

1. ユーラス肝付ウインドファームと事故の概要

1.1. ユーラス肝付ウインドファーム（以下「肝付 WF」）概要

発電所概要		風力発電設備概要	
所在地	鹿児島県肝属郡肝付町	型式	JSW 製 J82-2.0
定格出力	30,000kW（2,000kW × 15 基）	風車クラス	極値 Class I（基準風速 50m/s） 疲労 Class II A（平均風速 8.5m/s）
運転開始	2011 年 3 月 18 日	発電機形式	ギアレス永久磁石励磁式同期発電機
		定格出力	2,000kW
		回転速度	19.0rpm
		ロータ直径	83.3m（取付位置：地上 65m）

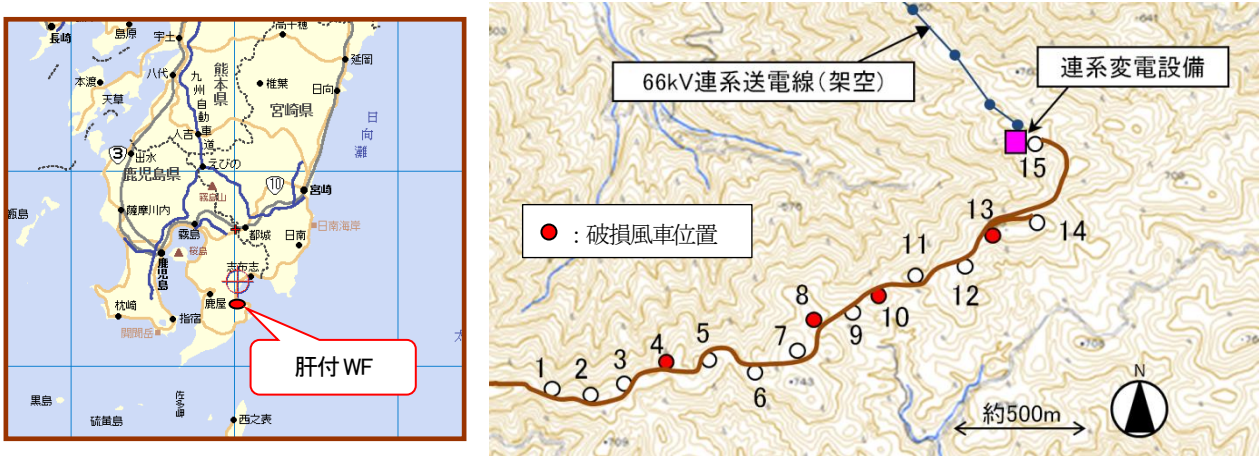


図 1-1 肝付 WF の位置とレイアウト

1.2. 事故概要

2016 年 9 月 20 日午前 0 時～3 時頃に台風 16 号（中心付近の気圧 945hPa）が肝付 WF 付近を通過し、肝付 WF の風車 15 基のうち 4 号機、8 号機のタワーが座屈、10 号機のブレード 3 枚が折損、13 号機のブレード 1 枚が折損した。

当該風車は風速 35m/s 以上において、ストームモード（ピッチ角フェザー、ダウンウィンドの状態）で制御されるようプログラムされており、実際に SCADA データよりストームモードで運転されていたことが確認されている。なお、事故時に風車への系統電源の供給は継続されていた。



(a) 4 号機

西北西方向にタワーが座屈、ブレードは第 1, 2, 3 軸が折損し、全て風車付近に落下



(b) 8 号機

北北西方向にタワーが座屈、ブレードは全てハブに付いたまま地上に落下



(c) 10 号機

ブレード第 1, 2, 3 軸が折損し、北～北北西方向に飛散（最大飛散距離約 250m）



(d) 13 号機

ブレード第 1 軸が折損し、北～北北西方向に飛散（最大飛散距離約 340m）

図 1-2 破損した風車の状況

1.3. 事故発生時の風況

事故発生前後の時間帯に各風車で観測された最大風速を表 1-1 に示す（4,8,10,12,13,14 号機は 0:23～0:58 頃を境に風車の保護装置動作等により通信が遮断されたため、データが残存する範囲での最大値）。全風車中の最大風速は 10 分平均値で 76.9m/s(12 号機)、3 秒平均値で 92.0m/s(11 号機)であった。

表 1-1 各風車で観測された最大風速（m/s）

号機	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10分平均風速最大値	65.5	66.2	59.1	64.6	68.0	68.8	70.0	60.1	71.0	54.8	70.3	76.9	62.7	67.6	50.3
3秒平均風速最大値	83.9	85.9	79.4	78.5	87.0	87.8	85.7	82.4	87.5	72.8	92.0	90.7	86.7	87.0	71.4

各風車の風速、風向の時系列の傾向はおおよそ同じであった。最大風速(3 秒平均値)を示した 11 号機のナセル風速計、風向計のデータを図 1-3、図 1-4 に例示する。風速は 0:30～1:00 頃にピークとなり、風向は 1:00～2:00 頃を境におおよそ南東方向から北西方向に変化していた。南東及び北西方向の風向は、風車が配置された北東方向に延びる尾根に直交するものであった。

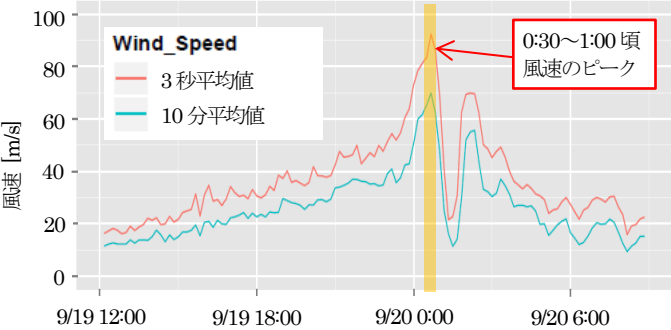


図 1-3 11 号機 風速

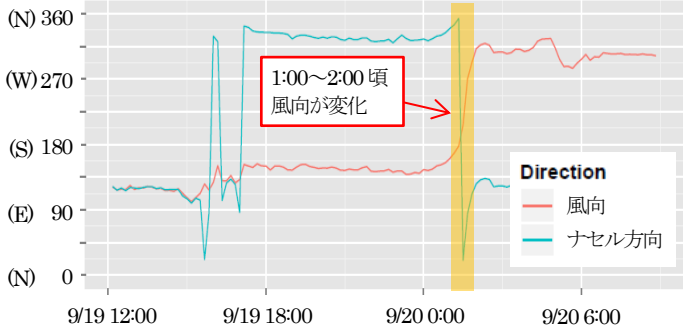


図 1-4 11 号機 風向・ナセル方向

2. 事故原因究明、再発防止対策検討フロー

事故原因究明及び再発防止対策の検討について、以下のフローにより対応を進めた。

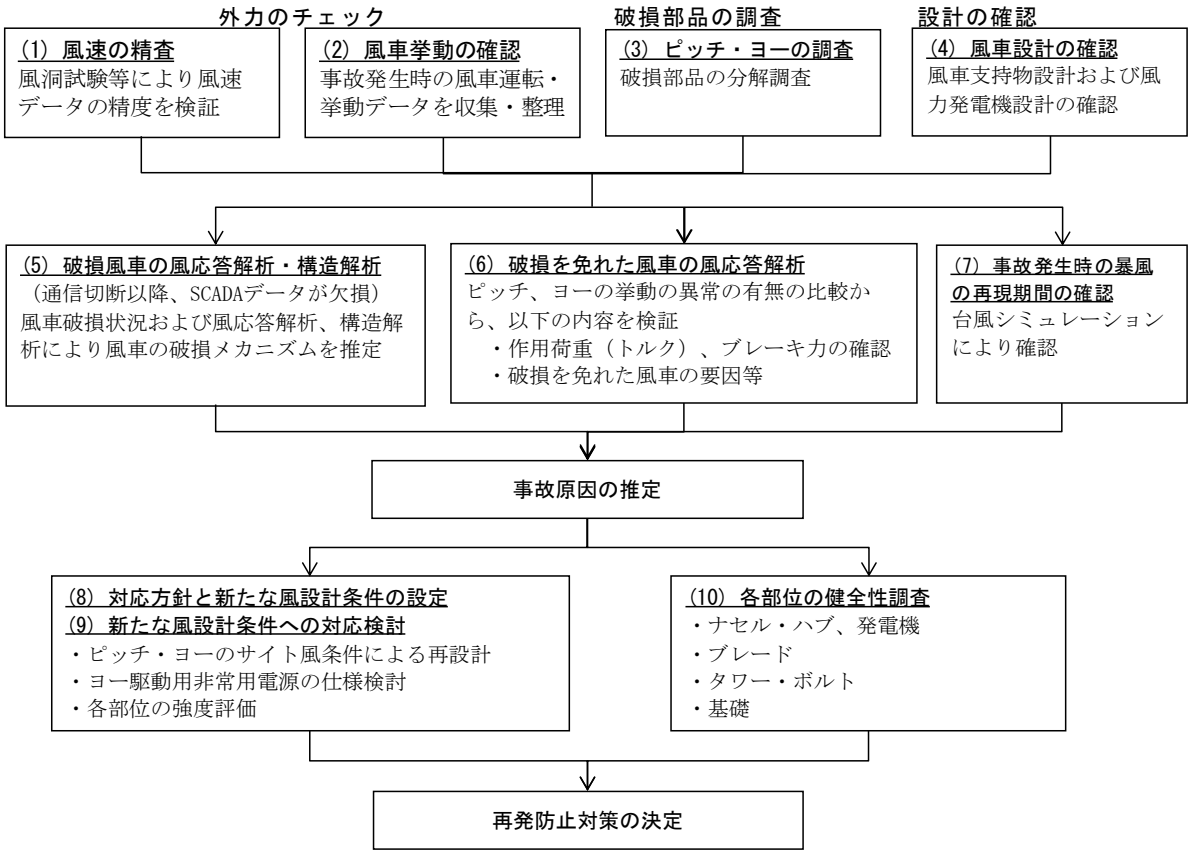


図 2-1 事故原因究明、再発防止対策検討フロー

3. 事故原因究明、再発防止対策検討結果

推定事故原因

(1)～(7)の検討結果により、今回の風車破損事故は、台風の規模・通過ルート(風向)及び肝付 WF の地形が複合的に影響し発生した設計再現期間を大きく上回る極めて稀な暴風(サイト内最大 10 分平均風速：76.9m/s)によるものであり、これが風車の設計風速を超過したことによるものと推定された。

(1) 風速の精査

- ナセル風速計の計測レンジは0.5～50m/s であるが、事故発生前後にはそれを大きく上回る風速が計測されていたため、50m/s を超える風速域における計測値の精度確認を実施した。
- ・風速 80m/s 以下：風洞試験にておおそメーカーの示す風速計精度の範囲(±3%)の出力が得られることを確認した。
 - ・風速 80m/s 超え：風速計主軸に回転機を接続し風速計パルス信号出力周波数が正しく出力されることを確認した。

⇒ 事故発生時に計測された風速計の値は適切な値であると判断

(2) 風車挙動の確認

- 破損風車(4, 8, 10, 13 号機)の SCADA に記録されていた風況・運転データを確認した結果、以下の状況を確認した。
- ・風 速：風車の設計風速(10 分平均 50m/s、3 秒平均 70m/s)を大きく上回る風速が記録されていた
 - ・エラー：ピッチ角の異常、ヨー制御の異常・ブレーカー遮断を示すエラーが発生していた
 - ・ピッチ：ブレーキがかかっていたにもかかわらず、フェザーの状態から角度が外れたものが多数確認された
 - ・ヨ ー：ダウンウィンドの姿勢を維持できなくなっていたことが確認された
 - ・通 信：それぞれ特定の時間で通信が切断されており、以降のデータは記録されていなかった

⇒ 設計風速を超える暴風が発生したこと、ピッチ及びヨーの制御が正常に維持できていなかったことを確認

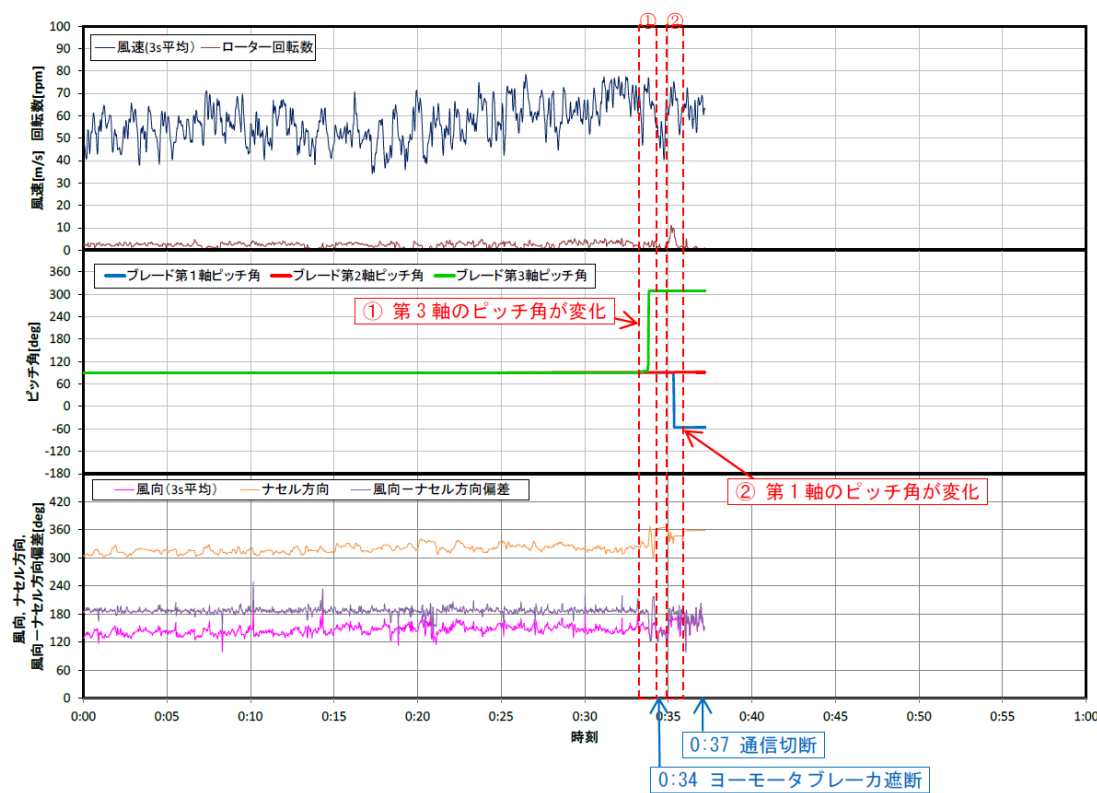


図 3-1 SCADA データの例 (4 号機)

(3) 破損部品の調査

- 4, 8, 10, 13 号機のピッチ、ヨー駆動装置(モーター及びレデューサー)の破損状況の調査を行った。
- ・ピッチ：モーターは一部異音がするものもあったが、全数動作した。レデューサーは4 号機 の1 台が破損していることが確認された。破損状況から、タワー座屈の際に過大な外力により破損したものと推定される。
 - ・ヨ ー：モーター、レデューサー全数に損傷が見られた。破損状況から、強風によりヨーが回された際に過大な外力が作用し、破損したと推定される。

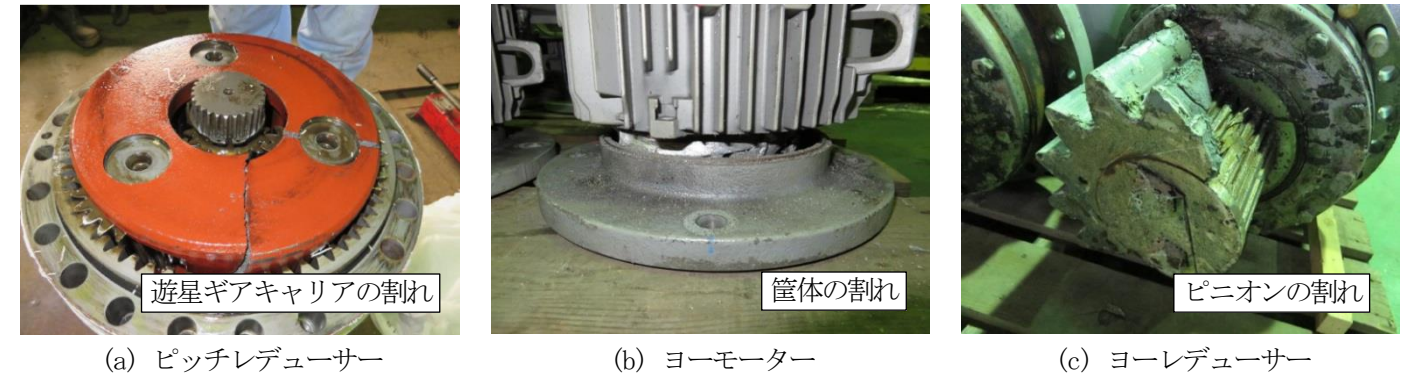


図 3-2 ピッチ、ヨーの破損状況例

⇒ 過大な外力によりピッチ及びヨーの駆動装置が破損した(経年劣化が破損原因ではない)ことを確認

(4) 設計の確認

風車支持物(タワー、基礎)については設計指針に従い建築基準法に基づく認定を受領していること、また風力発電機については設計認証(極値クラス I)を受領していることを確認した。

⇒ 風車は工事計画届提出時の法規、国際規格等に従い適切に設計されていたことを確認

(5) 破損風車の風応答解析・構造解析

破損した風車の SCADA に記録されていた風況・運転のデータ及び推定による通信切断後の風況・運転データ(事故発生前に通信が切断されていたことから、一定の想定のもと作成)を用いて、シミュレーションソフトによる風応答解析(ウインドシード 10 ケース×アジマス角 36 ケース=計 360 ケース)を行い、風車に作用する荷重を算出し、この作用荷重を基に構造解析を実施した。

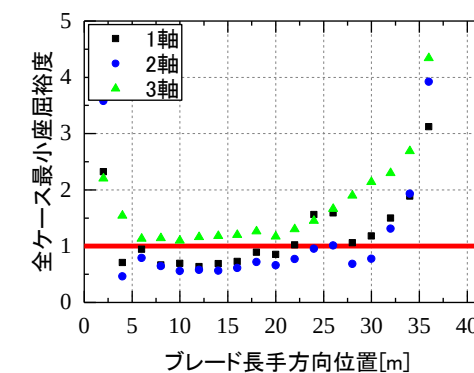


図 3-3 10 号機ブレード最小座屈裕度

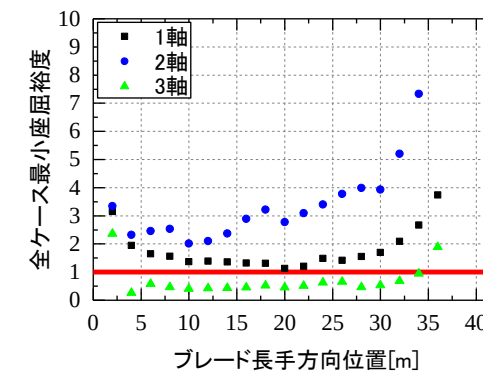


図 3-4 13 号機ブレード最小座屈裕度

ブレードの座屈裕度が 1 を下回るケースを確認(10, 13 号機)
※ 座屈裕度=座屈荷重/作用荷重であり、これが 1 を下回るとブレードが折損する可能性がある。

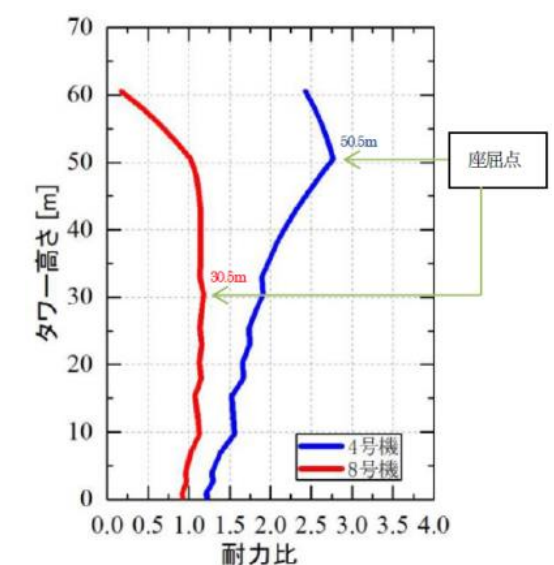


図 3-5 4,8 号機タワー座屈解析結果

実際のタワー座屈位置と解析上の座屈位置が一致し、事故状況がシミュレーション結果でも再現された(4, 8 号機)
※ 耐力比=作用荷重/座屈荷重であり、これが 1 を上回るとタワーが座屈する可能性がある。

⇒ 事故時の暴風による荷重によって、風車が破損した可能性があることを確認

(6) 破損を免れた風車の風応答解析

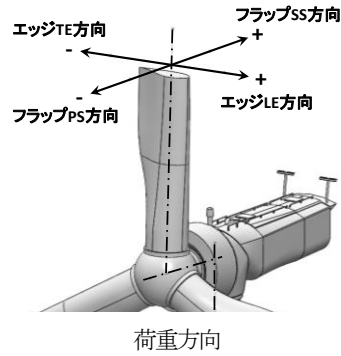
再発防止対策検討の一助とするため、破損を免れた風車の挙動解析を実施した。

a) ブレードに作用する荷重の解析結果

破損を免れた風車のうち、高風速を記録した 6, 11, 12, 14 号機の 4 基に対し風応答解析を行い、ブレード基部に作用する荷重を算出した。

表 3-1 ブレード基部に作用するモーメントの比較（黄色網掛け部は異常値）

機番	軸番号	解析対象時間のSCADAデータ			ブレード基部に作用するモーメントの設計荷重超過
		最大風速[m/s] (3秒平均値)	ピッチ角[deg]※1	ヨー偏差[deg]※2	
6号機	1	85.4	254.2	189.5	全ケース超過（フラップSS※4方向）
	2		288.0		全ケース超過（フラップPS※4方向）
	3		89.2		なし
11号機	1	83.0	92.9	181.8	なし
	2		90.7		なし
	3		90.0		なし
12号機	1	89.5	90.3	193.3	超過するケースあり（フラップSS方向）
	2		235.9		全ケース超過（フラップSS方向）
	3		90.0		超過するケースあり（フラップSS方向）
14号機	1	81.9	-35.0	191.7	全ケース超過（フラップPS方向）
	2		90.1※3		なし
	3		269.9		超過するケースあり（フラップSS方向）



- ピッチ角がフェザーから変化したブレードには設計荷重を超える荷重が作用しうる
- ピッチ角がフェザーに保たれていた 11 号機には設計荷重を超える荷重はブレードに作用しなかった

※1 ピッチ角は 90deg がフェザー

※3 14 号機 2 軸お通信切断後、SCADA データのない時間帯でピッチ角が変化

※2 ヨー偏差は 180deg がダウンウィンド

※4 SS : Suction Side、PS : Pressure Side の略

b) ヨー駆動機構に作用する荷重の解析結果

ヨーについては、原設計のモーター容量 1.5kW 仕様の風車（13 基）とモーター容量が 2.2kW 仕様の風車（2 号機、5 号機の 2 基）がある。よって高風速を記録しかつヨー駆動機構が破損していた 12 号機、14 号機と、2.2kW 仕様のモーターを備えていた 2 号機、5 号機の計 4 基を評価対象とした。解析対象時間はピッチ角が変化した時間帯及びヨーモータブレーカ遮断やヨーセンサ異常が発生した時間帯（ヨー駆動機構が破損した時間帯と推定される）を選定した。

表 3-2 ヨー制御機構の状況比較（黄色網掛け部は異常値及び破損）

機番	軸番号	解析対象時間のSCADAデータ※1			ヨーモーター容量[kW]	最大ヨー回転速度[deg/s]	ヨーまわりの機器異常	ピニオンにかかる荷重※2[kNm]
		最大風速[m/s] (3秒平均値)	ピッチ角[deg]	ヨー偏差[deg]				
2号機	1	83.2	254.2	148.8	2.2	11.1	ブレーキ摩耗	2,485～4,658
	2		288.0					
	3		89.2					
5号機	1	79.3	92.9	171.5	2.2	4.7	異常無し	512～1,900
	2		90.7					
	3		90.0					
12号機	1	74.1	90.2	147.7	1.5	15.8	ヨーリング、モーター、レデュサー破損	3,295～4,376
	2		235.9					
	3		95.2					
14号機	1	78.8	-35.0	207.5	1.5	19.7	ヨーリング、モーター、レデュサー破損	6,999～7,940
	2		90.1					
	3		269.9					

- ピッチ角がフェザーから変化することでヨーベアリング周りのモーメントが大きくなり、ヨー駆動機構の破損に至ることを確認（12,14 号機）
- ただし、ヨーモーターの容量が大きい仕様（2.2kW）のものはピッチ角がフェザーから変化してもヨー回転速度が抑えられ、軽微な破損で済んだ（2 号機）
- ピッチ角がフェザーから変化しなかったものはヨー機構が破損しうる荷重が作用しなかったことを確認（5 号機）

※1 表 6-11 とは解析対象時間は異なる

※2 ピニオンの耐荷重は約 3,800kNm

➡ ピッチ、ヨーの制御が維持できれば、風車の構造安全性が確保できる可能性があることが示唆された

(7) 事故発生時の暴風の再現期間の確認

風向特性を考慮した気流解析(台風シミュレーション)により肝付WFにおける50～2,000年再現期待風速を算出した(図3-6)。事故発生時に観測された最大風速76.9m/s(10分平均値)の再現期間は1,000～2,000年相当(台風の規模(接近時の中心付近の気圧945hPa)、台風のルート及び肝付WFの地形が複合的に影響し発生した極めて稀な事象)と想定される。

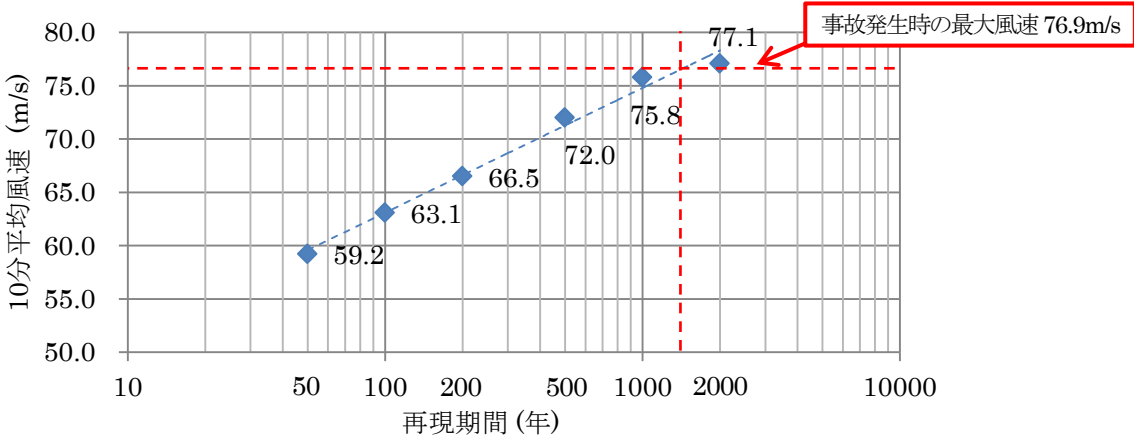


図 3-6 台風シミュレーションによる再現期間別の 10 分平均風速 (V_{ref})

➡ 事故発生時の暴風は再現期間 1,000 年以上の極めて稀な事象であったことを確認

再発防止対策

事故原因究明により得られた結果及び(8)～(10)の検討結果により、以下の対策にて再発防止を図る。

- ピッチ、ヨーのモーター・ブレーキの機能強化を実施する
- 系統電源喪失時の制御確保のための非常用電源システムを設置する

(8) 新たな風設計条件の設定

暴風時の新たな設計条件として、①関係法令への適合性、並びに②当社独自の判断により今回の台風相当の暴風時においても風車破損が再発しないことを考慮し、以下の 2 条件を設定する。

- ① 再現期間 50 年の設計風速(台風シミュレーションにより、10分平均風速 59.3m/s、3秒平均風速 83.0m/s)
➔ IEC に則り所要の部分安全率を考慮
- ② 本台風時にナセル上で観測された最大風速（10 分平均風速 76.9m/s、3 秒平均風速 92.0m/s）
➔ 再現期間が 1,000～2,000 年相当と発電所供用期間中に経験することが極めて稀であると考えられることから、要求性能を安全限界とし、各部分安全率を 1.00 とする

また、系統電源喪失時の制御確保のための非常用電源を具備し、DLC6.1 で設計を進める。(非常用電源不作動時は DLC7.1 についても検討する必要があるが、DLC7.1 の条件(66.4m/s、荷重部分安全率 1.1)は原設計条件の DLC6.2(70m/s、荷重部分安全率 1.1)に包含されるため、評価不要と判断)

※ DLC : Design Load Case の略で、以下の状況を表す

表 3-3 DLC の概要

DLC	風条件	運転状態	ヨー制御	風向-ナセル方向偏差	荷重部分安全率
6.1	極値風モデル (50年再現期待風速+乱流風)	待機中	正常に動作	±8° 以内	1.35
6.2	極値風モデル (50年再現期待風速+乱流風)	待機中(電源喪失)	不動作	±180° 以内(全方向)	1.10
7.1	極値風モデル (1年再現期待風速+乱流風)	待機中の故障	不動作	±180° 以内(全方向)	1.10

以上により決定した肝付 WF における暴風時の新たな設計条件と原設計条件の比較を表 3-4 に示す。

表 3-4 肝付 WF における風車の原設計条件と新たな設計条件（極値条件）

	原設計条件	設計条件① (50 年再現期待風速※)	設計条件② (既往最大風速)
10 分平均風速 (V_{ref})	50m/s	59.3m/s	76.9m/s
3 秒平均風速 (V_{cs0})	70m/s	83.0m/s	92.0m/s
設計荷重ケース	DLC6.1, 6.2	DLC6.1	DLC6.1
流入風条件	IEC 設計要件に基づき、 所要の条件を設定	±8°（非定常風）	±8°（非定常風）
風車姿勢		ダウンウィンド	ダウンウィンド
ピッチ状態		ネガティブフェザー	ネガティブフェザー
荷重部分安全率		1.35 (IEC 設計要件)	1.00 (安全限界)

➡ 暴風時の新たな風設計条件を設定し、これに対して構造安全性を確保する設計変更により、再発を防止

(9) 新たな風設計条件への対応検討

a) ピッチ、ヨーの再設計

新たな設計条件①、②においてピッチ、ヨーに作用する最大荷重を算出し、表 3-1 のとおり対策仕様を決定した。対策仕様を満たす機器にピッチ、ヨーのモーター・ブレーキの変更を行う。

表 3-1 ピッチ、ヨーの仕様

	原設計仕様	対策仕様
ピッチモーター・ブレーキ	ブレーキ保持トルク：104 Nm 以上	ブレーキ保持トルク：236 Nm 以上
ヨーモーター・ブレーキ	モーター駆動トルク：157 Nm ブレーキ保持トルク：75 Nm	モーター駆動トルク：247 Nm ブレーキ保持トルク：200 Nm

➡ 新たな設計条件に対応するピッチ、ヨーのモーター・ブレーキの機能強化を実施

b) 荷重・強度評価

新たな設計条件①、②において風車各部(タワー、ブレード、ハブ、ナセル、ピッチ・ヨー周りの機械部品)に作用する荷重を算出し、荷重評価及び強度評価を実施した。図 3-7 にフローを示す。結果、荷重が原設計時の値以下もしくは発生応力が許容値以下となり、暴風時の新たな設計条件に対しても構造安全性を確保できると判断した。

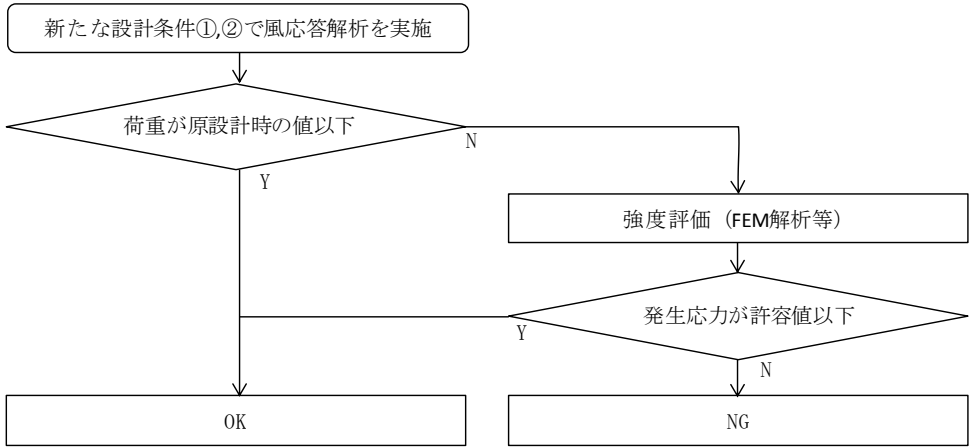


図 3-7 荷重・強度評価のフロー

➡ ピッチ、ヨーのモーター・ブレーキ以外の風車部位は現状のままで変更不要と判断

c) 非常用電源の検討

暴風時の新たな設計条件では、風車の制御が維持されることが前提となっているため、暴風時に系統電源が喪失した際に自動で非常用発電機が起動し風車の制御を確保するために必要な電源を供給する設備を設置する必要がある。表 3-5 に非常用電源の仕様の検討結果を示す。

表 3-5 非常用電源仕様

項目	仕様	特記事項
駆動方式	ガスタービン	－
燃料	重油	－
定格出力	2,500kVA	事故時の稼働実績データを元にピッチモータ、ヨーモーター、コンバーター（過回転防止機能）等の駆動に必要な容量を 1,879 kW と算定、機器仕様はメーカー標準を考慮し 2,000kW (=2,500kVA×力率 0.8) を選定
運転継続時間 (燃料タンク容量)	22 時間以上	台風シミュレーションにより 1 万年間に発生した台風のうち、運転開始：40m/s(架空電線路の耐風速)を上回る時点～運転終了：50m/s(風車原設計風速)を下回る時点の最大継続時間は 21.3 時間

➡ 非常用電源システムを設置することで、暴風時に系統電源が喪失した場合にも風車制御を確保

(10) 各部の健全性調査結果

タワーが座屈した 4, 8 号機(撤去済み)以外の風車に対し、表 3-6 に示す各種健全性調査を行った。いずれの部位についても、部品の交換や補修等により再使用可能と判断した。

表 3-6 健全性調査項目

対象部位	調査内容	評価
機械・電気機器	外観検査、触診検査、動作確認、ブレーキギャップ測定、絶縁抵抗測定、ボルト増し締め	可
ナセル・ハブ構造部材	応力集中部非破壊検査（PT）、外観検査	可
ブレード	固有振動数測定、目視、非破壊検査（UT）	可
タワー	溶接線非破壊検査（UT, MT, ET）、ボルト増締め※、3D 計測、固有振動数測定	可
基礎	弾性波検査	可

※ ボルトについては 10 号機のトップ・ミドルのフランジで緩みが確認されたため、暫定措置として増締めを実施し、今後交換予定

➡ 部品の交換、補修等により残存する風車は再使用可能と判断

4. 今後の予定

- 再稼働の予定は以下のとおり（今後の状況により変更になる可能性あり）。タワーが座屈した 4, 8 号機の再建は未定。
- 2018 年 6 月 8 基稼働（軽微な補修を要する 1, 2, 3, 5, 6, 9, 11, 15 号機が再稼働）
- ※ 今夏の台風シーズンまでには再発防止恒久対策実施が間にあわないことから、以下(1), (2)の暫定台風対策を実施し、50 年再現期待風速（新たな設計条件①）に対して構造安全性を確保する。
- (1) ピッチモーター・ブレーキ強化(200Nm 仕様のブレーキ導入)によりブレーキ保持トルクをアップ（新たな設計条件①におけるピッチモーター・ブレーキの所要保持トルクは 197Nm(安全率 1.35)）
- (2) 暴風＋系統停電時にアクティブヨー化するための仮設非常用発電機の設置（台風シーズン期間中は各風車へ非常用発電機を設置し、台風到来直前に手動切り替えにより風車補機へ電源供給を実施。）
- 2019 年 1 月 上記 8 基の再発防止対策(ピッチ、ヨーのモーター・ブレーキの機能強化)完了
- 2019 年 5 月 12 基稼働（ヨー補修を要する 7, 12, 14 号機、ブレード交換を要する 13 号機が再発防止対策完了、再稼働）
非常用電源システムの設置完了
- 2019 年 9 月 13 基稼働（ブレード交換を要する 10 号機が再発防止対策完了、再稼働）

以上