

洋上風力発電の取組

洋上風況観測システム実証研究

洋上風力発電システム実証研究

超大型風力発電システム技術研究開発

ナセル

軸受け、増速器、発電機などを収納する格納部です。除塩設備を搭載するなど陸上機に比べて塩害対策を強化しています。

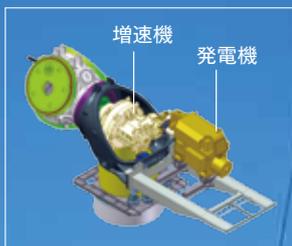


発電装置

■増速機：ブレードの回転数（十数回/分）を引き上げて（1500～1800回転）、発電機へ伝達する装置です。

■発電機：構造が簡便で、低コストの誘導発電機と電圧などの調整が可能な同期発電機などがあります。

■監視装置：遠隔監視装置を用いて洋上風車の運転状況や構造物の疲労をリアルタイムに把握し、効率的な維持管理を行います。



ナセル
発電装置

ブレード

タワー

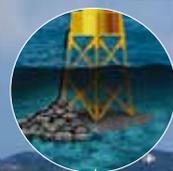
基礎

海中のタワーを支える構造部分。

■重力式：海底地盤が比較的良好な場所に適した基礎構造。内部は空洞で、錘となるスラグ（鉛滓）を投入して、安定化させます。（銚子沖）



■ハイブリッド重力式：重力式の経済面の利点とジャケット式の構造安定性・施工性における利点も生かした構造です。（北九州市沖）



基礎

洋上風力発電の取組

風力発電は、太陽光、波力・潮力に比べて、発電コストが低く、再生可能エネルギーの中でもコスト競争力を持つエネルギー源です。その中で、洋上風力発電は陸上風力発電と比べ、安定的かつ効率的な発電や風車の大型化が可能となり、欧州を中心に導入普及が急速に進んでいます。今号ではNEDOが、洋上の風向きと風速を観測する洋上風況観測タワーと実際に洋上で発電を行う風車を実海域に設置する、日本で初めての沖合における洋上風力発電の実現に向けた取り組みについてご紹介します。

洋上風力発電の取組

洋上風況観測システム実証研究
洋上風力発電システム実証研究
超大型風力発電システム技術研究開発

■NEDOインタビュー

- 日本初！
沖合洋上風力発電への挑戦 4
- グローバル競争の中で
国を挙げた洋上風力発電の産業育成が必要 7
NEDO「洋上風力発電等技術研究開発」プロジェクトリーダー
石原 孟 教授
- 国内初！沖合における洋上風力発電はじまる 8
- ・千葉県銚子沖の洋上風力発電システム運転開始！ 9
 - ・福岡県北九州市沖の洋上風力発電システム運転開始！ 13
- 7MW級の超大型風車で世界市場を目指す 16

NEDOインタビュー

日本初！ 沖合洋上風力発電への挑戦

欧州を中心に洋上風力発電の建設が活発になっています。

国内でも、再生可能エネルギーへの期待の高まりを背景に注目を集めています。

NEDOは2008年度から沖合洋上風力発電への取り組みを進めており、

世界的な洋上風力発電のトレンドとそこでのNEDOプロジェクトの
位置付けについて紹介します。

NEDO 新エネルギー部 風力・海洋エネルギーグループ 主任研究員 伊藤 正治

東洋のドーヴァーと呼ばれる「屏風ヶ浦」をナセルから望む

陸上から洋上へシフトする風力発電の取組



世界で最も風力発電の導入が進む欧州では2020年時点の再生可能エネルギーの比率を20%とする目標達成のため、法的拘束力のある目標値を各国に課しています。中でも風力発電への期待が大きく、陸上の適地が減ってきていることや北海油田の減産に伴う雇用確保の観点などから、風力発電の設置を陸上から洋上にシフトする動きが広がっており、洋上風力発電はこれまでに、欧州を中心に2012年末時点で約540万kWが導入されています。

我が国においても、風力発電の導入拡大において洋上風力発電が有望な選択肢のひとつであり、NEDOでは、2008年度に洋上風力発電に係る実現可能性調査を開始しました。2009年度からは、気象・海象条件の異なる太平洋側と日本海側に実際に、我が国初となる洋上風況観測タワーと洋上風車を建設し、実証研究を行うプロジェクトを立ち上げました。そして、度重なる台風やうねりの影響を受ける中、太平洋側の実証海

域である千葉県銚子沖では2012年10月に洋上風車の建設作業を完了し、日本海側の実証海域である福岡県北九州市沖では2013年3月に同じく洋上風車の建設作業をそれぞれ無事完了することができました。このように厳しい自然環境の洗礼を受ける中で、我が国初の沖合における洋上風力発電の建設を成功に導くことができたのは、当該プロジェクトの関係者のご尽力や地域の皆様のご協力の賜であり、この場を御借りして、厚く御礼申し上げたく存じます。

千葉県銚子沖及び福岡県北九州市沖における実証研究では、約2年間、洋上風況観測タワー及び洋上風車の運転・保守を推進し、発電に係る各種データの蓄積、気象・海象条件や環境への影響を明らかにし、実証研究の成果を社会に発信して参ります。そして、我が国における洋上ウインドファームの実現や導入拡大の基盤を整備して参ります。



克服すべき三つの課題

風力発電は、再生可能エネルギーの中で成熟した技術体系と豊富な実績を持ち、かつ、発電原価が低いという理由から、世界的に導入・普及が進んでいます。

日本でも風力発電の導入は、陸上を中心に2000年代前半から急速に増加し、2012年度末には約265万kW(約1900基)に達しています。しかし将来、風況や立地制約などの面で風力発電の適地が減少すると予想される中、風力発電の導入拡大を図るためには、膨大なポテンシャルが期待される洋上風力発電の展開を図る必要があります。

洋上風力発電の課題は、大きく三つあります。

一つめはコストです。洋上風車は海上に設置するため、風車や基礎(海中に没している土台の部分)、海底ケーブルの設置工事など、陸上の約2倍のコストがかかると言われています。また、運転開始後のO&M(部品交換などの維持管理)についても、陸上風車と異なり、多くの費用を要します。当然、離岸距離や水深によってもコストは異なり、最近の欧州の洋上ウイン

ドファームは、陸域から遠く、水深の深い海域に移行しつつあるため、設置コストも上がっています。

二つめは技術です。初期の洋上風車は増速機や発電機の故障が頻発したため、塩害対策や風車の状態を遠隔監視する技術など、信頼性を向上させるための技術開発が進められています。また、設置場所が浅い海域から深い海域へ移行する場合、コスト低減のため風車1基当たりの発電量を増やす必要があり、風車の大型化と信頼性の向上が洋上風車の技術開発の大きな課題となっています。

三つめは、社会受容性です。漁業者など海面利用者の理解なくして洋上風力発電は成立しません。そのため、洋上における環境アセスメントが重要になってきます。

こうした課題は、自然環境や社会環境など欧州の洋上風力発電事情と大きく異なる面があるため、現在実施している実証研究によって、日本に適合した、低コストの洋上風力発電技術を確認する必要があります。

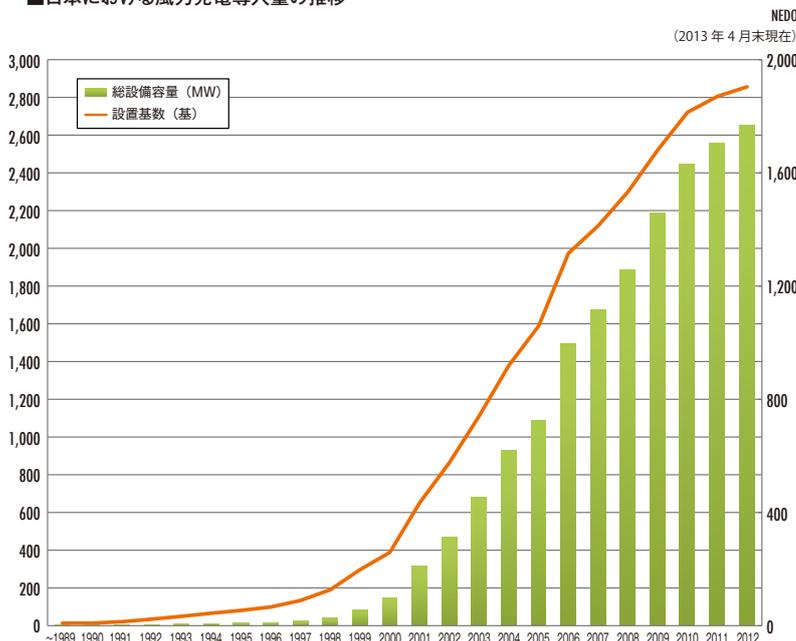


▲千葉県銚子沖の風況観測タワーと風車

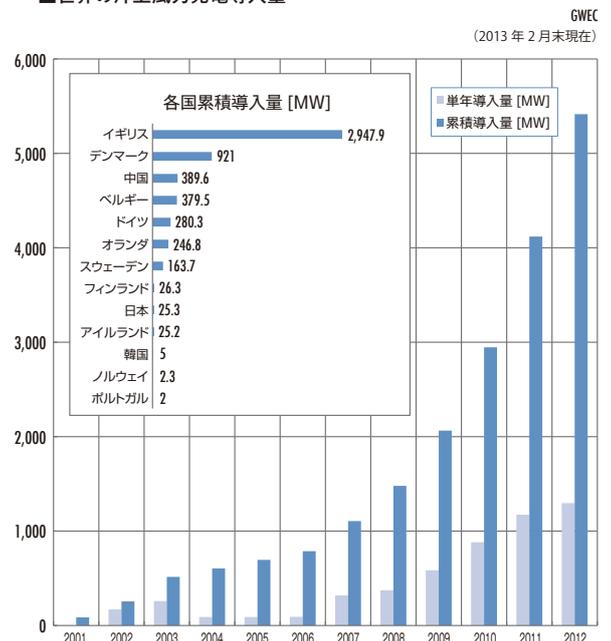


▲福岡県北九州市沖の風況観測タワーと風車

■日本における風力発電導入量の推移



■世界の洋上風力発電導入量



日本の洋上風力発電技術の基盤を築く



欧州では洋上風力発電について“Offshore is not offshore”という表現を使うことがあります。同じ洋上風力発電でも海象条件（水深、離岸距離など）の違いがあることなどから、「一言で洋上風力発電とは言ってもタイプはいろいろ」というわけです。

日本でも、海域によって気象・海象条件が大きく異なるため、実証試験は太平洋側（銚子沖）と日本海側（北九州市沖）の2海域で実施しています。

特に、日本では、洋上風況を長期間、高高度で計測した事例はありません。洋上風況、波浪・潮流などの諸特性の把握は洋上風力発電設備を設計する上で非常に重要です。そのため、高精度の計測装置による観測を約2年間行います。こうした観測データは今後、洋上風力発電の技術基準を策定する際に貴重なデータになります。

洋上風車の開発では、塩害対策や台風・落雷対策など洋上の厳しい自然環境に適合可能な技術開発課題に取り組む必要があります。また、洋上風車へのアクセスは、陸上の場合に比べて大きく制限されます。そこで、高い稼働率の維持に必要なメンテナンス性や運転監視技術の高度化の研究開発を行い、それらの課題を克服すると共にデータを蓄積します。

環境影響評価については、海洋生物の定量的な調査・評価が重要となります。採取できない底魚類の調査方法や^{いしゅう}蛸集効果などの評価手法を検討します。

日本では、洋上風力発電は動き出したばかりですが、陸上で培われた風力発電の技術や超大型化への取り組みなど先行する欧州勢に技術的に対抗できる可能性は大いにあると思っています。

現在、開発を進めている7MWクラスの超大型風車は、革新的なドライブトレイン（動力伝達装置）を持ち、メンテナンス性を改善した世界に類を見ない全く新しい風車です。日本の重工メーカーの豊富なりソースを活かし、一方で海外の革新的な技術を取り込むことで、先行している海外の風車専門メーカーの水準を超えようとするものです。このような取り組みは、今後の技術開発の一つの方向性を示すものです。



伊藤 正治（いとう まさはる）
NEDO新エネルギー部
風力・海洋エネルギーグループ 主任研究員
2006年4月より新エネルギー技術開発部の
風力担当を経て、2009年10月より現職。



（左）同グループ 福岡県北九州市沖担当 主査
山崎 雄一郎（やまざき ゆういちろう）
（右）同グループ 千葉県銚子沖担当 職員
大重 隆（おおいげ たかし）



▲風況観測タワー建設の様子（北九州市沖）



▲実証エリア（千葉県銚子沖と福岡県北九州市沖）



▲風況観測タワー建設の様子（銚子沖）

北九州市沖 風況観測タワーの測定装置

- ①三杯式風速計
- ②超音波風向風速計
- ③温湿度計
- ④海面温度計
- ⑤気圧計
- ⑥雨量計
- ⑦海象計
- ⑧LIDAR（遠隔風況測定機）
- ⑨矢羽根式風向計





グローバル競争の中で 国を挙げた洋上風力発電の産業育成が必要

2012年10月、銚子沖の洋上風力発電システムの風車が完成し、2013年から本格的に発電を開始した、「洋上風力発電等技術研究開発」のプロジェクトリーダーである東京大学大学院 石原孟教授に、本プロジェクトで得られる成果への期待と、今後の展望についてお話を伺いました。

NEDO「洋上風力発電等技術研究開発」プロジェクトリーダー
東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 石原 孟 教授

Profile

石原 孟(いはら たけし) 1962年北京生まれ。東京工業大学理工学研究科土木工学専攻博士課程修了後、清水建設㈱に入社。2000年に東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻の助教授に就任。2008年より現職。専門分野は、風力エネルギー利用のための賦存量評価、風力発電量のリアルタイム予測、風力発電設備の耐風設計、浮体式洋上風力発電システムの開発など。

日本で「初めての沖合」洋上風力の持つ意味

——日本ではこれまで主に陸上に風力発電設備が作られてきましたが、洋上風力発電所もいくつか存在しますね。

石原 今回建設を完了した銚子沖と北九州市沖の洋上風車の一番の特徴は、建設、運転、保守ともすべて沖合の洋上で行ったということです。他の洋上風力発電所でも外洋に面して建設されているものもありますが、建設や保守は陸上から行っています。すべての作業を沖合の洋上で行った本格的な洋上風車という意味では今回初めての試みになります。

——多数の洋上風力発電所が建設・運転されている欧州のノウハウを活かすことはできないのでしょうか。

石原 銚子沖は日本でも有数の波の「うねり」が厳しい海域です。また、北九州市沖は「台風銀座」と呼ばれるほど、台風の影響を受ける海域です。このような欧州とは異なる自然条件のもとで、洋上風力発電所の建設、運転、保守のノウハウを蓄積する必要があります。今回の実証研究ではうねりや台風、更には冬場の厳しい気象・海象条件の中、無事施工を完了しました。実証研究から得られるデータやノウハウは、今後の洋上風力発電所の設計や運転に利用できます。実際に、IEC（国際電気標準会議）などの国際標準へ提案しなければいけない項目も整理できつつあります。

今回のデータが将来の礎となる

——世界的に風車の大型化が進んでいますが、日本でも大型化を目指していくのでしょうか。

石原 今回の2.4MWの風車を、日本の技術で実際に建設できたということが重要です。もちろん、今後、更に洋上風力のメリットをより活かせる大型化を進めていく必要があ

ります。今回の洋上風況観測タワーの100mという高さは7MW級風車のタワーの高さと同じです。また、観測範囲である200mは7MW級風車のブレードの最高点と同じです。今回の実証研究で収集するデータの多くは、大型風車の開発にも役立ててすることができます。

大規模ウィンドファームの実現に向けて

——今後、日本で洋上風力発電が普及していくためには、どのような課題があるのでしょうか。

石原 課題の一つは、海洋利用のためのインフラ整備です。洋上風車の基礎やナセルなどを積み出すためには、港湾設備の整備が必要です。また、建設のための大型起重機船や作業船も必要です。これらのインフラは、浮体式洋上風力発電が実用化する際にも必要です。こうしたインフラの整備は、民間だけでは難しく、国の支援が不可欠です。もう一つの課題は国内の開発体制の構築です。風車が大型になると、部品の調達が難しくなります。国内で部品の開発・試験・製造ができるようにしないと、国際競争力は上がりません。

——今後、NEDOに期待されるのはどのようなことでしょうか。

石原 海外では、国が導入目標を定めて、法整備とインフラ整備を行い、国を挙げて風力発電を産業として育成しようとしています。また、欧米だけでなく韓国などのアジア圏でも急速に開発を加速させてきています。日本も欧米のように国が高い導入目標を定めると共に、インフラ整備を含めて技術開発で戦略的に支援をしていく必要があると思います。NEDOには、グローバル競争を勝ち抜くための強いリーダーシップを期待しています。

国内初！沖合における 洋上風力発電はじまる

NEDOは、千葉県銚子沖と福岡県北九州市沖に洋上風況観測タワーと洋上風車を設置し運転を開始しました。実際に洋上風車で発電した電力を陸上に送電、風車の運用やメンテナンス技術など、洋上風力発電を導入普及する上で重要となる技術を確立します。また、洋上風況観測タワーを国内で初めて太平洋側と日本海側に設置することで、洋上の風況特性の定量的な評価が可能となります。NEDO「洋上風力発電等技術研究開発」プロジェクトの銚子沖、北九州市沖の取り組みを現場の声と共にご紹介します。



銚子沖

千葉県銚子沖の 洋上風力発電システム運転開始!

■スケジュール

2009年度	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度
洋上風況観測タワー					
調査	設計	製作	設置 8月設置完了	運転・保守 (風況観測)	
洋上風車					
	設計	製作	設置 10月設置完了	運転・保守 (発電)	

実証研究の概要

NEDOは、2009年度から「洋上風況観測システム実証研究(銚子沖)」、(委託先:東京電力株式会社、東京大学)を、2010年度から「洋上風力発電システム実証研究(銚子沖)」、(共同研究先:東京電力株式会社)を実施しています。

本実証研究では、風車と観測タワーなどの実証研究設備を、日本でも特に厳しい海象・気象条件の千葉県銚子沖に設置。安全な基礎形状や構造などを開発し、洋上で実証することで、日本に適用可能な洋上風力発電設備の設計方法を確

立します。

具体的には、沖合洋上の厳しい環境下で、除塩フィルターや熱交換器などによりナセルへの塩分の流入を減らすなど、最適な耐塩害機構を開発、洋上で実証します。また、プレストレスト鉄筋コンクリート構造により、ひび割れの発生を抑制し、塩害劣化が生じにくい基礎を開発します。これらを洋上で実証することにより、風車と基礎に作用する外力と動的挙動の計測や、ナセル内機器の健全性の計測などの設計方法を確立します。

さらには、遠隔監視や遠隔制御機能の強化による点検インターバルの延伸など、アクセスが難しい洋上風車の最適な運転保守方法を確立します。

風況観測タワーの組立が2012年8月に、風車の組立は同年10月に完了。2013年1月からは日本で最初の沖合洋上風力発電実証研究設備の運転を開始しました。

作業工程(銚子沖)

1 環境影響評価



生物や景観などの事前調査を行い、洋上風況観測タワーと洋上風車の設置に伴う環境への影響を予測・評価します。なお、環境影響は洋上風車の設置前後や稼働中にも行い、環境影響評価を検証します。

2 基礎構造物の建設



基礎構造物は、台風や地震などの厳しい自然環境下においても洋上風況観測タワーと洋上風車を支えるように設計・製作されたものです。海底から海面まで十数mの高さの構造物で重量は数千tです。

3 洋上風況観測タワーの設置



洋上約100mの鉄塔で、10m間隔で風向や風速などを計測します。最大200mまでの上空の風況をリモートセンシング技術で観測できる国内初の観測用のタワーです。

4 海底ケーブルの敷設



洋上風車で発電した電力を陸上に送電したり、洋上風況観測タワーの計器類に電源を供給する電力ケーブルと、観測結果や風車のデータを送信する通信ケーブルを海底に敷設しています。

5 洋上風車の設置



ブレードの中心は海面高さ約80m、ローター径92mで、2400kWの発電機や変圧器などが搭載されている格納施設(ナセル)には、塩害対策や結露・腐食防止対策などを施しています。

6 送变电設備の設置



送变电設備は、洋上風車で発電した電力の電圧を変えたり、既存の電力系統への接続・遮断を行い、発電した電力を送電するための設備で、洋上風車に近い陸上に設置します。

7 試運転



すべての設備の設置終了後、各設備の試運転を行い、発電設備、観測設備、通信設備などの点検を行います。特に風車の試運転では、電気系統、安全装置、ブレーキ、ピッチ制御などの動作確認を行います。

8 運転開始



2014年度末まで約2年間、洋上風況観測タワーによる風況データの収集および洋上風車における発電性能の検証や運転・保守に関する技術の検討などを行い、データやノウハウを蓄積します。

日本で最も厳しい環境の海域を制し洋上風力発電のモデルケースを構築する



左から東京大学の石原孟教授、東京電力㈱の福本幸成氏、鹿島建設㈱の田中秀夫氏

すべてが「初めて」の手探りでの作業

「一つひとつの作業がすべて初めてのことばかりなので、設計はもちろん、様々な手続きにも時間がかかりました」と振り返るのは、東京電力(株)技術開発研究所の福本幸成氏。日本で初めて沖合に洋上風車と洋上風況観測タワーを建設するため、認可する行政側にも経験がなく、通常1~2カ月で済む審査に7~10カ月もの期間を要しました。

「東京大学の石原教授らの専門家の協力を得て、欧州の洋上風車の実績に日本の自然条件を加味し、一つひとつ設計条件を決めていきました」

洋上風車の建設でもっとも重要な点は、環境への影響評価と地元住民の理解です。地元の漁協などの関係者の元に幾度も足を運んで説明したという福本氏は、「地元の皆さんには、いろいろな点でご協力をいただき、大変感謝しています」と、地元の理解と協力がプロジェクトの成功に不可欠であることを強調します。

アイデアと経験で困難を克服

実際の建設工事を担当した鹿島建設(株)東京土木支店土木部工事第4グループ担当部長の田中秀夫氏は、「予想以上に大変な作業で、困難の連続でした」と振り返ります。親潮と黒潮がぶつかり、波のうねりが強いことで知られる銚子沖での建設作業は、台風シーズン前の6~8月までに基礎工事を完了する必要があり、海底の浚渫工事を2011年2月から開始しましたが、その直後に東日本大震災が発生しました。

「浚渫工事の現場も津波に襲われ、基礎を製作していた鹿島港も被害を受けました。震災後は、工事を中断して船舶や資材などを復旧支援のため被災地に提供しました」と、田中氏は当時を振り返ります。



完成した基礎は、FD船に積込・運搬し、起重機船で吊り下げて所定の場所に設置します

銚子沖での基礎工事が再開されたのは1年後の2012年2月。海底を岩盤まで浚渫した後は、大小の石を敷き詰め、水平に整地する必要がありました。

「水中バックホウという特殊な建設機械を使用しましたが、視界が30cm程度しかなく、ダイバーの手作業で工事を進めざるを得なくなりました。銚子沖特有のうねりのため、ダイバーは石を動かすだけでなく、自分の体が流されないようにする必要があります。ベテランばかりだったのですが、今まででこんな過酷な現場はなかったと言われました。しかし、ダイバーの努力のおかげで±5cmの精度が要求される整地作業が6月に完了しました」

しかし、海底の整地工事の後にも難工事が続きました。風車の基礎になるケーソンと呼ばれる巨大な函状構造物は、底面の直径が21m、重量が約2300tの三角フラスコのような形状をしたコンクリート製の構造物で、水深約12mの海底に設置しなければなりません。

「今回使用した起重機船は全施回式では日本最大級ですが、1600tまでしか吊り下げられません。そこで、ケーソンを半分水没させ、浮力と起重機でケーソンを吊り下げる方法を採用しました。また、船の先端から起重機で吊り下げると波の影



響をもろに受けるので、動揺の小さい船の真ん中から吊り下げて、波と波の間の距離が船体の長さ以下になり、船が安定する一瞬を狙ってケーソンを降ろしました。

毎日、天気予報とにらめっこして、早朝、波の様子を確認して、船を出すタイミングを見計らう日が続いたので、成功した時は本当にしびれました」

所定の場所に設置されたケーソンの内部には、スラグが詰め込まれ、完成重量が約5400tになったケーソンが、風車を支えています。

工事の経験や実証データが財産に

風況観測タワーや風車は、SEP(Self Elevating Platform)船を使って建設します。SEP船は、昇降する4つの脚を持ち、この脚を海底につけて、船体を海面から持ち上げることで、波の影響を受けることなく洋上で工事を行えます。

「SEP船のおかげで基礎工事よりは順調に作業が進みました。作業員は、荒波の中でも影響を受けずにSEP船で作業を進めています。2012年2月に再開以降、現場は一日の休みもなく作業をしています」(田中氏)

2012年8月に風況観測タワー、10月に風車の設置が完了、2013年3月からは、本格的に運転を開始しました。

「基礎の製作では、巨大な基礎を運び出せる港を探すのに苦労しました。風車の建設に利用できる港湾設備の必要性を強く感じました」と福本氏は工事をこう振り返ります。

田中氏も、「外洋で作業を行うためには、外洋に適した専用船が必要です。大型風車の建設には洋上が適していますが、そのためには大型の風車専用船を開発する必要があります」と、洋上風力発電の普及にはインフラの整備が必要であると強調します。

日本で最も厳しい工事環境であると言われる銚子沖で蓄積された洋上風車の建設で得られた経験や今後取得するデータのすべてが、日本の洋上風力の普及に大きく役立つことが期待されます。



東京電力株式会社
技術開発研究所
洋上風力発電技術
グループマネージャー
福本 幸成氏



鹿島建設株式会社
東京土木支店
土木部工事第4グループ
担当部長 田中 秀夫氏

タワーや風車を組み立てるSEP船上には、ナセルなどのすべての部材が積み込まれています







北九州市沖

福岡県北九州市沖の 洋上風力発電システム運転開始！

■スケジュール

2009年度	2010年度	2011年度	2012年度	2013年度	2014年度
洋上風況観測タワー					
調査	設計	製作	設置 6月設置完了	運転・保守 (風況観測)	
洋上風車					
		設計・製作	設置 3月設置完了	運転・保守 (発電)	

実証研究の概要

NEDOは、2009年度から「洋上風況観測システム実証研究（北九州市沖）」（委託先：電源開発株式会社、独立行政法人港湾空港技術研究所、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社）を、2011年度から「洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）」（共同研究先：電源開発株式会社）を実施しています。

前者は主として洋上に風況観測タワーを設置し、洋上における気象・海象の特性を把握するものです。また、海域の気

象・海象条件を適切に推定するためのシミュレーションシステムを構築し、実際の観測データによる検証を行います。後者は、日本固有の気象・海象を考慮した施工方法や洋上での適切な発電計画や運転方法の確立に必要なもので、今後の洋上風力発電の促進に資するデータとして取りまとめることを目的としています。千葉県銚子沖とは、支持構造物や風車の発電方式に違いがあり、両サイトで取得される支持構造物に作用する応力や風車の運転・保守から得られる各種データを比較することにより、我が国に適した洋上風力発電の検証が可能となります。福岡県北九州市沖では、観測タワーの据え付けと各種計測装置の設置が2012年6月に完了し、同年10月から風況や海象の観測を開始しました。一方、風車については、これらのデータを活用しながら、日本海側の厳しい冬季の気象・海象を予測し、作業可能な日時や作業日数を随時検証しながら2013年3月に無事、洋上風車の据付を完了し、同年6月より運転を開始します。

作業工程（北九州市沖）

1 環境影響評価



洋上風況観測タワー、洋上風車設置に伴う生物や景観などの調査を行い、環境への影響を予測・評価します。洋上風車設置前後や稼働中にも調査を実施します。

2 支持構造物の建設



支持構造物は、コンクリートと鋼材を組み合わせた、ハイブリッド重力式を採用しました。この型式は、安定性と耐波浪性に優れています。

3 洋上風況観測タワーの設置



海面高さ約80mの観測タワーを、大型起重機船によって据付しました。10m間隔で風向・風速を計測します。

4 海上鉄柱の設置



敷設した海底ケーブルを陸上に設置する開閉設備へ接続するために、陸上に近い海域部に、海上鉄柱を設置し架空でケーブルを接続します。

5 海底ケーブルの敷設



洋上風車で発電した電力を陸上へ送電したり、洋上風況観測タワーの計測装置に電源を供給する電力ケーブルと、観測データ等を送信する通信ケーブルを専用の作業船を用いて海底に敷設しています。

6 洋上風車の設置



ブレードの中心は海面高さ約80m、ローター径83mで、1980kwの発電機、変圧器などが搭載されています。また、塩害対策など洋上ならではの対策も講じております。

7 開閉設備の設置



開閉設備は、洋上風車で発電した電力を、既存の電力系統へ接続・遮断を行い、発電した電力を送電するための設備で、陸上に設置します。

8 運転開始



2014年度末まで、洋上風況観測タワーによる風況データの収集および洋上風車における発電性能の検証や運転・保守に関する技術の検討などを行い、データやノウハウを蓄積します。

冬の日本海の過酷な気象条件を考慮し構造設計や工法に活かす



▲左から電源開発(株)の中嶋周作氏と吉村豊氏、五洋建設(株)の小菌澄久氏と松本隆氏
▶あらかじめフローティングドック上で製作された支持構造物を、4000 t吊級の起重機船を用いて据え付ける。
風車はSEP(自己昇降式作業船)を用いて据え付ける。



①フローティングドック上で製作された支持構造物の状況



②支持構造物の海上輸送・設置



③風車設置(ブレード設置状況)



④設置完了

国内初の洋上風況観測タワー

2012年6月30日、福岡県北九州市沖で、国内初となる洋上風況観測タワーが設置されました。「6月の北九州市沖は、季節はずれの台風に見舞われるなど天候に恵まれず、安全上の観点から、なかなか作業が進められない日もありましたが、無事に国内初となる洋上風況観測タワーの設置に成功しました」と、プロジェクトを実施する電源開発(株)環境エネルギー事業部風力事業室室長代理の吉村豊氏は、安堵の表情でこう語りました。

吉村氏は「地元の皆様のご理解と北九州市が港湾利用などについて迅速かつ機動的なご対応をしてくださったことが一番大きかったです。こうした支援によって今があるのだと思います」と地域のバックアップの重要性を指摘します。

さらに、技術的な困難さについても、「構造機能面から観測タワー・風車ともに基礎面で $\pm 5\text{cm}$ 、傾きでそれぞれ0.30、0.25度内での精度管理を行いました。構造のプレキャスト化や海上での施工方法を含めて、これらをクリアするのは非常に大変でした。何度も検討を重ねてようやく成功したという感じです」と振り返ります。

「ハイブリッド重力式支持構造」採用

北九州市沖のプロジェクトで特徴的なのが、洋上風況観測タワーと風車の支持構造物として「ハイブリッド重力式」という方式を採用した点です。

「支持構造物の方式には、重力式(ケーソン等)、杭式(モノパイル、組杭等)、ジャケット式などがありますが、今回のプロジェクトでは、重力式の施工メリットと、ジャケット式の主に構造特性における利点を活かしたハイブリッド重力式を採用しました。これは、海底の基礎捨石マウンド上に、底版コンクリートと一体化したジャケットを設置する構造です」(吉村氏)

さらにハイブリッド重力式のメリットについて、吉村氏はこう解説します。「まず、構造面では、水中部を骨組部材で透過構造とすることにより、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できます。また、施工性については、捨石マウンド築造後、プレキャスト(あらかじめ工場などで組立・製作しておくこと)化、すなわち底版コンクリートとジャケットを一体化して4000t吊級の起重機船を用いて据え付けることにより、海上での作業量を大幅に減らすことができます。さらに、鋼材とコンクリートを併用したハイブリッド構造によって、安定を保ち、ねばり強い構造にすることが可能となります。

洋上の風車に求められる機能

今回、北九州市沖のプロジェクトで設置される風車の特徴の一つが、銚子沖とは異なる「ギアレス式」の発電機を採用している点です。風力事業室課長の稲葉真一氏によれば、「今回のプロジェクトで採用した(株)日本製鋼所製のギアレス式風力発電機は、増速機を使用せず、部品数が比較的小さいため、他形式の製品よりも故障が少なくメンテナンスコストが低いことなどが特長です」



電源開発(株)では、すでに福井県のあわら北潟風力発電所でもギアレス機を採用していますが、今回のプロジェクトでは、洋上への設置を考慮して、塩分対策を重点的に行っているそうです。

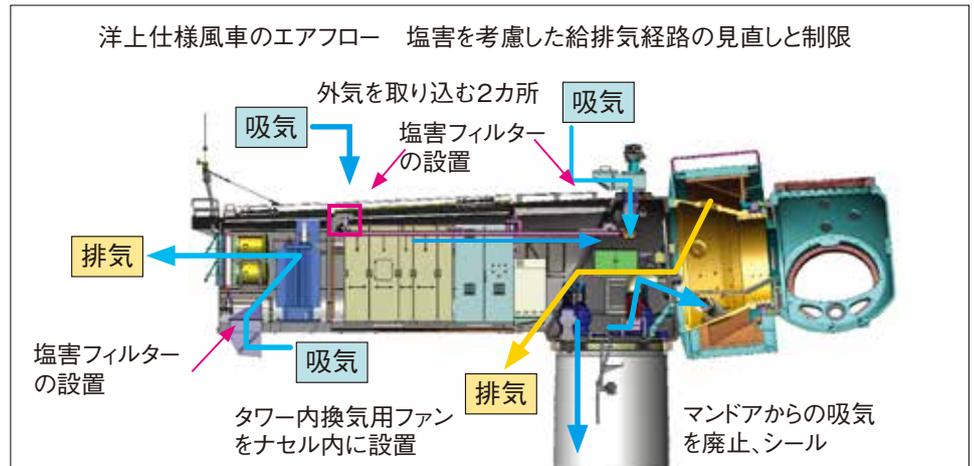
「主に塗装とエアフローの2点で塩分対策を行っています。まず塗装については、タワー、ハブ、ナセル、サブフレーム、発電機に重耐塩塗装を施しています。通常、風車は冷却のためにタワー下部から空気を取り入れ、ナセルに送風することで駆動部の冷却を行っていますが、洋上では、タワー下部から空気を取り入れると塩分を含んだ空気が風車内を通過することになってしまいます。そのため、エアフローを反転し、ナセル上部から塩分除去フィルターを通過させた後に空気を取り入れる方式を採用しています」(稲葉氏)

2013年2～3月の風車の設置作業を担当した、五洋建設(株)九州支店響灘観測塔工事事務所工事所長(当時)の小蘭澄久氏は、悪条件の中での風車設置作業について、こう振り返ります。

「当時、風車支持構造物の点検作業のために洋上へ船を出すことがあったのですが、60cm程度の波でも影響を感じる状況でした。これが2～3月頃には1～2mの波が予想され、作業にはさらに慎重を期す必要がありました。ただ、設置作業そのものはSEP船で行いますから、波が問題となるのは、主に作業人員の輸送です。風車の設置作業においては、むしろ風が最大の難敵となります。特に冬の日本海側での作業になりますので、条件はさらに過酷になる中で作業計画を検討しました」

過酷な冬場の洋上風車の施工

そして、2013年3月23日、福岡県北九州市沖において洋上風車の設置が完了しました。「風車据付工事は、2013年2月末より本格的な海上作業を開始しましたが、冬場の日本海での工事でもあり非常にチャレンジングなものでした。工事関係者のご尽力もあり無事風車据付を完了することができました」と、プロジェクトを担当する吉村氏は語りました。続けて、吉村氏は「冬季それも短期間での施工という前例のあまりない工事のため、仮設備含め風車据付作業に関する綿密な作業手順を作成しました。また、一日に数回波浪・風速予測を行いながら随時作業手順を関係者で協議、見直すことで、安全にしかも所定の精度で風車据付を行うことができました」と振り返り



ます。

工事を担当した小蘭氏は、「風車据付でSEPを用いましたが、SEPへの作業員の安全輸送や風車据付時に問題となる波高や風速の事前予測など、洋上風車据付工事特有の課題は明らかになったと思います。また工事中は、風速や波高予測結果を基に翌日の作業実施可否を判断し、さらに当日早朝の予測結果を基に当日午前の作業実施可否を判断しました。このように、細やかな予測を取り入れて、確実・安全かつ効率的な工事を実施することで、過酷な冬場の風車据付を無事完了することができました。」と語りました。

洋上風車は各種動作確認、試験運転を経て2013年6月より運転を開始する計画であり、本格的な洋上風力発電の導入に向けた、貴重なデータ収集作業が始まります。

最後に、本プロジェクトの意義について吉村氏に聞きました。「日本海側の厳しい自然条件のデータが初めて本格的に取れるという意味では非常に大きな意義があります。本プロジェクトでは、海面下15mから海上80mの高さにわたって、洋上風況観測タワーに取り付けられた観測システムによって気象・海象などの観測データを取得します。こうしたデータは今後の洋上風力発電にとって極めて重要です。洋上風力発電については世界的な競争が激化してきており、また、震災以降は国内でも急速に期待が高まってきています。こうした期待にぜひ応えていきたいと思っています」



電源開発株式会社
環境エネルギー事業部
風力事業室 室長代理
吉村 豊氏



電源開発株式会社
環境エネルギー事業部
風力事業室 課長
稲葉 真一氏



五洋建設株式会社九州支店
響灘観測塔工事事務所
工事所長
小蘭 澄久氏

7MW級の超大型風車で 世界市場を目指す

NEDOは、世界に先駆けて7MW級以上の超大型風力発電システムを実用化するために、2011年度から「超大型風力発電システム技術研究開発」プロジェクトを進めています。このプロジェクトでは、信頼性が高くメンテナンス性に優れた構造のドライブトレイン（ブレードの回転を発電機へ伝達する動力伝達装置）、剛性が高く軽量化された長翼ブレード、部品の故障やメンテナンス時期を予測できる遠隔監視システムを一体として開発することが目的です。現在、2.4MW級の新型ドライブトレインの実証試験が進められている三菱重工業株式会社 横浜製作所（金沢工場）で、開発の進捗状況などについてお話を伺いました。

●大きさを競う時代に

クリーンエネルギーとして注目を集めている風力発電ですが、洋上風力発電では発電コストの低減が大きな課題になっています。1基当たりの発電量が大きくなれば、設置数を減らすことができます。そのため、風車の大型化は世界的な潮流となっています。そして、大型風車は陸上では運搬・施工時の制約などがあるため、洋上風力発電での適用が想定されています。

「現在、世界各国の風車メーカーが主力機として生産しているのは3～4MW級の風車です。開発が表明されているものでも、5～6MW級がほとんどです。この事業では、商用化可能な範囲では最大級となる7MW級の風車の開発を目標にしています」

原動機事業本部風車事業部洋上風車開発プロジェクト室室長の宇摩谷雅英氏は、プロジェクトの目標をこう説明します。

●大型風車実現のテクノロジー

同プロジェクト室技術担当部長の浜野文夫氏は、「単にスケールアップするだけでは超大型風車を実現することが難しいという現実があります。例えば、現在主流となっている風力発電機には増速機と呼ばれる装置が必要ですが、超大型風車では増速機に使用する歯車も巨大なものになります。そのため、故障しやすく、技術・コストの面でも制約が見えてきています」と指摘し、超大型風車に必要な技術開発として、「油圧ドライブ」「長翼ブレード」「遠隔監視システム」の三つを挙げます。

信頼性と堅牢性を両立～油圧ドライブ～

風力発電では、風車の回転を発電機に伝えるドライブトレインと呼ばれる動力伝達装置が不可欠です。油圧DDT

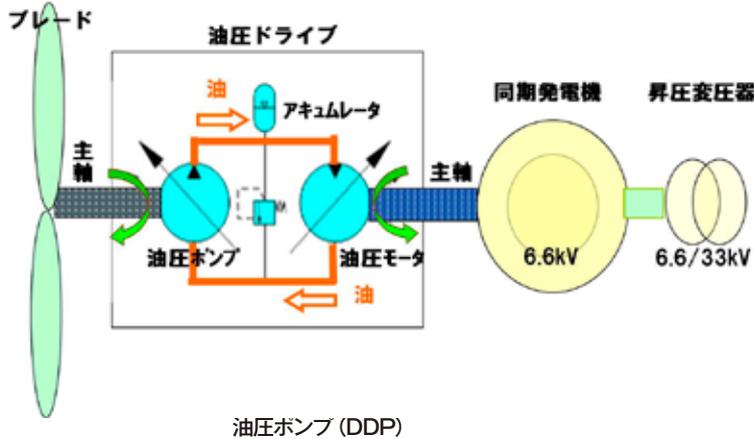
(Digital Displacement[®] Transmission: デジタル制御可変容積式動力伝達機構)では、風車の回転をいったん油圧ポンプで油の流れに変え、それを油圧モーターに伝えることで、発電機を回す仕組みになっています。三菱重工業(株)では、英国エジンバラのベンチャー企業アルテミス社 (Artemis Intelligent Power LTD) が開発した油圧DDTの制御技術を導入して、洋上風車用ドライブトレインの開発を進めています。

「油圧DDTでは、油圧ポンプと油圧モーターのシリンダーが油を介してエネルギーをやり取りします。他の方式では大きな故障が生じた場合に装置全体を交換する必要がありますが、油圧DDTであれば油圧部品の部分交換で対応することができます。また、単純にシリンダーなど小部品の数を増やしたり、油圧モーターの数を増やしたりすることで大出力化が可能であり、大出力化への対応も容易であるという特長があります。さらに、一つの油圧モーターが故障したとしても他のものが動いていれば出力が完全にゼロにならないというのは電力を供給する立場からすると大きなメリットになります。」と浜野氏は話します。



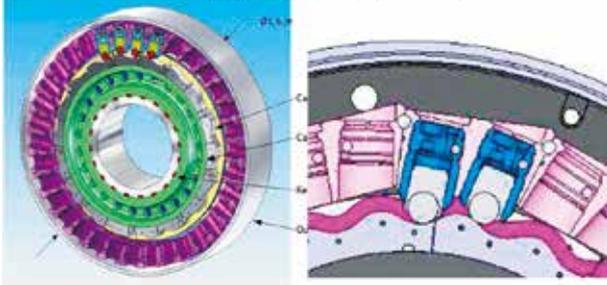
油圧DDTについて打ち合わせを行う三菱重工業(株)とアルテミス社のメンバー

Key Technology キーテクノロジー ①

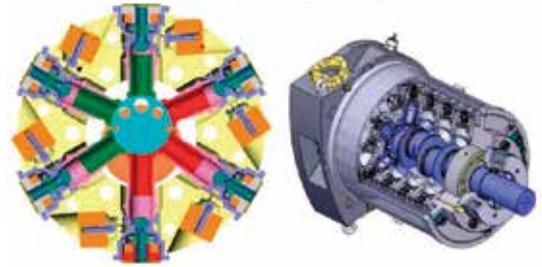


油圧DDTでは、油圧ポンプで高圧油を生成し、油圧モーターを回転させ、発電機で発電します
(上:油圧DDT原理、下左:油圧ポンプ、下右:油圧モーター)

油圧ポンプ (DDP)



油圧モーター (DDM)



油圧ポンプ (DDP: Digital Displacement[®] Pump)の動作原理

風を受けたブレードは1分間に10回転程度の低速でゆっくりと回転し、この回転力は主軸を介して上図の赤色部分に示す波型の構造物に伝えられます。波型構造物が回転することにより、その上に取り付けられているシリンダー（42個×4列）が上下運動することにより、大気圧の約350倍の高圧油が生成されます。高圧油は配管を通して油圧モーター（DDM: Digital Displacement[®] Motor）へ送られます。油圧ポンプと油圧モーターの間が配管で接続されていることにより、高い自由度でナセル内の機器を配置することができます。そのため、ブレードから発電機まで主軸で直結された風車と比較して、高い自由度のナセル内機器配置が可能になります。また、風の強さに応じて、使用するシリンダーの数を調整することができるため、風が弱いときには、一部のシリンダーを休止させることにより、ブレードから発電機へと高いエネルギー伝達効率を発揮することができます。

油圧モーターの動作原理

油圧モーターは円周方向に6個のシリンダーを持ち、7MW油圧式風車では6個×2列で構成されています。油圧ポンプにて生成された高圧油で油圧モーターを回転させることにより発電機軸の回転数とトルクを自由に微調整することができます。この特性により、通常の火力発電所と同じ、汎用同期発電機を風車で採用することが可能となります。そのため、電力品質に直結する発電電力の電圧、周波数、力率を油圧モーターで直接、微調整することができるため、従来の風車で必要であった、電力変換器が油圧式風車では不要になるメリットがあります。

大出力と高い利用率を実現～長翼ブレード～

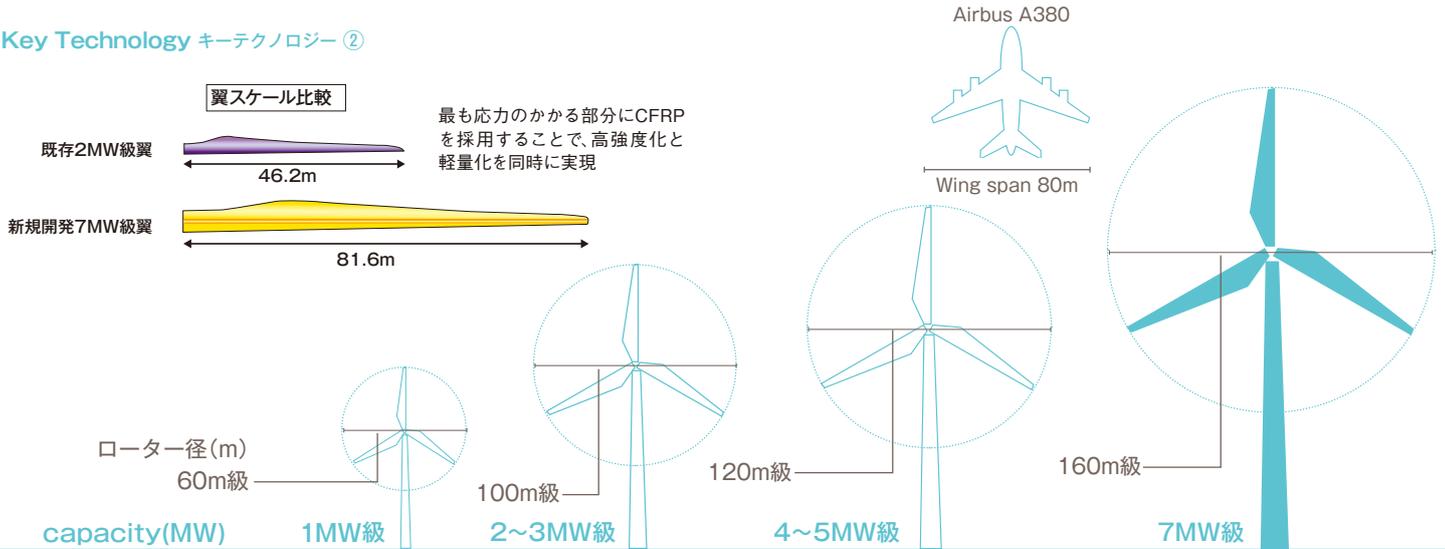
風車を大型化すると、風車のブレードも長翼化する必要があります。7MW級の風車ではブレード長が80mを超えるため、風によるたわみも大きくなり、現在使用しているGFRP（ガラス繊維強化プラスチック）では、強度的に耐えられません。

「軽量で高強度のブレードの材料にはCFRP（炭素繊維強化プラスチック）が適しているのですが、GFRPの10倍の価格であるため大量には使用できません。そこでブレードの一部にCFRPを使用し、強度を高める工夫を施しました」(宇磨谷氏)



モールドと呼ばれるブレードを整形する型でブレードを製作します
(左:モールド、右:試作を行った81.6mブレード)

Key Technology キーテクノロジー ②



耐雷性能を落雷試験で評価します
(上: アタッチメントと呼ばれる落雷ポイントへの落雷試験、下: アーク放電による試験)

高強度化と軽量化のほかにも、長翼ブレードには解決すべき課題があります。それは落雷・塩害・磨耗への対策です。

浜野氏は「ブレードの主要構造部材に使用するCFRPは導電体ですので、大きな落雷があると、CFRPの内部に大電流が通るため故障してしまいます。そのため、銅製のメッシュをブレード表面に取り付けて、電流を逃がす機構にしています。同機構は、航空機翼の耐雷設計で適用された解析技術による検証に加えて、

公式基準としては最も厳しいIEC Level1を超える電流及びエネルギーで大電流導通試験による検証試験を実施し、CFRPが健全なまま銅製のメッシュで導通出来ることを確認しています。また、耐雷設計においては、翼先端部に設置したレセプタにて確実に雷を補足することが重要ですが、あらゆる角度から被雷することを想定したレセプタ雷捕捉試験を実施し、捕捉率100%を達成しています」

また、「超大型風車ではブレードの先端部分の速度が時速300kmほどになるので、この速度で雨粒が当たると通常の塗料は剥がれてしまいます。また、長期間太陽光にさらされることにより、紫外線の影響で塗料の強度は低下します。そのため、紫外線によるダメージ、高速の雨粒を想定した耐久試験を実施し、耐久性の高いコーティング材を選定しています。そのため、超大型のブレードは知的財産とノウハウの塊です」とブ

レードの特徴について説明します。

そして、宇麼谷氏は「世界最大級の大型風車翼の試作を完了し、2013年5月末にドイツ/ザスニッツより試験設備への輸送を完了しました。完成した翼は、特殊トレーラによる陸上輸送と、輸送船による海上輸送を組み合わせ、ドイツの試験設備まで輸送し、2013年7月より実施する各種試験の準備を開始しました」と最新の開発状況について、力を込めて説明します。



81.6mブレードの性能試験を行うため試験所へ出荷します
(上: ブレードの積出、下: ブレードの搬送)

故障を予知するインテリジェントシステム～遠隔監視～

洋上風車を運用する上で鍵となるのが、保守・故障時の対応だと指摘する宇麼谷氏は、「洋上風車の場合、冬に故障しても作業船が風車に接岸できずに、翌年の夏まで修理できないといった事態が想定されます。そのために重要になるのが、故障の予知を可能にする遠隔監視システムなのです」と、故障予測の重要性を強調します。

「三菱重工業(株)ではプラント管理で培ったノウハウを活かして、超大型洋上風力発電システムを管理しています。風車に張り巡らせたセンサーから、様々なデータを取得することにより、故障の予測を行います。こうした保守・管理技術も日本の大きな強みになると思っています」と(浜野氏)



油圧DDTは工場内で試験した後に、実際に屋外で2.4MW級風車で発電試験を行います。
(上：工場内での油圧DDTの性能試験、右：2.4MW級風車による発電試験)

●まずはイギリス、そして世界市場へ

「金沢工場では実際に2.4MW級の風車で油圧DDTの実証試験を行います。油圧DDTを風車に搭載する前に、新規に開発した試験装置を使用して、油圧ポンプと油圧モーターの単体試験を実施して、安定運転性確認及び摺動部の信頼性確認や、弁類の最適な開閉タイミングの調整をする必要があります。そのため、工場内に油圧DDTを組立、工場内総合試験と称し、自動起動機能と、電源系統への同期投入機能の確認と、異常発生時の安全停止機能の確認を、想定されるあらゆる風条件下にて実施し、油圧システムの全体効率が目標値以上であることを確認しました。そして、2012年12月以降、金沢工場の2.4MW級風車に油圧DDTを風車タワーの上部のナセルに搭載し、実風車による総合試験を継続中です」と、これまでの取組を説明する風車事業部洋上風車開発プロジェクト室部長代理の向井正行氏は、「2013年中には、イギリスで7MW級油圧DDTの実証試験を行う計画で、まず、イギリスへの風車供給を目指しているところです。イギリス以外にも北海沿岸、アメリカ、中国などでも洋上風力発電の計画があり、日本製の超大型風車の導入を提案していきたいと考えています」と、今後の展開について話します。

世界市場を目指す7MW級の超大型風車について、宇磨谷氏は「油圧ポンプや油圧モーターを構成する、多数の小さいシリンダー（330/150CC）をANGEL（天使）にみたてて、高い信頼性が要求される洋上風車において、油圧技術にて、低炭素社会実現に貢献できるようにとの願いを込めて“SEA ANGEL®”と名前を付けました」と笑顔で説明します。

日本製の超大型風車が、世界中の洋上でクリーンな電力を生み出す日に向かって、NEDOは超大型風車の技術開発を進めていきます。



7MW洋上風車の“SEA ANGEL®”



三菱重工業株式会社 原動機事業本部
風車事業部 洋上風車開発プロジェクト室



室長
宇磨谷 雅英氏



技術担当部長
浜野 文夫氏



部長代理
向井 正行氏



銚子沖の洋上風況観測タワーの建設風景（2012年8月撮影）



銚子沖の洋上風車の建設風景（2012年10月撮影）



北九州市沖の洋上風況観測タワーの建設風景（2012年6月撮影）



北九州市沖の洋上風車（2013年3月撮影）



**独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構
新エネルギー部**

〒212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310番
ミューザ川崎セントラルタワー 18階
TEL: 044-520-5273 FAX: 044-520-5276