

洋上風力発電等技術研究開発委員会  
平成 25 年度 風車事故対策ワーキンググループ  
洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の運転に向けて

報 告 書

2013 年 6 月 20 日

風車事故対策ワーキンググループ

## 目 次

1. はじめに	1
2. ワーキンググループの目的	1
3. ワーキンググループにおける検討	1
4. ワーキンググループの検討結果	1
5. まとめ	3

### 別添一覧

別添 1. 経済産業省の要請（経済産業省ホームページより抜粋）

別添 2. ウインドパーク笠取発電所 CK-19 号機風車 ナセル脱落事故について（最終報告）（経済産業省ホームページより抜粋）

別添 3. 洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の事業実施者報告

## 1. はじめに

平成 25 年 4 月 7 日にウインドパーク笠取風力発電所において風車の落下事故が発生した。洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）は、同風力発電所の事故機と基本的に同一機種であるため、同事故の原因を踏まえ、風車の安全対策に万全を期するとともに、今後の風力発電技術開発に活かしていく必要がある。

そこで、洋上風力発電等技術研究開発委員会に技術専門家からなる風車事故対策ワーキンググループ（以下、「ワーキンググループ」）を設置し、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）における風車の安全対策の妥当性について評価を行った。

## 2. ワーキンググループの目的

技術専門家からなるワーキンググループを設置し、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）における洋上風車の安全対策の妥当性について、以下の二項目を検討することを目的とした。

### <ワーキンググループの目的>

- ①ウインドパーク笠取風力発電所の風車事故を踏まえ、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）に必要となる安全対策について、技術的見地から評価を行うとともに、安全性の確認を行った。
- ②その他、風車の安全性確認に必要な事項について検討を行った。

### <ワーキンググループの委員>

ワーキンググループの委員は以下の通りである。

氏名	所属・役職
勝呂 幸男（主査）	一般社団法人 日本風力エネルギー学会 会長
石原 孟	東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授
前田 太佳夫	三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授

注1）主査を除き委員は五十音順 注2）敬称略

## 3. ワーキンググループにおける検討

ワーキンググループでは、別添 1 の経済産業省の要請、及び別添 2 に示すウインドパーク笠取風力発電所において発生したナセル脱落事故報告の結果を参照し、その事故原因を精査すると共に、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の安全対策の検討を行った。加えて別添 3 に示す洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の事業実施者から現況を聴取すると共に、技術的な検討を行い、その結果を報告書にまとめた。

## 4. ワーキンググループにおける検討結果

洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車は、ウインドパーク笠取風力発電所事故機と同機種の(株)日本製鋼所社製 J-82 を使用しているが、事故原因と

なったピッチモータブレーキを構成するスプラインについては、別添3のとおり不適切とされる材質は使われていない。したがって、ワーキンググループでは、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）と同じピッチモータブレーキを使用し、運転実績がある既設風力発電所データとの比較を基に以下の検討を行った。

#### 4-1 洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車（ピッチモータブレーキ）の設計・製作の妥当性について

洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車の基本的な構造は、現状のJ-82と同様にドイツの認証機関であるGermanischer Lloyd (GL)のプロトタイプ的设计認証を受けている。

ピッチモータブレーキの設計に関しては風車メーカーが必要な保持トルクを解析によって求め、これをピッチモータメーカーへの要求仕様としている。このピッチモータブレーキのスプライン材質は製品証明書に示された鋼材を使用しており、本材質はウインドパーク笠取風力発電所の事故機と異なった材料である。風車の設計と製造は審査登録されたISO9001にて品質管理されていることから、ピッチモータブレーキの設計・製作については妥当と判断した。

#### 4-2 ブレーキライニングの磨耗量及びスプラインの材質について

ウインドパーク笠取風力発電所事故機の場合には、アルミ合金製のスプラインを採用していたため、スプラインの接触部に摩耗が発生し、その摩耗粉によりブレーキライニングが摩耗して必要な保持力が保たれなくなったことが原因とされている。同発電所の風車においては対策の一環としてステンレス製の材料に変更するとの報告である。

洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車は、他の陸上サイトで2年を超える発電実績を有する既設風力発電所のスプライン構成と同じ鋼・鋼（オス・メス）を採用していることから、ブレーキライニングの摩耗の発生について、既設風力発電所における摩耗の実測値及びピッチモータメーカーから提供された製品証明書をを用いて、評価を行った。

既設風力発電所のピッチモータブレーキのギャップ測定結果から、過去2年3ヶ月の間に発生した磨耗量は0～0.2mmであり、鋼製のスプラインを採用したピッチモータブレーキにおけるブレーキライニング摩耗の発生は、最大約0.1mm/年と推定された。また、0～0.2mmの磨耗量は、ピッチモータメーカーから提供された製品証明書に示される管理値内に収まっている。以上のことから、鋼製のスプラインを用いたピッチモータブレーキは、適切なメンテナンス下にあっては、十分なブレーキ保持力が確保されるものであると評価した。

洋上風車におけるピッチモータブレーキのスプライン材質はC45・C43（オス・メス）であり、これはJISのS45C・S43C（機械構造用炭素鋼）に相当するもので、オ

ス・メス共に、鋼製であることから、ウインドパーク笠取風力発電所事故機で発生したスプラインの異常摩耗の可能性は極めて少ない。S45C・S43Cの違いは炭素量の差であるが、製鋼上からはその差異は小さく、現実的に材質の差異はほとんどない。C45・C43の硬度差がほとんどないことから、スプラインの摩耗は少なく、ウインドパーク笠取風力発電所で発生した材質差異による摩耗の問題は発生しないものと考えられる。

なお、鋼製の硬度が180-230であるのに対し、ステンレスは180であり、硬度は、鋼製の方がステンレスより高く、摩耗は硬度に依存することから、鋼・鋼の組合せは鋼・ステンレスに比べて同等以上の寿命と考えられる。

#### 4-3 ピッチモータブレーキのメンテナンスについて

ピッチモータブレーキのメンテナンスについては、メーカー推奨期間が3年間となっている。2年以上運転を行っている既設風力発電所の運転実績から求められる安全側である最大の摩耗量0.1mm/年を想定して計算した結果、3年間のギャップ進行予想値は初期のギャップ値を安全側にとった場合でも十分管理値内におさまることが認められた。そこで、メンテナンス間隔は十分な間隔である1年を原則とし、更なる安全を考慮して当初は6ヶ月で点検することとし、その後状況により3ヶ月ずつ延長することとした。

#### 4-4 ブレーキ保持力のチェック機能と過回転対策の強化について

過回転対策については、これまで空力ブレーキを独立する保安装置が採用されている。洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車ではこれに加え、ピッチモータブレーキのブレーキ保持力のチェック機能や回転数制御を追加することにより更なる安全を図る。

### 5. まとめ

ワーキンググループにおいて、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車における安全性について検討した結果、以下の項目について、安全性は妥当であると判断され、運転を開始するに必要な安全性が確保されていることが確認された。

- 1) 洋上風力発電システム実証研究(北九州市沖)洋上風車(ピッチモータブレーキ)の設計・製作の妥当性について
- 2) ブレーキライニングの磨耗量及びスプラインの材質について
- 3) ピッチモータブレーキのメンテナンスについて
- 4) ブレーキ保持力のチェック機能と過回転対策の強化について

# 経済産業省

2013FY004

平成25年5月2日

九州産業保安監督部  
部長 守屋 猛 殿

経済産業省商務流通保安グループ  
電力安全課長 村上 博之

## 発電用風力設備の安全確認について

平成25年4月7日にウインドパーク笠取風力発電所において発生した風車の落下及び支持物折損事故については、事故調査の結果、別紙のとおり、風車の一部材料において、不適切な材質で製造されたものを使用していたことが判明しています。

本事故については、引き続き調査を実施し、再発防止対策の実施が必要となりますが、上記の状況に鑑み、公共の安全の確保の観点から、発電用風力設備の安全管理に万全を期すため、管内の発電用風力設備の設置者に対し、下記の措置を講じるよう、要請をお願いします。

### 記

1. 風車の製造事業者が同発電所と同じ設備である場合には、下記の措置を講じること。
  - ① 風車の安全な状態の確保に係る保安点検及び必要に応じ補修等の対策を実施すること。その際には、通常実施する点検に加え、ピッチモータブレーキなど制御装置を中心に、運転開始以降、当該部位における事故・故障、修理履歴等を調査し、当該部位における摩耗等が発生している、又はその恐れがある場合は、速やかに当該部位を取り替えるなどの対策を講じた上で、これらの結果を評価すること。
  - ② 点検終了までの間、一般公衆の接近防止措置を強化又は必要に応じ運転停止等の適切な安全確保措置を講じること。
  - ③ ①及び②の対策を講じた結果を、5月23日を目途に報告すること。
2. 風車の製造事業者が同発電所と同じ設備でない場合には、今般の事故に係る調査状況に鑑み、速やかに点検等保守管理を確実に実施すること。

(別紙)

平成25年4月7日にウインドパーク笠取風力発電所で発生した風車落下及び支持物折損事故の概要について

1. 設置者：株式会社シーテック

2. 発電所の概要

(1) 発電所名：ウインドパーク笠取風力発電所

(2) 住所：三重県津市美里町及び伊賀市上阿波地内

(3) 運転開始年月：平成22年2月（第1期）、12月（第2期）

(4) 出力：38,000kW

2,000kW風車10基（第1期）

2,000kW風車9基（第2期）

3. 事故発生概要：

(1) 事故発生日時：平成25年4月7日（日）16時37分～16時55分の間（推定日時）

(2) 事故事象：19号の風車上部（地上6.5m）から風車（ブレード、ナセル）が地上に落下。更に、タワーが中央付近で折損（5度傾斜）

(3) 事故原因：ピッチモータブレーキを構成するスプラインが耐摩耗性の低い不適切な材質で製造されたため、異常摩耗が発生し、3枚のブレードのピッチ制御が出来なくなるとともに、過回転が発生。また、過回転時にブレードがタワーに接触し、風車が地上に落下。

引き続き調査を実施し、再発防止対策を検討。

4. 風車の製造事業者：株式会社日本製鋼所

（同社の2,000kW級同型機は、現在国内に約110基設置され運転中）

# 経 済 産 業 省

2013FY013  
平成25年6月19日

九州産業保安監督部  
部長 守屋 猛 殿

経済産業省商務流通保安グループ  
電力安全課長 村上 博之

## ウインドパーク笠取風力発電所事故を踏まえた対応について

平成25年6月4日付け2013FY011をもって、太鼓山風力発電所及びウインドパーク笠取風力発電所事故を踏まえた当面の対応について周知を要請したところですが、ウインドパーク笠取風力発電所において発生した風車の落下事故に関し、平成25年6月18日付けで、同発電所の設置者である株式会社シーテックから 中部近畿産業保安監督部長宛てに事故報告書（最終報告）が別紙のとおり提出されました。

同報告では、学識経験者等から構成される事故調査委員会での検討を経て、今般の事故に至る原因究明及び再発防止対策がまとめられています。

同報告における再発防止対策は、公共の安全の確保の観点から推奨すべき内容であり、有用な情報を含んでいることから、発電用風力設備の安全管理に万全を期すため、管内の発電用風力設備の設置者に対し、同報告の内容の周知をお願いします。

併せて、風車の製造事業者がウインドパーク笠取風力発電所と同じである設置者に対しては、下記の措置についても周知をお願いします。

## 記

今般の事故報告の内容を十分踏まえた上で、下記の措置を講じることが望ましい。

なお、ピッチモータブレーキに係る不備が新たに確認された場合は、速やかに国に報告すること。

### 1. ピッチモータブレーキを構成するスプラインに摩耗の可能性のある材料を使用していた事実が確認された発電設備について

ウインドパーク笠取風力発電所で確認されたものと同様の設備にあっては、既に摩耗に強い材料のものへ交換されているが、こうした設備における関係材料は、今後消耗品と位置づけて管理することとし、交換した材料の摩耗状況やギャップ測定等を含めた当該設備の健全性について、定期的に確認すること。また、こうした点検に係るマニュアル等を整備し取り組むこと。なお、ピッチモータブレーキの健全性が十分確認されるまでの間、一般公衆の接近防止措置等の継続を図ること。

ピッチモータブレーキの保持力が正常であることを確認するため、定期的な保持力確認機



能の追加や、強風時前後における当該保持力の確認等、必要な対策を講じること。

風車がフェザリング状態においてロータ回転数が許容値を超えた場合、発電機をモータ駆動させることにより、ロータ回転数を抑制するための過回転防止機能を追加すること。

## 2．ピッチモータブレーキを構成するスプラインに摩耗の可能性のある材料を使用していない発電設備について

1．を参考に必要な措置を講じること。

ウインドパーク笠取発電所 CK-19号機風車 ナセル脱落事故について (最終報告)

1. ウインドパーク笠取発電所と事故の概要

(1) サイトの概要

- ・所在地：三重県津市美里町および伊賀市上阿波地内（CK-19号機は津市美里町）
- ・定格出力：38MW(2,000kW×19基)
- ・運転開始：第1期平成22年2月22日  
第2期平成22年12月15日（CK-19号機は第2期）



図1 発電所位置図

(2) 風力発電設備の概要

- ・風車：(株)日本製鋼所(JSW)社製
- ・定格出力：2,000kW
- ・回転数：19rpm
- ・ロータ：直径83.3m、取付位置 地上65m

(3) 事故の概要

- ・推定日時：平成25年4月7日16時37分～16時55分の間
- ・状況：ロータ過回転によるブレード、ナセルの脱落

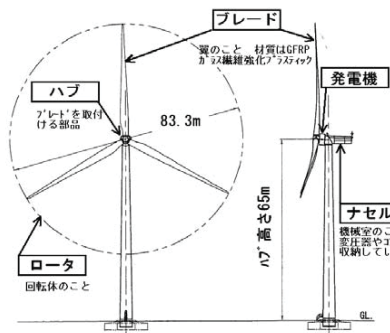


図2 風車各部の名称

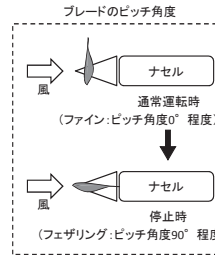


写真1 ブレード、ナセル脱落状況



2. 事故状況

(1) 気象状況・風況

- ・三重県は4月6日夕方より発達した低気圧に見舞われ、ウインドパーク笠取においても7日未明より風速20m/s超過が多々発生し、15時前後にはカット外風速25m/sとなり、16時27分には最大瞬間風速42m/sを記録。風向は西北西。
- ・事故発生直前(4月7日16時37分(記録として最終時間))のCK-19号風車での風速観測データ：風速20.67m/s 10分移動平均風速27.9m/s

(2) 風車の状況 (風速・回転数・ピッチ角の時系列については図3参照)

(正常な制御)

- ・15:15:23 カット外(3s 平均30m/s)発生。但し12:28:45の時点で運転を停止していた為、ブレードはフェザリング状態。
- ・15:40:27 カット外(10min 平均25m/s)発生。但し12:28:45の時点で運転を停止していた為、ブレードはフェザリング状態。
- ・15:56:47 ストームモード(3s 平均40m/s)へ移行し、風下へ向く様に強制モード動作開始。(16:02頃完了 (0.5deg/s))

(事故発生直前の風車状態を示す記録)

- ・16:01:43 ピッチ1制御異常が発生。ピッチ角が変化しフェザリング状態が維持出来ず。(風速27.99m/s、ロータ回転0.31rpm、ピッチ角87deg)
- ・16:06:22 ピッチ3制御異常が発生。ピッチ角が変化しフェザリング状態が維持出来ず。(風速32.04m/s、ロータ回転1.22rpm、ピッチ角93deg)
- ・16:07:27 ピッチ2制御異常が発生。ピッチ角が変化しフェザリング状態が維持出来ず。(風速37.45m/s、ロータ回転0.4rpm、ピッチ角93deg)
- ・16:14:09 フェザリング状態にもかかわらずロータが回転(3rpm以上)した警報が発生。
- ・16:36:26 ロータ・発電機過回転(ワト上で24rpm以上)発生。
- ・16:36:28 ロータ・発電機過回転(ワト上で26rpm以上)発生、セーフティチェーン動作。
- ・16:36:34 逆回転方向異常(風向とナセルの向きが不一致)発生。(16:36:29よりストームモードが維持出来ず風に正対方向へ向う)
- ・16:36:38 ナセル異常振動発生(ナセル内振動計(振子式)の動作(設定値:0.2G))
- ・16:37:30～33 変圧器地絡故障他多数の故障発生(最後の記録)

(事故発生時のピッチ角、回転数、ナセル方向の変化)

【ピッチ角】

- ・ピッチ1制御異常が発生(16:01:43)後、16:13頃から徐々にピッチ角が26degから-187degとなり逆フェイン状態となる。
- ・ピッチ2制御異常が発生(16:07:27)後、16:15頃から急激にピッチ角が175degとなり逆フェイン状態となる。
- ・ピッチ3制御異常が発生(16:06:22)後、急激にピッチ角が92degから176degとなり逆フェイン状態となる。
- ・16:36:28以降において3枚のブレードピッチ角が逆フェイン状態に揃い、過回転状態となる。

【回転数】

- ・16:36:28に26rpmを記録し、57秒後の16:37:25には最大回転数57.78rpm、16:37:33に53.19rpmを最終記録した。

【ナセル方向】

- ・15:56:47にストームモード(自動制御)となり、ダウンウィンド状態になった。
- ・16:36:28にセーフティチェーン動作後、逆回転が開始し、アップウィンド状態へと移行し、62秒後の16:37:30には風方向にほぼ正対した。

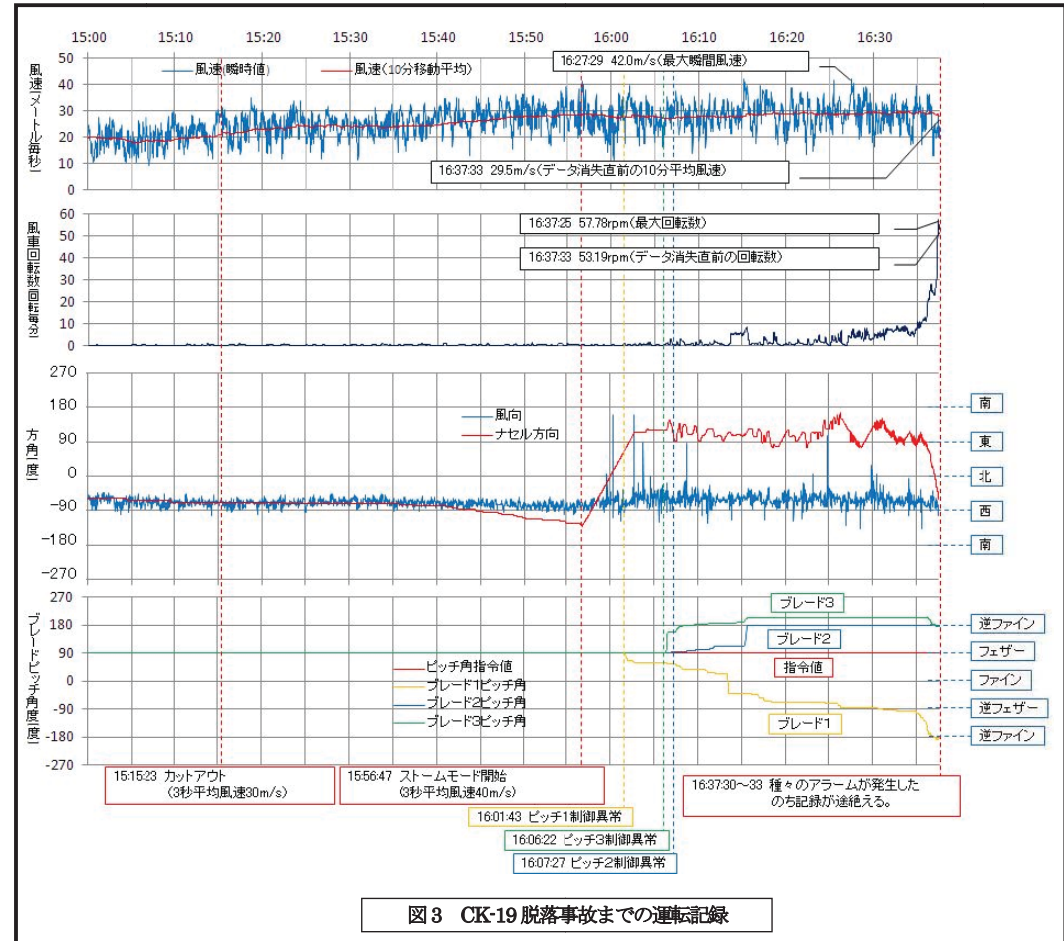


図3 CK-19脱落事故までの運転記録

出典：経済産業省 電力安全課ホームページ

[http://www.meti.go.jp/policy/safety\\_security/industrial\\_safety/oshirase/2013/06/250619-1-3.pdf](http://www.meti.go.jp/policy/safety_security/industrial_safety/oshirase/2013/06/250619-1-3.pdf)

### 風車の脱着状況

#### 【タワー】

・タワーは、タワーの中央部付近(地上より 30.6m、38.3mを低部として)の2箇所までブレードが衝突し、風下(東南東)に約 5deg 程度屈曲している。更にタワー頂部では風上(西北西)に座屈が見られる。  
また、中央部付近から上部には擦傷が見られる。

#### 【発電機及びブナセル】

・発電機及びブナセルはタワーから風下方向(80deg~90deg)の斜面上に脱落している。ナセルとタワーを接続するフランジ面のボルトは、引張応力(変圧器側)により 37/108 本(約 1/3)が、せん断応力(ブナセル側)により 71/108 本(約 2/3)が破壊を確認。

#### 【ブレード】

・ブレードは3枚全て表裏が剥離しており原形を留めておらず、第1軸・第2軸・第3軸ブレードの特定は不可。  
・0.5枚×2枚はタワーに巻き付いた状態、0.5枚はナセル(ブナセル)に付いた状態、1.5枚は山中に夫々飛散した状態を確認。

#### 【コンクリート基礎】

・僅かにタワー風下方向に、コンクリートの剥離が見られる。

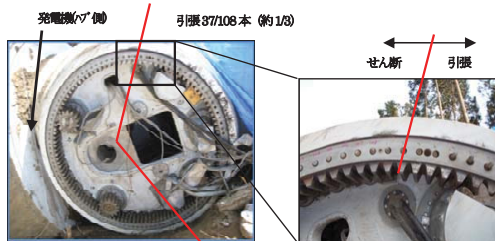


写真2 フランジ面の状況

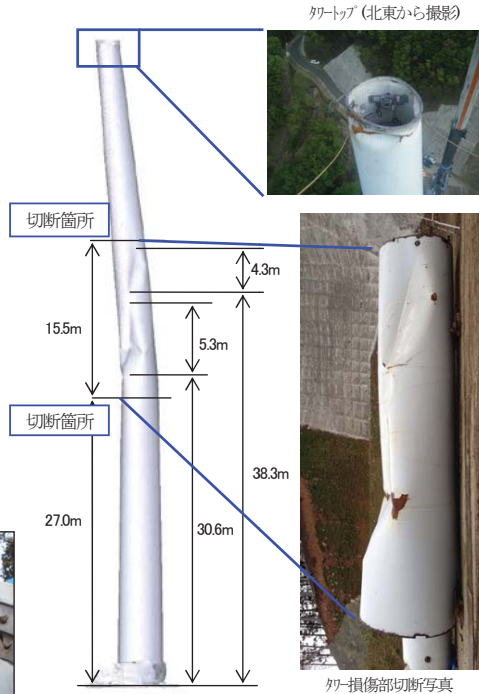


写真3 タワー損傷状況

### 3. 事故原因の究明

#### (1) 事故に至った要因(事実の確認)

- ① 高風速によりス tormモードに移行した後3軸共ピッチ制御異常が発生しピッチ角が変化しフェザリング状態が維持出来なくなり過回転に至った。
- ② ブレードはフェザリング状態が維持出来ず、3枚別々に逆方向状態へ移行した(制御信号無し)。これにより、ローは通常運転とは逆方向に回転し過回転となり、セーフティン(安全装置)が動作したものの、フェザリング状態には移行せず、ローは反時計方向へ通常の約 8 倍の速度(設定値 0.5deg/s)にて旋回した。その後、ローは風に正対し通常の約 3 倍の回転速度(定格回転速度 19rpm)に至った。
- ③ ナセルの接合ボルトは1/3が引張応力、2/3がせん断応力により破壊しナセルが脱落した。ブレード破片は最大約260m程度飛散(小片は約370m)




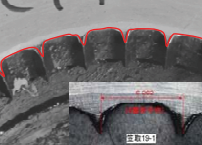


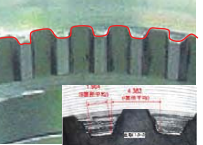
#### (2) ピッチモータの分解調査結果と事故原因への考察

運転ログデータよりス tormモード時にフェザリング状態が維持できなかったことから、ピッチモータの不良の有無について検証するため、事故機からピッチモータを回収し、分解調査を行った。

#### 【調査結果】

- ① ピッチモータの保持トルク測定結果は最大でも 34.5Nm であり、3 台とも規定値の 200Nm を下回っていた。
- ② 3 台ともピッチモータを構成するスプライン(メス側)の歯が三角形に摩耗しており、その摩耗粉と推定される粉を確認した。
- ③ スプライン(メス側)は摩耗しているものの、歯山の高さは設計基準値を満足していた。(スプライン自身は空回りしていない。)
- ④ ブレーキを保持するギャップは 2.0mm~2.4mm であり、3 台とも規定値(0.15mm~0.35mm)を逸脱する値であった。

※3ピッチモータへの購入仕様値であり、設計上必要な値は約 100Nm

調査内容	第1軸	第2軸	第3軸	備考	
外観					
	軸・ブレイキ・ファンカバーが変形	モータ冷却フィンの一部が変形	ファンカバーに若干の凹みあり		
モータ駆動試験	軸変形のため、モータ駆動試験は実施せず。	正、逆回転※1とも定格回転数 1,800rpm で駆動可能。	正、逆回転※1とも定格回転数 1,800rpm で駆動可能。異音あり。	※1 正回転(負荷側から見て左回転)、逆回転(同右回転)	
ピッチモータブレイキ	保持トルク測定	正回転: 24Nm※2 逆回転: 25.5Nm※2	正回転: 33.5Nm 逆回転: 34.5Nm	正回転: 20.5Nm 逆回転: 22.5Nm	【規定値】 200Nm 以上 【設計値】 約 100Nm 以上
	ギャップ測定	2.4mm	2.2mm	2.0mm	【規定値】 0.15mm~0.35mm
	スプライン(メス側)外観				
	歯山高さ: 2.23mm	歯山高さ: 2.29mm	歯山高さ: 2.30mm	設計基準値: 2.0mm	

#### 【スプライン摩耗とブレーキ保持力低下のメカニズム(推定)】

- ① スプラインのオス・メスの歯同士はわずかな隙間(約 0.05mm)を確保して組み立てられており、ブレーキが掛かっている状態でこのわずかな隙間で微振動が発生した。
- ② 微振動が繰り返されることにより、スプライン(メス側)の摩耗が進んだ。(メス側よりメス側の材質の硬度が低すぎたため)
- ③ スプラインメス側の摩耗粉がライニングに付着し、ブレーキ動作の都度、ライニングが可動板・固定板との間で摩擦することで、異常な速度でライニングが摩耗した。
- ④ ライニングの摩耗により、ライニング~可動板のギャップが拡大し、スプラインのストロークが長くなったことで可動板を押しつける力が弱まり、ピッチを保持することが出来なくなった。

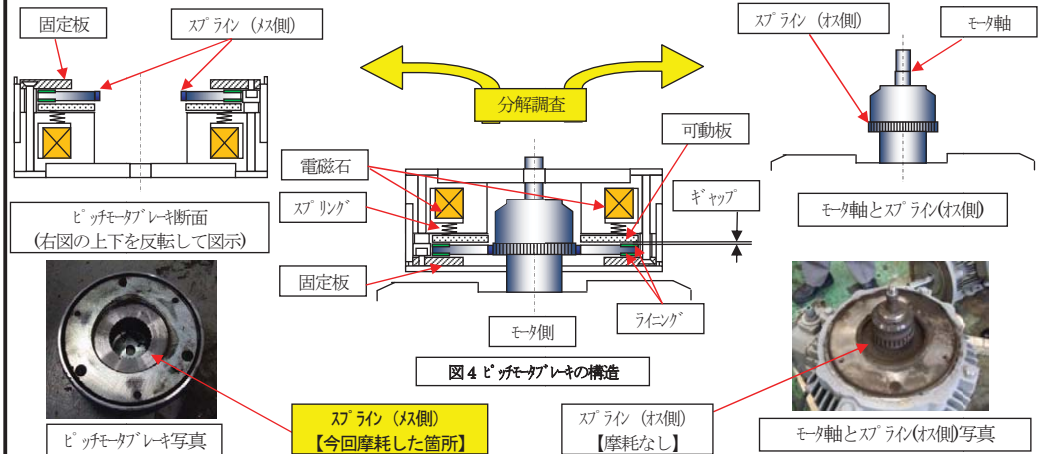


図4 ピッチモータブレーキの構造

スプライン(メス側) 【今回摩耗した箇所】

スプライン(オス側) 【今回摩耗なし】

モータ軸とスプライン(オス側)写真



③ ナセル・タワー結合ボルトの破損調査と事故原因への推定

【調査結果】

調査ボルト	ハブ側ボルト(#82)	変圧器側ボルト(#19)	備考
外観			
破面SEM観察			
評価	破断面近傍で絞りが認められず、破面は平坦で一定方向の伸長ディンプルが観察されたことから、せん断方向の過大応力により破断(せん断破断)したと判断。	破断面近傍で絞りがあり、傾斜した破面先端方向に向かった伸長ディンプルが観察されたことから、軸方向の過大応力により破断(延性破断)したと判断。	いずれも金属疲労に特有の断面は観察されなかった。

【調査結果からの推定】

破面SEM(Scanning Electron Microscope)走査型電子顕微鏡)観察結果から#82ボルトにおいてはせん断破断、#19ボルトにおいては延性破断と推定され、繰返し荷重による疲労破面は観察されなかったことから、ボルトの破断は金属疲労ではない。従って、今回のボルトの落下は金属疲労によるものではない。

④ 風応答解析

事故原因を解明するため、風応答解析等各種解析を実施した。ここで風応答解析とは実機と同様の動作を行うモデルに風を流入させ、風車各部に作用する荷重を評価する解析である。

【モーターブレーキに働くトルクの解析】

実機ログデータより風速、風向、ブレード3本のピッチ角を入力して、モーターブレーキに働くトルクを求めた。風荷重により各ブレードに発生するピッチメントの解析値から、ピッチアップの抵抗とデューサ(減速機)の損失を差し引き、ブレーキに働くトルクを計算すると、モーターブレーキに働くトルクは約12Nm~47Nmであった。実機ログデータから概ね27Nm以上のトルクが作用した場合にピッチ角が変化しており、この値は回収したピッチモーター分解調査で測定した保持トルク(20.5Nm~34.5Nm)とほぼ一致した。

【ロータが過回転に至った原因の解明】

本事故ではピッチ角が変化し始めたブレードが、風の流れに対して多少の角度を保持した状態でロータが回転している。解析の結果、ある程度ブレーキ保持力が残存している場合には、3本のブレードは回転方向に対する抵抗が最も小さい位置で状態を保持する様になり、ロータは回転を継続する。更に回転数が上昇して行くとブレードが3枚とも逆風の角度に移行し、過回転に至ることを確認した。

【事故直前の過回転およびタワーヒットの検証】

実機ログデータより風向およびブレード3本のピッチ角を入力とし、過回転に至るロータ回転数及びブレードの挙動を求めた。なお、解析の入力風速は解析対象時刻における、風速の瞬時値を一定風速として与えた。解析結果では、ロータ回転数は最大60rpmに達し、記録データとほぼ一致した。

16:36:28には、セトルブレードのピッチ角のばらつきから発生した振動による回転力および風圧等の外力により旋回を始め、62秒後に風方向にほぼ正対したと推測される。風車が風に正対しブレードが逆風状態になり、ロータが過回転になったために、ブレードはロータに近づく方向へ変位した。解析結果から事故直前の16:37:33におけるブレードの変位量は、図5に示すとおりブレード1は13.8m、ブレード2は10.6m、ブレード3は5.5mとなった。よって、ブレード1およびブレード2はロータに衝突する可能性が高い。(無風時の逆風状態では、ブレード先端とロータとの距離は約5.3mである)

風応答解析によるブレードが衝突する位置予測と、実機が損傷した①部位の位置関係は、図5の様にほぼ一致することを確認した。但し、②部位は、①にブレードが衝突した事によりロータが落下しながら回転したブレードが衝突したと推察される。

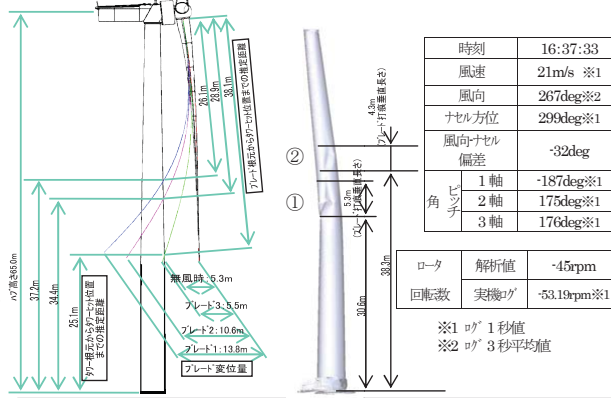


図5 過回転時におけるブレード変位量とタワーヒット位置関係と計測結果

4. 事故原因のまとめ

ピッチモーター分解調査、ナセル・タワー結合ボルト破損調査および風応答解析から、事故原因としては以下のとおり。

- ピッチモーターブレーキを構成するスライクが不適切な材質で製造されたため、スライクの異常摩耗が発生し、ブレーキインゲが摩耗したことにより、3枚のブレードともピッチ角を保持するブレーキ力が規定値を下回った。これにより、強風時にフェザリング状態を保持出来なくなり3枚のブレードが同時に逆風になったことで、ロータの過回転が発生した。尚、ピッチモーターブレーキの保持力低下を事前に検知する機能は無かった。
- ロータ過回転によりブレードが変形し、ブレードがタワーに接触し、セトルとタワーを結合するボルトに設計荷重を超えるせん断応力および引張応力が作用したことにより、ボルトが破断し、ナセルが脱落した。
- 過回転が発生した場合に風車を停止するための機能として安全回路(セーフティ)が設けられていたが、この機能はピッチモーターブレーキが正常であることが前提条件として設計されており、今回のようなピッチモーターブレーキに異常がある場合は機能できず、過回転防止機能として不十分であったことが判明した。

5. 再発防止対策

今回の事故原因の解明結果から、過回転を防止する為の再発防止対策を下記の通り策定した。

- ピッチモーターブレーキを構成するスライクの材質選定
  - アルミ合金製より摩耗強度(硬度・引張強度)の高いステンレス製を選定する。
  - 摩耗寿命耐久試験としてアルミ合金製とステンレス製で、ACサーボモーターにトルク制限を掛けた状態で、正逆運転させた際の、スライクのガリ(角度)の変化を確認する。100万回繰返し負荷試験を実施し、ステンレス製の検証を行った所、アルミ合金製と比較してステンレス製は7倍程度の耐久性が有ると判断された。よって、摩耗に対する寿命が単純に7倍になったものと考え、リフトバック筐取での実績(1年6ヶ月)から従来よりも耐久性が大幅に改善され、摩耗寿命が10年程度と想定しステンレス製を採用した。今後は消耗品としての位置付けで管理する。
  - ピッチモーターブレーキの健全性を確認するため、6ヶ月毎にギャップ測定を実施して状態を観察し、その結果に従い適切な処置を行う様に点検マニュアルを整備する。
- ピッチモーターブレーキの性能を維持するための整備(予防保全)
 

ピッチモーターブレーキ保持力が正常であることを確認するため、ブレーキを掛けた状態にてモーターに所定のトルクを掛け、モーターが動かないことを確認する。実施は自動プログラムにて適宜(当初は1週間に一度)低風速時に、フェザリング状態にて1軸毎行う。更に、低気圧(台風を含む)通過前等あらかじめ強風が予想される時および通過後には、適宜手動にて実施し、ブレーキ保持力が正常であることを確認する。
- 過回転防止措置
 

風車がフェザリング状態で待機しているにもかかわらず、ロータ回転数が許容回転数(3rpm)を超えた場合、発電機をモーター駆動させ、ロータの回転数を抑える様に自動制御を付加する。

問題点	対策	実施時期
1 ピッチモーターブレーキの保持力低下	<1.1.ピッチモーターブレーキを構成するスライクの材質変更> ・耐摩耗性の低い、或いはブレーキ力の低いピッチモーターブレーキは、スライクの材質をアルミ合金製からステンレス製へ変更し取替える。 <1.2.定期点検マニュアルの整備> ・6ヶ月に一度の定期点検時に、ギャップ測定等の項目を追記する。	済(~4/27) 済(~5/31)
2 過回転防止機能の不足	<2.1.ピッチモーターのブレーキ保持力のチェック機能追加> ・ピッチモーターのブレーキ保持力が正常であることをモーターに所定のトルクを掛け、ピッチが動かないことにて確認する。実施は自動プログラムにて適宜(当初は1週間に一度)、低風速時(3m/s以下)に、フェザリング状態にて1軸毎行う。 ・低気圧(台風を含む)通過前後等は適宜、上記プログラムを手動にて実施し、ブレーキ保持力が正常であることを確認する。 <3.回転数制御によるロータ過回転防止機能追加> ・風車がフェザリング状態で待機しているにもかかわらず、ロータ回転数が許容回転数(3rpm)を超えた場合、発電機をモーター駆動させ、ロータの回転数を抑える様に自動制御を付加する。	~6末 ~6/21

※ 再発防止対策のうち1-2,2,3についてはWP等取全号機に水平展開いたします。

6. まとめ

今回のナセル脱落事故に関する原因究明では、風応答解析等各種解析を実施するとともに、風車制御のログの解析、ピッチモーターブレーキの分解調査、ボルトの断面SEM観察を行った結果、不適切な材質で製造されたピッチモーターブレーキのスライクが異常摩耗し、その摩耗粉によりブレーキインゲが摩耗したこと、3枚のブレードともピッチ角を保持するブレーキ力が規定値を下回ったことが、直接的な原因であることを明らかにした。

強風時に3枚のブレードが同時に逆風となったことでロータの過回転が発生し、それによりブレードが大きく変形した。その結果、ブレードがタワーに接触し、セトルとタワーを結合するボルトに設計荷重を超えるせん断応力および引張応力が作用したことにより、ボルトが破断し、セトルが脱落した。

これらの事故原因を鑑み、耐摩耗性の高いスライクへの交換、ピッチモーターブレーキ保持力のチェック機能の追加、過回転防止機能の追加等の再発防止対策を策定した。

今後は、再発防止対策を確実に実行するとともに、風力発電所の長期に亘る安全運転に努めていく。

## 洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の事業実施者報告

## 1) ピッチモータブレーキの設計・製造の妥当性

洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車は、現状の J-82 市場機と同様に GL のプロトタイプ of 認証を受け、また風車の設計と製造は審査登録された ISO9001 にて品質管理されている。

また、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車のピッチモータブレーキのスプラインのオス材質及びメス材質共に鋼製であり、これはウィンドパーク笠取風力発電所 19 号機のオス材質の鋼、メス材質のアルミと異なり、更に硬度が高いものである。洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車同様、スプラインのオス材質及びメス材質共に鋼製である風車については、事業実施者が発電事業を行っている、既設風力発電所においてこれまで 2 年 3 か月の運転実績があり、この間にピッチモータブレーキのスプラインに関する問題は発生していない。

表 1. 設計条件等の比較

地点	製作	モータ仕様	ブレーキ容量	ブレーキ仕様型式	ブレーキギャップ	スプライン仕様メス/オス	乱流強度 (H=40m)
笠取	A 社	11kw/230V 誘導電動機	200Nm	BXW-20-10-12	0.15-0.35mm	A2017/S45C	
既設風力	B 社	11kw/230V 誘導電動機	150Nm	FD07	0.4-0.7-mm	C43/C45	0.133
洋上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	0.118

また、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車及び既設風力発電所にピッチモータブレーキを供給している B 社のピッチモータブレーキは世界の風車市場で十分な実績があり（シェア 30%、BTM 調査報告 2011.11）、重大な故障・事故の発生も無く、洋上風車の納入実績もある。

そのため、これまでの設計や運転実績から洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車に採用されているピッチモータブレーキは、安全面で問題は無いと考えられる。

## 2) ピッチモータブレーキ（ディスクブレーキ）の摩耗量の妥当性

ピッチモータブレーキ（ディスクブレーキ）の摩耗量（ギャップ）について、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車と同じ材質を使っている、

既設風力発電所の実績を調査した結果、表2に示す通り全てメーカーのギャップ管理値である0.4～0.7mm内にあった。運転開始時のギャップ測定記録が無いため、管理値の最小0.4mmを初期値と仮定すると、2年3ヶ月の運転で、0mm～0.2mm摩耗したことになる。さらに、この結果を基に、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車の摩耗量を推定すると、表3に示す通り最大でも約0.1mm/年程度の小さな値になることがわかる。

表2. 既設風力発電所におけるギャップ測定値

運転開始 2011年2月1日

測定日 2013年4月28日

ギャップ管理値 0.4mm～0.7mm

		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
1号	1軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	2軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	3軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
2号	1軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	2軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	3軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
3号	1軸	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.5
	2軸	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5
	3軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
4号	1軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	2軸	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5
	3軸	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.5
5号	1軸	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5
	2軸	0.4	0.4	0.5	0.5	0.5	0.5
	3軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
6号	1軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	2軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	3軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
7号	1軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	2軸	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5
	3軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
8号	1軸	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
	2軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	3軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
9号	1軸	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.5
	2軸	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5	0.5
	3軸	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.5
10号	1軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
	2軸	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.5
	3軸	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5

表 3. 既設風力発電所におけるブレーキ摩耗量

測定箇所		GAP量 (mm)	摩耗量 (mm)	発電電力量 (MWh)	摩耗速度 (mm/MWh)	摩耗速度 (mm/年)
1号	1軸	0.50	0.10	7,730	1.29E-05	4.44E-02
	2軸	0.50	0.10	7,730	1.29E-05	4.44E-02
	3軸	0.50	0.10	7,730	1.29E-05	4.44E-02
2号	1軸	0.50	0.10	7,587	1.32E-05	4.44E-02
	2軸	0.50	0.10	7,587	1.32E-05	4.44E-02
	3軸	0.50	0.10	7,587	1.32E-05	4.44E-02
3号	1軸	0.48	0.08	7,697	1.08E-05	3.70E-02
	2軸	0.47	0.07	7,697	8.66E-06	2.96E-02
	3軸	0.50	0.10	7,697	1.30E-05	4.44E-02
4号	1軸	0.50	0.10	8,886	1.13E-05	4.44E-02
	2軸	0.45	0.05	8,886	5.63E-06	2.22E-02
	3軸	0.55	0.15	8,886	1.69E-05	6.67E-02
5号	1軸	0.47	0.07	9,192	7.25E-06	2.96E-02
	2軸	0.47	0.07	9,192	7.25E-06	2.96E-02
	3軸	0.50	0.10	9,192	1.09E-05	4.44E-02
6号	1軸	0.50	0.10	7,229	1.38E-05	4.44E-02
	2軸	0.50	0.10	7,229	1.38E-05	4.44E-02
	3軸	0.50	0.10	7,229	1.38E-05	4.44E-02
7号	1軸	0.50	0.10	6,710	1.49E-05	4.44E-02
	2軸	0.47	0.07	6,710	9.93E-06	2.96E-02
	3軸	0.50	0.10	6,710	1.49E-05	4.44E-02
8号	1軸	0.42	0.02	7,123	2.34E-06	7.41E-03
	2軸	0.50	0.10	7,123	1.40E-05	4.44E-02
	3軸	0.50	0.10	7,123	1.40E-05	4.44E-02
9号	1軸	0.43	0.03	6,752	4.94E-06	1.48E-02
	2軸	0.47	0.07	6,752	9.87E-06	2.96E-02
	3軸	0.47	0.07	6,752	9.87E-06	2.96E-02
10号	1軸	0.50	0.10	6,508	1.54E-05	4.44E-02
	2軸	0.52	0.12	6,508	1.79E-05	5.19E-02
	3軸	0.50	0.10	6,508	1.54E-05	4.44E-02
MAX.		0.55	0.15	9,192	1.79E-05	6.67E-02

3) ピッチモータブレーキのメンテナンスの妥当性

ピッチモータブレーキのメンテナンスについては、メーカー推奨期間が3年間であるが、ピッチモータブレーキのブレーキライニングの最大摩耗量を想定し0.1 mm/年で計算した場合でも、1年間の摩耗であれば十分な管理値内におさまることが認められた。これよりメンテナンスは原則1年とし、更なる安全を考慮し当初は6ヶ月で点検し、その後状況により3ヶ月ずつ延長を判断することとする。