特集

風力エネルギーとその溶接技術

洋上風力発電プロジェクトの リスクマネジメント*

三浦 佳範**, 松永 圭介**, Johan-Petter Tutteren**

Johan-Petter Tutteren

Risk Management in Offshore Wind Farm Project*

by MIURA Yoshinori**, MATSUNAGA Keisuke** and Johan-Petter Tutteren**

キーワード 洋上風力発電, リスクマネジメント, オフショア, 認証, 設置

1. はじめに

低炭素社会の実現に向けて再生可能エネルギーへの転換が脚光を浴びています。今年4月に起きたアメリカでの原油流出事故は、化石燃料への依存を脱し、クリーンエネルギーに転換する流れを加速することになりそうです。この深海油田開発中の事故により、人々は、安く、大量に入手できる石油の時代の終わりを改めて認識しました。一方、環境政策に力を入れているEUでは、域内の最終エネルギー消費量の20%を再生可能エネルギーでまかなうことを義務づけた再生可能エネルギー指令（Renewable Energy Directive - 2009/28/EC）を2009年に発令しています。

このように再生可能エネルギーの開発機運が高まるなか、アメリカや欧州では早くから風力エネルギーに注目し、世界全体の風力発電容量の約70%を占めています。さらに欧州では、2009年現在76GWである風力発電容量を2020年には230GW、2030年には400GWへと増やす計画が進行中です。また、現在世界第3位（25GW）の風力発電容量を持つ中国などをあわせた世界全体の風力発電容量は、2020年には約7倍（2009年比）に増加するとも言われています（図1）。

一方で健康や景観への影響懸念や好適地の不足により、風車の設置場所を陸上から洋上へと広げる動きも広がっています。欧州では2000年頃から2MW級の風車を用いた複数の洋上風力発電プロジェクトが実施され、2009年で約2GWの発電容量となりました。現在も多数のプロジェクトが実施、計画されており、2020年には40GW、2030年には250GWに増加すると見込まれています¹⁾。

洋上風力発電プロジェクトはその厳しい環境に耐えうる高度な技術が要求されます。波浪荷重や疲労強度の検

図1 世界の風力発電容量予測

討、腐食防止や電気部品の塩害対策など、陸上風車とは異なるアプローチで取り組まなくてはなりません。また、洋上風車の設置や保守にあたっては、ジャッキアップバージなどのオフショア作業船を使用することになります。このため、プロジェクトに関わるリスクも大きくなり、綿密なリスクマネジメントがプロジェクトの成否を左右することとなります。

本稿では、世界的な認証機関であるDNVが風力エネルギー分野で展開するサービスを例にとって、洋上発電プロジェクトのリスクマネジメントについての考え方を述べます。

2. DNVについて

1864年にノルウェーで船級協会として発足したDNV

*原稿受付 平成22年7月15日
** デット ノルスケ ベリタス DNV Japan

は、世界約 100 カ国の9000人の従業員により総合的なリスクマネジメントサービスを展開しています。風力エネルギー分野でも25年以上にわたり認証やコンサルティングサービスを提供してきました。さらに、40年以上にわたるオフショア分野での知見をいかして、洋上風車設置船に対する世界初のクラスノーテーション²⁾を開発しました。このようにして、DNV は世界の洋上風力発電プロジェクトの75%に関与するという実績を持っています。

3. 洋上風力発電の特殊性

洋上は風環境に優れており、また風力発電設備の建設による周囲の環境への負荷も僅かです。しかしながら、洋上風力発電の実現のためには多大な投資が必要であり、企業にとってはリスク管理が必要不可欠です。そのリスクを最小限に抑えるために DNV はあらゆる手法を用いて企業をサポートしています。まず、ここでは洋上での風力発電に関するリスクを明確にするためにも、洋上風車の設置環境とそれに伴う問題点について DNV の洋上風車規格³⁾に沿って示します。

3.1 環境条件

環境条件は洋上風車を設置する上でもっとも重要な要素の一つです。エネルギー源である風環境は言うまでもなく、長期的な設備の維持を考慮すると波環境、潮流、水位、氷雪、落雷、地質、地震活動、塩害、気温、空気密度、海上交通、送電ケーブルなど多くの点について検証しなければなりません。

3.2 荷重条件

洋上風車で考慮すべき荷重としては、以下のようなものがあげられます。

不 変 荷 重	構造物の質量、バラスト水や装備の質量、静水圧
可変機能荷重	人、クレーンの作業荷重、船舶衝撃、設置作業に関する荷重
環 境 荷 重	風、流体力、地震荷重、潮汐効果、氷雪荷重、水位、波力

3.3 基礎部の設計

洋上風車は大きく2つのパーツに分けることができます。それは水面より上部のタワー、ローター、発電機部分と水中の支持構造物部分です。洋上風車の設置には様々な方法がありますが、最も基本的な方法として支持構造物部分を海底に固定する方法が挙げられます。そのため、安定した設置のためには海底の地質調査が非常に重要です。また、地質だけでなく支持構造物とタワーとの相互作用についても十分に考慮しなければなりません。

3.4 腐食対策

塩分による腐食を防ぐために、水面より上部には防食塗装、水中部分には電気防食を施す必要があります。特に水面近傍の「Splash Zone」と呼ばれる部分には、オフショア構造物用の特殊コーティングが要求されます。また、定期的なメンテナンスを実施することで、洋上風車の状態を確認していかなければなりません。

3.5 輸送と設置

洋上風車を設置するには高度な技術が求められます。ある段階まで組み立てられた風車を船で輸送し、設置を行います。また、本体の設置だけではなく海底に送電ケーブルを正確に敷設することも非常に困難です。輸送と設置は洋上発電プロジェクトで最も危険性の高い作業です。このため、DNV が1996年に発行した Rules for Planning and Execution of Marine Operations などを適用し、十分な検証を行うことが肝要です。

4. プロジェクトの過程

洋上風力発電設備を建設するにあたり、その構想から建設の実現、廃棄まで、プロジェクトすべての過程における様々なリスクを把握し、これらを適切に管理する必要があります。まずここでは洋上風力発電プロジェクトの流れを図2に示します。

4.1 アセスメント：Assess opportunities

風力発電とそれを取り巻くエネルギー分野についての様々な調査と、それに基づく実現可能性の検討を行います。

図2 洋上風力発電プロジェクトの過程

4.2 ビジネスコンセプトの設定：Select concept

プロジェクト基本計画の検証，測定計画を含む現地条件の検証，風力資源の調査，EIA(Environmental Impact Assessment：環境影響評価) 検証などを実施します。

4.3 プロジェクト開発：Develop project

地質，海象，風況などを含む現地条件を考慮し，洋上風車のタワー，ローター，発電機や支持構造物の設計仕様を決定します。IEC（International Electrotechnical Commission：国際電気標準会議）規格⁴⁾により，支持構造物を除き洋上風車の型式承認（Type certification）は必須です。また，プロジェクト承認（Project Certification）の一環として支持構造物の承認も要求されます。

4.4 プロジェクトの実施：Execute project

型式承認やプロジェクト承認の一環として製造者の品質システム監査が行われます。その後，承認されたプロジェクト計画に基づき洋上風車などの設置を行います。

4.5 稼動と評価：Operate and evaluate

洋上風車，支持構造物，送電ケーブルの定期検査を行います。これは長期運用に必須とされる規則や基準の順守と維持を確認するためでもあります。検査は，ブレード，ギアボックス，変圧器，発電機，昇降機などの主要設備に対して重点的に行われます。この過程で部品の疲労き裂，変形や損傷，腐食などの有無を確認します。

5. 洋上風力発電プロジェクトの承認

洋上風車の製作にあたっては，4.3に挙げたように型式

承認 (Type Certification) の取得が必要です。さらに，型式承認を受けた洋上風車やその支持構造物が，それらが設置される海域の諸条件に適合していることを確認するために，個別のプロジェクト承認（Project Certification）も必要です。これらの型式承認やプロジェクト承認は DNV などの認証機関が IEC 規格 61400-22: に沿って行います。図 3 にはこの承認過程を示します。

型式承認は大きく分けて次の 4 つのステップで行われます。

設計評価 (Design Evaluation)	風車本体の設計がIEC61400基準を満たすことを確認するため，認証機関が独自に審査します。
製造評価 (Manufacturing Evaluation)	洋上風車があらかじめ承認された設計図書に基づいて製造されていることを確認します。品質管理システムの審査と重要部品の製造過程での実地検査を認証機関が行います。
型式試験 (Type Testing)	安全装置，発電性能，荷重測定，ブレードの動的挙動や静的挙動などの試験を行い，その試験結果を認証機関が審査します。
最終評価 (Final Evaluation)	すべての審査や試験が終了したことを認証機関が確認し，設置やメンテナンスなどの各種マニュアル類の審査を行います。

最終評価の後，型式証明書（Type Certificate）が認証機関によって発行されます。型式承認の有効期間は 5 年で，2.5 年に 1 度の定期監査が実施されます。

図3 洋上風車プロジェクトの認証過程

6. 支持構造物

洋上風車はその設置場所の水深や海底の状況により、さまざまな支持構造物が採用されます。このため、これらに対する設計はオフショア構造物の知見を生かし慎重に行うことが大切です。なかでも、ジャケット式などの支持構造物に見られる管継手では、応力集中による疲労破壊に対して十分な解析を行うことが求められます。ここでは、DNV Offshore Standard, DNV-OS-J101: Design of Offshore Wind Turbine Structures に規定さ

図4 管継手に生ずる応力

図5 管継手の応力発生スキーム

れている、管継手の応力集中評価について簡単に紹介します。

高い応力集中は管継手の溶接箇所の端部に生じます。その応力は以下の3パターンに分類することができます(図4)。

- ・接続部の形状による幾何学的応力
- ・ブレースとコードの溶接部の形状によるノッチ応力
- ・溶接ビードの形状による溶接止端の局部応力

幾何学的応力 (a) は任意の2点の応力により線形外挿法を用いることで求められます。そしてこのデータが疲労設計や試験データの比較の有効なパラメーターとなります。ノッチ応力 (b) はB点と溶接止端の間の局部的に増加した応力です。局部応力 (c) は溶接ビードの局部形状によるが、接続形状には依存しません。また、局部応力はすぐに減衰し、約2-3mmの深さまでしか影響を与えません。溶接ビードの形状による局部応力集中は破壊力学計算において考慮されていると考えられています。

図5はチューブ接続部に内在する応力の概略図です。図5aに接続部の曲げモーメントによる応力を示します。これらの応力は梁理論によって導かれます。この応力は疲労き裂が広がるコードの厚さに対して一定であると推定されます。図5bに示すように、荷重がブレースの先端にかかっている時には、ブレースの変形によってコードの一部に引張荷重と圧縮荷重が生じます。ブレースの回転中心は図5aのAB線とブレースの中心線の交点です。この変形によってコードには膜応力が生じます。図5aのように荷重Pを設定すると引張膜応力がA側で生じます。図5cに示すように、コードはさらに大きく変形し、曲げ応力が生じています。溶接部にかかる応力のほとんどは局部的な平板の曲げによるものです。したがって、曲げ応力と反対側の応力の合計値の割合として定義されるDoB (Degree of Bending) はチューブ接続において70-80%にもおよびます。

7. プロジェクトリスクマネジメント

企業活動には複雑性、不確実性、変化というものが存在し、これらの危険因子が企業に与える影響は大きなものとなっています。このため、適切なリスクマネジメントは企業の成長の可能性を最大化するための必須条件です。リスクマネジメントは、危険因子それぞれを認識、理解、管理することで、それらが顕在化した場合の損失を回避あるいは緩和することを目的としています。ここでは洋上風力発電プロジェクトに適用可能なリスクマネジメントの一例として、DNVが行うサービスについて説明します。

7.1 エンタープライズリスクマネジメント：

Enterprise Risk Management

まず、プロジェクト全般にわたって企業が抱える危険因子の包括的な認識、理解、管理をすることが重要です。プロジェクトの様々な過程において企業に影響を与える恐れのあるリスクを特定し、それぞれに個別の解決方法を見つけ出すことにより素早かつ確かな意志決定につなげます。

7.2 安全衛生環境管理：SHE Risk Management

稼働中の事故の多くは、風車設計上の不具合に起因する機械的な事故と、風車の設置やメンテナンス中のヒューマンエラーに起因する人為的な事故に分けることが可能です。前者だけでなく、ヒューマンエラーを誘発した原因が風車設計の不具合にあるとされた場合には製造物責任は免れません。このため設計段階からヒューマンエラーを未然に防ぐ対策を講じておくことにより、安全衛生環境管理上の危険因子を出来るだけ少なくしておくことが大切です。さらに、メンテナンスなどの作業手順書、作業船の風車への衝突や係留策切断などの非常事態に対応する手順書等の整備と教育訓練は、安全衛生管理対策の根幹となります。

7.3 新技術の認定：Technology Qualification⁵⁾

エネルギー開発プロジェクトで試みられる新しい技術や手法に対しては、適用可能な規則や規格が未整備であることが一般的です。このため新技術を導入しようとする者は、その新技術が本来適用されるべき規則や規格で求められるものと同等以上の安全性や機能性を備えていることを証明する必要があります。Technology Qualification とは、新しく開発される機器や設備が安全に所期の性能を発揮することを第三者が証明するための手法として DNV が開発しました。これについては第 8 章で詳しく述べます。

7.4 検証：Risk Based Verification⁶⁾

プロジェクトの重要工程においては第三者機関による厳格な検証が必要です。これを通じプロジェクトオペレーターが要求する仕様や機能性を満足することを確認するだけでなく、安全性や環境保護へのコンプライアンス

に対する透明性を高めることにつながります。

7.5 アセットリスクマネジメント：

Asset Risk Management

新しい技術開発の目的は、製造コストを下げ、資本的支出を抑え、さらには、稼働中の運転・維持コストを最小化することで、プロジェクト全体の経済効果を最大化することにあります。これには、新技術導入に伴う投資決定プロセスをサポートする NPV（正味現在価値）試算ツールなどを活用します。

8. Technology Qualification

Technology Qualification のワークフローを図 6 に示します。

8.1 適格性認定基準の設定：

Definition of qualification basis

Technology Qualification を実施するにあたり、新技術が満たすべき基準や仕様を設定する必要があります。適格性認定基準として、設計者やプロジェクトオペレーター、諸官庁などが求める各種設計条件や規則、経済的要求などを採用します。

8.2 新規性の評価：Technology assessment

新しい機器の開発は既存技術の応用と新技術の組み合わせで行われるケースが大半を占めています。このプロセスでは、開発段階で採用されるさまざまな技術をリストアップしたうえで、個別の技術項目に対して新規性の評価を行います。そのうえで、新規性の高い技術項目に対して技術的課題や不確実性を具体的に特定する作業を行います。

図6 Technology Qualification

8.3 故障モード解析による危険度判定：

Failure mode identification and risk ranking

8.2で新技術と定義された技術項目に対して故障モードの解析を行い、それぞれの故障モードに起因する事象について不確実性や危険度を判定します。

8.4 設計の見直し：Concept improvement

8.3で高リスクと判定された技術項目については設計を改善する必要があります。変更点については8.2と8.3の手法により再評価を行います。

8.5 試験解析方法の選択：

Selection of qualification methods

新技術採用に伴う不確実性を減らし故障モードの危険度に応じた設計マージンを確保するために、詳細な解析や模型試験などの実施は不可欠です。一方で新技術開発コストを抑えるためには、無駄のない試験解析の方法をあらかじめ確立しておくことが重要です。Technology Qualificationでは、8.3で判定した危険度に応じた試験解析方法を選択することにより、低コストで精度の高い解析を可能にしています。

8.6 成功可能性の評価：Success evaluation

コストと時間のかかる試験解析段階に移行する前に、これまでのプロセスの再検証により新技術の実現可能性を定性的に判断します。この結果、計画通り開発を進めることに支障がないと判断された場合、“Statement of Endorsement”が発行されます。

8.7 試験解析の実施：

Data collection (Analysis and Testing)

8.5で選択された試験解析を行います。

8.8 最終評価：Functionality assessment

解析や試験の結果、8.1で指定された基準や仕様を満たしていることが確認された後、適合証明書（Certificate of Fitness for Service）が発行されます。これによりTechnology Qualificationで評価した新技術が、当該プ

ロジェクトで合意された信頼性のレベルで適用可能であることを宣言します。

9. おわりに

従来、日本で再生可能エネルギーといえば太陽光発電を中心とした政策がとられていましたが、経済産業省が2010年6月に公表した「産業構造ビジョン2010」では風力発電にも言及しており、洋上風力発電に対する政策的な後押しが期待されます。太陽光発電に比べ裾野の広い産業が関わる風力発電は、今後の戦略分野の一つとして、官民連携による積極的な研究開発とともに、関連法規の整備を急ぐ必要があります。

DNVは、世界中の風力発電プロジェクトから得られる知見を生かし、さらなる風力発電関連規格の開発や整備をさらに進めます。また、天候による出力変動問題を解決するため、風力エネルギーを貯蔵可能なエネルギーに変換する研究等にも取り組んでいます。このようなDNVの活動が日本の風力エネルギー産業の成長の一助となれば幸いです。

- 1) EWEA Annual Report 2009
- 2) 船級規則にはすべての船舶や海洋構造物に適用される共通規則と、特別な設備や機能にのみ適用される規則があります。後者を適用した場合にはクラスノーテーションという符号を船級証書に付記することで、他の船舶や海洋構造物と区別します。
- 3) DNV Offshore Standards: DNV-OS-J101 Design of Offshore Wind Turbine Structures (November 2009)
- 4) IEC Standard 61400-22 (May 2010) Wind turbines - Part 22: Conformity testing and certification
- 5) DNV Offshore Service Specifications: DNV-OSS-401 Technology Qualification Management (April 2007) / DNV Recommended Practices: DNV-RP-A203 Qualification Procedures for New Technology
- 6) DNV-OSS-300 Risk Based Verification (April 2004)