

# 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 (中間報告)

## 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）

### (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 1 発電所位置図

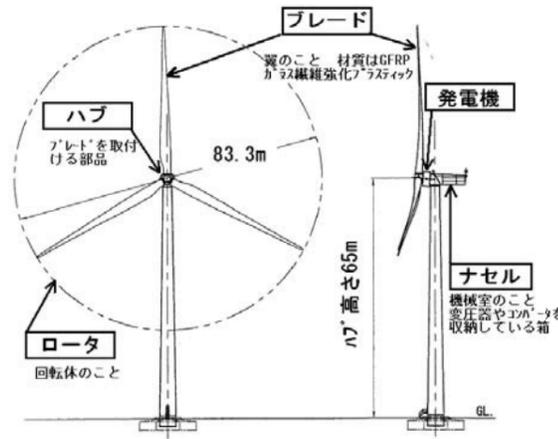


図 2 風車各部の名称

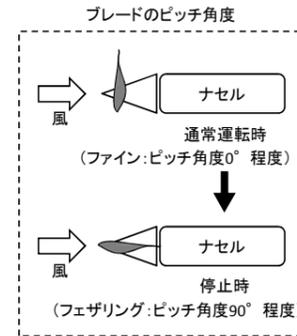


写真 1 ブレード、ナセル脱落状況



## 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 時前後にはカットアウト風速 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添付書類参照のこと)

#### (正常な制御)

- 12:28:45 コンバータトリップの発生 (0 時から累計 12 回発生) により風車非常停止。それまでは強風であるものの通常運転にて発電。
- 15:15:23 カットアウト(3sec 平均 30m/s)発生。但し上記 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 カットアウト(10min 平均 25m/s)発生。但し上記 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 (3sec 平均 40m/s)へ移行し、風下へ向く様に強制ヨー動作開始。(16:02 頃完了 0.5 度/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 87 度)
- 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 92 度)
- 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 93 度)
- 16:14:09 B200 ブレーキ時間超過 (フェザリング状態にもかかわらずロータが回転(3rpm 以上))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 ヨー旋回方向異常(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 26 度から -187 度となり逆フィン状態となる。
- 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 +175 度となり逆フィン状態となる。
- ピッチ 3 制御異常が発生(16:06:22)後、急激にピッチ角が 92 度から 176 度となり逆フィン状態となる。
- 16:36:28 以降において 3 枚のブレードピッチ角が逆フィン状態に揃い、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、ヨーの滑りが発生し、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。

### (3) 風車の脱落状況

#### 【タワー】

- タワーはドムタワーの中央部付近(頂部より約 33m)の付近で風下(東南東)に約 5 度程度屈曲している。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。

#### 【発電機及びナセル】

- 発電機及びナセルはタワーから風下方向(80°～90°)の斜面に脱落している。ナセルとタワーを接合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(ワト側)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(ワト)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 タワー座屈状況



せん断 71/108 本 (約 2/3)

写真 3 フランジ面ボルト状況

引張 37/108 本 (約 1/3)

写真 4 ボルト引張破壊状況

## 3. ナセル落下とタワー損傷の原因究明

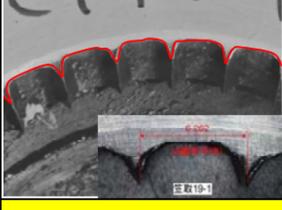
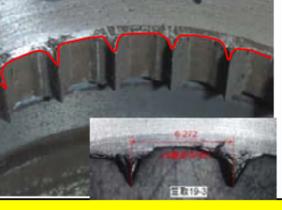
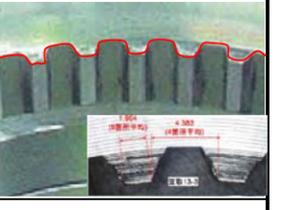
### (1) 事故に至った要因

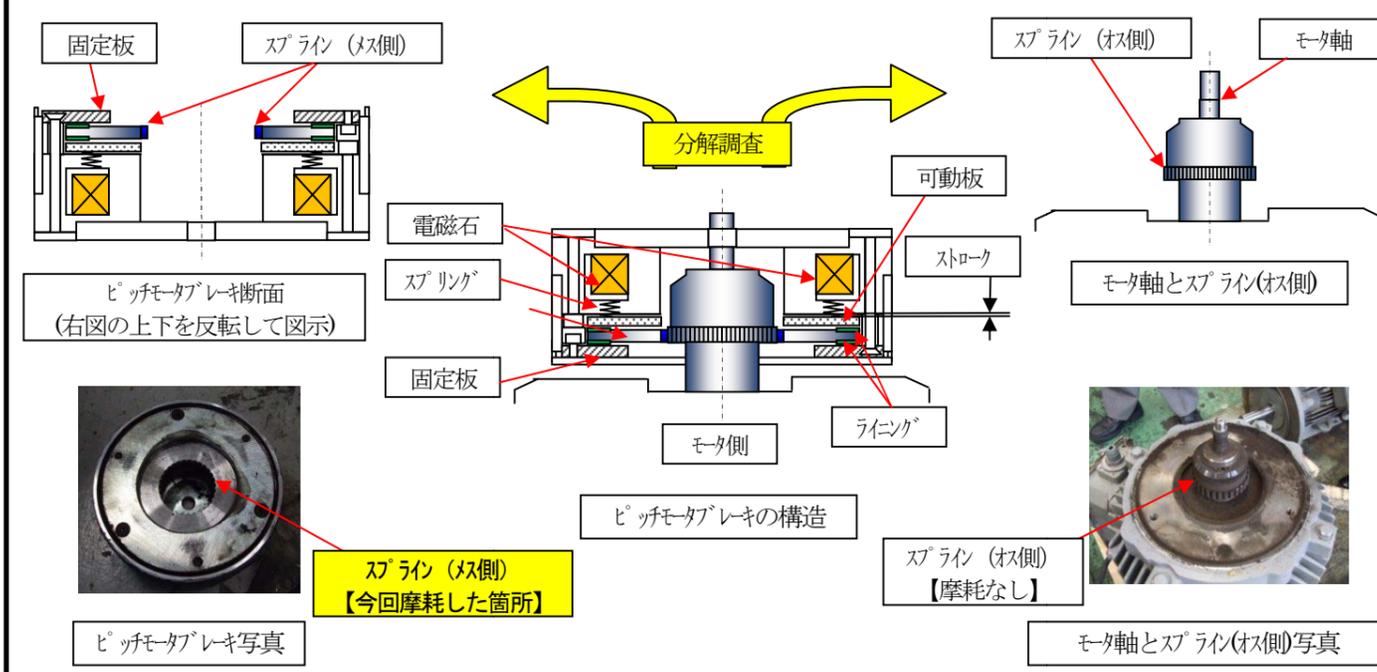
- 高風速によりストームモードに移行した後、3 軸共ピッチ制御異常が発生し、ピッチ角が変化しフェザリング状態が維持出来なくなり過回転に至った。この時点にてピッチモータ電磁ブレーキの故障の有無は不明。
- フェザリング状態が維持出来ず、3 軸共バラバラではあるが逆フィン状態へ通常の約 3 倍の速度にて移行(制御信号無)し逆過回転となり、セーフティチェーンが動作したがフェザリング状態へ移行せず、ヨー旋回も指令(制御信号有)とは反対方向へ通常の約 8 倍の速度にて旋回をした。
- ナセルの接合ボルトは 1/3 が引張応力、2/3 がせん断応力により破壊しナセルが脱落した。ブレード破片は最大約 260m 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推定

#### 【調査結果】

- ピッチモータブレーキ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。
- 3 台ともピッチモータブレーキを構成するスプライン(ヌ側)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。
- スプライン(ヌ側)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)
- ブレーキを保持するばねストロークは 2.0～2.4mm であり、3 台とも規定値(0.15～0.35mm)を上回る値であった。

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※とも定格回転数1,800rpmで駆動可能。	正、逆回転※とも定格回転数1,800rpmで駆動可能。異音あり。	※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※ 逆回転: 25.5Nm※ ※軸曲状態での計測のため、参考値	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	
	ストローク測定	2.4mm	2.2mm	2.0mm	【規定値】 0.15~0.35mm	
	スプライン(メス側)外観					
		三角形状に歯が摩耗	三角形状に歯が摩耗	三角形状に歯が摩耗	未使用状態のスプライン	
	歯山高さ: 2.35 mm	歯山高さ: 2.29 mm	歯山高さ: 2.30 mm	設計基準値: 2.0 mm		

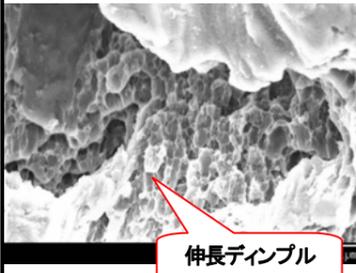
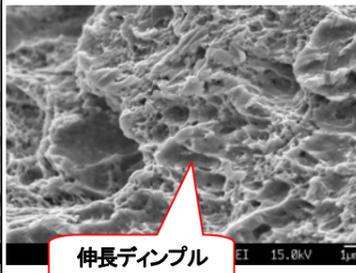
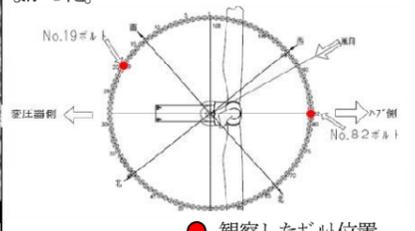


【調査結果からの推定】

- ① ピッチモータブレイキ動作中に発生する応力によりピッチモータとブレイキディスクを接合するスプラインが摩耗し、その摩耗粉がブレイキライニングに付着したことでブレイキの摩擦力が低下した。
- ② スプラインの摩耗粉がブレイキライニングに付着した状態でピッチモータブレイキが動作し制動トルクが掛かったことにより、ブレイキライニングが摩耗し、ライニング厚さが規定以上に薄くなった。これにより、ブレイキを保持するばねのストロークが長くなり、ばねの押付け力が低下した。
- ③ ①、②の事象が発生した結果、ブレイキの保持力が規定値 200Nm を下回り、ブレードのピッチ角が保持できなくなった。

(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)	評価
外観			<p>【#82 ボルト】</p> <p>破断部近傍で絞り認められず、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(せん断破壊)したと判断。</p> <p>【#19 ボルト】</p> <p>破断部近傍で絞りが認められ、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(延性破壊)したと判断。</p> <p>いずれも金属疲労に特有の断面は観察されなかった。</p>
破面SEM観察			 <p>● 観察したボルト位置</p>

【調査結果からの推定】

破面 SEM 観察結果から #82 ボルトにおいてはせん断破壊、#19 ボルトにおいては延性破壊と推定され、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、今回のナセルの落下は金属疲労によるものではない。

(4) 風応答解析と事故発生メカニズムの推定

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。

- ① ブレードピッチ角を保持できなくなった原因を究明するため、風応答解析からピッチモータブレイキに作用する荷重解析を行った。風荷重により 3 枚のブレードに発生するピッチモーメントは 25kNm~87kNm であった。また、フェザリングまたはピッチ角を保持した状態で、概ね 49kNm 以上のピッチモーメントが作用した場合にピッチ角が変化する。ピッチモーメント  $M_z$  とピッチモータブレイキに作用するモーメント  $M_b$  は次の式で示される。  

$$M_b = M_z / 1198.5 \text{ (Nm)}$$
 49kNm のピッチモーメントが作用した場合、上式によりピッチモータブレイキには 41Nm のモーメントが作用することとなり、この値はピッチモータ分解調査で計測したピッチモータブレイキの保持トルク(22.5~34.5Nm)を上回っている。  
 解析結果に示すように、ピッチモータブレイキが本来の設計要求を満たすことが出来ない状態になり、通常発生するモーメントに対しピッチ角の制御が出来なくなった。  
 注)上記の値は、シミュレーションに入力した諸条件によって異なるため、現実の値とは異なる可能性がある。
- ② 過回転となった原因の解明とブレードの変形に関する解析を行った。  
 16:37:20 以降の時刻について、風応答解析を実施したところ、ロータ回転数は記録データ(57rpm)とほぼ一致し、最大で約 60rpm に達することが判明した。  
 また、風車が風に正対しブレードが逆フィン状態にあり、ロータ回転が 60rpm になれば、流入風と回転により大きな揚力が発生し、ブレードはタワーに近づく方向に変位する。解析結果からブレードの変位量はそれぞれ第1軸:13.8m、第2軸:10.6m、第3軸:5.5m となり、少なくとも第1軸、第2軸はタワーに衝突する可能性が高い事が判明した。(正対時の逆フィン時には、ブレード先端とタワーとの距離は、約 5.3m である)

4. 事故原因のまとめ

- ピッチモータ分解調査、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の事故原因解明としては以下のとおり。
- (1) ピッチモータブレイキを構成するスプラインが不適切な材質で製造されたため、スプラインの異常摩耗が発生し、3 枚のブレードともピッチ角を保持するブレイ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フィンになったことで、ロータの過回転が発生した。
  - (2) ロータの過回転により大きく変形したブレードがタワーに接触し、ナセ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。
  - (3) 風応答解析から、事故時の風条件においてピッチモータブレイキに作用する風荷重がブレイキ力を上回り、ブレードのピッチ角を保持出来なくなったことを明らかにした。また過回転時のブレードの変形量から、ブレードがタワーに衝突した可能性の高いことを示した。

5. 当面の措置および今後の検討課題

- (1) WP 笠取全風車 (18 基) のピッチモータブレイキについて、早急に点検を行い健全性を確認するとともに、耐摩耗性の低い、或いはブレイキ力の低いピッチモータブレイキを取替える。
- (2) 今後、事故原因であったピッチモータブレイキの安全性向上のために、ピッチモータブレイキの点検マニュアルを整備するとともに、ブレイキ力の監視方法やフェザリング時のピッチ角の保持方法などの再発防止策を検討する。

# WP 笠取 CK-19 脱落事故までの運転記録

