

平成 28 年 1 月 26 日  
株式会社日立製作所  
中部電力株式会社

中部電力株式会社 御前崎風力発電所 3 号機ブレード取付ボルト破断について  
(見直し部分の説明)

「第 7 回新エネルギー発電設備事故対応・構造強度ワーキンググループ(平成 28 年 1 月 25 日開催)」  
の質疑を踏まえ、「FTA」の見直しを行った。

(見直し前)

【現象】	【要因区分】	【要因】	【調査内容】	【調査結果】	【判定】	
ブレード取付 ボルト破断	環境要因	応力腐食割れ	応力腐食割れにより脆化, 破断	材料分析, ボルト腐食状況確認	分析結果, 疲労破断の形跡, 応力腐食割れなし	×
		腐食疲労	腐食環境下で疲労強度低下し破断	ボルト腐食状況確認	・腐食はあるが減肉による断面減少なし ・ボルトコーティング損傷部有 (腐食有) ・残置ボルトに微小き裂あり	○
	運転要因	設計想定荷重を超過し運転	異常な過荷重現象が発生し破壊	過荷重現象の発生調査	過荷重発生記録なし	×
	設計要因	ボルト設計強度不足	設計想定荷重に対し強度不足で破断	ボルト強度区分の妥当性確認	必要な強度は満足	×
		設計締付力不適	ボルト締付力過大により破断	構造設計書, 締付線図確認	軸力設定の妥当性確認	×
	製造要因	ボルト強度不足	設計強度に対し実際のボルト強度不足で破断	製品検査記録, 成分分析等の確認	破断ボルト成分分析, 製品検査記録は満足	×
	施工要因	締結部の陥没や外力によるボルト軸力低下	陥没や繰返し外力によりボルトの軸力が低下し破壊	ボルト軸力調査, 静荷重調査, 軸力 0 kN (1 本のみ) 場合の引張応力算定 (FEM解析)	軸力 0 kN あり, 異常荷重記録なし, FEM 解析で 1 本のみ 0 kN の場合, 軸力測定結果に基づく場合, 単独での破断はしない	△ ↓ ×
				ボルトの施工状態を模擬し FEM 解析を行い締付面が接触し曲げ応力の影響を加味した疲労評価	FEM 解析を実施した結果, 接触 (ズレ面最大 4 mm) による応力集中ではボルト破断しない	×
		締結施工不良	ボルト・ピッチベアリング結合時, ブレードとピッチベアリング孔位置がズレ, ボルトとピッチベアリング孔内壁が接触したことにより応力集中またはフレットイングが発生し破断	ブレード孔とピッチベアリング孔とのズレ観察	孔位置にズレがあり, ズレ面摩擦なし建設時のズレと推定 (ブレード孔と旋回軸受孔位置がズレた状態で締結)	△ ↓ ○
				接触による破断面の位置を方向が一致するか確認	破断面と接触部の位置と方向は一致しており旋回軸受側に錆が少ない部分を確認 (残置ボルトも一致)	△ ↓ ○
				図面から幾何学的に金属接触が発生するかの確認	図面から幾何学的に金属接触することを確認。FEM 解析で軸力低下による接触部のクリアランス変化も確認	○
				類似事象の確認 (3 G-2 軸-No. 37, 39 を抜き取り調査)	No. 37, 39 を抜き取り非破壊検査を実施したがき裂はなし。腐食あり	△ ↓ ×
	保守要因	ボルト軸力低下 (リラクゼーション)	軸力低下により内力係数増加, または接触状況変化で破断	初期点検での増し締め記録確認, 軸力測定実績の確認	初期点検で増し締め未実施, ボルト軸力低下を確認	○

図10 FTA

(見直し後; 施工要因以下の部分を抜粋)

施工要因	締結部の陥没や外力によるボルト軸力低下	陥没や繰返し外力によりボルトの軸力が低下し破壊	ボルト軸力調査, 静荷重調査, 軸力 0 kN (1 本のみ) 場合の引張応力算定 (FEM解析)	軸力 0 kN あり, 異常荷重記録なし, FEM 解析で 1 本のみ 0 kN の場合, 軸力測定結果に基づく場合, 単独での破断はしない	△ ↓ ×
			ボルトの施工状態を模擬し FEM 解析を行い締付面が接触し曲げ応力の影響を加味した疲労評価	FEM 解析を実施した結果, 接触 (ズレ面最大 4 mm) による応力集中ではボルト破断しない	×
	締結施工不良	ボルト・ピッチベアリング結合時, ブレードとピッチベアリング孔位置がズレ, ボルトとピッチベアリング孔内壁が接触したことにより応力集中またはフレットイングが発生し破断	ブレード孔とピッチベアリング孔とのズレ観察	孔位置にズレがあり, ズレ面摩擦なし建設時のズレと推定 (ブレード孔と旋回軸受孔位置がズレた状態で締結)	△ ↓ ○
			接触による破断面の位置を方向が一致するか確認	破断面と接触部の位置と方向は一致しており旋回軸受側に錆が少ない部分を確認 (残置ボルトも一致)	△ ↓ ○
			図面から幾何学的に金属接触が発生するかの確認	図面から幾何学的に金属接触することを確認。FEM 解析で軸力低下による接触部のクリアランス変化も確認	○
			類似事象の確認 (3 G-2 軸-No. 37, 39 を抜き取り調査)	No. 37, 39 を抜き取り非破壊検査を実施したがき裂はなし。腐食あり	△ ↓ ×
ボルト軸力低下 (リラクゼーション)	軸力低下により内力係数増加, または接触状況変化で破断	初期点検での増し締め記録確認, 軸力測定実績の確認	初期点検で増し締め未実施, ボルト軸力低下を確認	○	

図10 FTA

以上

1 はじめに

御前崎風力発電所3号機において、平成26年5月21日の定期点検の際、2軸ブレードを回転軸受に取り付けているボルト M30×54本のうちの1本 (No.38) の破断を発見した。

これを受け、本事象に関する調査状況と推定原因について、「新エネルギー発電設備事故対応・構造強度ワーキンググループ委員による意見交換会 (平成26年8月26日)」に中間報告 (添付資料1) を行った。

今回、中間報告以降の調査および不具合要因と対策について報告する。

2 調査結果報告 (残る課題の調査)

調査項目	調査内容	結果
①破断ボルトの観察 (ブレード側)	・外観観察 (外観観察, 外径測定, 外観マクロ観察) ・破面観察 (破面マクロ観察, 破面 SEM 観察) ・浸透探傷試験 (PT), 腐食状況観察 ・断面観察 (断面マクロ観察, 断面マイクロ組織観察)	・破面は典型的な疲労破壊様相 ・き裂起点近傍の側面に微小クラックを確認
②現地測定 (ブレード接続部)	・ブレード取付ボルト孔真円度測定 (制限値 2.39mm) ・ブレード取付状態の測定	・真円度 1.49mm 良 ・孔部のズレ 5mm、クロスボルト中心のズレ 2.5mm
③ブレード取付ボルトのクリアランス評価 (FEM解析)	・ブレード取付作業時、ブレード孔と回転軸受孔との位置がずれ、ブレード取付ボルト胴部と回転軸受が接触した状態でボルトを締め付けた場合のボルトのクリアランスを評価	・ボルトの軸力変化に伴い、ボルトと回転軸受孔のクリアランスが変化し、接触状態になることを確認した。
④ブレード取付ボルトの寿命評価 (FEM解析)	・ブレード取付ボルトの軸力が低下した状態で、ボルトに印加される応力の変化 (御前崎の運転状況) を考慮し、ボルトの寿命 (破断までの年数) を評価	・複合要因 (ボルト緩み+フレットing+腐食) により、6.6年程度でボルト破断に至ることを確認した。

①破断ボルトの観察 (ブレード側)

(ア) 破面観察

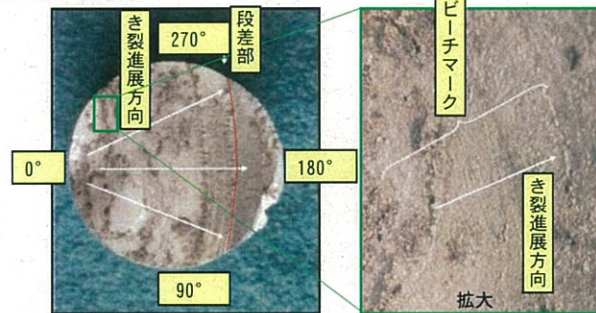


図1 破面観察

(イ) 腐食観察

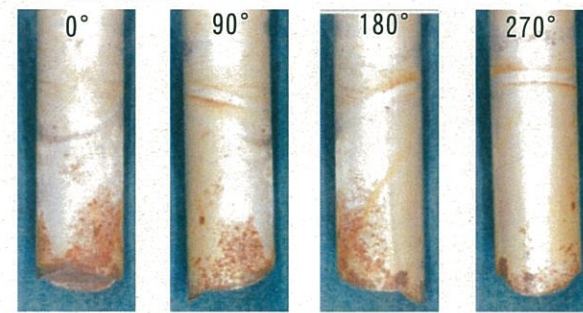


図2 腐食観察

【破面マクロ観察結果】  
・疲労破壊時にみられるビーチマークあり  
【破面 SEM 観察】  
・段差部より 0° 側には疲労破壊様相あり  
・段差部より 180° 側では、延性破壊時にみられるディンプル模様あり

【腐食状況観察結果】  
・破断部付近を酸洗いし、腐食状況を確認した結果、0° 側のボルト外面に錆がある程度  
・いずれの面も視覚で把握できるき裂なし

(ウ) 断面観察結果

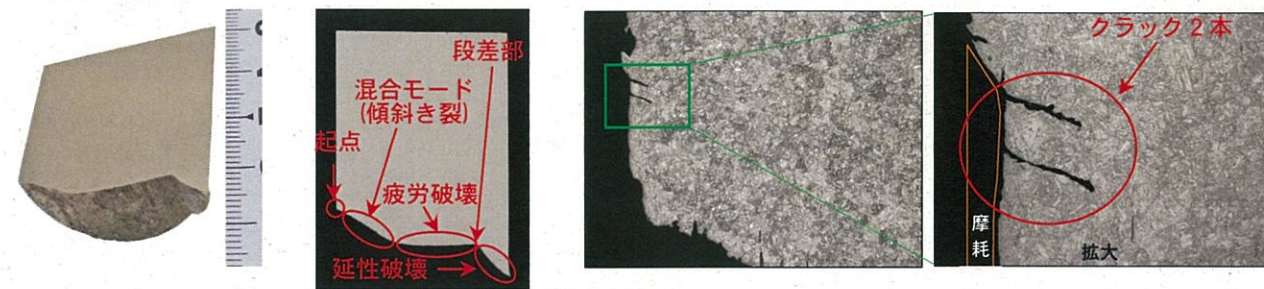


図3 断面観察

【断面マイクロ観察結果】  
・破断面のクラック起点近傍の側面に、2本のクラック (長さ50~60 μm) を確認  
文献等に示される、フレットing摩擦の初期クラックの長さ20 μm~1mmと一致

② 現地測定 (ブレード接続部)

(ア) ブレード取付ボルト孔真円度測定

ポータブル3次元測定器でブレードのボルト孔の真円度測定を実施したところ、理想円に対し楕円状態に潰れているが、真円度\*1は制限値2.39mm以下であり、設計を満足することが確認された (図4)。

\*1 真円度: 任意の断面において測定した最大半径と最小半径との差

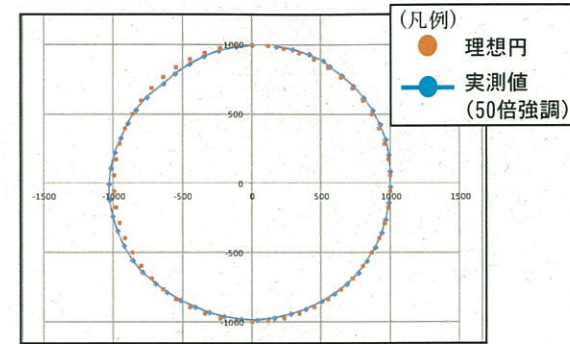


図4 真円度

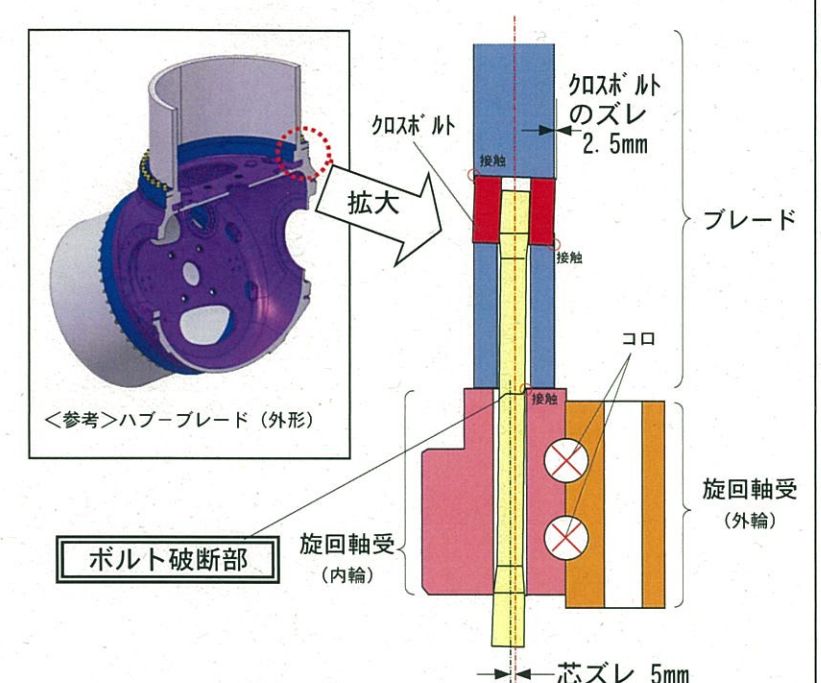


図5 ブレードと回転軸受のズレ (破断ボルト (No. 38) 位置)

(イ) ブレード取付状態の測定

破断したNo.38ボルトを取外した後に、ブレード取付ボルト孔と回転軸受孔の「ズレ」を測定した。結果を図5に示す。孔部のズレ (それぞれの孔芯のギャップ) は5mmであり、ボルトをブレードに固定するクロスボルトの中心のズレは2.5mmであった。

なお、ズレ面に摩擦痕がないことから、施工時に発生したズレであると考えられる。

③ブレード取付ボルトのクリアランス評価 (FEM解析)

図5のブレード取付状態のモデル化を行い、ボルトの軸力変化に伴うボルトと回転軸受の境界部のクリアランスを確認するため、FEM解析を実施した。

ボルトの設計軸力 (225kN) が確保されていれば、クリアランスは「0.103mm」であるが、ボルト軸力が0kN (ブレード取付作業時) では、ブレード取付ボルトと回転軸受の境界部が接触状態に至ることが確認された。

また、風圧等の荷重負荷による変位 (0.077mm: 相対変位) を考慮すると、ボルト軸力が規定値 (設計軸力: 225kN) の70%程度まで低下した場合に接触状態となることが判明した。

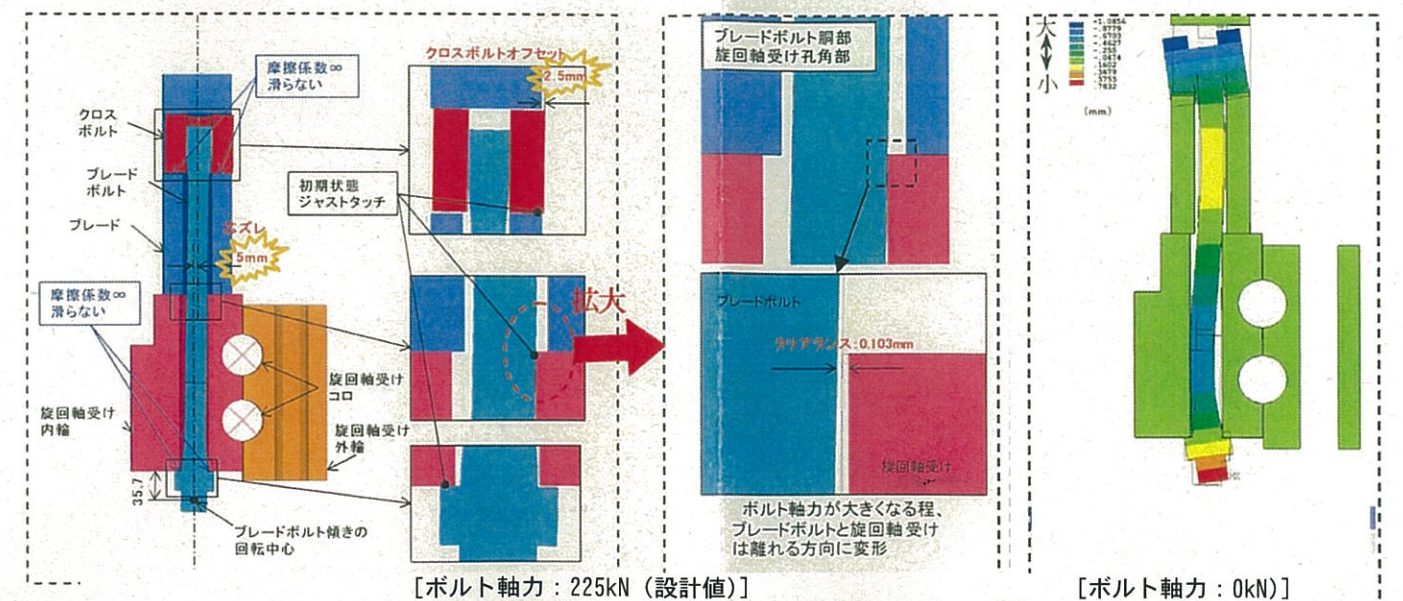


図6 破断ボルト (No. 38ボルト) のブレード孔と回転軸受孔の位置 (解析結果)

④ ブレード取付ボルトの寿命評価 (FEM解析)

(ア) FEM解析モデルとボルト軸力

ブレード取付ボルトの軸力低下に伴う影響を検証するためにFEM解析を実施した。解析モデルは、図7に示すとおり、フレットイングの発生箇所であるボルトと回転軸受との接点を「結合状態(固着状態)」として構築した。

なお、ボルト軸力は、0%・25%・50%・75%・100%の5パターンで影響を評価した。

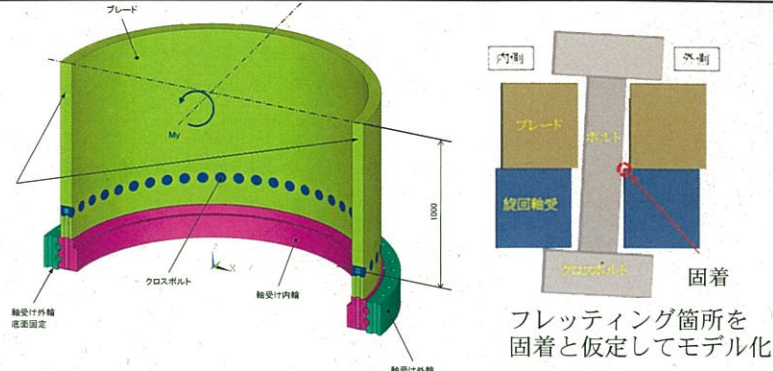


図7 FEM解析モデル

(イ) 御前崎風力発電所3号機のブレード取付ボルトに加わる応力と発生頻度

御前崎3号機の運転実績(風速, ヨー誤差, 風車状態: 1秒データ)から10分平均値を求め、設計で考慮しているLOADケース(通常発電, グリッドロス, 弱風待機, 強風待機等)ごとに分類し、それぞれの発生回数をカウントした。

この結果を元に、ブレード端部に作用する実働荷重を求め、運転想定期間(20年間)においてブレード取付ボルトに加わる応力範囲と発生頻度を推定した(図8)。

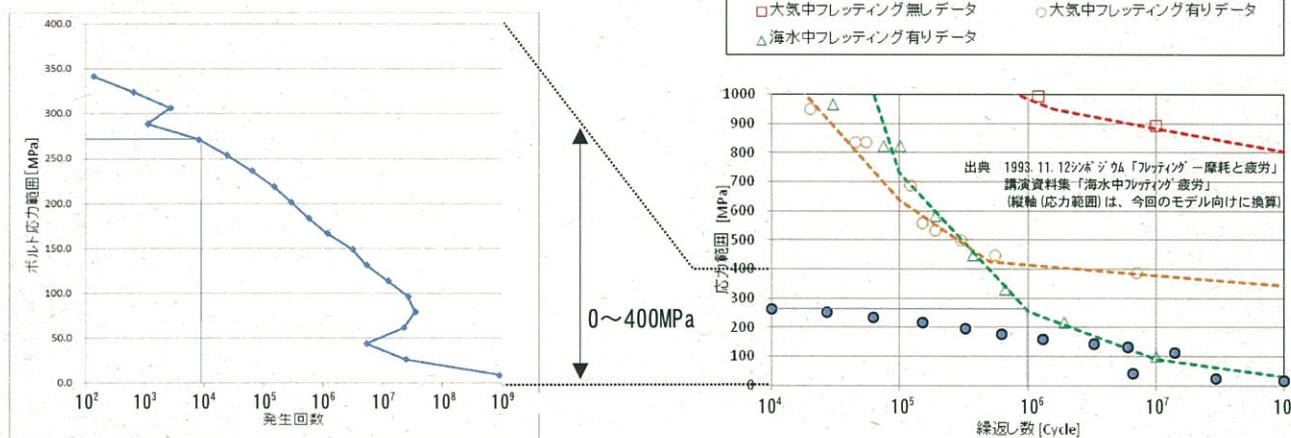


図8 運転実績に基づくボルト応力と発生回数(頻度)

図9 S-N曲線

(ウ) 複合環境下(ボルト緩み+フレットイング+腐食)での寿命(ボルト破断)評価

図7のモデルを使用し、ブレード取付ボルトに加わる応力(図8)における累積疲労損傷度を解析した。なお、ボルト軸力は、ボルトに加わる応力範囲(圧縮・引張応力の合計)が最も大きい25%に設定し、腐食やフレットイングの影響は、図9のS-N曲線を用いた。

この結果、**ブレード取付ボルトの寿命は6.6年となり、今回のボルト破断に至った4.5年に近いものとなった。**

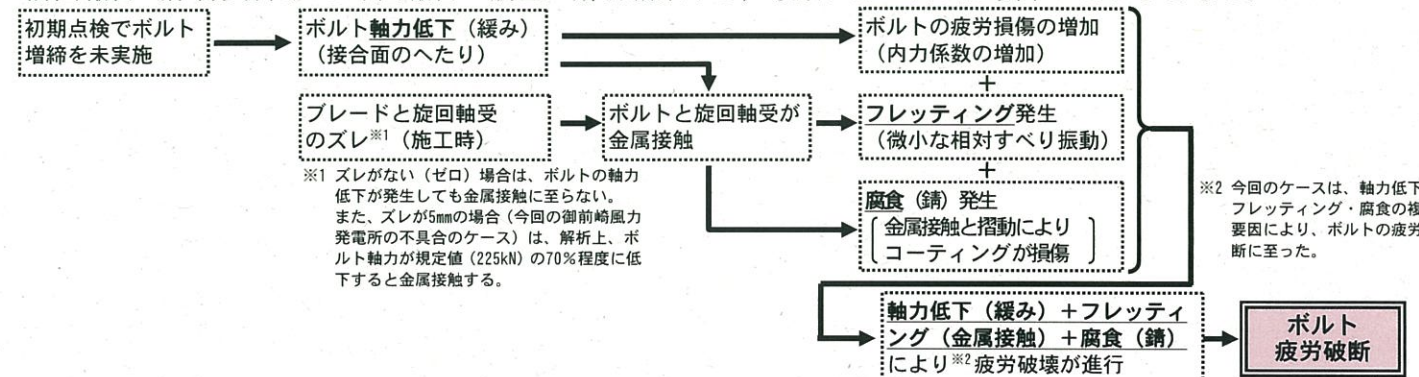
表1 解析結果

累積疲労損傷度※ (20年間累計)	3.0
寿命 (ボルト破断)	6.6年

※ 累積疲労損傷度が1.0を超えると疲労破断に至る

4 ブレード取付ボルト破断メカニズム

前回報告(添付資料1)と今回報告の調査・解析結果から、破断メカニズムは以下のとおりとなる。



3 要因分析と調査結果

環境要因(応力腐食・腐食疲労)、運転要因(想定荷重超過)・設計・製造要因(ボルト設計強度不足、軸力低下による破断)、施工要因(金属接触による応力集中)など、追加調査・解析した内容を反映して要因分析した。FTAを図10に示す。

【現象】	【要因区分】	【要因】	【調査内容】	【調査結果】	【判定】	
ブレード取付ボルト破断	環境要因	応力腐食割れ	材料分析, ボルト腐食状況確認	分析結果, 疲労破断の形跡, 応力腐食割れなし	×	
		腐食疲労	ボルト腐食状況確認	・腐食はあるが減肉による断面減少なし ・ボルトコーティング損傷部有(腐食有) ・残留ボルトに微小き裂あり	○	
	運転要因	設計想定荷重を超過し運転	異常な過荷重現象が発生し破断	過荷重現象の発生調査	過荷重発生記録なし	×
		ボルト設計強度不足	設計想定荷重に対し強度不足で破断	ボルト強度区分の妥当性確認	必要な強度は満足	×
	設計要因	設計締付力不適	ボルト締付力過大により破断	構造設計書, 締付線図確認	軸力設定の妥当性確認	×
		ボルト強度不足	設計強度に対し実際の材料強度不足で破断	製品検査記録, 成分分析等の確認	破断ボルト成分分析, 製品検査記録は満足	×
	施工要因	締結部の陥没や外力によるボルト軸力低下	陥没や繰返し外力によりボルトの軸力が低下し破断	ボルト軸力調査, 静荷重調査, 軸力0kN(1本のみ)の場合の引張応力算定(FEM解析)	軸力0kNあり, 異常荷重記録なし, FEM解析で1本のみ0kNの場合, 軸力測定結果に基づく場合, 単独での破断はしない	△ ↓ ×
		締結施工不良	ボルト・ピッチベアリング結合時, ブレードとピッチベアリング孔位置がズレ, ボルトとピッチベアリング孔内壁が接触したことにより応力集中またはフレットイングが発生し破断	ボルトの施工状態を模擬しFEM解析を行い締付面が接触し曲げ応力の影響を加味した疲労評価 ブレード孔とピッチベアリング孔とのズレ観察	FEM解析を実施した結果, 接触(ズレ最大4mm)による応力集中ではボルト破断しない 孔位置にズレがあり, ズレ面摩擦なし建設時のズレと推定(ブレード孔と回転軸受孔位置がズレた状態で締結)	△ ↓ ○
	ボルト軸力低下(リラクゼーション)	ボルト軸力低下	軸力低下により内力係数増加, または接触状況変化で破断	類似事象の確認(3G-2軸-No.37, 39を抜き取り調査)	No.37, 39を抜き取り非破壊検査を実施したがき裂はなし, 腐食あり	△ ↓ ×
		初期点検での増し締め記録確認, 軸力測定実績の確認	初期点検で増し締め未実施 ボルト軸力低下を確認			○

(凡例)  
 判定記号  
 ○: 原因  
 ×: 原因の可能性なし

朱記: 中間報告以降の追記・修正部分

図10 FTA

5. 不具合要因と対策

①ブレード取付ボルトと回転軸受内壁の接触防止

(ア) 全号機のブレード取付ボルト全数について、ファイバースコープにてクリアランスを確認。

(イ) クリアランスが確保できていないものは、調整器具を用いてブレード取付状態を修正。

(ウ) 回転軸受内壁に接触していたボルト(クリアランス=ゼロ)は全数交換。

- ウ-1 ブレードを降ろしてボルトを交換する場合(3号機2軸ブレード)
  - ・ブレード取付ボルトに「接触防止用カラー(図11)」を取付け、作業においてブレード取付ボルト孔と回転軸受孔の「ズレ」が発生することを防止
- ウ-2 ブレードを取付したままボルトを交換する場合
  - ・ブレード取付ボルトに「接触防止用テープ(図12)」を巻き付け、クリアランスを確保。

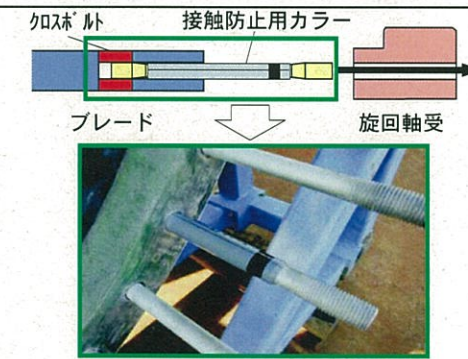


図11 接触防止用カラー

②ボルト軸力の低下防止

(ア) 全号機のブレード取付ボルト全数を増締(設計締付力: 225kNを確保)。

(イ) ボルト交換・ブレード再取付を行ったものは、初期点検(稼働後100時間経過を目途)でボルトを増締

(ウ) 定期点検において、ブレード取付ボルトの緩みの有無を確認。

なお、御前崎風力発電所は、①・②の全項目を実施済みである。

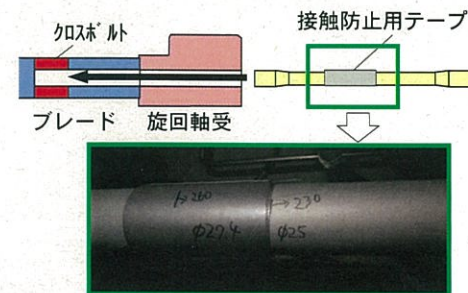


図12 接触防止用テープ

添付資料1 「中部電力(株)御前崎風力発電所3号機ブレード取付ボルト破断について(中間報告)」