

本原原発第29号
平成30年9月20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 9 月 20 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 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。</p> <p>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。</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) (詳細は別添のとおり。)</p>
<p>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狹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」、「き裂の進展量が大きい下流側(山 8)」を中心に選定した。</p> <p>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が観察された。また、そ</p>

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。

(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、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、本事象を踏まえ打痕を含む偶発事象を捉えるための更なる改善として、排気管伸縮継手の破損に係る検知性を向上させる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。

(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、及び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。

(4)熱疲労

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。

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

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。

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缩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, 低サイクル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(5 号機 D/G 供用開始)から平成 30 年 6 月 5 日(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 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、熱収縮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

今回破損した排気管伸縮継手は、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納入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。

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付け作業に着目し、打痕が付いた要因の調査を行った。

現場作業を観察した結果、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。

(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、疲労評価結果より、一定の打痕形状の場合、150 回程度の繰り返し回数で疲労割れが発生することが確認された。当該排気管伸縮継手は取付け後から約 160 回の起動・停止でベローズの破損が発生したことから、この打痕形状の場合と比較すると、繰り返し回数がおおよそ一致する結果が得られた。

(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 初期き裂の発生から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と併せ、初期き裂の発生から破損に至るまでのメカニズムを以下のとおり推定した。

具体的には、斜め方向に鋭角な凹みがある打痕近傍にて、熱収縮によるベローズの変位の繰り返しによる応力集中により初期き裂が発生した。また、打痕 A 近傍の初期き裂

	<p>は、当該排気管伸縮継手の内圧の影響を受けることにより、当該排気管伸縮継手両側のフランジ部方向(軸方向)に進展するとともに、周期的な内圧の変動によって発生する振動により周方向へ進展したと推定した。</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、ベローズを取り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
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

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。

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> <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。</p> <p>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</p>
--------	---

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)打痕などの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、打痕が今後付いた状態で使用する可能性は低いですが、その他の偶発事象発生の可能性も考慮し、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

保温材を取外して排気管伸縮継手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。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、排気管伸縮継手を取付けた 1 年後に、改善した施工管理の妥当性を全ての排気管伸縮継手の外観点検により検証する。

(3)打痕などの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 1 個が全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てい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

排気管伸縮継手が破損した場合、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おり、通常時の目視は困難であることから、黒煙の検知性を向上し、排気管伸縮継手の破損を早期に把握するため、保温材の形状を変更し、容易に排気管伸縮継手の外観点検が可能となるようにする。

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常時確保するとともに、排気管伸縮継手の交換基準を定め、排気管伸縮継手を実用炉報告基準の運用(訓令)に記載の消耗品と位置付けることとする。排気管伸縮継手の取替えは 2 日間で実施可能であり、万一、本事象と同様の不具合が発生した場合においても、保安規定に定める 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である 10 日間の間に速やかな復旧が可能である。

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。

(詳細は別添のとおり。)

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

中部電力株式会社

目 次

1	件名	1
2	事象発生の日時	1
3	事象発生場所	1
4	事象発生時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制	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	14
6. 2. 7	運転経験の反映に関する要因	16
6. 3	事象発生時の推定メカニズム	17
6. 3. 1	初期き裂発生時の推定メカニズム	17
6. 3. 2	初期き裂発生推定メカニズムの検証	18
6. 3. 3	初期き裂の発生から破損に至るまでの推定メカニズム	19
7	事象の原因	20
8	保護装置の種類及び動作状況	20
9	放射能の影響	21
10	被害者	21
11	他に及ぼした障害	21
12	復旧の日時	21
13	再発防止対策	21

1 4	添付資料一覧	24
-----	--------------	----

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の動作可能な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1本の破損を想定し、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した。

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、評価の前提として、保守的に排気管伸縮継手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が全量漏えいすることを想定した。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、直接的及び間接的影響のいずれもD/Gの機能要求に影響を与えず、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。

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 1 7

（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 1 8

（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（添付資料 1 8 図 1 8 - 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 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ったと考えられる。

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、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。

添付資料 2 6, 2 7

(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 2 8

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、本事象を踏まえ打痕を含む偶発事象を捉えるための更なる改善として、排気管伸縮継手の破損に係る検知性を向上させる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、及び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 29, 35, 49

(4) 熱疲労

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。

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、低サイクル疲労が発生した可能性は否定できない。

添付資料 18, 50

(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 51, 52, 53

6. 2. 7 運転経験の反映に関する要因

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 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。

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 18, 50

(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、熱収縮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

今回破損した排気管伸縮継手は、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納入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。

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付け作業に着目し、打痕が付いた要因の調査を行った。

現場作業を観察した結果、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。

添付資料 56

(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、疲労評価結果より、一定の打痕形状の場合、150 回程度の繰り返し回数で疲労割れが発生することが確認された。当該排気管伸縮継手は取付け後から約 160 回の起動・停止でベローズの破損が発生したことから、この打痕形状の場合と比較すると、繰り返し回数がおおよそ一致する結果が得られた。

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 初期き裂の発生から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と併せ、初期き裂の発生から破損に至るまでのメカニズムを以下のとおり推定した。

具体的には、斜め方向に鋭角な凹みがある打痕近傍にて、熱収縮によるベローズの変位の繰り返しによる応力集中により初期き裂が発生した。また、打痕 A 近傍の初期き裂は、当該排気管伸縮継手の内圧の影響を受けることにより、当該排気管伸縮継手両側のフランジ部方向（軸方向）に進展するとともに、周期的な内圧の変動によって発生する振動により周方向へ進展したと推定した。

添付資料 1 7, 1 8, 5 8

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、ベローズを取り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) 打痕などの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、打痕が今後付いた状態で使用する可能性は低いですが、その他の偶発事象発生の可能性も考慮し、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

保温材を取外して排気管伸縮継手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。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、排気管伸縮継手を取付けた 1 年後に、改善した施工管理の妥当性を全ての排気管伸縮継手の外観点検により検証する。

(3) 打痕などの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 1 個が全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

排気管伸縮継手が破損した場合、低出力運転時には不完全燃焼による黒煙が D/G 室内に漏えいする。排気管伸縮継手は保温材に覆われており、通常時の目視は困難であることから、黒煙の検知性を向上し、排気管伸縮継手の破損を早期に把握するため、保温材の形状を変更し、容易に排気管伸縮継手の外観点検が可能となるようにする。

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常時確保するとともに、排気管伸縮継手の交換基準を定め、排気管伸縮継手を実用炉報告基準の運用(訓令)に記載の消耗品と位置付けることとする。排気管伸縮継手の取替えは 2 日間で実施可能であり、万一、本事象と同様の不具合が発生した場合においても、保安規定に定める 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である 10 日間の間に速やかな復旧が可能である。

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。

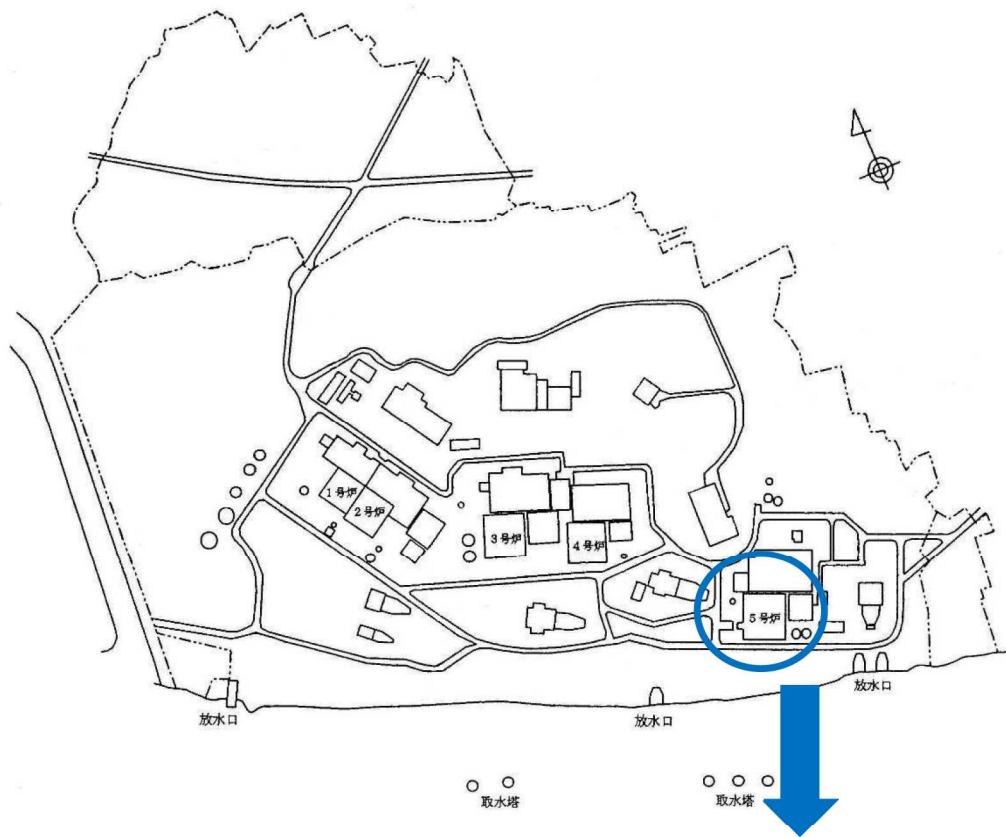
1 4 添付資料一覧

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	排気筒ガスモニタチャート
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り付け方向)
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

以 上

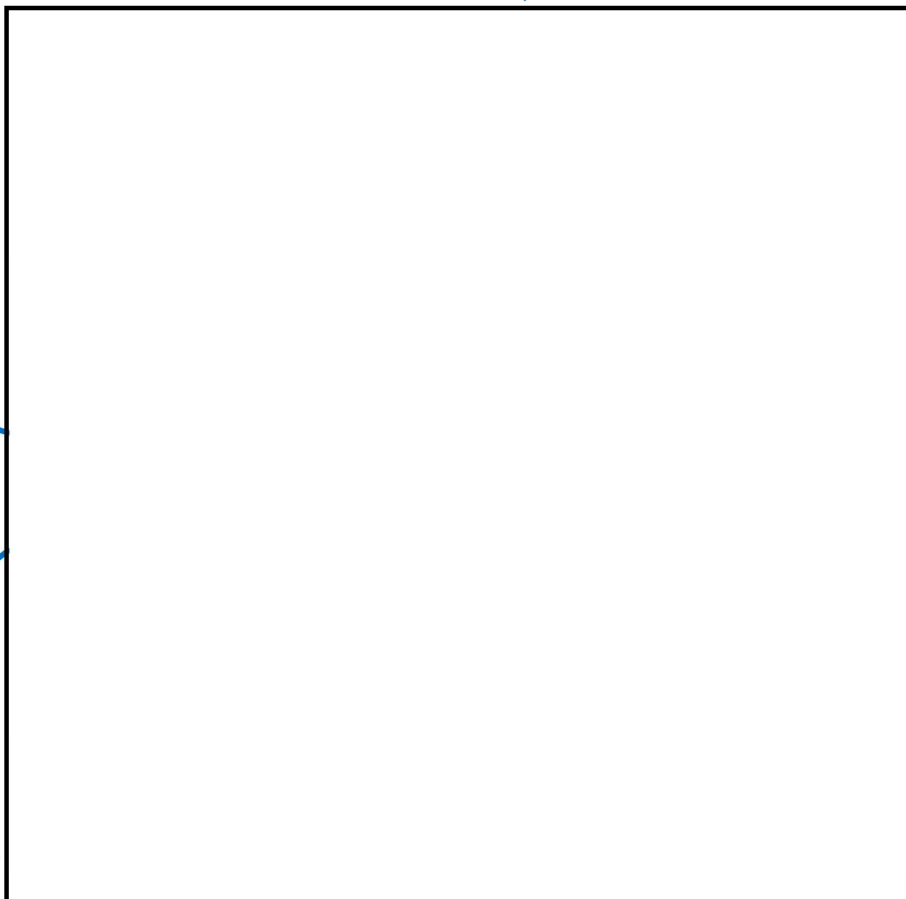
現場機器配置



D/G(B)



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。

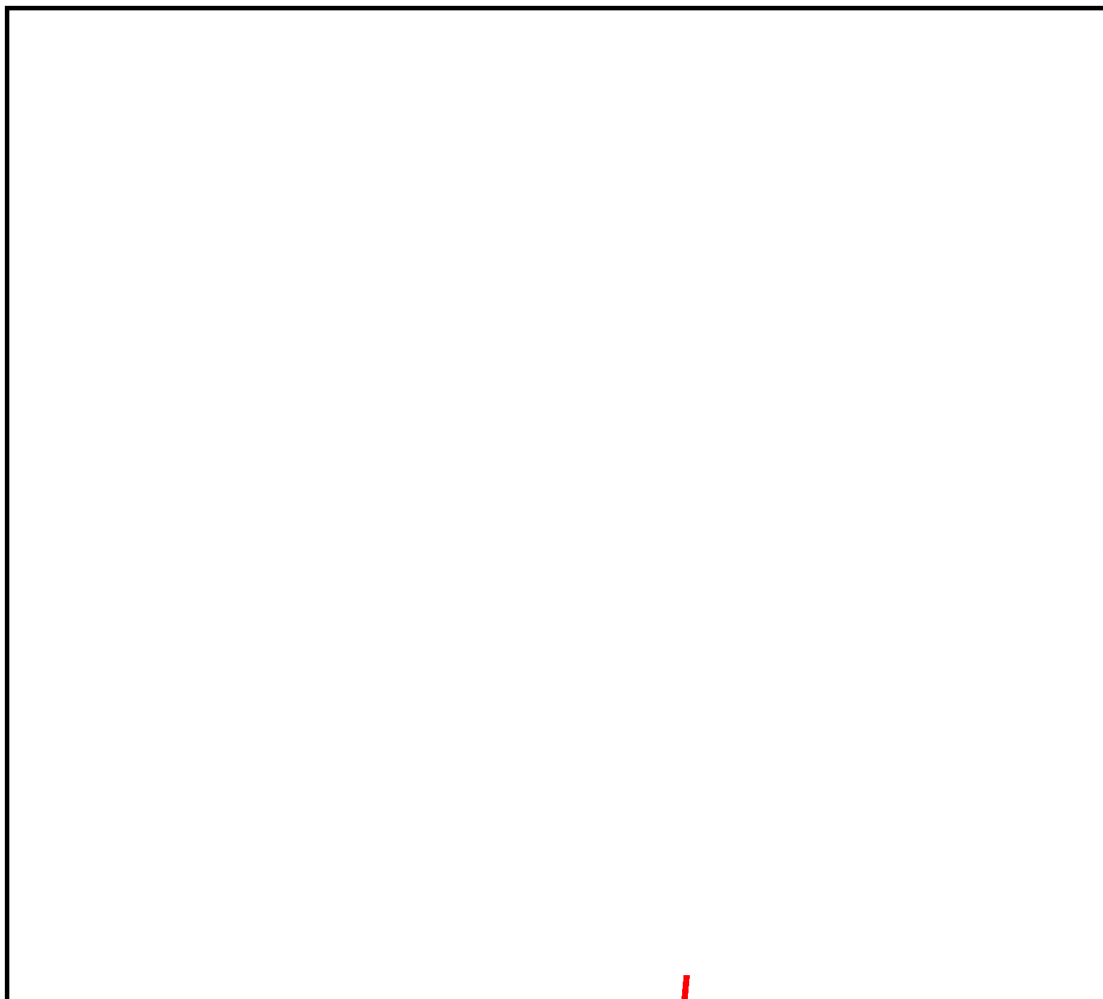
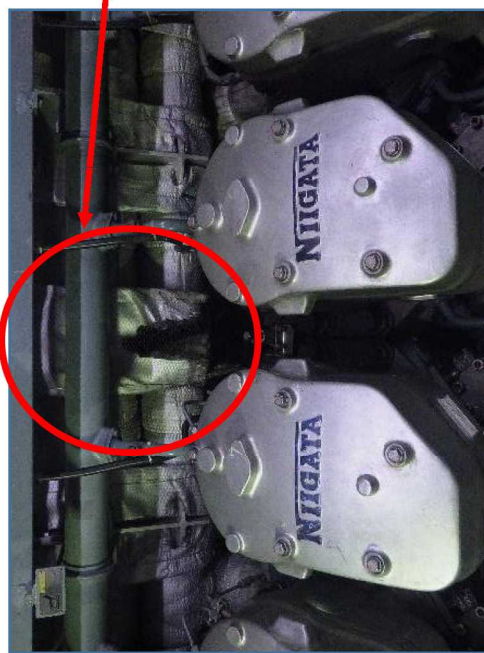
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

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 ・放水口モニタ:5.5cps ・SGTS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



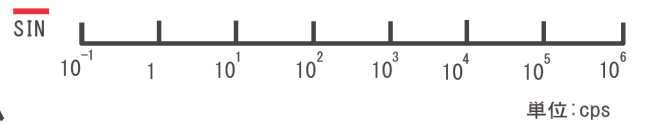
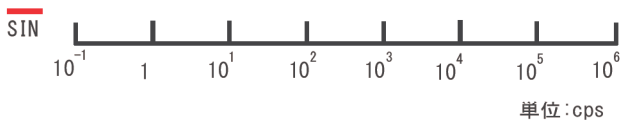
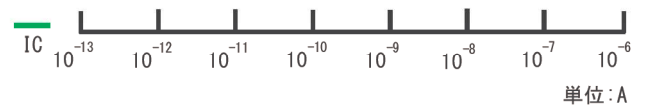
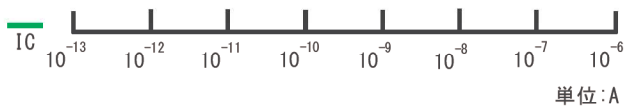
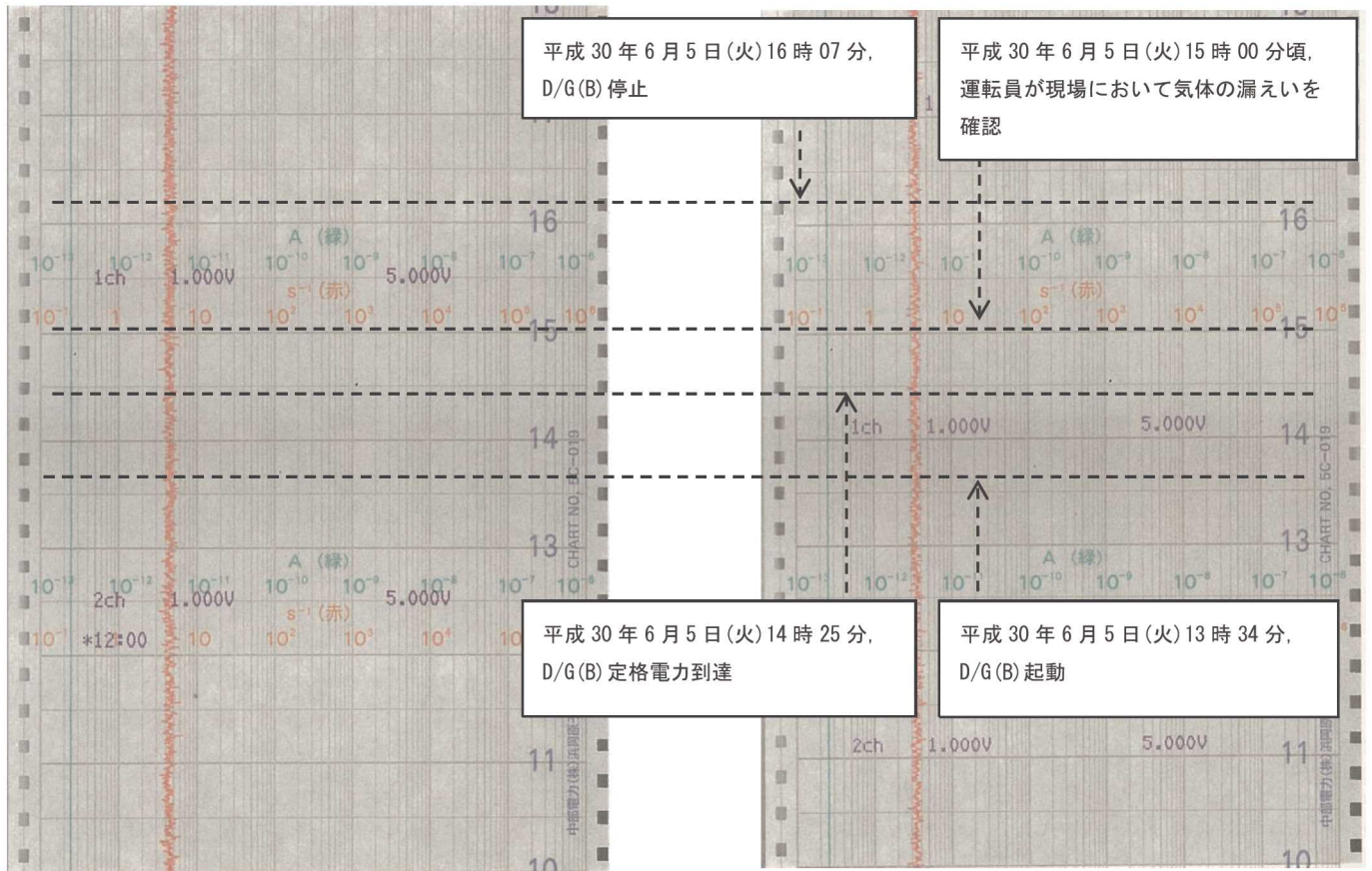
本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

排気筒ガスモニタチャート

平成 30 年 6 月 5 日 (火)

排気筒ガスモニタ (A)

排気筒ガスモニタ (B)



時間

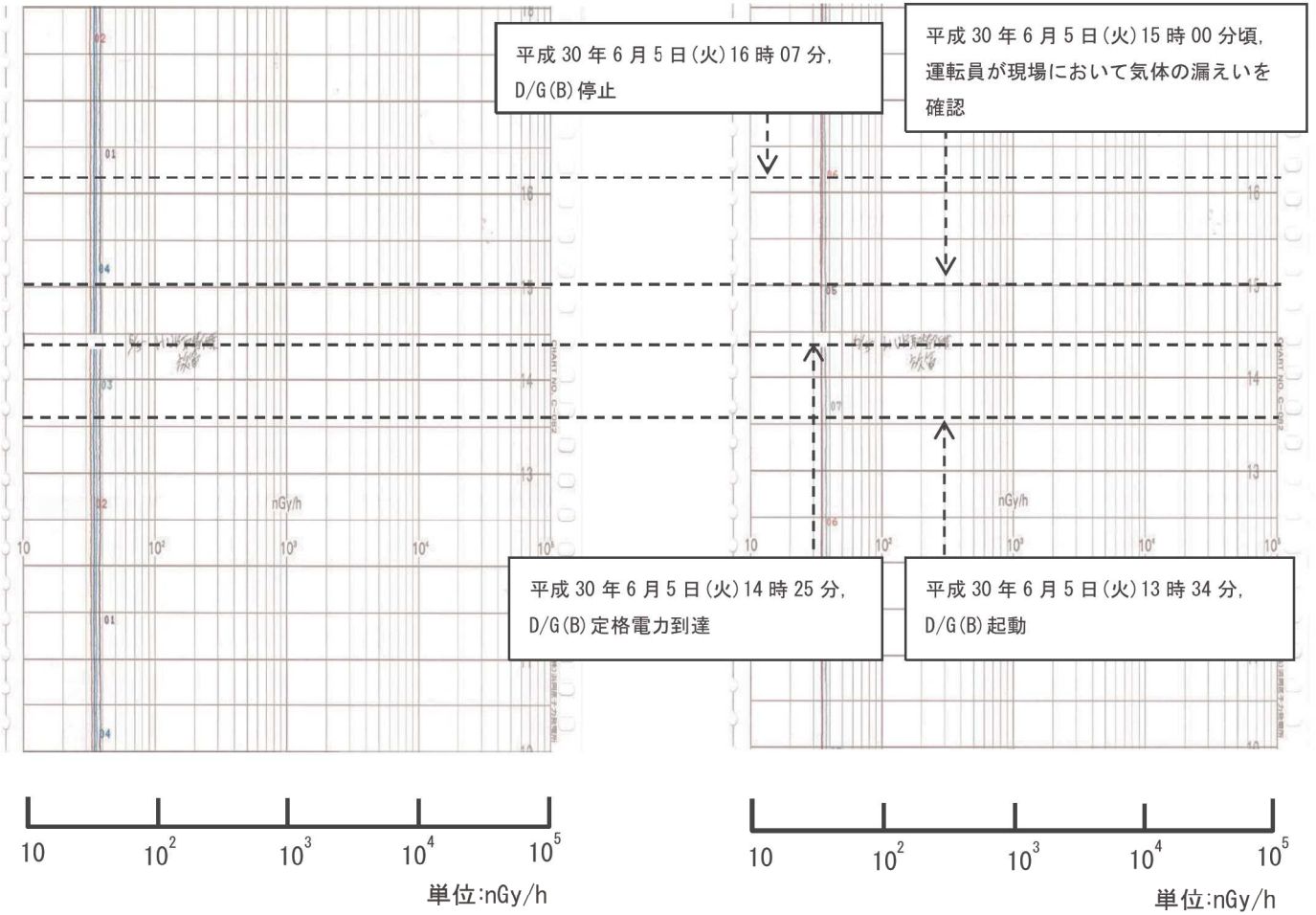
IC: イオンチェンバー
SIN: シンチレーション検出器

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

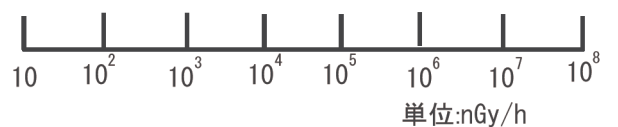
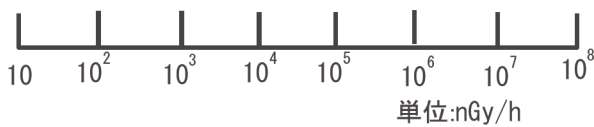
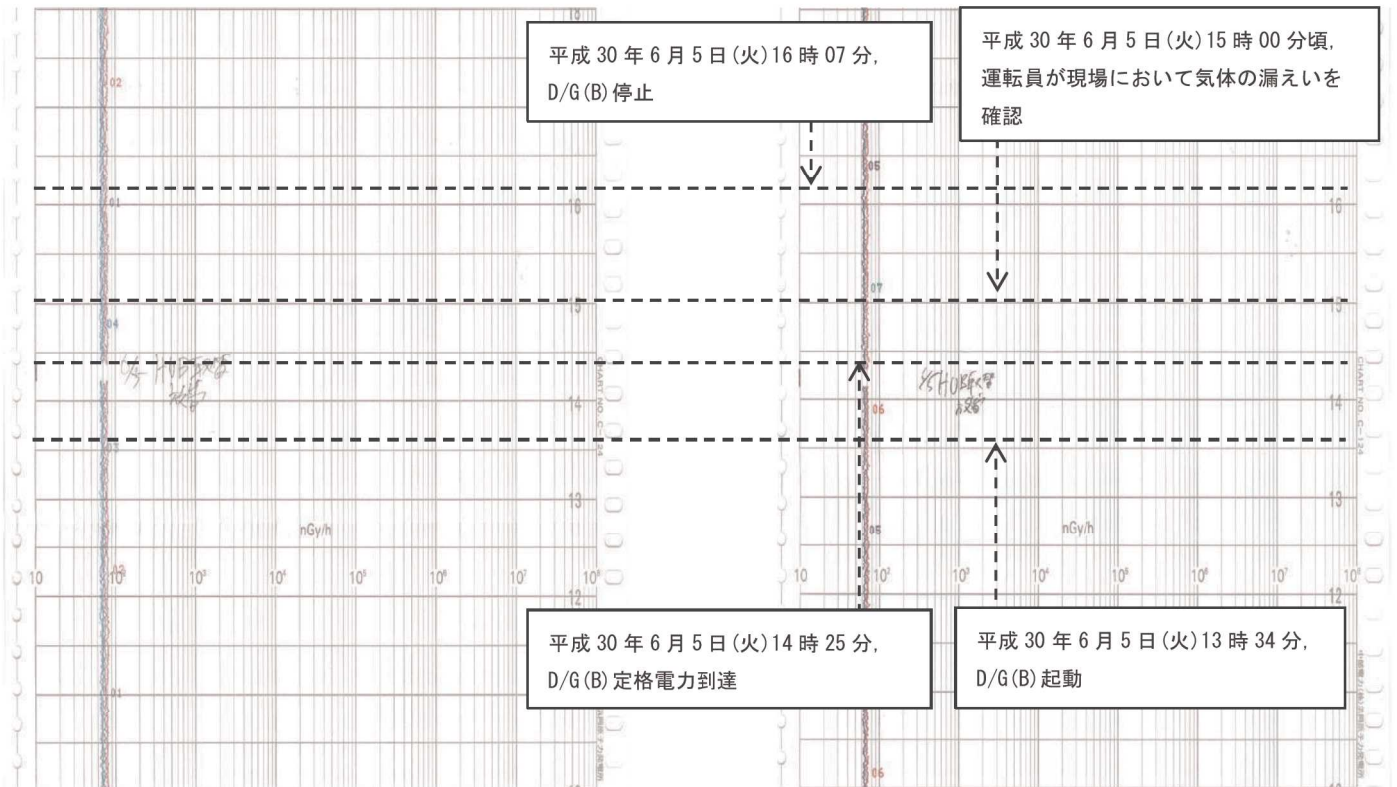
NaI: シンチレーション検出器

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(IC) No.1~4

モニタリングポスト(IC) No.5~7



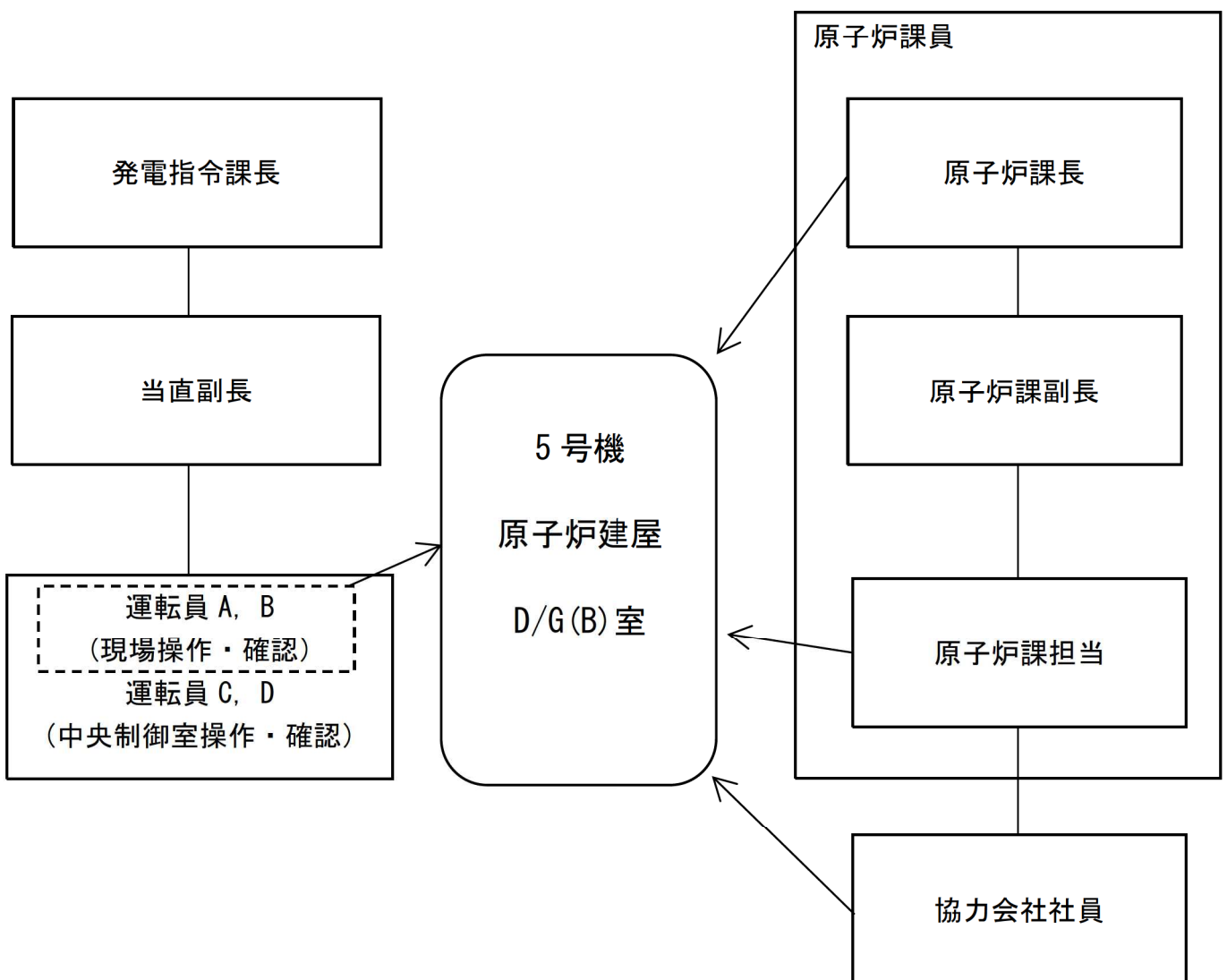
時間

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。

※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。

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

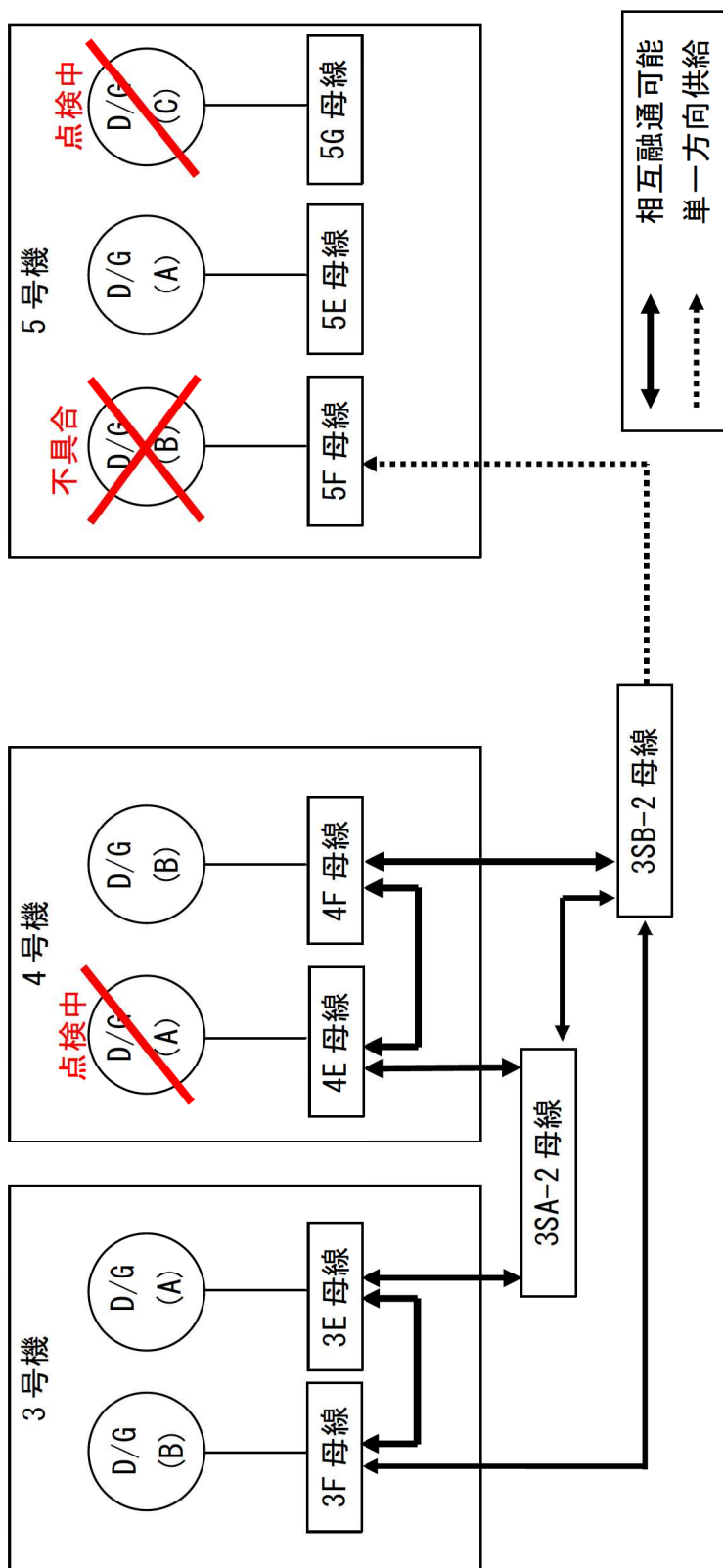
上記のとおり、原子炉の状態が冷温停止及び燃料交換において、D/G を含む非常用発電設備は常に 2 台要求されている。5 号機は、「5F 母線 (D/G は(B))」が 3 号機、4 号機の共用母線である 3SB-2 母線と接続されている。これにより、3 号機 D/G(A), D/G(B), 4 号機 D/G(A), D/G(B) の 4 台全てが待機の場合に限り、電源融通を受けられる。この場合、3, 4 号機の D/G を保安規定第 1 編第 60 条の非常用発電機 1 台分とみなすことができる。

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



＜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。

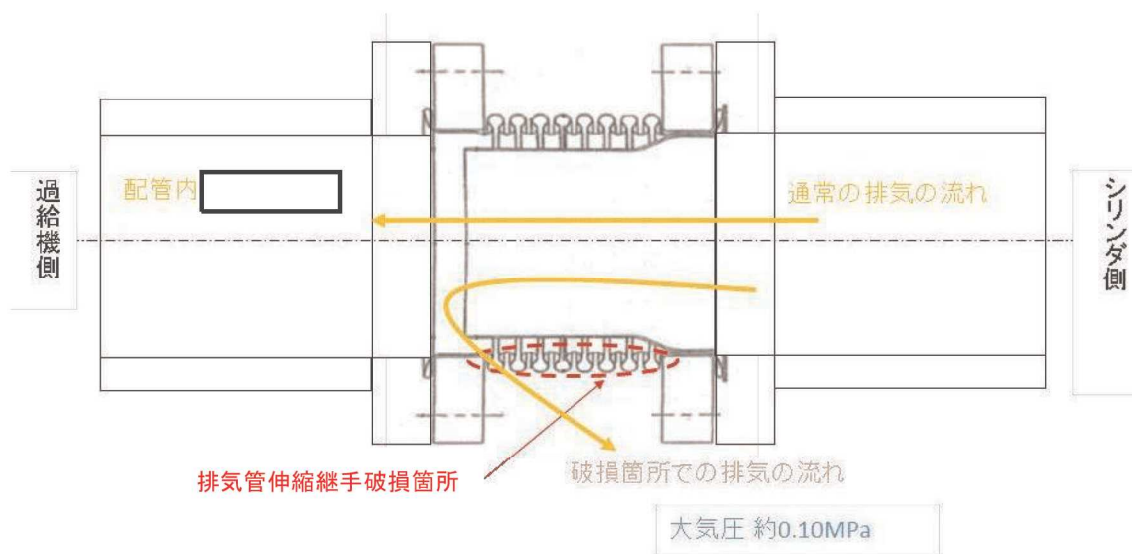


図 8-1 排気管伸縮継手廻りの排気経路の概要

以 上

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。

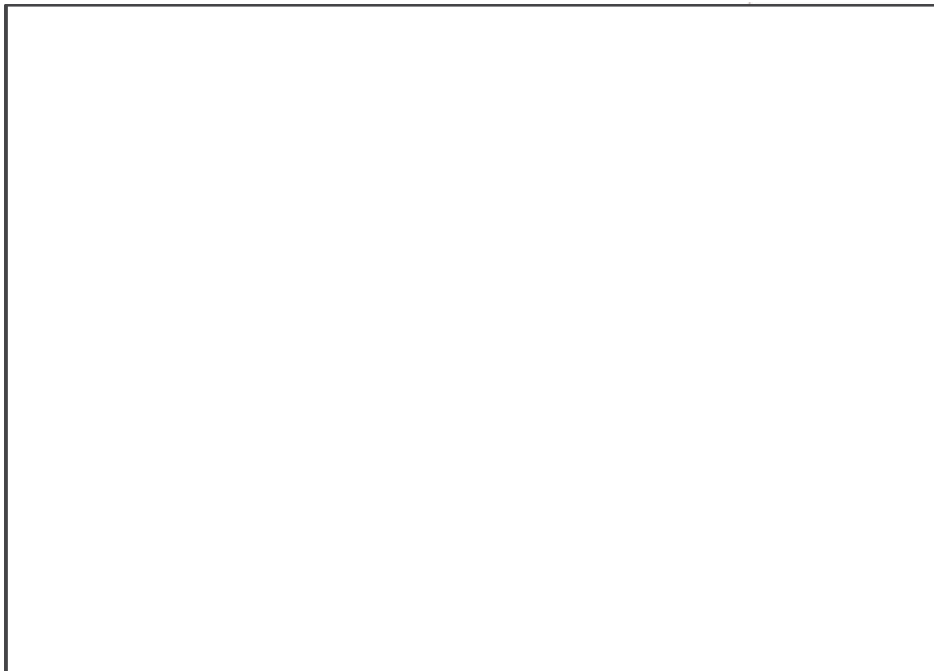


図 9-1 調査範囲(排気管側)

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。

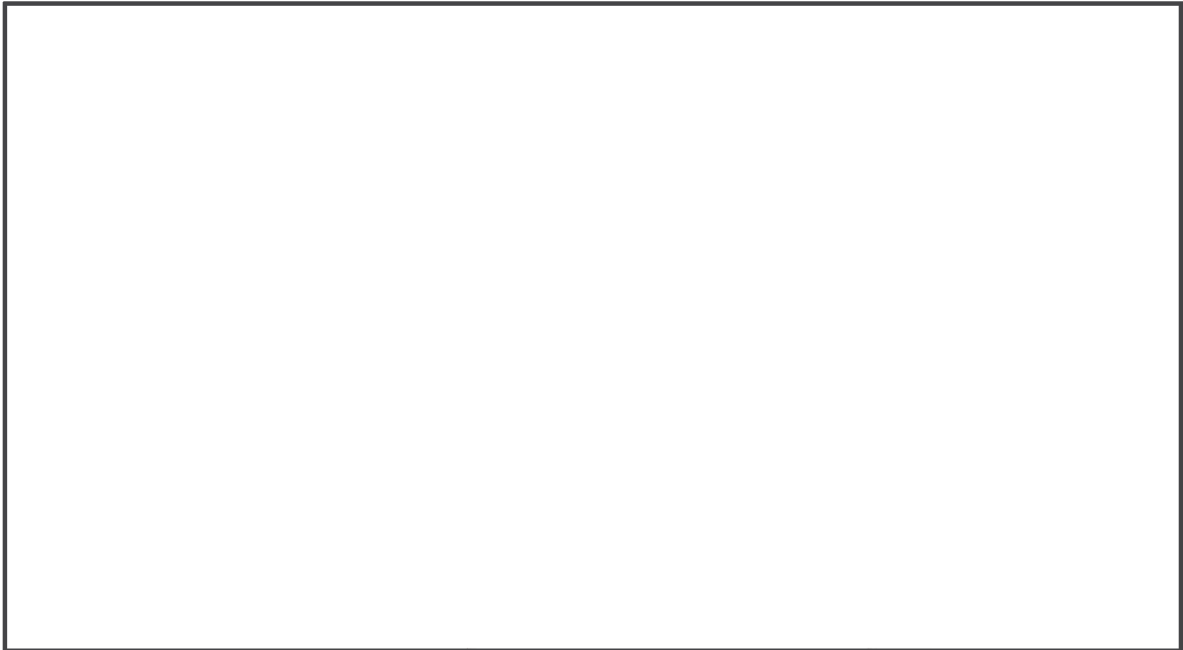


図 9-2 調査範囲(過給機側)

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。

以 上

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。

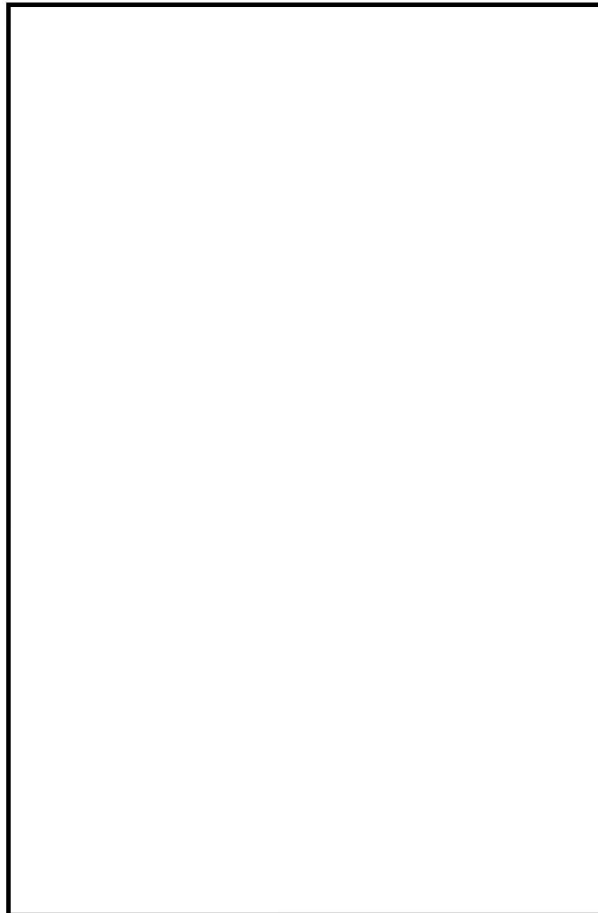


図 10-1 調査範囲(D/G(B)室内)

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。

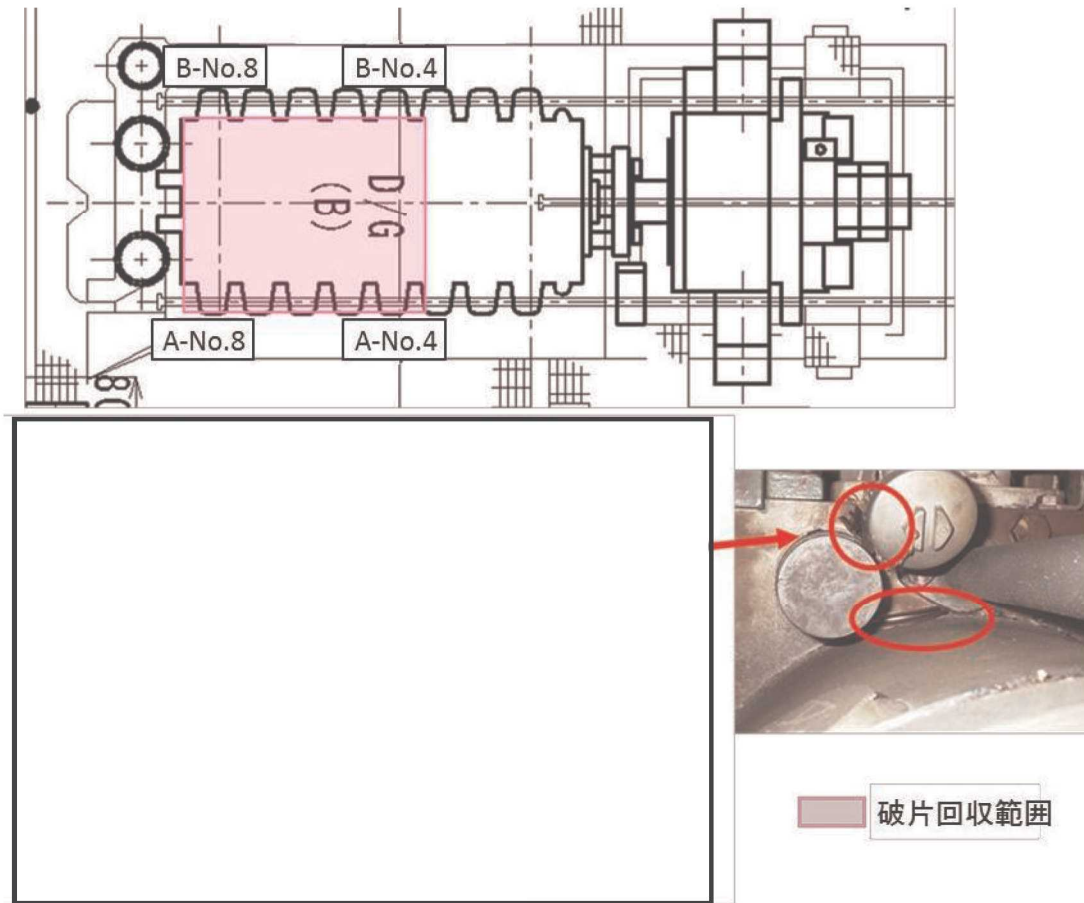


図 10-2 破片回収範囲(機関周辺)

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

以上

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

以 上

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。

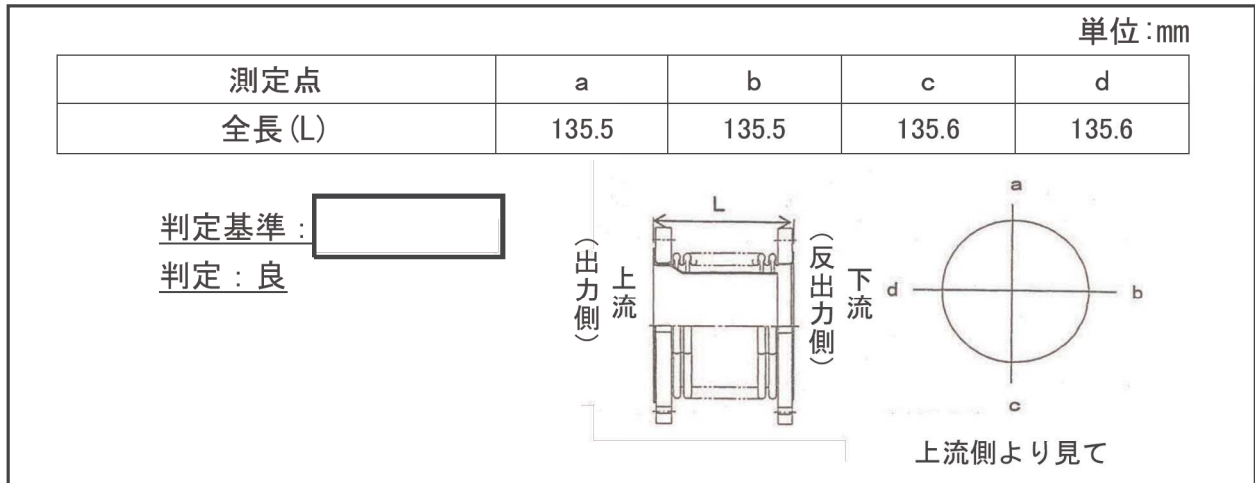


図 12-1 全長測定

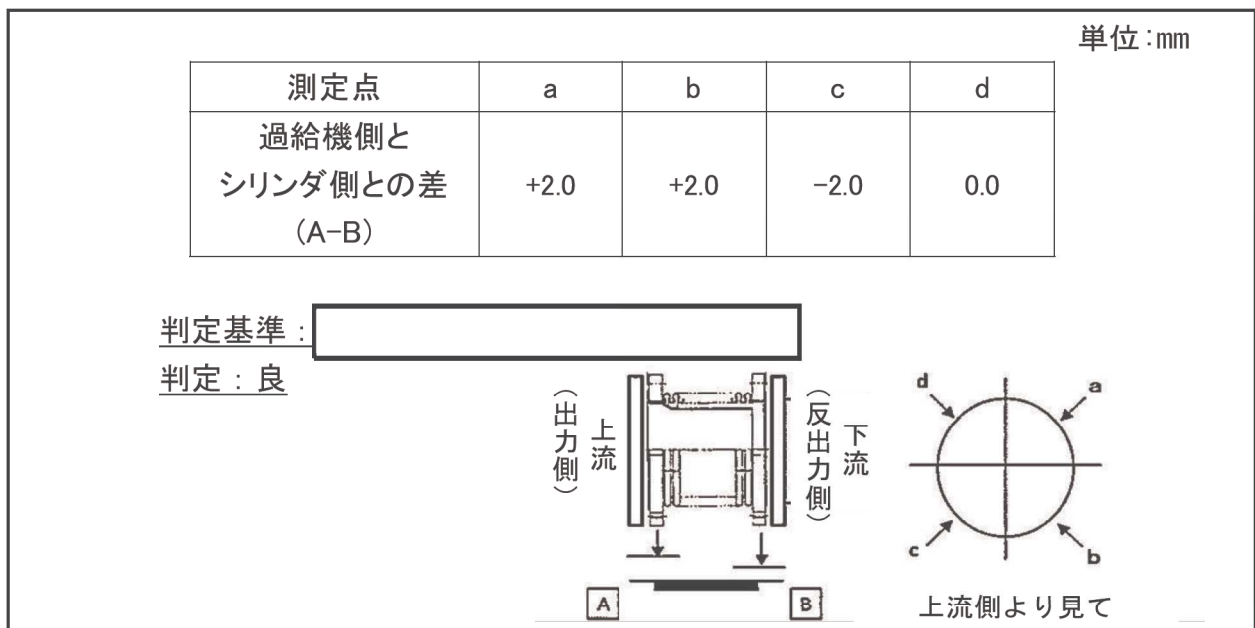


図 12-2 段差(芯ずれ)測定

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。

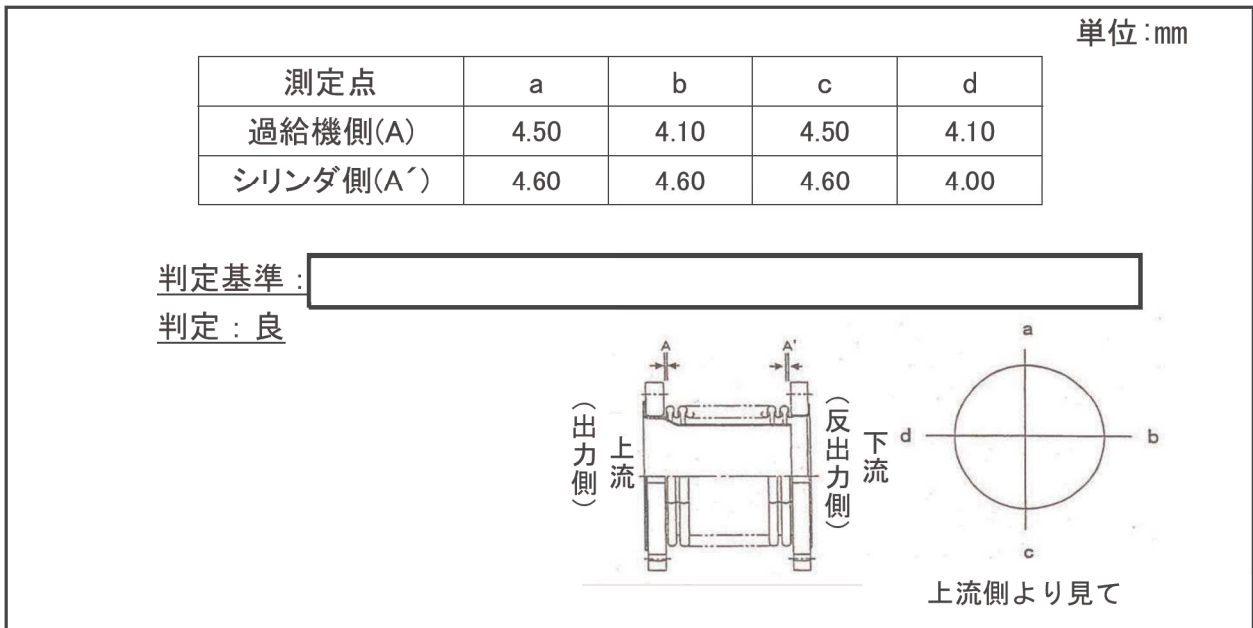


図 12-3 フランジ - ベローズ間隙測定

以上

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ペ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。

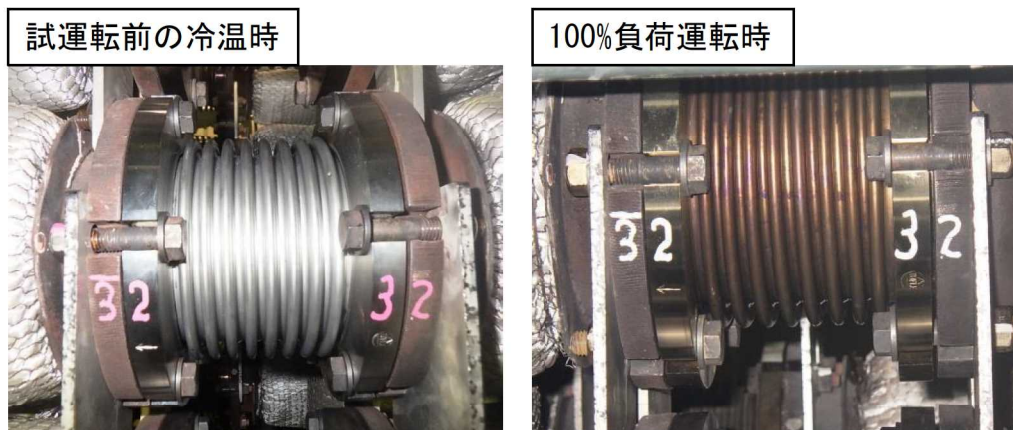


図 13-1 試運転前の冷温時及び 100%負荷運転時における排気管伸縮継手外観

(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。

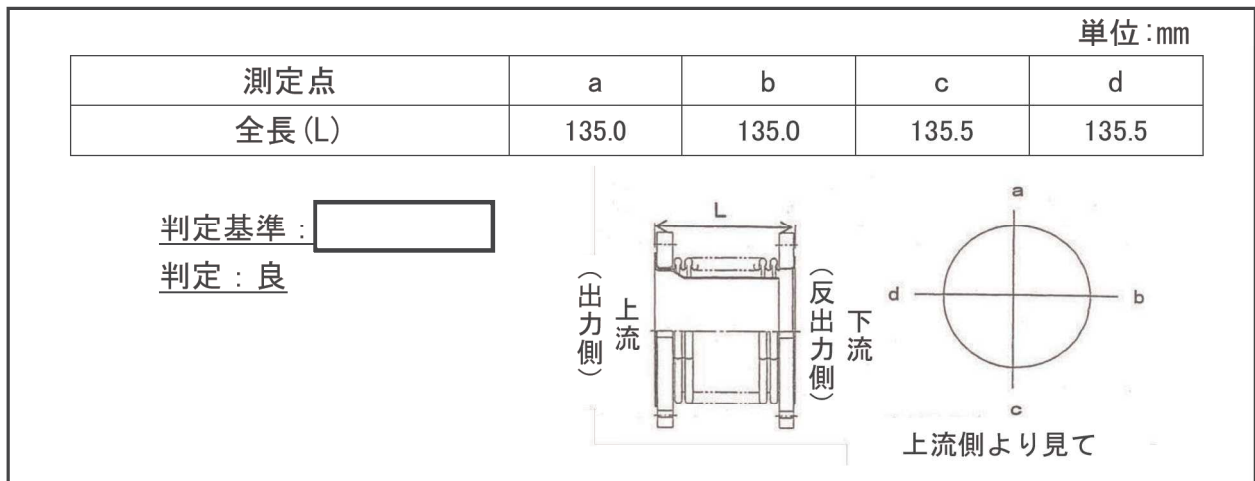


図 13-2 当該排気管伸縮継手の全長測定

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。

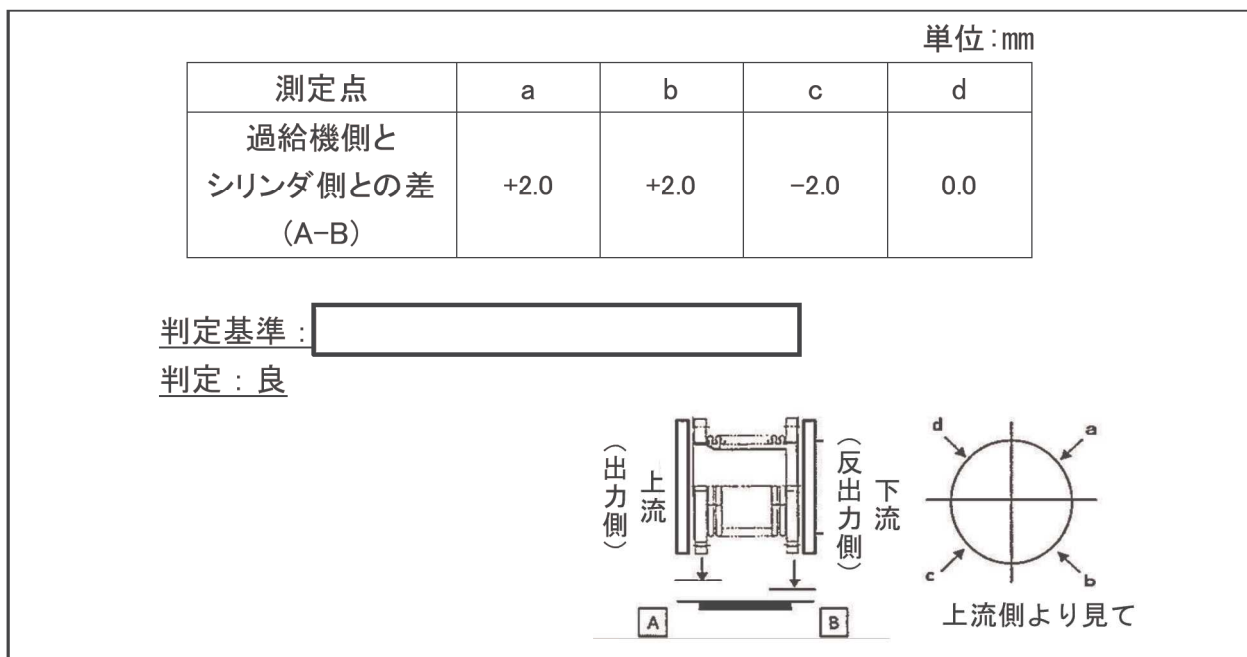


図 13-3 取替え後の当該排気管伸縮継手の段差(芯ずれ)測定

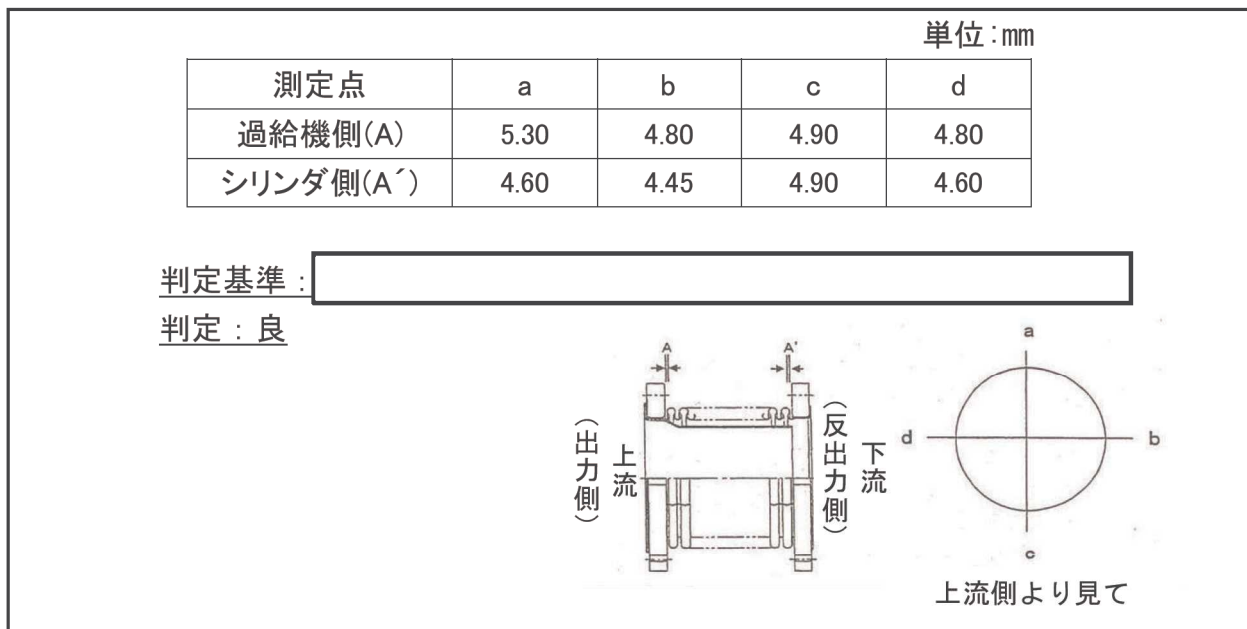


図 13-4 取替え後の当該排気管伸縮継手のフランジ - ベローズ間隙測定

以上

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。