

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3月18日

## 1. 事象の概要

- 1-1. 事象発生時の状況
- 1-2. 主な工場調査結果

## 2. 過給機軸固着の起回事象の特定

- 2-1. 調査結果に基づく過給機軸固着の起回事象の特定

## 3. タービンブレード折損に関する調査結果

- 3-1. タービンブレードの疲労破壊に関する要因調査
- 3-2. 要因：レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱
- 3-3. 要因：タービンブレードファツリ一部寸法の設計値逸脱
- 3-4. 疲労破壊に対する評価結果

## 4. 原因及び事象発生メカニズム

- 4-1. 原因と全体メカニズム
- 4-2. タービンブレードの疲労破壊の推定メカニズム
- 4-3. 過給機軸固着の推定メカニズム
- 4-4. 発電機出力低下に関する推定メカニズム

## 5. 対策及び水平展開

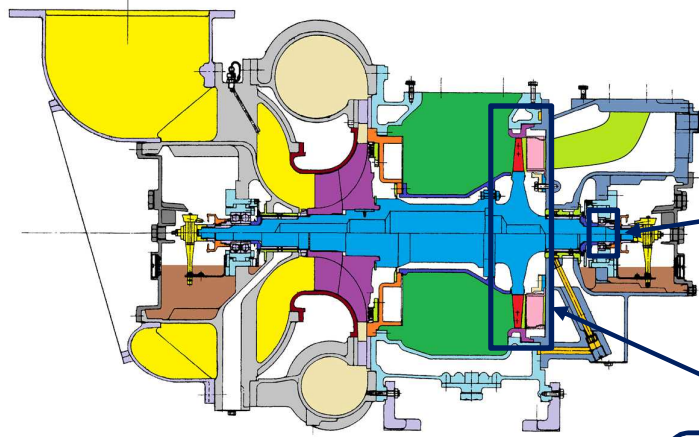
- 5-1. 対策及び水平展開

### 参考資料

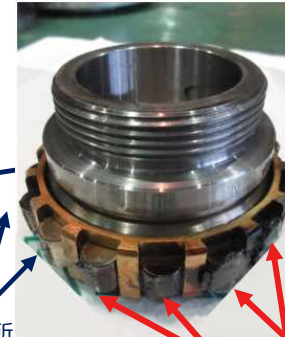
- ✓ 2018年8月30日14時30分より、柏崎刈羽原子力発電所1号機非常用ディーゼル発電機（B系）（以下、「当該D/G」）を定例試験のために起動し、確認運転を実施。
- ✓ 同日15時16分に異音が発生するとともに、当該D/G発電機出力が定格出力6.6MWから0MWに低下したため手動停止。
- ✓ その後、当該D/Gの発電機出力が低下した原因を調査していたところ、9月6日に過給機（R/L側の全2台）1台（R側）の軸固着を確認。  
⇒ 实用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条第3号「発電用原子炉施設の安全を確保するために必要な機能を有していないと認められたとき」に該当するものと判断。

# 1-2. 主な工場調査結果

- ✓ 軸固着を確認したR側過給機をメーカー工場にて詳細点検を実施。  
 ⇒「タービンブレード」、「レーシングワイヤ」及び「ベアリング」に比較的大きな損傷を確認。  
 ※その他部位（ノズルリングやインペラ等）にも摺動痕等を確認。
- ✓ 調査当初は異常が確認されなかったL側過給機についても比較調査のため詳細点検を実施。  
 ⇒タービンブレード及びロータのファツリー部にき裂を確認。



過給機 断面図



正常箇所

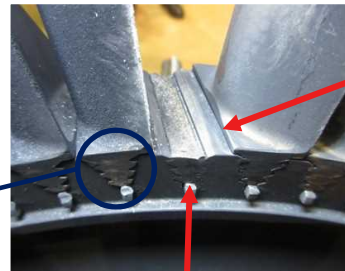
片減り・潰れ

### ベアリング

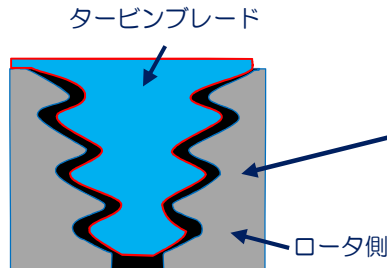
軌道輪（内輪と外輪）、転動体（玉又はころ）及び保持器から構成され、回転や往復運動する相手部品に接して荷重を受け、軸などを支持して円滑な運動をさせる部品。

### タービンブレード

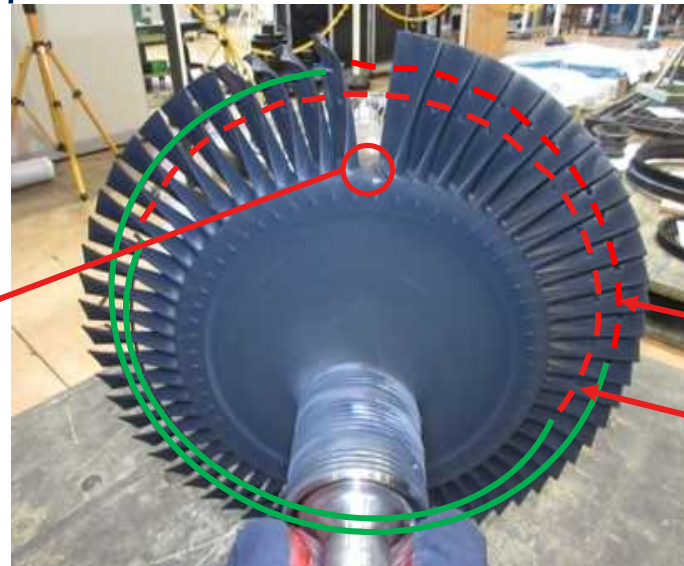
回転するロータシャフトディスク外周部に取り付けられるタービンの翼。燃焼ガスのエネルギーを回転エネルギーに変換するための部品。



タービンブレード1枚が  
付け根部より折損



ファツリー部 概略構造図



### 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：脱落部位  
 緑色実線部：残存部位

#### 内周レーシングワイヤ

赤色点線部：脱落部位  
 緑色実線部：残存部位



1. 事象の概要
  - 1-1. 事象発生時の状況
  - 1-2. 主な工場調査結果
  
2. 過給機軸固着の起回事象の特定
  - 2-1. 調査結果に基づく過給機軸固着の起回事象の特定
  
3. タービンブレード折損に関する調査結果
  - 3-1. タービンブレードの疲労破壊に関する要因調査
  - 3-2. 要因：レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱
  - 3-3. 要因：タービンブレードファツリ一部寸法の設計値逸脱
  - 3-4. 疲労破壊に対する評価結果
  
4. 原因及び事象発生メカニズム
  - 4-1. 原因と全体メカニズム
  - 4-2. タービンブレードの疲労破壊の推定メカニズム
  - 4-3. 過給機軸固着の推定メカニズム
  - 4-4. 発電機出力低下に関する推定メカニズム
  
5. 対策及び水平展開
  - 5-1. 対策及び水平展開

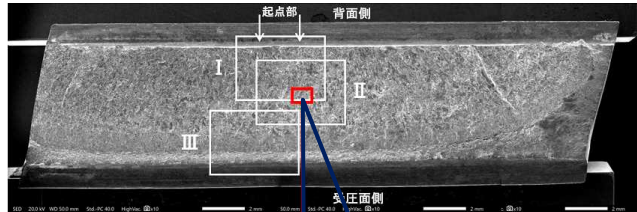
## 参考資料

## 2-1. 調査結果に基づく過給機軸固着の起因事象の特定

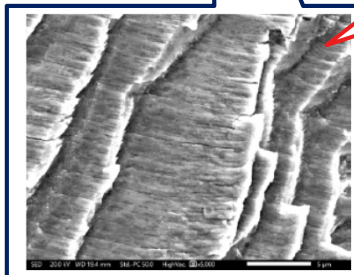
- ✓ R側過給機の損傷部位について軸固着に至る事象の起点部位を考察。
  - ・タービンブレード：破断面の一部に煤等の汚れがあり、疲労破壊を示すストライエーション模様を確認。
  - ・レーシングワイヤ：瞬間的な応力による破壊を示すディンプル模様を確認。
  - ・ベアリング：瞬間的な衝撃荷重による損傷であることを確認。
- ✓ 損傷部位の様相から「タービンブレード折損」が軸固着事象の起点部位であると判断。
  - ・レーシングワイヤ及びベアリング、その他部位の損傷はタービンブレード折損による従属的な事象と判断。
- ✓ L側過給機タービンブレード及びロータのファツリー部にも疲労破壊を示すストライエーション模様を確認。

### <SEM観察結果>

タービンブレード破断面外観



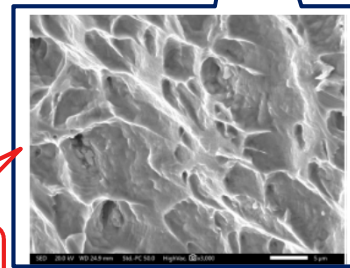
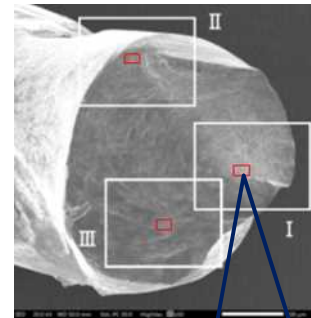
疲労破壊を示す  
ストライエーション模様



SEM観察写真

瞬間的な応力による破壊  
を示すディンプル模様

レーシングワイヤ破断面外観



SEM観察写真

### <ベアリング点検結果>

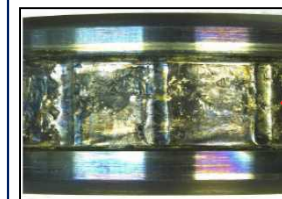


ベアリング外観



瞬間的な衝撃荷  
重による摩耗や  
潰れ

ころ転動面外観



瞬間的な衝撃荷  
重による圧痕

内輪軌道面外観

1. 事象の概要
  - 1-1. 事象発生時の状況
  - 1-2. 主な工場調査結果
  
2. 過給機軸固着の起回事象の特定
  - 2-1. 調査結果に基づく過給機軸固着の起回事象の特定
  
3. タービンブレード折損に関する調査結果
  - 3-1. タービンブレードの疲労破壊に関する要因調査
  - 3-2. 要因：レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱
  - 3-3. 要因：タービンブレードファツリ一部寸法の設計値逸脱
  - 3-4. 疲労破壊に対する評価結果
  
4. 原因及び事象発生メカニズム
  - 4-1. 原因と全体メカニズム
  - 4-2. タービンブレードの疲労破壊の推定メカニズム
  - 4-3. 過給機軸固着の推定メカニズム
  - 4-4. 発電機出力低下に関する推定メカニズム
  
5. 対策及び水平展開
  - 5-1. 対策及び水平展開

## 参考資料

### 3-1. タービンブレードの疲労破壊に関する要因調査

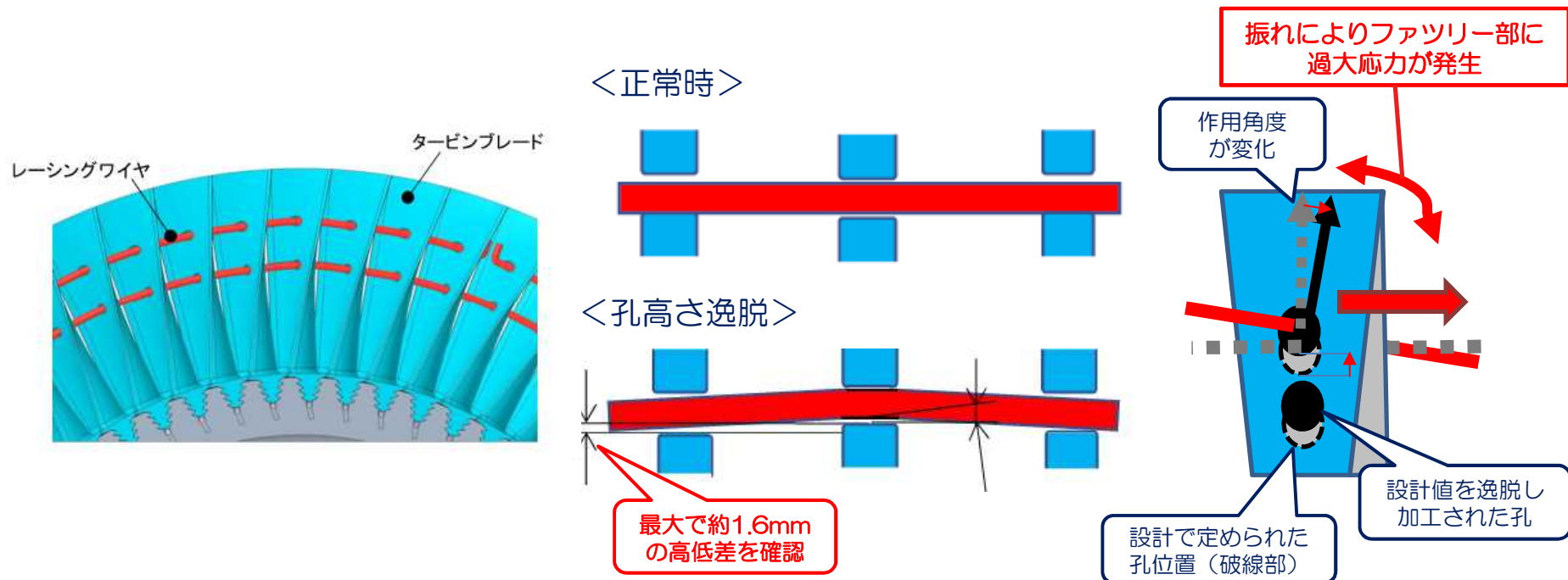
- ✓タービンブレードの疲労破壊に関する要因について、要因分析表に基づき調査を実施。
  - ⇒主たる要因として「レーシングワイヤ孔径及び孔高さ」及び「ブレード取外・取付作業」に問題を確認。
  - ⇒主要因とはならないが事象進展を助長したのものとして「腐食・汚れ」及び「経時的変化」の影響を確認。

要因	要因詳細	調査結果・判定
加工不良	レーシングワイヤ孔径及び孔高さ	【主たる要因】 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大きい箇所を確認。
組立不良	ブレード取外・取付作業	【主たる要因】 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。タービンブレードの「再取付」によりファツリー部の当たり状態が変化。
外的要因	腐食・汚れ	【事象進展を助長】 ファツリー部に酸化スケール及び煤の汚れを確認。汚れの程度としては特段の異常はないが、腐食・汚れが増加することでファツリー部の当たり状態に影響。
	経時的変化	【事象進展を助長】 タービンブレードファツリー部のクリアランスにばらつきがあることを確認。タービンブレードの経時的な寸法変化が、タービンブレードの再利用に伴い、クリアランスのばらつきにつながり、ファツリー部の当たり状態（局所的な応力の作用）に影響。



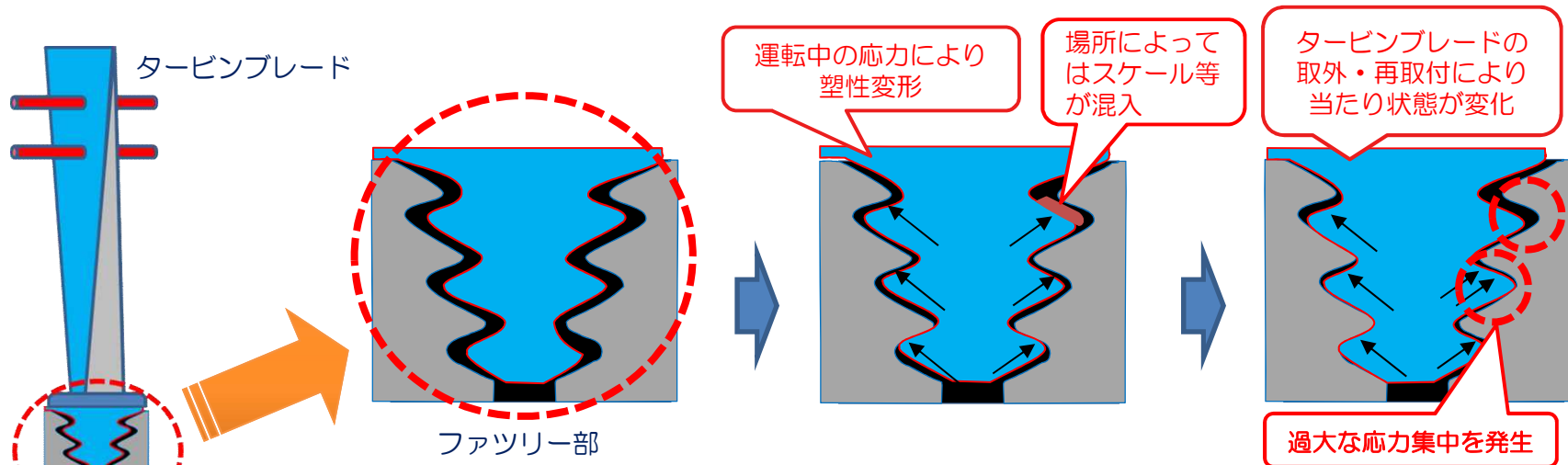
## 3-2. 要因：レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱

- ✓ レーシングワイヤ孔の現品計測を実施した結果、孔高さが設計値を逸脱しており、隣接するタービンブレードとの高低差が大きい箇所があることを確認。
- ✓ 隣接するタービンブレードにおいて孔高さ位置に高低差が生じると、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ことを応力解析により確認。
- ✓ R側及びL側過給機のいずれにおいても、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おり、レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱が、タービンブレードの疲労破壊の主たる要因であると判断。
- ✓ レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱は「タービンブレード製造時の孔加工不良」と判断。



### 3-3. 要因：タービンブレードファツリー部寸法の設計値逸脱 9/23

- ✓タービンブレードファツリー部の三次元計測（寸法測定）を実施した結果、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。
- ✓タービンブレードファツリー部は、運転に伴う熱応力、排気圧力及び回転（遠心力）による応力を受けることにより、経時的な寸法変化（塑性変形）が発生したと判断。
- ✓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たことを確認。  
※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、レーシングワイヤ孔の「再加工」を実施。
- ✓タービンブレード及びロータのファツリー部に酸化スケール及び煤等の汚れを確認。腐食・汚れは、タービンブレード取外時の手入れにて除去され、タービンブレード再取付け後のファツリー部の当たり状態やクリアランスの部分的な状態変化に寄与したものと判断。
- ✓既に寸法変化が発生した状態で、タービンブレードの取外・再取付（再利用）したことに伴い、ファツリー部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たる要因となったものと判断。



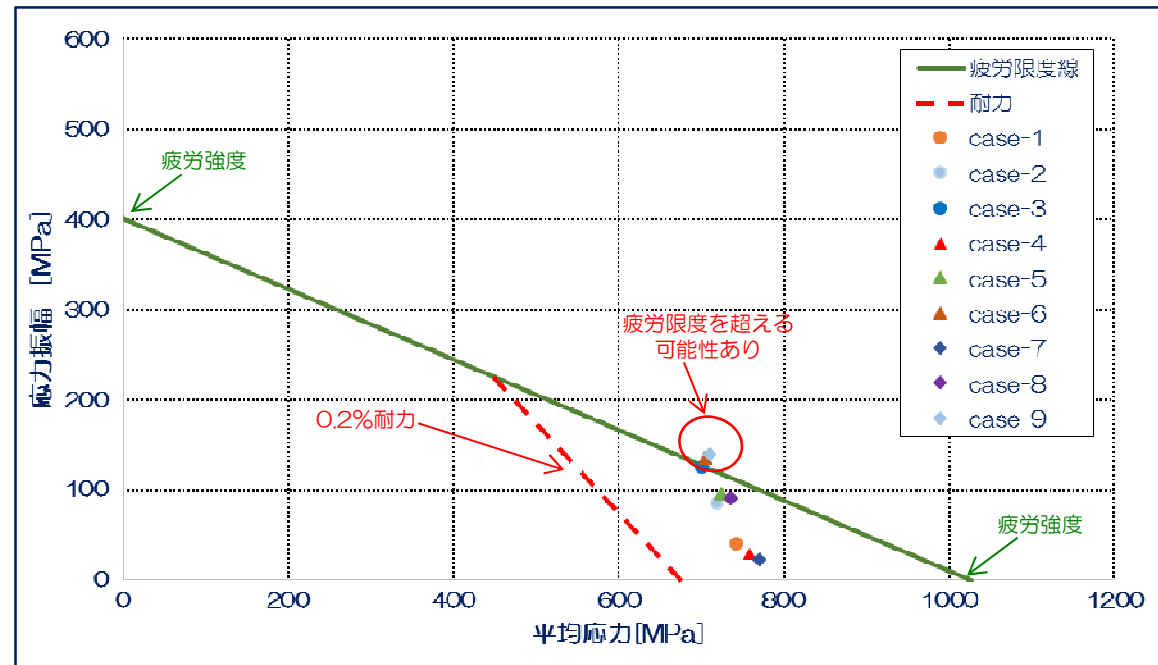
### 3-4. 疲労破壊に対する評価結果

- ✓ 要因調査を踏まえ、「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」がタービンブレードファツリー部に及ぼす影響について応力解析を実施。
- ✓ 応力解析の結果、タービンブレードファツリー部背面側の応力が設計値を上回り、疲労限度に達することを確認。
- ✓ 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」について、各々の事象単独においては、疲労限度には至らないことを確認。

解析結果一覧表

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	×

修正グッドマン線図



1. 事象の概要
  - 1-1. 事象発生時の状況
  - 1-2. 主な工場調査結果
  
2. 過給機軸固着の起回事象の特定
  - 2-1. 調査結果に基づく過給機軸固着の起回事象の特定
  
3. タービンブレード折損に関する調査結果
  - 3-1. タービンブレードの疲労破壊に関する要因調査
  - 3-2. 要因：レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱
  - 3-3. 要因：タービンブレードファツリ一部寸法の設計値逸脱
  - 3-4. 疲労破壊に対する評価結果
  
4. 原因及び事象発生メカニズム
  - 4-1. 原因と全体メカニズム
  - 4-2. タービンブレードの疲労破壊の推定メカニズム
  - 4-3. 過給機軸固着の推定メカニズム
  - 4-4. 発電機出力低下に関する推定メカニズム
  
5. 対策及び水平展開
  - 5-1. 対策及び水平展開

## 参考資料

## 4-1. 原因と全体メカニズム

### ■ 原因

- ✓ 事象の原因は、以下の要因が重畳したことにより、タービンプレードが疲労破壊したものと推定。
  - レーシングワイヤ孔の製造時の加工不良によるレーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱。
  - 塑性変形したタービンプレードの取外・再取付（再利用）による、ファツリー部の当たり状態の変化。

### ■ 全体メカニズム

- ✓ 事象の起点から、当該D/Gの発電機出力低下に至る全体のメカニズムは以下と推定。

R側過給機タービンプレードの疲労破壊による折損

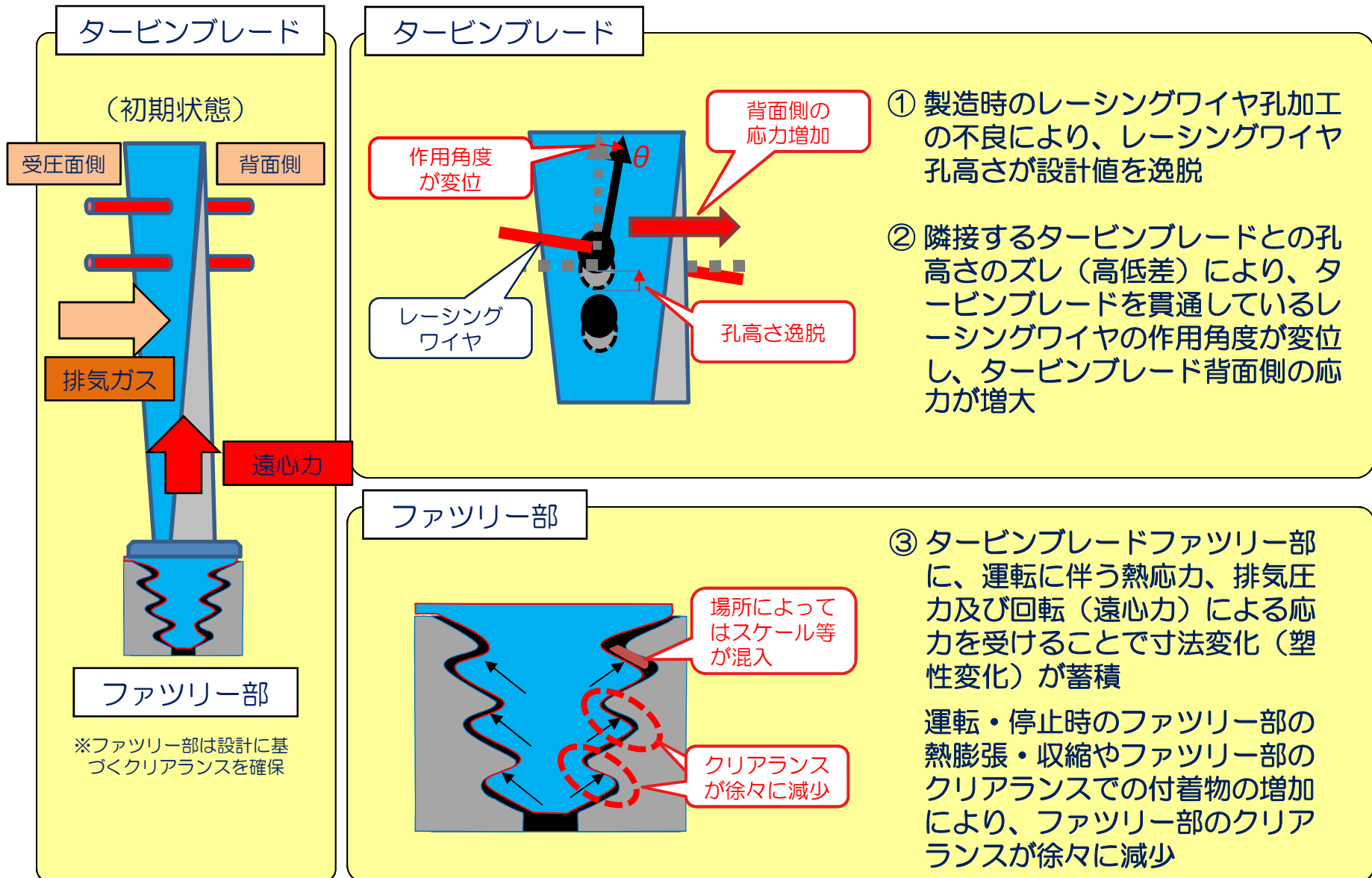


R側過給機軸固着の発生



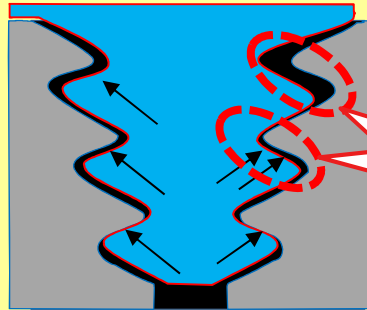
当該D/Gの発電機出力低下

## 4-2. タービンブレードの疲労破壊の推定メカニズム (1/2) 13/23



## 4-2. タービンブレードの疲労破壊の推定メカニズム (2/2) 14/23

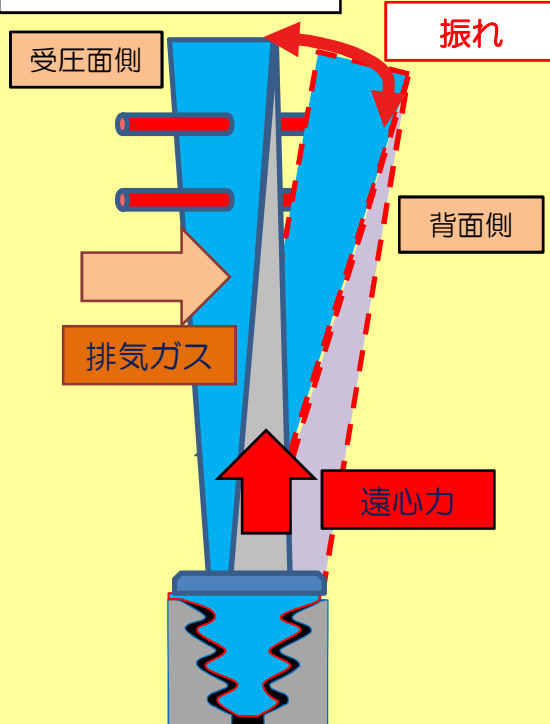
ファツリー部



当たり状態が変化

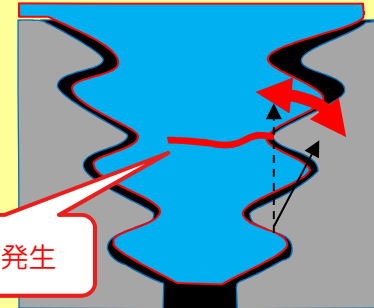
④ タービンブレード取外時の手入れ（腐食・汚れの除去）により、タービンブレード再取付け後のファツリー部の当たり状態やクリアランスが部分的に変化

タービンブレード



⑤ レーシングワイヤ孔高さのズレによりタービンブレード背面側の応力増大と、ファツリー部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・収縮が加わり、ディーゼル機関からの排気脈動等による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

ファツリー部



き裂が発生

⑥ 運転時に増大した応力が作用し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

## 4-3. 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	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	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。
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が強く接触。
⑤	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。



## 4-4. 発電機出力低下に関する推定メカニズム

- ✓ 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。
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。
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出来ず、発電機出力がOMW近傍まで急激に低下。

1. 事象の概要
  - 1-1. 事象発生時の状況
  - 1-2. 主な工場調査結果
  
2. 過給機軸固着の起回事象の特定
  - 2-1. 調査結果に基づく過給機軸固着の起回事象の特定
  
3. タービンブレード折損に関する調査結果
  - 3-1. タービンブレードの疲労破壊に関する要因調査
  - 3-2. 要因：レーシングワイヤ孔高さの設計値逸脱
  - 3-3. 要因：タービンブレードファツリ一部寸法の設計値逸脱
  - 3-4. 疲労破壊に対する評価結果
  
4. 原因及び事象発生メカニズム
  - 4-1. 原因と全体メカニズム
  - 4-2. タービンブレードの疲労破壊の推定メカニズム
  - 4-3. 過給機軸固着の推定メカニズム
  - 4-4. 発電機出力低下に関する推定メカニズム
  
5. 対策及び水平展開
  - 5-1. 対策及び水平展開

## 参考資料

### ■ 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。
- ✓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。
  - ・タービンブレード製造（孔加工）に係る対策  
レーシングワイヤ孔加工時の検査にて、レーシングワイヤ孔高さが設計要求値以内であることを確認（作業要領書を改訂）。
  - ・保守管理に係る対策  
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。

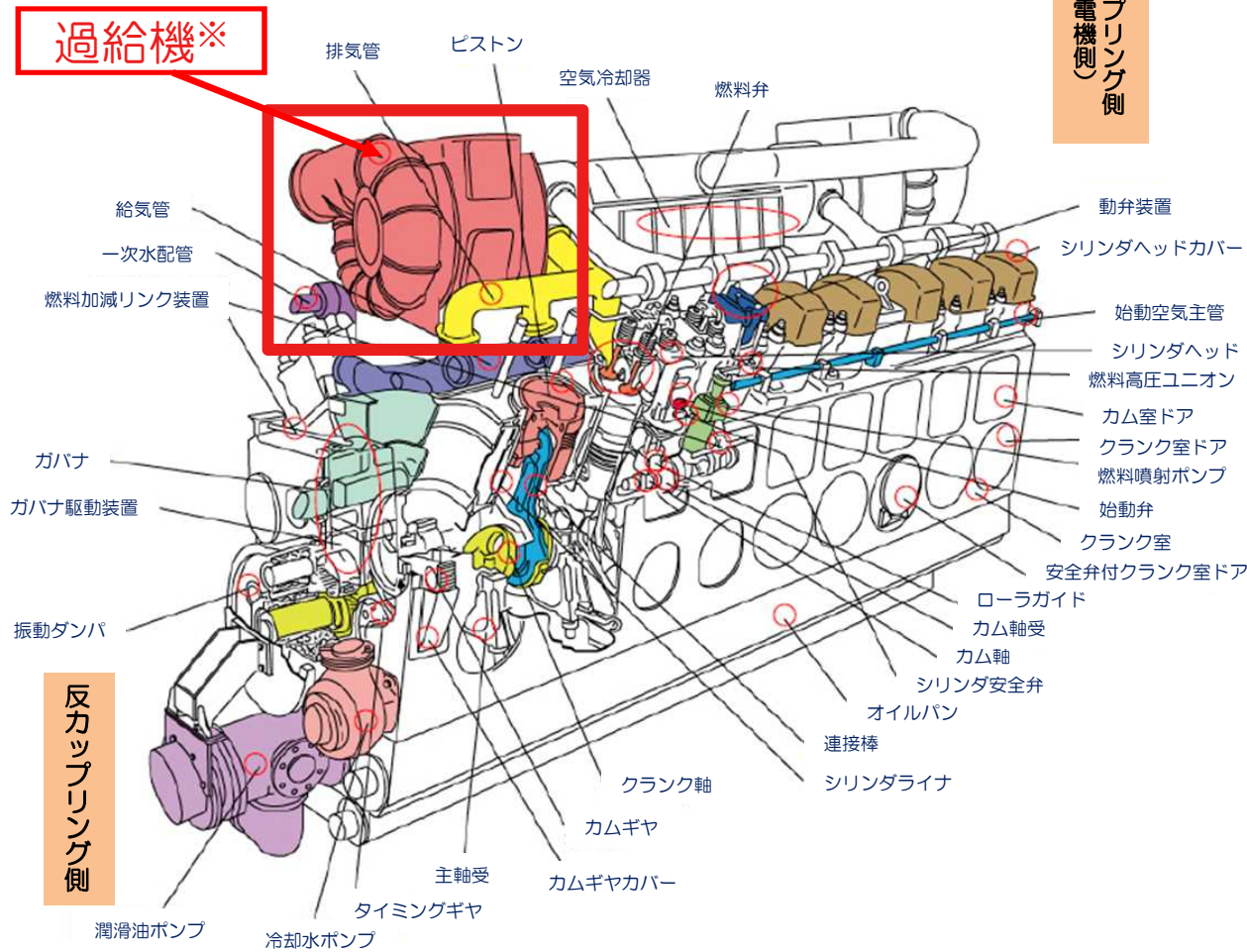
### ■ 水平展開

- ✓過去に、タービンブレードの取外・再取付（再利用）の実績のある過給機を対象として点検を実施。
- 【点検内容】
- ・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。
  - ・同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。

# 参考資料

# 参考資料：D/G機関 概要図と仕様

※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)



**過給機※**

カップリング側  
(発電機側)

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

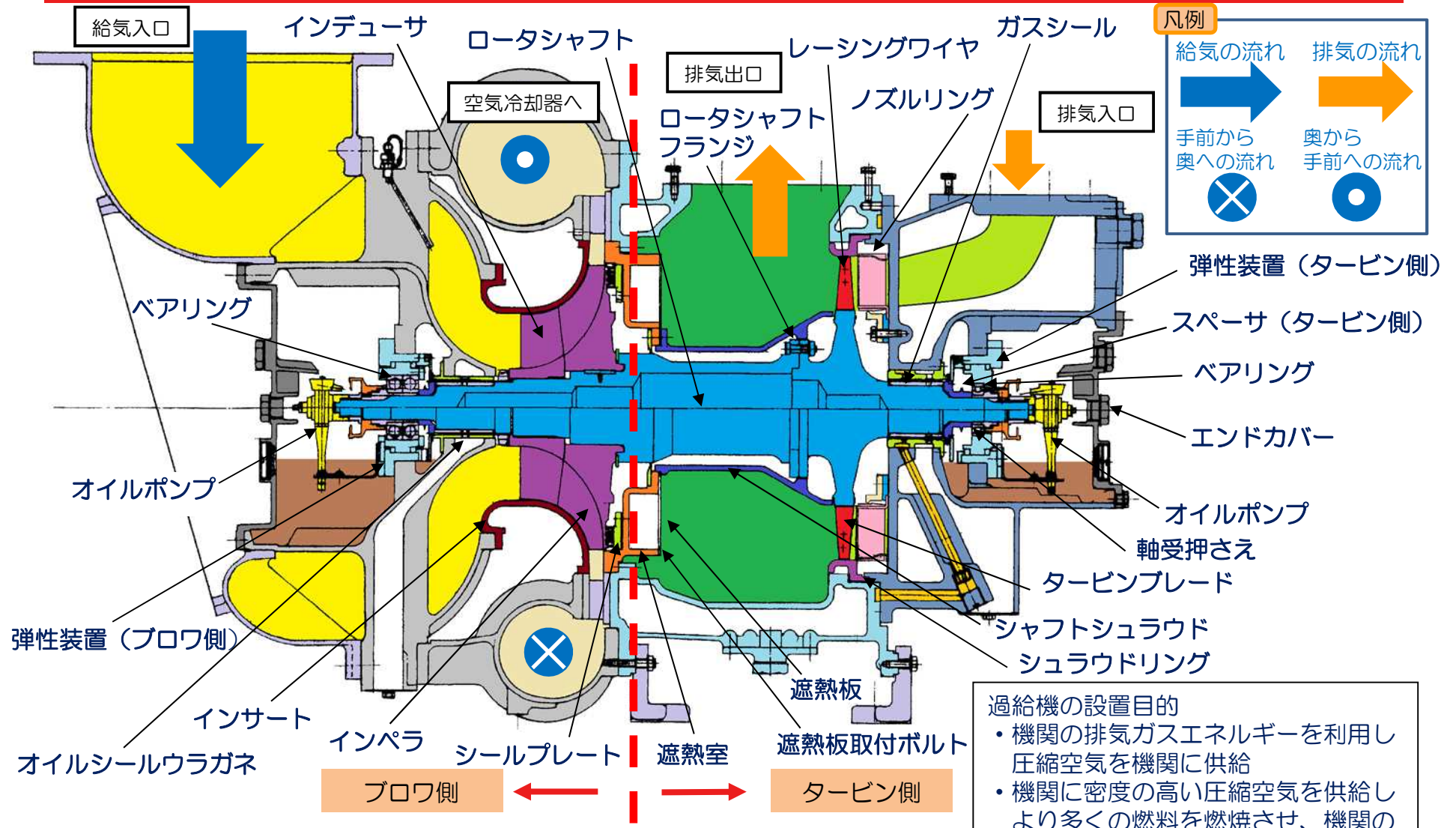
名称		ディーゼル機関
種類	—	4サイクルたて形18気筒ディーゼル機関
出力	PS / 個	9450
回転数	rpm	500
個数	—	1

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



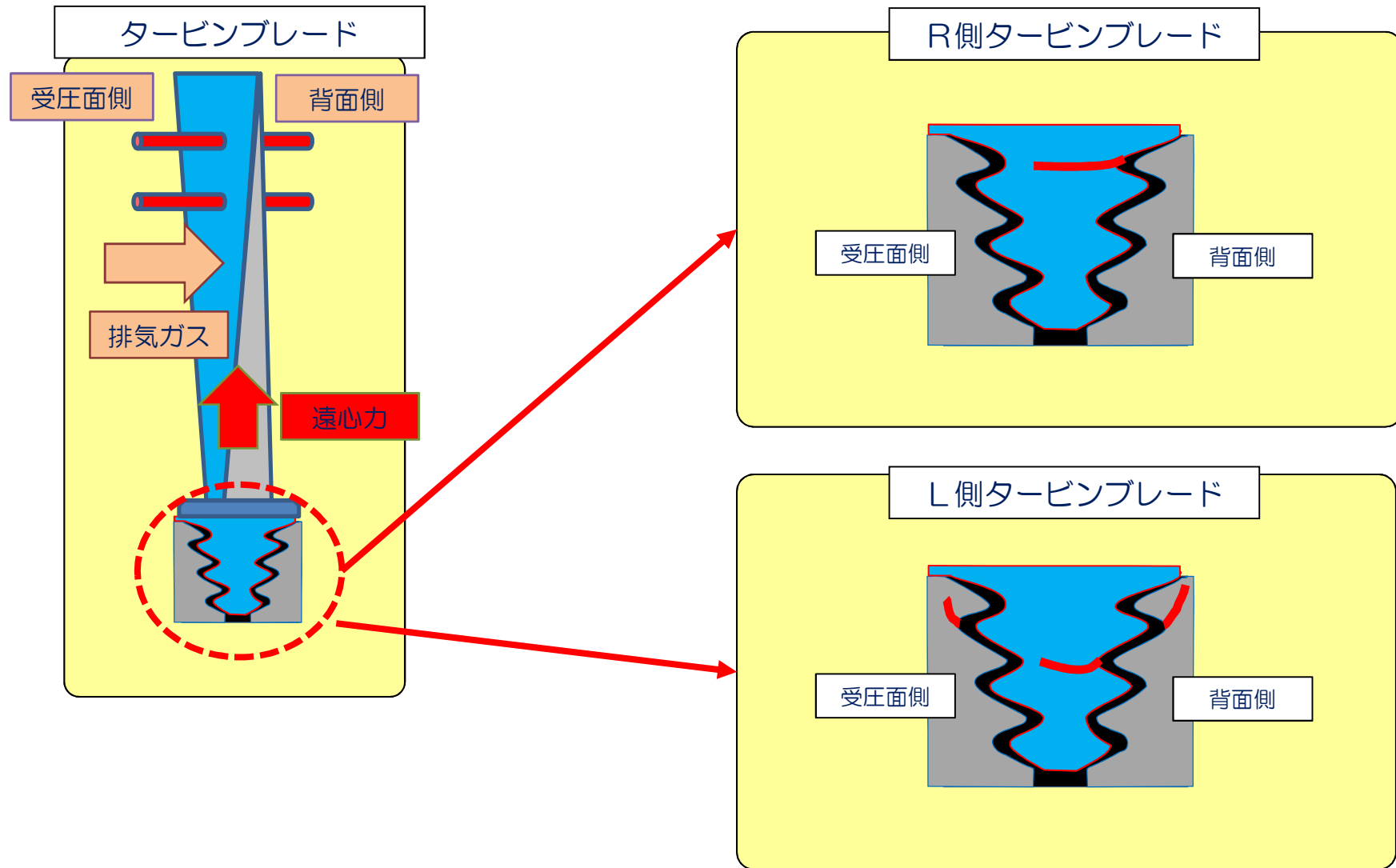
過給機の設置目的

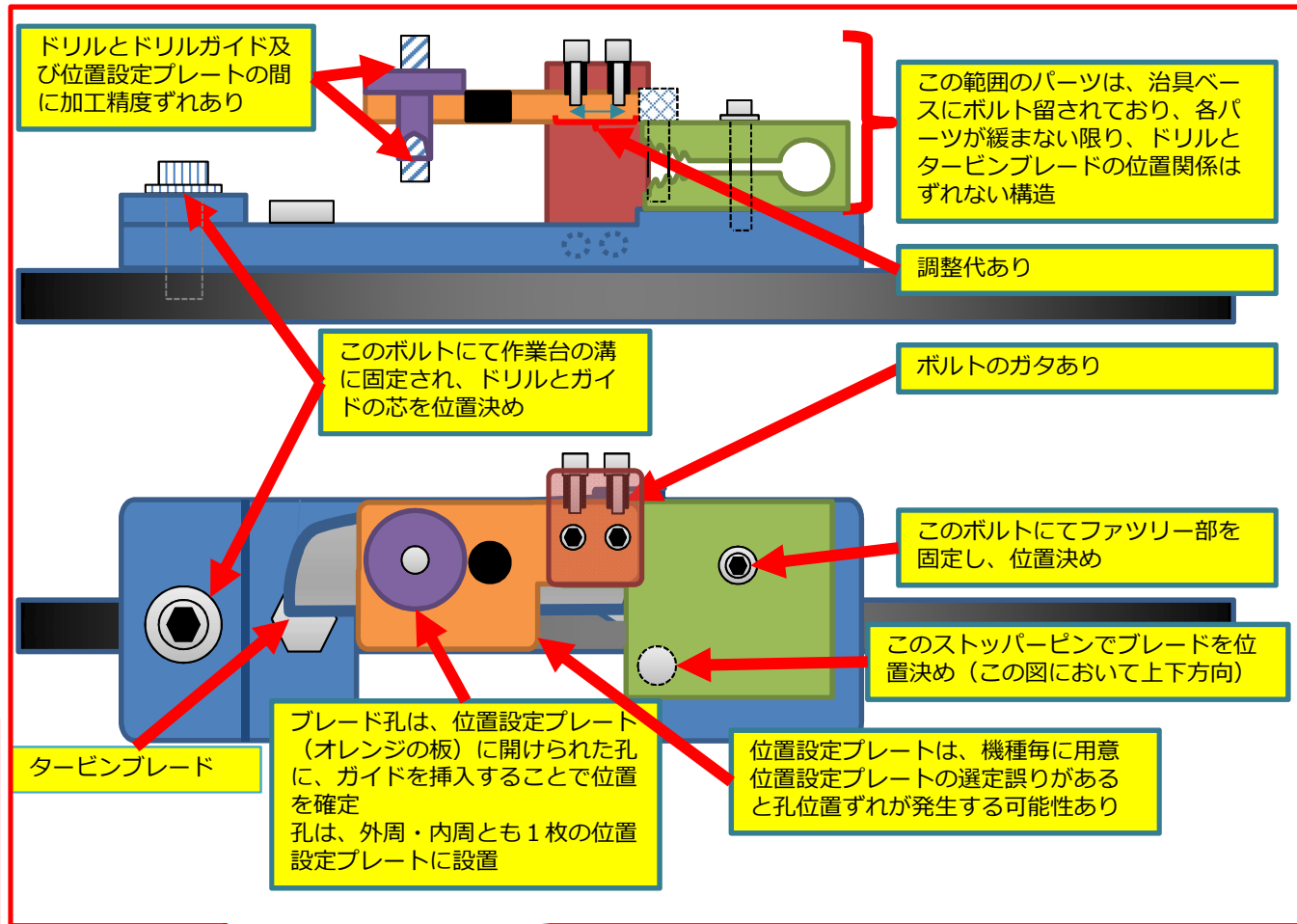
- ・機関の排気ガスエネルギーを利用し圧縮空気を機関に供給
- ・機関に密度の高い圧縮空気を供給しより多くの燃料を燃焼させ、機関の出力を向上させるもの

名称		過給機
種類	-	排気タービン式
圧力	kg/cm <sup>2</sup>	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







加工治具解説



写真：加工時の様子



**TEPCO**

---