

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 (最終報告)

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軸ブレードを旋回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, 断面ミクロ組織観察)	・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、ブレード孔と旋回軸受孔との位置がずれ、ブレード取付ボルト胴部と旋回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、ボルトと旋回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+フレッシング+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

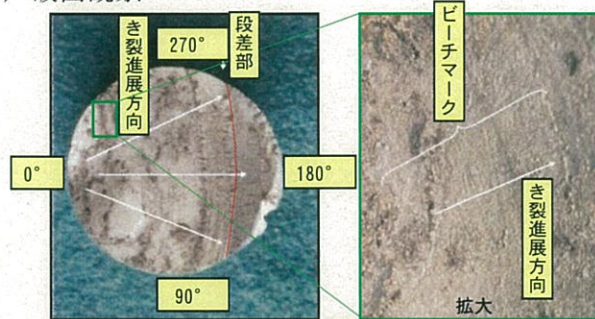


図1 破面観察

(イ) 腐食観察

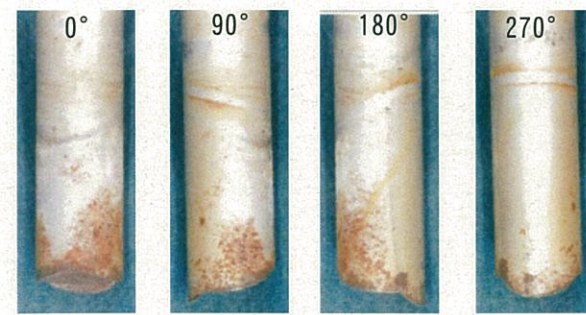


図2 腐食観察

【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

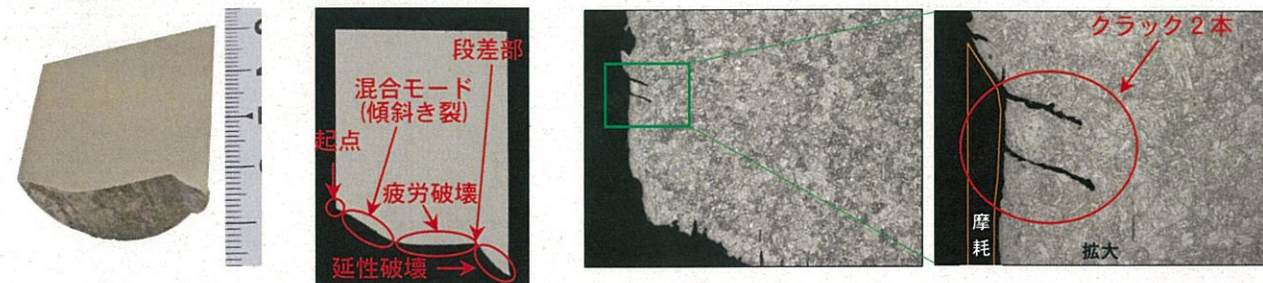


図3 断面観察

【断面ミクロ観察結果】  
・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50~60μm) を確認  
文献等に示される、フレッシング摩耗の初期クラックの長さ20μm~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

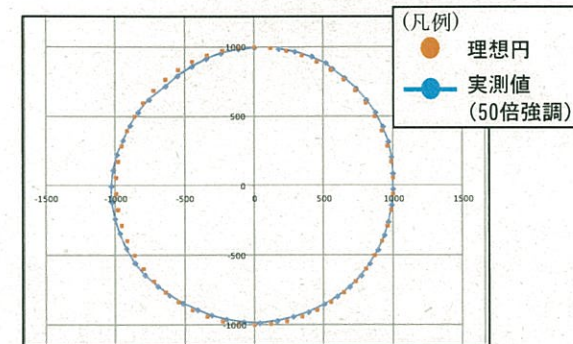


図4 真円度

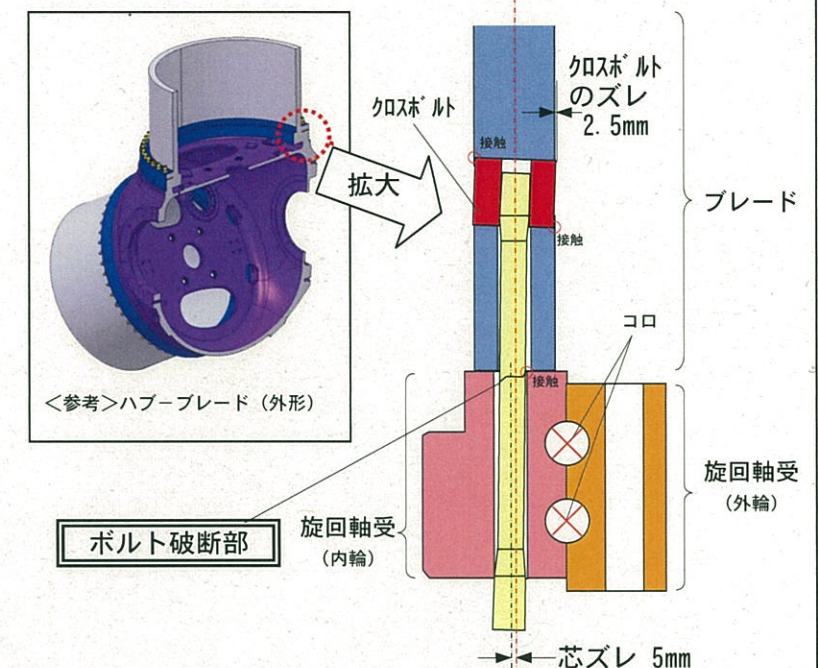


図5 ブレードと旋回軸受のズレ (破断ボルト (No. 38) 位置)

(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旋回軸受孔の「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、ズレ面に摩耗痕がないことから、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旋回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旋回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。

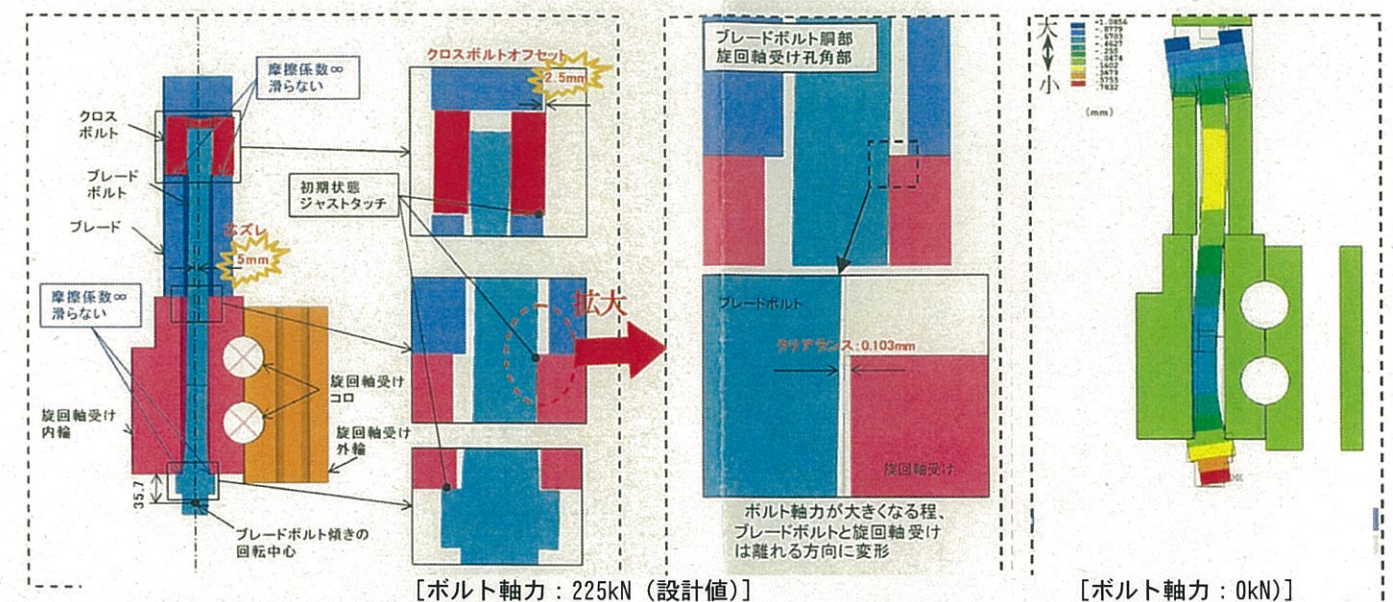


図6 破断ボルト (No. 38ボルト) のブレード孔と旋回軸受孔の位置 (解析結果)

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。

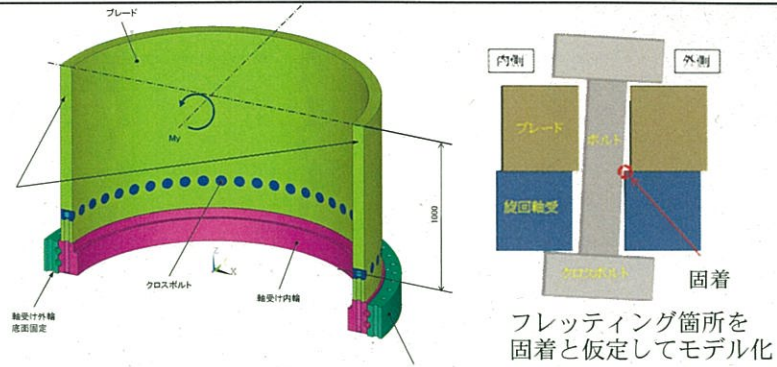


図7 FEM解析モデル

(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)。

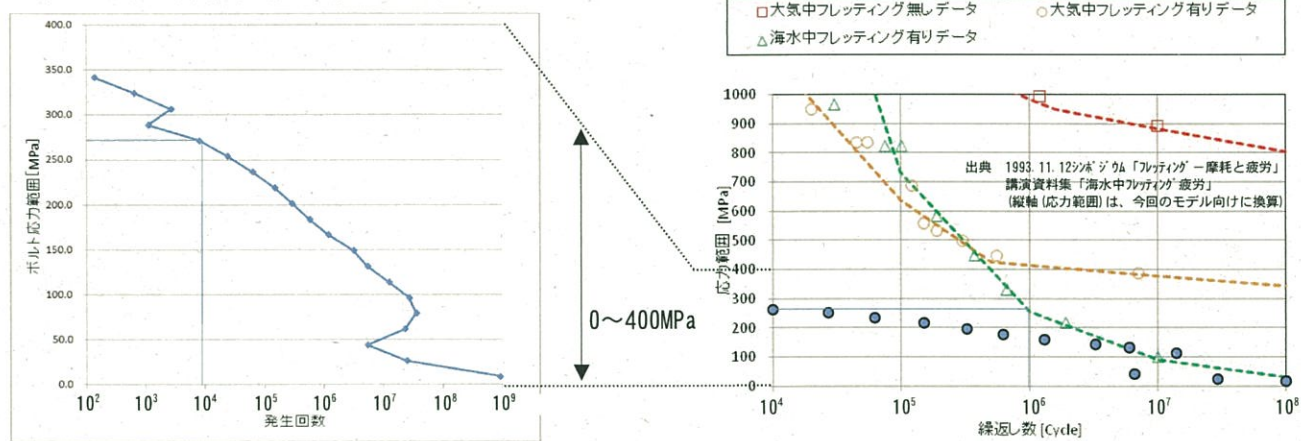


図8 運転実績に基づくボルト応力と発生回数 (頻度)

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。**

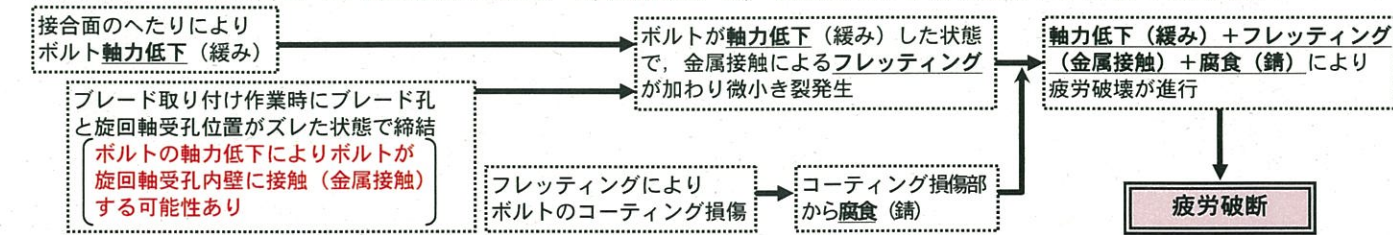
表1 解析結果

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。



(注) 中間報告以降の追記・修正は朱記

<参考>

解析には文献値を使用した。今回の事象に近い条件での疲労特性試験データ (S/N曲線) を反映するため、実環境を模擬したフレットイング疲労特性試験を実施している。

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断	過荷重現象の発生調査	過荷重発生記録なし	×
		設計強度不足	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	×
		設計強度不足	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
製造要因	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) 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 フレット孔とピッチベアリング孔とのズレ観察	×
施工要因	接触による破断面の位置と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回転軸受側に錆が少量確認 (残置ボルトも一致)	破断面と接触部の位置と方向は一致しており回転軸受側に錆が少量確認 (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	○	
保守要因	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	初期点検で増し締め未実施 ボルト軸力低下を確認	△ ↓ ×	
		類似事象の確認 (3G-2軸-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)	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	△ ↓ ×	

(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。

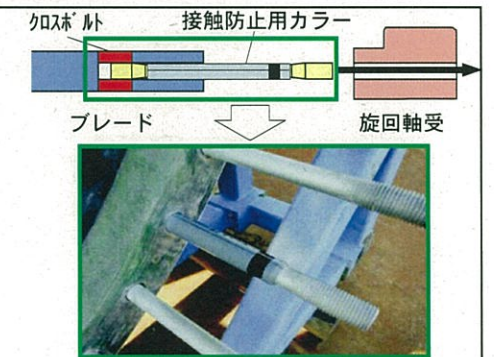


図11 接触防止用カラー

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。

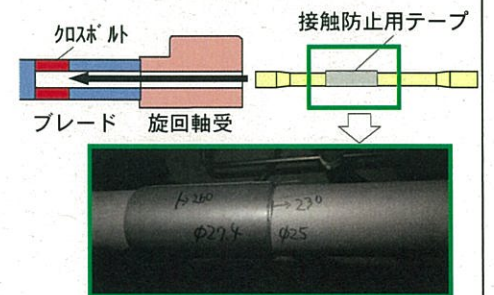


図12 接触防止用テープ

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)」

1. 本不具合の水平展開範囲と対策（本資料「5. 不具合要因と対策」の補足）

(1) 不具合要因の関係性検証

今回の不具合は初期点検（稼動後 100 時間経過を目処）点検時に増し締めを実施せず、リラクゼーションによりボルト軸力が低下したことにより金属接触が発生し、金属接触が発生したことで連鎖的にフレットングと腐食が発生したことが原因である。これらの要因が複合的に作用してブレード破断につながった。

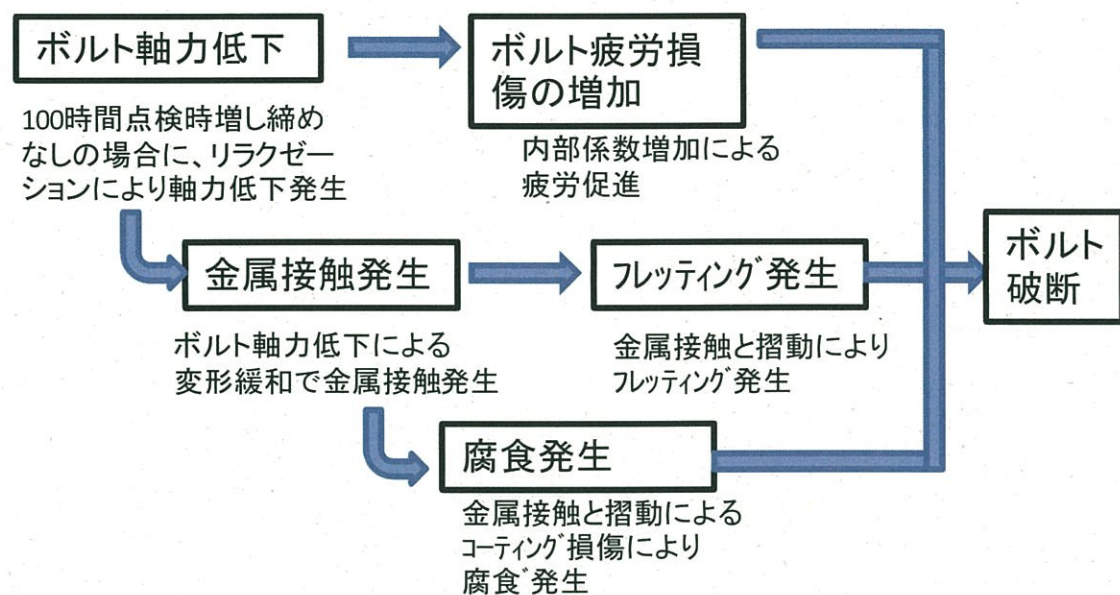


図1 不具合要因関係図

(2) 水平展開範囲の設定

初期点検（稼動後 100 時間経過を目処）での増し締めを実施しなかったことによるボルト軸力の低下が主原因であることから、水平展開の範囲を初期点検（稼動後 100 時間経過を目処）時のボルト全数の増し締めの有無で判断する。以下の表に点検整備要領書によるボルト全数の増し締め指示の有無を示す。某サイト B 以前は、点検整備要領書 D9S-474 が適用されており、ここにはボルト全数の増し締め指示はなく、御前崎 II 期以降は、改定された点検整備要領書（D9S-474C）が適用され、ボルト全数増し締めの規定が追加された。

故に、本不具合の水平展開範囲は、某サイト A、御前崎 I 期、某サイト B となる。

尚、御前崎 I 期については、5. 「不具合要因と対策」で示される対策済みであるため、これを除いた某サイト A、某サイト B が水平展開対象となる。

表1 増し締め規定

	サイト	点検整備要領書	ボルト全数増し締め指示	点検実績
2008/4	某サイトA	D9S-474	なし	ボルト抜き取り4本以上で軸力確認。緩みあれば増し締め
2010/3	御前崎 I 期	D9S-474	なし	
2010/7	某サイトB	D9S-474	なし	
2011/2	御前崎 II 期	D9S-474C	有り(追加)	ボルト全数増し締め
↓	以降	↓	↓	

(3) 対策と実施状況

①初期点検（稼動後 100 時間経過を目処）で増し締めが実施されていないサイトの対策

本対策の水平展開範囲は、某サイト A、某サイト B となる。

これらのサイトは、初期点検（稼動後 100 時間経過を目処）で増し締めが実施されていないことから、ボルトの軸力低下の可能性があり、それにともない発生するフレットングによる累積疲労損傷の蓄積がコーティング損耗に伴う腐食環境下で進展している可能性がある。このため、これらのサイトの対策としては、損傷の可能性のあるボルト全数を交換とする。

某サイト B については、2013 年 6 月に 2 号機において、ブレードボルト 1 本の破断が発生しており、その原因を SCC（応力腐食割れ）と判断した。対策としては、2 号機については、損傷の可能性のあるボルトの交換を行うとともに、経過観察として定期点検での実施期間を短縮し、これまで 3 年目点検で抜き取りで実施していたボルト軸力確認（増し締め）を 1 年目点検で全数実施と変更した。また 2 号機以外については、3 年目点検で抜き取りから全数実施に変更した。

しかし今回の原因究明の結果により、御前崎 I への対策と同じ対策を、某サイト A も実施していく。

②初期点検（稼動後 100 時間経過を目処）で増し締めが実施されているサイトの対策

一方、初期点検（稼動後 100 時間経過を目処）時にボルト全数の増し締めが実施されていた御前崎 II 期サイト以降では、このような損傷の可能性が考えられないため、通常の定期点検での点検方法（約 90 度ピッチで 4 箇所以上で軸力確認。規定軸力に達していない場合は、対象ボルトだけではなく、規定軸力に達していないボルトの範囲を特定して、それらすべてを増し締め）とする。

サイト	号機	対策		実施状況
某サイトA	全号機	・半年毎点検時、ボルト打音チェック ・3年目点検でのボルト全数増し締め	-	申し入れ済み
御前崎 I 期	1~3号機	ボルト全数の増し締め実施	損傷の可能性のあるボルト全数交換	実施済み
某サイトB	2号機 (ボルト破断発生)	半年毎点検時、ボルト打音チェック 1年目点検でのボルト全数増し締め	損傷の可能性のあるボルト交換	ボルト交換実施済み 点検申し入れ済み
	2号機以外	半年毎点検時、ボルト打音チェック 3年目点検でのボルト全数増し締め	-	申し入れ済み
御前崎 II 期	4~11号機	対策不要(通常の定期点検)	-	-
以降		同上	同上	-



サイト	号機	対策(見直し)		実施状況
某サイトA	全号機	ボルト全数の増し締め実施	損傷の可能性のあるボルト全数交換	今後実施
御前崎 I 期	1~3号機	ボルト全数の増し締め実施	損傷の可能性のあるボルト全数交換	実施済み
某サイトB	2号機 (ボルト破断発生)	ボルト全数の増し締め実施	損傷の可能性のあるボルト交換	ボルト交換実施済み 点検申し入れ済み
	2号機以外	ボルト全数の増し締め実施	損傷の可能性のあるボルト全数交換	今後実施
御前崎 II 期	4~11号機	対策不要(通常の定期点検)	-	-
以降		同上	同上	-