

風力発電稼働率向上に関する調査研究

<不可欠物質の安定供給、国際協力、環境対応その他の公益に関する調査研究>

報 告 書

平成 26 年 3 月 31 日

一般社団法人 日本海事検定協会

(NKKK総合研究所)

目次

1. はじめに	2
2. 調査研究の内容	2
3. 調査研究の方法（計測/分析方法）	3
4. 調査対象機明細	5
5. 調査研究の結果と考察	7
5-1. シャフトアライメントテスト	7
5-2. 潤滑油汚染度測定及び含有金属分析	7
5-3. メインベアリング・グリスの鉄分含有量分析	17
6. 考察	18

1. はじめに

「新エネルギー特別措置法」(RPS 制度)が制定され、二酸化炭素排出削減の方策の一つとして風力発電促進の施策が進められているが、風力発電は必ずしも普及していないのが現状である。その主な理由として、風力発電の装置及び部品に多くの海外製品を用いていること等もあり、使用部品及び交換部品を円滑に調達し、修理・復旧を迅速に実施する体制の整備が不十分であるため、故障発生から復旧まで多くの時間を要し、電気事業者はその間安定した発電を行うことができないことや、故障を未然に防止するための通常時における定期点検の体制が未整備であることが考えられる。

本事業は、風力発電の普及のネックとなっている主にシャフト、増速機、及びベアリングのメンテナンスにおける問題点を抽出し、風力発電の促進に必要な条件整備のあり方について検討し、提言を行うものである。

2. 調査研究の内容

24年度の調査により、事業者が把握すべき保有設備の現状・点検項目としてシャフト、増速機、及びベアリングに関する以下の項目について試験及び分析を行うことを多くの電気事業者が望んでいることから、当該試験・分析実施に関し公募を行い、その結果を応募者に提供するとともに、メンテナンスにおける問題点を抽出し検討することとした。

① シャフトアライメントテスト（シャフトの水平・垂直方向のずれ計測）

シャフト（軸）の軸芯ずれは、回転機器の予期せぬ稼働停止及び軸受やギアの損傷の原因となることから、レーザー測定器を用いてシャフトの水平及び垂直方向の軸芯ずれ計測を行う。

② 潤滑油汚染度測定

潤滑油の汚れ（劣化）も故障の原因となることから、レーザー粒子カウンターを用いて、潤滑油の汚染度測定を行う。

③ 潤滑油含有金属の分析

潤滑油内に含まれる金属を特定することで、設備内の意図せぬ故障や不具合を発見できることから、潤滑油に含まれる金属分析を行う。

④ メインベアリング・グリスの鉄分含有量分析

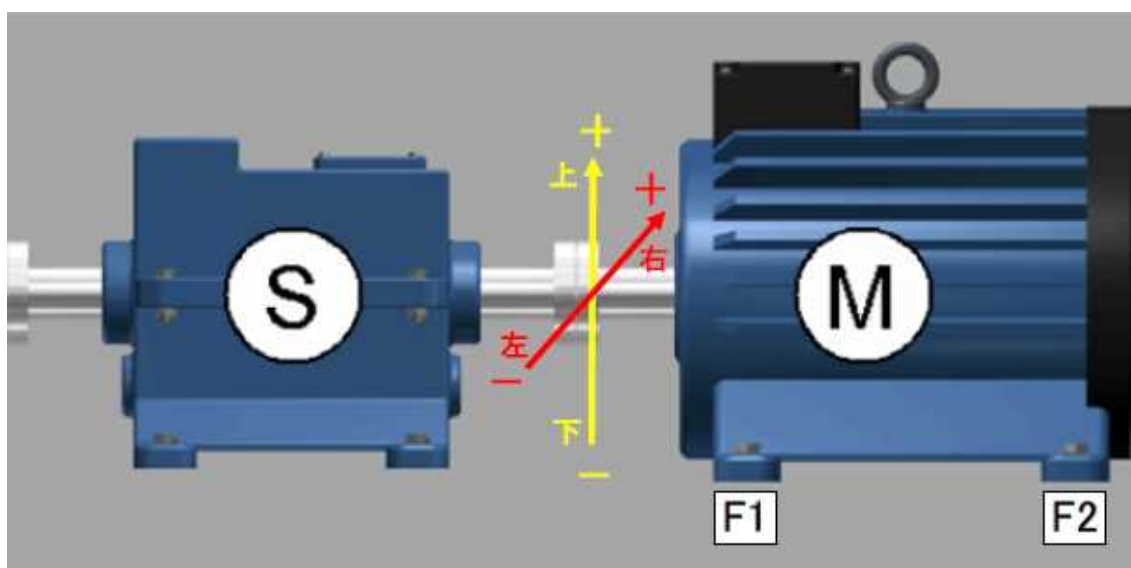
グリス内に含まれる金属成分量を分析特定することで、ベアリングの磨耗状態が推測できることから、金属成分含有量分析を行う。

3. 調査研究の方法（計測/分析方法）

3-1. シャフトアライメントテスト

「EASY LASER E710」を計測器として用い、水平・垂直方向のずれをそれぞれ計測し、以下詳細を結果として提供することとした。

「オフセット」	カップリング面における軸芯位置のずれ量
「角度ずれ」	$\tan \theta = X/100\text{mm}$ で表示される値
「F1（前脚）」	軸ずれ = 0 とした場合の、前脚の現状位置
「F2（後脚）」	軸ずれ = 0 とした場合の、後脚の現状位置



3-2. 潤滑油汚染度測定及び含有金属分析

ヴァンパイアポンプを用い、増速機内低層部の潤滑油をサンプリングし、オイル性状として酸化度、塩基価、動粘度、及び水分試験を行い、レーザー粒子カウンターを用いて汚染度（計数法：NAS 等級:個/100ml 及び ISO コード: 個/ml）を測定した。加えて含有粒子形状分析及び潤滑油に含まれる金属元素についても分析した。

測定/分析項目と実施方法/機器については下表の通り。

分析項目	項目	実施方法/機器
一般性状	酸価 [mgKOH/g]	電位差滴定
	塩基価 [mgKOH/g]	電位差滴定
	動粘度 40°C [mm ² /s]	動粘度装置
	動粘度 100°C [mm ² /s]	動粘度装置
	水分 [ppm]	カールフィッシャー電量滴定

分析項目	項目	実施方法/機器
------	----	---------

金属分析	鉄 (Fe) [ppm]	ICP (誘導結合プラズマ発光分析装置)
	クロム (Cr) [ppm]	
	銅 (Cu) [ppm]	
	アルミニウム (Al) [ppm]	

分析項目	項目	実施方法/機器
汚染度 (ISO コード) 個/ml	> 4 μ m	SpectroLNF Q200 レーザーネットファイン
	> 6 μ m	
	> 14 μ m	
粒子形状情報*		SpectroLNF Q200 レーザーネットファイン

分析項目	項目	実施方法/機器
汚染度 (NAS 等級) 個/100ml	5-15 μ m	SpectroLNF Q200 レーザーネットファイン
	15-25 μ m	
	25-50 μ m	
	50-100 μ m	
	>100 μ m	

* 粒子形状情報は、以下の粒子種類により分類され、その概要は下表の通りである。

<粒子分類解説>

粒子種類		概要	形状
Cutting	切削摩耗	硬い粗さの突起や、外部からの異物による切削が原因となり生じる。	カール状, 線状
Severe Sliding Ware	シビア摩耗	過酷な条件の摺動による重度な凝着の結果生じ、焼付の可能性を示す。	直線エッジ状
Fatigue Ware	疲労摩耗	材質の疲労により生じる粒子。	平板状, 不定形
Non Metallic Wear	非金属	砂, ポリマー等の非金属の粒子。	光透過性
Unclassified Ware	その他	-	-

3-3. メインベアリング・グリスの鉄分含有量分析

希望する事業者から提供されたメインベアリング・グリス試料を ICP (誘導結合プラズマ発光分析装置) を用いて鉄含有量分析を行った。

4. 調査対象機明細

<識別符号 N_TO_600_1>

設置場所： 北海道
メーカー： IHI-NORDEX
定格出力： 600 kW
稼動開始年月： 1998 年 12 月
総発電量： 2,692,338,654 kW
総稼動時間： ー
実施日： 平成 25 年 9 月 10 日（増速機潤滑油採取）

<識別符号 N_TO_600_2>

設置場所： 北海道
メーカー： IHI-NORDEX
定格出力： 600 kW
稼動開始年月： 1999 年 11 月
総発電量： 7,672,474 kW
総稼動時間： ー
実施日： 平成 25 年 9 月 10 日（増速機潤滑油採取）

<識別符号 B_TO_1000_0>

設置場所： 北海道
メーカー： BONUS
定格出力： 1,000 kW
稼動開始年月： 2000 年 12 月
総発電量： 22,131,886 kW
総稼動時間： 2,183 時間
実施日： 平成 25 年 9 月 10 日
(シャフトアライメントテスト及び増速機潤滑油採取)

<識別符号 G_AJ_1500_0>

設置場所： 青森県
メーカー： GE Wind Energy
定格出力： 1,500 kW
稼動開始年月： 2003 年 2 月
総発電量： 34,387,824 kW
総稼動時間： 91,669 時間
実施日： 平成 25 年 8 月 7 日
(シャフトアライメントテスト及び増速機潤滑油採取)

<識別符号 V_IT_225_0>

設置場所： 新潟県

メーカー： VESTAS
定格出力： 225 kW
稼働開始年月： 1999 年 10 月
総発電量： 10,802 kW
総稼働時間： 574 時間
実施日： 平成 25 年 5 月 22 日
(シャフトアライメントテスト及び増速機潤滑油採取)

<識別符号 M_HI_600_1>

設置場所： 静岡県
メーカー： 三菱重工業
定格出力： 600 kW
稼働開始年月： 2003 年 12 月
総発電量： 11,713,144 kW
総稼働時間： 56,116 時間
実施日： 平成 25 年 7 月 3 日
(シャフトアライメントテスト及び増速機潤滑油採取)

<識別符号 M_HI_600_2>

設置場所： 静岡県
メーカー： 三菱重工業
定格出力： 600 kW
稼働開始年月： 2003 年 12 月
総発電量： 12,970,739 kW
総稼働時間： 55,134 時間
実施日： 平成 25 年 7 月 3 日
(シャフトアライメントテスト及び増速機潤滑油採取)

<識別符号 M_HI_600_3>

設置場所： 静岡県
メーカー： 三菱重工業
定格出力： 600 kW
稼働開始年月： 2003 年 12 月
総発電量： 12,341,942 kW
総稼働時間： 55,625 時間
実施日： 平成 25 年 7 月 3 日
(シャフトアライメントテスト及び増速機潤滑油採取)

5. 調査研究の結果と考察

5-1. シャフトアライメントテスト

識別符号	オフセット		角度ズレ		F1 (前脚)		F2 (後脚)	
	水平 (mm)	垂直 (mm)	水平 (mm/100mm)	垂直 (mm/100mm)	水平 (mm)	垂直 (mm)	水平 (mm)	垂直 (mm)
B_TO_1000_0	-1.62	0.55	-0.05	0.05	2.02	-0.95	2.51	-1.44
G_AJ_1500_0	-0.25	0.60	0.07	0.23	0.24	2.25	1.28	5.76
V_IT_225_0	5.05	-3.01	-0.58	-0.09	-0.04	-3.81	-4.77	-4.55
M_HI_600_1	-0.04	0.70	-0.02	0.14	-0.15	1.73	-0.27	2.88
M_HI_600_2	-0.32	-0.09	0.03	-0.02	-0.16	-0.24	0.04	-0.43
M_HI_600_3	-0.55	-0.68	-0.14	-0.03	-1.44	-0.87	-2.57	-1.13

「G_AJ_1500_0 機」については、発電機前脚:垂直方向+0.24mm、水平方向+2.25mm、後脚:垂直方向+1.28mm、水平方向+5.76mm と比較的ずれが大きく、結果報告を受けて、事業者においてアライメント実施を行うこととなった。

5-2. 潤滑油汚染度測定及び含有金属分析

<識別符号 N_TO_600_1>

項目	結果	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
		許容限度	注意レベル	危険レベル
酸価 (mgKOH/g)	0.94	—	—	—
塩基価 (mgKOH/g)	0.39	—	—	—
動粘度 40°C (mm ² /s)	328.40	304~336	294~346	288~352
動粘度 100°C (mm ² /s)	35.75	—	—	—
水分 (ppm)	63	300 未満	300~600	600 以上

項目	結果 (ppm)	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
		許容限度	注意レベル	危険レベル
鉄 (Fe)	21	50 未満	50~150	150 以上
クロム (Cr)	0	—	—	—
銅 (Cu)	1	20 未満	20~50	50 以上
アルミニウム (Al)	0	20 未満	20~50	50 以上

(ISO コード: ISO 4406)

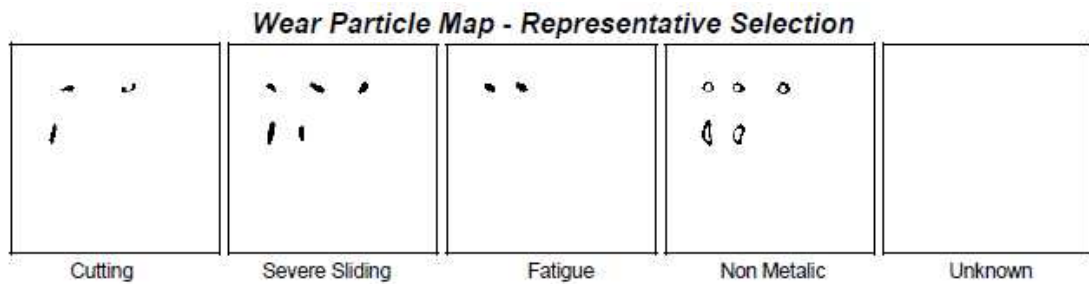
サイズ	結果	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)

	個/mL	コード	許容限度	注意レベル	危険レベル
$\geq 4 \mu\text{m}$	15,521.1	21	—	—	—
$\geq 6 \mu\text{m}$	3,608.7	19	16	17	18
$\geq 14 \mu\text{m}$	32.4	12	13	14	15

(NAS 等級)

サイズ	結果	
	個/100mL	コード
5-15 μm	357,633	11
15-25 μm	2,684	6
25-50 μm	525	7
50-100 μm		
>100 μm	29	7
総合		11

(粒子分布)



潤滑油交換を定期的に行っているが、汚染度総合評価が比較的高かった。来年度以降の結果と比較し傾向分析等を行なっていくこととした。

<識別符号 N_TO_600_2>

項目	結果	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
		許容限度	注意レベル	危険レベル
酸価 (mgKOH/g)	0.87	—	—	—
塩基価 (mgKOH/g)	0.42	—	—	—
動粘度 40°C (mm ² /s)	329.10	304~336	294~346	288~352
動粘度 100°C (mm ² /s)	37.20	—	—	—
水分 (ppm)	84	300 未満	300~600	600 以上

項目	結果 (ppm)	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
		許容限度	注意レベル	危険レベル

鉄 (Fe)	7	50 未満	50~150	150 以上
クロム (Cr)	0	—	—	—
銅 (Cu)	1	20 未満	20~50	50 以上
アルミニウム (Al)	0	20 未満	20~50	50 以上

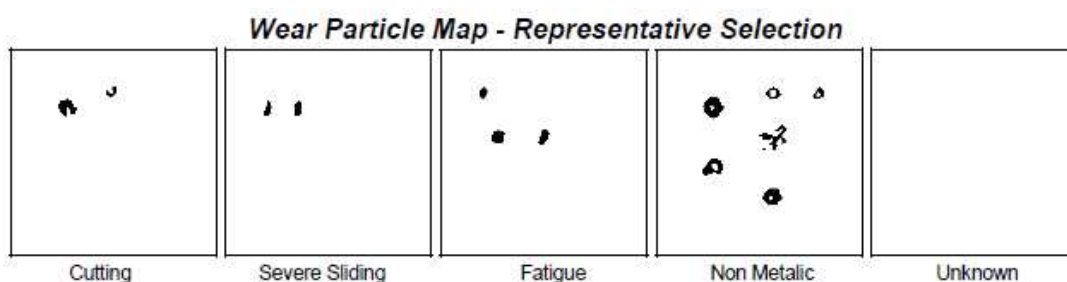
(ISO コード: ISO 4406)

サイズ	結果		監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
	個/mL	コード	許容限度	注意レベル	危険レベル
≥4 μm	502.2	16	—	—	—
≥6 μm	230.3	15	16	17	18
≥14 μm	19.6	11	13	14	15

(NAS 等級)

サイズ	結果	
	個/100mL	コード
5-15 μm	21,078	7
15-25 μm	1,635	6
25-50 μm	292	6
50-100 μm	29	5
>100 μm		
総合		7

(粒子分布)



潤滑油交換を定期的に行っており、来年度以降の結果と比較し傾向分析等を行なっていくこととした。

<識別符号 B_TO_1000_0>

項目	結果	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)
----	----	------------------------------

		許容限度	注意レベル	危険レベル
酸価 (mgKOH/g)	0.84	—	—	—
塩基価 (mgKOH/g)	0.59	—	—	—
動粘度 40°C (mm ² /s)	320.00	304~336	294~346	288~352
動粘度 100°C (mm ² /s)	33.33	—	—	—
水分 (ppm)	65	300 未満	300~600	600 以上

項目	結果 (ppm)	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
		許容限度	注意レベル	危険レベル
鉄 (Fe)	17	50 未満	50~150	150 以上
クロム (Cr)	1	—	—	—
銅 (Cu)	0	20 未満	20~50	50 以上
アルミニウム (Al)	1	20 未満	20~50	50 以上

(ISO コード: ISO 4406)

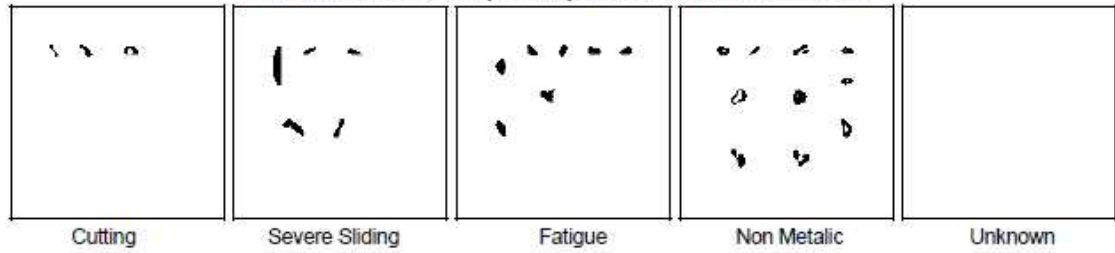
サイズ	結果		監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
	個/mL	コード	許容限度	注意レベル	危険レベル
≥4 μm	357.1	16	—	—	—
≥6 μm	164.2	15	16	17	18
≥14 μm	17.8	11	13	14	15

(NAS 等級)

サイズ	結果	
	個/100mL	コード
5-15 μm	14,638	6
15-25 μm	1,372	5
25-50 μm	350	6
50-100 μm	58	6
>100 μm		
総合		6

(粒子分布)

Wear Particle Map - Representative Selection



潤滑油交換を定期的に行っており、来年度以降の結果と比較し傾向分析等を行なっていくこととした。

<識別符号 G_AJ_1500_0>

項目	結果	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
		許容限度	注意レベル	危険レベル
酸価 (mgKOH/g)	0.91	—	—	—
塩基価 (mgKOH/g)	0.67	—	—	—
動粘度 40°C (mm ² /s)	322.10	304~336	294~346	288~352
動粘度 100°C (mm ² /s)	34.45	—	—	—
水分 (ppm)	266	300 未満	300~600	600 以上

項目	結果 (ppm)	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
		許容限度	注意レベル	危険レベル
鉄 (Fe)	4	50 未満	50~150	150 以上
クロム (Cr)	0	—	—	—
銅 (Cu)	0	20 未満	20~50	50 以上
アルミニウム (Al)	11	20 未満	20~50	50 以上

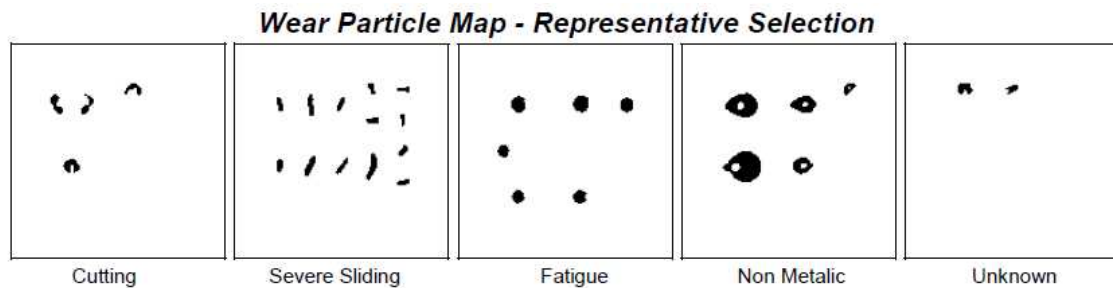
(ISO コード: ISO 4406)

サイズ	結果		監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
	個/mL	コード	許容限度	注意レベル	危険レベル
≥4 μm	1,172.3	17	—	—	—
≥6 μm	332.8	16	16	17	18
≥14 μm	26.4	12	13	14	15

(NAS 等級)

サイズ	結果	
	個/100mL	コード
5-15 μm	30,640	7
15-25 μm	2,011	6
25-50 μm	570	7
50-100 μm	60	6
>100 μm		
総合		7

(粒子分布)



水分が高く何故かアルミニウム含有値が高い。汚染度評価については今年度測定の 8 基の内一番悪い測定結果となった。前回の潤滑油交換は 2009 年 (4 年前) であることから今回の結果になったと思われる。サンプル採取翌週に潤滑油交換を行ったと報告があった。

<識別符号 V_IT_225_0>

項目	結果	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
		許容限度	注意レベル	危険レベル
酸価 (mgKOH/g)	0.70	—	—	—
塩基価 (mgKOH/g)	0.19	—	—	—
動粘度 40°C (mm ² /s)	160.1	304~336	294~346	288~352
動粘度 100°C (mm ² /s)	15.69	—	—	—
水分 (ppm)	122	300 未満	300~600	600 以上

項目	結果 (ppm)	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
		許容限度	注意レベル	危険レベル
鉄 (Fe)	43	50 未満	50~150	150 以上
クロム (Cr)	1	—	—	—
銅 (Cu)	8	20 未満	20~50	50 以上
アルミニウム (Al)	0	20 未満	20~50	50 以上

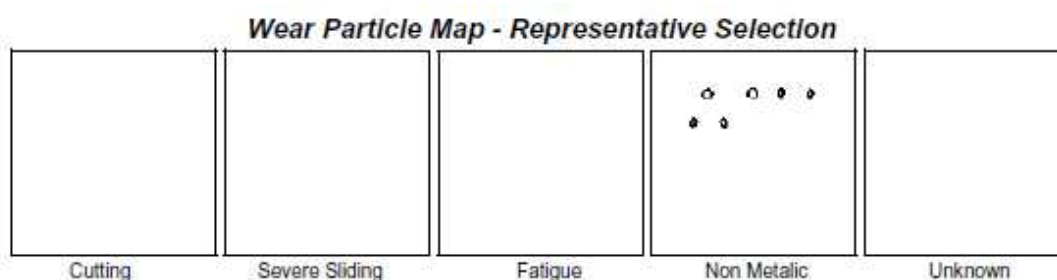
(ISO コード: ISO 4406)

サイズ	結果		監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
	個/mL	コード	許容限度	注意レベル	危険レベル
$\geq 4 \mu\text{m}$	4,897.5	19	—	—	—
$\geq 6 \mu\text{m}$	1,234.0	17	16	17	18
$\geq 14 \mu\text{m}$	49.4	13	13	14	15

(NAS 等級)

サイズ	結果	
	個/100mL	コード
5-15 μm	118,477	9
15-25 μm	4,937	7
25-50 μm		
50-100 μm		
>100 μm		
総合		9

(粒子分布)



動粘度が低くサラサラな状態、又、鉄分及び銅分の含有が多く、汚染度も ISO Code で 13、NAS 等級で 9 と比較的高い。約 5 年間潤滑油交換がなされておらず、前回までのメンテナンス業者によるずさんな管理が窺える。尚、本年 10 月に潤滑油は交換された。

<識別符号 M_HI_600_1>

項目	結果	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
		許容限度	注意レベル	危険レベル
酸価 (mgKOH/g)	0.45	—	—	—
塩基価 (mgKOH/g)	0.19	—	—	—
動粘度 40°C (mm ² /s)	313.9	304~336	294~346	288~352
動粘度 100°C (mm ² /s)	24.13	—	—	—
水分 (ppm)	62	300 未満	300~600	600 以上

項目	結果 (ppm)	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
		許容限度	注意レベル	危険レベル
鉄 (Fe)	4	50 未満	50~150	150 以上
クロム (Cr)	1	—	—	—
銅 (Cu)	0	20 未満	20~50	50 以上
アルミニウム (Al)	1	20 未満	20~50	50 以上

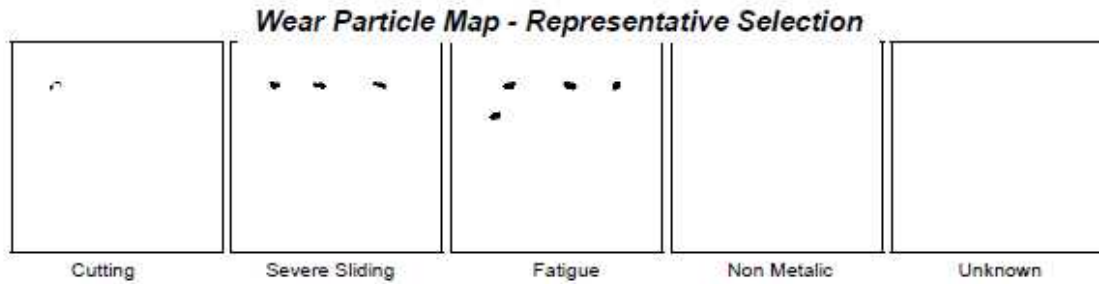
(ISO コード: ISO 4406)

サイズ	結果		監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
	個/mL	コード	許容限度	注意レベル	危険レベル
≥4 μm	367.1	16	—	—	—
≥6 μm	94.4	14	16	17	18
≥14 μm	2.3	8	13	14	15

(NAS 等級)

サイズ	結果	
	個/100mL	コード
5-15 μm	9,216	6
15-25 μm	226	3
25-50 μm		
50-100 μm		
>100 μm		
総合		6

(粒子分布)



一般性状、含有金属、及び汚染度とも問題ない数値結果である。来年度以降の結果と比較し傾向分析等を行なっていくこととした。

<識別符号 M_HI_600_2>

項目	結果	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
		許容限度	注意レベル	危険レベル
酸価 (mgKOH/g)	0.66	—	—	—
塩基価 (mgKOH/g)	0.54	—	—	—
動粘度 40°C (mm ² /s)	306.5	304~336	294~346	288~352
動粘度 100°C (mm ² /s)	23.71	—	—	—
水分 (ppm)	109	300 未満	300~600	600 以上

項目	結果 (ppm)	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
		許容限度	注意レベル	危険レベル
鉄 (Fe)	1	50 未満	50~150	150 以上
クロム (Cr)	0	—	—	—
銅 (Cu)	1	20 未満	20~50	50 以上
アルミニウム (Al)	1	20 未満	20~50	50 以上

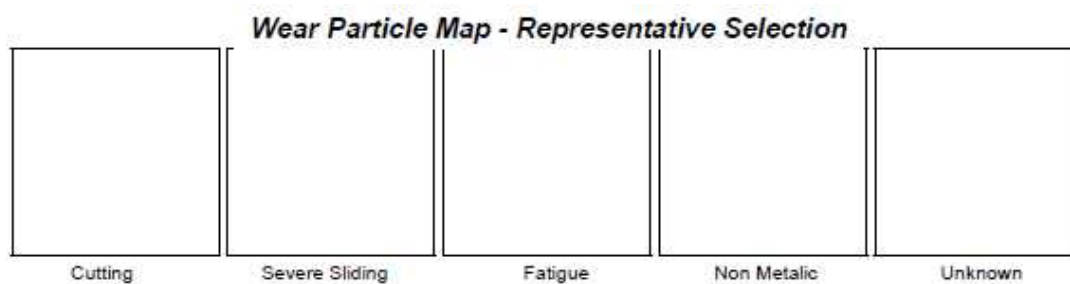
(ISO コード: ISO 4406)

サイズ	結果		監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
	個/mL	コード	許容限度	注意レベル	危険レベル
≥4 μm	86.6	14	—	—	—
≥6 μm	22.1	12	16	17	18
≥14 μm	3.5	9	13	14	15

(NAS 等級)

サイズ	結果	
	個/100mL	コード
5-15 μm	1,862	3
15-25 μm	145	2
25-50 μm	187	5
50-100 μm		
>100 μm	21	7
総合		7

(粒子分布)



一般性状、含有金属、及び汚染度とも問題ない数値結果である。来年度以降の結果と比較し傾向分析等を行なっていくこととした。

<識別符号 M_HI_600_3>

項目	結果	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
		許容限度	注意レベル	危険レベル
酸価 (mgKOH/g)	0.49	—	—	—
塩基価 (mgKOH/g)	0.24	—	—	—
動粘度 40°C (mm ² /s)	313.8	304~336	294~346	288~352
動粘度 100°C (mm ² /s)	24.31	—	—	—
水分 (ppm)	72	300 未満	300~600	600 以上

項目	結果 (ppm)	監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
		許容限度	注意レベル	危険レベル
鉄 (Fe)	1	50 未満	50~150	150 以上
クロム (Cr)	0	—	—	—
銅 (Cu)	0	20 未満	20~50	50 以上
アルミニウム (Al)	1	20 未満	20~50	50 以上

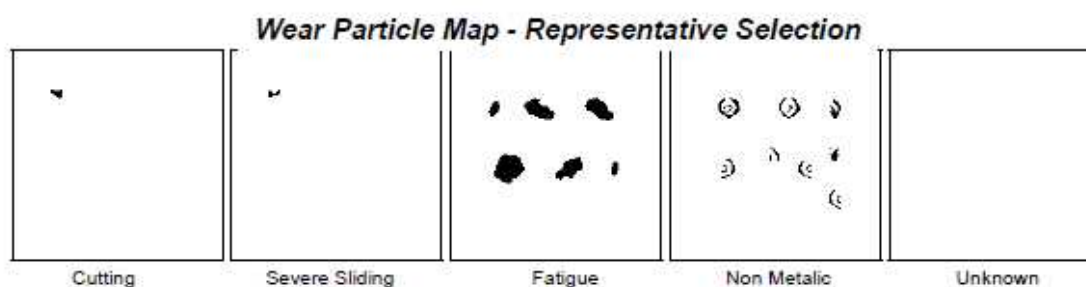
(ISO コード: ISO 4406)

サイズ	結果		監視レベル (IEC IEC 61400-4:2012)		
	個/mL	コード	許容限度	注意レベル	危険レベル
$\geq 4 \mu\text{m}$	260.8	15	—	—	—
$\geq 6 \mu\text{m}$	60.0	13	16	17	18
$\geq 14 \mu\text{m}$	9.7	10	13	14	15

(NAS 等級)

サイズ	結果	
	個/100mL	コード
5-15 μm	5,022	5
15-25 μm	463	4
25-50 μm	414	6
50-100 μm	97	7
>100 μm		
総合		7

(粒子分布)



一般性状、含有金属、及び汚染度とも問題ない数値結果である。来年度以降の結果と比較し傾向分析等を行なっていくこととした。

5-3. メインベアリング・グリスの鉄分含有量分析

	鉄 (Fe) (ppm)	銅 (Cu) (ppm)
V_IT_225_0	872	39
M_HI_600_1	773	30
M_HI_600_2	435	14
M_HI_600_3	261	24

6. 考察

風力発電設備の現状を把握するために、シャフトアライメントテスト、増速機潤滑油の汚染度測定、含有粒子形状解析、並びに含有金属元素分析、及びベアリンググリスの鉄分含有量分析は有効であると考えられ、来年度以降も、希望電気事業者の設備に関し、それらの試験・分析を行い、その結果を提供するとともに、結果に傾向を併せて公表することにより、風力発電促進の条件整備に努めたい。