

苫前グリーンヒルウインドパーク 11 号風車破損事故について（最終報告概要）

1. 苫前グリーンヒルウインドパーク（苫前 GHWP）と事故の概要

(1) サイトの概要

- ・所在地：北海道苫前郡苫前町上平 15-1
- ・定格出力：20MW (1,000kW×20 基)
- ・運転開始：1999 年 11 月 1 日

(2) 風力発電設備の概要

- ・風車：Bonus Energy A/S
(現 Siemens Wind Power A/S)
- ・定格出力：1,000kW/200kW(大発と小発の極数切換方式)
- ・回転数：22/15rpm
- ・ロータ：直径 54.2m、取付位置 地上 45m

(3) 事故の概要

- ・日時：2013 年 9 月 5 日 4 時 44 分頃
- ・状況：主軸破断によりロータハブ(ブレード 3 枚含む)が落下



図-1 発電所位置

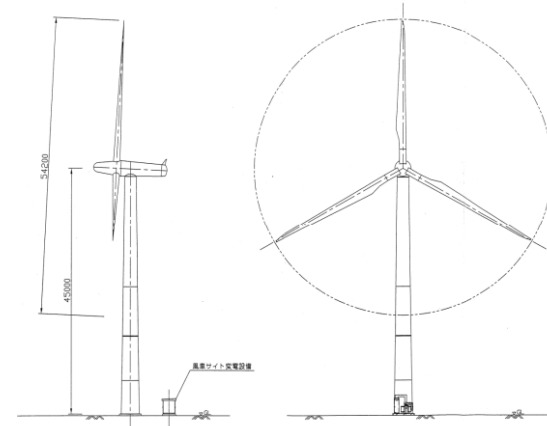


図-2 風車外形図



図-3 ロータハブ落下状況

2. 事故状況

(1) 気象状況・風況

- ・旭川地方気象台の留萌地方羽幌測候所の気象データによると、9 月 5 日の 4 時は南西の風 6.5m/s(天候:曇り、気温:22.2℃)であり、同日 5 時は南西の風 8.7m/s(天候:曇り、気温:22.2℃)であった。

(2) 風車の状況

(事故発生前の運転状況)

【風速】

9 月 4 日 14 時頃までは 3~5m/s 程度であり、その後上昇して 8~10m/s 程度となり、事故発生直前(9 月 5 日 4 時 40 分)の 10 分間平均風速は約 10.3m/s。

【回転数】

9 月 4 日 15 時頃までは 14rpm(小発運転)、それ以降は 21rpm(大発運転)に移行。風車の定格回転数(15/22rpm)にほぼ一致。

【出力】

風速の変化に伴い推移しており、事故発生直前(9 月 5 日 4 時 40 分)の 10 分間平均出力は約 600kW。

【ナセル角度】

9 月 4 日 6 時~14 時は概ね北東、4 日 15 時~5 日 1 時は東南東、それ以降は西方向にナセル旋回し、事故発生直前(9 月 5 日 4 時 40 分)は南西方向。

【アラームログ】

9 月 5 日 4 時 44 分に「Overspeed VCU(過回転)」*1 が発報し、続けて「G-Sensor Activated(加速度異常)」、「Pitch(A, B, C) encoder error(ブレード角度検知センサー異常)」、「Hyd.Oil Level/Temp error(制御油レベル/温度異常)」が発報。

(3) ロータハブの落下状況(風車の破損状況)

【ロータハブ】

ロータハブは南西方向を向いていたナセルから、ほぼ真下に落下。

【主軸破断面(ハブ側)】

主軸破断面の外観は、典型的な疲労破壊の様相が認められた。また、亀裂発生起点と思われる箇所は、主軸段付き部(軸受とグリスリング装着部の間)の曲率半径 R 部に複数(少なくとも 3 ヶ所)あった(図-4)。

【主軸破断面(ナセル側)】

ナセル前部カバー(下側)が約 180 度反転し、確認可能な範囲で調査したところ、以下の様相が確認された(図-5)。

- ・主軸直径は約 510mm(設計は 530mm)
- ・主軸の周りに約 20mm 幅のリングあり(設計はリングなし)
- ・主軸段付き部の曲率半径 R は約 1mm 程度(設計は 10mm)
- ・主軸段付き部の曲率半径 R 付近には溝なし(設計は溝有り)



図-4 主軸破断面(ハブ側)



図-5 主軸破断面(ナセル側)

【ナセル】

ロータヘッド側はタワーとナセルの隙間が無く、ナセルのハッチより前側の左右両側面に周方向の凹みがある。

【ブレード】

ブレードはロータハブと接触もしくは近接した位置に落下しており、ブレード損傷に伴う FRP 等の飛散物の範囲もブレード落下地点の近隣のみであった。ロータ過回転の様相は見られない。

- ・A ブレード：ルート部から裂けており、リーディングエッジとトレーリングエッジが開口。先端 2.5m が折れ曲がっている。
- ・B ブレード：先端 2.9m が折れ曲がっており、タワーと接触したと思われる痕がある。
- ・C ブレード：ルート部から裂けており、プレッシャーサイドとサクションサイドは完全に分離。それぞれ先端から 14.2m、14.8m で折損。

【タワー】

タワー側面(南側)にブレードが接触して出来たと思われる凹みがあるが、それ以外には傷は認められなかった。

【基礎】

ペDESTアル、グラウト、アンカーボルトのいずれも異常無し。

3. 主軸および軸受の概要・履歴

(1) 主軸の概要(風車メーカー原設計)

- ・主軸段付き部には、応力集中を和らげるために曲率半径 R (R=10mm) の加工がなされている。主軸の材質は、Fe510 規格品(UNI 規格)であり、炭素量が 0.2~0.23%の低炭素鋼である。熱処理は無い(図-6, 7)。

(2) 事故発生した主軸の履歴

- ・1999 年 11 月~2011 年 12 月：苫前 GHWP7 号機で使用
- ・2011 年 12 月：軸受の焼付き発生、主軸および軸受交換
- ・2012 年 3 月：主軸を国内修理業者に搬入、主軸修理
- ・2012 年 4 月：主軸の修理完了、予備主軸として保管
- ・(風車メーカー原設計と異なる修理)
- ・2012 年 5 月：苫前 GHWP11 号機にて軸受破損発生
- ・2012 年 6 月：苫前 GHWP11 号機の主軸および軸受交換
- ・(当該主軸を使用して運転再開)
- ・2012 年 6 月~2013 年 9 月：苫前 GHWP11 号機として運転
- ・2013 年 9 月 5 日：ロータハブ落下事故発生

(3) 主軸の修理内容

- ・国内修理業者に搬入・分解時には、主軸の軸受取付部の損傷が著しく、主軸直径が風車メーカー原設計よりも小さかった。(風車メーカー原設計：530mm、実測値：526mm)
- ・主軸の軸受取付部は損傷が著しいため、機械旋盤により直径 20mm 程度旋削し、細くなった部分には外径を設計寸法に合わせるため、厚み 10mm 程度のスリーブを焼き嵌めした。
- ・主軸段付き部は、曲率半径 R の加工は施していない(図-8, 9)

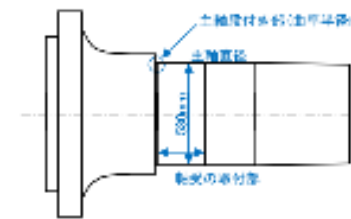


図-6 主軸断面図(原設計)

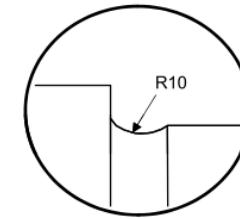


図-7 主軸段付き部(原設計)



図-8 主軸断面図(事故機)

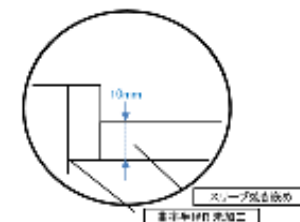


図-9 主軸段付き部(事故機)

*1 なお「Overspeed VCU」は、ロータハブ落下状況にロータ過回転の様相が見られないことから、ロータハブ落下に伴いセンサーのケーブルが断線したことにより発報したと考えられる。

4. 主軸破断面の調査

(1) 調査方法

主軸破断面（ハブ側、ナセル側）をビデオマイクロスコープ、レーザー顕微鏡、電子顕微鏡で観察し、破断原因・過程を解明した。

(2) 観察結果

【ハブ側】（図-10）

- ・領域 1 は、疲労破壊の典型的な特徴であるビーチマーク^{*2}を 3 箇所確認した。
- ・領域 2 は、凹凸が激しいことから、最終破断面と推定した。
- ・領域 1 の 3 箇所の亀裂のうち、亀裂 2 にて長さ 0.5mm 程度のステップ^{*3}を 2 箇所確認し、ステップ^{*3} その近傍には加工傷も確認した。（図-11）
- ・亀裂 3 に高温酸化が見られた。

【ナセル側】

- ・亀裂 1 は、亀裂 1-1 と亀裂 1-2 があり、亀裂 1-1 では、微小なステップ^{*3}が観察された。亀裂 1-2 では、起点部が損傷しており観察できなかった。
- ・亀裂 3 では、ハブ側に比べ高温酸化は無く、無数の微小なステップが観察された。（図-12）

【焼付き】

- ・2011 年 12 月に発生した軸受の焼き付きは、下記の理由から亀裂発生の原因ではない事を確認した。
- ・仮に、焼付き時の疲労強度低下が原因で疲労亀裂が発生した場合は、主軸補修の旋削工程において、ステップ^{*3}と破断面の傾き^{*4}は、ともに削り取られており観察されない。しかしながら今回の破断面の観察では、これらの事象が二つとも確認できたことから、軸受の焼付きに伴う、疲労強度の低下は、亀裂発生の原因ではない事を確認した。

【調査結果まとめ】

- ・主軸は疲労破壊により破断した。亀裂は肉眼で観察可能な大きさでは、4 箇所から発生した。
- ・亀裂は全て加工不良（曲率半径 R の不足、加工形状不良）による応力集中が原因であった。
- ・亀裂 2 の起点部付近のレプリカを採取し、その断面をレーザー顕微鏡で観察したところ、R は 1.72mm であった。

^{*2}【ビーチマーク】

疲労によって破断した部品などの破断面において、特に疲労負荷が変化したときに観察される特徴的な様相を言い、その模様が海岸に繰り返し打ち寄せる波で浜辺の砂場が縞状に見える形態に類似している。ビーチマークの形成については、図 13 に示す。

^{*3}【ステップ】

疲労亀裂は複数の起点より生じる。その際に、巨視的にはほぼ同一の面に生じるが、微視的には面の位置は微小にずれている。亀裂が進展し合体しようとするとき、そのずれのところに段差が生じる。これを“ステップ”という。ステップの形成について図 13 に示す。

^{*4}【破断面の傾き】

繰り返し引張荷重を受ける丸棒に生じる疲労亀裂は、巨視的には最大応力方向に垂直な面を形成する。これに対して段付き構造の R 部に生じる最大応力方向は、R 部に沿って傾くことから、疲労亀裂は軸方向と垂直ではなく、図-14 に示すような傾いた面を形成する。これを“破断面の傾き”と呼ぶこととする。

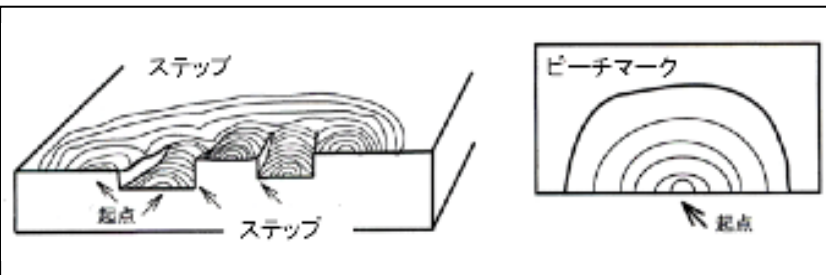


図-13 疲労破断面の起点部の特徴

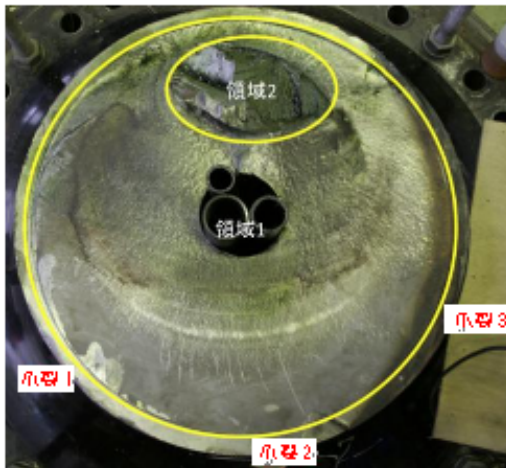


図-10 主軸破断面（ハブ側）

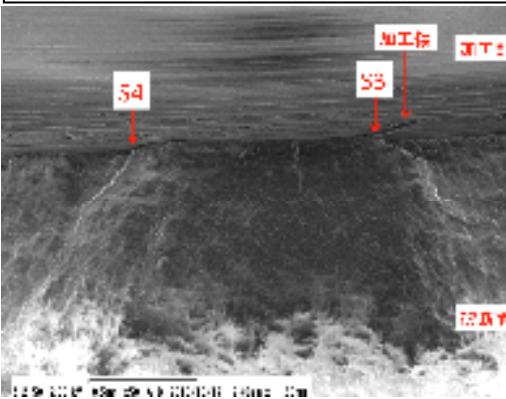


図-11 主軸破断面（ハブ側）の亀裂 2

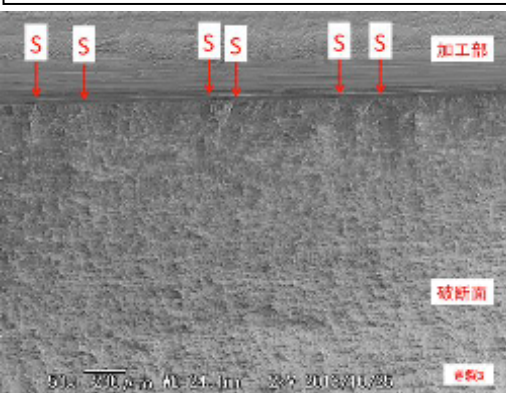


図-12 主軸破断面（ナセル側）の亀裂 3

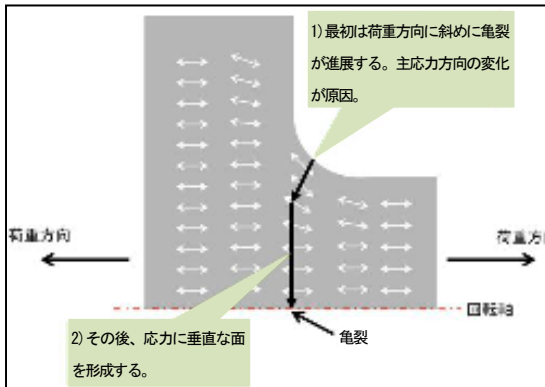
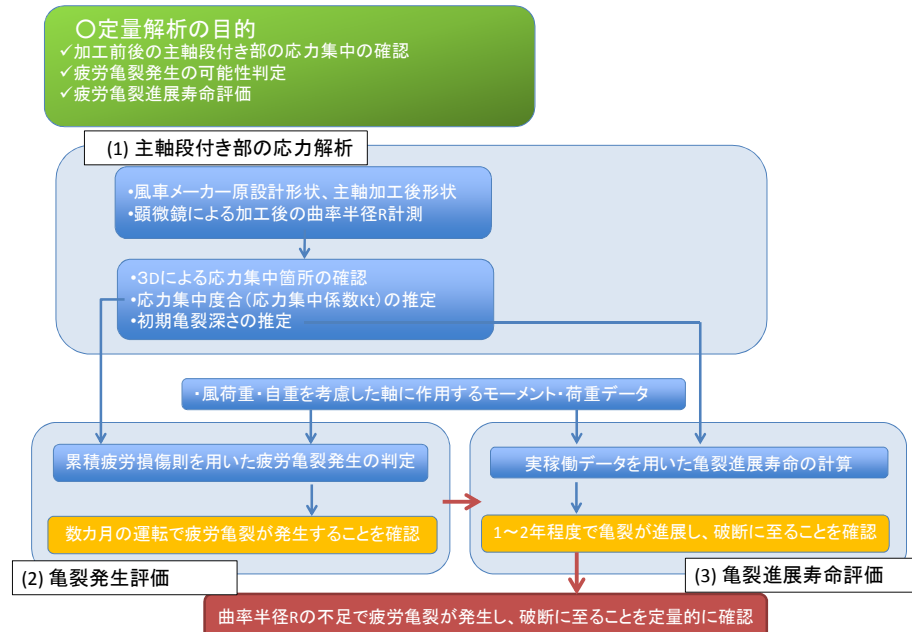


図-14 段付き部構造 R 部に発生する疲労亀裂の進展経路

5. 応力集中、亀裂発生、亀裂進展寿命等の定量解析

主軸破断面の調査で明らかになった疲労破壊メカニズムを検証するため、主軸段付部の応力解析、亀裂発生評価、亀裂進展寿命評価を行った。下記に定量解析フローを示す。



(1) 主軸段付き部の応力解析

【解析手法】

主軸段付き部 直径 530mm の段付き R10（曲率半径 10mm、実機設計形状）と、直径 510mm の段付き R1、R2、R4（主軸加工後形状）の 4 ケースについて、有限要素法（FEM）により解析し、全体解析により応力の集中度合（応力集中係数 Kt）を求めた。また、詳細解析により応力集中点の降伏領域から、初期亀裂深さを推定した。R1. 72mm（実測形状）の Kt を正確に求めるため、段付き部の詳細解析を行った。

【解析結果】

- ・加工後の形状において、主軸段付き部 R 部の円周方向に応力集中が確認された。
- ・Kt は、R1. 72mm では R10mm に対して約 1.8 倍となった。
- ・応力線図断面を用い、応力集中点における降伏領域の大きさから初期亀裂深さを約 2mm と推定した。

(2) 亀裂発生評価

【解析手法】

実働応力振幅に対し、R10mm では 20 年間、R1. 72mm では 1 年の繰り返し数を与え、S-N 曲線（疲労強度曲線）に基づく累積疲労損傷則により応力振幅に応じた損傷度の和を求め、疲労亀裂発生の有無を判定した。

【解析結果】

(1) で求めた Kt を基に損傷度を算出したところ、R10mm では 20 年の運転でも疲労亀裂が発生しないという評価に対し、R1. 72mm の換算応力では数カ月の運転で疲労亀裂発生に至るとの結果を得た。

(3) 亀裂進展寿命評価

【解析手法】

疲労亀裂の発生を仮定し、亀裂進展速度式（ $da/dN = C \Delta K^n$ 、 da/dN ：繰り返し応力 1 回当たりの亀裂進展深さ、 ΔK ：応力拡大係数、 C 、 n ：材料定数）に実働応力振幅を与え、実際に風車が回転した数に応じた繰り返し荷重で進展亀裂深さを求め、破断に至るまでの寿命を評価した。

【解析結果】

(1) で求めた初期亀裂深さを所与として亀裂進展寿命計算を行ったところ、運転を開始してから 1～2 年で破断に至るとの結果となり、実際に破断に至った日数（462 日）に相当した。

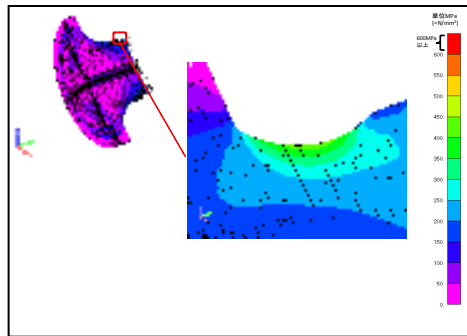


図-15 R10（設計形状）断面の応力解析

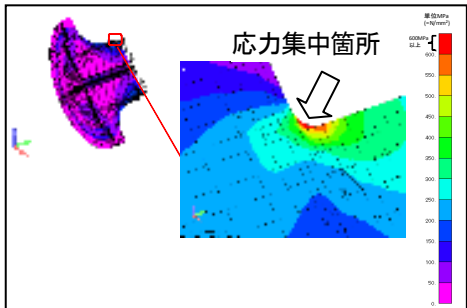


図-16 R2（加工後形状）断面の応力解析

6. 事故原因まとめ

主軸破断面の顕微鏡観察及び定量解析により、事故原因とそのメカニズムについては、以下の通りである事が明らかとなった。

- ・主軸は疲労破壊により破断した。
- ・当社の指示が不十分であり加工不良（曲率半径 R の不足、加工形状不良）により応力集中が起こり、亀裂が発生した。
- ・修理後の曲率半径 R は 1.72mm（原設計では 10mm）であった。
- ・疲労亀裂発生評価では、原設計（R10mm）では 20 年間の運転でも疲労亀裂は発生しないのに対し、加工後形状（R1.72mm）では数カ月の運転で疲労亀裂発生に至るとの結果を得た。
- ・亀裂進展寿命計算から得られた破断までの期間は 1～2 年であり、実際に破断に至った日数に相当した。

7. 同型風車についての検査結果

(1) 超音波検査

事故機と同型の風車の健全性確認のために同型機全機（25 機）の超音波検査を実施したが、亀裂の存在が確認された風車は無かった。ただし、健全な主軸とは異なる検査結果が得られた 6 機については、検査を実施した風車メーカーの推奨に従い、以下を実施する。

- ・ 1 機については、当該機の主軸を地上に降ろし、精度の高い追加調査・確認を実施する。
- ・ 5 機については運転再開後の風車の状況を確認するため、非破壊検査を定期的に実施する。

(2) 寸法測定及び非破壊検査

- ・ 同型機の内、4 機を抽出し寸法測定と浸透探傷検査又は、磁粉探傷検査を実施した。
- ・ 寸法については全ての風車で風車メーカーの原設計どおりであった。
- ・ 非破壊検査の結果、3 機については亀裂・傷の存在は検出されなかった。ただし、1 機については磁粉探傷検査の結果、曲率半径 R 部に軸方向に長さ 12mm 程度の傷が確認されたため、さらなる追加調査を実施する。



図-17 浸透探傷検査の良好例
(浜頓別 2 号)

8. 再発防止対策

事故の再発防止を図るため、「事故原因に対する防止対策」と「当社の取組」を下記の通り実施する。

8-1. 事故原因に対する防止対策

(1) 主軸の適切な修理

①重要部位（ブレード、ハブ本体、主軸、タワー）に関する修理方針の徹底

重要部位に対して、風車メーカーの事前確認が取得できない場合、原設計の変更となる修理は行わない旨を記載した技術標準書を 2013 年 12 月末迄に策定する。ただし、当該技術標準書作成までの経過措置として、直ちに社内通達を発出し、周知徹底する。

②重要部位に関する修理部品使用方針の徹底

重要部位を修理する場合、原則として風車メーカーの純正品を使用する旨を記載した技術標準書を 2013 年 12 月末迄に策定する。ただし、当該技術標準書作成までの経過措置として、直ちに社内通達を発出し、周知徹底する。

③主要設備（ブレード、ハブ本体、主軸、タワー、増速機、発電機、変圧器、基礎）発注時の仕様書作成、社内組織の見直し、検収の徹底

主要設備（修理を含む）の発注をする際は、当社要求仕様（検収項目を含む）を明確にした仕様書を作成し、新たに設ける購買担当組織にて発注先の適正審査や発注仕様書の内容を確認する。また、仕様書に従って検収（修理後の健全性の確認・検証）を行う。（購買担当組織は 2013 年 12 月末迄に設ける。仕様書作成と購買担当組織による審査のルール化について、直ちに社内通達を発出し、周知徹底する。）

(2) 主軸軸受の焼付き防止

軸受の焼付きは本件事故の直接原因ではないが、軸受の重度の損傷であるため、再発防止を図るべく以下を実施する。

①主軸軸受へのセンサー等の設置

- ・ 主軸軸受に温度センサーが無い風車を対象に、2013 年 12 月末を目途に温度センサーを設置し、設定温度を超えた場合には風車を自動停止させる対策を実施する。温度センサーについては PT100、バイメタル、サーミスタ等を選定中であり、主軸軸受のハウジングに設置することで詳細を検討中。
- ・ 温度センサーに加えて、実施可能な対策についても検討する。

②主軸軸受管理手順の見直し

現在主軸軸受の管理手順は保安規程の下位文書である運転保守要領に記載されている。今回は保安規程を改定し、運転保守要領の位置づけを明確に記載する。改訂は 2013 年 12 月末迄に実施する。2014 年 3 月末を目途に現行の管理手順をより実効的な手順に見直す（主軸の非破壊検査の実施等）。

8-2. 当社の取組

上記対策に加えて、設備保全の更なる強化を目的として、以下を実施する。

①設備状態の見える化

主要設備について、設備状態が見える化するためのカルテ（主要設備の諸元や保守点検記録等を全社大で一元管理するためのシステムを新たに構築し、保守点検データを時系列でグラフ化して劣化傾向の把握に役立てる）を作成し、設備のリスク評価を行い、的確な設備保全ならびに事故の防止に繋げる。2013 年 12 月末を目途に、システムを構築する。

②従業員の技術・技能向上

従業員の技術・技能の更なるレベルアップを図り、設備保全レベルの向上に繋げる。

9. 今後の対応について

今後は、再発防止対策を早急を実施していくものとする。事故機以外の同型風車については、安全を確認した上で順次運転の再開を目指すものとする。あわせて、発電所の長期にわたる安全且つ安定した運転を確保するために、運転保守に係る社内ルール・管理体制の随時見直しを行い、改善を重ねていく所存である。