW 基 ≒1.3 億円(£1million) (タワー高さによる)
業者例	風力発電機メーカー, Ambau, BiFab, Bladt, KGW, SIAG, Skykon
要点	▪ 風力発電機メーカーの設計に基づき,加工業者が無償支給材(鋼材と内部材料の両方)を使って製造することが多い. ▪ 各タワーの高さは,およそ 80m で質量は 200～400t(内 90%は鋼板で,残り 10%の殆どはフランジ)である. ▪ タワーは,一様にテーパ状で,5MW 基用では頂部直径が約 4～5m,底部直径が約 6m ある. ▪ 設計時の検討事項は,疲労・終局荷重と固有振動周波数である.沖合に設置される洋上用タワーには,陸上用の輸送費による寸法制限を受けない. ▪ タワー高さは,プロジェクト毎に異なり,計画時の制約や,より高いタワーによって増加するコストと発電量の比較検討を行う. ▪ 陸上設置では,特に高いタワーの場合コンクリートまたはコンクリート鋼材のハイブリッドタワーが使われる場合もある.一般に洋上用タワーはそこまで高くないが,特にコンクリート基礎にはコンクリートタワーが使われる可能性がある.
要素	▪ 鋼材 [T3.1] ▪ 人員アクセスと救命装置 [T3.2] ▪ 調整式ダンパ [T3.3] ▪ 電気システム [T3.4] ▪ タワー内部照明 [T3.5] ▪ 留め具 [T1.13]

T3.1 鋼材	
概要	タワー材には,鋼材が最もよく使われる.
コスト	鋼材価格は,比較的流動的である.風力発電機メーカーが無償供給するが多いが,タワー供給業者が仕入れる場合もある.
業者例	Corus, Dillinger Hütte, Ilsenburger, Rukki, Salzgitter, Siegthaler, Thyssen
要点	▪ タワーの製造は,鋼板を切削・圧延加工し,溶接して通常 3m 程度の“管”にする.それらを溶接して,例えば 40m 程度の両端にボルト付けされたフランジを持つタワーセクションを作る. ▪ 鋼板は,通常 S355J2G3 NL グレード,厚み 10～70mm のものが使われる. ▪ 鋼板厚みは,それぞれの“管”によって異なり,上部ほど 0.5mm 程度まで薄くなる.厚さは,基礎を含む支持構造物の全体固有振動周波数と,各”管”ごとの疲労寿命,またその他設計因子を考慮して最適値を選ぶ. ▪ フランジは,通常,S355 EN10.11302 NL 鋼材を鍛造・圧延加工し,溶接疲労強度を高めた突合せ溶接フランジを使う.時にタワー頂部のフランジは,溶接後に加工し,ヨー軸受との接続に必要な平坦性を許容値以内にする必要がある. ▪ その他の鋼材用途として,タワー底部のドアフレームがあり,通常 S235 J2G3 NL グレードを使う.即ち,人員アクセス[T3.2]のため大きく切り落とした,疲労強度的に重要なこのタワー底部を,フレームにより埋め合わせる必要がある. ▪ タワーセクションは,成形加工後,ショットブラスト仕上げをして塗装し,その他内部部品を取

	付け輸送・保管する. ▪ 表面処理は,定期的に行い,金属溶射に続いて厚膜形エポキシ樹脂塗装,ポリウレタン塗装を行う(合わせて約 250μm).
要素	▪ 鋼板 ▪ 鋼製フランジ ▪ 表面処理

T3.2 人員アクセスと救命装置	
概要	殆ど全てのメンテ作業で,ナセルへの安全なアクセスが必要となる.梯子は常に必要だが,殆どの大型風力発電機はエレベータも備える. 更に,洋上風力発電機は洋上救命装置を常備し,天候悪化により風力発電機から離れることが出来なくなった場合に備えている.
コスト	コストは,タワー高さと安全衛生要求事項による.
業者例	▪ エレベータ: Avanti, Hailo, Power Climber Wind ▪ 落下防止装置: Avanti, Latchways, Limpet Technology, Uniline Safety
要点	▪ 一般的に,エレベータは約 20m/min で運行し,重量制限は 240～500kg 程度である.メンテ作業を簡単にするため,より大きな重量制限のエレベータを設置することもある. ▪ 梯子には,通常アルミが使われる.落下防止装置をレール上,もしくは梯子自体にワイヤを備え,メンテ人員は常に案全帯で繋ぐ. ▪ 休憩場所と落下防止装置用に,チェッカープレート付のアルミ製プラットフォーム,もしくは支持鋼材を安全衛生要求事項に従って設置する. ▪ 救命装置には,遭難信号灯,また最低でも 3 日分の飲食物やその他を含む.
要素	▪ 落下防止装置 ▪ 梯子 ▪ エレベータ ▪ プラットフォーム

T3.3 調整式ダンパ	
概要	タワー負荷を制限するため,タワー頂部に大きなダンパを取り付けることがある.
コスト	≒総タワー費の数% (調整頻度と減衰量による)
業者例	通常汎用品から製造される.
要点	▪ ダンパは,一般に液体で満たされている.液面揺動は,ロータの空力荷重変動から生じるタワーの疲労荷重を最大限に減らすように,慎重に調整される. ▪ ダンパにより,風力発電機シャットダウン時の過度荷重を抑制することもできる.
要素	▪ 支持構造 ▪ 液体収納容器 ▪ ダンパ液(通常,水ベース)

T3.4 電気システム	
概要	全ての風力発電機は,タワー底部に制御盤を備え,タワーを登らずにメンテ人員が現場で制御できるようになっている.多くの風力発電機は,タワー底部のスペースに種々のパワーテイクオフ(動力取出装置)を備え付ける.
業者例	通常,据付け時に風力発電機メーカーがタワー製造業者へ供給する.
要点	▪ タワー底部へのアクセスは,ドアからのみ可能である.変圧器等をタワー底部に設置するのであれば,ドアを介して交換ができなければならない. ▪ タワー底部にデリケートな電気システムを設置する場合,空調が必要になる.
要素	▪ 制御システム [T1.7] ▪ パワーテイクオフ [T1.6] ▪ 空調

T3.5 タワー内部照明	
概要	ナセルとタワーへの人員の安全なアクセスのため,照明を設置する.
コスト	コストは,タワー高さと安全衛生要求事項による.
業者例	全部品は,汎用品である.
要点	▪ 照明器具は,梯子やプラットフォームに設置される.また,場所によりタワー壁部への応力集中を避けるため,溶接ではなく磁石を使ってタワー壁部に設置する. ▪ 系統損失時には,UPS が非常灯と通常灯の一部へ電力を供給する.
要素	▪ 照明器具 ▪ 低圧線 ▪ ケーブルトレイ ▪ 非常時バックアップ(UPS 含む)

5. その他設備

【B0. その他設備】	
概要	ウィンドファームに関する風力発電機以外の全ての設備を対象とする.
コスト	500MW ≒520.0～650.0 億円 (￡400-500million:30%)
要点	UK ラウンド3の規模,水深,離岸距離が意味することは,コストに対して非常に多くの不確定要

	素があり,経験や時間と共にかなりの範囲でコスト削減の可能性がある.
要素	▪ ケーブル [B1] ▪ 風力発電機基礎 [B2] ▪ 洋上変電所 [B3] ▪ 陸上変電所 [B4]

B1. ケーブル	
概要	風力発電機から陸上へ電力を輸送する.
コスト	500MW ≒104.0 億円(£80million)
業者例	以降の関連項目を参照
要点	▪ ラウンド3の総ケーブル長は,8,000km 程度に及ぶ(HVAC: 3,000km,HVDC: 5,000km). ▪ 押出し製造ラインは,一ラインで年間約 200km のケーブルコアを製造できる(およそ 40cm/min に相当).ケーブル工場のライン新設には,ある程度の立ち上げ期間を要するため,新規投資が直ぐに行われなければ,2015 年以降,洋上風力とその他インフラ設備に対する製造キャパシティが不十分との懸念がある. ▪ 海底ケーブルは,工場から直接敷設船に積載する必要がある. ▪ 洋上風力用の標準海底ケーブル仕様は,撚り線導体,遮蔽層,XLPE(架橋ポリエチレン)絶縁体,がい装から構成する,3 心 AC ケーブルである.
要素	▪ 送電ケーブル [B1.1] ▪ アレイケーブル [B1.2] ▪ ケーブル防護 [B1.3]

B1.1 送電ケーブル	
概要	洋上と陸上変電所を繋ぐ.
コスト	500MW ≒78.0 億円(£60million)
業者例	ABB, Nexans, NKT, Prysmian
要点	▪ AC 送電は,3 心だが,2 極の HVDC 送電は 2 つの単心高圧ケーブルからなる.このため同容量の場合,HVDC ケーブルの方が軽く,敷設費が安くなる. ▪ HVAC ケーブルは,長距離では無効電力損失が非常に大きい.長距離送電には,ケーブル全容量を有効電力に変換できる(無効電力が無い),HVDC ケーブルを使う. ▪ HVDC 変換所は,高額なため,送電距離が 50mile(80km)以上無ければ,HVDC ケーブル使用によるコストメリットが無い. ▪ ケーブル構成は,導体上に絶縁体とがい装を積層する.これらは敷設に耐える高い耐化学性,耐摩擦性,引張り強度を有してなければならない. ▪ AC 送電ケーブルの定格は,通常 132kV 程度だが,245kV のケーブルも使われており,3 心一組の送電容量は 350～450MW である.一方,HVDC ケーブルの送電容量は,二極の単心ケーブルで 1200MW あり,時にこの容量は更に増える. ▪ 132kV 送電ケーブルの質量はおよそ 60kg/m である.
要素	▪ 導体 ▪ 絶縁体 ▪ 機械的・化学的防護

B1.2 アレイケーブル	
概要	風力発電機と洋上変電所を繋ぐ.
コスト	500MW ≒26.0 億円(£20million)
業者例	ABB, JDR Cable Systems, Draka, Nexans, NKT, NSW, Parker Scanrope, Prysmian
要点	▪ 一つの風力発電機につき、およそ 1km のアレイケーブルが必要になる(風力発電機容量と風力発電機間距離による). ▪ インターアレイケーブルの定格は、一般に 33～36kV だが 66kV ケーブルの使用も検討されている. ▪ 33kV ケーブルの質量は,およそ 20kg/m である.
要素	▪ 導体 ▪ 絶縁体 ▪ 機械的・化学的防護

B1.3 ケーブル防護	
概要	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防護する.
コスト	500MW ≒9,100 万円(£700k)
業者例	Trelleborg, Tekmar, Polyurethane Engineering
要点	▪ 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わけでは無い. ▪ 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,クランプによりケーブルをモノパイルの引込穴へ導く.
要素	▪ J チューブシール ▪ 曲がり止め ▪ 補強材 ▪ ケーブルマット

B2. タービン基礎	
概要	風力発電機を支持し,且つ人員用のアクセスにもなる.
コスト	500MW ≒390.0 億円 (£300million:100 基.水深により変動) (その他設備の内,最大コストを占める)
業者例	▪ 設計: Aarsleff, Grontmij, LICEngineering, MT Højgaar, OWEC, Ramboll, SLP ▪ モノパイル: Bladt, SIF/Smulder ▪ ジャケット,その他鋼構造体: Aker Solutions, BiFab ▪ コンクリート: Aarsleff, NCC
要点	▪ 昨今の基礎構造は,殆どモノパイルであり,海底に打込んで設置,またはドリルソケット内に据え付けてグラウチングする. ▪ 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. ▪ 浅海で海況がそれほど厳しくない場合,コンクリート製の重力式基礎構造の使用が成功している.しかし 3,000 トンのコンクリート及びバラストの使用により,コストは比較的高くなる. ▪ コンクリート材料費は,鋼材費に比べて流動性はかなり低いため,鋼価格が高い時にはコンクリート価格の低い場合が多にしてある. ▪ 風力発電機の容量が大きく,且つ水深が深い場所では,モノパイルのコストは著しく増加する.水深 30～35m 以深は,トリポッドや,特にジャケット方式がモノパイルに代わって,コスト競争力に優れる. ▪ トランジションピースを含むジャケットまたはモノパイルの質量は,5MW 基,水深 20m で約 600 トン程度である.水深 30m ではジャケットの質量は約 800 トンとなり,モノパイルはそれよりもかなり重い.

	▪ 大型風力発電機の固有振動周波数の要件を満たすためには,剛性のあるジャケットがモノパイルよりも優れている. ▪ 実証試験が行われている他の基礎構造は,サクション式である. ▪ 大水深では,浮体式構造が必要になるが, ラウンド 3海域では殆どその必要は無い.
要素	▪ 基礎構造体 [B2.1] ▪ トランジションピース [B2.2] ▪ 人員アクセスシステム [B2.3] ▪ J チューブ [B2.4] ▪ 洗掘防止材 [B2.5] ▪ 犠牲陽極 [B2.6]

B2.1 基礎構造	
概要	主要基礎構造体は,海底とトランジションピース間のインターフェースとなる.
コスト	基礎費用に含まれる.
業者例	B2.を参照
要点	▪ 最近のモノパイルは,一般的に長さ 45m,直径 4.5m,質量 300 トン程度である.パイルの厚みは種々異なるが,平均して 60mm 程度である.通常,水深と風力発電機容量の増加に伴い,これらの寸法も増加する, ▪ 製造は簡単で,圧延加工と管の溶接以外には殆ど無い. ▪ 一方で,ジャケット方式の製造工程は非常に多くなる.現在の供給業者の関心は,石油・ガス業界用と合わせて生産し,より多くのジャケット構造を迅速かつ最小のスペースと人員で製造することにある. ▪ 製造効率をあげるには,一定直径のモジュール式ユニットと,特別に製造された結合部と事前に準備された管状物を使う. ▪ コンクリートを使用する基礎の製造工程はかなり異なる.重力方式は時にバージ上で製造され,その後の設置海域への輸送に備える.
要素	▪ 鋼板(モノパイル方式) ▪ 鋼管と鋳造鋼製結合部(ジャケット方式) ▪ 鉄筋とコンクリート(重力方式)

B2.2 トランジションピース	
概要	トランジションピースは,基礎とタワーを海面上 20m 程度の位置で連結する.
コスト	≒6,500 万円(£500k) (一般に基礎の供給契約に含まれる)
業者例	通常,基礎供給業者または沿岸部に施設を持つタワー供給業者が製造する.

要点	▪ トランジションピースは鋼製である. ▪ 通常,基礎に対する垂直性を確保するためグラウチングする. ▪ 表面保護(特に波の飛沫帯)が重要である. ▪ 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及びJチューブの支持構造となる. ▪ 風力発電機の変圧器や人員避難場所を設置する場合もある.
要素	▪ リング状の陽極,人員アクセス,プラットフォームとJチューブを含む鋼鉄製品 ▪ 船舶とのドッキングインターフェース ▪ ダビットまたは同等の軽クレーン

B2.3 人員アクセスシステム	
概要	人員に対して風力発電機プラットフォームへの安全なアクセスを提供する.
業者例	トランジションピースの一部.その他の関連設備は補助船舶の一部.
要点	▪ 悪天候により風力発電機へのアクセスが制限されると,必要不可欠なメンテ作業の遅れ,更には収益の逸失に繋がる. ▪ 現在の標準的な船舶は,波高 1.5m 以下でのみ乗員を降ろすことができる. ▪ ヘリコプターでアクセスできる風力発電機もあるが,常用すると費用も高く,また安全や健康にも留意しなければならない. ▪ 幅広い海況でのアクセスが可能で,ヘリコプターの使用を減らす新たなアクセスシステムの開発が行われている.例えば,船舶の波揺れ補償システム,船舶用油圧式エレベータ,風力発電機プラットフォームへのクレーンの設置等がある. ▪ Carbon Trust 社がこの方面の開発を援助している.

B2.4 Jチューブ	
概要	J チューブは,その中にインターアレイケーブルを通し,基礎,更には風力発電機へケーブルを導く.
コスト	トランジションピース費用に含まれる.
業者例	通常,基礎供給業者または沿岸部に施設を持つタワー供給業者が製造する.
要点	▪ 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.[B1.3]

B2.5 洗掘防止材	
概要	基礎自体の存在により,基礎周りの流れが増速され引き起こされる,海底の洗掘を防止する.
業者例	Peter Madsen, SSCS, その他岩石の設置に適した装備の船舶を持つ業者.
要点	▪ 一般に岩石が洗掘防止材として使われる. ▪ 直径 6m のモノパイル方式では,洗掘防止材の範囲は直径 25m に及ぶ. ▪ 洗掘防止用の岩石が,イセエビやカニの生息地となることが多々ある. ▪ 時に,岩石が海底堆積土内に沈むこともあるため,洗掘防止用藻類マットやその他の代替品の使用が必要になる. ▪ 定期検査を行い,洗掘防止効果を確認し基礎構造の移動リスクを低減する.洗掘深さはモノパイル直径を超える場合もある.洗掘深さの増加率は時間と共に小さくなり,最初の 1 年程度で最終的な洗掘深さの半分に達する. ▪ 予期される洗掘レベルに対応するための,初期洗掘防止材への追加・修繕コストは,時に設計費用を上回る. ▪ ジャケット構造は洗掘の影響を受けにくいとされるが,各辺の洗掘が構造物全体の洗掘と連成する.
要素	▪ 岩石 ▪ 洗掘防止マット ▪ 配置方法 ▪ 検査

B2.6 犠牲陽極	
概要	犠牲陽極は,異なった金属のイオン化傾向の差を利用して腐食を防止する方法である.反応しやすい金属は保護金属より酸化し易く,先に腐食し始める.
コスト	腐食防止は低コストで,且つ膨大な修繕費を回避できる.
業者例	多くの供給業者が洋上石油・ガス産業に存在する.
要点	犠牲陽極は鋼製構造体に取り付けられた亜鉛／アルミ棒で構成される.

B3. 洋上変電所	
概要	洋上変電所は,陸上への送電前に昇圧して,電力損失を低減する.
コスト	≒65.0 億円/変電所(£50million/substation)
業者例	▪ 電気システム: ABB, Siemens T&D, AREVA T&D

	▪ 構造体: Bladt, Harland and Wolff, Mcnulty Offshore, Heerema ▪ 構造体設計: Atkins, Ramboll
要点	▪ 変電所は,通常ウィンドファームの系統接続契約の一要素として納入される. ▪ 変電所質量は,2,000 トン程度.プラットフォーム高さは海面上約 25m で面積は約 800m^2. ▪ 一般に,一つの変電所で 500MW 規模のウィンドファームからの入力を処理できる.送電安全性を高めるため,二つ以上の変電所が設置される場合もある. ▪ 殆どの変電所は,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が,通常僅かに機器を備えつけた作業場は存在する.海岸から遠く離れた地点に変電所が建設される場合,避難所や一時的・永久的居住区等の追加機能を備える場合がある.
要素	▪ 電気システム [B3.1] ▪ 付帯設備 [B3.2] ▪ 構造体 [B3.3]

B3.1 電気システム	
概要	各風力発電機からの出力を統合し,陸上送電に備えて,例えば 33kV から 132kV へ昇圧し,直流送電の場合は DC へ変換する.
コスト	≒39.0 億円/変電所(£30million/substation)
業者例	▪ ABB, Siemens T&D, EDF, Areva T&D ▪ 変圧器: 上記＋Tironi
要点	▪ 陸上変電所からの距離が約 90km 以上となると,送電損失を減らすため HVDC(高電圧直流給電)を採用する. ▪ 現状の HVDC システムは,各変電所間のみでの操作となり,それぞれの変電所(陸上と洋上)にコンバータが必要となる. ▪ 変電所メーカーは,それぞれ独自技術の HVDC システムを持つ. ▪ 変電所の主な構成要素は, - 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.通常の洋上変電所は,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: 電気機器と変電所構造体を電気的に接続する. - 制御盤,ケーブルトレイ・通路・クリート・支持
要素	▪ 補助電源 ▪ 開閉装置(スイッチギア) ▪ 変圧器(AC の場合) ▪ コンバータ(DC の場合) ▪ リアクトル ▪ 接地材 ▪ 制御盤,ケーブルトレイ・通路・クリート・支持

B3.2 付帯設備	
概要	変電所とウィンドファームの運転とメンテナンスを補助する.
コスト	変電所の一部として供給される.
業者例	▪ クレーン: Kenz Figee ▪ 防火・防爆装置: Mech-Tools (鋼材用), SCS (複合材用) ▪ 一般設備: 変電所近くの供給業者
要点	▪ 変圧器は,油と冷却材を擁しており,火災の危険があるため,防火・防爆装置が必要となる.プラットフォーム上の如何なる地点の火災からも変圧器を護る必要がある.殆どの変電所には,予備を含めて通常 2 台の変圧器が備えられている.全ての居住施設及び避難ルートも防護される.全ての防火装置は特注品を使う. 一般に,鋼材防護には絶縁,波形,耐火性を持つ厚さ 20cm に及ぶ 2 重皮膜を使う.その他構造品に使う防護材は,より薄い(4～15cm).変圧器間は 2 重に防護する. ▪ 作業船からの物品昇降用に,2.5 トン程度のクレーンを備えつける. ▪ その他にも,制御室,居住施設,水や燃料タンク,低圧電源,航海補助装置,安全システムが必要となる.
要素	▪ 防火・防爆装置 ▪ クレーン ▪ 制御室 ▪ 居住施設(一時的または永久的施設,避難場所) ▪ 水タンク ▪ 低圧電源 ▪ 航海補助装置 ▪ 燃料タンク

	▪ 安全システム

B3.3 構造体	
概要	電気システムやその他システムを支持し,また防護する.
コスト	≒13.0 億円/変電所(£10million/substation)
業者例	▪ 構造体: BiFab, Bladt, Harland and Wolff, Heerema, McNulty Offshore ▪ ヘリポート: Bayards, Aluminum Offshore, その他石油・ガス産業の供給業者
要点	▪ 構造体は,多くの安全性と機能を併せ持つように複雑に設計される. ▪ 小規模変電所の基礎には,風力発電機と同等のものが使われる場合があるが,負荷パターンは異なる. ▪ 大規模変電所の基礎には,複数箇所のパイルか,ジャケットの使用が好ましい. ▪ 通常ヘリポートを備える.ヘリポートには侵食を抑え質量を最小化するため,アルミが良く使われる.離着陸時の事故により,燃料タンクが破裂し数百リットルのジェット燃料が漏れ出す可能性があり,厳格な安全規則と,統合的消火システムを規定する.通常,ただ一人の乗員移送にヘリコプターは使わない. ▪ 船舶による変電所へのアクセスは,風力発電機へのアクセスと似ている.
要素	▪ 基礎 ▪ ヘリポート ▪ プラットフォームアクセス

B4. 陸上変電所	
概要	変圧器を介して,系統電圧,例えば 400kV に昇圧して接続する.HVDC 送電ケーブルを使用している場合,3 相 AC へ変換する.
コスト	≒52.0 億円(£40million/substation)
業者例	通常,洋上変電所[B3]と同じ供給者と契約を結ぶ.一般に陸上変電所はウィンドファーム所有者と系統運用者が共同で所有する.
要点	▪ 多くの電気機器仕様は,洋上変電所のものと似ている. ▪ 洋上変電所と同様に,重量と空間による制限を受ける. ▪ 系統への入力を監視する計量装置を備える.
要素	▪ 洋上変電所と同様の電気システム [B3.1] ▪ 洋上変電所に比べて単純な建屋やその他設備 [B3.2] ▪ 計量装置

6. 建設と試運転

【I0. 建設と試運転】	
概要	陸上・洋上の両作業を含む,風力発電機とその他全ての設備の建設と試運転.
コスト	500MW ≒520.0 億円(£400million:26%)
業者例	▪ 管理: Fluor, KBR ▪ 建設: 以降の関連項目を参照.
要点	▪ 昨今の一般的な建設プロセスは,始めの 1 年間で,基礎とケーブルを別々に設置し,翌年に風力発電機の設置・試運転を行う. ▪ UK ラウンド3は離岸距離が遠く,水深が深いため,その他の建設戦略を採用する可能性が高い.コスト削減の余地が著しくある. ▪ 建設作業が可能な季節の幅は広がっているが,同時に悪天候によるダウンタイムも増えている. ▪ 各事業者が取る建設戦略は異なるが,通常,ケーブル引入れ(送電,アレイ),変電所建設,基礎設置,風力発電機設置の下請契約を結ぶ.
要素	▪ 送電ケーブル引入れ [I1] ▪ 基礎設置 [I2] ▪ アレイケーブル引入れ [I3] ▪ 港湾施設 [I4] ▪ 洋上変電所建設 [I5] ▪ 海上補助 [I6] ▪ 風力発電機設置 [I7] ▪ 試運転 [I8]

I1. 送電ケーブル引入れ	
概要	ケーブルを敷設し,陸上と洋上変電所を繋ぐ.
コスト	500MW ≒104.0 億円(£80million) (離岸距離と海底地質による)
業者例	Global Marine Systems, Nexans, Prysmian, Subocean, Visser & Smit
要点	▪ 海底での接続を避けるため,出来るだけ長いスパンで敷設し,時に長さ 70km にも及ぶ. ▪ 通常,漁船や船の錨等による干渉を避けるため,海底地中 1.5～3m に埋設する. ▪ 様々な海底地質条件下で,ケーブルの敷設と埋設を同時に行う. 通常,ケーブル埋設機(Cable Plough)[I1.2.1]を使用する. ▪ 一方で 2 段階の敷設過程を取ることもある.その場合,ケーブルを海底に敷設した後,トレンチ掘削船[I1.1]に搭載されたトレンチ掘削 ROV[I1.1.1]によりケーブルを埋設する. ▪ 送電ケーブル敷設作業は専用船舶数に限りがあり,また専門技術を擁する企業が殆ど無

	いため,建設作業全体への重大な制約と見られている. ▪ 敷設中および敷設後に起きるケーブル損傷は,幾つかの重大な保険金請求を引き起こすため,難作業であることが証明されている.
要素	▪ トレンチ掘削船 [I1.1] ▪ 送電ケーブル敷設船 [I1.2]

I1.1 トレンチ掘削船	
概要	海底ケーブル敷設後に埋設を行う.
コスト	チャーター費 ≒1,000～1,200 万円/日 (£75-90k/day)
業者例	多くの洋上船舶操業者が保有する.
要点	▪ 通常,全長 90m 程度の DP2 クラス船舶を使用する. ▪ 敷設後の埋設は,トレンチ掘削 ROV[I1.1.1]によって行い,海底を流動化させケーブルを必要深さまで沈める.高圧ジェッティング装置を使う.
要素	トレンチ掘削 ROV [I1.1.1]

I1.1.1 トレンチ掘削 ROV	
概要	ケーブルを埋設するトレンチを掘削する.
コスト	トレンチ船舶費に含まれる.
業者例	▪ 掘削: トレンチ掘削業者 ▪ 製造: IHC Engineering Business, Perry Slingsby, SMD
要点	▪ 高圧ジェッティング装置により海底を流動化させ,ケーブルを必要深さまで沈める. ▪ 海底が泥質や岩盤の場合,トレンチカ.ッターを使う.
要素	▪ 電源 ▪ 推進装置 ▪ 制御装置 ▪ 高圧ジェッティング装置 ▪ 照明装置 ▪ トレンチカッター

I1.2 送電ケーブル敷設船	
概要	洋上・陸上変電所間にケーブルを敷設する.
コスト	チャーター費 ≒1,000～1,600 万円/日 (£75-125k/day) (船舶サイズ・能力による)
業者例	Global Marine Systems, Nexans, Prysmian, Subocean, Visser & Smit
要点	▪ 過去には,ケーブル敷設はターンテーブル,張力調整装置,引入れ作業員によりバージ上から行った. ▪ Thanet ウィンドファームのアレイケーブルは,自動船位保持船舶(DP2 クラス)により敷設された.自動船位保持船舶は,バージに比べてより短い準備・敷設時間で敷設でき,またより厳しい海況や風況でも静止状態を維持できる. ▪ 送電ケーブルとアレイケーブルの敷設には,同じ船舶を使うことが時々あるが,一般に送電ケーブル敷設船は,長距離ケーブル長に対応する大きなターンテーブルを備える.また海岸に近い場所での敷設では,浅喫水船舶であることが必要になる場合がある.
要素	▪ ターンテーブル,ケーブル埋設機(Cable Plough)[I1.2.1],水中作業 ROV[I1.2.2] ▪ ケーブル埋設機(Cable Plough)の着水,回収用の昇降装置

I1.2.1 ケーブル埋設機(Cable Plough)	
概要	ケーブル敷設と埋設を同時に行うため,ケーブル埋設機を使用する.
コスト	▪ チャーター費 ≒ケーブル敷設船に含まれる 購入費 ≒13 億円(£10million)
業者例	▪ 埋設: ケーブル敷設業者 ▪ 製造: IHC Engineering Business, SMD
要点	ケーブル埋設機は,海底地中 3～4m にケーブルを埋設する.一般に,海底で埋設機を引っ張るために必要な牽引力は約 150 トンである.バージを使う場合,タグボートで牽引する.自動船位保持船舶を使う場合,適切な係船柱を備えた特別船が必要となる.
要素	▪ 引入れ先端側に高圧ジェットノズルを装備するものもある. ▪ 埋設機を必要深度に維持する,そり(Sled)

I1.2.2 水中作業 ROV(遠隔操作無人探査機)	
概要	水中作業 ROV の作業範囲は広く,例えば J チューブや基礎等の海底構造物の検査,J チューブへのケーブル引入れ,パイル・グラウチング作業の監視等がある.
コスト	作業内容により異なる.
業者例	▪ 埋設: ケーブル敷設業者 ▪ 製造: Perry Slingsby, Saab Seaeye, SMD
要点	ケーブル敷設者はコスト削減のため,ROV の使用を避ける方法を探す.しかし ROV の使用は,大水深では特別な機器や長時間減圧により高額となる潜水士の代わりとなり得る.
要素	▪ 遠隔カメラ ▪ 電源 ▪ 推進装置

	▪ 制御相落ち ▪ 照明装置

I2. 基礎設置	
概要	基礎を輸送し設置する.手順は採用した基礎構造により異なる.モノパイルは通常ジャッキアップ船から打込まれるが,海上船からドリル設置する場合もある.ジャケットやトリポッド基礎は,クレーン船により設置する.重力基礎は,クレーン船または専用バージにより設置する.
コスト	500MW ≒130 億円(£100million) (100 基)
業者例	A2SEA, Ballast Nedam, Bilfinger Berger, Fluor, Geosea, Beluga-Hochtief, Jack-Up Barge, Marine Construct International, MPI Offshore, MT Højgaard, Per Asleff, Seajacks, Scaldis Salvage, SLP
要点	▪ モノパイル(直径 6m 以下)はハンマーで海底に打込み,その後トランジションピースの設置と基礎内へのケーブル引入れを行う. ▪ 5MW 以上の風力発電機では,通常鋼製のジャケット,トリポッドもしくはコンクリート製の重力基礎が使われる. ▪ ジャケットとトリポッド基礎の設置は,まずガイドパイルを打込みその上に基礎を設置しグラウチングする. ▪ 重力基礎は他に比べて非常に重く(3,000 トン),設置位置で着水し沈める.海底は設置前に平らにしていなければならない. ▪ 洋上変電所の基礎は,風力発電機と同様の方法で設置され,その大きさは非常に大きい. ▪ ケーブルは,海底から J チューブを通って基礎台座まで引き上げられ,風力発電機内に引き込まれる.
要素	基礎設置船 [I2.1]

I2.1 基礎設置船	
概要	基礎を波止場の加工施設から現場まで輸送する.自己推進式ジャッキアップ船,曳航ジャッキアップバージ,sheerleg クレーン船またはカタマラン式クレーン船等がある.
コスト	▪ チャーター費 ≒2,000 万円/日(£150k/day)(建設費 169 ～ 195 億円程度(£130-150million)のサイトの特別ジャッキアップ船) ▪ チャーター費 ≒3,500 万円超/日(£270k/day)(クレーン船)
業者例	▪ 操業: A2SEA, Ballast Nedam, Beluga-Hochtief, Geosea, Jack-Up Barge, Marine Construct International, MPI Offshore, DBB, Scaldis Salvage, Seajacks ▪ 建造: 通常,極東地域の業者
要点	▪ 昨今のモノパイル設置に使われる船舶は,自己推進式ジャッキアップ船である(例:MPI Resolution).仕様例は,全長 140m,船幅 45m,喫水 6m,最大航海速度 11 ノットである. ▪ 水深 40m までジャッキアップできる. ▪ クレーン船(例:Samson, Rambiz, Stanislav Yudin)は,ジャケット,トリポッド,重力基礎の設置に使われる. ▪ 船舶は,設置する基礎構造の種類によって種々の船上装置を備え付けている. ▪ モノパイル基礎の打込みには,船上ハンマーとアンビルシステムを使う.海底状況や環境制限により打込みが出来ないところでは,船上ドリルシステムを使い,その後グラウチングする ▪ モノパイルは,upending tool を使って吊上げ,回転,下降し海底に位置決めする. ▪ パイルの打込ガイドには handling tool を使う. ▪ 新設ジャッキアップ船の船上クレーン容量は,一般に 1,000 トン程度である.Rambiz のような,より大きなクレーン船のクレーン容量は 3,000 トンある.
要素	▪ 船上クレーン ▪ 自動船位保持 ▪ 推進システム ▪ ジャッキアップシステム ▪ 特別基礎設置装置

I3. アレイケーブル敷設	
概要	風力発電機と洋上変電所間に電力ケーブルを敷設する.
コスト	500MW ≒78 億円(£60million)
業者例	CTC, Global Marine Systems, MPI, Subocean, Visser & Smit
要点	▪ ケーブルは,洋上変電所に繋がる単線ケーブルに少数の風力発電機が接続されて,クモの巣状に配置されているか,もしくは 6～10 基の風力発電機がそれぞれ鎖状に配置されている. ▪ 通常,風力発電機や変電所近くでは,ケーブル埋設機(Cable Plough)の使用はできないため,これらの近くではトレンチ掘削 ROV[I1.1.1]によりケーブルを埋設する. ▪ MPI 社は,風力発電機間距離 1km 程度のケーブルの運搬・敷設・埋設を同時に行う,遠隔

	操作海底ケーブル敷設ROV「tractor」を導入した.この ROV はトレンチカッターと高圧ジェッティング装置を装備している.
要素	▪ アレイケーブル敷設船 [I3.1]

I3.1 アレイケーブル敷設船	
概要	風力発電機と洋上変電所間に電力ケーブルを敷設する.
コスト	チャーター費 ≒850～1,200 万円/日(£65-95k/day)(サイズと容量による)
業者例	Subocean, Visser & Smit, Global Marine Systems
要点	▪ 過去には,ケーブル敷設はターンテーブル,張力調整装置,引入れ作業員によりバージ上から行った. ▪ アレイケーブルの敷設には,自動船位保持(DP2)船舶を使用する.DP2 船舶はバージに比べてより短い準備・敷設時間で敷設し,またより厳しい海況や風況でも静止状態を維持できる.
要素	▪ ターンテーブル ▪ ケーブル保管用のケーブルタンク/リール ▪ ケーブル埋設機 [I1.1.1]及びまたはトレンチ掘削 ROV [I1.1.1]

I4. 港湾施設	
概要	事前組立て拠点.ウィンドファームへの基礎供給拠点と風力発電機供給拠点は別になる場合もある.地点選定は非常に重要で,輸送時間と天候影響度を左右する.
コスト	▪ 500MW ≒13.0～19.5 億円(£10-15million) ▪ 設備投資費(CAPEX)の約 1%
業者例	UK 港湾: Barrow, Belfast, Harwich, Mostyn
要点	▪ 建設拠点港は一般に: - 最低 8ha. 製品の一時保管,事前組立が可能な港湾. - 波止場長さは 200～300m.高い耐荷重性を有し,アクセスが近い. - 海面からの上空クリアランスは最低 100m(タワーの垂直輸送が可能な高さ). - 天候制限が厳しい場所,またはさらに大規模の建設では最大 30ha.程度の追加保管場所が必要になる可能性がある. ▪ 典型的な建設拠点港は,北ウェールズの Mostyn 港である.ここは最大 300MW/年の建設をサポートできる. ▪ 風力発電機を地上に横倒しに保管する場合,広い空間を必要とする.この時,二つの風力発電機でおよそ 2ha.の空間を占める.
要素	▪ 波止場 ▪ 保管場所 ▪ クレーン ▪ 作業場 ▪ 人的施設

I5. 洋上変電所建設	
概要	波止場の製作場から変電所を輸送し,基礎上に据付ける.据付けには 1000 トン超の重量クレーンを使い,通常クレーン船によって行う.
コスト	≒13.0 億円(£10million) (変電所規模と据付け現場による)
業者例	▪ 通常,変電所の建設は供給契約に含まれる. ▪ Fluor, Hochtief, Per Asleff, Bilfinger Berger, MT Højgaard, Ballast Nedam, Geosea
要点	変電所は,港湾からバージに載せられる.基礎上への据付けは,バージが重量クレーンを備えているか,もしくは別のクレーン船によって行う.
要素	洋上変電所建設船 [I5.1]

I5.1 洋上変電所建設船	
概要	事前に据付けた基礎上に洋上変電所設置するため,輸送し吊上げる.
コスト	クレーン船チャーター費 ≒3,500 万円超/日(£270k/day)
業者例	Bonn & Mees, DBB, Huisman, Scaldis Salvage, Seaway Heavy Lift
要点	▪ クレーン船は,sheerleg かカタマラン式である. ▪ 洋上風力案件に使用されているクレーン船は Rambiz, Stanislav Yudin, Samson 等がある. ▪ クレーン容量は 900～3,000 トン超である.

I6. 海上補助	
概要	多くの船舶が建設をサポートしうる.例えば,交通船,アンカーハンドリング船,バージ,潜水支援船,ROV 支援船等がある.
コスト	チャーター費は,船舶サイズ,機能,搭乗員レベルによる.
業者例	▪ 操業: Holyhead Towing, MPI Offshore, Offshore Wind Power Marine Services, Williams Shipping, Windcat ▪ 製造: Alicat, Arklow Marine Services, Alnmaritec, South Boats
要点	▪ 建設や試運転用に人員をウィンドファームへ移送する場合,一般に 15～20m の双胴船が使われる. ▪ ROV 支援船は,80～100m の自動船位保持

	(DP2)船でムーンプールとデッキクレーンを備える. ▪ 潜水支援船の仕様は,ROV 支援船のそれと似ている.大水深長時間潜水(50m 超)を可能にする飽和潜水システムが必要となる場合もある.

I7. 風力発電機設置	
概要	▪ 風力発電機の設置は,拠点港から風力発電機部品の輸送 [I4]と,基礎上への設置から構成される. ▪ 種々の設置方法があり,タワー,ナセル,ブレードを海上で組立てる方法,または既に陸上で組立てた風力発電機を現地へ輸送する方法等がある.後者は最近では実証試験でのみ採用される.
コスト	500MW ≒182.0 億円(£140million)
業者例	A2SEA, Ballast Nedam, Geosea, Jack-Up Barge, Marine Construct International, MPI Offshore, Scaldis Salvage
要点	▪ ラウンド1,2案件では,輸送前に 1～2 枚のブレードをタワーに接続した状態で,船舶上に垂直に載せられる. ▪ 市場が発展するにつれ,特別建造船を伴う革新的な解決策が現れつつある.ある者は風力発電機を海上で組み上げ,ナセルとブレードをタワー上へ吊上げる方法を取り,他には海上での作業時間を最小化するため,陸上で組み上げた風力発電機を輸送する者もいる.
要素	▪ 風力発電機設置船 [I7.1] ▪ 風力発電機設置船プラントと装備

I7.1 風力発電機設置船	
概要	風力発電機を基礎上へ据付ける.基礎建設にも同様の船舶を使う場合がある.強固な吊上げ用プラットフォームを確保するため,通常ジャッキアップ機能を有する.
コスト	▪ チャーター費 ≒2,000 万円/日(£130k/day)(建造費 195 億円程度(£150million)の新設船) ▪ チャーター費 ≒3,500 万円/日(£270k/day)(事前組立てした風力発電機吊上げに使うクレーン船) ▪ 500MW ≒最大 104.0 億円(£80million)
業者例	▪ 供給: 通常,風力発電機設置契約の一部 ▪ 操業: A2SEA, Ballast Nedam, Beluga-Hochtief, Geosea, Jack-Up Barge, Marine Construct International, MPI Offshore, Scaldis Salvage, Seajacks ▪ 建造: 通常,極東地域の業者
要点	▪ 風力発電機設置用に特別に建設された船舶数は僅かしかない.洋上風力産業の成長は,これら特別建造船への新規投資を呼び込むと考えられる.こうした船舶の典型的な仕様は: - 全長: 130m, 船幅: 38m, 喫水: 5m - 乗員用寝台数: 100 - クレーン: 1,000 トン - 載荷質量: 9,300 トン - 航海速度: 11knots - ジャッキアップ高さ: 35m - 最大搭載可能風力発電機数: 6 - ジャッキアップ脚数: 4～6 - ジャッキアップ速度: 1m/min. - 自動船位保持システム
要素	▪ 船上クレーン ▪ 自動船位保持 ▪ 推進システム ▪ ジャッキアップシステム ▪ 風力発電機輸送・据付専用フレーム

I8. 試運転	
概要	建設終了時に試運転を行い,引渡し前に全システムが稼動することを確認し,パンチリストを作成する.
コスト	一般に風力発電機の供給契約に含まれる.
業者例	通常,風力発電機メーカーと変電所供給者
要点	▪ 洋上変電所とケーブルの試運転順序は,視覚検査,機械試験,防護試験,電気絶縁試験,電源投入前の事前確認,トリップ試験,負荷確認である. ▪ 風力発電機の系統接続完了時点の試運転順序は: - 全サブシステムの投入 - 一連の安全・緊急時システムの各リンク試験 - 全ての安全・重大・補助システムの動作確認 - ロータを緩やかに回転させ,ドライブトレインのバランスとスムーズな運転状態の確認 - 過速度センサとその他の安全・重大確認 - 試運転と通常運転での全システムの確認 - ある期間の有人運転後の重要部品と接続部の確認,その後更に長期の無人運転 - 試運転後も定期的に各風力発電機と変電所のパンチリストを作成し,顧客とO&Mチームへの引渡し前に残工事項目の特定に務

	める.更に,引渡し前には同意されたある一定期間の性能と信頼性の実証期間が必要となる.

7. 運転とメンテナンス

【O0. 運転とメンテナンス】	
概要	最適出力を確保するため,ウィンドファームの運転寿命の間,サポートを行う.
コスト	500MW ≒32.5～52.0 億円(£25-40million)
業者例	通常,風力発電機の保証期間は,最初の 5 年間であり,この期間はメーカーが全ての O&M サービスを行う.これ以降はウィンドファーム所有者自身が運用,または専門業者と契約を結ぶ,もしくは新たに仲介協定を結ぶ.
要点	▪ 運転サポートは,24 時間 365 日提供され,その内容は,不測の風力発電機故障への対応,天候監視,風力発電機状態監視に加えて,顧客と供給業者の仲介も含む. ▪ メンテナンスには,予定作業とそうではない作業があり,風力発電機,陸上・洋上変電所への定期的な人員派遣を必要とする. ▪ 比較的小規模で岸から近かった,既設の洋上ウィンドファームに比べて,殆どのラウンド3の運転計画はまだ開発されていない. ▪ 更なる革新を図る際に重要となるのは,風力発電機への安全なアクセスである. ▪ 必要に応じて,風力発電機製造業者の専門スタッフが主要修理を行う. ▪ 最新の陸上風力発電機の利用可能率は,約 98%である.一方で,多くの洋上風力発電機の利用可能率は,アクセス制限による損失時間のため,約 90%である. ▪ 最新の洋上風力発電機の設備利用率は,陸上の 30%(UK)または 20%(その他低風速地点)に比べて,40～50%に達する. ▪ O&M 作業の目的は,コストを許容レベル以下に抑えつつ,ウィンドファームの利用可能率と設備利用率を最適化することである.
要素	▪ 運転 [O.1] ▪ メンテナンス [O.2]

O1. 運転	
概要	ウィンドファームの性能監視,メンテナンスの計画,顧客と供給業者の仲介を行う.
コスト	500MW ≒32.5～52.0 億円(£25-40million)
業者例	保証期間中: 風力発電機メーカー
要点	▪ 陸上の制御室では,SCADA やその他システムを通して,各風力発電機,変電所,気象観測タワー,洋上人員・船舶に関する詳細なリアルタイム・過去データへのアクセスができる. ▪ ウィンドファームは,SCADA,状態監視システム,海中構造物を含む能動的監視により遠隔監視される. ▪ SCADA データの確認と状態監視は,故障前の予防メンテナンス実施に役立つ. ▪ 天候と予備部品及び特殊船のアベイラビリティを考慮した定期及び予定しない作業の詳細な計画が重要となる. ▪ システムは,運転管理者が全人員と船舶の位置情報を確実に把握しているものでなければならない. ▪ 機器関連作業に加えて,ウィンドファームによる現地の環境と海生生物への影響を監視するモニタリングも実施する. ▪ 人員が風力発電機で立ち往生する場合に備えて,各風力発電機は緊急時の避難所を備える. ▪ 緊急時には,救助活動の安全なアクセスのため,個別の風力発電機またはウィンドファーム全体を遠隔操作で停止できる.

O2. メンテナンス	
概要	定期的な観察,サービス,修理を行う.
コスト	通常最初の 5 年間が保証期間
業者例	保証期間中: 風力発電機メーカー
要点	▪ 定期的なメンテナンスは,風力発電機の信頼性を高め,安全な運転に必須である. ▪ 風力発電機のメンテナンス項目は,ブレードやその他主要部品の視覚検査,主要ボルト接続部の油圧確認,潤滑(自動潤滑システムへの補充も含む),安全・緊急システムの適切な運転状態の完全確認,消耗材の交換(例:スリップリングブラシ)そして清掃である. ▪ 計画メンテナンスは,アクセスが平均的に簡単で,風力発電機停止時の収益損失が比較的少ない,夏に実施することが最も望ましい. ▪ 非計画メンテナンスは,風力発電機故障や運転データの確認から得た警告に応じて実施する.通常,非計画的訪問が必要となった場合,同時に定期作業の実施も検討する. ▪ 健全性と安全性の厳格な要求事項に従い,船舶規模とメンテナンス人員内容が決まる.
要素	▪ O&M 港 [O2.1] ▪ 作業員及び装置の移送 [O2.2] ▪ 洋上居住施設 [O2.3] ▪ 大型部品の再加工,交換,修理

O2.1 O&M 港	
概要	ウィンドファームの運転と監視に関連する施設に加え,現場作業施設や船舶燃料の保管施設を備える.
コスト	≒6.5 億円/年(£5million/year)
業者例	ウィンドファーム運用者がその建設中に O&M 港を整備する.
要点	▪ 一般的にウィンドファーム運転管理者は,悪天候時の時間損失を最小化するため,要求仕様を満たす中で最も近い港湾を探す.より沖合のウィンドファームでは,洋上居住施設やその他施設(他のウィンドファームとの共有可能性もある)の利用がより望ましくなる. ▪ 理想的には,支援船への積載時間を最小化するため,建屋は波止場に近いほうがよい. ▪ 大型交換部品(増速機等)を保管することはあまりない. ▪ 500MW ウィンドファームは,最大 100 人の雇用を創出し,その内 3/4 を作業員が占める.優秀な作業員の確保が,ウィンドファーム所有者と運転管理者の懸念事項の一つである. ▪ O&M 施設へのアクセスは,24 時間 365 日可能でなければならない. ▪ 港湾施設の使用に加えて,運転管理者は陸上での遠隔支援サービス,例えば技術的助言・情報・支援,性能監視,24時間の制御室監視等を行う. ▪ 常時アクセスに備え,港湾機能を遊ばせてはならない. ▪ 各支援船は,20m の停泊水域を必要とする.500MW ウィンドファームでは,離岸距離にもよるが,約7隻の操業が必要となる. ▪ O&M 港は複数の船舶への同時アクセスを容易にする種々の傾斜・階段式アクセスを備えることが好ましい.
要素	▪ 管理施設と運転室 ▪ 持上装置: 例えば部品を港から作業船へ積載するためのフォークリフト(600kg)や小型クレーン(1トン) ▪ 作業場: 火気(例: 溶接,アングル材切削),クランプ装置,作業台,機材倉庫 ▪ 倉庫: 特殊船を必要としない小型部品を保管 ▪ 居住空間: 個人防御用器材保管場所を含む ▪ 燃料倉庫: ヘリコプターや船舶用の燃料を保管

O2.2 人員及び装置の移送	
概要	船舶またはヘリコプターによりウィンドファームへのアクセスを提供する.
コスト	▪ チャーター費 ≒20 万円/日(£1500k/day) ▪ 船舶購入費 ≒1.95 億円(£1.5million)
業者例	▪ 船舶操業: North Sea Logistics, Windcat Workboats, MPI Workboats, Turbine Transfers ▪ 船舶製造: Alicat, Alnmaritec, Arklow Marine, South Boats ▪ ヘリコプター操業: Bond Air Services ▪ ヘリコプター製造: Eurocopter
要点	▪ 主な要求事項は,天候不良時でも作業できる強固な船舶である.多くのウィンドファーム運転管理者は,20m アルミ製カタマラン式且つ 12 名程度の作業員を搭載できる船舶を選択する. ▪ 航海速度は 20 ノット超,またメンテナンス作業に備え,メンテナンスチームを快適かつ安全にウィンドファームへ移送するように設計される. ▪ ヘリコプターは,船舶によるアクセスが難しい天候不良時も含め,風力発電機や洋上変電所または居住施設へのアクセスを可能にする.作業員を 5 人まで移送できる. ▪ 通常,ウィンドファーム運転管理者はヘリコプター操業者と,ある日数単位での年間契約を結ぶ. ▪ 風力発電機へのアクセス[B2.3]は,技術革新を期待する分野である.ある作業船は風力発電機プラットフォームへのアクセスを容易にする[へさき]を船首に備える.厳しい海況時の解決策として,エレベータシステムや波揺れ補償システム等が提案されている.

O2.3 洋上居住施設	
概要	ウィンドファームの現場において,人員へ居住施設を提供し,移動時間を著しく減らす.
業者例	変電所または個別の海上構造物の一部
要点	▪ 洋上居住施設は,岸から遠く離れたウィンドファームの運転管理者にとって魅力的な選択肢となる. ▪ 30 人程度の容量を想定する. ▪ 洋上居住施設は,Horns Rev 2 で始めて採用され,変電所プラットフォームに並んで建設された.
要素	洋上居住施設に必要となる多くのシステムは,洋上変電所にも備えられている.すなわち,発電

	機,照明,水供給・浄水,アクセス施設,福祉施設等である.

O2.4 大型部品の交換	
概要	ブレードや増速機,発電機等の大型部品を,タイムリー且つ優れたコスト効率で交換する
要点	▪ 洋上風力発電機は,大型部品の修理や交換を外的要因に関わらず容易に実施できるように設計される.内蔵クレーンは時に相当な負荷を持上げることができる. ▪ しかし,幾つかの部品は,風力発電機設置時に使うものよりは小規模のものとはいえ,交換時にジャッキアップバージを必要とする.交換は一回の現場来訪で行い,その後オフサイトで修理する. ▪ 修理に必要な往復回数に基づき,効果的な船舶利用を慎重に計画する.

謝辞

本稿の作成に当たり資料の発行元であり転載許可を頂いた THE CROWN ESTATE,資料の作成者である BVG Associates に感謝する.

また、本論文の内容は Crown Copyright により保護されており、一部または全体の転載には The Crown Estate の許可を必要とする。

参考文献

1) BVG Associates, A Guide to an Offshore Wind Farm, *THE CROWN ESTATE*, 2010, pp.9-68.