公益財団法人
自然エネルギー財団
RENEWABLE ENERGY INSTITUTE

■ 自然エネルギー活用レポート No.23

風力と太陽光のハイブリッド発電で収益安定

福岡県・北九州市で進むエネルギー拠点化構想

● 概要

九州の最北端に位置する福岡県の北九州市では、風力と太陽光を中心に自然エネルギーの発電設備が相次いで運転を開始している。日本海に面した「響灘（ひびきなだ）地区」に大規模な発電設備が集まり、市が推進するエネルギー拠点化構想が着々と進む。年間を通して強い風が吹く臨海工業地帯の中で、風力と太陽光によるハイブリッド型の発電所が 2018 年 1 月から稼働中だ。大型風車 2 基と 1 万枚を超える太陽光パネルを組み合わせて年間に 5500 世帯分の電力を供給する。風力と太陽光は天候によって発電量が変動し、特に風力は年によって差が大きい。2 種類を組み合わせることで売電収入のばらつきを抑えられる点が事業者にとってのメリットの 1 つである。天候による変動を抑制して、地域に安定した電力を供給できる利点もある。大型風車には洋上仕様の機種を採用した。北九州市が響灘地区の沖合で推進する洋上風力発電に向けた実証の役割も果たす。

● 基本データ

①運営体制	事業者名	響灘ウインドエナジーリサーチパーク合同会社	事業者の所在地	福岡県北九州市若松区響町 1-15
	発電所名	響灘ウインドエナジーリサーチパーク	発電所の所在地	福岡県北九州市若松区響町 2-8-3 ほか
	運転開始	風力：2018 年 1 月 1 日 太陽光：2017 年 9 月 1 日	運営人員	電気主任技術者（常駐）：1 名 メーカー技術員（常駐）：2 名
	建設	東光電気工事	運転・保守	Vestas Japan 鹿島建物総合管理
②発電設備	機器構成	風力発電機、太陽光パネル、変電設備	メーカー/機種/台数	風力発電機：MHI ヴェスタス/V112-3.3MW（洋上）/2 基 太陽光パネル：LS 産電/単結晶 290W/1 万 504 枚
	最大出力	風力：6600kW 太陽光：3046kW	送電能力	8600kW
	年間発電量	1997 万 kWh	設備利用率	—
	電力供給先	九州電力	FIT 認定	風力：2015 年 3 月 9 日 太陽光：2014 年 3 月 24 日
③収支計画	事業費	非公表	事業期間	20 年（運転開始から）
	売上高	非公表	運転維持費	非公表
	年間売電量	非公表	売電単価	風力：22 円/kWh 太陽光：36 円/kWh
	資金調達先	プロジェクトファイナンスによる金融機関からの融資	投資回収年数	非公表
			補助金	なし

1. 発電事業の経緯

本州に隣接する北九州市は、1900 年代の初めから製鉄で発展してきた。しかし 1950 年代からの高度経済成長に伴って公害が深刻な問題になり、それ以降は産業振興と環境保全を両立させる取り組みを続けている。2008 年には内閣府が低炭素社会を目指して全国から選定した「環境モデル都市」にもなった。

環境モデル都市の構想の中で、臨海工業地帯の一角を占める「響灘（ひびきなだ）地区」（図 1）を対象に、風力発電関連産業の総合拠点を形成する長期計画の「グリーンエネルギーポートひびき」を 2010 年にスタートさせた。すでに開始から 10 年が経過して、現在は大規模な洋上風力発電の開発プロジェクトも進んでいる。

図 1◇エネルギー関連設備が集まる「響灘地区」
出典：北九州市

響灘地区は年間を通して海から強い風が吹きつける風力発電の適地である。上空では年間平均風速が 6～7 メートル/秒に達する（図 2）。風力発電には年間平均風速が 5 メートル/秒以上になる場所が望ましく、響灘地区は絶好の立地と言える。

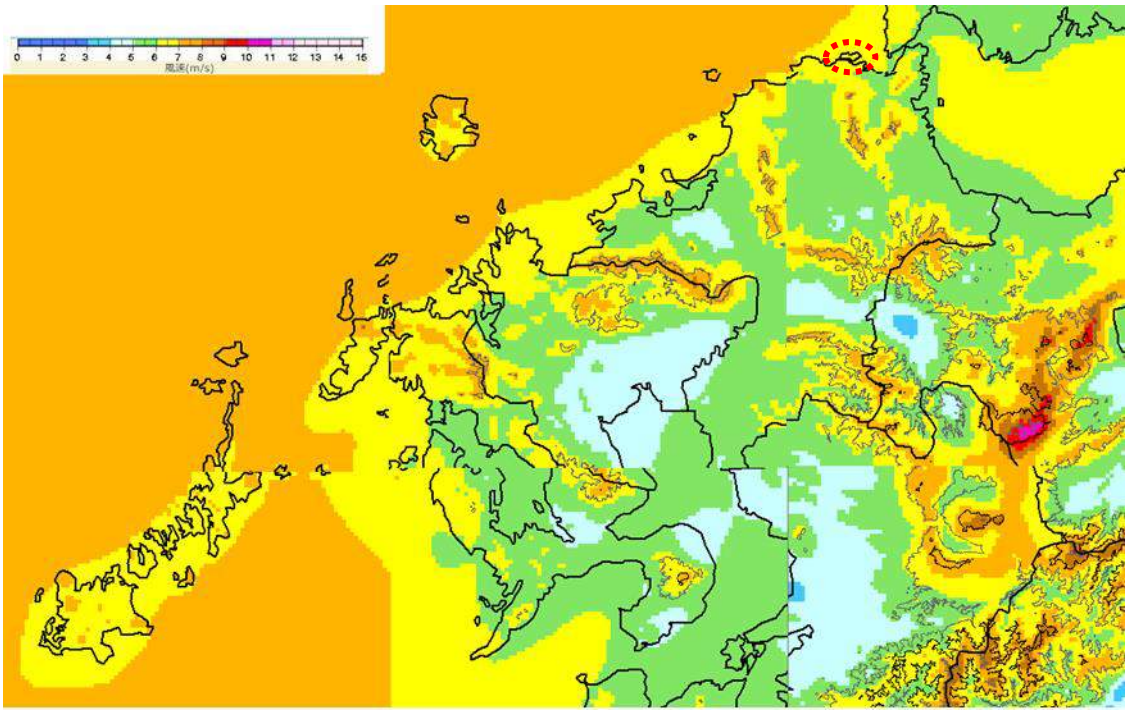

図 2◇九州北部の年間平均風速。右上の赤い点線で囲んだところが響灘地区
出典：北九州市（NEDO の風況マップをもとに作成）

北九州市が長期計画で取り組む「グリーンエネルギーポートひびき」は 3 つのフェーズに分けられている（図 3）。フェーズ 1 で風力発電の実証研究施設やメンテナンスセンターを誘致して、フェーズ 2 で大規模な洋上風力発電を展開しながら、並行してフェーズ 3 で基地になる港湾を核とした風力発電関連産業の総合拠点を形成する。「響灘地区を日本で最大の風力発電の拠点にするために、国や事業者と連携しながら、必要な機能を拡充していく計画である」（北九州市港湾空港局エネルギー産業拠点化推進室の川嵜孝之風力発電担当係長）。

図 3◇風力発電関連産業の総合拠点を目指す「グリーンエネルギーポートひびき」の事業スケジュール
O&M：オペレーション＆メンテナンス。出典：北九州市

フェーズ 1 では廃棄物の最終処分場跡地の 2 区画（約 24 万平方メートル）を実証・研究ゾーンに位置づけて、2013 年に公募を実施した。公募の対象は風力発電の実証・研究拠点のほか、製造・組立や物流・メンテンナンスなど、風力発電関連産業に寄与する提案を求めた。

公募の結果、3 つの事業者が選ばれた。そのうちの 1 つはジャパン・リニューアブル・エナジー（JRE）と北拓の共同事業体である。JRE は米国の大手金融機関ゴールドマン・サックスが設立した発電事業者で、のちにシンガポール政府投資公社が資本参加した。北拓は風力発電を専門とするメンテナンスサービス会社である。日本国内で自然エネルギーによる発電事業を拡大する計画の JRE と、風力発電のメンテナンスサービスを全国に展開する北拓の意向が合致した。

JRE と北拓は共同出資で「響灘ウインドエナジーリサーチパーク合同会社」を設立して、風力と太陽光のハイブリッド発電所の開発に着手。フェーズ 1 の事業実施区域の中に 2 基の大型風車と 1 区画のメガソーラーを建設した（図 4）。さらに北拓が風力発電のメンテナンスセンターを近隣の用地に設置して、将来の総合拠点化に欠かせないメンテナンス要員を育成することも計画に加えた。

図 4◇フェーズ 1 の事業実施区域と対象事業。出典：北九州市役所

発電設備の建設に向けて風況調査と地盤調査、さらに環境アセスメントを実施した。「地盤調査で 2 基の大型風車を設置する場所の地中をボーリング調査した結果、十分な地盤条件が得られなかった」（プロジェクトリーダーを務めた JRE の酒井祐豪氏、現在は事業開発本部洋上風力開発部プロジェクトマネジメントチームマネージャー）。響灘地区は廃棄物や土砂で造った埋立地で、建設予定の場所は地盤が軟弱だった。

軟弱な地盤の対策として、風車の周囲に 8 本のコンクリート杭を打ち込む工法を採用した。2 カ所のうち 1 カ所は地下 22 メートルまで、もう 1 カ所は 14 メートルまで杭を入れる。さらに液状化を防ぐ対策として、砂杭工法による地盤改良を実施した。「新たな対策を取り入れた設計には想定以上の時間がかかり、工事の前に必要な電気事業法の工事計画届の受理までに約 1 年を要した」（酒井氏）。実際に工事を開始できたのは、開発に着手してから 4 年近くが経過した 2017 年 2 月である。

大型風車は 1 基あたりの出力が 3300kW の機種を選定した。風力発電所の環境アセスメントは、国の基準では出力が 1 万 kW（キロワット）以上の場合に義務づけられている（7500kW 以上の場合にはアセスメントの必要性を国が判断）。2 基の合計で 6600kW であれば、国のアセスメントの対象にはならないが、北九州市の条例では国の基準の半分にあたる出力 5000kW 以上の風力発電所は環境アセスメントが必要になる。

「工業都市として発展してきた北九州市は、公害に悩まされた歴史があり、環境アセスメントには先進的に取り組む方針を掲げている」（北九州市環境局環境国際経済部地域エネルギー推進課の平井良知政策係長）。環境アセスメントの実施項目は国とほぼ同じである。

響灘地区には希少猛禽類の「チュウヒ」というタカ科の鳥が生息している。環境アセスメントで注意が必要な対象だ。チュウヒは春に産卵期を迎えるため、風力発電設備の工事が繁殖に影響を与えないように、2 月から 5 月までの 4 カ月間は工事を実施しないように配慮した（図 5）。そのあいだは太陽光発電設備の建設に注力した。さらに建設現場の周辺に巣を作らないように、定期的に草刈りを実施することも欠かせない。

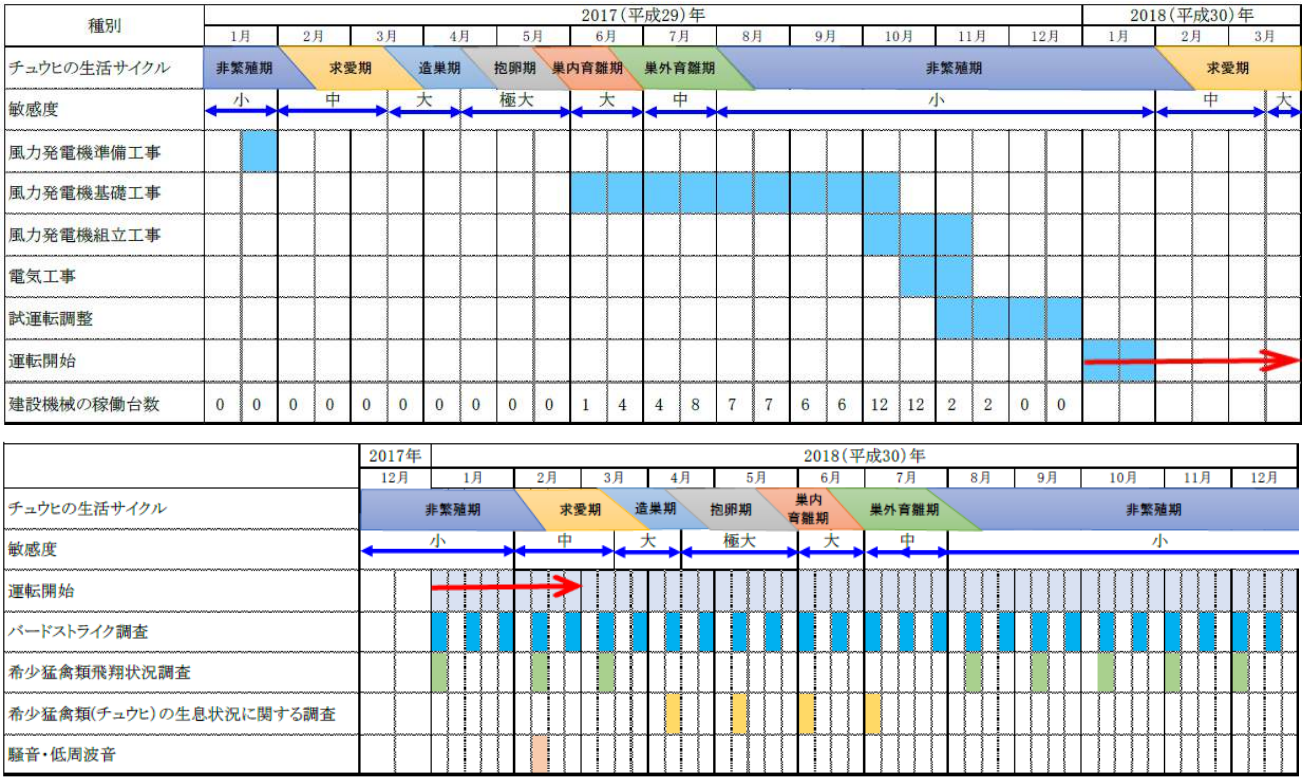

図 5◇希少猛禽類「チュウヒ」の生活サイクルを考慮した建設工事計画（上）
運転開始後の調査実施計画（下、2019 年以降も継続）
出典：響灘ウインドエナジーリサーチパーク

発電所の運転を開始した後も、バードストライクの調査を 2 週間に 1 回の頻度で実施して影響を調べている。「風力発電所の運転開始から 2 年が経過したが、これまでにバードストライクは発生していない」（響灘ウインドエナジーリサーチパークの瀬浦裕樹所長）。バードストライクの調査結果は運転開始から 1 年後に北九州市に報告した。

風力発電所の建設には地元の住民から反対意見が出る場合がある。その点では響灘地区は港湾区域のため近くに住宅がなく、住民から反対意見が出ることはなかった。港から建設現場まで大型風車のパーツを輸送する時も、港湾区域内の道路を使うだけで済むため、手続きが少ない。港湾区域内に風力発電所を建設するメリットの 1 つと言える。

系統接続の工事もスムーズに進んだ。北九州市が公募前に送配電ネットワークの空き状況を確認していた。「工期は短く、工事負担金も大した額ではなかった」（酒井氏）。環境アセスメントから系統接続まで市が事業者を支援して、風力発電プロジェクトを可能な限り円滑に進められるようにした。

工事期間中には大きなトラブルもなく、太陽光発電設備は着工から 7 カ月後の 2017 年 9 月に運転を開始した。続いて 4 カ月後の 2018 年 1 月に風力発電設備も運転を開始して、風力と太陽光によるハイブリッド発電所から電力の供給が始まった。太陽光発電設備の横に変電所を建設して、2 基の風力発電機から送られてくる電力と合わせて送電する（図 6）。

図 6◇「響灘ウインドエナジーリサーチパーク」の主要設備の配置計画
出典：響灘ウインドエナジーリサーチパーク

2. 発電事業の詳細

響灘ウインドエナジーリサーチパークがハイブリッド型で運転を開始して 2 年が経過した（写真 1）。2 基の大型風車は西側の海から吹き付ける風を受けて回転する。発電機を内蔵した中心部のナセルの高さは地上 84 メートル、ブレード（翼）の回転直径は 112 メートルに及ぶ。

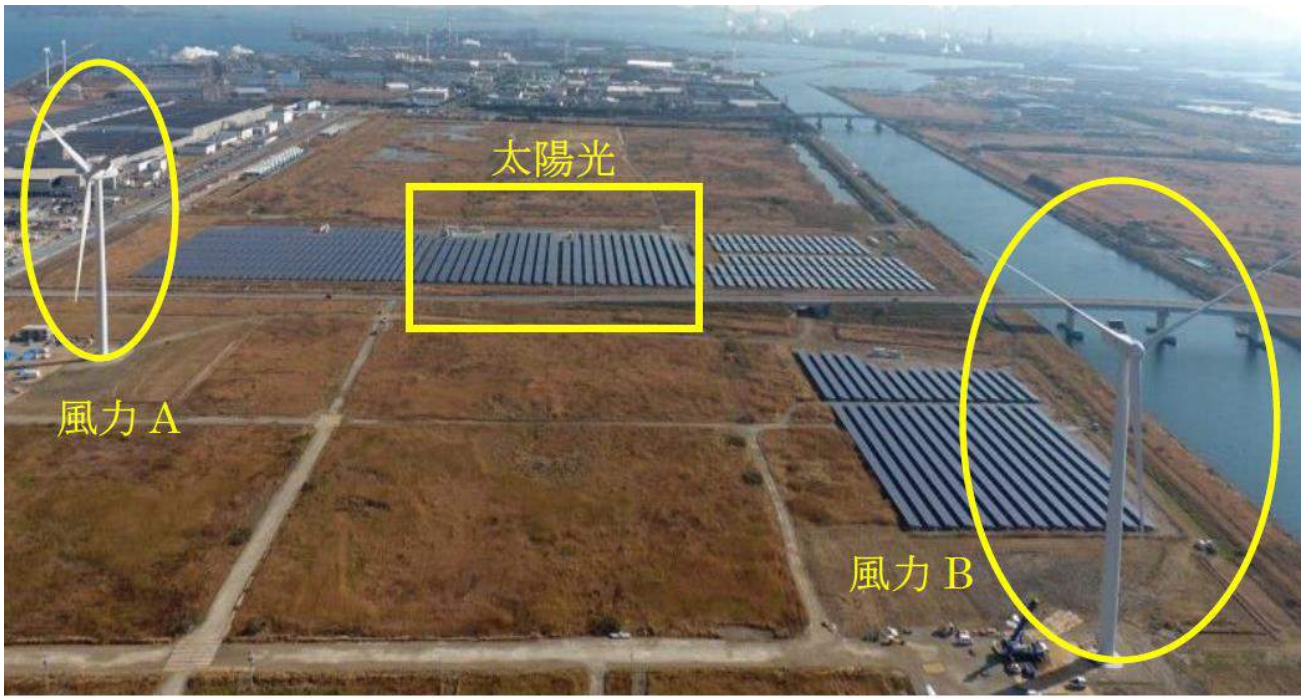

写真 1◇「響灘ウインドエナジーリサーチパーク」の全景（2018 年 1 月の運転開始時）
風力 A が 2 号機、風力 B が 1 号機、太陽光は黄色の枠内だけ
出典：ジャパン・リニューアブル・エナジー

風力発電機は世界各国で使われている MHI ヴェスタス社の製品を採用した（写真 2）。出力は 3.3MW（メガワット＝1000kW）で、洋上で使用するものと同型の機種を選んだ。陸上用が風速 8.5 メートル/秒以下を対象としているのに対して、洋上用は 8.5～10 メートル/秒の風速に適している。「北九州市の公募の要件には、洋上用の風車を使うことは入っていなかった。将来の洋上風力発電に向けて、運用のノウハウを得るために採用した」（北拓の吉田悟副社長）。

写真 2◇風車の中心部。1 号機（左）、2 号機（右）。それぞれに共同事業会社のロゴを表示

洋上用の風車は陸上用と比べて耐久性を高めた点が特徴である。「洋上では風車の部品が故障しても、すぐに交換に行くことはむずかしい。発電機などの強度を上げて故障の頻度を減らし、塩害対策も施されている。耐用年数は陸上用よりも長くなる」（吉田氏）。

電気事業法上の技術基準に適合させるために、風車を搭載するタワーの基礎も強固に造成する必要があった（写真 3）。八角形の基礎を厚さ 3.5 メートルのコンクリートで造り、その下にセメントを混ぜたコンクリートを地中深くまで流し込む工法で 8 本の杭を打ち込んだ。タワーの周囲はボルトで基礎に固定している。

写真 3◇風車の基礎（2 号機）。左後方に見えるのが 1 号機。タワーを基礎に固定するボルト（右）

一方の太陽光発電設備は合計 1 万 504 枚の太陽光パネルで構成する（次ページの写真 4）。パネル 1 枚あたりの出力は 290 ワットで、全体で 3046kW の規模になる。風力発電設備と同様に、塩害による金属の腐食を防ぐ必要がある。太陽光パネルを設置する架台は、高耐食性のメッキを施した鋼板を採用した。パネルの設置角度は南向き 15 度である。

写真 4◇太陽光パネルの設置状態。後方に見えるのが風車 2 号機。さらに後方は他社の風力発電所

太陽光パネルを搭載する架台の基礎にも工夫をこらした。通常は杭として使う PC（プレキャストコンクリート）パイルを、はしご状に組み合わせた（写真 5）。軟弱な地盤のため、はしご状の PC パイルで上からの圧力を分散させる。さらに中央には複数の PC パイルを並べて、架台の重しに利用する。「一般に流通している PC パイルを使うことで、現場でコンクリートを打設する方法と比べてコストを抑えることができ、作業時間の短縮に寄与した」（JRE の酒井氏）。

写真 5◇太陽光パネルを搭載する架台と基礎。コンクリート製の杭を基礎に利用して工期を短縮

風力と太陽光を合わせると、最大出力は 9646kW になる。風力で発電した電力は最大 6600kW で送電する一方、太陽光ではパネルの出力合計 3046kW に対して最大で 2000kW に抑えて送電する（写真 6）。太陽光パネルの最大出力（3046kW）がパワーコンディショナーの出力（2000kW）を上回る“過積載”の状態になっている。夜間に発電しない太陽光の設備利用率（最大出力に対する年間の発電量の割合）を高めるための方策である。

写真 6◇パワーコンディショナーを格納した変電設備。手前が太陽光発電用、左右が風力発電用

風力と太陽光を合わせた年間の発電量は 1997 万 kWh（キロワット時）を想定している。標準的な家庭の電力使用量（年間 3600kWh）に換算して約 5500 世帯分に相当する。響灘ウインドエナジーリサーチパークでは風力と太陽光の発電量の比率は公表していない。

資源エネルギー庁が固定価格買取制度の対象になっている発電設備の実績データをまとめた結果では、事業用の風力発電の設備利用率は 27%、太陽光発電の設備利用率は 17%である。これをもとに計算すると、響灘ウインドエナジーリサーチパークの風力と太陽光の年間発電量の比率はおおむね 8 対 2 になる。

太陽光の年間発電量は風力よりも少ないが、年による差が小さくて安定している。「風況は年によって大きく変わるため、風力の売電収入は変動幅が大きい。太陽光で安定した売電収入を確保できることは、財務的なメリットがある」（酒井氏）。風力単独の場合よりも安定した収益を得られることがハイブリッド発電の大きな利点と考えている。

建設資金に関しては、特別目的会社の響灘ウインドエナジーリサーチパークに対するプロジェクトファイナンスで銀行の融資を受けた。「ハイブリッド発電で毎年の売電収入が安定すれば、融資の返済余力も下がらずに済む」（同）。

地域全体の電力供給という観点では、風力と太陽光を組み合わせることで、天候による発電量の変動を抑制できる効果がある。風力と太陽光の出力変動パターンが異なるため、相互に補完して変動量を平準化できる。「実際の効果については、まだ運転を開始して 2 年しか経過していないため、検証するのに十分なデータを蓄積できていない。引き続きデータをとりながら、風力と太陽光で相互補完できる部分とできない部分を明らかにしていきたい。」（酒井氏）。

風力と太陽光で発電した電力は、個別のメーターで送電量を計測して、九州電力に売電する。固定価格買取制度による風力（2014 年度に認定）の買取価格は 1kWh あたり 22 円で、太陽光（2013 年度に認定）は 36 円である（いずれも税別）。

響灘ウインドエナジーリサーチパークは年間の売電収入額を公表していない。かりに風力と太陽光の発電量を 8 対 2 で想定すると、年間の売電収入は 5 億円程度の規模になる。ただし九州では太陽光発電に対して無制限に出力抑制を求められる可能性があり、売電収入を減らす要因になる。「出力抑制の影響がどの程度になるか、コンサルティング会社にも試算してもらって、収支計画に織り込んだ。売電収入の減少額を発電所単独で見ると、それなりに大きいと想定している」（酒井氏）。

発電所の運転状況は 1 キロメートルほど離れた場所にある遠隔監視システムで確認できる（写真 7）。発電量や風速などをリアルタイムにモニターに表示するほか、運転中のエラーの発生を 1 日 24 時間体制で監視する。風車メーカーのヴェスタスもインドの集中監視センターから遠隔で制御する体制をとっている。

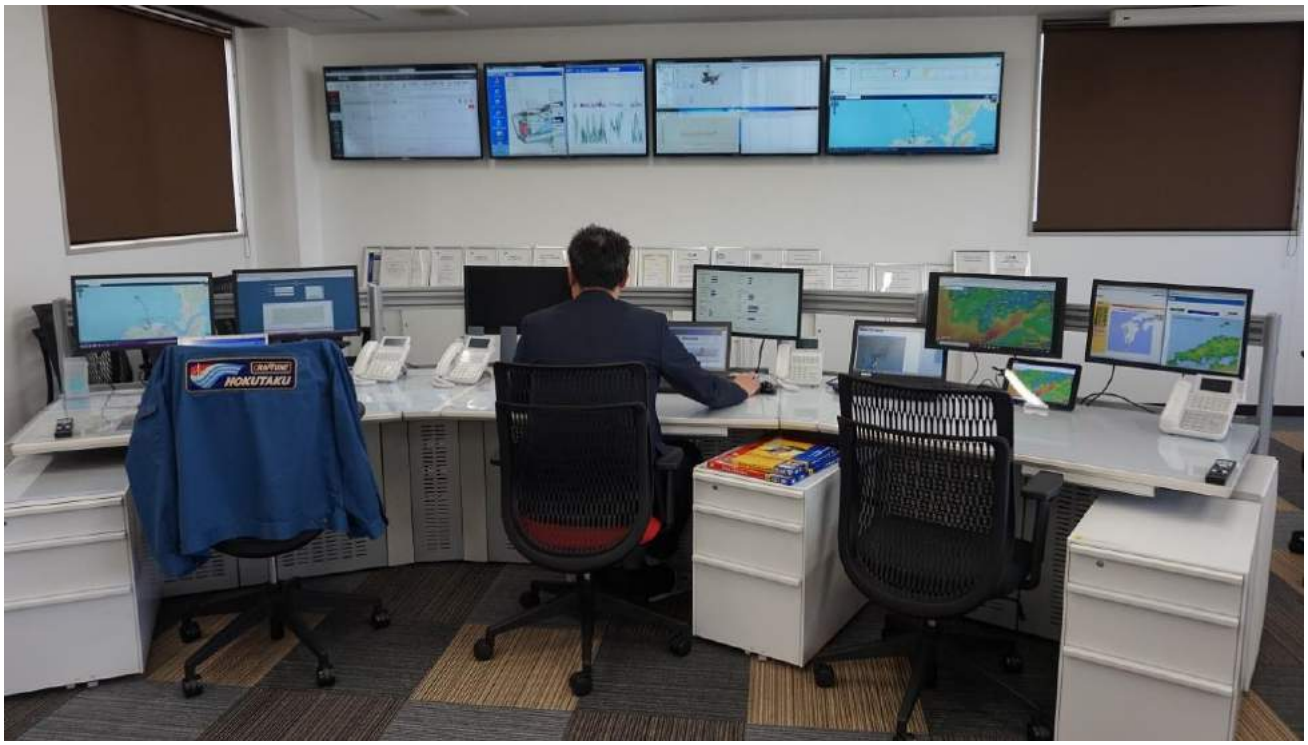

写真 7◇遠隔監視システム。技術者が常駐して 1 日 24 時間体制で運転状況を監視

この遠隔監視システムは北拓が 2016 年 10 月に響灘地区に開設した北九州支店の中にある（写真 8）。北九州市の公募に合わせて風力発電のメンテナンスセンターの役割を果たす。遠隔監視システムを備えた事務所の横に、風力発電設備の主要な部品を格納する倉庫がある。屋外には巨大な風車のブレード（翼）が並んでいる。

写真 8◇風力発電設備の遠隔監視とメンテナンスの拠点になる北拓の北九州支店（上）
屋外に並ぶ風車のブレード（下、日立製作所の 2000kW 風車用）

「風力発電の稼働率を上げるためには、故障した部品をすぐ交換できるようにストックしておく必要がある。ヴェスタスの風車は 1 基あたり数万点に及ぶ部品があるが、そのうち故障する可能性が高いものを用意している」（北拓の吉田氏）。モーターやセンサーなど、重機を使わずに交換できる部品が対象だ。

北拓は響灘地区にある別の風力発電所のメンテナンスも手がけている。日立製作所の出力 2000kW の大型風車が使われているが、ブレードをはじめ発電機や増速機など 1 基分の部品すべてが北九州支店に揃っている。「今後さらにスキルのある技術者を増やして、洋上風力も含むメンテナンスサービスの拠点として拡充していく」（吉田氏）。

3. 今後の計画

響灘ウインドエナジーリサーチパークの事業期間は運転開始から 20 年を予定している。2037 年末には北九州市と結んだ用地の賃借契約が完了して、固定価格買取制度による買取期間も終了する。それ以降の計画は未定だが、北九州市と協議のうえ運転を延長する可能性もある。響灘地区には風力や太陽光のほかに大規模なバイオマス・石炭混焼発電所も稼働している（図 7）。

図 7◇響灘地区の主な発電設備と事業者（風力④は NEDO の浮体式、風力⑤は開発中）。出典：北九州市

北九州市は市内で発電された低炭素な電力を企業や公共施設に供給して、地産地消を推進する方針である。市が出資して 2015 年に設立した小売電気事業者の「北九州パワー」が市内 3 カ所のごみ焼却工場で発電した電力を中心に供給する。新たに住宅用の太陽光発電で固定価格買取制度（FIT）を終了した“卒 FIT”の電力の買取も開始した。「今後は事業用の発電設備でも卒 FIT が増えてくるので、できるだけ多く買い取って地産地消を広げたい」（北九州市環境局の平井氏）。

響灘地区には 10 基を超える大型風車が稼働している。さらに北九州市の公募で事業者に選ばれた自然電力が、出力 5000kW の大型風車 1 基を 2020 年の春に運転開始する予定だ。地区内には遊歩道があり、市民が散歩しながら数多くの大型風車を目にすることができる。「風車の大きさや動きを現地で見て、自分たちが使う電力が作られていることを実感していただきたい。これから洋上風力を展開していくが、市民に理解されることが重要だと考えている」（北九州市港湾空港局の川嵜氏）。

グリーンエネルギーポートひびきのフェーズ 2 の中核になる洋上風力発電の開発プロジェクトは 2017 年から始まっている。九州電力グループの九電みらいエナジーを代表者とする 5 社の共同事業体が北九州市の公募で選ばれた。共同事業体には九電工、西部ガス、電源開発、そして響灘ウインドエナジーリサーチパークの共同事業者である北拓が加わった。5 社が出資して設立した「ひびきウインドエナジー」がプロジェクトを推進している。

響灘地区の沖合に広がる約 2700 ヘクタール（27 平方キロメートル）の港湾区域を対象に、最大で約 22 万 kW の洋上風力発電設備を建設する壮大な計画である（図 8）。総事業費は 1750 億円程度を見込む。完成すれば日本で最大の洋上風力発電所になる。建設に向けて環境アセスメントを実施中で、2022 年度から工事を開始する予定だ。

図 8◇洋上風力発電設備の設置予定エリア。出典：ひびきウインドエナジー

洋上に設置する風車は、MHI ヴェスタス社が優先交渉権をもつ機種である。1 基あたりの出力は 9500kW で、ブレードの回転直径は 174 メートル。響灘ウインドエナジーリサーチパークの風車（回転直径 112 メートル）の 1.5 倍以上になる。

洋上風力発電設備の建設と並行して、フェーズ 3 で響灘地区に 4 つの拠点を形成する。1 つ目は風車の仮組立と事前点検を実施する「風車積出拠点」。2 つ目は国内および海外とのあいだで風車の主要部品をやりとりするための「輸出入・移出入拠点」。3 つ目は風車のオペレーション（運転管理）とメンテナンスを担当する「O&M 拠点」。4 つ目は洋上風力発電設備の部材などを製作する「産業拠点」である。

4 つの拠点が機能することによって、響灘地区が洋上風力発電の建設から運転・保守までを一貫して請け負う一大基地になる（次ページの図 9）。グリーンエネルギーポートひびきの目標である風力発電関連産業の総合拠点が完成する。「北九州市は重量・長大な貨物を扱う港湾施設など物流インフラが発達しているので、洋上風力発電の拠点として最適と考えている」（川嵜氏）。

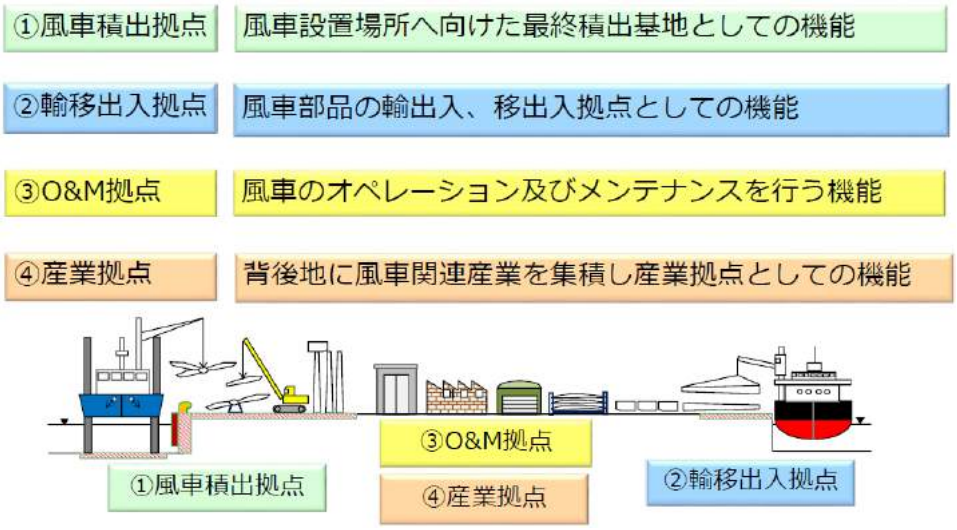

図 9◇風力発電関連産業の総合拠点化。O&M：オペレーション＆メンテナンス

出典：北九州市

特に将来の成長産業として期待をかけるのは、O&M（オペレーション＆メンテナンス）の分野である。「洋上風力発電のコストを分析すると、風車が占める割合は 2 割程度で、最も大きいのは O&M のコスト。この点に注目して地域の産業を育成していきたい」（川嵜氏）。北九州市が実証・研究拠点として位置づけた響灘ウインドエナジーリサーチパークの成果も生かしながら、これから拡大する洋上風力発電の市場に向けて最先端の O&M 拠点を形成していく方針だ。

製鉄で栄えた北九州市が風力発電を中心に新たなエネルギー産業の拠点に生まれ変わろうとしている。2017 年度に策定した「北九州市地球温暖化対策実行計画」では、市全体で排出する CO2 を 2050 年度に 50%削減（2005 年度比）する長期目標を掲げた。この計画を 2021 年度に見直して削減率を引き上げる予定だ。大量の石炭を使って CO2 を排出する製鉄から、CO2 を排出しない自然エネルギー主体の産業へ移行することで、環境モデル都市としての北九州市が果たす役割はいっそう高まる。

＊本レポートの内容はヒアリング実施日（下記）の時点の情報です。

ヒアリング実施日：2020 年 1 月 17 日

レポート作成協力：響灘ウインドエナジーリサーチパーク、ジャパン・リニューアブル・エナジー、北拓
北九州市 環境局 環境国際経済部 地域エネルギー推進課
北九州市 港湾空港局 エネルギー産業拠点化推進室 エネルギー産業拠点化推進課

レポート作成者：石田雅也（自然エネルギー財団 シニアマネージャー）

©自然エネルギー財団　Renewable Energy Institute 2020