

洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の  
レセプタ脱落防止対策に係る検討結果報告書

2014年3月10日

洋上風力発電等技術研究開発委員会

風車事故対策ワーキンググループ

## 目 次

1. はじめに .....	1
2. ワーキンググループの目的 .....	1
3. ワーキンググループにおける検討 .....	1
4. ワーキンググループにおける検討結果 .....	1
5. まとめ .....	3

### 別紙一覧

別添 1. JSW 製風車レセプタ脱落事故について (電源開発株)

別添 2. 直撃雷検出装置概要

## 1. はじめに

2013年12月に、あわら北潟風力発電所・若松ひびき風力発電所においてブレード受雷部（キャップ型レセプタ）の脱落事故が発生した。

洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車は、あわら北潟風力発電所の事故機と同じ(株)日本製鋼所社製の風車をベースに洋上仕様に改良したものを使用しており、また、若松ひびき風力発電所の事故機も同社製であることから、それらの事故原因を踏まえ、風車のレセプタ脱落防止に万全を期するとともに、今後の風力発電技術開発に活かしていく必要がある。

そこで、洋上風力発電等技術研究開発委員会に技術専門家からなる風車事故対策ワーキンググループ（以下、「ワーキンググループ」）を設置し、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）における風車のレセプタ脱落防止対策の妥当性について検討し、評価を行った。

## 2. ワーキンググループの目的

技術専門家からなるワーキンググループを設置し、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）における洋上風車のレセプタ脱落防止対策について、技術的見地から妥当性を評価することを目的とする。

### <ワーキンググループの委員>

ワーキンググループの委員は以下の通りである。

氏名	所属・役職
勝呂 幸男（主査）	一般社団法人 日本風力エネルギー学会 会長
石原 孟	東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 教授
前田 太佳夫	三重大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 教授

注1) 主査を除き委員は五十音順 注2) 敬称略

## 3. ワーキンググループにおける検討

ワーキンググループでは、平成26年1月8日、1月14日、1月16日（計3回）に会合を開催した。別添1（JSW製風車レセプタ脱落事故について（電源開発(株)））を参照しながら、実証研究事業者・メーカーから現況を聴取し、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の技術面・安全面の検討を行った。

## 4. ワーキンググループにおける検討結果

レセプタの脱落事故が発生したあわら北潟風力発電所（J-82）・若松ひびき風力発電所（J-100）のレセプタ構造・固定方法を見ると、前者は重量5kgのレセプタをくさび効果・接着力、後者は重量0.5kgのレセプタをくさび効果・接着力・ダウンコンダクタ

による保持作用を考慮されていたが、落雷によりそれぞれの方法では保持できずに事故が発生していた。

洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車（J-82 洋上仕様）は、あわら北潟風力発電所で使用されている風車（J-82）用レセプタをベースに、レセプタ脱落防止対策を強化した改良型レセプタを当初より装着しており、改良型レセプタの開発にあたっては、設計の妥当性を検証するために、極値引張試験を実施している。

以上を踏まえ、本ワーキンググループでは、あわら北潟風力発電所におけるレセプタ構造と脱落事故状況、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）洋上風車に適用されている改良型レセプタの構造等を基に以下の検討を行った。

#### 4-1 洋上風車レセプタの脱落防止対策について

日本製鋼所社製風車（J82・J100）はブレード先端に固定するキャップ型レセプタを採用している。あわら北潟風力発電所の事故機については、ブレードへのレセプタ保持対策として①レセプタ基部のくさび効果（抜けにくいくさび形状）、②レセプタ基部とブレードとの接着効果（エポキシ樹脂による接着）を主体に講じられていたが、落雷によってブレードのエッジ部が開いたため、①・②の保持効果が失われ、さらに風車回転時の遠心力を受けて、レセプタが脱落したものと推定される。

洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車のレセプタは、落雷によってブレードのエッジ部が開口してもレセプタが脱落しないように負圧側ブレード（以下SS面）とレセプタを一体化させた構造とする等、①、②に加えて③の対策が施されている。

- ① レセプタ基部のくさび効果（基部にFRP積層のくさびを巻いて抜け防止を図る）
- ② レセプタ基部とブレードSS面の接着効果（レセプタ基部に開口部を設け、エポキシ充填することにより、レセプタとブレードSS面との接着力を増強し抜け防止を図る）
- ③ FRP積層によるブレードSS面との一体成型効果（①・②を施すと同時に、レセプタ基部とブレードSS面をFRP積層により一体化して保持力増強を図る）。

当該レセプタについては、認証機関GLが規定する極値強度・疲労強度に対する安全係数を採用して、FRP積層固定を設計しており、レセプタ正常時のブレードの健全性は数値解析等で確認している。また、レセプタのFRP積層固定は、2方向繊維（遠心方向に対して45°に配列）による固定強化を図り、ブレードのエッジ開口時（ブレードが損傷し圧力側ブレード[PS面]が離脱した状態）のレセプタに作用する遠心力の設計検討を行うとともに製造プロセス管理によりその品質を管理している。

さらには上記保持対策を講じた実機ブレード切り出しモデルにより、ブレードのエッジ開口時を想定し、ブレードSS面とレセプタの極値引張試験を実施しており、その結果では設計荷重の10倍相当の負荷に対する保持力が確認されている。

FRP積層によるブレードとレセプタの一体成型はブレードとレセプタのボルト固定と同様なレセプタ保持力機能を有するものであり、レセプタ脱落対策として妥当な構造と考えられる。

#### 4-2 落雷発生時の洋上風車の運用について

一般に日本海側は雷の発生確率が高く、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）洋上風車サイトもそのリスクの高いエリアである。本洋上風車への落雷計測は実証研究の一環であるものの、保安管理を第一とした運用が必要不可欠である。

洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）洋上風車サイトにおいては、直撃雷検出装置を導入するとともに、落雷予測時の有効な運転方法を必要に応じて講ずることにより、より安全な運用を行うこととする。

### 5. まとめ

ワーキンググループでは、洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）の洋上風車のレセプタ脱落防止対策の安全性について検討した結果、洋上風車のレセプタ脱落防止対策と落雷発生時の運用について、その安全性は妥当であると判断され、運転を開始するに必要な安全性が確保されていることが確認された。

しかしながら、落雷による風車破損のメカニズムには解明されていない点が多いため、レセプタやダウンコンダクタなどの機能の検証や、落雷時のブレードの亀裂発生メカニズムの解明等について、検討を行う必要がある。

# JSW 製風車 レセプタ脱落事故について

2014/01/16  
電源開発

## 1. あわら事故状況

### (1) 風車配置



図 1 あわら北潟風力発電所 風車配置図

2011年2月運転開始  
日本製鋼所 J82 型風車 10基

### (2) 現場写真



図 3 6号風車レセプタ脱落地点



図 4 レセプタ脱落状況

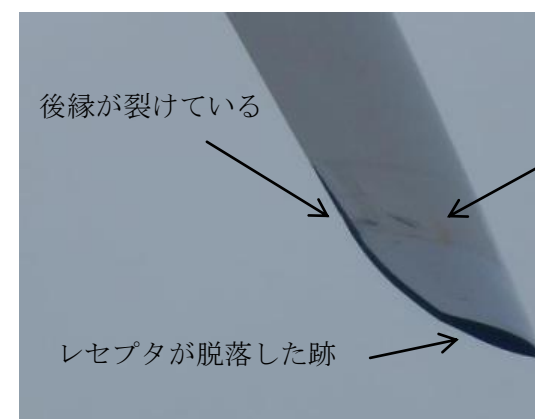


図 5 6号風車#3 翼写真 (事故後)



図 6 事故前 (11/30 撮影)

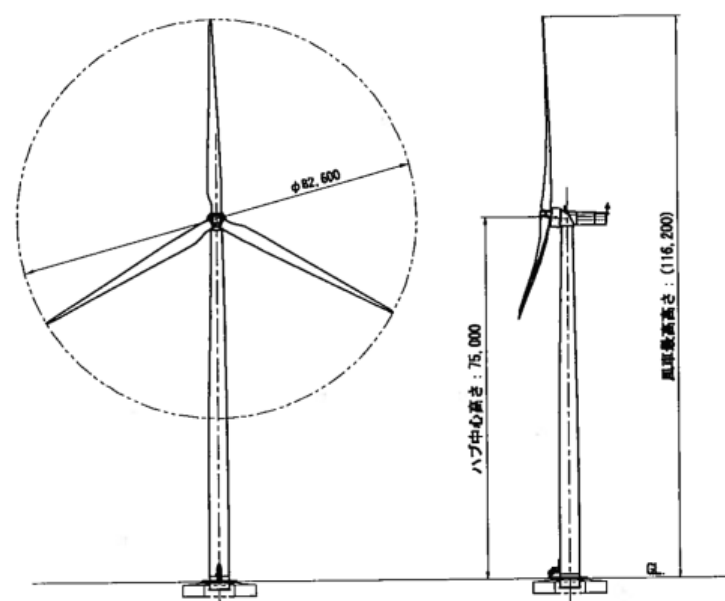


図 2 日本製鋼所 J82 型風車

出力 2,000kW  
ナセル高さ 75m  
ローター径 82.6m  
最高到達点 116.2m  
定格回転数 19rpm

#### ※レセプタ

風車ブレードの先端に取付け、避雷針のように雷を受ける金属部品、今回の風車はアルミ合金製、重量 4.8kg

### (3) 事故発生状況

12月14日8:30頃、6号風車故障不具合対応のため、風車メーカー作業員が6号風車に到着。風車を停止させて、故障調査を開始した。10:30頃雷がひどいため、作業員は調査を中止し、タワーを降り風車を運転させた。そのときにブレードから異音があったことから、風車を停止し確認したところ、#3翼からレセプタが脱落していることを発見。現在全台停止中。また6号風車については、進入道路にチェーンを張り、部外者の立入りは不可。

### (4) あわら地点の落雷状況

NEDO 事業にて、1号風車にログスキーコイルを設置し、落雷を観測した。2012年の落雷状況は以下の通り。仁賀保の落雷が年間10回程度であるのに対し、あわらでは非常の多数の落雷が観測されている。

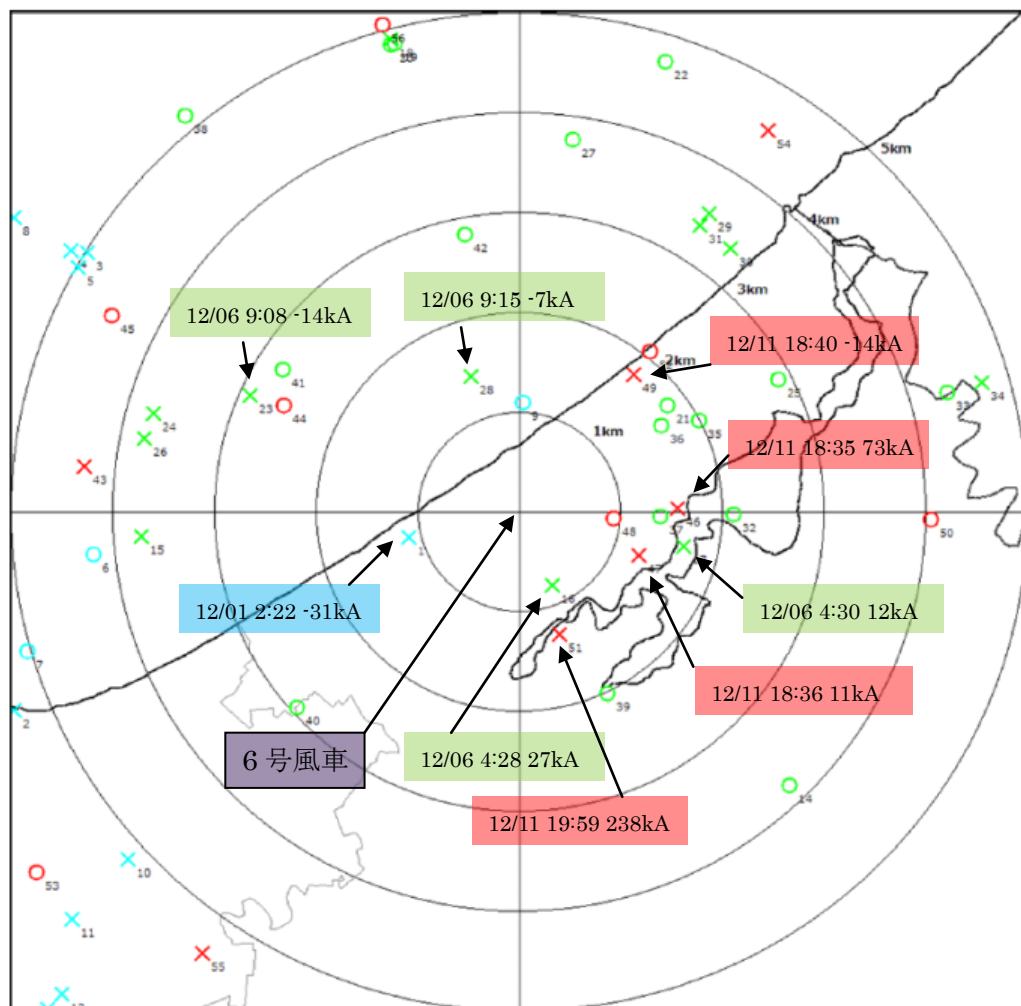
【あわらでの雷害実績 (#1 風車)】

2012/1/24	1回	2012/11/1	7回
2012/1/25	7回	2012/11/13	1回
2012/1/26	3回	2012/11/14	2回
2012/1/27	5回	2012/11/15	11回
2012/1/31	2回	2012/12/8	4回
2012/2/1	1回	2012/12/11	2回
2012/2/3	2回	2012/12/12	3回
2012/2/4	2回	2012/12/24	3回
2012/2/10	1回	2012/12/31	1回
2012/2/17	1回		
2012/3/25	1回	延べ 20 日間	60 回

1号風車は、2012年の60回の落雷では、風車停止に至るような損傷を受けていないが、2013年5月に#3翼に損傷が発見されており、2013年11月に補修をしている。

(5) 6号風車への着雷実績

当該風車は11月30日にダウンコンダクタの接続補修を受けており、雷被害は11月30日～12月14日の間と考えられる。フランクリンジャパンから入手した着雷情報を以下に示す。



冬季雷の場合、距離の誤差は2～3km 上向き雷は検出できないことも多いが、6号風車の周辺で、かなりの落雷が観測されている。

No.51 は波高値が 238kA であり、IEC の保護クラス 200kA を超過しているが、エネルギー量が不明なことから翼端の破壊との因果関係は不明

図7 あわら6号周辺落雷状況(11/30～12/14)

(6) 6号風車第3号翼の着雷状況

2. あわら北湯風力発電所、6号機3軸ブレード落雷情報について

	落雷箇所	位置	備考
A	ブレードSS	5000	
B	ブレードSS	4000	
C	ブレードSS	1000	複数の落雷痕
D	レセプタ先端	(0)	

備考：ブレードのTE(Trailing edge)が損傷している箇所がある。



ブレードの損傷

TE(Trailing Edge): 後縁  
LE(Leading Edge): 前縁  
SS(Suction Side): 風下側  
PS(Pressure Side): 風上側

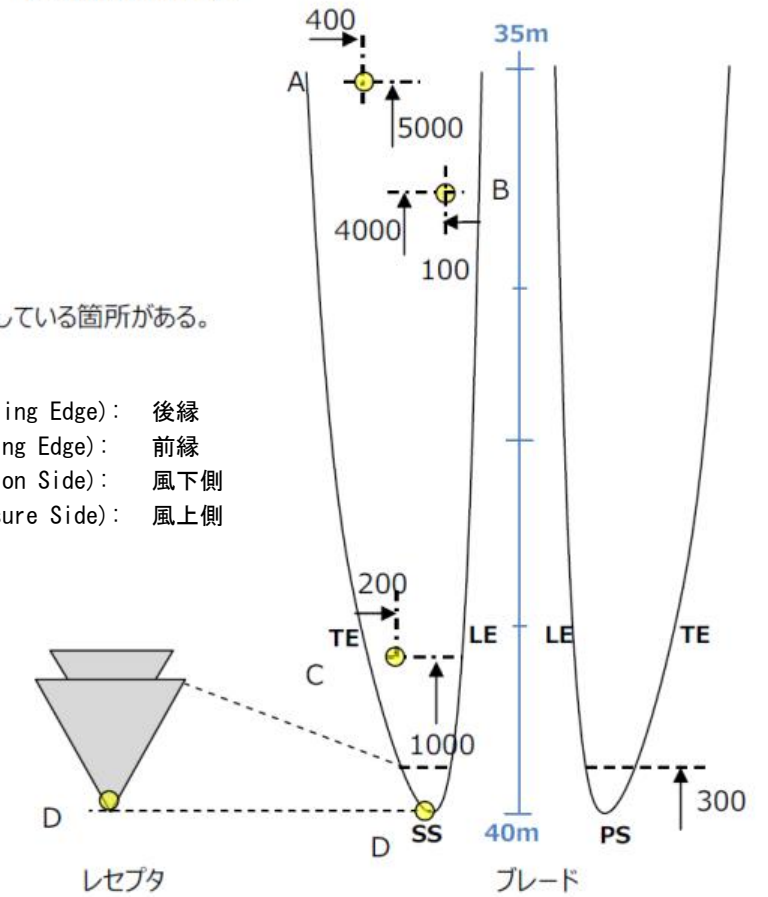


図8 あわらブレード着雷状況

(7) 11月の補修内容

当該風車は、9月の点検時にダウンコンダクタの接続不良が報告されたことから、11月に接続部を強化する補修を行った。2013年7月時点で同型風車のレセプタ脱落事故の情報を得ていたが、そうした脱落は、ダウンコンダクタの接続不良が原因と推定し、冬季雷シーズン前にあわら6号風車の接続を補強した。

(8) 脱落原因

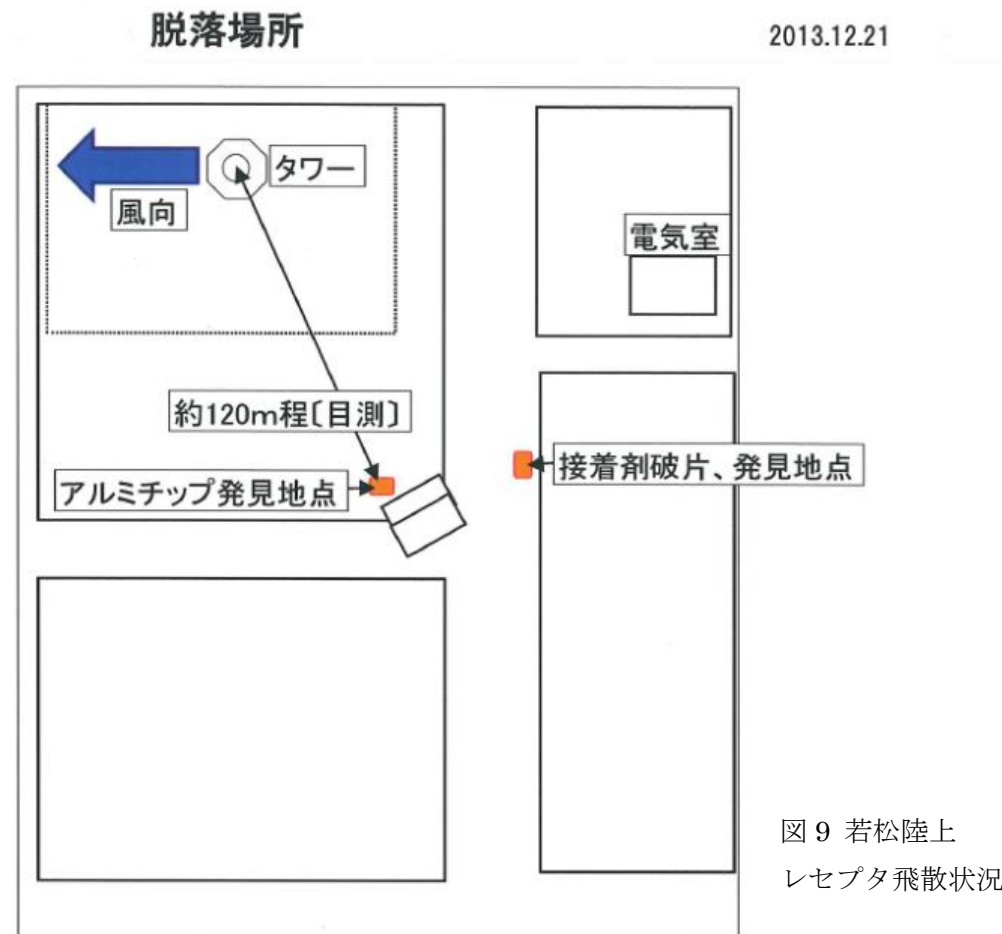
第3号翼には、複数の落雷痕が確認されたが、落雷痕Dは軽微な落雷であった。落雷痕Cの着雷（ブレード外皮を突き抜け、ダウンコンダクタに直接侵入、複数あり）でTEが1100mm 裂けたことでレセプタの保持力を喪失、ダウンコンダクタでは4.8kgのレセプタに働く遠心力を支えきれず、ダウンコンダクタのスリーブ接続部が抜け、レセプタの脱落に至ったものと推定される。なお、風車の接地抵抗は2.0Ωであり、接地設計には問題ない。

(9) 現在の状況

6号風車は停止、他の風車も全台停止。直撃雷検出装置を取付け、直撃雷検出後は点検を実施。

## 2. 若松陸上風車事故状況

### (1) 風車位置と飛散地点



風車は JSW J100 2.7MW

### (2) 事故時の状況

事故発生は 2013 年 12 月 21 日

- 7:55 タワー内、タワーベース盤にて風速調査、瞬間 15m/s、10分値 15.6m/sを確認。  
車内での待機とした。  
待機中、雲行きが怪しいのでウエザーニュースで落雷情報を確認。  
周辺に落雷があったので待機とした。
- 8:46 待機中、突然周りが光り、音が同時になったので、おそらく風車が落雷があったもよう。  
退避のため車で、風車を離れる際に風車から100m強離れた鉄板上に先端レセプターを  
発見した。
- 9:20 電源開発様の指示により、電気室で待機。
- 10:30 タワー内の確認、通電状態、RMU 通常の状態。

### (3) 落雷状況

保守員が確認していることから、12月21日8:46に風車に落雷したことは確実であるが、フランクリンジャパン、九州電力の落雷データには、当該の落雷データが記録されていない。冬季雷に見られる上向き雷は雷検知システムで検知できないケースがあるという話もあり。

### (4) ひびき風車1号翼の着雷状況

#### 3. ジェイパワーひびき風力発電所、1軸ブレード落雷情報について

	落雷箇所	位置	備考
A	レセプタ内部	250	ブレードを貫通
B	レセプタ	100	
C	レセプタ先端	(0)	

備考：ブレードの先端部 PS、SS が損傷している。

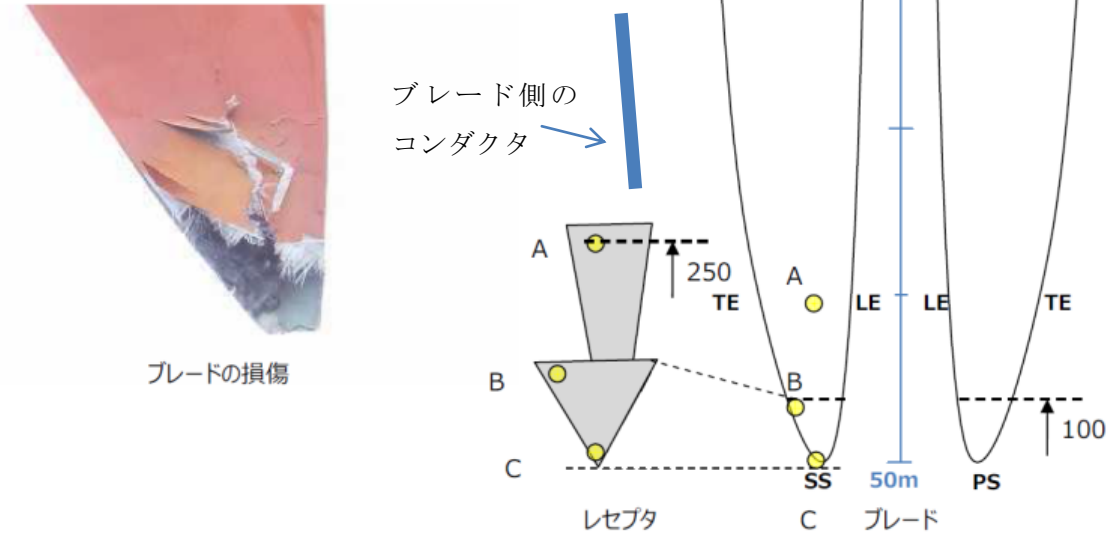


図10 ひびき風車着雷状況

落雷痕 A~C のうち、最もエネルギーの大きな雷が A であった。FRP 面を通じてレセプタに着雷した際に、着雷面の FRP が繊維破断を含む損傷を起こした。裏面の接着も全て剥離したことで、ブレード外皮によるレセプタの保持力は喪失したと思われる。

ひびき風車はあわらと違い、レセプタが軽量 (0.5kg) であり、ダウンコンダクタでレセプタを保持できる設計となっていたが、レセプタ側でダウンコンダクタが抜けている。ダウンコンダクタは、2本のネジによって、レセプタにネジ止めされていたが、着雷時に高温になった (銅が溶融しており、1000℃程度になったと思われる) ことから、銅スリーブの強度が低下し、その結果ネジ止めしていたダウンコンダクタの保持力も低下し、レセプタが遠心力で外れたものと推定される。

レセプタに着雷したにも関わらずブレードの外皮がひどく損傷した原因、およびダウンコンダクタが抜けてレセプタが脱落した原因については、今後実験などにより検証予定。

### (5) 接地設計

J100 風車は J82 風車と比べ接地設計も改善されている。風車内部の接地システムを専門家に確認頂き、問題ないことを確認している。また接地抵抗は 0.28Ω であり、レセプタ部以外の接地設計が原因で雷エネルギーの放流ができなかった可能性は小さい。



### 3. 今後の方針

今回脱落の原因となった、ブレードの口開きについては、冬季日本海側でごく希に発生する極めて大きなエネルギー雷に完全に対応することは難しい。また、電中研の実験の例などから、レセプタ以外への着雷についても、完全に防止することはできないと思われる。エッジが開いて放圧することで、ブレードの爆発を防止している面もある。そのため、雷撃時にブレードの接着部が口開きすることは容認し、口開きしてもレセプタが脱落しない方策の検討を中心に、以下の方針で各種対応を進めたい。

#### (1) 検討事項

- 直撃雷検出装置の設置による雷撃後の風車停止及び点検（陸上）
- レセプタ脱落防止策ならびの点検方法の検討（あわら、陸上）
- レセプタに着雷したにも関わらず、外皮が大破した原因の解明（陸上）※
- ダウンコンダクタ断線のメカニズム解明（あわら、陸上）※
- 若松の落雷が落雷検知システムで検知されなかった原因の解明（陸上）
- 冬季雷に対する運用方法の検討（あわら、陸上）

#### (2) 対外対応

- 自治体、住民への説明（あわら）
- NEDO WG 対応
- METI 風力発電設備構造強度 WG 対応
- JWPA 風車安全対策 TF 対応

※外皮の大破やダウンコンダクタの断線については、大電流試験で検証することで、今後電中研と調整予定

以 上

## 1. 洋上用風車のレセプタについて

JSW では、以前からレセプタの引き抜け防止対策を検討している。洋上風車については、受雷部は従来の大型形状を流用し、ブレードへの取付け方法を改善した新型のレセプタを採用している。新型レセプタは、以下の特徴を有する。

- 耐雷性能の高い大型の受雷部を採用
- レセプタの根元部の形状を改善して、ブレード外皮の接着力を強化
- FRP くさび効果、接着効果、FRP 積層による一体成型効果によって、外皮の片面が完全にはがれても脱落せず
- 600C の雷エネルギー処理能力を持つ

レセプタの比較

項目	J40a 従来型レセプタ (あわら)	J40a 新設計レセプタ (響灘洋上、及び新設風車)	JB50 標準型レセプタ (響灘陸上)
重量	約 5kg	約 5kg	約 0.5kg
レセプタ保持力	くさび効果 接着力	FRP 自体の強度	くさび効果 接着力
雷強度	600C 以上	600C 以上	600C 以上
レセプタ概要図	<p>① 300mm ② 100mm</p>	<p>① 300mm ② 170mm</p>	<p>① 100mm ② 150mm</p>

タイプ	問題点
あわら	質量が大きい (4.8kg) ため、ダウンコンダクタでは保持することができず、エッジが開いたらレセプタが脱落する可能性が高い。
洋上	FRP くさび効果、接着効果、FRP 積層による一体成型効果によって、外皮の片面が完全にはがれても脱落しない。
陸上	質量が小さい (0.5kg) ため、接着がはがれてもダウンコンダクタで保持できるはずであったが、実際には接続部で抜けている。

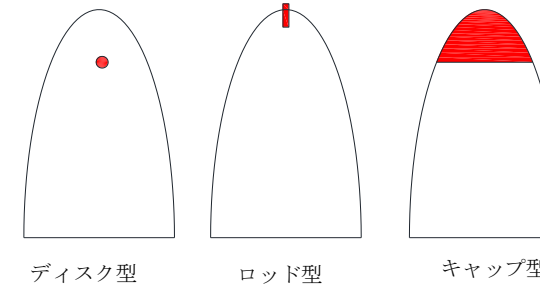
あわらについては、レセプタの保持は接着剤に依存している。接着剤以外の脱落防止策が必要ではないか？陸上は接着剤+ダウンコンダクタで保持していたが、着雷時に接着剤が剥離、ダウンコンダクタも熱で保持力が低

下し脱落に至ったと推定。

## 2. レセプタの種類

レセプタには、ディスク型、ロッド型、キャップ型があるが、JSW が採用しているキャップ型には以下のメリットがある。

- 利点 1 → キャップ型は面積が大きいので雷の捕集効率が高い。
- 利点 2 → 金属の体積が大きいので、エネルギー処理能力が高い。
- 利点 3 → 先端を金属で保護するため、ブレードが損傷しにくい。



耐雷性能の高いキャップ型レセプタを採用したが、ブレードの接着のみでレセプタを保持する方式を採用していたため、エネルギーの大きな冬季雷でブレードが裂けたことで、脱落に至ったものと思われる。あわらのような冬季雷リスクの極めて高い地区では、ブレードが裂けることは避けられないため、ブレードが裂けてもレセプタを保持できる固定方法を取るべきであったと思われる。

以上

## 直撃雷検出装置概要

本装置は雷撃時にタワーに雷電流が流れる際に発生する磁界を検出し、雷の直撃を検知するものである。計測ならびに積分機能を有さないため、電流値や電荷量を計測することができないものの、ピーク電流  $0.5\text{kA}$  以上の直撃雷を検出可能である。

図 2 は別の装置を用いて観測した仁賀保における 2005～2010 年の雷電流観測結果（386 ケース）をまとめたものである。 $0.5\text{kA}$  未満の雷は 10 ケース（2.6%）あったが、ほとんどの雷は  $0.5\text{kA}$  以上であった。したがって本装置によってほとんどの雷撃を検出可能である。なお、ピーク電流  $0.5\text{kA}$  未満の雷は本装置で検出できないが、エネルギーも小さく、風車に被害を与えることは少ないと考えられる。

直撃雷検出装置導入の利点は以下の通りである。

- 雷直撃時に風車を停止することで、ブレードに掛かる遠心力や風荷重を瞬時に減じることができ、雷撃で被害を受けたブレードの被害拡大を防止することができる。
- 雷直撃時後、外観点検をした上で運転再開をすることで、不健全な風車を運転するリスクを軽減できる。
- 風車への落雷履歴を管理することで、適切なメンテナンス計画を立案実施することができる。

以上



図-1 直撃雷検出装置

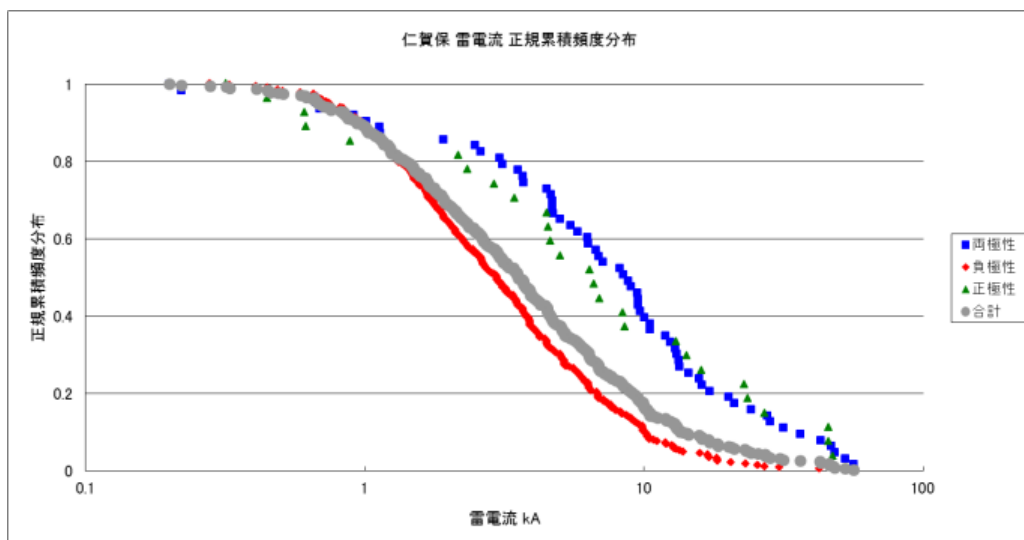


図-2 雷電流の頻度分布（仁賀保）