

本原原発第38号
平成30年11月28日

原子力規制委員会 殿

名古屋市東区東新町1番地
中部電力株式会社
代表取締役社長 勝野 哲
社長執行役員

浜岡原子力発電所5号機 非常用ディーゼル発電機（B）
排気管伸縮継手破損による排気漏えいに伴う
運転上の制限からの逸脱について

実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条の規定により、平成30年6月15日付け本原原発第16号及び平成30年9月20日付け本原原発第29号をもって提出した発電用原子炉施設故障等報告書について、別紙のとおり補正致します。

別紙

発電用原子炉施設故障等報告書

浜岡原子力発電所5号機 非常用ディーゼル発電機（B）排気管伸縮継手
破損による排気漏えいに伴う運転上の制限からの逸脱について

以上

発電用原子炉施設故障等報告書

平成 30 年 11 月 28 日

中部電力株式会社

件 名	浜岡原子力発電所 5 号機 非常用ディーゼル発電機(B)排気管伸縮継手破損による排気漏えいに伴う運転上の制限からの逸脱について
事象発生の日時	平成 30 年 6 月 5 日(火)17 時 06 分 (実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第 134 条第 5 号に定める報告事象に該当すると判断した時刻)
事象発生の場所	浜岡原子力発電所 5 号機 原子炉建屋 1 階 非常用ディーゼル発電機(B)室
事象発生の発電用原子炉施設名	非常用予備発電装置－非常用ディーゼル発電設備
事象の状況	<p>平成 30 年 6 月 5 日(火)14 時 35 分頃、施設定期検査中の浜岡原子力発電所 5 号機(以下、「5 号機」という。)原子炉建屋 1 階の非常用ディーゼル発電機(B)室(放射線管理区域外)において、運転員が、定期試験中^{*1}の非常用ディーゼル発電機(以下、「D/G」という。)(B)の定格電力到達 10 分後の記録採取にて、各シリンダ出口排気温度差が目標値である <input type="text"/> 未満を上回っていることを確認した。このため、15 時 00 分頃、運転員は現場確認を実施したところ、D/G(B)排気管付近からの気体の漏えいを確認した。運転員は発電指令課長に連絡し、発電指令課長から原子炉課へ連絡した。原子炉課員による現場確認で、A-No.6 シリンダと A-No.7 シリンダの間で気体の漏えいと保温材の破れを確認したことから、気体の漏えい箇所について詳細な確認を実施するため、原子炉課長は発電指令課長に D/G(B)の停止を依頼した。</p> <p>16 時 07 分、発電指令課長は D/G(B)の運転を停止し、排気管付近からの気体の漏えい箇所の詳細な調査・点検が必要との判断から、D/G(B)を待機除外とすることとしたため、16 時 20 分、浜岡原子力発電所原子炉施設保安規定第 1 編(以下、「保安規定」という。)第 60 条に定める運転上の制限からの逸脱を判断した^{*2}。</p> <p>調査の結果、D/G(B)排気管の伸縮継手に破損があり、実用炉報告基準の運用(訓令)^{*3}に示された消耗品の交換や機器の調整により復旧できるものではないことから、17 時 06 分に実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則(以下、「実用炉規則」という。)第 134 条第 5 号に定める報告事象に該当すると判断した。</p> <p>その後、破損した排気管伸縮継手の破片による D/G(B)への影響評価、当該排気管伸縮継手以外の排気管伸縮継手の点検、当該排気管伸縮継手の新品(予備品)への取替え、D/G(B)の試運転を実施した後、6 月 12 日(火)9 時 50 分、D/G(B)の定期試験を開始し、定期試験における確認項目(電圧、周波数、電力等)が判定基準を満足していること及び非常用高圧母線に並列できることを確認した。このため、発電指令課長は、15 時 45 分、保安規定第 60 条第 1 項の運転上の制限である原子炉の状態が冷温停止及び燃料交換において、非常用高圧母線に接続する 2 台の非常用発電設備が動作可能であることを確認したことから、運転上の制限逸脱からの復帰を判断した。</p> <p>本事象に伴う外部への放射能の影響はなかった。 なお、D/G からの排気ガスの漏えいが D/G の機能要求へ与える影響について、排気</p>

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

	<p>管伸縮継手 1 個のベローズが完全に破損し、排気管 1 本に流れる排気ガスの全量漏えいを想定して評価を実施した。その結果、排気管伸縮継手 1 個のベローズが完全に破損した場合においても、D/G の機能要求を満足できることを確認した。併せて、現実的な条件下での影響を確認するために、排気ガスの漏えい量及び D/G 出力について、系統試験等の実績値を用いて評価を実施した結果、別の排気管に設置される排気管伸縮継手が 2 個破損した場合においても、D/G の機能要求を満足できることを確認した。</p> <p>※1:保安規定に基づき、月 1 回の頻度で実施している。</p> <p>※2:保安規定第 60 条第 1 項の運転上の制限として、原子炉の状態が冷温停止及び燃料交換において、非常用高圧母線に接続する D/G を含む 2 台の非常用発電設備が動作可能であるとして、D/G (A) が待機中、D/G (C) が点検中であり、動作可能な非常用発電設備が D/G (A) 1 台となったことから、運転上の制限からの逸脱を判断した。</p> <p>※3:実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第 134 条及び研究開発段階にある発電の用に供する原子炉の設置、運転等に関する規則第 129 条の運用について(訓令)</p> <p style="text-align: right;">(詳細は別添のとおり。)</p>
<p style="text-align: center;">事象の原因</p>	<p>1 原因調査</p> <p>1.1 当該排気管伸縮継手の破損状況の確認</p> <p>当該排気管伸縮継手の破損状況の把握を目的として、回収した破片により組立てた排気管伸縮継手のベローズの外観観察を行うとともに、当該排気管伸縮継手のベローズの破片に対し光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡による破面観察を行った。</p> <p>(1)回収した破片による復元及び外観観察</p> <p>ベローズ復元作業は、各破片の外観を観察しながら、周方向又は軸方向の割れが一致する破片をつなぎ合わせることで実施した。また、復元した当該排気管伸縮継手のベローズの全体外観、破片単位のマクロ的な破壊、変形及び腐食等の経年劣化事象の特徴について観察を行った。回収した破片によるベローズ復元作業において、一部破片の欠損が確認された。このため、追加でディーゼル機関の狭隘部についてファイバースコープ等で追加の回収作業を行った。追加作業で回収した破片も加えて復元作業を行った上で、外観観察を行った。</p> <p>破片単位、山(谷)単位及びベローズ全体の外観観察を実施した結果、復元したベローズの 2 箇所(180° 付近及び 110° 付近)に大きな円弧状の凹みがあり、いずれもその中心部に鋭角な凹みが認められたことから、これらは打痕であると推定した。(以降、180° 付近の打痕を打痕 A、110° 付近の打痕を打痕 B と定義する。)</p> <p>この他、破片やベローズ残存部分に摩耗の痕跡や有意な腐食は認められなかった。</p> <p>打痕 A は、破損している領域のほぼ中心に位置している。き裂の特徴については、周方向のき裂は打痕 A 近傍を除き山部にき裂が進展していること、打痕 A 近傍を含む軸方向のき裂は比較的直線状に並んでいること、及び打痕 A は打痕中心部に鋭角な凹みがあり、それに沿ってき裂が発生していることを確認した。また、打痕 A 近傍では、破片が細かく局所的な変形が認められた。</p> <p>(2)破片の破面観察</p> <p>当該排気管伸縮継手のベローズ破片の破面観察によって、当該ベローズの破損の形態を把握することを目的として、光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡による破面観察を実施した。観察範囲は「破損の著しい打痕 A 近傍」、「溶接部近傍」、「き裂の進展量</p>

が大きい下流側(山 8)」を中心に選定した。

観察の結果、観察した破面の大部分はつぶれており、有益な情報は得られなかったものの、一部に疲労破壊の特徴であるストライエーション状模様^{*4}が観察された。また、そのストライエーション状模様は内外表面を起点とする破面や一方向に進行する破面に観察された。

溶接部近傍においては、溶接起因の劣化を示す特徴は確認されなかった。

※4:疲労破面において電子顕微鏡レベルで観察されるすじ模様のこと。

(3) 外観観察及び破面観察結果による考察

一般的に、健全な排気管伸縮継手のベローズの場合、周方向き裂は排気管伸縮継手のベローズの収縮によって発生する軸方向引張応力により疲労破壊が発生する可能性がある。一方、軸方向き裂は内圧により発生する周方向引張応力のみでは発生しにくい。破片1では、軸方向に上流から下流へ進む疲労破面、破片下流側の周方向では板厚方向に進む疲労破面を確認した。この結果は、健全なベローズで想定される事象と異なっており、山 1～4 間で初期の軸方向き裂の発生が考えられる。

また、ベローズ山部に斜め方向に鋭角な線状の凹みがある場合、ベローズの伸縮によって線状の凹みに垂直な方向に引張応力が作用する。そのため、打痕 A では軸方向と斜め方向に鋭角な凹みが認められていることから、鋭角な凹みに沿ったき裂の発生により、軸方向へき裂が進展した可能性がある。しかしながら、破面の大部分はつぶれていたことから、起点の特定には至らなかった。なお、打痕 B は打痕 A と比較して打痕形状は小さいため、打痕 A 近傍に初期き裂が生じた可能性が考えられる。ただし、打痕 B においても打痕近傍の山は大きく変形していることや、端部でのき裂は認められ、打痕の影響が示唆される。

ベローズのフランジ部のき裂先端では、打痕 A 近傍の軸方向き裂を中心に左右にき裂が伝播している様相が確認されており、破面観察の結果、確認されたき裂進展方向と一致している。一旦き裂が生じた後は、D/G(B)運転中における、周期的な内圧の変動による振動によってベローズの周方向のき裂が進展したと考えられる。また、周期的な内圧の変動に伴う周方向のき裂の進展により、一部のベローズが片持ちになり、ある程度の大きさごとに破片となっていたと考えられる。

なお、平成 30 年 7 月 18 日(水)、5 号機 D/G(A)～(C)の排気管伸縮継手の外観点検を改めて実施した結果、D/G(A)排気管伸縮継手 1 個に 2 箇所、D/G(B)排気管伸縮継手 4 個に各 1 箇所の打痕を確認した。このため、これらの排気管伸縮継手については新品(予備品)に交換した。

1. 2 要因分析図による調査

本事象では、当該排気管伸縮継手のベローズが破損しており、このベローズが破損した原因究明のため、設計、製作、施工、運転管理、保守管理、経年劣化及び運転経験の反映の観点における破損要因を抽出し、細分化した上で評価を行った。

各要因の調査にあたっては関連する品質保証活動の状況も含めて確認した。

以下に、調査結果を示す。

1. 2. 1 設計に関する要因

設計においては、設計インプット条件である使用環境、使用期間及び過去の排気管伸縮継手のベローズの不具合事例を基に設計要件を定めており、当該排気管伸縮継手の設計プロセスが妥当であることを検証する。

設計要件を満足しない場合、ベローズが破損する可能性がある。このため、ベローズを含む排気管伸縮継手の設計要件について、設計上の構造強度の妥当性を確認した。

その結果、設計要件は D/G の設計要求に合致しており、実使用環境に対して十分余裕を考慮した設計となっていることを確認した。また、ディーゼル機関メーカー及び排気管伸縮継手メーカーへの聞き取り及び工場立入により、設計変更及び設計検証履歴を確認し、排気管伸縮継手のベローズの不具合事例の報告を受けて設計変更が行われるプロセスが確立されており、過去に破損事例を受けた対策として設計変更が適切に実施されていることを確認した。

以上より、設計に関する要因は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

1.2.2 製作に関する要因

製作においては、インプット条件として設計要件にて定めた材料を使用し、製作にあたっての製作手順を定めており、当該排気管伸縮継手の製作プロセスが妥当であることを検証する。

以下に、製作に関する各要因の調査結果を示す。

(1)材料不良

材料不良が生じた場合、ベローズの強度が低下し、ベローズが破損する可能性があることから、ベローズの機械的性質及び化学成分が規格値を満足していることを調達時の試験検査記録により確認した。

その結果、ベローズの材質は設計で規定した SUS321 であることを確認した。また、機械的性質及び化学成分は、それぞれ SUS321 の規格値を満足していることを確認した。

以上より、材料不良は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

(2)製作不良

排気管伸縮継手の製作不良が生じた場合、ベローズが薄肉になることなどにより、許容応力を超え、ベローズが破損する可能性があることから、当該排気管伸縮継手について製作不良の有無を製作時の試験検査記録により確認した。

その結果、当該排気管伸縮継手の製作時における試験検査結果が判定基準を満足していることを確認した。また、当該排気管伸縮継手のベローズに対して定められた手順で製作・組立工程が行われていることを排気管伸縮継手メーカーへの聞き取り及び工場立入により確認した。

その結果、当該排気管伸縮継手のベローズに対して、定められた手順に従い製作されていたことを確認した。

以上より、製作不良は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

(3)溶接不良

ベローズの溶接が適切な溶接施工要領に従い実施されていない場合、溶接欠陥が生じ、ベローズが破損する可能性がある。このため、溶接施工要領及び施工・検査記

録により、ベローズが溶接施工要領に従い適切な技量を有した溶接士により溶接施工されていることを確認した。

その結果、ベローズの溶接は第三者機関に承認を受けた品質管理プロセスに基づき定めた溶接施工要領に従い、適切な技量を有した溶接士が実施しており、溶接後の検査においても判定基準を満足していることを確認した。

以上より、溶接不良は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

1. 2. 3 施工に関する要因

施工においては、工事要領書に従い排気管伸縮継手の取付け等が適切に行われ、この施工プロセスが妥当であることを確認する。

以下に、施工に関する各要因の調査結果を示す。

(1)組立不良

排気管伸縮継手フランジボルトの締付けが不足した場合、排気管伸縮継手取付け位置がずれることで過大な力が加わりベローズが破損する可能性がある。

このため、当該排気管伸縮継手を取替えた際の工事要領書、工事報告書及びディーゼル機関メーカーの聞き取りによりフランジボルトの締付け管理状況を確認した。

その結果、当該排気管伸縮継手の締付け確認として、当該排気管伸縮継手取付け後のフランジの面間測定において規定範囲で均等に締付けられていること、及びディーゼル機関メーカーが実施する漏えい確認において異常がないことを確認するとともに、当該排気管伸縮継手の取外し前のフランジボルトの締付け状況の確認により、当該排気管伸縮継手位置のずれはなく、フランジボルトに緩みはなく適切に締付けられていたことを確認した。

また、ベローズに打痕・傷が生じていた場合、当該部を起点としてベローズが破損する可能性がある。このため、当該排気管伸縮継手の外観観察により、打痕・傷の有無を確認した。更に、当該排気管伸縮継手の取替え後(平成 20 年)以降の当該排気管伸縮継手近傍における作業履歴を確認し、ベローズに打痕・傷を与える可能性のある作業を抽出し、当該排気管伸縮継手の保温材取外しの有無を確認した。

その結果、破片を復元した当該排気管伸縮継手のベローズに4箇所打痕があることを確認した。作業履歴について、当該排気管伸縮継手の取替え作業以外にベローズに打痕を与える可能性がある作業を実施していないこと、及び当該排気管伸縮継手の取替え以降、保温材を取外していないことより、当該排気管伸縮継手の取替え時に打痕を生じさせた可能性がある。

(2)排気管伸縮継手の取付け方向誤り

排気管伸縮継手の取付け方向を誤った場合、排気ガスの整流ができず、排気ガスが直接ベローズに当たることで、過大な圧力がかかり破損する可能性がある。

このため、当該排気管伸縮継手破損時に撮影した写真により当該排気管伸縮継手の取付け方向を確認した。

その結果、排気管伸縮継手に刻印されている流れ方向を示す矢印とディーゼル機関の排気ガスが流れる方向が一致していることを確認した。また、上流側に内筒ツバの厚み分の隙間が生じており内筒の取付け方向も正しいことから、当該排気管伸縮継手は正しく取付けられていることを確認した。

以上より、排気管伸縮継手の取付け方向に誤りはなく当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

(3) 芯ずれ

排気管伸縮継手に芯ずれがあった場合、ベローズに過大な力が加わり破損する可能性がある。

このため、工事報告書に基づき測定した当該排気管伸縮継手の段差寸法を記録により確認した結果、当該排気管伸縮継手の段差寸法は、判定基準を満足しており、芯ずれがないことを確認した。

以上より、芯ずれは当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

(4) ねじれ

ベローズがねじれていた場合、排気管伸縮継手に過大な力が加わり破損する可能性がある。

このため、排気管伸縮継手の構造を確認した結果、取付け前は排気管伸縮継手のベローズとフランジは周方向には固定されておらず、ベローズ自体が回転できる構造となっている。よって、フランジ締付け時において、ベローズにねじれが発生することはないことを確認した。

以上より、ねじれは当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

(5) 振動

排気管サポートの締付け不良により排気管の拘束がなくなった場合、D/G(B)運転時に排気管が振動し、ベローズに過大な振動が生じ破損する可能性がある。

このため、当該排気管伸縮継手を取替えた際(平成 20 年)の工事報告書により排気管サポートの締付け状況を確認するとともに、当該排気管伸縮継手取替え時(平成 20 年)以降の排気管サポートに関する作業の有無を確認した。また、当該排気管伸縮継手の取外し前に排気管サポートの締付け状況及び外観を確認した。

その結果、本事象発生時に排気管サポートに緩みがないこと、及び当該排気管伸縮継手取替え時(平成 20 年)から本事象発生までの間も排気管サポートに緩みがないことを確認した。

また、フランジボルトの締付け不良により排気管伸縮継手取付け位置がずれた場合、ベローズに過大な振動が生じ破損する可能性がある。

このため、当該排気管伸縮継手を取替えた際(平成 20 年)の工事要領書、工事報告書及びディーゼル機関メーカーの聞き取りにより、施工時のフランジボルトの締付け状況を確認した。

その結果、当該排気管伸縮継手の締付け確認として、当該排気管伸縮継手取付け後のフランジの面間測定で均等に締付けられていること、及びディーゼル機関メーカーが実施する漏えい確認において異常がないことを確認した。また、当該排気管伸縮継手の取外し前のフランジボルトの締付け状況の確認により緩みはなく、適切に締付けられていたことを確認した。

以上より、振動は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

1. 2. 4 運転管理に関する要因

運転管理として、毎月実施している定期試験の結果である定期試験記録によりD/G 運転状態に異常がないこと、定期試験手順書及び判定基準が適切に定められていることを確認する。また、点検後の試運転時に採取する運転性能記録により D/G 運転状態に異常がないことを確認する。

(1)排気ガス温度等の異常

D/G 運転中において排気ガス温度等が設計仕様を超過した場合、ベローズが破損する可能性がある。

このため、定期試験記録及び運転性能記録により、異常燃焼等により発生する排気管の異常な振動の有無及び排気ガス温度の異常な上昇の有無を確認するとともに、破損事象確認後の振動測定記録及び解析により圧力脈動の発生の可能性を調査した。

その結果、振動測定結果は他の排気管伸縮継手と比較しても同程度であること、及び排気ガス温度が判定基準値を超えていないことを確認した。また、振動測定結果及び解析結果より圧力脈動により発生するひずみは許容ひずみと比較して小さいことを確認した。

以上より、排気ガス温度等の異常は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

(2)運転手順の誤り

定期試験手順書、試運転手順書及びその判定基準の誤り、並びに定期試験手順書を逸脱する操作により、排気温度の異常上昇が発生し、過大な応力が加わることでベローズが破損する可能性がある。

このため、定期試験手順書、試運転手順書及びその判定基準が妥当なものであり、それに基づき運転が行われていることを確認した。

その結果、定期試験及び試運転の手順はメーカー推奨手順を逸脱するものではなく、定期試験及び試運転の判定基準もメーカーの仕様書等で要求される基準を満足するように定められていることを確認した。また、定期試験手順書を逸脱する操作がなかったことを、D/G(B)定期試験時の誤操作による不適合件名がないこと及び定期試験記録結果より排気温度の判定基準からの逸脱がないことにより確認した。

以上より、運転手順の誤りは当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

1. 2. 5 保守管理に関する要因

保守管理として、保全重要度が適切に設定され、その重要度を勘案して、想定される経年劣化事象及び偶発事象を考慮した保全計画が策定されていることを確認する。

保全内容が不適切な場合、想定外の劣化が生じて排気管伸縮継手が破損する可能性がある。

このため、保全の内容が適切な考え方に基づき設定されていることを確認した。

その結果、非常用ディーゼル発電設備は、保全重要度を社内規定に基づき設定しており、その重要度を勘案して、想定される経年劣化事象及び偶発事象を踏まえ、保全項目が設定されていることから、非常用ディーゼル発電設備の機器の一部である排気管伸縮継手においても保全の内容は妥当であると評価した。

以上より、保守管理は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

しかしながら、本事象を踏まえ偶発事象を捉えるための更なる改善として、状態監視を強化していく必要があると評価した。

1.2.6 経年劣化に関する要因

経年劣化として、腐食、材料劣化、振動及び熱による疲労等の発生を確認する。以下に、経年劣化に関する各要因の調査結果を示す。

(1) 腐食

当該排気管伸縮継手のベローズに腐食が発生した場合、破損する可能性がある。このため、ベローズの表面観察により流れ加速型腐食、すきま腐食、孔食、応力腐食割れ及び硫化腐食の発生の有無を確認した。

その結果、これらの腐食が発生した様相は認められなかった。応力腐食割れについては、鋭敏化組織^{※5}がないことから粒界型応力腐食割れの発生はなく、また、当該排気管伸縮継手が保温材に覆われているため、外表面に塩分の付着はなく、塩分付着による腐食は発生しないことを確認した。また、硫化腐食については、表面観察の結果に加え、建設時に測定した排気ガス中の硫黄酸化物濃度が基準値より低いことから、硫化腐食は発生していないと評価した。

以上より、腐食は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

※5:溶接等の入熱により、オーステナイト系ステンレス鋼は結晶粒界にクロム炭化物が生成し、隣接部分のクロム量が減少する場合がある。このような組織を鋭敏化組織という。

(2) 材料劣化

当該排気管伸縮継手に、熱時効による脆化が発生した場合やクリープが発生した場合、ベローズが破損する可能性がある。

このため、当該排気管伸縮継手のベローズの破面観察及び硬さ測定を行った。

その結果、ベローズの破面に脆性破面、クリープボイドや微小き裂等は認められなかった。また、ベローズの母材部、溶接部及び新品の母材部における硬さ測定の結果、硬さは同等であることを確認した。

以上より、熱時効による脆化やクリープによる材料劣化は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

(3) 疲労(振動)

機器・配管の振動(動的機器からの振動伝播や圧力脈動)により、ベローズに疲労割れが発生した場合、ベローズが破損する可能性がある。

このため、D/G 機関据付部及び過給機の至近の振動測定結果と過去の測定結果を比較することで、経年劣化による振動値の上昇傾向がないことを確認するとともに、共振がないことを確認する。

その結果、排気管伸縮継手フランジ部の振動測定結果は他の排気管伸縮継手と同程度であり、概算により算出したひずみ量が許容ひずみより小さいこと、排気管伸縮継手の固有周波数は□以上であり、D/G 機関との共振は発生していないこと、並びに機関据付部及び過給機の振動値は許容値以内であり排気管伸縮継手取替え時から有意な上昇傾向がないことを確認した。また、排気管サポート拘束不良及びフランジボルトの緩みについて施工状況等を確認した結果、いずれも緩み等は確認されなかつ

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

た。

以上より、疲労(振動)は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

(4)熱疲労

D/G の起動、停止時に生じる排気管の熱伸縮による変位によりベローズに繰り返しひずみが付加されることにより生じる低サイクル疲労(以下、本報告書においては「熱疲労」という。)に起因して破損する可能性がある。

このため、D/G 運転中における排気管伸縮継手の軸方向と軸直角方向の収縮量の確認、及び D/G の起動、停止回数と設計上の繰り返し寿命回数を設計仕様と比較した。

その結果、当該排気管伸縮継手の収縮量は設計上の値と比較して小さいこと、及び D/G の起動、停止回数も設計寿命回数よりも少ないことを確認した。

一方、破面観察より疲労破面が確認されていることから、熱疲労が発生した可能性は否定できない。

(5)外力

D/G 運転時に排気管の熱膨張によりベローズ側面部とフランジ端面が接触する可能性がある。

このため、当該排気管伸縮継手フランジの接触痕の有無、当該排気管伸縮継手施工時のフランジ隙間計測記録からフランジとベローズの隙間が判定基準を満足していること、及び D/G 運転中の排気管伸縮継手の外観点検記録よりフランジ内面とベローズとの接触の有無を確認した。

その結果、フランジ内面に接触痕は確認されず、当該排気管伸縮継手の取付け時に隙間管理が適切になされていること、及び本事象発生後の D/G 運転中における外観点検にて、フランジ内面とベローズとの接触は確認されなかった。

また、D/G 運転時に想定以上の変形が排気管に生じ、当該排気管伸縮継手の変形し、ベローズに過大な力が加わった場合、ベローズが破損する可能性がある。このため、サポート部外観点検記録及びサポート部締付け確認記録より排気管サポートの施工状況及びD/G 運転中の排気管伸縮継手の軸方向と軸直角方向の熱変位測定記録を確認した。その結果、排気管サポートのボルト類の緩みはないこと及び軸方向と軸直角方向の熱変位が許容値を満足していることを確認した。当該排気管伸縮継手の内筒の外観点検を行い接触痕の有無を確認した結果、当該排気管伸縮継手の内筒にベローズの谷部と擦れた痕跡がないことを確認した。

以上より、外力は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

1. 2. 7 運転経験の反映に関する要因

平成 17 年 1 月 18 日(火)(5 号機 D/G 供用開始)から平成 30 年 6 月 5 日(火)(本事象発生)の期間に発生した自プラント及び他プラントにおける排気管伸縮継手に係る不具合事象について、是正処置が適切に実施されていない場合、排気管伸縮継手破損事象が発生する可能性がある。

このため、自プラントの不具合事象については是正処置報告書を確認するとともに、他プラントについては NUCIA トラブル情報及びスクリーニング報告書を確認し、不具合事象の反映がある場合は、是正処置が適切に実施されているかを確認した。

その結果、排気管伸縮継手の損傷に関し、自プラントの不具合事象を 1 件確認し、他プラントについては情報がないことを確認した。自プラントの不具合事象は平成 19 年に発生した 5 号機 D/G(B)排気管伸縮継手のベローズの損傷事例であり、是正処置が適切に実施されていることを確認した。

以上より、運転経験の反映は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

1.3 事象発生 の 推定メカニズム

要因分析図による調査結果より、当該排気管伸縮継手が破損した要因は組立時における打痕及び熱疲労の可能性があることを確認した。

抽出された 2 つの要因について、初期き裂の発生メカニズムを推定するとともに、初期き裂発生後のき裂の進展により当該排気管伸縮継手が破損に至るまでのメカニズムを推定した。

1.3.1 初期き裂発生 の 推定メカニズム

要因分析図による調査結果より抽出された 2 つの要因は、各々が単一で要因となった可能性又は 2 つが複合して要因となった可能性がある。このため、以下の 3 通りについて初期き裂が発生しうるか確認を行った。

(1) 打痕の単一要因

排気管伸縮継手のベローズはステンレス製であり、ステンレスは一般に延性脆性遷移温度が低く室温においては延性が有意であるため外力による割れは発生し難い。また、繰り返し疲労試験の試験体作成時に排気管伸縮継手のベローズへ当該排気管伸縮継手に確認された打痕と同程度の大きさの打痕を付与した後、浸透探傷試験を実施し線状指示がないことを確認した。

加えて、打痕のみで初期き裂が発生していたと仮定すると、排気管伸縮継手取替え作業直後の D/G 起動よりき裂が進展し、運転初期に破損に至ると予想される。これは当該排気管伸縮継手が前回取替え時(平成 20 年)から起算して約 160 回の起動・停止を経験している事実と一致しない。

このため、打痕が初期き裂を発生させる単一要因にはならない。

(2) 熱疲労の単一要因

熱疲労は排気管伸縮継手の設計要件に含まれている。

本事象発生時における当該 D/G(B)の起動、停止(常温状態から運転時の高温状態)回数は、前回取替え時(平成 20 年)から起算すると約 160 回であり、設計で考慮している繰り返し寿命回数には至っていない。また、D/G(B)運転中の当該排気管伸縮継手の収缩量は、設計上の軸方向及び軸直角方向の変位はいずれも設計仕様と比較して小さいことを確認している。

このため、熱疲労が初期き裂を発生させる単一要因にはならない。

(3) 打痕及び熱疲労の複合要因

当該排気管伸縮継手のベローズに打痕がついていることで、D/G(B)起動中に排気管の熱膨張によりベローズが収縮することによって打痕部近傍に設計上想定されるひずみより大きいひずみが生じ、このひずみにより設計で想定する繰り返し寿命回数より

少ない回数(約 160 回)で初期き裂が発生した可能性がある。

このため、打痕及び熱疲労が複合し初期き裂を発生させた可能性がある。

1. 3. 2 初期き裂発生推定メカニズムの検証

前項で推定した打痕及び熱疲労の複合要因による初期き裂発生メカニズムについて、打痕が付いた原因を調査するとともに構造解析及び繰り返し疲労試験により検証を実施した。

(1) 打痕の原因

当該排気管伸縮継手のベローズに打痕を与える可能性がある作業を抽出するため、当該排気管伸縮継手の近傍における作業及び当該排気管伸縮継手の点検作業を確認した結果、平成 20 年の当該排気管伸縮継手の取替え作業時に打痕を生じさせた可能性があることを確認した。

排気管伸縮継手の取替え作業における排気管伸縮継手の運搬及び取付け作業について調査した結果、運搬時には、排気管伸縮継手は梱包され緩衝材による部品保護がなされており、打痕が付いた可能性はない。排気管伸縮継手の取替え作業について、現場状況を観察した結果、当該排気管伸縮継手の打痕の位置や大きさから、取付け時に当該排気管伸縮継手を落下させ作業エリアの突起物と接触したことで打痕が付いた可能性が高いことを確認した。

なお、要因分析図による調査の結果から、当該排気管伸縮継手は、製作時の品質管理は妥当であること及び当該排気管伸縮継手の取付け以降は保温材を取外していないことから、製作時及び取付け以降に打痕が付いた可能性はないことを確認した。その他の排気管伸縮継手も同様の調査を行い、製作時及び取付け以降に打痕が付いた可能性はないことを確認した。このため、調査対象の打痕は、いずれも排気管伸縮継手の製作後からディーゼル機関への取付けまでの期間に付いたものと推定した。

(2) 構造解析

排気管伸縮継手のベローズに生じた打痕と破損の関係を確認するため、ベローズに生じた打痕を円弧状の形状で模擬した解析モデルを作成して構造解析を行い、ベローズに生じるひずみ量を算定するとともに、算出したひずみ量を用いて疲労破壊に至る繰り返し回数を評価した。

その結果、ベローズ健全部と比較して打痕近傍(構造不連続部)でひずみ量が増大することを確認した。また、当該排気管伸縮継手の破片に確認された打痕の形状を基に疲労評価を実施した結果、当該排気管伸縮継手の取付け後からベローズの破損までの D/G(B)の起動・停止回数(約 160 回)と同程度の繰り返し回数で疲労割れが発生することを確認した。

(3) 繰り返し疲労試験

打痕が付いた排気管伸縮継手のベローズと繰り返し変位による破損の因果関係を確認するため、排気管伸縮継手のベローズに打痕を付与した試験体を用いて繰り返し疲労試験を実施し、割れの発生状況を確認した。

打痕は排気管伸縮継手が落下し、突起物と接触して付いた可能性が高いため、突起物を模擬した金属製の棒に実機から取外した排気管伸縮継手を落下させ、試験体に打痕を付与した。なお、打痕付与後に試験体ベローズの浸透探傷試験を実施し、線

状指示がないことを確認した。

材料強度試験機を用いて、排気管伸縮継手の軸方向の許容変位量にて、繰り返し疲労試験を実施し、打痕部の割れや変形を観察した。

試験の結果、打痕部の周辺に割れが発生することを確認した。

1. 3. 3 打痕により当該排気管伸縮継手が破損に至るまでの推定メカニズム

当該排気管伸縮継手の初期き裂の発生は、構造解析及び繰り返し疲労試験の結果も踏まえ、組立時の打痕と熱疲労の複合要因により発生したものと推定した。また、復元した当該排気管伸縮継手の外観観察及び破面観察の結果並びに打痕の原因調査の結果と併せ、当該排気管伸縮継手に打痕が付き、破損に至るまでの推定メカニズムを以下のとおり考察した。

当該排気管伸縮継手は、平成 19 年に発生した排気管伸縮継手破損事象の対応において、平成 20 年に取替えを行った。この取替え作業時のフランジボルト締付けの際に、狭隘部の作業で排気管伸縮継手の支持が不安定となり、排気管伸縮継手を落下させた可能性が高い。排気管伸縮継手が落下し、薄肉部材であるベローズが排気管伸縮継手の下方に位置する吸気管の突起物に接触したことにより、ベローズの山を跨ぐ形(山 3 と山 4)で斜め方向の鋭角な打痕(凹み)が付いたと推定した。

平成 20 年以降、本事象が発生するまでの間におよそ 160 回の起動停止を経験した。起動、停止時に生じる排気管の熱伸縮による変位により斜め方向の鋭角な凹みに繰り返しひずみが付加されることにより熱疲労による初期き裂が発生した。一方、D/G 定期試験におけるシリンダ出口温度の定期試験データによると、本事象が発生した平成 30 年 6 月 5 日のみ特異な変動が認められることから、この定期試験時においてベローズに鋭角な打痕に沿って軸方向にき裂が進展し排気ガスが吹き出したと推定した。一旦き裂が生じた後は、D/G 運転中における周期的な内圧の変動による振動によってベローズの周方向のき裂が進展した。また、周期的な内圧の変動に伴う周方向へのき裂の進展により、一部のベローズが片持ちになり、ある程度の大きさごとに破片になっていったと推定した。

1. 4 変形を与えた可能性のある作業の抽出とその影響について

本事象の発生要因は、当該排気管伸縮継手を取付け時に落下させ、鋭角な凹みを付けたことと推定した。D/G の他の部品においても同様な変形が否定できないことから、部品に変形を与えた可能性のある作業を抽出し、その影響を確認した。

調査対象は、現場での目視等による破損の早期検知が困難な、気体のバウンダリのうち、吸気・排気ラインに係る部品及び関連する作業とした。吸気・排気ラインに係る部品としては、伸縮継手(排気管伸縮継手、過給機入口伸縮継手及び排気ライン伸縮継手)、配管及び機器を調査対象とした。調査にあたり、関連する作業(部品に変形を与えた可能性のある作業)を、当該部品が移動して他の部品・機器と接触する場合と、他の部品・機器・工具が移動して当該部品に接触する場合とに区分した。この観点から整理を進め、その作業手順・実績、機器の配置状況及び接触する部品の性状を考慮し、『伸縮継手と取付け作業』、『伸縮継手と近傍作業』、『配管及び機器と取付け作業』を部品に変形を与えた可能性のある部品と作業の組み合わせとして抽出した。取付け作業の詳細は、取付け作業中の移動時における他機器との接触、据付時における当該部品の落下、及びボルト締付け時の使用工具との接触であった。

この組み合わせに対し、想定される変形が破損につながる可能性を評価した。伸縮継

	<p>手については、排気管伸縮継手のみが取付け作業中の落下を起こす可能性があり、今回破損に至ったような鋭角な凹みの原因となりうることを確認した。一方、いずれの伸縮継手も、他機器との接触(近傍作業含む)又は使用工具との接触では鋭角な凹みが発生しないため、破損に至る可能性は低いと評価した。</p> <p>配管及び機器については、使用工具との接触のみが変形を与えた可能性があった。しかし、使用工具の接触に対して対象部品は比較的厚く、変形が生じにくい構造であることから、破損に至る可能性は低いと評価した。</p> <p>2 事象の原因</p> <p>組立時の打痕と熱疲労の複合要因により、当該排気管伸縮継手のベローズに初期き裂が発生し、当該排気管伸縮継手の内圧にて初期き裂が進展し、破損に至ったと推定した。</p> <p>当該排気管伸縮継手のベローズに打痕が付いた原因は、打痕の大きさや打痕が付いた箇所、D/G(B)室における作業エリアの突起物の状況から、当該排気管伸縮継手の取付け時に落下させた可能性が高いことを確認した。</p> <p>排気管伸縮継手取付け時の作業手順は、使用治工具の指定を含め、作業手順が明確に定められておらず、打痕に対する判定基準も不明確であった。そのため、現場作業員は当該排気管伸縮継手の取付け時に打痕が付いた際において、打痕は軽微であり機器の健全性に影響を及ぼすものではないと判断した可能性がある。当社社員は、取付け時に記録による確認を行っていたが、記録には打痕に関する記載がなかったことから、打痕があることを認識していなかった。</p> <p>以上より、打痕が付いた要因として以下を抽出した。</p> <p>(1)現場作業要領の不備</p> <p>現場作業における作業要領において、ベローズを取扱う際の注意点の記載がなく、また、取替え作業時の適正工具の使用を含めた作業手順が明確でなかった。</p> <p>(2)薄肉部材に対して打痕が与える影響に関する力量不足</p> <p>現場作業員は、排気管伸縮継手の定期取替えを行っておらず、ベローズを取扱う経験が少なかったため、ベローズが薄肉構造(板厚)で運転中の変位を吸収するために設置された、打痕の影響を受けやすい部材であるという意識が低かった。このため、排気管伸縮継手に打痕が付くことを防止する対策を取らず、打痕を見つけた際にも健全性に影響を与えるものではないと誤って判断した。</p> <p>なお、平成19年に5号機D/G(B)排気管伸縮継手の破損が認められた事象について、破損した排気管伸縮継手の運転回数(184回)及び運転時間(201時間)が本事象発生時の運転回数(163回)及び運転時間(212時間)と比較的近かったが、平成19年の破損事象は排気管伸縮継手のベローズとフランジ部の隙間が不足し接触したことにより発生した摩耗部を起点として破損したものであり、本事象との関連性はない。</p> <p style="text-align: right;">(詳細は別添のとおり。)</p>
保護装置の種類及び動作状況	なし
放射能の影響	なし

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

被害者	なし
他に及ぼした障害	なし
復旧の日時	平成 30 年 6 月 12 日(火)15 時 45 分
再発防止対策	<p>排気管伸縮継手破損事象の発生要因が「組立時における打痕・傷」及び「熱疲労」の複合要因で発生したものと推定したことを踏まえ、以下の再発防止対策を行う。排気管伸縮継手 1 個が完全に破損した場合であっても D/G の機能は維持できることを確認しているが、本事象が打痕を一因として発生したため、今後偶発事象が発生する可能性も含め検討を行った。</p> <p>(1)打痕が付くことを防止する対策 排気管伸縮継手の取替え時に打痕が付くことを防止するため、以下の対策を行う。</p> <p>a 当社社員の立会項目の追加 組立時において打痕が付いた状態で熱疲労が加わることを防止するため、記録確認としていた排気管伸縮継手取付け後の外観確認を当社社員の立会項目とする。</p> <p>b 現場作業手順の明確化 打痕の要因として、現場作業要領の不備があることから、排気管伸縮継手の取替え手順に以下の内容を追加し、取付け作業時に打痕が付くことを防止する。</p> <p>①取付け作業実施前におけるベローズへの打痕防止用の養生の実施 取付け作業時のベローズと治工具の接触を防止するための養生を行う旨を作業手順に追加する。</p> <p>②取付け時の排気管伸縮継手落下防止対策の実施 取付け時の排気管伸縮継手の落下を防止するため、排気管伸縮継手に落下防止対策を行う旨を作業手順に追加する。</p> <p>③締付け時の適正(専用)工具の使用の明確化 不適切な工具の使用により打痕が付くことを防止するため、使用する工具を作業手順に追加する。</p> <p>④取付け後の外観点検時の判定基準の明確化 取付け時における打痕等の異常を確実に検知するため、取付け後の外観点検時の判定基準を明確化し、点検手順に追加する。</p> <p>⑤取付け後の外観点検方法の明確化 打痕の見落としを防止するため、鏡を利用し狭隘部まで確認する旨を作業手順に追加する。</p> <p>c 薄肉部材に対して打痕が与える影響に対する意識の向上 打痕の要因として、排気管伸縮継手のような薄肉部材に対して打痕が与える影響に関する意識不足があることから、以下の対策を行い、薄肉部材に対して打痕が与える影響に対する意識の向上を図る。</p>

①作業要領への明記

ディーゼル機関の排気管伸縮継手の作業要領にベローズの取扱いに関する注意を記載する。

②着工前及び取付け作業前の打合せ時における注意喚起

現場監督者及び現場作業員に対し、排気管伸縮継手のベローズの構造やその取扱い上の注意点について、作業前の打合せ及び取付け作業前の TBM にて注意喚起を行う。

③教育による意識の向上

発電所の教育プログラムの中に本事例を盛り込み、薄肉部材に対して打痕が与える影響に関する当社社員及び協力会社社員の意識の向上を図る。

(2)偶発事象を早期に検知するための対策

上記の対策により、今後、打痕が付いた状態で使用する可能性は低いですが、D/Gについては、偶発事象による故障が至近の10年の間に13件発生しており、他の機器と比較して多い状況を踏まえ、以下の対策を行い偶発事象に対する検知性の向上を図る。

a 排気管伸縮継手の定期的な外観点検の実施

偶発事象が排気管伸縮継手に生じるリスクも考慮し、保温材を取外して排気管伸縮継手全周の外観点検を定期的に行い、打痕等の異常が発生していないことを確認する旨をディーゼル機関の点検計画に明記する。これにより、改善した施工管理の妥当性を継続的に確認していく。

なお、排気管伸縮継手のフランジとベローズ間は隙間管理を実施しているが、排気管伸縮継手取付けやD/Gの運転等の理由により、隙間値が変動する可能性がある。そのため、この観点も考慮して点検していく。

(3)偶発事象に起因して排気管伸縮継手に破損が発生した場合の対策

排気管伸縮継手2個が破損した場合であってもディーゼル機関の機能は維持できることを確認しているが、偶発事象が発生し排気管伸縮継手が破損した場合を想定し、以下の対策を行い破損の兆候の早期把握及び予備品の常時確保によりディーゼル機関の早期復旧を図る。

a 保温材の形状の変更

排気管伸縮継手の破損の兆候がある場合、低出力運転時には不完全燃焼による黒煙がD/G室内に漏れやすくなる。排気管伸縮継手は保温材に覆われているため、黒煙がより漏れやすい形状に保温材を変更することで、黒煙の検知性を向上する。併せて、保温材の形状を排気管伸縮継手の外観の確認が可能となるよう変更することで、試運転中に排気管伸縮継手の漏れい場所を早期に特定し、破損の兆候の把握を可能にする。

b 排気管伸縮継手の予備品化

排気管伸縮継手の予備品を配備し、事前に取り替手順を定めることで、排気管伸縮継手の取替えは2日間で実施可能である。それにより、保安規定に定める10日間(D/Gが動作可能な状態に復旧したことを確認するまでの完了時間)の間の速やかな復旧が可能である。なお、予備品化により、排気管伸縮継手は実用炉報告基準の運用(訓令)に記載の消耗品の位置づけとなる。

	<p>上記対策のうち「(3) a. 保温材の形状の変更」は、次回点検に同調して実施(平成 31 年 11 月完了目標)し、その他の対策は平成 30 年 12 月完了を目標に対策を実施する。なお、5 号機の D/G は、現状保温材を取外して待機状態としているため、万一排気管伸縮継手のベローズが破損したとしても、早期検知は可能である。</p> <p>(詳細は別添のとおり。)</p>
--	--

浜岡原子力発電所 5号機
非常用ディーゼル発電機(B)
排気管伸縮継手破損による排気漏えいに伴う
運転上の制限からの逸脱について

平成30年6月提出
平成30年9月補正
平成30年11月補正
中部電力株式会社

目 次

1	件名	1
2	事象発生の日時	1
3	事象発生の場所	1
4	事象発生の発電用原子炉施設名	1
5	事象の状況	1
5.1	排気管付近からの漏えいの確認	2
5.2	運転上の制限からの逸脱の判断	2
5.3	運転上の制限からの逸脱時に要求される措置	3
5.4	気体漏えい箇所の特定	3
5.5	実用炉規則第134条第5号に定める報告事象の該当判断	3
5.6	応急復旧の実施	4
5.7	D/G(B)待機除外中における全交流電源喪失リスクへの対応手段	5
5.8	運転上の制限逸脱からの復帰	6
5.9	非常用発電設備の更なる冗長性の確保	6
5.10	排気管伸縮継手破損がD/Gの機能要求へ与える影響	7
6	原因調査	7
6.1	当該排気管伸縮継手の破損状況の確認	7
6.2	要因分析図による調査	9
6.2.1	設計に関する要因	9
6.2.2	製作に関する要因	10
6.2.3	施工に関する要因	11
6.2.4	運転管理に関する要因	13
6.2.5	保守管理に関する要因	14
6.2.6	経年劣化に関する要因	15
6.2.7	運転経験の反映に関する要因	17
6.3	事象発生の推定メカニズム	17
6.3.1	初期き裂発生の推定メカニズム	17
6.3.2	初期き裂発生推定メカニズムの検証	18
6.3.3	打痕により当該排気管伸縮継手が破損に至るまでの推定メカニズム	20
6.4	変形を与えた可能性のある作業の抽出とその影響について	20
7	事象の原因	21
8	保護装置の種類及び動作状況	22
9	放射能の影響	22
10	被害者	22
11	他に及ぼした障害	22

1 2	復旧の日時	22
1 3	再発防止対策	22
1 4	添付資料一覧	26
1 5	参考資料一覧	27

1 件名

浜岡原子力発電所 5 号機 非常用ディーゼル発電機(B)排気管伸縮継手破損による排気漏えいに伴う運転上の制限からの逸脱について

2 事象発生の日時

平成 30 年 6 月 5 日(火)17 時 06 分(実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第 134 条第 5 号に定める報告事象に該当すると判断した時刻)

3 事象発生の場所

浜岡原子力発電所 5 号機 原子炉建屋 1 階
非常用ディーゼル発電機(B)室(放射線管理区域外)

4 事象発生の発電用原子炉施設名

非常用予備発電装置－非常用ディーゼル発電設備

5 事象の状況

平成 30 年 6 月 5 日(火)14 時 35 分頃、施設定期検査中の浜岡原子力発電所 5 号機(以下、「5 号機」という。)原子炉建屋 1 階の非常用ディーゼル発電機(B)室(放射線管理区域外)において、運転員が、定期試験中の非常用ディーゼル発電機(以下、「D/G」という。)(B)の定格電力到達 10 分後の記録採取にて、各シリンダ出口排気温度差が目標値である 未滿を上回っていることを確認した。このため、15 時 00 分頃、運転員は現場確認を実施したところ、D/G(B)排気管付近からの気体の漏えいを確認した。運転員は発電指令課長に連絡し、発電指令課長から原子炉課へ連絡した。原子炉課員による現場確認で、A-No. 6 シリンダと A-No. 7 シリンダの間で気体の漏えいと保温材の破れを確認したことから、気体の漏えい箇所について詳細な確認を実施するため、原子炉課長は発電指令課長に D/G(B)の停止を依頼した。

16 時 07 分、発電指令課長は D/G(B)の運転を停止し、排気管付近からの気体の漏えい箇所の詳細な調査・点検が必要との判断から、D/G(B)を待機除外とすることとしたため、16 時 20 分、浜岡原子力発電所原子炉施設保安規定第 1 編(以下、「保安規定」という。)第 60 条に定める運転上の制限からの逸脱を判断した。

調査の結果、D/G(B)の排気管伸縮継手に破損があり、実用炉報告基準の運用(訓令)^{*1}に示された消耗品の交換や機器の調整により復旧できるものではないことから、17 時 06 分に実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則(以下、「実用炉規則」という。)第 134 条第 5 号に定める報告事象に該当すると判断した。

その後、破損した排気管伸縮継手の破片による D/G(B)への影響評価、当該排気

※1 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第 134 条及び研究開発段階にある発電の用に供する原子炉の設置、運転等に関する規則第 129 条の運用について(訓令)

管伸縮継手以外の排気管伸縮継手の点検、当該排気管伸縮継手の新品(予備品)への取替え、D/G(B)の試運転を実施した後、6月12日(火)9時50分、D/G(B)の定期試験を開始し、定期試験における確認項目(電圧、周波数、電力等)が判定基準を満足していること及び非常用高圧母線に並列できることを確認した。このため、発電指令課長は、15時45分、保安規定第60条第1項の運転上の制限である原子炉の状態が冷温停止及び燃料交換において、非常用高圧母線に接続する2台の非常用発電設備が動作可能であることを確認したことから、運転上の制限逸脱からの復帰を判断した。

なお、本事象に伴う外部への放射能の影響はなかった。

添付資料1, 2, 3, 4, 5

5. 1 排気管付近からの漏えいの確認

6月5日(火)12時30分、D/G(B)の定期試験を開始した。13時34分にD/G(B)を起動し、14時25分に定格電力に到達した。5号機原子炉建屋1階のD/G(B)室にて定期試験を実施していた運転員Aは、定格電力到達後の10分間に、D/G(B)の運転状態を確認するとともに、定期試験手順書に基づき定格電力到達10分後に行う記録採取の準備をしていた。14時35分頃、運転員Aは定格電力到達10分後の記録採取において、各シリンダ出口排気温度差(目標値 未満)^{※2}について、A-No. 5シリンダ出口とB-No. 1シリンダ出口との温度差が 以上であることを確認した。これを受けて、現場の状況を確認していた運転員Aは、15時00分頃、シリンダ付近から異音が発生していることを確認したことから、詳細に現場確認したところ、A-No. 5シリンダとA-No. 6シリンダの間にて気体の漏えいを確認した。運転員Aは発電指令課長に連絡を実施し、発電指令課長から設備主管部署である原子炉課へ連絡を実施した。その後、原子炉課員及び協力会社社員による現場確認の結果、A-No. 6シリンダとA-No. 7シリンダの間で気体の漏えいと保温材の破れを確認した。気体の漏えい箇所について詳細な確認を実施するため、原子炉課長は発電指令課長に対してD/G(B)の停止を依頼した。

添付資料2, 3, 6

5. 2 運転上の制限からの逸脱の判断

発電指令課長は、D/G(B)の定期試験における確認項目(電圧、周波数、電力等)が判定基準を満足していること及びD/G(B)が定格電力における運転継続が可能な状態であったことにより、D/G(B)に求められる機能は満足していることを確認した上で、16時07分、D/G(B)を停止した。

発電指令課長は、排気管付近からの気体の漏えい箇所の詳細な調査・点検が必要と

※2 各シリンダ出口排気温度差は、各シリンダの燃焼度のばらつきをみる目標値であり、D/Gの動作可能の判断基準に係るものではない。

の判断から、D/G(B)を待機除外とすることとした。このため、16時20分、保安規定第60条第1項の運転上の制限として、原子炉の状態が冷温停止及び燃料交換において、非常用高圧母線に接続するD/Gを含む2台の非常用発電設備が動作可能であるとしているところ、D/G(A)が待機中、D/G(C)が点検中であり、動作可能な非常用発電設備がD/G(A)1台となったことから、発電指令課長は、運転上の制限からの逸脱を判断した。

添付資料2, 7

5. 3 運転上の制限からの逸脱時に要求される措置

保安規定第60条表60-3に規定される運転上の制限からの逸脱時に要求される措置に対して、表1のとおり速やかに措置を講じた。

表1 運転上の制限からの逸脱時に講じた措置

講じた措置	時刻	結果
A1: 運転上の制限を満足させる措置を開始	16:20	良
A2: 炉心変更を実施していないことを確認	16:31	良
A3: 原子炉建屋原子炉室内で照射された燃料に係る作業を実施していないことを確認	16:31	良
A4: 有効燃料頂部以下の高さで原子炉圧力容器に接続している配管について原子炉冷却材圧力バウンダリを構成する隔離弁の開操作を禁止	16:31	良

5. 4 気体漏えい箇所の特定

16時11分、D/G(B)停止に伴い、運転員A及びBは気体の漏えいが停止したことを確認した。

16時23分、原子炉課員及び協力会社社員は、排気管の保温材を取外して気体の漏えい箇所(A-No.6シリンダとA-No.7シリンダ間)を確認した結果、A-No.2シリンダとA-No.7シリンダの排気を過給機へ導く排気管合流部のA-No.2シリンダ側の排気管に設置されている排気管伸縮継手が破損していることを確認した。

添付資料2, 3

5. 5 実用炉規則第134条第5号に定める報告事象の該当判断

実用炉規則第134条第5号に定める報告基準は、「発電用原子炉施設の故障(発電用原子炉の運転に及ぼす支障が軽微なものを除く。)により、運転上の制限を逸脱したとき」とされており、「発電用原子炉の運転に及ぼす支障が軽微なもの」の場合は除かれるが、破損した排気管伸縮継手は、新品(予備品)を発電所内に保管し

ているものの、通常の使用又は時間の経過による劣化に対して計画的に交換が管理されている部品ではないため、実用炉報告基準の運用(訓令)に示された消耗品には該当しないことから、消耗品の交換や機器の調整により速やかに復旧できる「発電用原子炉施設の運転に及ぼす支障が軽微なもの」には該当しないと判断し、17時06分、総括管理課長は、実用炉規則第134条第5号「発電用原子炉施設の故障により、運転上の制限を逸脱したとき」に該当すると判断した。

なお、実用炉規則第134条第3号「発電用原子炉設置者が、安全上重要な機器等又は常設重大事故等対処設備に属する機器等の点検を行った場合において、当該安全上重要な機器等が技術基準規則第十七条若しくは第十八条に定める基準に適合していないと認められたとき、当該常設重大事故等対処設備に属する機器等が技術基準規則第五十五条若しくは第五十六条に定める基準に適合していないと認められたとき又は発電用原子炉施設の安全を確保するために必要な機能を有していないと認められたとき。」については、実用炉規則第82条第1項の規定に基づく安全上重要な機器等を定める告示において、非常用所内電源系設備の機器及び構造物は、「ディーゼル機関、発電機、発電機から非常用負荷までの配電設備及び電路、燃料系、燃料輸送系、始動用空気系、吸気系、冷却水系、軽油タンク」であることから、当該排気管伸縮継手を含む排気ラインは安全上重要な機器ではなく、当該条項には該当しないと判断した。

5.6 応急復旧の実施

当該排気管伸縮継手の破片については、D/G運転中は排気ガスの流れがあるため排気管内に流入することは考え難いものの、排気経路内の内部確認を実施し、また、回収した当該排気管伸縮継手の破片の重量確認を実施した。加えて、当該排気管伸縮継手を除くD/G(B)の23個の排気管伸縮継手について外観点検により健全性を確認し、当該排気管伸縮継手を新品(予備品)へ取替えた上で、D/G(B)の試運転を実施した。

(1) 破損した排気管伸縮継手の破片によるD/G(B)への影響評価

D/G運転中は、排気管伸縮継手内側の排気圧力は、排気管伸縮継手外側より高くなっている。排気管伸縮継手が破損した場合においても、破損箇所の内側から外側へ排気は流れるため、その破片が排気管内に流入することは考え難い。

当該排気管伸縮継手の破片が排気管内に流入していないことを確認するため、当該排気管伸縮継手が接続されている排気経路(排気管内及び過給機内)にファイバースコープを挿入し内部を確認した。その結果、当該排気管伸縮継手の破片は確認されなかった。

また、当該排気管伸縮継手の破片については、破片の飛散が想定されるD/G(B)廻りの範囲を目視で調査し、破片が散乱していたシリンダA-No.4～No.8及びシリンダB-No.4～No.8のシリンダ周辺で破片の回収を行った。その結果、回収した破

片と当該排気管伸縮継手との重量の合計(5.33kg)と、新品(予備品)の排気管伸縮継手の重量(5.32kg)は同程度であった。

添付資料 8, 9, 10

(2) 破損した排気管伸縮継手以外の排気管伸縮継手の点検

当該排気管伸縮継手を除く D/G(B) の 23 個の排気管伸縮継手について、同様の破損の有無を確認するため、保温材を取外して外表面の外観点検を実施した結果、機器の健全性に影響を及ぼす欠陥がないことを確認した。(当該排気管伸縮継手と同様な破損がないことの観点で確認)

添付資料 11

(3) 破損した排気管伸縮継手の取替え

当該排気管伸縮継手を取外し、新品(予備品)の排気管伸縮継手を取付けた。取付け時に変形がないことや摩耗を防止するための間隙が確保されていることを確認するため、全長測定、段差(芯ずれ)測定及びフランジベローズ間隙測定を行い、全て判定基準内であることを確認した。

添付資料 12

(4) 試運転の実施

当該排気管伸縮継手の破片が排気経路にないこと、当該排気管伸縮継手以外の排気管伸縮継手に機器の健全性に影響を及ぼす欠陥がないこと、原因調査のため停止中(冷温状態)に採取する記録を採取したこと、当該排気管伸縮継手の取替えが完了したこと、及び D/G(B) 試運転中と停止後に確認すべき項目が整理されたことから、D/G(B) を起動し運転状態を確認した。

D/G(B) 試運転中において、取替え後の排気管伸縮継手の熱による変形等を確認した結果、24 箇所全ての排気管伸縮継手及びディーゼル機関の運転状態に異常はなく、運転性能に係る周波数等のデータが至近の試運転記録及び定期試験記録から有意な変化がないことを確認した。また、D/G(B) 試運転後(停止後)における外観点検や取替え後の排気管伸縮継手を含む寸法確認の結果、異常は認められなかった。

添付資料 13

5. 7 D/G(B) 待機除外中における全交流電源喪失リスクへの対応手段

本事象発生時、5号機は全燃料が原子炉内から取出されており、使用済燃料貯蔵槽に保管されていた。また、原子炉と使用済燃料貯蔵槽の間にあるプールゲートは閉状態であるため、必要となる安全機能は、使用済燃料貯蔵槽の冷却・注水機能である。本事象発生後、D/G(B)は待機除外となり、D/G(C)は点検中であったため、D/G(A)のみ待機状態となったが、この状況において外部電源は確保されており、

また、D/G(A)により、使用済燃料貯蔵槽を冷却する設備である燃料プール冷却浄化系や余熱除去系への電源供給も可能な状態であった。

更に、燃料の崩壊熱は十分低く、使用済燃料貯蔵槽温度が保安規定上の制限値である65℃に到達するまでの時間は90時間と評価しており、十分な時間余裕がある。このため、万が一、全交流電源喪失が発生した場合においても、使用済燃料貯蔵槽への注水手段として整備済みの可搬式動力ポンプを用いた代替注水手順により対応できる。具体的には、余熱除去系又は消火用水系配管を經由し使用済燃料貯蔵槽へ注水することで燃料を冷却することが可能である。また、原子炉建屋内に可搬ホースを敷設し、直接、可搬式動力ポンプから使用済燃料貯蔵槽へ注水することも可能である。本事象発生時の5号機各系統の点検状況においては、消火用水系からの余熱除去系への接続配管にある逆止弁が点検中ではあるものの、使用済燃料貯蔵槽の温度上昇には十分な時間余裕があり、当該弁を半日程度で復旧した後に余熱除去系(A)、(B)又は(C)系の配管を使用することが可能である。

上記の状況から、可搬式動力ポンプによる代替注水の優先順位は、短時間で設置可能な順番である、①消火用水系配管、②原子炉建屋内への可搬ホース敷設、③余熱除去系配管とし、その状況について所員へ周知を図った。

添付資料 1 4

5. 8 運転上の制限逸脱からの復帰

当該排気管伸縮継手が破損した以降の確認結果や試運転の結果を原子炉課が評価し、D/G(B)に異常がないことを確認した。これを受けて、6月12日(火)9時50分、D/G(B)の定期試験を開始し、定期試験における確認項目(電圧、周波数、電力等)が判定基準を満足していること及び非常用高圧母線に並列できることを確認した。このため、発電指令課長は、15時45分、保安規定第60条第1項の運転上の制限である原子炉の状態が冷温停止及び燃料交換において、非常用高圧母線に接続する2台の非常用発電設備が動作可能であることを確認したことから、運転上の制限逸脱からの復帰を判断した。

添付資料 1 5

5. 9 非常用発電設備の更なる冗長性の確保

保安規定第60条における必要な非常用発電設備数を確保するために、D/Gのバックアップとして検討を進めていた緊急時ガスタービン発電機(以下、「GTG」という。)について、設備の健全性の確認方法及び4号機非常用高圧母線(E)への給電手順書を定め、6月12日(火)より非常用発電設備としてみなすこととした。また、GTGを非常用発電設備としてみなすにあたり、GTG2台(1台あたりの容量:4,000kVA)でD/G(3,4号機:7,875kVA,5号機:6,900kVA)と同等以上の容量を確保できることを確認した。

その後、GTGから4号機非常用高圧母線(F)への接続工事が完了したことから給電手

順書を定めるとともに、GTG から 4 号機非常用高圧母線(H)への電源経路についても、他号機への電源融通ができるように給電手順書を定めた。また、3～5 号機 D/G から 3～5 号機の各非常用母線への電源融通の一部について、単一方向の電源供給となっており、逆方向に電源供給するための検討が必要であった。このため、5 号機 D/G(B)から 3, 4 号機非常用高圧母線への電源融通、及び 3, 4 号機非常用高圧母線(H)から 5 号機非常用高圧母線への電源融通について、設計上、電源供給が可能であることを確認した後に給電手順書を定め、更なる非常用発電設備の冗長性の確保を図った。

5. 10 排気管伸縮継手破損が D/G の機能要求へ与える影響

D/G に設置される排気管の破損を想定し、D/G からの排気ガスの漏えいが D/G の機能要求へ与える影響について評価を実施した。

評価の前提として、D/G の構造は排気管全 8 本が独立して過給機のタービンに接続されており、他の排気管の排気ガスが漏えい部に逆流することはないことを踏まえ、排気ガスの漏えい量は、保守的に排気管伸縮継手のベローズが完全に破損し、排気管に流れる排気ガスが全量漏えいすること、D/G 出力については外部電源喪失かつ原子炉冷却材喪失事故時を想定して設定された設計値を想定した。評価においては、D/G に要求される機能への影響（直接的影響）、及び D/G 室内の機器や室内環境への影響（間接的影響）を確認した。

その結果、排気管伸縮継手 1 個のベローズが完全に破損した場合においても、D/G の機能要求を満足できることを確認した。

また、上記の保守的な条件による評価と併せて、現実的な条件下での D/G 機能要求への影響について評価を実施した。具体的には、排気ガスの漏えい量は本事象時の D/G (B) 過給機入口温度の温度上昇率から算出した値とするとともに、D/G 出力については建設時における系統試験時の実績値（設計値の 70%）を採用した。この現実的な条件を用いて D/G 機能要求へ与える直接的影響及び間接的影響を評価した結果、別の排気管に設置される排気管伸縮継手が 2 個破損した場合においても、D/G の機能要求を満足できることを確認した。

添付資料 16

6 原因調査

6. 1 当該排気管伸縮継手の破損状況の確認

当該排気管伸縮継手の破損状況の把握を目的として、回収した破片により組立てた排気管伸縮継手のベローズの外観観察を行うとともに、当該排気管伸縮継手のベローズの破片に対し光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡による破面観察を行った。

(1) 回収した破片による復元及び外観観察

ベローズ復元作業は、各破片の外観を観察しながら、周方向又は軸方向の割れ

が一致する破片をつなぎ合わせることで実施した。また、復元した当該排気管伸縮継手のベローズの全体外観、破片単位のマクロ的な破壊、変形及び腐食等の経年劣化事象の特徴について観察を行った。回収した破片によるベローズ復元作業において、一部破片の欠損が確認された。このため、追加でディーゼル機関の狭隘部についてファイバースコープ等で追加の回収作業を行った。追加作業で回収した破片も加えて復元作業を行った上で、外観観察を行った。

破片単位、山（谷）単位及びベローズ全体の外観観察を実施した結果、復元したベローズの2箇所（180°付近及び110°付近）に大きな円弧状の凹みがあり、いずれもその中心部に鋭角な凹みが認められたことから、これらは打痕であると推定した。（以降、180°付近の打痕を打痕A、110°付近の打痕を打痕Bと定義する。）

この他、破片やベローズ残存部分に摩耗の痕跡や有意な腐食は認められなかった。

打痕Aは、破損している領域のほぼ中心に位置している。き裂の特徴については、周方向のき裂は打痕A近傍を除き山部にき裂が進展していること、打痕A近傍を含む軸方向のき裂は比較的直線状に並んでいること、及び打痕Aは打痕中心部に鋭角な凹みがあり、それに沿ってき裂が発生していることを確認した。

また、打痕A近傍では、破片が細かく局所的な変形が認められた。

添付資料17

（2）破片の破面観察

当該排気管伸縮継手のベローズ破片の破面観察によって、当該ベローズの破損の形態を把握することを目的として、光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡による破面観察を実施した。観察範囲は「破損の著しい打痕A近傍」、「溶接部近傍」、「き裂の進展量が大きい下流側（山8）」を中心に選定した。

観察の結果、観察した破面の大部分はつぶれており、有益な情報は得られなかったものの、一部に疲労破壊の特徴であるストライエーション状模様^{※3}が観察された。また、そのストライエーション状模様は内外表面を起点とする破面や一方向に進行する破面に観察された。

溶接部近傍においては、溶接起因の劣化を示す特徴は確認されなかった。

添付資料18

（3）外観観察及び破面観察結果による考察

一般的に、健全な排気管伸縮継手のベローズの場合、周方向き裂は排気管伸縮継手のベローズの収縮によって発生する軸方向引張応力により疲労破壊が発生する可能性がある。一方、軸方向き裂は内圧により発生する周方向引張応力のみでは発

※3 疲労破面において電子顕微鏡レベルで観察されるすじ模様のこと。

生しにくい。破片 1（添付資料 18 図 18-2）では、軸方向に上流から下流へ進む疲労破面、破片下流側の周方向では板厚方向に進む疲労破面を確認した。この結果は、健全なベローズで想定される事象と異なっており、山 1~4 間で初期の軸方向き裂の発生が考えられる。

また、ベローズ山部に斜め方向に鋭角な線状の凹みがある場合、ベローズの伸縮によって線状の凹みに垂直な方向に引張応力が作用する。そのため、打痕 A では軸方向と斜め方向に鋭角な凹みが認められていることから、鋭角な凹みに沿ったき裂の発生により、軸方向へき裂が進展した可能性がある。しかしながら、破面の大部分はつぶれていたことから、起点の特定には至らなかった。なお、打痕 B は打痕 A と比較して打痕形状は小さいため、打痕 A 近傍に初期き裂が生じた可能性が考えられる。ただし、打痕 B においても打痕近傍の山は大きく変形していることや、端部でのき裂は認められ、打痕の影響が示唆される。

ベローズのフランジ部のき裂先端では、打痕 A 近傍の軸方向き裂を中心に左右にき裂が伝播している様相が確認されており、破面観察の結果、確認されたき裂進展方向と一致している。一旦き裂が生じた後は、D/G(B) 運転中における、周期的な内圧の変動による振動によってベローズの周方向のき裂が進展したと考えられる。また、周期的な内圧の変動に伴う周方向のき裂の進展により、一部のベローズが片持ちになり、ある程度の大きさごとに破片となっていたと考えられる。

なお、平成 30 年 7 月 18 日(水)、5 号機 D/G(A)~(C)の排気管伸縮継手の外観点検を改めて実施した結果、D/G(A)排気管伸縮継手 1 個に 2 箇所、D/G(B)排気管伸縮継手 4 個に各 1 箇所の打痕を確認した。このため、これらの排気管伸縮継手については新品(予備品)に交換した。

添付資料 18, 19

6. 2 要因分析図による調査

本事象では、当該排気管伸縮継手のベローズが破損しており、このベローズが破損した原因究明のため、設計、製作、施工、運転管理、保守管理、経年劣化及び運転経験の反映の観点における破損要因を抽出し、細分化した上で評価を行った。

各要因の調査にあたっては関連する品質保証活動の状況も含めて確認した。

以下に、調査結果を示す。

添付資料 20

6. 2. 1 設計に関する要因

設計においては、設計インプット条件である使用環境、使用期間及び過去の排気管伸縮継手のベローズの不具合事例を基に設計要件を定めており、当該排気管伸縮継手の設計プロセスが妥当であることを検証する。

設計要件を満足しない場合、ベローズが破損する可能性がある。このため、ベローズを含む排気管伸縮継手の設計要件について、設計上の構造強度の妥当性を確認した。

その結果、設計要件はD/Gの設計要求に合致しており、実使用環境に対して十分余裕を考慮した設計となっていることを確認した。また、ディーゼル機関メーカ及び排気管伸縮継手メーカへの聞き取り及び工場立入により、設計変更及び設計検証履歴を確認し、排気管伸縮継手のベローズの不具合事例の報告を受けて設計変更が行われるプロセスが確立されており、過去に破損事例を受けた対策として設計変更が適切に実施されていることを確認した。

以上より、設計に関する要因は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

添付資料 2 1, 2 2, 2 3

6. 2. 2 製作に関する要因

製作においては、インプット条件として設計要件にて定めた材料を使用し、製作にあたっての製作手順を定めており、当該排気管伸縮継手の製作プロセスが妥当であることを検証する。

以下に、製作に関する各要因の調査結果を示す。

(1) 材料不良

材料不良が生じた場合、ベローズの強度が低下し、ベローズが破損する可能性があることから、ベローズの機械的性質及び化学成分が規格値を満足していることを調達時の試験検査記録により確認した。

その結果、ベローズの材質は設計で規定した SUS321 であることを確認した。また、機械的性質及び化学成分は、それぞれ SUS321 の規格値を満足していることを確認した。

以上より、材料不良は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

添付資料 2 4, 2 5

(2) 製作不良

排気管伸縮継手の製作不良が生じた場合、ベローズが薄肉になることなどにより、許容応力を超え、ベローズが破損する可能性があることから、当該排気管伸縮継手について製作不良の有無を製作時の試験検査記録により確認した。

その結果、当該排気管伸縮継手の製作時における試験検査結果が判定基準を満足していることを確認した。

また、当該排気管伸縮継手のベローズに対して定められた手順で製作・組立工程が行われていることを排気管伸縮継手メーカへの聞き取り及び工場立入により確認した。

その結果、当該排気管伸縮継手のベローズに対して、定められた手順に従い製

作されていたことを確認した。

以上より、製作不良は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

添付資料 26, 27

(3) 溶接不良

ベローズの溶接が適切な溶接施工要領に従い実施されていない場合、溶接欠陥が生じ、ベローズが破損する可能性がある。このため、溶接施工要領及び施工・検査記録により、ベローズが溶接施工要領に従い適切な技量を有した溶接士により溶接施工されていることを確認した。

その結果、ベローズの溶接は第三者機関に承認を受けた品質管理プロセスに基づき定めた溶接施工要領に従い、適切な技量を有した溶接士が実施しており、溶接後の検査においても判定基準を満足していることを確認した。

以上より、溶接不良は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

添付資料 28

6. 2. 3 施工に関する要因

施工においては、工事要領書に従い排気管伸縮継手の取付け等が適切に行われ、この施工プロセスが妥当であることを確認する。

以下に、施工に関する各要因の調査結果を示す。

(1) 組立不良

排気管伸縮継手フランジボルトの締付けが不足した場合、排気管伸縮継手取付け位置がずれることで過大な力が加わりベローズが破損する可能性がある。

このため、当該排気管伸縮継手を取替えた際の工事要領書、工事報告書及びディーゼル機関メーカーの聞き取りによりフランジボルトの締付け管理状況を確認した。

その結果、当該排気管伸縮継手の締付け確認として、当該排気管伸縮継手取付け後のフランジの面間測定において規定範囲で均等に締付けられていること、及びディーゼル機関メーカーが実施する漏えい確認において異常がないことを確認するとともに、当該排気管伸縮継手の取外し前のフランジボルトの締付け状況の確認により、当該排気管伸縮継手位置のずれはなく、フランジボルトに緩みはなく適切に締付けられていたことを確認した。

また、ベローズに打痕・傷が生じていた場合、当該部を起点としてベローズが破損する可能性がある。このため、当該排気管伸縮継手の外観観察により、打痕・傷の有無を確認した。更に、当該排気管伸縮継手の取替え後（平成 20 年）以降の当該排気管伸縮継手近傍における作業履歴を確認し、ベローズに打痕・傷を与える可能性のある作業を抽出し、当該排気管伸縮継手の保温材取外しの有無を確認した。

その結果、破片を復元した当該排気管伸縮継手のベローズに 4 箇所打痕がある

ことを確認した。作業履歴について、当該排気管伸縮継手の取替え作業以外にベローズに打痕を与える可能性がある作業を実施していないこと、及び当該排気管伸縮継手の取替え以降、保温材を取外していないことより、当該排気管伸縮継手の取替え時に打痕を生じさせた可能性がある。

添付資料 2 9, 3 0, 3 1

(2) 排気管伸縮継手の取付け方向誤り

排気管伸縮継手の取付け方向を誤った場合、排気ガスの整流ができず、排気ガスが直接ベローズに当たることで、過大な圧力がかかり破損する可能性がある。

このため、当該排気管伸縮継手破損時に撮影した写真により当該排気管伸縮継手の取付け方向を確認した。

その結果、排気管伸縮継手に刻印されている流れ方向を示す矢印とディーゼル機関の排気ガスが流れる方向が一致していることを確認した。また、上流側に内筒ツバの厚み分の隙間が生じており内筒の取付け方向も正しいことから、当該排気管伸縮継手は正しく取付けられていることを確認した。

以上より、排気管伸縮継手の取付け方向に誤りはなく当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

添付資料 3 2

(3) 芯ずれ

排気管伸縮継手に芯ずれがあった場合、ベローズに過大な力が加わり破損する可能性がある。

このため、工事報告書に基づき測定した当該排気管伸縮継手の段差寸法を記録により確認した結果、当該排気管伸縮継手の段差寸法は、判定基準を満足しており、芯ずれがないことを確認した。

以上より、芯ずれは当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

添付資料 3 3

(4) ねじれ

ベローズがねじれていた場合、排気管伸縮継手に過大な力が加わり破損する可能性がある。

このため、排気管伸縮継手の構造を確認した結果、取付け前は排気管伸縮継手のベローズとフランジは周方向には固定されておらず、ベローズ自体が回転できる構造となっている。よって、フランジ締付け時において、ベローズにねじれが発生することはないことを確認した。

以上より、ねじれは当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

添付資料 3 4

(5) 振動

排気管サポートの締付け不良により排気管の拘束がなくなった場合、D/G(B)運転時に排気管が振動し、ベローズに過大な振動が生じ破損する可能性がある。

このため、当該排気管伸縮継手を取替えた際(平成 20 年)の工事報告書により排気管サポートの締付け状況を確認するとともに、当該排気管伸縮継手取替え時(平成 20 年)以降の排気管サポートに関する作業の有無を確認した。また、当該排気管伸縮継手の取外し前に排気管サポートの締付け状況及び外観を確認した。

その結果、本事象発生時に排気管サポートに緩みがないこと、及び当該排気管伸縮継手取替え時(平成 20 年)から本事象発生までの間も排気管サポートに緩みがないことを確認した。

また、フランジボルトの締付け不良により排気管伸縮継手取付け位置がずれた場合、ベローズに過大な振動が生じ破損する可能性がある。

このため、当該排気管伸縮継手を取替えた際(平成 20 年)の工事要領書、工事報告書及びディーゼル機関メーカーの聞き取りにより、施工時のフランジボルトの締付け状況を確認した。

その結果、当該排気管伸縮継手の締付け確認として、当該排気管伸縮継手取付け後のフランジの面間測定で均等に締付けられていること、及びディーゼル機関メーカーが実施する漏えい確認において異常がないことを確認した。また、当該排気管伸縮継手の取外し前のフランジボルトの締付け状況の確認により緩みはなく、適切に締付けられていたことを確認した。

以上より、振動は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

添付資料 29, 35

6. 2. 4 運転管理に関する要因

運転管理として、毎月実施している定期試験の結果である定期試験記録により D/G 運転状態に異常がないこと、定期試験手順書及び判定基準が適切に定められていることを確認する。また、点検後の試運転時に採取する運転性能記録により D/G 運転状態に異常がないことを確認する。

(1) 排気ガス温度等の異常

D/G 運転中において排気ガス温度等が設計仕様を超過した場合、ベローズが破損する可能性がある。

このため、定期試験記録及び運転性能記録により、異常燃焼等により発生する排気管の異常な振動の有無及び排気ガス温度の異常な上昇の有無を確認するとともに、破損事象確認後の振動測定記録及び解析により圧力脈動の発生の可能性を調査した。

その結果、振動測定結果は他の排気管伸縮継手と比較しても同程度であること、及び排気ガス温度が判定基準値を超えていないことを確認した。また、振動測定結果及び解析結果より圧力脈動により発生するひずみは許容ひずみと比較して小さいことを確認した。

以上より、排気ガス温度等の異常は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

添付資料 36, 37

(2) 運転手順の誤り

定期試験手順書、試運転手順書及びその判定基準の誤り、並びに定期試験手順書を逸脱する操作により、排気温度の異常上昇が発生し、過大な応力が加わることでベローズが破損する可能性がある。

このため、定期試験手順書、試運転手順書及びその判定基準が妥当なものであり、それに基づき運転が行われていることを確認した。

その結果、定期試験及び試運転の手順はメーカー推奨手順を逸脱するものではなく、定期試験及び試運転の判定基準もメーカーの仕様書等で要求される基準を満足するよう定められていることを確認した。また、定期試験手順書を逸脱する操作がなかったことを、D/G(B)定期試験時の誤操作による不適合件名がないこと及び定期試験記録結果より排気温度の判定基準からの逸脱がないことにより確認した。

以上より、運転手順の誤りは当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

添付資料 38, 39

6. 2. 5 保守管理に関する要因

保守管理として、保全重要度が適切に設定され、その重要度を勘案して、想定される経年劣化事象及び偶発事象を考慮した保全計画が策定されていることを確認する。

保全内容が不適切な場合、想定外の劣化が生じて排気管伸縮継手が破損する可能性がある。

このため、保全の内容が適切な考え方に基づき設定されていることを確認した。

その結果、非常用ディーゼル発電設備は、保全重要度を社内規定に基づき設定しており、その重要度を勘案して、想定される経年劣化事象及び偶発事象を踏まえ、保全項目が設定されていることから、非常用ディーゼル発電設備の機器の一部である排気管伸縮継手においても保全の内容は妥当であると評価した。

以上より、保守管理は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

しかしながら、本事象を踏まえ偶発事象を捉えるための更なる改善として、状態監視を強化していく必要があると評価した。

添付資料 40

6. 2. 6 経年劣化に関する要因

経年劣化として、腐食、材料劣化、振動及び熱による疲労等の発生を確認する。以下に、経年劣化に関する各要因の調査結果を示す。

(1) 腐食

当該排気管伸縮継手のベローズに腐食が発生した場合、破損する可能性がある。

このため、ベローズの表面観察により流れ加速型腐食、すきま腐食、孔食、応力腐食割れ及び硫化腐食の発生の有無を確認した。

その結果、これらの腐食が発生した様相は認められなかった。応力腐食割れについては、鋭敏化組織^{※4}がないことから粒界型応力腐食割れの発生はなく、また、当該排気管伸縮継手が保温材に覆われているため、外表面に塩分の付着はなく、塩分付着による腐食は発生しないことを確認した。また、硫化腐食については、表面観察の結果に加え、建設時に測定した排気ガス中の硫黄酸化物濃度が基準値より低いことから、硫化腐食は発生していないと評価した。

以上より、腐食は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

添付資料 17, 18, 41, 42, 43, 44, 45

(2) 材料劣化

当該排気管伸縮継手に、熱時効による脆化が発生した場合やクリープが発生した場合、ベローズが破損する可能性がある。

このため、当該排気管伸縮継手のベローズの破面観察及び硬さ測定を行った。

その結果、ベローズの破面に脆性破面、クリープボイドや微小き裂等は認められなかった。また、ベローズの母材部、溶接部及び新品の母材部における硬さ測定の結果、硬さは同等であることを確認した。

以上より、熱時効による脆化やクリープによる材料劣化は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

添付資料 18, 45, 46, 47, 48

(3) 疲労（振動）

機器・配管の振動(動的機器からの振動伝播や圧力脈動)により、ベローズに疲労割れが発生した場合、ベローズが破損する可能性がある。

このため、D/G 機関据付部及び過給機の至近の振動測定結果と過去の測定結果を比較することで、経年劣化による振動値の上昇傾向がないことを確認するとともに、共振がないことを確認した。

その結果、排気管伸縮継手フランジ部の振動測定結果は他の排気管伸縮継手と同

※4 溶接等の入熱により、オーステナイト系ステンレス鋼は結晶粒界にクロム炭化物が生成し、隣接部分のクロム量が減少する場合がある。このような組織を鋭敏化組織という。

程度であり、概算により算出したひずみ量が許容ひずみより小さいこと、排気管伸縮継手の固有周波数は□以上であり、D/G 機関との共振は発生していないこと、並びに機関据付部及び過給機の振動値は許容値以内であり排気管伸縮継手取替え時から有意な上昇傾向がないことを確認した。また、排気管サポート拘束不良及びフランジボルトの緩みについて施工状況等を確認した結果、いずれも緩み等は確認されなかった。

以上より、疲労(振動)は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

添付資料 2 9, 3 5, 4 9

(4) 熱疲労

D/G の起動、停止時に生じる排気管の熱伸縮による変位によりベローズに繰り返しひずみが付加されることにより生じる低サイクル疲労(以下、本報告書においては「熱疲労」という。)に起因して破損する可能性がある。

このため、D/G 運転中における排気管伸縮継手の軸方向と軸直角方向の収縮量の確認、及びD/G の起動、停止回数と設計上の繰り返し寿命回数を設計仕様と比較した。

その結果、当該排気管伸縮継手の収縮量は設計上の値と比較して小さいこと、及びD/G の起動、停止回数も設計寿命回数よりも少ないことを確認した。

一方、破面観察より疲労破面が確認されていることから、熱疲労が発生した可能性は否定できない。

添付資料 1 8, 5 0

(5) 外力

D/G 運転時に排気管の熱膨張によりベローズ側面部とフランジ端面が接触する可能性がある。

このため、当該排気管伸縮継手フランジの接触痕の有無、当該排気管伸縮継手施工時のフランジ隙間計測記録からフランジとベローズの隙間が判定基準を満足していること、及びD/G 運転中の排気管伸縮継手の外観点検記録よりフランジ内面とベローズとの接触の有無を確認した。

その結果、フランジ内面に接触痕は確認されず、当該排気管伸縮継手の取付け時に隙間管理が適切になされていること、及び本事象発生後のD/G 運転中における外観点検にて、フランジ内面とベローズとの接触は確認されなかった。

また、D/G 運転時に想定以上の変形が排気管に生じ、当該排気管伸縮継手の変形し、ベローズに過大な力が加わった場合、ベローズが破損する可能性がある。このため、サポート部外観点検記録及びサポート部締付け確認記録より排気管サポートの施工状況及びD/G 運転中の排気管伸縮継手の軸方向と軸直角方向の熱変位測定記録を確認した。その結果、排気管サポートのボルト類の緩みはないこと及び軸方向

と軸直角方向の熱変位が許容値を満足していることを確認した。当該排気管伸縮継手の内筒の外観点検を行い接触痕の有無を確認した結果、当該排気管伸縮継手の内筒にベローズの谷部と擦れた痕跡がないことを確認した。

以上より、外力は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

添付資料 5 1, 5 2, 5 3

6. 2. 7 運転経験の反映に関する要因

平成 17 年 1 月 18 日(火)(5 号機 D/G 供用開始)から平成 30 年 6 月 5 日(火)(本事象発生)の期間に発生した自プラント及び他プラントにおける排気管伸縮継手に係る不具合事象について、是正処置が適切に実施されていない場合、排気管伸縮継手破損事象が発生する可能性がある。

このため、自プラントの不具合事象については是正処置報告書を確認するとともに、他プラントについては NUCIA トラブル情報及びスクリーニング報告書を確認し、不具合事象の反映がある場合は、是正処置が適切に実施されているかを確認した。

その結果、排気管伸縮継手の損傷に関し、自プラントの不具合事象を 1 件確認し、他プラントについては情報がないことを確認した。自プラントの不具合事象は平成 19 年に発生した 5 号機 D/G(B)排気管伸縮継手のベローズの損傷事例であり、是正処置が適切に実施されていることを確認した。

以上より、運転経験の反映は当該排気管伸縮継手が破損した要因ではない。

添付資料 5 1, 5 4

6. 3 事象発生の推定メカニズム

要因分析図による調査結果より、当該排気管伸縮継手が破損した要因は組立時における打痕及び熱疲労の可能性のあることを確認した。

抽出された 2 つの要因について、初期き裂の発生メカニズムを推定するとともに、初期き裂発生後のき裂の進展により当該排気管伸縮継手が破損に至るまでのメカニズムを推定した。

6. 3. 1 初期き裂発生の推定メカニズム

要因分析図による調査結果より抽出された 2 つの要因は、各々が単一で要因となった可能性又は 2 つが複合して要因となった可能性がある。このため、以下の 3 通りについて初期き裂が発生しうるか確認を行った。

(1) 打痕の単一要因

排気管伸縮継手のベローズはステンレス製であり、ステンレスは一般に延性脆性遷移温度が低く室温においては延性が有意であるため外力による割れは発生し難い。また、繰り返し疲労試験の試験体作成時に排気管伸縮継手のベローズへ当該排

気管伸縮継手に確認された打痕と同程度の大きさの打痕を付与した後、浸透探傷試験を実施し線状指示がないことを確認した。

加えて、打痕のみで初期き裂が発生していたと仮定すると、排気管伸縮継手取替え作業直後の D/G 起動よりき裂が進展し、運転初期に破損に至ると予想される。これは当該排気管伸縮継手が前回取替え時（平成 20 年）から起算して約 160 回の起動・停止を経験している事実と一致しない。

このため、打痕が初期き裂を発生させる単一要因にはならない。

添付資料 5 5

（２）熱疲労の単一要因

熱疲労は排気管伸縮継手の設計要件に含まれている。

本事象発生時における当該 D/G(B) の起動・停止（常温状態から運転時の高温状態）回数は、前回取替え時（平成 20 年）から起算すると約 160 回であり、設計で考慮している繰り返し寿命回数には至っていない。また、D/G(B) 運転中の当該排気管伸縮継手の収縮量は、設計上の軸方向及び軸直角方向の変位はいずれも設計仕様と比較して小さいことを確認している。

このため、熱疲労が初期き裂を発生させる単一要因にはならない。

添付資料 1 8, 5 0

（３）打痕及び熱疲労の複合要因

当該排気管伸縮継手のベローズに打痕がついていることで、D/G(B) 起動中に排気管の熱膨張によりベローズが収縮することによって打痕部近傍に設計上想定されるひずみより大きいひずみが生じ、このひずみにより設計で想定する繰り返し寿命回数より少ない回数（約 160 回）で初期き裂が発生した可能性がある。

このため、打痕及び熱疲労が複合し初期き裂を発生させた可能性がある。

6. 3. 2 初期き裂発生推定メカニズムの検証

前項で推定した打痕及び熱疲労の複合要因による初期き裂発生メカニズムについて、打痕が付いた原因を調査するとともに構造解析及び繰り返し疲労試験により検証を実施した。

（１）打痕の原因

当該排気管伸縮継手のベローズに打痕を与える可能性がある作業を抽出するため、当該排気管伸縮継手の近傍における作業及び当該排気管伸縮継手の点検作業を確認した結果、平成 20 年の当該排気管伸縮継手の取替え作業時に打痕を生じさせた可能性があることを確認した。

排気管伸縮継手の取替え作業における排気管伸縮継手の運搬及び取付け作業について調査した結果、運搬時には、排気管伸縮継手は梱包され緩衝材による部品保護がなされており、打痕が付いた可能性はない。排気管伸縮継手の取替え作業について、現場状況を観察した結果、当該排気管伸縮継手の打痕の位置や大きさから、取付け時に当該排気管伸縮継手を落下させ作業エリアの突起物と接触したことで打痕が付いた可能性が高いことを確認した。

なお、要因分析図による調査の結果から、当該排気管伸縮継手は、製作時の品質管理は妥当であること及び当該排気管伸縮継手の取付け以降は保温材を取外していないことから、製作時及び取付け以降に打痕が付いた可能性はないことを確認した。その他の排気管伸縮継手も同様の調査を行い、製作時及び取付け以降に打痕が付いた可能性はないことを確認した。このため、調査対象の打痕は、いずれも排気管伸縮継手の製作後からディーゼル機関への取付けまでの期間に付いたものと推定した。

添付資料 3 1, 5 6

(2) 構造解析

排気管伸縮継手のベローズに生じた打痕と破損の関係を確認するため、ベローズに生じた打痕を円弧状の形状で模擬した解析モデルを作成して構造解析を行い、ベローズに生じるひずみ量を算定するとともに、算出したひずみ量を用いて疲労破壊に至る繰り返し回数を評価した。

その結果、ベローズ健全部と比較して打痕近傍（構造不連続部）でひずみ量が増大することを確認した。また、当該排気管伸縮継手の破片に確認された打痕の形状を基に疲労評価を実施した結果、当該排気管伸縮継手の取付け後からベローズの破損までの D/G(B) の起動・停止回数（約 160 回）と同程度の繰り返し回数で疲労割れが発生することを確認した。

添付資料 5 7

(3) 繰り返し疲労試験

打痕が付いた排気管伸縮継手のベローズと繰り返し変位による破損の因果関係を確認するため、排気管伸縮継手のベローズに打痕を付与した試験体を用いて繰り返し疲労試験を実施し、割れの発生状況を確認した。

打痕は排気管伸縮継手が落下し、突起物と接触して付いた可能性が高いため、突起物を模擬した金属製の棒に実機から取外した排気管伸縮継手を落下させ、試験体に打痕を付与した。なお、打痕付与後に試験体ベローズの浸透探傷試験を実施し、線状指示がないことを確認した。

材料強度試験機を用いて、排気管伸縮継手の軸方向の許容変位量にて、繰り返し疲労試験を実施し、打痕部の割れや変形を観察した。

試験の結果、打痕部の周辺に割れが発生することを確認した。

添付資料 5 5

6. 3. 3 打痕により当該排気管伸縮継手が破損に至るまでの推定メカニズム

当該排気管伸縮継手の初期き裂の発生は、構造解析及び繰り返し疲労試験の結果も踏まえ、組立時の打痕と熱疲労の複合要因により発生したものと推定した。また、復元した当該排気管伸縮継手の外観観察及び破面観察の結果並びに打痕の原因調査の結果と併せ、当該排気管伸縮継手に打痕が付き、破損に至るまでの推定メカニズムを以下のとおり考察した。

当該排気管伸縮継手は、平成 19 年に発生した排気管伸縮継手破損事象の対応において、平成 20 年に取替えを行った。この取替え作業時のフランジボルト締付けの際に、狭隘部の作業で排気管伸縮継手の支持が不安定となり、排気管伸縮継手を落下させた可能性が高い。排気管伸縮継手が落下し、薄肉部材であるベローズが排気管伸縮継手の下方に位置する吸気管の突起物に接触したことにより、ベローズの山を跨ぐ形（山 3 と山 4）で斜め方向の鋭角な打痕（凹み）が付いたと推定した。

平成 20 年以降、本事象が発生するまでの間におよそ 160 回の起動停止を経験した。起動、停止時に生じる排気管の熱伸縮による変位により斜め方向の鋭角な凹みに繰り返しひずみが付加されることにより熱疲労による初期き裂が発生した。一方、D/G 定期試験におけるシリンダ出口温度の定期試験データによると、本事象が発生した平成 30 年 6 月 5 日のみ特異な変動が認められることから、この定期試験時においてベローズに鋭角な打痕に沿って軸方向にき裂が進展し排気ガスが吹き出したと推定した。一旦き裂が生じた後は、D/G 運転中における周期的な内圧の変動による振動によってベローズの周方向のき裂が進展した。また、周期的な内圧の変動に伴う周方向へのき裂の進展により、一部のベローズが片持ちになり、ある程度の大きさごとに破片になっていたと推定した。

添付資料 1 7, 1 8, 5 8, 5 9

6. 4 変形を与えた可能性のある作業の抽出とその影響について

本事象の発生要因は、当該排気管伸縮継手を取付け時に落下させ、鋭角な凹みを付けたことと推定した。D/G の他の部品においても同様な変形が否定できないことから、部品に変形を与えた可能性のある作業を抽出し、その影響を確認した。

調査対象は、現場での目視等による破損の早期検知が困難な、気体のバウンダリのうち、吸気・排気ラインに係る部品及び関連する作業とした。吸気・排気ラインに係る部品としては、伸縮継手（排気管伸縮継手、過給機入口伸縮継手及び排気ライン伸縮継手）、配管及び機器を調査対象とした。調査にあたり、関連する作業（部品に変形を与えた可能性のある作業）を、当該部品が移動して他の部品・機器と接触する場合と、他の部品・機器・工具が移動して当該部品に接触する場合とに区分した。この

観点から整理を進め、その作業手順・実績、機器の配置状況及び接触する部品の性状を考慮し、『伸縮継手と取付け作業』、『伸縮継手と近傍作業』、『配管及び機器と取付け作業』を部品に変形を与えた可能性のある部品と作業の組み合わせとして抽出した。取付け作業の詳細は、取付け作業中の移動時における他機器との接触、据付時における当該部品の落下、及びボルト締付け時の使用工具との接触であった。

この組み合わせに対し、想定される変形が破損につながる可能性を評価した。伸縮継手については、排気管伸縮継手のみが取付け作業中の落下を起こす可能性があり、今回破損に至ったような鋭角な凹みの原因となりうることを確認した。一方、いずれの伸縮継手も、他機器との接触（近傍作業含む）又は使用工具との接触では鋭角な凹みが発生しないため、破損に至る可能性は低いと評価した。

配管及び機器については、使用工具との接触のみが変形を与えた可能性があった。しかし、使用工具の接触に対して対象部品は比較的厚く、変形が生じにくい構造であることから、破損に至る可能性は低いと評価した。

添付資料60

7 事象の原因

組立時の打痕と熱疲労の複合要因により、当該排気管伸縮継手のベローズに初期き裂が発生し、当該排気管伸縮継手の内圧にて初期き裂が進展し、破損に至ったと推定した。

当該排気管伸縮継手のベローズに打痕が付いた原因は、打痕の大きさや打痕が付いた箇所、D/G(B)室における作業エリアの突起物の状況から、当該排気管伸縮継手の取付け時に落下させた可能性が高いことを確認した。

排気管伸縮継手取付け時の作業手順は、使用治工具の指定を含め、作業手順が明確に定められておらず、打痕に対する判定基準も不明確であった。そのため、現場作業員は当該排気管伸縮継手の取付け時に打痕が付いた際において、打痕は軽微であり機器の健全性に影響を及ぼすものではないと判断した可能性がある。当社社員は、取付け時に記録による確認を行っていたが、記録には打痕に関する記載がなかったことから、打痕があることを認識していなかった。

以上より、打痕が付いた要因として以下を抽出した。

(1) 現場作業要領の不備

現場作業における作業要領において、ベローズを取扱う際の注意点の記載がなく、また、取替え作業時の適正工具の使用を含めた作業手順が明確でなかった。

(2) 薄肉部材に対して打痕が与える影響に関する力量不足

現場作業員は、排気管伸縮継手の定期取替えを行っておらず、ベローズを取扱う経験が少なかったため、ベローズが薄肉構造（板厚 ）で運転中の変位を吸収

するために設置された、打痕の影響を受けやすい部材であるという意識が低かった。このため、排気管伸縮継手に打痕が付くことを防止する対策を取らず、打痕を見つけた際にも健全性に影響を与えるものではないと誤って判断した。

添付資料 5 6

なお、平成 19 年に 5 号機 D/G(B) 排気管伸縮継手の破損が認められた事象について、破損した排気管伸縮継手の運転回数（184 回）及び運転時間（201 時間）が本事象発生時の運転回数（163 回）及び運転時間（212 時間）と比較的近かったが、平成 19 年の破損事象は排気管伸縮継手のベローズとフランジ部の隙間が不足し接触したことにより発生した摩耗部を起点として破損したものであり、本事象との関連性はない。

8 保護装置の種類及び動作状況

なし。

9 放射能の影響

なし。

10 被害者

なし。

11 他に及ぼした障害

なし。

12 復旧の日時

平成 30 年 6 月 12 日(火) 15 時 45 分

13 再発防止対策

排気管伸縮継手破損事象の発生要因が「組立時における打痕・傷」及び「熱疲労」の複合要因で発生したものであると推定したことを踏まえ、以下の再発防止対策を行う。排気管伸縮継手 1 個が完全に破損した場合であっても D/G の機能は維持できることを確認しているが、本事象が打痕を一因として発生したため、今後偶発事象が発生する可能性も含め検討を行った。

(1) 打痕が付くことを防止する対策

排気管伸縮継手の取替え時に打痕が付くことを防止するため、以下の対策を行う。

a 当社社員の立会項目の追加

組立時において打痕が付いた状態で熱疲労が加わることを防止するため、記録確認としていた排気管伸縮継手取付け後の外観確認を当社社員の立会項目とする。

b 現場作業手順の明確化

打痕の要因として、現場作業要領の不備があることから、排気管伸縮継手の取替え手順に以下の内容を追加し、取付け作業時に打痕が付くことを防止する。

① 取付け作業実施前におけるベローズへの打痕防止用の養生の実施

取付け作業時のベローズと治工具の接触を防止するための養生を行う旨を作業手順に追加する。

② 取付け時の排気管伸縮継手落下防止対策の実施

取付け時の排気管伸縮継手の落下を防止するため、排気管伸縮継手に落下防止対策を行う旨を作業手順に追加する。

③ 締付け時の適正（専用）工具の使用の明確化

不適切な工具の使用により打痕が付くことを防止するため、使用する工具を作業手順に追加する。

④ 取付け後の外観点検時の判定基準の明確化

取付け時における打痕等の異常を確実に検知するため、取付け後の外観点検時の判定基準を明確化し、点検手順に追加する。

⑤ 取付け後の外観点検方法の明確化

打痕の見落としを防止するため、鏡を利用し狭隘部まで確認する旨を作業手順に追加する。

c 薄肉部材に対して打痕が与える影響に対する意識の向上

打痕の要因として、排気管伸縮継手のような薄肉部材に対して打痕が与える影響に関する意識不足があることから、以下の対策を行い、薄肉部材に対して打痕が与える影響に対する意識の向上を図る。

① 作業要領への明記

ディーゼル機関の排気管伸縮継手の作業要領にベローズの取扱いに関する注意を記載する。

② 着工前及び取付け作業前の打合せ時における注意喚起

現場監督者及び現場作業員に対し、排気管伸縮継手のベローズの構造やその取扱い上の注意点について、作業前の打合せ及び取付け作業前の TBM にて注意喚起を行う。

③ 教育による意識の向上

発電所の教育プログラムの中に本事例を盛り込み、薄肉部材に対して打痕が与える影響に関する当社社員及び協力会社社員の意識の向上を図る。

(2) 偶発事象を早期に検知するための対策

上記の対策により、今後、打痕が付いた状態で使用する可能性は低いが、D/G については、偶発事象による故障が至近の 10 年の間に 13 件発生しており、他の機器と比較して多い状況を踏まえ、以下の対策を行い偶発事象に対する検知性の向上を図る。

a 排気管伸縮継手の定期的な外観点検の実施

偶発事象が排気管伸縮継手に生じるリスクも考慮し、保温材を取外して排気管伸縮継手全周の外観点検を定期的に行い、打痕等の異常が発生していないことを確認する旨をディーゼル機関の点検計画に明記する。これにより、改善した施工管理の妥当性を継続的に確認していく。

なお、排気管伸縮継手のフランジとベローズ間は隙間管理を実施しているが、排気管伸縮継手取付けや D/G の運転等の理由により、隙間値が変動する可能性がある。そのため、この観点も考慮して点検していく。

(3) 偶発事象に起因して排気管伸縮継手に破損が発生した場合の対策

排気管伸縮継手 2 個が破損した場合であってもディーゼル機関の機能は維持できることを確認しているが、偶発事象が発生し排気管伸縮継手が破損した場合を想定し、以下の対策を行い破損の兆候の早期把握及び予備品の常時確保によりディーゼル機関の早期復旧を図る。

a 保温材の形状の変更

排気管伸縮継手の破損の兆候がある場合、低出力運転時には不完全燃焼による黒煙が D/G 室内に漏れいする。排気管伸縮継手は保温材に覆われているため、黒煙がより漏れやすい形状に保温材を変更することで、黒煙の検知性を向上する。併せて、保温材の形状を排気管伸縮継手の外観の確認が可能となるよう変更することで、試運転中に排気管伸縮継手の漏れい場所を早期に特定し、破損の兆候の把握を可能にする。

b 排気管伸縮継手の予備品化

排気管伸縮継手の予備品を配備し、事前に取り替手順を定めることで、排気管伸縮継手の取替えは2日間で実施可能である。それにより、保安規定に定める10日間（D/Gが動作可能な状態に復旧したことを確認するまでの完了時間）の間の速やかな復旧が可能である。

なお、予備品化により、排気管伸縮継手は実用炉報告基準の運用(訓令)に記載の消耗品の位置づけとなる。

上記対策のうち「(3) a. 保温材の形状の変更」は、次回点検に同調して実施（平成31年11月完了目標）し、その他の対策は平成30年12月完了を目標に対策を実施する。なお、5号機のD/Gは、現状保温材を取外しているため、万一、排気管伸縮継手のベローズが破損したとしても、早期検知は可能である。

1 4 添付資料一覧

添付資料 1	現場機器配置
添付資料 2	事象の時系列
添付資料 3	排気管伸縮継手破損に伴う気体漏えい箇所
添付資料 4	排気筒モニタチャート
添付資料 5	モニタリングポストチャート
添付資料 6	D/G(B) 定期試験及び本事象発生時の対応体制について
添付資料 7	保安規定第 60 条第 1 項で求められる D/G 必要台数の考え方
添付資料 8	排気管伸縮継手内外の排気圧力について
添付資料 9	排気経路の内部確認について
添付資料 1 0	当該排気管伸縮継手の破片の回収について
添付資料 1 1	当該排気管伸縮継手以外の排気管伸縮継手の確認について
添付資料 1 2	当該排気管伸縮継手取替え後の各寸法測定結果について
添付資料 1 3	試運転結果について
添付資料 1 4	全交流電源喪失時等における代替注水手段について
添付資料 1 5	D/G(B) の運転上の制限逸脱からの復帰について
添付資料 1 6	排気管伸縮継手破損が D/G の機能要求へ与える影響
添付資料 1 7	当該排気管伸縮継手のベローズの破片復元及び外観観察結果
添付資料 1 8	当該排気管伸縮継手のベローズ破片の破面観察結果
添付資料 1 9	D/G 排気管伸縮継手の外観確認結果
添付資料 2 0	要因分析図
添付資料 2 1	要因調査結果及び評価 (設計検証プロセス)
添付資料 2 2	要因調査結果及び評価 (ベローズの設計要件)
添付資料 2 3	要因調査結果及び評価 (使用材料特性)
添付資料 2 4	要因調査結果及び評価 (材質)
添付資料 2 5	当該排気管伸縮継手のベローズ破片の材料成分分析結果
添付資料 2 6	要因調査結果及び評価 (排気管伸縮継手製作時の試験検査)
添付資料 2 7	要因調査結果及び評価 (排気管伸縮継手の製作・組立工程)
添付資料 2 8	要因調査結果及び評価 (溶接施工)
添付資料 2 9	要因調査結果及び評価 (排気管伸縮継手フランジボルトの締付け)
添付資料 3 0	要因調査結果及び評価 (組立時における打痕・傷)
添付資料 3 1	要因調査結果及び評価 (作業によるベローズへの接触)
添付資料 3 2	要因調査結果及び評価 (排気管伸縮継手内筒の取付け方向)
添付資料 3 3	要因調査結果及び評価 (排気管伸縮継手の芯ずれ)
添付資料 3 4	要因調査結果及び評価 (ベローズのねじれ)
添付資料 3 5	要因調査結果及び評価 (排気管サポートの締付け)

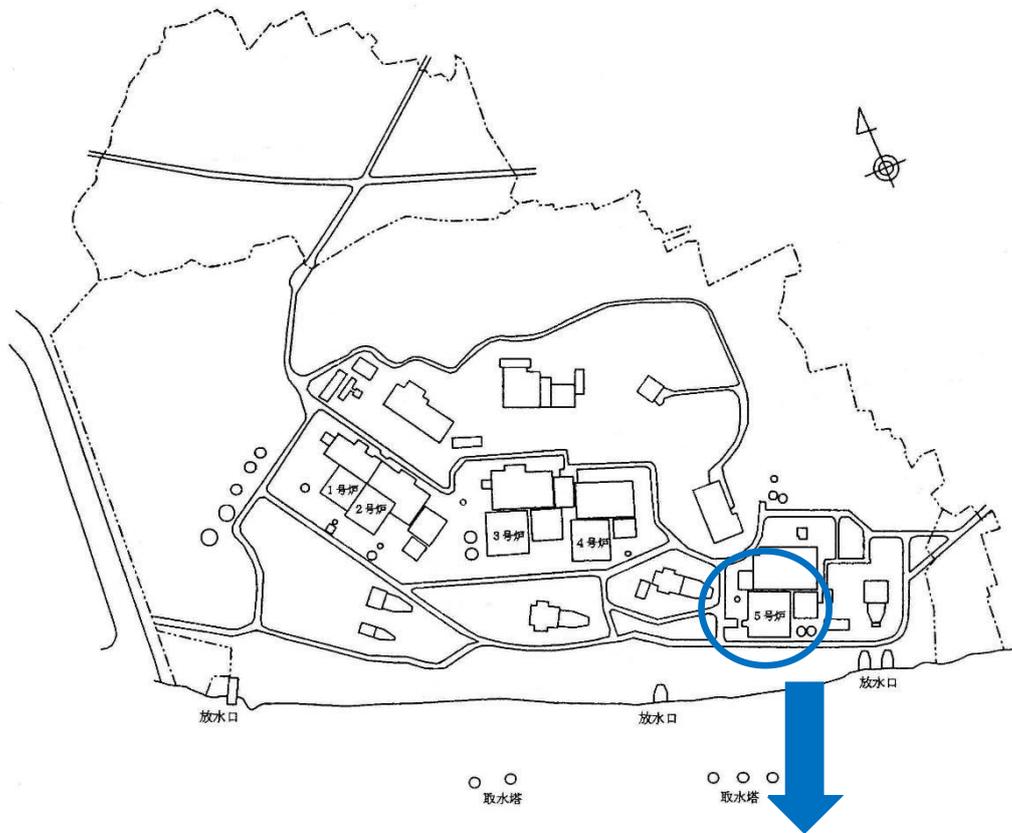
- 添付資料 3 6 要因調査結果及び評価 (D/G 運転中の排気ガス温度)
- 添付資料 3 7 要因調査結果及び評価 (排気管の圧力脈動)
- 添付資料 3 8 要因調査結果及び評価 (定期試験時における判定基準の逸脱)
- 添付資料 3 9 要因調査結果及び評価 (運転操作手順書の誤り)
- 添付資料 4 0 要因調査結果及び評価 (保全内容)
- 添付資料 4 1 要因調査結果及び評価 (流れ加速型腐食)
- 添付資料 4 2 要因調査結果及び評価 (すきま腐食及び孔食)
- 添付資料 4 3 要因調査結果及び評価 (応力腐食割れ)
- 添付資料 4 4 要因調査結果及び評価 (硫化腐食)
- 添付資料 4 5 当該排気管伸縮継手のベローズ破片の組織観察結果
- 添付資料 4 6 当該排気管伸縮継手のベローズ破片の硬さ測定結果
- 添付資料 4 7 要因調査結果及び評価 (熱時効脆化)
- 添付資料 4 8 要因調査結果及び評価 (クリープ破損)
- 添付資料 4 9 要因調査結果及び評価 (機器・配管からの振動による疲労割れ)
- 添付資料 5 0 要因調査結果及び評価 (熱疲労割れ)
- 添付資料 5 1 要因調査結果及び評価 (ベローズとフランジの接触)
- 添付資料 5 2 要因調査結果及び評価 (D/G 運転時の排気管の変形)
- 添付資料 5 3 要因調査結果及び評価 (排気管伸縮継手内筒の破損)
- 添付資料 5 4 要因調査結果及び評価 (不適合事象の反映)
- 添付資料 5 5 繰り返し疲労試験結果
- 添付資料 5 6 当該排気管伸縮継手に確認した打痕の原因について
- 添付資料 5 7 ベローズの打痕を模擬した構造解析を用いた疲労評価結果
- 添付資料 5 8 ベローズ破損の推定メカニズムについて
- 添付資料 5 9 D/G(B) 定期試験時の運転データ比較について
- 添付資料 6 0 変形を与えた可能性のある作業の抽出とその影響について

1 5 参考資料一覧

参考資料 5 号機 D/G の排気管伸縮継手の保全の考え方について

以 上

現場機器配置



D/G(B) 外観



D/G(B) 室
(放射線管理区域外)



本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

事象の時系列

日時	事象
6月5日 12:30	D/G(B) 定期試験開始。
13:34	D/G(B) 起動操作実施。
13:55	D/G(B) 並列操作実施。
14:25	D/G(B) 定格電力到達。
14:25	5号機原子炉建屋1階D/G(B)室にて定期試験を実施していた運転員Aが、定格電力到達時の運転状態に異常がないことを確認。
14:35頃	運転員Aが、定格電力到達10分後のデータ採取において各シリンダ出口排気温度差が <input type="text"/> 以上(最高温度 A-No.5 シリンダ出口: <input type="text"/> , 最低温度 B-No.1 シリンダ出口: <input type="text"/>)あることを確認したことから、現場状況の確認を実施。
15:00頃	運転員Aは、現場確認において異音が発生していることを確認したため、詳細に現場確認を実施した結果、A-No.5 シリンダと A-No.6 シリンダの間にて気体の漏えいを確認したことから、発電指令課長に連絡を実施。発電指令課長から設備主管部署である原子炉課への連絡を実施。
15:09	各シリンダ出口排気温度差が目標値の <input type="text"/> 未満でなかったことから、その後の状況確認のために、シリンダ出口排気温度の再測定を実施。 <再測定1回目> 最低温度 B-No.1 シリンダ出口: <input type="text"/> 最高温度 A-No.5 シリンダ出口: <input type="text"/>
15:15	<再測定2回目> 最低温度 B-No.1 シリンダ出口: <input type="text"/> 最高温度 A-No.5 シリンダ出口: <input type="text"/>
15:35	原子炉課員及び協力会社社員が現場に到着し、現場確認を実施。気体の漏えい箇所における保温材の破れを確認。
15:54	気体の漏えい箇所の詳細確認を実施するため、原子炉課長から発電指令課長に対してD/G(B)の停止を依頼。
15:56	D/G(B) 出力降下操作開始。
16:01	D/G(B) 解列操作実施。
16:07	D/G(B) 停止操作実施。
16:11	運転員A及びBはD/G(B)の惰性による機関の動作停止に伴い、当該箇所からの気体の漏えいが停止したことを確認。

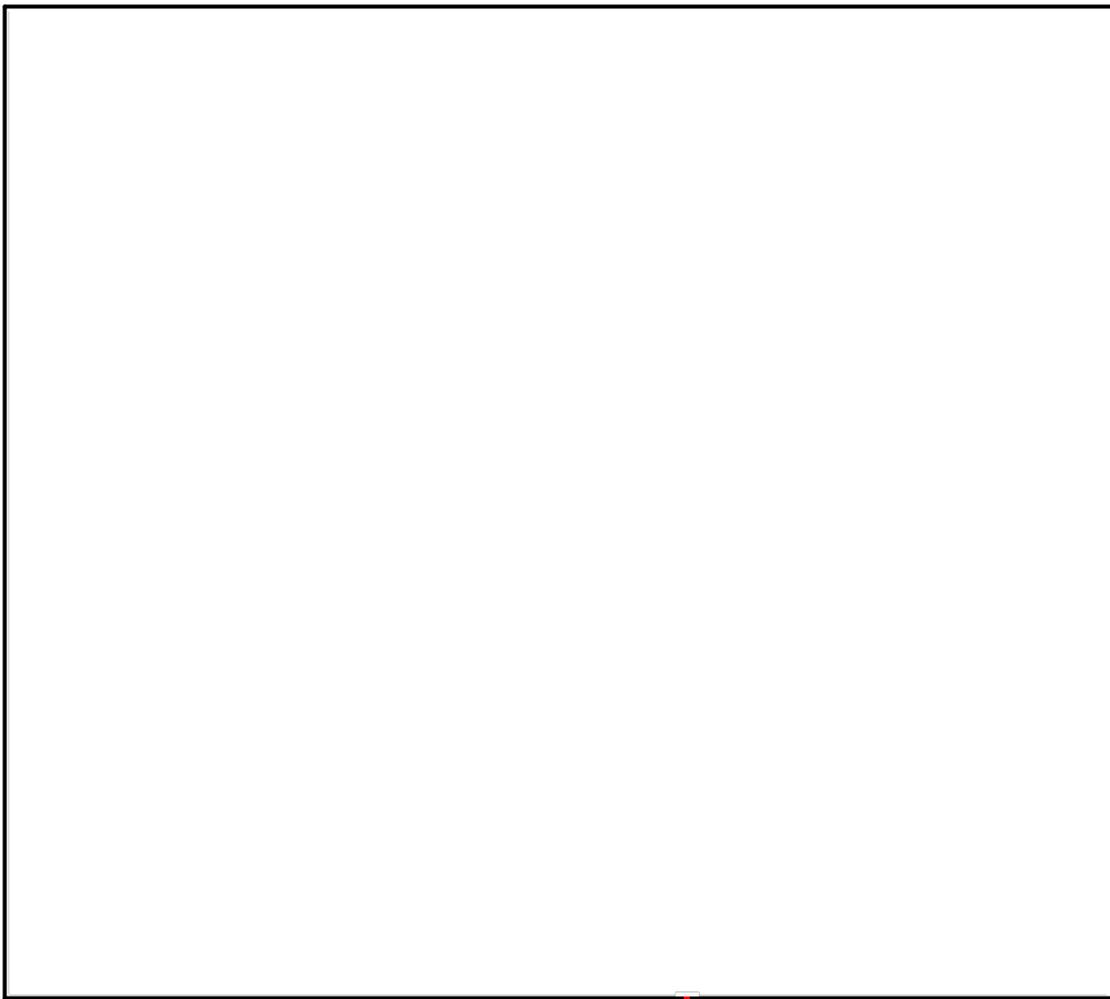
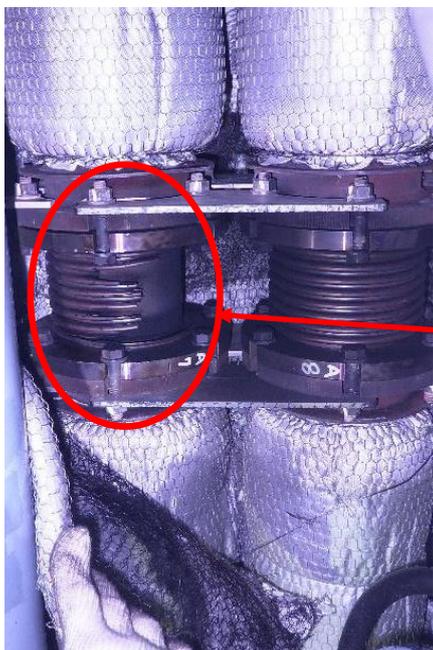
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

日時	事象
16:20	<p>発電指令課長は、排気管付近からの気体の漏えい箇所の詳細な調査・点検が必要との判断から、D/G(B)を待機除外とすることとしたため、運転上の制限からの逸脱を判断(保安規定第1編 第60条第1項)した。</p> <p><判断理由></p> <p>原子炉の状態が冷温停止及び燃料交換において、非常用高圧母線に接続するD/Gを含む2台の非常用発電設備が動作可能であるとしているところ、D/G(A)が待機中、D/G(C)が点検中であり、動作可能な非常用発電設備がD/G(A)1台となったことから、運転上の制限からの逸脱を判断したため。</p>
16:20	<p>発電指令課長から発電部長及び総括管理課長に運転上の制限からの逸脱を判断した旨の連絡実施。</p>
16:23	<p>原子炉課にて、A-No.6 シリンダと A-No.7 シリンダ間の排気管の伸縮継手が破損していることを確認し、その旨を発電指令課長へ連絡実施。</p>
16:25	<p>D/G(B)停止プルロック操作実施。</p>
16:25	<p>発電指令課長は、各種モニタに異常がないことを確認。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・排気筒モニタ:4.5cps ・放水口放射線モニタ:5.5cps ・非常用ガス処理モニタ:3.5cps ・モニタリングポスト:最大77nGy/h(No.2)
17:06	<p>トラブル判断、事故・故障対応体制発令。</p> <p><判断理由></p> <p>原子炉課による調査の結果、当該排気管伸縮継手は消耗品として通常の使用又は時間の経過による劣化に対して計画的に交換が管理されている部品ではないため、実用炉報告基準の運用(訓令)に示された消耗品の交換や機器の調整により速やかに復旧できるものではないことから、実用炉規則第134条第5号「発電用原子炉施設の故障により、運転上の制限を逸脱したとき」に該当すると判断。</p>
17:19	<p>総括管理課から原子力規制庁へ電話にて報告を実施。</p>
6月5日 ～6日	<p>原子炉課員は、当該排気管伸縮継手の破片の回収を実施。</p>
6月6日	<p>原子炉課員及び協力会社社員は、当該排気管伸縮継手の外観点検を実施。</p>
6月6日 ～8日	<p>原子炉課員及び協力会社社員は、以下を実施。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ファイバースコープによる排気経路内の内部確認 ・当該排気管伸縮継手の取外し ・回収した破片と当該排気管伸縮継手の重量測定、比較 ・当該排気管伸縮継手以外の23個の排気管伸縮継手の外観点検
6月7日	<p>破損した箇所に新品(予備品)の排気管伸縮継手を取付け、排気管伸縮継手の寸法測定、</p>

日時	事象
	外観点検を実施。
6月7日 ～8日	<p>原子炉課長の依頼により、23時11分、発電指令課長は、D/G(B)の試運転を開始。6月8日1時17分、試運転が終了したことから、発電指令課長は、D/G(B)を停止。</p> <p>原子炉課員及び協力会社社員は、D/G(B)試運転中の記録を採取。</p> <p>試運転時、新品(予備品)の排気管伸縮継手を含む全ての排気管伸縮継手の外観点検を実施。</p>
6月8日	試運転後、冷温状態で取替えた排気管伸縮継手の外観点検、各部寸法測定を実施。
6月12日	<p>9時46分、原子炉課の連絡により作業アイソレをキャンセルし、保全作業が完了した。</p> <p>発電指令課長は9時50分よりD/G(B)の定期試験を開始し、15時36分、定期試験が終了した。発電指令課長は、定期試験における確認項目(電圧、周波数、電力等)が判定基準を満足していること及び非常用高圧母線に並列できることを確認した。このため、発電指令課長は、15時45分、保安規定第60条第1項の運転上の制限である原子炉の状態が冷温停止及び燃料交換において、非常用高圧母線に接続する2台の非常用発電設備が動作可能であることを確認したことから、運転上の制限逸脱からの復帰を判断した。</p> <p>15時45分、事故・故障対応体制を解除した。</p>

排気管伸縮継手破損に伴う気体漏えい箇所

排気管伸縮継手の破損が認められた箇所



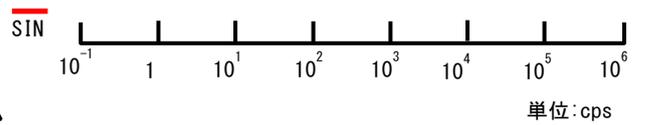
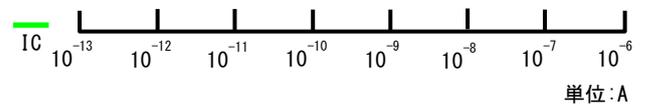
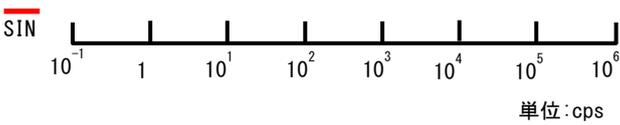
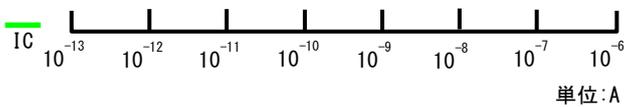
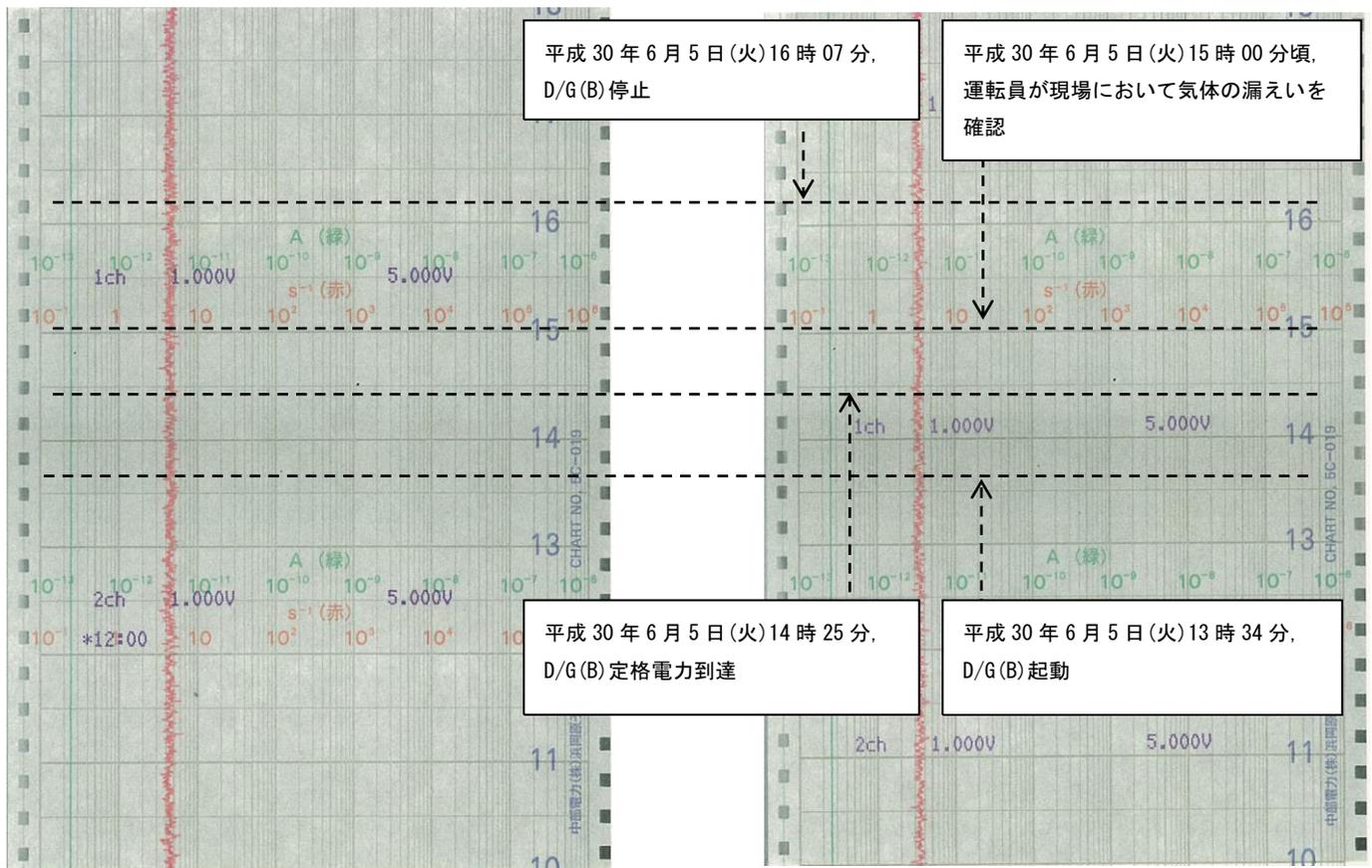
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

排気筒モニタチャート

平成 30 年 6 月 5 日 (火)

排気筒モニタ (A)

排気筒モニタ (B)



時間

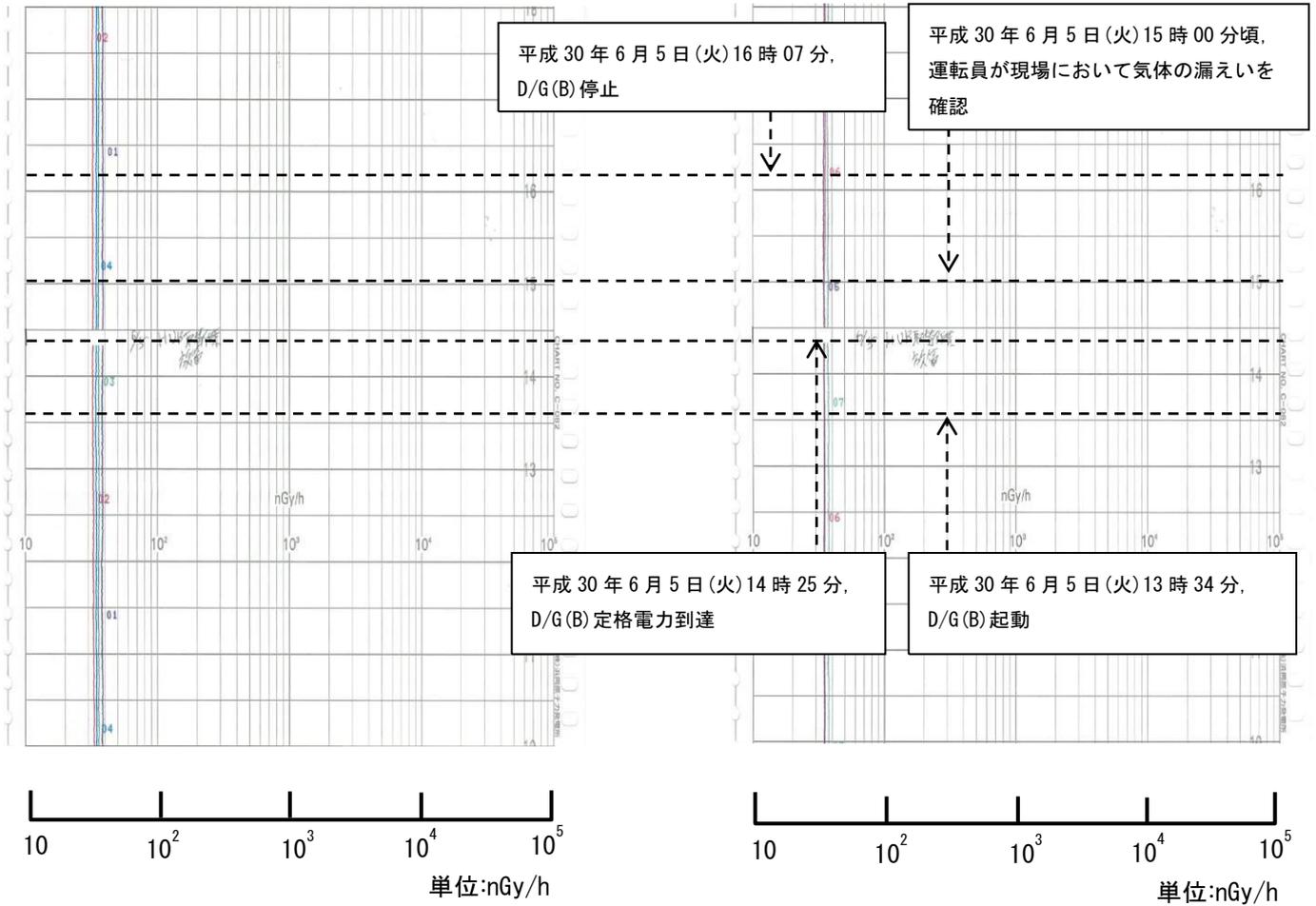
IC: イオンチェンバー
SIN: シンチレーション検出器

モニタリングポストチャート

平成 30 年 6 月 5 日(火)

モニタリングポスト(NaI)No.1~4

モニタリングポスト(NaI) No.5~7



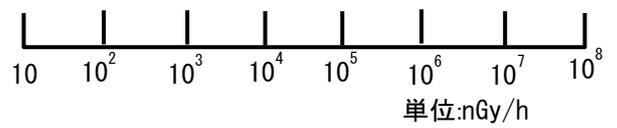
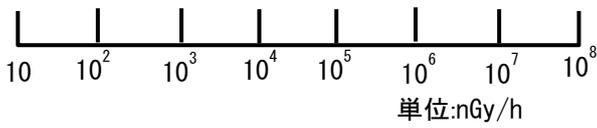
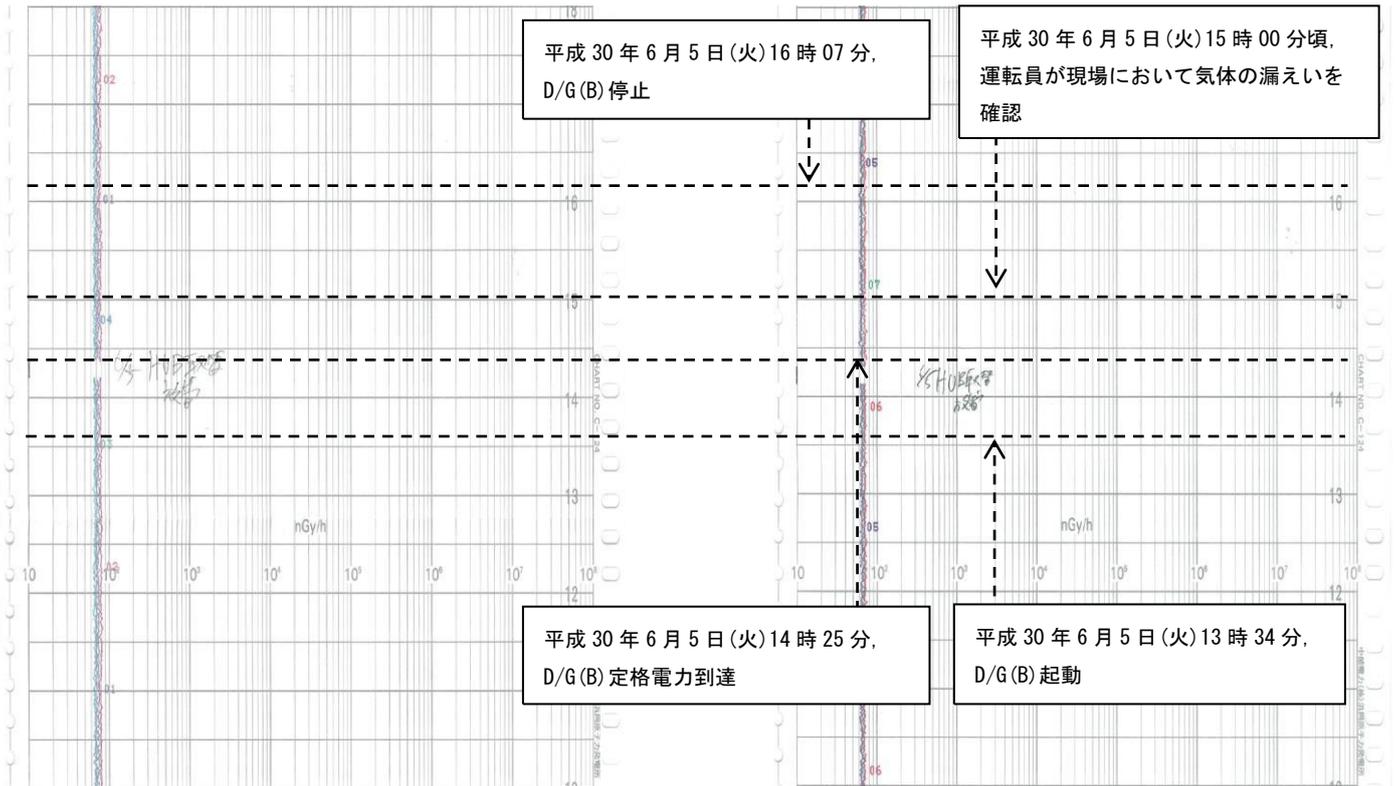
↑
時間

NaI: シンチレーション検出器

平成 30 年 6 月 5 日(火)

モニタリングポスト(IC) No.1~4

モニタリングポスト(IC) No.5~7



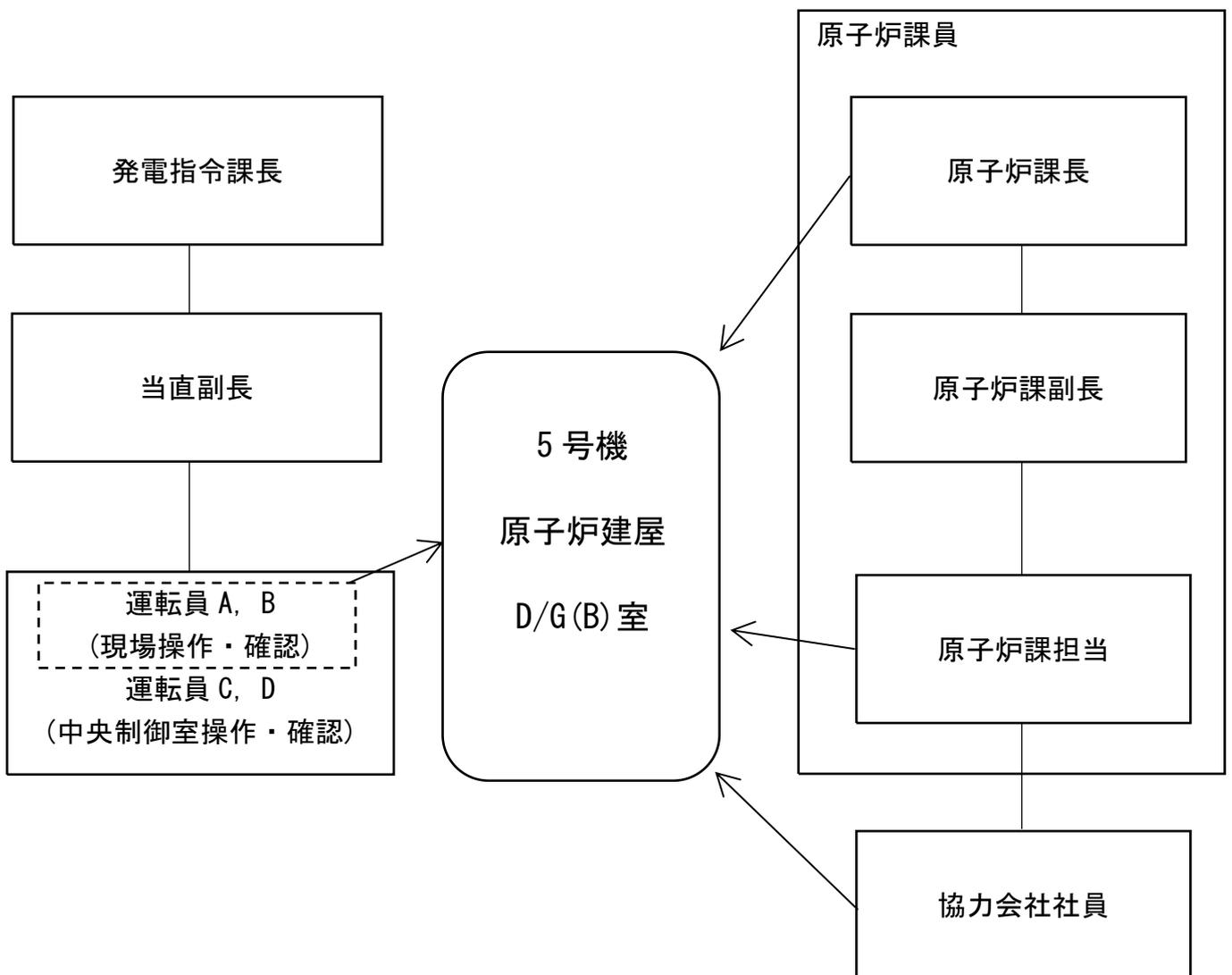
時間

IC: イオンチェンバー

D/G(B) 定期試験及び本事故発生時の対応体制について

【定期試験体制】

【設備主管部署の
本事故対応体制】



保安規定第 60 条第 1 項で求められる D/G 必要台数の考え方

1 基本的な考え方

保安規定第 60 条(非常用ディーゼル発電機その 2)における運転上の制限は、「第 65 条で要求される非常用高圧母線に接続する非常用ディーゼル発電機を含め 2 台の非常用発電設備^{※1}が動作可能であること」を要求している。これは、外部電源喪失時に D/G の単一故障が発生したとしても、崩壊熱を除去する機能を維持するために、原子炉及び使用済燃料貯蔵槽を冷却する設備の維持に必要な系統及び機器への電源供給を確保するものである。

また、保安規定の附則(平成 23 年 5 月 11 日)第 1 条第 2 項に、「第 60 条において、非常用発電機の運用を開始するまでは、必要な電力供給が可能な場合、他号炉の非常用ディーゼル発電機又は災害対策用高圧発電機を非常用発電機とみなすことができる。」と規定している。

2 他号機から 5 号機への電力供給(以下、「電源融通」という。)の考え方

上記のとおり、原子炉の状態が冷温停止及び燃料交換において、D/G を含む非常用発電設備は常に 2 台要求されている。5 号機は、「5F 母線(D/G は(B))」が 3 号機、4 号機の共用母線である 3SB-2 母線と接続されている。これにより、3 号機 D/G(A)、D/G(B)、4 号機 D/G(A)、D/G(B) の 4 台全てが待機の場合に限り、電源融通を受けられる。この場合、3、4 号機の D/G を保安規定第 1 編第 60 条の非常用発電機 1 台分とみなすことができる。

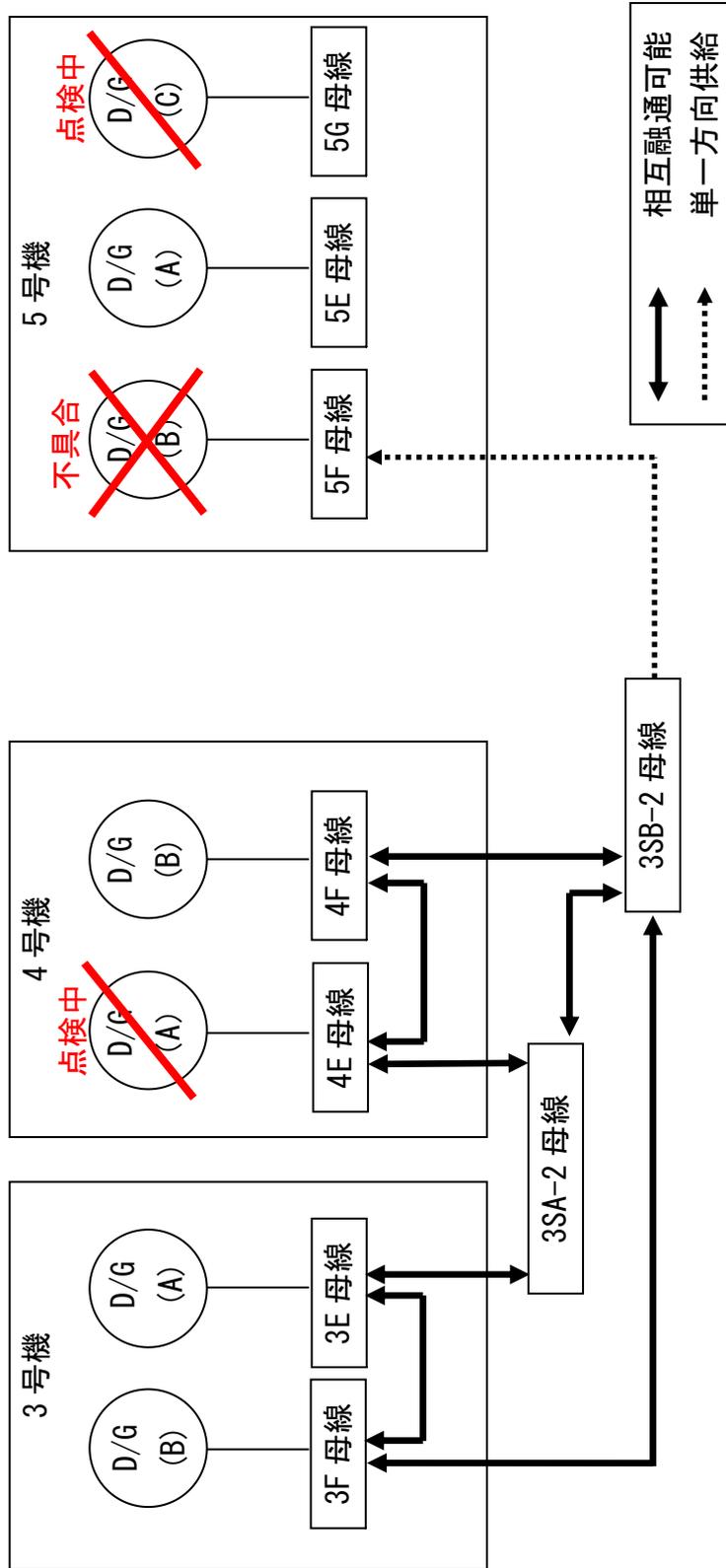
なお、5 号機 5F 母線停電(D/G(B)点検)時は、3、4 号機から電源融通が不可のため、5 号機の D/G は 2 台を使用可能としておく必要がある。

3 まとめ

上記 1 及び 2 を踏まえた 5 号機 D/G の必要待機台数は以下のとおり。

電源融通可否	5 号機 D/G の必要待機台数
3, 4 号機から 5 号機(5F 母線)へ 電源融通が不可の場合	2 台
3, 4 号機から 5 号機(5F 母線)へ 電源融通が可能な場合	1 台

※1 非常用発電設備とは、非常用ディーゼル発電機及び必要な電力供給が可能な非常用発電機をいう。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。



＜事象発生時の保安規定第 60 条に係る D/G 待機状態＞

排気管伸縮継手内外の排気圧力について

排気管伸縮継手廻りの排気経路の概要を図 8-1 に示す。

D/G 運転中の排気管伸縮継手内側の排気圧力は であるのに対し、排気管伸縮継手外側は大気圧(約 0.10MPa)である。

このため、D/G 運転中に排気管伸縮継手が破損した場合の排気の流れは、圧力差により排気管伸縮継手内側から外側となる。

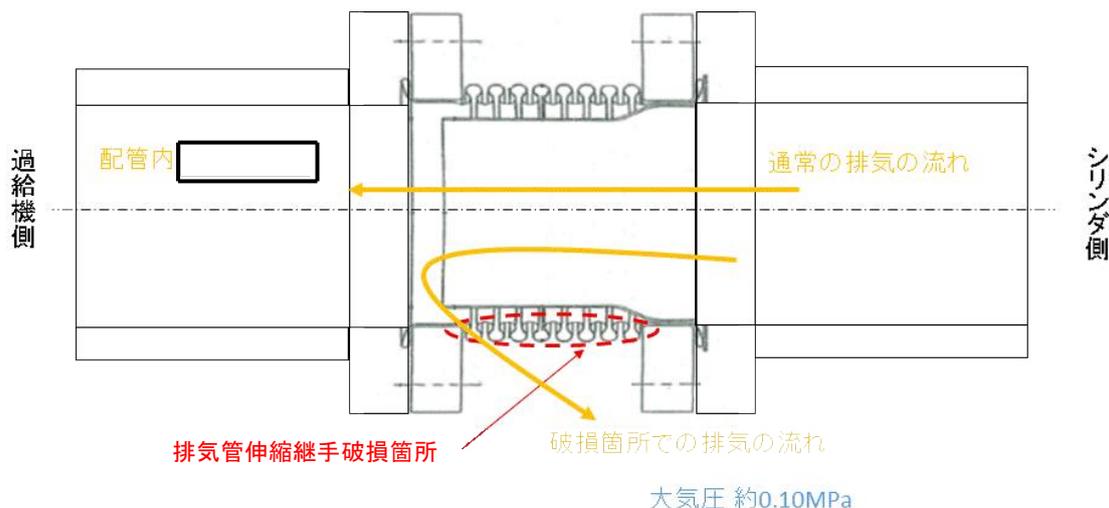


図 8-1 排気管伸縮継手廻りの排気経路の概要

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

排気経路の内部確認について

1 調査目的

当該排気管伸縮継手の破片については、D/G 運転中は排気ガスの流れがあるため排気管内に流入することは考え難いものの、排気経路内の内部確認を実施し、破片の有無を調査する。

2 調査方法

(1) 調査方法

排気経路における破片の有無を、ファイバースコープによる目視確認によって調査する。

- ・ 当該排気管伸縮継手取付け部からの排気管上流/下流側の内部確認
- ・ A-No. 2/A-No. 7 シリンダの温度検出器取付用閉止栓からの内部確認
- ・ 過給機入口/出口の温度検出器取付用閉止栓からの内部確認

(2) 調査範囲

調査範囲を図 9-1, 9-2 に示す。

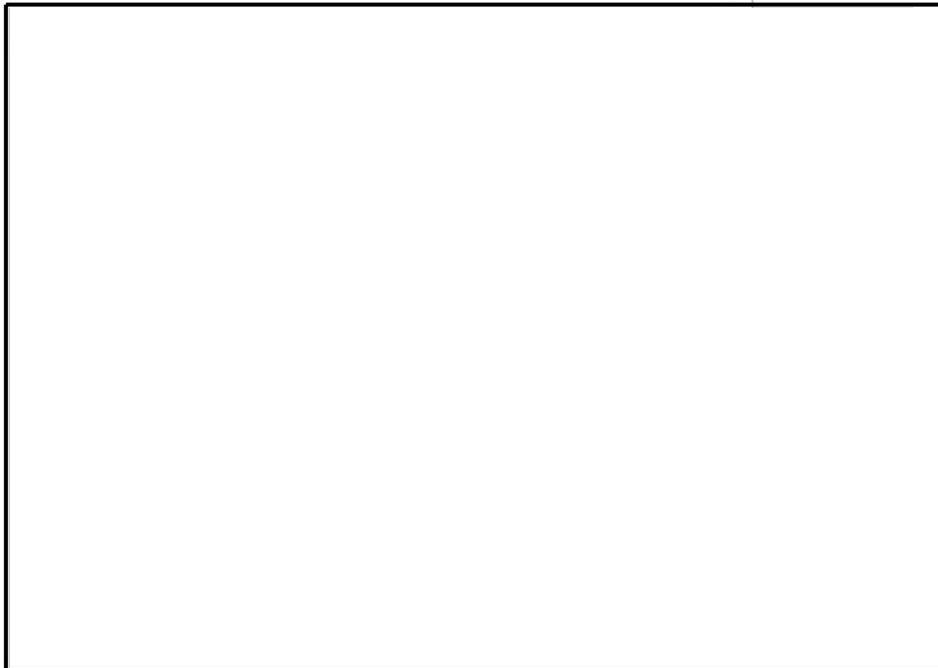


図 9-1 調査範囲(排気管側)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



図 9-2 調査範囲(過給機側)

3 調査期間

平成 30 年 6 月 7 日(木)

4 調査結果

調査の結果, 調査範囲に当該排気管伸縮継手の破片は確認されなかった。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

当該排気管伸縮継手の破片の回収について

1 回収目的

当該排気管伸縮継手の破片については、D/G 運転中は排気ガスの流れがあるため排気管内に流入することは考え難いものの、回収した破片と当該排気管伸縮継手の重量の合計と、新品(予備品)の排気管伸縮継手の重量との比較を行うことにより、破片の回収状況を確認する。

2 回収方法

(1) 回収方法

破片の飛散が想定される範囲を目視で調査し、破片の回収を行う。

(2) 調査範囲

破片の飛散が想定される範囲(図 10-1, 10-2 参照)とする。

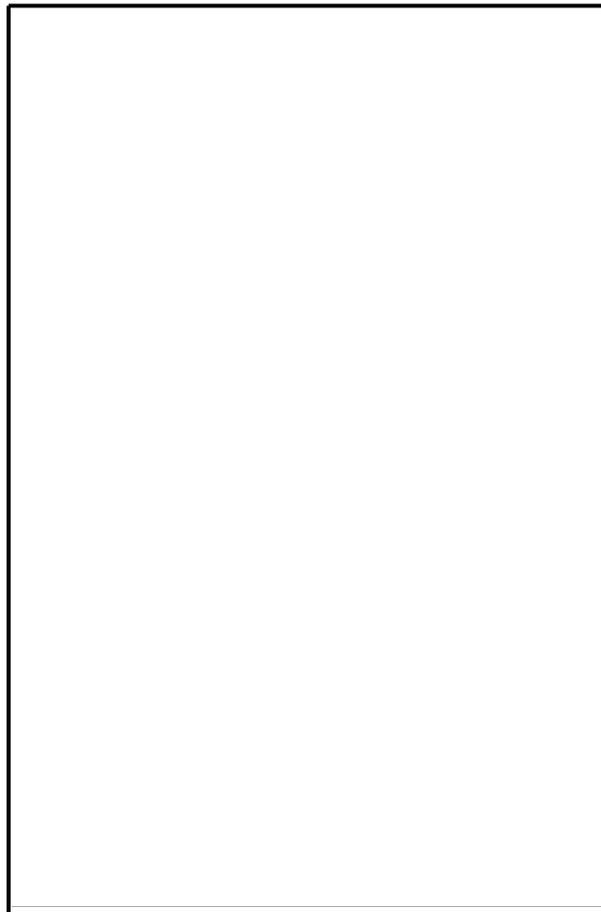


図 10-1 調査範囲(D/G(B)室内)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

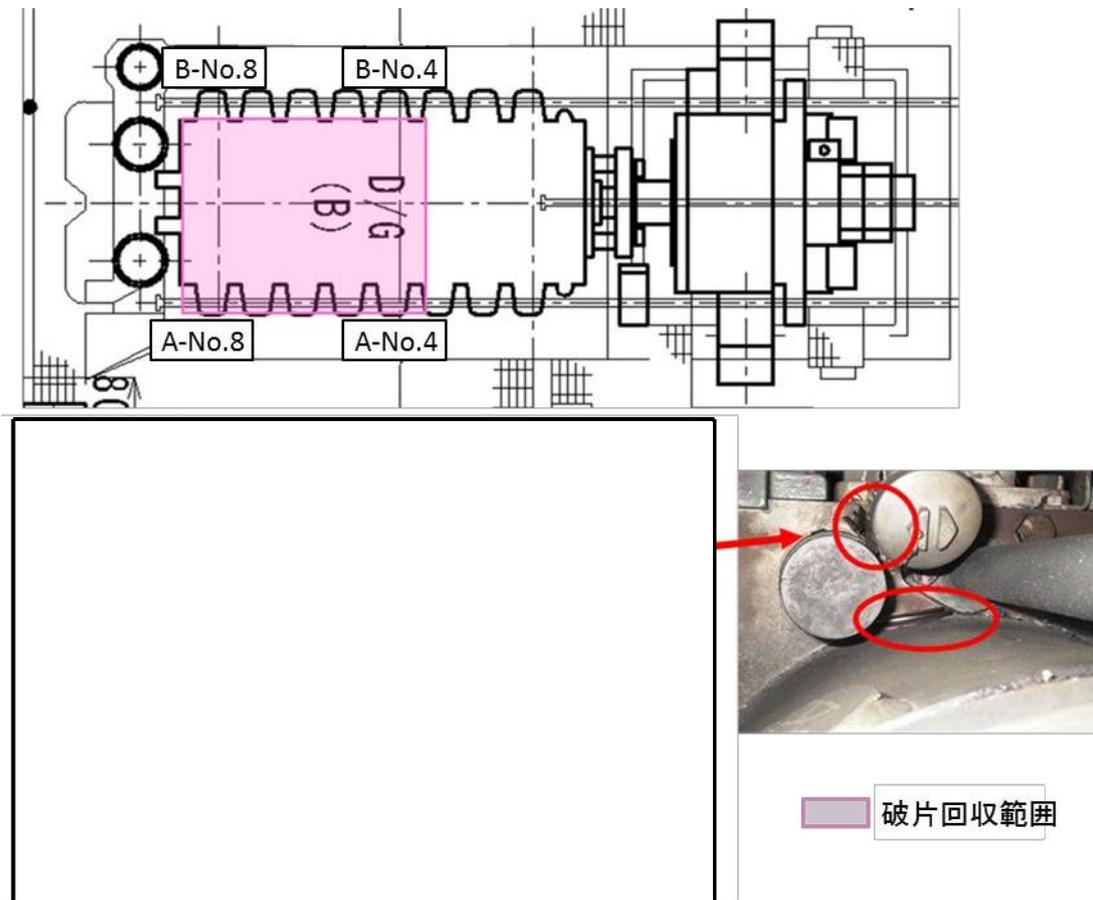


図 10-2 破片回収範囲 (機関周辺)

3 回収期間

平成 30 年 6 月 5 日 (火) ~ 平成 30 年 6 月 6 日 (水)

4 回収結果

当該排気管伸縮継手の破片は、シリンダ A-No. 4~A-No. 8 及び B-No. 4~B-No. 8 の機関上部周辺に散乱していた。

回収物重量測定と新品 (予備品) 重量測定の結果を表 10-1, 10-2 に示す。結果、回収した破片と当該排気管伸縮継手の重量の合計と、新品 (予備品) の排気管伸縮継手の重量は同程度であった。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表 10-1 新品(予備品)重量測定

単位:kg

	予備品 A	予備品 B	予備品 C
重量	5.32	5.32	5.32

表 10-2 回収物重量測定

単位:kg

	当該排気管 伸縮継手	回収した 破片	合計
重量	5.20	0.13	5.33



当該排気管伸縮継手



回収した破片

当該排気管伸縮継手以外の排気管伸縮継手の確認について

1 点検目的

当該排気管伸縮継手以外の排気管伸縮継手について、外観点検を実施し、その健全性を確認する。

2 点検方法

(1) 点検方法

排気管伸縮継手の外表面が外観点検できるよう排気管伸縮継手周辺の保温材を取外して、D/G(B) 停止時及び試運転時の外観点検を実施する。

(2) 点検範囲

D/G(B) の点検範囲を図 11-1 に示す。



(□ - ○と表し、□が左図数字、○が右図数字とする)

当該排気管伸縮継手以外の排気管伸縮継手の個数:23 個(A 列側 11 個, B 列側 12 個)

図 11-1 外観点検範囲

3 点検期間

平成 30 年 6 月 6 日(水)～平成 30 年 6 月 8 日(金)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

4 点検結果

点検の結果を表 11-1 に示す。点検範囲において健全性に影響を及ぼす欠陥はなかった。

表 11-1 外観点検結果

		点検結果			点検結果
A 列	1-1	良	B 列	5-1	良
	2-1	良		6-1	良
	2-2	良		6-2	良
	2-3	良		6-3	良
	3-1	良		7-1	良
	3-2			7-2	良
	3-3	良		7-3	良
	3-4	良		7-4	良
	4-1	良		8-1	良
	4-2	良		8-2	良
	4-3	良		8-3	良
	4-4	良		8-4	良

判定基準：機器の健全性に影響を及ぼす欠陥がないこと。

判定：合格

当該排気管伸縮継手取替え後の各寸法測定結果について

1 調査目的

当該排気管伸縮継手取替え後の寸法測定を実施する。

2 調査方法

当該排気管伸縮継手取替え後における以下の項目を実施する。

- ・ 全長測定
- ・ 段差(芯ずれ)測定
- ・ フランジ - ベローズ間隙測定

3 調査期間

平成 30 年 6 月 7 日(木)

4 調査結果

各寸法測定の結果，各測定値は判定基準内であることを確認した。

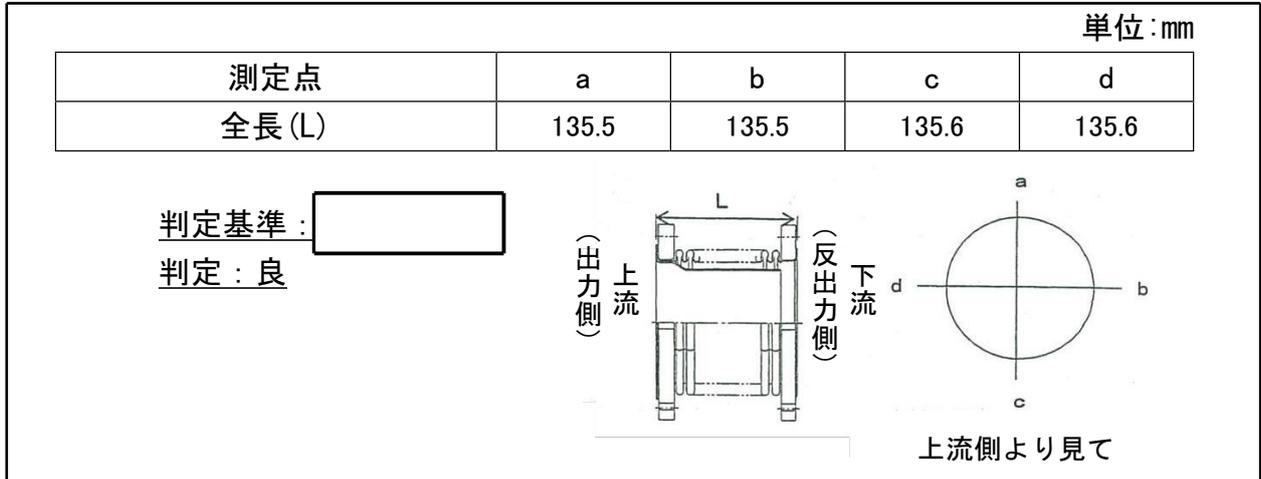


図 12-1 全長測定

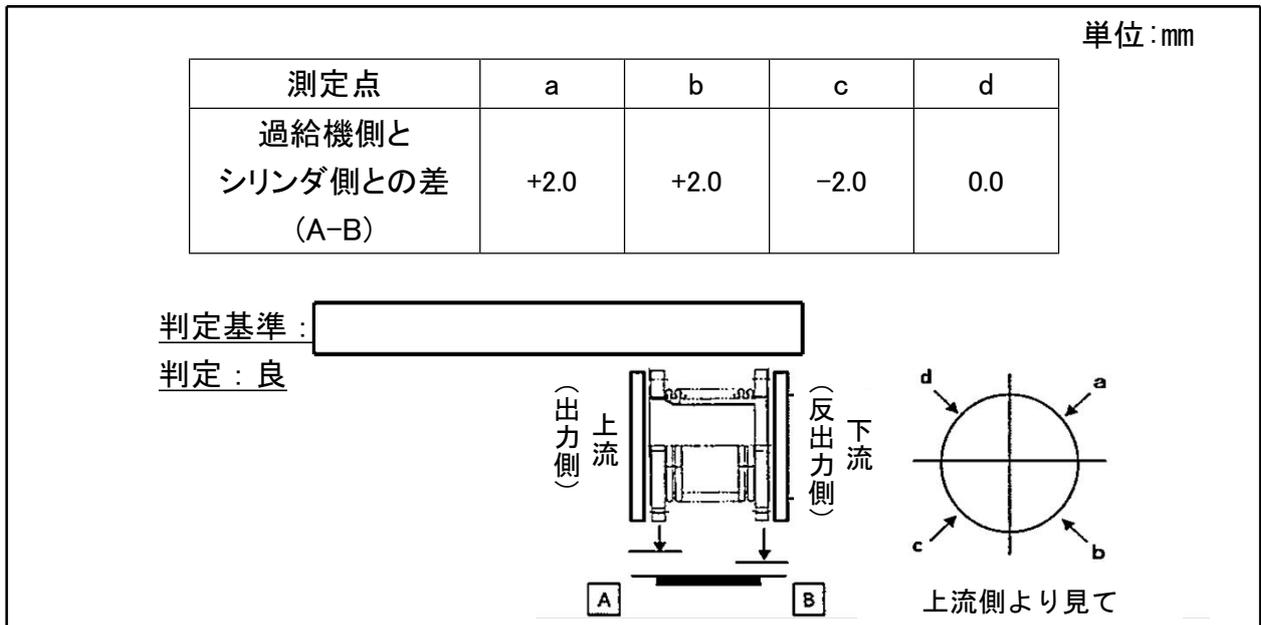


図 12-2 段差(芯ずれ)測定

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

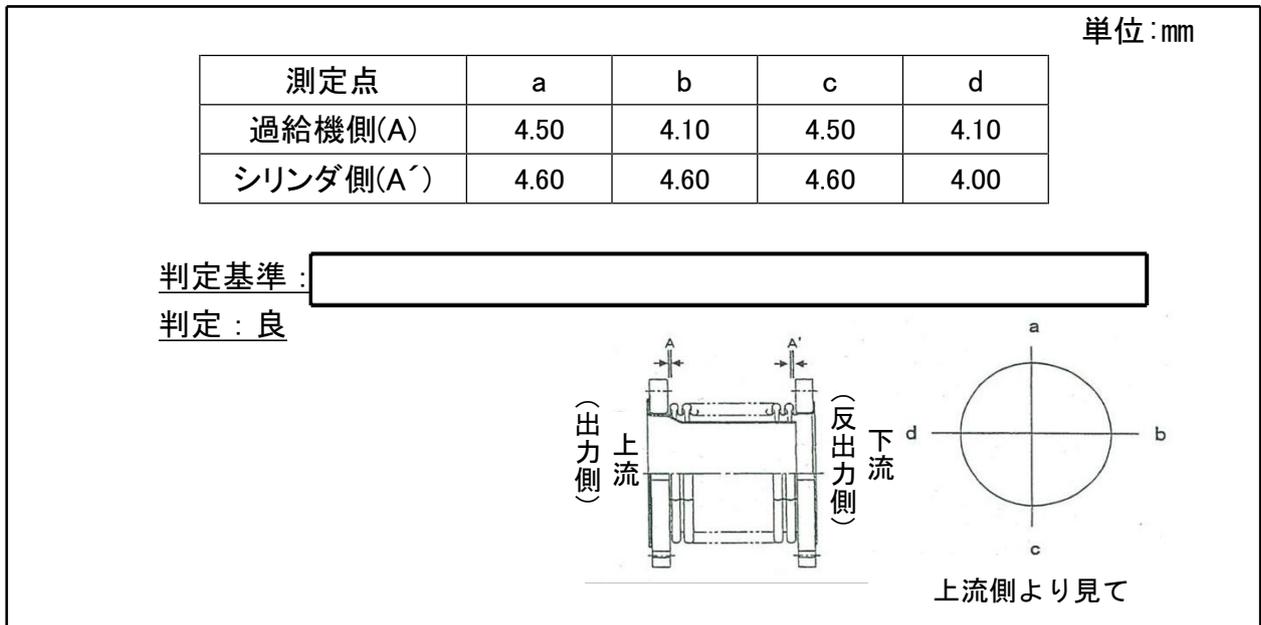


図 12-3 フランジ - ベローズ間隙測定

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

試運転結果について

1 調査目的

試運転において、排気管伸縮継手取替え後のベローズの熱伸びによる変形の有無及び機関の運転状態、並びに、試運転後の停止した状態における外観・寸法の確認を実施する。

2 調査方法

試運転における 100%負荷運転時及び試運転後停止時において、以下の調査を実施する。

(1) 100%負荷運転時

- a 機関運転性能記録(シリンダ部排気温度)
- b 排気管伸縮継手の外観点検, 漏えい確認
- c 排気管伸縮継手の熱による変形状況
- d 異音, 異臭確認

(2) 試運転後停止時

- a 排気管伸縮継手の外観点検
- b 排気管伸縮継手の寸法測定

3 調査期間

平成 30 年 6 月 7 日(木)～平成 30 年 6 月 8 日(金)

4 調査結果

(1) 100%負荷運転時

- a 機関運転性能記録(シリンダ部排気温度)

機関運転性能記録におけるシリンダ部排気温度を表 13-1 に示す。調査の結果、過去の運転状態と比較して有意な差異はなく、判定基準以内であることを確認した。

表 13-1 シリンダ部排気温度

単位: °C

		100%負荷運転時 平成 30 年 6 月 8 日	至近の定期試験時 平成 30 年 5 月 11 日	至近の試運転時 平成 30 年 3 月 9 日
シリンダ部排気温度	A-No. 1			
	A-No. 2			
	A-No. 3			
	A-No. 4			
	A-No. 5			
	A-No. 6			
	A-No. 7			
	A-No. 8			
	平均			

単位: °C

		100%負荷運転時 平成 30 年 6 月 8 日	至近の定期試験時 平成 30 年 5 月 11 日	至近の試運転時 平成 30 年 3 月 9 日
シリンダ部排気温度	B-No. 1			
	B-No. 2			
	B-No. 3			
	B-No. 4			
	B-No. 5			
	B-No. 6			
	B-No. 7			
	B-No. 8			
	平均			

判定基準: 以下

判定: 良

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

b 排気管伸縮継手の外観点検，漏えい確認

取替え後の当該排気管伸縮継手を含む全ての排気管伸縮継手の外観点検(高温により伸縮継手の前面のみ実施)及び漏えい確認を実施した。調査の結果，異常がないことを確認した。

c 排気管伸縮継手の熱による変形状況

取替え後の当該排気管伸縮継手について写真による伸び量の確認を行った。試運転前の冷温時及び 100%負荷運転時における排気管伸縮継手の外観を図 13-1 に示す。試運転前の冷温時における排気管伸縮継手の長さは である。100%負荷運転時は高温であり接近しての測定ができなため，写真から排気管伸縮継手の長さを推定した結果 であった。このため，伸縮差を と推定した。

またビデオ映像による振動状況を確認した。その結果，機関運転に伴う排気管伸縮継手の振動は軽微であった。

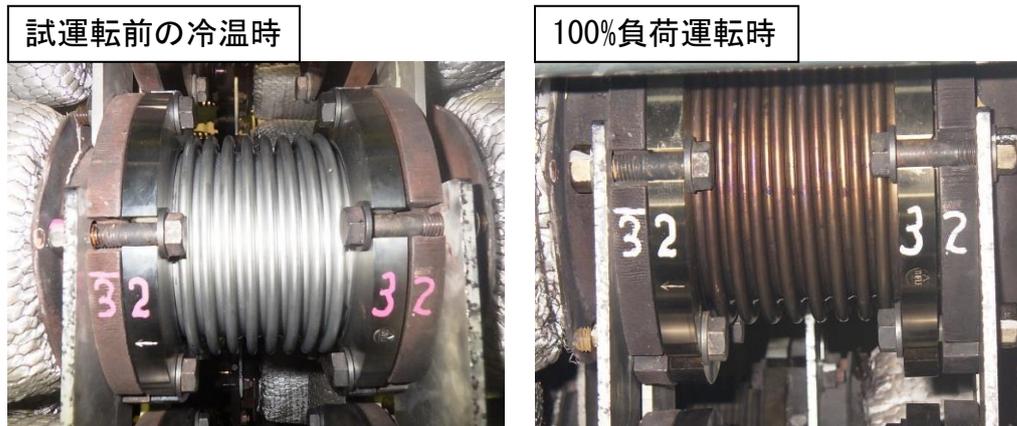


図 13-1 試運転前の冷温時及び 100%負荷運転時における排気管伸縮継手外観

d 異音，異臭確認

取替え後の当該排気管伸縮継手を含む全ての排気管伸縮継手及び機関全体の異音，異臭の確認を実施した。調査の結果，排気管伸縮継手及び機関に関し，異音，異臭がないことを確認した。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(2) 試運転後停止時冷温状態

a 排気管伸縮継手の外観点検

取替え後の当該排気管伸縮継手を含む全ての排気管伸縮継手の外観点検を実施した。点検の結果、異常がないことを確認した。

b 取替え後の当該排気管伸縮継手の寸法測定

取替え後の当該排気管伸縮継手について、各部位(全長, 段差(芯ずれ), フランジ - ベローズ間隙)の寸法測定を実施した。各部位(全長, 段差(芯ずれ), フランジ - ベローズ間隙)の寸法測定結果を図 13-2, 13-3, 13-4 に示す。

調査の結果、全て判定基準値以内であることを確認した。

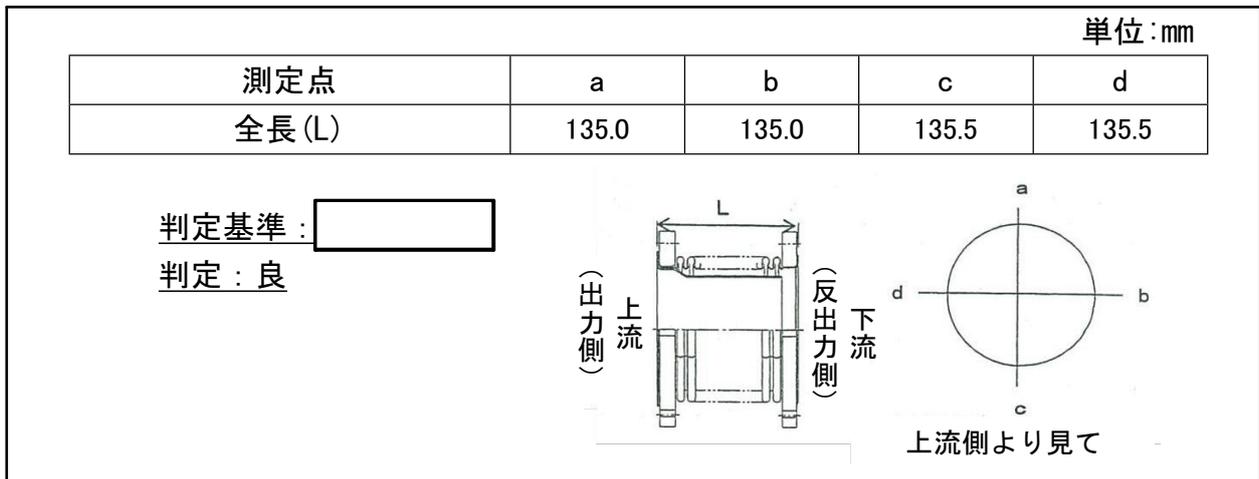


図 13-2 当該排気管伸縮継手の全長測定

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

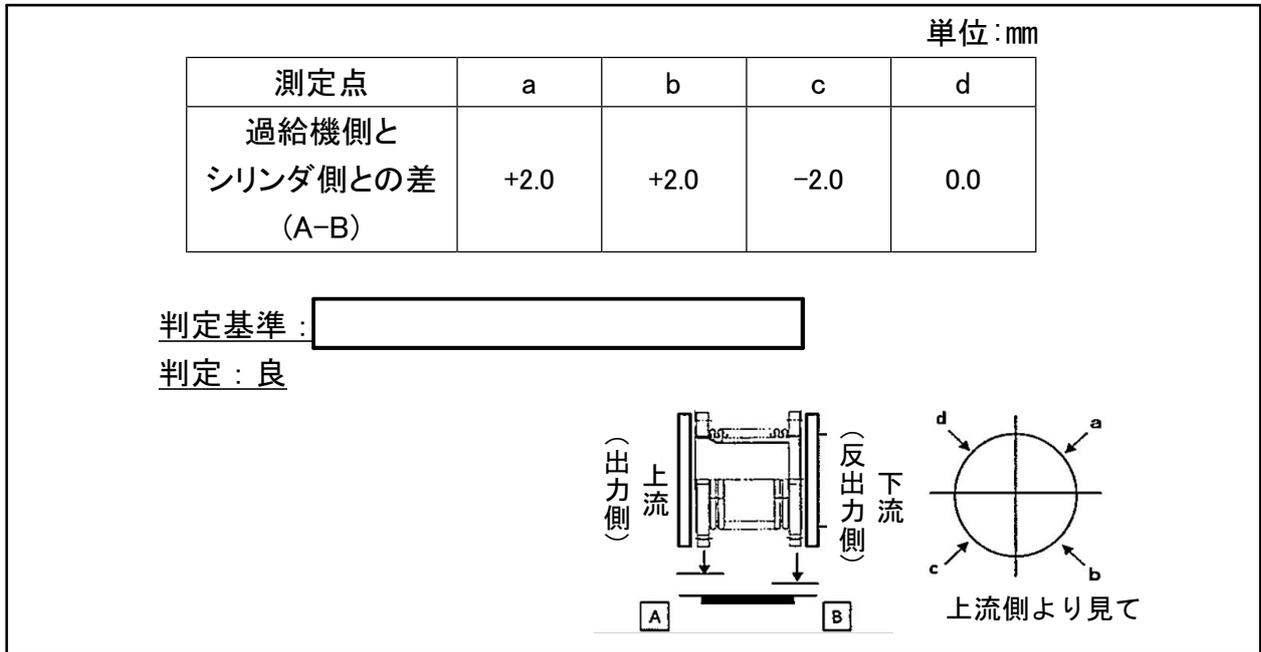


図 13-3 取替え後の当該排気管伸縮継手の段差(芯ずれ)測定

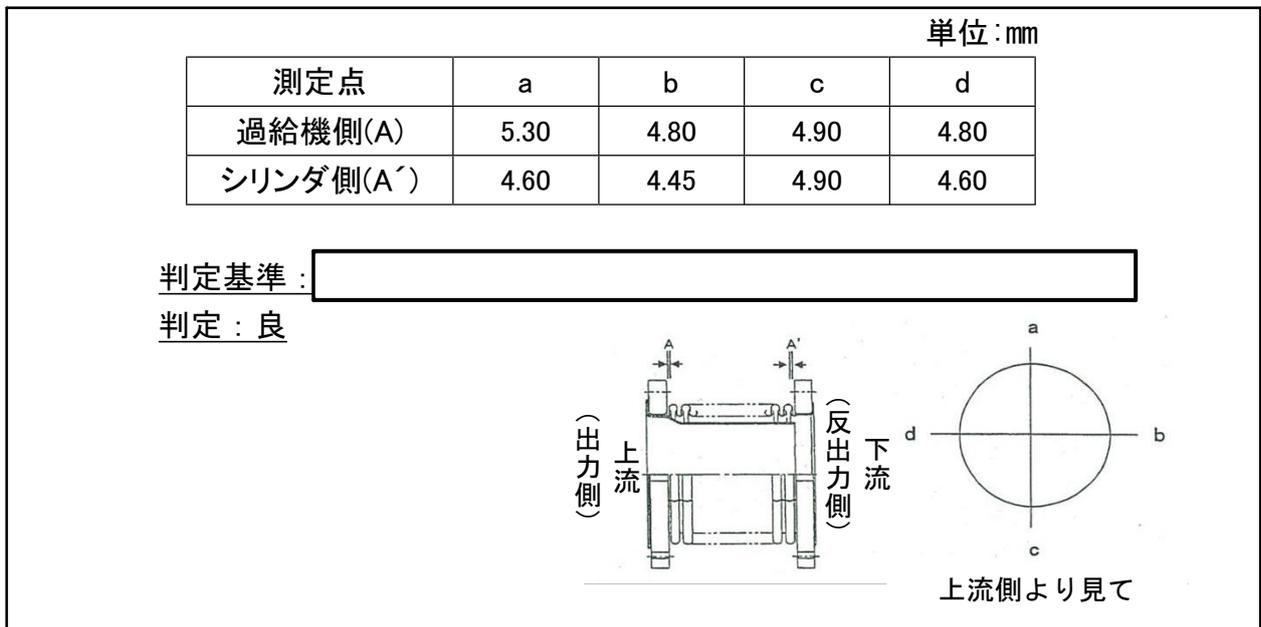
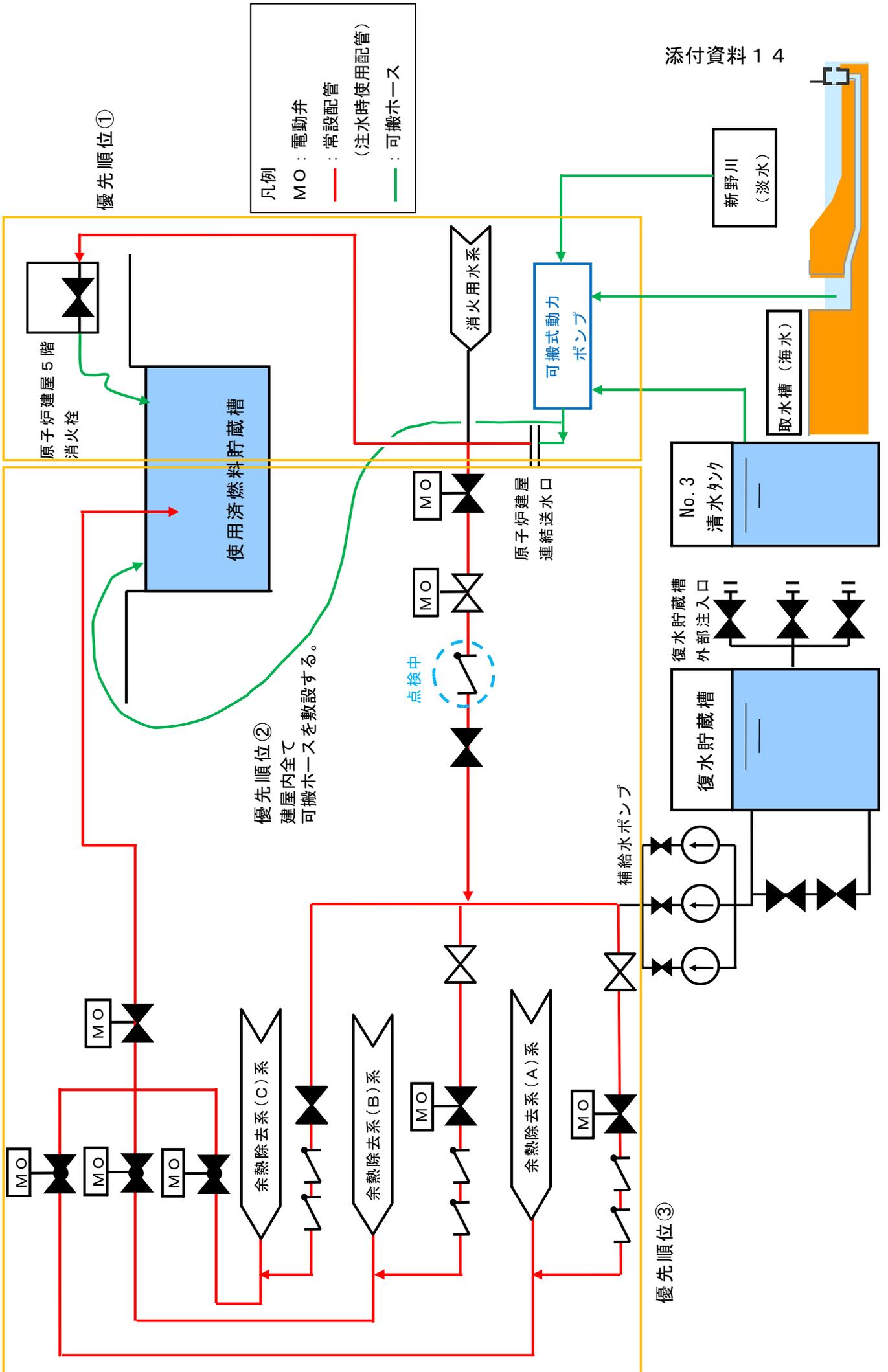


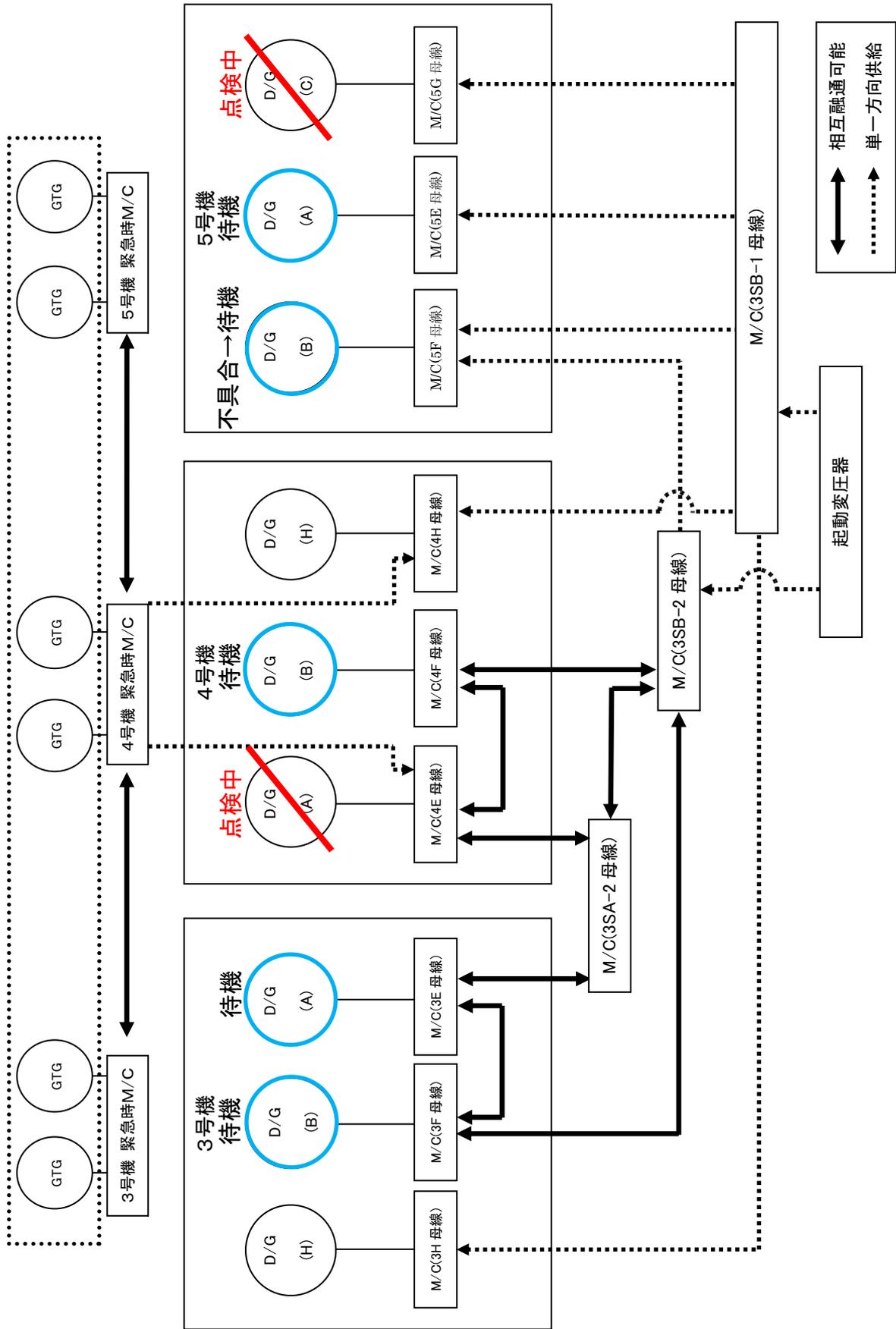
図 13-4 取替え後の当該排気管伸縮継手のフランジ - ベローズ間隙測定

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

全交流電源喪失時における代替注水手段について



D/G(B)の運転上の制限逸脱からの復帰について



排気管伸縮継手破損が D/G の機能要求へ与える影響

1 目的

本評価では、排気管伸縮継手のベローズが破損することを想定し、D/G の排気ガスの漏えいが D/G の機能要求へ与える影響について確認する。機能要求については、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」をもとに抽出を行った（別紙-1）。

2 検討方法

想定する排気管伸縮継手の破損個数に対し、排気管伸縮継手からの漏えい率や D/G の出力等の条件を保守的に設定して評価を行った。また、合わせて建設時の系統試験、本事象発生時及び本事象復旧時の測定値を用いた現実的な条件を用いて評価を行った。

(1) 保守的な条件

ベローズの内側には整流のための内筒があるため、ベローズが全周破損した場合であっても開口面積は全断面の□□となる。しかし、ベローズ及び内筒が破損して排気管 1 本を流れる排気ガスが全て開口部から漏えいすると保守的に想定し、排気管伸縮継手 1 個あたりの漏えい率を排気ガス全量の 1/8 (12.5%) とした。なお、排気管全 8 本は独立して過給機のタービンに接続されており、他の排気管の排気ガスが漏えい部に逆流することはない。

D/G の発電機出力は、原子炉冷却材喪失事故を伴う外部電源喪失時を想定して設定された設計値の 5,880kW とした。

(2) 現実的な条件

排気管伸縮継手 1 個あたりの漏えい率は、本事象発生時における過給機入口温度の上昇量（破損発生時の平均値：□□，復旧時の平均値：□□）を、ディーゼル機関メーカーにて測定した排気ガス量と排気温度の関係（図 16-1）に適用して算出した□□とした。

D/G の発電機出力は、原子炉冷却材喪失事故を伴う外部電源喪失時を模擬した建設時の系統試験における電気出力の測定結果※1を用いて、設計値の 70%とした。

※1 発電機の電気出力 設計値：5,500kW，測定値：3,650kW

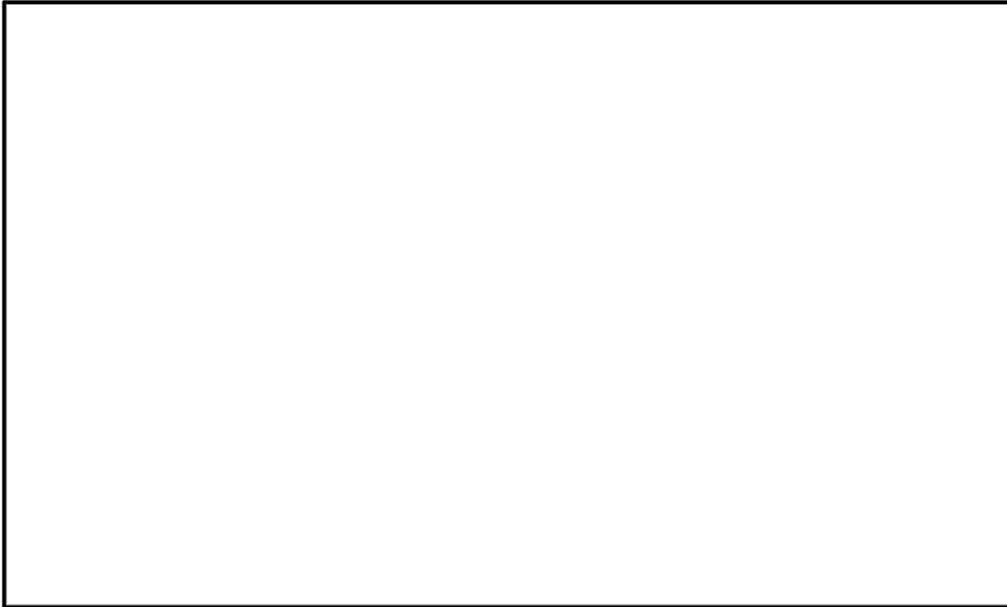


図 16-1 排気ガス量と排気温度の関係

排気管伸縮継手内側の排気圧力は、排気管伸縮継手外側より高くなっており、排気管伸縮継手が破損した場合においても、破損箇所の内側から外側へ排気は流れるため、その破片が排気管内に流入することは考え難いことから、排気管への破片の混入は考慮しない。

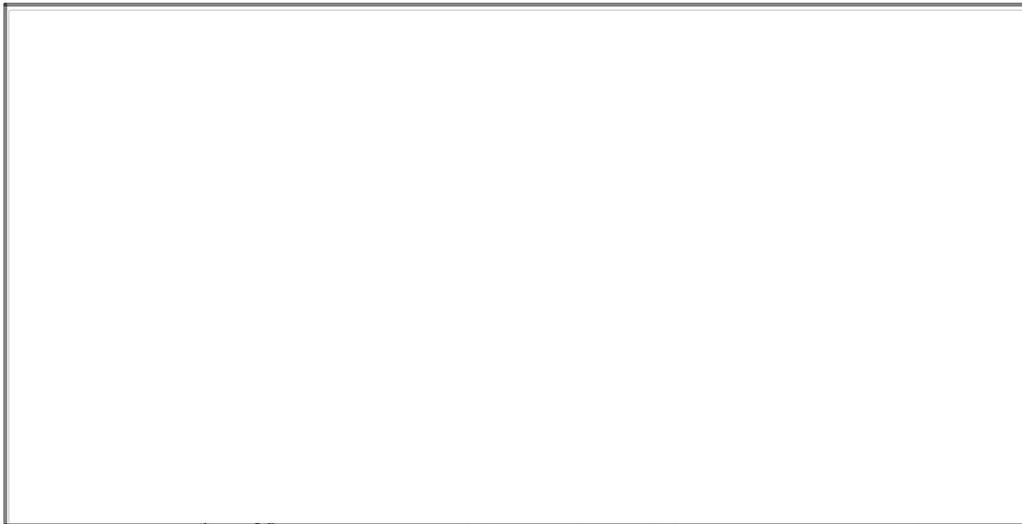


図 16-2 排気管の構成

- 3 排気管伸縮継手破損が与える影響
排気管伸縮継手破損により D/G の排気ガスが漏えいすることによる D/G の

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

機能への直接的・間接的な影響を検討した。

(1) D/G の機能へ直接的に与える影響

表 16-1 に示す通り、排気管伸縮継手 1 個のベローズ及び内筒が全周破損した場合であっても、D/G の機能を満足することを確認した。排気管伸縮継手 1 個の破損に加え、別の排気管の排気管伸縮継手 1 個の破損を仮定した場合においても、現実的な条件による評価では D/G の機能を満足すると考えられる。なお、排気管伸縮継手 3 個が破損した場合は、現実的な条件による評価でも、出力や回転数等の維持が困難となる可能性がある。

具体的な検討結果を別紙-2 に示す。

表 16-1 排気管伸縮継手破損が D/G の機能へ直接的に与える影響

機能	要求	排気管伸縮継手が破損した際の機能への影響	
		1 個	2 個
出力	5,880kW (保守的な条件) / 5,880kW の 70% (現実的な条件)	○	○*
回転数	720rpm	○	○*
起動時間	発電機電圧確立まで 15 秒以内	○	—
燃料使用量	1,545ℓ/h	○	○*
燃料貯蔵量	D/G が約 7 日間連続運転 できる容量	○	○*
非常時の許容 周波数降下及 び電圧降下	定格時の 83% 周波数 定格時の 75% 電圧	○	○*

○ : 機能を満足することを確認

○* : 現実的な条件による評価において機能を満足することを確認

— : D/G の起動時に複数の配管伸縮継手が同時に破損する可能性は極めて低いことから、D/G の機能への影響はないと評価

(2) D/G の機能へ間接的に与える影響

表 16-2 に示す通り、排気管伸縮継手 1 個のベローズ及び内筒が全周破損した場合であっても、D/G の機能を満足することを確認した。排気管伸縮継手 1 個の破損に加え、別の排気管の排気管伸縮継手 1 個の破損を仮定した場合においても、現実的な条件による評価では D/G の機能を満足すると考

えられる。なお、排気管伸縮継手 3 個が破損した場合は、現実的な条件による評価でも、D/G 機関温度及び D/G 室内温度が設計温度を超過し、D/G の機能を満足できなくなる可能性がある。

詳細を別紙-3 に示す。

表 16-2 排気管伸縮継手破損が D/G の機能へ間接的に与える影響

環境条件	排気管伸縮継手が破損した際の 機能への影響	
	1 個	2 個
D/G 機関温度	○	○*
D/G 室内温度	○	○*
高温の噴流による影響	○	○
煤煙による影響	○	○

○：機能を満足することを確認

○*：現実的な条件による評価において機能を満足することを確認

4 まとめ

排気管伸縮継手破損による D/G の排気ガスの漏えいが D/G の機能要求へ与える影響を確認した結果、現実的な条件において、排気管伸縮継手の破損が 2 個までであれば、直接的に影響を与える出力等の機能と、間接的に影響を与える D/G 室内温度等の環境条件の両者を満足し、運転継続が可能と評価した。

D/G の機能要求の抽出結果

D/G に要求される機能を以下の通り抽出した。なお、排気管伸縮継手の破損は D/G の構造強度に影響を与えるものではないため、構造強度に対する要求は除外した。

法令要求	要求事項	排気管伸縮継手 破損の影響
< 実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則 >		
<p>(保安電源設備)</p> <p>第四十五条 発電用原子炉施設には、電線路及び当該発電用原子炉施設において常時使用される発電機からの電力の供給が停止した場合において発電用原子炉施設の安全性を確保するために必要な装置の機能を維持するため、内燃機関を原動力とする発電設備又はこれと同等以上の機能を有する非常用電源設備を施設しなければならない。</p>	<p>< 設置許可 ></p> <p>容量は、外部電源が完全に喪失した場合でも、非常用ディーゼル発電機 2 台で余熱除去系等原子炉を安全に停止するために必要な負荷、又は工学的安全施設の負荷をとり得る設計とする。</p> <p>< 工認 ></p> <p>出力 (kW/個) 5,880</p> <p>回転数 (rpm) 720</p>	あり
<p>7 非常用電源設備及びその附属設備は、多重性又は多様性を確保し、及び独立性を確保し、その系統を構成する機械又は器具の単一故障が発生した場合であっても、運転時の異常な過渡変化時又は設計基準事故時において工学的安全施設及び設計基準事故に対処するための設備がその機能を確保するために十分な容量を有するものでなければならない。</p>	<p>< 設置許可 ></p> <p>非常用ディーゼル発電機は、外部電源が喪失した場合に自動起動し、重要度の特に高い設備等に給電する。</p> <p>台数 3</p> <p>起動時間 約 15 秒</p> <p>非常用ディーゼル発電機が約 7 日間連続運転できる燃料貯蔵設備を発電所内に設ける。</p>	あり
(準用)		
第四十八条 3 発電用火力設備に関する技術基準を定める省令第二十五条から第二十九条までの規定は、設計基準対象施設に施設する内燃機関について準用する。		
< 発電用火力設備に関する技術基準を定める省令 >		
<p>(調速装置)</p> <p>第二十六条 誘導発電機と結合する内燃機関以外の内燃機関には、その回転速度及び出力が負荷の変動の際にも持続的に動揺することを防止するため、内燃機関に流入する燃料を自動的に調整する調速装置を設けなければならない。この場合において、調速装置は、定格負荷を遮断した場合に達する回転速度を非常調速装置が作動する回転速度未満にする能力を有するものでなければならない。</p>	<p>< 工認 ></p> <p>調速装置 油圧式</p> <p>< 機器設計仕様書 ></p> <p>非常時の許容周波数降下及び電圧降下</p> <p>所定の負荷シーケンスに沿って負荷を投入した時の電圧及び周波数は、次の値を下回らないこと。</p> <p>定格時の 83% 周波数</p> <p>定格時の 75% 電圧</p>	あり

法令要求	要求事項	排気管伸縮継手 破損の影響
<p>(非常停止装置)</p> <p>第二十七条 内燃機関には、運転中に生じた過回転その他の異常による危害の発生を防止するため、その異常が発生した場合に内燃機関に流入する燃料を自動的かつ速やかに遮断する非常調速装置その他の非常停止装置を設けなければならない。</p>	<p><工認></p> <p>非常調速装置 電気-空気式</p>	なし
<p>(計測装置)</p> <p>第二十九条 内燃機関には、設備の損傷を防止するため運転状態を計測する装置を設けなければならない。</p>	<p><使用前検査></p> <p>ディーゼル発電機比率差動継電器動作 ディーゼル発電機過電流継電器動作 等</p>	なし

排気管伸縮継手の破損が D/G の機能に直接的に与える影響について

○ : 機能を満足することを確認

○* : 現実的な条件による評価において機能を満足することを確認

機能	要求	排気管伸縮継手破損による機能喪失の可能性	排気管伸縮継手 1 個が破損した際の機器への影響	別の排気管の排気管伸縮継手 2 個が破損した際の機器への影響
出力	5,880kW (保守的な条件) / 5,880kW の 70% (現実的な条件)	排気管伸縮継手破損による過給機への給気量の減少により、D/G 機関への給気量が減少することから、出力及び回転数を維持するため燃料供給量が自動的に増加する。燃料供給量が上限に達した場合は、出力が維持できなくなる可能性がある。	○ ディーゼル機関メーカーにおける D/G の性能確認試験の結果、過給機への給気量が 12.5%減少した場合、燃料供給量が自動的に約 <input type="text"/> 増加 (図 16-3) する。しかし、D/G の実燃費は設計燃費と比較して約 <input type="text"/> (※1) 少なく、燃料供給量が増加しても設計上の燃料供給量に到達しないことから、出力が低下する可能性はない。	○* 排気管伸縮継手 2 個が破損し、過給機への給気量が保守的に 25%減少すると想定した場合、燃料供給量 (※2) が供給可能量の上限に達し、出力が維持できなくなる可能性がある。一方で、今回の事象における漏えい量評価結果を踏まえ、排気管伸縮継手 2 個が破損し、過給機への給気量が <input type="text"/> 減少すると想定した場合、排気ガス量と燃料消費率の関係を示す試験データ (過給機の給気量減少率は <input type="text"/> まで) (図 16-3) を外挿すると燃料供給量は <input type="text"/> 程度増加すると考えられる。発電機出力の実測値は設計値の約 70% (※3) であり、出力 (kW) あたりの燃費消費量はほぼ一定で燃料消費量も定格時の約 70%となることを考慮すると、設計上の燃料供給量に到達せず、出力は維持可能と評価する。
回転数	720rpm	排気管伸縮継手破損による過給機への給気量の減少により、D/G 機関への給気量が減少することから、出力及び回転数を維持するため燃料供給量が自動的に増加する。燃料供給量が上限に達した場合は、回転数が維持できなくなる可能性がある。	○ ディーゼル機関メーカーにおける D/G の性能確認試験の結果、過給機への給気量が 12.5%減少した場合、燃料供給量が自動的に約 <input type="text"/> 増加 (図 16-3) する。しかし、D/G の実燃費は設計燃費と比較して約 <input type="text"/> (※1) 少なく、燃料供給量が増加しても設計上の燃料供給量に到達しないことから、回転数が低下する可能性はない。	○* 排気管伸縮継手 2 個が破損し、過給機への給気量が保守的に 25%減少すると想定した場合、燃料供給量 (※2) が供給可能量の上限に達し、回転数が維持できなくなる可能性がある。一方で、今回の事象における漏えい量評価結果を踏まえ、排気管伸縮継手 2 個が破損し、過給機への給気量が <input type="text"/> 減少すると想定した場合、排気ガス量と燃料消費率の関係を示す試験データ (過給機の給気量減少率は <input type="text"/> まで) (図 16-3) を外挿すると燃料供給量は <input type="text"/> 程度増加すると考えられる。発電機出力の実測値は設計値の約 70% (※3) であり、出力 (kW) あたりの燃費消費量はほぼ一定で燃料消費量も定格時の約 70%となることを考慮すると、設計上の燃料供給量に到達せず、回転数は維持可能と評価する。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

機能	要求	排気管伸縮継手破損による機能喪失の可能性	排気管伸縮継手 1 個が破損した際の機器への影響	別の排気管の排気管伸縮継手 2 個が破損した際の機器への影響
起動時間	発電機電圧確立まで 15 秒以内	排気管伸縮継手破損による過給機給気量の減少により、D/G 機関への給気量が減少することから、定格回転数に到達するまでに必要となるトルクが得られず、起動時間が設計値を超過する可能性がある。なお、D/G 起動中の燃料供給量は最大となる。	<p>○ 機関設計時に用いている起動時間推定要領により、トルクが 12.5%減少した場合の起動時間を算出した。その結果、起動までに最も時間を要する条件（始動空気槽（※4）の圧力が設計の最低値 <input type="text"/> の場合）では、起動時間は設計条件で <input type="text"/> のところ <input type="text"/> になること（図 16-4）を確認した。トルク減少率と過給機への給気量減少率はおおよそ比例関係にあること、及び計算による起動時間は実起動時間と比較して保守的に算出されることから、設計値を超過することはないと評価する。</p>	<p>— D/Gの起動時に複数の配管伸縮継手が同時に破損する可能性は極めて低いことから、D/Gの機能への影響はないと評価する。</p>
燃料使用量	1,545ℓ/h	排気管伸縮継手破損による過給機への給気量の減少により、D/G 機関への給気量が減少することから、出力を維持するため燃料供給量が自動的に増加する。燃料供給量が増加することにより、燃料使用量が設計値を超過する可能性がある。	<p>○ ディーゼル機関メーカーにおける D/G の性能確認試験の結果、過給機への給気量が 12.5%減少した場合、燃料消費量が約 <input type="text"/> 増加（図 16-3）することを確認した。D/G の実燃費は設計燃費と比較して約 <input type="text"/>（※1）少なく、燃料消費量が増加しても設計上の燃料供給量に到達しないことから、燃料使用量が設計値を超過することはない。</p>	<p>○* 排気管伸縮継手 2 個が破損し、過給機への給気量が保守的に 25%減少すると想定した場合、燃料消費量（※2）が設計値を超過する可能性がある。 一方で、今回の事象における漏えい量評価結果を踏まえ、排気管伸縮継手 2 個が破損し、過給機への給気量が <input type="text"/> 減少すると想定した場合、排気ガス量と燃料消費率の関係を示す試験データ（過給機の給気量減少率は <input type="text"/> まで）（図 16-3）を外挿すると燃料供給量は <input type="text"/> 程度増加すると考えられる。発電機出力の実測値は設計値の約 70%（※3）であり、出力（kW）あたりの燃費消費量はほぼ一定で燃料消費量も定格時の約 70%となることを考慮すると、設計上の燃料供給量に到達せず、燃料使用量は設計値を超過することはないと評価する。</p>

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

機能	要求	排気管伸縮継手破損による機能喪失の可能性	排気管伸縮継手 1 個が破損した際の機器への影響	別の排気管の排気管伸縮継手 2 個が破損した際の機器への影響
燃料貯蔵量	D/G が約 7 日間連続運転できる容量	排気管伸縮継手破損による過給機への給気量の減少により、D/G 機関への給気量が減少することから、出力を維持するため燃料供給量が自動的に増加する。燃料供給量が増加することにより、燃料貯蔵量は D/G が 7 日間連続運転できる容量を下回る可能性がある。	○ ディーゼル機関メーカーにおける D/G の性能確認試験の結果、過給機への給気量が 12.5%減少した場合、出力及び回転数を維持するため燃料消費量が約 [] 増加 (図 16-3) することを確認した。D/G の実燃費は設計燃費と比較して約 [] (※1) 少ないことから、燃料貯蔵量は D/G が 7 日間連続運転できる容量を下回る可能性はない。	○* 排気管伸縮継手 2 個が破損し、過給機への給気量が保守的に 25%減少すると想定した場合、燃料消費量 (※2) が設計値を超過し、定格での 7 日間連続運転ができなくなる可能性がある。 一方で、今回の事象における漏えい量評価結果を踏まえ、排気管伸縮継手 2 個が破損し、過給機への給気量が [] 減少すると想定した場合、排気ガス量と燃料消費率の関係を示す試験データ (過給機の給気量減少率は [] まで) (図 16-3) を外挿すると燃料供給量は [] 程度増加すると考えられる。発電機出力の実測値は設計値の約 70% (※3) であり、出力 (kW) あたりの燃費消費量はほぼ一定で燃料消費量も定格時の約 70%となることを考慮すると、設計上の燃料供給量に到達せず、燃料貯蔵量は D/G が 7 日間連続運転できる容量を下回らないと評価する。
非常時の許容周波数降下及び電圧降下	定格時の 83%周波数及び 75%電圧を下回らないこと	排気管伸縮継手破損による過給機給気量の減少により、D/G 機関への給気量が減少するため、負荷変動時にトルクが得られず、周波数及び電圧が変動し設計値を下回る可能性がある。	○ 機関設計時に用いている負荷投入時の周波数変動率の計算手法により、最大の負荷投入 (B 系における第 1 ブロック (HPCF 等)) 時の周波数変動率を、通常時と過給機への給気量が 12.5%減少した条件において算出した。その結果、周波数変化率は通常時 [] のところ [] となった (図 16-5)。また、算出結果は実測値 (通常時 [] (※5)) と比較して保守的な結果であることを確認した。以上より、過給機への給気量が 12.5%減少した場合であっても、定格時の 83%周波数を満足すると評価する。また、上記の周波数変化量を考慮すると、電圧 (通常時 [] (※5)) についても規定値を満足すると評価する。	○* 排気管伸縮継手 2 個が破損し、過給機への給気量が保守的に 25%減少すると想定した場合、周波数及び電圧が変動し設計値を下回る可能性がある。 一方で、今回の事象における漏えい量評価結果を踏まえ、排気管伸縮継手 2 個が破損し、過給機への給気量が [] 減少すると想定した場合、左記の通り、過給機への給気量の変化による周波数変化率はわずかであり、算出結果は実測値 (通常時 [] (※5)) と比較して保守的な結果であることを踏まえると、定格時の 83%周波数及び 75%電圧を満足すると評価する。

※1 : 5 号機系統試験報告書及び至近の運転実績にて確認

※2 : 25%の減少はディーゼル機関メーカーにおける D/G の性能確認試験の実施範囲を超えるため、測定結果を外挿し推定

※3 : 5 号機系統試験報告書にて、発電機の電気出力が設計値 5,500kW のところ、測定値 3,650kW であることを確認

※4 : D/G 機関を始動させるための圧縮空気を充てんした貯槽

※5 : 5 号機系統試験報告書にて確認

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



図 16-3 排気ガス量と燃料消費率の関係



図 16-5 負荷投入時の回転数変化量



図 16-4 起動時間推定結果

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

排気管伸縮継手の破損が D/G の機能に間接的に与える影響について

- : 機能を満足することを確認
- * : 現実的な条件による評価において機能を満足することを確認

環境条件	排気管伸縮継手破損による機能喪失の可能性	排気管伸縮継手 1 個が破損した際の機器への影響	別の排気管の排気管伸縮継手 2 個が破損した際の機器への影響
D/G 機関温度	<p>排気管伸縮継手破損による過給機への給気量の減少により、D/G 機関への給気量が減少することから、出力を維持するため燃料供給量が自動的に増加する。燃料供給量の増加による排気温度の上昇により、排気温度が規定値 [] を超過した場合は、熱ひずみが生じるため機器が破損する可能性がある。</p>	<p>○ ディーゼル機関メーカーにおける D/G の性能確認試験の結果、過給機への給気量が 12.5% 減少した場合、排気温度は約 [] 上昇する (図 16-6)。当該排気管伸縮継手交換以降 (平成 20 年) の定期試験記録を確認した結果、過給機排気ガス温度の平均値は最高で [] であり、温度上昇量は設計値 [] とのマーヅンの範囲内であることから、設計値を超過することはない。</p>	<p>○* 排気管伸縮継手 2 個が破損し、過給機への給気量が保守的に 25% 減少すると想定した場合、排気温度が設計値を超過する。 一方で、今回の事象における漏えい量評価結果を踏まえ、排気管伸縮継手 2 個が破損し、過給機への給気量が [] 減少すると想定した場合、排気ガス量と排気温度の関係を示す試験データ (過給機の給気量減少率は [] まで) (図 16-6) を外挿すると排気温度は約 [] 上昇すると考えられる。しかし、発電機出力の実測値は設計値の約 70% (※1) であることから温度上昇量は緩和され、さらに排気温度は定格時と比較して約 [] 低下 (※1) することを踏まえると、設計値を超過することはないと評価する。</p>
D/G 室内温度	<p>排気管伸縮継手破損により D/G 室内に高温の排気ガスが漏えいすることから、D/G 室内の温度が上昇する可能性がある。D/G 室内の温度が運転中の設計室温 [] を超過した場合、絶縁抵抗の低下による発電機の故障や、計器類の故障など、D/G 室内の機器が故障する可能性がある。また、温度上昇により、作業環境が悪化する可能性がある。</p>	<p>○ 本事象発生時と復旧後の試験運転時の D/G 室温度測定結果を元に、排気管伸縮継手 1 つが全破損した場合の D/G 室内温度を推定したところ、約 [] 上昇することを確認した。D/G 室の給気は外気を直接取り入れており、御前崎市の統計上の最高温度は 36.7℃ であることから、約 [] まで室温が上昇する可能性がある。 発電機は [] であり、使用による温度上昇は [] 未満であることを確認したことから、室内温度が今回想定する約 [] まで上昇しても室内の機器に影響を与えるものではないことを確認した。なお、計器類は D/G の継続運転に影響を与えないことを確認した。 また、温度上昇により作業環境が悪化するが、D/G 起動時、運転継続時、停止時のいずれにおいても D/G 室外にて監視及び操作が可能であり、D/G 室内へ常時滞在する必要はない。一時的に入室する必要がある場合は、中央制御室に配備されている消防服及びセルフエアセットを着用することで、短時間の活動は可能である。(詳細は別紙 - 4 参照。)</p>	<p>○* 保守的に排気ガスの 25% が D/G 室内に漏えいすると想定した場合、排気温度が設計値を超過すると共に、D/G 室内温度は設計室温を大きく超過し、室内の機器及び作業環境に影響を与える可能性がある。 一方で、発電機出力の実測値は設計値の約 70% (※2) であり、漏えいする排気ガスの熱量も約 70% になると考えられること、及び今回の事象における漏えい量評価結果を踏まえ、排気管伸縮継手 2 個が破損し、過給機への給気量が [] 減少することを想定すると、D/G 室内温度上昇は [] 程度であり、D/G 室内の機器及び作業環境に影響を与えるものではないと評価する。(詳細は別紙 - 4 参照。)</p>

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

環境条件	排気管伸縮継手破損による機能喪失の可能性	排気管伸縮継手 1 個が破損した際の機器への影響	別の排気管の排気管伸縮継手 2 個が破損した際の機器への影響
高温の噴流による影響	排気管伸縮継手破損により高温の排気ガスが漏えいすることから、排気管伸縮継手近傍に可燃物がある場合は発火し、火災が発生する可能性がある。	○ 排気管伸縮継手近傍 (1m (※3)) 範囲の部品を調査した結果、可燃性の材料は使用されていないことを確認した。ただし、近傍に設置している温度計の難燃性ケーブルが熱の影響を受け損傷する可能性はあるが、当該温度計は指示機能のみを有しており、D/G の安全機能に影響を与えるものではない。また、温度測定は可搬型の温度計によって代替が可能である。	○ 同左
煤煙	排気管伸縮継手破損により煤煙を含む排気ガスが漏えいすることから、作業環境が悪化する可能性がある。	○ 排気管伸縮継手破損により D/G 室内に最大で [] ([] の場合 []) の排気ガスが漏えいするが、D/G 室給気ファン 2 台 (容量 []) によって約 29 倍の排気量を確保しているため、作業環境が悪化する可能性はないと評価する。	○ 排気管伸縮継手 2 個が破損した場合、D/G 室内に最大で [] ([] の場合 []) の排気ガスが漏えいするが、D/G 室給気ファン 2 台 (容量 []) によって約 14 倍の排気量を確保しているため、作業環境が悪化する可能性はないと評価する。

※1 : 5号機系統試験報告書にて、100%負荷運転時と75%負荷運転時の平均排気温度 (100%負荷運転時 : [] , 75%負荷運転時 : []) を比較し確認

※2 : 5号機系統試験報告書にて、発電機の電気出力が設計値 5,500kW のところ、測定値 3,650kW であることを確認

※3 : 排気管伸縮継手は運転時は保温材に覆われているため、噴流の影響範囲を 1m として検討した

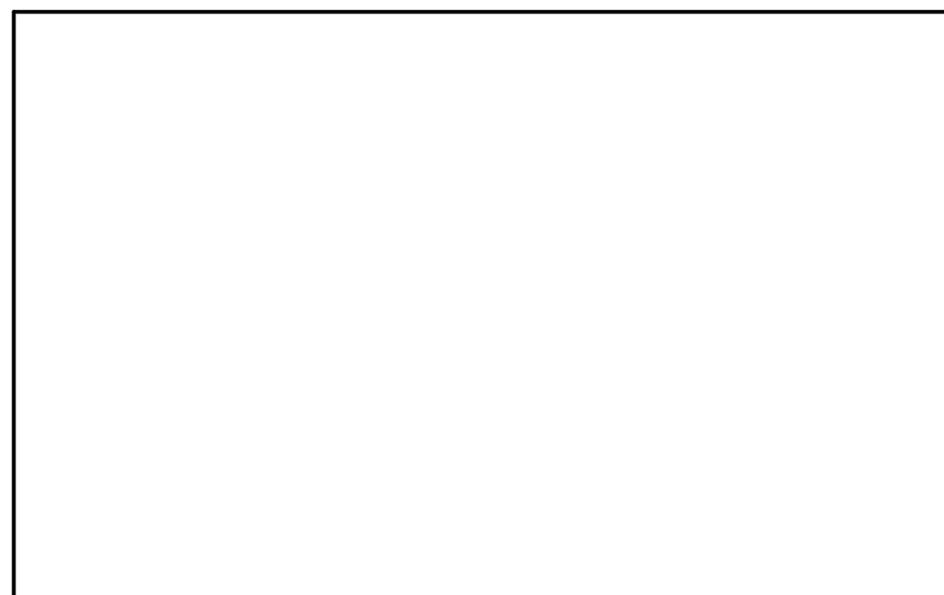


図 16-6 排気ガス量と排気温度の関係

排気管伸縮継手のベローズが破損した場合の 実機温度データに基づく D/G 室温度上昇量の推定について

1 はじめに

D/G (B) 排気管伸縮継手破損事象を踏まえ、排気管伸縮継手の破損が D/G の機能に与える影響の確認を行っている。その一環として、排気管からの排気ガス漏えいが D/G 室温に与える影響について確認し、D/G 室内の機器の機能に対する評価を行った。

2 温度上昇量の推定方針

排気管伸縮継手が破損し排気ガスが漏えいした場合の温度上昇量を、排気管伸縮継手破損事象発生時（平成 30 年 6 月 5 日）、復旧時（平成 30 年 6 月 7 日、12 日）の D/G (B) 室の温度変化実績及び想定される熱負荷を用いて推定する。

3 実機での温度変化実績及び室内負荷

排気管伸縮継手破損事象発生時（平成 30 年 6 月 5 日）、復旧時（平成 30 年 6 月 7 日、12 日）の温度変化実績及び室内の負荷を以下に示す。D/G 起動中最大温度については、図 16-7 に示す、D/G (B) 室の温度トレンドにて確認した。事象発生時においては、の排気ガスが排気ガス全体のに相当する漏えいしたものと推定しているため、漏えいした排気ガスが持つ熱エネルギーも室内の負荷に加えた。

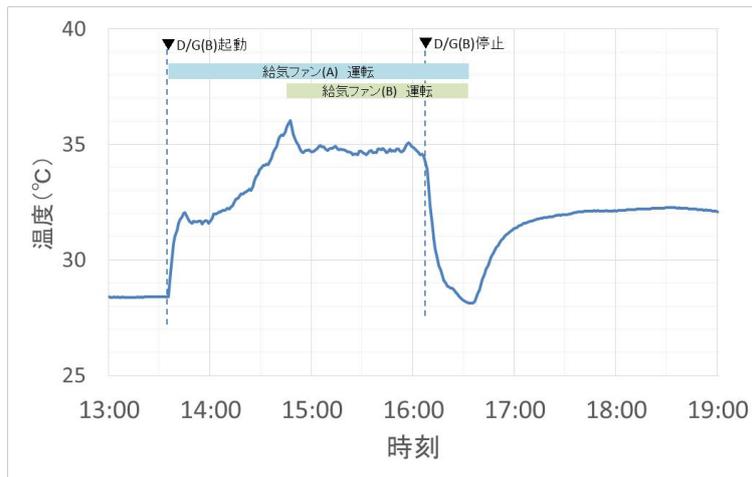
表 16-3 温度変化実績

	6 月 5 日	6 月 7 日	6 月 12 日
D/G 起動中最大温度 (°C)	35.2	33.8	35.2
外気温 (御前崎市最高気温) (°C)	25.0	24.1	26.7
温度上昇量 (°C)	10.2	9.7	8.5
D/G 室給気ファン起動数 (台)	2	1	1

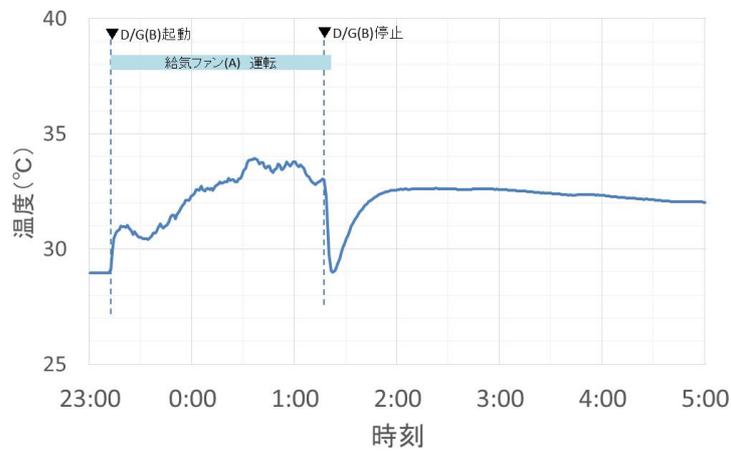
表 16-4 D/G 室内負荷

	6 月 5 日	6 月 7 日	6 月 12 日
機関からの発熱 (設計値) (kcal/h)	<input type="text"/>		
照明からの発熱 (設計値) (kcal/h)			
排気ガスによる発熱 (計算値) (kcal/h)			
総発熱量 (kcal/h)			

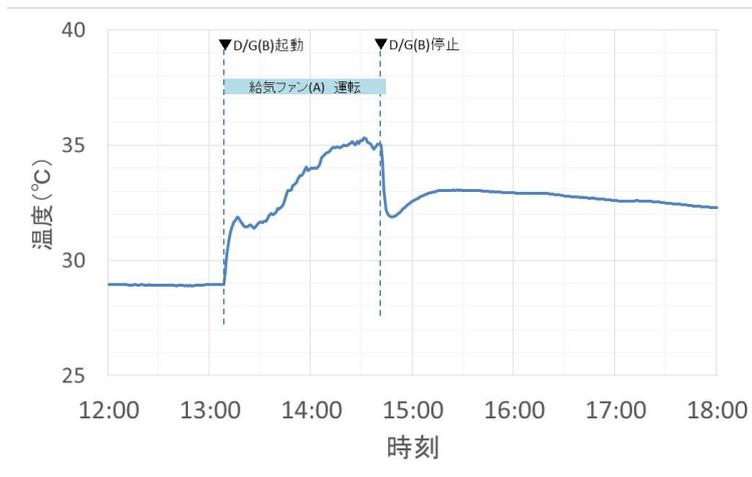
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



(a) 排気管伸縮継手破損事象発生時 (平成 30 年 6 月 5 日)



(b) 復旧時 (平成 30 年 6 月 7 日)



(c) 復旧時 (平成 30 年 6 月 12 日)

図 16-7 排気管伸縮継手破損事象発生時及び復旧時 D/G(B) 室の温度トレンド

4 D/G 室内温度の推定

(1) 排気管伸縮継手 1 個破損時

排気管伸縮継手 1 個のベローズが全破損した場合に漏えいする排気ガスを、保守的に [] (排気ガスの 12.5%相当), [] (排気温度の上限値^{※2}) と想定し、D/G 室内の温度上昇量の推定を行った。想定した負荷条件を表 16-5 に示す。

表 16-5 排気管伸縮継手 1 個が全破損した際の D/G 室内負荷

機関からの発熱 (設計値) (kcal/h)	[]	[]
照明からの発熱 (設計値) (kcal/h)	[]	
排気ガスによる発熱 (計算値) (kcal/h)	[]	
総発熱量 (kcal/h)	[]	

図 16-8 は、排気管伸縮継手破損事象発生時と復旧時の総発熱量と温度上昇量から、原点を通る最小二乗法にて発熱量と温度上昇量を推定したものである。本図から、D/G 室内負荷 [] の場合、温度上昇量は約 [] と評価した。御前崎市の統計上の最高気温の 36.7℃ に温度上昇量を足すと、D/G 室内温度は約 [] となる。なお、図 16-8 においては、復旧時 (平成 30 年 6 月 7 日, 12 日) は D/G 室給気ファンが 1 台起動であったことから、2 台起動時の環境を推定するため、温度上昇量を 1/2 にしてプロットした。

(2) 別の排気管に設置される排気管伸縮継手 2 個破損時

排気管伸縮継手 2 個のベローズが全破損した場合、保守的な条件では排気ガスは [] (排気ガスの 25%相当), [] (排気温度の上限値) 以上となり、室内温度は設計室温 [] を大きく超過する。このため、現実的な条件として、D/G の出力を定格の 70%、漏えいする排気ガスを [] (排気ガスの [] 相当), []^{※3} と想定した場合の D/G 室内の温度上昇量を推定した。

想定した負荷条件を表 16-6 に示す。

※2 D/G 機関温度の評価結果では、本条件での排気温度は最大で [] であるため、保守的に設計温度の上限値を用いた。

※3 D/G 機関温度の評価結果では、本条件での排気温度は最大で [] であることから本値を用いた。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表 16-6 排気管伸縮継手 2 個が破損した際の D/G 室内負荷 (現実的な条件)

機関からの発熱 (設計値) (kcal/h)		
照明からの発熱 (設計値) (kcal/h)		
排気ガスによる発熱 (計算値) (kcal/h)		
総発熱量 (kcal/h)		

図 16-8 に示す通り, D/G 室内負荷 の場合, 温度上昇量は約 と評価した。御前崎市の統計上の最高気温の 36.7°C に温度上昇量を足すと, D/G 室内温度は約 となる。

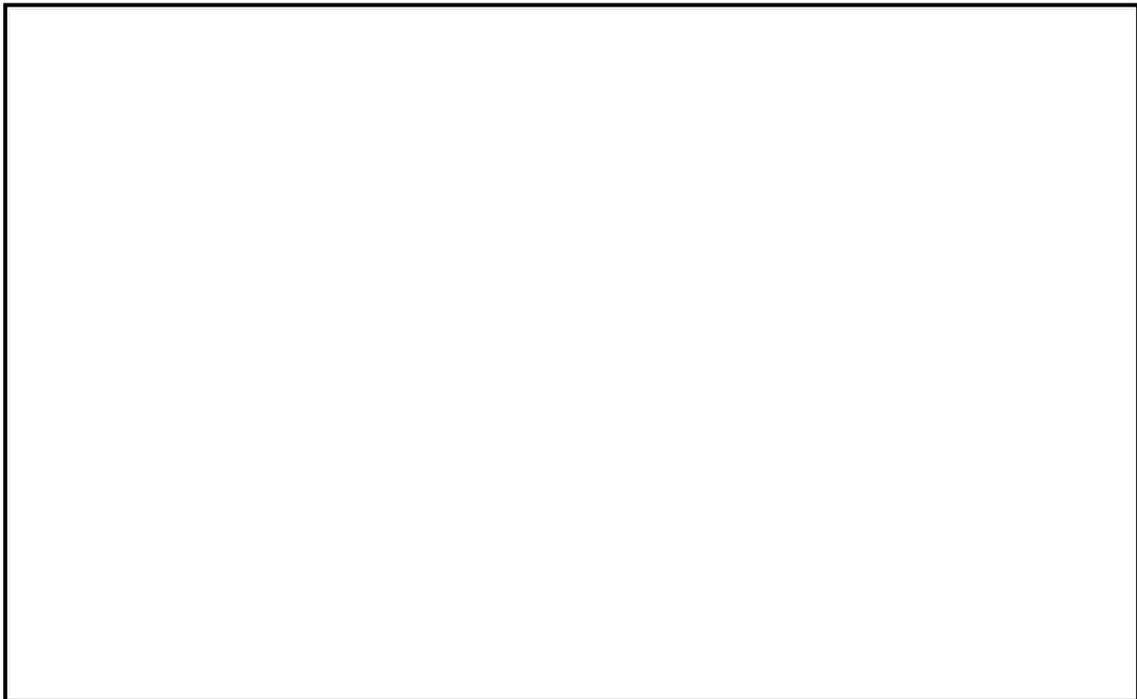


図 16-8 D/G 室内熱負荷と温度上昇の関係

5 D/G 室内温度上昇による影響

(1) 機器への影響

D/G 室内温度が設計室温 を超過した場合, D/G 室の機器のうち発電機及び計器類が温度上昇による影響を受ける可能性がある。しかし, 発電機は であり, D/G 運転による温度上昇は 未満であることから, までは機器への影響はないことを確認した。

本資料のうち, 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

また、計器類はD/Gの運転継続に影響を与えないことを確認した。

(2) 作業環境への影響

D/G 室内温度が設計室温 を超過した場合、作業環境が悪化するが、D/G 起動時、運転継続時、停止時の監視及び操作は中央制御室の制御盤又はD/G 室外のD/G 制御盤において実施可能であり、D/G 室内へ常時滞在する必要はない。一時的に入室する必要がある場合は、中央制御室に配備されている消防服及びセルフエアセットを着用することで、機器への影響がない までであれば短時間の活動は可能である。

6 まとめ

排気管伸縮継手 1 個の破損の場合、排気ガスの漏えいによって D/G 室の温度は設計温度を超過するが、機器及び作業環境に対して影響はない範囲に留まることを確認した。

別の排気管に設置される排気管伸縮継手 2 個の破損の場合、現実的な条件において、排気ガスの漏えいによって D/G 室の温度は設計温度を超過するが、D/G 室の温度は機器及び作業環境に対して影響はない範囲に留まるものと評価した。

当該排気管伸縮継手のベローズの破片復元及び外観観察結果

1 目的

回収した当該排気管伸縮継手のベローズの破片を組み立てて、当該ベローズの復元・外観観察をすることで、ベローズ全体及び山ごと、破片単位のマクロ的な破壊、変形や腐食等の経年劣化事象の特徴の把握を目的とする。

2 復元及び外観観察方法

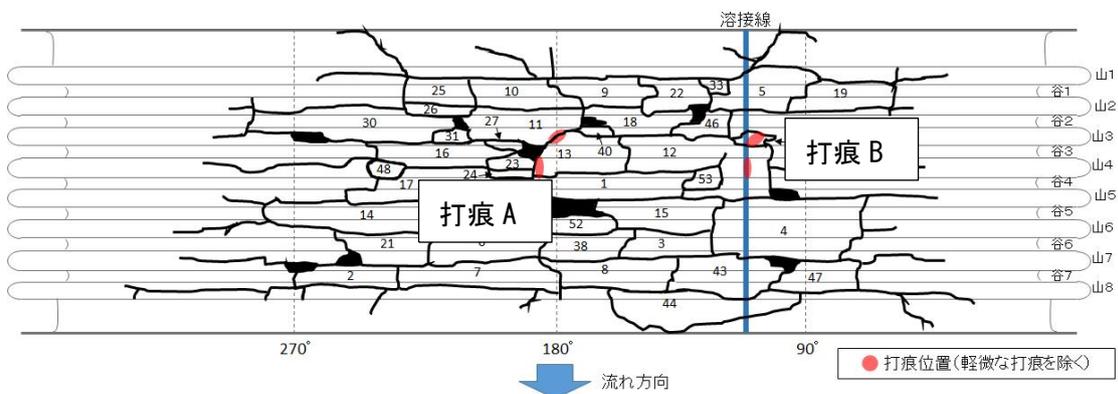
ベローズ復元作業は、各破片の外観を観察しながら、周方向又は軸方向の割れが一致する破片をつなぎ合わせることで実施した。

復元作業に合わせて、破片単位、山(谷)単位、ベローズ全体の外観観察を実施した。

3 復元及び観察結果

3. 1 復元結果

当該排気管伸縮継手のベローズの全体復元図を図 17-1 に示す。180°、110° 付近に大きな打痕が認められた。以降、180° 付近の打痕を打痕 A、110° 付近の打痕を打痕 B と定義する。



※本スケッチにおいて、各破片に認められた変形は反映されていない
 ※微細な破片や変形が大きく破片復元作業が困難であった破片(計12個)は本復元図に含まれていない

図 17-1 当該排気管伸縮継手のベローズの全体復元図

3. 2 復元した当該排気管伸縮継手のベローズの外観観察結果

<ベローズ全体の外観観察結果(打痕部)> (別紙-1 参照)

- 打痕 A、打痕 B はともに、打痕中心部に円弧状の鋭角な凹みが認められる。

<ベローズ全体の外観観察結果(その他)> (別紙-2 参照)

- 打痕 A は、ベローズの破損している領域のほぼ中央に位置している。
- 打痕 A 近傍を含む軸方向のき裂は、比較的直線状に並んでいる。
- 下流側の方が周方向のき裂の進展量が大きい(破損領域が広い)。
- 打痕 A 近傍の破片(破片 No. 23, 24, 27)において、損傷が著しく、小さな破片が多い。

<ベローズ山(谷)単位の外観観察結果> (別紙-3 参照)

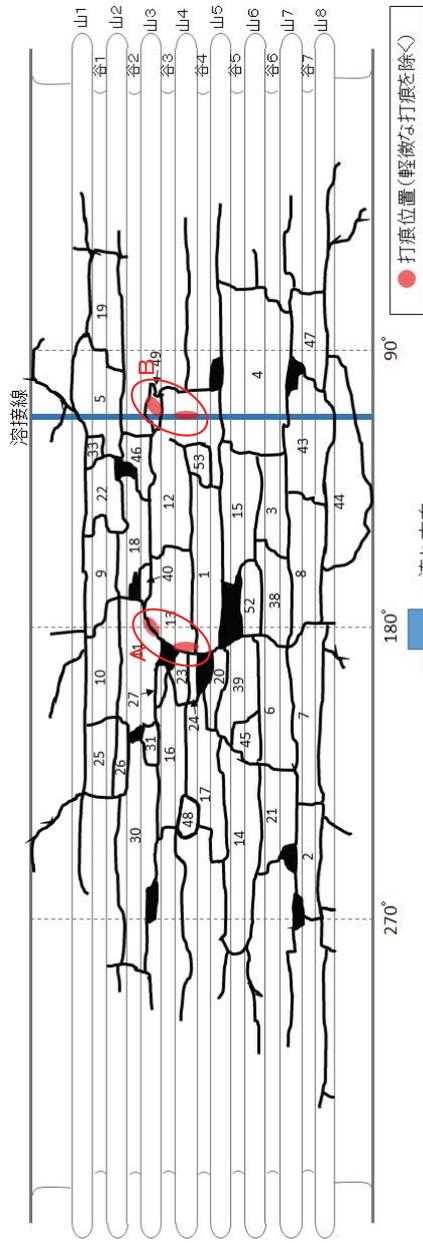
- 上流側(山 1~山 5 間)の変形量が下流側と比較すると大きく、下流側では隣接する山間の幅の減少はほとんどない。
- 打痕が認められる山 3, 4 の周辺にて、打痕近傍に周方向のき裂は認められない。

<破片単位の外観観察結果> (別紙-4 参照)

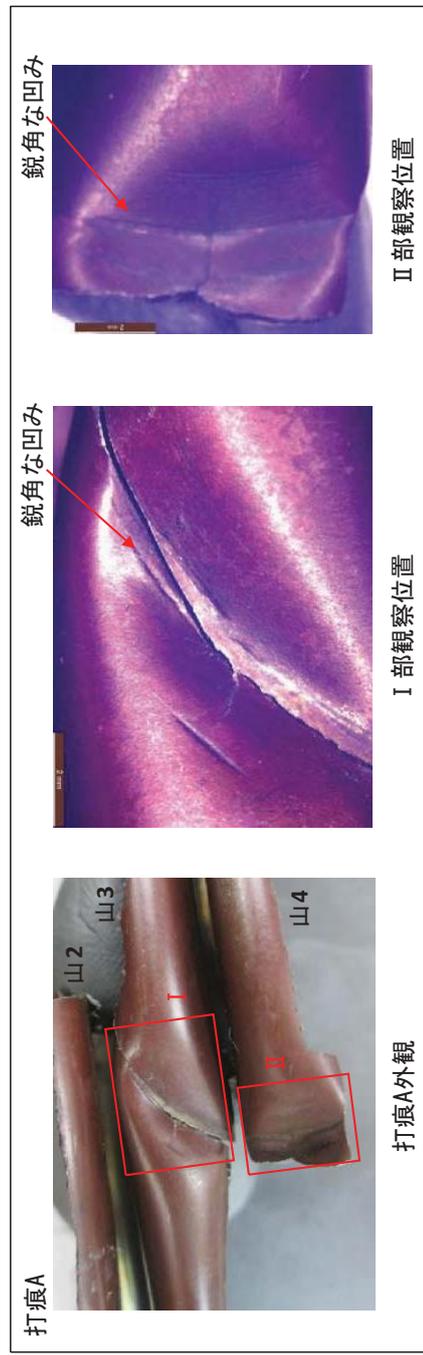
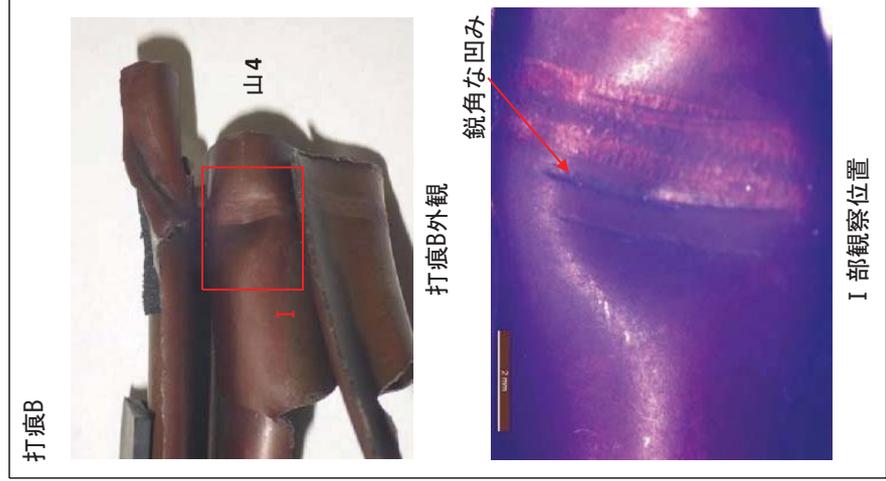
- 周方向のき裂の多くは山にて発生しているが、一部、打痕 A 近傍の破片(破片 No. 11, 13, 23, 24, 27, 52)において谷側にも周方向のき裂が認められた。
- 打痕近傍は、多くが打痕端部の構造不連続部に沿ってき裂が発生しているが、打痕中心部に円弧状の鋭角な凹みが認められる打痕 A は、鋭角な凹みに沿ってき裂が発生している。
- 破片 No. 12 は山 4 から山 5 にかけて、軸方向に大きくめくれ上がるように変形している。
- 破片端部に軽微な塑性変形を伴っているものがある。
- 打痕 A 近傍の破片のうち谷側破面は、山側破面と比較して破面の損傷が著しい。
- 破片やベローズ残存部分に有意な腐食・接触痕は認められない。

ベローズ全体の外観観察結果(打痕部)

・打痕A, 打痕Bともに, 打痕中心部に円弧状の鋭角な凹みが認められる。



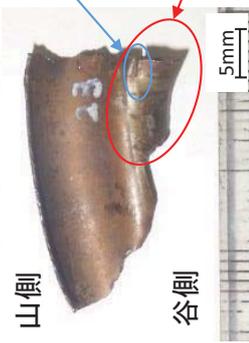
※本スケッチにおいて, 各破片に認められた変形は反映されていない
※微細な破片や変形が大きく破片復元作業が困難であった破片(計12個)は本復元図に含まれていない



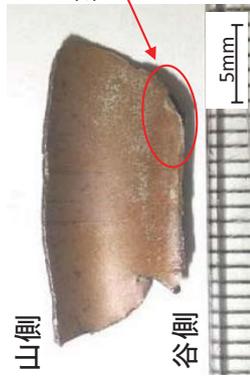
ベローズ全体の外観観察結果(その他)

- ・打痕Aは、ベローズの破損している領域のほぼ中央に位置している。
- ・打痕A近傍を含む軸方向のき裂は、比較的直線状に並んでいる。
- ・下流側の方が周方向のき裂の進展量が大きい(破損領域が広い)。
- ・打痕A近傍の破片(破片No. 23, 24, 27)において、損傷が著しく小さな破片が多い。

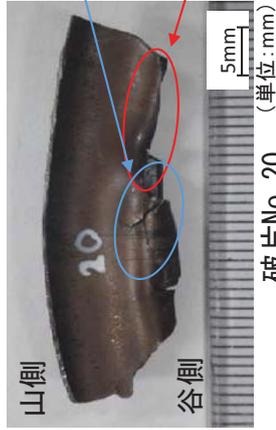
打痕A近傍では損傷が著しく、小さな破片が多い



谷部で周方向のき裂が認められる
大きな塑性変形が認められる



塑性変形が認められる

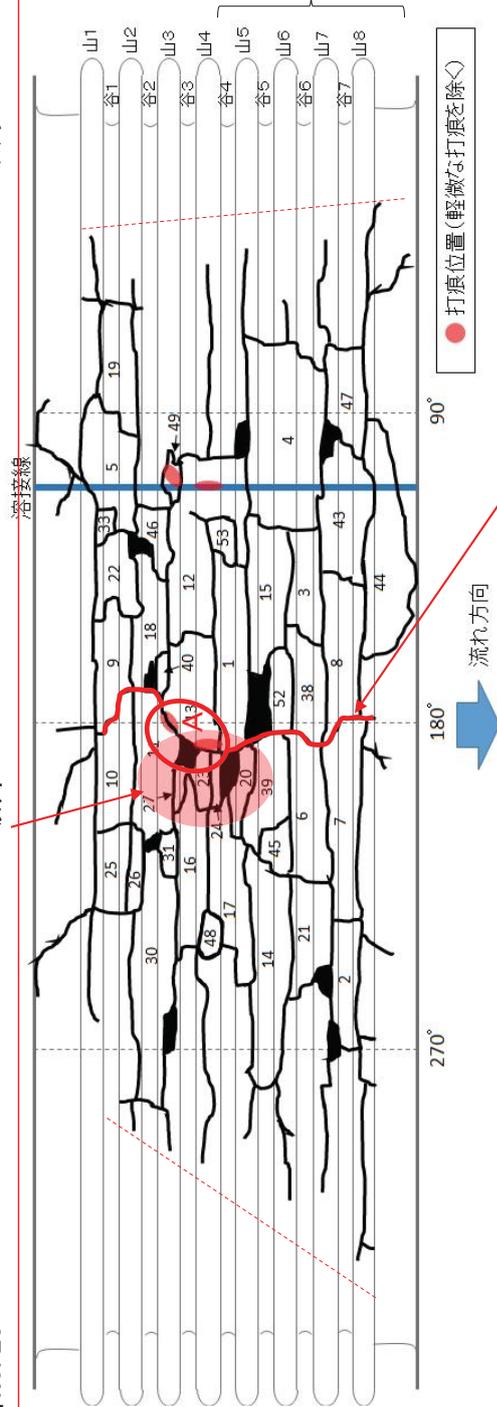


谷部でき裂が認められる
大きな塑性変形が認められる

破片No. 23 (単位:mm)

破片No. 27

破片No. 20 (単位:mm)

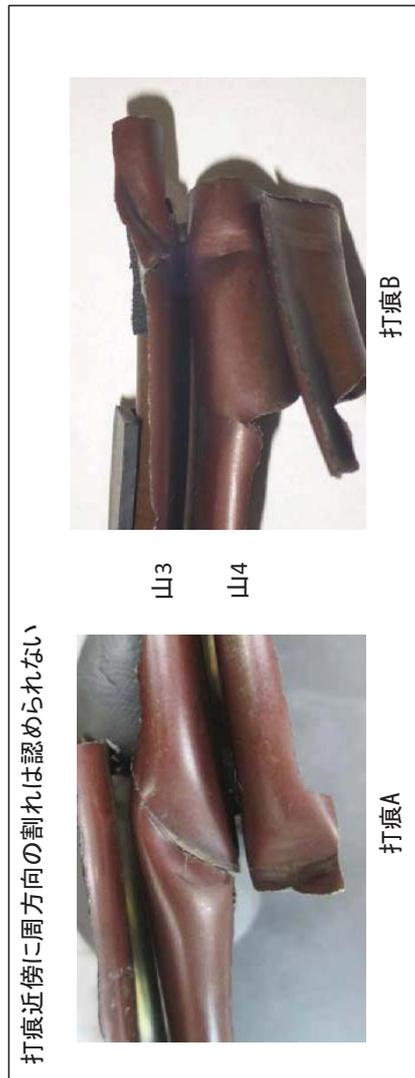
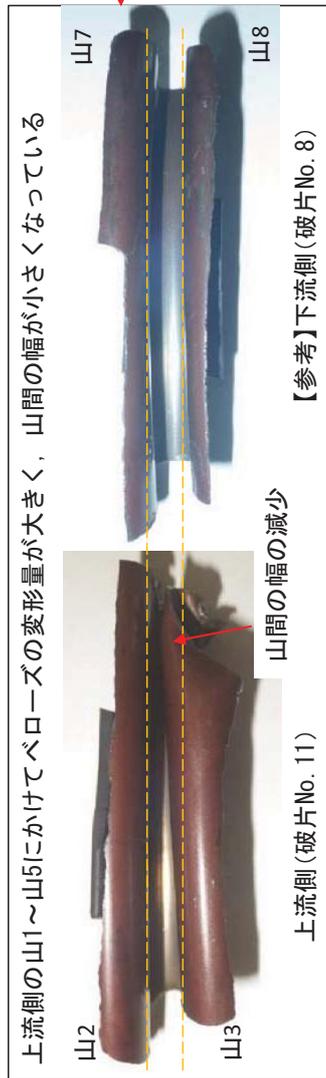
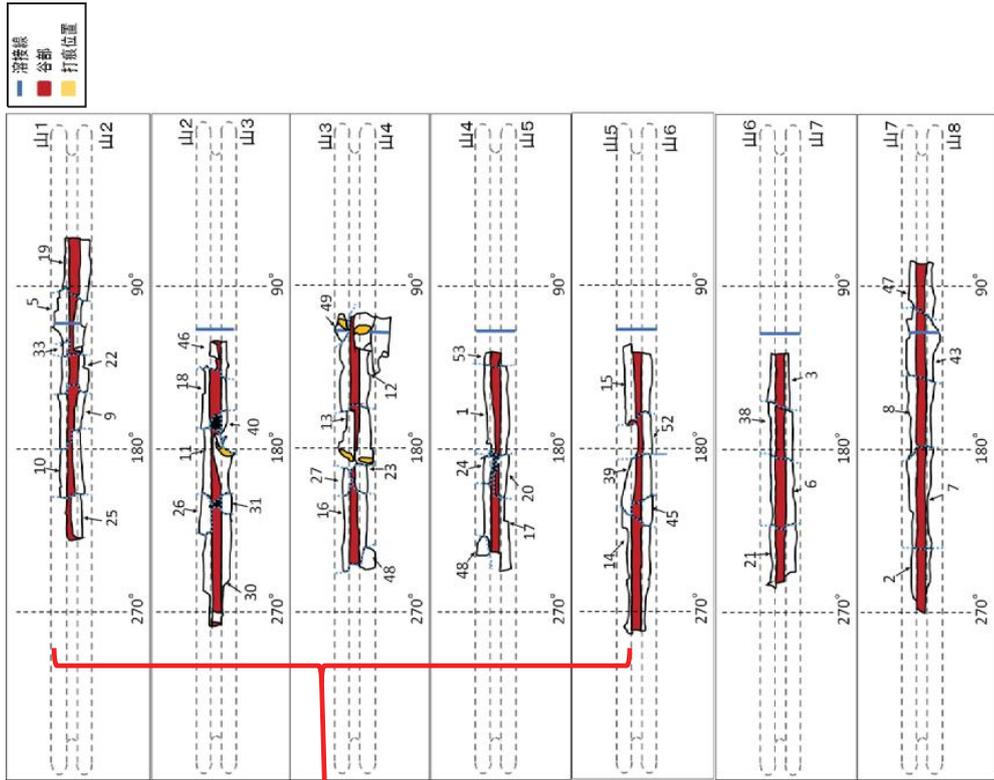


下流側の方が、周方向のき裂進展量が大きい(破損領域が広い)

打痕A近傍を含む軸方向のき裂は、比較的直線状に並んでいる
※本スケッチにおいて、各破片に認められた変形は反映されていない
※微細な破片や変形が大きく破片復元作業が困難であった破片(計12個)は本復元図に含まれていない

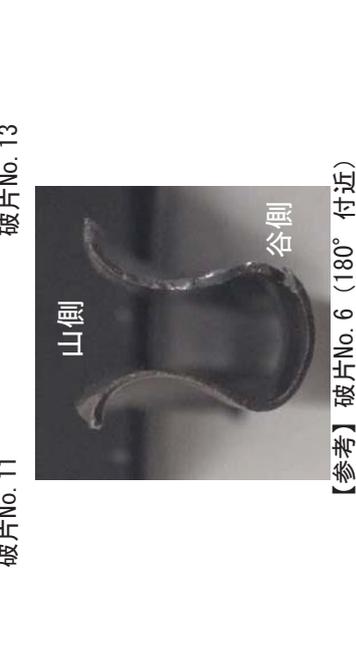
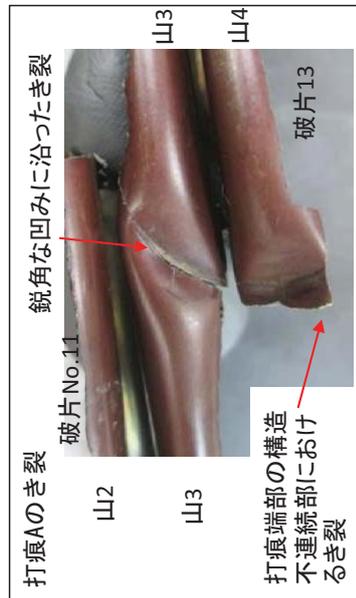
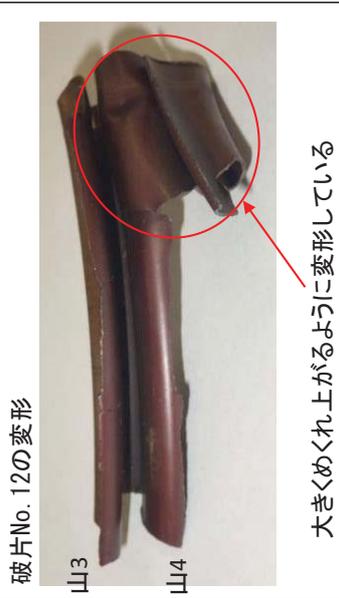
ペローズ山(谷)単位の外観観察結果

- ・上流側（山1～山5間）の変形量が下流側と比較すると大きく、下流側では隣接する山間の幅の減少はほとんどない。
- ・打痕が認められる山3, 4の周辺にて、打痕近傍に周方向のき裂は認められない。



破片単位の外観観察結果

- ・周方向のき裂の多くは山にて発生しているが、一部、打痕A近傍の破片（破片No. 11, 13, 23, 24, 27, 52）において谷側にも周方向のき裂が認められた。
- ・打痕近傍は、多くが打痕端部の構造不連続部に沿ってき裂が発生しているが、打痕中心部に円弧状の鋭角な凹みが認められる打痕Aは、鋭角な凹みに沿ってき裂が発生している。
- ・破片No. 12は山4から5にかけて、軸方向に大きいくれ上がるように変形している。
- ・破片端部に軽微な塑性変形を伴っているものがある。
- ・打痕A近傍の破片のうち谷側破面は、山側破面と比較して破面の損傷が著しい。
- ・破片やベローズ残存部分に有意な腐食・接触痕は認められない。



当該排気管伸縮継手のペローズ破片の破面観察結果

1 目的

当該排気管伸縮継手のペローズ破片の破面観察によって、当該ペローズの破壊の形態を把握することを目的として、光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡による破面観察を実施する。

2 調査方法・範囲

図 18-1 に示す範囲について、光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡によって、破面観察を実施した。

ここで、 180° 付近の打痕を打痕 A、 110° 付近の打痕を打痕 B と定義し、観察範囲は「破壊の著しい打痕 A 近傍」、「溶接部近傍」、「き裂の進展量が大きい下流側（山 8）」を中心に選定した。

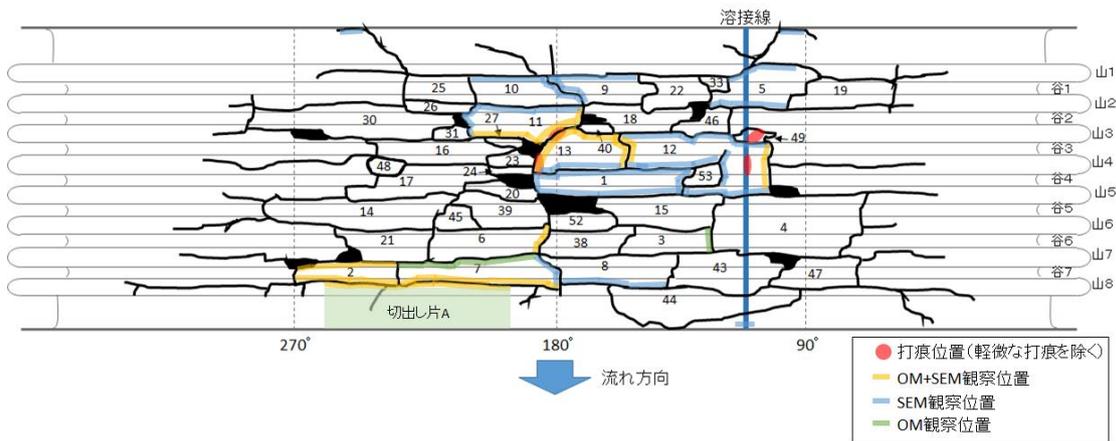


図 18-1 破面観察試料の位置

3 破面観察結果

破面観察の結果、観察した破面の大部分はつぶれており、有益な情報は得られなかったものの、疲労破面を確認した。光学顕微鏡と走査型電子顕微鏡の観察結果の特徴を以下に示す。

3. 1 光学顕微鏡観察結果

観察範囲について光学顕微鏡観察を実施した結果を以下に示す。

代表として、破片 No. 11, 13 の観察結果を別紙 1 に示す。

- 打痕 A 近傍である破片 No. 11, 13 (軸方向破面) の光学顕微鏡観察の結果、谷側破面の破損が山側破面と比較して著しい。
- 打痕 A 近傍である破片 No. 11, 13 (軸方向破面) の光学顕微鏡観察の結果、打痕がついている箇所の破面 (断面) は、ペローズの山が大きくつぶれ

ていることを確認した。

3. 2 走査型電子顕微鏡観察結果

観察範囲について走査型電子顕微鏡観察を実施した結果を以下に示す。

代表として、破片No. 1, 5, 11, 切出し片Aの観察結果を別紙2に示す。

- 打痕 A 近傍である破片 No. 11 (軸方向破面) の破面のうち、比較的破面の損傷が小さい山側破面の走査型電子顕微鏡観察の結果、全体的に破面がつぶれていた。
- 打痕 A 近傍である破片 No. 1 (軸方向/周方向破面) の走査型電子顕微鏡観察の結果、全体的に破面はつぶれていたが、一部に疲労破壊の特徴であるストライエーション状模様が確認された。
- 打痕 A 近傍である破片 No. 1 の軸方向破面において、山 4 から山 5 にかけてき裂が進展しているストライエーション状模様が確認された。
- 打痕 A 近傍である破片 No. 1 の周方向破面 (山 5 側) においてストライエーション状模様が確認され、ベローズの内外表面からき裂が進展していた。
- 溶接部を含む破片 No. 5 の走査型電子顕微鏡観察の結果、全体的に破面はつぶれていたが、疲労破壊の特徴であるストライエーション状模様が確認された。
- 山 8 周方向破面である切出し片 A の走査型電子顕微鏡観察の結果、全体的に破面はつぶれていたが、疲労破壊の特徴であるストライエーション状模様、及びラチェットマーク^{※1}が確認された。

4 破面観察結果のまとめ

2 項, 3 項をまとめた結果を図 18-2 に示す。

※1 ラチェットマークとは、単一平面にない複数の箇所からき裂が発生し、それらが進展し合体したときの痕跡であり、その近傍がき裂の起点であることを示す。

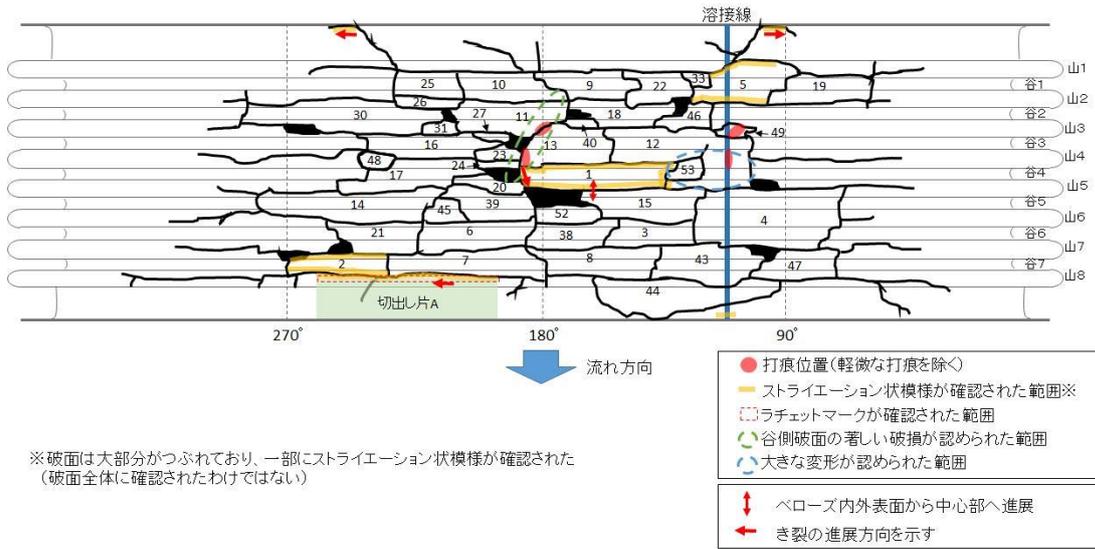
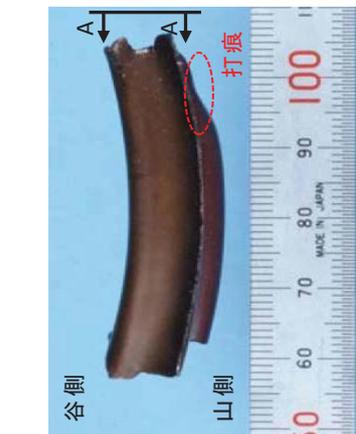


図18-2 き裂の進展方向

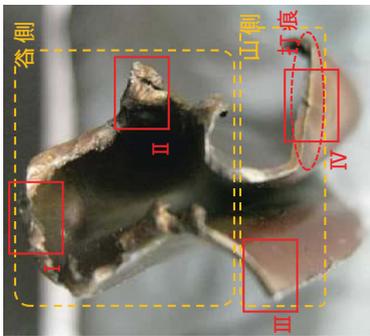
破面観察結果（光学顕微鏡観察）＜破片No. 11／破片No. 13軸方向＞

＜破片No. 11／破片No. 13軸方向観察結果まとめ＞

- ・ 谷側破面の損傷が激しく、大きくくめられるような変形をしていた。
- ・ 山側破面の損傷の程度は比較的小さく、打痕部は大きく変形していた。



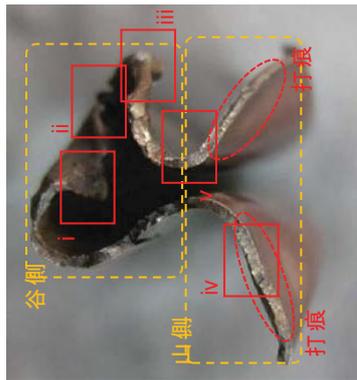
破片No. 11 山2側外観



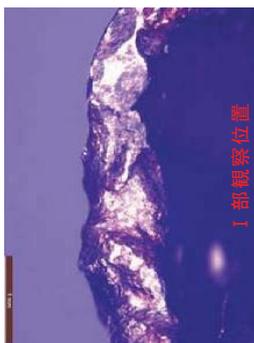
A-A矢視



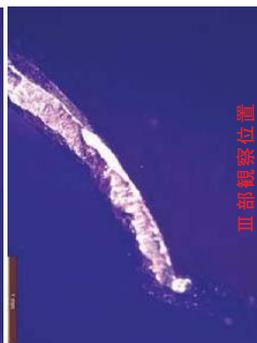
破片No. 13 山4側外観



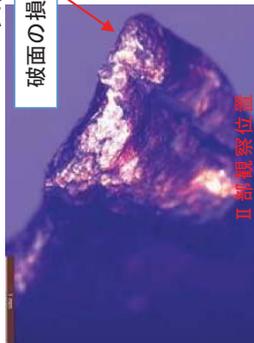
A-A矢視



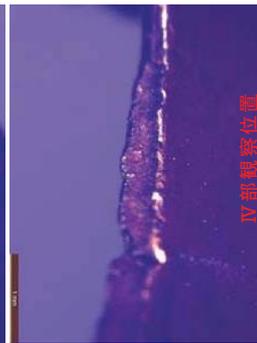
I 部観察位置



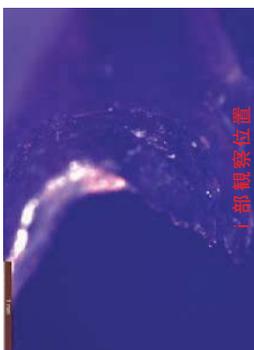
III 部観察位置



II 部観察位置



IV 部観察位置



I 部観察位置



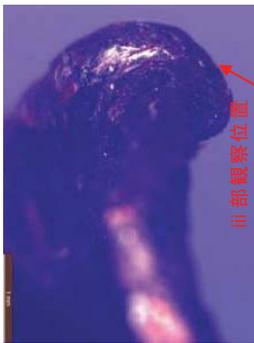
IV 部観察位置



II 部観察位置



V 部観察位置



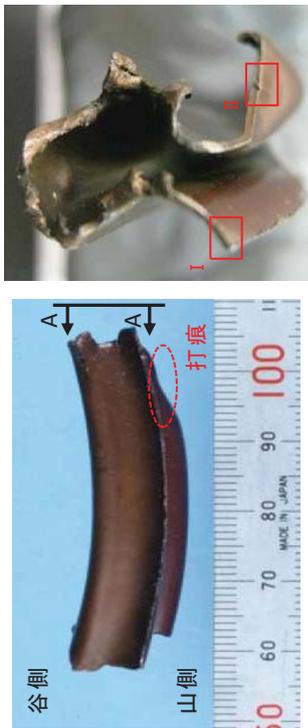
III 部観察位置

添付資料 18 (4 / 9)
別紙 1

破面の
損傷が
激しい

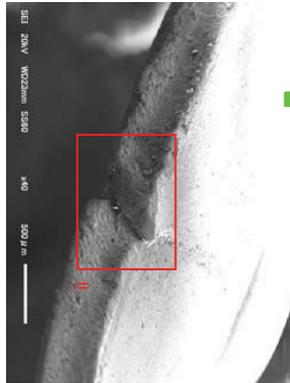
破面観察結果 (走査型電子顕微鏡観察) <破片No. 11軸方向>

<破片No. 11 (軸方向) 観察結果まとめ>
・山側破面の大部分がつぶれていた。

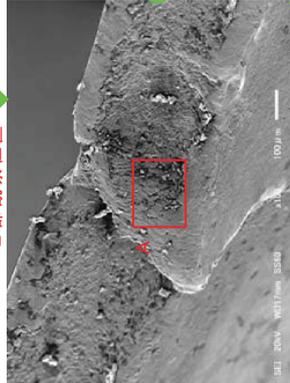


A-A矢視

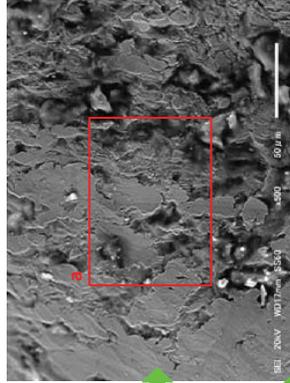
破片No. 11 山2側外観



I部観察位置

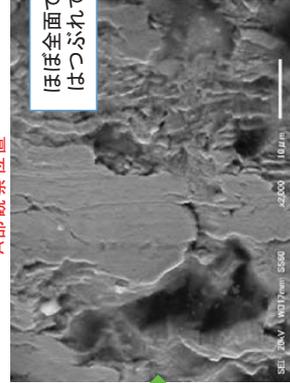


II部観察位置



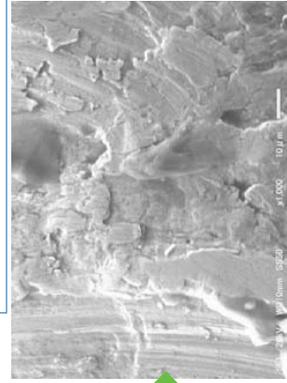
A部観察位置

ほぼ全面で破面はつぶれている

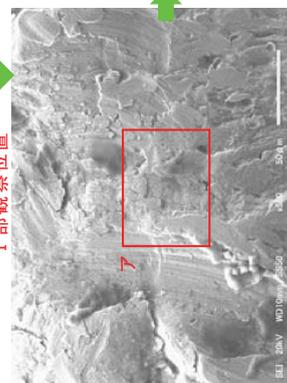


ア部観察位置

ほぼ全面で破面はつぶれている



ア部観察位置



I部観察位置

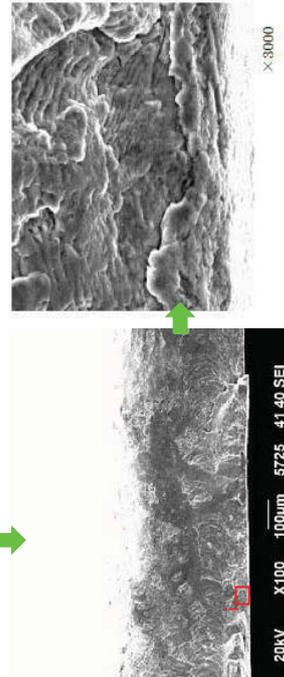
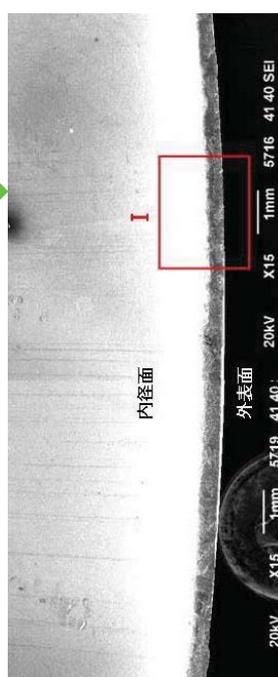
破面観察結果 (走査型電子顕微鏡観察) <破片No. 1円周方向>

<破片No. 1 (円周方向) 観察結果まとめ>

- ・内外表面から内側に向かう疲労き裂を観察した。
- ・疲労破壊の特徴であるストライエーション状模様を観察した。

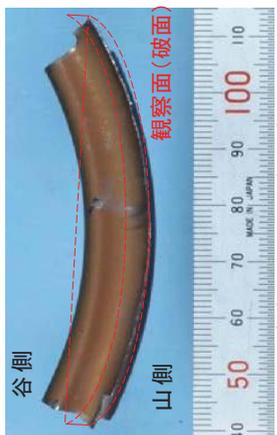


破片No. 1 山5側外観

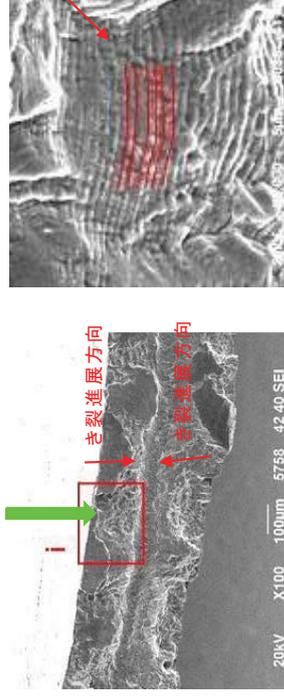
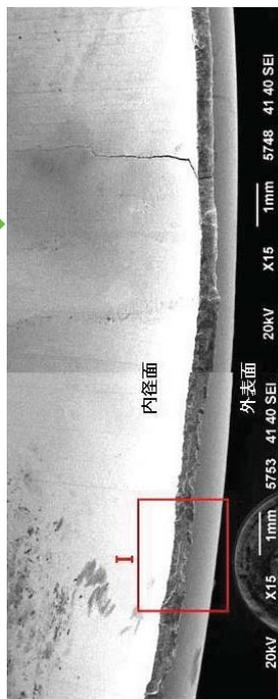


I 部観察位置

I 部観察位置

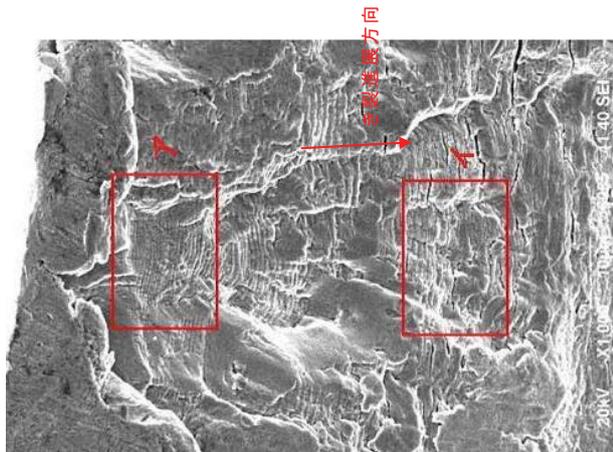


破片No. 1 山4側外観



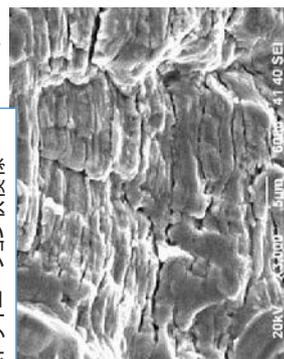
I 部観察位置

I 部観察位置



I 部観察位置

ストライエーション状模様

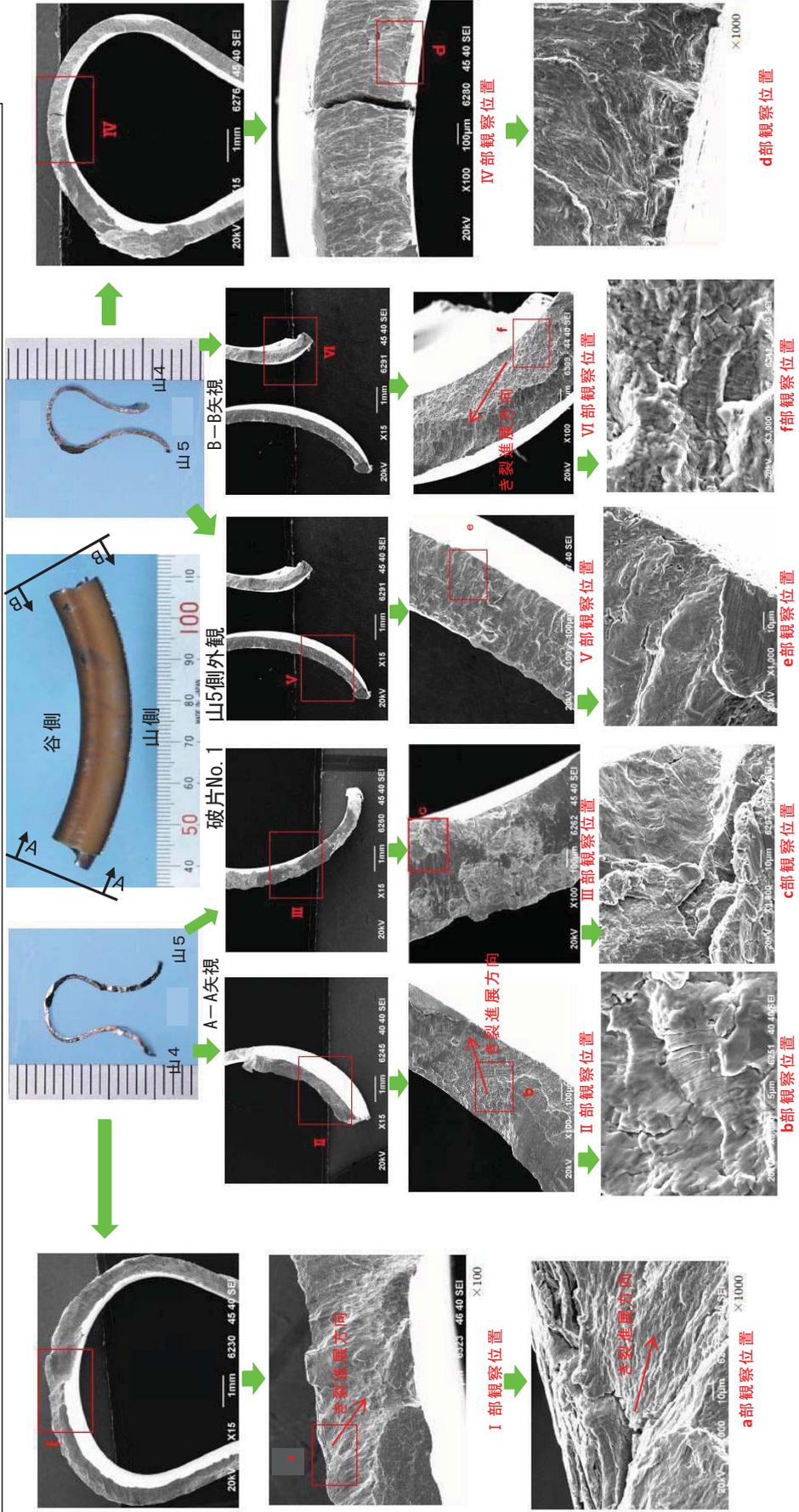


I 部観察位置

破面観察結果 (走査型電子顕微鏡観察) <破片No. 1軸方向>

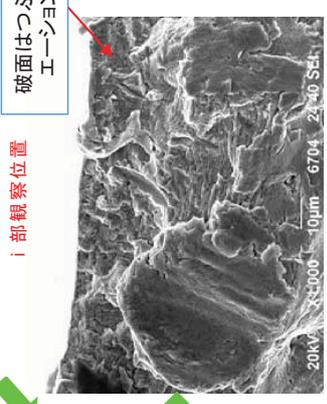
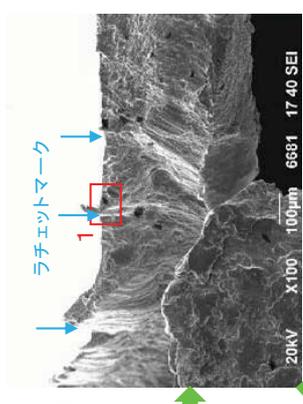
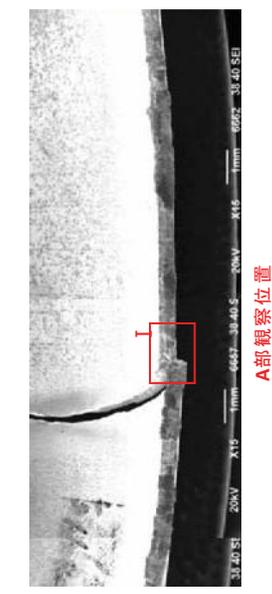
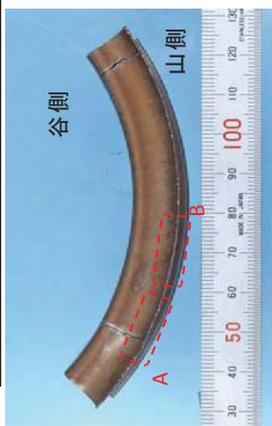
<破片No. 1 (軸方向) 観察結果まとめ>

- ・破面の損傷が著しいが、軸方向の破面からは4山目から5山目 (上流から下流) 方向に向かうき裂の進行方向を観察した。
- ・ストライエーション状模様を観察し、軸方向のき裂においても疲労き裂を観察した。

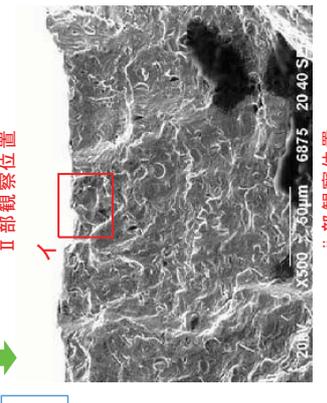
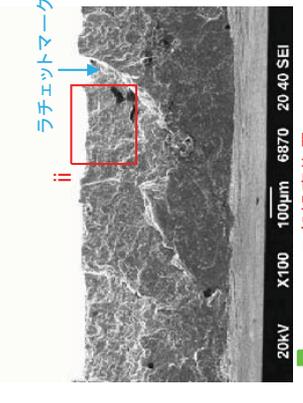
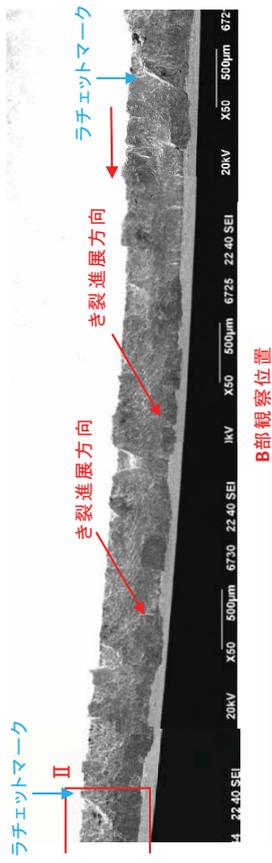


破面観察結果（走査型電子顕微鏡観察）＜切出し片A円周方向＞

＜切出し片A（円周方向）観察結果まとめ＞
 ・ラチエットマークを確認した。
 ・ストライエーション状模様を観察した。



i部観察位置



ii部観察位置

添付資料 18 (9 / 9)
 別紙 2 (5 / 5)

i部観察位置

i部観察位置

D/G 排気管伸縮継手の外観確認結果

1 目的

当該排気管伸縮継手の原因調査において、ベローズに打痕を確認したため、同型機関である 5 号機 D/G(A), (B), (C)の排気管伸縮継手に打痕がないことを確認する。

2 確認方法

排気管伸縮継手の保温材を取外した状態において、外観目視点検により打痕の有無を確認する。狭隘部については、手鏡及びライトを用いて確認を行う。

また、打痕を確認した箇所については、直尺を用いて寸法測定を行い、浸透探傷検査により、き裂・割れの有無を確認する。

3 確認結果

表 19-1 のとおり、5 個の排気管伸縮継手に打痕を確認した。(平成 30 年 7 月 18 日)

また、打痕を確認した箇所の浸透探傷検査の結果、5 個の排気管伸縮継手のうち、4 個に打痕による円形状の指示模様を確認したが、き裂・割れとなる線状の指示は確認されなかった。

表 19-1 打痕確認箇所

対象号機	打痕を確認した伸縮継手	備考
D/G(A)	A2	図 19-2 参照
D/G(B)	A7	図 19-3 参照
	A12	図 19-4 参照
	B5	図 19-5 参照
	B12	図 19-6 参照
D/G(C)	なし	-

4 打痕を確認した排気管伸縮継手に対する処置

打痕を確認した箇所にき裂・割れは確認されなかったものの、今後、当該排気管伸縮継手と同様に打痕を起点として破損する可能性があることから、打痕を確認した排気管伸縮継手については、新品への取替えを実施した。

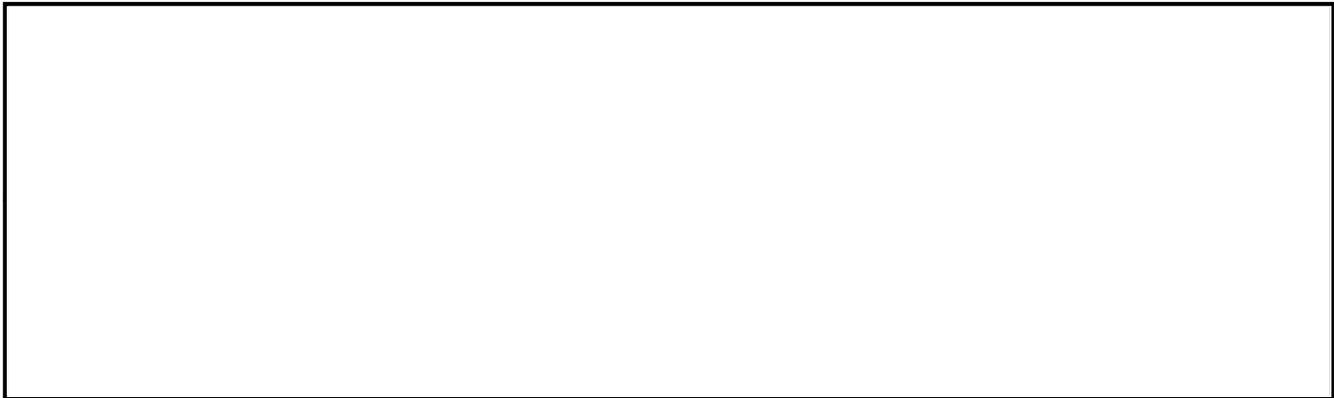
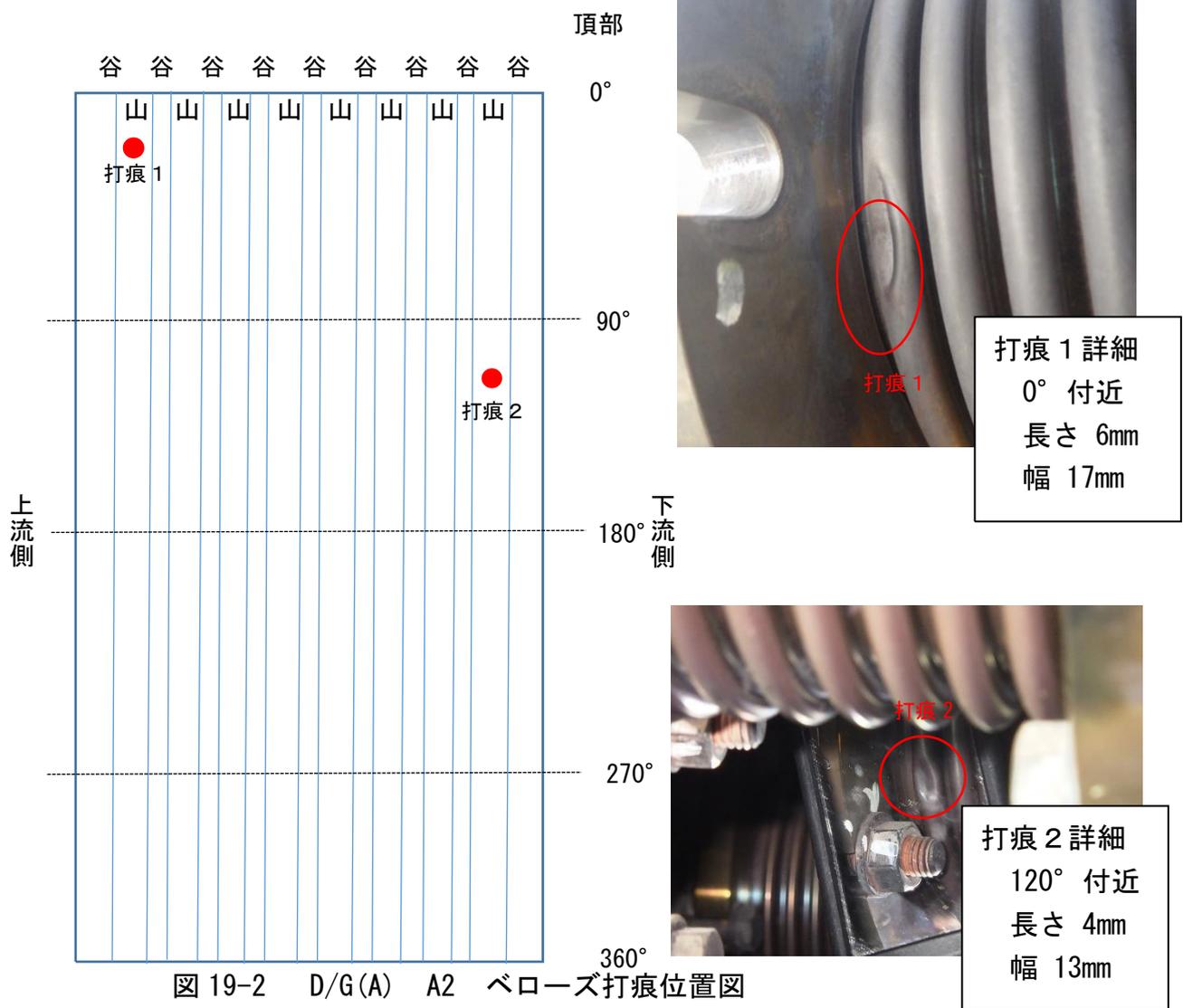


図 19-1 排気管伸縮継手概略図



本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

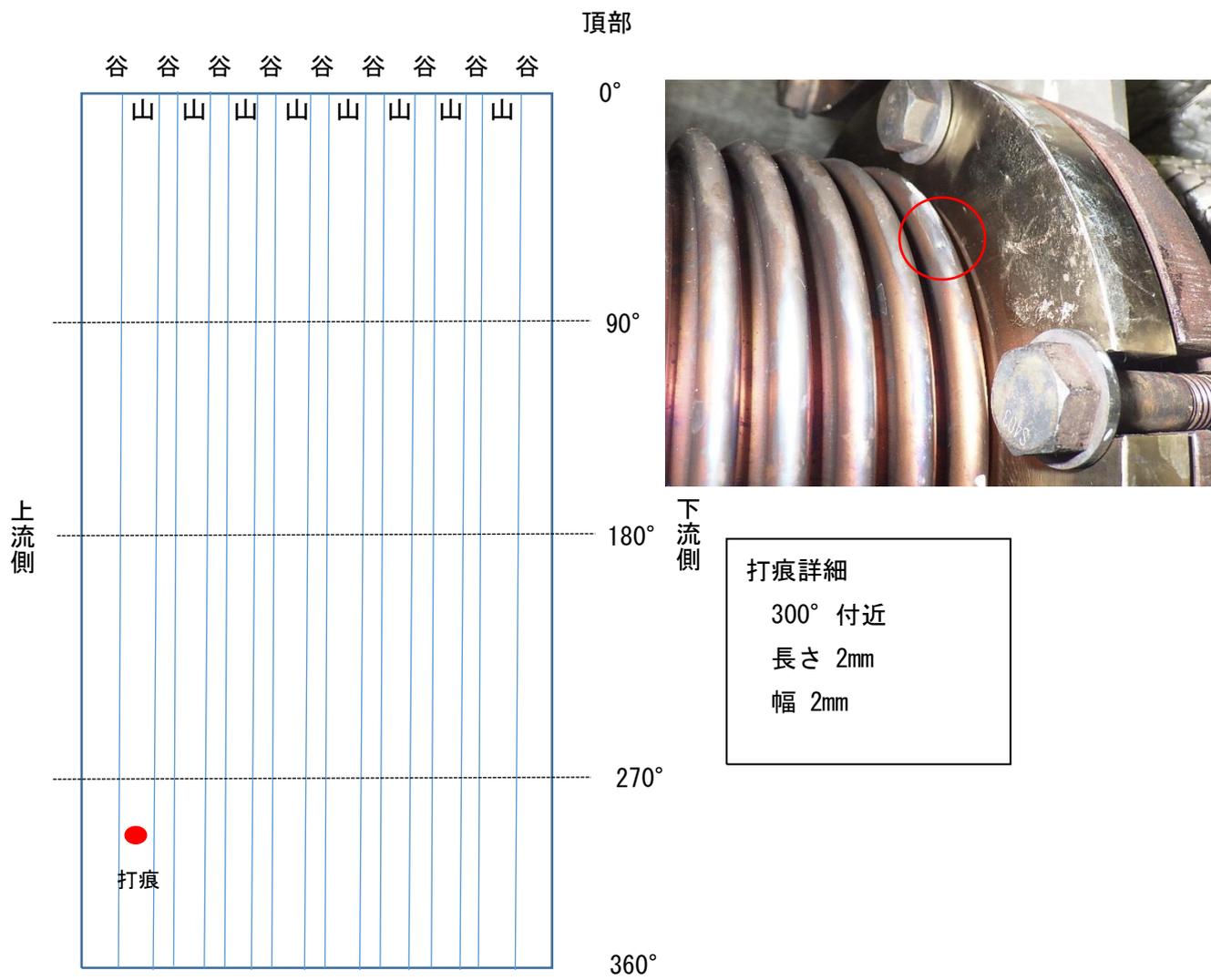


図 19-3 D/G(B) A7 ベローズ打痕位置図

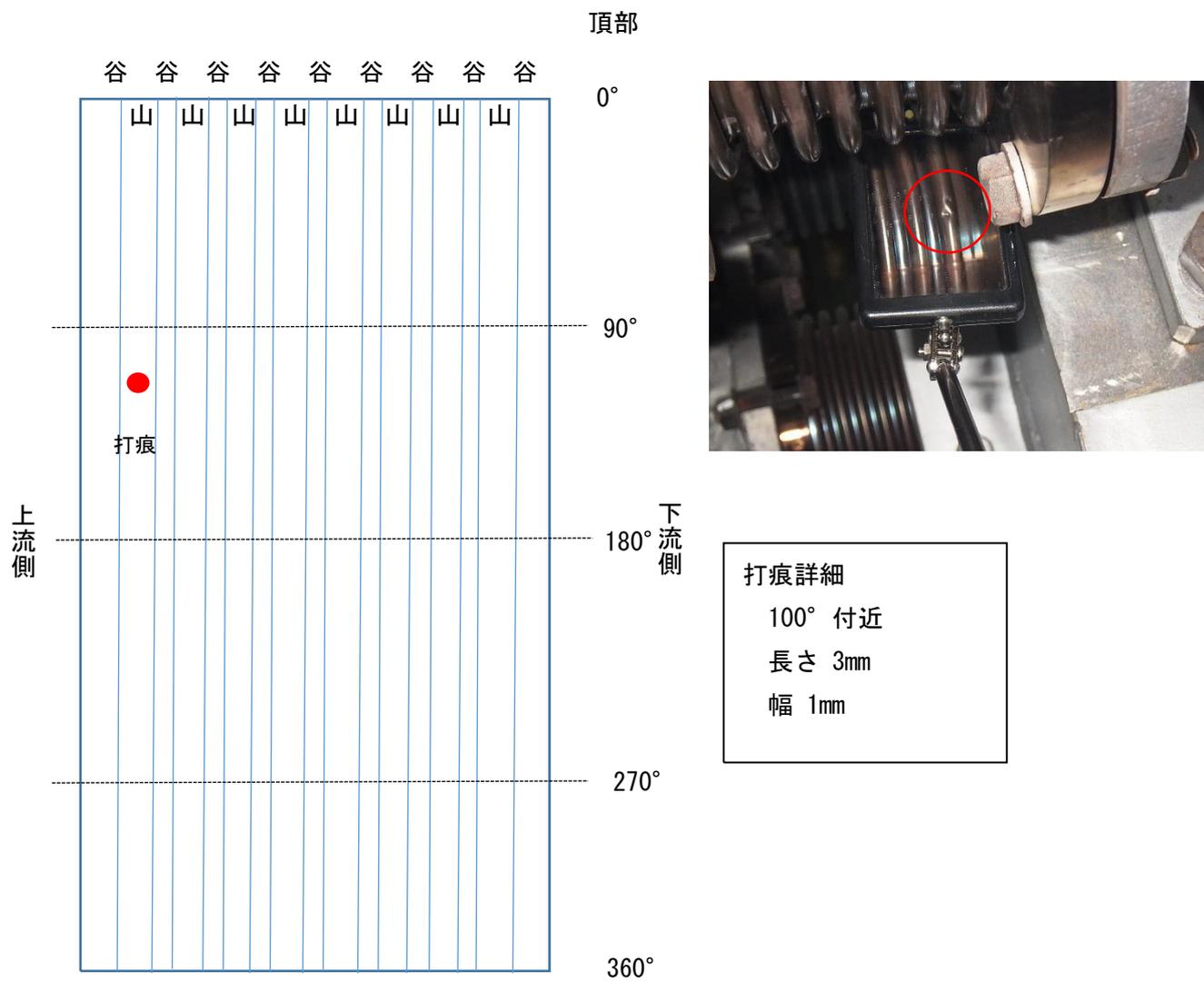


図 19-4 D/G(B) A12 ベローズ打痕位置図

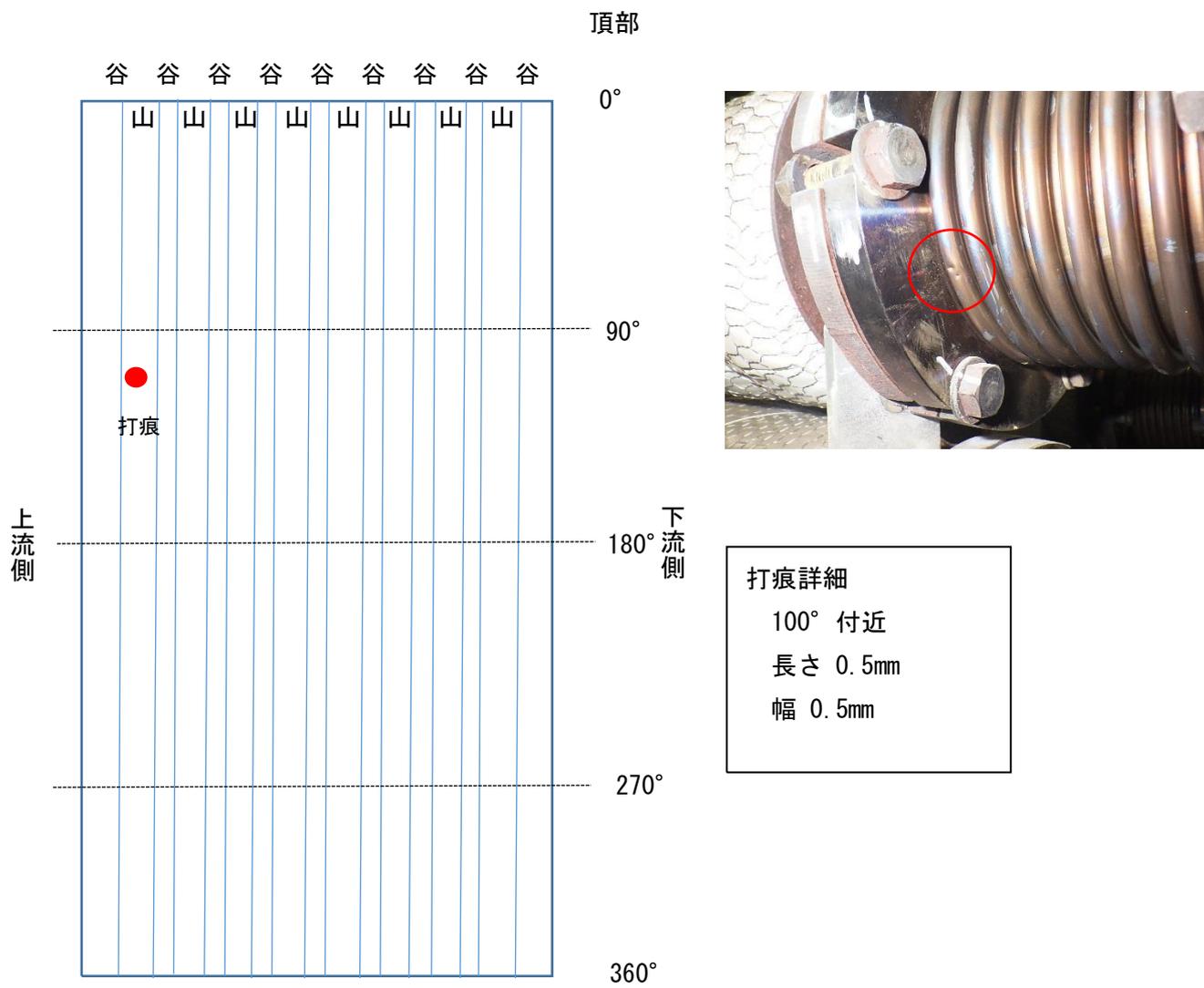


図 19-5 D/G(B) B5 ベローズ打痕位置図

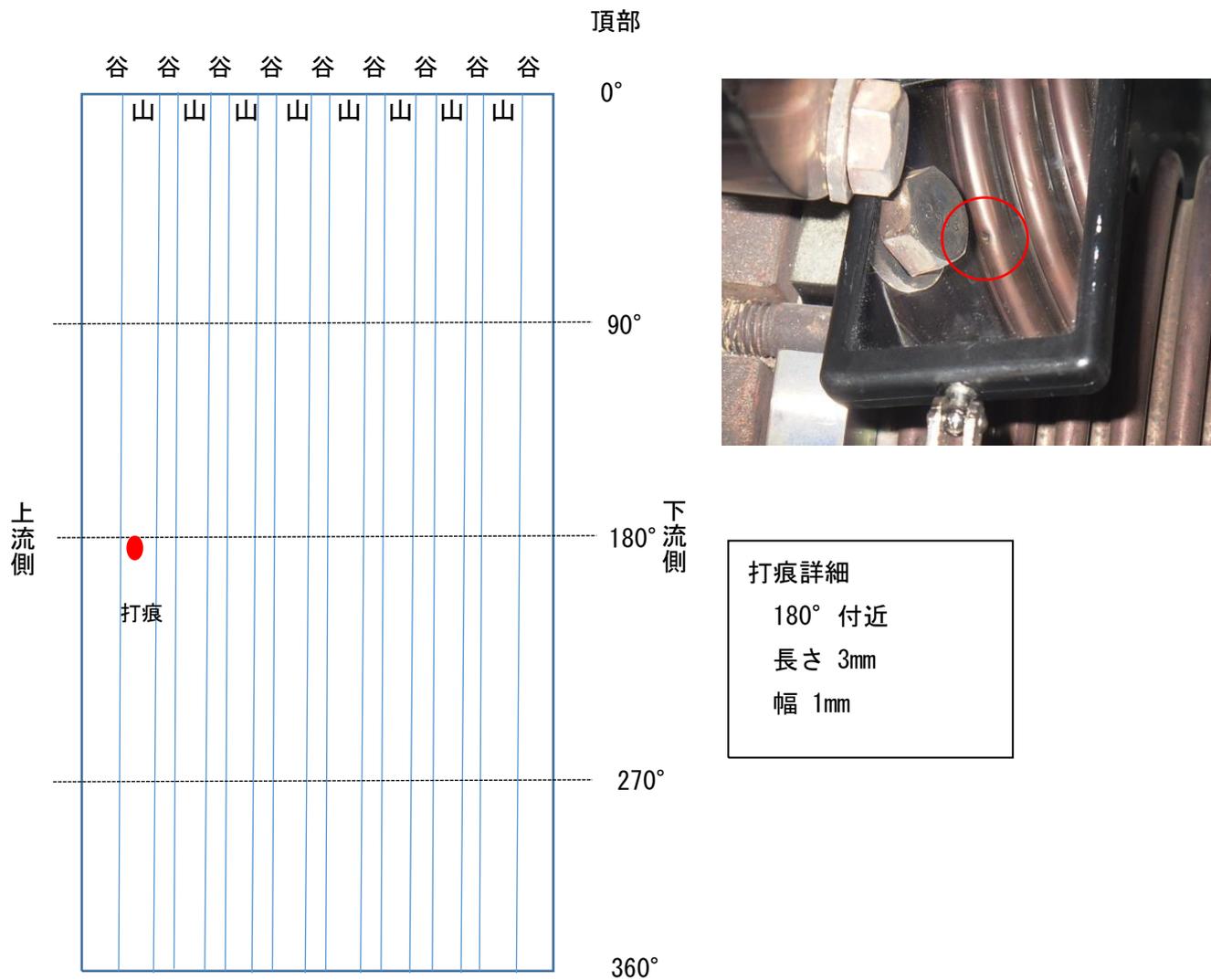


図 19-6 D/G(B) B12 ベローズ打痕位置図

要因調査結果及び評価
(設計検証プロセス)

【要因】	設計—強度不足—設計不良—構造強度の設計不良	
	設計的に強度が不足する場合又は過去の排気管伸縮継手のベローズ不具合事例の対策が行われていない場合、ベローズが破損する可能性がある。	
【調査方法】	ディーゼル機関メーカー及び排気管伸縮継手メーカーにおける排気管伸縮継手の不具合事例に対する設計変更及び設計検証履歴を確認する。	
【調査結果】	<p>排気管伸縮継手の設計に係る不具合事例は、ディーゼル機関メーカーから排気管伸縮継手メーカーへ情報提供される。排気管伸縮継手メーカーが対策の検討を行い、設計変更及び設計検証が行われ、ディーゼル機関メーカーへ報告されるプロセスが確立していることをディーゼル機関メーカー、排気管伸縮継手メーカーへの聞き取り及び工場立入により確認した。</p> <p>当社において平成 19 年に発生した排気管伸縮継手の破損事例について、ISO9001 に基づく品質保証プロセスに従い破損対策を検討し、設計変更が行われ、図面（図 21-2）が改訂され、ディーゼル機関メーカーへ設計変更が共有されていることを確認した。</p> <p>また、ディーゼル機関メーカーで把握する同種の排気管伸縮継手の一般産業における不具合 <input type="checkbox"/> は、設計に係るものではないことを確認した。</p>	
【評価】	×	不具合事例の報告を受けて設計変更が行われるプロセスが確立されており、過去に破損事例を受けた対策として設計変更が適切に実施されていることから、要因ではない。

[評価欄記号説明]

×：要因ではない

△：複合要因の一つとして考えられる

○：主要因と推定される

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

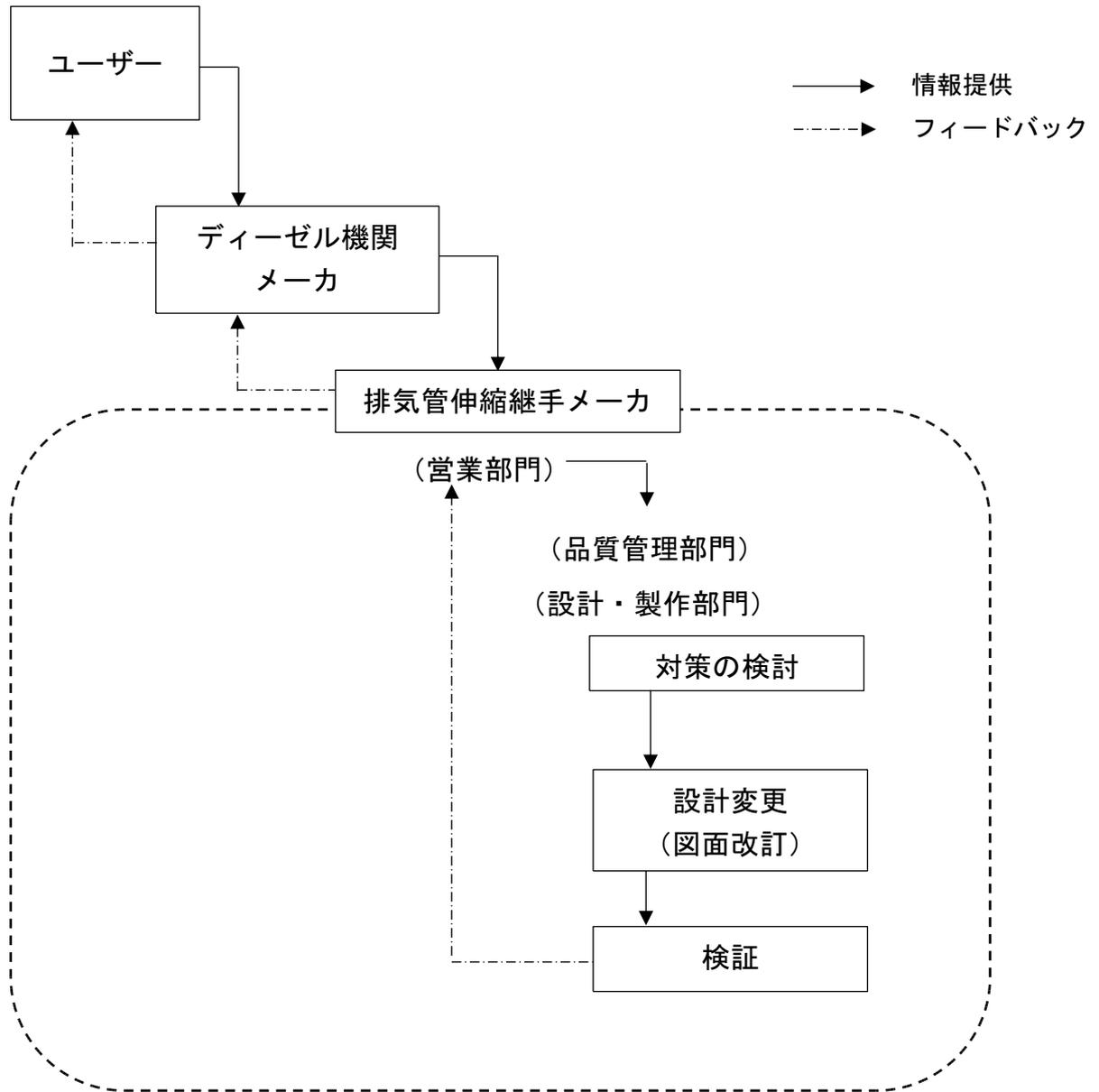


図 21-1 不具合事例反映プロセス図

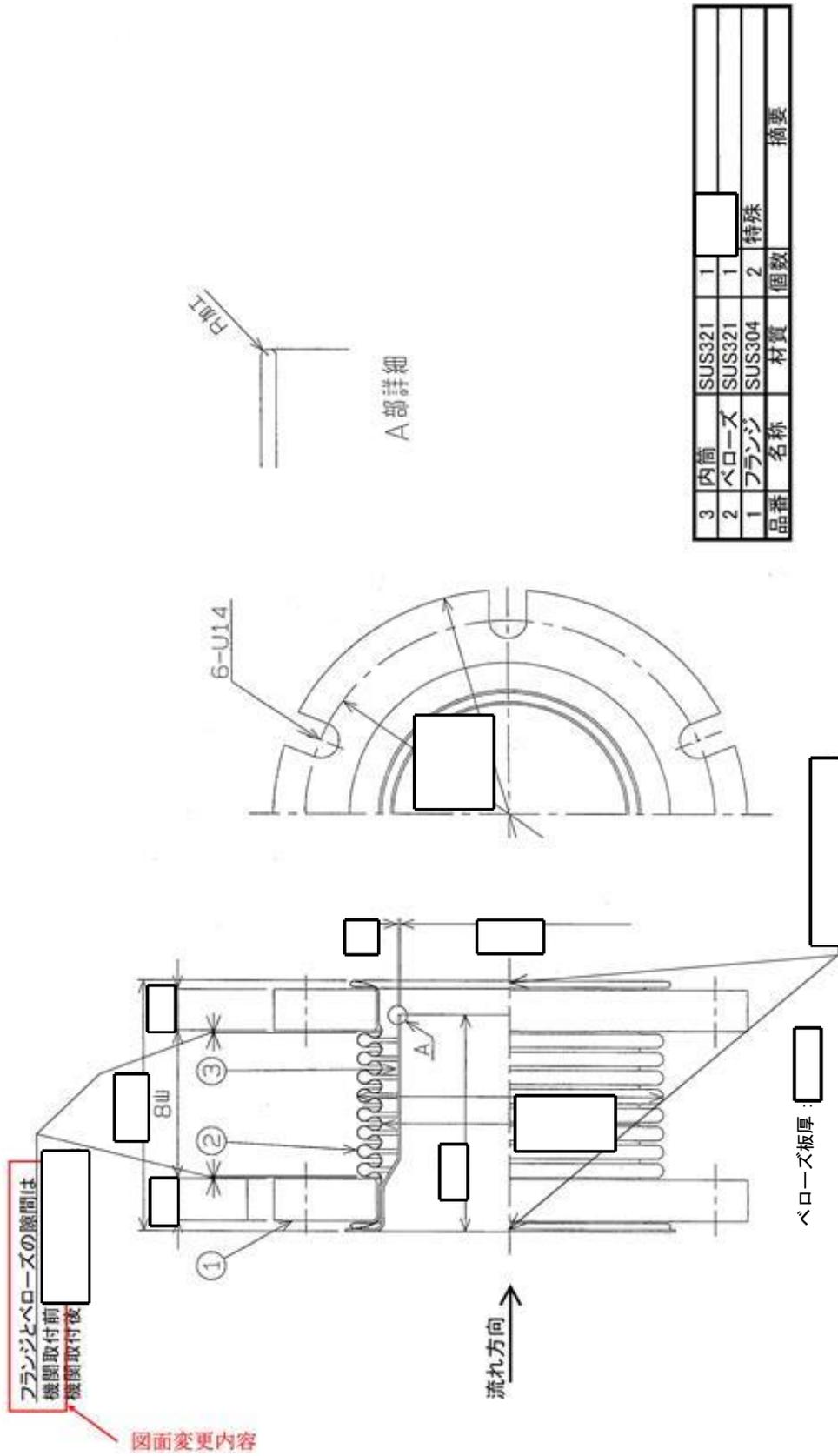


図 21-2 排気管伸縮継手構造図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

要因調査結果及び評価
(ベローズの設計要件)

<p>【要因】</p>	<p>設計—強度不足—設計不良—構造強度の設計不良</p> <p>設計的に強度が不足する場合又は過去のベローズ不具合事例の対策が行われていない場合、ベローズが破損する可能性がある。</p>														
<p>【調査方法】</p>	<p>設計上の構造強度の妥当性を確認するため、ベローズを含む排気管伸縮継手の設計要件が D/G の設計要件と合致していること及び実環境を想定して規定されていることを確認する。</p>														
<p>【調査結果】</p>	<p>排気管伸縮継手の設計要件を表 22-1 に示す。</p> <p>表 22-1 排気管伸縮継手設計要件</p> <table border="1" data-bbox="523 882 1267 1516"> <thead> <tr> <th>設計要目</th> <th>設計要件</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>① 材質</td> <td>ベローズ : SUS321 内筒 : SUS321 フランジ : SUS304</td> </tr> <tr> <td>② 寸法</td> <td>製作全長 : <input type="text"/> 取付全長 : <input type="text"/></td> </tr> <tr> <td>③ 使用流体</td> <td>排気ガス</td> </tr> <tr> <td>④ 圧力</td> <td rowspan="5"><input type="text"/></td> </tr> <tr> <td>⑤ 温度</td> </tr> <tr> <td>⑥ 軸方向変位</td> </tr> <tr> <td>⑦ 軸直角方向変位</td> </tr> <tr> <td>⑧ 繰り返し寿命回数</td> </tr> </tbody> </table> <p>排気管伸縮継手の設計要件について、以下のとおり D/G の設計要件と合致していること及び実使用環境を考慮して規定されていることを確認した。</p> <p>① 材質 (SUS321)</p> <p>D/G 過給機入口排気温度の上限値は <input type="text"/> であるため、高温クリープ特性に優れる SUS321 を選定している。また、D/G(B) の定格運転時の機関排気ガス温度が約 <input type="text"/> であることを確認した。</p> <p>② 寸法</p>	設計要目	設計要件	① 材質	ベローズ : SUS321 内筒 : SUS321 フランジ : SUS304	② 寸法	製作全長 : <input type="text"/> 取付全長 : <input type="text"/>	③ 使用流体	排気ガス	④ 圧力	<input type="text"/>	⑤ 温度	⑥ 軸方向変位	⑦ 軸直角方向変位	⑧ 繰り返し寿命回数
設計要目	設計要件														
① 材質	ベローズ : SUS321 内筒 : SUS321 フランジ : SUS304														
② 寸法	製作全長 : <input type="text"/> 取付全長 : <input type="text"/>														
③ 使用流体	排気ガス														
④ 圧力	<input type="text"/>														
⑤ 温度															
⑥ 軸方向変位															
⑦ 軸直角方向変位															
⑧ 繰り返し寿命回数															

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

	<p>D/G の排気管伸縮継手取付け部面間寸法が [] であり排気管に取付け可能なことを確認した。また、D/G(B)において排気管伸縮継手取付け部面間寸法が 135.5~135.6mm であることを確認した。</p> <p>③ 使用流体 D/G の設計要件で指示している使用流体は排気ガスである。また、D/G(B)において使用流体が排気ガスであることを確認した。</p> <p>④ 圧力 [] D/G(B) の工場運転時の排気ガス圧力実測値は約 [] であることを確認した。</p> <p>⑤ 温度 [] D/G 過給機入口排気温度の上限値は [] である。また、D/G(B) の定格運転時の機関排気ガス温度は約 [] であることを確認した。</p> <p>⑥ 軸方向の変位量 [] D/G(B) にて排気管伸縮継手の変位量測定を実施した結果、変位量は約 7.8mm であることを確認した。</p> <p>⑦ 軸直角方向の変位量 [] D/G(B) にて排気管伸縮継手の変位量測定を実施した結果、変位量は約 1mm であり、図 22-1 に示す熱変位量の許容値を満足していることを確認した。</p> <p>⑧ 繰り返し寿命回数 [] 以上) 原子力発電所向けの D/G の発停回数は 20~40 回/年を想定していることから、繰り返し寿命回数は [] 以上としている。排気管伸縮継手の厚さ等の仕様をもとに、排気管伸縮継手メーカー基準に基づき繰り返し寿命回数を計算した結果、表 22-1 に示すとおり [] 以上を満足していることを確認した。当該計算では、JIS B 2352 ケログの梁理論と同様の応力算出を行い、一般的に採用されている EJMA^{※1} の式により繰り返し寿命回数が算出されている。 また、5 号機 D/G における起動回数は最大で D/G (A) の約 580 回であり、繰り返し寿命回数に至っていない。</p>
--	--

※1 Expansion Joint Manufacturers Association : 伸縮継手製造者協会 (米)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

【評価】	×	ベローズを含む排気管伸縮継手の設計要件を確認した結果、D/G の設計要件と合致していること及び実使用環境に対して十分余裕を考慮して規定されていることから、要因ではない。
------	---	--

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される



図 22-1 フランジの軸方向-軸直角方向熱変位量の許容値

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表 22-1 排気伸縮継手・強度計算書シート(1/2)

仕 様	口径		(A)		ベローズ仕様								
	流体		(P)		(kgf/cm ²)				内径	id	(mm)		
	圧力				(°C)				外径	od	(mm)		
	温度				(+X)				(mm)	平均径	dp	(mm)	
	変 位 量				軸方向				(-X)	(mm)	ピッチ	q	(mm)
					軸直角方向				(+Y)	(mm)	山高	w	(mm)
									(-Y)	(mm)	山数	N	
	角変位				(θ)				(°)	有効長	L	(mm)	
	ベローズ材料規格				JISG4305				板厚	t	(mm)		
	材質				SUS321				層数	n			
	ヤング率				(E)				(kgf/mm ²)	円弧部半径	R	(mm)	
										形状係数	C		
強 度 計 算													

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表 22-1 排気伸縮継手・強度計算書シート (2/2)

仕 様	口径		(A)		ベローズ仕様						
	流体				内径				id (mm)		
	圧力		(P)		(kgf/cm ²)				外径	od (mm)	
	温度				(°C)				平均径	dp (mm)	
	変 位 量		軸方向		(+X)				(mm)	ピッチ	q (mm)
					(-X)				(mm)	山高	w (mm)
			軸直角方向		(+Y)				(mm)	山数	N
					(-Y)				(mm)	有効長	L (mm)
			角変位		(θ)				(°)	板厚	t (mm)
	ベローズ材料規格				JISG4305					層数	n
	材質				SUS321					円弧部半径	R (mm)
	ヤング率		(E)		(kgf/mm ²)					形状係数	C
強 度 計 算											

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

要因調査結果及び評価
(使用材料特性)

【要因】	<p style="text-align: center;">設計—強度不足—設計不良—構造強度の設計不良</p> <p>設計的に強度が不足する場合又は過去のベローズ不具合事例の対策が行われていない場合、ベローズが破損する可能性がある。</p>	
【調査方法】	<p>ベローズの想定使用温度条件に適した材料を選定していることを確認する。</p>	
【調査結果】	<p>ベローズの想定使用温度条件（最高使用温度：<input type="text"/>）において、SUS304等の通常のオーステナイトステンレス鋼を長時間使用すると粒界腐食感受性が高くなる。そのため、Ti（チタン）の添加により、材料の鋭敏化を防ぎ、高温クリープ特性に優れた SUS321（400～900℃の腐食条件で使われる高温用の溶接構造品）を選定している。</p>	
【評価】	×	<p>ベローズの想定使用温度条件に適した材料（SUS321）を選定しているため、要因ではない。</p>

[評価欄記号説明]

- ×：要因ではない
- △：複合要因の一つとして考えられる
- ：主要因と推定される

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

要因調査結果及び評価
(材質)

【要因】	製作—強度不足—材料不良—機械的性質及び化学成分不良																																											
	材料不良が生じた場合、ベローズが破損する可能性がある。																																											
【調査方法】	ベローズの材質が、設計で規定した材質の JIS 規格値を満足していることを調達時の試験検査記録により確認する。																																											
【調査結果】	<p>試験検査記録を確認した結果、ベローズの材質は設計どおり SUS321 であることを確認した。また、機械的性質及び化学成分は、下表に示すとおり、それぞれ JIS G4305 2012 の SUS321 の規格値を満足していることを確認した。</p> <p style="text-align: center;">表 24-1 機械的性質</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 20%;"></th> <th style="width: 15%;">耐力 N/mm² (kg/mm²)</th> <th style="width: 15%;">引張強さ N/mm² (kg/mm²)</th> <th style="width: 15%;">伸び %</th> <th style="width: 15%;">硬さ HV</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>JIS G 4305 2012 SUS321</td> <td>205 以上</td> <td>520 以上</td> <td>40 以上</td> <td>200 以下</td> </tr> <tr> <td>ミルシート</td> <td>235 (24)</td> <td>588 (60)</td> <td>63</td> <td>156</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">表 24-2 化学成分 (%)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;"></th> <th style="width: 7%;">C</th> <th style="width: 7%;">Si</th> <th style="width: 7%;">Mn</th> <th style="width: 7%;">P</th> <th style="width: 7%;">S</th> <th style="width: 7%;">Ni</th> <th style="width: 7%;">Cr</th> <th style="width: 7%;">Ti</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>JIS G 4305 2012 SUS321</td> <td>0.08 以下</td> <td>1.00 以下</td> <td>2.00 以下</td> <td>0.045 以下</td> <td>0.030 以下</td> <td>9.00 ~ 13.00</td> <td>17.00 ~ 19.00</td> <td>5×C 以上</td> </tr> <tr> <td>ミルシート</td> <td>0.039</td> <td>0.41</td> <td>1.49</td> <td>0.026</td> <td>0.007</td> <td>9.10</td> <td>17.40</td> <td>0.34</td> </tr> </tbody> </table>			耐力 N/mm ² (kg/mm ²)	引張強さ N/mm ² (kg/mm ²)	伸び %	硬さ HV	JIS G 4305 2012 SUS321	205 以上	520 以上	40 以上	200 以下	ミルシート	235 (24)	588 (60)	63	156		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti	JIS G 4305 2012 SUS321	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	9.00 ~ 13.00	17.00 ~ 19.00	5×C 以上	ミルシート	0.039	0.41	1.49	0.026	0.007	9.10	17.40	0.34
		耐力 N/mm ² (kg/mm ²)	引張強さ N/mm ² (kg/mm ²)	伸び %	硬さ HV																																							
JIS G 4305 2012 SUS321	205 以上	520 以上	40 以上	200 以下																																								
ミルシート	235 (24)	588 (60)	63	156																																								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti																																				
JIS G 4305 2012 SUS321	0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	9.00 ~ 13.00	17.00 ~ 19.00	5×C 以上																																				
ミルシート	0.039	0.41	1.49	0.026	0.007	9.10	17.40	0.34																																				
【評価】	×	ベローズの材質は設計で規定した材質 SUS321 の JIS 規格値を満足していることから、要因ではない。																																										

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

当該排気管伸縮継手のベローズ破片の材料成分分析結果

1 目的

排気管伸縮継手のベローズに使用する材料は SUS321 とディーゼル機関メーカーの設計要件に定まっており、排気管伸縮継手メーカーは、素材の受け入れ検査時にミルシート確認によって、排気管伸縮継手に使用する材料が SUS321 であることを記録確認している。

ここでは、当該排気管伸縮継手に使用された材料が SUS321 であることを実物で確認するため、エネルギー分散型 X 線分析 (EDX) によって破片の成分分析を実施する。

2 調査方法・範囲

当該排気管伸縮継手のベローズの、図 25-1 に示す位置から、ベローズ中央部の破片 No. 1 と溶接部を含む破片 No. 4 について分析用試料を採取し、エネルギー分散型 X 線分析 (EDX) を実施した。

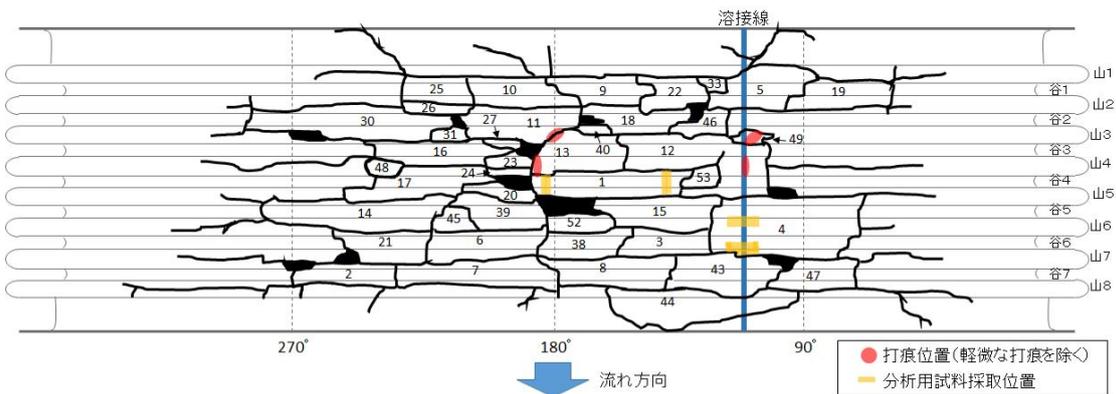


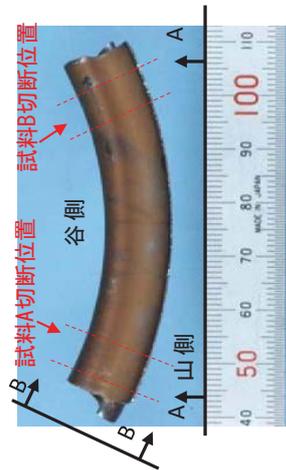
図 25-1 分析用試料採取位置

3 成分分析結果

成分分析の結果を別紙 1 に示す。分析結果は SUS321 の JIS 規定値を満足していることを確認した。

成分分析の結果 (EDX) <破片No.1 / 破片No.4 >

<成分分析の結果のまとめ>
成分分析の結果は、SUS321の規定値 (JIS) を満足している。

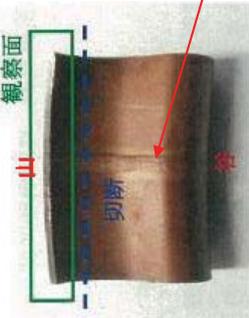


破片No.1 山5側外観

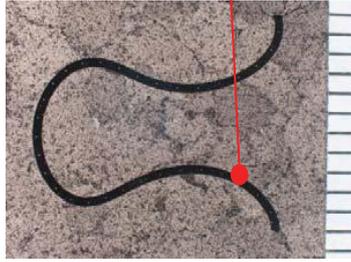
A-A矢視



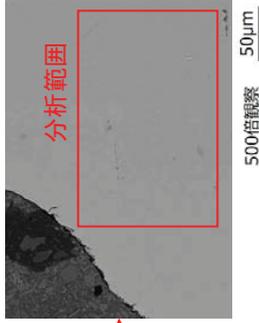
破片No.4 外表面



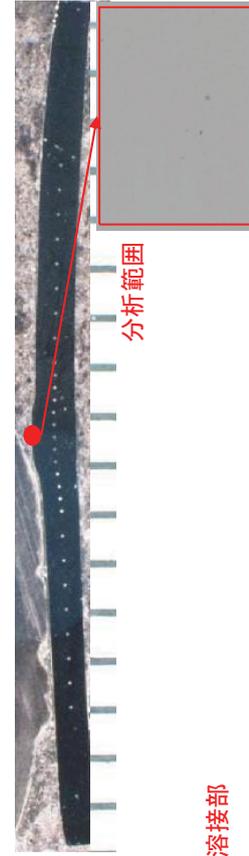
試験C (B-B矢視)



試験A (B-B矢視)



分析位置のイメージ (試験A)



分析位置のイメージ (試験C)

(単位 wt.%)

成分分析結果

	Cr	Ni	Ti	C	Si	Mn	P	S
破片No.1 試験A	17.7	9.2	0.3	-	0.6	1.8	-	-
破片No.1 試験B	17.9	9.0	0.4	-	0.6	1.8	-	-
破片No.4 試験C	17.9	9.2	0.3	-	0.6	1.8	-	-
SUS321 (JIS)	17.00~19.00	9.00~13.00	5×C%以上	0.08以下	1.00以下	2.00以下	0.045以下	0.030以下

※「-」は検出限界以下

要因調査結果及び評価
(排気管伸縮継手製作時の試験検査)

【要因】	<p style="text-align: center;">製作—強度不足—製作不良—許容応力</p> <p>排気管伸縮継手の製作不良が生じた場合、許容応力を超え、ベローズが破損する可能性がある。</p>	
【調査方法】	<p>排気管伸縮継手メーカーの試験検査記録の確認により、当該排気管伸縮継手の製作不良の有無を確認する。</p>	
【調査結果】	<p>当該排気管伸縮継手の試験検査記録（外観・寸法検査成績書、耐圧・漏えい試験成績表）により、判定基準を満足していることを確認した。(図 26-1~3)</p>	
【評価】	×	<p>製作時の試験検査結果が判定基準を満足していることから、要因ではない。</p>

[評価欄記号説明]

- × : 要因ではない
- △ : 複合要因の一つとして考えられる
- : 主要因と推定される

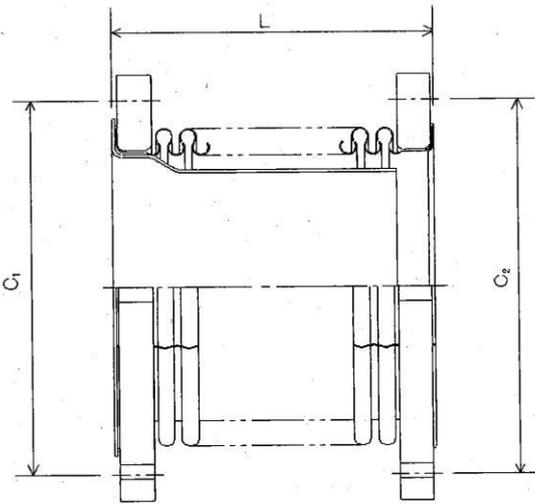
外観・寸法検査成績書			
発電所名	中部電力株式会社殿 浜岡原子力発電所第5号機 向		
設備名	ディーゼル発電機設備	品名	排気伸縮継手
検査年月日	平成20年8月11日	図面番号	<input style="width: 100%;" type="text"/>
製作手配No.	<input style="width: 100%;" type="text"/>	数量	<input style="width: 100%;" type="text"/>
			
(別紙、測定結果のとおり)			
判定 : 合格			

図 26-1 外観・寸法検査成績書 (1/3)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(測定結果)					単位:mm	
測定箇所	フランジ面取付穴ピッチ		全長	ペローズ山数	外観検査	
	C ₁	C ₂	L	8山	・組立状況	・仕上げ状況
				—		
				—		
				8山		良
				8山		良
				8山		良
				8山		良
				8山		良
				8山		良
				8山		良
				8山		良
				8山		良
				8山		良
				8山		良
				8山		良
08-08-13	185.3	185.1	135	8山	良	
				8山	良	
				8山	良	
				8山	良	
				8山	良	
				8山	良	
				8山	良	
				8山	良	
				8山	良	
				8山	良	
				8山	良	

図 26-1 外観・寸法検査成績書 (2/3)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

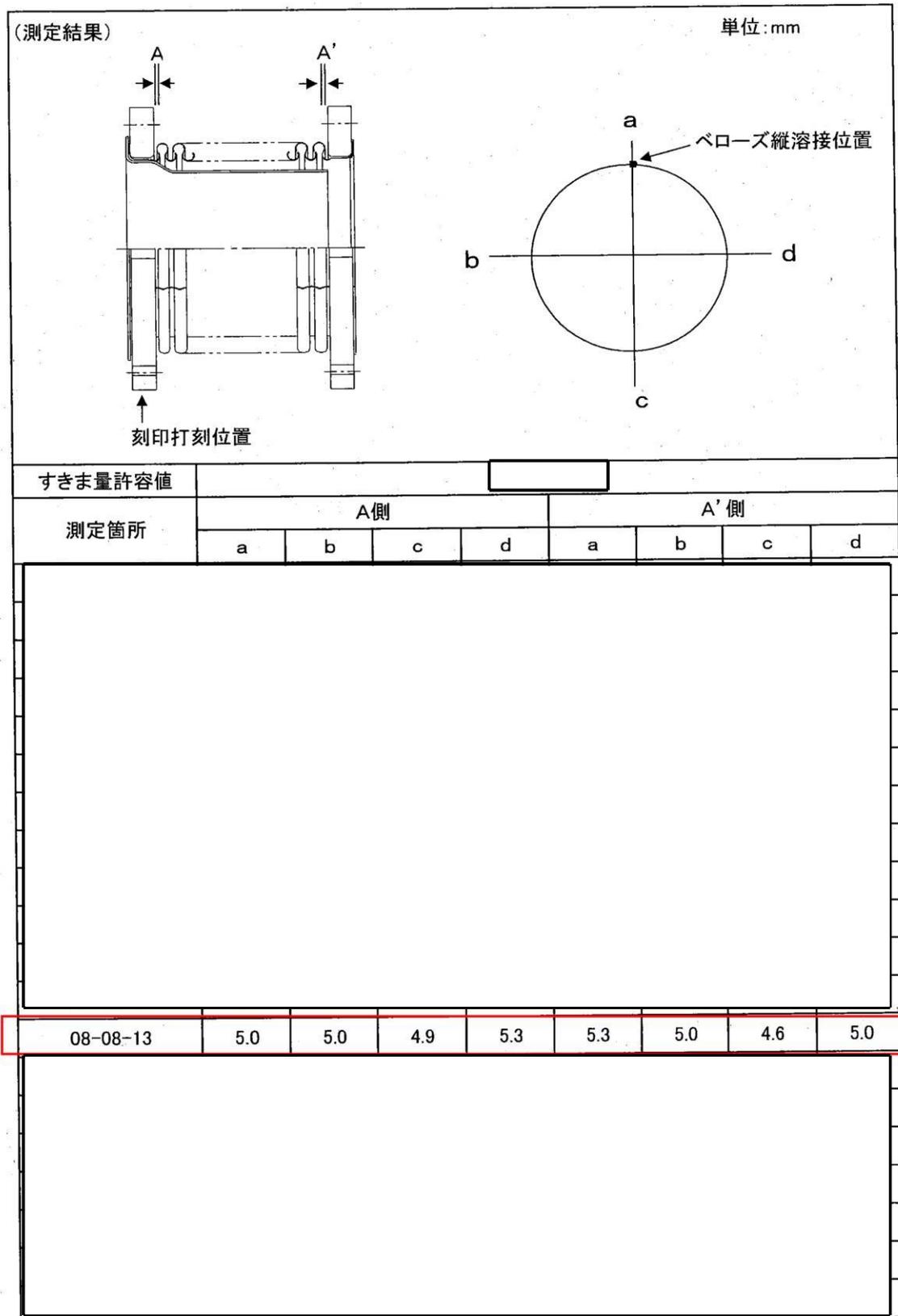


図 26-1 外観・寸法検査成績書 (3/3)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

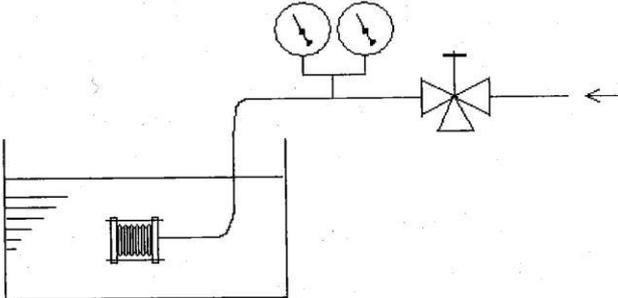
耐圧・漏えい試験成績表			
発電所名	中部電力株式会社 浜岡原子力発電所第5号機 向		
設備名	ディーゼル発電機設備	品名	排気伸縮継手
検査年月日	平成20年8月1日～8日	図面番号	<input style="width: 100px; height: 15px;" type="text"/>
製作手配No.	<input style="width: 100px; height: 15px;" type="text"/>	数量	<input style="width: 100px; height: 15px;" type="text"/>
1. 試験条件			
試験の種類	水圧 ・ 気密 ・ 水張り		
圧力計測定レンジ	<input style="width: 100px; height: 15px;" type="text"/>		
試験圧力	<input style="width: 100px; height: 15px;" type="text"/>		
保持時間	30分	液気温	24.5℃
圧力計番号	18-C55976	圧力計校正年月日	平成20年3月28日
	18-C55977		平成20年3月28日
2. 試験要領図			
			
3. 判定基準			
試験圧力に耐え、漏洩のないこと。			
4. 判定			
合格			

図 26-2 耐圧・漏えい試験成績表

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

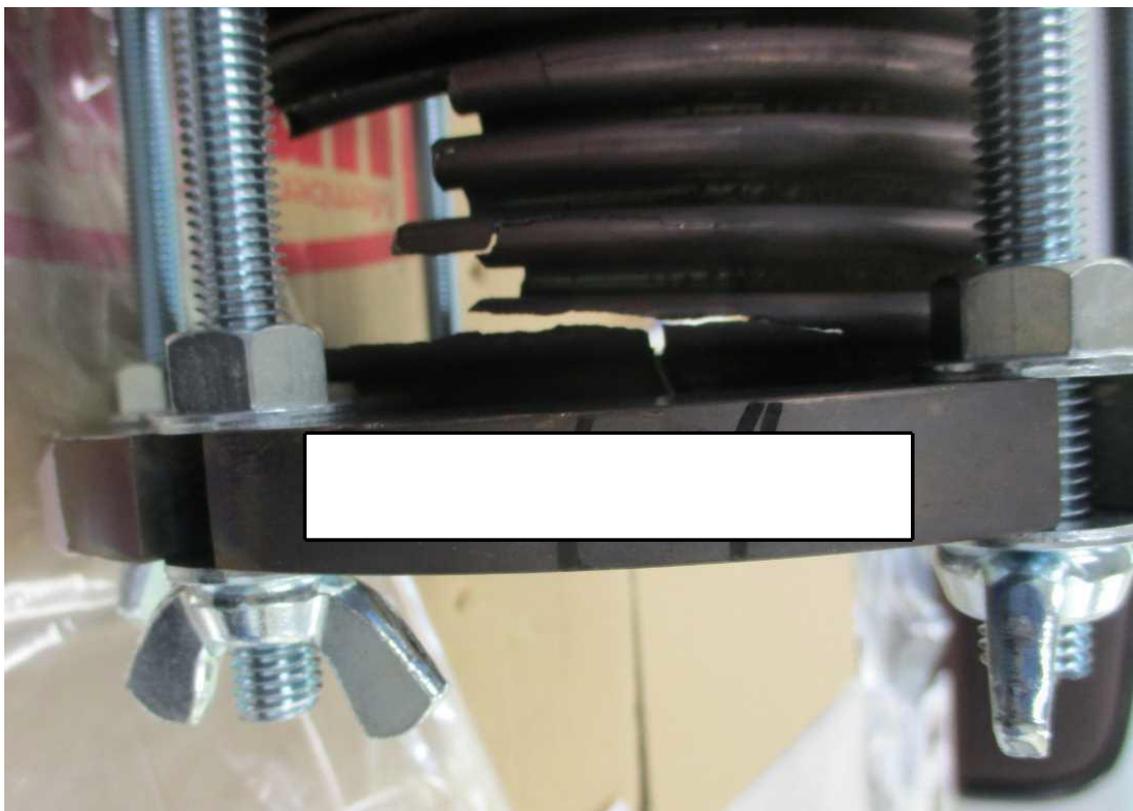


図 26-3 当該排気伸縮継手の刻印

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

要因調査結果及び評価
(排気管伸縮継手の製作・組立工程)

【要因】	<p style="text-align: center;">製作—強度不足—製作不良—許容応力</p> <p>排気管伸縮継手の製作不良が生じた場合、許容応力を超え、ベローズが破損する可能性がある。</p>	
【調査方法】	<p>当該排気管伸縮継手に対して排気管伸縮継手メーカーの社内規程に定められた手順で製作・組立工程が行われていることを確認する。</p>	
【調査結果】	<p>排気管伸縮継手メーカーへの聞き取り及び工場立入により、排気管伸縮継手の製作・組立工程について以下のことを確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・社内規程に定められた手順（表 27-1）に従い作業を実施していること。 ・社内規程に定められた手順は、平成 19 年に発生した 5 号機 D/G (B) の排気管伸縮継手の破損に対する是正処置での変更（隙間量の変更）を除いて変更がないこと。 ・製作工程において、設備・作業者の変更がないこと。 	
【評価】	×	<p>排気管伸縮継手メーカーへの聞き取り及び工場立入の結果より、排気管伸縮継手メーカーでは社内規程に定められた手順に従い作業を実施しており、当該排気管伸縮継手の製作時から上記以外の手順の変更がないこと、設備・作業者の変更がないことを確認したため、当該排気管伸縮継手に対して社内規程に定められた手順に従い製作・組立されていたことから、要因ではない。</p>

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

表 27-1 ファブリケーションシーケンス (1/2)

ベローズ製作工程	検査・作業	識別・記録

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表 27-1 ファブリケーションシーケンス (2/2)

製品組立工程	検査・作業等	機別・記録

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

要因調査結果及び評価
(溶接施工)

<p>【要因】</p>	<p>製作—強度不足—溶接不良—溶接施工不良</p> <p>ベローズの溶接が溶接施工要領に従い実施されていない場合、溶接欠陥が生じ、ベローズが破損する可能性がある。</p>
<p>【調査方法】</p>	<p>溶接要領及び施工・検査記録により、ベローズが溶接施工要領に従い適切な技量を有した溶接士により溶接施工されていることを確認する。</p>
<p>【調査結果】</p>	<p><溶接施工要領> 第三者機関に承認をうけた溶接プロセスに基づき作成した溶接施工要領を用いていることを排気管伸縮継手メーカーへの聞き取り及び工場立入により確認した。</p> <p><溶接施工> 溶接施工要領に従い実施していることを確認した。</p> <p><溶接施工記録> 母材：SUS321+SUS321 溶接方法：自動溶接 姿勢：<input type="text"/> 溶接棒：<input type="text"/> シールドガス：<input type="text"/> 電流：<input type="text"/></p> <p><溶接の検査> 溶接検査チェックシートにより、開先検査、開先合わせ検査、溶接検査、浸透探傷検査が実施されていることを確認した。また、ベローズ成型・組立後に耐圧試験を実施しており、判定基準を満足していることを確認した。</p>

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

	<p><技術者の技量> 溶接は日本海事協会のステンレス鋼の溶接士資格 (SUT N1F※1) を有している者が実施していることを確認した。なお、浸透探傷検査は日本非破壊検査協会の非破壊試験技術者資格 (浸透探傷試験・レベル 2) を有している者が実施していることを確認した。</p>	
【評価】	×	<p>ベローズの溶接は溶接施工要領に従い、適切な技量を有した溶接士が実施しており、溶接後の検査においても判定基準を満足していることから、要因ではない。</p>

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

※1 SUT N1F とは次の溶接が可能な条件である。

ステンレス鋼ーティグ溶接ー裏当て金なしー厚さ 5mm までー下向き

要因調査結果及び評価
(排気管伸縮継手フランジボルトの締付け)

【要因】	<p>施工—外力—組立不良（フランジボルトの締付け不良） —過大応力の発生</p> <p>フランジボルトの締付けが不足した場合、排気管伸縮継手取付け位置がずれることで過大な力が加わり破損する可能性がある。</p>
【調査方法】	<p>当該排気管伸縮継手を取替えた際（平成 20 年）の工事要領書及び工事報告書、並びにディーゼル機関メーカー聞き取りにより、フランジボルトの締付け状況を確認する。</p>
【調査結果】	<p>当該排気管伸縮継手の締付け確認として、当該排気管伸縮継手取付け後のフランジの面間測定において規定範囲（最大・最小の差が ）に対して最大箇所で 0.5mm であり、均等に締付けられていること及びディーゼル機関メーカー実施の漏えい確認において異常がないことを確認した。</p> <p>なお、ディーゼル機関メーカーへの聞き取りの結果、工事要領書においてフランジボルトの締付け管理は面間測定及びトルク管理を行うと記載されているが、排気管伸縮継手の取付け部は狭隘部であり、構造上トルクレンチを使用した締付けが困難な箇所であることから、トルク管理は実施されていないことを確認した。</p> <p>また、当該排気管伸縮継手取外し前に締付け状況を確認したところ、当該排気管伸縮継手位置のずれはなく、フランジボルトの緩みがないことを確認した。また、当該排気管伸縮継手を取替えてから取外しを行っていないことを確認した。</p>
【評価】	<p>× 当該排気管伸縮継手取替え時の締付け確認において異常がないこと、当該排気管伸縮継手取外し前にフランジボルトに緩みはなく適切に締付けられていたことから、要因ではない。</p> <p>なお、工事要領書に規定したとおりに施工されていなかったことについては、不適合管理を実施し是正処置を行う。</p>

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

要因調査結果及び評価
(組立時における打痕・傷)

	施工—外力—組立不良—組立時における打痕・傷	
【要因】	ベローズに打痕・傷が生じていた場合、当該部を起点として破損する可能性がある。	
【調査方法】	ベローズについて、目視による外観観察により、打痕・傷の有無を確認する。	
【調査結果】	ベローズの外観観察を実施した結果、打痕を4箇所確認した。外観観察結果は、添付資料17を参照。	
【評価】	△	ベローズに打痕を4箇所確認したことから、当該部を起点として当該排気管伸縮継手が破損した可能性は否定できない。

[評価欄記号説明]

×：要因ではない

△：複合要因の一つとして考えられる

○：主要因と推定される

要因調査結果及び評価
(作業によるベローズへの接触)

【要因】	施工—外力—組立不良—組立時における打痕・傷	
	ベローズに打痕・傷が生じていた場合、当該部を起点として破損する可能性がある。	
【調査方法】	<p>当該排気管伸縮継手の取替え後(平成 20 年)以降の当該排気管伸縮継手の近傍における作業履歴を確認し、ベローズに打痕・傷を与える可能性のある作業を抽出する。</p> <p>また、通常時は当該排気管伸縮継手に保温材が取付けられており、ベローズへの接触による打痕・傷は付かないと考えられるため、当該排気管伸縮継手の保温材取外しの有無を確認し、ベローズに打痕・傷を与える可能性がないことを確認する。</p>	
【調査結果】	<p>当該排気管伸縮継手の取替え(平成 20 年)以降、ベローズに打痕・傷を与える可能性のある作業を抽出するために、当該排気管伸縮継手の近傍における作業及び当該排気管伸縮継手の点検作業を抽出した。その結果、平成 20 年の当該排気管伸縮継手取替え作業時に、打痕・傷を与える可能性があることを確認した。</p> <p>また、当該排気管伸縮継手取替え作業以降は保温材を取り外していないことを確認した。</p>	
【評価】	△	平成 20 年の当該排気管伸縮継手取替え作業時に打痕・傷を与えた可能性があり、当該部を起点として当該排気管伸縮継手が破損した可能性は否定できない。

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

要因調査結果及び評価
(排気管伸縮継手内筒の取付け方向)

【要因】	施工—外力—排気管伸縮継手取付け方向誤り—内筒の取付け方向誤り	
	排気管伸縮継手の取付け方向を誤った場合，排気ガスの整流ができず，排気ガスが直接ベローズに当たることで，過大な圧力が加わり破損する可能性がある。	
【調査方法】	排気管伸縮継手破損時に撮影した写真により，排気管伸縮継手の取付け方向を確認する。	
【調査結果】	排気管伸縮継手破損時に撮影した写真（図 32-1）より排気管伸縮継手の取付け方向を確認した結果，排気管伸縮継手に刻印されている流れ方向を示す矢印とディーゼル機関の排気ガスが流れる方向が一致していることを確認した。また，上流側のフランジ部に内筒ツバの厚み分の隙間が生じており，内筒の取付け方向も正しいことから，当該排気管伸縮継手は正しく取付けられていることを確認した。	
【評価】	×	排気管伸縮継手は正しく取付けられていることから要因ではない。

[評価欄記号説明]

×：要因ではない

△：複合要因の一つとして考えられる

○：主要因と推定される

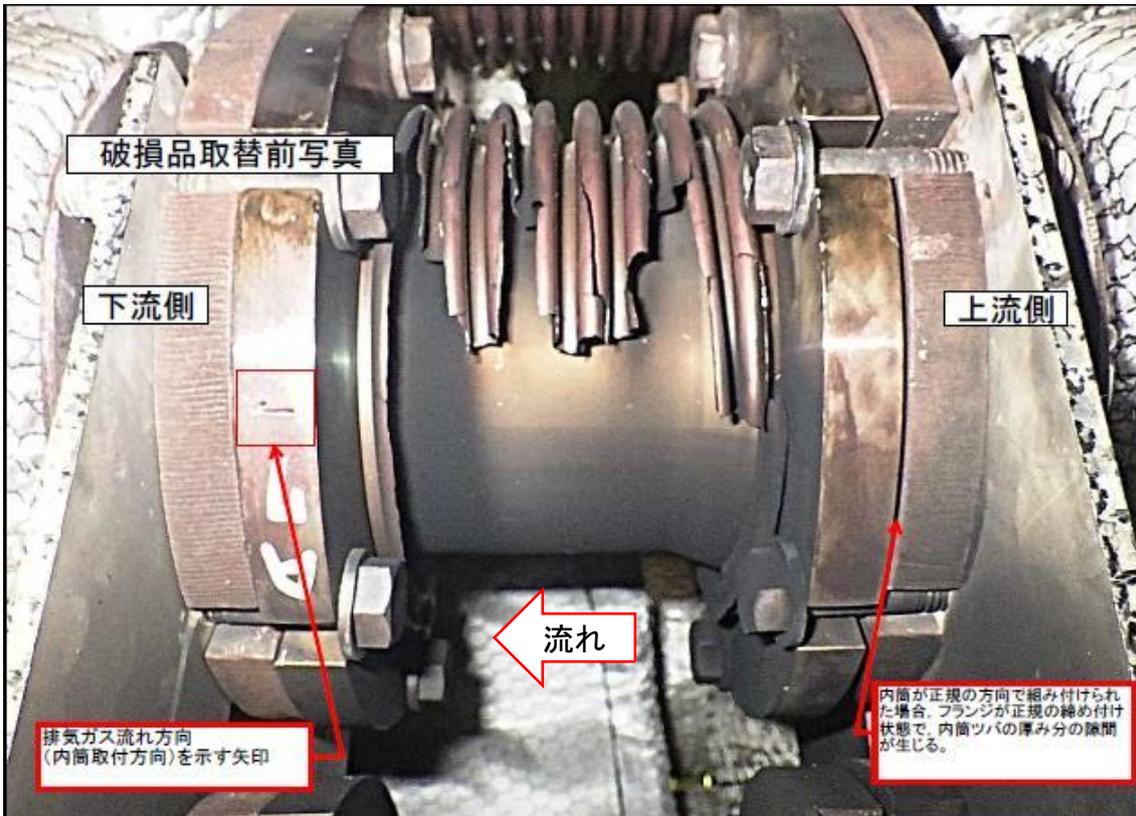


図 32-1 排気管伸縮継手破損時の現場状況

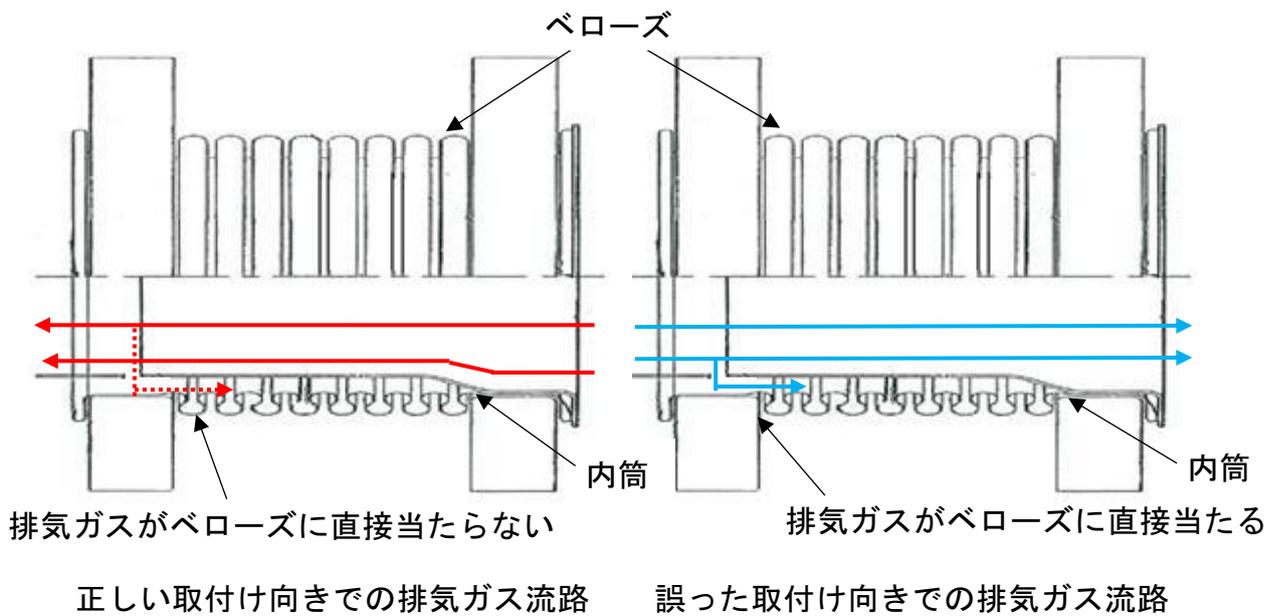


図 32-2 内筒の取付け方向の相違による排気ガス流路

要因調査結果及び評価
(排気管伸縮継手の芯ずれ)

【要因】	<p>施工—外力—芯ずれ—排気管伸縮継手の芯ずれ</p> <p>排気管伸縮継手に芯ずれがあった場合、ベローズに過大な力が加わり破損する可能性がある。</p>	
【調査方法】	<p>当該排気管伸縮継手を施工した際(平成 20 年)の工事報告書に基づき測定した当該排気管伸縮継手の段差寸法を記録により確認する。</p>	
【調査結果】	<p>当該排気管伸縮継手の段差寸法値は、以下に示すとおりであり、判定基準 (<input type="text"/> 以内) を満足していることを確認した。(図 33-1)</p> <p><段差寸法値></p> <p>測定点 a 2.8mm</p> <p>測定点 b 2.9mm</p>	
【評価】	×	<p>当該排気管伸縮継手の段差寸法値は、判定基準を満足している。判定基準は内筒とベローズの間隙から定められており、要因ではない。</p>

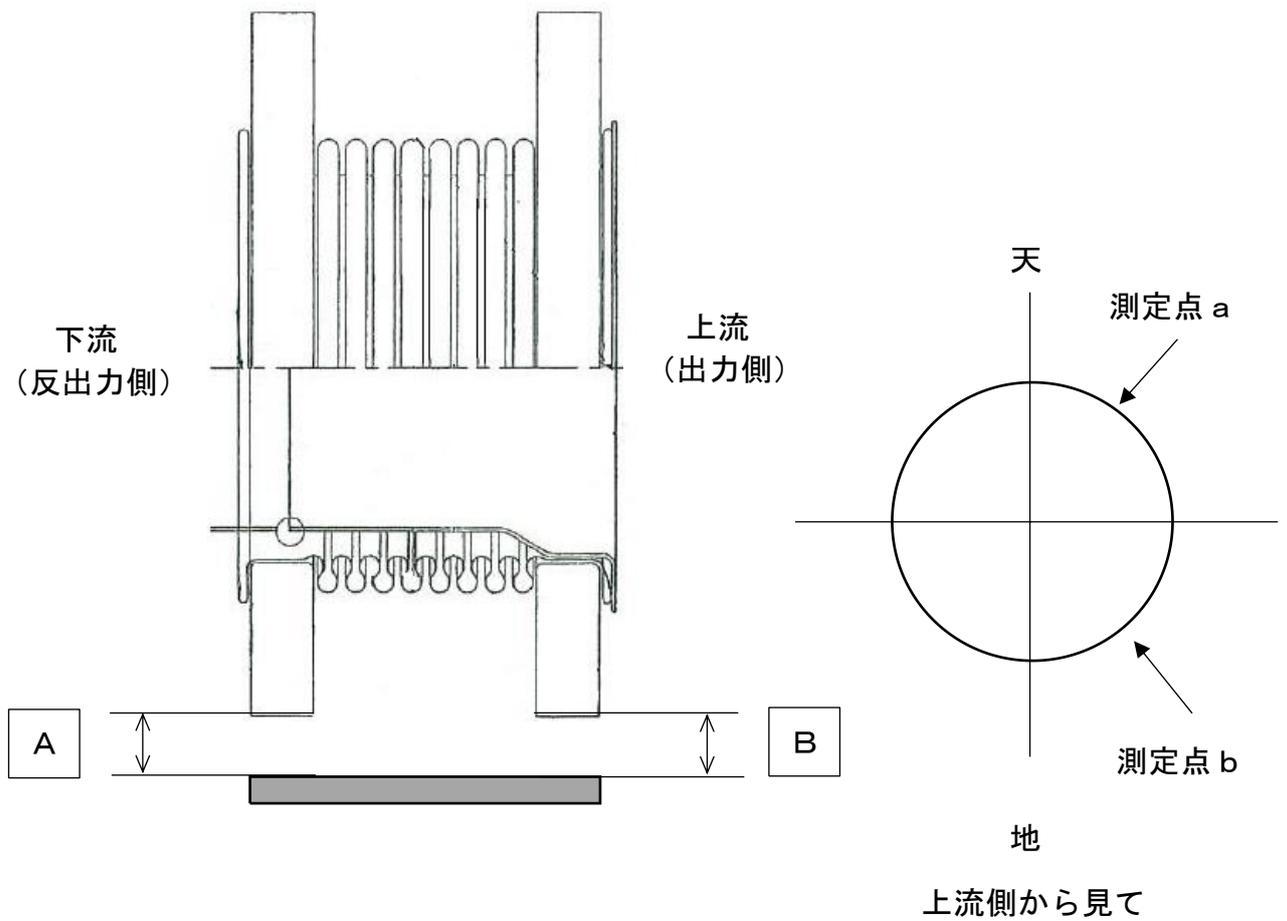
[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



判定基準 : AとBの 以内

図 33-1 排気管伸縮継手の段差寸法の測定位置

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

要因調査結果及び評価
(ベローズのねじれ)

<p>【要因】</p>	<p>施工—外力—ねじれ—ベローズのねじれ</p> <p>ベローズがねじれていた場合、排気管伸縮継手に過大な力が加わり破損する可能性がある。</p>	
<p>【調査方法】</p>	<p>排気管伸縮継手の構造を確認して、取付け時のベローズのねじれの可能性の有無を確認する。</p>	
<p>【調査結果】</p>	<p>排気管伸縮継手の構造は、フランジとベローズは周方向には固定されていない。(図 34-1)</p>	
<p>【評価】</p>	<p>×</p>	<p>排気管伸縮継手のベローズとフランジは周方向には固定されておらず、ベローズ自体が回転できる構造となっている。このことから取付け時において、ベローズにねじれが発生することはないため、要因ではない。</p>

[評価欄記号説明]

- × : 要因ではない
- △ : 複合要因の一つとして考えられる
- : 主要因と推定される

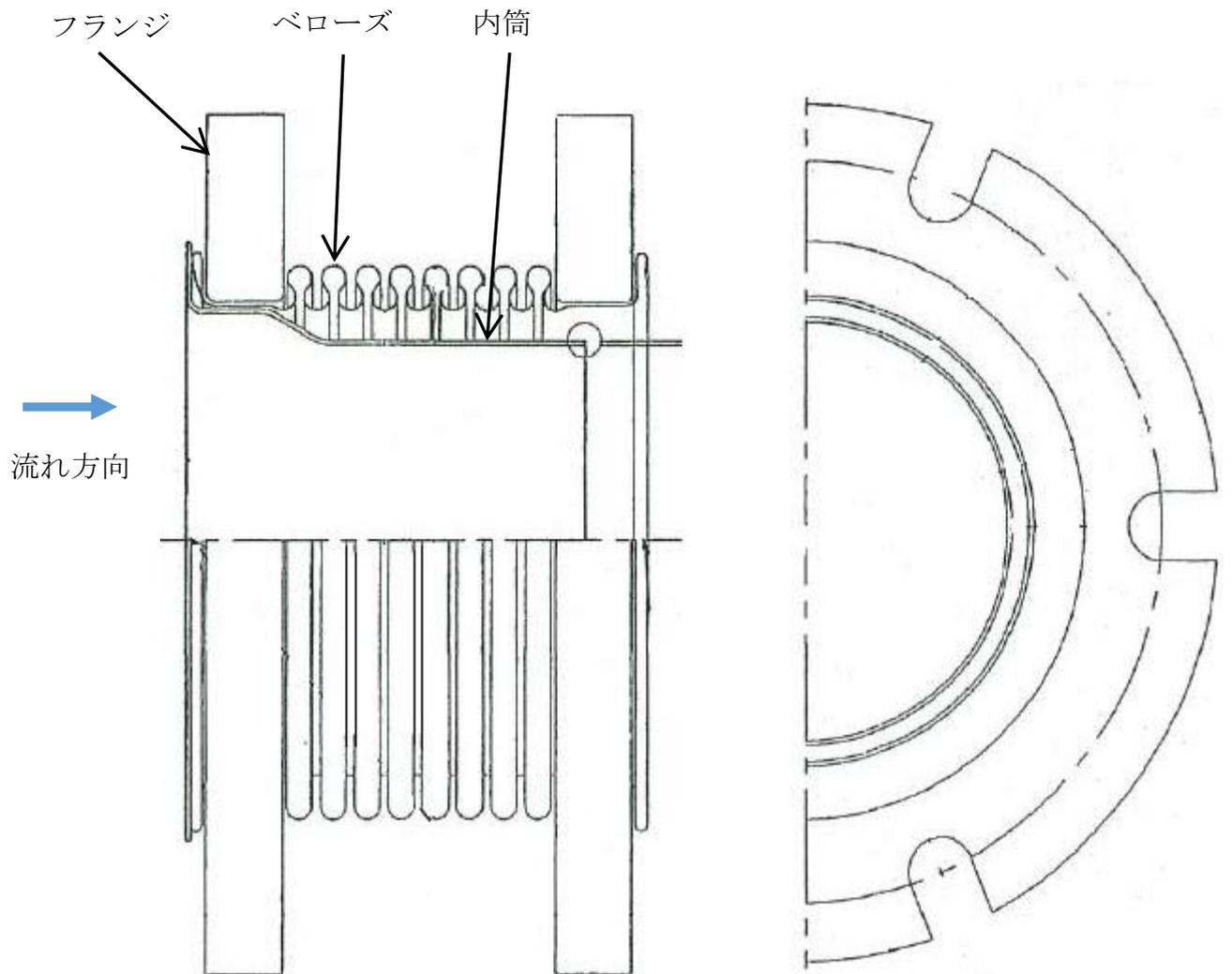


図 34-1 排気管伸縮継手の構造

要因調査結果及び評価
(排気管サポートの締付け)

【要因】	施工—外力—振動—排気管サポート拘束不良	
	排気管サポートの締付け不良により、排気管の拘束がなくなつた場合、D/G(B)運転時に排気管が振動し、ベローズに過大な振動が生じ破損する可能性がある。	
【調査方法】	<p>当該排気管伸縮継手を取替えた際(平成 20 年)の工事報告書より、排気管サポートの締付け状況を確認する。</p> <p>排気管伸縮継手取替え後(平成 20 年)以降の排気管サポートに関する作業の有無を確認し、排気管サポートの締付け状況を確認する。</p> <p>また、当該排気管伸縮継手の取外し前(平成 30 年)に排気管サポートの締付け状況及び外観の確認をする。</p>	
【調査結果】	<p>工事報告書を確認した結果、排気管伸縮継手取替え時(平成 20 年)は排気管サポートに関する作業を実施していないことを確認した。</p> <p>排気管伸縮継手取替え時から平成 30 年 6 月 6 日までの間に実施した点検計画に基づく排気管サポートの点検実績については、保全作業報告書より、平成 26 年及び平成 27 年に実施しており、排気管サポートの締付け状況に緩みがないことを確認している。(図 35-1)</p> <p>また、平成 30 年 6 月 6 日に当該排気管伸縮継手の排気管サポートの締付け状況を確認した結果、緩みがなく、外観確認の結果においても、排気管表面に摺動痕がないことを確認した。</p>	
【評価】	×	<p>本事象発生時に排気管サポートに緩みがないこと、及び排気管伸縮継手取替え時(平成 20 年)から本事象発生までの間も排気管サポートに緩みがないことから、D/G(B)運転時に排気管が振動し、ベローズに過大な振動が発生することはないため、要因ではない。</p>

[評価欄記号説明]

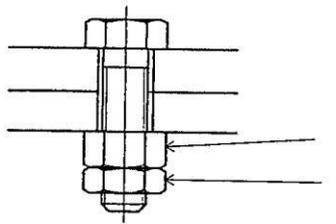
× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

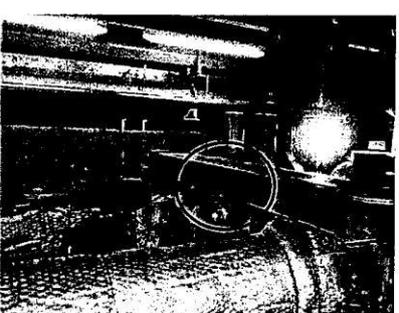
○ : 主要因と推定される

記録番号 : F-91 (2/2)

浜岡原子力発電所 第5号機										中電 確認	
機器名 : 非常用ディーゼル発電装置 [A · (B) · C] 排気管サポート締付記録										承認	
										審査	作成
										27.5.11	27.5.11



①
②



シリンダ No.	締付箇所	本数	取外日付		締付							緩み角度				漏洩				
			確認者	全 マーク	面間 (mm)				トルク等	塗布材	日付	実施者	確認者	ナット角度 (1/16, 1/8, 1/4)				日付	確認者	
					1	2	3	4						1	2	3	4			
9/16	①	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無
	②	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無
10/16	①	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無
	②	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無
11/16	①	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無
	②	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無
12/16	①	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無
	②	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無
13/16	①	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無
	②	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無
14/16	①	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無
	②	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無
15/16	①	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無
	②	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無
16/16	①	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無
	②	1	○	○	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2/11	無	無	無	無	無	無

備考 上段 : 分解前または規定 下段 : 組立後	測定基準 全マーク : 分解前と差異がないこと 面間 : 分解前と差異がないこと。面間の差が0.5mm以内であること。 トルク等 : 規定のとおり締められていること。 塗布材 : 規定のとおり塗布されていること。 漏洩 : 漏洩またはその痕跡がないこと。	検用計器 ばね : - トルクレンチ : - 総合判定 : 合格
--	---	--

757

図 35-1 排気管サポート締付記録 (2/2)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

要因調査結果及び評価
(D/G 運転中の排気ガス温度)

【要因】	<p>運転管理—過大応力による延性破壊—運転状態の異常—排気ガス温度等の異常</p>	
	<p>運転中において排気ガス温度の判定基準値及び振動値が基準値を超過した場合、ベローズが破損する可能性がある。</p>	
【調査方法】	<p>当該排気管伸縮継手取替え後(平成 20 年)から破損事象前(平成 30 年)までの運転性能記録(定格運転中), 定期試験記録(定格運転中)により排気ガス温度を確認する。また, 当該排気管伸縮継手が破損した以降の試運転時の温度解析, 振動測定により, 異常燃焼等による排気温度の異常な上昇の有無, 排気管の異常な振動の有無を確認する。</p>	
【調査結果】	<p>当該排気管伸縮継手取替え後(平成 20 年)から破損事象前(平成 30 年)までの運転性能記録及び定期試験記録を確認した結果, 当該過給機入口温度は最大で [] であり, 判定基準値 [] 以下であることを確認した。</p> <p>当該排気管伸縮継手が破損した以降の試運転時の当該排気管伸縮継手出入口管の温度解析の結果, 当該排気管伸縮継手フランジ部の温度は最大で約 [] であり, 判定基準値 [] 以下であることを確認した。また, D/G 定格運転中の排気管伸縮継手の振動測定の結果, A-7 排気管伸縮継手の上流側・下流側の振動値は, 最大で [] 程度であり, 他の排気管伸縮継手と比較しても同程度であった。</p>	
【評価】	×	<p>当該排気管伸縮継手取替え(平成 20 年)以降に, 当該過給機入口温度は判定基準値を超えていないこと, 及び当該排気管伸縮継手破損事象後の試運転時における排気管伸縮継手の温度及び振動測定結果においても異常は確認されていないことから, 要因ではない。</p>

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

本資料のうち, 枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

要因調査結果及び評価
(排気管の圧力脈動)

<p>【要因】</p>	<p>運転—過大応力による延性破壊—運転状態の異常—排気温度等の異常</p> <p>排気管の構造により，当該排気管伸縮継手近傍に圧力脈動が発生し，ベローズが破損する可能性がある。</p>
<p>【調査方法】</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ 圧力脈動の影響による異常な振動の発生の有無を確認するため，D/G 定格運転中に当該排気管伸縮継手に発生する振動値を測定する。 ・ D/G 定格運転中を模擬した流体解析を行い，当該排気管伸縮継手近傍の排気流による圧力脈動の発生の有無を調査する。 ・ 圧力脈動がある場合，構造解析にて，ベローズに生じるひずみを算定し，そのひずみを用いて疲労評価を行う。
<p>【調査結果】</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ D/G 定格運転中の当該排気管伸縮継手の振動値は <input type="text"/> であり，他の排気管伸縮継手と比較しても同程度である。 ・ D/G 定格運転中を模擬した流体解析の結果，<input type="text"/> 周期の圧力脈動が認められ，圧力脈動によってベローズに最大約 <input type="text"/> の圧力が発生する。 ・ 構造解析の結果，圧力脈動によりベローズに最大 4.5×10^{-5} のひずみが発生する。
<p>【評価】</p>	<p>×</p> <p>D/G 定格運転中の当該排気管伸縮継手の振動値は，他の排気管伸縮継手と同程度であり問題ない。</p> <p>排気管伸縮継手近傍に発生する圧力脈動を流体解析により確認した。さらに，構造解析の結果，圧力脈動により発生するひずみは繰り返し回数 10^6 回の許容ひずみ (約 2.8×10^{-3}) と比較して十分に小さく高サイクル疲労の要因にはならない。</p> <p>以上より，圧力脈動によりベローズが破損する可能性がないことから，要因ではない。</p>

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

解析結果について

1 目的

D/G 定格運転中の、当該排気管伸縮継手近傍の排気流による圧力脈動の発生の有無を流体解析により調査する。圧力脈動がある場合、構造解析にて、ベローズに生じるひずみを算定し、そのひずみを用いて疲労評価する。

2 流体解析概要

汎用熱流体解析プログラム ANSYS Fluent

<解析条件>

解析範囲を排気管伸縮継手及び排気管とし、シリンダ (A2, A7) からの排気ガス量を入力し、排気ガスの挙動を確認した。

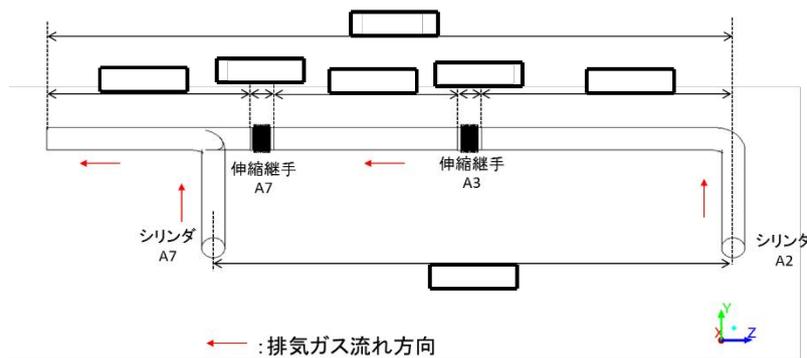


図 37-1 流体解析範囲

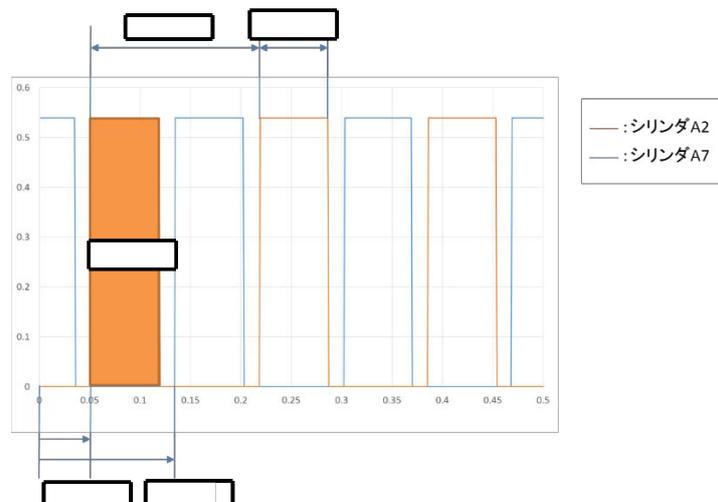


図 37-2 排気ガス流入条件

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

3 流体解析結果

当該排気管伸縮継手近傍の排気流により、 周期の圧力脈動が認められ、ベローズに最大約 の圧力が発生する。

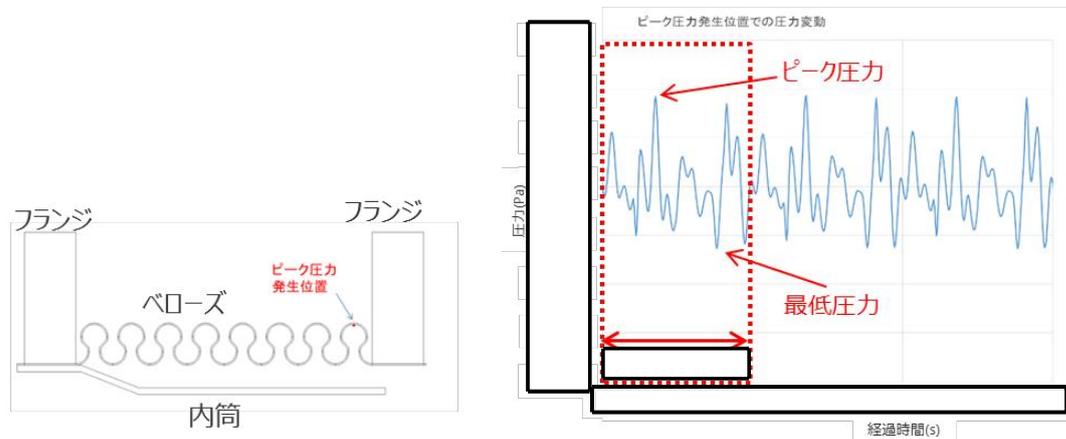


図 37-3 流体解析結果

4 構造解析概要

汎用有限要素法解析プログラム ABAQUS

<解析条件>

流体解析で求めた排気ガス圧力のピーク圧力および最低圧力から応力振幅を求め、その差分によりベローズに発生する応力を算定する。

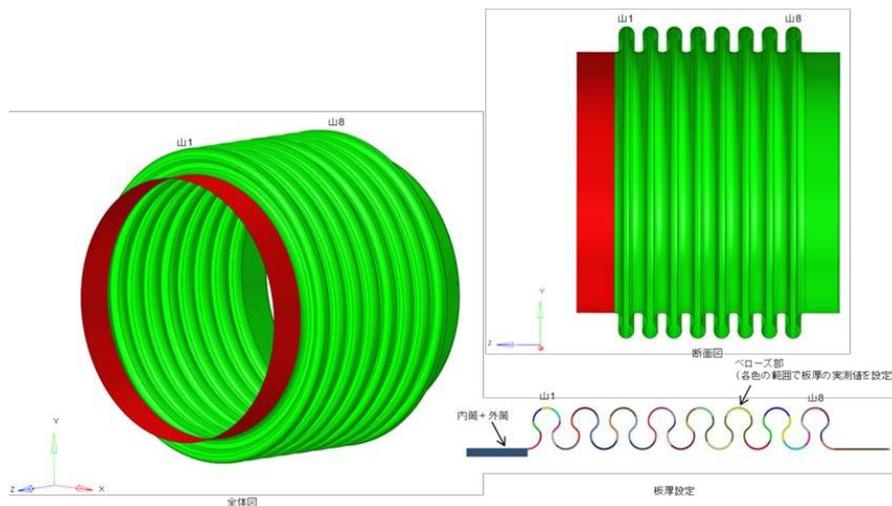


図 37-4 構造解析モデル

5 構造解析結果

圧力脈動により、ベローズに発生する応力は 7.4MPa であった。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

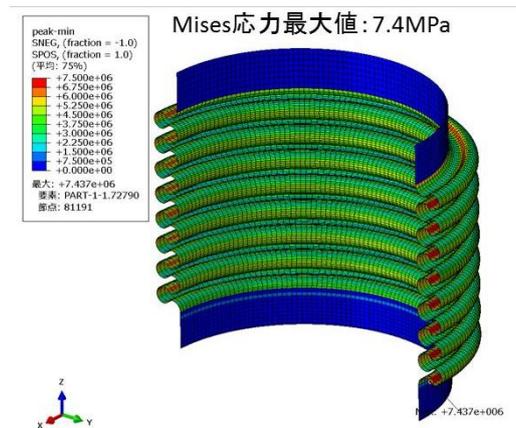


図 37-5 構造解析結果

6 疲労評価方法

疲労評価については、発電用原子力設備 設計・建設規格（2009 年版）＜第Ⅱ編高速炉編＞に基づき、ベローズに生じるひずみを用いて判定した。なお、ベローズに生じるひずみについては、発生応力をヤング率で除して算定した。

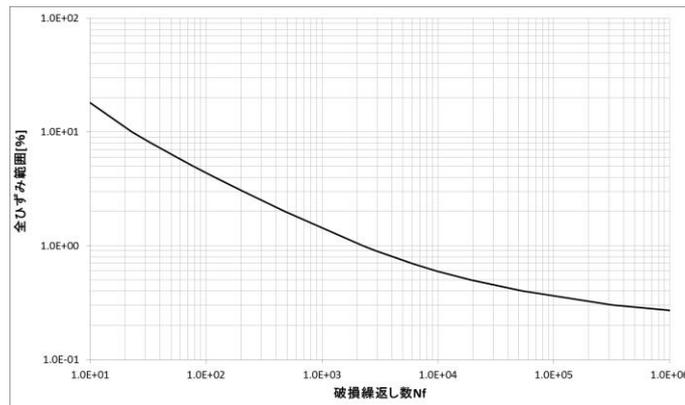


図 37-6 破損繰返し回数と全ひずみ範囲の関係 (の場合)

7 疲労評価結果

ベローズに生じるひずみは、 4.5×10^{-5} であり、繰返し回数 10^6 回の許容ひずみ（約 2.8×10^{-3} ）以下であることを確認した。

8 結論

排気管伸縮継手近傍に発生する圧力脈動を流体解析により確認した。さらに、構造解析の結果、圧力脈動により発生するひずみは疲労限度以下であることからベローズが破損することはない。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

要因調査結果及び評価
(定期試験時における判定基準の逸脱)

【要因】	運転管理—過大応力による延性破壊—運転状態の異常—運転手順の誤り	
	定期試験時に、定期試験手順書を逸脱する操作により、排気温度の異常上昇が発生し、過大な応力がかかることで、ベローズが破損する可能性がある。	
【調査方法】	<p>当該排気管伸縮継手取替え後(平成 20 年)から破損事象前(平成 30 年)における以下の項目について確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CAP 登録件名において、定期試験手順書を逸脱する操作により発生した不適合件名の有無。 ・定期試験記録における、排気温度の判定基準の逸脱の有無。 	
【調査結果】	<p>平成 20 年 9 月 30 日から平成 30 年 6 月 5 日(排気管伸縮継手交換後に D/G 待機状態へ復帰した時点から排気管伸縮継手破損に至るまでの期間)における以下の項目について確認した。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・CAP 登録件名において、定期試験手順書を逸脱する操作により発生した不適合件名はなし。 ・定期試験記録における、排気温度の判定基準の逸脱なし。 <p>なお、定期試験手順書を使用しない D/G 起動操作の実績を確認した結果、平成 21 年 8 月 11 日の駿河湾の地震時の D/G 起動が該当するが、運転員の操作が介在しない自動起動であったこと、また、無負荷の運転のみで停止操作を実施していることから、排気温度の異常上昇に至る操作はなかったと判断する。</p>	
【評価】	×	CAP 登録件名確認結果より、定期試験手順書を逸脱する操作による不適合が発生していないこと、及び定期試験記録結果より、排気温度の異常上昇が発生していないことから、ベローズ破損の要因ではない。

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

要因調査結果及び評価
(運転操作手順書の誤り)

【要因】	運転管理—過大応力による延性破壊—運転状態の異常—運転手順の誤り	
	定期試験手順書, 試運転手順書及びその判定基準の誤りにより, メーカー推奨の運転状態を逸脱することで, 排気温度の異常上昇が発生し, 過大な応力がかかることで, ベローズが破損する可能性がある。	
【調査方法】	定期試験手順書, 試運転手順書及びそれらの判定基準が, メーカー推奨の基準に対し妥当なものであることを確認する。	
【調査結果】	D/Gの定期試験手順書, 試運転手順書とメーカーの手順書の比較を行い, 定期試験手順書, 試運転手順書がメーカー推奨の手順から逸脱がないことを確認した。 また, 定期試験の判定基準及び試運転時の判定基準を定めた点検計画の記載が, メーカーの仕様書等で要求される基準であることを確認した。	
【評価】	×	定期試験及び試運転はメーカーの定める要求事項に適合する手順書及び判定基準で実施されていることから, 運転手順に誤りはなく, 要因ではない。

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

要因調査結果及び評価
(保全内容)

【要因】	<p>保守管理—不適切な保全内容</p> <p>保全の内容が不適切な場合、想定外の劣化により排気管伸縮継手が破損する可能性がある。</p>
【調査方法】	<p>保全の内容が適切な考え方に基づき設定されていることを確認する。</p>
【調査結果】	<p>浜岡原子力発電所においては、原子力発電所の保守管理規程（JEAC4209-2007）を保守管理の指針・手引に取り込み、保守管理活動を実施している。</p> <p>設備の保全内容は下記プロセスを経て設定している。</p> <p>（１）保全対象範囲の策定</p> <p>（２）保全重要度の設定</p> <p>（３）保全計画の策定</p> <p>（１）保全対象範囲の策定について</p> <p>非常用ディーゼル発電設備は、発電用軽水型原子炉施設の安全機能の重要度分類に関する審査指針において「安全上必須なその他の構築物、系統及び機器（MS-1）」に該当するため、保全の対象範囲である。</p> <p>（２）保全重要度の設定について</p> <p>保全重要度を決定する要素は以下の３要素としている。</p> <p>①安全重要度（MS-1, 2 : A, MS-3 : B, 外 : C）</p> <p>②リスク重要度（影響度高 : A, 無 : -）</p> <p>③供給信頼度（供給停止 : A, 出力変動 : B, 影響なし : C）</p> <p>また、①～③に示した重要度の設定においては、保全の対象範囲について系統ごとの範囲と機能を明確にした系統機能整理表を作成している。</p> <p>この中で、非常用ディーゼル発電設備は「非常用所内電源供給機能（MS-1）」が要求されているため、重要度は以下のとおり設定している。</p> <p>安全重要度 : A, リスク重要度 : A, 供給信頼度 : C</p> <p>このため、非常用ディーゼル発電設備の保全重要度は最も高い A を設定している。</p> <p>（３）保全計画の策定について</p> <p>保全計画は、関係法令、関係規格及び基準を遵守するとと</p>

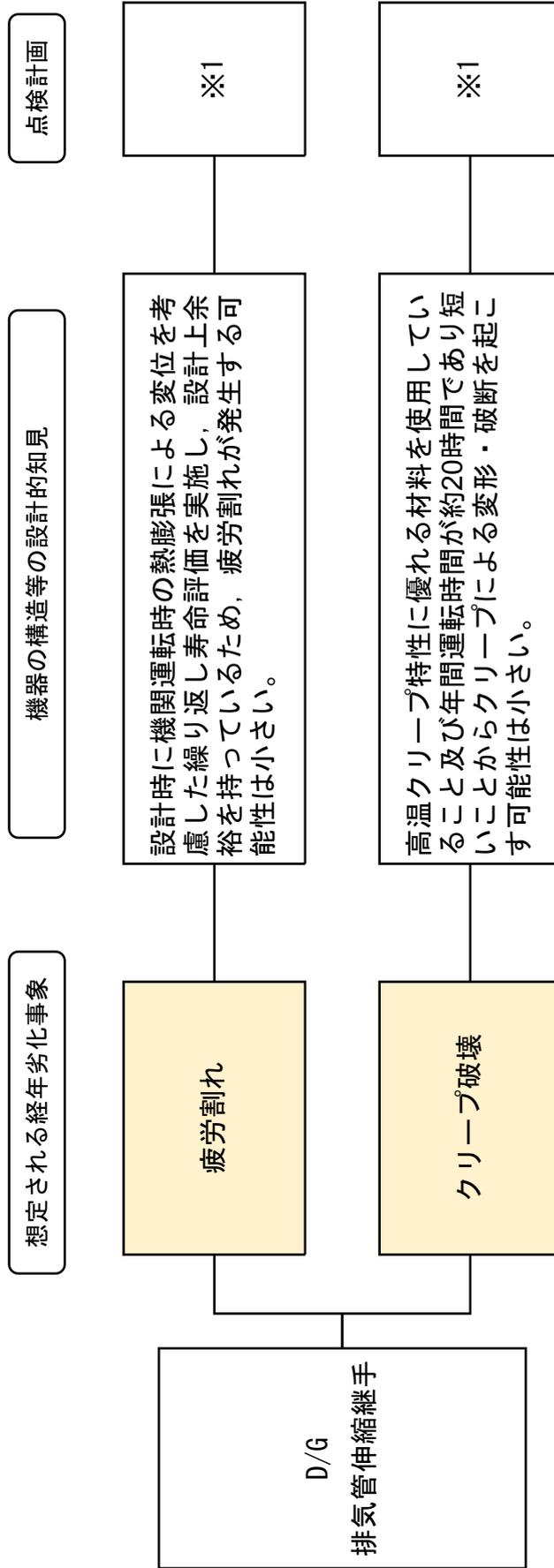
	<p>もに、保全重要度を勘案し、以下の事項を考慮した上で想定される経年劣化事象並びに発生の時期又は部位が予測できない偶発事象の両方の要因を考慮し保全の内容を策定している。</p> <ul style="list-style-type: none"> ① 運転実績、事故及び故障事例などの運転経験 ② 使用環境及び設置環境 ③ 劣化・故障モード ④ 機器の構造等の設計的知見 ⑤ 科学的知見 <p>非常用ディーゼル発電設備については、保全重要度が A であるため、経年劣化が想定される部位については劣化の兆候を適切に捉えるよう定期的に分解点検及び部品の取替えを点検計画に定めている。</p> <p>また、定期的な運転確認等により設備の健全性を確認することで偶発事象を含めた設備の機能喪失を未然に防止するように努めている。</p> <p>このうち、当該部については、経年劣化メカニズムまとめ表（「日本原子力学会標準 原子力発電所の高経年化対策実施基準」）より使用材料及び環境条件から、経年劣化事象として疲労割れ及びクリープ破壊が想定されるものの、これらについては機器設計時に考慮されているため、定期的に保温材を取外した上での外観点検は実施していない。（図 40-1）</p> <p>一方、偶発事象の発生を考慮し、試運転時及び定期的な運転確認において運転状態の異常（漏えい、振動等）の有無を確認することを点検計画に定め、設備が機能喪失に至らないよう保全を実施している。（表 40-1）</p>
<p>【評価】</p>	<p>×</p> <p>非常用ディーゼル発電設備は、適切な考え方に基づき、保全項目が設定されていることから、非常用ディーゼル発電設備の機器の一部である排気管伸縮継手においても保全の内容は妥当であると評価した。</p> <p>しかしながら、本事象を踏まえ偶発事象を捉えるための更なる改善として、状態監視を強化していく必要があると評価した。</p>

[評価欄記号説明]

×：要因ではない

△：複合要因の一つとして考えられる

○：主要因と推定される



※1 機器設計時に考慮されているため、定期的に保温材を取外した上での外観点検は必要としていない。

図 40-1 D/G 排気管伸縮継手に想定される経年劣化事象について

表 40-1 点検計画 抜粋

点検計画	点検部位	点検手入れ ・試験内容	管理基準
原子炉編	D/G 本体	<ul style="list-style-type: none"> ・定格負荷運転状態の確認 ・漏えい確認 ・各シリンダの排気温度のバラツキが [] 以上となった場合は、燃焼バラツクス調整を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 振動, 温度, 流量, 圧力, 電流等パラメータが従来と大きな差がないこと。 ・ 振動: 本体ベース部 [] 以下, 発電機ベース部 [] 以下, 過給機 [] 以下 (判定) ・ シリンダ内最高圧力: [] 以下, 各シリンダのバラツキ [] 以内 (判定) ・ 排気温度: シリンダ出口: [] 以下 (判定) 各シリンダのバラツキが [] 以内 (目標), 過給機入口: [] 以下 (判定), 過給機出口: [] 以下 (判定) ・ 清水温度 (機関出口): [] (判定) ・ 清水圧力: [] (判定) ・ 潤滑油温度: 機関入口: [] (判定) ・ 潤滑油圧力: 機関入口: [] (判定) ・ 発電機周波数: [] (判定) ・ 機関付清水ポンプメカニカルシール漏えい量: [] (管理) ・ 漏えい又はその形跡, 亀裂, 変形等がないこと。(判定)
発電編	非常用ディーゼル発電機系	<ul style="list-style-type: none"> ・ 振動 (運転状態) ・ 異音 (運転状態) ・ 異臭 (運転状態) ・ 漏えい (運転状態) 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 不規則な振動がないこと ・ 不規則な音, 断続的な音等がないこと ・ 過熱による異臭等がないこと ・ 燃料弁, 空気冷却器ドレン管以外の各系統配管接続部より漏えいのないこと

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

要因調査結果及び評価
(流れ加速型腐食)

	経年劣化—腐食—流れ加速型腐食	
【要因】	ベローズに流れ加速型腐食が発生した場合、破損する可能性がある。	
【調査方法】	当該排気管伸縮継手のベローズについて、流れ加速型腐食の有無を目視による表面観察により確認する。	
【調査結果】	表面観察を実施した結果、流れ加速型腐食の特徴である鱗状模様が発生していないことを確認した。表面観察結果は、添付資料 17 を参照。	
【評価】	×	当該排気管伸縮継手のベローズに流れ加速型腐食は発生していないため、要因ではない。

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

要因調査結果及び評価
(すきま腐食及び孔食)

【要因】	<p>経年劣化—腐食—すきま腐食, 孔食</p> <p>ベローズにすきま腐食, 孔食が発生した場合, 破損する可能性がある。</p>	
【調査方法】	<p>当該排気管伸縮継手のベローズについて, すきま腐食, 孔食の有無を目視による表面観察により確認する。</p>	
【調査結果】	<p>表面観察を実施し, すきま腐食及び孔食の有無を確認した結果, 腐食がないことを確認した。表面観察結果は, 添付資料 17 を参照。</p>	
【評価】	×	<p>当該排気管伸縮継手のベローズにすきま腐食や孔食は発生していないため, 要因ではない。</p>

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

要因調査結果及び評価
(応力腐食割れ)

<p style="text-align: center;">【要因】</p>	<p>経年劣化—腐食—応力腐食割れ</p> <p>ベローズに応力腐食割れが発生した場合、破損する可能性がある。</p>
<p style="text-align: center;">【調査方法】</p>	<p>当該排気管伸縮継手のベローズについて、応力腐食割れの発生の有無を光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡による破面観察により確認する。また、粒界・粒内型応力腐食割れの発生の有無を以下の方法により確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・組織が鋭敏化したことにより粒界型応力腐食割れが発生する可能性があるため、鋭敏化組織の有無を光学顕微鏡による断面組織観察により確認する。 ・ベローズの外表面に塩分が付着したことにより、粒内型応力腐食割れが発生する可能性があるため、外表面に塩分が付着する可能性について確認する。また、塩分付着による腐食の発生の有無を目視による表面観察により確認する。
<p style="text-align: center;">【調査結果】</p>	<p>破面観察を実施した結果、応力腐食割れが発生していないことを確認した。</p> <p>断面組織観察を実施した結果、鋭敏化が発生しやすい溶接部・溶接部近傍において、鋭敏化組織がないことを確認した。</p> <p>当該排気管伸縮継手は保温材で覆われているため、通常時は直接外表面に塩分が付着する環境になく、当該排気管伸縮継手の取替え(平成 20 年)以降は、保温材を取外していないため、外表面に塩分の付着はなかった。</p> <p>表面観察結果、光学顕微鏡・走査型電子顕微鏡観察結果は、添付資料 1 7, 1 8, 4 5 を参照。</p>

【評価】	×	<p>ベローズに鋭敏化組織はないことから粒界型応力腐食割れは発生していないため、要因ではない。</p> <p>また、当該排気管伸縮継手は取替え以降、保温材を取外しておらず、外表面へ塩分が付着する環境になく、外観観察を実施した結果からも塩分付着による腐食は発生していないため、要因ではない。</p>
------	---	--

[評価欄記号説明]

×：要因ではない

△：複合要因の一つとして考えられる

○：主要因と推定される

要因調査結果及び評価
(硫化腐食)

【要因】	<p style="text-align: center;">経年劣化—腐食—硫化腐食</p> <p>ベローズに硫化腐食が発生した場合、破損する可能性がある。</p>	
【調査方法】	<p>当該排気管伸縮継手のベローズについて、硫化腐食の発生の有無を以下の方法により確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・目視による表面観察 ・光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡による破面観察 	
【調査結果】	<p>表面観察及び破面観察を実施し、硫化腐食の有無を確認した結果、腐食がないことを確認した。</p> <p>表面観察結果、光学顕微鏡・走査型電子顕微鏡観察結果は、添付資料 17, 18 を参照。</p> <p>なお、建設時に測定した排ガス中の硫黄酸化物濃度を確認した結果、5号機は基準値 (<input type="text"/>) 以下の 2ppm であった。</p>	
【評価】	×	<p>当該排気管伸縮継手のベローズに腐食はなかったことから、硫化腐食は発生していないため、要因ではない。</p>

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

当該排気管伸縮継手のベローズ破片の組織観察結果

1 目的

当該排気管伸縮継手のベローズの応力腐食割れ感受性を確認するために、組織観察により熱鋭敏化の有無を調査する。また、破損ベローズの脆化（ σ 相脆化）の影響を確認するために、組織観察によって σ 相の析出の有無を調査する。

2 調査方法・範囲

破損した排気管伸縮継手ベローズの、図 45-1 に示す位置から組織観察用の試料を採取し、金属組織観察を実施した。

2. 1 クロム炭化物の観察

金属組織観察によってクロム炭化物の析出の有無を調査することで熱鋭敏化の有無を確認する。

2. 2 σ 相の観察

金属組織観察によって σ 相の析出の有無を調査することで σ 相脆化の影響を確認する。

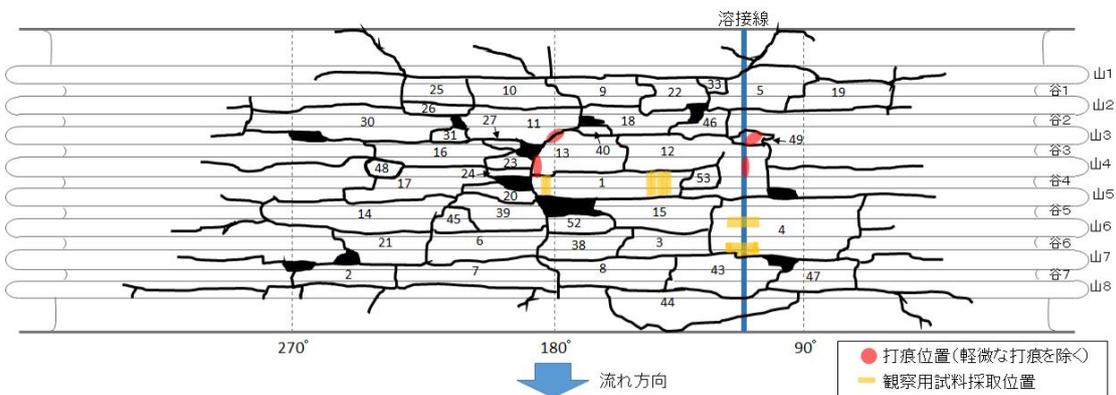


図 45-1 観察用試料採取位置

3 金属組織観察結果

3. 1 クロム炭化物の観察結果

金属組織観察（クロム炭化物）の結果を別紙 1 に示す。クロム炭化物の析出は認められなかったことから、熱鋭敏化は発生していないと考えられる。

3. 2 σ 相の観察結果

金属組織観察（ σ 相）の結果を別紙 2 に示す。 σ 相の析出は認められなかったことから、 σ 相脆化は発生していないと考えられる。

金属組織観察結果(クロム炭化物) <破片No. 1 / 破片No. 4 >

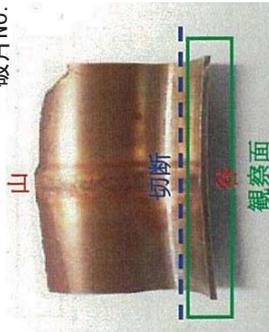
<金属組織観察結果(クロム炭化物)まとめ (破片No. 4) >
 ・破片No. 4の組織観察の結果, 溶接部や溶接部近傍に炭化物の析出は認められない。



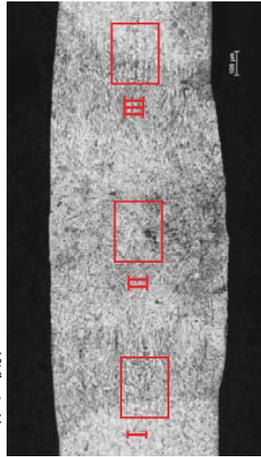
破片No. 4 (山5側)



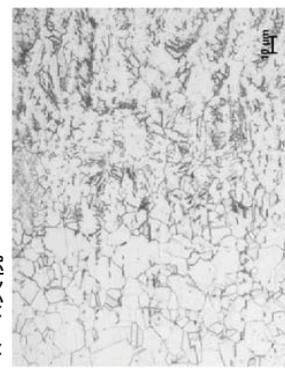
A-A矢視



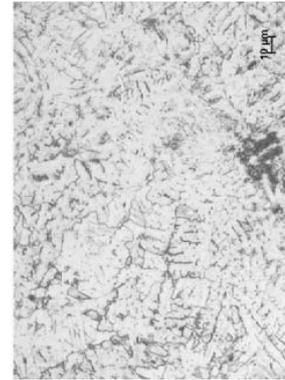
B-B矢視 (試料A)



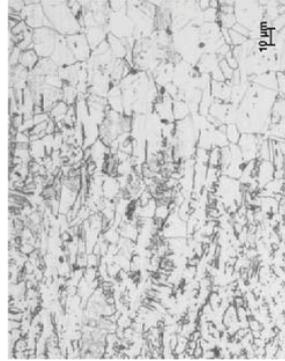
試料A溶接部拡大



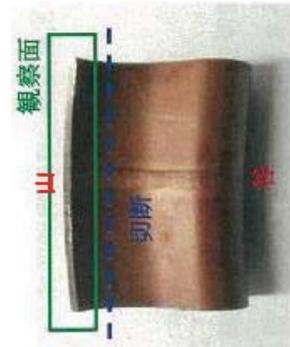
I 部観察位置



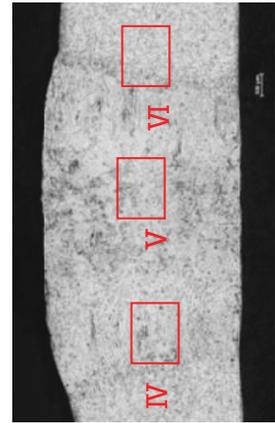
II 部観察位置



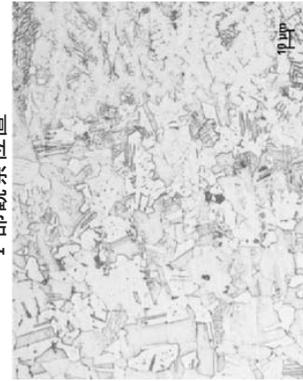
III 部観察位置



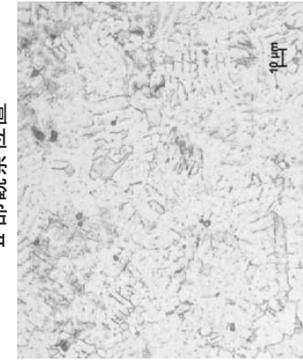
C-C矢視 (試料B)



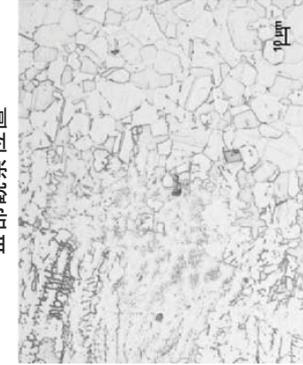
試料B溶接部拡大



IV 部観察位置



V 部観察位置

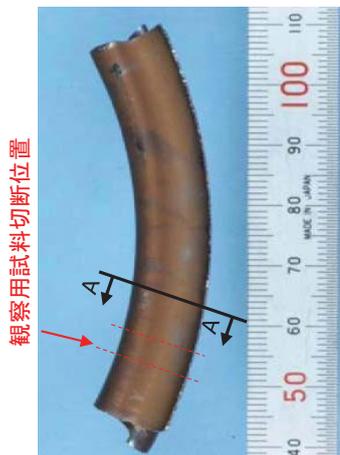


VI 部観察位置

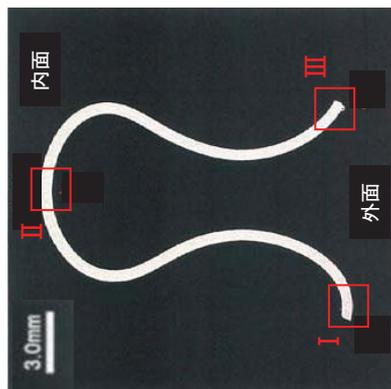
添付資料 4 5 (3 / 4)
 別紙 1 (2 / 2)

金属組織観察結果 (σ相) <破片No. 1>

<金属組織観察結果 (σ相) まとめ>
・破片No. 1において、σ相の析出は認められない。



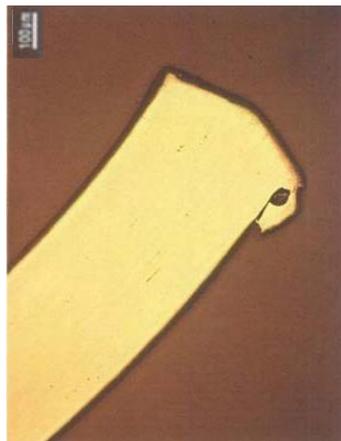
破片No. 1 山5側外観



観察断面 (A-A矢視)



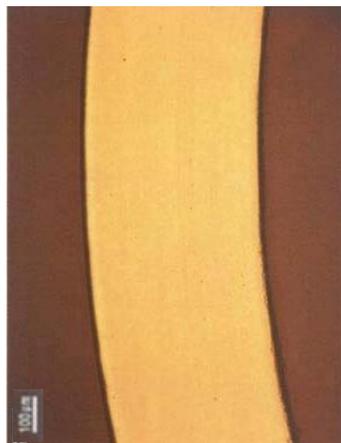
(参考)σ相析出時の見え方



Ⅲ部観察位置



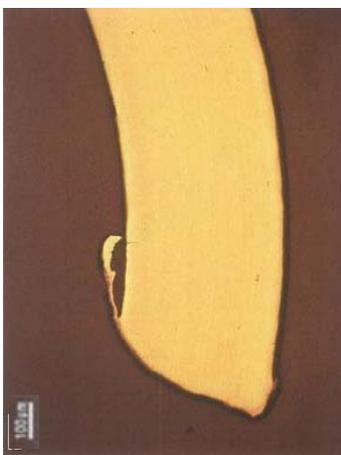
Ⅲ部観察位置拡大



Ⅱ部観察位置



Ⅱ部観察位置拡大



Ⅰ部観察位置



Ⅰ部観察位置拡大

当該排気管伸縮継手のベローズ破片の硬さ測定結果

1 目的

当該排気管伸縮継手のベローズと新品の排気管伸縮継手のベローズの硬さの比較をすることで、当該排気管伸縮継手のベローズの材料の性質の変化の把握を目的として、マイクロビッカース硬さ試験による硬さ測定を実施する。

2 調査方法

当該排気管伸縮継手のベローズの、図46-1に示す位置から測定用試料を採取し、マイクロビッカース硬さ試験を実施した。また、新品の排気管伸縮継手のベローズについても硬さ試験を実施した。

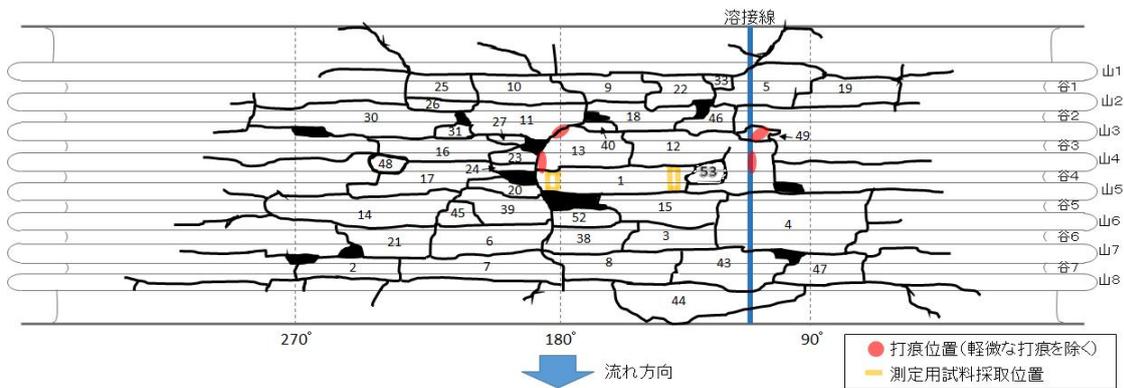


図46-1 分析用試料採取位置

3 マイクロビッカース硬さ試験結果

マイクロビッカース硬さ試験の結果を別紙1に示す。当該排気管伸縮継手のベローズと新品の排気管伸縮継手のベローズ硬化の程度に大きな違いはないことを確認した。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

＜硬さ測定結果まとめ＞

- ・新品の排気管伸縮継手のベローズ、当該排気管伸縮継手のベローズの破片No. 1，破片No. 4ともに山部で加工硬化と考えられる硬化（最大 ）を確認した。
- ・溶接部においては、有意な硬化は認められなかった。

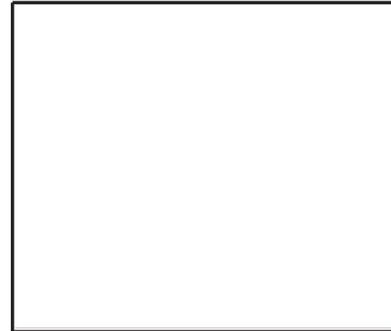
硬さ測定結果

	最大 (測定箇所)	最小 (測定箇所)
新品 (母材部)	<input type="text"/> (山側)	<input type="text"/> (谷側)
破片No. 1 (母材部)	<input type="text"/> (山側)	<input type="text"/> (谷側)
破片No. 4 (溶接部中心)	<input type="text"/> (山側)	<input type="text"/> (谷側)

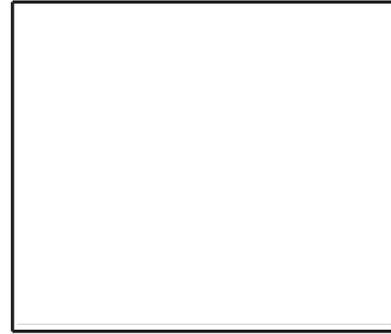


始点からの移動距離(mm)
硬さ測定(新品)

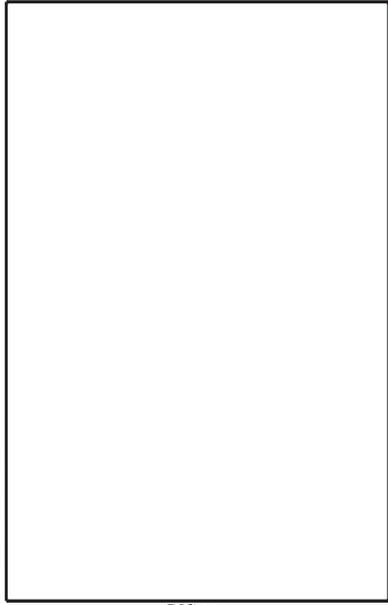
新品の排気管伸縮継手のベローズ断面(山7~山8断面)



A-A矢視(試料A)



B-B矢視(試料B)



始点からの移動距離(mm)
硬さ測定(破片No. 1)

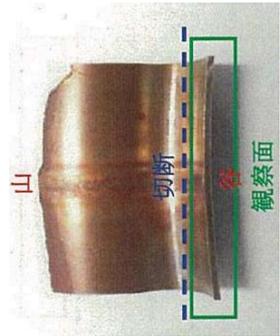
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



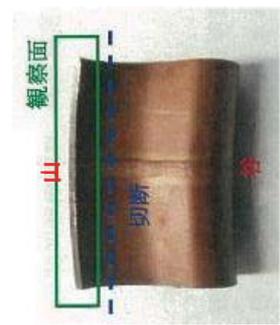
破片No. 4 (山5側)



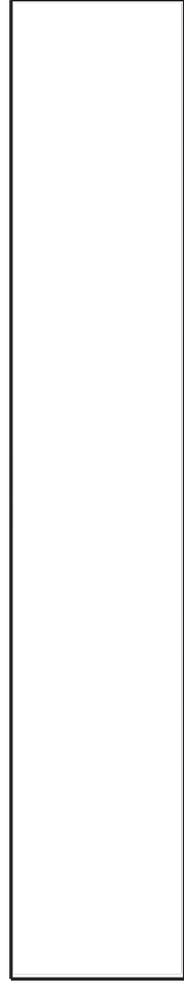
A-A矢視



試験A (谷部観察用)



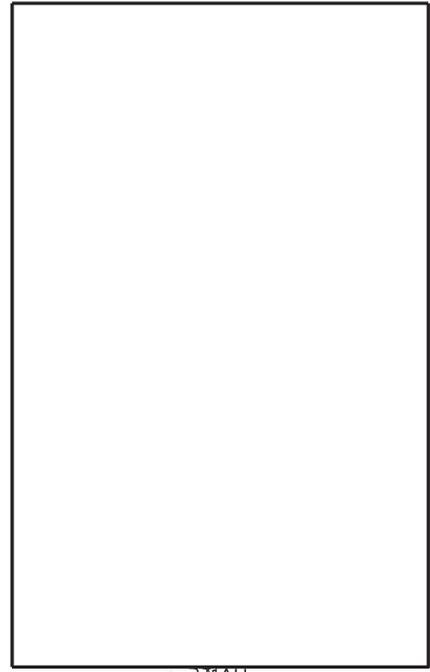
試験B (山部観察用)



試験A (谷部溶接部)



試験B (山部溶接部)



始点からの移動距離(mm)
硬さ測定 (破片No. 4)

要因調査結果及び評価
(熱時効脆化)

【要因】	<p>経年劣化—材料劣化—脆化（熱時効）—割れ</p> <p>ベローズに熱時効による脆化が発生した場合、破損する可能性がある。</p>												
【調査方法】	<p>当該排気管伸縮継手のベローズにおいて、脆化（σ相脆化）の有無を走査型電子顕微鏡による破面観察及び光学顕微鏡による断面組織観察により確認する。</p> <p>また、当該排気管伸縮継手のベローズの母材部及び溶接部における硬さ、新品材料の母材部における硬さをマイクロビッカース硬さ試験により確認・比較することで脆化の有無を確認する。</p> <p>なお、脆化が発生する要因として熱影響が考えられ、機関運転中における排気管伸縮継手の熱分布は一様であることから、代表サンプルでの調査を実施する。</p>												
【調査結果】	<p>・破面観察を実施した結果、脆性破面の特徴であるリバーパターンやへき開破面がないことを確認した。また、断面組織観察を実施した結果、σ相の析出がないことを確認した。光学顕微鏡・走査型電子顕微鏡観察結果は、添付資料 1 8, 4 5 を参照。</p> <p>・当該排気管伸縮継手のベローズの母材部、溶接部及び新品材料の母材部におけるマイクロビッカース硬さ測定結果を表 47-1 に示す。当該排気管伸縮継手のベローズの母材部と溶接部における硬さと新品材料の母材部における硬さは同程度であった。マイクロビッカース硬さ測定結果は添付資料 4 6 を参照。</p> <p style="text-align: center;">表 47-1 マイクロビッカース硬さ測定結果</p> <table border="1" data-bbox="472 1697 1355 1944"> <thead> <tr> <th></th> <th>最大 (測定箇所)</th> <th>最小 (測定箇所)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>破損品 (母材部)</td> <td><input type="text"/> (山側)</td> <td><input type="text"/> (谷側)</td> </tr> <tr> <td>破損品 (溶接部中心)</td> <td><input type="text"/> (山側)</td> <td><input type="text"/> (谷側)</td> </tr> <tr> <td>新品 (母材部)</td> <td><input type="text"/> (山側)</td> <td><input type="text"/> (谷側)</td> </tr> </tbody> </table>		最大 (測定箇所)	最小 (測定箇所)	破損品 (母材部)	<input type="text"/> (山側)	<input type="text"/> (谷側)	破損品 (溶接部中心)	<input type="text"/> (山側)	<input type="text"/> (谷側)	新品 (母材部)	<input type="text"/> (山側)	<input type="text"/> (谷側)
	最大 (測定箇所)	最小 (測定箇所)											
破損品 (母材部)	<input type="text"/> (山側)	<input type="text"/> (谷側)											
破損品 (溶接部中心)	<input type="text"/> (山側)	<input type="text"/> (谷側)											
新品 (母材部)	<input type="text"/> (山側)	<input type="text"/> (谷側)											
【評価】	<p>× 当該排気管伸縮継手のベローズにおける破面観察及</p>												

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

		び組織観察の結果より、脆性破面の特徴は認められておらず、 σ 相の析出もないことから脆化(σ 相脆化)は発生していないと評価する。また、マイクロビッカース硬さ試験の結果より、当該排気管伸縮継手のベローズと新品材料の硬さは同程度であることから脆化が破損の要因ではない。
--	--	--

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

要因調査結果及び評価
(クリープ破損)

	経年劣化—材料劣化—クリープ—クリープ破損	
【要因】	ベローズにクリープが発生した場合、破損する可能性がある。	
【調査方法】	<p>当該排気管伸縮継手のベローズについて、サンプル破片のクリープの有無を以下の方法にて確認する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡による破面観察 	
【調査結果】	<p>破面観察を実施した結果、サンプル破片にクリープポイドや微小き裂、粒界割れやディンプルがないことを確認した。</p> <p>また、当該排気管伸縮継手のベローズは高温特性に優れている材料を使用していること及び年間運転時間が約 20 時間であり短いことからクリープが発生する可能性は低い。</p> <p>光学顕微鏡・走査型電子顕微鏡観察結果は、添付資料 1 8 を参照。</p>	
【評価】	×	当該排気管伸縮継手のベローズにクリープは発生していないため、要因ではない。

[評価欄記号説明]

×：要因ではない

△：複合要因の一つとして考えられる

○：主要因と推定される

要因調査結果及び評価
(機器・配管からの振動による疲労割れ)

【要因】	<p>経年劣化—疲労—振動—機器・配管の振動</p> <p>機器・配管の振動（動的機器からの振動伝播や圧力脈動）により、ベローズに疲労割れが発生した場合、破損する可能性がある。</p>
【調査方法】	<ul style="list-style-type: none"> ・取替え後の試運転時に排気管伸縮継手の振動計測を行い、他の排気管伸縮継手と振動値を比較する。 ・振動による変位で発生するひずみを概算し、そのひずみを用いて疲労評価を行う。 ・ディーゼル機関と当該排気管伸縮継手の共振がないことを確認するため、排気管に取付いた状態にて当該排気管伸縮継手の打診試験を行い、ディーゼル機関との固有周波数を比較する。 ・ディーゼル機関据付部、過給機の振動計測及び過去の計測結果を比較することで、経年劣化による振動値の有意な上昇傾向がないことを運転性能記録により確認する。
【調査結果】	<ul style="list-style-type: none"> ・振動計測の結果、当該排気管伸縮継手の振動値は最大 <input type="text"/> (軸直角方向) であり、他の排気管伸縮継手と比較しても、同程度の振動値であることを確認した。(図 49-1) ・表 22-1 に示す排気管伸縮継手・強度計算書を基に、振動による変位 <input type="text"/> によって発生するひずみを概算した結果、ベローズに約 3.0×10^{-4} のひずみが発生することを確認した。(添付資料 22 参照) ・当該排気管伸縮継手の打診試験の結果、固有周波数は <input type="text"/> 以上であった。 ・運転性能記録（平成 20 年排気管伸縮継手取替え時、平成 30 年 3 月点検時）の機関据付部及び過給機の振動計測結果は許容値（機関据付部：<input type="text"/> 過給機：<input type="text"/>）以下であり、振動値に有意な上昇傾向がないことを確認した。(図 49-2)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

【評価】	×	<p>当該排気管伸縮継手の振動計測の結果、他の排気管伸縮継手と比較して同程度の振動値であり問題ない。</p> <p>振動による変位 [] によって発生するひずみ(約 3.0×10^{-4})は繰り返し回数 10^6 回の許容ひずみ(約 2.8×10^{-3})と比較して小さい。また、振動計測は排気管伸縮継手の上流及び下流のフランジ面にて行っており、振動の発生源は両者とも D/G であるため、振動の位相は同じだと考えられる。このため、フランジ面間の位相差(ベローズに加わる変位)は測定値より小さいと考えられることから、高サイクル疲労の要因にはならない。</p> <p>排気管伸縮継手の固有周波数は [] 以上であり、ディーゼル機関の卓越周波数 12Hz とずれていることから、D/G 運転による排気管伸縮継手の共振は発生していない。また、ディーゼル機関据付部及び過給機の振動値は許容値以内であり、排気管伸縮継手取替え時から上昇傾向がないことから経年劣化による振動値の有意な上昇傾向はない。</p> <p>以上により、機器・配管の振動によって当該排気管伸縮継手が破損する可能性は低いことから要因ではない。</p>
------	---	---

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

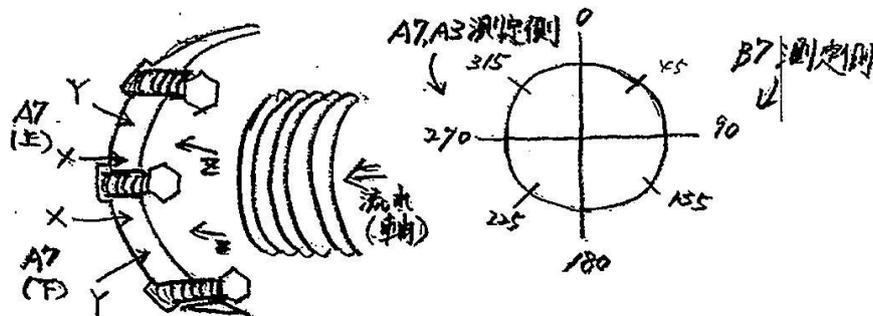
記録番号:	
浜岡原子力発電所 第5号機	中部電力確認者 XXXXXXXXXX
作業 非常用ディーゼル発電設備排気管点検工事	
振 動 測 定 記 録 (総 括 表)	承認 審査 作成者

定格時に測定を行う。

単位: μm

対象箇所	測定箇所 (流れ方向から見て)	上流フランジ	下流フランジ
A7(上)	水平(270°)		
	垂直(315°)		
	軸(315°)		
A7(下)	水平(270°)		
	垂直(225°)		
	軸(225°)		
A3(上)	水平(270°)		
	垂直(315°)		
	軸(315°)		
A3(下)	水平(270°)		
	垂直(225°)		
	軸(225°)		
B7(上)	水平(90°)		
	垂直(45°)		
	軸(45°)		
B7(下)	水平(90°)		
	垂直(135°)		
	軸(135°)		
A6(上)	水平(270°)		
	垂直(315°)		
	軸(135°)		
A6(下)	水平(270°)		
	垂直(225°)		
	軸(225°)		

測定箇所図



計測器: 振動計C-E-84

測定日: 2018年7月14日
測定者: XXXXXXXXXX

図 49-1 排気管伸縮継手フランジ部振動計測結果

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

<p>浜岡原子力発電所 第5号機</p> <p>機器名 : 非常用ディーゼル発電装置 (A・B・C系)</p> <p>機関振動計測記録</p>		<p>記録番号 1-5-(4)</p> <p>中部電力確認</p>	
		承認 審査 作成	
		<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;">承認 20.9.29</div> <div style="text-align: center;">審査 20.9.29</div> <div style="text-align: center;">作成 20.9.29</div> </div>	
点検年月日	平成20年 9月29日	点検者	
<p>1) 計測位置図 ⇒ からみて 左 : A側 右 : B側</p>			
<p>2) 計測計器 振動計 : VM3314A 2041637</p> <p>判定基準 : 許容値以内であること</p>			
<p>3) 計測結果 ※ベース上にて計測 (全振幅) 単位: 1/1000mm</p>			
	位置		
方向		① ② ③ ④ ⑤ ⑥ ⑦ ⑧	
側 A	水平		
	垂直		
	軸方向		
側 B	水平		
	垂直		
	軸方向		
許容値			
[記事]			

図 49-2 機関据付部振動計測結果 (1/2)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

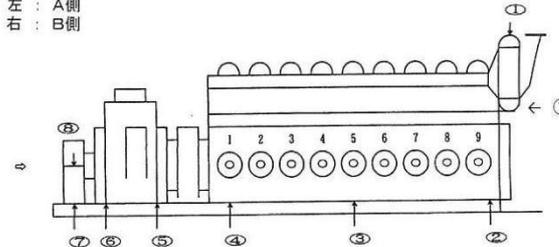
<p>浜岡原子力発電所 第 5 号機</p> <p>機器名 : 非常用ディーゼル発電装置 (A (B) C 系)</p> <p>機 関 振 動 計 測 記 録</p>		<p>記録番号 1-7</p> <p>中部電力 確 認</p> <p>承認 審査 作成</p> <p>H 30 . 3 . 9 H 30 . 3 . 9 H 30 . 3 . 9</p>																																						
点検年月日	平成30年3月9日	点検者																																						
<p>1) 計測位置図 ⇒ からみて 左 : A側 右 : B側</p>  <p>2) 計測計器 振動計 : NPS-H9</p> <p>判定基準: 許容値以内であること</p> <p>3) 計測結果 ※ベース上にて計測 (全振幅) 単位: 1/1000mm</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th colspan="2" rowspan="2">方向</th> <th>位置</th> <th>①</th> <th>②</th> <th>③</th> <th>④</th> <th>⑤</th> <th>⑥</th> <th>⑦</th> <th>⑧</th> </tr> <tr> <th>側</th> <th colspan="9" rowspan="6" style="text-align: center; vertical-align: middle;">[Redacted Measurement Results]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">A</td> <td>水平</td> <td></td> </tr> <tr> <td>垂直</td> <td></td> </tr> <tr> <td>軸方向</td> <td></td> </tr> <tr> <td rowspan="3">B</td> <td>水平</td> <td></td> </tr> <tr> <td>垂直</td> <td></td> </tr> <tr> <td>軸方向</td> <td></td> </tr> <tr> <td colspan="2">許 容 値</td> <td></td> </tr> </tbody> </table>			方向		位置	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	側	[Redacted Measurement Results]									A	水平		垂直		軸方向		B	水平		垂直		軸方向		許 容 値		
方向		位置			①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧																												
		側	[Redacted Measurement Results]																																					
A	水平																																							
	垂直																																							
	軸方向																																							
B	水平																																							
	垂直																																							
	軸方向																																							
許 容 値																																								
<p>判定日: 平成30年3月9日 判定者: [Redacted] 総合判定: 合格</p>																																								

図 49-2 機関据付部振動計測結果 (2/2)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

要因調査結果及び評価
(熱疲労割れ)

【要因】	経年劣化—疲労—熱疲労—熱疲労割れ	
	D/Gの起動、停止時の排気管の熱伸縮により、ベローズに熱疲労が蓄積して破損する可能性がある。	
【調査方法】	<p>当該 D/G について、運転中における当該排気管伸縮継手の軸方向と軸直角方向の収縮量及び、D/Gの起動、停止回数と設計上の繰返し寿命回数を設計仕様と比較する。</p> <p>また、当該排気管伸縮継手のベローズについて、疲労破面の有無を光学顕微鏡及び走査型電子顕微鏡による破面観察にて確認する。</p>	
【調査結果】	<ul style="list-style-type: none"> ・D/G 運転中の当該排気管伸縮継手の軸方向及び軸直角方向の収縮量は、軸方向は最大 7.8mm であり、排気管伸縮継手の設計上の軸方向変位 と比較して小さいことを確認した。(図 50-1) また、軸直角方向についても上流及び下流のフランジ間の差は 1mm であり、設計上の軸直角方向変位 と比較して小さいことを確認した。(図 50-2) ・D/G(B)の起動、停止(常温状態から運転時の高温状態)回数は、前回取替え時(平成 20 年)から起算すると 163 回であり、設計で考慮している繰返し寿命回数 ()には至っていないことを確認した。(図 50-3) ・破片 1, 5, 切出し片 A の破面観察を実施し、各々の破面において疲労破面(ストライエーション状模様)及び切出し片 A にラチェットマークが確認された。光学顕微鏡・走査型電子顕微鏡観察結果は、添付資料 18 を参照。 	
【評価】	△	排気管伸縮継手の収縮量は設計上の値を下回っており、起動、停止回数も設計で考慮している繰返し寿命回数よりも少ないことを確認した。一方、破面観察より疲労破面が確認されたことから、低サイクル疲労の可能性は否定できない。

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

浜岡原子力発電所 第5号機		記録番号: 		
作業 非常用ディーゼル発電設備排気管点検工事		承認 審査 作成者		
熱変位測定記録 (総括表)				
測定日: 7月5日 対象号機: 非常用D/G(B)				
単位: mm				
対象箇所	測定箇所	停止時	定格時	差
A1	45度			
	90度			
	135度			
A2	45度			
	90度			
	135度			
A3	45度			
	90度			
	135度(フランジ外側)			
A4	45度(フランジ外側)			
	90度(フランジ外側)			
	135度			
A5	45度			
	90度			
	135度			
A6	45度			
	90度			
	135度			
A7	45度	99.90	92.10	7.80
	90度(フランジ外側)	131.70	125.00	6.70
	135度(フランジ外側)	132.60	125.05	7.55
A8	45度(フランジ外側)			
	90度(フランジ外側)			
	135度			
A9	45度			
	90度			
	135度			
A10	45度			
	90度			
	135度			
A11	45度			
	90度			
	135度			
A12	45度			
	90度			
	135度			
B7	45度			
	90度(フランジ外側)			
	135度(フランジ外側)			

注) A9～A12については、作業安全上の観点より、測定不可とする。

計測器: ノギス CS-51 測定者: XXXXXXXXXX

図 50-1 熱変位測定結果

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

浜岡原子力発電所 第5号機		記録番号:	
作業 非常用ディーゼル発電設備排気管点検工事		中部電力確認者	
熱 変 位 測 定 記 録 (伸縮継手垂直方向)		承認	審査
		作成者	

伸縮継手	測定フランジ	停止時	定格出力時	差	備考
A7	上流	0	2	2	
	下流	0	1	1	

単位: mm

測定日: 2018年7月19日
 確認者: ██████████

1 点検内容
 伸縮継手の垂直方向への変位について確認をする。

測定工具
 ・鋼尺
 ・レーザー墨だし器

図 50-2 熱変位測定 (垂直方向) 結果

3, 4号については過去の運転日誌が残されていないため、定期的な運転イベントと経過月数とで計算により算出する。(添付-1, 3参照)

3. D/G運転回数および運転時間調査結果

(1) 5号D/G (B) 運転回数および運転時間調査結果

対象	運転回数 (回)	運転時間 (h)	備考
5号D/G (B)	347	413	
	163	212	前回伸縮継手取替～今回破損まで

(2) 5号D/G (A) (C) 運転回数および運転時間調査結果

対象	運転回数 (回)	運転時間 (h)	備考
5号D/G	(A)	580	494
	(C)	337	417

(3) 3, 4号D/G運転回数および運転時間調査結果

対象	運転回数 (回)	運転時間 (h)	備考
3号D/G	(A)	826	898
	(B)	826	898
	(H)	826	898
4号D/G	(A)	889	768
	(B)	889	768
	(H)	889	768

4. 添付資料

- 1 3～5号機D/G運転回数および運転時間調査結果
- 2 5号D/G (B) (A) (C) 運転回数・運転時間 (プラント運開以降～破損まで)
- 3 3, 4号プラント運開～破損までの運転回数および運転時間算出結果

以上

図 50-3 D/G 運転回数及び運転時間実績調査結果

要因調査結果及び評価
(ベローズとフランジの接触)

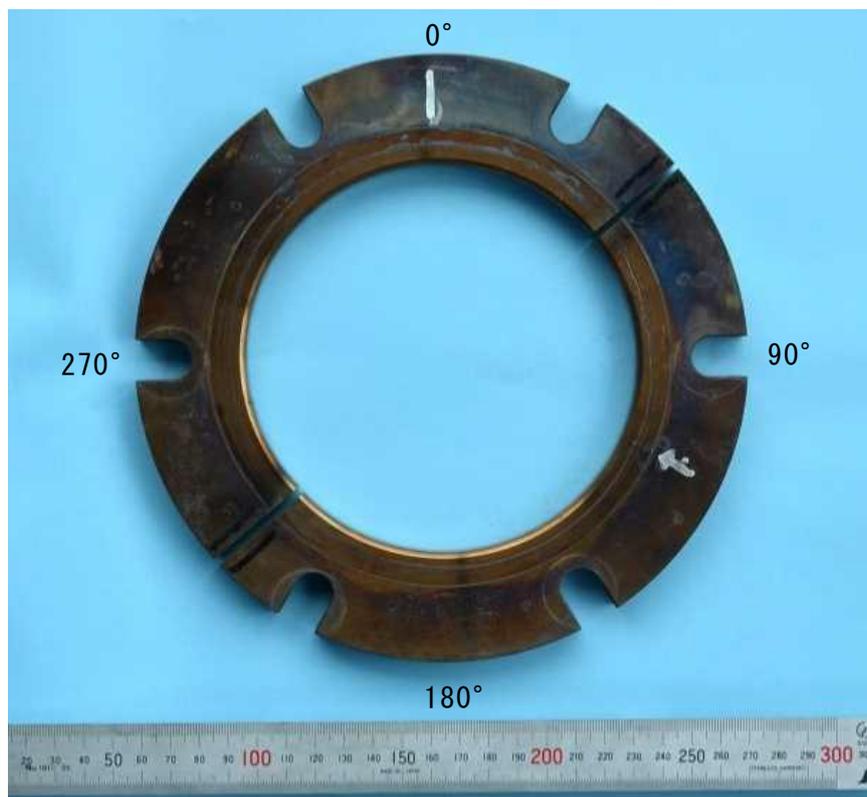
<p style="text-align: center;">【要因】</p>	<p>経年劣化—外カーフランジとの接触—ベローズの側面部の接触摩耗</p> <p style="text-align: center;">D/G 運転時に排気管の熱膨張によりベローズ側面部とフランジ端面が接触した場合、ベローズが破損する可能性がある。</p>
<p style="text-align: center;">【調査方法】</p>	<p>ベローズとフランジの接触の有無を確認するため、以下を調査する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・当該排気管伸縮継手のフランジについて接触痕の有無 ・当該排気管伸縮継手施工時のフランジ隙間計測記録より、フランジとベローズの隙間が判定基準を満足していること ・当該排気管伸縮継手破損事象後の試運転時（平成 30 年 6 月 7 日）の外観点検記録より、ベローズとフランジとの接触の有無
<p style="text-align: center;">【調査結果】</p>	<p>当該排気管伸縮継手の外観点検の結果、フランジ内面に変色、外面に接触痕を確認した。(図 51-1, 2)</p> <p>当該排気管伸縮継手取付け時（平成 20 年）のフランジ隙間計測記録より、フランジとベローズの隙間が判定基準（ 以上）を満足していることを確認した。(図 51-3)</p> <p>当該排気管伸縮継手破損事象後の試運転時（平成 30 年 6 月 7 日）の外観点検において、ベローズとフランジとの接触は確認されなかった。(図 51-4) また、当該排気管伸縮継手のベローズ破片復元後の外観観察の結果から、ベローズ最外面の破片にフランジとの接触痕は確認されなかった。</p>
<p style="text-align: center;">【評価】</p>	<p style="text-align: center;">×</p> <p>当該排気管伸縮継手のフランジ外面に確認した接触痕については、当該排気管伸縮継手取付け時（平成 20 年）にベローズつば部と接触し、発生したものである。フランジ内面に確認した変色については、運転時の温度むらによるものと推定する。</p> <p>以上より、フランジ外面に接触痕が確認されたものの、フランジ内面に接触痕は確認されなかったため、ベ</p>

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

		ローズ側面部とフランジ端面の接触は当該排気管伸縮継手破損の要因ではない。
--	--	--------------------------------------

[評価欄記号説明]

- × : 要因ではない
- △ : 複合要因の一つとして考えられる
- : 主要因と推定される

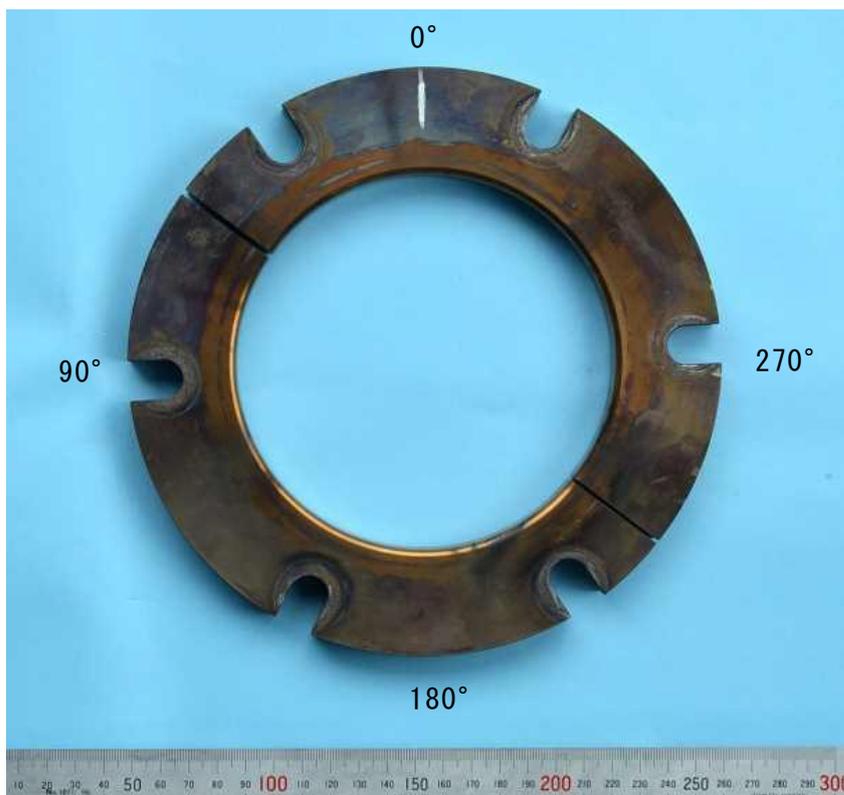


ガス入口側フランジ切断面 入口ー上流側



ガス入口側フランジ切断面 ガス入口ー上流側 0° 付近拡大

図 51-1 ベローズつば部との接触痕(フランジ外面)

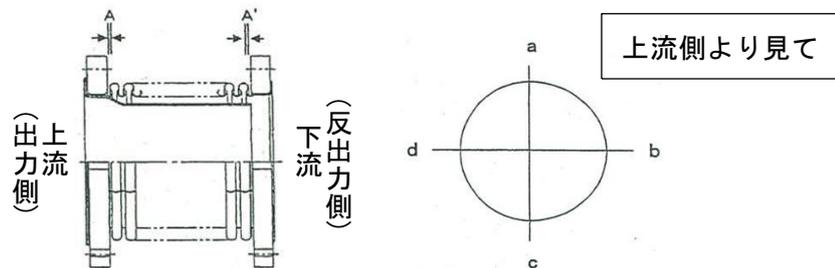
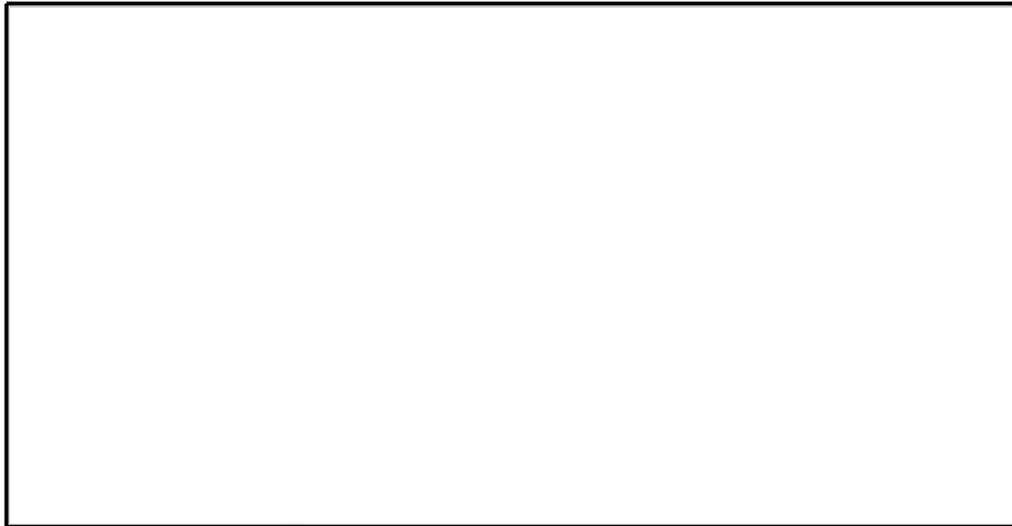


ガス入口側フランジ切断面 入口ー下流側



ガス入口側フランジ切断面 ガス入口ー下流側 0° 付近拡大

図 51-2 ベローズの変色(フランジ内面)



判定基準: A, A' が 以上であること

(単位: mm)

		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	
A 列 側	出力側	a							5.40					
		b							6.30					
		c							6.30					
		d							6.30					
	反出力側	a							5.40					
		b							5.40					
		c							5.40					
		d							5.40					
B 列 側	出力側	a												
		b												
		c												
		d												
	反出力側	a												
		b												
		c												
		d												

判定: 合格

図 51-3 フランジ隙間計測記録(抜粋)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



図 51-4 試運転時の当該排気管伸縮継手の外観点検結果

要因調査結果及び評価
(D/G 運転時の排気管の変形)

<p style="text-align: center;">【要因】</p>	<p>経年劣化—外力—芯ずれ等—排気管の変形</p> <p>D/G 運転時に想定以上の変形が排気管に生じた場合、排気管伸縮継手の変形し、ベローズに過大な応力が加わり破損する可能性がある。</p>	
<p style="text-align: center;">【調査方法】</p>	<p>当該排気管にはサポートが設置されており、締付けボルトの緩みにより、排気管がずれ、変形する可能性がある。このため、本事象発生後に作成したサポート部外観点検記録(図 52-1)及びサポート部締付確認記録(図 52-2)において、締付けボルトの緩みの有無を確認する。また、排気管に想定以上の変形が発生していないことを D/G 運転中の排気管伸縮継手の軸方向と軸直角方向の熱変位測定記録(添付資料 5 0 図 50-1, 2)により確認する。</p>	
<p style="text-align: center;">【調査結果】</p>	<p>本事象発生後に作成したサポート部外観点検記録及びサポート部締付記録において、排気管サポートの締付けボルトに緩みがないことを確認した。</p> <p>また、D/G 運転中の排気管伸縮継手の軸方向と軸直角方向の熱変位測定記録を確認した結果、許容値を満足していることを確認した。</p>	
<p style="text-align: center;">【評価】</p>	×	<p>排気管サポート部の緩みがないことから、排気管が大きくずれていることはなく、D/G 運転中の排気管伸縮継手の軸方向と軸直角方向の熱変位測定記録が許容値を満足していることから、排気管に変形は認められない。このため、ベローズに過大な応力が加わり破損する可能性はなく、要因ではない。</p>

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される評価結果

浜岡原子力発電所 第5号機 作業 非常用ディーゼル発電設備排気管点検工事 サポート部外観点検 記録		記録番号: 中部電力確認者 承認 審査 作成者																																																																																																																																																											
1 点検内容 排気管サポート部の外観確認およびボルトの緩み確認を行う。 ただし、配管配置および保温材の取り付け状況より、シリンダヘッド側表面のみの確認とする。																																																																																																																																																													
2 点検結果																																																																																																																																																													
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>No</th> <th>点検位置</th> <th>外観結果</th> <th>ボルト緩み</th> <th>点検日</th> <th>点検者</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>1-1</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>2-1</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>2-2</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>2-3</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td>3-1</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td>3-2</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td>3-3</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td>3-4</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td>4-1</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td>4-2</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td>4-3</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>12</td><td>4-4</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> </tbody> </table>	No	点検位置	外観結果	ボルト緩み	点検日	点検者	1	1-1	良否	有(無)	7月14日		2	2-1	良否	有(無)	7月14日		3	2-2	良否	有(無)	7月14日		4	2-3	良否	有(無)	7月14日		5	3-1	良否	有(無)	7月14日		6	3-2	良否	有(無)	7月14日		7	3-3	良否	有(無)	7月14日		8	3-4	良否	有(無)	7月14日		9	4-1	良否	有(無)	7月14日		10	4-2	良否	有(無)	7月14日		11	4-3	良否	有(無)	7月14日		12	4-4	良否	有(無)	7月14日		<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>No</th> <th>点検位置</th> <th>外観結果</th> <th>ボルト緩み</th> <th>点検日</th> <th>点検者</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>13</td><td>5-1</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>14</td><td>6-1</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>15</td><td>6-2</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>16</td><td>6-3</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>17</td><td>7-1</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>18</td><td>7-2</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>19</td><td>7-3</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>20</td><td>7-4</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>21</td><td>8-1</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>22</td><td>8-2</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>23</td><td>8-3</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> <tr><td>24</td><td>8-4</td><td>良否</td><td>有(無)</td><td>7月14日</td><td></td></tr> </tbody> </table>	No	点検位置	外観結果	ボルト緩み	点検日	点検者	13	5-1	良否	有(無)	7月14日		14	6-1	良否	有(無)	7月14日		15	6-2	良否	有(無)	7月14日		16	6-3	良否	有(無)	7月14日		17	7-1	良否	有(無)	7月14日		18	7-2	良否	有(無)	7月14日		19	7-3	良否	有(無)	7月14日		20	7-4	良否	有(無)	7月14日		21	8-1	良否	有(無)	7月14日		22	8-2	良否	有(無)	7月14日		23	8-3	良否	有(無)	7月14日		24	8-4	良否	有(無)	7月14日	
No	点検位置	外観結果	ボルト緩み	点検日	点検者																																																																																																																																																								
1	1-1	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
2	2-1	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
3	2-2	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
4	2-3	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
5	3-1	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
6	3-2	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
7	3-3	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
8	3-4	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
9	4-1	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
10	4-2	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
11	4-3	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
12	4-4	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
No	点検位置	外観結果	ボルト緩み	点検日	点検者																																																																																																																																																								
13	5-1	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
14	6-1	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
15	6-2	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
16	6-3	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
17	7-1	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
18	7-2	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
19	7-3	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
20	7-4	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
21	8-1	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
22	8-2	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
23	8-3	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
24	8-4	良否	有(無)	7月14日																																																																																																																																																									
3 判定基準 ・配管表面に有意な摺動痕がないこと。 ・サポートボルトに緩みがないこと。		使用工具 スパナ																																																																																																																																																											
4 判定 合格																																																																																																																																																													
点検位置図 <div style="border: 1px solid black; height: 100px; width: 100%;"></div>																																																																																																																																																													

図 52-1 サポート部外観点検結果

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

14(分解前) Rev6

締付確認記録

系統名	非常用ディーゼル発電設備		納 先	中部電力株式会社	
機器名称 (機器番号)	5号機 非常用ディーゼル発電設備(B) 機関付排気伸縮継手 (58894)		電力局	<input type="checkbox"/> 附立会 <input checked="" type="checkbox"/> 記録確認	
図面番号	-	Rev.	-	適用要領書番号	- Rev. -

1. 点検内容
保温取り外し後に、排気管サポートの締付ボルトの締付状況を確認する。

2. 点検結果

No	点検位置	結果	点検日	点検者	確認者	No	点検位置	結果	点検日	点検者	確認者
1	1-1	良・否				13	5-1	良・否			
2	2-1	良・否				14	6-1	良・否			
3	2-2	良・否				15	6-2	良・否			
4	2-3	良・否				16	6-3	良・否			
5	3-1	良・否				17	7-1	良・否			
6	3-2	<input checked="" type="checkbox"/> 良・否	6/6			18	7-2	良・否			
7	3-3	良・否				19	7-3	良・否			
8	3-4	良・否				20	7-4	良・否			
9	4-1	良・否				21	8-1	良・否			
10	4-2	良・否				22	8-2	良・否			
11	4-3	良・否				23	8-3	良・否			
12	4-4	良・否				24	8-4	良・否			

3. 判定基準
ボルトに緩みが無い事。

4. 判定
合格

3-2
 枠中のボルトナット4カ所の締付確認を実施した。

		承認	審査	作成
		2018.6.6	2018.6.6	2018.6.6

図 52-2 サポート部締付確認記録

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

要因調査結果及び評価
(排気管伸縮継手内筒の破損)

<p style="text-align: center;">【要因】</p>	<p>経年劣化－外力－内筒の破損</p> <p>内筒が破損した場合，排気ガスが直接ベローズに当たり破損する可能性やベローズが内筒と接触，摩耗して破損する可能性がある。</p>	
<p style="text-align: center;">【調査方法】</p>	<p>当該排気管伸縮継手の内筒の外観点検を行い，内筒の破損等の有無を確認する。</p>	
<p style="text-align: center;">【調査結果】</p>	<p>当該排気管伸縮継手の内筒の外観点検をした結果，内筒に破損はないことを確認した。更に，内筒がベローズの谷部と擦れた痕跡がないことを確認した。</p>	
<p style="text-align: center;">【評価】</p>	×	<p>当該排気管伸縮継手の内筒の外観点検の結果，異常は認められなかったことから，要因ではない。</p>

[評価欄記号説明]

- ×：要因ではない
- △：複合要因の一つとして考えられる
- ：主要因と推定される

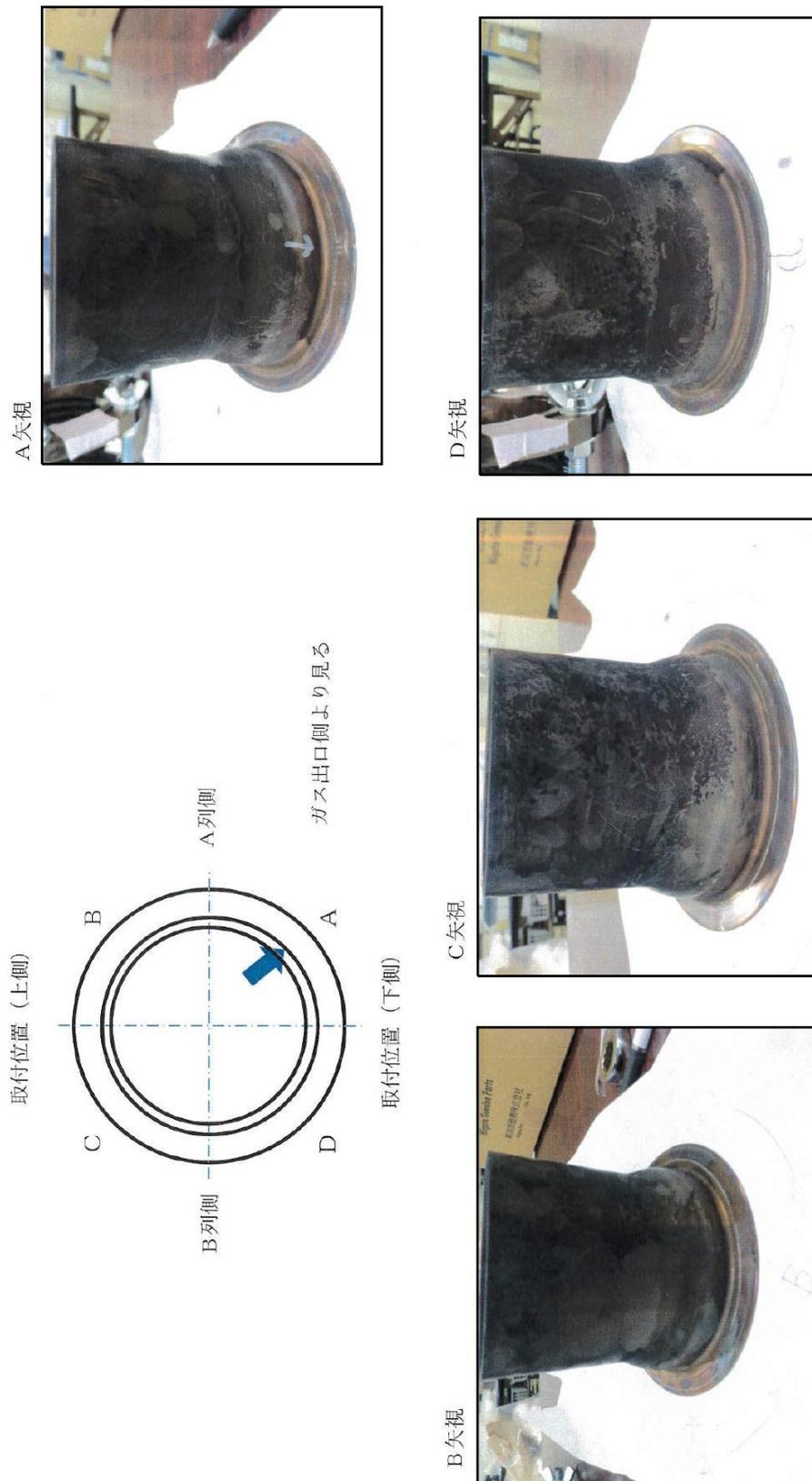


図 53-1 排気管伸縮継手内筒外観点検結果

要因調査結果及び評価
(不適合事象の反映)

<p>【要因】</p>	<p>運転経験の反映—運転経験の反映忘れ—不適合事象の是正処置未実施</p> <p>平成17年1月18日(5号機D/G供用開始)から平成30年6月5日(本事故発生)の期間に発生した自プラント及び他プラントにおける排気管伸縮継手に係る不適合事象について、是正処置が適切に実施されていない場合、排気管伸縮継手破損事象が発生する可能性がある。</p>
<p>【調査方法】</p>	<p>平成17年1月18日(5号機D/G供用開始)から平成30年6月5日(本事故発生)の期間に発生した自プラント及び他プラントにおける排気管伸縮継手に係る不適合事象を、自プラントについては是正処置報告書、他プラントについてはNUCIAトラブル情報及びスクリーニング報告書にて調査する。また、抽出した件名において是正処置を実施している場合は、是正処置が適切に実施していることについても確認する。</p>
<p>【調査結果】</p>	<p>平成17年1月18日(5号機D/G供用開始)から平成30年6月5日(本事故発生)の期間に発生した排気管伸縮継手に係る不適合事象を調査した結果、自プラントについては平成19年6月9日に発生した図54-1に示す排気管伸縮継手のベローズとフランジが接触、摩耗して破損した事象を1件確認した。なお、破損した排気管伸縮継手は本事故と同じ箇所であった。</p> <p>当該事象の是正処置として、事象発生以前は「取付け後\square以上」としていた排気管伸縮継手のベローズとフランジの隙間管理値を「製造時\square以上」及び「取付け時\square以上」とすることとし、平成20年9月27日に当該排気管伸縮継手の取替えを実施し、取替え後の隙間測定において隙間管理値を満足していることを確認した。また、平成30年6月5日の本事故発生後に実施した当該排気管伸縮継手の取替え時における隙間測定においても、隙間管理値を満足していることを確認した。(図54-2,3)</p> <p>また、当該排気管伸縮継手の外観点検の結果から、フランジに接触痕、摩耗による減肉の様相はみられなかった。(添付資料51参照)</p> <p>他プラントについては、NUCIAトラブル情報及びスクリーニ</p>

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

	ング報告書において排気管伸縮継手の破損事象がないことを確認した。	
【評価】	×	5号機 D/G 供用開始以降に発生した排気管伸縮継手に係る不適合事象について、自プラントについては排気管伸縮継手破損事象が発生しているものの、是正処置が適切に実施されていることから、要因ではない。また、他プラントについてはNUCIAトラブル情報及びスクリーニング報告書において排気管伸縮継手破損事象がなかった。

[評価欄記号説明]

× : 要因ではない

△ : 複合要因の一つとして考えられる

○ : 主要因と推定される

07-01-3 不適合処理報告書
 是正処置 (承認書・報告書) (発電所B用)

保存期間：10年見直し
 保存期限：//3/ 年度末見直し

報告		主管部署		原子炉課	
品質保証・検査部長 (是正処置承認書、是正処置報告書のみ)	主管部 部長	承認 課長		審査	作成
				副長	担当

← 是正処置承認書および是正処置報告書は
 管理グループ主幹へ回覧

No.	2007-1501-R-R	発生日：2007年6月9日	クラス： <input checked="" type="checkbox"/> B 1 <input type="checkbox"/> B 2 <input type="checkbox"/> 是正
件名	5号機D/G(B)の排気管伸縮継手破損について		
ヒューマンエラー	<input type="checkbox"/> 該当 <input checked="" type="checkbox"/> 否		
「保安規定19条 表119-1 2.(4)」に基づく記録【注1】	<input checked="" type="checkbox"/> 該当 (担当者：) <input type="checkbox"/> 否		
号機等	浜岡5号 [H5-R43-D-600B 排気管(B)]		
不適合等の内容	負荷遮断試験のため、D/G(B)を起動したところ、排気管より黒い排ガスの発生を確認した。 そのため、D/G(B)を直ちに停止し、保温材を取り外したところ、伸縮継手が破損していることを確認した。破損箇所の大きさ：約3cm×1.5cm(蛇腹2山分)		
不適合処理	処理結果 <input type="checkbox"/> 修正 <input type="checkbox"/> 特別採用 <input checked="" type="checkbox"/> 表示・隔離・廃棄・取替 <input type="checkbox"/> なし 当該伸縮継手を取り替えた。		
処理結果【注2】	再検証結果 取り替えた伸縮継手について、D/G(B)運転時に漏えいがないことを確認した。		
	完了年月日：2007年6月9日		

【注1】 以下の場合が該当する。また、担当者欄には、主管部署の長の氏名を記載する。
 ・点検・補修等を実施した構築物、系統および機器が所定の機能を発揮しうることを確認・評価できない場合
 ・最終的な機能確認では十分な確認・評価ができない場合にあって、定めたプロセスに基づき、点検・補修等が実施されていることが確認・評価できない場合
 【注2】 特別採用した場合は、原子力安全に与える影響の評価結果を記入する。
 再検証結果には、原子力施設の場合は、性能、機能試験等を実施し、文書については関連する文書との整合性、現場確認等により要求事項を満足することを確認した結果を記入する。

Rev. 39

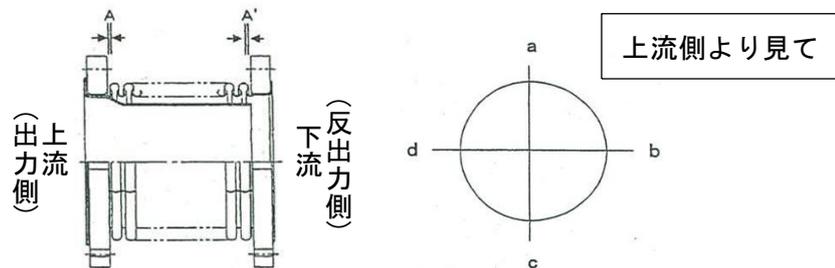
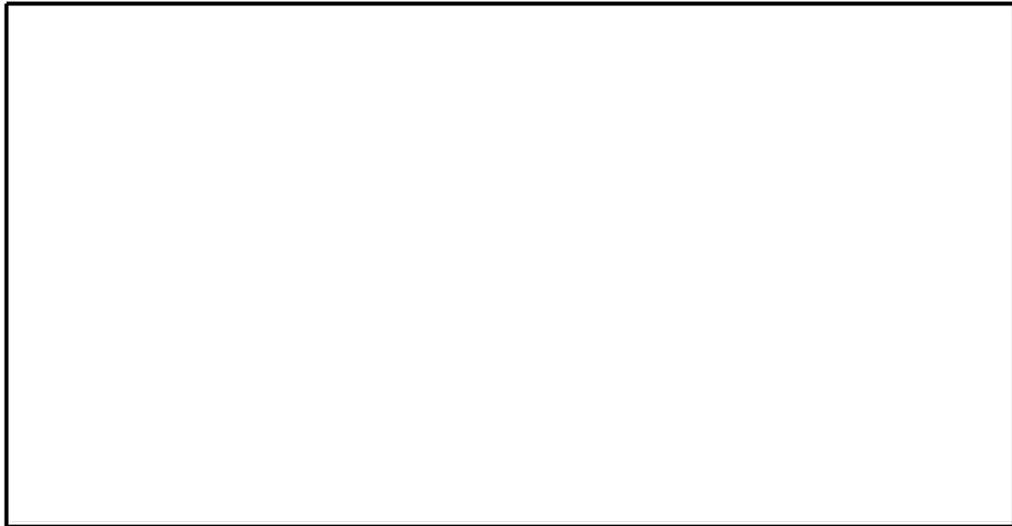
図 54-1 不適合管理記録(1/2)

	伸縮管のフランジ側を点検したところ、伸縮管とフランジが接触していたと思われる跡が確認されたことから、同部の隙間が不足していたことにより接触し、摩耗部を起点として破損に至ったと推定される。		
不適合等の原因			
処置の必要性評価	同事象発生防止のため是正が必要である。	<input type="checkbox"/> 一括是正 <input checked="" type="checkbox"/> 個別是正 管理グループ 主幹	
	<input checked="" type="checkbox"/> 処置要 <input type="checkbox"/> 処置否		
是正処置	同事象発生の未然防止として、同仕様である5号D/G排気伸縮継手について伸縮管とフランジの隙間が少ないもの(取り付け状態で <input type="checkbox"/> 以下のもの)5個について取替を実施する。 再発防止については検討後、後日回覧する。 <平成19年8月30日追記> 5号D/G排気伸縮継手について伸縮管とフランジの隙間が少ないもの(取り付け状態で <input type="checkbox"/> 以下のもの)5個の取替を実施した。(2007/6/20完了) 同事象再発防止としては、以下の処置を行う。 ①5号DG排気伸縮継手の伸縮管とフランジの隙間について、管理値を「製造時 <input type="checkbox"/> 以上」、「取付時 <input type="checkbox"/> 以上」とする。また、5号DGと同型式の排気伸縮継手が使用されている1号DGについても同様の管理値とする。 ②5号DGにおいて、現在の取付状態が「取付時 <input type="checkbox"/> 以上」を満足しないものについて次回定検において取替を実施する。なお、ペローズ部の摩耗量を評価した結果、取付状態で <input type="checkbox"/> を超えるものについては、少なくとも次回定検まで摩耗減肉による破損が発生しないものと評価されており、緊急性はない。 ③1号DGにおいて、現在の取付状態を順次確認し、「取付時 <input type="checkbox"/> 以上」を満足しないものについて取替を実施する。 完了予定年月： 2008年11月		
	処置方法と有効性評価【注3】	【処置方法に対する評価】 (<input checked="" type="checkbox"/> 適切 <input type="checkbox"/> 不適) 【他部署での水平展開検討の要否】 (<input type="checkbox"/> 要 <input checked="" type="checkbox"/> 否) 理由 <input type="checkbox"/> 原子炉課特有の不適合であり、水平展開は不要。	
	処置方法に対する評価および他部署での水平展開検討の要否 (管理グループ主幹記載)	・品質保証・検査部： <input type="checkbox"/> 品質保証G、 <input type="checkbox"/> 管理G、 <input type="checkbox"/> 検査管理課 ・総務部： <input type="checkbox"/> 警備課、 <input type="checkbox"/> 人事保健課、 <input type="checkbox"/> 経理課 ・技術部： <input type="checkbox"/> 技術課、 <input type="checkbox"/> 保安・防災課、 <input type="checkbox"/> 原子燃料課、 <input type="checkbox"/> 環境保安課、 <input type="checkbox"/> 放射線安全課、 <input type="checkbox"/> S&T管理G ・発電部： <input type="checkbox"/> 発電管理課、 <input type="checkbox"/> 発電運営課、 <input type="checkbox"/> 定検保安課、 <input type="checkbox"/> 廃棄物管理課 ・修保部： <input type="checkbox"/> 保守管理課、 <input type="checkbox"/> 設備保全課、 <input type="checkbox"/> 原子炉課、 <input type="checkbox"/> タービン課、 <input type="checkbox"/> 電気課、 <input type="checkbox"/> 計測課、 <input type="checkbox"/> 建築課、 <input type="checkbox"/> 土木課 <input type="checkbox"/> 研修センター、 <input type="checkbox"/> 原子力部、 <input type="checkbox"/> 他 ()	審査 管理グループ 主幹
処置結果	同事象再発防止としては、以下の処置を行った。 ①5号DG排気伸縮継手の伸縮管とフランジの隙間について、管理値を「製造時 <input type="checkbox"/> 以上」、「取付時 <input type="checkbox"/> 以上」とした。 ②5号DGにおいて、現在の取付状態が「取付時 <input type="checkbox"/> 以上」を満足しないものについて3回定検において取替を実施した。 1号DG排気伸縮継手については、「取付時 <input type="checkbox"/> 以上」を満足しないものの、運開から不具合事象は確認されておらず、平成20年度の維持点検において、当該部の目視点検を行った結果、接触等の異常が認められないことから、今後の摩耗による破損の可能性は極めて低いと考え、新規取替は実施しないこととする。 なお、管理値の「製造時 <input type="checkbox"/> 以上」・「取付時 <input type="checkbox"/> 以上」とは、排気伸縮継手の新規取替時の管理値であり、保守管理上の管理値を示すものではない。 完了年月日： 2008年11月26日	審査 管理グループ 主幹	

【注3】 ヒューマンエラー等の場合で、処置方法が教育・周知の場合は、有効性評価（定着状況の確認方法等）を含める。

図 54-1 不適合管理記録(2/2)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



判定基準: A, A' が 以上であること

(単位: mm)

		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	
A 列 側	出力側	a							5.40					
		b							6.30					
		c							6.30					
		d							6.30					
	反出力側	a							5.40					
		b							5.40					
		c							5.40					
		d							5.40					
B 列 側	出力側	a												
		b												
		c												
		d												
	反出力側	a												
		b												
		c												
		d												

判定: 合格

図 54-2 隙間測定結果 (取替え後)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

04(分解前) Rev6

寸法計測記録

系統名	非常用ディーゼル発電設備		納 先	中部電力株式会社	
機器名称 (機器番号)	5号機 非常用ディーゼル発電設備(B) 機関付排気伸縮継手 (56994)		電力殿	<input type="checkbox"/> 御立会 <input checked="" type="checkbox"/> 記録確認	
図面番号	-	Rev.	-	適用要領書番号	- Rev. -

1. 点検内容
保温取外し後に、伸縮継手の隙間を計測する。

2. 判定基準
A・A'がそれぞれ あること。

上流側より見て

3. 点検結果 (単位:mm)

		a	b	c	d	結果	点検日	点検者	確認者	確認者	
A 列	1-1	A'側				良・否					
		A側				良・否					
	2-1	A'側				良・否					
		A側				良・否					
	2-2	A'側				良・否					
		A側				良・否					
	2-3	A'側				良・否					
		A側				良・否					
	3-1	A'側				良・否					
		A側				良・否					
	3-2	A'側	4.00	3.50	- ※	3.90	B ・否	6/6			
		A側	3.90	4.00	- ※	3.80	B ・否	6/6			
	3-3	A'側					良・否				
		A側					良・否				
	3-4	A'側					良・否				
		A側					良・否				

※ 破損により計測不可。

4. 判定
合格

使用計測器: スキミゲージ (S-1)

	承認	審査	作成
	2018.6.6	2018.6.6	2018.6.6

図 54-3 隙間測定結果(取替え前)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

繰り返し疲労試験結果

1 目的

当該排気管伸縮継手のベローズに打痕を確認しており、この打痕が影響して破損に至った可能性がある。また、構造解析の結果からも、打痕部周辺にひずみが集中し、破損する結果が得られている。(添付資料 5 7 参照)

打痕と破損の因果関係を実試験で確認するため、ベローズに打痕を付与した試験体を用いて繰り返し疲労試験を行い、割れの発生状況を確認する。

2 試験体の打痕付与方法

当該排気管伸縮継手の打痕は、排気管伸縮継手取付け作業の際に、取付け箇所下部に位置する吸気管の吊ピース座（直径約 30mm）に落下して付いた可能性がある（図 55-1）。よって、吸気管の吊ピース座への落下を模擬するため、吊ピース座を模擬した金属製の棒を作成し、その上に排気管伸縮継手を落下させ打痕を付与した（図 55-2, 3）。打痕付与後にベローズの浸透探傷試験を実施し、線状指示が無いことを確認した。試験体は実機から取外した排気管伸縮継手を用いた。

棒径及び落下高さについては、現場状況を踏まえ決定した。

棒径：直径約 30mm，落下高さ：約 1000mm

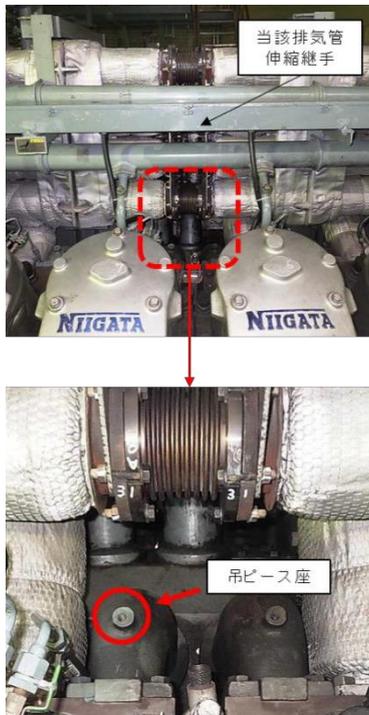


図 55-1 排気管伸縮継手設置状況

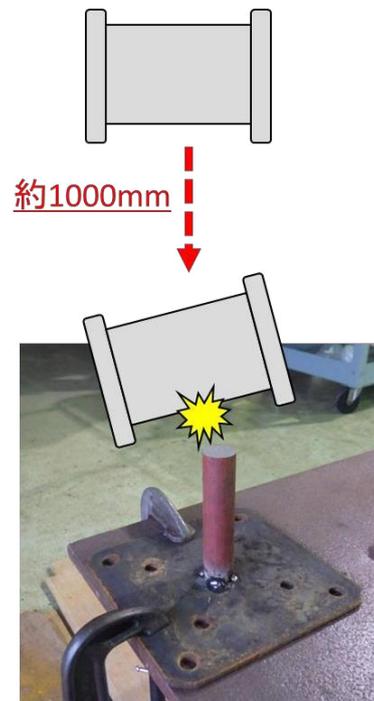


図 55-2 打痕付与概要



図 55-3 打痕付与状況

3 繰り返し疲労試験方法

材料強度試験機を用いて、排気管伸縮継手の軸方向の許容変位量を負荷し、繰り返し疲労試験を行い、割れの発生状況を確認した。

試験装置及び試験実施状況を図 55-4 に示す。

<試験条件>

①変位量（载荷ストローク） 軸方向変位：

排気管伸縮継手の軸方向の許容変位量とする。

②繰り返し速度：7sec/1 サイクル

排気管伸縮継手の 1 サイクルは、ディーゼル機関の起動・停止であり、実試験では試験時間が長期になるため、加速試験とした。繰り返し疲労試験による試験体の発熱等の影響の受けないことを考慮し、ひずみ速度（1%/sec）を設定し、構造解析（打痕形状 2R の場合）（添付資料 5 7 参照）で得られた打痕部に発生するひずみを基に本試験の繰り返し速度を設定した。

③内圧：大気圧

構造解析にて、内圧が破損に影響を与えないことを確認したことから、大気圧とした。（添付資料 5 7 参照）

④温度：室温（約 30℃）

表 55-1 の通り、構造解析（打痕形状 2R の場合）にて、高温（ディーゼル機関運転中）と室温で発生するひずみに大きな差異が無いことを確認したため、室温とした。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

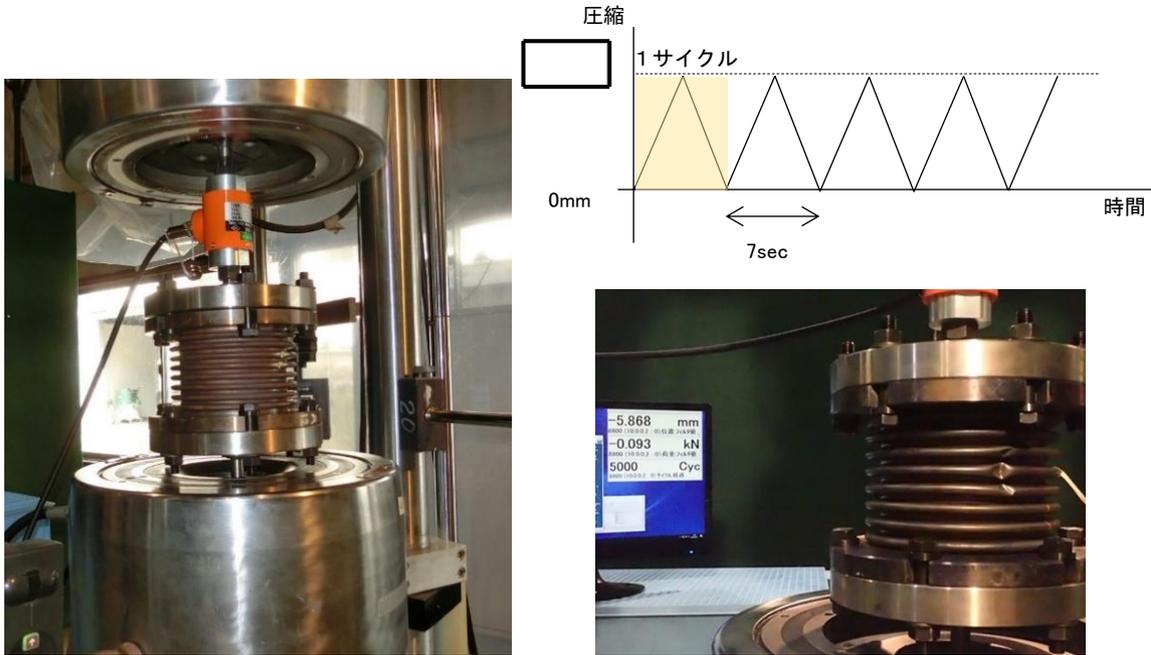


図 55-4 試験装置及び試験実施状況

表 55-1 構造解析結果（高温・室温比較）

	高温	室温
温度	<input type="text"/>	30°C
変位量（軸方向）	約 8mm	約 8mm
発生ひずみ（打痕部）	0.0351	0.0306

4 試験結果

繰り返し疲労試験を行った結果、繰り返し回数 3000~4000 回にて、図 55-5 に示す通り、打痕部周辺の外表面に割れを確認した。当該排気管伸縮継手のペローズ部の破片について確認した結果、打痕部周辺から割れが発生している可能性があり、繰り返し疲労試験のき裂開始点と概ね一致することを確認した。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

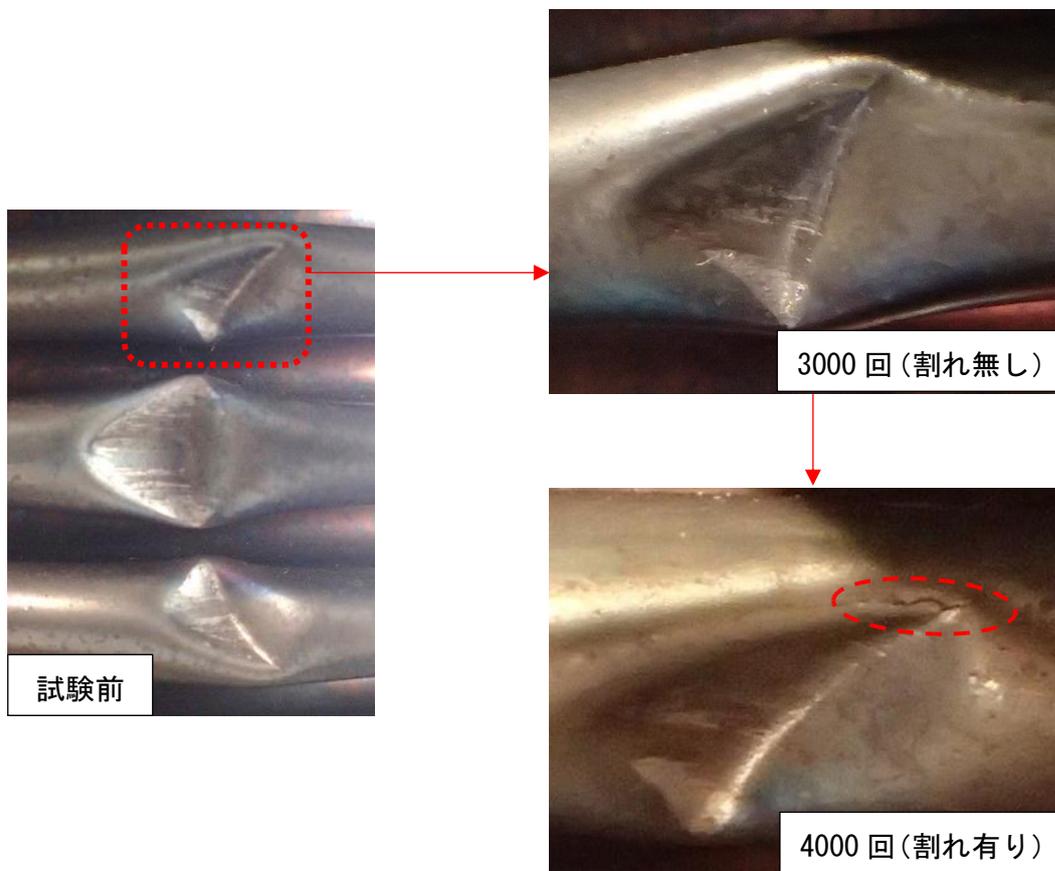


図 55-5 試験結果

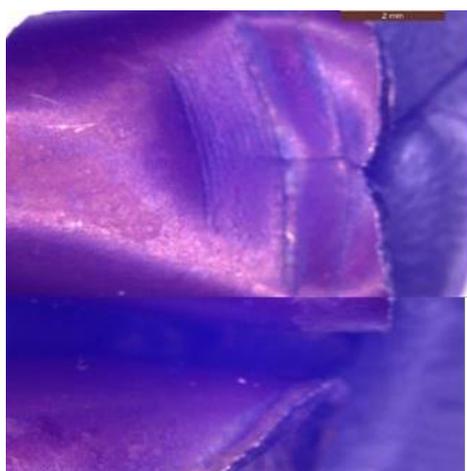


図 55-6 当該排気管伸縮継手打痕部の破損状況

5 実機と本試験における繰り返し回数の差異の考察

当該排気管伸縮継手では、約 160 回の繰り返し回数でペローズの割れが発生したが、本試験では、3000～4000 回の繰り返し回数で割れが発生したため、実機と本試験における繰り返し回数の差異について考察した。

(1) 繰り返し回数の差異に及ぼす要因

① 温度の違いによる繰り返し回数の相違 (約 4 倍)

温度の違いにより、疲労寿命を評価するための疲労線図が相違する。

実機 () を模擬した構造解析では、打痕形状 2R の場合、発生ひずみはペローズ内表面で 3.51%、繰り返し回数は約 150 回であった。室温条件を模擬した構造解析で得られた発生ひずみは 3.06%、繰り返し回数は約 600 回であった。高温条件と室温条件における解析で得られた発生ひずみは同等であるが、繰り返し回数に差が生じているのは、高温に比べ室温の方が同程度のひずみであっても疲労寿命が延びるからである。

② ペローズ内外表面の曲率の違いによる発生ひずみの相違 (約 1/2 倍)

構造解析の結果、ペローズ内表面と比較すると外表面は曲率が大きいことから発生するひずみが約 1/2 になることを確認している。

また、本試験はペローズの外表面の観察により割れを確認しているため、3000～4000 回よりも少ない繰り返し回数で、外表面より先に内表面の割れが発生している可能性がある。

③ 変位量 (載荷ストローク) の違いによるひずみの相違 ()

当該排気管伸縮継手の熱による軸方向変位の実測値は 7.8mm であったが、本試験では、加速試験を行っており、変位量を で実施した。したがって、発生するひずみは になる。

④ 打痕形状の違いによるひずみの相違 (不確定性大)

構造解析 (添付資料 5 7 参照) にて打痕形状の感度解析を実施した結果、打痕形状 1R と 3R で発生ひずみは約 2 倍、繰り返し回数は約 3 倍異なることが確認されている。打痕形状は落ち方や当たり方により不確定性が大きいため、実機で認められた打痕形状を再現することは不可能である。このため、打痕形状により繰り返し回数変動する可能性がある。

なお、治工具との接触模擬を考慮した繰り返し疲労試験も実施しており、排気管伸縮継手の落下模擬に比べ、打痕が浅く、打痕端部が緩やかな形状であり、繰

繰り返し回数 11000 回でも破損に至らなかった (図 55-7)。本試験の結果を踏まえると、当該排気管伸縮継手に確認された打痕は、治工具の接触では無く、排気管伸縮継手を落下させて付いたと考えられる。



図 55-7 治工具との接触模擬及び排気管伸縮継手の落下模擬による打痕形状の違い

(2) 繰り返し回数の差異に対する考察

繰り返し回数の差異に及ぼす要因を疲労線図にプロットしたものを図 55-8 に示す。

構造解析の結果、打痕が付いたベローズを実機の温度・変位量で熱収縮させると、打痕近傍のベローズ内表面が応力的に最も厳しく、約 150 回でベローズ内表面に疲労割れが発生しうる。

これを本試験に置き換えると、

- ①温度条件を室温に変えると、繰り返し回数は約 4 倍 (600 回) となる。
- ②評価対象をベローズ内表面から外表面に変えると、ひずみは 1/2 となる。
- ③変位量を繰り返し疲労試験条件に変えると、ひずみは となる。

(②, ③の 2 つの要因は相殺され、繰り返し回数への影響はない)

④打痕形状については、不確定性が大きく、繰り返し回数への影響を把握することは難しいが、解析上の繰り返し回数 600 回と、本試験 3000~4000 回の相違があることを勘案すると、ひずみ量は約 1/2 であったと推測できる。

従って、実機に比べ試験では形状が緩やかであった可能性がある。

なお、構造解析の感度解析においても形状の違いにより、ひずみが 2 倍程度変わりうることを確認している。

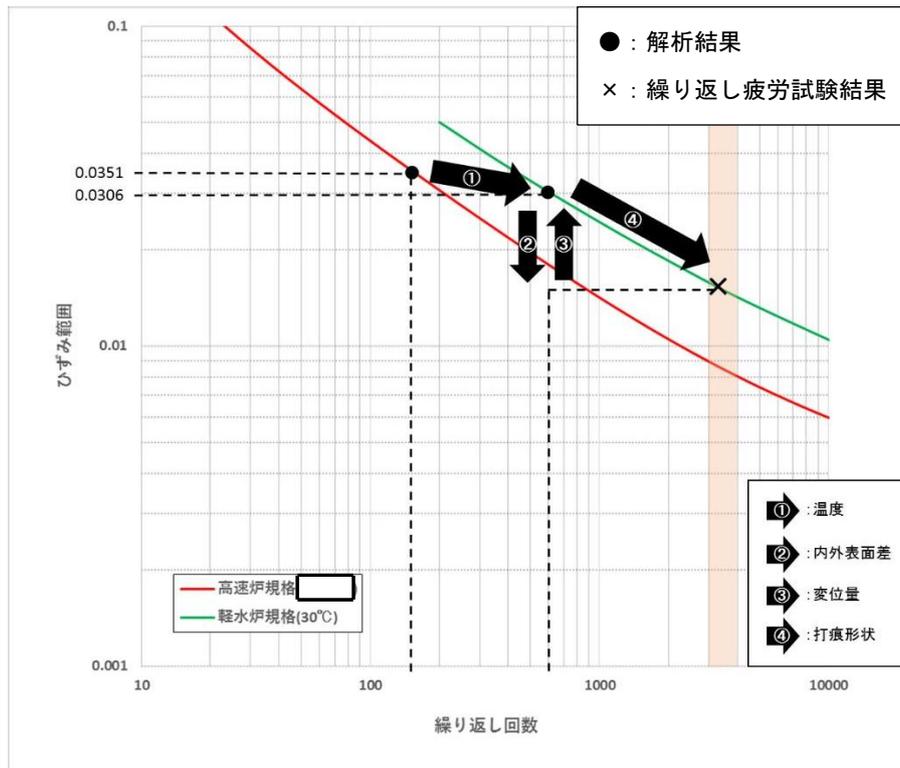


図 55-8 繰り返し疲労試験に用いた疲労線図

<参考>繰り返し回数とひずみの関係について

構造解析は、高温条件を評価するため、発電用原子力設備 設計・建設規格（2009 年版）<第Ⅱ編高速炉編>に規定される最適疲労破損式に基づき疲労評価を実施したが、425℃以下には適用できない。本試験は室温条件（約 30℃）であるため、発電用原子力設備 設計・建設規格（2016 年版）<第Ⅰ編軽水炉規格>に基づき、繰り返し回数とひずみの関係を確認した。

軽水炉規格に規定される設計疲労線図は、繰り返し回数と繰り返しピーク応力強さに安全率が考慮されているため、本試験にて想定されるペローズ破損における繰り返し回数とひずみの関係については、繰り返し回数を 20 倍及び繰り返しピーク応力強さを 2 倍して、算出した。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

当該排気管伸縮継手に確認した打痕の原因について

1 はじめに

排気管伸縮継手破損の要因分析により、「組立時における打痕・傷」が破損した要因の一つとなる可能性を確認した。本資料では、打痕の原因について調査を行った結果を取りまとめる。

2 調査対象

当該排気管伸縮継手に確認された打痕と、今回の事象を受けて実施した現場調査の中で他の排気管伸縮継手に確認された打痕を調査対象とする。調査対象を表 56-1 に示す。調査対象の打痕が確認された排気管伸縮継手は全て、5号機運転開始以降に現場での取替え実績があるものであった。

表 56-1 排気管伸縮継手に確認された打痕

対象号機	排気管伸縮継手設置場所	打痕の概略位置	排気管伸縮継手取付け時期
D/G(A)	A2	1山目 0° 付近 8山目 120° 付近	平成 20 年 10 月
D/G(B)	A7 (破損品)	3-4山目 110° 付近 3-4山目 180° 付近	平成 20 年 9 月
D/G(B)	A7	1山目 300° 付近	平成 30 年 6 月 (破損品の取替え)
D/G(B)	A12	1山目 100° 付近	平成 20 年 9 月
D/G(B)	B5	1山目 100° 付近	平成 19 年 6 月
D/G(B)	B12	1山目 180° 付近	平成 20 年 9 月

3 打痕の原因調査

当該排気管伸縮継手は、要因分析の通り、製作時及び取替え以降に打痕が付いた可能性はないことを確認した。その他の排気管伸縮継手も同様の調査を行い、製作時及び取替え以降に打痕が付いた可能性はないことを確認した。このため、調査対象の打痕は、いずれも排気管伸縮継手の製作後からディーゼル機関への取替えまでの期間に付いたものと推定した。

このことから、打痕が認められた排気管伸縮継手の運搬及び取替え作業に着目し、打痕が付いた要因の調査を行った。

(1) 運搬時

運搬時においては、排気管伸縮継手は箱に梱包された状態で D/G 室への持ち込みを行っており、排気管伸縮継手は緩衝材による緩衝防止処置がなされていることを聞き取りにより確認した。このため、運搬時における打痕の発生はない。

(2) 取替え時

取替え作業中の打痕の要因として、治工具との接触や排気管伸縮継手の落下が考えられる。打痕の位置が当該排気管伸縮継手とその他の排気管伸縮継手で異なることから、分けて調査を行った。

a 当該排気管伸縮継手について

打痕は、3-4 山部に 2 箇所並行して確認されている。

治工具の接触については、フランジ部の締付けボルトから離れていることから可能性は低い。また、打痕は排気管伸縮継手の裏面にも確認されており、狭隘な空間での締付け作業中に、排気管伸縮継手に確認されたものと同等の大きさの打痕を付けることは難しい。以上より、打痕は治工具との接触によるものではないと推定する。

排気管伸縮継手の落下については、排気管伸縮継手の取替え作業の観察を行った結果、狭隘部での取替え作業であるため、締付けボルト締付け作業中に排気管伸縮継手の支持が不十分になる場合があることを確認した。以上より、打痕は排気管伸縮継手の落下により付いた可能性がある。

また、取替え時の作業手順を調査した結果、使用治工具の指定を含めた作業手順や、打痕に対する判定基準が明確に定められていなかったことを確認した。なお、当時の作業員への聞き取りを試みたが、10 年以上前の作業のため、回答を得ることができなかった。

当社社員は、記録による確認を行っており、打痕に関する記載がなかったことから、打痕があることを認識していなかった。

以上から、取替え時の排気管伸縮継手の落下によって打痕が付き、作業後の目視点検で、打痕は認識したものの、軽微であり機器の健全性に影響を及ぼすものではないと判断した可能性は否定できない。

b その他の排気管伸縮継手について

打痕は、全てフランジに近接する 1 山または 8 山にて確認されている。

治工具が接触する可能性については、打痕はフランジ部の締付けボルトに近く、締付け作業中に工具先端が接触した可能性がある。

排気管伸縮継手の落下の可能性については、排気管伸縮継手を落下させた場合、作業エリアの突起部と接触し、打痕が付く可能性がある。

また、取替え時（平成 20 年、平成 30 年）の作業手順を調査した結果、使用治工具の指定を含めた作業手順や、打痕に対する判定基準が明確に定められていなかったことを確認した。

さらに、作業員への聞き取りを実施した結果、平成 20 年の取替え作業については、10 年以上前の作業のため、回答を得ることができなかったが、平成 30 年の D/G(B)A7 排気管伸縮継手の取替え作業については、取替え後に作業員は打痕の存在に気づいたが、打痕に対する判定基準が不明確であったため、打痕は軽微であり機器の健全性に影響を及ぼすものではないと判断し、報告を行わなかったことを確認した。

当社社員は、記録による確認を行っており、打痕に関する記載がなかったことから、打痕があることを認識していなかった。

以上から、取替え時の排気管伸縮継手の落下、又は取替え時の治工具との接触によって打痕が付き、作業後の目視点検で打痕は認識したものの、軽微であり機器の健全性に影響を及ぼすものではないと判断した可能性は否定できない。

4 取替え時に打痕を付けた要因の調査

以上の調査結果から、打痕はいずれも排気管伸縮継手の現場での取替え作業時に付いた可能性が高いことを確認した。一方で、D/G 製作時にディーゼル機関メーカーの工場にて取り付けした排気管伸縮継手には打痕が認められていないことから、取替え方法の違いを確認し、打痕が付いた背後要因を調査した。

その結果、現場作業時には排気管伸縮継手が定期取替えを行っていないこともあり、取替え手順が明確に定められていなかったのに対し、工場では「社内資格認定者^{※1}」であるディーゼル機関メーカーの社員が「機関全体組立指示書」に基づき、組立を行っていることを確認した。また、「機関全体組立指示書」には、「ボルト締付は、排気管伸縮継手に変形を与えぬよう注意すること」との記載があることを確認した。

以上より、打痕が付いた要因として以下を抽出した。

(1) 現場作業要領の不備

現場作業における作業要領において、ベローズを取扱う際の注意点の記載がなく、また、取替え作業時の適正工具の使用を含めた作業手順が明確でなかった。

(2) 薄肉部材に対して打痕が与える影響に関する力量不足

現場作業員は、排気管伸縮継手の定期取替えを行っておらず、ベローズを取扱う経験が少なかったため、運転中の変位を吸収するために設置された薄肉構

※1 手順書・指示書を理解しており業務に必要な資格を与えられた作業員

造のベローズが、打痕の影響を受けやすい部材であるという意識が低かった。このため、排気管伸縮継手への打痕を防止する対策を取らず、打痕を見つけた際にも健全性に影響を与えるものではないと誤って判断した。

また、当社社員も、取替え後の外観確認に立ち会っておらず、打痕が付いた状態で排気管伸縮継手を使用することを防止することができなかった。

5 まとめ

打痕はいずれも排気管伸縮継手の現場での取替え作業時に付いたものと推定した。打痕が付いた要因としては、現場作業要領の不備及び薄肉部材に対して打痕を与える影響に関する力量不足と評価した。

ベローズの打痕を模擬した構造解析を用いた疲労評価結果

1 目的

当該排気管伸縮継手ベローズに生じた打痕と破損の関係を確認するため、打痕を模擬した解析モデルを作成し、構造解析を行い、ベローズが疲労破壊に至る繰り返し回数を評価する。

2 解析概要

2. 1 解析方法

当該排気管伸縮継手を復元した後の外観確認にて確認した打痕を模擬した排気管伸縮継手の解析モデルを作成し、実機運転状態で測定した熱変位量を荷重条件として、ベローズに発生するひずみ量を算定する。

2. 2 解析プログラム

汎用有限要素法解析プログラム ABAQUS

2. 3 解析モデル

解析モデルは、排気管伸縮継手の設計図面を基に、1/4 対称形状の 3 次元モデルを作成した。また、複数連続した打痕数の違いにより発生するひずみを比較するため、打痕を 100° 付近に 1 箇所、190° 付近に 2 箇所連続して模擬した解析モデルを作成した。

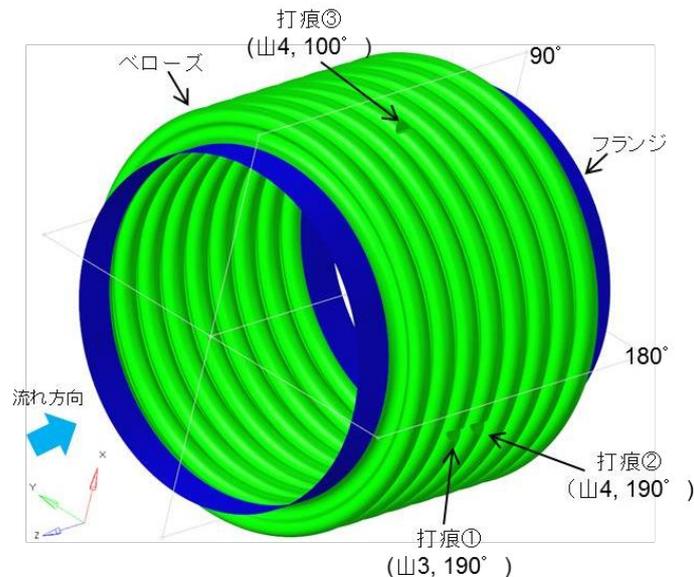


図 57-1 解析モデル

2. 4 打痕形状について

当該排気管伸縮継手の破片に確認された打痕の形状を測定し、その結果を踏まえて打痕をモデル化した。深さ方向については、き裂進展時の変形の影響を受けている可能性があるため、曲率を変化させた5種類の打痕形状をモデル化し、解析を実施した。また、参考として打痕がないパターンについても解析を行った。

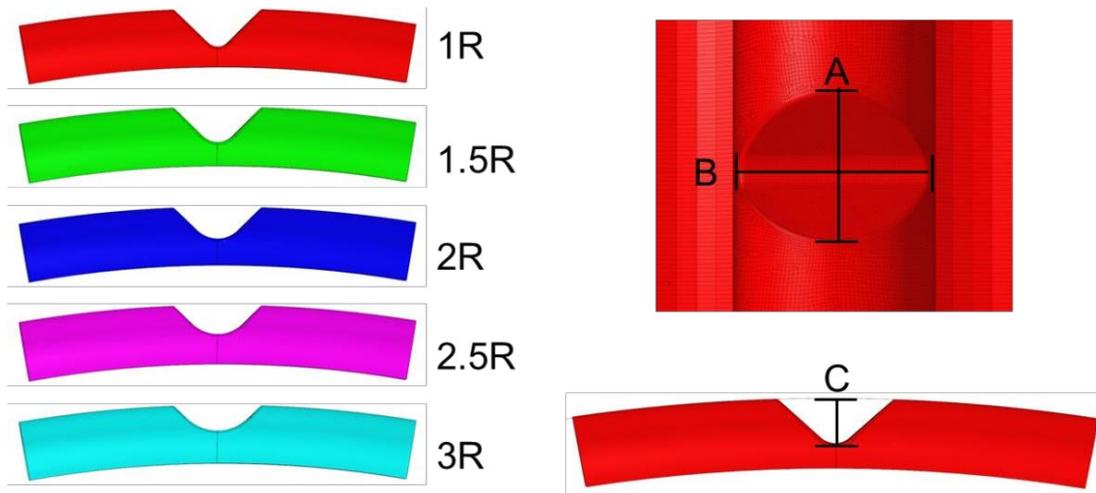


図 57-2 打痕形状の詳細

表 57-1 打痕形状一覧表

打痕形状 \ 寸法	A	B	C
1R	6.1mm	7.7mm	2.6mm
1.5R	6.1mm	7.5mm	2.4mm
2R	6.1mm	7.3mm	2.2mm
2.5R	6.1mm	7.1mm	2.0mm
3R	6.1mm	6.8mm	1.8mm

2. 5 入力条件

①内圧：

ペローズの内面に設計圧力を均一に負荷することで設定。

②温度：

D/G(B) 定格運転時における、排気管伸縮継手の温度測定結果を基に設定。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

③変位量：(軸方向) 7.8mm, (軸直角方向) 1mm

D/G(B) 定格運転時における, 排気管伸縮継手の実機運転による変位量測定計測結果を基に設定。

2. 6 応力ひずみ関係

応力ひずみ関係は, 動力炉・核燃料開発事業団 報告書「高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等」に記載されている「SUS321 の弾塑性応力-ひずみ関係式」を適用し, 算出した。本解析では, 真応力-真ひずみの関係式を用いた。

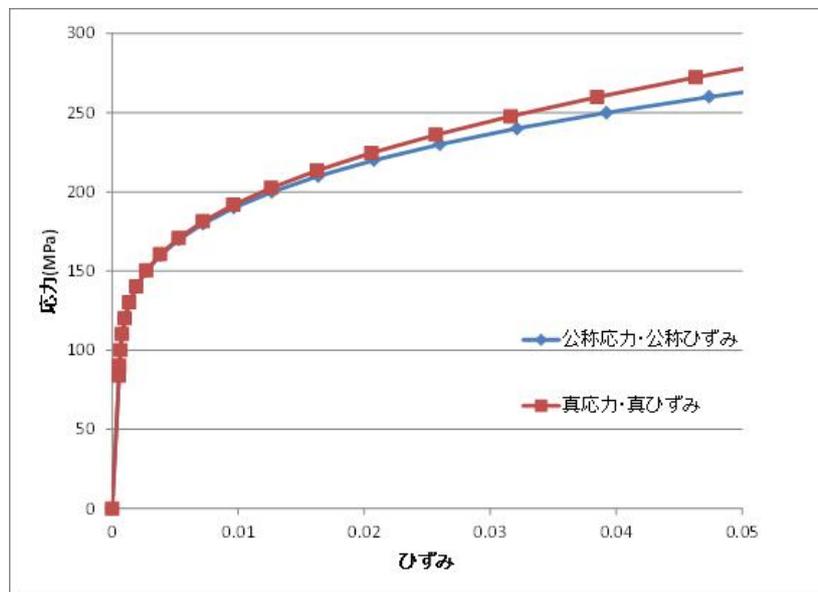


図 57-3 応力ひずみ線図

3 疲労評価方法

解析にて算定したベローズに生じるひずみ量から排気管伸縮継手ベローズの破損繰り返し数を確認した。疲労評価に用いるひずみ量と破損繰り返し数の関係については, 発電用原子力設備 設計・建設規格 (2009 年版) <第 II 編高速炉編> で規定されている SUS321 の最適疲労破損式を用いて算出した (軽水炉規格は, 430℃以上の評価ができない)。

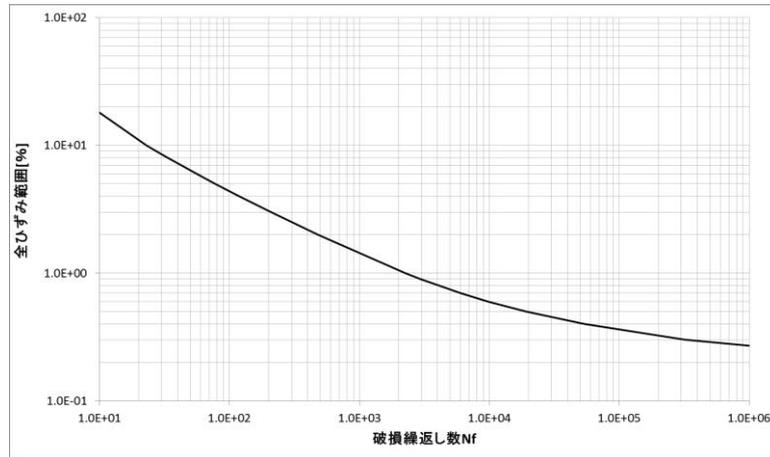


図 57-4 破損繰返し回数と全ひずみ範囲の関係 (の場合)

4 解析結果及び疲労評価結果

構造解析の結果、ベローズ健全部と比較して、打痕近傍（構造不連続部）でひずみ量が増大することを確認した。

また、疲労評価結果より、打痕形状によって、80~280 回程度の繰返し回数で疲労割れが発生することを確認した。

表 57-2 解析結果及び疲労評価結果一覧（打痕有り）

打痕形状	相当ひずみ				許容繰返し回数			
	打痕部 山3・190°	打痕部 山4・190°	打痕部 山4・100°	0°谷部	打痕部 山3・190°	打痕部 山4・190°	打痕部 山4・100°	0°谷部
1R	0.0488	0.0451	0.0388	0.00314	81	94	126	229920
1.5R	0.0406	0.0377	0.0325	0.00314	116	133	179	228433
2R	0.0351	0.0327	0.0281	0.00314	154	177	239	229560
2.5R	0.0302	0.0282	0.0242	0.00314	207	237	324	230746
3R	0.0261	0.0244	0.0209	0.00314	278	317	437	231940

表 57-3 解析結果及び疲労評価結果一覧（打痕無し）

打痕形状	相当ひずみ		許容繰返し回数	
	最大部 谷1・180°	0°谷部	最大部 谷1・180°	0°谷部
無し	0.00512	0.00312	17680	241415

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

＜発生ひずみ算出結果：打痕形状 2R の場合＞

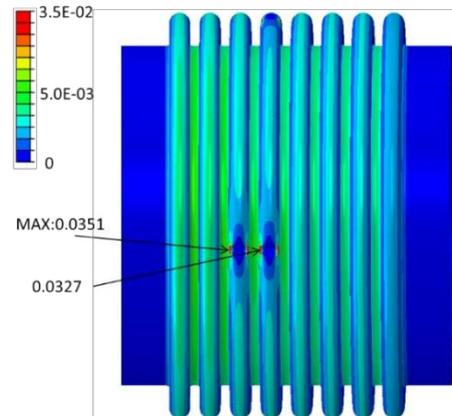


図 57-5 解析結果（打痕形状 2R）

＜発生ひずみ算出結果：打痕無し＞

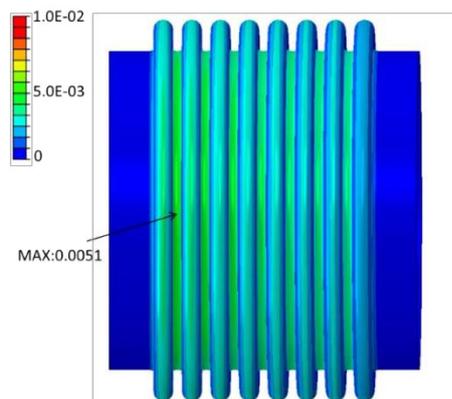


図 57-6 解析結果（打痕無し）

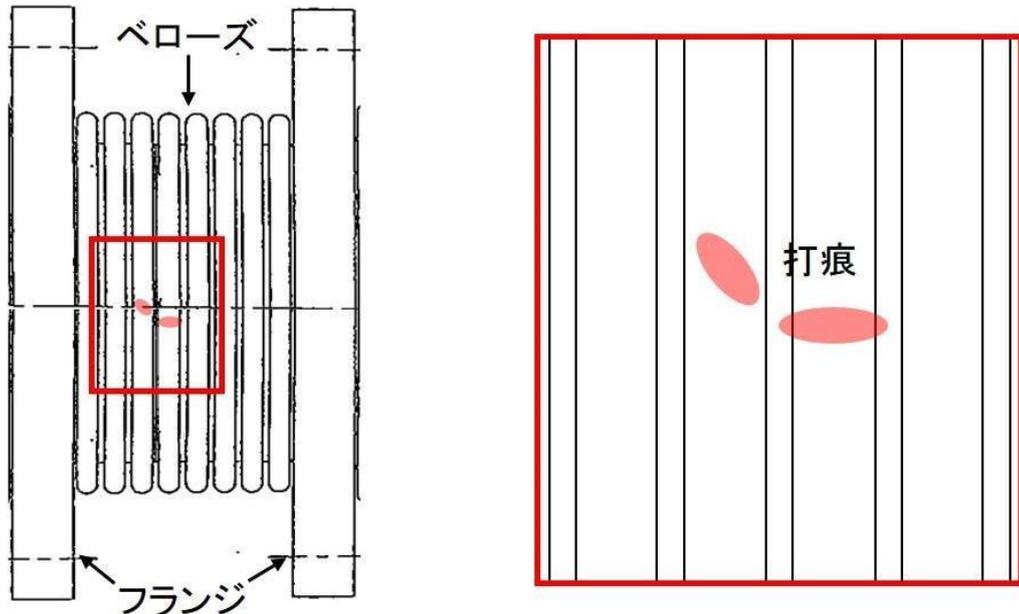
5 まとめ

当該排気管伸縮継手ペローズに生じた打痕と破損の関係を確認するため、打痕を模擬した解析モデルを作成し、構造解析を行った。解析にあたっては、当該排気管伸縮継手の破片に確認された打痕形状の測定結果を基に、曲率を変化させた 5 種類の打痕形状をモデル化した。

その結果、ペローズ健全部と比較して、打痕近傍（構造不連続部）でひずみ量が増大することを確認した。また、疲労評価結果より、80～280 回程度の繰り返し回数で疲労割れが発生することを確認した。疲労評価結果は、当該排気管伸縮継手が破損に至るまでの起動・停止回数（約 160 回）と同程度であり、当該排気管伸縮継手に生じた打痕形状によって疲労割れが発生する可能性があることを確認した。

ベローズ破損の推定メカニズムについて

①排気管伸縮継手取付け時にベローズ山部に打痕が付いたと推定



②起動、停止時に生じる排気管の熱伸縮による変位により斜め方向の鋭角な凹みに繰り返しひずみが負荷されることにより熱疲労による初期き裂が発生したと推定

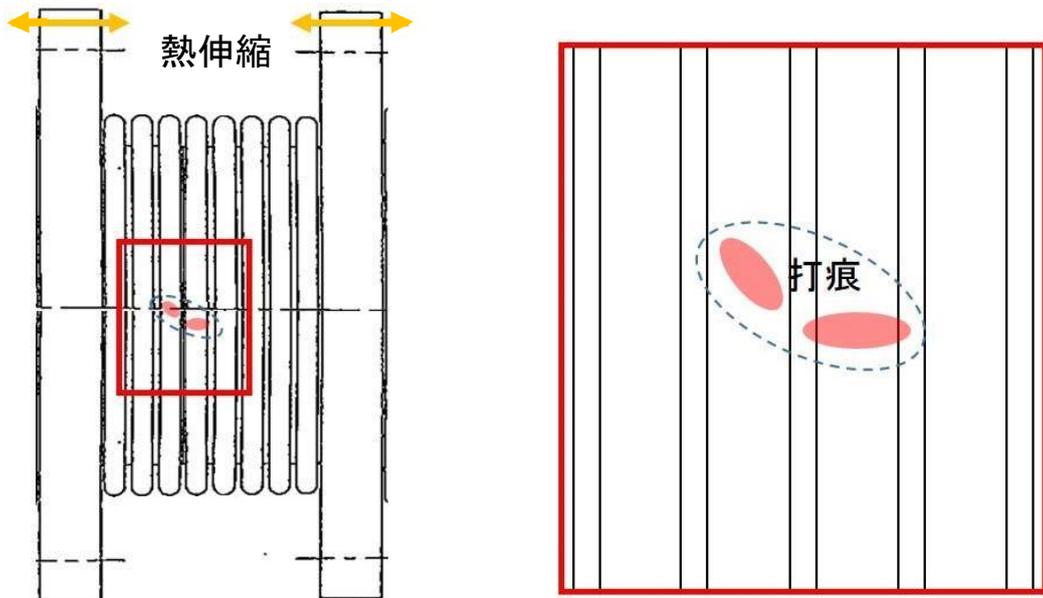
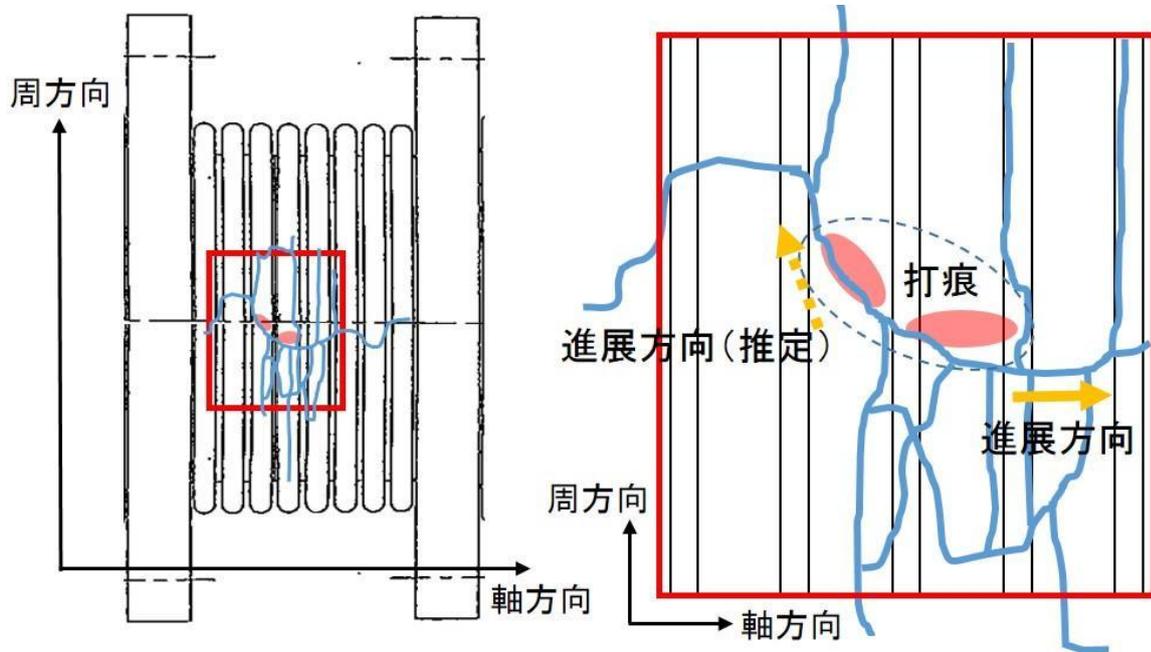


図 58 破損メカニズム模式図 (1/2)

③-1 本事象が発生した D/G 定期試験でベローズに鋭角な打痕に沿って軸方向き裂が進展し排気ガスが吹き出したと推定



③-2 排気ガスの吹き出しによる周期的な振動によって、ベローズの周方向へき裂が進展し、一部のベローズが片持ちになり、ある程度の大きさごとに破片となったと推定

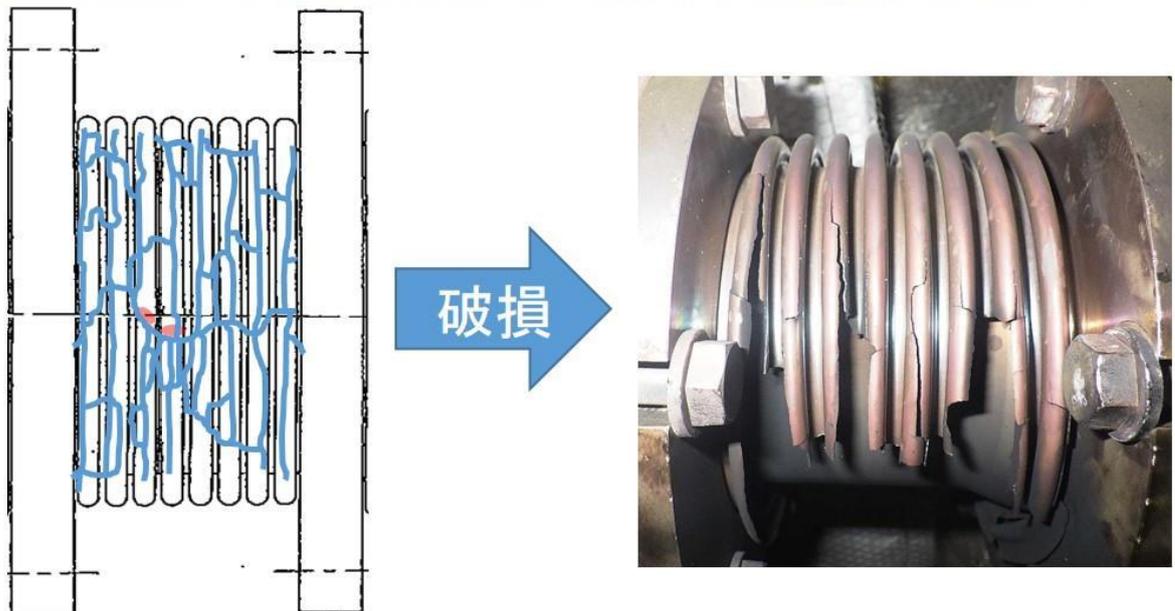


図 58 破損メカニズム模式図 (2/2)

D/G (B) 定期試験時の運転データ比較について

D/G は点検中以外において、1 回/月の定期試験として負荷運転を実施している。

平成 30 年 6 月 5 日の定期試験で D/G (B) 排気管伸縮継手のベローズの破損が発生しているが、定期試験での採取データにおいてその兆候が確認されていないか、ベローズ破損前後の定期試験のデータを比較した。

1 ベローズ破損時前後の定期試験結果について

ベローズ破損時に破損箇所近傍に設置され、顕著なデータ変動があった排気温度について平成 30 年に実施した D/G (B) の定期試験データを抽出し図 59-1, 2 に示す。(各温度データの検出点は、別紙-1 参照)

図 59-1, 2 に示すとおり、ベローズ破損時には顕著な温度上昇がみられるものの、判定基準(シリンダ出口: , 過給機入口: , 過給機出口:) を超えることはなく、また、破損前の 4 月、5 月に実施した定期試験データにおいては、大きな変化は見られないことが確認できた。

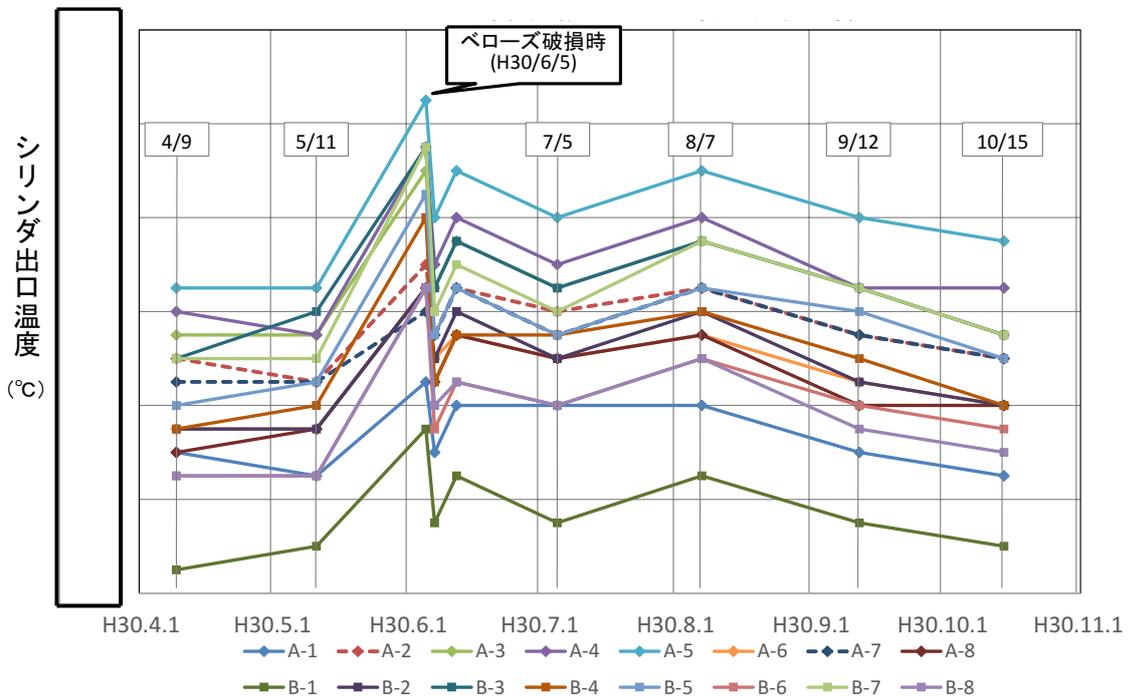


図 59-1 シリンダ出口温度定期試験データ

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

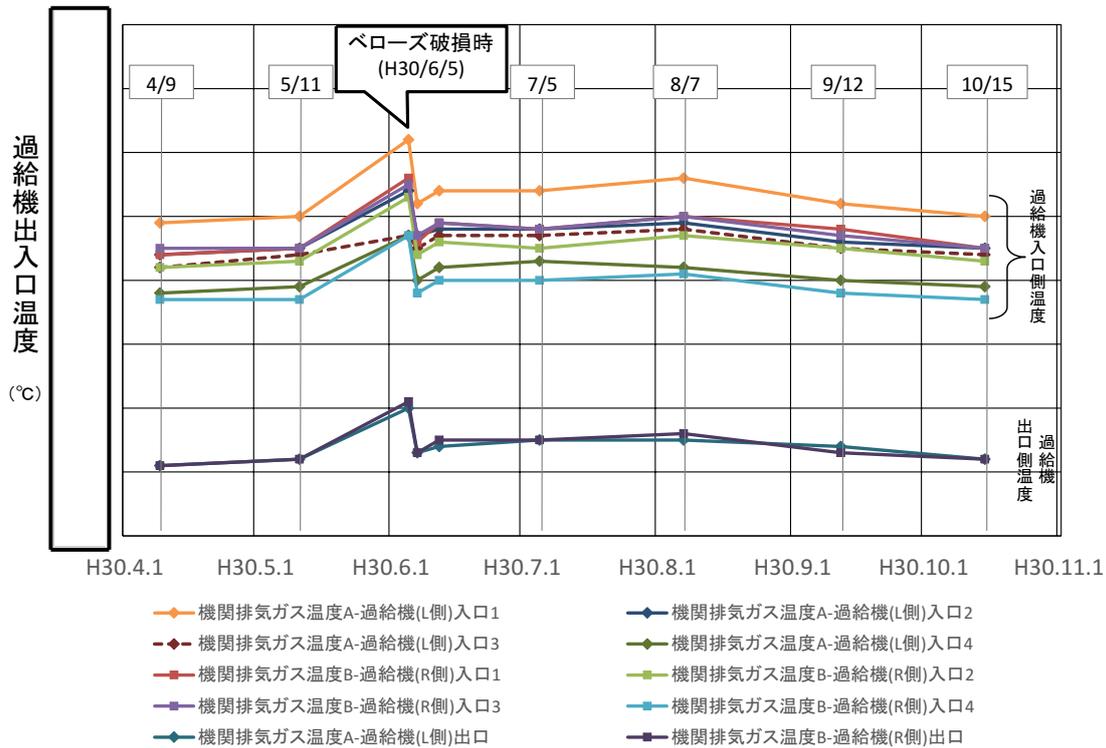


図 59-2 過給機出入口温度定期試験データ

なお、ベローズの破損が確認された平成 30 年 6 月 5 日のデータを確認すると、破損したベローズが設置されている排気管に接続されるシリンダ (A-2, A-7) の出口温度 (図 59-1 破線データ) は、他のベローズが健全なシリンダとほぼ同等の挙動となっている。

一方で、破損したベローズが接続される過給機 L 側入口 (3) 排気管 (図 59-2 破線データ) については、ベローズ破損時に他の排気管に見られる温度上昇が見られない。これは、破損箇所から排気ガスが漏れたことにより他の排気管に比べ排気ガス量が低下したことによるものと推定される。

2 排気温度への外気温度の影響について

各排気温度の変化について、外気温度の影響を確認した。外気温度の変化を確認するため、長期スパン (平成 28 年から現在) における外気温度と、代表としてシリンダ出口温度 (シリンダ A-1~B-8 の平均) とのデータ確認についても実施した結果、図 59-3 に示すとおり、外気温度の変化に同調しシリンダ出口温度も変動している。

また、外気温度が 20°C 一定であったと想定し、20°C と外気温度の差温度をシリンダ出口温度に補正 (図 59-3 破線データ) した結果、ベローズの破損が発生した平成 30 年 6 月 5 日までは概ね で安定しているのに対し、ベロー

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

ズ破損時には を超える温度変化がみられている。(ベローズ破損後の定期試験データは、破損前に比べて高めに推移しているが、保温材を取外した状態で定期試験を実施した影響と推定される。)

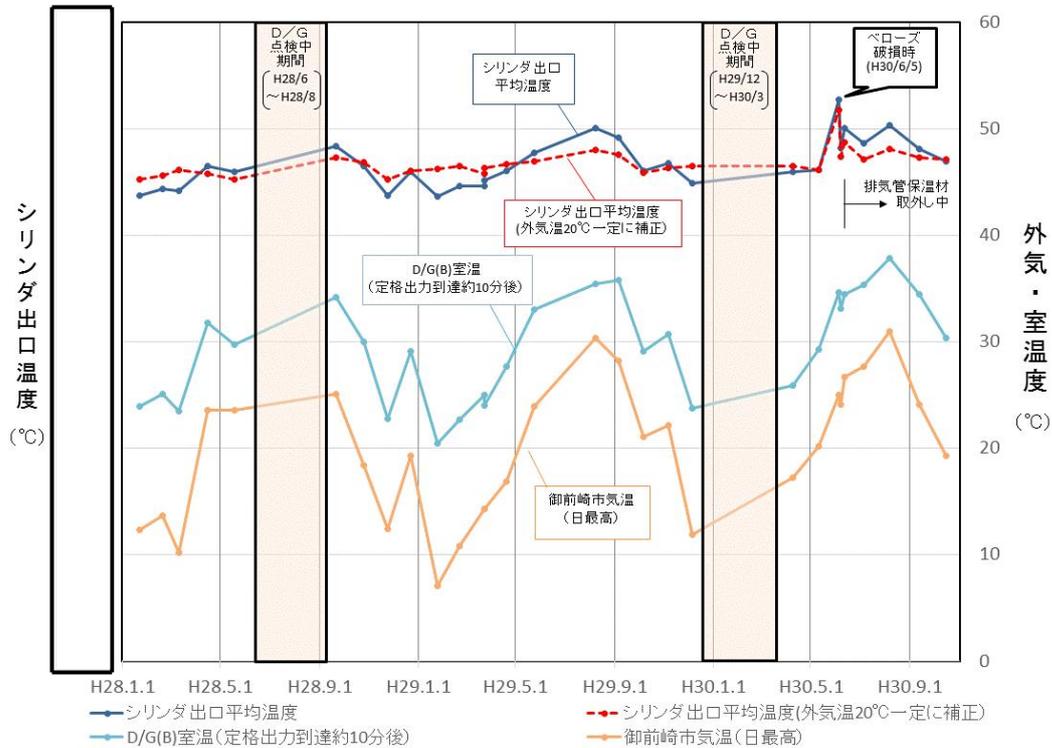


図 59-3 定期試験データ及び外気温度の長期データ

3. データ確認結果

以上の結果より、外気温度を考慮した場合においても、ベローズ破損が確認された平成 30 年 6 月 5 日の定期試験でのデータのみ特異なデータを示していること、また、その前月までに実施したデータについては、外気温度変動による温度変化しか見られないことから、ベローズにき裂が発生し、排気ガスが吹き出しを開始したのは、平成 30 年 6 月 5 日の定期試験であると推定される。

なお、排気管以外の定期試験採取データについては、平成 30 年 6 月 5 日を含め、その前後で顕著なデータ相違は見られていない。(排気管以外のデータについては、別紙-2 参照)

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

各温度計検出点について

排気系に係る温度検出点について下図に記載する。

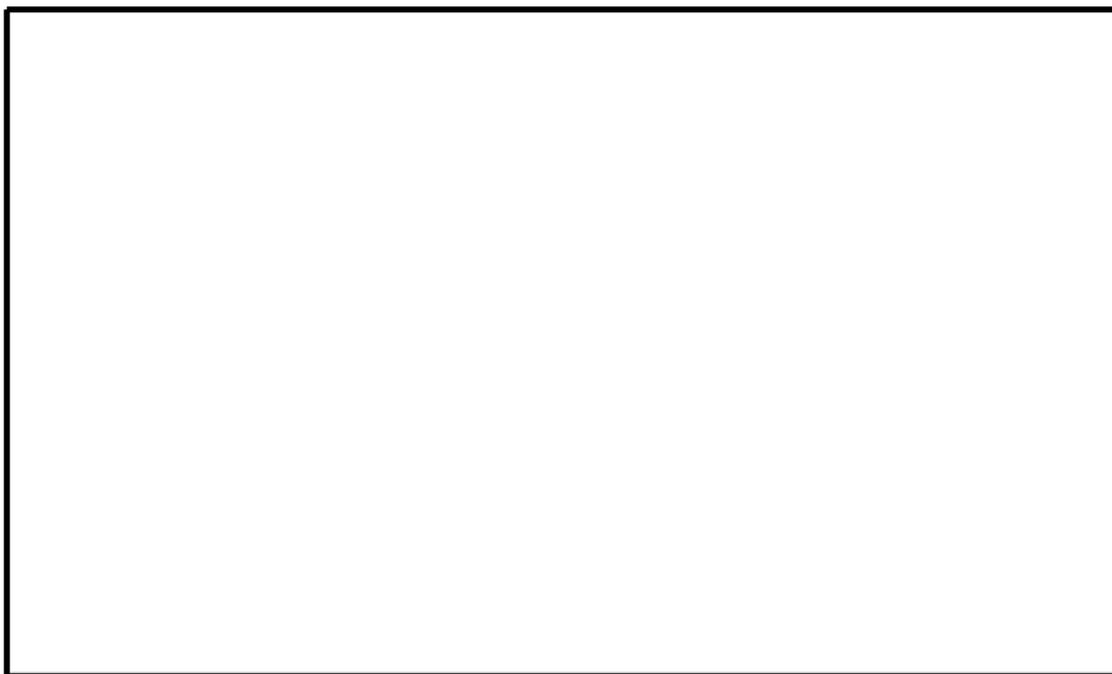


図 59-4 排気系各温度検出点

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

排気管以外の定期試験データについて

D/G 定期試験において採取するデータのうち、排気温度以外のデータについては、ベローズの破損が発生した平成 30 年 6 月 5 日を含む前後の記録において有意な変動がないことを確認した。データについて図 59-5, 6 に示す。

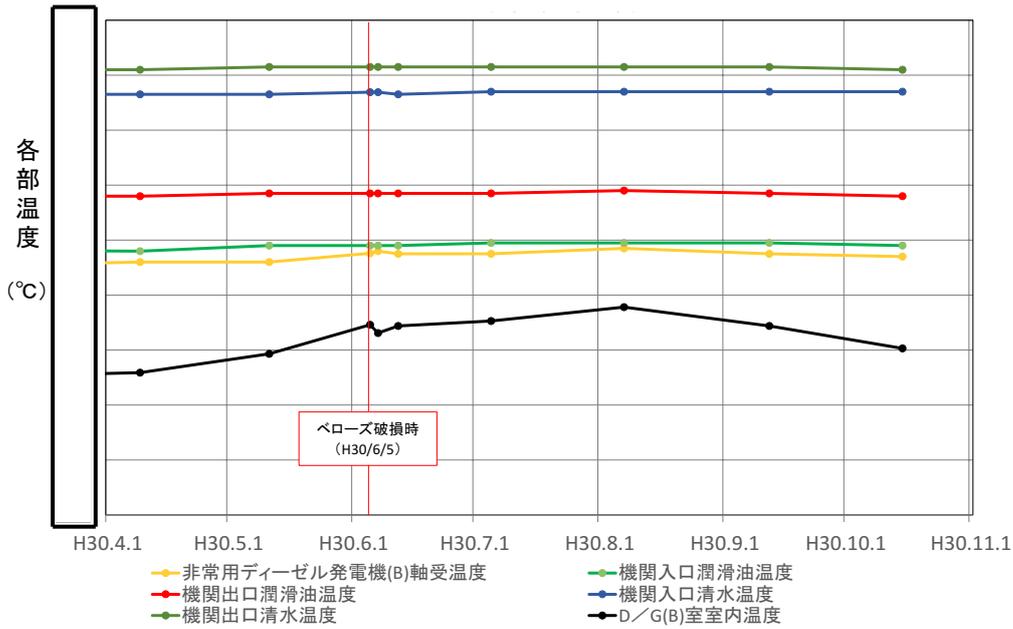


図 59-5 機関各部温度定期試験データ

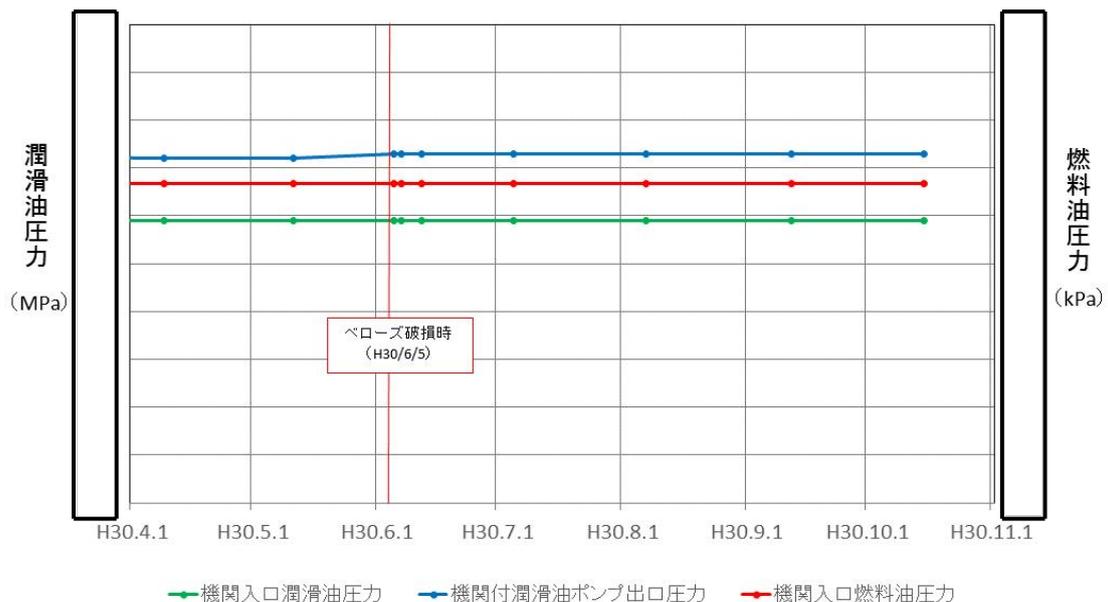


図 59-6 機関各部圧力定期試験データ

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

変形を与えた可能性のある作業の抽出とその影響について

1 目的

今回の事象の発生要因は、排気管伸縮継手取替え時の打痕と熱疲労の複合要因で、変形を起点とした破損が生じ、漏えいが起こったものと推定した。5号機 D/G において変形を与えた可能性のある作業（運転・待機中の巡視点検等を含む）及び部品を抽出し、その影響を確認する。

2 検討対象

部品の変形に起因する破損によってバウンダリ機能が喪失し、D/G の発電機駆動機能が影響を受ける可能性がある。ここでは現場での目視や異音、運転パラメータの監視による早期検知が困難な、気体の漏えい（バウンダリ機能）のうち吸気・排気ラインを検討対象とした。

その他の部位に部品の変形が生じ D/G の発電機駆動機能が影響を受ける場合は、現場での目視や異音、運転パラメータの監視により早期検知可能である。特に、気体のバウンダリのうち起動用空気ラインは常時一定の圧力で維持されており、万一漏えいにより圧力が低下した場合は警報により早期検知可能である。

3 変形を与えた可能性のある作業及び部品の抽出結果

D/G の吸気・排気ラインは、機器、配管、及び伸縮継手で構成される（図 60-1 及び表 60-1 参照）。これらの部品に対し、変形を与えた可能性のある作業の調査を行った。

部品の変形は、当該部品が移動して他の部品・機器と接触すること、又は他の部品・機器・工具が移動して当該部品に接触することで生じる。前者の事象としては当該部品の落下と当該部品移動中の接触、後者の事象としては使用工具との接触、落下品との接触、移動品との接触が考えられる。このため、これらの事象が発生する可能性のある作業ステップを、D/G の定期的な点検及び非定例の点検の手順書を基に抽出した。その結果、当該部品の取付け作業及び点検・手入れ作業、並びに近傍作業、運転員日常巡視・定期試験確認作業を、変形を与えた可能性のある作業として特定した。

抽出された作業と部品の組み合わせに対し、作業実績や機器配置、作業手順、接触する部品の性状を考慮し、変形を与えた可能性のある組み合わせの特定を行った。

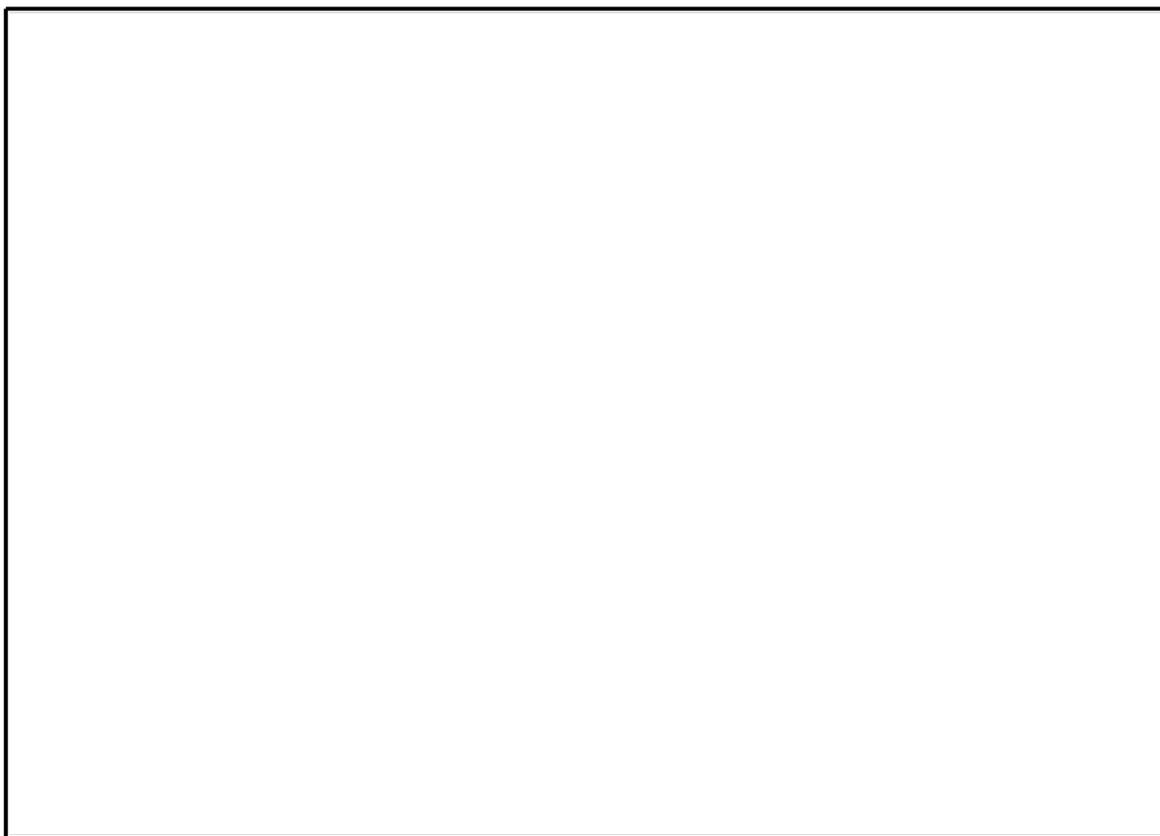


図 60-1 D/G の吸気・排気ライン（概略図）

表 60-1 D/G の吸気・排気ラインを構成する部品

種類	構成部品
機器	過給機
	機関本体
	空気冷却器
配管	吸気管
	排気管
伸縮継手	排気管伸縮継手
	過給機入口伸縮継手
	排気ライン伸縮継手

※屋外に設置されている排気管及び排気ライン伸縮継手の一部並びに排気消音器は、仮に破損しても D/G の要求機能に影響を与えないことから評価対象外とした。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

調査の結果、以下の作業と部品の組み合わせを抽出した。

・取付け作業

伸縮継手（当該部品の落下、当該部品移動中の接触、使用工具との接触）

配管及び機器（使用工具との接触）

・近傍作業

伸縮継手（移動品との接触）

調査結果の詳細を表 60-2 に示す。

表 60-2 5号D/Gにおいて変形を与えた可能性のある作業及び部品の抽出結果 (1/2)

当該部品に対するこれまでの作業内容を確認し、変形を与えた可能性のある作業及び部品の抽出を行った。
各部品の定期的な点検の周期は以下の通り。

機関本体：毎サイクル数気筒ごとの点検を実施
過給機：4 サイクル (特別な保全計画では5 サイクル)
伸縮継手、配管：分解点検なし

【凡例】 ×：変形を与えるリスクはない ○：変形を与えるリスクがある

区分	事象の分類	変形を与えた可能性のある作業	伸縮継手 (排気管伸縮継手、過給機入口伸縮継手、排気ライン伸縮継手)	対象部品 配管 (排気管、吸気管)	機器 (機関本体、過給機、空気冷却器)
当該部品の落下	当該部品の落下	取付け 【排気管伸縮継手】 排気管伸縮継手取替え作業時の危険部における取付け作業があるため、落下により変形を与えるリスクがある。 【過給機入口伸縮継手、排気ライン伸縮継手】 建設時に取付け作業を行っているが、当該部品は重量物であることから、固縛を行った上でチェーンフック等にて徐々に吊上げて作業するため、高所から落下させることはなく、ハウンドリ機能に影響を与えるリスクはない。また、建設以降は取付け作業の実績はない。	○	×	×
			当該部品が移動して他の部品・機器と接触	×	×
当該部品移動中の接触	当該部品移動中の接触	取付け 【排気管伸縮継手】 排気管伸縮継手取替え作業時の危険部における取付け作業があるため、接触により変形を与えるリスクがある。 【排気ライン伸縮継手、過給機入口伸縮継手】 建設時に取付け作業を行っているが、当該部品は重量物であることから、固縛を行った上でチェーンフック等にて徐々に吊上げて作業するため、高所から落下させることはなく、ハウンドリ機能に影響を与えるリスクはない。また、建設以降は取付け作業の実績はない。	○	×	×
			当該部品移動中の接触	×	×

表 60-2 5号D/Gにおいて変形を与えた可能性のある作業及び部品の抽出結果 (2/2)

		【凡例】 × : 変形を与えるリスクはない ○ : 変形を与えるリスクがある		
使用工具との接触	取付け	<p>【排気管伸縮継手】 排気管伸縮継手取替え作業時の接触部における取付け作業にてフランジボルトの緩め・締付けがあるため、接触により変形を与えるリスクがある。</p> <p>【通給機入口伸縮継手】 通給機の取付け作業、及び通給機分解点検時の通給機取付け作業にてフランジボルトの緩め・締付けがあるため、接触により変形を与えるリスクがある。</p> <p>【排気ライン伸縮継手】 建設時の取付け作業時のフランジボルトの緩め・締付けがあるため、接触により変形を与えるリスクがある。また、建設以降は取付け作業の実績はない。</p>	<p>【排気管】 建設時及び排気管伸縮継手の不定期取替時の取付け作業にてフランジボルトの緩め・締付けがあるため、使用工具との接触により変形を与えるリスクがある。</p> <p>【吸気管】 建設時の取付け作業にてフランジボルトの緩め・締付けがあるため、使用工具との接触により変形を与えるリスクがある。また、建設以降は取付け作業の実績はない。</p>	○
	点検・手入れ	<p>過去の点検実績において、点検・手入れを行った実績はなく、変形を与えるリスクはない。</p>	<p>過去の点検実績において、点検・手入れを行った実績はなく、変形を与えるリスクはない。</p>	×
他の部品・機器・工具が移動して当該部品に接触	運転員・定期試験確認	<p>【排気管伸縮継手】 点検方法が外観点検であるため治工具との接触はないこと、また保温材が取付けられていることから変形を与えるリスクはない。</p> <p>【通給機入口伸縮継手】 点検方法が外観点検であるため治工具との接触はないこと、また保温材を与えるリスクはない。なお、偶発的な接触を考慮しても治工具は軽量であり、治工具との接触によりパワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p> <p>【排気ライン伸縮継手】 点検方法が外観点検であるため治工具との接触はないこと、また保温材が取付けられていることより変形を与えるリスクはない。</p>	<p>【排気管】 点検方法が外観点検であるため治工具との接触はないこと、また保温材が取付けられていることから変形を与えるリスクはない。</p> <p>【吸気管】 点検方法が外観点検であるため治工具との接触はないこと、また保温材を与えるリスクはない。なお、偶発的な接触を考慮しても治工具は軽量であり、治工具との接触によりパワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p>	×
	落下品との接触	<p>【排気管伸縮継手】 保温材が取付けられていることから、落下品との接触によりパワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p> <p>【通給機入口伸縮継手】 通給機入口伸縮継手は通給機の近傍にあり、通給機分解点検時に簡易足場を設置するが、通給機入口伸縮継手の上部に足場材を吊り上げることはないことから、パワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p> <p>【排気ライン伸縮継手】 保温材が取付けられていることから、落下品との接触によりパワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p>	<p>【排気管】 保温材が取付けられていることから、落下品との接触によりパワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p> <p>【吸気管】 保温材は高所に設置されており、吸気管の上部に部品を吊り上げることはないことから、変形を与えるリスクはない。</p>	×
移動品との接触	近傍作業	<p>【排気管伸縮継手】 通給機入口伸縮継手は通給機の近傍にあり、通給機分解点検時に簡易足場を設置するが、通給機入口伸縮継手の上部に足場材を吊り上げることはないことから、パワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p> <p>【通給機】 分解除点検時に簡易足場を設置するが、通給機の上側に足場材を吊り上げることはないことから、パワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p> <p>【空気が却器】 空気が却器は通給機の近傍にあり、通給機分解点検時に簡易足場でステーションを設置するが、空気が却器の上部に足場材を吊り上げることはないことから、パワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p>	<p>【排気管】 通給機入口伸縮継手は通給機本体と比較して軽量であり、強く接触することはないことから、当該部品の変形はなく、パワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p> <p>【通給機】 分解除点検時に簡易足場を設置するが、通給機の上側に足場材を吊り上げることはないことから、パワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p> <p>【空気が却器】 空気が却器は通給機の近傍にあり、通給機分解点検時に簡易足場でステーションを設置するが、空気が却器の上部に足場材を吊り上げることはないことから、パワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p>	×
	移動品との接触	<p>【排気管伸縮継手】 保温材が取付けられていることから、接触によりパワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p> <p>【通給機入口伸縮継手】 通給機入口伸縮継手は通給機の近傍にあり、通給機分解点検時に簡易足場を設置するが、通給機入口伸縮継手の上部に足場材を吊り上げることはないことから、変形を与えるリスクがある。</p> <p>【排気ライン伸縮継手】 保温材が取付けられていることから、接触によりパワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p>	<p>【排気管】 保温材が取付けられていることから、接触によりパワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p> <p>【吸気管】 吸気管の一部は通給機の近傍にあり、通給機分解点検時に簡易足場でステーションを設置するため、足場材が吸気管に接触する可能性がある。しかし、足場材は吸気管と比較して軽量であり、足場組立・解体時に強く接触することはないことから、パワングリ機能に影響を与えるリスクはない。</p>	×

4 バウンダリ機能への影響の確認結果

(1) 伸縮継手

伸縮継手には、排気管伸縮継手、排気ライン伸縮継手、過給機入口伸縮継手がある(表 60-3 参照)ため、それぞれに対しバウンダリ機能への影響の確認を行った。伸縮継手とそれに変形を与えた可能性のある作業の組み合わせを表 60-4 に示す。

表 60-3 5号機 D/G の伸縮継手 (B号機の例)

名称 項目	排気管 伸縮継手 (当該)	過給機入口 伸縮継手	排気ライン伸縮継手				
			過給機出口 伸縮継手	排気管配管 伸縮継手	排気管配管 伸縮継手	排気管配管 伸縮継手	排気消音器 入口伸縮継手
口径							
フランジボ ルト呼び径							
肉厚 (mm)							
長さ (mm)							
重量 (kg)							
材質							
山数							
個数 ^{※1}							
設計温度 (°C)							
設計圧力 (MPa)							
繰り返し寿 命回数 (回)							
設置場所							

※1 D/G1 基あたり

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

表 60-4 伸縮継手とそれに変形を与えた可能性のある作業の組み合わせ

伸縮継手 名称	熱疲労	変形を与えた 可能性のある作業	変形を与えた 可能性のある事象	破損に つながる 可能性
排気管 伸縮継手	有り	排気管伸縮継手取替え 時の狭隘部における取 付け作業	・ 排気管伸縮継手の落下	有り
			・ 排気管伸縮継手の他機器 との接触 ・ 使用工具の排気管伸縮継 手への接触	無し
排気ライン 伸縮継手	有り	建設時の取付け作業	・ 使用工具の排気ライン伸 縮継手への接触	無し
過給機入口 伸縮継手	無し	建設時の取付け作業及 び過給機点検時 ^{※1} の過 給機取付け作業	・ 使用工具の過給機入口伸 縮継手への接触	無し
		過給機点検時の近傍作 業（過給機まわりの足 場組立・解体作業）	・ 足場材の過給機入口伸縮 継手への接触	無し

a 排気管伸縮継手

排気管伸縮継手に変形を与えた可能性のある作業として、今回の事象の原因と推定した排気管伸縮継手取替え時の狭隘部における取付け作業のみが抽出された。排気管伸縮継手の落下による変形は、本文 6. 3. 2（初期き裂発生推定メカニズムの検証）にて検証したとおり、破損につながる可能性がある。

b 排気ライン伸縮継手

排気ライン伸縮継手に関しては、建設時の使用工具との接触により、変形が生じている可能性がある。

使用工具との接触による変形は、変形端部の形状が緩やかになるため、応力は集中しにくい。また、排気ラインの伸縮継手は排気管伸縮継手と比較して設計寿命が長いため、伸縮時に発生する応力は小さい。このため、排気ライン伸縮継手に使用工具との接触による変形が生じたとしても、破損につながる可能性は低い。

また、仮に排気ライン伸縮継手が破損した場合であっても、過給機以降の

※1 点検計画では 4 定検に 1 回、特別な保全計画では 5 サイクルに 1 回（1 サイクル：18 ヶ月）

排気ライン上に設置されているため内包流体は大気圧であること、及び保温材が取付けられていることから、短時間で大きな漏えいが発生する可能性は低い。漏えいが拡大した場合は、D/G 室の温度計にて検知可能である。

c 過給機入口伸縮継手

過給機入口伸縮継手の目視点検の結果、複数の変形が確認された。代表例を別紙-1に示す。これらは、変形の位置、形状から、使用工具又は足場材との接触により変形したものと考えられ、上述の変形を与えた可能性のある作業及び部品の抽出結果と矛盾するものではない。

過給機入口伸縮継手はD/Gの吸気ラインに設置されているため、常温の流体が流れることから大きな熱変位は加わらず、繰り返し応力はほとんど発生しない。このため、確認された変形は、破損につながる可能性はないと評価した。

(2) 配管及び機器

使用工具との接触が想定され、「経年劣化メカニズムまとめ表^{※2}」にて低サイクル疲労割れが想定されている部位は、機関本体のシリンダヘッドのみである。しかし、シリンダヘッドのフランジ面近傍は厚肉であることから、低サイクル疲労割れと変形の複合要因によりプラント運転期間に破損につながる可能性は低い。

また、シリンダヘッド以外の配管及び機器については、低サイクル疲労割れが想定されていないこと、及びフランジ面近傍は厚肉であり変形しにくいことから、破損につながる可能性は低い。

5 まとめ

5号機のD/G設備において破損につながる変形を与えた可能性のある作業及び部品の組み合わせを調査し、抽出された組み合わせに対してバウンダリ機能に対する影響を評価した。その結果、今回の事象の原因と推定した、非定例の排気管伸縮継手取替え時の狭隘部における取付け作業のみが、破損につながる変形を与えた可能性があることを確認した。

本結果を踏まえ、今後新たな作業を行う場合は、変形を与える可能性とその影響を確認し、必要に応じ変形防止措置を講じる。

※2 日本原子力学会標準「原子力発電所の高経年化対策実施基準」：2015

付属書 A (規定) 経年劣化メカニズムまとめ表に基づく経年劣化管理 添付資料-2

5号機 D/G 過給機入口伸縮継手の外観確認結果

1 目的

排気管伸縮継手の原因調査において、ベローズに打痕を確認したため、5号機 D/Gにおいて、定期的な点検にてフランジボルトの締付けを実施している過給機入口伸縮継手の変形の有無を確認する。

2 確認結果

使用工具や足場材が接触したと考えられる変形を確認した。このうち、D/G(C)R側過給機入口伸縮継手において確認された変形面積が最も大きい変形を図 60-2 に示す。変形の形状から、使用工具との接触によるものと推定した。

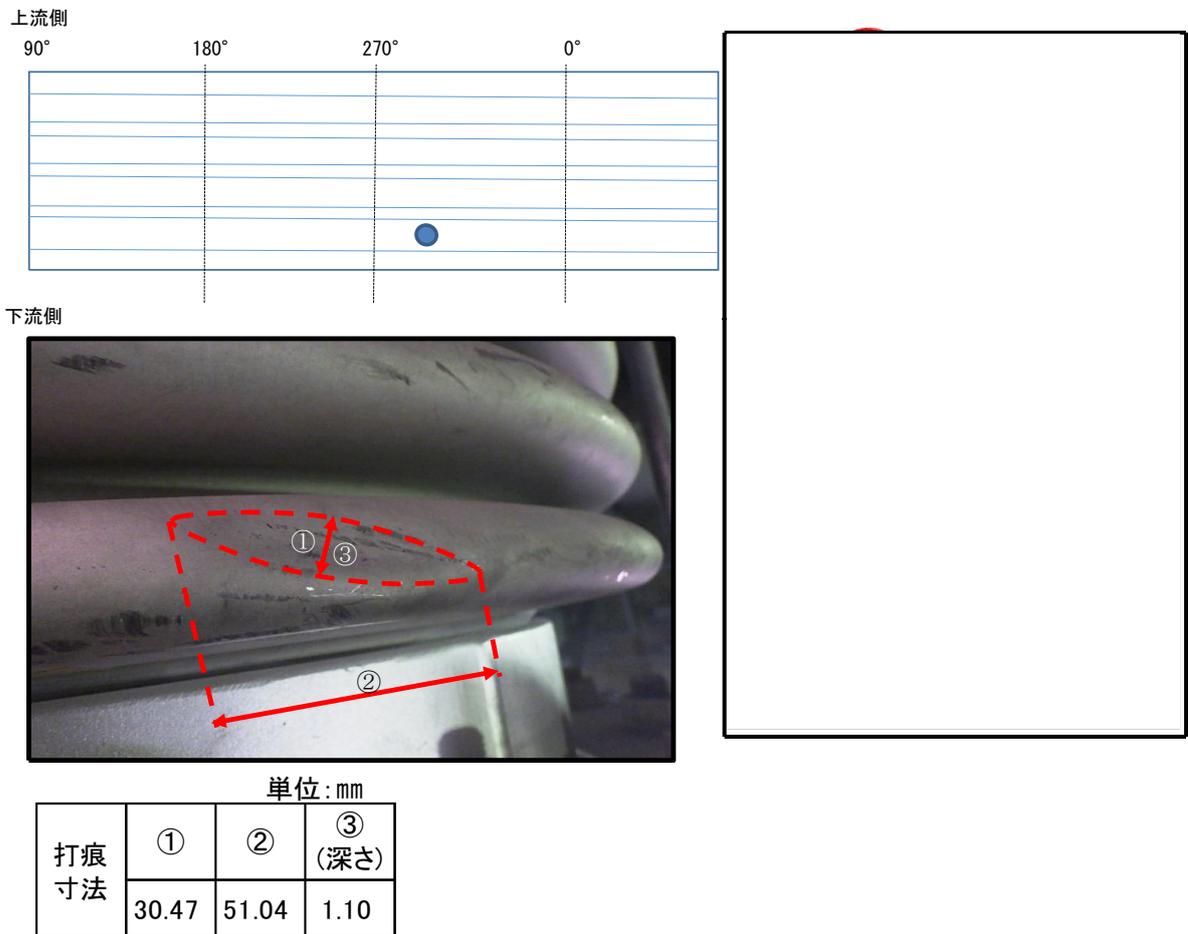


図 60-2 過給機入口伸縮継手位置図

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

過給機出口伸縮継手における 使用工具との接触による変形の影響

1 はじめに

排気管伸縮継手は、繰返し疲労試験において使用工具との接触による変形では破損に至らないことを確認した。また、過給機入口伸縮継手及び排気ライン伸縮継手は、排気管伸縮継手より繰返し寿命回数が長いことより同様に使用工具との接触による変形では破損に至らないと評価した。

ここでは、過給機入口伸縮継手及び排気ライン伸縮継手に使用工具との接触による変形が生じた場合の影響を確認するために構造評価を実施し、変形による影響について確認を行った。

2 評価対象

過給機入口伸縮継手及び排気ライン伸縮継手のうち、排気ラインの最も上流で内包流体の温度が高い過給機出口伸縮継手を評価対象とした。対象号機は排気管伸縮継手の破損が発生した B 号機とした。

3 想定変形形状

過給機出口伸縮継手と過給機入口伸縮継手は、口径とフランジボルト呼び径が等しいため締付け作業には同等の工具を用いる。また、肉厚も等しいことから、使用工具との接触による変形量は同程度になると考えられる。このため、過給機入口伸縮継手にて確認された、使用工具との接触によるものと考えられる変形のうち、変形面積及び深さが最も大きいものを解析時に想定する変形とした。



図 60-3 過給機入口伸縮継手で認められている変形写真

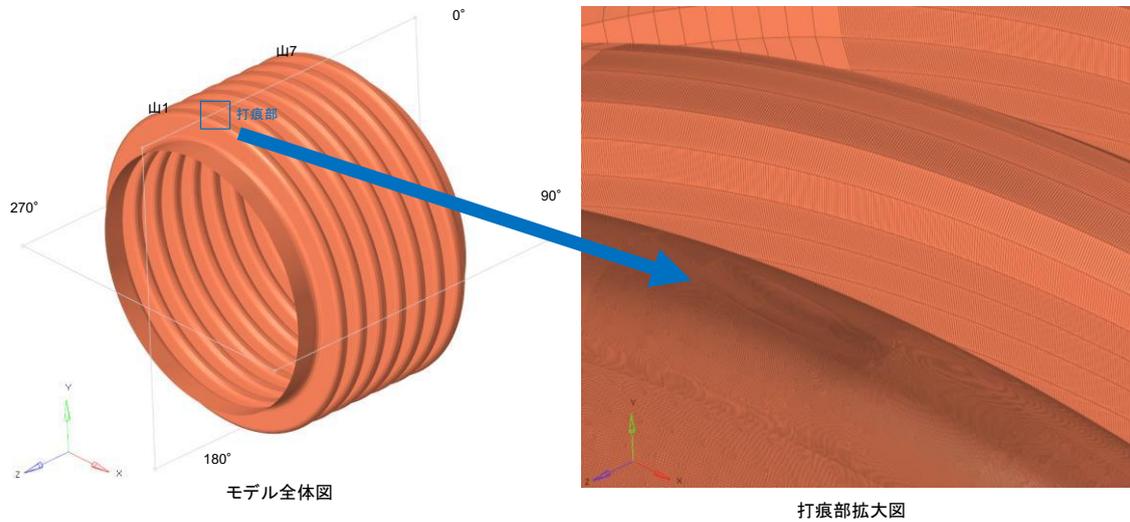


図 60-4 当該変形を模擬した解析モデル

4 評価方法

4.1 物性値

解析に用いる物性値は、「JAEA 報告書 PNC-TN241 84-10 解説 高速原型炉高温構造設計方針 材料強度基準等」の値を用いた。

表 60-5 物性値

材質	温度	ヤング率	ポアソン比	塑性ひずみ
SUS304	500°C	159GPa	0.318	ϵ_p を算出

4.2 入力条件

①変位量：

(x 軸方向：軸直角上下方向)

(y 軸方向：軸直角左右方向)

(z 軸方向：軸方向)

過給機出口伸縮継手設計移動量を基に設定した。

②内圧：

当該伸縮継手の設計圧力は大気圧であることから とした。

③温度：

過給機出口伸縮継手の設計温度を基に設定した。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

5 評価結果

解析結果を表 60-6 に示す。疲労評価に用いるひずみ量と破損繰り返し回数の関係は、発電用原子力設備 設計・建設規格 (2009 年版) <第 II 編高速炉編> で規定されている SUS304 の最適疲労破損式を用いて算出した。

表 60-6 解析結果

塑性ひずみ		許容繰り返し回数	
内面側	外面側	内面側	外面側
1.20×10^{-3}	1.44×10^{-3}	2.28×10^7	4.89×10^6

変形による応力集中は小さく、最大応力集中点は変形と離れたベローズ谷部の外面側で発生していた。最大応力集中点での発生ひずみは 1.44×10^{-3} であり、許容繰り返し回数は 4.89×10^6 回であった。

塑性ひずみ(外面側)

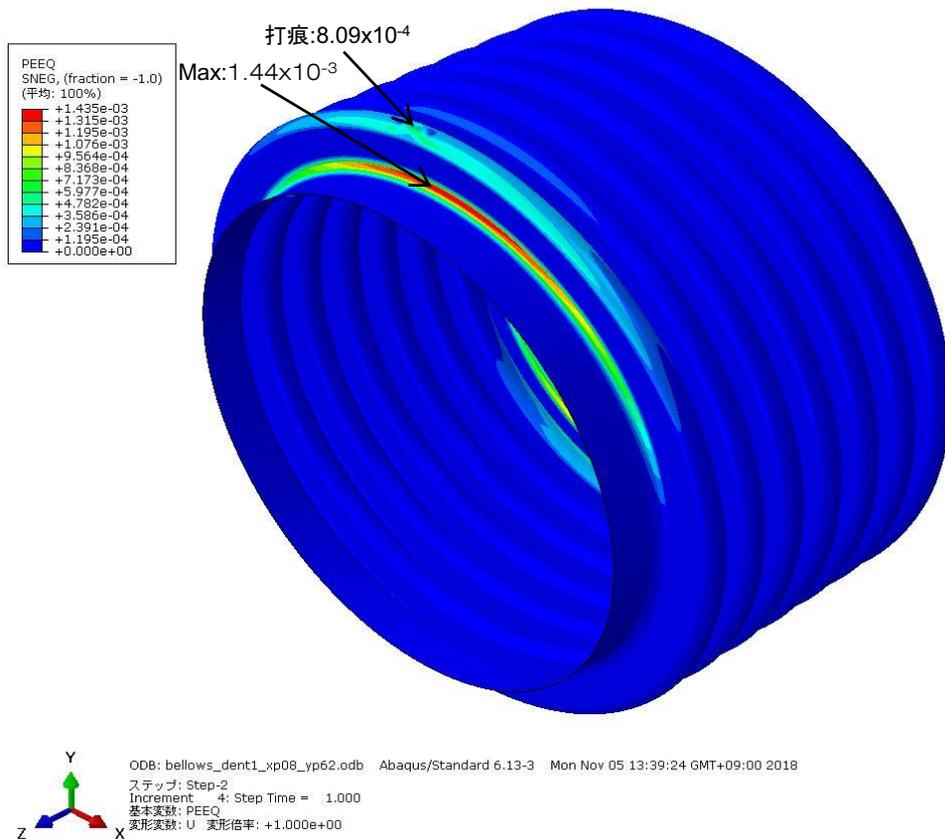


図 60-5 塑性ひずみの解析結果

6 まとめ

伸縮継手に使用工具との接触による変形が生じた場合の影響を定量的に確認するため、過給機出口伸縮継手に対して使用工具との接触による変形をモデル化し、構造評価を実施した。その結果、変形による応力集中は小さく、過給機出口伸縮継手の最大応力集中点とならないことを確認した。また、許容繰返し回数は 4.89×10^6 回であり、設計繰返し寿命回数の を上回ることを確認した。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

5号機 D/G の排気管伸縮継手の保全の考え方について

各機器の部品の交換は、保全内容の一つとして、当社での運転経験や他プラントでの不具合事例、使用条件及び設置環境等を踏まえ、その要否や頻度を決定している。当該排気管伸縮継手は、先行号機の保全内容と同様に、試運転時及び定期的な運転確認時において運転状態の異常の有無の確認を行っている。また、プラント運転期間中に想定される経年劣化事象は、劣化が顕在化しないよう設計されているため、定期的な交換や、保温材を取外したうえでの外観点検は実施していない。

排気管伸縮継手のメーカ推奨の保全内容は、定期的な試運転と、定期的な排気管伸縮継手の交換であった。排気管伸縮継手の交換頻度は、常用発電機は1日1回の起動停止を考慮して□を推奨している。非常用発電機は年間□の起動停止を想定すると□となるが、ディーゼル機関のその他の部品の推奨点検周期と併せ、□での交換を推奨している。

一方、当社のD/Gの起動停止回数は年間に12回程度であり、通常の運転期間において繰り返し寿命回数に達する可能性は低い□と判断し、保全内容を設定している。

5号機 D/G の排気管伸縮継手のディーゼル機関メーカと当社の交換の考え方

	ディーゼル機関メーカ	当社
交換の考え方	排気管伸縮継手の繰り返し寿命回数□を基準に設定	当社内での運転経験や他プラントでの不具合事例、使用環境及び設置環境等を踏まえ、その要否や頻度を決定
交換頻度	常用発電機 ^{※1} : □ 非常用発電機 ^{※2} : □	定期的な交換は不要

※1：離島発電・産業用プラント等の常用発電機

※2：原子力発電所及び民間用の非常用発電機

また、排気管伸縮継手以外の吸排気配管の伸縮継手は、プラント運転期間中の取替えが不要となるよう、プラントメーカにて繰り返し寿命回数を□と設定していることから交換の推奨はない。当社内での運転経験や他プラントでの不具合事例、使用環境及び設置環境等を踏まえ、定期的な交換は不要と判断している。

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。