

ユーティリティ施設 非常用発電機（2号機）過給機の故障原因及び 今後の対応について

平成 30 年 12 月 11 日
核燃料サイクル工学研究所
工 務 技 術 部

1. はじめに

平成 30 年 8 月 4 日にユーティリティ施設の非常用発電機（2号機）の年次点検において、過給機^{※1}の異常（写真 1、写真 2 参照）が確認された。異常が確認された過給機はメーカ工場にて修理及び作動確認を行い、更に非常用発電機本体に破片等の異物がないことを確認した上で 10 月 1 日にユーティリティ施設の非常用発電機に取付けた。過給機取付け後、非常用発電機の試運転により、機能・性能に問題ないことを確認し、仮復旧とした。

過給機の仮復旧と並行して進めていた故障原因の究明が終了したことから報告する。

※1：過給機（ターボチャージャー）は、原動機の排気エネルギーを利用してエンジンに圧縮空気を供給することにより、エンジンの出力を向上させるための機器。

2. 過給機の故障に係る要因分析（図-1「過給機構造図」参照）

故障した過給機はメーカ工場にて分解点検を行った結果、ブロワ側にも接触痕等が認められたが、タービン側の損傷状況から、タービン側ベアリングの損傷を発端に、タービンブレード、インペラ等に影響したものと判断する。

タービン側ベアリングが損傷する要因としては、「回転体の異常」、「タービン側ベアリングの異常」が考えられ、要因分析（図-2「過給機損傷に伴う要因分析図」参照）を実施した。

(1) 回転体の異常

回転体の異常が発生する要因としては、ロータシャフトの軸ブレ、シール部の接触、タービンブレードの損傷、タービンブレードへの異物付着が考えられ、損傷部位の測定、観察等を実施した結果、

- ・ ロータシャフトの軸ブレの有無を確認するため計測をした結果、管理値内であり問題なし。
- ・ シール部に接触痕が確認されたが、ベアリングが損傷したことによる二次的な影響と判断。
- ・ タービンブレードに接触摩耗が認められたが、ベアリングが損傷したことによる二次的な影響と判断。
- ・ タービンブレード表面にススの付着は全体的に見られるが、過度な付着は認められないため、問題なし。

となり、回転体の異常ではないと判断した。

(2) タービン側ベアリングの異常

タービン側ベアリングが異常となる要因としては、ベアリングの製品不良、摩耗等による経年劣化、潤滑油の供給不足、構成部品のゆるみが考えられ、損傷部位の測定、分析等を実施した結果、

- ・ ベアリングは製造メーカーの標準品であり、製造番号からトレースした検査記録から問題なしと判断。
- ・ 損傷したベアリングを製造メーカーにて調査したところ、損傷原因は、潤滑油不良が原因との見解（添付資料-1「タービン過給機用軸受損傷品の調査」参照）。
- ・ 構成部品のゆるみについて、今回の年次点検ではベアリングの取り外しをしておらず、ベアリングナットにゆるみがないことから問題なしと判断。

となった。

潤滑油の供給系統の調査では、L0 ポンプ^{※2}ガイドのシールリング溝に摩耗が見られた。ベアリングへの潤滑油供給は、過給機にセットされた L0 ポンプデスクが過給機の運転に伴い回転することでポンプ室が真空になり、これにより潤滑油はポンプ室内に吸い込まれ、ベアリングに供給される。

しかし、シールリング溝に摩耗が発生すると、トメワ及びシールリングがズレ、シールリング溝との間に隙間が生じポンプ室内の真空が保てなくなる。このため、潤滑油を吸い上げることが出来なくなり、ベアリングへの潤滑油の供給不足となる。

他に挙げた要因に問題がないことから、L0 ポンプガイドのシールリング溝の摩耗からベアリングへの潤滑油の供給不足となり、ベアリングが損傷に至ったものと判断した。

※2：L0 ポンプは、過給機に設置されているベアリングに潤滑油を供給するための機器。

(3) L0 ポンプガイドのシールリング溝の形状検査

L0 ポンプガイドのシールリング溝部について、3D スキャンにより形状検査を実施したところ、損傷品の溝の形状は新品に比べて減肉していることが確認された。

減肉は、シールリングもしくはトメワとの接触により摩耗したと推定される。

詳細は、添付資料-2「L0 ポンプガイド 3D スキャンによる形状計測結果」参照

(4) L0 ポンプガイドのシールリング溝の摩耗の要因

点検時における L0 ポンプガイドの取付け・取外しや運転中のロータシャフトの熱膨張及び収縮^{※3}により L0 ポンプデスクフタが軸方向に移動する際に、L0 ポンプガイドのシールリング溝部は、シールリング及びトメワと接触する構造となっている。このため、年次点検による分解点検及び発電機の発停によるロータシャフトの熱膨張、収縮の繰り返しにより摩耗したと推定される。なお、過給機は、毎年、年次点検において、「潤滑油の交換」、「内部清掃」、「軸受点検」及び「外観点検」を行っている。L0 ポンプガイドの外観確認は実施しているものの、シールリング溝の摩耗は微小であり、現地で確認することが出来ない。

詳細は、添付資料-3「L0 ポンプガイド シールリング溝の摩耗について」及び図-3「年次点検における要因とそのための対応」参照

※3：ロータシャフトはブロワ側を固定とし、熱膨張代はタービン側にとってある。

3. 過給機故障に至るフロー

過給機のロータシャフトは、 を超える速度で回転するため、常時ベアリングへの潤滑油供給が必要となる。

今回、発生した事象では、L0 ポンプガイドのシールリング溝の摩耗が原因で潤滑油の吸込みが悪くなったことによりベアリングが損傷し、その後、ロータシャフトの軸ブレによりタービンブレード、インペラ等の接触が発生したものと判断する。

詳細は、添付資料-4「過給機故障に至るフロー」参照

4. 是正処置計画

非常用発電機（2号機）の過給機の故障の原因となった、L0 ポンプガイド、シールリング及びトメワに関しては他の損傷部位とともにメーカー工場にて全てメーカー標準品と交換し、10月1日に現地据付け後、非常用発電機の試運転により機能・性能に問題が無いことを確認している。

故障の原因となった、L0 ポンプガイド、シールリング及びトメワの摩耗状態を点検で確認し対応することは年次点検での取り外し、外部専門機関での3Dスキャン等による調査が必要となり非常用発電機の点検期間が長期間となることから、これらの部品を定期交換部品として位置付け、年次点検に合わせて計画的に交換する。L0 ポンプガイド等の交換推奨時期については、過給機製造メーカーにおいて定期交換部品になっていないことから、今回の事象を踏まえメーカーと調整の上、交換周期を決定し「ユーティリティ供給設備保守管理要領書」に反映する。また、非常用発電機（2号機）には過給機が2基設置されており、健全な側の過給機についても、今回、発生した事象の原因検討結果を踏まえ、同様に、L0 ポンプガイド、シールリング及びトメワの交換を行う。

「ユーティリティ供給設備保守管理要領書」への交換周期の記載及び非常用発電機（2号機）の健全な側の過給機の部品交換が完了次第、非常用発電機（2号機）を本復旧とする。

5. 水平展開

今回、故障した過給機と同一型式の過給機は、非常用発電機（1号機）に2基設置されていることから、非常用発電機（2号機）の本復旧が完了次第、部品交換を行う。

以上

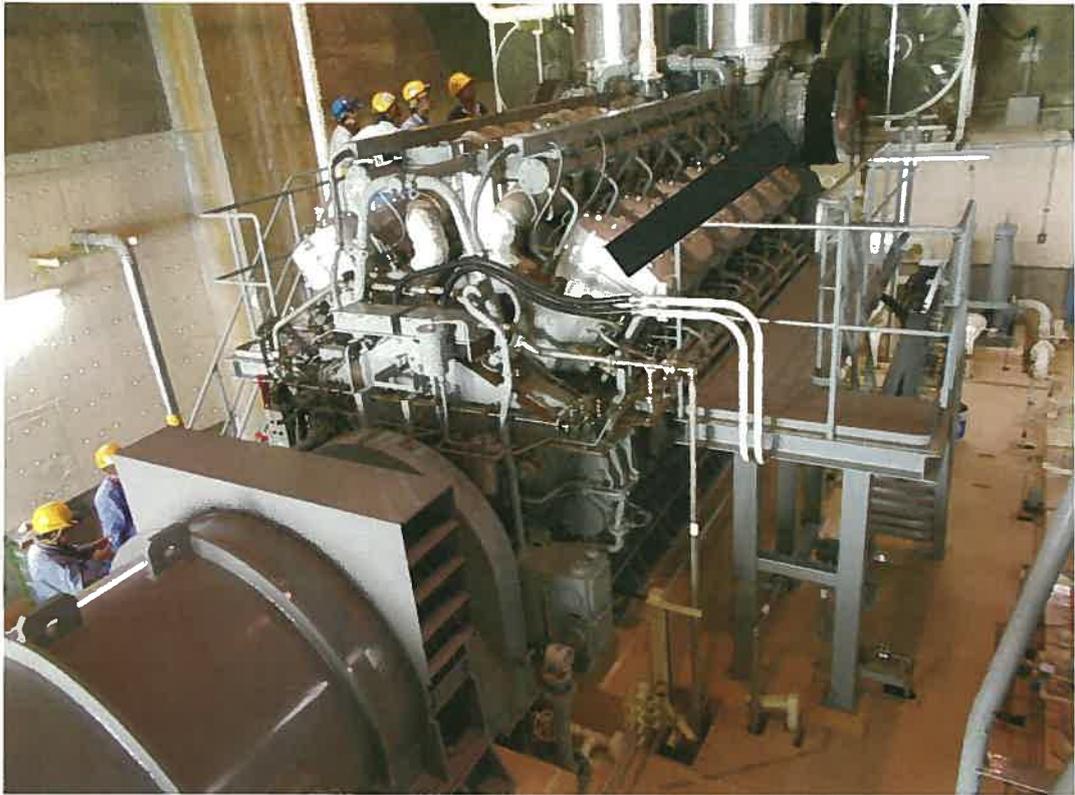


写真1：非常用発電機（2号機）

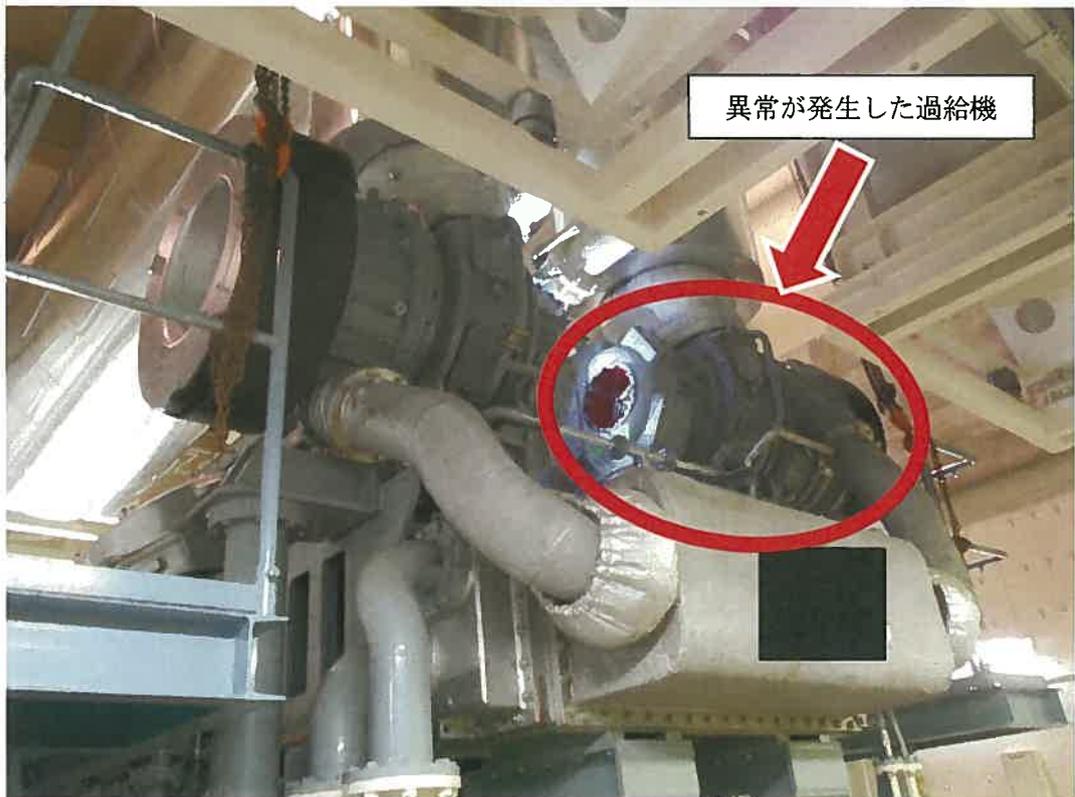


写真2：過給機

凡例 ○：主要因
×：要因ではない

事象	推定要因	調査内容	調査結果	評価			
過給機の故障	回転体の異常	ロータシャフト軸ブレ	ロータシャフト軸に軸ブレがないか確認する。	ロータシャフトの軸ブレ計測結果は管理値 \blacksquare mm 以内に対し実測値最大 \blacksquare mm であり、ロータシャフトのアンバランスは生じないと判断する。	×		
		シール部の接触	シール部に接触がないか確認する。	オイルシールブレード、ガスシールウラガネ、オイルシールウラガネ等とロータシャフトが接触していることが確認された。これらはベアリングが損傷したことによりロータシャフトが振れ回り接触した二次的損傷(摩耗)と判断する。	×		
		タービンブレード損傷によるアンバランス	タービンブレードにアンバランスがないか確認する。	タービンブレードに接触摩耗が認められたが、ロータシャフトの軸振れ計測結果は管理値 \blacksquare mm 以内に対し、実測値最大 \blacksquare mm であり、軸振れによる接触摩耗が生じたことは考えられない。要因はベアリングが損傷したことによりロータシャフトが振れ回り接触した二次的損傷と判断する。	×		
		タービンブレード異物付着	タービンブレードに異物の付着がないか確認する。	タービンブレード表面にススの付着は全般的に見受けられるが、燃焼残渣物の過度な付着は認められないため、異物付着によるロータシャフトのアンバランスは生じないと判断する。	×		
	タービン側ベアリング異常	ベアリング製品不良	損傷したベアリングの仕様を確認する。	仕様について調査を行い実績のあるメーカー標準のベアリングを使用しており問題のないことを確認した。現品の製造番号からトレースした検査記録からも問題がないと判断する。	×		
		ベアリング経年劣化	ベアリングの製造メーカーに調査を依頼する。	ベアリング調査結果は、潤滑油不良の影響と判断する。	×		
		潤滑油供給不良	L0ポンプデスク異常(変形)	L0ポンプデスクに異常がないか確認する。	目視検査では損傷などの異常は認められない。但し、タービン側L0ポンプデスクの内径にシールリング・トメワとの接触による変形や発熱による変色が認められた。ベアリングが損傷したことによりロータシャフトが振れ回り接触した二次的損傷と判断する。	×	
				供給系統部品損傷(シールリング、トメワ及びL0ポンプガイド)	経年劣化	シールリング、トメワ及びL0ポンプガイドに摩耗等の劣化がないか確認する。	シールリング、トメワが損傷し、一部損傷片が軸受室の金属粉の中から確認された。また、シールリング・トメワを組み込むL0ポンプガイドのシールリング溝部に摩耗が認められた。なお、過給機は、毎年、年次点検において、「潤滑油の交換」、「内部清掃」、「軸受点検」及び「外観点検」を行っている。L0ポンプガイドの外観確認は実施しているものの、シールリング溝の摩耗は微小であり、現地で確認することが出来ない。年次点検においてL0ポンプガイドの摩耗が発見出来なかったことに関しては、図-3「年次点検における要因とそのための対応」参照
			取付不良		シールリング、トメワの取付方法に人的な問題がなかったか確認する。	L0ポンプガイド、シールリング及びトメワが取付けられているエンドカバは、今回の年次点検時に取外し及び取付けを行っている。エンドカバを取付ける際は、 \blacksquare 箇所のスタッドにナットを取付け、対角線上に締め付け込みを行うため、傾きが生じた場合には、取付けが困難な構造である。作業員への聞き取りで慎重に実施していることを確認しており、点検時の取付上の問題はないと判断する。	×
			油量不足	潤滑油の油量を確認する。	外観点検を行い潤滑油の漏れは認められなかった。また、運転停止後、過給機油面計の油面が規定レベル内であることを現地で確認した。	×	

※1

※2

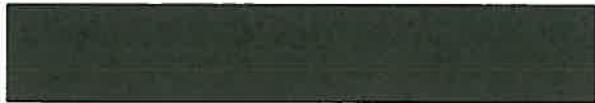
図-2 過給機損傷に伴う要因分析図

事象	推定要因	調査内容	調査結果	評価
※1 構成部品の ゆるみ	※2 選定不良	潤滑油の成分分析を行い選定不良がないか確認する。	メーカー指定の潤滑油粘度はSAE [] のうち、今回使用油はSAE []番を使用している。その新油の粘度は [] mm ² /sであり管理値の新油粘度の []に対して分析結果はタービン側・プロワ側ともに [] mm ² /sであり潤滑油の粘度としては問題ないものと判断する。	×
	潤滑油劣化	潤滑油の劣化、交換履歴を確認する。	潤滑油は毎年交換しており、今回の点検作業でも新油へ交換しているため、劣化等の問題はないと判断する。	×
	供給系統閉塞	潤滑油通路に詰まりがないか確認する。	タービン側 L0 ポンプデスク内の油穴 [] 中1ヶ所に閉塞物が確認された。その異物は2つの片状の異物であり、成分分析結果からベアリング（外輪・内輪）に使用されている []の成分が確認されたためベアリングの損傷による二次的な閉塞と判断する。	×
	ベアリング	図面どおりに組込まれているか確認する。	今回の年次点検では、取外しをしていない。また、分解調査によりベアリングは図面どおり弾性装置に組み込まれており、ベアリングナットの緩みがないことをベアリング座金の折り曲げで確認していることから問題ないと判断する。	×
	弾性装置	弾性装置が図面どおりに組込まれているか確認する。	今回の年次点検では、取外しをしていない。2017年の点検の際にインペラクリアランスを計測し、管理値内であることを確認済みのため組み込み不良はないと判断する。	×

図-2 過給機損傷に伴う要因分析図

事 象	要 因(1)	要 因(2)	対 策	評 価
年次点検において、L0 ポンプガイドのシールリング溝の摩耗が発見出来なかった。	L0 ポンプガイドは潤滑油の供給系統であり、潤滑油交換が主要な作業であった。	L0 ポンプガイドの外観点検は実施しているが、シールリング溝の摩耗までは確認していなかった。	年次点検において L0 ポンプガイドを取り外し、専門機関にて 3D スキャンによる摩耗の状態を調査する。 (非常用発電機の点検期間が長期間となる。)	×
	L0 ポンプガイドの摩耗による不具合の知見がなかったため、摩耗に係る点検項目が無かった。	L0 ポンプガイドは、消耗品という位置付けではなかったため、摩耗の確認を行うという概念が無かった。		
		過去に、L0 ポンプガイドのシールリング溝の摩耗を起因とする故障は発生していなかった。	L0 ポンプガイドを定期交換部品として管理する。 (点検期間は通常通り。)	○
		製造メーカーから、L0 ポンプガイドの交換頻度が示されていないため、摩耗の確認は不要と考えていた。		

図-3 年次点検における要因とそのための対応



2018年10月18日



調査報告書

部長	課長	担当
[Redacted]		

件名：タービン過給機用軸受損傷品の調査



1. 調査目的

タービン側に使用されている標記軸受が損傷した事から内部調査を行いました。以下に結果をご報告致します。

2. 品名・使用機械・使用条件

品名：[Redacted] (2015年7月製)
 使用機械：ディーゼル機関向け排気タービン過給機(タービン側)
 運転時間：17時間(2017年7月交換、2018年8月損傷)
 使用条件：詳細不明

3. 調査結果

(1) 外観状況【2頁】

- ・内輪軌道面、外輪軌道面及び鋼球は、著しい摩耗、かじり及び変色が認められます。又、内輪軌道面に鋼球の肩乗り上げが認められます。
- ・保持器ポケット面は、著しい摩耗及びかじりが認められます。

(2) 寸法精度【3頁】

- ・内輪内径及び外輪外径は、変形等により規格を外れています。

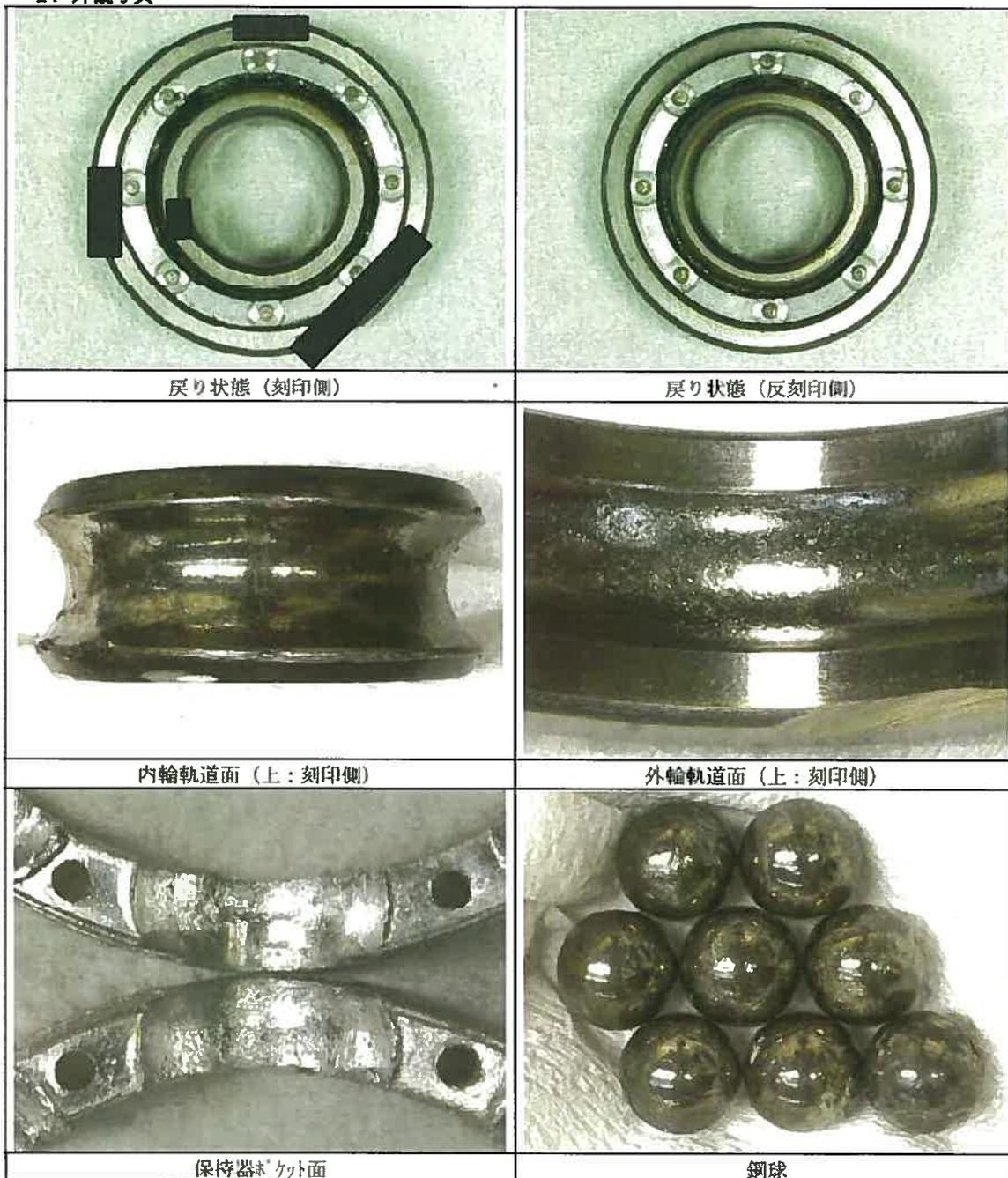
(3) 表面硬度【3頁】

- ・内輪及び外輪は、規格内です。

4. まとめ

以上の調査結果より、軸受内部に著しい摩耗やかじりが認められました。尚、摩耗やかじりの原因としては、潤滑不良の影響が考えられます。

1. 外観写真



L0 ポンプガイド 3D スキャンによる形状計測結果

・目的

過給機損傷要因の一つとして、潤滑油のシールリング部の不具合による潤滑油供給不足が考えられたことから、エンドカバー中央に位置するL0 ポンプガイドのシールリング及びトメワが取付けられる溝の詳細計測を行った。

・潤滑油供給部構造

過給機断面図を図 1 に示す。潤滑油は、詳細図 B に示すように、ロータが回転することで遠心力により L0 ポンプデスクとポンプデスクフタで構成されるポンプ室内の空気が抜け、負圧になることで、潤滑油が吸い込まれ、軸受に供給される仕組みとなっている。

ポンプ室は、詳細図 A に示すように、L0 ポンプガイド（静止部品）の溝（シールリング溝）に取付けられたシールリング及びトメワにより密閉性が保たれる構造となっている。

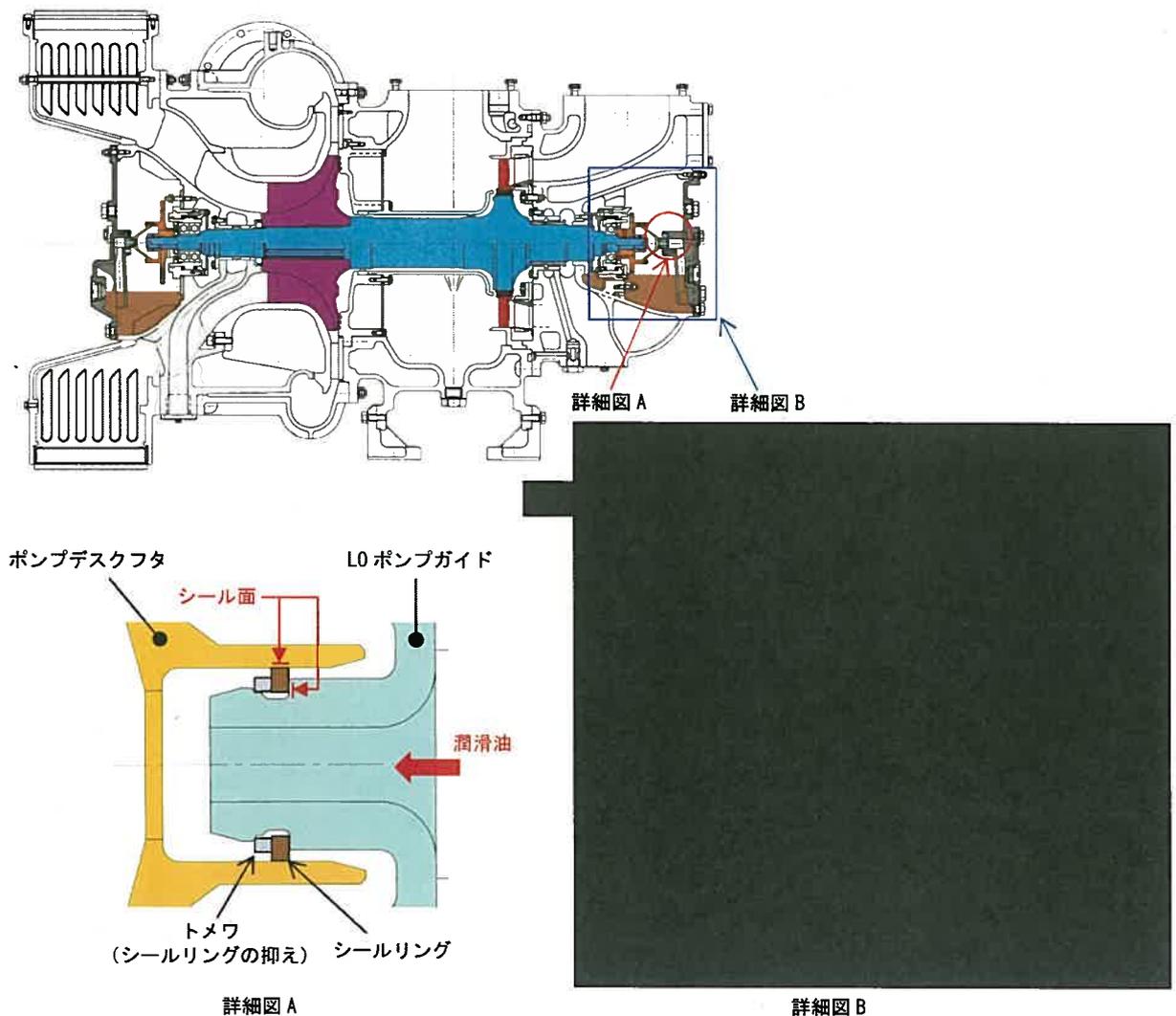


図 1 過給機断面図及びシールリング部拡大図

・計測結果

L0 ポンプガイドのシールリング溝部の 3D スキャンによる計測結果を図 2 に示す。また、a~e 各寸法を表に示す。本図より、新品に比べ損傷品は正規の溝形状から変化していることが認められた。損傷品の A, B 部は、シールリングもしくはトメワとの接触により摩耗した部分であると推察される。図 3 に A, B の拡大図を示す。a~e 各寸法及び図 3 より、経年的に溝の角部が丸くなるよう変化し、トメワの位置がずれ、シールリングの遊びが大きくなることで、シールが不十分となり、注油不良が生じた可能性が考えられる。

尚、図の C 部は過給機損傷時にシールリング及びトメワの脱落により、ポンプデスクフタと接触し、変形したものと判断される。



新品

損傷品

[緑：図面寸法と一致、黄：図面■■■■mm、赤：図面■■■■mm、青：図面■■■■mm]

図 2 L0 ポンプガイド シールリング溝部 3D スキャン計測結果

L0 ポンプガイド溝部寸法 (単位: mm)

箇所	新品	損傷品	備考
a	■■■	■■■	
b	■■■	■■■	
c	■■■	■■■	
d	■■■	■■■	
e	■■■	■■■	2次損傷による



図 3 L0 ポンプガイド A, B 溝端部拡大 (新品と損傷品の重ね合わせ)

L0 ポンプガイド シールリング溝の摩耗について

・目的

L0 ポンプガイドのシールリング溝の3D計測の結果、ポンプガイドの溝端部が摩耗しトメワの位置がずれてシール機能が低下したものと判断されたことから、摩耗が生じる経過とその影響について検討した。

・シールリング及びトメワの装着状態について

1) L0 ポンプガイドの取付け

シールリングの外径はポンプデスクフタ内径よりも大きい寸法であり、取付け時にシールリングの切れ目をたわませてポンプデスクフタの内径に張り付かせている。トメワはシールリングの抜け止めのための部品だが、取付け時は自重により若干下側へずれていると想定される。このような寸法関係により、取付け時は溝端部が接触することになる。

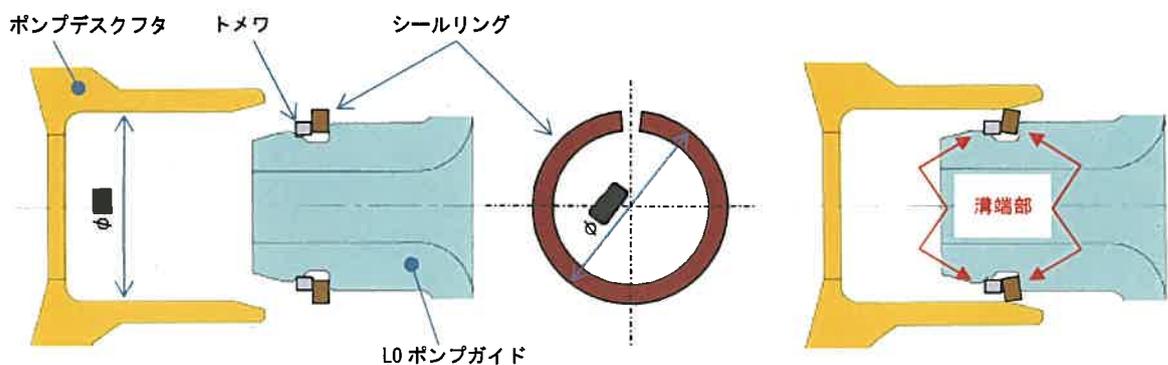


図1 L0 ポンプガイド取付け図

2) L0 ポンプガイドの取外し

取付けと逆の作業となるが、取外し時は、シールリングがポンプデスクフタの内径に張り付いていることから、抵抗によりトメワを軸方向に押すことにより、溝端部に強く接触することが考えられる。尚、上下方向についてはエンドカバの嵌め込み隙間が径で $\square \sim \square$ mm であり、傾きが生じてトメワやリングが損傷しない構造としている。

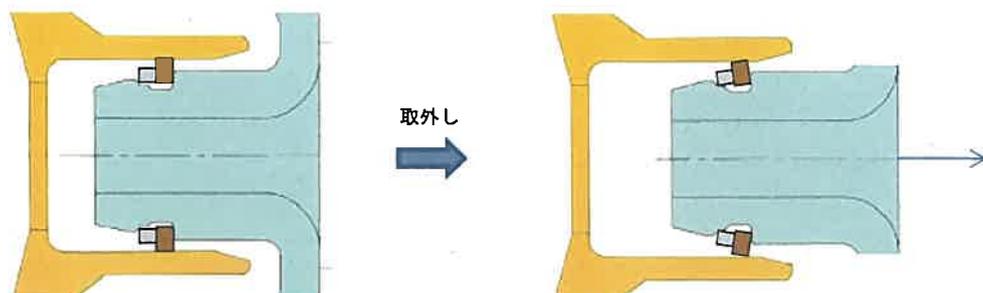


図2 L0 ポンプガイド取外し図

3) 過給機運転時

過給機運転時、無負荷から負荷運転までの間に、ロータがタービン側へ約 \blacksquare mm 熱膨張により移動する。停止前の無負荷運転時には逆に軸方向に約 \blacksquare mm 戻るため、ポンプデスクフタと L0 ポンプガイドの位置が相対的にずれて、取付け・取外し時と同様にシールリング溝端部にシールリング及びトメワが接触することが考えられる。

(タービン側弾性装置には熱膨張を許容できる可動部を設けている。ブロウ側の弾性装置には可動部は無く固定されている)

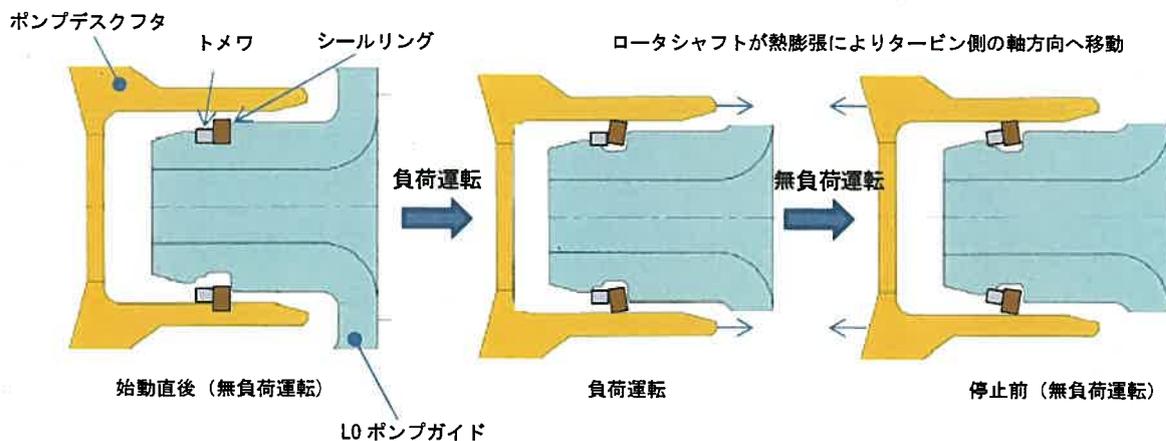


図3 運転時 L0 ポンプガイド部状況

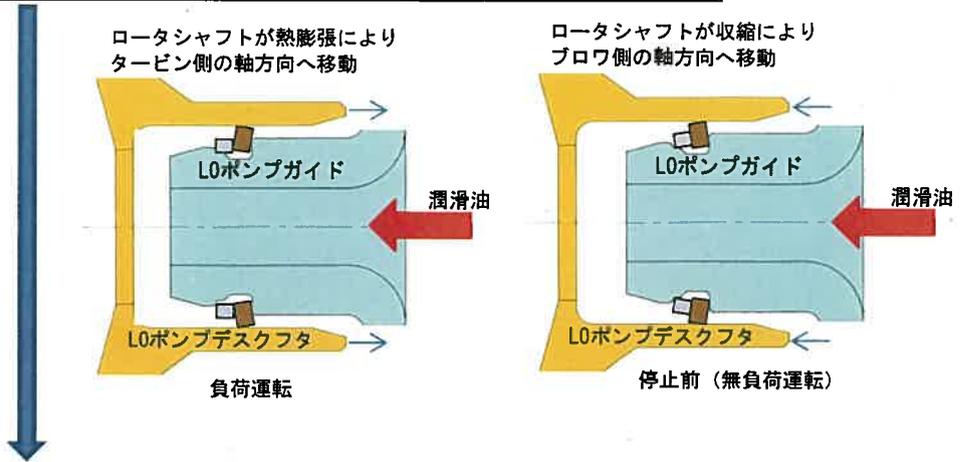
・考察

L0 ポンプガイドのシールリング溝部は、取付け、取外し及び運転中の熱膨張で軸方向に移動する際に溝端部がシールリング及びトメワと接触する。現地での負荷運転の熱膨張の繰り返しは長期に亘り行われてきたことで、ポンプガイド側の溝端部の経年摩耗により、トメワがしっかりと装着されないことにより、シールリングとトメワ間の間隙が増え、シール性が損なわれたことから、潤滑油の注油不足によりベアリングに異常が発生したと考えられる。

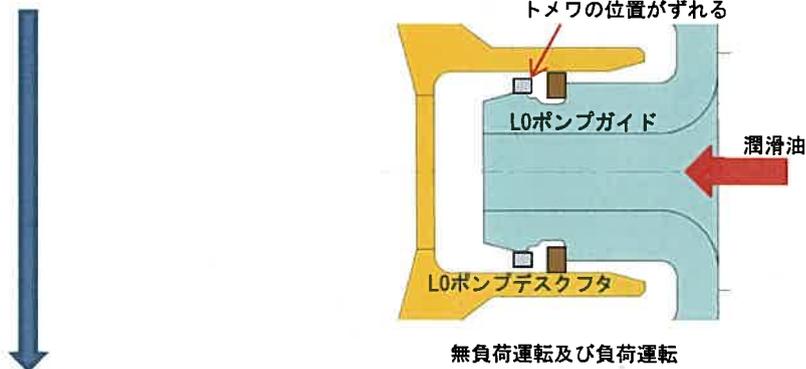
—以上—

過給機故障に至るフロー

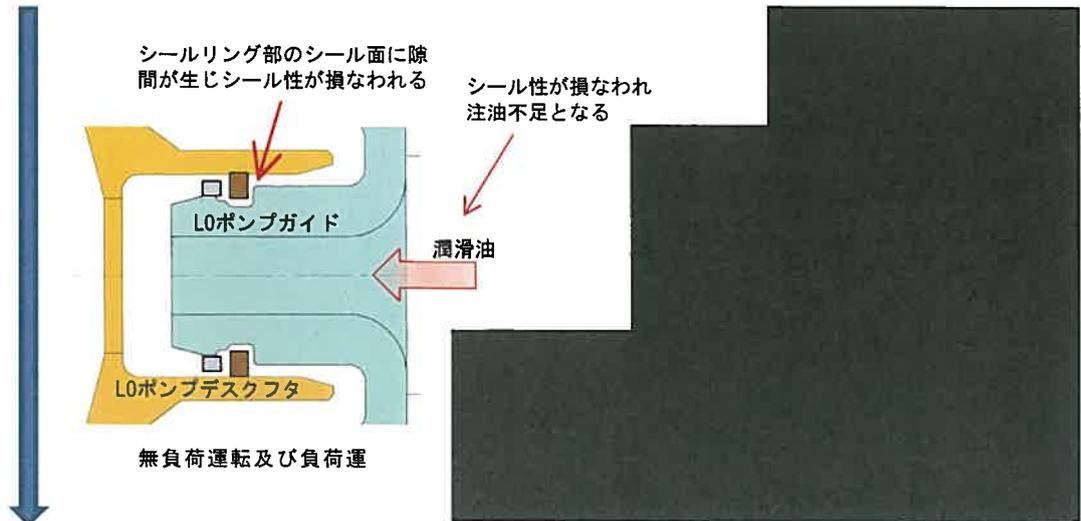
1. 運転・停止によるロータ軸の熱膨張・収縮等により、軸端部に付属するL0ポンプデスクフタの軸方向への移動の繰返しからL0ポンプガイドの摩耗が進展する。



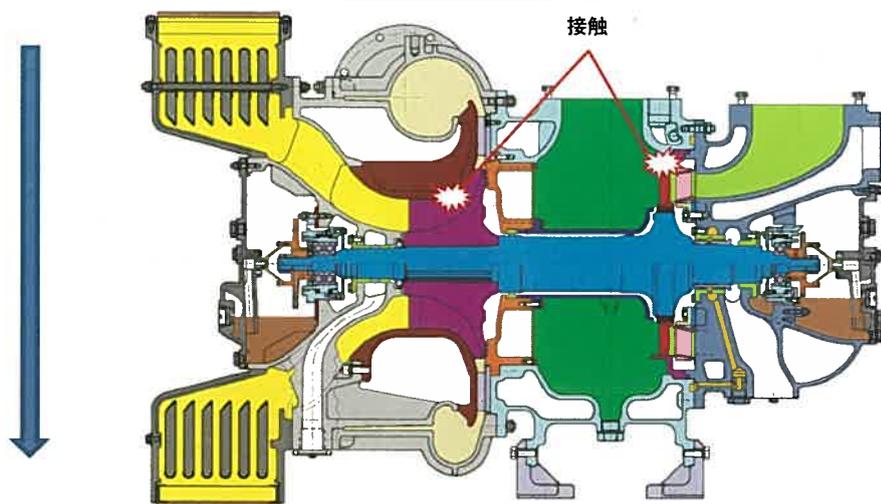
2. 経年使用によるタービン側のシール溝端部が摩耗した結果、トメワがしっかりと固定されない状況が発生。



3. シールリング部のシール性が損なわれたことにより、ポンプ室内の真空が維持できず、潤滑油を吸い上げられなくなる。その後、ベアリングへの潤滑油注油不足が生じてベアリングに異常が発生。



4. タービン側ベアリングが損傷したことによりタービンブレードとシュラウドリング、インペラとインサートが接触し過給機が損傷。



5. 過給機のロータシャフトと固定側のシール部品が強く接触することで異音発生。

