

2015 年 7 月 30 日
稚内市水道部

稚内市水道部風力発電施設 1号機ブレード脱落事故 事故調査報告（概要）

1. 稚内市水道部風力発電施設と事故の概要

(1) サイトの概要

- ・設置場所：北海道稚内市声間 6899
- ・定格出力：1,980kW（660kW×3基）
- ・運転開始：2001年4月

(2) 風力発電設備の概要

- ・風車：Vestas Wind Systems A/S社製 V47-660kW
- ・定格出力：660kW
- ・回転数：28.5rpm
- ・ローター：直径47m、取付位置33m（ハブ高）

(3) 事故の概要

- ・日時：2014年11月3日 10:56頃
- ・状況：1号機のブレード3枚のうち1枚が運転中に脱落・飛散



図 1-1 発電所位置図

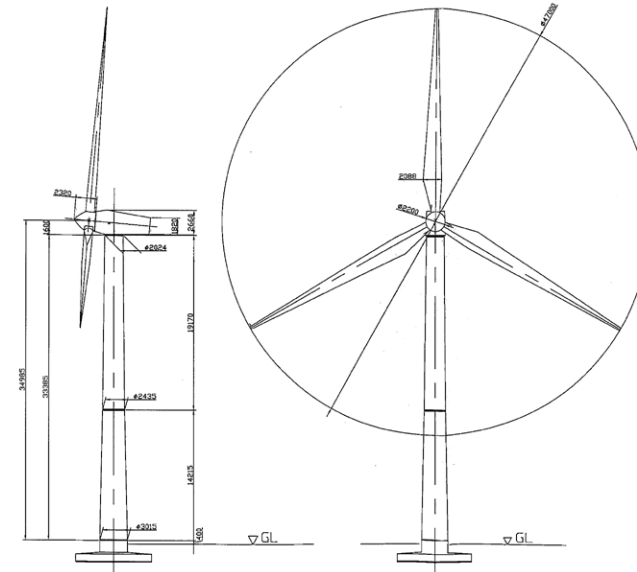


図 1-2 風車外形図



図 1-3 ブレード落下状況

2. 事故状況

(1) 気象状況・風況

- ・気象庁（声間観測所）データによると宗谷北部では急速に発達する低気圧の影響により、南西の強い風が吹き、発生直前の10:50には最大瞬間風速22.1m/sを記録
- ・ナセル風速計による事故発生時の平均風速は15.4m/s（1分平均）
- ・事故発生時に警報は発令されていない。また、落雷は発生していない。

(2) 風車の状況

（事故発生前の運転状況）

ほぼ定格出力で運転中。事故直前の運転データは以下の通り。

【発電出力】659.5kW 【風況】風速15.4m/s、風向SW（風向はデータないため推定）

【ローター回転速度】30.2rpm 【発電機回転速度】1579rpm

【アラームログ】

- ・事故発生までの数日間において、モジュール不具合により強風時に出現しやすい軽微なエラー（ワーニング）とピッチ制御関係のエラーが断続的に発生
- ・11:00に発生した警報156“Chock sensor triggered”（振動検出エラー）により風車が停止

【メンテナンス実施状況】

- ・2014年10月23～27日に年次点検を実施しており、ブレードおよびハブについても締結ボルトの固定状態の確認等の点検がなされているが、いずれの項目も「異常なし」という結果となっていた。
- ・点検リストには事故発生部位であるアルミニウムリングのクラック検査という項目はない。

(3) ブレード落下および被害の状況

- ・風車運転中にブレードが脱落し、飛散したブレードは市道を越え北の方角約55m先に落下。ブレードは、ハブ側ピッチベアリングとブレードを接続するアルミニウムリングの接着部から剥離・脱落した。
- ・アルミニウムリング、ブレードベアリングはハブ側に残った状態であった。

- ・アルミニウムリングに長さ144cmの亀裂を確認。亀裂の開口部は約10mm（風車メーカーによる現地調査での測定値。事故調査委員会による実測値は亀裂長さ138cm、開口部8mm）。
- ・ブレード飛散により稚内メガソーラー発電所の自営送電線（33kV）を断線する被害が発生した。
- ・発電所近傍に敷設されている北海道電力(株)の高压電線の被覆および芯線の損傷が確認された（北海道電力(株)による12月1日の柱上点検にて発見）。
- ・人的被害は発生していない。



図 2-1 ハブ側に残ったアルミニウムリングと亀裂

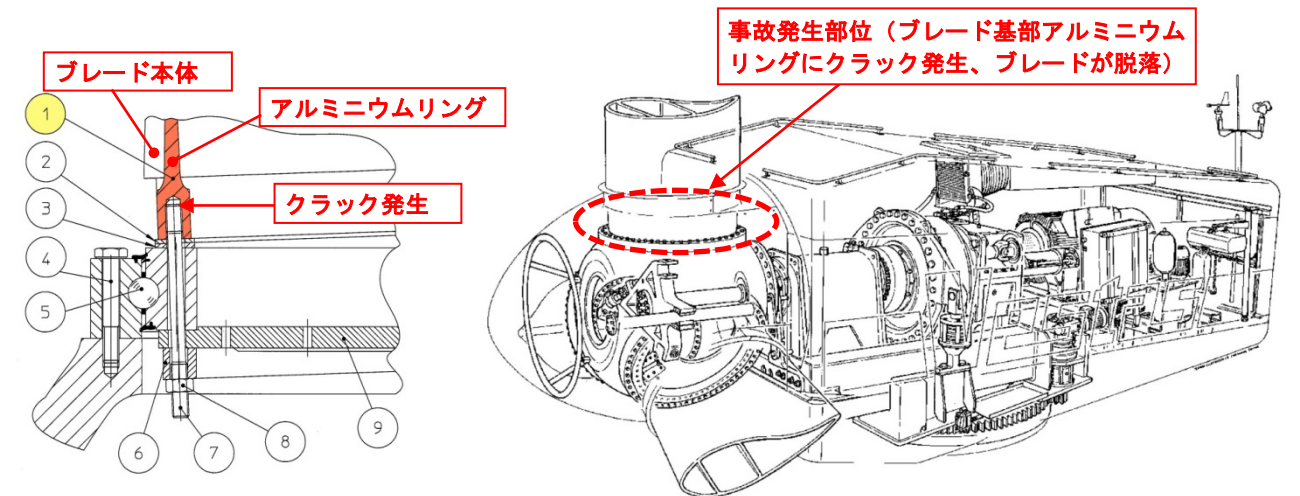


図 2-2 事故部位周辺の断面図

図 2-3 V47 風車のナセル～ロータ部分の構造と事故発生部位

3. 事故原因の究明

(1) 事故部位（破損状況）の確認

- 1) アルミニウムリング取付ボルトの軸力・トルクチェック
全ボルト（59 本）中、緩みが確認されたのは No.53 ボルト 1 本のみであり、クラック発生・拡大との因果関係は認められない。
- 2) アルミニウムリングの形状測定

アルミニウムリングは、クラック発生～ブレード脱落に至る段階で変形が生じ、ゆがんだ形となっていた。このため、その形状（面間距離）を測定した。測定箇所および想定結果を図 3-1 に示す。最短面の F-F'（ゆがみがほとんどない方向と考えられる）に対して最長面の C-C' は 14mm 程度外側（C 側）に開いた形状となっていた。

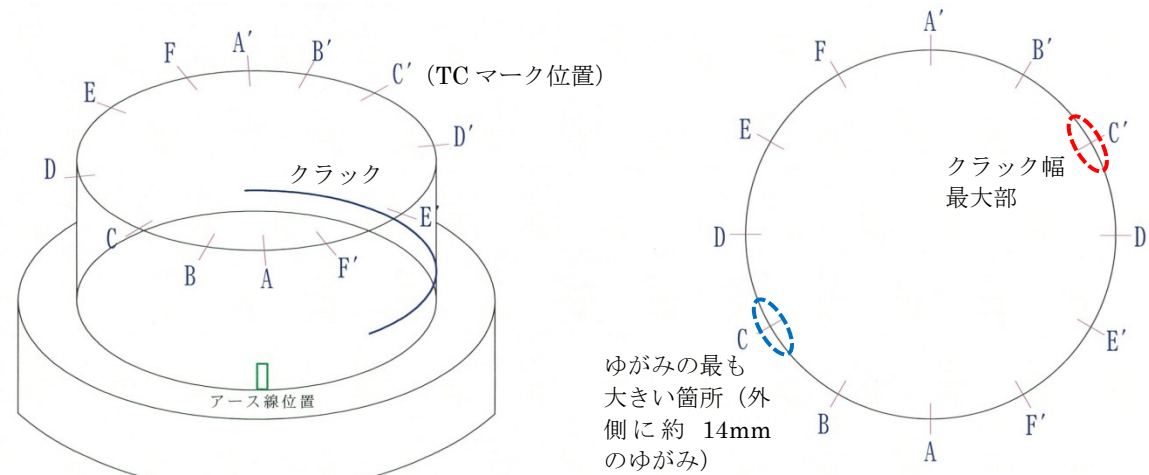


図 3-1 アルミニウムリングの測定箇所および測定結果

3) アルミニウムリングのクラック破断面の状況

- ・アルミニウムリングのクラックは、図 3-1 の F 付近から A'、…、E'、F' の範囲に相当するリングのほぼ半周、クラック長 138cm にわたっており、開口部が最も広いのは C' 付近（ボルト No.39～40 前後）で開口幅は約 8mm であった。
- ・クラックが最初に発生したと考えられる C' 付近では、クラックはボルト孔の底部から周囲に広がっており、隣接するボルト孔底部につながる形で進展しているように見受けられる。
- ・クラックの周辺部になるとボルト孔底部からは外れた形でクラックが伸びている。また、ボルト孔底部を結ぶ形で伸びているクラックは、ところどころに段差が見られる（図 3-2 右図）。



(1) アルミニウムリングの外観とクラックの状況 (2) クラック／ボルト孔底部拡大図（ところどころに大きな段差）

図 3-2 アルミニウムリングの測定箇所および測定結果

(2) Vestas 社による事故調査報告書の評価・検証

1) Vestas 社による事故調査報告書の概要

Vestas 社は事故発生後の 11 月 8 日に現地調査を実施し、「Final Incident Report - Wakkanai City Water Department Wind Farm, Japan / Blade Damage, V47-660kW」（2015 年 1 月 12 日）として報告書を稚内市水道部に対して提出している。以下にその要点を示す。

【Vestas 社による事故原因推定結果】

同報告書による事故発生のメカニズムは以下の通り。

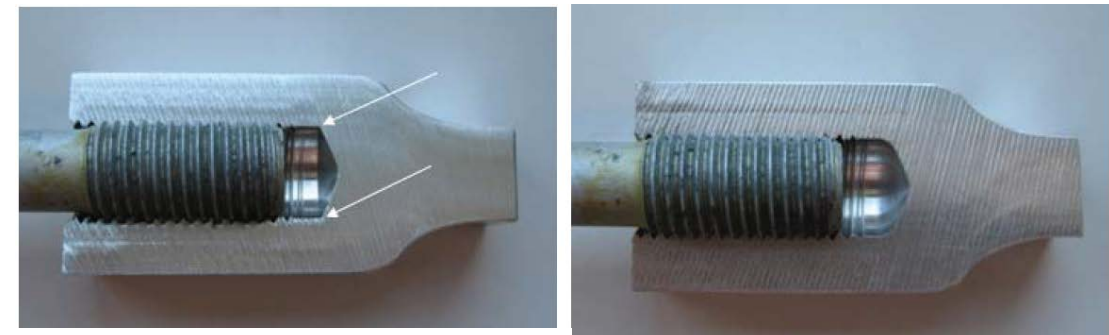
- ①アルミニウムリングのクラック拡大によって横断面（クラック部分）に係る荷重が喪失することにより、接着されたリング部に非線形のひずみが生じた。
- ②クラック長が長くなるにつれ、接着剤の結合部に係る荷重が上昇し、最終的にアルミニウムリングから接着剤が剥離することとなった。
- ③これにより、ブレードが脱落した。

【同報告書によるその他の主な記述】

- ・クラックは恐らく最初、一つのボルト孔で発生し、隣接するボルト孔底部を伝って、インサートの円周方向に次々に疲労破壊が発生したと思われる。
- ・落雷に関連した事象による損傷は確認できない。
- ・接着結合部に異常は見られず、接着に関する不具合を示す証拠はない。
- ・事故発生前にいくつかのピッチ関連の警報が確認されているが、これらはアルミニウムリングで発見されたクラック発生には何ら影響を及ぼさないため、当該事故の根本要因とはならない。
- ・クラック発生・拡大の可能性と原因については、Vestas 社は「Technical Customer Communication」（TCC）で 2010 年に事業者に対して通知するとともに、超音波探傷検査（UT）を推奨していた。

2) TCC によるクラック発生・拡大の根本原因

- ・TCC は V47 複数基において発生した上記クラックについて、原因分析と対策の検証結果を示したものであり、V47 風車の所有者に検査の実施を促し、不具合発生が予見された場合の対策を提示している。
- ・アルミニウムリングのクラックは、リングのボルト孔底の角部の曲率が小さすぎるフィレットとなっている場合に生じる（図 3-3）。
- ・このような鋭い角状のエッジは、風車の運転による荷重をボルト孔の局所的な範囲に集中させ、長時間の運転によりアルミニウムリングの疲労クラックを発生・進展させるものであり、ひどい場合にはブレードの脱落に至ることがある。



(1) 鋭い角（フィレット）を持つボルト孔（矢印はクラックの発生する開始点を示す） (2) 丸い角を持つボルト孔

図 3-3 アルミニウムリングのボルト孔形状（左：事故発生の可能性があるもの、右：対策品）

3) 事故調査委員会による Vestas 社事故調査結果の検証結果

①クラックの発生場所、拡大状況の確認

- ・クラックが最初に発生した場所を、長さ約 140cm のクラック中央部付近と想定（ボルト番号で No.39～No.40 付近）し、そこを中心としてクラックの状況を観察した。
- ・No.40 および No.41 のクラックはボルト孔底部を横断している。
- ・No.38 および No.39 はボルト孔部分に段差が生じており、ボルト孔の底部よりも上側がクラック面となっているところも確認できた。
- ・ボルト孔 No.42, 43 も No.40 および No.41 とほぼ同様のクラック面であったが、No.44 は No.38 および No.39 と類似の状況で、ボルト孔部に段差が生じてやや粗い破断面となっていた（図 3-2 参照）。
- ・これらの傾向は、Vestas 社による TCC に示された解析結果（図 3-4）と概ね一致している。

⇒・クラックは No.40～No.43 付近で最初に発生し、両側に進展していったものと考えられる。

- ・Vestas 社の報告書では 1 つのクラックが徐々に拡大していったとの記述があるが、複数のボルト孔で成長していたクラックが、最終的に不安定に連結・拡大したものである（その結果、場所によっては段差状にクラック同士がつながった）。

②ボルト孔底部の形状確認

- ・事故機のアルミニウムリングのボルト孔部分を切り出し、形状を確認した（図 3-5）。
- ・ボルト孔底部はほとんど丸みがない“Sharp edge”状になっていることが確認できた。

③接着剤の剥離状況の確認

- ・アルミニウムリングとブレード本体（FRP）は、アルミニウムリング側の接着面と接着剤がほぼ完全に剥離した形となっており、アルミニウムリング側には接着剤の残部やブレードの FRP はほとんど残っていない状況であった。
- ・接着面を観察すると、接着面からきれいに剥離する「界面破壊」となっていることから、接着の品質（接着剤の性能を十分に発揮できていたか）については疑問が残るが、Vestas 社から表面処理等を含む詳細な設計資料および製造時の検査データ等が出てこないと検証は困難である。
- ・当該風車は 10 年以上運転していること、他の風車で接着不良による脱落の報告がないことなどから、設計上想定していた接着強度は確保できていたと考えてよい。

(3) 超音波探傷検査によるクラック発生状況の確認（2, 3 号機含む）

Vestas 社では、同型式の風車のアルミニウムリングにクラックが発生するリスクについて、2010 年に TCC にて風車の所有者に通知し、超音波探傷検査（UT）による点検の実施を推奨している。当該点検ブ

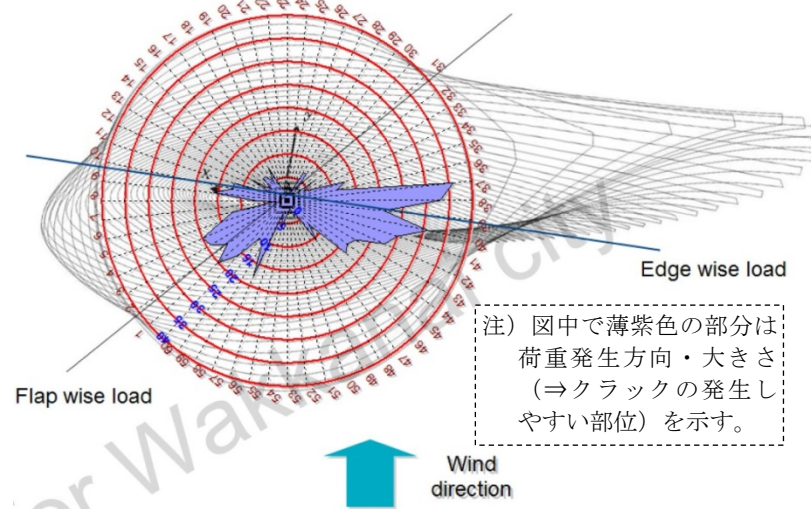


図 3-4 ボルト番号とブレードに対する風、荷重方向の関係

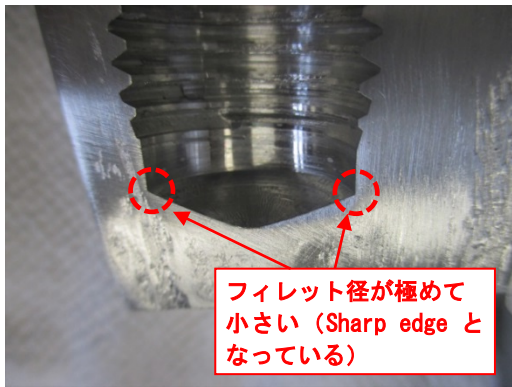


図 3-5 ボルト孔底部の形状確認結果

ログラムは、2011 年 9 月に稚内市風力発電施設の 2 号機および 3 号機には実施されていたが、事故機である 1 号機については故障停止中であったため実施されていなかった。これらの経緯を表 3-1 に示す。

表 3-1 本件に関する経緯、稚内市水道部の対応状況

年月日	内容	備考
2010 年 6 月 29 日	Vestas 社より稚内市水道部／メンテナンス会社宛てに「Technical Customer Communication (TCC)」提出	稚内市水道部／メンテナンス会社側に記録が残っていない。
2010 年 8 月 18 日	Vestas 社よりメンテナンス会社宛に「V47-660kW：ブレードルートインサート超音波検査、アップグレードについて」の文書通知	同上
2011 年 9 月 29 日	Vestas 社により 2 号機・3 号機を対象にブレードリング調査の実施（無償）、1 号機はギアボックストラブルによる故障停止中で調査せず ¹⁾ 。	Vestas 社による自主的な検査。
2012 年 3 月 13 日	Vestas 社からメンテナンス会社を経由し「V47 ブレードリング調査報告書」の報告を受ける。〔調査結果を表 3-3 に示した〕	
2012 年 3 月 23 日	稚内市水道部より Vestas 社に対して今後のあり方の提案を要請(※)	その後、Vestas 社からの回答なし。(Vestas 社に要請記録なし。)
2014 年 11 月 3 日	1 号機にて事故発生	
2015 年 1 月 12 日	Vestas 社より事故調査報告書（Final Incident Report）の提出	

注) 1. 1 号機は調査実施の時には発電機とギアボックスが外された状態となっており、ブレードリング調査には風車が運転できる状態である必要があるため、調査を実施できなかった。Vestas 社はその後、2,3 号機を含めた調査を有償にて提案した。

※ この時点での稚内市水道部の認識、対応は以下の通り。

- 1) Vestas 社のコメントが、直ちに運転停止を要求するものではなかったことから、ブレード脱落に至る危険性を認識していなかった。
- 2) Vestas 社が推奨する修理方法はブレードを取り外す必要があるものであり、簡単にできるものではなかった。Vestas 社に実施可能な方法を検討依頼するも、返答がなかった。
- 3) 1)、2)の理由から、これまで保安規程に定められる巡視を行いながら運転してきたが、アルミニウムリング部の点検は通常の点検項目に含まれておらず、ブレード脱落に至った。

2011 年 9 月および事故発生後の 2015 年 1 月に実施したアルミニウムリングの UT 検査を実施した結果を表 3-3（次頁）に示す。本検査による判定基準は表 3-2 の通りである。

表 3-2 超音波探傷結果の評価基準と推奨する対応（Vestas 社による）

分類	損傷の状態	対応(再調査の推奨期間)
Category 1	特記すべき損傷なし	24 ヶ月以内に再調査
Category 2	ねじ山(スレッド)の周囲にわずかなクラック	24 ヶ月以内に再調査
Category 3	微細なクラック:10mm 以下のクラック	12 ヶ月以内に再調査
Category 4	クラック割れ:10～49mm のクラック	12 ヶ月以内に再調査
Category 5	大きな亀裂:50～99mm のクラック	6 ヶ月以内に再調査
Category 6	重大な損傷:100mm 以上	ブレード交換および風車停止を推奨

表 3-3 超音波探傷検査結果

号機	検査実施日	2011年9月29日			2015年1月22-23日		
1号機	ブレード番号	20513	19994	19996	20513	19994	19996
	クラック総延長(mm)				13	0	50
	損傷分類				Category 4	Category 1	Category 5
2号機	ブレード番号	19884	19880	19878	19884	19880	19878
	クラック総延長(mm)	0	57	31	119	50	43
	損傷分類	Category 1	Category 5	Category 4	Category 6	Category 5	Category 4
3号機	ブレード番号	20518	20529	20528	20518	20529	20528
	クラック総延長(mm)	17	14	49	48	20	120
	損傷分類	Category 4	Category 4	Category 4	Category 4	Category 4	Category 6

注) 1. 2011年の検査は2,3号機のみ実施した(1号機は故障停止中で検査が実施できなかった)。
2. 1号機事故ブレード(#19996)は外部クラックがない箇所のみを検査した。

(4) 風況条件の確認

当該サイトにおける実際の風況（年平均風速、乱流強度）と風車の設計条件を比較した。

評価結果の概要は以下の通り。

- ・年平均風速：風車の設計条件は IEC-Class I 相当の 10m/s に対して、現地ハブ高の年平均風速は 6.2m/s で問題なし。
- ・乱流強度：風車の設計条件は「Max17%」（IEC 規格の乱流 Category 表記はなし；概ね IEC の A 乱流に相当）と比較すると、風速 13m/s 程度以上の風速域において 90 パーセントイル値はわずかながらこの値を超過（図 3-6）。

⇒乱流強度がやや高いものの、年平均風速を考慮した風車への疲労荷重という点では、IEC クラス I 相当で設計された風車に対して実際の年平均風速が 6m/s 程度と低く、大きな問題とならないと評価

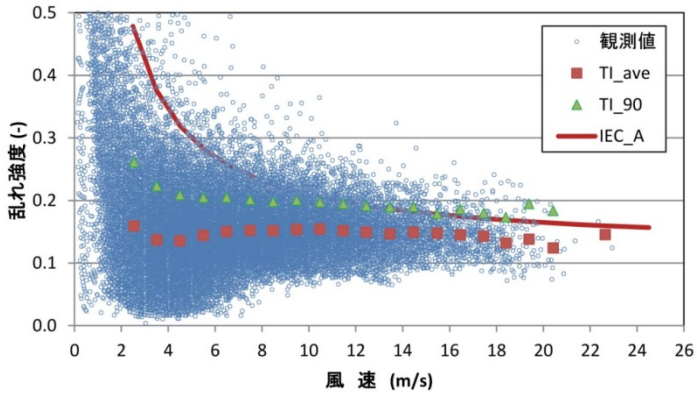


図 3-6 当該地点における乱流強度

4. 事故原因のまとめ

本事故によるブレード脱落の直接的な原因は、Vestas 社の報告書にある通り、アルミニウムリングのボルト孔底部を起点として、疲労破壊によるクラックが発生し、長期間の運転によりクラックが拡大したことである。その結果、2014 年 11 月 3 日に横断部（クラック部分）に係る荷重が喪失することにより、接着されたリング部に非線形のひずみが生じ、接着された結合部への荷重が限界点に達し、接着剤がアルミニウムリングから剥離する要因となった。これにより、ブレードが脱落した。

アルミニウムリングのボルト孔底部にクラックが発生した理由は、アルミニウムリング製造時のボルト孔底部（角部）のフィレット径が過小であったためであり、これにより同箇所にアルミニウム部材の疲労強度を超える局所的な応力が発生したことによる。風車メーカーによる当該部位の図面を見ると、フィレット径については記述がなく、TCC には設計段階ではこのような不具合が発生することを想定していなかったとの記述がある。フィレット径の指示がなければ、アルミニウムリングのボルト孔の形状は通常鋭角のままであり、したがって「製造不良」であるとは言えない。すなわち、事故発生のも

また、副次的な要因として、風車メーカー（Vestas 社）からの情報が正確にメンテナンス会社や事業者

に伝わり、適切な対応（超音波探傷検査の実施等）とメンテナンス（保守・点検・修理）がなされてい

れば、このような事故の発生を防ぐことができていた可能性もある。なお、事故発生前の 10 月 23～27 日に

定期点検（年次点検）が行われていたが、当該部位は点検項目に含まれておらず、アルミニウムリングの

クラックを発見することができなかったため、事故発生の可能性を予見することができなかった。

5. 再発防止策

【復旧対策】

- ・1 号機脱落ブレード：アルミニウムリングのボルト孔形状をフィレット径が大きい対策品とした中古ブレードへの交換の実施
- ・1 号機の残りのブレードならびに 2, 3 号機の各ブレード：超音波探傷検査（UT）によるクラック発生状況の詳細確認および補修※の実施

【再稼働後の再発防止策】

- ・定期的な超音波探傷検査の実施（初回検査実施の半年後を目途に再検査を行い、その後 1 年毎（年次点検時）に実施する予定であるが、検査結果の状況に応じて検査間隔を見直すことも考慮）
- ・クラックの発生を検出した場合、その程度に応じたアルミニウムリングの補修の実施、または点検頻度

の見直し。

なお、メーカーからの情報が正確にメンテナンス会社や事業者

に伝わっていなかったことも副次的な事故の要因であったため、メーカーとの積極的な情報交換等に努め、意思疎通を図っていく。

※ 補修方法：クラック部に TIG 溶接による肉盛補修を行い、ボルト孔形状の再加工を行うものである。

WPT-Nord GmbH 社（本社：ドイツ）によって提案された手法であり、同社ではヨーロッパを中心に 30 基程度の Vestas V47 のアルミニウムリングの修理実績がある。なお、同社は本修繕方法に関して認証機関による認証を受けている。

6. まとめ

今回のブレード脱落事故に関する原因究明では、事故部位の破損状況の詳細確認、Vestas 社による事故調査報告書の評価・検証、超音波探傷試験によるクラック発生状況の確認（保安停止中の他号機含む）、風況解析等を行った結果、ブレード基部アルミニウムリングのボルト孔底部のフィレット径が過小であり、そこを起点として疲労破壊によるクラックが発生し、長期間の運転によりクラックが拡大したことが直接的な原因であるとの結論を得た。なお、ボルト孔底部のフィレット径が過小であったことは、設計段階での配慮がなされていなかったことによる（すなわち「設計上の問題」があった）。一方で Vestas 社からの情報が正確にメンテナンス会社や事業者

に伝わり、適切な対応（超音波探傷検査の実施等）とメンテナンス（保守・点検・修理）がなされてい

れば、このような事故の発生を防ぐことができていた可能性も否定

できない。

今回の事故原因を鑑み、事故機の復旧にあたってはブレードをアルミニウムリングのボルト孔フィレット径の大きい対策品に交換するとともに、アルミニウムリングのクラックを早期に発見するための定期的な超音波探傷検査を再発防止策として策定し、確実に実施することとした。

今後、事故機および他号機の運転再開にあたっては、再発防止策を確実に実行するとともに、Vestas 社との積極的な情報交換等を行い、風力発電所の長期に亘る安全運転に努めていかなければならない。