

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

2023年6月5日

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) 事故発生時の気象状況・風況
- (2) 事故発生時の風車の運転状況
- (3) タワーの損傷状況

3. 風車タワー設計・製造の概要

4. 事故原因の究明

- (1) 事故原因の究明方針
- (2) 破断部の調査
 - a. 1-3号機の破断面の調査
 - b. 4-2号機の亀裂の調査
 - c. その他同型機の調査(緊急点検)
 - d. 亀裂進展ストーリー推定
- (3) 過去の履歴調査
- (4) 強度検討/解析・疲労進展解析
 - a. 応力集中部の検討

- b. 倒壊事象の強度解析
- c. 疲労進展解析
- (5) 過去の点検の確認
- (6) 事故原因のまとめ
 - a. 推定される事故原因
 - b. 今後の調査・試験・解析方針

5. 再発防止対策と今後の対応

- (1) 緊急点検
- (2) 再発防止策
 - a. 亀裂損傷の早期発見(定期点検見直し)
 - b. 亀裂損傷の判定、クライテリアの設定
 - c. SCADAデータ利用による予防保全
- (3) 実施項目および今後の予定

[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

(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鮫字二又地区

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. 事業及び事故概要

(1)事業の概要：六ヶ所村風力発電所 1-3号機位置図

事故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。

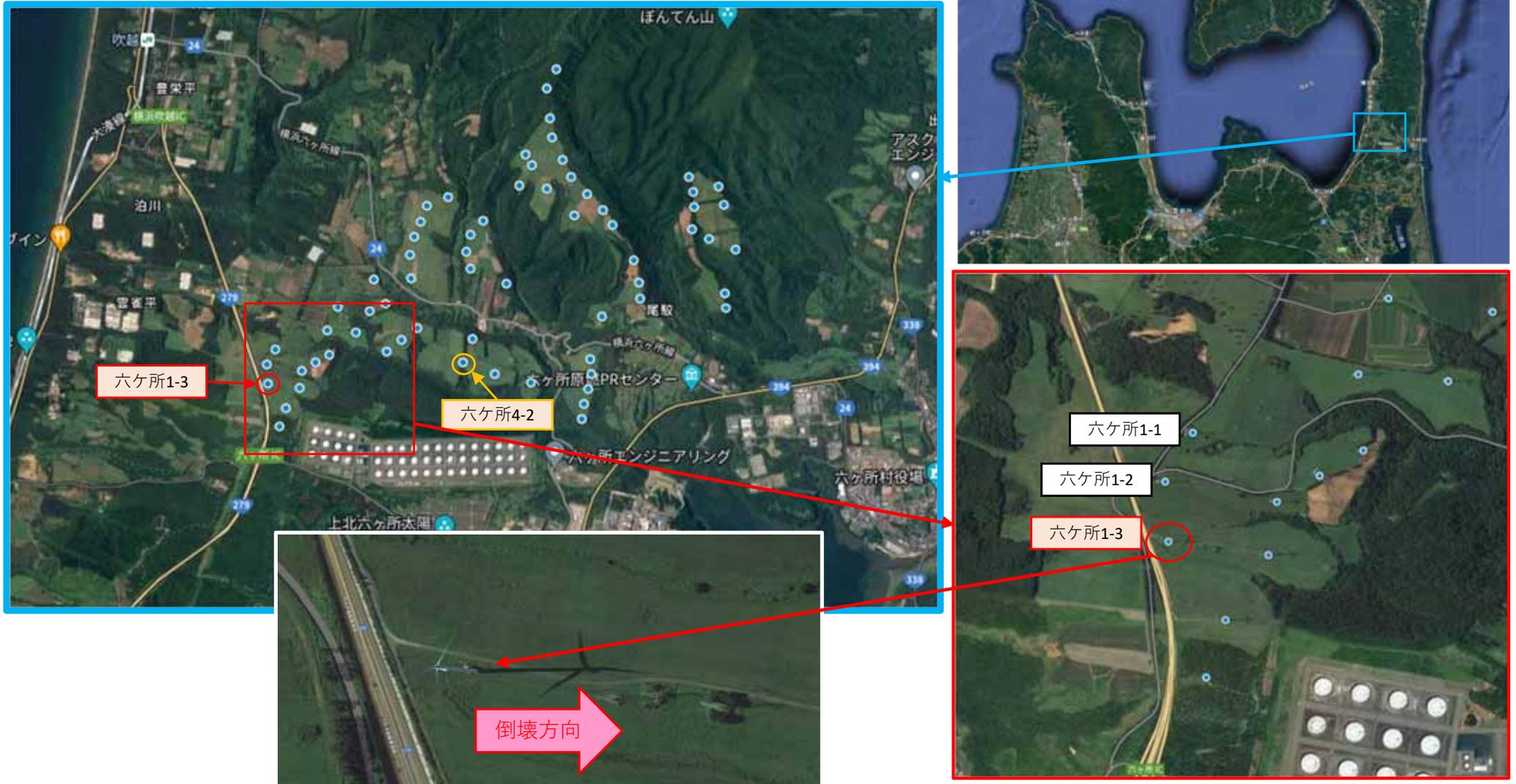


図1-1. 六ヶ所村風力発電所 1-3号機位置図

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。

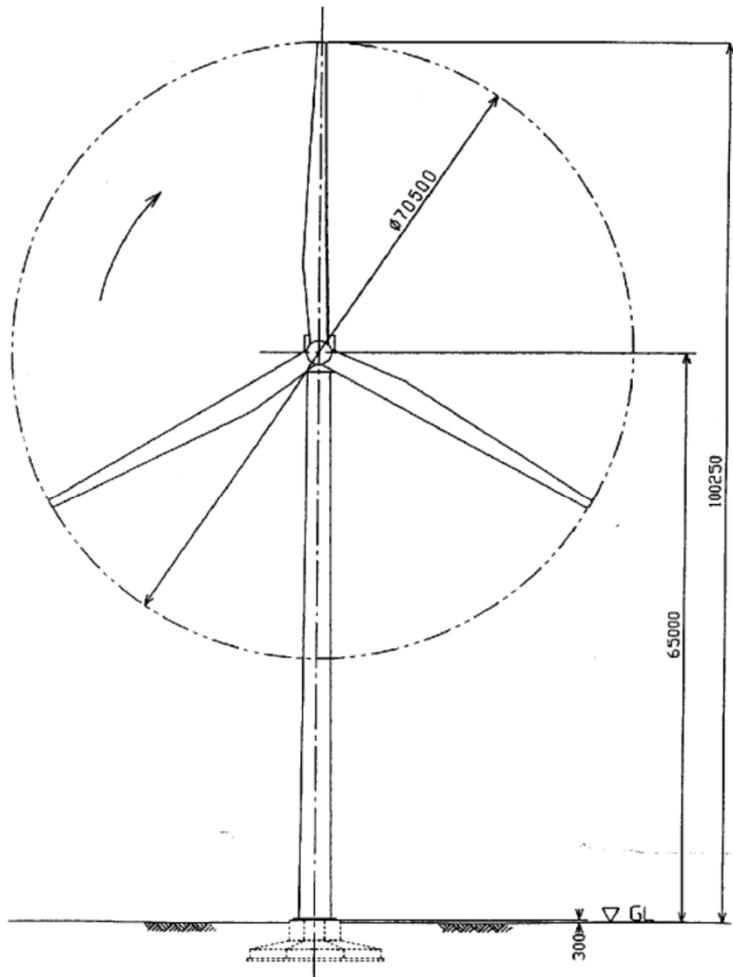


図1-2. 風力発電設備外形

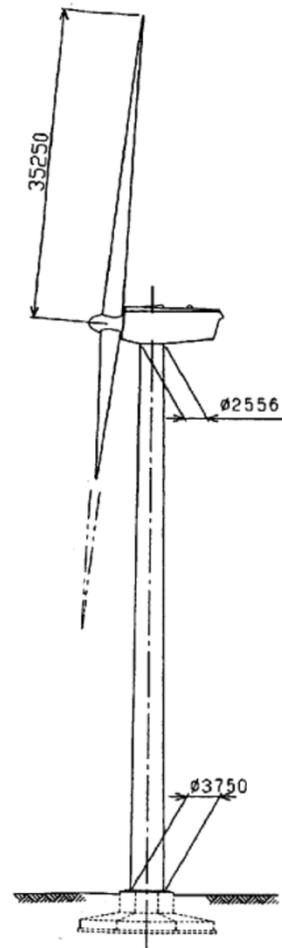


図1-3. 規格認証状況

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

1. 事業及び事故概要

(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ました。

事故確認後に六ヶ所村風力発電所 全機保安停止させ、現時点(6月5日現在)も停止中です。

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. 事業及び事故概要

(2)事故の概要：タワー損傷位置図(詳細)と損傷写真(下側)

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

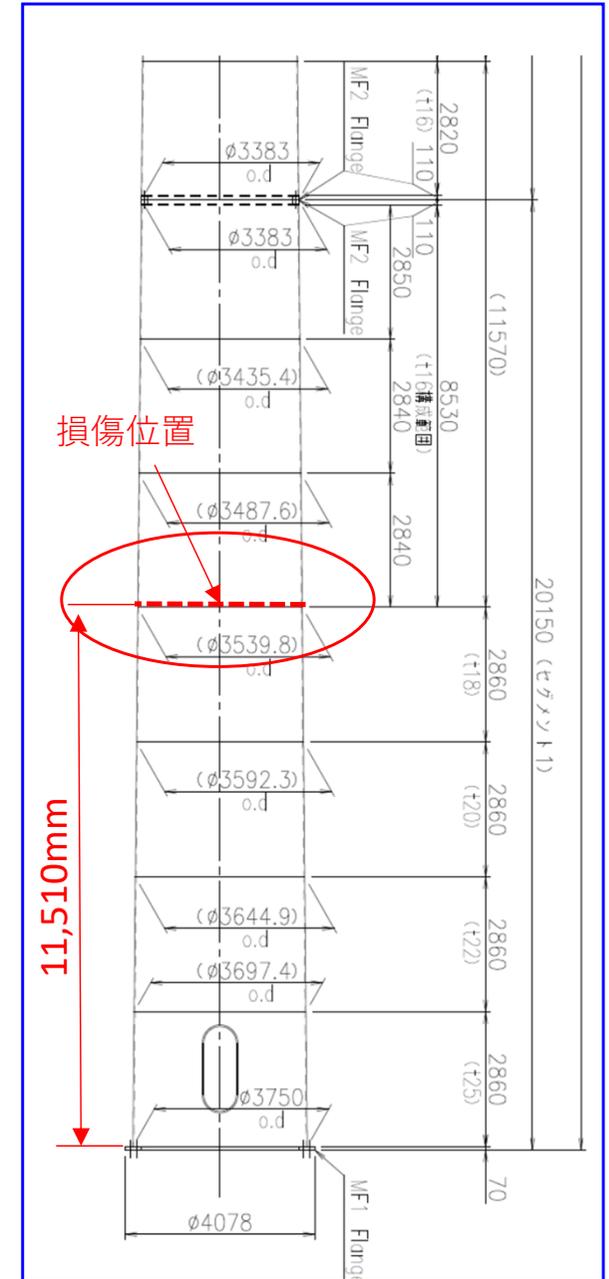
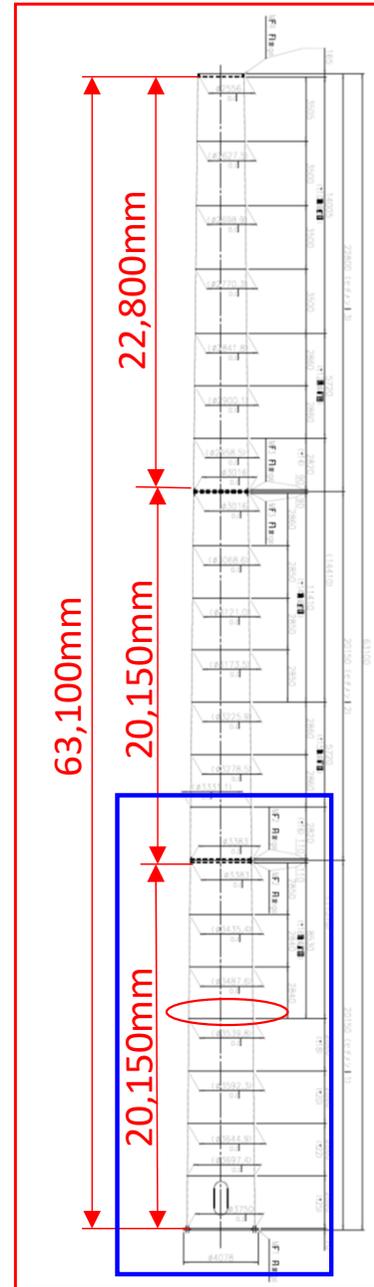
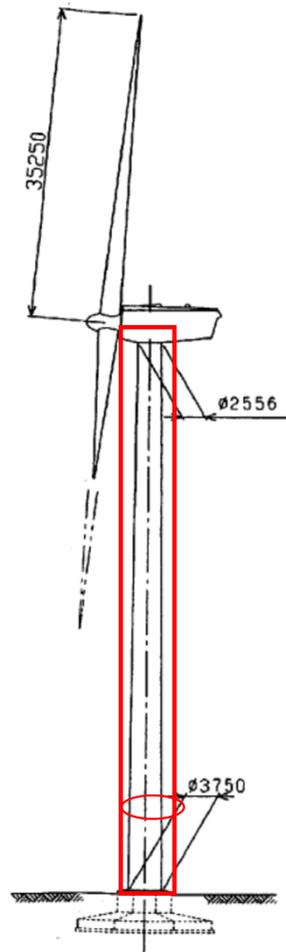
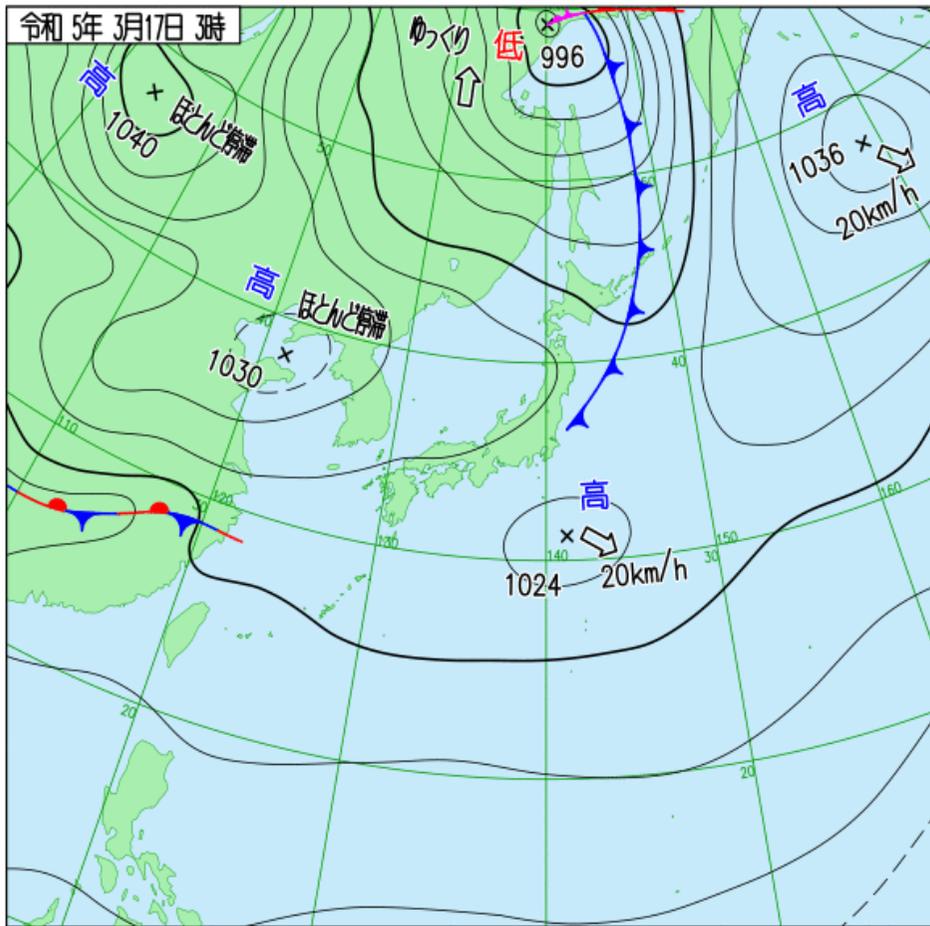


図1-5. タワー損傷位置図

(1) 事故発生時の気象状況・風況

事故発生した当時の気象状況は下図の通りで、西風約8~12m程度の風速とみられています。事故発生時における雷・突風・地震等の情報はありません。



2023年3月17日AM3時 天気図(気象庁HP)



2023年3月17日AM0時 風況(Windyより)

図2-1. 事故発生時の気象状況・風況

(2) 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。倒壊事故前にエラーの発生はありません。

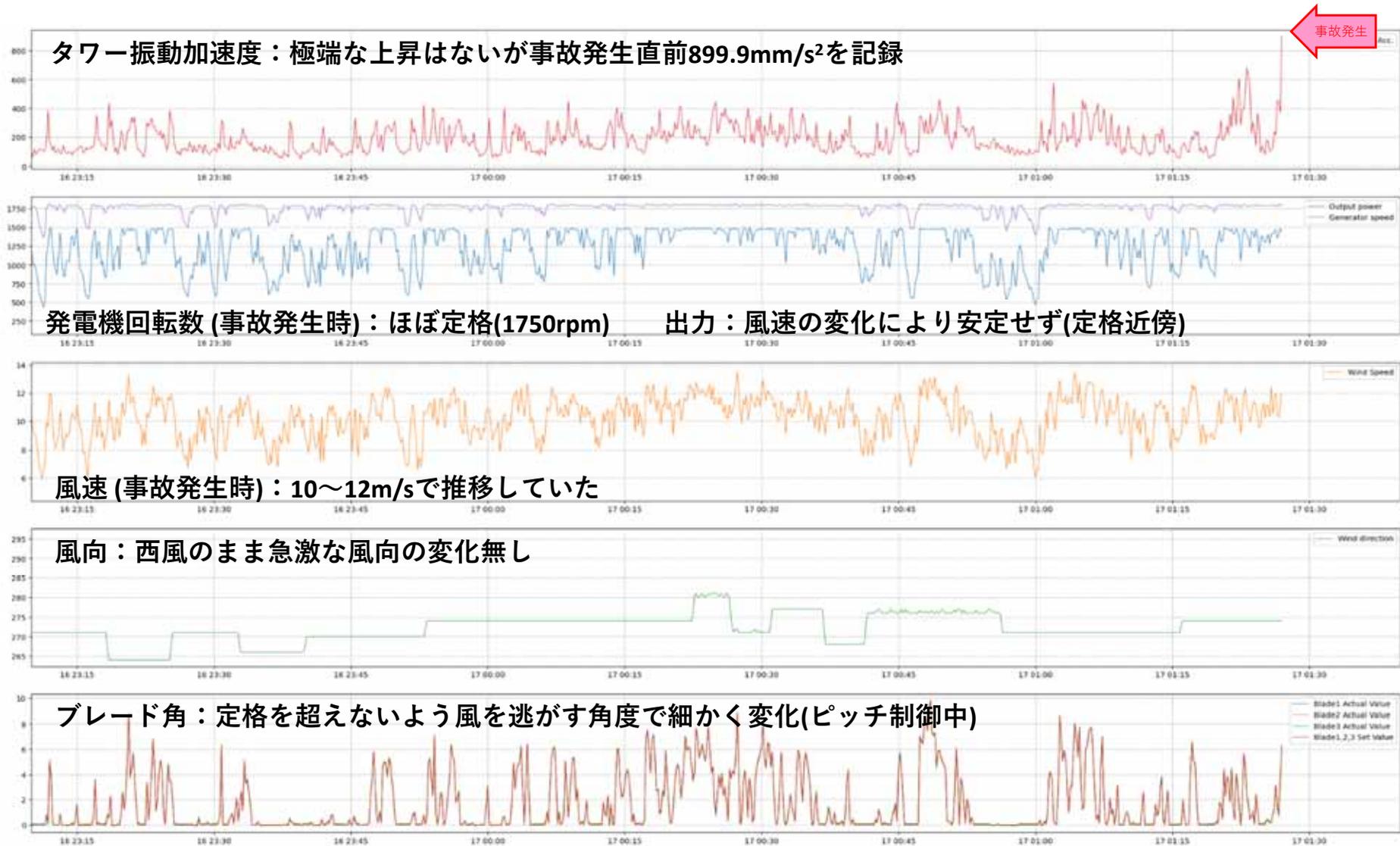


図2-2. SCADA 10秒平均値推移 (2023/3/16 19:40:00 ~ 2023/3/17 1:27:00 約6時間)

(3) 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推定しています(発錆している範囲は130-140°程度：破断部はキグチにて初期調査を実施済み)。

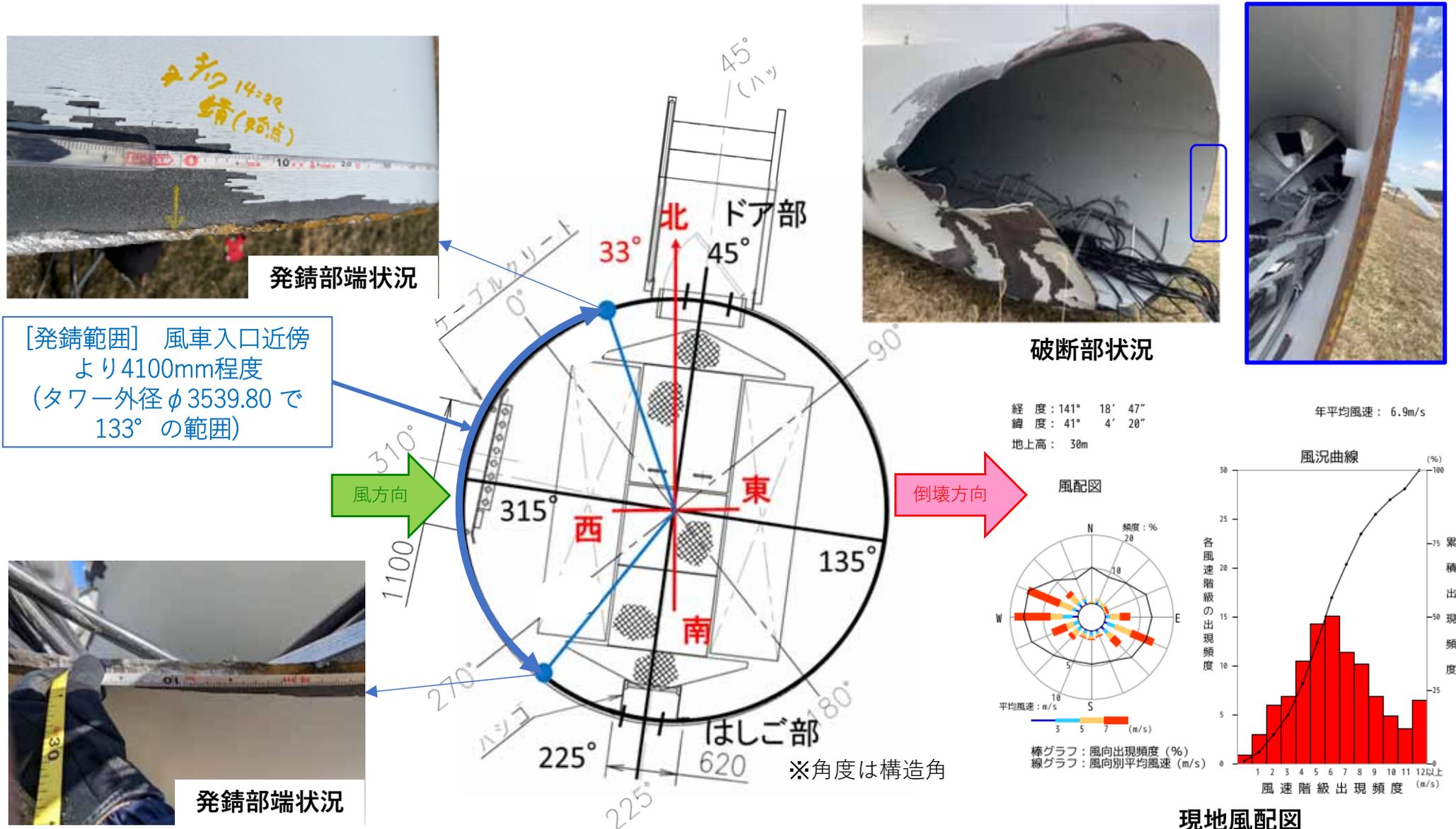


図2-3. タワーの損傷状況：破断面観察状況・発錆範囲

当該タワー設計は、IEC 61400-1 Class II Aに基づいたものとしてGermanischer Lloyd (GL)の認証を受けており、GEの設計仕様に基づきJSWが製造設計し製造したものです。 現在、仕様詳細について確認中です。

[設計指針] 適用法規および基準(JSW計算書より抜粋)

- (1) 建築基準法および同施工法
- (2) 鋼構造設計基準 (日本建築学会 1970制定、1999版)
- (3) 塔状鋼構造設計指針・同解説 (日本建築学会1980制定)
- (4) 煙突構造設計施工指針1982年度版 (日本建築センター)
- (5) 日本工業規格 (JIS基準)
- (6) IEC61400-1 : Wind Turbine Generator System-Part1 Safety Requirements
- (7) Germanischer Lloyd: Regulations for the Certification of Wind Energy Conversion systems

[タワー材質・損傷部溶接準拠規格]

- (1) シェル材質 JIS G3106 SM490B
- (2) 周溶接部適用規格 DIN4133(鋼製煙突)
(表B.1の図1の溶接クラス2)

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3-1 DIN4133 (表B.1の図1の溶接クラス2)

4. 事故原因の究明

(1)事故原因の究明方針

- 社外専門家を含めた事故調査委員会を設置し、事故原因を究明中です。
- 事故原因の特定、再発防止策の策定に繋げる為に以下のフローに従い、原因究明を実施します。

1. 原因究明：タワー倒壊に至る発生事象の解明

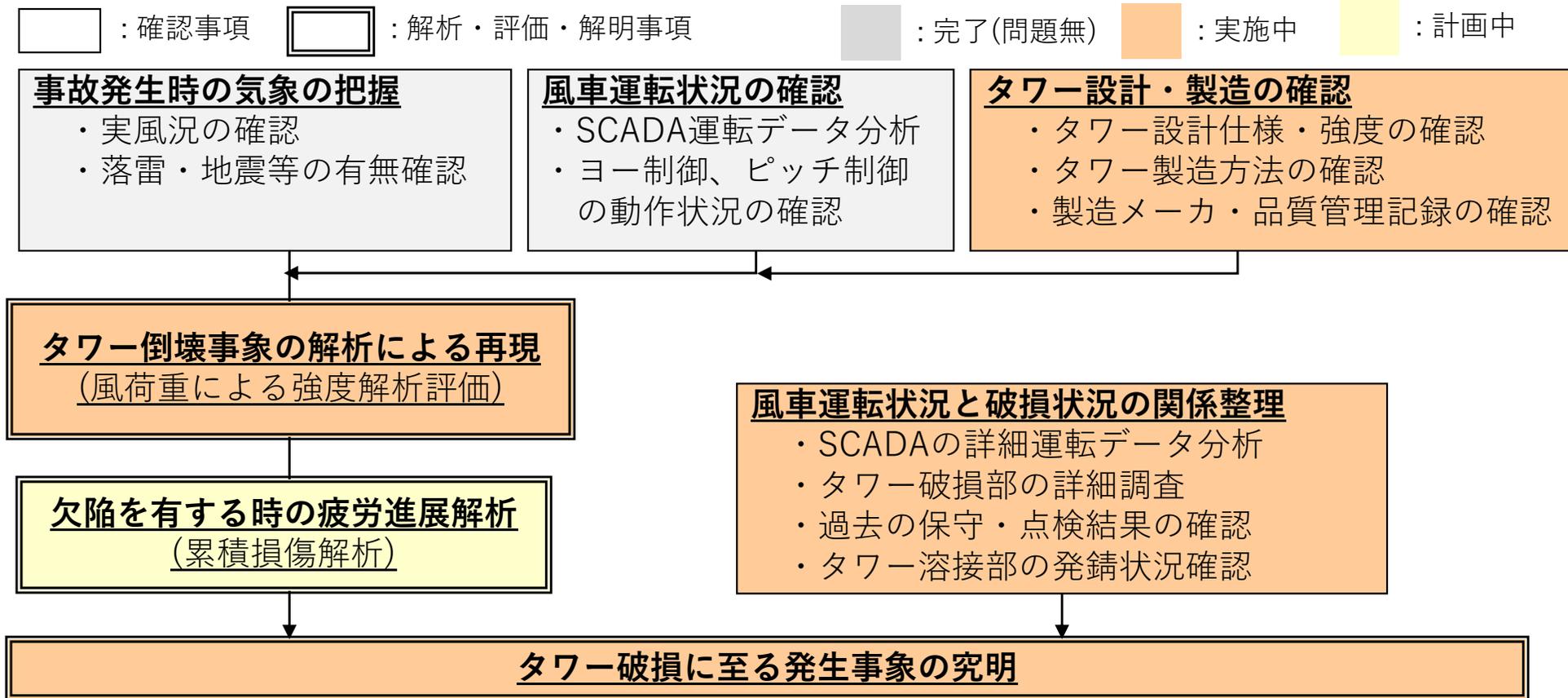


図4-1. タワー倒壊に至る発生事象の解明

2. 水平展開（緊急点検実施、要管理・要対策風車判定の考え方協議）

緊急点検方法検討、判定基準の策定、事故機以外のタワー健全性(耐久性)評価

3. 再発防止対策（予防保全策）の立案と実施

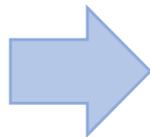
4. 事故原因の究明 (2) 破断面の調査

a. 1-3号機の破断面の調査 : 調査の進め方

材料の評価の第三者機関であるキグチにて初期調査(破断面の記録、溶接部形状計測)を実施し、詳細調査を開始しています。

1. 初期調査(完了)

- ・ 倒壊側検体に角度記載
- ・ 上下重ね合わせ
- ・ 残置側に角度記載
- ・ 破面の記録 (鋳取り前・後)
- ・ 溶接肉盛り部の形状計測



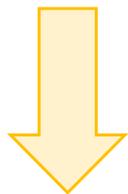
2. 疲労亀裂起点周辺の詳細調査(実施中)

【調査対象箇所】
残置側および倒壊側
ストライエーション、ラチェットマークの確認
(SEM、EDX)



4. 溶接品質調査(実施中)

【調査対象箇所】
残置側：溶接施工箇所
残置側 + 倒壊側 溶接突き合わせ



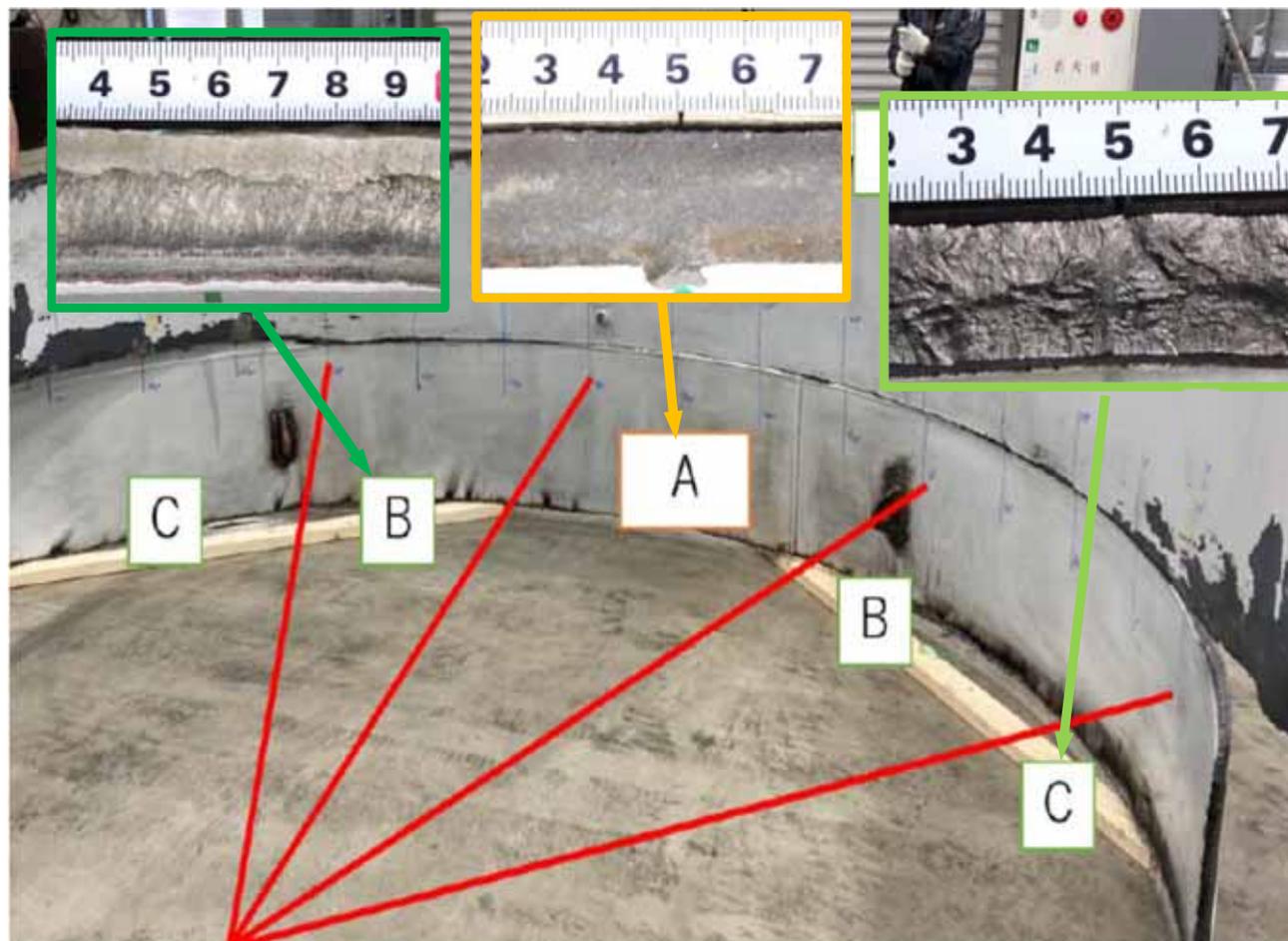
3. 母材調査(実施中)

【調査対象箇所】
残置側：永久変形の影響を受けていない部分
倒壊側：溶接部から十分に離れた母材

図4-2. 1-3号機の破断面の調査 : 調査の進め方

a. 1-3号機の破断面の調査 : 試験体観察(4/12実施)

試験体観察(破断面の外観確認:4/12実施)の結果、亀裂はA部(縦シーム溶接がある近傍)から発生し、B部・C部へと広がったと推定されています。



A部：板に鉛直・直線状であり、平らで、つぶされた断面。

B部：内面側は板に鉛直・直線部があるが、外面側は角度が付いた断面(Cに近づくにつれ斜め部が増える)。

C部：斜断面であり、溶接線からも外れている。

図4-3. 試験体観察(4/12実施)

a. 1-3号機の破断面の調査 : 錆取り後の破面マクロ観察結果

錆取り後の破面マクロ観察結果は、下図の通りです。

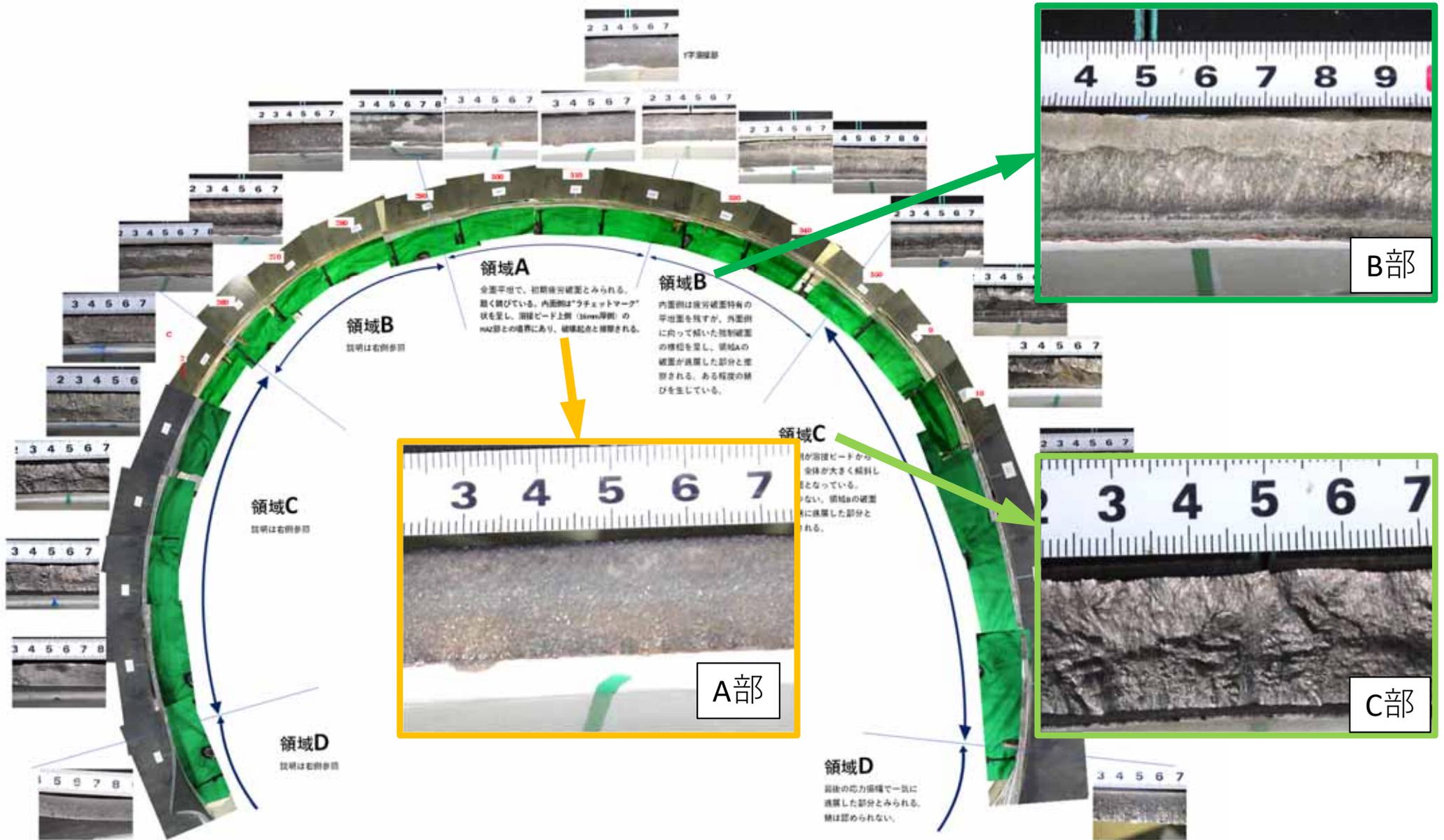


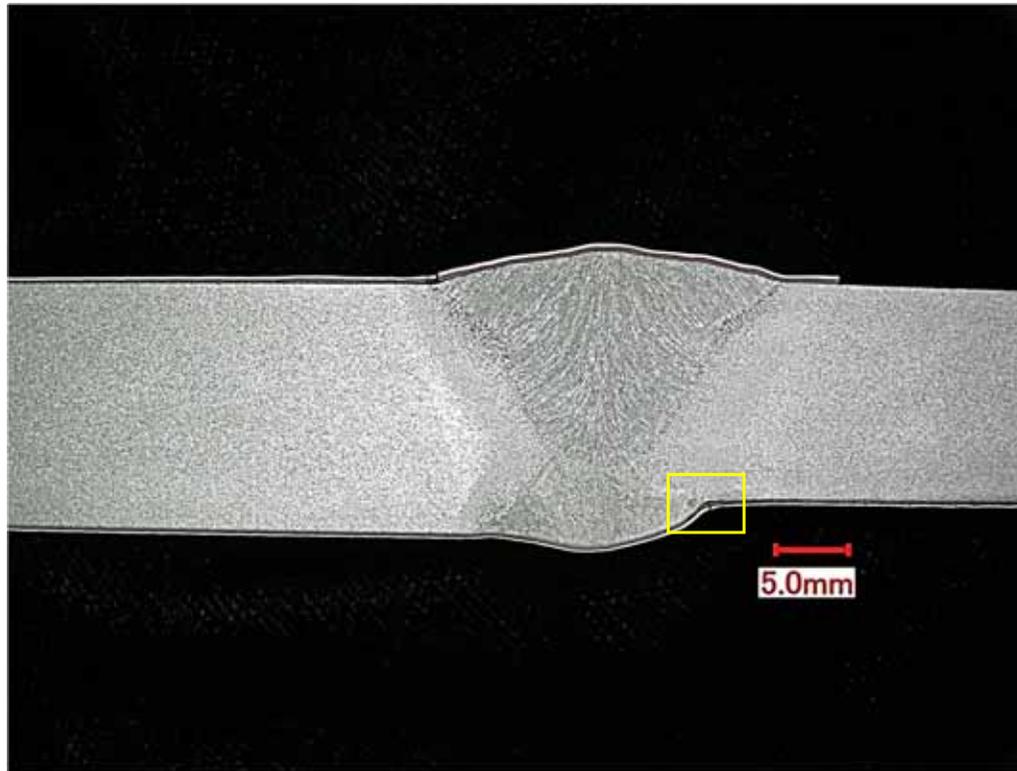
図4-4. 錆取り後の破面マクロ観察結果

4. 事故原因の究明 (2) 破断部の調査

a. 1-3号機の破断面の調査 : 溶接部断面マクロ観察結果 (235° のみ・速報)

16

溶接部断面のマクロ観察結果 (破断溶接線位置の未破断部:235° のみ・速報) を下記に示します。



18mm板厚と16mm板厚の溶接継手部には5mm以上の熱影響部が見られた(通常状態)。

塗装割れの下に金属部分には明確な亀裂は認められなかった。凹凸のある隙間状に見えるものは塗装割れに伴って直下の金属部分に錆びが生じているものと現段階では推察している。

図4-5. 溶接部断面マクロ観察結果 (235° のみ・速報)

b. 4-2号機の亀裂の調査：第4節亀裂方位(4/19調査時)

緊急点検にて発見された、4-2号機の亀裂は、内外共に約 $175^{\circ} \sim 250^{\circ}$ （構造角:西方向）の範囲に発錆・亀裂が見られます。長さは約2mです(詳細は別途NDT:非破壊検査の結果参照)。

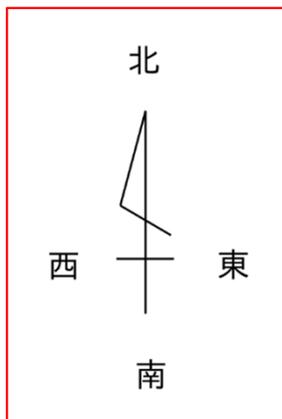
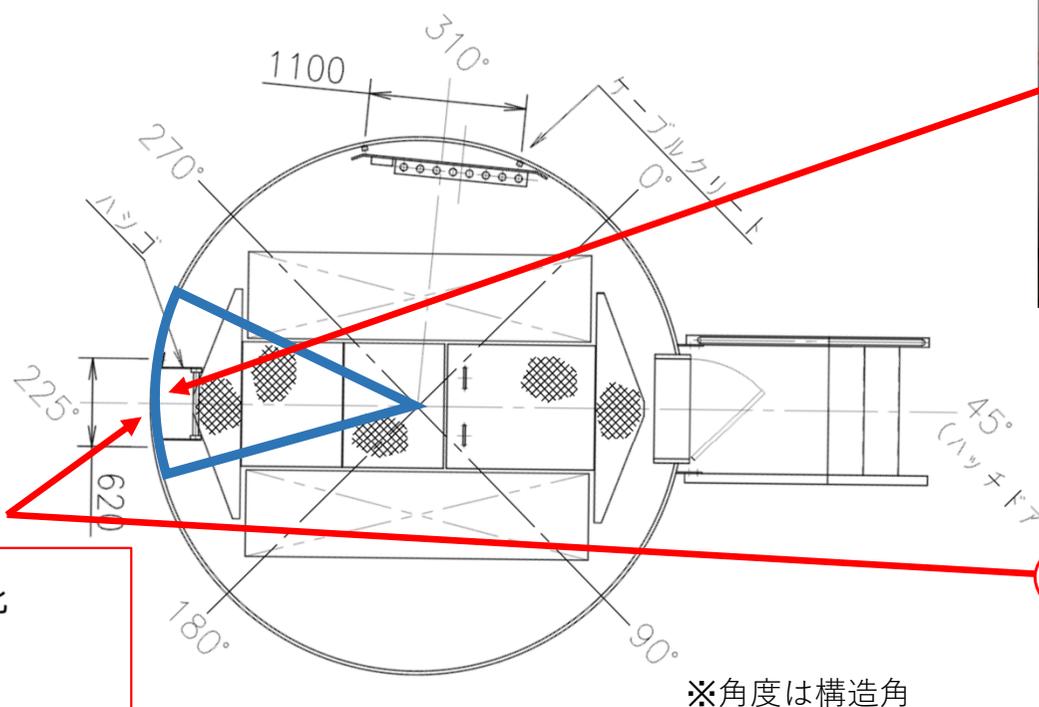
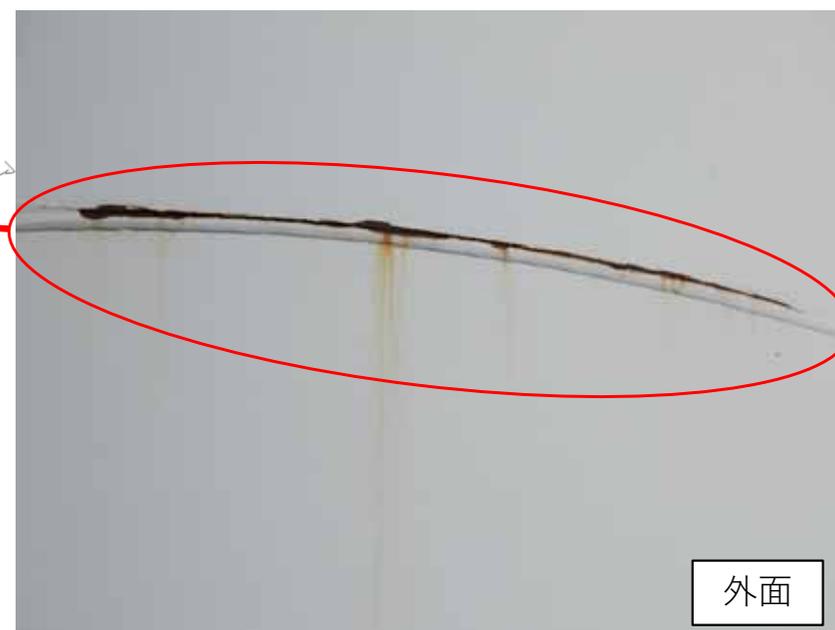


図4-6. 4-2号機の亀裂の調査：第4節亀裂方位(4/19調査時)

b. 4-2号機の亀裂の調査 :第4節内面亀裂状況(4/25 非破壊調査)

※角度は構造角

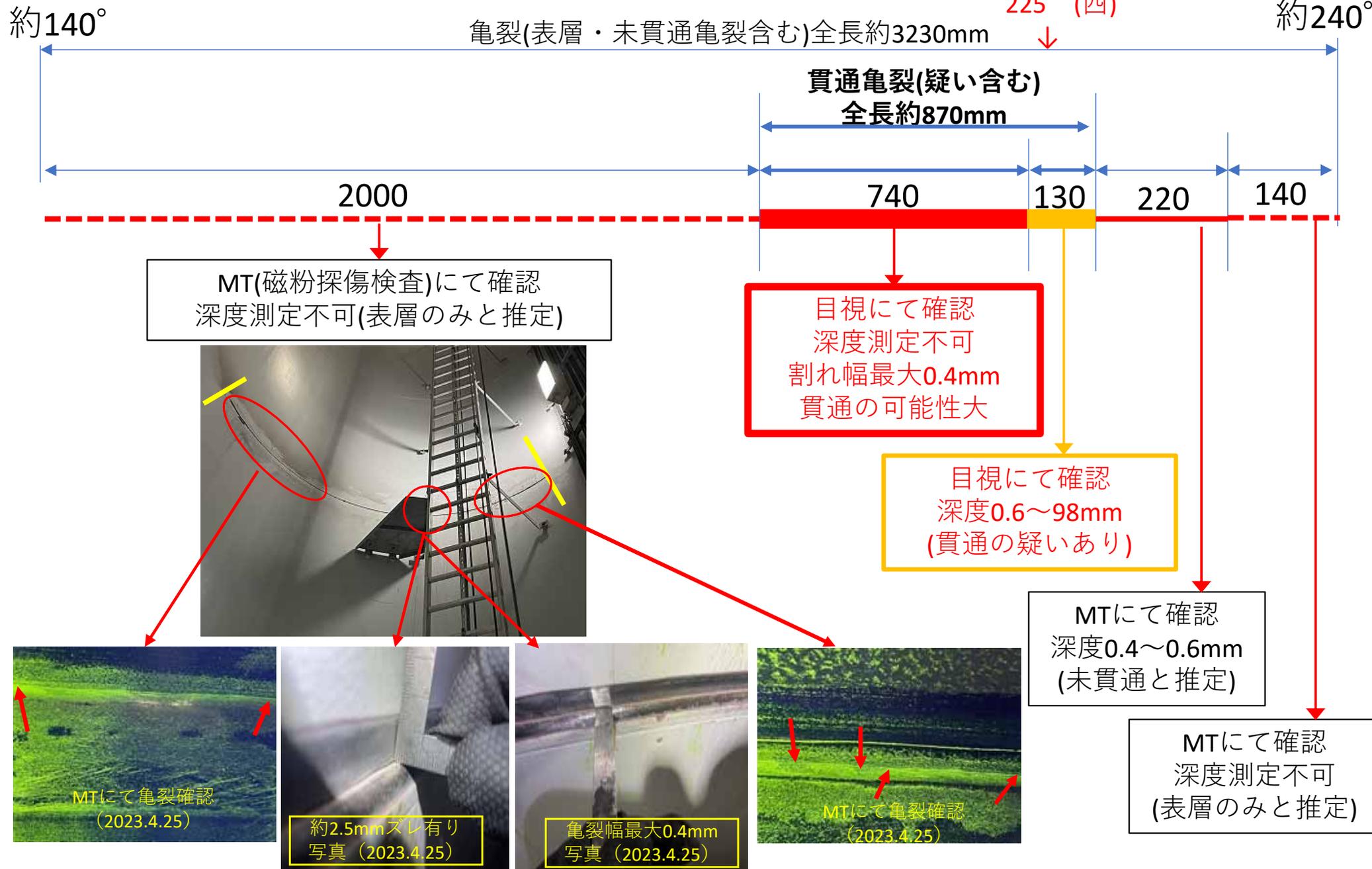


図4-7. 4-2号機の亀裂の調査 :第4節内面亀裂状況(4/25 非破壊調査)

c. その他同型機の調査(緊急点検結果) : EES緊急点検にて発見された亀裂(疑い含む)の調査状況等

緊急点検の結果、緊急点検内容とは別に、追加で発見された亀裂(塗装割れ・疑いを含む)のその後の調査(非破壊検査)の状況は、下表の通りです。

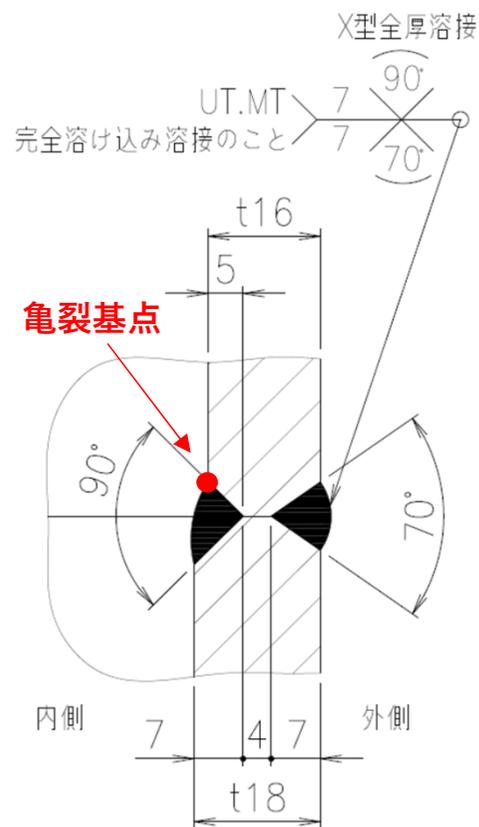
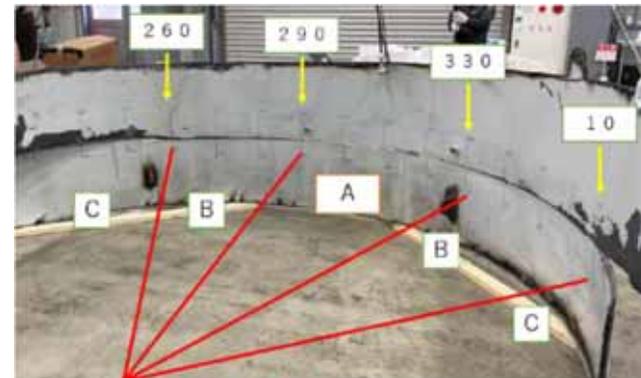
国内で稼働しているGE1.5s189基の緊急点検の結果、倒壊号機、貫通亀裂が発見された4-2号機の2基以外は問題のあるものではありませんでした。

表4-1. EES緊急点検にて発見された亀裂(疑い含む)の調査状況(国内稼働中GE1.5s 189基の調査結果)

No.)	WF	号機	位置			亀裂状況等			判定
			縦方向	方位	主風向との関係	範囲(内面)	範囲(外面=貫通)	備考	
1	六ヶ所村	1-3	④	西	主風向側	4100mm (推定)	1200mm以上 (推定)	倒壊機。内面は破断状態で発錆範囲、外面はフラットな断面部(約40°)の長さ換算値	(倒壊機)
2	六ヶ所村	4-2	④	北西	主風向側	3230mm (1090mm)	870mm (1000mm以下)	外面範囲の()値は、外観写真からの推定値。内面範囲は、非破壊検査で判明した深さが無い亀裂部位を含み、()値は、深さがあると推定された範囲(4/25)。	運転停止 (要監視)
3	六ヶ所村	4-1	④	東	主風逆向側	300mm (塗装割れ・発錆)	無	内面の塗装割れ・発錆部のMT検査を実施した結果、35mmと70mmの亀裂らしきものがあったが、亀裂深度計で深さなく、サンディングで消失(4/24)。	問題無
4	六ヶ所村	4-1	②	3か所	主風向側他	10~300mm (塗装割れ)	無	No.3の調査時に、同時に実施。内面の塗装割れのMT検査を実施した結果、亀裂らしきものがあったが、亀裂深度計で深さが測定できない(表層傷)(4/24)。	問題無
5	A WF	26	③	西	主風向側	100mm程度 (塗装割れ)	無	塗装除去しPT検査したが、母材にクラックはなし(4/19)。	問題無

d. 亀裂進展ストーリー推定

現時点で試験体観察および現地緊急点検の結果から、亀裂進展ストーリーは本図の通りと推定しています。今後はこれらの現象を裏付けるエビデンス(解析・試験)を検討・実施していきます。



溶接部詳細 (板厚 18×16)
S=1/1 周方向

①内面溶接余盛端部に
微小亀裂発生
・外面に向かって進展



4-1号機

②外面に貫通し、
周方向に進開始



4-2号機

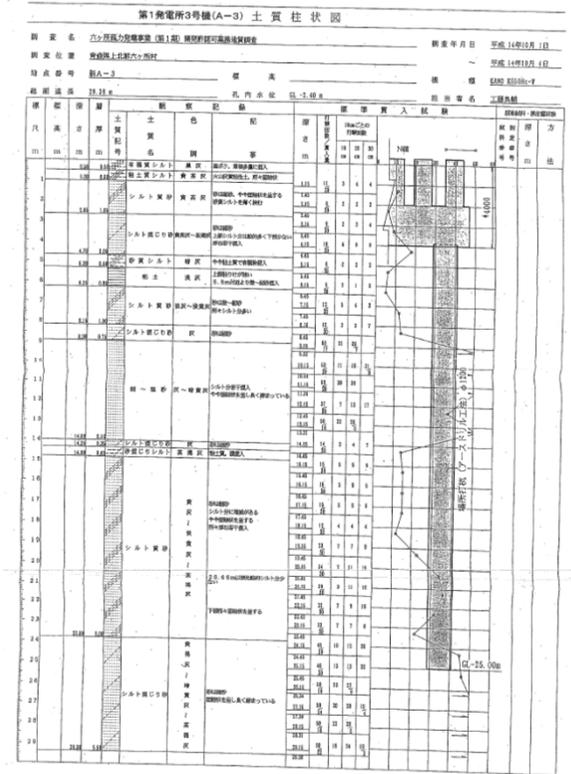
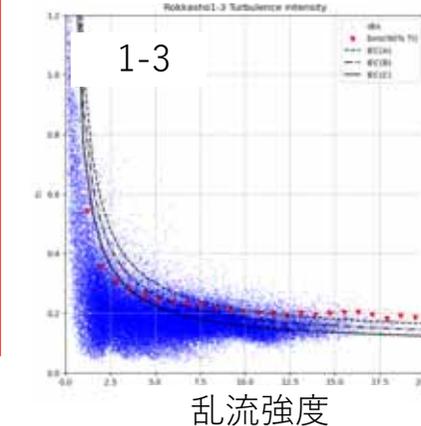
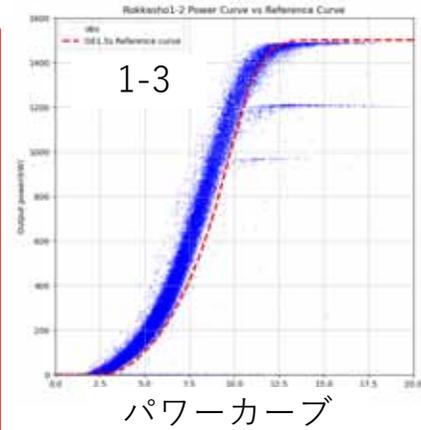
③徐々に亀裂進展が
増速し、最終破断



図4-8. 亀裂進展ストーリー推定

(3) 過去の履歴調査：近隣風車との風況・地盤の相違確認

並んで設置されている 1-1, 1-2, 1-3号風車の2022/1/1から2022/12/31の1年間のパワーカーブ・乱流強度を比較した結果、3基に有意な差は見られませんでした。基礎ボーリング柱状図を見ても、1-3の特異性はなく、基礎形状もほぼ同じです。また、過去のメンテナンスを調査し、支持構造物の構造や強度、回転体（ドライブトレイン）のバランスを大きく変化させるような変更並びに改造、機器機材補修や交換工事は無いことが確認されました。



1-3の基礎ボーリング柱状図

図4-9. 近隣風車との風況・地盤の相違確認

a. 応力集中率の検討：溶接余盛形状不良

GEのタワー製造仕様、およびGEの指示する規格DIN4133(1991)の溶接仕様に余盛高さ h は溶接幅 L の10%以下との記載があります。一方、JSWのWPS(溶接仕様)では、3mm以下との規定のみで溶接幅の10%以下との規定はありませんでした。また、JSWの板厚違い部の合わせ方が外面合わせであり、破断部は内面に2mmの段差があることから、形状的に溶接幅の10%以下との規定を守ることが困難な状況でした。これに加えて製造上の食い違い段差等があると、溶接端の角度 β (180° - フランク角 α) が大きくなり、これらが亀裂起点の応力集中率を高めた可能性が高いと推定しています。

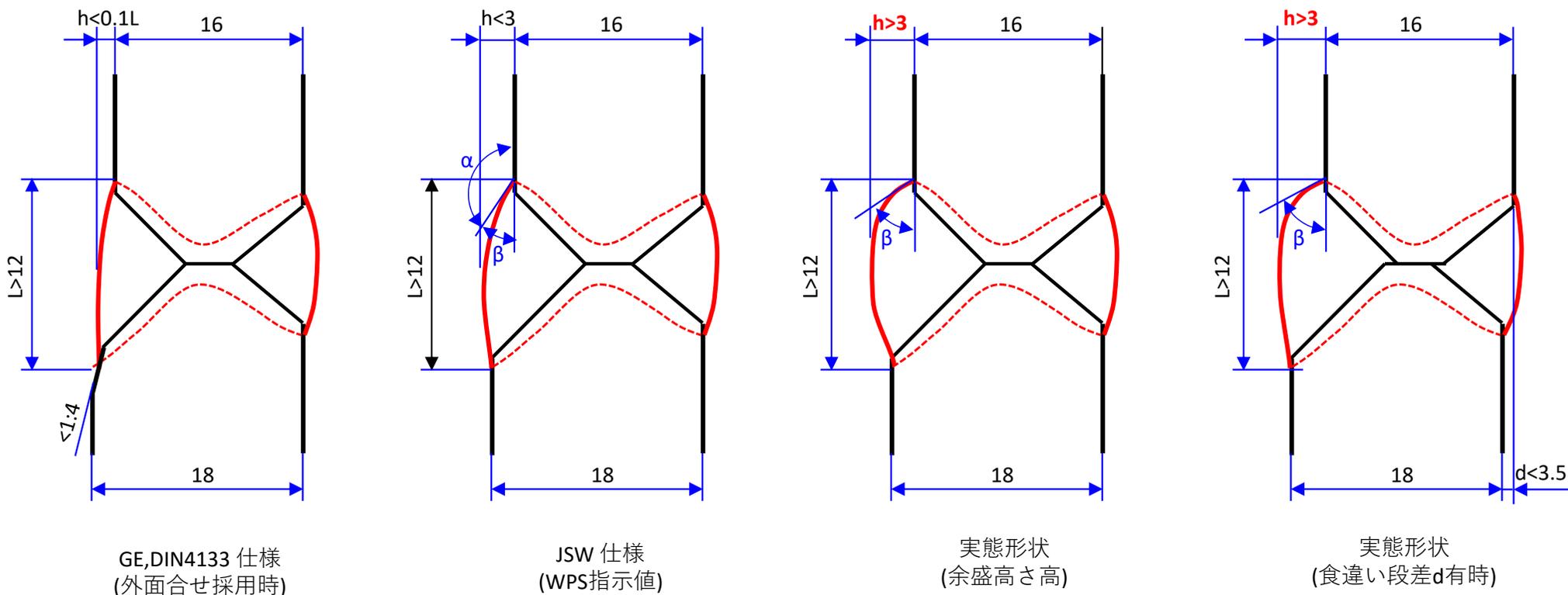


図4-10. 応力集中率の検討：溶接余盛形状不良

a. 応力集中率の検討： 内側溶接部形状の測定（4-2、1-1、1-2号機）

貫通亀裂が観察された4-2号機、および倒壊した1-3号機に隣接している1-1,1-2号機(亀裂がないこと確認済み)の溶接形状について、レーザースキャナで測定実施し、余盛高さ(c,d)、溶接幅(e)、余盛端角 β (180° - フランク角 α)を比較した図を示します。4-2号機の亀裂発生近傍(未貫通)部である 235° において、4-2号機の余盛高さ、材料段差(c-d)、余盛端角 β が高いことが判明しました。特に材料段差は4.4mmに達しており、板厚差2mmを2.4mm超過しています(外面合わせ部に食い違い段差が生じていると推定)。

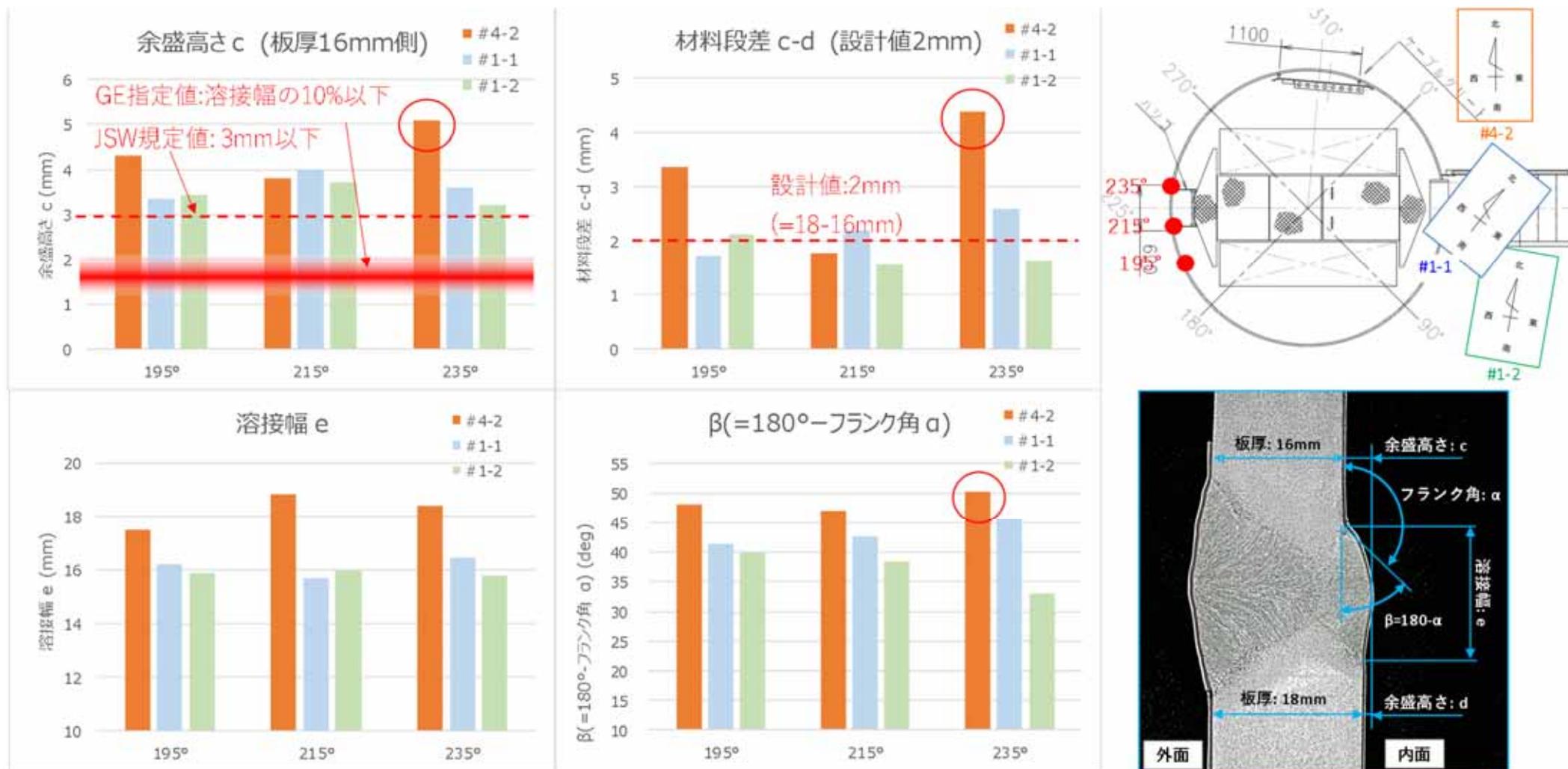


図4-11 内側溶接部形状の測定（4-2,1-1,1-2号機）

b. 倒壊事象の強度解析 / c. 疲労進展解析

・破断解析 (非線形) (実施中)

本解析により、事故原因として推定している亀裂状態をモデル化し、倒壊現象を再現することにより推定している損傷形態(風による倒壊事象)を確認します。

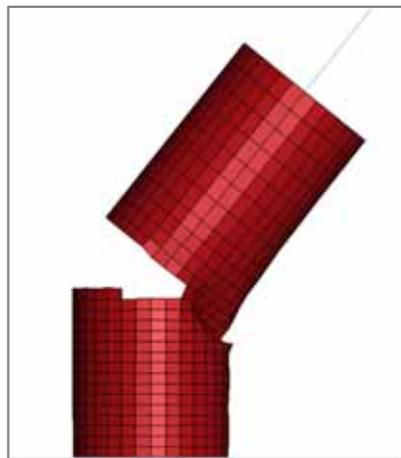
・溶接部の応力集中解析 (計画中・6月開始予定)

溶接余盛高さ、材料段差等の形状差による応力集中率の違いを解析し、亀裂発生の原因究明に使用します。

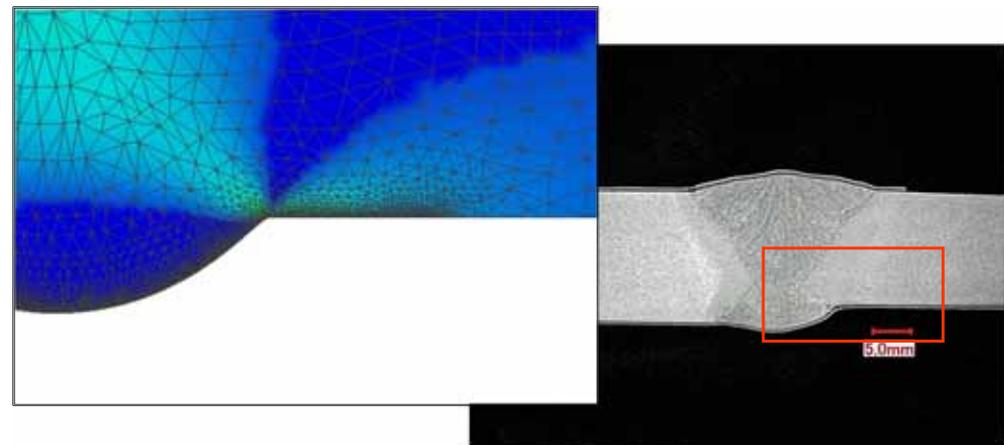
・亀裂進展解析 (計画中・6月開始予定)

亀裂の進展速度(繰り返し荷重回数との関係)を求め、今後の点検の基準・周期を定める指標とします。

解析は (株) PAL構造 と協力し、実施しています。



破断解析のイメージ



応力集中解析のイメージ

図4-12 内側溶接部形状の測定 (4-2、1-1、1-2号機)

(5) 過去の点検の確認

風車の定期自主検査の方法は、「電気事業法施行規則第94条の3第1号及び第2号に定める定期自主検査の方法の解釈」に例示されており、風車のタワーの溶接部については、風力発電設備の定期点検指針（JEAG 5005-2017）にも、目視により、塗装や溶接割れが発生していないか確認することが示されています（点検周期1年）。

本点検指針は過去のトラブル（太鼓山風力発電所タワー損傷等）の知見等に基づき制定されており、タワーフランジ近辺の溶接部についての注意を促していました。

(別表2) 開放、分解による点検及び作動試験等の定期事業者検査の十分な方法の解釈（風力設備）

設備	項目	検査方法	内容
タワー	35 ボルト・ナット	(1) タワーフランジボルト・ナット	目視及び打音又は触手 合マークのズレや塗装割れ、ボルトの緩みがないか確認する。
		(2) ナセル-タワー結合部ボルト・ナット	測定 測定機器で軸力又は締付トルク等を確認する。風車設置後、ボルトの緩みや破断が生じていない場合には、1年間で10%以上又は8方位以上のいずれか多い本数のボルトについて締め付け確認を行う。
	(3) アンカーボルト		
	継手	36 フランジ継手	目視 目視及び触手又は測定
	37 溶接継手	目視	塗装や溶接割れが発生していないか確認する。
38 胴・アンカーリング		目視	外面に損傷や変形、錆がないか確認する。
		目視	タワー内底部に落下物や漏洩物がないか確認する。
		目視及び触手又は測定	接地線に損傷、緩みがないか確認する。

図4-13. 電気事業法施行規則第94条の3の第1号及び第2号に定める定期自主検査の方法の解釈

2-5-3 タワー - 継手 - 溶接継手

(1) 点検の目的

溶接継手の損傷・クラックの拡大によるタワー倒壊、ロータ・ナセル落下等の事故を防止する。

(2) 技術基準との関係

【風技】第7条（風車を支持する工作物）

【風技・解釈】第10条（特定支持物の構造等）

(3) 点検方法・内容・周期

点検方法	点検内容	点検周期
目視	・塗装や溶接割れが発生していないか確認する。 ・上記と併せて、溶接継手に、クラック、変形、錆、腐食等がないか確認することが望ましい。 ^{※1}	1年

※1 溶接継手にクラック等が発見された場合は、周辺部分についても必要に応じて非破壊検査を実施することが望ましい。

(4) 事故事例

タワートップボルトの折損により、タワートップフランジの溶接止端部近傍の内側で疲労亀裂が発生、円周方向に進展し、最終的に円周破断に至りナセルが落下した事例があった。

図4-14. 風力発電設備の定期点検指針（JEAG 5005-2017）

(5) 過去の点検の確認 : タワーフランジ錆状況確認時の溶接線状況 (2021年9月21日)

1-3号機において、定期点検に加え、2021年9月21日にタワー外観点検を実施し、発錆状況を確認し、2022年10月18日～2022年11月4日に、トップとミドル間フランジのみの塗装補修が行われましたが、溶接線部の発錆については塗装補修されていませんでした。今回の損傷部位については写真等、記録されておらず、フランジ面部の発錆状態に比して、重要な発錆とは認識していなかった可能性が高いと推定しています(なぜ・なぜ分析実施中)。

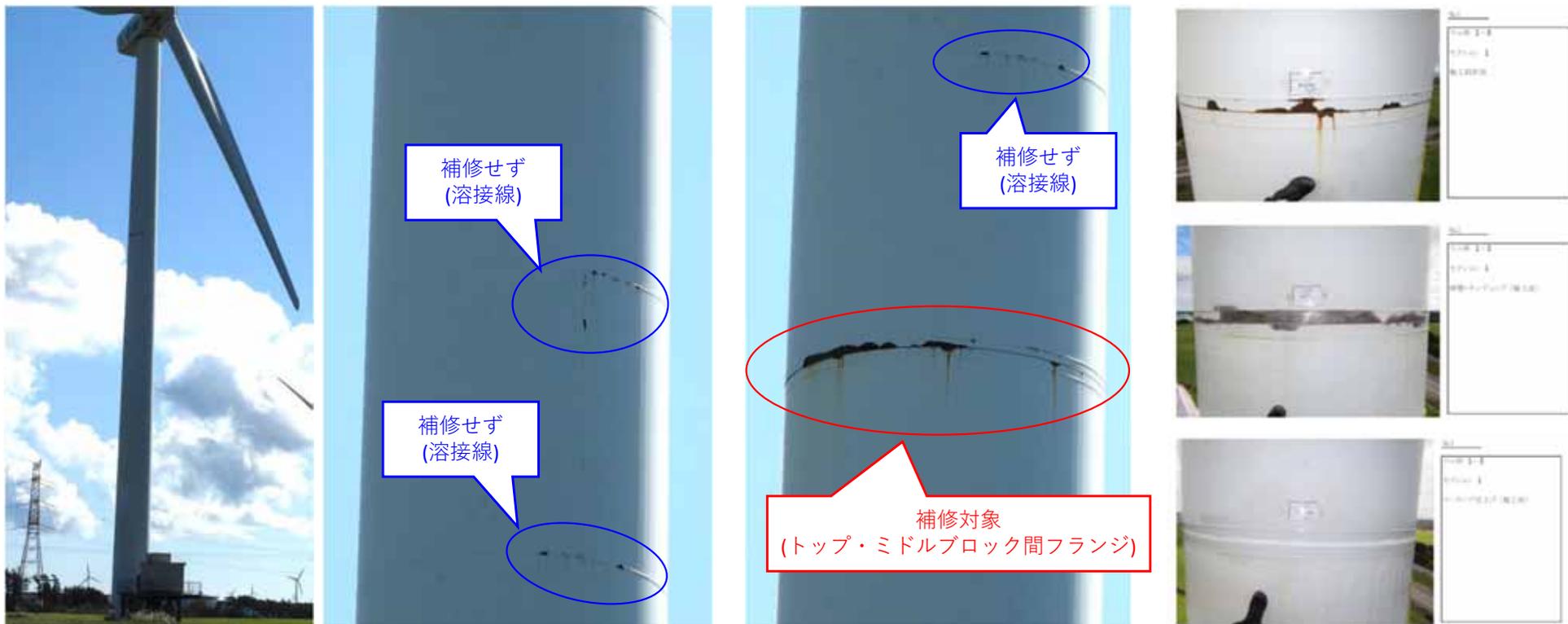


図4-15. 2021年9月21日 1-3 タワー外観点検記録写真

図4-16. フランジ部補修
2022.10月

(5) 過去の点検の確認：点検の問題点・見直しについて

損傷の起因となっていた発錆・クラックは長期にわたり存在していた可能性があり、なぜ過去の点検にて発見できなかったか、分析を実施しています(なぜ・なぜ分析)。今後、この結果をもとに、定期点検実施方法を見直ししていきます。

[課題]

- ① 長期間、タワー内面溶接線に発錆・クラックがあった(はず)のに発見できなかった。
- ② 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。

[実施方法]

下記3グループで個別に実施し、その結果をまとめていく。

- A. 事業所長等現場管理職(管理職目線での分析)
- B. 点検担当者(実務者目線での分析)
- C. 技術部門(技術者目線での分析)

[実施結果]

主要な問題点として下記等が抽出された。今後、再発防止策を検討し、定期点検等へ反映する。

- a. 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。
- b. **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認識がなかった。**
- c. 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薄かった**(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)。
- d. 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。

a. 推定される事故原因(フィッシュボーン図)

周方向シーム溶接部亀裂が発生し進展・倒壊に至った要因は下記の通りと推定しています。AからDは製品の要因であり、現運用機では対策が困難であることから、E.運用、F.メンテナンスでの対策を検討していきます。

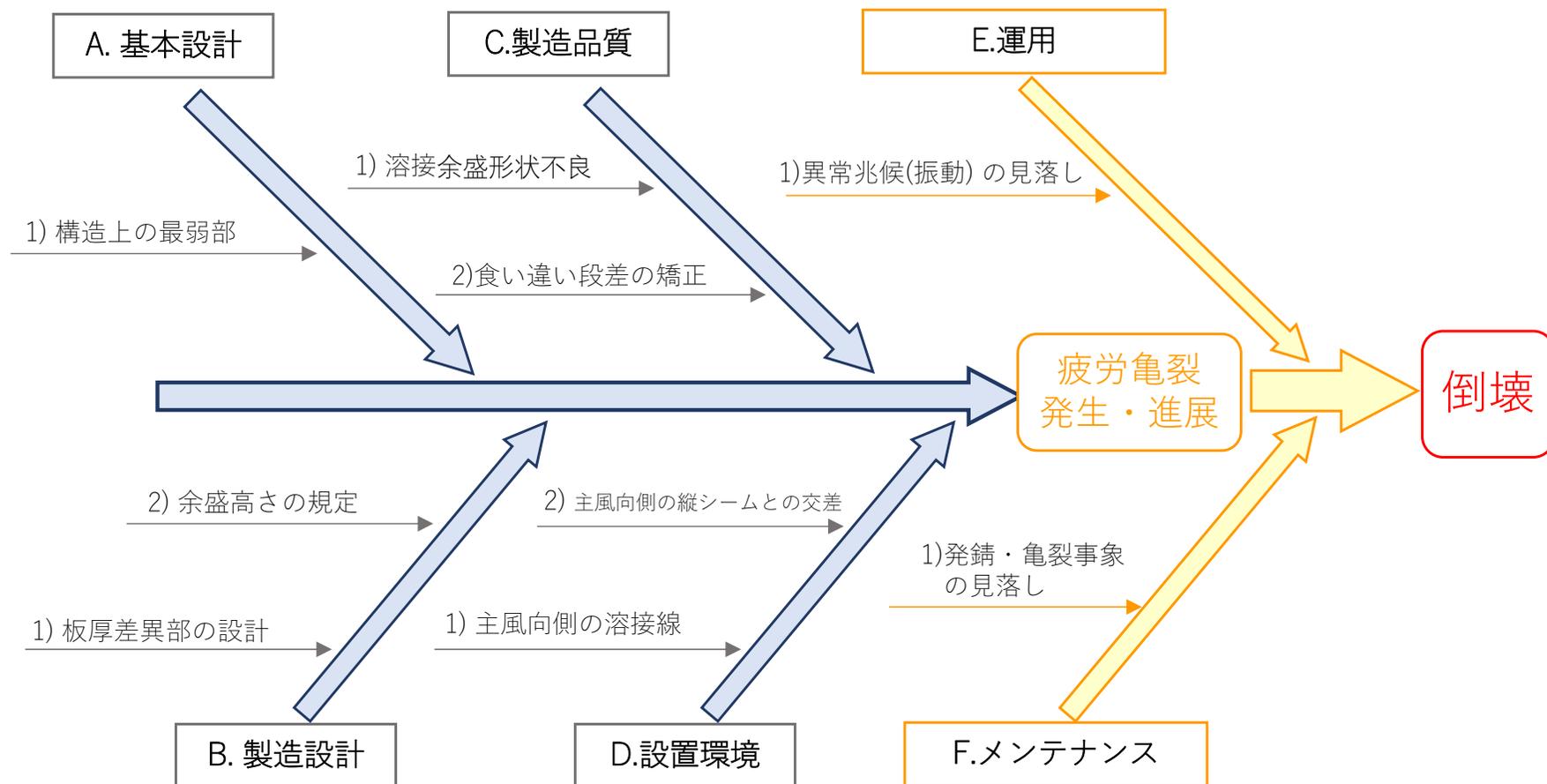


図4-17. 推定される事故原因(フィッシュボーン図)

a. 推定される事故原因(一覧)

周方向シーム溶接部亀裂の発生・進展、倒壊要因の根拠および調査方法は下記の通りです。

表4-2. 溶接部亀裂の発生・進展、倒壊要因の根拠および調査方法

要因	原因	内容	評価	根拠	調査方法
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	□	他の板厚差異部が1.61~3.33の対疲労安全率を有しているのに比して、当該部は1.49と一番低い。	GE基本設計書確認
B 製造設計	1) 板厚差異部の設計	板厚差異部の合わせ方(外側合わせ)	△	JSWタワーは外面合わせだが、同型タワーの他社製2社はセンター合わせであり、他社と比して応力集中度が高い。板厚差を外側合わせとしたことで、応力の流れが偏り、内面側の応力集中を大きくした可能性がある。	要求仕様の調査・同型風車他社製の調査。センター合わせと、外面合わせで、どれだけ応力集中が変わるのか、解析・試験実施検討。
	2) 余盛高さの規定	溶接余盛高さ仕様規定外(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WPSにはその指示がない。実態もOVERしている。余盛高さによる応力集中の違いの解析を実施し、疲労に対する感度を調査する。	要求仕様の調査・JSWの仕様調査・実体調査、余盛高さによる応力集中度の差異解析
C 製造品質	1) 溶接余盛形状不良	溶接余盛形状不良(溶接端部の角度が高くなることで応力集中が増大)	△	板厚差異部であり、他箇所と比して当該溶接部の溶接高さが高くなることから、溶接端の角度が高い可能性がある。	損傷品、健全機同場所の溶接形状の3Dデータ取得・比較。溶接端角度の違いによる応力集中度の差異解析
	2) 食い違い段差の矯正	製缶時の食い違い段差の矯正過大	△	製缶時の食い違い段差が大きい場合、食い違い段差を製造時に矯正することにより、内部応力が残存する。	品質記録確認・4-2号機形状測定・発生内部応力の影響解析
D 設置環境	1) 主風向側の溶接線	亀裂発生箇所は、主風向側等、風向頻度が高い方向に発生	□	主風向側にその他の要因が重なることで疲労亀裂が発生。	実風況からの疲労損傷度解析
	2) 主風向側の縦シーム	縦シーム溶接部との交差(縦シーム溶接部との交差部は、他の箇所に比して板厚さが大きいいため、応力集中が大きくなる)	△	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る。	縦シーム部との交点による応力集中度の差異解析
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	△	振動エラーは、今までの経験で乱流時や、ピッチ関係機器の不調時に発生することがわかっており、多発し始めたことは認識しつつも、倒壊に至る異常兆候とは判断できなかった可能性がある。	過去記録の確認、監視センターからの聞き取り
F メンテナンス	1) 発錆・亀裂事象の見落とし	メンテナンス時の溶接線部発錆・亀裂事象の見落とし	△	タワー外面の発錆は、フランジ継手部に多くみられており、溶接線部に発生していた発錆は比較的程度が低く、また、フランジの溶接線部以外の溶接線にクラックが発生することは想定していなかった。	過去点検記録の確認、定期点検実施者からの聞き取り、なぜなぜ分析の実施

◎：主要因 △:要因の可能性あり(調査中) □：副次要因 ×：要因ではない

b. 今後の調査・試験・解析方針

試験体の確認及び、現在実施している緊急点検の結果を受けて、下記方針で今後検討・調査していきます。

① 実機での調査・計測

- a. 実機での溶接部や発生した亀裂形状の測定
- b. 溶接部発生応力の確認

② 試験体による破断面詳細検査・溶接部性状・形状調査

- a. 断面性状の詳細確認、亀裂進展段階の判定
- b. 母材・溶接部性状の確認(強度・組織等)

③ 解析による破断ストーリーの裏付け・時間尺度検討

- a. 倒壊現象の解析(強度解析)
- b. 疲労進展現象の解析(疲労進展解析)

(1) 緊急点検：緊急点検進捗状況(EES実施緊急点検)

1. 実施事項

- ① タワー外面溶接線部点検
タワー外面を望遠カメラ等を使用し点検を行い、周方向溶接線の発錆部を確認・記録する。
- ② タワー内面溶接線部点検
①にて確認された発錆部の内面部の溶接線部に塗装割れ、発錆がないか、確認、記録する。
- ③ 詳細調査
②にて内面の塗装割れ・発錆が認められた箇所については、詳細点検として非破壊検査(UT/MT等)を実施し、亀裂の有無、範囲を確認する。

2. 進捗状況

緊急点検については、全号機完了。

EESにて①②実施…157/(189-32)基
設置者にて対応…32基

③詳細点検に至ったものは、六ヶ所村WF：4-2号機のみ(当該号機は運転停止中であつたが、周囲安全確保実施し、今後速やかに撤去する方針)。

その他、内部に塗装割れ、微小な発錆があつた下記号機については、念のためNDTを実施し問題ないこと確認。

六ヶ所村WF：4-1, 4-2号機(貫通亀裂部以外)

A WF：26号機

3. 今後の予定

事故調査により追加された知見にて、今後の定期点検への織り込みを念頭に、点検済の設備についても下記再点検を実施中。

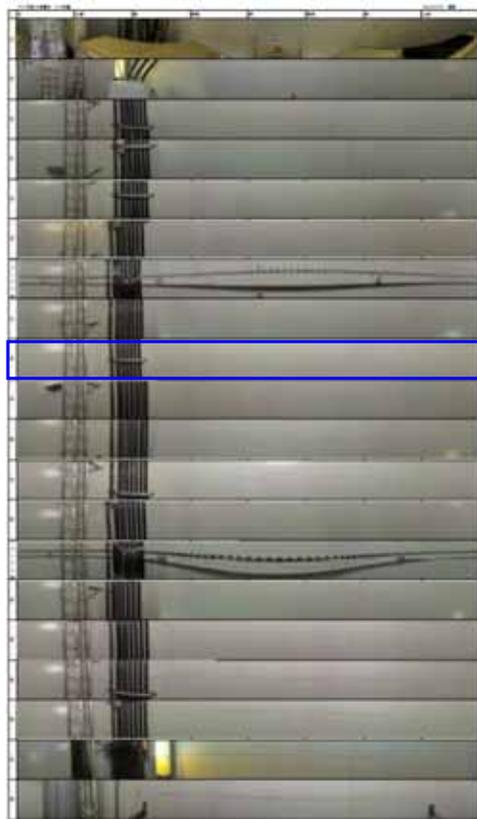
- ✓ 内面溶接線については、360°カメラ撮影による点検方法試行中。
- ✓ 外面については、4方向からの全景写真を記録(将来はドローンによる撮影・記録検討)。

5. 再発防止策と今後の対応

(1) 緊急点検：追加実施（360° カメラによる内部溶接線撮影・点検）

タワー内面溶接線部点検・記録方法として、360° カメラの使用を検討し、試行しています。

- ✓ 記録が残るので、経年変化・履歴管理が可能。
- ✓ 判定を専門員にて実施することで個人差をなくす。



タワー内面溶接線の記録例
(6-4号機データ)

外形寸法	51.7×136.2×29(mm)
質量	約170g
静止画性能	11K 11008×5504ピクセル 5.5K 5504×2752ピクセル
動画性能	5.7K 5760×2880ピクセル/30fps 4K 3840×1920ピクセル/60fps 4K 3840×1920ピクセル/30fps 2K 1920×960ピクセル/30fps 最大連続記録時間:25分

THETA X

360° カメラ(試行機)

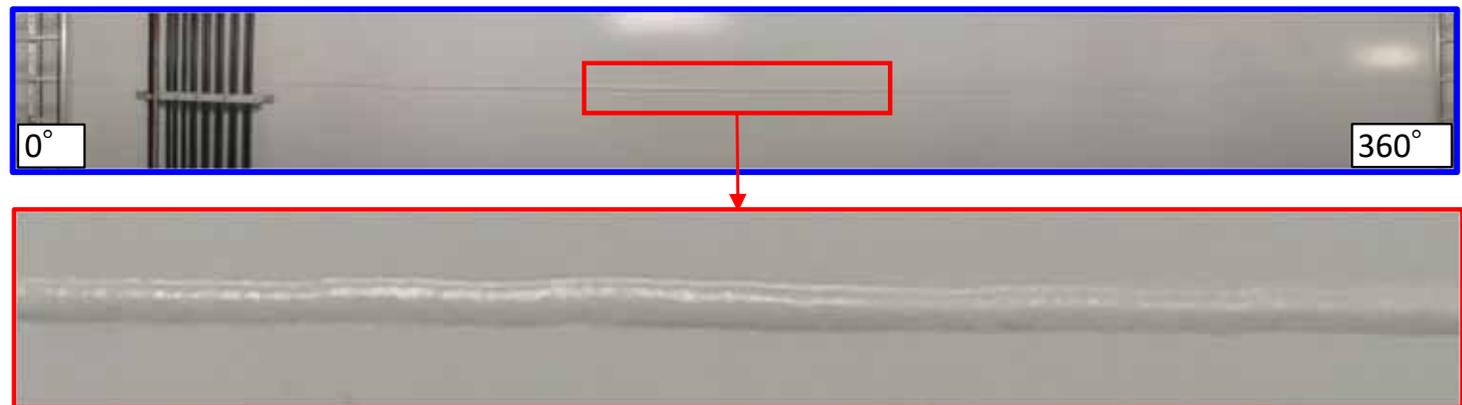


図5-1. 360° カメラによる溶接線部撮影

(2) 再発防止策：再発防止策の検討

原因究明中ではありますが、類似災害防止のために、並行して下記の再発防止策を検討中です。

a. 亀裂損傷の早期発見

実施した緊急点検、なぜ・なぜ分析等から得られた知見を基に、定期点検方法を改定し、定期的に調査・検査を実施することを検討。

b. 亀裂損傷の判定、クライテリアの設定

発見された亀裂の危険性の判定、監視方法を検討。

c. SCADAデータ(振動エラーログ)利用による予防保全

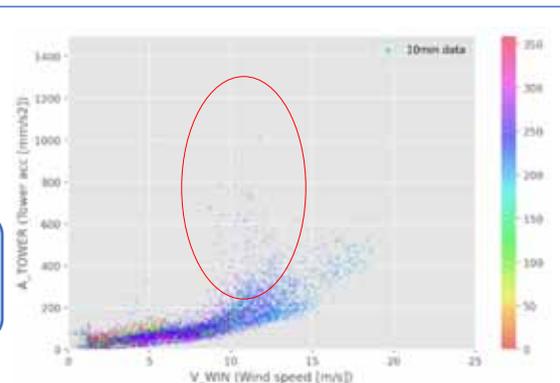
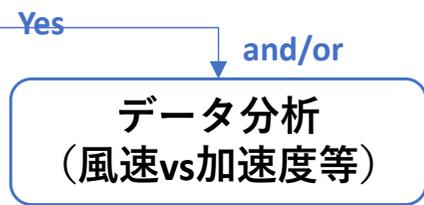
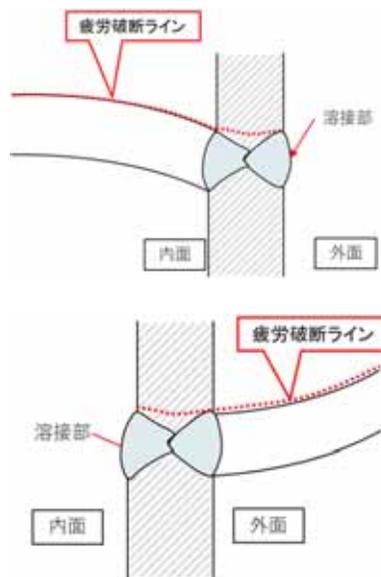
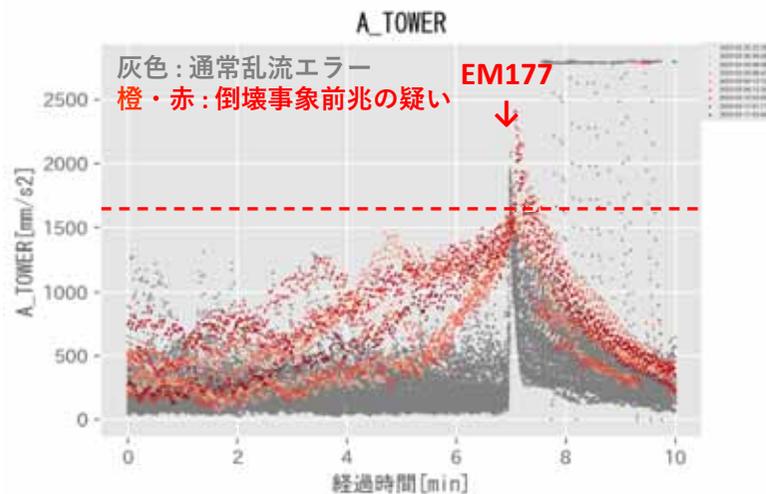
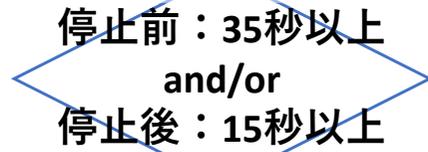
振動エラー発生時のデータ分析により、異常兆候診断実施。

c. 予防保全：EM177タワー振動エラー発生時の対応フロー(案)

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、予防保全とする。

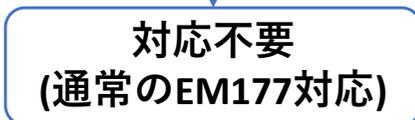
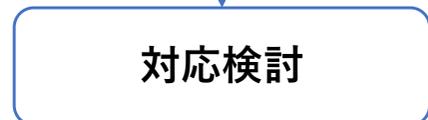


基準加速度：1000[mm/s²]



異常なし

異常あり



本フローは六ヶ所1-3号機タワー倒壊事象に特化した内容であり、総合的にはタワー振動発生時のリセット基準に組込む。

図5-2. EM177発生時の対応フロー(案)

(3) 今後の対応：実施事項・今後の対応工程案

今までの実施項目、今後の対応工程は下記の通りです。

表5-1. 実施事項・今後の対応工程案

項目		2023年											
		3月			4月				5月			6月以降	
		13-	20-	27-	3-	10-	17-	24-	1-	8-	15-		22-
現地工程		★3/17事故(WF停止)			試験体切出し		現地復旧(損傷物搬出)						
事故報告・WG等		j●3/17事故報告(速報)			●4/14事故報告(詳報)				●5/26報告徴収			★WG(審議)	
事故調査委員活動		●3/18委員会KO(第1回委員会) ●3/20委員会KO(第2回委員会) ●3/21-22現地調査(第3回委員会)			●3/31緊急点検方針(第4回委員会)				●4/20-21破断面観察(第5回委員会)			●第6回委員会 ○委員会開催(1回/1~2か月)	
委員活動	① 現地調査	現地調査											
	② 原因推定	原因推定・絞り込み											
	③ 原因追及(分析)	原因追及(調査・分析)											
	④ 原因追及(解析)	原因追及(強度解析・疲労進展解析)											
	⑤ 対策の検討	対策・水平展開の検討											
水平展開	① 現状調査	SCADA等データ確認・分析 現状調査・緊急点検											
	② 対策実施	暫定対策 恒久対策											
	② 再発防止(体制・状態監視)	再発防止策検討 再発防止策試行・効果確認 再発防止策本格適用											

(3) 今後の対応：今後の点検方針及び運転方針案

倒壊部試験体・亀裂発生号機の確認及び、現在実施している緊急点検の結果を受けて、下記方針を検討しています。

緊急点検の結果、

- ①損傷なし : 運転継続・再開
- ②内面亀裂 : 委員会で検討した監視方法で運転(今後策定)
- ③貫通亀裂 : クライテリア・対応方針(撤去を含む)が立案されるまで運転停止

尚、定期点検方法は、今回得られた知見にて更改します。

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