

原管発官R1第 34号
令和 元年 6月18日

原子力規制委員会 殿

東京都千代田区内幸町1丁目1番3号
東京電力ホールディングス株式会社
代表執行役社長 小早川 智明

柏崎刈羽原子力発電所1号機非常用ディーゼル発電機(B)の過給機軸固着
に関する発電用原子炉施設故障等報告書の提出について

実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条の規定によ
り、原管発官31第7号(平成31年4月12日付)にて提出した発電用
原子炉施設故障等報告書について、別添のとおり補正いたします。

添付資料

発電用原子炉施設故障等報告書「柏崎刈羽原子力発電所1号機非常用
ディーゼル発電機(B)の過給機軸固着について」 1部

以 上

発電用原子炉施設故障等報告書

令和 元年 6月18日

東京電力ホールディングス株式会社

件名	柏崎刈羽原子力発電所1号機 非常用ディーゼル発電機（B）の過給機軸固着について
事象発生の日時	平成30年 9月 6日 13時50分（必要な機能を有していないと判断した日時）
事象発生の場所	柏崎刈羽原子力発電所1号機 原子炉建屋地下1階非常用ディーゼル発電機（B）室（非管理区域）
事象発生の 発電用原子炉施設名	非常用予備発電装置 非常用ディーゼル発電設備
事象の状況	<p>1. 事象発生時の状況</p> <p>柏崎刈羽原子力発電所1号機は第16回定期検査中のところ、平成30年8月30日14時30分より、非常用ディーゼル発電機（B系）（以下、「当該D/G」という。）を定例試験のために起動し確認運転を実施していた際、同日15時16分に異音が発生するとともに、発電機出力が6.6MWから0MWに低下したため、当該D/Gを手動停止した。</p> <p>なお、本事象発生時は、他の非常用ディーゼル発電機2台（A系、高圧炉心スプレイ系）が動作可能であったことから、柏崎刈羽原子力発電所原子炉施設保安規定第61条で要求されている運転上の制限^{*1}は満足していることを確認した。</p> <p>その後、当該D/Gの発電機出力が低下した要因を調査していたところ、9月6日に、当該D/GのR側過給機の軸が固着していることを確認した。当該D/GのR側過給機が軸固着に至った要因の詳細調査は、工場への持出しが必要であり、速やかな復旧が難しいことから、同日13時50分に、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条第3号「発電用原子炉施設の安全を確保するために必要な機能を有していないと認められたとき」に該当するものと判断した。</p> <p>なお、本事象による外部への放射能の影響はなかった。</p> <p>※1 柏崎刈羽原子力発電所 原子炉施設保安規定 第61条（非常用ディーゼル発電機その2）抜粋</p> <p>原子炉の状態が冷温停止及び燃料交換において、非常用ディーゼル発電機（非常用ディーゼル発電機とは、A系、B系及び高圧炉心スプレイ系の非常用ディーゼル発電機をいう。）は「非常用交流高圧電源母線に接続する非常用ディーゼル発電機を含め2台の非常用発電設備が動作可能であること」を運転上の制限とする。</p> <p>2. 当該D/G発電機出力低下時の時系列</p> <p>【8月30日】</p> <p>14:30 当該D/G定例試験開始</p> <p>14:30 当該D/G起動</p> <p>14:43 当該D/G並列</p> <p>14:52 当該D/Gハーフロード到達</p> <p>15:05 当該D/G定格出力6.6MW到達</p> <p>15:16 中央制御室の主機操作員が異音を確認、同じく現場の補機操作員が異音を確認 現場の研修生が当該D/G上部に灰色のもやを確認 警報発生 「ディーゼル発電機1B異常」（中央制御室） 「動弁注油タンク油面低」（現場） 当該D/Gエリア自動火災報知機盤プレアラーム動作 「光電アナログ注意・光電アナログ蓄積中/回復」（中央制御室） 当該D/G関連中央制御室パラメータ変化 当該D/G発電機出力：6.6MW→異音発生直後：6.6MW→ 異音消滅後：6.0MW→その後：0MW</p> <p>15:16 上記の異常を確認したため、主機操作員が中央制御室にて手動操作により</p>

	<p>当該D/Gを解列、停止 15:16 当直長が当該D/G不待機宣言 15:40 当該D/G作動除外操作実施</p> <p>3. R側過給機軸固着確認までの時系列</p> <p>【8月30日】 ・点検調査方法の検討開始</p> <p>【9月3日】 ・点検調査のための安全処置実施</p> <p>【9月4日～5日】 ・動弁注油タンク、クランク室、過給機ブロワ側潤滑油採取 ・各カバー開放による機関内部外観目視点検実施（異常なし）</p> <p>【9月5日】 ・燃料噴射ラック動作確認、発電機絶縁抵抗・巻線抵抗測定（異常なし）</p> <p>【9月6日】 ・継電器点検、計器点検、発電機目視点検、発電機の界磁回路絶縁抵抗・発電機の巻線抵抗測定（異常なし） ・機関ターニングによる動作確認（異常なし） ・過給機ロータハンドターニングによる動作確認（R側過給機（発電機側から見て右側の過給機）に軸固着確認。L側は異常なし）</p> <p>（詳細は、別添の「柏崎刈羽原子力発電所1号機 非常用ディーゼル発電機（B）の過給機軸固着について（報告書）」のとおり。）</p>
<p>事 象 の 原 因</p>	<p>1. 事象の原因調査 1-1. 要因調査（その1） 事象の状況を踏まえ、当該D/Gの発電機出力低下に関する要因分析表を作成し、故障箇所の特定のための要因調査を以下のとおり実施した。</p> <p>1-1-1. 発電機出力低下に関する要因分析に基づく調査</p> <p>(1) 潤滑油系統 a. 摺動部異常 (a) 摺動部抵抗大 潤滑油系統に異常を生じ、摺動部の抵抗が大きくなると、発電機出力低下の要因となる可能性がある。 そのため、クランクケースカバー開放による内部点検（目視点検）、カムケースカバー開放による内部点検（目視点検）、シリンダヘッドカバー開放による内部点検（目視点検）、潤滑油分析、ターニングによる動作確認を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。</p> <p>b. 回転部異常 (a) 回転部抵抗大 潤滑油系統に異常を生じ、回転部の抵抗が大きくなると、発電機出力低下の要因となる可能性がある。 そのため、クランクケースカバー開放による内部点検（目視点検）、カムケースカバー開放による内部点検（目視点検）、シリンダヘッドカバー開放による内部点検（目視点検）、潤滑油分析、ターニングによる動作確認を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。</p> <p>(2) 燃焼機関系統 a. 特定シリンダの着火異常 (a) 燃料噴射ポンプの異常 燃料噴射ポンプに異常がある場合、燃焼機関系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。 そのため、燃料噴射ラックの動作確認（各気筒）を実施したが、異常は確認されなかった。</p> <p>(b) 過給機の異常 過給機に異常がある場合、燃焼機関系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。 そのため、R側及びL側過給機について、過給機エンドカバー（ブロワ側、ター</p>

ビン側) 開放による内部点検 (目視点検)、過給機ロータのハンドターニング、潤滑油分析を実施したところ、R側過給機において、以下の異常を確認した。

- ・ R側過給機エンドカバー (タービン側) 開放による内部点検にて軸受押さえ回り止め部の欠損を確認
 - ・ R側過給機ロータのハンドターニングにて軸固着を確認
 - ・ 潤滑油内で金属粉を確認したことから、成分分析を実施
- なお、L側過給機に異常は確認されなかった。

(3) 給排気系統

a. 特定シリンダの圧力異常

(a) 圧縮圧力低下

圧縮圧力の低下がある場合、給排気系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、クランクケースカバー開放による内部点検 (目視点検) を実施したが、異常は確認されなかった。

(4) 制御系統

a. ガバナ異常

(a) 設定値異常

ガバナの設定値に異常がある場合、制御系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、ロードリミット値、スピードドループ値の確認を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。

(b) ガバナ動作異常

ガバナの動作に異常がある場合、制御系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、ガバナの動作確認及び作動油内の異物確認を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。

(5) 冷却水系統

a. 制御系異常

(a) 温度調整弁の異常

定例試験記録より、当該D/G停止までは正常に冷却水が温度制御されており、異常は確認されていないことに加え、冷却水の制御系異常が発電機出力低下の要因となる可能性は低い、念のため温度調整弁の分解点検を実施したが、異常は確認されなかった。

b. 機械系異常

(a) 冷却水ポンプの異常

定例試験記録より、当該D/G停止までは正常に冷却水が供給されており、異常は確認されていないことに加え、冷却水の機械系異常が発電機出力低下の要因となる可能性は低い、念のため冷却水ポンプの動作確認 (機関ターニングと同時動作確認) を実施したが、異常は確認されなかった。

(6) 発電機系統

a. 監視系異常

(a) 計器単品異常

中央制御室に設置している電力計に異常がある場合、誤った発電機出力を示す可能性がある。

そのため、電力計の計器点検を実施したが、異常は確認されなかった。

(b) PT・CT異常、ヒューズ溶断

中央制御室に設置している電力計、過渡現象記録装置へ信号を出力する回路上で異常がある場合、誤った発電機出力を示す可能性がある。

そのため、PT・CTの目視点検、ヒューズの溶断確認を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。

b. 発電機主回路異常

(a) 受電遮断器の開放

	<p>受電遮断器の意図しない開放がある場合、発電機出力低下の要因となる可能性がある。</p> <p>そのため、運転員への操作実績の聞き取り及び過渡現象記録装置のトレンド確認を実施したが、受電遮断器の意図しない開放はなかった。</p> <p>また、受電遮断器の動作確認を実施したが、異常は確認されなかった。</p> <p>(b) 主回路での地絡、短絡 主回路上に地絡、短絡が発生した場合、発電機出力低下の要因となる可能性がある。</p> <p>そのため、発電機の絶縁抵抗測定、巻線抵抗測定を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。</p> <p>なお、念のため主回路を監視している警報要素に係る継電器点検を実施したが、異常は確認されなかった。</p> <p>(c) AVR異常 AVRに異常がある場合、発電機の制御不良により、発電機出力低下の要因となる可能性がある。</p> <p>そのため、AVR点検を実施したが、異常は確認されなかった。</p> <p>(d) 界磁回路での地絡、短絡 界磁回路上に地絡、短絡が発生した場合、発電機出力低下の要因となる可能性がある。</p> <p>そのため、界磁回路の絶縁抵抗測定、巻線抵抗測定を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。</p> <p>c. 系統異常 (a) 系統動揺 系統動揺が発生している場合、発電機系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。</p> <p>そのため、過渡現象記録装置のトレンドにて系統電圧、系統周波数を確認したが、系統動揺は確認されなかった。</p> <p>d. 発電機異常 (a) 発電機の異常振動 発電機に異常振動がある場合、回転部の機械的な異常により、発電機出力低下の要因となる可能性がある。</p> <p>そのため、カップリング嵌合部、発電機基礎ボルト、速度検出器、ブラシホルダー及びコレクターリングの目視点検、ターニングによる動作確認、軸受部上蓋開放確認、発電機及び界磁回路の絶縁抵抗測定、巻線抵抗測定を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。</p> <p>1-1-2. 発電機出力低下に関する要因分析に基づく調査まとめ 以上の当該D/G発電機出力低下に関する要因分析に基づく調査結果より、燃焼機関系統の調査において、R側過給機のロータに軸固着が確認された。</p> <p>過給機以外に異常は確認されていないことから、R側過給機軸固着が当該D/G発電機出力低下の要因であると判断し、R側過給機軸固着の要因分析表を作成して調査を実施した。</p> <p>1-2. 要因調査（その2） 発電機出力低下に関する要因分析に基づく調査にて確認された故障箇所について、個別に要因分析表を作成し、原因特定のための調査を以下のとおり実施した。</p> <p>1-2-1. 過給機軸固着に関する要因分析に基づく調査 過給機については、軸固着を確認したR側過給機をメーカー工場に持出して詳細点検を実施した。</p> <p>なお、発電機出力低下に関する発電所内における調査にて異常の確認されていないL側過給機についてもメーカー工場に持出し、R側過給機との比較調査を実施した。</p> <p>(1) 回転体の異常 a. タービンブレードとシュラウドとの接触 (a) タービンブレード異常</p>
--	--

タービンプレードに変形等の異常がある場合、回転体と静止部との接触や軸偏芯等が生じることによる軸受等の損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカ工場にて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

< R側過給機 >

- ・タービンプレード1枚 (No. 1) がタービンプレードファツリー部背面側の第一くびれ部の谷部より折損を確認
- ・折損部 (No. 1のタービンプレード) から反時計方向にタービンプレード4枚の先端部変曲を確認
- ・1時～5時方向のタービンプレード先端部に接触痕を確認

< L側過給機 >

- ・全てのタービンプレードの先端部に接触痕を確認
- ・タービンプレード1枚 (No. 25) において、タービンプレードファツリー部背面側の第二くびれ部の谷部にき裂を確認
- ・き裂が確認されたタービンプレード (No. 25) を受け止めるロータファツリー部の第一くびれ部の谷部に、指示模様 (磁粉探傷検査) を確認
- ・ロータファツリー部片側の側面部に打痕と見られる変形を確認

折損、き裂が確認された箇所の破面を走査型電子顕微鏡 (以下、「SEM」という。) 観察した結果を以下に示す。

- ・折損が確認されたR側過給機のタービンプレードの破面をSEM観察した結果、疲労破壊を示す縞模様 (ストライエーション模様) を確認
- ・き裂が確認されたL側過給機のタービンプレードのき裂箇所を強制切断し、SEM観察した結果、疲労破壊を示す縞模様 (ストライエーション模様) を確認
- ・き裂が確認されたL側過給機ロータファツリー部のき裂箇所を強制切断し、SEM観察した結果、疲労破壊を示す縞模様 (ストライエーション模様) を確認

以上のことから、R側過給機のタービンプレードは、これまでの運転の過程で、何らかの繰り返し応力を受け、疲労破壊した可能性があると考え。

(b) レーシングワイヤ異常

レーシングワイヤ^{※2}に異常がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカ工場にて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

- ・R側過給機の外周側レーシングワイヤの脱落と止端部の破断を確認
 - ・R側過給機の内周側レーシングワイヤ \blacksquare 本のうち1本の脱落を確認
- ※2 レーシングワイヤ：タービンプレードの振動を抑制することを目的として、タービンプレードに対し外周、内周それぞれ \blacksquare 本ずつのワイヤが取付けられている。

破断したレーシングワイヤの破面をSEM観察し、レーシングワイヤの破断原因が疲労破壊か、タービンプレード折損に伴う破断かの確認を実施した。

SEM観察の結果から、延性による破断を示すディンプル模様が確認され、疲労破壊を示す縞模様 (ストライエーション模様) は確認されなかった。

そのため、レーシングワイヤの破断は、タービンプレード折損に伴う破断であると考え。

b. タービンプレードとノズルリングとの接触

(a) ノズルリングの異常

ノズルリングに異常がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカ工場にて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

- ・R側過給機のノズルリング9時～2時方向に接触痕 (小さい傷) を確認
- ・R側過給機のノズルリング4時～7時方向に接触痕 (大きい傷) を確認

R側過給機のノズルリングに確認された接触痕は、ノズルリングの排気入口側ではなくタービンプレード側に確認されたことから、R側過給機のタービンプレード (No. 1) 折損による従属的な事象であると考え。

(b) 異物飛び込みによるノズル損傷

異物飛び込みによりタービンブレード及びノズルリングに損傷がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカ工場にて詳細点検を実施したが、タービンブレード及びノズルリングに異物飛び込みの痕跡は確認されなかった。

なお、タービンブレード及びノズルリングには、折損したタービンブレードが隙間に入り込んだことによる接触痕が確認された。

R側過給機のノズルリングに確認された接触痕は、ノズルリングの排気入口側ではなくタービンブレード側に確認されたことから、異物飛び込みによるものではなく、R側過給機のタービンブレード (No. 1) 折損による従属的な事象であると考える。

c. インペラとケースとの接触

(a) インペラ、インデューサの異常

インペラ、インデューサに異常がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカ工場にて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

- ・ R側過給機のインデューサの6時～11時方向の先端部に接触痕を確認
- ・ R側過給機のインペラの6時～11時方向の先端部に接触痕を確認

確認された異常は、いずれもシャフトフランジの開きによる軸の振れまわりによって発生したものと推定されることから、軸固着の原因となるインペラ、インデューサの異常はなかったものとする。

(b) 異物飛び込みによるインペラ及びインデューサ損傷

異物飛び込みによりインペラ及びインデューサに損傷がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカ工場にて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

- ・ R側過給機のインペラ背面に接触痕を確認

確認された接触痕は、シャフトシュラウド、シールプレート固定ボルト、ナット・ワッシャ脱落によるもので、インペラの空気取入れ側からの異物飛び込みによる損傷ではないと考える。

d. シール部品とロータ軸との接触

(a) ロータ軸偏芯

ロータ軸の曲がりにより接触がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、過給機エンドカバー開放によるハンドターニング、及びメーカ工場にて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

- ・ ハンドターニングの結果、R側過給機の軸固着を確認
- ・ R側過給機のロータシャフトフランジ部の0時～6時方向に最大0.5mm程度の隙間を確認

確認されたロータシャフトフランジ部の隙間は、締結ボルトに伸びが確認されていることから、R側過給機軸固着に至る過程での急激な過大応力を受けたことによる従属的な事象と考える。

(b) シール部品の脱落

固定ボルト等の緩みがある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカ工場にて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

- ・ R側過給機のシャフトシュラウド、シールプレート固定ボルト (■本中2本) 及びナット・ワッシャ (■個中3個) の脱落を確認
- ・ R側過給機のシャフトシュラウドの破損を確認

ロータシャフトアンバランス発生に伴う振動により、ボルト、ナット・ワッシャが脱落し、ロータシャフトとシャフトシュラウドの接触が起こればシャフトシュラウドの破損が発生したものとする。

(2) 軸受の異常

a. ベアリングの異常

(a) ベアリング摩耗

ベアリング摺動部に異常摩耗がある場合、軸受に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、R側過給機のベアリング（過給機タービン側及びプロワ側）についてベアリングメーカーにて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

<過給機タービン側ころ軸受>

- ・内輪軌道面の約1/3周に、ころのピッチ間隔で変形（圧痕）を確認
- ・保持器ポケット柱面の約1/3周に破断、摩耗、変色を確認
- ・ころ転動面に摩耗、変形を確認

<過給機プロワ側玉軸受>

- ・内輪軌道面の約1/3周に剥離を確認

R側過給機の両ベアリングの損傷・変形は、瞬間的な荷重（衝撃荷重）を受けたことにより発生したものと推定されることから、特にタービン側ころ軸受ベアリングの損傷は、ロータシャフトアンバランス発生に伴う振動により、ロータシャフトが屈曲し、ベアリングのころと保持器が潰れたものであり従属的に発生したものと考える。

(b) 潤滑油不良

潤滑油補給時の銘柄間違いがある場合、軸受に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、前回の本格点検時の補給記録を確認したが、R側及びL側過給機ともに補給した潤滑油の銘柄の相違はなかった。

(c) 潤滑油の劣化、油量不足

潤滑油性状の劣化、オイルポンプ故障による軸受部への注油量不足がある場合、軸受に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、潤滑油性状の劣化については、潤滑油分析を実施したが、R側及びL側過給機ともに潤滑油性状に異常は確認されなかった。

オイルポンプの健全性については、メーカー工場にて詳細点検を実施し、オイルポンプ性能に関する異常は確認されなかった。

(d) 潤滑油への異物混入

潤滑油への異物混入がある場合、ベアリングに損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、潤滑油性状の劣化については、潤滑油分析を実施したが、R側及びL側過給機ともに潤滑油性状に異常は確認されなかった。

潤滑油内に残留していた金属粉の成分分析を実施した結果、タービン側にて亜鉛（Zn）成分と銅（Cu）成分、プロワ側にて鉄（Fe）及びクロム（Cr）を含む成分が多く検出された。確認された金属粉に関する発生源調査を実施した結果、いずれもベアリングの構成部材であることが確認された。

このことから、潤滑油に残留していた金属粉は、ベアリング損傷によるベアリング部材の摩耗等により発生したものであり、潤滑油への異物混入はなかったと考える。

b. 構成部品の緩み、異常

(a) 部品の脱落

固定ボルト等の緩み、脱落がある場合、軸受に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカー工場にて詳細点検を実施した結果、R側過給機において以下の異常を確認した。

- ・R側過給機のシャフトシュラウド、シールプレート固定ボルト（■本中2本）、ナット・ワッシャ（■個中3個）の脱落を確認

確認された部品の脱落は、ロータシャフトアンバランス発生に伴う振動により発生したものと推定し、従属的に発生したものと考える。

1-2-2. R側過給機軸固着に関する要因分析に基づく調査結果の考察

(1) R側過給機軸固着の起点部位と従属的損傷部位の考察

R側過給機軸固着に関する調査結果を踏まえ、比較的大きく損傷している「タービンプレード」、「レーシングワイヤ」及び「ベアリング」について、いずれの事象が起点部位であるかを考察した。

レーシングワイヤは瞬間的な応力による破断であること、ベアリングは瞬間的な衝撃荷重による損傷であることに対し、タービンプレードは、事象の進展に一定の時間を要する疲労破壊の様相を確認している。

また、打痕や接触痕が確認された他の損傷部位は、確認された傷の表面に腐食や煤の付着等が確認されず比較的新しいことから、事象の起点ではないと考える。

なお、タービンプレードの折損面には腐食や煤の付着が確認されており、破断前のき裂が、一定期間存在していたものとする。

以上より、R側過給機軸固着の起点部位はタービンプレードの疲労破壊であり、その他は従属的に損傷したものとする。

(2) L側過給機タービンプレード先端部の傷の考察

L側過給機点検にて確認されたタービンプレードの先端部の傷は、接触したと考えられるノズリング側の接触痕が、下部に集中していることから、R側過給機の軸固着時の衝撃により、瞬間的にタービンプレードと周囲のノズリングの一部が接触し発生したものとする。

(3) L側過給機タービンプレードき裂の考察

タービンプレードファツリー部のき裂の破面観察結果は、疲労破壊を示す縞模様（ストライエーション模様）であり、R側過給機の折損したタービンプレードと同様にファツリー部にて発生していることから、R側過給機と同様に、疲労破壊が進展していたものとする。

なお、確認されたき裂は、タービンとしての機能への影響はなく、当該D/Gの発電機出力低下の原因ではなかったものとする。

(4) L側過給機ロータファツリー部のき裂の考察

L側過給機ロータファツリー部のき裂は、タービンプレードファツリー部のき裂と対する箇所にて確認されている。タービンプレードファツリー部に比べ、ロータファツリー部は設計上発生応力に対して許容される応力の余裕が大きい。そのため、先にタービンプレードファツリー部にき裂が発生し、タービンプレードファツリー部とロータファツリー部の当たり状態が変化することで、ロータファツリー部の一部に過大な応力が加わり、き裂が従属的に発生したものとする。また、き裂の破面観察結果は、疲労破壊を示す縞模様（ストライエーション模様）であることから、タービンプレードファツリー部と同様に疲労破壊が進展していたものとする。

(5) L側過給機ロータファツリー部側面の打痕に関する考察

L側ロータファツリー部に確認された変形は、表面に接触痕等が確認されず、また、腐食や煤の付着があることから、本事象発生前から存在していたものとする。

工場の作業員に対し、過去の作業履歴に関して聞き取りした結果は以下のとおり。

- ・当発電所2号機において発生した非常用ディーゼル発電機過給機の不具合に伴う水平展開として、タービンプレードの取外・取付を実施した。
- ・取外・取付の際に、通常は樹脂製ハンマー及び黄銅棒にて打撃するところ金属製ハンマーにより打撃を実施したこと、さらにL側ロータファツリー部の側面を誤って打撃し、変形したものとする。
- ・金属製ハンマーを使用した理由は、ファツリー部間に堆積した煤等によりファツリー部の取外し時の接触抵抗が増大していたこと、レーシングワイヤの反発及びタービンプレードファツリー部の塑性変形により、タービンプレードファツリー部とロータファツリー部間の取付け時の接触抵抗が増大していたことによるものと推定した。

この打撃により発生したファツリー部の変形がファツリー部間の当たり状態を変化させ、タービンプレードファツリー部への応力増加となったと考える。

1-2-3. R側過給機軸固着に関する要因分析に基づく調査まとめ

R側過給機軸固着の起回事象は、タービンプレードの折損（疲労破壊）であると判断したことから、タービンプレードの折損に関する要因調査を実施した。

1-3. 要因調査 (その3)

タービンプレードの疲労破壊に関する要因について、材料、設計条件、加工不良、組立不良、外的要因の観点で要因分析表に基づき調査を実施した。

1-3-1. タービンプレードの疲労破壊に関する要因調査

(1) 材料に関する要因調査

a. 化学成分

(a) 設計要求仕様逸脱

タービンプレード及びロータシャフトの材料が設計要求仕様を逸脱していると、強度不足により、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、タービンプレードファツリー部及びロータファツリー部の断面をEPMA^{※3}にて分析し、材料の化学成分を確認したが、いずれも設計要求材質とおりの化学成分であり、異常は確認されなかった。

※3 Electron Probe Micro Analyzer

: 電子線を照射し、発生する特性X線の波長と強度から構成元素を分析する手法

b. 硬度分布

(a) 設計要求仕様逸脱

タービンプレード及びロータシャフトの硬度が設計要求仕様を逸脱していると、強度不足となり、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、タービンプレードファツリー部及びロータファツリー部の断面の硬さ測定を実施したが、いずれも硬さは均一な分布であり、異常は確認されなかった。

c. 引張強度

(a) 設計要求仕様逸脱

タービンプレード及びロータシャフトの引張強度が設計要求仕様を逸脱していると、強度不足となり、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、タービンプレードファツリー部及びロータファツリー部より試験片を取出し、引張試験を実施したが、いずれも設計値を満足しており、異常は確認されなかった。

d. 初期欠陥

(a) 材料の初期欠陥確認

タービンプレード及びロータシャフトの材料に初期欠陥が存在していると、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、R側過給機のタービンプレードファツリー部、L側過給機のタービンプレードファツリー部及びL側過給機ロータファツリー部で確認されたき裂箇所

の破面についてSEM観察を実施した。

SEM観察の結果、き裂箇所に初期欠陥となり得る内部欠陥は確認されなかった。

(2) 設計条件に関する要因調査

a. 材料選定

(a) 材料選定に関する調査

必要強度に対する材料の選定間違いがあると、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、メーカーにこれまでの使用実績を聞き取りした結果、当該D/G過給機タービンプレード等の材料は、大型船舶やディーゼル発電機の材料に標準材料として採用されていることが確認されたことから、材料選定に関する問題はなかったと考える。

b. 遠心応力

(a) 遠心応力に関する解析調査

設計条件で求めた遠心応力に対して実際の構成部材に作用する遠心応力が過大であると、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、レーシングワイヤ付加荷重の応力解析を実施し、修正グッドマン線図を用いた評価を行った結果、疲労限度内にあることから遠心応力に関する問題は確認されなかった。

c. レーシングワイヤ局部応力

(a) レーシングワイヤ局部応力に関する解析調査

タービンプレードに対するレーシングワイヤの遠心応力が設計条件と異なると、タービンプレードへの付加荷重が発生し、き裂発生の原因となる可能性がある。
そのため、レーシングワイヤの遠心応力による付加荷重について、修正グッドマン線図を用いた評価を行った結果、レーシングワイヤ作用角度が付いた場合にファツリー部への応力振幅がわずかに疲労限度に近づくものの疲労限度内にあることから、レーシングワイヤ局部応力に関する問題は確認されなかった。

d. 起動・停止過程における過大応力

(a) 起動・停止の過程における過大応力に関する解析調査

起動・停止過程において、発電機出力が中間出力時の低回転域や定格出力到達時に発生するオーバーシュートによる過給機の過回転により設計条件を上回る過大な応力が発生すると、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、タービンプレードとタービンロータアッセンブリモデルによる固有値解析を実施した。

解析の結果、想定される回転数領域に、共振点は存在しないことが確認されたことから、起動・停止過程における過大応力に関する問題はなかったと考える。

(3) 加工不良に関する要因調査

a. ファツリー形状

(a) ファツリー形状製作に関する調査

ファツリー形状について、設計値と異なる寸法に製作すると、ファツリー部間のクリアランスが無くなることで、ファツリー部のくびれ部に作用する応力が過大となり、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、ファツリー形状製作時の品質記録、要領書、管理基準に関する調査を実施した。製作当時のファツリー部加工結果（寸法）を示す品質記録は存在していないものの、出荷条件となる判定基準を満足していることから、品質管理上、ファツリー形状製作に関する問題はなかったと考える。

b. ファツリー部加工方法

(a) ファツリー部加工方法に関する調査

ファツリー部の面粗度が粗くなると、疲労限度が低下し、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、ファツリー部加工方法及び面粗度について確認した。

ファツリー部の加工方法は、当該ファツリー部の加工時から、現在までにいくつか変更があったが、面粗度の設計値に変更はなく、き裂が発生したR側過給機のタービンプレードファツリー部の面粗度の計測結果も設計値を満足しており、ファツリー部加工方法に関する問題は確認されなかった。

c. レーシングワイヤ線径

(a) レーシングワイヤ線径加工に関する調査

レーシングワイヤの線径が設計値を逸脱すると、ファツリー部くびれ部に作用する応力が過大となり、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、レーシングワイヤ線径の計測を実施した結果、レーシングワイヤ線径が応力解析の結果に対して必要強度を十分有していることから、レーシングワイヤ線径加工に関する問題は確認されなかった。

d. レーシングワイヤ孔径及び孔高さ

(a) レーシングワイヤ孔加工に関する調査

レーシングワイヤ孔径及び孔高さが部分的に設計値を逸脱し、隣接するタービンプレード間を貫通しているレーシングワイヤが傾くことで、ファツリー部くびれ部の応力を高め、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、レーシングワイヤ孔の現品計測を実施した。

計測の結果、レーシングワイヤ孔径に、設計値を僅かに超えるものが確認された。

また、レーシングワイヤ孔高さについて設計値を逸脱し隣接するタービンプレードとの高低差が大きい箇所があることを確認した。

メーカーに聞き取りした結果、レーシングワイヤ孔径の設計値逸脱は、製造時に全数検査を行っていることから運転中の摩耗が原因であると考えられ、レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱の原因は、製作時の孔加工不良である可能性が高いことを確認した。

なお、レーシングワイヤの傾きへの寄与は、隣接するタービンプレードのレーシ

ングワイヤ孔高さの高低差によるものが支配的であることから、レーシングワイヤ孔径の設計値逸脱は、き裂発生に対して問題はなかったと考える。

(4) 組立不良に関する要因調査

a. レーシングワイヤ取付

(a) レーシングワイヤ取付に関する調査

レーシングワイヤ止端部の形状や取付状態に不良があると、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、至近の本格点検記録を確認した結果、止端部の形状や取付状態に異常がないことから、レーシングワイヤ取付に関する問題は確認されなかった。

なお、き裂が確認されたタービンプレードは、レーシングワイヤ止端部に隣接していないことから、止端部の形状や取付状態による影響はなかったものとする。

b. ブレード取外・取付作業

(a) ブレード取外・取付作業に関する調査

ブレードの取外・取付作業によって、ファツリー形状の変形や接触面の当たり状態が変化すると、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、過去の点検記録の確認及び外観目視点検を実施したところ、以下の問題を確認した。

- ・過去の点検時にタービンプレードの取外・取付作業を実施したことを確認
- ・タービンプレード取外・取付時の打撃によるものと考えられるL側過給機ロータファツリー部端部に変形を確認

なお、タービンプレード取外・取付作業は、当発電所2号機において発生した非常用ディーゼル発電機過給機の不具合に伴う水平展開として、当該D/G過給機のレーシングワイヤ孔の再加工工事の際に実施されていた。

取外し後の再取付実施前には、ファツリー部に付着した煤や腐食生成物の洗浄を実施することから、再取付によってファツリー部間の当たり状態が変わり、タービンプレードき裂発生の起因の可能性があると考える。

また、打撃により発生したロータファツリー部端部の変形がファツリー部間の当たり状態を変化させ、タービンプレードファツリー部への応力増加となった可能性があると考えられる。

(5) 外的要因に関する要因調査

a. 腐食・汚れ

(a) 腐食・汚れに関する調査

腐食・汚れによる経年変化により、タービンプレードファツリー部とロータファツリー部間のクリアランス減少及び接触面の粗度が増加し、ファツリー部に応力が発生し、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、外観目視点検による腐食・汚れの確認を実施した結果、以下の問題を確認した。

- ・タービンプレードファツリー部及びロータファツリー部に酸化スケール及び煤と思われる汚れの付着を確認

ファツリー部間のクリアランスへ汚れが入り込むことによりファツリー部間の当たり状態が変化し、ファツリー部に歪みによる局部応力が発生した可能性がある。使用継続に伴い、腐食・汚れが増加することで、タービンプレードのき裂発生を助長した可能性があると考えられる。

b. 運転負荷

(a) 運転負荷状況に関する調査

現在の当該D/G運転負荷状況については、問題は確認されていないが、過去に運転負荷上昇率の変更等の運用変更があった場合には、過給機への過負荷による過大応力を発生させ、き裂発生の起因となっていた可能性がある。

そのため、過去の運用方法を確認した結果、納入から現時点に至るまで、発電機並列～定格負荷～発電機解列までの運用方法に変更はなく、運転負荷状況に関する問題は確認されなかった。

c. 運転時間、起動回数

(a) 運転時間、起動回数に関する調査

運転時間、起動回数が当該D/Gのみ過度に多い場合には、経年影響により、き

裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、プラントの運転開始からの総運転時間、起動回数について確認したが、1号機の他の非常用ディーゼル発電機と比較し、特異性はなく、運転時間、起動回数に関する問題は確認されなかった。

なお、起動・停止による低サイクル疲労破壊に関する評価を実施したが、低サイクル疲労に対する疲労寿命は \square サイクル程度であることが確認され、非常用ディーゼル機関の設計仕様書で想定する起動回数 \square 回に対し、十分な余裕があることを確認している。

d. 保守・整備

(a) 保守・整備の影響に関する調査

ロータシャフト取外・取付時に、ブレードを接触させると、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、前回の本格点検記録を調査したが、ブレードを接触させた等の記録はなく、保守・整備の影響に関する問題は確認されなかった。

e. 経時的変化

(a) 経時的変化に関する調査

タービンブレードファツリー部及びロータファツリー部の寸法が経時的に変化することで、ファツリー部間のクリアランスにばらつきが生じ、ファツリー部接触部への応力が増大することで、き裂の起因となる可能性がある。

そのため、タービンブレードファツリー部及びロータファツリー部の三次元計測による寸法測定を実施したところ、以下の問題を確認した。

- ・タービンブレードファツリー部の寸法が設計値を逸脱していることを確認
- ・ロータファツリー部の寸法が設計値を逸脱していることを確認

摩耗による減肉や煤の付着による厚肉等も否定できないものの、経時的変化によりファツリー部間のクリアランスが変化していた可能性がある。

応力解析の結果、タービンブレードファツリー部は、当該D/G定格運転中は0.2%耐力を加味した弾性限度を逸脱することから、経時的な寸法変化が生じる。一方、ロータファツリー部寸法の設計値逸脱については、ロータファツリー部の材料特性の確認結果より、ロータファツリー部は、弾性領域での使用であること、また、ロータファツリー部の製作時には、寸法測定は実施せずモデルブレードが全数のロータファツリー部に通ることの確認のみであり、経時的な変化ではなく製作時の誤差によるものと考えられることから、クリアランスの変化には寄与しない。

タービンブレードファツリー部の経時的な寸法変化が生じ、ファツリー部間のクリアランスにばらつきが発生していることを確認した。このばらつきにより、ファツリー部接触部への応力が増大し、き裂の一因となったと考える。

1-3-2. タービンブレードの疲労破壊に関する要因調査まとめ

タービンブレードの疲労破壊に関する調査の結果、「レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱」及び「タービンブレードファツリー部寸法の設計値逸脱」が確認された。

確認された事象をもとにタービンブレードの疲労破壊に関する要因の考察を以下に整理する。

(1) レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱に関する考察

レーシングワイヤ孔高さが設計値を逸脱し、隣接するタービンブレードとの高低差が生じると、タービンブレードとレーシングワイヤの作用角度が変位し、タービンブレード背面側の応力が増大する可能性がある。

本事象では、R側過給機、L側過給機ともにタービンブレードファツリー部の背面側を起点とするき裂が発生していることから、レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱は、タービンブレードの疲労破壊の要因であると考えられる。

(2) タービンブレードファツリー部寸法の設計値逸脱に関する考察

タービンブレードファツリー部の寸法が経時的に変化し、ファツリー部間のクリアランスが減少することで、タービンブレードファツリー部とロータファツリー部が運転中の熱膨張により接触しやすくなり、その結果、ファツリー部接触部への応力を増大させた可能性がある。

タービンブレードファツリー部は、運転に伴う熱応力、排気圧力及び遠心力による応力を受けることにより、寸法変化（塑性変形）が発生する。

更に、当該D/Gにおいては、過去にタービンブレードの取外・再取付を実施してい

る。既に寸法変化が発生した状態のタービンプレードを再利用したことに伴い、ファツリー部間の当たり状態が大きく変化した可能性があり、ファツリー部への応力集中の主要因となったと考える。

なお、過給機の使用継続に伴うファツリー部の寸法変化による影響は、今回の事象発生に伴う調査を行うまで、製造メーカの知見がなく、タービンプレードの保守点検内容、頻度や交換等の検討はなされていなかった。

(3) タービンプレードの疲労破壊に関する考察

「レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱」に加え「タービンプレードファツリー部寸法の設計値逸脱」が発生した状況を模擬した応力解析を実施した結果、タービンプレードファツリー部の背面側に掛かる応力が設計値を上回り、疲労限度に達することを確認した。

なお、「レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱」と「タービンプレードファツリー部寸法の設計値逸脱」のそれぞれの事象単独による応力解析結果では、疲労限度には到達しないことを確認した。

以上より、「レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱」及び「タービンプレードファツリー部寸法の設計値逸脱」の重畳により、タービンプレードファツリー部背面側に応力が集中し、疲労限度を超えたため、同部位を起点として疲労破壊に至ったものと考えられる。

1-4. その他の調査

これまでの調査の他に、本事象に関連する以下の調査を実施した。

1-4-1. R側過給機軸固着に伴う影響調査

R側過給機軸固着に伴い、当該D/Gの排気側・給気側それぞれに、損傷部品の破片が流出した可能性が高いことから、ディーゼル機関の点検を以下のとおり実施し、異常のないことを確認した。

- ・R側の全9気筒の開放とL側の代表2気筒の開放点検を実施し、異常のないことを確認
- ・R側及びL側の排気管全数に対し内部点検（目視点検）及び伸縮継手の内外面点検を実施し、異常のないことを確認
- ・R側の空気冷却器の開放点検を実施し、異常のないことを確認したが、R側の空気冷却器内部に過給機損傷部から発生したと考える金属片の混入を確認

1-4-2. 保守管理に関する調査

当該D/G過給機の保守管理に関する調査を実施した結果、保全プログラムによる点検内容（本格点検）が計画的に実施されており、問題ないことを確認した。

1-4-3. 過去の類似事象に関する調査

非常用ディーゼル発電機過給機のタービンプレード折損に関する過去の類似事象について、原子力安全推進協会の国内外トラブル情報等にて確認したが、本事象と同様の原因による類似事象は確認されなかった。

2. 推定原因

これまでの調査結果を踏まえ、タービンプレードが折損に至った原因は、以下の2項目が重畳することで、タービンプレードファツリー部の設計応力を超えたことにより発生したと考える。

- ① レーシングワイヤ孔の製造時の加工不良。
- ② 塑性変形したタービンプレード取外・再取付による、ファツリー部間の当たり状態の変化。

3. タービンプレード疲労破壊の推定メカニズム

調査結果を踏まえ、タービンプレード疲労破壊のメカニズムを以下のように推定した。

- ① 製造時のレーシングワイヤ孔加工の際に、タービンプレード固定治具の操作不良または穴開けドリル位置ずれにより、レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱が発生。
- ② 隣接するレーシングワイヤ孔の高低差により、タービンプレードを貫通しているレーシングワイヤが設計と異なる作用角度に変位し、タービンプレード背面側に応力が増大。
- ③ タービンプレードファツリー部に、運転に伴う熱応力、排気圧力及び遠心力による応力を受けることで寸法変化（塑性変形）が蓄積するとともに、運転・停止時

のファツリー部の熱膨張・収縮やファツリー部間のクリアランスでの付着物の増加により、ファツリー部間のクリアランスが徐々に減少。

- ④ タービンプレード取外し後の手入りに伴うファツリー部の付着物除去により、タービンプレード再取付け後のファツリー部間の当たり状態やクリアランスが部分的に変化。
- ⑤ タービンプレード背面側への応力増大とファツリー部間の当たり状態やクリアランスの変化に伴う応力集中に、運転・停止時の熱膨張・収縮が加わることで、ある時点を境に、ディーゼル機関からの排気脈動を加えた運転時の応力が疲労限度を超え、ファツリー部くびれ部にき裂が発生。
- ⑥ 増大した運転時の応力を受け続けることで、き裂が進展し、最終的にタービンプレードがファツリー部より延性破壊し、折損。
L側ロータファツリー部は、L側タービンプレードファツリー部で発生したき裂により、タービンプレード側から受ける応力が局所的に増大し、結果としてロータ側にき裂が発生したものと推定。

タービンプレードファツリー部のき裂発生箇所は、R側が第一くびれ部、L側が第二くびれ部となっており、それぞれ異なるが、ファツリー部間の当たり状態の相違により応力集中箇所が異なったことによるものと推定。

4. 事象発生の推定メカニズム

4-1. R側過給機軸固着の推定メカニズム

調査結果を踏まえ、R側過給機軸固着のメカニズムを以下のように推定した。

- ① レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱に伴うタービンプレード背面側への応力増大、運転時の応力に伴う塑性変形が発生したタービンプレード取外・再取付けによる応力集中とディーゼル機関運転時の応力により、R側過給機のタービンプレード1枚が疲労限度を超え、き裂が発生・進展し、ファツリー部より折損。
- ② 折損したタービンプレードは、レーシングワイヤを切断し、外周方向に引き出しながら、6時方向で隣接するタービンプレードとシュラウドリングの間に入り込み、同時にノズルリングとも接触。
- ③ 接触によりタービンプレードが分割、破断片はタービン排気流に乗って排気管へ移動。比較的大きい根元部はケーシング内に落下。
- ④ タービンプレードは遠心力とともにレーシングワイヤを引き出し、脱落したレーシングワイヤは排気管内へ移動。
- ⑤ タービンプレードが折損したことにより、ロータシャフトはアンバランスとなり振動が増加しラジアル方向の変位増加。
- ⑥ ロータシャフトフランジやタービンプレードファツリー部がシャフトシュラウドと摺動接触。
- ⑦ ロータシャフトのアンバランスによりインデューサとインペラがインサート内面に接触。
- ⑧ シャフトシュラウドとシールプレートの固定ボルト2本、ナット・ワッシャ3個が緩み脱落。
- ⑨ ロータシャフトフランジがシャフトシュラウドと摺動接触し、ロータシャフトフランジ結合部に隙間が発生。
- ⑩ シャフトシュラウド下部は、シャフトシュラウド自身の振動またはロータシャフトとの接触により破損し、ケーシング内に破損部が脱落。
- ⑪ ロータシャフト屈曲、アンバランス等の要因により軸が振れまわり、回転体とケーシングが強く接触。
- ⑫ キックバック現象によりロータシャフトが3時方向に急負荷し、ベアリングのころと保持器を潰し、完全軸固着。同時にタービン側弾性装置（軸受押さえ回り止め部）が逆回転方向に回転し、軸受押さえ回り止め部の爪を折損させ270°回転。

4-2. 発電機出力低下に関する推定メカニズム

これまでの全ての調査結果を踏まえ、当該D/Gの発電機出力低下に関するメカニズムは、以下のとおりと推定した。

- ① R側過給機のタービンプレード損傷によりR側過給機の軸固着が発生。
R側過給機軸固着による衝撃により、動弁注油タンク油面低検出器が誤作動し、警報発生。
- ② R側過給機の軸固着により、R側過給機は機関への送気機能を喪失。
R側過給機の送気機能喪失により過給機の軸シールが失われ、過給機上部への排気ガスが漏れ、もやの発生と火災報知機盤プレアラーム動作。

	<p>③ 過給機のR側とL側は、給気と排気ラインが各々分離しており、L側への送気及び機関の運転は継続されていた。一方、R側は燃焼室への送気がほぼ遮断され、R側シリンダは不完全燃焼から未燃焼状態となった。R側シリンダ内のピストン上下動作は圧縮損失となりL側シリンダへの動作抵抗が増加し、機関回転速度を低下させるように働く。</p> <p>④ 系統連携した機関の回転速度は変化せず、手動ガバナ操作であったため、ガバナは機関への燃料供給量を変化することなく機関出力は急激に低下。</p> <p>⑤ 機関出力が低下傾向状態では、R側シリンダの抵抗を上回る機関出力をL側シリンダで発生させることができず、発電機出力が0MW近傍まで急激に低下。</p> <p>(詳細は、別添の「柏崎刈羽原子力発電所1号機 非常用ディーゼル発電機(B)の過給機軸固着について(報告書)」のとおり。)</p>
保護装置の種類及び動作状況	該当せず
放射能の影響	なし
被害者	なし
他に及ぼした傷害	なし
復旧の日時	未定
再発防止対策	<p>1. 対策</p> <p>当該D/G過給機(R側及びL側)については、タービンブレード及びロータシャフトを新製して復旧するが、以後の非常用ディーゼル発電機過給機の新製及び既設非常用ディーゼル発電機を含めた過給機の保守管理に際して、以下の対策を実施する。</p> <p>① 加工不良(新製時)に関する対策</p> <p>レーシングワイヤ孔加工時の検査にて、レーシングワイヤ孔高さが設計要求値以内であることを確認を作業要領書に定め、実施する。</p> <p>② 保守管理に関する対策</p> <p>ファツリ部の経時的な変化及びタービンブレード取外・再取付に伴うファツリ部の当たり状態の変化を考慮し、不適合等によりタービンブレードの取外が必要となった場合は、タービンブレードを再利用しないこととする。</p> <p>2. 水平展開</p> <p>過去の過給機点検において、タービンブレードをロータシャフトから取外し、取り外したタービンブレードを再度取付けた実績のある過給機を対象として点検を実施する。</p> <p>点検の内容として、隣接するタービンブレードレーシングワイヤ孔高さの高低差確認及び非破壊検査によるタービンブレードファツリ部のき裂の有無の確認を実施し、本事象と同様な事象が発生する可能性を評価し、必要に応じタービンブレード等の交換を実施する。</p> <p>なお、上記を除く全ての過給機に対し、通常の点検の中で隣接するタービンブレードレーシングワイヤ孔高さの高低差確認を実施する。点検によって得られた知見については必要に応じて対策や水平展開対象として反映する。</p> <p>(詳細は、別添の「柏崎刈羽原子力発電所1号機 非常用ディーゼル発電機(B)の過給機軸固着について(報告書)」のとおり。)</p>

柏崎刈羽原子力発電所 1号機
非常用ディーゼル発電機（B）の過給機軸固着について
（報告書）

平成31年 3月提出

平成31年 4月補正

令和 元年 6月補正

東京電力ホールディングス株式会社

1. 件名

柏崎刈羽原子力発電所 1 号機
非常用ディーゼル発電機 (B) の過給機軸固着について

2. 事象発生の日時

平成 3 0 年 9 月 6 日 1 3 時 5 0 分 (必要な機能を有していないと判断した日時)

3. 事象発生の場所

柏崎刈羽原子力発電所 1 号機
原子炉建屋地下 1 階非常用ディーゼル発電機 (B) 室 (非管理区域)

4. 事象発生の発電用原子炉施設名

非常用予備発電装置 非常用ディーゼル発電設備

5. 事象の状況

(1) 事象発生時の状況

柏崎刈羽原子力発電所 1 号機は第 1 6 回定期検査中のところ、平成 3 0 年 8 月 3 0 日 1 4 時 3 0 分より、非常用ディーゼル発電機 (B 系) (以下、「当該 D / G」という。) を定例試験のために起動し確認運転を実施していた際、同日 1 5 時 1 6 分に異音が発生するとともに、発電機出力が 6 . 6 MW から 0 MW に低下したため、当該 D / G を手動停止した。

なお、本事象発生時は、他の非常用ディーゼル発電機 2 台 (A 系、高圧炉心スプレイ系) が動作可能であったことから、柏崎刈羽原子力発電所原子炉施設保安規定第 6 1 条で要求されている運転上の制限¹は満足していることを確認した。

その後、当該 D / G の発電機出力が低下した要因を調査していたところ、9 月 6 日に、当該 D / G の R 側過給機の軸が固着していることを確認した。当該 D / G の R 側過給機が軸固着に至った要因の詳細調査は、工場への持出しが必要であり、速やかな復旧が難しいことから、同日 1 3 時 5 0 分に、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第 1 3 4 条第 3 号「発電用原子炉施設の安全を確保するために必要な機能を有していないと認められたとき」に該当するものと判断した。

なお、本事象による外部への放射能の影響はなかった。

1 柏崎刈羽原子力発電所原子炉施設保安規定 (抜粋)

第 6 1 条 (非常用ディーゼル発電機その 2)

原子炉の状態が冷温停止及び燃料交換において、非常用ディーゼル発電機 (非常用ディーゼル発電機とは、A 系、B 系及び高圧炉心スプレイ系の非常用ディーゼル発電機をいう。) は表で定める事項を運転上の制限とする。

項目	運転上の制限
交流電源	非常用交流高圧電源母線に接続する非常用ディーゼル発電機を含め 2 台の非常用発電設備が動作可能であること

(2) 当該 D / G 発電機出力低下時の時系列

【 8 月 3 0 日 】

- 14:30 当該 D / G 定例試験開始
- 14:30 当該 D / G 起動
- 14:43 当該 D / G 並列
- 14:52 当該 D / G ハーフロード到達
- 15:05 当該 D / G 定格出力 6 . 6 MW 到達
- 15:16 中央制御室の主機操作員が異音を確認、同じく現場の補機操作員が異音を確認
現場の研修生が当該 D / G 上部に灰色のもやを確認
警報発生
 - 「ディーゼル発電機 1 B 異常」(中央制御室)
 - 「動弁注油タンク油面低」(現場)
- 当該 D / G エリア自動火災報知機盤プレアラーム動作
 - 「光電アナログ注意・光電アナログ蓄積中 / 回復」(中央制御室)
- 当該 D / G 関連中央制御室パラメータ変化
- 当該 D / G 発電機出力 : 6 . 6 MW 異音発生直後 : 6 . 6 MW
異音消滅後 : 6 . 0 MW その後 : 0 MW
- 15:16 上記の異常を確認したため、主機操作員が中央制御室にて手動操作により
当該 D / G を解列、停止
- 15:16 当直長が当該 D / G 不待機宣言
- 15:40 当該 D / G 作動除外操作実施

(3) R 側過給機軸固着確認までの時系列

【 8 月 3 0 日 】

- ・点検調査方法の検討開始

【 9 月 3 日 】

- ・点検調査のための安全処置実施

【 9 月 4 日 ~ 5 日 】

- ・動弁注油タンク、クランク室、過給機ブロワ側潤滑油採取
- ・各カバー開放による機関内部外観目視点検実施 (異常なし)

【 9 月 5 日 】

- ・燃料噴射ラック動作確認、発電機絶縁抵抗・巻線抵抗測定 (異常なし)

【 9 月 6 日 】

- ・継電器点検、計器点検、発電機目視点検、発電機の界磁回路絶縁抵抗・発電機の巻線抵抗測定 (異常なし)
- ・機関ターニングによる動作確認 (異常なし)
- ・過給機ロータハンドターニングによる動作確認 (R 側過給機 (発電機側から見て右側の過給機) に軸固着確認。L 側は異常なし)

(添付資料 - 1、2、3 参照)

6．事象の原因調査

6 - 1．要因調査（その1）

事象の状況を踏まえ、当該D / Gの発電機出力低下に関する要因分析表を作成し、故障箇所の特定のための要因調査を以下のとおり実施した。

（添付資料 - 4 参照）

6 - 1 - 1．発電機出力低下に関する要因分析に基づく調査

（1）潤滑油系統

a．摺動部異常

（a）摺動部抵抗大

潤滑油系統に異常を生じ、摺動部の抵抗が大きくなると、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、クランクケースカバー開放による内部点検（目視点検）、カムケースカバー開放による内部点検（目視点検）、シリンダヘッドカバー開放による内部点検（目視点検）、潤滑油分析、ターニングによる動作確認を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。

（添付資料 - 5（1）参照）

b．回転部異常

（a）回転部抵抗大

潤滑油系統に異常を生じ、回転部の抵抗が大きくなると、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、クランクケースカバー開放による内部点検（目視点検）、カムケースカバー開放による内部点検（目視点検）、シリンダヘッドカバー開放による内部点検（目視点検）、潤滑油分析、ターニングによる動作確認を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。

（添付資料 - 5（2）参照）

（2）燃焼機関系統

a．特定シリンダの着火異常

（a）燃料噴射ポンプの異常

燃料噴射ポンプに異常がある場合、燃焼機関系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、燃料噴射ラックの動作確認（各気筒）を実施したが、異常は確認されなかった。

（添付資料 - 5（3）参照）

(b) 過給機の異常

過給機に異常がある場合、燃焼機関系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、R側及びL側過給機について、過給機エンドカバー（ブロウ側、タービン側）開放による内部点検（目視点検）、過給機ロータのハンドターニング、潤滑油分析を実施したところ、R側過給機において、以下の異常を確認した。

- ・ R側過給機エンドカバー（タービン側）開放による内部点検にて軸受押さえ回り止め部の欠損を確認
 - ・ R側過給機ロータのハンドターニングにて軸固着を確認
 - ・ 潤滑油内で金属粉を確認したことから、成分分析を実施
- なお、L側過給機に異常は確認されなかった。

（添付資料 - 5（4）参照）

(3) 給排気系統

a . 特定シリンダの圧力異常

(a) 圧縮圧力低下

圧縮圧力の低下がある場合、給排気系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、クランクケースカバー開放による内部点検（目視点検）を実施したが、異常は確認されなかった。

（添付資料 - 5（5）参照）

(4) 制御系統

a . ガバナ異常

(a) 設定値異常

ガバナの設定値に異常がある場合、制御系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、ロードリミット値、スピードドロープ値の確認を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。

（添付資料 - 5（6）参照）

(b) ガバナ動作異常

ガバナの動作に異常がある場合、制御系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、ガバナの動作確認及び作動油内の異物確認を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。

（添付資料 - 5（7）参照）

(5) 冷却水系統

a . 制御系異常

(a) 温度調整弁の異常

定例試験記録より、当該 D / G 停止までは正常に冷却水が温度制御されており、異常は確認されていないことに加え、冷却水の制御系異常が発電機出力低下の要因となる可能性は低いですが、念のため温度調整弁の分解点検を実施したが、異常は確認されなかった。

(添付資料 - 5 (8) 参照)

b . 機械系異常

(a) 冷却水ポンプの異常

定例試験記録より、当該 D / G 停止までは正常に冷却水が供給されており、異常は確認されていないことに加え、冷却水の機械系異常が発電機出力低下の要因となる可能性は低いですが、念のため冷却水ポンプの動作確認 (機関ターニングと同時動作確認) を実施したが、異常は確認されなかった。

(添付資料 - 5 (9) 参照)

(6) 発電機系統

a . 監視系異常

(a) 計器单品異常

中央制御室に設置している電力計に異常がある場合、誤った発電機出力を示す可能性がある。

そのため、電力計の計器点検を実施したが、異常は確認されなかった。

(添付資料 - 5 (1 0) 参照)

(b) P T ・ C T 異常、ヒューズ溶断

中央制御室に設置している電力計、過渡現象記録装置へ信号を出力する回路上で異常がある場合、誤った発電機出力を示す可能性がある。

そのため、P T ・ C T の目視点検、ヒューズの溶断確認を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。

(添付資料 - 5 (1 1) 参照)

b . 発電機主回路異常

(a) 受電遮断器の開放

受電遮断器の意図しない開放がある場合、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、運転員への操作実績の聞き取り及び過渡現象記録装置のトレンド確認を実施したが、受電遮断器の意図しない開放はなかった。

また、受電遮断器の動作確認を実施したが、異常は確認されなかった。

(添付資料 - 5 (1 2) 参照)

(b) 主回路での地絡、短絡

主回路上に地絡、短絡が発生した場合、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、発電機の絶縁抵抗測定、巻線抵抗測定を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。

なお、念のため主回路を監視している警報要素に係る継電器点検を実施したが、異常は確認されなかった。

(添付資料 - 5 (1 3) 参照)

(c) AVR異常

AVRに異常がある場合、発電機の制御不良により、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、AVR点検を実施したが、異常は確認されなかった。

(添付資料 - 5 (1 4) 参照)

(d) 界磁回路での地絡、短絡

界磁回路上に地絡、短絡が発生した場合、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、界磁回路の絶縁抵抗測定、巻線抵抗測定を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。

(添付資料 - 5 (1 5) 参照)

c . 系統異常

(a) 系統動揺

系統動揺が発生している場合、発電機系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、過渡現象記録装置のトレンドにて系統電圧、系統周波数を確認したが、系統動揺は確認されなかった。

(添付資料 - 5 (1 6) 参照)

d . 発電機異常

(a) 発電機の異常振動

発電機に異常振動がある場合、回転部の機械的な異常により、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

そのため、カップリング嵌合部、発電機基礎ボルト、速度検出器、ブラシホル

ダー及びコレクターリングの目視点検、ターニングによる動作確認、軸受部上蓋開放確認、発電機及び界磁回路の絶縁抵抗測定、巻線抵抗測定を実施したが、いずれも異常は確認されなかった。

(添付資料 - 5 (1 7) 参照)

6 - 1 - 2 . 発電機出力低下に関する要因分析に基づく調査まとめ

以上の当該D / G発電機出力低下に関する要因分析に基づく調査結果より、燃焼機関系統の調査において、R側過給機のロータに軸固着が確認された。

過給機以外に異常は確認されていないことから、R側過給機軸固着が当該D / G発電機出力低下の要因であると判断し、R側過給機軸固着の要因分析表を作成して調査を実施した。

6 - 2 . 要因調査 (その 2)

発電機出力低下に関する要因分析に基づく調査にて確認された故障箇所について、個別に要因分析表を作成し、原因特定のための調査を以下のとおり実施した。

6 - 2 - 1 . 過給機軸固着に関する要因分析に基づく調査

過給機については、軸固着を確認したR側過給機をメーカ工場に持出して詳細点検を実施した。

なお、発電機出力低下に関する発電所内における調査にて異常の確認されていないL側過給機についてもメーカ工場に持出し、R側過給機との比較調査を実施した。

(添付資料 - 6 参照)

(1) 回転体の異常

a . タービンブレードとシュラウドとの接触

(a) タービンブレード異常

タービンブレードに変形等の異常がある場合、回転体と静止部との接触や軸偏芯等が生じることによる軸受等の損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカ工場にて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

< R側過給機 >

- ・タービンブレード1枚 (No . 1) がタービンブレードファツリー部背面側の第一くびれ部の谷部より折損を確認
- ・折損部 (No . 1 のタービンブレード) から反時計方向にタービンブレード4枚の先端部変曲を確認
- ・1時～5時方向のタービンブレード先端部に接触痕を確認

< L側過給機 >

- ・全てのタービンブレードの先端部に接触痕を確認

- ・タービンブレード1枚(No. 25)において、タービンブレードファツリー部背面側の第二くびれ部の谷部にき裂を確認
- ・き裂が確認されたタービンブレード(No. 25)を受け止めるロータファツリー部の第一くびれ部の谷部に、指示模様(磁粉探傷検査)を確認
- ・ロータファツリー部片側の側面部に打痕と見られる変形を確認

折損、き裂が確認された箇所の破面を走査型電子顕微鏡(以下、「SEM」という。)観察した結果を以下に示す。

- ・折損が確認されたR側過給機のタービンブレードの破面をSEM観察した結果、疲労破壊を示す縞模様(ストライエーション模様)を確認
- ・き裂が確認されたL側過給機のタービンブレードのき裂箇所を強制切断し、SEM観察した結果、疲労破壊を示す縞模様(ストライエーション模様)を確認
- ・き裂が確認されたL側過給機ロータファツリー部のき裂箇所を強制切断し、SEM観察した結果、疲労破壊を示す縞模様(ストライエーション模様)を確認

以上のことから、R側過給機のタービンブレードは、これまでの運転の過程で、何らかの繰り返し応力を受け、疲労破壊した可能性があると考える。

(添付資料 - 7 (1) 参照)

(b) レーシングワイヤ異常

レーシングワイヤ²に異常がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカ工場にて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

- ・R側過給機の外周側レーシングワイヤの脱落と止端部の破断を確認
- ・R側過給機の内周側レーシングワイヤ \blacksquare 本のうち1本の脱落を確認

2レーシングワイヤ：タービンブレードの振動を抑制することを目的として、タービンブレードに対し外周、内周それぞれ \blacksquare 本ずつのワイヤが取付けられている。

破断したレーシングワイヤの破面をSEM観察し、レーシングワイヤの破断原因が疲労破壊か、タービンブレード折損に伴う破断かの確認を実施した。

SEM観察の結果から、延性による破断を示すディンプル模様が確認され、疲労破壊を示す縞模様(ストライエーション模様)は確認されなかった。

そのため、レーシングワイヤの破断は、タービンブレード折損に伴う破断であると考える。

(添付資料 - 7 (2) 参照)

b．タービンプレードとノズルリングとの接触

(a) ノズルリングの異常

ノズルリングに異常がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカ工場にて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

- ・ R側過給機のノズルリング 9時～2時方向に接触痕（小さい傷）を確認
- ・ R側過給機のノズルリング 4時～7時方向に接触痕（大きい傷）を確認

R側過給機のノズルリングに確認された接触痕は、ノズルリングの排気入口側ではなくタービンプレード側に確認されたことから、R側過給機のタービンプレード（No. 1）折損による従属的な事象であると考ええる。

（添付資料 - 7（3）参照）

(b) 異物飛び込みによるノズル損傷

異物飛び込みによりタービンプレード及びノズルリングに損傷がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカ工場にて詳細点検を実施したが、タービンプレード及びノズルリングに異物飛び込みの痕跡は確認されなかった。

なお、タービンプレード及びノズルリングには、折損したタービンプレードが隙間に入り込んだことによる接触痕が確認された。

R側過給機のノズルリングに確認された接触痕は、ノズルリングの排気入口側ではなくタービンプレード側に確認されたことから、異物飛び込みによるものではなく、R側過給機のタービンプレード（No. 1）折損による従属的な事象であると考ええる。

（添付資料 - 7（4）参照）

c．インペラとケースとの接触

(a) インペラ、インデューサの異常

インペラ、インデューサに異常がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカ工場にて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

- ・ R側過給機のインデューサの6時～11時方向の先端部に接触痕を確認
- ・ R側過給機のインペラの6時～11時方向の先端部に接触痕を確認

確認された異常は、いずれもシャフトフランジの開きによる軸の振れまわりによって発生したものと推定されることから、軸固着の原因となるインペラ、インデューサの異常はなかったものと考ええる。

（添付資料 - 7（5）参照）

(b) 異物飛び込みによるインペラ及びインデューサ損傷

異物飛び込みによりインペラ及びインデューサに損傷がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカ工場にて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

- ・ R側過給機のインペラ背面に接触痕を確認

確認された接触痕は、シャフトシュラウド、シールプレート固定ボルト、ナット・ワッシャ脱落によるもので、インペラの空気取入れ側からの異物飛び込みによる損傷ではないと考える。

(添付資料 - 7 (6) 参照)

d . シール部品とロータ軸との接触

(a) ロータ軸偏芯

ロータ軸の曲がりにより接触がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、過給機エンドカバー開放によるハンドターニング、及びメーカ工場にて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

- ・ ハンドターニングの結果、R側過給機の軸固着を確認
- ・ R側過給機のロータシャフトフランジ部の0時～6時方向に最大0.5mm程度の隙間を確認

確認されたロータシャフトフランジ部の隙間は、締結ボルトに伸びが確認されていることから、R側過給機軸固着に至る過程での急激な過大応力を受けたことによる従属的な事象と考える。

(添付資料 - 7 (7) 参照)

(b) シール部品の脱落

固定ボルト等の緩みがある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカ工場にて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

- ・ R側過給機のシャフトシュラウド、シールプレート固定ボルト(■本中2本)及びナット・ワッシャ(■個中3個)の脱落を確認
- ・ R側過給機のシャフトシュラウドの破損を確認

ロータシャフトアンバランス発生に伴う振動により、ボルト、ナット・ワッシャが脱落し、ロータシャフトとシャフトシュラウドの接触が起こりシャフトシュラウドの破損が発生したものと考える。

(添付資料 - 7 (8) 参照)

(2) 軸受の異常

a. ベアリングの異常

(a) ベアリング摩耗

ベアリング摺動部に異常摩耗がある場合、軸受に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、R側過給機のベアリング（過給機タービン側及びブロワ側）についてベアリングメーカーにて詳細点検を実施した結果、以下の異常を確認した。

<過給機タービン側ころ軸受>

- ・内輪軌道面の約1/3周に、ころのピッチ間隔で変形（圧痕）を確認
- ・保持器ポケット柱面の約1/3周に破断、摩耗、変色を確認
- ・ころ転動面に摩耗、変形を確認

<過給機ブロワ側玉軸受>

- ・内輪軌道面の約1/3周に剥離を確認

R側過給機の両ベアリングの損傷・変形は、瞬間的な荷重（衝撃荷重）を受けたことにより発生したものと推定されることから、特にタービン側ころ軸受ベアリングの損傷は、ロータシャフトアンバランス発生に伴う振動により、ロータシャフトが屈曲し、ベアリングのころと保持器が潰れたものであり従属的に発生したものと考える。

（添付資料 - 7（9）参照）

(b) 潤滑油不良

潤滑油補給時の銘柄間違いがある場合、軸受に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、前回の本格点検時の補給記録を確認したが、R側及びL側過給機ともに補給した潤滑油の銘柄の相違はなかった。

（添付資料 - 7（10）参照）

(c) 潤滑油の劣化、油量不足

潤滑油性状の劣化、オイルポンプ故障による軸受部への注油量不足がある場合、軸受に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、潤滑油性状の劣化については、潤滑油分析を実施したが、R側及びL側過給機ともに潤滑油性状に異常は確認されなかった。

オイルポンプの健全性については、メーカー工場にて詳細点検を実施し、オイルポンプ性能に関する異常は確認されなかった。

（添付資料 - 7（11）参照）

(d) 潤滑油への異物混入

潤滑油への異物混入がある場合、ベアリングに損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、潤滑油性状の劣化については、潤滑油分析を実施したが、R側及びL側過給機ともに潤滑油性状に異常は確認されなかった。

潤滑油内に残留していた金属粉の成分分析を実施した結果、タービン側にて亜鉛（Zn）成分と銅（Cu）成分、プロワ側にて鉄（Fe）及びクロム（Cr）を含む成分が多く検出された。確認された金属粉に関する発生源調査を実施した結果、いずれもベアリングの構成部材であることが確認された。

このことから、潤滑油に残留していた金属粉は、ベアリング損傷によるベアリング部材の摩耗等により発生したものであり、潤滑油への異物混入はなかったと考える。

（添付資料 - 7（12）参照）

b. 構成部品の緩み、異常

(a) 部品の脱落

固定ボルト等の緩み、脱落がある場合、軸受に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

そのため、メーカ工場にて詳細点検を実施した結果、R側過給機において以下の異常を確認した。

- ・R側過給機のシャフトシュラウド、シールプレート固定ボルト（■本中2本）ナット・ワッシャ（■個中3個）の脱落を確認

確認された部品の脱落は、ロータシャフトアンバランス発生に伴う振動により発生したものと推定し、従属的に発生したものと考える。

（添付資料 - 7（13）参照）

6 - 2 - 2 . R側過給機軸固着に関する要因分析に基づく調査結果の考察

(1) R側過給機軸固着の起点部位と従属的損傷部位の考察

R側過給機軸固着に関する調査結果を踏まえ、比較的大きく損傷している「タービンブレード」、「レーシングワイヤ」及び「ベアリング」について、いずれの事象が起点部位であるかを考察した。

レーシングワイヤは瞬間的な応力による破断であること、ベアリングは瞬間的な衝撃荷重による損傷であることに対し、タービンブレードは、事象の進展に一定の時間を要する疲労破壊の様相を確認している。

また、打痕や接触痕が確認された他の損傷部位は、確認された傷の表面に腐食や煤の付着等が確認されず比較的新しいことから、事象の起点ではないと考える。

なお、タービンブレードの折損面には腐食や煤の付着が確認されており、破断前のき

裂が、一定期間存在していたものとする。

以上より、R側過給機軸固着の起点部位はタービンブレードの疲労破壊であり、その他は従属的に損傷したものとする。

(2) L側過給機タービンブレード先端部の傷の考察

L側過給機点検にて確認されたタービンブレードの先端部の傷は、接触したと考えられるノズルリング側の接触痕が、下部に集中していることから、R側過給機の軸固着時の衝撃により、瞬間的にタービンブレードと周囲のノズルリングの一部が接触し発生したものとする。

(3) L側過給機タービンブレードき裂の考察

タービンブレードファツリー部のき裂の破面観察結果は、疲労破壊を示す縞模様(ストライエーション模様)であり、R側過給機の折損したタービンブレードと同様にファツリー部にて発生していることから、R側過給機と同様に、疲労破壊が進展していたものとする。

なお、確認されたき裂は、タービンとしての機能への影響はなく、当該D/Gの発電機出力低下の原因ではなかったものとする。

(4) L側過給機ロータファツリー部のき裂の考察

L側過給機ロータファツリー部のき裂は、タービンブレードファツリー部のき裂と相対する箇所にて確認されている。タービンブレードファツリー部に比べ、ロータファツリー部は設計上発生応力に対して許容される応力の余裕が大きい。そのため、先にタービンブレードファツリー部にき裂が発生し、タービンブレードファツリー部とロータファツリー部の当たり状態が変化することで、ロータファツリー部の一部に過大な応力が加わり、き裂が従属的に発生したものとする。また、き裂の破面観察結果は、疲労破壊を示す縞模様(ストライエーション模様)であることから、タービンブレードファツリー部と同様に疲労破壊が進展していたものとする。

(5) L側過給機ロータファツリー部側面の打痕に関する考察

L側ロータファツリー部に確認された変形は、表面に接触痕等が確認されず、また、腐食や煤の付着があることから、本事象発生前から存在していたものとする。

工場の作業員に対し、過去の作業履歴に関して聞き取りした結果は以下のとおり。

- ・当発電所2号機において発生した非常用ディーゼル発電機過給機の不具合に伴う水平展開として、タービンブレードの取外・取付を実施した。
- ・取外・取付の際に、通常は樹脂製ハンマー及び黄銅棒にて打撃するところ金属製ハンマーにより打撃を実施したこと、さらにL側ロータファツリー部の側面を誤って打撃し、変形したものとする。
- ・金属製ハンマーを使用した理由は、ファツリー部間に堆積した煤等によりファツ

リー部の取外し時の接触抵抗が増大していたこと、レーシングワイヤの反発及びタービンプレードファツリー部の塑性変形により、タービンプレードファツリー部とロータファツリー部間の取付け時の接触抵抗が増大していたことによるものと推定した。

この打撃により発生したファツリー部の変形がファツリー部間の当たり状態を変化させ、タービンプレードファツリー部への応力増加となったと考える。

6 - 2 - 3 . R側過給機軸固着に関する要因分析に基づく調査まとめ

R側過給機軸固着の起回事象は、タービンプレードの折損（疲労破壊）であると判断したことから、タービンプレードの折損に関する要因調査を実施した。

6 - 3 . 要因調査（その3）

タービンプレードの疲労破壊に関する要因について、材料、設計条件、加工不良、組立不良、外的要因の観点で要因分析表に基づき調査を実施した。

（添付資料 - 8 参照）

6 - 3 - 1 . タービンプレードの疲労破壊に関する要因調査

（1）材料に関する要因調査

a . 化学成分

（a）設計要求仕様逸脱

タービンプレード及びロータシャフトの材料が設計要求仕様を逸脱していると、強度不足により、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、タービンプレードファツリー部及びロータファツリー部の断面をEPMA³にて分析し、材料の化学成分を確認したが、いずれも設計要求材質とおりの化学成分であり、異常は確認されなかった。

3 Electron Probe Micro Analyzer

：電子線を照射し、発生する特性X線の波長と強度から構成元素を分析する手法

（添付資料 - 9（1）参照）

b . 硬度分布

（a）設計要求仕様逸脱

タービンプレード及びロータシャフトの硬度が設計要求仕様を逸脱していると、強度不足となり、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、タービンプレードファツリー部及びロータファツリー部の断面の硬さ測定を実施したが、いずれも硬さは均一な分布であり、異常は確認されなかった。

（添付資料 - 9（2）参照）

c . 引張強度

(a) 設計要求仕様逸脱

タービンプレード及びロータシャフトの引張強度が設計要求仕様を逸脱していると、強度不足となり、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、タービンプレードファツリー部及びロータファツリー部より試験片を取出し、引張試験を実施したが、いずれも設計値を満足しており、異常は確認されなかった。

(添付資料 - 9 (3) 参照)

d . 初期欠陥

(a) 材料の初期欠陥確認

タービンプレード及びロータシャフトの材料に初期欠陥が存在していると、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、R側過給機のタービンプレードファツリー部、L側過給機のタービンプレードファツリー部及びL側過給機ロータファツリー部で確認されたき裂箇所破面についてSEM観察を実施した。

SEM観察の結果、き裂箇所に初期欠陥となり得る内部欠陥は確認されなかった。

(添付資料 - 9 (4) 参照)

(2) 設計条件に関する要因調査

a . 材料選定

(a) 材料選定に関する調査

必要強度に対する材料の選定間違いがあると、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、メーカにこれまでの使用実績を聞き取りした結果、当該D / G過給機タービンプレード等の材料は、大型船舶やディーゼル発電機の材料に標準材料として採用されていることが確認されたことから、材料選定に関する問題はなかったと考える。

(添付資料 - 9 (5) 参照)

b . 遠心応力

(a) 遠心応力に関する解析調査

設計条件で求めた遠心応力に対して実際の構成部材に作用する遠心応力が過大であると、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、レーシングワイヤ付加荷重の応力解析を実施し、修正グッドマン線図を用いた評価を行った結果、疲労限度内にあることから遠心応力に関する問題

は確認されなかった。

(添付資料 - 9 (6) 参照)

c . レーシングワイヤ局部応力

(a) レーシングワイヤ局部応力に関する解析調査

タービンプレードに対するレーシングワイヤの遠心応力が設計条件と異なると、タービンプレードへの付加荷重が発生し、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、レーシングワイヤの遠心応力による付加荷重について、修正グッドマン線図を用いた評価を行った結果、レーシングワイヤ作用角度が付いた場合にファツリー部への応力振幅がわずかに疲労限度に近づくものの疲労限度内にあることから、レーシングワイヤ局部応力に関する問題は確認されなかった。

(添付資料 - 9 (7) 参照)

d . 起動・停止過程における過大応力

(a) 起動・停止の過程における過大応力に関する解析調査

起動・停止過程において、発電機出力が中間出力時の低回転域や定格出力到達時に発生するオーバーシュートによる過給機の過回転により設計条件を上回る過大な応力が発生すると、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、タービンプレードとタービンロータアッセンブリモデルによる固有値解析を実施した。

解析の結果、想定される回転数領域に、共振点は存在しないことが確認されたことから、起動・停止過程における過大応力に関する問題はなかったと考える。

(添付資料 - 9 (8) 参照)

(3) 加工不良に関する要因調査

a . ファツリー形状

(a) ファツリー形状製作に関する調査

ファツリー形状について、設計値と異なる寸法に製作すると、ファツリー部間のクリアランスが無くなることで、ファツリー部のくびれ部に作用する応力が過大となり、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、ファツリー形状製作時の品質記録、要領書、管理基準に関する調査を実施した。製作当時のファツリー部加工結果(寸法)を示す品質記録は存在していないものの、出荷条件となる判定基準を満足していることから、品質管理上、ファツリー形状製作に関する問題はなかったと考える。

(添付資料 - 9 (9) 参照)

b . ファツリー部加工方法

(a) ファツリー部加工方法に関する調査

ファツリー部の面粗度が粗くなると、疲労限度が低下し、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、ファツリー部加工方法及び面粗度について確認した。

ファツリー部の加工方法は、当該ファツリー部の加工時から、現在までいくつか変更があったが、面粗度の設計値に変更はなく、き裂が発生したR側過給機のタービンプレードファツリー部の面粗度の計測結果も設計値を満足しており、ファツリー部加工方法に関する問題は確認されなかった。

(添付資料 - 9 (1 0) 参照)

c . レーシングワイヤ線径

(a) レーシングワイヤ線径加工に関する調査

レーシングワイヤの線径が設計値を逸脱すると、ファツリー部くびれ部に作用する応力が過大となり、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、レーシングワイヤ線径の計測を実施した結果、レーシングワイヤ線径が応力解析の結果に対して必要強度を十分有していることから、レーシングワイヤ線径加工に関する問題は確認されなかった。

(添付資料 - 9 (1 1) 参照)

d . レーシングワイヤ孔径及び孔高さ

(a) レーシングワイヤ孔加工に関する調査

レーシングワイヤ孔径及び孔高さが部分的に設計値を逸脱し、隣接するタービンプレード間を貫通しているレーシングワイヤが傾くことで、ファツリー部くびれ部の応力を高め、き裂発生の原因となる可能性がある。

そのため、レーシングワイヤ孔の現品計測を実施した。

計測の結果、レーシングワイヤ孔径に、設計値を僅かに超えるものが確認された。また、レーシングワイヤ孔高さについて設計値を逸脱し隣接するタービンプレードとの高低差が大きい箇所があることを確認した。

メーカーに聞き取りした結果、レーシングワイヤ孔径の設計値逸脱は、製造時に全数検査を行っていることから運転中の摩耗が原因であると考えられ、レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱の原因は、製作時の孔加工不良である可能性が高いことを確認した。

なお、レーシングワイヤの傾きへの寄与は、隣接するタービンプレードのレーシングワイヤ孔高さの高低差によるものが支配的であることから、レーシングワイヤ孔径の設計値逸脱は、き裂発生に対して問題はなかったと考える。

(添付資料 - 9 (1 2) 参照)

(4) 組立不良に関する要因調査

a . レーシングワイヤ取付

(a) レーシングワイヤ取付に関する調査

レーシングワイヤ止端部の形状や取付状態に不良があると、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、至近の本格点検記録を確認した結果、止端部の形状や取付状態に異常がないことから、レーシングワイヤ取付に関する問題は確認されなかった。

なお、き裂が確認されたタービンブレードは、レーシングワイヤ止端部に隣接していないことから、止端部の形状や取付状態による影響はなかったものと考えられる。

(添付資料 - 9 (1 3) 参照)

b . ブレード取外・取付作業

(a) ブレード取外・取付作業に関する調査

ブレードの取外・取付作業によって、ファツリー形状の変形や接触面の当たり状態が変化すると、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、過去の点検記録の確認及び外観目視点検を実施したところ、以下の問題を確認した。

- ・過去の点検時にタービンブレードの取外・取付作業を実施したことを確認
- ・タービンブレード取外・取付時の打撃によるものと考えられる L 側過給機ロータファツリー部端部に変形を確認

なお、タービンブレード取外・取付作業は、当発電所 2 号機において発生した非常用ディーゼル発電機過給機の不具合に伴う水平展開として、当該 D / G 過給機のレーシングワイヤ孔の再加工工事の際に実施されていた。

取外し後の再取付実施前には、ファツリー部に付着した煤や腐食生成物の洗浄を実施することから、再取付によってファツリー部間の当たり状態が変わり、タービンブレードき裂発生の起因の可能性があると考える。

また、打撃により発生したロータファツリー部端部の変形がファツリー部間の当たり状態を変化させ、タービンブレードファツリー部への応力増加となった可能性があると考える。

(添付資料 - 9 (1 4) 参照)

(5) 外的要因に関する要因調査

a . 腐食・汚れ

(a) 腐食・汚れに関する調査

腐食・汚れによる経年変化により、タービンブレードファツリー部とロータファツリー部間のクリアランス減少及び接触面の粗度が増加し、ファツリー部に応力が発生し、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、外観目視点検による腐食・汚れの確認を実施した結果、以下の問題

を確認した。

- ・タービンブレードファツリー部及びロータファツリー部に酸化スケール及び煤と思われる汚れの付着を確認

ファツリー部間のクリアランスへ汚れが入り込むことによりファツリー部間の当たり状態が変化し、ファツリー部に歪みによる局部応力が発生した可能性がある。使用継続に伴い、腐食・汚れが増加することで、タービンブレードのき裂発生を助長した可能性があると考える。

(添付資料 - 9 (1 5) 参照)

b . 運転負荷

(a) 運転負荷状況に関する調査

現在の当該 D / G 運転負荷状況については、問題は確認されていないが、過去に運転負荷上昇率の変更等の運用変更があった場合には、過給機への過負荷による過大応力を発生させ、き裂発生の起因となっていた可能性がある。

そのため、過去の運用方法を確認した結果、納入から現時点に至るまで、発電機並列～定格負荷～発電機解列までの運用方法に変更はなく、運転負荷状況に関する問題は確認されなかった。

(添付資料 - 9 (1 6) 参照)

c . 運転時間、起動回数

(a) 運転時間、起動回数に関する調査

運転時間、起動回数が当該 D / G のみ過度に多い場合には、経年影響により、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、プラントの運転開始からの総運転時間、起動回数について確認したが、1号機の他の非常用ディーゼル発電機と比較し、特異性はなく、運転時間、起動回数に関する問題は確認されなかった。

なお、起動・停止による低サイクル疲労破壊に関する評価を実施したが、低サイクル疲労に対する疲労寿命は■■■■サイクル程度であることが確認され、非常用ディーゼル機関の設計仕様書で想定する起動回数■■■■回に対し、十分な余裕があることを確認している。

(添付資料 - 9 (1 7) 参照)

d . 保守・整備

(a) 保守・整備の影響に関する調査

ロータシャフト取外・取付時に、ブレードを接触させると、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、前回の本格点検記録を調査したが、ブレードを接触させた等の記録はなく、保守・整備の影響に関する問題は確認されなかった。

e . 経時的変化

(a) 経時的変化に関する調査

タービンブレードファツリー部及びロータファツリー部の寸法が経時的に変化することで、ファツリー部間のクリアランスにばらつきが生じ、ファツリー部接触部への応力が増大することで、き裂の起因となる可能性がある。

そのため、タービンブレードファツリー部及びロータファツリー部の三次元計測による寸法測定を実施したところ、以下の問題を確認した。

- ・タービンブレードファツリー部の寸法が設計値を逸脱していることを確認
- ・ロータファツリー部の寸法が設計値を逸脱していることを確認

摩耗による減肉や煤の付着による厚肉等も否定できないものの、経時的変化によりファツリー部間のクリアランスが変化していた可能性がある。

応力解析の結果、タービンブレードファツリー部は、当該D / G定格運転中は0 . 2 %耐力を加味した弾性限度を逸脱することから、経時的な寸法変化が生じる。一方、ロータファツリー部寸法の設計値逸脱については、ロータファツリー部の材料特性の確認結果より、ロータファツリー部は、弾性領域での使用であること、また、ロータファツリー部の製作時には、寸法測定は実施せずモデルブレードが全数のロータファツリー部に通ることの確認のみであり、経時的な変化ではなく製作時の誤差によるものと考えられることから、クリアランスの変化には寄与しない。

タービンブレードファツリー部の経時的な寸法変化が生じ、ファツリー部間のクリアランスにばらつきが発生していることを確認した。このばらつきにより、ファツリー部接触部への応力が増大し、き裂の一因となったと考える。

(添付資料 - 9 (1 9) 参照)

6 - 3 - 2 . タービンブレードの疲労破壊に関する要因調査まとめ

タービンブレードの疲労破壊に関する調査の結果、「レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱」及び「タービンブレードファツリー部寸法の設計値逸脱」が確認された。

確認された事象をもとにタービンブレードの疲労破壊に関する要因の考察を以下に整理する。

(1) レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱に関する考察

レーシングワイヤ孔高さが設計値を逸脱し、隣接するタービンブレードとの高低差が生じると、タービンブレードとレーシングワイヤの作用角度が変位し、タービンブレード背面側の応力が増大する可能性がある。

本事象では、R側過給機、L側過給機ともにタービンブレードファツリー部の背面

側を起点とするき裂が発生していることから、レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱は、タービンブレードの疲労破壊の要因であると考える。

(2) タービンブレードファツリー部寸法の設計値逸脱に関する考察

タービンブレードファツリー部の寸法が経時的に変化し、ファツリー部間のクリアランスが減少することで、タービンブレードファツリー部とロータファツリー部が運転中の熱膨張により接触しやすくなり、その結果、ファツリー部接触部への応力を増大させた可能性がある。

タービンブレードファツリー部は、運転に伴う熱応力、排気圧力及び遠心力による応力を受けることにより、寸法変化（塑性変形）が発生する。

更に、当該D/Gにおいては、過去にタービンブレードの取外・再取付を実施している。既に寸法変化が発生した状態のタービンブレードを再利用したことに伴い、ファツリー部間の当たり状態が大きく変化した可能性があり、ファツリー部への応力集中の主要因となったと考える。

なお、過給機の使用継続に伴うファツリー部の寸法変化による影響は、今回の事象発生に伴う調査を行うまで、製造メーカの知見がなく、タービンブレードの保守点検内容、頻度や交換等の検討はなされていなかった。

(3) タービンブレードの疲労破壊に関する考察

「レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱」に加え「タービンブレードファツリー部寸法の設計値逸脱」が発生した状況を模擬した応力解析を実施した結果、タービンブレードファツリー部の背面側に掛かる応力が設計値を上回り、疲労限度に達することを確認した。

なお、「レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱」と「タービンブレードファツリー部寸法の設計値逸脱」のそれぞれの事象単独による応力解析結果では、疲労限度には到達しないことを確認した。

以上より、「レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱」及び「タービンブレードファツリー部寸法の設計値逸脱」の重畳により、タービンブレードファツリー部背面側に応力が集中し、疲労限度を超えたため、同部位を起点として疲労破壊に至ったものと考える。

(添付資料 - 10 参照)

6 - 4 . その他の調査

これまでの調査の他に、本事象に関連する以下の調査を実施した。

6 - 4 - 1 . R側過給機軸固着に伴う影響調査

R側過給機軸固着に伴い、当該D/Gの排気側・給気側それぞれに、損傷部品の破片が流出した可能性が高いことから、ディーゼル機関の点検を以下のとおり実施し、異常

のないことを確認した。

- ・ R側の全9気筒の開放とL側の代表2気筒の開放点検を実施し、異常のないことを確認
- ・ R側及びL側の排気管全数に対し内部点検（目視点検）及び伸縮継手の内外面点検を実施し、異常のないことを確認
- ・ R側の空気冷却器の開放点検を実施し、異常のないことを確認したが、R側の空気冷却器内部に過給機損傷部から発生したと考える金属片の混入を確認

（添付資料 - 1 1 参照）

6 - 4 - 2 . 保守管理に関する調査

当該D / G過給機の保守管理に関する調査を実施した結果、保全プログラムによる点検内容（本格点検）が計画的に実施されており、問題ないことを確認した。

（添付資料 - 1 2 参照）

6 - 4 - 3 . 過去の類似事象に関する調査

非常用ディーゼル発電機過給機のタービンブレード折損に関する過去の類似事象について、原子力安全推進協会の国内外トラブル情報等にて確認したが、本事象と同様の原因による類似事象は確認されなかった。

（添付資料 - 1 3 参照）

7 . 推定原因

これまでの調査結果を踏まえ、タービンブレードが折損に至った原因は、以下の2項目が重畳することで、タービンブレードファツリー部の設計応力を超えたことにより発生したと考える。

レーシングワイヤ孔の製造時の加工不良。

塑性変形したタービンブレード取外・再取付による、ファツリー部間の当たり状態の変化。

8 . タービンブレード疲労破壊の推定メカニズム

調査結果を踏まえ、タービンブレード疲労破壊のメカニズムを以下のように推定した。

製造時のレーシングワイヤ孔加工の際に、タービンブレード固定治具の操作不良または穴開けドリル位置ずれにより、レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱が発生。隣接するレーシングワイヤ孔の高低差により、タービンブレードを貫通しているレーシングワイヤが設計と異なる作用角度に変位し、タービンブレード背面側に応力が増大。

タービンブレードファツリー部に、運転に伴う熱応力、排気圧力及び遠心力による応力を受けることで寸法変化（塑性変形）が蓄積するとともに、運転・停止時

のファツリー部の熱膨張・収縮やファツリー部間のクリアランスでの付着物の増加により、ファツリー部間のクリアランスが徐々に減少。

タービンブレード取外し後の手入れに伴うファツリー部の付着物除去により、タービンブレード再取付け後のファツリー部間の当たり状態やクリアランスが部分的に変化。

タービンブレード背面側への応力増大とファツリー部間の当たり状態やクリアランスの変化に伴う応力集中に、運転・停止時の熱膨張・収縮が加わることで、ある時点を境に、ディーゼル機関からの排気脈動を加えた運転時の応力が疲労限度を超え、ファツリー部くびれ部にき裂が発生。

増大した運転時の応力を受け続けることで、き裂が進展し、最終的にタービンブレードがファツリー部より延性破壊し、折損。

L側ロータファツリー部は、L側タービンブレードファツリー部で発生したき裂により、タービンブレード側から受ける応力が局所的に増大し、結果としてロータ側にき裂が発生したものと推定。

タービンブレードファツリー部のき裂発生箇所は、R側が第一くびれ部、L側が第二くびれ部となっており、それぞれ異なるが、ファツリー部間の当たり状態の相違により応力集中箇所が異なったことによるものと推定。

(添付資料 - 14 参照)

9. 事象発生の推定メカニズム

9 - 1 . R側過給機軸固着の推定メカニズム

調査結果を踏まえ、R側過給機軸固着のメカニズムを以下のように推定した。

レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱に伴うタービンブレード背面側への応力増大、運転時の応力に伴う塑性変形が発生したタービンブレード取外・再取付による応力集中とディーゼル機関運転時の応力により、R側過給機のタービンブレード1枚が疲労限度を超え、き裂が発生・進展し、ファツリー部より折損。

折損したタービンブレードは、レーシングワイヤを切断し、外周方向に引き出しながら、6時方向で隣接するタービンブレードとシュラウドリングの間に入り込み、同時にノズルリングとも接触。

接触によりタービンブレードが分割、破断片はタービン排気流に乗って排気管へ移動。比較的大きい根元部はケーシング内に落下。

タービンブレードは遠心力とともにレーシングワイヤを引き出し、脱落したレーシングワイヤは排気管内へ移動。

タービンブレードが折損したことにより、ロータシャフトはアンバランスとなり振動が増加しラジアル方向の変位増加。

ロータシャフトフランジやタービンブレードファツリー部がシャフトシュラウドと摺動接触。

ロータシャフトのアンバランスによりインデューサとインペラがインサート内面

に接触。

シャフトシュラウドとシールプレートの固定ボルト 2 本、ナット・ワッシャ 3 個が緩み脱落。

ロータシャフトフランジがシャフトシュラウドと摺動接触し、ロータシャフトフランジ結合部に隙間が発生。

シャフトシュラウド下部は、シャフトシュラウド自身の振動またはロータシャフトとの接触により破損し、ケーシング内に破損部が脱落。

ロータシャフト屈曲、アンバランス等の要因により軸が振れまわり、回転体とケーシングが強く接触。

キックバック現象によりロータシャフトが 3 時方向に急負荷し、ベアリングのころと保持器を潰し、完全軸固着。同時にタービン側弾性装置(軸受押さえ回り止め部)が逆回転方向に回転し、軸受押さえ回り止め部の爪を折損させ 270°回転。

(添付資料 - 15 参照)

9 - 2 . 発電機出力低下に関する推定メカニズム

これまでの全ての調査結果を踏まえ、当該 D / G の発電機出力低下に関するメカニズムは、以下のとおりと推定した。

R 側過給機のタービンブレード損傷により R 側過給機の軸固着が発生。

R 側過給機軸固着による衝撃により、動弁注油タンク油面低検出器が誤作動し、警報発生。

R 側過給機の軸固着により、R 側過給機は機関への送気機能を喪失。

R 側過給機の送気機能喪失により過給機の軸シールが失われ、過給機上部への排気ガスが漏れ、もやの発生と火災報知機盤プレアラーム動作。

過給機の R 側と L 側は、給気と排気ラインが各々分離しており、L 側への送気及び機関の運転は継続されていた。一方、R 側は燃焼室への送気がほぼ遮断され、R 側シリンダは不完全燃焼から未燃焼状態となった。R 側シリンダ内のピストン上下動作は圧縮損失となり L 側シリンダへの動作抵抗が増加し、機関回転速度を低下させるように働く。

系統連携した機関の回転速度は変化せず、手動ガバナ操作であったため、ガバナは機関への燃料供給量を変化することなく機関出力は急激に低下。

機関出力が低下傾向状態では、R 側シリンダの抵抗を上回る機関出力を L 側シリンダで発生させることができず、発電機出力が 0 MW 近傍まで急激に低下。

(添付資料 - 16 参照)

10 . 対策

当該 D / G 過給機 (R 側及び L 側) については、タービンブレード及びロータシャフトを新製して復旧するが、以後の非常用ディーゼル発電機過給機の新製及び既設非常用ディーゼル発電機を含めた過給機の保守管理に際して、以下の対策を実施する。

加工不良（新製時）に関する対策

レーシングワイヤ孔加工時の検査にて、レーシングワイヤ孔高さが設計要求値以内であることを確認を作業要領書に定め、実施する。

保守管理に関する対策

ファツリー部の経時的な変化及びタービンブレード取外・再取付に伴うファツリー部の当たり状態の変化を考慮し、不適合等によりタービンブレードの取外が必要となった場合は、タービンブレードを再利用しないこととする。

11．水平展開

過去の過給機点検において、タービンブレードをロータシャフトから取外し、取り外したタービンブレードを再度取付けた実績のある過給機を対象として点検を実施する。

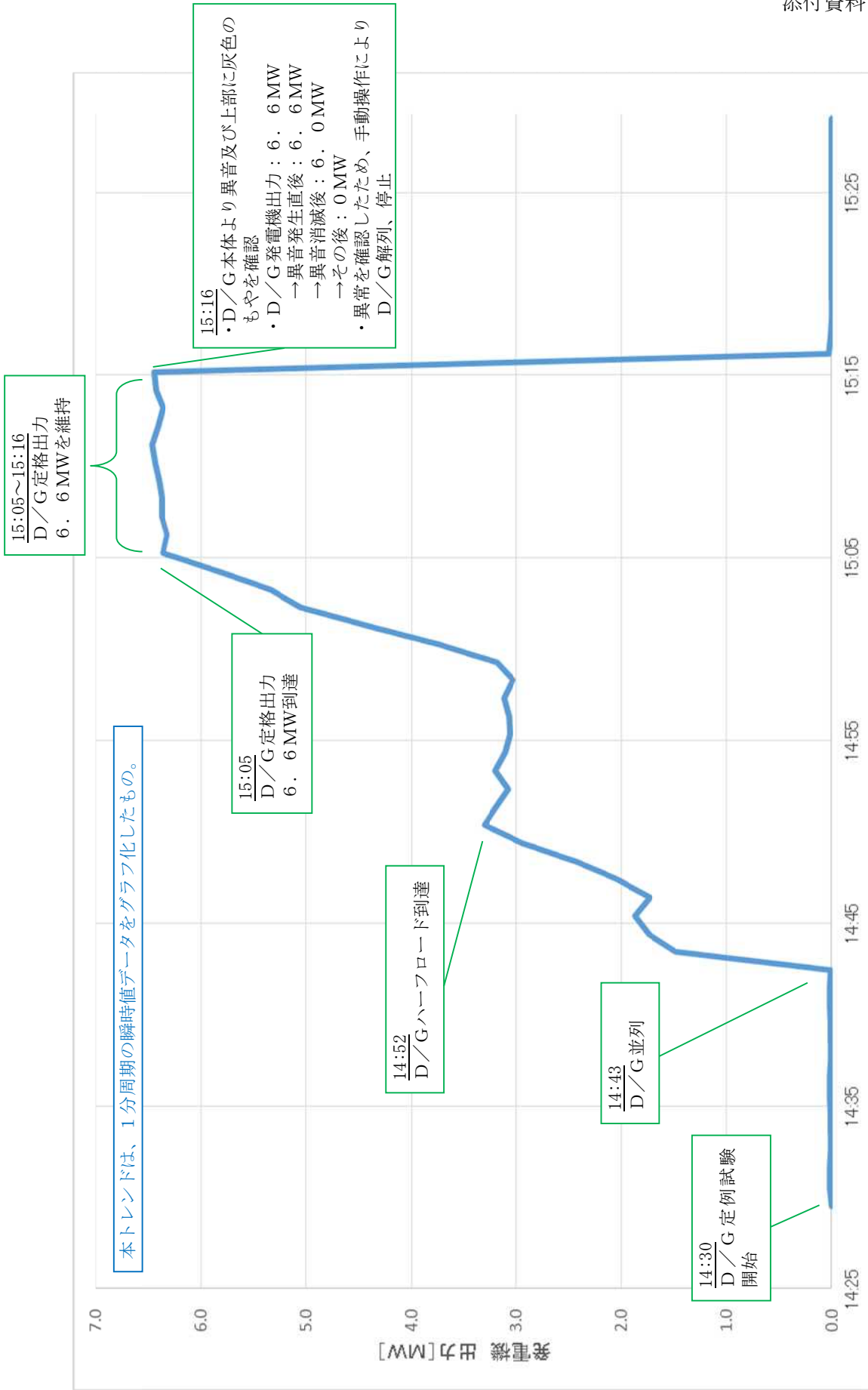
点検の内容として、隣接するタービンブレードレーシングワイヤ孔高さの高低差確認及び非破壊検査によるタービンブレードファツリー部のき裂の有無の確認を実施し、本事象と同様な事象が発生する可能性を評価し、必要に応じタービンブレード等の交換を実施する。

なお、上記を除く全ての過給機に対し、通常の点検の中で隣接するタービンブレードレーシングワイヤ孔高さの高低差確認を実施する。点検によって得られた知見については必要に応じて対策や水平展開対象として反映する。

以 上

添付資料

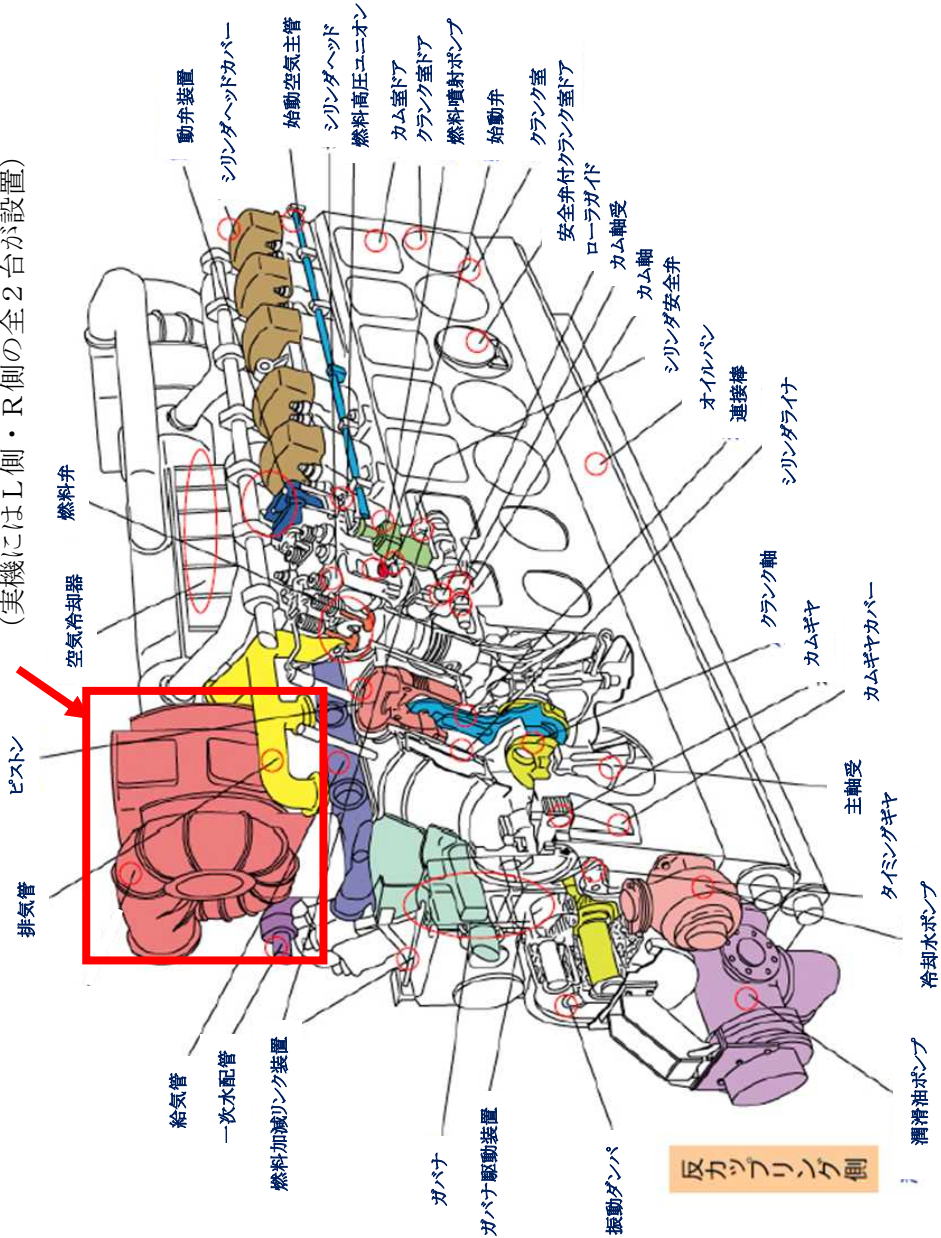
- 添付資料 - 1 当該D / G発電機出力トレンド
- 添付資料 - 2 非常用ディーゼル発電機 機関概要図と仕様(発電機、ディーゼル機関、調速装置、励磁装置)・機関外観写真
- 添付資料 - 3 過給機 構造図・仕様
- 添付資料 - 4 要因分析表(発電機出力低下)
- 添付資料 - 5 発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果
- 添付資料 - 6 要因分析表(R側過給機軸固着)
- 添付資料 - 7 R側過給機軸固着に関する要因分析に基づく要因調査結果
- 添付資料 - 8 要因分析表(タービンブレードの疲労破壊)
- 添付資料 - 9 タービンブレードの疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果
- 添付資料 - 10 タービンブレードの疲労破壊に関する考察
- 添付資料 - 11 過給機軸固着に伴う影響調査結果
- 添付資料 - 12 保守管理に関する調査結果
- 添付資料 - 13 過去の類似事象に関する調査結果
- 添付資料 - 14 タービンブレード疲労破壊の推定メカニズム
- 添付資料 - 15 R側過給機軸固着のメカニズム
- 添付資料 - 16 発電機出力低下に関する推定メカニズム



当該D/G発電機出力トレンド

過給機※1

※1 本図はL側過給機を1台のみ表示
(実機にはL側・R側の全2台が設置)



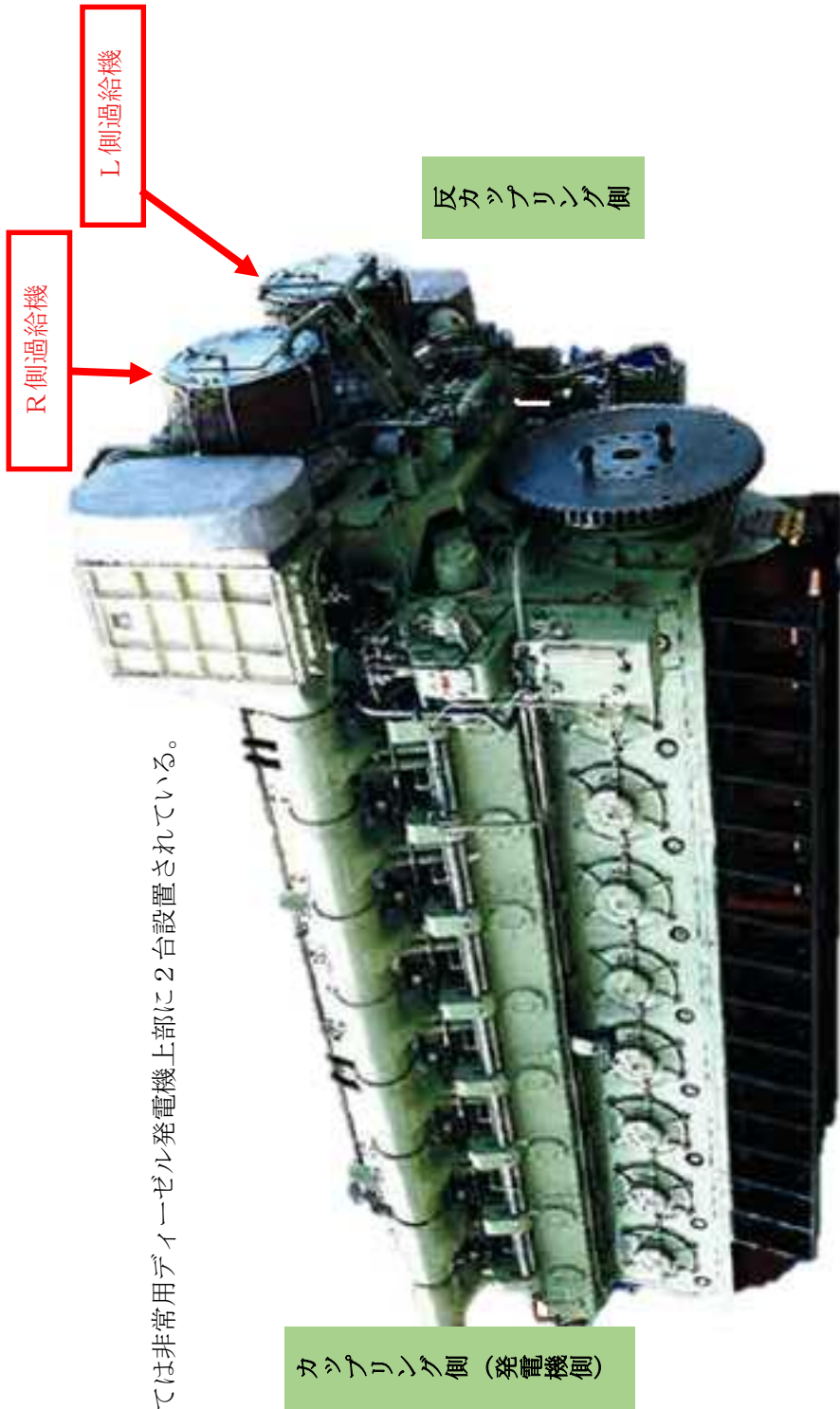
名称	発電機
種類	横軸回転界磁三相交流同期発電機
容量	kVA/個 8250
力率	% 80
電圧	V 6900
相	3
周波数	Hz 50
回転数	r p m 500
結線法	星形
冷却法	空気冷却
個数	1

名称	ディーゼル機関
種類	4サイクルたて形18気筒ディーゼル機関
出力	PS/個 9450
回転数	r p m 500
個数	1

名称	调速装置
種類	油圧式

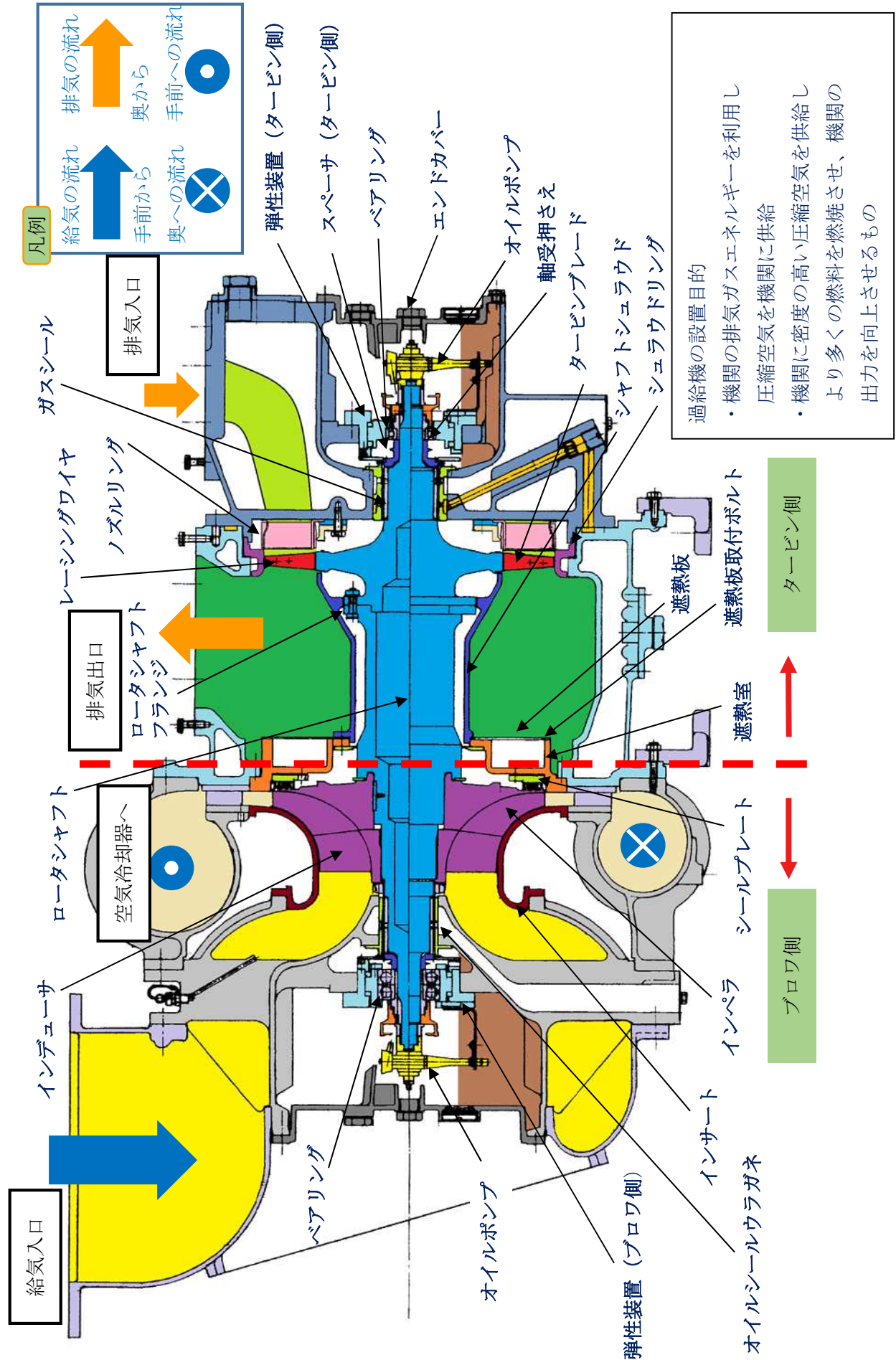
名称	励磁装置
種類	静止形自励式
容量	kW/個 45.1
電圧	V 110
個数	1

非常用ディーゼル発電機 機関概要図と仕様



過給機については非常用ディーゼル発電機上部に2台設置されている。

非常用ディーゼル発電機 機関外觀写真



過給機 構造図

過給機 仕様

名称		過給機
種類	—	排気タービン式
圧力	k g / c m ²	2. 0 (最大連続回転時)
回転数	r p m	1 7 0 0 0 (最大連続回転数)
個数	—	2
寸法	m	約 1 × 1 × 2 (高さ×幅×奥行き)
重量	k g	約 1 6 5 0

要因分析表 (発電機出力低下)

確認事象	故障モード	要因	懸念事項	点検内容	点検結果	判定	備考
異音	潤滑油系統異常	【要因1】 揺動部抵抗大	・ピストン、ライナー抵抗大 ・クランク軸、軸受の抵抗大 ・歯車への異物混入 ・ローラガイドの抵抗大 ・給排気弁の抵抗大	・クランクケースカバー開放による内部点検 (目視点検) 【9月4日】 ・カムケースカバー開放による内部点検 (目視点検) 【9月4日】 ・シリンダヘッドカバー開放による内部点検 (目視点検) 【9月4日】 ・潤滑油分析 【9月18日】、【9月27日】 ・ターニングによる動作確認 【9月6日】	・クランクケースカバー開放による内部点検 【異常なし】 ・カムケースカバー開放による内部点検 【異常なし】 ・シリンダヘッドカバー開放による内部点検 【異常なし】 ・潤滑油分析 【潤滑油性状異常なし】 ・ターニングによる動作確認 【異常なし】	×	添付資料-5 (1)
		【要因2】 回転部抵抗大	・クランク軸、軸受の抵抗大 ・主軸受の抵抗大 ・カム軸受の抵抗大 ・揺動部の抵抗大	・クランクケースカバー開放による内部点検 (目視点検) 【9月4日】 ・カムケースカバー開放による内部点検 (目視点検) 【9月4日】 ・シリンダヘッドカバー開放による内部点検 (目視点検) 【9月4日】 ・潤滑油分析 【9月18日】、【9月27日】 ・ターニングによる動作確認 【9月6日】	・クランクケースカバー開放による内部点検 【異常なし】 ・カムケースカバー開放による内部点検 【異常なし】 ・シリンダヘッドカバー開放による内部点検 【異常なし】 ・潤滑油分析 【潤滑油性状異常なし】 ・ターニングによる動作確認 【異常なし】	×	添付資料-5 (2)
発電機出力低下	燃焼機系統異常	【要因3】 燃料噴射ポンプの異常	・ブランジヤのスティック ・吐出弁のスティック ・燃料噴射ラックのスティック	・燃料噴射ラックの動作確認 (各気筒) 【9月5日】	・燃料噴射ラックの動作確認 【異常なし】	×	添付資料-5 (3)
		【要因4】 過給機の異常	・軸受の異常 ・回転体の異常	・過給機エンドカバー開放による内部点検 (目視点検) 【プロウ側: 9月4日、5日】 ・過給機エンドカバー開放による内部点検 (目視点検) 【タービン側: 9月7日】 ・過給機ロータのハンドターニング 【9月6日】 ・潤滑油分析 【プロウ側: 9月18日】 【タービン側: 9月27日】 ・潤滑油内で確認された金属粉の成分分析 【9月14日】	・過給機エンドカバー (プロウ側) 開放による内部点検 【異常なし】 ・過給機エンドカバー (タービン側) 開放による内部点検にてR側過給機の軸受押さえ戻り止め部の欠損を確認 ・過給機ロータのハンドターニング 【R側過給機軸受確認】 【L側過給機異常なし】 ・潤滑油分析 【プロウ側、タービン側: 潤滑油性状異常なし】 ・潤滑油内の金属粉はベアリング構成部品材料であることを確認。	○	添付資料-5 (4)
	給排気系統異常	【要因5】 圧縮圧力低下	・ピストンリング気密不良	・クランクケースカバー開放による内部点検 (目視点検) 【9月4日】	・クランクケースカバー開放による内部点検 【異常なし】	×	添付資料-5 (5)
制御系統異常	ガバナ異常	【要因6】 設定値異常	・ロードリミット、スピードループ設定により、ガバナ制御が正常に行われない。	・ガバナ設定値 (ロードリミット値、スピードループ値) の確認 【8月30日 (写真記録9月19日)】	・定例試験時にロードリミット値及びスピードループ値に異常が無いことを確認している。 ・当該D/Gの手動停止までは、ガバナの動作状況に異常は確認されていない。	×	添付資料-5 (6)
		【要因7】 ガバナ動作異常	・ガバナ作動油に異物があった場合、異物噛み込みにより、ガバナ制御が正常に行われない。 ・ガバナ内部に異物があった場合、ガバナ制御が正常に行われない。	・動作確認 【9月28日】 ・作動油内の異物確認 【9月28日】	・当該D/Gの手動停止までは、ガバナの動作状況に異常は確認されていない。 ・ガバナの異常で出力が低下した際は、450rpm以下にて「ガバナ設定値異常」警報が発生する。 ・中央制御室操作スイッチによるインテグレーション操作、連続操作にて動作確認を実施したが、何れも追従性に異常は確認されなかった。 ・ガバナ作動油について、マッシュにて確認したが、ガバナ動作を阻害するような異物は確認されなかった。	×	添付資料-5 (7)
冷却水系統異常	制御系異常	【要因8】 温度調整弁の異常	・温度調整弁のエレメント不良により、冷却水の温度制御が正常に行われない。	・温度調整弁の分解点検 【10月22日】	・温度調整弁の分解点検 【異常なし】 ・定例試験記録より当該D/G停止までは正常に冷却水温度が温度制御されており、異常は確認されていない。 ・当該D/G停止後に温度上昇が確認されたが、当該D/G停止後は冷却水の循環運転が行われないことによるものであり問題ない。	×	添付資料-5 (8)
	機械系異常	【要因9】 冷却水ポンプの異常	・ポンプ故障により、冷却水の循環が正常に行われない。	・冷却水ポンプ動作確認 【9月6日】	・冷却水ポンプの動作確認 【異常なし】 ・定例試験記録より当該D/G停止までは正常に冷却水が供給されており、異常は確認されていない。 ・当該D/G停止後に温度上昇が確認されたが、当該D/G停止後は冷却水の循環運転が行われないことによるものであり問題ない。	×	添付資料-5 (9)
発電機系統異常	監視系異常	【要因10】 計器単品異常	・中央制御室電力計の異常	・計器点検 【9月6日】	・計器点検 【異常なし】	×	添付資料-5 (10)
		【要因11】 PT・CT異常 ヒューズ溶断	・中央制御室電力計、過渡現象記録装置へ信号を出力する回路上での異常	・PT・CTの目視点検 【9月5日】 ・ヒューズの溶断確認 【9月5日】	・PT・CTの目視点検 【異常なし】 ・ヒューズの溶断確認 【異常なし】	×	添付資料-5 (11)
	発電機主回路異常	【要因12】 受電遮断器の開放	・受電遮断器の意図しない開放	・過渡現象記録装置のトレンド (受電遮断器動作) 確認 【9月7日】 ・受電遮断器単体動作確認 【9月7日】 ・発電機出力低下事象について運転員への聞き取り実施 【9月25日】	・過渡現象記録装置のトレンド (受電遮断器動作) 確認 【異常なし】 ・受電遮断器単体動作確認 【異常なし】 ・受電遮断の解列操作を運転員にて実施を確認 【異常なし】	×	添付資料-5 (12)
		【要因13】 主回路での地絡、短絡	・主回路上の地絡 ・主回路上の短絡 ・主回路を監視している警報要素に係わる継電器異常	・発電機の絶縁抵抗測定 【9月5日】 ・発電機の巻線抵抗測定 【9月5日】 ・警報要素に係る継電器点検 【9月5日、6日】	・発電機の絶縁抵抗測定 【異常なし】 ・発電機の巻線抵抗測定 【異常なし】 ・警報要素に係る継電器点検 【異常なし】	×	添付資料-5 (13)
		【要因14】 AVR異常	・AVR異常による発電機の制御不良	・AVR点検 【9月13日~10月1日】	・AVR点検 【異常なし】	×	添付資料-5 (14)
	【要因15】 界磁回路での地絡、短絡	・界磁回路上の地絡 ・界磁回路上の短絡	・界磁回路の絶縁抵抗測定 【9月6日】 ・界磁回路の巻線抵抗測定 【9月6日】	・界磁回路の絶縁抵抗測定 【異常なし】 ・界磁回路の巻線抵抗測定 【異常なし】	×	添付資料-5 (15)	
	系統異常	【要因16】 系統動揺	・系統動揺による発電機出力低下	・過渡現象記録装置のトレンド (系統電圧) 確認 【9月7日】 ・過渡現象記録装置のトレンド (系統周波数) 確認 【9月7日】	・過渡現象記録装置のトレンド (系統電圧) 確認 【異常なし】 ・過渡現象記録装置のトレンド (系統周波数) 確認 【異常なし】	×	添付資料-5 (16)
発電機異常	【要因17】 発電機の異常振動	・カップリング結合部の視み	・カップリング結合部目視点検 【9月6日】	・カップリング結合部目視点検 【異常なし】	×	添付資料-5 (17)	
・軸のセンターリング不良		・ターニングによる動作確認 【9月6日】	・ターニングによる動作確認 【異常なし】	×			
		・発電機基礎ボルト視み	・発電機基礎ボルト目視点検 【9月6日】	・発電機基礎ボルト目視点検 【異常なし】	×		
		・軸受部の異常 (摩耗・損傷)	・潤滑油分析 (潤滑油系統異常で実施) ・軸受部上蓋開放確認 【9月18日~9月28日】	・軸受部上蓋開放確認 【異常なし】	×		
		・発電機エアギャップの異常による回転子と固定子の接触 ・歯車と速度検出器の接触 ・ブラシホルダーとコレクターリングの接触	・発電機の絶縁抵抗測定 【9月5日】 ・発電機の巻線抵抗測定 【9月5日】 ・界磁回路の絶縁抵抗測定 【9月6日】 ・速度検出器目視点検 【9月6日】 ・ブラシホルダー、コレクターリング目視点検 【9月6日】	・発電機の絶縁抵抗測定 【異常なし】 ・発電機の巻線抵抗測定 【異常なし】 ・界磁回路の絶縁抵抗測定 【異常なし】 ・速度検出器目視点検 【異常なし】 ・ブラシホルダー、コレクターリング目視点検 【異常なし】	×		

○: 要因の可能性あり, ×: 要因の可能性はないと考えられる

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因1】摺動部抵抗大

潤滑油系統に異常を生じ、摺動部の抵抗が大きくなると、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・ クランクケースカバー開放による内部点検（目視点検：全18気筒）を実施し、ピストン、ライナーの動きを阻害する異物や著しい摺動傷の無いこと
- ・ カムケースカバー開放による内部点検（目視点検：全18気筒）を実施し、ローラガイドの動きを阻害する異物や著しい摺動傷の無いこと
- ・ シリンダヘッドカバー開放による内部点検（目視点検：全18気筒）を実施し、給排気弁の動きを阻害する異物や摺動傷の無いこと
- ・ 潤滑油分析を実施し、潤滑油の性状に異常の無いこと
- ・ ターニングによる動作確認を実施し、ピストン、ライナー、クランク軸、軸受、歯車、ローラガイド、給排気弁がスムーズに作動すること

(2) 点検結果

- ・ 内部点検（目視点検）

	点検対象	結果	点検日	備考
1	ピストン、ライナー	異常なし	2018/9/4	別紙－1
2	ローラガイド	異常なし	2018/9/4	別紙－2
3	給排気弁	異常なし	2018/9/4	別紙－3

- ・ 潤滑油分析

	点検対象	結果	点検日※1	備考
4	クランク室	異常なし	2018/9/18, 27	別紙－4
5	機関付動弁注油タンク	異常なし	2018/9/18, 27	別紙－4

※1 分析結果受領日

- ・ ターニングによる動作確認

	点検対象	結果	点検日	備考
6	ピストン、ライナー	異常なし	2018/9/6	－
7	クランク軸、軸受	異常なし	2018/9/6	－
8	歯車	異常なし	2018/9/6	－
9	ローラガイド	異常なし	2018/9/6	－
10	給排気弁	異常なし	2018/9/6	－

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因2】回転部抵抗大

潤滑油系統に異常を生じ、回転部の抵抗が大きくなると、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・ クランクケースカバー開放による内部点検（目視点検：全18気筒）を実施し、クランク軸の動きを阻害する異物や著しい摺動傷の無いこと
- ・ カムケースカバー開放による内部点検（目視点検：全18気筒）を実施し、カム軸受の動きを阻害する異物や著しい摺動傷の無いこと
- ・ シリンダヘッドカバー開放による内部点検（目視点検：全18気筒）を実施し、揺腕軸の動きを阻害する異物や著しい摺動傷の無いこと
- ・ 潤滑油分析を実施し、潤滑油の性状に異常の無いこと
- ・ ターニングによる動作確認を実施し、クランク軸、軸受、主軸受、カム軸受、揺腕軸がスムーズに作動すること

(2) 点検結果

- ・ 内部点検（目視点検）

	点検対象	結果	点検日	備考
1	クランク軸	異常なし	2018/9/4	別紙－1
2	カム軸受	異常なし	2018/9/4	別紙－2
3	揺腕軸	異常なし	2018/9/4	別紙－3

- ・ 潤滑油分析

	点検対象	結果	点検日※2	備考
4	クランク室	異常なし	2018/9/18, 27	別紙－4
5	機関付動弁注油タンク	異常なし	2018/9/18, 27	別紙－4

※2 分析結果受領日

- ・ ターニングによる動作確認

	点検対象	結果	点検日	備考
6	クランク軸、軸受	異常なし	2018/9/6	－
7	主軸受	異常なし	2018/9/6	－
8	カム軸受	異常なし	2018/9/6	－
9	揺腕軸	異常なし	2018/9/6	－

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因3】燃料噴射ポンプの異常

燃料噴射ポンプに異常がある場合、燃焼機関系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・燃料噴射ラックの動作確認（全18気筒）を実施し、引っ掛かり等の抵抗が無いこと

(2) 点検結果

- ・動作確認

	点検対象	結果	点検日	備考
1	燃料噴射ラック	異常なし	2018/9/5	別紙－5

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因4】過給機の異常

過給機に異常がある場合、燃焼機関系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

（1）点検内容及び判定基準

- ・過給機エンドカバー（ブロア側、タービン側）開放による内部点検（目視点検）を実施し、軸受及び回転体の動きを阻害する異物や著しい摺動傷の無いこと
- ・過給機ロータのハンドターニングを実施し、ロータがスムーズに作動すること
- ・潤滑油分析を実施し、潤滑油の性状に異常がないこと

（2）点検結果

・内部点検（目視点検）

	点検対象	結果	点検日	備考
1	R側過給機（ブロワ側）	異常なし	2018/9/4	別紙－6
2	L側過給機（ブロワ側）	異常なし	2018/9/5	別紙－6
3	R側過給機（タービン側）	異常あり ^{※3}	2018/9/7	別紙－6
4	L側過給機（タービン側）	異常なし	2018/9/7	別紙－6

※3 軸受押さえ回り止め部の欠損を確認

・ハンドターニング

	点検対象	結果	点検日	備考
5	R側過給機ロータ	異常あり ^{※4}	2018/9/6	－
6	L側過給機ロータ	異常なし	2018/9/6	－

※4 R側過給機ロータのハンドターニングにて軸固着を確認

・潤滑油分析

	点検対象	結果	点検日 ^{※6}	備考
7	R側過給機（ブロワ側）	異常なし ^{※5}	2018/9/18	別紙－4
8	L側過給機（ブロワ側）	異常なし	2018/9/18	別紙－4
9	R側過給機（タービン側）	異常なし ^{※5}	2018/9/27	別紙－4
10	L側過給機（タービン側）	異常なし	2018/9/27	別紙－4

※5 金属粉を確認（測定日：2018/9/14）

※6 分析結果受領日

・成分分析

	点検対象	結果	点検日	備考
1 1	潤滑油内で確認された 金属粉の成分分析	異常なし※7	2018/9/14	—

※7 潤滑油内に残留していた金属粉の成分分析を実施した結果、タービン側にて
亜鉛(Zn)成分と銅(Cu)成分、ブロワ側にて鉄(Fe)及びクロム(Cr)を
含む成分が多く検出
確認された金属粉に関する発生源調査を実施した結果、いずれもベアリング
の構成部材であることを確認

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因5】圧縮圧力低下

圧縮圧力の低下がある場合、給排気系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

（1）点検内容及び判定基準

- ・クランクケースカバー開放による内部点検（目視点検：全18気筒）を実施し、ピストン、ライナーに排ガスの漏れ跡が無いこと

（2）点検結果

- ・内部点検（目視点検）

	点検対象	結果	点検日	備考
1	ピストン、ライナー	異常なし	2018/9/4	別紙－1

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因6】設定値異常

ガバナの設定値に異常がある場合、制御系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

（1）点検内容及び判定基準

- ・ガバナ設定値（ロードリミット値、スピードドループ値）の確認を実施し、前回点検時の設定値となっていること

【前回点検時の設定値】

ロードリミット値：■■■■■

スピードドループ値：■■■■■

（2）点検結果

- ・目視点検

	点検対象	結果	点検日	備考
1	ガバナ設定値	異常なし	2018/8/30	別紙－7

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因7】ガバナ動作異常

ガバナの動作に異常がある場合、制御系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・中央制御室の調整スイッチによるインチング操作、連続操作にてガバナ動作確認を実施し、追従性に異常の無いこと
- ・ガバナ作動油を[]メッシュにて濾し、ガバナ動作を阻害する異物が無いこと

(2) 点検結果

・動作確認

	点検対象	結果	点検日	備考
1	ガバナ	異常なし	2018/9/28	—

・作動油内異物確認

	点検対象	結果	点検日	備考
2	ガバナ作動油	異常なし	2018/9/28	別紙-7

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因8】温度調整弁の異常

定例試験記録より、当該D/G停止までは正常に冷却水が温度制御されており、異常は確認されていないことに加え、冷却水の制御系異常が発電機出力低下の要因となる可能性は低いと見られるが、念のため温度調整弁の分解点検を実施する。

（1）点検内容及び判定基準

- ・温度調整弁の分解点検を実施し、エレメントが設定温度範囲にて作動すること、及び必要リフト量が確保されていること

（2）点検結果

- ・分解点検

	点検対象	結果	点検日	備考
1	温度調整弁	異常なし	2018/10/22	－

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因 9】冷却水ポンプの異常

定例試験記録より、当該D/G停止までは正常に冷却水が供給されており、異常は確認されていないことに加え、冷却水の機械系異常が発電機出力低下の要因となる可能性は低いが、念のため冷却水ポンプの動作確認（機関ターニングと同時動作確認）を実施する。

（1）点検内容及び判定基準

- ・ターニングによる機関動作確認を実施し、冷却水ポンプが機関ターニングと同時に作動すること及び異音の無いこと

（2）点検結果

- ・ターニングによる動作確認

	点検対象	結果	点検日	備考
1	冷却水ポンプ	異常なし	2018/9/6	—

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因１０】計器単品異常

中央制御室に設置している電力計に異常がある場合、誤った発電機出力を示す可能性がある。

（１）点検内容及び判定基準

- ・中央制御室に設置している電力計について、電圧及び電流を模擬入力した際の電力指示値の誤差率が、管理値以内であること

（２）点検結果

- ・計器点検

	点検対象	結果	点検日	備考
1	ディーゼル発電機 1 B 電力	異常なし	2018/9/6	－

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因１１】PT・CT異常、ヒューズ溶断

中央制御室に設置している電力計、過渡現象記録装置へ信号を出力する回路上で異常がある場合、誤った発電機出力を示す可能性がある。

（１）点検内容及び判定基準

- ・計器用変圧器（PT）、計器用変流器（CT）の目視点検を実施し、変色が無いこと
- ・ヒューズの確認を実施し、溶断の無いこと

（２）点検結果

- ・目視点検

	点検対象	結果	点検日	備考
1	PT・CT	異常なし	2018/9/5	—
2	ヒューズ	異常なし	2018/9/5	—

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因12】受電遮断器の開放

受電遮断器の意図しない開放がある場合、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

（1）点検内容及び判定基準

- ・運転員への聞き取り及び過渡現象記録装置のトレンドを確認し、受電遮断器の意図しない開放が無いこと
- ・受電遮断器の手動及び電動動作確認を実施し、受電遮断器動作に異常の無いこと

（2）点検結果

- ・過渡現象記録装置のトレンド確認

	点検対象	結果	点検日	備考
1	D/G 1B 遮断器	異常なし	2018/9/7	—

- ・受電遮断器単体動作確認

	点検対象	結果	点検日	備考
2	M/C 1D 3B [非常用ディーゼル発電機 1B]	異常なし	2018/9/7	—

- ・運転員への聞き取り確認

	点検対象	結果	点検日	備考
3	運転員への聞き取り	異常なし	2018/9/25	—

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因１３】主回路での地絡、短絡

主回路上に地絡、短絡が発生した場合、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

（１）点検内容及び判定基準

[絶縁抵抗測定・巻線抵抗測定]

- ・地絡、短絡が発生していないことを確認するため、発電機の絶縁抵抗測定、巻線抵抗測定を実施し、絶縁抵抗値は管理値以上、巻線抵抗値は管理値以内であることを確認

[継電器点検]

継電器	警報表示	確認方法
D/G (B) 過電流継電器	発電機過電流 継電器動作	発電機電流を模擬入力し、動作値が管理値以内であることを確認 また、警報が発生することを確認
D/G (B) 過電圧継電器	発電機過電圧	発電機電圧を模擬入力し、動作値が管理値以内であることを確認 また、警報が発生することを確認
D/G (B) 電圧平衡継電器	計器用 P T ヒューズ断	計器用 P T 2 個の二次側の電圧差を模擬入力し、動作値及び動作時間が管理値以内であることを確認 また、警報が発生することを確認
D/G (B) 地絡過電圧継電器	発電機地絡	発電機中性点電圧を模擬入力し、動作値が管理値以内であることを確認 また、警報が発生することを確認
D/G (B) 逆電力継電器	発電機逆電力 継電器動作	発電機電圧・電流を模擬入力し、電流を変化させた時の、その動作値が管理値以内であること、電流の位相を変化させた時の、その動作値が管理値以内であることを確認 また、警報が発生することを確認
D/G (B) 電圧継電器	—	発電機電圧を模擬入力し、動作値及び動作時間が管理値以内であることを確認
D/G (B) 比率差動継電器	発電機比率差 動継電器動作	発電機内部故障電流を模擬入力し、動作値及び動作時間が管理値以内であることを確認 また、警報が発生することを確認

（2）点検結果

・絶縁抵抗測定、巻線抵抗測定

	点検対象	結果	点検日	備考
1	発電機絶縁抵抗	異常なし	2018/9/5	－
2	発電機巻線抵抗	異常なし	2018/9/5	－

・継電器点検

	点検対象	警報表示	結果	点検日	備考
3	D／G（B）過電流継電器	発電機過電流 継電器動作	異常なし	2018/9/5, 6	－
4	D／G（B）過電圧継電器	発電機過電圧	異常なし	2018/9/5, 6	－
5	D／G（B）電圧平衡継電器	計器用PT ヒューズ断	異常なし	2018/9/5, 6	－
6	D／G（B）地絡過電圧継電器	発電機地絡	異常なし	2018/9/5, 6	－
7	D／G（B）逆電力継電器	発電機逆電力 継電器動作	異常なし	2018/9/5, 6	－
8	D／G（B）電圧継電器	－	異常なし	2018/9/5, 6	－
9	D／G（B）比率差動継電器	発電機比率差 動継電器動作	異常なし	2018/9/5, 6	－

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因１４】ＡＶＲ異常

ＡＶＲに異常がある場合、発電機の制御不良により、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

（１）点検内容及び判定基準

- ・ 発電機の出力電圧を模擬入力し変化させ、検出電流及び界磁制御の出力電圧が所定の特性範囲内であること

（２）点検結果

- ・ ＡＶＲ点検

	点検対象	結果	点検日	備考
1	自動電圧調整器（ＡＶＲ）	異常なし	2018/9/13 ～10/1	—

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因１５】界磁回路での地絡、短絡

界磁回路上に地絡、短絡が発生した場合、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

（１）点検内容及び判定基準

- ・地絡、短絡が発生していないことを確認するため、界磁回路の絶縁抵抗測定、巻線抵抗測定を実施し、絶縁抵抗値は管理値以上、巻線抵抗値は管理値以内であること

（２）点検結果

- ・絶縁抵抗測定、巻線抵抗測定

	点検対象	結果	点検日	備考
1	界磁回路絶縁抵抗	異常なし	2018/9/6	—
2	界磁回路巻線抵抗	異常なし	2018/9/6	—

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因１６】系統動揺

系統動揺が発生している場合、発電機系統に異常を生じ、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

（１）点検内容及び判定基準

- ・過渡現象記録装置のトレンドを確認し、系統電圧、系統周波数に系統動揺が無いこと

（２）点検結果

- ・過渡現象記録装置のトレンド確認

	点検対象	結果	点検日	備考
1	系統電圧	異常なし	2018/9/7	—
2	系統周波数	異常なし	2018/9/7	—

発電機出力低下に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因１７】 発電機の異常振動

発電機に異常振動がある場合、回転部の機械的な異常により、発電機出力低下の要因となる可能性がある。

（１）点検内容及び判定基準

- ・カップリング嵌合部の目視点検を実施し、緩みの無いこと
- ・発電機基礎ボルトの目視点検を実施し、緩みの無いこと
- ・速度検出器の目視点検を実施し、歯車と速度検出器の接触が無いこと
- ・ブラシホルダー、コレクターリングの目視点検を実施し、ブラシホルダーとコレクターリングの接触が無いこと
- ・ターニングによる動作確認を実施し、異音、異常振動の無いこと
- ・軸受部上蓋開放確認を実施し、軸受部に運転上支障となる摩耗・損傷の無いこと
- ・発電機エアギャップの異常による回転子と固定子の接触が無いことを確認するため、発電機及び界磁回路の絶縁抵抗測定、巻線抵抗測定を実施し、絶縁抵抗値は管理値以上、巻線抵抗値は管理値以内であること

（２）点検結果

・目視点検

	点検対象	結果	点検日	備考
1	カップリング嵌合部	異常なし	2018/9/6	別紙－８
2	発電機基礎ボルト	異常なし	2018/9/6	別紙－９
3	速度検出器	異常なし	2018/9/6	別紙－１０
4	ブラシホルダー コレクターリング	異常なし	2018/9/6	別紙－１１

・ターニングによる動作確認

	点検対象	結果	点検日	備考
5	非常用ディーゼル発電機 1 B	異常なし	2018/9/6	－

・軸受部上蓋開放確認

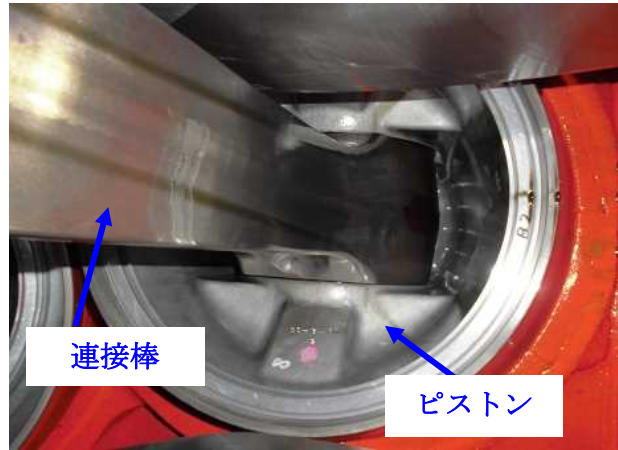
	点検対象	結果	点検日	備考
6	非常用ディーゼル発電機 1 B	異常なし	2018/9/18 ～9/28	別紙－１２

・絶縁抵抗測定、巻線抵抗測定

	点検対象	結果	点検日	備考
7	発電機絶縁抵抗	異常なし	2018/9/5	—
8	発電機巻線抵抗	異常なし	2018/9/5	—
9	界磁回路絶縁抵抗	異常なし	2018/9/6	—
10	界磁回路巻線抵抗	異常なし	2018/9/6	—



No. 1 クランクケース



No. 2 クランクケース



No. 3 クランクケース



No. 4 クランクケース



No. 5 クランクケース



No. 6 クランクケース



No. 7 クランクケース



No. 8 クランクケース



No. 9 クランクケース



No. 10 クランクケース



No. 11 クランクケース



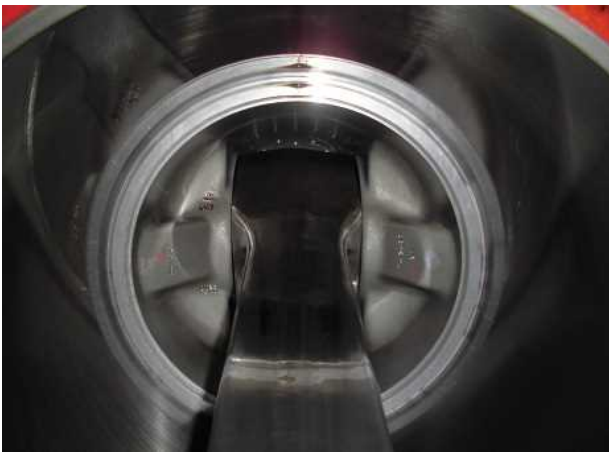
No. 12 クランクケース



No. 13 クランクケース



No. 14 クランクケース



No. 15 クランクケース



No. 16 クランクケース



No. 17 クランクケース



No. 18 クランクケース



No. 1カムケース



No. 2カムケース



No. 3カムケース



No. 4カムケース



No. 5カムケース



No. 6カムケース



No. 7カムケース



No. 8カムケース



No. 9カムケース



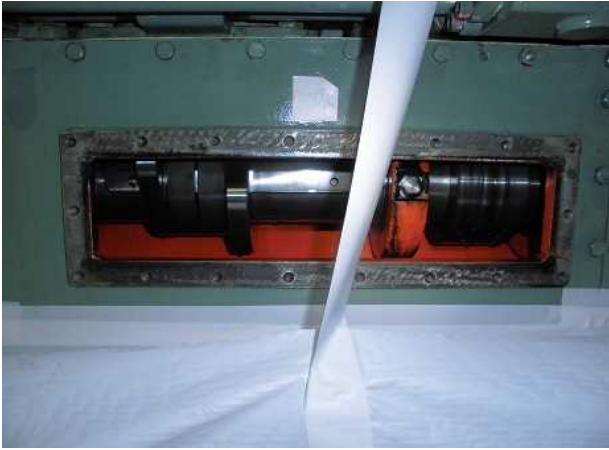
No. 10カムケース



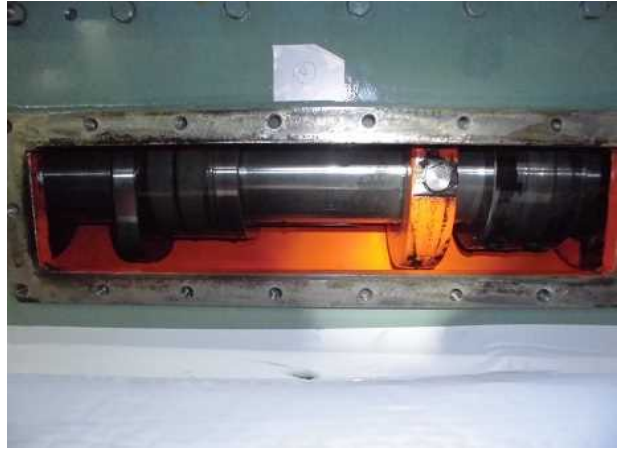
No. 11カムケース



No. 12カムケース



No. 13カムケース



No. 14カムケース



No. 15カムケース



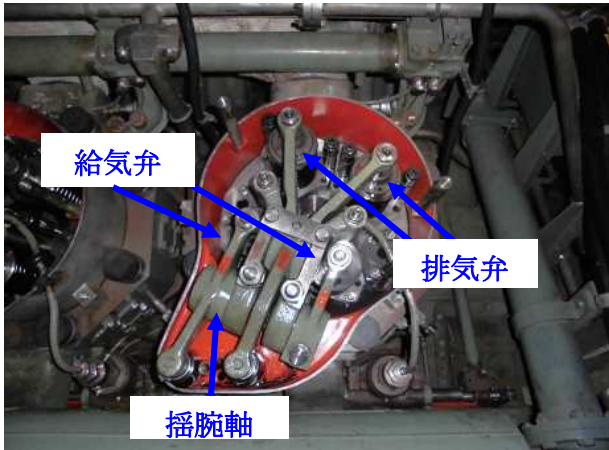
No. 16カムケース



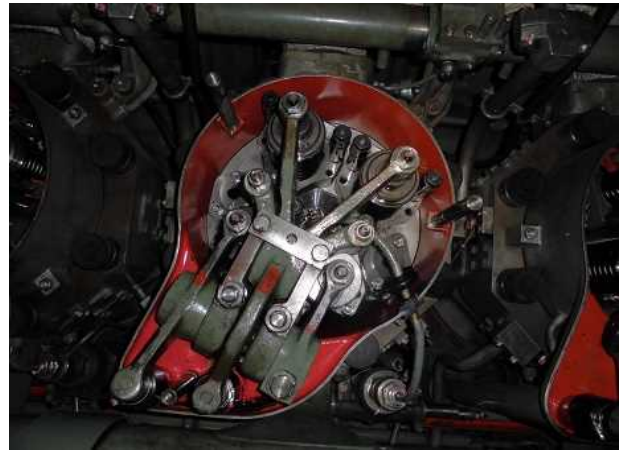
No. 17カムケース



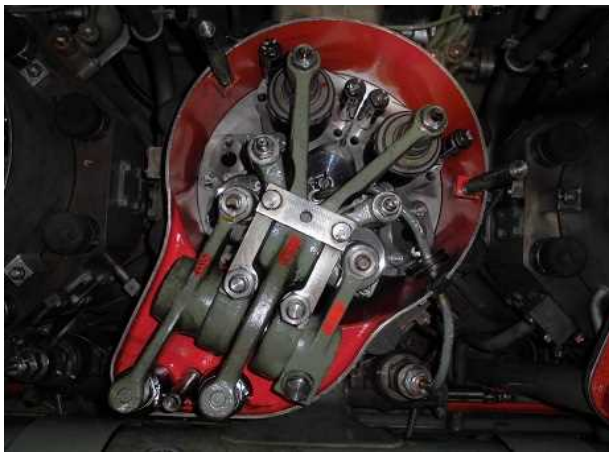
No. 18カムケース



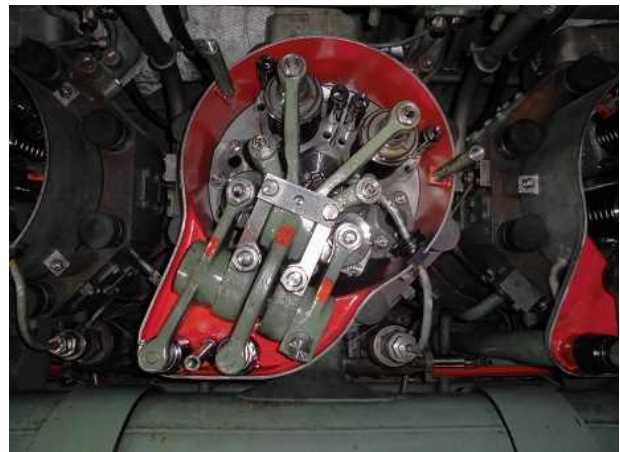
No. 1 シリンダヘッド



No. 2 シリンダヘッド



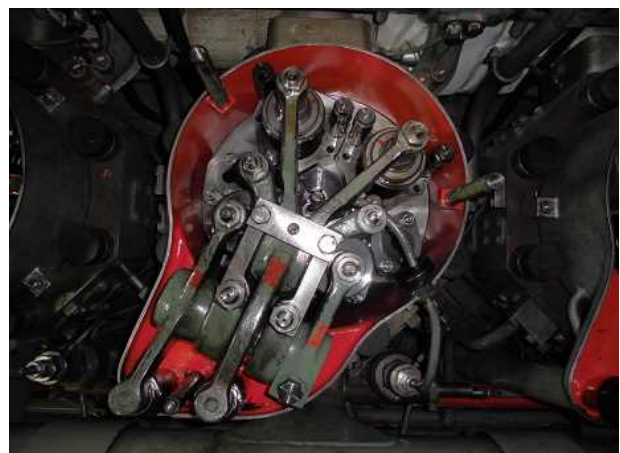
No. 3 シリンダヘッド



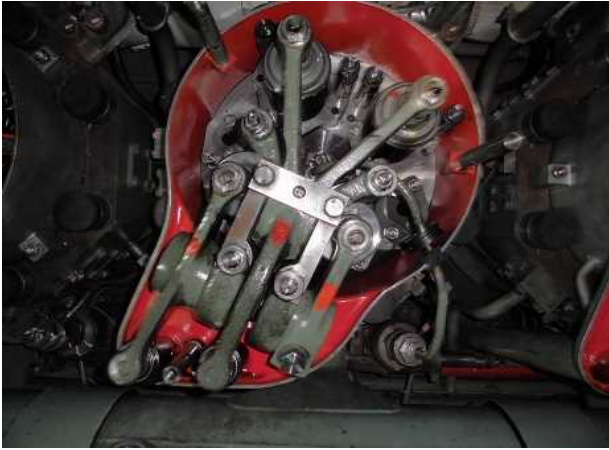
No. 4 シリンダヘッド



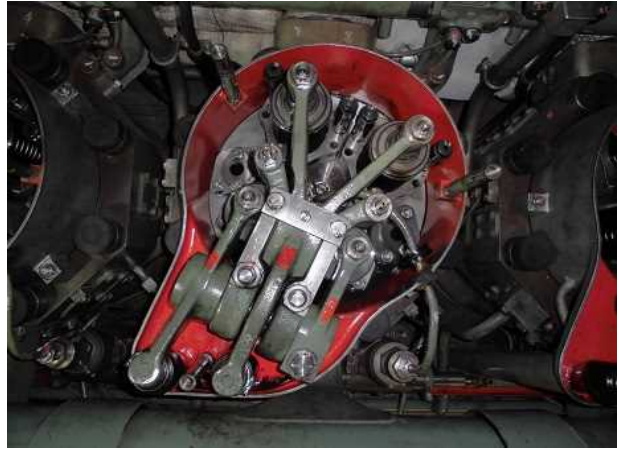
No. 5 シリンダヘッド



No. 6 シリンダヘッド



No. 7 シリンダヘッド



No. 8 シリンダヘッド



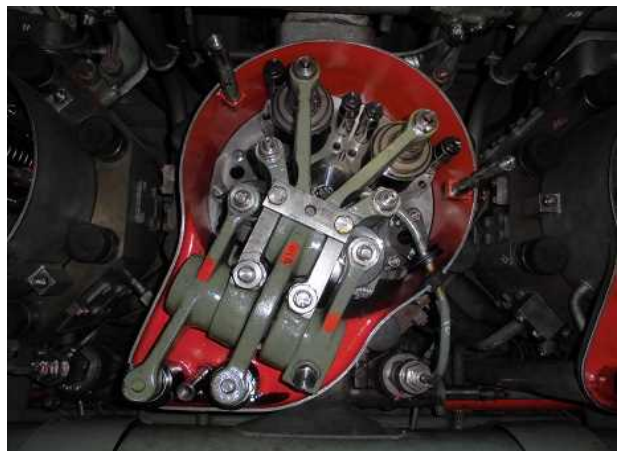
No. 9 シリンダヘッド



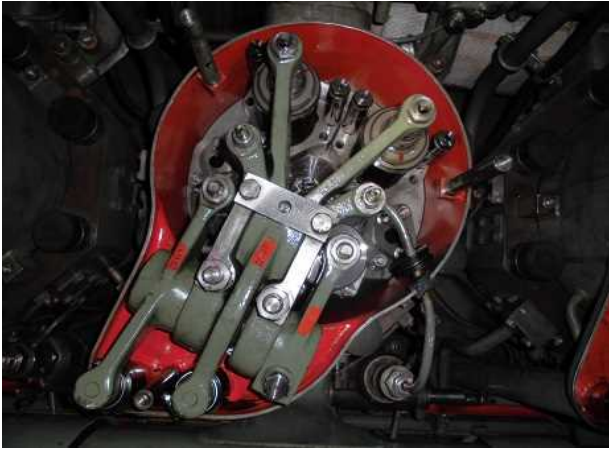
No. 10 シリンダヘッド



No. 11 シリンダヘッド



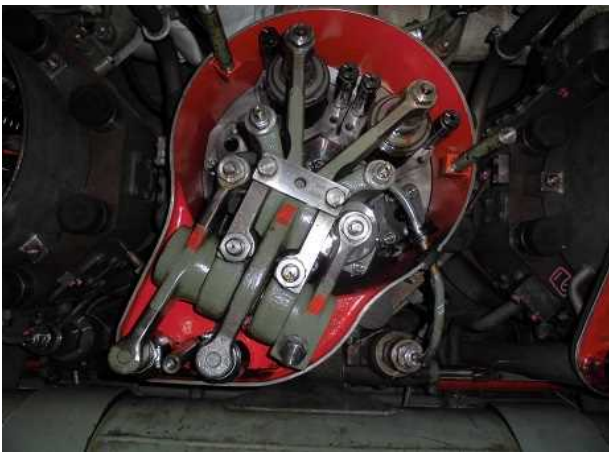
No. 12 シリンダヘッド



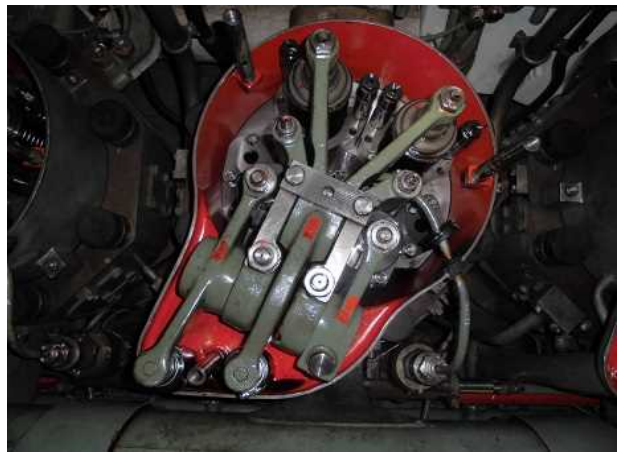
No. 13 シリンダヘッド



No. 14 シリンダヘッド



No. 15 シリンダヘッド



No. 16 シリンダヘッド



No. 17 シリンダヘッド



No. 18 シリンダヘッド

潤滑油分析 点検結果

1. 分析対象サンプル

- ① 1号機 D/G (B) 系 機関 (B) 潤滑油
- ② 1号機 D/G (B) 系 機関付動弁注油タンク (B) 潤滑油
- ③ 1号機 D/G (B) 系 R側過給機 (ブロワ側) 潤滑油
- ④ 1号機 D/G (B) 系 L側過給機 (ブロワ側) 潤滑油
- ⑤ 1号機 D/G (B) 系 R側過給機 (タービン側) 潤滑油
- ⑥ 1号機 D/G (B) 系 L側過給機 (タービン側) 潤滑油

2. 試料採取日

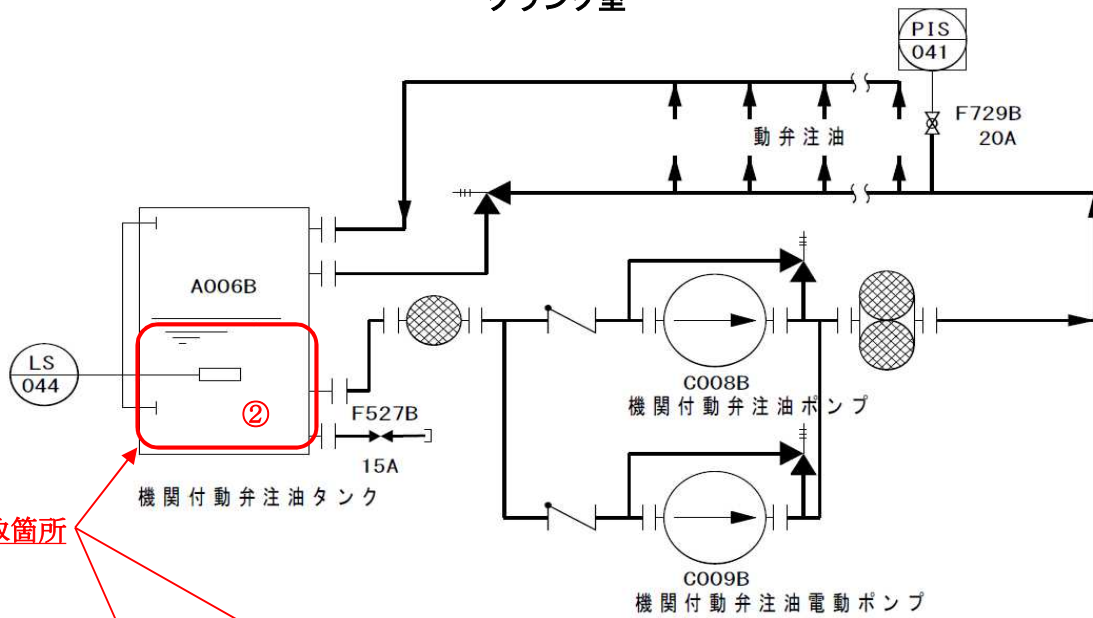
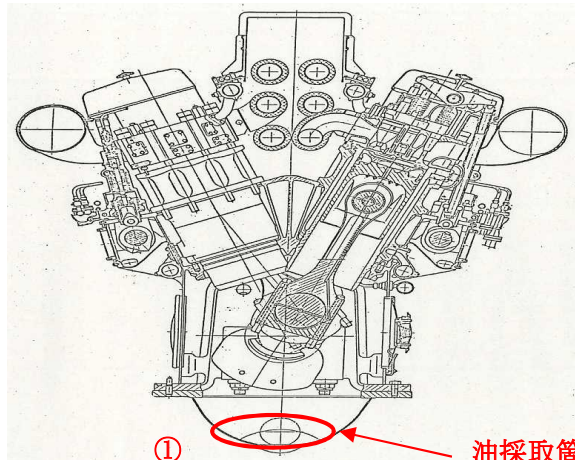
- ・ 2018年9月4日、5日、7日

3. 試験項目

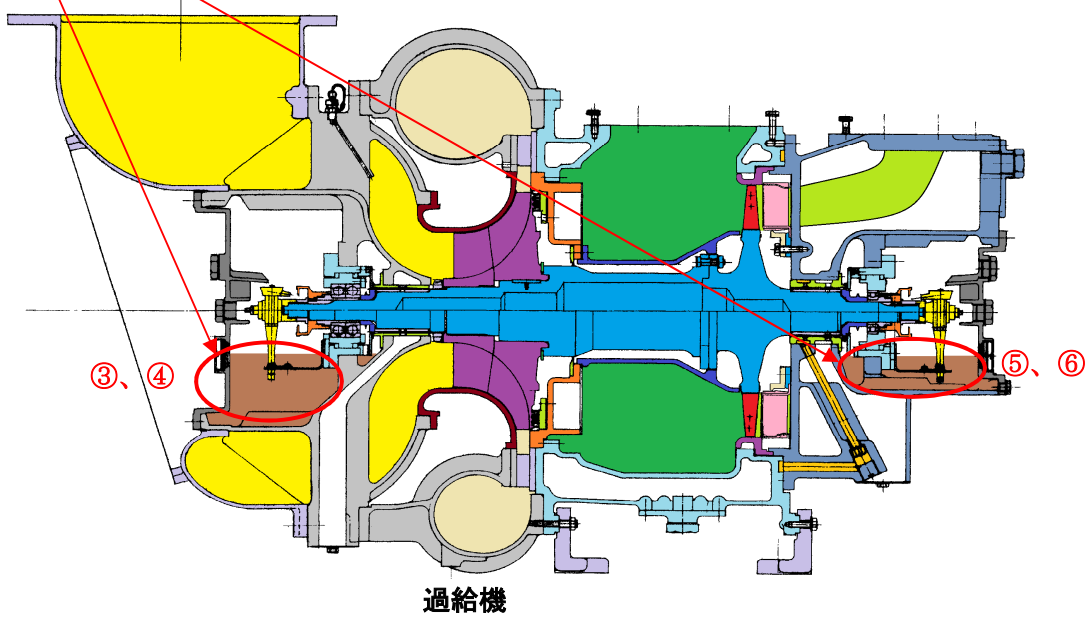
- | | 管理基準値 |
|-----------------|-------------------------|
| ・ 引火点 | ■■■■℃以上 |
| ・ 動粘度 | ■■■■ mm ² /s |
| ・ 水分 (蒸留法) | ■■■■%以下 |
| ・ 微粒きょう雑物 (質量法) | ■■■■ |
| ・ 塩基価 (過塩素酸法) | ■■■■ mgKOH/g以上 |
| ・ ペンタン不溶分 | ■■■■%以下 |
| ・ トルエン不溶分 | ■■■■ |

4. 分析結果 (結果受領日: 9月18日、27日)

- ・ 全て異常なし (継続使用可能であることを確認)

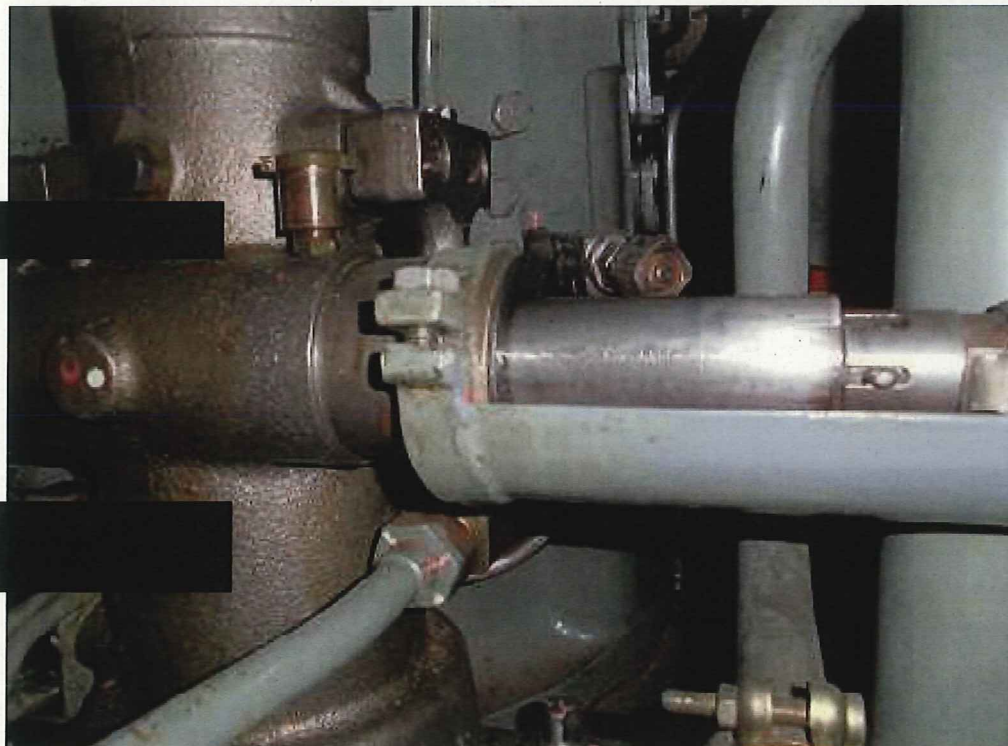


油採取箇所

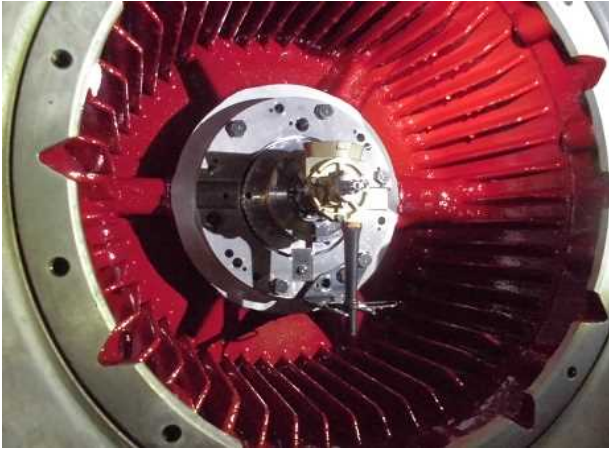




燃料噴射ラック (減方向)



燃料噴射ラック (増方向)



R側過給機 (ブロワ側)



L側過給機 (ブロワ側)

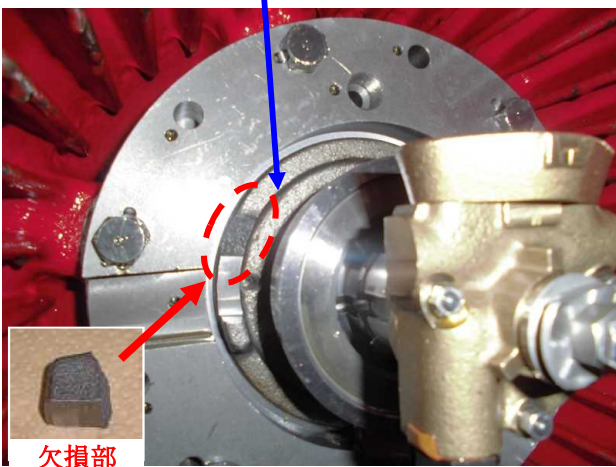


L側過給機 (タービン側)

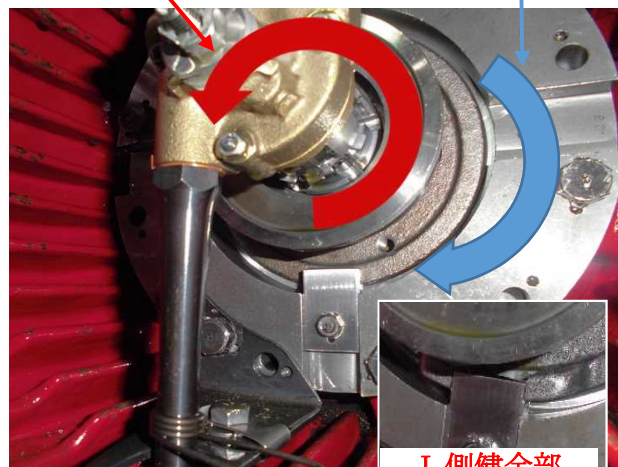
軸受押さええ回り止め部

270度反時計
計周りに回転

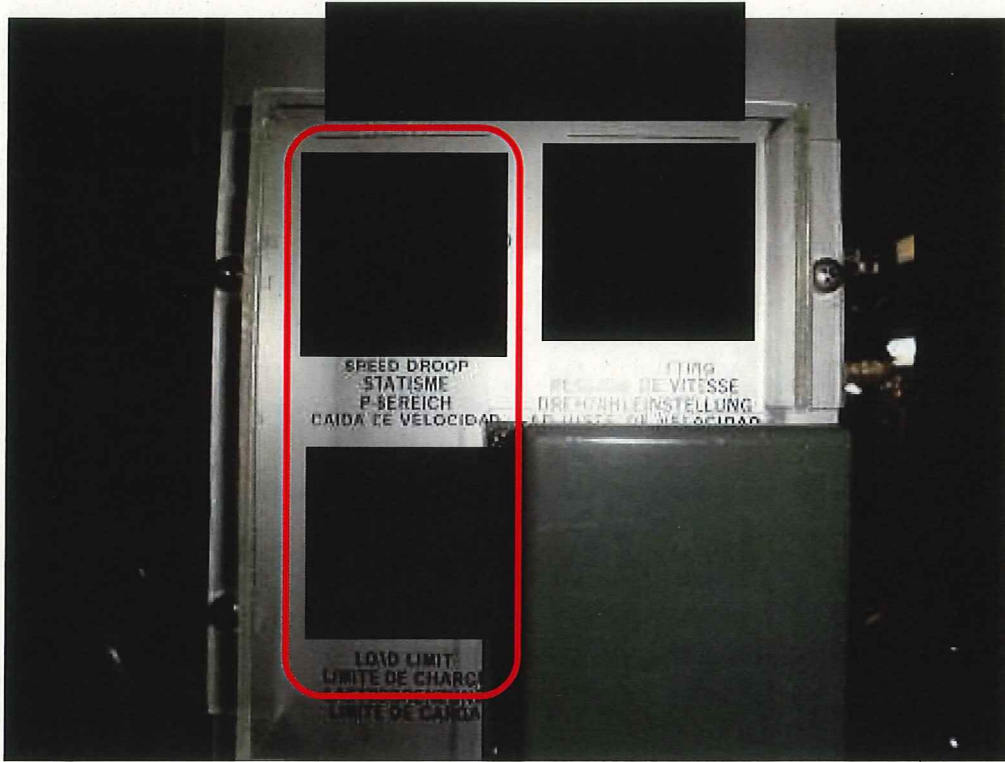
ロータ回転方向



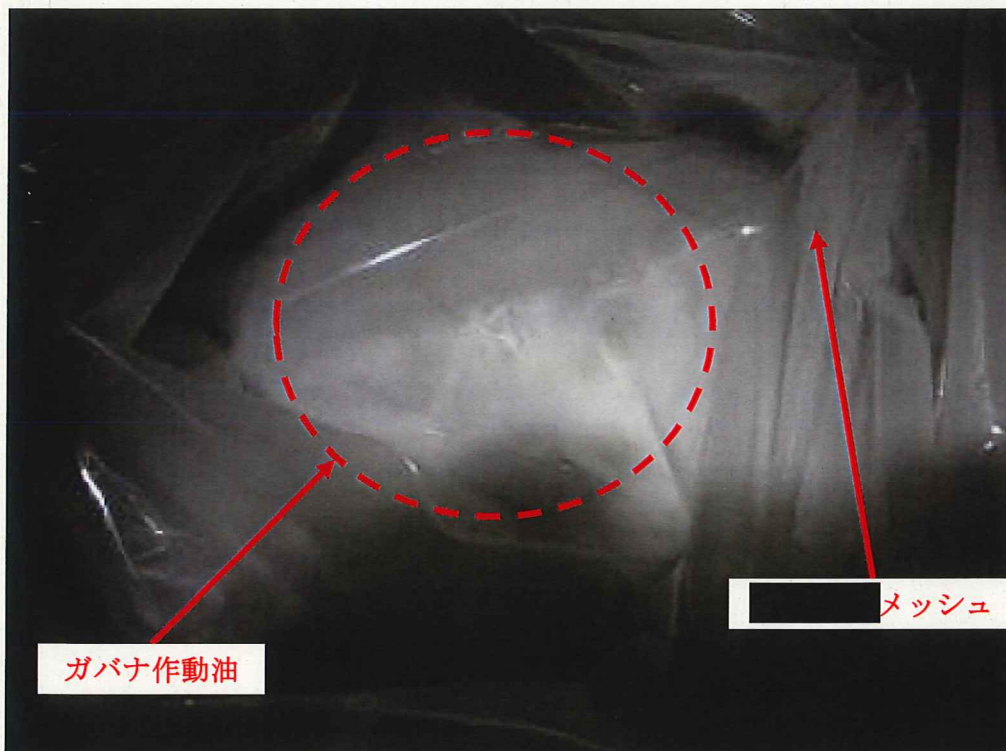
R側過給機 (タービン側)



R側過給機 (タービン側)



ガバナ設定値



ガバナ作動油を濾した [redacted] メッシュ
(※ 1インチ間による目数が [redacted] 個のメッシュにガバナ作動油を濾した写真)



カップリング全体外観



カップリングボルト拡大①



カップリングボルト拡大②



カップリングボルト拡大③



カップリングボルト拡大④



カップリングボルト拡大⑤



カップリングボルト拡大⑥



カップリングボルト拡大⑦



カップリングボルト拡大⑧



カップリングボルト拡大⑨



カップリングボルト拡大⑩



カップリングボルト拡大⑪



カップリングボルト拡大⑫



カップリングボルト拡大⑬



メタルポスト基礎ボルト①



メタルポストベースボルト①



メタルポスト基礎ボルト②



メタルポストベースボルト②



発電機本体基礎ボルト①



発電機本体基礎ボルト②



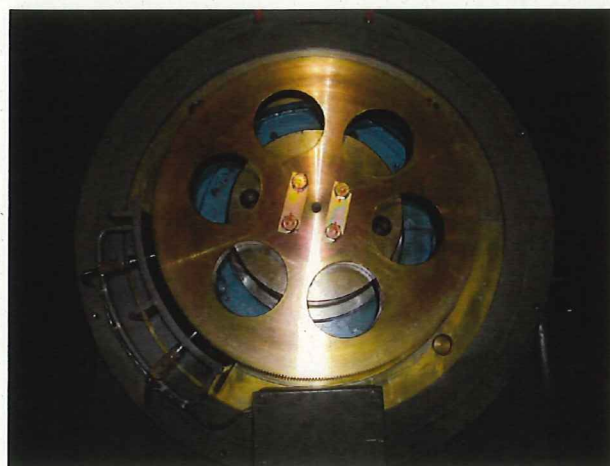
発電機本体基礎ボルト③



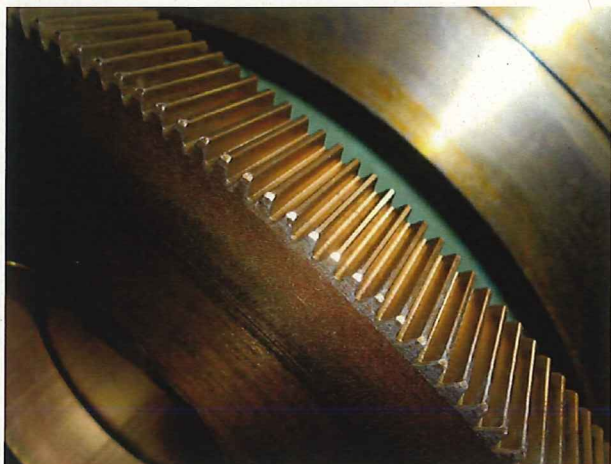
発電機本体基礎ボルト④



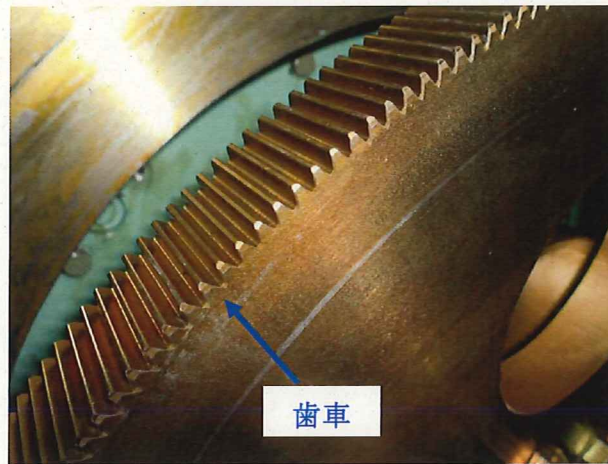
発電機全体外観



速度検出器歯車外観



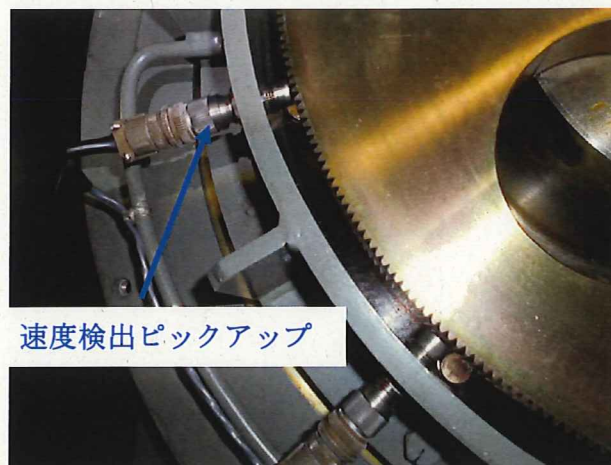
速度検出器歯車 一部拡大①



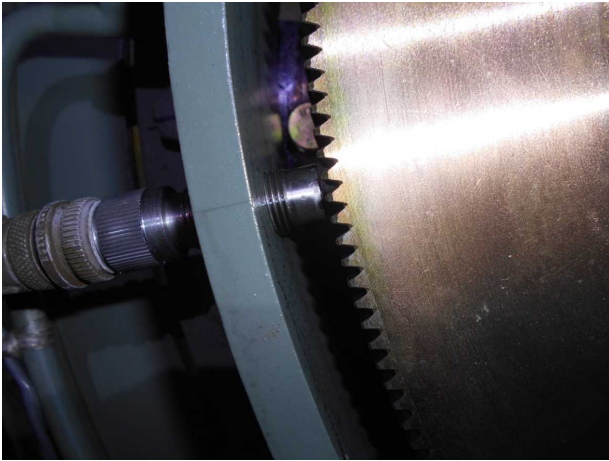
速度検出器歯車 一部拡大②



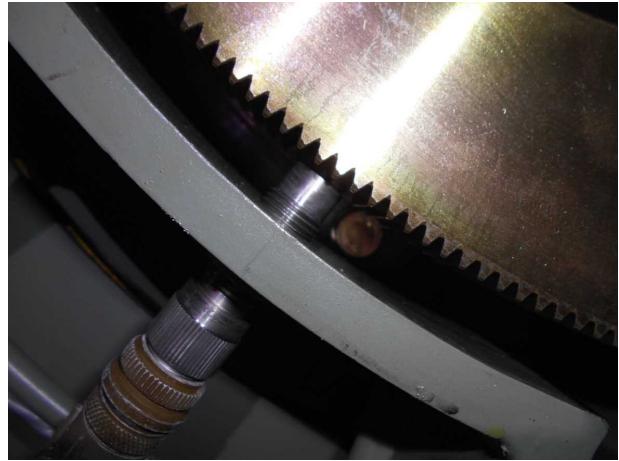
速度検出器歯車 一部拡大③



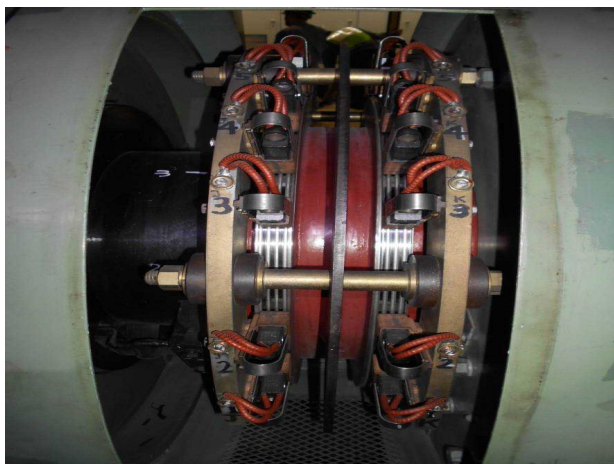
速度検出器ピックアップ外観



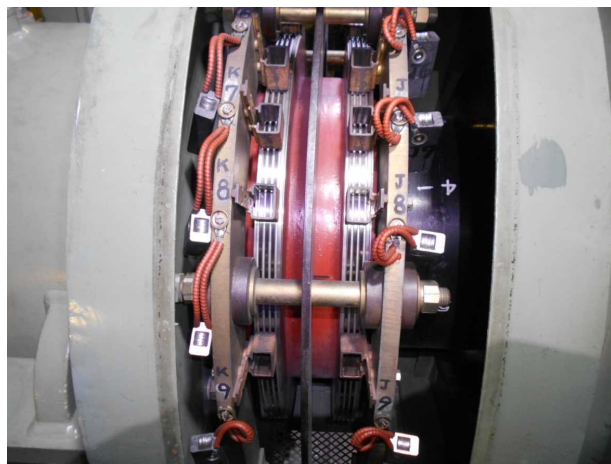
速度検出器ピックアップ 拡大 (常用)



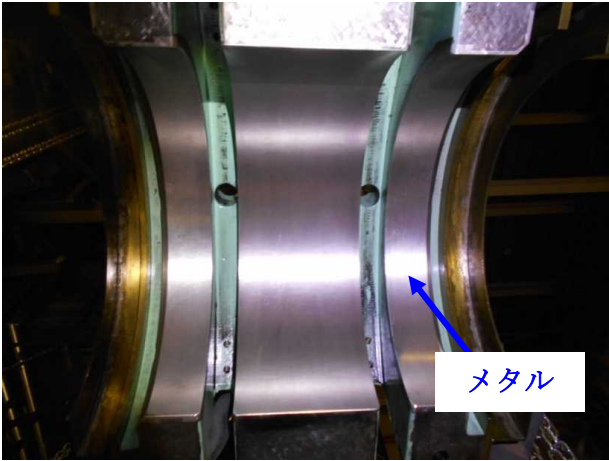
速度検出器ピックアップ 拡大 (予備)



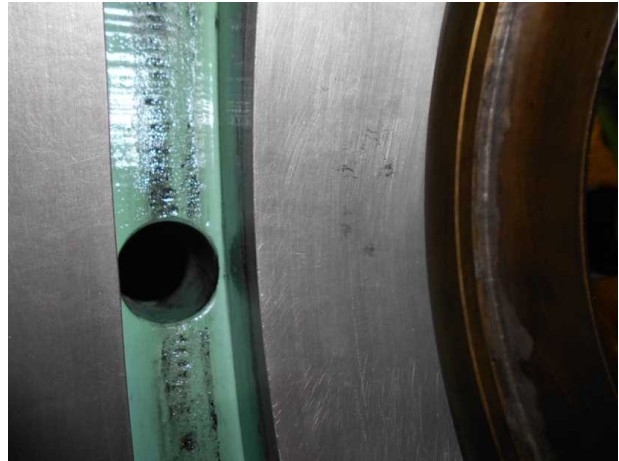
ブラシホルダー①



ブラシホルダー②



反機関側上半メタル (全体)



反機関側上半メタル (拡大①)



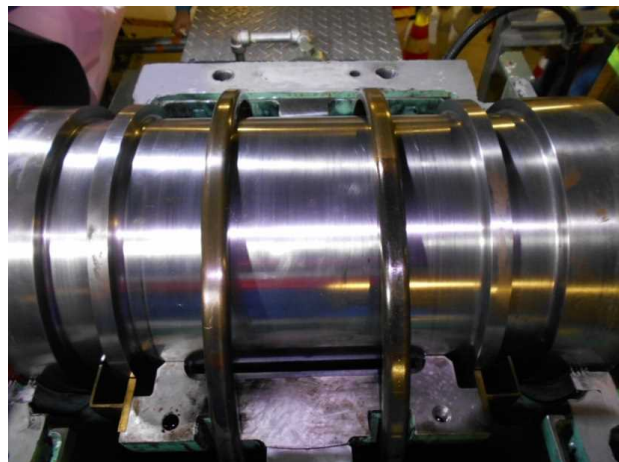
反機関側上半メタル (拡大②)



反機関側上半メタル (拡大③)



反機関側シャフト①



反機関側シャフト②

要因分析表 (R側過給機軸固着)

確認事象	故障モード	要因	懸念事項	点検内容	点検結果	判定	備考		
過給機 ロータのハンドターニング 【R側軸固着確認】	回転体の異常	【要因1】 タービンブレード異常	タービンブレードの異常によるタービンブレード折損	・タービンブレードの異常によるタービンブレード折損	・メーカ工場にて詳細点検 ・R側過給機のタービンブレード折損破面のSEM観察	・R側過給機のタービンブレード1枚のファッジー部分が折損及び4枚の変曲、ブレード先端部に接触痕を確認 ・R側過給機のタービンブレード破面に疲労破壊を示す縞模様(ストライエーション模様)を確認	○	添付資料-7 (1)	
		【要因2】 レーシングワイヤ異常	レーシングワイヤが破断 ・これに伴いシュラウドリングと接触	・レーシングワイヤ破断若しくはタービンブレードの折損によりレーシングワイヤが破断 ・これに伴いシュラウドリングと接触	・メーカ工場にて詳細点検 ・レーシングワイヤ破断面のSEM観察	・レーシングワイヤ脱落及び止端部の破断、破断破面に延性による破断を示すディンプル模様を確認	×	添付資料-7 (2)	
	タービンブレードと ノズルリングとの接触	【要因3】 ノズルリングの異常	ノズルリングの異常による損傷で損傷部品がタービンブレードに飛び込み アンバランス発生	・ノズルリングの異常による損傷で損傷部品がタービンブレードに飛び込み アンバランス発生	・メーカ工場にて詳細点検	・R側過給機ノズルリングに接触痕を確認	×	添付資料-7 (3)	
		【要因4】 異物飛び込みによる ノズル損傷	異物飛び込みによりタービンブレード及びノズルリングが損傷	・異物飛び込みによりタービンブレード及びノズルリングが損傷	・メーカ工場にて詳細点検	・タービンブレード及びノズルリングに異物飛び込みの痕跡は確認されなかった	×	添付資料-7 (4)	
	インペラとケース との接触	【要因5】 インペラ、インデューサ の異常	インペラ、インデューサに異常による損傷によりアンバランス発生	・インペラ、インデューサに異常による損傷によりアンバランス発生	・メーカ工場にて詳細点検	・インデューサに接触痕を確認 ・インペラに接触痕を確認	×	添付資料-7 (5)	
		【要因6】 異物飛び込みによる インペラ及びインデュー サ損傷	異物飛び込みによりインペラ及びインデューサが損傷	・異物飛び込みによりインペラ及びインデューサが損傷	・メーカ工場にて詳細点検	・インペラ、インデューサ外観に異物衝突痕は確認されなかった ・インペラ背面に接触痕を確認 ・インペラの空気取入れ側(過給機吸込み配管)からの異物飛び込みなし	×	添付資料-7 (6)	
	シール部品とロータ軸 との接触	【要因7】 ロータ軸偏芯	ロータ軸の曲がりにより接触	・ロータ軸の曲がりにより接触	・過給機エンドカバー開放によるハンドターニング ・メーカ工場にて詳細点検	・ロータシャフトのハンドターニングにてR側過給機の軸固着を確認 ・ロータシャフトフランジ部の0時~6時方向に最大0.5mm程度の隙間を確認	×	添付資料-7 (7)	
		【要因8】 シール部品の脱落	固定ボルト等の回り止めボルトの緩み	・固定ボルト等の回り止めボルトの緩み	・メーカ工場にて詳細点検	・シャフトシュラウド、シールプレート固定ボルト(■本中2本)及びナット・ワッシャ(■個中3個)の脱落を確認 ・R側過給機のシャフトシュラウドの破損を確認	×	添付資料-7 (8)	
	軸受の異常	ベアリングの異常	【要因9】 ベアリング摩耗	ベアリング摺動部の異常摩耗	・ベアリング摺動部の異常摩耗	・ベアリングメーカにてベアリングの詳細点検	・タービン側のころ軸受の内輪軌道面の約1/3周に、ころのピッチ間隔で変形(圧痕)を確認 ・タービン側 ベアリング保持器ポケット柱面の約1/3周に破断、摩耗、変色を確認 ・タービン側 ベアリングころ軌道面に摩耗、変形を確認 ・プロワ側の玉軸受の内輪軌道面の約1/3周に剥離を確認	×	添付資料-7 (9)
			【要因10】 潤滑油不良	潤滑油給油時の銘柄間違いによる軸受損傷	・潤滑油給油時の銘柄間違いによる軸受損傷	・点検記録にて「銘柄」を確認	・潤滑油銘柄に相違がないことを確認	×	添付資料-7 (10)
			【要因11】 潤滑油の劣化、油量不足	潤滑油性状の劣化、オイルポンプ故障による注油量不足により軸受損傷	・潤滑油性状の劣化、オイルポンプ故障による注油量不足により軸受損傷	・潤滑油分析 ・メーカ工場にて詳細点検	・潤滑油性状に異常がないことを確認 ・オイルポンプに異常がないことを確認	×	添付資料-7 (11)
			【要因12】 潤滑油への異物混入	潤滑油への異物混入によるベアリング損傷	・潤滑油への異物混入によるベアリング損傷	・潤滑油分析 ・潤滑油内で確認された金属粉の成分分析	・潤滑油性状に異常がないことを確認 ・潤滑油内の金属粉はベアリング構成部材であることを確認	×	添付資料-7 (12)
	構成部品の緩み、異常	【要因13】 部品の脱落	座金折り曲げ忘れによる、固定ボルト等の緩み	・座金折り曲げ忘れによる、固定ボルト等の緩み	・メーカ工場にて詳細点検	・シャフトシュラウド、シールプレート固定ボルト(■本中2本)及びナット・ワッシャ(■個中3個)の脱落を確認	×	添付資料-7 (13)	

○：要因の可能性あり、×：要因の可能性はないと考えられる

R 側過給機軸固着に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因 1】タービンプレード異常

タービンプレードに変形等の異常がある場合、回転体と静止部との接触や軸偏芯等が生じることによる軸受等の損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・目視点検を実施し、タービンプレードに損傷がないこと

(2) 点検結果

- ・目視点検

	点検項目	結果	点検日	備考
1	R 側過給機のタービンプレード	異常あり※ ¹	2018/10/17	別紙－ 1
2	L 側過給機のタービンプレード	異常あり※ ²	2018/10/15	別紙－ 1

※ 1 R 側過給機

- ・ R 側過給機のタービンプレード 1 枚（ N o . 1 ）において、タービンプレードファツリー部背面側の第一くびれ部の谷部より折損を確認
- ・折損部（ N o . 1 のタービンプレード）から反時計方向にタービンプレード 4 枚の先端部変曲を確認
- ・ 1 時～ 5 時方向のタービンプレード先端部に接触痕を確認

※ 2 L 側過給機

- ・ 全てのタービンプレードの先端部に接触痕を確認

全てのタービンプレードの先端部に接触痕を確認したことから、追加で以下検査を実施。

・浸透探傷検査

L 側過給機のタービンプレード 1 枚（ N o . 2 5 ）において、タービンプレードファツリー部背面側の第二くびれ部の谷部にき裂を確認

・磁粉探傷検査

き裂が確認されたタービンプレード（ N o . 2 5 ）を受け止めるロータファツリー部の第一くびれ部の谷部に、指示模様を確認

ロータファツリー部片側の側面部に打痕と見られる変形を確認

・SEM 観察

折損が確認された R 側過給機のタービンプレードの破面を SEM 観察した結果、疲

劣破壊を示す縞模様（ストライエーション模様）を確認

き裂が確認された L 側過給機のタービンプレードのき裂箇所を強制切断し、SEM 観察した結果、劣破壊を示す縞模様（ストライエーション模様）を確認

き裂が確認された L 側過給機のロータファツリー部のき裂箇所を強制切断し、SEM 観察した結果、劣破壊を示す縞模様（ストライエーション模様）を確認

R側過給機軸固着に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因2】レーシングワイヤ異常

レーシングワイヤに異常がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・目視点検を実施し、レーシングワイヤに損傷がないこと

(2) 点検結果

- ・目視点検

	点検項目	結果	点検日	備考
1	R側過給機のレーシングワイヤ	異常あり※3、※4	2018/10/16	別紙-2
2	L側過給機のレーシングワイヤ	異常なし	2018/10/15	—

※3 R側過給機の外周側レーシングワイヤの脱落と止端部の破断

※4 R側過給機の内周側レーシングワイヤ■本のうち1本の脱落

R側過給機のレーシングワイヤに異常を確認したことから、追加で以下検査を実施。

・SEM観察

破断したレーシングワイヤの破面をSEM観察し、レーシングワイヤの破断原因が疲労破壊か、タービンブレード折損に伴う破断かの確認を実施した。

SEM観察の結果から、延性による破断を示すディンプル模様が確認され、疲労破壊を示す縞模様（ストライエーション模様）は確認されなかった。

R 側過給機軸固着に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因 3】ノズルリングの異常

ノズルリングに異常がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・目視点検を実施し、ノズルリングに損傷がないこと

(2) 点検結果

- ・目視点検

	点検項目	結果	点検日	備考
1	R側過給機のノズルリング	異常あり※5、※6	2018/10/16	別紙－ 3
2	L側過給機のノズルリング	異常なし	2018/10/15	－

※ 5 R側過給機のノズルリング 9時～2時方向に接触痕（小さい傷）を確認

※ 6 R側過給機のノズルリング 4時～7時方向に接触痕（大きい傷）を確認

R 側過給機軸固着に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因 4】異物飛び込みによるノズル損傷

異物飛び込みによりタービンプレード及びノズルリングに損傷がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・目視点検を実施し、タービンプレード及びノズルリングに異物飛び込みの痕跡がないこと

(2) 点検結果

- ・目視点検

	点検項目	結果	点検日	備考
1	R側過給機のノズルリング	異常なし※7	2018/10/16	別紙－ 3
2	L側過給機のノズルリング	異常なし	2018/10/15	－

タービンプレード目視点検については、【要因 1】タービンプレード異常にて実施

※7 衝突痕は確認されなかったが、タービンプレードが折損後にノズルリングとの隙間に入り込んだことによる接触痕が確認された。

R 側過給機軸固着に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因 5】 インペラ、インデューサの異常

インペラ、インデューサに異常がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・目視点検を実施し、インペラ、インデューサに損傷がないこと

(2) 点検結果

- ・目視点検

	点検項目	結果	点検日	備考
1	R 側過給機のインペラ、インデューサ	異常あり※8、※9	2018/10/16	別紙－ 4
2	L 側過給機のインペラ、インデューサ	異常なし	2018/10/15	－

※ 8 R 側過給機のインデューサの 6 時～ 1 1 時方向の先端部に接触痕を確認

※ 9 R 側過給機のインペラの 6 時～ 1 1 時方向の先端部に接触痕を確認

R側過給機軸固着に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因 6】異物飛び込みによるインペラ及びインデューサ損傷

異物飛び込みによりインペラ及びインデューサに損傷がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・インペラ、インデューサの目視点検を実施し、異物衝突痕がないこと
- ・インペラの空気取入れ側（過給機吸込み配管）の目視点検を実施し、異物衝突痕がないこと

(2) 点検結果

- ・目視点検

	点検項目	結果	点検日	備考
1	R側過給機のインペラ、インデューサ	異常なし※10	2018/10/16	別紙－ 5
2	L側過給機のインペラ、インデューサ	異常なし	2018/10/15	－
3	R側過給機の吸込み配管	異常なし	2018/10/17	－
4	L側過給機の吸込み配管	異常なし	2018/10/15	－

※ 10 衝突痕は確認されなかったが、R側過給機のインペラ背面に接触痕を確認

R 側過給機軸固着に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因 7】ロータ軸偏芯

ロータ軸の曲がりにより接触がある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・ロータシャフトのハンドターニングを実施し、軸固着のないこと
- ・ロータシャフトの軸振れ計測を実施し、計測値に異常のないこと

(2) 点検結果

- ・ロータシャフトのハンドターニング

	点検項目	結果	点検日	備考
1	R側過給機のロータシャフト	異常あり※ ^{1 1}	2018/10/16	－
2	L側過給機のロータシャフト	異常なし	2018/10/15	－

※ 1 1 R側過給機の軸固着を確認

- ・ロータシャフト軸振れ計測

	点検項目	結果	点検日	備考
3	R側過給機のロータシャフト	異常あり※ ^{1 2}	2018/10/25	別紙－ 6
4	L側過給機のロータシャフト	異常なし	2018/10/26	－

※ 1 2 R側過給機のロータシャフトフランジの 0 時～ 6 時方向に最大 0. 5 mm 程度の隙間を確認

R側過給機軸固着に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因8】シール部品の脱落

固定ボルト等の緩みがある場合、回転体に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・目視点検を実施し、固定ボルト等の回り止めボルトの緩みがないこと

(2) 点検結果

- ・目視点検

	点検項目	結果	点検日	備考
1	R側過給機の各部品の固定ボルト締め付け状態	異常あり※13	2018/10/16	別紙-7
2	L側過給機の各部品の固定ボルト締め付け状態	異常なし	2018/10/15	-

※13 R側過給機のシャフトシュラウド、シールプレート固定ボルト (■本中2本) 及びナット・ワッシャ (■個中3個) の脱落を確認

R側各部品の固定ボルト締め付け状態を確認していたところ、シャフトシュラウドの破損を確認

R 側過給機軸固着に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因 9】 ベアリング摩耗

ベアリング摺動部に異常摩耗がある場合、軸受に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・ベアリング分解による詳細調査を実施し、ベアリングに異常摩耗がないこと

(2) 点検結果

- ・ベアリング分解による詳細調査

	点検項目	結果	点検日	備考
1	ベアリング	異常あり※14、※15	2018/10/25 ～11/19	別紙－ 8

※ 1 4 過給機タービン側ころ軸受

- ・内輪軌道面の約 1 / 3 周に、ころのピッチ間隔で変形（圧痕）を確認
- ・保持器ポケット柱面の約 1 / 3 周に破断、摩耗、変色を確認
- ・ころ転動面に摩耗、変形を確認

※ 1 5 過給機ブロワ側玉軸受

- ・内輪軌道面の約 1 / 3 周に剥離を確認

R側過給機軸固着に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因10】潤滑油不良

潤滑油給油時の銘柄間違いがある場合、軸受に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・潤滑油の銘柄を確認し、相違がないこと

(2) 点検結果

	点検項目	結果	点検日	備考
1	工事報告書により補給潤滑油の銘柄確認	異常なし※16	2018/9/19	—

※16 工事報告書にて [] が補給されていることを確認。

R 側過給機軸固着に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因 1 1】潤滑油の劣化、油量不足

潤滑油性状の劣化、オイルポンプ故障による軸受部への注油量不足がある場合、軸受に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・潤滑油分析を実施し、潤滑油の性状に異常がないこと
- ・オイルポンプの目視点検を実施し、異常がないこと

(2) 点検結果

- ・潤滑油分析

	点検項目	結果	点検日※17	備考
1	R 側過給機の潤滑油分析	異常なし	ブロワ側 2018/9/18 タービン側 2018/9/27	別紙－ 9
2	L 側過給機の潤滑油分析	異常なし	ブロワ側 2018/9/18 タービン側 2018/9/27	別紙－ 9

※ 1 7 分析結果受領日

- ・オイルポンプ目視点検

	点検項目	結果	点検日	備考
3	R 側過給機のオイルポンプ分解	異常なし	2018/10/17	別紙－ 9
4	L 側過給機のオイルポンプ分解	異常なし	2018/10/15	別紙－ 9

R 側過給機軸固着に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因 1 2】潤滑油への異物混入

潤滑油への異物混入がある場合、ベアリングに損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・潤滑油分析を実施し、潤滑油の性状に異常がないこと
- ・潤滑油内で確認された金属粉の成分分析を実施し、潤滑油への異物が混入していないこと

(2) 点検結果

- ・潤滑油分析

	点検項目	結果	点検日※18	備考
1	R 側過給機の潤滑油分析	異常なし	ブロワ側 2018/9/18 タービン側 2018/9/27	別紙－ 9
2	L 側過給機の潤滑油分析	異常なし	ブロワ側 2018/9/18 タービン側 2018/9/27	別紙－ 9

※ 1 8 分析結果受領日

- ・成分分析

	点検対象	結果	点検日※20	備考
3	潤滑油内で確認された金属粉の成分分析	異常なし※19	2018/9/27	別紙－ 9

※ 1 9 潤滑油内に残留していた金属粉の成分分析を実施した結果、タービン側にて亜鉛 (Z n) 成分と銅 (C u) 成分、ブロワ側にて鉄 (F e) 及びクロム (C r) を含む成分が多く検出された。確認された金属粉に関する発生源調査を実施した結果、いずれもベアリングの構成部材であることが確認された。

※ 2 0 分析結果受領日

R側過給機軸固着に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因13】 部品の脱落

固定ボルト等の緩み、脱落がある場合、軸受に損傷を生じ、過給機軸固着の要因となる可能性がある。

(1) 点検内容及び判定基準

- ・ 固定ボルト等の目視点検を実施し、緩みがないこと

(2) 点検結果

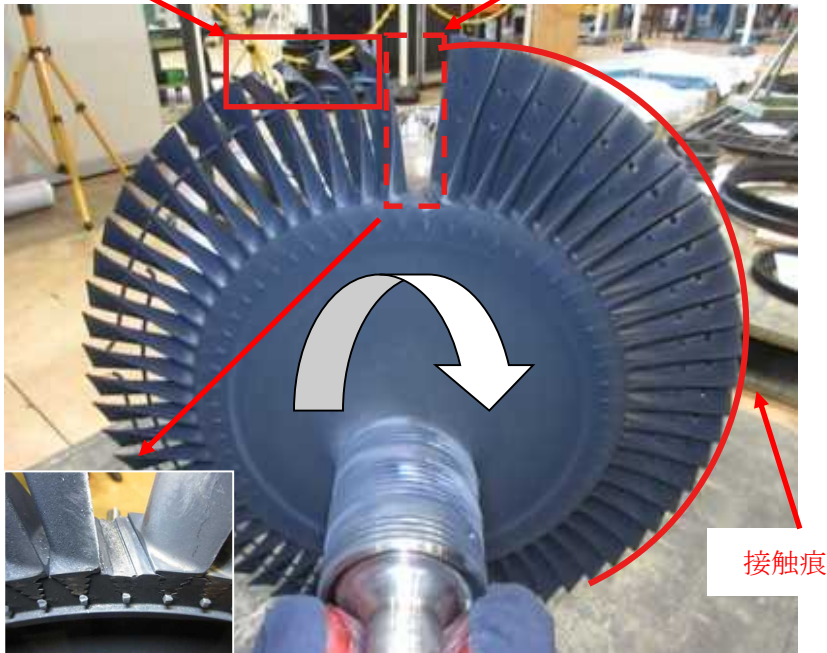
- ・ 目視点検

	点検対象	結果	点検日	備考
1	R側過給機の固定ボルト等 (工場での詳細点検)	異常あり※21	2018/10/17	別紙-10
2	L側過給機の固定ボルト等 (工場での詳細点検)	異常なし	2018/10/15	-

※21 R側過給機のシャフトシュラウド、シールプレート固定ボルト (■本中2本)、ナット・ワッシャ (■個中3個) の脱落を確認。

先端部変曲

タービンプレードが折損



折損部詳細

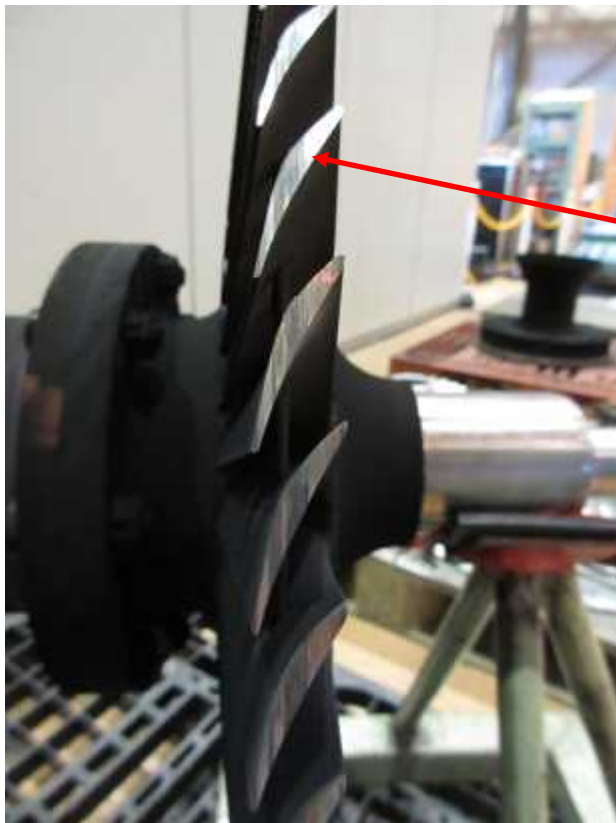
R側過給機のタービンプレード全体写真

R側過給機のタービンプレード1枚 (No. 1) において、タービンプレードファッリ部背面側の第一くびれ部の谷部より折損を確認

折損部 (No. 1のタービンプレード) から反時計方向にタービンプレード4枚の先端部変曲を確認

1時～5時方向のタービンプレード先端部に接触痕を確認

接触痕



接触痕

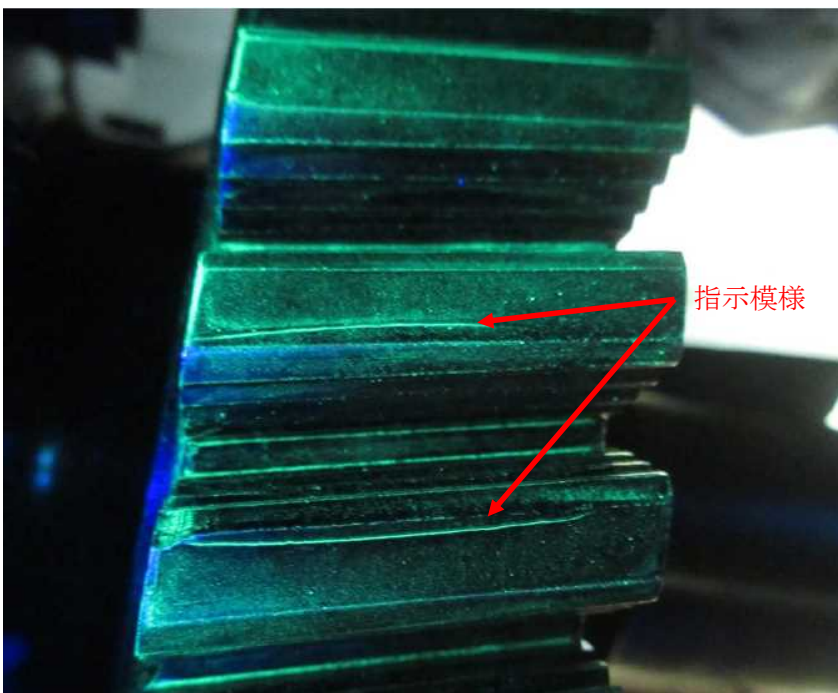
L側過給機のタービンプレード

L側過給機の全てのタービンプレードの先端部に接触痕を確認



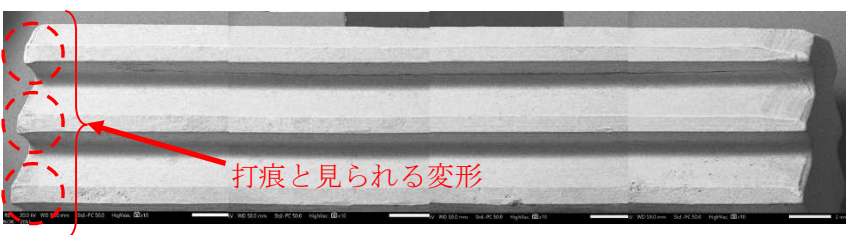
L側過給機のタービンブレード
浸透探傷検査指示模様

タービンブレード1枚 (No. 25) において、タービンブレードファツリ部背面側の第二くびれ部の谷部にき裂を確認



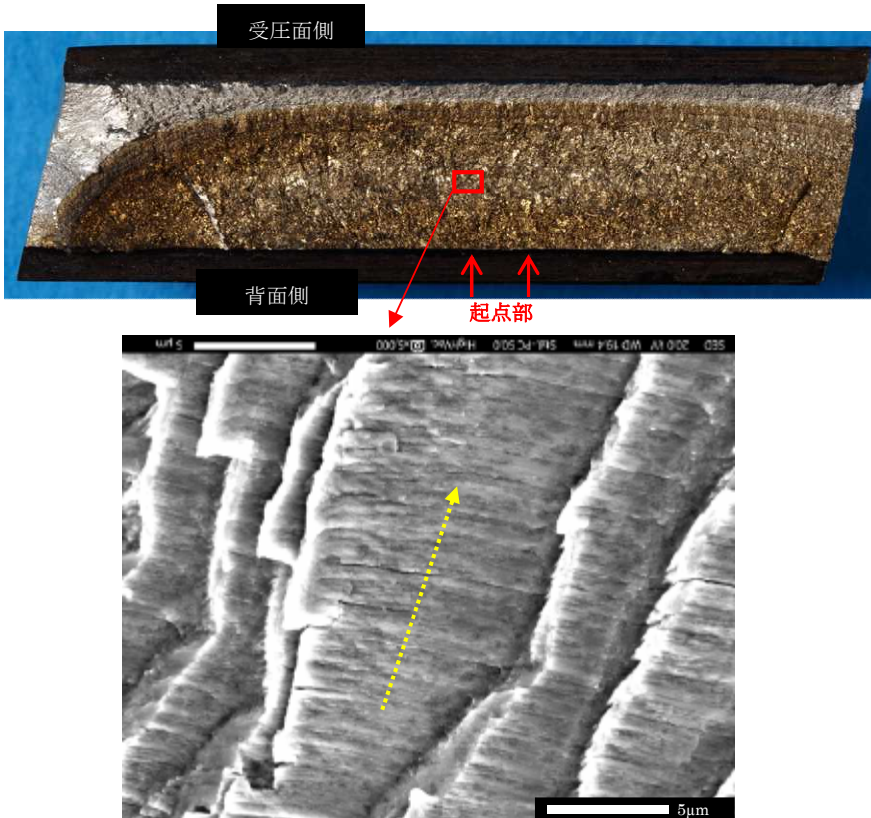
L側過給機のロータシャフトファツリ部
(磁粉探傷検査)

き裂が確認されたタービンブレード (No. 25) を受け止めるロータファツリ部の谷部に、指示模様 (磁粉探傷検査) を確認



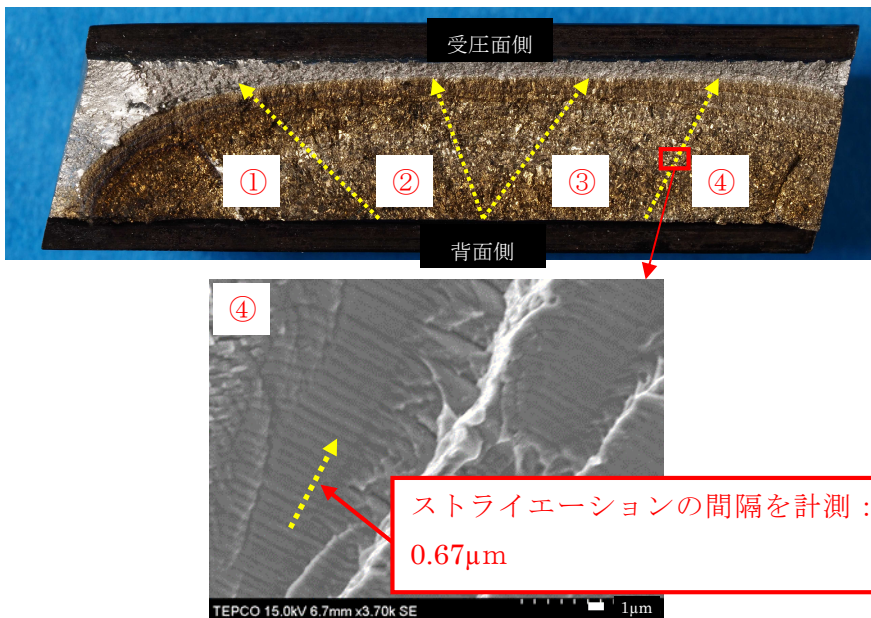
L側過給機のタービンブレードNo. 25受圧面

ロータファツリ部片側の側面部に打痕と見られる変形を確認



R側過給機のタービンブレード破面のストライエーション模様

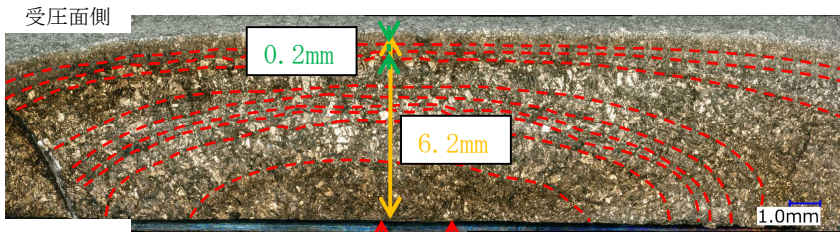
折損が確認されたR側過給機のタービンブレードの破面をSEM観察した結果、疲労破壊を示す縞模様（ストライエーション模様）を確認



R側過給機のタービンブレード No. 1 破面のストライエーション模様

R側過給機のタービンブレード No. 1 の破面観察にて、応力サイクル数「約 10,000 サイクル」のストライエーションを確認

	①	②	③	④
き裂長さ (mm)	8.2	6.7	7.7	6.7
ストライエーション間隔 (μm)	0.70	0.81	0.87	0.67
サイクル数	11000	8200	8800	10000

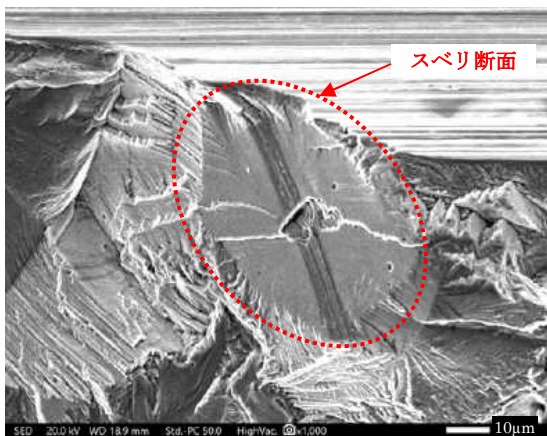
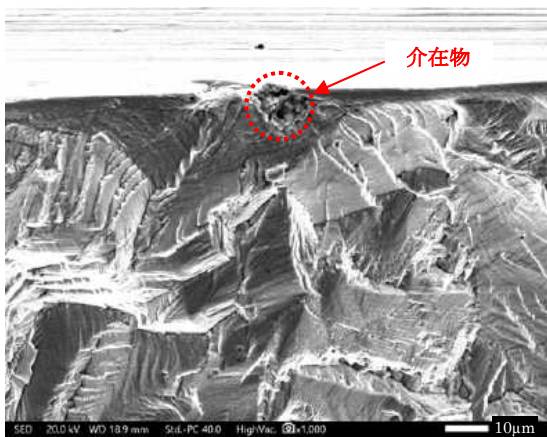


R側過給機のタービnbrレード No. 1 ファツリ一部

- ① き裂起点から最深点までのき裂進展長さとその線状のビーチマーク間隔の選定
- ② 下記式より破断に至るまでの回数を評価

$$\frac{\text{亀裂進展長さ}}{\text{ビーチマーク間隔}}$$

- ①②の結果より破断に至るまでの回数は31回と評価
破断に至るまでの起動・停止回数は約30回以上と推定

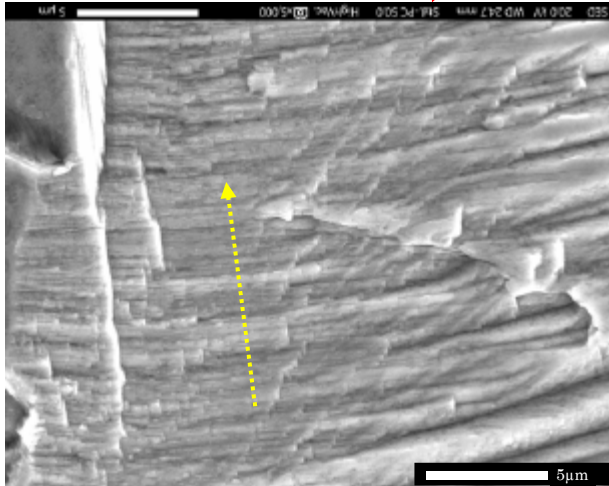
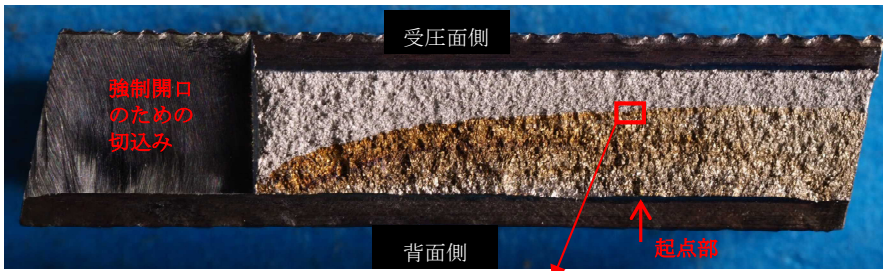


R側過給機のタービnbrレード No. 1 ファツリ一部

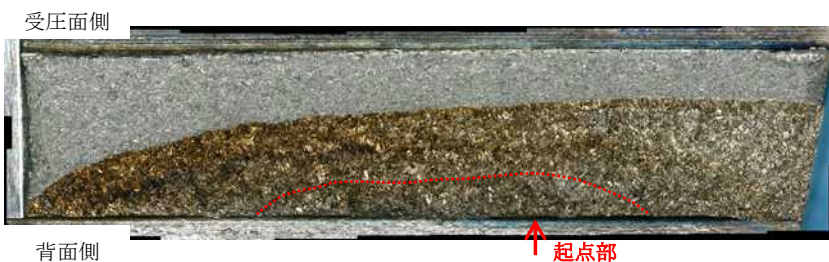
R側過給機のタービnbrレード No. 1 の破面にビーチマークを確認

(ビーチマークは、き裂を発生させるような応力がかかる際(当該D/Gの起動、停止等)に発生
ビーチマークの評価から、き裂発生後、30回以上の起動、停止があったものと推定)

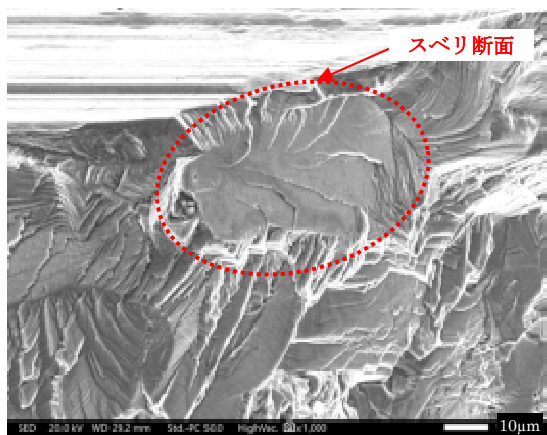
R側過給機のタービnbrレードの起点部に微少な介在物及びスベリ断面を確認



L側過給機のタービンブレード破面のストライエーション模様



L側過給機のタービンブレード No. 25 ファツリー部



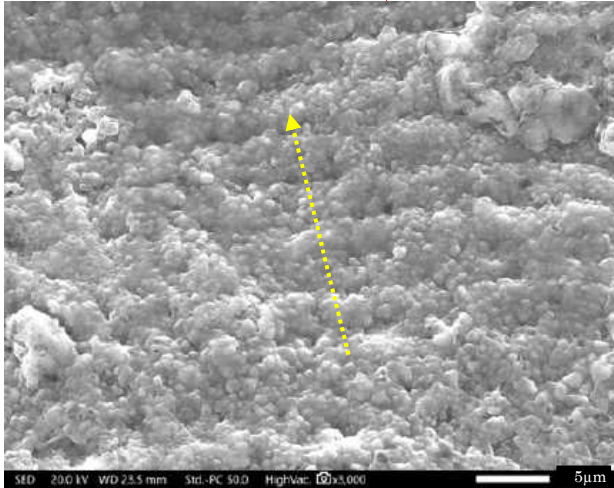
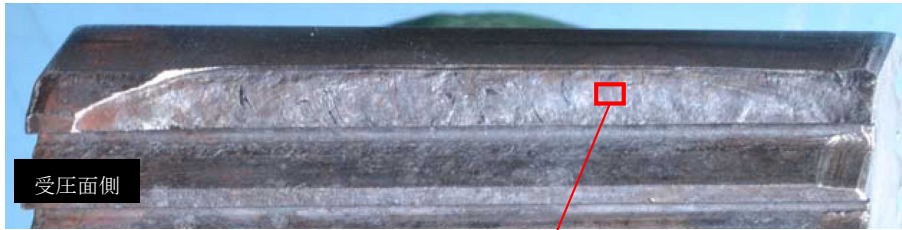
L側過給機のタービンブレード No. 25 ファツリー部

き裂が確認されたL側過給機のタービンブレードのき裂箇所を強制切断し、SEM観察した結果、疲労破壊を示す縞模様（ストライエーション模様）を確認

L側過給機のタービンブレード No. 25 の破面にビーチマークを確認

R側過給機のタービンブレードに比べ、ビーチマークが不鮮明

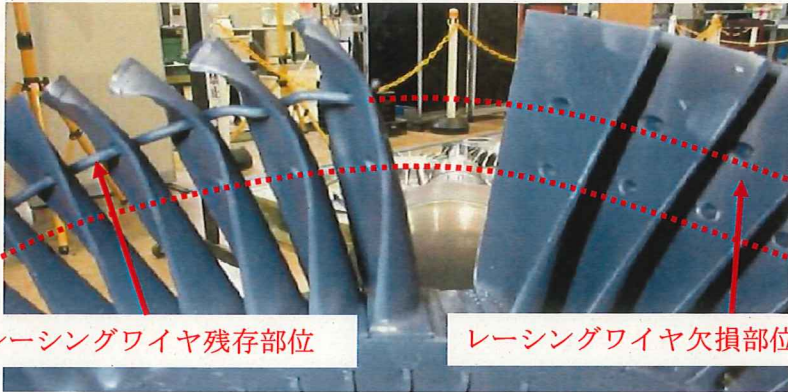
L側過給機のタービンブレードの起点部にスベリ断面を確認



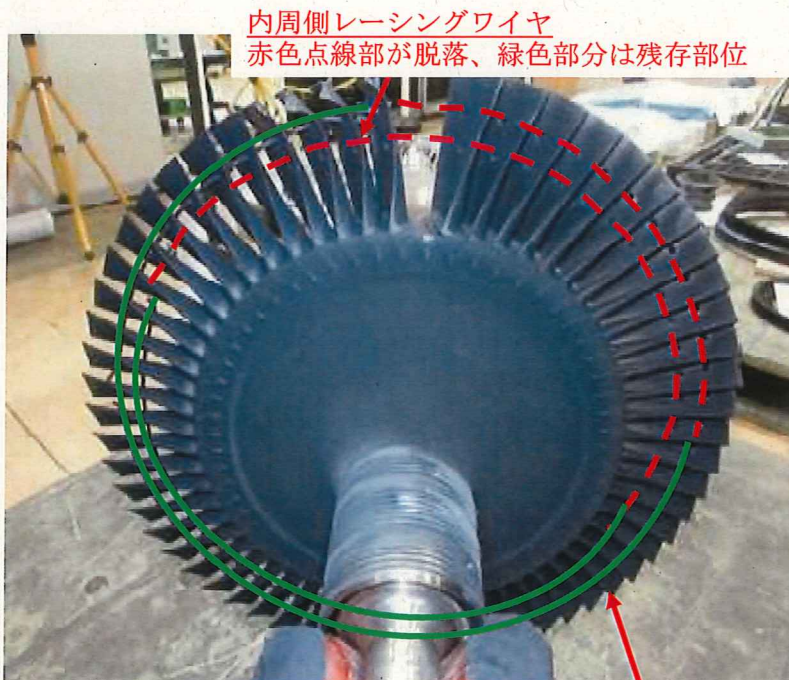
L側過給機のロータファツリー部
No. 25 受圧面破面のストライエーション模様

L側過給機のロータファツリー部
No. 25 受圧面部のき裂箇所を強制
切断し、SEM観察した結果、疲
勞破壊を示す縞模様（ストライエ
ーション模様）を確認

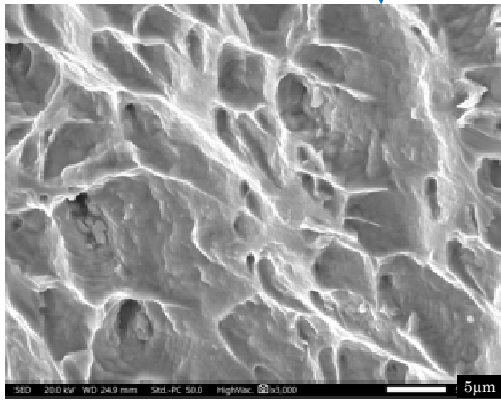
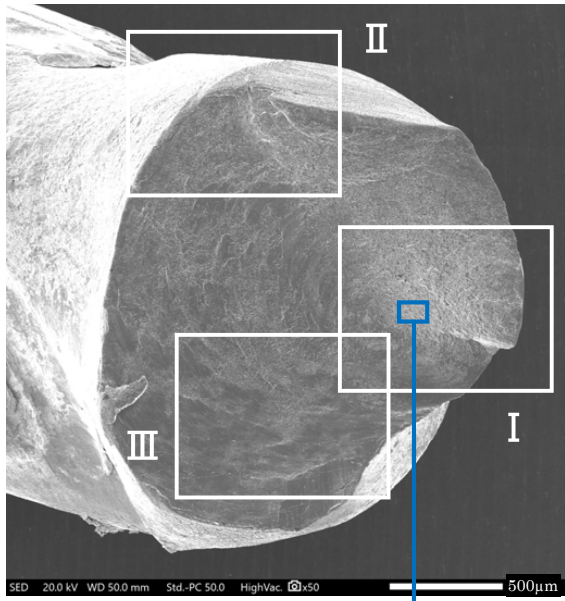
ロータファツリー部の材料は、タ
ービンブレードファツリー部の材
料よりも耐食性が劣ることから、
破面の様相が相違
酸化等の影響により、ストライエ
ーション模様、ビーチマーク及び
き裂の起点部位は不鮮明



R側過給機の外周側レーシングワイヤの脱落と止端部の破断を確認

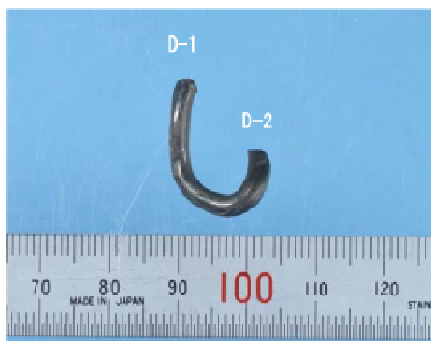
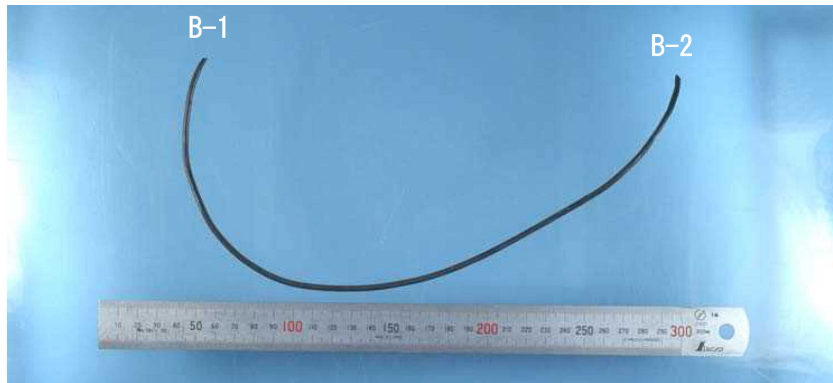
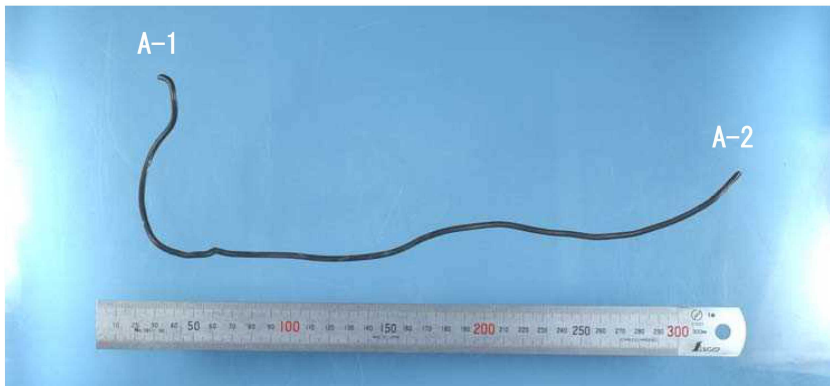


R側過給機の内周側レーシングワイヤ■本のうち1本の脱落を確認



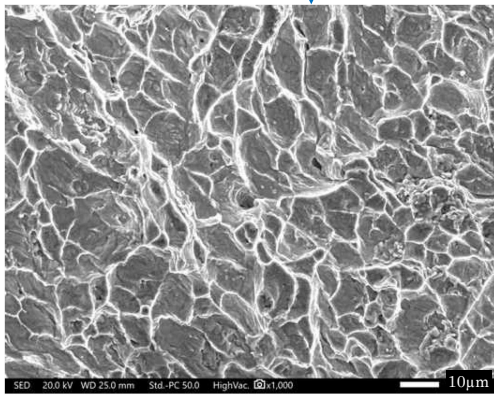
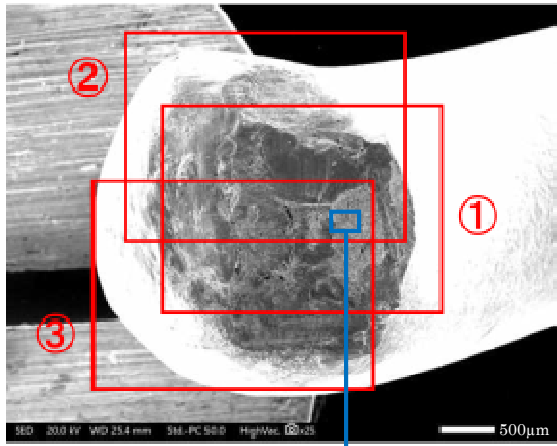
残存していたレーシングワイヤの破面

折損したレーシングワイヤの内、タービンに残存していたレーシングワイヤの破面をSEM観察した結果、延性による破断を示すディンプル模様を確認され、疲労破壊を示す縞模様（ストライエーション模様）のないことを確認

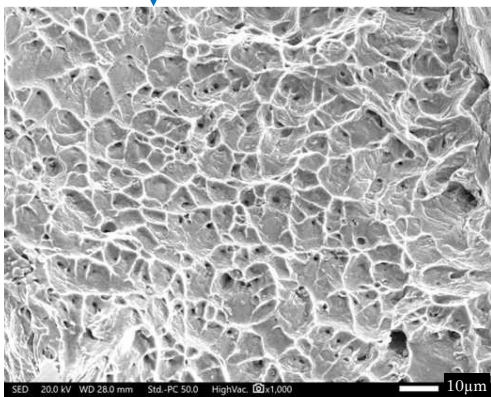
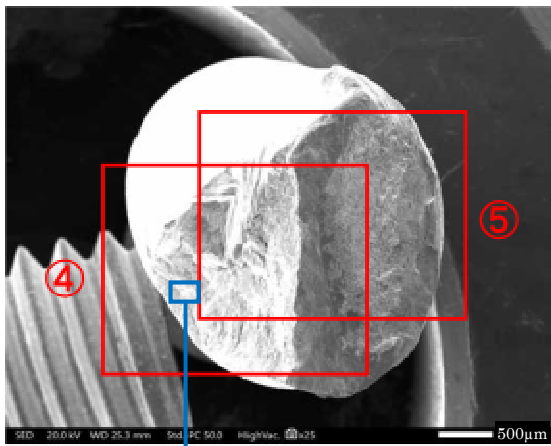


脱落したレーシングワイヤの破面をSEM観察した結果、延性による破断を示すディンプル模様が確認され、疲労破壊を示す縞模様（ストライエーション模様）のないことを確認

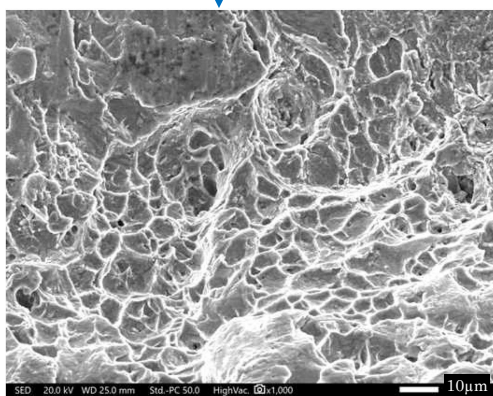
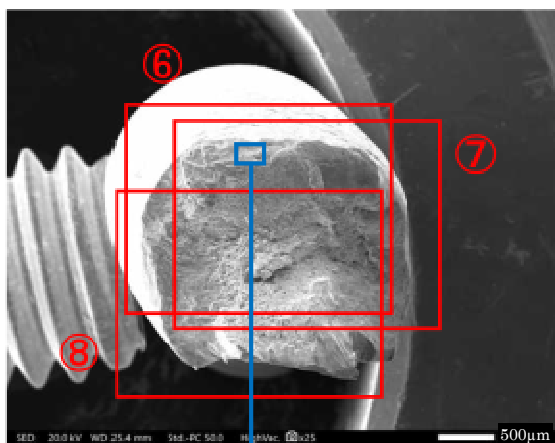
D-1、D-2、E-1、E-2については、屈曲が大きいことから、折損したタービンブレード付近と推定



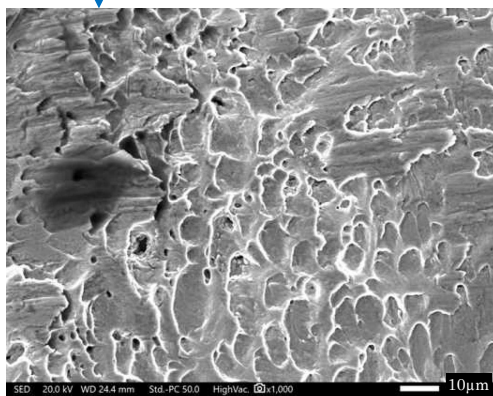
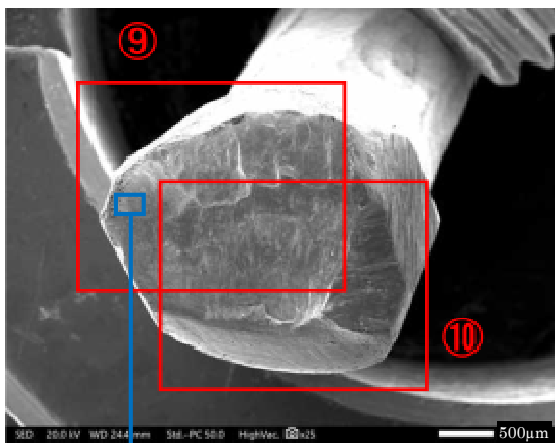
A - 1



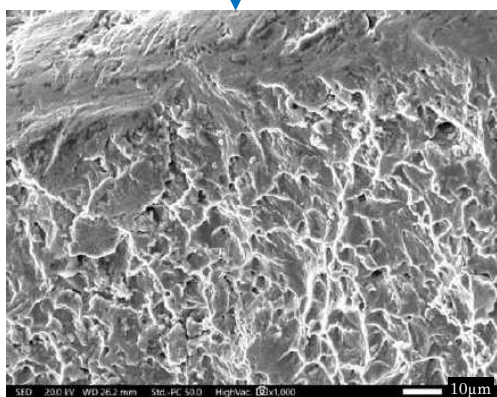
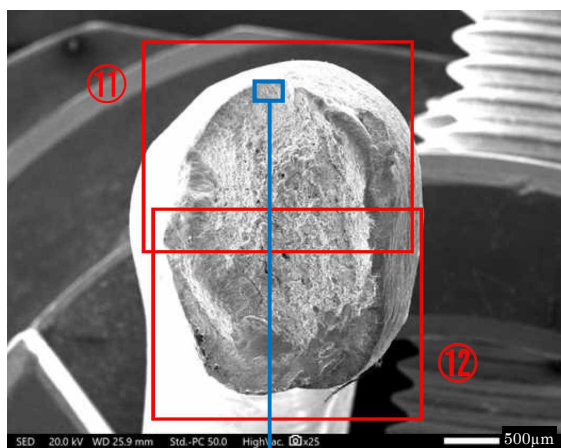
A - 2



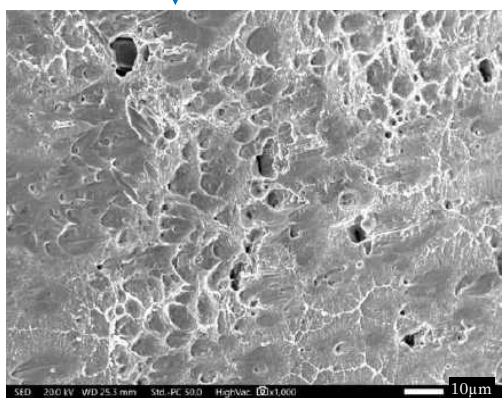
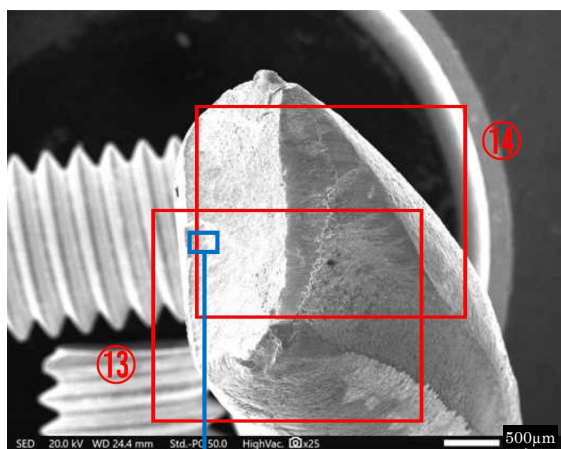
B - 1



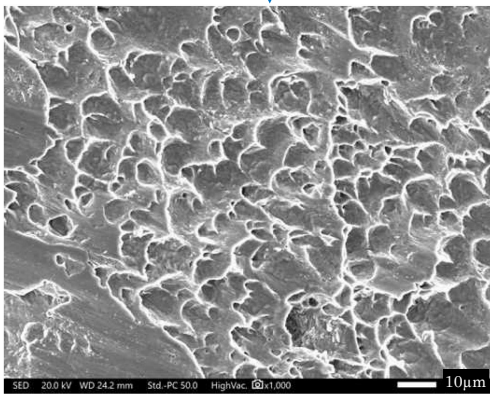
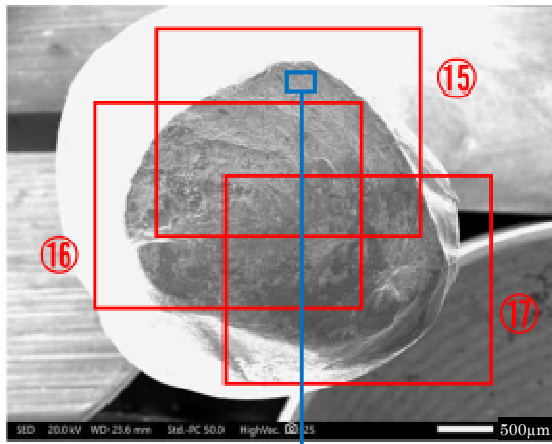
B - 2



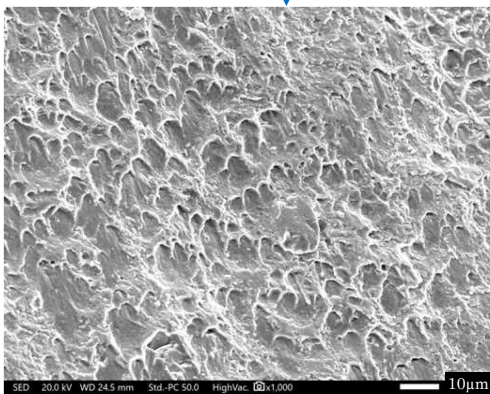
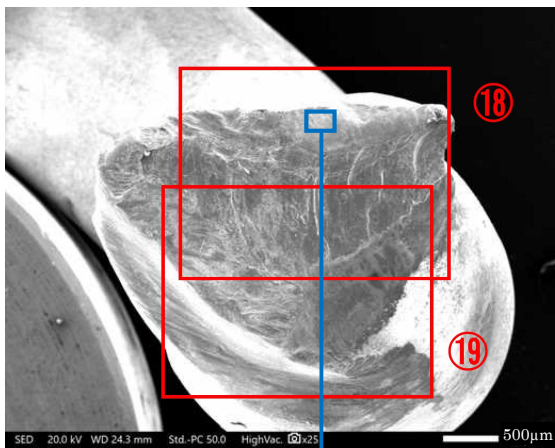
C - 1



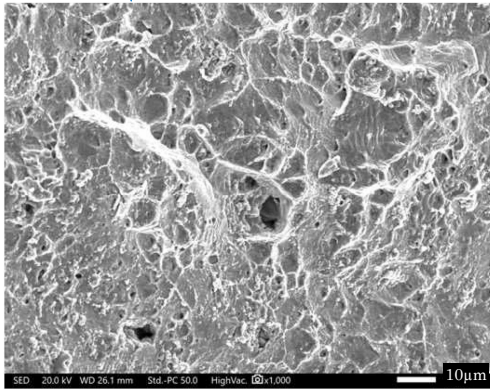
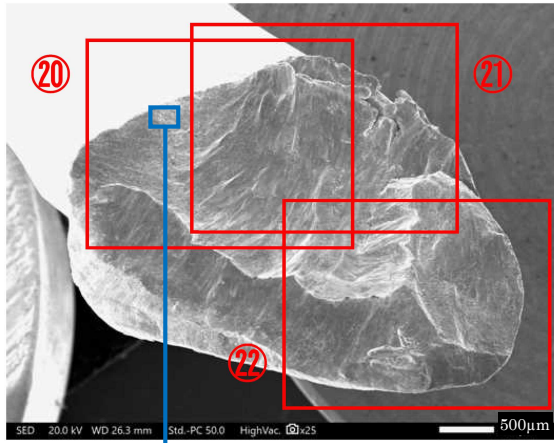
C - 2



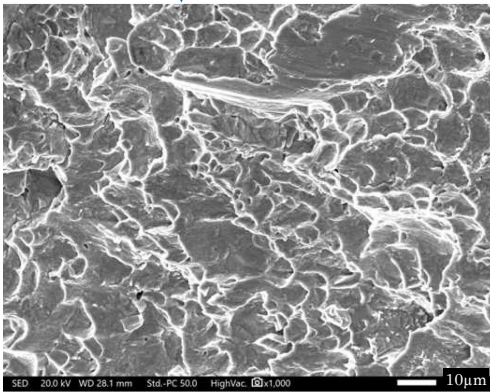
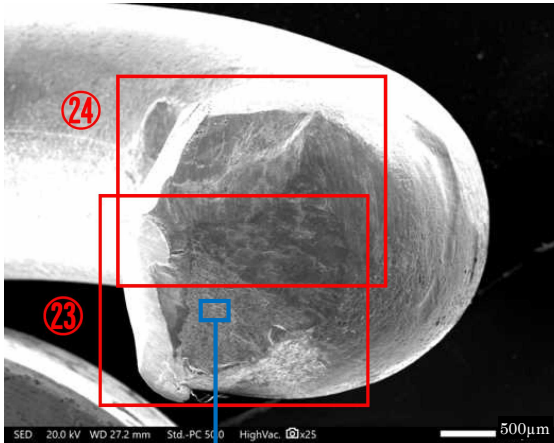
D - 1



D - 2



E - 1

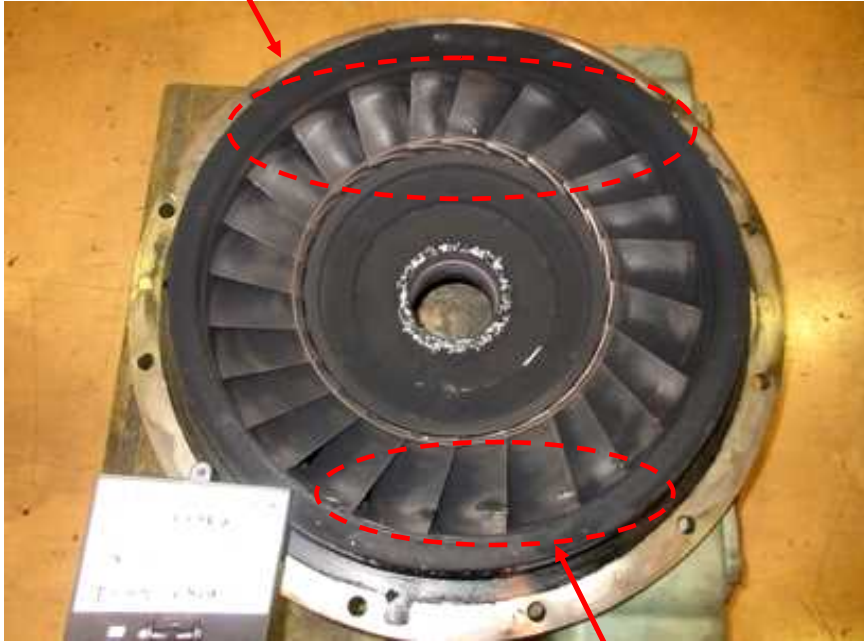


E - 2

ノズルリング

9時～2時方向の小さな接触痕

排気出口側



4時～7時方向の大きな接触痕

排気入口側



接触痕なし

R側過給機のノズルリング9時～2時方向に小さな接触痕を確認、4時～7時方向に大きな接触痕を確認

異物飛び込みの痕跡のないことを確認

タービンブレードが折損後にノズルリングとの隙間に入り込んだことによる接触痕を確認

インペラ、インデューサ



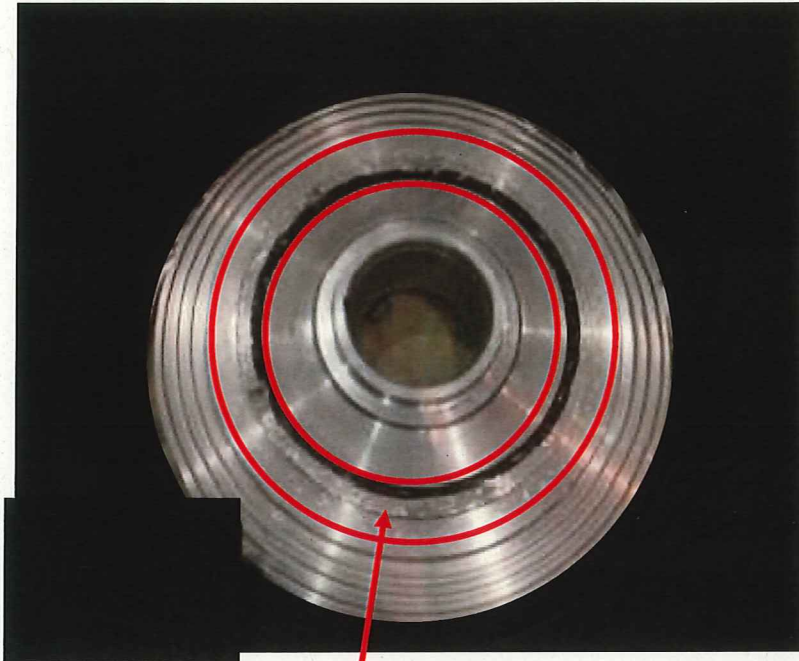
インデューサ接触痕

インペラ接触痕

R側過給機のインデューサの6時～11時方向の先端部に接触痕を確認

R側過給機のインペラの6時～11時方向の先端部に接触痕を確認

インペラ



赤線の範囲内に無数の接触痕
(回転方向：撮影方向から時計周り)

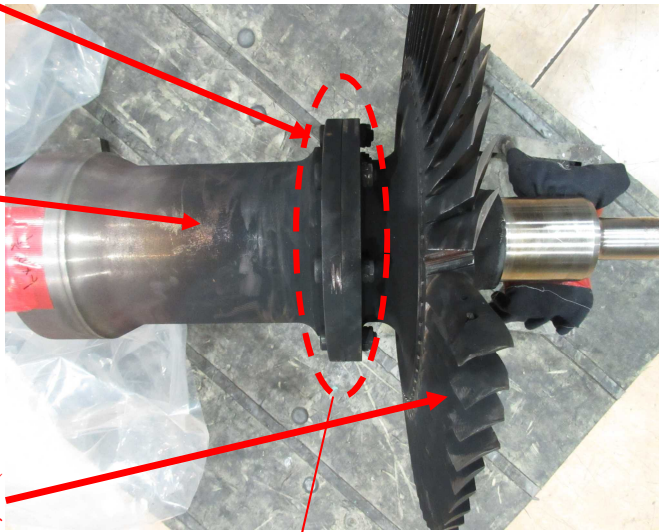
R側過給機のインペラ背面に接触痕を確認

ロータシャフトフランジ

若干の隙間

ロータ
シャフト

タービン
ブレード



拡大写真

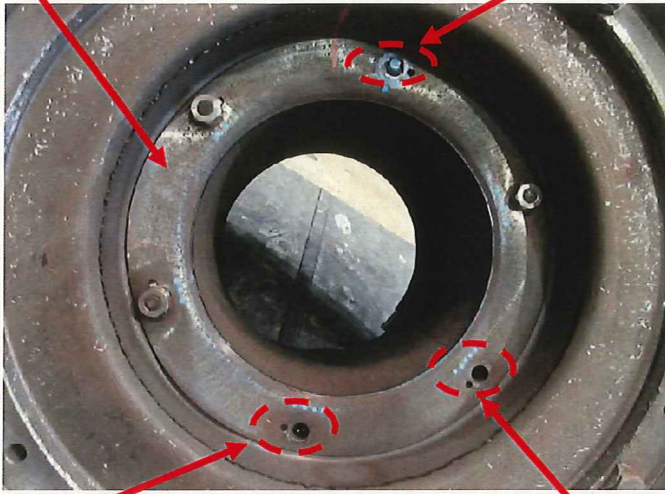


R側過給機のロータシャフトフランジの0時~6時方向に最大0.5mm程度の隙間を確認

シールプレート

シールプレート

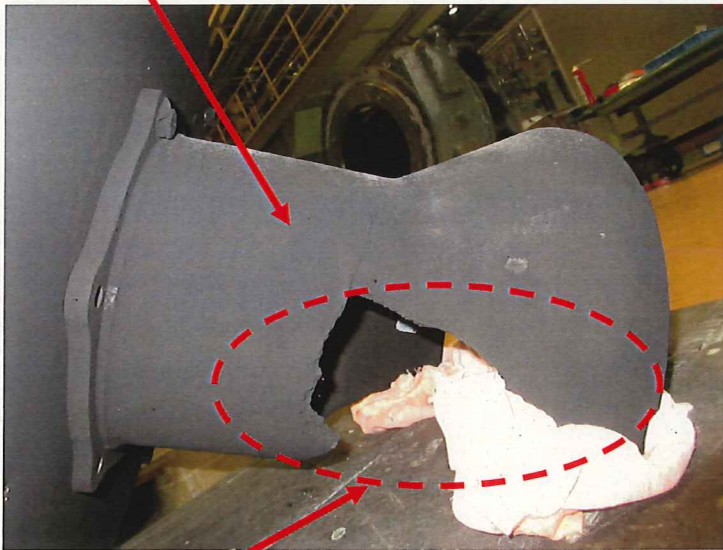
ナット脱落



ボルト・ナット脱落

ボルト・ナット脱落

シャフトシュラウド

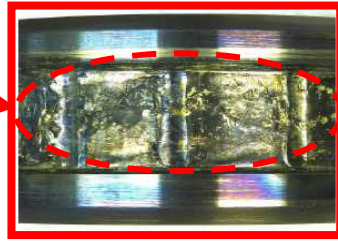


シャフトシュラウド破損箇所

R側過給機のシャフトシュラウド、シールプレート固定ボルト(■本中2本)及びナット・ワッシャ(■個中3個)が脱落し、シャフトシュラウドの破損を確認

ベアリング

圧痕及び摺動痕



内輪軌道面外観



タービン側 ころ軸受外観



保持器外観

タービン側のころ軸受の内輪軌道面の約1/3周に、ころのピッチ間隔で変形(圧痕)を確認

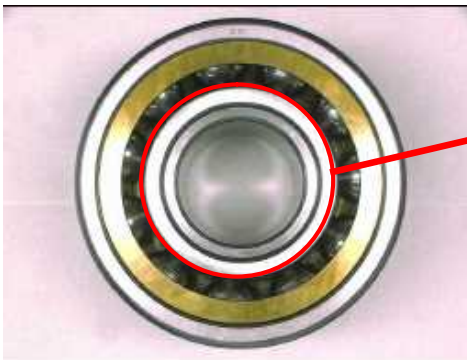
保持器ポケット柱面の約1/3周に破断、摩耗、変色を確認

潰れ

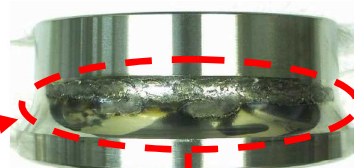


ころ転動面外観

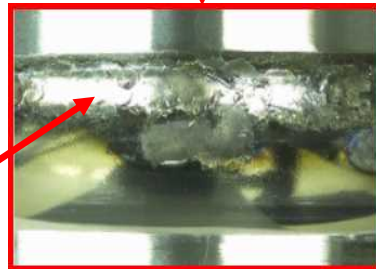
ころ転動面に摩耗、変形を確認



ブロワ側 玉軸受外観



剥離



内輪軌道面外観

ブロワ側の玉軸受の内輪軌道面の約1/3周に剥離を確認

<p>金属粉 成分分析結果</p> <p>1. 分析対象サンプル</p> <ul style="list-style-type: none">a. 1号機 D/G (B) 系 過給機 (R) 金属粉 タービンb. 1号機 D/G (B) 系 過給機 (R) 金属粉 ブロワ <p>2. 測定日</p> <ul style="list-style-type: none">・2018年9月27日 <p>3. 分析方法</p> <ul style="list-style-type: none">・SEM観察によるEDS <p>4. 分析結果 (定量結果)</p> <ul style="list-style-type: none">a. 1号機 D/G (B) 系 過給機 (R) 金属粉 タービン<ul style="list-style-type: none">Cu : 54.7%Zn : 30.5%O : 2.5%(Cは、バックグラウンドとして検出されているため記載せず) b. 1号機 D/G (B) 系 過給機 (R) 金属粉 ブロワ<ul style="list-style-type: none">Fe : 89.7%Cr : 1.5%(Cは、バックグラウンドとして検出されているため記載せず) <p>5. 定量結果から想定される設備・機器</p> <ul style="list-style-type: none">a. ベアリング保持器b. 不明 (成分から該当する設備なし)	<p>金属粉はベアリングの構成部材であることを確認</p>
---	-------------------------------

オイルポンプ分解



R側 (タービン側)



R側 (ブロワ側)

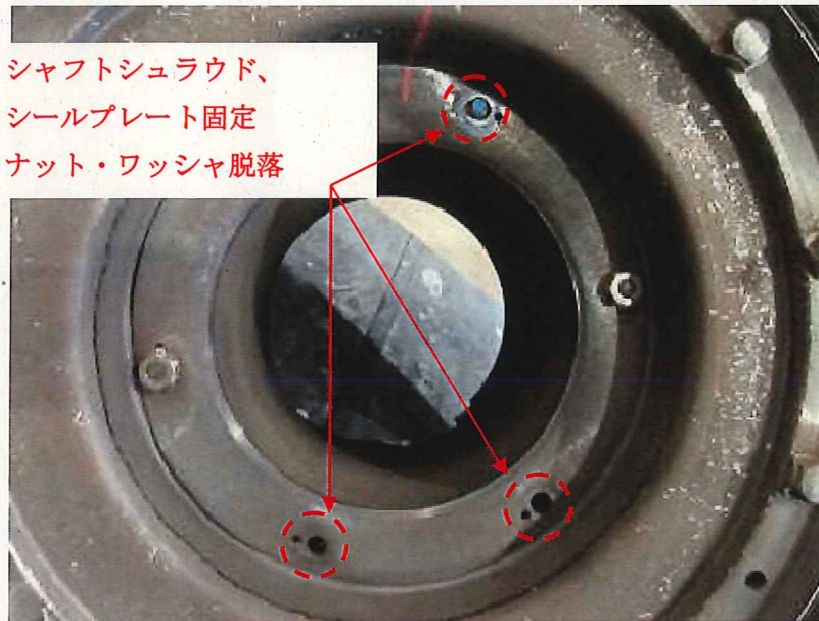


L側 (タービン側)



L側 (ブロワ側)

分解点検にて異常のないことを確認



シャフトシュラウド、シールプレート固定ボルト (■本中2本)、ナット・ワッシャ (■個中3個) の脱落を確認