

関原発 第509号  
2024年 2月 6日

原子力規制委員会 殿

大阪市北区中之島3丁目6番16号  
関西電力株式会社  
執行役社長 森 望

高浜発電所1号機 B-給水ブースタポンプ入口配管からの蒸気漏れについて

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、別紙  
のとおり原因およびその対策について取り纏めましたのでご報告します。

## 発電用原子炉施設故障等報告書

2024年2月6日

関西電力株式会社

件名	高浜発電所1号機 B-給水ブースタポンプ入口配管からの蒸気漏れについて
事象発生の日時	2024年1月24日 13時00分 (発電用原子炉施設の故障を確認した日時)
事象発生の場所	高浜発電所1号機 タービン建屋1階 E.L. 4.0m (非管理区域)
事象発生の発電用原子炉施設名	原子炉冷却系統施設
事象の状況	<p>高浜発電所1号機(加圧水型軽水炉、定格電気出力82.6万kW、定格熱出力244万kW)は定格熱出力一定運転中のところ、2024年1月21日23時25分頃に巡回点検中の運転員がタービン建屋1階面(E.L. 4.0m)にあるB-給水ブースタポンプ(以下、「FWBP」という)<sup>*1</sup>入口配管の一部より僅かな蒸気漏えい(保温材より蒸気の立ち昇り)を発見した。</p> <p>漏えい発見時は、FWBP3台のうち、AおよびB-FWBPの2台が運転中であり、待機中のC-FWBPを1月22日0時46分に起動し、B-FWBPを1時29分に停止した後、2時00分に漏えい箇所の隔離を開始し3時00分に完了した。</p> <p>運転員がAおよびC-FWBPの運転状態を点検していたところ、5時00分頃にA-FWBPのグラント部<sup>*2</sup>からのドレン量(2次冷却水)が通常よりも多いことを確認した。設備所管課員が点検した結果、ポンプ運転継続には問題ないものの、今後の運転に万全を期すため、作業員安全確保の観点から当該ポンプを停止した上でグラント部の点検等を行うこととした。このため、当直課長が電気出力40%までの負荷抑制が必要と5時30分に判断し、9時05分より負荷降下を開始、12時22分に負荷降下が完了した。その後、13時04分にA-FWBPを停止し、15時00分に隔離を開始し、16時00分に完了した。なお、B-FWBP入口配管保温材から立ち昇っている蒸気については、13時00分に立ち昇りがなくなっていることを運転員が確認した。</p> <p>設備所管課員は、B-FWBP入口配管付近の蒸気漏えい箇所について、周辺温度が低下した後、保温材を取り外して目視点検および浸透探傷試験を実施した。その結果、ベント管と管台の溶接部に沿った長さ約35mmの周方向の浸透指示模様を確認したため、発電用原子炉施設の故障により5%を超える発電用原子炉の出力変化が生じる事象であることから、1月24日13時00分に実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当することを判断した。</p> <p><sup>*1</sup> 給水ポンプの吸込みを補助するために設置している装置。 <sup>*2</sup> ポンプの軸シール部であり、内部流体が回転軸の貫通部から外部に漏えいしないように封じている。</p>

事 象 の 原 因

1. 原因調査

(1) B-FWBP入口配管ベント管からの蒸気漏えいに係る調査

ベント管から蒸気漏えいした原因について、要因分析図に基づき調査を実施した。

a. 現地調査結果

保温材を取り外した状態で現地にて実施できる調査を行った結果は以下のとおり。

(a) 漏えい箇所の特定

ア. 目視点検

蒸気漏えいが確認された入口配管のベント管について外観観察を行った結果、母材部、溶接部に有意な外面腐食がないことを確認した。

ベント管については、周辺設備と最も近接している箇所がベント管頂部であった。最も近接している周辺設備である上部架台底部とベント管頂部の隙間は確保されているが、それぞれに凹みを確認した。

イ. 浸透探傷試験

蒸気漏えいが確認された入口配管のベント管について浸透探傷試験を行った結果、ベント管と管台をつなぐ溶接部に沿った長さ約35mmの周方向の浸透指示模様を確認した。

(b) ベント管の詳細調査

ア. 施工履歴

蒸気漏えいが確認された入口配管のベント管について施工履歴を確認した結果、建設以降の改造・取替実績はないことを確認した。

また、浸透指示模様が確認された溶接部の施工は現地溶接であることをプラントメーカーへの聞き取りにて確認した。

イ. 過去点検実績の確認

蒸気漏えいが確認された入口配管のベント管について過去の点検実績を確認したところ、配管の振動計測を第21回定期検査(2002年11月～2003年3月)に入る直前の運転状態にて実施しており、溶接部に発生する応力は約8.3MPaであった。この値は許容応力以下であり、問題はなかった。

また、第27回定期検査中の2011年1月に、2次系配管の肉厚を測定する目的で保温材を取り外した際に、当該部を目視にて確認した結果、漏えい跡などの異常は認められなかった。

ウ. 類似箇所の確認

類似箇所であるAおよびC-FWBP入口配管ベント管について外観観察を行った結果、母材部、溶接部に有意な外面腐食がないことを確認した。

ベント管については、周辺設備と最も近接している箇所がベント管頂部であった。最も近接している周辺設備である上部架台底部とベント管頂部の隙間は確保されており、異常は認められなかった。

浸透探傷試験を行った結果、指示模様がないことを確認した。

b. 工場等調査結果

浸透指示模様が認められた当該部を切り出し、工場にて詳細調査を行った結果および関連する記録を確認した結果は以下のとおり。

(a) 溶接部

ア. 溶接不良

(ア) 材料不良

材料分析(以下、「EPMA<sup>\*3</sup>分析」という)の結果、母材と同等である炭素鋼の化学成分を概ね満足しており、適切な材料が使用されていることを確認した。

<sup>\*3</sup> 電子プローブマイクロアナライザーの略称であり、材料表面に電子線を照射し、表面から発生する特性X線の波長と強度の検出を行い、構成元素を分析する手法である。

(イ) 脚長、のど厚不足

断面観察の結果、規格要求を満足していることを確認した。

(ウ) ブローホール

放射線透過試験(以下、「RT」という)およびX線コンピュータ断層撮影(以下、

事 象 の 原 因

- 「X線CT」という)の結果、溶接部にブローホールは認められなかった。
- (エ) スラッグの巻き込み  
RTおよびX線CTの結果、溶接部にスラッグの巻き込みは認められなかった。
- (オ) アンダーカット  
RTおよびX線CTの結果、溶接部にアンダーカットは認められなかった。
- (カ) 溶け込み不良、融合不良等  
RTおよびX線CTの結果、溶接部に溶け込み不良、融合不良は認められなかった。
- (キ) 熱処理不良  
溶接後熱処理を要しないものに該当するため、溶接部熱処理を行う必要はない。
- イ. 溶接部腐食
- (ア) 外面 (腐食)  
塗装剥離前、剥離後の外観観察の結果、著しい腐食のないことを確認した。
- ウ. 応力腐食割れ  
材料は応力腐食割れの環境下になく、X線CTの結果、応力腐食割れは認められなかった。
- エ. 疲労割れ (過大応力)
- (ア) 圧力・熱サイクル疲労  
断面観察の結果、溶接部に圧力・熱サイクル疲労の様相は認められなかった。
- (イ) 振動 (共振)  
振動計測記録より、ベント管の固有振動数がポンプの振動成分と重複していないことを確認した。
- (ウ) 接触・熱移動  
外観観察の結果、ベント管頂部と上部架台底部に接触痕(ベント管頂部0.56mmの凹み、上部架台底部にたて約10mm、よこ約15mm)を確認した。ベント管頂部と上部架台底部とのすき間は、約5mmであったが、熱伸び評価では、約5.5mmの熱伸びが想定されており、ポンプ運転時は上部架台底部と接触していたと考えられるが、RTおよびX線CTの結果、溶接部については健全であることを確認した。
- (b) 母材部
- ア. 設計・施工不良
- (ア) 材料選定不良  
図面確認の結果、STPT38<sup>\*4</sup>との記載があり、規格要求の材料を使用しており、問題ないことを確認した。
- <sup>\*4</sup> 高温配管用炭素鋼管
- (イ) 材料不良  
図面確認の結果、STPT38との記載があり、EPMA分析の結果、STPT38の化学成分を概ね満足していることを確認した。また、配管公称肉厚は2.8mmであるが、寸法測定の結果3.7mmであり、相違があるものの強度的に問題ないことを確認した。
- (ウ) 外面塗装不良  
プラントメーカーへの聞き取りにて塗装指示がされていることを確認した。また、外観観察にて塗装されていることを確認した。
- イ. 延性破壊
- (ア) 異常昇圧  
断面観察、破面観察の結果、延性破壊の特徴であるディンプルは認められないことから、異常昇圧はない。
- ウ. 腐食減肉
- (ア) 外面 (腐食)  
塗装剥離前、剥離後の外観観察の結果、著しい腐食のないことを確認した。

事 象 の 原 因

(イ) 内面 (腐食減肉)

内面観察および寸法測定の結果、外面で確認された浸透指示模様位置と同様の周方向の浸透指示模様を確認したが、ベント管内面に有意な腐食減肉がないことを確認した。

エ. 応力腐食割れ

材料は応力腐食割れの環境下になく、断面観察および破面観察の結果、応力腐食割れの様相は認められなかった。

オ. 疲労割れ (過大応力)

(ア) 圧力・熱サイクル疲労

断面観察、破面観察の結果、 $0^\circ$  付近の外表面を主起点としてき裂が発生し、繰り返し応力が発生したことによるビーチマーク (4本) を確認した。また、破面は概ね平坦で顕著な凹凸がなく、き裂の先端が揃っており、直線的に進展し、破面近傍に塑性変形の様相が認められないことを確認した。

なお、疲労割れの特徴であるストライエーションの様相は認められなかった。これは、高温の漏えい水により表面が浸食されたため様相が消失したものと考えられる。

外観観察の結果、ソケット溶接止端部に円周方向に約35mmの浸透指示模様を確認した。

X線CTの結果、浸透指示模様と同様の位置に約42mmの貫通指示を確認した。

(イ) 振動 (共振)

振動計測記録より、ベント管の固有振動数がポンプの振動成分と重複していないことを確認した。

(ウ) 接触・熱移動

外観観察の結果、ベント管頂部と上部架台底部に接触痕 (ベント管頂部0.56mmの凹み、上部架台底部にたて約10mm、よこ約15mm) を確認した。ベント管頂部と上部架台底部とのすき間は、約5mmであったが、熱伸び評価では、約5.5mmの熱伸びが想定されており、ポンプ運転時は上部架台底部と接触していたと考えられる。

c. き裂発生および進展のメカニズム

当該部の損傷については、架台梁との接触によりベント管付け根部に曲げ応力が作用し、さらにベント管頂部が拘束された状態でFWBPの機械振動が加わったことにより、疲労限度を超え外面に疲労損傷によるき裂が発生し、内面に向けき裂が進展した可能性が考えられることから今回の事象を検証した。

(a) 発生応力評価

B-FWP入口配管ベント管に塑性変形が発生していたことから、変形後のベント管には、炭素鋼の降伏応力約215MPa相当が作用していると評価した。

また、B-FWP入口配管ベント管と上部架台梁が接触した状態で配管母材の溶接止端部に発生する応力を評価した結果、約106MPaであり、応力集中係数 (約1.7) を考慮した結果、約179MPaの応力振幅が発生すると評価した。

(b) 疲労強度の算出

調査したベント管は塑性変形していたことから、平均応力は降伏応力約215MPaを使用し、修正グッドマン線図を用いて評価した結果、平均応力約215MPaにおける疲労限度約62MPaを大きく上回る、約179MPa (2倍以上) の応力振幅が発生していると評価した。

よって、疲労限度を超える状態にあったと推定する。

(c) 応力繰り返し数の評価

炭素鋼のS-N線図より、疲労限度は約 $1 \times 10^7$ 回サイクルと評価される。

疲労損傷を生じさせる応力振幅は、FWBPの機械振動によるものであり、FWBPの回転数 (885rpm) から算出した14.75Hzの振幅で発生することから、機械振動が疲労限度の約 $1 \times 10^7$ 回サイクルに到達するのは約8日と評価した。

上記評価より、ベント管頂部と架台梁が接触した後、短期間で疲労き裂が発生したものと推定する。

(d) 疲労き裂発生進展の可能性

疲労き裂進展速度 ( $da/dN$ ) を、き裂進展速度式 (J SME S NA 1 配管用フェライト鋼の疲労亀裂進展速度式) を用いた応力拡大係数 ( $\Delta K$ ) を考慮し、算出した。

$$\Delta K \leq 19.48 \text{ の場合 } da/dN = 1.48 \times 10^{-14} \Delta K^{5.95}$$

2005～2006年：平均疲労き裂進展速度	4.2 × 10 <sup>-12</sup> m/cycle
2008～2009年：平均疲労き裂進展速度	5.0 × 10 <sup>-12</sup> m/cycle
2009～2011年：平均疲労き裂進展速度	1.5 × 10 <sup>-11</sup> m/cycle
2023年～	：平均疲労き裂進展速度 1.4 × 10 <sup>-10</sup> m/cycle

(e) 考察

本事象が、機械振動により繰り返しの応力振幅が加わることにより、き裂進展速度が徐々に増えながらき裂が進展するという、疲労割れ特有の挙動を示していることが分かった。

d. 調査結果まとめ

(a) 蒸気漏えいが発生した原因

B-FWB P入口配管ベント管は、B-FWB P運転中の機械振動により損傷しない設計としているとともに、配管系の熱伸びを考慮しても周辺設備に干渉しない配置としており、ベント管が上部架台底部と接触するまではベント管に応力が集中することなく運転継続してきたが、今回、配管系の熱伸びによりベント管頂部と上部架台底部が接触したため、配管母材部に曲げ応力が発生した。

さらに、ベント管頂部と上部架台底部が接触し拘束された状態で、B-FWB Pの運転による機械振動が加わることにより、配管母材の溶接止端部に応力が集中することで、き裂が発生したと推定した。

発生したき裂を起点に、上部架台底部との接触とB-FWB Pの運転による機械振動が加わることによりき裂は進展し、今回僅かな蒸気漏えいの発生に至ったものである。

破面観察の結果、母材部に明瞭なビーチマークが4本確認された。

これはB-FWB Pの起動・停止による応力振幅の変化にて発生する破面の様相であり、き裂が発生した時期は第21回定検(2002年)プラント起動後(1サイクル目)と推定した。

以降、第22回定検(2004年)から第26回定検(2009年)のB-FWB Pの運転中(2～4サイクル目)は機械振動により、徐々にき裂が進展し、2009年～2011年(5サイクル目)にき裂が内面に到達し貫通に至ったと推定した。

第27回定検後(2023年8月)の再稼働後(6サイクル目)においても、B-FWB Pの運転による機械振動により、き裂がさらに進展し、配管の半周程度に割れが進展した時点で、巡回点検で発見できる程度に蒸気漏れが拡大し発見に至った。

(b) ベント管頂部と上部架台底部が接触した原因

ベント管頂部と上部架台底部が接触した原因を調査した結果、当該部の振動計測を第21回定検開始前(出力運転中(温態時))の2002年11月に実施していることを確認した。

関係会社への聞き取り調査の結果、振動計測箇所が狭隘であり振動計のセンサーを接触させることができないことから、上部架台梁を取り外した状態で計測していたことを確認した。

また、取り外した上部架台梁は第21回定検開始後の冷態時に復旧しており、上部架台梁のボルト穴には数mmの調整代があることから、取り外し時(温態時)のベント管頂部と上部架台梁が接触しない据付状態を再現できずに復旧されたと推定した。

以上のことから、ベント管頂部と上部架台底部の接触は、第21回定検(2002年)プラント起動後に発生したと推定され、破面観察により確認されたき裂が発生した時期と一致する。

事 象 の 原 因

事 象 の 原 因

(2) A-FWBP グランド部からのドレン量増加に係る調査

グランド部のドレン量が増加した原因について、要因分析図に基づき調査を実施した。

a. グランド部からのドレン量増加

(a) グランドパッキン不良

ア. 型番不良

A-FWBP グランド部のグランドパッキンは、2020年9月に取替を行っている。取替を行った際の工事報告書を確認し、グランドパッキンの仕様がメーカ指定品であることを確認した。

イ. 組込み（装着）不良

(ア) パッキン押えの傾き、ナットの緩み

パッキン押えとパッキン箱間の寸法を直尺にて4点測定し、均一に締め付けられていることを確認した。また、触診によりナットの緩みがないことを確認した。

通常運転と同様のシール水圧力（1.20MPa）でシール水を供給し、グランド部のパッキン押えナットを増締め（1/12R）した結果、ドレン量が低下（うどん1本⇒そば1本）した。よって、グランドパッキンのシール性能は健全であった。

(イ) グランドパッキン切口合せ面の隙間

グランドパッキン切口合せ面に隙間がないことを目視により確認した。

(ウ) グランドパッキン切口合せ面の位置

上下のグランドパッキン切口合せ面の位置が要領書どおり180度ずれるように挿入されていることを目視により確認した。

(エ) グランドパッキン、ランタンリング挿入不良

前回工事報告書のグランドパッキン各段、ランタンリングの挿入状況を確認し、図面どおりに挿入されていることからグランドパッキンの組み立て状態に問題はなかった。

(b) グランドパッキン劣化

ア. 経年劣化

グランドパッキンの外観点検を実施したところ、有意な傷やむしれ等の劣化はなかった。

A-FWBPは2023年7月から運転しており、運転期間は約7ヶ月程度であることから、取替周期である3定検に達していない。

イ. シール水流量低

(ア) ランタンリング通水穴閉塞

ランタンリングを目視にて確認したところ、シール水の流れを阻害するような閉塞がないことを確認した。

(イ) シール水入口圧力低

ポンプ運転時のシール水入口圧力は、標準値（1.06MPa～1.27MPa）内であることを運転員への聞き取りにより確認した。

ウ. パッキン箱冷却不足

(ア) パッキン箱冷却水流量低

冷却水戻り配管のサイトフローを確認し、冷却水が通常どおり流れていることを目視により確認した。

(c) 軸スリーブ摩耗

ア. パッキン締付け不良

軸スリーブ摺動面に有意な傷および摩耗がないことを目視により確認した。

イ. 異物混入

グランド部まわり（パッキン箱内面、ネックブッシュ）に異物混入および傷がないことを目視により確認した。

事 象 の 原 因

(d) グランド部内圧高

ア. バランス穴閉塞

上部ケーシングバランス穴に流れを阻害するような閉塞がないことを目視およびファイバースコープにより確認した。

イ. FWBP吸込み側圧力高

ポンプ運転時の圧力は0.87MPaであり標準値0.80MPa～0.90MPa（FWBP吸込み側圧力と同等の圧力である脱気器内圧力）内に収まっていることから、吸込み圧力が適正であることを確認した。

ウ. バランス管閉塞

バランス管内の内部に流れを阻害するような閉塞がないことを目視およびファイバースコープにより確認した。

b. シール水、クエンチング水の状態変化

シール水圧力は、通常の2台運転の状態では1.10MPaにて供給しており、FWBP切替の3台運転時に1.27MPaに調整したが、いずれも通常の圧力範囲内（1.06MPa～1.27MPa）であったことを確認した。

また、クエンチング水はFWBP2台および3台運転時に流量調整弁の操作を実施していないことを確認した。

c. 運転パラメータの変動によるグランド部への影響

ポンプ切替（3台運転）時のFWBP吸込み側圧力上昇に伴うシール水圧力上昇操作が、グランド部のドレン量の増加に起因した可能性は否定できない。

以上の結果、グランド部を構成する各部品に異常は認められなかったが、ポンプ切替時のシール水圧力上昇操作がグランド部からのドレン量増加の起因となった可能性が否定できないことから、以下のとおり検討した。

グランドパッキンは運転に伴いパッキンの馴染みによりドレン量が増加する特性があることから、通常はグランド部を増締めすることにより、グランド部からのドレン量を調整している。

FWBPの切り替えに伴う3台運転中は、2台運転時より2次冷却水の系統圧がわずかに上昇する傾向にあり、今回も同様な傾向が認められていたため、A-FWBPシール水圧力を1.10MPaから1.27MPaに調整したことを、操作を行った運転員に確認している。グランド部にかかる圧力が変化し、グランドパッキンとスリーブとの隙間を流れるドレンの流路に影響し、グランド部からのドレン量増加に至った可能性が考えられる。グランド部からのドレン量が増加したことから、その後にシール水圧力を1.10MPaに戻したがドレン量の変化はなかった。

グランドを有するポンプは、運転中にグランド部からのドレン量が増加した場合、通常の保守作業の範囲内でグランド部の増締めを行っている。ポンプ切り替え時の系統水やシール水の圧力変化によってグランド部からのドレン量がある程度、変化することは通常の動作範囲内であり、グランド部の調整によって対応している。

なお、今回はB-FWBP入口配管付近の蒸気漏えいが発生していた現場近傍での作業であったことから、作業安全を確保する観点よりポンプ運転中でのグランド部の増締めは行わなかった。

2. 推定原因

(1) B-FWBP入口配管ベント管からの蒸気漏れの原因

ベント管頂部にある上部架台梁を脱着した際、給水配管が冷めている状態で架台梁がベント管に接触しないよう据え付けたが、運転開始により高温となった給水配管が熱伸びしたことにより、ベント管頂部と上部架台底部が接触し、ベント管の付け根部に曲げ応力が作用した。さらに、ベント管頂部が拘束されたことによりB-FWBPの運転による機械振動にて配管母材の溶接止端部に応力が発生し、ベント管外面にき裂が発生したと推定した。

発生したき裂を起点に、B-FWBPを運転継続してきたことにより機械振動が加わり続け、き裂が進展・配管を貫通して漏えいに至ったものと推定した。

事象の原因	<p>(2) A-FWBPのグランド部からのドレン量増加の原因</p> <p>ポンプ切替時、系統水の圧力上昇やシール水圧力の調整によって、グランド部にかかる圧力が増加し、徐々にグランドパッキンとスリーブとの隙間に伝播して、ドレンの流路が広がったため、グランド部からのドレン量増加に至ったものと推定した。</p> <p>ポンプ停止後、シール水を供給した状態でパッキン押えナットを増締めしたことによりドレン量が低下したこと、また、グランド部の点検結果に異常がなかったことから、グランド部のシール性能は健全であったと推定した。</p>
保護装置の種類及び動作状況	該当せず
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	2024年2月上旬
再発防止対策	<p>B-FWBP入口配管付近の蒸気漏えいに係る対策を以下のとおり実施する。</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. 損傷が認められたベント管を新管に取り替えるとともに、給水配管等の熱変位が発生しても上部架台と接触しないように上部架台の形状を変更する。</li> <li>2. 工事完了後の現場確認として以下の注意事項を「原子力発電所請負工事一般仕様書」、「請負工事に関する心得集」に追記する。 <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 工事完了後の現場確認断面において、周辺機器との接触、干渉がないことを確認する。特に、高温機器・配管等を含む系統、設備周辺にて工事を実施した際は、高温状態での接触状況を確認するなど、熱変位による影響も考慮し確認すること。</li> </ul> </li> </ol> <p>今後、類似系統*<sup>5</sup>の振動影響のある小口径配管が、周辺機器・構造物と干渉がないことを点検していく。</p> <p>*<sup>5</sup> 重要度分類クラス1、クラス2および発電出力に影響を及ぼす設備を含む系統</p>

## 高浜発電所 1 号機

B－給水ブースタポンプ入口配管からの蒸気漏れについて

2024年2月

関西電力株式会社

1. 件 名  
高浜発電所1号機 B-給水ブースタポンプ入口配管からの蒸気漏れについて

2. 事象発生日  
2024年1月24日（発電用原子炉施設の故障を確認した日）

3. 事象発生の発電用原子炉施設  
原子炉冷却系統施設

4. 事象発生前の運転状況  
定格熱出力一定運転中

5. 事象発生の状況 （添付資料-1～6）

高浜発電所1号機（加圧水型軽水炉、定格電気出力82.6万kW、定格熱出力244万kW）は定格熱出力一定運転中のところ、2024年1月21日23時25分頃に巡回点検中の運転員がタービン建屋1階面（E.L. 4.0m）にあるB-給水ブースタポンプ（以下、「FWBP」という）\*<sup>1</sup>入口配管の一部より僅かな蒸気漏えい（保温材より蒸気の立ち昇り）を発見した。

漏えい発見時は、FWBP3台のうち、AおよびB-FWBPの2台が運転中であり、待機中のC-FWBPを1月22日0時46分に起動し、B-FWBPを1時29分に停止した後、2時00分に漏えい箇所の隔離を開始し3時00分に完了した。

運転員がAおよびC-FWBPの運転状態を点検していたところ、5時00分頃にA-FWBPのグラウンド部\*<sup>2</sup>からのドレン量（2次冷却水）が通常よりも多いことを確認した。設備所管課員が点検した結果、ポンプ運転継続には問題ないものの、今後の運転に万全を期すため、作業員安全確保の観点から当該ポンプを停止した上でグラウンド部の点検等を行うこととした。このため、当直課長が電気出力40%までの負荷抑制が必要と5時30分に判断し、9時05分より負荷降下を開始、12時22分に負荷降下が完了した。その後、13時04分にA-FWBPを停止し、15時00分に隔離を開始し、16時00分に完了した。なお、B-FWBP入口配管保温材から立ち昇っている蒸気については、13時00分に立ち昇りがなくなっていることを運転員が確認した。

設備所管課員は、B-FWBP入口配管付近の蒸気漏えい箇所について、周辺温度が低下した後、保温材を取り外して目視点検および浸透探傷試験を実施した。その結果、ベント管と管台の溶接部に沿った長さ約35mmの周方向の浸透指示模様を確認したため、発電用原子炉施設の故障により5%を超える発電用原子炉の出力変化が生じる事象であることから、1月24日13時00分に実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当することを判断した。

\*<sup>1</sup> 給水ポンプ（以下、「FWP」という）の吸込みを補助するために設置している装置。

\*<sup>2</sup> ポンプの軸シール部であり、内部流体が回転軸の貫通部から外部に漏えいしないように封じている。

6. 環境への影響  
なし

## 7. 時系列

1月21日(日)

23時25分頃 運転員がタービン建屋1階面にあるB-FWP入口配管の一部より僅かな蒸気漏えい(保温材より蒸気の立ち昇り)を発見

1月22日(月)

00時30分 FWP付近を立入制限区画に設定(ロープ、フェンスを設置)し、立入制限区画内への入域は保護具着用であることを関係者へ周知

00時46分 待機中のC-FWPを起動  
系統水の圧力上昇に伴い、A-FWPシール水圧力を調整(1.10MPa→1.27MPa)

01時29分 B-FWPを停止  
以降、運転中のAおよびC-FWPの点検を適宜実施

02時00分 B-FWP入口配管の隔離を開始

03時00分 B-FWP入口配管の隔離が完了、放熱による冷却を開始

05時00分頃 現場点検していた運転員がA-FWPのグランド部からのドレン量が通常よりも多いことを確認

(通常のドレン量であるうどん1本から3~4本に増加)  
ドレン量の増加を確認したため、A-FWPシール水圧力を再調整(1.27MPa→1.10MPa)したが、ドレン量に変化なし

設備所管課員は、B-FWP入口配管の一部より蒸気漏えいがある環境のため、労働安全の観点よりポンプ運転中でのグランド増締め作業は困難であることを当直課長へ連絡

05時30分 当直課長が電気出力40%までの負荷抑制\*<sup>3</sup>が必要と判断

09時05分 電気出力の負荷降下を開始  
(開始時点の電気出力105.6%、蒸気発生器熱出力99.8%)

12時22分 電気出力40%に到達  
(以降、電気出力40%を保持し、蒸気発生器熱出力は安定した14時時点において42.3%\*<sup>4</sup>)

その後、蒸気の立ち昇り箇所がB-FWP入口配管ベント管の付け根付近であることを運転員が確認した

13時00分 B-FWP入口配管ベント管の付け根付近からの蒸気の立ち昇りがなくなっていることを運転員が確認

13時04分 A-FWPを停止  
(グランド部からのドレン量に変化なし)

15時00分 A-FWPの隔離を開始

16時00分 A-FWPの隔離が完了、放熱による冷却を開始

\*<sup>3</sup> FWP1台容量(約50%)に余裕を考慮した電気出力。

\*4 定格運転時以外では、2次系各ヒータを加熱する蒸気量が減少し2次系の熱効率が低くなるため、1次系の出力を大きくし電気出力を維持している。これは通常の起動・停止時にみられる傾向である。

1月23日(火)

01時40分 B-給水配管内の水温が低下したため、ブローを開始  
07時30分 B-給水配管内のブローが完了  
20時15分 A-給水配管内の水温が低下したため、ブローを開始  
(グラウンド部のドレン量がうどん3~4本から1本に減少)  
21時00分 A-FWB P グラウンド増締め代有無の確認

1月24日(水)

07時00分 A-給水配管内のブローが完了  
(グラウンド部からのドレン量がなくなった)  
13時00分 B-FWB P 入口配管ベント管の付け根付近の蒸気漏えい箇所について、周辺温度が低下した後、保温材を取り外して目視点検および浸透探傷試験を実施した。その結果、ベント管と管台の溶接部に沿った長さ約35mmの周方向の浸透指示模様を確認した。

## 8. 原因調査

### (1) B-FWB P 入口配管ベント管からの蒸気漏えいに係る調査

(添付資料-7、9~23)

ベント管から蒸気漏えいした原因について、要因分析図に基づき調査を実施した。

#### a. 現地調査結果

保温材を取り外した状態で現地にて実施できる調査を行った結果は以下のとおり。

##### (a) 漏えい箇所の特定

###### ア. 目視点検

蒸気漏えいが確認された入口配管のベント管について外観観察を行った結果、母材部、溶接部に有意な外面腐食がないことを確認した。

ベント管については、周辺設備と最も近接している箇所がベント管頂部であった。最も近接している周辺設備である上部架台底部とベント管頂部の隙間は確保されているが、それぞれに凹みを確認した。

###### イ. 浸透探傷試験

蒸気漏えいが確認された入口配管のベント管について浸透探傷試験を行った結果、ベント管と管台をつなぐ溶接部に沿った長さ約35mmの周方向の浸透指示模様を確認した。

(b) ベント管の詳細調査

ア. 施工履歴

蒸気漏えいが確認された入口配管のベント管について施工履歴を確認した結果、建設以降の改造・取替実績はないことを確認した。

また、浸透指示模様が確認された溶接部の施工は現地溶接であることをプラントメーカーへの聞き取りにて確認した。

イ. 過去点検実績の確認

蒸気漏えいが確認された入口配管のベント管について過去の点検実績を確認したところ、配管の振動計測を第21回定期検査(2002年11月～2003年3月)に入る直前の運転状態にて実施しており、溶接部に発生する応力は約8.3MPaであった。この値は許容応力以下であり、問題はなかった。

また、第27回定期検査中の2011年1月に、2次系配管の肉厚を測定する目的で保温材を取り外した際に、当該部を目視にて確認した結果、漏えい跡などの異常は認められなかった。

ウ. 類似箇所の確認

類似箇所であるAおよびC-FWBP入口配管ベント管について外観観察を行った結果、母材部、溶接部に有意な外面腐食がないことを確認した。

ベント管については、周辺設備と最も近接している箇所がベント管頂部であった。最も近接している周辺設備である上部架台底部とベント管頂部の隙間は確保されており、異常は認められなかった。

浸透探傷試験を行った結果、指示模様がなかったことを確認した。

b. 工場等調査結果

浸透指示模様が認められた当該部を切り出し、工場にて詳細調査を行った結果および関連する記録を確認した結果は以下のとおり。

(a) 溶接部

ア. 溶接不良

(ア) 材料不良

材料分析(以下、「EPMA<sup>\*5</sup>分析」という)の結果、母材と同等である炭素鋼の化学成分を概ね満足しており、適切な材料が使用されていることを確認した。

<sup>\*5</sup> 電子プローブマイクロアナライザーの略称であり、材料表面に電子線を照射し、表面から発生する特性X線の波長と強度の検出を行い、構成元素を分析する手法である。

(イ) 脚長、のど厚不足

断面観察の結果、規格要求を満足していることを確認した。

(ウ) ブローホール

放射線透過試験（以下、「RT」という）およびX線コンピュータ断層撮影（以下、「X線CT」という）の結果、溶接部にブローホールは認められなかった。

(エ) スラッグの巻き込み

RTおよびX線CTの結果、溶接部にスラッグの巻き込みは認められなかった。

(オ) アンダーカット

RTおよびX線CTの結果、溶接部にアンダーカットは認められなかった。

(カ) 溶け込み不良、融合不良等

RTおよびX線CTの結果、溶接部に溶け込み不良、融合不良は認められなかった。

(キ) 熱処理不良

溶接後熱処理を要しないものに該当するため、溶接部熱処理を行う必要はない。

イ. 溶接部腐食

(ア) 外面（腐食）

塗装剥離前、剥離後の外観観察の結果、著しい腐食のないことを確認した。

ウ. 応力腐食割れ

材料は応力腐食割れの環境下になく、X線CTの結果、応力腐食割れは認められなかった。

エ. 疲労割れ（過大応力）

(ア) 圧力・熱サイクル疲労

断面観察の結果、溶接部に圧力・熱サイクル疲労の様相は認められなかった。

(イ) 振動（共振）

振動計測記録より、ベント管の固有振動数がポンプの振動成分と重複していないことを確認した。

(ウ) 接触・熱移動

外観観察の結果、ベント管頂部と上部架台底部に接触痕（ベント管頂部0.56mmの凹み、上部架台底部にたて約10mm、よこ約15mm）を確認した。ベント管頂部と上部架台底部とのすき間は、約5mmであったが、

熱伸び評価では、約5.5mmの熱伸びが想定されており、ポンプ運転時は上部架台底部と接触していたと考えられるが、RTおよびX線CTの結果、溶接部については健全であることを確認した。

(b) 母材部

ア. 設計・施工不良

(ア) 材料選定不良

図面確認の結果、STPT38<sup>\*6</sup>との記載があり、規格要求の材料を使用しており、問題ないことを確認した。

<sup>\*6</sup> 高温配管用炭素鋼管

(イ) 材料不良

図面確認の結果、STPT38との記載があり、EPMA分析の結果、STPT38の化学成分を概ね満足していることを確認した。また、配管公称肉厚は2.8mmであるが、寸法測定の結果3.7mmであり、相違があるものの強度的に問題ないことを確認した。

(ウ) 外面塗装不良

プラントメーカーへの聞き取りにて塗装指示がされていることを確認した。

また、外観観察にて塗装されていることを確認した。

イ. 延性破壊

(ア) 異常昇圧

断面観察、破面観察の結果、延性破壊の特徴であるディンプルは認められないことから、異常昇圧はない。

ウ. 腐食減肉

(ア) 外面（腐食）

塗装剥離前、剥離後の外観観察の結果、著しい腐食のないことを確認した。

(イ) 内面（腐食減肉）

内面観察および寸法測定の結果、外面で確認された浸透指示模様位置と同様の周方向の浸透指示模様を確認したが、ベント管内面に有意な腐食減肉がないことを確認した。

エ. 応力腐食割れ

材料は応力腐食割れの環境下になく、断面観察および破面観察の結果、応力腐食割れの様相は認められなかった。

オ．疲労割れ（過大応力）

（ア）圧力・熱サイクル疲労

断面観察、破面観察の結果、0° 付近の外表面を主起点としてき裂が発生し、繰り返し応力が発生したことによるビーチマーク（4本）を確認した。また、破面は概ね平坦で顕著な凹凸がなく、き裂の先端が揃っており、直線的に進展し、破面近傍に塑性変形の様相が認められないことを確認した。

なお、疲労割れの特徴であるストライエーションの様相は認められなかった。これは、高温の漏えい水により表面が浸食されたため様相が消失したものと考えられる。

外観観察の結果、ソケット溶接止端部に円周方向に約35mmの浸透指示模様を確認した。

X線CTの結果、浸透指示模様と同様の位置に約42mmの貫通指示を確認した。

（イ）振動（共振）

振動計測記録より、ベント管の固有振動数がポンプの振動成分と重複していないことを確認した。

（ウ）接触・熱移動

外観観察の結果、ベント管頂部と上部架台底部に接触痕（ベント管頂部0.56mmの凹み、上部架台底部にたて約10mm、よこ約15mm）を確認した。ベント管頂部と上部架台底部とのすき間は、約5mmであったが、熱伸び評価では、約5.5mmの熱伸びが想定されており、ポンプ運転時は上部架台底部と接触していたと考えられる。

c．き裂発生および進展のメカニズム

（添付資料－28）

当該部の損傷については、架台梁との接触によりベント管付け根部に曲げ応力が作用し、さらにベント管頂部が拘束された状態でFWBPの機械振動が加わったことにより、疲労限度を超え外面に疲労損傷によるき裂が発生し、内面に向けき裂が進展した可能性が考えられることから今回の事象を検証した。

（a）発生応力評価

B-FWBP入口配管ベント管に塑性変形が発生していたことから、変形後のベント管には、炭素鋼の降伏応力約215MPa相当が作用していると評価した。

また、B-FWBP入口配管ベント管と上部架台梁が接触した状態で配管母材の溶接止端部に発生する応力を評価した結果、約106MPaであり、応力集中係数（約1.7）を考慮した結果、約179MPaの応力振幅が発生すると評価した。

(b) 疲労強度の算出

調査したベント管は塑性変形していたことから、平均応力は降伏応力約215MPaを使用し、修正グッドマン線図を用いて評価した結果、平均応力約215MPaにおける疲労限度約62MPaを大きく上回る、約179MPa（2倍以上）の応力振幅が発生していると評価した。

よって、疲労限度を超える状態にあったと推定する。

(c) 応力繰り返し数の評価

炭素鋼のS-N線図より、疲労限度は約 $1 \times 10^7$ 回サイクルと評価される。疲労損傷を生じさせる応力振幅は、FWBPの機械振動によるものであり、FWBPの回転数（885rpm）から算出した14.75Hzの振幅で発生することから、機械振動が疲労限度の約 $1 \times 10^7$ 回サイクルに到達するのは約8日と評価した。

上記評価より、ベント管頂部と架台梁が接触した後、短期間で疲労き裂が発生したものと推定する。

(d) 疲労き裂発生進展の可能性

疲労き裂進展速度（da/dN）を、き裂進展速度式（JSME SNA1配管用フェライト鋼の疲労亀裂進展速度式）を用いた応力拡大係数（ΔK）を考慮し、算出した。

$$\Delta K \leq 19.48 \text{ の場合 } da/dN = 1.48 \times 10^{-14} \Delta K^{5.95}$$

2005～2006年：平均疲労き裂進展速度	4.2 × 10 <sup>-12</sup> m/cycle
2008～2009年：平均疲労き裂進展速度	5.0 × 10 <sup>-12</sup> m/cycle
2009～2011年：平均疲労き裂進展速度	1.5 × 10 <sup>-11</sup> m/cycle
2023年～	：平均疲労き裂進展速度 1.4 × 10 <sup>-10</sup> m/cycle

(e) 考察

本事象が、機械振動により繰り返しの応力振幅が加わることにより、き裂進展速度が徐々に増えながらき裂が進展するという、疲労割れ特有の挙動を示していることが分かった。

d. 調査結果まとめ

(添付資料-28)

(a) 蒸気漏えいが発生した原因

B-FWP入口配管ベント管は、B-FWP運転中の機械振動により損傷しない設計としていたとともに、配管系の熱伸びを考慮しても周辺設備に干渉しない配置としており、ベント管が上部架台底部と接触するまではベント管に応力が集中することなく運転継続してきたが、今回、配管系の熱伸びによりベント管頂部と上部架台底部が接触したため、配管母材部に曲げ応力が発生した。

さらに、ベント管頂部と上部架台底部が接触し拘束された状態で、B-FWB Pの運転による機械振動が加わることにより、配管母材の溶接止端部に応力が集中することで、き裂が発生したと推定した。

発生したき裂を起点に、上部架台底部との接触とB-FWB Pの運転による機械振動が加わることによりき裂は進展し、今回僅かな蒸気漏えいの発生に至ったものである。

破面観察の結果、母材部に明瞭なビーチマークが4本確認された。

これはB-FWB Pの起動・停止による応力振幅の変化にて発生する破面の様相であり、き裂が発生した時期は第21回定検（2002年）プラント起動後（1サイクル目）と推定した。

以降、第22回定検（2004年）から第26回定検（2009年）のB-FWB Pの運転中（2～4サイクル目）は機械振動により、徐々にき裂が進展し、2009年～2011年（5サイクル目）にき裂が内面に到達し貫通に至ったと推定した。

第27回定検後（2023年8月）の再稼働後（6サイクル目）においても、B-FWB Pの運転による機械振動により、き裂がさらに進展し、配管の半周程度に割れが進展した時点で、巡回点検で発見できる程度に蒸気漏れが拡大し発見に至った。

#### (b) ベント管頂部と上部架台底部が接触した原因

ベント管頂部と上部架台底部が接触した原因を調査した結果、当該部の振動計測を第21回定検開始前（出力運転中（温態時））の2002年11月に実施していることを確認した。

関係会社への聞き取り調査の結果、振動計測箇所が狭隘であり振動計のセンサーを接触させることができないことから、上部架台梁を取り外した状態で計測していたことを確認した。

また、取り外した上部架台梁は第21回定検開始後の冷態時に復旧しており、上部架台梁のボルト穴には数mmの調整代があることから、取り外し時（温態時）のベント管頂部と上部架台梁が接触しない据付状態を再現できずに復旧されたと推定した。

以上のことから、ベント管頂部と上部架台底部の接触は、第21回定検（2002年）プラント起動後に発生したと推定され、破面観察により確認されたき裂が発生した時期と一致する。

#### (2) A-FWB P グランド部からのドレン量増加に係る調査

(添付資料-8、24～27)

グランド部のドレン量が増加した原因について、要因分析図に基づき調査を実施した。

##### a. グランド部からのドレン量増加

###### (a) グランドパッキン不良

###### ア. 型番不良

A-FWBP グランド部のグランドパッキンは、2020年9月に取替を行っている。取替を行った際の工事報告書を確認し、グランドパッキンの仕様がメーカー指定品であることを確認した。

イ. 組込み（装着）不良

(ア) パッキン押えの傾き、ナットの緩み

パッキン押えとパッキン箱間の寸法を直尺にて4点測定し、均一に締め付けられていることを確認した。また、触診によりナットの緩みがないことを確認した。

通常運転と同様のシール水圧力（1.20MPa）でシール水を供給し、グランド部のパッキン押えナットを増締め（1/12R）した結果、ドレン量が低下（うどん1本⇒そば1本）した。よって、グランドパッキンのシール性能は健全であった。

(イ) グランドパッキン切口合せ面の隙間

グランドパッキン切口合せ面に隙間がないことを目視により確認した。

(ウ) グランドパッキン切口合せ面の位置

上下のグランドパッキン切口合せ面の位置が要領書どおり180度ずれるように挿入されていることを目視により確認した。

(エ) グランドパッキン、ランタンリング挿入不良

前回工事報告書のグランドパッキン各段、ランタンリングの挿入状況を確認し、図面どおりに挿入されていることからグランドパッキンの組み立て状態に問題はなかった。

(b) グランドパッキン劣化

ア. 経年劣化

グランドパッキンの外観点検を実施したところ、有意な傷やむしれ等の劣化はなかった。

A-FWBPは2023年7月から運転しており、運転期間は約7ヶ月程度であることから、取替周期である3定検に達していない。

イ. シール水流量低

(ア) ランタンリング通水穴閉塞

ランタンリングを目視にて確認したところ、シール水の流れを阻害するような閉塞がないことを確認した。

(イ) シール水入口圧力低

ポンプ運転時のシール水入口圧力は、標準値（1.06MPa～1.27MPa）内であることを運転員への聞き取りにより確認した。

ウ. パッキン箱冷却不足

(ア) パッキン箱冷却水流量低

冷却水戻り配管のサイトフローを確認し、冷却水が通常どおり流れていることを目視により確認した。

(c) 軸スリーブ摩耗

ア. パッキン締付け不良

軸スリーブ摺動面に有意な傷および摩耗がないことを目視により確認した。

イ. 異物混入

グランド部まわり (パッキン箱内面、ネックブッシュ) に異物混入および傷がないことを目視により確認した。

(d) グランド部内圧高

ア. バランス穴閉塞

上部ケーシングバランス穴に流れを阻害するような閉塞がないことを目視およびファイバースコープにより確認した。

イ. FWBP吸込み側圧力高

ポンプ運転時の圧力は0.87MPaであり標準値0.80MPa～0.90MPa (FWBP吸込み側圧力と同等の圧力である脱気器器内圧力) 内に収まっていることから、吸込み圧力が適正であることを確認した。

ウ. バランス管閉塞

バランス管内の内部に流れを阻害するような閉塞がないことを目視およびファイバースコープにより確認した。

b. シール水、クエンチング水の状態変化

シール水圧力は、通常の2台運転の状態では1.10MPaにて供給しており、FWBP切替の3台運転時に1.27MPaに調整したが、いずれも通常の圧力範囲内 (1.06MPa～1.27MPa) であったことを確認した。

また、クエンチング水はFWBP2台および3台運転時に流量調整弁の操作を実施していないことを確認した。

c. 運転パラメータの変動によるグランド部への影響

ポンプ切替 (3台運転) 時のFWBP吸込み側圧力上昇に伴うシール水圧力上昇操作が、グランド部のドレン量の増加に起因した可能性は否定できない。

以上の結果、グランド部を構成する各部品に異常は認められなかったが、ポンプ切替時のシール水圧力上昇操作がグランド部からのドレン量増加の起因となった可能性が否定できないことから、以下のとおり検討した。

グランドパッキンは運転に伴いパッキンの馴染みによりドレン量が増加する特性があることから、通常はグランド部を増締めすることにより、グランド部からのドレン量を調整している。

FWBPの切り替えに伴う3台運転中は、2台運転時より2次冷却水の系統圧がわずかに上昇する傾向にあり、今回も同様な傾向が認められていたため、A-FWBPシール水圧力を1.10MPaから1.27MPaに調整したことを、操作を行った運転員に確認している。グランド部にかかる圧力が変化し、グランドパッキンとスリーブとの隙間を流れるドレンの流路に影響し、グランド部からのドレン量増加に至った可能性が考えられる。グランド部からのドレン量が増加したことから、その後にシール水圧力を1.10MPaに戻したがドレン量の変化はなかった。

グランドを有するポンプは、運転中にグランド部からのドレン量が増加した場合、通常の保守作業の範囲内でグランド部の増締めを行っている。ポンプ切り替え時の系統水やシール水の圧力変化によってグランド部からのドレン量がある程度、変化することは通常の動作範囲内であり、グランド部の調整によって対応している。

なお、今回はB-FWBP入口配管付近の蒸気漏えいが発生していた現場近傍での作業であったことから、作業安全を確保する観点よりポンプ運転中でのグランド部の増締めは行わなかった。

## 9. 推定原因

### (1) B-FWBP入口配管ベント管からの蒸気漏れの原因

ベント管頂部にある上部架台梁を脱着した際、給水配管が冷めている状態で架台梁がベント管に接触しないよう据え付けたが、運転開始により高温となった給水配管が熱伸びしたことにより、ベント管頂部と上部架台底部が接触し、ベント管の付け根部に曲げ応力が作用した。さらに、ベント管頂部が拘束されたことによりB-FWBPの運転による機械振動にて配管母材の溶接止端部に応力が発生し、ベント管外面にき裂が発生したと推定した。

発生したき裂を起点に、B-FWBPを運転継続してきたことにより機械振動が加わり続け、き裂が進展・配管を貫通して漏えいに至ったものと推定した。

### (2) A-FWBPのグランド部からのドレン量増加の原因

ポンプ切替時、系統水の圧力上昇やシール水圧力の調整によって、グランド部にかかる圧力が増加し、徐々にグランドパッキンとスリーブとの隙間に伝播して、ドレンの流路が広がったため、グランド部からのドレン量増加に至ったものと推定した。

ポンプ停止後、シール水を供給した状態でパッキン押えナットを増締めしたことによりドレン量が低下したこと、また、グランド部の点検結果に異常がなかったことから、グランド部のシール性能は健全であったと推定した。

## 10. 対策

(添付資料-29)

B-FWP入口配管付近の蒸気漏えいに係る対策を以下のとおり実施する。

- (1) 損傷が認められたベント管を新管に取り替えるとともに、給水配管等の熱変位が発生しても上部架台と接触しないように上部架台の形状を変更する。
- (2) 工事完了後の現場確認として以下の注意事項を「原子力発電所請負工事一般仕様書」、「請負工事に関する心得集」に追記する。
  - ・ 工事完了後の現場確認断面において、周辺機器との接触、干渉がないことを確認する。特に、高温機器・配管等を含む系統、設備周辺にて工事を実施した際は、高温状態での接触状況を確認するなど、熱変位による影響も考慮し確認すること。

今後、類似系統<sup>\*7</sup>の振動影響のある小口径配管が、周辺機器・構造物と干渉がないことを点検していく。

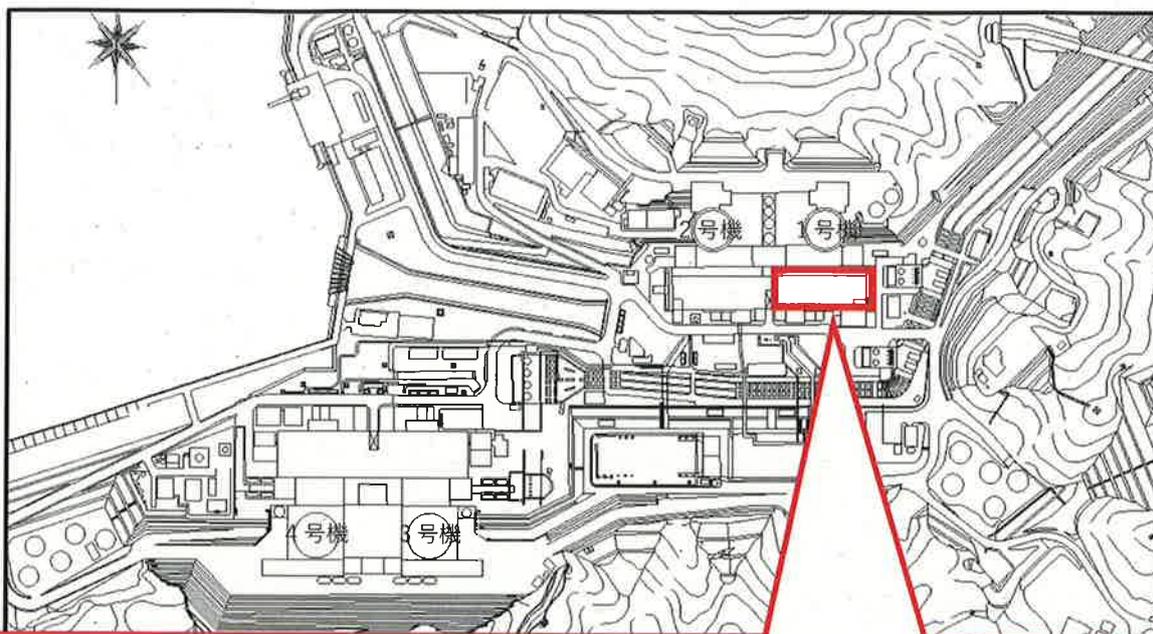
<sup>\*7</sup> 重要度分類クラス1、クラス2および発電出力に影響を及ぼす設備を含む系統

以 上

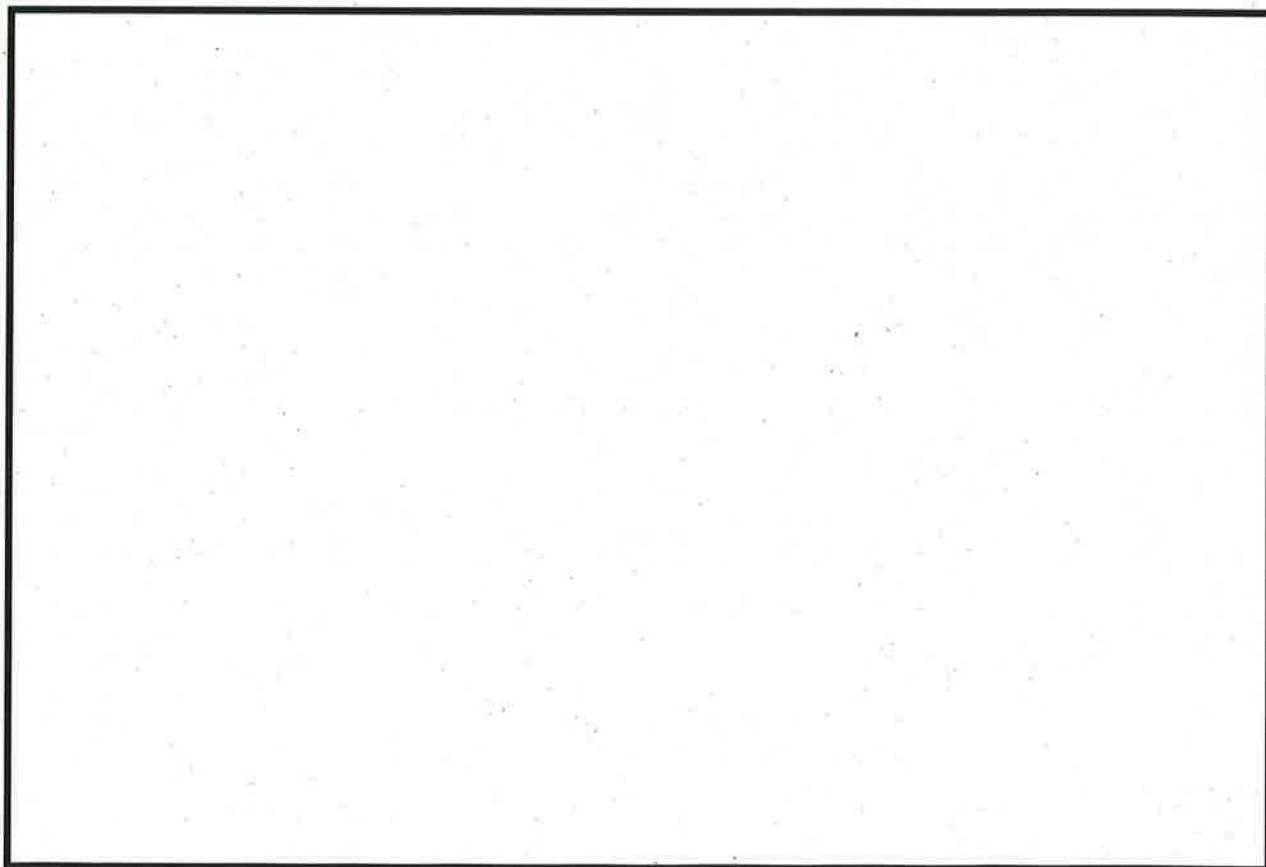
## 添付資料

1. 発生場所図
2. 漏えい箇所系統図
3. 関連パラメータ
4. B-FWP入口配管ベント管の構造図、事象発生時の現場写真
5. A-FWPポンプ・グランド部の構造図、事象発生時の現場写真
6. A-FWPグランド部のドレン量確認状況
7. B-FWP入口配管ベント管からの僅かな蒸気漏えいに係る要因分析図
8. A-FWPグランド部のドレン量増加に係る要因分析図
9. B-FWP入口配管ベント管 EPMA分析結果
10. B-FWP入口配管ベント管 寸法測定結果
11. B-FWP入口配管ベント管 放射透過試験（RT）結果
12. B-FWP入口配管ベント管 X線CT結果
13. B-FWP入口配管ベント管 外観観察結果（塗装剥離前、塗装剥離後）
14. B-FWP入口配管ベント管 断面観察結果
15. B-FWP入口配管ベント管 振動点検結果
16. B-FWP入口配管ベント管 外観観察結果
17. B-FWP入口配管ベント管 破面観察結果
18. B-FWP入口配管ベント管 内面観察および浸透探傷試験結果
19. B-FWP入口配管ベント管 現地切断位置
20. B-FWP入口配管切断後の外観写真
21. 類似箇所の外観観察結果（AおよびC-FWP入口配管ベント管）
22. 類似箇所の浸透探傷試験結果（AおよびC-FWP入口配管ベント管）
23. B-FWP入口配管ベント管と上部架台梁の接触メカニズムについて
24. 分解前のA-FWPグランド部の点検結果
25. 分解後のA-FWPグランド部の点検結果
26. FWP、FWBP切替時のパラメータ
27. グランド部のドレン量増加メカニズム
28. ベント管からの蒸気漏えいメカニズム
29. 点検スケジュール

# 発生場所図

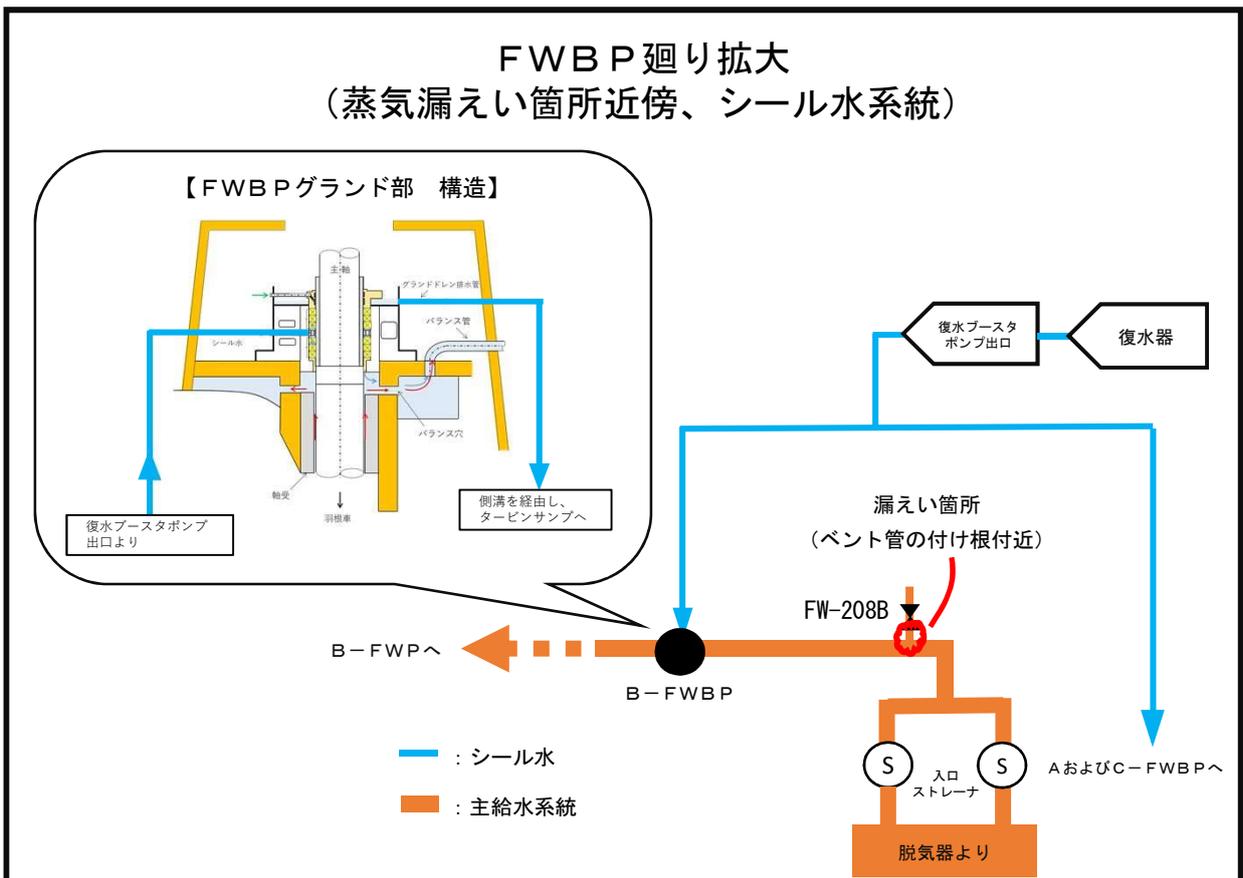
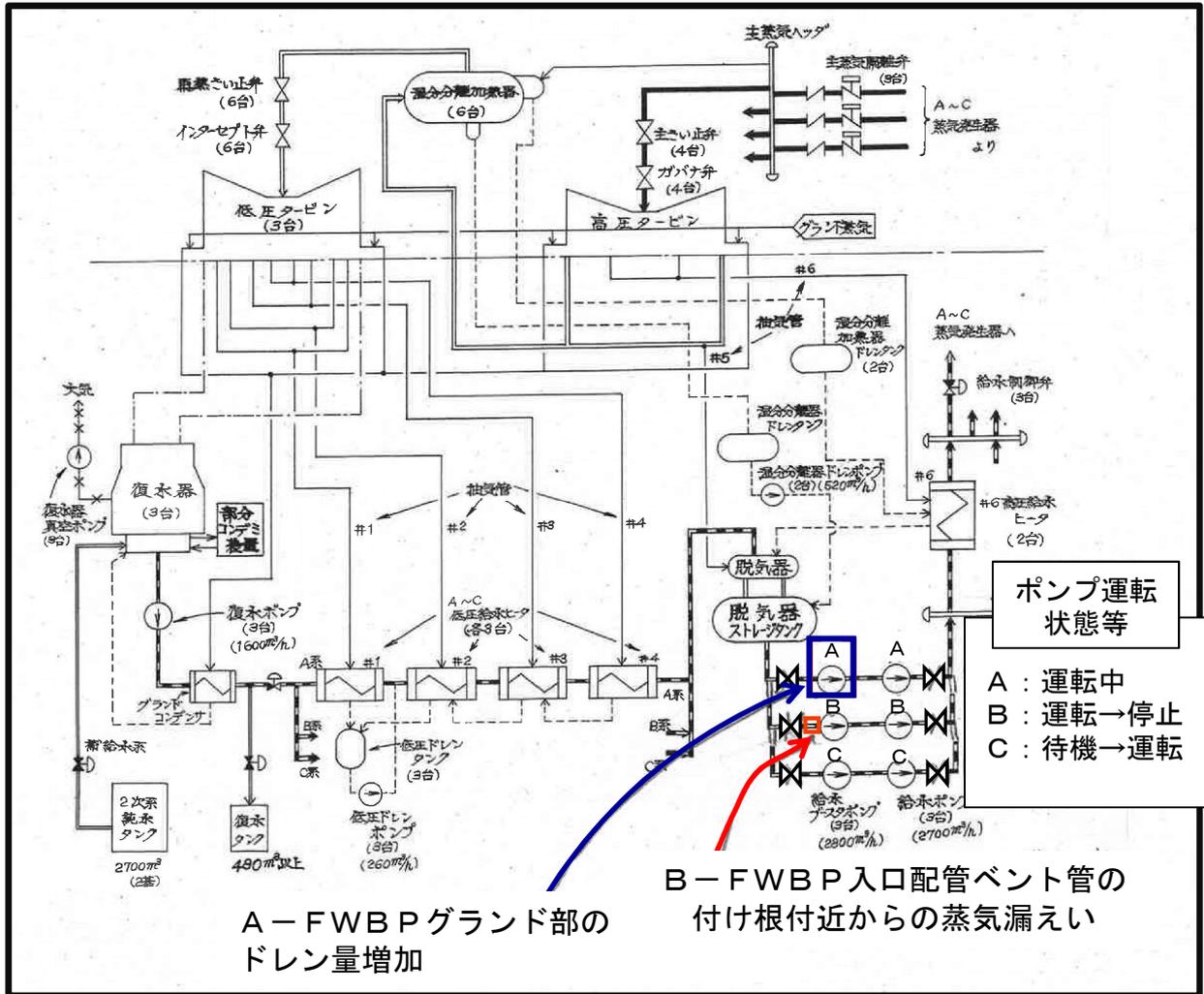


(1号機タービン建屋4.0m 機器配置図)



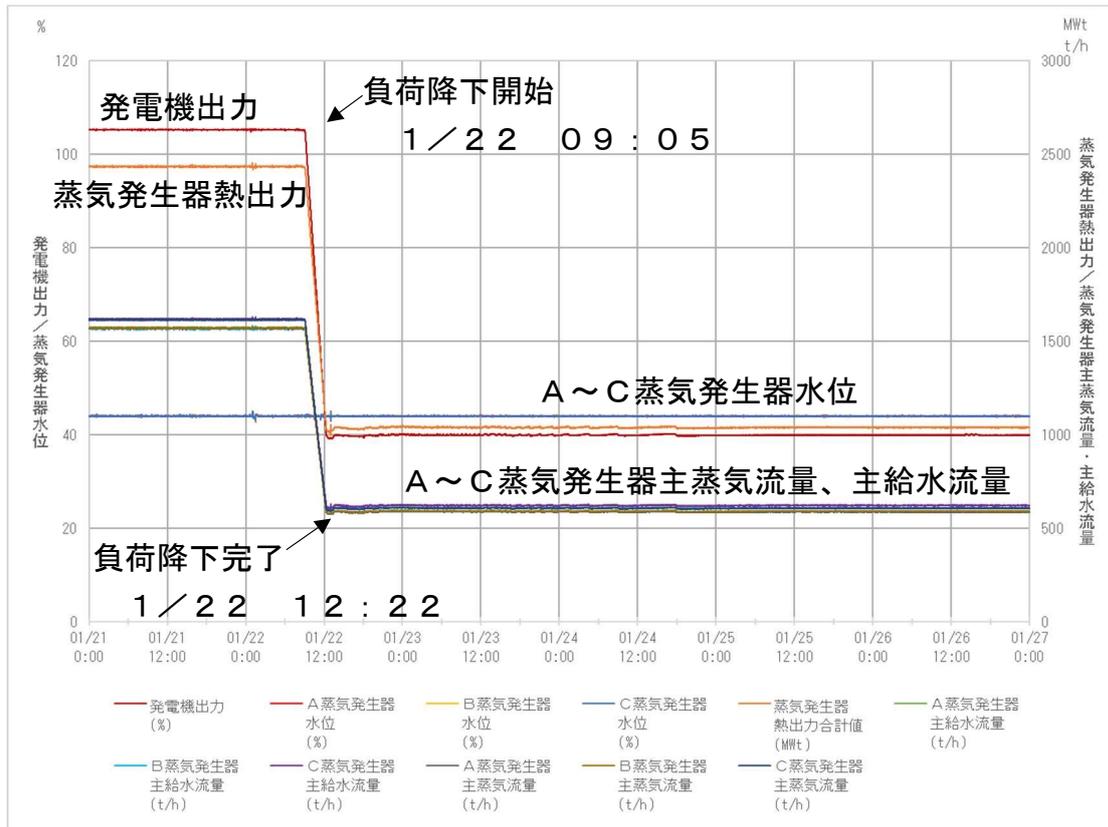
□ : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

# 漏えい箇所系統図



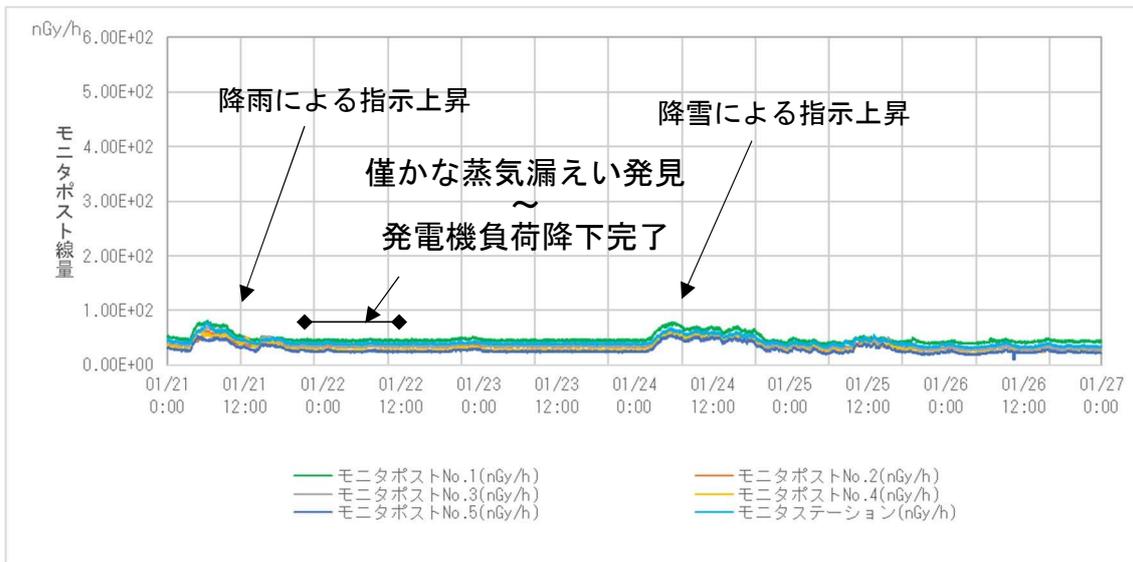
関連パラメータ (1/2)

(1号機 発電機出力/蒸気発生器熱出力/蒸気発生器水位/主蒸気・主給水流量)

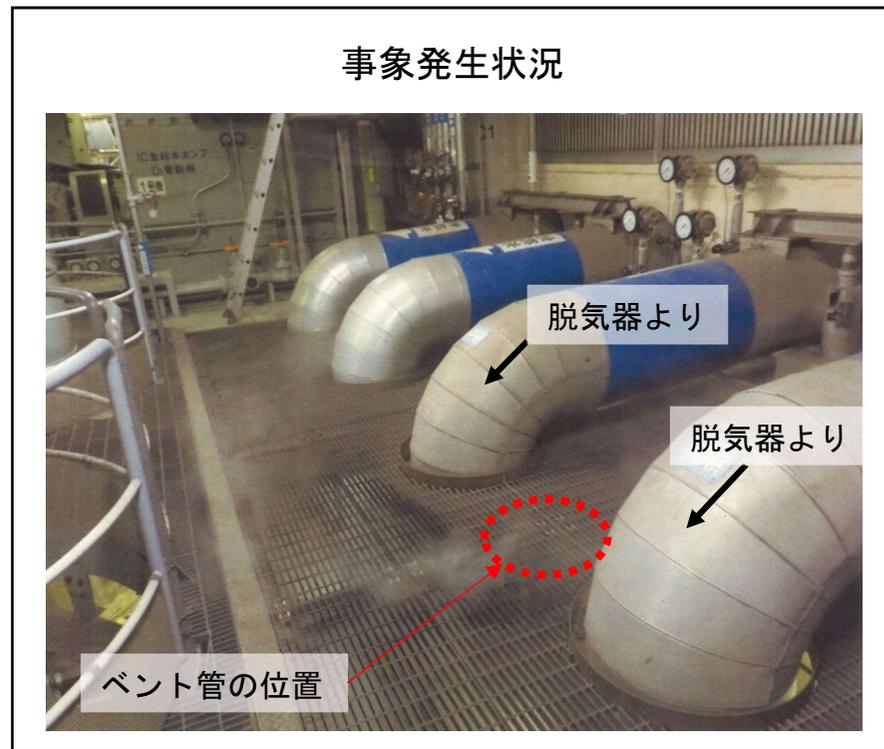
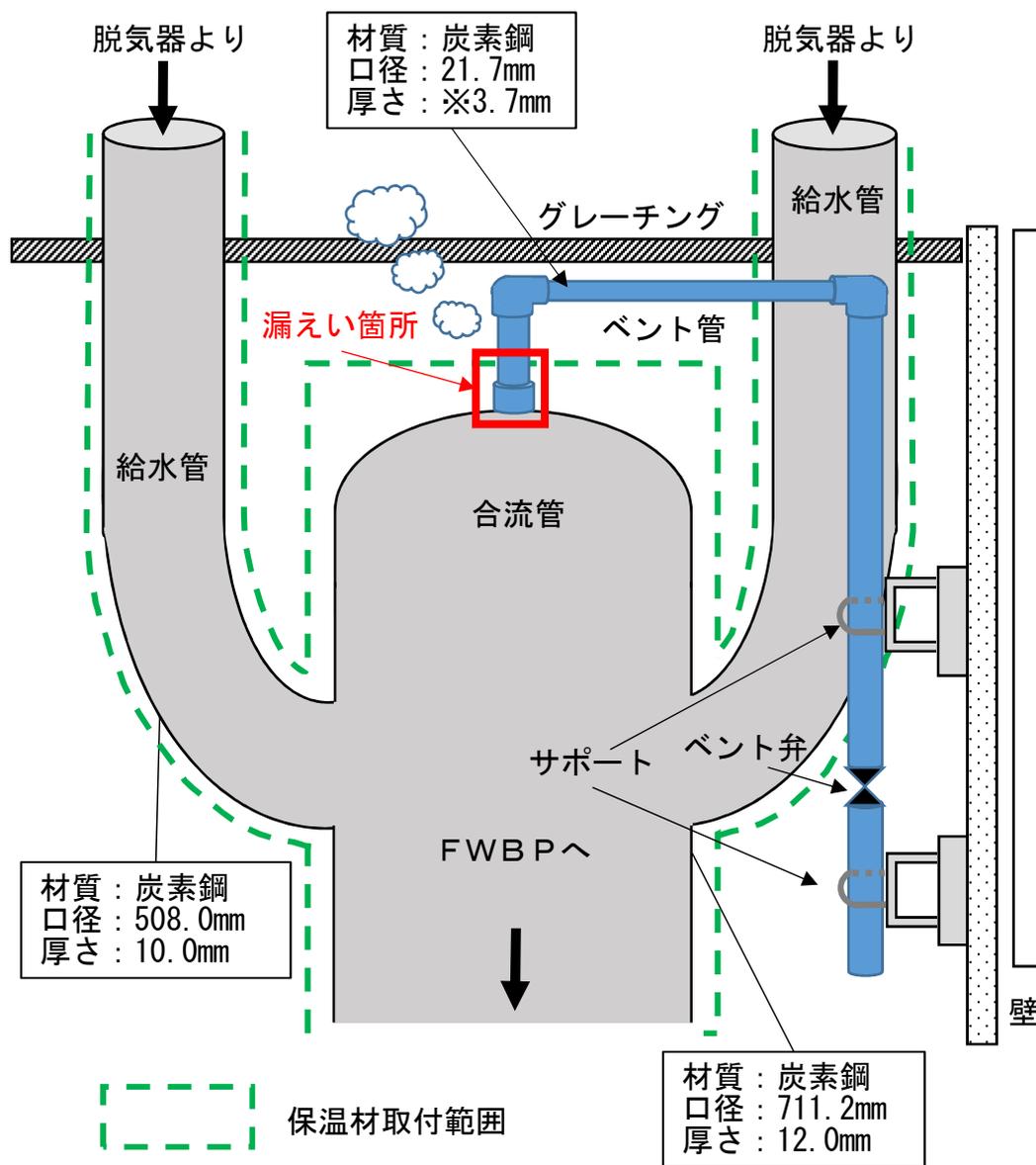


関連パラメータ (2/2)

(No. 1~No. 5モニタポスト、モニタステーション)



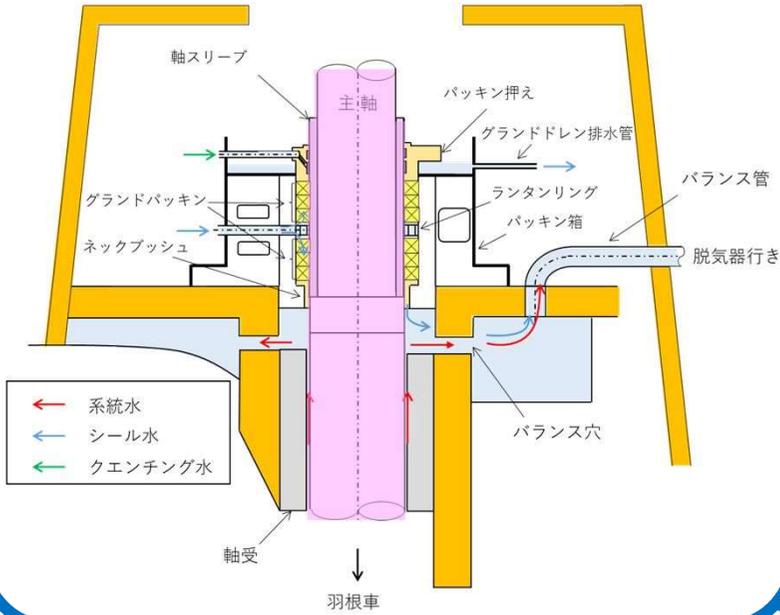
# B-FWBP入口配管ベント管の構造図、事象発生時の現場写真



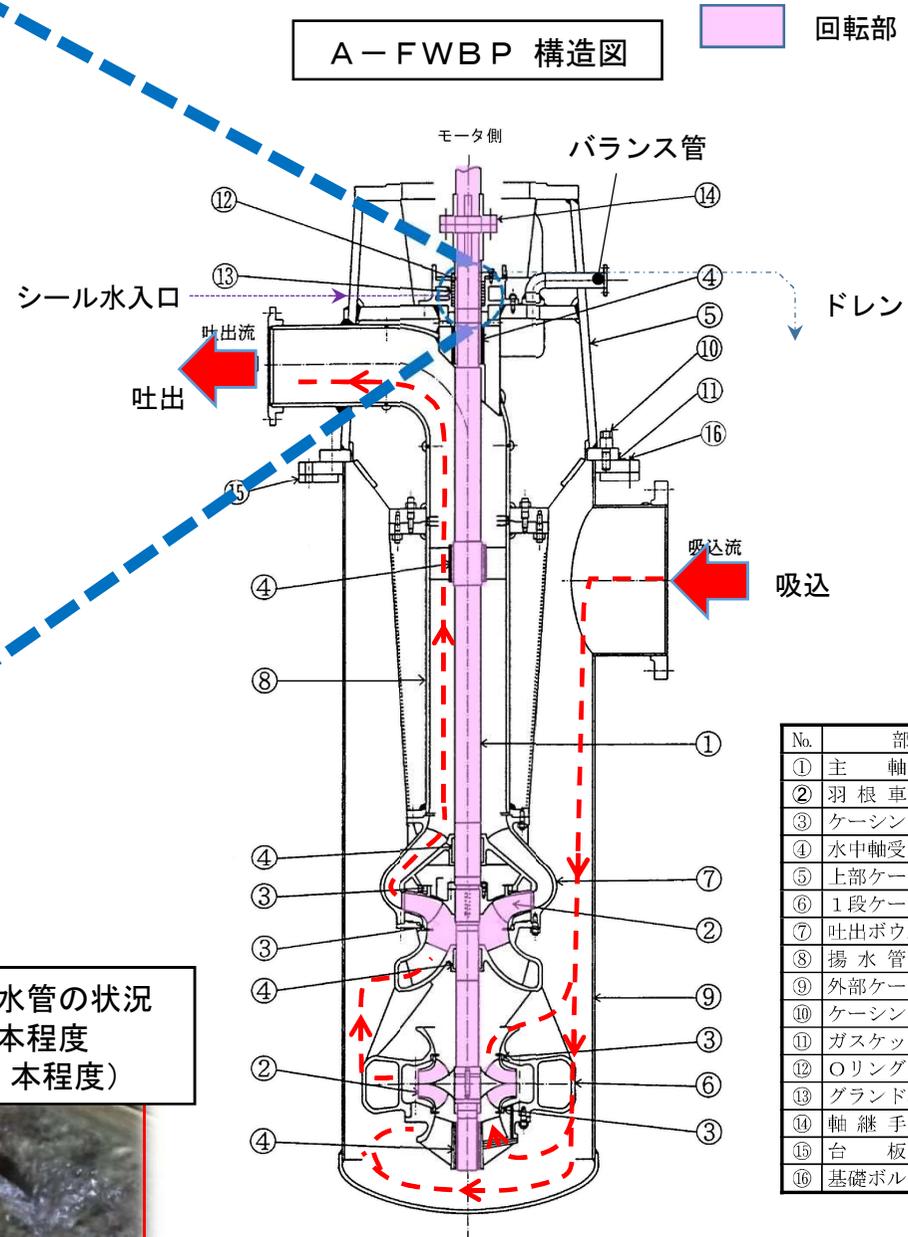
※配管公称肉厚は2.8mmであるが、寸法測定の結果、3.7mmであった。

# A-FWBPポンプ・グランド部の構造図、事象発生時の現場写真

グランド部拡大図



A-FWBP 構造図



グランド部写真



グランド dren 排水管の状況  
うどん 3~4 本程度  
(通常はうどん 1 本程度)



No.	部 位
①	主 軸
②	羽 根 車
③	ケーシングリング
④	水中軸受 (すべり)
⑤	上部ケーシング
⑥	1 段ケーシング
⑦	吐出ボウル
⑧	揚 水 管
⑨	外部ケーシング
⑩	ケーシングボルト
⑪	ガスケット
⑫	Oリング
⑬	グランドバックシン
⑭	軸 継 手
⑮	台 板
⑯	基礎ボルト

# A-FWBP グランド部のドレン量確認状況

グランド部

グランドドレン排水管



## (グランド部からのドレン状況)

- ・ 1/22 5時頃 グランド部からのドレン量増加確認  
(通常：うどん1本程度⇒うどん3~4本程度)
- ・ 以降、1/22 13:04 A-FWBP停止までの間は、  
ドレン量に変化はなかった。  
(現場滞在の運転員・保修課員が約30分毎に確認)



うどん3~4本程度

B-FWBP入口配管ベント管からの僅かな蒸気漏えいに係る要因分析図

事象	要因①	要因②	要因③	調査項目	確認結果	判定	添付資料
日給水ブースタポンプ入口配管ベント管からの漏えい	溶接部	溶接不良	材料不良	EPMA分析	EPMA分析の結果、母材と同等である炭素鋼の化学成分を概ね満足しており、適切な材料が使用されていることを確認した。	×	添付資料－ 9
			脚長、のど厚不足	断面観察	断面観察の結果、規格要求を満足していることを確認した。	×	添付資料－ 10 (2/2)
			ブローホール	放射線透過試験 (RT)、X線CT	放射線透過試験 (RT) およびX線CTの結果、溶接部にブローホールは認められなかった。	×	添付資料－ 11 添付資料－ 12
			スラグの巻き込み	放射線透過試験 (RT)、X線CT	放射線透過試験 (RT) およびX線CTの結果、溶接部にスラグの巻き込みは認められなかった。	×	添付資料－ 11 添付資料－ 12
			アンダーカット	放射線透過試験 (RT)、X線CT	放射線透過試験 (RT) およびX線CTの結果、溶接部にアンダーカットは認められなかった。	×	添付資料－ 11 添付資料－ 12
			溶け込み不良、融合不良	放射線透過試験 (RT)、X線CT	放射線透過試験 (RT) およびX線CTの結果、溶接部に溶け込み不良、融合不良は認められなかった。	×	添付資料－ 11 添付資料－ 12
			熱処理不良	図面確認	溶接後熱処理を要しないものに該当するため、溶接部熱処理を行う必要はない。	×	-
		溶接部腐食	外面 (腐食)	外観観察	塗装剥離前、剥離後の外観観察の結果、著しい腐食のないことを確認した。	×	添付資料－ 13
		応力腐食割れ		X線CT	材料は応力腐食割れの環境下になく、X線CTの結果、応力腐食割れは認められなかった。	×	添付資料－ 12
		疲労割れ (過大応力)	圧力・熱サイクル疲労	断面観察	断面観察の結果、溶接部に圧力・熱サイクル疲労の様相は認められなかった。	×	添付資料－ 14
				振動 (共振)	振動計測記録の確認	振動計測記録より、ベント管の固有振動数がポンプの振動成分と重複していないことを確認した。	×
			接触・熱移動	外観観察、熱伸び評価	外観観察の結果、ベント管頂部と上部架台底部に接触痕(ベント管頂部0.56mmの凹み、上部架台底部にたて約10mm、よこ約15mm)を確認した。ベント管頂部と上部架台底部とのすき間は、約5mmであったが、熱伸び評価では、約5.5mmの熱伸びが想定されており、ポンプ運転時は上部架台底部と接触していたと考えられるが、放射線透過試験 (RT) およびX線CTの結果、溶接部については健全であることを確認した。	×	添付資料－ 16 (1/2)
	母材部	設計・施工不良	材料選定不良	図面確認、規格の確認	図面確認の結果、STPT38との記載があり、規格要求の材料を使用しており、問題ないことを確認した。	×	-
			材料不良	図面確認、EPMA分析、寸法測定結果	図面確認の結果、STPT38との記載があり、EPMA分析の結果、STPT38の化学成分を概ね満足していることを確認した。また、配管公称肉厚は2.8mmであるが、寸法測定の結果3.7mmであり、相違があるものの強度的に問題ないことを確認した。	×	添付資料－ 9 添付資料－ 10 (1/2)
			外面塗装不良	外観観察	プラントメーカーへの聞き取りにて塗装指示がされていることを確認した。また、外観観察にて塗装されていることを確認した。	×	添付資料－ 13
		延性破壊	異常昇圧	断面観察、破面観察	断面観察、破面観察の結果、延性破壊の特徴であるディンプルは認められないことから、異常昇圧はない。	×	添付資料－ 14 添付資料－ 17
		腐食減肉	外面 (腐食)	外観観察	塗装剥離前、剥離後の外観観察の結果、著しい腐食のないことを確認した。	×	添付資料－ 13
			内面 (腐食減肉)	内面観察、寸法測定結果	内面観察および寸法測定の結果、外面で確認された浸透指示模様位置と同様の周方向の浸透指示模様を確認したが、ベント管内面に有意な腐食減肉がないことを確認した。	×	添付資料－ 10 (1/2) 添付資料－ 18
		応力腐食割れ		断面観察、破面観察	材料は応力腐食割れの環境下になく、断面観察および破面観察の結果、応力腐食割れの様相は認められなかった。	×	添付資料－ 14 添付資料－ 17
		疲労割れ (過大応力)	圧力・熱サイクル疲労	外観観察、断面観察、破面観察、X線CT	断面観察、破面観察の結果、0°付近の外表面を主起点としてき裂が発生し、繰返し応力が発生したことによるピーチマーク(4本)を確認した。また、破面は概ね平坦で顕著な凹凸がなく、き裂の先端が揃っており、直線的に進展し、破面近傍に塑性変形の様相が認められないことを確認した。外観観察の結果、ソケット溶接止端部に円周方向に約35mmの浸透指示模様を確認した。X線CTの結果、浸透指示模様と同様の位置に約42mmの貫通指示を確認した。	○	添付資料－ 12 添付資料－ 16 (2/2) 添付資料－ 17
振動 (共振)				振動計測記録の確認	振動計測記録より、ベント管の固有振動数がポンプの振動成分と重複していないことを確認した。	×	添付資料－ 15
接触・熱移動			外観観察、熱伸び評価	外観観察の結果、ベント管頂部と上部架台底部に接触痕(ベント管頂部0.56mmの凹み、上部架台底部にたて約10mm、よこ約15mm)を確認した。ベント管頂部と上部架台底部とのすき間は、約5mmであったが、熱伸び評価では、約5.5mmの熱伸びが想定されており、ポンプ運転時は上部底部と接触していたと考えられる。	○	添付資料－ 16 (1/2)	

○：要因と考えられる  
×：要因とは考えにくい

A-FWB P グランド部のドレン量増加に係る要因分析図

事象	要因①	要因②	要因③	要因④	調査項目	確認結果	判定	添付資料
A-FWB P グランド部からのドレン量増加	グランド部からのドレン量増加	グランドパッキン不良	型番不良		グランドパッキンの仕様確認	A-FWB P グランド部のグランドパッキンは、2020年9月に取替を行っている。取替を行った際の工事報告書を確認し、グランドパッキンの仕様がメーカー指定品であることを確認した。	×	添付資料-24 (1/2)
			組込み(装着)不良	パッキン押えの傾き、ナットの緩み	パッキン押えの傾き、ナットの緩み確認 グランドパッキンの増締め代確認	パッキン押えとパッキン箱間の寸法を直尺にて4点測定し、均一に締め付けられていることを確認した。また、触診によりナットの緩みがないことを確認した。 通常運転と同様のシール水圧力(1.20MPa)でシール水を供給し、グランド部のパッキン押えナットを増締め(1/12R)した結果、ドレン量が低下(うどん1本⇒そば1本)した。よって、グランドパッキンのシール性能は健全であった。	×	添付資料-24 (2/2)
				グランドパッキン切口合せ面の隙間	グランドパッキン取外し時の組込み状態確認	グランドパッキン切口合せ面に隙間がないことを目視により確認した。	×	添付資料-25 (1/2)
				グランドパッキン切口合せ面の位置		上下のグランドパッキン切口合せ面の位置が要領書どおり180度ずれるように挿入されていることを目視により確認した。	×	添付資料-25 (1/2)
				グランドパッキン、ランタンリング挿入不良	グランドパッキン各段、ランタンリングの挿入状況確認	前回工事報告書のグランドパッキン各段、ランタンリングの挿入状況を確認し、図面どおりに挿入されていることからグランドパッキンの組み立て状態に問題はなかった。	×	添付資料-25 (2/2)
		グランドパッキン劣化	経年劣化	グランドパッキン外観点検(摺動面の劣化)、運転期間の確認	グランドパッキンの外観点検を実施したところ、有意な傷やむしれ等の劣化はなかった。 A-FWB Pは2023年7月から運転しており、運転期間は約7ヶ月程度であることから取替周期である3定検に達していない。	×	添付資料-25 (3/2)	
		シール水流量低	ランタンリング通水穴閉塞	ランタンリング外観点検	ランタンリングを目視にて確認したところ、シール水の流れを阻害するような閉塞がないことを確認した。	×	添付資料-25 (4/2)	
			シール水入口圧力低	シール水入口圧力のパラメータ確認	ポンプ運転時のシール水入口圧力は、標準値(1.06MPa~1.27MPa)内であることを運転員への聞き取りにより確認した。	×	添付資料-25 (5/2)	
		パッキン箱冷却不足	パッキン箱冷却水流量低	パッキン箱冷却水流量確認	冷却水戻り配管のサイトフローを確認し、冷却水が通常どおり流れていることを目視により確認した。	×	添付資料-25 (6/2)	
		軸スリーブ摩耗	パッキン締付け不良	軸スリーブ摺動面の目視点検	軸スリーブ摺動面に有意な傷および摩耗がないことを目視により確認した。	×	添付資料-25 (7/2)	
	異物混入		グランド部まわり(パッキン箱内面、ネックブッシュ)の外観点検	グランド部まわり(パッキン箱内面、ネックブッシュ)に異物混入および傷がないことを目視により確認した。	×	添付資料-25 (8/2)		
	グランド部内圧高	バランス穴閉塞	上部ケーシングバランス穴(8-φ30)目視確認	上部ケーシングバランス穴に流れを阻害するような閉塞がないことを目視およびファイバースコープにより確認した。	×	添付資料-25 (9/2)		
		FWB P 吸込み側圧力高	FWB P 吸込み側圧力のパラメータ確認	ポンプ運転時の脱気器内圧力は0.87MPaであり標準値0.80MPa~0.90MPa(FWB P 吸込み側圧力と同等の圧力である脱気器内圧力)内に収まっていることから、吸込み圧力が適正であることを確認した。	×	添付資料-25 (10/2)		
		バランス管閉塞	バランス管(80A)内部確認	バランス管内の内部に流れを阻害するような閉塞がないことを目視およびファイバースコープにより確認した。	×	添付資料-25 (11/2)		
	シール水、クエンチング水の状態変化			シール水、クエンチング水の状態変化の確認	シール水圧力は、通常の2台運転の状態では1.10MPaにて供給しており、FWB P 切替の3台運転時に1.27MPaに調整したが、いずれも通常の圧力範囲内(1.06MPa~1.27MPa)であったことを確認した。 また、クエンチング水はFWB P 2台および3台運転時に流量調整弁の操作を実施していないことを確認した。	×	添付資料-25 (12/2)	
	運転パラメータの変動によるグランド部への影響			運転パラメータの確認	ポンプ切替(3台運転)時のFWB P 吸込み側圧力上昇に伴うシール水圧力上昇操作が、グランド部のドレン量の増加に起因した可能性は否定できない。	△	添付資料-26	

○：要因と考えられる  
△：要因の可能性は否定できない  
×：要因とは考えにくい

# B-FWBP 入口配管ベント管 EPMA 分析結果

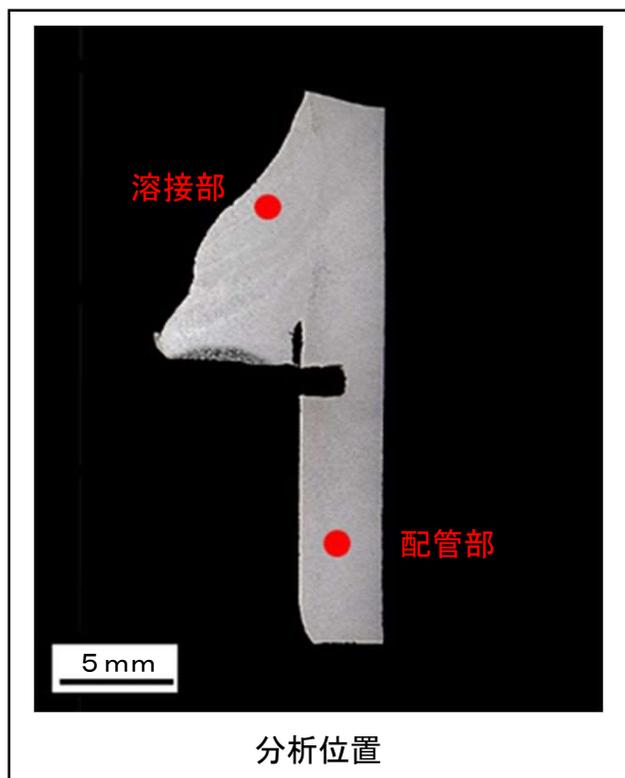
(単位：質量%)

材料	部位		炭素 C	ケイ素 Si	マンガン Mn	鉄 Fe	リン P	硫黄 S	備考
STPT38	配管	分析値	(注2)	0.4 (注3)	0.6	98.9	0.1 (注3)	—	
		規格	≦0.25	0.10~ 0.35	0.30~ 0.90	—	≦0.035	≦0.035	JIS G 3456
—	溶接部	分析値	(注2)	0.2	0.9	98.9	—	—	

(注1) —は未検出元素である。

(注2) 炭素Cは電子線照射により測定値を過大評価する可能性があるため、除外している。

(注3) 分析値は定性分析で検出された値であり、元素によっては実際の値と数%の誤差を有する。

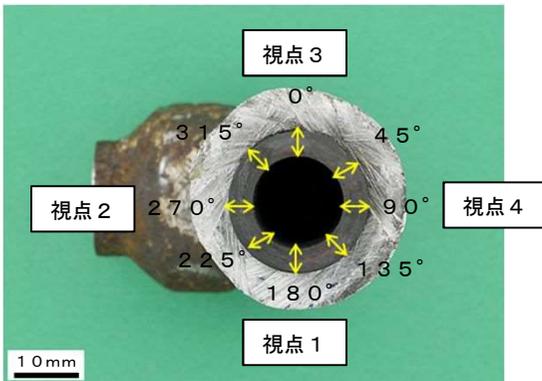


・確認日：2024.2.1

・確認結果

- ・溶接部は母材と同等である炭素鋼の化学成分を概ね満足しており、適切な材料が使用されていることを確認した。
- ・母材はSTPT38の化学成分を概ね満足していることを確認した。

# B-FWBP 入口配管ベント管 寸法測定結果 (1/2)



外径測定結果

単位 : mm

計測位置	0° - 180°	45° - 225°	90° - 270°	135° - 315°
A	21.62	21.64	21.63	21.61
B	21.69	21.72	21.71	21.70

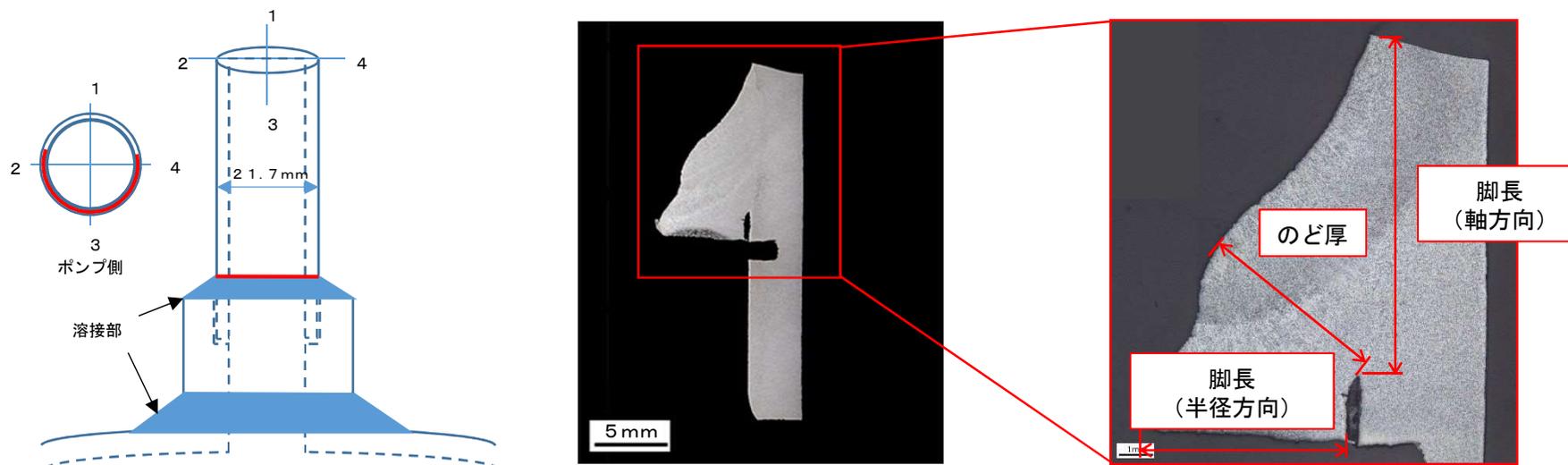
肉厚測定結果

単位 : mm

0°	45°	90°	135°	180°	225°	270°	315°
3.78	3.81	3.79	3.77	3.79	3.79	3.82	3.77

- ・ 確認日 : 2024. 2. 1
- ・ 測定結果  
配管公称肉厚は2.8mmであるが、寸法測定の結果、3.7mmであり、相違があるものの強度的に問題ないことを確認した。
- ・ 考察  
配管外径は21.6~21.7mm、肉厚は3.77~3.82mmであった。計測位置、角度によるばらつきがなく、配管に減肉がないことを確認した。

# B-FWBP 入口配管ベント管 寸法測定結果 (2/2)

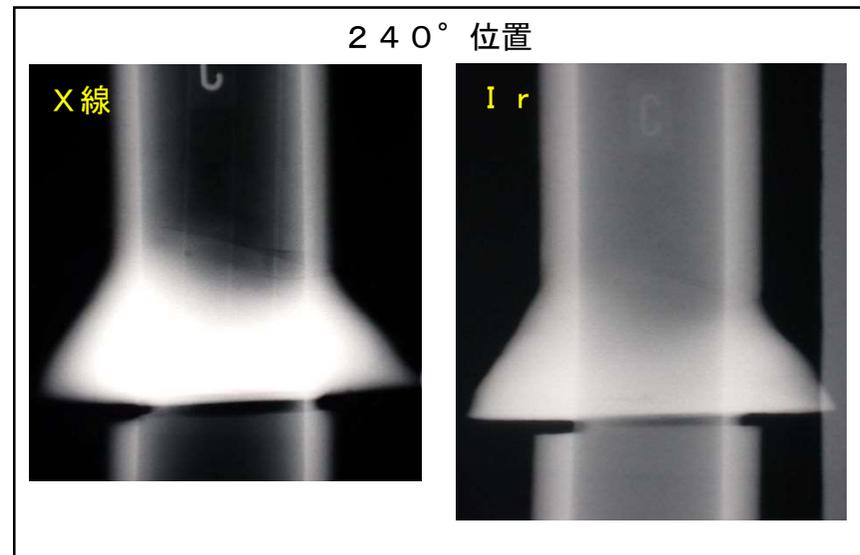
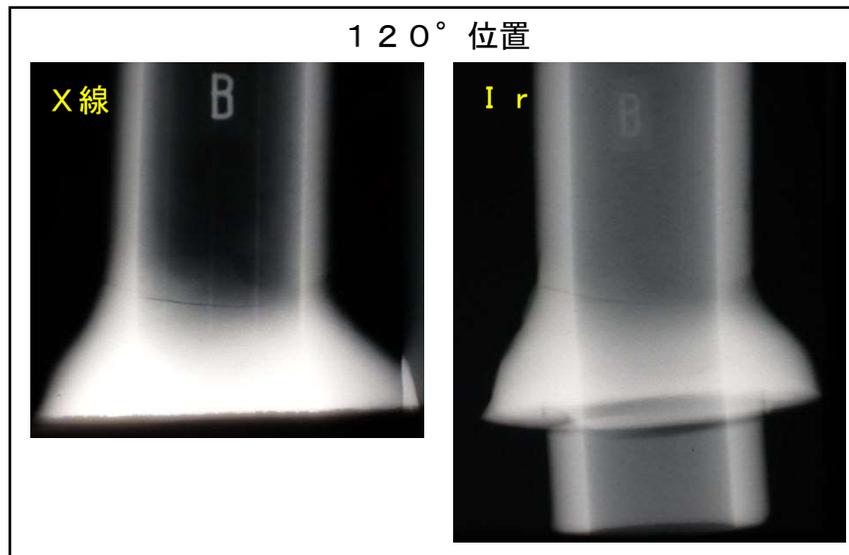
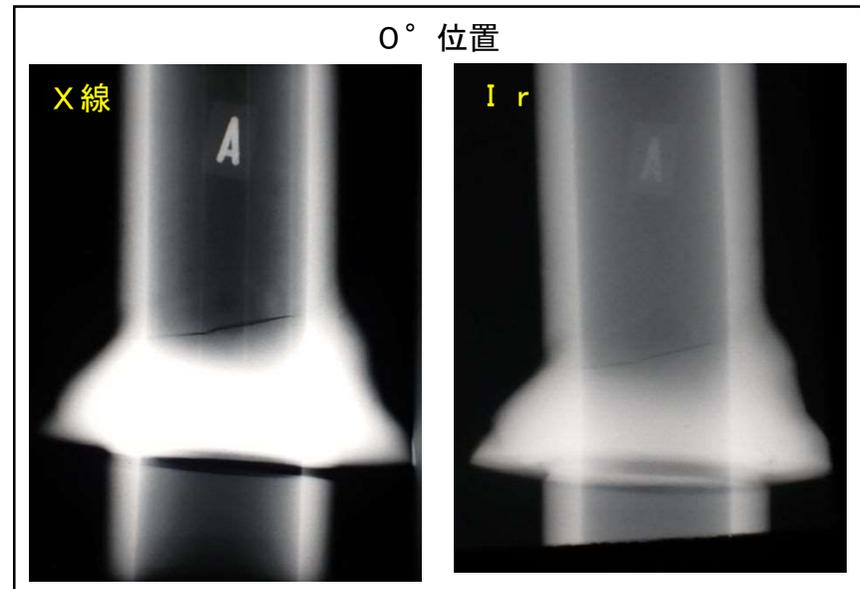
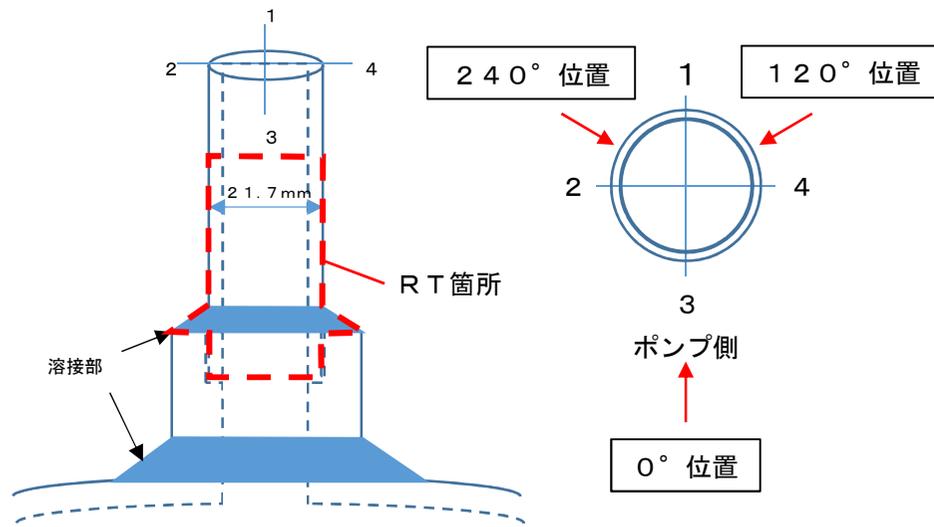


脚長およびのど厚の寸法測定結果

断面	脚長寸法 (判定値：4.5 mm)		のど厚寸法* (判定値：3.15 mm) ※45° 基準
	軸方向	半径方向	
視点 1 断面	9.5 mm	6.1 mm	5.6 mm
視点 2 断面	9.6 mm	6.6 mm	6.3 mm
視点 3 断面	9.1 mm	6.0 mm	5.7 mm
視点 4 断面	14.2 mm	6.0 mm	5.1 mm

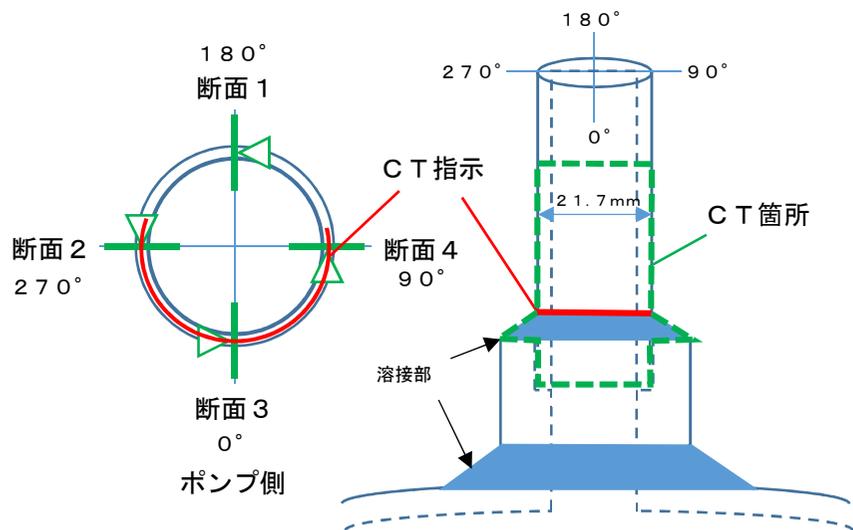
- ・確認日：2024.2.1
- ・観察結果  
断面観察の結果、規格要求を満足していることを確認した。

# B-FWBP 入口配管ベント管 放射透過試験 (RT) 結果



- ・ 確認日 : 2024. 2. 1
- ・ 確認結果  
 溶接部にブローホール、スラッグの巻き込み、アンダーカット、溶け込み不良、融合不良がないことを確認した。

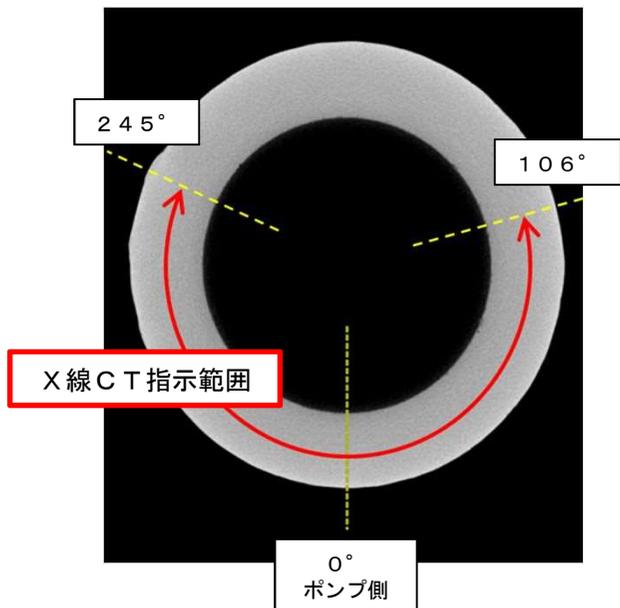
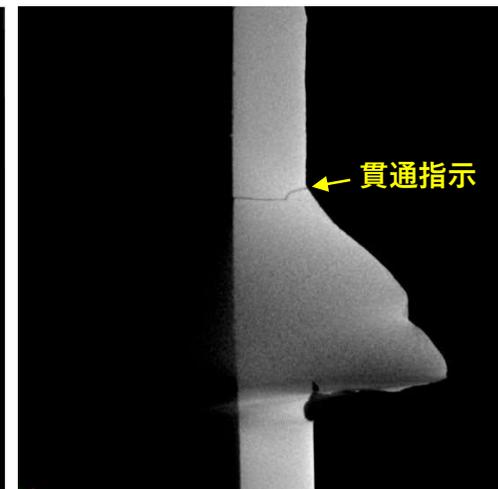
# B-FWBP 入口配管ベント管 X線CT結果



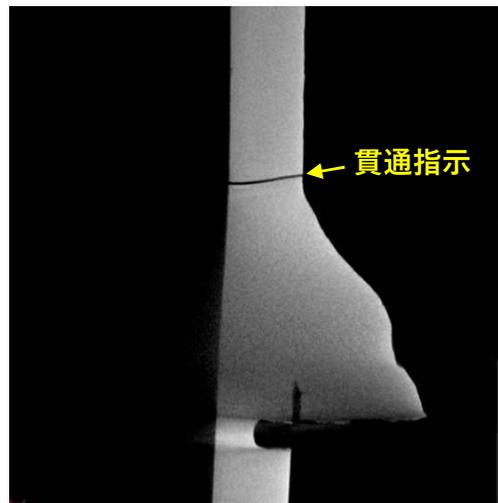
断面 1



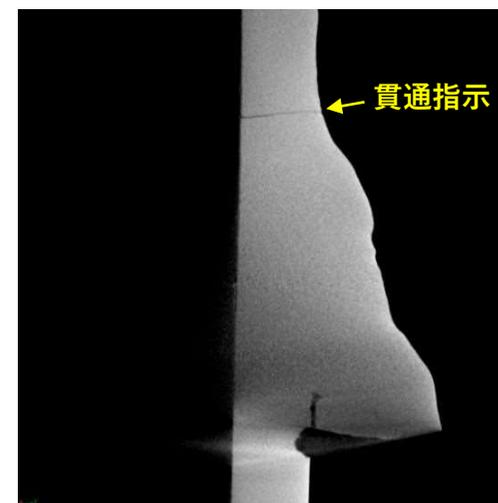
断面 2



断面 3



断面 4



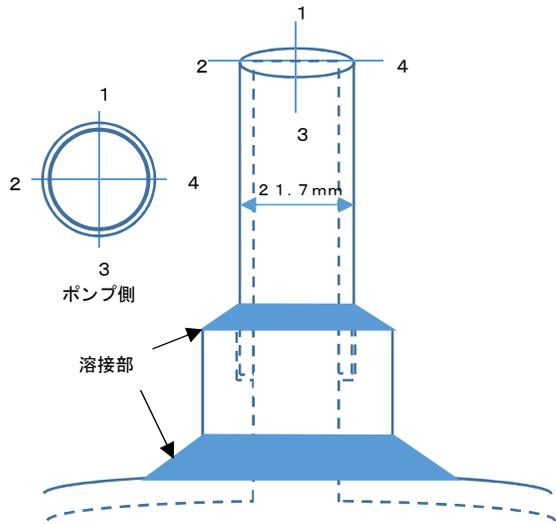
・ 確認日：2024. 2. 1

・ 観察結果

浸透探傷試験で確認した指示模様と同様の位置に約4.2mmの貫通指示を確認した。

溶接部にブローホール、スラッグの巻き込み、アンダーカット、溶け込み不良、融合不良、応力腐食割れがないことを確認した。

# B-FWBP 入口配管ベント管 外観観察結果（塗装剥離前）



視点 1



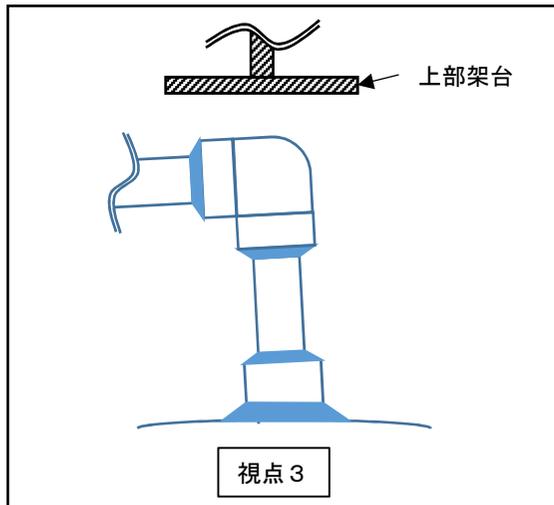
視点 2



視点 3

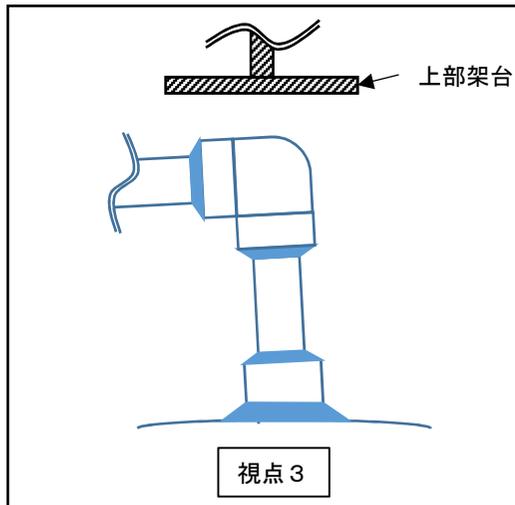
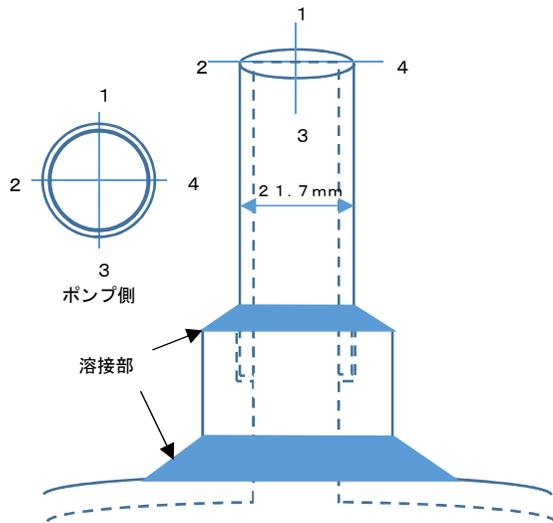


視点 4



- ・ 確認日：2024. 1. 24
- ・ 観察結果  
 塗装剥離前の外観観察の結果、著しい腐食のないことを確認した。

# B-FWBP 入口配管ベント管 外観観察結果（塗装剥離後）



視点1



視点2



視点3

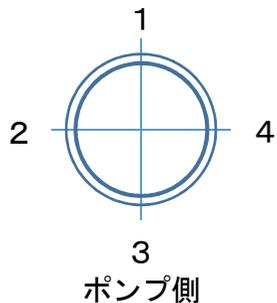


視点4

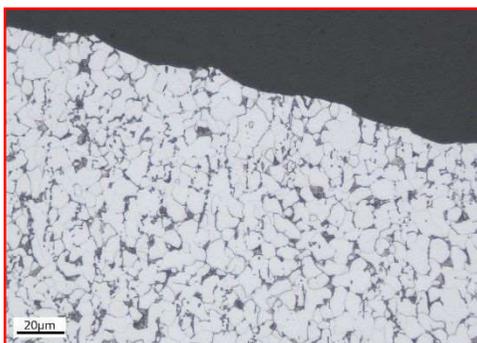
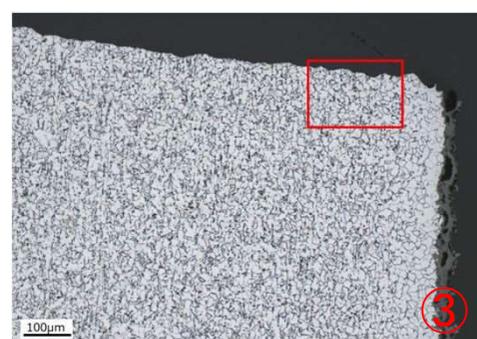
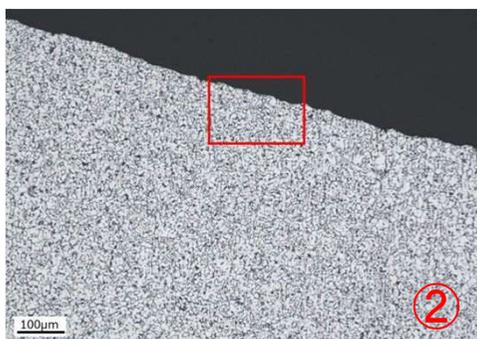
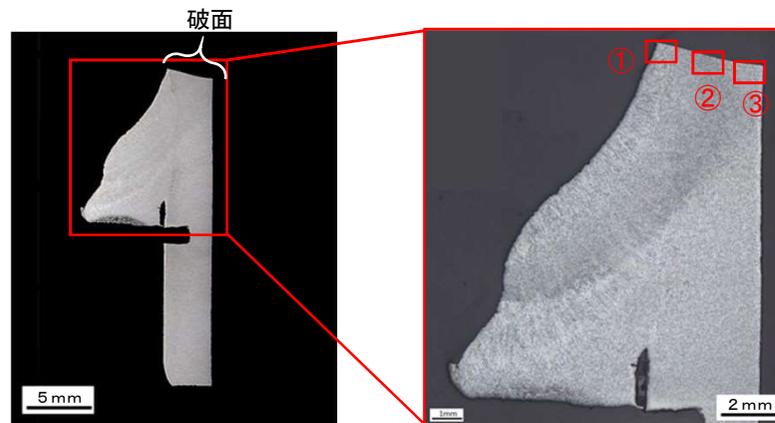


- ・確認日：2024. 1. 24
- ・観察結果  
塗装剥離後の外観観察の結果、著しい腐食のないことを確認した。

# B-FWBP 入口配管ベント管 断面観察結果



観察位置



き裂部の断面ミクロ観察結果

- ・ 確認日：2024. 2. 1
- ・ 観察結果
  - ・ 溶接部に圧力・熱サイクル疲労の様相は認められなかった。
  - ・ 延性破壊の特徴であるディンプルは認められなかった。
  - ・ 応力腐食割れの様相は認められなかった。

# B-FWBP 入口配管ベント管 振動点検結果

振動応力測定結果：8.22MPa

配管 固有振動数 (Hz)		
X方向	Y方向	Z方向
44.6	40.7	28.8

	ポンプ振動成分 (Hz)	判定基準
N成分 (注2)	14.8	±10% (13.2Hz ~ 16.3Hz) を回避すること
Nz成分 (注3)	88.5	±10% (79.6Hz ~ 97.4Hz) を回避すること

(注1) FWBP回転数：885rpm=14.8Hz、FWBP羽根枚数：6枚

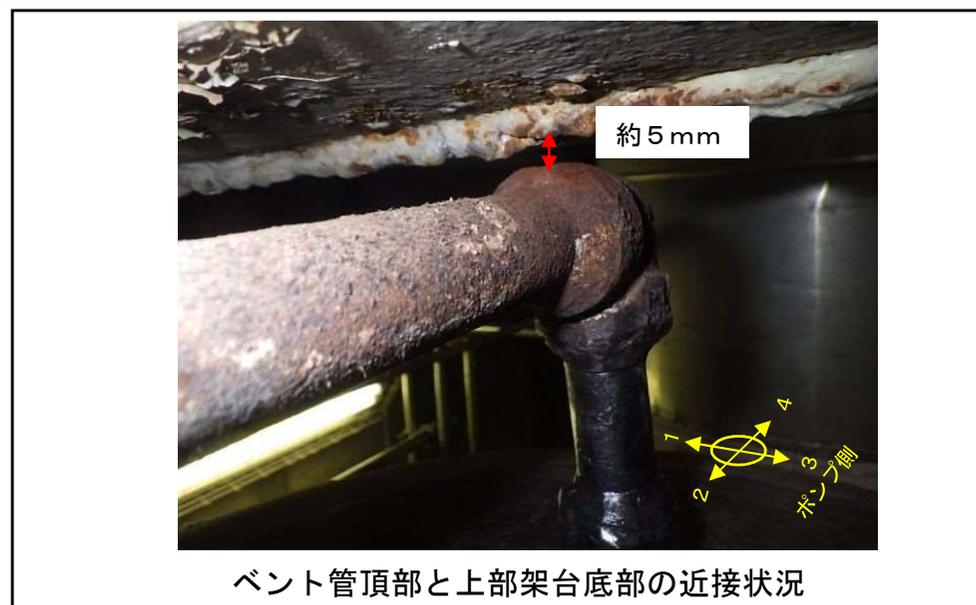
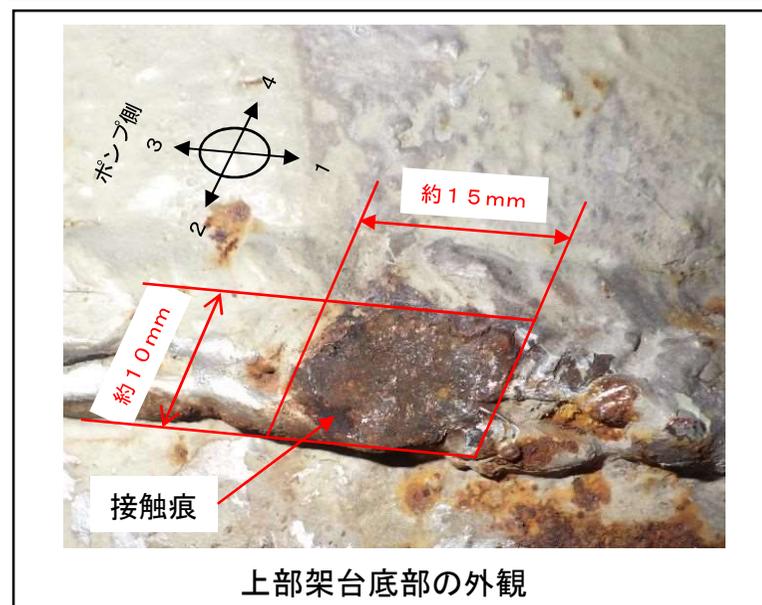
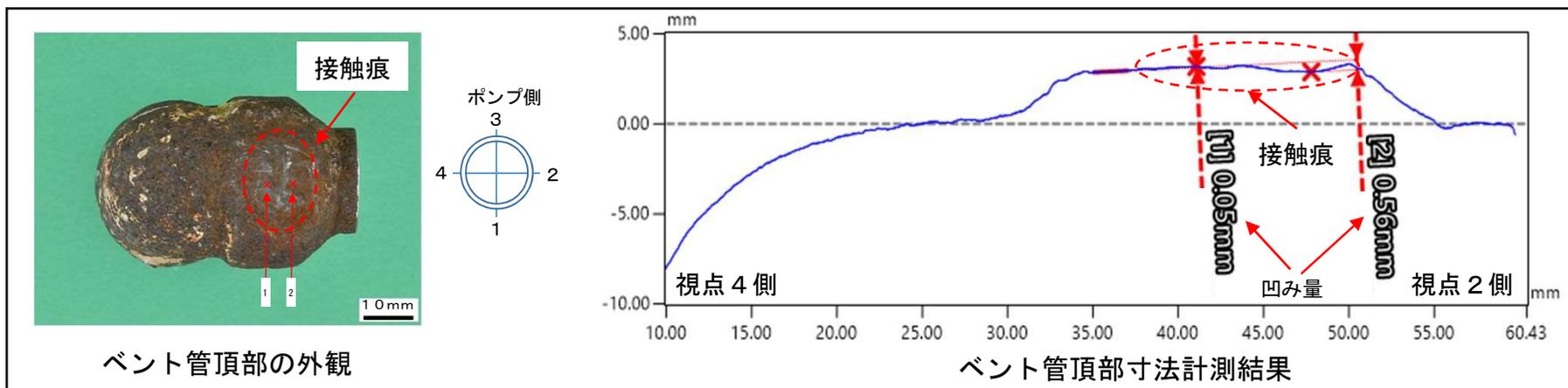
(注2) N成分：ポンプの回転数に起因する振動が配管等を伝わり発生する励振力（機械振動成分）  
(N = ポンプ回転数)

(注3) Nz成分：ポンプの回転数に起因する振動が流体の脈動として伝わる励振力（脈動振動成分）  
(Nz = ポンプ回転数 × 羽根枚数)

- ・確認日：2024.2.1
- ・確認結果（2002年振動点検時の記録確認）  
測定実績（2002年）から、配管の固有振動数がポンプの振動成分の近傍になく共振を回避していることを確認した。

# B-FWBP 入口配管ベント管 外観観察結果 (1/2)

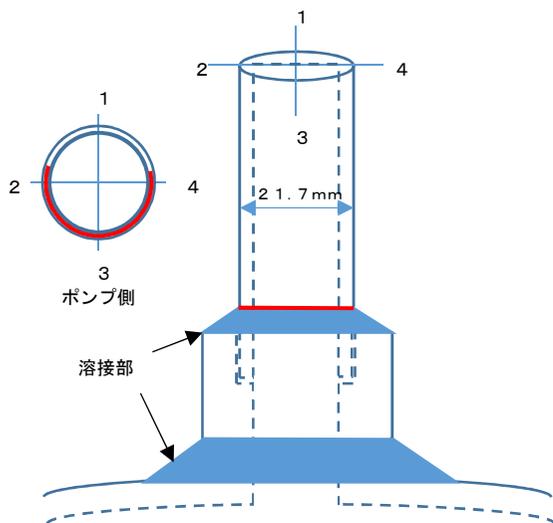
## ベント管頂部および上部架台底部の接触痕について



- ・ 確認日：2024. 2. 1
- ・ 観察結果  
ベント管頂部および上部架台底部に接触痕を確認した。  
ベント管頂部に0. 56mmの凹みを確認した。  
上部架台底部に、たて約10mm、よこ約15mmの接触痕を確認した。

# B-FWBP 入口配管ベント管 外観観察結果 (2/2)

## 外面浸透探傷試験結果



視点 1



視点 2



視点 3



視点 4



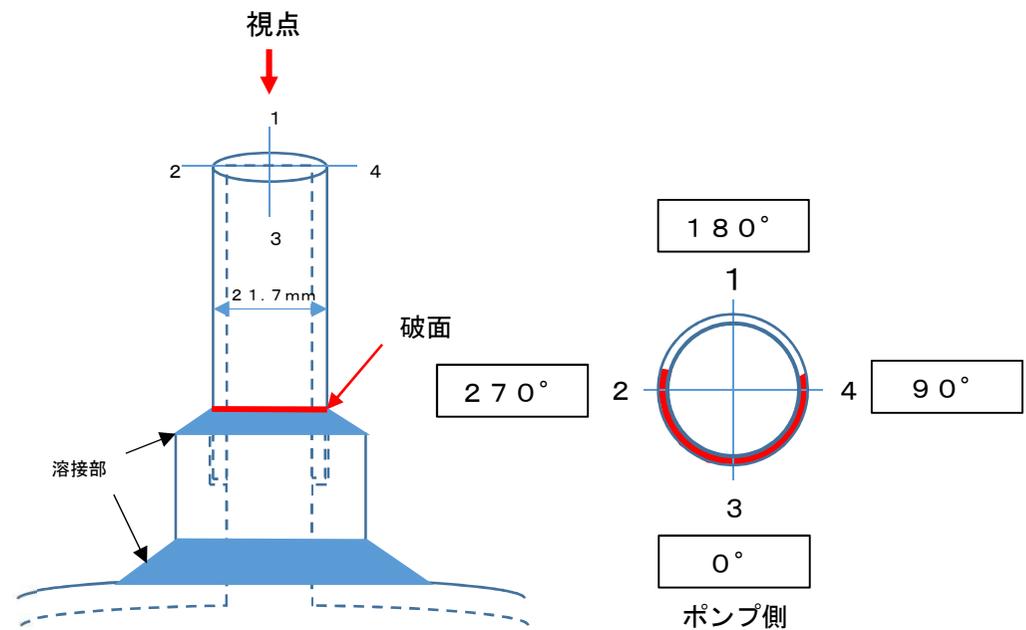
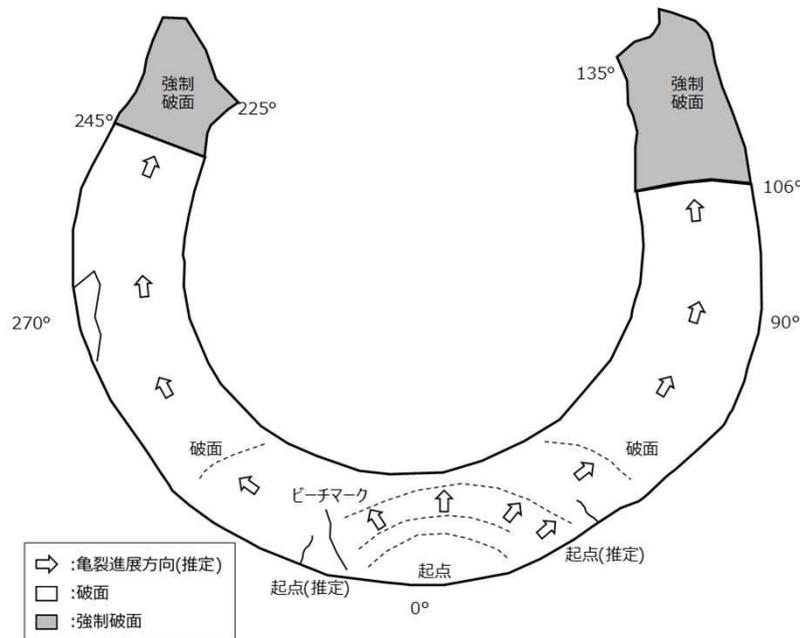
・確認日：2024.2.1

・観察結果

ソケット溶接止端部に沿って、視点 2→視点 3→視点 4 にかけてほぼ半周にわたる連続した浸透指示模様が確認した。

浸透指示の長さ：円周方向に約 35 mm を確認した。

# B-FWBP 入口配管ベント管 破面観察結果 (1/2)



・ 確認日 : 2024. 2. 1

・ 観察結果

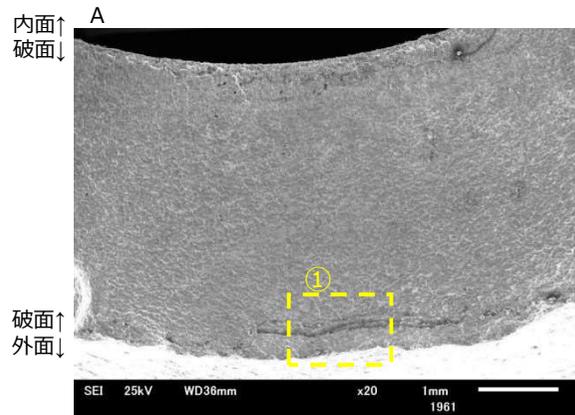
以下の破面の特徴を観察した。

- ・ 破面が概ね平坦で顕著な凹凸がない。
- ・ き裂の先端が揃っており、直線的に進展している。
- ・ 破面近傍に塑性変形の様相が認められない。
- ・ 確認されたビーチマークの数は4本である。
- ・ 延性破壊の特徴であるディンプルは認められなかった。
- ・ 応力腐食割れの様相は認められなかった。

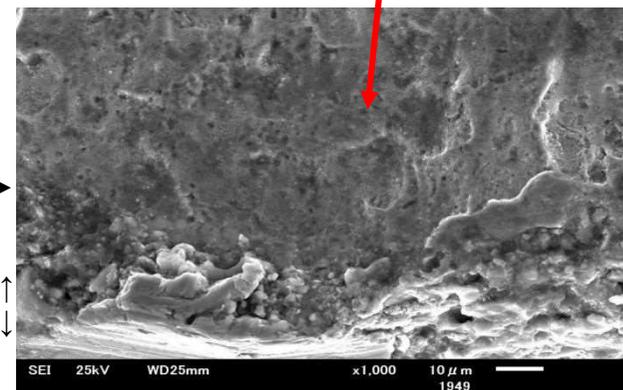
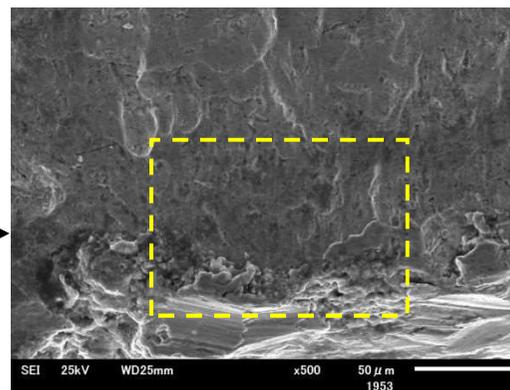
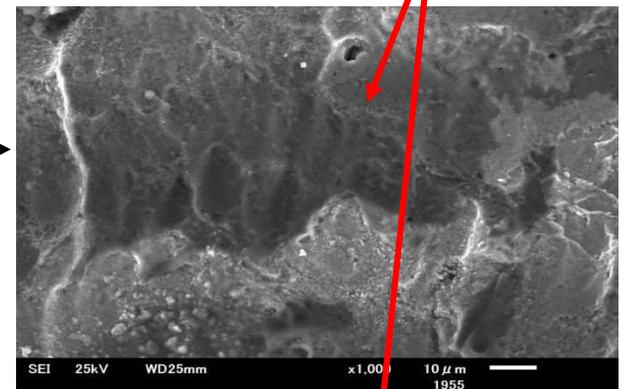
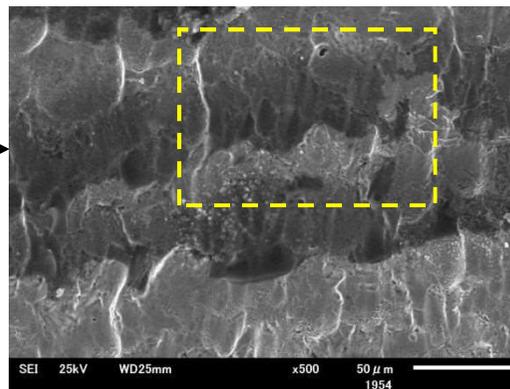
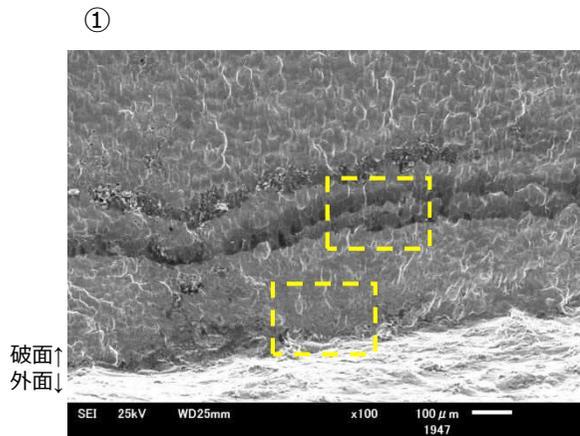
・ 考察

ビーチマークの形状より、0° 付近の外表面を主起点としてき裂が発生し、90° および270° の両方向へ進展したと考えられる。

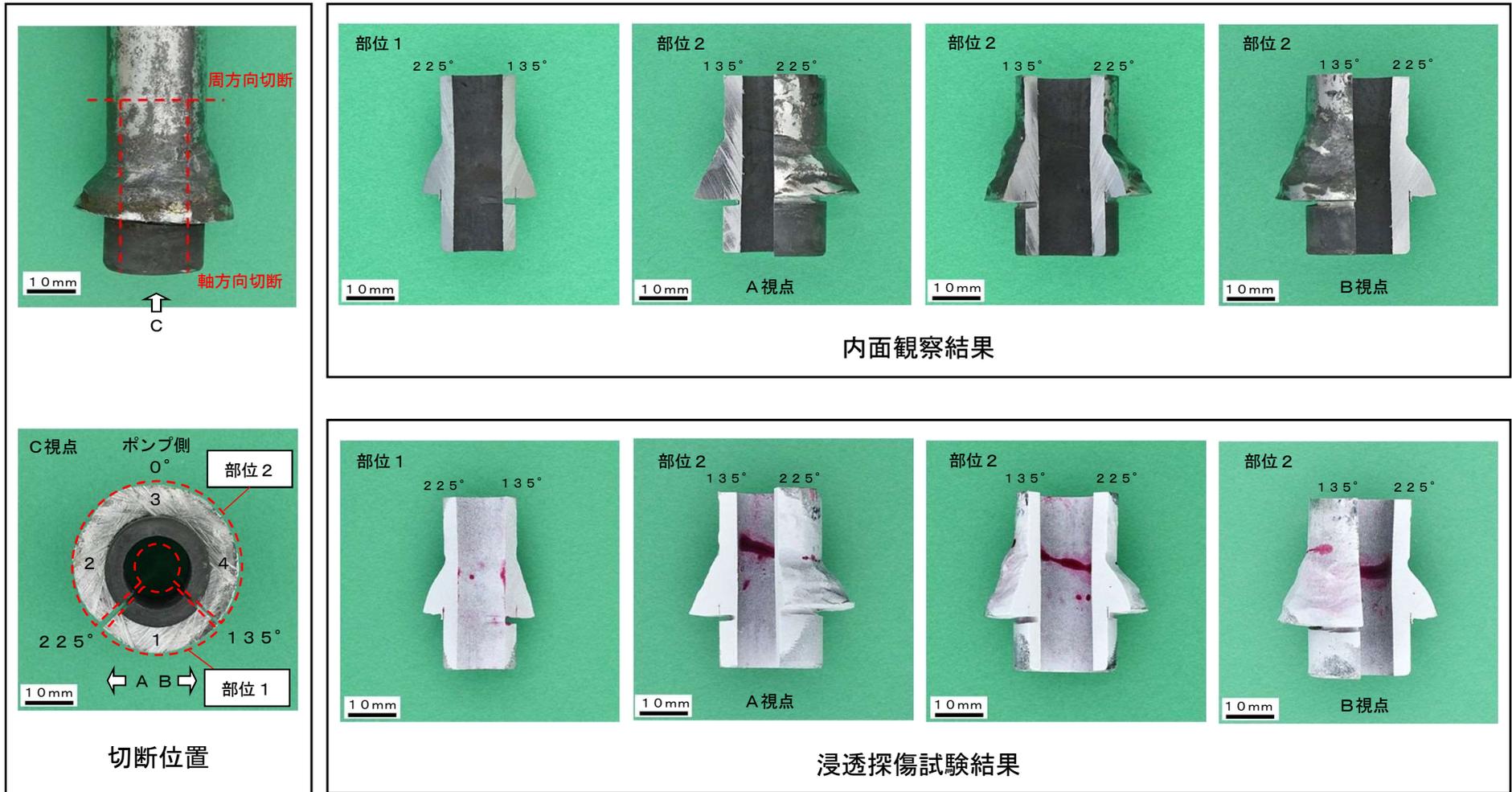
# B-FWBP 入口配管ベント管 破面観察結果 (2/2)



延性破壊で見られるディンプルや疲労破壊で見られるストライエーションのような特徴のある様相は認められなかった。

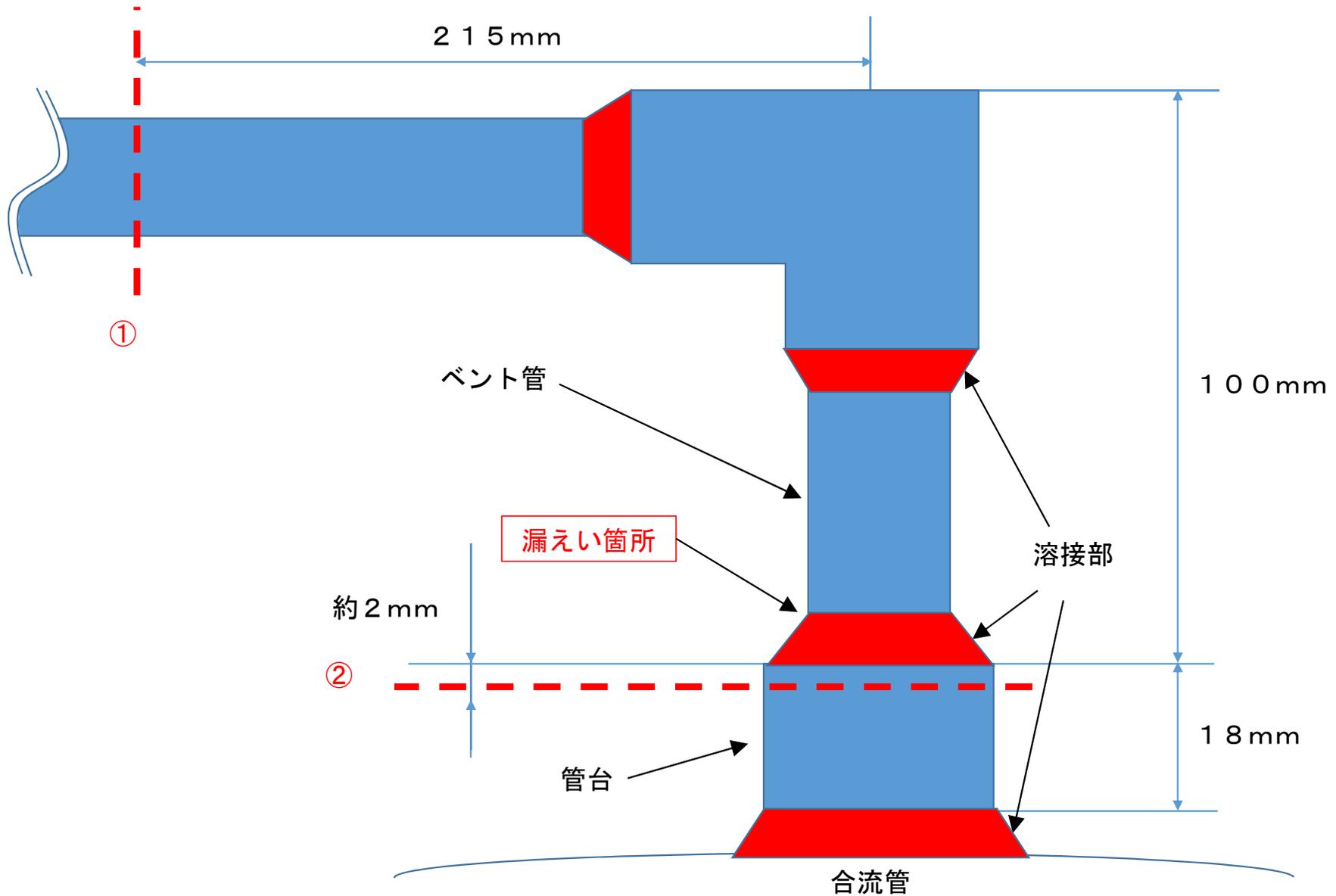


# B-FWBP入口配管ベント管 内面観察および浸透探傷試験結果



- ・確認日：2024. 2. 1
- ・観察結果  
ベント管内面に有意な腐食減肉がないことを確認した。  
ベント管内面にも、外面で確認された浸透指示模様的位置と同様に視点 2→視点 3→視点 4 にかけて周方向の浸透指示模様を確認した。

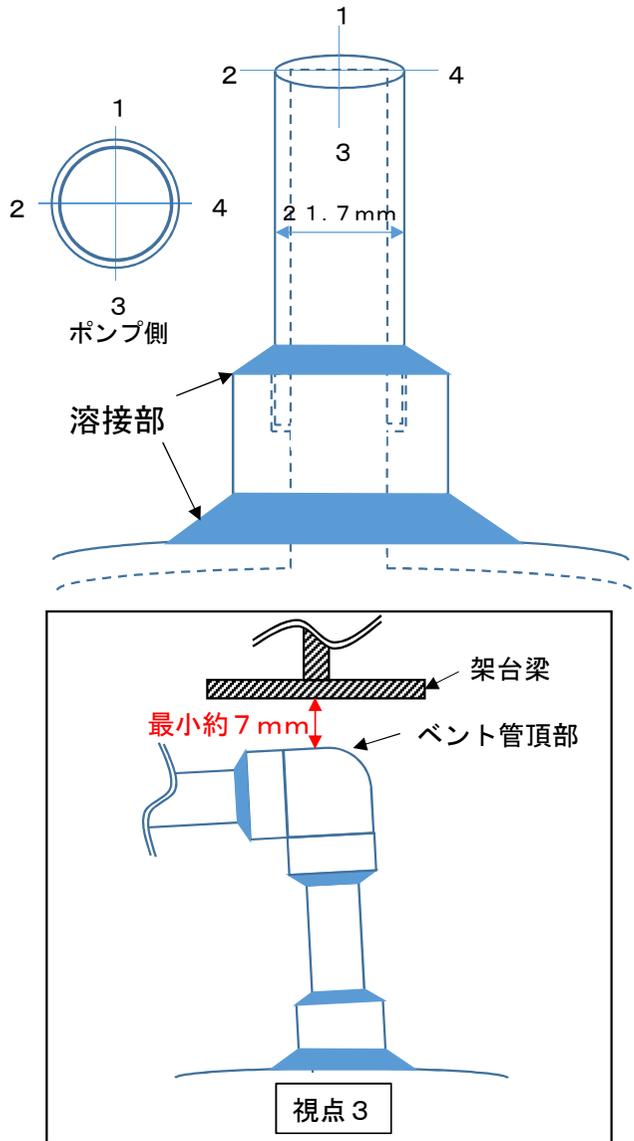
# B-FWBP入口配管ベント管 現地切断位置



B-FWBP 入口配管切断後の外観写真



## 類似箇所の外観観察結果（A-FWBP入口配管ベント管）



視点1



視点2



視点3



視点4



・確認日：2024. 1. 25

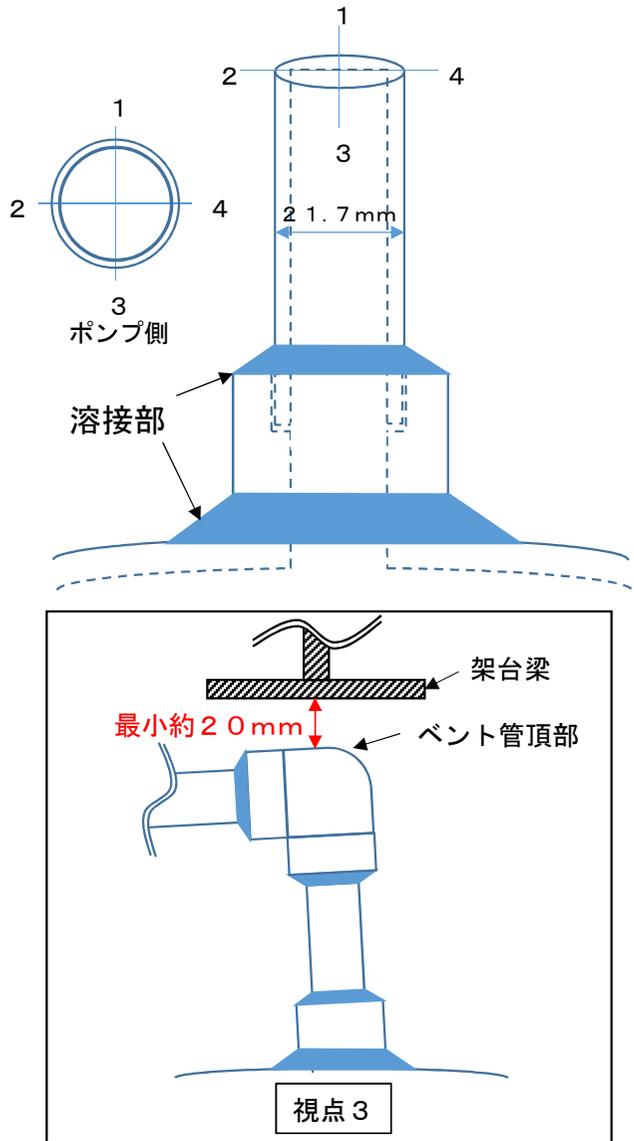
・観察結果

ベント管に外面腐食は認められなかった。

周辺設備との干渉はないが、最も近接しているところはベント管頂部であった。

なお、ベント管頂部と上部架台底部の隙間は確保されており、異常は認められなかった。

## 類似箇所の外観観察結果（C-FWBP入口配管ベント管）



視点1



視点2



視点3



視点4



・確認日：2024. 2. 2

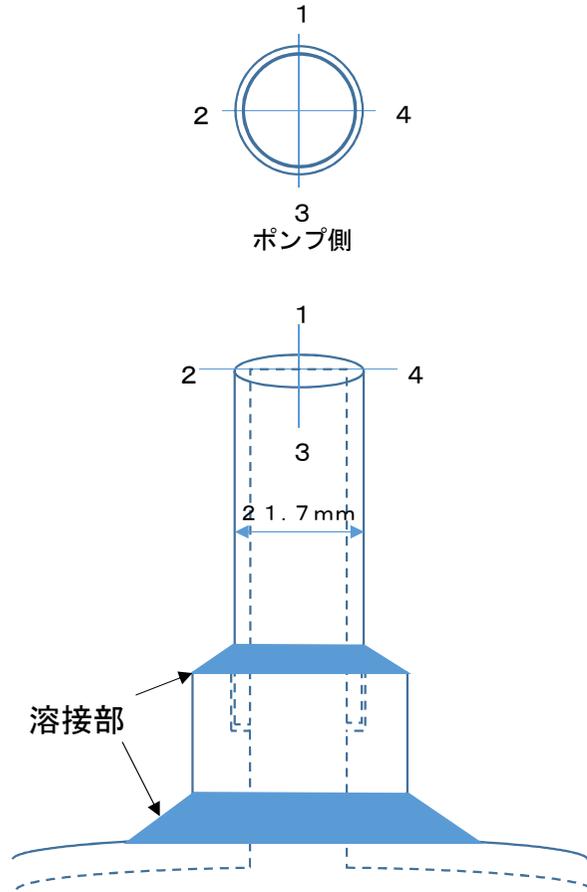
・観察結果

ベント管に外面腐食は認められなかった。

周辺設備との干渉はないが、最も近接しているところはベント管頂部であった。

なお、ベント管頂部と上部架台底部の隙間は確保されており、異常は認められなかった。

# 類似箇所の浸透探傷試験結果（A-FWBP入口配管ベント管）



視点 1



視点 2



視点 3

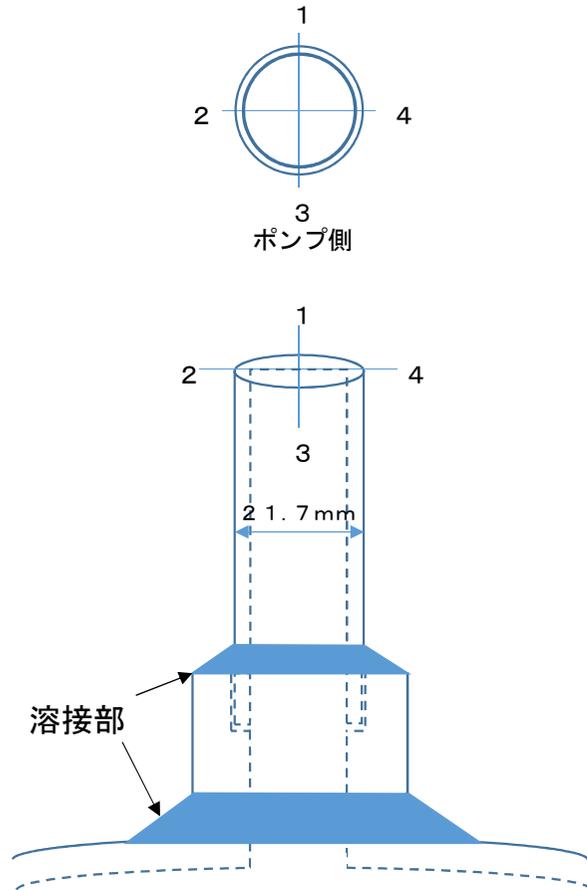


視点 4



- ・確認日：2024. 1. 25
- ・点検結果  
異常なし。

# 類似箇所の浸透探傷試験結果（C-FWBP入口配管ベント管）



視点 1



視点 2



視点 3



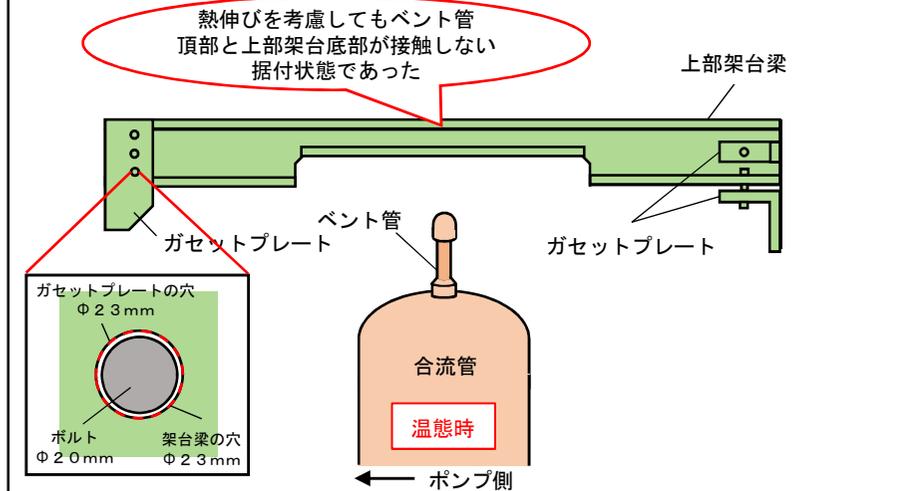
視点 4



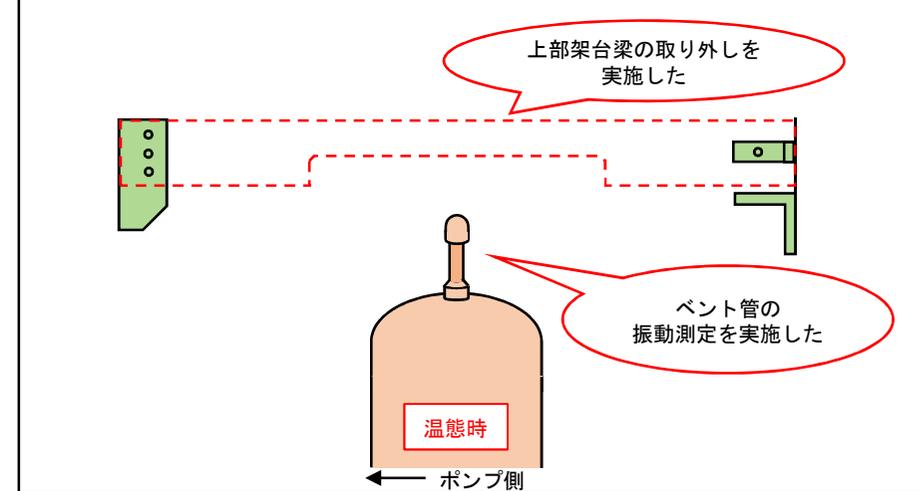
- ・確認日：2024. 2. 3
- ・点検結果  
異常なし。

# B-FWBP 入口配管ベント管と 上部架台梁の接触メカニズムについて

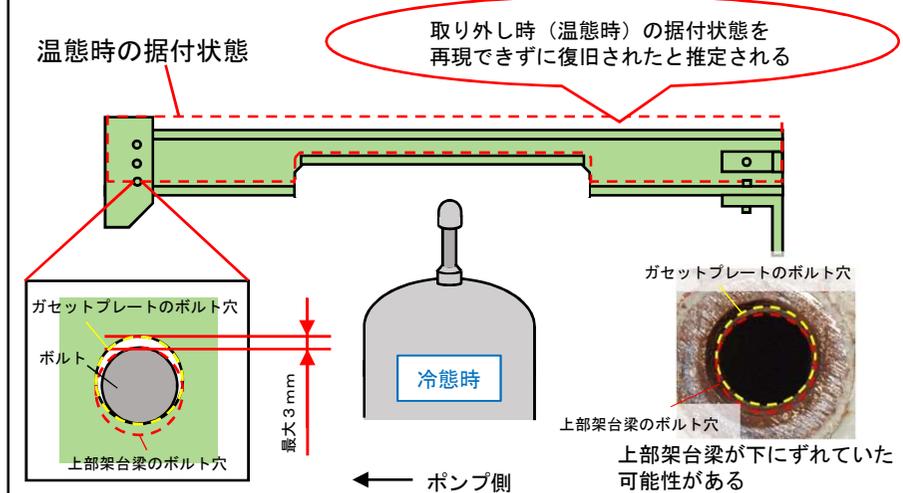
## 1. 振動計測前のベント管および上部架台梁の据付状態（温態時）



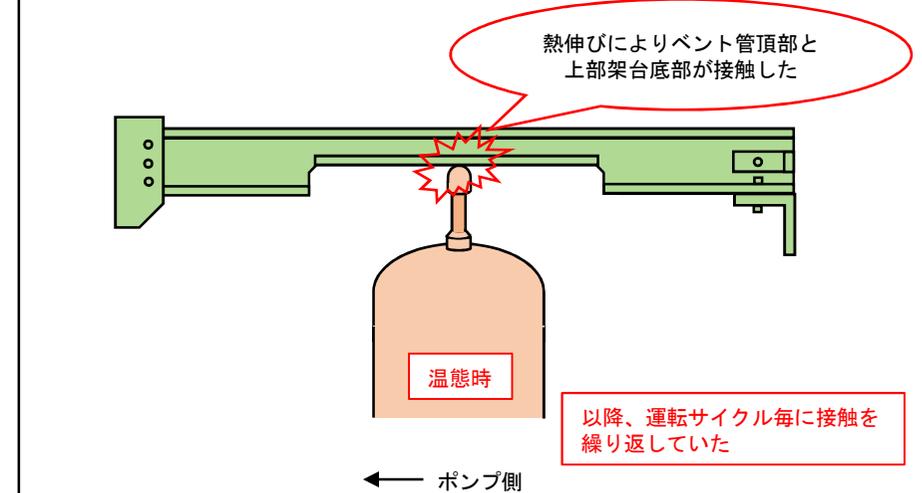
## 2. 振動計測に伴う上部架台梁の取り外し（温態時）



## 3. 上部架台梁の復旧（冷態時）



## 4. 熱伸びによるベント管頂部と上部架台底部の接触（温態時）



# 分解前のA-FWBPグランド部の点検結果 (1/2)

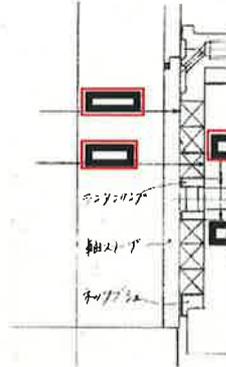
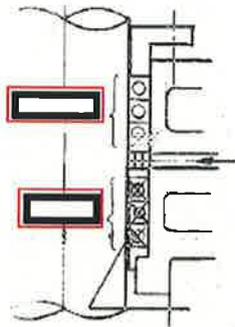
## グランドパッキンの仕様確認

### 確認方法

前回工事報告書を確認し、グランドパッキンの仕様を確認する。

### 【設計仕様】

メーカー技術連絡書抜粋



### 【前回工事報告書】

工事報告書抜粋

【使用部材点検チェックシート】

品名: 給水ブースタポンプ

品目 No.	管理番号	品名	使用先	仕様(材質・寸法)	数量	指定 可燃物	危険 物	社 社	使用 前	点検		使用 後	点検 結果	備考
										結	果			
50	FWBP-01	シートパッキン	ベルマウス		3枚	-	-	○	✓	5/2	5/2	0	-	
57	FWBP-02	シートパッキン	ケーシング(1-2段)		3枚	-	-	○	✓	5/2	5/2	0	-	
55	FWBP-03	シートパッキン	ケーシング(2段-給水管)		3枚	-	-	○	✓	5/2	5/2	0	-	
51	FWBP-04	シートパッキン	ケーシング(給水管-上継手側)		3枚	-	-	○	✓	5/2	5/2	0	-	
53	FWBP-05	シートパッキン	ポンプ台座		3枚	-	-	○	✓	5/2	5/2	0	-	
54	FWBP-06	シートパッキン	スタフリングネックス		3枚	-	-	○	✓	5/2	5/2	0	-	
64	FWBP-07	ガスケット	吸込フランジ		3枚	-	-	○	✓	5/2	5/2	0	-	
66	FWBP-08	ガスケット	吐出フランジ		3枚	-	-	○	✓	5/2	5/2	0	-	
53	FWBP-09	シートパッキン	冷却水配管		12枚	-	-	○	✓	5/2	5/2	0	-	
5	FWBP-10	Oリング	シール水ドレン管		8本	-	-	○	✓	5/2	5/2	0	-	
70	FWBP-11	Oリング	軸スリーブ		3本	-	-	○	✓	5/2	5/2	0	-	
71	FWBP-12	Oリング	上部軸受		3本	-	-	○	✓	5/2	5/2	0	-	
73	FWBP-13	Oリング	スタフリングネックス		3本	-	-	○	✓	5/2	5/2	0	-	
8	FWBP-14	グランドパッキン	軸封部(ランタリング上)		9本	-	-	○	✓	5/2	5/2	0	-	
12	FWBP-15	グランドパッキン	軸封部(ランタリング下)		9本	-	-	○	✓	5/2	5/2	0	-	

※1.指定可燃物・危険物及び社給・請負会社持ち倒しは、該当有りのとき○印、無しのととき一印を記入する。(指定可燃物・危険物はその数量が保管可能数量(指定数量)未満であっても○印を記入すること)  
 ※2.結果欄は異常なしのとき△印、異常有りのとき▲印を記入する。  
 ※3.残品処理欄は、閉電退却、倉入れ、廃棄、等を記入する。  
 ※4.備考欄は、部材の仕様を変更する際に「代替品使用」等を記入する。

### 確認結果 良

確認日 2024.1.23

前回工事報告書を確認し、グランドパッキンの仕様がメーカー指定品であることを確認したことからドレン量増加の要因とは考えにくい。

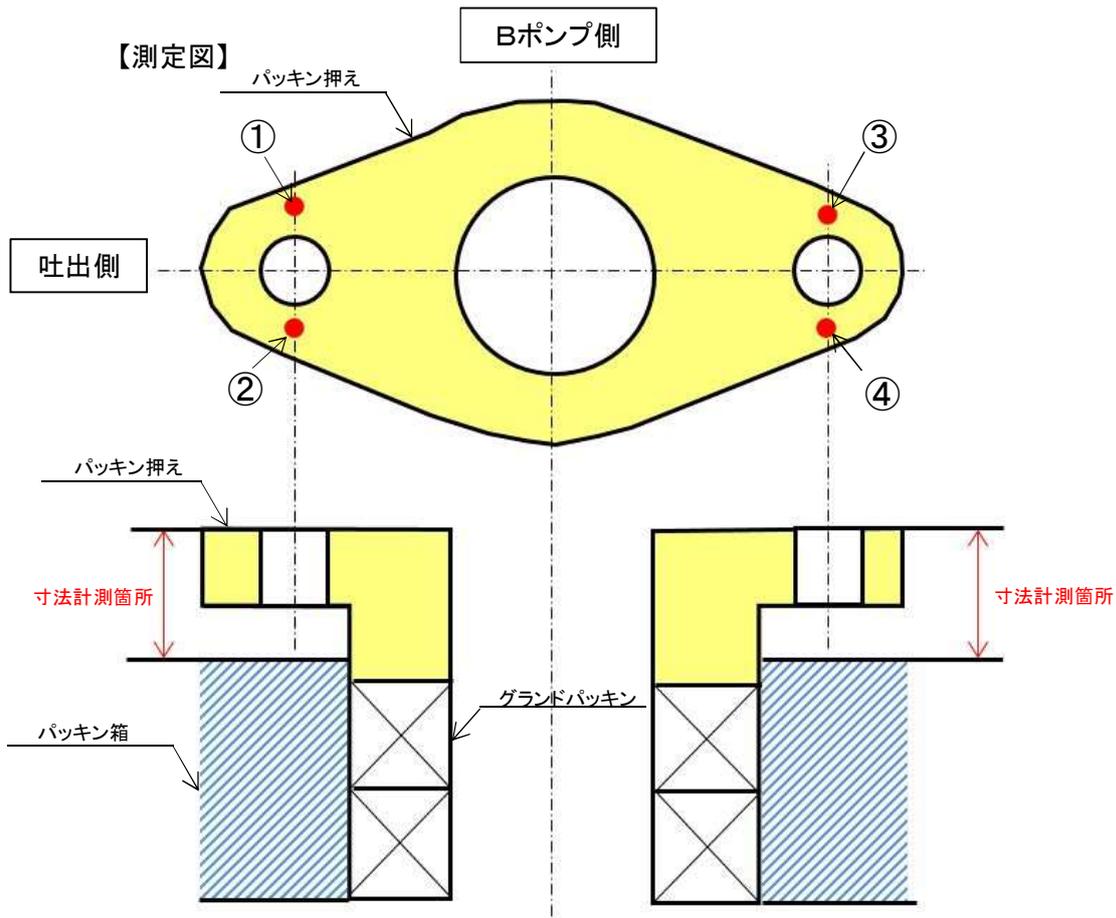
: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

分解前のA－FWBPグランド部の点検結果（2／2）

パッキン押えの傾き、ナットの緩み確認  
グランドパッキンの増締め代確認

確認方法

1. パッキン押えとパッキン箱間の寸法を4点測定し、傾きやナットの緩みがないことを確認する。(測定図参照)
2. 通常運転と同様のシール水圧力(1.2MPa)でシール水を供給し、グランド部のパッキン押えナットを増締めしドレン量の変化を確認する。



点検箇所	測定結果
①	31mm
②	31mm
③	31mm
④	31mm

1. 確認結果 良

確認日 2024.1.23

パッキン押えとパッキン箱間の寸法を直尺にて4点測定し、均一に締め付けられていることを確認した。また、触診によりナットの緩みがないことを確認したことからドレン量増加の要因とは考えにくい。

2. 確認結果 良

確認日 2024.1.23

通常運転と同様のシール水圧力(1.2MPa)でシール水を供給し、グランド部のパッキン押えナットを増締め(1/12R)した結果、ドレン量が低下(うどん1本⇒そば1本)した。よってグランドパッキンのシール性能は健全でありドレン量増加の要因とは考えにくい。

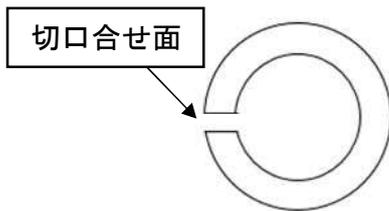
## 分解後のA－FWBPグランド部の点検結果（1／12）

### グランドパッキン取外し時の組込み状態確認

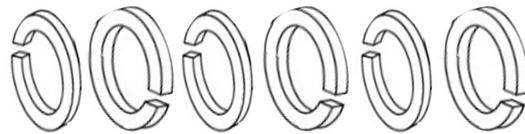
#### 確認方法

1. 分解点検時にグランドパッキン切口合せ面に隙間がないことを目視により確認し、各部の組込み状態を確認する。
2. 分解点検時に上下のグランドパッキン切口合せ面の位置が要領書どおり180度ずれるように挿入されていることを目視により確認し、各部の組込み状態を確認する。

#### 【切口合せ面の隙間確認】

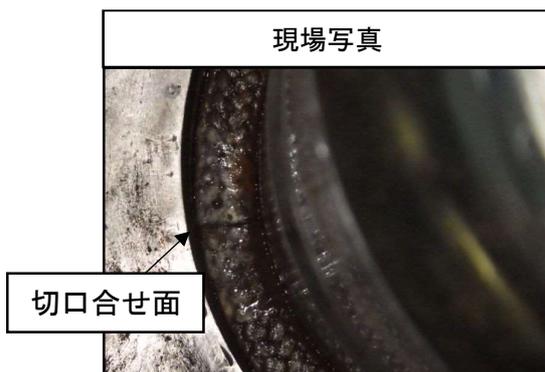


#### 【切口合せ面の位置確認】



※切口合せ面の位置が180度ずれるように挿入されていることを確認する

※切口合せ面に隙間がないことを確認する



#### 1. 確認結果 良

確認日 2024.1.25

グランドパッキン切口合せ面に隙間がないことを目視により確認したことからドレン量増加の要因とは考えにくい。

#### 2. 確認結果 良

確認日 2024.1.25

上下のグランドパッキン切口合せ面の位置が要領書どおり180度ずれるように挿入されていることを目視により確認したことからドレン量増加の要因とは考えにくい。

分解後のA-FWPグランド部の点検結果 (2/12)

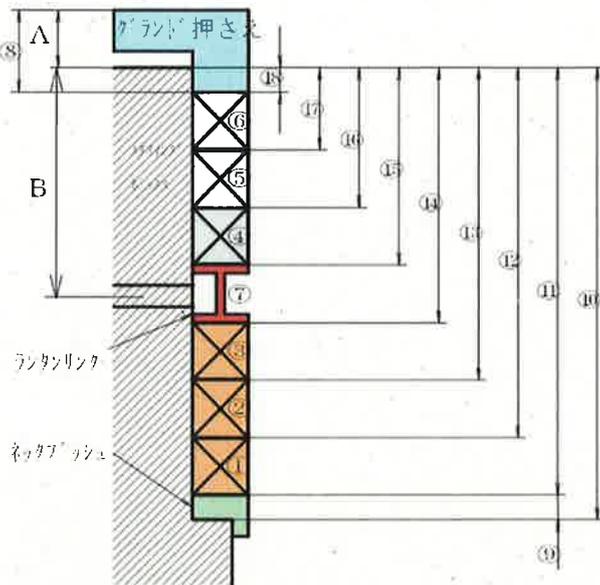
グランドパッキン各段、ランタンリングの挿入状況確認

確認方法

前回工事報告書を確認し、グランドパッキン各段、ランタンリングの挿入状況を確認する。

【前回工事報告書】

工事報告書抜粋



5 グランドパッキン挿入記録(参考記録)		単位:mm	
各厚み寸法		挿入時寸法	
グランドパッキン厚み	①		⑩
	②		⑪
	③		⑫
	④		⑬
	⑤		⑭
	⑥		⑮
ランタンリング	⑦		⑯
グランド押さえ	⑧		⑰
ネックブラシ	⑨		⑱
グランド押さえ代	締付前 A1		⑧-⑩
	締付後 A2		実測値
	押さえ代		A1-A2
シール水供給口	B		

確認結果 良

確認日 2024.1.25

前回工事報告書のグランドパッキン各段、ランタンリングの挿入状況を確認し、図面どおりに挿入されていることからグランドパッキンの組み立て状態に問題はなく、ドレン量増加の要因とは考えにくい。

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

分解後のA-FWBPグランド部の点検結果 (3/12)

グランドパッキン外観点検(摺動面の劣化)、運転期間の確認

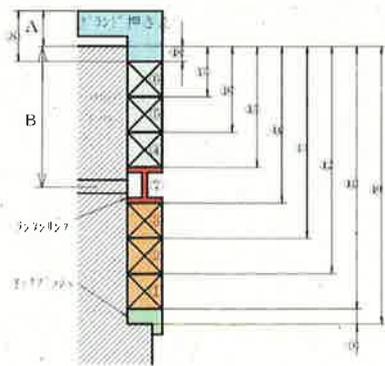
確認方法

1. 取り外したグランドパッキンの外観点検を実施する。
2. グランドパッキンの前回取替時期を確認し、取替後の運転期間を確認する。



【前回工事報告書】

工事報告書抜粋



② グランドパッキン挿入記録(参考記録) 単位:mm

各厚み寸法		挿入寸法	
グランドパッキン厚み	①		挿
	②		挿
	③		挿
	④		挿
	⑤		挿
	⑥		挿
ファンリンク グランド押さえ ネック ブッシュ	⑦		挿
	⑧		挿
	⑨		挿
グランド押さえ代	挿付前 A1		実測値
	挿付後 A2		実測値
	押さえ代		A1-A2
シール水供給口	B		
パッキン仕様			
計測者			
計測日	2020年9月8日		
計測器No.	JキスNo.16022643		

1. 確認結果 良

確認日 2024.1.25

グランドパッキンの外観点検を実施したところ、有意な傷やむしれ等の劣化がないことからドレン量増加の要因とは考えにくい。

2. 確認結果 良

確認日 2024.1.25

A給水ブースタポンプは2023年7月から運転しており、運転期間は約7ヶ月程度で取替周期である3定検に達していないことからドレン量増加の要因とは考えにくい。

□ : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

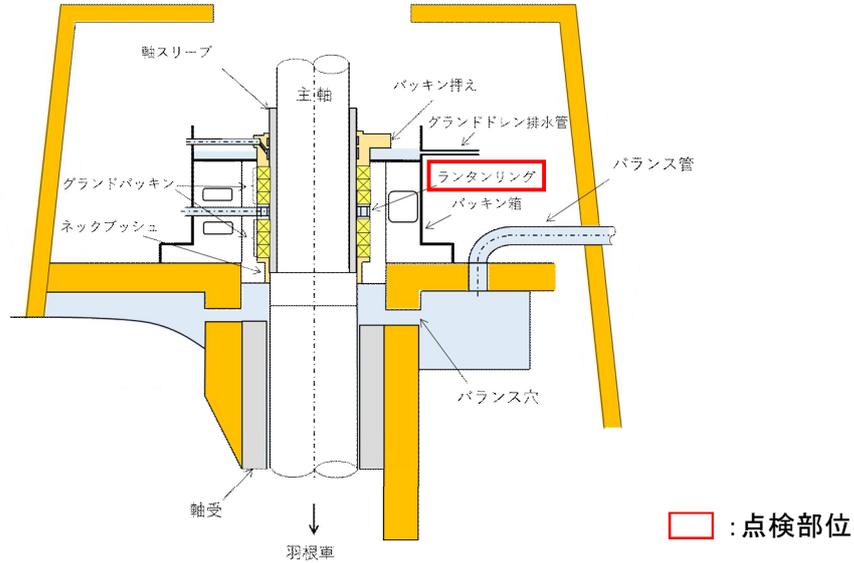
分解後のA－FWBPグランド部の点検結果（4／12）

ランタンリング外観点検

確認方法

ランタンリングの通水穴にシール水の流れを阻害するような閉塞がないことを確認する。

【構造図】



確認結果 良

確認日 2024.1.25

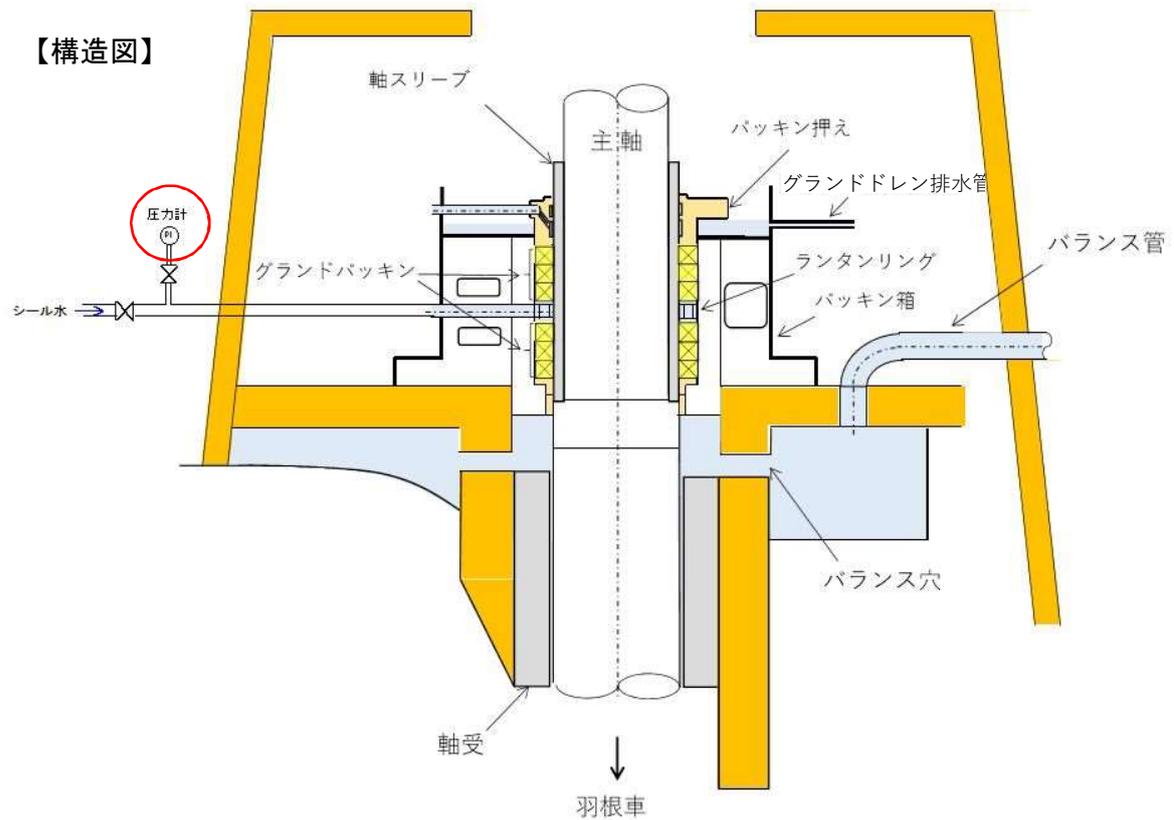
ランタンリングを目視にて確認したところ、シール水の流れを阻害するような閉塞がないことを確認したことからドレン量増加の要因とは考えにくい。

分解後のA-FWBPグランド部の点検結果 (5/12)

シール水入口圧力のパラメータ確認

確認方法

ポンプ運転時のパラメータ(シール水入口圧力)を確認する。



確認結果 良

確認日 2024.1.24

ポンプ運転時のシール水入口圧力は、標準値(1.06~1.27MPa)内であることを運転員への聞き取りにより確認したことからドレン量増加の要因とは考えにくい。

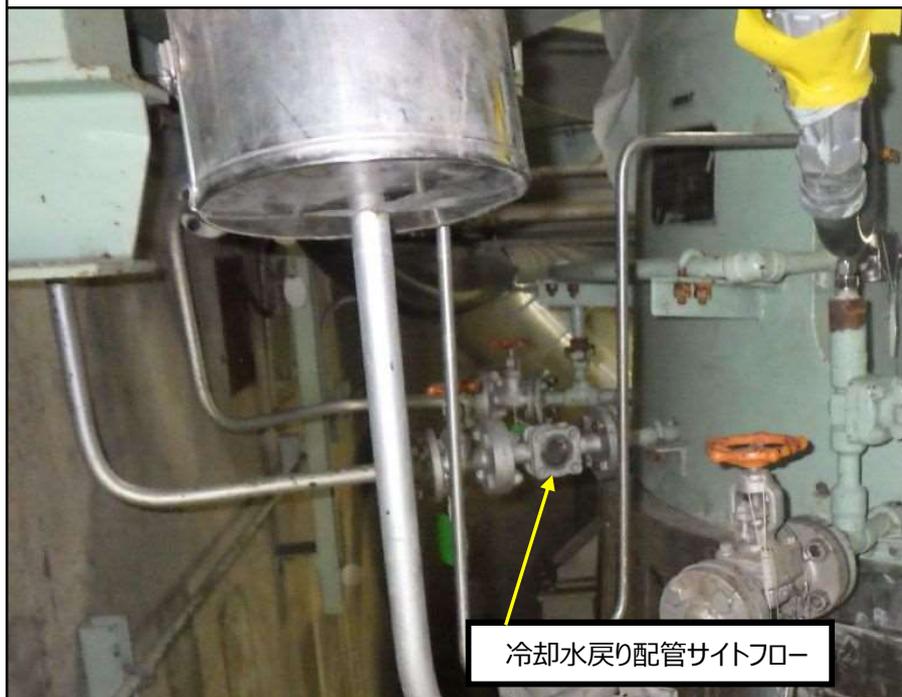
## 分解後のA－FWBPグランド部の点検結果（６／１２）

### パッキン箱冷却水流量確認

#### 確認方法

冷却水戻り配管のサイトフローに冷却水が通常どおり流れていることを目視により確認する。

#### 現場写真



確認結果 良

確認日 2024.1.22

冷却水戻り配管のサイトフローを確認し、冷却水が通常通り流れていることを目視により確認したことからドレン量過大の要因とは考えにくい。

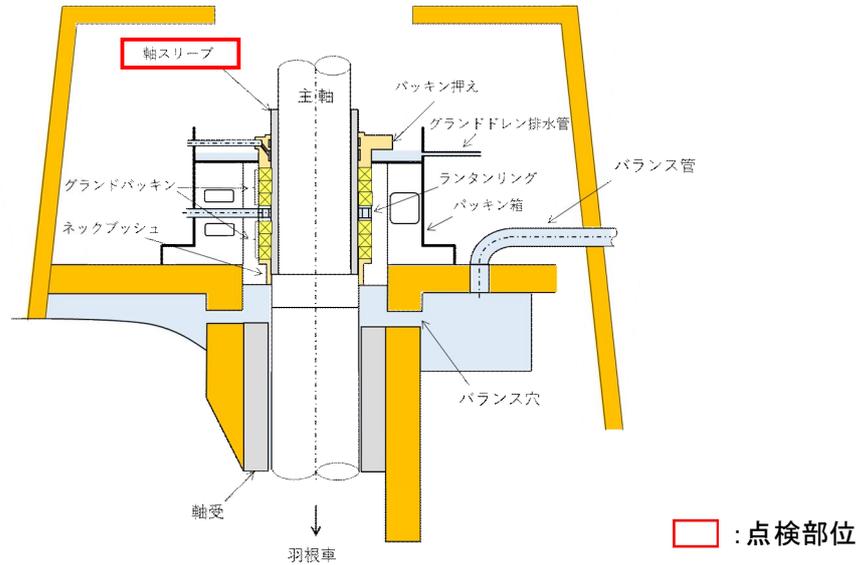
分解後のA-FWBPグランド部の点検結果 (7/12)

軸スリーブ摺動面の目視点検

確認方法

軸スリーブ摺動面に有意な傷および摩耗がないことを目視により確認する。

【構造図】



確認結果 良

確認日 2024.1.25

軸スリーブ摺動面に有意な傷および摩耗がないことを目視により確認したことからドレン量増加の要因とは考えにくい。

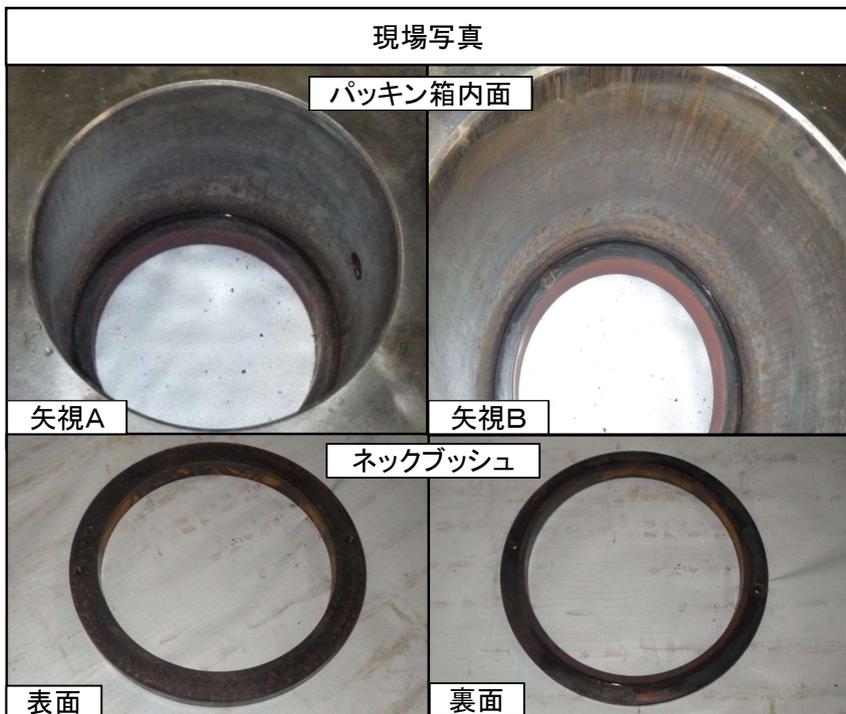
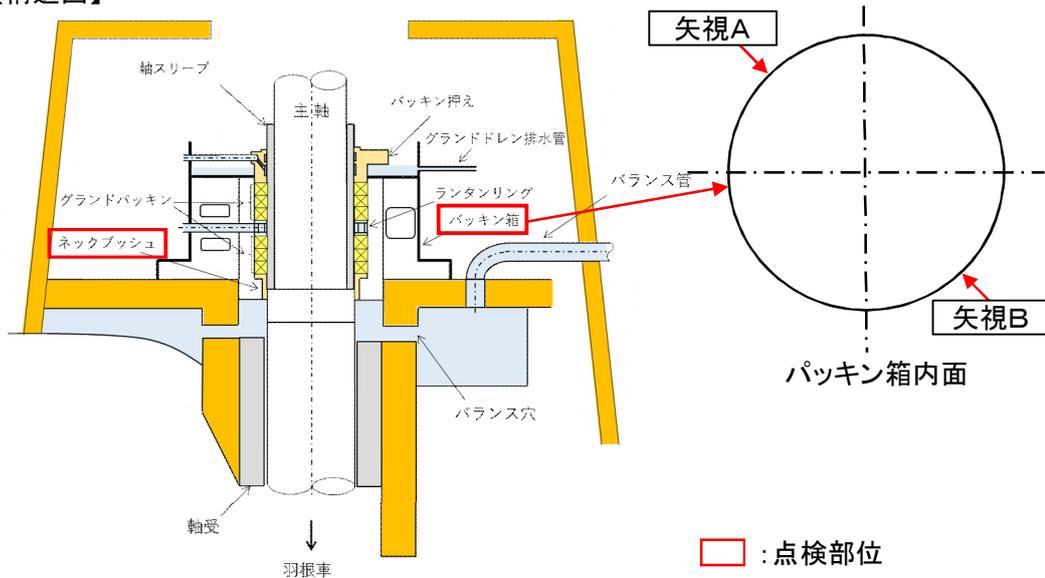
分解後のA-FWPグランド部の点検結果 (8/12)

グランド部まわり(パッキン箱内面、ネックブッシュ)の外観点検

確認方法

グランド部まわり(パッキン箱内面、ネックブッシュ)に異物混入および傷がないことを目視により確認する。

【構造図】



確認結果 良

確認日 2024.1.25

グランド部まわり(パッキン箱内面、ネックブッシュ)に異物混入および傷がないことを目視により確認したことからドレン量増加の要因とは考えにくい。

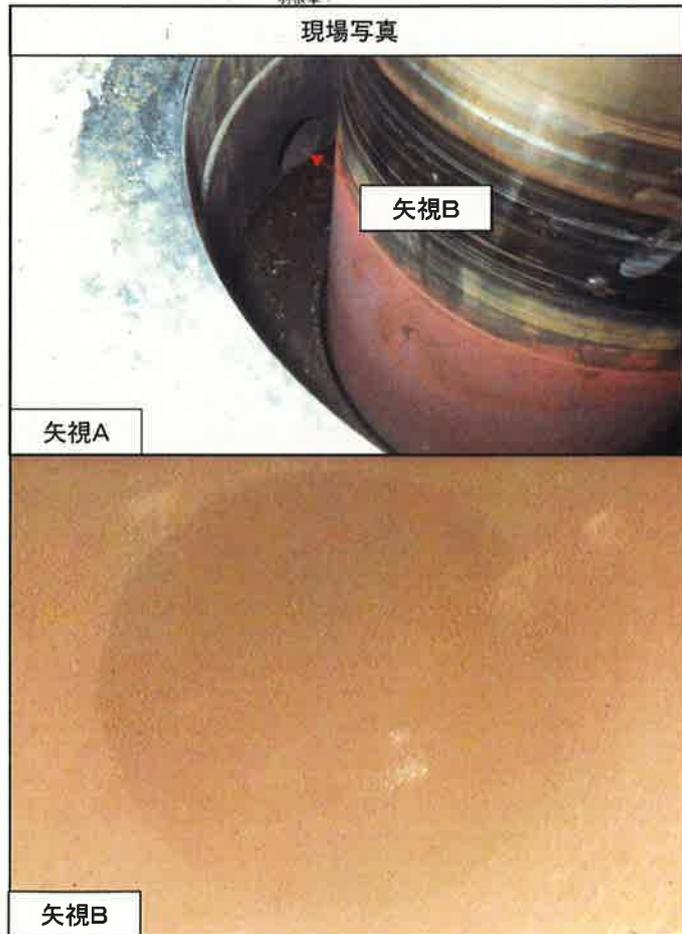
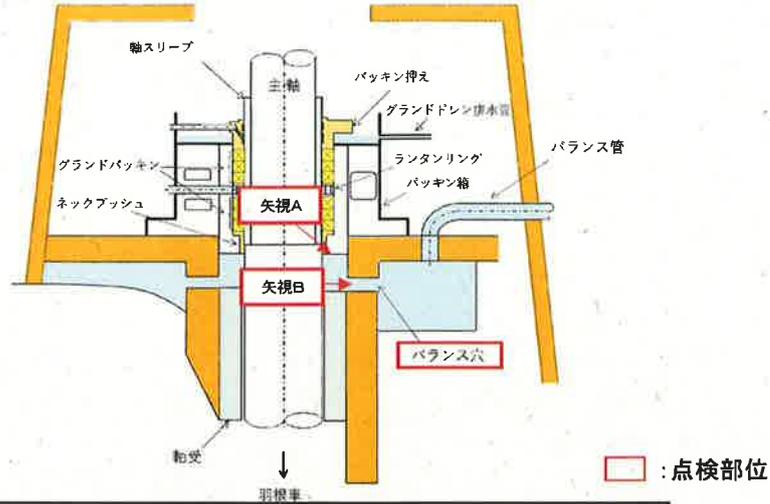
### 分解後のA-FWBPグランド部の点検結果 (9/12)

#### 上部ケーシングバランス穴( )目視確認

##### 確認方法

上部ケーシングバランス穴( )に流れを阻害するような閉塞がないことを目視およびファイバースコープにより確認する。

##### 【構造図】



確認結果 良

確認日 2024.1.25

上部ケーシングバランス穴に流れを阻害するような閉塞がないことを目視およびファイバースコープにより確認したことからドレン量増加の要因とは考えにくい。

：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

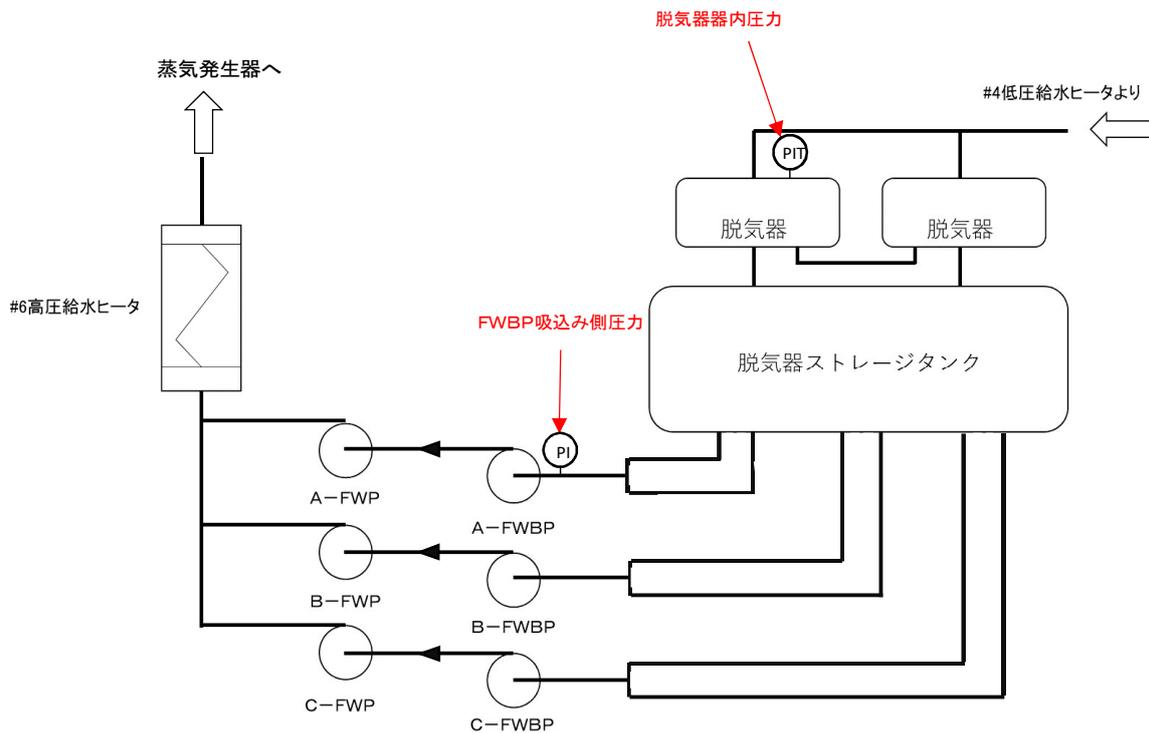
## 分解後のA-FWBPグラウンド部の点検結果 (10/12)

### FWBP吸込み側圧力のパラメータ確認

#### 確認方法

ポンプ運転時の脱気器器内パラメータ(FWBP吸込み側圧力同等の圧力である脱気器器内圧力)を確認する。

#### 【概略系統図】



#### 確認結果 良

確認日 2024.1.24

ポンプ運転時の脱気器器内圧力は0.87MPaであり標準値0.80~0.90MPa(FWBP吸込み側圧力と同等の圧力である脱気器器内圧力)内に収まっていることから、吸込み圧力が適正であることを確認したことからドレン量増加の要因とは考えにくい。

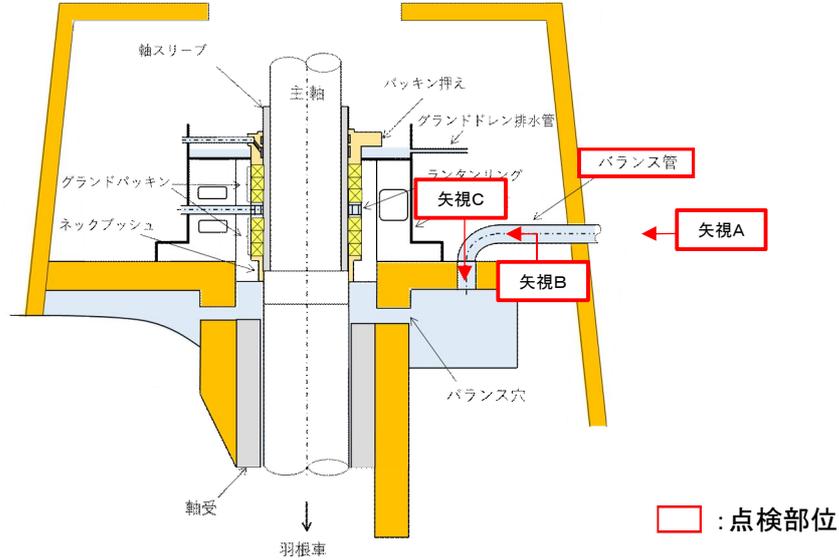
分解後のA-FWBPグランド部の点検結果 (11/12)

バランス管(80A)内部確認

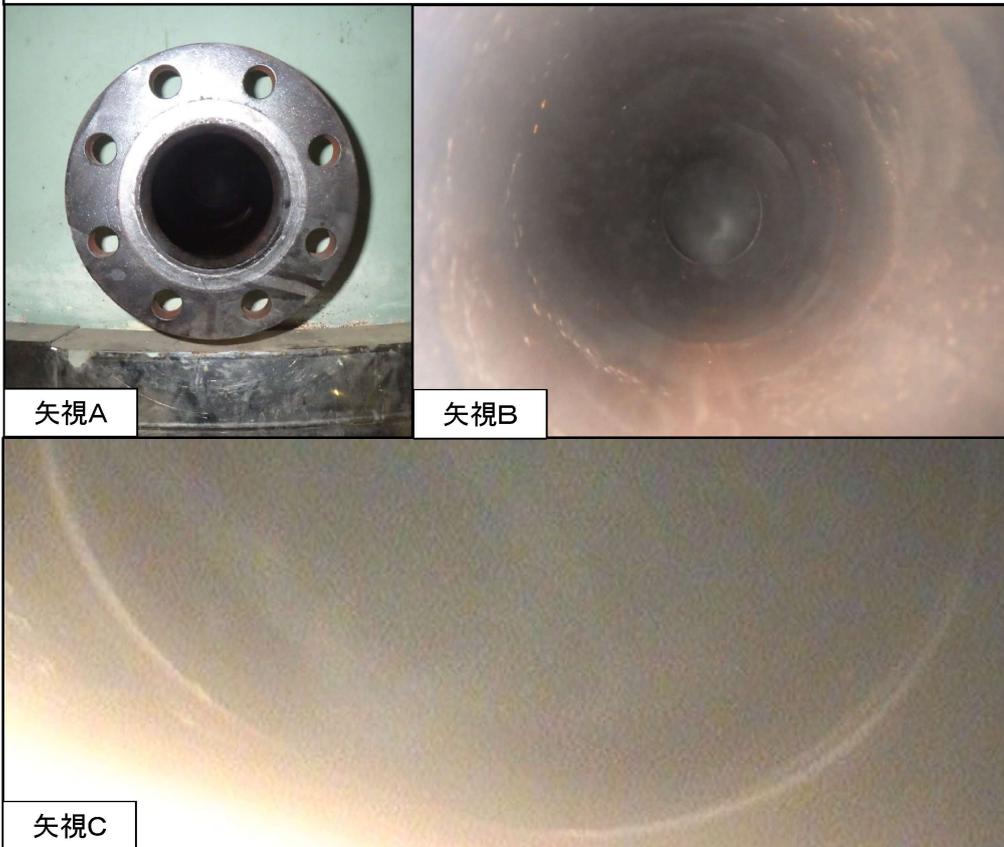
確認方法

バランス管の内部に流れを阻害するような閉塞がないことを目視およびファイバースコープにより確認する。

【構造図】



現場写真



確認結果 良

確認日 2024.1.25

バランス管内の内部に流れを阻害するような閉塞がないことを目視およびファイバースコープにより確認したことからドレン量増加の要因とは考えにくい。

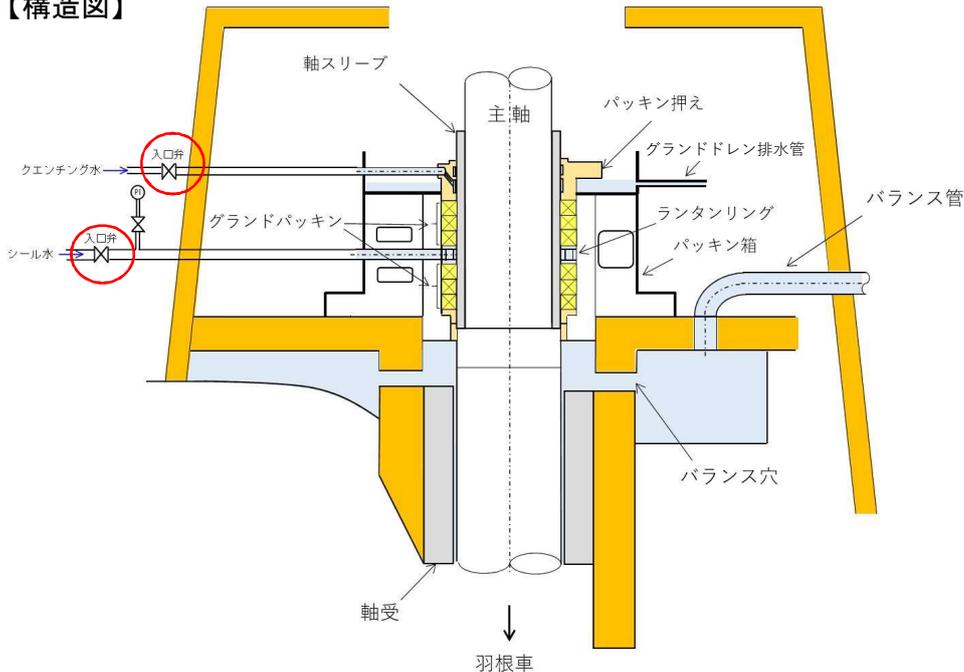
## 分解後のA-FWBPグランド部の点検結果 (12/12)

## シール水、クエンチング水の状態変化の確認

## 確認方法

- ・シール水圧力については、通常の圧力範囲内(1.06~1.27MPa)であることを確認する。
- ・クエンチング水については、流量調整弁の操作を実施していないことを確認する。

## 【構造図】



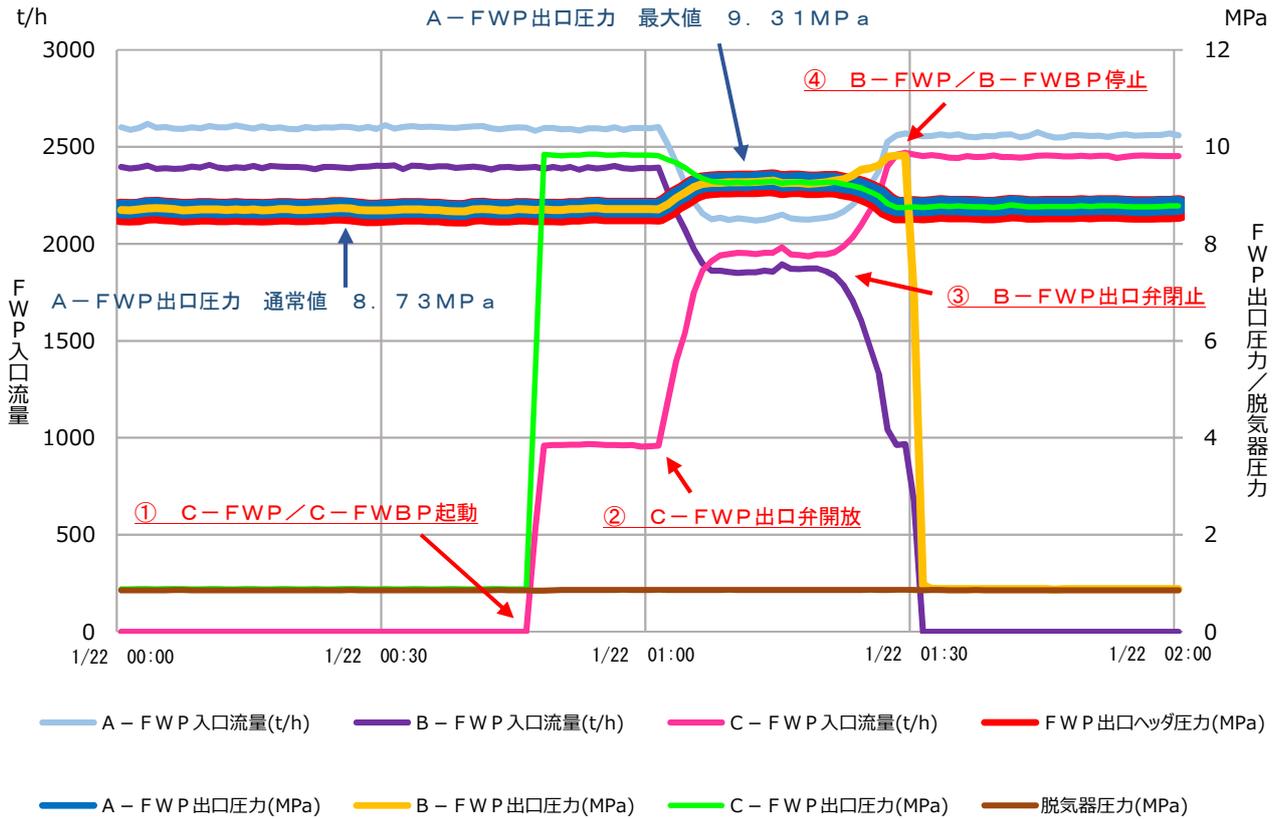
## 確認結果 良

確認日 2024.1.23

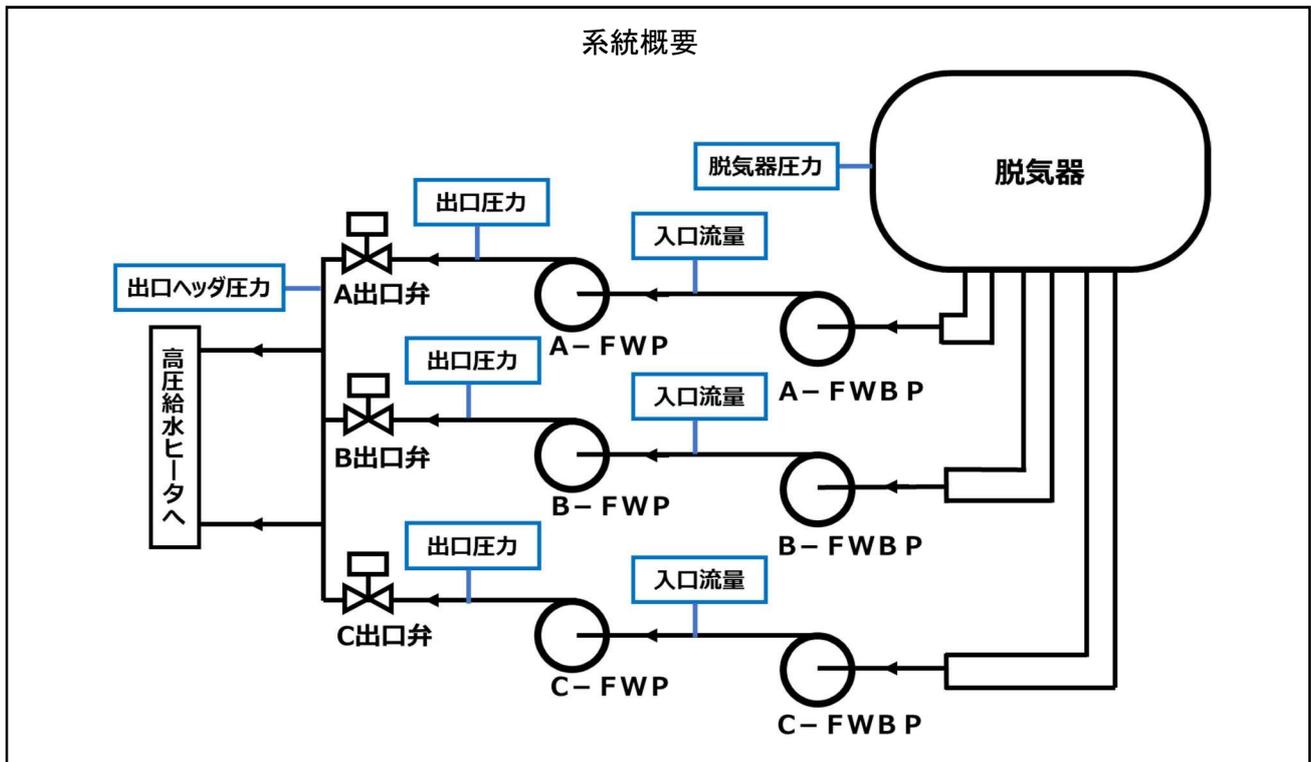
シール水圧力は、通常の2台運転の状態では1.10MPaにて供給しており、FWBP切替の3台運転時に1.27MPaに調整したが、いずれも通常の圧力範囲内(1.06~1.27MPa)であったことを確認した。

また、クエンチング水においても、流量調整弁の操作を実施していないことを確認したことからドレン量増加の要因とは考えにくい。

FWP、FWBP切替時のパラメータ

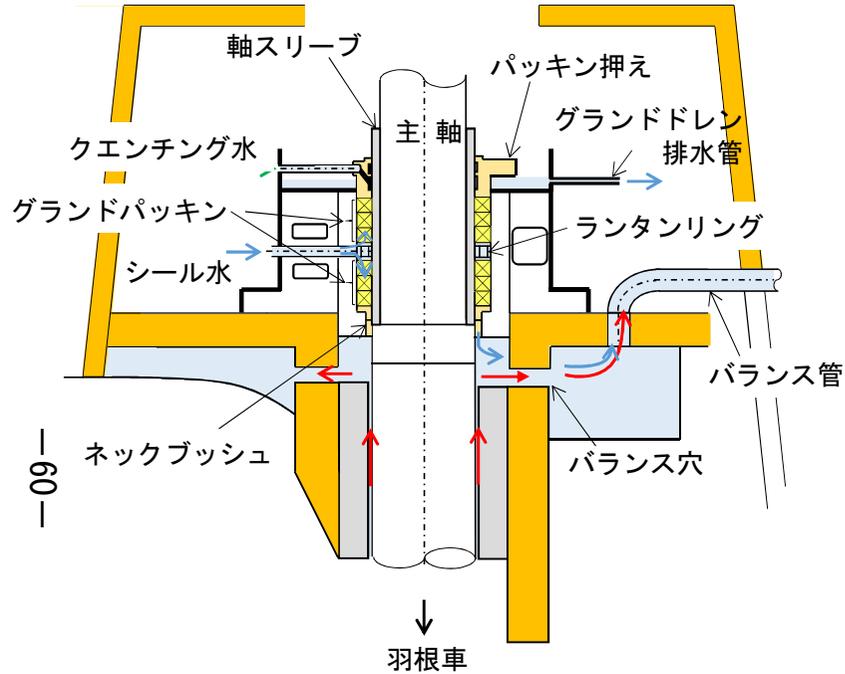


※凡例のアルファベットは系統概要のアルファベットに対応

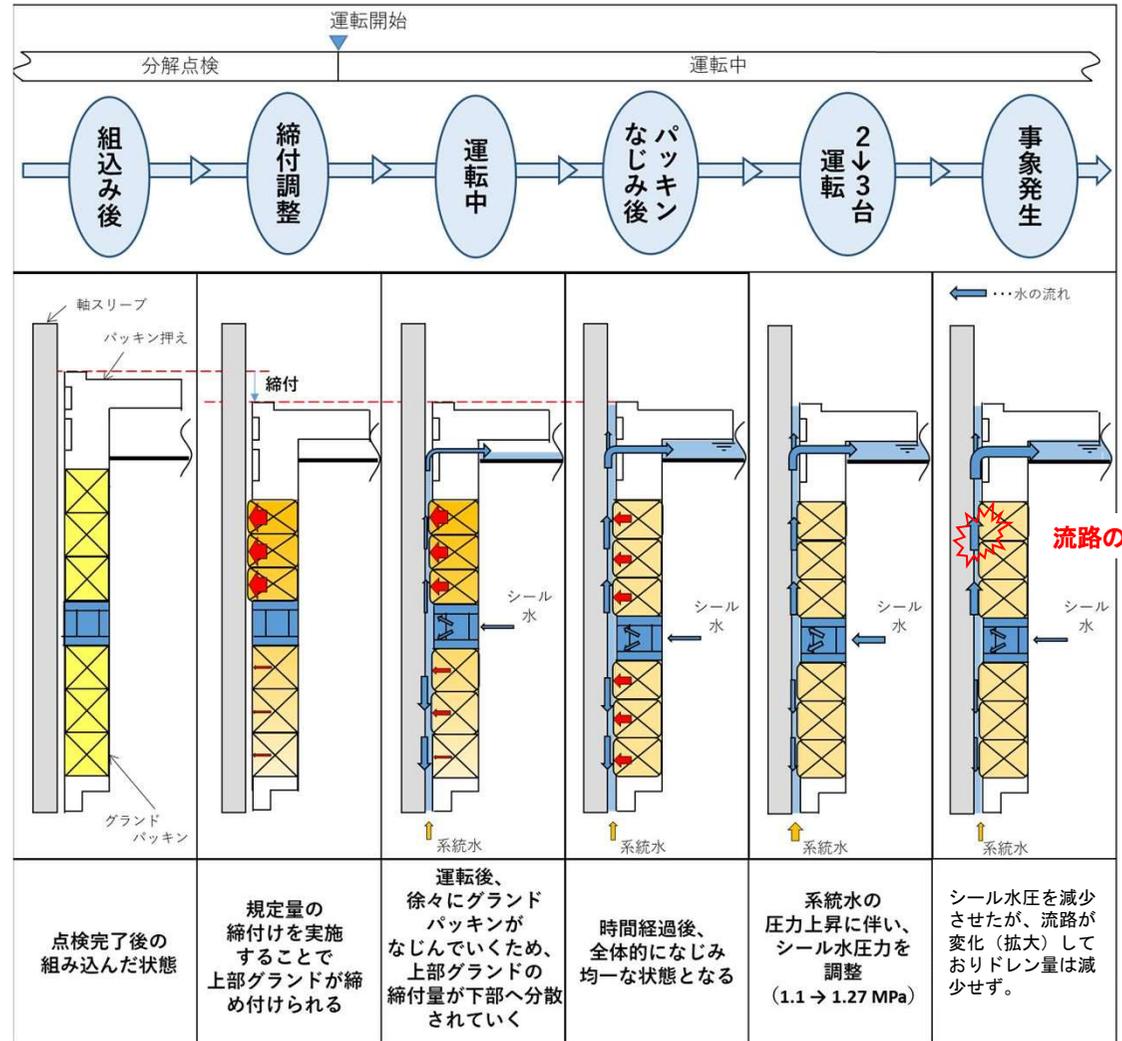


# グランド部のドレン量増加メカニズム (1/2)

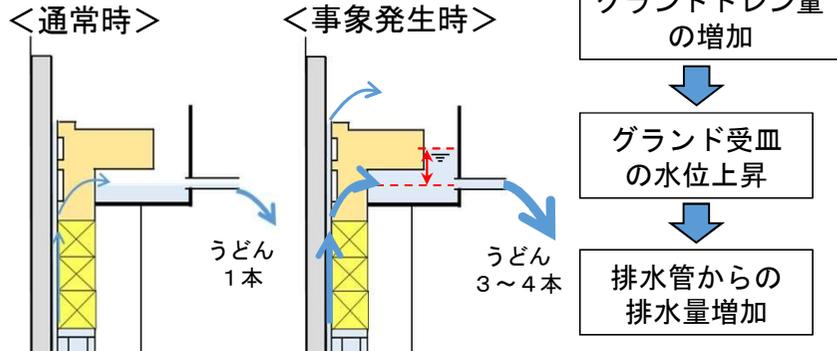
【グランド部 構造図】



【増加メカニズム】

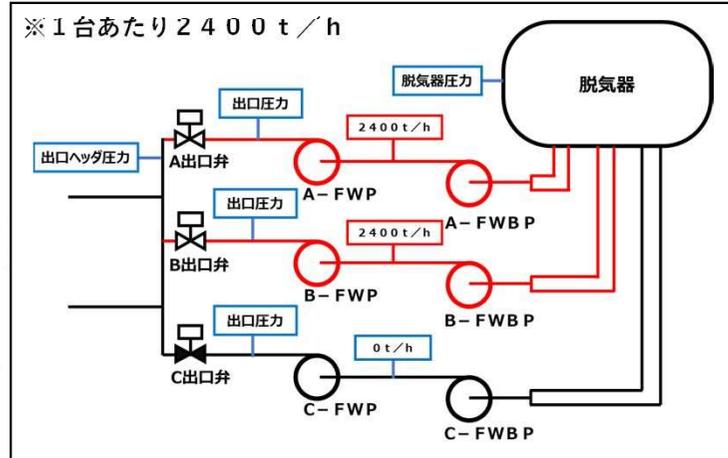


【排水量の増加要因】

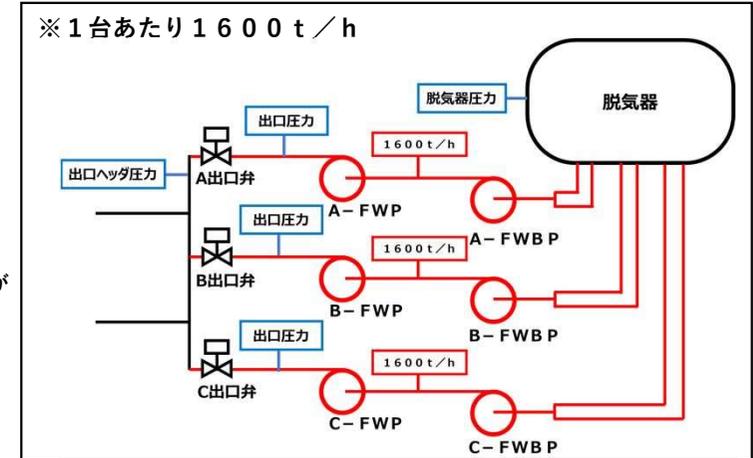


# グランド部のドレン量増加メカニズム (2/2) (系統水の圧力上昇メカニズム)

## ① 2台運転 (4800 t/hを2台で給水)



## ② 3台運転 (4800 t/hを3台で給水)



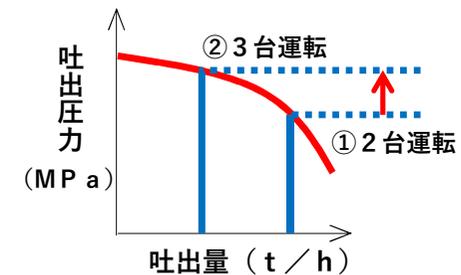
FWBP 1台  
当たりの流量が  
2/3になる

### ○吸込側圧力の変化

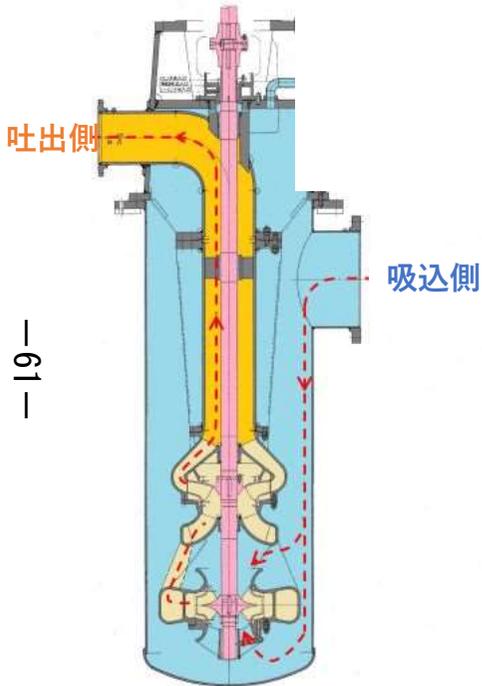
1台当たりのポンプ流量減少に伴い  
脱気器～FWBP間の配管圧損が減少し、  
FWBP吸込圧力は約0.02 MPa上昇する。

### ○吐出側圧力の変化

2台運転から3台運転となることで、吐出量が減少し、  
吐出圧力が約0.05 MPa上昇する。

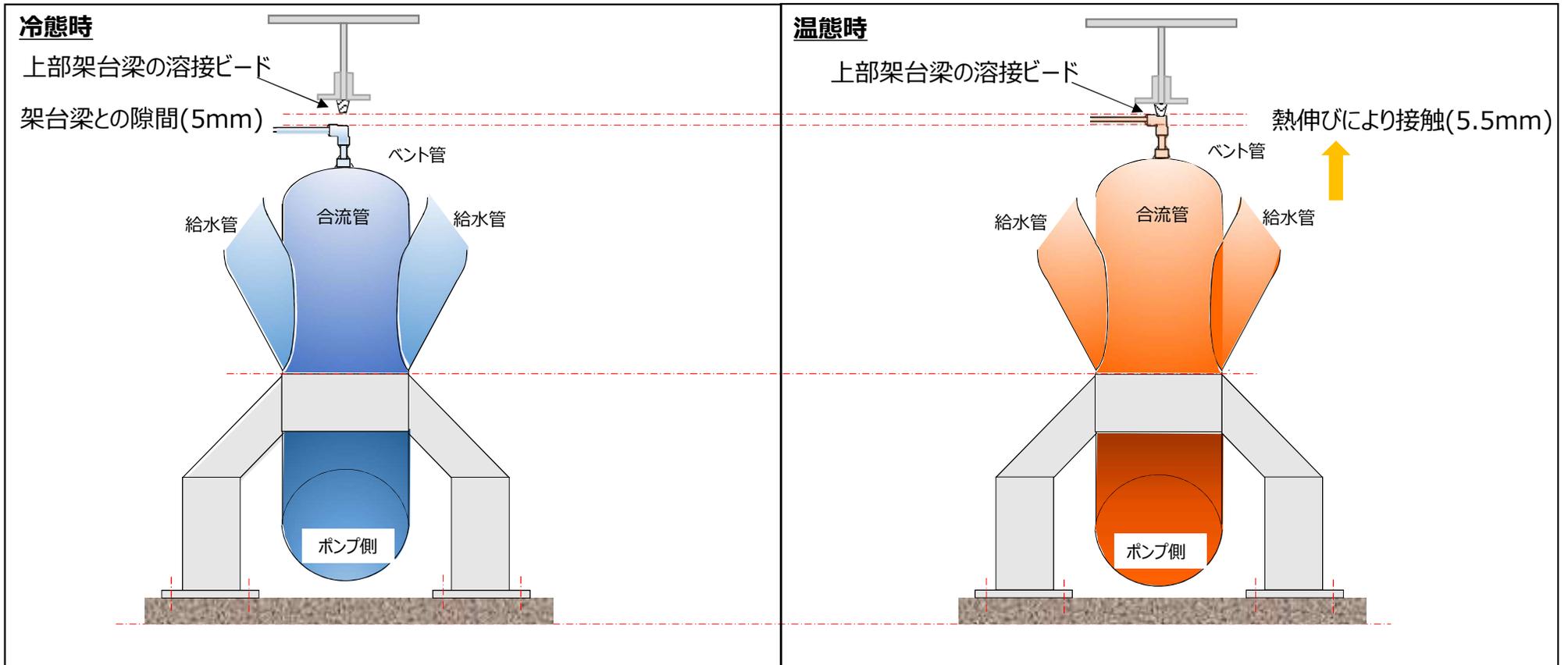


FWBPの切替に伴い2台運転から3台運転となった際、ポンプ吸込圧力と吐出圧力は上昇する。

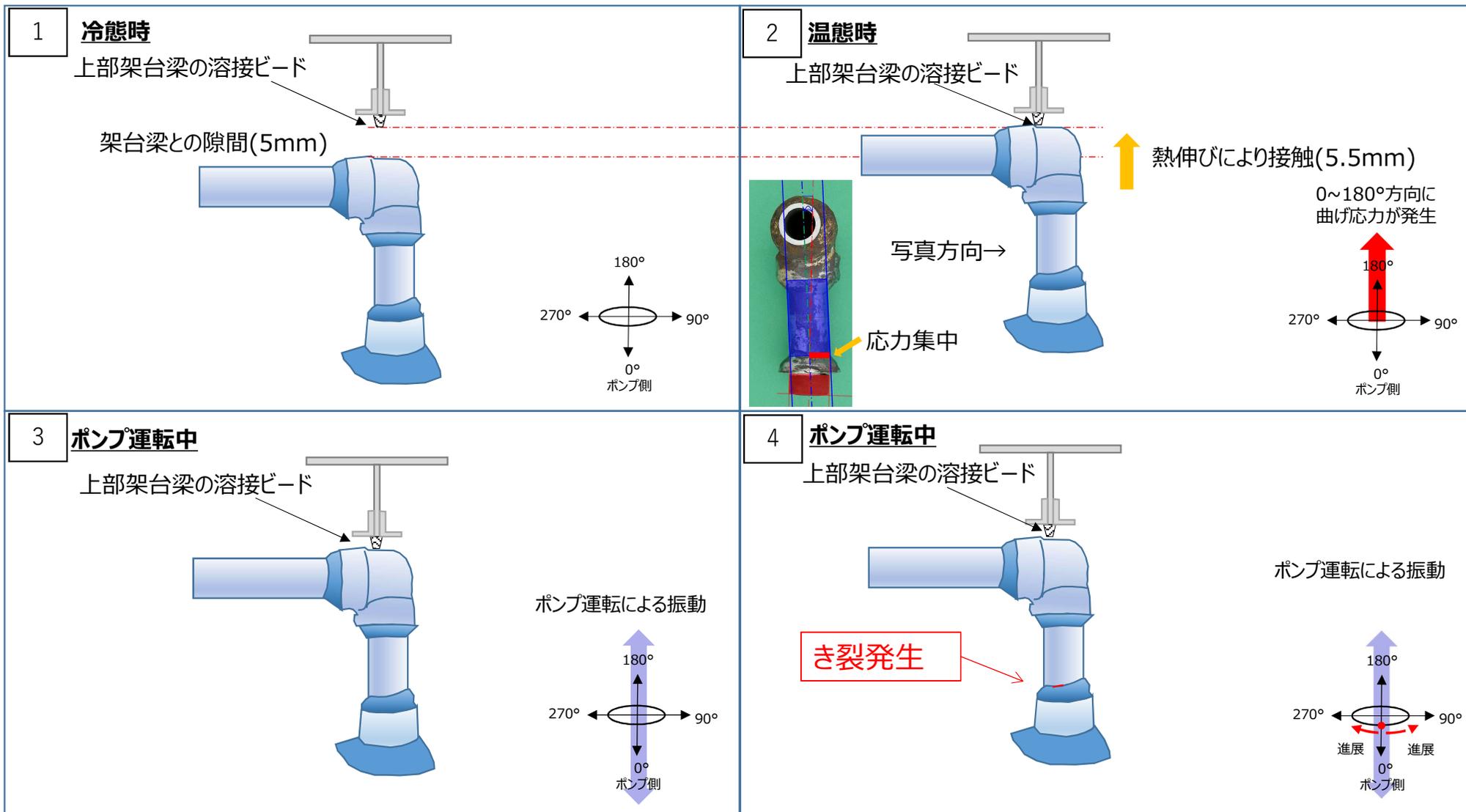


【FWBP概要図】

## 発生メカニズム(1/2)



## 発生メカニズム(2/2)



## 1. 熱伸びによる入口配管ベント管と架台梁の接触

ベント管の上部には架台梁が設置されており、ベント管頂部から約5mm程度のすき間が確認されている。図1に現地状況を示す。

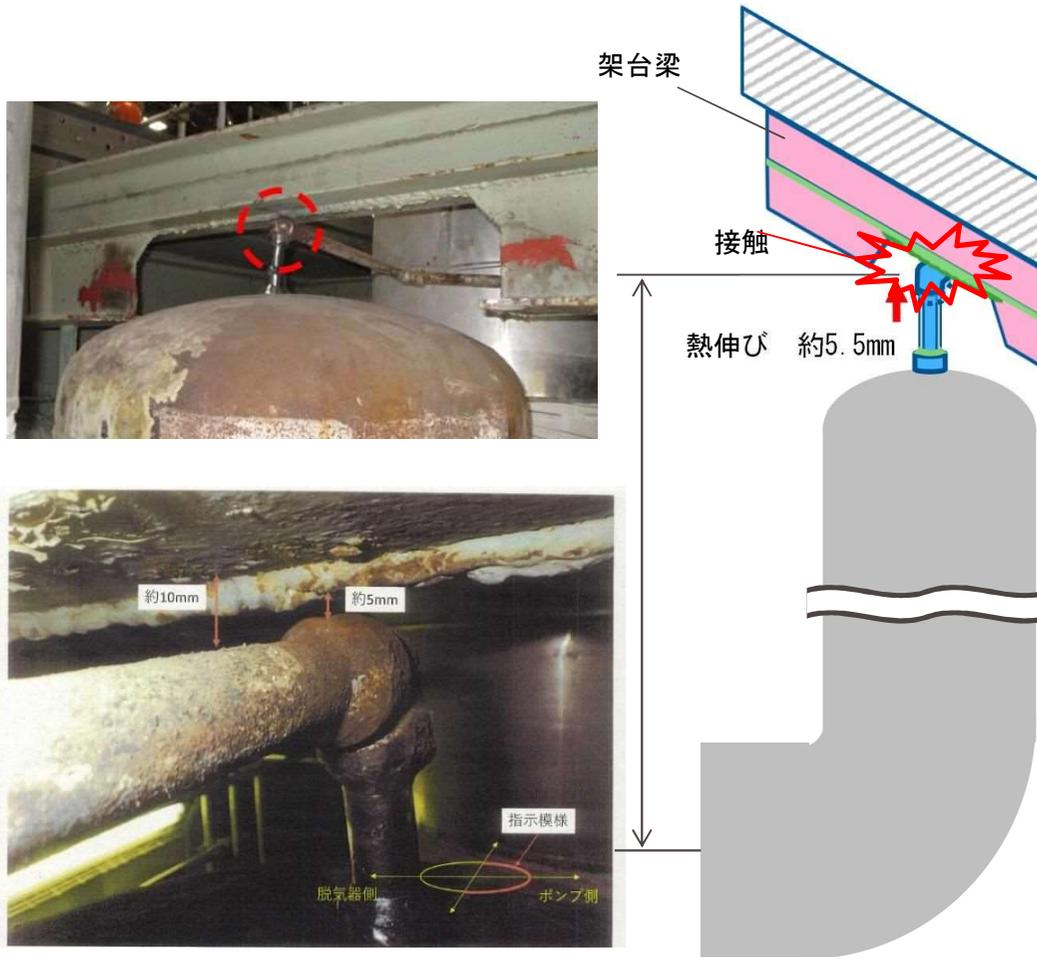


図1 現地状況

熱伸びにより接触

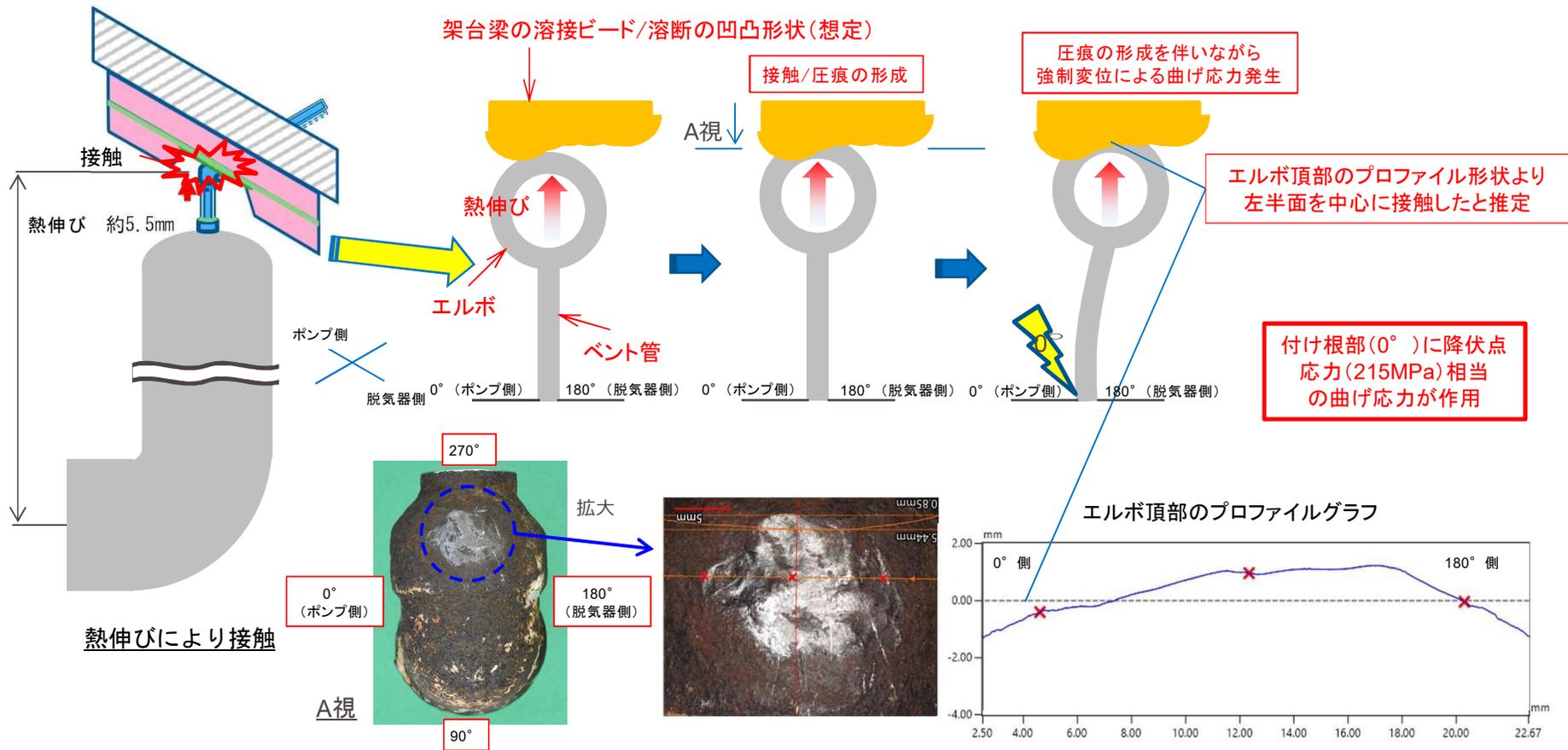
配管熱応力解析を実施し、ベント管頂部の熱伸び量を算出すると、鉛直上向き方向に約5.5mmの熱伸びが想定されており、運転時（昇温時）にはベント管頂部（エルボの頂部）と架台梁は接触していたと考えられる。

エルボの頂部には圧痕が確認される。（図2）



図2 ベント管のエルボ頂部の圧痕

## 2. ベント管付け根部に発生する応力の方向

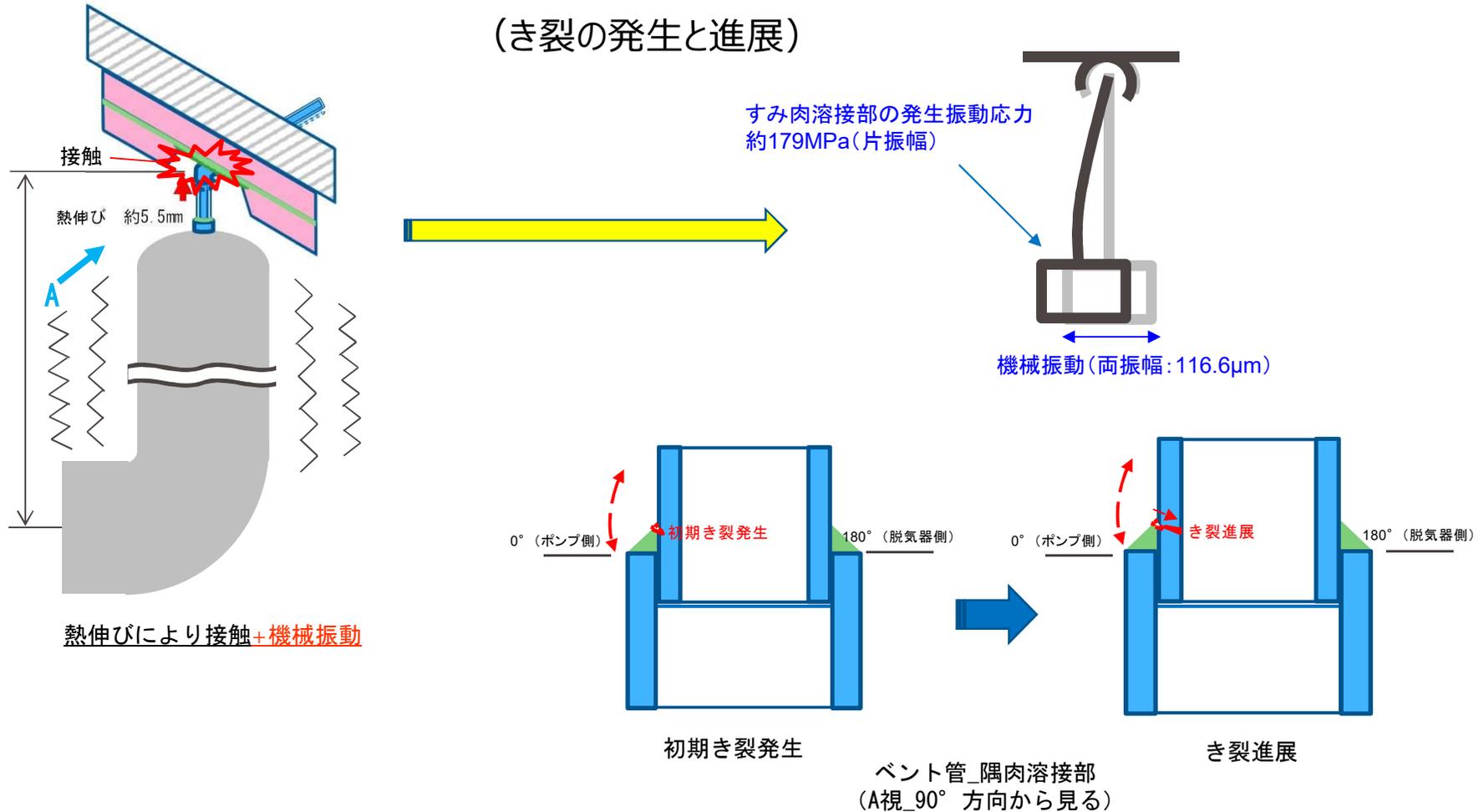


架台梁との接触により、曲げ応力が作用する

架台梁の下面は溶接ビードより凹凸形状となっている。配管の熱伸びによりベント管と架台梁が接触した際、凹凸形状に合わせて接触した際、圧痕の形成を伴いながら強制変位による曲げ応力発生したと考えられる。

エルボ頂部のプロファイル形状より左半面を中心に接触し、ベント管の付け根部(0°)には降伏点応力(215MPa)相当の曲げ応力が作用したと考えられる。

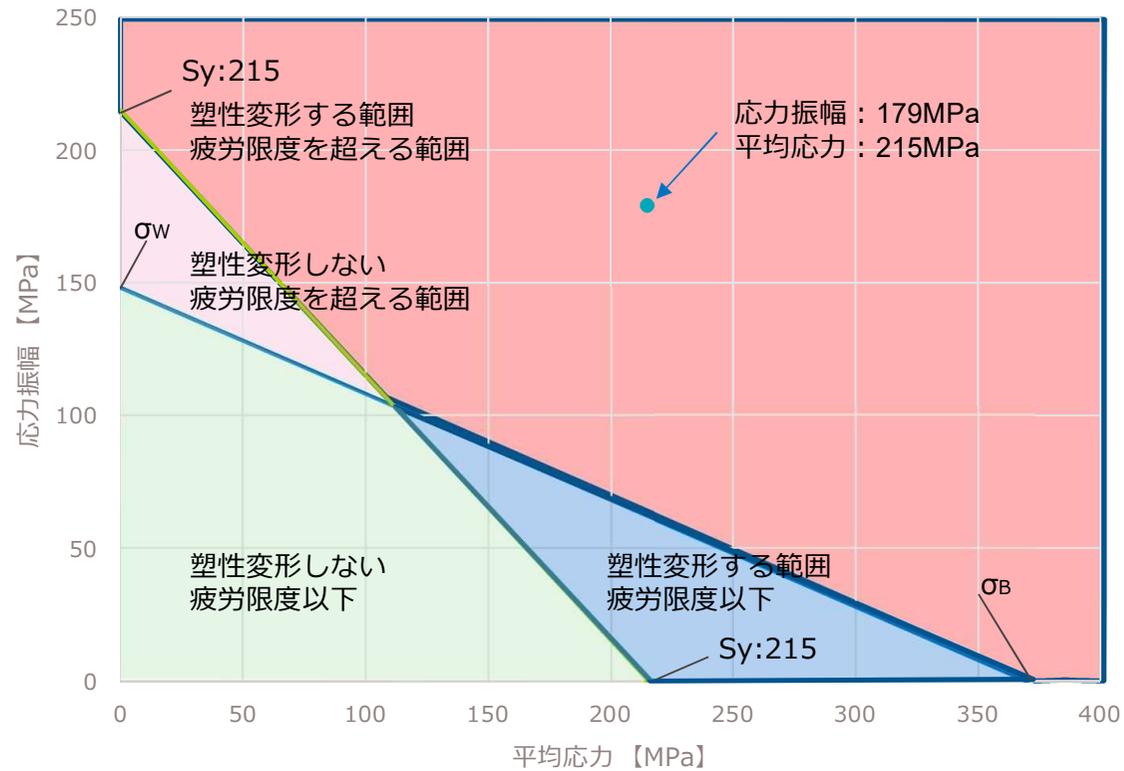
### 3. 機械振動による繰り返し応力



熱伸びによりベント管付け根部に降伏点応力(215MPa)相当の曲げ応力が作用していた。さらにベント管頂部が拘束された状態で、FWBPの機械振動(両振幅: 116.6 $\mu$ m)が加わったことにより、疲労限度を超え、損傷に至った可能性が考えられる。

## 4. 機械振動による繰り返し応力

修正グッドマン線図より、降伏点応力相当の平均応力が作用した状態で機械振動による応力振幅（179MPa）を受けた場合、疲労限度を超える範囲に位置することから損傷に至ったものと考えられる。



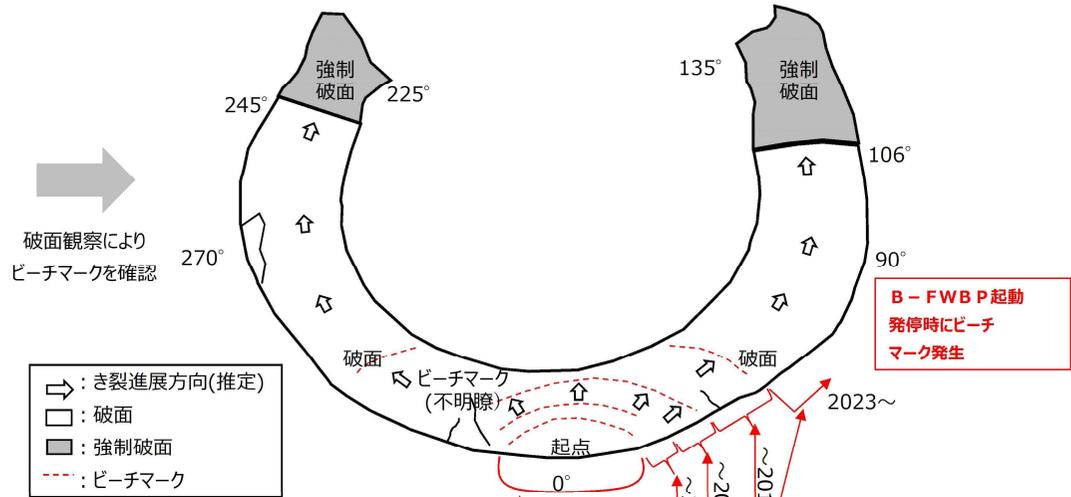
修正グッドマン線図 (STPT370)

5. ポンプの起動・停止とビーチマークの相関

高浜1号機 B-FWB Pの起動・停止履歴とビーチマークの相関について



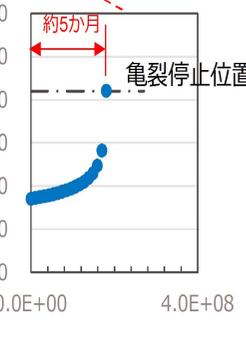
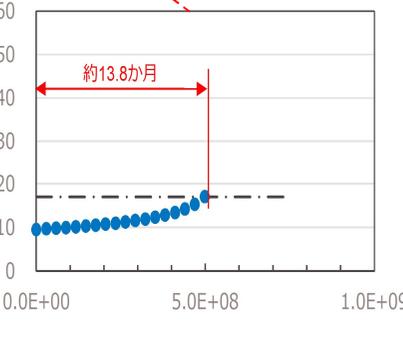
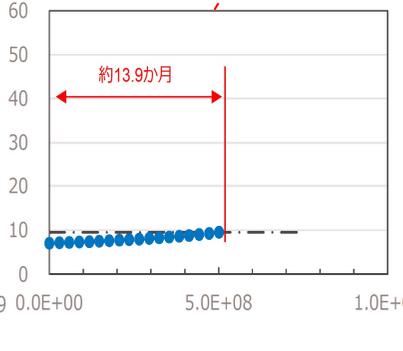
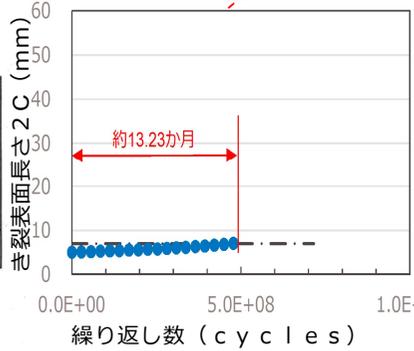
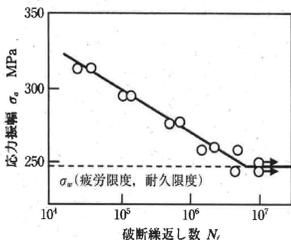
き裂 破面観察 (管台側)



	2002年度(H14)	2003年度(H15)	2004年度(H16)	2005年度(H17)	2006年度(H18)	2007年度(H19)	2008年度(H20)	2009年度(H21)	2010年度(H22)	2011年度(H23)	2023年度(R3)	2024年度(R6)	累積運転期間 (ヵ月)
高浜1号機 (1974.11.14)	[第21回] 11/20 2/15	[第22回] 4/11 6/17	[第23回] 8/14 9/29	[第24回] 11/22 2/26	[第25回] 3/19 7/10	[第26回] 9/14 11/18	[第27回] 1/10	[第28回]	[第29回]	[第30回]	8/2		64.27
B-FWB P	運転期間	運転期間	運転期間	運転期間	運転期間	運転期間	運転期間	運転期間	運転期間	運転期間	運転期間	運転期間	64.27
運転期間(ヵ月)													64.27
													定検期間

き裂発生に至るまでの繰り返し数は約  $1 \times 10^7$  であり、ポンプのN成分 (14.75Hz) に起因して振動することから、これは約8日間に相当する

- ・き裂の発生  
・き裂の進展 (1回目)  
= 1本目のビーチマーク
- ・き裂の進展 (2回目)  
= 2本目のビーチマーク
- ・き裂の進展 (3回目)  
= 3本目のビーチマーク
- ・き裂の進展 (4回目)  
= 4本目のビーチマーク
- ・き裂の進展 (5回目)  
= 破面終点

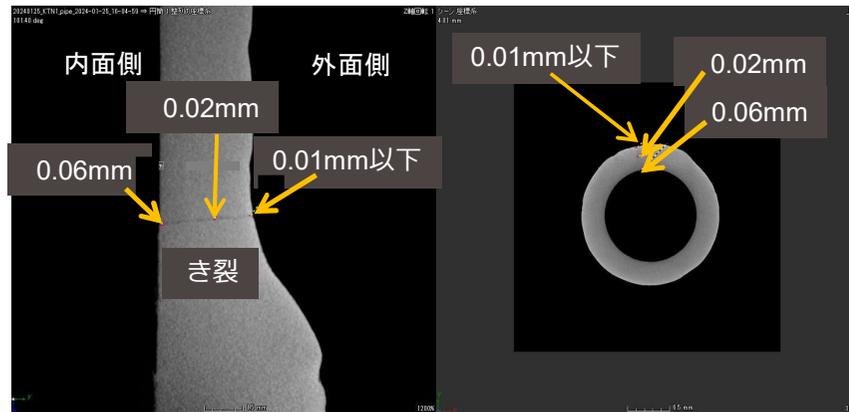


## 6. 第27サイクルでの貫通

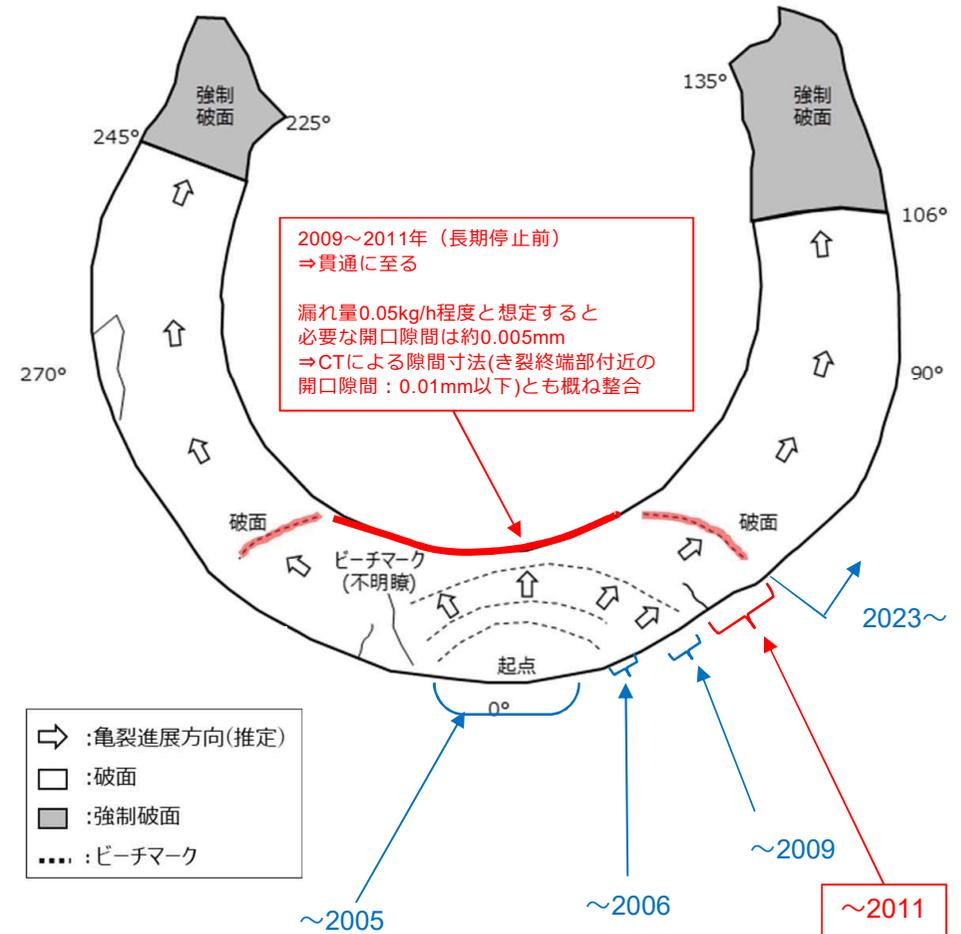
き裂が貫通に至った時期は、2009~2011年と推定した。



き裂 破面観察 (管台側)



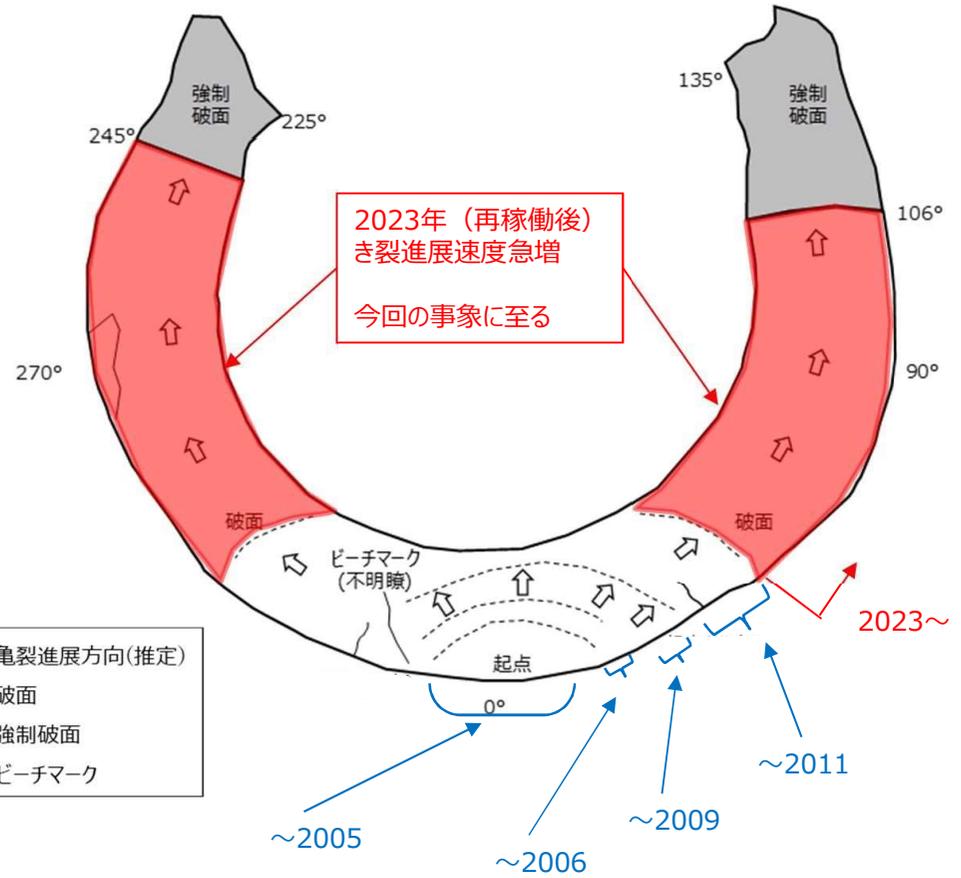
き裂終端付近 (100°近傍) のCT画像



7. 第28サイクルでのき裂進展



き裂 破面観察 (管台側)



き裂の拡大により、応力拡大係数は増加しそれに伴い、進展速度は指数的に増加する。

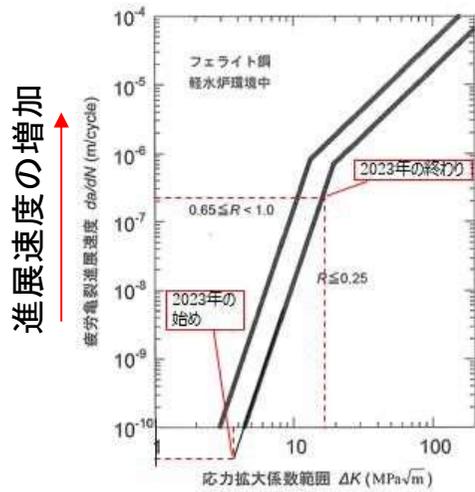
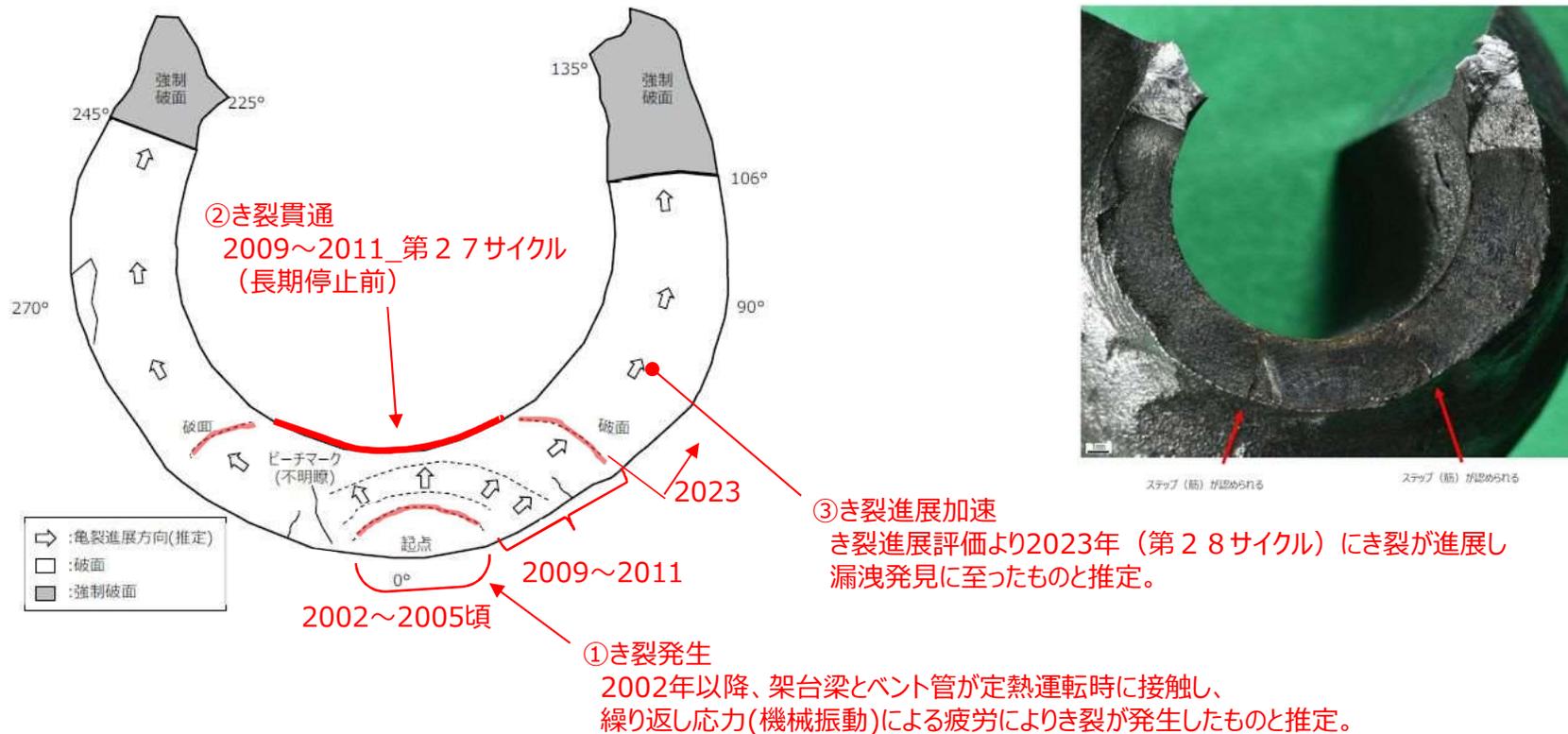


図 添付E-2-FV-2 フェライト鋼の軽水炉環境中 (0.0R, 0.0R) の疲労亀裂進展速度線図 き裂の拡大

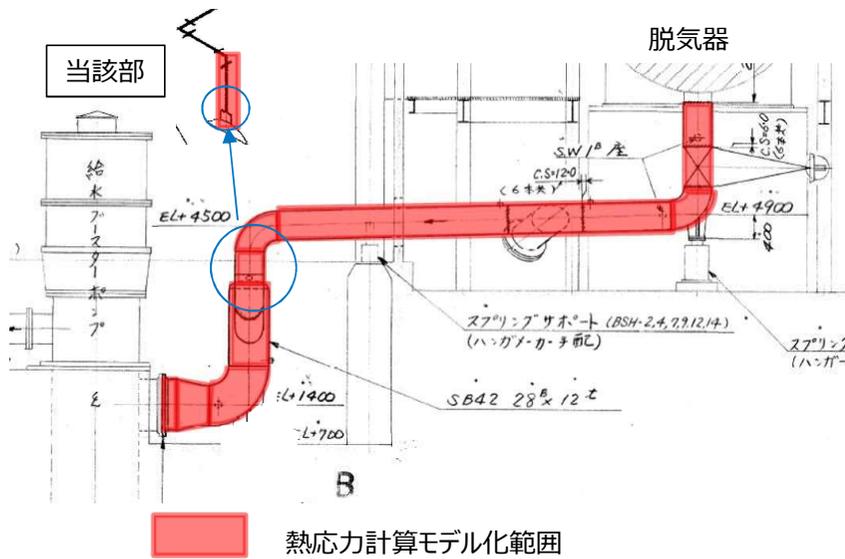
## 8.まとめ



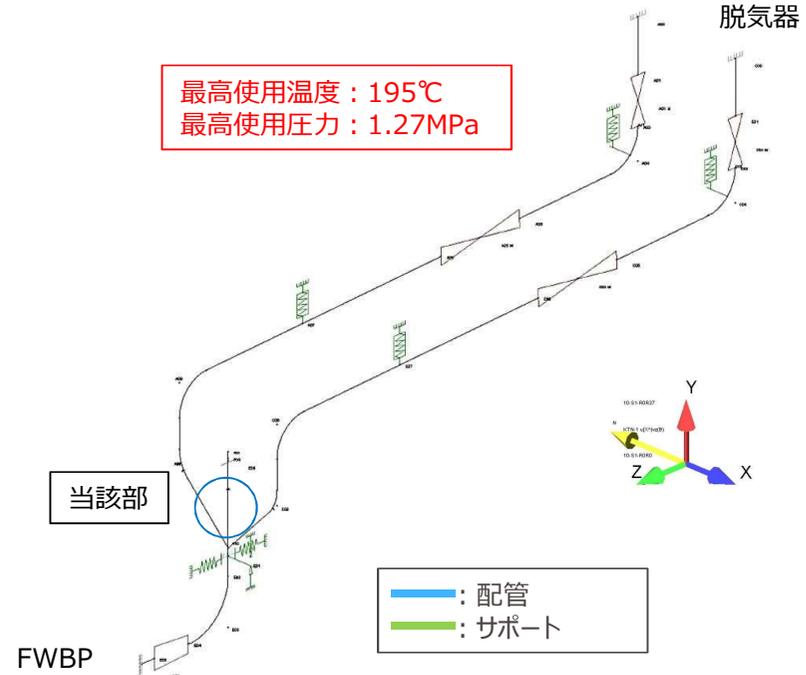
- ① き裂発生  
2002年以降、架台梁とベント管の接触による曲げ応力と機械振動により、き裂が発生したものと推定した。
- ② き裂貫通  
2009年~2011年、第27サイクル長期停止前にき裂が内面に到達し貫通に至ったものと推測される。
- ③ き裂進展加速  
2023年(第28サイクル)き裂が進展し漏洩が確認された。

## 熱伸び評価

ベント管はヘッダーから第一エルボまでモデル化



最高使用温度：195℃  
最高使用圧力：1.27MPa



● 当該部の範囲をモデル化し、熱応力計算を実施。

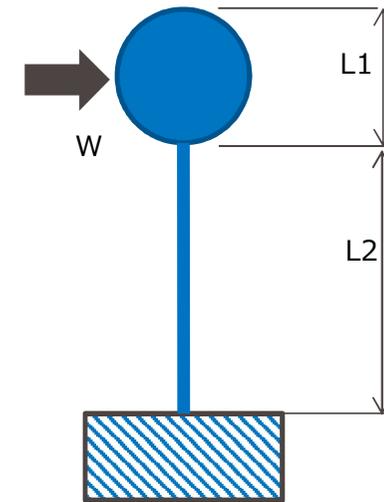
常温 (21.1℃) → 最高使用温度(195℃)		
CASE	ベント管頂部すき間	ベント管頂部変位量
ベント管拘束されない場合	拘束なし	5.471mm

拘束されず熱伸びする場合、5.471mm ⇒ 5.5mm 熱伸びる。

隅肉溶接部の発生振動応力評価 (1/2)

項目	記号	数値	単位
配管仕様	-	15A×Sch80	
外径	OD	21.7	mm
板厚	t	3.7	mm
断面積	A	209.230	mm <sup>2</sup>
断面2次モーメント	I	8831.862	mm <sup>4</sup>
断面係数	Z	813.996	mm <sup>3</sup>
縦弾性係数 (炭素鋼)	E	191400	MPa
エルボ (剛体)	L1	50.4	mm
エルボ～評価部位	L2	32	mm

\* 1



ベント管の発生振動応力算出モデル

$$v_{\max} = WL_2^3 * (1 + 3L_1 / (2L_2)) / (3EI) = ML_2^2 a / (3EI)$$

$$= \sigma Z L_2^2 a / (3EI)$$

$$M = WL_2$$

$$\sigma = M / Z$$

$$a = (1 + 3L_1 / (2L_2))$$

$$\sigma = v_{\max} * 3EI / (a Z L_2^2)$$

変位から応力/荷重計算

先端の変位	$\delta$	0.0583	mm
発生応力 (応力集中除く)	$\sigma$	105.5	MPa

\* 2

\* 1 (193000MPa@175℃、191000MPa@200℃)、JSMEより引用

\* 2 両振幅116.6μmより、片振幅として 116.6 / 2 = 58.3 μm ⇒ 0.0583mm

上記計算より、発生応力 (105.5 MPa) に、応力集中係数 (1.7) を掛け

$$105.5 \times 1.7 = 179.35 \Rightarrow 179 \text{ MPa}$$

## 隅肉溶接部の発生振動応力評価 (2/2)

縦弾性係数は、JSMEより引用

JSME S NC1-2005/2007

付録材料図表 Part 6 表1 材料の各温度における縦弾性係数 (MPa)

種類	温度 (°C)																
	20	50	75	100	125	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425
炭素量が0.3%以下の炭素鋼	203000	201000	200000	198000	196000	195000	193000	191000	190000	188000	187000	185000	182000	178000	176000	172000	167000

材料力学の式は、機械工学便覧より引用

表 3・1 各種断面形の断面二次モーメント  $I$ , 断面二次半径  $k$ , 断面係数  $Z$  および塑性断面係数  $Z_p$  (その 1)

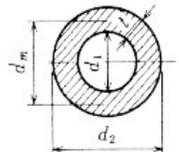
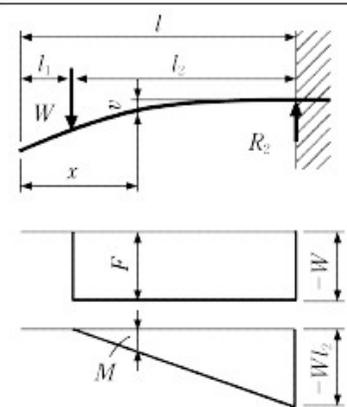
番号	断面形	$I$	$k^2$	$Z$	$Z_p$	$Z_p/Z$
7		$\frac{\pi}{64}(d_2^4 - d_1^4)$	$\frac{1}{16}(d_2^2 + d_1^2)$	$\frac{\pi}{32} \frac{d_2^4 - d_1^4}{d_2} \approx 0.8d_m^3 t$ ( $t/d_m$ が <sup>3</sup> 小さいとき)	$\frac{1}{6}(d_2^3 - d_1^3)$	1.25 ( $t/d_m$ が <sup>3</sup> 小さいとき)

表 3・2 はりの図表 (その 1)

番号	荷重, 弾性線, せん断力図 (shearing force diagram) および曲げモーメント図 (bending moment diagram)	反力 $R$ および せん断力 $F$	曲げモーメント $M$	たわみ $v$ および傾斜 $i$
2		$R_2 = W$ $F = -WU(x - l_1)$	$M = -W(x - l_1)$ $ M _{\max} = Wl_2 \quad \dots (x = l)$	$v = \frac{Wl_2^3}{3EI} \left\{ 1 - \frac{3(x - l_1)}{2l_2} + \frac{(x - l_1)^3}{2l_2^3} \right\}$ $v_{\max} = \frac{Wl_2^3}{3EI} \left( 1 + \frac{3l_1}{2l_2} \right) \quad \dots (x = 0)$ $ i _{\max} = \frac{Wl_2^2}{2EI} \quad \dots (0 \leq x \leq l_1)$

## 機械振動評価

管名称	弁番号	最高使用温度 (°C)	配管圧力		液体種類	備考
			(kg/cm <sup>2</sup> G)	(MPa G)		
LINE 20 : B給水ブースターポンプ入口ベント弁	FW-208B	195	13.0	1.28	水	FWBP吸込管

測定箇所	固有振動数 (Hz)	加速度(G)			変位/振幅(δ) μ-m		
		X	Y	Z	X	Y	Z
1		0.3	0.3	0.3	50	60	100
2		0.5	0.4	0.7	70	60	130
3		0.2	0.2	0.2	70	100	90
4		0.1	0.3	0.3	120	90	80
5		0.2	0.3	0.1	80	60	90
6		0.2	0.2	0.1	10	50	70
7		0.1	0.1	0.1	25	30	60

計測器No.	AS-05	固有振動数	計測日:
			計測者:
計測器No.	AS-05	加速度/振幅	計測日:
			計測者:

【仕様】

- 配管仕様(材質・口径・管厚) : 炭素鋼 15A
- 弁仕様(メーカー・材質・圧力・口径) : EXCO S28C 800-1/2
- 弁重量 : 1.9 kgf (19 N)
- 母管との継手種類 : ソケット溶接式管
- ポンプ回転数 : —

表 3.20 LINE 20 : B給水ブースターポンプ入口ベント弁

43

### 振動計測データ

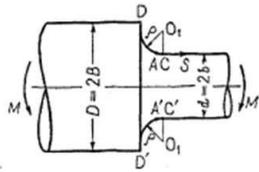
ベント管母管接続部①、変位/振幅 Y、Z 方向の値より

$$\sqrt{(100^2 + 60^2)} = 116.619$$

よって、機械振動 (両振幅) : 116.6μmを使用する。

## 発生振動応力評価に使用する応力集中係数の算出

差込配管のすみ肉溶接部形状に対し、曲げが作用する条件を求める  
 応力集中の評価式は、近似の形状にて応力集中係数を想定した。



各寸法は以下の通り

- 曲率半径ρ: 2.19~3.49mm \*1
- D: 34mm ソケット外径
- d: 21.7mm 配管外径

$$D/d=34.0/21.7=1.57$$

<曲率半径2.19mmの場合>  
 $2\rho/d=(2*2.19)/21.7=0.20$

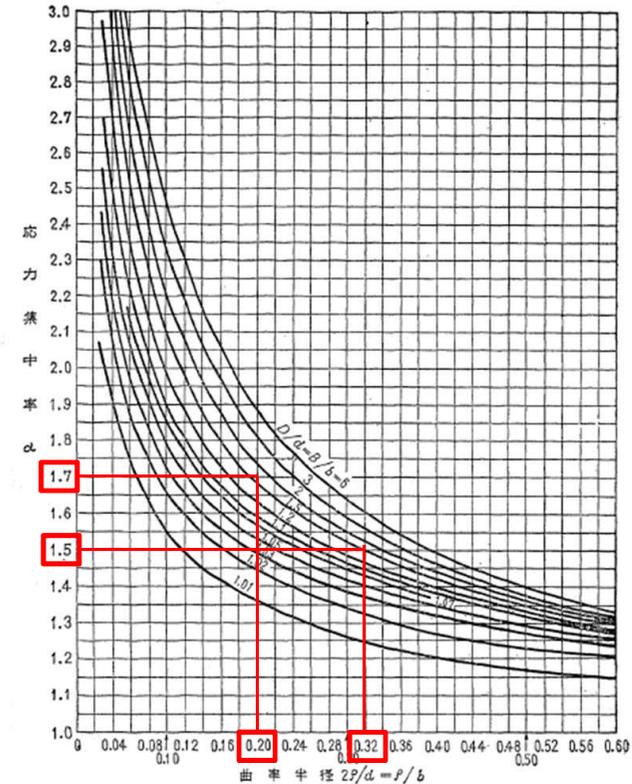
<曲率半径3.49mmの場合>  
 $2\rho/d=(2*3.49)/21.7=0.32$

よって、下図より、応力集中係数Ktは1.5~1.7と想定  
 これより、発生振動応力値を158~179MPaと算出

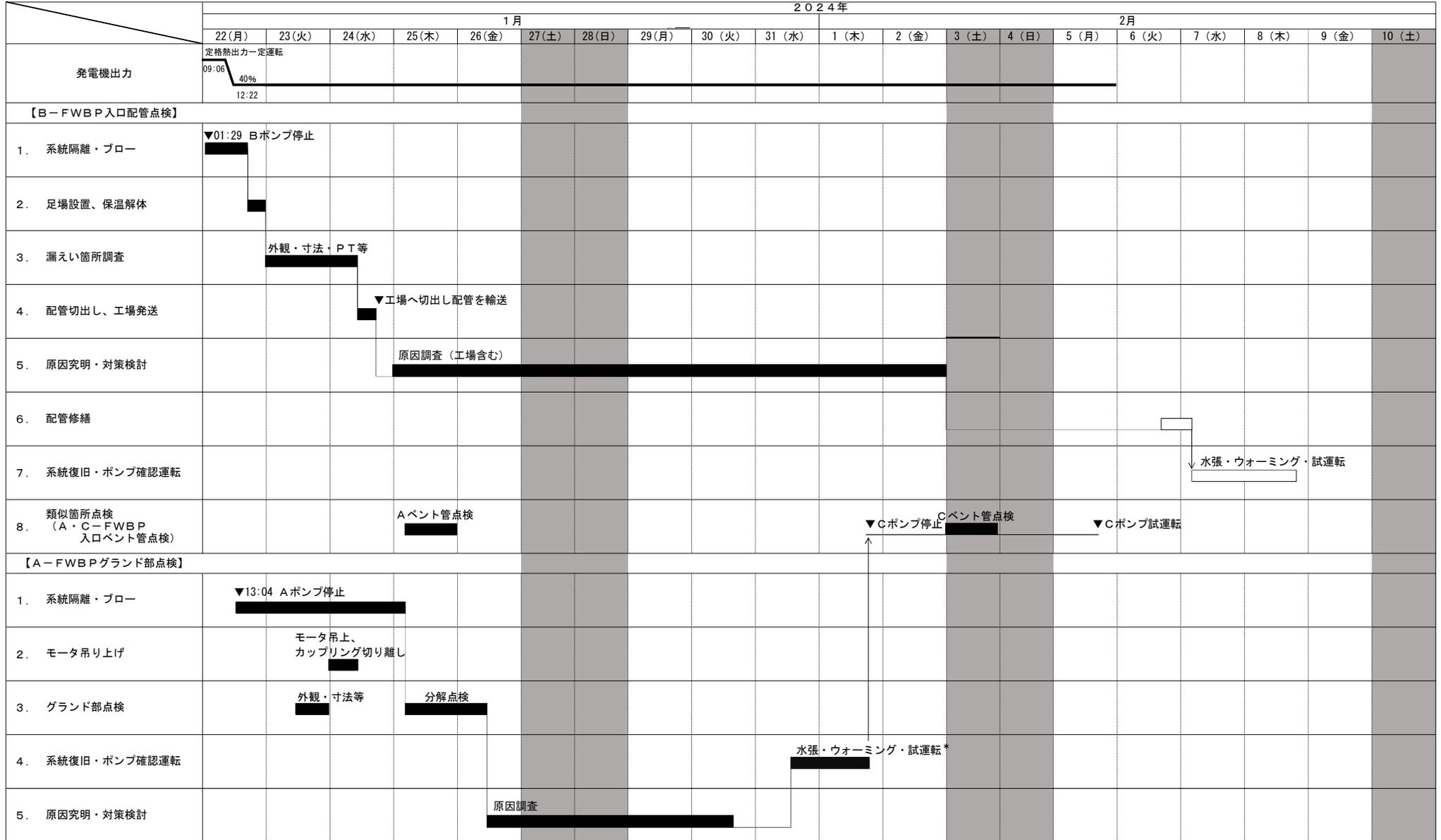
応力集中率の表

形状測定位置	形状測定結果
<p>計測位置</p>	<p>配管 2.19~3.49 溶接金属</p>

\*1 0°の形状測定より得られた曲率半径2.19~3.49mmを用いた。



# 点検スケジュール



\* : A-FWBPについてはグラウンド部を復旧後、リーク量を確認した結果、問題がないことから本格運転を開始

作業進捗状況により、変更の可能性あり。