

美浜発電所 1 号機

Aー非常用ディーゼル発電機過給機の損傷について

平成 2 5 年 3 月

関西電力株式会社

1. 件名

美浜発電所1号機 A-非常用ディーゼル発電機過給機の損傷について

2. 事象発生日時

平成25年2月6日 13時15分（必要な機能を有していないと判断）

3. 事象発生の電気工作物

非常用予備発電装置

4. 事象発生前の運転状況

第25回定期検査中

5. 事象発生の状況

（添付資料-1～7）

美浜発電所1号機（定格電気出力34万キロワット）は第25回定期検査中のところ、平成25年2月5日、A-非常用ディーゼル発電機（以下、A-DGという。）の定期負荷試験のため、9時24分に現地にて運転員がA-DGを起動した。

続いて、現地にてA-DGを発電所内へ送電する系統へ接続し、電気出力を100%にするための操作を行い、9時47分、100%電気出力に到達した。その後、電気出力の低下（3,120kWから約2,000kWへ低下）が認められ、屋外の排気筒からの黒煙を確認したため、運転員はA-DGを手動停止した。また、非常用ディーゼル発電機室内において黒煙が確認され、煙感知器が動作した。

2月6日、原因調査のためA-DGを外観目視点検したところ、4台ある過給機のうち、1台の過給機（以下、当該過給機という。）でタービン室のフランジ面が外れて開口していることを確認した。この開口部からファイバースコープを挿入し当該過給機内部を点検したところ、過給機のタービンロータ（翼と軸からなる構造物）が損傷していることを確認したことから、13時15分にA-DGは必要な機能を有していないと判断した。

なお、当該過給機の下部に複数の金属片を確認したが、外観上、当該過給機以外の機器に異常は認められなかった。

本事象は、B-非常用ディーゼル発電機および空冷式非常用発電装置により保安規定第75条の運転上の制限（非常用ディーゼル発電機2基が動作可能であること）は満足している。また、周辺環境への放射能の影響はない。

<時系列>

[2月5日]

- 09:24 定期負荷試験のため、現地にて運転員がA-DGを起動
- 09:36 現地にてA-DGを発電所内へ送電する系統へ接続
- 09:47 現地にて負荷上昇操作を行い100%（3,120kW）出力に到達
100%出力到達後、出力の低下を確認（約2,000kWまで低下）
運転員が屋外の排気筒にて黒煙を確認
また、過給機付近で黒煙と異音を確認
- 09:48 運転員がA-DG手動停止
煙感知器動作（室内は煙のみで発火はなし）

[2月6日]

- 09:30 現地にて目視点検開始
当該過給機でタービン室のフランジ面外れおよび開口を発見
開口部からファイバスコップを挿入し、タービンロータ（翼と軸からなる構造物）の損傷を発見
- 13:15 A-DGに必要な機能を有していないと判断

6. 聞き取り調査結果 (添付資料-8)

事象発生時にA-DG定期負荷試験に現場で立ち会った当社運転員から聞き取り調査を行った結果、以下の通りであった。

- ・100%出力到達後、現地のDG制御盤にて発電機負荷が低下したことに気付いたことから、屋外の排気筒を確認したところ黒煙が認められた。
- ・100%出力到達以降、ガバナコントロールスイッチの操作は行っていない（出力の降下および上昇操作は行っていない）。
- ・DGの異常と判断し、DGを停止するよう指示を行った。
- ・DG停止指示がされた後、過給機付近で異音と黒煙を確認した。
- ・DGの停止操作を行った。
- ・DG機関停止により黒煙は止まった。

7. 現地および工場調査結果 (添付資料-9)

当該過給機に損傷が発生した原因について要因分析（F T）図に基づき、点検調査を実施した。

(1) 現地状況調査結果

a. 外観目視点検結果 (添付資料-10)

1) 過給機およびタービン出口伸縮継手

i. 取外し前

過給機およびタービン出口伸縮継手の外観目視点検を行った結果、当該過給機のタービン室のフランジ面が外れていた。また、タービン出口伸縮継手がつぶれていた。

過給機の取付ボルト（伸縮継手フランジボルト、オイルパイプ取付ボルト、下部取付ボルト）の取付状態を目視および触手により確認した結果、取付ボルトに緩みや脱落はなく、正常な取付状態であった。

ii. 取外し後

当該過給機のタービン側のフランジ取付ボルトが全て外れてなくなっており、ロックプレートが脱落していた。また、タービンロータの破損が認められた。

なお、コンプレッサ側の外観に異常はなかった。

2) 吸気系統

吸気ダクト、過給機（コンプレッサ側）、空気冷却器等について機関より取り外した後、外観目視点検を行った結果、損傷などの異常は認められなかった。また、吸気消音器の外観目視点検を行った結果、損傷などの異常は認められなかった。

3) 燃焼室

シリンダ内部や吸・排気弁、燃料噴射弁等についてシリンダヘッドを取り

外した後、外観目視点検を行った結果、損傷など異常は認められなかった。

4) 排気系統

排気管および排気ダクトの一部については、機関より取り外した後、外観目視点検を行った結果、損傷など異常は認められなかった。また、排気ダクトおよび排気消音器の外観目視点検を行った結果、損傷など異常は認められなかった。

b. 潤滑油・燃料油分析結果 (添付資料-10~11)

潤滑油および燃料油 (A重油) の分析を行った結果、オイル性状は基準値を満足しており、異常は認められなかった。

なお、潤滑油タンクの油面レベルを確認した結果、規定レベルを満足していた。

c. 運転状況確認結果 (添付資料-12)

A-DG負荷試験における負荷上昇の推移を確認した結果、従来と変わりはなく事象発生までは異常は認められなかった。

また、平成24年9月~平成25年2月までに実施した負荷試験における運転パラメータを確認した結果、異常を示す記録は認められなかった。

d. 前回点検結果 (添付資料-13)

前回 (23回定期検査) の当該過給機の分解点検状況について記録を確認した結果、各部位に異常は認められなかった。また、軸受やOリング等の消耗品の取替えを行っていた。

(2) 工場調査結果

当該過給機とA-DGに取り付けられていた残りの3台の過給機 (以下、その他過給機という。) をメーカーの工場に搬送し、詳細調査を実施した。

a. 外観目視点検結果 (添付資料-14)

1) コンプレッサカバー

当該過給機のコンプレッサカバー内面の外周部には通常認められるコンプレッサプレートの当たり跡以外、へこみ等の異常は認められなかったものの内周部には全周に渡り、すじ状の接触跡が認められた。

2) ロックナット

当該過給機のロックナットは、コンプレッサホイール側座面に光沢が確認され周方向の摺動跡が認められた。

また、当該過給機分解時において締付状態を確認したところロックナットは緩んでおりトルクがかかっていない状態であることが認められた。

3) コンプレッサホイール

当該過給機のコンプレッサホイールは、翼の破損等は認められなかったものの翼部にコンプレッサカバーと接触したと思われる接触跡が認められた。コンプレッサホイールのシャフト部端面にロックナットおよびフリंगाスリーブとの接触によるものと思われる摺動跡が認められた。また、コンプレッサホイールシャフト貫通部内面にシャフトとの接触によるものと思われる摺動跡が認められた。

- 4) ディフューザ
当該過給機のディフューザに異常は認められなかった。
- 5) コンプレッサプレート
当該過給機のコンプレッサプレートは、タービン側の一部に今回の不完全燃焼により発生したと推定されるすす状の汚れが見られるが、傷・変形などの異常は認められなかった。
- 6) 軸受
 - i. スラストリング
当該過給機のスラストリングは、スラストベアリングとの接触面に軽微な摺動跡が認められるが、健全品と同程度であり、異常は認められなかった。
 - ii. スラストベアリング
当該過給機のスラストベアリングに異常な摩耗等は認められなかった。
 - iii. ベアリング
当該過給機のベアリングに若干の擦り傷は認められたものの、焼付き等の異常は認められなかった。
- 7) タービンハウジングボルト
当該過給機のタービンハウジングボルト12本中、2本の脱落が認められたが、脱落していたボルトのネジ部に摩耗等の異常は認められなかった。
脱落した2本は、タービンバックプレートの欠損部位に相当する。
- 8) フリングスリーブ
当該過給機のフリングスリーブについては、有意な異常は認められなかったもののコンプレッサホイールとの接触面に摺動跡が認められた。
- 9) ロックプレート
当該過給機のタービン側のロックプレートは、全数過給機本体から外れており、ねじれによる変形が認められた。なお、コンプレッサ側のロックプレートに異常は認められなかった。
- 10) フランジ取付ボルト
当該過給機のフランジ取付ボルトは、8本のうち1本は外れており、7本はネジ部途中にて折損が認められた。
- 11) フランジ
当該過給機のフランジ内周部に損傷および一部欠損が認められた。
- 12) ノズルリング
当該過給機のノズルリングは、全ての翼について損傷しており、全体が大きく変形していた。
- 13) タービンハウジング
当該過給機のタービンハウジングの一部に貫通したひび割れが認められた。
- 14) タービンロータ
 - i. シャフト
当該過給機のタービンホイールとの接合面は、溶接部で折損していた。シャフトのコンプレッサホイール取付け部において、周方向に複数の摺動跡が認められた。また、ベアリング部に微小な摺動跡および変色が見られるが、焼付き跡は認められなかった。なお、一部に今回の分解時にシャフ

トを引き抜いた際に発生したと思われる軸方向の傷が認められた。

ii. タービンホイール

当該過給機のタービンホイールは、シャフト溶接部で折損しており、全ての翼は大きく破損していた。また、中心部（ハブ部）付近からの破損も認められた。

15) タービンバックプレート

当該過給機のタービンバックプレートは、一部が欠損するとともに、ひび割れ、変形等が認められた。

16) ラビリンスプレート

当該過給機のラビリンスプレートは、欠損および軸貫通部近傍に接触跡が認められた。

17) ベアリングハウジング

当該過給機のベアリングハウジングは、タービン側のフランジ外周部の一部に欠損が認められた。

b. 材料確認結果 (添付資料－15)

過給機主要部品の使用材料についてミルシート等を調査した結果、異常は認められなかった。

c. 各部寸法計測結果 (添付資料－16)

各部品について寸法計測を行った結果、今回の事象による損傷・変形と思われるもの以外に異常は認められなかった。

d. 浸透探傷試験結果 (添付資料－17)

折損の認められた当該過給機のタービンロータ（シャフトおよびタービンホイール）の浸透探傷試験（以下、PTという。）を実施した結果、タービンホイール背面（コンプレッサ側）ハブ部において、中心から約20mmの位置に円周状のPT指示が断続的に認められ、PT指示の最も長いものは約10mmであった。なお、シャフトにはPT指示は認められなかった。

e. 破面観察結果 (添付資料－18)

損傷の認められた当該過給機のタービンロータ（シャフトおよびタービンホイール）およびフランジ取付ボルトなどについて、破面観察を実施した。また、それらの破面を走査型電子顕微鏡（SEM）にて拡大観察を実施した。

1) シャフト

シャフト溶接部が全周に渡って破断しており、損傷部には破断面全体に渡り擦り傷が多数認められた。

シャフト溶接部の一部の破断部には、延性破壊の特徴であるディンプルが認められ、多少ねじりを含む破面の様相が認められた。その他は、接触跡により明確な破面形態は識別できなかった。

2) タービンホイール

タービンホイール側シャフト折損部は、破断面全体に渡り擦れ傷が多数認められ、一部については、延性破壊の特徴であるディンプルが認められた。

タービンホイール破損部の破面は、全体的に凹凸が大きく、デンドライト（樹枝状晶）境界に沿った割れの模様が認められるとともに、延性破壊の特徴であるディンプルと推定される破面が部分的に認められた。これらは、強制的に破壊したときに現れる破面であり、観察したものには疲労破面は見られなかった。また、破面には有意な鑄造欠陥等は認められなかった。

タービンホイールP T指示部破面は、延性破面の特徴であるディンプルが認められた。

3) フランジ取付ボルト

フランジ取付ボルトの折損部は比較的平坦であった。

フランジ取付ボルト折損部の破面は、延性破面の特徴であるディンプルが認められた。

4) タービンバックプレート

タービンバックプレートの欠損部破面は、延性破面の特徴であるディンプルが認められた。

5) ノズルリング

ノズルリング翼折損部の破面は、延性破面の特徴であるディンプルが認められた。

6) ラビリンスプレート

ラビリンスプレートの欠損部の破面は、延性破面の特徴であるディンプルが認められた。

7) タービンハウジング

タービンハウジングの割れの破面は、延性破面の特徴であるディンプルが認められた。

8) フランジ

フランジの破断部（欠損部）は、延性破面の特徴であるディンプルが認められた。

9) タービン出口伸縮継手

タービン出口伸縮継手の破断部は延性破面の特徴であるディンプルが認められた。

また、変形が著しく、ベローズの原型を留めていなかった。

f. 断面ミクロ組織観察結果

（添付資料－19）

破損の認められた当該過給機のタービンロータ（シャフトおよびタービンホイール）およびフランジ取付ボルトの断面ミクロ組織観察を実施した。

1) シャフト

折損部表面から深さ約1mmの範囲に、溶接による熱影響部が認められた。

一般部は、マルテンサイトとベイナイトの混合組織となっており、クロムモリブデン鋼材として異常は認められなかった。

シャフトネジ部は、健全な状態であったがコンプレッサホイールとの取り付け付近に付着物が認められた。なお、付着物を分析した結果、アルミニウムであることが確認された。

2) タービンホイール

割れは、ジグザグ状で概ねデンドライト（樹枝状晶）の境界を進展していることが認められた。母材部の組織は、ニッケル合金鑄物翼として異常は認

められなかった。コンプレッサ側表面に微小なき裂が認められたことから、コンプレッサ側を起点としたき裂が発生した可能性が考えられる。

3) フランジ取付ボルト

ボルト破断部近傍は、著しい変形に伴うすべり線が多く認められた。

4) ロックナット

ナットネジ部ならびにナット端面は健全な状態であったがコンプレッサホイールとの接触面に付着物が認められた。なお、付着物を分析した結果、アルミニウムであることが確認された。

5) コンプレッサホイール

コンプレッサホイールのロックナット側およびフリングスリーブ側ともに摩耗が認められ、ロックナット側は約 $10\ \mu\text{m}$ 、フリングスリーブ側は約 $140\ \mu\text{m}$ の摩耗が認められた。

g. 硬度測定結果 (添付資料-20)

折損の認められた当該過給機のタービンロータ (シャフトおよびタービンホイール) およびフランジ取付ボルトにおいて硬さ試験を実施した。

1) シャフト

深さ方向の硬さ分布は一般部で $309\sim 336\text{HV}$ 、溶接部で 448HV 、溶接による熱影響部で $488\sim 530\text{HV}$ であった。母材の一般部の硬さについてはミルシートに示される 311HB からの換算硬さ 327HV と同等であり、異常は認められなかった。

2) タービンホイール

破断部で $383\sim 488\text{HV}$ 、P T 指示部破面近傍で $461\sim 506\text{HV}$ と損傷による硬化が認められた。母材の一般部の硬さについてはミルシートに示される 35.8HRC からの換算硬さ 352HV と同等であり、異常は認められなかった。

3) フランジ取付ボルト

破断部では $302\sim 322\text{HV}$ と $267\sim 336\text{HV}$ 、内部では $245\sim 251\text{HV}$ と $273\sim 279\text{HV}$ と破断による硬化が認められたが、特に問題となるものではなかった。

h. 材料成分分析結果 (添付資料-21)

電子線マイクロアナライザー (EPMA) による成分分析の結果、折損の認められた当該過給機のシャフト、タービンホイール、フランジ取付ボルトおよびタービンホイール翼部は、ミルシート値と同等であり、材料成分に異常は認められなかった。

i. その他過給機の点検結果

分解点検の結果、外観目視点検・寸法測定等に異常は認められなかった。また、ロックナットの緩みも認められなかった。

(添付資料-22)

以上の工場調査結果から、当該過給機のタービン側が大きく損傷しており、コンプレッサ側のロックナットに緩みが認められ、コンプレッサホイールにはシャフトとの取付け部に周方向の摺動跡が認められるとともにナット締付け部

に摩耗が認められた。また、破面調査を行った結果、デンドライトに沿った破面および延性破面が認められ、タービンロータのシャフトとタービンホイールおよびフランジ取付ボルトは強制的に破壊したものと考えられる。

(3) 破片回収結果

(添付資料-23)

損傷した当該過給機の破片について調査を行った。

a. 系統内

当該過給機排気出口直後の排気ダクト内にタービンロータの破損翼と思われる破片が認められた。

また、過給機から排気消音器に至る排気ダクト内や排気消音器床面に少量の破片が認められた。

なお、空気冷却器やシリンダ内部、吸排気管等に破片は、認められなかった。

b. A-DG室内

A-DG室内において破片の調査を行った結果、過給機下部、機関下部、機関左右の台板上にて破損品を発見し、回収した。

c. 過給機内部

工場にて過給機タービンハウジング内部より破片を回収した。

現地および工場にて回収した破片を合わせた総重量から破片の評価を行った結果、破片は全て回収したものと判断する。

現地調査において損傷した当該過給機タービンの上流側の機器に損傷や異物は認められず、下流側にて回収した破片についても当該過給機のものであると判断できることから異物による損傷の可能性は低い。

(4) 過給機設計に関する調査

(添付資料-24)

過給機は、回転部の構造として両ホイールをシャフトでつなぎ、その間に軸受機構を設置することでコンパクトな構造とし、メンテナンスのため、コンプレッサホイールを脱着可能なロックナット構造としている。

また、タービンホイールとシャフトは、電子ビーム溶接で一体接合し、万が一、高速回転でタービンホイールが損傷した場合でも、電子ビーム溶接部が折損することで内部潤滑油の漏えいによる火災が発生しないよう設計されている。

当該過給機のロックナットの締付けは、 $147\text{ N}\cdot\text{m}$ のトルクで締付けた時の軸力評価にて適切性を確認した上で設定している。

当初の設計では、全ての過給機のロックナットは標準的なネジ加工である右ネジを採用していたが、平成元年以降、トラック・乗用車向けエンジンの出力アップに伴い、過給機の高回転化要求が生じ、ロックナットの緩みによる損傷事例、並びにユーザからの改善要望を踏まえ、小型過給機については左ネジに変更してきた。過給機のロックナットを左ネジとした場合は、過給機の起動時・運転時・停止時ともロックナットにかかる回転力はロックナットが締まる方向に力が働くこととなる。しかし、当該過給機は小型過給機に比べ回転数が低く左ネジへの変更対象外であり、ロックナットは設計上、右ネジのままであることを確認した。

なお、A-DGの出力降下について評価した結果、4台中1台の過給機の機能喪失により、出力が約32%低下することがあり、今回3,120kWから約2,000kW

W (2, 136 kW) への約 32%低下は、1 台の過給機が損傷したことによるものと考えられる。

(5) メーカー知見の調査 (添付資料-25)

当該過給機製造メーカーにおいて過去に経験した過給機の損傷事例について調査した結果、損傷部位は主に「タービンホイール翼部 (以下、翼部という。)」 「タービンホイールハブ部 (以下、ハブ部という。)」 「シャフト溶接部」であった。

以下にそれぞれの損傷の特徴を示す。

「翼部」からの損傷：シャフト溶接部の損傷を伴うことはあるものの、ハブ部の損傷はない。

「ハブ部」からの損傷：翼部ならびにシャフト溶接部の損傷を伴っており、破面にはディンプルが認められた。

「シャフト溶接部」からの損傷：ハブ部の損傷はない。

また、メーカーによるタービンロータ損傷時の影響を確認するためのタービンロータの過回転による実証試験によると、当該タービンロータはハブ部から損傷するとともに、翼部ならびにシャフト溶接部の損傷を伴っていた。なお、この際フランジ取付ボルトの折損、フランジの外れ、タービンホイールの外部への飛び出しおよびタービンハウジングのき裂も認められた。

(6) 当該過給機の点検履歴 (添付資料-26)

当該過給機は、平成9年にローテーション運用とするために、新たに2台を追加購入し、第15回定期検査 (平成9年4月～6月) にてA-DGへ取付けられた。その後、4定期検査毎に点検を実施しており、その点検結果に異常は認められなかった。

なお、過給機の点検は、第21回定期検査までは、メーカー工場において分解点検を行っていたが、第22回定期検査以降は、現地にて分解点検を行っていた。

(7) 原因調査のまとめ

工場調査における破面調査の結果、タービンロータのシャフトとタービンホイールには延性破面およびデンドライトに沿った破面が認められたことから、強制的に破壊したものと考えられる。

現地調査において当該過給機タービン上流側の機器に損傷や異物は認められず、下流側にて回収した破片についても当該過給機のものとは判断できることから異物による損傷の可能性は低い。

工場における分解時にコンプレッサホイールのロックナットに緩みが認められたこと、ロックナット等に摺動跡が認められるとともにコンプレッサホイールの材質であるアルミニウムがロックナットに付着していたこと、また、タービンロータのシャフト部 (コンプレッサホイール取付け部) に周方向の摺動跡が認められアルミニウムの付着が認められたことから、ロックナットが緩み、コンプレッサホイールが空回りした可能性が考えられる。

当該過給機の損傷部位とメーカー知見の調査結果を比較するとタービンホイールのハブ部、翼部、シャフト溶接部が損傷していることから、今回の損傷は過回転によるハブ部からの損傷に類似している。

以上より何らかの原因によりロックナットが緩み、タービンホイールが過回転

となったことが当該過給機の損傷につながったと考えられることから、ロックナットの緩みおよびタービンホイールが過回転となる要因について検討を実施した。

8. 損傷要因の検討

原因調査結果を踏まえ、損傷に至る要因について試験や解析により確認・検証を行った。

(1) 緩みに対する検討

a. 前回点検時の締付方法

(添付資料-27)

当該過給機分解時、ロックナットにトルクがかかっていなかったことからロックナットの締付けについて着目し、過給機組立時の作業方法の調査を行った。

1) 作業要領書

過給機の分解点検作業は、定期点検工事用の作業要領書に基づき実施している。しかし、当該過給機の具体的な作業手順はDG機関本体の一連の作業ではなく、過給機単体で施工されることおよび過去に当該過給機における不具合が発生していないことから、分解・組立に関する詳細な手順についてはメーカー推奨のノウハウ等である「整備解説書」に基づき実施している。なお、各部の寸法、組み込み、非破壊検査等は点検記録として保存されているが、ロックナット等の締付記録は保存されていなかった。

2) 締付方法

上述の整備解説書では、ロックナット締付方法として過給機を床面に横置きにした図が示され、タービンホイールを固定しロックナットを規定トルクで締め付けることとされている。前回(第23回定期検査)の点検について当時のメーカー指導員へ聞き取りしたところ、組立時にメーカー工場での締付方法(専用受台を用い縦置き)を考慮して過給機を縦置きとしたが、専用受台を使用せず、補助作業員が過給機を手で支える不安定な状態で締め付けを行っていたことが分かった。このため、ロックナットの適正なトルクによる締め付けができなかった可能性が考えられる。

b. 締付力検証

(添付資料-28)

締付作業状態の違いによる締付力のばらつきを確認するため、前々回まで実施していた横置きによる締付作業と、前回実施した専用受台を使用しない縦置きによる締付作業による締付力(軸力)の差を確認する試験を実施した。その結果横置きであれば、ほぼ適正軸力である45kNの軸力を得ることができたが、縦置きの場合は過給機を支える部位によりばらつきが大きく、30kNより小さい軸力となる場合があることが分かった。よって、前回の分解点検において専用受台を使用せずに過給機を縦置きにしてコンプレッサホイールを支えた状態で締付けた際には、コンプレッサホイールの抵抗により適正なトルクによる締め付けができず、締付力が不十分な状態となった可能性があることが分かった。

(2) 締付力不十分により過回転となることの検討

a. 締付力不十分によるコンプレッサホイールの滑り

締付力が不十分なことにより、ロックナットの締付けによる軸力が100%負荷時に必要な軸力を下回る場合には、コンプレッサホイールが回転に追従できず、滑りが生じる可能性がある。この滑りについて、試験を行った結果、滑り

の発生が確認され、その際の軸力は約29 kNと計算された。

また、コンプレッサホイールが微小に滑ることにより摩耗が生じ、これが繰り返されることで軸力がさらに低下する。その結果、コンプレッサホイールが連続的に滑ることにより、追従不良につながったと考えられる。

b. タービンホイールの過回転

コンプレッサホイールが追従不良となったことにより、タービンホイールの回転数より遅れが生じ、当該コンプレッサが吐出する空気の圧力、流量が低下する。解析結果では、コンプレッサホイールの回転数に対して、滑り率約5%以上で吐出圧力が健全な他のコンプレッサ3台に押し負け、健全な3台の過給機からの高温の空気が滑りを起こしたコンプレッサへ逆流してくることとなる。この影響により、ロックナットネジ部に塗布されていた緩み止め剤の緩み抑制効果が低減され、また、ロックナットの締付けが回転力により緩む方向（右ネジ）であることと相まってロックナットが緩んだ可能性が考えられる。これにより、コンプレッサホイールの滑りが増大しタービンホイールの過回転に至ったと考えられる。

(3) 過回転による応力評価

応力解析を行った結果、タービンホイールに負荷される応力は遠心力が支配的であり、定格運転時（46, 600 rpm、584℃）において、ハブ部の応力が最も高く、半径方向平均応力は260 MPaであった。一方、当該材料の降伏応力は811 MPaであり、定格運転時にタービンホイールの損傷が発生することはない。

しかし、タービンホイールが過回転になると発生応力は回転数の2乗に比例するため、回転数が84,000 rpmを超えると平均応力が材料の降伏応力を超え、ハブ部の損傷に至る可能性があることが分かった。なお、当該過給機のタービンホイールハブ部にPT指示が認められており、応力解析結果と整合することが確認された。

9. 損傷メカニズムの推定

(添付資料-29)

上記の調査結果等から、損傷メカニズムについて以下の通り推定を行った。

(1) 前回点検時におけるロックナットの締付力不十分

平成20年4月の前回点検時、コンプレッサホイールのロックナット締付作業において、専用受台を用いずに不安定な状態で作業を行うなど締付方法に不備があり、締付けトルクが適正に作用せずコンプレッサホイールの締付力が不十分であった。

(2) 初期締付力不十分による経時的な軸力の低下

締付力が不十分な状態で負荷試験を行うことで、コンプレッサホイールの微小な滑りにより摩耗が生じ、負荷試験を繰り返すことで徐々に軸力が低下した。

(3) 軸力の低下によるコンプレッサホイールの追従不良

軸力の低下により、今回の負荷試験における100%負荷時にコンプレッサホイールの追従不良が発生し、当該過給機の空気圧縮機能を喪失した。これにより、A-DGの出力が低下したものと考えられる。

(4) コンプレッサホイール空回りによる過回転の発生

さらに、ロックナットの緩みによりコンプレッサホイールが空回りし、タービ

ンホイールの回転に対するコンプレッサの負荷（抵抗）が減少したため、タービンホイールの回転数が上昇しタービンホイールが過回転となった。

(5) 過回転によるタービンホイールハブ部の損傷

タービンホイールが過回転となることで、遠心力による過大な応力がタービンホイールに発生し、応力集中部であるハブ部よりタービンホイールが損傷した。

(6) 周辺部位の損傷

タービンホイールが損傷した衝撃により、シャフト溶接部が折損するとともに、破損した部品により周囲の部品が損傷した。

10. 推定原因

過給機の分解・組立に関する詳細な手順については、メーカ指導員が運用している整備解説書に基づいていたが、前回の分解点検復旧時に専用受台がないにもかかわらずメーカ工場での締付け方法を考慮して過給機を縦置きとした。このため、不安定な状態となったことから、コンプレッサホイールを支えて締付けを行った結果、締付けたトルクが適正に軸力として作用せず初期軸力が低くなった。

その後、A-DGの運転に伴い軸力が次第に低下し、今回の負荷試験においてコンプレッサホイールが連続的に滑り始めた。締付力が不十分であったことと、ロックナットの締付けが回転力により緩む方向（右ネジ）であることが相まってロックナットが緩み、タービンホイールが過回転となった。過回転によりタービンホイールのハブ部に過大な応力が発生・損傷し、さらに、タービンホイールが破損した衝撃により、シャフト溶接部が折損するとともに、破損した部品により周囲の部品が損傷したものと推定される。

11. 対策

(添付資料-30)

- (1) 今後の分解点検は、当該ロックナットに対し確実に締付けトルクを付与することができるよう、適切な専用受台を用いて組立てを行う。
- (2) 締付作業において、コンプレッサホイールを把持しない等適切に締付けを行うための注意事項を作業手順書に明記し、関係者に周知徹底する。
- (3) 当該DG全ての過給機について、ロックナットの締付を回転方向と逆にすることにより緩み防止措置を行い、当該DGに取付けた後、DGの健全性を確認する。

以 上

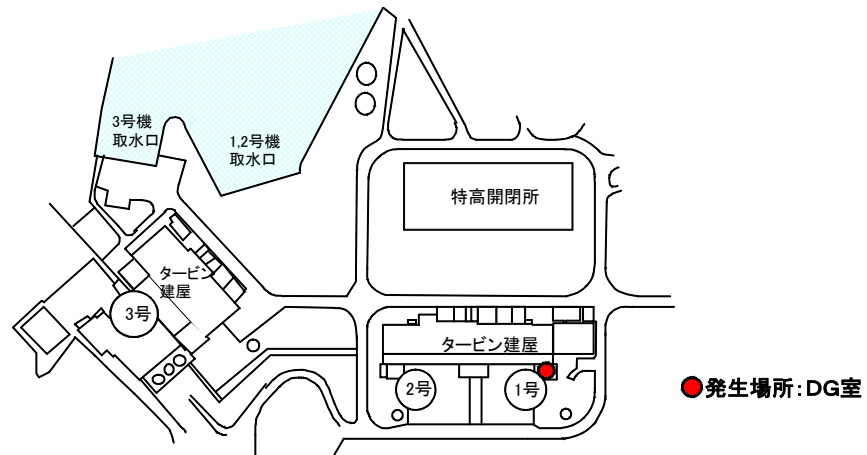
添付資料

1. 発生場所および電源系統概略図
2. 保安規定抜粋
3. DG全体図
4. 過給機外観点検状況
5. DG吸排気系統概略図および過給機断面図
6. 周辺モニタチャート
7. A-DG発電機出力グラフ
8. 過給機損傷 聞き取り調査結果
9. A-DG過給機損傷事象 要因分析（F T）図
10. 外観目視点検結果（現場）
11. 潤滑油・燃料油の分析結果
12. 運転記録の確認
13. A-DG第23回定期検査点検記録
14. A-DG過給機外観目視点検結果（工場）
15. 材料確認結果
16. 寸法計測結果
17. 浸透探傷試験結果
18. 破面観察結果
19. 断面ミクロ組織観察結果
20. 硬度測定結果
21. 材料成分分析結果
22. 工場調査結果のまとめ
23. 破片回収結果
24. 過給機設計に関する調査
25. 過去の過給機損傷事例
26. 当該過給機の点検履歴
27. 過給機分解点検フロー
28. 損傷要因検証
29. 過給機損傷メカニズム 推定フロー
30. 対策

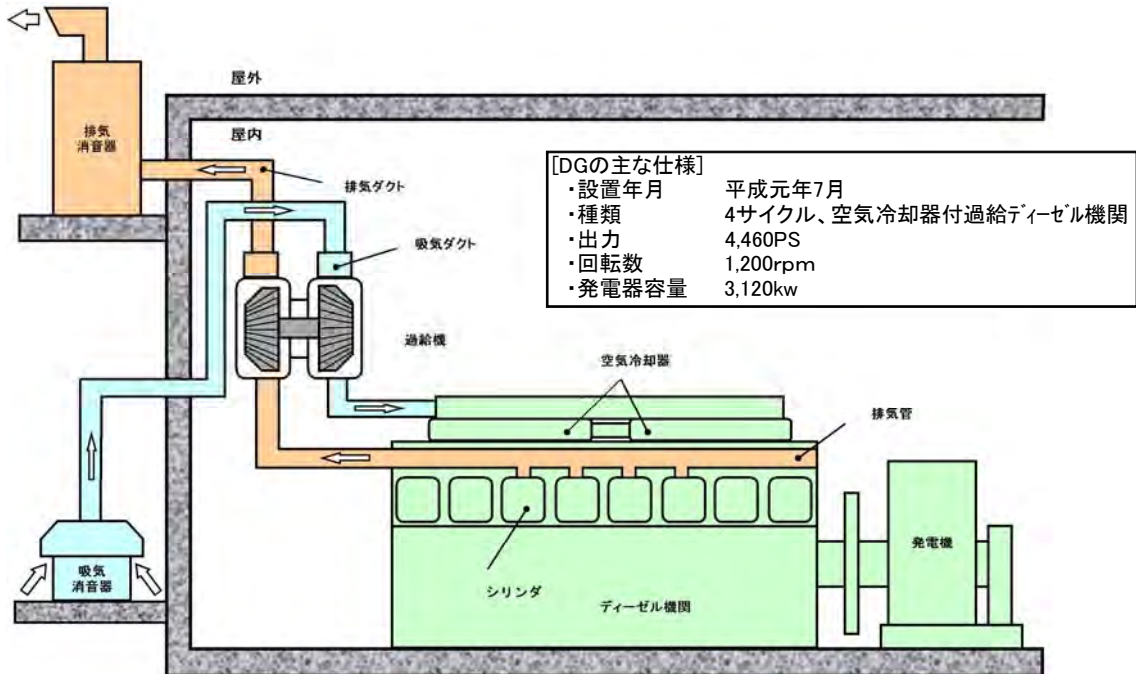
発生場所および電源系統概略図

発生場所

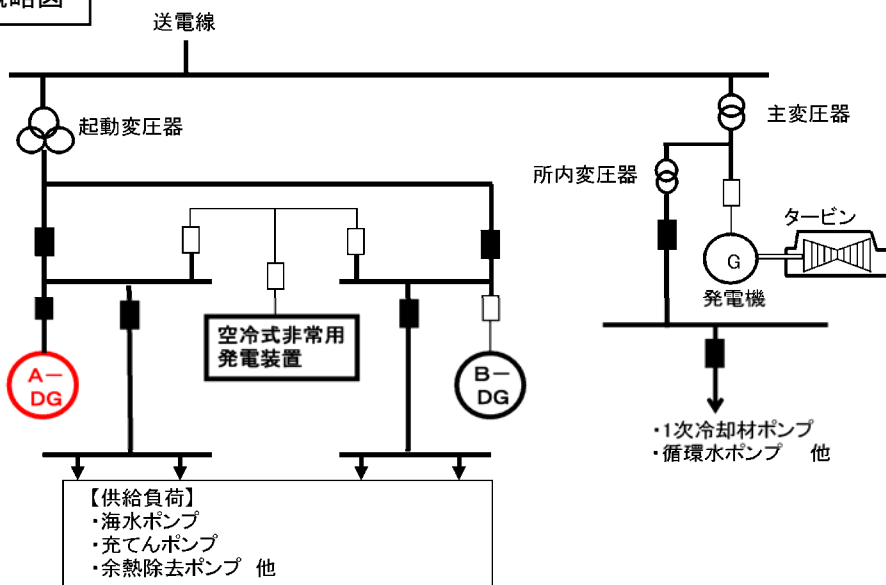
<発電所全体図>



<DG室断面図>



電源系統概略図



■ : しゃ断器「入」
□ : しゃ断器「切」
— : 充電中
— : 停電中

【供給負荷】
・海水ポンプ
・充てんポンプ
・余熱除去ポンプ 他

保安規定抜粋

(ディーゼル発電機 –モード1、2、3および4以外–)

第 75 条 モード1、2、3および4以外において、ディーゼル発電機は、表75-1で定める事項を運転上の制限とする。

2. ディーゼル発電機が前項で定める運転上の制限を満足していることを確認するため、次号を実施する。
- (1) 当直課長は、モード1、2、3および4以外において、1ヶ月に1回、ディーゼル発電機について以下の事項を実施する。
- (a) ディーゼル発電機を待機状態から起動し、無負荷運転時の電圧が $6,900 \pm 345$ V および周波数が 60 ± 3 Hz であることを確認する。
- (b) 燃料油サービスタンク貯油量を確認する。
3. 当直課長は、ディーゼル発電機が第1項で定める運転上の制限を満足していないと判断した場合、表75-3の措置を講じるとともに、照射済燃料の移動を中止する必要がある場合は、原子燃料課長に通知する。通知を受けた原子燃料課長は、同表の措置を講じる。

表75-1

項 目	運転上の制限
ディーゼル発電機	(1) <u>ディーゼル発電機2基が動作可能であること</u> ※1※2 (2) (1)のディーゼル発電機に対応する燃料油サービスタンクの貯油量が表75-2に定める制限値内にあること※3

※1：ディーゼル発電機の予備潤滑運転（ターニング、エアラン）を行う場合、運転上の制限を適用しない。

※2：ディーゼル発電機には、非常用発電機1基を含めることができる。非常用発電機とは、所要の電力供給が可能なものをいう。なお、非常用発電機は複数の号炉で共用することができる。

※3：ディーゼル発電機が運転中および運転終了後の24時間は、運転上の制限を適用しない。

表75-2

項 目	制限値		
	1号炉	2号炉	3号炉
燃料油サービスタンク貯油量 (保有油量)	0.66 m ³ 以上	0.55 m ³ 以上	0.66 m ³ 以上

附 則 (平成23年5月11日 17原安防通達第1号-19)
(施行期日)

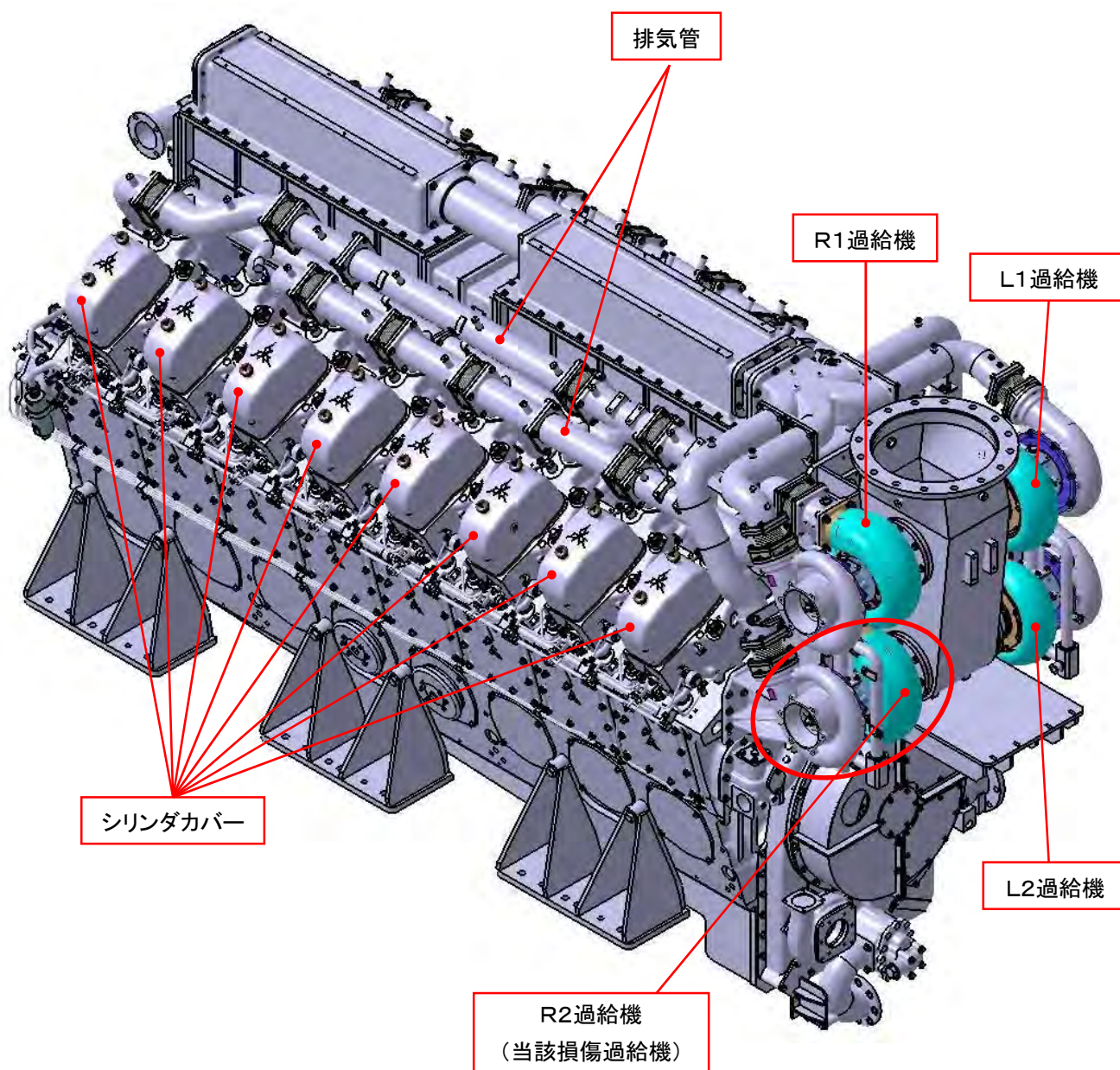
第 1 条 この通達は、平成23年5月12日から施行する。

2. 第75条(ディーゼル発電機 –モード1、2、3および4以外–)の表75-1について、非常用発電機の運用を開始するまでは、所要の電力供給が可能な場合、他の号炉のディーゼル発電機または移動式発電装置を非常用発電機とみなすことができる。

附 則 (平成24年9月6日 17原安防通達第1号-21)
(施行期日)

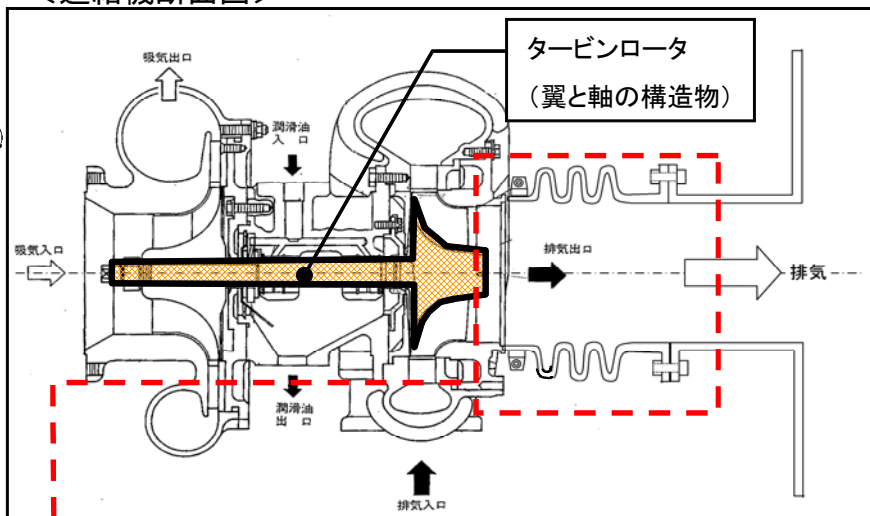
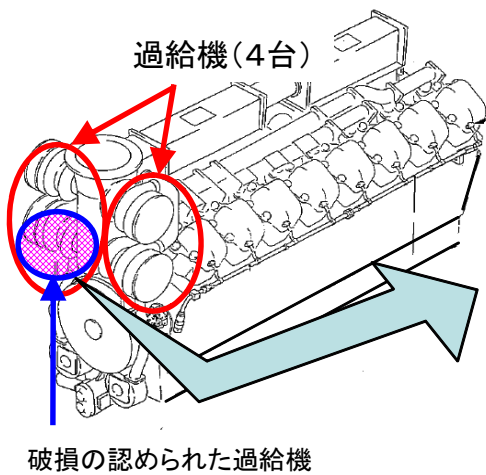
第 1 条 この通達は、平成24年9月14日から施行する。

D G 全体図



過給機外観点検状況

<過給機断面図>

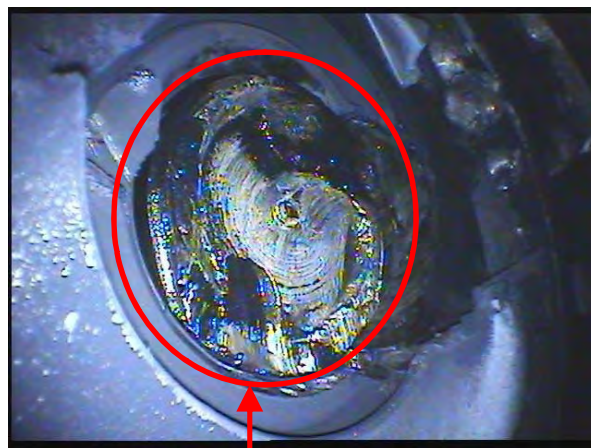


フランジ開口部



フランジおよび伸縮継手が外れている

ファイバースコープにて過給機内部観察

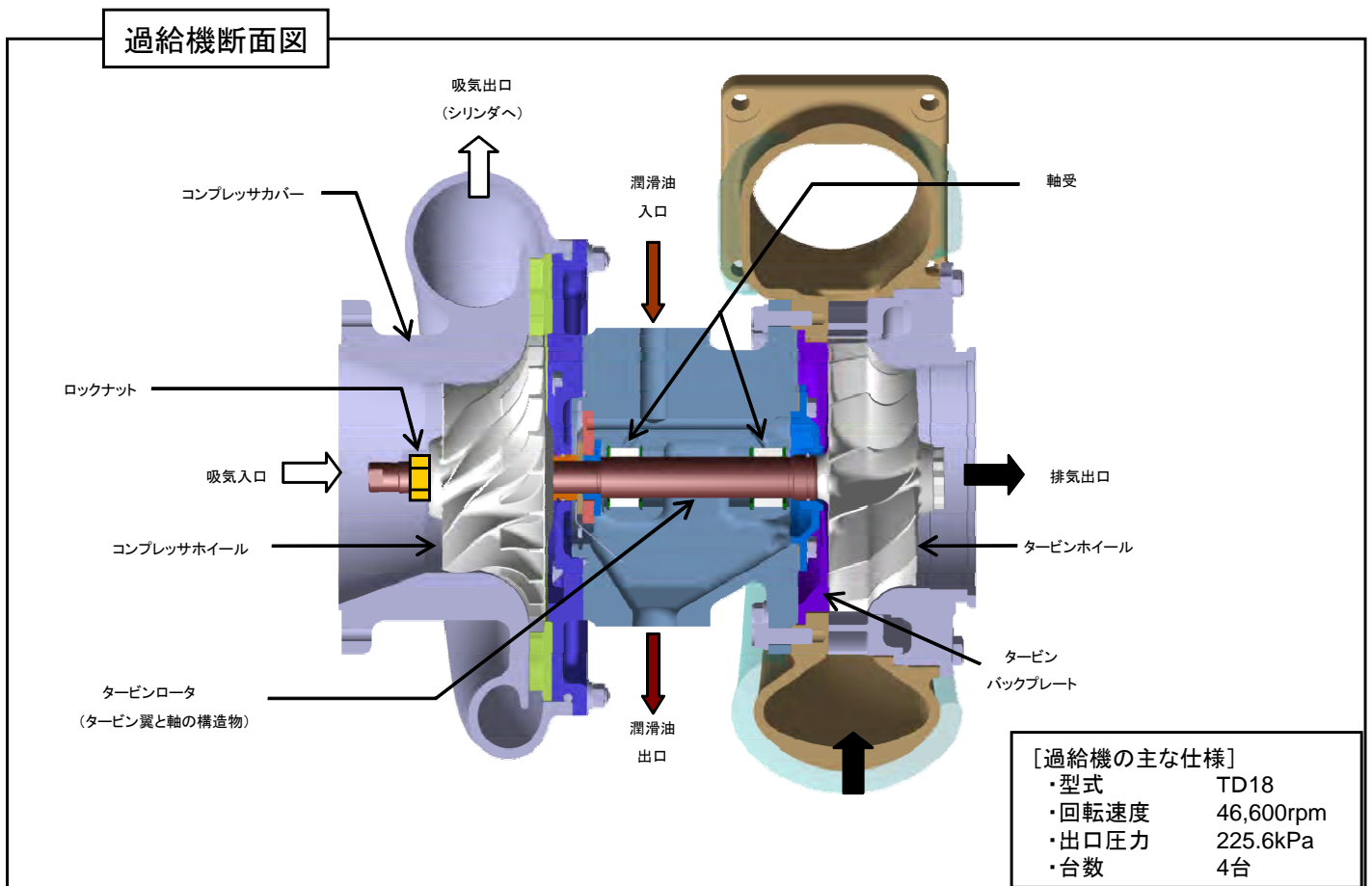
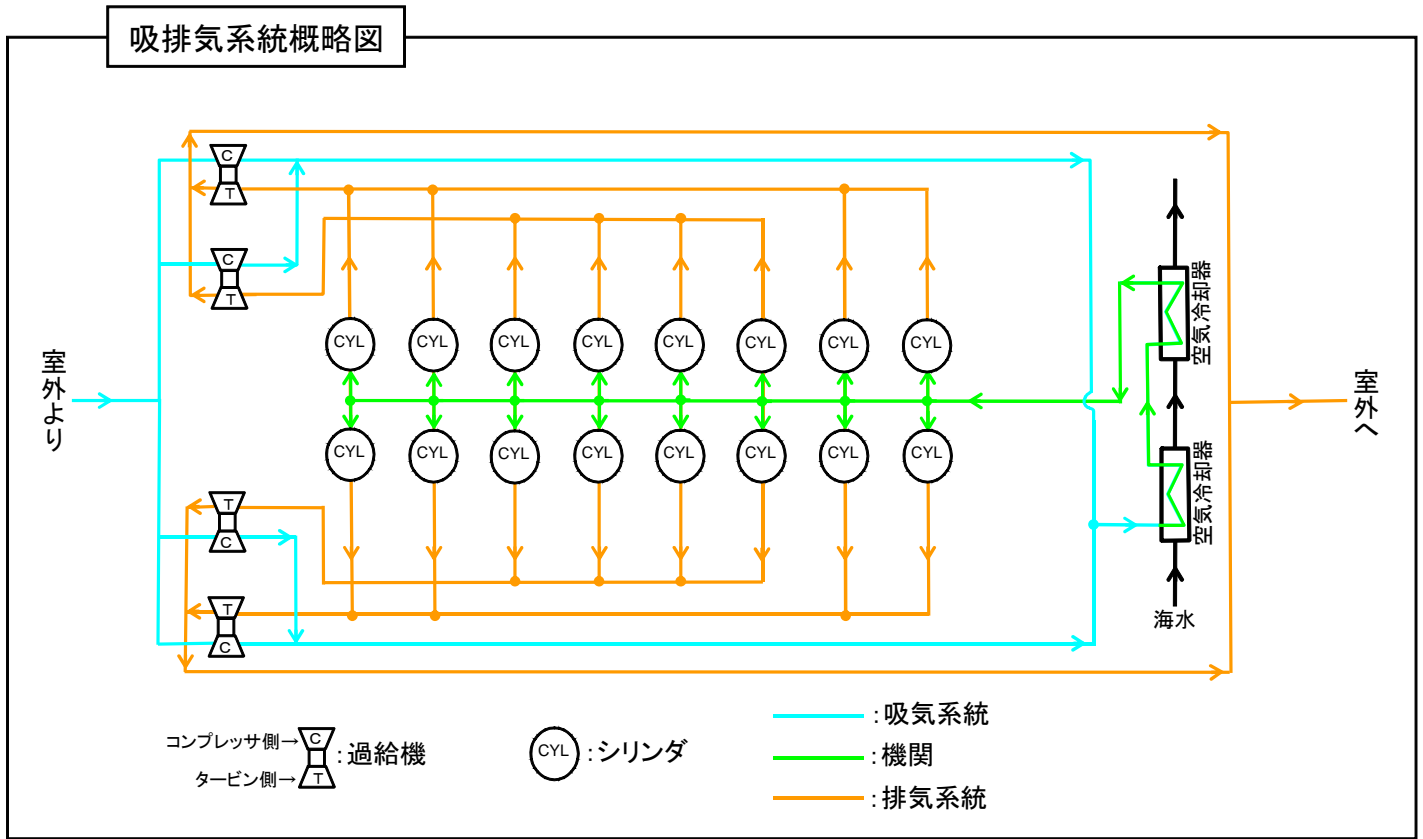


タービンロータが損傷している。

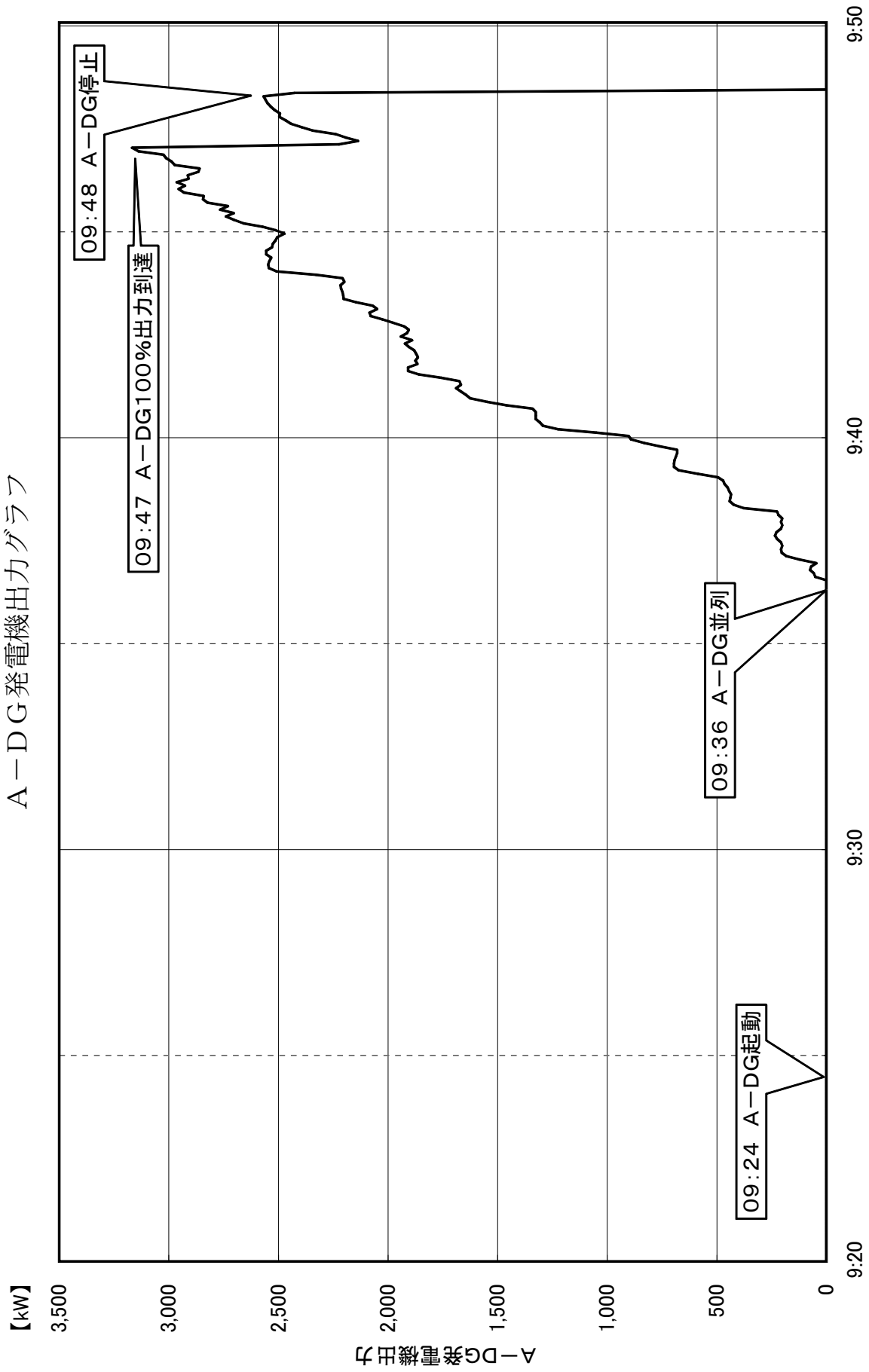
過給機付近にて発見された金属片



D G 吸排気系統概略図および過給機断面図



A-DG発電機出力グラフ

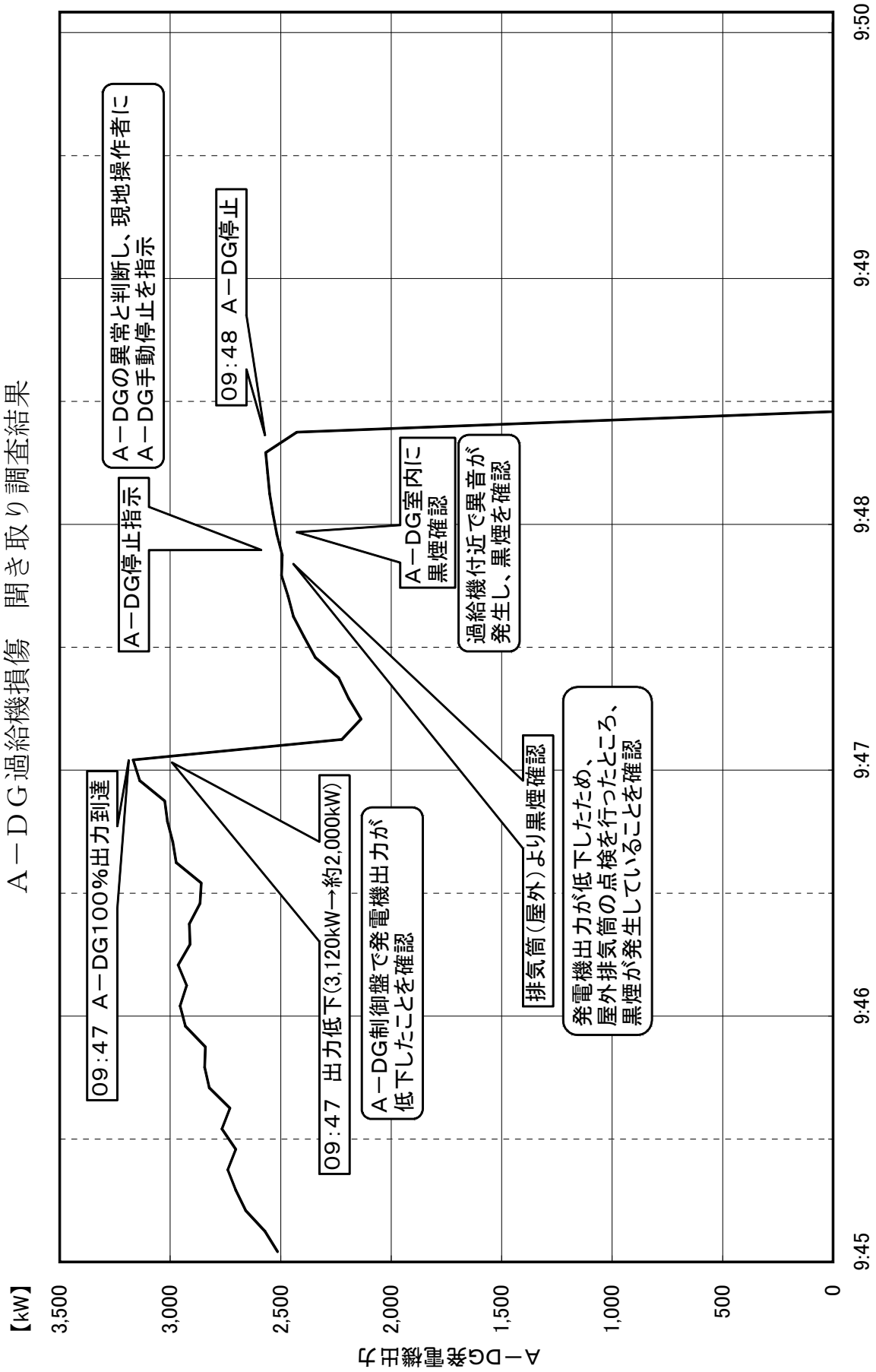


過給機損傷 聞き取り調査結果

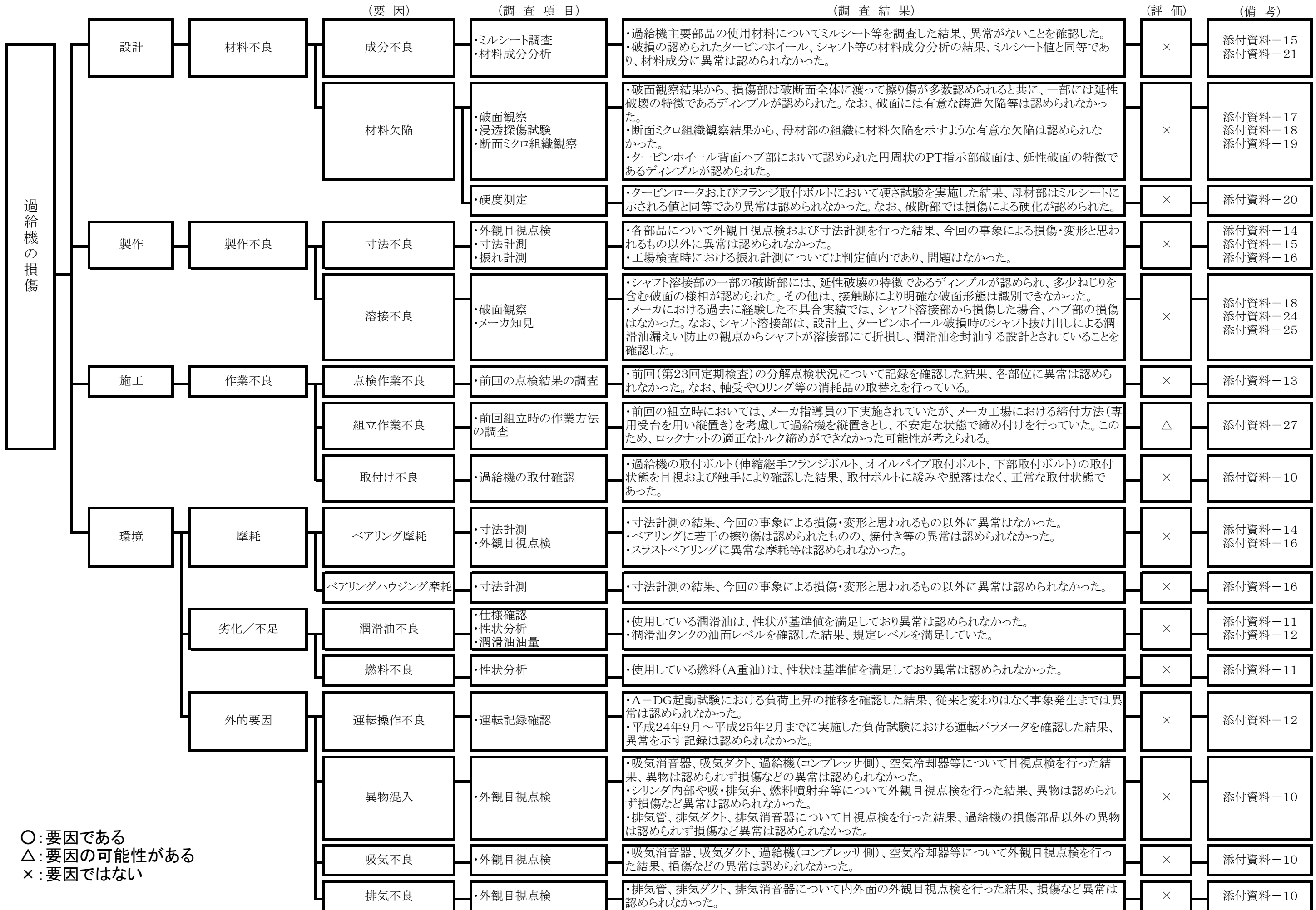
事象発生時にA-DG定期負荷試験に現場で立ち会った当社運転員(A, B, C)から聞き取り調査を行った結果、以下の通りであった。

時 間	状 況	運 転 操 作	聞 き 取 り 調 査 結 果
9:24	A-DG起動	現地操作盤の1Aディーゼル発電機コントロールスイッチを「起動」にする。 (運転員C)	A-DG起動操作を行い、起動状態に異常がないことを中央制御室に報告 (運転員B)
9:36	A-DG並列	現地操作盤のしゃ断器4-1AEGコントロールスイッチを「入」にする。 (運転員C)	並列操作を行い、並列状態に異常がないことを中央制御室に報告 (運転員B)
	A-DG出力上昇	現地操作盤の1Aディーゼルガバナコントロールスイッチで出力を上昇する。 (運転員C)	出力上昇操作を行い、出力上昇状態に異常がないことを中央制御室に報告 (運転員B)
9:47	100%出力(3,120kW)到達	点検を開始 (運転員A・B・C)	A-DG制御盤で100%出力に到達したことを確認 (運転員A・B・C)
9:47	出力低下 (3,120kW→約2,000kW)		A-DG制御盤で発電機出力が低下したことを確認 (運転員A・C)
	排気筒(屋外)より黒煙確認		発電機出力が低下したため、屋外排気筒の点検を行ったところ、黒煙が発生していることを確認 (運転員A)
	A-DG停止指示		A-DGの異常と判断し、現地操作者にA-DG手動停止を指示 (運転員A)
	A-DG室内に黒煙確認		過給機付近で異音が発生し、黒煙を確認 (運転員B・C)
9:48	停止操作	現地操作盤の1Aディーゼル発電機コントロールスイッチを「停止」にする。 (運転員C)	A-DG停止操作を実施 (運転員C)
9:48	火災報知器動作		火災報知器の動作は、出火によるものではなく、排煙による動作であることを中央制御室に報告 中央制御室より、現地の状況確認の指示あり (運転員A)
9:49	A-DG停止確認		A-DG停止を確認 (運転員A)

A-DG過給機損傷 聞き取り調査結果



A-DG過給機損傷事象 要因分析 (FT) 図



○: 要因である
△: 要因の可能性がある
×: 要因ではない

外観目視点検結果 (現場)

以下の箇所の外観目視点検を実施し、過給機(タービン側)およびタービン室出口伸縮継手に損傷を確認した。

		点検部位	結果	
吸気系統	機関外	吸気消音器	良	
		吸気ダクト	機関外	良
	機関内		良	
	機関内	過給機(コンプレッサ側)	良	
		過給機(コンプレッサ側) 出口吸気管	良	
		空気冷却器	良	
		吸気室	良	
		吸気弁	良	
シリンダ内部		良		
排気系統	機関内	排気弁	良	
		排気管	良	
		過給機(タービン側)	損傷あり	
		タービン室出口 伸縮継手	損傷あり	
	機関外	排気ダクト	機関内	良
			機関外	良
		排気消音器	良	
その他		潤滑油 油量確認	良	

外観目視点検結果 (現場)

①吸気消音器

損傷なし

②吸気ダクト

損傷なし

⑬排気消音器

損傷なし

⑫排気ダクト

損傷なし

③過給機(コンプレッサ側)

外観に異常は確認されなかった。

④吸気ダクト

損傷なし

⑦シリンダ内部

吸気弁
ポート側 カム側
排気弁
ポート側 カム側

吸気弁 排気弁

従来と同程度のすすが認められ、損傷なし

⑪排気ダクト

R2 過給機排気ダクトに翼、損傷なし

⑤空気冷却器

損傷なし

⑥吸気室

損傷なし

⑧排気管

損傷なし

⑨過給機(タービン側)

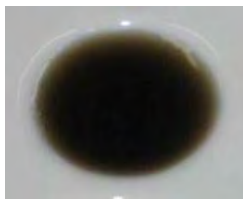
取付ボルトが全てなくなり
ロックプレートが破損し脱落

⑩過給機出口伸縮継手

タービン側 排気ダクト側

伸縮継手の破れ、つぶれ、フランジ面の外れあり

潤滑油・燃料油の分析結果



オイル性状は基準値を満足しており、異常は認められなかった。

潤滑油(出光 ダフニーマリンオイル SX30)

分析項目		単位	基準値	供試油	新油 (カタログ値)
動粘度	40℃	mm ² /S	—	97.1	92.5
	100℃		9.6~14.7	11.4	11.3
粘度指数		—	—	104	107
引火点		℃	180以上	258	250
水分		%	0.2以下	0.1以下	0.1以下
塩基価 (塩酸法)		mgKOH/g	2.0以上	9.9	11.5
酸価			新油+3.0以下	1.7	—
ペンタン不溶分	A法	%	0.5以下	0.05以下	—
	B法		3.0以下	0.05以下	—
トルエン不溶分	A法		—	0.05以下	—
	B法		—	0.05以下	—



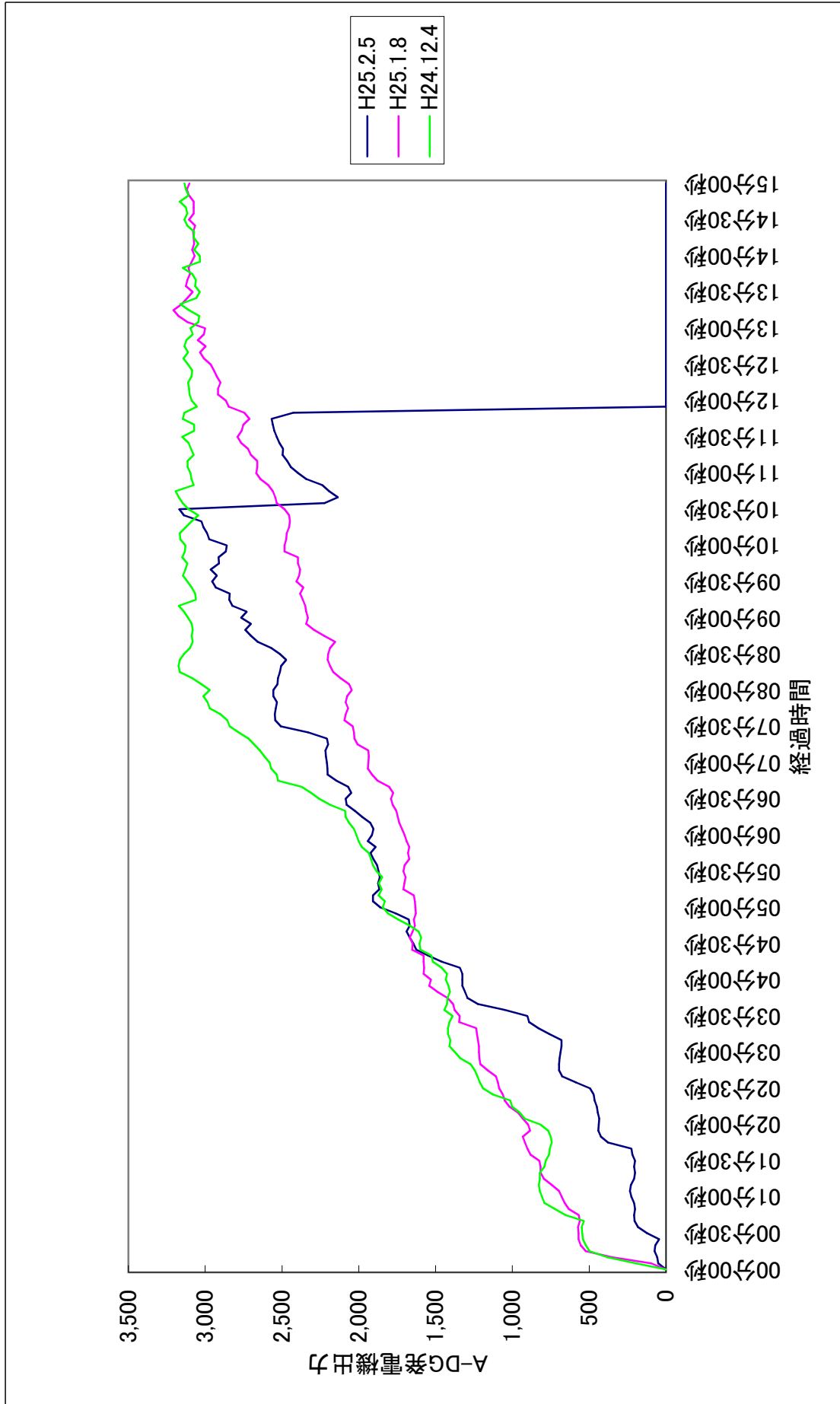
オイル性状は基準値を満足しており、異常は認められなかった。

燃料油(A重油)

分析項目		単位	基準値	供試油
密度	15℃	g/cm ³	—	0.8647
動粘度	50℃	mm ² /S	20以下	2.697
引火点	PM法	℃	60以上	76.0
硫黄分		mass%	1号 0.5以下	0.07
			2号 2.0以下	
蒸留性状	初留点	℃	—	169.0
	90%留出温度		—	349.0
セタン指数		—	—	43.3
水分と沈殿物		Vol%	0.3以下 (水分)	0.01以下
流動点		℃	0以下	-22.5
目詰まり点			—	-12

運転記録の確認

A-DG負荷試験時の発電機出力上昇比較



負荷上昇の推移が従来とは変わりはなく事象発生までは異常は認められなかった。

運転記録の確認

発電室採取

No.	計測項目	標準値	日時	確認結果					
				2012				2013	
				9/4	10/2	11/6	12/4	1/8	2/5
			並列・起動	中央	現地	中央	現地	中央	現地
1	A-DG燃料油貯蔵タンク油面(mm)	>1940.0	起動前	2394.5	2455.0	2397.5	2340.0	2453.0	2396.0
			起動後	2340.0	2404.0	2345.0	2290.0	2399.0	2395.0
2	A-DG燃料油サービスタンク油量(L)	745~960 (計器誤差±24)	起動前	860	910	960	930	950	915
			起動後	925	945	958	960	945	793
3	A-DG潤滑油タンク油面(L)	>1300 (規定値レベル)	起動前	2170	2174	2155	2150	2140	2135
			起動後	2215	2202	2200	2190	2180	2140
4	A-DG潤滑油機関入口圧力(MPa)	0.590~0.690		0.640	0.640	0.640	0.640	0.640	記録採取出来ず
5	A-DG燃料油機関入口圧力(kPa)	250~390		310	305	300	305	305	
6	A-DGシリンダ冷却水機関入口圧力(kPa)	130~250		230	230	230	230	235	
7	A-DG機関吸気圧力(kPa)	<230		195	195	195	200	200	
8	潤滑油機関入口温度(°C)	40.0~58.0		55.7	55.3	55.2	54.6	54.3	
9	潤滑油機関出口温度(°C)	40.0~70.0		67.7	67.0	66.7	66.0	65.6	
10	シリンダ冷却水機関出口温度(°C)	55.0~82.0		69.1	67.2	66.3	65.4	65.2	

過去5回のA-DG負荷試験のパラメータを確認した結果、異常を示す記録は認められなかった。

運転記録の確認

保守課採取

No.	計測項目	標準値	確認結果			
			2012		2013	
			日時 並列・起動	10/2 現地	12/4 現地	2/5 現地
1	シリンダ圧力(MPa)	<14.7	CR1	11.3	12.0	
			CR2	11.3	12.0	
			CR3	11.3	12.0	
			CR4	11.3	12.0	
			CR5	11.3	12.3	
			CR6	11.5	12.0	
			CR7	11.5	12.0	
			CR8	12.0	12.3	
			CL1	11.5	12.3	
			CL2	11.5	12.0	
			CL3	11.5	12.0	
			CL4	11.5	12.0	
			CL5	11.8	12.5	
			CL6	11.8	12.3	
			CL7	11.8	12.3	
			CL8	11.0	12.3	
2	シリンダ内出口排気ガス温度(°C)	<620.0	CR1	527.6	495.9	
			CR2	547.4	518.1	
			CR3	563.2	536.1	
			CR4	573.8	549.2	
			CR5	563.1	539.8	
			CR6	570.8	546.0	
			CR7	572.7	546.8	
			CR8	579.3	552.9	
			CL1	521.7	499.2	
			CL2	544.8	520.2	
			CL3	547.9	522.4	
			CL4	543.8	519.5	
			CL5	557.5	531.1	
			CL6	570.3	546.5	
			CL7	564.4	538.7	
			CL8	535.5	513.4	
3	過給機入口排気ガス温度(°C)	<650.0	CR-1,2,7,8	592.1	559.3	
			CR-3,4,5,6	610.8	577.5	
			CL-1,2,7,8	566.5	537.5	
			CL-3,4,5,6	593.3	562.9	
4	機関吸気温度(°C)	<45.0	40.1	32.4		
5	燃料油機関入口温度(°C)	—	34.4	30.6		
6	シリンダ冷却水冷却器海水入口温度(°C)	<40.0	32.2	22.4		
7	シリンダ冷却水冷却器海水出口温度(°C)	<50.0	35.2	25.5		
8	室内温度(°C)	10~45	37.0	30.4		
9	ラック目盛	<9.0	8.7	8.7		

記録採取出来ず

過去2回(1回/2ヶ月に記録採取)のA-DG負荷試験のパラメータを確認した結果、異常を示す記録は認められなかった。

開放点検記録

工事件名	美浜発電所 第1号機 第23回 A号機 非常用ディーゼル定期点検工事
記録名称	機器開放点検

区分 ◎：作業中同時立会
○：作業完了後立会
△：作業記録の審査
/：該当なし
(点検結果の審査)
レ：異常なし
▲：異常あり

No.	対象機器	点検項目	点検方法	判定基準	判定	点検日	区分	関電	作責	作業者
1	No.1過給機	1) 傷・異常な摩耗等の有無	目視	表面上に機能・性能に影響を及ぼすものあるとき、打こん、変形及び摩耗がないこと。	良	H20.4.12	◎	◎	◎	
		2) 計測	別紙記録	結果			4/12	4/12	4/12	
2	No.2過給機	1) 傷・異常な摩耗等の有無	目視	表面上に機能・性能に影響を及ぼすものあるとき、打こん、変形及び摩耗がないこと。	良	H20.4.12	◎	◎	◎	
		2) 計測	別紙記録	結果			4/12	4/12	4/12	
3	No.3過給機	1) 傷・異常な摩耗等の有無	目視	表面上に機能・性能に影響を及ぼすものあるとき、打こん、変形及び摩耗がないこと。	良	H20.4.12	◎	◎	◎	
		2) 計測	別紙記録	結果			4/12	4/12	4/12	
4	No.4過給機	1) 傷・異常な摩耗等の有無	目視	表面上に機能・性能に影響を及ぼすものあるとき、打こん、変形及び摩耗がないこと。	良	H20.4.12	◎	◎	◎	
		2) 計測	別紙記録	結果			4/12	4/12	4/12	
5	空気冷却器(前部)	1) 管の内部、管板 2) 水室内部(ライニング) 3) 外観	目視	表面上に機能・性能に影響を及ぼすものあるとき、打こん、変形及び摩耗がないこと。	良	H20.4.12	◎	◎	◎	
		4) リークテスト	別紙記録	結果			4/12	4/12	4/12	
6	空気冷却器(後部)	1) 管の内部、管板 2) 水室内部(ライニング) 3) 外観	目視	表面上に機能・性能に影響を及ぼすものあるとき、打こん、変形及び摩耗がないこと。	良	H20.4.12	◎	◎	◎	
		4) リークテスト	別紙記録	結果			4/12	4/12	4/12	

1-2001-23M610
ドキュメント番号

クラス
係
課長 係長 班長
20.7.19 20.7.18 20.7.17
20.7.22

関西電力(株)美浜発電所 1号機
第23回定期検査
非常用ディーゼル定期点検工事
総括報告書
兼定期点検工事記録

三重工原力技術資料クラスB 発行 三重工工業株式会社 神戸造船所 兼 美浜発電所 作成 平成 20年 6月 19日	改定 所長 品管 安全 工務 班長 作責 作成	作業所 図番 番号 KM1-23-D104 0	関連資料 図番 番号	改定
現場 配布 先	作業所 1	内容	三重工工業株式会社 神戸造船所 技術工務部	改定
配布 先	1	注文主	三重工工業株式会社	改定
		注文書	担当	改定
		年月日	担当	改定
		照会者	担当	改定
		アイテム	担当	改定
		2202336	担当	改定
		三重工電力(株)	担当	改定
		美浜発電所	担当	改定
		第1号機	担当	改定
		表紙共 351枚	担当	改定
		備考	担当	改定
		原簿保管	担当	改定
		技術工務部	担当	改定
		作成	担当	改定
		出書	担当	改定
		図番	担当	改定
		番号	担当	改定

A-DG第23回定期検査点検記録

EDIXX-01A
ディーゼル機関
点検記録

区別 作業 品管
月日 4/12 4/12 4/12
結果 V V V

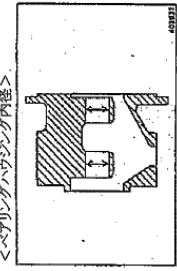
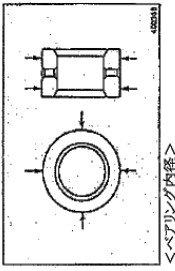
計測者 [Redacted]

区分 作業中同時立会
○:作業完了後立会
△:作業記録の審査
/:該当なし
(点検結果の審査)
レ:異常あり
▲:異常なし

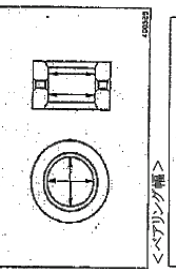
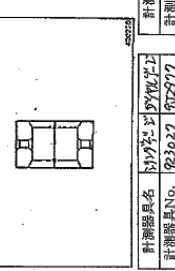
記録名称 通給機各部計測 (1/3)
検査日 H20.4.12
通給機No. (本体製造番号: 180447)

単位: mm

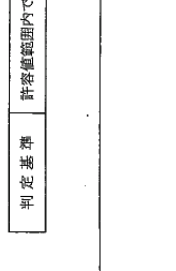
計測位置	管理目標値	許容値	実測値
タービン側	40.00 ~ 40.02	40.02以下	40.01
コンプレッサ側			40.01

計測位置	管理目標値	許容値	実測値
タービン側	39.88 ~ 39.90	39.88以上	39.89
コンプレッサ側			39.88

計測位置	管理目標値	許容値	実測値
タービン側	27.91 ~ 27.93	27.93以下	27.92
コンプレッサ側			27.91



計測位置	管理目標値	許容値	実測値
タービン側	19.90 ~ 20.10	19.90以上	20.00
コンプレッサ側			20.01

計測器具名: [Redacted]
計測器具No.: [Redacted]

計測器具名: [Redacted]
計測器具No.: [Redacted]

計測器具名: [Redacted]
計測器具No.: [Redacted]

計測器具名: [Redacted]
計測器具No.: [Redacted]

判定基準 許容値範囲内であること

判定結果
総合判定 H.20 判定者 [Redacted]

外観点検記録

工事件名 美浜発電所 第1号機 第23回 A・B号機
非常用ディーゼル定期点検工事

記録名称 機器外観点検

区分 ○:作業中同時立会
○:作業完了後立会
△:作業記録の審査
/:該当なし
(点検結果の審査)
レ:異常なし
▲:異常あり

No.	対象機器	点検項目	点検方法	判定基準	点検日	点検者	判定	開電	作業	品管
1	調速装置 (油圧式調速機)	1) 据付状態の異常の有無 2) 潤滑油漏洩の有無 (100%負荷試運転時)	目視	機能・性能に影響を及ぼすおそれのある取付け状態、支持状態、各部からの漏れ、き裂及び変形等の異常がないこと。	H20.4.30	[Redacted]	良	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓
2	No.1過給機	1) 据付状態の異常の有無 2) 潤滑油漏洩の有無 (100%負荷試運転時)	目視	機能・性能に影響を及ぼすおそれのある取付け状態、支持状態、各部からの漏れ、き裂及び変形等の異常がないこと。	H20.4.30	[Redacted]	良	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓
3	No.2過給機	1) 据付状態の異常の有無 2) 潤滑油漏洩の有無 (100%負荷試運転時)	目視	機能・性能に影響を及ぼすおそれのある取付け状態、支持状態、各部からの漏れ、き裂及び変形等の異常がないこと。	H20.4.30	[Redacted]	良	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓
4	No.3過給機	1) 据付状態の異常の有無 2) 潤滑油漏洩の有無 (100%負荷試運転時)	目視	機能・性能に影響を及ぼすおそれのある取付け状態、支持状態、各部からの漏れ、き裂及び変形等の異常がないこと。	H20.4.30	[Redacted]	良	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓
5	No.4過給機	1) 据付状態の異常の有無 2) 潤滑油漏洩の有無 (100%負荷試運転時)	目視	機能・性能に影響を及ぼすおそれのある取付け状態、支持状態、各部からの漏れ、き裂及び変形等の異常がないこと。	H20.4.30	[Redacted]	良	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓
6	シリンダ冷却水タンク	1) 据付状態の異常の有無 2) 冷却水漏洩の有無 (100%負荷試運転時)	目視	機能・性能に影響を及ぼすおそれのある取付け状態、支持状態、各部からの漏れ、き裂及び変形等の異常がないこと。	H20.4.30	[Redacted]	良	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓	区分 ○ 月日 4/30 結果 ✓

A-DG 第23回定期検査点検記録

ED1XX-01A
ディーゼル機関
点検記録

計測者: [Redacted]

区分	区画	作業	品管
月	4/12	4/12	4/12
日	4/12	4/12	4/12

区分 ①:作業中同時立会
②:作業完了後立会
△:作業記録の審査
○:検査なし
/:該当なし
(点検結果の審査)
レ:異常あり
▲:異常なし

ED1XX-01A
ディーゼル機関
点検記録

計測者: [Redacted]

区分	区画	作業	品管
月	4/12	4/12	4/12
日	4/12	4/12	4/12

区分 ①:作業中同時立会
②:作業完了後立会
△:作業記録の審査
○:検査なし
/:該当なし
(点検結果の審査)
レ:異常あり
▲:異常なし

NPDG-
記録名称 通給機各部計測 (3/3)
検査日 H20.4.12
通給機No. (本体製造番号: 180447)

単位: mm

<シャフトジャーナル外径>

計測位置	管理目標値	許容値	実測値
タービン側	27.86 ~ 27.87	27.86以上	27.86
コンプレッサ側			27.87

<シャフトの曲がり>

計測位置	管理目標値	許容値	実測値
軸端部	0	0.02以下	0

<ピストリング合口隙間>

計測位置	管理目標値	許容値	実測値
コンプレッサプレート	0.04 ~ 0.24	0.24以下	0.16
ラピンスプレート			0.17

<タービンローダレバリングの隙間>

計測位置	管理目標値	許容値	実測値
端部	0.87 ~ 1.61	0.87以上	1.31

計測器具名	ダイヤル	計測器具No.	
計測器具名	ダイヤル	計測器具No.	

判定基準 許容値範囲内であること

総合判定	判定結果
合格	H.20 判定書

NPDG-
記録名称 通給機各部計測 (3/3)
検査日 H20.4.12
通給機No. (本体製造番号: 180447)

単位: mm

<タービンローダの軸方向遊び>

計測位置	管理目標値	許容値	実測値
軸端部	0.10 ~ 0.15	0.15以下	0.12

<タービンバンププレートピストリング背面の隙間>

計測位置	管理目標値	許容値	実測値
端部	0.73 ~ 1.27	1.27以下	0.97

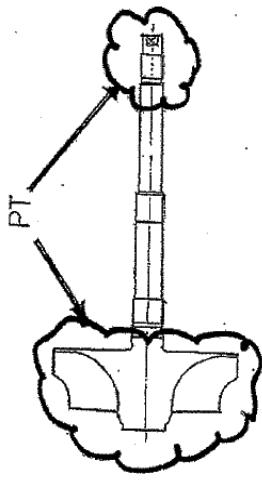
計測器具名	ダイヤル	計測器具No.	
計測器具名	ダイヤル	計測器具No.	

判定基準 許容値範囲内であること

総合判定	判定結果
合格	H.20 判定書

A-DG 第23回定期検査点検記録

EDIXX-01A/B ディーゼル機関 点検記録		<table border="1"> <tr> <th>区分</th> <th>開電</th> <th>作費</th> <th>品管</th> </tr> <tr> <td>◎</td> <td>◎</td> <td>◎</td> <td>◎</td> </tr> <tr> <td>4/11</td> <td>4/11</td> <td>4/11</td> <td>4/11</td> </tr> <tr> <td>結果</td> <td>✓</td> <td>✓</td> <td>✓</td> </tr> <tr> <td>確認者</td> <td colspan="3">[Redacted]</td> </tr> </table>		区分	開電	作費	品管	◎	◎	◎	◎	4/11	4/11	4/11	4/11	結果	✓	✓	✓	確認者	[Redacted]		
区分	開電	作費	品管																				
◎	◎	◎	◎																				
4/11	4/11	4/11	4/11																				
結果	✓	✓	✓																				
確認者	[Redacted]																						
非数値データ		区分 ◎: 作業中間時立会 ○: 作業完了後立会 △: 作業記録の審査 /: 該当なし (点検結果の審査) ♪: 異常なし ▲: 異常あり																					
記録名称	表面検査記録 (通給機)																						
検査日	平成20年4月11日																						
検査方法	■ 溶剤除去性染色浸透探傷法																						
検査箇所	過給機タービンロータ 4台 本体製造番号: 187032, 187044, 187025, 187026																						
探傷剤	浸透液	製造業者名	銘柄																				
	洗淨液	製造業者名	銘柄																				
	現像液	製造業者名	銘柄																				
照度	500ルクス以上																						
浸透時間	//分	//分	温度 /6℃																				
施工法	社団法人日本機械学会JSMES NC1-2006「蒸気用原子力発電機燃料設計-建設設備 (2005年版) <新編 電力が飛躍>」(以下「設計-建設設備」という)に準拠する。																						
判定基準	<input checked="" type="checkbox"/> 浸透指示線が「設計-建設設備」に適合していること。	結果																					
	<input type="checkbox"/> 「設計-建設設備」に適合しない場合は、機能・性能に影響を及ぼす浸透指示線が確認されたこと。	良																					
判定者 (検査員)	NDI-浸透検査試験レベル2 [Redacted] NDI-浸透検査2種																						
探傷箇所	<table border="1"> <tr> <td>探傷箇所</td> <td>整備センター</td> </tr> <tr> <td></td> <td>4F-100-000</td> </tr> </table>			探傷箇所	整備センター		4F-100-000																
探傷箇所	整備センター																						
	4F-100-000																						



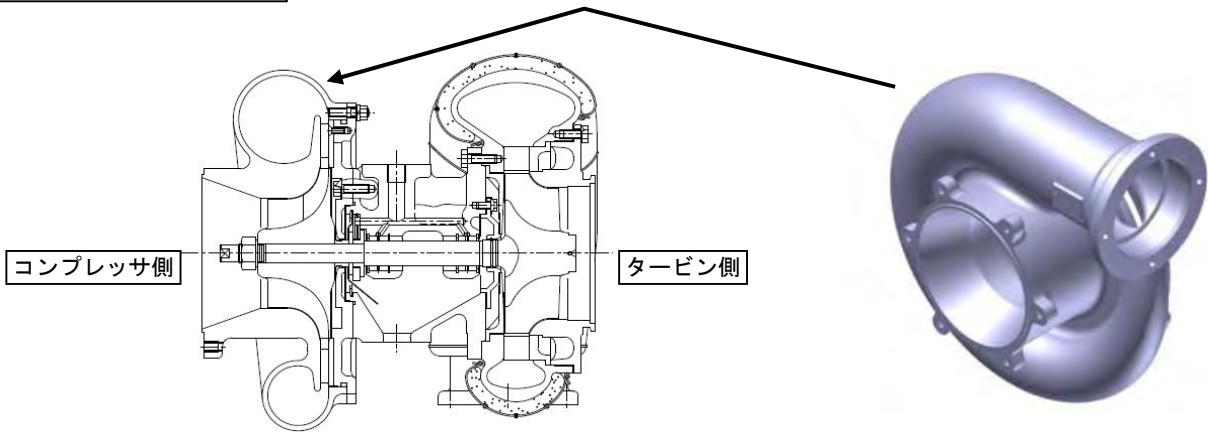
A-DG過給機外観目視点検結果 (工場)

(対象部位)

No	部 位
(1)	コンプレッサカバー
(2)	ロックナット
(3)	コンプレッサホイール
(4)	ディフューザ
(5)	コンプレッサプレート
(6)	スラストリング(コンプレッサ側)
(7)	スラストリング(タービン側)
(8)	スラストベアリング
(9)	ベアリング
(10)	タービンハウジングボルト
(11)	フリガスリーブ
(12)	ロックプレート
(13)	フランジ取付ボルト
(14)	フランジ
(15)	ノズルリング
(16)	タービンハウジング
(17)	タービンロータ
(18)	タービンバックプレート
(19)	ラビリンスプレート
(20)	ベアリングハウジング

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

コンプレッサカバー(1)

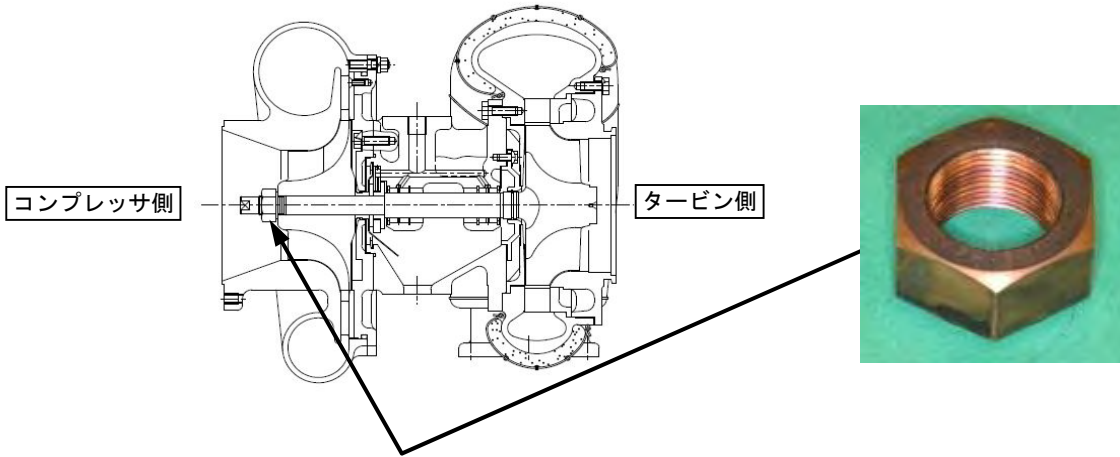


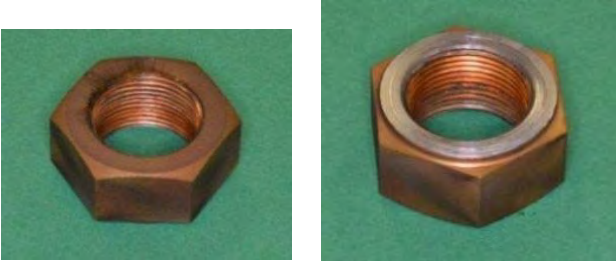
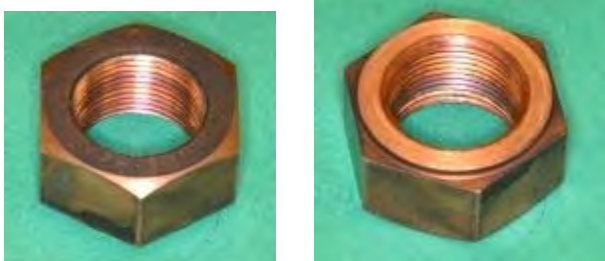
	損傷側過給機 (R2)	健全側過給機 (L2)
外面側		
内面側		
内面部		【参考】健全側同部

コンプレッサカバー内面の外周部には通常認められるコンプレッサプレートの当たり跡以外、へこみ等の異常は認められなかったものの内周部には全周に渡り、すじ状の接触跡が認められた。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

ロックナット(2)

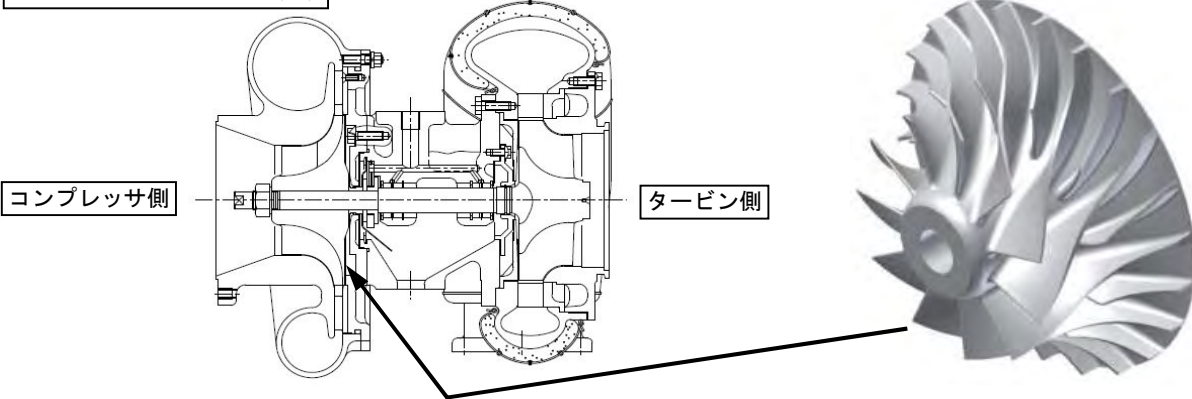


損傷側過給機(R2)	健全側過給機(L2)
 <p data-bbox="493 1352 783 1384">コンプレッサホイール側座面</p>	 <p data-bbox="1139 1352 1430 1384">コンプレッサホイール側座面</p>

コンプレッサホイール側座面に光沢が確認され周方向の摺動跡が認められた。また、当該過給機分解時において締付け状況を確認したところロックナットは緩んでおりトルクがかかっていない状態であることが認められた。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

コンプレッサホイール(3)

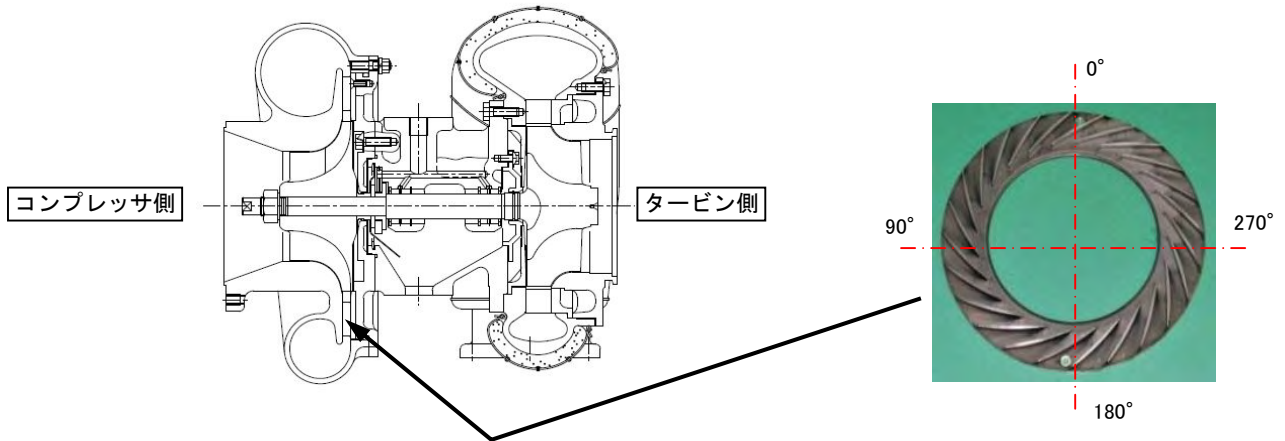


	損傷側過給機 (R2)	健全側過給機 (L2)
コンプレッサ側		
翼部		
タービン側		
シャフト部内面		

翼部にコンプレッサカバーと接触したと思われる接触跡が認められた。コンプレッサホイールのシャフト部端面にロックナットおよびフリंगाスリーブとの接触によるものと思われる摺動跡が認められた。また、コンプレッサホイールシャフト貫通部内面にシャフトとの接触によるものと思われる摺動跡が認められた。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

ディフューザ(4)

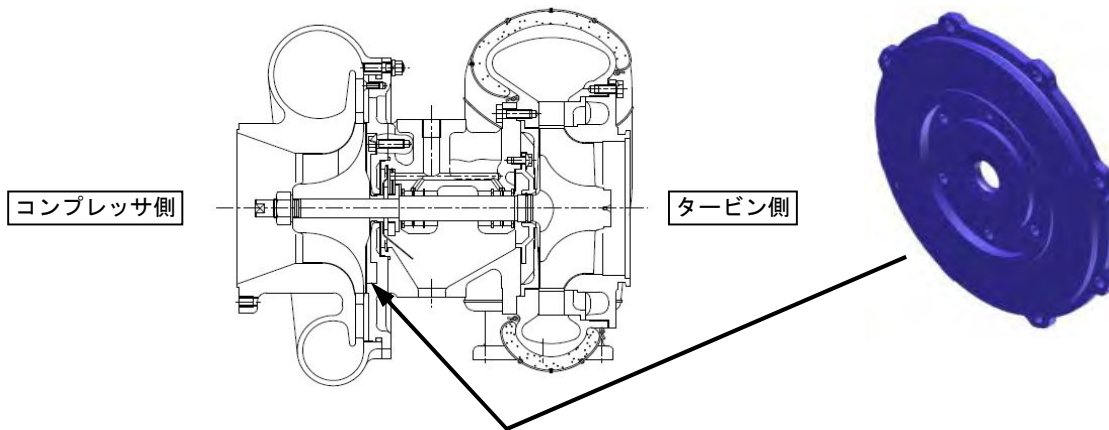


	損傷側過給機 (R2)	健全側過給機 (L2)
コンプレッサ側		
タービン側		

異常は認められなかった。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

コンプレッサプレート(5)

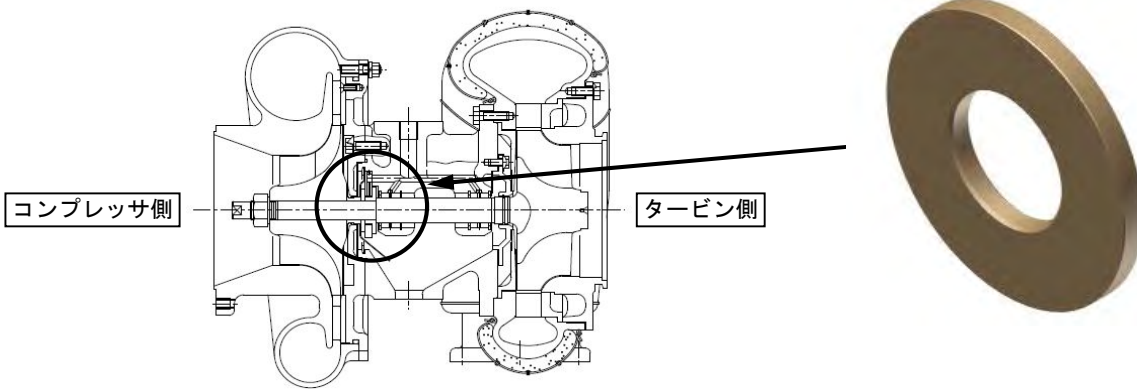


	損傷側過給機 (R2)	健全側過給機 (L2)
コンプレッサ側		
タービン側		

タービン側の一部に今回の不完全燃焼により発生したと推定されるすす状の汚れが見られるが、傷・変形などの異常は認められなかった。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

スラストリング(コンプレッサ側)(6)

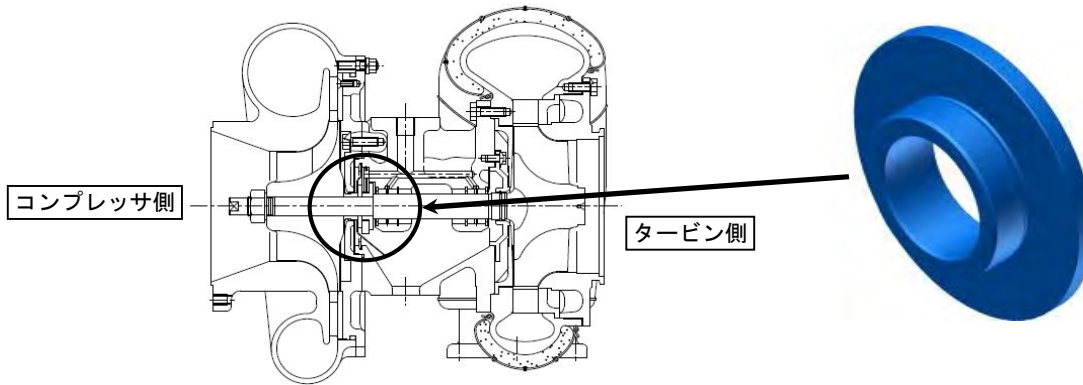


	損傷側過給機(R2)	健全側過給機(L2)
コンプレッサ側		
タービン側		

スラストベアリングとの接触面に軽微な摺動跡が認められるが、健全品と同程度であり、異常は認められなかった。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

スラストリング(タービン側)(7)

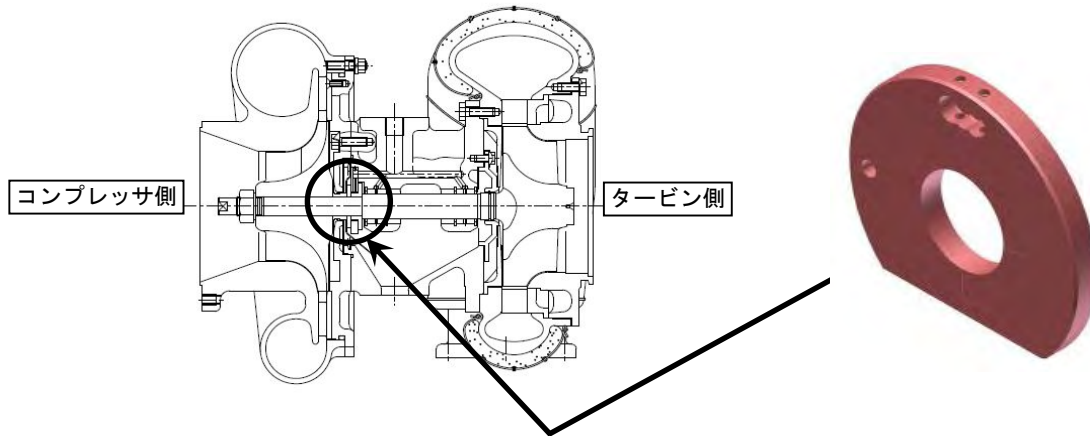




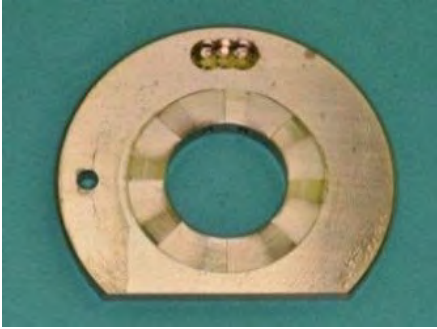
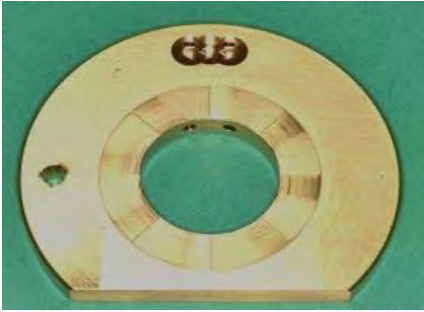
	損傷側過給機(R2)	健全側過給機(L2)
コンプレッサ側		
タービン側		

スラストベアリングとの接触面に軽微な摺動跡が認められるが、健全品と同程度であり、異常は認められなかった。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

スラストベアリング(8)

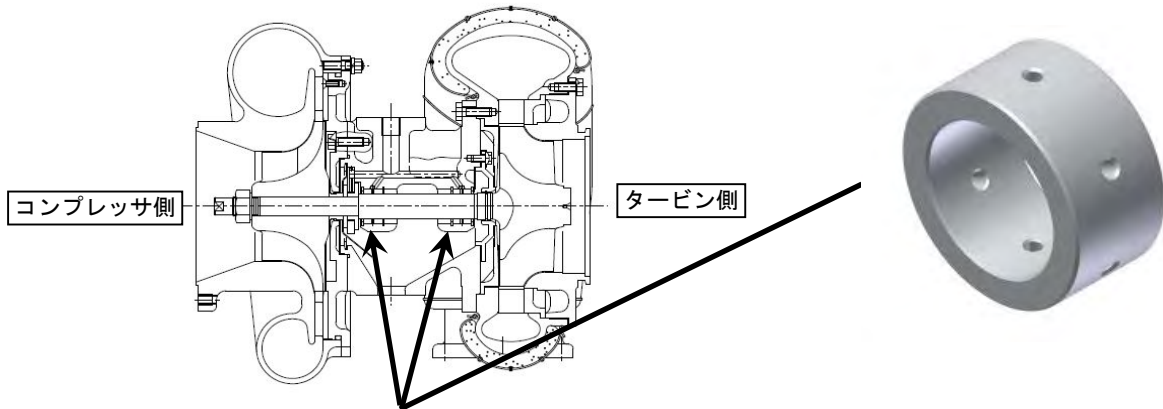


	損傷側過給機(R2)	健全側過給機(L2)
コンプレッサ側		
タービン側		

異常な摩耗等は認められなかった。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

ベアリング(9)

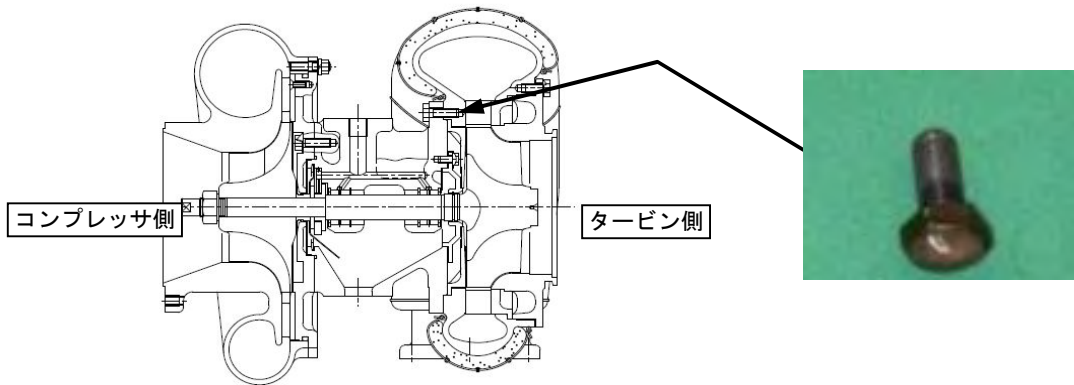


	損傷側過給機(R2)	健全側過給機(L2)
コンプレッサ側		
タービン側		

若干の擦り傷は認められたものの、焼付き等の異常は認められなかった。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

タービンハウジングボルト(10)

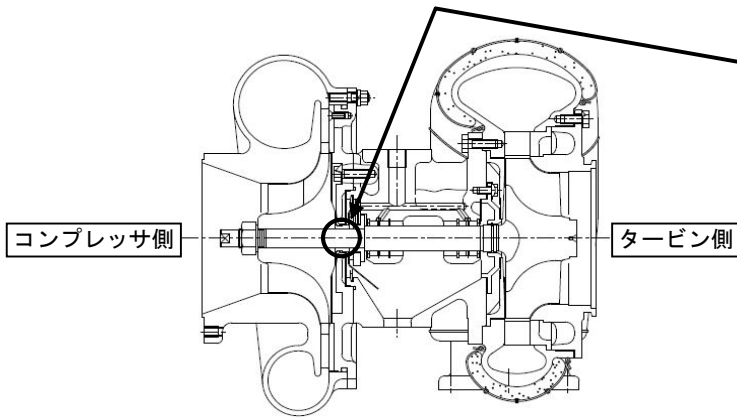


損傷側過給機(R2)	健全側過給機(L2)
<p>ボルト ① ボルト ② ボルト ③ ボルト ④ ボルト ⑦</p> <p>ボルト ⑤ ボルト ⑥ ボルト ⑩ ボルト ⑪ ボルト ⑫</p> <p>脱落したボルト</p>	<p>⑫ ① ⑩ ⑨ ⑧ ⑦</p> <p>⑬ ⑤ ⑭ ③ ② ④</p>

12本中、2本の脱落が認められたが、脱落していたボルトのネジ部に摩耗等の異常は認められなかった。脱落した2本は、タービンバックプレートの欠損部位に相当する。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

フリンガスリーブ(11)

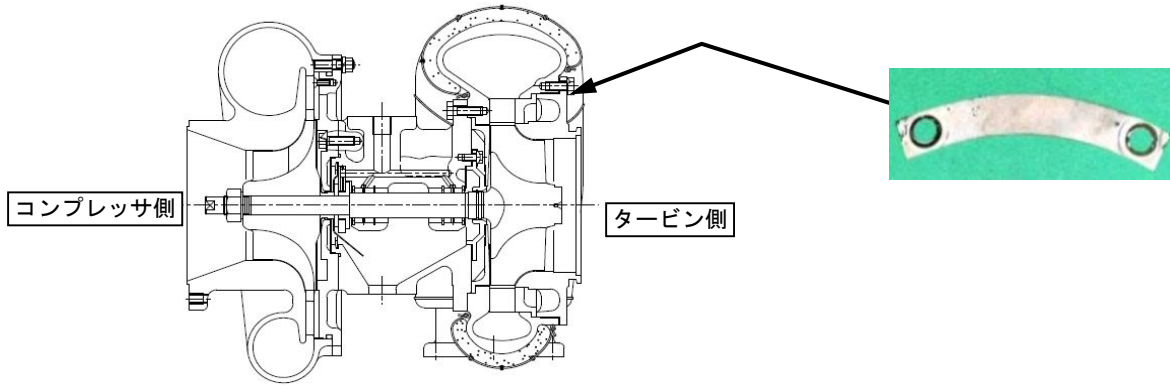


	損傷側過給機(R2)	健全側過給機(L2)
コンプレッサ側		
タービン側		

有意な異常は認められなかったもののコンプレッサホイールとの接触面に摺動跡が認められた。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

ロックプレート(12)

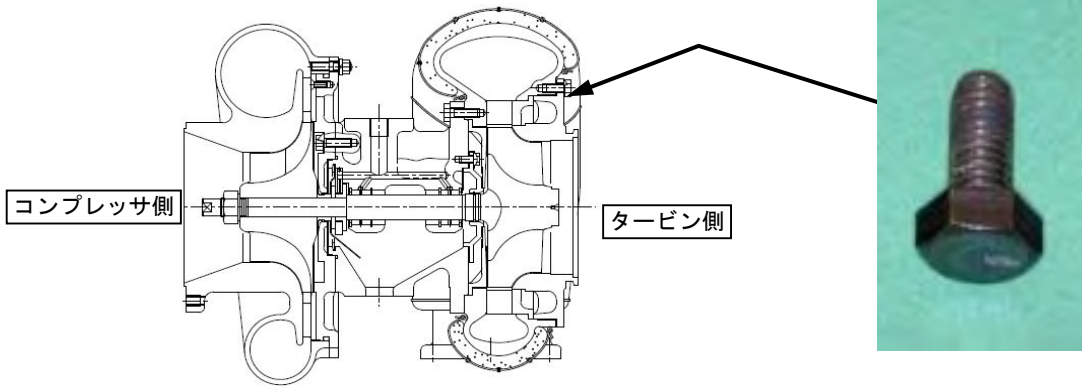


<p>損傷側過給機(R2)</p>	<p>健全側過給機(L2)</p>

全数過給機本体から外れており、ねじれによる変形が認められた。コンプレッサ側のロックプレートに異常は認められなかった。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

フランジ取付ボルト(13)

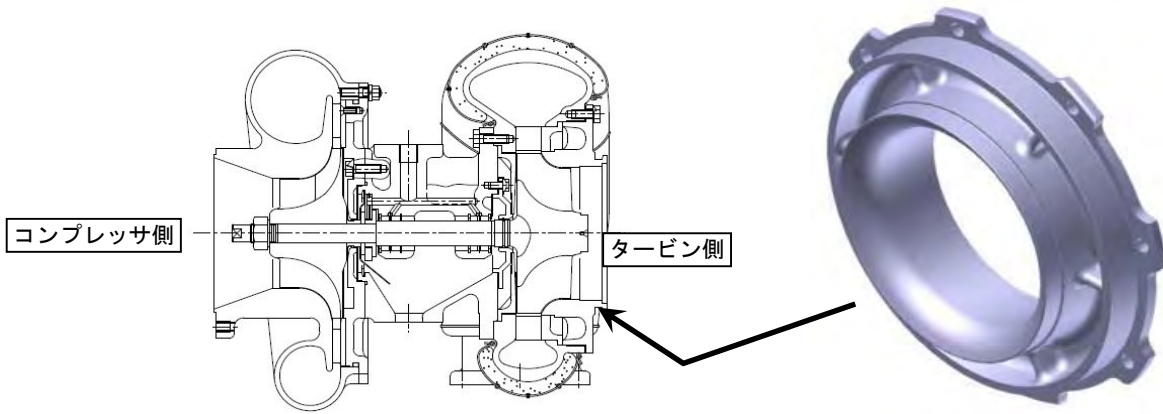


損傷側過給機(R2)	健全側過給機(L2)

8本のうち1本は外れており、7本はネジ部途中にて折損が認められた。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

フランジ(14)

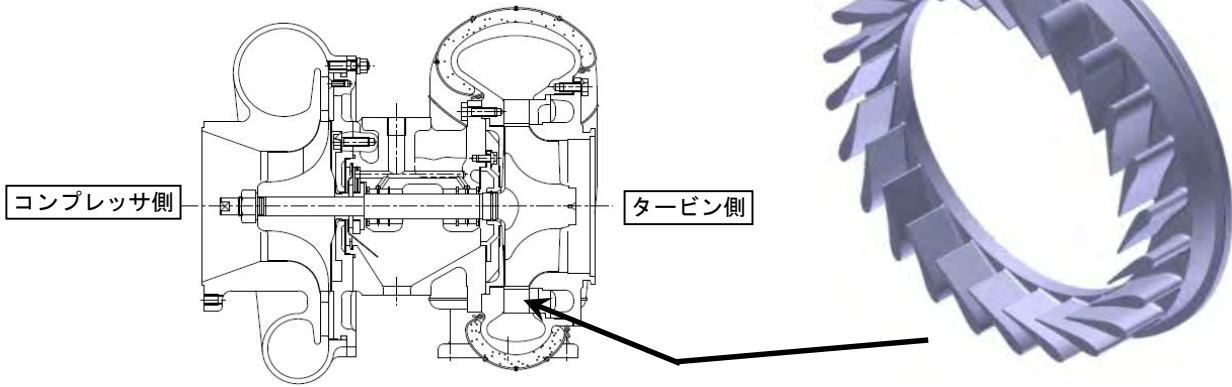


	損傷側過給機(R2)	健全側過給機(L2)
コンプレッサ側		
タービン側		

フランジ内周部に損傷および一部に欠損が認められた。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

ノズルリング(15)

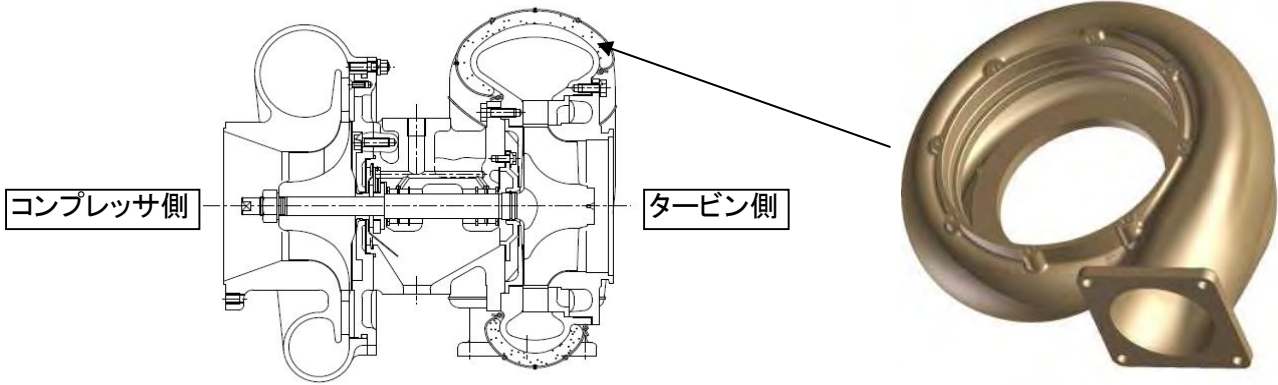


	損傷側過給機(R2)	健全側過給機(L2)
コンプレッサ側		
タービン側		

全ての翼について損傷しており、全体が大きく変形していた。

A-DG過給機外観目視点検結果 (工場)

タービンハウジング(16)

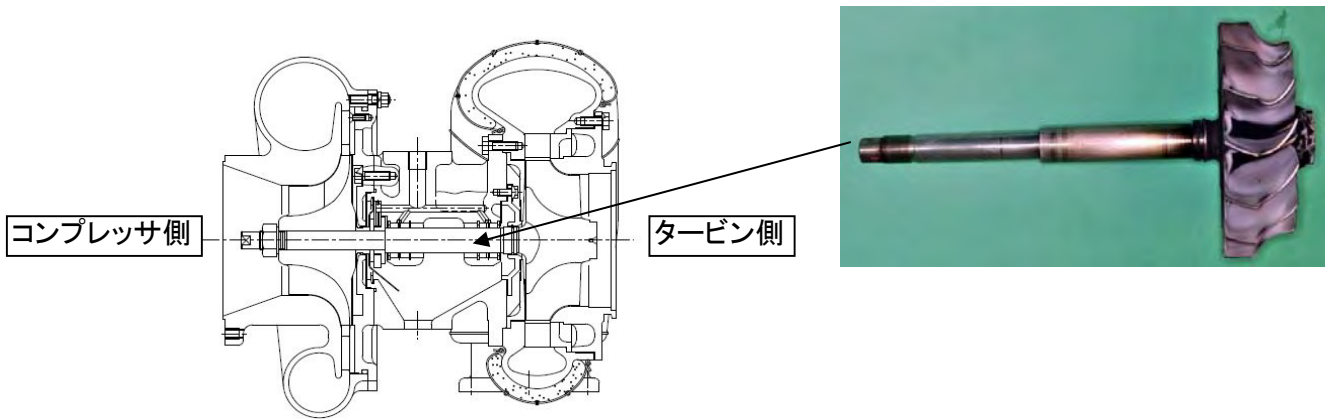



	損傷側過給機(R2)	健全側過給機(L2)
コンプレッサ側		
タービン側		
周辺		

タービンハウジングの一部に貫通したひび割れが認められた。

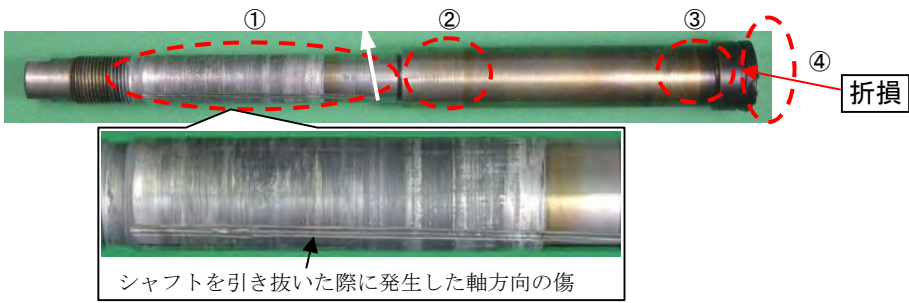
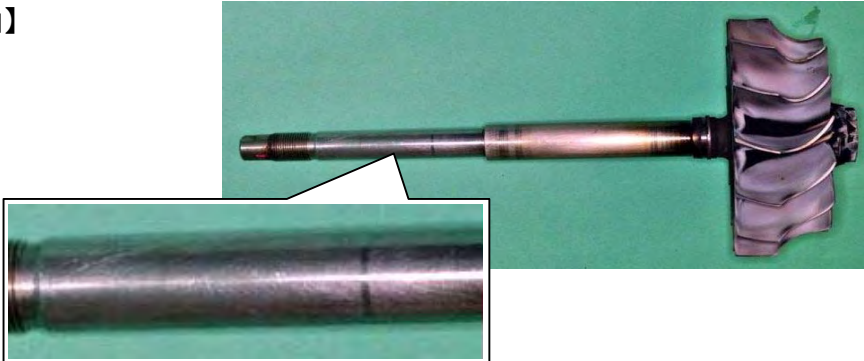
A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

タービンロータ(シャフト全体)(17)



	損傷側過給機(R2)	健全側過給機(L2)
折損断面	 <p>タービンホイールとの接合面は折損</p>	健全軸であり折損面なし

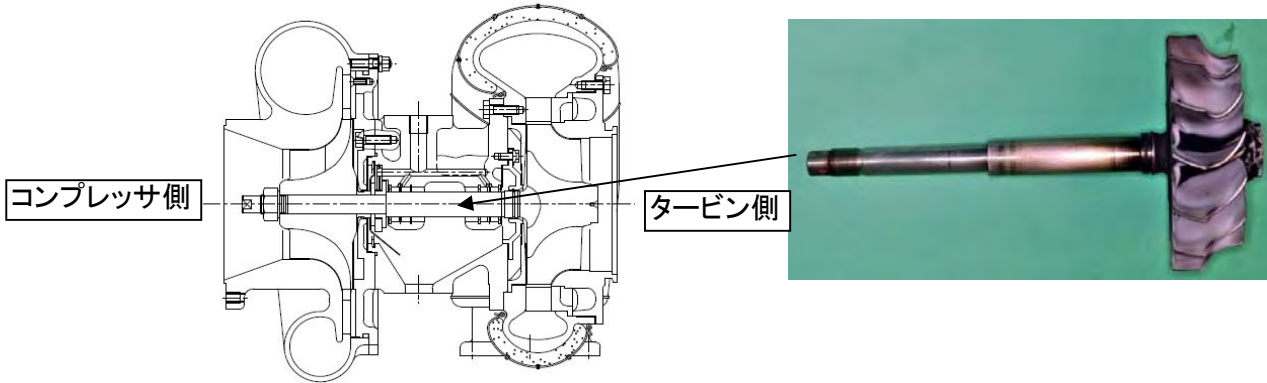
タービンロータ折損軸

損傷側過給機 (R2)	<p>【折損軸】</p>  <p>① コンプレッサホイール取付け部において、周方向に複数の摺動跡が認められた。 ②③ ベ어링部に微小な摺動跡および変色が見られるが、焼付き跡は認められなかった。 ④ タービンホイールとの接合面は、溶接部で折損していた。 なお、一部に今回の分解時にシャフトを引き抜いた際に発生した軸方向の傷が認められた。</p>
健全側過給機 (L2)	<p>【健全軸】</p> 

- ① コンプレッサホイール取付け部において、周方向に複数の摺動跡が認められた。
 - ②③ ベ어링部に微小な摺動跡および変色が見られるが、焼付き跡は認められなかった。
 - ④ タービンホイールとの接合面は、溶接部で折損していた。
- なお、一部に今回の分解時にシャフトを引き抜いた際に発生した軸方向の傷が認められた。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

タービンロータ(タービンホイール全体)(17)

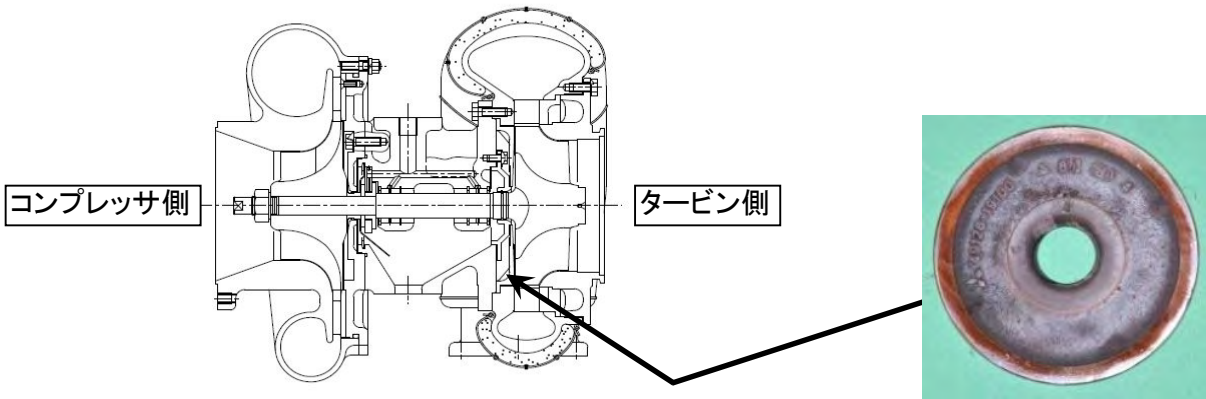


	損傷側過給機 (R2)	健全側過給機 (L2)
タービン側		
側面	<p>コンプレッサ側</p> <p>タービン側</p>	<p>コンプレッサ側</p> <p>タービン側</p>

シャフト溶接部で折損しており、全ての翼は大きく破損していた。また中心部(ハブ部)付近からの破損も認められた。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

タービンバックプレート(18)

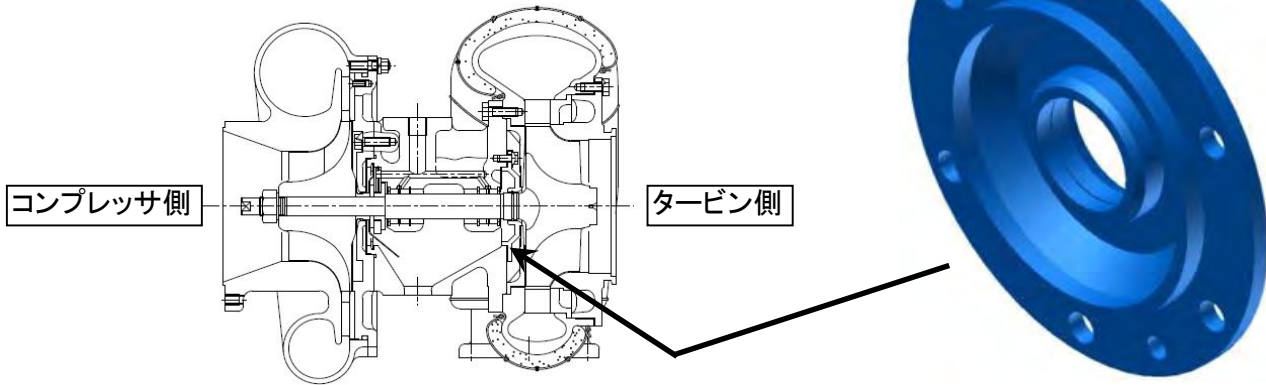


	損傷側過給機 (R2)	健全側過給機 (L2)
コンプレッサ側		
タービン側		

一部が欠損するとともに、ひび割れ、変形等が認められた。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

ラビリンスプレート(19)

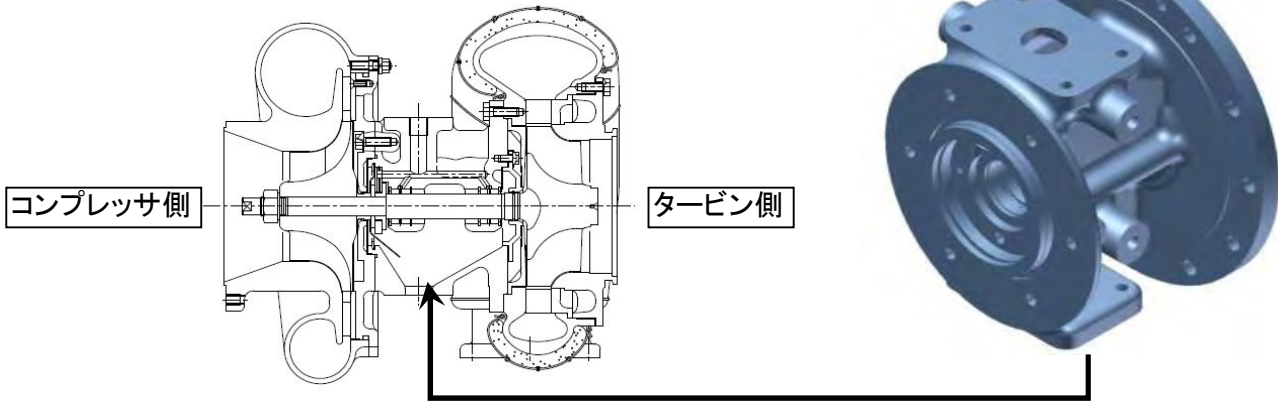


	損傷側過給機 (R2)	健全側過給機 (L2)
コンプレッサ側		
タービン側		

欠損および軸貫通部近傍に接触跡が認められた。

A-DG 過給機外観目視点検結果 (工場)

ベアリングハウジング(20)



	損傷側過給機(R2)	健全側過給機(L2)
コンプレッサ側		
タービン側		

タービン側のフランジ外周部の一部に欠損が認められた。

材料確認結果

1. 過給機の主要材料

材料証明書のあるコンプレッサカバー、コンプレッサホイール、タービンハウジング、タービンロータ、ベアリングハウジングについて規格値以内であることを確認した。

その他については、素材メーカーに対して調達要求として規格が指定されていることを確認した。

No	名 称	材 質
1	コンプレッサカバー	アルミニウム合金鋳物
2	ロックナット	一般構造用圧延鋼材
3	コンプレッサホイール	アルミニウム合金ダイカスト相当品
4	スラストベアリング	銅および銅合金の板並びに条
5	ベアリング	銅および銅合金鋳物
6	ボルト	冷間圧造用ステンレス鋼線
7	フランジ	球状黒鉛鋳鉄品
8	ノズルリング	ステンレス鋼鋳鋼品
9	タービンハウジング	ハイシリコンダクタイル鋳鉄
10	タービンロータ	ニッケル合金鋳物 クロムモリブデン鋼
11	タービンバックプレート	球状黒鉛鋳鉄品
12	ラビリンスプレート	機械構造用炭素鋼鋼材
13	ベアリングハウジング	ねずみ鋳鉄

2. 振れ計測

工場検査時におけるR 2 過給機の振れ計測については判定値内であり、問題なかったことを確認した。

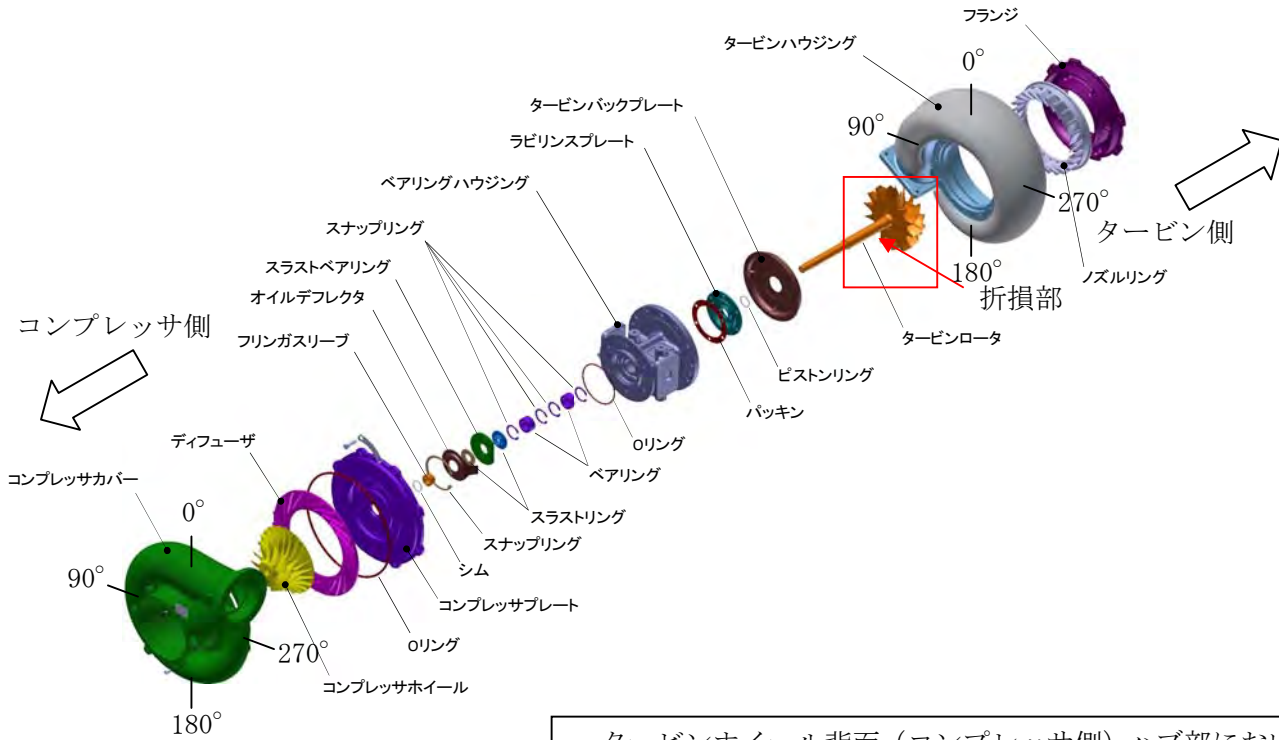
試験項目	試験内容および判定基準	結果
振れ計測試験	軸の振れが判定値以内であることを確認する。	良

	部品名称	結果	備考
コンプレッサ側	ロックナット	良	
	コンプレッサカバー	良	ごくわずかに公差を超える箇所はあるものの、機能上特に問題となるものではない。
	コンプレッサホイール	良	ごくわずかに公差を超える箇所はあるものの、機能上特に問題となるものではない。
	シールリング	良	ごくわずかに公差を超える箇所はあるものの、機能上特に問題となるものではない。
	フリंगाスリーブ	良	ごくわずかに公差を超える箇所はあるものの、機能上特に問題となるものではない。
	ロックプレート	良	
	スラストリング(コンプレッサ側)	良	
	スラストリング(タービン側)	良	
	ディフューザ	良	ごくわずかに公差を超える箇所はあるものの、機能上特に問題となるものではない。
	コンプレッサプレート スラストベアリング	良 良	
ベアリング部	ベアリング(コンプレッサ側)	良	ごくわずかに公差を超える箇所はあるものの、機能上特に問題となるものではない。
	ベアリング(タービン側)	良	ごくわずかに公差を超える箇所はあるものの、機能上特に問題となるものではない。
	ベアリングハウジング	-	タービン側フランジの一部が欠損している。

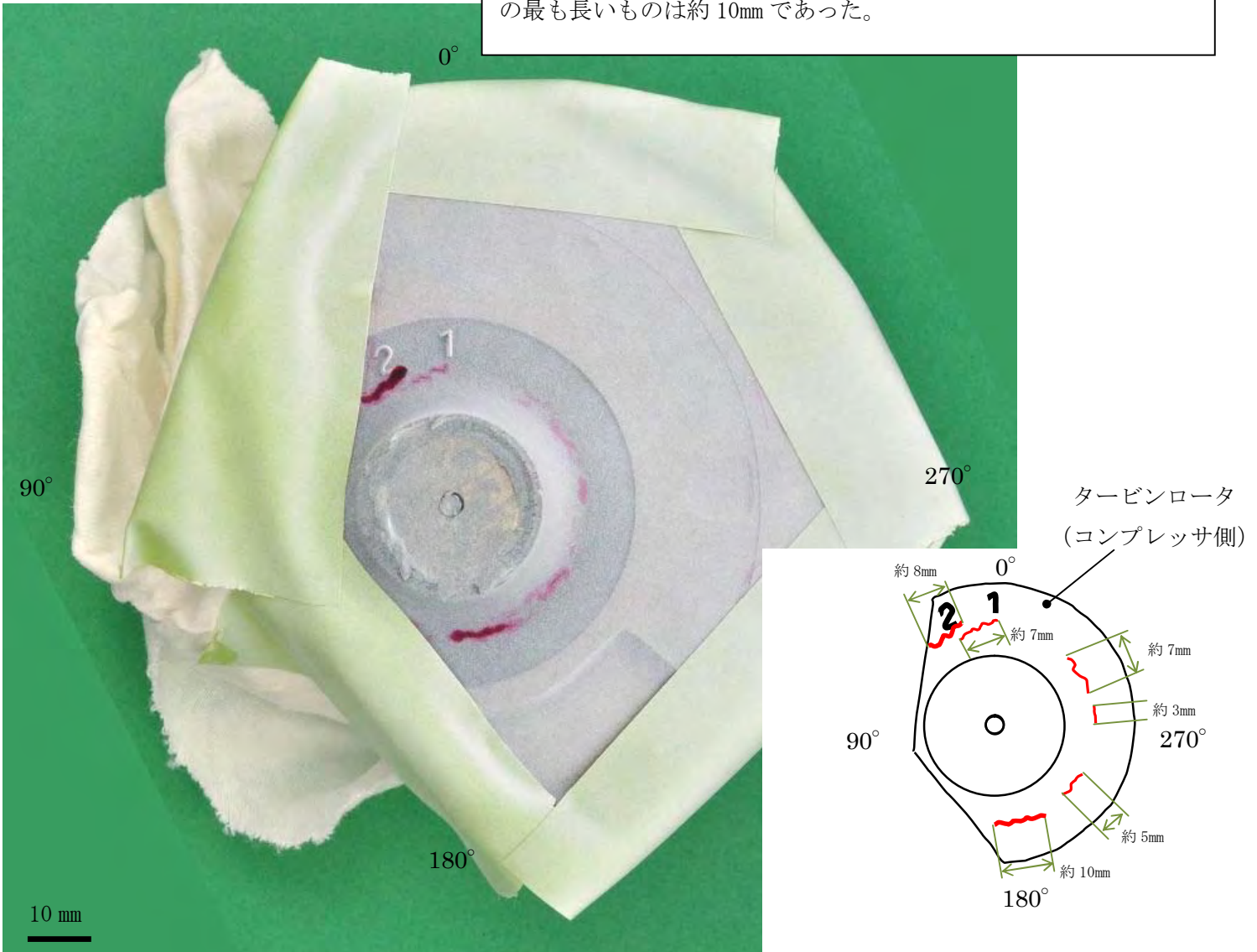
	部品名称	結果	備考
タービン側	パッキン	-	一部のみ残存していた。
	タービンバックプレート	-	タービンホイールとの接触により内面側の1/5程度欠損している。
	ラビリンスプレート	-	タービンホイールとの接触により端部の一部が欠損および接触跡が認められる。
	ノズルリング	-	リングは楕円状に変形し、ブレードは損傷が認められる。
	タービンハウジング	-	全体的に変形、損傷している。
	フランジ	-	全体的に変形、損傷し、端部で一部欠損している。
	タービンホイール	-	翼が大きく破損しており、原形を留めていない。
	タービンロータシャフト	-	タービンホイールとの溶接部で折損している。
	ロックプレート	-	全数にねじれによる変形が認められた。

浸透探傷試験結果

○タービンロータ (タービンホイール) の浸透探傷試験結果



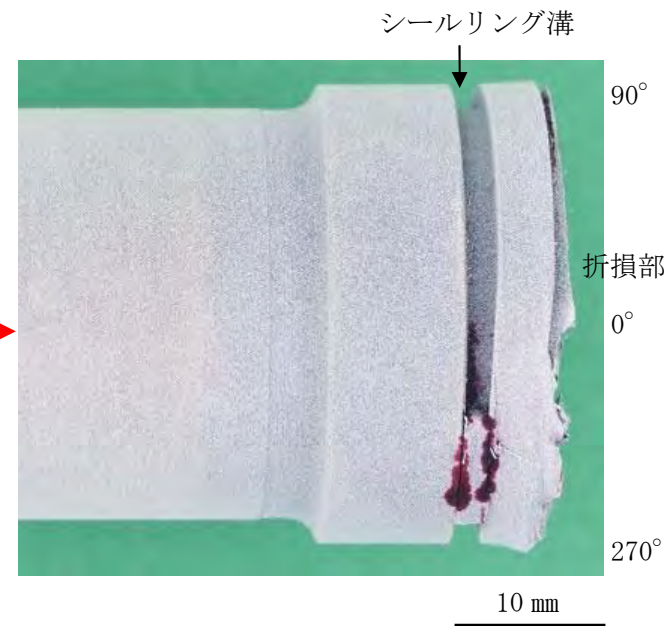
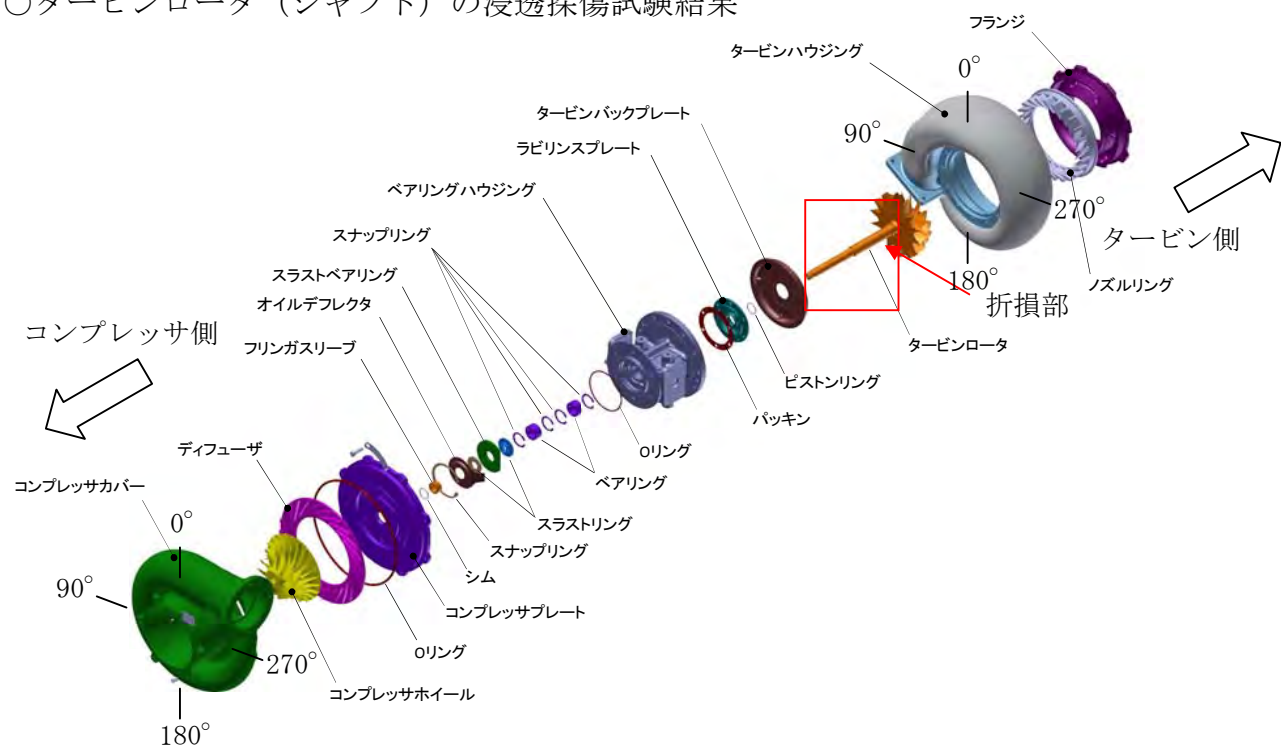
タービンホイール背面 (コンプレッサ側) ハブ部において、中心から約 20mm の位置に円周状の PT 指示が断続的に認められ、PT 指示の最も長いものは約 10mm であった。



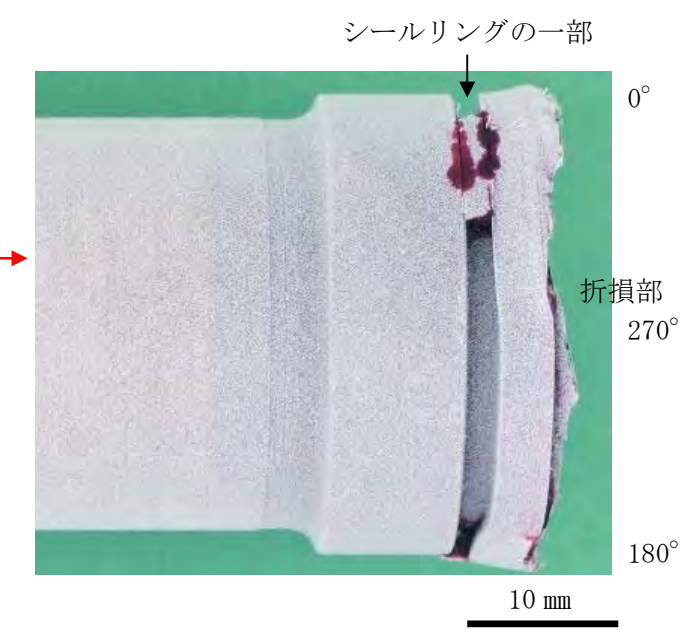
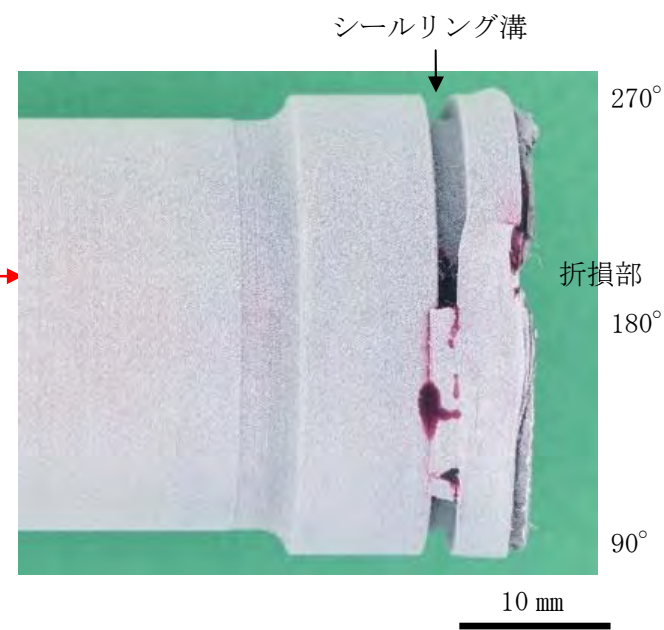
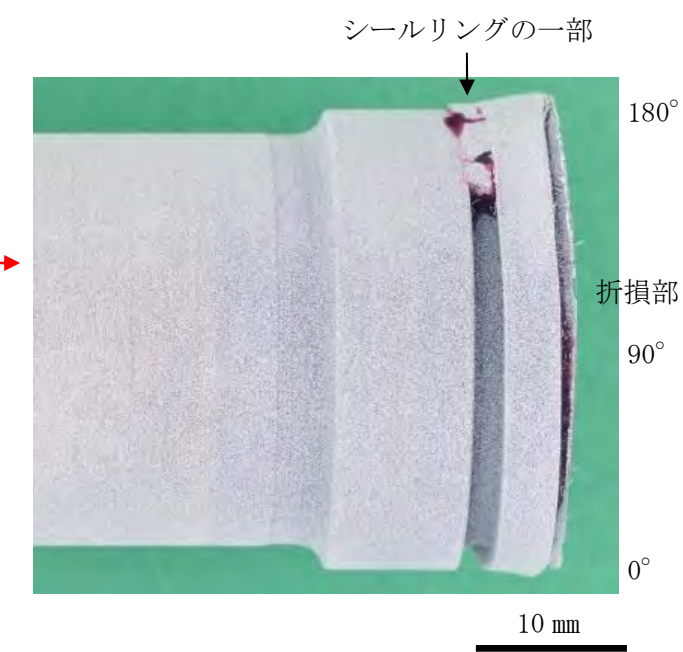
正面：コンプレッサ側

浸透探傷試験結果

○タービンロータ (シャフト) の浸透探傷試験結果

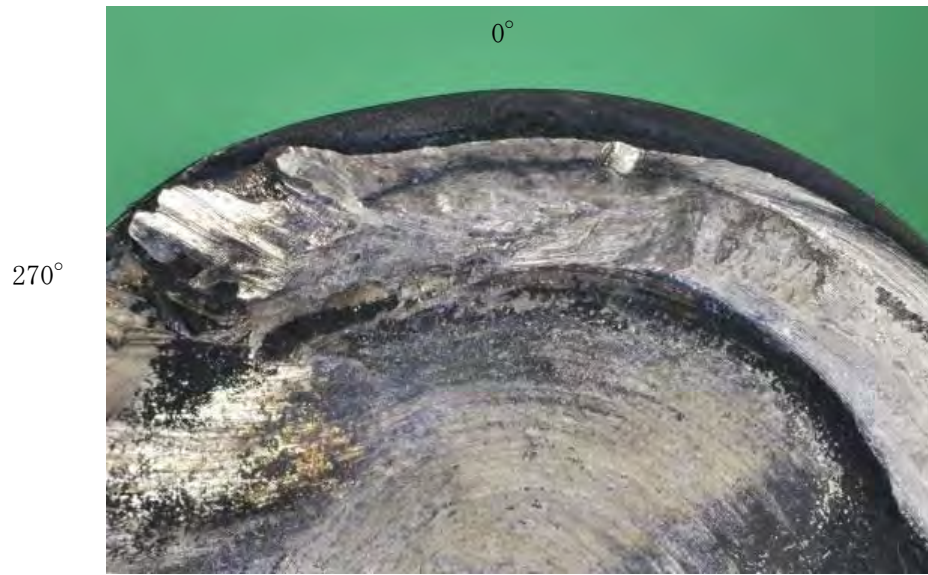
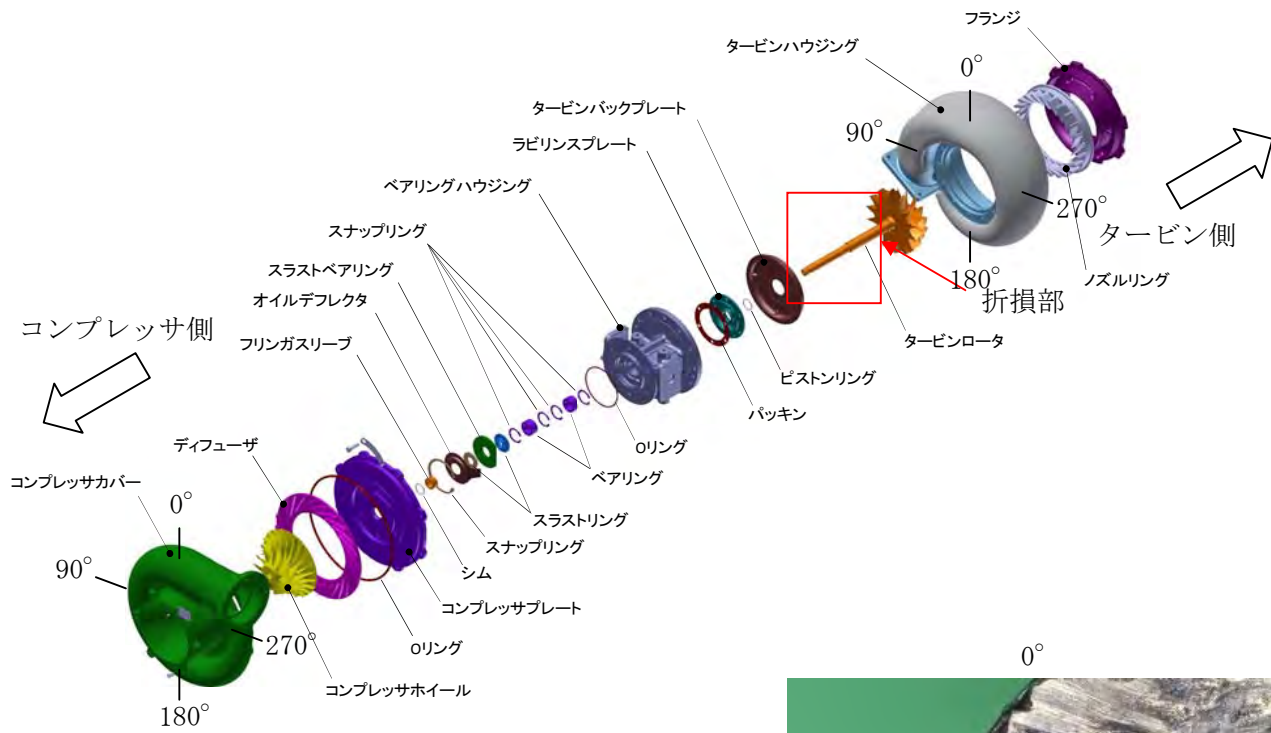


シャフトにはPT 指示は認められなかった。

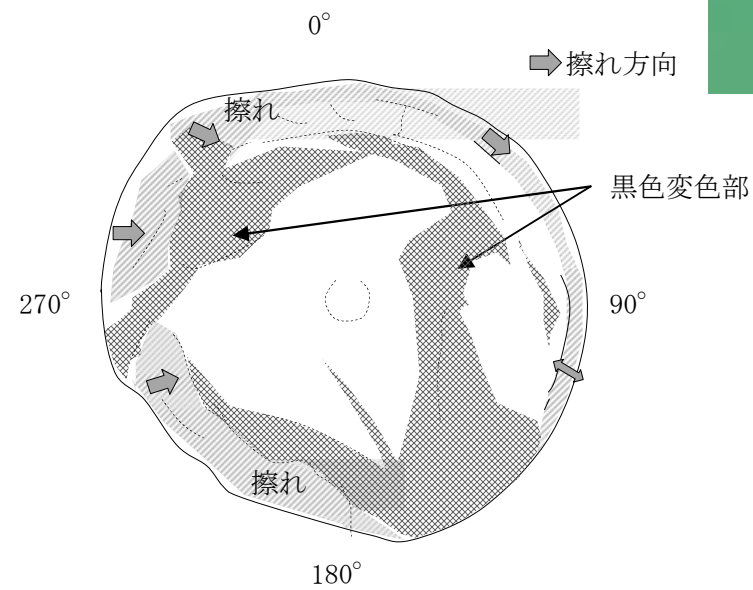
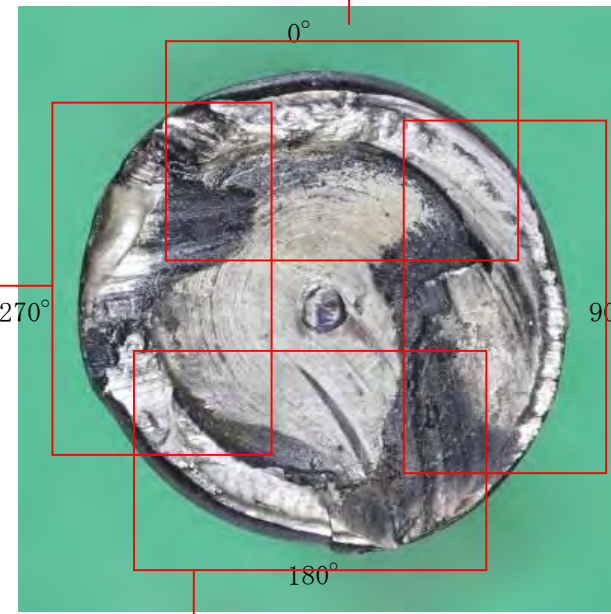


破面観察結果

○タービンロータ（シャフト）の破面外観観察結果

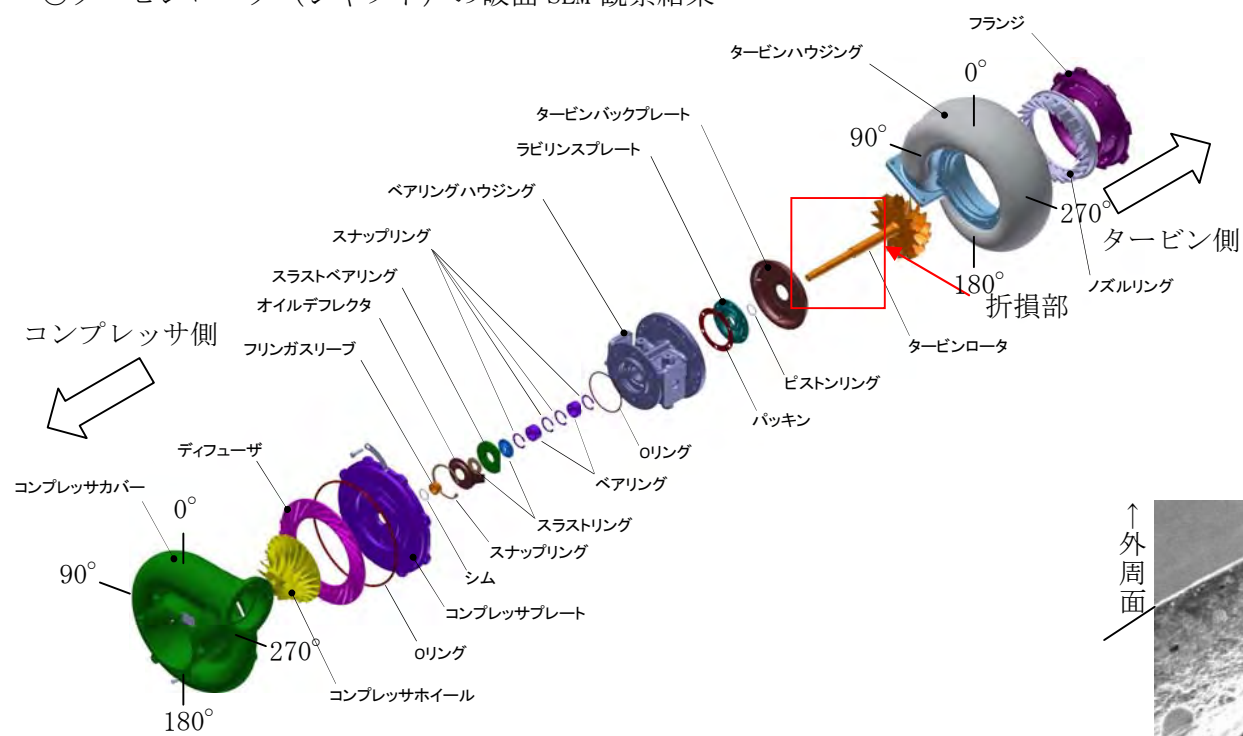


シャフト溶接部が全周に渡って破断しており、損傷部には破断面全体に渡って擦り傷が多数認められた。

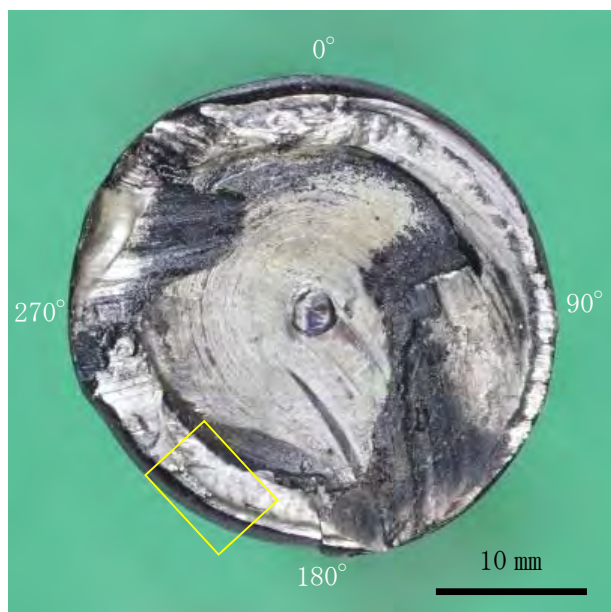


破面観察結果

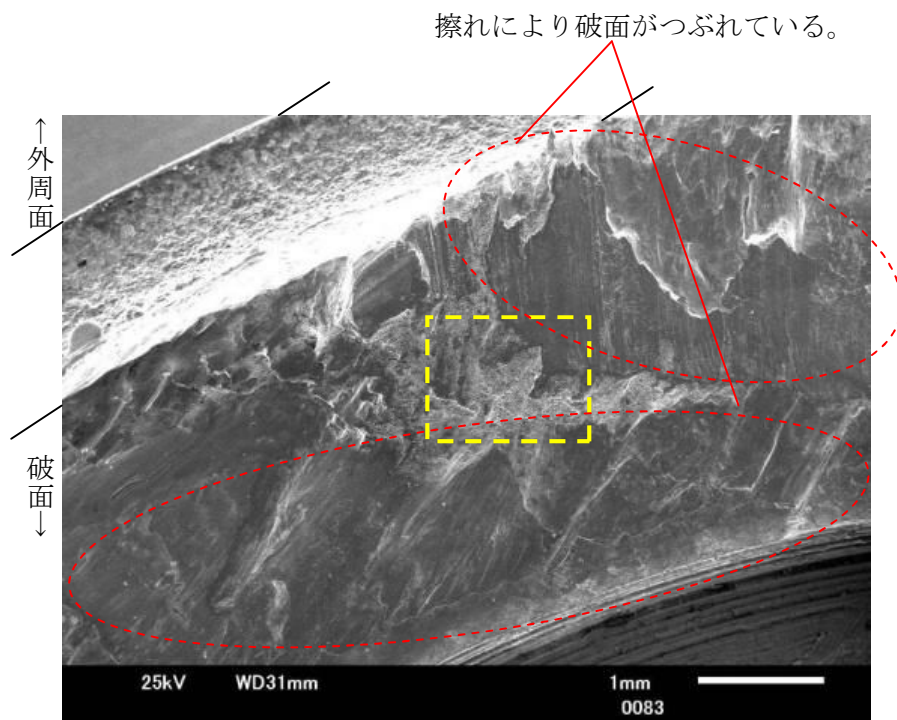
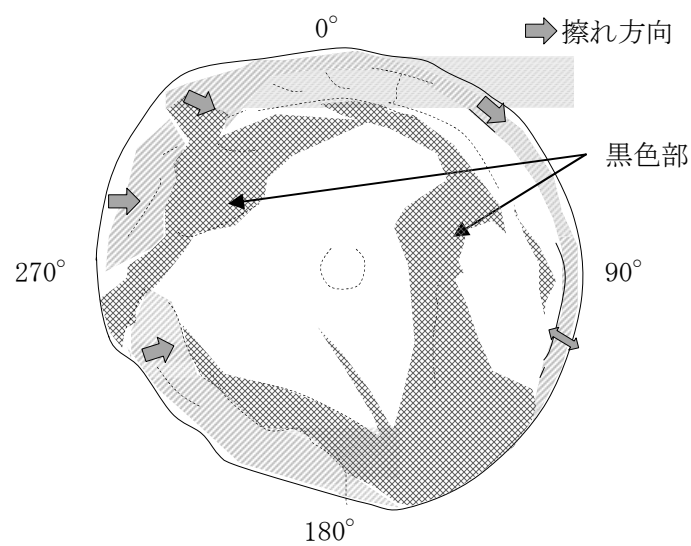
○タービンロータ（シャフト）の破面SEM観察結果



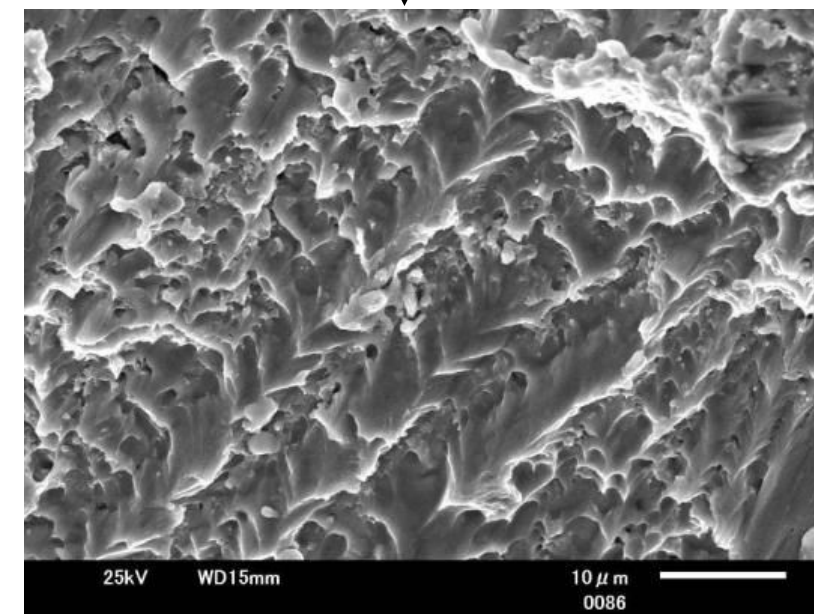
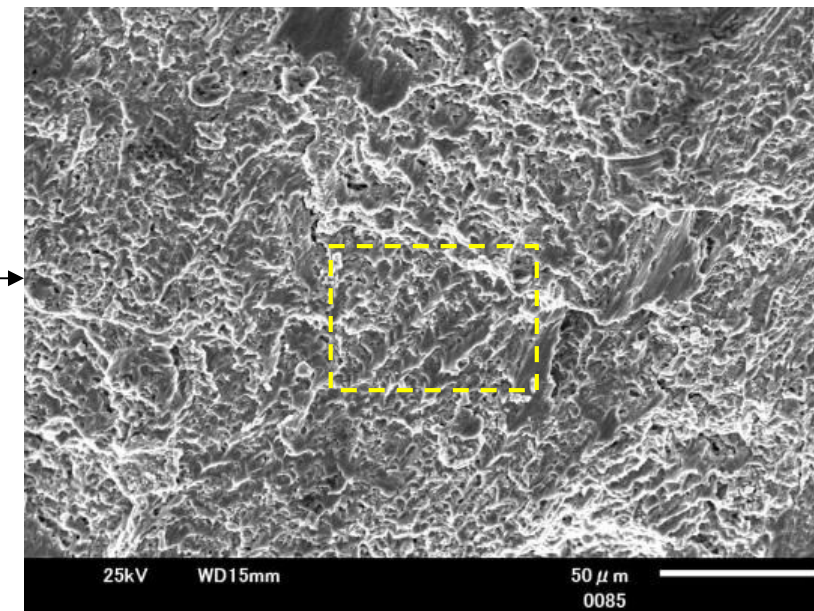
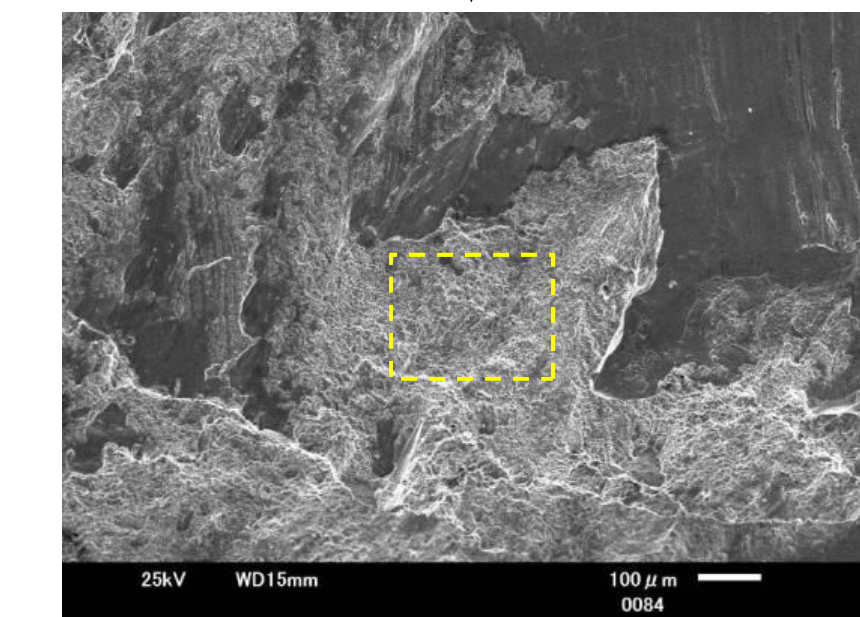
シャフト溶接部の一部の破断部には、延性破壊の特徴であるディンプルが認められ、多少ねじりを含む破面の様相が認められた。その他は、接触跡により明確な破面形態は識別できなかった。



正面：タービン側



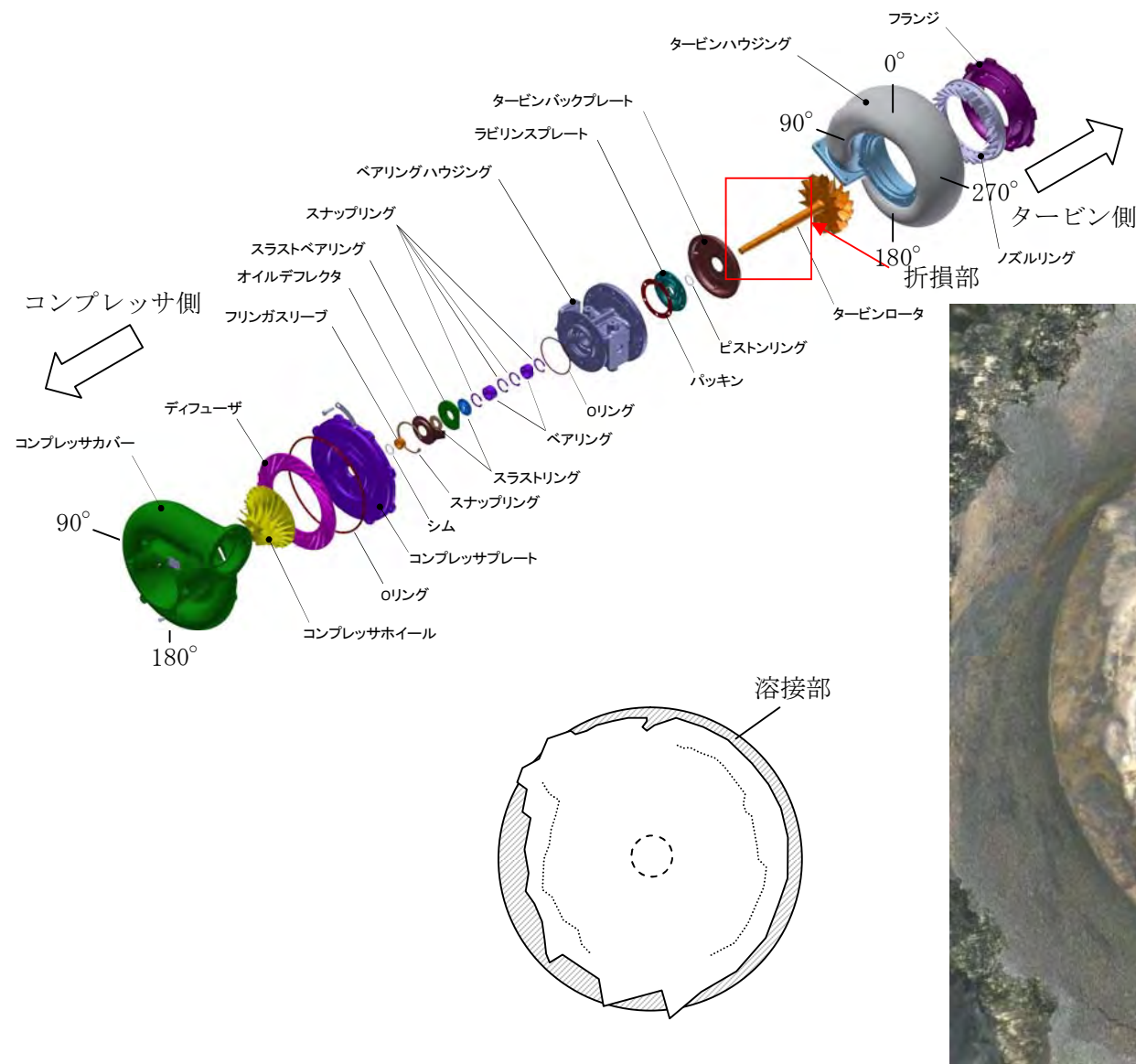
擦れにより破面がつぶれている。



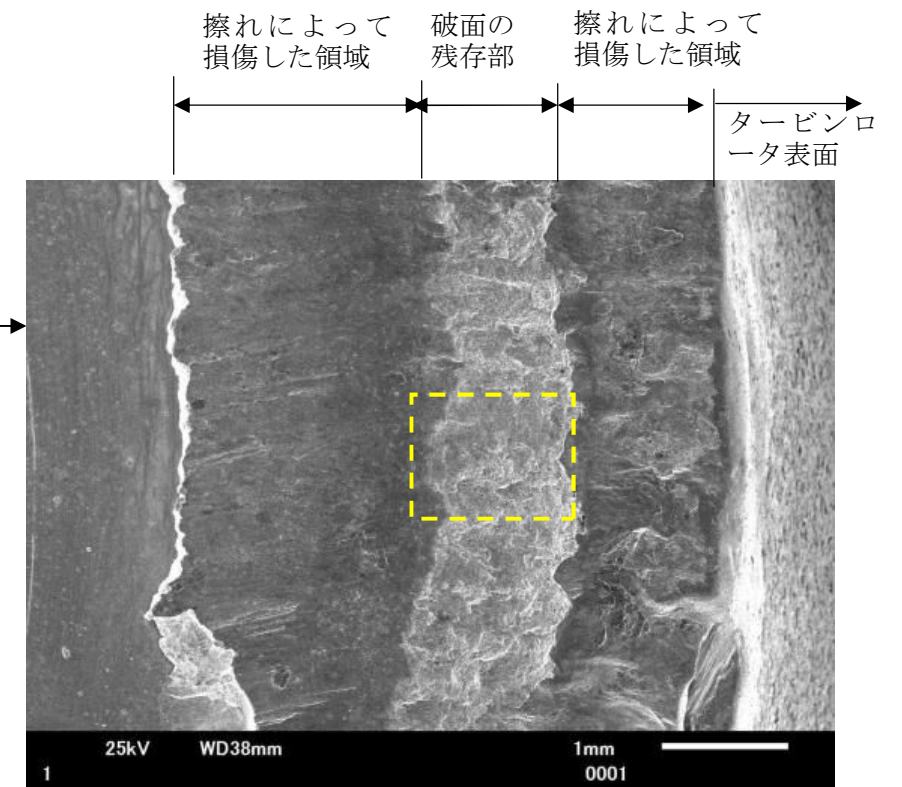
延性破壊の特徴であるディンプル破面と考えられる。

破面観察結果

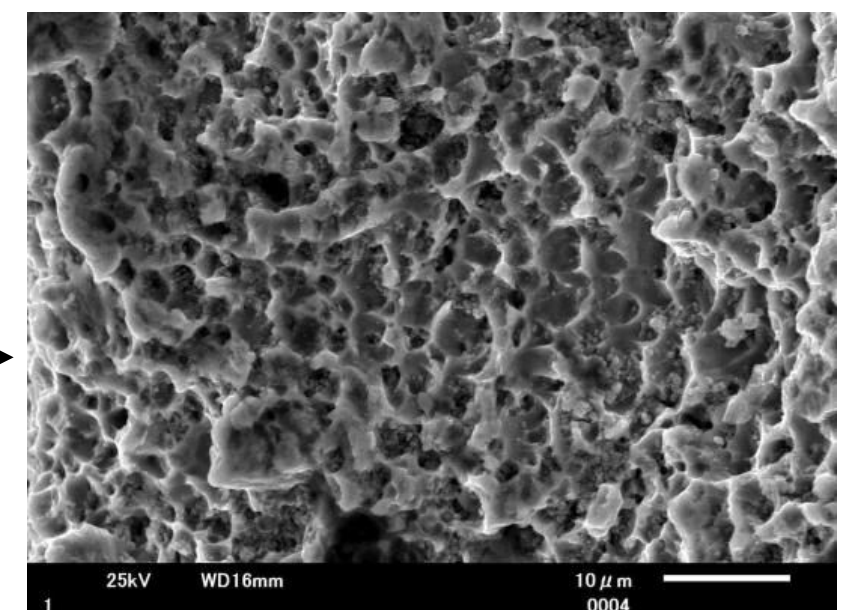
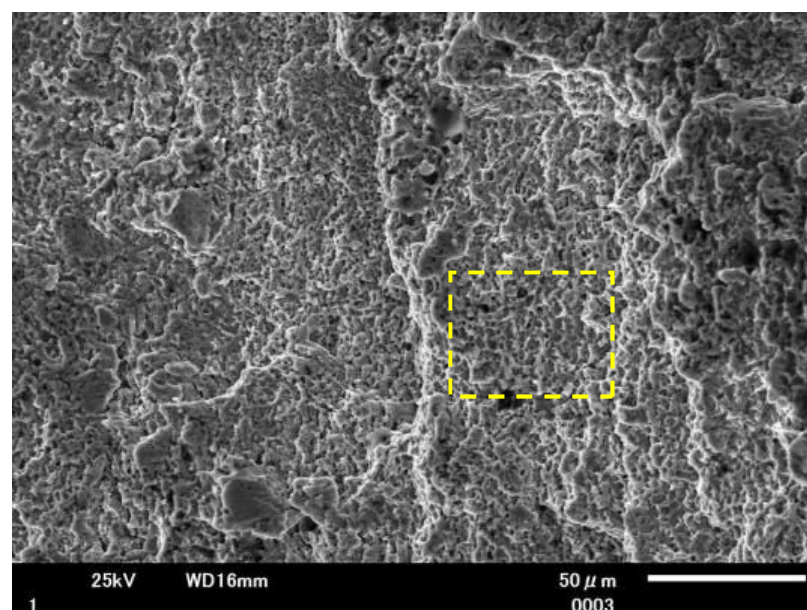
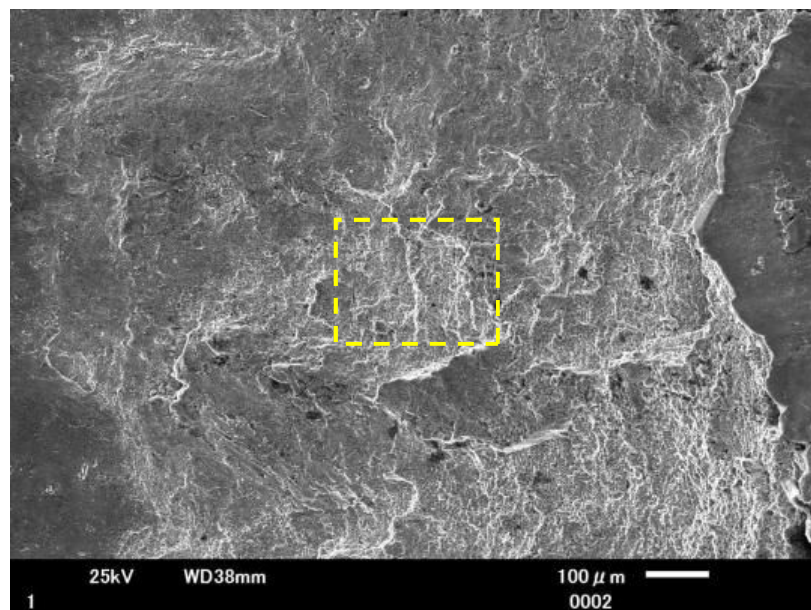
○タービンロータ (タービンホイールシャフト部) の破面 SEM 観察結果



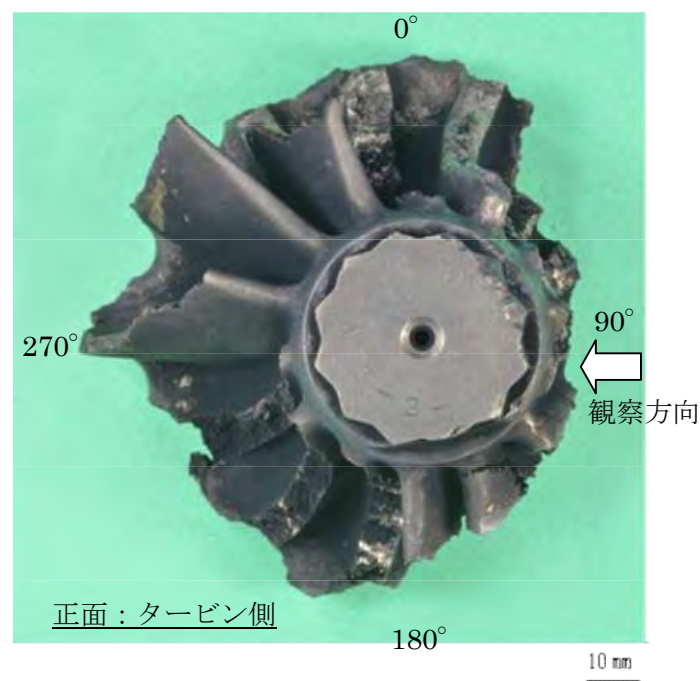
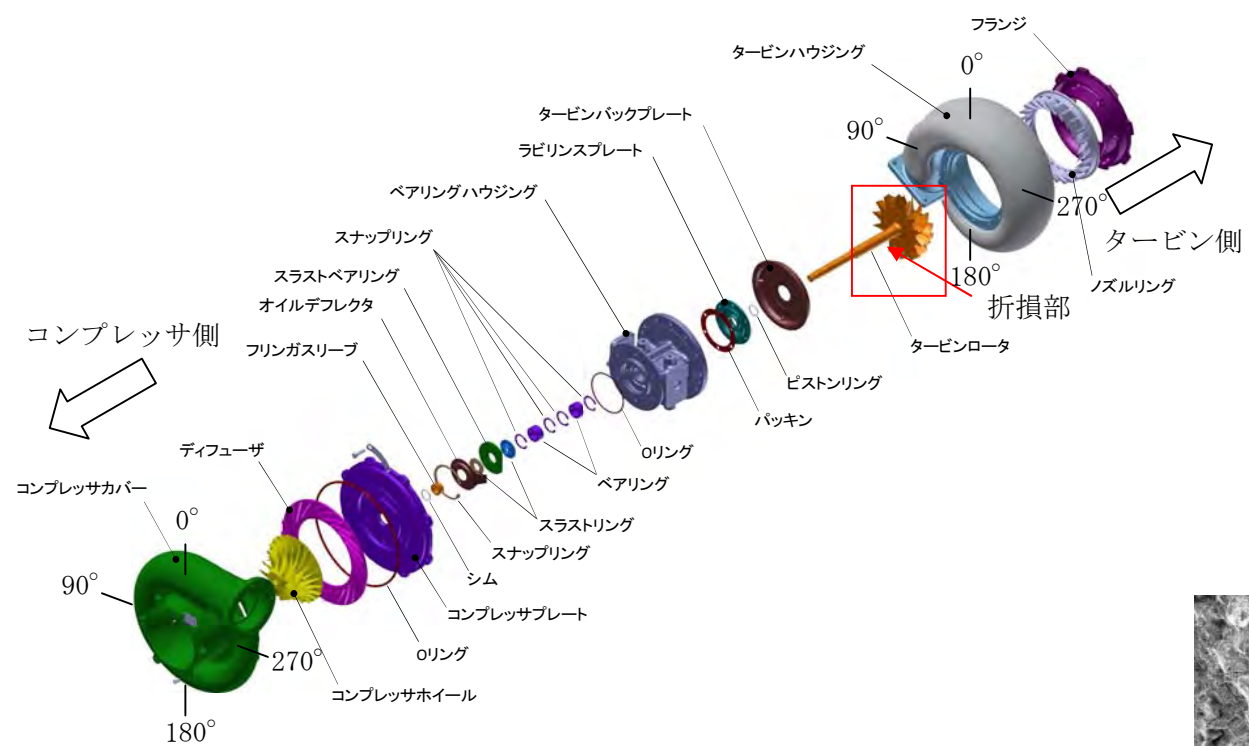
タービンホイール側シャフト折損部は、破断面全体に渡り擦れ傷が多数認められ、一部については、延性破壊の特徴であるディンプルが認められた。



延性破壊の特徴であるディンプル破面

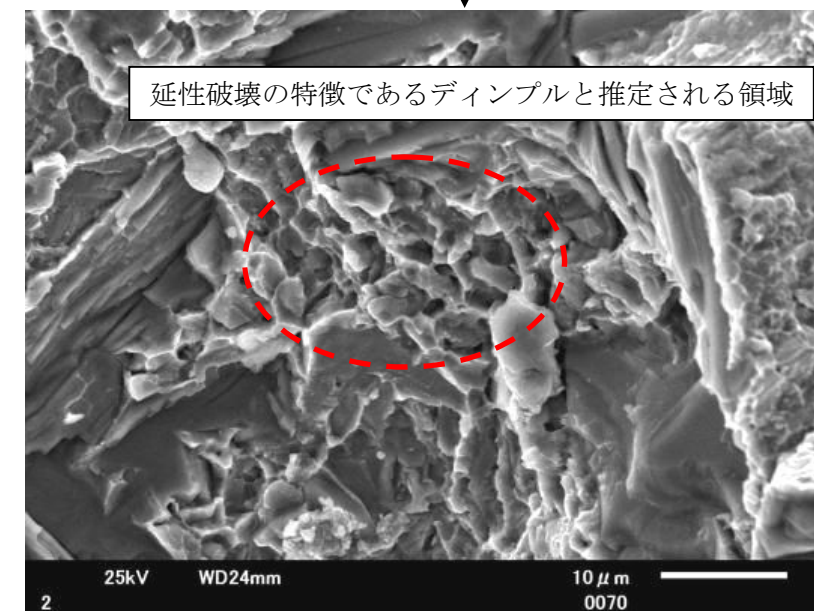
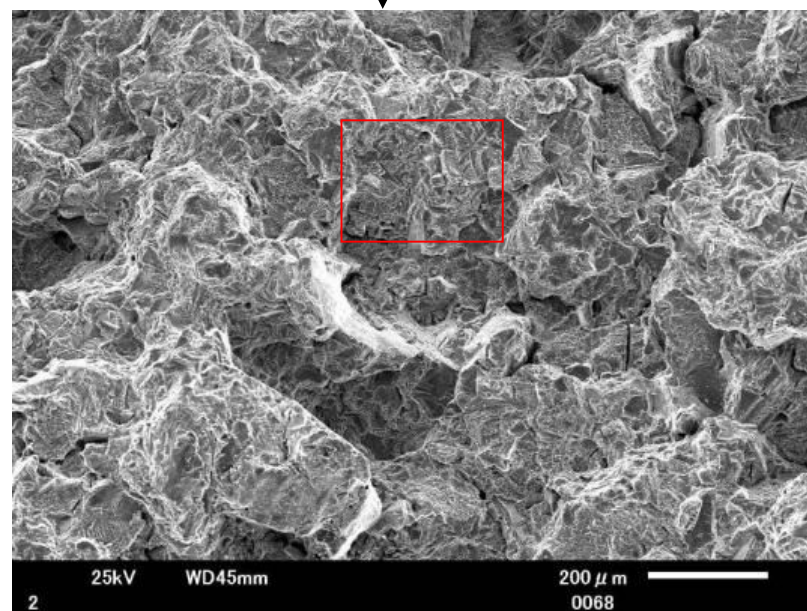
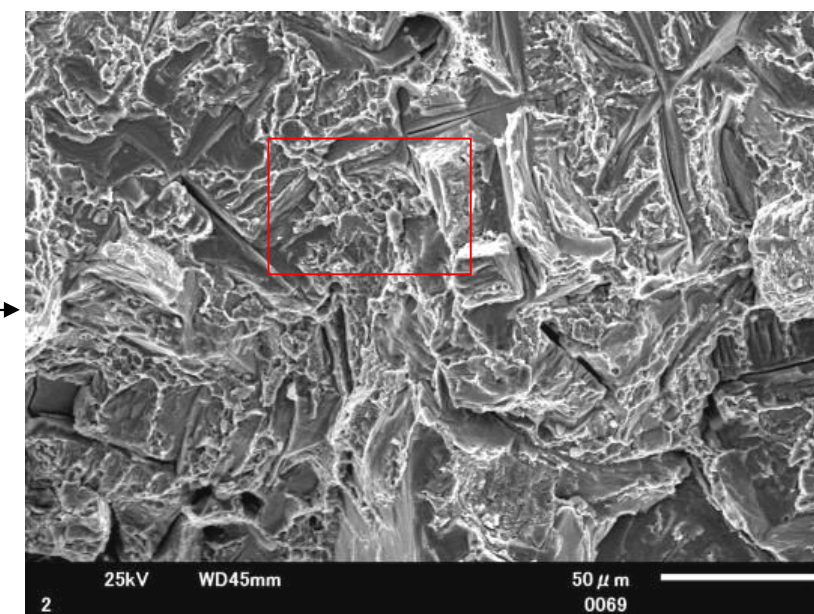
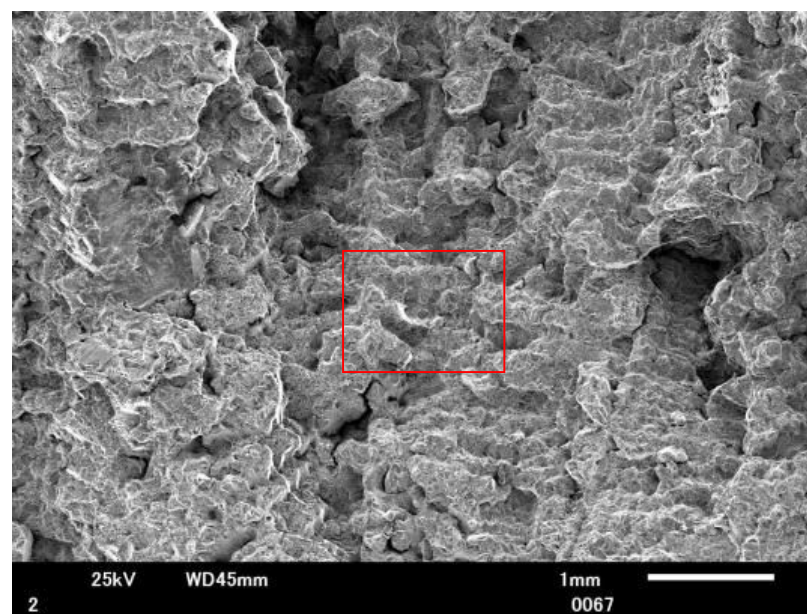


○タービンロータ (タービンホイール) の破面 SEM 観察結果

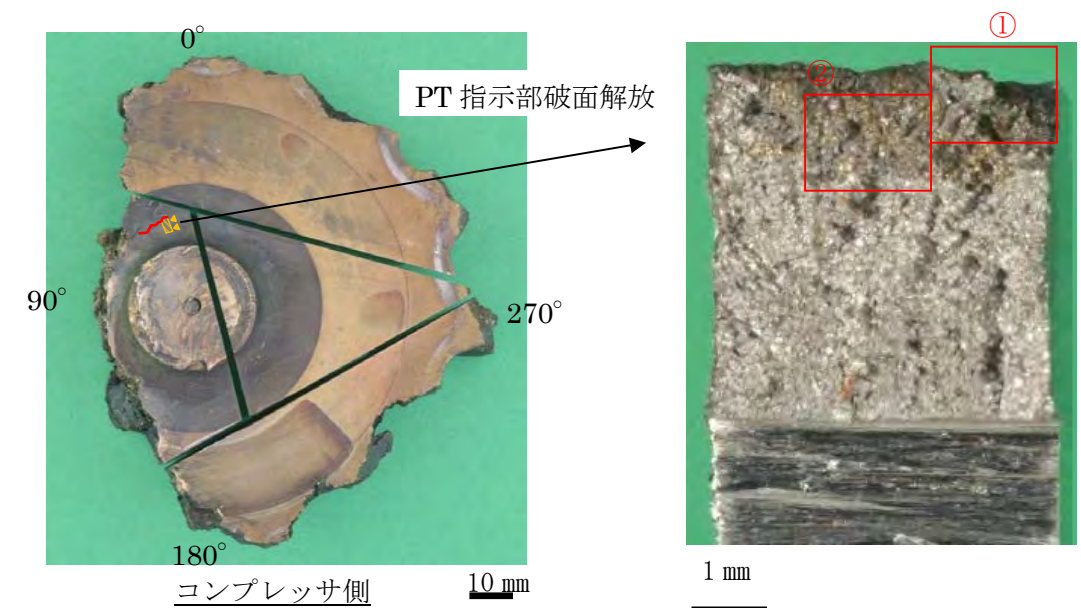
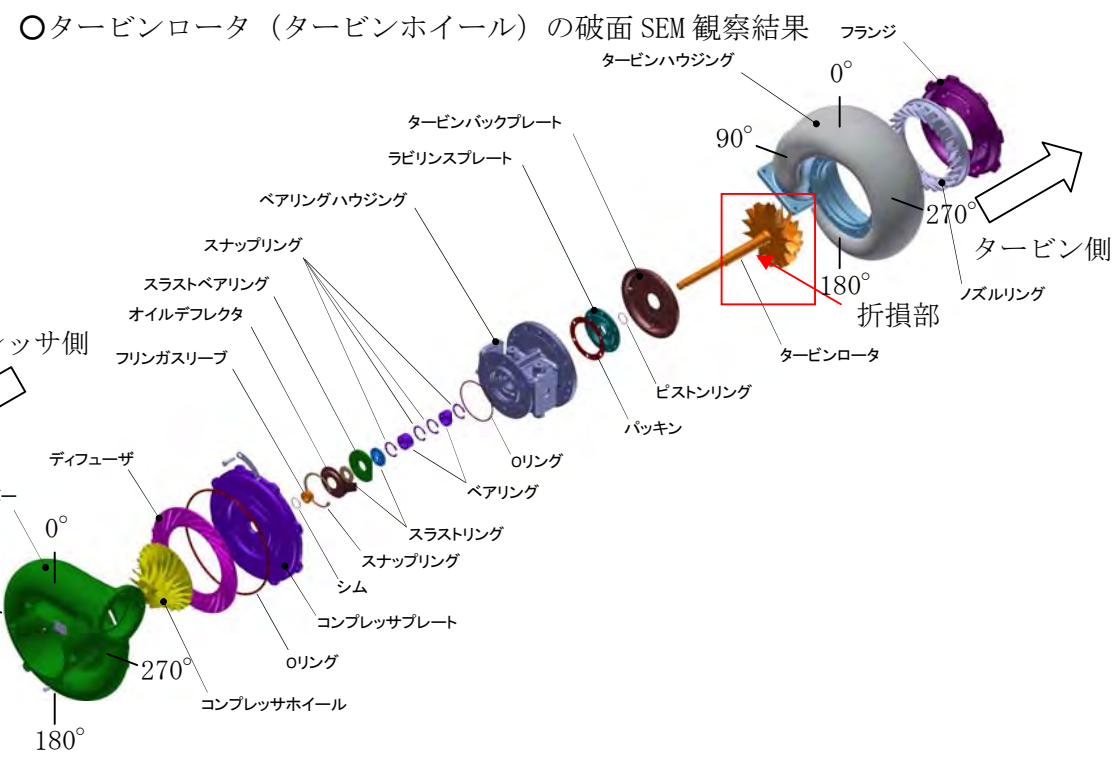


タービンホイール破損部の破面は、全体的に凹凸が大きく、デンドライト (樹枝状晶) 境界に沿った割れの模様が認められるとともに、延性破壊の特徴であるディンプルと推定される破面が部分的に認められた。これらは、強制的に破壊したときに現れる破面であり、観察したものには疲労破面は見られなかった。

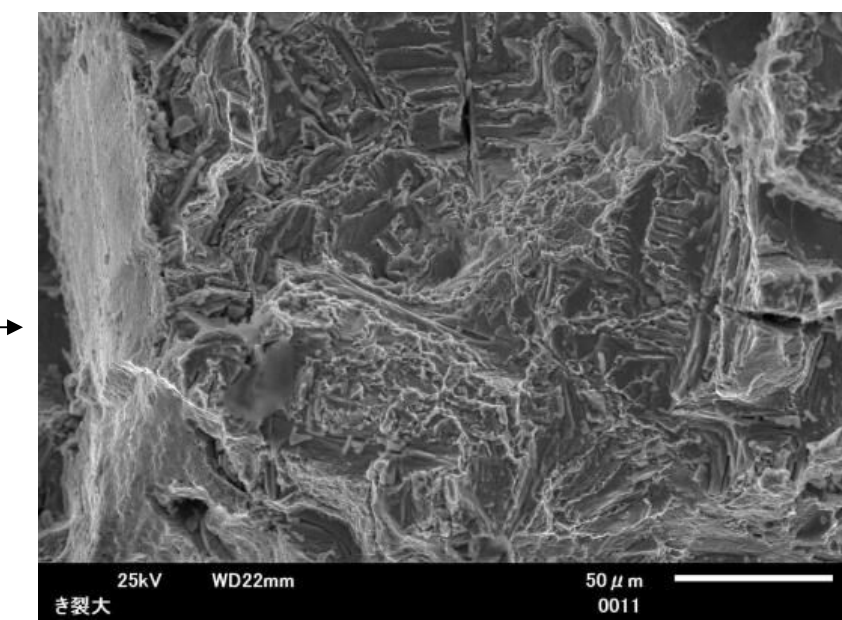
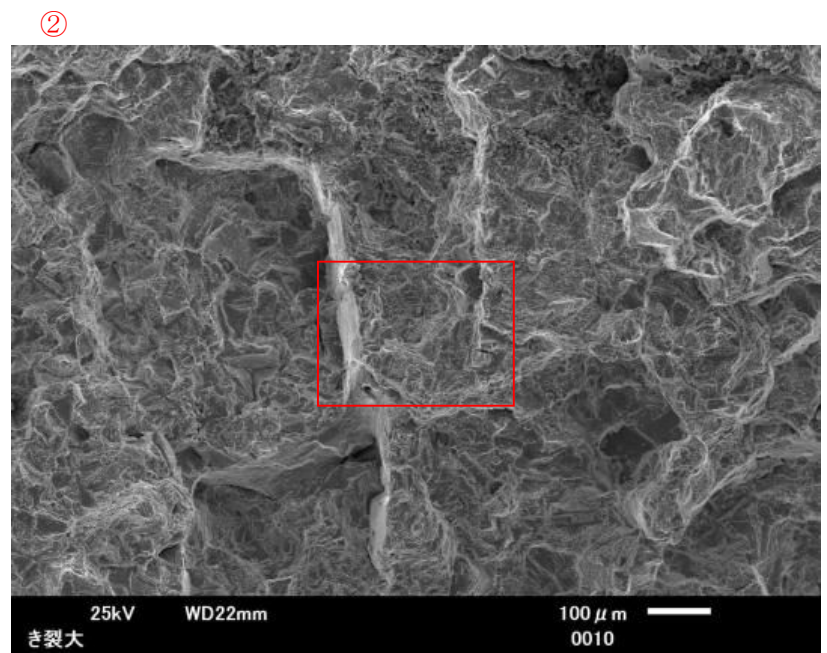
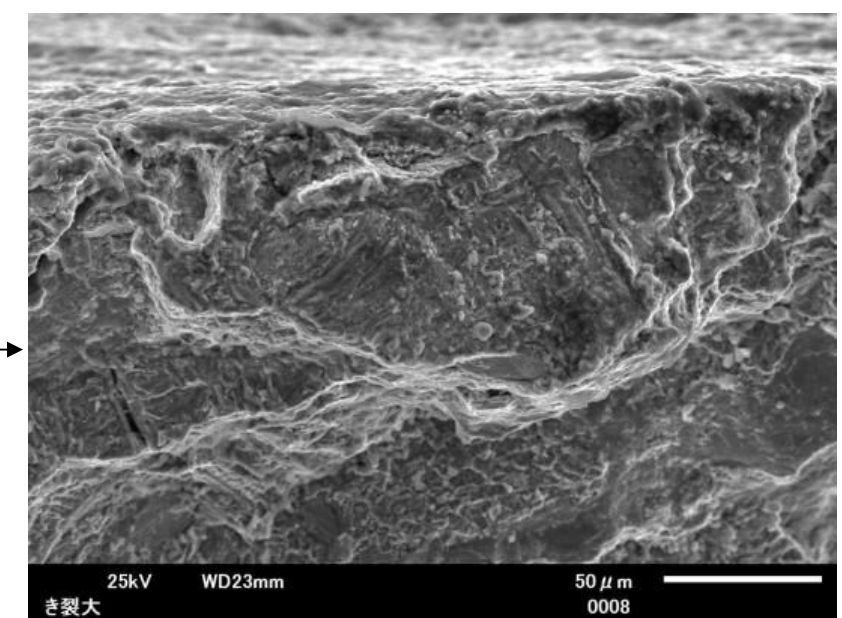
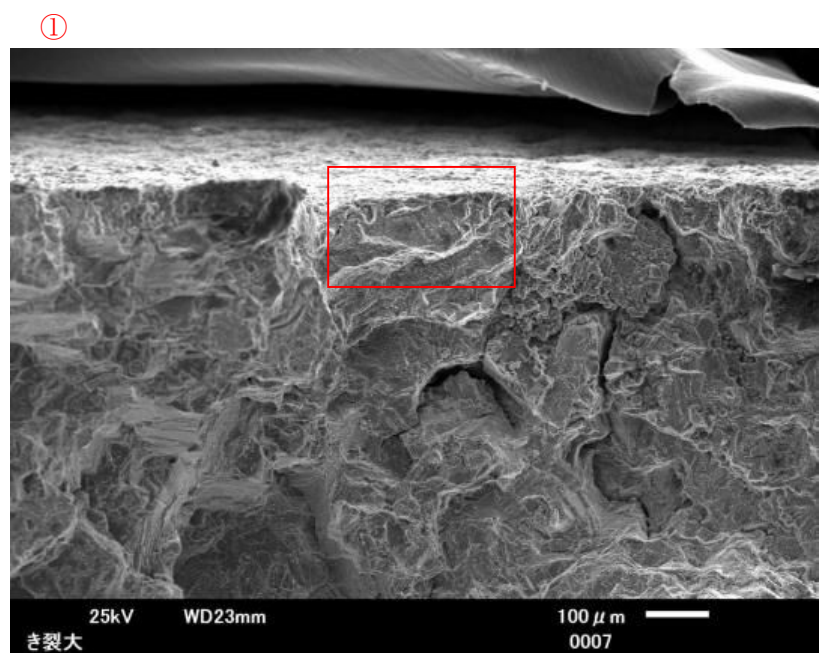
破面観察結果



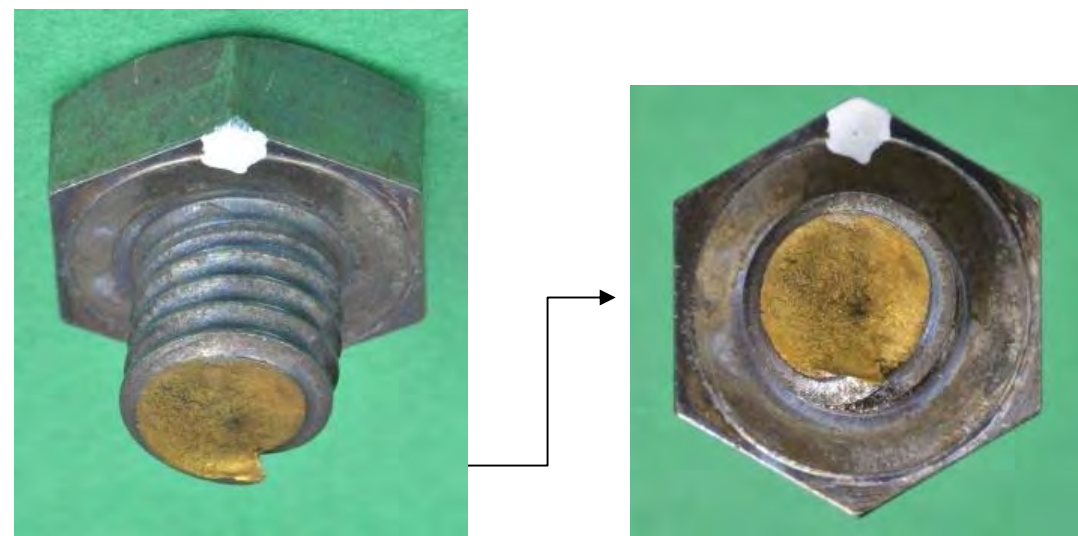
破面観察結果



タービンホイール PT 指示部破面は、延性破面の特徴であるディンプルが認められた。

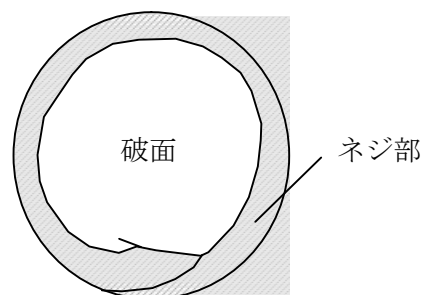
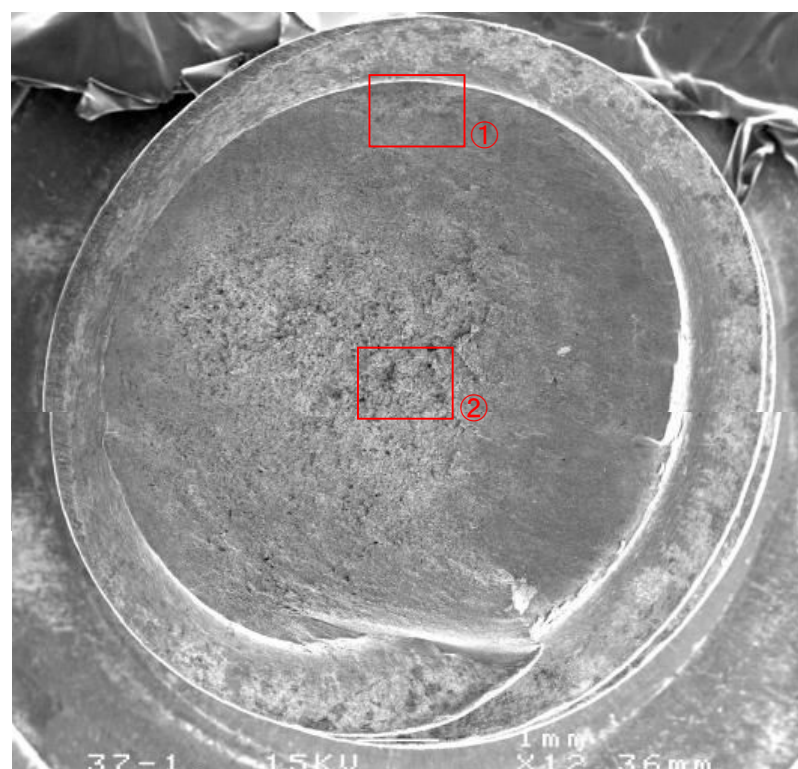


○フランジ取付ボルトの破面 SEM 観察結果

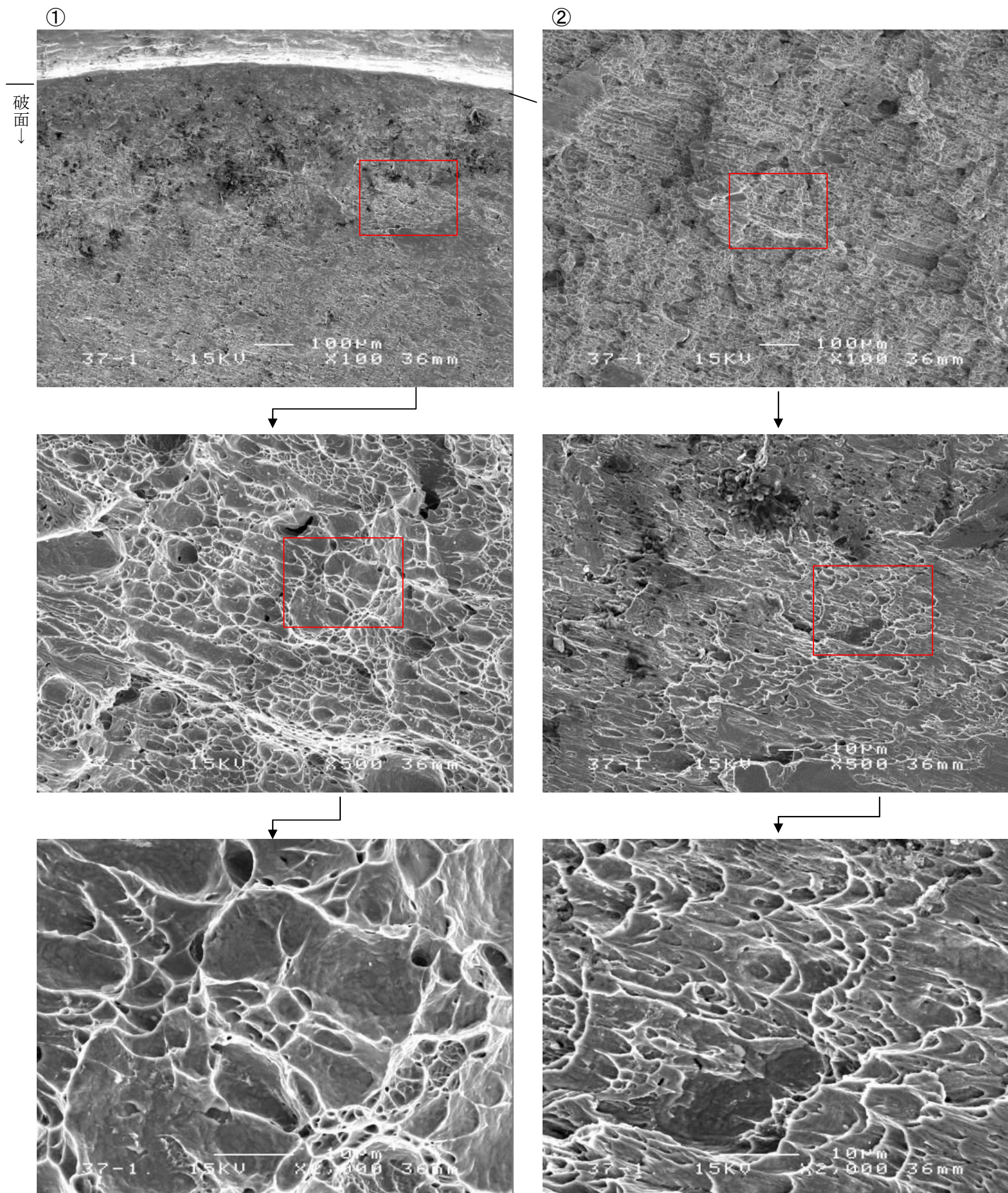


観察位置

フランジ取付ボルトの折損部は比較的平坦であった。
フランジ取付ボルト折損部の破面は、延性破面の特徴であるディンプルが認められた。



破面観察結果

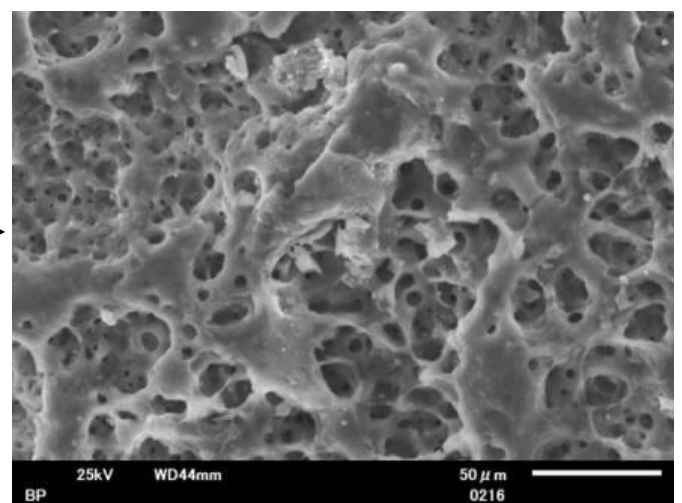
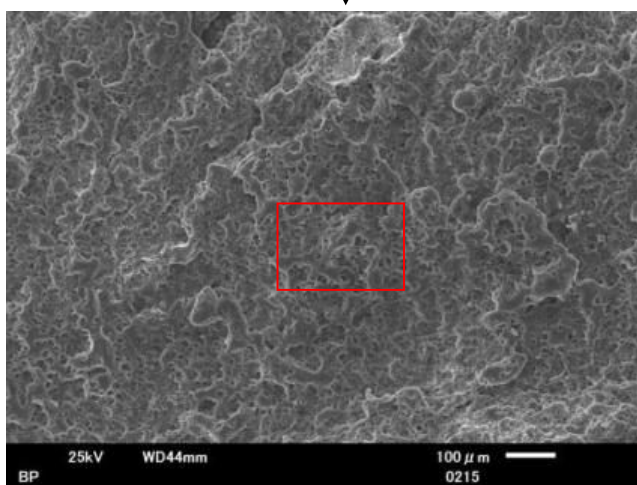
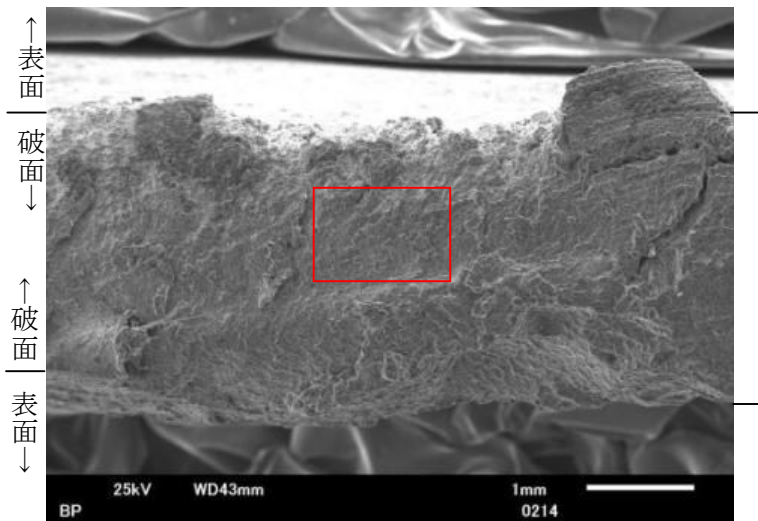
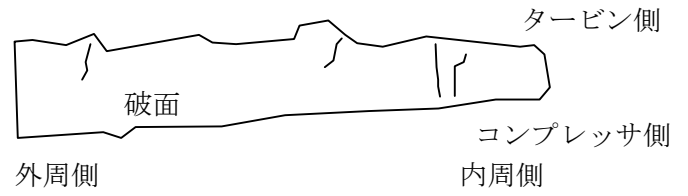


ディンプルを伴った延性破面

破面観察結果

○タービンバックプレートの破面拡大および SEM 観察結果

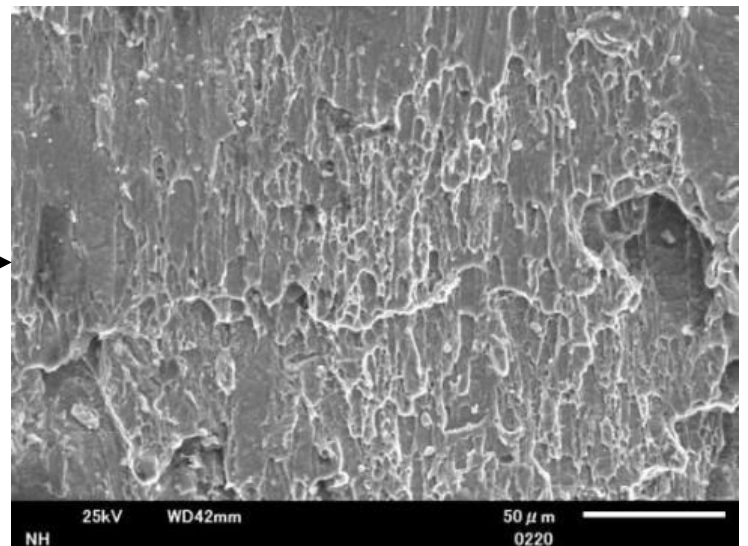
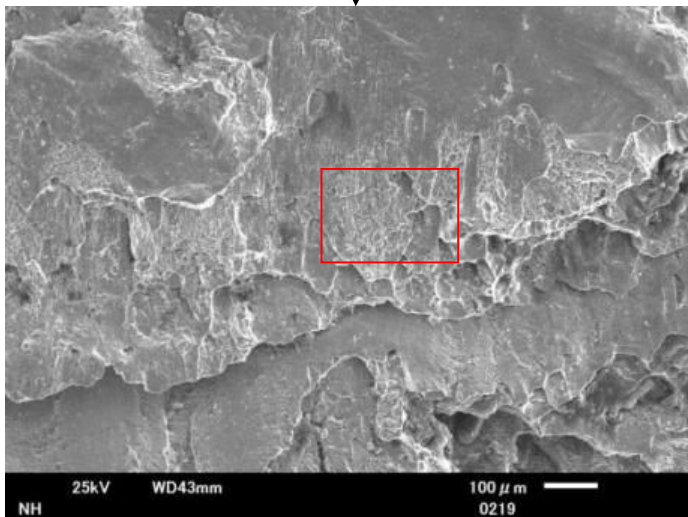
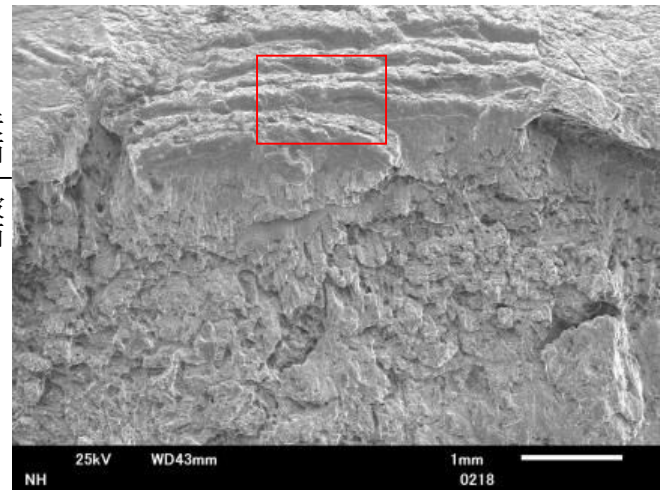
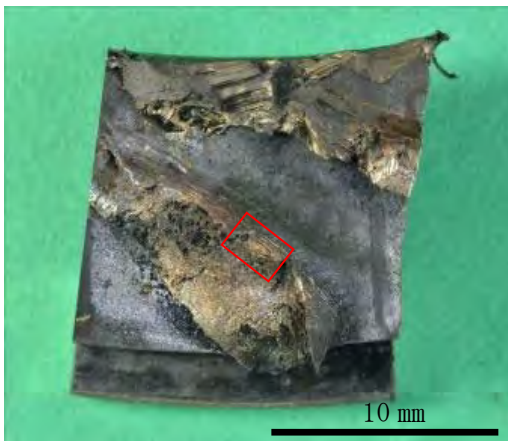
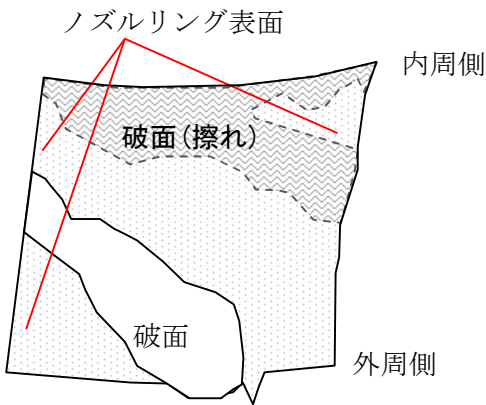
タービン側



タービンバックプレートの欠損部破面は、延性破面の特徴であるディンプルが認められた。

破面観察結果

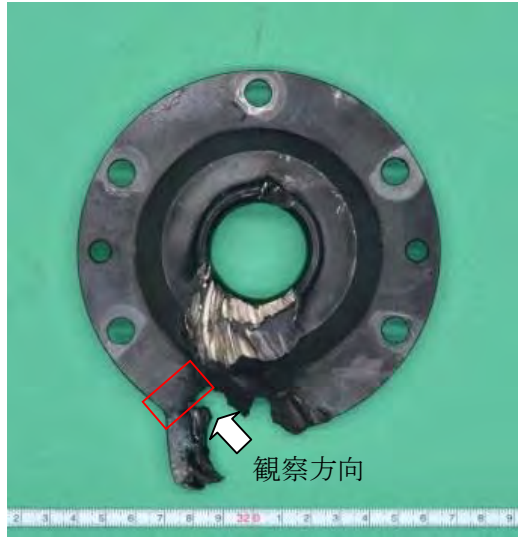
○ノズルリングの破面拡大および SEM 観察結果



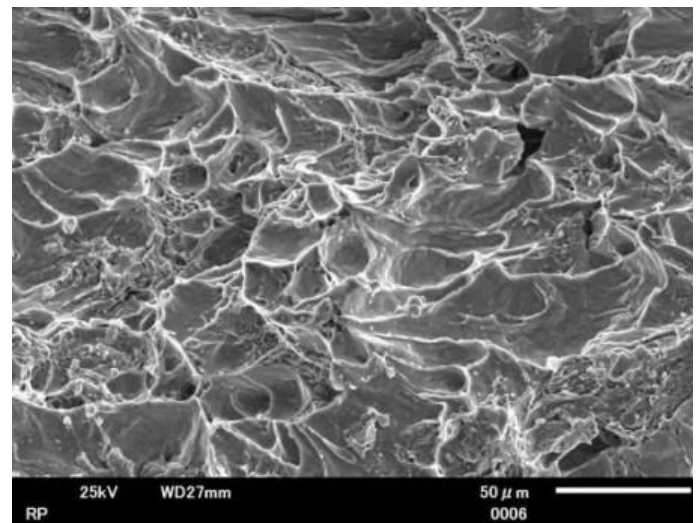
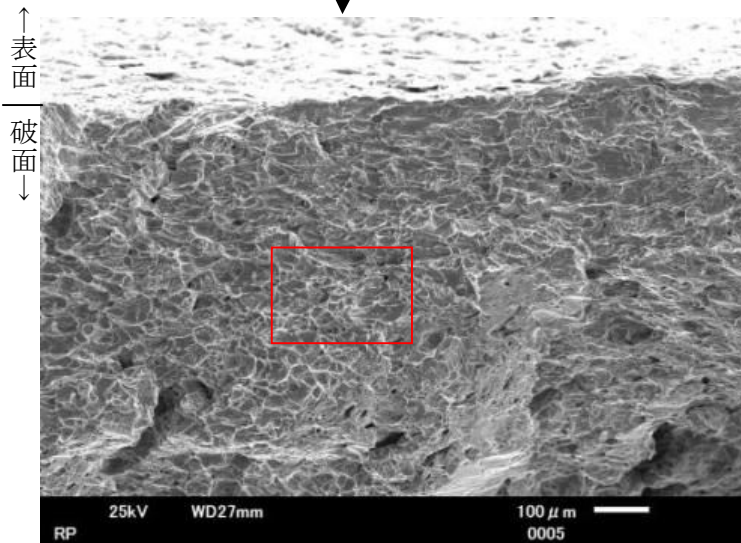
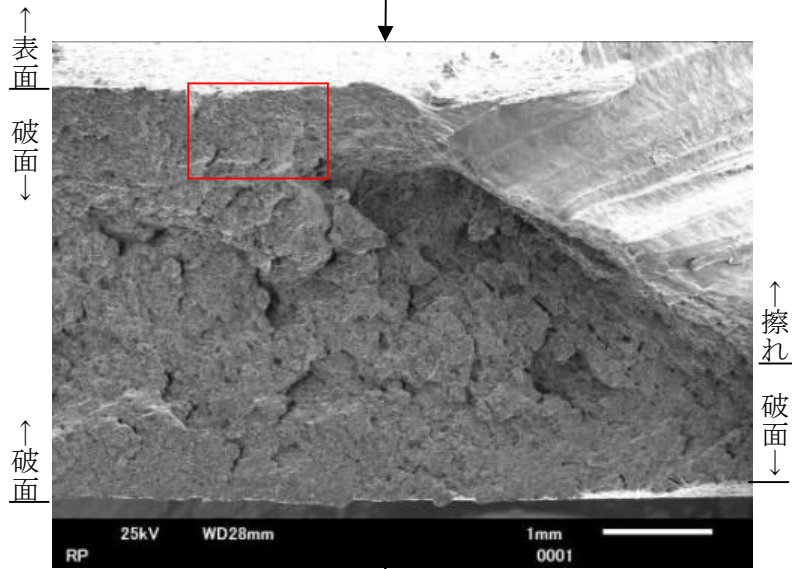
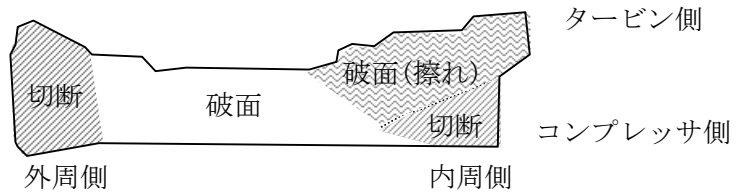
ノズルリング翼折損部の破面は、延性破面の特徴であるディンプルが認められた。

破面観察結果

○ラビリンスプレートの破面拡大およびSEM観察結果



(タービン側)



ラビリンスプレートの欠損部の破面は、延性破面の特徴であるディンプルが認められた。

破面観察結果

○タービンハウジングの破面拡大およびSEM観察結果



正面：タービン側

切断 →

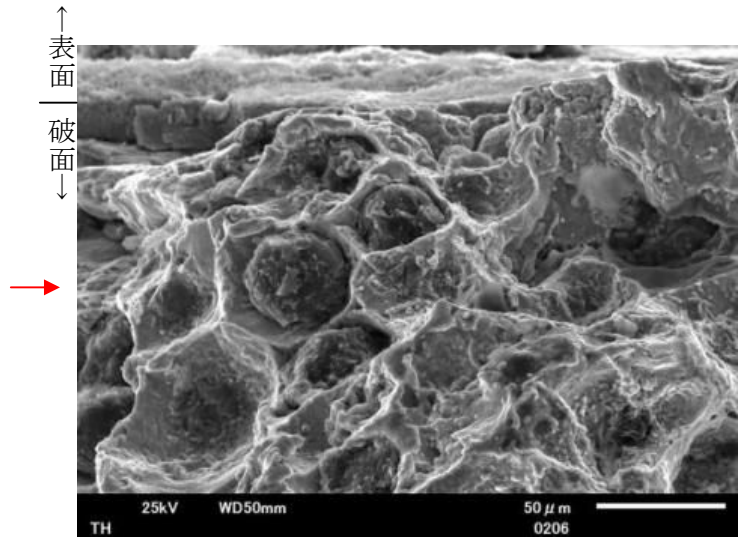
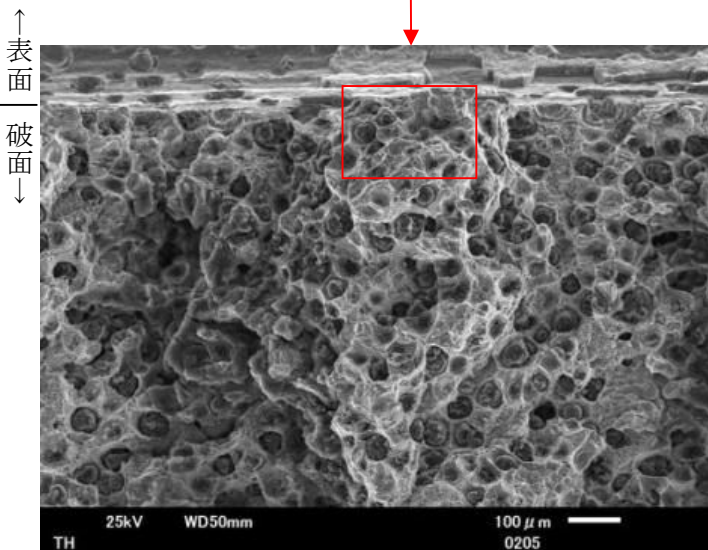
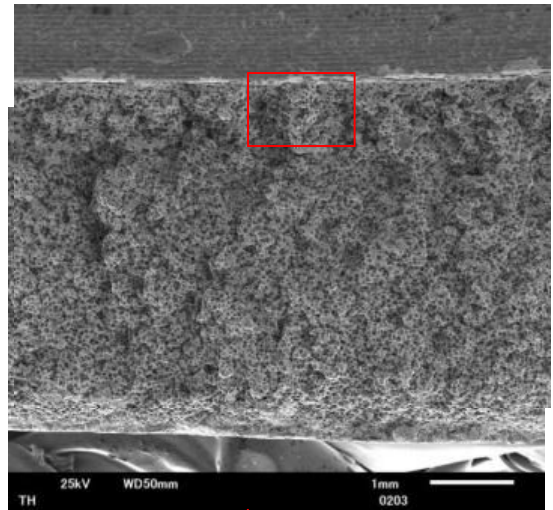
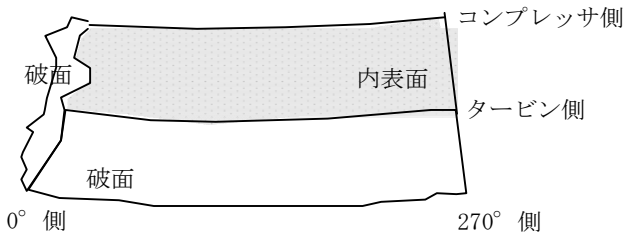


コンプレッサ側

タービン側(内面)



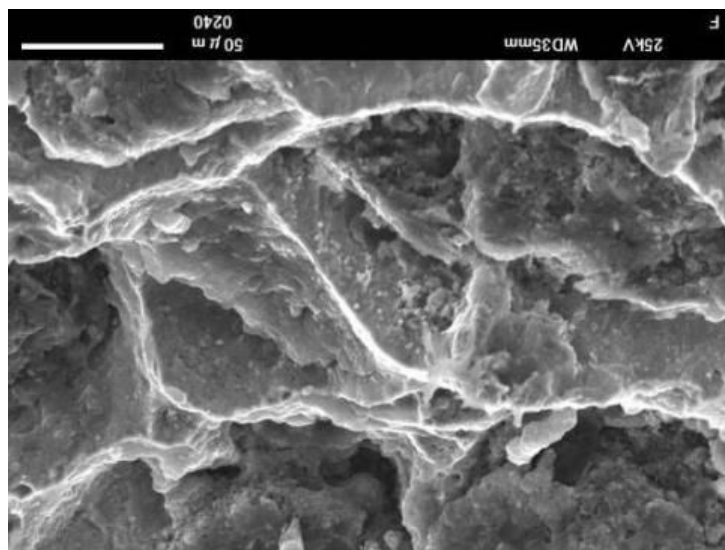
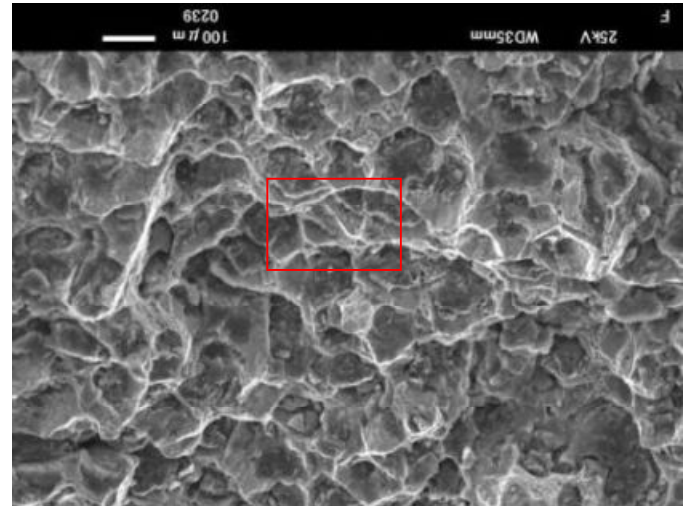
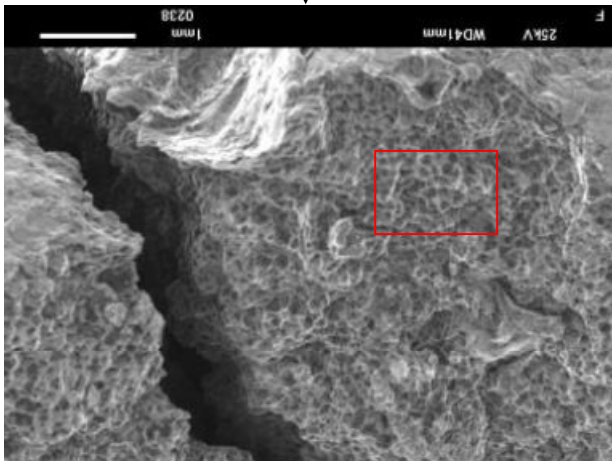
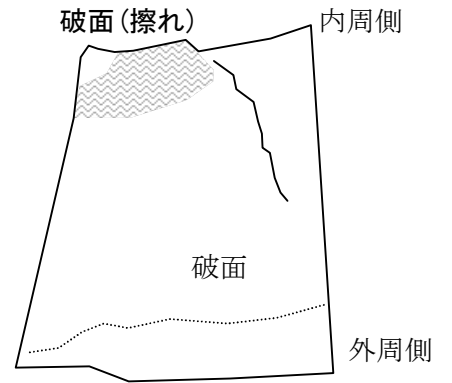
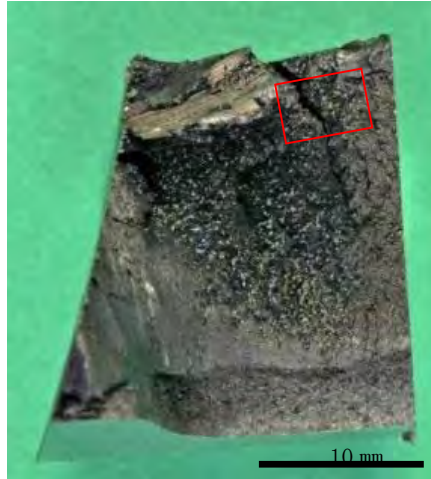
破面拡大観察



タービンハウジングの割れの破面は、延性破面の特徴であるディンプルが認められた。

破面観察結果

○フランジの破面拡大および SEM 観察結果
(コンプレッサ側)



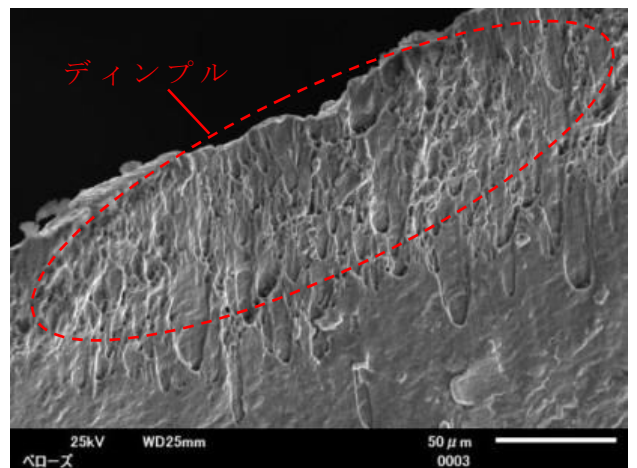
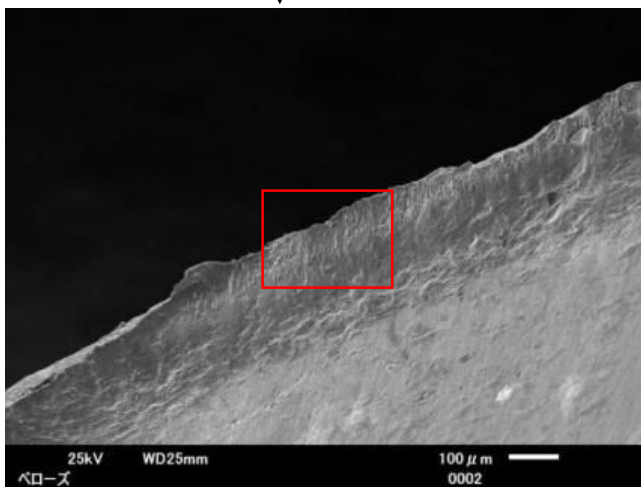
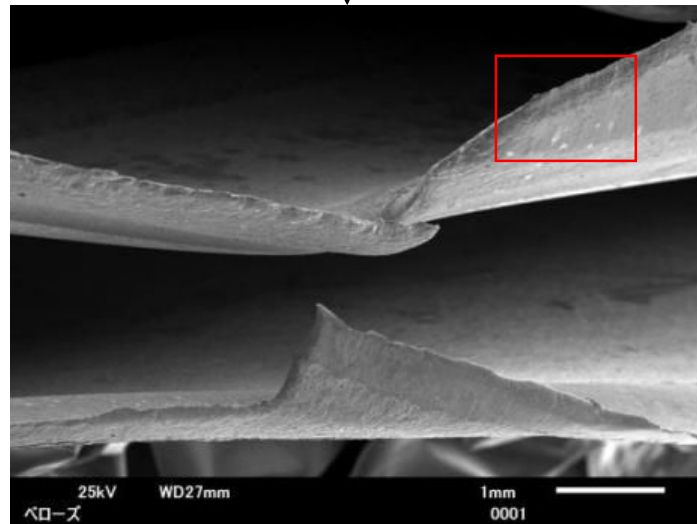
フランジの破断部(欠損部)は、延性破壊の特徴であるディンプルが認められた。

破面観察結果

○タービン出口伸縮継手（ベローズ）のSEM観察結果

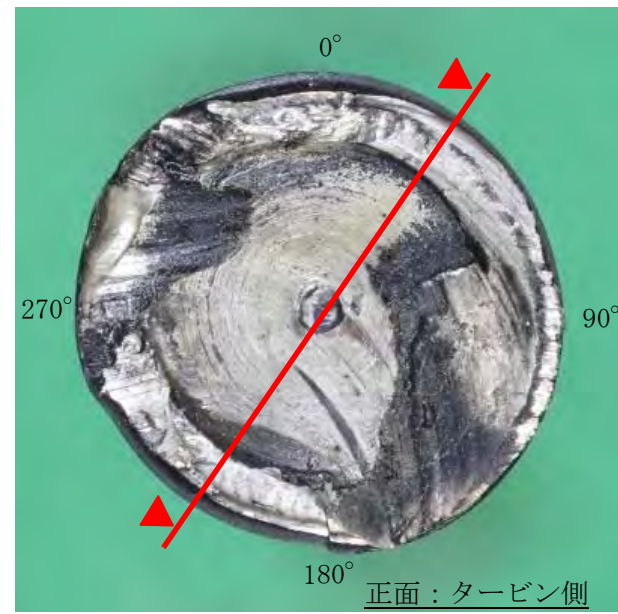


(内面側)

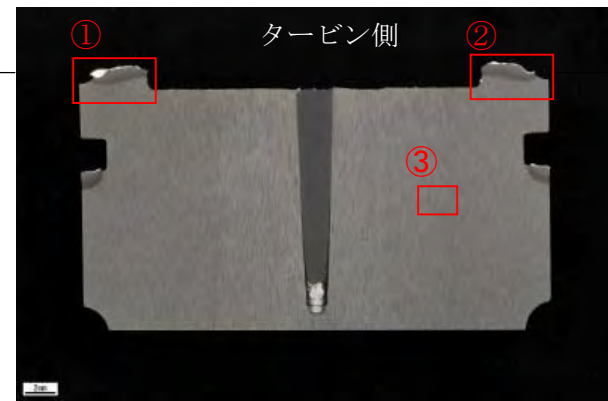


タービン出口伸縮継手の破断部は延性破面の特徴であるデンプルが認められた。
また、変形が著しく、ベローズの原型を留めていなかった。

○タービンロータ（シャフト）の断面金属組織観察結果

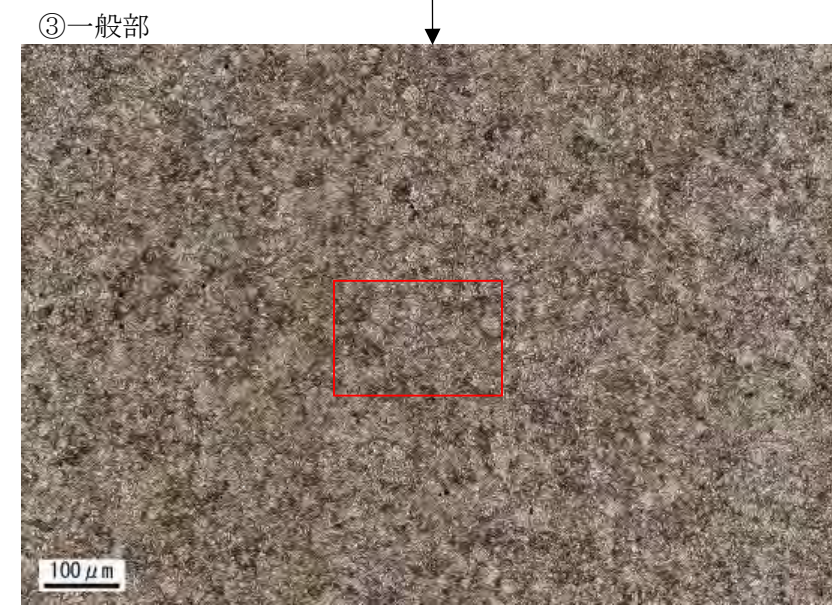
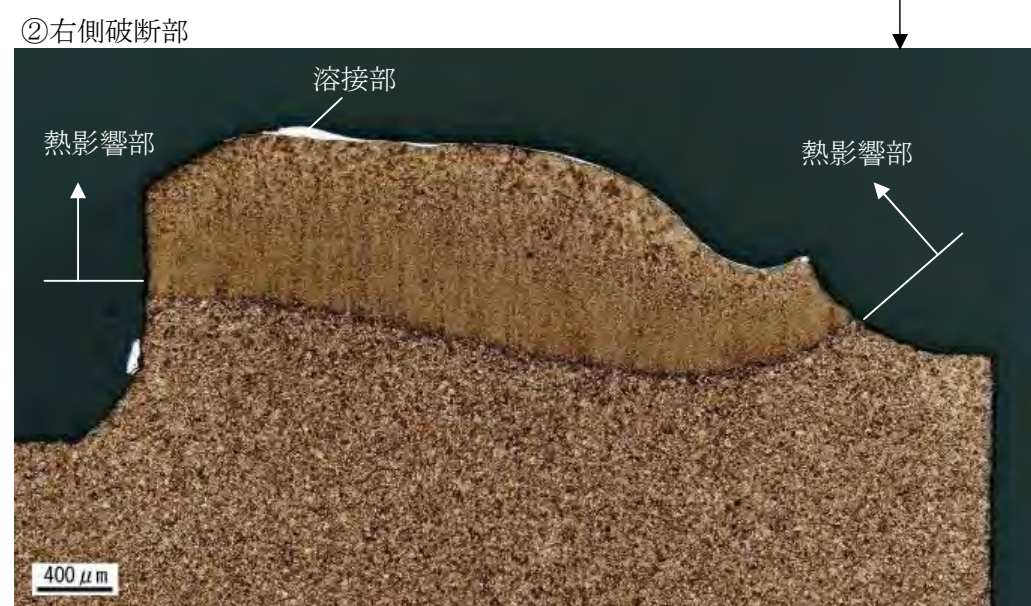


切断位置および観察断面



断面マクロ組織観察結果および断面ミクロ組織観察位置

折損部表面から深さ約1mmの範囲に、溶接による熱影響部が認められた。
一般部は、マルテンサイトとベイナイトの混合組織となっており、クロムモリブデン鋼材として特に問題は認められなかった。



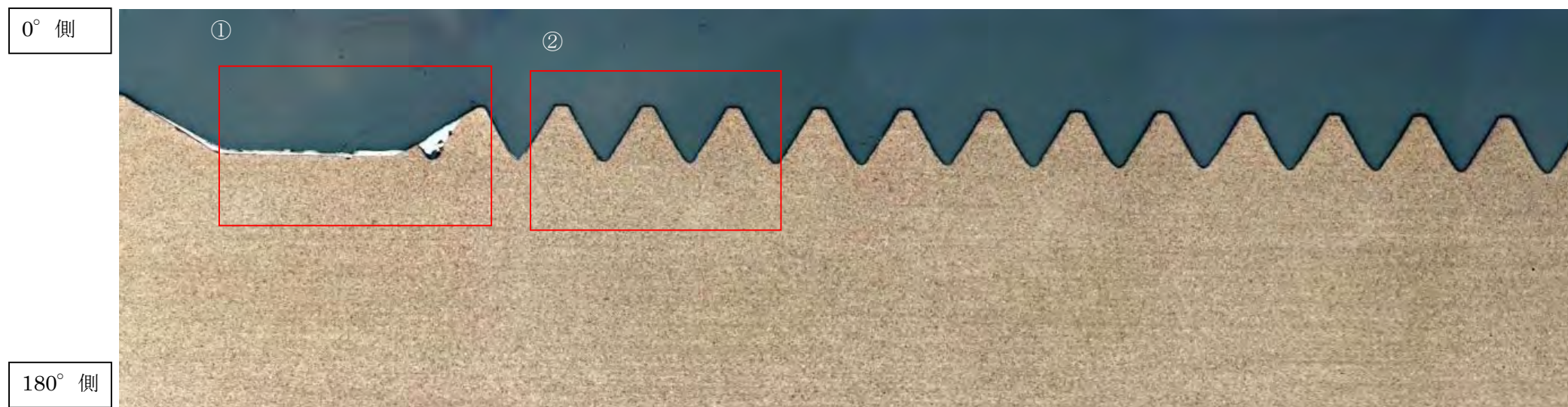
断面マイクロ組織観察結果

○タービンロータ（シャフトネジ部）の断面金属組織観察結果



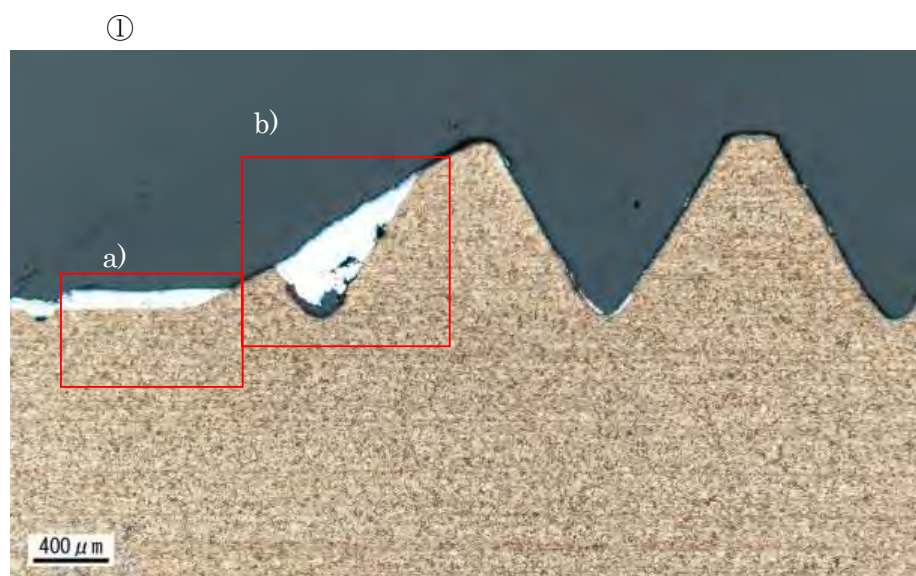
タービン側

コンプレッサ側 ×2



0°側

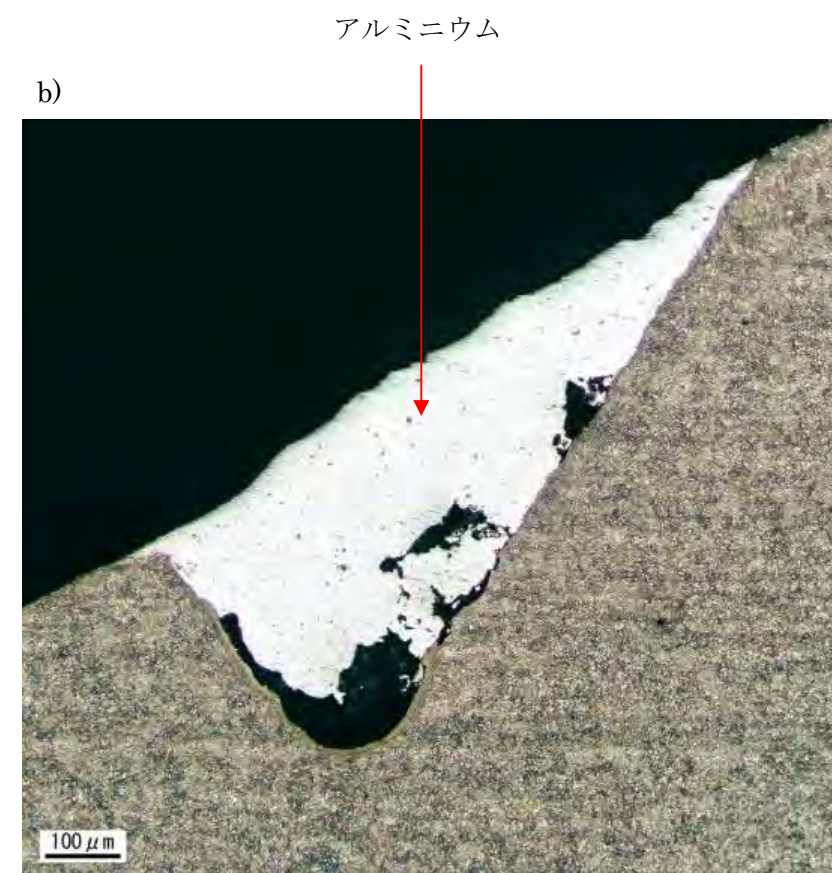
180°側



×25



×100



×100



×25

○付着物の成分分析結果

(Wt%)

	Mg	Al	Si	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu
分析値	0.5	70.6	14.2	0.2	0.3	0.2	12.2	1.9

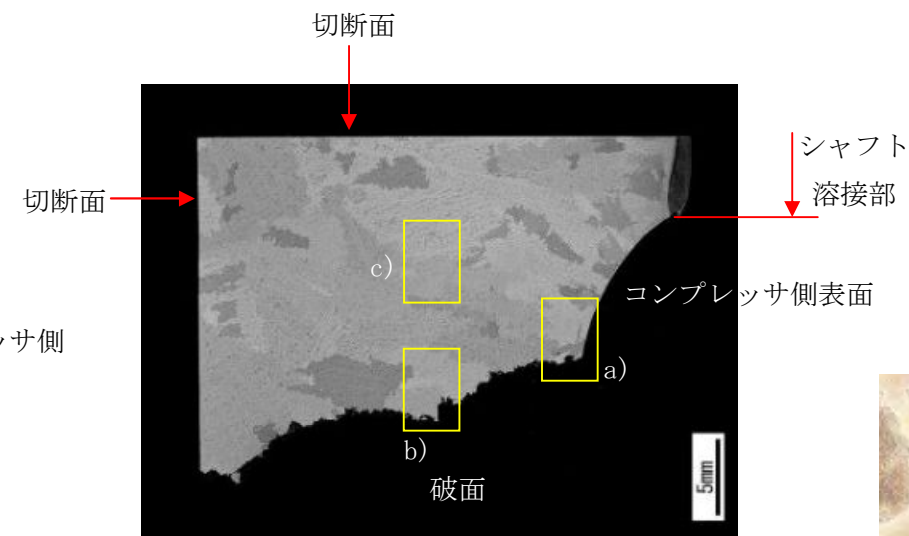
シャフトネジ部は、健全な状態であったがコンプレッサホイールとの取り合い付近に付着物が認められた。なお、付着物を分析した結果、アルミニウムであることが確認された。

断面マイクロ組織観察結果

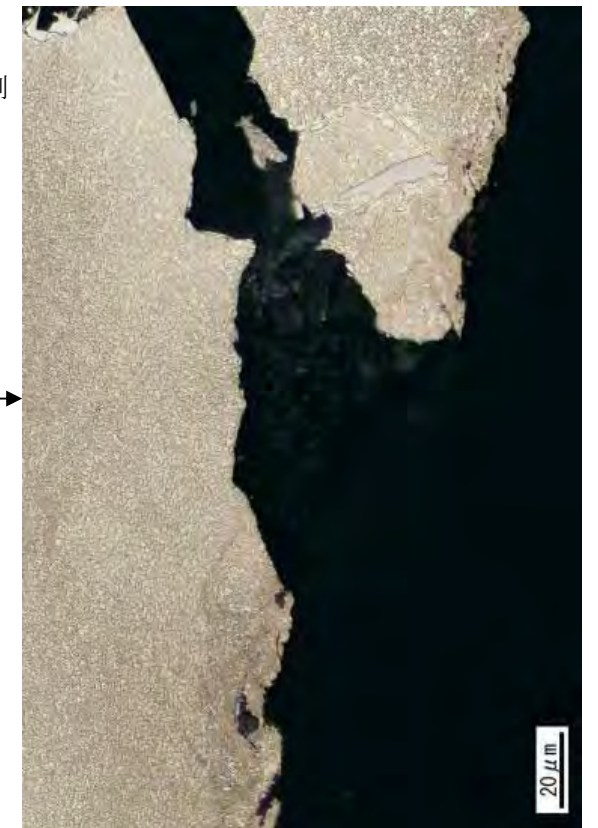
○タービンロータ(タービンホイール) コンプレッサ側破断面のマイクロ組織観察結果



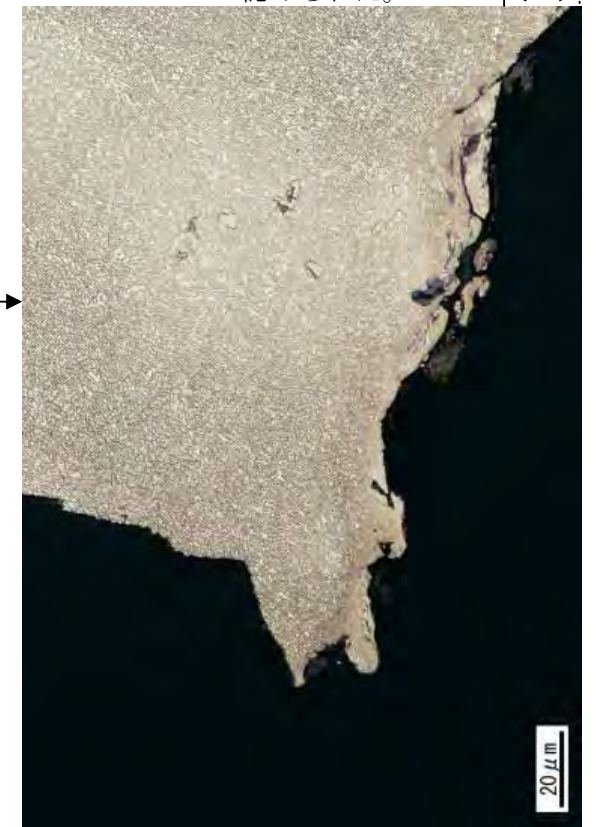
切断位置および観察位置



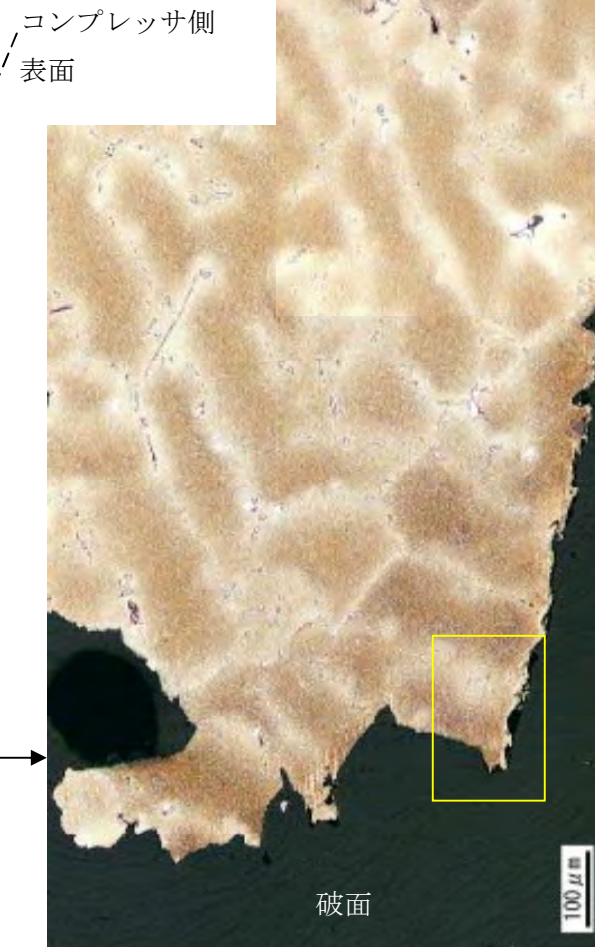
コンプレッサ側破断面の
マクロ組織および拡大位置



表面近傍に変質層が
認められた。

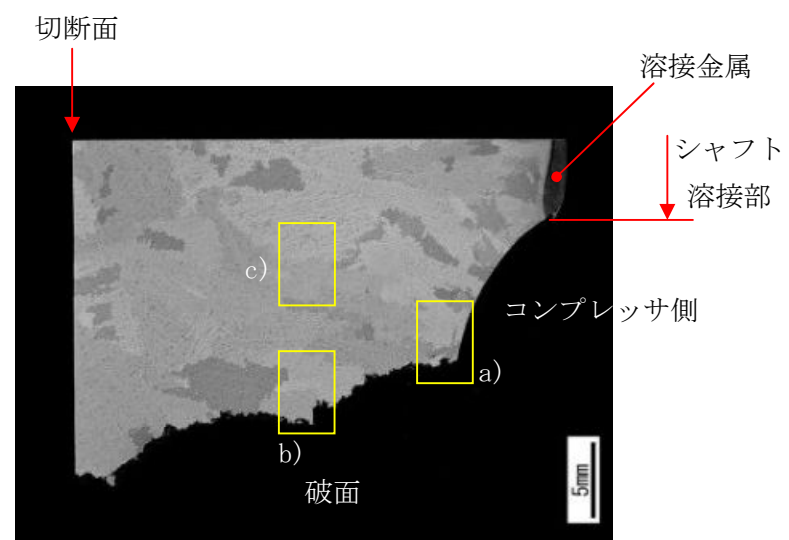
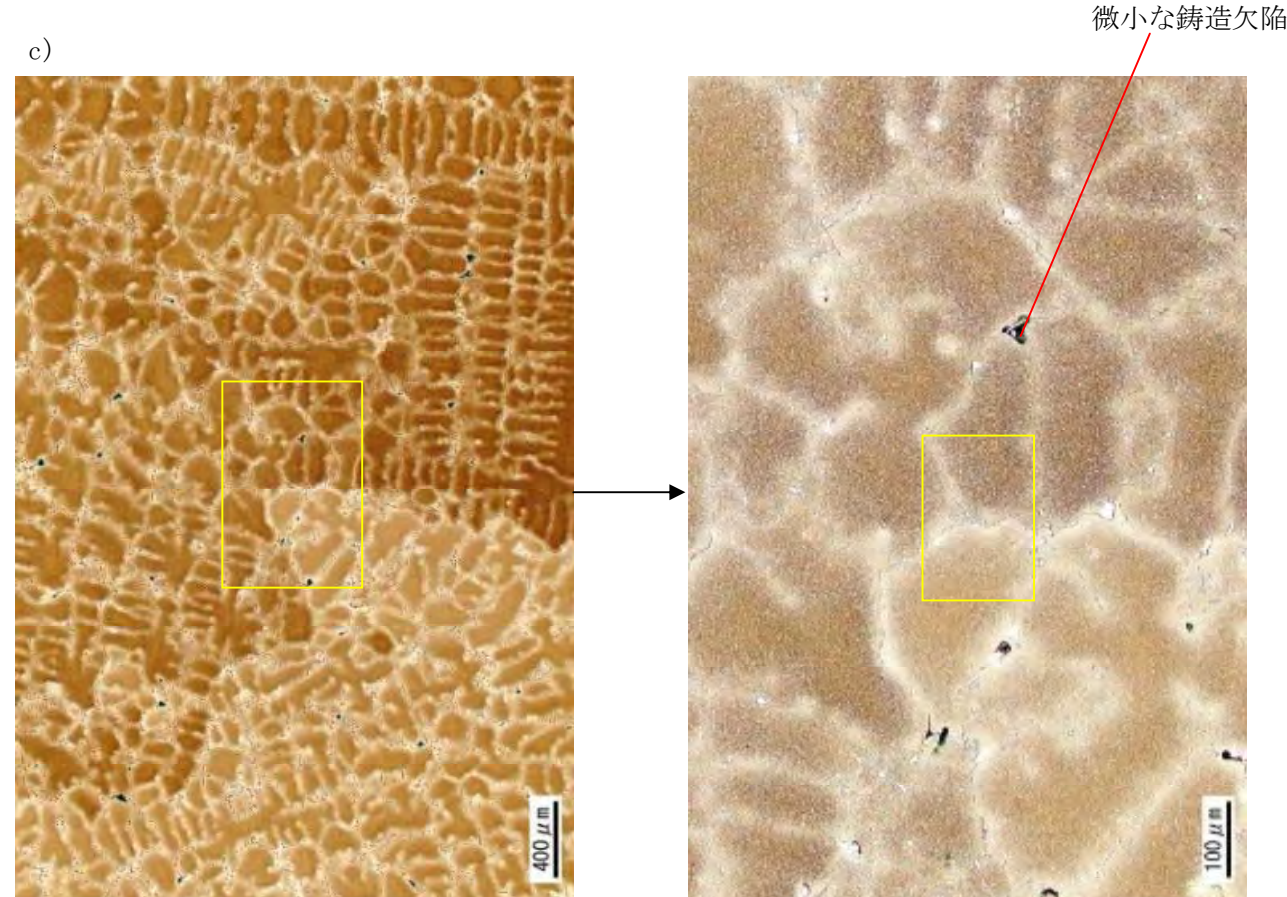
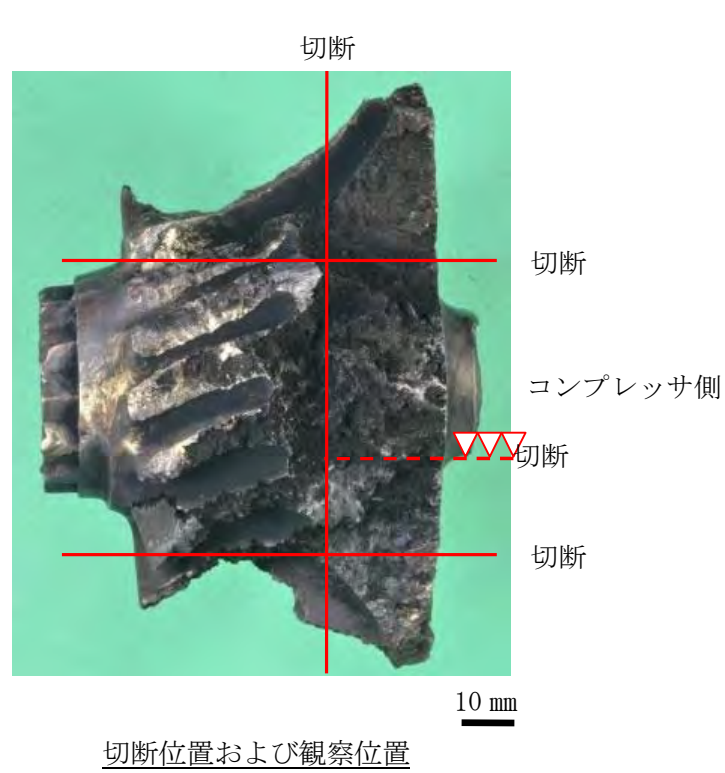


割れは、ジグザク状で概ねデンドライト(樹枝状晶)の境界を進展していることが認められた。
母材部の組織は、ニッケル合金鋳物翼として異常は認められなかった。
コンプレッサ側表面に微小なき裂が認められたことから、コンプレッサ側を起点としたき裂が発生した可能性が考えられる。

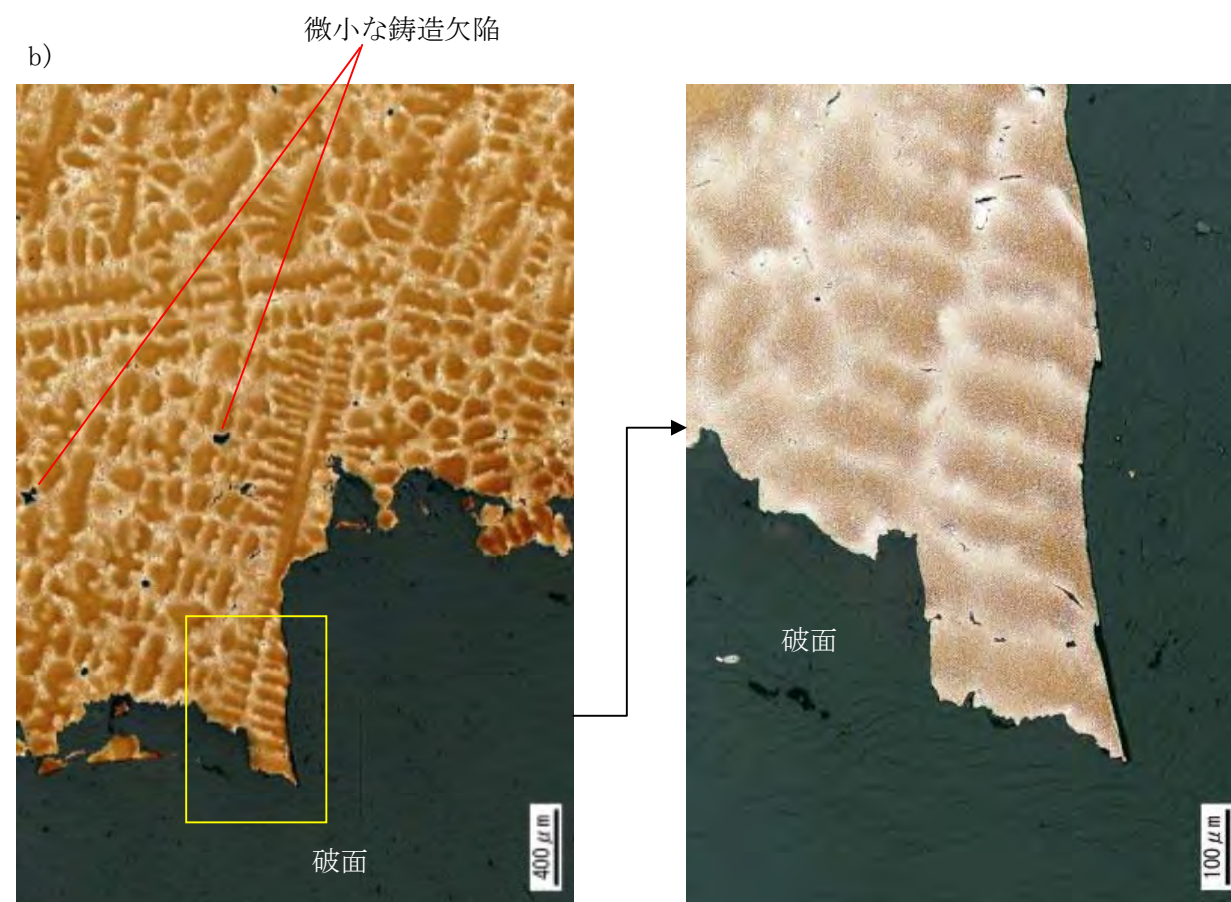


断面マイクロ組織観察結果

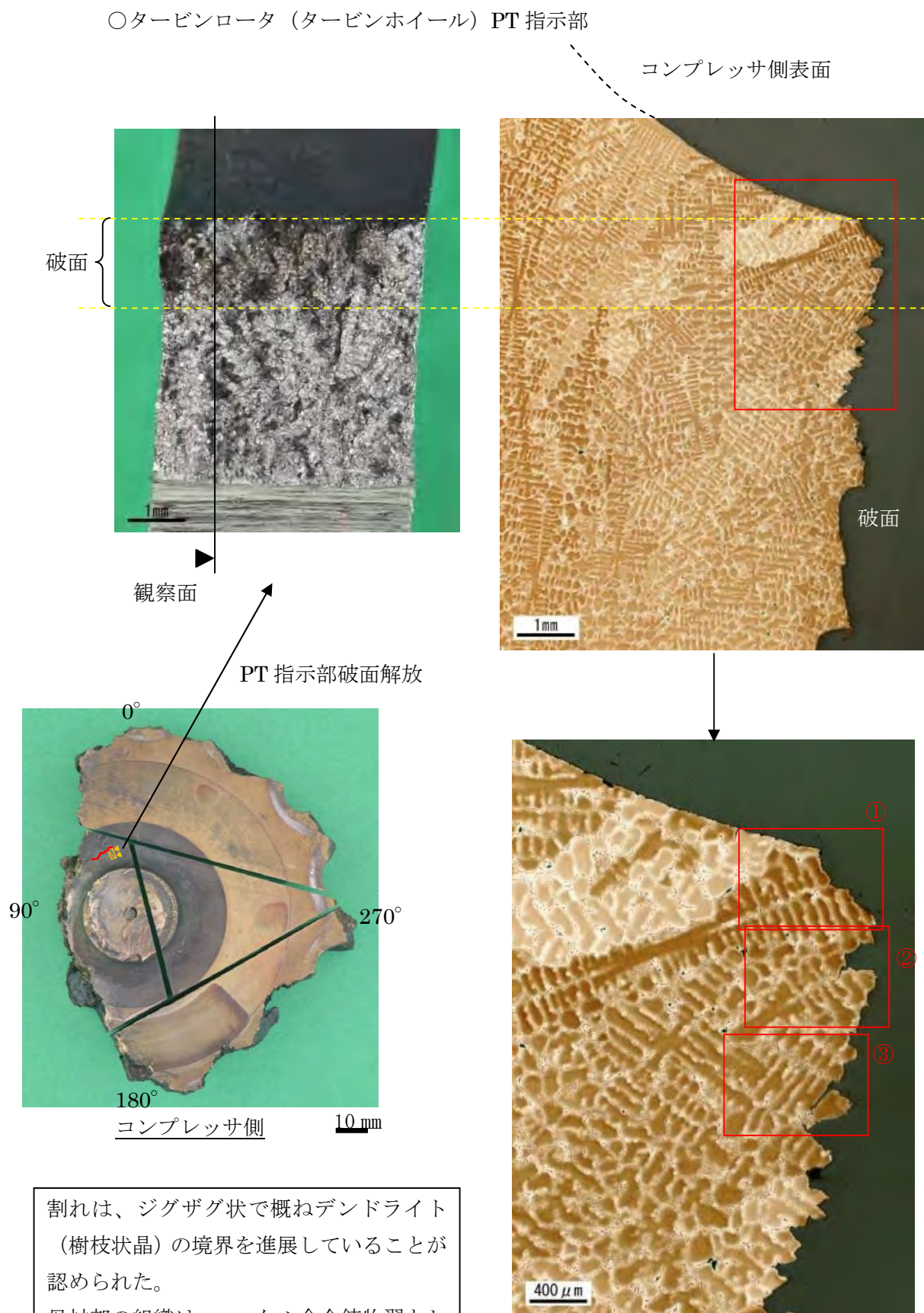
○タービンロータ(タービンホイール) コンプレッサ側破断面のマイクロ組織観察結果



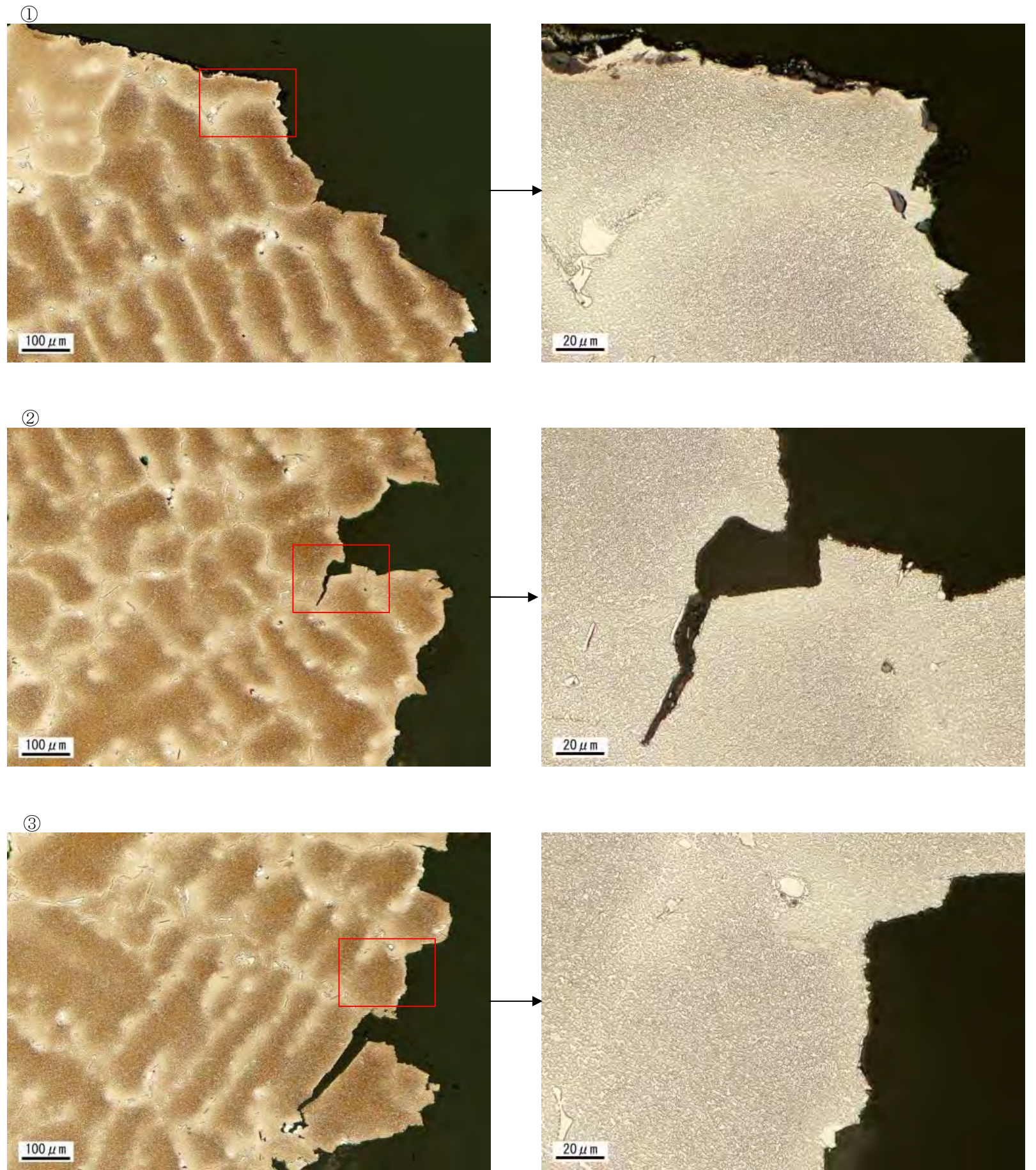
コンプレッサ側破断面の
マクロ組織および拡大位置



割れは、ジグザク状で概ねデンドライト(樹枝状晶)の境界を進展していることが認められた。
母材部の組織は、ニッケル合金鑄物翼として異常は認められなかった。



割れは、ジグザグ状で概ねデンドライト (樹枝状晶) の境界を進展していることが認められた。
母材部の組織は、ニッケル合金鋳物翼として異常は認められなかった。



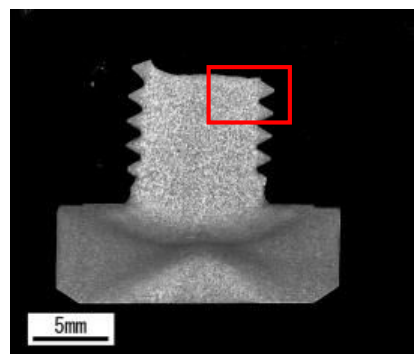
断面マイクロ観察結果

○フランジ取付ボルトの断面マイクロ観察結果



切断位置および観察断面

ボルト①

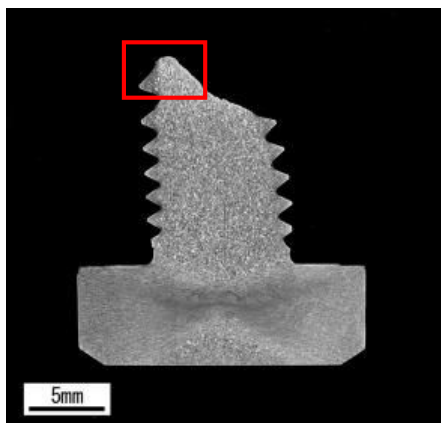


×2



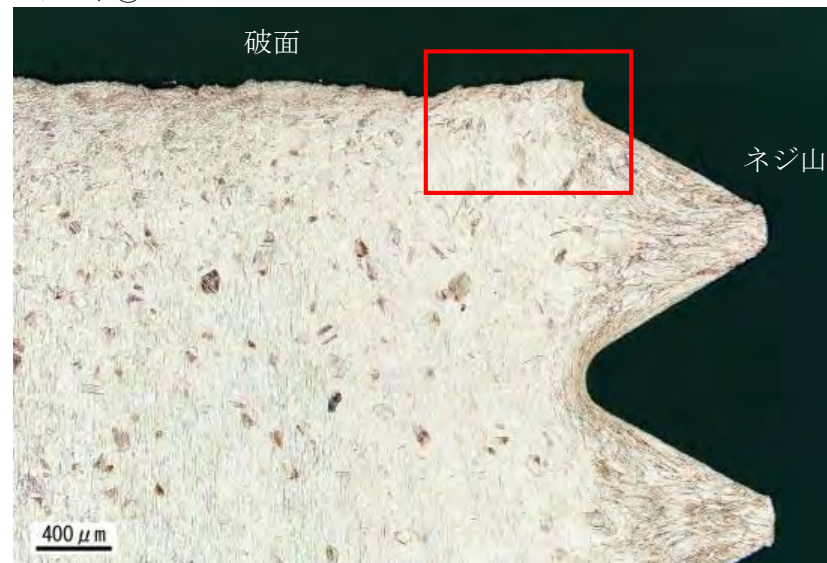
切断位置および観察断面

ボルト②



×2

ボルト①



×25



×100

ボルト②



×25

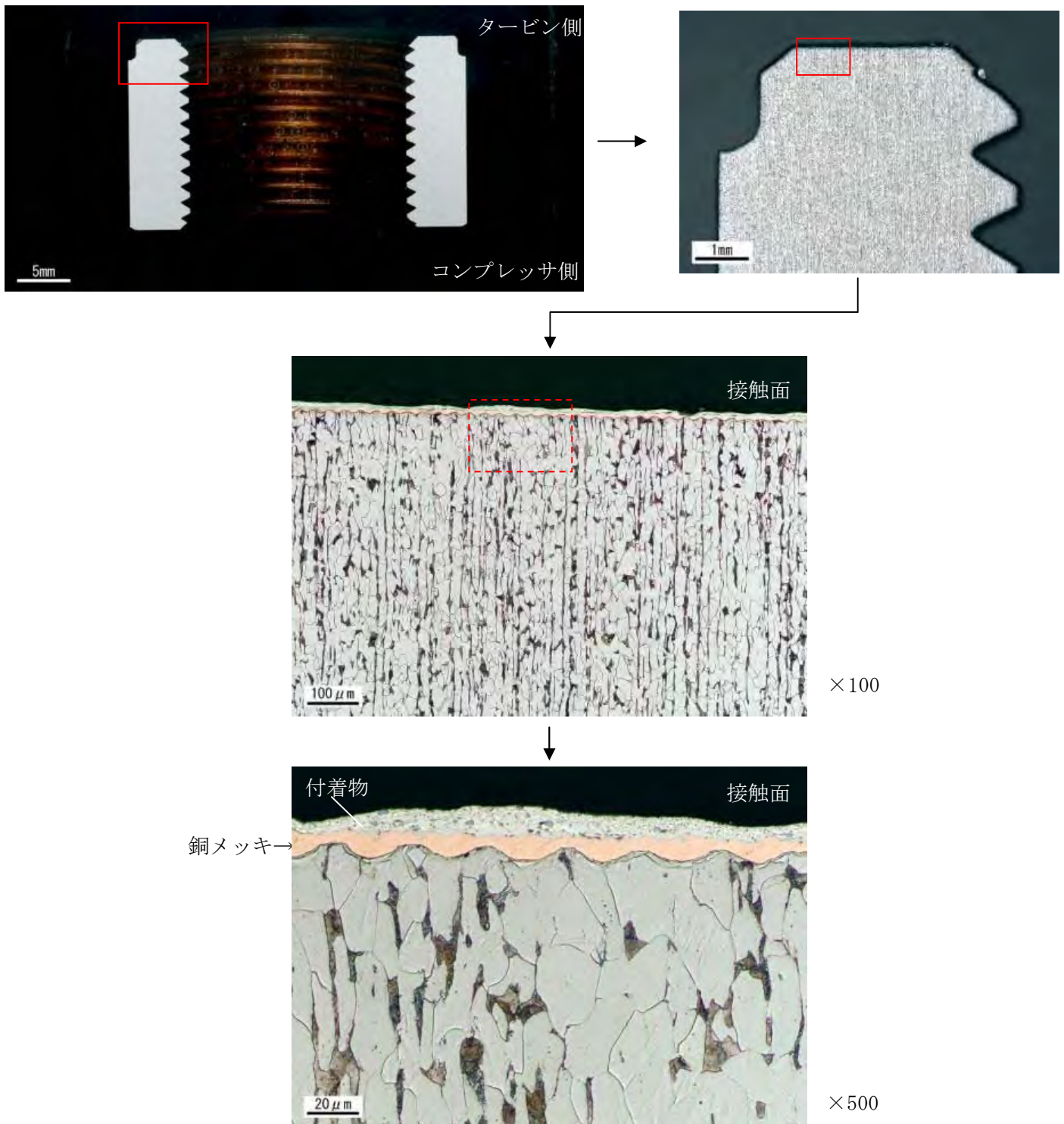


×100

ボルト破断部近傍は、著しい変形に伴うすべり線が多く認められた。

断面マイクロ組織観察結果

○ロックナットの断面金属組織観察結果 (接触部)



○付着物の成分分析結果

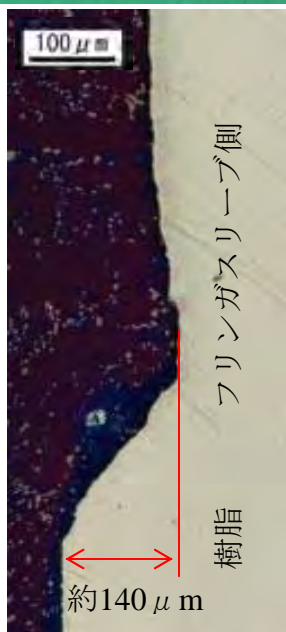
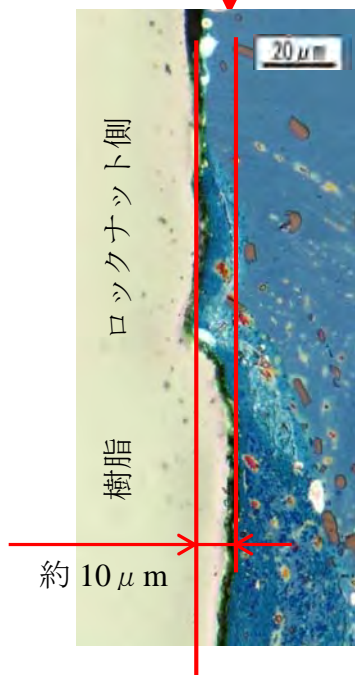
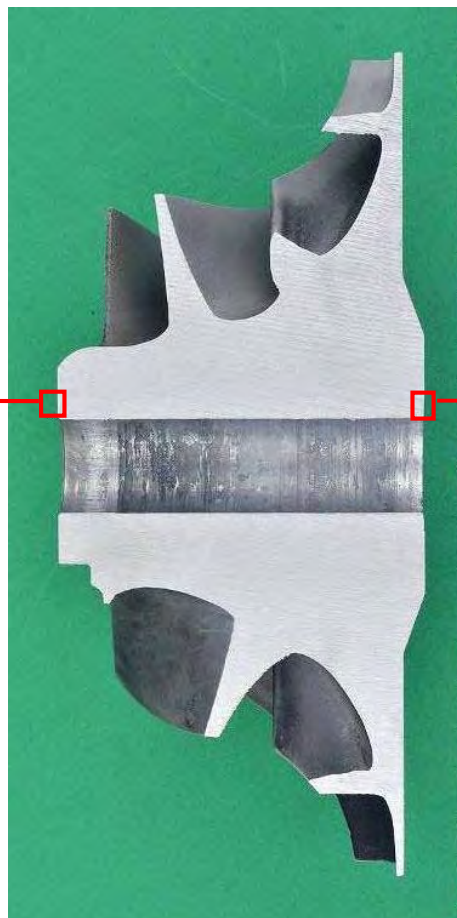
(wt%)

	Mg	Al	Si	Fe	Cu
分析値	0.4	72.7	14.7	5.8	6.4

ナットネジ部ならびにナット端面は健全な状態であったがコンプレッサホイールとの接触面に付着物が認められた。なお、付着物を分析した結果、アルミニウムであることが確認された。

断面マイクロ組織観察結果

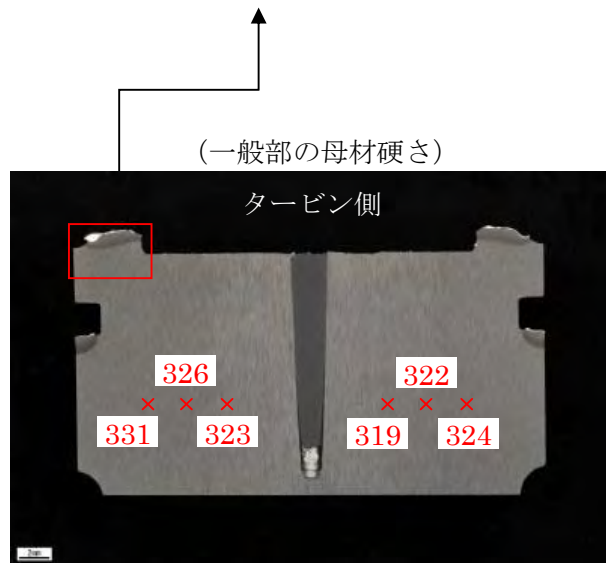
○コンプレッサホイールの断面拡大観察結果



コンプレッサホイールのロックナット側およびフリंगाスリーブ側ともに摩耗が認められ、ロックナット側は約 10 μm 、フリंगाスリーブ側は約 140 μm の摩耗が認められた。

硬度測定結果

○タービンロータ（シャフト）の硬さ測定結果

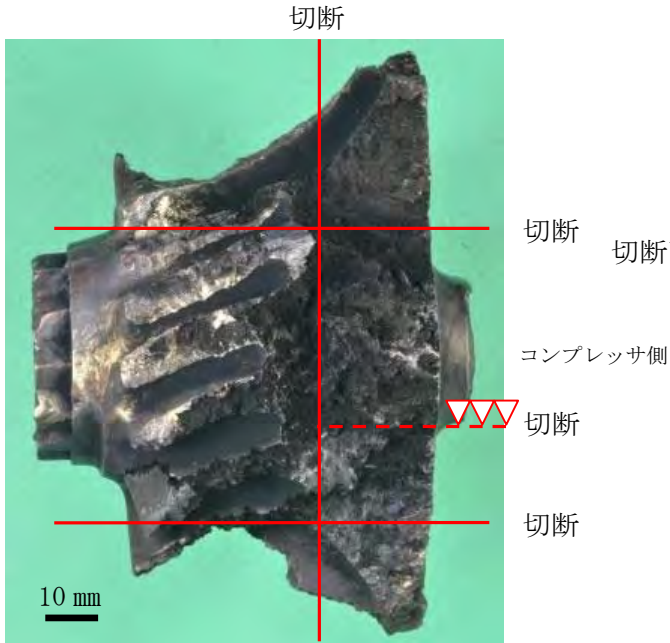


深さ方向の硬さ分布は一般部で 309～336HV、溶接部で 448HV、溶接による熱影響部で 488～530HVであった。

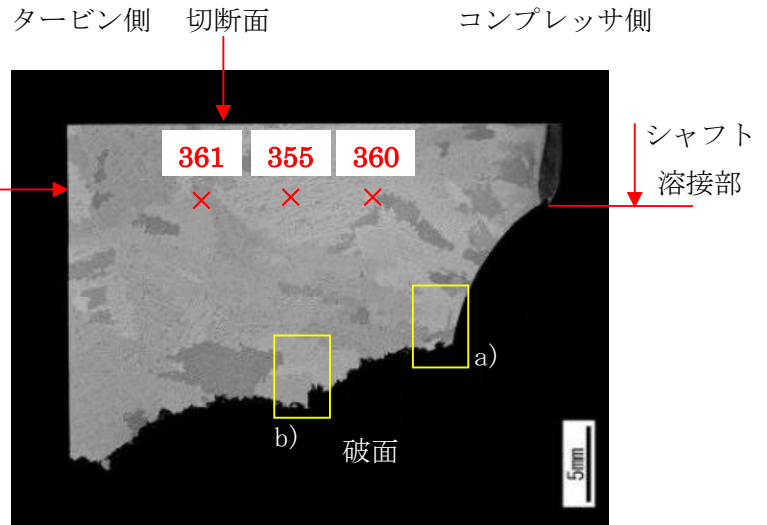
母材の一般部の硬さについてはミルシートに示される 311HB から換算硬さ 327HV と同等であり、異常は認められなかった。

硬度測定結果

○タービンロータ(タービンホイールハブ部)コンプレッサ側破断部のビッカース硬度試験結果



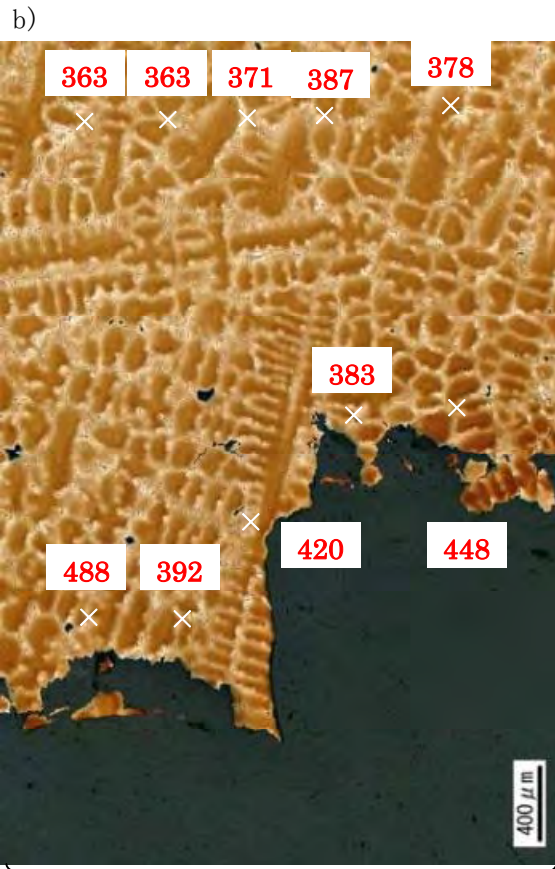
切断位置および観察位置



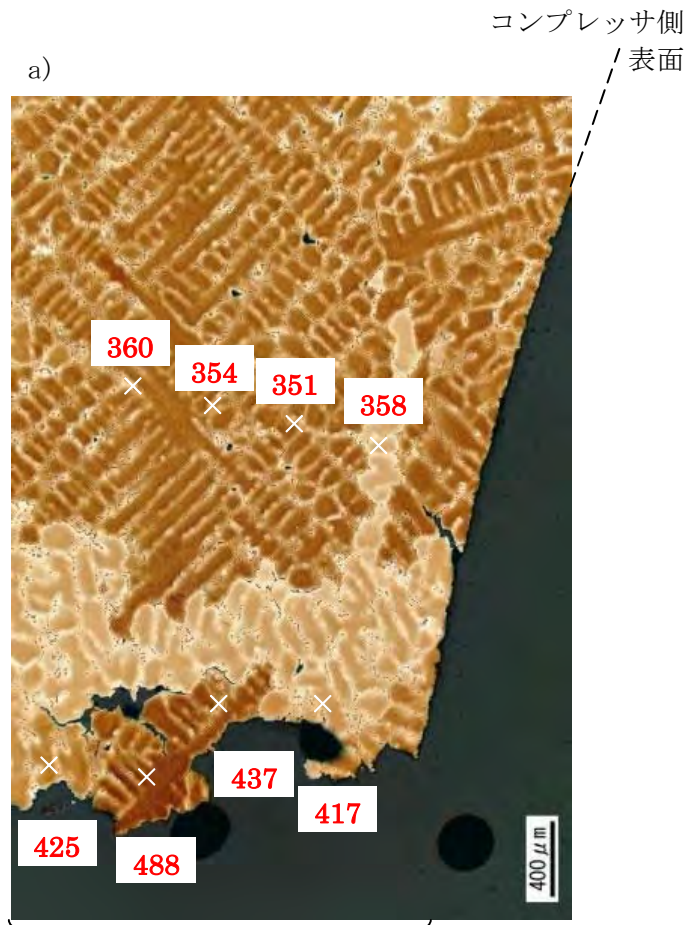
コンプレッサ側破断部の
の硬度測定位置および一般部硬さ

【コンプレッサ側破断部】
 破面近傍： 383～488HV
 一般部： 351～387HV
 【参考】
 ミルシート値： 352HV (35.8HRC)

母材の一般部で 351～387HV、破断部で 383～488HVと損傷による硬化が認められた。母材の一般部の硬さについてはミルシートに示される 35.8HRCからの換算硬さ 352HVと同等であり、異常は認められなかった。



破面

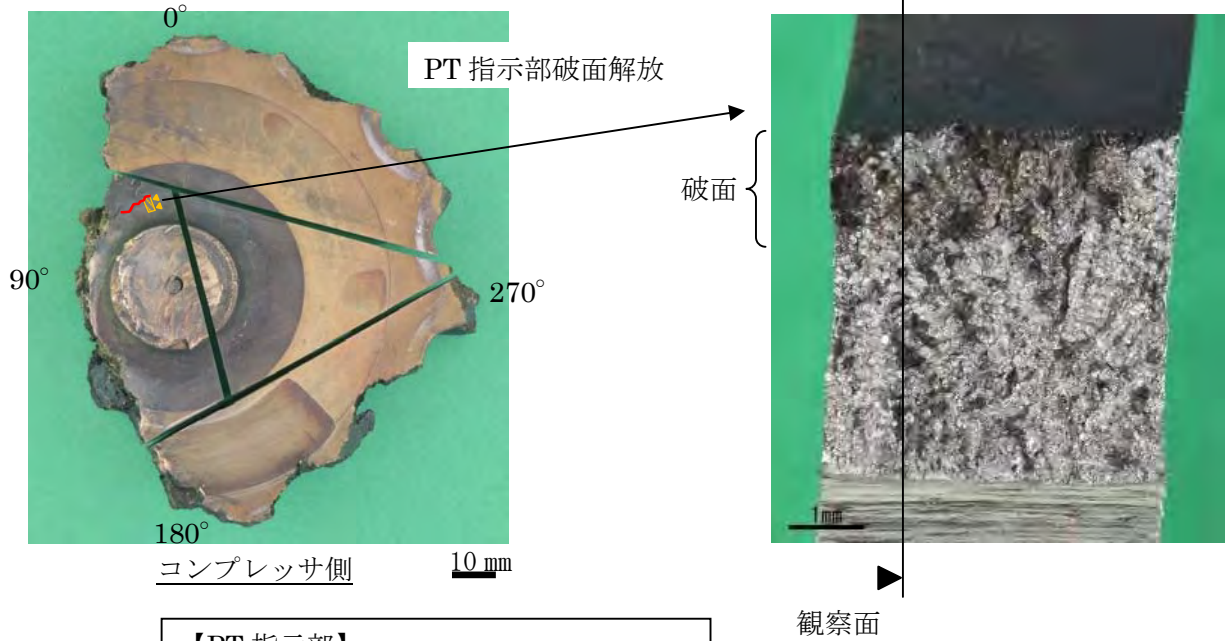


破面

コンプレッサ側表面

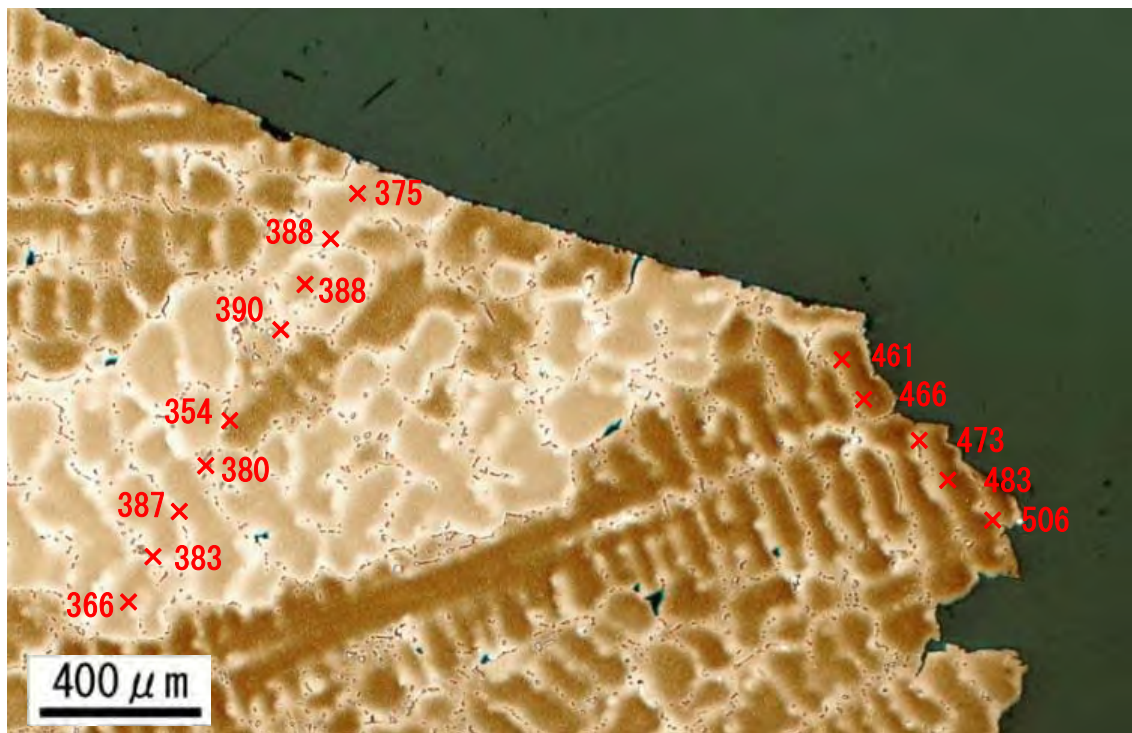
硬度測定結果

○タービンロータ (タービンホイール) PT 指示部の硬さ測定結果



【PT 指示部】
 破面近傍：461～506HV
 一般部：354～390HV
【参考】
 ミルシート値：352HV (35.8HRC)

母材硬さは一般部で 354～390HV であり、(ミルシート値 352HV (35.8HRC)：別鑄データ)、破断部で 461～506HV と損傷による硬化が認められたが、特に問題となるものではなかった。



硬度測定結果

○フランジ取付ボルトのビッカース硬さ測定結果

ボルト①



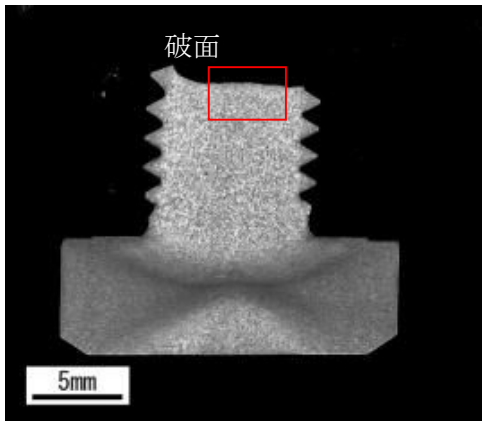
切断位置および観察断面

ボルト②

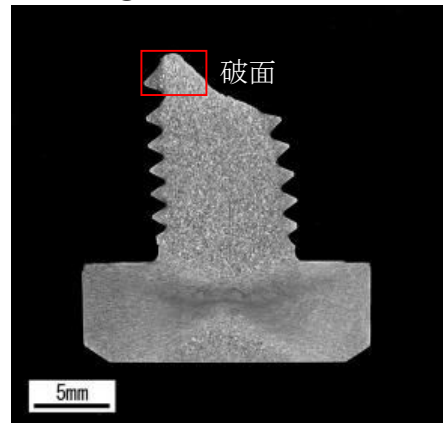


切断位置および観察断面

ボルト①



ボルト②



ボルト①



ボルト②



破断部では 302~322HV と 267~336HV、内部では 245~251HV と 273~279HV と破断による硬化が認められたが、特に問題となるものではなかった。

材料成分分析結果

タービンロータ (シャフト)

単位 : 重量%

元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
分析結果	—	0.3	0.8	—	—	—	1.2
ミルシート値	0.36	0.25	0.79	0.017	0.016	0.08	0.99
規格値	0.32-0.39	0.15-0.35	0.55-0.90	0.030max	0.030max	0.25max	0.85-1.25

元素	Cu	Mo	Fe
分析結果	—	0.2	97.5
ミルシート値	0.14	0.15	—
規格値	0.30max	0.15-0.35	—

— : 検出限界以下

ミルシート値と同等であり、材料成分に異常は認められなかった。

タービンロータ (タービンホイール)

単位 : 重量%

元素	C	Si	Mn	Fe	Cu	Cr
分析結果	—	0.1	—	0.1	—	14.0
ミルシート値	0.12	0.06	0.02	0.46	0.01	13.47
規格値	0.08-0.20	0.50max	0.25max	2.50max	0.50max	12.00-14.00

元素	Al	Cb+Ta	Ti	Mo	B	Zr	Ni
分析結果	6.5	2.3	0.8	4.5	—	—	71.3
ミルシート値	6.31	2.59	0.72	4.28	0.011	0.10	Bal.
規格値	5.50-6.50	1.80-2.80	0.50-1.00	3.80-5.20	0.005-0.015	0.05-0.15	Bal.

— : 検出限界以下

ミルシート値と同等であり、材料成分に異常は認められなかった。

材料成分分析結果

フランジ取付ボルト

単位：重量%

元素	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
分析結果	—	0.4	1.8	—	—	8.2	18.2	2.2
ミルシート値	規格値							
規格値	0.08max	1.00max	2.00max	0.045max	0.030max	8.00-10.50	17.00-19.00	1.00-3.00

—：検出限界以下

ミルシート値と同等であり、材料成分に異常は認められなかった。

タービンロータ(タービンホイール翼)

単位：重量%

元素	C	Si	Mn	Fe	Cu	Cr
分析結果	—	0.1	—	0.2	—	14.0
ミルシート値	0.12	0.06	0.02	0.46	0.01	13.47
規格値	0.08-0.20	0.50max	0.25max	2.50max	0.50max	12.00-14.00

元素	Al	Cb+Ta	Ti	Mo	B	Zr	Ni
分析結果	6.1	2.7	1.0	4.0	—	—	71.9
ミルシート値	6.31	2.59	0.72	4.28	0.011	0.10	Bal.
規格値	5.50-6.50	1.80-2.80	0.50-1.00	3.80-5.20	0.005-0.015	0.05-0.15	Bal.

—：検出限界以下

ミルシート値と同等であり、材料成分に異常は認められなかった。

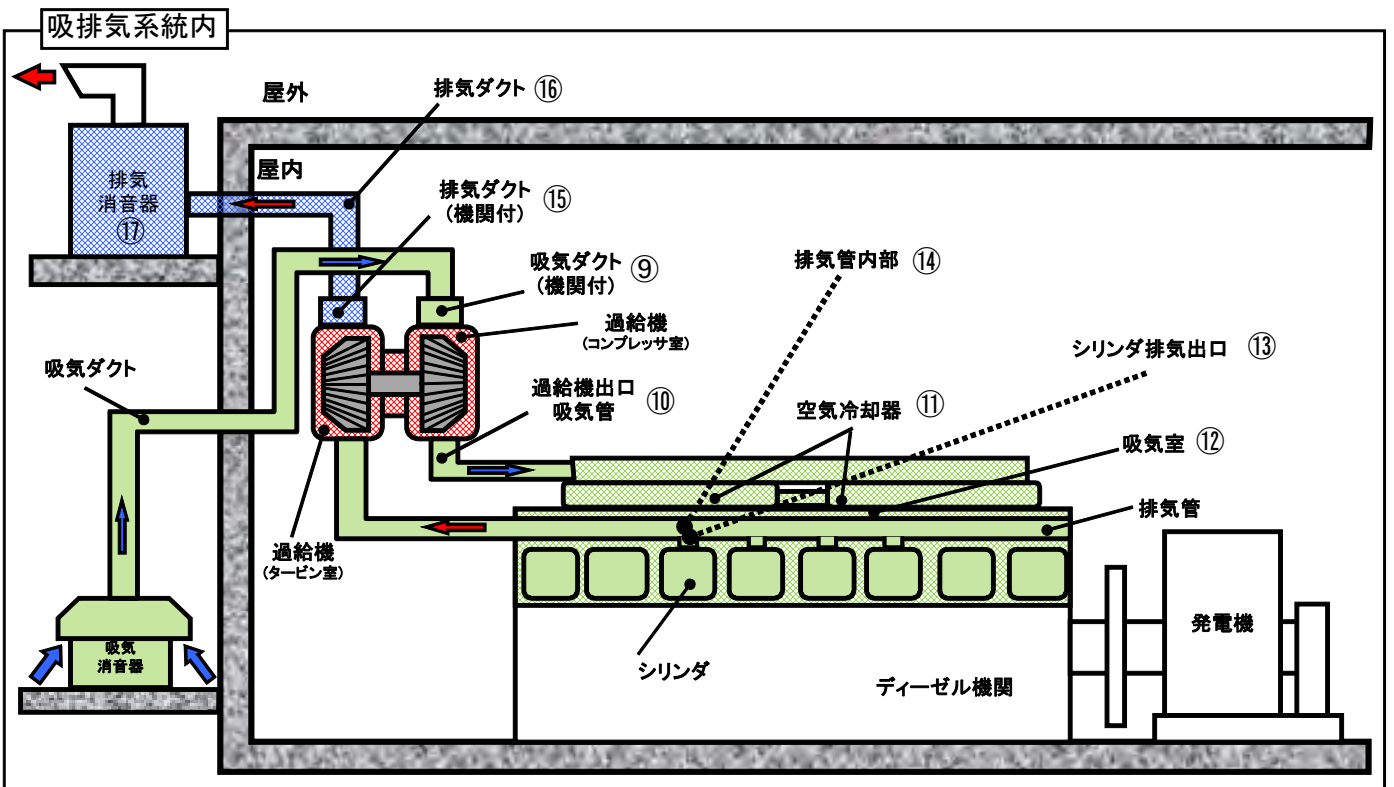
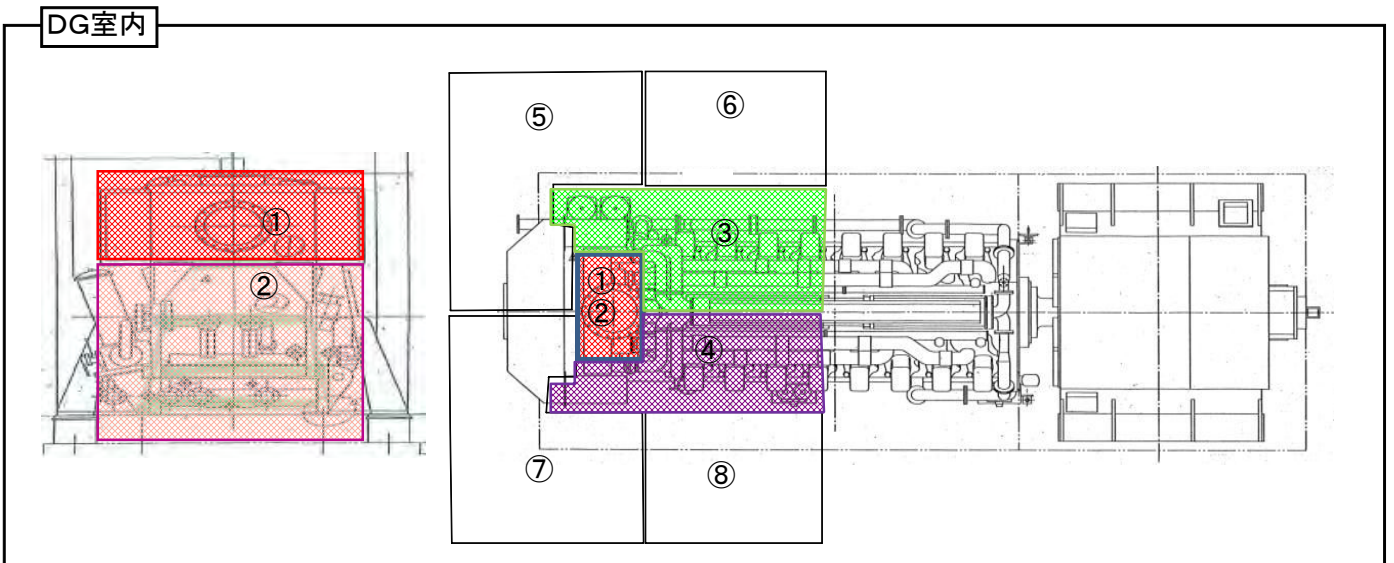
工場調査結果のまとめ

調査対象		調査項目						
		①外観 目視点検	②PT 検査	③破面 観察	④破面 SEM 観察	⑤断面ミクロ 組織観察	⑥硬度 測定	⑦化学成分 (EPMA 分析)
①	タービンロータ (シャフト) 【材質：クロムモリブデン鋼】	タービンホイールとの接合面は、溶接部で折損していた。シャフトのコンプレッサホイール取付け部において、周方向に複数の摺動跡が認められた。なお、ベアリング部に微小な摺動跡および変色が見られるが、焼付き跡は認められなかった。なお、一部に今回の分解時にシャフトを引き抜いた際に発生したと思われる軸方向の傷が認められた。	シャフトにはPT 指示は認められなかった。	シャフト溶接部が全周に渡って破断しており、損傷部には破断面全体に渡って擦り傷が多数認められた。	シャフト溶接部の一部の破断部には、延性破壊の特徴であるディンプルが認められ、多少ねじりを含む破面の様相が認められた。その他は、接触跡により明確な破面形態は識別できなかった。	折損部表面から深さ約 1 mm の範囲に、溶接による熱影響部が認められた。一般部は、マルテンサイトとベイナイトの混合組織となっており、クロムモリブデン鋼材として特に問題は認められなかった。シャフトネジ部は、健全な状態であったがコンプレッサホイールとの取り合い付近に付着物が認められた。なお、付着物を分析した結果、アルミニウムであることが確認された。	深さ方向の硬度分布は一般部で 309~336HV、溶接による熱影響部で 488~530 HVであった。母材の一般部の硬度についてはミルシートに示される 311HB から換算硬度 327HV と同等であり、異常は認められなかった。	ミルシート値と同等であり、材料成分に異常は認められなかった。
②	タービンロータ (タービンホイール) 【材質：ニッケル合金铸件】	シャフト溶接部で折損しており、全ての翼は大きく破損していた。また、中心部（ハブ部）付近からの破損も認められた。	タービンホイール背面（コンプレッサ側）ハブ部において、中心から約 20mm の位置に円周状の P T 指示が断続的に認められ、P T 指示の最も長いものは約 10mm であった。	タービンホイール側シャフト折損部は、破断面全体に渡り擦れ傷が多数認められた。タービンホイール破損部の破面は、全体的に凹凸がある破面形態が認められた。	タービンホイール側シャフト折損部は、一部については、延性破壊の特徴であるディンプルが認められた。タービンホイール破損部の破面は、デンドライト（樹枝状晶）境界に沿った割れの模様が認められるとともに、延性破壊の特徴であるディンプルと推定される破面が部分的に認められた。これらは、強制的に破壊したときに現れる破面であり、観察したものには疲労破面は見られなかった。また、破面には有意な鑄造欠陥等は認められなかった。	割れは、ジグザク状で概ねデンドライト（樹枝状晶）の境界を進展していることが認められた。母材部の組織は、ニッケル合金铸件翼として異常は認められなかった。コンプレッサ側表面に微小なき裂が認められたことから、コンプレッサ側を起点としたき裂が発生した可能性が考えられる。	PT 指示部破面近傍で 461~506HV、破断部で 383~488HV と損傷による硬化が認められた。母材の一般部の硬度についてはミルシートに示される 35.8HR C からの換算硬度 352HV と同等であり、異常は認められなかった。	ミルシート値と同等であり、材料成分に異常は認められなかった。
③	フランジ取付ボルト 【材質：冷間圧造用ステンレス鋼線】	8 本のうち 1 本は外れており、7 本はネジ部途中にて折損が認められた。	—	折損部は比較的平坦であった。	破面は延性破面の特徴であるディンプルが認められた。	ボルト破断部近傍は、著しい変形に伴うすべり線が多く認められた。	破断部では 302~322HV と 267~336HV、内部では 245~251HV と 273~279HV と破断による硬化が認められたが、特に問題となるものではなかった。	ミルシート値と同等であり、材料成分に異常は認められなかった。

破片回収結果 (現場)

回収物確認を実施した結果を下表に示す。

No	回収物確認部位(DG室内)	回収物確認	No	回収物確認部位(吸排気系統内)	回収物確認
①	過給機下部	回収物有り	⑨	吸気ダクト(機関付)	無し
②	機関下部	回収物有り	⑩	過給機出口吸気管	無し
③	機関右部(台板上まで)	回収物有り	⑪	空気冷却器 冷却フィン	無し
④	機関左部(台板上まで)	回収物有り	⑫	吸気室	無し
⑤	床エリア⑤	無し	⑬	シリンダ排気出口	無し
⑥	床エリア⑥	無し	⑭	排気管内部	無し
⑦	床エリア⑦	無し	⑮	排気ダクト(機関付)	回収物有り
⑧	床エリア⑧	無し	⑯	排気ダクト内部	回収物有り
			⑰	排気消音器内部	回収物有り



破片回収結果
(工場)

タービンハウジング内に残存していた破片を回収した。

1. 各部品の回収量と鋼種の関係

部品名称	L2 総重量(kg)	R2			鋼種
		①	②	①+②	
		残重量(kg)	回収重量(kg)	総重量(kg)	
ベアリングハウジング	15.100	14.700	0.835	—	炭素鋼系
タービンバックプレート	1.320	1.280		—	
ラビリンスプレート	0.520	0.500		—	
フランジ	8.080	7.750		—	
ロックプレート	0.056	—		—	
タービンハウジング	22.326	22.288		—	
ノズルリング	3.300	2.686	0.709	—	SUS系
ボルト(フランジ)	0.200	—		—	
ボルト(タービンハウジング)	0.300	0.250		—	
タービンロータ	5.232	1.150	3.725	—	インコネル系
その他	—	—	0.278	—	分類不可回収物
合 計	56.433	50.604	5.546	56.149	

2. 損傷部品重量

L2 (健全品)	R2 (当該品)			健全品との 総重量比率(%) ④/①	健全品との 重量差(Kg) ①-④
① 総重量(Kg)	② 残重量(Kg)	③ 回収重量(Kg)	④ 総重量(Kg) ②+③		
56.433	50.604	5.546	56.149	99.5	0.284

3. 過給機本体の総重量のバラツキ考慮

(美浜発電所内にある健全過給機4台の総重量のバラツキを考慮)

・最小重量品と最大重量品との比率

$$\frac{74.7\text{kg}(\text{min})}{75.2\text{kg}(\text{max})} = 99.3\%$$

$$99.5\% > 99.3\%$$

・最大重量品と最小重量品との差

$$75.2\text{kg} - 74.7\text{kg} = 0.5\text{kg}$$

$$0.5\text{kg} > 0.284\text{kg}$$

*注: 損傷のなかったコンプレッサ等を含んだ質量

損傷部品の残存の可能性のある当該過給機排気系統および周辺、当該過給機内の点検を行い、当該部品と
考えられるものはすべて回収した。その結果、他の健全品に対し重量比で99.5%となったが、同型過給機の重
量バラツキを考慮すると、損傷部品は、全て回収したものと考えられる。

過給機設計に関する調査

○設計の考え方

当該過給機製造メーカーは、大型車両用エンジンへの搭載を目的に開発が始まり、その後トラック・乗用車向けを中心に開発・製造を行ってきた。そのためコンパクト・軽量かつ量産に適した構造を採用している(図 1 参照)。その後、発電用・船用・産業用に大型化した際にも、同一の思想で設計している。

材料面では、エンジンへ供給する空気を圧縮するコンプレッサホイールには軽量で高速回転可能なアルミニウム鋳造材を、排気ガスから駆動力を取り出すタービンホイールには耐熱性が良好なニッケル基合金のインコネル材を適用している。構造面ではホイール材をシャフトでつなぎ、その間に軸受機構を設置することでコンパクトな構造としている。また、メンテナンスのため、脱着可能なロックナット構造としている。

また、インコネル材の難削性の観点より、タービンホイール側はシャフトと電子ビーム溶接で一体接合したタービンロータ構造を採用している。これは万が一、高速回転でタービンホイールが損傷した場合でも、内部潤滑油の漏えいが生じない構造にしており、電子ビーム部が折損することでベアリングハウジングの損傷防止を図っている。

上述の通り、小型乗用車向けから大型発電機・船用まで、同一思想で設計し、多くの採用実績がある。

当該過給機のロックナットは、147N・mのトルクで締付けた時の軸力評価(回転必要軸力・すべり軸力)にて適切性を確認した上で設定している。

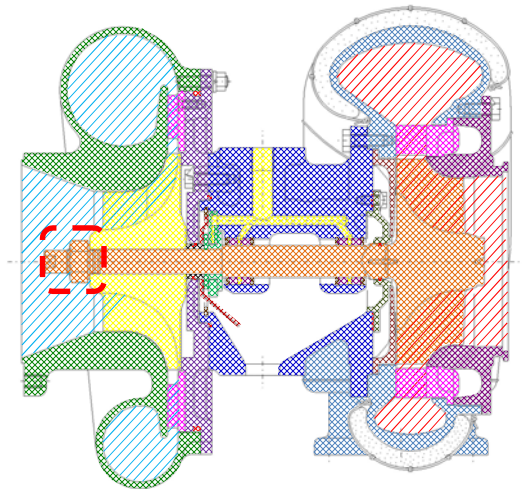


図 1 汎特製過給機断面構造図

当初の設計では、全ての過給機のロックナットは標準的なネジ加工である右ネジを採用していたが、平成元年以降、トラック・乗用車向けエンジンの出力アップに伴い、過給機の高回転化要求が生じ、ロックナットの緩みによる損傷事例、並びにユーザーからの改善要望を踏まえ、小型過給機については左ネジに変更してきた。

一方、今回の過給機を含む大型の過給機については、規定トルクでの締付で問題ないと考えていた。なお、ロックナット締結時に緩み止め剤を塗布することとしている。

過給機設計に関する調査

○電気出力の低下挙動について

今回の事象は、定期負荷試験の約100%出力時(約3,120kW)に異常が発生し、電気出力が約 2,000(2,136)kW まで低下した。

ここで電気出力の低下について計算により求める。電気出力(L_g)は以下の式で表される。

出典：日本機械学会論文集

$$L_g = H_u \times G_f \times \eta_{otto} \times \eta_{combe} \times (1 - \eta_{pl}) \times (1 - \eta_{hl}) \times \eta_m$$

低位発熱量 H_u : 43 MJ/kgK (物性値), 燃料流量 G_f : 687kg/h,
 実機関のサイクル効率 η_{otto} : 48%, ポンピング損失率 $1 - \eta_{pl}$: 100%
 熱損失量 $1 - \eta_{hl}$: 89%, 機械効率 η_m : 89%, 1 MJ = 0.2778 kWh

※上記パラメータは、メーカ性能試験結果による。 η_{combe} は燃焼効率であり、以下にて推定した。

過給機1台が機能喪失すると単純計算ではエンジンに供給される空気量は約 75%まで低下することになるが、このエンジンでは、過給機の出口がつながっているために、正常な3台で圧縮された空気が、この機能喪失したコンプレッサを逆流するため、エンジンに供給される空気量はさらに低下することになる。

空気量低下時の空気過剰率を求めるため、熱流動解析を行った。解析の結果、機能喪失したコンプレッサをオリフィスとして置き換え、誤差を考慮すると等価直径が $\phi 41 \sim \phi 45$ となる。熱流動解析結果の一部を図1に示す。(解析コード: ANSYS CFX ver.14.0)

次に本等価直径を用いて燃焼効率を求めた。等価直径 $\phi 41 \sim 45$ から求まる空気過剰率は $\lambda = 0.7 \sim 0.9$ になる。負荷が急激に低下し燃焼状態が不安定であったと考えられることを踏まえ、燃焼効率が低い $\lambda = 0.7$ を選定し、図2に示す燃焼効率有効範囲の下限値である燃焼効率 $\eta_{combe} = 0.68$ を用いて評価を行った結果、発電出力(L_g)は 2,120kW (32%低下)となった。これは今回の電気出力低下時の出力約 2,136kW (32%低下)とほぼ同等であり、過給機1台の損傷による出力低下について説明できる。

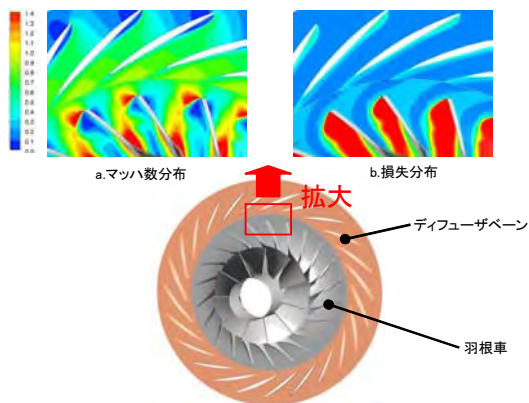


図1 熱流動解析で表したコンプレッサの内部流動

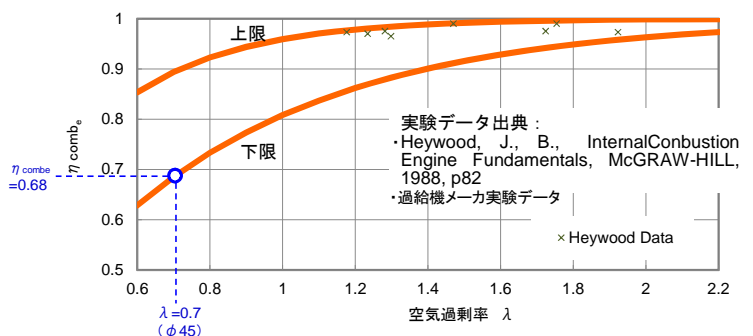







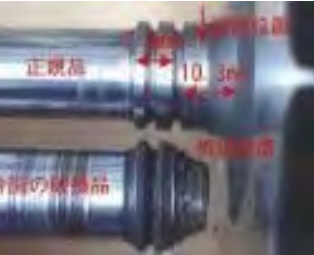
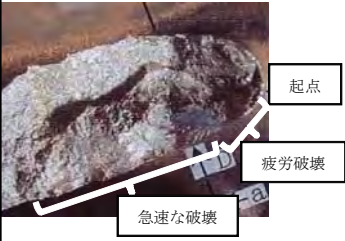

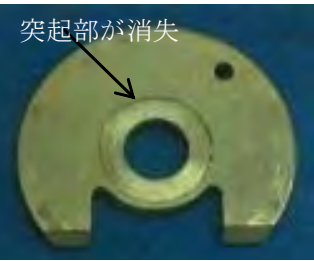

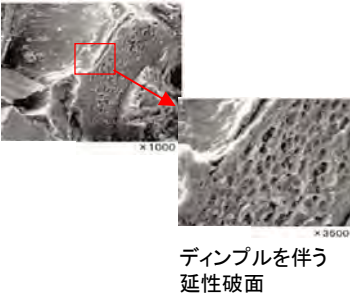

図2 空気過剰率と燃焼効率の関係

過去の過給機損傷事例

タービンロータ不具合事例(2001年～2012年)

損傷の起点	発生数	破損箇所		
		ハブ部	翼部	溶接部
翼部	5	—	○	△
ハブ部	3	○	○	○
シャフト溶接部	3	—	—	○
その他	9	—	—	—

○: 破損あり
△: 破損しない場合もあり
—: 破損なし

損傷起点	翼部	ハブ部	シャフト部
仕様および破損形態	過給機仕様(タービンホイール外形): TD08L(φ85) 用途:トラック 運転時間:118,000km 破損形態:翼部からの損傷(共振による疲労破壊) シャフト溶接部の損傷を伴うことはあるものの、ハブ部の損傷なし。	過給機仕様(タービンホイール外形): TD10L(φ106) 用途:非常用発電機 運転時間:不明 破損形態:ハブ部からの損傷 翼部ならびにシャフト溶接部の損傷を伴っている。	過給機仕様(T/W外径)TD13(φ132) 用途:常用発電 運転時間:58,000時間 破損形態:シャフト溶接部からの損傷 ハブ部・翼部の損傷なし。
破損形態の写真			
			
			
			

過去の過給機損傷事例

タービンロータ過回転による実証試験

1. TD18(当該機種)

試験目的:タービンハウジングからの飛び出し防止(強度)を確認

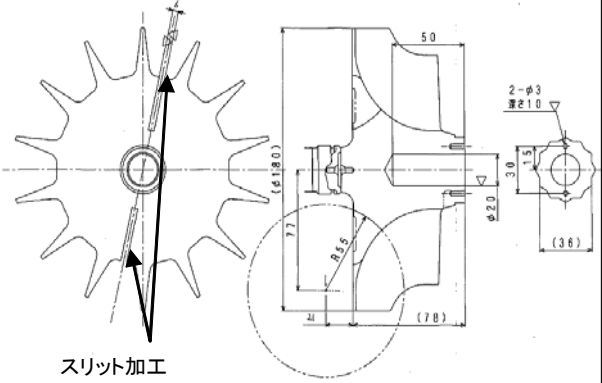
試験体:TD18($\phi 180$ mm)

試験要領:①50000rpm(定格回転)で10分間定格運転を実施。
 ②回転数を上昇させ、タービンロータをバーストさせる。

試験結果:バースト回転数63186rpm(定格回転の1.26倍)

ハブ部から損傷するとともに、翼部ならびにシャフト溶接部の損傷を伴っていた。

また、フランジ取付ボルトの折損、フランジの外れ、タービンホイールの外部への飛び出しおよびタービンハウジングのき裂も認められた。

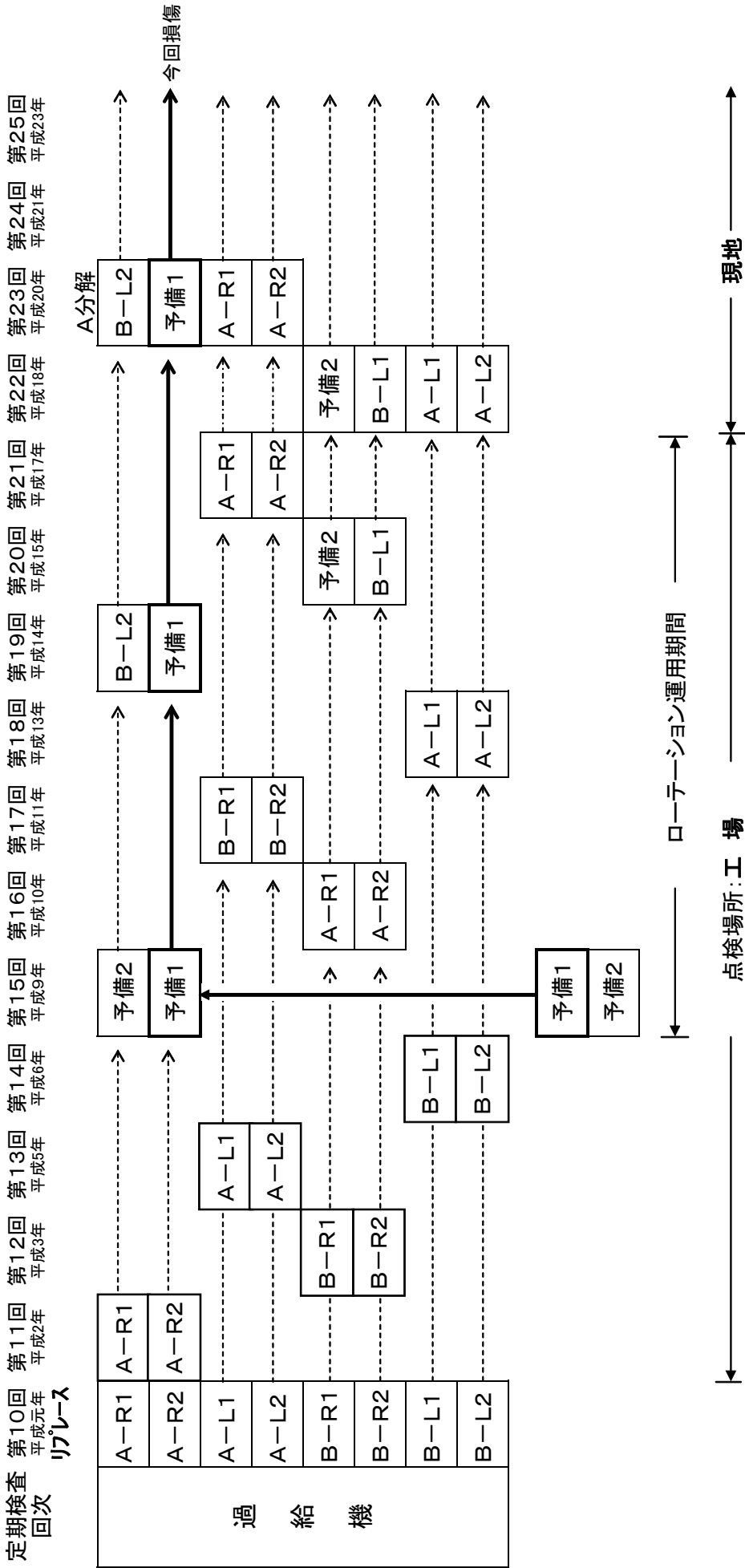


スリット加工

	
<p>タービンホイール出口側フランジが脱落し、タービンロータが外に飛び出している。</p>	<p>タービンホイール出口側フランジが脱落していた。また、締結ボルトはタービンホイールのねじ山ごとボルトが抜けるか、もしくは切断されていた。</p>
	
<p>周方向に二箇所のき裂があった。</p>	<p>スリットを入れたところから破損はしているが、分割するまでには至っていない。</p>
	
<p>タービンホイールのねじ山ごと外れたのが3本、切断されたのが4本、残り1本は試験後発見できなかった。</p>	

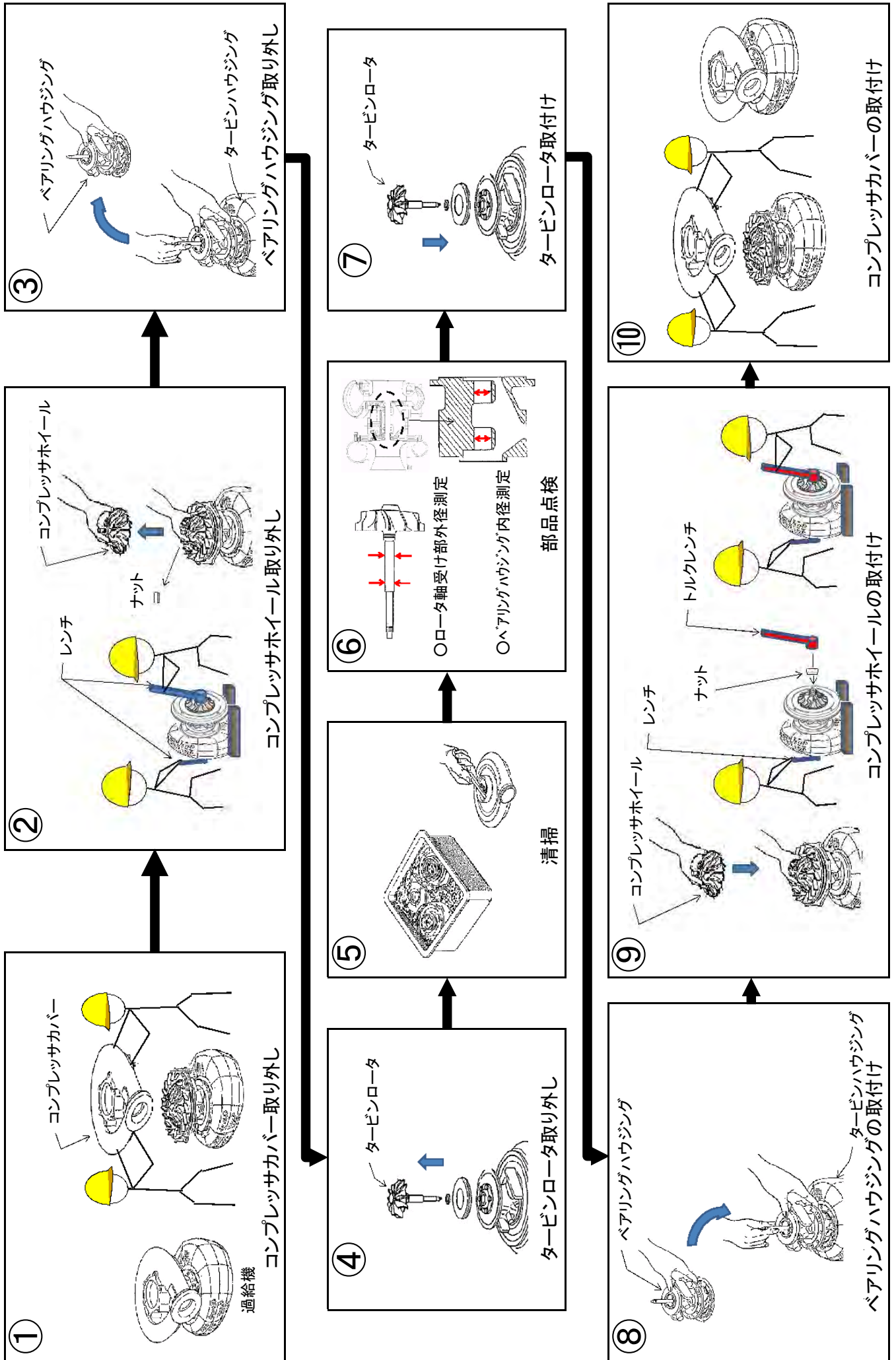
当該過給機の点検履歴

□: A号機R2損傷過給機の動き



第15回定期検査にて予備品の運用を開始し、その後4定期検査毎に点検を実施しており、その点検結果に異常は認められなかった。第21回定期検査までは、メーカ工場において分解点検を行っていたが、第22回定期検査以降は、現地にて分解点検を行っていた。

過給機分解点検フロー



過給機分解点検フロー

	工場（組立標準）	現場	
		整備解説書	第23回定期検査時
① 作業全般	 <p>過給機</p> <p>回転可</p>	 <p>過給機</p>	 <p>過給機</p>
	<ul style="list-style-type: none"> 過給機のターボハウジングを専用受台に取り付ける。(フランジ部でホルトにて取付け) ターボハウジング上で装置を組み上げる。 専用台は、回転可能 	<ul style="list-style-type: none"> 過給機の分解・点検・組立は、通常床面上で実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> 過給機の分解・点検・組立は、床面上で実施。
② ナット締付け	 <p>ボックスレンチ</p> <p>トルクレンチ</p> <p>専用台</p> <p>過給機</p> 	 <p>トルクレンチ (コンプレッサ側)</p> <p>ボックスレンチ (タービン側)</p> <p>過給機</p> <p>メーカー指導員判断により、工場の作業姿勢に整合するように変更 (聞き取り聴取結果)</p>  <p>タービンホイール</p> <p>ソケット</p> <p>万力</p>	 <p>スパナ (コンプレッサ側)</p> <p>ボックスレンチ (タービン側)</p> <p>過給機</p> <ul style="list-style-type: none"> 過給機は横置きで床面に仮置き。 タービン側をボックスレンチで固定し、コンプレッサ側のナットをスパナで締め、仮締め。  <p>トルクレンチ (コンプレッサ側)</p> <p>ソケット (タービン側)</p> <p>万力</p>
	<ul style="list-style-type: none"> ボックスレンチ(ナット)側を固定し、トルクレンチを回すことによって主軸を回転させ、トルク締めを行う。 	<ul style="list-style-type: none"> 過給機は横置きで床面に仮置き。 タービン側をボックスレンチで作業員が固定。 コンプレッサ側のナットをトルクレンチで締付け。 	<ul style="list-style-type: none"> 作業架台上に万力を設置し、ソケットを万力上に固定。 過給機を架台上に持ち上げ、タービン側をソケットにはめ込み、作業員が支持。 コンプレッサ側のナットをトルクレンチで締付け。

・現場におけるナットの締付け作業は、メンテナンス向け整備解説書(当時)に基づき、横置きにて実施することとなっている。一方、工場においては、専用受台を用いて縦置きで締付けをしているため、メーカー技術指導員の指示により第23回定期検査時においてはそれを勘案し、万力を用いた仮の台にて縦置きでの作業を実施した。

	①前回点検時	②負荷試験時(約60回)	③コンプレッサホイール滑り発生
コンプレッサホイール断面			
	<p>第23回定期検査時のロックナット締付け時の軸力が不十分</p>	<p>平成20年4月以降、約60回の負荷試験を実施。コンプレッサホイールとロックナット、フリingasリーブ間の座面の摩耗が進み、コンプレッサホイールの滑り量は、徐々に増大(微小な滑り)</p>	<p>平成25年2月5日、負荷試験時にコンプレッサホイールの滑りが約5%(連続的な滑り)に到達し、DG出力が低下</p>

軸力低下イメージ	<p>コンプレッサホイール</p>		
	<p>締付作業状態の違いによる締付力(軸力)の変化を検証(研究所にて実証試験を実施)</p>		
	<p>【試験条件】トルク:147 Nm 試験数n:各6回 (計24回)</p> <p>縦置き (第23回定期検査の模擬) 横置き (第22回定期検査の模擬) 縦置き (工場点検の模擬)</p> <p>コンプレッサホイール固定条件</p>		
	<p>施工条件によっては、締付トルクが減少して軸力が低下することを確認。</p>		
	<p>滑りクライテリア 必要軸力 軸力(実力) 必要軸力が軸力(実力)を上回ること、微小滑りが発生し、微小摩耗により、軸力がわずかに低下</p> <p>軸力 滑りクライテリア 軸力(実力) 必要軸力 29kN 46,600rpm 回転数</p> <p>⇒ 定格46600rpmの負荷試験時の発電機出力100%近傍で微小滑りが生じる</p>		
	<p>連続すべり発生 摩耗量 約60回</p> <p>連続すべり発生 軸力 29kN 連続すべり発生 約60回</p> <p>摩耗による軸力低下イメージ</p> <p>摩耗が進むことで、軸力が低下していき、約60回の負荷試験を経て、コンプレッサホイールが連続して滑る状態になったと考えられる。</p>		

損傷要因検証

軸力のすべり限界値について (1/2)

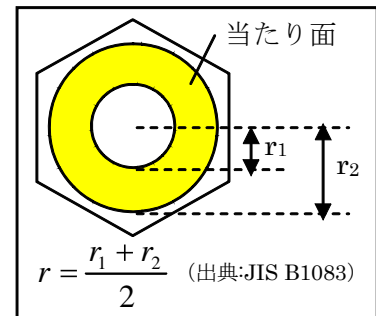
軸力のすべり限界値 F_{lim} [kN] は、当たり面の摩擦力によって生じるトルク $\mu F_{lim} r$ が回転トルク T と等しくなるという関係式から、次式で表される。

$$F_{lim} = \frac{T}{\mu r} \quad \dots \text{①}$$

T : 当該過給機の定格運転時の回転トルク [Nm]

μ : ロックナットとコンプレッサの当たり面での摩擦係数

r : 当たり面の有効半径 [mm] (右図参照)



当該過給機 (TD18) の F_{lim} を算出するため、同構造で小型の試験機 (TD10) を用いた実証試験を行った。

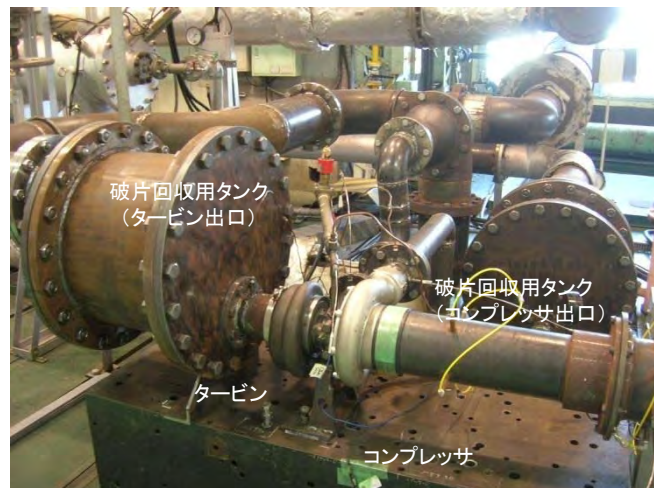
○ 試験条件

試験温度 : 室温 (約 10 ~ 20 °C)

TD10、18の諸元 : 下表のとおり

	TD10	TD18
コンプレッサホイール直径D (mm)	125	190
軸径d (mm)	11	22
定格回転数R (rpm)	70800	46600
定格運転時の回転トルクT (Nm)	14.7	49.9
当たり面有効半径r (mm)	7.4	13.1

試験状況



損傷要因検証

軸力のすべり限界値について (2 / 2)

○ 試験結果

コンプレッサホイールの初期締付軸力 15 [kN]にて試験を行ったところ、回転数が 62400 [rpm]にて滑りが認められ、TD10のすべり限界が分かった。

○ 考察

上記試験結果から得られる抵抗係数 μ の値を TD18 に適用する為に、①式に 62400 [rpm]における軸力 F 、回転トルク T および当たり面有効半径 r を代入し、 μ を求めた。

$$\mu = \frac{T}{Fr} = \frac{11.4}{11.5 \times 7.4} = 0.13$$

なお、ここで T は、62400 [rpm]における回転トルクであり、遠心力の運動方程式 ($F = mr\omega^2$) の関係より回転数の 2 乗に比例することから、定格 70800 [rpm]における回転トルク 14.7 [Nm] より、11.4 [Nm] を用いた。また、 F は、初期締付軸力 15 [kN] に対し、62400 [rpm]における遠心力、熱膨張差 (FEM) を考慮し 11.5 [kN] とした。

①式を用いて、当該過給機である TD18 の F_{lim} を以下のとおり算出する。

$$F_{lim} = \frac{T}{\mu \times R_{TD18}} = \frac{49.9}{0.13 \times 13.1} = 29.3 \text{ [kN]}$$

ここで、 T は TD18 の定格運転時の回転トルク、 R_{TD18} は TD18 のトルク伝達面の平均径である。

以上より、当該過給機の軸力のすべり限界値は、約 29 [kN] と推定した。

以 上

損傷要因検証

コンプレッサが機能喪失する滑り量を求める為、コンプレッサの作動状態について検証する。

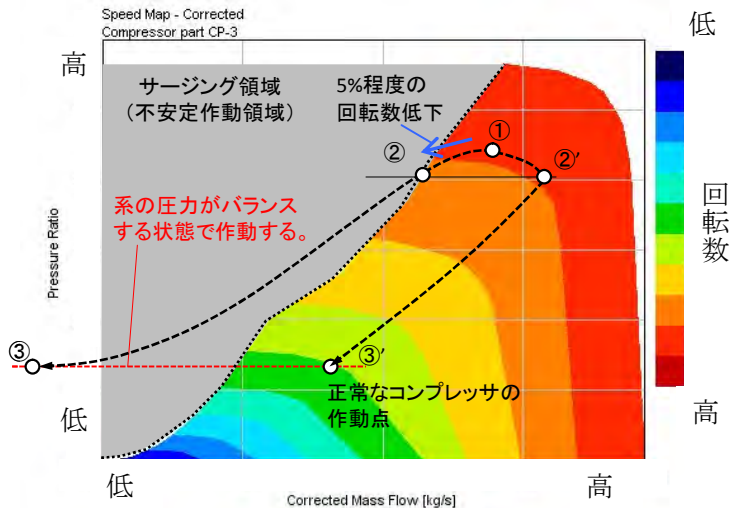


図1 過給機コンプレッサ性能曲線上の推定作動線

図1に当該過給機のコンプレッサ性能曲線上での推定作動線を示す。

出典及び解析コード

- 三菱ターボチャージャーコンプレッサ性能曲線 TD18-75B 三菱重工(株)相模原製作所
- エンジン性能計算コード GT-Power

図2にコンプレッサの作動流量の遷移を示す。

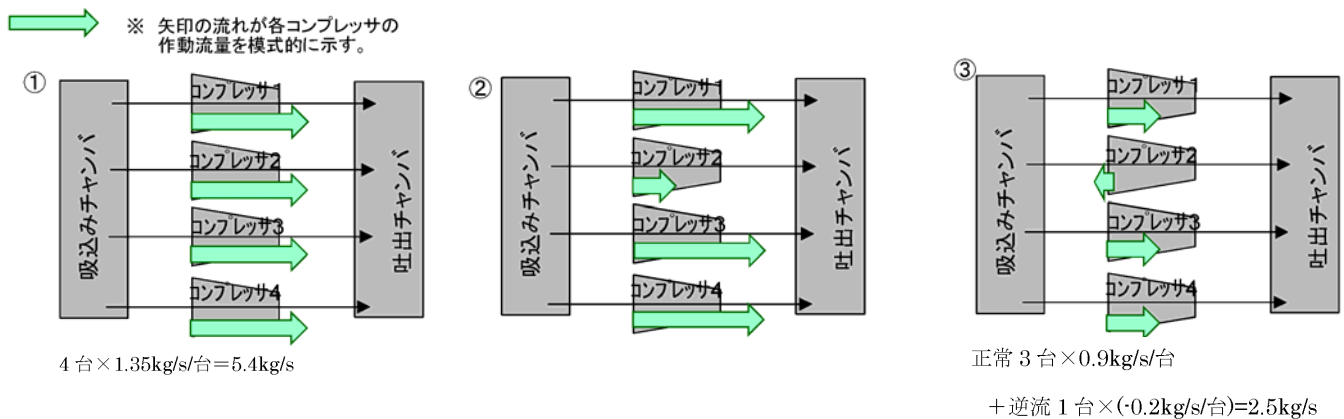


図2 各作動条件における過給機コンプレッサの作動流量

ここで、正常運転状態を①、滑り5%程度のコンプレッサと3台の健全なコンプレッサの運転状態を②と②'、滑り5%以上のコンプレッサと3台の健全なコンプレッサの運転状態を③と③'とする。

各運転状態におけるコンプレッサの作動状態は以下の通り。

- ①. コンプレッサ4台作動 (正常な運転状態)
- ②. 1台のコンプレッサホールと駆動シャフトに滑りが発生し、コンプレッサホイール回転数がシャフト回転数よりも小さくなる。その結果、タービン出力がコンプレッサに伝わり難いため吐出圧力および空気流量が低下してくる。
- ②'. 4台のコンプレッサの吸込みと吐出部は同一部に接続されているため、バランスする状態で作動する。正常 (滑りの無い) コンプレッサホイール3台は、若干回転数を落としながら、流量が増加する状態へ作動していく。
- ③. 滑りが生じたコンプレッサホイール1台 (②) の滑りがさらに大きくなり、約5%以上の滑りが発生すると、コンプレッサのサージング領域 (不安定作動域=空気を吐出できない状態) での状態となることから、コンプレッサは逆流状態となる。
- ③'. 正常 (滑りの無い) コンプレッサ3台で圧縮された空気が、滑りのあるコンプレッサへ逆流するために、エンジンへの供給空気量が減り、結果としてタービンへ供給されるエンジン排ガスが減り、徐々にターボチャージャーの回転数が低下していく。
- ③, ③'. 正常 (滑りの無い) コンプレッサ3台で圧縮される空気量が減り、吐出圧力が減るため、滑りが発生したコンプレッサホイールにかかる圧力も減る。正常 (滑りの無い) コンプレッサ3台と、滑りが生じたコンプレッサ1台とが圧力バランスする。

損傷要因検証

○応力評価結果

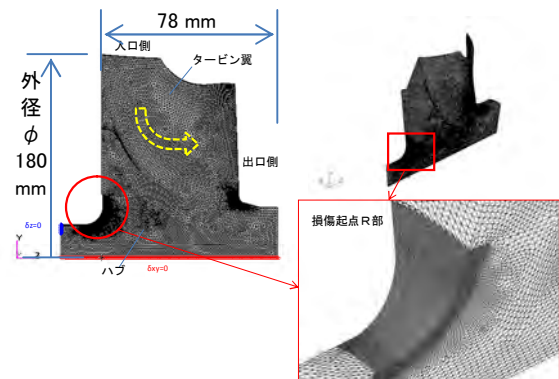
1. はじめに

降伏応力に到達するタービン回転数を求める為、運転時に発生する遠心力、熱応力について解析する。

2. 解析方法

汎用構造解析コード ABAQUS6.8.4 を用いて当該タービン翼について静的弾性解析を行う。以下の定格運転条件にて評価。

- ・タービン回転数 : 46,600rpm
- ・ガス温度 : 584℃
- ・寸法 : 外形φ180 mm
- ・材料 : ニッケル合金鋳物
- ・総要素数 : 約 44 万要素



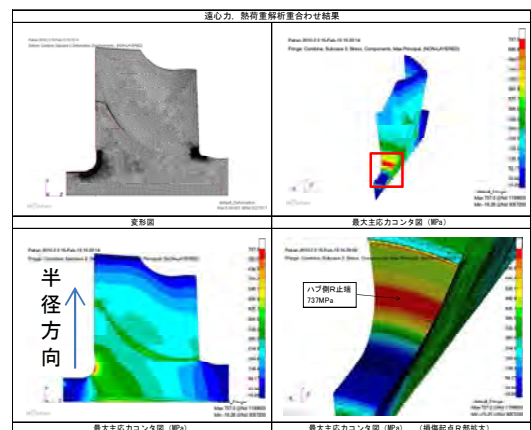
解析モデル (1/14 ケーキカットモデル)

3. 解析結果

遠心力解析，熱荷重解析，およびそれらを重ね合わせた結果は以下のとおり。

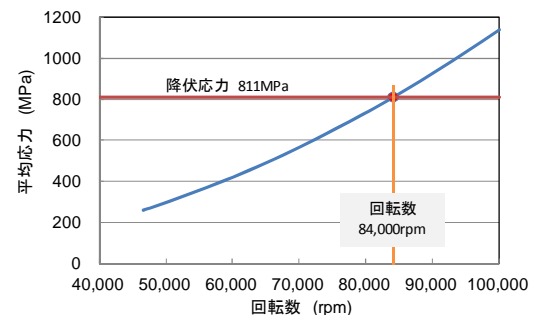
	半径方向 変形量[mm]	半径方向平均 応力 [MPa]
遠心力	最大 0.1	244 (損傷部)
熱荷重	最大 0.5	16 (損傷部)
重ね合せ	最大 0.6	260 (損傷部)

遠心力解析，熱荷重解析重ね合せ結果→

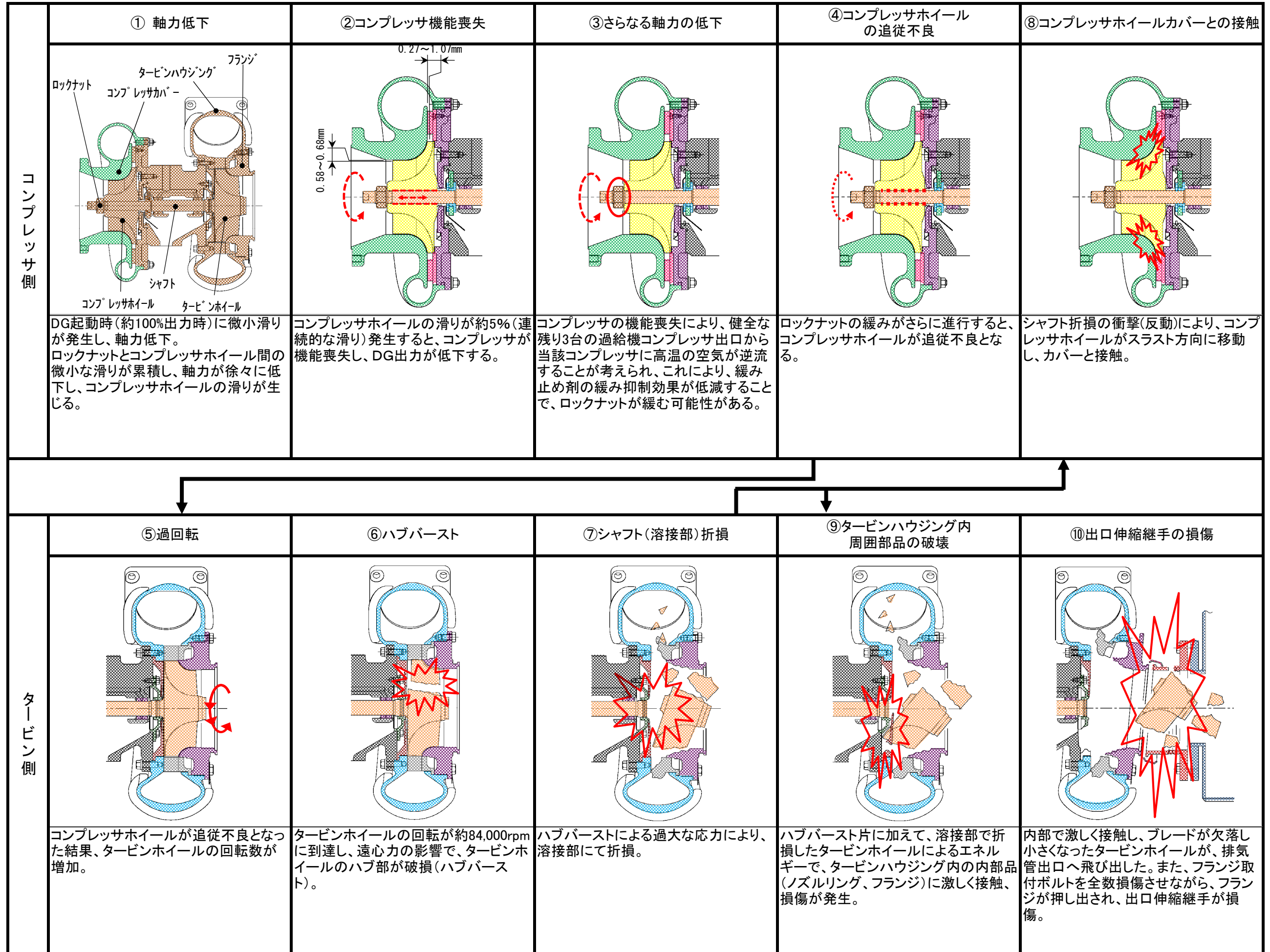


4. 評価まとめ

当該タービンホイールの強度特性は、ミルシート値より降伏応力：811MPa であり、発生応力は回転数の2乗に比例することから、回転数約 84000rpm において平均応力は右図の通り降伏応力に到達する。よって、回転数が上昇することによる遠心力の増加によりハブ部が損傷する可能性が確認された。

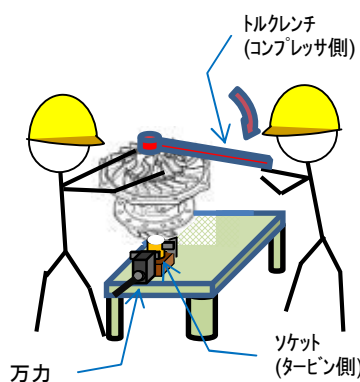


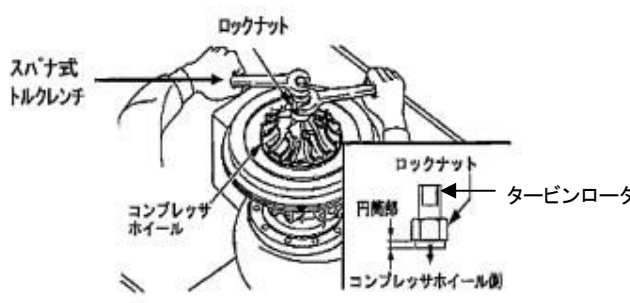


過給機損傷メカニズム 推定フロー



対 策

1. 組立方法

前回組立方法	対策後(メーカ工場)
<p>○コンプレッサホイールの取付け</p> <p>(1)コンプレッサホイールを取付け、ロックナットのねじ部に緩み止め剤を塗布する。</p> <p>(2)タービンロータのボスを押え、ロックナットを規定トルクで締付ける。</p> <p>締付けトルク: $147 \pm 20 \text{N} \cdot \text{m}$ <ロックナット締付け状況></p>  <p>トルクレンチ (コンプレッサ側)</p> <p>ソケット (タービン側)</p> <p>万力</p>	<p>○コンプレッサホイールの取付け</p> <p>(1)専用受台にタービンロータを取付ける。</p> <p>(2)シャフトにコンプレッサホイールを取付ける。</p> <p>(3)ロックナットのねじ部に指定の潤滑剤を塗布する。</p> <p>(4)ロックナットを固定し、タービンロータ端部をトルクレンチにて締付けることにより確実に軸力を付与する。</p> <p>締付けトルク: $157 \pm 10 \text{N} \cdot \text{m}$ (2) <ロックナット締付け状況></p>  <p>(1) <専用受台></p>   <p>ロックナット</p> <p>スパナ式トルクレンチ</p> <p>コンプレッサホイール</p> <p>タービンロータ</p> <p>ロックナット</p> <p>円筒部</p> <p>コンプレッサホイール側</p>

2. 緩み防止措置

