

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
【概要版】

2019年2月28日

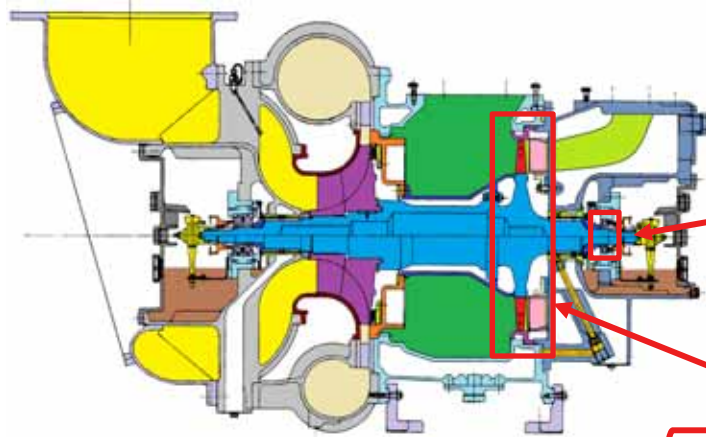
TEPCO

1. 事象の概要

- ✓ 2018年8月30日14時30分より、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。
 - ✓ 同日15時16分に異音が発生するとともに、当該D/G発電機出力が定格出力6.6MWから0MWに低下したため、手動停止。
 - ✓ その後、当該D/Gの発電機出力が低下した原因を調査していたところ、9月6日に1台（全2台）の当該D/G過給機に軸固着を確認。
- ⇒ 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

2. 主な工場調査結果

- ✓ 2018年10月より、軸が固着した過給機を工場に持ち出し、詳細調査を実施。
- ✓ その結果、「タービンブレード」や「レーシングワイヤ」、「ベアリング」が比較的大きく損傷していることを確認。



ベアリング

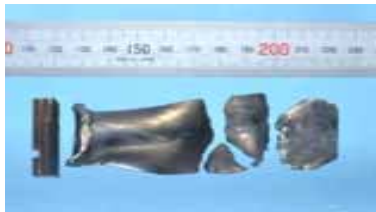
軌道輪（内輪と外輪）、転動体（玉又はころ）及び保持器から構成され、回転や往復運動する相手部品に接して荷重を受け、軸などを支持して円滑な運動をさせる部品。

正常箇所

片減り・潰れ

タービンブレード

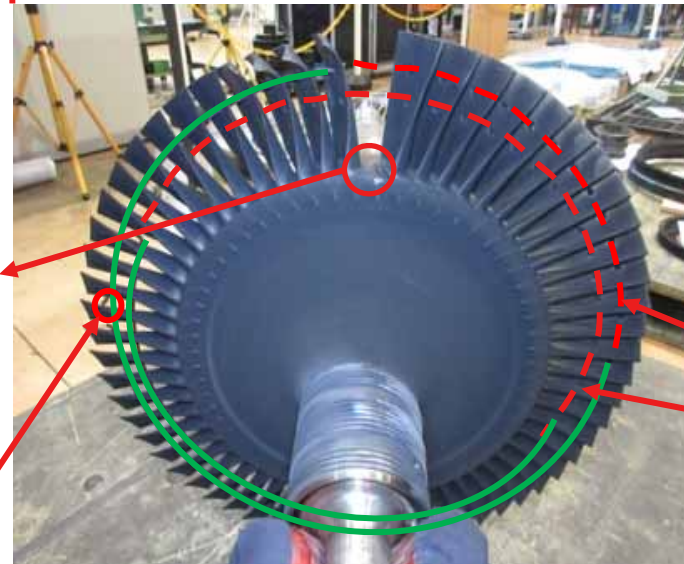
回転するロータシャフトディスク外周部に取り付けられるタービンの翼。燃焼ガスのエネルギーを回転エネルギーに変換するための部品。



タービンブレード1枚が付け根部より破損



止端部折損



レーシングワイヤ

タービンブレードの翼振動を低減させるために装着している部品。レーシングワイヤは内周・外周共にワイヤで一周させている。

外周レーシングワイヤ
赤色点線部が脱落、緑色部は残存部位

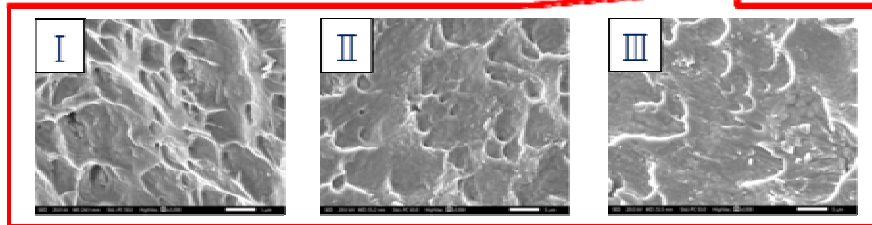
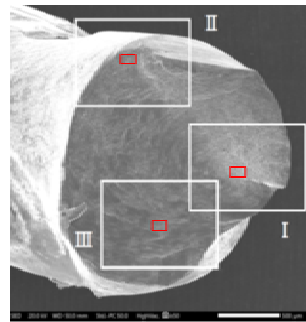
内周レーシングワイヤ
赤色点線部が脱落、緑色部は残存部位

3. 過給機軸固着の原因調査結果

- ✓ R側過給機において「タービンブレード」、「レーシングワイヤ」および「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。
- ✓ 破断面のSEM観察を行った結果、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たことから、起点部位と特定。
- ✓ レーシングワイヤは瞬間的なせん断応力による破壊であることと、ベアリングは瞬間的な衝撃荷重による損傷であることが確認されたことから、従属的な事象と判断。

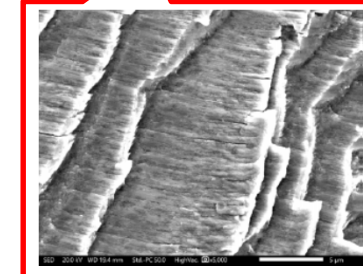
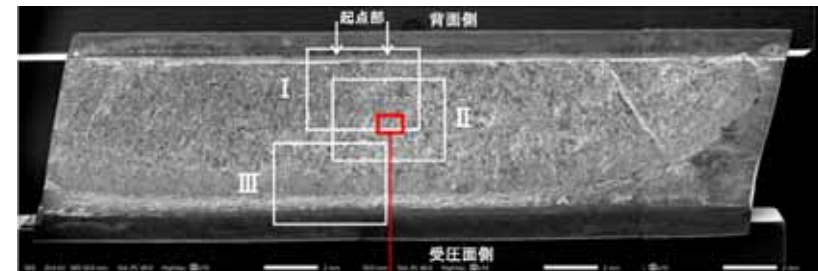
<SEM観察結果>

レーシングワイヤ破断面外観



SEM観察写真

タービンブレード破面



SEM観察写真

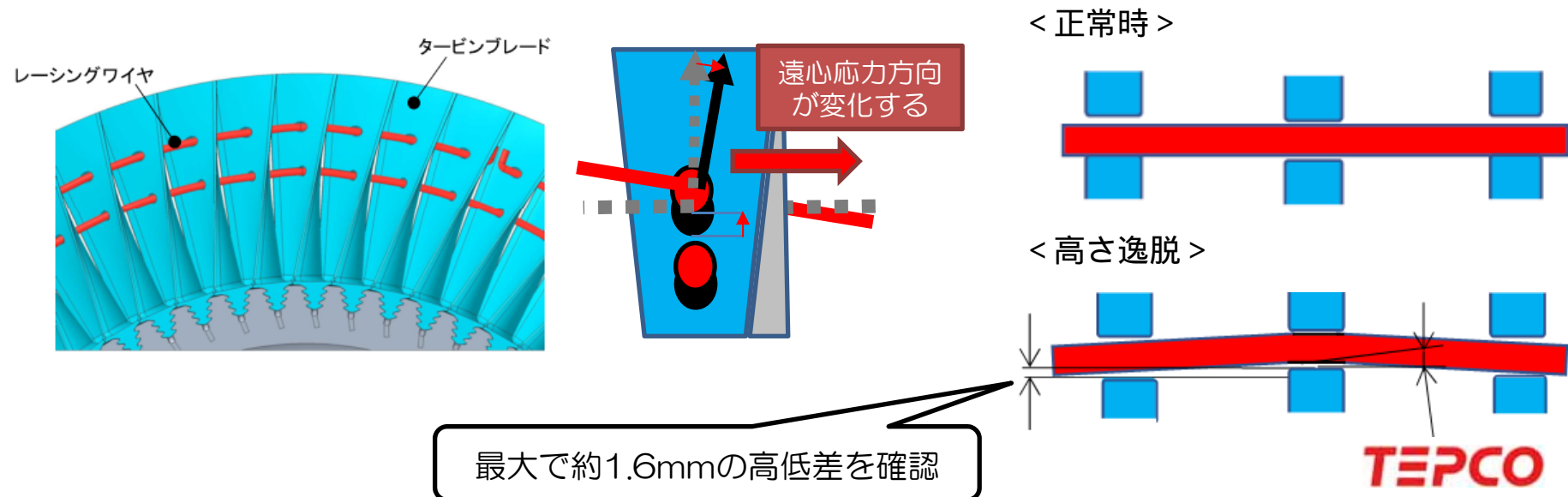
4-1. タービンブレード破損に関する要因調査①

これまでの調査結果から、タービンブレードが破損に至った原因は以下の2項目が組み合わさることで、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 タービンブレードレーシングワイヤ孔の高さ逸脱
- ② 変形したタービンブレードの再利用

タービンブレードレーシングワイヤ孔の高さ逸脱

- ✓ レーシングワイヤ孔高さが部分的に設計値を逸脱すると、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、き裂発生の変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結果、レーシングワイヤ孔高さについて基準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基準値逸脱の原因を調査した結果、製造時の孔加工不良である可能性が高いことを確認した。

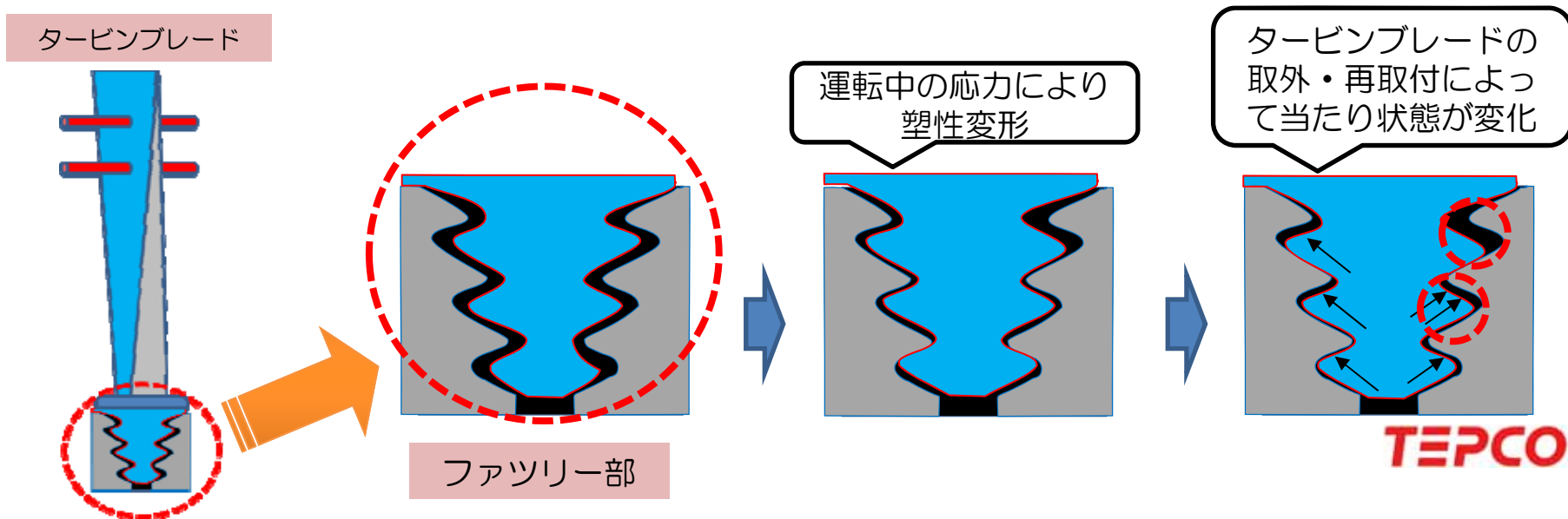


4-2. タービンブレード破損に関する要因調査②

変形したタービンブレードの再利用

- ✓タービンブレードファツリー部が変形し、ファツリー部間の隙間が減少することで、ファツリー部間の応力が増大する可能性がある。
- ✓そのため、タービンブレードファツリー部の三次元計測による寸法測定を実施したところ、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。
- ✓タービンブレードファツリー部の変形の要因は、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塑性変形※が発生することによるものである。
- ✓また、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。これは、柏崎刈羽原子力発電所2号機において発生したD/G（A）過給機（L側）の不具合に伴う水平展開として、レーシングワイヤ孔再加工をする際に行われたものである。
- ✓当時、既にタービンブレードファツリー部の塑性変形が発生した状態で、タービンブレードを再利用したことに伴い、ファツリー部の当たり状態が変化し、ファツリー部への更なる応力集中の要因となった可能性が考えられる。

※変形を引き起こしている荷重を取り除いた後、戻らずに残っている変形のこと



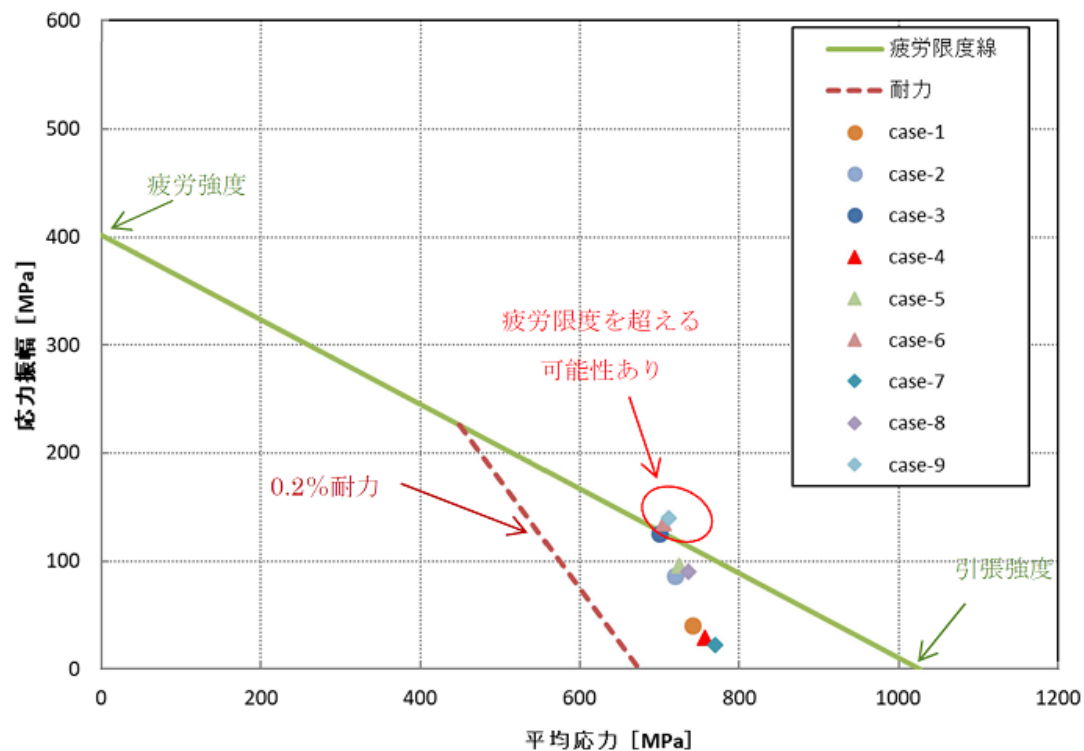
4-3. タービンブレード破損に関する要因調査③

- ✓ タービンブレードレーシングワイヤ孔の高さ逸脱と、ファツリー部の変形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、タービンブレードレーシングワイヤ孔の高さ逸脱と、ファツリー部の変形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。

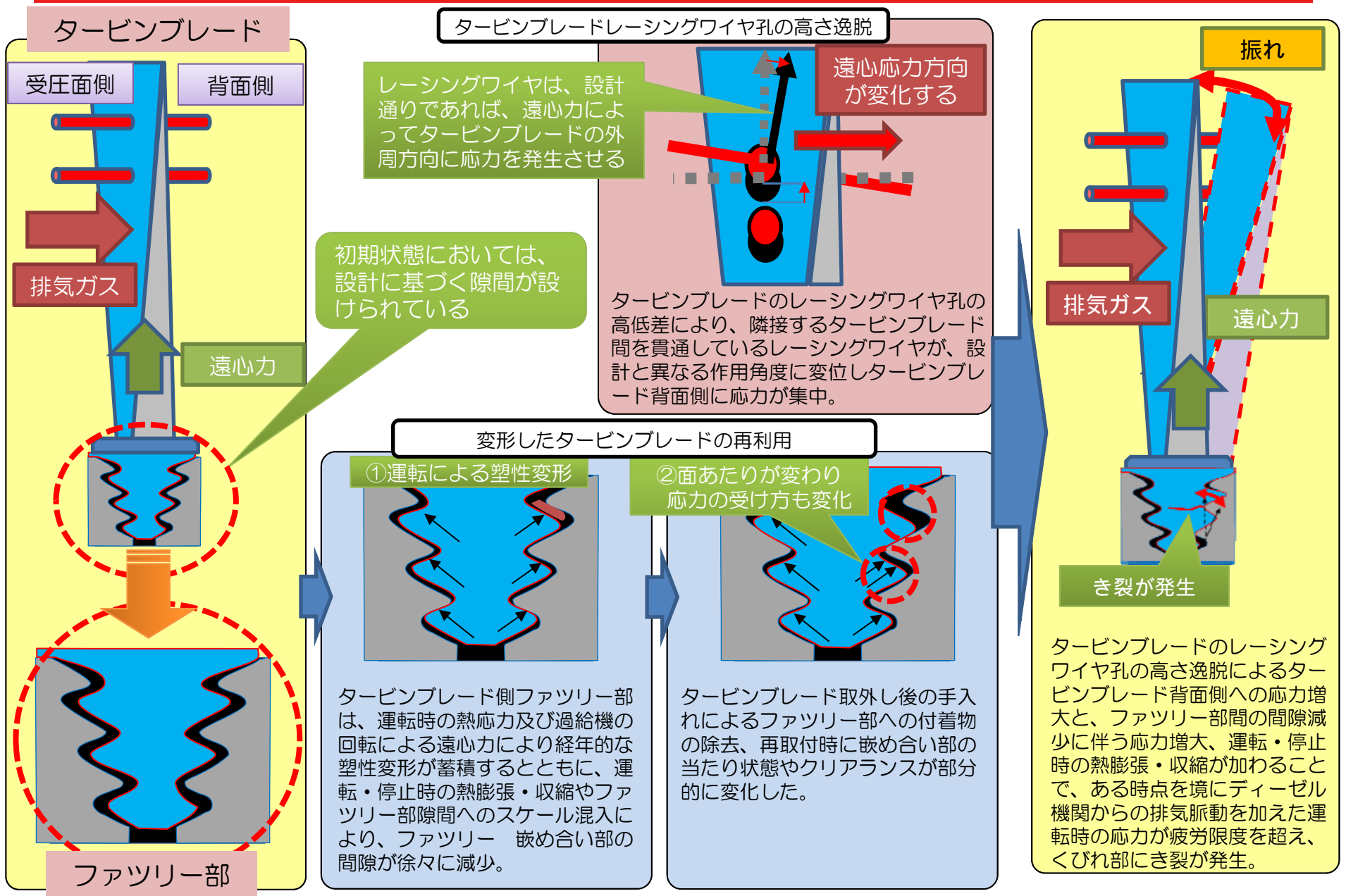
応力解析結果一覧

ファツリー 隙間 (mm)	解析 Case-No	ワイヤ角 (°)	評価
通常	—	作用無	—
	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	×

ファツリー部 疲労評価



5. タービンブレード破損の推定メカニズム



6. 過給機軸固着の推定メカニズム

✓ 過給機軸固着の推定メカニズムを以下のとおり整理。

順序	発生事象
①	タービンブレードレーシングワイヤ孔の高さ逸脱と、運転時の応力に伴う塑性変形の影響により、R側過給機のタービンブレード1枚が疲労限度超過により割れが発生し、き裂が進展し、ファツリー部より延性破壊により折損。
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	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により振動が増加しラジアル方向（軸に対して直角の方向）の変位増加。
④	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側が強く接触。
⑤	キックバック現象によりシャフトが3時方向に急負荷し、ベアリングロータと保持器を潰し、完全軸固着。

7. 発電機出力低下の推定メカニズム

これまでにお知らせ済み

9

✓ 発電機出力低下に関するメカニズムを以下のとおり整理。

順序	発生事象
①	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。
②	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動作がL側シリンダへの抵抗となり、機関回転速度を低下させるように働く。
③	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する。
④	未燃焼状態の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となる。
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出来ず、発電機出力がOMW近傍まで急激に低下した。

8. まとめ

対策

✓ 加工不良に関する対策

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の高さが設計要求値以内であることを作業要領書に定め確認することとする。

✓ 保守管理に関する対策

ファツリー部の経時的な変化およびタービンブレード取外し取付に伴う当たり面の変化を考慮し、不適合等によりタービンブレードの取外し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。

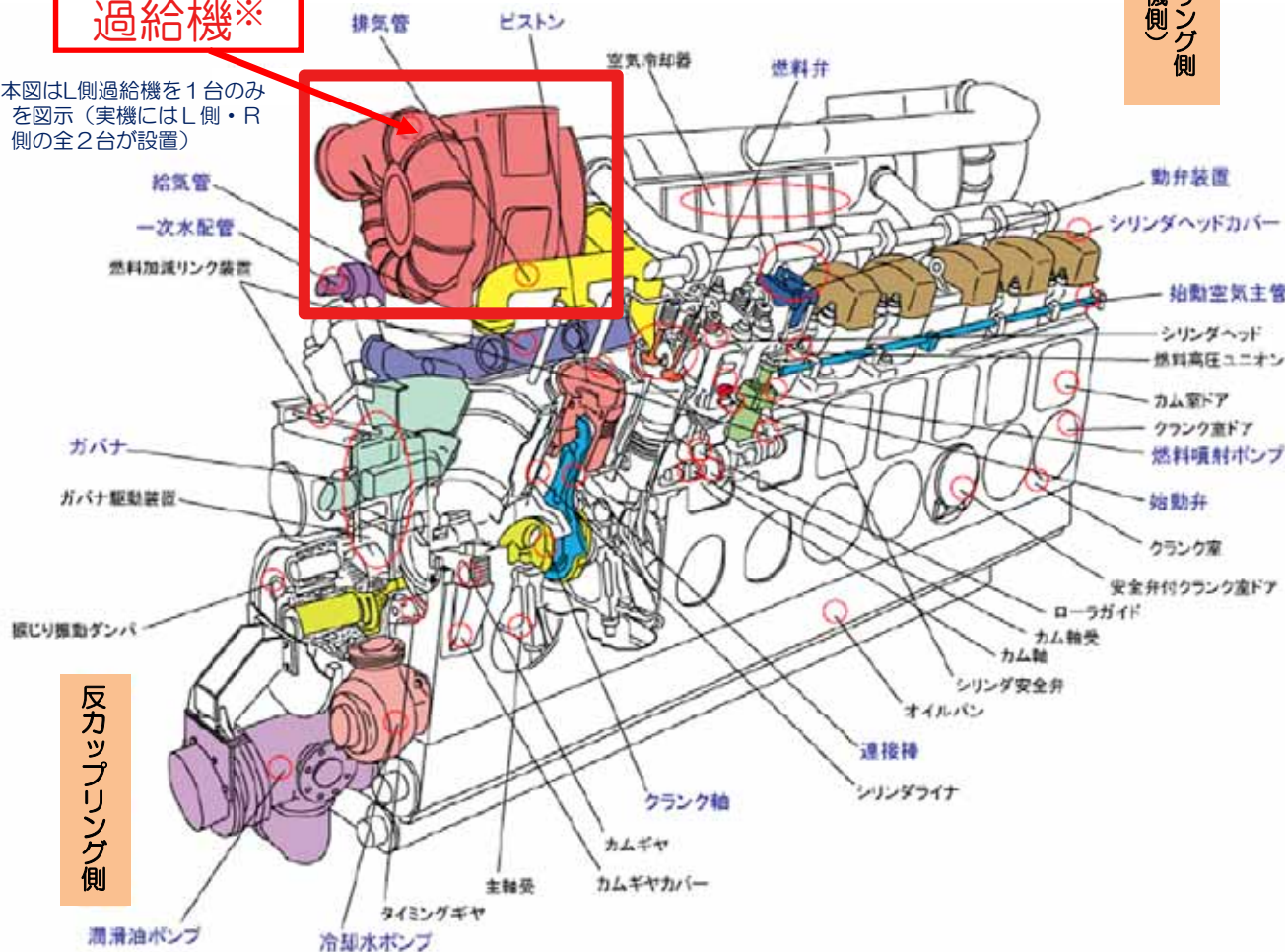
水平展開

- ✓ 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り外し、再度取り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およびタービンブレード側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。

参考資料 D/G機関 概要図と仕様

過給機※

※本図はL側過給機を1台のみを図示（実機にはL側・R側の全2台が設置）



（発電機側）
カップリング側

反カップリング側

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

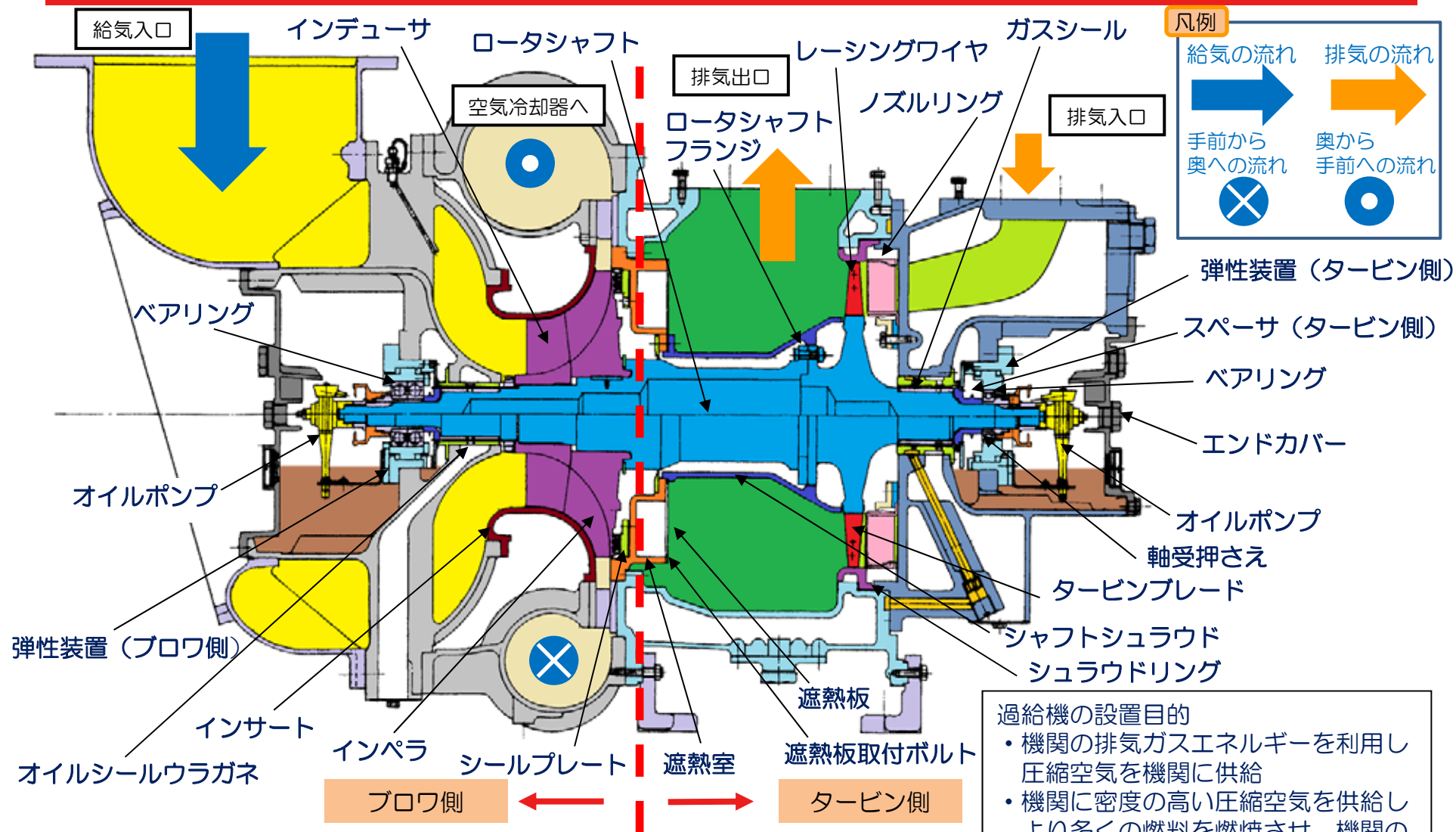
名称		ディーゼル機関
種類	-	4サイクルたて形18気筒ディーゼル機関
出力	PS / 個	9450
回転数	rpm	500
個数	-	1

名称		调速装置
種類	-	油圧式

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

D/G機関 概要図と仕様

参考資料 過給機 構造図と仕様



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

過給機 構造図と仕様