

丹後地域（太鼓山周辺）における新たな風力発電事業の実施について

京都府環境部公営企画課

1 事業実施予定者の選定

事業実施予定者		選定理由	
<p>(株)市民風力発電（提案者3社） 総合点：71.4点（100点満点） ※評価項目毎に外部有識者5名の平均点を集計し、総合点を算出</p>		<p>太鼓山の環境条件を踏まえた技術的な検討やリスク想定とその対策の検討がなされている点、安全性の高い風車が採用されている点、豊富な運営実績がある点を評価。</p>	
外部有識者	SOMPO リスクマネジメント(株) リスクエンジニアリング 開発部フェロー	足立 慎一 氏	(危機管理)
	東京大学大学院工学系研究科教授	石原 孟 氏	(風車構造)
	(株)京都銀行融資審査部副部長	上垣 健一 氏	(財務)
	京都大学大学院エネルギー科学研究科教授	手塚 哲央 氏	(エネルギー)
	三重大学大学院工学研究科教授	前田 太佳夫 氏	(風車機械)

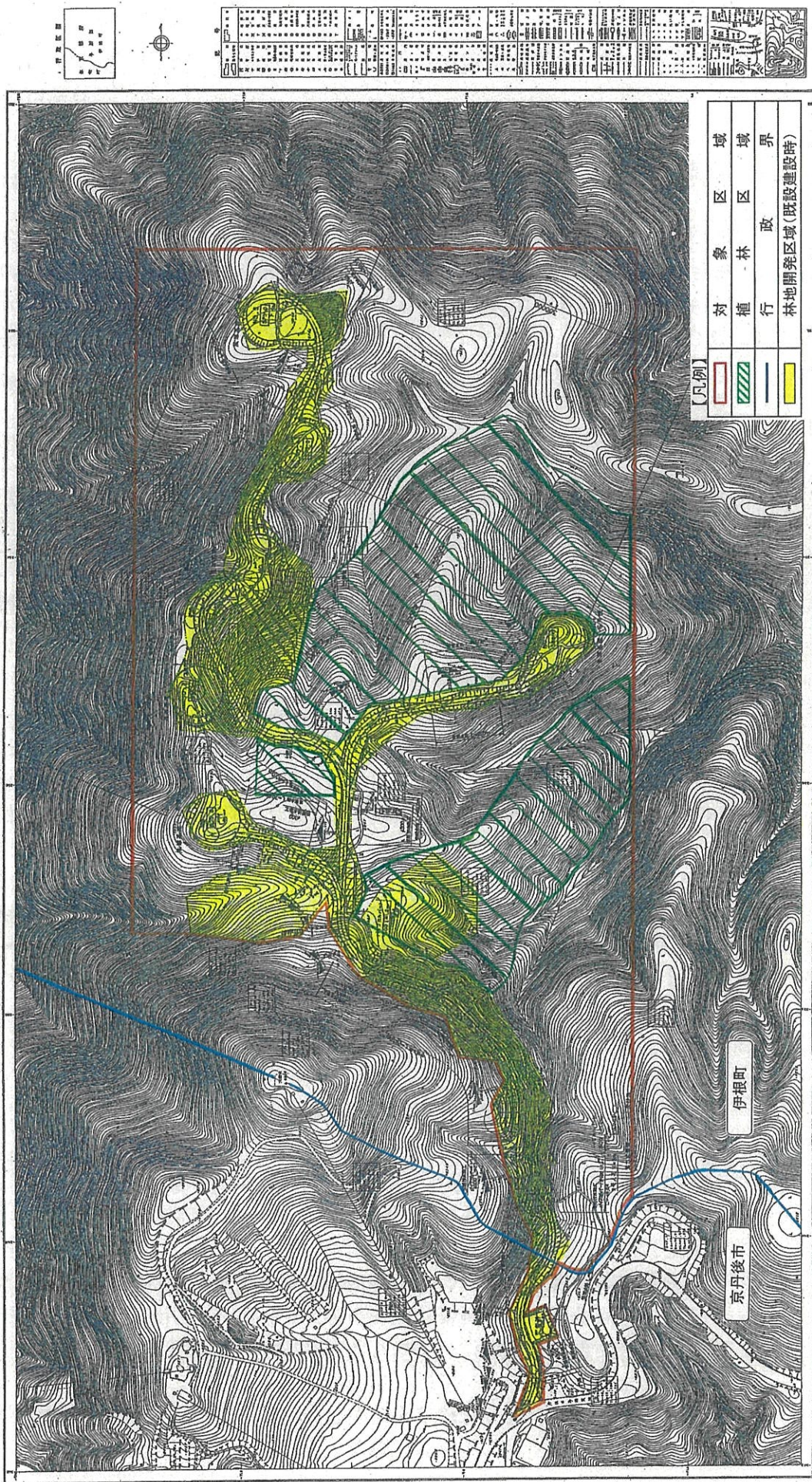
2 企画提案募集要領（京都府・筒川財産区・伊根町）の概要

【趣旨・目的】
 太鼓山での風力発電は、府内における多種多様な再生可能エネルギー電源の導入促進や丹後地域の活性化に繋げていく上で1つの大きな資源である。また、落雷や乱流等、環境条件の厳しい太鼓山で風力発電を継続することにより得られる技術的知見は、我が国における風力発電技術の向上を図る上でも大きな意義がある。このような視点を明確にしながら、丹後地域（太鼓山周辺）における新たな風力発電事業の実現に向け、風力発電事業を適切に行える民間事業者を事業実施予定者として選定するため、企画提案を募集する。

【企画提案する事業計画に関すること（抜粋）】

- 対象区域
裏面のとおり
- 事業期間
風力発電施設の運転期間は20年間。運転終了後おおむね2年間で撤去。
- 規模及び設置位置
 - ・風力発電施設の計画出力は、総出力6,000kW以上10,000kW未満。
 - ・規模（計画出力及び基数）及び配置位置は、周辺地域における環境影響等を配慮した上で、適切に提案するものとする。
- 「風力発電等環境アセスメント基礎情報整備モデル事業（京都府伊根町情報整備モデル地区における地域固有環境情報調査事業）報告書」を活用した環境保全計画とすること。
- 現在の太鼓山風力発電所は、少なくとも2019年10月末日までは運転。
（既設風力発電施設については、京都府が撤去を行うことを前提。）
- 原則として、事業者は運転終了後おおむね2年間で風力発電施設の撤去を行い、土地を原状回復した上で土地の所有者へ返還すること。

平面図



目的

- 環境アセスメントに活用できる環境基礎情報(貴重な動植物の生息・生育状況等の情報)のデータベース化及びその提供を通じて、質が高く効率的な環境アセスメントの実施を促進する。

期待される効果

- 風力発電等により影響を受けやすい場所を予め明らかにすることによる環境影響の回避・低減。
- 事業者が情報を活用することによる質の高い環境アセスメントの効率的な(=環境調査期間の短縮化)実施が可能。

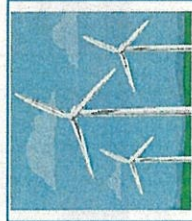
⇒ 風力発電等の早期大規模導入に資する。

モデル地区の環境基礎情報の調査

- モデル地区の選定(環境省、地方自治体)
陸上風力 / 洋上風力 / 地熱
- 文献調査、現地調査、ヒアリング調査
 - ・渡り鳥の飛来ルート
 - ・猛禽類の営巣状況
 - ・動植物の生息・生育状況等

全国の地域既存環境情報の収集

- 土地利用規制等の情報
- 動植物の分布情報
- 国内外の技術情報



環境アセスメント 環境基礎情報 データベース

- ・ データベースとして
整備・提供
- ・ 地図情報は
WEB-GISで
閲覧可能

閲覧・情報の活用

風力発電等事業者

- ・ 初期の立地調査や現況調査の省略・効率化
- ・ 事業の円滑化(期間短縮と環境調査費用の低減効果、環境問題化するリスクを軽減)

住民、地方自治体

- ・ 情報を閲覧し、風力発電事業等の環境影響評価手続に関与することで、情報交流が拡大

情報整備モデル地区の選定状況

環境省選定地区 (H24~H25)

自治体公募による選定地区 (H25~H27)

H24

都道府県	地区名
北海道	上ノ国町
青森県	青森市
	横浜町
岩手県	洋野町(種市)
秋田県	由利本荘市(岩城)
山形県	小国町
福島県	いわき市(雨降山)
福井県	小浜市
山口県	萩市(弥富上)
鹿児島県	阿久根市
9 道県	10地区

H25

都道府県	地区名
北海道	八雲町
	島牧村
青森県	田子町
岩手県	洋野町(中野)
秋田県	由利本荘市(東由利)
	大仙市
秋田県	能代市沖
	湯沢市
千葉県	館山市
	君津市
山口県	阿武町・萩市
	下関市
愛媛県	砥部町・内子町
長崎県	西海市沖
熊本県	芦北町
鹿児島県	指宿市
10道県	16地区

H25追加選定

都道府県	地区名
北海道	稚内市沖
岩手県	普代村・野田村
	洋野町沖
秋田県	秋田市・潟上市
	南部沖
秋田県	北部沖
	いわき市(一本ふな)
福島県	古殿町
	天栄村
静岡県	南相馬市・飯館村
	御前崎港
兵庫県	神河町
鳥取県	中部沖
山口県	萩市(権現山)
福岡県	北九州沖
長崎県	五島市黄島沖
	長崎市池島町沖
鹿児島県	串木野港
11道県	18地区

H26

都道府県	地区名
北海道	二七〇町
	岩内町沖
	寿都町
青森県	寿都町沖
	八戸市
秋田県	能代市
福島県	南相馬市
石川県	輪島市
静岡県	磐田市
愛媛県	八幡浜市
高知県	室戸市
福岡県	北九州市沖
長崎県	新上五島町沖
鹿児島県	薩摩川内市沖
11道県	14地区

H26追加選定

都道府県	地区名
北海道	八雲町山崎
青森県	五所川原市金木町
	五所川原市魔ノ岳
岩手県	八戸市南郷区
	奥州市
兵庫県	久慈市
	豊岡市竹野町
静岡県	豊岡市但東町
	新温泉町
兵庫県	牧之原市沖
兵庫県	洲本市沖
島根県	出雲市沖
新潟県	村上市沖
8道県	13地区

H27

都道府県	地区名
岩手県	二戸市浄法寺町
福島県	二戸市仁左平
	郡山市御霊橋峠
京都府	郡山市諏訪峠
	郡山市・須賀川市
鳥取県	伊根町
島根県	鳥取市
	大田市朝山
徳島県	大田市鳥井
	鳴門市
6道県	10地区

想定事業

調査面積	
陸上風力	442 km ²
洋上風力	3,462 km ²
地熱	4 km ²

※調査中の地区を含む

平成27年度までに23道府県、81カ所(陸上風力58カ所、洋上風力21カ所、地熱2カ所)で事業を実施

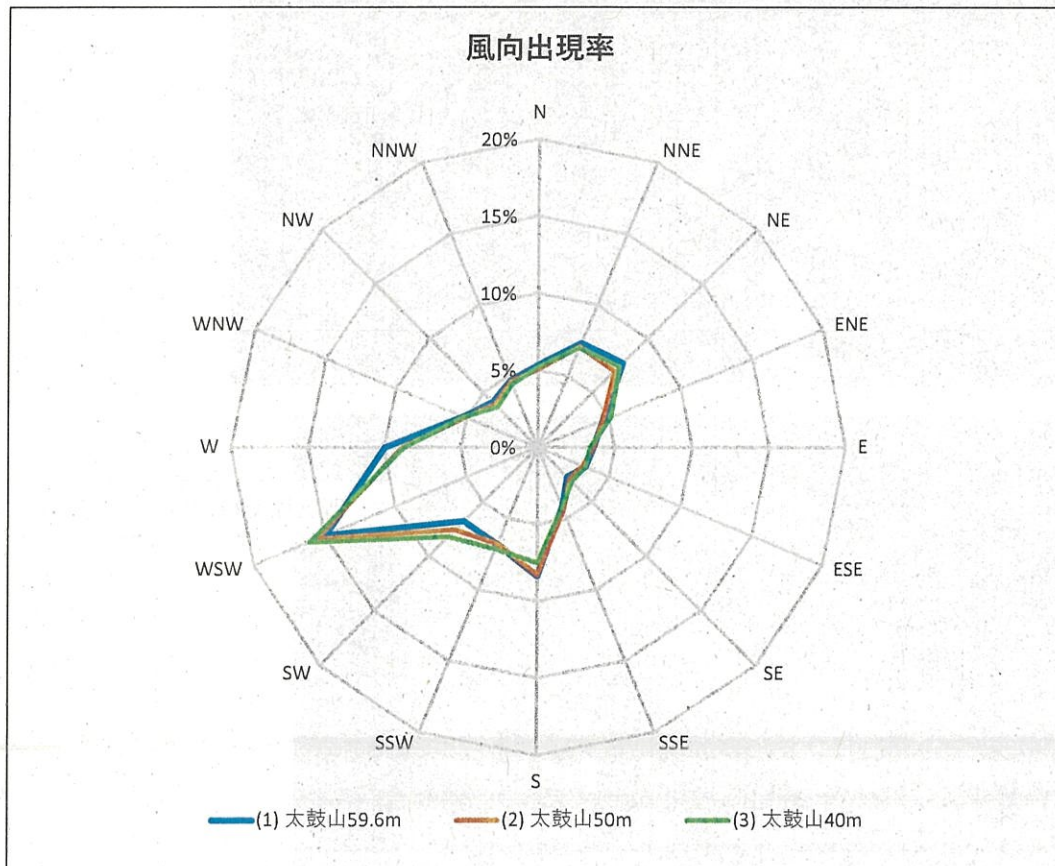
太鼓山 既設風況観測塔 まとめ

取り纏め期間：2015/12/01 00:00～2016/11/30 23:00

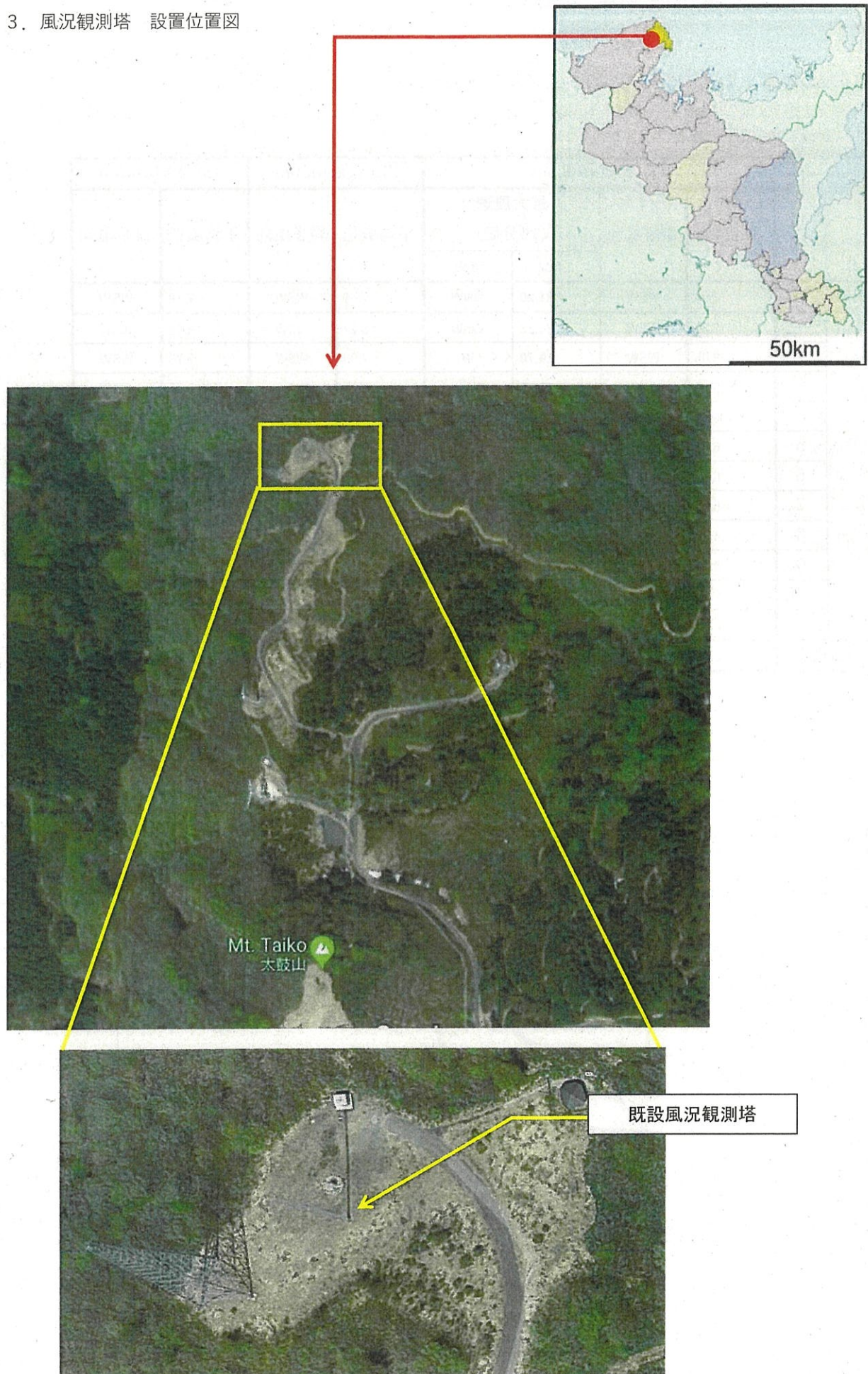
1. 風速、風向取り纏め

観測地点		(1) 太鼓山59.6m				(2) 太鼓山50m		(3) 太鼓山40m	
年	月	平均風速	最多風向	最大風速 (10分値)		平均風速	最多風向	平均風速	最多風向
				風速	風向				
2015	12	7.54	WSW	21.20	NNW	7.40	WSW	7.18	WSW
2016	1	8.39	WSW	24.20	WSW	8.27	WSW	8.15	WSW
	2	8.05	WSW	19.70	W	7.90	WSW	7.70	WSW
	3	5.83	WSW	17.20	WNW	5.78	WSW	5.59	WSW
	4	6.63	S	23.10	WSW	6.49	WSW	6.29	WSW
	5	6.61	S	19.40	WSW	6.41	S	6.21	S
	6	5.79	S	19.00	S	5.64	S	5.44	S
	7	5.25	W	17.30	W	5.13	WSW	5.00	WSW
	8	4.48	NE	17.30	WSW	4.42	NE	4.36	NE
	9	4.99	NE	20.70	WNW	4.91	NE	4.71	NE
	10	5.65	NNE	28.30	WSW	5.71	NNE	5.53	NNE
	11	6.90	WSW	16.60	W	6.89	WSW	6.63	WSW
全期間		6.33	WSW	28.30	WSW	6.23	WSW	6.05	WSW

2. 風向グラフ



3. 風況観測塔 設置位置図



京都府太鼓山風力発電所3号機ナセル落下事故に関する報告書(概要版)

1. 太鼓山風力発電所とナセル落下事故の概要

(1) サイト概要

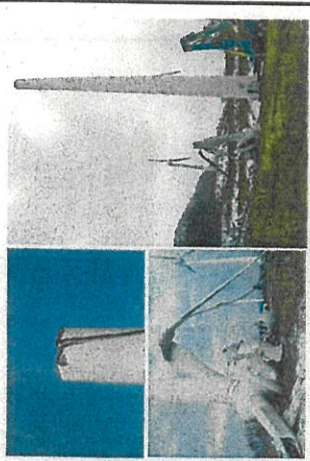
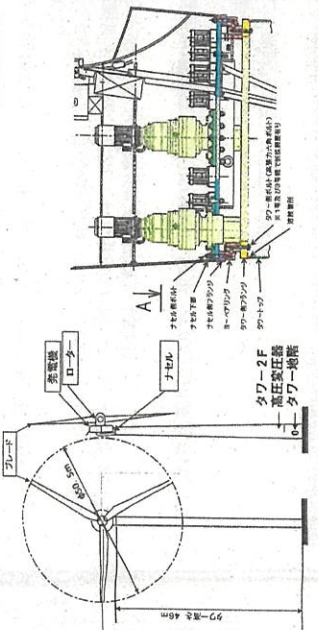
- 所在地 : 京都府与野郡伊根町宇野村小宇太鼓山(図1-1)
- 定格出力 : 4500kW(750kW/基×6基)
- 運転開始 : 平成13年11月15日

(2) 風力発電設備の概要

- 風車 : オランダ ラガウェイ社(以下LW社)製(図1-2、3)
- タワー : 日本 日本鋼管(現JFEエンジニアリング)製
- 定格出力 : 750kW
- 回転数 : 13~33rpm
- ロータ : 直径 50.5m、取付位置 地上 50m

(3) 事故の概要

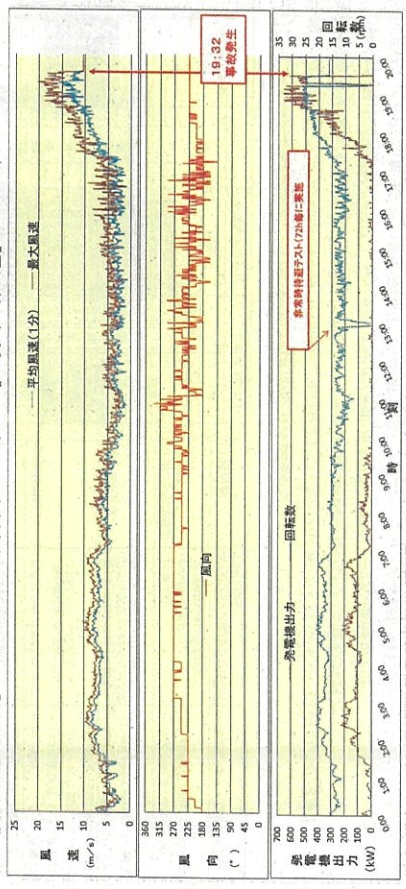
- 日時 : 3月12日19:32に運転停止(推定)
- 3月13日9:42 現地に3号機ナセル落下を確認
- 状況 : タワーの風車接続フランジ下でタワーが破断し、ナセル/ブレードが地上へ落下(写真1-1)



2. 事故状況

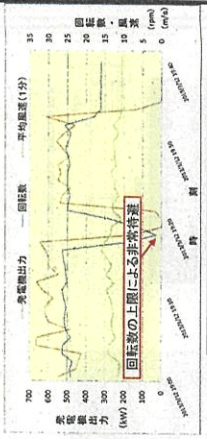
(1) 事故発生時の気象状況・風況

- 事故が発生した3月12日の3号機の風況観測データから、事故発生前は概ねa南西の風、最大風速15~20m/s、1分間平均風速約11~15m/sで推移していた。
- 3号機の風況データ及び運転状況を図2-1、図2-2に示す。
- 事故発生前(3月12日19:32)の3号風車での風速観測データ
【風向】 SW(南西) (1分間データ) 【10分平均風速】 10.9m/s
【最大瞬間風速】 14.5m/s (1分間データ)



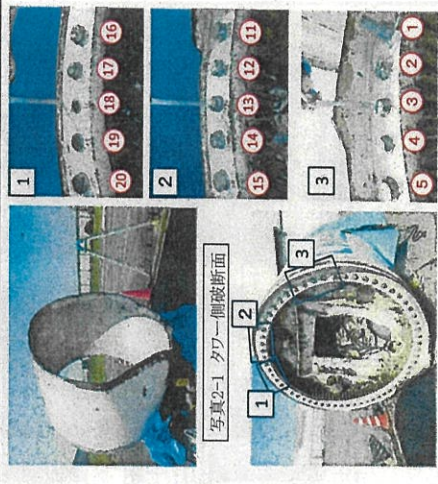
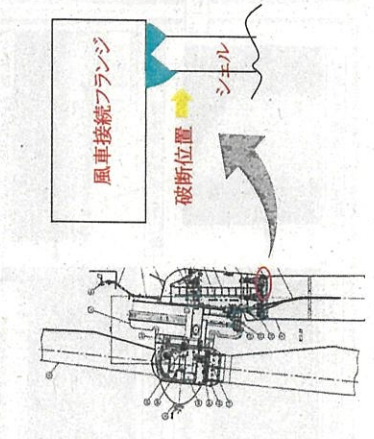
(2) 事故発生時の風車の運転状況

- 事故発生前の運転状態は、19時頃から概ね回転数25rpmで推移し、発電機出力は430kW~660kWの出力が得られていた。
- 事故発生直前の状況:
【回転数】 25.7rpm (1分間データ)
【発電出力】 614kW (1分間データ)



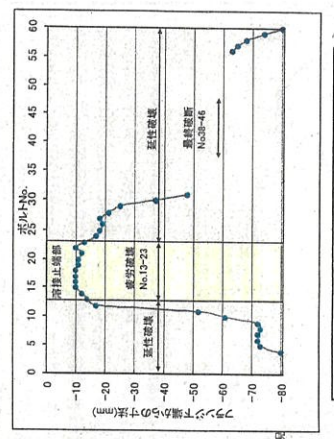
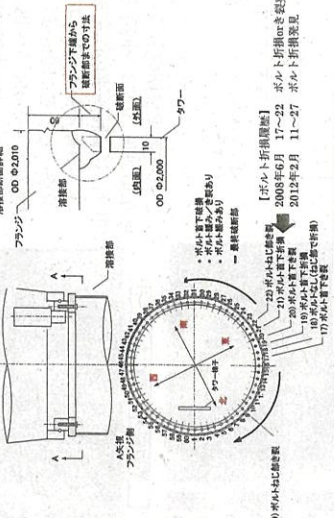
(3) ナセルとタワーの損傷状況

- タワーの損傷状態は、タワートップとフランジ溶接部付近で破断しており、特に主風向の反対に位置する北から東の位置でタワートップの風車接続フランジとシェル(タワー母材)の間の溶接止端部付近で破断している。
- タワーの破断位置を図2-3に示す。また、タワー破断状況を写真2-1~3に示す。



(4) タワーの破断部の状況

- 破断面の円周方向の状況を確認した結果、図2-4に示すとおり、ボルトNo13~23の範囲で、き裂はフランジ下端が最も近く、溶接止端部と一致したところで発生したことが確認されている。また、ほぼ同じ範囲において、ボルトの緩みや折損が確認されている。
- このことから、ボルトNo13~23の範囲でまず疲労き裂が進み、その後、疲労破断から延性破断に変化して円周方向に進展し、最終にナセル/ブレードが落下したと推定される。



3. 事故原因の究明
(1) タワー破断部の調査

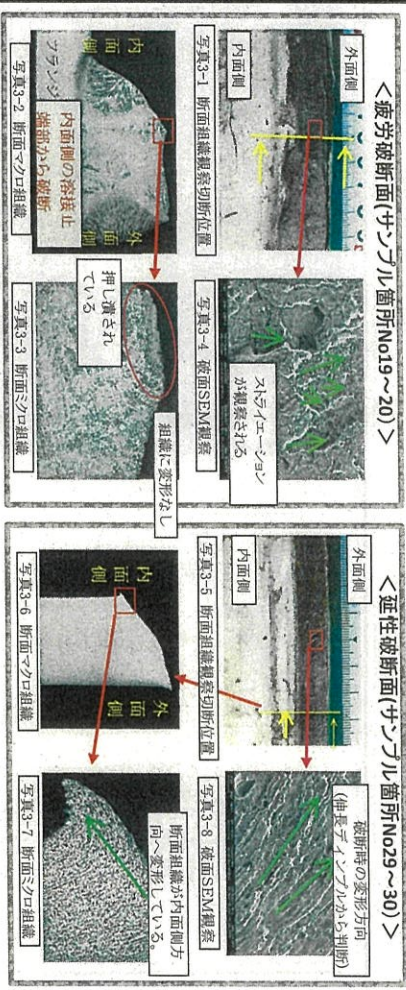
＜疲労破断状況＞
・タワートップボルトNo.13～23の範囲内の破断面組織観察及びSEM観察の結果、次のことが確認され、タワートップ溶接部の疲労破断であることが確認された。

- ① 応力集中部である内面側の溶接止端部からき裂が発生し破面組織に変形が無く、破断している。(写真3-1参照) また、き裂発生後、応力の変動により破断面が繰り返し開閉して押し潰された痕がある。(写真3-3参照)
- ② SEM観察により、疲労破面に特徴的なスライエーションが観察される。(写真3-4参照)

＜延性破断状況＞
・タワートップボルトNo.13～23以外の範囲内の破断面組織観察及びSEM観察の結果、次のことが確認され、タワーの延性破断と考えられる状況が確認された。

- ① 破断面の歪みが認められる。(写真3-7参照)
- ② 破断時の歪み方向が、伸長スライエーションにて確認できる。(写真3-8参照)

【調査結果】
・破断面のSEM観察等から、タワートップの溶接止端部内面側にき裂が発生し、その後、疲労破断から延性破断に変化して円周方向に進展した後に、最終的に全周破断に至ったものと考えられる。

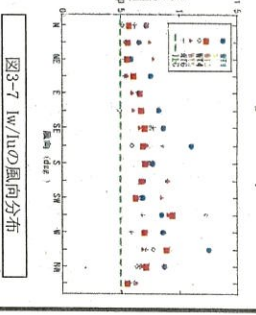
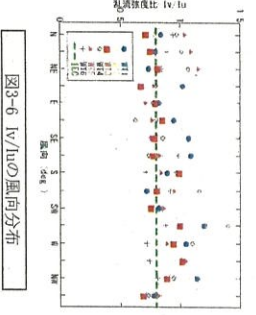
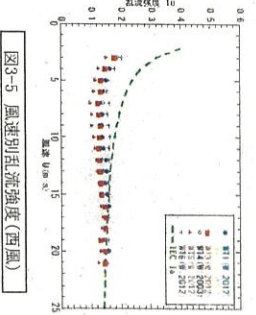
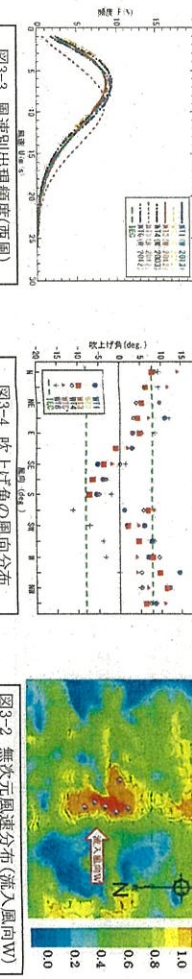


(2) 風力発電サレにおける風況の解析

＜各号機における平均風速と乱流強度の分布＞
・風車設置地点と避雷針塔における平均風速と乱流強度をLESモデルを用い、3次元非定常解析により求めた。ハブ高さにおける無次元風速のベクトルと風速比(実地形風速と平坦地形上の風速との比)について、モデル図を図3-1、コンター図を図3-2に示す。西側崖地形の影響により、風車設置地点では増速していることがわかった。

【調査結果】

・大鼓山風力発電所の風車全6機の平均風速と乱流強度を調べた結果、各号機の年平均風速は6.52～7.26m/sであり、風車の国際基準(BECクラスII、8.5m/s)の値よりやや低くなっている。ハブ高さ(約50m)における吹上げ角はほぼBECの規定の範囲内に収まっているが、西方向を中心に各々高い値となっており、風速別の風方向乱流強度は各号機による違いも見られず、ほぼBECの値以下に収まっているのに対して、風速角方向の乱流強度比(IV/II)と鉛直方向の乱流強度比(IV/II)は共にBECの値を上回っており、特に西方向付近の風で大きな乱れとなっていることが確認された。その内容を図3-3～7に示す。



(3) 3号機タワートップ部ボルトに関する調査

＜タワートップボルトの折損と点検の履歴等＞
・大鼓山風力発電所においては、表3-1に示すとおり、3号機で事故時を含め3度のタワートップボルト折損が確認されている。最初にタワートップボルトの折損が確認された平成20年6月以降の定期点検からは、表3-2に示すとおりハイパークによる目視確認に加え、年2回全タワートップボルト数の10%(6本)のトルク確認(680Nm)を実施してきたが、平成24年2月には定期点検後約1か月、平成25年3月には定期点検後約3か月の間にタワートップボルトの折損が確認されている。なお、タワートップボルトの維持管理及び交換はメーカーサービスマニュアルに従い実施している。

表3-1 3号機タワートップボルトにおける点検と折損等の履歴

ボルト No	H20 5/13	H20 11/22	H23 12/14	H24 6/19	H24 12/22 (事故後)	H25 3/12
1	点検	点検	点検	点検	点検	点検
2	点検	点検	点検	点検	点検	点検
3	点検	点検	点検	点検	点検	点検
4	点検	点検	点検	点検	点検	点検
5	点検	点検	点検	点検	点検	点検
6	点検	点検	点検	点検	点検	点検
7	点検	点検	点検	点検	点検	点検
8	点検	点検	点検	点検	点検	点検
9	点検	点検	点検	点検	点検	点検
10	点検	点検	点検	点検	点検	点検
11	点検	点検	点検	点検	点検	点検
12	点検	点検	点検	点検	点検	点検
13	点検	点検	点検	点検	点検	点検
14	点検	点検	点検	点検	点検	点検
15	点検	点検	点検	点検	点検	点検
16	点検	点検	点検	点検	点検	点検
17	点検	点検	点検	点検	点検	点検
18	点検	点検	点検	点検	点検	点検
19	点検	点検	点検	点検	点検	点検
20	点検	点検	点検	点検	点検	点検
21	点検	点検	点検	点検	点検	点検
22	点検	点検	点検	点検	点検	点検
23	点検	点検	点検	点検	点検	点検
24	点検	点検	点検	点検	点検	点検
25	点検	点検	点検	点検	点検	点検
26	点検	点検	点検	点検	点検	点検
27	点検	点検	点検	点検	点検	点検
28	点検	点検	点検	点検	点検	点検
29	点検	点検	点検	点検	点検	点検
30	点検	点検	点検	点検	点検	点検
31	点検	点検	点検	点検	点検	点検
32	点検	点検	点検	点検	点検	点検
33	点検	点検	点検	点検	点検	点検
34	点検	点検	点検	点検	点検	点検
35	点検	点検	点検	点検	点検	点検
36	点検	点検	点検	点検	点検	点検
37	点検	点検	点検	点検	点検	点検
38	点検	点検	点検	点検	点検	点検
39	点検	点検	点検	点検	点検	点検
40	点検	点検	点検	点検	点検	点検
41	点検	点検	点検	点検	点検	点検
42	点検	点検	点検	点検	点検	点検
43	点検	点検	点検	点検	点検	点検
44	点検	点検	点検	点検	点検	点検
45	点検	点検	点検	点検	点検	点検
46	点検	点検	点検	点検	点検	点検
47	点検	点検	点検	点検	点検	点検
48	点検	点検	点検	点検	点検	点検
49	点検	点検	点検	点検	点検	点検
50	点検	点検	点検	点検	点検	点検
51	点検	点検	点検	点検	点検	点検
52	点検	点検	点検	点検	点検	点検
53	点検	点検	点検	点検	点検	点検
54	点検	点検	点検	点検	点検	点検
55	点検	点検	点検	点検	点検	点検
56	点検	点検	点検	点検	点検	点検
57	点検	点検	点検	点検	点検	点検
58	点検	点検	点検	点検	点検	点検
59	点検	点検	点検	点検	点検	点検
60	点検	点検	点検	点検	点検	点検
61	点検	点検	点検	点検	点検	点検
62	点検	点検	点検	点検	点検	点検
63	点検	点検	点検	点検	点検	点検
64	点検	点検	点検	点検	点検	点検
65	点検	点検	点検	点検	点検	点検
66	点検	点検	点検	点検	点検	点検
67	点検	点検	点検	点検	点検	点検
68	点検	点検	点検	点検	点検	点検
69	点検	点検	点検	点検	点検	点検
70	点検	点検	点検	点検	点検	点検
71	点検	点検	点検	点検	点検	点検
72	点検	点検	点検	点検	点検	点検
73	点検	点検	点検	点検	点検	点検
74	点検	点検	点検	点検	点検	点検
75	点検	点検	点検	点検	点検	点検
76	点検	点検	点検	点検	点検	点検
77	点検	点検	点検	点検	点検	点検
78	点検	点検	点検	点検	点検	点検
79	点検	点検	点検	点検	点検	点検
80	点検	点検	点検	点検	点検	点検
81	点検	点検	点検	点検	点検	点検
82	点検	点検	点検	点検	点検	点検
83	点検	点検	点検	点検	点検	点検
84	点検	点検	点検	点検	点検	点検
85	点検	点検	点検	点検	点検	点検
86	点検	点検	点検	点検	点検	点検
87	点検	点検	点検	点検	点検	点検
88	点検	点検	点検	点検	点検	点検
89	点検	点検	点検	点検	点検	点検
90	点検	点検	点検	点検	点検	点検
91	点検	点検	点検	点検	点検	点検
92	点検	点検	点検	点検	点検	点検
93	点検	点検	点検	点検	点検	点検
94	点検	点検	点検	点検	点検	点検
95	点検	点検	点検	点検	点検	点検
96	点検	点検	点検	点検	点検	点検
97	点検	点検	点検	点検	点検	点検
98	点検	点検	点検	点検	点検	点検
99	点検	点検	点検	点検	点検	点検
100	点検	点検	点検	点検	点検	点検

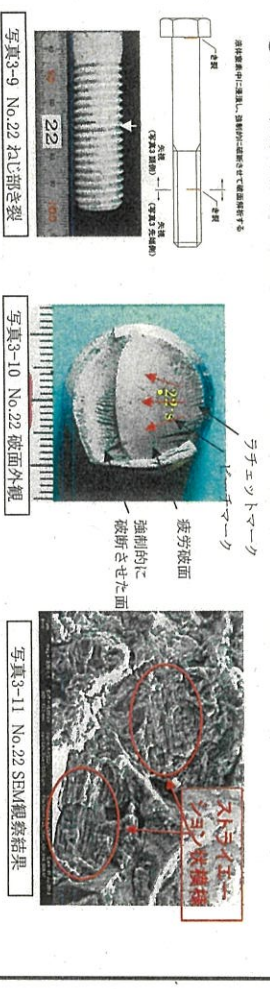
表3-2 タワートップボルトの定期点検の内容

項目	サービスマニュアル	実施内容
○締め付けトルク	B50Nm	> H14～16年度 680Nmでの確認 > H17～20年度 年間全タワー > H20年度 7期以降 680Nmでの確認 > H21～22年度 年間全タワー > H23～24年度 年間全タワー > H25年度 7期以降 680Nmでの確認
○点検間隔	1年毎(5%) (3本)をチエック のみのチェックを行う。	> H14年度 年1回実施(3本×2回) > (H17～20年度は、全タワー確認のみ) > H15年度 年2回実施(3本×2回) > H16年度 年2回実施(3本×2回) > H17～20年度 年間全タワー確認 > H20年度 7期以降 10% (3本)をチエック > H21～22年度 年間全タワー確認 > H23～24年度 年間全タワー確認 > H25年度 7期以降 10% (3本)をチエック > (ボルト交換時と同様に購入)
○ボルト交換	新しいボルトには、二酸化炭素 の付着防止のためのコーティング を施すこと。(オイル使用不可)	> H24年度 7期以降 10% (3本)をチエック > H25年度 7期以降 10% (3本)をチエック > (ボルト交換時と同様に購入)
○ボルト交換時の 手続	記録簿 ※ボルト交換履歴(交換履歴)	> 任意の箇所(2段階)を (1段階:500Nm、2段階:850Nm)
○溶接部	記録簿 ※溶接部点検履歴	> 年1回タワー溶接部を点検 > 年2回タワー溶接部を点検

＜タワートップボルトの折損と点検の履歴等＞

・3号機のタワートップボルトNo.19(首下折損)、No.9(ねじ)、No.20(首下)およびNo.22(ねじ)の4本について破面観察を実施した結果、次のことにより、いずれも疲労破断であることが確認された。

- ① 疲労破面に特徴的なラチエットマークの段差及びヒビークが確認された。
- ② SEMによる破面観察で、疲労破面に特徴的なスライエーションが確認された。
- ③ ねじの谷部や首下の応力集中部を起点とし、疲労き裂が段階的に進展したと推定される。



【調査結果】

・今回の結果から、トルクエック及びハイパークによる目視点検は、緩みは確認できるが、ボルトにき裂が発生している場合、現行のマニュアルによる定期点検では異常が発見できない場合があることがわかった。

4. タワートップ部の構造解析の結果

・ボルト折損時のタワートップ溶接部への影響を明らかにするため、FEM解析を実施した。その結果、ローター側に重心位置があり、その対面のタワートップボルトには引張応力が作用しており、そのボルトの折損によりタワートップ溶接部内側の引張応力は、著しく増大することを確認した。この応力集中により疲労が蓄積しタワーの破断に至ったものと推測される。

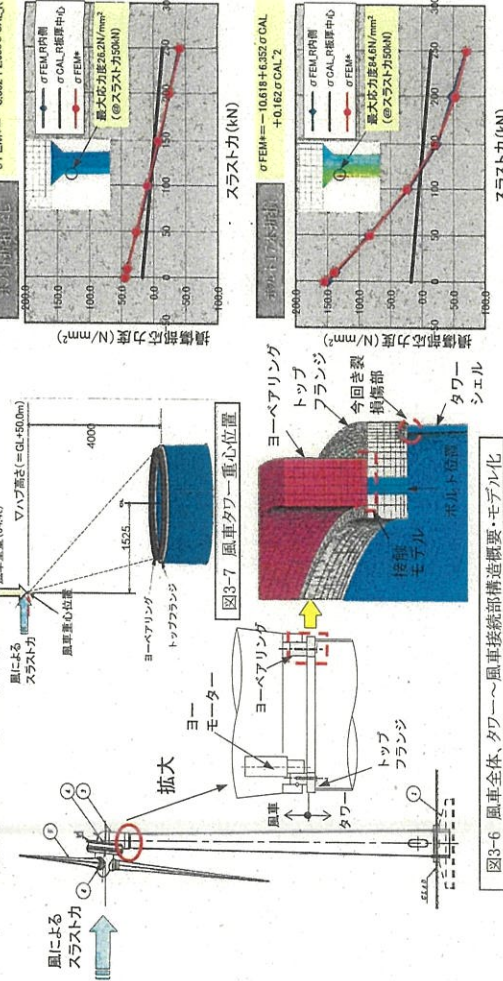


図3-6 風車全体、タワー～風車接続部構造概要・モデル化

(5) タワー損傷部の疲労寿命評価

・当該事故風車(3号機)は平成23年12月14日の定期点検の後、平成24年2月4日に計17本のタワートップボルト折損が発見され、また平成24年12月22日の定期点検の後、ナセル落下事故が発生した。平成25年3月12日にボルト14本の折損と緩み(事故後調査により)が発見された。ボルト折損の期間はそれぞれ約1.7ヶ月(50日)と約2.7ヶ月(80日)である。これらのボルト折損を考慮したタワーの疲労寿命を評価し、タワーに疲労き裂が短期間に発生する可能性を調べた。ボルト折損は冬季に発生していることや、風況調査結果から冬季は風がほぼ西から吹いていることから、西風時のタワーの疲労寿命を評価した。なお、疲労寿命評価の際には、風観測と風況予測から9-14に示す。タワー損傷部の疲労寿命の評価結果を表3-3及び図3-9に示す。

表3-3 疲労寿命の予測結果

解析ケース	条件	20年間累積疲労損傷度	疲労寿命
ケース1	ボルト正常 + IEC標準乱流	0.742	27年
ケース2	ボルト正常 + 現地の風の乱れ	0.940	21年
ケース3	ボルト17本折損 + 現地の風の乱れ	79.3	0.25年 (約3.0ヶ月)

【調査結果】

- ・ IECの標準乱流モデルにより評価された風車タワー溶接部の疲労寿命は設計疲労寿命の20年より長く、現地の風の乱れを考慮しても、設計寿命内に風車タワー溶接部が疲労損傷に至らなかった。
- ・ 一方、ボルトが折損した場合には、応力集中によりタワー損傷部に過大な応力が発生し、その結果、タワー損傷部の疲労寿命はボルト正常時の100分の1程度に短くなった。
- ・ ボルト折損時におけるタワー損傷部の疲労寿命は、ボルト折損の期間とほぼ一致したことから、当該事故風車のタワーの損傷はボルトの折損により引き起こされたことと推定された。

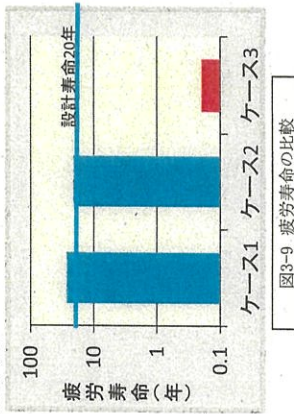


図3-9 疲労寿命の比較

4. 事故原因のまとめ

タワートップ破断部の調査、タワートップボルトに関する調査、風力発電サイトにおける風況の解析、タワートップ部の構造解析、タワートップ破断部の疲労寿命評価から、事故原因は以下のとおり。

- ① タワートップフランジの溶接部近傍の内側で疲労き裂が発生し、疲労破断から延性破断に変化して円周方向に進展し、最終的に全周破断に至り、ナセルが落下した。
また、タワートップボルトの調査により、多数のボルトの折損状態であったことから、現在の定期点検の内容では、ボルトのき裂を発見できない場合があることが確認された。
- ② 風の評価、風応答解析及び構造解析を実施し、当サイトでの風の乱れを考慮した疲労寿命評価を行った結果、ボルト17本折損時に、タワートップ溶接部にボルト折損がない場合の約3.2倍(スラスト力50kNの場合)の引張応力が作用し、約3.0か月で疲労損傷に至る結果を得た。

上記、①②の結果から、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溶接部内側の引張応力が著しく増大し、短期間に疲労寿命に達したことにより、タワートップ溶接部の破断が引き起こされたと推定された。なお、他号機タワートップ溶接部の調査結果から、き裂がないことが確認された。

5. 再発防止策

タワートップボルトの折損等を事故前の定期点検において未然に発見することができなかったことが、今回の事故原因であることから、タワートップボルトのき裂を早期に発見するための定期的な超音波探傷試験及びタワートップボルトの健全性を担保するためのボルト交換とした再発防止策を策定した。この再発防止対策は、保安規程に定める電気工作物の巡視・点検及び測定に関する実施要項に組み入れて実施することとする。今後引き続き、タワートップボルト折損防止対策の検証を行うとともに、風力発電所の安全運転に努める。

表5-1 再発防止対策

項目	問題点	対策	整備するマニュアル	備考
超音波探傷試験による早期き裂の発見	目視確認及びビジュアル検査だけでは、ボルトの緩みを検知することはできず、早期のき裂を検知することができない場合がある。	定期的にタワートップボルト全数の超音波探傷試験を実施し、タワートップボルトのき裂を早期に発見する。また、試験に当たっては、確実かつ適切に実施するためのマニュアルを整備する。	超音波探傷試験マニュアル	対応済
タワートップボルトの定期点検と交換	ボルトの取替が想定されていなかったため、取替時の施工要領等がない。	タワートップボルトのき裂又は緩みが発見した場合は、早期に取替を実施する。タワートップボルト定期点検とボルト交換に当たっては適切に実施するためのマニュアルを整備する。	タワートップボルト定期点検要領	対応済
タワートップボルト折損対策	タワートップボルト折損防止対策の検証が必要	各種ボルトについての軸力調査、FEM解析、寿命予測を実施するとともに、ボルト折損対策の検証を行う。	—	今後検証

6. まとめ

今回のナセル落下事故に関する原因究明では、タワートップ溶接部及びタワートップボルトの破面調査、破面SEM観察、FEM解析、風応答解析を実施した結果、ボルト折損によりタワー溶接部の応力が著しく増大し、溶接部近傍の内側で疲労き裂が発生し、ナセルが落下したことが明らかとなった。
また、実施していた定期点検では、タワートップボルトのき裂を発見することができなかったため、ボルトの折損から最終的にタワーが破断することとなった。
今回の事故原因を鑑み、タワートップボルトのき裂を早期に発見するための定期的な超音波探傷試験及びタワートップボルトの健全性を担保するためのボルト交換とした再発防止策を確実に実施するとともに、タワートップボルト折損防止対策の検証を行う。
今後、事故機以外の風車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、風力発電所の長期に亘る安全運転に努めていく。

付属資料 3 特徴的な故障・事故等の詳細

3-1 落雷による被害事例（京都府太鼓山風力発電所）

平成 21 年 12 月に落雷による複数基の風車被害が発生した首記の風力発電所について、風車の落雷被害を中心とする詳細調査／ヒアリング実施した。以下にその概要を記す。

(1) 調査対象風車

- 1) 設置場所： 京都府与謝郡伊根町字野村小字太鼓山（付図 3-1）
- 2) 事業者： 京都府
- 3) 発電所： 太鼓山風力発電所
- 4) 風車概要： 定格出力 750kW×6 基、ピッチ制御式アップウインド型風車
耐風速 60m/s（IEC クラス II 相当）、平成 13 年 11 月設置



付図 3-1 太鼓山風力発電所の位置および外観

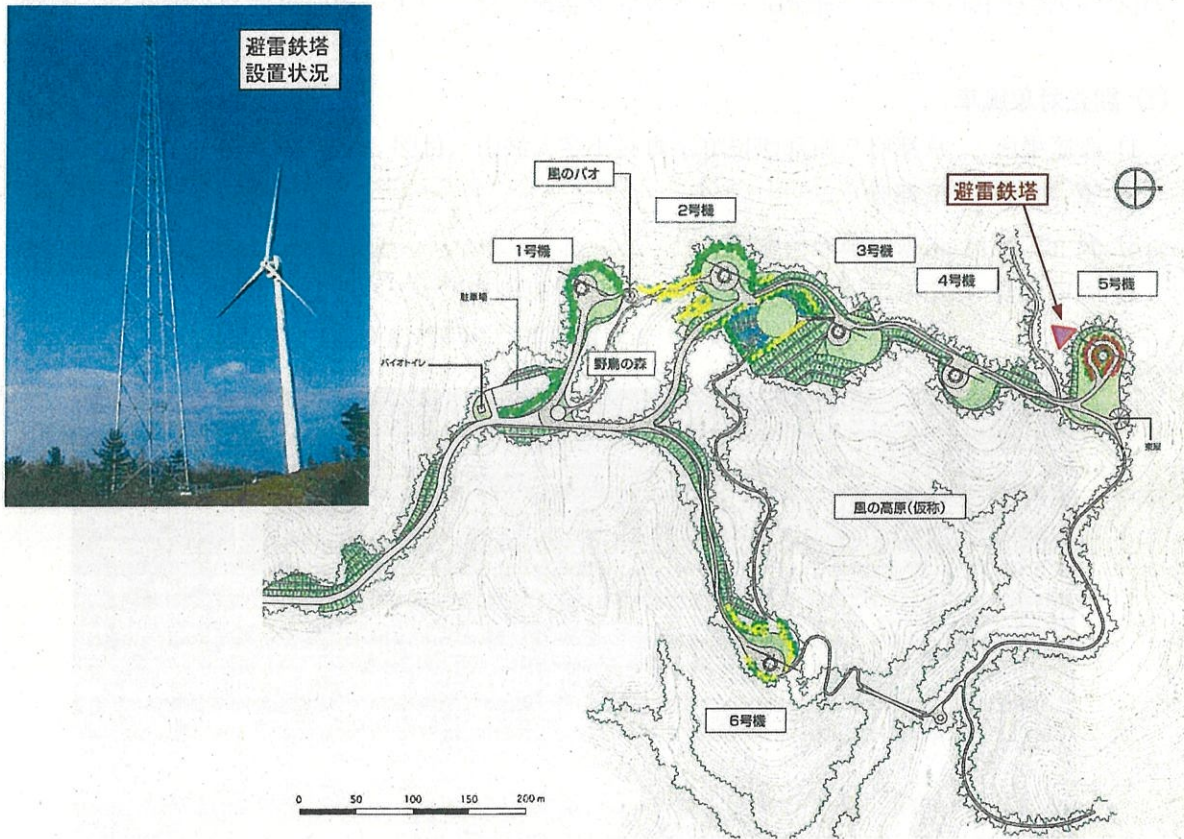
(2) 故障・事故の内容

1) 過去の故障・事故発生状況と対策の概要

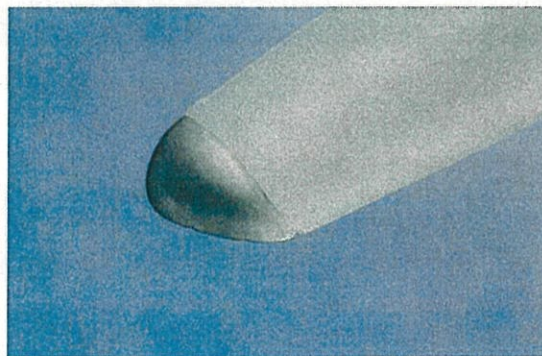
当該風車は平成 13 年 11 月の設置当初からトラブルが多く、十分な稼働ができない状況が続いていた。このため、平成 14 年度の後半に風車メーカーが制御系機器を国産化し、以降が実質的な正常運転となる。

しかし、同年度の冬には全基が落雷で故障するというトラブルがあり、これを受けて落雷対策委員会を設置し、検討した結果、避雷鉄塔の設置が有効であるとのことから、平成 15 年 12 月に 5 号機近傍（全風車の一番北側〔＝冬季主風向の風上側〕；付図 3-2）に高さ 100m の避雷鉄塔を設置した（注：風車ハブ高は 50m、ブレード最高到達点は約 75m である）。また、同年には 1 号機（避雷鉄塔から最も遠い風車）について、試験的にメーカーと共同開発した新型の耐雷ブレード（先端をアルミ製ブロックとしたもの；付図 3-3）に交換しその効果を確認することとした（他の号機は一般的なレセプタが設置されている）。以降は、風車への落雷は大幅に減少し避雷鉄塔の効果は確認された（付表 3-1、付図 3-4）が、100%保護

できるわけではなく、毎年落雷により何らかの被害が発生している。また、耐雷ブレードを採用した1号機については、交換以降は運転に支障が出るようなブレードの被害は1件も発生しておらず、十分な効果が現れているようである。



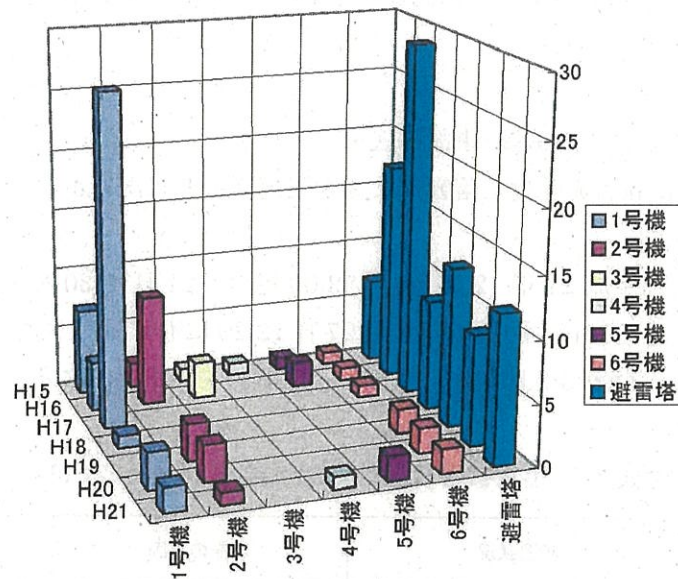
付図 3-2 太鼓山風力発電所の風車配置と避雷鉄塔設置位置



付図 3-3 1号機の新型ブレード(先端をアルミブロックとした)

付表3-1 太鼓山風力発電所における落雷被害発生状況(修繕が必要になった件数)

	H13	H14	H15	H16	H17	H18	H19	H20	H21	合計	全期間発生率	H16~21発生率
1号機		3							1	4	9%	4%
2号機		3	2	3		1	2	1	1	13	30%	33%
3号機		2		1	1			1		5	11%	13%
4号機		3		1		1				5	11%	8%
5号機	1	3		1	2				1	8	18%	17%
6号機		3		1	1		2	1	1	9	20%	25%



付図 3-4 号機別の落雷回数

上記に示したような落雷による被害は、太鼓山風力発電所の場合冬季（その中心は12月・1月）に集中しており、夏季においては修繕が必要となるような被害は発生していないとのことである。

なお、同発電所では落雷対策として、上記以外に以下の対策も実施している。

- ・アレスタ、耐雷トランスの増設
- ・襲雷予報システムによる風車の停止
- ・鉄塔およびタワーにはロゴスキーコイルを設置（平成15年12月）し落雷データを計測

また、同発電所では落雷以外でも以下のような比較的大きな故障およびトラブルが報告されており、事業性を圧迫する大きな要因となっている。

- ・ヨーギア関連の不具合：3号機と4号機において平成17～18年の間にヨーギアに多数の不具合が発生し損傷に至った。4号機はヨーギア交換ができないため、平成22年2月現在も風向を自動で追尾できない状態であり、特定風向のみの発電運転を余儀なくされている（詳細は後述）。
- ・ロータベアリング（主軸軸受）の不具合：6号機において平成19年にロータベアリングから異音が発生しているのが確認され、確認したところロータ全体が前のめりに傾いていた。このためベアリングを交換（メーカーによる無償修理）し、また同様の不具合が懸念される1号機についてグリス交換・点検強化にて状態監視することとした（詳細は後述）。
- ・定格出力が出ない不具合：風車設置以降、安定して定格出力（750kW）を発生することができず、結果として好風況時にも本来得られるべき発電量が得られていない。メーカーによれば、乱れが大きく過回転状態が発生しオーバーロードとなるため、定格回転数を下げ出力制限を行っているとのことであるが、他の風車ではあまり見られない（注：同

機種を採用している他事業者では同様の事象が発生している) 現象であり、風車制御上の問題点なども考えられる。

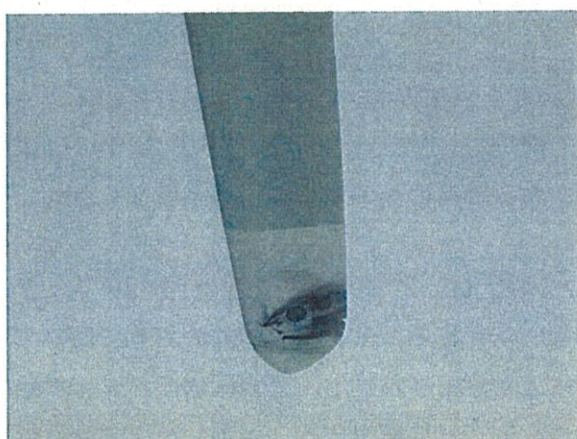
2) 平成 21 年度の落雷による故障・事故の状況

以下に、本年度に報告を受けた落雷による大規模被害の状況を示す。

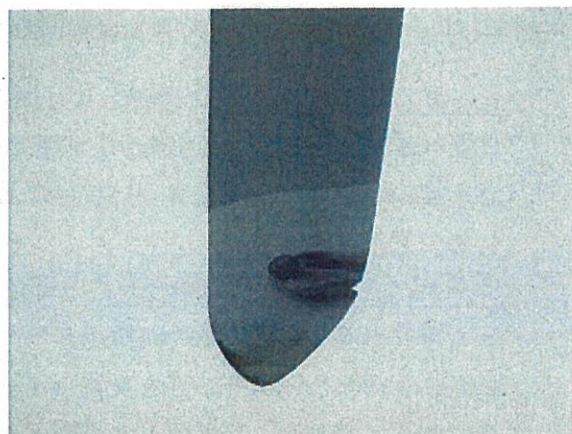
- ・ 事故発生日時： 平成 21 年 12 月 20 日 22:00 過ぎ～21 日 0:30 頃にかけて
その後、平成 22 年 1 月 27 日 12:20 にもブレード被害が発生している。
- ・ 被害の概要： 付表 3-2 に示す。また、被害状況を付図 3-5 に示す。

付表 3-2 落雷被害状況(平成 21 年 12 月 20～21 日)

号機	運転の可否(a)	送電の可否(b)	被害状況	左記の原因	落雷電流の状況 (落雷カウンタにて測定)
開閉所	×	×	遠方監視装置通信制御機器損傷 1式 不良ユニット数 不明	落雷や誘導雷の影響で大電流が弱電回路に流れ込み損傷したと思われる。	—————
1号機	×	×	IGBTユニット損傷 3台 コンデンサユニットフューズ溶断 1個	落雷や誘導雷の影響で大電流が弱電回路に流れ込み損傷したと思われる。	12/20 22:26:13 +45kA
2号機	×	×	ブレード損傷(#3 No5364) 1枚 IGBTユニット損傷 4台 コンデンサユニットフューズ溶断 4個	落雷や誘導雷の影響で大電流がブレード及び弱電回路に流れ込み損傷したと思われる。	12/21 00:22:43 +81kA (同所で計測された最大値を記録)
5号機	×	×	IGBTユニット損傷 2台 コンデンサユニットフューズ溶断 1個	落雷や誘導雷の影響で大電流が弱電回路に流れ込み損傷したと思われる。	落雷カウンタは落雷無し、避雷鉄塔のカウンタ 12/20 22:32 ~ 12/21 0:08この間、8回落雷あり：最大95.3kA
6号機	×	×	ブレード損傷(#3 No6132) 1枚 IGBTユニット損傷 3台 コンデンサユニットフューズ溶断 2個	落雷や誘導雷の影響で大電流が弱電回路に流れ込み損傷したと思われる。	12/21 00:04:26 +6kA 00:25:26+20kA



(a) 2号機ブレード被害

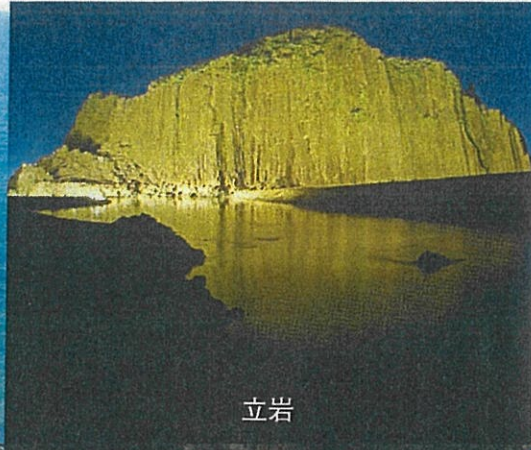


(b) 6号機ブレード被害

付図 3-5 落雷被害状況(続き;平成 21 年 12 月 20～21 日)



屏風岩



立岩



鳴き砂の琴引浜



玄武洞



ジオカヌー(竹野海岸)



神鍋山

日本海形成に伴う多様な地形・地質・風土と人々の暮らしを体感！
世界ジオパークネットワーク加盟認定



San'in Kaigan Geopark

—山陰海岸ジオパーク—



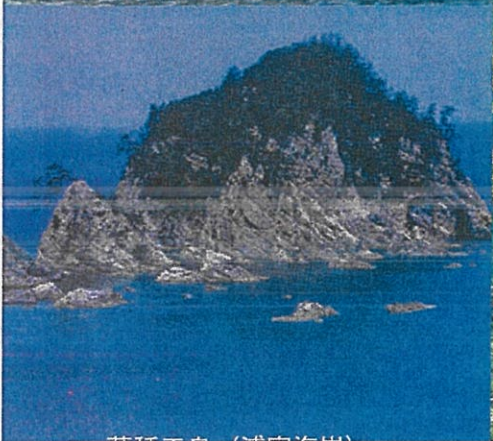
鎧の袖 (香住海岸)



和佐父の棚田



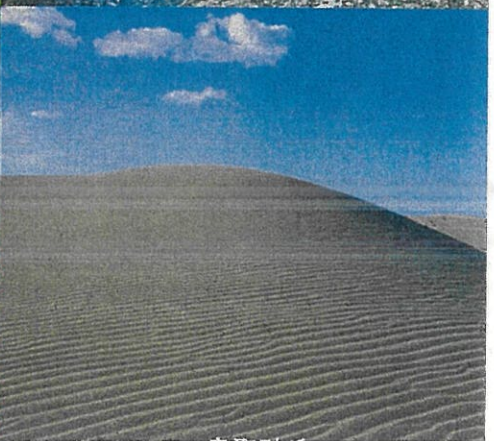
三尾大島 (但馬御火浦)



若狭大島 (若狭海岸)



大滝



大砂丘

山陰海岸ジオパークって？

ジオパークとは大地に親しみ、大地の成り立ちを知り、人間と地球のこれからの関係を考える「大地の公園」です。自然遺産を保全するとともに、地球科学の普及や環境教育などを行い、さらに観光資源として活用したジオツーリズムを通じて、地域社会の活性化を目指します。

山陰海岸ジオパークでは、日本列島がアジア大陸の一部だった時代から、今日に至るまでの経過を確認できる貴重な地質遺産を含む豊かな自然を背景とした人々の暮らしを体験することができます。



見る!

鳥取砂丘、浦富海岸、但馬御火浦、琴引浜など数々の国指定天然記念物をはじめとした美しい自然風景にふれることができます。



食べる!

松葉カニをはじめとした豊富な海産物、但馬牛、多様な地形を活かして栽培される農作物などグルメの宝庫です。



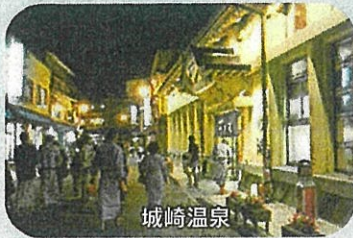
豊かな自然、その中で育まれた歴史、文化、産業など様々な地域資源を活用した体験学習に参加することができます。また、新温泉町山陰海岸ジオパーク館など各地域の学習施設も充実しています。

学ぶ!



温泉!

城崎温泉などの千年以上の歴史をもつ名湯をはじめ、良質の温泉に数多く恵まれた温泉王国です。



山陰海岸ジオパークの魅力はまだまだ盛りだくさんです。詳しくはホームページを御覧ください。

山陰海岸ジオパーク推進協議会HPアドレス

<http://sanin-geo.jp/>



山陰海岸ジオパーク推進協議会事務局

〒668-0025 兵庫県豊岡市幸町7-11

兵庫県豊岡総合庁舎4階

☎ (0796) 26-3783