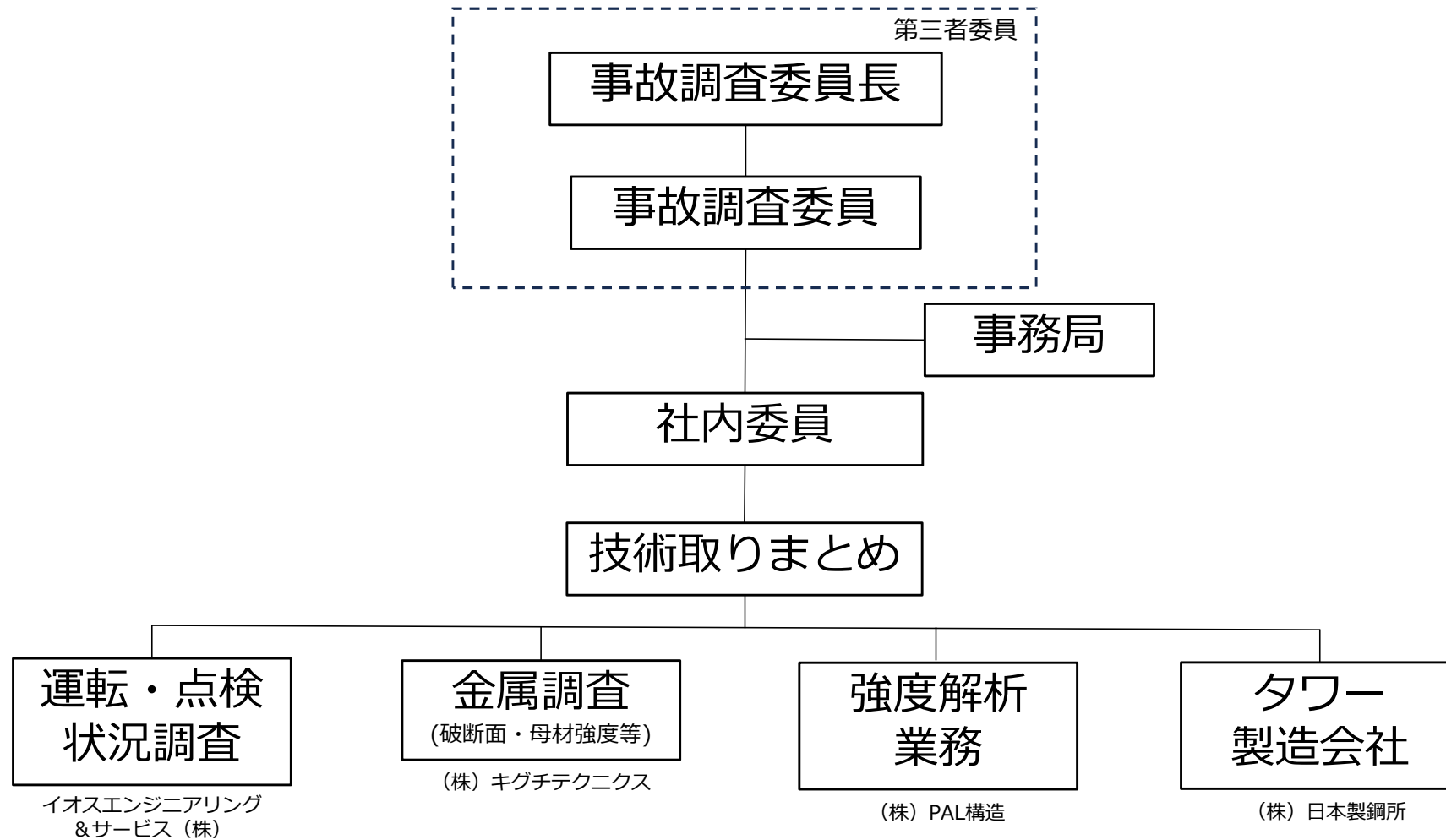


六ヶ所村風力発電所 1-3号機 タワー破損事故について

【設置者】 日本風力開発ジョイントファンド株式会社
【みなし設置者】 イオスエンジニアリング&サービス株式会社

2024年3月21日

事故調査委員会組織図



A. 結論

1. 当該事故の原因
2. 原因に対する再発防止策
3. 改善へのスケジュール・見通し

B. #19WG資料(一部語句更改版)

WG資料概要

- (1) 事故の状況
- (2) 事故の原因
- (3) 予防保全・再発防止策

1. 事業及び事故概要

- (1) 事業の概要
- (2) 事故の概要

2. 事故の状況

- (1) 事故発生時の風車の運転状況
- (2) タワーの損傷状況
- (3) 破断面・亀裂部の調査

3. 事故原因の究明

- (1) 亀裂進展メカニズム
 - a. 倒壊に至るまでの過程
 - b. Paris則による疲労亀裂進展時間の計算
- (2) 事故原因
 - a. フィッシュボーン図
 - b. 事故要因分析

- (3) 倒壊要因
 - a. 運用
 - b. メンテナンス
- (4) 疲労亀裂発生・進展要因

4. 予防保全・再発防止対策

- (1) 当該事故に対する予防保全・再発防止策
 - E-1. SCADAデータ利用による予防保全
 - F-1. 点検チェックシートの変更
 - F-2. タワー鏑のガイドライン(案)の作成
- (2) 類似事故を想定した予防保全策
 - a. なぜ対策実施工程
 - b. なぜ分析結果・対策
 - c. 心理的安全性

C. #19回WGの委員質問事項への回答

A) 技術事項

B) 品質事項

C) 組織・体制・体質事項

[会社略称]

- | | | |
|-----|---|---------------------|
| JF | : | 日本風力開発ジョイントファンド(株) |
| JWD | : | 日本風力開発(株) |
| EES | : | イオスエンジニアリング&サービス(株) |
| JSW | : | (株)日本製鋼所 |
| GE | : | ゼネラルエレクトリック社 |
| キグチ | : | (株)キグチテクニクス |

A.結論

- B. #19WG資料(一部語句更改版)
- C. #19回WGの委員質問事項への回答

1. 当該事故の原因

- 亀裂が発生しタワーが倒壊した事象の起因は、溶接部における許容値を超えた板の食い違い段差であり、倒壊は運用、メンテナンスの「見落とし」が原因であることが判明。
- 起因としている溶接部における許容値を超えた食い違い段差は、タワー製造メーカーでの製造品質基準を満たさない製品の流出であり、検査が不十分であったことから発生した。（特定のタワー製造メーカーの固有の不具合）

2. 原因に対する再発防止策

(1) 製造不具合に対する対応

- 事故調査によって、食い違い段差と寿命の関係を定量的に評価し、製品寿命を満たす基準値を算定できることがわかった。
- 同型風車については、同様な亀裂が発生する可能性があるため、食い違い段差と寿命の関係を定量評価し、亀裂発生の可能性を判断する。
- 方法は、JFが設置者となっているJSW製タワーが設置されている全WFにおいて、風況の厳しいWF・風車を対象に抽出し、溶接線形状測定を実施することで、製品寿命を定量的に評価し、稼働継続可能か判断する。

(2) 運用に対する対応

- タワー溶接部に亀裂があった場合は、風車を停止する。
- 亀裂の疑いのある発錆においても同様に、風車停止して確認・検査を行う運用を実施する。

(3) メンテナンスでの対応

- 発錆及び亀裂事象の見落としとしていたため、「点検チェックシートの変更」、「タワー錆ガイドライン」を策定しメンテナンス時に同様な事象が無いことを確認していく。
- メンテナンス時に見落としとしていたという事象の対策では、個人の意識と組織の風土の問題点が挙げられたため、個人の心理的安全性の意識付け及び組織や体制、社内風土の改善策をJWDグループ全体で行い、引続きインフロニアHDの監督の下で強化を図っていく。

(追加対策) 運用に対する対応

- 異常兆候の振動を見逃していたため、同型風車に対するSCADAデータを利用した振動エラー発生時の対応フローを定め、停止措置を含めた予防保全対策を実施する。

3. 改善へのスケジュール・見通し

(1)製造不具合に対する対応(リスクのあるWF・風車に対する定量的評価)

- リスクのあるWF・風車の抽出 : 2024年5月迄を目途に実施
- 同上のWF・風車における溶接線形状の測定および製品寿命判断 2024年7月迄を目途に実施

(2) 運用に対する対応

- タワー溶接部に亀裂があった場合は、風車を停止する。
亀裂の疑いのある発錆においても同様に、風車停止して確認・検査を行う運用を実施する。 : 実施中

(3) メンテナンスでの対応

- 「点検チェックシートの変更」「タワー錆ガイドライン」を策定 : 変更・策定完了し適用中
- 個人の心理的安全性の意識付け及び組織や体制、社内風土の改善策 : 実施中(定例化し継続実施)

(追加対応) 運用に対する対応

- 異常兆候の振動検知の予防保全対策 : 実施中

A. 結論

B. #19WG資料(一部語句更改版)

C. #19回WGの委員質問事項への回答

(1)事故の状況

2023年3月17日に六ヶ所村風力発電所1-3号機のタワーが破損(タワー途中で折損)しました。当該事故発生を受け、事故調査委員会を設置し、原因究明を実施してきました。

損傷した位置は、地上から約11m高さの溶接部であり、事故後の緊急点検の結果、同様の亀裂が同風力発電所の4-2号機でも発見されています(4-2号機は9月に撤去済)。



図 概要-1. 事故状況

(2)事故の原因

今回の事故は、初期疲労亀裂がタワーの内側の溶接余盛端部に発生し、その亀裂が板厚方向に進展・板貫通に至り、その後、周方向へ進展し、最終的に倒壊に至ったと判断し、原因は下記の通りと判断しました。

[亀裂発生の原因]

タワー外板の板厚変化部周方向溶接における食い違い段差(タワー製造時に発生)による応力の増加

[倒壊に至った要因]

- メンテナンスにおける亀裂の見落とし
- 倒壊前の異常振動多発現象の見落とし

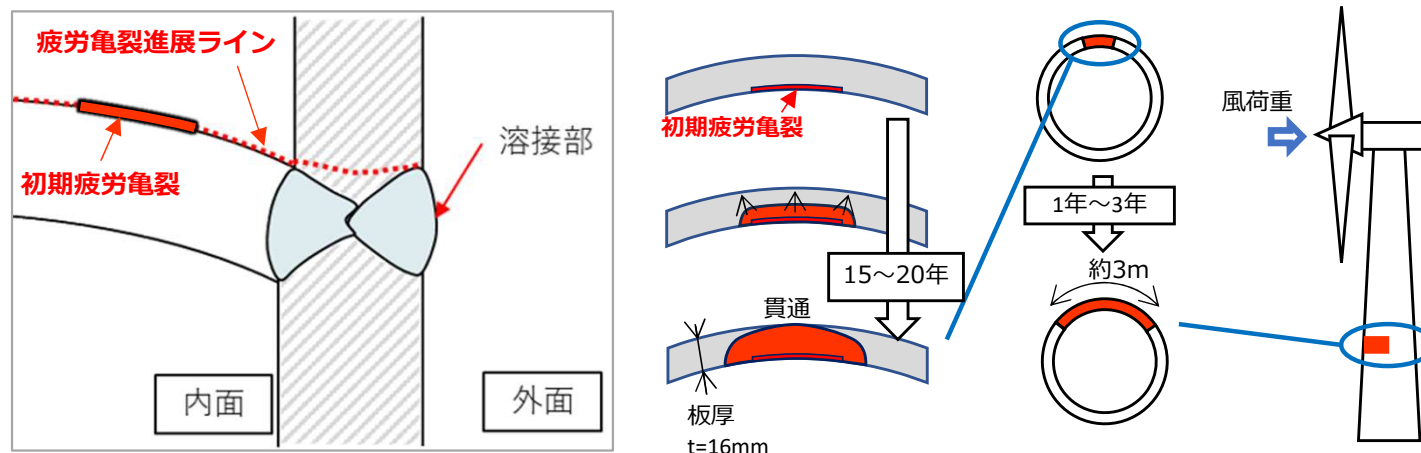


図 概要-2. 亀裂発生・進展・倒壊メカニズム

(3) 予防保全・再発防止策

① 緊急対応

国内同型機189基の溶接部の点検を実施し、倒壊した1-3号機、貫通亀裂が発見された4-2号機の2基以外には問題がないことを確認しました。

② 当該事故に対する予防保全・再発防止策

- ・ 「異常振動多発現象の見落とし」 対策

事故機において倒壊前2か月間の間に発生していた異常振動に対する対応フローを決め、適用開始しました。

- ・ 「錆・亀裂事象の見落とし」 の対策

定期点検方法(チェックリスト)の見直しにより、タワー内、外共に点検時に写真記録を残すこととし、特に亀裂起点となる内面については溶接線全線の管理を実施しています。

- ・ タワー錆のガイドライン(案)の作成

タワー外面の発錆に対しては、「(仮称)タワー錆のガイドライン」を取りまとめ、タワー錆管理に利用していきます。

③ 類似事故を想定した予防保全策

今回の事故だけではなく、知見のない事故等をも防ぐことができるような体制を構築するために、なぜなぜ分析から得られた結果から、対策を検討し、実行開始しております。 また、特に、「組織の中で自分の考えや気持ちを誰に対してでも安心して発言できる状態=心理的安全性」の構築による不具合情報の共有が大切と考え、その取り組みを開始しました。

(1)事業の概要

① 風力発電所の概要

発電所名： 六ヶ所村風力発電所

所在地： 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駸字二又地区

定格出力： 33,000kW（1,500kW×22基）

運転開始： 2003年12月

② 風力発電設備の概要

風車型式： ゼネラルエレクトリック社製 GE1.5s

定格出力： 1,500kW

ロータ回転数： 11～20rpm

ロータ直径： 直径70.5m（取付位置 地上64.7m）

タワー： （株）日本製鋼所製 鋼製3分割タワー（63.1m）

(1)事業の概要：六ヶ所村風力発電所（1-3号機位置図）

事故が発生した六ヶ所村風力発電所 1-3号機の位置は下記のとおりです(4-2号機は緊急点検の結果、亀裂が見つかった号機の位置を示す)。

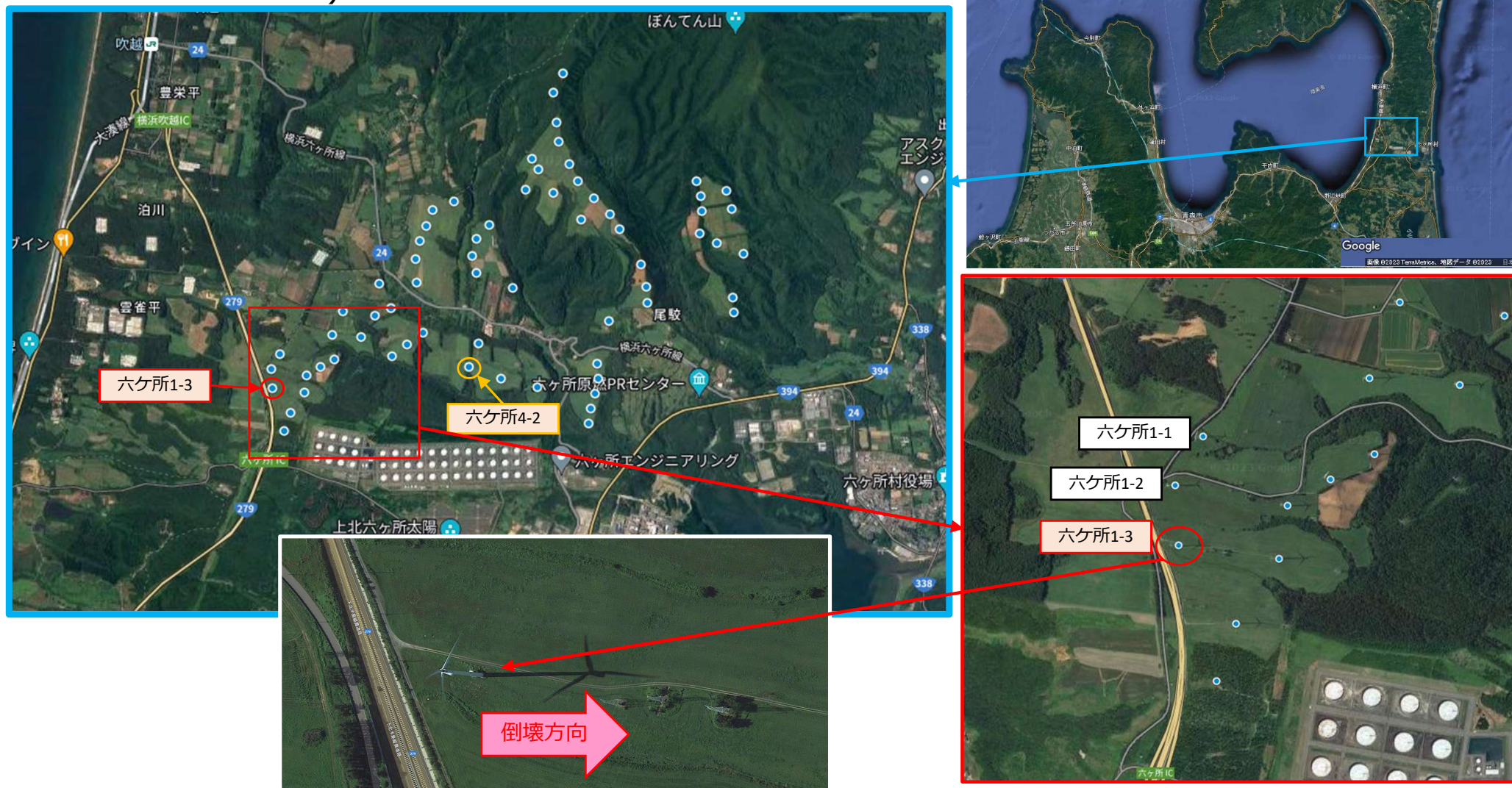


図1-1. 六ヶ所村風力発電所 1-3号機、4-2号機位置図

※引用:Google Map 地図データ2023

1. 事業及び事故概要

(1)事業の概要：風力発電設備概要

事故発生した六ヶ所村風力発電所 1-3号機の風車仕様は、下記のとおりです。同機は2003年12月に運転開始しています。

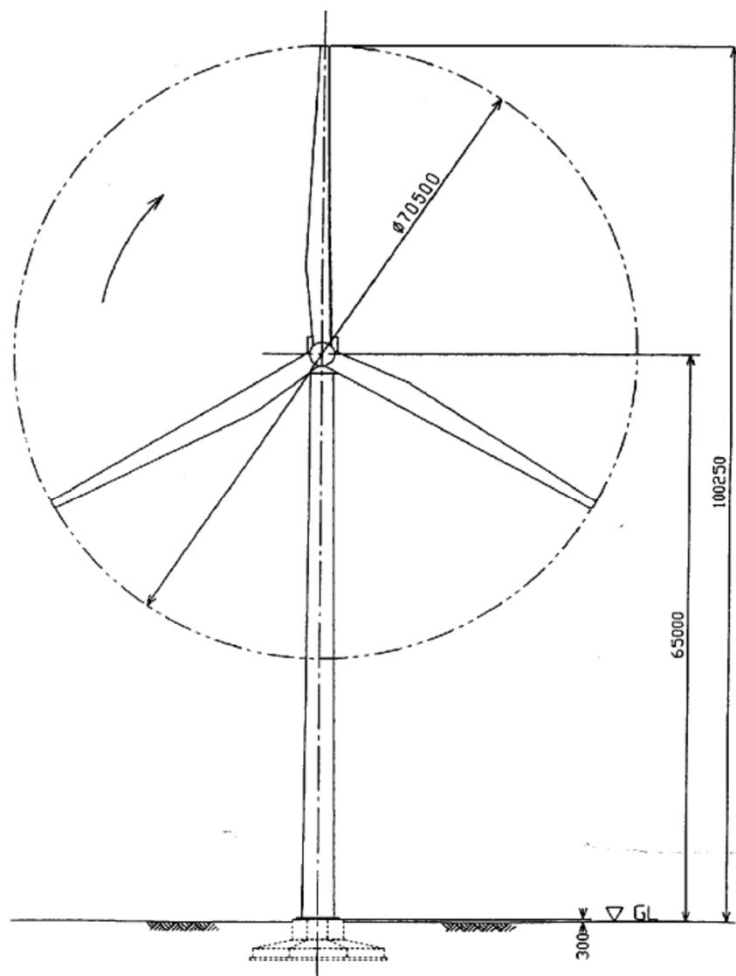


図1-2. 風力発電設備外形

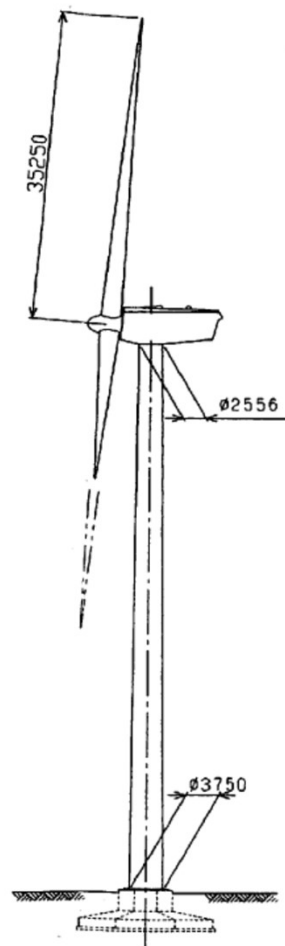


図1-3. 規格認証状況

表1-1. 風力発電設備仕様

風車機種	GE1.5s
製造者	ゼネラル・エレクトリック・カンパニー
種類	アップウィンド型 可変ピッチ風車 (3翼同期)
定格出力	1,500kW
定格ロータ回転数	11-20rpm
ロータ直径	70.5m
ロータ取付位置	64.7m
カットイン風速	3m/s
定格風速	12m/s
カットアウト風速	25m/s
ブレード材質	ガラス繊維強化プラスチック (GFRP)
ブレード長さ	34.0m
ブレード重量	5,625kg ± 200kg
認証クラス	GLクラス3 (IEC IIクラス相当)
極値風速	42.5m/s (10分平均)

GL Wind Statement No.: WT 00-005A-2001, Revision 2

This Statement of Compliance for the Design Assessment of the Wind Turbine

GE Wind Energy 1.5s

is issued to

GE Wind Energy GmbH
Holsterfeld 16 / 48499 Salzbergen / Germany

This statement attests the compliance with below mentioned normative references concerning the design. The Design Assessment is based on the calculations and fabrication drawings listed in the relevant Certification Reports referenced below and the characteristic data given in the attached Annex.

Certification Report numbers and titles:

70999-1, Rev. 1	dated 06.02.2003	Load Assumption IEC 61400-1 and NVN 11400-0 Class IIA, Hub Heights 64.7 m or 85 m
71000-1, Suppl. 1, Rev. 1	dated 06.02.2003	Load Assumptions IEC 61400-1 and NVN 11400-0 Class IIA, Hub Height 64.7 m
71541-1, Rev. 1	dated 19.07.2004	Load Assumptions IEC 61400-1 Class IIA, Hub Height 64.7m
71169-2, Rev. 2	dated 21.07.2004	Safety System and Manuals
71541-3	dated 23.08.2004	Rotor Blade GE 34a
71169-3, Rev. 1	dated 06.02.2003	Rotor Blade GE 34c
71351-3, Rev. 1	dated 06.02.2003	Rotor Blade LM 34.0P
71169-4, Rev. 5	dated 23.08.2004	Machinery Components
71169-6, Rev. 1	dated 06.02.2003	Electrical Equipment
71351-7, Rev. 2	dated 21.07.2004	Tubular Steel Tower, IEC TC IIA, Hub Height 64.7 m

(2)事故の概要

推定時刻：2023年3月17日、1時27分と推定(回収したデータ履歴より)

事故状況：1-3号機のタワーの破損(タワー途中で折損)、ナセル及びロータハブ(ブレード3枚を含む)が地上に落下していることを確認し、六ヶ所村風力発電所 全機保安停止させました。

表1-2. 事故時対応状況

日時	対応事項
2023/3/17, 1:27	六ヶ所村風力発電所 1-3号機 情報未着発生
2023/3/17, 8:12	1-3号機 タワー破損を確認
初動対応	
2023/3/17, 8:27	電気主任技術者(六ヶ所村風力発電所) へ事故速報連絡
9:40	六ヶ所村風力発電所 全機保安停止完了
9:41	六ヶ所村役場へ速報連絡
9:42	電気主任技術者(二又風力発電所) へ事故速報連絡
9:48	野辺地警察署へ速報連絡
10:30	公衆安全対策実施完了(2次災害対策) (バリケード設置・注意喚起掲示)
10:30～	現場状況確認実施
13:00	東北産業保安監督部へ電気事故速報を連絡



図1-4. 事故時の上空からの状況写真

(1) 事故発生時の風車の運転状況

事故発生時のSCADAデータ(10秒平均)を確認したところ、損傷発生時は定格出力近傍で運転中でした。雷・突風等の情報はなく、また、倒壊事故前にエラーの発生はありませんでした。

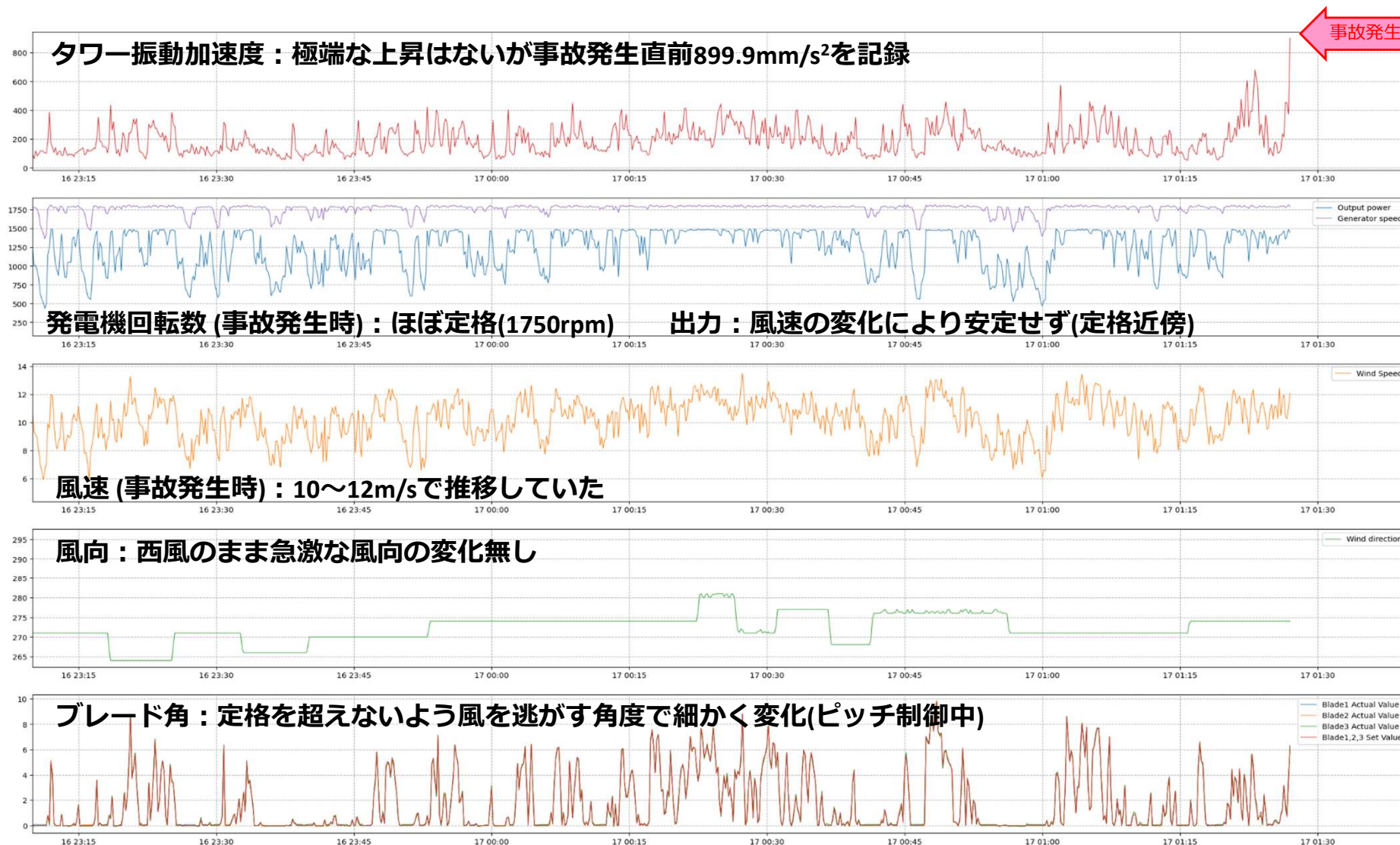


図2-1. SCADA 10秒平均値推移
(2023/3/16 19:40:00 ～ 2023/3/17 1:27:00 約6時間)

(2)タワーの損傷状況: タワー損傷位置図

損傷した位置は、フランジ接合の三分割タワーの最下段(ボトムタワー:約20m高さ)の中間部(約11m高さ)であり、周方向溶接部と合致しています。



損傷タワー下部残存部

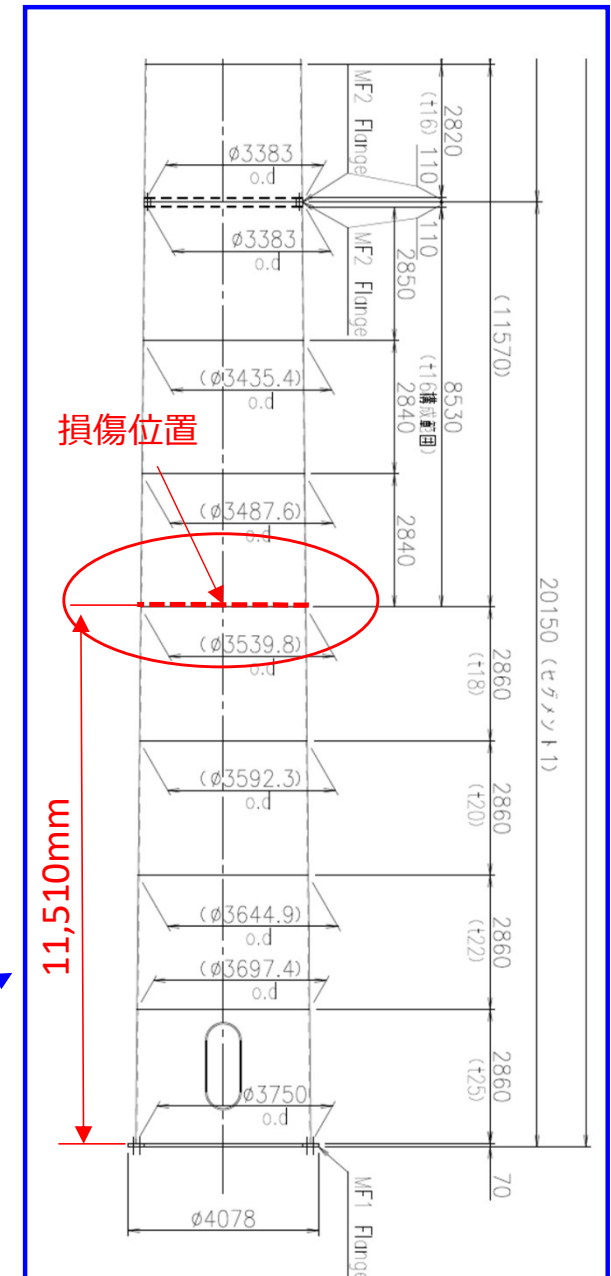
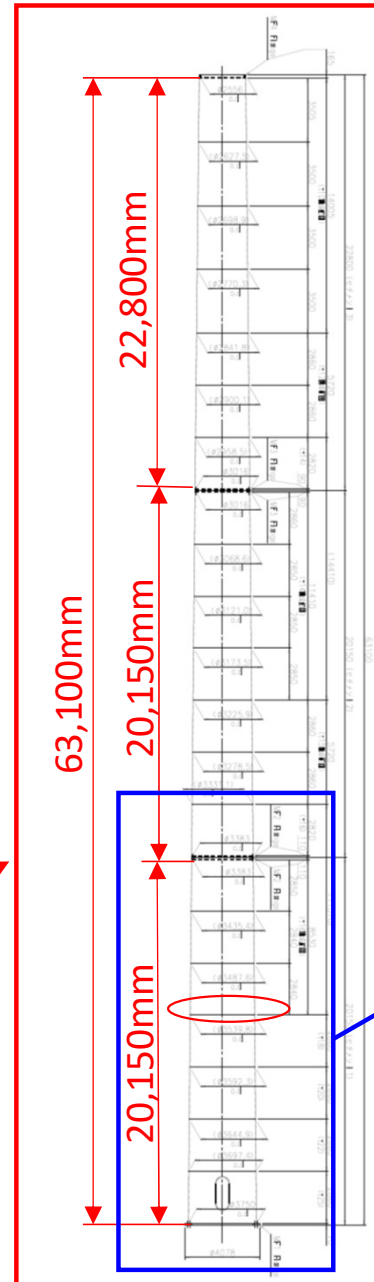
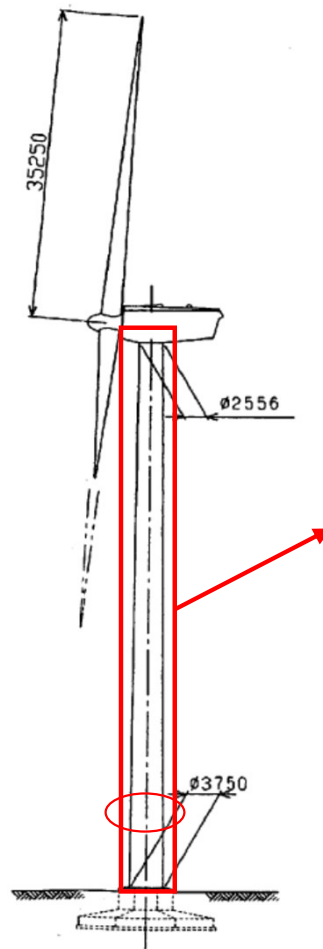


図2-2. タワー損傷位置図

2. 事故の状況

18

(2) タワーの損傷状況：破断面観察状況・発錆範囲

損傷した部分の溶接線部断面には発錆が見られており、以前より亀裂が発生していたと認められます(発錆している範囲は130-140°程度：破断部はキグチにて調査を実施済み)。

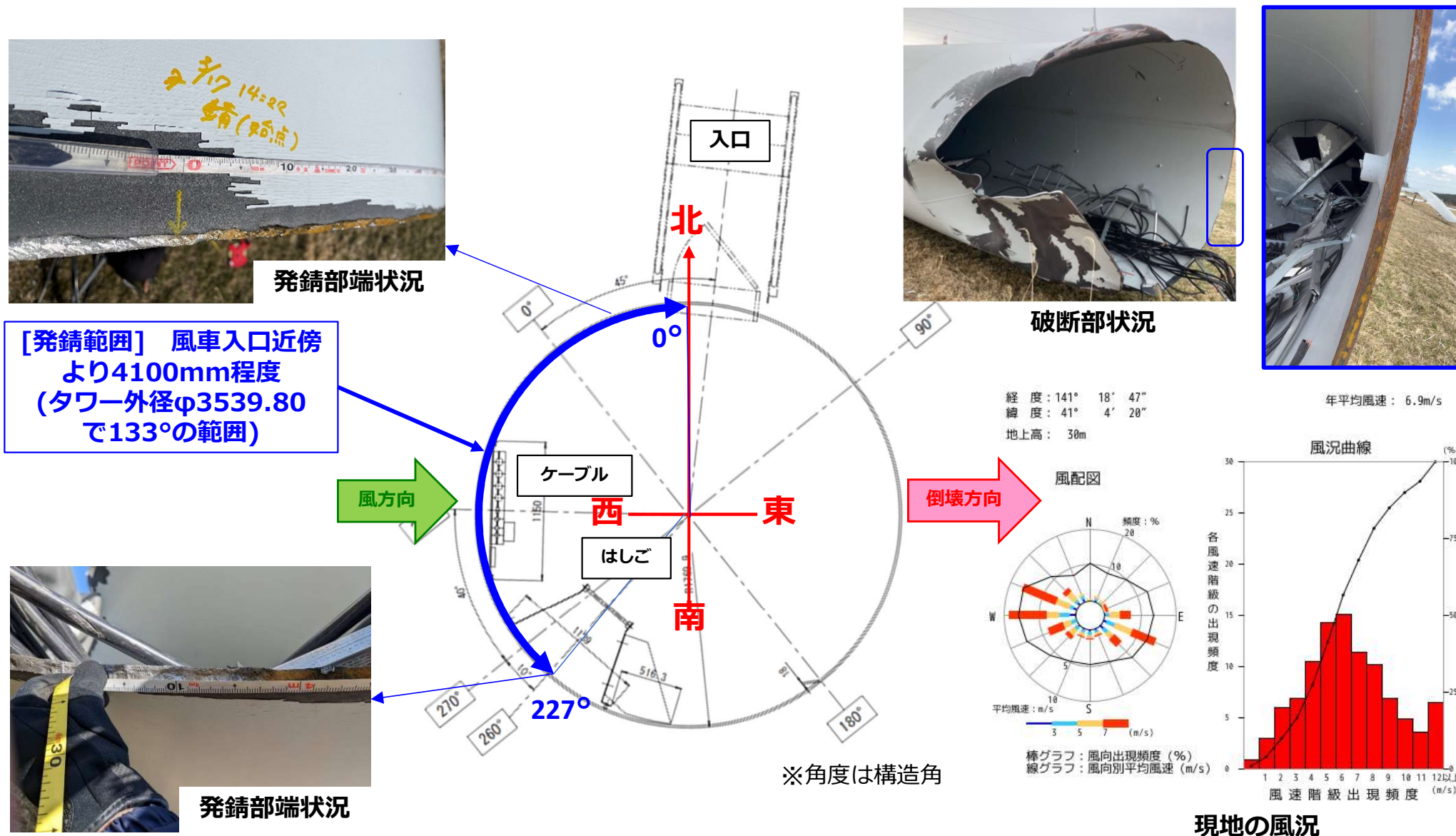
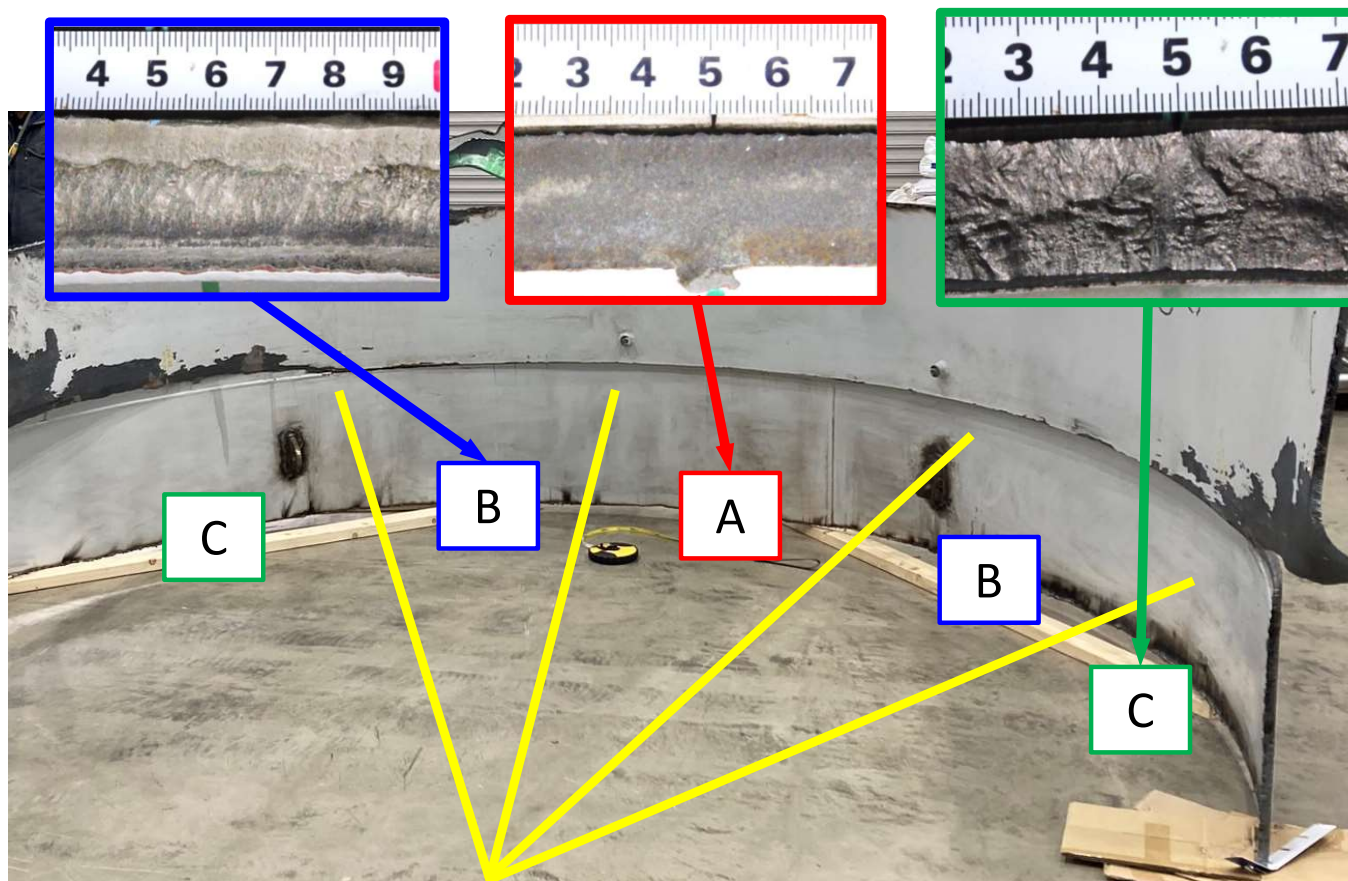


図2-3. タワーの損傷状況：破断面観察状況・発錆範囲

(3) 破断面・亀裂部の調査 a. 1-3号機破断面(1)

材料の評価の第三者機関であるキグチにて調査(破断面の記録、溶接部形状計測)を実施し、詳細調査を実施しました。試験体観察(破断面の外観確認:4/12実施)の結果、亀裂は領域Aから発生し、領域B・領域Cへと広がったと認められます。



破断面調査の結果、破断面の状態を4種類に大別

- ・ **領域A** :
全面平坦な初期疲労破面
- ・ **領域B** :
内側は疲労破面(板に鉛直・直線)、外側は強制破面(板に対して傾斜)
- ・ **領域C** :
全体的に大きく傾斜した破面。
- ・ **領域D (A～C以外)** :
錆がない破断面

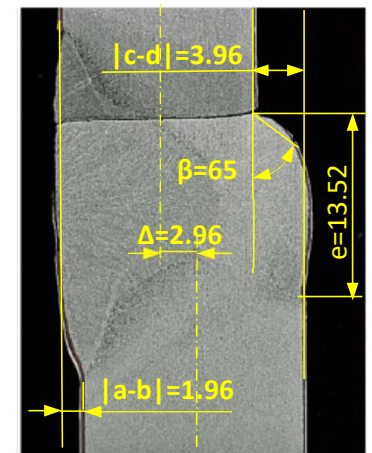
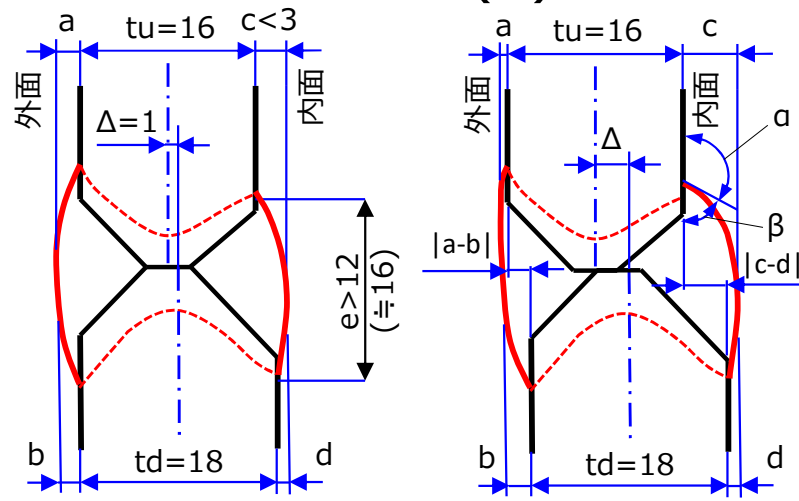
図2-4. #1-3試験体観察(4/12実施)

2. 事故の状況

(3) 破断面・亀裂部の調査 a. #1-3号機破断面(2)

溶接線形状計測の結果、最大2.96mmの食い違い段差 Δ (設計値1mm)が確認されました。

食い違い段差 $\Delta(\equiv |c-d|-1)$ と余盛端角 $\beta(=180^\circ - \text{フランク角}\alpha)$ が大きい範囲と主風向が重なったことが、過大な応力集中を招き疲労亀裂進展を進めやすい環境にあったと考えられます。



1-3号機280°マクロ断面

JSW 溶接仕様
(WPS:溶接施工要領書記載)
食い違い段差 Δ

実態形状
(食い違い段差 $\Delta > 1$ の場合)

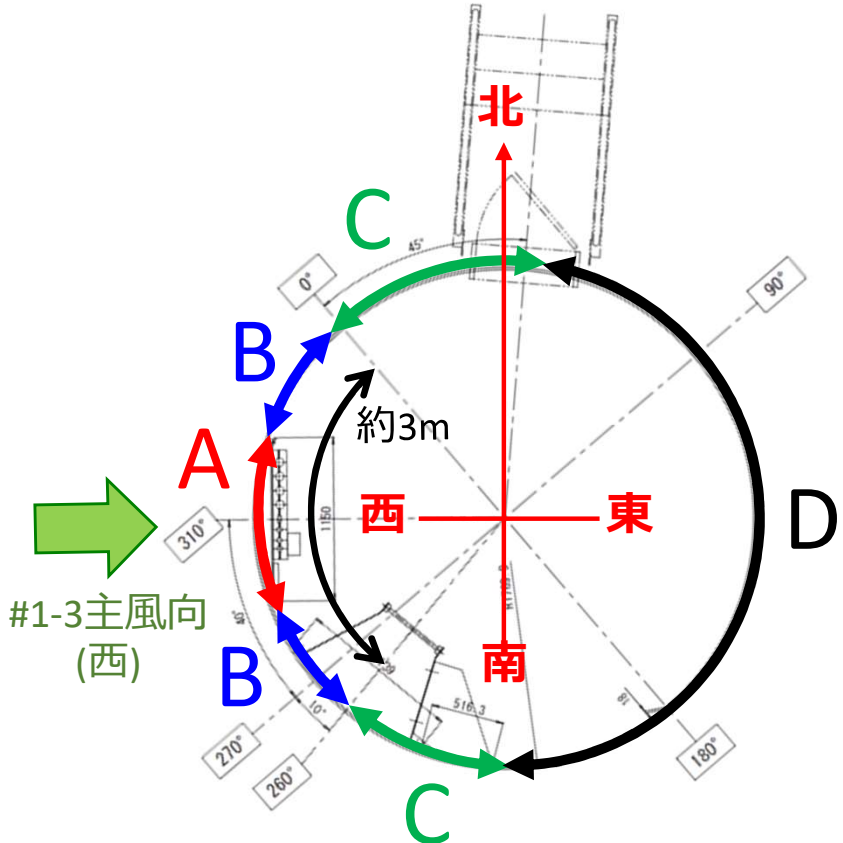
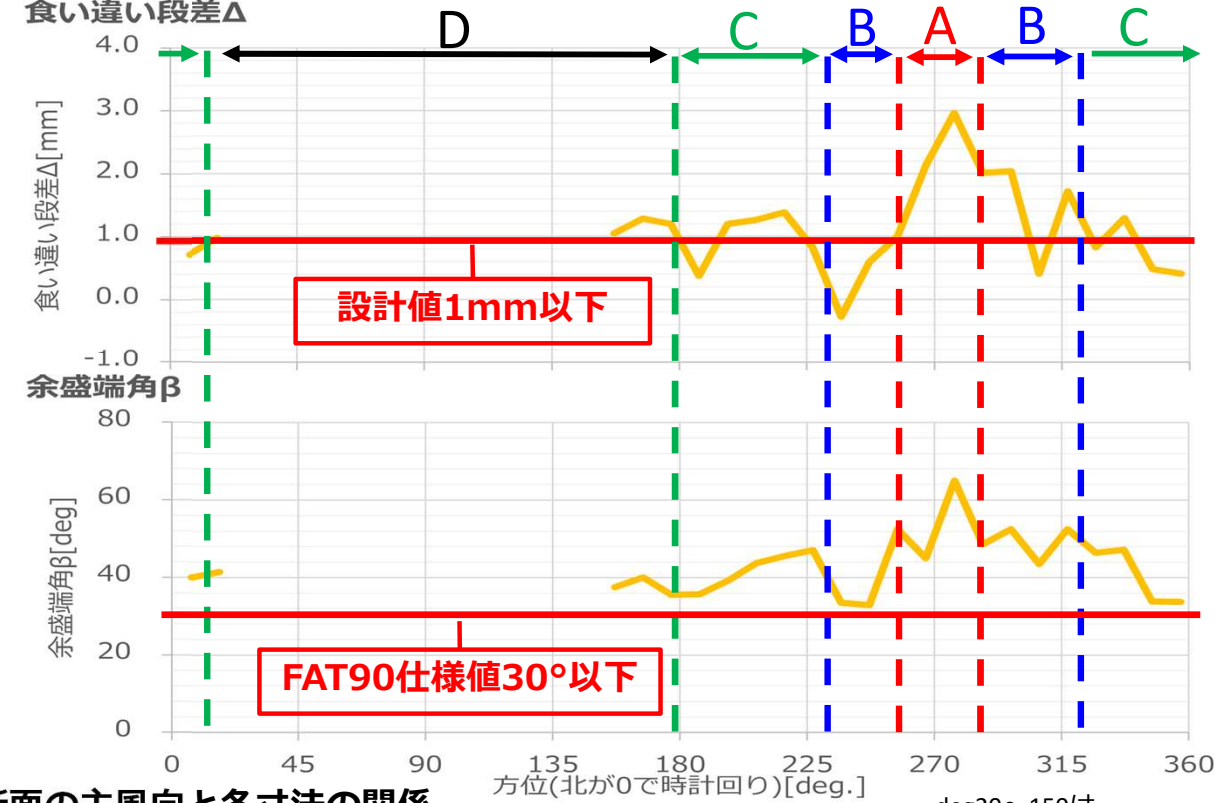


図2-5. #1-3破断面の主風向と各寸法の関係

deg20~150は
欠損により寸法測定不能

3. 事故原因の究明

(1) 倒壊メカニズム a. 倒壊に至るまでの過程

当該風車は、タワーに作用する繰り返しの風荷重によって、疲労亀裂が進展したため強度が低下し、最終的には瞬間的な風荷重に耐えられずに座屈し、倒壊したと推定されます。最初に初期疲労亀裂がタワーの内側の溶接余盛端部に発生し、その亀裂が板厚方向に進展・板貫通に至り（①15年から20年）、その後、周方向へ進展したと推定されます（②1年から3年）。最終局面では、き裂先端の応力が大きくなり延性破壊によって急速に亀裂が進展したと推定されます（③倒壊まで数か月）。

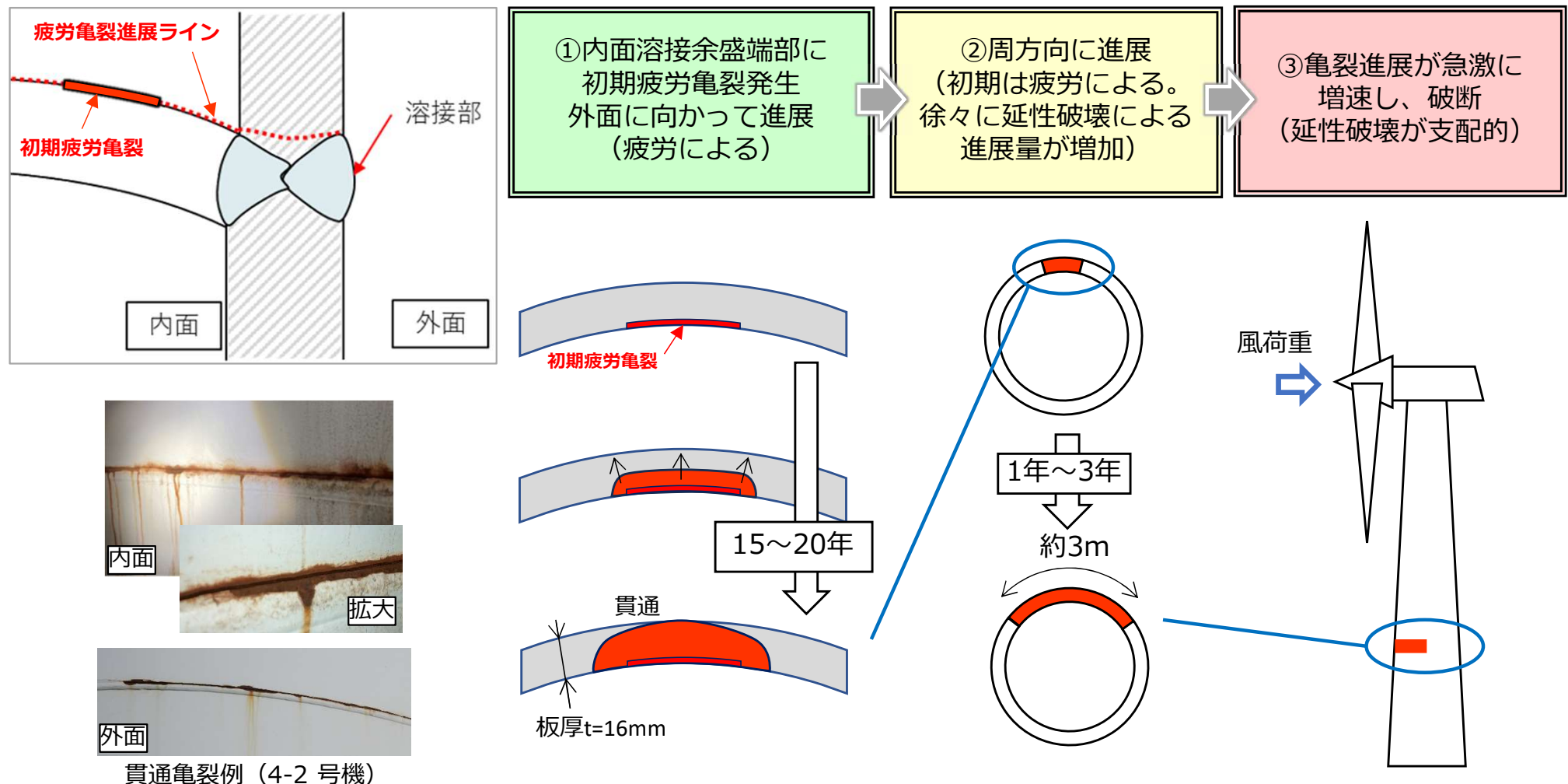


図3-1. 倒壊に至るまでの過程

3. 事故原因の究明

(1) 倒壊メカニズム b. Paris則による疲労亀裂進展時間の計算

22

Paris則を用いて計算した結果、疲労亀裂は、①15～20年、②1～3年、③数か月をかけて進展したと考えられます。①の疲労亀裂進展時間は長い期間を要しますが、②および③は、①より短い時間で亀裂が進展することがわかります。したがって、再発防止の観点からは①の内面側に発生した亀裂が貫通するまでに、点検によって亀裂を早期に発見することが重要となります。

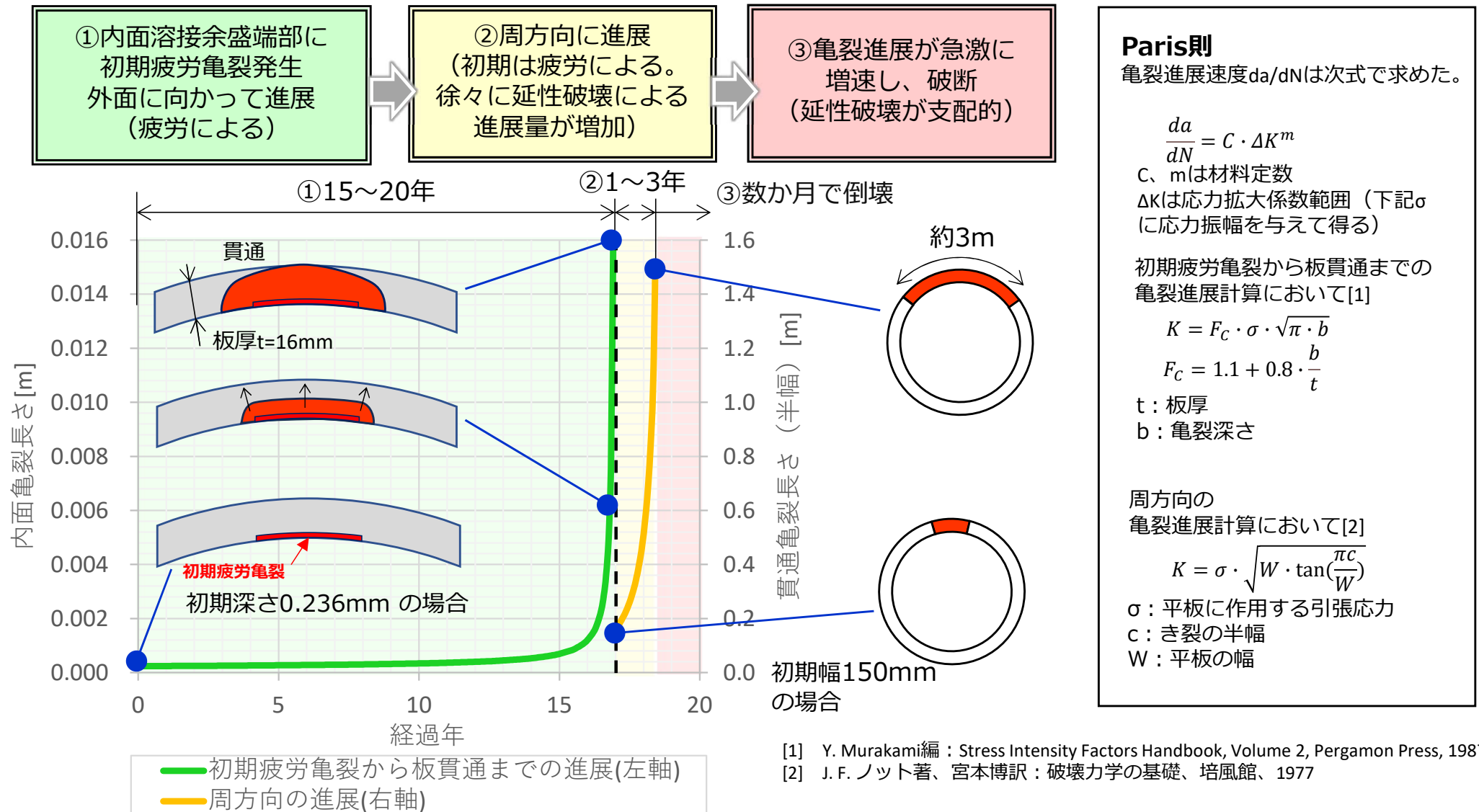


図3-2. Paris則による疲労亀裂進展時間

[1] Y. Murakami編：Stress Intensity Factors Handbook, Volume 2, Pergamon Press, 1987

[2] J. F. ノット著、宮本博訳：破壊力学の基礎、培風館、1977

(2) 事故原因 a. フィッシュボーン図

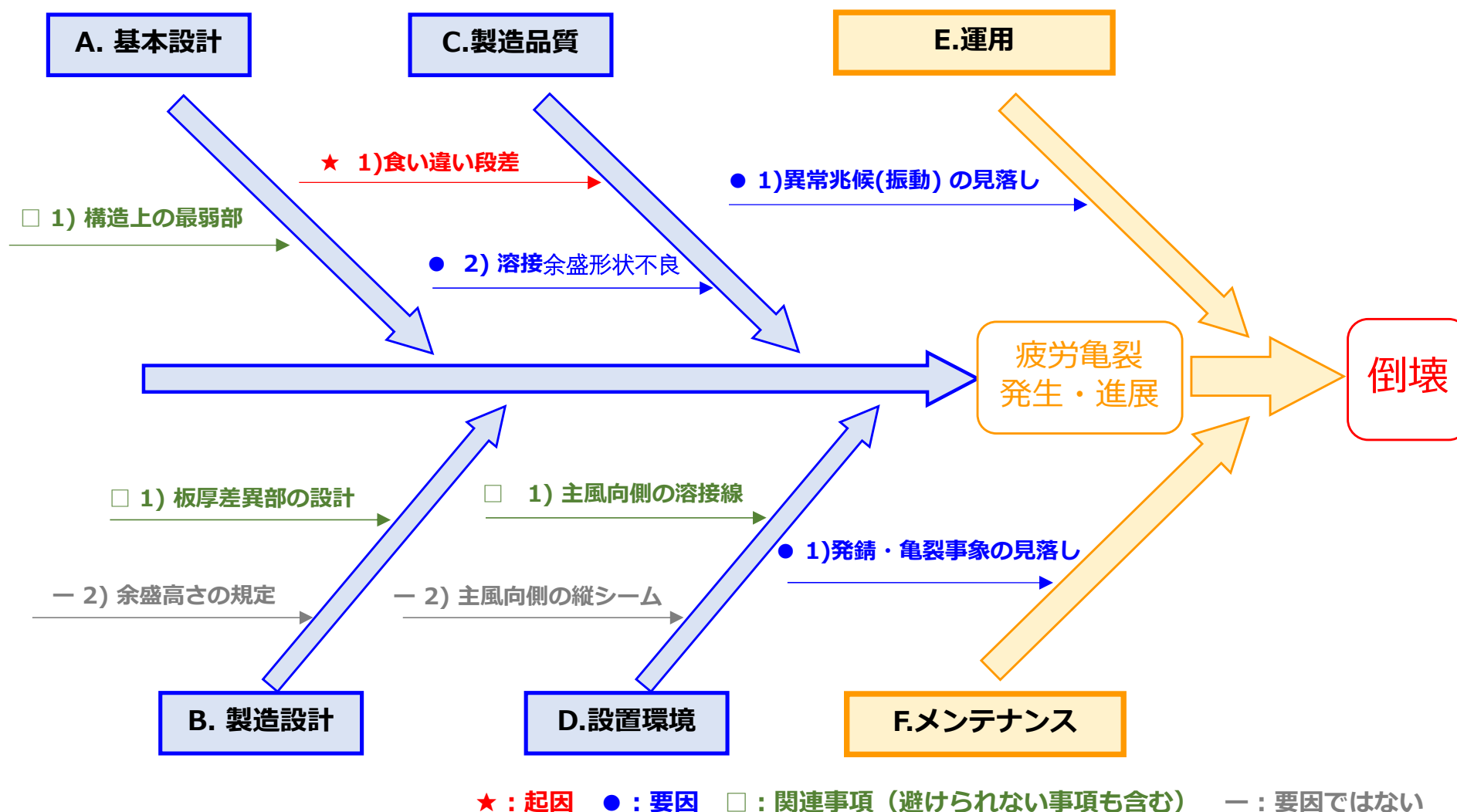


図3-3. 事故原因(フィッシュボーン図)

亀裂が発生しタワーが倒壊した事象の起因は、溶接部における板の食い違い段差であり、倒壊は運用、メンテナンスの「見落とし」であることが判明しました。そのため緊急対応として既に全風車の溶接部での亀裂の有無を点検し亀裂がないことを確認しましたが、今後も定期的に亀裂の有無を確認します。さらに、振動エラー発生時に振動データの時系列を分析して、異常がないかを確認します。

(2) 事故原因 b.事故要因分析

事故要因分析から、亀裂発生起因は、板厚差異部の主風向側にあった製造時の食い違い段差による応力の増加であり、倒壊に至った要因は、メンテナンス時の亀裂の見落とし、及び倒壊前の異常振動多発が亀裂進展を表すことに気がつかなかったことと判断しました。

表3-1. 事故要因分析表

要因	原因	内容	評価	根拠
A 基本設計	1) 構造上の最弱部	十分な安全率は有しているが、タワー内では疲労強度最弱部	□	タワー全体は安全率を考慮して疲労設計されていた。しかしながら当該部（溶接線第④節）は耐疲労余裕度が他の板厚差異部に比して一番小さく、そこに食い違い段差があったことで、疲労亀裂が発生した。
	2) 余盛高さの規定	溶接余盛高さGE仕様規定外（溶接幅の10%以下の規定を守れていない）	—	当該部の余盛高さ基準として溶接幅の10%以下にするとの規定があったが、JSWの当時のWPSにはそれが記載されていなかった。調査の結果、当時の「建築工事標準仕様書 JASS6 鉄骨工事」に則って規定しており、製造設計としては要求基準強度は満たしていた。
C 製造品質	1) 食い違い段差	製缶時の製造誤差により、食い違い段差が生じていた	★	上部側(t16)が下部側(t18)に比して外側に飛び出す、食い違い段差が生じていた。溶接前には誤差を矯正していたと推定されるが、溶接時に食い違い段差が生じた状態で溶接されたと推定。段差と溶接形状による応力集中と、偏心による曲げを招いた。
	2) 溶接余盛形状	溶接端部の角度が高くなることで応力集中が増大	●	今回の亀裂始点には食い違い段差も生じており、溶接段差がより高くなっており、溶接端の角度が高くなっていた。
D 設置環境	1) 主風向側の溶接線	亀裂発生個所は主風向側であり、風向頻度が高い方向に発生	□	主風向側に生じていた食い違い段差の影響で疲労亀裂が発生した。主風向側にあったことから、高い繰り返し応力が頻度高く付加され、亀裂進展につながった。
	2) 主風向側の縦シーム	縦シーム溶接部との交差	—	1-3号機の疲労亀裂基点部は縦シーム溶接との交差点であり、応力集中を助長した可能性があったが、貫通亀裂が見つかった4-2号機は横シーム溶接のみの箇所であり、要因ではない。
E 運用	1) 異常兆候(振動)の見落とし	倒壊前2か月間の間に、振動エラーが多発していた	●	振動エラー発生時の振動データの時系列を分析した結果、倒壊した風車と通常の風車とで明らかな違いがあった。この点を倒壊前に把握していれば、倒壊を防げた。
F メンテナンス	1) 発錆・亀裂事象の見落とし	点検時の溶接線部発錆・亀裂事象の見落とし	●	内面から発生する疲労亀裂の進展速度を解析した結果、内面亀裂が発生してから貫通亀裂、さらには倒壊に至るまでに数年を要することが分かった。この間に亀裂を発見していれば倒壊を防げた。

3. 事故原因の究明

(3) 倒壊要因 E. 運用(異常兆候(振動)の見落とし)

倒壊前2か月間の間に、1-3号機ナセルの振動エラー(EM177)が多発していました(年間約5~10回の発生だったものが、倒壊前2か月で21回発生)。今までの経験からこの振動エラーは、乱流時やピッチ関係機器の不調時に発生すると認識しており、多発し始めたことは認識しつつも、現地確認では過去のブレード損傷事故を想定したブレード状態確認(外観・異音)を実施して運転再開しており、倒壊に至るタワーの異常兆候は認識できず、倒壊に至りました。(当時は振動エラー発生後に、SCADA振動データの確認をしていませんでした)。

表3-2. 2023年の1-3号機ナセルの振動エラー(EM177)発生状況(2023年1月~3月事故発生まで:計21回)

No.	発生日	時刻	停止時間	復旧※	対応内容	No.	発生日	時刻	停止時間	復旧※	対応内容
1	1/29	3:09	0:03	自動		12	2/25	22:36	0:03	自動	
2	1/31	14:00	0:02	自動		13	2/26	4:35	0:03	自動	
3	2/2	0:37	0:03	自動		14	2/26	8:13	0:11	遠隔	現地ブレード外観確認
4	2/2	4:51	2:50	遠隔	現地ブレード外観確認	15	2/26	8:48	1:11	遠隔	現地ブレード外観確認
5	2/3	9:13	5:31	遠隔	現地ブレード外観確認	16	3/4	13:19	0:02	自動	
6	2/9	5:32	0:02	自動		17	3/4	13:42	5:32	遠隔	現地ブレード外観確認
7	2/9	5:56	6:06	遠隔	現地ブレード外観確認	18	3/10	22:16	0:02	自動	
8	2/9	12:56	3:37	遠隔	現地ブレード外観確認	19	3/11	1:24	0:03	自動	
9	2/9	19:53	15:50	遠隔	現地ブレード外観確認 出力制限1,000kW(~2/10 8:48) 振動計通信部品を交換し復旧	20	3/11	3:51	4:56	遠隔	現地ブレード外観確認
10	2/20	3:56	0:02	自動		21	3/13	17:09	0:02	自動	
11	2/21	17:53	0:02	自動			3/17	1:27	-		倒壊事故発生

※復旧項目の「自動」はプログラムによる自動リセット、「遠隔」は現地確認後の監視センターによる手動リセットを示す。

(3) 倒壊要因 F. メンテナンス(発錆・亀裂事象の見落とし)

事故機のタワー外面は、フランジ継手部(下図赤丸部)に多く発錆があり見られ、その部分については塗装補修を行いました。それに比べて錆の少ない溶接線部分(下図青丸部分)については、注意が疎かになっていました(塗装補修は実施せず)。また、内面溶接線部に関しては、フランジの溶接線部以外の溶接線に亀裂が発生することは想定していなかったため、定期点検時にチェックすることになっていませんでした。

そのため、少なくとも1年～3年前には貫通亀裂が発生し、発錆があったと推定されていますが、その亀裂、発錆を見落としていたと推定しています。

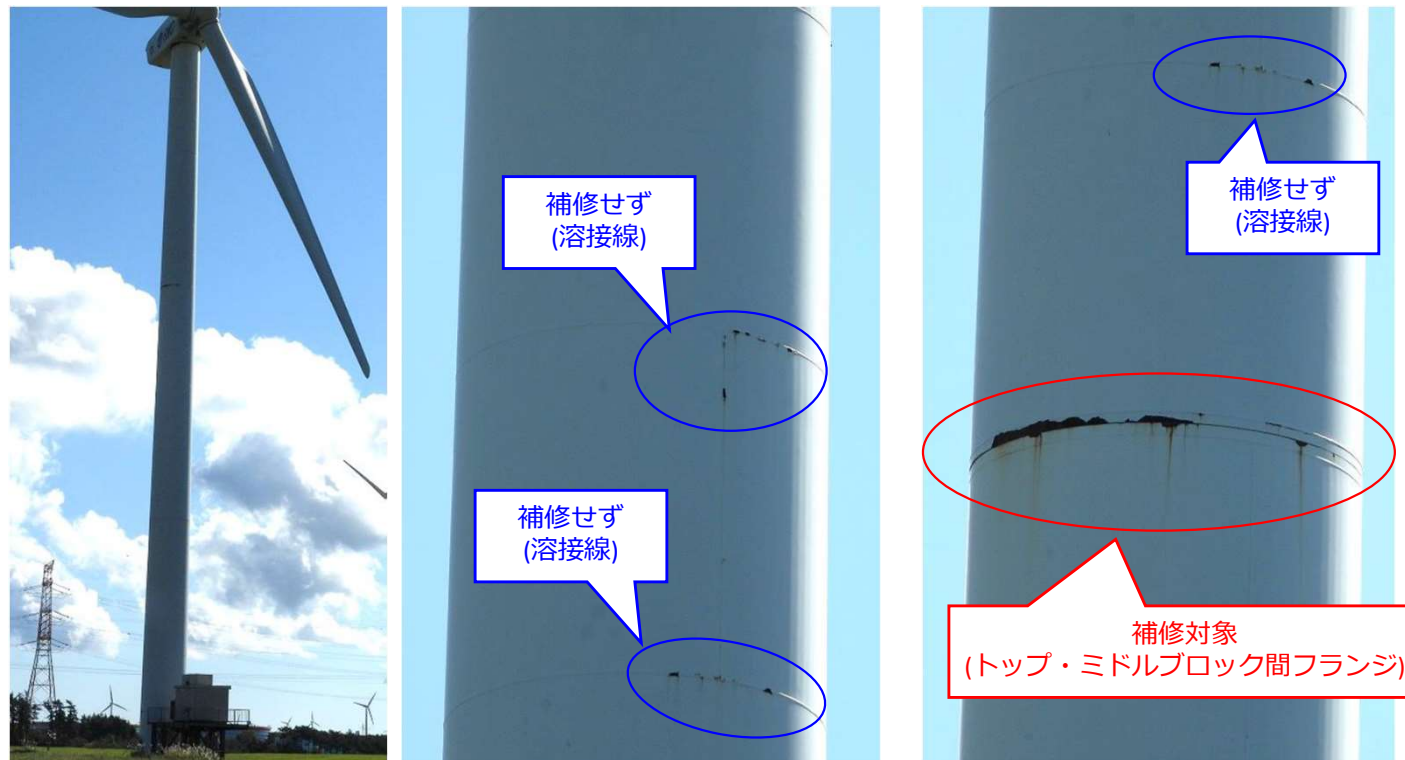


図3-4. 2021年9月21日 1-3号機 タワー外観点検記録写真



図3-5. 1-3号機フランジ部補修
2022.10月

※図3-4と同一タワーの別フランジ接合部

3. 事故原因の究明

(4) 疲労亀裂発生・進展要因 (基本設計・製造設計・製造品質)

27

当該タワーの基本設計は、IEC 61400-1 Class II Aに基づきGermanischer Lloyd (GL)から認証を受けていました。溶接部の基本設計・製造設計・製造品質の状況は下表のとおりです。損傷したタワーの食い違い段差および溶接余盛形状は、当時の製造品質基準を満たしていませんでした。

[溶接部適用規格]

- ①タワー図面：DIN4133(1991年度版)表B.1の継手の種類1のクラス2（溶接疲労強度はFAT90）
- ②タワー仕様書：DVS0705(1994年版)の表4aのクラスB（DVS0705は溶接規格DIN EN25817,ISO5817の推奨基準）

Tabelle B.1. Kerbfallkatalog

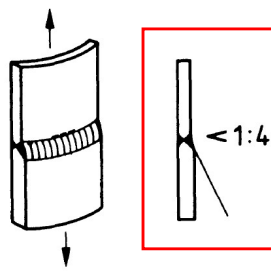
1	125/112/90
Transverse splices in shell Butt weld carried out from both sides Quality class 1 125 Quality class 2 90 Quality class 2 in flat position 112	
	

図3-6 DIN4133（表B.1の図1の溶接クラス2）

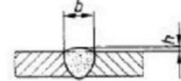
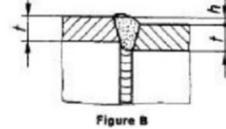
No.	Imperfection designation	ISO 6520 reference	Remarks	Limits for imperfections for quality levels		
				Moderate D	Intermediate C	Stringent B
12	Excess weld metal	502	Smooth transition is required 	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,25 b$, max. 10 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,15 b$, max. 7 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,1 b$, max. 5 mm
18	Linear misalignment	507	The limits relate to deviations from the correct position. Unless otherwise specified, the correct position is that when the centrelines coincide (see also clause 1). 	Figure B – Circumferential welds $a \leq 0,5 z$ max. 4 mm max. 3 mm max. 2 mm		

図3-7 DIN EN25817(1992)におけるクラスBの規定

表3-3. 基本設計・製造設計・製造品質比較

項目	基本設計書の記載(GE社)	製造設計(JSW)	1-3,4-2号機の測定値
余盛高さ(h)	①DIN4133 $h < 0.1 \times B$ B:余盛幅	余盛高さについては、GE社と協議しJASS6(建築工事標準仕様書)に基づき製造設計	1-3号機: 余盛高さ2.3~4.5mm(余盛幅の19~30%)
	②DVS0705 $h < 1\text{mm} + 0.1 \times B$ B:余盛幅(最大5mm)	余盛高さは、18mm母材部からの余盛高さ3mm以下とした	4-2号機: 余盛高さ3.0~5.0mm(余盛幅の15~28%)
板厚差異部テーパ	①DIN4133 1:4 (0.25)以下	外面合わせで段差2mm/開先幅12mm=0.17 製造精度1mm込みで $2 \pm 1\text{mm}/12 \leq 0.25$	1-3号機：亀裂起点部で $3.96/12 = 0.33$ 4-2号機：亀裂起点部で $4.38/12 = 0.37$
食い違い段差(d)	①DIN4133 規定なし	溶接工程で最大1.0mm目標で管理	1-3号機亀裂部最大2.96mm(板厚中心) 4-2号機亀裂部最大3.38mm(板厚中心)
	②DVS0705 最大3mm(板端)		
	②DIN EN25817 最大2mm(板厚中心)		

[緊急対応]

国内同型機189基の溶接部の点検を実施し、倒壊した1-3号機、貫通亀裂が発見された4-2号機の2基以外には問題がないことを確認しました。

(1)当該事故に対する予防保全・再発防止策

F-1. 点検チェックシートの変更

「錆・亀裂事象の見落とし」の対策として、定期点検方法の見直しを実施しました。具体的には、タワー内、外共に点検時に写真記録を残すこととし、特に亀裂起点となる内面については360°カメラを利用した溶接線全線の管理を実施しています。なお、その他のチェックシートについても見直しを開始しています。

F-2. タワー錆のガイドライン(案)の作成

タワー外面の発錆に対しては、従来重要視せず、溶接線部の貫通亀裂による外面発錆を見逃す要因となりました。今後はタワーの発錆状態について、「(仮称)タワー錆のガイドライン」を取りまとめ、タワー錆について写真管理してしていきます。

(2) 類似事故を想定した予防保全策

今回の事故だけではなく、知見のない事故等をも防ぐことができるような体制を構築するために、なぜなぜ分析から得られた結果から、対策を検討し、実行開始しております。また、特に、「組織の中で自分の考えや気持ちを誰に対してでも安心して発言できる状態=心理的安全性」の構築による不具合情報の共有が大切と考え、その取り組みを開始しました。

[追加対応]

E-1. SCADAデータ利用による予防保全

事故機において倒壊前2か月間の間に、振動エラーEM177が従来より多発していたことがわかっており、当該エラー発生時の対応フローを決め、予防保全を開始しました。

4. 予防保全・再発防止策

(1) 当該事故に対する予防保全・再発防止策

異常兆候(振動)の見落とし/発錆・亀裂事象の見落としについて、なぜなぜ分析等の結果から、運用・メンテナンスにおける問題点を抽出し、対策を検討、実行しました。

表4-1. 運用・メンテナンスにおける問題点と対策

要因		原因		主要問題点	主要対策	説明ページ
E	運用	1)	異常兆候(振動エラー多発)の見落とし	倒壊前2か月間の間に、 振動エラーが多発 していたことは認識しつつも、この 多発が倒壊に至るタワーの異常兆候とは認識できず 。	振動警報発生時に、 SCADAデータによる振動分析を実施 することを規定した。	E-1. SCADAデータ利用による予防保全
		1)	発錆・亀裂事象の見落とし(全般)	点検チェックシートは溶接線毎の良否判断ではなく、 タワー全体での「腐食、フランジ亀裂、溶接継目、塗装損傷」の良否判断 となっていた。 チェックシートの 良・非の判定 は、現場技術員のみでの判断で行われており、 個人の主観による判断 で行われていた。 今回のタワー損傷形態(工場溶接部からの損傷)の知見がなく、フランジ部近傍以外の タワー内面工場溶接部に対する危険認識がなかった 。 錆は過去から発生して、徐々に拡大しており、過去の点検において問題なしとなっていた場合、月例巡視・半年/年点検での 変化に気が付くことができず、危険との認識はできなかった 。	チェックシートを改善 し、特に亀裂起点である内面溶接線については、全溶接線の 360°カメラによる記録を残す こととした。 写真を撮り、記録を残す ようにチェックシートを改定し複数者で状態確認が出来るようにした。 客観的判定のためにタワー錆のガイドライン(案)を制定 した。 タワー錆のガイドライン(案)を作成 し、錆・状態の判定や、 錆の程度による対応方法を明確 にした。 写真管理にて記録することとし、過去の状態とも比較 できるようにした。判断はタワー錆のガイドライン(案)に準じて実施することとした。	F-1. 点検チェックシートの変更 F-1. 点検チェックシートの変更 F-2. タワー錆のガイドライン(案) F-2. タワー錆のガイドライン(案) F-1. 点検チェックシートの変更 F-2. タワー錆のガイドライン(案)
F	メンテナンス	2)	発錆・亀裂事象の見落とし(タワー内面)	点検実施する内面フランジボルト近辺についてはプラットフォームがあり、ボルト点検時に目視点検していたが、その他の箇所は 点検場所との認識がなかった 。 プラットフォームがない途中の溶接線は点検場所が暗く、通過するだけだった。	チェックシートを改善 し、特に亀裂起点である内面溶接線については、全溶接線の点検を 360°カメラによって実施し記録を残す こととした。 高輝度LEDライトをつけた高解像度360°カメラによって撮影実施し、 写真にて確認 できるようにした。	F-1. 点検チェックシートの変更 F-1. 点検チェックシートの変更
				外面の発錆は劣化、環境要因と認識しており、亀裂を伴う 重大損傷の可能性 があるとの認識がなかった。	タワー錆のガイドライン(案)を作成 し、錆・状態の判定や、錆の程度による対応方法を明確にした。	F-2. タワー錆のガイドライン(案)
		3)	発錆・亀裂事象の見落とし(タワー外面)			

4. 予防保全・再発防止策

(1) 当該事故に対する予防保全・再発防止策 F-1. 点検チェックシートの変更

タワー全体での「腐食、フランジ亀裂、溶接継目、塗装損傷」の良否判断となっていたチェックシートを変更し、点検箇所、及び点検手法・評価について詳細に定めました。タワー内面の溶接線管理については、点検において360°半自動撮影ができる機材を使用し、点検と共にデータを取り、検査員の確認だけでなく、責任者も確認できるように、且つ過去の点検結果と比較できるようにしました。なお、その他のチェックシートについても見直しを開始しています。

変更前

	タワー壁面				
4.2 Y	項目	腐食,フランジ亀裂,溶接継目,塗装損傷, フランジ間の隙間,接地線	目視点検	腐食他異常無し	良・否
		電気照明(点灯消灯)	機能試験	点灯消灯異常無し	良・否



図4-3. 定期点検方法の見直し

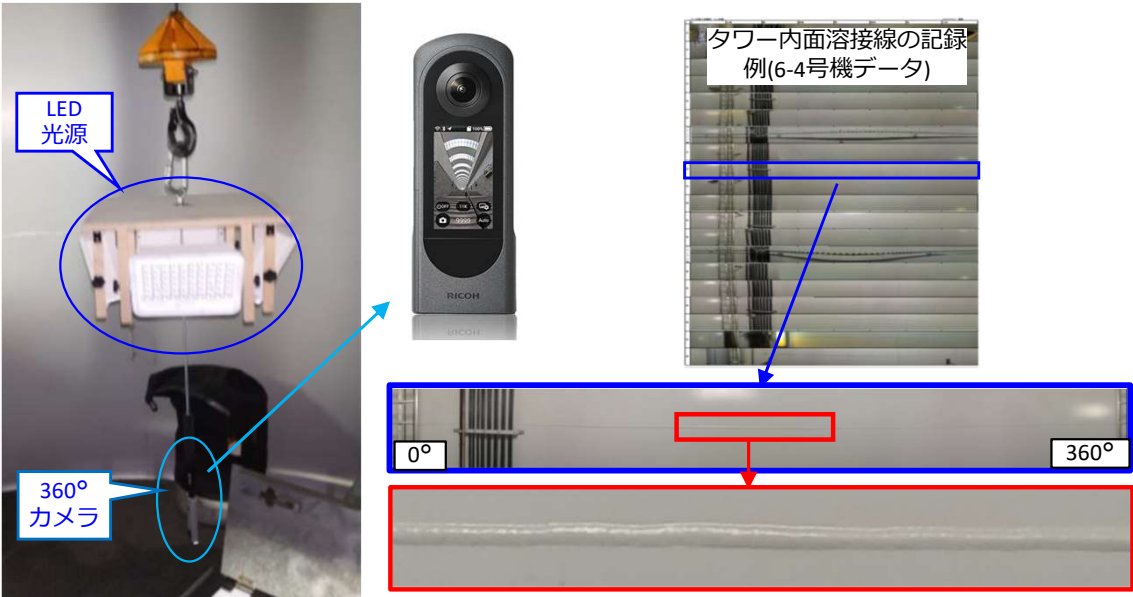


図4-4. 360°カメラによる内部溶接線の撮影

変更後

別紙8

タワー溶接線写真点検記録書		承認(電技)		印	
		承認日			
	検査員	点検日	評価者 (検査責任者)	評価日	評価
外面					良, 要詳細調査
内面					良, 要詳細調査

詳細調査結果	良(運転可)	・詳細調査報告書 文書番号 写真の保存先 等々
評価日:	否(運転不可)	亀裂は確認されなかった。

タワー溶接線写真点検要領

1. 検査の目的

タワー壁面の損傷拡大によるタワー倒壊等の事故を防止する。

2. 検査の周期

年1回

3. 検査の方法(検査員による目視点検及び検査責任者による写真検査)

① タワー外面の溶接部、フランジ部の発錆状況の点検

・タワー外面を望遠カメラ等を用いて点検を行い、塗装割れ・発錆部を確認・別紙8-1に記録する。

② タワー内面の溶接部、フランジ部の発錆状況の点検

・全ての周方向溶接線を360°カメラで撮影・点検を行い、塗装割れ・発錆部を確認、別紙8-2に記録する。

360°カメラで撮影出来ない部位(アンカーフランジ部等)は通常のカメラで全周を分割撮影する。

③ 再点検

・別紙8-1、8-2にて塗装割れ・発錆が認められた箇所については、(〇〇〇-社内手順書)に基づき再点検を行い、別紙8-1、別紙8-2に記録する。

④ 損傷評価

・別紙8-1、8-2の点検記録を用いて評価者(検査責任者)は内面部の溶接線部に塗装割れ・発錆がないか確認、評価して本記録書に記録する。

⑤ 詳細調査と評価

・④にて非破壊検査要と評価された損傷については詳細点検として非破壊検査(UT/MT)を実施し、亀裂の有無、範囲を確認して検査者は評価者に報告する。

・亀裂有りの報告を受けた評価者はOM本部技術部と協議し運転可否、監視方法等の評価を行う。

※ 点検実施における注意事項

・外面の溶接線上部は、タワー真下からでは見えないため、ある程度遠方から見る。

・2023年3月発生のタワー倒壊事故機破断部はタワー塔体の板厚変化部溶接線上部(板厚小側)で発生しており、板厚変化部の溶接線上部について注意して観察する。

・点検は周方向溶接を全線確認するが、疲労亀裂発生方向は主風向側であることが確認されているので、主風向側に特に注意する。

・⑤で亀裂が発見された場合の処置(運転可否、監視方法)等は損傷程度に応じ個々に規定する。

(1) 当該事故に対する予防保全・再発防止策 F-2. タワー鏝のガイドライン(案)の作成

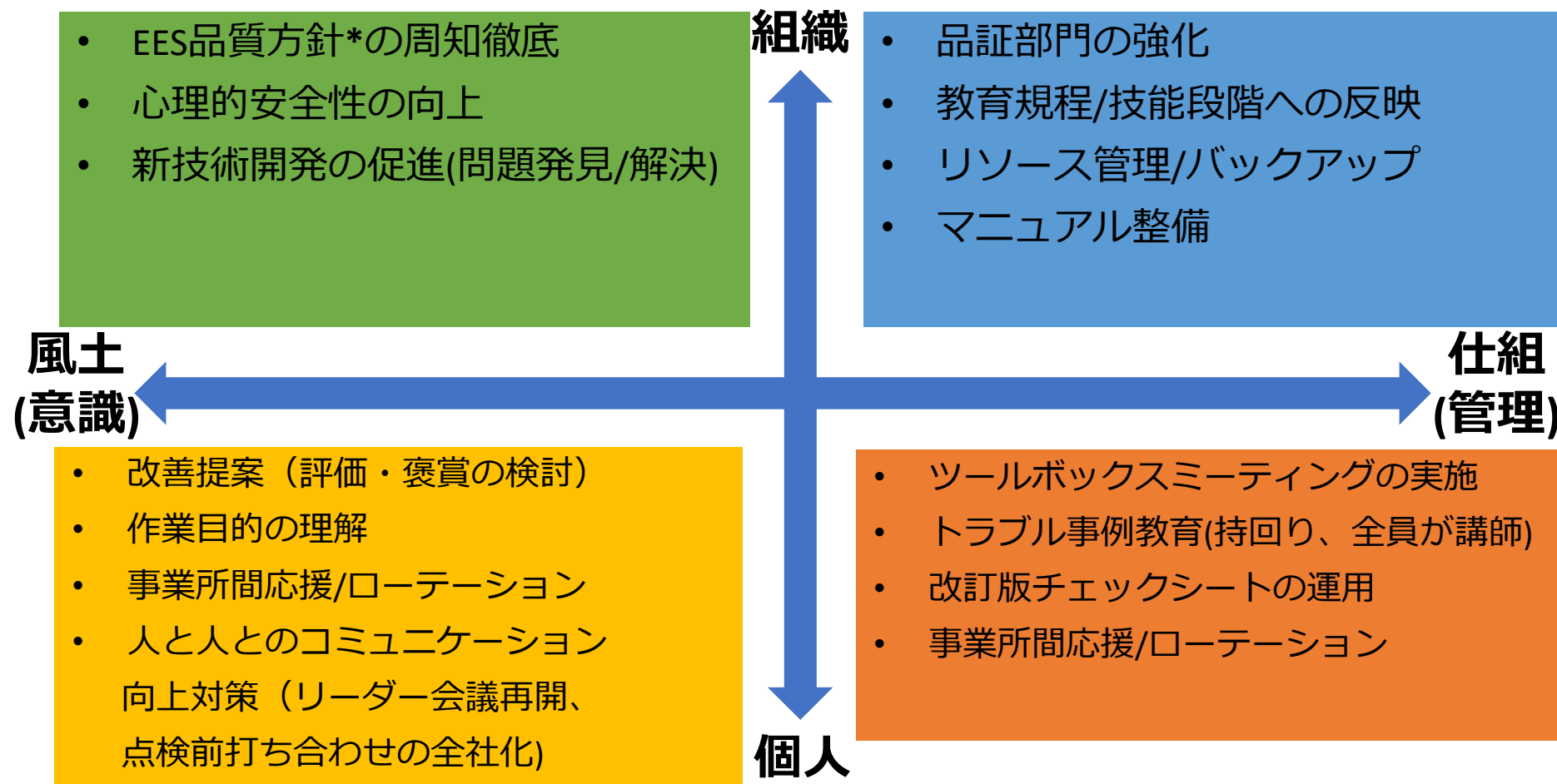
タワー外面の発鏝に対しては、従来重要視せず、溶接線部の貫通亀裂による外面発鏝を見逃す要因となりました。今後はタワーの発鏝状態について、「(仮称)タワー鏝のガイドライン」を取りまとめ、タワー鏝について写真管理してしていきます。ガイドラインでは、鏝の位置・状態によって、A:危険(即時停止し確認)、B:要注意(定期点検時まで詳細調査)、C:観察継続(過去写真の確認)に分類し、今まで主観的だった判断を客観化するとともに、過去の状態と継続的に比較できるようにします。



図4-5. タワー鏝のガイドライン

(2) 類似事故を想定した再発防止策 a.なぜなぜ分析結果・対策

タワー発錆の見落としについて、管理者・実務者・技術員各階層にてなぜなぜ分析を実施し、その結果を類似事故（これまで発生していない事故）の再発防止も想定し、風土・意識、仕組・管理の観点で区分し、組織レベルから担当レベルまで、改善を図る対策を検討し、実施しています。



組織レベルから担当レベルまで、風土も仕組も改善を図る

図4-6. なぜなぜ分析の結果分類

(2) 類似事故を想定した再発防止策 b. 対策実施工程

なぜなぜ分析の結果から検討された各再発防止対策に対して重要度・緊急性等評価を行い、重要度の高いものから実施し、年内の実施を目標として進めています。本年以降は定常業務(ルーチンワークand/or教育センターによる教育計画)に組み込み、ブラッシュアップを行います。

★…タワー倒壊に直接関係する項目

項目		緊急度	重要度	実現性	評価	2023年													
						7月			8月				9月					10～12月	
						1-	10-	20-	1-	10-	17-	24-	1-	8-	15-	22-	29-		
組織の仕組み	品証部門の強化・連携	3	3	3	9	7/1 新品証体制発足 定期点検レビュー・立ち合い													
組織の仕組み	リソース管理/バックアップ	3	3	3	9	★360°カメラの報告書まとめのバックアップ													定期点検記録のバックアップ
組織の仕組み	教育規程/技能段階への反映	1	1	2	4												教育規程反映		
組織の仕組み	マニュアル整備	1	2	1	4												経年数に応じた点検+α		
組織の風土	新技術開発の促進(問題発見/解決)	3	3	3	9	★360°カメラ導入による作業・データ管理効率化													
組織の風土	EES品質方針の周知徹底	2	2	2	6					現場パトロール・品質に関するアナウンスを定期的実施									
組織の風土	心理的安全性の向上	3	3	2	8											社外講習受講・社内展開			
個人の管理	改訂版チェックシートの運用	1	2	3	6											★改訂版チェックシートの運用			
個人の管理	TBMの実施	1	2	2	5											朝礼見直、着手作業の過去事例共有			
個人の管理	トラブル事例教育	1	2	2	5											トラブル事例教育(持回り、全員が講師)			
個人の意識	事業所間応援/ローテーション	2	3	2	7	7/1 ローテーション実施				事業所間応援・ローテーションの継続									
個人の意識	コミュニケーション向上対策	2	2	2	6										リーダー会議再開、点検前打合全社化				
個人の意識	作業目的の理解	2	2	1	5											作業目的の理解			
個人の意識	改善提案	1	2	1	4											評価・褒賞検討			

図4-7. 再発防止策実施状況

(2) 類似事故を想定した再発防止策 c. 心理的安全性

なぜなぜ分析の結果、多くの項目の根底にあった心理的安全性欠如については、外部講師による研修を9月26日に実施しました。初回の受講は管理職を主体としたメンバーとし、以後は社内「教育センター」と、外部講師の助力により教育計画に組み込んで恒常的に実施します。

■ 心理的安全性

『組織の中で自分の考えや気持ちを誰に対してでも安心して発言できる状態』

○心理的安全性を高める4つの因子

- ・話しやすさ⇒傾聴のコミュニケーション
- ・助け合い⇒「競争」ではなく「共創」の風土
- ・挑戦⇒失敗を恐れずにやってみる。ダメだったら、反省すればよい
- ・新奇歓迎⇒チーム内に視点や価値観の違い、相違点こそが相乗効果をもたらす

●心理的安全性の不足が引き起こす4つの不安

- ・『無知』だと思われる不安
- ・『無能』だと思われる不安
- ・『邪魔』をしていると思われる不安
- ・『ネガティブ』だと思われる不安

⇒報連相の習慣、チーム力の強化につながる

⇒本社-事業所間、事業所-事業所間のコミュニケーションも活性化

	促進要因	阻害要因
若年層	○仕事ができるようになる、腕が上がる ○考えていた仕事や条件と差がない ○成功体験とそれを認められたこと ◇職場に歓迎されている ◇同年代に近い人との交流場面 ◇相談しやすい環境	×仕事を分かるように教えてくれない ×できないことを咎められる ×なんとなくの仕事、職場選択であった ◆給与、休日、残業への不満 ◆先輩が会社を否定する ◆健康を損ねかねない状況への不安
中堅層	○仕事で成長している感覚を持てる ○自己裁量領域がある、多くある ○顧客、ユーザーからの強い支持 ◇評価が客観的で納得できる ◇この先のキャリアイメージが描ける ◇会社による働く者への配慮がある	×他者と比較したときの自分の限界感 ×業務成績が芳しくない ×毎日が同じことの繰り返しである ◆人間関係への不満（特に上司との） ◆評価基準の不透明さ ◆仕事や事業の社会的価値への疑問
中核層	○将来の事業戦略への自らの関与 ○自分の専門分野で貢献できる ○組織や仕事のやり方を変える可能性 ◇権限の委譲と拡大が行われている ◇経営層との業務接点や公私の交流 ◇社内外での有形無形の高評価	×組織管理（専門）能力が伸びない ×業務上の大きな失態 ×不得手な分野での業務遂行 ◆責任や目標達成への重圧 ◆同僚中核層、上位層の力量への不満 ◆重圧も含めた精神的疲労

心理的安全性教育資料例 図出典：(株)オフィス55



図4-8. 心理的安全性教育実施状況

4. 予防保全・再発防止策

(1) [追加対応]当該事故に対する予防保全・再発防止策 E-1. SCADAデータ利用による予防保全

35

事故機において倒壊前2か月間の間に、振動警報EM177が従来に比べて多発していました。事故後に、振動警報時の振動を分析したところ、事故機以外の振動警報時の振動と異なっていました。この違いを、今後の振動警報EM177が発生した場合に即時分析することとしています。(6/20の制定以降、8/17までにEM177が50件発生し、そのうち6件がデータ分析対象となり、判定実施：すべて異常なし)

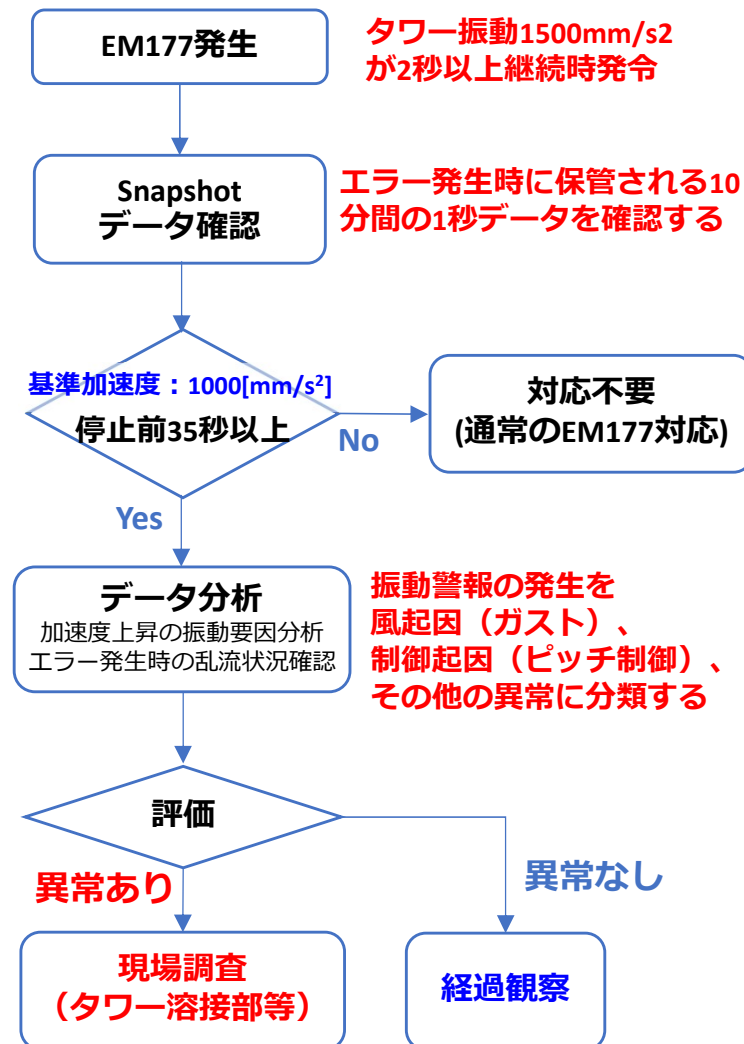


図4-1. EM177発生時の対応フロー

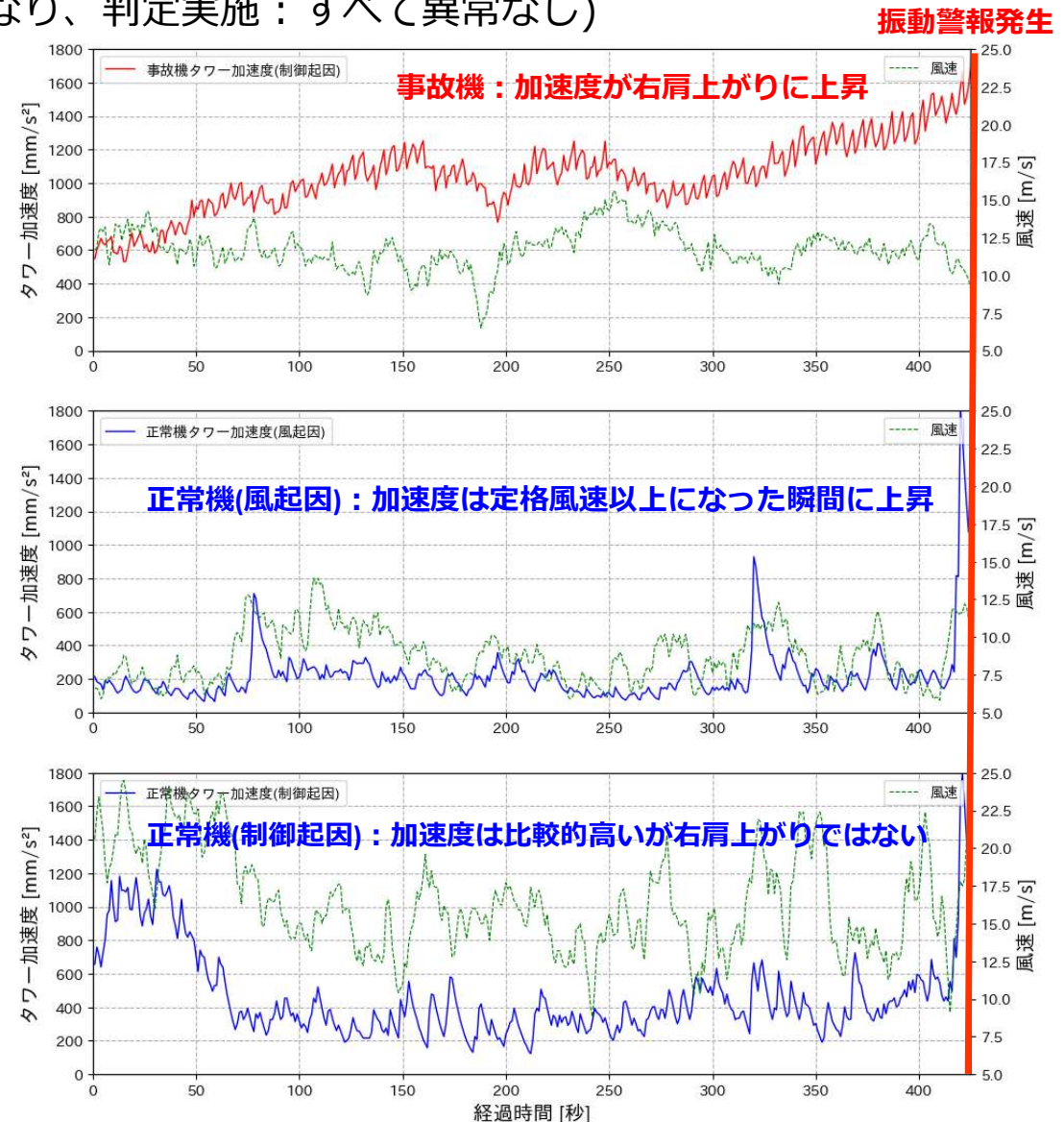


図4-2. Snapshotデータ(1sec×10分間)

A. 結論

B. #19WG資料(一部語句更改版)

C. #19回WGの委員質問事項への回答

#19回WGの委員質問事項への回答

#19回WGにて委員より指摘・質問を、技術事項、品質事項、組織・体制・体質事項に分類して回答します。
技術事項のご指摘については、**食い違い段差と寿命の関係を定量的に評価し、製品寿命を満たす基準値を算定**しました。

品質事項のご指摘については、**タワー内外面のガイドラインの確認方法・フロー等、明確に**いたしました。
組織・体制・体質事項については、なぜなぜ分析の結果を受けて、取り組んでいる**各種取り組み、また会社としての取り組み**をご紹介します。

A) 技術事項

- ① 食い違い段差と寿命の関係の定量化
- ② 食い違い段差の実機調査と評価
- ③ 食い違い段差等の実試験・検討・調査
- ④ 風車タワー基準の見直要否

B) 品質事項

- ① タワー検査の内容
- ② 錆のガイドライン

C) 組織・体制・体質事項

- ① 心理的安全性事例紹介
- ② 心理的安全性(集団心理)
- ③ 報告の体制
- ④ リスクマネジメント

① 食い違い段差と寿命の関係の定量化(1/3)

[質問] 品質-食い違い段差が、本来の条件を満たしていない。そのような風車を運転していいのか。食い違い段差の大きさによって、あと残りの寿命がどのくらいあるのか。**止めるべき風車について定量的に説明**してほしい。

[質問] 食い違い段差の大きさによって寿命の短縮が予想できるのでは。今回の調査でどういうプロセスで、どのくらいの精度か。(貫通してから倒壊まで) 1-3年というのは幅が大きい。太鼓山はボルトが破損した後1か月程度で壊れた。ただし、過去の運転実績の疲労もあった。

[質問] (内部亀裂発生から貫通まで)10年かかる、(貫通してから倒壊まで)1-3年かかる、という話は段差の大きさによって変わると思う。過去の小型の風車の場合は、段差を調査して結果を踏まえ寿命を評価している。**問題ないということを示す定量的な資料**を出してほしい。

[回答] 食い違い段差と寿命の関係を定量的に評価し、製品寿命を満たす基準値を算定しました。次ページ以降に、食い違い段差と寿命の関係の定量評価を説明します。

計測した食い違い段差が、製品寿命を満たす基準値を超える場合は、風車を停止します。その後については、設計寿命を担保するための対策を講じます。

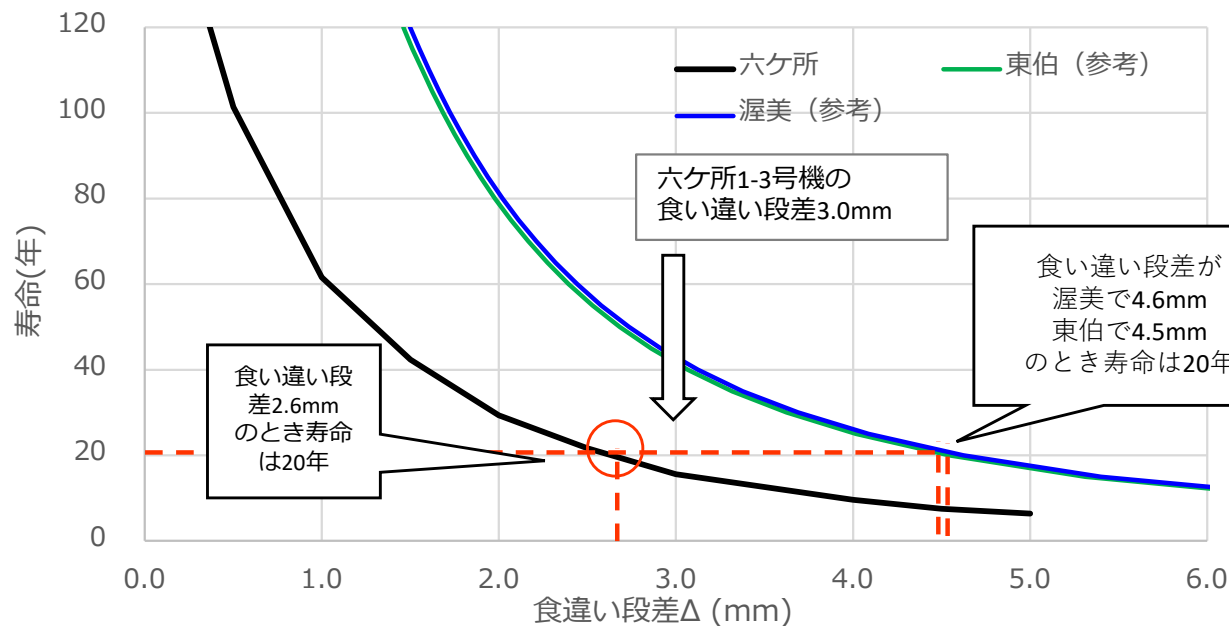
なお、2024年3月現在、六ヶ所村風力発電所は運転を終了し、全機停止しております。

① 食い違い段差と寿命の関係の定量化(2/3)

[回答] 食い違い段差(板厚中心位置の差 Δ)と寿命の関係を求めました。タワーが倒壊した六ヶ所村1-3号機では、溶接部に3.0mmの食い違い段差があり、内面に約16年で疲労損傷が発生したと判断しました。**食い違い段差の製造許容値2 mmの場合は、疲労損傷が発生するのは29.4年であり、設計寿命20年(食い違い段差2.6mm)に対して余裕があることがわかりました。**

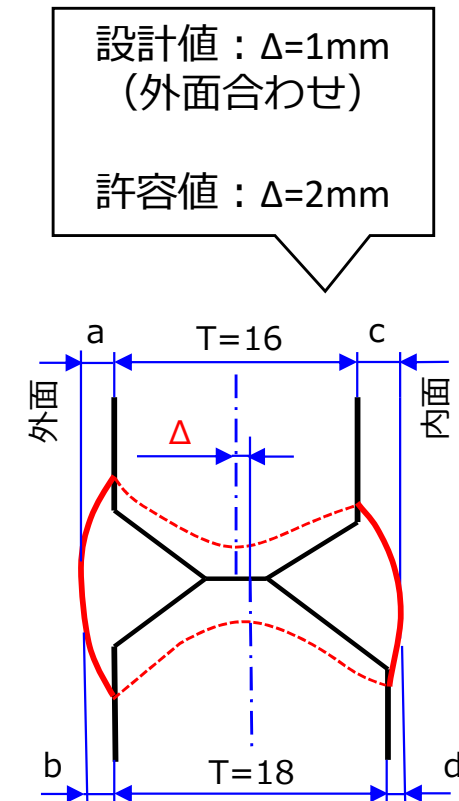
表A-1 食い違い段差と寿命の関係

食い違い段差 Δ	1 mm	2 mm	3 mm	4 mm	5 mm
疲労損傷度計算	61.6年	29.4年	15.6年	9.6年	6.4年



図A-1 食い違い段差と寿命の関係

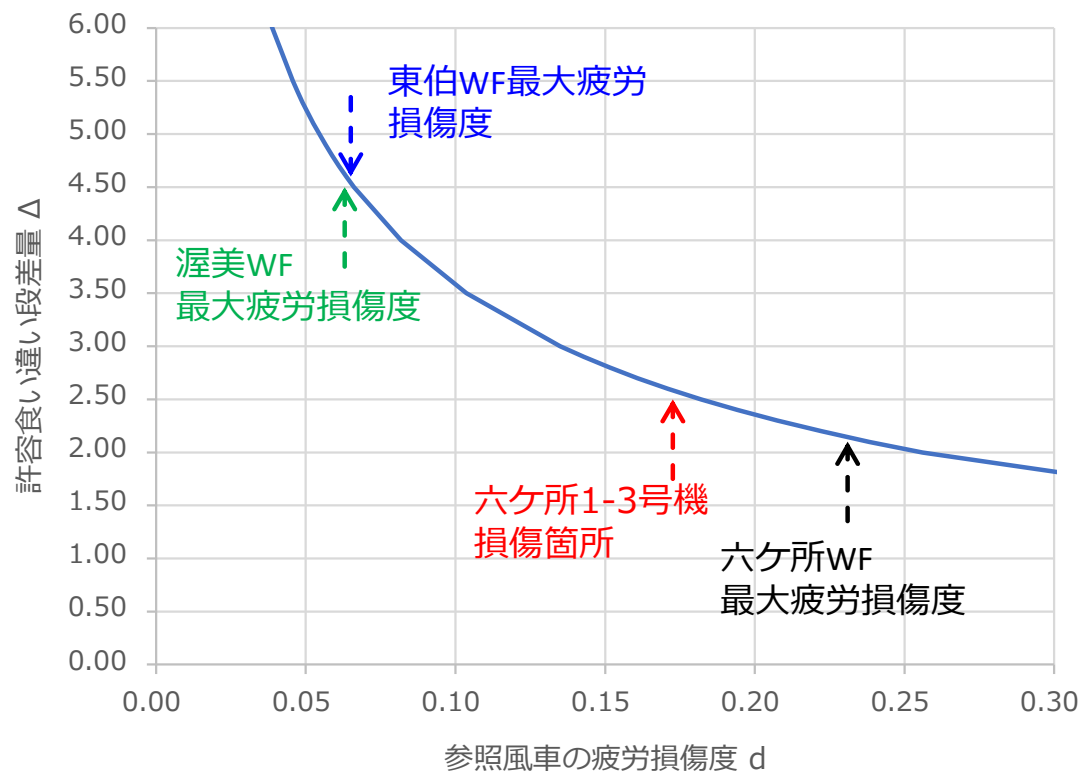
注：疲労損傷度はS-N線図に基づく。

図A-2 食い違い段差 Δ
(板厚中心位置の差)について

① 食い違い段差と寿命の関係の定量化(3/3)

[回答] 実際にはWFごとに風況（風向偏差、乱流強度）が異なり、疲労蓄積に差があるため許容食い違い段差はWFごと、溶接線方向により異なると考えられます。そこで、各WFの実風況から計算した、設計寿命20年における疲労損傷度dに対する、許容食い違い段差量 Δ を確認しました。六ヶ所村WFは、他地域のWFに比して疲労損傷度が高いことがわかり、六ヶ所村WFでは、2～3mmの許容値、渥美WF(愛知県)および東伯WF(鳥取県)では5mm以上の許容値を持つことがわかりました。

このように、実風況がわかっている現存WFにおいては、許容値をWF毎、部位ごとに算定することが可能です。



図A-3 疲労損傷度 d に対する許容食い違い段差

表A-2 風車WFごとの許容食い違い段差

WF名	疲労損傷度d	許容 Δ (mm)
六ヶ所村	0.231 (最大値)	2.1
渥美	0.063 (最大値)	4.6
東伯	0.065 (最大値)	4.5
六ヶ所村#1-3	0.173 (損傷箇所)	2.6 (損傷箇所の実測値は3.0mm)

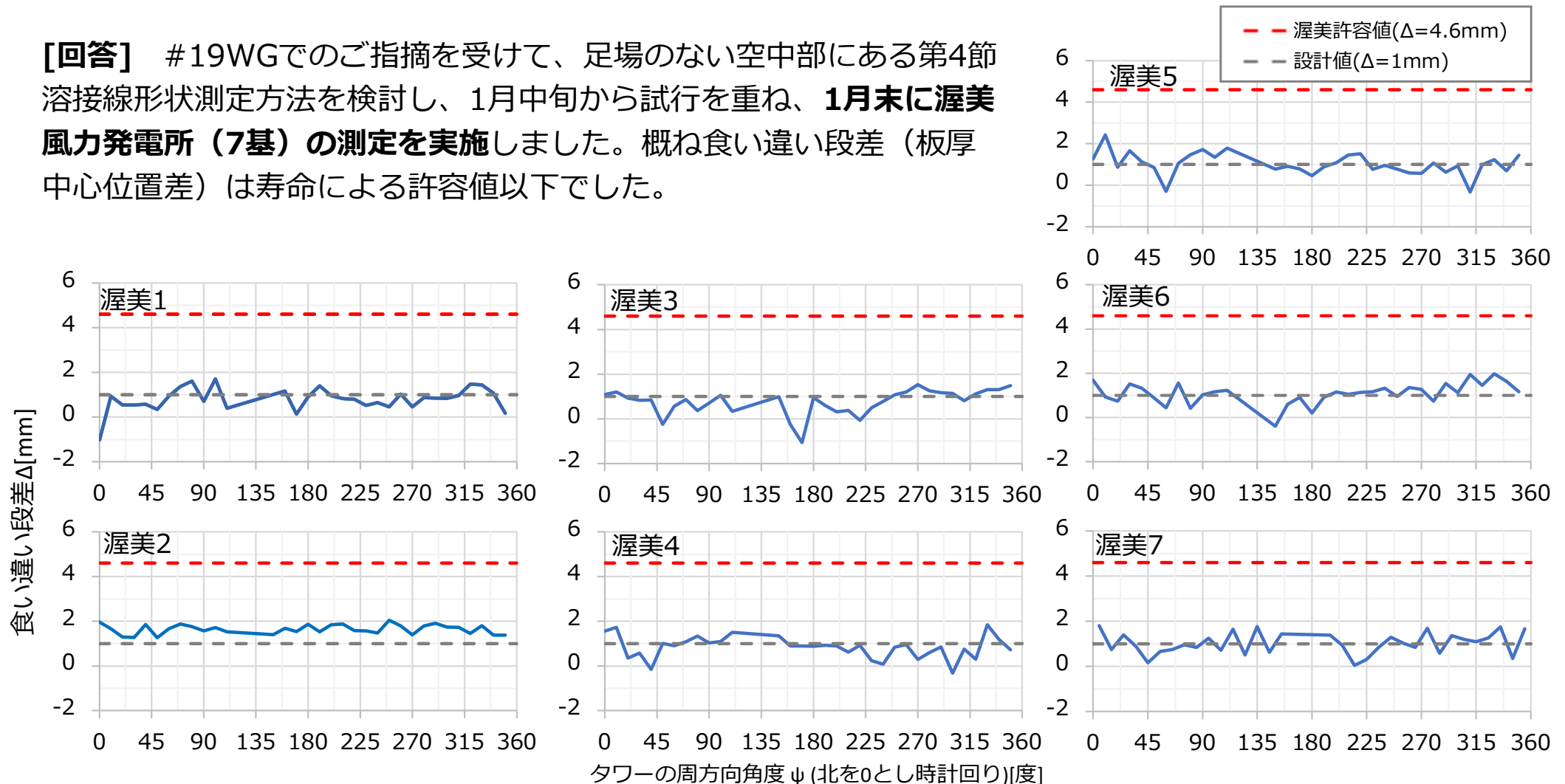
※疲労損傷度の最大値とは、風向ごとに繰り返し荷重の大きさと回数から算出し、その中で疲労損傷が最も大きい方向にある箇所での値を指します。
六ヶ所#1-3の損傷箇所における疲労損傷度とは、亀裂が貫通した位置での風向を考慮した疲労損傷度を指します。

② 食い違い段差の実機調査と評価(1/2)

【質問】 今回の一番の重大な問題は、段違いというのは原因であって、**段違いを把握**しないで今亀裂がないから問題ないと言えるのは、調査のレベルがあまりにも低いではないですか。

【質問】 今回の一番重大な問題は食い違い段差、**食い違い段差の有無**についてJSWは全機やるべき。

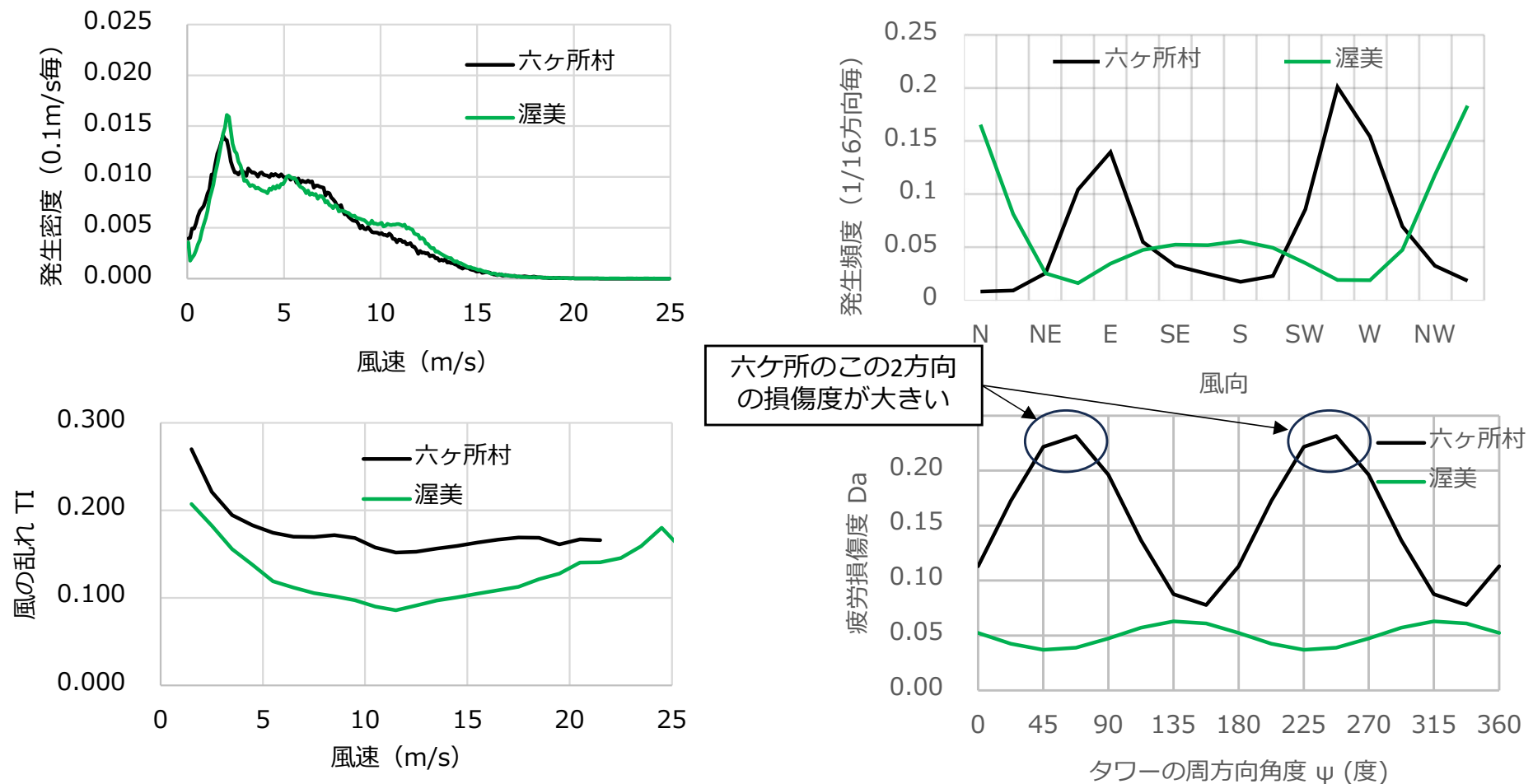
【回答】 #19WGでのご指摘を受けて、足場のない空中部にある第4節溶接線形状測定方法を検討し、1月中旬から試行を重ね、**1月末に渥美風力発電所（7基）の測定を実施**しました。概ね食い違い段差（板厚中心位置差）は寿命による許容値以下でした。



図A-4 渥美WF 溶接線(第4節)形状測定結果

② 食い違い段差の実機調査と評価(補足1/4)

食い違い段差の影響を評価するために、まず風況履歴に基づいて、WF毎に、風車タワーのどの方向に疲労損傷度が蓄積するのかを計算しました。(計算対象は参照記載WFです。)
 疲労損傷度が大きいのは六ヶ所村であり、主風向がある方向に顕著であることと、風の乱れが大きいことが疲労損傷度が大きい理由です。



図A-6 風況履歴に基づいた疲労損傷度の蓄積計算

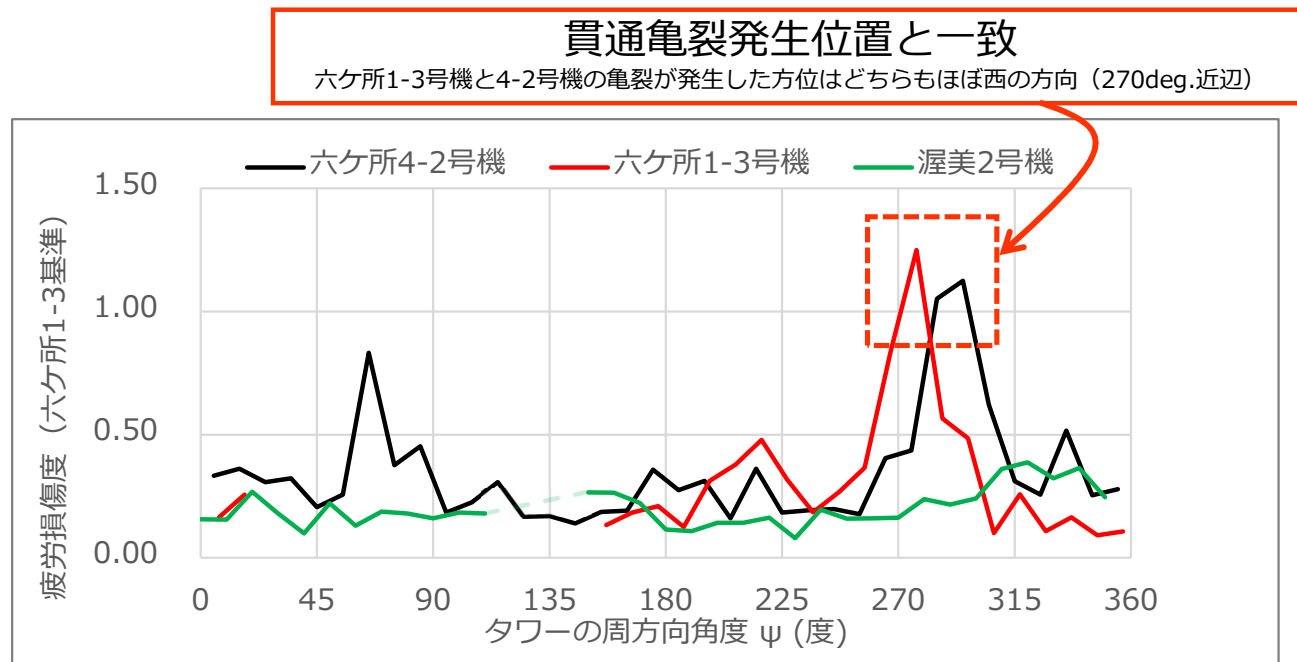
② 食い違い段差の実機調査と評価(補足2/4)

食い違い段差による応力増加の割合を算出し、実風況により算定した疲労損傷度とかけ合わせたグラフを示します。

六ヶ所1-3と4-2号機において、主風向である270deg付近で疲労損傷度が大きくなりました。これは、実際の亀裂発生位置とも一致しており、亀裂の発生原因と考えられます。

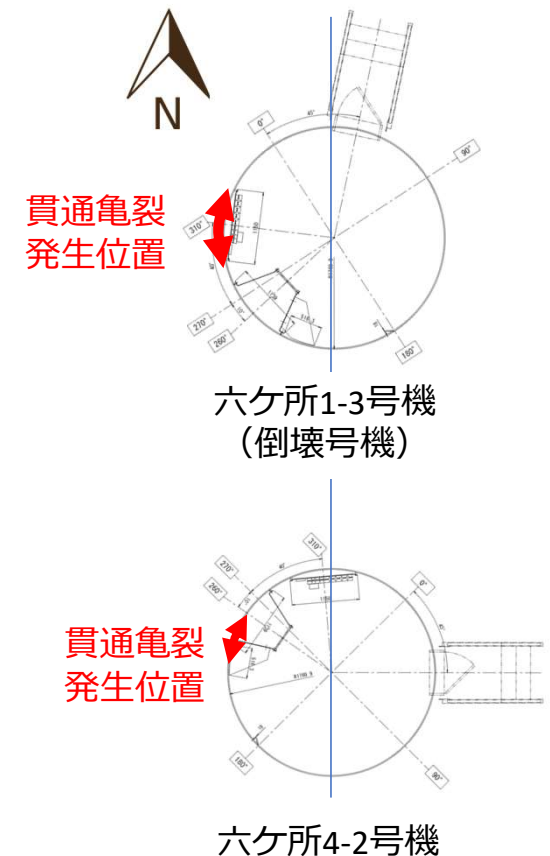
今後、さらに溶接線形状測定を実施し、リスクのある風車がないかを確認します。

風況による疲労損傷度と、食い違い段差による応力増加が複合し、亀裂が発生したと考えられます。これに基づいて、溶接線形状測定を実施する対象は、乱流強度の高いWF(六ヶ所と同様の風況の風車)で、主風向側(の第④節)とし、計測を進めます。



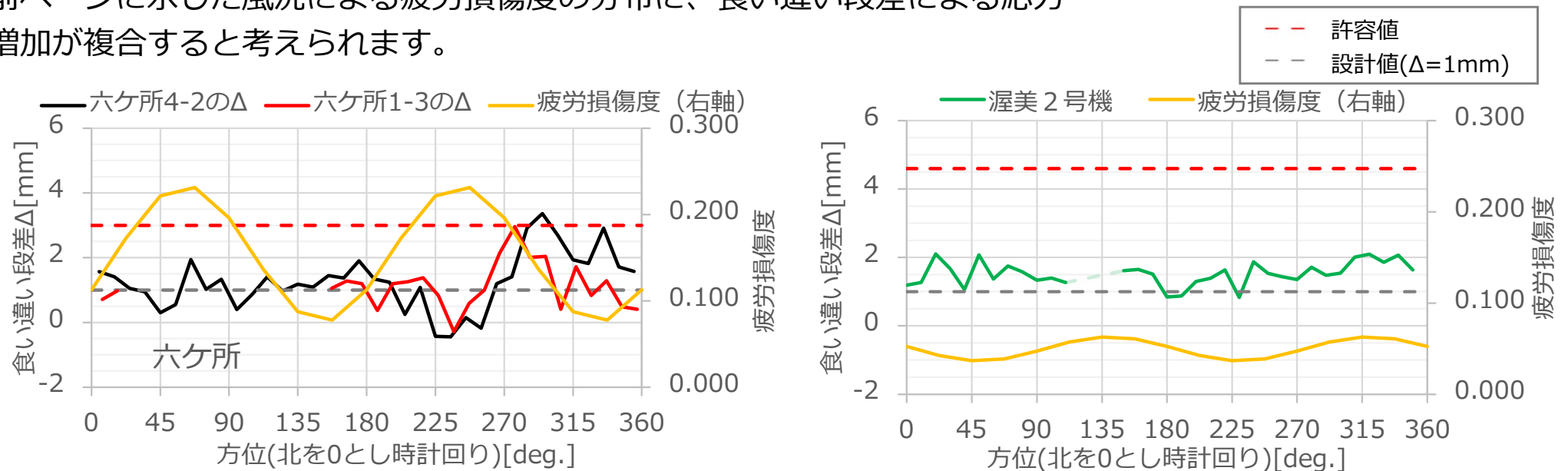
図A-5 食い違い段差と風況履歴の複合による方位ごとの疲労損傷度(20年間)

※六ヶ所1-3号機が16年で亀裂が貫通したとし、その最大点を1.25とし、相対評価した図です。



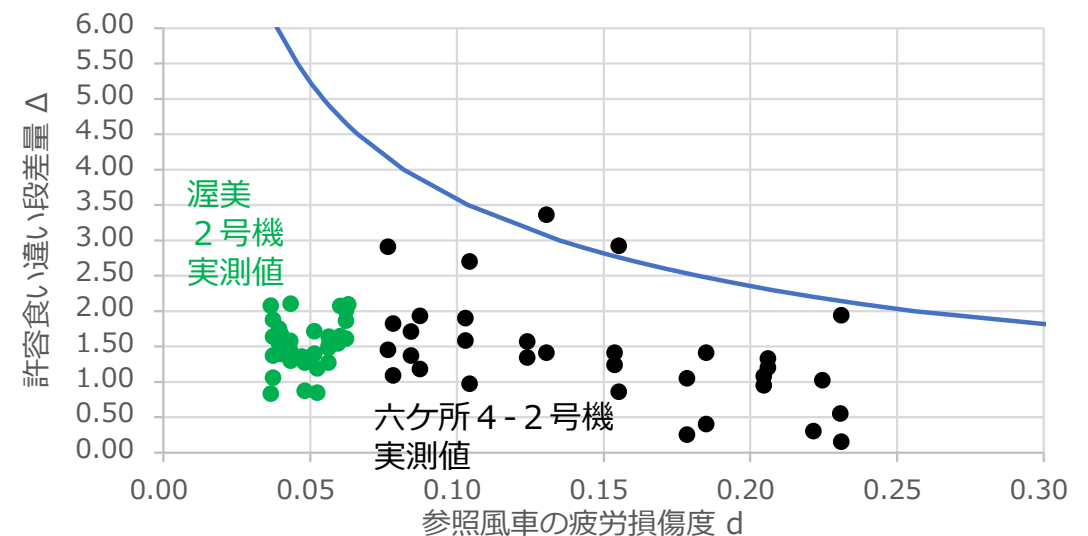
② 食い違い段差の実機調査と評価(補足3/4)

下に、食い違い段差と風況による疲労損傷度を合わせたグラフを示します。
前ページに示した風況による疲労損傷度の分布に、食い違い段差による応力増加が複合すると考えられます。



図A-7 食い違い段差と風況による疲労損傷度

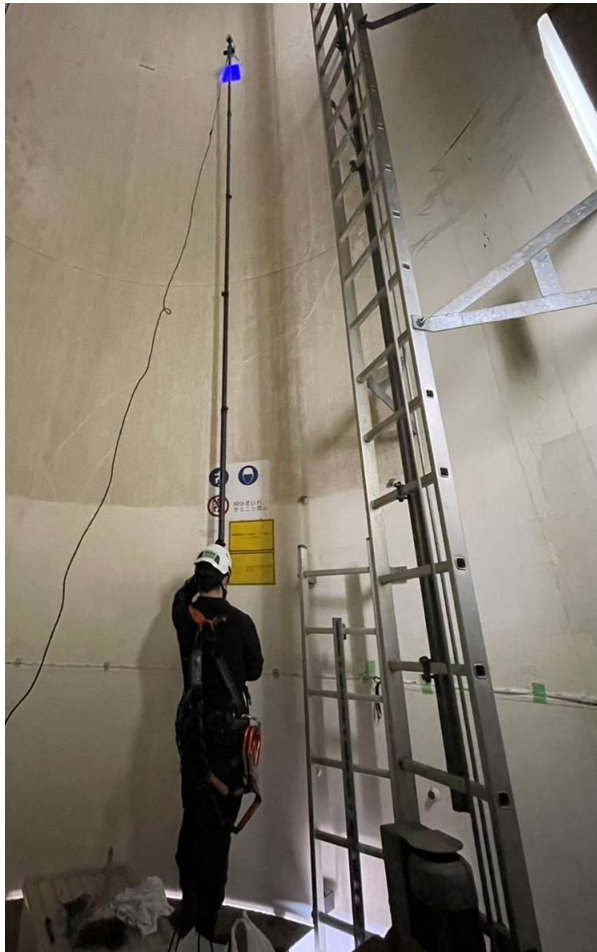
右に、疲労損傷度dに対する許容食い違い段差量Δのグラフに実測値をプロットした図を示します。六ヶ所4-2号機(亀裂発生機)は、許容値を超えた実測値が存在することが確認できます。一方、渥美2号機の実測食い違い段差は許容値より十分に小さいことがわかります。



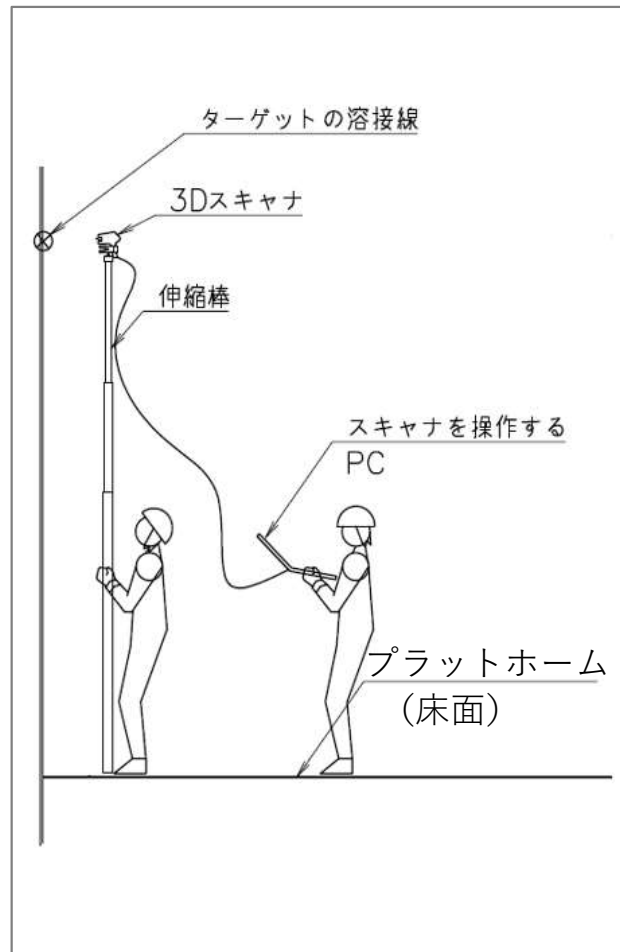
図A-8 疲労損傷度dに対する許容食い違い段差量Δ(実測値をプロット)

② 食い違い段差の実機調査と評価(補足4/4)

食い違い段差の測定は、下図の通り、3次元スキャナーを用いて実施しています。



測定の様子

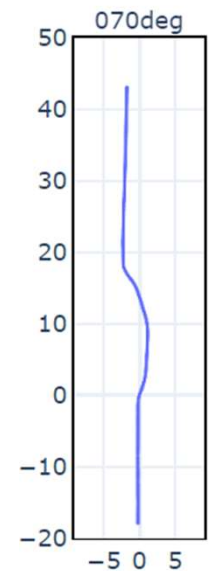
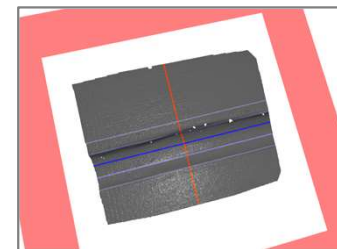
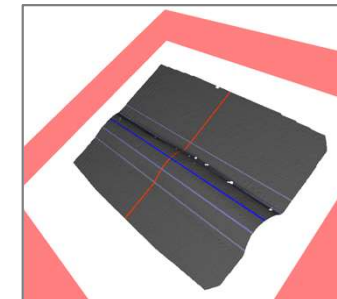


測定法概略図

使用したスキャナ
REVOPOINT MINI



※写真はメーカーページより



測定結果例

図A-9 食い違い段差の測定方法例

③ 食い違い段差等の実試験・検討・調査

[質問] (食い違い段差について)実際の試験をして、定量的に評価、ということだが、**今回どこまで調査したか。**

[回答] 事故発生以降、事故調査委員の御指導の下、同型機への緊急点検・追加点検の実施、JSW製、他社製の溶接線形状の測定、損傷機(#1-3)・亀裂機(#4-2)の亀裂観察、溶接部の疲労試験等を実施してきております(下記工程表)。

表A-3 事故後の調査、試験工程

項目			実施事項		2023年																								2024年																						
			項目	担当	3月		4月		5月		6月		7月		8月		9月		10月		11月		12月		1月		2月		3月		2024年度																				
					13-	20-	27-3-	10-	17-	24-1-	8-	15-	22-	29-5-	12-	19-	26-3-	10-	17-	24-31-	7-	14-	21-	29-4-	11-	18-	25-2-	9-	16-	23-	30-6-	13-	20-	27-4-	11-	18-	25-1-	8-	15-	22-	29-5-	12-	19-	26-4-	11-	18-	25-	4月	5月	6月	7月以降
現地工程			◇調査・撤去	六ヶ所村事業所	★3/17事故発生時状況		見地線白(損傷物撤出)		R4-2他溶接形状等調査		R4-2樹立		●9/25六ヶ所WF運転再開												●2/29六ヶ所WF発電運転停止																										
事故報告・WG等			◇電気設備自然災害等WG ◇報告徴収	電安課	●3/17事故報告		●4/14事故報告(詳細)		●5/26報告徴収		★5/5WG(#1審議)				●10/4 JWO/EESJWG.GE打合 ●10/19 電安課打合 JSW異速対応				●11/29 JSW.GE打合 ★12/4#19WG(#2回答書) ●12/15 電安課打合				●2/14 電安課打合		★#20WG(#3回答書)見込																										
事故調査委員(第三者)活動			◇事故調査委員会 ◇現地調査・試験体確認 ◇報告会	事故調	●3/18委員会KO(第1回) ●3/20委員会(第2回) ●3/21-22現地調査(第3回) ●3/31緊急点検方針(第4回)		●4/20-21破断面観察(第5回) ●5/18WG準備(第6回) ■6/13WG報告会		■8/2調査報告会		●8/23(第7回) ●9/8(第8回)@キグチ ●9/19緊急委員会 ★9/22WG資料提出		JSW異速対応		●10/11社打合報告会				■12/7WG報告会 ■12/12試験方針打合 ■12/27WG方針打合				●第9回委員会予定 ■WG報告会(見込)		★最終報告提出(見込み)																										
委員活動	①	現地・現物調査	#1-3、#4-2亀裂調査 第3節溶接形状調査(他メーカ)	事故調	現地調査		●破断面観察(#1-3) ②メーカ(欧州・M社・N社製)溶接形状調査 ●#4-2亀裂詳細観察(JSW)		●#4-2破断面詳細計測(キグチ)		●9/7-8 #4-2 亀裂部観察(@キグチ)												実稼動・応力調査(二文#19) 高稼働率WF事後線測定																												
	②	原因推定	損傷原因・損傷ストーリー	事故調	原因推定・絞り込み		損傷原因・損傷ストーリーの確認		★亀裂起因確認(起因:食塩腐蝕大)																																										
	③	原因追及(試験・分析)	#1-3、#4-2試験体調査	事故調(キグ)	原因追及(調査・分析)#1-3,#4-2						原因確認(#4-2亀裂詳細調査・測定)												#4-2亀裂実体分析・試験																												
	④	原因説明(解析/検討)	強度解析(損傷の確認) 疲労進展解析 風況影響/損傷ストーリー	事故調	原因追及(強度解析)				全口溶接部再検査(※注記参照)		実風況が疲裂被害度とばす影響																																								
	⑤	対策の検討	再発防止対策 水平展開の検討	事故調	再発防止対策・水平展開の検討				亀裂進展速度検討(疲労進展計算)		風車タワーの破断・倒壊メカニズムの分析																																								
再発防止・水平展開	①	亀裂損傷早期発見(定期点検の改定)	◇緊急点検 ◇追加点検 ◇なぜなぜ分析 ◇定期点検見直し ◇バックサイト機能確立 ◇定期点検品質検査	北村 佐伯	現状調査・緊急点検		追加点検・調査		▼品質管理体制変更(定期点検品質検査) バックサイト機能確立												再発防止策本格適用(定期点検時の360°カメラによる内面全溶接線確認他)																														
	②	亀裂損傷判定クライテリア設定	◇溶接線形状調査 ◇実応力調査 ◇製造品質調査 ◇応力集中要因調査 ◇成分・強度試験(疲労試験) ◇強度解析・疲労進展解析 ◇余寿命評価	中野 竹内	溶接線形状調査・製造品質調査		応力集中影響検討・解析		金属調査・強度試験(疲労試験)		余寿命評価		疲労進展解析(時間軸裏付)		実稼動・応力調査(二文#19) 高稼働率WFの溶接線形状測定																																				
	③	振動エラーログ利用による予防保全	◇SnupShotデータ分析 ◇実振動調査 ◇データ調査GUI検討	橋口 山本	SCADA等データ確認・分析		振動データ分析		データ調査GUI検討・作成		亀裂クライテリアの設定		再発防止策(亀裂クライテリア本格適用・亀裂機は運転しない)										実振動データ確認																												
							予防保全フロー検討・実行						再発防止策本格適用(振動エラーログ利用)																																						

③食い違い段差等の実試験・検討・調査

[回答]溶接線形状測定調査スケジュール

- ①リスクのあるWF・風車の抽出：2024年5月迄を目途に実施
- ②同上のWF・風車における溶接線形状の測定および製品寿命判断 2024年7月迄を目途に実施

	4月				5月					6月				7月			
	1週	2週	3週	4週	1週	2週	3週	4週	5週	1週	2週	3週	4週	1週	2週	3週	4週
リスクのあるWF・風車の抽出	風況収集・分析				クライテリア決定 測定対象 風車決定												
溶接線形状の測定および製品寿命判断						リスクのあるWFの号機の溶接線測定											
											他事業者のWF溶接線測定※				※依頼があれば実施		
								測定結果の分析									
												測定結果報告（電安課）			★	評価・ 処置判定	

④ 風車タワー基準の見直要否

[質問] 風車のようなものポール型の建築物は煙突等に比べて冗長性が低く、1か所の損傷が倒壊につながる。このような建設物の安全性の基準について見直す必要があるか。

[回答] 最新GLでは、冗長性の規定があり、安全率が設定されています。GL 2010 Table 5.3.1で、冗長性が低い部品に対しては、安全率を1.15あるいは1.25(応力値)。寿命換算で、 $1.15^3 = 1.52$ あるいは $1.25^3 = 1.95$ の安全率を有します。また、設計疲労被害度Dは $D < 0.5$ と規定されています。六ヶ所村タワーの設計時(GL1999) には、部分安全率は1.1、 $D < 1$ であったとのこと。

尚、今回の事象は、設計起因ではなく、製造品質起因でした。現在では、第三者認証制度の型式認証・プロジェクト認証により、製造評価・製造監督が実施されることで、製造品質は担保されていると考えます。

Table 5.3.1 Partial safety factor γ_M for fatigue verification

Inspection and accessibility	Component failure results in destruction of wind turbine or endangers people	Component failure results in wind turbine failure or consequential damage	Component failure results in interruption of operation
Periodic monitoring and maintenance; good accessibility	1.15	1.0	1.0
Periodic monitoring and maintenance; poor accessibility	1.25	1.15	1.0

(2) When working out a damage accumulation, all stress ranges $\Delta\sigma_i$ due to operational loads in accordance with Chapter 4 shall, as a matter of principle, be used in conjunction with their associated stress cycle numbers n_i . The damage sum D from the fatigue strength calculation is dependent on the material, type of loading and structural geometry. The damage sum may not exceed the following values:

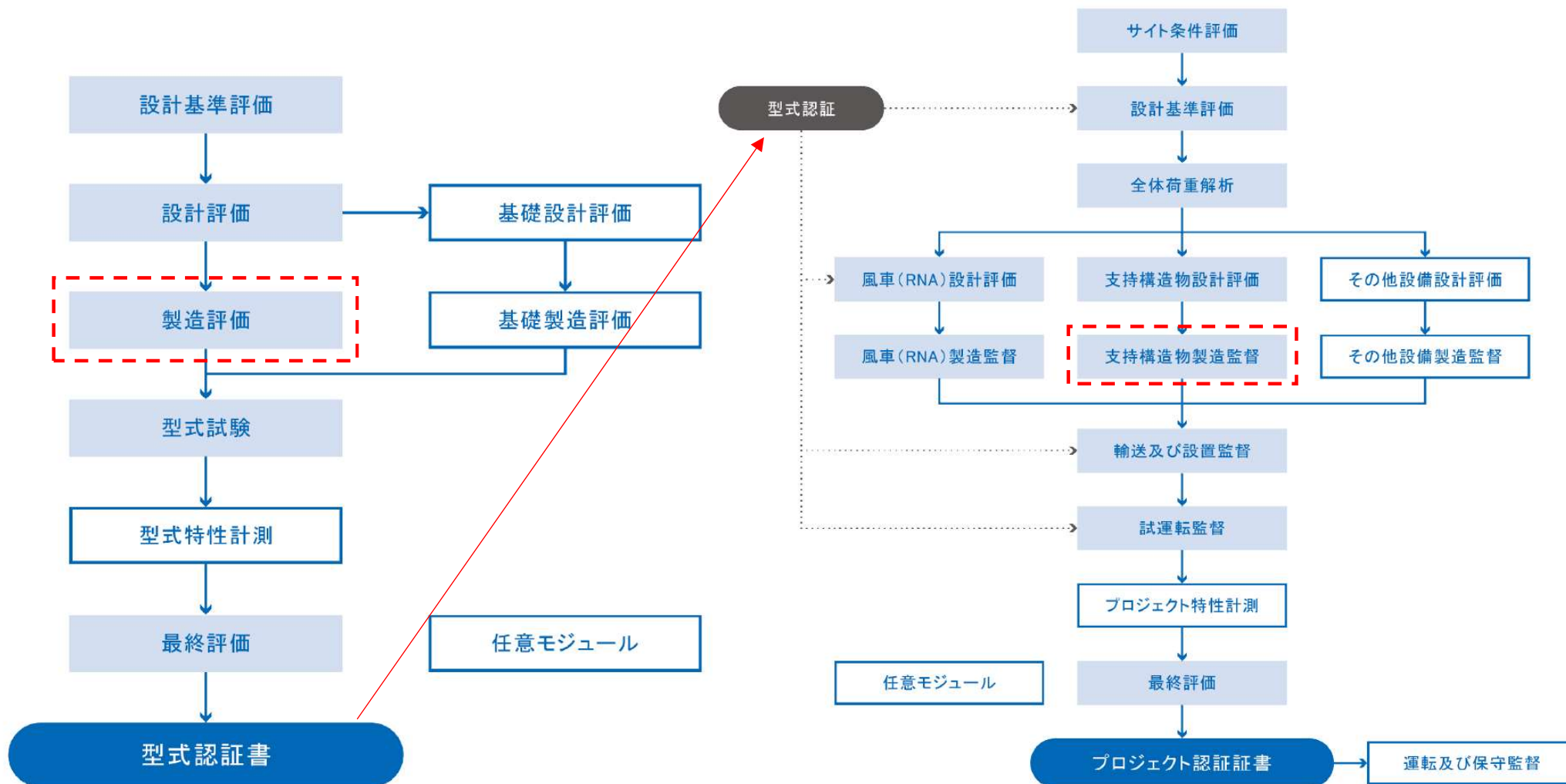
$$D \leq 1$$

In case of welded machinery components that are subjected to variable amplitude loading, the damage sum may not exceed

$$D \leq 0.5$$

GL2010 Guideline for the Certification of Wind Turbines Chapter 5.3 Metallic Materials より抜粋

図A-10 GL2010 安全率及び疲労被害度規定



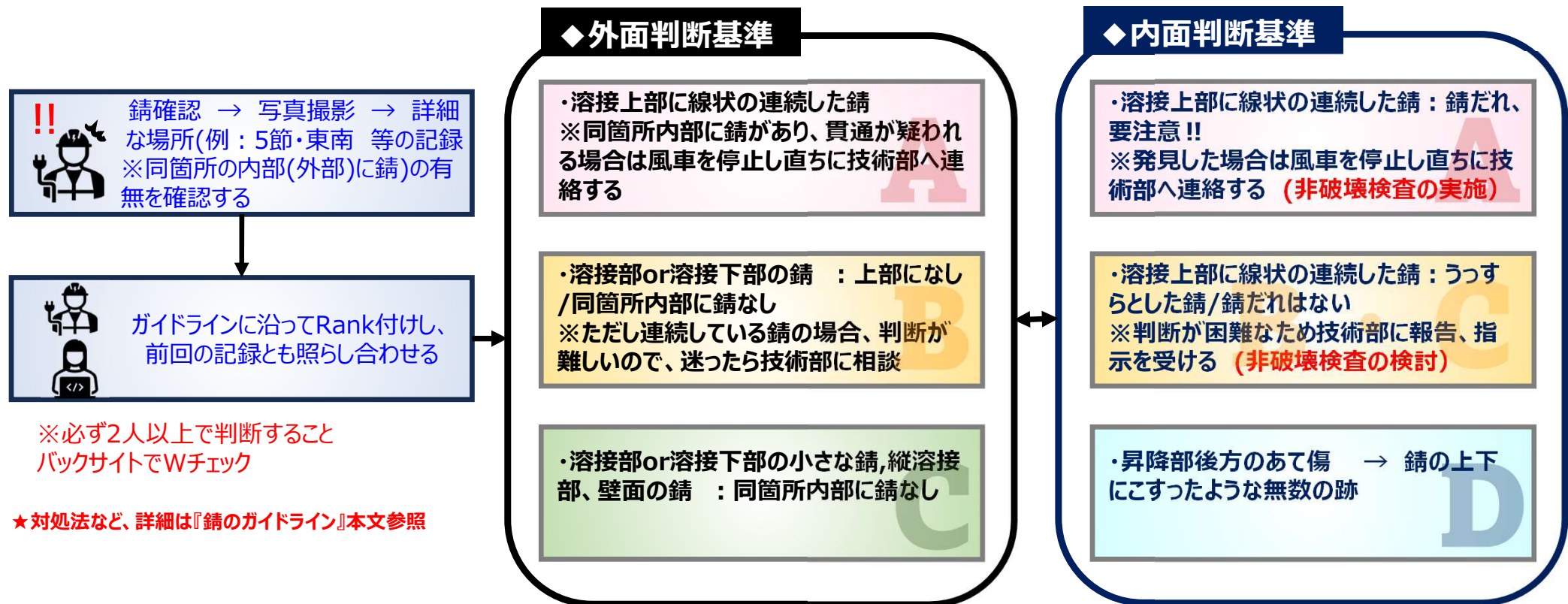
Class NK GUIDLINE NKRE-GL-WT01 Edition : October 2021より抜粋

図A-11 型式認証およびプロジェクト認証制度

① タワー検査の内容

[質問] タワー検査について、これは画像ベース、基本的に目視ベースなのか。タワーの表面、内側の表面亀裂について、問題なのは、亀裂がどれくらい進展しているのか、というのが重要。深刻度についてどのように定量的評価するのか。

[回答] 点検は、「錆のガイドライン」に沿って目視と写真管理で定期検査時に実施します。そこで問題(内部溶接線上部塗装割れ・発錆)がある場合は、**非破壊(UT検査)を実施**していくことになります。鋼板に亀裂が見つかった風車については、運転停止します。「錆のガイドライン」に点検処理を明示するために作業フロー図を追加しました。



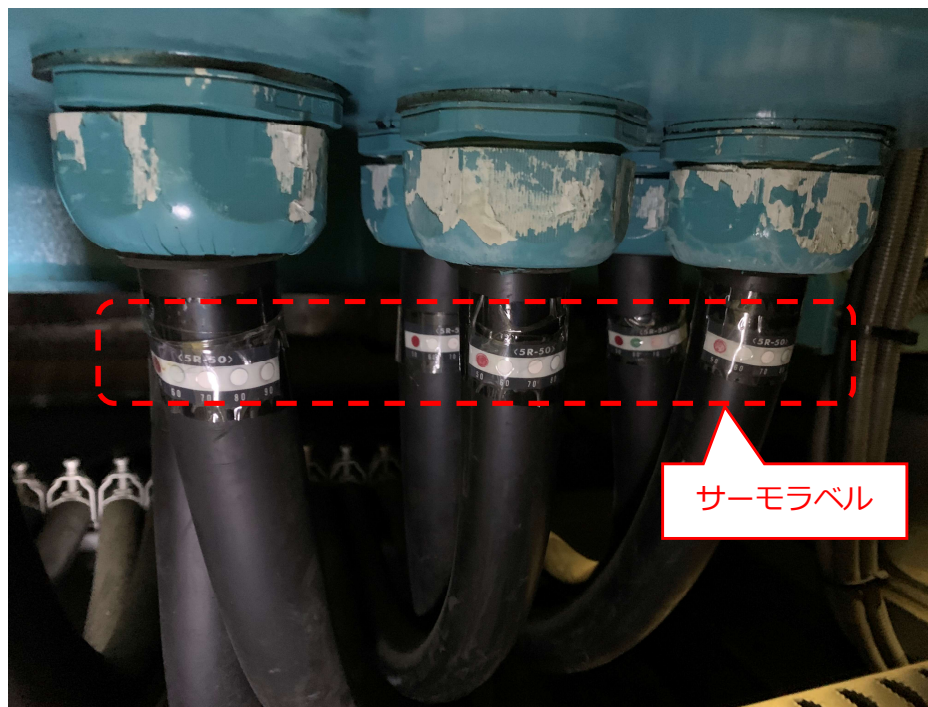
図B-1 「錆のガイドライン」作業フロー図

②錆のガイドライン

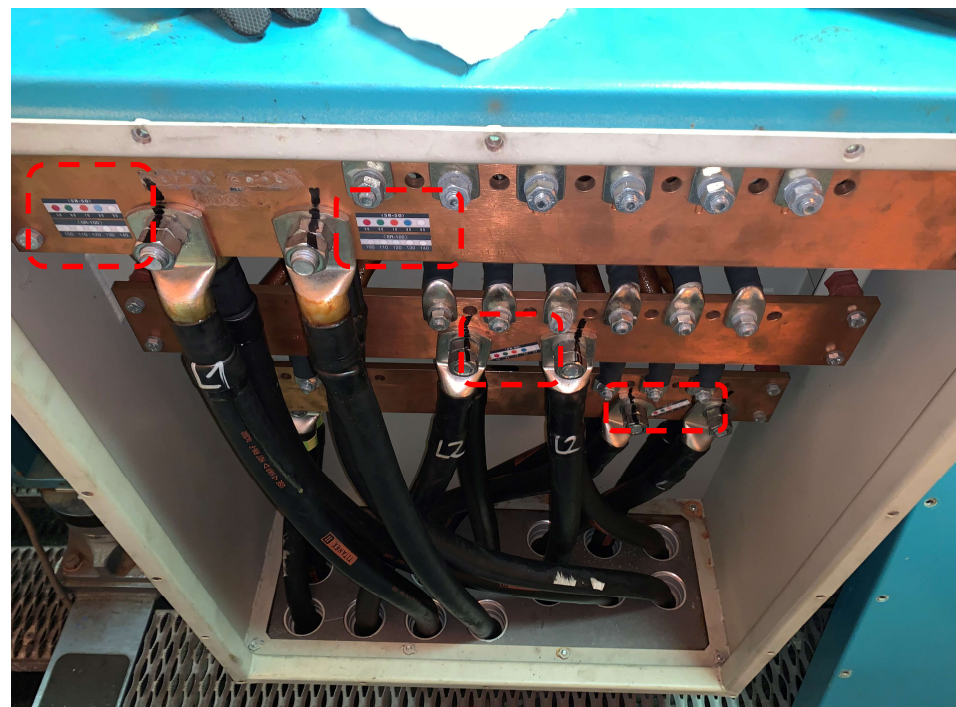
[質問] ガイドラインで目視点検を充実とのことだが、ガイドラインの作成にあたり外部専門家の意見を踏まえて作成したのか？

[回答] 本ガイドラインは、GE1.5s機 向JSW製タワーにおける工場溶接部亀裂発生の予兆現象である内面錆、さらにその予兆を万が一見逃し、亀裂が貫通に至った場合に発生する外面錆を見逃さないためのもので、目的・用途が限定的であるため、今回の事故に関わって頂いた**事故調査委員の委員(第三者委員)**に確認いただいております。

尚、今回のガイドラインは上述の通り、限定的ですが、目視点検で実施している他の項目にも応用できるものと考えており、今後、同様な**目視点検を補助するガイドライン**や**目視点検の定量化**を図っていきます。



発電機ケーブル取込口



発電機ケーブル接続部

図B-2 目視点検の定量化例（ケーブル損傷のサーモラベルによる確認）

① 心理的安全性事例紹介

[質問] 心理的安全性、対策についてはよいと思う。ヒアリング等で心理的安全性がなかったと判断した事例を紹介してほしい。

[回答] ヒアリングから抽出した心理的安全性に関わる事例とその対策について紹介します。

【該当事例】

- ・ 個人の判断で不具合と決める事が出来なかったが、**仕事を増やす事になるので相談できなかった**
- ・ **不具合は自他ともに仕事が増える、厄介事**と捉えてしまい、異常を見つけても報告出来なかった
- ・ 不具合を**発見した人が修繕(処置)まで行うという風潮**があった
- ・ **点検時間の短縮を強いられている**と感じていた

表C-1 原因分析・対策（点検での現象見落）

内容	なぜ1	なぜ2	なぜ3	問題点	再発防止対策
長期間タワー外面溶接線に発錆・クラックがあった(はず)のに問題視しなかった。	個人の判断で損傷と決めることができなかった	仕事を増やすことになるので相談できなかった	共有意識が低い	個人の意識	発見者と不具合対応者を分ける
	異常を見つけても報告し辛い風潮があった。	自他ともに仕事が増える、厄介事と捉えてしまう。	まあいいかと、見て見ぬふりを許す風土	組織の風土	心理的安全性に関する外部講習受講
	仕事を増やすことになるので相談できなかった	不具合を発見した人が修繕まで行う風潮があった	人員不足による業務の過多	組織の風土	新機材による業務効率化 バックサイトの協力 発見・報告のリスト管理 ホワイトボードの共有
タワー緊急点検だけでなく点検に対する意識が低い	点検に関わる時間が他よりも短い(1日の)	点検時間の短縮を強いられていると感じていた	過去からの悪風習を引きずっている 伝え方・伝わり方に齟齬があった	個人の意識	点検時間を定める 点検に対するマインド再教育

項目		実施事項	2023年						2024年							
		項目	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月以降	
類似事故 予防 保全 策	A	組織の仕組み	品証部門の強化・連携 リソース管理/バックアップ 教育規程/技能段階への反映 マニュアル整備													
			7/1 新品証体制発足 定期点検レビュー・立ち合い													
			360° カメラの報告書まとめのバックアップ 定期点検記録のバックアップシステム（点検アプリ）													
			教育規程反映 経年数に応じた点検+α													
	B	組織の風土	新技術開発の促進(問題発見) EES品質方針の周知徹底 心理的安全性の向上													
			360° カメラ導入による作業・データ管理効率化													
			現場パトロール・品質に関するアナウンスを定期的 to 実施													
			心理的安全性 社外講師による講習(9/26)・社内展開													
			品質管理教育													
			品質管理教育 社外講師による講習（2/13-2/22）・社内展開													
	C	個人の管理	改訂版チェックシートの運用 TBMの実施 トラブル事例教育													
			★改訂版チェックシートの運用													
			チェックシートの改良検討・改訂													
			改訂チェックシー運用開始													
			朝礼見直、着手作業の過去事例共有													
			トラブル事例教育(持回り、全員が講師)													
	D	個人の意識	事業所間ローテーション コミュニケーション向上対策 作業目的の理解 改善提案活動													
			7/1 ローテーション実施													
			来期事業所間応援・ローテーションの計画													
			リーダー会議再開、点検前打合全社化													
			作業目的の理解													
			資格（等級）・役職制度の見直し（社内説明）													
			資格（等級）・役職制度改定													

② 心理的安全性(集団心理) (2/4) EESとしての取り組み

[回答] EES会社としては、当該事故についての反省および事故再発防止に関するトップによるコミットメントを2023年10月に実施しました。現在、2024年度の会社方針・部門方針を策定中ですが、その第一項に「1. 人の安全、風車の安全を第一」を掲げ、全社、全部門の重点管理目標にブレークダウン中です。

宣 言 書

公衆災害に波及する重大事故を未然に防止するため以下に取り組みます。

1. 停止をためらわない(安全第一)

2. 組織・風土・仕組みの改善

3. 心理的安全性の向上

4. 異常の早期発見

5. 予防保全策の改善

2023年10月1日

EES 代表取締役 須藤 豊

BP 代表取締役 須藤 豊

2024年度社方針		
1. 人の安全、風車の安全を第一		
2.		
OM本部		
(0)	人の安全・風車の安全が育まれる風土:心理的安全性が確立された職場づくり	①[人の安全] 心理的安全性をベースとした真の安全確立(危険と感じた時はやめる・やめさせる)
		②[風車の安全] 日々の活動(定期点検・監視)の重要性認識、+αの感性・気づき・行動
(1)		

図C-2 EES会社としての取り組み

② 心理的安全性(集団心理) (3/4) JWDグループとしての取り組み

【回答】 2023年9月にJWD前社長が贈賄の事実で起訴されたことに関して、10月に経産省より指導を受け、事実関係の調査、当社のガバナンスや内部統制の検証を含む発生原因の分析及び再発防止策の提言を目的として、特別調査委員会を設置しました。この調査と並行して、JWDグループとして主体的に以下の施策を検討・実施しています。また、これ等の取り組みについては、インフロニアグループの一員として既に実施していますが、引続きインフロニアHDの監督の下で強化を図って参ります。

表C-3 再発防止策実施事項・時期

	実施事項	実施時期
1	教育・研修等による役職員のコンプライアンス意識の向上 ・「JWDグループ行動規範」の制定、専門家による研修 等	・JWDグループ行動規範の制定（24/3～） ・コンプライアンス研修（24/2）
2	社内規程・組織体制の整備 ・決裁基準や意思決定プロセスの再整理 等	・整備検討中
3	内部監査部門の立ち上げ及び定期的な内部監査の実施	・内部監査部の設立（24/3～）
4	取締役会・監査役会の機能向上等による内部統制の強化	・強化検討中
5	法務・コンプライアンス部門の立ち上げ	・法務部の設立（24/4～）
6	内部通報制度の拡充・活性化	・内部通報窓口の設置（24/2～）
7	懲罰規程の強化	・就業規則の改定（24/3～）

② 心理的安全性(集団心理) (4/4) JWDグループとしての取り組み



図C-3 例:「JWDグループ行動規範」の制定('24.3月～)

社内の誰かに話しにくい場合や、匿名での通報が可能で安心して報告ができる第三者機関が運営する内部通報窓口を設置しました。不正の通報の他、ハラスメントやメンタルヘルスの相談、改善提案にも幅広く対応しています。



図C-4 例:JWDグループの内部通報窓口の設置('24.2月～)

① 誠実・公正な事業活動へのコミットメント

法令や社内規程を遵守します

積極的に競争する一方で公平であり続けます

インサイダー情報を悪用しません

贈収賄や汚職に関する行為を行いません

贈答・接待の授受は責任をもって適切にします

利益相反を管理します

ビジネスパートナーを慎重に選びます

② 透明性・堅牢性へのコミットメント

正確な財務報告および社内記録を維持します

会社の資産を守ります

知的財産を守り尊重します

非公開情報・機密情報・プライバシーを守ります

情報セキュリティを徹底します

責任をもってコミュニケーションを図ります

③ 社会・環境・安全へのコミットメント

地域の経済・文化・教育への発展に貢献するよう行動します

地球に配慮します

人権を尊重します

ハラスメントのない健全な職場環境の維持に取り組みます

安全衛生活動を推進します

③ 報告の体制 EES内(1/2)

[質問] 報告をどのように上げて、だれが判断するのが重要。目視点検を複数名で実施するなど、フローチャートがないと、確実にあがって、それに対して次にどういうアクションを行うか、という判断をするには、コミュニケーションだけでは不足では。

[回答]

業務報告は、作業体制と会社組織に沿って進めています。各事業所の判断(承認)は、事業所長が行います。報告は技術部が内容を精査の上、技術部長が最終判断(承認)を行います。尚、点検は複数名で実施しており、さらに今回事象(溶接線確認)については、別部門で写真管理を実施しその段階でも確認を行います。

尚、報告の過程において、事業所の判断が難しい場合(未知見事項)は、事業所から技術部に問い合わせを行います。技術部は、問合せ内容を検討し、判断・指示・助言を事業所に出します。

今回の事故を踏まえ、事業所と本社に品質担当を新たに設け、体制の強化を図りました(「報告プロセス」の赤枠で囲んだ箇所が新たに設けた体制)。各事業所・OM本部・安全衛生品質管理部の品質担当者がトライアングル状の連携体制をとっています。

品質担当の活動

■品質パトロール

本社 品質担当と事業所 品質担当が共同で作業現場のパトロールを実施。

(第1回目)2023/8～11 六ヶ所村、肥前、大山、珠洲、渥美

(第2回目)2024/1～2 肥前、大山、六ヶ所村

■課題への取り組み

各品質担当者が持っている問題、課題を集約し、次の品質活動に繋がるよう活動中。

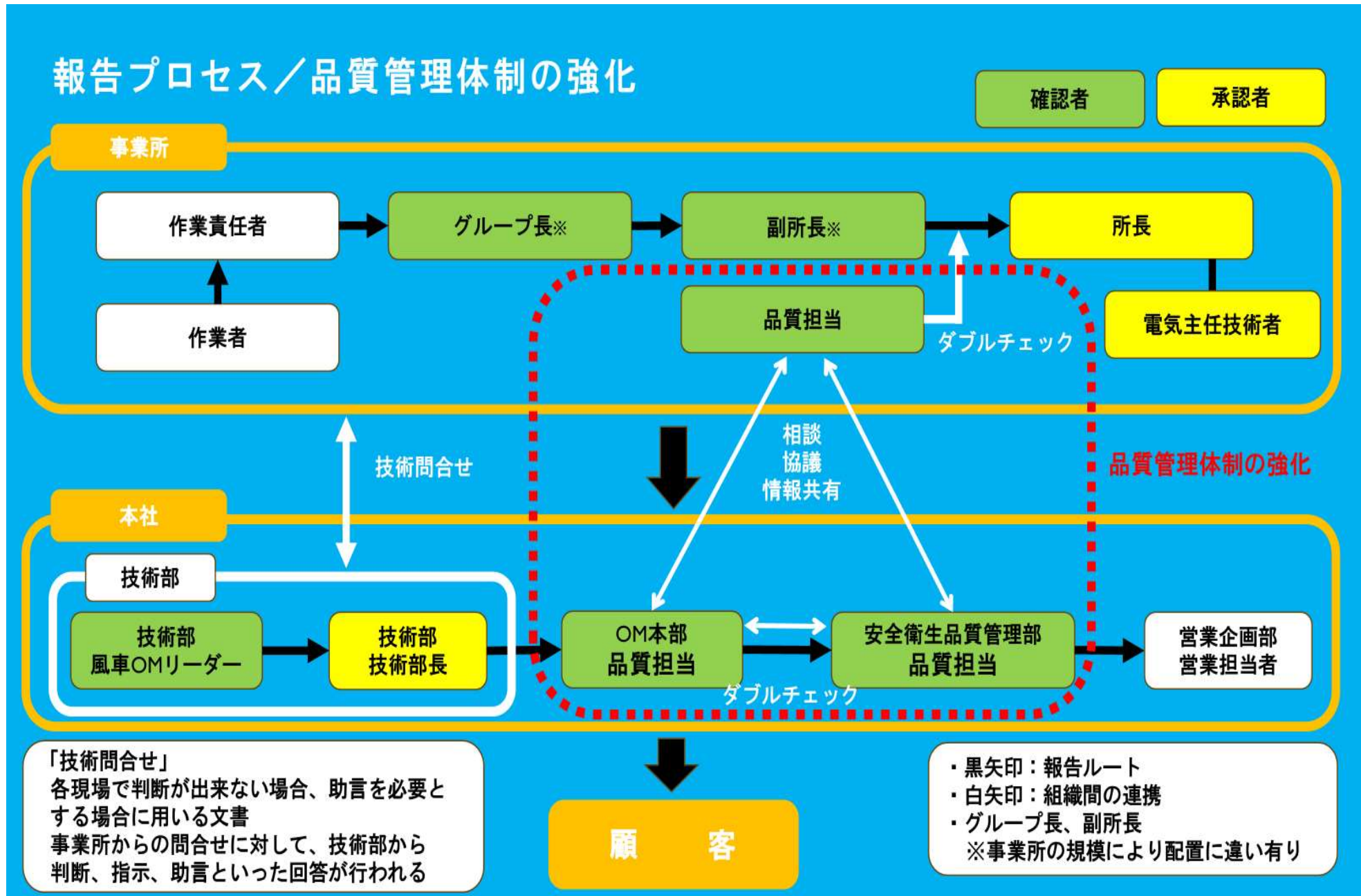
- ・品質教育 (対象)品質担当者 (期間)2/14～16、2/20～22 (講師)社外講師

(テーマ)品質管理技法、5Sによるムダ取り・改善の進め方

- ・品質教育のフォローアップ 品質教育で気付いた品質に関わる職場の問題や課題の抽出。

各担当者への情報共有と今後の取り組みに向けた意見出し。

③ 報告の体制 EES内(2/2)



図C-5 報告プロセス/品質管理体制の強化

④ リスクマネジメント

[質問] 最終的に事故が起きてしまった根本的な問題までたどり着いているのか。最終的に亀裂が入っていることが事故につながることを予測されていなかった。

1. 亀裂に気づいていなかった？/モニタリングをやりましょう(対策に効果あり)
2. 気づいていたが、問題があるとも思っていたが、言えなかった/心理的安全性の講義が効果あり
3. 亀裂に気づいていたが、問題ないだろうと思い込んでいた/対策はあるか？重要性を理解できない状況について。**このケースの場合は、実施されている対策では対処出来ていない。どういう対応が必要か教えてほしい。**

[回答] 今回の件は、亀裂を見落としていたというより、**錆が危険なものと思わず、錆の経年変化に注意を払っていなかったことが大きな原因**と考えています(錆については、質問事項3に該当)。亀裂を確認した段階で問題だと認識していなかったということではありません。亀裂があれば問題視して報告がなされたと判断しています(亀裂については、質問事項1に該当し、対策として定期点検時の全線確認+写真管理実施)。

質問の3について、亀裂を錆に置き換えて下記の通り対応について回答いたします。

今回の問題点は、錆があつてその下に亀裂があることを確認(認識)できていなかった、錆はゆっくりと経年的に変化していくものであったため危険視していなかったことが大きな問題と考えました。

対策は、亀裂については、定期点検による全溶接線確認・記録、**錆については、誰もが錆の重要性を認識できるガイドラインを定めて、錆の状況から、さらに調査を実施すべきかの判断**をしていきます。調査については非破壊検査を含めた検査を実施します。

六ヶ所村風力発電所 1-3号機 タワー破損事故について

了