

石狩湾新港洋上風力発電所の建設について

Wind Farm Construction Project in Ishikari Bay Area

(株) グリーンパワーインベストメント 瀬谷 和彦
(株) グリーンパワーインベストメント 高橋 孝介
(株) グリーンパワーインベストメント 藤田 亮

Kazuhiko Seya, Green Power Investment
Kosuke Takahashi, Green Power Investment
Ryo Fujita, Green Power Investment

Abstract

The offshore wind farm in Ishikari Bay started commercial operation on January 1st, 2024. We have gone through many hardships to get to this point. For example, we applied jacket foundation as first case of commercial scale offshore wind farm in Japan, considering structural stability of seismic design against soft geological layer. During the construction period, there were times of stormy weather such as lightning strikes and an unseasonable typhoon approaching, but thanks to the efforts of those involved in the construction as well as the understanding of the local people, we were able to complete the construction and commence the commercial operation of the largest offshore wind farm in Japan.

1. プロジェクトの概要と特徴

右図に案件の概要位置図を示します。本プロジェクトは、石狩湾新港の北防波堤の外側に、単機出力 8MW の風車 14 基を設置し、それらの風車を連結した海底ケーブルを通じて送電し、180MWh の蓄電池設備を介して、自営送電線にて、北海道電力の西札幌変電所へ接続する発電所設備です。一般家庭約 83,000 世帯分の発電量を有します。

石狩湾新港の北防波堤沖合に指定された再生可能エネルギーを利活用する区域内に、発電効率の観点から最適な位置に 14 基の風車を配置しています。それぞれの風車は、ループ状に布設された海底ケーブルで接続されています。ループ状にしているのは、海底ケーブルが損傷した場合でも、逆方向からの集電により、発電した電気を損失な



写真-1 全体配置

く送電できるように工夫しているためです。石狩地区は、冬季は強風・降雪になることを考慮して、自営送電線は、「全て埋設」により対応しています。

1-1 本プロジェクトの経緯

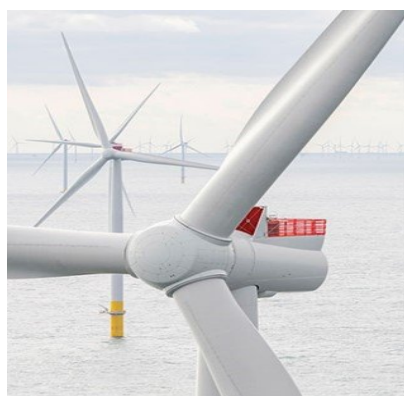
本プロジェクトの開発を当社が開始したのは、2007年からでした。この頃はまだ、日本では「洋上風力」への注目度は低い時期でしたが、欧州を中心に導入拡大に向けた動きがあったこともあり、日本でも洋上風力の実施可能性の検討が始まりました。一方で、当時は事業の実施権利を担保できる法律がなかったため、国に働きかけ、その結果、「港湾法で規定される港湾区域のみ」という結論を得ました。それを受け、当社では全国の重要港湾を風況等の観点から調査し、この石狩湾新港を本格的に開発することを決めました。2011年には日本で初めて、民間企業による防波堤上への風況観測機の設置を実現しました。翌2012年には、国土交通省が「港湾における風力発電の導入を円滑にするマニュアル」を公表し、それを受けて、2013年に石狩湾新港管理組合が港湾計画を変更し、「再生可能エネルギーを利活用する区域」が設定されました。これで、いよいよ石狩湾新港へ洋上風車設置への「足固め」が出来たこととなります。2015年に事業者公募が実施され、当社が事業者に選定されたことを受け、北海道電力との系統連系に関する協定書を締結しました。そして2020年に陸上の電気工事に着手しました。石狩湾は冬季の海象条件が非常に厳しく、洋上作業が困難であることを考慮して、洋上工事実施可能時期は2022年及び2023年の5月～8月末の各4か月間として工事工程を進めました。

1-2 本プロジェクトの特徴

本プロジェクトの特徴は、以下の3点となります。

① 日本で最大規模の洋上風力発電設備（8MW×14基）＋蓄電池設備の併設

採用した風車はシーメンスガメサリニューアブルエナジー（以下、SGRE）社製の、単機出力8MWの洋上専用風車になります。この風車はブレード（羽根）の回転直径が167mあり、現状、国内に設置されている風車としては最大規模のものです。世界的には欧州や台湾で設置実績を十分に有し、発電設備としては重厚長大ですが、非常にコンパクトに構成されており、全ての発電機器がナセルの中に納まっています。本プロジェクトでは毎日一定時間、需要に合わせて出力をコントロールすることが求められました。自然条件に左右される再エネ電源においては非常に難しいことですが、本プロジェクトでは180MWhもの容量を持つ蓄電池設備を建設することにより、出力コントロールの要件を満たすことができました。これほどの規模の蓄電池を有する洋上風力発電所は世界的にも稀と言えます。



写真提供：シーメンスガメサ・リニューアブル・エナジー

今後、SGRE 社は、「さらなる風車の大型化」を指向しており、日本国内では本プロジェクトでの採用が、「最初で最後の 8MW 機」となるかもしれません。

② 商用規模洋上風力発電所向け風車基礎として、日本で初の「ジャケット式」を採用

風車の基礎には、「ジャケット式着床基礎」を採用しています。日本では、これまでクルーズ船の栈橋、港湾の岸壁、羽田空港の D 滑走路（多摩川河口流域内）などで、ジャケット構造を採用した鋼構造物は多数ありますが、商用規模の洋上風力発電所における風車基礎としては、日本で初の採用となりました。本プロジェクトのジャケットは、1 基あたり約 800 トンの重量を有しており、海底面に打設した 4 本の鋼管杭で支えられています。

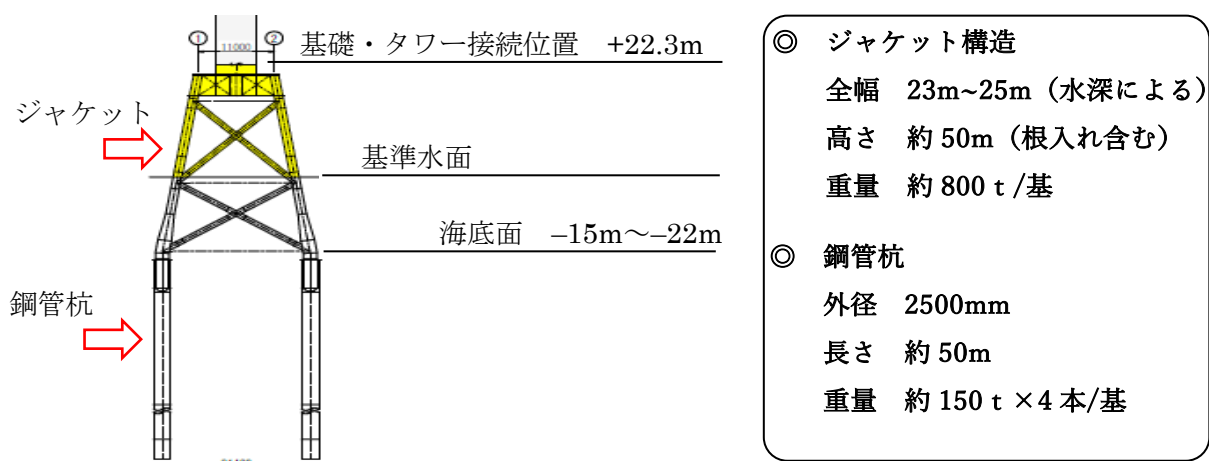


図-1 ジャケット構造

③ 2500 トン吊の世界最大級の SEP 船（SEP = Self Elevating Platform）を活用した工事

本工事は、2021 年に完成した新造船（Blue Wind：清水建設所有）を使用しました。本船は、世界最大級の風車据付専用の大型船であり、最大吊能力は 2500 トン、クレーンの最高揚程は 152m に及びます。総排水量は 37,200 トンであり、24 時間体制で作業が行えるよう、寝食が可能な居住区を合わせ持った最新鋭の工事船舶です。



写真-3 大型 SEP 船

写真提供：清水建設

風車の据付には、スパットカンを装備したレグを挿入し、波浪の影響を受けないように船体を海面より上昇させて固定します。風車部材は精密機械でもあり、ボルトで締結するため、船体動揺を回避する必要があります。石狩湾は軟弱地盤のため、このレグの固定が大きな課題の一つとなりました。

2. プロジェクトの実行体制

本工事のプロジェクト実行体制を以下の図-2 に示します。



図-2 プロジェクト実行体制

本プロジェクトは、SGRE 社と「風車供給契約（Turbine Supply Agreement : TSA 契約）」を締結して進めました。洋上風力プロジェクト全体のコストを 100 とすると、一般的には多くを欧米企業に頼らざるを得ない風車関連の購入品が 35 の割合を占めていますが、残りの 65 の要素については、本プロジェクトでは多くの国内企業に参画してもらい、「All Japan 体制」で臨みました。日本国政府も各種サプライチェーンを構築し、2040 年までに洋上風力事業の国内調達比率 60%以上という目標を掲げておりますが、本プロジェクトでは 2040 年を待たずして、約 65%を「国内調達」で賄うことが出来ました。日本に風車メーカーが無いため、今後も国内調達比率 60%以上は、他のプロジェクトにおいても高いハードルになることが予想されます。SGRE 社は、世界中のサプライチェーンから風車部品を石狩に搬入し、納入しましたが、組立ての時点で清水建設にハンドオーバーされることから、通関・部品の過不足・不具合など、SGRE と清水建設のインターフェースの面で、些細なものを含むものの、相当数のトラブルが発生することとなりました。これらは一つ一つコミュニケーションを通じて、時には知恵を出し合いながら解決しましたが、欧州と日本の文化の違いもあり、スタッフが最も苦労した点になります。

一方で、組み立て終わった風車は、再度 SGRE にハンドオーバーされ、コミッショニングを

実施して、「最終製品としての保証」に耐える製品となって完成していることが確認された後に清水建設に戻されます。従って、清水建設は、SGRE が定めた組立手順に従わなければならない、安全管理方法も含めて、日本と欧州の文化の違いを融合させることが難しい場面は多くありました。風車の組立て、据付の施工方法そのものは、一部、特殊な機器を使いますが、それほど難しいものではなく、「北欧のレゴブロックの思想」なので、基本構造は、全てユニット化され、それを作業手順に従って順番に組み立てるというものでした。日本のこれまでの高い土木・建築の技術力をもって対応すれば、全く問題とはなりませんでした。

3. プロジェクトの技術的ポイントと各工種ご紹介

① 工事全体フロー

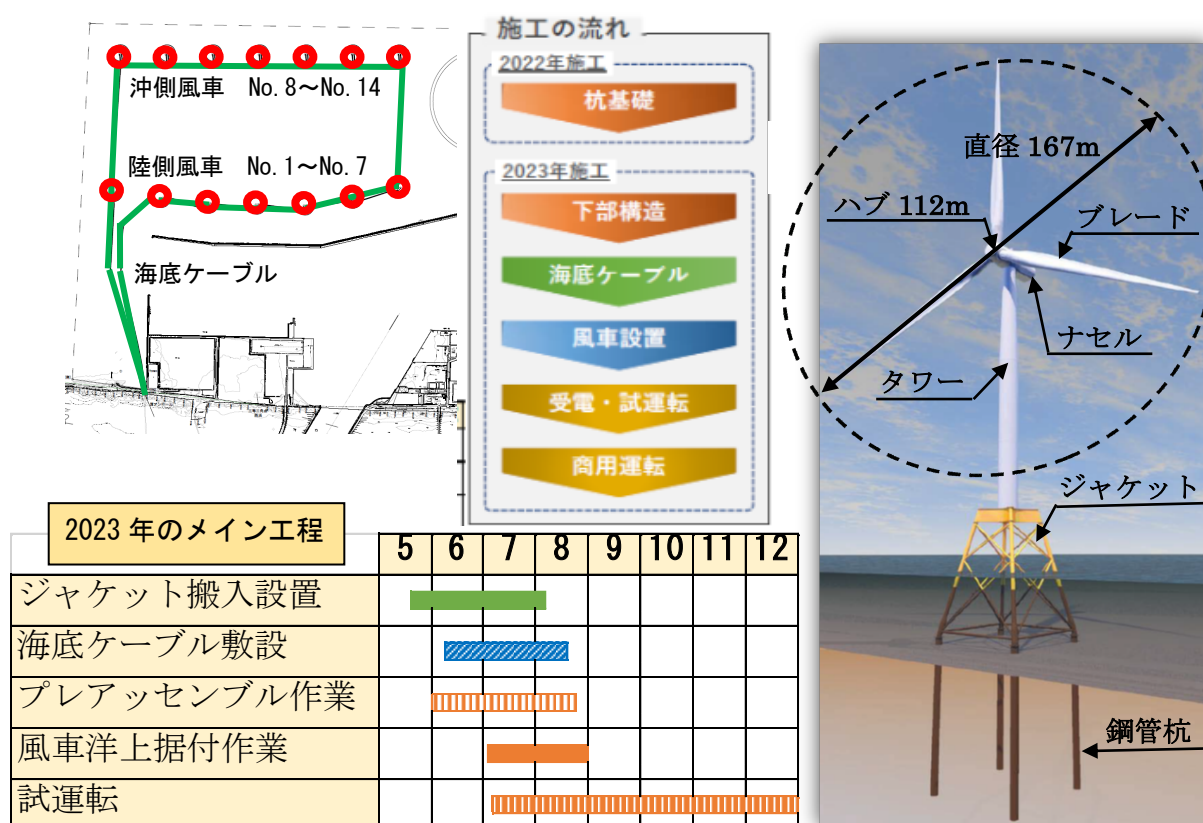


図-3 工事全体フロー

14基の風車は、上図のフローに従って施工しました。工程管理上のポイントは、基礎⇒グラウト⇒海底ケーブル⇒風車据付を順次行っていくため、途中の工種の遅れは、そのまま後工程への遅れに繋がることとなり、全ての風車組立施工が「クリティカルパス」になることです。従って、それぞれの工種で、十分な机上検討、施工エンジニアリングを実施して、考えられる工程の遅延リスクを、バックアッププランを用意しながら回避することに努めました。また、各工種実行時は、漁業者との船舶錯綜も憂慮されたことから、施工順序、時期を漁業組合と詳細に詰めて、漁業の操業と工事の安全確保の両方を実現できるように、柔軟に対応しました。

② 杭の施工 (2022年5月～)

風車の施工に先立って、2022年にジャケット基礎の杭打ちを実施しました。杭打ちに際しての注意すべきポイントは、

★ 杭の打設精度（間隔、対角、打止め高さ）と所定（設計上期待される）の支持力

★ 杭打設時の騒音対策

になります。鋼管杭は、日本で 50m 超の長物一本にする工場が無かったことから、日本の材料を一旦韓国に輸送し、韓国にて杭の製作を行っております。杭の施工は、日鉄エンジニアリング（株）が担当し、（一財）港湾空港総合技術センターによる MWS（Marine Warranty Survey）を実施した後に開始しました。杭の施工は、1800 トン吊の全旋回作業船「第一豊号（森長組所有）」を用いて施工しました。杭の施工に関しては、各杭を正確に視準し、杭の鉛直度を管理しながら進め、ヤットコを用いて海底面から 4～5m の位置で打止めしています。杭は油圧ハンマーによる打撃で打設し、必要支持力の 2 倍以上の支持力が得られていることを確認しました。打設は油圧ハンマーで実施するため騒音が懸念されましたが、騒音対策の実施と、杭径が小さいこと、加えて、石狩湾は軟弱地盤であることも助けとなり、騒音クレームは一切ありませんでした。順調に施工が進捗した結果、2 週間程度の工程短縮を実現することができました。



写真提供：自社ドローン撮影

写真-4 杭施工状況

③ ジャケットの設計～製作～輸送～据付、グラウトの施工

現地での準備施工と並行して、ジャケットの製作を日鉄エンジニアリング（株）若松工場（北九州市）で実施しました。製作に先立ち、ジャケットの設計に時間を要しました。国内では商用規模の洋上風力発電所向けとしては初適用となるジャケット式基礎であること、石狩湾は軟弱地盤であることなどの要素から、日本海事協会によるウィンドファームの認証取得に 3 年以上の年月を費やしました。特に、日本は欧州と違って、「地震と台風」があるため、これら外力が設計上考慮すべき荷重として大きなウェイトを占めることから、地盤の評価方法など、数多くの議論を重ね、最良の構造を追及することとなりました。日本初となる要素が多かったこともあり、かなり Classical な構造のジャケットとなり、溶接量が若干多くなったことは、今後改善の余地があると思います。

ジャケットは北九州の若松工場で製作されましたが、トランジションピース（以下 TP）の重量が非常に大きかったため、詳細検討し、作り方も通常のジャケットとは違った製造方法を採用しています。北九州で製作されたジャケットは、3 基ずつ台船に搭載して、約 10 日間をかけて日本海を北上し、石狩湾に輸送しました。輸送中は TP 内に事前設置した機器類に加速度計を

取りつけ、輸送中の船体動揺に伴う加速度、振動を管理しながら輸送しました。石狩湾に到着後は、西埠頭に係留し、陸揚げすることなく、そのまま据付工事に入りました。据付工事においては、2000 トン吊の起重機船を用いてジャケットを荷取りし、そのまま吊曳航にて据付地点まで移動し、アンカーリングを行った上で、前年施工した杭（4本）にジャケットの脚を差し込みます。ジャケットの施工は、1基/2日のペースで実施し、これも10日ほど短縮して終わることができました。ジャケット据付後は、杭とジャケットを一体化するためのグラウト施工を行いました。このグラウト施工は、以下の理由により本工事の重要管理工種の一つとなります。

- ★ グラウトは、100N/mm²という高強度で、しかも輸入品であり、硬化速度が速いこと
- ★ 一回勝負でやり直しが一切できない事

よって、グラウト施工に関しては、事前の「実験確認」が非常に大切なポイントとなりました。杭とジャケットの間隙にグラウトがきちんと充填されるか、また、海中打設時において杭中の海水とグラウトが置き換わるかを、模型を製作して徹底的に検証しました。あわせて、本体構造において、通常の打設ルートに加え、緊急切り替え用など、多くのバックアッププランを準備して施工に臨みました。事前の準備もあって、グラウト施工も工程計画通り且つ高品質で打設完了することができました。



写真-5 ジャケット施工状況



写真-6 グラウト施工状況

写真提供：自社ドローン撮影

④ 海底ケーブルの敷設、埋設

海底ケーブルは、グラウト施工と同じく、以下の理由により本工事における最重要管理項目

の一つでした。

- ★ ケーブルをジャケット内の J-Tube と呼ばれる 3次元曲管内に引き込まなければならない
- ★ ケーブルは形状非線形挙動するため、張力によりサグ変動から管内摩擦抵抗が変わる
- ★ 失敗すると、ケーブルの引き抜き、機材再配置など、10 日以上の工程遅延をもたらす

上記理由により、海底ケーブルの引き込み、敷設には、相当の事前技術検討と実験をしました。ケーブル外装被覆と鋼管との間に生じる摩擦抵抗をどのようにして減じるかが大きな課題となりました。その方策として、北九州の若松にて完成したジャケットを用いて、実機にて引込試験を徹底的に実験検証することで、ウインチの能力、資機材の配置、要員配置、管理項目、管理数値などのエンジニアリングを実施しました。実際は水中での施工となるため、浮力が働いて、ケーブルの見かけの重量が減じられることから、陸上で引けることを確認することで、施工計画の正当性を確保できると考えました。検証当初は苦戦しましたが、改良に改良を重ね、繰り返し検証を行った結果、現場では非常に円滑な施工を行うことができました。



写真提供：自社撮影

写真-7 ケーブル引込み試験状況

⑤ 風車の組立と SEP 船による風車据付

本プロジェクトのメイン工種である風車タワーのプレアセンブルは、西埠頭に設置されたタワースタンド上で実施しました。3分割で海外から納入されたタワー部材は、順次スタンド上でボルト接合により組み立てました。タワースタンドは、耐震性能上十分な耐力を有する構造とし、タワー施工時の自由振動に対しても、疲労対策として減衰ダンパーを設置して品質向上に努めました。今回は、工程上の制約から、2セット組立⇒出荷⇒据付の工程を組んだため、合計7航海の SEP 船による風車部材の積込みを実施することとなりました。石狩湾の海底には軟弱地盤が広がり、西埠頭前面の海底面も軟弱層が厚く堆積していることから、西埠頭前面での SEP 船のレグ貫入が既設護岸に与える影響について、事前に検討する必要性がありました。SEP 船のレグと西埠頭前面との適切な離隔について、国土交通省の協力を得ながら、実験や数値解析を行って、西埠頭での SEP 船の係留位置を決定しました。また、解析結果の妥当性を確認すべく、施工期間中においてはリアルタイムで埠頭前面の変位を計測し、問題が無いことも確認しました。このプロジェクトの3点目の重要管理ポイントは、SEP 船のレグ貫入の管理となります。SEP 船は代替が無いことから、メカダウンには細心の注意を払いました。



写真提供：自社ドローン撮影

写真-8 風車タワープレアセンブル状況

風車タワーのプレアセンブルは、写真-8のように2台のクローラクレーンを用いて、建起こし⇒組立てを行いました。タワー製造時において、ボルト孔精度は正確に管理していたので、組立ては遅滞なく実施できました。

タワー組立て後に、SEP船を西埠頭前に係留し、順次、タワー・ナセル・ブレードを2基分積み込んだ後、風車据付位置まで航行し、そこでSEP船のレグを海底に固定して風車の据付けを行いました。風車の据付けは24時間体制で実施され、様々なトラブルに見舞われましたが、都度対応しながら組立てを完了しました。施工計画時は、1基/3日の工程を組んでいましたが、徐々に習熟効果も表れ、最終的には1基/2日のペースで施工を進める事ができました。目標は2023年8月末で大型船を使った工事を完了すること(9月よりサケ漁解禁)としていましたが、実際には10日の遅れが生じ、9月10日に全ての風車を設置完了しました。石狩湾漁業協同組合には、10日の遅延に対し、特例でのご理解とご協力をいただいたことに感謝の意を表します。



写真提供：自社ドローン撮影

写真-9 風車部材積み込み状況



写真-10 風車据付け状況

写真提供：自社ドローン撮影

4. おわりに

本プロジェクトは、多くの「日本初」を伴ったことから、手探り状態を進める事も多く、多くのトラブルを「その場で解決」しながら進めてきました。当然、不手際も多々あり、多くの関係者にご迷惑をおかけしたと存じますが、石狩湾漁業協同組合、石狩湾新港管理組合、海上保安庁小樽海上保安部を筆頭に、多くの方々のご理解とご協力をもって完成させることができました。この場をお借りして、厚く御礼を申し上げます次第です。