新エネルギー発電設備事故対応・構造強度ワーキンググループ

根占7号機タワー損傷について(第4報)

1. はじめに

既報のとおり、根占7号機タワーに発生した損傷に関し、これまで変位計による変形状況のモニタリング、既 存技術図書による設計検証の実施、原位置試験(真円度、鉛直度他)、材料分析(X線試験他)、風況データの 確認、運転ログの検証を実施した。本書では、本年7月~8月に実施した原位置試験ならびに材料分析の結果 を報告する。

2. 真円度測定結果

調査は、3D スキャナーを用い、真円が保持されていると見なされるフランジ部にクロスゲージを設置して円 中心の位置出しを行い、中心にスキャナーを設置し計測した。測定はナセル下架前後の2回実施した。計測位 置は、鉛直方向に 500 mmピッチで行い、最少内径と最大内径の差で評価した。また、水平方向はラダー位置 を基準点(0°)とし、上面から見て時計まわりを正とした。

鉛直方向は、Eフランジ上面を0mmとした。



図·1 真円度計測位置





写真-1 計測装置

測定結果は以下のとおり。

内径差最大:ナセル下架前 45 mm (EL。49,000mm部) ナセル下架後 45 mm (EL。49,000mm部)



※1:損傷位置は、40,000 mmの位置。

図-2 真円度測定結果(鉛直方向)

資料3



歪みの拡大方法

1

3. 鉛直度調査結果

3D スキャナーを用いタワー鉛直度を計測した。図-4 は 209°の傾斜角度は、ナセル下架前で 0.097°、下架後 で 0.056° である。一般的にタワーの据付は±1 mmの精度で実施されており、タワーボトム径が 3,875 mmのた め、この場合、管理値は約0.03°となる。





COMMA





5. 損傷部の表面硬度計測結果

測定状況を写真-6に、測定方法を図-6に、測定結果を表-1に示す。 一部に表面硬度が高い部位を確認できる。タワー加工時における硬化と推察している。 また、損傷部以外に硬度が高い部位を確認できるが、タワー成型加工時における加熱による熱硬化と推察。









4. サンプリング

サンプル切り出し位置は図-5に示すとおり。

第2段タワーの損傷部を輪切りにし、サンプル採集した。



図-5 サンプル切り出し位置



写真-3 第2段タワーを輪切りにしているところ



写真-5 切り出したサンプル部





↓損傷の大きな部分



表-1 表面硬度計測結果

外側	硬度(HV)	内側	硬度(HV)
1	154	1	133
2	151	2	135
3	151	3	161
4	148	4	172
5	139	5	134
6	136	6	144
7	138	7	155
8	139	8	147
9	132	9	156
10	136	10	163
11	163	11	153
12	155	12	141
13	131	13	157
14	136	14	162
15	136	15	157
16	136	16	156
17	140	17	144
18	139	18	143
19	144	19	141
20	144	20	136
21	145	21	144
22	145	22	148
23	151	23	135
24	152	24	147

6. 磁粉損傷検査結果

サンプリングで採取した損傷部位を用いて実施した。試験材表面の亀裂を確認できなかった。



写真-7 磁粉損傷検査結果(①は最大変形部位、②は変形部位終点と推察される部位)

7. 材料分析結果

分析項目を表-2に示す。

表-2	材料試驗
1 4	

試験項目	内容
X線透過試験 (RT試験)	目的:座屈部での内部欠陥の有無の調査
マクロミクロ組織観察	目的:座扇部と平滑部のマクロ・ミクロ組織の比較。
硬さ分布測定	目的:座屈部と平滑部の硬さの比較。
板厚測定	目的:座屈部から平滑部への板厚変動の有無を調査
化学成分分析	目的:座屈部と平滑部の化学成分の比較。
引張試験	日的:座屈部と平滑部の引服強さの比較。 試験片形状:JIS14A 号試験片(平行部の外径 6mm)

7.1 X 線透過試験(RT 試験)

損傷が著しい位置における周方向および軸方向にフィルムをセットして試験を実施した。内部欠損、補修溶接 痕跡を確認できなかった。



写真-8 RT 試験

一覧

7.2 マクロ組織観察結果

損傷部(Z部)および平滑部(K部)にて、マクロ組織を観察した。写真-9に示すとおり、内部結果ならびに 補修溶接等を確認できなかった。



図-7 切り出し位置







2本の筋状の傷

写真-10 損傷部拡大写真



7.3 ミクロ組織観察結果

写真-11、12に観察結果を示す。異常を確認できなかった。

7.4 硬さ分布測定

ビッカース硬さ試験方法(HV10)により、表層から板厚方向ならびに水平方向の硬さ分布を計測した。 損傷部から平滑部にかけて硬度が漸減している。損傷部は加工時の硬化と想定される。

一般的な圧延鋼板に見ら

れる組織



図-8 板厚方向の硬さ測定結果

表-3 板厚方向の硬さ測定結果

表層からの	硬さ測定結果HV10						
距離 (mm)	符号21 (最大座居部)	符号Z2 (Z1から 距離15mm)	符号23 (21から 距離27.5mm)	符号K1 (平滑部)			
1	152	159	153	133			
2	157	159	160	127			
3	156	159	157	124			
4	151	160	150	130			
5	151	148	146	128			
6	137	142	146	122			
7	140	143	141	122			
8	138	144	145	125			
9	137	142	147	120			
10	145	143	143	123			
11	146	149	148	124			
12	152	153	151	133			
13	153	156	150	126			
14	156	158	157	125			
15	161	158	161	130			

損傷部

表-4水平方向の硬さ測定結果(測定位置:表面から1mm下)

Z1から の距離 (nn)	硬き測定 結果HY10	21から の距離 (mm)	硬き 測定 結果HV10	Z1から の距離 (nm)	硬き制定 結果HV10
10	169	50	151	90	145
20	168	60	152	100	130
30	156	70	148	110	131
40	154	80	151	120	137



写真-12 平滑部のミクロ組織

非損傷部

7.5 板厚測定

表層の塗装を除去した後、最大の損傷部を基点として、タワー鉛直方向の板厚をノギスを用いて測定した。い ずれも公称板厚である 16.0 mmを満足していた。



表-5 タワー鉛直方向の板厚測定結果

板厚 (nn)	上下方向 への距離 (nm)	板厚 (nn)	上下方向 への距離 (nn)	板厚 (mn)	上下方向 への距離 (nn)	板厚 (mm)	上下方向 への距離 (nm)
16.30	190	16.33	40	16.23	-110	16.17	-280
16.29	200	16.34	50	16.19	-100	16.17	-270
16.28	210	16.31	60	16.25	-90	16.16	-260
16.29	220	16.31	70	16.25	-80	16.17	-250
16, 27	230	16.30	80	16.26	-70	16.17	-230
16.28	240	16.28	90	16.25	-60	16.18	-220
16.30	250	16.29	100	16.30	-50	16.17	-210
16.31	260	16.29	110	16.31	-40	16.18	-200
16.29	270	16.29	120	16.33	-30	16.20	-190
16.29	280	16.28	130	16.15	-20	16.19	-180
16.30	290	16.27	140	16.23	-10	16.19	-170
16.31	300	16.29	150	16.36	0	16.22	-160
16.31	310	16.27	160	16.36	10	16.20	-150
16.31	320	16.27	170	16.31	20	16.22	-130
16.30	330	16.28	180	16.32	30	16,21	-120

公称厚さ16mm以上

7.7 引張試験結果

損傷部ならびに平滑部より試験片を切り出し、引張試験を実施した。いずれも、SM400AのJIS 規格の範囲内 であった。

表-7 引張試験結果

					-	-		
位置	符合	直径 (mm)	上降伏点 (N/mm ²)	下降伏点 (N/mm ²)	0.2%耐力 (N/nn ²)	引張強さ (N/mm ²)	破断 伸び (%)	絞り (%)
座	Z 1	6.02		—	264	443	32	69
屈	Z2	6.02	258	255		431	37	71
部	Z 3	6.02	270	265		429	39	70
平	K1	6,01	274	266	—	423	39	70
滑	K 2	6.02	274	263		420	40	70
部	N	6.01	275	266		428	40	70
	SM400Aの JIS規格編	の 紅囲	245以上	245以上	245以上	400~510	(18% 以上)	_





8. サンプル試験の結論

原位置試験ならびにサンプリング、化学分析結果から、内部欠損ないし補修痕跡を確認できず、また板厚等の 物理試験結果も公称値を満足しており、材料自体は健全と考えられる。

7.6 化学成分分析結果

損傷部ならびに平滑部において科学成分分析を実施した。いずれも、SM400AのJIS 規格の範囲内であった。

	the second s							
位置	С	Si	Mn	Р	S	Cr	Мо	Ni
座屈部(符号Z)	0.15	0.20	0.55	0.018	0.008	0.011	<0.01	<0.01
平潜部(符号K)	0.15	0.20	0.55	0.018	0.008	0.011	<0.01	<0.01
SM400A Ø	0.23	_	2.5×C%	0.035	0.035			
JIS規格範囲	以下	_	以上	以下	以下			

表-6 化学成分分析

<分析方法>JIS G 1253スパーク放電発光分光分析法

9. 今後の検討の進め方(案)

これまでの調査結果をまとめると以下の通り

(1) 運転ログ(荷重の推定)

風車の運転データは、1 分平均値、10 分平均値が、監視用サーバーに保管されていたが、以下の理由もあり、 損傷の原因となる事象は見つかっていない。

- 瞬時データ、最大値、最小値が記録されていない。
- データ欠落が多いこと。
- ただし、電圧低下は系統事故により、負荷遮断が多数発生している。
- 過去の最高風速は、設計値 40m/s に対し、2006 年 9 月 17 日に台風 13 号が接近した際の 33m/s であった。 台風時のログにも欠測しているものがあり、設計値以上の風速が発生した可能性もある。

(2) 他号機の状況(製作品質の推定)

他号機には、7号機で見られたタワー内部の膨らみを伴うような変形は見つかっていないが、タワー外部に筋 が確認できるタワーもある。ただし筋の詳細は不明。また根占のタワーは、表面の傷が多いように見える。

(3) タワー設計の確認(設計の確認)

タワーの設計者は IHI、製作者はアムテック(IHI 子会社)であるが、タワー製造国は中国、製作工場は中国 大蓮金州重型机器有限公司。

タワーの設計は、2003年2月28日に建築確認済み。損傷が発生した15節の応力度比は0.93(暴風時)。

(4) タワー製造記録の確認(製作品質の推定)

ミルシートには異常なし。タワー形状についてはフランジ部にて真円度を確認し、0.1%以下であった。タワー 塔体部の変形については計測値がなく不明。またタワー製造時の表面損傷有無についても記録なし。

(5) タワー建設時の補修の確認(現地補修記録の確認)

根占発電所のタワーは、建設時にタワー溶接部に溶接不良が発見され、現地で全数補修を受けている。その際 の記録を確認した。今回損傷部は、14節と15節の溶接部の上500mmに発生しているが、一般的に、500mm離 れれば、残留応力の影響は小さいと言われている。溶接補修の前後で真円度の変化がなかったことは、補修時の 記録で確認されている。

(6) タワー鉛直度、真円度調査(製作品質、据付品質の推定)

ナセル下架前後で 3D スキャナによる真円度、鉛直度を測定した。

表-8 3D 計測結果

	下架前	下架後
内径差(最大径-最小径)	45mm(EL49,000mm部)	45mm(EL49,000mm部)
鉛直度	0.097° (50.884° 方向)	0.056° $(55.319^{\circ}$)

真円度誤差の影響については未検討。

(7) タワー材質

タワーの材質については、今回報告の通り。

表-9 損傷要因の推定

要因	今回の損傷原因の可能性	説明
タワー設計	\bigtriangleup	座屈に対するマージンが少ない
タワー材質	×	材料には問題なし
製作品質	\bigtriangleup	タワー塔体部の歪みが大きい
据付品質	\bigtriangleup	タワーの傾きが一般的な管理値より大きい。ただし建設
		時からの傾きの経過は不明。
現地溶接補修	\bigtriangleup	ただし、残留応力の影響は小さいと思われる。
荷重	\bigtriangleup	SCADA データが不足しており、荷重の詳細が不明
運転保守	\bigtriangleup	負荷遮断、起動停止の回数が多い。

これまでの調査結果、単独でタワー損傷の直接原因と判断されるような事象は見つかっていない。ただし、当 該部分の発生応力度と許容応力度の比は 0.93 であり、タワーは設計上、座屈に対してそれほどマージンを持って いない。そのため複合的な要因でタワーの初期不整が拡大した可能性が考えられる。今後は、タワーの変形状況 や材料試験結果、他風車による実荷重の計測結果を含めて、損傷の可能性を検討することとしたい。

また現在保安停止している他号機については、タワーの材質は7号風車と同等で問題がないと考えられる。今 後タワー形状(3D 計測)の異常と、タワー表面の変形(土木学会 風力発電設備支持物構造設計指針で規定され ている許容初期不整値以上の変形)の有無を確認、健全性を確認することとしたい。

タワーの変形が許容範囲内の風車については、運転した結果、タワーに損傷が発生し急激に進展することはな いものと考えられる。従い週1回の目視点検をしながら暫定的に運転を再開し、合わせて代表風車について実荷 重の計測などを進めることとしたい。



図・11 土木学会 風力発電設備支持物構造設計指針で規定されている初期不整の例 (初期不整値Wが、0.010以下であれば、座屈耐力への影響が少ない)

以上