

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  
（原因調査進捗状況）

---

2018年12月12日

# INDEX

---

1. 調査状況について
  - 1-1. はじめに
  - 1-2. タービン損傷に関する調査進捗
  - 1-3. その他調査進捗
  - 1-4. 過給機軸固着の推定メカニズム
  - 1-5. 調査状況まとめ
  
2. 今後の調査について
  - 2-1. 疲労破壊に関する調査
  
3. 今後の対応
  - 3-1. まとめ
  - 3-2. 調査スケジュール

参考資料

# 1. 調査状況について

---

## 1. 調査状況について

- 1-1. はじめに
- 1-2. タービン損傷に関する調査進捗
- 1-3. その他調査進捗
- 1-4. 過給機軸固着の推定メカニズム
- 1-5. 調査状況まとめ

## 2. 今後の調査について

- 2-1. 疲労破壊に関する調査

## 3. 今後の対応

- 3-1. まとめ
- 3-2. 調査スケジュール

参考資料

## 1-1. はじめに

---

### これまでの調査報告の概要

- ✓ 10月29日の公開会合において、以下を報告。
  - R側過給機軸固着に関する要因調査  
⇒起因事象は「タービンブレードの折損」または「レーシングワイヤの破断」のいずれかと推定し、調査を継続。
  - 発電機出力低下に関する要因調査  
⇒ディーゼル機関（過給機を除く）や発電機側にも異常がないことから、「R側過給機の軸固着」による従属的な事象と推定。
- ✓ 過給機軸固着に関する要因調査については、以下を実施。
  - タービン損傷に関する継続調査  
⇒R側過給機軸固着の起因事象の特定：レーシングワイヤの破面観察  
⇒L側過給機タービンブレード等の調査
  - 損傷したベアリングの詳細調査
  - 過給機損傷に伴う影響調査として、ディーゼル機関のエンジンシリンドラや排気管・伸縮継手等を点検

上記の調査状況及び、今後の調査方針について報告。

## 1-2. タービン損傷に関する調査進捗 (1 / 5)

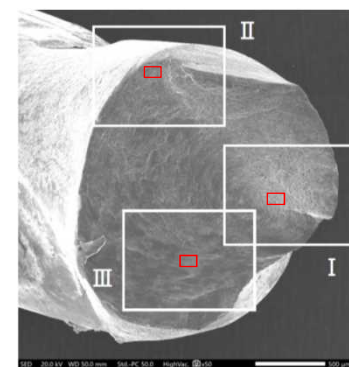
- ✓ R側過給機タービンブレードに残存していたレーシングワイヤの破断面についてSEM観察を実施。
- ✓ 破断面は、疲労破壊を示す痕跡は確認されず、応力によるせん断を示すディンプル模様を確認。
- ✓ レーシングワイヤの破断は、タービンブレードの折損により発生したものと推定。



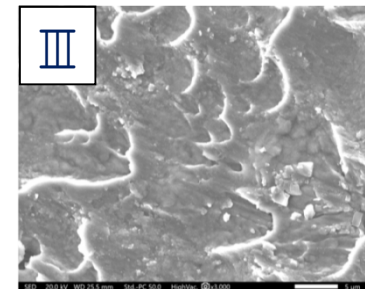
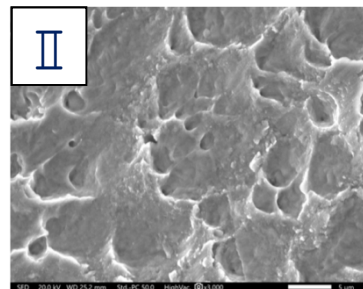
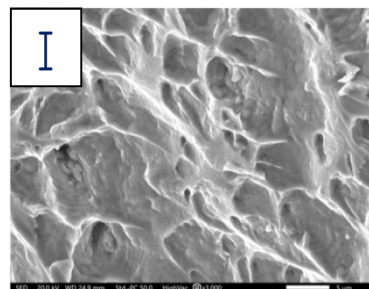
タービン外観



レーシングワイヤ破断面外観



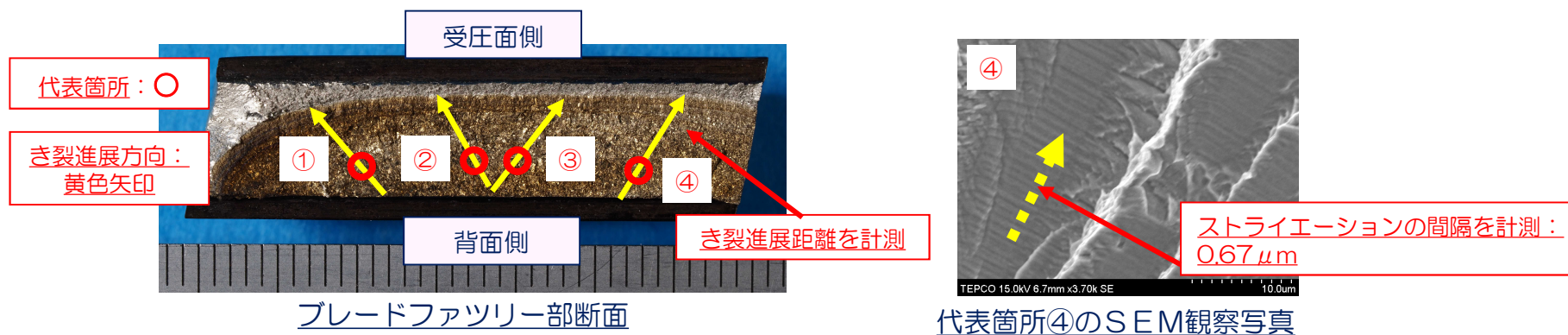
I~III ディンプル模様を確認



SEM観察写真

## 1-2. タービン損傷に関する調査進捗（2/5）

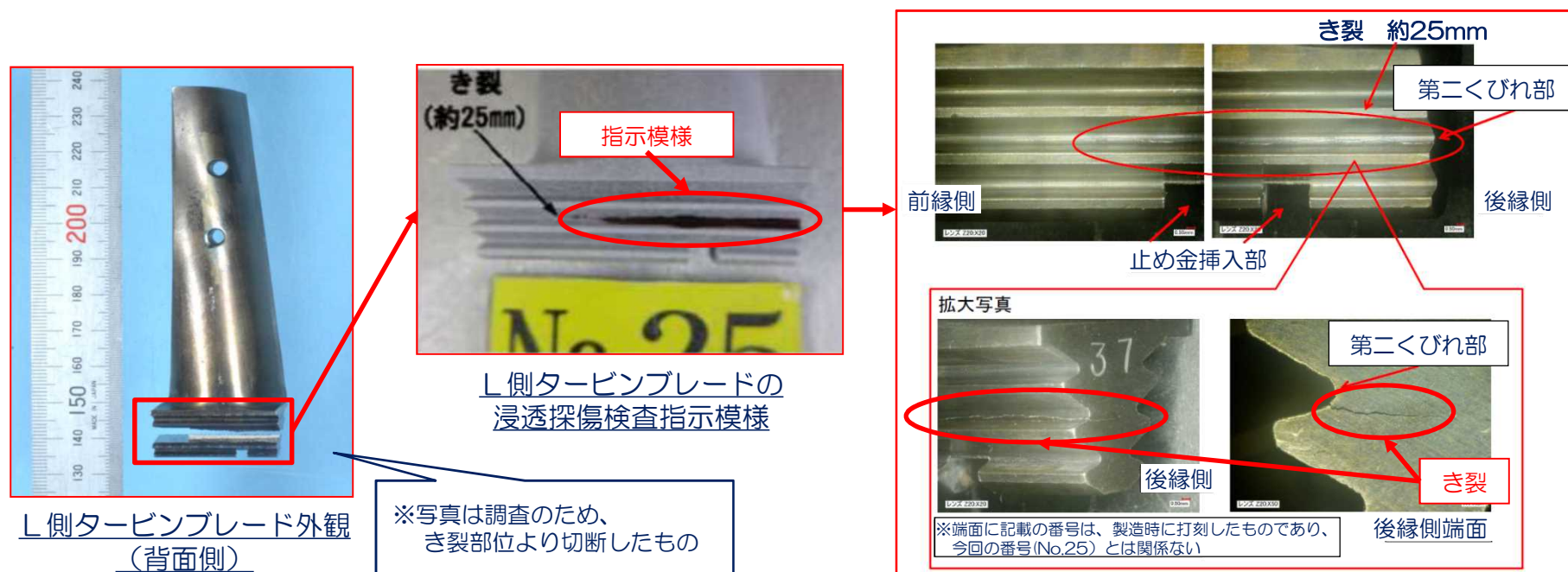
- ✓ R側過給機の折損したタービンブレードについては、破面の縞模様（ストライエーション）の間隔を測定し、き裂に至る応力サイクル数を算出。  
 ※応力サイクル数 = き裂進展距離 / ストライエーション間隔  
 ※ストライエーション間隔は代表4箇所にて評価
- ✓ 応力サイクル数は「約10,000サイクル」であり、D/G機関の運転時間中における、限定した期間・状態において進展（低サイクル疲労）したものと推定。
- ✓ 疲労破壊に至る「共振モード（低出力運転時の過給機回転との共振等）」を念頭に、応力解析及びハンマリング試験等により、き裂発生の評価を実施。



	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

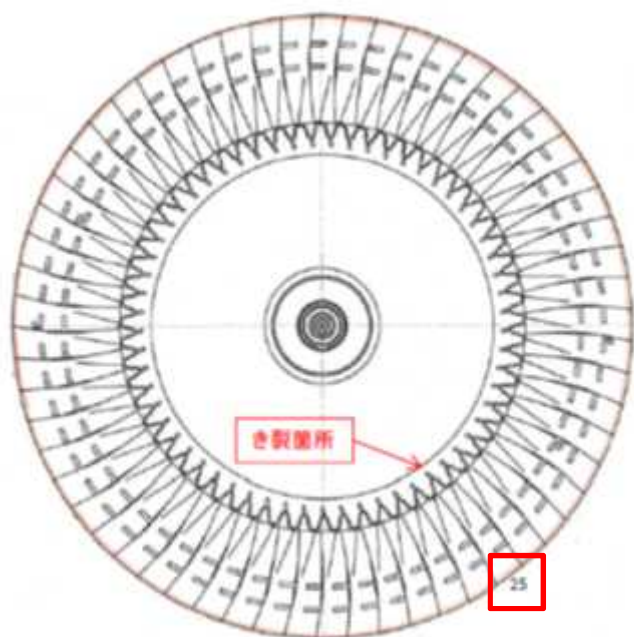
## 1-2. タービン損傷に関する調査進捗 (3/5)

- ✓ タービンブレードの折損を踏まえ、R側及びL側の全てのタービンブレードのファツリー部について、浸透探傷検査を実施。
- ✓ R側（過給機軸固着側）：折損したタービンブレード以外に指示模様は確認されず。
- ✓ L側：タービンブレード1枚より、ブレード背面側のファツリー部第二くびれ部の谷部にて指示模様を確認。  
 ※R側はブレード背面側のファツリー部第一くびれ部の谷部が損傷



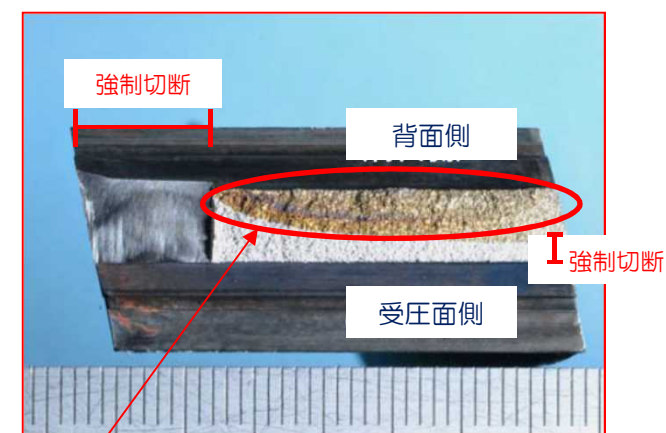
## 1-2. タービン損傷に関する調査進捗（4/5）

- ✓ 指示模様が確認されたL側タービンブレード1枚について、ファツリー部の当該部位付近を強制切断し、破面の外観観察を実施。
- ✓ 背面側のファツリー部底部から半弧状の疲労き裂（ビーチマーク）を確認。
- ✓ 破面の詳細を確認するためSEM観察を実施中。

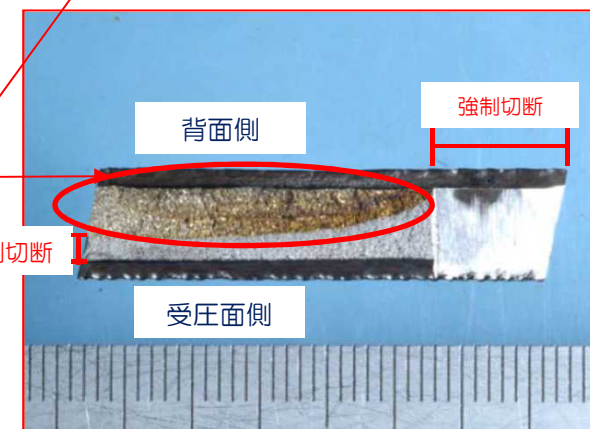


L側タービンブレード  
外観（背面側）

背面側からの半弧状の  
疲労き裂を確認



L側タービンブレード翼側破面外観

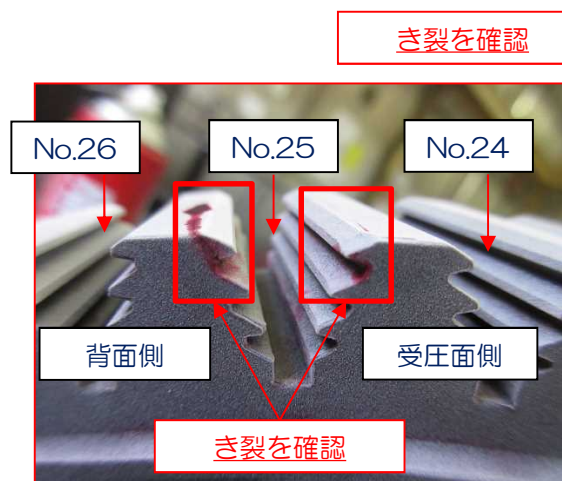
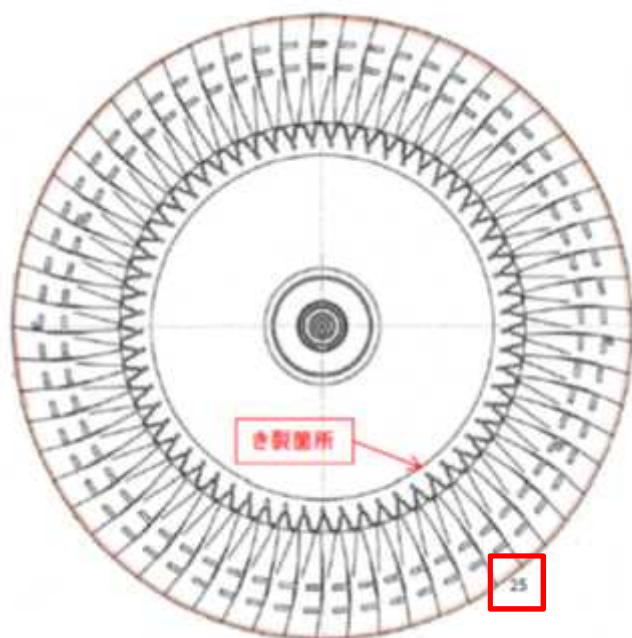


L側タービンブレード根元側破面外観

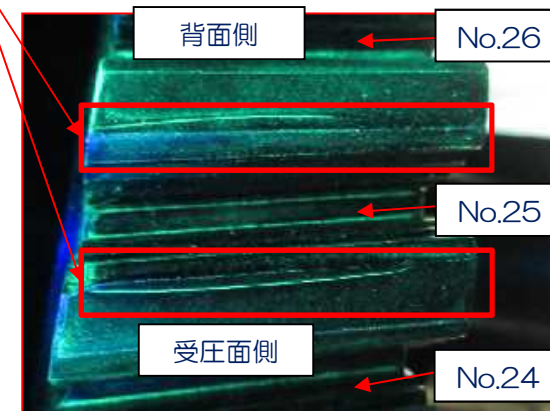


## 1-2. タービン損傷に関する調査進捗（5/5）

- ✓ 指示模様が確認されたL側タービンブレードについて、受け側のロータシャフトファツリ部に浸透探傷検査及び磁粉探傷検査を実施したところ、き裂を確認。
- ✓ L側ロータシャフトファツリ部当該箇所以外にはき裂がないことを確認。
- ✓ R側ロータシャフトファツリ部全数にき裂がないことを確認。
- ✓ 今後、き裂部分を強制切断し、破面の詳細調査を実施。



L側ロータシャフトファツリ部  
(浸透探傷検査)

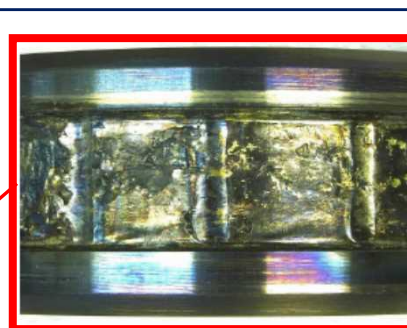
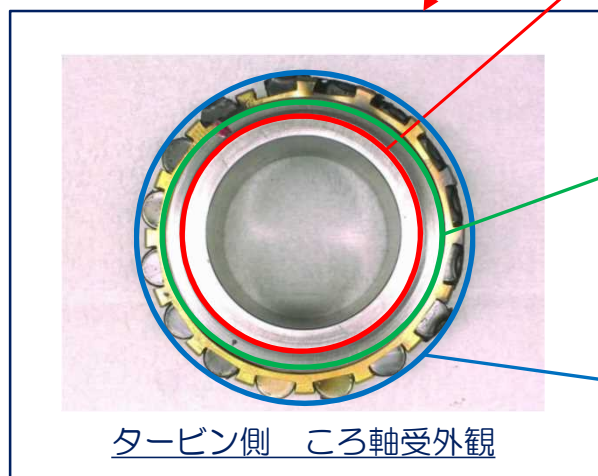
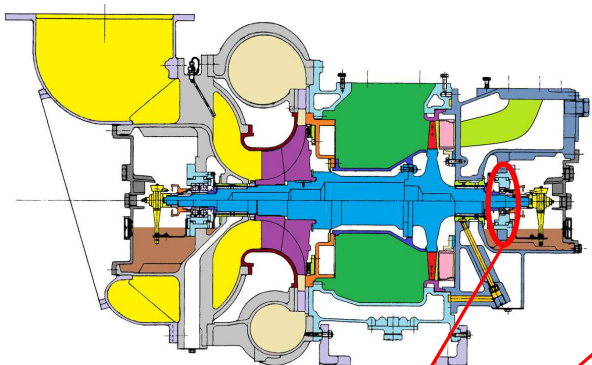


L側ロータシャフトファツリ部  
(磁粉探傷検査) (真上から撮影)

# 1-3. その他の調査進捗 (1/3) ベアリングに関する詳細調査その1

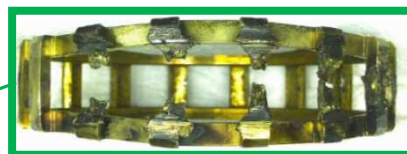
対象：R側過給機タービン側 ころ軸受

- ✓ 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。
- ✓ 変形は、瞬間的に大きな荷重（衝撃荷重）を受けたことによるものと推定。



内輪軌道面外観

内輪軌道面外観では、ころのピッチ間隔で変形（圧痕）を確認



保持器外観

保持器外観では、内輪軌道面の約1/3周で保持器の柱が破断していることを確認



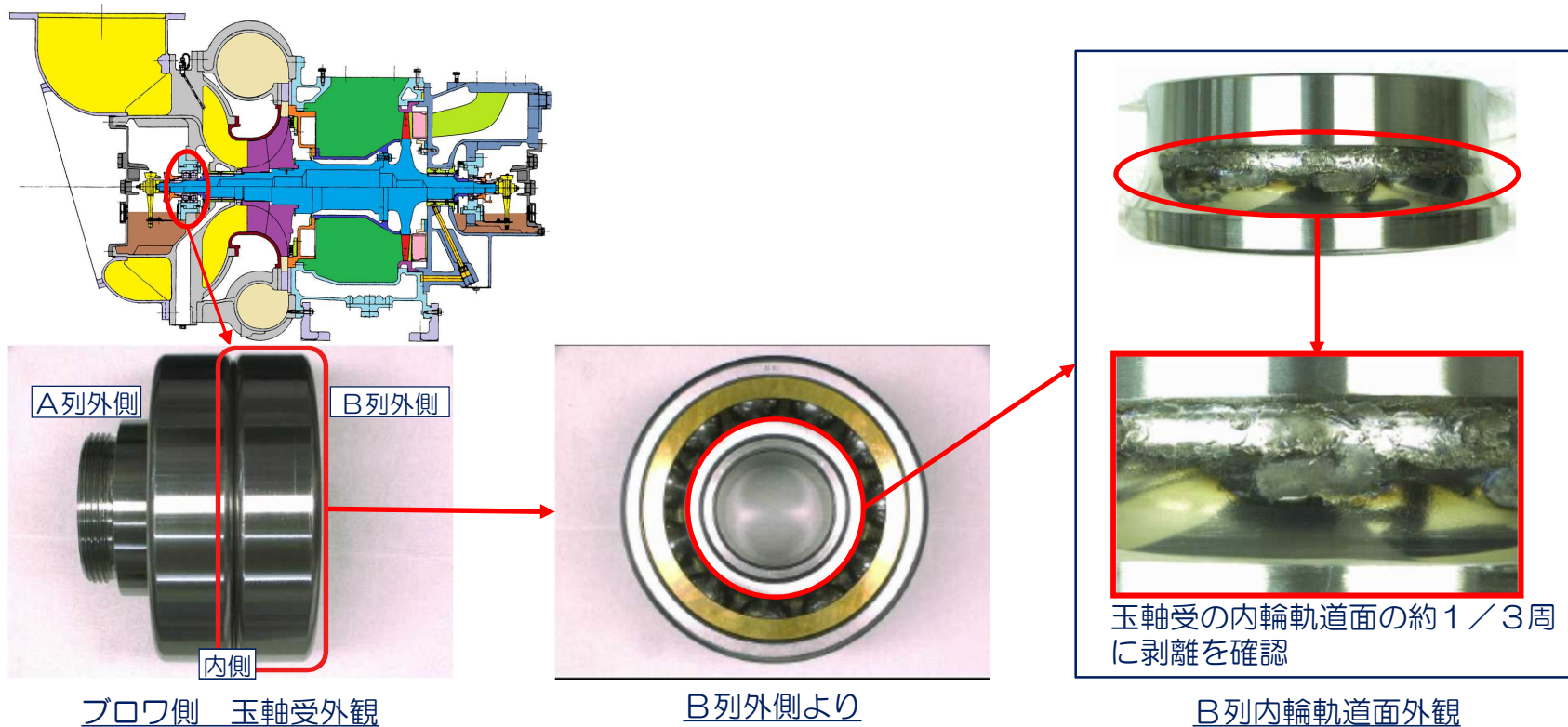
ころ転動面外観

ころ転動面外観では、約1/2のころが摩耗、変形していることを確認

# 1-3. その他の調査進捗 (2/3) ベアリングに関する詳細調査その2

対象：R側過給機ブロウ側 玉軸受

✓ 玉軸受の内輪軌道面の約1/3周に剥離を確認。



✓ ベアリングの損傷は、前回報告の推定メカニズムのとおり従属的に発生したものであり、ロータシャフトがアンバランスにより振動し、ロータシャフトが屈曲し、ベアリングが潰れたものと推定。

## 1-3. その他の調査進捗（3/3）過給機損傷に伴う影響調査進捗

- ✓ 過給機損傷に伴う影響調査のため、ディーゼル機関の点検を実施。
- ✓ 過給機が損傷したR側のシリンダ全9気筒について開放点検を実施し、異常なしを確認。
  - ※L側シリンダについても、比較調査のため、代表2気筒の開放点検を実施し、異常なしを確認。
- ✓ シリンダ給排気弁については、R側及びL側の全72箇所の動作確認を実施し、異常なしを確認。
- ✓ R側及びL側の排気管全数点検（排気管（18箇所）の内部点検、伸縮継手の内外面の外観目視点検）を実施し、異常なしを確認。



No.10.シリンダ（R側）



No.1.シリンダ（L側）

- シリンダ内に過給機の損傷部材等の混入なしを確認。
- 異常な燃焼を示す痕跡がないことを確認。

### シリンダ内部点検結果

No.10シリンダ  
出口排気管  
(R側)No.7排気管継手（外面）  
(R側)No.7排気管継手（内面）  
(R側)

- 排気管内部に異常な燃焼を示す痕跡がないことを確認。
- 排気管継手の内外面に破損等の異常がないことを確認。

### 排気管点検結果

## 1-4. 過給機軸固着の推定メカニズム（1 / 3）

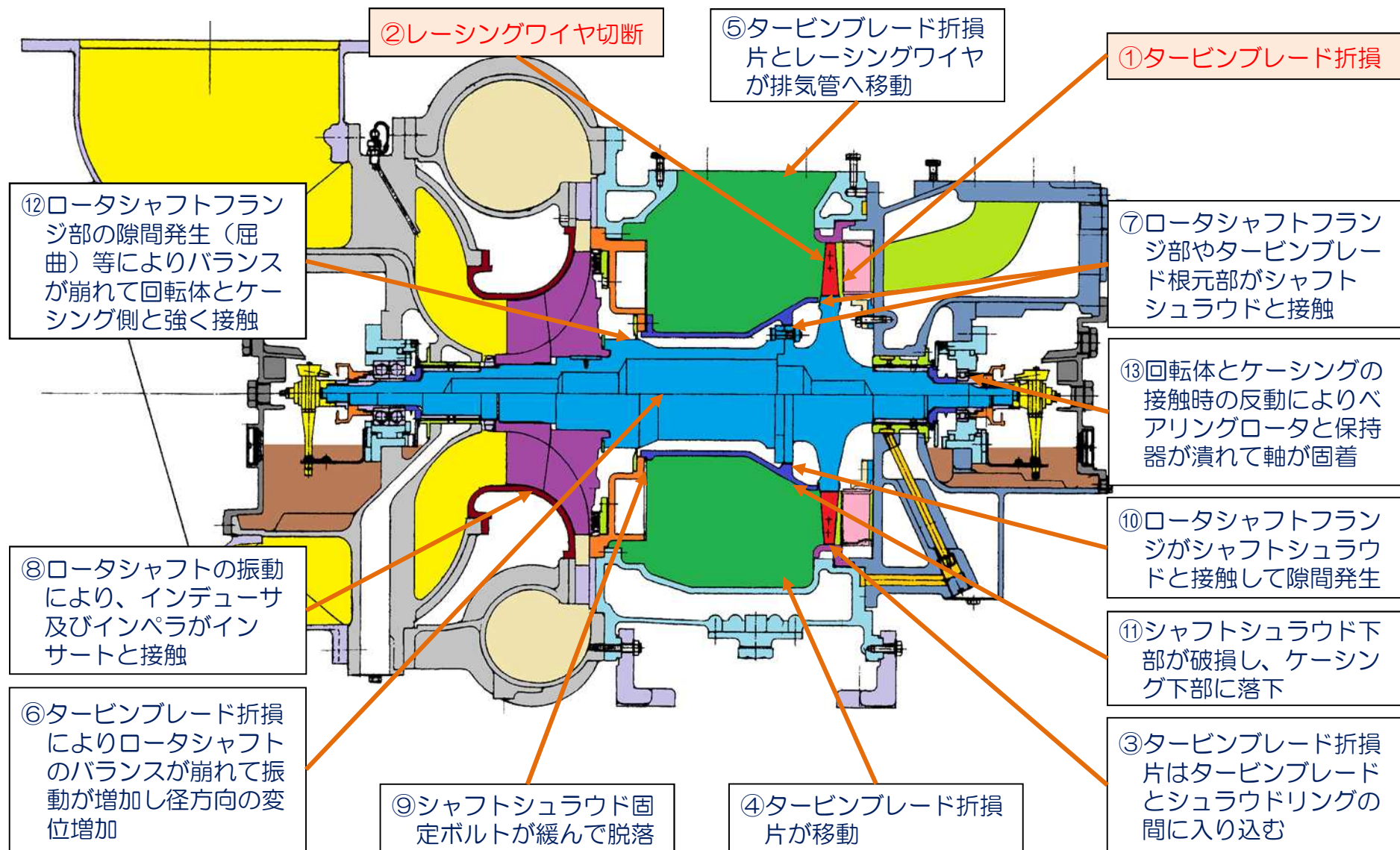
- ✓ レーシングワイヤの破面観察及びベアリングの詳細調査の結果から、事象の起因は「タービンブレードの折損」であることを特定。
- ✓ 過給機軸固着の推定メカニズムを以下のとおり再整理（順序1及び2）。

順序	発生事象（推定）
①	0時方向のタービンブレード1枚のファツリー部が疲労限度超過から割れ、破面が拡大し延性破壊により折損（破面の起点部付近に疲労模様、最終点付近に延性模様を確認）
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（破断したタービンブレード角部に擦れ痕を多数確認）
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、抜け出たワイヤは排気管へ移動（タービンブレードのレーシングワイヤ孔周辺に痕跡あり）
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によ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根元部がシャフトシュラウドと摺動接触

## 1-4. 過給機軸固着の推定メカニズム（2/3）

順序	発生事象（推定）
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し表面を研削
⑧	シャフトシュラウド固定ボルト2本、ナット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部に若干の隙間が発生
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 （タービン排気ケーシング内の初回確認時、タービンブレード片と脱落ボルトの上にシャフトシュラウド破片が覆い被さっていた事からも推定される）
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側が強く接触
⑫	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 同時にタービン側弾性装置（軸受押さえ廻り止め部）が逆回転方向に回転し、軸受押さえ廻り止め部の爪を折損させ270° 回転

# 1-4. 過給機軸固着の推定メカニズム (3/3)



## 1-5. 調査状況まとめ

---

- ✓ R側過給機のレーシングワイヤ破断は、応力によるせん断（ディンプル模様）であることを確認。※疲労破壊を示す痕跡も確認されず。
- ✓ R側過給機のベアリングの損傷は、従属的な事象であることを再確認。



上記要因の絞り込みにより、R側過給機軸固着の起因は「タービンブレードの折損」であることを特定。

- ✓ L側過給機タービンについても疲労による損傷を確認。
  - タービンブレード1枚のファツリー部に、疲労によるき裂を確認。
  - 同ブレードのロータシャフト側ファツリー部にもき裂を確認。



タービンブレードが疲労破損に至る原因調査を継続



## 2. 今後の調査について

---

1. 調査状況について
  - 1-1. はじめに
  - 1-2. タービン損傷に関する調査進捗
  - 1-3. その他調査進捗
  - 1-4. 過給機軸固着の推定メカニズム
  - 1-5. 調査状況まとめ
  
2. 今後の調査について
  - 2-1. 疲労破壊に関する調査
  
3. 今後の対応
  - 3-1. まとめ
  - 3-2. 調査スケジュール

参考資料

## 2-1. 疲労破壊に関する調査（1 / 2）

---

- ✓ 次頁の要因分析表に基づき疲労破壊に関する調査を実施。
- ✓ タービンブレード損傷について、疲労破壊に至る要因について継続調査。
  - 材料に関する要因
    - R側タービンブレードの材料調査（サンプル調査）
    - 化学成分、硬度分布、引張強度、初期欠陥について、EPMA、硬さ測定、引張試験、浸透探傷検査、SEM観察により確認
      - ※EPMA：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
  - 設計条件に関する要因
    - レーシングワイヤ付加荷重やタービンブレードアッセンブリモデル化による応力解析
    - ハンマリング試験による共振周波数の確認
    - 材料選定、遠心応力、レーシングワイヤ局部応力、起動・停止過程における過大応力を評価
  - 加工不良に関する要因
    - タービンブレードファツリー部及びレーシングワイヤの現品を計測
    - ファツリー形状、レーシングワイヤ孔径等の加工状況を確認

# 2-1. 疲労破壊に関する調査 (2/2)

①R側タービンブレードに折損を確認  
 ②L側タービンブレードにき裂を確認  
 ③R側レーシングワイヤに強制破断を確認  
 ④L側ローシャフトファツリー部にき裂を確認

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
材料に関する要因		化学成分	・設計要求仕様逸脱により、き裂発生の原因となる。	・R側No.33タービンブレードの断面をEPMA※にて分析、確認する。 ※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		△	
		硬度分布	・設計要求仕様逸脱により、き裂発生の原因となる。	・R側No.33タービンブレードの断面の硬さを測定する。		△	
		引張強度	・設計要求仕様逸脱により、き裂発生の原因となる。	・R側No.34、35、36タービンブレードより試験片を採取し、引張試験を行なう。		△	
		初期欠陥	・材料の初期欠陥が起点となり、き裂が発生する。	・タービンブレード全数のき裂の有無を浸透探傷検査にて確認する。 ・き裂が確認されたものについて、破面をSEM観察にて確認する。	・R側No.1タービンブレード折損に至る起点部に微小な空洞は確認されたが、材料製作の過程においては問題になるものではない。 ・L側No.25タービンブレードにき裂が確認されたことから、破面のSEM観察を実施していく。	△	
設計条件に関する要因		材料選定	・必要強度に対する材料の選定間違いにより、き裂発生の原因となる。	—	・大型船舶やディーゼル発電機の過給機ブレード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問題ない。	×	
		遠心応力	・定常運転において、過大な遠心応力が発生し、き裂発生の原因となる。	・タービンブレード単体およびローシャフトのレーシングワイヤ有無モデルによる応力解析により、確認する。 ・タービンブレードのロータアセンブリモデル化による応力解析により、確認する。 ・タービンブレードとロータのハンマリング試験(固有振動数計測)の実施する。	・タービンブレード単体の応力解析結果により、過大応力が発生しない事を確認済み。	△	
		レーシングワイヤ局部応力	・定常運転において、過大な局部応力が発生し、き裂発生の原因となる。	・タービンブレード単体およびローシャフトのレーシングワイヤ有無モデルによる応力解析により、確認する。 ・レーシングワイヤ付加荷重による応力解析により、確認する。	・タービンブレード単体の応力解析結果により、過大応力が発生しない事を確認済み。	△	
		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、き裂発生の原因となる。	・タービンブレードのロータアセンブリモデル化による応力解析により、確認する。 ・タービンブレードとロータのハンマリング試験(固有振動数計測)の実施する。		△	
加工不良に関する要因		ファツリー形状	・ファツリーの寸法、クリアランス異常により、ファツリー部くびれ部の応力を高める。	・現品計測を行い、基準値内であることを確認する。	・寸法測定の際にL側No.25ローシャフトファツリー部にき裂が確認されたことから、詳細調査を実施していく。	△	
		レーシングワイヤ孔径及び仕上げ	・レーシングワイヤ孔径や形状、仕上げ不良により、ファツリー部くびれ部の応力を高める。 ・レーシングワイヤの線径の基準値逸脱に伴い、ファツリー部くびれ部の応力を高める。	・現品計測を行い、基準値内であることを確認する。		△	
組立不良に関する要因		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不良により、き裂発生の原因となる。	・前回本格点検時の記録にて、止端部形状や取付状態の異常なしを確認する。	・前回本格点検時の点検結果において異常なしを確認済み。	×	
環境による要因		腐食、汚れ	・腐食、汚れによる経年変化による応力が発生する。	・外観目視にて腐食、汚れの状況を確認する。	・工場詳細点検において、腐食や過度の汚れは確認されていない。 ・また、過去の点検結果においても、腐食や過度の汚れは確認されていない。	×	

○: 要因の可能性あり、△: 要因の可能性は否定できない、×: 要因の可能性はないと考えられる

### 3. 今後の対応

---

1. 調査状況について
  - 1-1. はじめに
  - 1-2. タービン損傷に関する調査進捗
  - 1-3. その他調査進捗
  - 1-4. 過給機軸固着の推定メカニズム
  - 1-5. 調査状況まとめ
  
2. 今後の調査について
  - 2-1. 疲労破壊に関する調査
  
3. 今後の対応
  - 3-1. まとめ
  - 3-2. 調査スケジュール

参考資料

## 3-1. まとめ

---

- ✓ 過給機（R側及びL側）を除くディーゼル機関や発電機側に異常は確認されておらず、「発電機出力低下」に至る原因は「R側過給機の軸固着」と推定。
- ✓ 「R側過給機の軸固着」に至る原因は、R側過給機のタービンブレード以外の損傷部位がいずれも従属的な事象であるものと整理できたことから、「タービンブレードの折損（疲労破損）」によるものと推定。
- ✓ タービンブレードの疲労破損は、L側過給機のタービンブレードにも確認されており、材料要因、設計要因、加工要因に係る調査を継続。
- ✓ 再発防止対策・水平展開については、タービンブレードの共振に係る原因調査を踏まえ、ファツリ一部の非破壊検査頻度や、D/G運転操作における共振域を避けた手順変更等を軸に検討中。
- ✓ 以上の方針に基づき、調査項目の追加等を踏まえて調査工程を見直し、本事象の原因及び再発防止対策・水平展開事項を1月に報告予定。

# 3-2. 調査スケジュール

「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」調査スケジュール

区分	観点	2018年					2019年
		8月	9月	10月	11月	12月	1月
全体工程		8/30 事象発生 9/6 法令報告 9/12 10日帯提出	10/3 原因調査状況報告	10/29 公開集会	12/3 進捗状況報告 12/12 公開集会	下旬 報告書提出	
調 査	潤滑油 系統点検	機関内部点検、潤滑油分析					
	給排気 系統点検	ピストリング気密確認		排気管伸縮継手取外	排気管伸縮継手点検		
	制御系 系統点検		ガバナ作動油確認、動作確認				
	冷却水 系統点検	冷却水ポンプ動作確認		温度調整弁分解点検			
	発電機 系統点検	監視系、発電機主回路、発電機機械系点検					
	燃焼機関 系統点検	燃料ラック動作確認、潤滑油分析			シリンダ点検		
	過給機 点検	過給機点検	損傷部の詳細調査	過給機付属機器取外	過給機取外、タービン置点検 過給機工場点検 (R側タービンブレードファッリー部破面のSEM観察) R側タービンブレード(残数) 浸透探傷検査(レーシングワイヤ、ファッリー取外、部品洗浄含む) L側タービンブレード(全数) 浸透探傷検査(レーシングワイヤ、ファッリー取外、部品洗浄含む) L側タービンブレードのファッリー部破面のSEM観察 L側タービンブレードのファッリー部破面のSEM観察	L側ローシャフトのファッリー部非破壊検査(浸透探傷検査・目視検査) L側ローシャフトのファッリー部切斷 L側ローシャフトのファッリー部破面のSEM観察	L側過給機に関する追加調査
	設計条件に関する要因		タービンブレード単体の応力解析	タービンブレードのレーシングワイヤ付加荷重による応力解析	タービンブレードのローアクセスプリモデル化による応力解析	タービンブレードとロータのハンヤリング試験	疲労破壊に関する追加調査
	材料に関する要因			R側・L側タービンブレード材料調査			
	加工不良に関する要因				R側・L側タービンブレードファッリー部及びレーシングワイヤ現品測定		
ベアリング詳細調査							
過給機軸固着の要因検討							
原因と再発防止対策・水平展開検討		発生メカニズムの特定・追加点検項目検討		再発防止対策・水平展開検討			
報告書とりまとめ		原因調査状況報告とりまとめ				報告書とりまとめ	

※本工程については、現状の見込みであり、進捗により適宜見直しを行う。

# 参考資料

## 参考資料：当該D/G出力低下時の時系列（1 / 2）

---

【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（3.3MW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

「動弁注油タンク油面低」（現場）

「ディーゼル発電機1B異常」（中央制御室）（現場の警報発生を知らせる警報）

当該D/Gエリア自動火災報知盤プレアラーム作動

「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発電機電力：6.6MW→異音発生後に6.0MW→  
異音消滅後に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

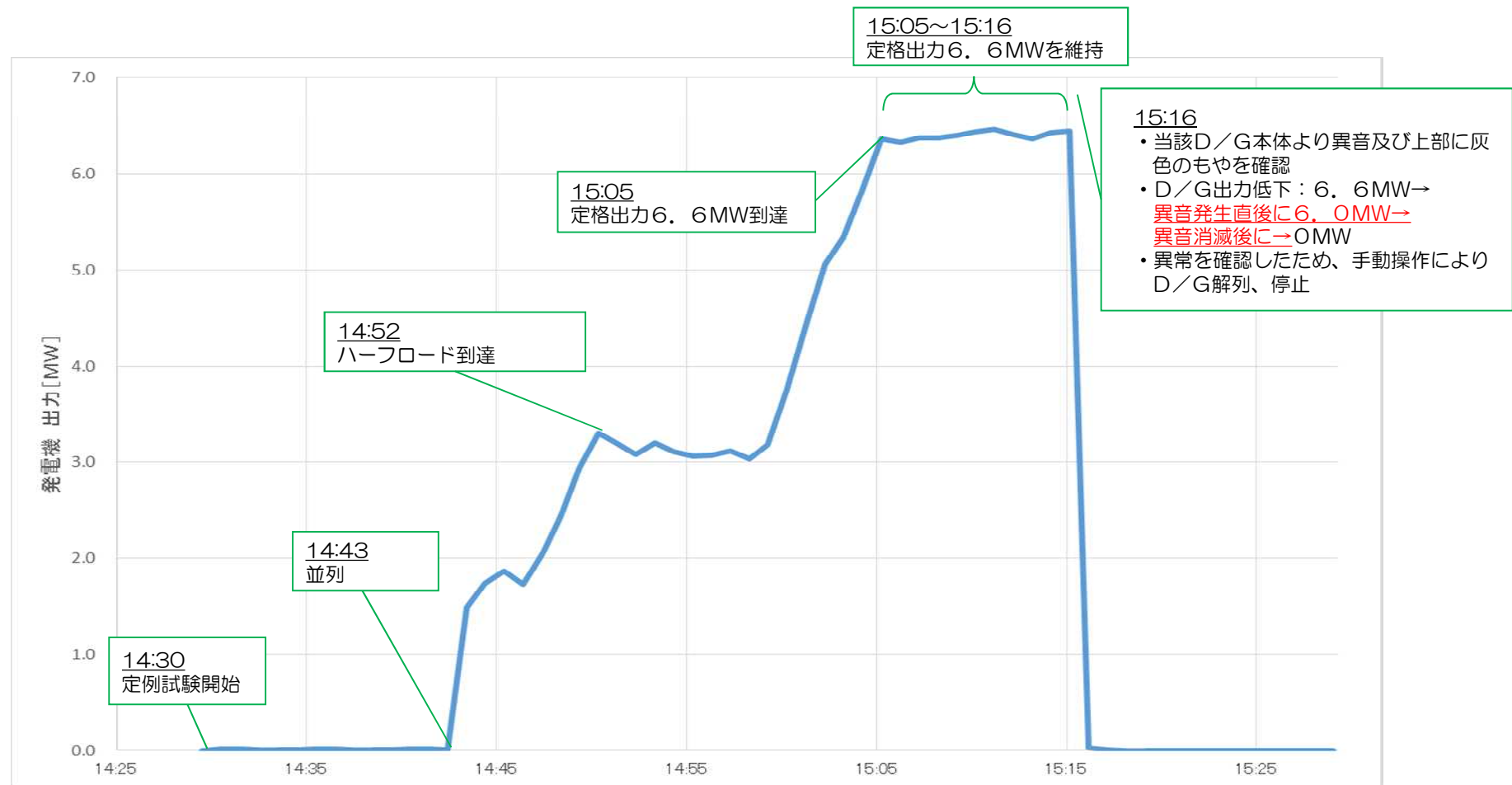
15:16 当直長が当該D/G不待機宣言

15:40 当該D/G作動除外操作実施

注：赤字箇所については、10月29日公開会合資料からの変更箇所



## 参考資料：当該D/G出力低下時の時系列（2/2）



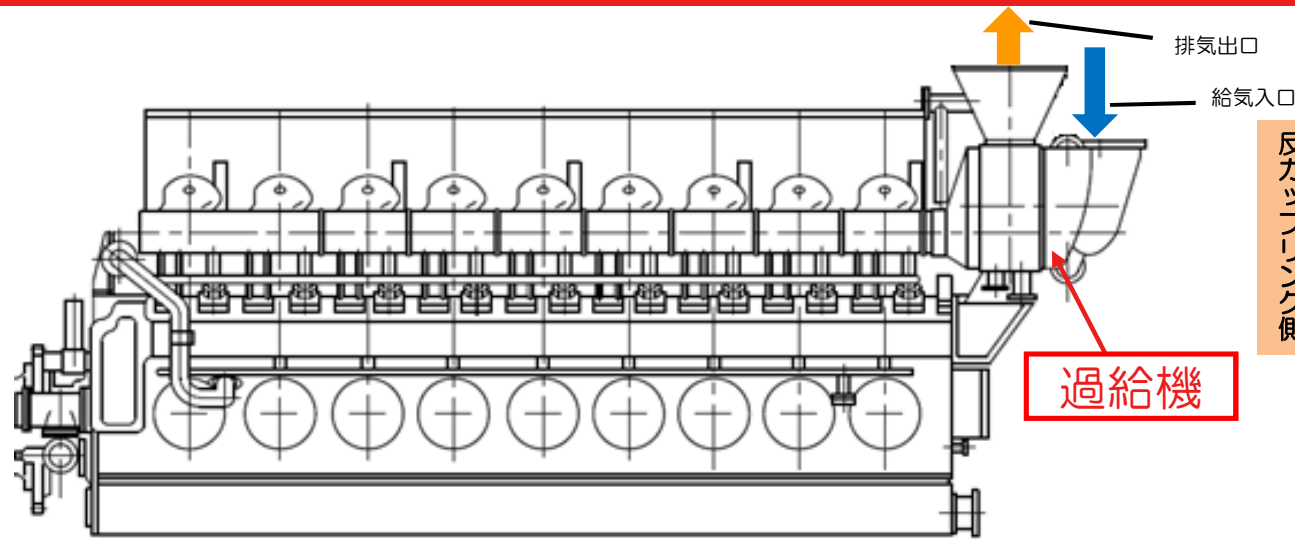
※本トレンドは、1分周期の瞬時値データをグラフ化したもの

### 当該D/G出力トレンド

注：赤字箇所については、10月29日公開会合資料からの変更箇所

# 参考資料：D/G機関 構造図

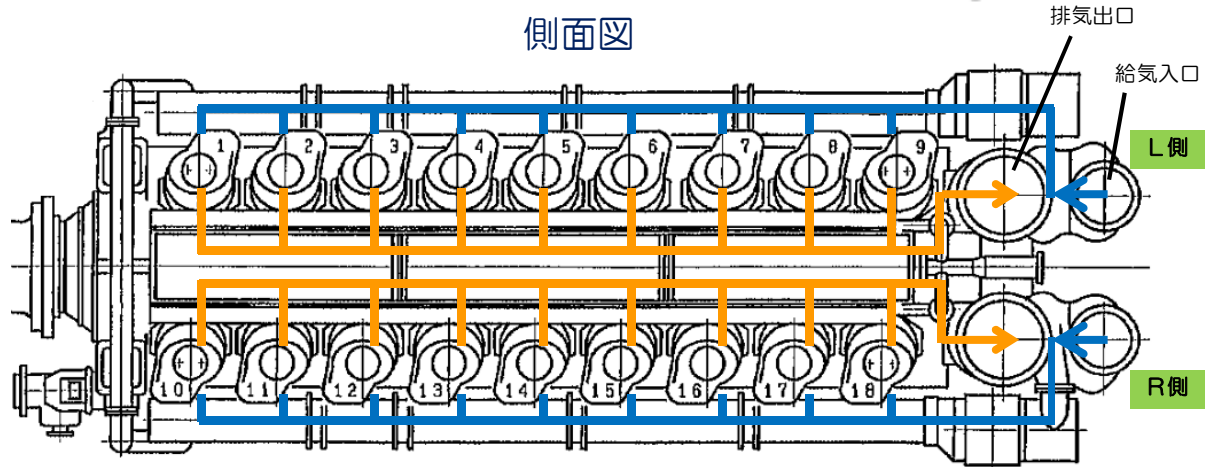
カップリング側（発電機側）



反カップリング側



カップリング側（発電機側）



反カップリング側

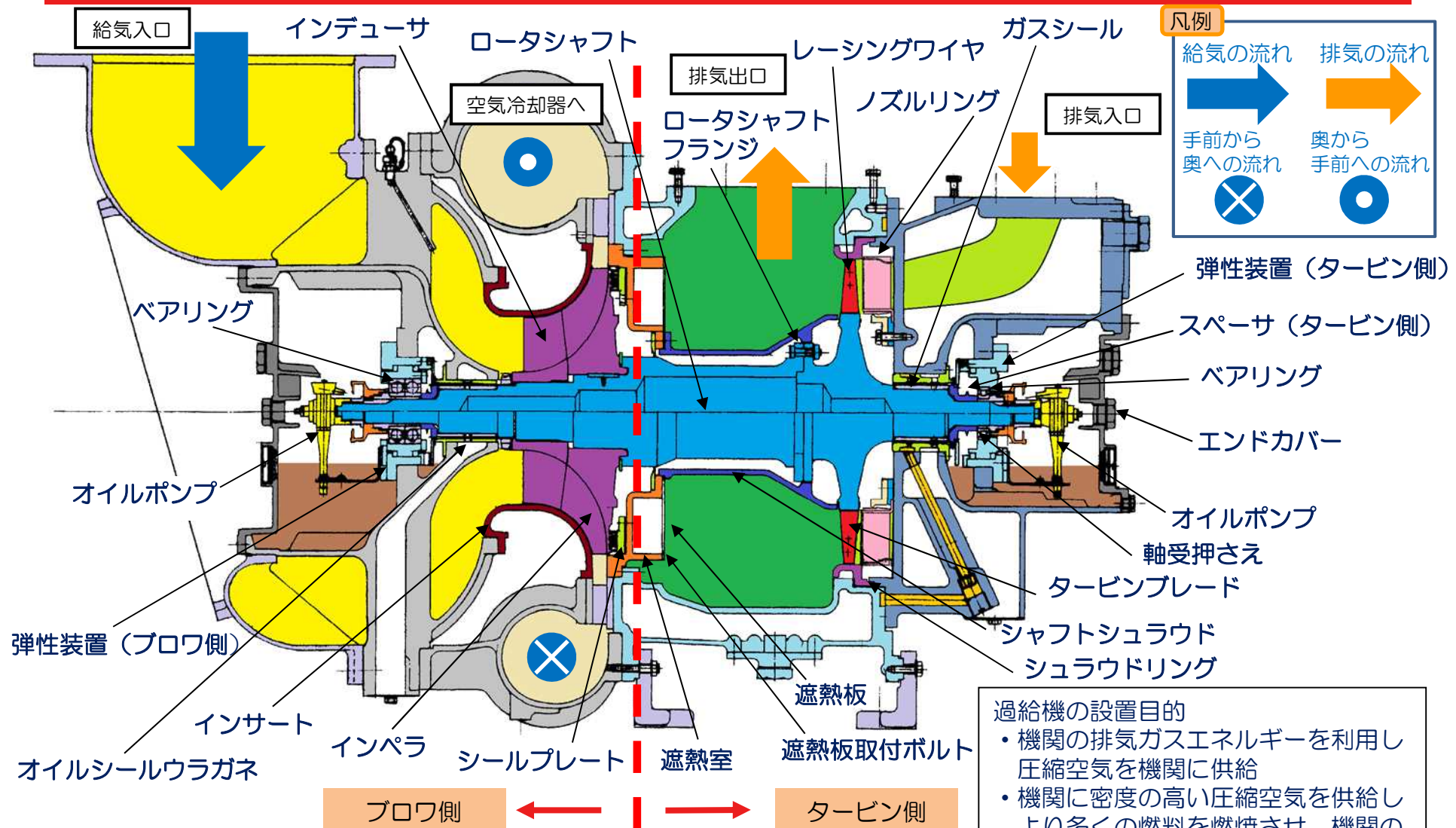
側面図

上面図

本図はD/Gの給排気の流れを示す。  
 当該D/G機関は給排気系がD/G機関の左右（L側・R側）  
 及び給気・排気にて分離（給気分離型）されている。

## D/G機関 構造図（給排気系の空気の流れ）

# 参考資料：過給機 構造図



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

## 参考資料：発電機出力低下の推定メカニズム

- ✓ 工場調査においてL側過給機のタービンブレードにもき裂が確認されたが、確認されたき裂による過給機の機能への影響は考えられないため、発電機出力低下のメカニズムは以下のとおりであると推定。

順序	発生事象（推定）
①	ロータ軸固着によりR側過給機は機関への送気機能を失った。
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及び排気がほぼ遮断され、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	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、発電機出力がゼロkW近傍まで急激に低下した。
⑤	運転員が直ちに解列操作を行ったことにより無負荷状態となり、その後はガバナ動作により回転速度設定値で運転が継続された。

**TEPCO**

---