

オロロン風力発電所 1号機ブレード落下事故について（最終報告概要）

1. オロロン風力発電所と事故の概要

(1) サイトの概要

- ・所在地：北海道羽幌町汐見（図-1 参照）
- ・定格出力：800kW（400kW×2基）
- ・運転開始：1998年11月

(2) 風力発電設備の概要（図-2 参照）

- ・風車：NEG Micon 社製（現在 Vestas 社）
- ・定格出力：400kW/100kW（極数変換方式）
- ・回転数：35.5/23.9min⁻¹
- ・ロータ：直径31m、ハブ高 地上36m
- ・ブレード保護：IEC61312-1 保護レベル I（200kA、10MJ/Ω、200C）

(3) 事故の概要

- ・推定日時：2013年12月5日（木） 0時10分36秒（推定）
- ・状況：被雷（推定）によりブレード1本が根本から飛散・落下、ハブカバー脱落、ブレードチップとブレード片が周辺に飛散

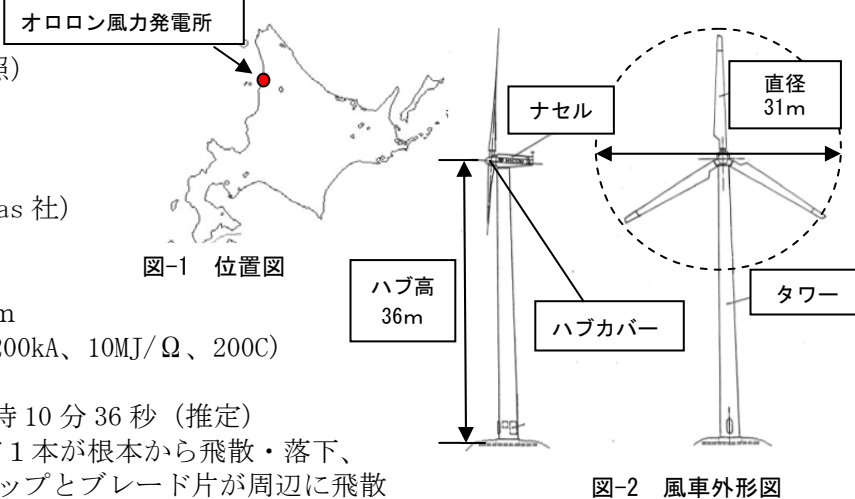


図-2 風車外形図

2. 事故状況

(1) 気象状況・風況

- ・0時10分：南南東の風5.6m/s、雨、気温3.6℃（羽幌測候所の気象データより）
- ・当該日（12月5日）は前後の日より3～4℃平均気温が高かった。
- ・羽幌地区の海水温は10～11℃で、平年より温かく冬季雷の発生条件に合致。
- ・フランクリン・ジャパン社の落雷解析によれば、12月5日0時10分36秒に10km圏内で3回の落雷が確認されている。

(2) 風車・電力系統の状況

- ・風車運転状況：12月5日0時10分35秒頃に制御コンピュータ電源喪失の記録。電源喪失直前の風車データは風速7.4m/s、発電機回転数1500min⁻¹、発電機出力55.27kW。
- ・電力系統：羽幌町では5日0時10分から1時19分まで、配電線事故の停電が発生。

(3) 損傷状況

計21個のブレード破片等の落下物を回収した。主要破片について図-4～8に示す。

- ・ブレード1本が翼根部付近から落下、ブレード前面が50m離れた国道脇に飛散（①）、風下約70m地点に背面部が飛散（②）
- ・ブレードチップ受雷部に被雷損傷痕跡、約120m離れた鉄工所の屋根にブレードチップが落下し、屋根が損傷（③）
- ・ブレードワイヤーの溶断、ライトニングケーブルの断線
- ・ブレードの内部の補強材（スパー）含めた部品が周辺に飛散
- ・ブレード内に複数の落雷によるアーク放電の痕跡、他ブレード2本にもエッジ部開口の損傷
- ・ハブカバー落下（約20m飛散④）、ハブの翼根部点検口蓋の飛散と損傷ブレードからの空気噴出痕
- ・（電気・制御設備等）1、2号機タワー内部避雷器（アレスター）の焼損、及び遮断器（MCCB）断、受変電設備では高圧交流負荷開閉器の放電痕、トランス内部異常、遮断器（MCCB）断、焼損、及び弱電設備の焼損

(4) 事故発生時刻

風車本体、及び受変電設備に落雷時に見られる損傷が確認でき、また落雷直前まで運転継続していたことから、12月5日0時10分36秒に1号機に落雷があったことによる事故であると推定する。



図-5 ①ブレード前面



図-6 ②ブレード背面



図-7 ③ブレードチップ



図-8 ④ハブカバー



図-3 事故後の風車全景



図-4 1号機羽根飛散位置図

(5) 風車の事故状況

本事故は主としてブレードの損傷と飛散である。ブレードの損傷状況を図-9にまとめた。



ライトニングケーブル（一部素線溶着、断線）



避雷ロッド（溶断）



アンカーブロック（先端部溶損）



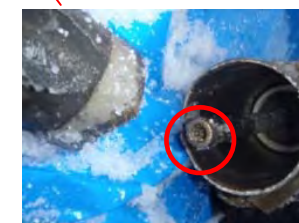
レセプター（受雷部落雷痕）



ライトニングケーブル（断線）



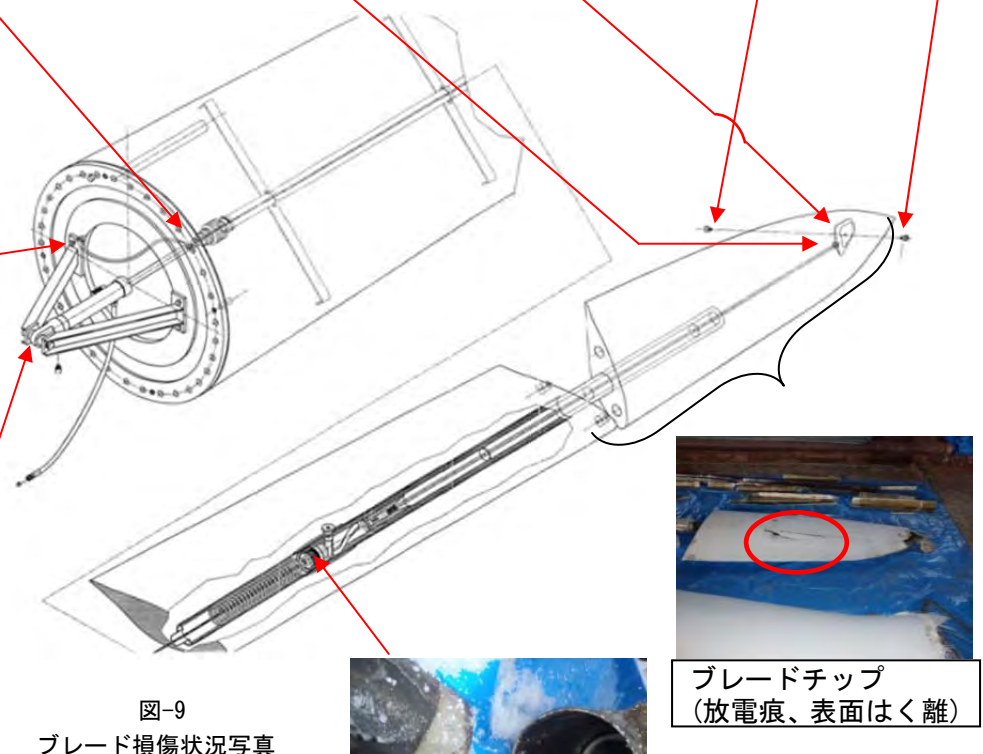
シリンダー（アーク放電痕）



ブレードワイヤー（溶断痕）



ブレードチップ（放電痕、表面はく離）

図-9
ブレード損傷状況写真

ハブ翼根部点検口（蓋は飛散）



ナセルカバー（損傷ブレードからの空気噴出痕）



他ブレードエッジ部（開口損傷）



ハブ取付け翼根部

3. 設備メンテナンス状況の確認

(1) 至近の点検実績

至近に行った点検実績を表-1に示す。ブレード関連の点検では経過観察中の微小なブレード表面亀裂以外、特に異常は確認されていない。

今回断線が確認されたライトニングケーブルは前々回の定期点検（2013年6月）で点検し断線していないことを確認している（点検間隔1回/年のため、前回2013年9月の定期点検では点検対象外）。

表-1 至近の点検実績一覧

| 点検種別 | 点検頻度 | 至近点検日 |
|----------|---------------|----------------|
| 月次点検 | 1回/月 | 2013年11月6日 |
| 定期点検 | 1回/6カ月 | 2013年9月14日～16日 |
| 臨時点検 | 災害発生時（強風・落雷等） | 2013年11月27日 |
| ブレード詳細点検 | 必要の都度 | 2011年9月1日～9月5日 |

(2) 過去の事故・故障履歴

2006年10月、2010年11月、2011年9月の計3度、ブレード先端部に開口・亀裂等の不具合が発生しており、その都度補修を行っている。

また、毎年、特に冬季には複数の電気制御系、通信系に落雷と推定される損傷が発生している。

4. 事故原因の分析

(1) ブレードの破損について

事故調査委員会による現地調査を2014年1月10日に実施し、事故原因を検討した。指摘は以下の通り。

- ・落雷とほぼ同時にブレードは破損したものとみられ、ブレード内部には溶断痕、放電痕が確認されている。
- ・一方、損傷ブレード前面・背面には落雷が見られないが、内部構造部材にはアーク痕は見られる。損傷ブレード以外のブレード内部を確認すると、接着剤等の劣化兆候等の様子は見られないことから、受雷部で受雷して避雷導線における溶断等を生じながらアーク放電による圧力上昇によってブレードの破損、飛散に至ったものと推定された。

(2) 詳細調査部位抽出

避雷システムで損傷のあった以下の部品（図-10参照）に関し、専門業者に分析を依頼して状況を確認した。

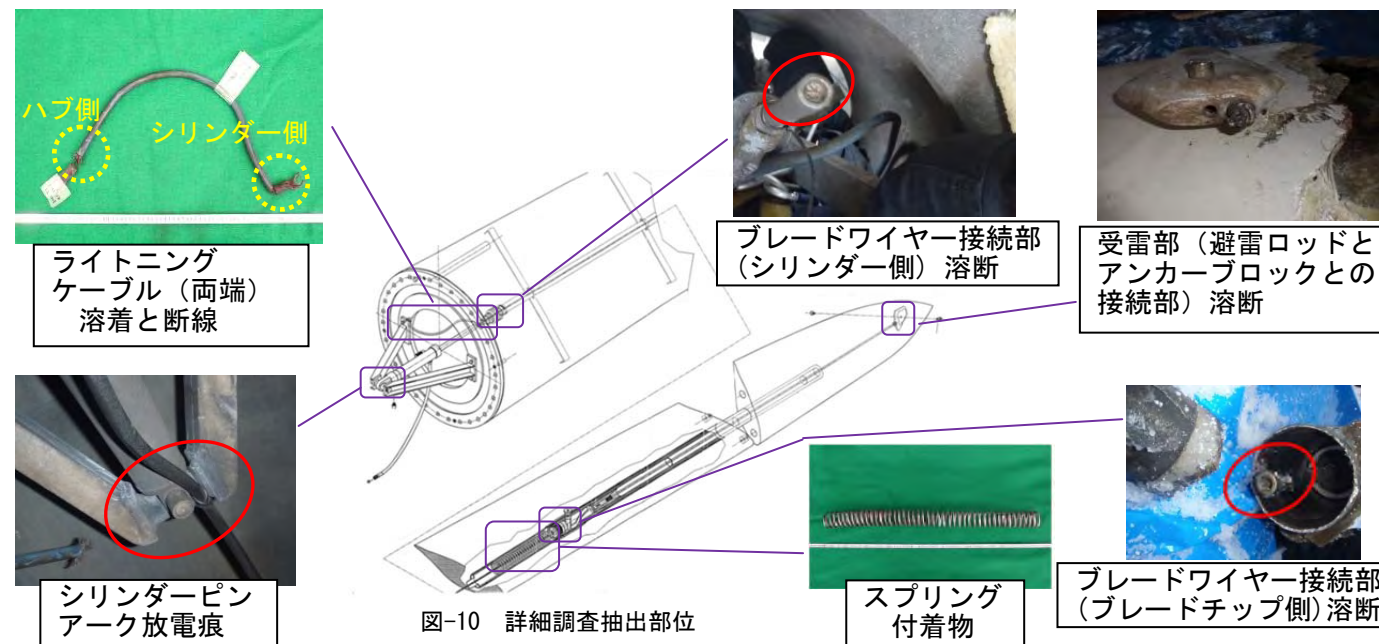


図-10 詳細調査抽出部位

(3) ライトニングケーブルの分析結果

- ・ライトニングケーブルのハブ側破断部は、破断部近傍の微細な割れ（図-11）と平坦な破断面（図-12）から、ブレード回転に起因する遠心力および重力により生じる繰り返し応力により疲労破壊が進展して、各素線の中心付近で破断したものと思われる。
- ・シリンダー側の一部素線破断部は、落雷により素線が溶融して破断したものと推定される（図-13）。

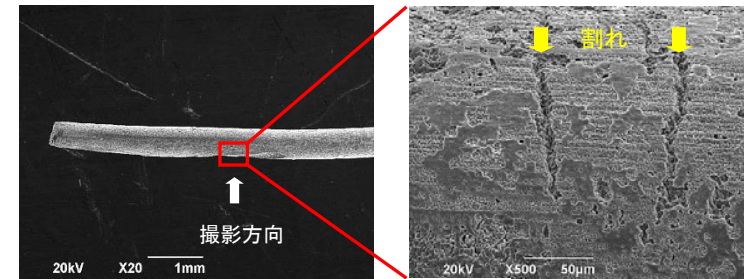


図-11 微細な割れ

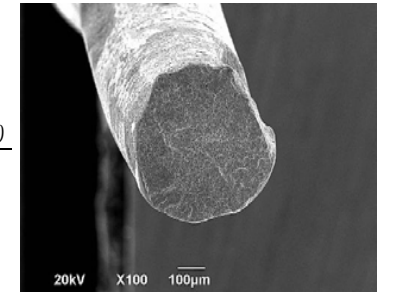


図-12 破断面

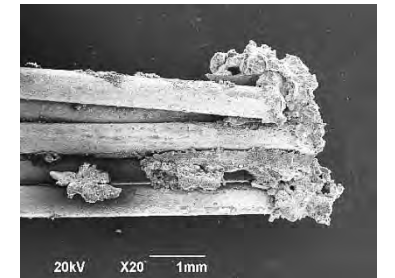


図-13 素線の溶融

また、当該風車では、何らかの理由で正規品のケーブルを使用していなかったことが判明した。事故機用ケーブルは正規品ケーブルと比べて電流容量等の問題はないが、可撓性が小さく、使用時間経過に伴い破断した可能性が高い。

前々回の定期点検でライトニングケーブルを点検しているが、当時既に疲労破壊が進行しており、この兆候を見逃した可能性もある。

以上の分析結果から以下のことが言える。

- ハブ側は使用中の疲労破壊が進展して事故時には破断（断線）していた。
- シリンダー側には一部素線の溶断が見られた。
- ライトニングケーブルは正規品を使用していなかった。

(4) ライトニングケーブル以外の分析結果

避雷システムで溶断の影響等が見られた部品についてマイクロ組織観察等の調査を実施した。部品各部の分析結果を表-2にまとめた。

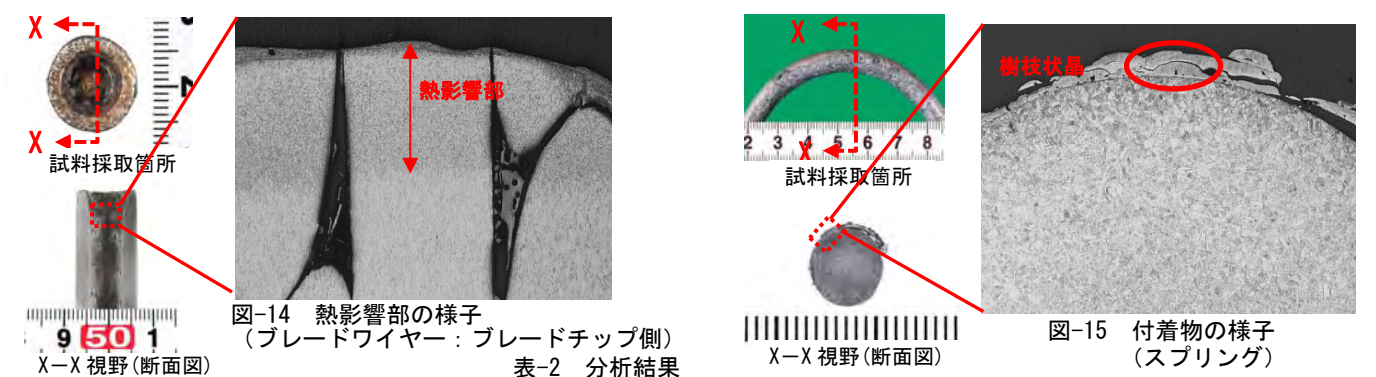


図-14 熱影響部の様子
（ブレードワイヤー：ブレードチップ側）
表-2 分析結果
図-15 付着物の様子
（スプリング）

| 部位 | 分析結果 |
|--------------------|-------------------------------------|
| 受雷部（避雷ロッド接続部） | 熱的要因と外力による破断 |
| ブレードワイヤー（ブレードチップ側） | 熱的要因による破断（図-14） |
| スプリング | 熱的要因により溶融・破断した部品（ブレードワイヤー）の付着（図-15） |
| ブレードワイヤー（シリンダー側） | 熱的要因による破断 |
| シリンダー取り付け部のピン | 熱的要因による溶融 |

(5) 避雷導線溶断からの雷性状の分析

溶断箇所は、アンカーブロッカー-避雷ロッド間とブレードワイヤー両端かしめ部である。雷電流で溶断が発生しうる条件を求め、各雷パラメータを推定した。

他ブレードの実測抵抗値から、溶断部分を溶融させるエネルギーを算出すると、落雷の比エネルギーは $\alpha \approx 9.1$ [MJ/Ω] 以上となった。これに基づきフランクリン・ジャパン社の落雷データ、及び NEDO 冬季雷データを総合的に考慮すると、ピーク電流値 28kA、電荷量 700C 以上、比エネルギー量 9.1MJ/Ω 以上の落雷と推定される。

(6) アーク放電による圧力上昇の発生

アーク放電発生時の現象は以下のように推測される。(図-16 参照)

1) 落雷により、避雷ロッド部、ブレードワイヤー接続部に溶断が発生した。

2) 溶断部分及びシリンダー取り付け部のピン周辺、ライトニングケーブルのシリンダー側の一部素線からアーク放電が発生し、放電がもたらしたエネルギーで空気が膨張、内部圧力が上昇し、ブレードの補強材(スパー)とブレード前面、ブレード背面との接着部分がはく離した。内圧上昇の追加要因として、ブレード内部の結露等の水分による、水蒸気爆発の可能性も考えられる。

3) この時点では風車の回転は継続されていたため、はく離したブレード前面、ブレード背面の間から入り込む風力によっても、ブレードの分解が進み破損に至った。

4) 飛散したブレード部品は風によるエネルギー、回転によるエネルギー、内部の圧力エネルギーの合力により、周辺に飛散し落下した。

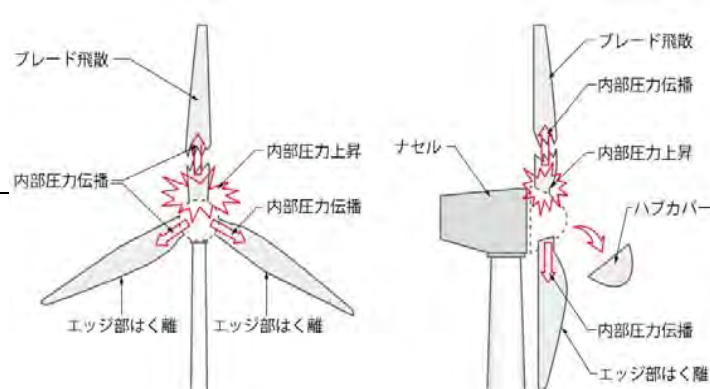


図-16 圧力上昇からブレード破損に至るまでの流れ

(7) ブレード飛散距離の分析

ブレードの回転速度と飛散距離の関係を表-3 に示す(自由落下運動と仮定)。

表-3 ブレード回転速度と飛散距離の関係

| 風車 | ハブ高 m | ロータ径 m | ブレード先端 m | 回転速度 min ⁻¹ | ブレード先端速度 m/s | 落下時間 sec | 計算飛散距離 m | 備考 |
|---------------|----------|-----------|-------------|---------------------------|-----------------|-------------|-------------|-----|
| NEG Micon 400 | 36 | 31 | 51.5 | 0 | 0.0 | 3.35 | 0 | 停止時 |
| | 36 | 31 | 51.5 | 23.9 | 38.8 | 3.35 | 130 | |
| | 36 | 31 | 51.5 | 35.5 | 57.6 | 3.35 | 193 | 事故時 |

ブレードチップ部は風車から約 120m 離れた鉄工所工場屋根にて発見されており、上記計算結果に空気抵抗等を考慮すれば、ほぼ妥当な距離と判断できる。

(8) メーカー等の分析結果

1) 風車メーカー: Vestas 社(旧 NEG Micon 社)による事故原因分析結果

雷電流が避雷導線とは別に内部構造部材を走ったことによる周辺部の強度低下、または雷電流により避雷導線接続部が溶解した際のアーク放電による内圧上昇が事故発生原因と考えられる。

避雷導線が破断せず、正常に機能していたとすればここまでの破壊は起こらなかったと推定する。

2) ブレードメーカー: LM Wind Power 社(旧 LM-Glassfiber 社)による事故原因分析結果

ブレード構造部材について、製造時の瑕疵及びメンテナンス・補修の不備が破壊をもたらしたと証拠付ける要素は認められなかった。

落雷の際、避雷システムがピーク電流に耐えられずブレード内部でアーク放電が発生。この落雷による損傷及び非常停止による負荷が、ブレードの構造一体性に影響した。

5. 事故原因のまとめ

事故原因については以下の3つの事項と推定する。

1) ライトニングケーブルの断線

事故時には、ライトニングケーブル(ハブ側)が断線し、避雷導線としての機能を果たせない状態になっていた。正規品ではない、可撓性が小さいケーブルを素線が破断し易い環境で使用していたことも断線の一因となった。

このため雷電流はシリンダー取り付け部等に流入し、アーク放電が増大する原因となった。

また過去の定期点検でライトニングケーブル一部素線破断の兆候を見逃した可能性がある。

2) 雷電流による避雷導線の溶断

IEC 規格を超える 700C 以上、比エネルギー量で 9.1MJ/Ω 以上と推定される落雷を受けたことにより、避雷導線が雷電流に耐えられず溶断し、断線箇所であーク放電が発生した。

3) アーク放電による内部圧力の上昇

ブレード内部の複数箇所にアーク放電が発生し、ブレード内部温度の上昇に伴い短時間に急激に内圧が上昇し、ブレードが損傷し飛散に至ったものと推定する。また、事故当時風車が運転中だったことが、周辺に飛散する一因になった。

6. 再発防止対策

1) 避雷システム及びブレード点検マニュアルの整備: ライトニングケーブルの点検強化、避雷システム安全性を確認。

2) 避雷システムの改修: ライトニングケーブルの2重化改修を行う。

3) ブレード飛散防止対策及び安全性確認作業の実施: 落雷情報に基づき事前に運転停止し、安全点検後、運転を再開する運用とする。

4) 直撃雷センサーの設置及び被雷後の安全性確認作業の実施: 直撃雷センサーを設置し、落雷を検知した場合は自動で停止する機能を追加する。落雷を検知した風車は安全点検実施後、運転を再開する。

5) 注意喚起: 落雷の危険性を周知する注意喚起看板を設置する。

1) ~5) に対する対策完了日を表-4 に示す。

表-4 原因に対しての対策及び対策完了日のまとめ

| No | 原因 | 対策 | 冬季雷エリア及び日本海エリアの同型風車 | 左記以外エリアの同型風車 |
|----|------------------------|--|---------------------|--------------|
| 1 | ライトニングケーブル断線 | 1) 避雷システム及びブレード点検マニュアルの整備 | 5月末 | 5月末 |
| | | 2) 避雷システムの改修(ライトニングケーブル2重化) | 7月末 | 10月末 |
| 2 | 雷電流による避雷導線溶断 | 1) 避雷システム及びブレード点検マニュアルの整備 | 5月末 | 5月末 |
| | | 2) 避雷システムの改修(ライトニングケーブル2重化) | 7月末 | 10月末 |
| 3 | アーク放電による内部圧力上昇(ブレード飛散) | 1) 避雷システム及びブレード点検マニュアルの整備 | 5月末 | 5月末 |
| | | 2) 避雷システムの改修(ライトニングケーブル2重化) | 7月末 | 10月末 |
| | | 3) ブレード飛散防止対策及び安全性確認作業の実施(落雷情報による風車停止) | 実施中 | 9月末 |
| | | 4) 直撃雷センサーの設置及び被雷後の安全性確認作業の実施 | 9月末 | 9月末 |
| | | 5) 注意喚起について(注意喚起看板の設置) | 7月末 | 7月末 |

7. まとめ

今回の事故に関する原因としては、①ライトニングケーブルの断線②雷電流による避雷導線の溶断③アーク放電による内部圧力の上昇が明らかになった。

事故原因を鑑みて避雷システムの改修・点検強化や健全性の確保、落雷情報に基づく運転停止の運用等の再発防止対策を策定し、今後はこれらの対策を確実に実施して安全運転に努めて行く。