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

東京電力ホールディングス株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

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）

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。

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。

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。

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６１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３０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６．６MW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

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３０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（ブロワ側、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。

（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。

（添付資料－５（１０）参照）

（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。

（添付資料－５（１１）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（１２）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（１３）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（１４）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（１５）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（１６）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（１７）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[redacted]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[redacted]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．タービンブ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ブレード側に確認されたことから、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。

（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。

（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（[redacted]本中２本）及びナット・ワッシャ（[redacted]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、ブロワ側にて鉄（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（[redacted]本中２本）、ナット・ワッシャ（[redacted]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考える。
　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考える。

（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考える。

（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考える。
　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考える。

（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したことで、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考える。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考える。

（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考える。
　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、変形したものと考える。
・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ブレードファツリー部の塑性変形により、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、タービンブ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因事象は、タービンブレードの折損（疲労破壊）であると判断したことから、タービンブ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）

タービンブ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．タービンブ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

タービンブ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、タービンブ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。

※３Ｅｌｅｃｔｒｏｎ　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

タービンブ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、タービンブ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

タービンブ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、タービンブ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

タービンブ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ブレードファツリー部、Ｌ側過給機のタービンブ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。

（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、き裂発生の起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過給機タービンブレード等の材料は、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。

（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

タービンブ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、タービンブレードへの付加荷重が発生し、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、き裂発生の起因となる可能性がある。

そのため、タービンブ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、き裂発生の起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、き裂発生の起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ブ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（１０）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、き裂発生の起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（１１）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、隣接するタービンブ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、き裂発生の起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ブ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。

（添付資料－９（１２）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。

（添付資料－９（１３）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（１４）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（１５）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（１６）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。

（添付資料－９（１７）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。

（添付資料－９（１８）参照）

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。

・一部の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
・一部の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については、弾性限度を逸脱することがないため、経時的な寸法変化が生じることはない。

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（１９）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－１１　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－１２　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－１３　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。

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。

① 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。

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。

③ 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。

④ 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。

⑤ 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。

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、最終的にタービンブレードがファツリー部より延性破壊し、折損。

（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。

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。

② 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。

③ 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。

④ 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。

⑤ 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。

⑥ 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。

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。

（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。

① 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。

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。

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。

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。

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。

（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。

① 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の確認を作業要領書に定め、実施する。

② 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

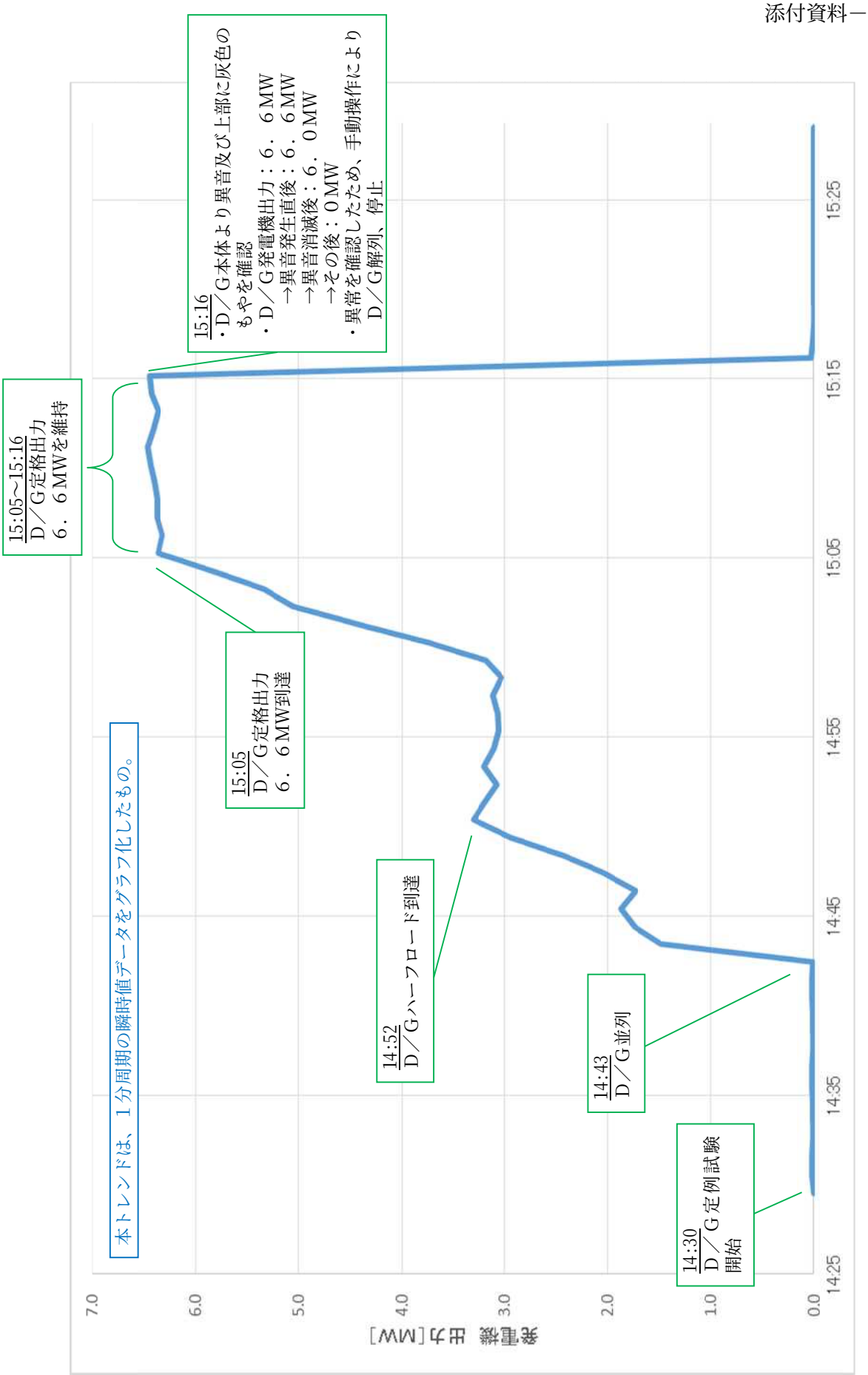
過去の過給機点検において、タービンブレードをロータシャフトから取外し、再度取付けた実績のある過給機を対象として点検を実施する。

点検の内容として、レーシングワイヤ孔高さ測定及び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。

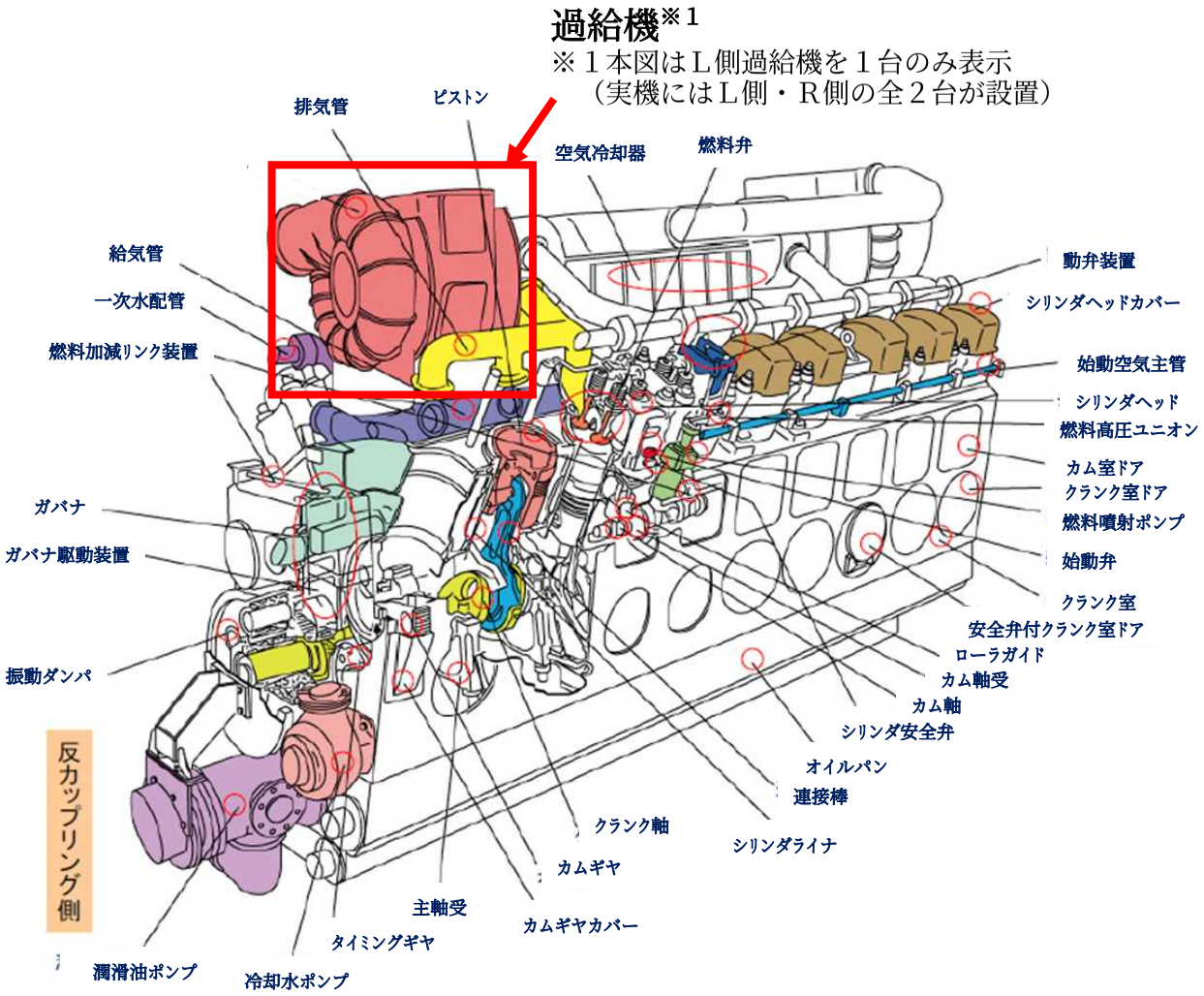
以　上

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



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	ｒｐｍ	５００
結線法	－	星形
冷却法	－	空気冷却
個　数	－	１

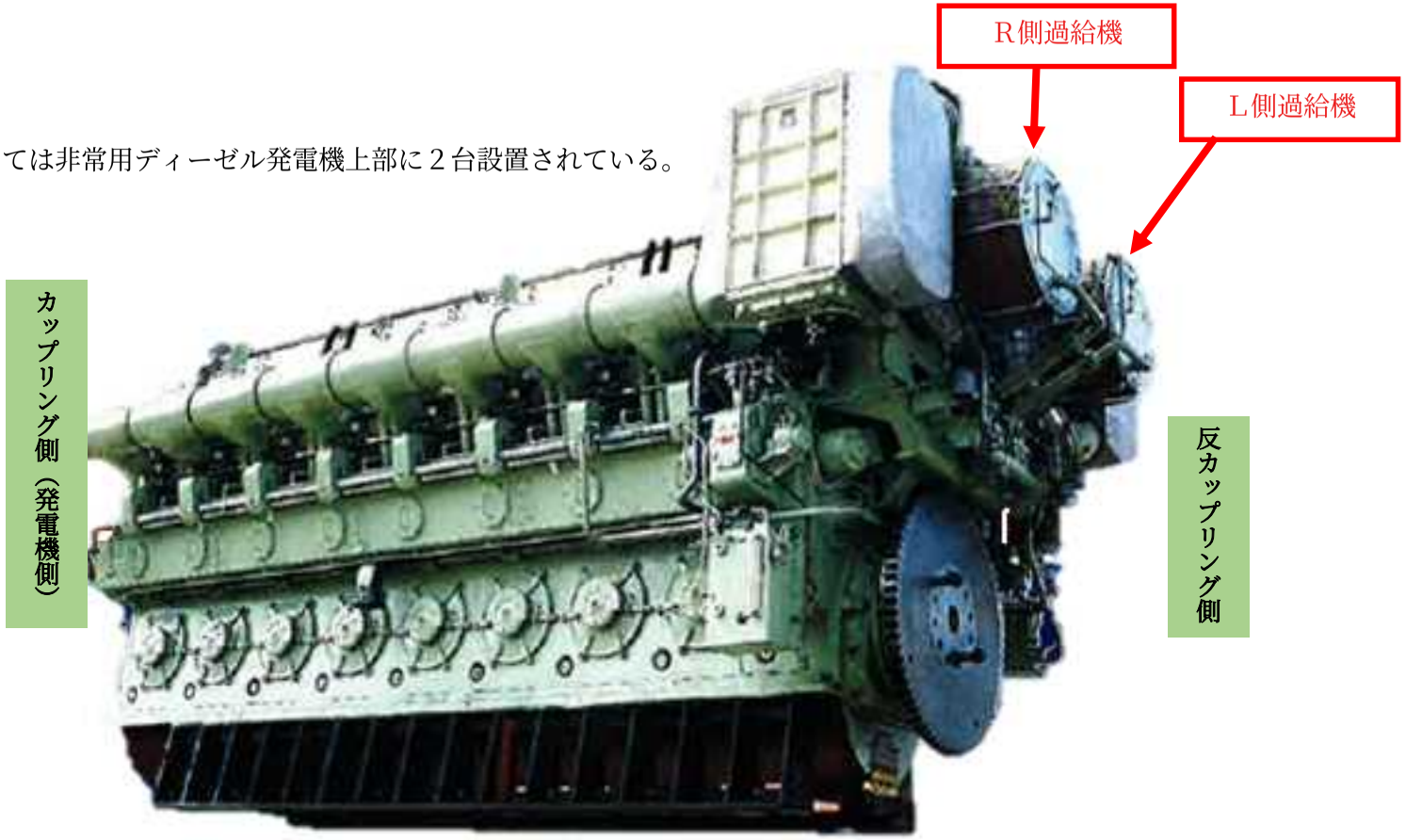
名　称		ディーゼル機関
種　類	－	４サイクルたて形 １８気筒ディーゼル機関
出　力	ＰＳ／個	９４５０
回転数	ｒｐｍ	５００
個　数	－	１

名　称	調速装置
種　類	油圧式

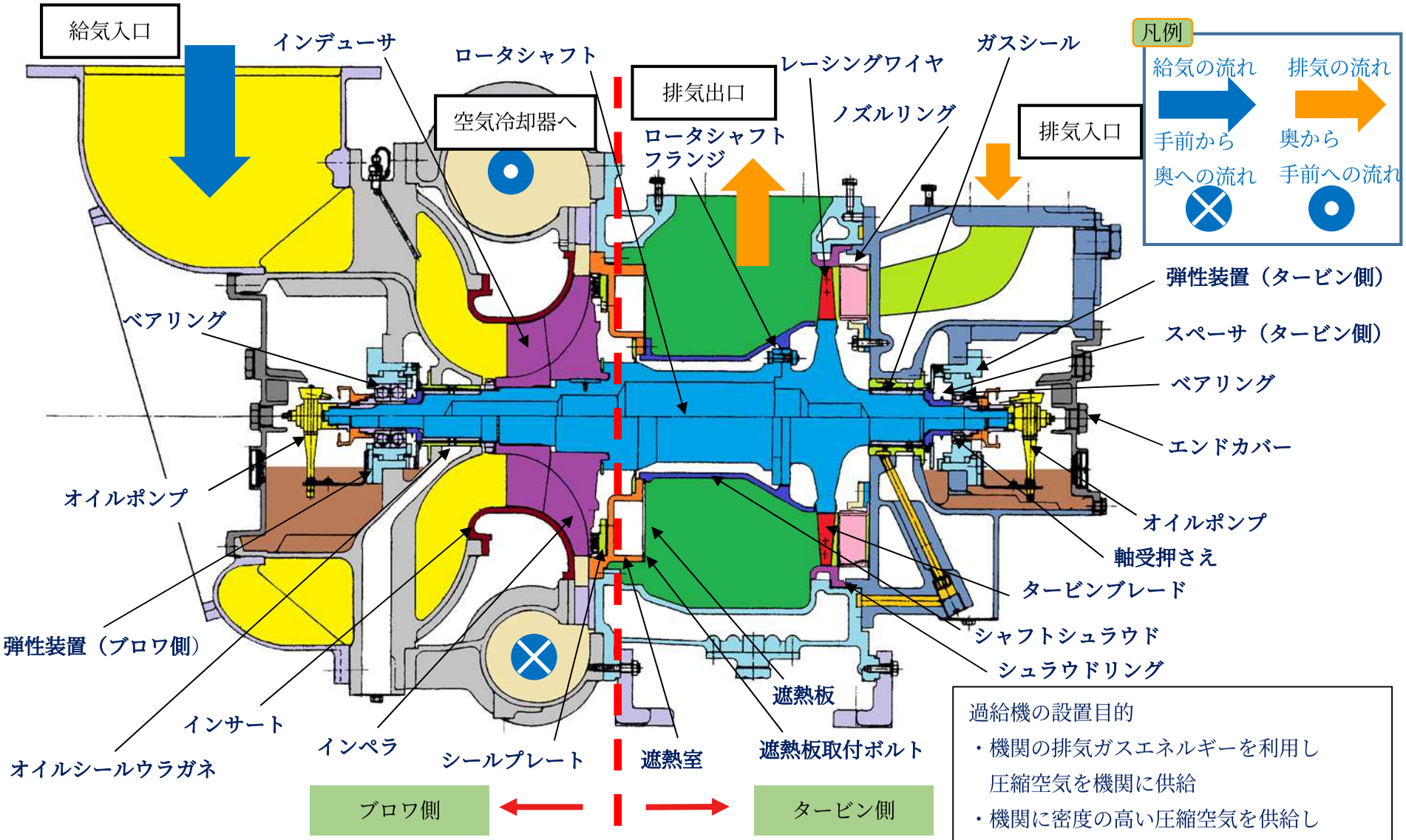
名　称		励磁装置
種　類	－	静止形自励式
容　量	ｋＷ／個	４５．１
電　圧	Ｖ	１１０
個　数	－	１

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　機関外観写真



過給機の設置目的

・機関の排気ガスエネルギーを利用し圧縮空気を機関に供給

・機関に密度の高い圧縮空気を供給しより多くの燃料を燃焼させ、機関の出力を向上させるもの

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	ｋｇ／ｃｍ^2	２．０（最大連続回転時）
回転数	ｒｐｍ	１７０００ （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	ｋｇ	約　１６５０

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 発電機出力低下	潤滑油系統異常	摺動部異常	【要因１】 摺動部抵抗大	・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】 ・ク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】 ・クーニングによる動作確認【異常なし】	×	添付資料－５ （１）
		回転部異常	【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 ・揺腕軸の抵抗大	・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】 ・ク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】 ・クーニングによる動作確認【異常なし】	×	添付資料－５ （２）
	燃焼機関系統異常	特定シリンダの 着火異常	【要因３】 燃料噴射ポンプの異常	・プランジャのスティック ・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） 【ブロワ側：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【ブロワ側：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（ブロワ側）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回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側過給機軸固着確認】【Ｌ側過給機異常なし】 ・潤滑油分析【ブロワ側、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	特定シリンダの 圧力異常	【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、スピードドループ誤設定により、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。 ・ガバナ内部に異常があった場合、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ない。 ・ガバナの異常で出力が降下した際は、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チング操作、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[redacted]メッシュにて濾したが、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	・カップリング嵌合部の緩み	・カップリング嵌合部目視点検【９月６日】	・カップリング嵌合部目視点検【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】	×	
				・発電機の基礎ボルト緩み	・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】 ・界磁回路の巻線抵抗測定【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】 ・界磁回路の巻線抵抗測定【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	－

※４Ｒ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
１１	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：[redacted]

スピードドループ値：[redacted]

（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[redacted]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　１Ｂ　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

［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ＰＴヒューズ断	計器用ＰＴ２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１Ｂ	異常なし	2018/9/6	－

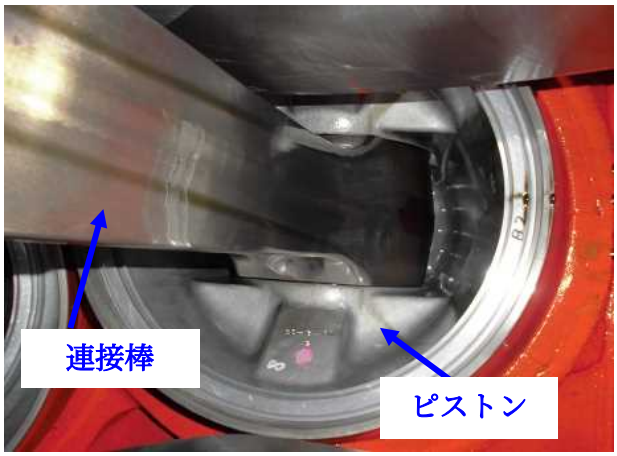
・軸受部上蓋開放確認

	点検対象	結果	点検日	備考
6	非常用ディーゼル発電機１Ｂ	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

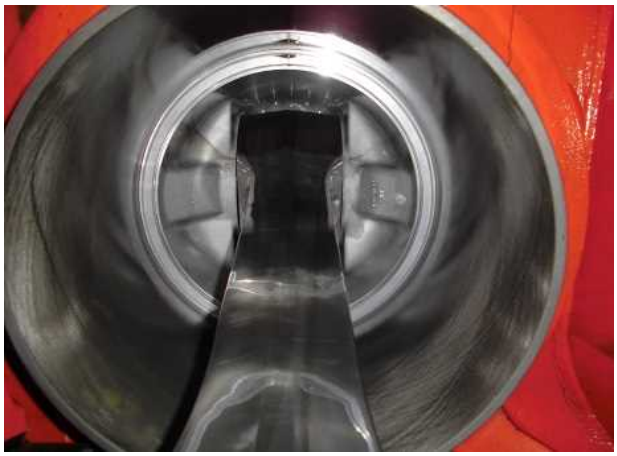
Ｎｏ．３クランクケース

Ｎｏ．４クランクケース

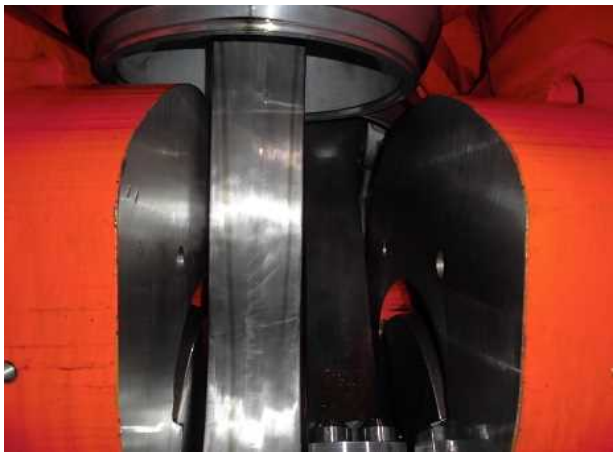
Ｎｏ．５クランクケース

Ｎｏ．６クランクケース

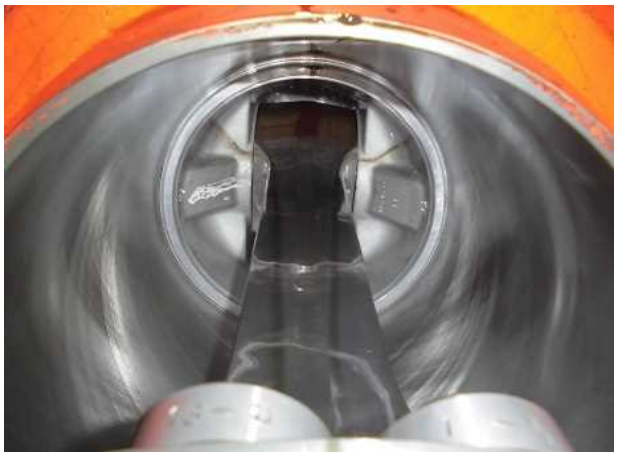
Ｎｏ．７クランクケース



Ｎｏ．８クランクケース



Ｎｏ．９クランクケース



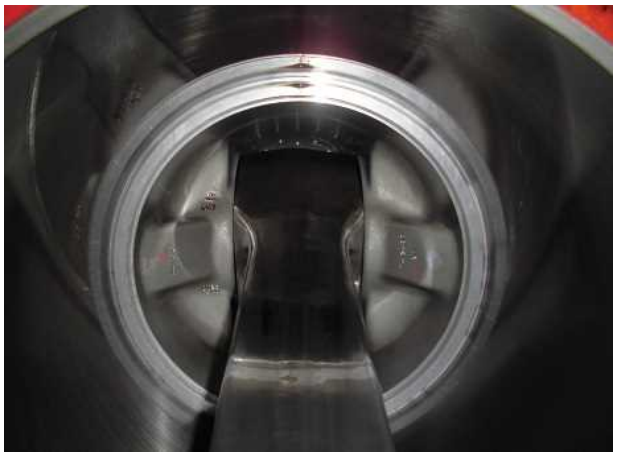
Ｎｏ．１０クランクケース

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

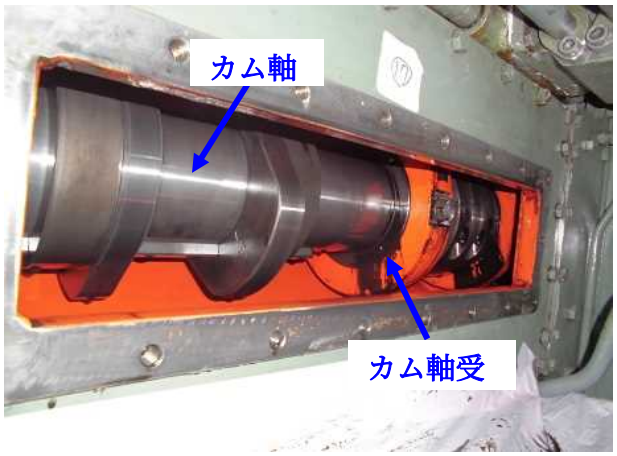


Ｎｏ．１５クランクケース

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

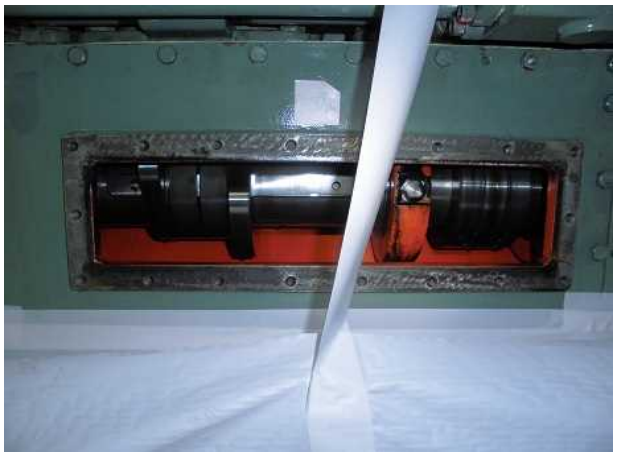
Ｎｏ．８カムケース

Ｎｏ．９カムケース

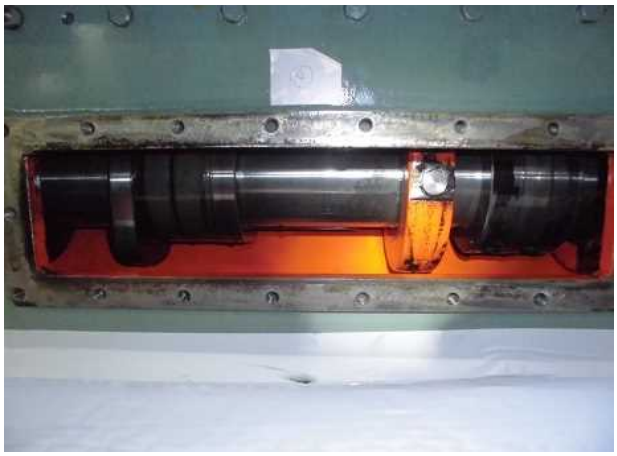
Ｎｏ．１０カムケース

Ｎｏ．１１カムケース

Ｎｏ．１２カムケース



Ｎｏ．１３カムケース



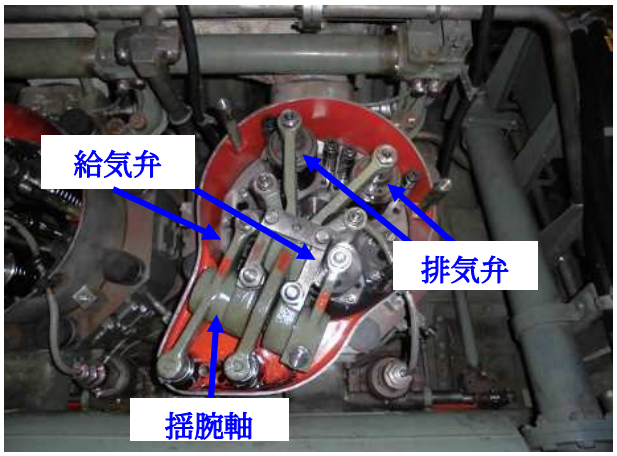
Ｎｏ．１４カムケース

Ｎｏ．１５カムケース

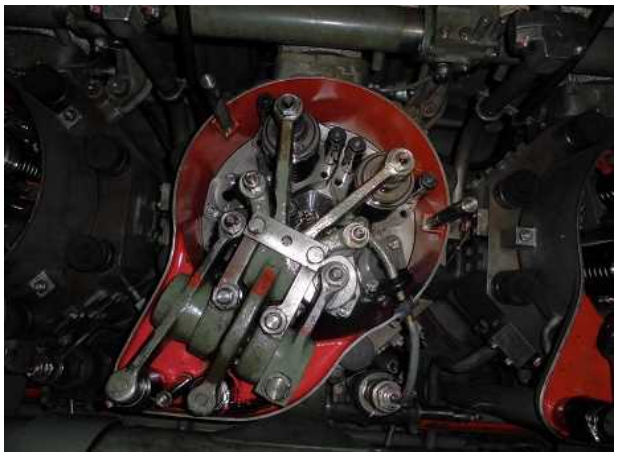
Ｎｏ．１６カムケース

Ｎｏ．１７カムケース

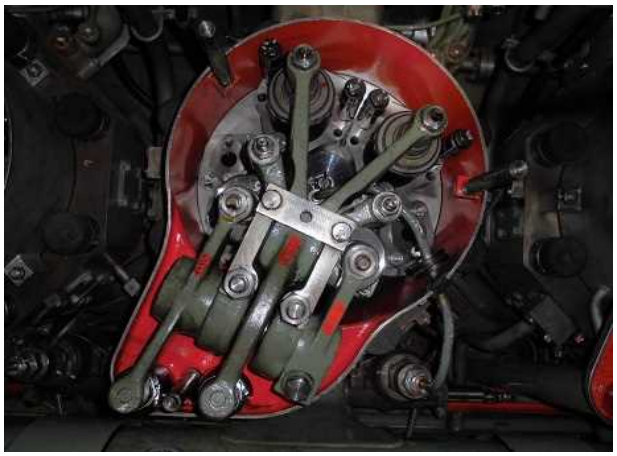
Ｎｏ．１８カムケース



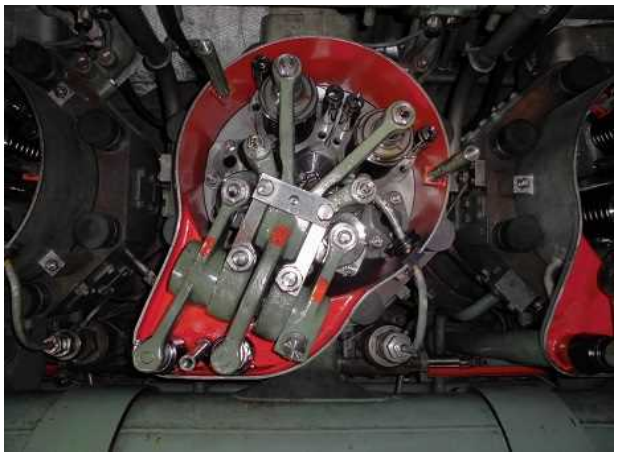
Ｎｏ．１シリンダヘッド



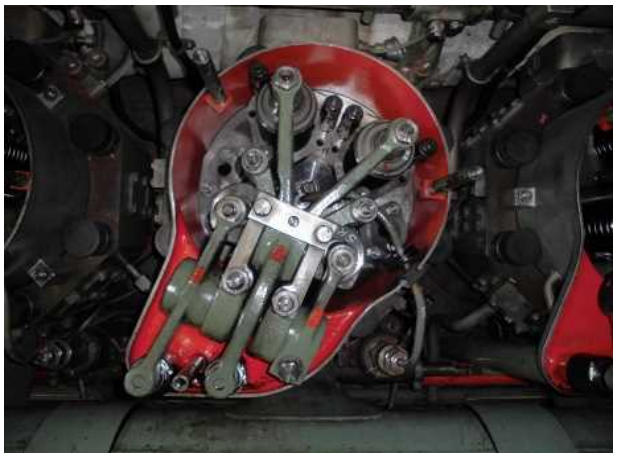
Ｎｏ．２シリンダヘッド



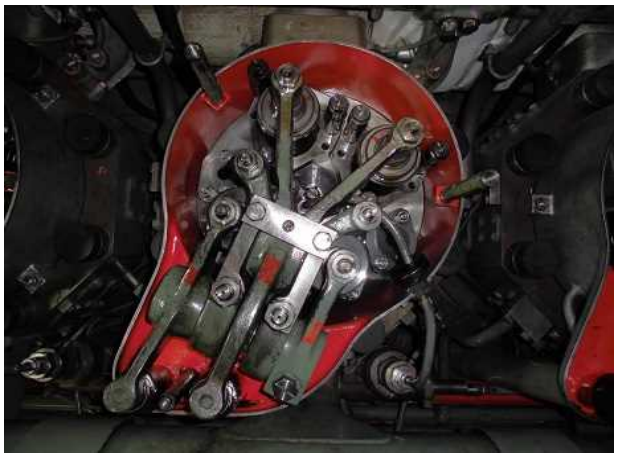
Ｎｏ．３シリンダヘッド



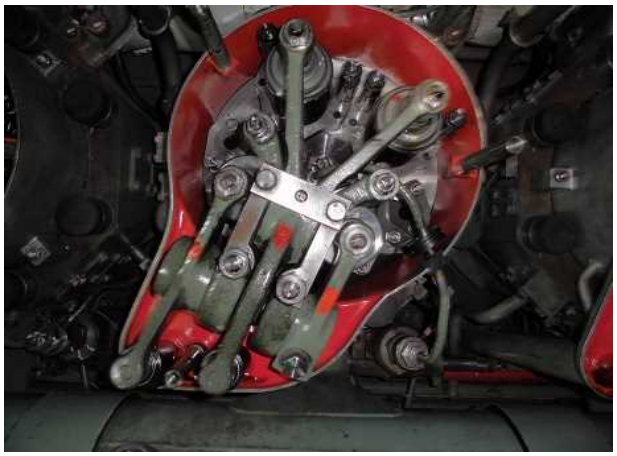
Ｎｏ．４シリンダヘッド



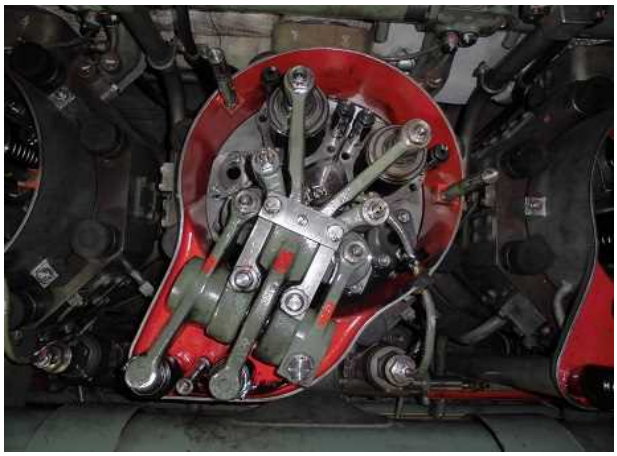
Ｎｏ．５シリンダヘッド



Ｎｏ．６シリンダヘッド



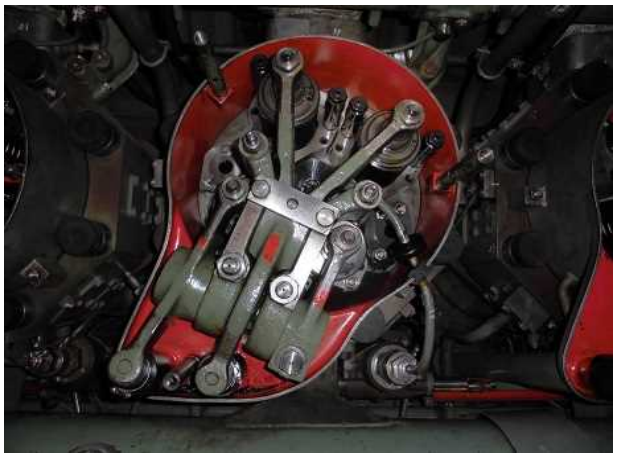
Ｎｏ．７シリンダヘッド



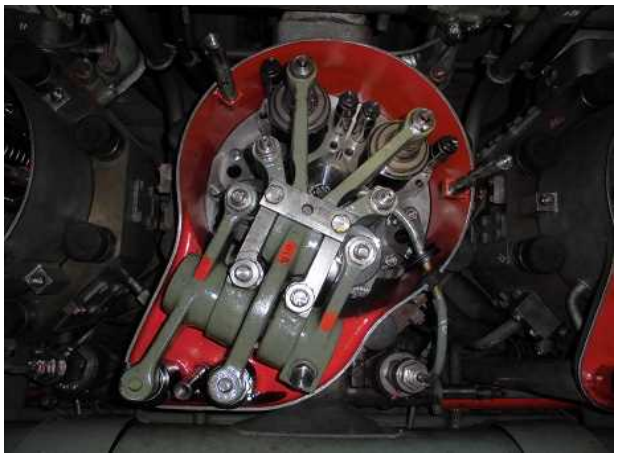
Ｎｏ．８シリンダヘッド

Ｎｏ．９シリンダヘッド

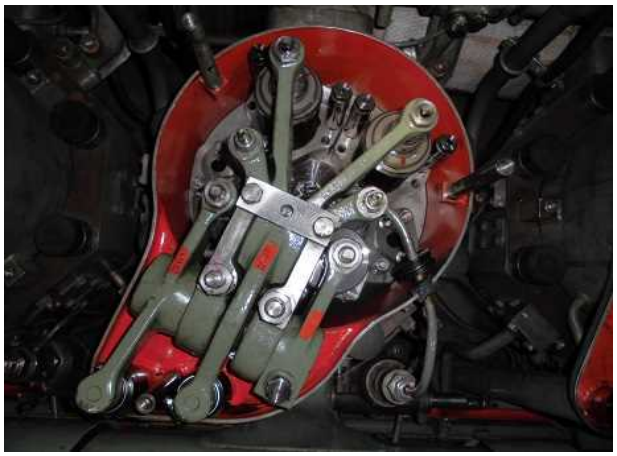
Ｎｏ．１０シリンダヘッド



Ｎｏ．１１シリンダヘッド

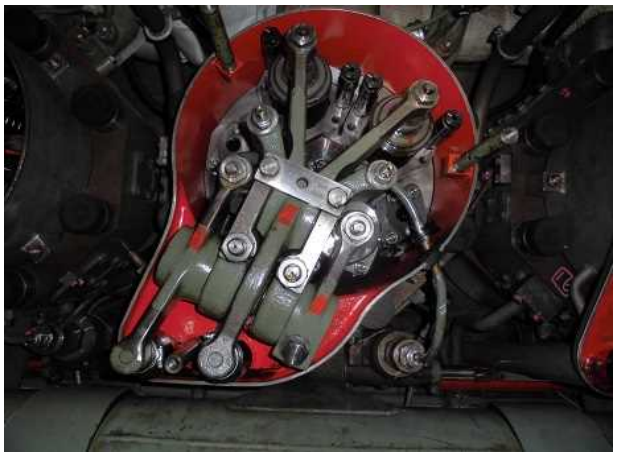


Ｎｏ．１２シリンダヘッド

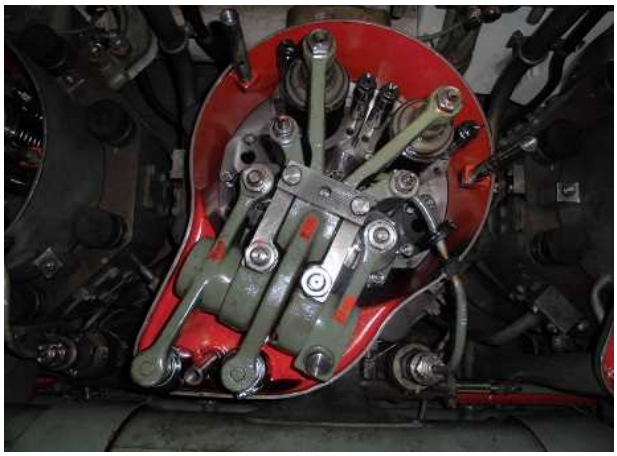


Ｎｏ．１３シリンダヘッド

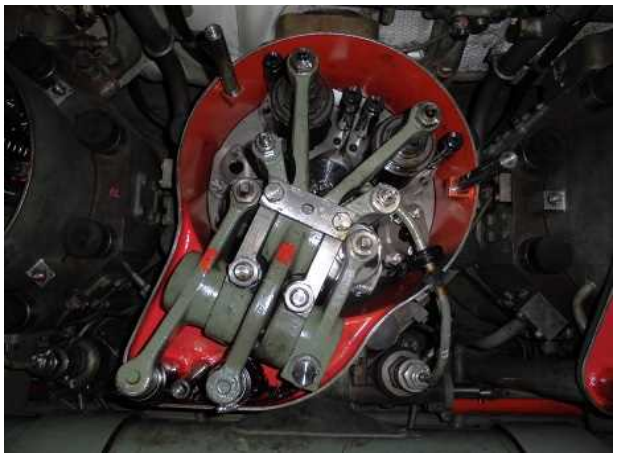
Ｎｏ．１４シリンダヘッド



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

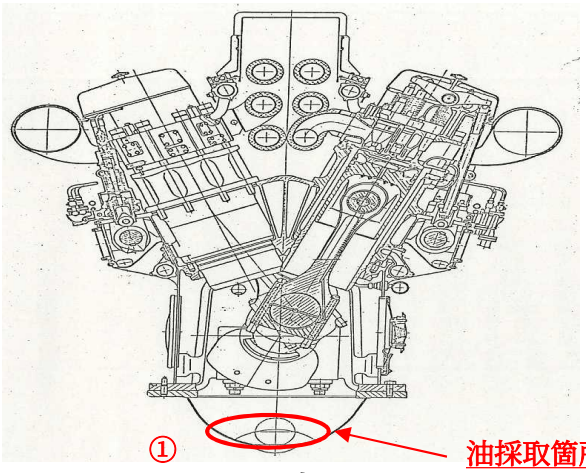
潤滑油分析　点検結果

１．分析対象サンプル
①１号機　Ｄ／Ｇ（Ｂ）系　機関（Ｂ）潤滑油
②１号機　Ｄ／Ｇ（Ｂ）系　機関付動弁注油タンク（Ｂ）潤滑油
③１号機　Ｄ／Ｇ（Ｂ）系　Ｒ側過給機（ブロワ側）潤滑油
④１号機　Ｄ／Ｇ（Ｂ）系　Ｌ側過給機（ブロワ側）潤滑油
⑤１号機　Ｄ／Ｇ（Ｂ）系　Ｒ側過給機（タービン側）潤滑油
⑥１号機　Ｄ／Ｇ（Ｂ）系　Ｌ側過給機（タービン側）潤滑油

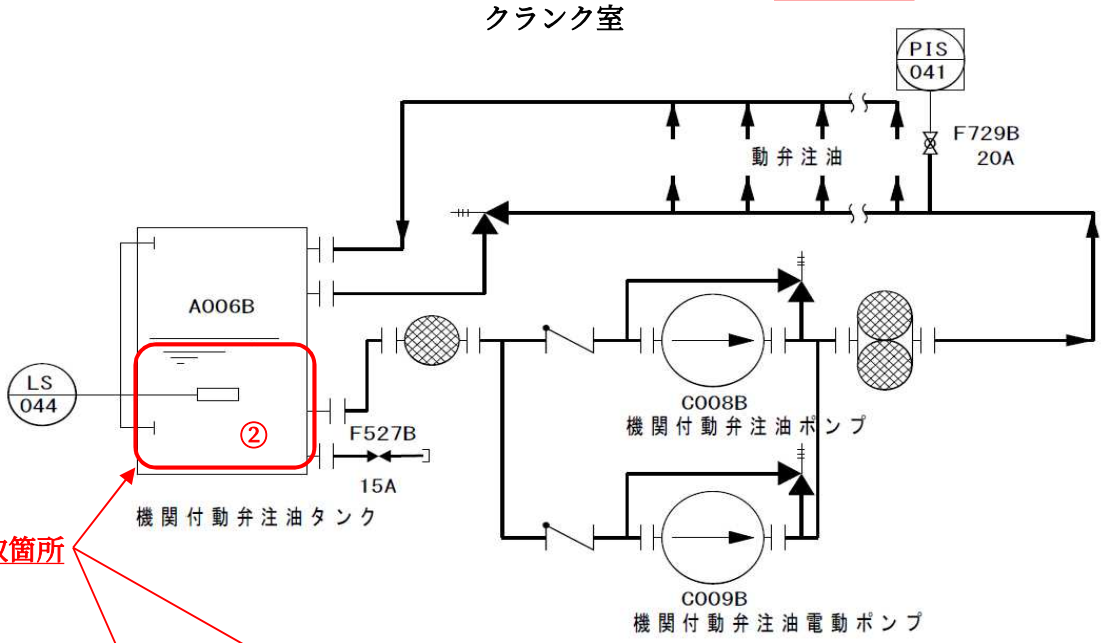
２．試料採取日
・２０１８年９月４日、５日、７日

３．試験項目　　管理基準値
・引火点　[redacted]℃以上
・動粘度　[redacted]mm2/s
・水分（蒸留法）　[redacted]％以下
・微粒きょう雑物（質量法）　[redacted]
・塩基価（過塩素酸法）　[redacted]mgKOH/g以上
・ペンタン不溶分　[redacted]％以下
・トルエン不溶分　[redacted]

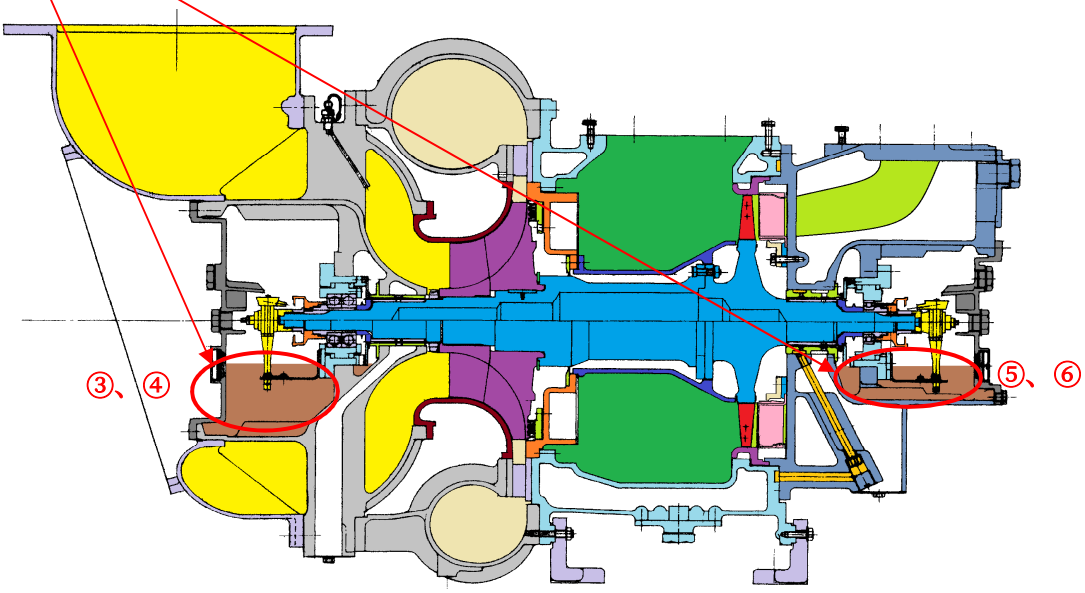
４．分析結果（結果受領日：９月１８日、２７日）
・全て異常なし（継続使用可能であることを確認）



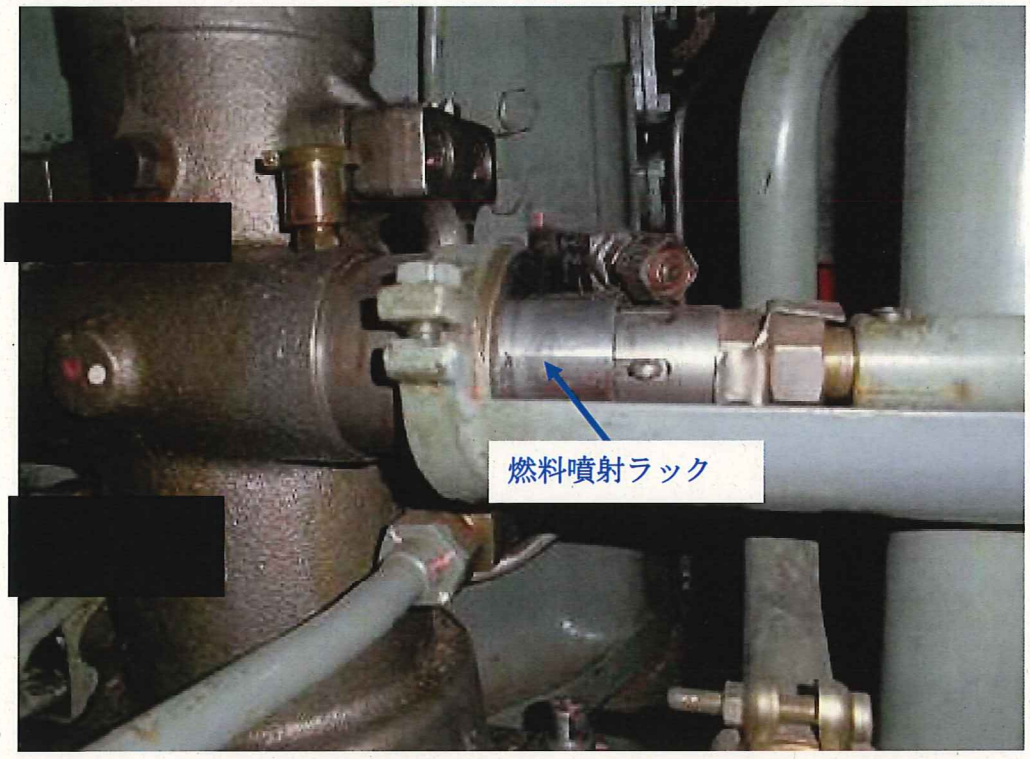
クランク室



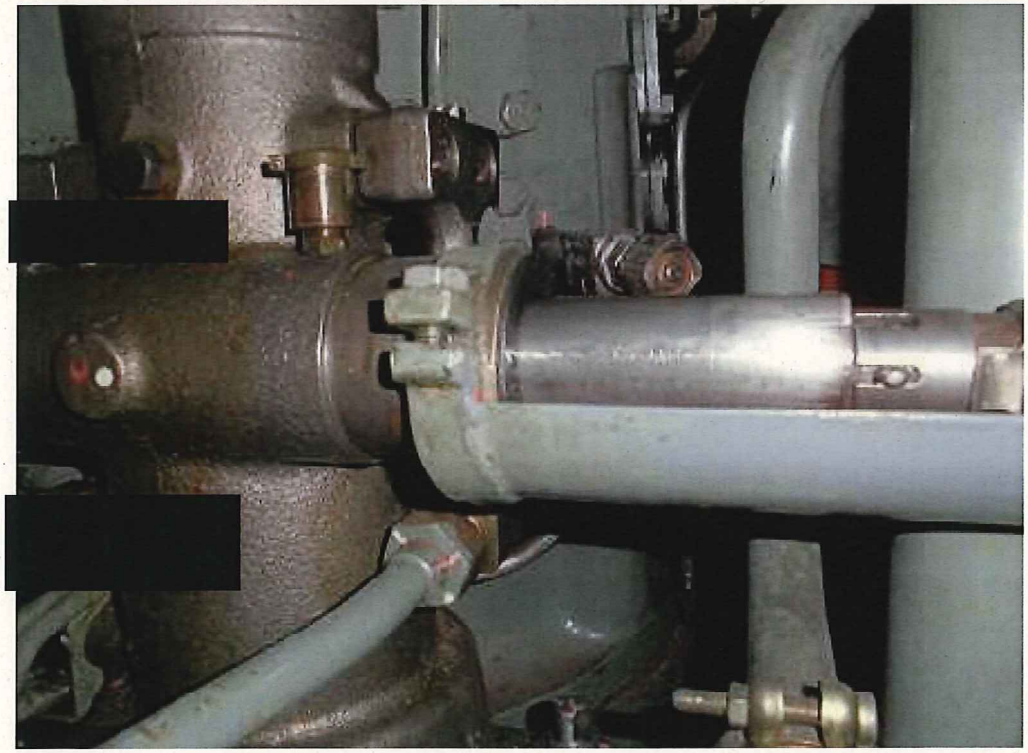
油採取箇所



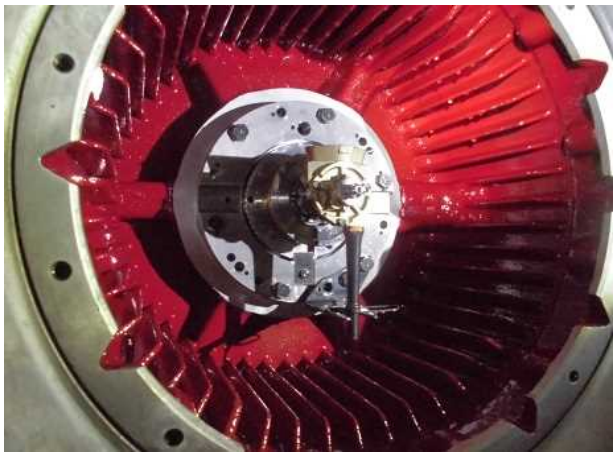
過給機



燃料噴射ラック（減方向）



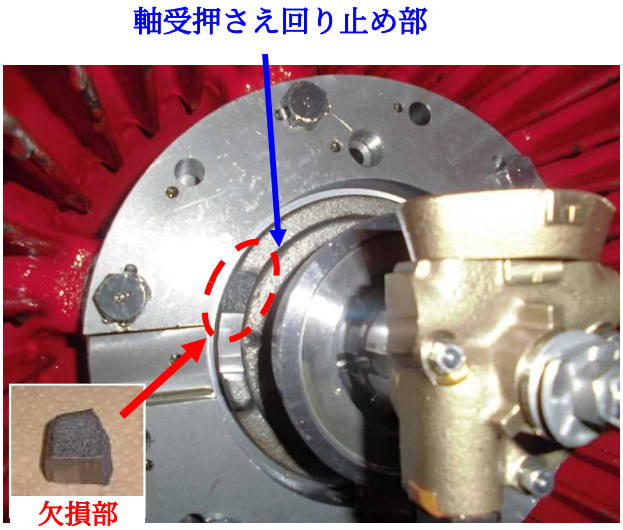
燃料噴射ラック（増方向）



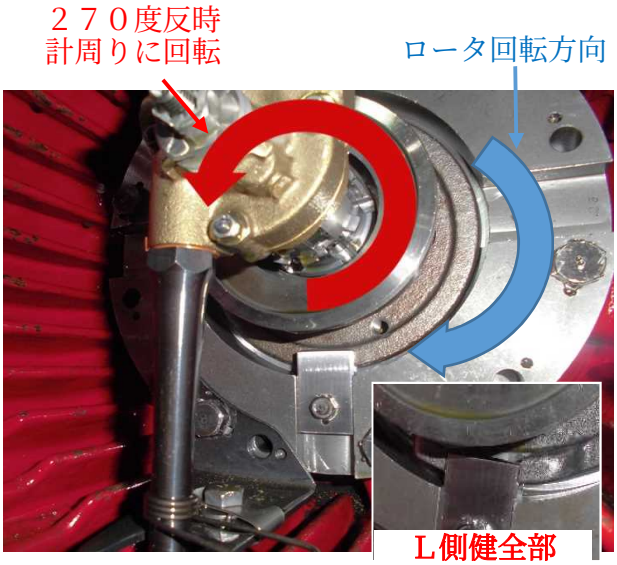
Ｒ側過給機（ブロワ側）

Ｌ側過給機（ブロワ側）

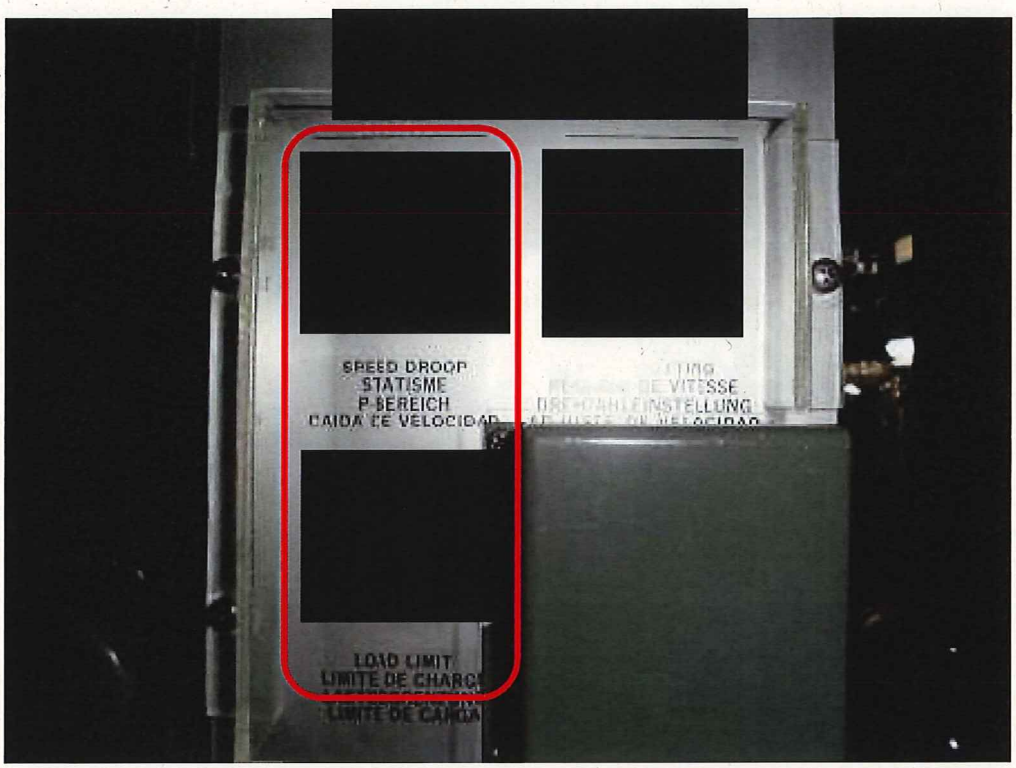
Ｌ側過給機（タービン側）



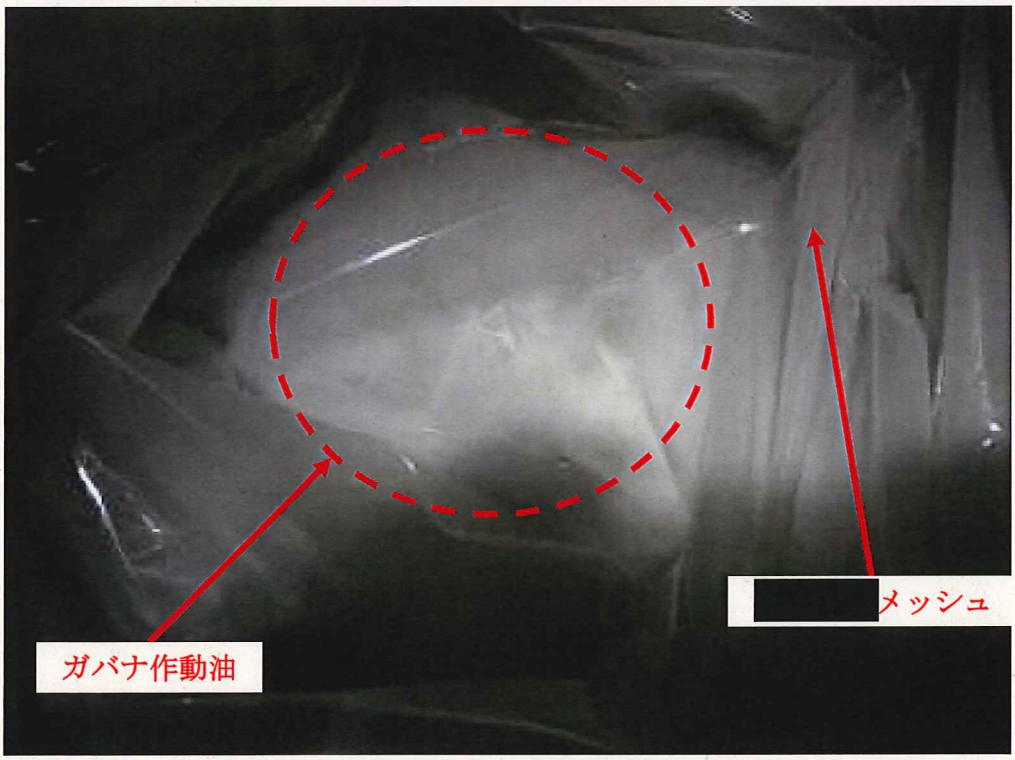
Ｒ側過給機（タービン側）



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

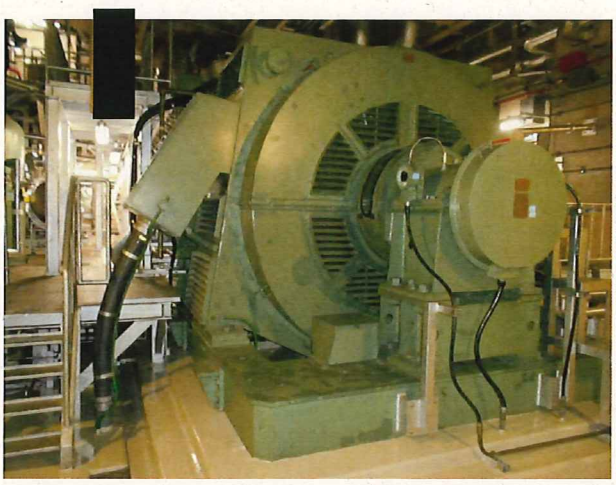
メタルポストベースボルト②

発電機本体基礎ボルト①

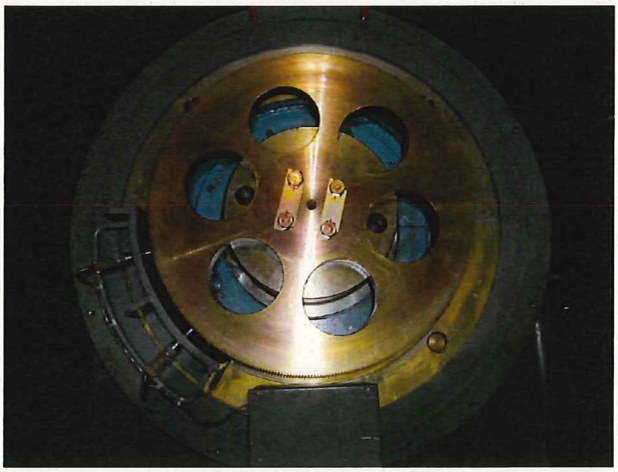
発電機本体基礎ボルト②

発電機本体基礎ボルト③

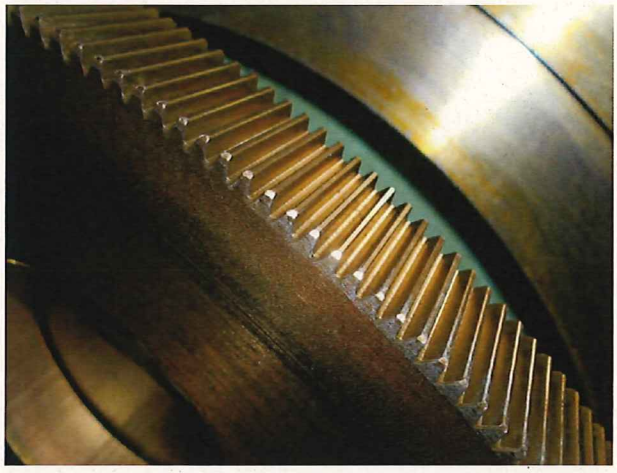
発電機本体基礎ボルト④



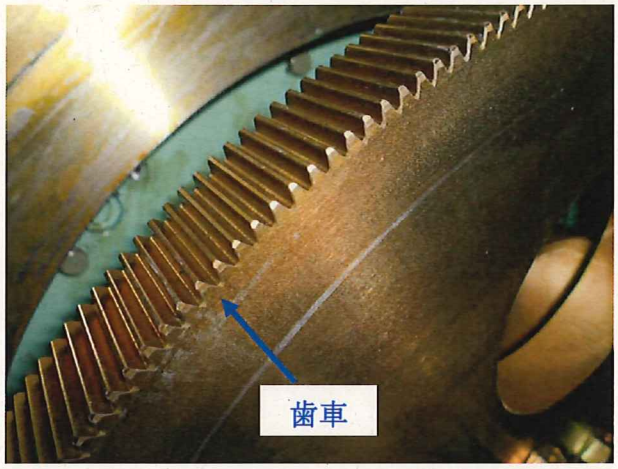
発電機全体外観



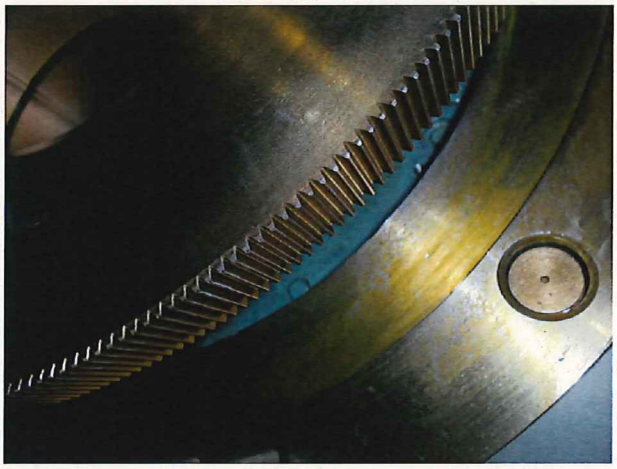
速度検出器歯車外観



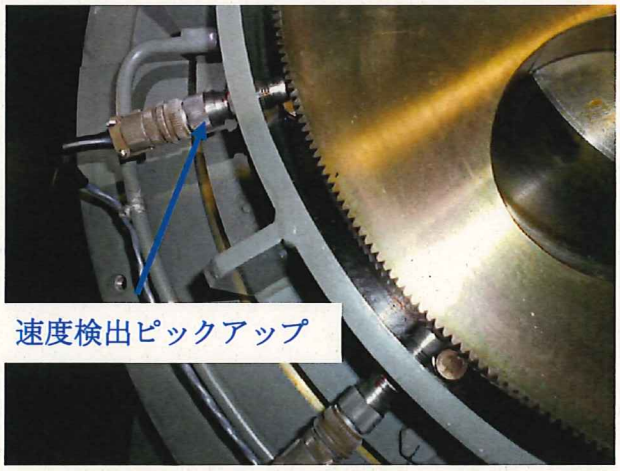
速度検出器歯車　一部拡大①



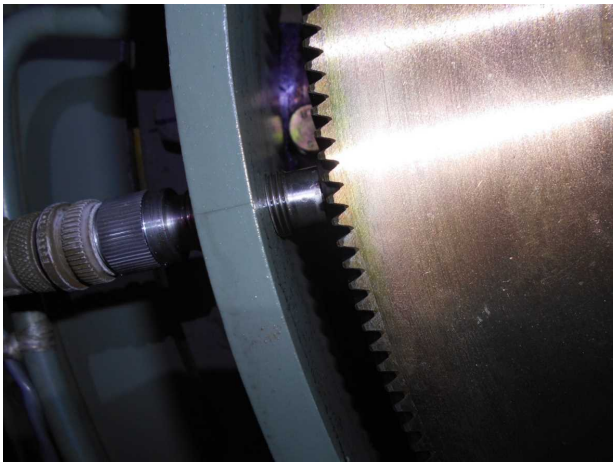
速度検出器歯車　一部拡大②



速度検出器歯車　一部拡大③

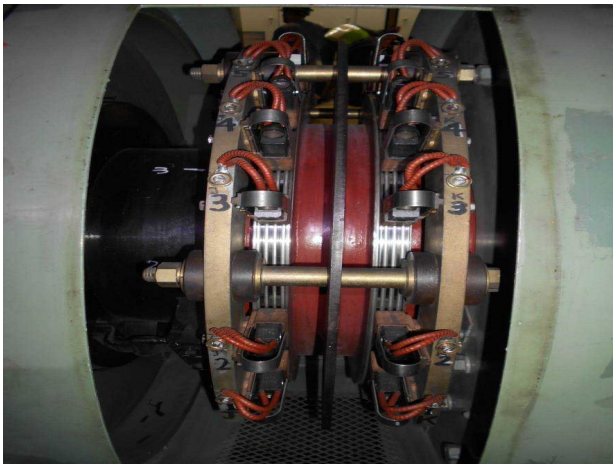


速度検出器ピックアップ外観

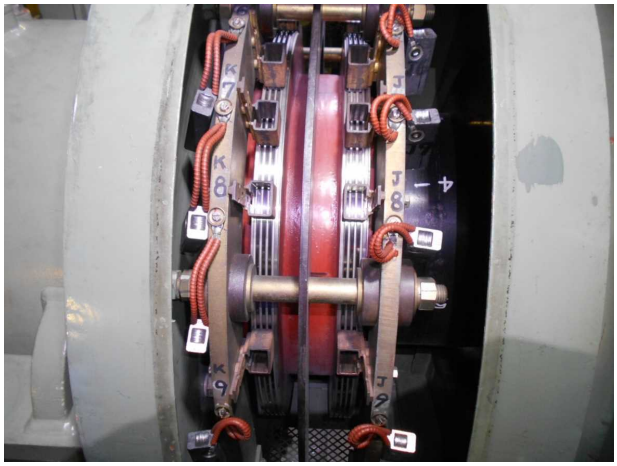


速度検出器ピックアップ　拡大（常用）

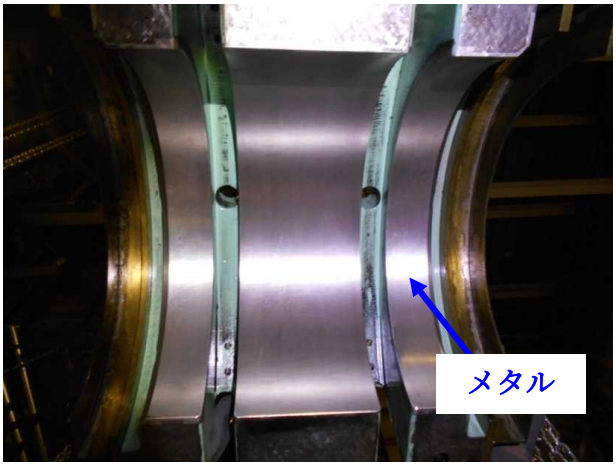
速度検出器ピックアップ　拡大（予備）



ブラシホルダー①



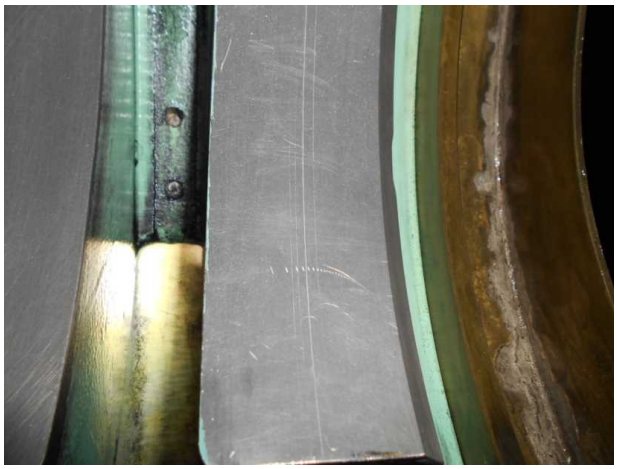
ブラシホルダー②



反機関側上半メタル（全体）

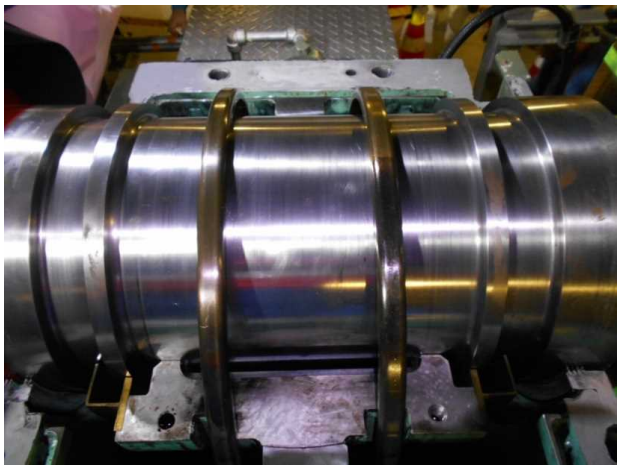
反機関側上半メタル（拡大①）

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	タービンブレードとシュラウドとの接触	【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	・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枚のファツリー部が折損及び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	・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	・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	・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	・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	・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	・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（[redacted]本中２本）及びナット・ワッシャ（[redacted]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　ベアリングころ転動面に摩耗、変形を確認 ・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	×	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	・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	・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（[redacted]本中２本）及びナット・ワッシャ（[redacted]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。

（１）点検内容及び判定基準

・目視点検を実施し、タービンブ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ブレード	異常あり※1	2018/10/17	別紙－１
2	Ｌ側過給機のタービンブレード	異常あり※2	2018/10/15	別紙－１

※１Ｒ側過給機

・Ｒ側過給機のタービンブレード１枚（Ｎｏ．１）において、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

※２Ｌ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

全てのタービンブ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

・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、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	－

※３Ｒ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

※４Ｒ側過給機の内周側レーシングワイヤ[redacted]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	－

※５Ｒ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

※６Ｒ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。

（１）点検内容及び判定基準

・目視点検を実施し、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	－

タービンブレード目視点検については、【要因１】タービンブ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	－

※８Ｒ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

※９Ｒ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

Ｒ側過給機軸固着に関す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※１１	2018/10/16	－
２	Ｌ側過給機のロータシャフト	異常なし	2018/10/15	－

※１１Ｒ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※１２	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	－

※１２Ｒ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

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	－

※１３Ｒ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（[redacted]本中２本）及びナット・ワッシャ（[redacted]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

※１４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

※１５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[redacted]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

※１７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１２】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

※１８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

※１９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。

※２０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

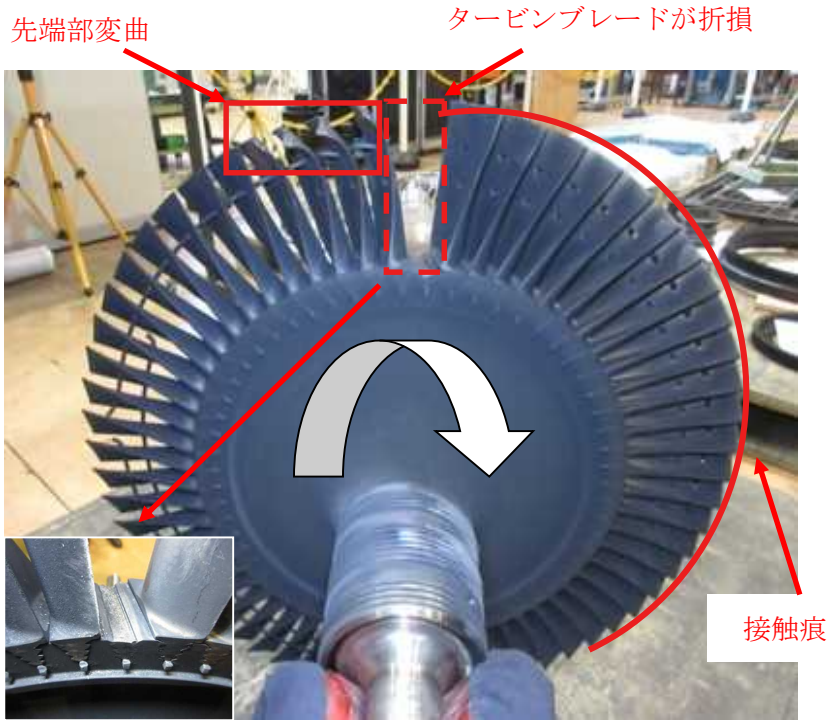
・固定ボルト等の目視点検を実施し、緩みがないこと

（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	－

※２１Ｒ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（[redacted]本中２本）、ナット・ワッシャ（[redacted]個中３個）の脱落を確認。

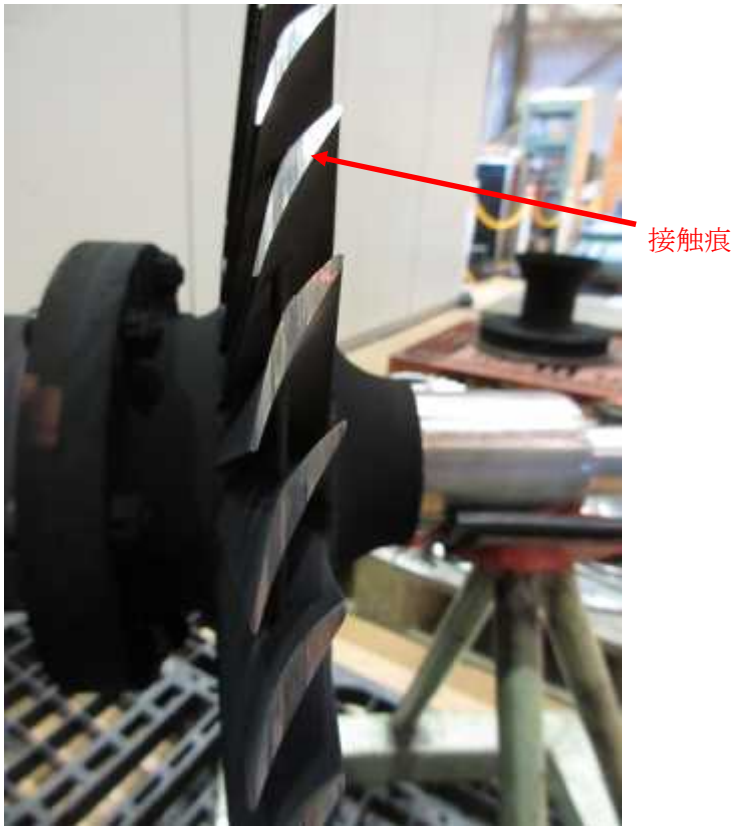


Ｒ側過給機のタービンブレード全体写真

Ｒ側過給機のタービンブレード１枚（Ｎｏ．１）において、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

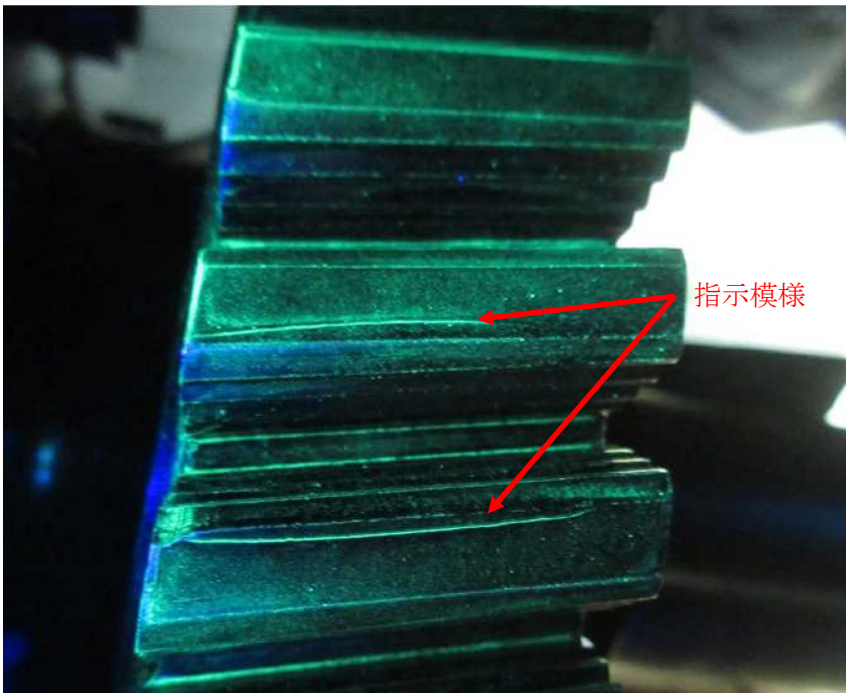


Ｌ側過給機のタービンブレード

Ｌ側過給機の全てのタービンブレードの先端部に接触痕を確認

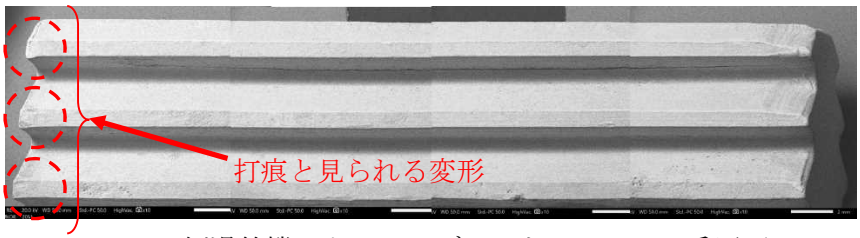
Ｌ側過給機のタービンブレード
浸透探傷検査指示模様

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ー部背面側の第二くびれ部の谷部にき裂を確認



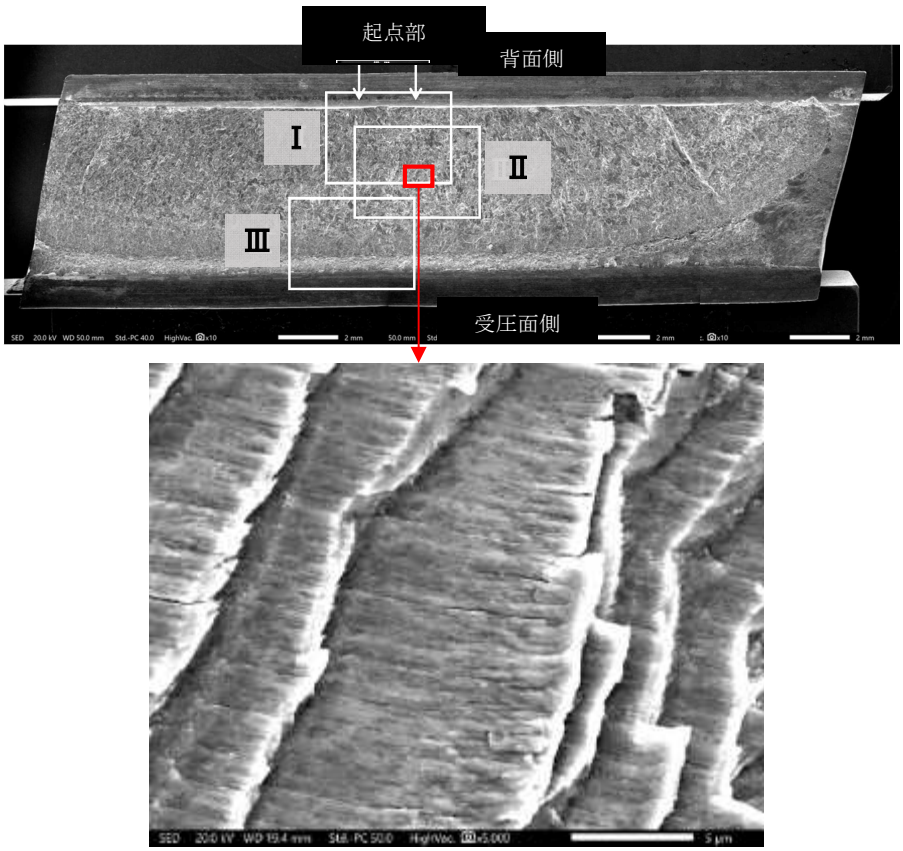
Ｌ側過給機のロータシャフトファツリー部
（磁粉探傷検査）

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ー部の谷部に、指示模様（磁粉探傷検査）を確認



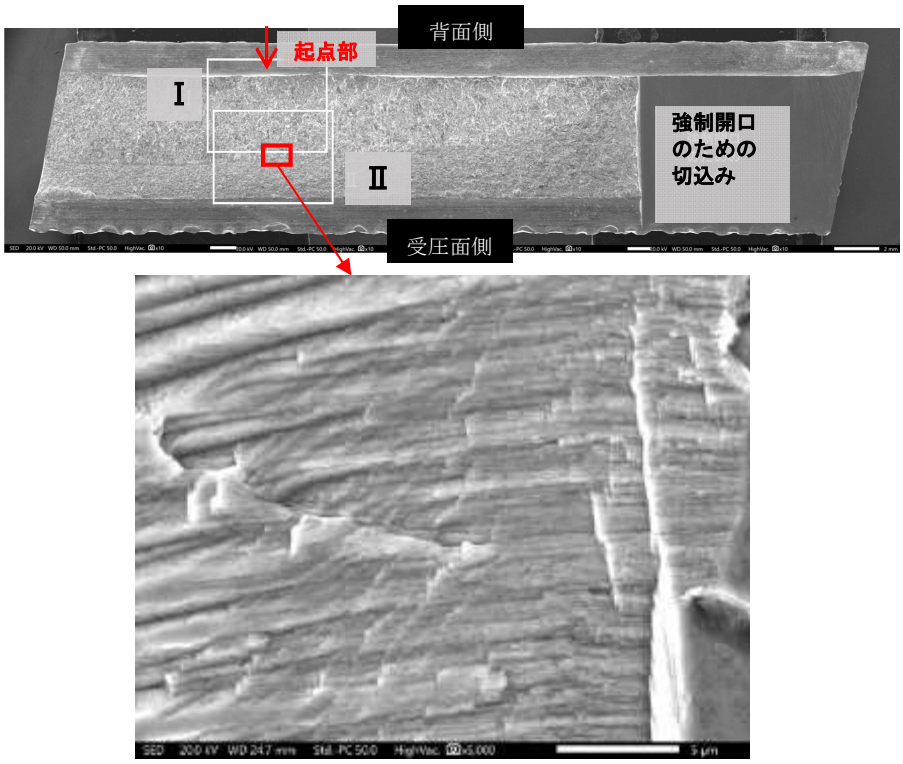
Ｌ側過給機のタービンブレードＮｏ．２５受圧面

ロータファツリー部片側の側面部に打痕と見られる変形を確認



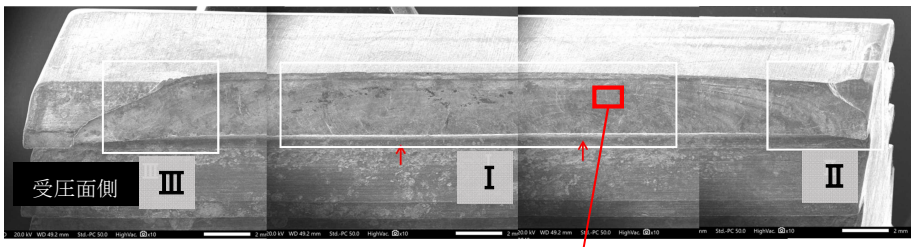
Ｒ側過給機のタービンブレード破面のストライエーション模様

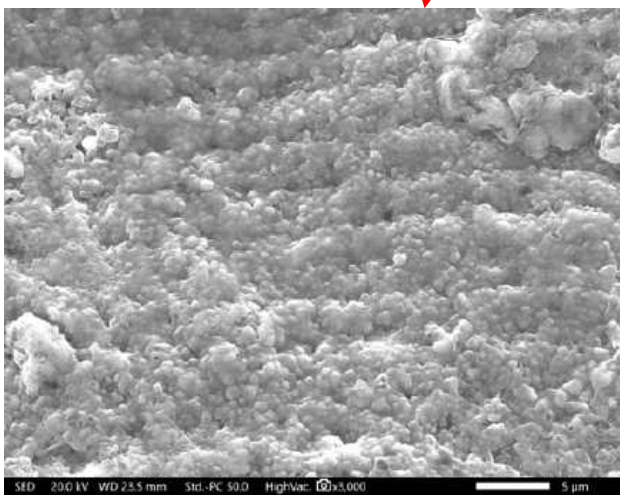
折損が確認されたＲ側過給機のタービンブレードの破面をＳＥＭ観察した結果、疲労破壊を示す縞模様（ストライエーション模様）を確認



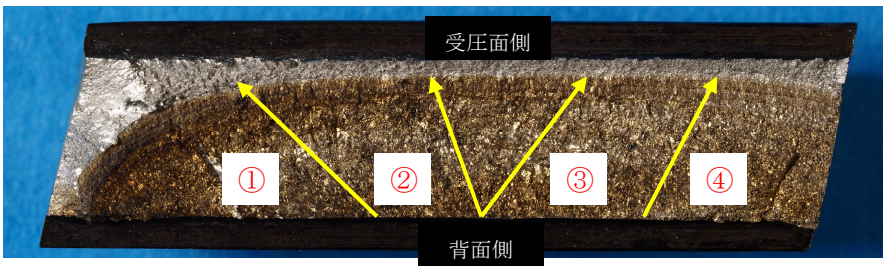
Ｌ側過給機のタービンブレード破面のストライエーション模様

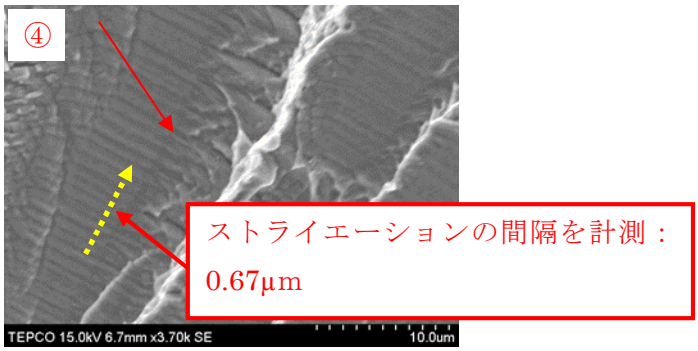
き裂が確認されたＬ側過給機のタービンブレードのき裂箇所を強制切断し、ＳＥＭ観察した結果、疲労破壊を示す縞模様（ストライエーション模様）を確認





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



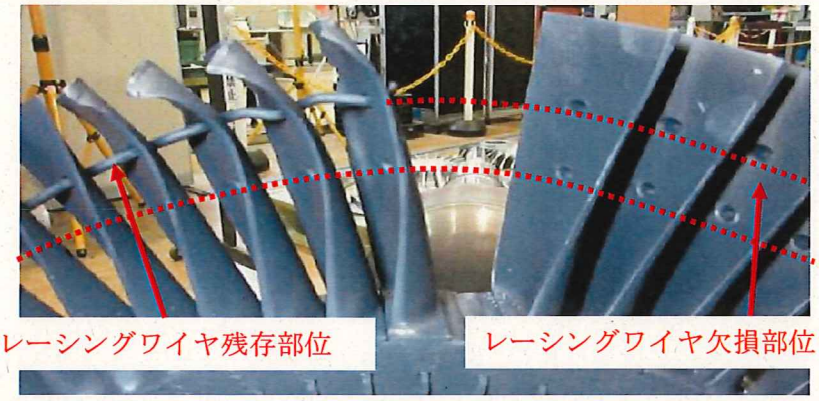


Ｒ側過給機のタービンブレード No. １破面のストライエーション模様

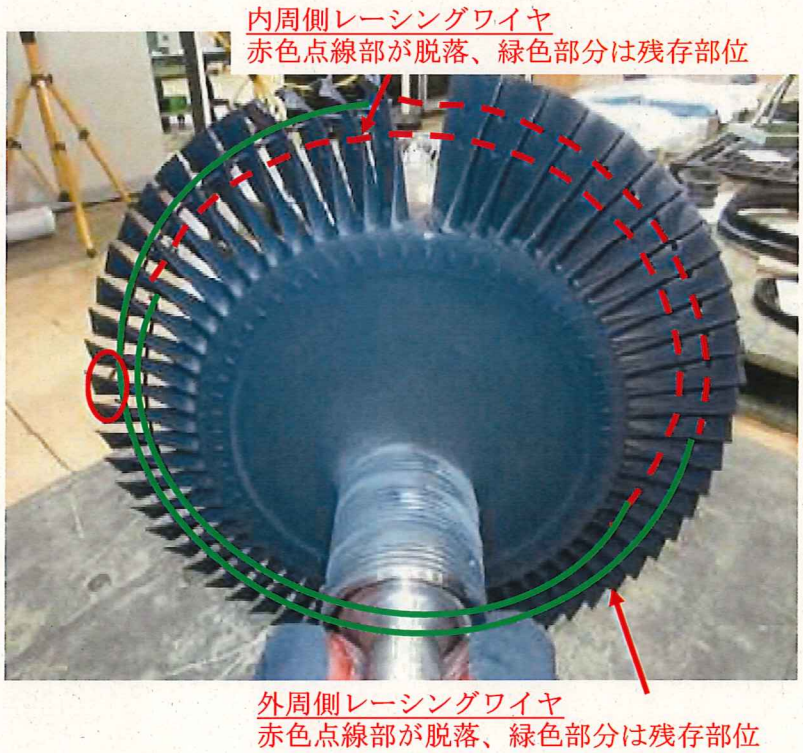
	①	②	③	④
き裂長さ（mm）	8.2	6.7	7.7	6.7
ストライエーション間隔（μm）	0.70	0.81	0.87	0.67
サイクル数	11000	8200	8800	10000

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

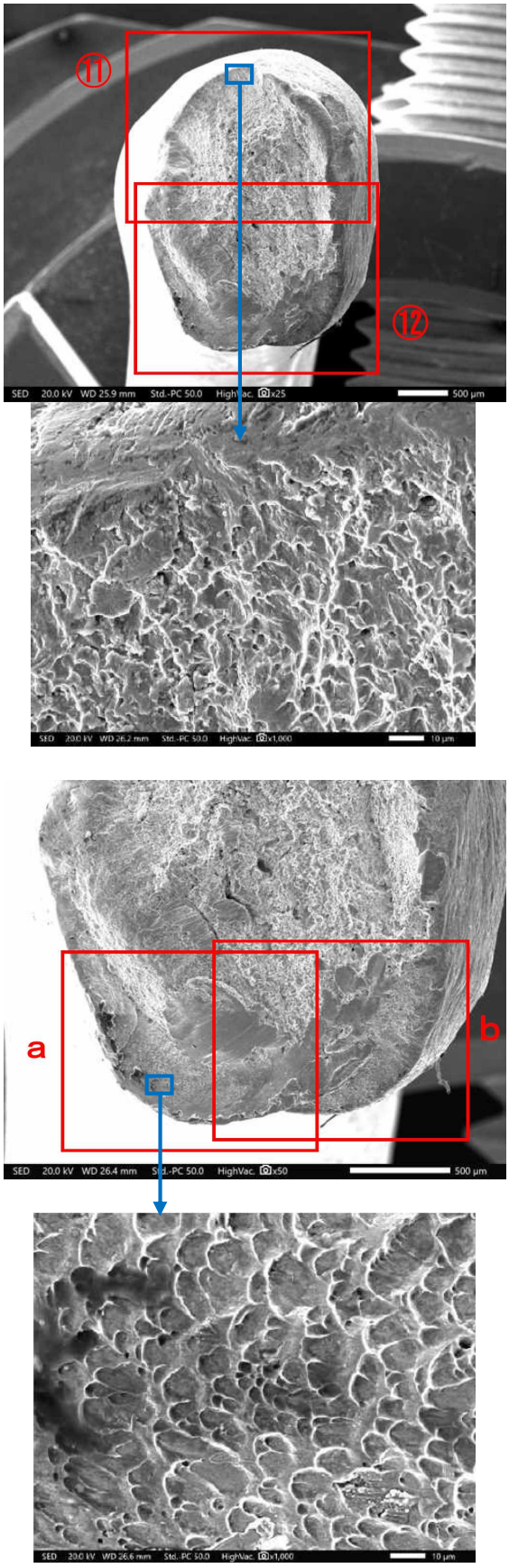
Ｒ側過給機のタービンブレード No. １の　破面観察にて、応力サイクル数　「約 10,000 サイクル」のストライエーションを確認



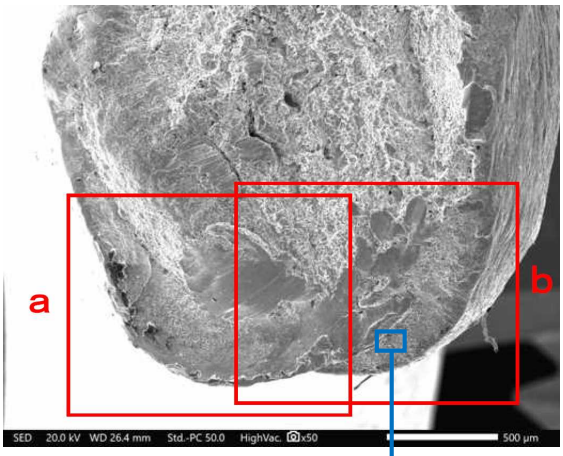
Ｒ側過給機の外周側レーシングワイヤの脱落と止端部の破断を確認

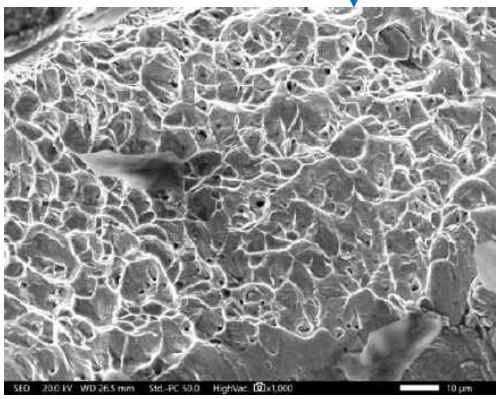


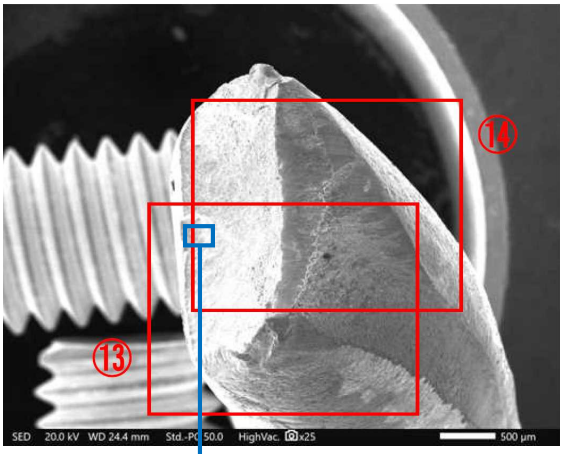
Ｒ側過給機の内周側レーシングワイヤ[redacted]本のうち１本の脱落を確認

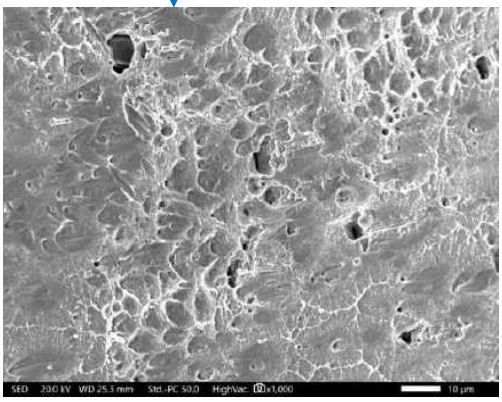


折損したレーシングワイヤの破面をＳＥＭ観察した結果、延性による破断を示すディンプル模様が確認され、疲労破壊を示す縞模様（ストライエーション模様）のないことを確認


a
b
SED 20.0 kV WD 26.4 mm Std.-PC 50.0 HighVac. x50 500 µm


SED 20.0 kV WD 26.5 mm Std.-PC 50.0 HighVac. x1,000 10 µm

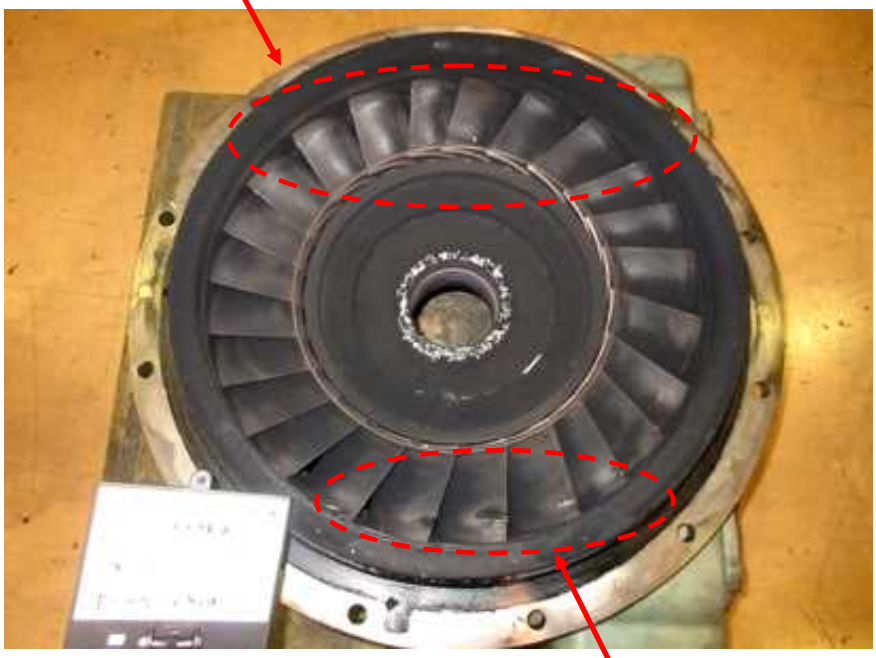

⑭
⑬
SED 20.0 kV WD 24.4 mm Std.-PC 50.0 HighVac. x25 500 µm


SED 20.0 kV WD 25.5 mm Std.-PC 50.0 HighVac. x1,000 10 µm

ノズルリング

９時～２時方向の小さな接触痕

排気出口側



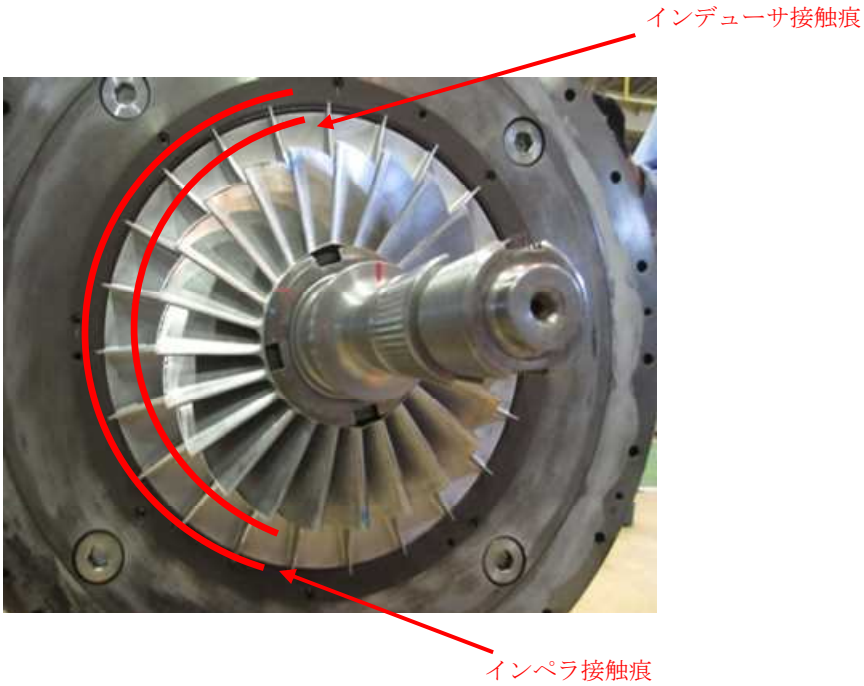
４時～７時方向の大きな接触痕

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

排気入口側

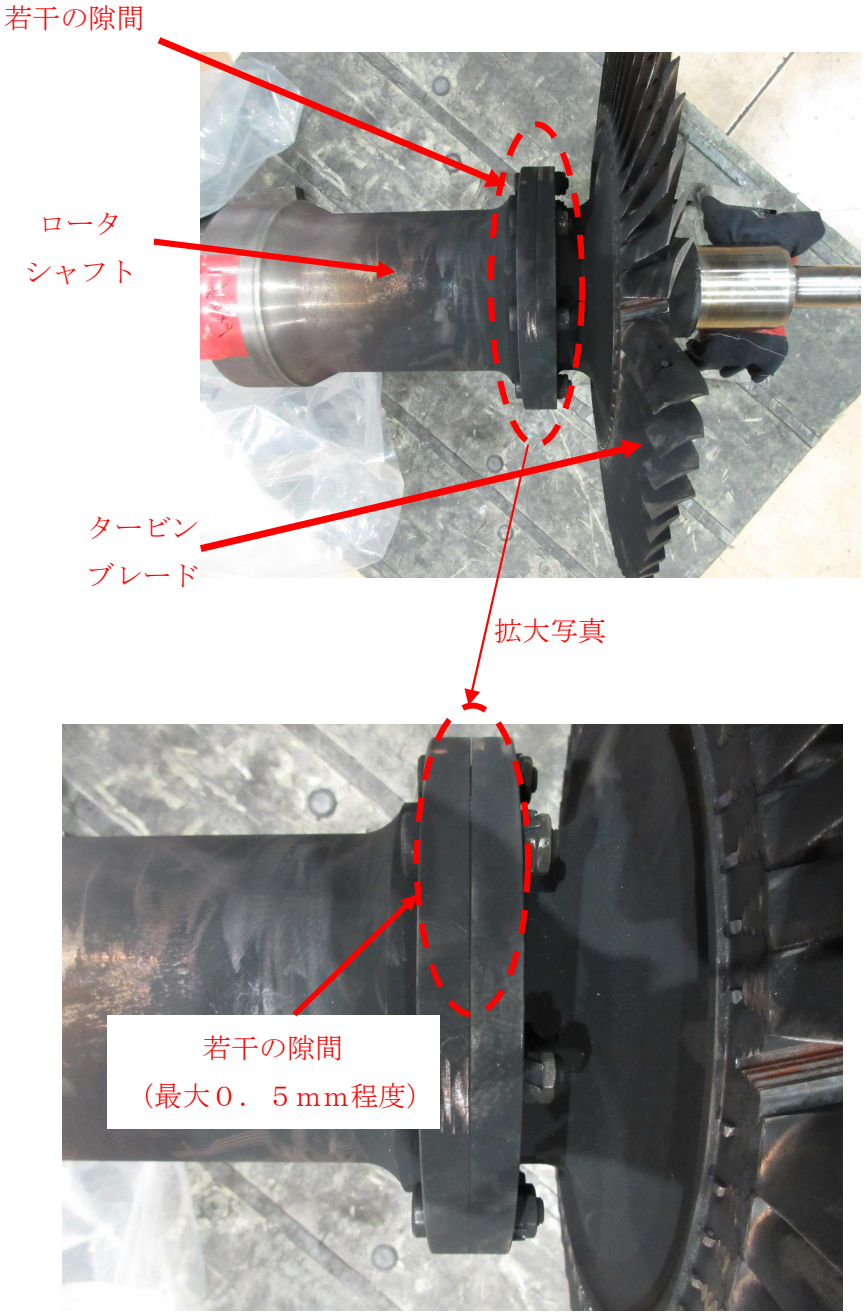
接触痕なし

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  	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

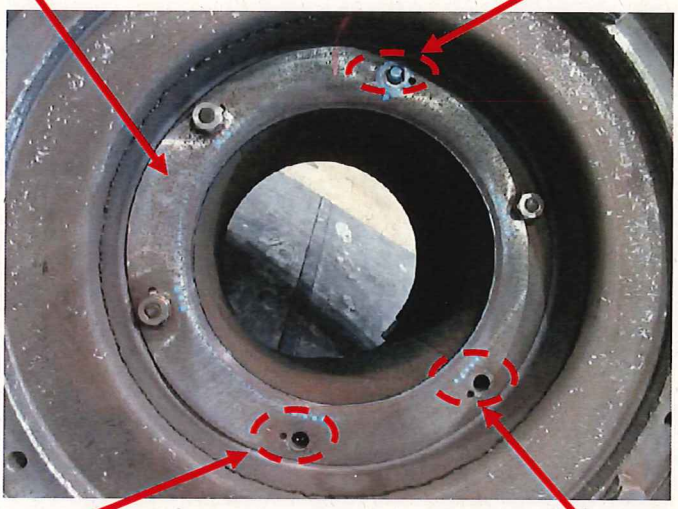
インペラ 赤線の範囲内に無数の接触痕 （回転方向：撮影方向から時計周り）	Ｒ側過給機のインペラ背面に接触痕を確認

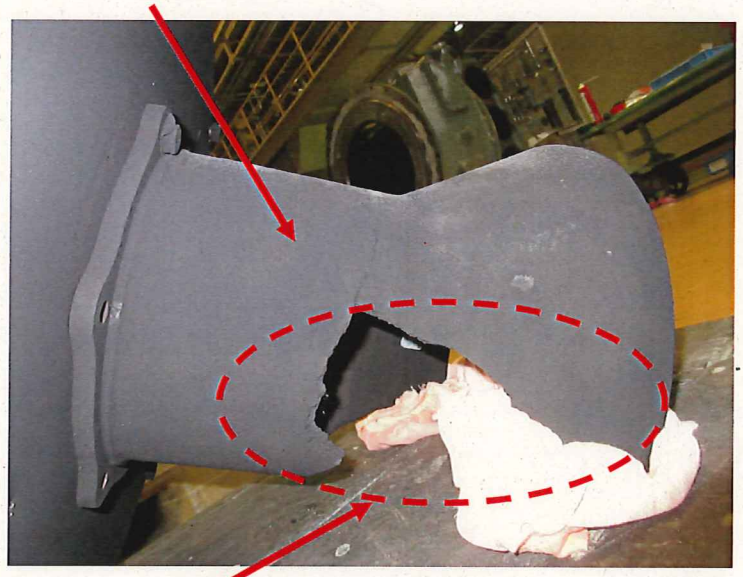
ロータシャフトフランジ



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

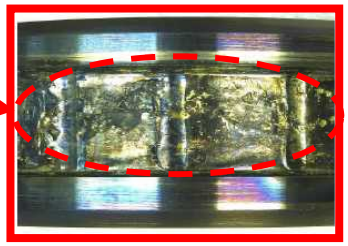




R側過給機のシャフトシュラウド、シールプレート固定ボルト（[redacted]本中２本）及びナット・ワッシャ（[redacted]個中３個）が脱落し、シャフトシュラウドの破損を確認

ベアリング

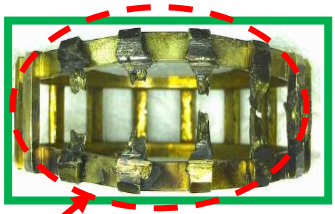
圧痕及び摺動痕



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　ころ軸受外観



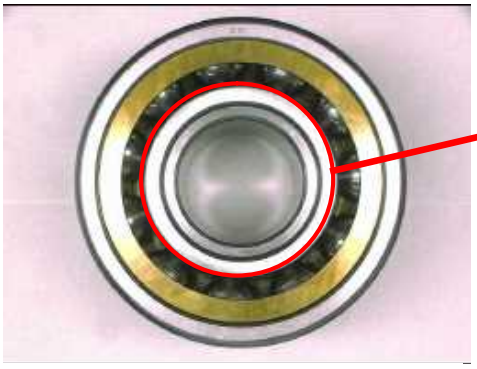
保持器外観

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

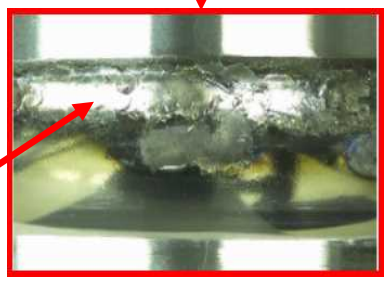
ころ転動面外観

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

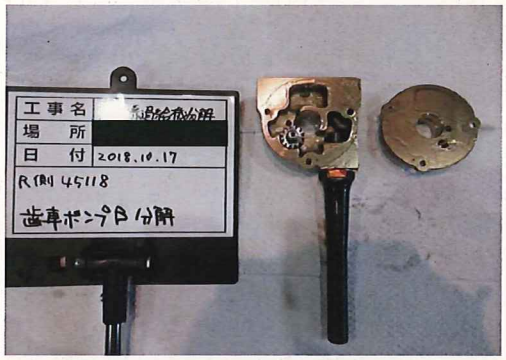
ブロワ側の玉軸受の内輪軌道面の約１／３周に剥離を確認

潤滑油分析　点検結果 １．分析対象サンプル ①１号機　Ｄ／Ｇ（Ｂ）系　機関（Ｂ）潤滑油 ②１号機　Ｄ／Ｇ（Ｂ）系　機関付動弁注油タンク（Ｂ）潤滑油 ③１号機　Ｄ／Ｇ（Ｂ）系　Ｒ側過給機（ブロワ側）潤滑油 ④１号機　Ｄ／Ｇ（Ｂ）系　Ｌ側過給機（ブロワ側）潤滑油 ⑤１号機　Ｄ／Ｇ（Ｂ）系　Ｒ側過給機（タービン側）潤滑油 ⑥１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　[redacted]℃以上 ・動粘度　[redacted]mm2/s ・水分（蒸留法）　[redacted]%以下 ・微粒きょう雑物（質量法）　[redacted] ・塩基価（過塩素酸法）　[redacted]mgKOH/g 以上 ・ペンタン不溶分　[redacted]%以下 ・トルエン不溶分　[redacted] 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）	潤滑油分析の結果、全て継続使用可能であることを確認

金属粉　成分分析結果 １．分析対象サンプル 　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 ２．測定日 　・２０１８年9月２７日 ３．分析方法 　・ＳＥＭ観察によるＥＤＳ ４．分析結果（定量結果） 　ａ．１号機　Ｄ／Ｇ（Ｂ）系　過給機（Ｒ）金属粉　タービン 　　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 　　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） ５．定量結果から想定される設備・機器 　ａ．ベアリング保持器 　ｂ．不明（成分から該当する設備なし）	金属粉はベアリングの構成部材であることを確認

オイルポンプ分解

R側（タービン側）

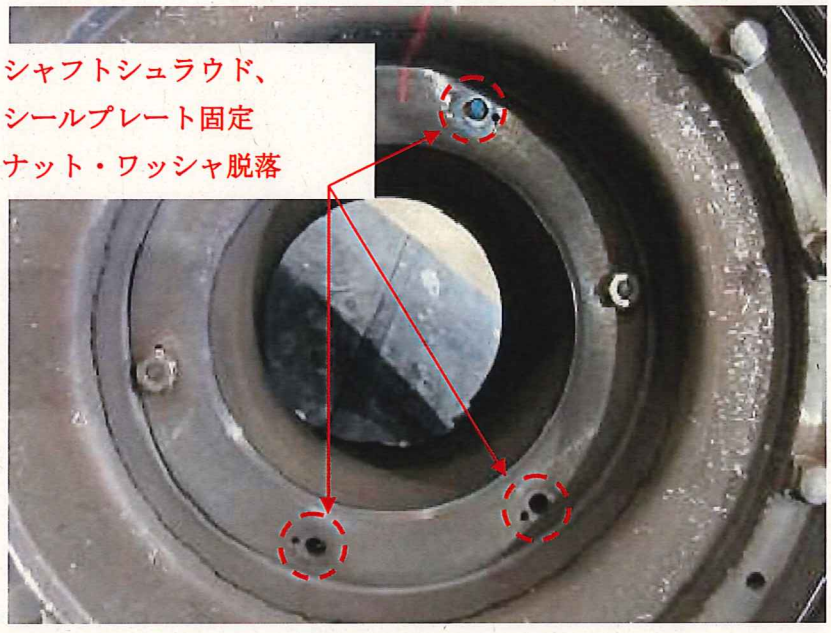


R側（ブロワ側）

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（[redacted]本中２本）、ナット・ワッシャ（[redacted]個中３個）の脱落を確認

要因分析表（タービンブレードの疲労破壊）

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
①Ｒ側過給機のタービンブレードに折損を確認 ②Ｌ側過給機のレーシングワイヤに瞬間的な応力による破断を確認	タービンブレードの疲労破壊	材料に関する要因	【要因１】 化学成分	・材料が設計要求仕様逸脱による強度不足により、き裂発生の起因となる。	・Ｒ側過給機のＮｏ．３３タービンブレード及びＬ側過給機のＮｏ．２３－２４間ファツリー部の断面をＥＰＭＡ※にて分析、確認する。 ※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	・ＥＰＭＡ分析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は、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。	×	添付資料－９（１）
			【要因２】 硬度分布	・硬度が設計要求仕様逸脱による強度不足により、き裂発生の起因となる。	・Ｒ側過給機のＮｏ．３３タービンブレードファツリー部及びＬ側過給機Ｎｏ．２３－２４間ロータファツリー部の断面の硬さを測定する。	・硬さはタービンブレードファツリー部、ロータファツリー部の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）
			【要因３】 引張強度	・引張強度が設計要求仕様逸脱による強度不足により､き裂発生の起因となる。	・Ｒ側過給機のＮｏ．３４、３５、３６タービンブレードファツリー部及びＬ側過給機のＮｏ．２６－２７間ロータファツリー部より試験片を取出し、引張試験を行う。	・引張強さはタービンブレードファツリー部、ロータファツリー部の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）
			【要因４】 初期欠陥	・材料の初期欠陥により、き裂発生の起因となる。	・Ｒ側過給機のタービンブレードファツリー部、Ｌ側過給機のタービンブ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観察を実施する。	・ＳＥＭ観察を実施し、介在物と１０μｍ程度のピットが確認されたが、２００μｍの欠陥が存在しても疲労限度内であり、１０μｍ程度の内部欠陥は十分許容できる強度を有していることを確認した。このことから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）
		設計条件に関する要因	【要因５】 材料選定	・必要強度に対する材料の選定間違いにより、き裂発生の起因となる。	・タービンブレード及びロータシャフトの材料の使用実績を確認する。	・大型船舶やディーゼル発電機の過給機タービンブレード等の材料に標準材料として採用されており、これまでの使用実績において問題がないことを聞き取りにて確認した。	×	添付資料－９（５）
			【要因６】 遠心応力	・定常運転において、過大な遠心応力が発生し、き裂発生の起因となる。	・レーシングワイヤ付加荷重の応力解析を実施する。 ・修正グッドマン線図を用いた評価を実施し、応力解析結果が設計値（疲労限度）を上回らないことを確認する。	・応力解析結果により疲労限度内にあることを確認した。	×	添付資料－９（６）
			【要因７】 レーシングワイヤ局部応力	・定常運転において、付加荷重が発生し、き裂発生の起因となる。	・レーシングワイヤの遠心応力による付加荷重のタービンブレードへの作用角度（５°、１０°、１５°）の３ケースについて応力解析を実施する。 ・修正グッドマン線図を用いた評価を実施し、応力解析結果が設計値（疲労限度）を上回らないことを確認する。	・付加荷重作用角度（５°、１０°、１５°）について応力解析により疲労限度内にあることを確認した。	×	添付資料－９（７）
			【要因８】 起動・停止過程における過大応力	・起動・停止の過程において、過大な応力が発生し、き裂発生の起因となる。	・タービンブレード及びタービンロータアッセンブリモデルによる固有値解析及びハンマリング試験による固有値計測により確認する。	・タービンブレード及びロータアッセンブリモデルによる固有値解析を実施し、解析結果から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。	×	添付資料－９（８）
		加工不良に関する要因	【要因９】 ファツリー形状	・ファツリー形状の寸法、クリアランス異常により、ファツリー部くびれ部の応力が過大となり、き裂発生の起因となる。	・ファツリー形状製作に関する製作時品質記録、要領書、管理基準に関する調査を実施する。	・製作当時のファツリー部加工結果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（ファツリー部を組み立てることができること）を満足していることから、品質管理上、問題はなかったと考える。	×	添付資料－９（９）
			【要因１０】 ファツリー部加工方法	・加工方法の変更により面粗度が粗くなり、疲労限度が低下して、き裂発生の起因となる。	・ファツリー部加工方法の変遷における面粗度の設計値を調査し、変更がないことを確認する。 ・面粗度を計測する	・加工設備の変更に係わらず面粗度の設計値は変わっていないことを確認した。また、き裂が発生したＲ側過給機（Ｎｏ．１タービンブレードファツリー部）の面粗度を計測した結果、設計値を満足していることを確認した。	×	添付資料－９（１０）
			【要因１１】 レーシングワイヤ線径	・レーシングワイヤの線径の設計値逸脱に伴い、ファツリー部くびれ部に作用する応力をが過大となり、き裂発生の起因となる。	・レーシングワイヤの線径計測を行い、必要強度を有していることを確認する。	・レーシングワイヤの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を確認した。	×	添付資料－９（１１）
			【要因１２】 レーシングワイヤ孔径及び孔高さ	・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、隣接するタービンブ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、き裂発生の起因となる。	・タービンブレードのレーシングワイヤ孔径及び孔高さ計測を行い、設計値内であることを確認する。 ・加工方法の妥当性について検証する。	・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ブ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、一方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。	○	添付資料－９（１２）
		組立不良に関する要因	【要因１３】 レーシングワイヤ取付	・レーシングワイヤ止端部形状や取付状態に不良があると、き裂発生の起因となる。	・レーシングワイヤ止端部形状や取付状態の至近の本格点検記録にて、止端部形状や取付状態の異常なしを確認する。	・至近の本格点検時の点検結果において異常がないことを確認した。	×	添付資料－９（１３）
			【要因１４】 ブレード取外・取付作業	・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。	・過去の点検記録を確認する。 ・外観目視にて確認する。	・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（１４）
		外的要因に関する要因	【要因１５】 腐食・汚れ	・腐食・汚れによる経年変化による応力が発生し、き裂発生の起因となる。	・外観目視にて腐食、汚れの状況を確認する。	・Ｒ側過給機の損傷ブレードのファツリー部に酸化スケール及び煤と思われる汚れを確認した。 ・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。	○	添付資料－９（１５）
			【要因１６】 運転負荷	・運転負荷上昇率が過去の運転変遷において変化点があり、それを起因として過大な応力が発生し、き裂発生の起因となる。	・過去の非常用ディーゼル発電機出力上昇曲線を確認する。	・納入からの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ついて変更がないことを確認した。	×	添付資料－９（１６）
			【要因１７】 運転時間、起動回数	・運転時間、起動回数が当該Ｄ／Ｇのみ過度に多く、経年影響により、き裂発生の起因となる。	・プラントの運転開始からの総運転時間、起動回数を確認する。	・総運転時間、起動回数について、他の非常用ディーゼル発電機と比較して特異性は無い。	×	添付資料－９（１７）
			【要因１８】 保守・整備	・ロータシャフト取外・取付時にブレードを接触させ、き裂発生の起因となる。	・前回の本格点検記録を確認する。	・前回の過給機本格点検記録（第１４回、２００５年）を調査したが、ブレードを接触させたという記録は無かった。	×	添付資料－９（１８）
			【要因１９】 経時的変化	・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し、応力が増大することで、き裂発生の起因となる。	・三次元計測にてファツリー部寸法を確認する。 （ブレード、ロータシャフトの１０％を三次元計測し確認する） ・タービンブレードファツリー部の応力解析 ・ロータファツリー部の応力解析	・一部の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した。 ・一部の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した。 ・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については、弾性限度を逸脱することがないため、経時的な寸法変化が生じることはない。	○	添付資料－９（１９）

○：要因の可能性あり、×：要因の可能性はないと考えられる

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

【要因１】化学成分

タービンブレード及びタービン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。

（１）調査内容及び判定基準

・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断面をＥＰＭＡ※1にて分析を実施し、材料の化学成分を確認すること

・健全箇所の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化学成分を確認し、設計要求材質とおりの化学成分であること

＜試験片として使用した健全箇所＞

Ｒ側過給機のＮｏ．３３タービンブレードファツリー部

Ｌ側過給機のＮｏ．２３－２４間ロータファツリー部

※1Ｅｌｅｃｔｒｏｎ　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

（２）点検結果

・成分分析結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	タービンブレードファツリー部	異常なし	2018/12/13	表－１
2	ロータファツリー部	異常なし	2019/1/17	表－２

表－１　タービンブレードファツリー部成分分析結果　（ｗｔ％）

	Ｃ	Ｓｉ	Ｍｎ	Ｎｉ	Ｃｒ	Ｃｏ	Ｔｉ
規定値	[redacted]						
分析結果	－	0.1	－	57.7	20.5	16.7	2.2
	Ａｌ	Ｆｅ					
規定値	[redacted]						
分析結果	1.5	1.3					

表－２　ロータファツリー部成分分析結果　（ｗｔ％）

	Ｃ	Ｓｉ	Ｍｎ	Ｐ	Ｓ	Ｃｒ	Ｍｏ
規定値	[redacted]						
分析結果	－	0.5	1.0	－	－	11.4	1.3
	Ｖ	Ｃｕ	Ｎ	Ｎｂ	Ｂ	Ｆｅ	
規定値	[redacted]						
分析結果	0.4	－	－	－	－	85.5	

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

【要因２】硬度分布

タービンブ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。

（１） 調査内容及び判定基準

・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断面の硬さ測定を実施し、健全箇所の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硬度分布が均一であること

＜試験片として使用した健全箇所＞

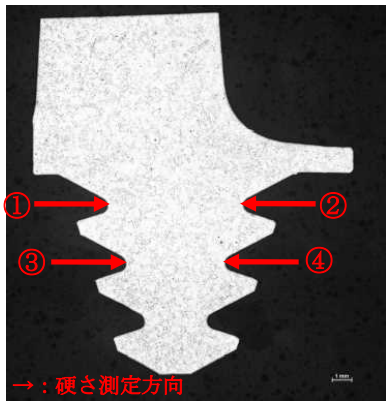
Ｒ側過給機のＮｏ．３３タービンブレードファツリー部

Ｌ側過給機のＮｏ．２３－２４間ロータファツリー部

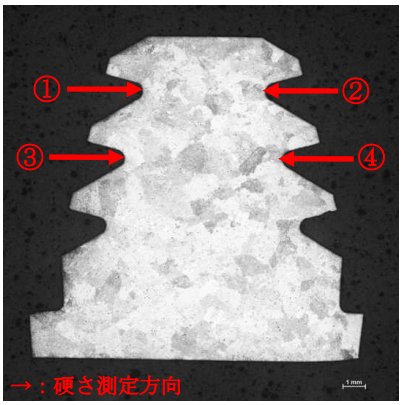
（２）点検結果

・硬度分布計測結果

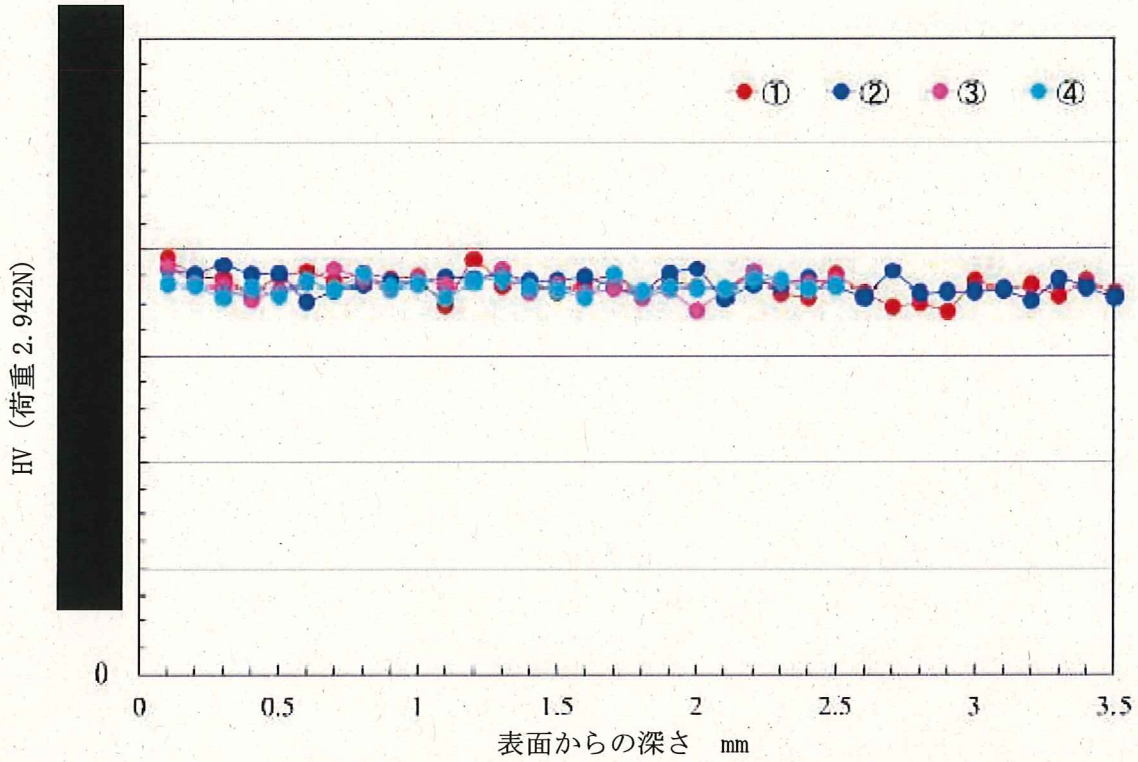
	点検対象	結果	点検日	備考
1	タービンブレードファツリー部	異常なし	2018/12/13	図－１
2	ロータシャフトファツリー部	異常なし	2019/1/17	図－２



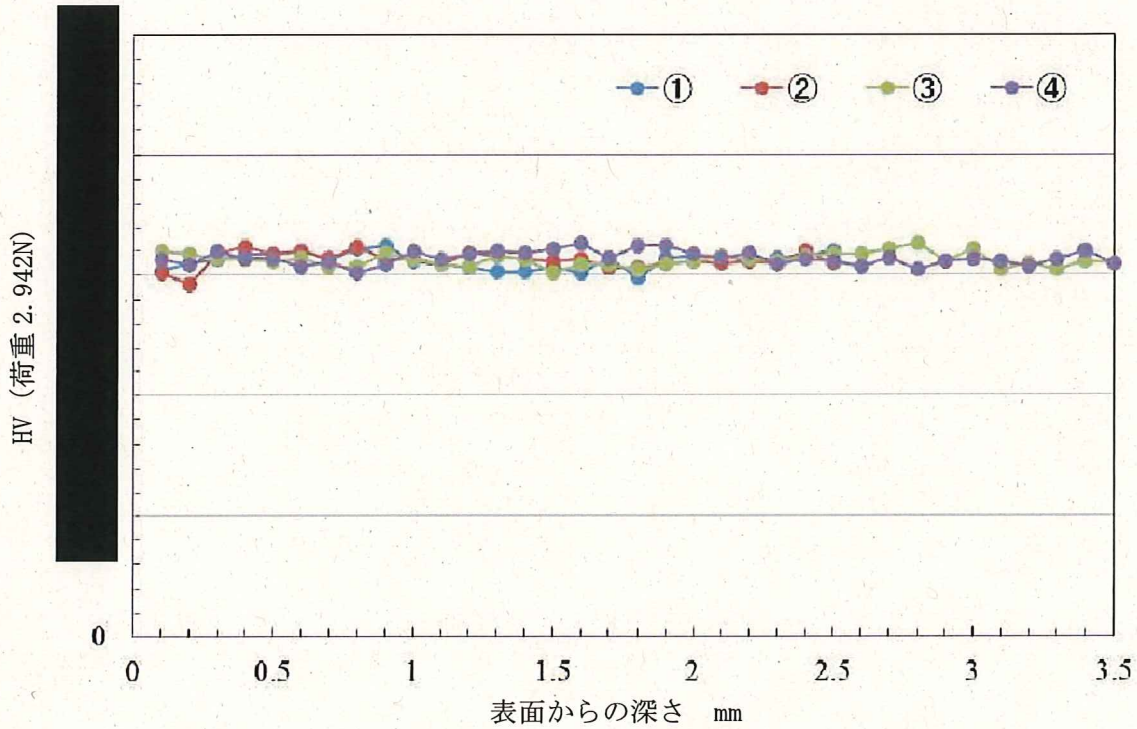
タービンブレードファツリー部測定点



ロータシャフトファツリー部測定点



図－１　タービンブレードファツリー部硬度分布計測結果



図－２　ロータファツリー部硬度分布計測結果

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

【要因３】引張強度

タービンブ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。

（１）調査内容及び判定基準

・健全箇所の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より試験片を取出し、引張試験を実施し、０．２％耐力及び引張強度が設計値以上であること

＜試験片として使用した健全箇所＞

Ｒ側過給機のＮｏ．３４、３５、３６タービンブレードファツリー部

Ｌ側過給機のＮｏ．２６－２７間ロータファツリー部

（２）点検結果

・引張試験結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	タービンブレードファツリー部	異常なし	2019/1/25	表－３
2	ロータファツリー部	異常なし※2	2019/1/25	表－４

※２Ｌ側過給機のＮｏ．２６－２７間ロータファツリー部の引張試験において、伸びはわずかに設計値を下回る結果が得られたが、０．２％耐力及び引張強さについては、設計値を満足しており大幅な材料強度の低下は認められない。

表－３　タービンブレードファツリー部引張試験結果

	0.2%耐力（N/mm²）	引張強さ（N/mm²）	伸び（%）	絞り（%）
設計値（室温）	[redacted]			
Ｒ側（室温）Ｎｏ．３４	７７６	１２０８	２７	４４
Ｒ側（室温）Ｎｏ．３５	７７３	１２０２	２７	４３
Ｒ側（室温）Ｎｏ．３６	７６６	１１９７	２６	４１

Ｒ側過給機のＮｏ．３４、３５、３６タービンブレードファツリー部の室温での引張試験において、設計値を満足する結果が得られた。

表－４　ロータファツリー部引張試験結果

	0.2%耐力（N/mm²）	引張強さ（N/mm²）	伸び（%）	絞り（%）
設計値（室温）	[redacted]			
Ｌ側（室温）	７９０～８３０	９６２～９９７	８～１０	１８～３７

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

【要因４】初期欠陥

タービンブ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。

（１）調査内容及び判定基準

・Ｒ側過給機のタービンブレードファツリー部、Ｌ側過給機のタービンブ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のＳＥＭ観察を実施する。

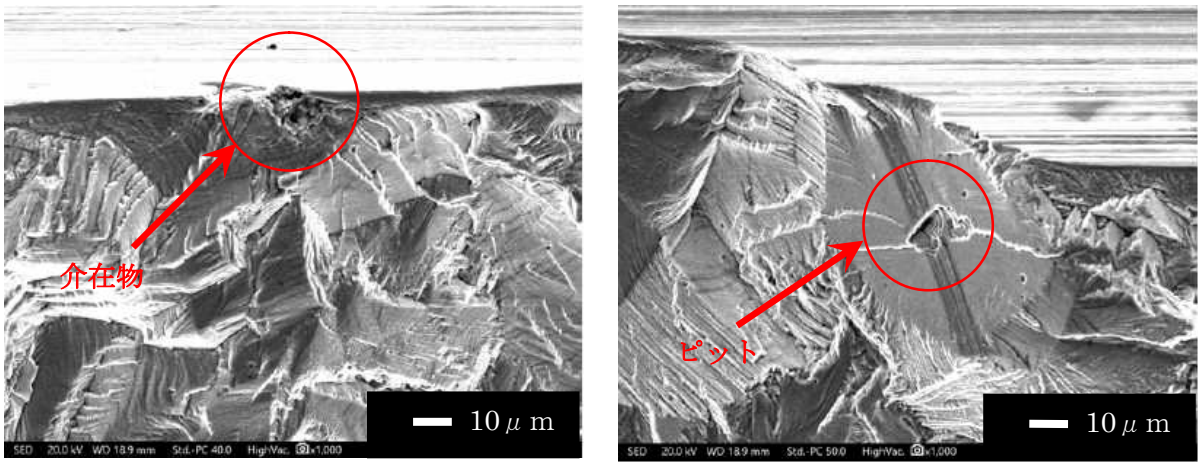
・き裂箇所破面のＳＥＭ観察を実施し、初期欠陥となり得る内部欠陥がないこと

（２）点検結果

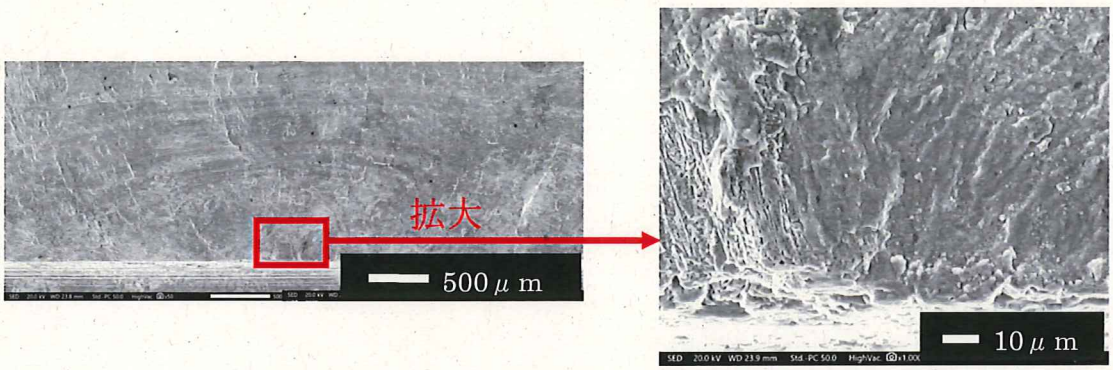
・破面ＳＥＭ観察結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	き裂箇所	異常なし※3	2018/12/21	図－３、４

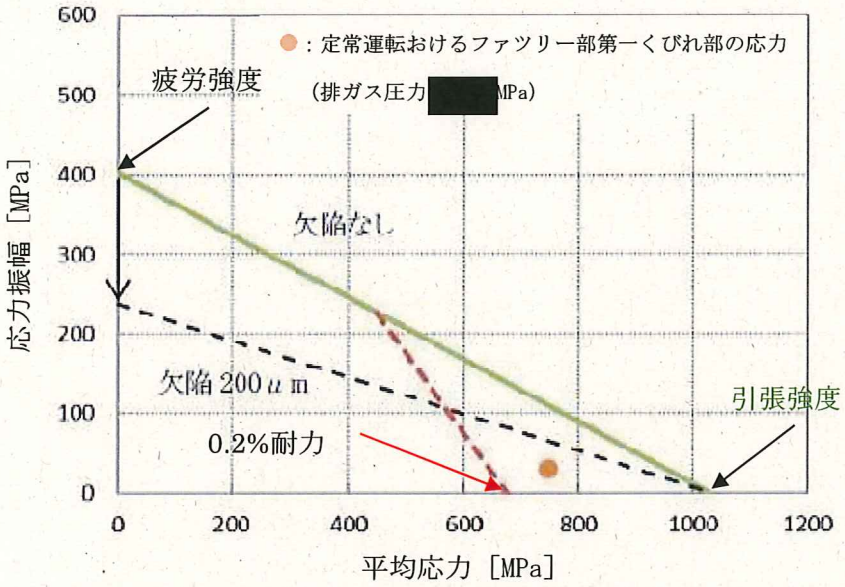
※３き裂箇所破面のＳＥＭ観察を実施し、介在物と１０μm程度のピットが確認されたが、内部欠陥、介在物等が存在する場合の疲労強度の低下を推察したが、２００μmの欠陥が存在しても「図－５　高サイクル疲労評価の修正グッドマン線図」に示すとおり、タービンブレードに発生する平均応力、応力振幅は「表－５　欠陥の大きさ別の疲労強度低減率」に示すとおり変わらず疲労限度内であり、１０μm程度の内部欠陥は十分許容できる強度を有していると考える。このことから初期欠陥となり得る内部欠陥は確認されなかった。



図－３　Ｒ側過給機のき裂箇所及びファツリー部ＳＥＭ観察結果



図－４　Ｌ側過給機のき裂箇所及びロータファツリー部ＳＥＭ観察結果



図－５　高サイクル疲労評価の修正グッドマン線図

表－５　欠陥の大きさ別の疲労強度低減率

	欠陥直径（μm）	√area（μm）	疲労強度 σ_w（MPa）	対比（%）
欠陥なし	－	[redacted]		１００
Ｃａｓｅ１	１０			９７
Ｃａｓｅ２	５０			７４
Ｃａｓｅ３	１００			６６
Ｃａｓｅ４	２００			５９

$$\sigma_w = \frac{1.56\times(HV+120)}{\left(\sqrt{Area_{max}}\right)^{1/6}}$$ ・・・内部の微小欠陥、き裂、介在物に対する疲労限度評価式

σ_w：修正疲労限度、HV：ビッカーズ硬さ、$\sqrt{Area_{max}}$：欠陥の大きさ

（出典：「微少欠陥と介在物の影響」村上敬宜　著）

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

【要因５】材料選定

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。

（１）調査内容及び判定基準

・タービンブレード及びロータシャフト材料に対する使用状況の、メーカへの聞き取りを実施し、材料選定に問題がないか確認すること

（２）点検結果

・使用実績調査結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	タービンブレード及び ロータシャフト	使用実績あり※4	2019/1/17	－

※４大型船舶やディーゼル発電機の過給機タービンブレード等の材料に標準材料として採用し、これまでの使用実績においても問題ないことを聞き取りにて確認した。

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

【要因６】遠心応力

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。

（１）調査内容及び判定基準

・レーシングワイヤ付加荷重の応力解析を実施する。

・レーシングワイヤ付加荷重の応力解析結果を評価し、設計値（疲労限度）を上回らないこと

（２）点検結果

・応力解析結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	レーシングワイヤ	異常なし※5	2018/11/30	別紙-１

※５レーシングワイヤ付加荷重を考慮した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ところ疲労限度内にあることを確認した。

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

【要因７】レーシングワイヤ局部応力

タービンブ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、タービンブレードへの付加荷重が発生し、き裂発生の起因となる可能性がある。

（１）調査内容及び判定基準

・レーシングワイヤの遠心応力による付加荷重のタービンブレードへの作用角度３ケース（５°、１０°、１５°）の応力解析を実施し、設計値（疲労限度）を上回らないこと

（２）点検結果

・応力解析結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	レーシングワイヤ	異常なし※6	2018/11/30	別紙－１

※６ レーシングワイヤの遠心応力による付加荷重について、タービンブレードへの作用角度を５°、１０°、１５°とした場合に修正グッドマン線図を用いて評価したところ、レーシングワイヤ作動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を確認した。

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

【要因８】起動・停止過程における過大応力

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、き裂発生の起因となる可能性がある。

（１）調査内容及び判定基準

・タービンブレード及びタービンロータアッセンブリモデルによる固有値解析及びハンマリング試験を実施し、固有振動数計測を実施する。

・解析結果と計測結果を確認し、想定される回転数領域に共振点が存在しないことを確認すること

（２）点検結果

・応力解析結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	タービンブレード及びタービンロータアッセンブリ	異常なし※7	2018/12/19	別紙-２

※７タービンブレード及び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、想定される回転数領域に、共振点は存在しないことを確認した。

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

【要因９】ファツリー形状

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、き裂発生の起因となる可能性がある。

（１） 調査内容及び判定基準

・ファツリー形状製作に関する製作時品質記録、要領書、管理基準に関する調査を実施する。

・ファツリー形状製作に関する製作時品質記録、要領書、管理基準を調査し、寸法、クリアランスが定められていること

（２）点検結果

・ファツリー形状製作図書調査結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	ファツリー部	異常なし※8	2019/2/19	－

※８ファツリー形状製作に関する製作時品質記録、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（ファツリー部を組み立てることができること）を満足していることから、品質管理上、問題はなかったと考える。

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

【要因１０】ファツリー部加工方法

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

（１） 調査内容及び判定基準

・ファツリー部加工方法の変遷における面粗度の設計値を調査し、変更のないことを確認する。

・面粗度の設計値を調査し、設計値（Ｒａ[redacted]）以下であること

（２）点検結果

・ファツリー部加工方法の変遷

	点検対象	結果	点検日	備考
1	ファツリー部	異常なし※9	2019/1/16	表－６

※９タービンブレード側は１９８５年まで縦型ブローチ盤によって加工されており、Ｋ－１製造時（１９８１～１９８２年）も同様であった。
ロータシャフト側は横型ブローチ盤により加工していたが、設備の老朽化により１９７７年から縦型ブローチ盤に変更した。Ｋ－１（１９８１～１９８２年）は後者の設備で加工していた。
加工方法の変更に係わらず面粗度の設計値は変わっていないことを確認した。
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の加工変遷を表－６に示す。

・面粗度

	点検対象	結果	点検日	備考
2	ファツリー部	異常なし※10	2019/1/16	図－６

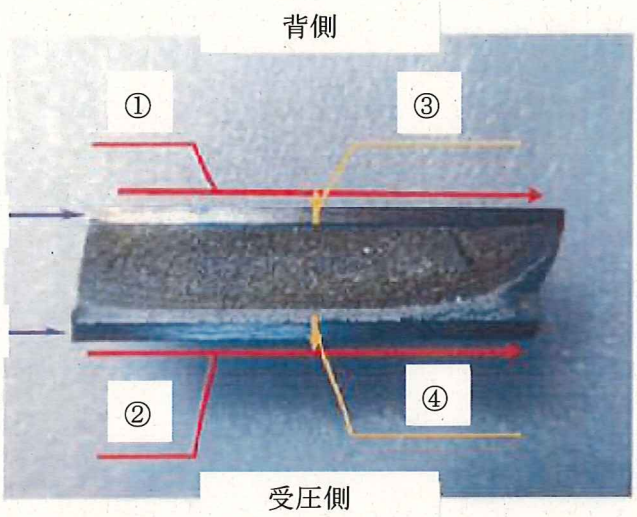
※１０き裂が発生したＲ側過給機のＮｏ．１タービンブレードファツリー部面粗度の計測結果は、設計値を満足しておりファツリー部加工方法に関する問題は確認されなかった。

表－６　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加工方法の変遷

年代	ロータシャフト		タービンブレード			ﾚｰｼﾝｸﾞﾜｲﾔ孔加工	備考（各サイト）
	加工機	カッター	加工機	砥石	ﾀﾞｲﾔﾓﾝﾄﾞﾄﾞﾚｯｻｰ		
1970 年以前	同下（推定）	同下（推定）	同下（推定）	同下（推定）	同下（推定）	汎用ﾎﾞｰﾙ盤 [redacted] ﾄﾞﾘﾙ＋ﾘｰﾏ	[redacted] 工場 1F-1/2 ([redacted]:1969 年)
1970 年	横型ﾌﾞﾛｰﾁ盤 [redacted]	[redacted]	縦型ﾌﾞﾛｰﾁ盤 [redacted]	ﾌﾞﾛｰﾁｶｯﾀｰ切削加工	不要	同上	[redacted] 操業開始
1972 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	1F-2 [redacted] 1F-3 [redacted] 1F-3/4 [redacted]
1973 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	1F-5A [redacted]
1974 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	1F-4A, 5B [redacted]
1976 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	1F-6A, 6H [redacted]
1977 年	縦型ﾌﾞﾛｰﾁ盤 [redacted]	[redacted] ﾌﾞﾛｰﾁｶｯﾀｰ	同上	同上	同上	同上	
1980 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	K-5H [redacted]
1981 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	K-1H [redacted]
1982 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	2F-3A, 3B, 3H, 4A, 4B, 4H [redacted] K-1A, B [redacted]
1983 年	同上	同上	同上	同上	同上	電解ﾎﾞｰﾙ盤	K-2A, B [redacted] K-2H [redacted]
1985 年	同上	同上	[redacted] 研削盤 [redacted]	砥石 [redacted]	[redacted]	同上	
1986 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	K-5A, B [redacted]
1987 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	
1990 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	K-3A, B [redacted] K-3H [redacted]
1991 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	K-4A, B [redacted] K-4H [redacted]
1992 年	同上	同上	同上	同上	同上	ﾗｼﾞｱﾙﾎﾞｰﾙ盤 ﾄﾞﾘﾙ＋ﾘｰﾏ	K-6A [redacted]
1993 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	K-6B, C [redacted] K-7A [redacted]
1994 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	[redacted] 工場へ製造移管 1F-6B [redacted] K-7B, C [redacted]
1995 年	同上	同上	同上	同上	同上	同上	1F-2B, 4B [redacted]
2015 年	同上	同上	[redacted] 研削盤 [redacted]	砥石 [redacted]	同上	同上	
現在	同上	同上	同上	同上	同上	同上	

加工方法の変更が行われても面粗度の設計値はＲａ[redacted]で変更がないことを確認。

（計測対象）
Ｒ側過給機の
No.1 タービンブレードファツリー部



・ファツリー形状加工平行方向

計測位置	背側①	受圧側②
計測値	Ｒａ0.291～0.650	Ｒａ0.376～0.604
結果	良	良

・ファツリー形状加工直角方向

計測位置	背側③	受圧側④
計測値	Ｒａ0.382	Ｒａ0.426
結果	良	良

判定基準
面粗度が設計値（Ｒａ[redacted]）以下を満足していること。

図－６　面粗度計測記録

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

【要因１１】レーシングワイヤ線径

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、き裂発生の起因となる可能性がある。

（１） 調査内容及び判定基準

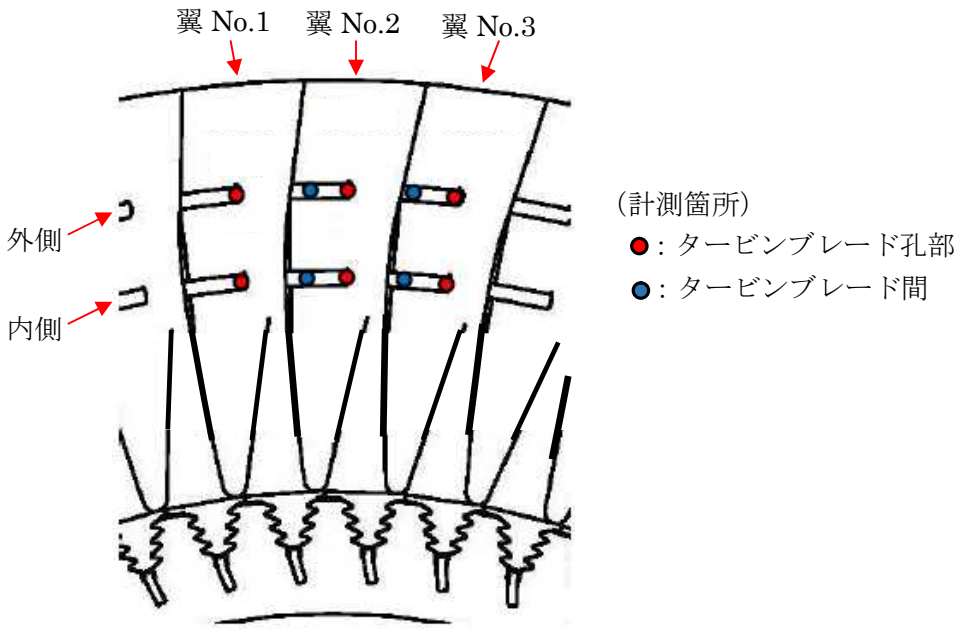
・レーシングワイヤ線径の計測を実施し、必要強度を有していること

（２）点検結果

・線径計測結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	レーシングワイヤ	異常なし※１１	2018/11/15	表－７、８

※１１実測された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を確認している。



レーシングワイヤ線径　計測箇所詳細図

表－７　レーシングワイヤ（Ｒ側）線径計測結果

Ｒ側線径								
翼Ｎｏ．	内	外	翼Ｎｏ．	内	外	翼Ｎｏ．	内	外
1	－	－	26	3.18	3.15	51	－	3.18
↓	－	－	↓	3.18	3.16	↓	－	3.16
2	－	－	27	3.18	3.18	52	－	3.17
↓	－	－	↓	3.19	3.16	↓	－	3.17
3	－	－	28	3.19	3.16	53	－	3.17
↓	－	－	↓	3.17	3.17	↓	－	3.17
4	－	－	29	3.18	3.16	54	－	3.15
↓	－	－	↓	3.17	3.18	↓	－	3.16
5	－	－	30	3.17	3.16	55	－	3.17
↓	－	－	↓	3.17	3.17	↓	－	3.16
6	－	－	31	3.17	3.16	56	－	**3.12**
↓	－	－	↓	3.17	3.16	↓	－	3.12
7	－	－	32	3.16	3.15	57	－	3.15
↓	－	－	↓	3.18	3.15	↓	－	3.15
8	－	－	33	3.19	3.15	58	－	3.19
↓	－	－	↓	3.17	3.16	↓	－	3.19
9	－	－	34	3.16	3.17	59	－	3.15
↓	－	－	↓	3.17	3.17	↓	－	3.17
10	－	－	35	3.18	3.16	60	－	3.15
↓	－	－	↓	3.18	3.18	↓	－	3.18
11	－	－	36	3.17	3.16	61	－	－
↓	－	－	↓	3.18	3.16	↓	－	－
12	－	－	37	3.18	3.17			
↓	－	－	↓	3.19	3.14	図面寸法		
13	－	－	38	3.19	3.15	[redacted]mm		
↓	－	－	↓	3.20	3.15			
14	－	－	39	3.19	3.15	未使用品線径（新品）		
↓	－	－	↓	3.18	3.17	[redacted]mm		
15	－	－	40	3.19	3.17			
↓	－	－	↓	3.18	3.15	使用計測器		
16	－	－	41	3.19	3.16	デジタルノギス		
↓	－	止端	↓	3.19	3.15			
17	－	3.18	42	3.17	3.16			
↓	－	3.17	↓	3.19	3.16			
18	－	3.16	43	3.17	3.16			
↓	－	3.17	↓	3.19	3.17			
19	－	3.16	44	3.19	3.16			
↓	－	3.16	↓	3.19	3.16			
20	－	3.17	45	3.20	3.17			
↓	止端	3.17	↓	3.19	3.15			
21	3.19	3.16	46	3.18	3.16			
↓	3.18	3.17	↓	3.17	止端			
22	3.18	3.15	47	3.18	3.18			
↓	3.17	3.16	↓	3.17	3.16			
23	3.18	3.16	48	**3.15**	**3.12**			
↓	3.18	3.15	↓	3.17	3.14			
24	3.18	3.17	49	3.16	3.20			
↓	3.16	3.17	↓	**3.15**	3.17			
25	3.17	3.16	50	3.17	3.20			
↓	3.18	3.19	↓	止端	3.17			

注１：Ｒ側の「－」は脱落し、場所を特定できないため計測していない。
注２：「↓」は前後数字（翼）の中間を計測した結果を示す（例：「1↓2」であれば翼 No.1 と No.2 の中間）
注３：表中の赤太文字は、最小値を示す。

表－８　レーシングワイヤ（Ｌ側）線径計測結果

Ｌ側線径								
翼Ｎｏ．	内	外	翼Ｎｏ．	内	外	翼Ｎｏ．	内	外
1	3.17	3.16	26	**3.15**	3.16	51	**3.15**	3.17
↓	3.17	3.17	↓	3.16	3.16	↓	3.17	3.15
2	3.17	3.16	27	3.16	**3.14**	52	3.19	3.16
↓	3.16	3.17	↓	3.16	3.16	↓	3.21	3.17
3	3.17	3.17	28	3.16	3.16	53	3.19	3.16
↓	3.16	3.17	↓	3.17	3.15	↓	3.17	3.17
4	3.16	3.16	29	**3.15**	**3.14**	54	3.17	3.16
↓	3.17	3.18	↓	3.16	3.15	↓	3.18	3.18
5	3.18	3.16	30	3.16	3.15	55	3.16	3.18
↓	3.17	3.18	↓	3.17	3.16	↓	3.19	3.16
6	3.17	3.17	31	3.17	3.15	56	3.16	3.15
↓	3.17	3.18	↓	3.17	3.16	↓	3.19	3.18
7	3.17	3.16	32	3.17	3.15	57	3.17	3.15
↓	3.16	3.17	↓	3.16	3.15	↓	3.17	3.17
8	3.17	3.16	33	3.17	3.16	58	3.17	3.16
↓	3.17	3.17	↓	3.17	3.15	↓	3.17	3.17
9	3.17	3.16	34	3.16	3.15	59	3.17	3.16
↓	3.17	3.17	↓	3.16	3.15	↓	3.17	3.16
10	3.17	3.17	35	3.17	3.15	60	3.17	3.15
↓	3.17	3.16	↓	3.17	3.16	↓	3.17	3.17
11	3.17	3.17	36	3.16	3.15	61	3.17	3.15
↓	3.17	3.17	↓	3.17	3.16	↓	3.17	3.17
12	3.17	3.17	37	3.17	3.15			
↓	3.17	3.17	↓	3.16	3.16	図面寸法		
13	3.17	3.17	38	3.17	3.15	[redacted]mm		
↓	3.17	3.17	↓	3.16	3.15			
14	3.16	3.15	39	3.17	3.15	未使用品線径（新品）		
↓	3.16	3.16	↓	3.16	3.15	[redacted]mm		
15	3.17	3.15	40	3.17	3.15			
↓	3.17	3.15	↓	3.16	3.17	使用計測器		
16	3.16	3.15	41	3.18	3.16	デジタルノギス		
↓	3.16	止端	↓	3.18	3.17			
17	3.16	3.18	42	3.17	3.16			
↓	3.18	3.17	↓	3.16	3.16			
18	3.16	3.16	43	**3.15**	3.17			
↓	3.17	3.17	↓	**3.15**	3.17			
19	3.16	3.17	44	**3.15**	3.17			
↓	3.16	3.18	↓	**3.15**	3.16			
20	3.16	3.17	45	**3.15**	3.17			
↓	止端	3.18	↓	3.17	3.17			
21	3.17	3.17	46	3.16	3.16			
↓	3.17	3.17	↓	3.16	止端			
22	3.16	3.17	47	3.16	3.17			
↓	3.17	3.17	↓	3.16	3.17			
23	3.17	3.17	48	3.16	3.17			
↓	3.17	3.17	↓	3.16	3.18			
24	3.17	3.16	49	3.17	3.17			
↓	3.16	3.17	↓	3.16	3.17			
25	3.16	3.17	50	3.18	3.19			
↓	3.17	3.15	↓	止端	3.18			

注１：「↓」は前後数字（翼）の中間を計測した結果を示す（例：「1↓2」であれば翼 No.1 と No.2 の中間）
注２：表中の赤太文字は、最小値を示す。

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

【要因１２】レーシングワイヤ孔径及び孔高さ

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、隣接するタービンブ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、き裂発生の起因となる可能性がある。

（１） 調査内容及び判定基準

・レーシングワイヤ孔の現品計測を実施し、レーシングワイヤ孔径及び孔高さが設計値内であること

（２）点検結果

・孔径計測結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	レーシングワイヤ孔	異常なし※１２	2018/11/15	表－９～１２

※１２レーシングワイヤ孔の現品計測を実施した結果、レーシングワイヤ孔径の計測結果で一部φ[redacted]ピンゲージを通るものが確認されているが、メーカ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、一部のレーシングワイヤ孔が拡大したものと考える。

・孔高さ計測結果

	点検対象	結果	点検日	備考
2	レーシングワイヤ孔	異常あり※13	2019/1/22	表－１３、１４、１５

※１３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ブレードとの高低差が大きい箇所があることを確認した。レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱の原因を調査した結果、製作時の加工不良である可能性が高いことを確認した。そのため、レーシングワイヤ穴高さの設定値逸脱の原因を調査した結果、「別紙－３　タービンブレードレーシングワイヤ孔加工に関する確認結果」に示すとおり、製作時の加工不良である可能性が高いことを確認した。（別紙－３参照）

表－９　レーシングワイヤ孔径（Ｒ側外側）点検結果

判定基準	レーシングワイヤ孔に図面指示寸法 φ[redacted]の下限 φ[redacted]ピンゲージが滑らかに通り、かつ φ[redacted]ピンゲージが通らないこと。

管理 No.	φ[redacted]	φ[redacted]
翼 No. 1	折損翼（※１）	
翼 No. 2	調査中（※２）	
翼 No. 3	良	良
翼 No. 4	良	良
翼 No. 5	良	良
翼 No. 6	否	良
翼 No. 7	良	良
翼 No. 8	良	良
翼 No. 9	良	良
翼 No. 10	否	良
翼 No. 11	良	良
翼 No. 12	良	良
翼 No. 13	良	良
翼 No. 14	良	良
翼 No. 15	良	良
翼 No. 16	良	良
翼 No. 17	良	良
翼 No. 18	良	良
翼 No. 19	否	良
翼 No. 20	良	良

管理 No.	φ[redacted]	φ[redacted]
翼 No. 21	良	良
翼 No. 22	良	良
翼 No. 23	良	良
翼 No. 24	良	良
翼 No. 25	良	良
翼 No. 26	良	良
翼 No. 27	良	良
翼 No. 28	否	良
翼 No. 29	否	良
翼 No. 30	良	良
翼 No. 31	良	良
翼 No. 32	否	良
翼 No. 33	否	良
翼 No. 34	良	良
翼 No. 35	良	良
翼 No. 36	良	良
翼 No. 37	良	良
翼 No. 38	良	良
翼 No. 39	否	良
翼 No. 40	良	良

管理 No.	φ[redacted]	φ[redacted]
翼 No. 41	良	良
翼 No. 42	否	良
翼 No. 43	良	良
翼 No. 44	良	良
翼 No. 45	良	良
翼 No. 46	良	良
翼 No. 47	良	良
翼 No. 48	良	良
翼 No. 49	良	良
翼 No. 50	良	良
翼 No. 51	否	良
翼 No. 52	良	良
翼 No. 53	良	良
翼 No. 54	良	良
翼 No. 55	良	良
翼 No. 56	良	良
翼 No. 57	否	良
翼 No. 58	良	良
翼 No. 59	良	良
翼 No. 60	良	良
翼 No. 61	否	良

※１：折損した翼で孔の形状が健全でないため計測していない。
※２：研究所にて詳細調査対象の翼であり、計測していない。

表－１０　レーシングワイヤ孔径（Ｒ側内側）点検結果

判定基準	レーシングワイヤ孔に図面指示寸法 φ[redacted]の下限 φ[redacted]ピンゲージが滑らかに通り、かつ φ[redacted]ピンゲージが通らないこと。

管理 No.	φ[redacted]	φ[redacted]
翼 No. 1	折損翼（※１）	
翼 No. 2	調査中（※２）	
翼 No. 3	否	良
翼 No. 4	良	良
翼 No. 5	良	良
翼 No. 6	否	良
翼 No. 7	否	良
翼 No. 8	良	良
翼 No. 9	否	良
翼 No. 10	否	良
翼 No. 11	否	良
翼 No. 12	否	良
翼 No. 13	否	良
翼 No. 14	良	良
翼 No. 15	良	良
翼 No. 16	良	良
翼 No. 17	良	良
翼 No. 18	良	良
翼 No. 19	否	良
翼 No. 20	良	良

管理 No.	φ[redacted]	φ[redacted]
翼 No. 21	良	良
翼 No. 22	良	良
翼 No. 23	良	良
翼 No. 24	良	良
翼 No. 25	良	良
翼 No. 26	良	良
翼 No. 27	良	良
翼 No. 28	否	良
翼 No. 29	否	良
翼 No. 30	良	良
翼 No. 31	否	良
翼 No. 32	否	良
翼 No. 33	否	良
翼 No. 34	良	良
翼 No. 35	良	良
翼 No. 36	良	良
翼 No. 37	良	良
翼 No. 38	否	良
翼 No. 39	否	良
翼 No. 40	良	良

管理 No.	φ[redacted]	φ[redacted]
翼 No. 41	良	良
翼 No. 42	否	良
翼 No. 43	良	良
翼 No. 44	良	良
翼 No. 45	良	良
翼 No. 46	否	良
翼 No. 47	良	良
翼 No. 48	否	良
翼 No. 49	否	良
翼 No. 50	良	良
翼 No. 51	否	良
翼 No. 52	良	良
翼 No. 53	良	良
翼 No. 54	良	良
翼 No. 55	否	良
翼 No. 56	良	良
翼 No. 57	否	良
翼 No. 58	否	良
翼 No. 59	良	良
翼 No. 60	良	良
翼 No. 61	良	否

※１：折損した翼で孔の形状が健全でないため計測していない。
※２：研究所にて詳細調査対象の翼であり、計測していない。

表－１１　レーシングワイヤ孔径（Ｌ側外側）点検結果

判定基準	レーシングワイヤ孔に図面指示寸法 φ[redacted]の下限 φ[redacted]ピンゲージが滑らかに通り、かつ φ[redacted]ピンゲージが通らないこと。

管理No.	φ[redacted]	φ[redacted]
翼No. 1	良	良
翼No. 2	良	良
翼No. 3	否	良
翼No. 4	否	良
翼No. 5	良	良
翼No. 6	良	良
翼No. 7	良	良
翼No. 8	否	良
翼No. 9	良	良
翼No. 10	良	良
翼No. 11	良	良
翼No. 12	良	良
翼No. 13	良	良
翼No. 14	良	良
翼No. 15	良	良
翼No. 16	良	良
翼No. 17	良	良
翼No. 18	良	良
翼No. 19	良	良
翼No. 20	否	良

管理No.	φ[redacted]	φ[redacted]
翼No. 21	良	良
翼No. 22	良	良
翼No. 23	良	良
翼No. 24	良	良
翼No. 25	良	良
翼No. 26	良	良
翼No. 27	否	良
翼No. 28	良	良
翼No. 29	良	良
翼No. 30	否	良
翼No. 31	良	良
翼No. 32	否	良
翼No. 33	良	良
翼No. 34	良	良
翼No. 35	良	良
翼No. 36	良	良
翼No. 37	良	良
翼No. 38	良	良
翼No. 39	否	良
翼No. 40	良	良

管理No.	φ[redacted]	φ[redacted]
翼No. 41	良	良
翼No. 42	否	良
翼No. 43	良	良
翼No. 44	良	良
翼No. 45	良	良
翼No. 46	良	良
翼No. 47	良	良
翼No. 48	良	良
翼No. 49	否	良
翼No. 50	否	良
翼No. 51	否	良
翼No. 52	否	良
翼No. 53	良	良
翼No. 54	良	良
翼No. 55	否	良
翼No. 56	良	良
翼No. 57	良	良
翼No. 58	良	良
翼No. 59	良	良
翼No. 60	良	良
翼No. 61	良	良

表－１２　レーシングワイヤ孔径（Ｌ側内側）点検結果

判定基準	レーシングワイヤ孔に図面指示寸法 φ[redacted]の下限 φ[redacted]ピンゲージが滑らかに通り、かつ φ[redacted]ピンゲージが通らないこと。

管理No.	φ[redacted]	φ[redacted]
翼No. 1	良	良
翼No. 2	良	良
翼No. 3	否	良
翼No. 4	否	良
翼No. 5	良	良
翼No. 6	良	良
翼No. 7	良	良
翼No. 8	否	良
翼No. 9	良	良
翼No. 10	良	良
翼No. 11	良	良
翼No. 12	良	良
翼No. 13	良	良
翼No. 14	良	良
翼No. 15	良	良
翼No. 16	良	良
翼No. 17	良	良
翼No. 18	良	良
翼No. 19	否	良
翼No. 20	良	良

管理No.	φ[redacted]	φ[redacted]
翼No. 21	良	良
翼No. 22	良	良
翼No. 23	良	良
翼No. 24	良	良
翼No. 25	否	良
翼No. 26	良	良
翼No. 27	否	良
翼No. 28	良	良
翼No. 29	良	良
翼No. 30	良	良
翼No. 31	良	良
翼No. 32	否	良
翼No. 33	否	良
翼No. 34	良	良
翼No. 35	良	良
翼No. 36	良	良
翼No. 37	否	良
翼No. 38	良	良
翼No. 39	否	良
翼No. 40	良	良

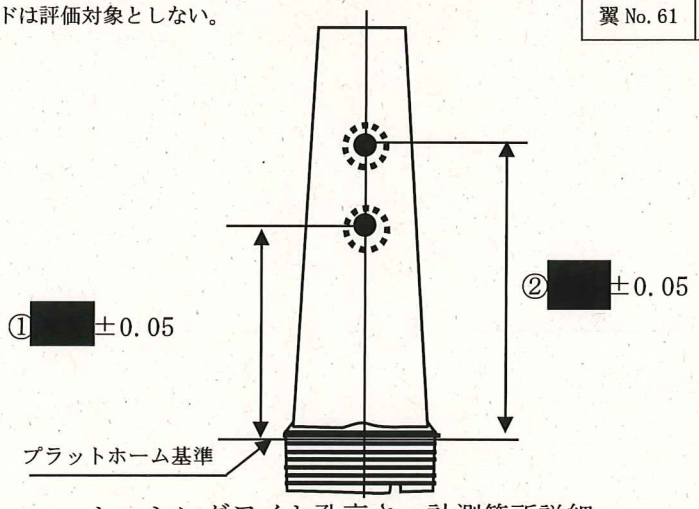
管理No.	φ[redacted]	φ[redacted]
翼No. 41	良	良
翼No. 42	否	良
翼No. 43	良	良
翼No. 44	良	良
翼No. 45	良	良
翼No. 46	良	良
翼No. 47	良	良
翼No. 48	良	良
翼No. 49	良	良
翼No. 50	否	良
翼No. 51	否	良
翼No. 52	否	良
翼No. 53	良	良
翼No. 54	良	良
翼No. 55	否	良
翼No. 56	良	良
翼No. 57	良	良
翼No. 58	良	良
翼No. 59	良	良
翼No. 60	良	良
翼No. 61	良	良

表－１３　レーシングワイヤ孔高さ（Ｒ側）点検結果

判定基準	レーシングワイヤ孔を φ[redacted]ｍｍと仮定し、高さ計測値に加算した計算値から図面指示高さ寸法を比較する。 プラットホーム基準からの「高さ寸法①[redacted]±０．０５」、「高さ寸法②[redacted]±０．０５」をそれぞれ満足していること。

管理 No.	計算値①	計算値②	結果	管理 No.	計算値①	計算値②	結果	管理 No.	計算値①	計算値②	結果
翼 No. 1	※折損翼		－	翼 No. 21	47.83	66.68	否	翼 No. 41	※客先殿調査品		－
翼 No. 2	47.80	66.69	否	翼 No. 22	47.83	66.70	否	翼 No. 42	※客先殿調査品		－
翼 No. 3	※治具に入らず		－	翼 No. 23	47.79	66.68	否	翼 No. 43	※客先殿調査品		－
翼 No. 4	47.83	66.69	否	翼 No. 24	47.85	66.69	良	翼 No. 44	※客先殿調査品		－
翼 No. 5	48.48	67.33	否	翼 No. 25	47.87	66.69	良	翼 No. 45	※客先殿調査品		－
翼 No. 6	47.80	66.65	否	翼 No. 26	※治具に入らず		－	翼 No. 46	47.78	66.67	否
翼 No. 7	47.82	66.68	否	翼 No. 27	47.77	66.68	否	翼 No. 47	47.81	66.69	否
翼 No. 8	47.80	66.68	否	翼 No. 28	47.84	66.69	否	翼 No. 48	47.79	66.68	否
翼 No. 9	47.75	66.71	否	翼 No. 29	47.81	66.71	否	翼 No. 49	47.81	66.70	否
翼 No. 10	※治具に入らず		－	翼 No. 30	47.87	66.66	良	翼 No. 50	47.83	66.69	否
翼 No. 11	47.78	66.68	否	翼 No. 31	47.78	66.67	否	翼 No. 51	47.87	66.70	良
翼 No. 12	47.79	66.68	否	翼 No. 32	47.88	66.62	否	翼 No. 52	※治具に入らず		－
翼 No. 13	47.79	66.69	否	翼 No. 33	※断面観察		－	翼 No. 53	47.80	66.70	否
翼 No. 14	48.66	67.45	否	翼 No. 34	※引張試験		－	翼 No. 54	※治具に入らず		－
翼 No. 15	47.80	66.68	否	翼 No. 35	※引張試験		－	翼 No. 55	47.79	66.68	否
翼 No. 16	47.80	66.64	否	翼 No. 36	※引張試験		－	翼 No. 56	47.86	66.70	良
翼 No. 17	47.84	66.68	否	翼 No. 37	47.83	66.69	否	翼 No. 57	47.77	66.72	否
翼 No. 18	47.81	66.70	否	翼 No. 38	47.80	66.68	否	翼 No. 58	47.95	66.81	否
翼 No. 19	47.82	66.71	否	翼 No. 39	47.79	66.68	否	翼 No. 59	48.86	67.67	否
翼 No. 20	47.82	66.70	否	翼 No. 40	47.77	66.69	否	翼 No. 60	47.95	66.45	否
								翼 No. 61	※損傷翼（変形）		－

※印の付したタービンブレードは評価対象としない。



レーシングワイヤ孔高さ　計測箇所詳細

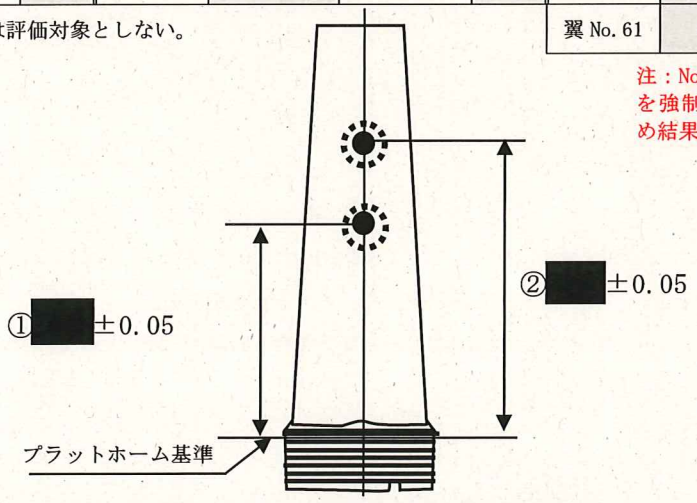
表－１４　レーシングワイヤ孔高さ（Ｌ側）点検結果

判定基準	レーシングワイヤ孔を φ[redacted]ｍｍと仮定し、高さ計測値に加算した計算値から図面指示高さ寸法を比較する。 プラットホーム基準からの「高さ寸法①[redacted]±０．０５」、「高さ寸法②[redacted]±０．０５」をそれぞれ満足していること。

管理 No.	計算値①	計算値②	結果	管理 No.	計算値①	計算値②	結果	管理 No.	計算値①	計算値②	結果
翼 No. 1	47.83	66.71	否	翼 No. 21	47.83	66.71	否	翼 No. 41	※治具に入らず		－
翼 No. 2	47.83	66.66	否	翼 No. 22	47.83	66.67	否	翼 No. 42	47.84	66.62	否
翼 No. 3	47.94	66.76	否	翼 No. 23	47.84	66.72	否	翼 No. 43	47.81	66.66	否
翼 No. 4	47.95	66.77	否	翼 No. 24	47.82	66.68	否	翼 No. 44	47.83	66.69	否
翼 No. 5	47.81	66.70	否	翼 No. 25	49.44	68.21	参考値	翼 No. 45	47.81	66.69	否
翼 No. 6	47.81	66.68	否	翼 No. 26	47.81	66.65	否	翼 No. 46	47.84	66.69	否
翼 No. 7	47.83	66.70	否	翼 No. 27	47.85	66.72	良	翼 No. 47	47.83	66.65	否
翼 No. 8	47.81	66.66	否	翼 No. 28	47.84	66.68	否	翼 No. 48	※治具に入らず		－
翼 No. 9	47.92	66.67	良	翼 No. 29	47.82	66.73	否	翼 No. 49	47.82	66.57	否
翼 No. 10	47.81	66.69	否	翼 No. 30	47.79	66.69	否	翼 No. 50	47.83	66.64	否
翼 No. 11	47.83	66.70	否	翼 No. 31	47.83	66.72	否	翼 No. 51	47.85	66.69	良
翼 No. 12	47.80	66.64	否	翼 No. 32	47.86	66.79	否	翼 No. 52	47.87	66.73	良
翼 No. 13	47.82	66.70	否	翼 No. 33	47.88	66.70	良	翼 No. 53	47.83	66.72	否
翼 No. 14	47.81	66.63	否	翼 No. 34	47.83	66.71	否	翼 No. 54	47.84	66.71	否
翼 No. 15	47.84	66.72	否	翼 No. 35	47.83	66.72	否	翼 No. 55	47.84	66.74	否
翼 No. 16	47.82	66.70	否	翼 No. 36	47.85	66.66	良	翼 No. 56	48.71	67.58	否
翼 No. 17	47.83	66.69	否	翼 No. 37	47.85	66.70	良	翼 No. 57	47.83	66.69	否
翼 No. 18	47.84	66.71	否	翼 No. 38	47.82	66.64	否	翼 No. 58	※治具に入らず		－
翼 No. 19	47.86	66.67	良	翼 No. 39	47.82	66.74	否	翼 No. 59	47.84	66.71	否
翼 No. 20	47.80	66.70	否	翼 No. 40	47.82	66.65	否	翼 No. 60	47.81	66.69	否
								翼 No. 61	47.83	66.72	否

※印の付したタービンブレードは評価対象としない。

注：No. 25 はファツリー部のき裂を強制開口したのち計測したため結果は参考値とする。



レーシングワイヤ孔高さ　計測箇所詳細

表－１５　レーシングワイヤ孔高低差（Ｒ側）（Ｌ側）結果

レーシングワイヤ孔　高低差（Ｒ側）

管理No.	計算値①	高低差
翼No.1	折損翼	
翼No.2	47.80	
翼No.3	治具に入らず	
翼No.4	47.83	0.65
翼No.5	48.48	0.68
翼No.6	47.80	0.02
翼No.7	47.82	0.02
翼No.8	47.80	0.05
翼No.9	47.75	
翼No.10	治具に入らず	
翼No.11	47.78	0.01
翼No.12	47.79	0.00
翼No.13	47.79	0.87
翼No.14	48.66	0.86
翼No.15	47.80	0.00
翼No.16	47.80	0.04
翼No.17	47.84	0.03
翼No.18	47.81	0.01
翼No.19	47.82	0.00
翼No.20	47.82	0.01
翼No.21	47.83	0.00
翼No.22	47.83	0.04
翼No.23	47.79	0.06
翼No.24	47.85	0.02
翼No.25	47.87	
翼No.26	治具に入らず	
翼No.27	47.77	0.07
翼No.28	47.84	0.03
翼No.29	47.81	0.06
翼No.30	47.87	0.09
翼No.31	47.78	0.10
翼No.32	47.88	
翼No.33	破面観察	
翼No.34	引張試験	
翼No.35	引張試験	
翼No.36	引張試験	
翼No.37	47.83	0.03
翼No.38	47.80	0.01
翼No.39	47.79	0.02
翼No.40	47.77	
翼No.41	他調査で使用	
翼No.42	他調査で使用	
翼No.43	他調査で使用	
翼No.44	他調査で使用	
翼No.45	他調査で使用	
翼No.46	47.78	0.03
翼No.47	47.81	0.02
翼No.48	47.79	0.02
翼No.49	47.81	0.02
翼No.50	47.83	0.04
翼No.51	47.87	
翼No.52	治具に入らず	
翼No.53	47.80	
翼No.54	治具に入らず	
翼No.55	47.79	
翼No.56	47.86	0.07
翼No.57	47.77	0.09
翼No.58	47.95	0.18
翼No.59	48.86	0.91
翼No.60	47.95	0.91
翼No.61	損傷翼	

管理No.	計算値②	高低差
翼No.1	折損翼	
翼No.2	66.69	
翼No.3	治具に入らず	
翼No.4	66.69	0.64
翼No.5	67.33	0.68
翼No.6	66.65	0.03
翼No.7	66.68	0.00
翼No.8	66.68	0.03
翼No.9	66.71	
翼No.10	治具に入らず	
翼No.11	66.68	
翼No.12	66.68	0.00
翼No.13	66.69	0.01
翼No.14	67.45	0.76
翼No.15	66.68	0.77
翼No.16	66.64	0.04
翼No.17	66.68	0.04
翼No.18	66.70	0.02
翼No.19	66.71	0.01
翼No.20	66.70	0.01
翼No.21	66.68	0.02
翼No.22	66.70	0.02
翼No.23	66.68	0.02
翼No.24	66.69	0.01
翼No.25	66.69	0.00
翼No.26	治具に入らず	
翼No.27	66.68	
翼No.28	66.69	0.01
翼No.29	66.71	0.02
翼No.30	66.66	0.05
翼No.31	66.67	0.01
翼No.32	66.62	0.05
翼No.33	破面観察	
翼No.34	引張試験	
翼No.35	引張試験	
翼No.36	引張試験	
翼No.37	66.69	
翼No.38	66.68	0.01
翼No.39	66.68	0.00
翼No.40	66.69	0.01
翼No.41	他調査で使用	
翼No.42	他調査で使用	
翼No.43	他調査で使用	
翼No.44	他調査で使用	
翼No.45	他調査で使用	
翼No.46	66.67	
翼No.47	66.69	0.02
翼No.48	66.68	0.01
翼No.49	66.70	0.02
翼No.50	66.69	0.01
翼No.51	66.70	0.01
翼No.52	治具に入らず	
翼No.53	66.70	
翼No.54	治具に入らず	
翼No.55	66.68	
翼No.56	66.70	0.02
翼No.57	66.72	0.02
翼No.58	66.81	0.09
翼No.59	67.67	0.86
翼No.60	66.45	1.22
翼No.61	損傷翼	

レーシングワイヤ孔　高低差（Ｌ側）

管理No.	計算値①	高低差
翼No.1	47.83	0.00
翼No.2	47.83	0.11
翼No.3	47.94	0.01
翼No.4	47.95	0.14
翼No.5	47.81	0.00
翼No.6	47.81	0.02
翼No.7	47.83	0.02
翼No.8	47.81	0.11
翼No.9	47.92	0.11
翼No.10	47.81	0.02
翼No.11	47.83	0.03
翼No.12	47.80	0.02
翼No.13	47.82	0.01
翼No.14	47.81	0.03
翼No.15	47.84	0.02
翼No.16	47.82	0.01
翼No.17	47.83	0.01
翼No.18	47.84	0.02
翼No.19	47.86	0.06
翼No.20	47.80	0.03
翼No.21	47.83	0.00
翼No.22	47.83	0.01
翼No.23	47.84	0.02
翼No.24	47.82	1.62
翼No.25	49.44	1.63
翼No.26	47.81	0.04
翼No.27	47.85	0.01
翼No.28	47.84	0.02
翼No.29	47.82	0.03
翼No.30	47.79	0.04
翼No.31	47.83	0.03
翼No.32	47.86	0.02
翼No.33	47.88	0.05
翼No.34	47.83	0.00
翼No.35	47.83	0.02
翼No.36	47.85	0.00
翼No.37	47.85	0.03
翼No.38	47.82	0.00
翼No.39	47.82	0.00
翼No.40	47.82	
翼No.41	治具に入らず	
翼No.42	47.84	0.03
翼No.43	47.81	0.02
翼No.44	47.83	0.02
翼No.45	47.81	0.03
翼No.46	47.84	0.01
翼No.47	47.83	
翼No.48	治具に入らず	
翼No.49	47.82	0.01
翼No.50	47.83	0.02
翼No.51	47.85	0.02
翼No.52	47.87	0.04
翼No.53	47.83	0.01
翼No.54	47.84	0.00
翼No.55	47.84	0.87
翼No.56	48.71	0.88
翼No.57	47.83	
翼No.58	治具に入らず	
翼No.59	47.84	0.03
翼No.60	47.81	0.02
翼No.61	47.83	0.00

管理No.	計算値②	高低差
翼No.1	66.71	0.05
翼No.2	66.66	0.10
翼No.3	66.76	0.01
翼No.4	66.77	0.07
翼No.5	66.70	0.02
翼No.6	66.68	0.02
翼No.7	66.70	0.04
翼No.8	66.66	0.01
翼No.9	66.67	0.02
翼No.10	66.69	0.01
翼No.11	66.70	0.06
翼No.12	66.64	0.06
翼No.13	66.70	0.07
翼No.14	66.63	0.09
翼No.15	66.72	0.02
翼No.16	66.70	0.01
翼No.17	66.69	0.02
翼No.18	66.71	0.04
翼No.19	66.67	0.03
翼No.20	66.70	0.01
翼No.21	66.71	0.04
翼No.22	66.67	0.05
翼No.23	66.72	0.04
翼No.24	66.68	1.53
翼No.25	68.21	1.56
翼No.26	66.65	0.07
翼No.27	66.72	0.04
翼No.28	66.68	0.05
翼No.29	66.73	0.04
翼No.30	66.69	0.03
翼No.31	66.72	0.07
翼No.32	66.79	0.09
翼No.33	66.70	0.01
翼No.34	66.71	0.01
翼No.35	66.72	0.06
翼No.36	66.66	0.04
翼No.37	66.70	0.06
翼No.38	66.64	0.10
翼No.39	66.74	0.09
翼No.40	66.65	
翼No.41	治具に入らず	
翼No.42	66.62	
翼No.43	66.66	0.04
翼No.44	66.69	0.03
翼No.45	66.69	0.00
翼No.46	66.69	0.00
翼No.47	66.65	0.04
翼No.48	治具に入らず	
翼No.49	66.57	
翼No.50	66.64	0.07
翼No.51	66.69	0.05
翼No.52	66.73	0.04
翼No.53	66.72	0.01
翼No.54	66.71	0.01
翼No.55	66.74	0.03
翼No.56	67.58	0.84
翼No.57	66.69	0.89
翼No.58	治具に入らず	
翼No.59	66.71	
翼No.60	66.69	0.02
翼No.61	66.72	0.03
		0.01

評価	レーシングワイヤ孔高さの点検結果より、隣接するタービンブレードとの高低差が大きい箇所が確認された

タービンブレード疲労破壊に関する要因分析に基づく要因調査結果

【要因１３】レーシングワイヤ取付

レーシングワイヤ止端部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。

（１） 調査内容及び判定基準

・至近の本格点検記録により止端部形状や取付状態の点検結果を確認し、レーシングワイヤ止端部形状や取付状態に異常のないこと

（２）点検結果

・止端部形状や取付状態点検結果

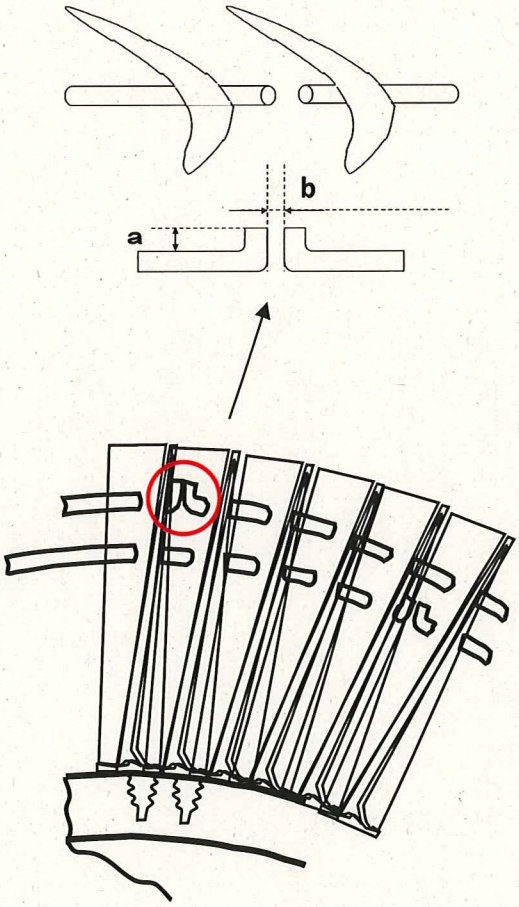
	点検対象	結果	点検日	備考
1	止端部形状	異常なし※14	2018/10/31	図－７、８
2	取付状態	異常なし※14	2018/10/31	図－７、８

※１４至近の第７回定検での本格点検記録（計測日：1994/11/1）を確認し、止端部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。

単位：ｍｍ

計測位置	基準値	上　段	下　段
第１　　ａ	[redacted]	５．４	６．１
第１　　ｂ		１．６	１．５
第２　　ａ		５．９	６．２
第２　　ｂ		１．２	１．２

計測位置の第１は，インペラ固定キー側
反対側を第２とする。

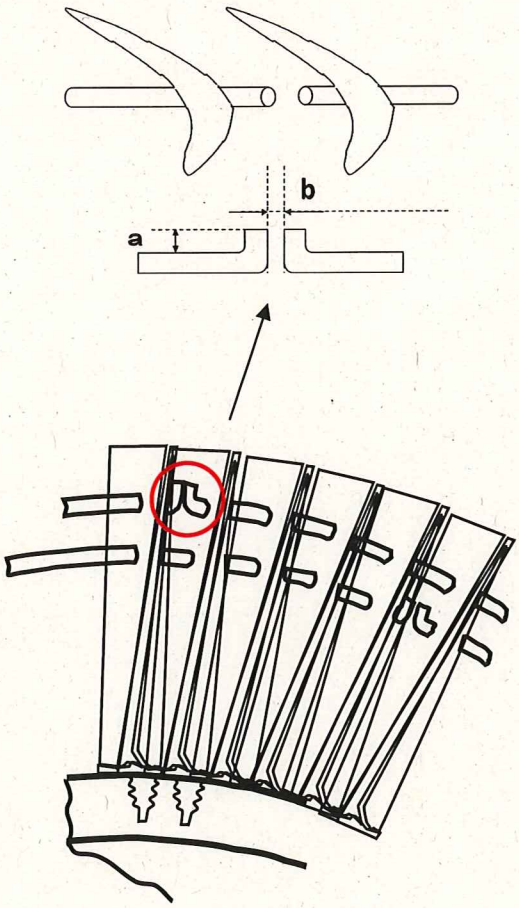


図－７　レーシングワイヤ止端部形状と取付状態
レーシングワイヤＲ側

単位：ｍｍ

計測位置	基準値	上　段	下　段
第１　　ａ	[redacted]	５．６	５．４
第１　　ｂ		１．３	１．４
第２　　ａ		５．４	５．８
第２　　ｂ		１．２	１．２

計測位置の第１は、インペラ固定キー側
反対側を第２とする。



図－８　レーシングワイヤ止端部形状と取付状態
レーシングワイヤＬ側

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

【要因１４】ブレード取外・取付作業

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。

（１） 調査内容及び判定基準

・過去の点検記録の確認及び外観目視点検を実施し、過去の点検時にタービンブレードの取外・取付作業によるファツリー形状の変形、接触面の当たり状態が変わった可能性について確認すること

（２）点検結果

・過去の点検記録の確認結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	点検記録	取外・取付 実績あり※15	2019/1/7	－

※１５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。

・外観目視点検結果

	点検対象	結果	点検日	備考
2	ファツリー部	異常あり※16	2019/1/7	－

※１６Ｌ側過給機のロータファツリー部端部に変形を確認。

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

【要因１５】腐食・汚れ

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。

（１）調査内容及び判定基準

・目視点検を実施し、腐食・汚れの有無を確認すること

（２）点検結果

・目視点検

	点検対象	結果	点検日	備考
1	ファツリー部	汚れあり※１７	2018/10/17	－

※１７酸化スケール及び煤と思われる汚れを確認。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。

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

【要因１６】運転負荷

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。

（１）調査内容及び判定基準

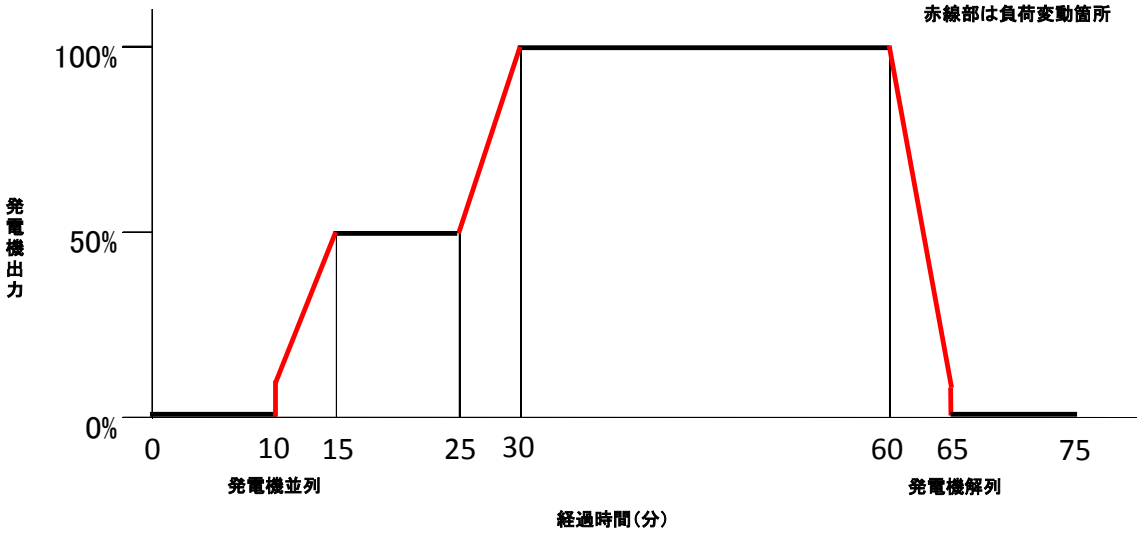
・過去の非常用ディーゼル発電機定例試験の出力上昇曲線について確認し、運転負荷上昇率に変更がないこと

（２）点検結果

・出力上昇曲線調査結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	出力上昇曲線	異常なし※１８	2019/2/21	図－９

※１８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。



図－９　非常用ディーゼル発電機出力上昇曲線

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

【要因１７】運転時間、起動回数

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。

（１）調査内容及び判定基準

・プラントの運転開始からの当該Ｄ／Ｇの総運転時間、起動回数について、非常用ディーゼル発電機（Ａ）と比較し、運転実績に特異性がないこと

（２）点検結果

・運転開始からの総運転時間、起動回数調査結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	総運転時間	異常なし※１９	2018/9/14	表―１６
2	起動回数	異常なし※１９	2018/9/14	表－１７

※１９　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。

表－１６　非常用ディーゼル発電機総運転時間(2018/8/31 時点)

１号機	非常用ディーゼル発電機（Ａ）	非常用ディーゼル発電機（Ｂ）
総運転時間※２０	約５４３時間	約５６２時間

※２０総運転時間は、定例試験記録より抽出し、建設時の試運転等は対象外

表－１７　非常用ディーゼル発電機起動回数(2018/8/31 時点)

１号機	非常用ディーゼル発電機（Ａ）	非常用ディーゼル発電機（Ｂ）
起動回数※２１	４２３回	４３７回

※２１起動回数は、定例試験記録より抽出し、建設時の起動回数等は対象外

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

【要因１８】保守・整備

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。

（１）調査内容及び判定基準

・前回の過給機本格点検記録を確認し、ブレードを接触させた等の記載がないこと

（２）点検結果

・本格点検記録調査結果

	点検対象	結果	点検日	備考
1	過給機本格点検記録	異常なし※２２	2018/10/31	－

※２２前回の過給機本格点検記録（第１４回定期検査、２００５年）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。

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

【要因１９】経時的変化

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。

（１）調査内容及び判定基準

・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を実施し、寸法測定結果が設計値内にあること

（２）点検結果

・三次元計測結果

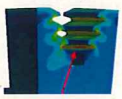
	点検対象	結果	点検日	備考
1	タービンブレードファツリー部及びロータファツリー部	異常あり※２３	2019/2/8	別紙－４

※２３一部の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。
一部の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。

上記の点検結果を踏まえて、タービンブレードファツリー部及びロータブレードファツリ部の応力解析結果を図－１０に示す。

ファツリー部応力
受圧面側：[redacted]MPa
背面側　：[redacted]MPa
材料強度（[redacted]）
引張強さ：[redacted]MPa
耐力　　：[redacted]MPa

タービンブレードファツリー部



ファツリー部応力
受圧面側：[redacted]MPa
背面側　：[redacted]MPa
材料強度 [redacted]
引張強さ：[redacted]MPa
耐力　　：[redacted]MPa

ロータファツリー部

図－１０　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応力解析結果

図－１０より、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については、弾性限度を逸脱することがないため、経時的な寸法変化が生じることはない。

過給機タービンブレード応力解析　レーシングワイヤ遠心力荷重の作用方向の検討

（１）解析モデル

・過給機型式：[redacted]

・解析ソフトウェア：ANSYS Mechanical Ver.18.0

解析モデルの詳細を以下に示す。

（２）解析条件

・材料定義

解析で使用した材料物性値を表－１に示す。

表－１　解析モデルの物性値

品名	材質	密度 (Kg/m³)	ヤング率 (GPa)	線膨張係数 (1/℃)	出典
タービンブレード	[redacted]				※１
ロータシャフト					※２
レーシングワイヤ					※１

（出典）※１：Total Materia Special Metal Corporation

※２：日本機械学会　金属材料の弾性係数

（３）解析の境界条件

・解析の境界条件を図―１に示す。

A　周期対称境界：ロータシャフトの圧力面側と負圧面側を周期対称境界とする。

B　回転速度　　：工場試験データによる。

C　排ガス圧力　：工場試験データによる。

D　周方向拘束　：ロータシャフトの後縁側を周方向拘束とする。

E　軸方向拘束　：ロータシャフトの前縁側を軸方向拘束とする。

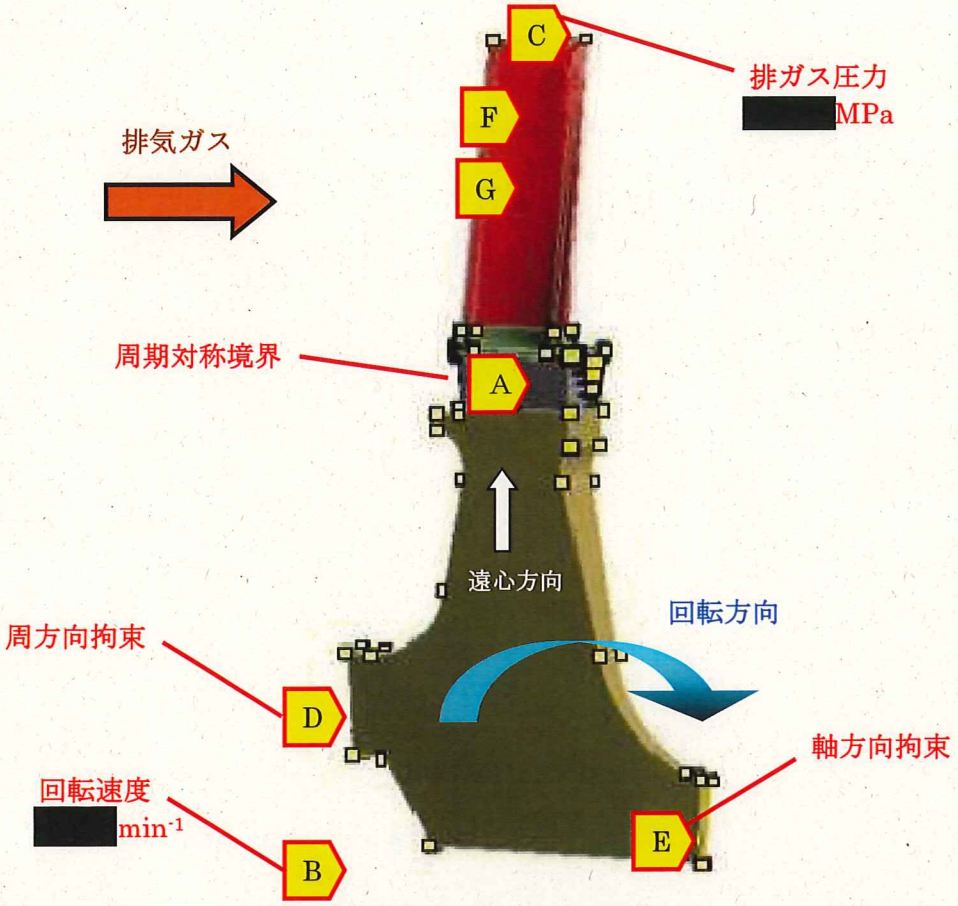
F　外周側レーシングワイヤ遠心力：[redacted]N（１翼分のワイヤ質量×半径×角速度^２より算出）

レーシングワイヤ半径[redacted]mm

G　内周側レーシングワイヤ遠心力：[redacted]N（１翼分のワイヤ質量×半径×角速度^２より算出）

レーシングワイヤ半径[redacted]mm

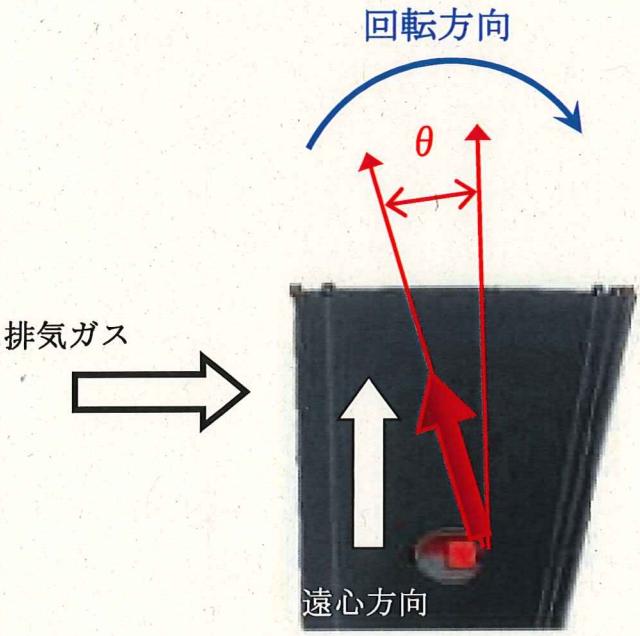
解析の温度条件は過給機運転時の[redacted]℃による。



図―１　解析境界条件

・レーシングワイヤ遠心力作用方向

レーシングワイヤ遠心力作用方向は、図－２の θ 方向で、５°、１０°、１５°の３ケース解析する。

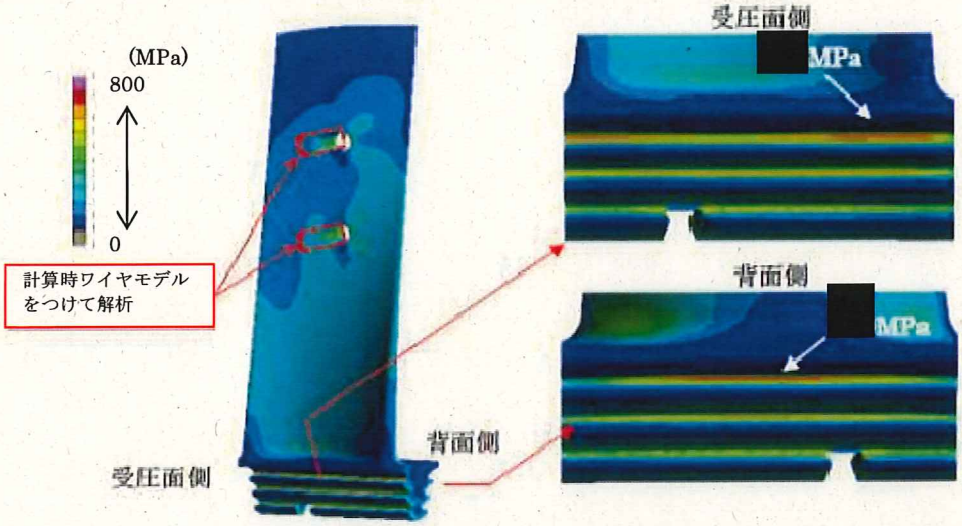


図―２　遠心力作用方向

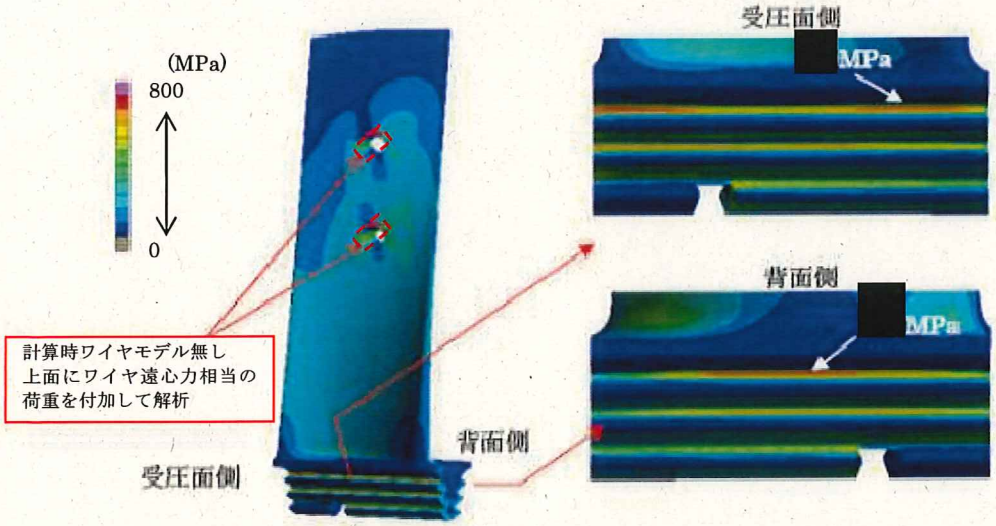
（４）解析結果

・付加荷重による解析結果の確認

レーシングワイヤをモデル化して解析した結果と、付加荷重／作用角度０°で解析した結果を比較し、付加荷重による解析の妥当性を確認する。図－３にレーシングワイヤをモデル化して解析した結果、図－４にワイヤモデルを無くし、レーシングワイヤ孔外周部に作用方向０°で遠心力荷重を付加して解析した結果を示す。２つの結果の比較により、付加荷重計算ではわずかに受圧面側の応力が低下し、背面側の応力が増加しているものの、ほぼ同じ結果が得られているものと判断した。



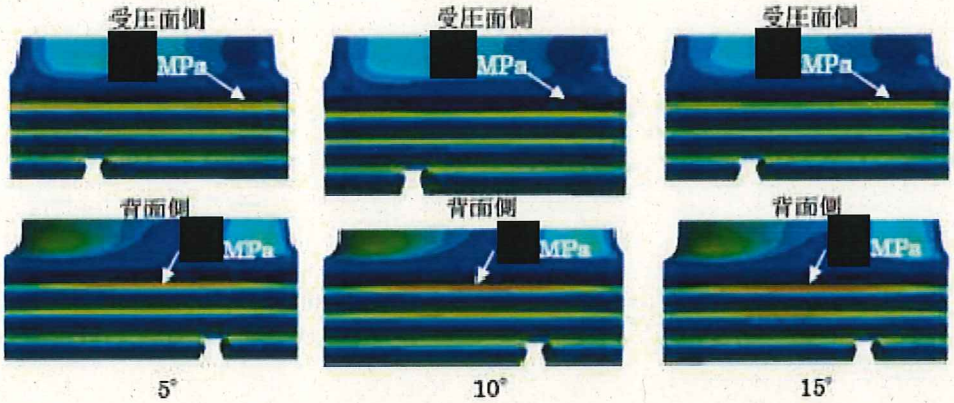
図－３　運転時の相当応力分布（レーシングワイヤモデルで計算）



図－４　運転時の相当応力分布（レーシングワイヤ付加荷重で計算）

・付加荷重の作用方向に傾きがある場合の解析結果

図－５に作用方向が５°、１０°、１５°のときのファツリー部の応力コンター図を示す。この結果より、レーシングワイヤによる遠心力の作用方向に傾きがある場合には、傾斜が付くほど、受圧面側ファツリー部の応力が低下し、背面側ファツリー部の応力が高まることが確認された。特に受圧面側については大きく応力が低下し、１０°以上の傾きがある場合には、材料の弾性変形の範囲内となっている。表－２に解析結果をまとめた。



図－５　付加荷重方向の変化と相当応力分布

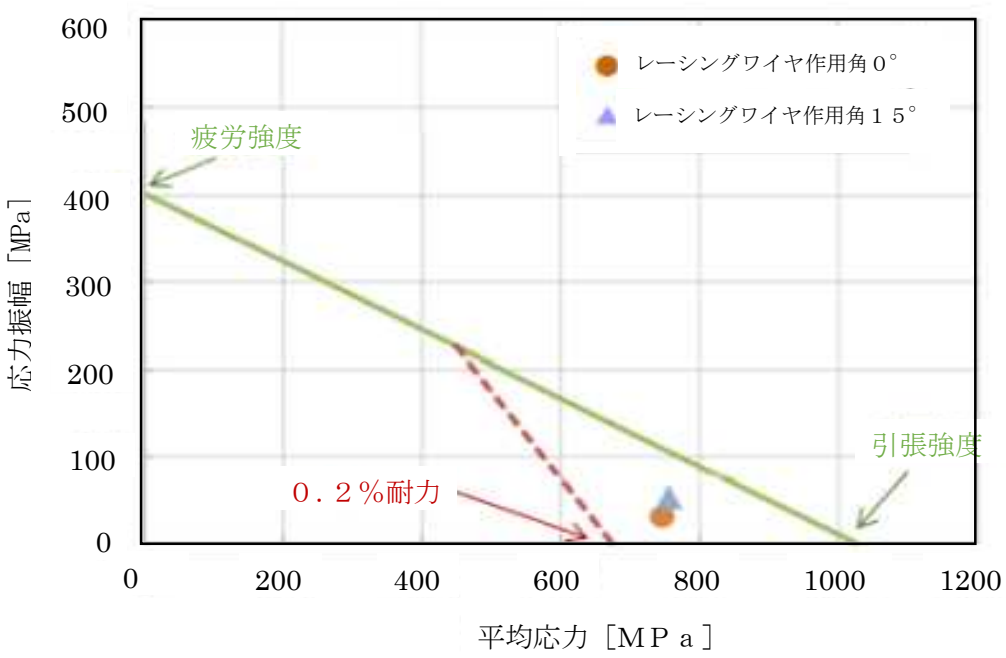
表－２　付加荷重による応力解析結果一覧　（単位：ＭＰａ）

No.	排ガス圧力	ワイヤモデル／付加荷重	付加荷重作用角度	受圧面側ファツリー部	背面側ファツリー部	材料0.2%耐力	材料引張強度
1	あり	荷重なし	なし	[redacted]	[redacted]	[redacted]	[redacted]
2	あり	モデル	なし				
3	あり	付加荷重	0°				
4	あり	付加荷重	5°				
5	あり	付加荷重	10°				
6	あり	付加荷重	15°				

・高サイクル疲労評価

付加荷重の作用方向に傾きを付けて計算した静的応力解析の結果について、レーシングワイヤの付加荷重の作用方向を０°及び１５°傾けた場合について、ファツリー部第一くびれタービンブレードに生じる相当応力の差から平均応力と応力振幅を算出し、修正グッドマン線図にプロットした結果を図－６に示す。

タービンブレードに発生する平均応力と応力振幅は、作用角度が付いた場合に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が確認された。



図－６　修正グッドマン線図

過給機ロータアッセンブリモデルによる固有値解析結果

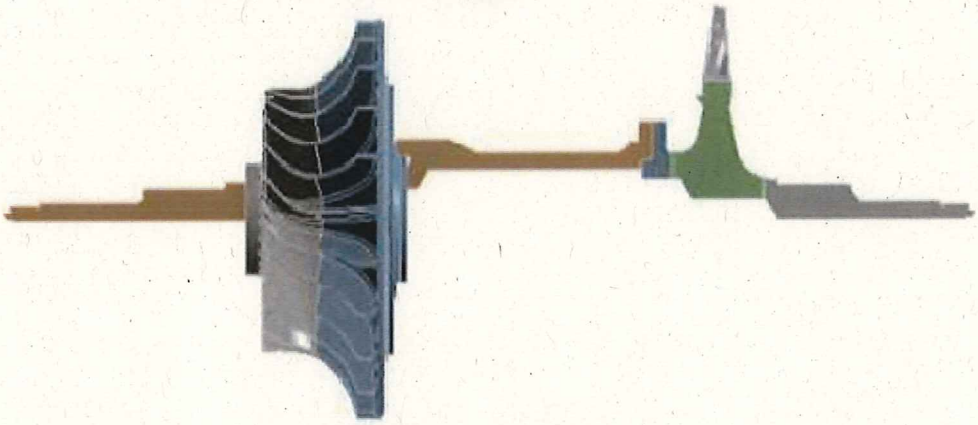
起動・停止過程における過給機の過回転による過大応力（共振）の影響を確認するため、タービンブレードとロータシャフトのアッセンブリモデルにて固有値解析を実施した。なお、タービンブレードとロータシャフトのハンマリング試験を実施し、解析結果の妥当性を確認した。

（１） 解析方法

・過給機型式：[redacted]

・解析ソフトウェア：ANSYS Mechanical Ver.18.0

・解析モデル：ロータアッセンブリ固有値解析モデル図を「図－１」に示す。
全てを３Ｄモデル化した場合には計算が収束しないことから、タービン翼数[redacted]枚より１／[redacted]カットモデルとした。一方でインペラを１／[redacted]にカットすると計算できなかったことから、インペラのみフルモデルとし、その他は１／[redacted]カットモデルにて計算を行った。



図－１　ロータアッセンブリ固有値解析モデル

（２）解析結果

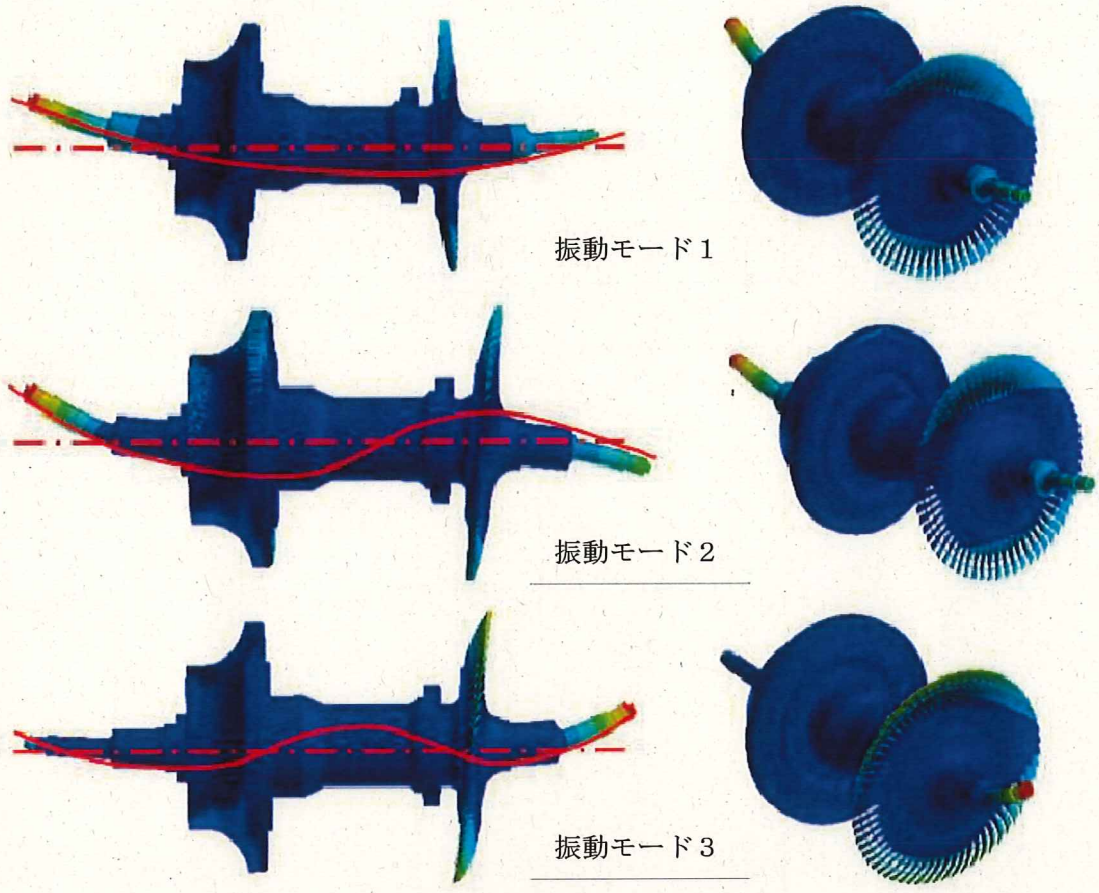
固有値解析結果を「表－１」、過給機回転周波数を「表－２」、振動モード図を「図－２」に示す。

表－１　固有値解析結果

振動モード	固有値（Ｈｚ）
1	[redacted]
2	
3	

表－２　過給機回転周波数

回転次数	回転周波数（Ｈｚ）
1	[redacted]
2	
3	



図－２　振動モード図

ロータアッセンブリモデルによる固有値解析より、振動モード１の固有値は回転１次周波数より大きく、定格運転状態までの間には危険速度を通過しない結果となった。

また、「図－２　振動モード図」に示すとおり、タービンブレードの振れが大きくなる振動モード３の固有値は[redacted]Ｈｚと高く、通常の運転において、このような振動状態にはならないものと思われる。

よって、ロータアッセンブリモデルによる固有値解析にて過大な応力が発生しないことを確認した。

（３）タービンブレードのハンマリング試験による固有振動数計測結果

・計測方法

計測対象：外観より接触痕等の少ない極力健全なブレードとして下記６枚を選定

Ｒ側Ｎｏ．４４、４９、５０、Ｌ側Ｎｏ．２、１０、３０

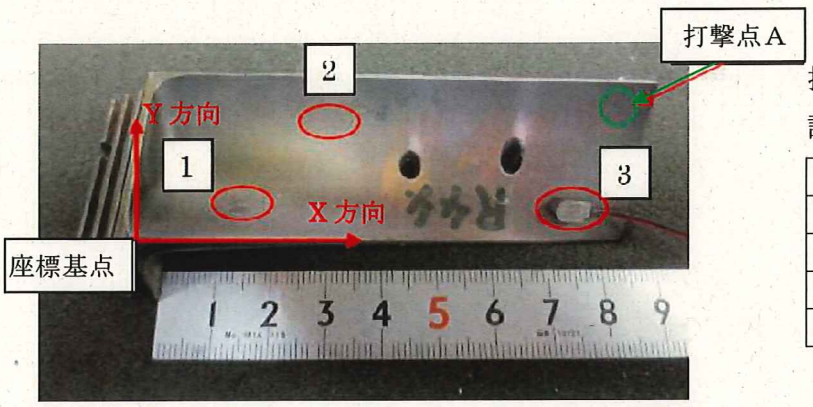
計測器：加速度ピックアップ

インパルスハンマ

ＦＦＴアナライザ

振動解析ソフト

計測位置：打撃点Ａを固定し、計測点１～３を順次移動する。



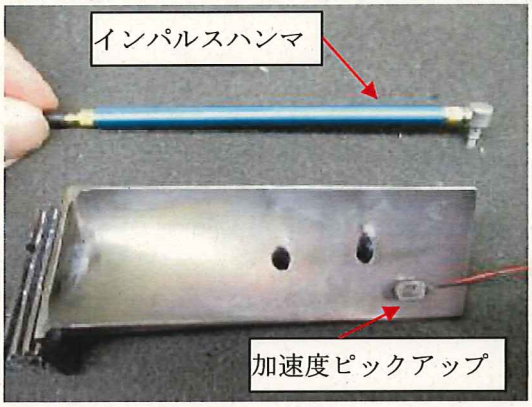
打撃点：Ａ（固定）

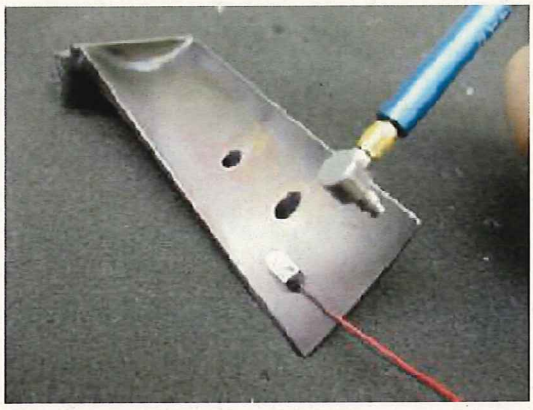
計測点：1、2、3（移動）

	座標（mm）	
計測点	X	Y
1	15	10
2	30	25
3	75	10

計測方法：各計測点の周波数応答関数（伝達関数）を計測収集し、固有振動数（ピーク値）を確認する。

ブレードの支持方法は、スポンジ上に置き、自由支持状態で計測する。





計測状態写真

・計測結果及び解析結果

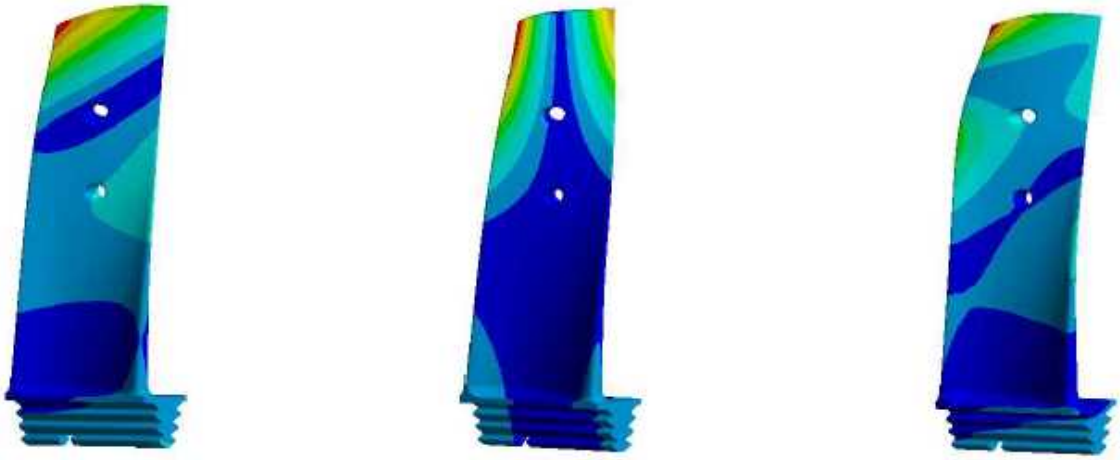
計測結果と解析結果を「表－３」に示す。

計測結果と解析結果はおよそ１０％程度の差が見られたが、概ね一致しており、固有値解析の妥当性が確認されたものと考える。

表－３　計測結果と解析結果

振動モード	計測結果（Ｈｚ）数字はＮｏ．を指す						計測平均	解析結果	差
	４４	４９	５０	２	１０	３０	①（Ｈｚ）	②（Ｈｚ）	②／①（％）
1	[redacted]								89.0
2									92.7
3									90.1

また、解析した振動モード図（変形）を「図－３」に示す。



振動モード１　　振動モード２　　振動モード３

図－３　振動モード図（変形）

（４）ロータシャフトのハンマリング試験による固有振動数計測結果

・計測方法

計測対象：Ｌ側ロータシャフト

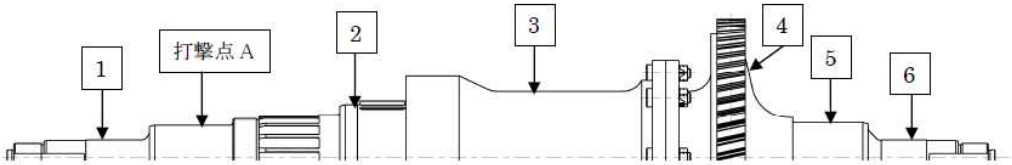
計測器：加速度ピックアップ

インパルスハンマ

ＦＦＴアナライザ

振動解析ソフト

計測位置：打撃点Ａを固定し、計測点１～６を順次移動する。



計測方法：各計測点の周波数応答関数（伝達関数）を計測収集し、固有振動数（ピーク値）を確認する。

ロータの支持方法は、スポンジ上に置き、自由支持状態で計測する。

計測状態写真

・計測結果及び解析結果

計測結果と解析結果を「表－４」に示す。

解析結果は、「図－４　ロータシャフト固有値解析モデル」に示すとおり、ハンマリング試験を行ったロータシャフトをモデル化して実施した。

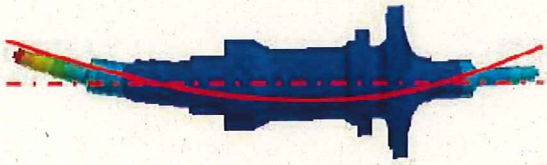
計測結果と解析結果は概ね一致しており、固有値解析の妥当性が確認された。

表－４　計測結果と解析結果

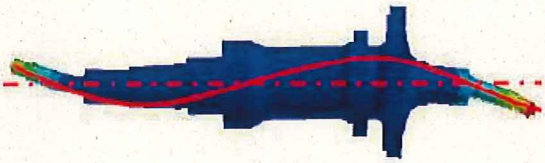
振動モード	計測結果①（Ｈｚ）	解析結果②（Ｈｚ）	差②／①(%)
1	[redacted]		９７．７
2			９６．０
3			９５．７

図－４　ロータシャフト固有値解析モデル

また、解析した振動モード図（変形）を「図－５」に示す。



振動モード１



振動モード２

振動モード３

図－５　振動モード図（変形）

タービンブレードレーシングワイヤ孔加工に関する確認結果

タービンブレードレーシングワイヤ孔加工は、図－１に示す加工治具を用いて加工する。加工治具は、治具台座とドリルビットガイドが一体でボルト留めされるが、レーシングワイヤ孔の高さ方向へのずれが発生する可能性について、加工治具を構成するパーツの組立寸法を評価し、位置ずれの要因について調査を実施した。

孔位置がずれる可能性を調査した結果、以下の２つの要素により発生する可能性を確認した。

（１）位置設定プレートは、治具ベース固定ボルトの緩み及びタービンブレードファツリー部固定治具の調整代により最大[redacted]ｍｍの位置調整が可能であることを確認

・治具ベース固定ボルトの緩み：[redacted]ｍｍ

・位置設定プレート調整代：[redacted]ｍｍ

・合計：[redacted]ｍｍ

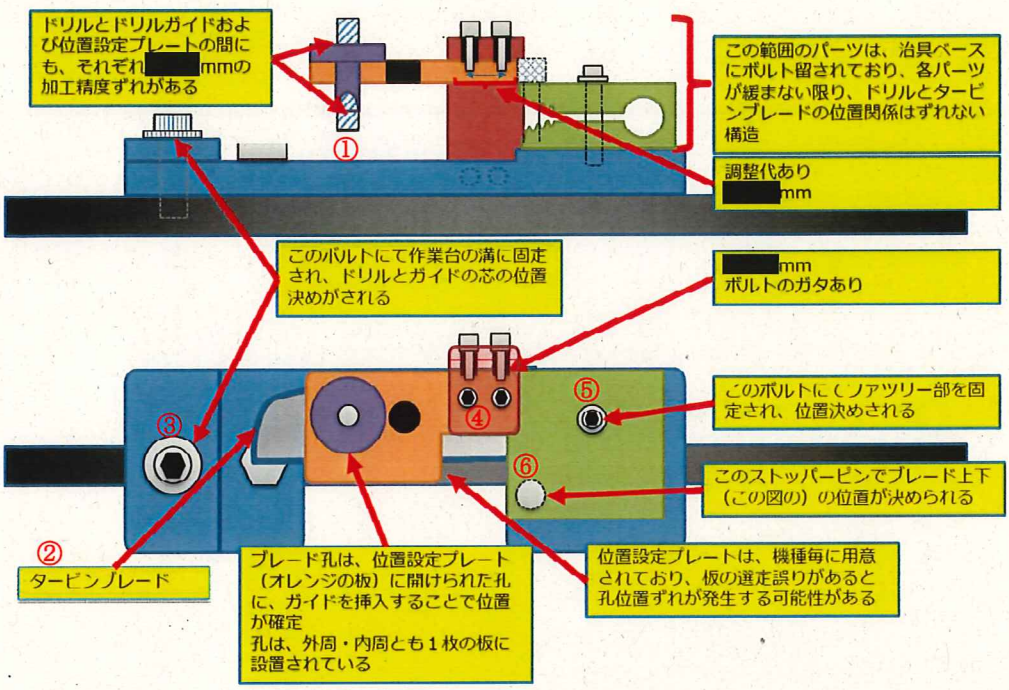
（２）位置設定プレートとドリルガイド及びドリルとの寸法差により、最大[redacted]ｍｍの製作誤差が発生することを確認

・位置設定プレートとドリルガイド寸法差：[redacted]ｍｍ

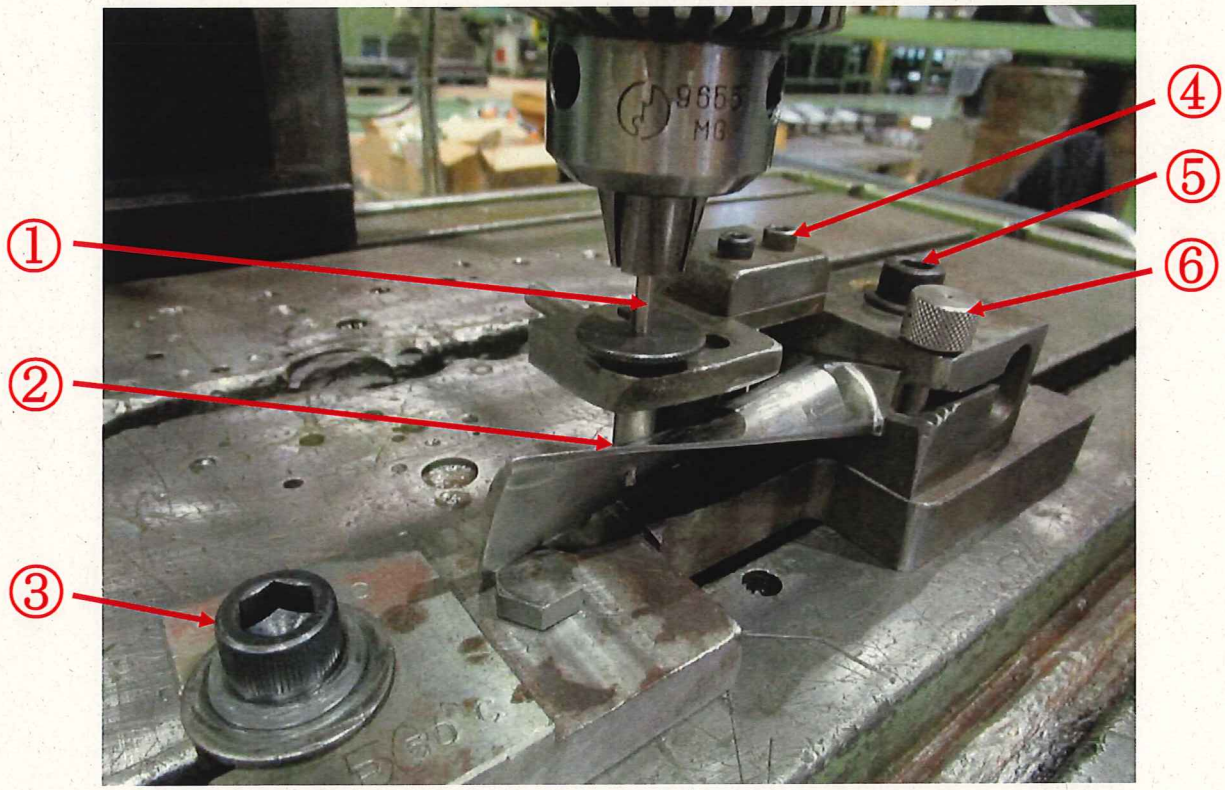
・ドリルガイドとドリル寸法差：[redacted]ｍｍ

・合計：[redacted]ｍｍ

（１）の固定ボルトが緩んでいた場合は、（２）製作誤差の最大値が加わることで最大[redacted]ｍｍのタービンブレードレーシングワイヤ孔高さの位置ずれが発生する可能性があることを確認した。



図－１　加工治具



参考　タービンブレードレーシングワイヤ孔加工状況（再現）

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　三次元計測結果

１．計測対象

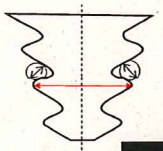
・任意性を考慮し、全タービンブレードファツリー部、ロータファツリー部の約１０％とし、Ｒ側過給機及びＬ側過給機より各[redacted]枚ずつ選定する。

・オーバピン計測※1で設計寸法どおりのブレードと設計寸法を逸脱したブレードより、任意のブレードを選定する。

※１球面マイクロメータ又はピンゲージを用いてファツリー部の第２くびれ部を計測

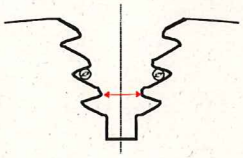
タービンブレードファツリー部：φ[redacted]mm（－０．０３～０）

計測位置



ロータファツリー部：φ[redacted]mm（－０．０２２～０．００３）

計測位置



２．計測結果

タービンブレードファツリー部は、全体に厚みがあることが認められた。

ロータファツリー部は、[redacted]翼中３翼について背面側に厚みのある部分が認められた。

なお、図中の寸法ゲージは、赤色＋０．０５mm　～　緑色±０　～　濃青色－０．０５mmを示す。

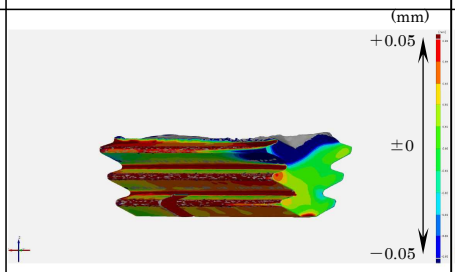
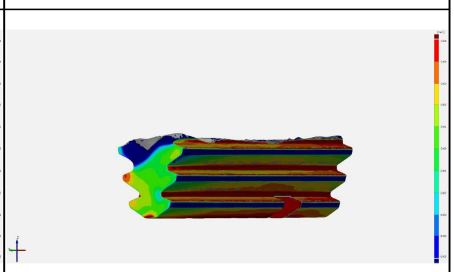
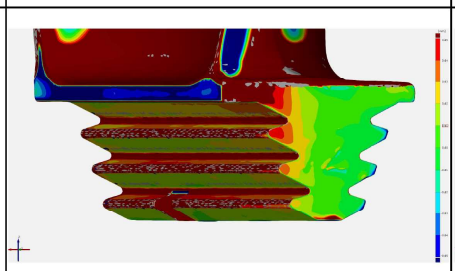
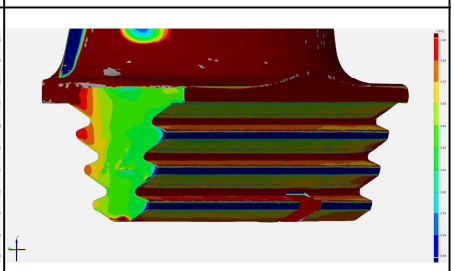
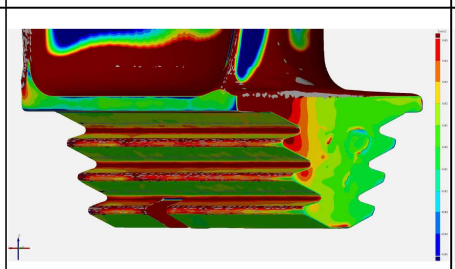
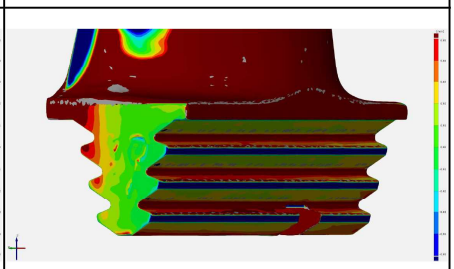
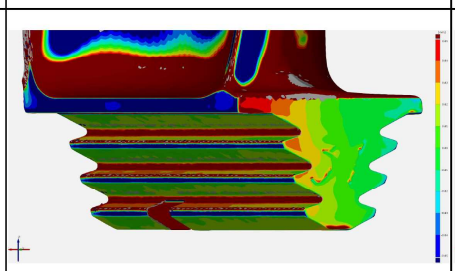
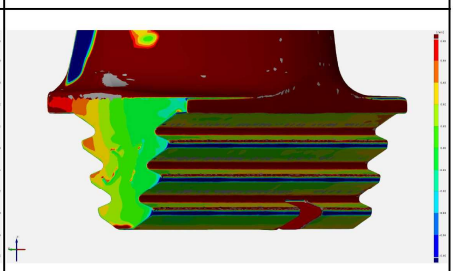
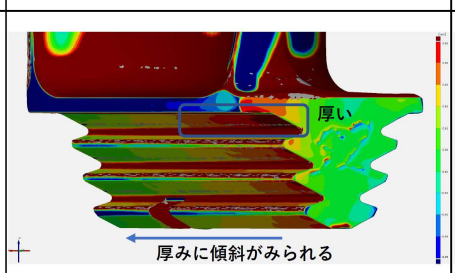
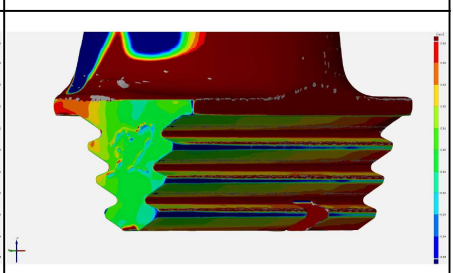
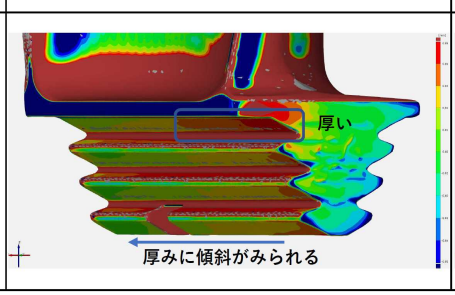
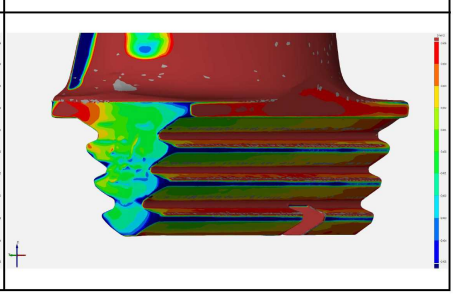
図－１　Ｒ側過給機のタービンブレードファツリー形状　三次元計測結果　参照

図－２　Ｌ側過給機のタービンブレードファツリー形状　三次元計測結果　参照

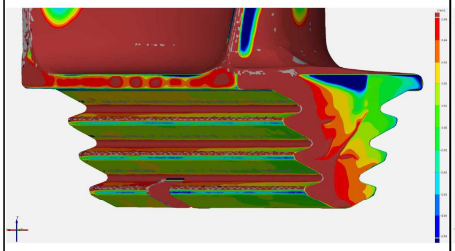
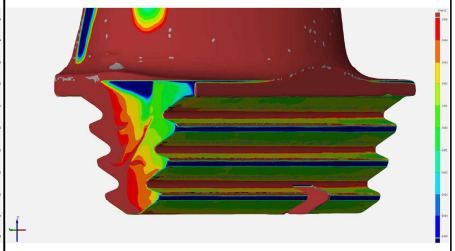
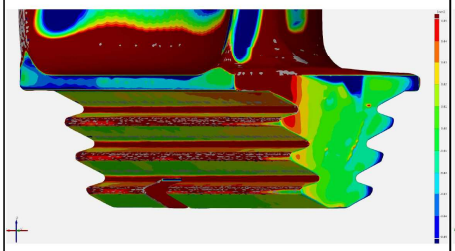
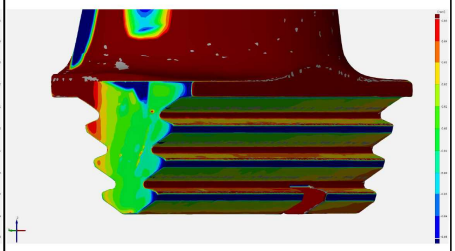
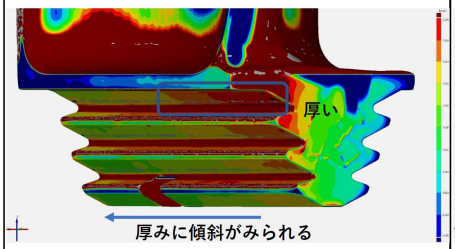
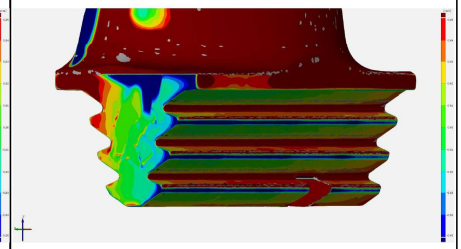
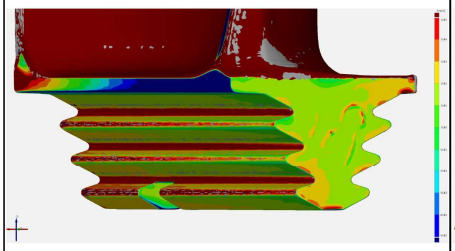
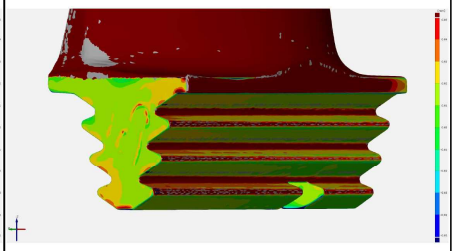
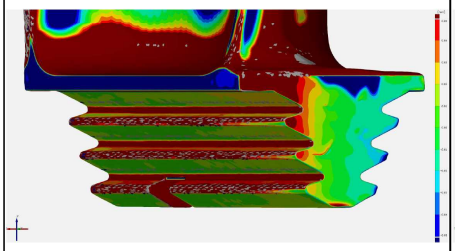
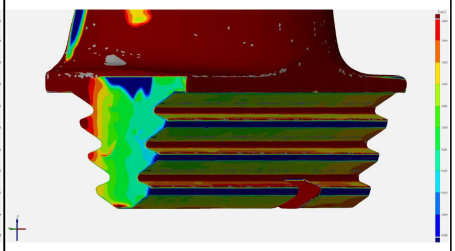
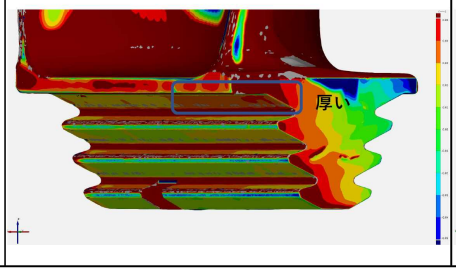
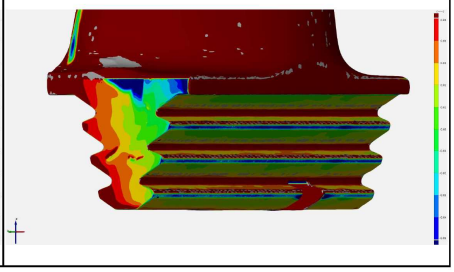
図―３　Ｒ側過給機のロータファツリー形状　三次元計測結果　参照

図―４　Ｌ側過給機のロータファツリー形状　三次元計測結果　参照

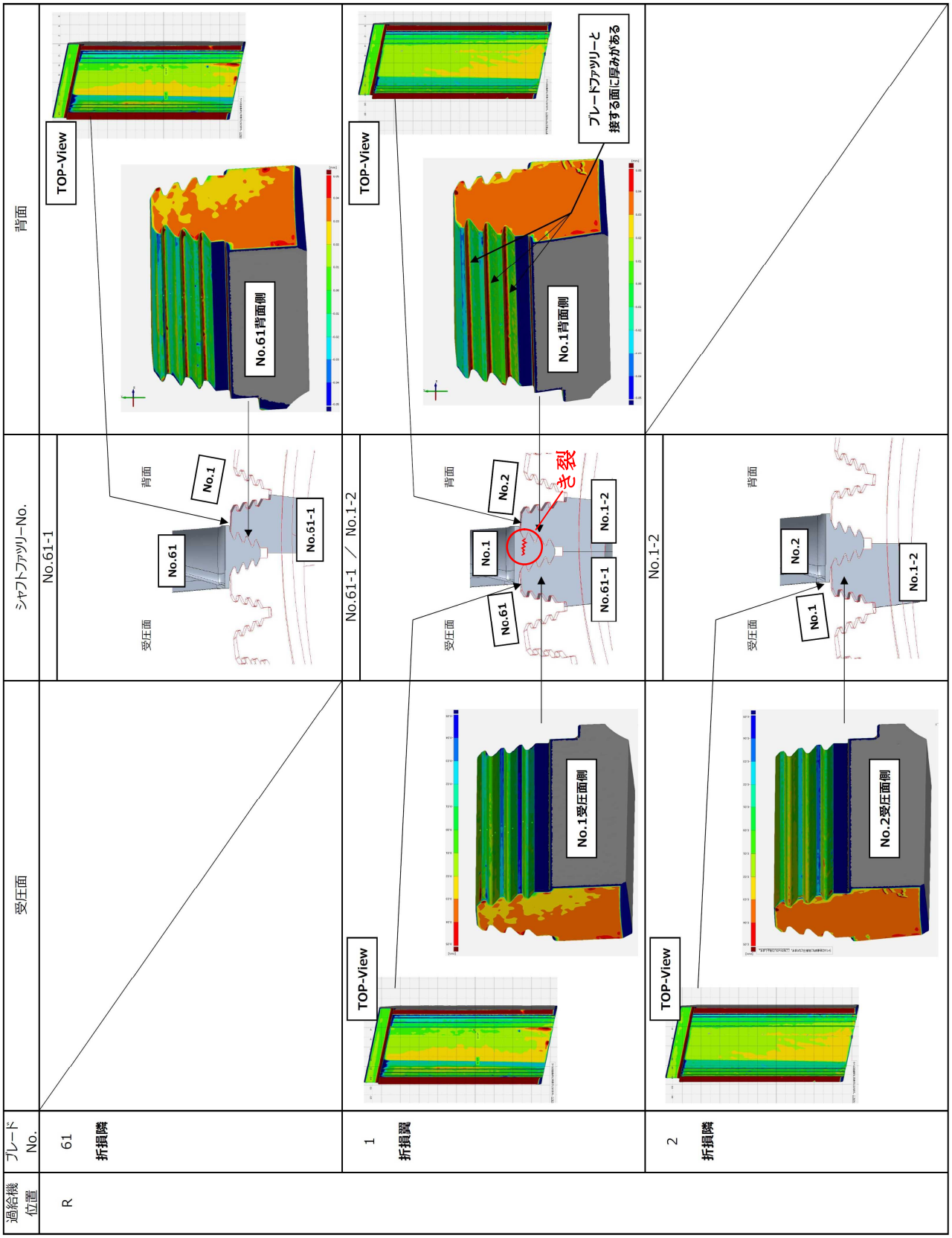
図－１　Ｒ側過給機のタービンブレードファツリー形状　三次元計測結果（１／１）

過給機位置	ブレード No.	受圧面	背面
R側	1 **折損**		
	12 **良の代表**		
	29 **良の代表**		
	31 **否の代表** **（細い）**		
	52 **否の代表** **（太い）** 冶具に入らない		
	54 **否の代表** **（太い）** 冶具に入らない		

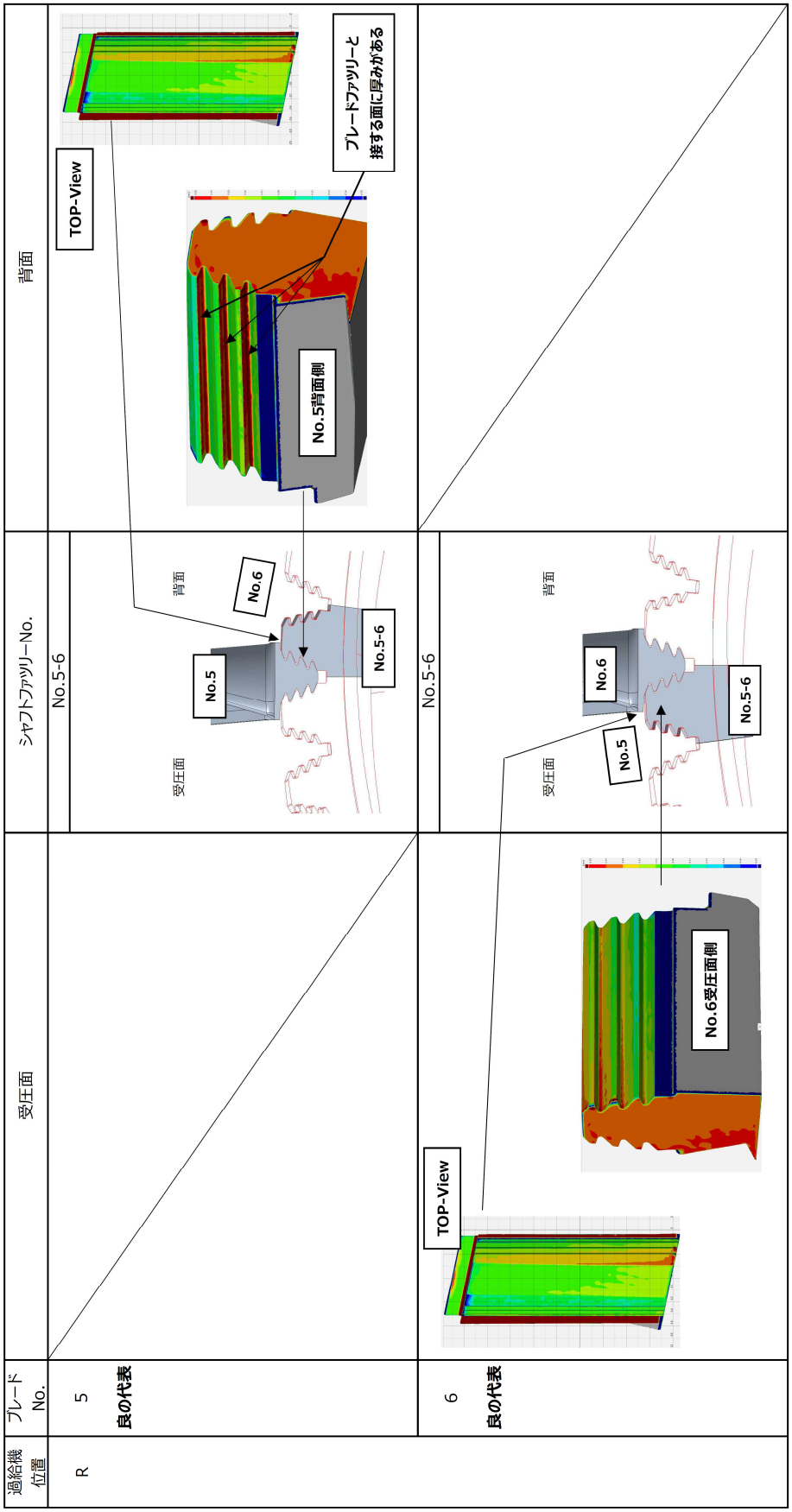
図－２　Ｌ側過給機のタービンブレードファツリー形状　三次元計測結果（１／１）

過給機位置	ブレード No.	受圧面	背面
L側	32 **否の代表（細い）**		
	47 **良の代表**		
	48 **否の代表（太い）** 冶具に入らない		
	49 **良の代表**		
	54 **良の代表**		
	58 **否の代表（太い）** 冶具に入らない		

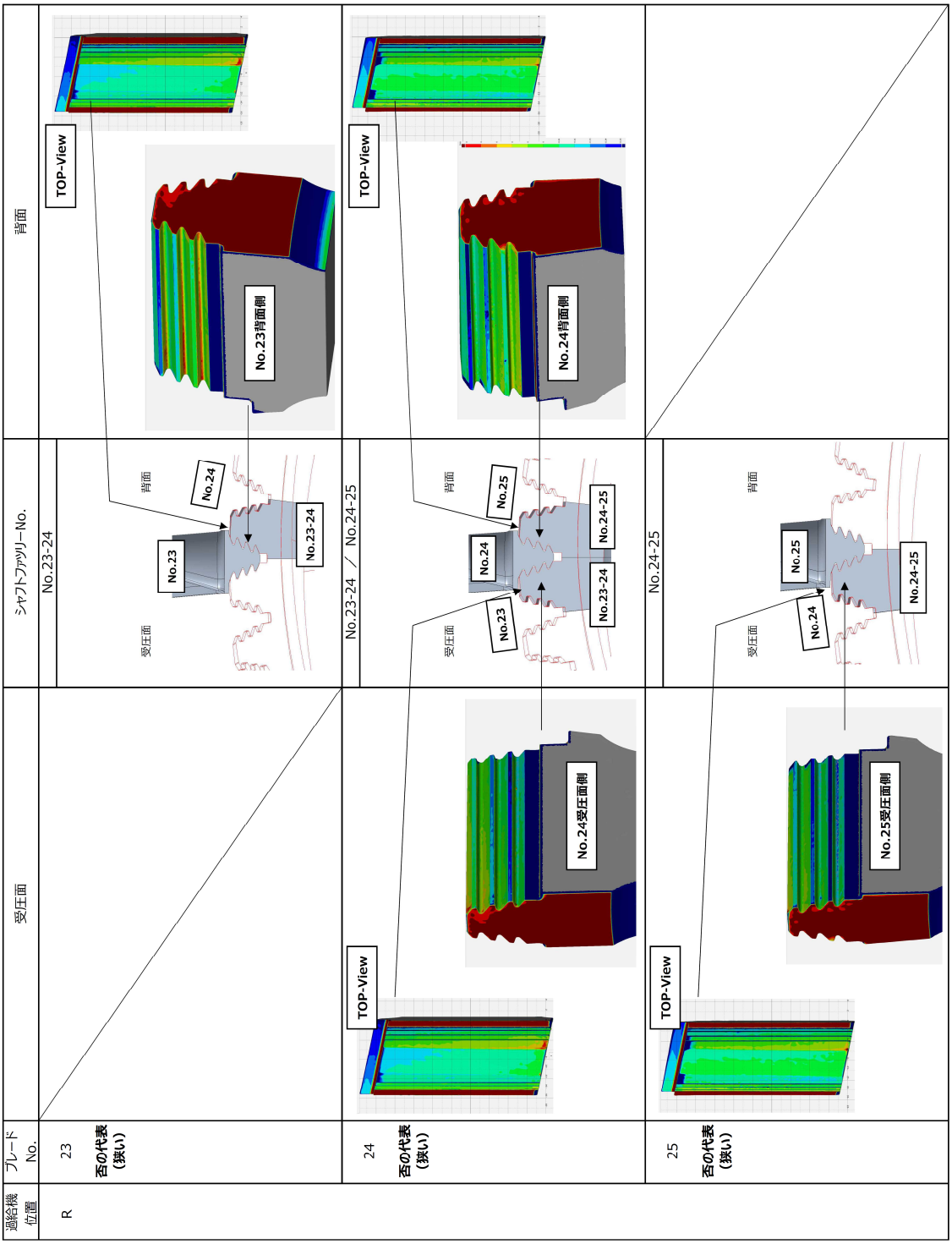
図－３　Ｒ側過給機のロータファツリー形状　三次元計測結果（１／４）



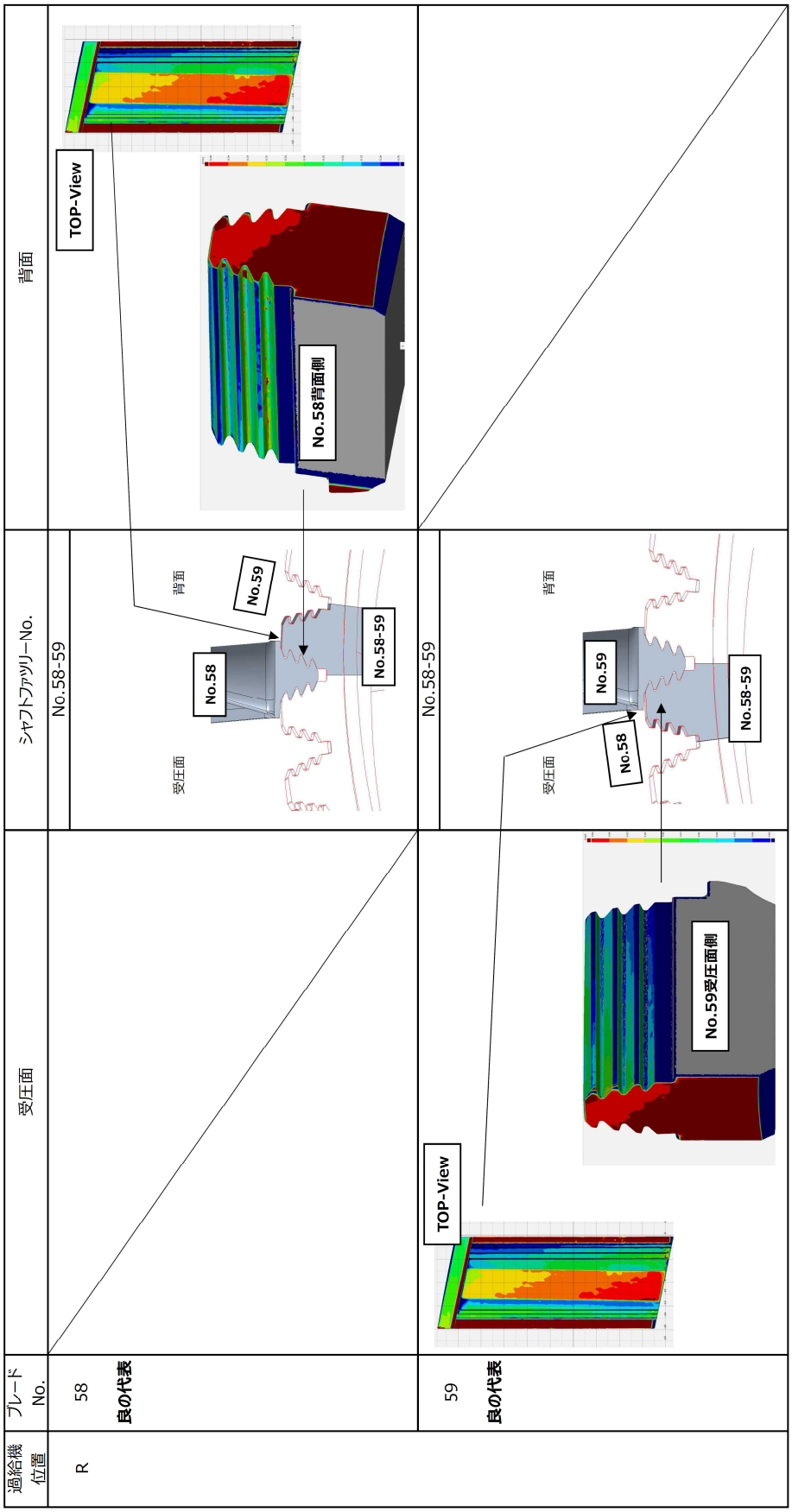
図－３　Ｒ側過給機のロータファツリー形状　三次元計測結果（２／４）



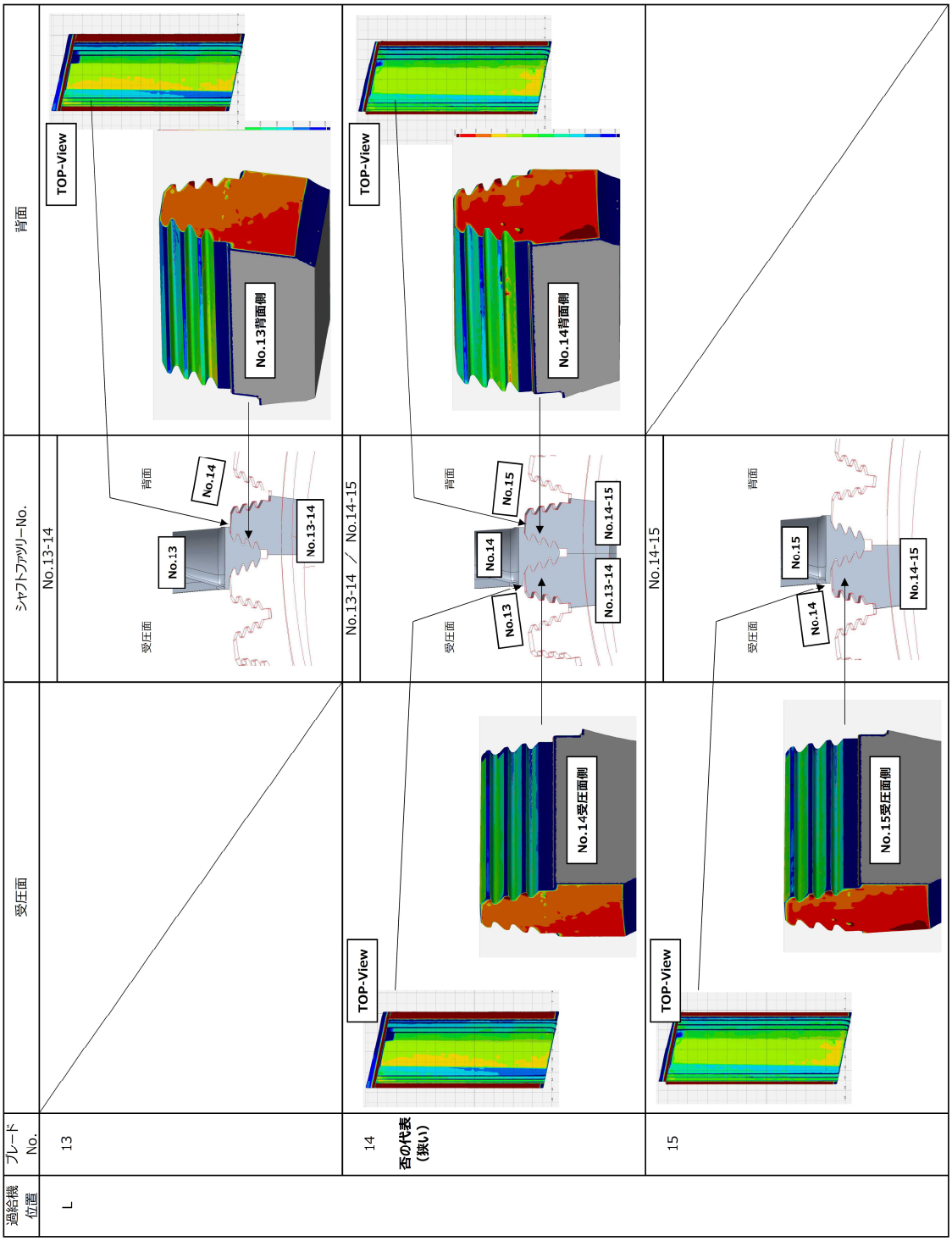
図－３　Ｒ側過給機のロータファツリー形状　三次元計測結果（３／４）



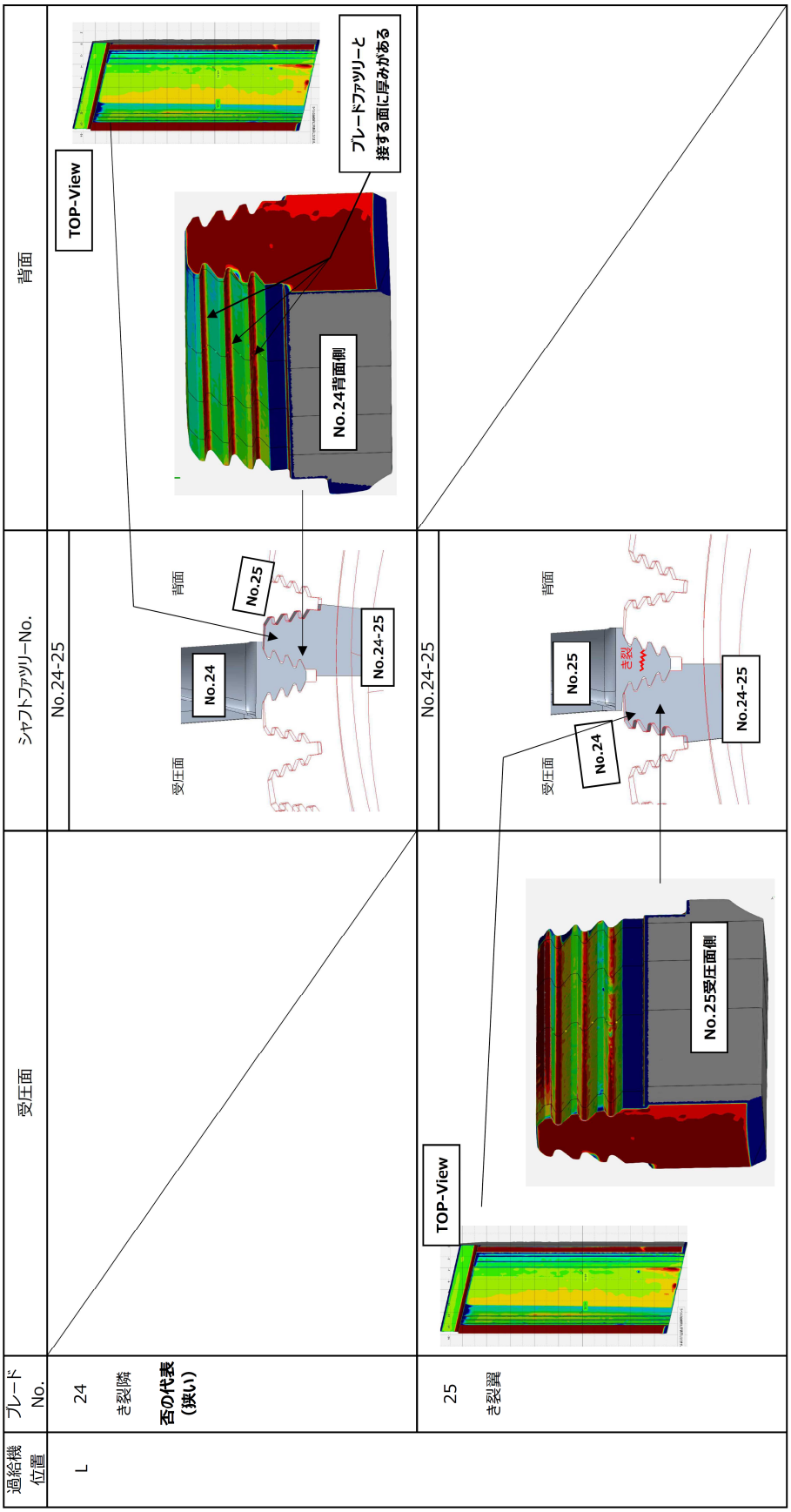
図－３　Ｒ側過給機のロータファツリー形状　三次元計測結果（４／４）



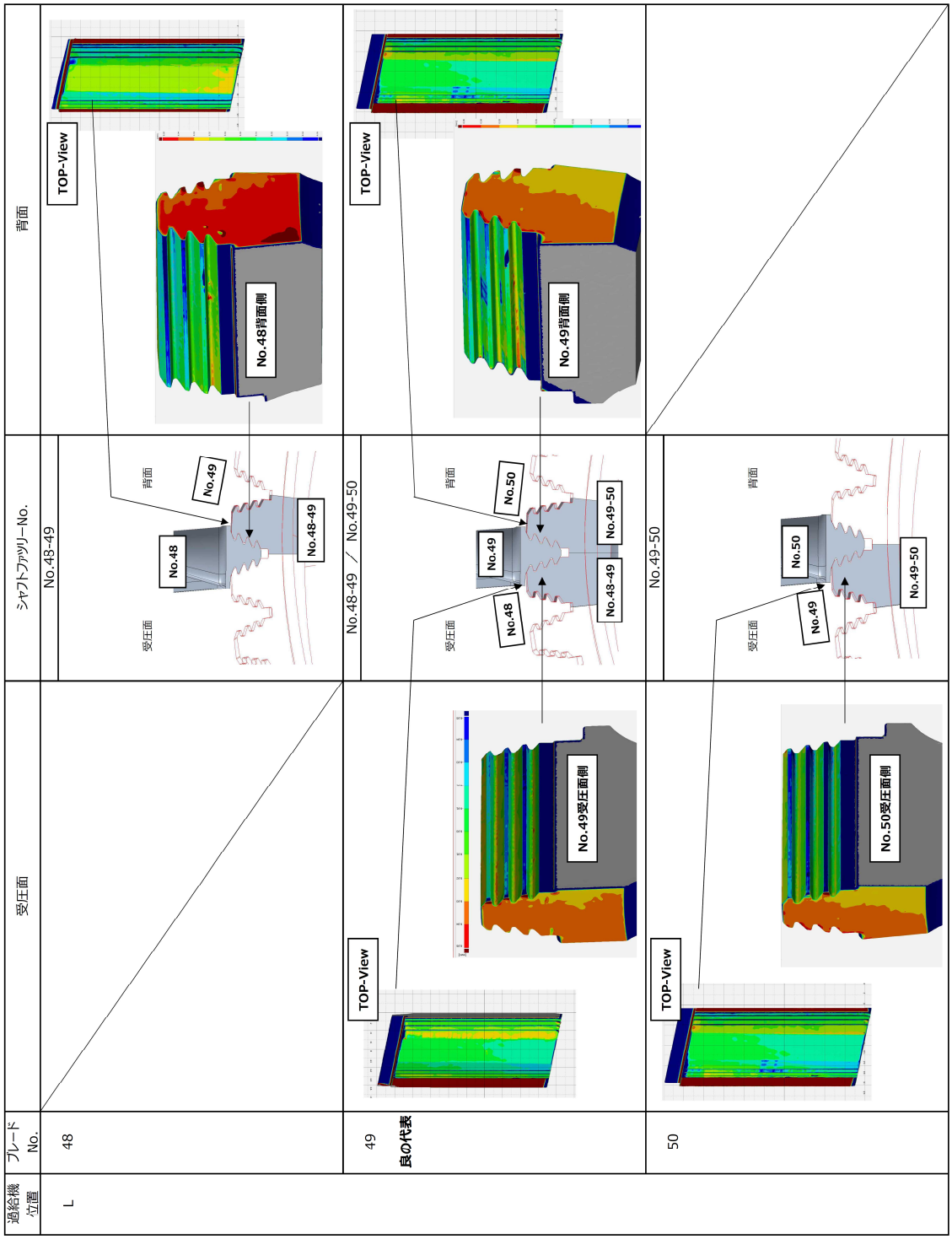
図－４　Ｌ側過給機のロータファツリー形状　三次元計測結果（１／４）



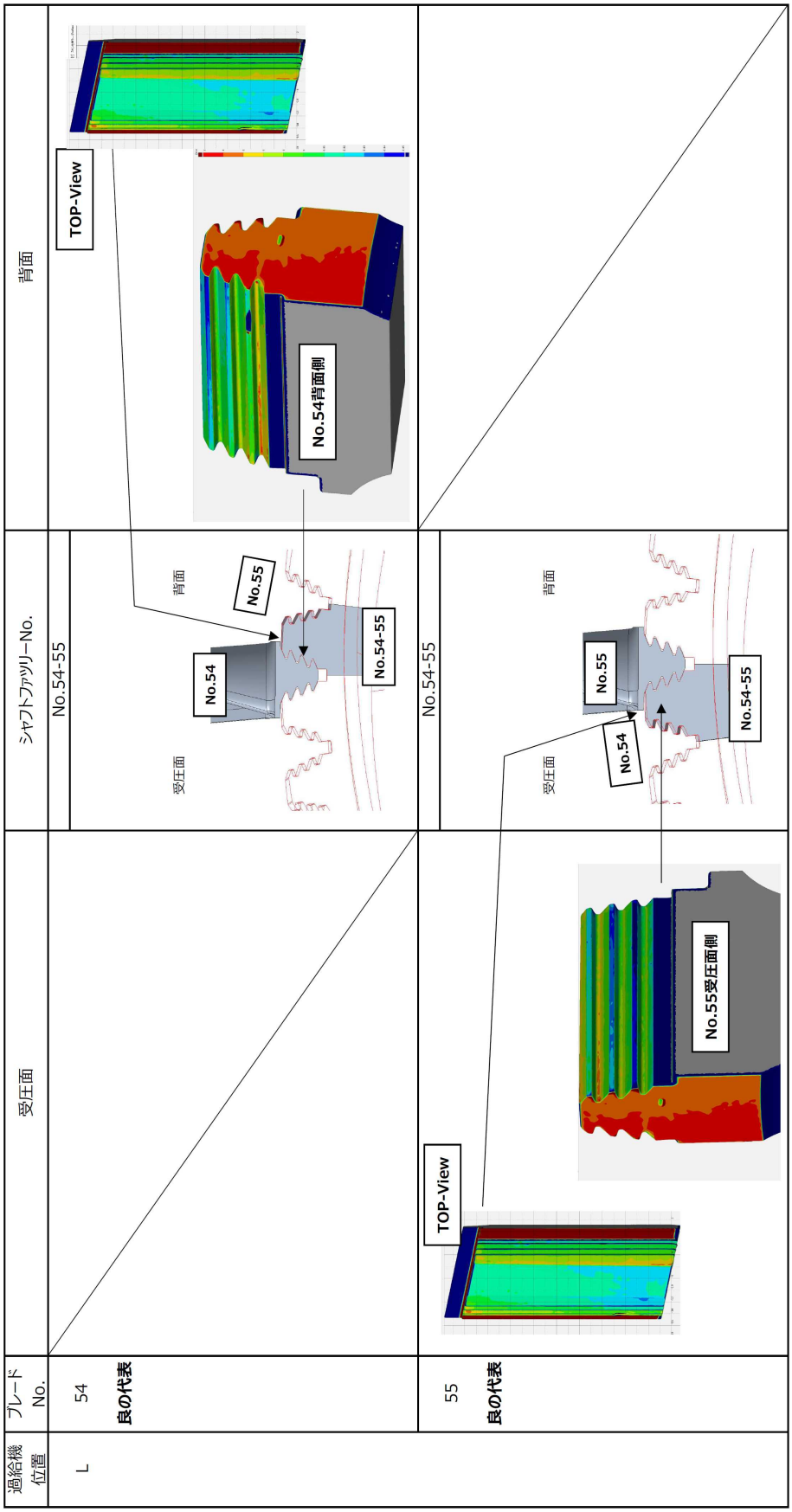
図－４　Ｌ側過給機のロータファツリー形状　三次元計測結果（２／４）



図－４　Ｌ側過給機のロータファツリー形状　三次元計測結果（３／４）



図－４　Ｌ側過給機のロータファツリー形状　三次元計測結果（４／４）



タービンブレードの疲労破壊に関する考察

点検調査にて確認されたレーシングワイヤ孔高さ設計値逸脱及びファツリー部寸法の設計値逸脱が、タービンブレードファツリー部に及ぼす影響について、各状況を踏まえた応力解析を実施した。

（１）解析モデル

・過給機型式：[redacted]

・解析ソフトウェア：ANSYS Mechanical Ver.18.0

解析モデルの詳細を以下に示す。

（２）解析条件

・材料定義

解析で使用した材料物性値を表－１に示す。

表－１　解析モデルの物性値

品名	材質	密度 (Kg/m³)	ヤング率 (GPa)	線膨張係数 (1/℃)	出典
タービンブレード	[redacted]				※１
ロータシャフト					※２
レーシングワイヤ					※１

（出典）※１Total Materia Special Metal Corporation

※２日本機械学会　金属材料の弾性係数

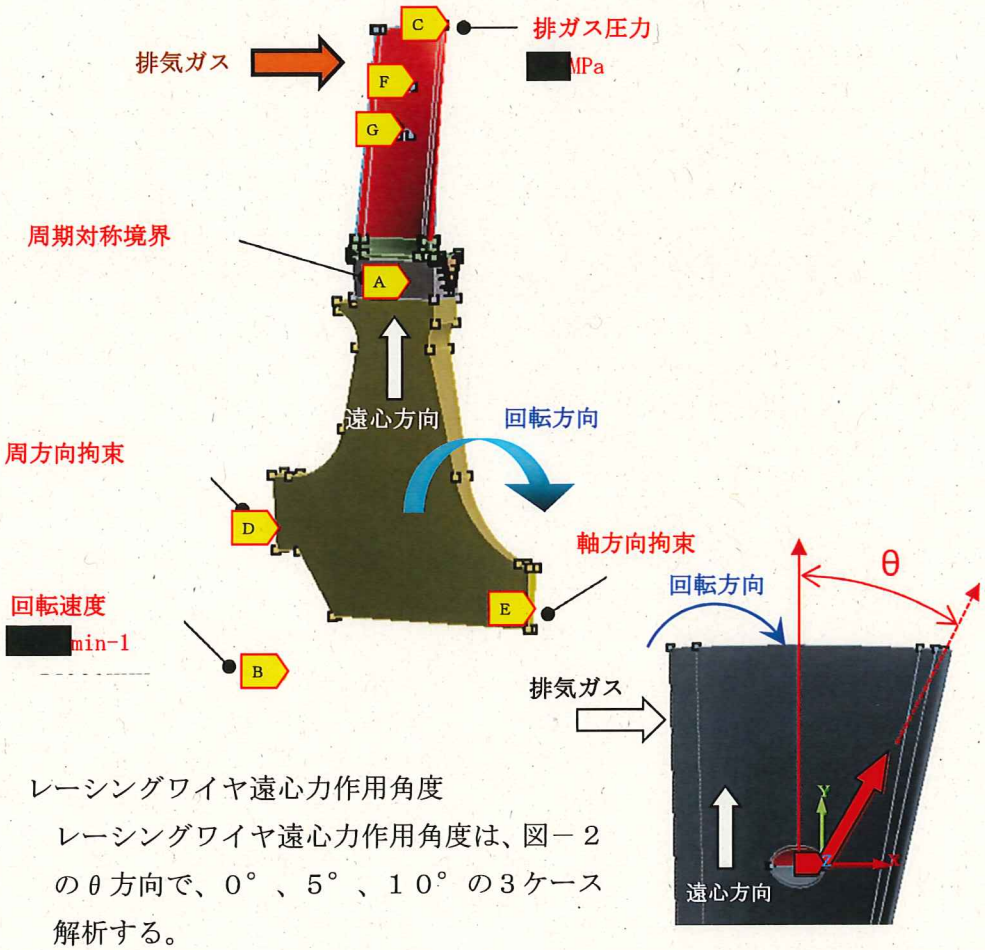
（３）解析の境界条件

解析の境界条件は以下のとおり。

A　周期対称境界　：ロータシャフトの圧力面側と負圧面側を周期対称境界とする
B　回転速度　：工場試験データによる
C　排ガス圧力　：工場試験データによるピーク圧力（ｃ．解析結果※１参照）
D　周方向拘束　：ロータシャフトの後縁側を周方向拘束とする
E　軸方向拘束　：ロータシャフトの前縁側を周方向拘束とする
F　外周側レーシングワイヤ遠心力：[redacted]N（1翼分のワイヤ質量×半径×角速度^2より算出）
　　レーシングワイヤ半径 [redacted]mm
G　内周側レーシングワイヤ遠心力：[redacted]N（1翼分のワイヤ質量×半径×角速度^2より算出）
　　レーシングワイヤ半径 [redacted]mm

解析の温度条件は過給機運転時の[redacted]℃による。

排ガス圧力：機関運転時の排気脈動を考慮し、ピーク圧力である[redacted]ＭＰａを解析条件とした。



レーシングワイヤ遠心力作用角度

レーシングワイヤ遠心力作用角度は、図－２のθ方向で、０°、５°、１０°の３ケース解析する。

（４）解析結果

表―２にパラメータを変化させて解析した結果を示す。

平均応力は、排ガス圧力がある場合とない場合の平均、応力振幅は、排ガス圧力がある場合とない場合の応力差として計算した。この結果より、レーシングワイヤの作用角が傾いた場合に、応力振幅が大きくなることがわかった。

表―２　解析結果一覧表（単位：ＭＰａ）

ファツリー隙間（mm）	解析 Case-No	ワイヤ角（°）	背面応力（MPa）	平均応力（MPa）※2	応力振幅（MPa）※2	評価
通常	－	作用無	[redacted]			－
	Case-1	0				○
	Case-2	5				○
	Case-3	10				○
背面のみ 0.05 狭い	－	作用無				－
	Case-4	0				○
	Case-5	5				○
	Case-6	10				×
背面のみ 0.10 狭い	－	作用無				－
	Case-7	0				○
	Case-8	5				○
	Case-9	10				×

※１　排ガス圧力は[redacted]ＭＰａ

※２　平均応力は隙間状態が「通常」、「背面のみ０．０５狭い」、「背面のみ０．１０狭い」各ケースの応力とワイヤ作用無状態（表中①を付した）との平均値、応力振幅はそれぞれの差とした。

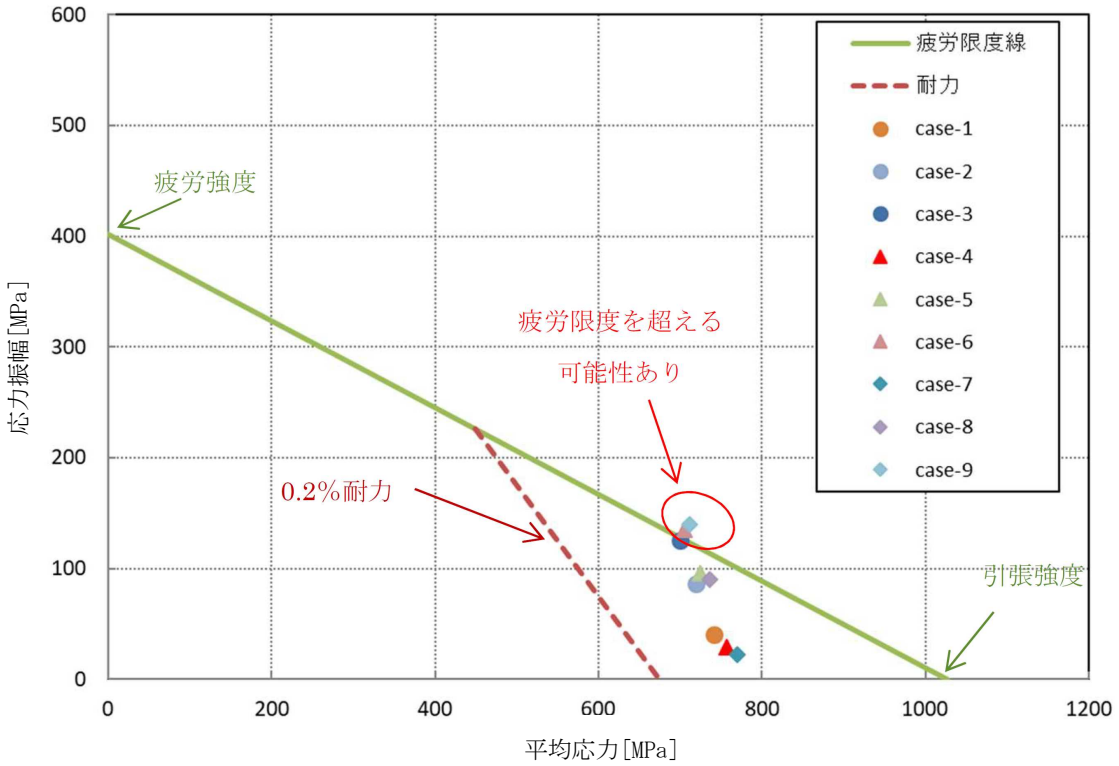
（２）高サイクル疲労評価

表―２の結果について、修正グッドマン線図にプロットした結果を図－１に示す。

タービンブレードの背面側ファツリー部に発生する平均応力は排ガス圧力とレーシングワイヤに作用角度がついた場合が重なった場合に、減少する傾向にあるが、その一方で応力振幅が増加する。また隙間が減少した場合には、排ガス圧力がかからない場合に背面側ファツリー部の応力を高める作用がある。これらの要因が重なることにより、条件によっては背面側ファツリー部応力が疲労限度を超える可能性があることを確認した。

現品の３Ｄ形状計測結果より、Ｒ側Ｎｏ．５ブレードの背面側ファツリー部はクリアラ

ンスが０．０５mm狭くなっている状況が確認されている。またＬ側Ｎｏ．２５ブレード部のレーシングワイヤには、約１０度の曲がりがみられた。この曲がりによりブレードに１０度の角度でワイヤ遠心力が作用する可能性が考えられる。これらの現品調査結果を反映した解析はｃａｓｅ－６となるが、ｃａｓｅ－６は、図－１の修正グッドマン線図において、疲労限度線をわずかに超えるところに位置することがわかった。



図―１　修正グッドマン線図

（３）解析結果まとめ

レーシングワイヤの遠心力荷重がタービンブレードに対し傾いて作用した条件及びファツリー部クリアランスが減少した条件を仮定し、静的応力解析を行った結果、レーシングワイヤ作用方向に角度がつくほど背面側ファツリー部の応力振幅が大きくなり、２つの要素が重なった場合には、疲労限度を超える可能性があることがわかった。

ファツリー部の隙間は、現品の３Ｄスキャンによる寸法計測結果より、約０．０５mm減少していることが確認されており、またレーシングワイヤも現品調査の結果、約１０°程度曲がりがみられる。この２つの条件が重なった場合にて解析を行ったところ、疲労限度をわずかに超える結果となった。従って、このことはタービンブレードがファツリー部より疲労破壊に至ったメカニズムをおおよそ再現しているものと考える。

過給機軸固着に伴う影響調査結果

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実施した。

（１）点検内容及び判定基準

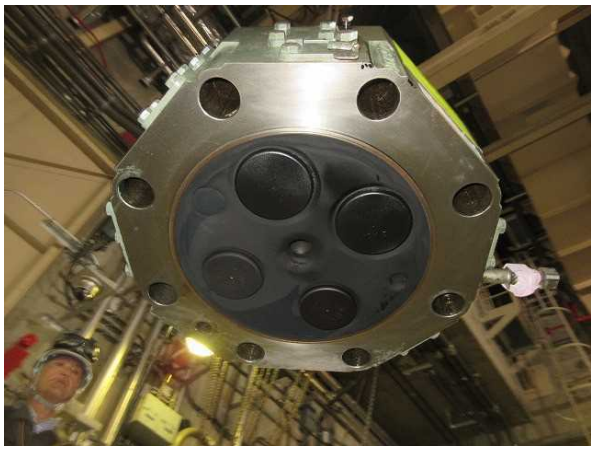
・Ｒ側全９気筒の開放を実施し、過給機の損傷部品がないこと
・Ｌ側代表２気筒の開放を実施し、過給機の損傷部品がないこと
・Ｒ側及びＬ側排気管全数に対し内部点検（目視点検）及び伸縮継手の内外面点検を実施し、異常がないこと
・Ｒ側空気冷却器の開放点検を実施し、異常がないこと

（２）点検結果

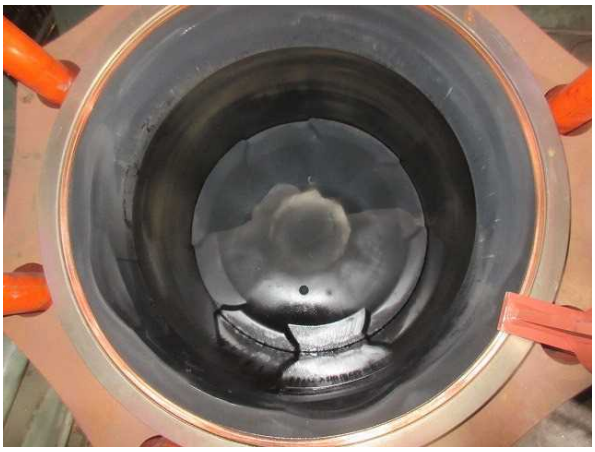
	点検対象	結果	点検日	備考
1	Ｒ側シリンダ	異常なし	2018/11/16～11/19	－
2	Ｌ側シリンダ	異常なし	2018/11/16～11/19	－
3	排気管・伸縮継手	異常なし	2018/11/28	－
4	Ｒ側空気冷却器	異常なし※1	2018/11/27	－

※１Ｒ側空気冷却器を開放した結果、空気冷却器に異常は確認されなかったが、Ｒ側過給機損傷部から発生したと考えられる金属片の混入を確認。

Ｒ側シリンダ

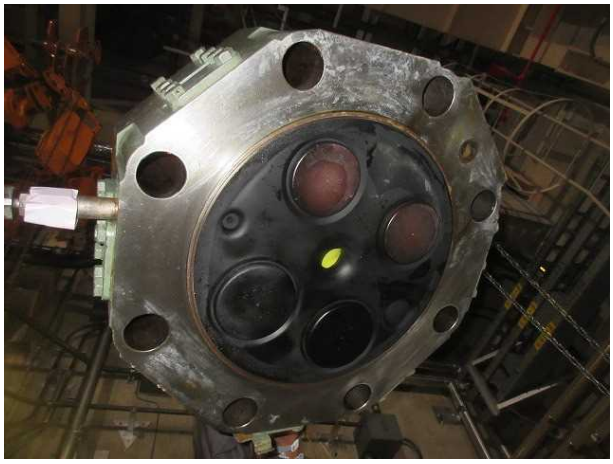


シリンダヘッド取外（Ｎｏ．１０）



ライナー内面確認（Ｎｏ．１０）

Ｌ側シリンダ



シリンダヘッド取外（Ｎｏ．１）

ライナー内面確認（Ｎｏ．１）

排気管・伸縮継手

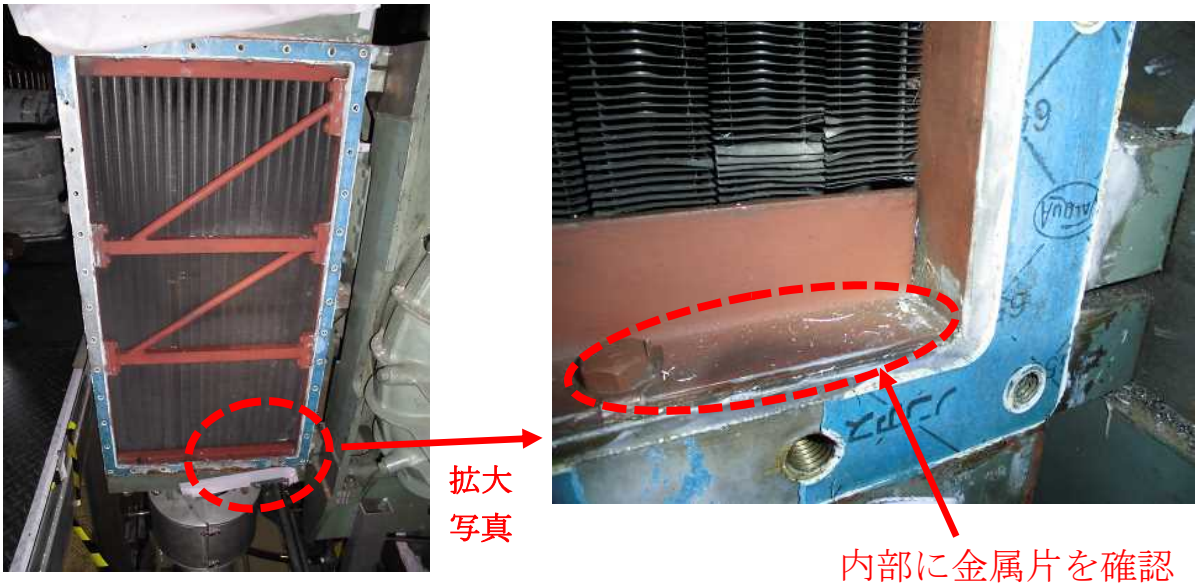
Ｌ側排気管・伸縮継手

Ｌ側排気管（内部）

Ｒ側排気管・伸縮継手

Ｒ側排気管（内部）

空気冷却器



R側空気冷却器

保守管理に関する調査結果

保全プログラムによる点検（表－１参照）

（１）過給機点検

・本格点検（分解点検）：５サイクル毎

外観目視点検及びタービンブレード翼部の非破壊検査（ＰＴ）

ベアリング交換

インデューサ、インペラの寸法検査

オイルポンプ芯振れ計測

インデューサ、インペラ、ディフューザ、ノズルリング非破壊検査（ＰＴ）

・簡易点検（潤滑油交換）：１サイクル毎

潤滑油交換を実施

表－１　当該Ｄ／Ｇ保守状況調査記録

定期検査	定期検査期間	点検内容
第７回	1994/9/18～1994/12/27	本格点検 （Ｋ２水平展開工事）
第９回	1997/6/28～1997/9/11	本格点検
第１４回	2005/6/14～2006/5/30	本格点検

過去の類似事象に関する調査結果

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、以下の方法により調査した。調査結果を表－１に示す。本事象のようにタービンブレードファツリー部に疲労破壊が生じた事象は確認されなかった。

調査方法

・原子力安全推進協会の国内外トラブル情報（ＮＵＣＩＡ）から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情報を検索。
・原子力安全推進協会の海外故障・トラブル要約情報（ＩＮＰＯ、ＷＡＮＯ、ＮＲＣ等の情報を要約したもの）から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情報を検索。
・その他国内原子力事業者のプレス情報等から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情報を検索。

表－１　調査結果

プラント	異常発生日 （発見日）	損傷状況	原因	水平展開要否
北海道電力 泊３号機	2009/8/19	・タービンブレードの翼部破損 （強制破断の様相が見られた） ・ノズル押え板固定ボルト緩み　等	製造組立て時の施工不良	済み （点検組立て時のトルク管理）
関西電力 美浜１号機	2013/2/5	・タービンブレードの翼部破損 （強制破断の様相が見られた） ・ブロアインペラ固定ボルトの緩み　等	点検組立て時の施工不良	不要 （構造が異なるため）
ＪＡＥＡ 東海再処理施設	2018/8/4	・タービンブレード外周部の摩耗 ・軸受損傷 ・油溜まり部に多量の金属粉が発生　等	オイルシール部の摺動摩耗	検討中 （2018/12/17 の公表を受けて）

タービンブレード疲労破壊の推定メカニズム

（以下の図は事象進展のイメージ図）

初期状態

ファツリー部には、設計に基づくクリアランスが設けられている

①

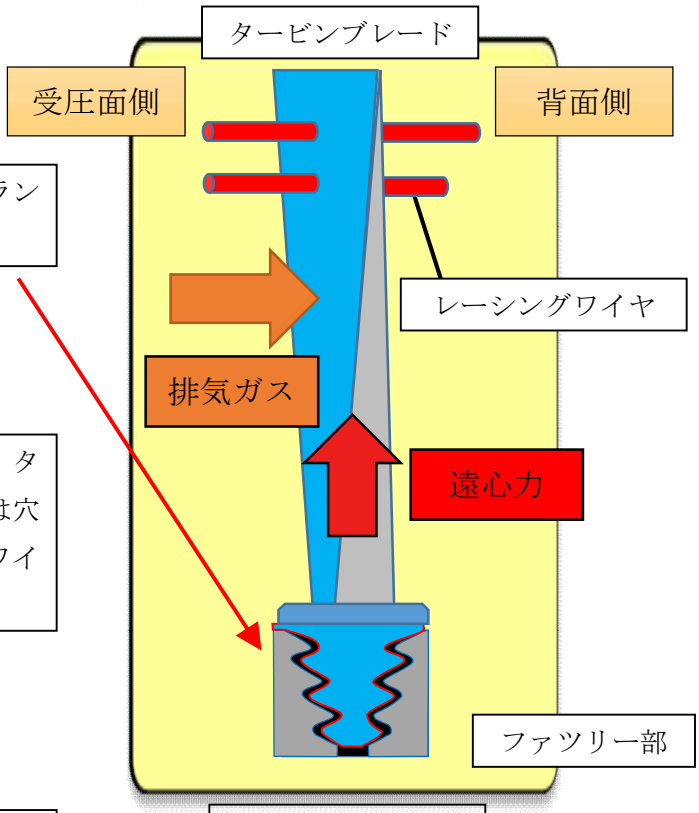
製造時のレーシングワイヤ孔加工の際に、タービンブレード固定治具の操作不良または穴開けドリル位置ずれにより、レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱が発生

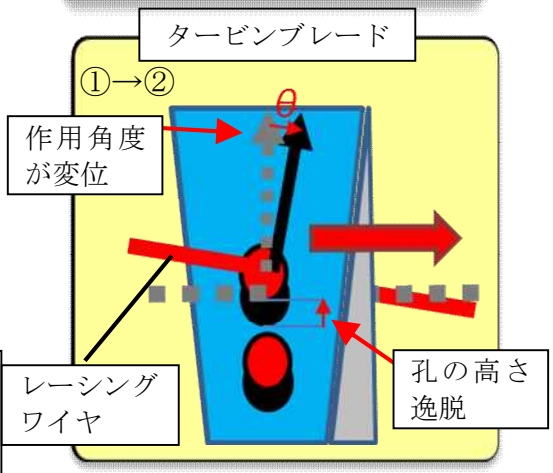
②

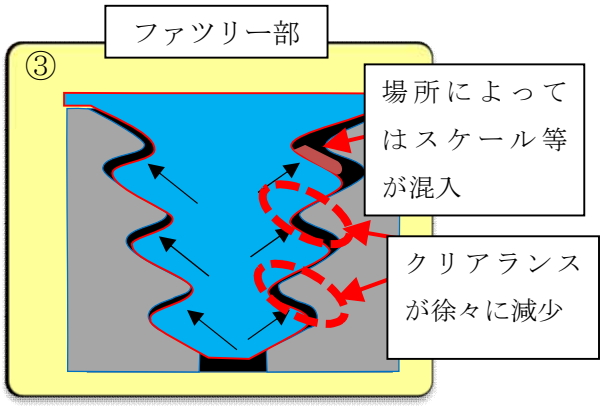
隣接するレーシングワイヤ孔の高低差により、タービンブレードを貫通しているレーシングワイヤが設計と異なる作用角度に変位し、タービンブレード背面側に応力が増大

③

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







④

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

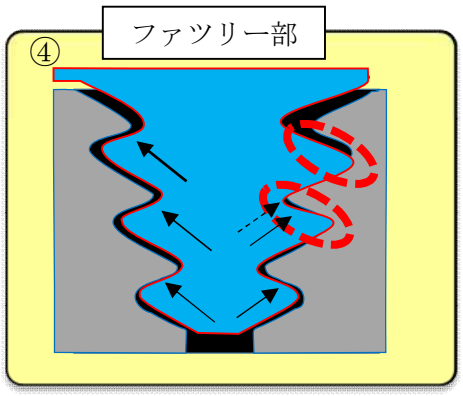
⑤

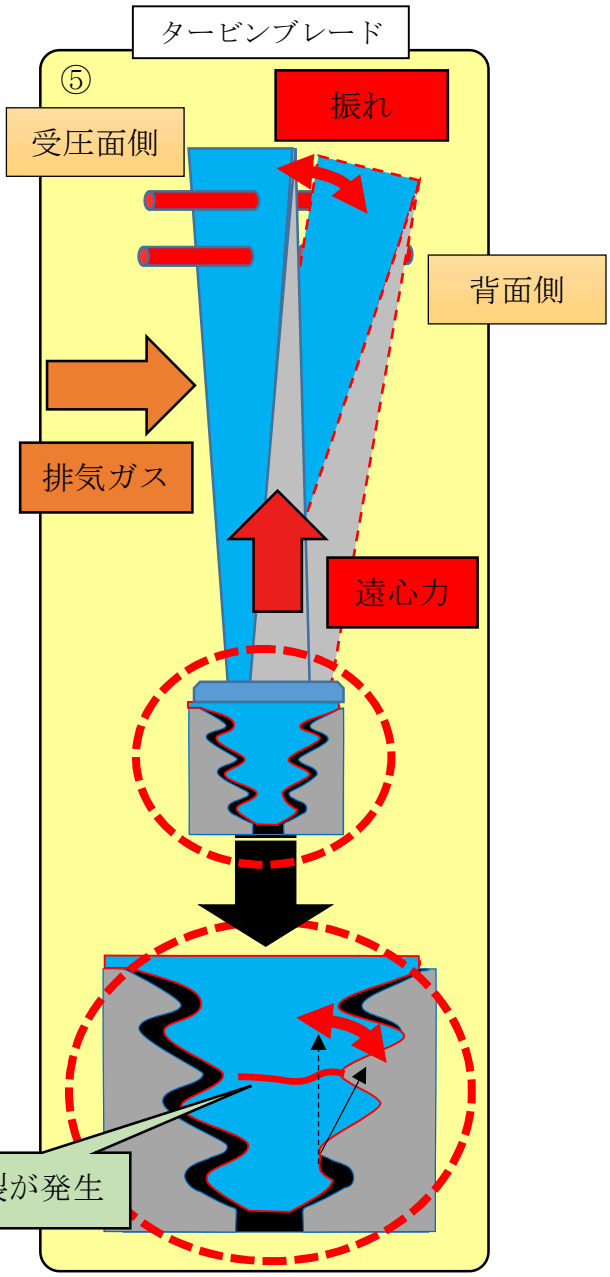
タービンブレード背面側への応力増大とファツリー部間の当たり状態やクリアランスの変化に伴う応力集中に、運転・停止時の熱膨張・収縮が加わることで、ある時点を境に、ディーゼル機関からの排気脈動を加えた運転時の応力が疲労限度を超え、ファツリー部くびれ部にき裂が発生

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、最終的にタービンブレードがファツリー部より延性破壊し、折損

（以下の図は事象進展のイメージ図）

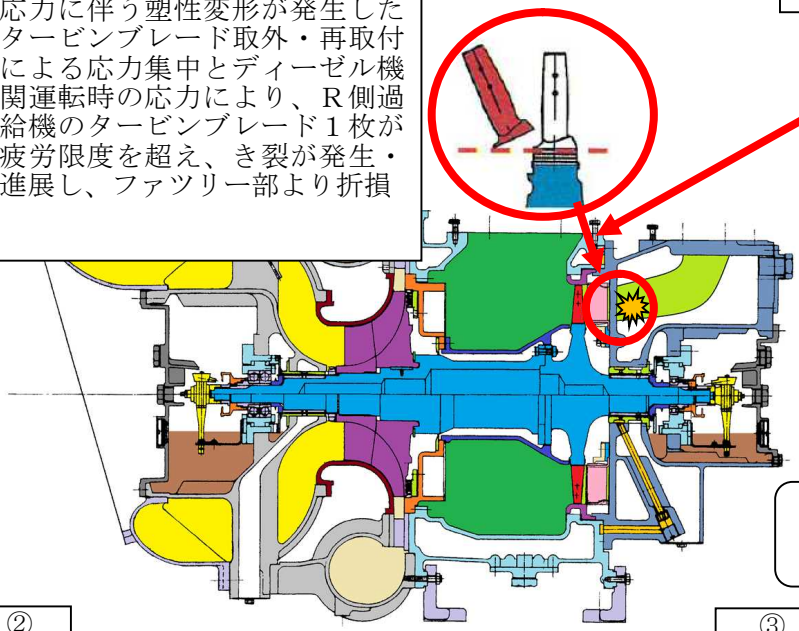


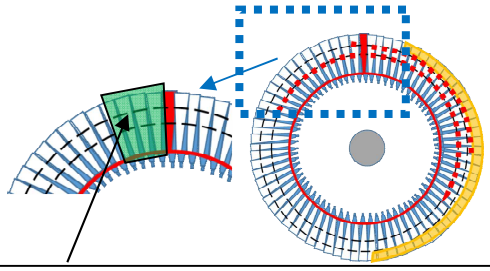


Ｒ側過給機軸固着の推定メカニズム

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

④
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





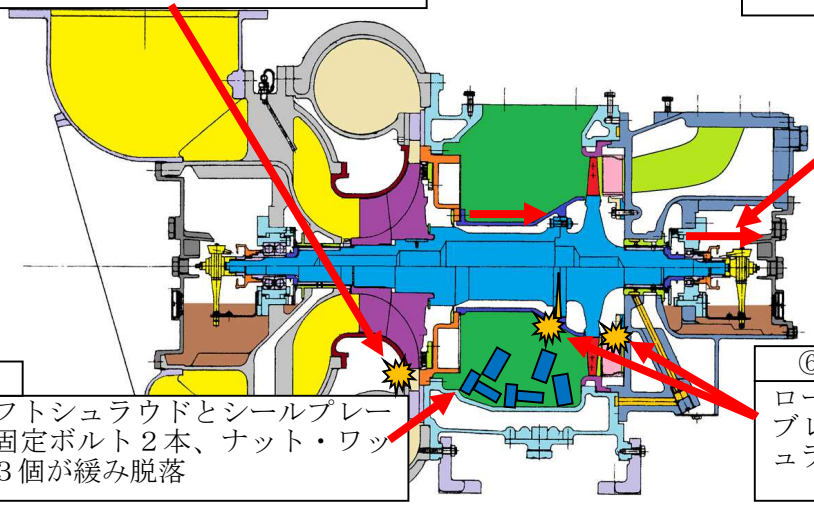
折損　先端接触
先端変形（４本）　レーシングワイヤ脱落

②
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

③
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

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

⑤
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

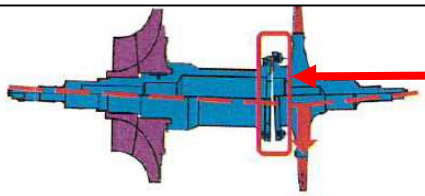


⑧
シャフトシュラウドとシールプレートの固定ボルト２本、ナット・ワッシャ３個が緩み脱落

⑥
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

⑨

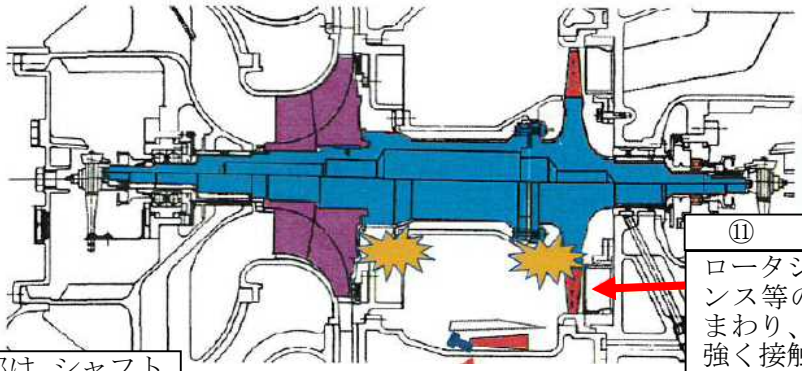
ロータシャフトフランジがシャフトシュラウドと摺動接触し、ロータシャフトフランジ結合部に隙間が発生



ロータシャフト結合ボルトに曲り、伸びが発生

ロータシャフトの結合部が口開き

ロータのアンバランスに対し剛性の低いシャフト結合箇所の結合面に最大０．５ｍｍの隙間が生じた。（ボルトに緩みはなかった。）



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

⑩

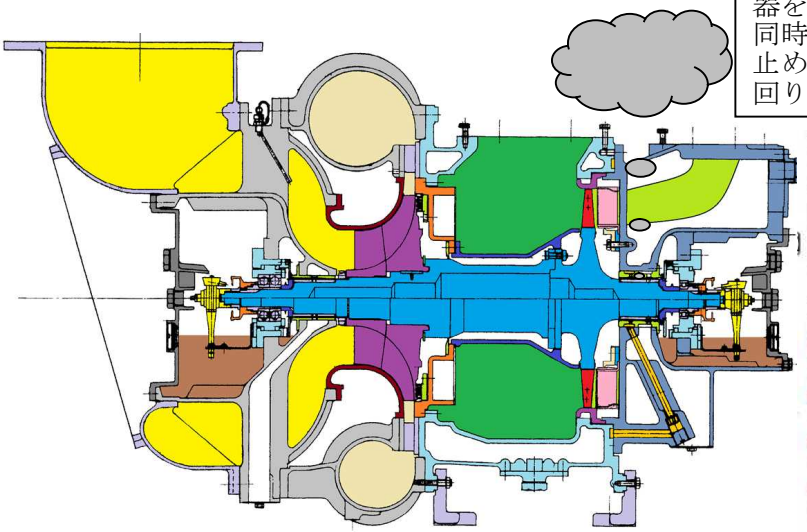
シャフトシュラウド下部は、シャフトシュラウド自身の振動またはロータシャフトとの接触により破損し、ケーシング内に破損部が脱落

タービン側ころ軸受のころ転動面外観では、内輪軌道面の約１／３周のころが摩耗、変形。瞬間的に大きな荷重（衝撃荷重）を受けたものと推定

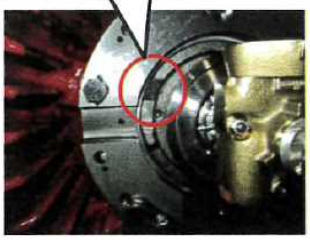
⑫

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

灰色のもやが過給機周囲から確認された。



欠損部



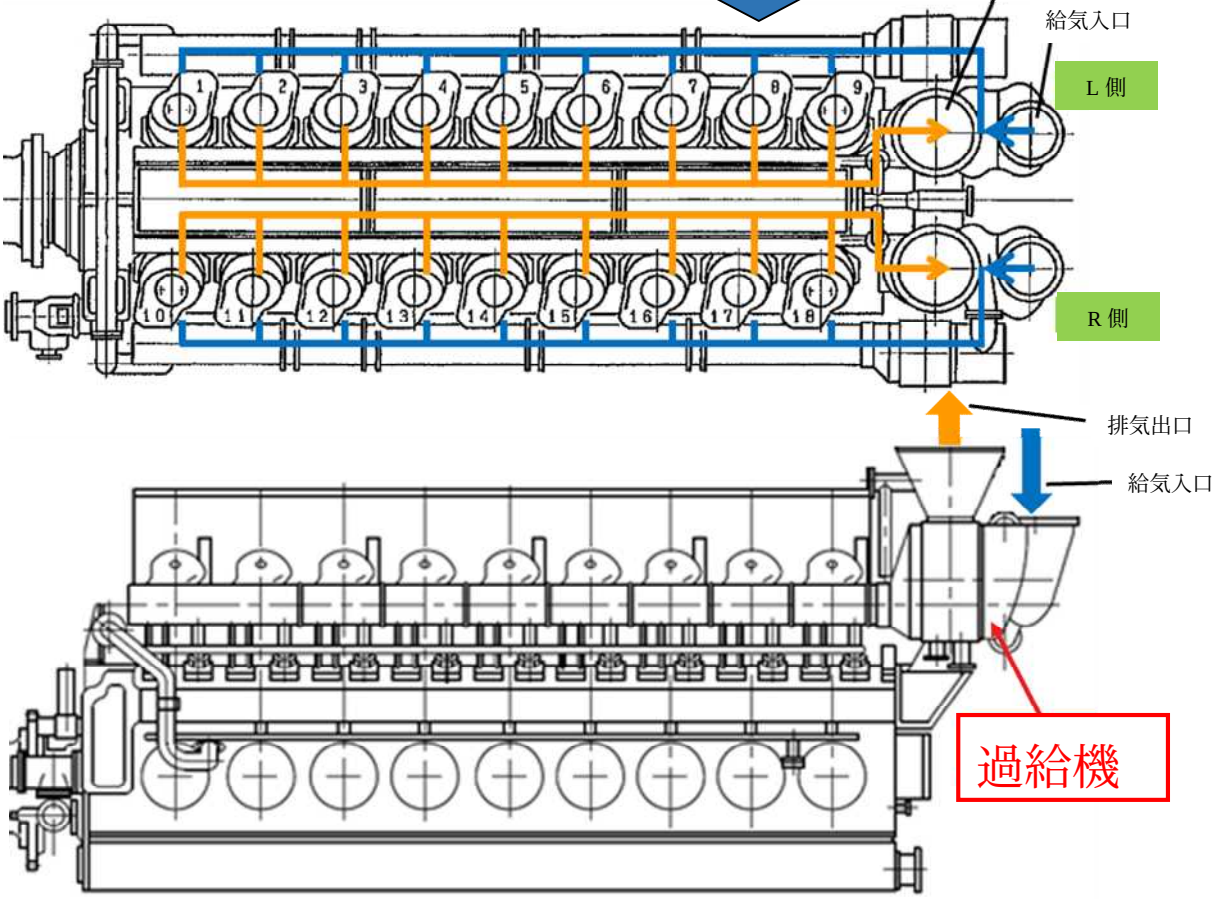
発電機出力低下に関する推定メカニズム

①

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し、Ｒ側過給機の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、警報が発生

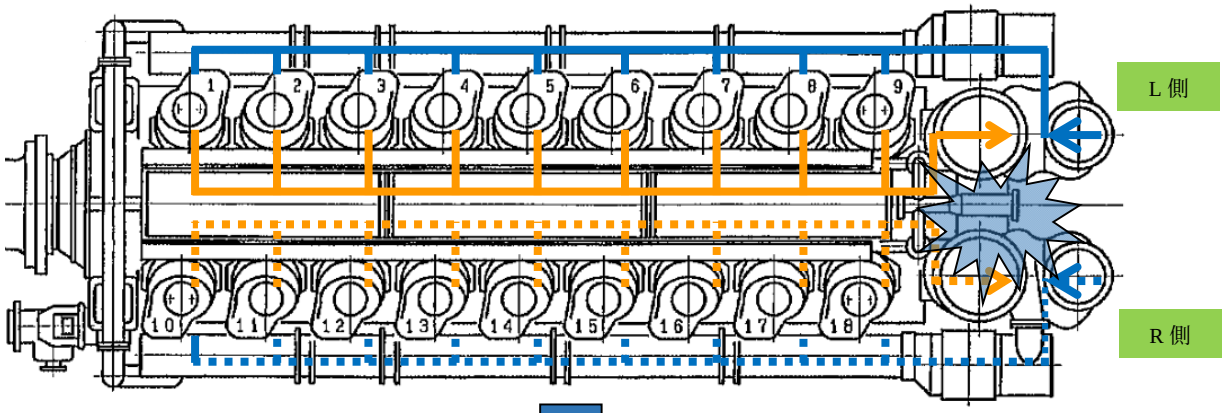
②

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



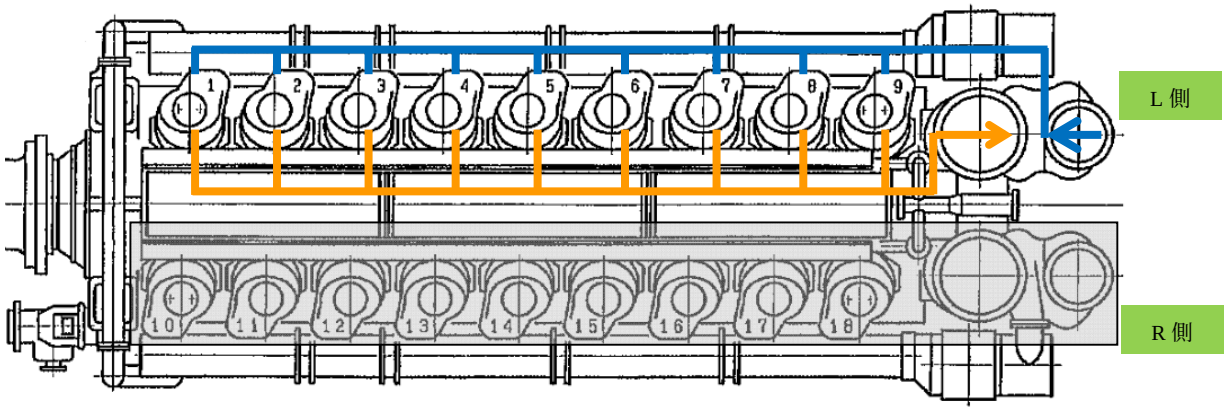
③

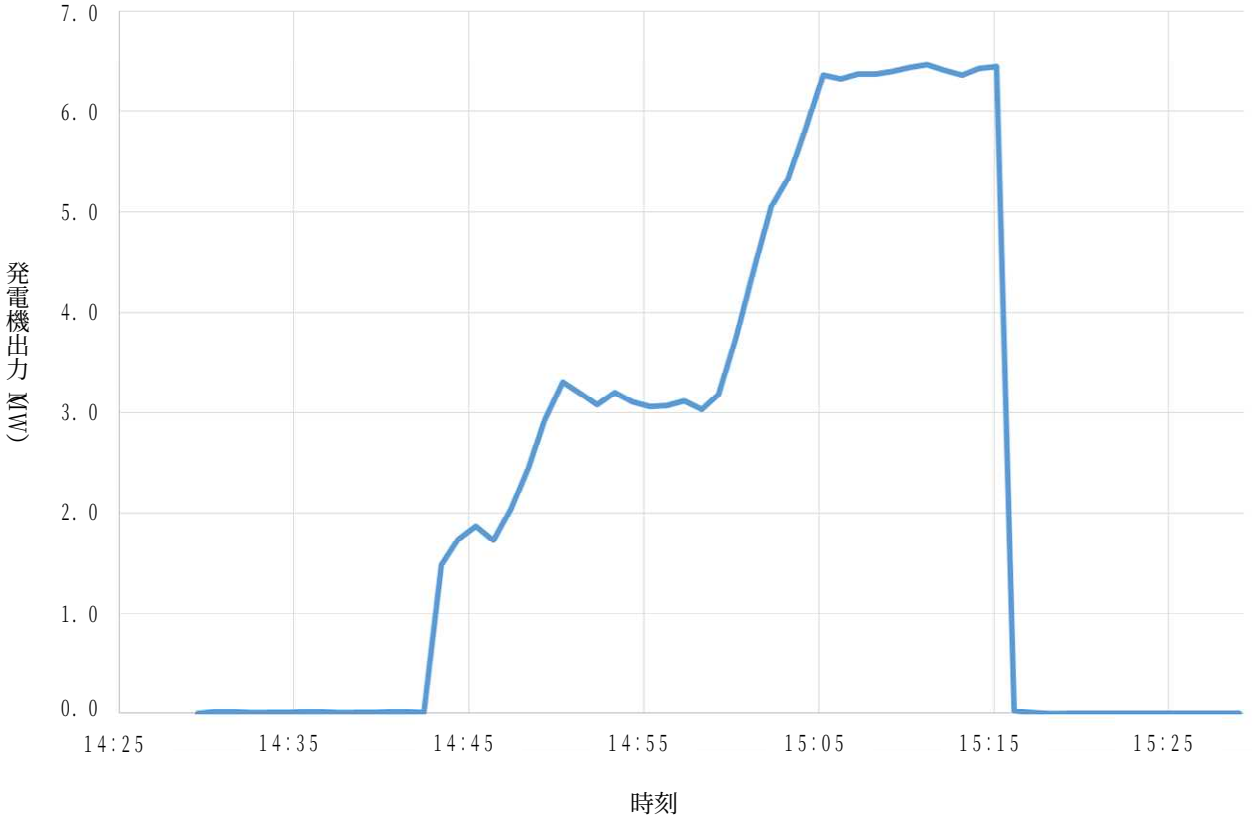
過給機のＲ側とＬ側は、給気と排気ラインが各々分離しており、Ｌ側への送気及び機関の運転は継続
一方、Ｒ側は燃焼室への送気がほぼ遮断され、Ｒ側シリンダは不完全燃焼から未燃焼状態となった
Ｒ側シリンダ内のピストン上下動作は圧縮損失となりＬ側シリンダへの動作抵抗が増加し、機関回転
速度を低下させるように働く



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



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