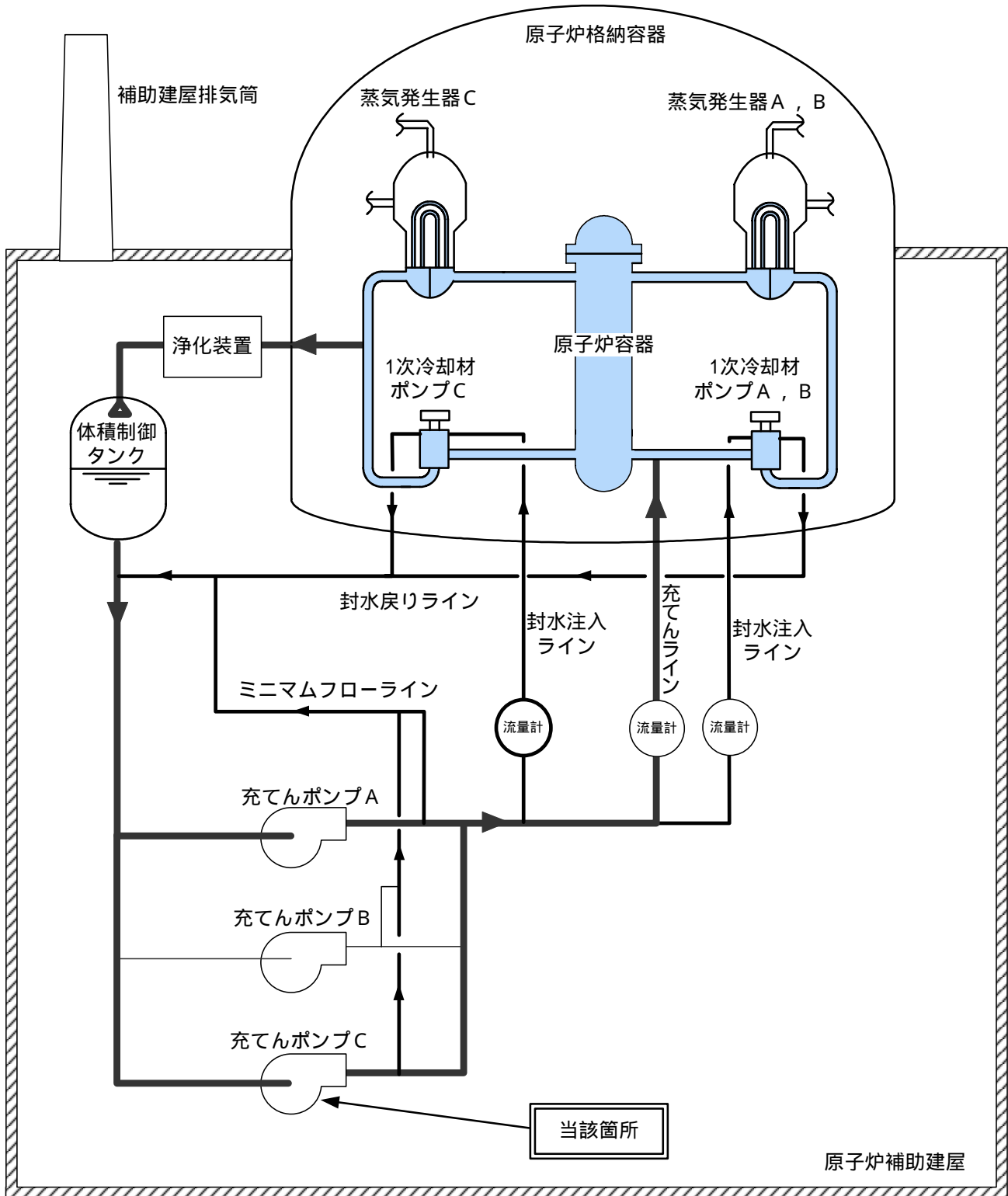


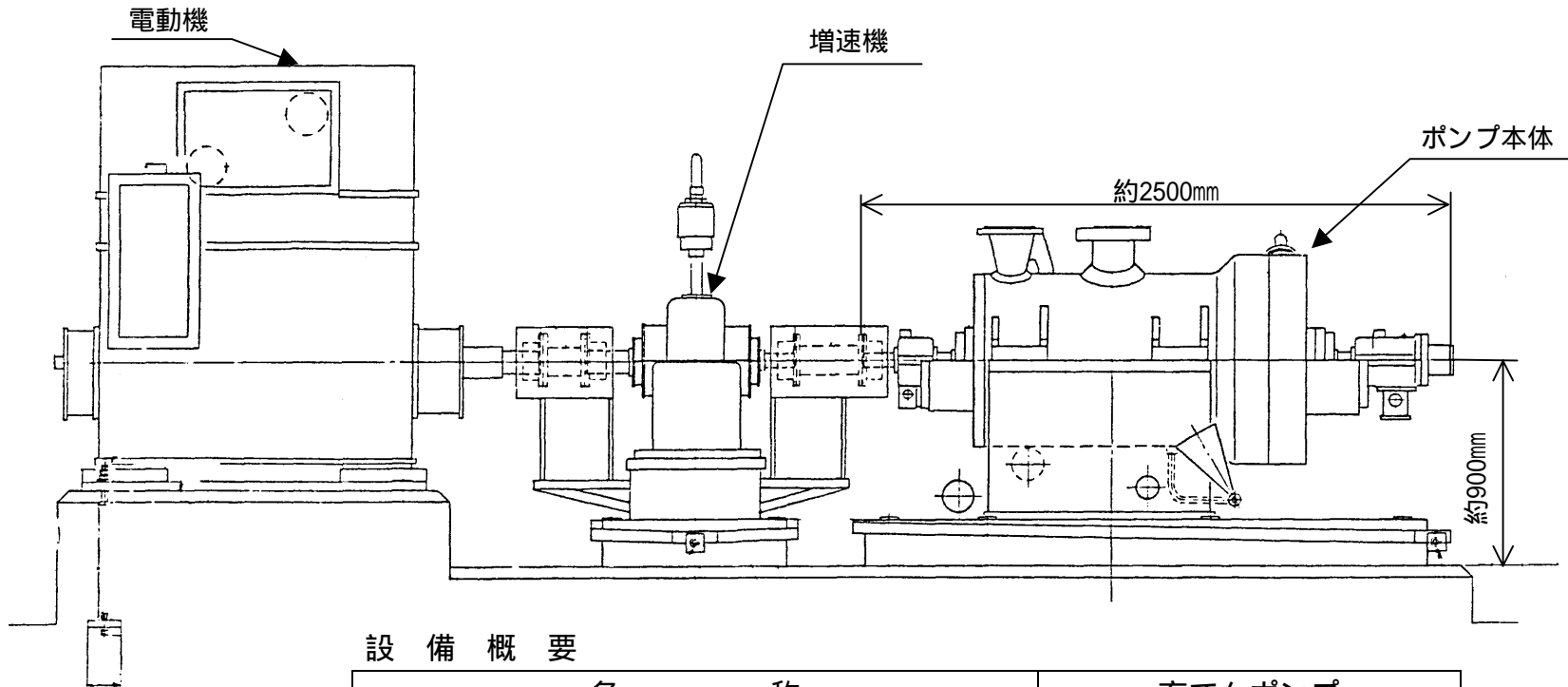
添 付 資 料

- 1 . 伊方3号機充てんポンプ概略系統図
- 2 . 伊方3号機充てんポンプ外形図
- 3 . 伊方3号機充てんポンプ構造図
- 4 . 補助建屋排気筒ガスモニタ記録、野外モニタ記録(チャート)
- 5 . 漏えい量および漏えい放射エネルギー評価、漏えい水の経路
- 6 . 環境への影響評価
- 7 . ポンプ外観目視点検等の調査結果
- 8 . 伊方3号機充てんポンプ3C主軸折損に関する要因分析図
- 9 . 破面観察結果
- 10 . 断面ミクロ観察結果
- 11 . 破面SEM観察結果
- 12 . 硬度測定結果
- 13 . 元素分析結果
- 14 . スプリットリング詳細調査結果
- 15 . 体積制御タンク大気開放時の気泡発生量評価および挙動調査
- 16 . 充てんポンプ3C運転実績(体積制御タンク大気開放時)
- 17 . 高サイクル疲労によるき裂の発生に関する評価結果
- 18 . き裂の進展に関する検討結果
- 19 . 事象発生 の 推定メカニズム
- 20 . 充てんポンプ3A, 3Bの調査
- 21 . 運転パラメータ挙動調査
- 22 . 安全上重要なポンプ・その他の放射能を含むポンプ調査表

伊方3号機 充てんポンプ概略系統図



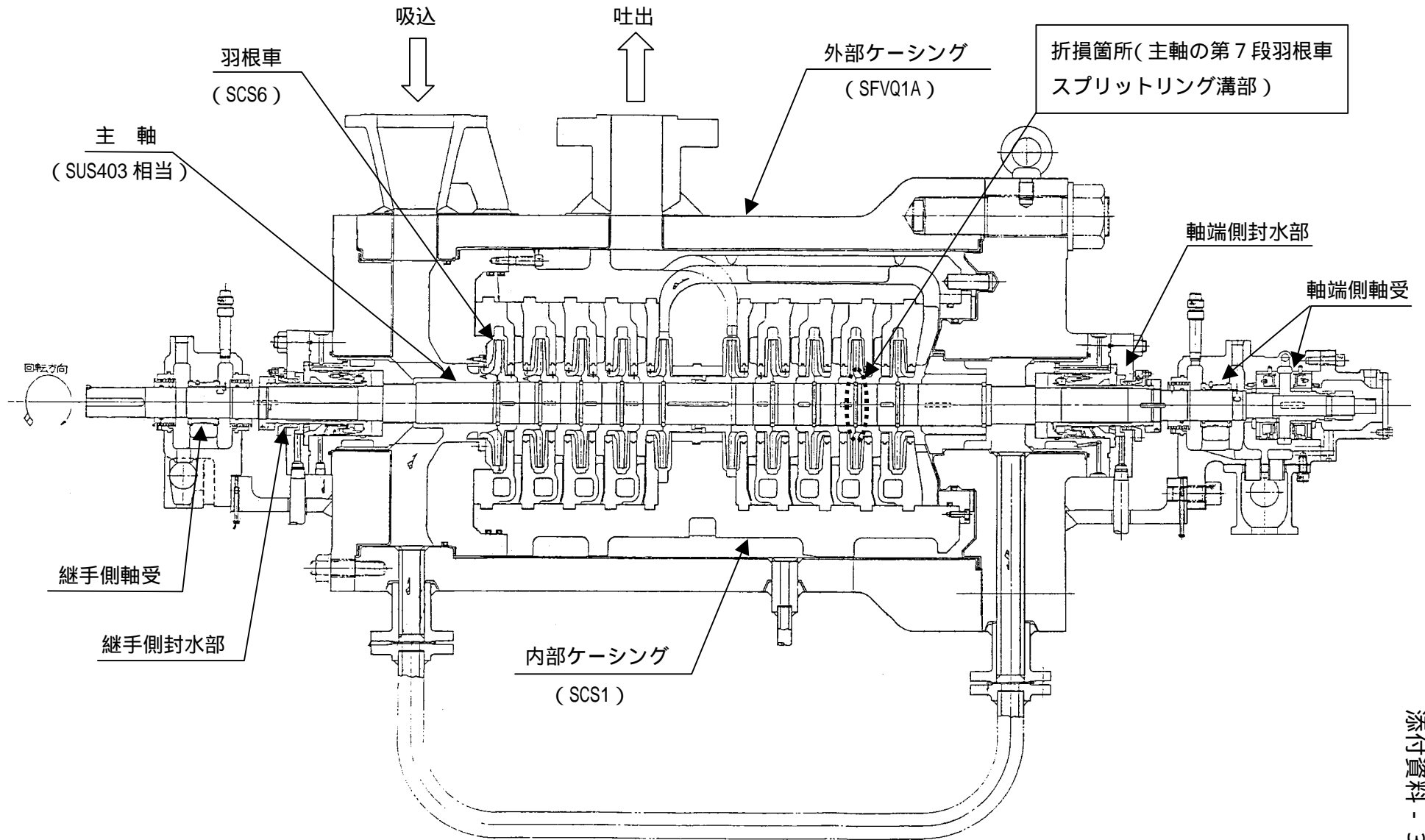
伊方3号機 充てんポンプ外形図



設備概要

名 称		充てんポンプ		
ポンプ	種 類	-	うず巻形	
	定 格 容 量	m ³ /h/個	45.4	
	定 格 揚 程	m	1,720	
	回 転 数	rpm	4,470	
	材 料	主 軸	-	ステンレス鋼(SUS403 相当)
		ケ ー シ ン グ	-	合金鋼(SFVQ1A)
	個 数	-	3	
電動機	種 類	-	3 相誘導電動機	
	出 力	kW/個	720	
	個 数	-	3	

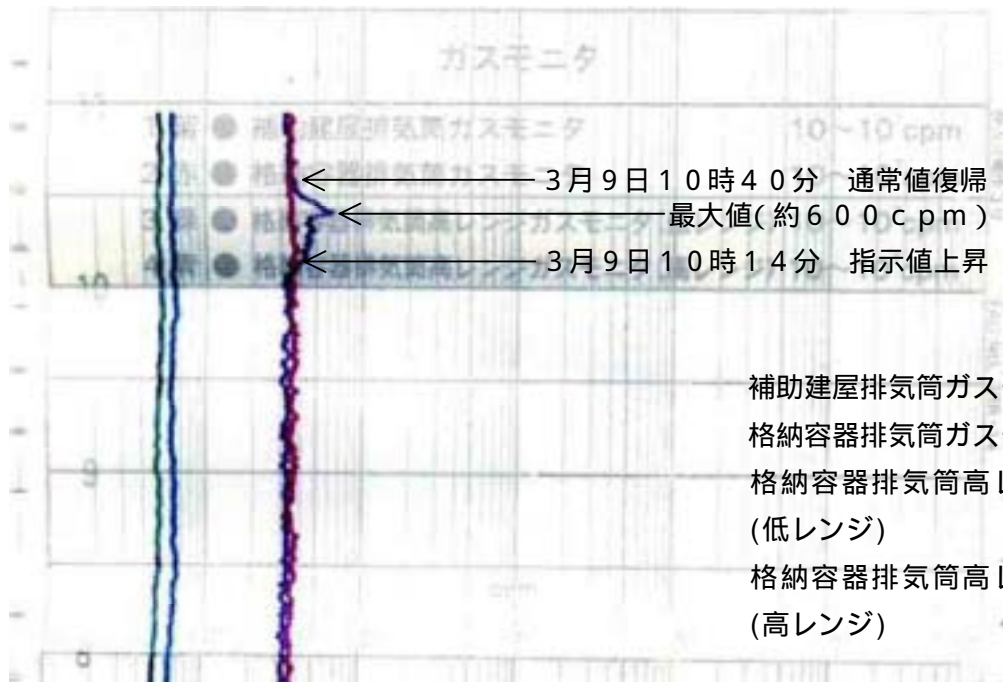
伊方3号機 充てんポンプ構造図



補助建屋排気筒ガスモニタ記録 (チャート)

補助建屋排気筒ガスモニタ (3 R - 1 4)

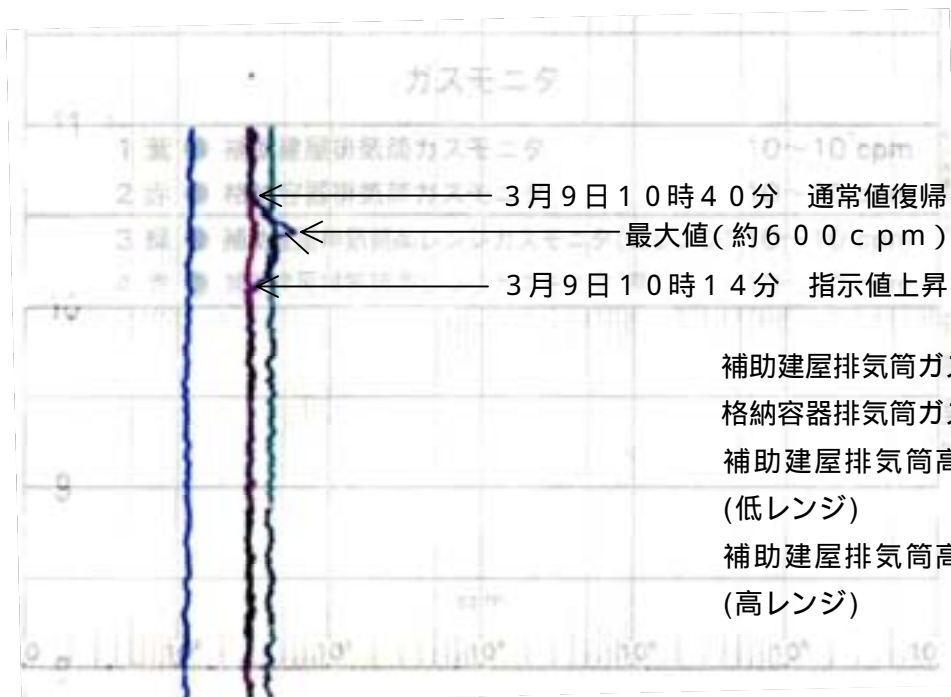
[3月9日8時~11時]



補助建屋排気筒ガスモニタ
格納容器排気筒ガスモニタ
格納容器排気筒高レンジガスモニタ
(低レンジ)
格納容器排気筒高レンジガスモニタ
(高レンジ)

補助建屋排気筒ガスモニタ (3 R - 2 8)

[3月9日8時~11時]

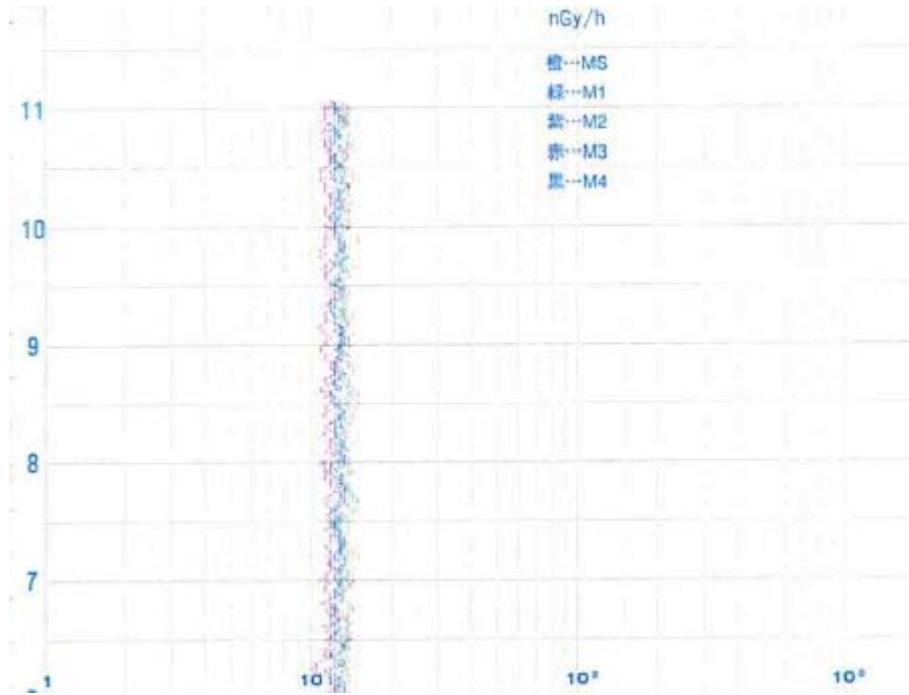


補助建屋排気筒ガスモニタ
格納容器排気筒ガスモニタ
補助建屋排気筒高レンジガスモニタ
(低レンジ)
補助建屋排気筒高レンジガスモニタ
(高レンジ)

野外モニタ記録 (チャート)

野外モニタ

[3月9日6時 ~ 11時]



漏えい量および漏えい放射能量評価

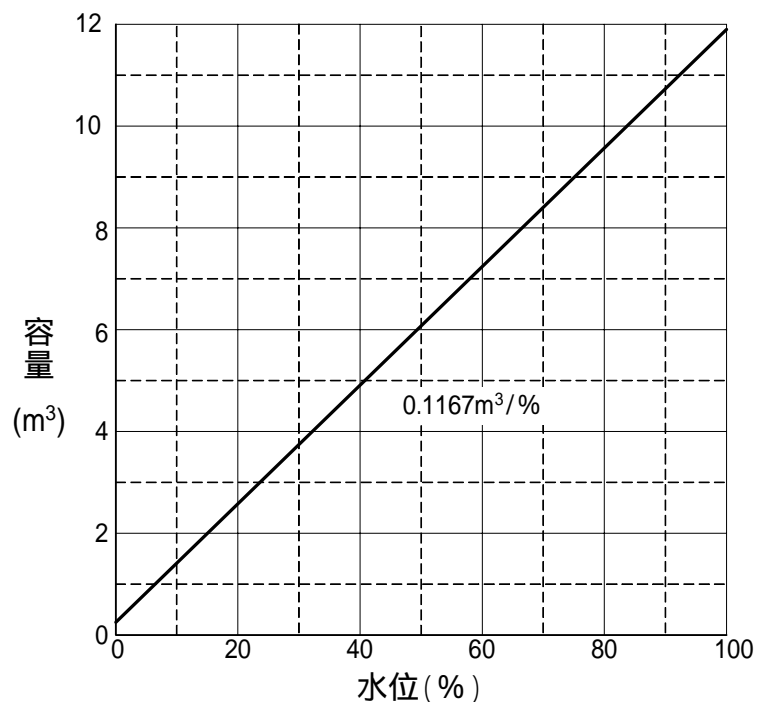
1 . 漏えい量評価

補助建屋サンプタンク水位の変化から漏えい量を評価した。

時 刻	補助建屋サンプタンク水位
9時30分 (事象発生前)	25.6%
10時40分 (漏えい停止確認時)	39.4%
水 位 上 昇 量	13.8%

$$\begin{aligned} \text{漏えい量} &= 13.8\% \times 0.1167\text{m}^3/\% \\ &= 1.61\text{m}^3 \end{aligned}$$

(補助建屋サンプタンク水位容量曲線による)



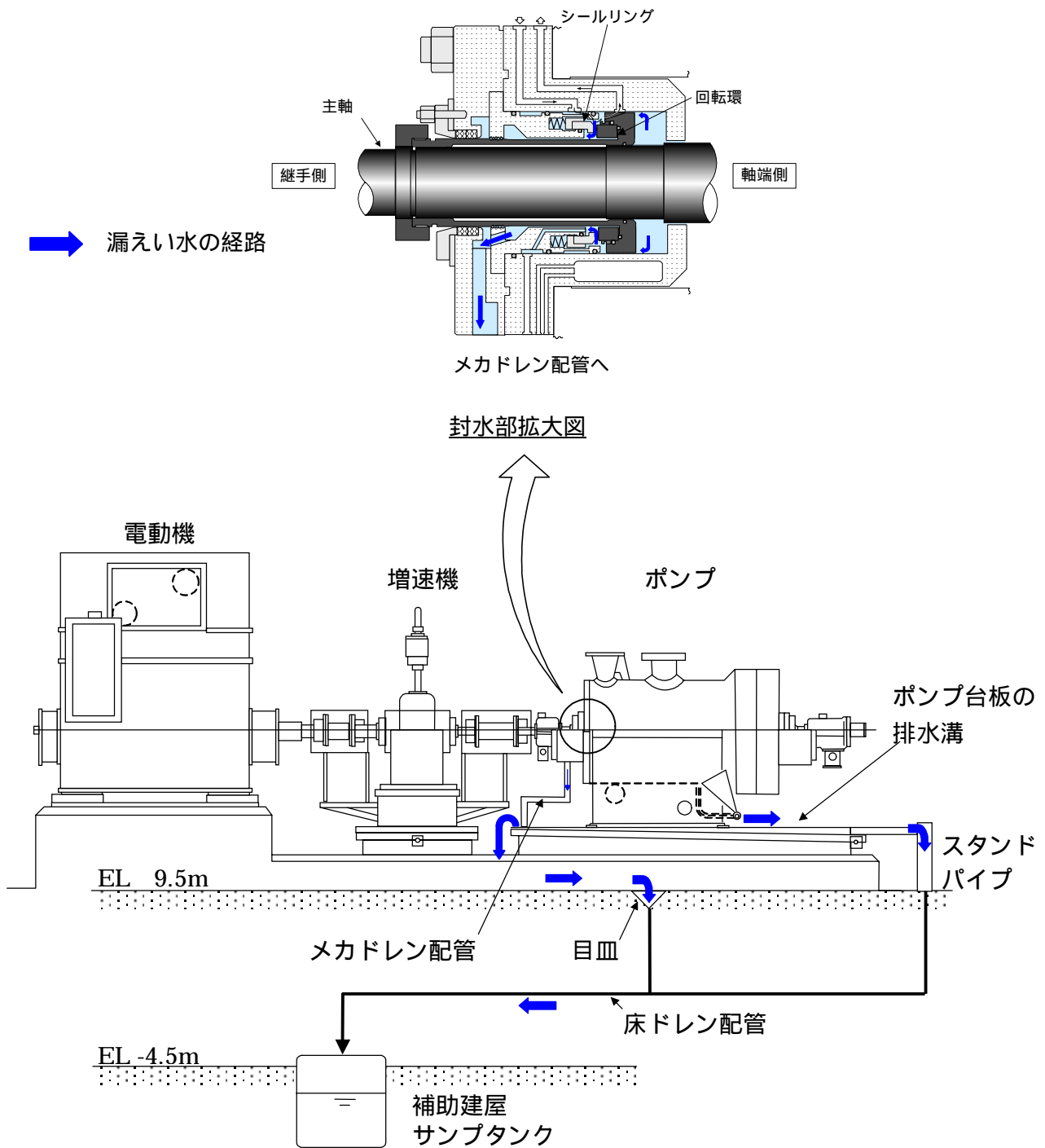
補助建屋サンプタンク水位容量曲線

2 . 漏えい放射能量評価

事象発生当日 (3月9日) に行った1次冷却水のサンプリング結果において、放射能濃度は3.0Bq/ccであったことから、漏えい放射能量を以下のとおり評価した。

$$\begin{aligned} \text{漏えい放射能量} &= 3.0\text{Bq/cc} \times 1.61\text{m}^3 \\ &= 4.8 \times 10^6 \text{Bq} \end{aligned}$$

漏えい水の経路



1次冷却水の漏えい経路

1次冷却水は、継手側封水部のメカニカルシールから漏えいし、メカドレン配管を通り、ポンプ台板の排水溝にあふれ、スタンドパイプ、目皿から床ドレン配管を経由して、補助建屋サンプタンクに流入した。

環境への影響評価

本事象により、補助建屋排気筒ガスモニタの値が一時的に上昇したことから、念のため補助建屋排気筒からの放射性ガス放出量を評価した。

評価結果については、以下のとおりである。

1. 評価条件

- ・評価モニタ : 3 R - 1 4 (補助建屋排気筒ガスモニタ)
- ・モニタ指示値 (N s): 391cpm (3月9日 10時~11時の1時間平均値)
- ・バックグラウンド (N b): 325cpm
- ・モニタの感度計数 (f) : $7.2 \times 10^{-5} \text{Bq/cm}^3/\text{cpm}$ (Xe-133)
- ・圧力補正係数 (P) : 1.10
- ・排風量 (V) : $8,590 \text{m}^3/\text{min}$ ($5.154 \times 10^{11} \text{cm}^3/\text{h}$)

2. 評価結果

$$\begin{aligned}
 \text{放出量} &= (N s - N b) \times f \times P \times V \\
 &= (391 - 325) \times 7.2 \times 10^{-5} \times 1.10 \times 5.154 \times 10^{11} \\
 &= 2.694 \times 10^9 \\
 &2.7 \times 10^9 \text{ [Bq]}
 \end{aligned}$$

(参考) 発電所敷地境界での線量評価

放出された放射性物質量は、伊方発電所原子炉施設保安規定に定められている年間放出管理目標値に比べ極めて小さいものであるが、念のため発電所敷地境界での実効線量を以下の条件で評価した。

1. 評価条件

緊急時環境放射線モニタリング指針(昭和59年6月21日 原子力安全委員会 最終改正 平成13年3月29日)に基づいて評価を行った。

- ・気象条件 (3月9日10時~11時のデータより)
 - 風向 : WNW (風下の発電所敷地境界までの距離 : 510m)
 - 風速 : 2.7m/s
 - 大気安定度 : A
- ・放出条件
 - 放出量 : $2.7 \times 10^9 \text{Bq}$
 - 放出時間 : 1時間
 - 線実効エネルギー : 1.28MeV (想定核種 : Ar-41)
 - 排気筒有効高さ : 40m

2. 評価結果

今回の放出による実効線量は、約 $1 \times 10^{-5} \text{mSv}$ と評価した。

ポンプ外観目視点検等の調査結果

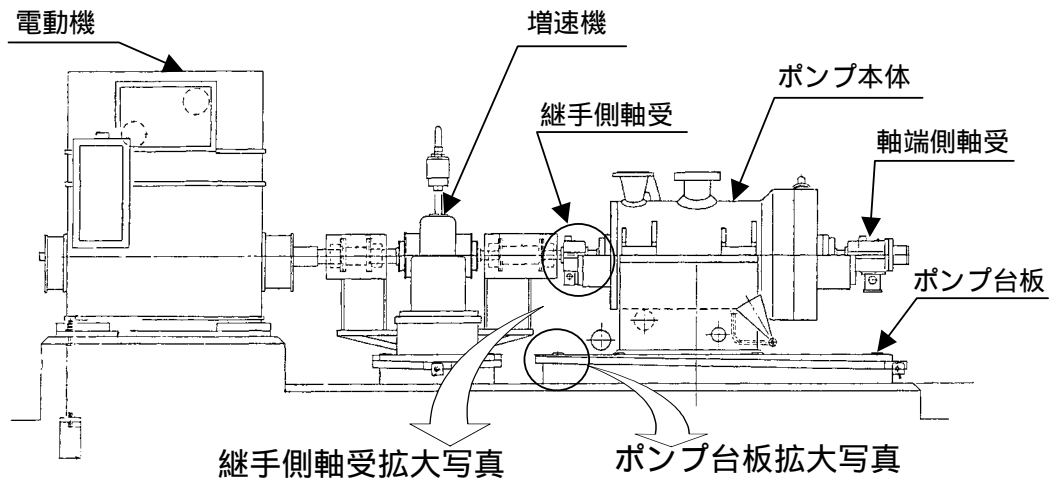
目的	<p>充てんポンプ 3 C の分解前状況および分解後の各部損傷状況を外観点検等により確認する。</p>
内容	<p>1 . 調査項目</p> <p>(1) 分解前の点検 ポンプ本体、増速機、電動機等の分解前状況を外観点検により確認する。</p> <p>(2) 分解点検 ポンプを分解し、主軸・羽根車、外部・内部ケーシング、軸受部、封水部および潤滑油供給装置の損傷状況を確認する。</p> <p>(3) 浸透探傷検査 折損部以外のスプリットリング溝部の浸透探傷検査を実施する。</p> <p>(4) 周辺配管等の点検 金属粉の影響調査のため当該ポンプ出口ラインの配管、弁の内部点検およびブラッシングを実施する。なお、念のため封水注入フィルタ 3 A の内部点検を実施する。</p> <p>2 . 調査結果</p> <p>(1) 外観点検等の調査 ポンプ主軸が軸端部から 2 枚目の羽根車 (第 7 段) のスプリットリング溝部軸端側で折損していた。 また、継手側の封水部のメカニカルシールに割れ、軸受部の油切り付近の変色、油切り (静止部) のフィンの変形が認められたほか、主軸ジャーナル部等の摺動傷が認められた。 電動機、増速機およびその他の部位には、重大な変形、損傷は認められなかった。 《別紙 (1) ~ (5) 》</p> <p>(2) 浸透探傷検査 主軸折損箇所がスプリットリング溝部であったことから、折損部 (第 7 段) 以外のスプリットリング溝部の損傷状況を確認するため、全てのスプリットリング溝部の浸透探傷検査を実施した結果、有意な指示は認められなかった。 《別紙 (6) 》</p> <p>(3) 周辺配管等の調査 ポンプ出口ラインの配管、弁および封水注入フィルタ 3 A に金属粉等は認められなかった。 《別紙 (7) 》</p>

別 紙	<ul style="list-style-type: none">(1) 分解前の点検結果 (ポンプ本体他)(2) 分解点検結果 (主軸・羽根車)(3) 分解点検結果 (ケーシング)(4) 分解点検結果 (軸受部および封水部)(5) 分解点検結果 (潤滑油供給装置)(6) ポンプ主軸の浸透探傷検査結果(7) 周辺配管等の点検結果
--------	--

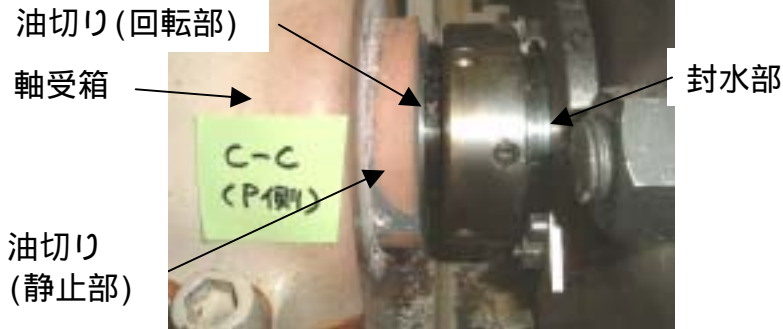
項目	分解前の点検結果 (ポンプ本体他)
点 検 結 果	<p>1 . 外観点検結果</p> <ul style="list-style-type: none">・継手側軸受のポンプ側油切り部で回転部と静止部の接触による変色が認められた。・油切りの上下半合わせ面が約 1mm 程度開いていた。・ポンプ台板の排水溝に粉状の金属粉の堆積物が認められた。 <p>2 . 増速機 - ポンプ継手結合状態</p> <ul style="list-style-type: none">・増速機 - ポンプ間継手の軸方向の隙間が約 3mm 狭くなっていた。 <p>3 . その他</p> <ul style="list-style-type: none">・ハンドターニングを実施したところ、増速機単体および電動機単体は円滑に回転し異常は認められなかったが、ポンプ単体では回転しなかった。・増速機の外観に異常は認められなかった。・電動機の外観に異常は認められなかった。・潤滑油配管等の外観に異常は認められなかった。・その他の外観には異常は認められなかった。

外観点検結果

(ポンプ本体他)

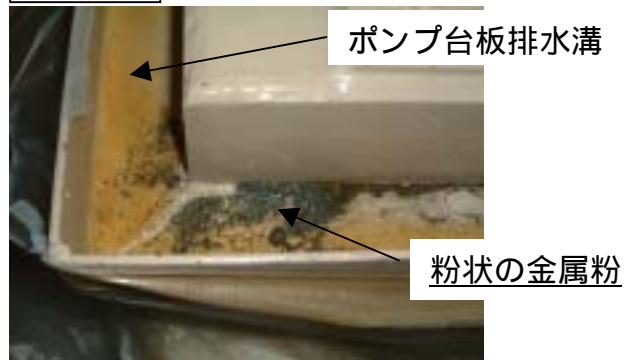


写真



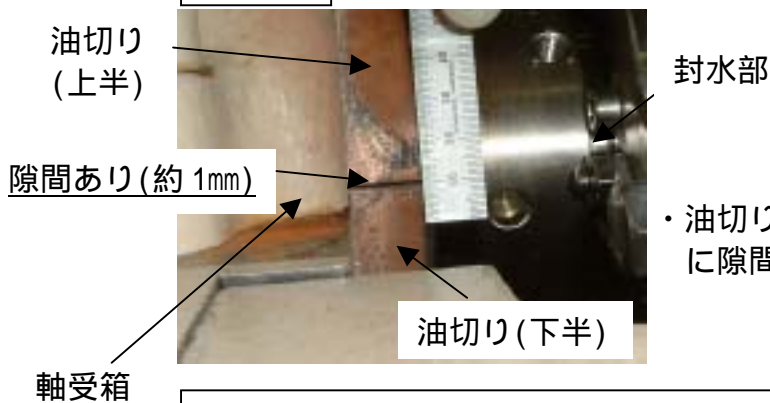
- ・油切り付近が変色
- ・油切り(回転部)が移動

写真



- ・ポンプ台板の排水溝に粉状の金属粉の堆積物

写真

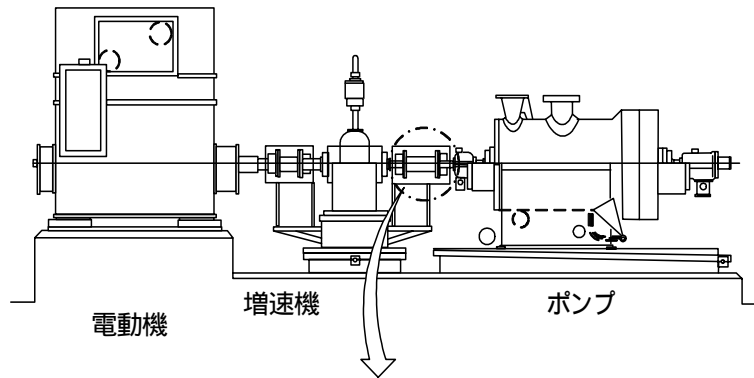


- ・油切り(ポンプ側)の上下合わせ面に隙間あり

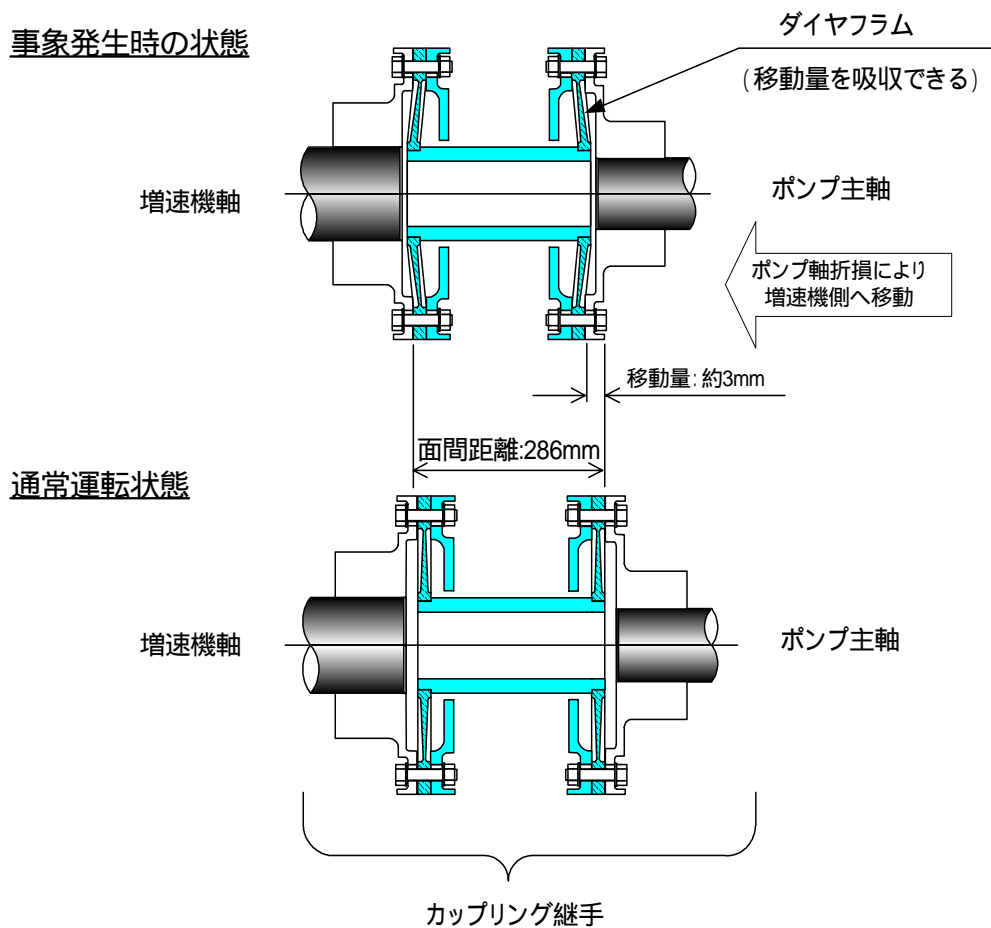
点検結果

- ・継手側軸受のポンプ側油切り部で回転部と静止部の接触による変色が認められた。
- ・油切りの上下半合わせ面が約 1mm 程度開いていた。
- ・ポンプ台板の排水溝に粉状の金属粉の堆積物が認められた。

増速機 - ポンプ継手結合状態 (増速機 - ポンプ間カップリング継手の隙間)



増速機 - ポンプ間カップリング継手部拡大スケッチ図



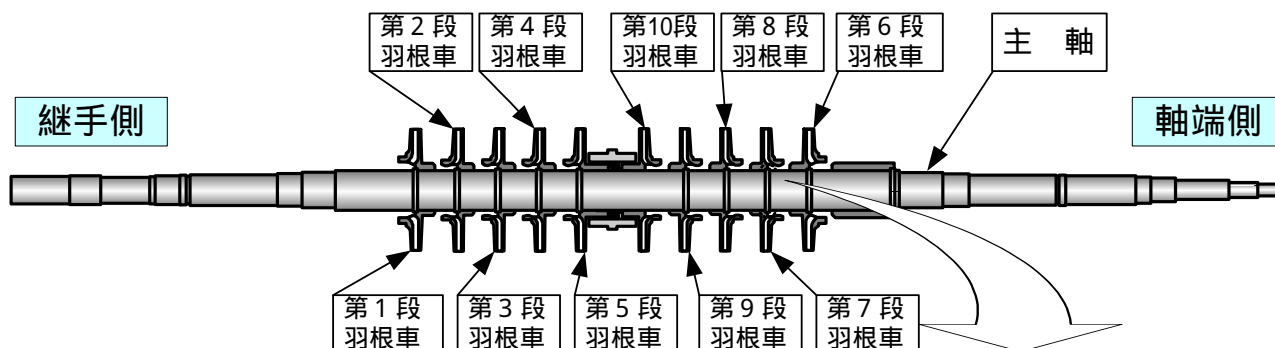
点検結果

- ・ 増速機 - ポンプ間カップリング継手の軸方向隙間が約 3mm 狭くなっていた。

項目	分解点検結果 (主軸 ・ 羽根車)
点 検 結 果	<ol style="list-style-type: none">1 . 第 7 段羽根車部<ul style="list-style-type: none">・ 主軸が、軸端側から 2 枚目の羽根車 (第 7 段) のスプリットリング溝部で折損していた。 2 . 第 1 段羽根車部<ul style="list-style-type: none">・ 羽根車の吸込部に接触による摺動傷が認められた。 3 . センターブッシュ部<ul style="list-style-type: none">・ 接触による摺動傷が認められた。 4 . 軸端側つり合いスリーブ部<ul style="list-style-type: none">・ 接触による摺動傷が認められた。 5 . その他<ul style="list-style-type: none">・ その他の部位に異常は認められなかった。

主軸・羽根車点検結果

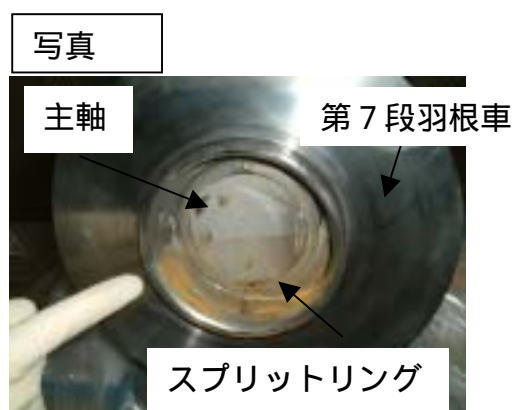
(第 7 段羽根車部)



主軸折損箇所拡大写真



・主軸の折損状況



・継手側折損面

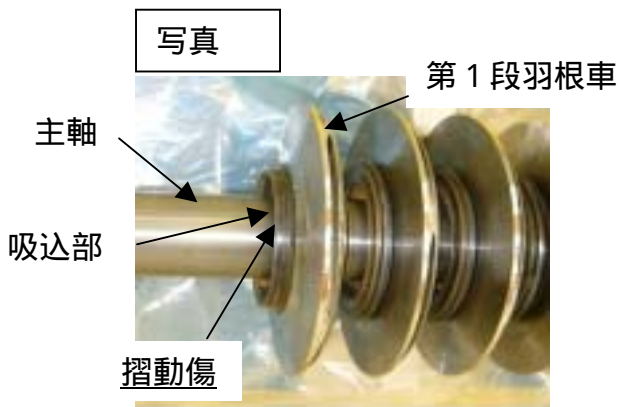
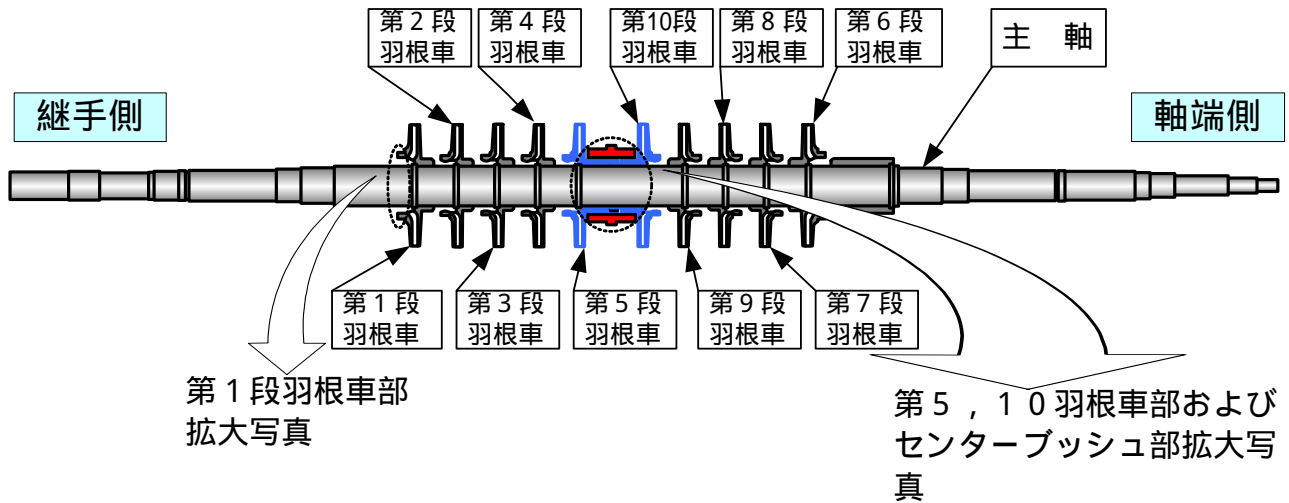


・軸端側折損面

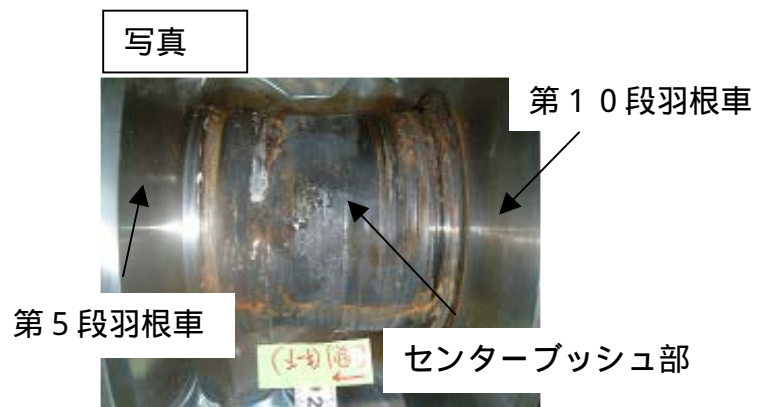
点検結果

・主軸が、第7段羽根車のスプリットリング溝部で折損していた。

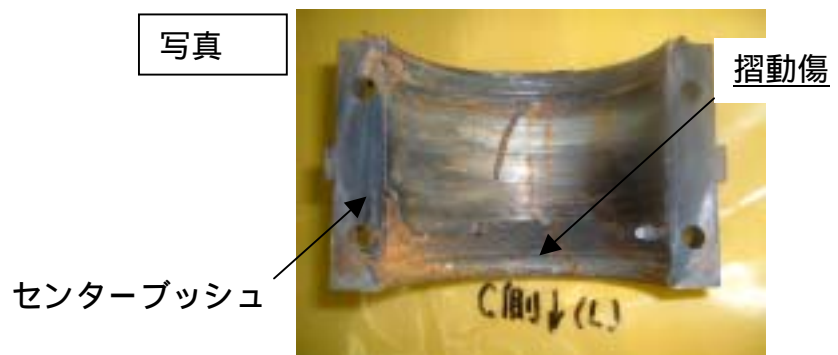
主軸・羽根車点検結果 (第 1 段羽根車部およびセンターブッシュ部)



・第 1 段羽根車吸込部の接触
による摺動傷



・センターブッシュとの接触に
よる摺動傷

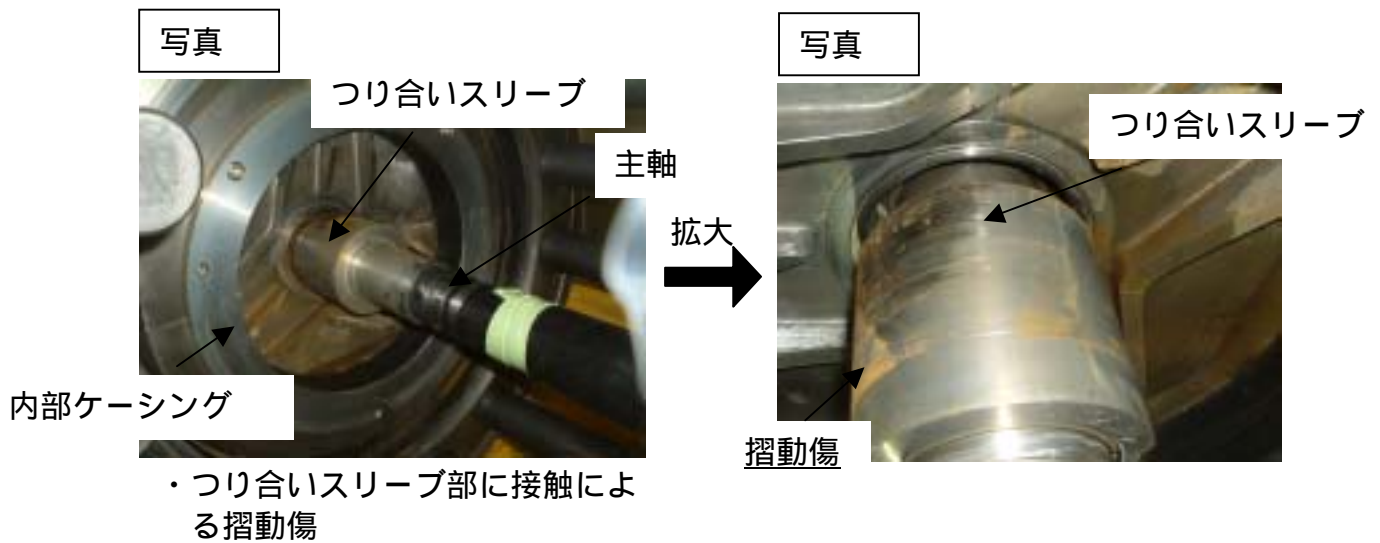
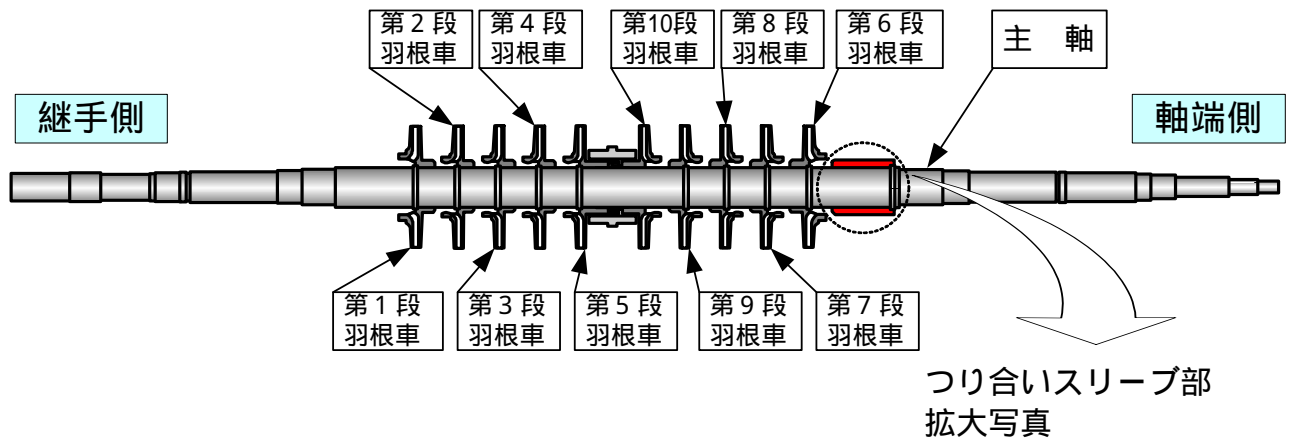


・センターブッシュ内面の接触に
よる摺動傷

点検結果

- ・第 1 段羽根車の吸込部およびセンターブッシュ部に接触による摺動傷が認められた。

主軸・羽根車点検結果 (軸端側つり合いスリーブ部)

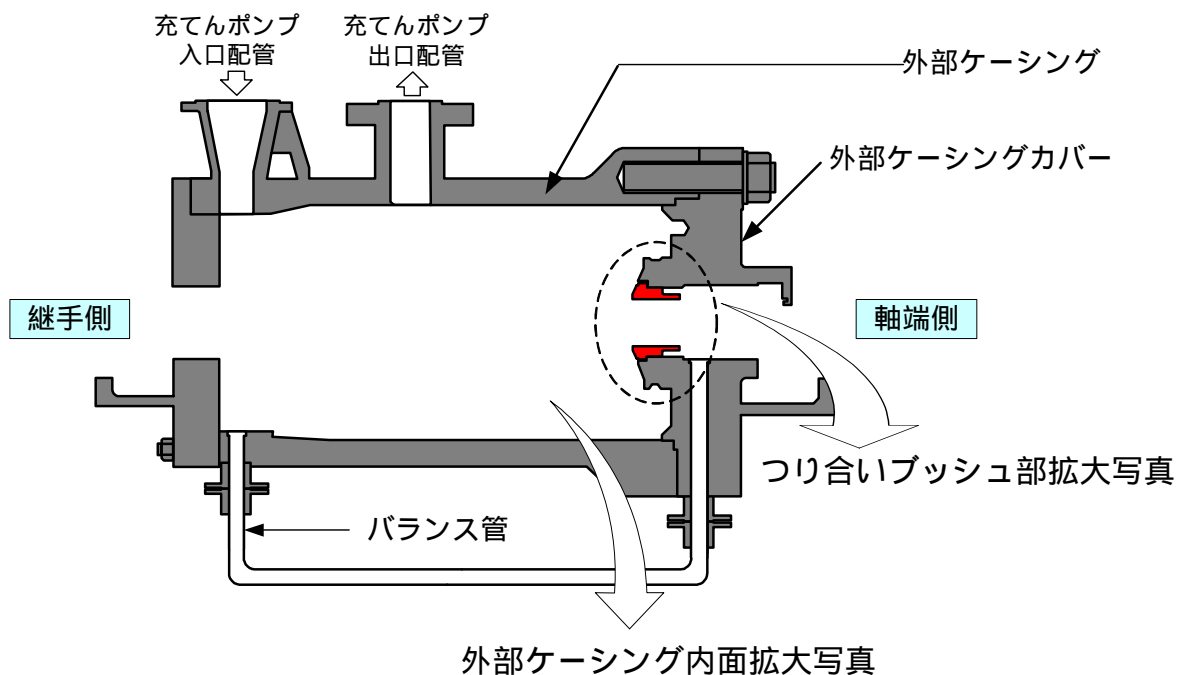


点検結果

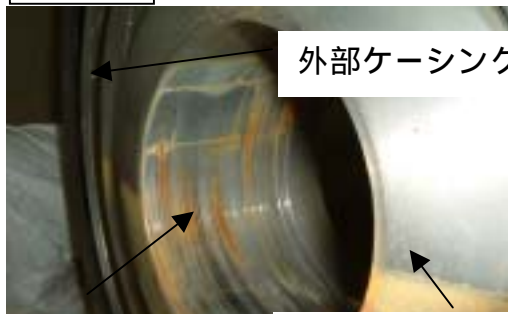
- ・つり合いスリーブ部に接触による摺動傷が認められた。

項目	分解点検結果 (ケーシング)
点 検 結 果	<p>1 . 外部ケーシング</p> <ul style="list-style-type: none">・ 取り付けブッシュ部に取り付けスリーブとの摺動傷が認められた。・ 外部ケーシングの内表面に粉状の金属粉が認められた。 <p>2 . 内部ケーシング</p> <ul style="list-style-type: none">・ 上下半ともセンターブッシュとのはめ合い部付近に、変色が認められた。・ 内部ケーシングの外表面に粉状・薄膜状の金属粉が認められた。

外部ケーシング点検結果 (つり合いブッシュ部および外部ケーシング内面)



写真



外部ケーシングカバー

摺動傷

つり合いブッシュ

- ・つり合いブッシュ部に接触による摺動傷

写真



外部ケーシング内面

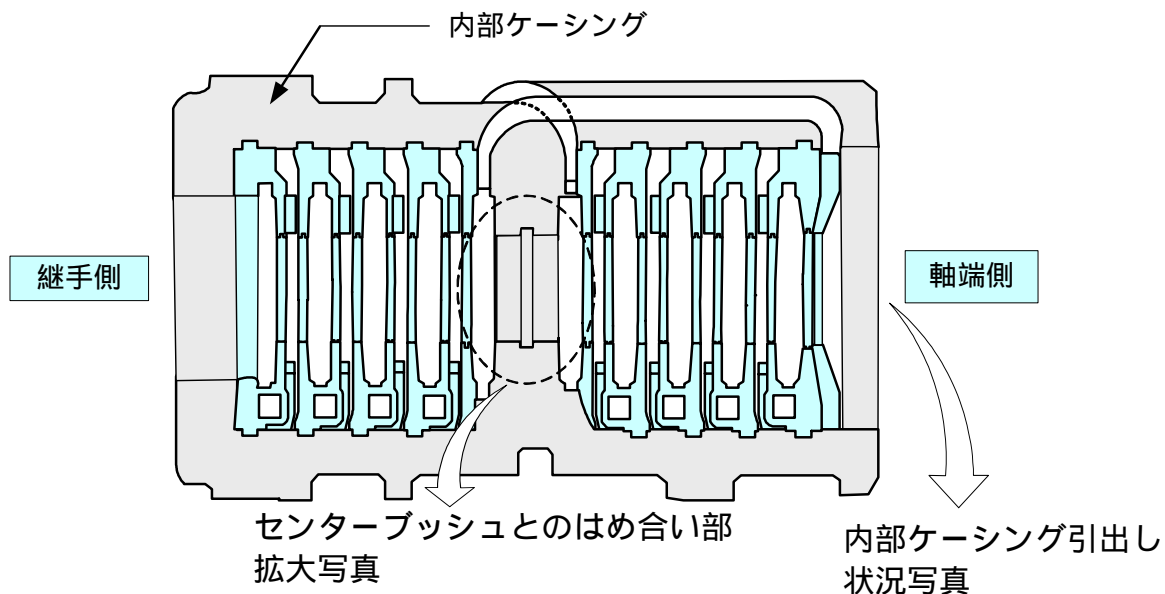
- ・粉状の金属粉が付着

点検結果

- ・つり合いブッシュ部につり合いスリーブとの接触による摺動傷が認められた。
- ・外部ケーシング内表面に粉状の金属粉が認められた。

内部ケーシング点検結果

(内部ケーシング外表面・内表面)

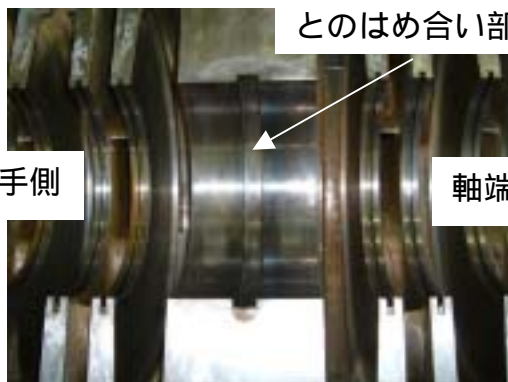


写真

変色箇所
センターブッシュ
とのはめ合い部

継手側

軸端側



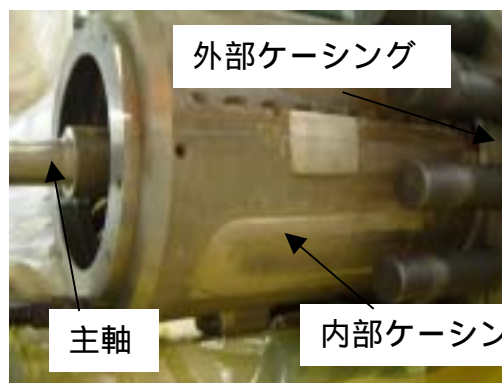
- ・ 上下半のセンターブッシュとのはめ合い部が変色 (写真は下半)

写真

外部ケーシング

主軸

内部ケーシング



- ・ 粉状の金属粉が付着

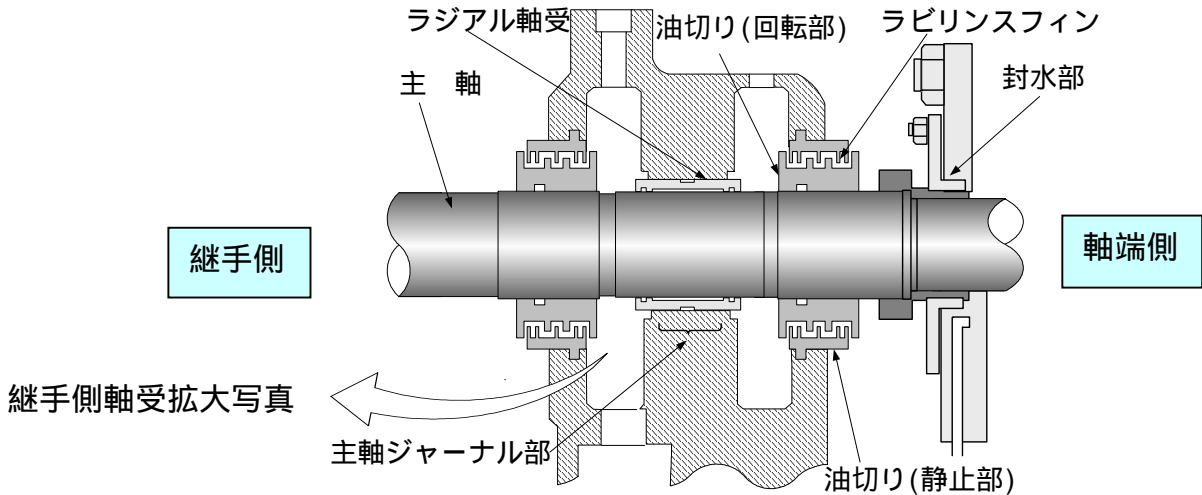
点検結果

- ・ 内部ケーシングの内面の上下半ともセンターブッシュとのはめ合い部付近に変色が認められた。
- ・ 内部ケーシングの外表面に粉状・薄膜状の金属粉が認められた。

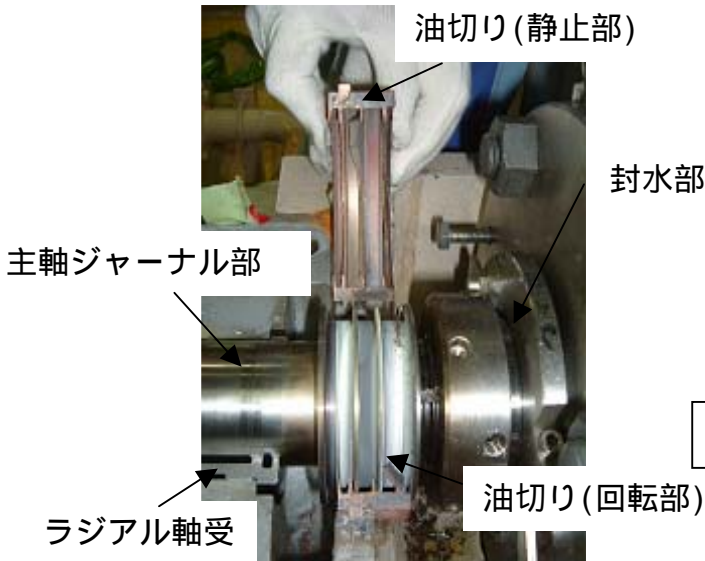
項目	分解点検結果(軸受部および封水部)
点 検 結 果	<p>1. 軸受部</p> <p>(1) 継手側軸受部</p> <ul style="list-style-type: none">・油切り部の静止部ラビリンスフィンが、回転部との接触により変形しその一部が内部で脱落していた。・軸受メタルの内表面および主軸ジャーナル部には摺動傷が認められた。 <p>(2) 軸端側軸受部</p> <ul style="list-style-type: none">・スラスト軸受構成部品、ラジアル軸受メタル内表面、主軸ジャーナル部および油切り部に異常は認められなかった。 <p>2. 封水部</p> <p>(1) 継手側メカニカルシール</p> <ul style="list-style-type: none">・回転環とシールリングに割れが認められた。 <p>(2) 軸端側メカニカルシール</p> <ul style="list-style-type: none">・軸端側メカニカルシール構成部品に異常は認められなかった。

軸受部点検結果

(継手側軸受)

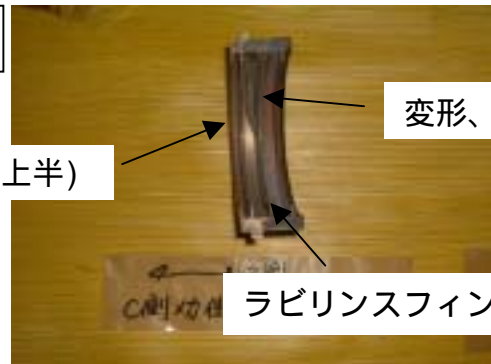


写真



- ・主軸ジャーナル部に摺動傷
- ・ラビリンスフィンが変形および損傷

写真



- ・上下半のラビリンスフィンが変形および損傷(写真は上半部)

写真



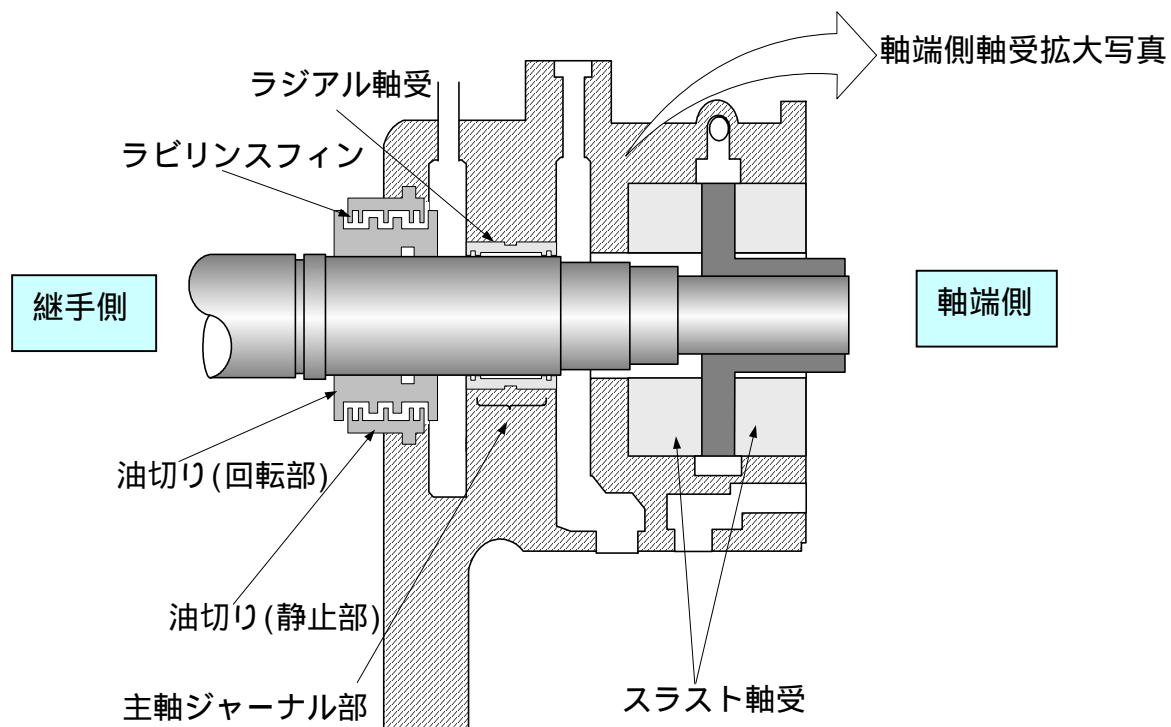
- ・軸受メタルの内表面に摺動傷

点検結果

- ・油切り部の静止部ラビリンスフィンが、回転部との接触により変形しその一部が内部で脱落していた。
- ・軸受メタルの内表面および主軸ジャーナル部には摺動傷が認められた。

軸受部点検結果

(軸端側軸受)

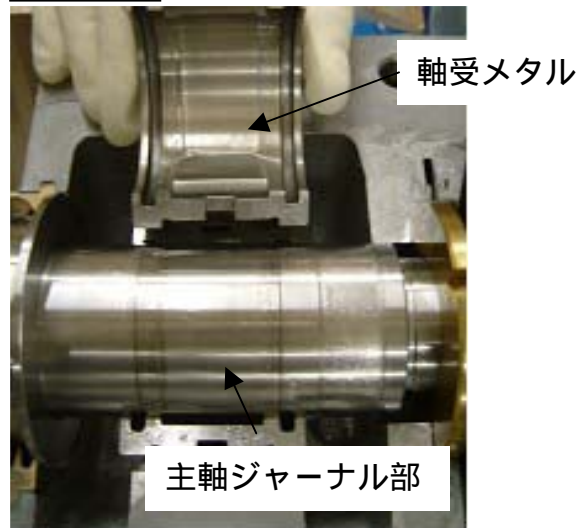


写真



・異常なし

写真

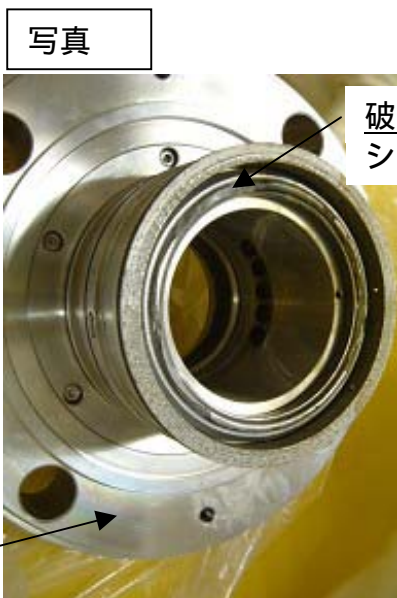
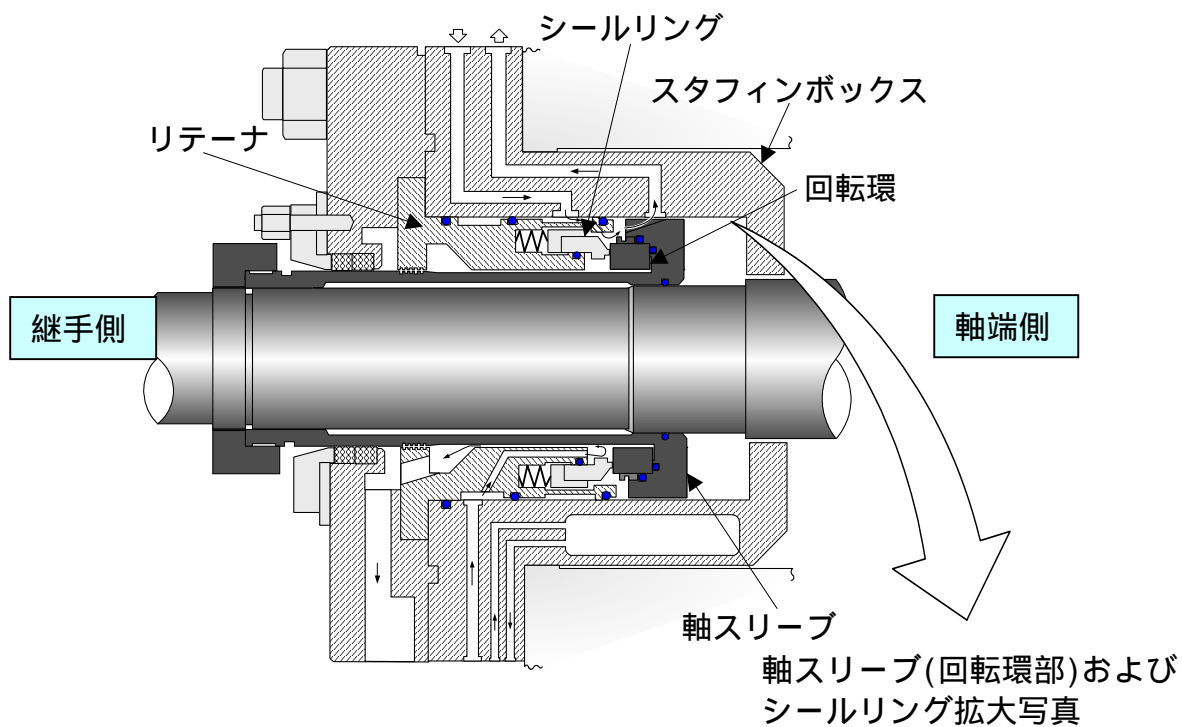


・異常なし

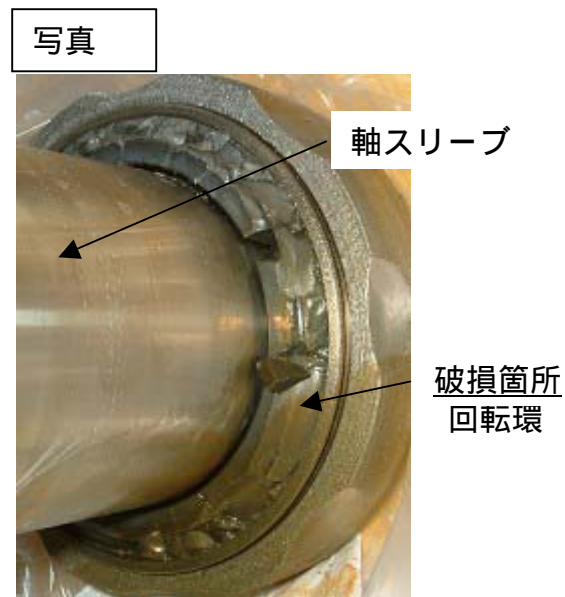
点検結果

- ・ 軸端側のスラスト軸受構成部品、ラジアル軸受メタル内表面、主軸ジャーナル部および油切り部に異常は認められなかった。

封水部点検結果 (継手側メカニカルシール)



・シールリングが破損

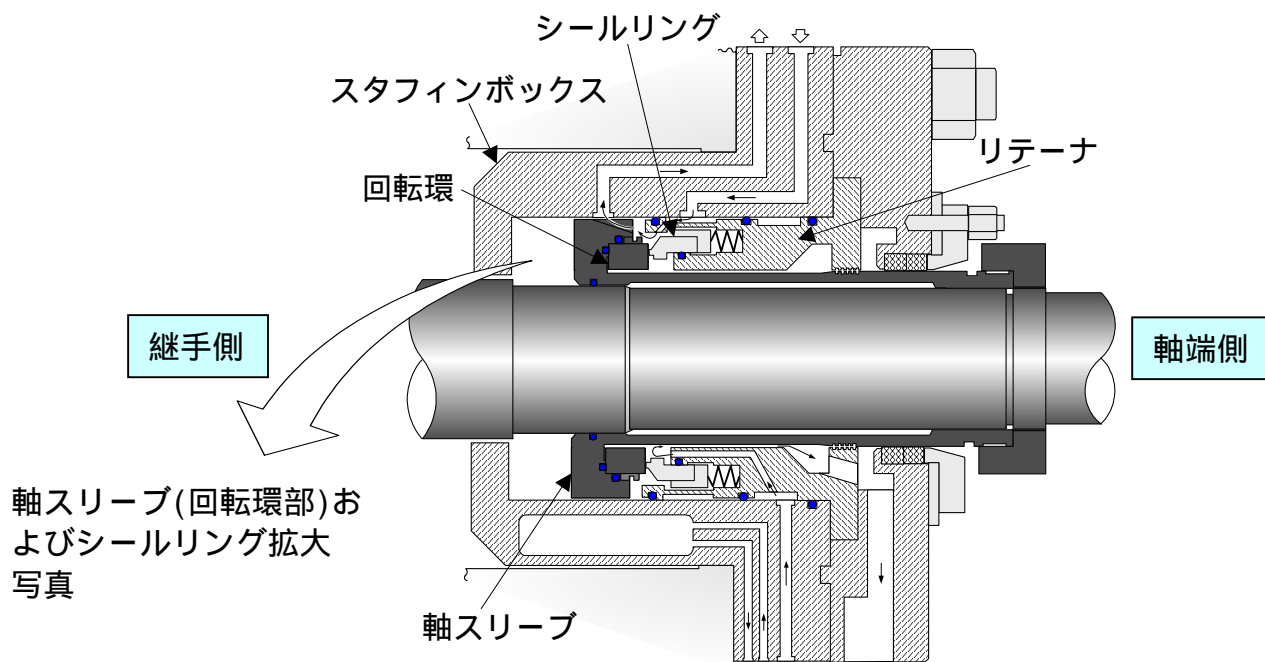


・回転環が破損

点検結果

- ・継手側メカニカルシールの回転環とシールリングに割れが認められた。

封水部点検結果 (軸端側メカニカルシール)



写真



・異常なし

写真



・異常なし

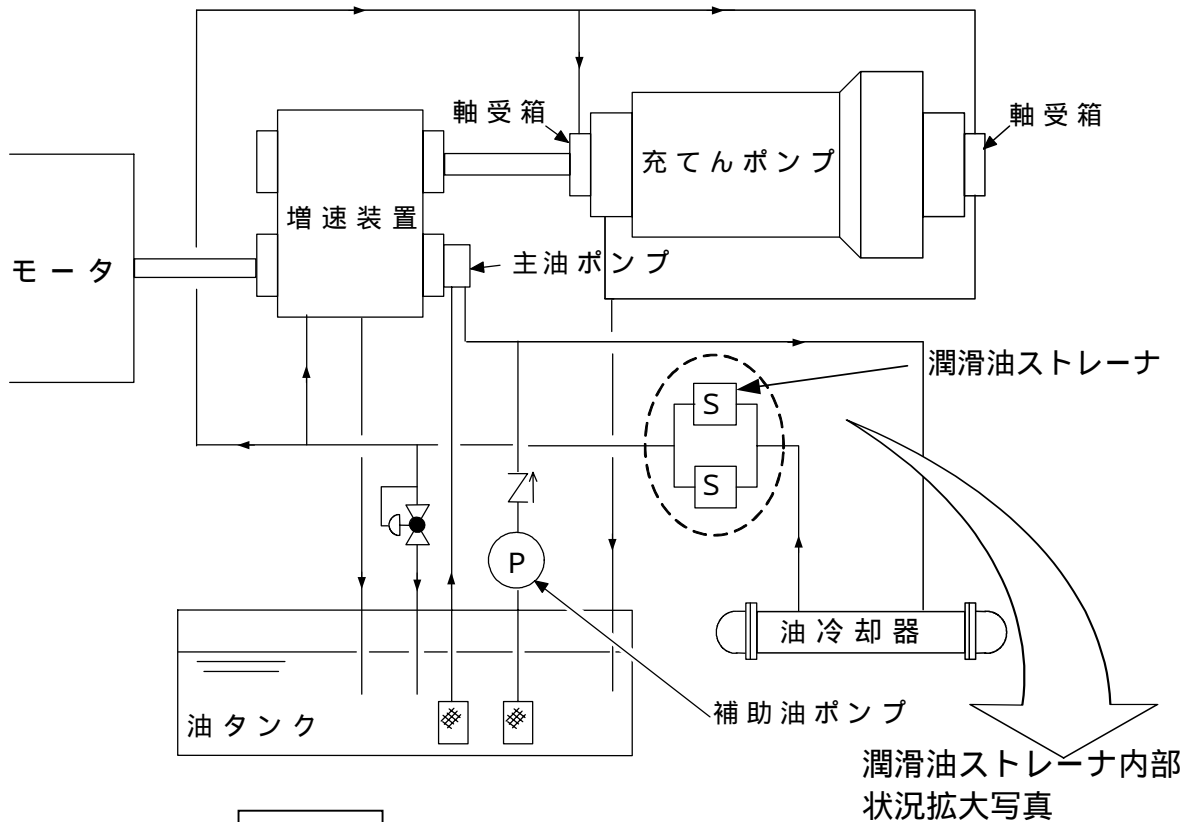
点検結果

・軸端側メカニカルシール構成品に異常は認められなかった。

項目	分解点検結果 (潤滑油供給装置)
点 検 結 果	<p>1 . 潤滑油ストレーナ 潤滑油ストレーナの金網等に損傷は認められず、ストレーナ内部に微量の金属粉が回収されていた。</p> <p>2 . 油冷却器 器内の潤滑油をサンプリング分析した結果、異常は認められなかった。</p> <p>3 . 油タンク 開放点検および潤滑油をサンプリング分析した結果、異常は認められなかった。</p> <p>4 . 主油ポンプ ハンドターニングの結果、異常は認められなかった。</p> <p>5 . 補助油ポンプ ハンドターニングの結果、異常は認められなかった。</p> <p>6 . 配管 配管内の清掃およびフラッシングを実施した結果、異常は認められなかった。</p>

潤滑油供給装置点検結果

(潤滑油ストレーナ内部)



写真



・潤滑油ストレーナ内部に微量の金属粉

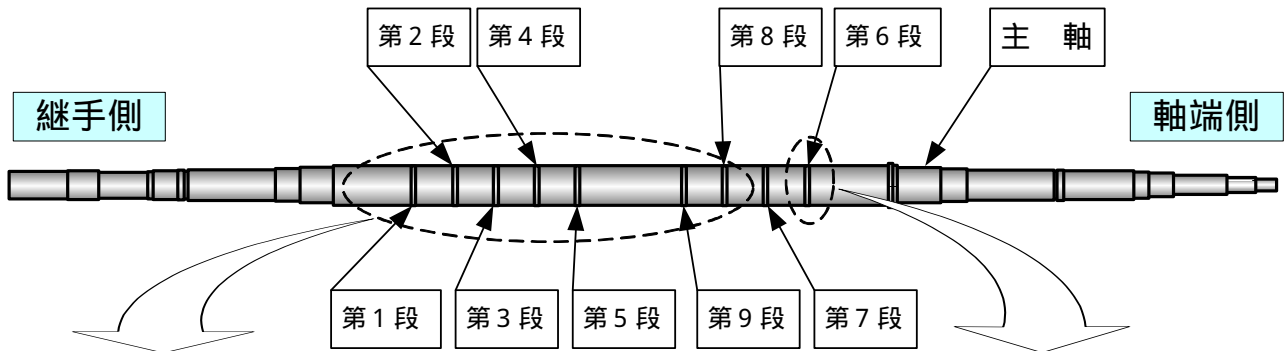
点検結果

- ・潤滑油ストレーナ の金網等に損傷は認められず、ストレーナ内部に微量の金属粉が回収されていた。
- ストレーナ：潤滑油の中に混入した固形の異物を捕捉するもの

項目	ポンプ主軸の浸透探傷検査結果
点 検 結 果	<p>主軸折損箇所がスプリットリング溝部であったことから、折損部（第7段）以外のスプリットリング溝部の損傷状況を確認するため、全てのスプリットリング溝部の浸透探傷検査を実施した結果、有意な指示は認められなかった。</p>

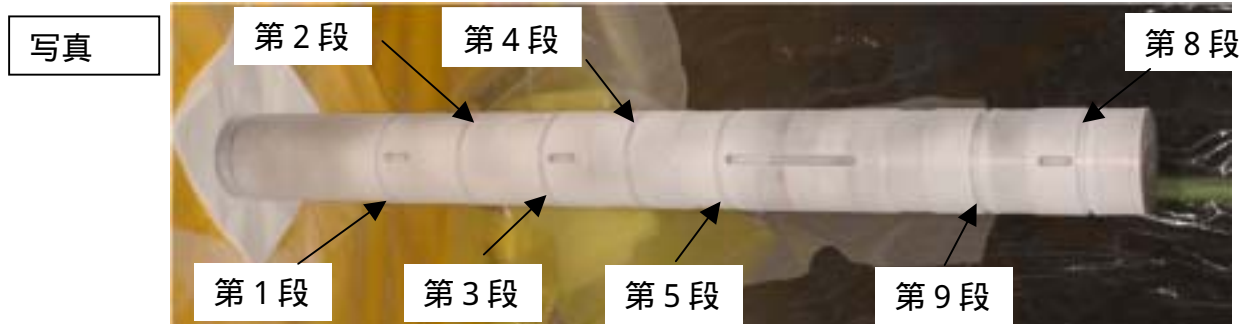
主軸スプリットリング溝部点検結果

(第 7 段以外の浸透探傷検査)



第 1 ~ 5 段および第 8 , 9 段のスプリットリング溝部の浸透探傷検査状況写真

第 6 段のスプリットリング溝部の浸透探傷検査状況写真



・ 有意な指示は認められなかった。



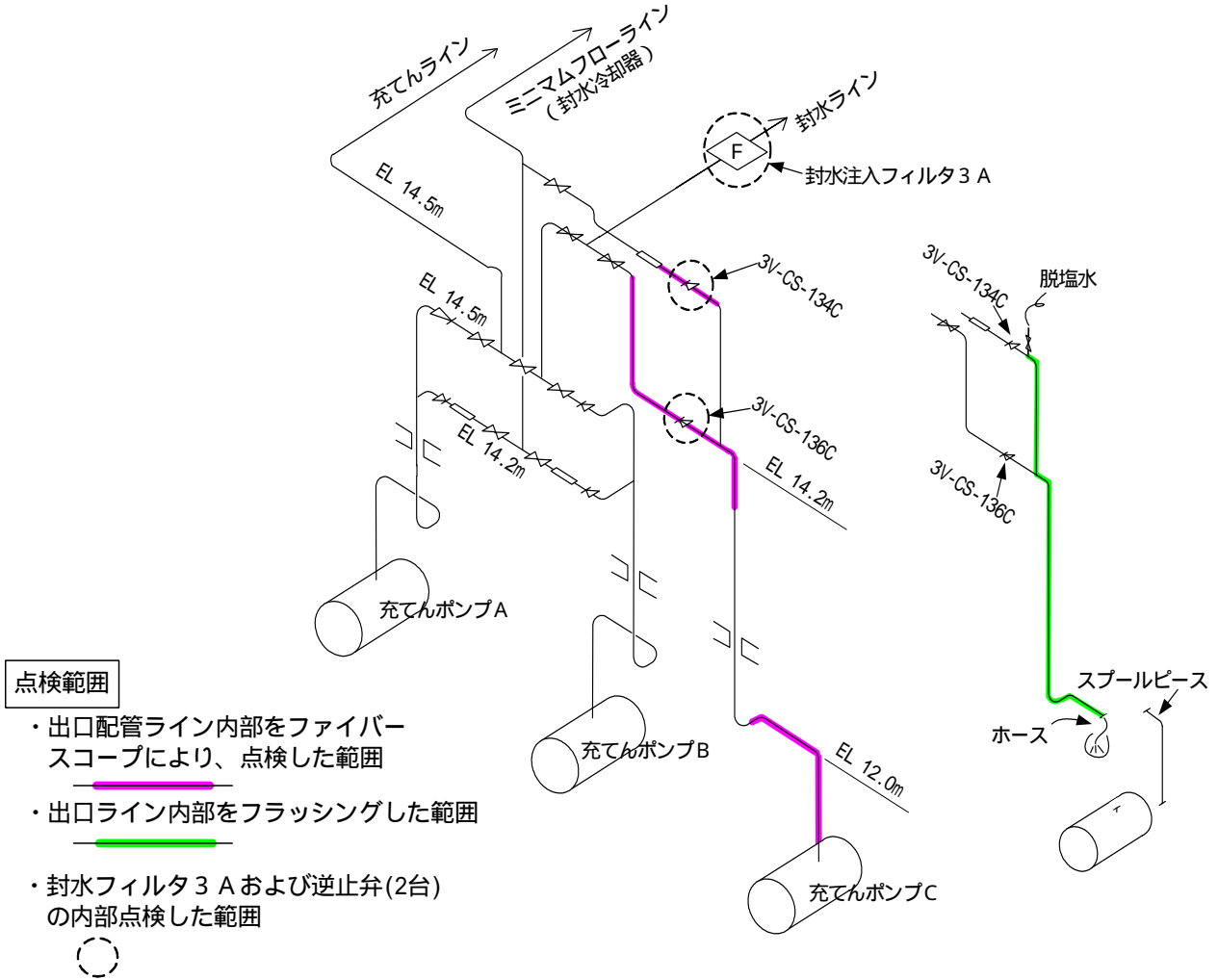
・ 有意な指示は認められなかった。

点検結果

- ・ ポンプ主軸より羽根車を取り外し、折損箇所 (第 7 段) を除く全てのスプリットリング溝部の浸透探傷検査を実施した結果、有意な指示は認められなかった。

項目	周辺配管等の点検結果
点検結果	<p>金属粉の影響調査のため、充てんポンプ3C出口ライン配管等の内部を点検した結果、異物等の異常は認められなかった。点検結果は以下のとおり。</p> <ul style="list-style-type: none">・ 出口ライン水平部 ファイバースコープにより内部点検を実施した結果、異物等はなく異常は認められなかった。・ 出口ライン垂直部 配管内部のフラッシングを実施した結果、異物等はなく異常は認められなかった。・ 出口ライン逆止弁および封水注入フィルタ3A 逆止弁および封水注入フィルタ3Aを開放し、内部点検を実施した結果、異物等はなく異常は認められなかった。

周辺配管等点検結果 (ポンプ出口配管)



ポンプ出口配管
異常なし



封水注入フィルタ
3 A 異常なし



逆止弁 (3V-CS-136C)
異常なし

点検結果

- ・ 出口ライン水平部に、異物等はなく異常は認められなかった。
- ・ 出口ライン垂直部に、異物等はなく異常は認められなかった。
- ・ 出口ラインの逆止弁および封水注入フィルタ 3 A に、異物等はなく異常は認められなかった。

伊方3号機 充てんポンプ3C 主軸折損に関する要因分析図

[備考]
 ○：可能性あり。
 ×：可能性なし。

事象	要因	因子	調査内容	調査結果	評価	
主軸折損	材料製作施工	材料不良	材料不良 ・材料証明書の確認 ・折損部の金属組織調査	材料証明書を確認した結果、化学成分、機械的性質、熱処理および硬さが規定値内であった。また、折損部の金属組織調査の結果でも化学成分、硬さに異常は認められなかった。	×	
		製作不良	製作不良 ・製作記録の確認	製作時の試験・検査記録を確認した結果、主軸・羽根車の寸法等の検査結果は規定値内であり、異常は認められなかった。	×	
		施工不良	施工不良 ・据付記録の確認	据付時の工事記録および試運転記録を確認した結果、各部振動、温度等は規定値内であり、異常は認められなかった。	×	
	疲労	応力集中	応力集中	・折損部の詳細調査	スプリットリング溝部の型取測定を実施した結果、第6段から第9段のコーナの曲率半径がR止まりで0.20~0.60mmとなっていた。また、第7段の継手側では0.30~0.60mmとなっていた。このため、折損部（第7段軸端側）においても同様にコーナのR止まりでは曲率半径が小さくなっていたものと推定され、当該部の応力集中係数が大きくなっていた可能性がある。	
			過大応力	・折損部の詳細調査	折損部の詳細調査の結果、第7段羽根車のスプリットリングの軸端側の面にスプリットリング溝との接触痕が認められた。このことから、スプリットリングと主軸の接触による当該溝部への応力発生の可能性がある。	
			流体振動	・折損部の金属組織調査 ・系統構成の確認 ・定期検査記録の確認 ・運転記録の確認	折損部の破面が平坦であり、粒内割れおよびビーチマークが観察されたことから、低応力高サイクル疲労によるものと判断した。 ・系統構成を確認した結果、充てんポンプのミニマムフローラインには流量制限オリフィスが設置されており、ミニマムフロー水はオリフィスで減圧された後、体積制御タンク下流のポンプ入口ラインに合流する系統であった。 ・運転記録を確認した結果、定期検査中に体積制御タンク大気開放状態で充てんポンプの運転が行なわれていた。 ・定期検査記録を確認した結果、第1段羽根車吸込部翼に浸食傷が認められ、グラインダーによる手入れを行っていた。 ・運転記録を確認した結果、プラント運転中および定期検査中における各種パラメータに異常は認められなかった。 ・体積制御タンク大気開放状態で充てんポンプの運転が行われた場合、ミニマムフローラインに設置されているオリフィス出口の圧力が低下し空気の気泡が発生すると考えられ、発生した気泡が充てんポンプに流れ込み、第1段羽根車で流体力のアンバランスによる機械的な振動が発生する可能性がある。	
		機械振動	機械振動	・定期検査記録の確認 ・振動記録の確認 ・ポンプ内部点検	(静止部と回転部の接触による励振の可能性) 定期検査記録を確認した結果、分解時にセンターブッシュ部に軽微な摺動傷は認められていたものの、組立後の試運転時の振動は規定値内にあり問題はなかった。また、ポンプ運転中の定期的な振動記録を確認した結果、振動は規定値内にあり異常は認められなかった。 (異物混入による励振の可能性) ポンプ内部点検の結果、異物はなく、異常は認められなかった。	×
			フレットニング	・折損部の詳細調査	スプリットリング溝部表面には光沢等すべりの痕は認められておらず、フレットニング疲労ではないと判断した。	×
		腐食	応力腐食割れ	・材料証明書の確認 ・運転記録の確認	材料証明書を確認した結果、SUS403相当材であった。 また、運転記録により各種パラメータを確認した結果、運転温度は45 程度と低いため、応力腐食割れの可能性はない。	×
		温度・圧力異常	異常昇温・昇圧	・運転記録の確認 ・定期検査記録の確認	運転記録および定期検査記録を確認した結果、運転温度・圧力とも設計条件内で運転しており、異常は認められなかった。	×
	保守不良	保守不良	・定期検査記録の確認	定期検査記録を確認した結果、分解・組立状況に異常は認められず、また、試運転時の振動は規定値内にあり、保守上の異常は認められなかった。	×	

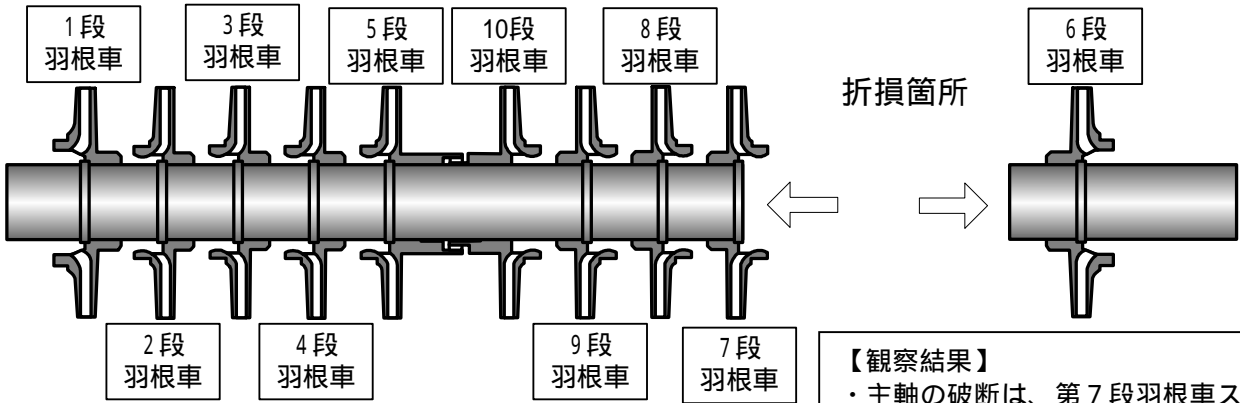
破面観察結果

目的	主軸破断面の観察を行い、折損の状況を確認する。
内容	<p>1 . 調査項目</p> <ul style="list-style-type: none"> ・マクロ的破面形状（平坦、凹凸）を確認する。 ・破断の起点の推定、ビーチマークの有無、色調の変化の有無を確認する。 <p>2 . 調査結果</p> <p>(1) 主軸破断部位 主軸の破断は、第7段羽根車スプリットリング溝部の軸端側で生じていた。 《別紙（1）》</p> <p>(2) 主軸破断面外観</p> <ul style="list-style-type: none"> ・主軸の破断は、スプリットリング溝部コーナ表面から生じていた。 ・破断部は、軸方向に対してほぼ垂直、破面は全体にほぼ平坦であり、疲労破壊に特有のビーチマークが認められた。^(注) <p>《別紙（2）》</p> <p>(3) 主軸破断面詳細</p> <ul style="list-style-type: none"> ・起点はき裂Aおよびき裂Bの2箇所があり、それぞれにビーチマークが12本および11本程度確認された。 ・最終破断部と推定される延性破壊した部分がき裂Aから約180°の位置に1箇所認められ、その周辺部にもビーチマーク状模様が確認された。 ・き裂Aから最終破断部までの破面も平坦ではあるが、起点部（き裂Aおよびき裂B）とは異なり、ざらざらとした金属光沢のある破面であった。 ・主軸折損時に軸端側と継手側破面が摺動して生じた傷が、軸端側および継手側破面に確認された。 <p>《別紙（3）》</p> <p>(注) 疲労破面の特徴 疲労破面の巨視的な特徴としては、一般的に平坦な破面であり、疲労き裂の進展速度に影響を与える作用応力や環境等の変化が生じた時に生成されるビーチマークが観察されることである。なお、本鋼種に近いマルテンサイト系ステンレス鋼の疲労破壊においては、破断繰返し数が増すほど破面が平坦になることが報告されている。(文献：江原隆一郎他, 「13Cr ステンレス鋼の腐食疲労破面について」, 「材料」, 第27巻(1978), 第292号, P.64)</p>
別紙	<p>(1) 主軸破断部位状況図</p> <p>(2) 主軸破断面状況（外観検査）</p> <p>(3) 主軸破断面拡大図（外観検査）</p>

主軸破断部位状況図

(継手側)

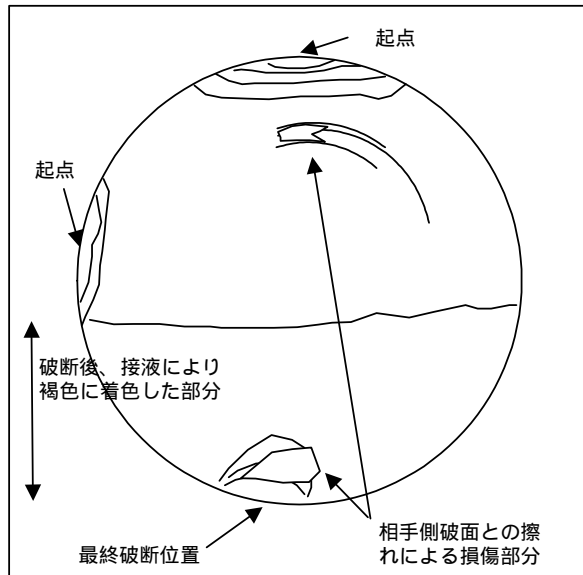
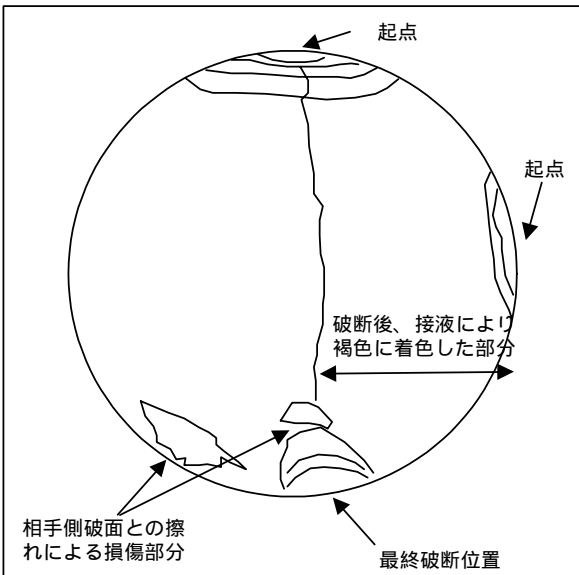
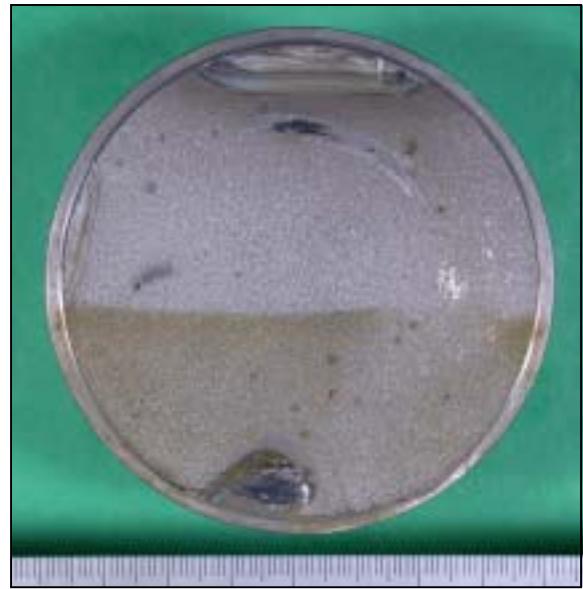
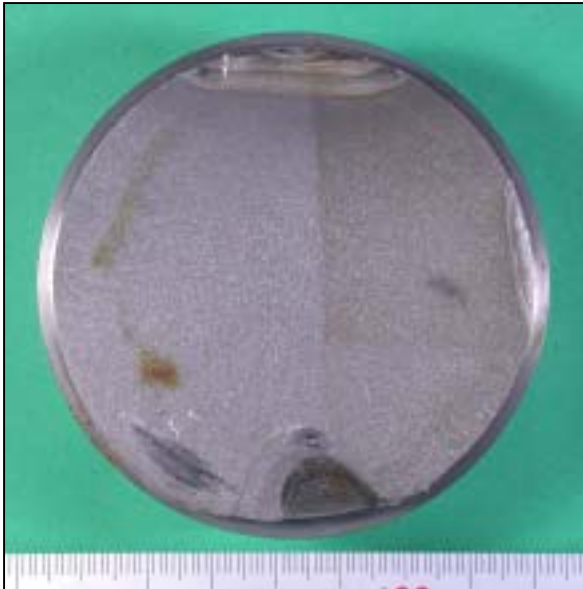
(軸端側)



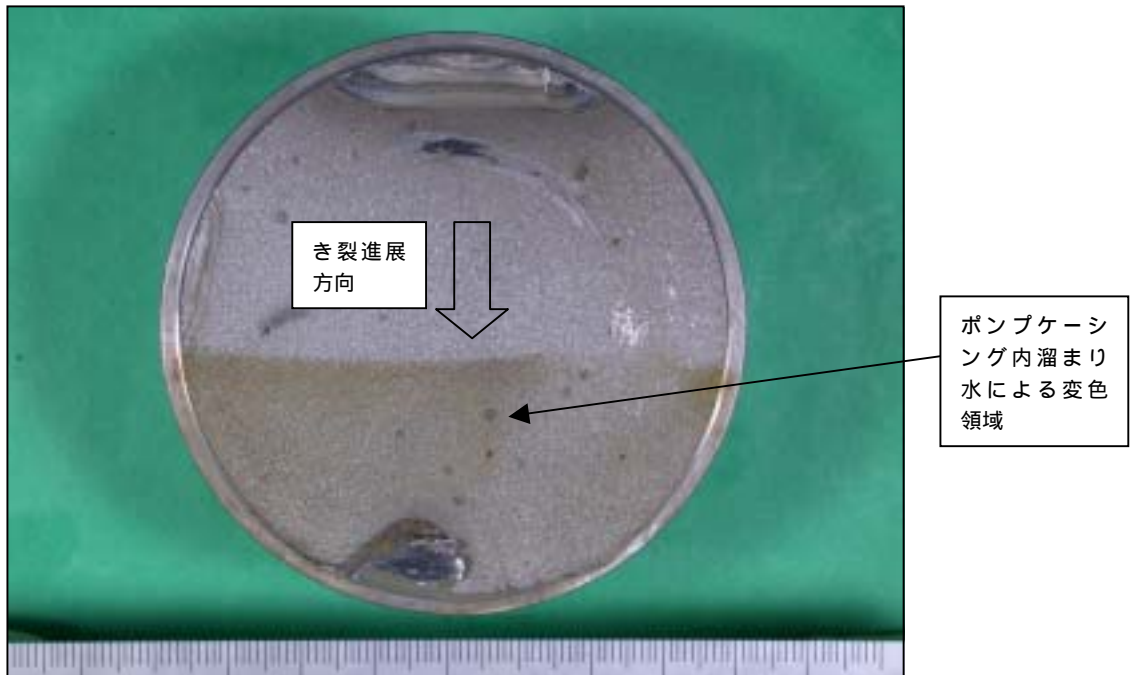
【観察結果】
 ・主軸の破断は、第7段羽根車スプリットリング溝部の軸端側で生じていた。

継手側

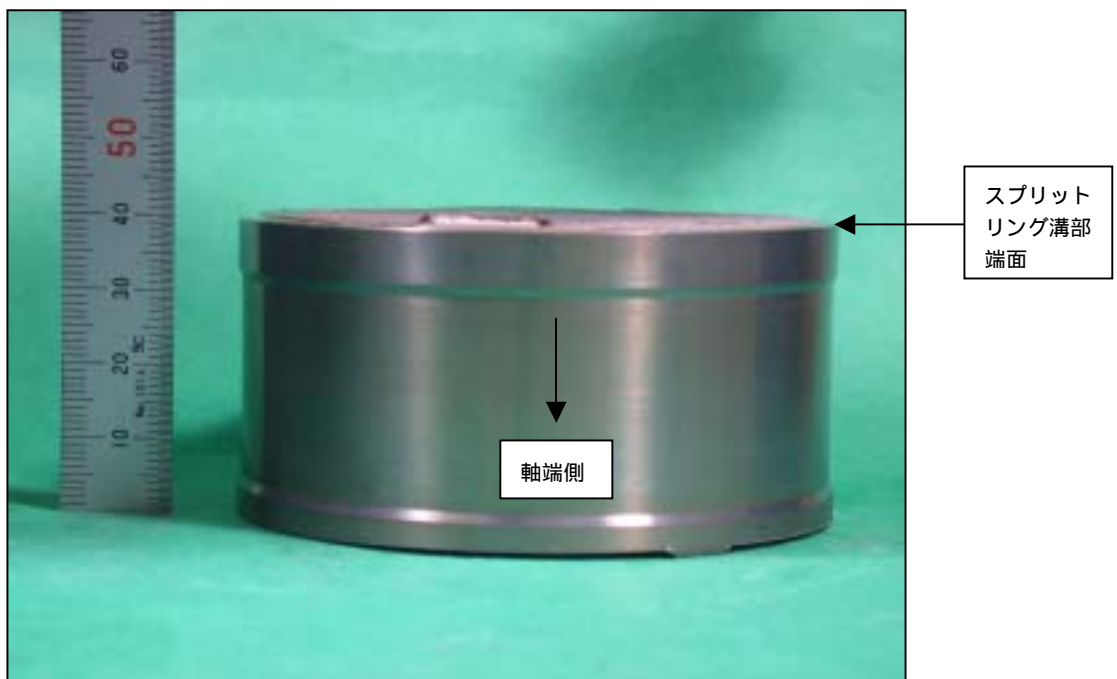
軸端側



主軸破断面状況 (外観検査) [軸端側]



充てんポンプ 3 C 主軸破面状況図 (軸方向より)

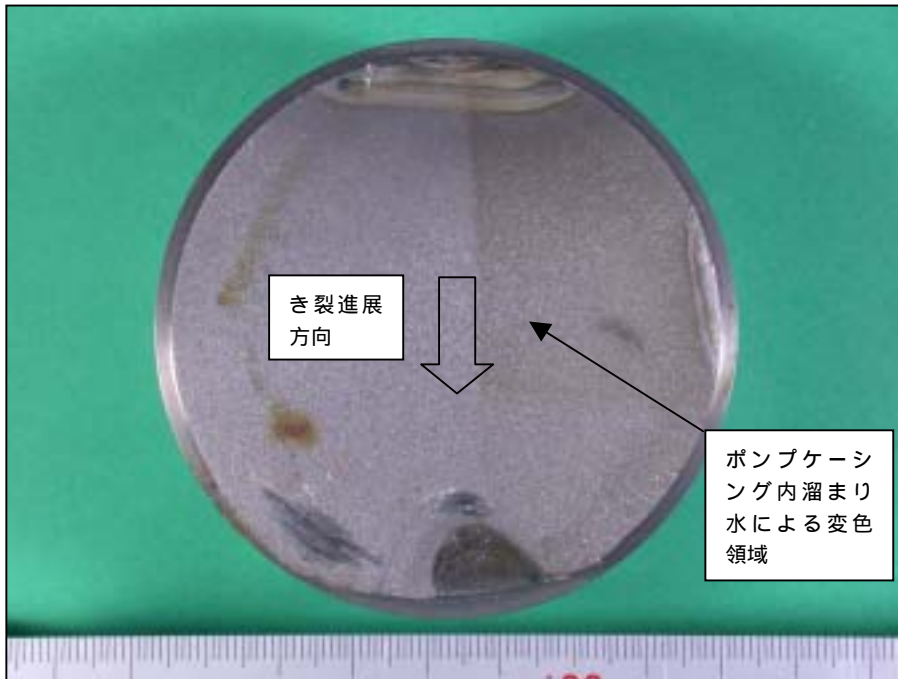


充てんポンプ 3 C 主軸破面状況図 (軸直角方向より)

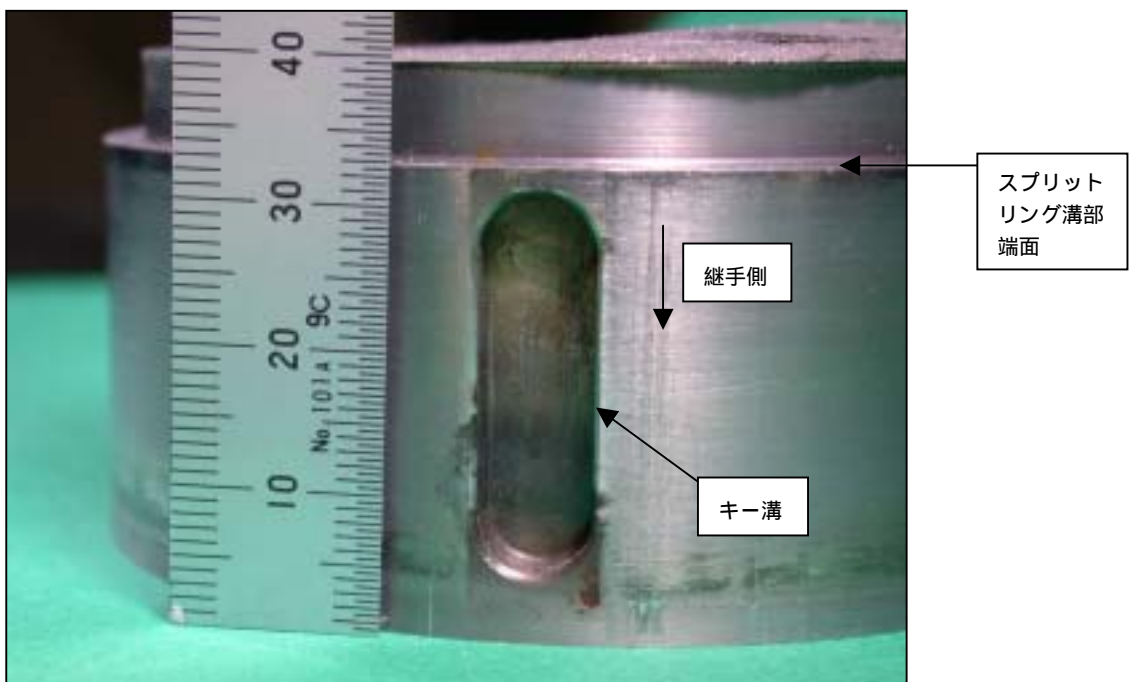
【観察結果】

- ・主軸の破断は、スプリットリング溝部コーナ表面から生じていた。
- ・破断部は、軸方向に対してほぼ垂直、破面は全体にほぼ平坦であり、疲労破壊に特有のビーチマークが認められた。

主軸破断面状況(外観検査)[継手側]



充てんポンプ3C主軸破面状況図(軸方向より)

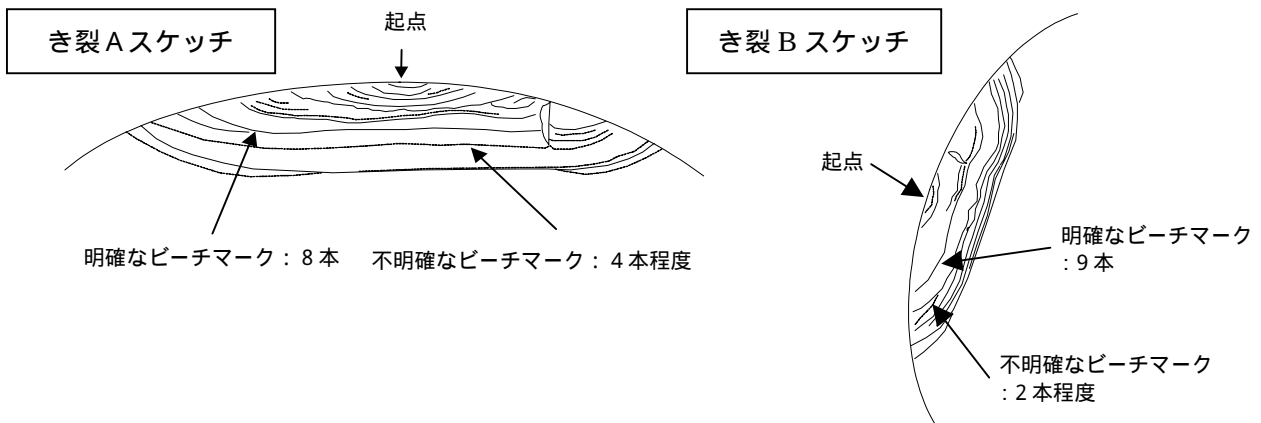
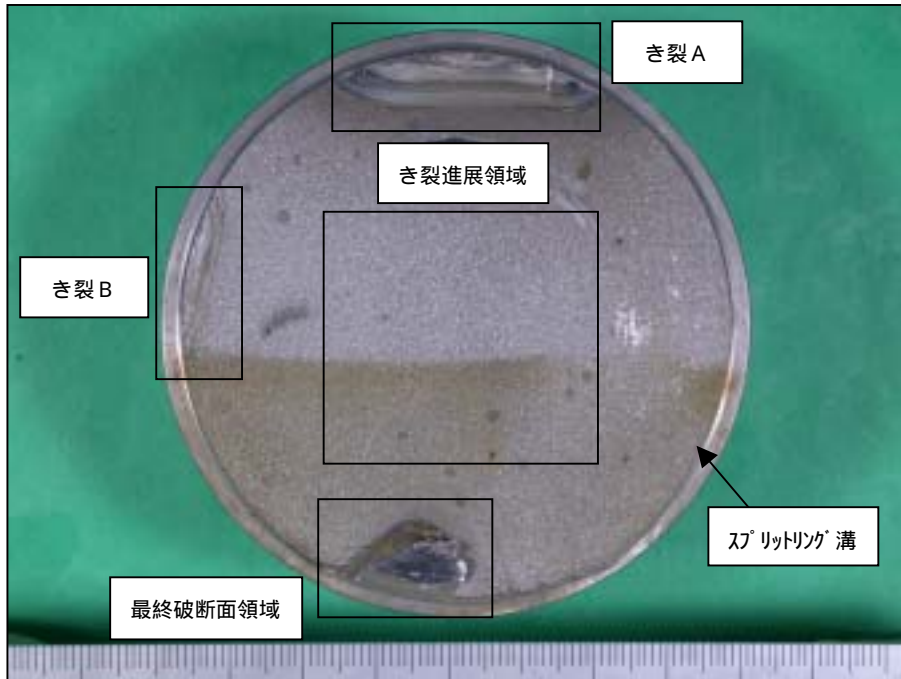


充てんポンプ3C主軸破面状況図(軸直角方向より)

【観察結果】

- ・主軸の破断は、スプリットリング溝部コーナ表面から生じていた。
- ・破断部は、軸方向に対してほぼ垂直、破面は全体にほぼ平坦であり、疲労破壊に特有のビーチマークが認められた。

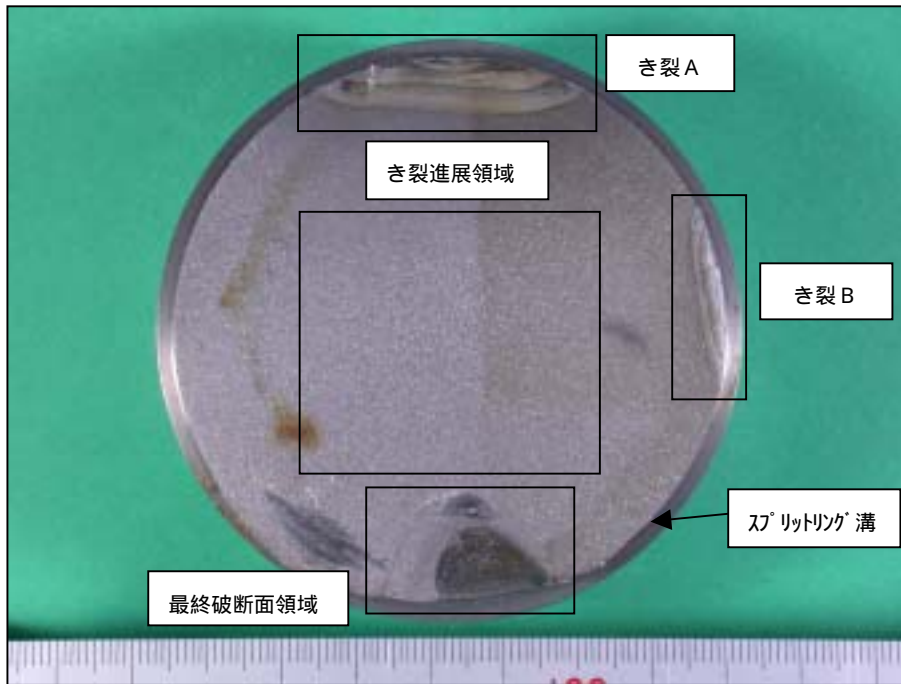
主軸破断面拡大図(外観検査)[軸端側]



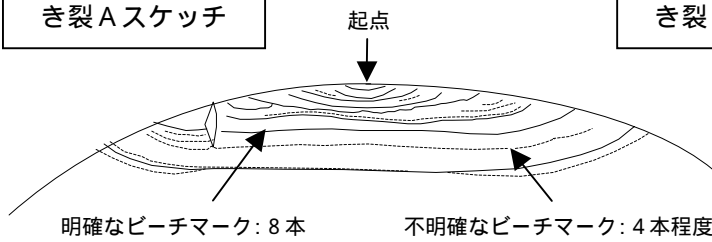
【観察結果】

- ・ 起点はき裂 A およびき裂 B の 2 箇所であり、それぞれにビーチマークが 12 本および 11 本程度確認された。
- ・ 最終破断面と推定される延性破壊した部分がき裂 A から約 180° の位置に 1 箇所認められ、その周辺部にもビーチマーク状模様が確認された。
- ・ き裂 A から最終破断面までの破面も平坦ではあるが、起点部(き裂 A およびき裂 B)とは異なり、ざらざらとした金属光沢のある破面であった。
- ・ 主軸折損時に軸端側と継手側破面が摺動して生じた傷が、軸端側および継手側破面に確認された。

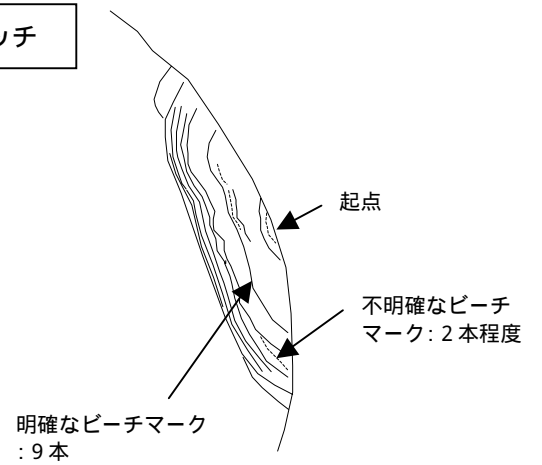
主軸破断面拡大図(外観検査)[継手側]



き裂Aスケッチ



き裂Bスケッチ



【観察結果】

- ・ 起点はき裂Aおよびき裂Bの2箇所であり、それぞれにビーチマークが12本および11本程度確認された。
- ・ 最終破断部と推定される延性破壊した部分がき裂Bから約180°の位置に1箇所認められ、その周辺部にもビーチマーク状模様が確認された。
- ・ き裂Bから最終破断部までの破面も平坦ではあるが、起点部(き裂Aおよびき裂B)とは異なり、ざらざらとした金属光沢のある破面であった。
- ・ 主軸折損時に軸端側と継手側破面が摺動して生じた傷が、軸端側および継手側破面に確認された。

断面ミクロ観察結果

目的	主軸破断面の断面を観察し、組織性状、材料欠陥の有無を確認する。
内容	<p>1 . 調査項目 主軸材料の組織性状、材料欠陥の有無を確認する。</p> <p>2 . 調査結果 主軸破断面（き裂A、き裂進展領域、最終破断面領域）</p> <ul style="list-style-type: none">・き裂の起点部においては、材料欠陥や変形等の異常は認められなかった。・主軸破断面では、本鋼種に特徴的なマルテンサイト組織が観察されており、組織性状の異常は認められなかった。 <p style="text-align: right;">《別紙（1）》</p>
別紙	（1）断面ミクロ観察状況 [軸端側]

断面ミクロ観察状況 [軸端側]

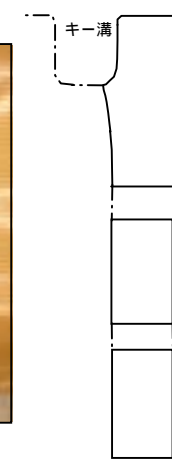
断面ミクロ組織観察結果



[軸端側破面]

◀ 観察方向

継手側 軸端側 き裂進展方向 破面 起点部 スプリットリング溝



観察断面
き裂起点部



拡大



【観察結果】

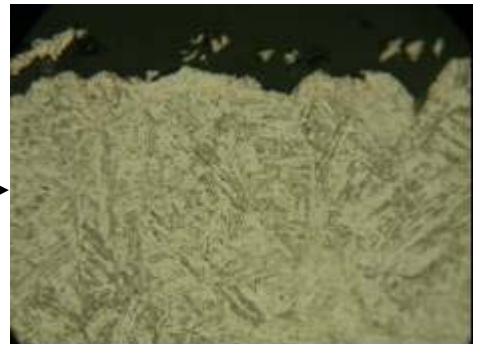
- ・き裂の起点部においては、材料欠陥や変形等の異常は認められなかった。
- ・主軸破断面では、本鋼種に特徴的なマルテンサイト組織が観察されており、組織性状の異常は認められなかった。

き裂進展方向

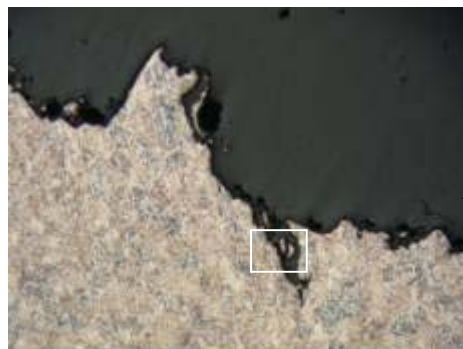
き裂中央部
表面



拡大



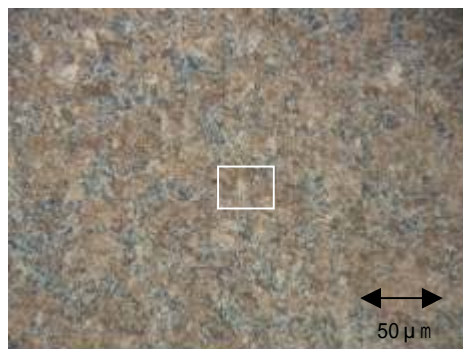
破断部



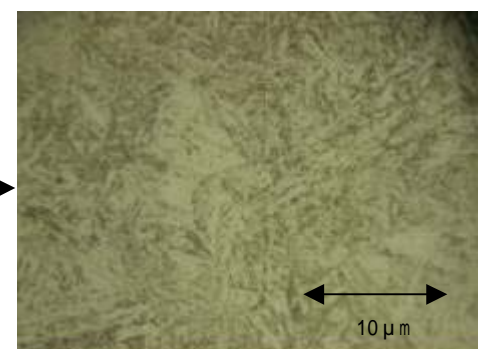
拡大



一般部



拡大

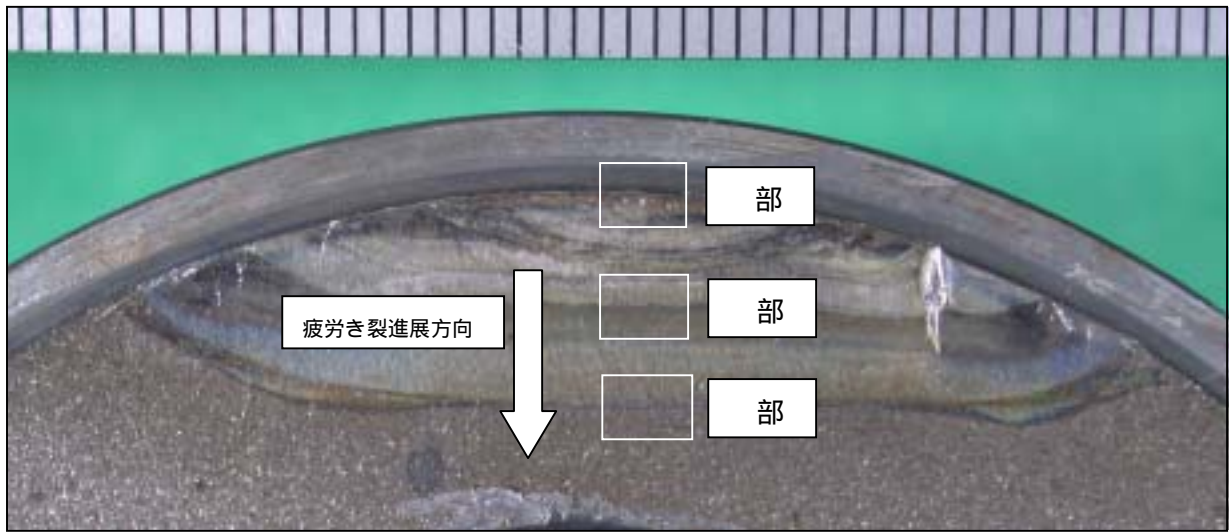


破面SEM観察結果

目的	主軸破断面の観察を行い、き裂進展の状況を確認する。
内容	<p>1 . 調査項目</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ミクロ的破面形状 (平坦、凹凸) を確認する。 ・き裂の起点の推定、ストライエーションおよび微細欠陥の有無等を確認する。 <p>2 . 調査結果</p> <p>(1) き裂A 状況</p> <ul style="list-style-type: none"> ・き裂A 起点部において、材料欠陥、顕著な機械加工傷、フレット痕 (こすれ痕) 腐食ピット等は確認できなかった。 ・マルテンサイト系ステンレス鋼の疲労破面では、変動応力が比較的大きい場合にはストライエーションが観察される^(注1)が、き裂A ではストライエーションは観察されず、特徴的な粒内割れ^(注1,注2)が確認されたため、低応力高サイクル疲労破壊と推定された。 <p style="text-align: right;">《別紙 (1) 》</p> <p>(2) き裂B 状況</p> <ul style="list-style-type: none"> ・き裂B 起点部において、軸端側破面では機械切削加工時の微小なえぐれと考えられるものが見られたが、材料欠陥、顕著な機械加工傷、フレット痕 (こすれ痕) 腐食ピット等は確認できなかった。 ・マルテンサイト系ステンレス鋼の疲労破面では、変動応力が比較的大きい場合にはストライエーションが観察される^(注1)が、き裂B ではストライエーションは観察されず、特徴的な粒内割れ^(注1,注2)が確認されたため、低応力高サイクル疲労破壊と推定された。 <p style="text-align: right;">《別紙 (2) 》</p> <p>(3) 最終破断面領域状況図</p> <p>最終破断面領域には、延性破面に特有なディンプル^(注3)が全面に確認された。</p> <p style="text-align: right;">《別紙 (3) 》</p> <p>(4) き裂進展領域状況</p> <p>起点部および最終破断面領域を除く破面では、粒界および粒内割れが混在した破面^(注4)が確認された。</p> <p style="text-align: right;">《別紙 (4) 》</p>

内 容	<p>(注1): マルテンサイト系ステンレス鋼の低応力(低 K)高サイクル疲労破面では、ストライエーションが観察されず、いわゆる「組織状模様(粒内割れ)」が観察されることが報告されている。一方、変動応力が比較的大きい場合には、ストライエーションが観察されることも知られている。(文献:藤原昌晴他,「疲労破面粗さに基づく作用応力推定」,「材料」,第40巻(1991),第453号,P.58)</p> <p>(注2): 低応力高サイクル疲労破壊に特徴的な粒内割れとは、疲労破面に現れるミクロ的破面模様的一种であり、「組織状模様」とも呼ばれる。「組織状模様」とは、金属材料をエッチングした時に観察される金属組織模様に類似していることから名付けられたものである。一般に、この「組織状模様」は、ストライエーションが現れる領域に比べてき裂進展速度が小さい領域において特徴的に観察される。 (参考文献:「日本原子力発電(株) 敦賀発電所2号機 再生熱交換器連絡配管からの一次冷却材漏えいについて(平成11年10月25日 資源エネルギー庁)」,添付資料 添付2-65(「SUS316のストライエーション間隔,き裂伝ば速度と Kの関係」))</p> <p>(注3): 金属材料が延性破壊した破面に特徴的に認められる、多数の小さなくぼみ状の模様をいう。 (参考文献:「フラクトグラフィーとその応用」,P.31,小寺沢良一編著(日刊工業新聞社))</p> <p>(注4): マルテンサイト系ステンレス鋼の低応力(低 K)高サイクル疲労破面(特にき裂進展部)では、粒界割れが観察されることが報告されている。(文献:H.Ishii, et al, The Effects of Heat Treatments on Corrosion Fatigue Properties of 13% Pct Chromium Stainless Steel in 3% NaCl Aqueous Solution, Metallurgical Transactions A, Vol.13A, (1982))</p>
別 紙	<p>(1) き裂A状況図</p> <p>(2) き裂B状況図</p> <p>(3) 最終破断面領域状況図</p> <p>(4) き裂進展領域状況図</p>

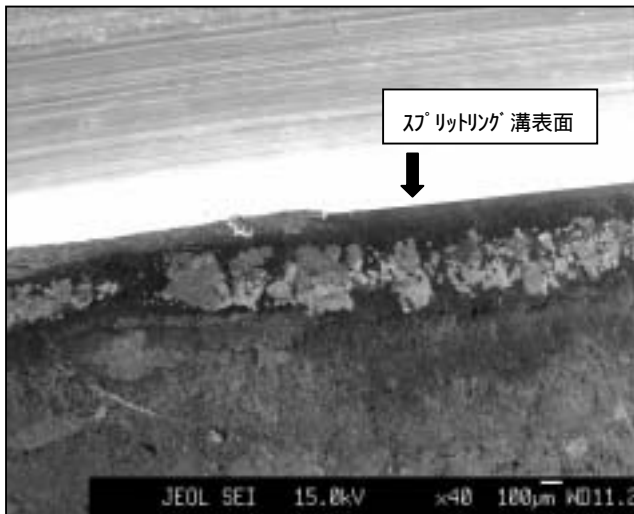
き裂 A 状況図 [軸端側]



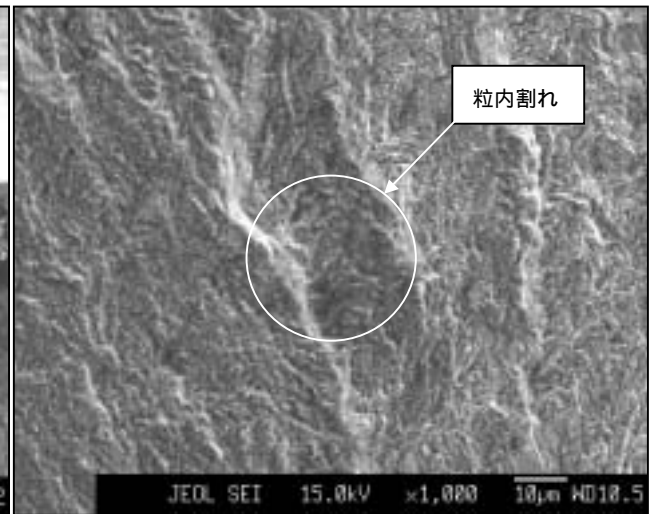
【観察箇所の選定方針】

- ・き裂 A 起点のスプリットリング溝底表面近傍での初期欠陥等の有無を詳細に調査するため、「部」を選定した。
- ・き裂発生後、運転応力で徐々に進展した破面領域を詳細に調査するため、「部」を選定した。
- ・き裂 A の破面様相（最終ビーチマーク以降）が変化する破面領域を詳細に調査するため、「部」を選定した。

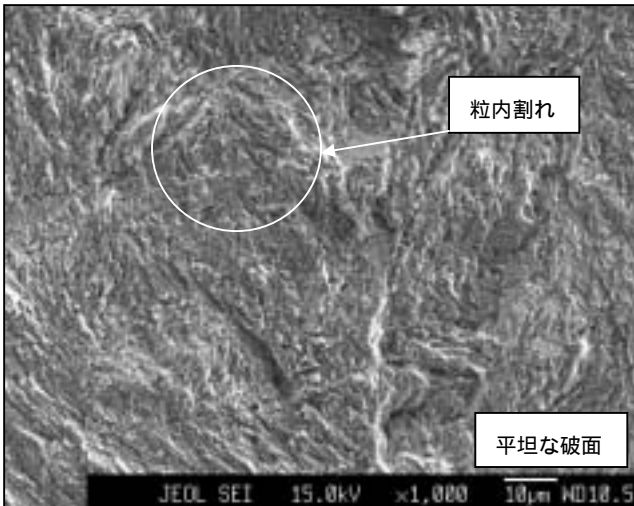
部観察結果 [き裂 A 起点部]



部観察結果 [き裂 A 進展部]



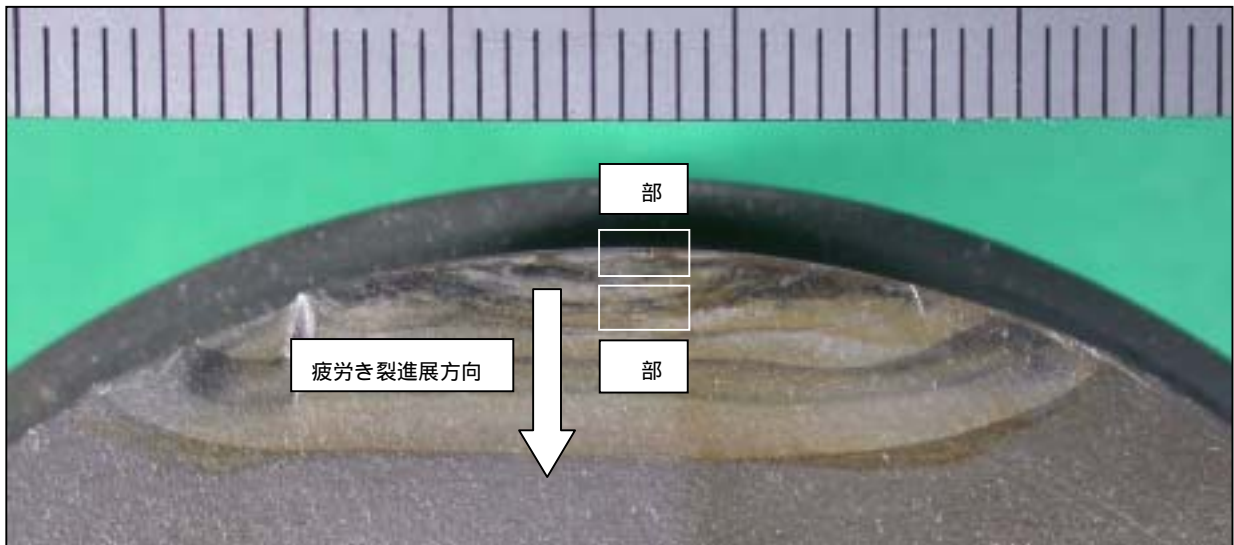
部観察結果 [き裂 A 進展部]



【観察結果】

- ・き裂 A 起点部において、材料欠陥、顕著な機械加工傷、フレット痕（こすれ痕）、腐食ピット等は確認できなかった。
- ・マルテンサイト系ステンレス鋼の疲労破面では、変動応力が比較的大きい場合にはストライエーションが観察されるが、き裂 A ではストライエーションは観察されず、特徴的な粒内割れが確認されたため、低応力高サイクル疲労破壊と推定された。

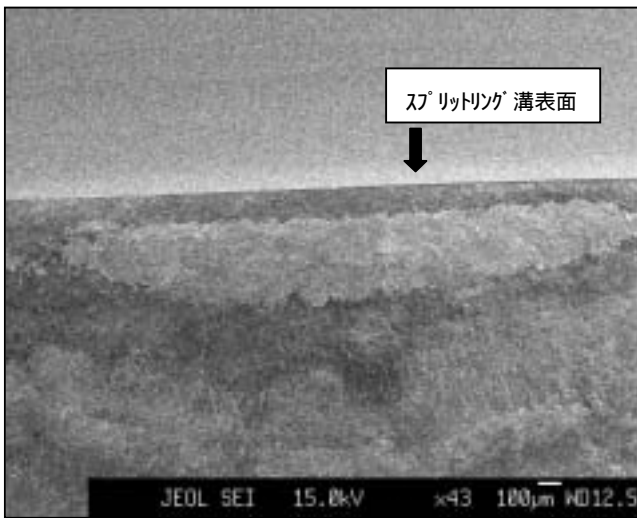
き裂 A 状況図 [継手側]



【観察箇所の選定方針】

- ・き裂 A 起点のスプリットリング溝底表面近傍での初期欠陥等の有無を詳細に調査するため、「部」を選定した。
- ・き裂発生後、運転応力で徐々に進展した破面領域を詳細に調査するため、「部」を選定した。

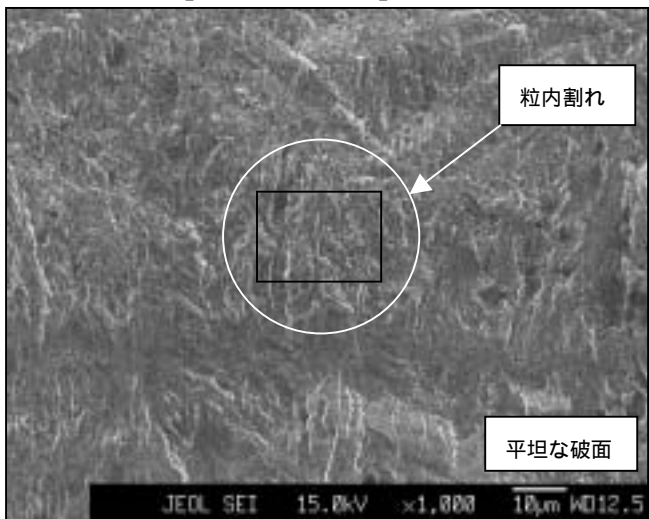
部観察結果 [き裂 A 起点部]



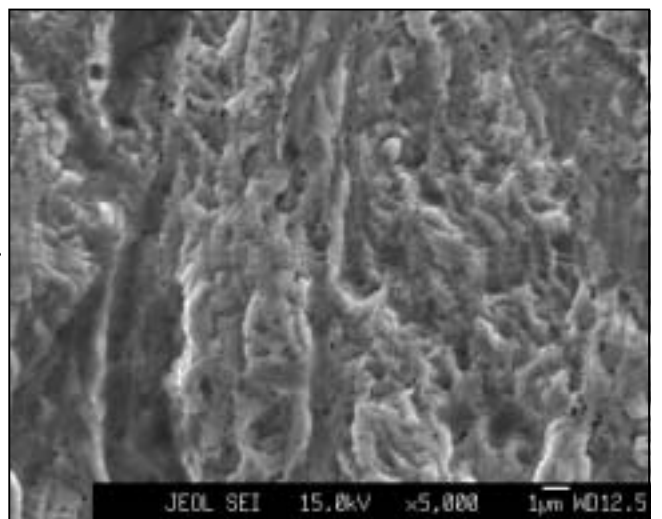
【観察結果】

- ・き裂 A 起点部において、材料欠陥、顕著な機械加工傷、フレット痕 (こすれ痕)、腐食ピット等は確認できなかった。
- ・マルテンサイト系ステンレス鋼の疲労破面では、変動応力が比較的大きい場合にはストライエーションが観察されるが、き裂 A ではストライエーションは観察されず、特徴的な粒内割れが確認されたため、低応力高サイクル疲労破壊と推定された。

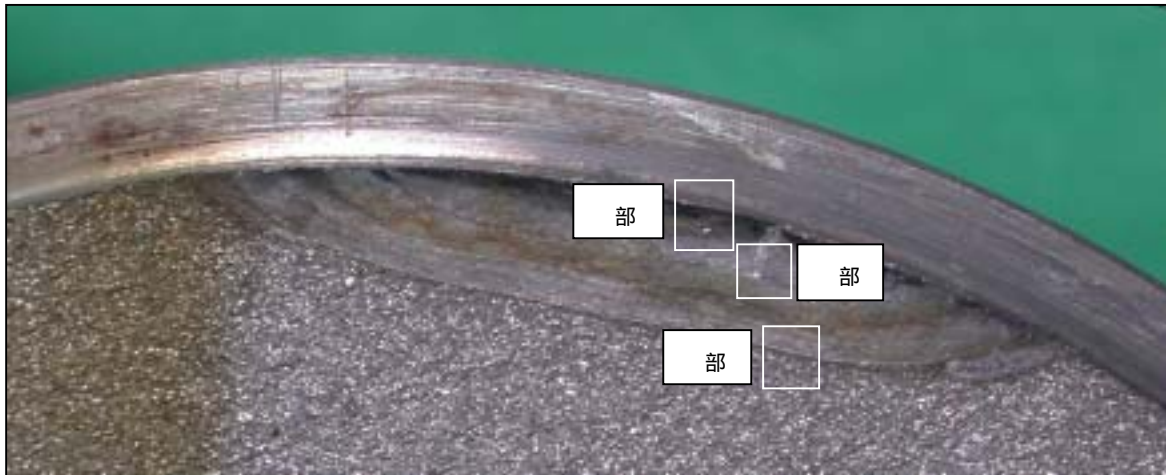
部観察結果 [き裂 A 進展部]



拡大
→



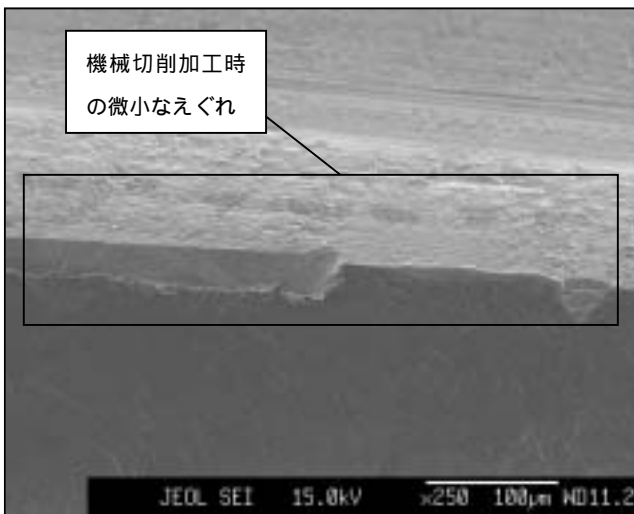
き裂B状況図 [軸端側]



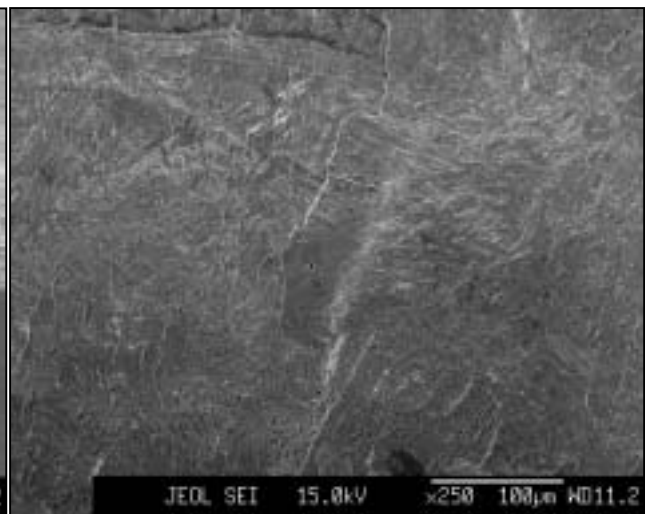
【観察箇所の選定方針】

- ・き裂B起点のスプリットリング溝表面近傍での初期欠陥等の有無を詳細に調査するため、「部」を選定した。
- ・き裂発生後、運転応力で徐々に進展した破面領域を詳細に調査するため、「部」を選定した。
- ・き裂Bの破面様相(最終ビーチマーク以降)が変化する破面領域を詳細に調査するため、「部」を選定した。

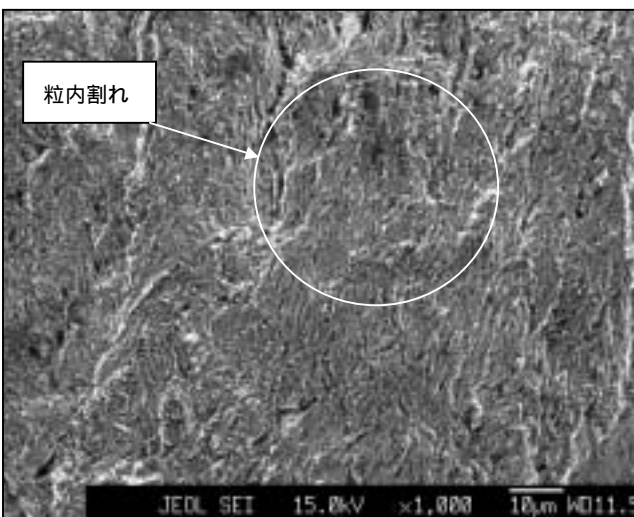
部観察結果 [き裂B起点部]



部観察結果 [き裂B進展部]



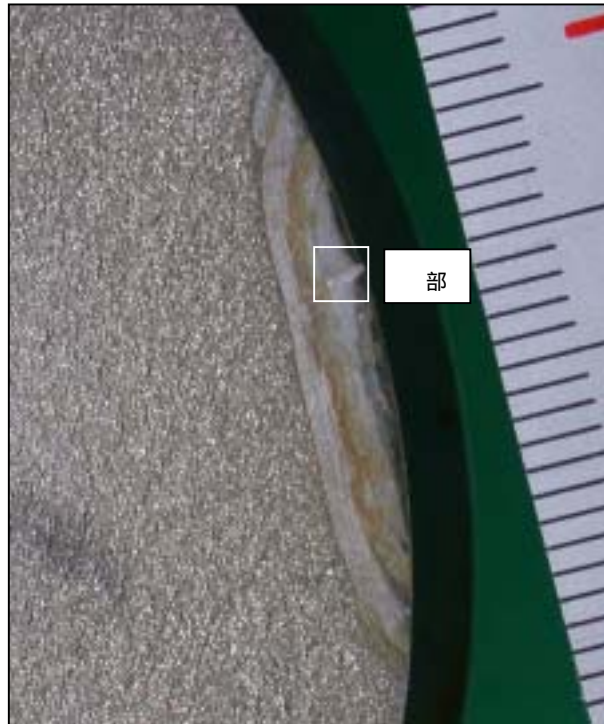
部観察結果



【観察結果】

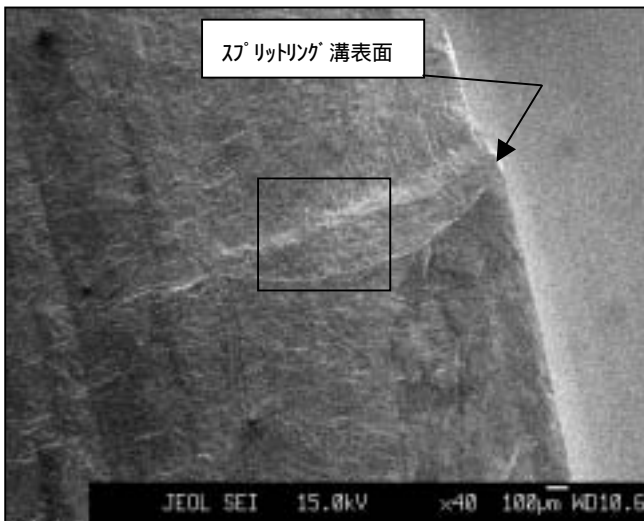
- ・き裂B起点部において、機械切削加工時の微小なえぐれと考えられるものが見られたが、材料欠陥、顕著な機械加工傷、フレッティング痕(こすれ痕)、腐食ピット等は確認できなかった。
- ・マルテンサイト系ステンレス鋼の疲労破面では、変動応力が比較的大きい場合にはストライエーションが観察されるが、き裂Bではストライエーションは観察されず、特徴的な粒内割れが確認されたため、低応力高サイクル疲労破壊と推定された。

き裂 B 状況図 [継手側]

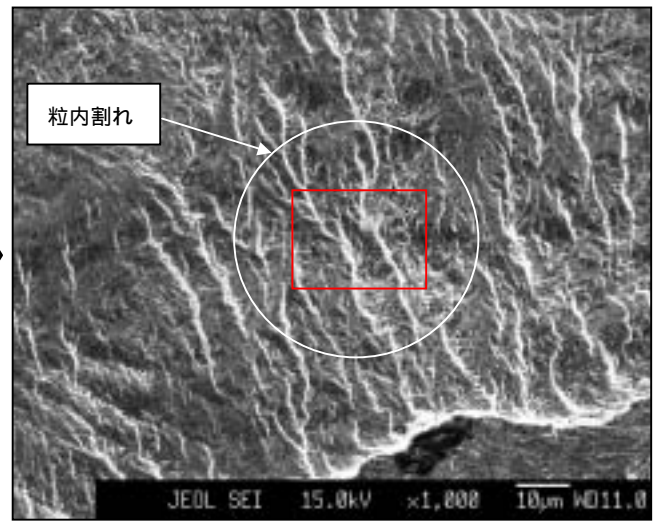


【観察箇所の選定方針】
 ・き裂 B 起点のスプリットリング溝表面近傍での初期欠陥等の有無及び破面状況を詳細に調査するため、「部」を選定した。

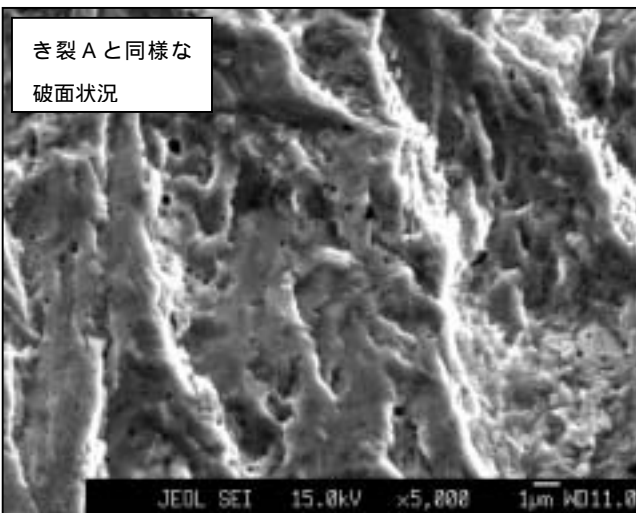
部観察結果 [き裂 B 起点部]



拡大

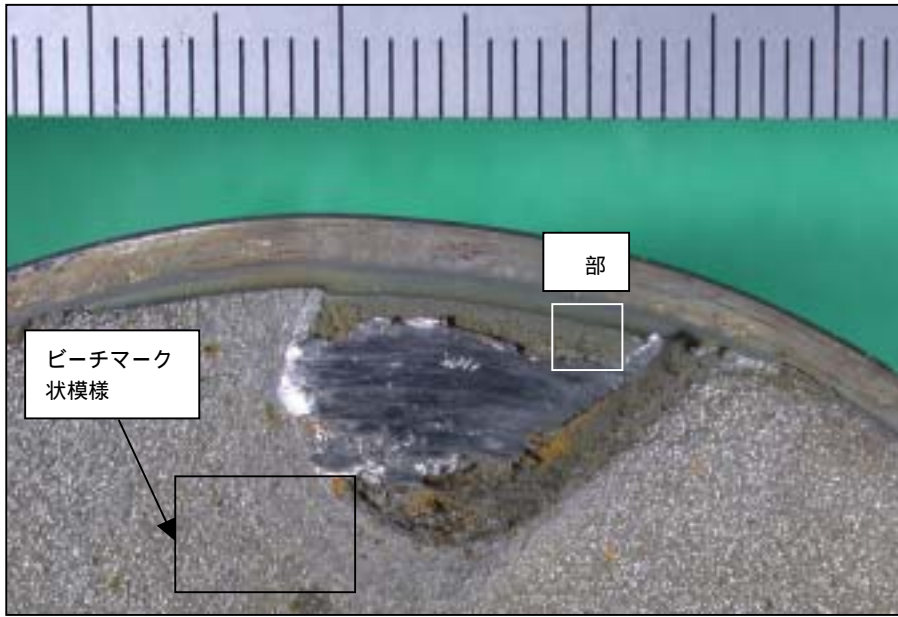


拡大



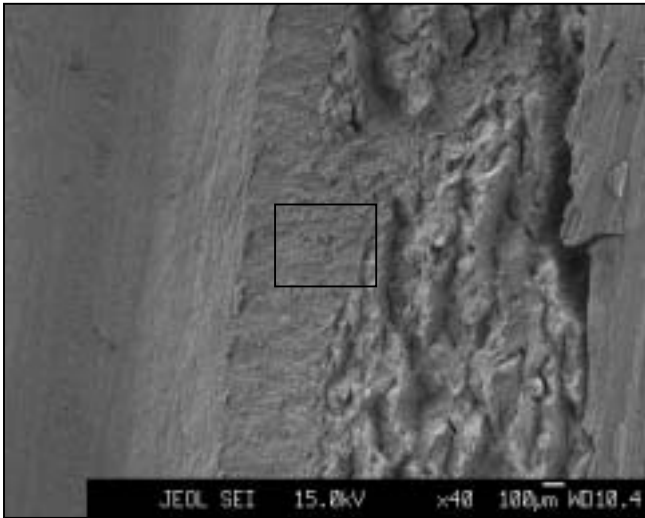
【観察結果】
 ・き裂 B 起点部において、材料欠陥、顕著な機械加工傷、フレット痕（こすれ痕）、腐食ピット等は確認できなかった。
 ・マルテンサイト系ステンレス鋼の疲労破面では、変動応力が比較的大きい場合にはストライエーションが観察されるが、き裂 B ではストライエーションは観察されず、特徴的な粒内割れが確認されたため、低応力高サイクル疲労破壊と推定された。

最終破断面領域状況図 [軸端側]

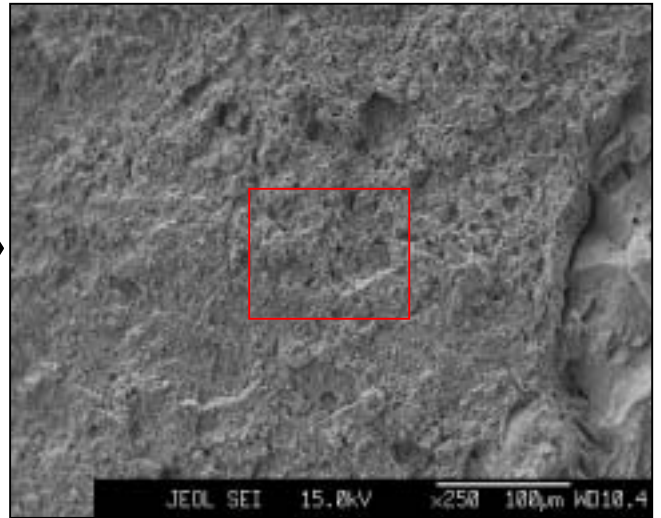


【観察箇所の選定方針】
・最終破断面領域のスプリットリング溝表面近傍での破面状況を詳細に調査するため、「部」を選定した。

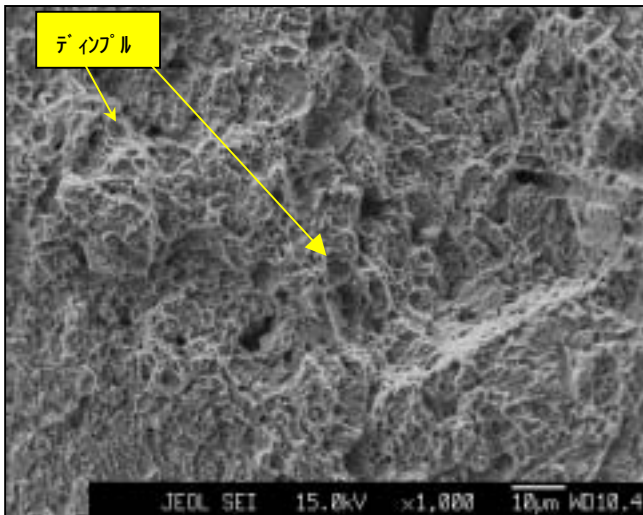
部観察結果



拡大
→

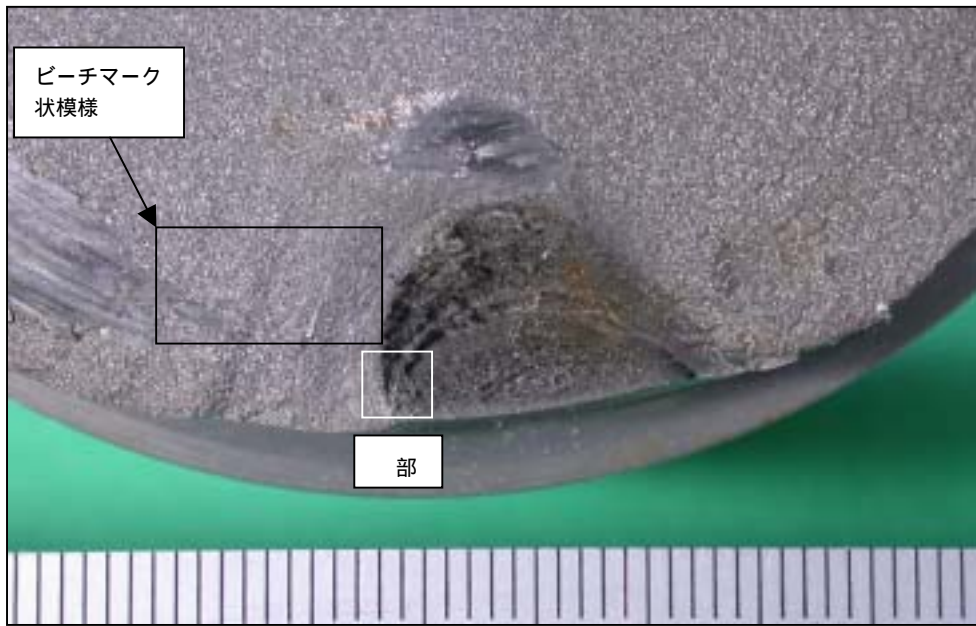


拡大
→



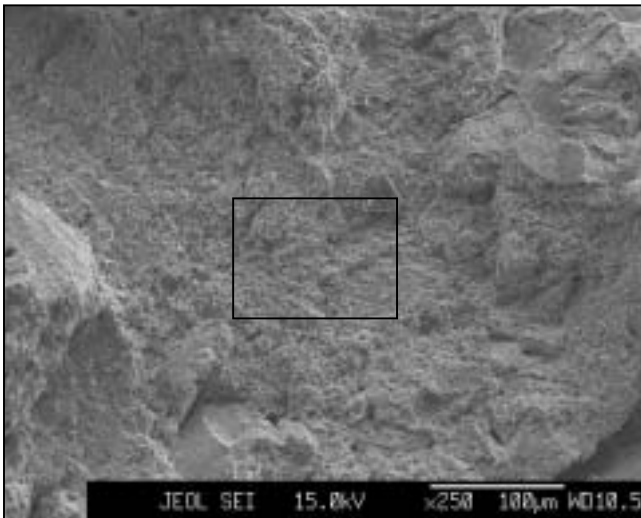
【観察結果】
・最終破断面領域には、延性破面に特有なディンプルが全面に確認された。

最終破断面領域状況図 [継手側]

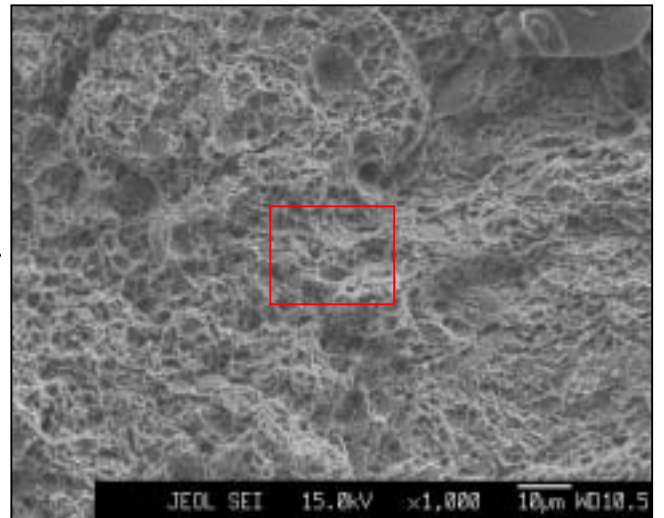


【観察箇所の選定方針】
・最終破断面領域の主軸内部側の破面状況を詳細に調査するため、「部」を選定した。

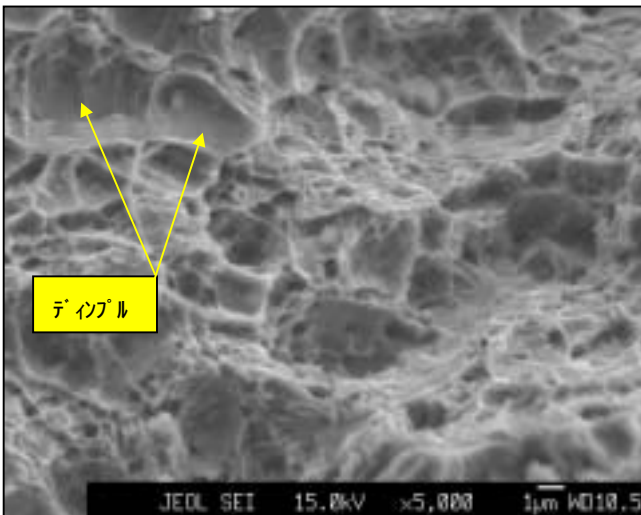
部観察結果



拡大
→

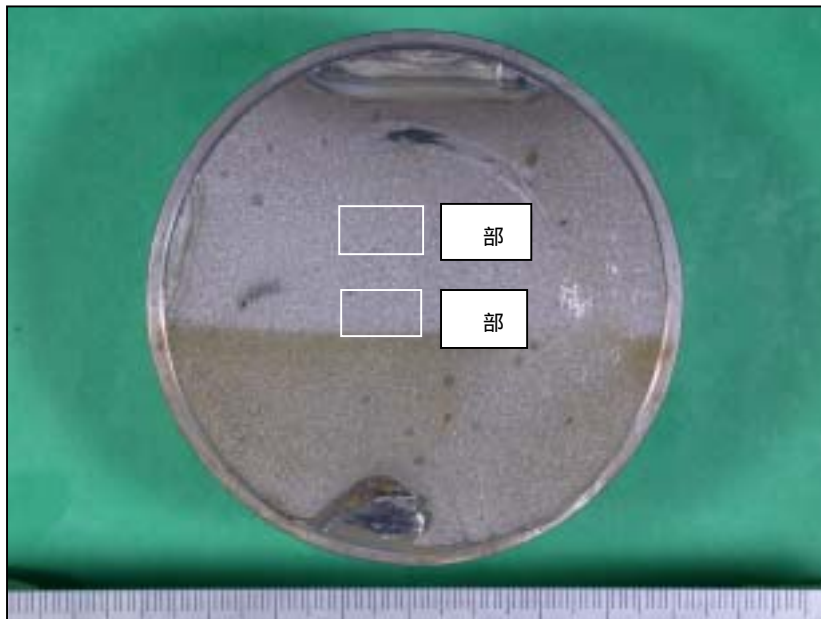


拡大
→



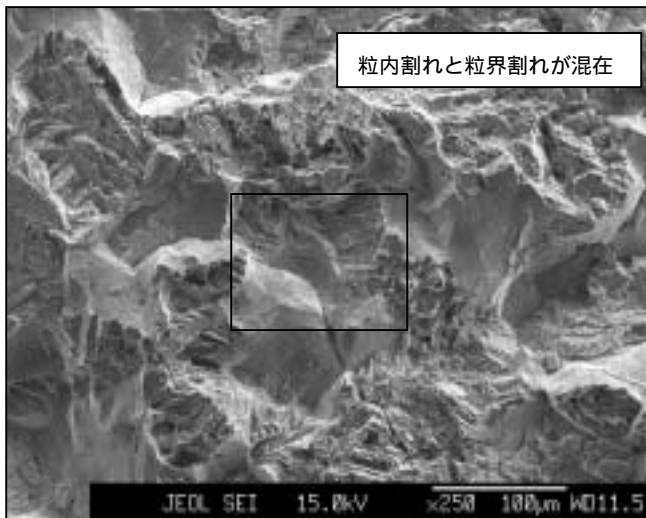
【観察結果】
・最終破断面領域には、延性破面に特有なディンプルが全面に確認された。

き裂進展領域状況図 [軸端側]

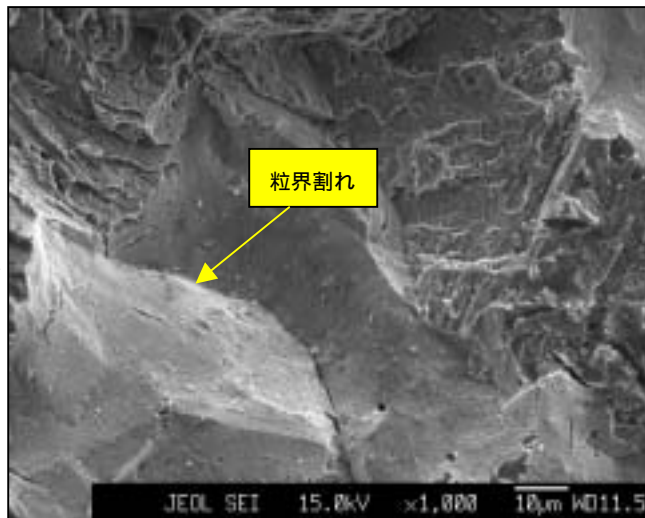


【観察箇所の選定方針】
 ・き裂進展領域の破面状況を詳細に調査するため、主軸中央付近の最終破断面側「部」とき裂A側「部」を選定した。

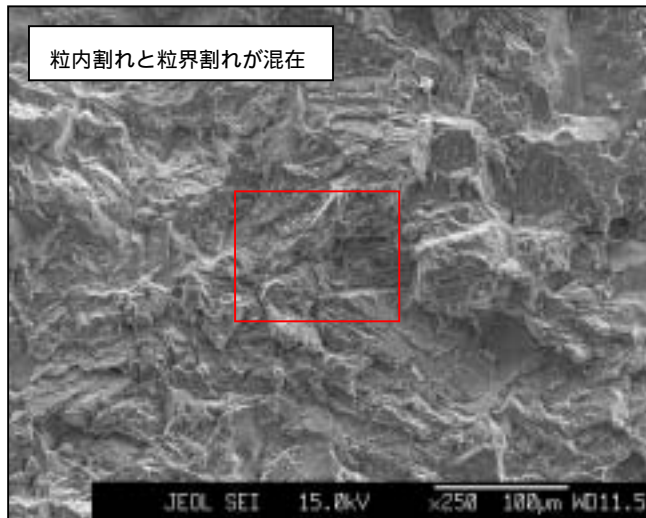
部観察結果



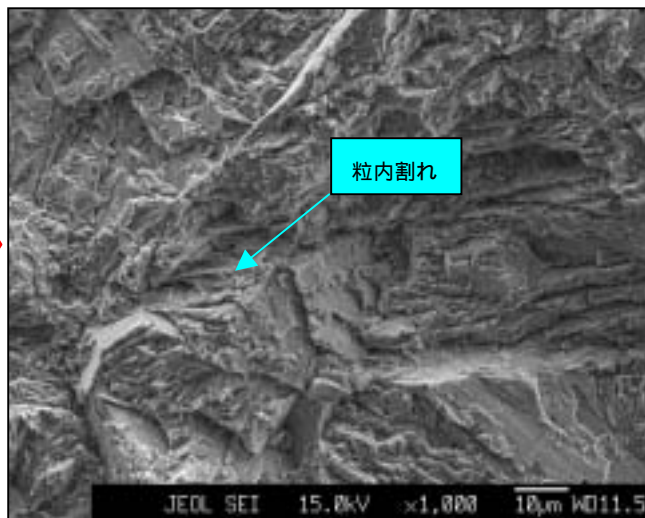
拡大



部観察結果

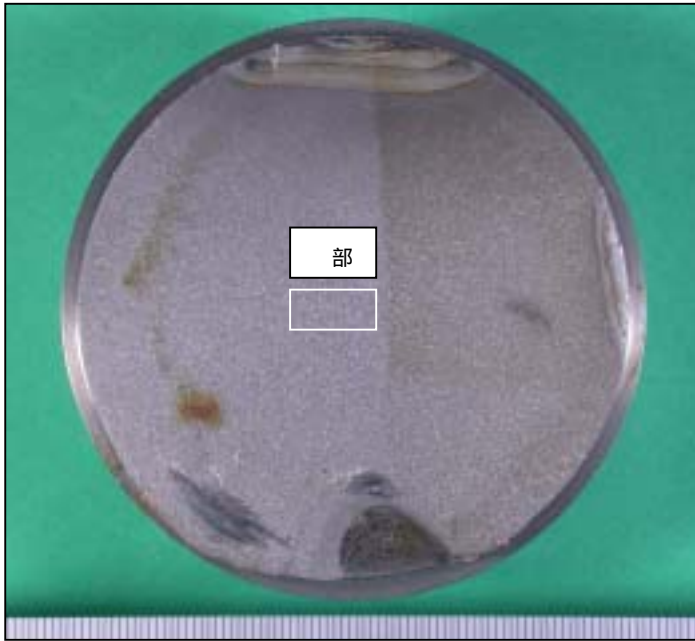


拡大



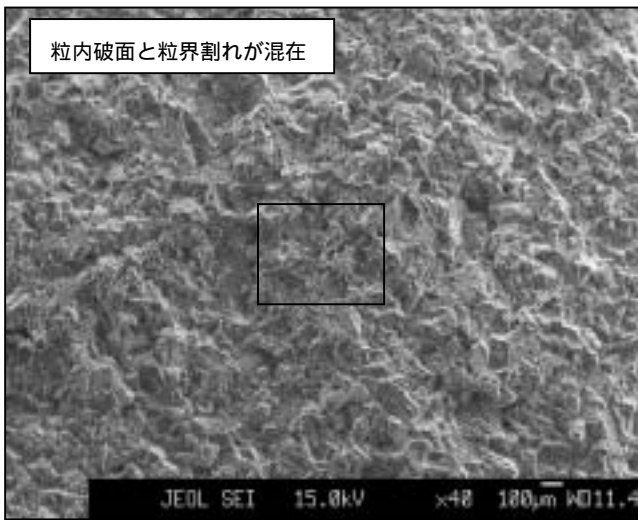
【観察結果】
 ・起点部および最終破断面領域を除く破面では、粒界および粒内割れが混在した破面が確認された。

き裂進展領域状況図 [継手側]

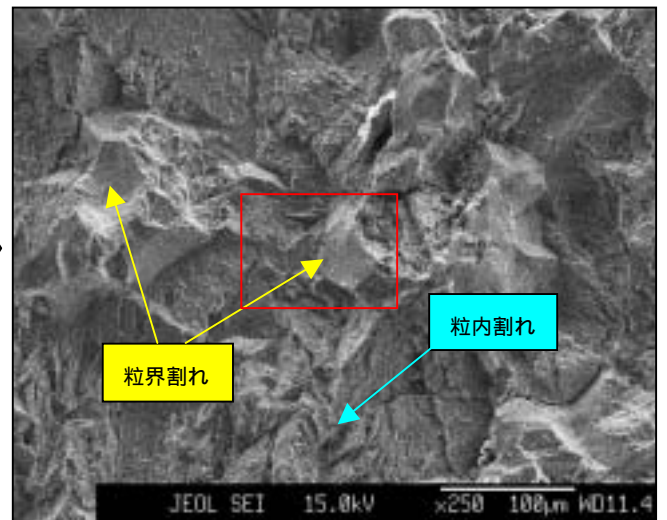


【観察箇所の選定方針】
・き裂進展領域の破面状況を詳細に調査するため、主軸中央付近の「部」を選定した。

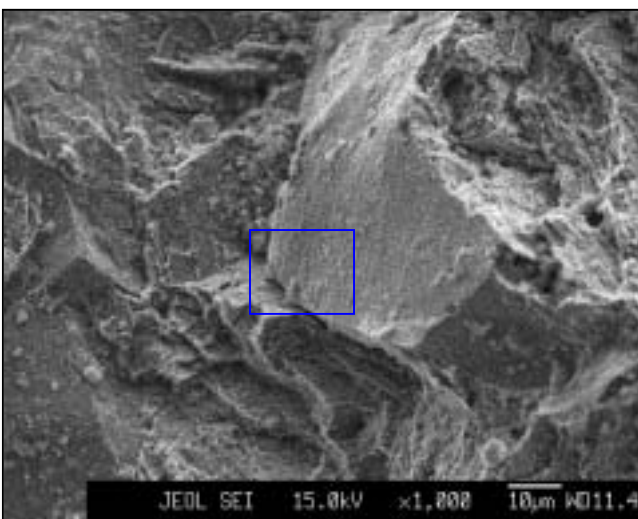
部観察結果



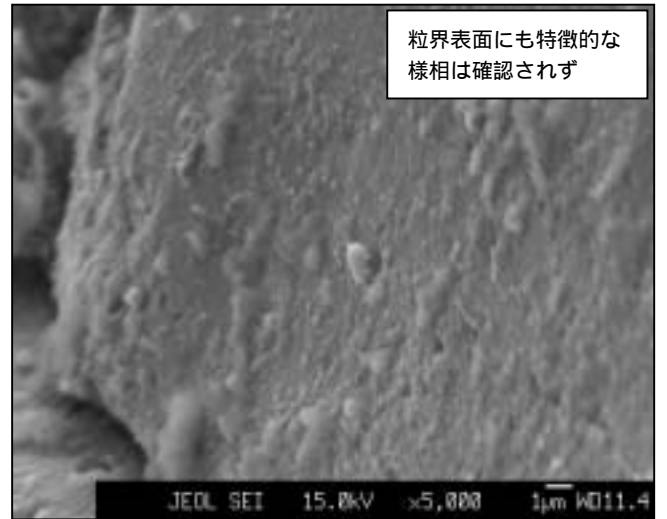
拡大



拡大



拡大



【観察結果】
・起点部および最終破断面領域を除く破面では、粒界および粒内割れが混在した破面が確認された。

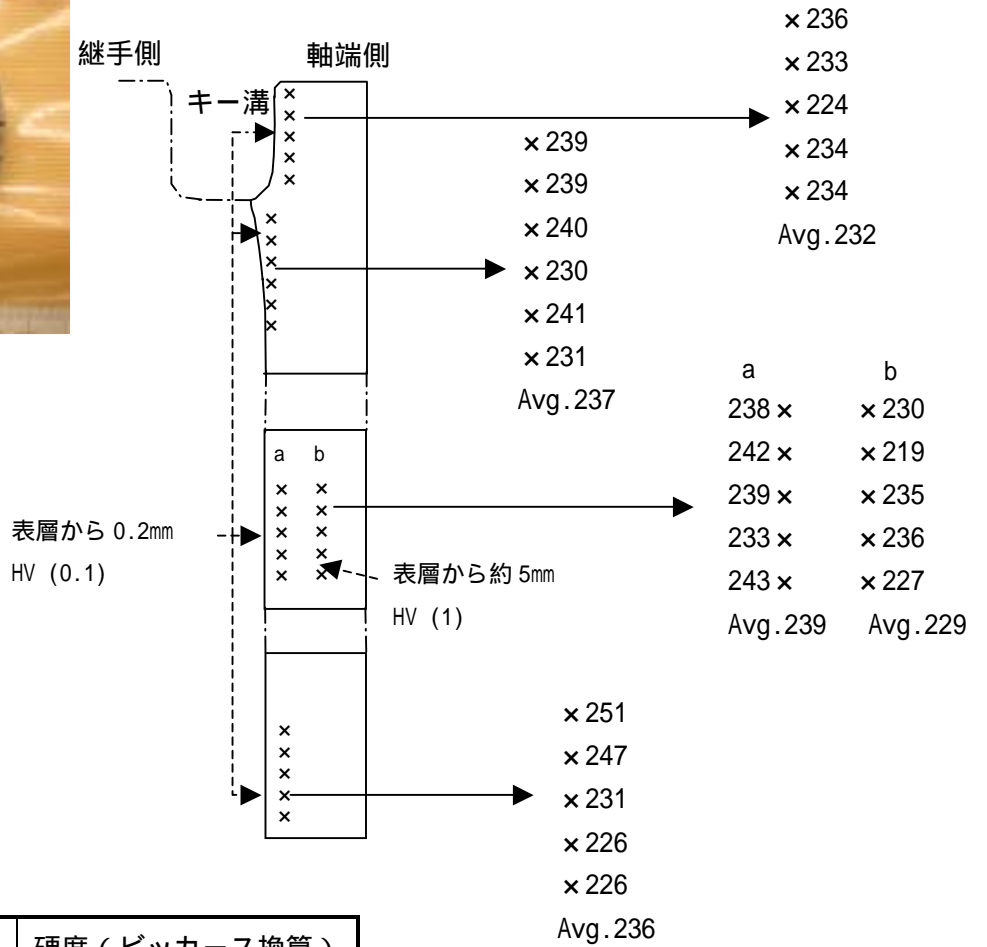
硬度測定結果

目的	主軸破断面上の硬度分布を測定し、異常な硬化相等の有無を確認する。
内容	<p>1 . 調査項目 主軸破断面の破面近傍および一般部のビッカース硬さを測定する。</p> <p>2 . 調査結果 主軸破断面（き裂A、き裂進展領域、最終破断面領域）[軸端側] 軸材料の硬度を測定した結果、破面近傍および一般部ともにビッカース硬さ（平均値）で約 2 2 9 ~ 2 3 9 であり、規定値（ 2 1 7 ~ 2 5 2 ）範囲内であった。</p> <p style="text-align: right;">《別紙（ 1 ）》</p>
別紙	（ 1 ）硬度測定状況図 [軸端側]

硬度測定状況図 [軸端側]



[軸端側破面] 測定方向



	硬度 (ピッカース換算)
規定値	217 ~ 252
材料証明書記載値	217

【硬度測定結果】

・ 軸材料の硬度を測定した結果、破面近傍および一般部ともにピッカース硬さ (平均値) で約 2 2 9 ~ 2 3 9 であり、規定値 (2 1 7 ~ 2 5 2) 範囲内であった。

元素分析結果

目 的	主軸破断面上に有害な元素がないことを確認する。
内 容	<p>1 . 調査項目 電子線マイクロアナライザー (E P M A) により、破断面上に有害な元素がないことを確認する。</p> <p>2 . 調査結果 き裂 A (軸端側)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 起点部の化学成分を電子線マイクロアナライザー (E P M A) により分析した結果、主軸 (SUS403 相当材) の主要元素以外の成分は検出されなかった。 ・ 当該部の元素含有量は材料証明書記載値とほぼ同等であった。 <p style="text-align: right;">《別紙 (1) 》</p>
別 紙	(1) 元素分析結果 [軸端側]

元素分析結果 [軸端側]

[単位 : 重量%]

	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
規定値 (10705AG) SUS403 相当	Max 0.50	11.50 ~ 13.00	0.30 ~ 0.60	Bal .	Max 0.60
材料証明書記載値	0.4	11.7	0.5	Bal .	0.5
分析値(起点部)	0.5	12.9	0.6	82.0	0.7

【元素分析結果】

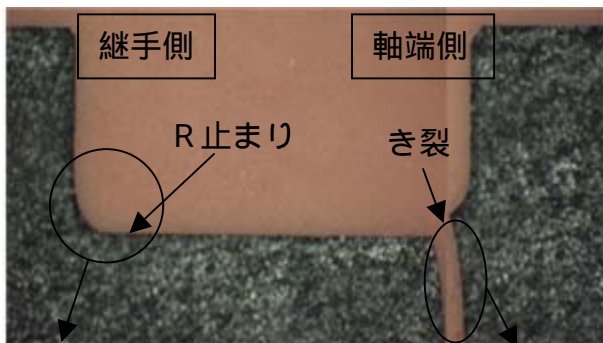
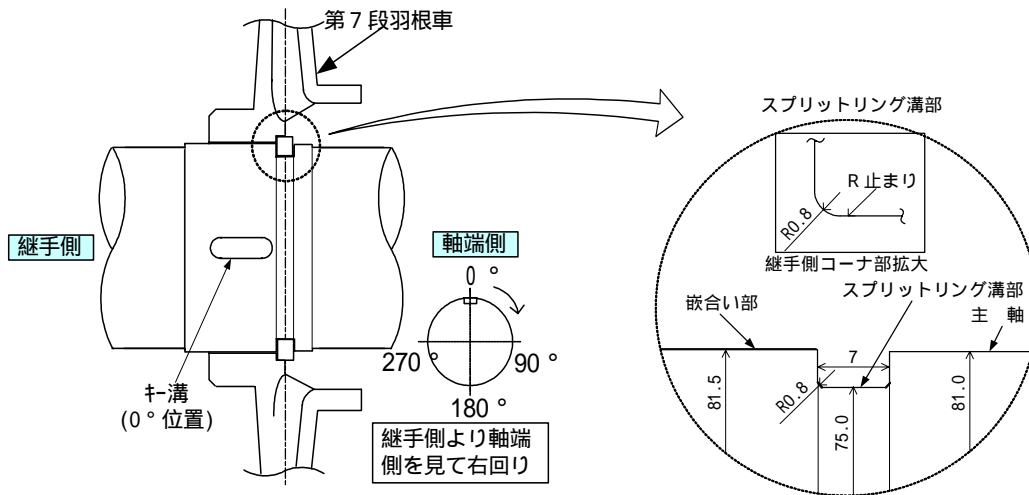
- ・ 起点部の化学成分を電子線マイクロアナライザー (E P M A) により分析した結果、主軸 (SUS403 相当材) の主要元素以外の成分は検出されなかった。
- ・ 当該部の元素含有量は材料証明書記載値とほぼ同等であった。

スプリットリング詳細調査結果

目的	スプリットリングの溝部の形状および外観を確認する。また、スプリットリング溝部コーナの加工状況を調査する。
内容	<p>1. 調査項目</p> <p>(1) スプリットリング溝部コーナの型取測定を行い、形状の確認を実施する。</p> <p>(2) スプリットリングの外観目視点検を実施する。</p> <p>(3) スプリットリング溝部コーナの加工状況を調査する。</p> <p>2. 調査結果</p> <p>(1) 型取測定結果</p> <p>第7段スプリットリング溝部の継手側の型取測定を実施した結果、コーナの曲率半径は、設計値の0.8mmに対して、ほぼ同等であったが、コーナのR止まりの曲率半径は0.30~0.60mmであった。</p> <p>また、第7段以外のスプリットリング溝部の継手側および軸端側の型取測定を実施した結果、コーナの曲率半径は、設計値の0.8mmに対して、0.74~0.97mmであり、コーナのR止まりの曲率半径は0.20~1.10mmであった。</p> <p style="text-align: right;">《別紙(1)》</p> <p>(2) 外観目視点検結果</p> <p>第7段スプリットリングの外観目視点検を実施した結果、軸端側の面にスプリットリング溝部との接触痕が認められた。</p> <p>また、第7段以外のスプリットリングについても外観目視点検を実施した結果、第4段および第9段のスプリットリングについて同様の接触痕が認められた。</p> <p style="text-align: right;">《別紙(2)》</p> <p>(3) スプリットリング溝部コーナの加工状況</p> <p>溝部の加工は、第1段~第4段の加工後、第5段~第9段の加工を行っていた。加工用バイトの刃先形状は曲率半径0.8mmのものを使用していた。</p> <p>コーナの型取測定の結果から、第5段~第9段のR止まりの曲率半径が設計値より若干小さくなっていたことから、連続加工によりバイト刃先形状が変化し溝部コーナのR止まりの曲率半径が小さく加工された可能性があると考えられる。</p> <p style="text-align: right;">《別紙(3)》</p>
別紙	<p>(1) スプリットリング溝部型取測定結果</p> <p>(2) スプリットリング点検結果</p> <p>(3) スプリットリング溝部コーナ加工状況</p>

スプリットリング溝部型取測定結果

(第7段スプリットリング溝部)



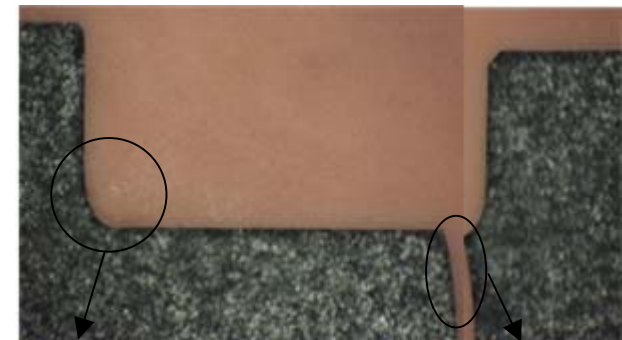
曲率半径 R:0.80mm
R 止まり:0.60mm
継手側:45°
き裂 A 部



曲率半径 R:0.81mm
R 止まり:0.40mm
継手側:135°



曲率半径 R:0.83mm
R 止まり:0.30mm
継手側:225°



曲率半径 R:0.81mm
R 止まり:0.40mm
継手側:315°
き裂 B 部

測定結果

- ・スプリットリング溝部コーナの曲率半径は、継手側で設計通りの0.8mm程度で加工されていた。
- ・コーナ部と溝底部との境目のR止まりの曲率半径は0.30~0.60mmであった。

スプリットリング溝部型取測定結果

(第7段以外のスプリットリング溝部)

第1～5, 9段スプリットリング溝部

(単位: mm)

	測定段	第1段	第2段	第3段	第4段	第5段	第9段
	測定部位	0°	0°	0°	0°	0°	0°
継手側	コーナ部	0.96	0.88	0.74	0.79	0.97	0.83
	R止まり	1.10	0.88	0.74	0.79	0.40	0.20
軸端側	コーナ部	0.77	0.81	0.82	0.79	0.79	0.80
	R止まり	0.77	0.81	0.82	0.79	0.20	0.20

第6, 8段スプリットリング溝部

(単位: mm)

	測定段	第6段				第8段			
	測定部位	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
継手側	コーナ部	0.80	0.81	0.80	0.79	0.81	0.81	0.80	0.79
	R止まり	0.20	0.20	0.30	0.30	0.30	0.30	0.40	0.50
軸端側	コーナ部	0.79	0.81	0.82	0.83	0.79	0.81	0.81	0.79
	R止まり	0.30	0.30	0.40	0.20	0.20	0.30	0.50	0.30

(参考) 第7段スプリットリング溝部

(単位: mm)

	測定段	第7段			
	測定部位	45°	135°	225°	315°
継手側	コーナ部	0.80	0.81	0.83	0.81
	R止まり	0.60	0.40	0.30	0.40
軸端側	コーナ部	-	-	-	-
	R止まり	-	-	-	-

測定結果

- ・その他のスプリットリング溝部コーナの曲率半径は、軸端側および継手側で設計値の0.8mmに対して、0.74～0.97mmで加工されていた。
- ・コーナ部と溝底部との境目のR止まりの曲率半径は0.20～1.10mmであった。

スプリットリング点検結果 (第7段および第4, 9段スプリットリング)

第7段スプリットリング

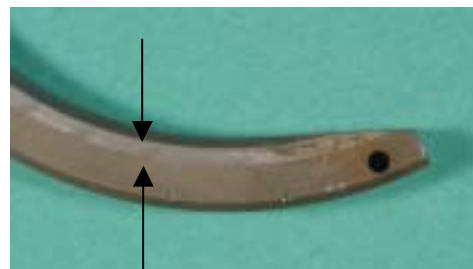


軸端側の面

拡大



拡大



主軸スプリットリング溝との接触痕

第4段スプリットリング



主軸スプリットリング溝との接触痕

軸端側の面

第9段スプリットリング



主軸溝スプリットリングとの接触痕

軸端側の面

点検結果

- ・ 第7段スプリットリングの軸端側の面にスプリットリング溝部との接触痕が認められた。
- ・ 第4段および第9段のスプリットリングの軸端側の面にスプリットリング溝部との接触痕が認められた。

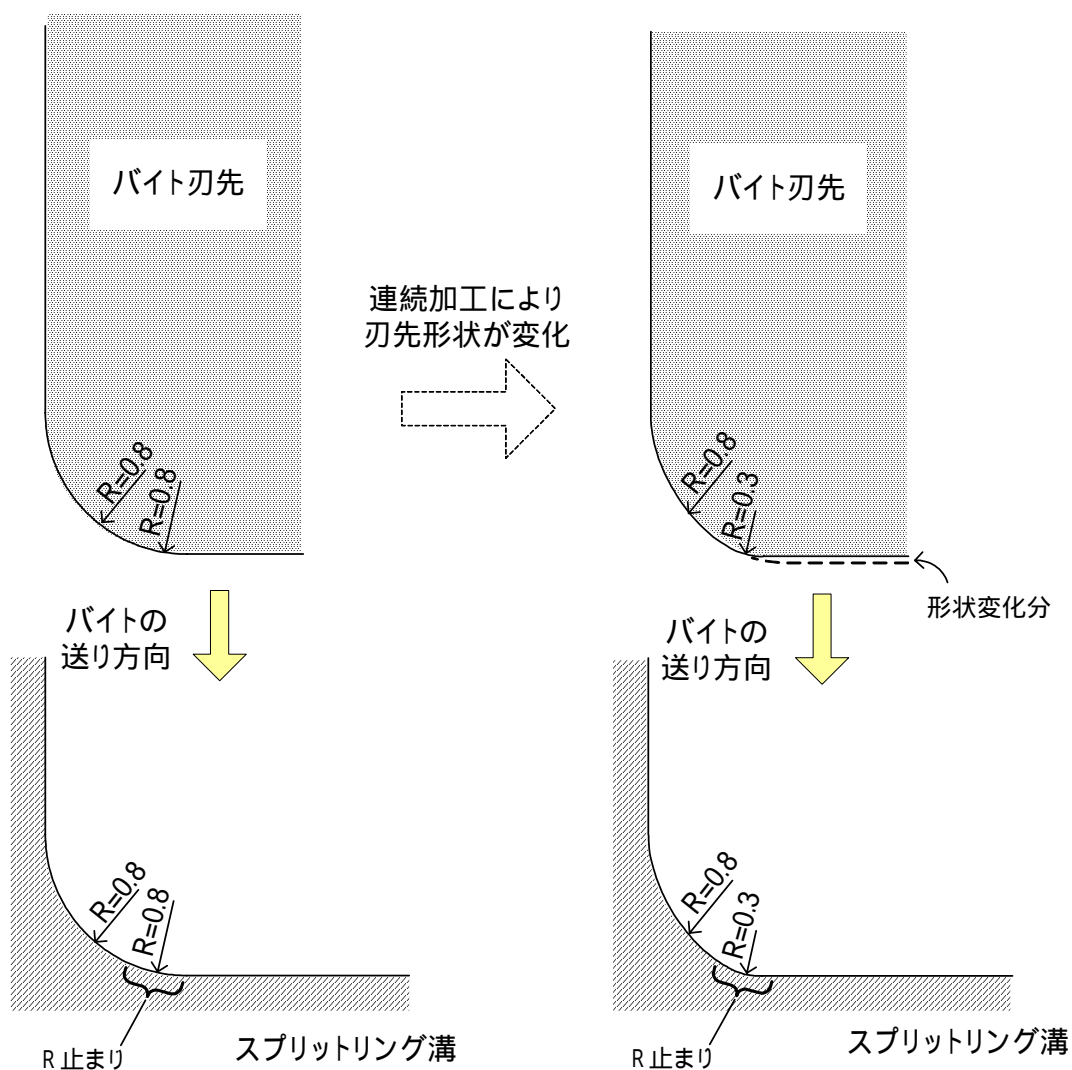
スプリットリング溝コーナ加工状況

(R 止まりの曲率半径が設計値より小さくなった推定)

スプリットリング溝コーナの曲率半径は、溝加工用バイトの刃先形状と同じに仕上げられるが、連続加工に伴い、バイト刃先形状が変化することがあり得る。これによって R 止まりの形状もバイト刃先形状と同じに曲率半径が小さくなったものと推定される。

バイト刃先の形状が一様に
R = 0.8 である場合

連続加工によりバイト刃先の
形状が変化し R = 0.3 の部分が
生じた場合

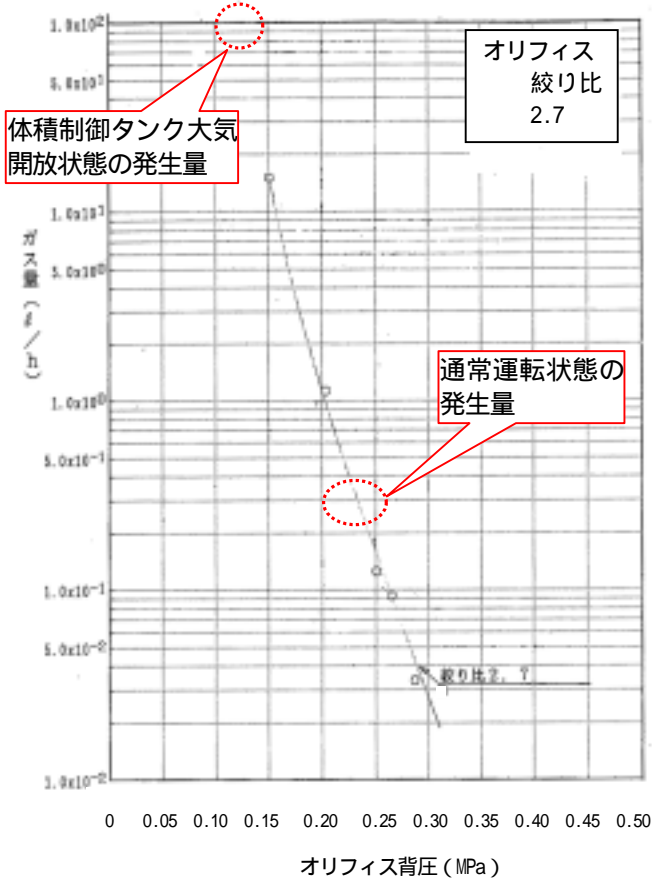


体積制御タンク大気開放時の気泡発生量評価および挙動調査

目的	体積制御タンクの大気開放時における気泡の発生量および配管内挙動について調査する。
内容	<p>1. 調査項目</p> <p>(1) 体積制御タンク大気開放時の気泡発生量評価</p> <p>(2) 体積制御タンク大気開放時の気泡の配管内挙動</p> <p>2. 調査結果</p> <p>(1) 体積制御タンク大気開放時の気泡発生量評価</p> <ul style="list-style-type: none"> ・体積制御タンク大気開放時におけるミニマムフローラインの流量制限オリフィス出口からの気泡発生量はその背圧との関係より以下のとおりである。 <ul style="list-style-type: none"> 通常運転時：0.3 ℓ/h程度の気泡発生量（微量） 大気開放時：100 ℓ/h以上の気泡発生量（多量） <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> <p>条件</p> <ul style="list-style-type: none"> ・通常運転時相当のオリフィス背圧：約0.23MPa ・体積制御タンク大気開放時相当のオリフィス背圧：約0.12MPa ・体積制御タンク水位：EL 19.3m ・ミニマムフロー流量：14m³/h </div> <ul style="list-style-type: none"> ・体積制御タンク大気開放時、溶存空気がすべて気泡となって発生したとすると最大 14m³/h×0.019=約 270 ℓ/h の気泡が発生する可能性がある。 <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; border-top: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black; padding: 5px; margin: 10px 0;"> <ul style="list-style-type: none"> ・ミニマムフロー流量：14m³/h ・1気圧(20℃)での空気の溶解度：0.019 </div> <p style="text-align: right;">《別紙（1）》</p> <p>(2) 体積制御タンク大気開放時の気泡の配管内挙動</p> <p>体積制御タンクの大気開放状態で充てんポンプの運転が行われた場合、ミニマムフローラインのオリフィス出口の圧力低下により、気泡が発生し、充てんポンプ入口配管を通して、充てんポンプに流れ込む可能性がある。</p> <p style="text-align: right;">《別紙（2）》</p>
別紙	<p>(1) 体積制御タンク大気開放時の気泡発生量評価</p> <p>(2) 体積制御タンク大気開放時の気泡の配管内挙動</p>

体積制御タンク大気開放時の気泡発生量評価

図 1 : 気泡発生へのオリフィス背圧の影響



充てん / 高圧注入ポンプガスバインディング対策に関する研究資料

注) 平成3年度電力共同研究

背景:

「米国 Farley 1号機において弁の定期試験を実施したところ、充てん / 高圧注入ポンプ吸込配管の高圧注入系の分岐配管に水素が蓄積していたことから、もしベンディングされる前に L O C A が発生していたならば充てん / 高圧注入ポンプは損傷していた可能性がある。」と NRC INFORMATION NOTICE に掲載 (1988.5) され、その後も数件同じ事象が米国において発生したことより国内プラントへの対策を電共研にて検討した。

目的:

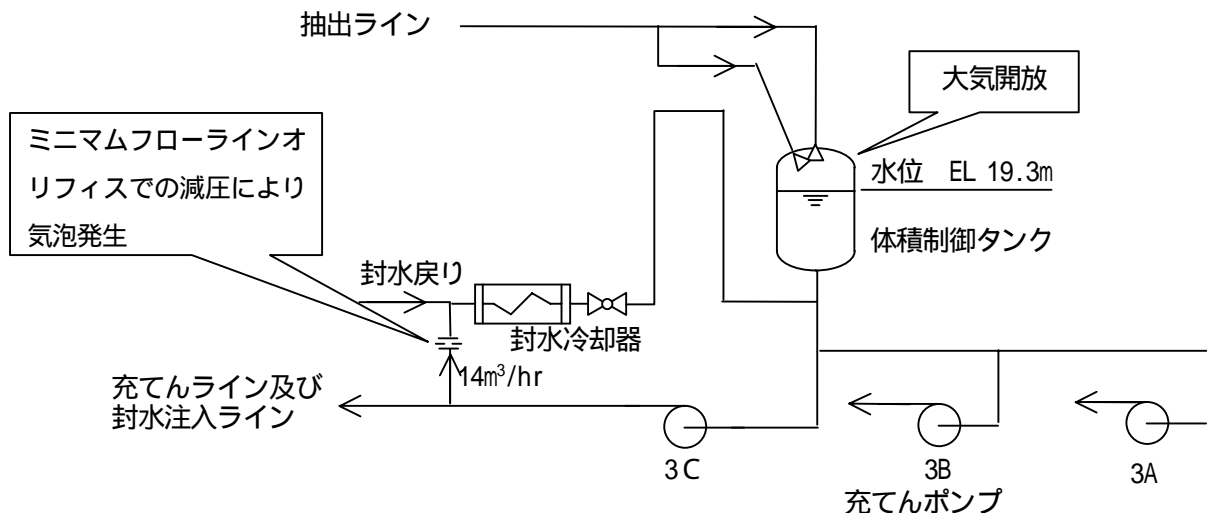
充てん (/ 高圧注入) ポンプガスバインディングの可能性について、水素ガス発生の原因、蓄積過程・速度の解明を行う。

結果:

水素ガス発生は、充てんポンプミニマムフローラインオリフィスでの減圧、体積制御タンクでのスプレイ状の噴霧による小さな泡の巻き込みが主原因であり、発生量の多いプラントについては、配管内での蓄積対策の必要性がある等の成果が得られた。

伊方3号機においては、通常運転時、体積制御タンクを約 0.1Mpa に加圧 (ミニマムフローラインオリフィス出口で約 0.23Mpa) しており、系統設計段階でガスバインディング対策を実施している。

図 2 : 充てんポンプ廻り系統図 (体積制御タンク大気開放時の系統構成)



体積制御タンク大気開放時の気泡の配管内挙動

	定期検査時 (体積制御タンク大気開放)	通常運転時 (体積制御タンク水素加压)
充てんポンプ運転状態	<p>圧力：大気圧</p> <p>体積制御タンク (EL. 19.3m)</p> <p>背圧：約 0.12MPa</p> <p>封水戻りライン</p> <p>封水装置</p> <p>ミニマムフローライン</p> <p>充てんポンプC</p> <p>充てんポンプB</p> <p>充てんポンプA</p>	<p>圧力：約 0.11MPa</p> <p>体積制御タンク (EL. 19.3m)</p> <p>背圧：約 0.23MPa</p> <p>封水戻りライン</p> <p>封水装置</p> <p>ミニマムフローライン</p> <p>充てんポンプC</p> <p>充てんポンプB</p> <p>充てんポンプA</p>
気泡の挙動	<p>充てんポンプミニマムフローライン及び封水戻りライン</p> <p>3 B</p> <p>4 B</p> <p>充てんポンプへ</p> <p>体積制御タンクから</p>	<p>充てんポンプミニマムフローライン及び封水戻りライン</p> <p>3 B</p> <p>4 B</p> <p>充てんポンプへ</p> <p>体積制御タンクから</p>
説明	<p>ミニマムフローラインに設置されている流量制限オリフィス出口の圧力低下により、気泡が発生し、充てんポンプ入口配管を通して、充てんポンプに流れ込む。</p>	<p>ミニマムフローラインに設置されている流量制限オリフィス出口の背圧が高いため、気泡は溶け込んだままであり、ほとんど発生しない。</p>

充てんポンプ3C運転実績 (体積制御タンク大気開放時)

定期検査	運転回数 [回]	運転時間	備 考
第 1 回	3	283時間41分	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>解列～並列</u> H8.1.15～H8.4.14 ・ <u>体積制御タンク大気開放期間</u> H8.1.19～H8.3.7
第 2 回	2	165時間46分	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>解列～並列</u> H9.5.16～H9.7.18 ・ <u>体積制御タンク大気開放期間</u> H9.5.20～H9.6.25
第 3 回	1	1時間17分	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>解列～並列</u> H10.9.11～H10.11.7 ・ <u>体積制御タンク大気開放期間</u> H10.9.15～H10.10.21
第 4 回	4	173時間56分	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>解列～並列</u> H11.11.4～H12.2.9 ・ <u>体積制御タンク大気開放期間</u> H11.11.8～H11.12.23
第 5 回	2	91時間26分	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>解列～並列</u> H13.4.2～H13.5.31 ・ <u>体積制御タンク大気開放期間</u> H13.4.5～H13.5.20
第 6 回	2	224時間32分	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>解列～並列</u> H14.5.24～H14.7.12 ・ <u>体積制御タンク大気開放期間</u> H14.5.27～H14.6.28
第 7 回	3	99時間00分	<ul style="list-style-type: none"> ・ <u>解列～並列</u> H15.9.19～H15.12.18 ・ <u>体積制御タンク大気開放期間</u> H15.9.22～H15.12.8
累 積	17	1039時間38分	

高サイクル疲労によるき裂の発生に関する評価結果

目的	<p>主軸折損の詳細調査結果から、第7段スプリットリング溝部の応力の発生要因として、</p> <p style="text-align: center;"> { スプリットリング溝部コーナの曲率半径が小さいことによる応力集中 スプリットリングと主軸の接触による溝部への応力の発生 定期検査中の体積制御タンク開放により発生した気泡の流れ込みで生じる振動 } </p> <p>が抽出されたことから、これらの要因により第7段スプリットリング溝部で高サイクル疲労によるき裂が発生する可能性について評価する。</p>
内容	<p>1. 検討項目</p> <p>(1) 応力集中係数 溝部コーナの曲率半径を模擬した3次元FEM解析により、応力集中係数を算出する。</p> <p>(2) スプリットリングと主軸の接触による発生応力 3次元FEM解析により、スプリットリングと主軸の接触による発生応力を算出する。</p> <p>(3) 気泡の流れ込みで生じる振動による発生応力 ポンプ回転部を模擬した2次元はり要素モデルにより、体積制御タンク大気開放時のポンプへの気泡の流れ込みで生じる振動による発生応力を算出する。</p> <p>(4) 発生応力および疲労強度評価 ・設計荷重による発生応力に加え(1)~(3)を考慮して、第7段スプリットリング溝部に発生する応力を算出する。 ・修正グッドマン線図を用いて、発生応力に対する疲労強度評価を実施する。</p> <p>2. 検討結果 解析および評価を実施し、以下の結果を得た。</p> <p>(1) 応力集中係数(第7段スプリットリング溝部コーナの曲率半径 $R=0.3\text{mm}$) 引張応力: 3.84、曲げ応力: 3.59、ねじり応力: 3.52 《別紙(1)》</p> <p>(2) スプリットリングと主軸の接触による発生応力: 128N/mm^2 《別紙(2)》</p> <p>(3) 気泡の流れ込みで生じる振動による発生応力: 238N/mm^2 《別紙(3)》</p> <p>(4) 発生応力: 平均応力 185N/mm^2、変動応力 279N/mm^2 疲労強度評価: 定期検査時の体積制御タンク開放時の発生応力は疲労限度を上回り、き裂が発生する可能性があることが判明した。 《別紙(4)》</p>
別紙	<p>(1) 応力集中係数</p> <p>(2) スプリットリングと主軸の接触による発生応力</p> <p>(3) 気泡の流れ込みで生じる振動による発生応力</p> <p>(4) 発生応力および疲労強度評価</p>

応力集中係数

第7段スプリットリング溝部のコーナの応力集中係数について、コーナの曲率半径を $R = 0.3\text{mm}$ (調査結果より推定) として、3次元FEM解析により算出する。

1. 解析方法

解析コード NASTRAN (汎用構造解析コード) により、以下のフローで解析を実施する。

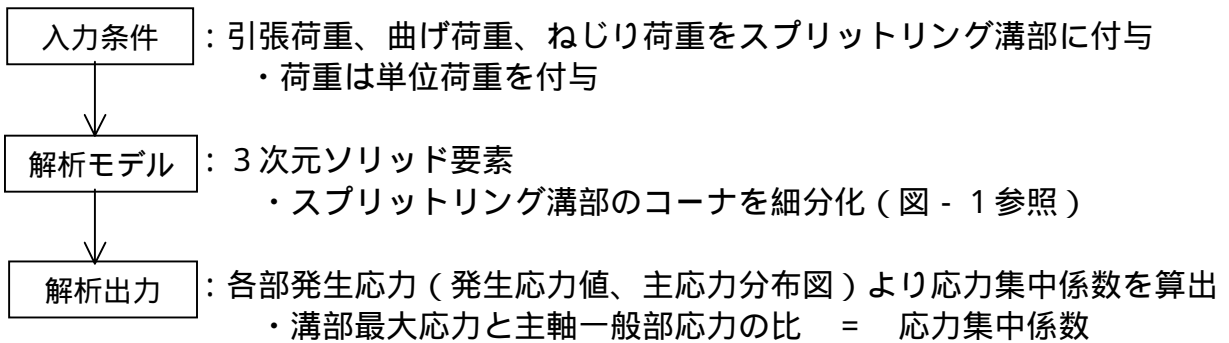
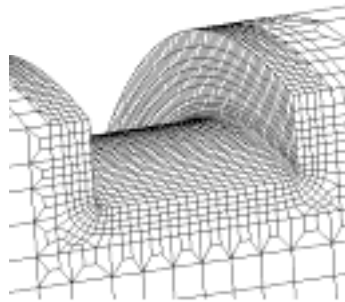
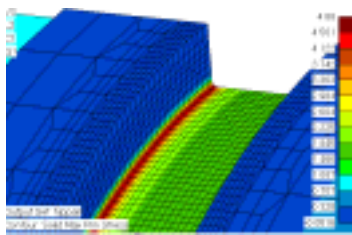


図 - 1 FEM解析モデル図
(第7段スプリットリング溝部)

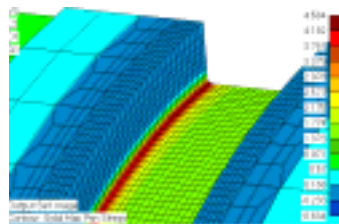


2. 解析結果

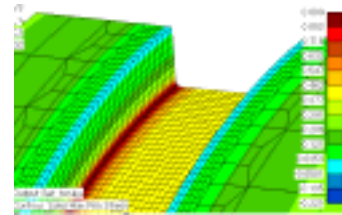
引張応力、曲げ応力、ねじり応力に対する応力集中係数の解析結果を以下に示す。



引張主応力分布図



曲げ主応力分布図



ねじり主応力分布図

応力集中係数解析結果 (溝部最大応力 / 主軸一般部応力)

	R0.3 []	R0.8 []	比 [/]
引張応力	3.84	3.08	1.25
曲げ応力	3.59	2.86	1.26
ねじり応力	3.52	2.00	1.76

第7段スプリットリング溝部 ($R = 0.3\text{mm}$) の応力集中係数は、設計値 ($R = 0.8\text{mm}$) の 1.25 ~ 1.76 倍であった。

スプリットリングと主軸の接触による発生応力

第7段のスプリットリングは、主軸との接触面で当たりが生じていることから、水平方向荷重がスプリットリング溝部に作用していたものと想定し、発生応力を算出する。

1. 解析方法

解析コード NASTRAN (汎用構造解析コード) により、以下のフローで解析を実施する。

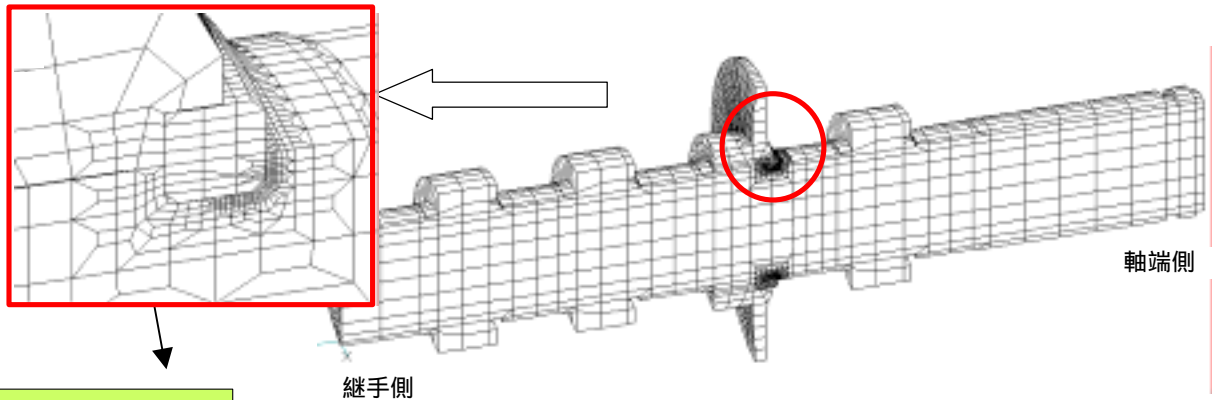
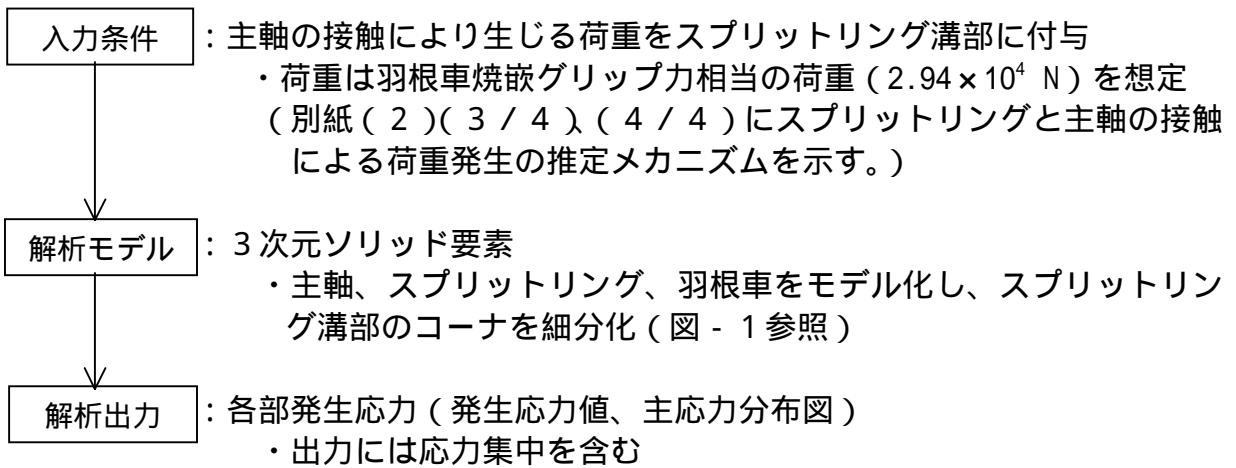
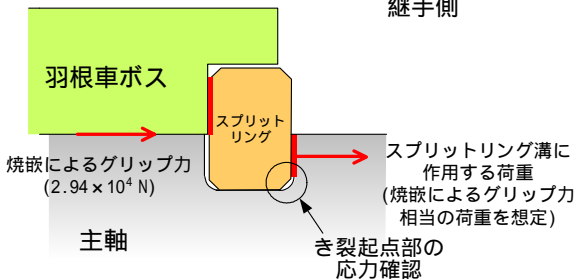


図-1
解析モデル図

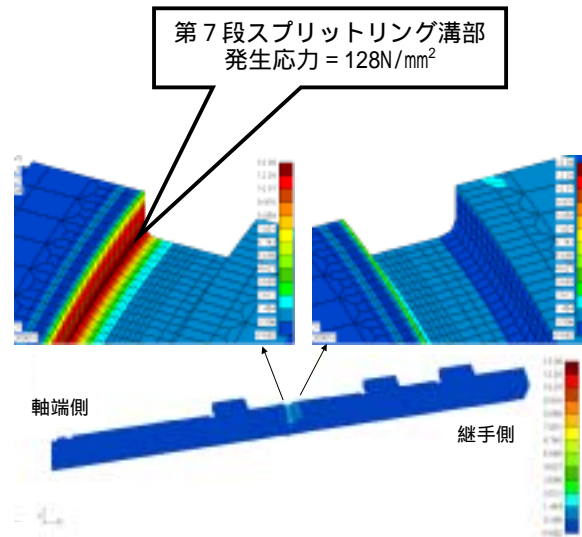


スプリットリングと主軸の接触模式図

2. 解析結果

解析結果を以下に示す。

第7段スプリットリング溝部には 128N/mm^2 の応力が発生する。



主応力分布図

スプリットリングと主軸の接触による荷重発生の推定メカニズム

1. 羽根車焼嵌時のスプリットリングと主軸の状況

- ・羽根車の焼嵌作業は、まず主軸中央部の5段、10段を実施し、第4段から順に第1段まで実施する。その後、第9段、第8段を焼嵌した後、第7段の焼嵌作業が行われる。 [図-1]
- ・第7段羽根車の焼嵌作業を実施する際には、前段の焼嵌作業により主軸の温度が上昇した状態でスプリットリングをリング溝に挿入することから、主軸とスプリットリングに温度差がある状態で、羽根車は所定の位置（スプリットリングの端面に接触する状態）に位置決めされる。 [図-2]
- ・その後、主軸の温度が徐々に下がり、スプリットリング溝部も収縮することから、スプリットリングが圧縮される。 [図-3]

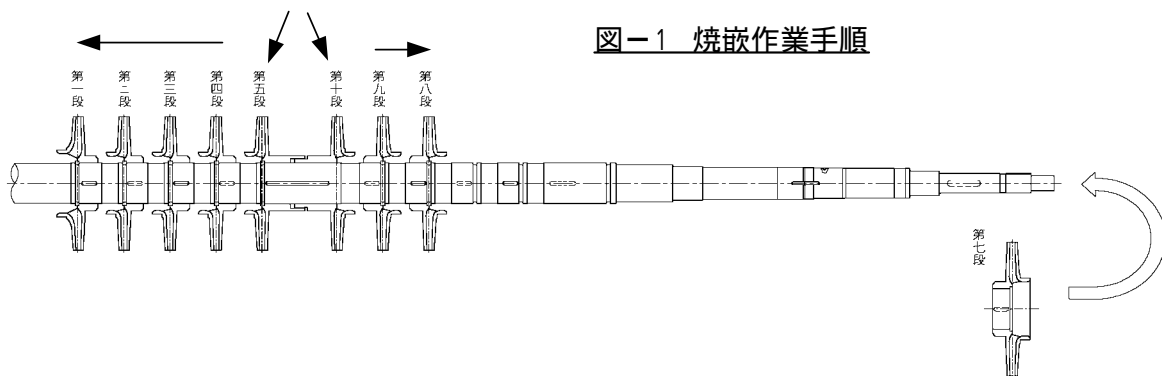


図-2
焼嵌直後の状態

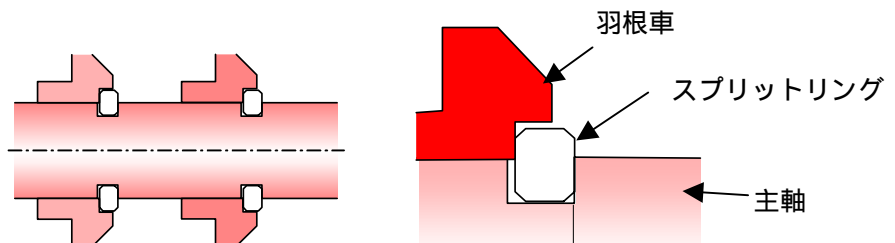
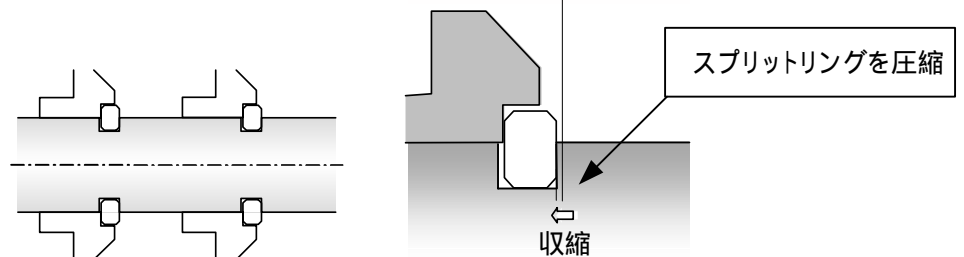


図-3
主軸冷却後の状態



2. 主軸の収縮量

焼嵌前の主軸の温度上昇を 30 と仮定し、主軸が冷却した状態での収縮量を下式により算出する。

$$L = \alpha \cdot L \cdot T = 10.4 \times 10^{-6} \times 7 \times 30 = 2.18 \times 10^{-3} \text{ [mm]} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 α : 熱膨張係数 (10.4×10^{-6} mm/mm)
 L : スプリットリング溝幅 (7mm)
 T : 主軸の温度上昇値 (30 と仮定)

3. スプリットリング溝に作用する荷重

主軸の収縮に伴い、スプリットリングに加わる圧縮荷重は増加するが、羽根車のグリップ力以上となると羽根車がスライドするため、スプリットリングの圧縮荷重が羽根車のグリップ力を超えることはない。

ここでは、スプリットリングの圧縮荷重が羽根車のグリップ力と釣り合う主軸の収縮量を計算し、2. で求めた L と比較することにより、羽根車にスライドが生じるか否かを確認する。

羽根車のグリップ力 : F_1

$F_1 = 2.94 \times 10^4$ [N] (製作時の焼嵌代 0.05mm から求まる面圧により生じる摩擦力として算出)

スプリットリングの圧縮荷重が羽根車のグリップ力と釣り合う主軸の収縮量 : L_1

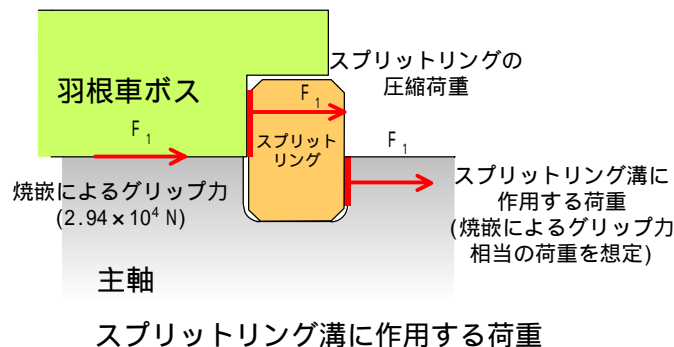
$$L_1 = \frac{F_1 \times L}{E \times A} = 2.07 \times 10^{-3} \text{ [mm]} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 F_1 : 羽根車のグリップ力 (2.94×10^4 N)
 L : スプリットリング溝幅 (7mm)
 E : 弾性係数 (2.00×10^5 N/mm²)
 A : スプリットリング受圧面積 (496mm²)

(1)、(2)より、

$$L_1 (= 2.07 \times 10^{-3} \text{ mm}) < L (= 2.18 \times 10^{-3} \text{ mm})$$

であり、羽根車にスライドが生じることから、スプリットリングの圧縮荷重は羽根車のグリップ力とバランスし、スプリットリング溝には羽根車のグリップ力相当の荷重が加わる。

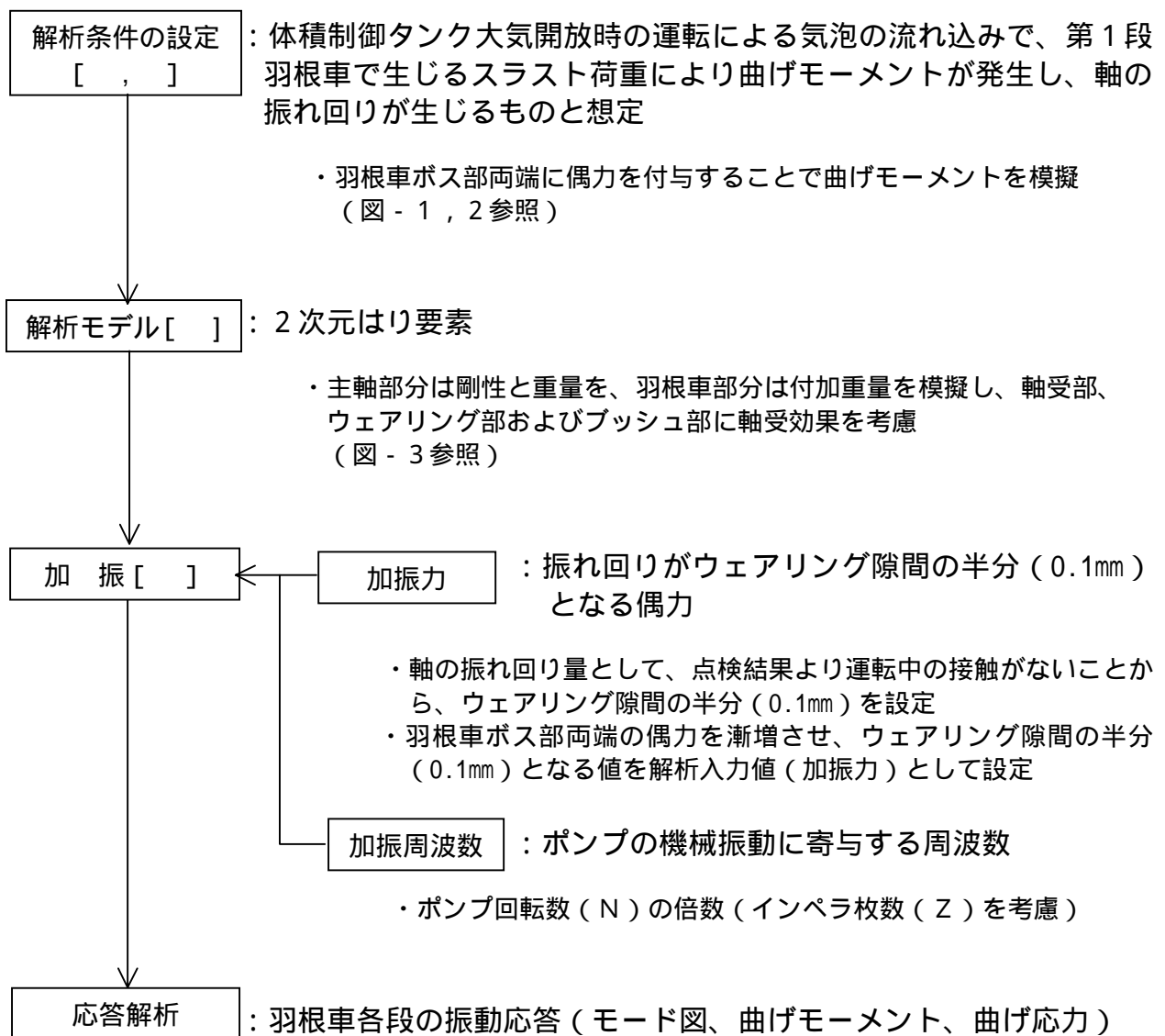


気泡の流れ込みで生じる振動による発生応力

体積制御タンク大気開放運転時のポンプへの気泡の流れ込みで生じる第1段羽根車部の曲げモーメントによりスプリットリング溝部に発生する応力を算出する。

1. 解析方法

解析コード ROT CAE^[1] (回転体振動解析コード)により、以下のフローで解析を実施する。



[1] 三菱重工業 (株) にて開発、原子力用ポンプ、蒸気タービン、ガスタービンの振動解析に適用。

[解析条件の設定]

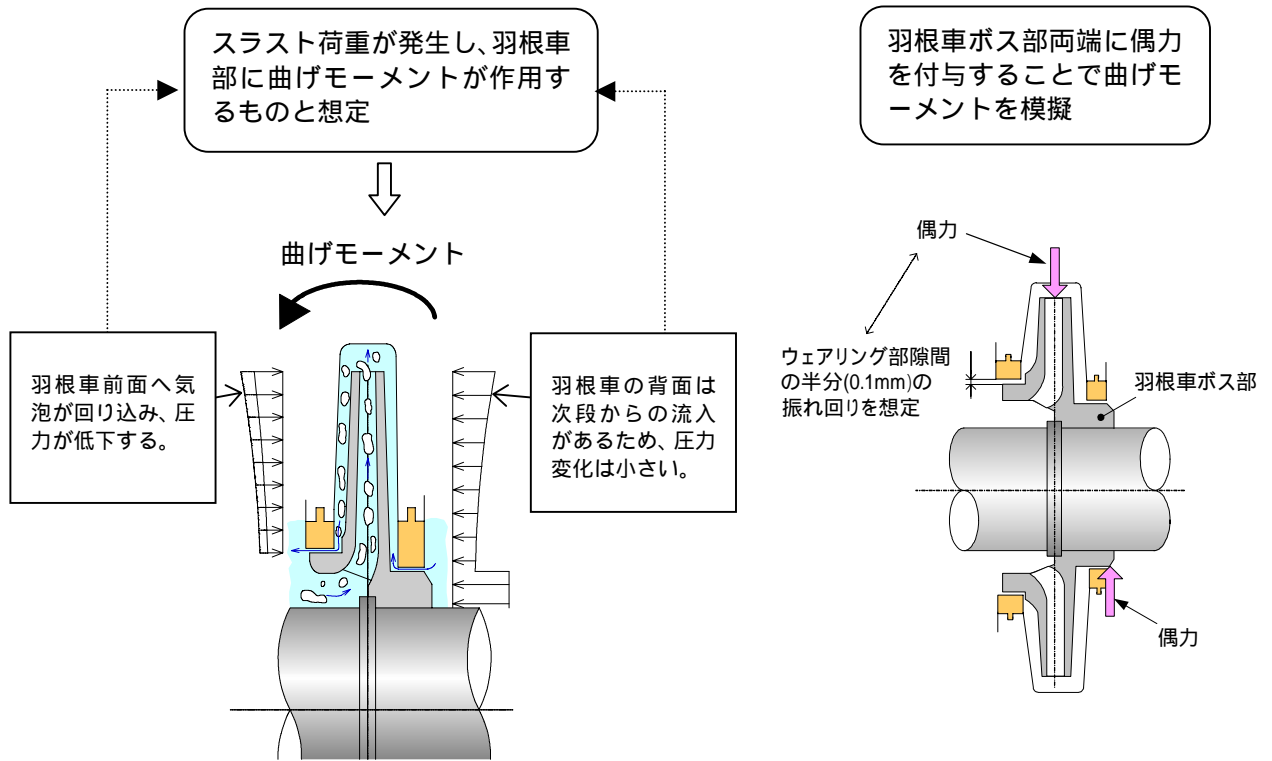


図 - 1
気泡の流れ込みによる曲げモーメントの発生

図 - 2
曲げモーメント模擬状況

[解析モデル]

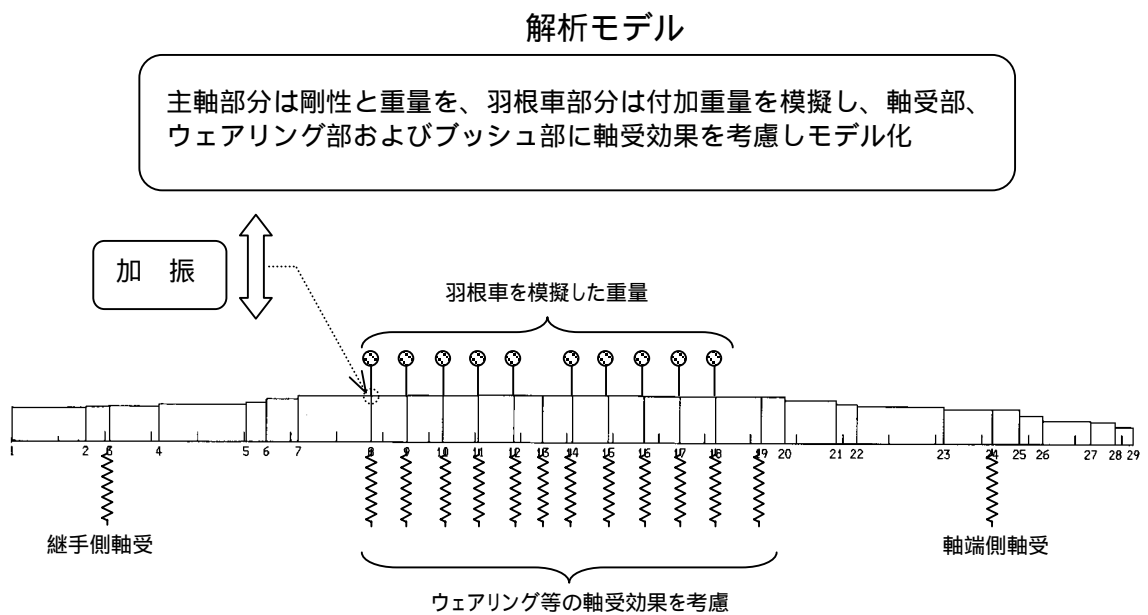


図 - 3 解析モデル図

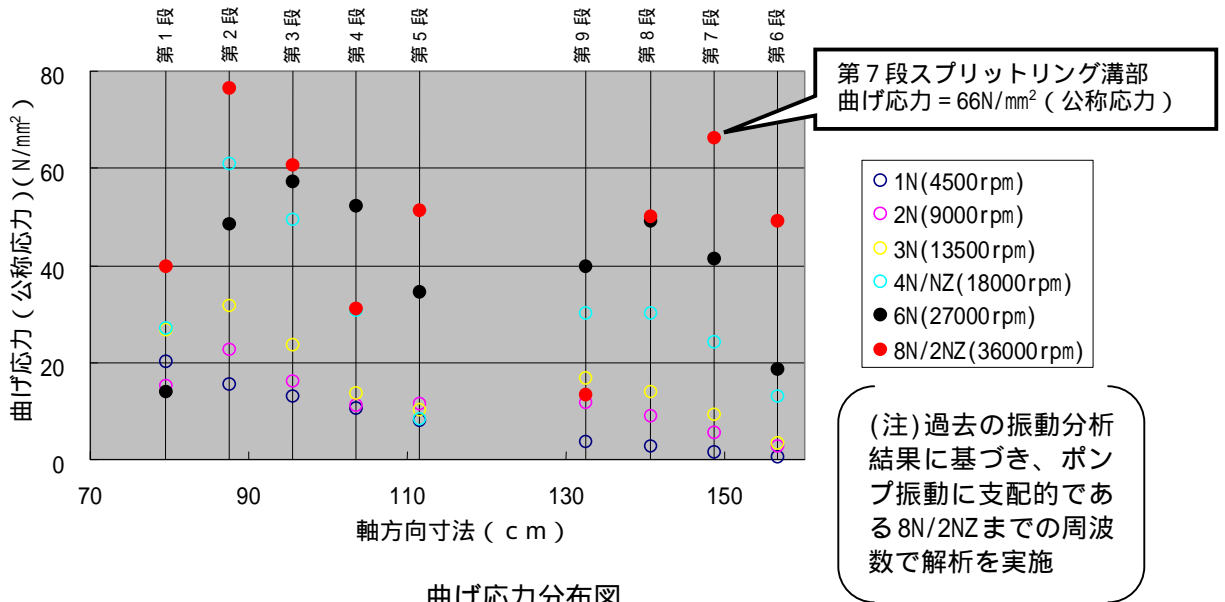
2. 解析結果

主軸各部の発生応力を以下に示す。

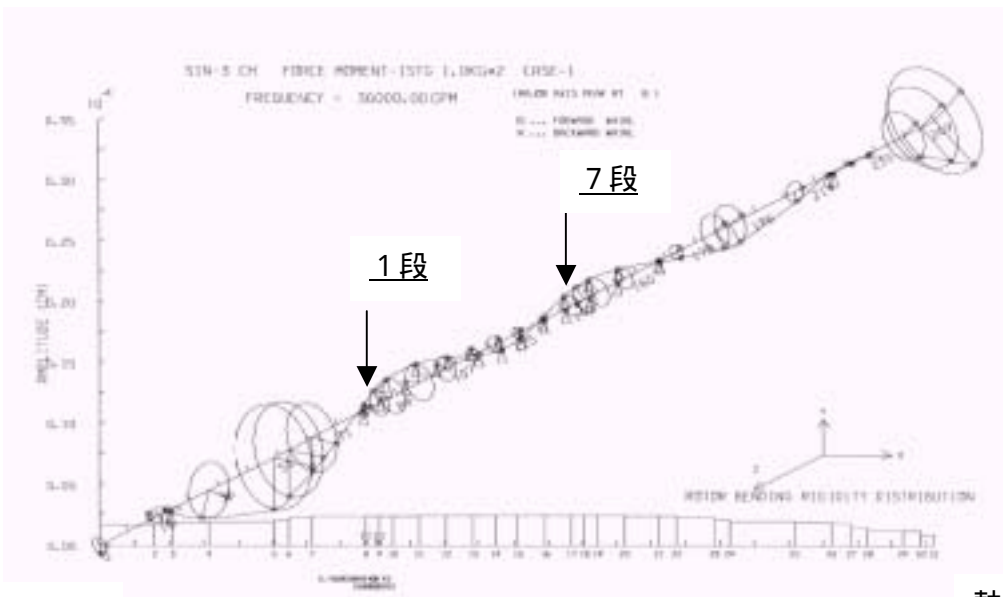
第7段スプリットリング溝部には 238N/mm² の曲げ応力 (公称応力 66N/mm² に応力集中係数 3.59 を考慮) が発生する。

第7段スプリットリング溝部解析結果

解析結果			⇨	応力集中考慮
曲げモーメント [× 10 ⁶ Nmm]	断面係数 [× 10 ⁴ mm ³]	曲げ応力(公称応力) [N/mm ²]		曲げ応力 [N/mm ²]
2.75	4.14	66		238



曲げ応力分布図



継手側

振動モード図 (8 N / 2 N Z 加振)

軸端側

発生応力および疲労強度評価

1. 発生応力

定期検査時の体積制御タンク大気開放時の運転における第7段スプリットリング溝部の発生応力は、設計荷重による発生応力に加えて、

応力集中係数

スプリットリングと主軸の接触による発生応力

気泡の流れ込みで生じる振動による発生応力

を考慮して計算した。なお、計算に当たり、スプリットリング溝部のコーナの曲率半径を $R = 0.3\text{mm}$ とした。

応力計算結果を下表に示す。

(第7段スプリットリング溝部の発生応力：平均応力 185N/mm^2 、変動応力 279N/mm^2)

第7段スプリットリング溝部発生応力

(単位: N/mm^2)

荷 重	引張応力		曲げ応力		ねじり応力	
	平均 応力	変動 応力	平均 応力	変動 応力	平均 応力	変動 応力
設計荷重 ^[1]	56	6	-	36	10	2
スプリットリングと主軸の接触	-	-	128	-	-	-
気泡の流れ込みで生じる振動	-	-	-	238	-	-
合 計	56	6	128	274	10	2

等価応力 ^[2]	
平均 応力	変動 応力
185	279

[1] 設計荷重による発生応力

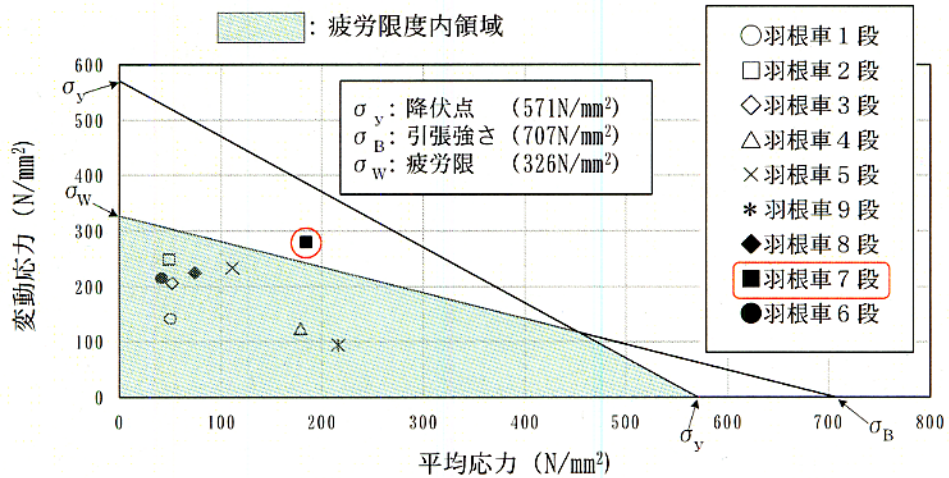
- ・引張応力 : 体積制御タンク大気開放時の運転流量で生じる羽根車スラスト荷重により発生する引張応力 [メーカー設計値] に、応力集中係数 [3.84] を乗じ平均応力を算出。変動応力は、平均応力の 10% [メーカー設計値] とした。
- ・曲げ応力 : 主軸、羽根車の自重および体積制御タンク大気開放時の運転流量で生じる羽根車の半径方向荷重により発生する曲げ応力 [メーカー設計値] に応力集中係数 [3.59] を乗じ算出。(回転曲げ応力のため変動応力に整理)
- ・ねじり応力 : 体積制御タンク大気開放時の運転流量で生じる軸トルクにより発生するねじり応力 [メーカー設計値] に応力集中係数 [3.52] を乗じ平均応力を算出。変動応力は、平均応力の 20% [メーカー設計値] とした。

[2] 等価応力算出式 (ミゼス)

$$\text{等価応力} = \sqrt{\text{引張応力} + \text{曲げ応力}^2 + 3 \times \text{ねじり応力}^2}$$

2. 疲労強度評価

発生応力（平均応力、変動応力）を修正グッドマン線図にプロットし、疲労強度評価を実施した。この結果、第7段スプリットリング溝部の発生応力は疲労限度を上回り、疲労き裂が発生する可能性があることが判明した。



疲労強度評価結果

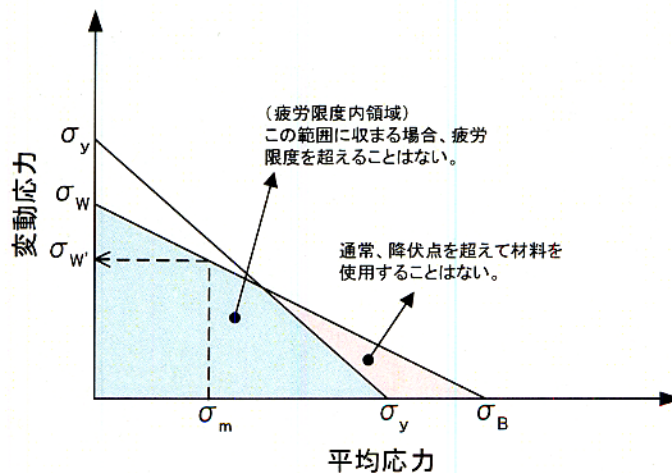
修正グッドマン線図について

一般に金属材料の疲労限度（無限回の応力繰返しに耐える疲労強度）は、平均応力が引張応力の時には低下し、逆に圧縮応力の時は増加する。

疲労限度に影響を及ぼす引張平均応力の影響は、下図のように横軸に平均（引張）応力を、縦軸に平均応力が零の時の疲労限度 σ_w をとって、右下がりの直線で表される。この直線を「修正グッドマン線図」という。（縦軸値が零の時の横軸値は、理論的には真破断強度 σ_T であるが、真破断強度が求められていない場合が多いので、便宜的に引張強さ σ_B がとられる。）

そこで、任意の平均応力 σ_m での疲労限度 σ_w' は、その平均応力値に立てた垂線が修正グッドマン線図と交わる高さで与えられる。

この修正グッドマン線図は元来疲労限度について提案されたものであるが、その後、疲労限度以外の時間強度（任意の繰返し数に対する疲労限度、変動応力）についても応用されている。



き裂の進展に関する検討結果

目的	<p>体積制御タンク大気開放運転時におけるき裂進展の状況と、通常運転時のき裂進展の可能性について評価する。</p>
内容	<p>1. 検討項目</p> <p>(1) 体積制御タンク大気開放運転時におけるき裂進展状況の整理</p> <p>(2) 通常運転時におけるき裂進展の可能性</p> <ul style="list-style-type: none"> ・き裂深さと疲労き裂進展限界変動応力の関係の整理 ・き裂深さ7.6mm(最終ビーチマーク深さに相当)の疲労き裂進展限界変動応力の算出 ・通常運転時の変動応力での疲労き裂進展の可能性評価 <p>2. 検討結果</p> <p>(1) 初期定期検査時の体積制御タンク大気開放運転時に発生した高サイクル疲労によるき裂は、その後の定期検査での体積制御タンク大気開放運転時においても、発生応力が主軸の疲労限度を上回ることから徐々に進展する。</p> <p>(2) 通常運転時の公称曲げ変動応力は $10\text{N}/\text{mm}^2$ であり、これは、7.6mm のき裂深さに対する疲労き裂進展限界変動応力 $10\text{N}/\text{mm}^2$ と一致する。このことから、き裂深さが7.6mm となった時点からは、通常運転時にき裂が進展する可能性があることが判明した。</p> <p style="text-align: right;">《別紙(1)》</p>
別紙	<p>(1) き裂の進展評価</p>

き裂の進展評価

1. 体積制御タンク大気開放運転時におけるき裂進展

初期定期検査時の体積制御タンク大気開放運転時に発生した高サイクル疲労によるき裂は、その後の定期検査での体積制御タンク大気開放運転時においても、発生応力が主軸の疲労限度を上回ることから徐々に進展する。

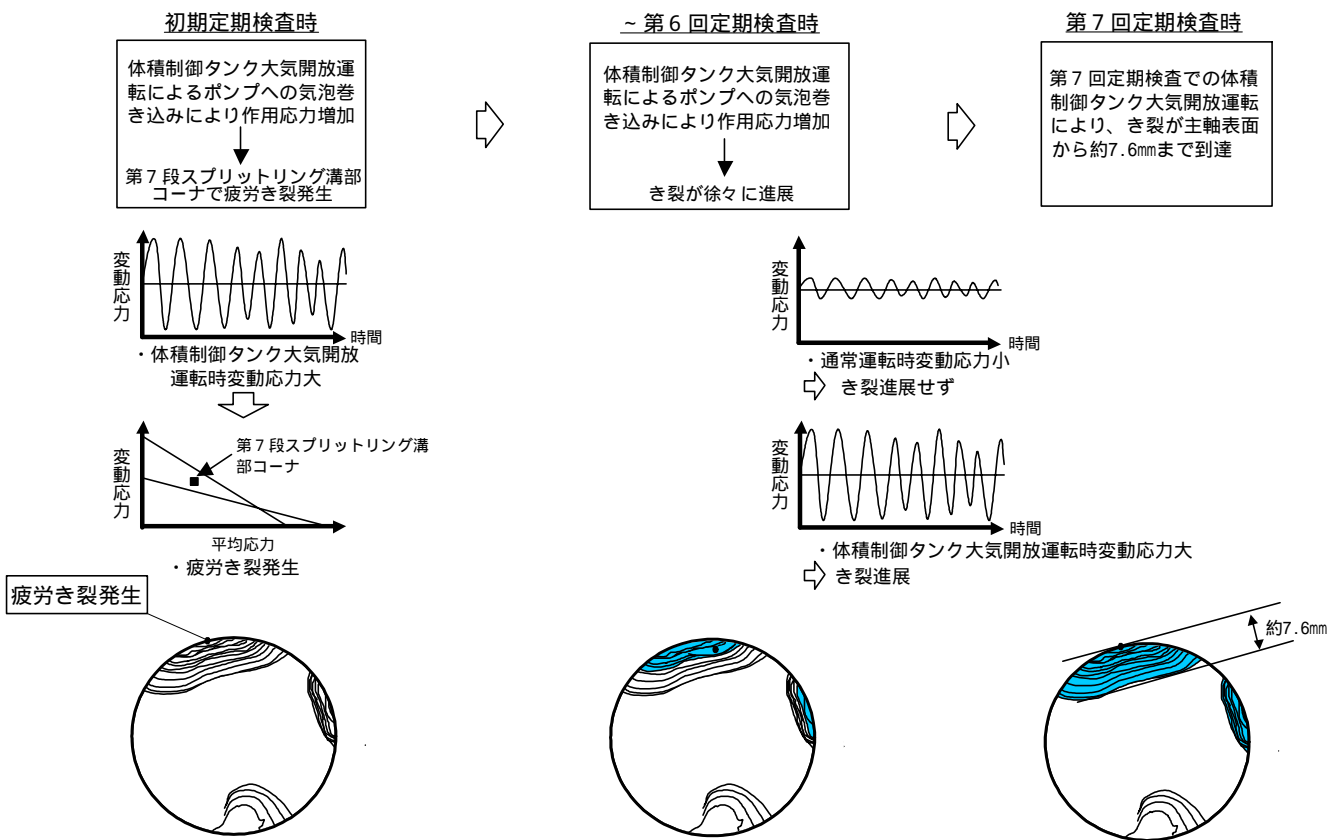


図1 体積制御タンク大気開放運転時のき裂進展状況

2. 通常運転時におけるき裂進展の可能性

(1) き裂がない場合の通常運転時の発生応力および疲労強度評価

通常運転時の、第7段スプリットリング溝部にき裂がない場合の平均応力は188N/mm²、変動応力は41N/mm²であり、これを修正グッドマン線図にプロットすると疲労限度内にある。

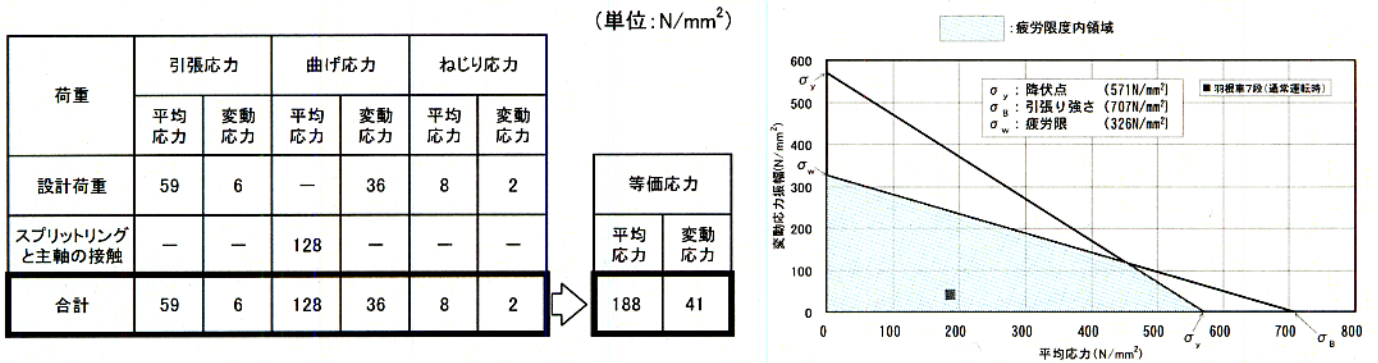


図2 疲労強度評価結果(通常運転時)

(2) き裂が存在する場合の通常運転時のき裂進展評価

き裂が存在しない場合には、通常運転時の発生応力によってき裂が発生したり、進展することはないが、き裂が既に存在する場合には、 $K > \Delta K_{th}$

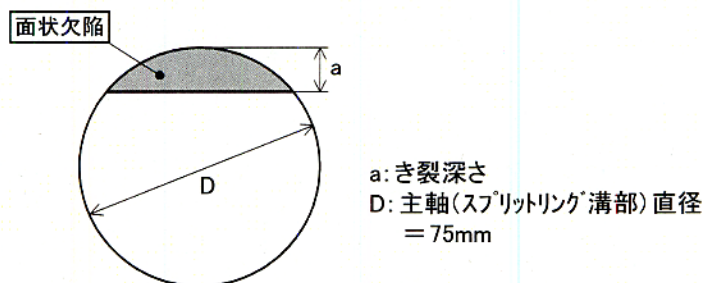
$$\left[\begin{array}{l} K : \text{応力拡大係数} \\ \Delta K_{th} : \text{疲労き裂の進展に対する下限界の応力拡大係数範囲} \end{array} \right]$$

の条件が満たされれば、そのき裂は進展する。

そこで、K 値算出式および ΔK_{th} 値を設定し、き裂深さとき裂進展条件を満たす変動応力(疲労き裂進展限界変動応力)の関係を整理した。

① K 値算出式の設定

主軸破断面観察結果から半月状の面状欠陥を想定し、欠陥形状モデルを設定。このモデルにおける応力拡大係数 K は、Daoud&Cartwright 式^[1]により求める。



$$K = [1.04 - 3.64(a/D) + 16.86(a/D)^2 - 32.86(a/D)^3 + 28.41(a/D)^4] \times \sigma \sqrt{\pi a}$$

ここで、a: き裂深さ、D: 鋼棒直径、σ: 公称変動応力

図3 K 値算出式の設定

[1] 参考文献: Strain energy release rate for shingle edge cracked in a circular bar subjected to bending. Eng. Fracture Mech. 19(1984)

② ΔK_{th} 値の設定

図4は、各鋼種における疲労き裂の進展に対する下限界の応力拡大係数範囲 ΔK_{th} と応力比 R との関係を示す図である。これより、本評価に用いる ΔK_{th} を $2.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ($8\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$) に設定した。

ΔK_{th} は応力比 (= 応力の最小値 / 応力の最大値) に依存するため、変動応力条件によっては、 $2.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ ($8\text{kgf}/\text{mm}^{3/2}$) 以上となるケースも想定されるが、実機ではさまざまなモードの合成を考慮する必要があることから、安全側に下限値を用いて評価を行った。

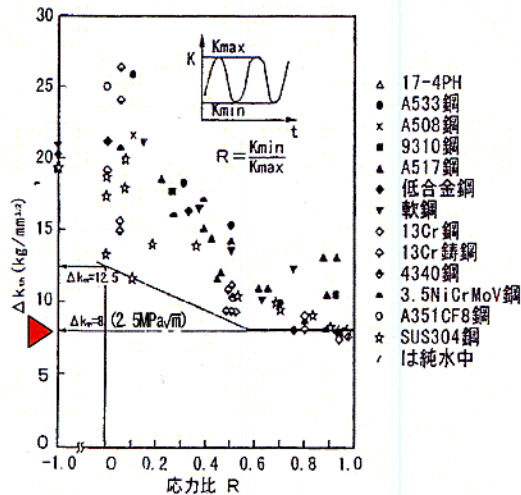


図4 疲労き裂進展下限界値データ^[2]

③ き裂深さと疲労き裂進展限界変動応力の関係

$K = \Delta K_{th}$ の条件を満たすき裂深さと疲労き裂進展限界変動応力の関係を図5に示す。この曲線の右側の領域が、疲労き裂が進展する条件を満たすことになる。

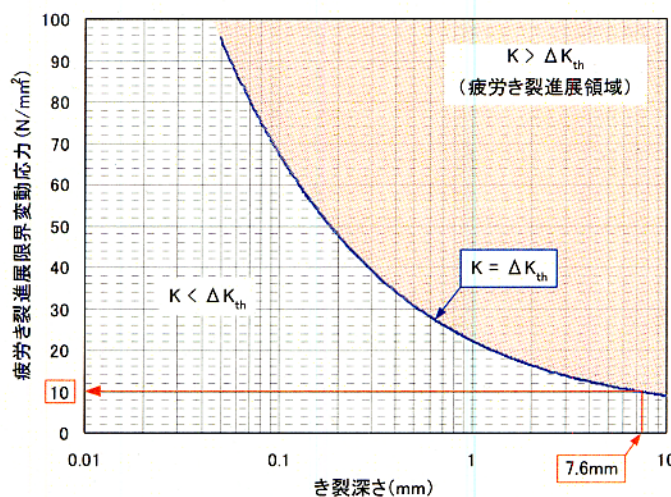


図5 き裂深さと疲労き裂進展限界変動応力の関係

^[2] 参考文献：メーカー技術資料による

通常運転時の変動応力での疲労き裂進展の可能性評価

図6に示すように、き裂Aに認められる最終ビーチマークの深さは7.6mmであり、このき裂深さに対する疲労き裂進展限界変動応力は図5より約 10N/mm^2 となる。

一方、第7段スプリットリング溝部に発生する通常運転時の公称曲げ変動応力は、約 10N/mm^2 (通常運転時曲げ変動応力 36N/mm^2 / 曲げ応力集中係数 $3.59^{[3]}$) であり、これは、7.6mmのき裂深さに対する疲労き裂進展限界変動応力と一致する。

このことから、最終ビーチマーク以降のき裂は、充てんポンプの通常運転時に進展したと推定される。

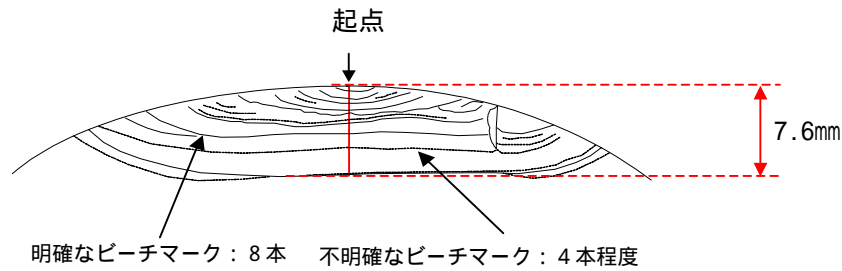


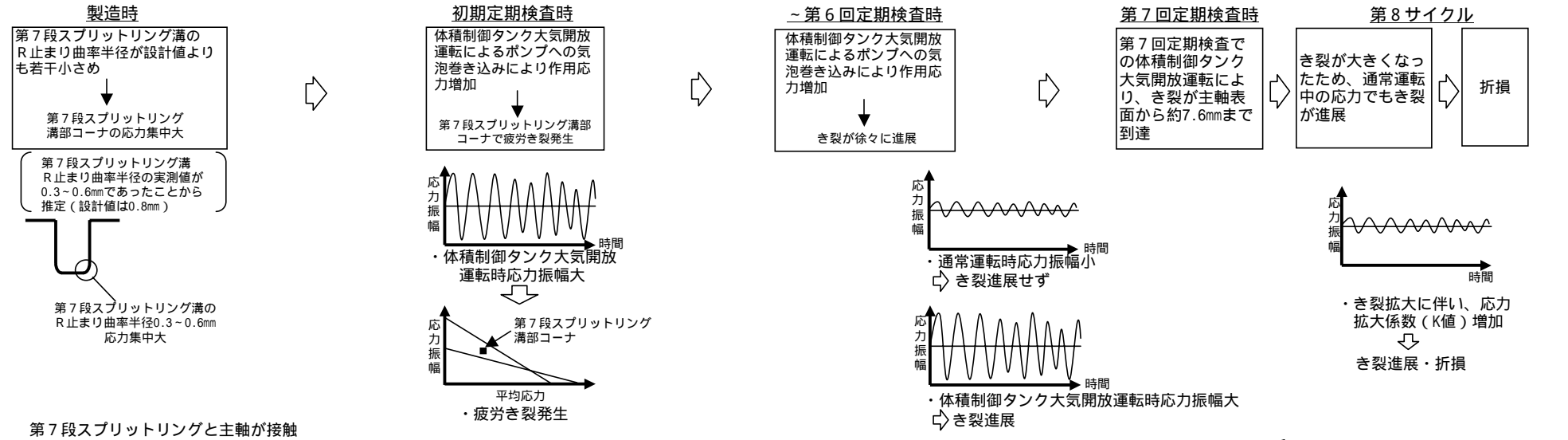
図6 主軸破断面 き裂A部の状況

[3] 添付 - 17 別紙(1) 参照

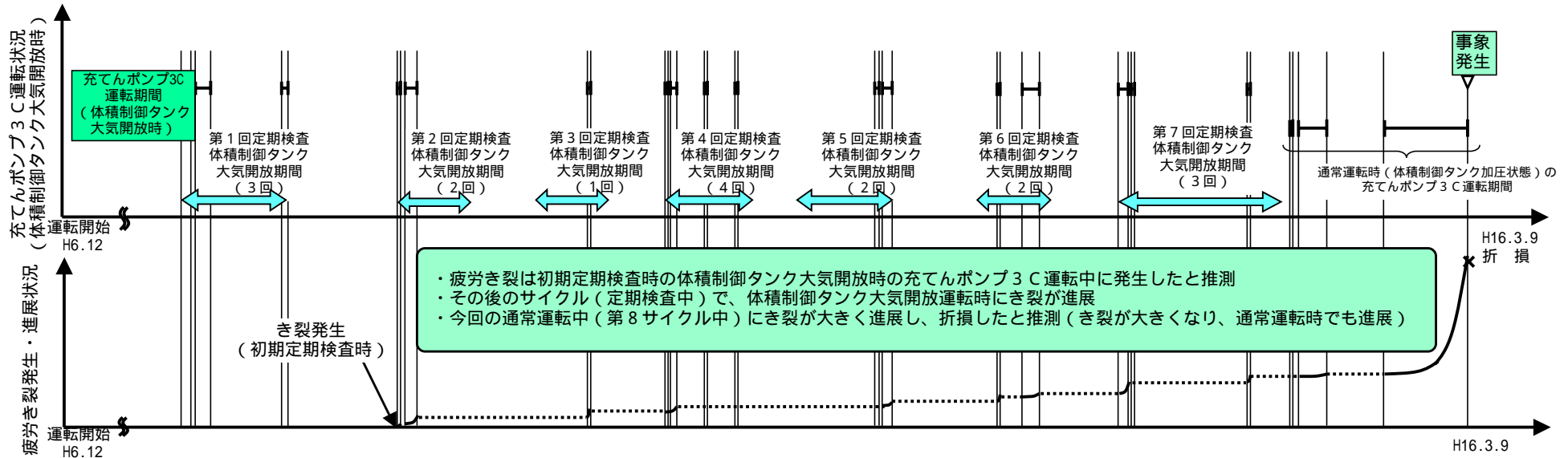
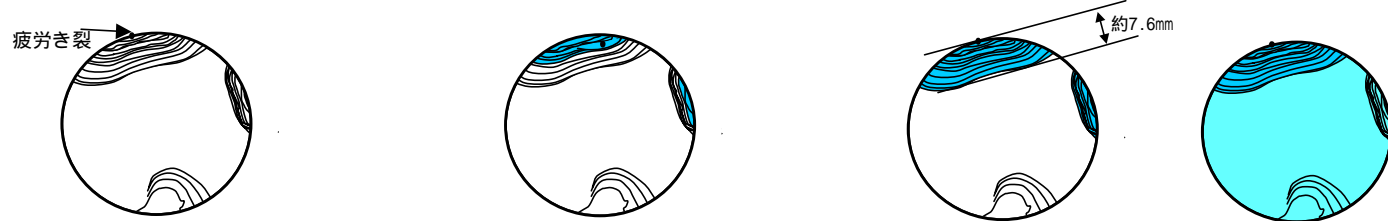
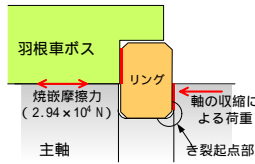
事象発生 の 推定メカニズム

目的	<p>充てんポンプ3C主軸の損傷に至った推定メカニズムを検討する。</p>
内容	<p>1. 事象発生 の 推定メカニズム</p> <p>製造時 第7段スプリットリング溝部コーナのR止まり曲率半径が設計値よりも若干小さめであり、当該部の応力集中が大きくなった。</p> <p>初期定期検査時 体積制御タンク大気開放運転によるポンプへの気泡流れ込みにより作用応力が増加し、第7段スプリットリング溝部コーナで疲労き裂が発生した。</p> <p>～第6回定期検査時 体積制御タンク大気開放運転によるポンプへの気泡巻き込みにより作用応力が増加し、き裂が徐々に進展した。</p> <p>第7回定期検査時 第7回定期検査での体積制御タンク大気開放運転により、き裂がスプリットリング溝部表面から約7.6mmまで到達した。</p> <p>第8サイクル き裂が大きくなったため、通常運転中の応力でもき裂が進展し、折損に至った。</p> <p style="text-align: right;">《別紙(1)》</p> <p>2. き裂の発生および深さに関する考察</p> <p>(1) き裂の発生</p> <p>(2) き裂の深さ</p> <p>について考察を行った。</p> <p style="text-align: right;">《別紙(2)》</p>
別紙	<p>(1) 事象発生 の 推定メカニズム</p> <p>(2) き裂の発生および深さに関する考察</p>

事象発生の推定メカニズム



第7段スプリットリングと主軸が接触
スプリットリングを介して溝部に応力が作用



き裂の発生および深さに関する考察

1. き裂の発生に関する考察

スプリットリング溝部のような形状の箇所に変動応力が加わる場合、

- ・表面粗さ
- ・機械切削時の状況
- ・R止まり寸法
- ・振動発生時の曲げ応力周方向分布

等の影響で疲労強度及び変動応力の周方向分布がばらつくことが考えられる。

材料の表面状態の影響を強く受ける疲労強度の周方向分布が生じれば、同じ繰返し回数の変動応力を負荷されても疲労強度の小さい部位より疲労き裂が発生し、進展する可能性がある。

また、応力集中の影響を強く受ける変動応力の周方向分布が生じれば、同じ疲労強度であっても変動応力が大きく疲労強度を超える部位より疲労き裂が発生し、進展する可能性がある。

第7段スプリットリング溝部のき裂Aおよびき裂Bでは、R止まり寸法が小さかった、機械切削時に微小な傷が残った、表面粗さが他の部位より粗かった、曲げ応力が他の部位より高かった等の要因のいずれかにより、相対的に疲労強度が小さく、かつ、変動応力が大きかったため、疲労き裂が発生・進展したものと推定される。

なお、疲労破壊においては、このように複数のき裂が発生する現象は一般的に認められる。

2. き裂の深さに関する考察

疲労き裂発生後のき裂進展速度は、初期き裂の深さに影響されると考えられる。

初期き裂の深さは、付加される変動応力の大きさに依存すると考えられ、き裂Aではき裂Bに比べて、R止まり寸法が小さかった、曲げ応力が高かった等により、付加された変動応力がき裂Bより高かったため、初期き裂深さがき裂Bより深かった可能性がある。

したがって、同じ変動応力が加わる場合、初期き裂が深い方がき裂進展速度が速いと考えられることから、き裂Aの方がき裂Bより深くなったと推定される。

充てんポンプ 3 A , 3 B の調査

目 的	充てんポンプ 3 C の主軸折損に伴い、念のため、充てんポンプ 3 A , 3 B の製作履歴等の調査を行う。
内 容	<p>1 . 調査項目</p> <p>(1) 製造履歴 製造工程での、材料や加工・組立状況などの違いの有無を調査する。</p> <p>(2) 運転・保守状況 運転時間・電流・振動および点検保守状況の比較を行う。</p> <p>(3) 配管構成等 ポンプ入口配管の系統構成、圧力損失、勾配の比較を行う。</p> <p>2 . 調査結果</p> <p>(1) 製造履歴</p> <ul style="list-style-type: none"> ・材料証明書を確認した結果、充てんポンプ 3 A , 3 B , 3 C と同じロットで作られており、規定値内であった。 ・製造時期はほぼ同時期であった。また、ロータ振れ計測記録を確認した結果、充てんポンプ 3 A , 3 B , 3 C のいずれも許容値内であり、異常は認められなかった。3 A , 3 B の計測値は、3 C に比べ極めて少なく良好であった。 <p style="text-align: right;">《別紙 (1) 》</p> <p>(2) 運転・保守状況</p> <ul style="list-style-type: none"> ・体積制御タンク大気開放時の累積運転時間および第 7 回定期検査後の運転時間について調査した結果、充てんポンプ 3 A , 3 B に比べ 3 C が短かった。また、振動値に有意な差は認められなかった。 ・体積制御タンク大気開放運転時および通常運転時の電流値に有意な差は認められなかった。 ・定期検査時に充てんポンプ 3 A , 3 B , 3 C とともに第 1 段羽根車に浸食傷が認められ同様の手入れを行っていた。 <p style="text-align: right;">《別紙 (2) 》</p> <p>(3) 配管構成等</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ポンプ入口配管の系統構成、配管圧力損失について調査した結果、充てんポンプ 3 A , 3 B の入口配管ルートは 3 C 入口配管側から分岐しており、また、配管圧力損失は、3 C に比べ、3 A , 3 B の方が大きいことが分かった。また、配管勾配に差異は認められなかった。 <p style="text-align: right;">《別紙 (3) 》</p>
別 紙	<p>(1) 製造履歴調査結果</p> <p>(2) 運転状況調査結果</p> <p>(3) 配管構成等調査結果</p>

製造履歴調査結果

(1) 材 料

単位：重量%

項 目	Si	Cr	Mn	Fe	Ni
規 格 値 (10705AG) SUS403 相当	Max 0.50	11.50 ~ 13.00	0.30 ~ 0.60	Bal.	Max 0.60
材料証明書記載値 (3A, 3B, 3Cは同一ロット)	0.4	11.7	0.5	Bal.	0.5

(2) 製造工程

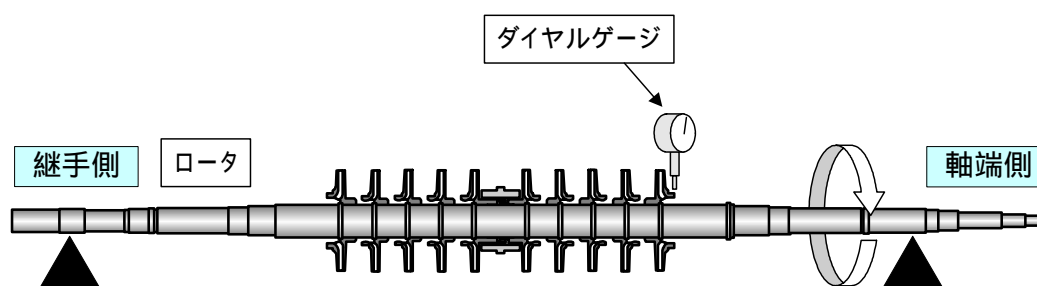
・ 製造時期

項 目	3 A	3 B	3 C
主 軸 加 工 (スプリットリング溝)	H 3 年 5 月	H 3 年 5 月	H 3 年 5 月
焼 嵌	H 3 年 9 月	H 3 年 10 月	H 3 年 10 月
ロータ振れ計測	H 3 年 9 月	H 3 年 10 月	H 3 年 11 月
工 場 試 験	H 3 年 10 月	H 3 年 11 月	H 3 年 12 月

・ ロータ振れ (羽根車部で測定)

単位：1/100mm

測定部	許容値	3 A	3 B	3 C
1 ~ 10 段	5	0 ~ 1	0 ~ 1	1 ~ 4



ロータ振れ測定概念図

調査結果

- ・ 材料、製造工程・時期に有意な差は認められない。
- ・ 製造時のロータ振れは充てんポンプ3A, 3Bは極めて良好な値に対し、充てんポンプ3Cの振れがやや大きい値となっていたが、いずれも許容値内であった。

運転状況調査結果

(1) 運転時間

期間：運開～H16年3月9日

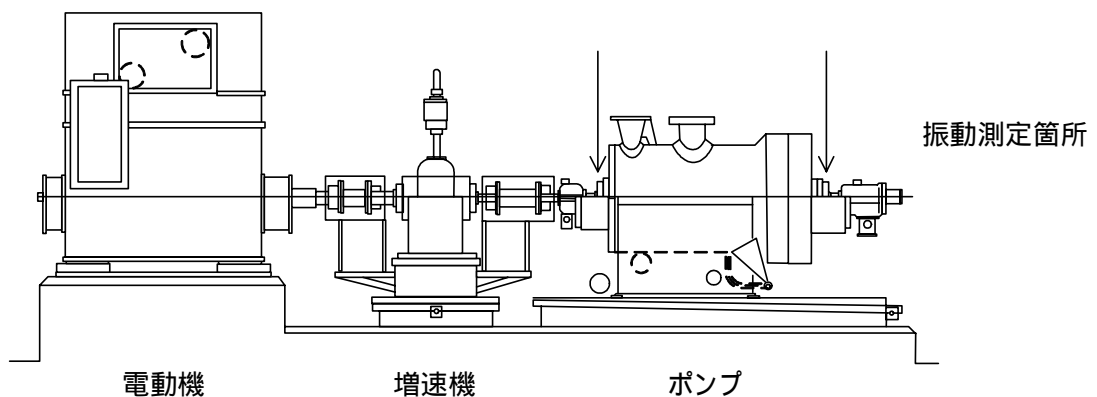
項目		3 A	3 B	3 C
大気開放 運転時間 (hr)	累計	約 1,720	約 1,180	約 1,040
通常 運転時間 (hr)	第7回定期 検査以降	約 1,600	約 1,500	約 1,200
	第7回定期 検査まで	約 43,200	約 43,100	約 40,800
	合計	約 44,800	約 44,600	約 42,000
運転回数 (回)	大気開放運転	23	14	17
	上記以外	48	44	46
	合計	71	58	63

(2) 振 動

期間：H9年4月～H16年3月

単位：mm/s

項目		3 A	3 B	3 C
管理値	良好値	4 以下		
	運転可	10 未満		
継手側		1.0～2.4	1.0～3.2	1.0～2.4
軸端側		1.0～2.0	0.9～2.1	1.0～1.6



調査結果

- ・運転時間は、体積制御タンク大気開放時の累積運転時間および7回定検以降の運転時間とも充てんポンプ3Cが3A, 3Bに対し短かった。また、運転回数はほぼ同等であった。
- ・振動に有意な差は認められない。

運転状況調査結果

(3) 電 流

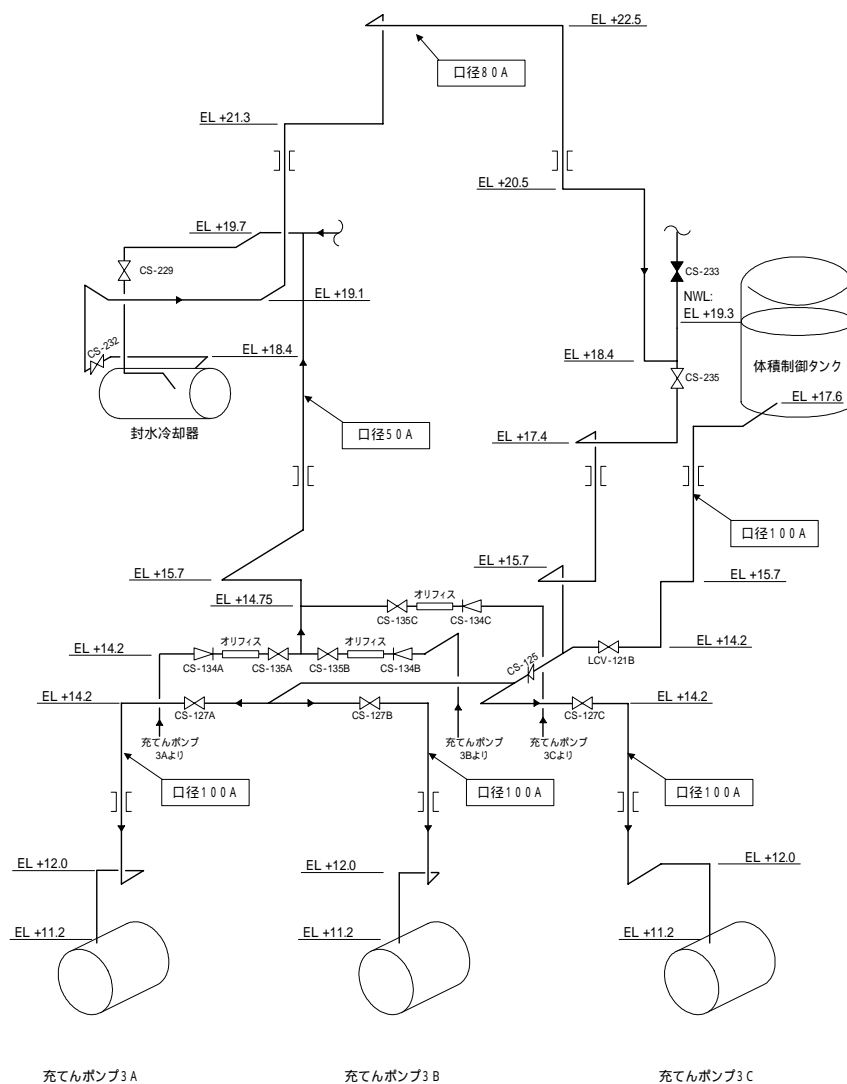
サイクル	状態	パラメータ	3 A	3 B	3 C
第 1	大気開放	電 流 (A)	48	-	50
		充てん流量 (m ³ /h)	22	-	29
	通常	電 流 (A)	45	45	45
		充てん流量 (m ³ /h)	39 / 2 台	39 / 2 台	39 / 2 台
第 2	大気開放	電 流 (A)	50	50	52
		充てん流量 (m ³ /h)	28	28	38
	通常	電 流 (A)	45	45	45
		充てん流量 (m ³ /h)	37 / 2 台	37 / 2 台	37 / 2 台
第 3	大気開放	電 流 (A)	-	52	-
		充てん流量 (m ³ /h)	-	39	-
	通常	電 流 (A)	45	45	45
		充てん流量 (m ³ /h)	39 / 2 台	38 / 2 台	38 / 2 台
第 4	大気開放	電 流 (A)	50	50	55
		充てん流量 (m ³ /h)	29	29	49
	通常	電 流 (A)	45	45	45
		充てん流量 (m ³ /h)	36 / 2 台	36 / 2 台	36 / 2 台
第 5	大気開放	電 流 (A)	56	-	51 ~ 53
		充てん流量 (m ³ /h)	44	-	約 36 ~ 38
	通常	電 流 (A)	45	46	45
		充てん流量 (m ³ /h)	38 / 2 台	38 / 2 台	38 / 2 台
第 6	大気開放	電 流 (A)	54	-	48
		充てん流量 (m ³ /h)	42	-	22
	通常	電 流 (A)	48	48	48
		充てん流量 (m ³ /h)	22	22	22
第 7	大気開放	電 流 (A)	50	-	50
		充てん流量 (m ³ /h)	28	-	28
	通常	電 流 (A)	48	48	48
		充てん流量 (m ³ /h)	24	24	24

注：計算機データからプラント状態が安定している時期のデータを記録

調査結果

- ・電流に有意な差は認められない。

配管構成等調査結果



ポンプ入口配管長および圧力損失

	共通部	3 A	3 B	3 C
配管長(m)	12.5	14.0	9.4	9.3
圧力損失(mH ₂ O)	1.45	1.58	1.42	1.04

調査結果

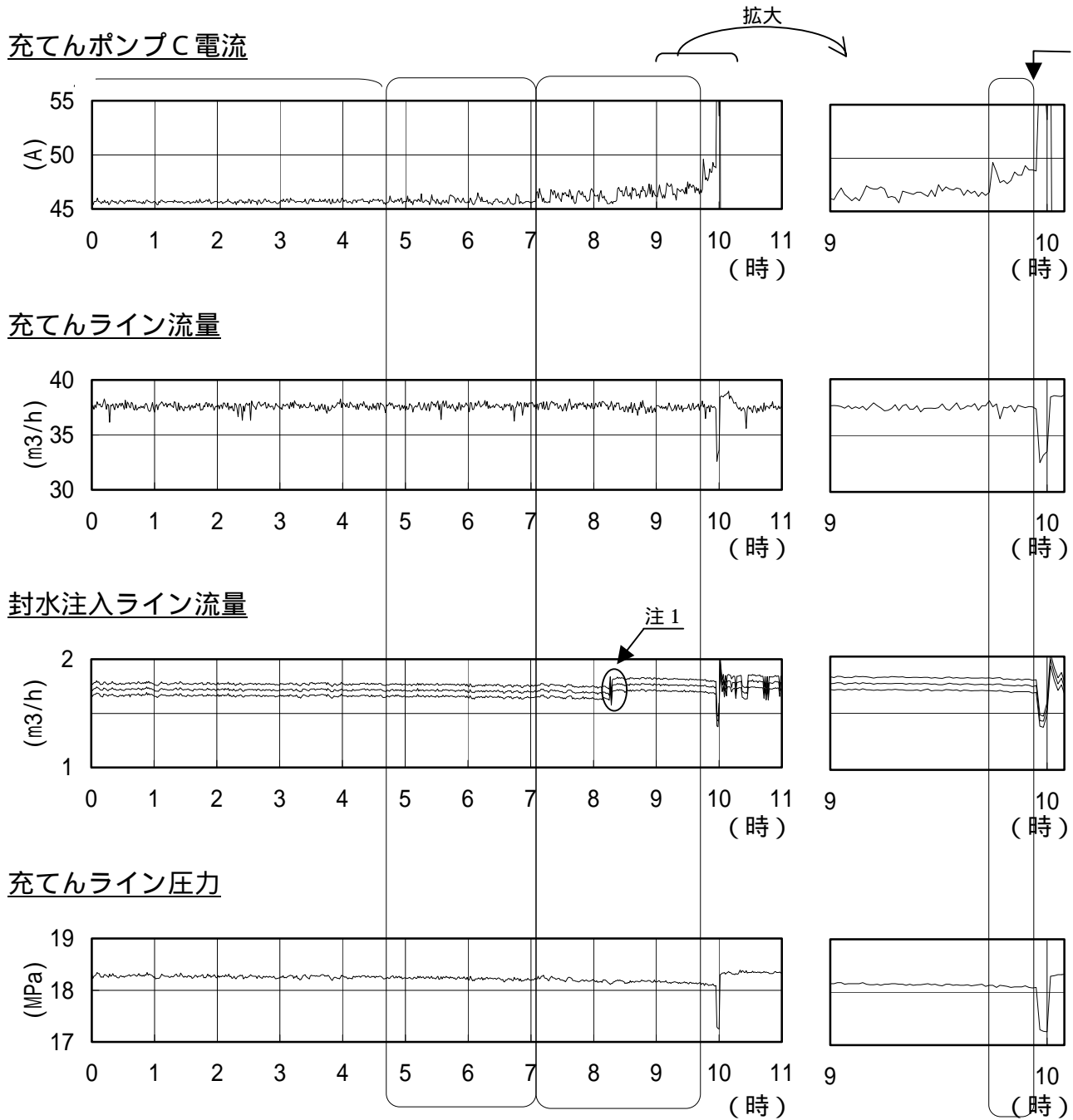
- ・ 充てんポンプ3A, 3Bの入口配管は3C入口配管側から分岐しており、配管圧力損失は、充てんポンプ3Cに比べ、3A, 3Bの方が大きいことが分かった。

運転パラメータ挙動調査

目的	<p>充てんポンプ3C主軸折損に至るまでの運転に係る主要なパラメータを調査し、事象発生までの当該ポンプの挙動の変化を確認する。</p>																																				
内容	<p>1. 調査項目 事象発生前後（H16年3月9日0時～11時）の主要なパラメータ（充てんポンプC電流、充てんライン流量、封水注入ライン流量、充てんライン圧力）を確認する。</p> <p>2. 調査結果 充てんポンプ3C主軸折損に至るまでの各パラメータの挙動 《別紙(1)》</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 10px;"> <thead> <tr> <th style="width: 15%;"></th> <th style="width: 15%;"></th> <th style="width: 15%;"></th> <th style="width: 15%;"></th> <th style="width: 15%;"></th> <th style="width: 15%;"></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: center;">時刻</td> <td style="text-align: center;">4:45以前</td> <td style="text-align: center;">4:45頃～7:05頃</td> <td style="text-align: center;">7:05頃～9:45頃</td> <td style="text-align: center;">9:45頃～9:57頃</td> <td style="text-align: center;">9:57頃</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">充てんポンプC電流</td> <td style="text-align: center;">安定</td> <td style="text-align: center;">漸増</td> <td style="text-align: center;">増加 振れ大</td> <td style="text-align: center;">ステップ状に増加</td> <td style="text-align: center;">急増</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">充てんライン流量</td> <td style="text-align: center;">安定</td> <td style="text-align: center;">変動なし</td> <td style="text-align: center;">変動なし</td> <td style="text-align: center;">低下</td> <td style="text-align: center;">急減</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">封水注入ライン流量</td> <td style="text-align: center;">安定</td> <td style="text-align: center;">わずかに低下</td> <td style="text-align: center;">低下</td> <td style="text-align: center;">低下</td> <td style="text-align: center;">急減 (「RCP封水注入流量低」 警報発信(設定値1.5m³/h))</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">充てんライン圧力</td> <td style="text-align: center;">安定</td> <td style="text-align: center;">わずかに低下</td> <td style="text-align: center;">低下</td> <td style="text-align: center;">低下</td> <td style="text-align: center;">急減</td> </tr> </tbody> </table> <p>以上より、事象発生の約5時間前より、充てんポンプ電流値がわずかにふらつき、事象発生の15分前には電流値が上昇していることが確認できた。 また同時に、事象発生の約5時間前より、「封水注入ライン流量の低下」、「充てんライン圧力の低下」という兆候も確認できた。</p>							時刻	4:45以前	4:45頃～7:05頃	7:05頃～9:45頃	9:45頃～9:57頃	9:57頃	充てんポンプC電流	安定	漸増	増加 振れ大	ステップ状に増加	急増	充てんライン流量	安定	変動なし	変動なし	低下	急減	封水注入ライン流量	安定	わずかに低下	低下	低下	急減 (「RCP封水注入流量低」 警報発信(設定値1.5m ³ /h))	充てんライン圧力	安定	わずかに低下	低下	低下	急減
時刻	4:45以前	4:45頃～7:05頃	7:05頃～9:45頃	9:45頃～9:57頃	9:57頃																																
充てんポンプC電流	安定	漸増	増加 振れ大	ステップ状に増加	急増																																
充てんライン流量	安定	変動なし	変動なし	低下	急減																																
封水注入ライン流量	安定	わずかに低下	低下	低下	急減 (「RCP封水注入流量低」 警報発信(設定値1.5m ³ /h))																																
充てんライン圧力	安定	わずかに低下	低下	低下	急減																																
別紙	<p>(1) 充てんポンプ3C主軸折損に至るまでの各パラメータの挙動</p>																																				

充てんポンプ3 C 主軸折損に至るまでの各パラメータの挙動

(平成16年3月9日)



注1：流量は自動制御しており、8:15頃に流量低下を検知し、制御弁の開度が増加したため、流量が増加している。

安全上重要なポンプ調査表

	名 称	設置 台数	段数	スプリット リング溝の 有無	減圧オリフィス の有無	オリフィス後 配管の戻り先	対策要否
				：有 ×：無	：有 ×：無	：ポンプ入口 ×：タンク 又はライン無	：有 ×：無
伊方3号	充てんポンプ	3	10				
	1次冷却材ポンプ	3	1	×	×	×	×
	高圧注入ポンプ	2	8			×	×
	電動補助給水ポンプ	2	11			×	×
	タービン動補助給水ポンプ	1	2			×	×
	余熱除去ポンプ	2	1	×	×		×
	格納容器スレイブポンプ	2	1	×	×		×
	原子炉補機冷却水ポンプ	4	1	×	×	×	×
	海水ポンプ	4	1	×	×	×	×
	ほう酸ポンプ	2	1	×		×	×
燃料取替用水タンクポンプ	2	1	×		×	×	
伊方1号	充てんポンプ	3	(往復動)	×	×	×	×
	1次冷却材ポンプ	2	1	×	×	×	×
	高圧注入ポンプ	2	8			×	×
	電動補助給水ポンプ	2	12			×	×
	タービン動補助給水ポンプ	1	2	×		×	×
	余熱除去ポンプ	2	1	×			×
	格納容器スレイブポンプ	2	1	×	×		×
	原子炉補機冷却水ポンプ	4	1	×	×	×	×
	海水ポンプ	4	1	×	×	×	×
	ほう酸ポンプ	2	1	×		×	×
燃料取替用水タンクポンプ	2	1	×		×	×	
伊方2号	充てんポンプ	3	(往復動)	×	×	×	×
	1次冷却材ポンプ	2	1	×	×	×	×
	高圧注入ポンプ	2	8			×	×
	電動補助給水ポンプ	2	12			×	×
	タービン動補助給水ポンプ	1	2	×		×	×
	余熱除去ポンプ	2	1	×			×
	格納容器スレイブポンプ	2	1	×	×		×
	原子炉補機冷却水ポンプ	4	1	×	×	×	×
	海水ポンプ	4	1	×	×	×	×
	ほう酸ポンプ	2	1	×		×	×
燃料取替用水タンクポンプ	2	1	×		×	×	

(調査台数：3号機：27台、1号機：26台、2号機：26台)

その他の放射能を含むポンプ調査表 (3号機)

名 称	設置 台数	段数	スプリット リング溝の 有無	減圧オリフィス の有無	オリフィス後 配管の戻り先	対策要否
			: 有 × : 無	: 有 × : 無	: ポンプ入口 × : タンク 又はライン無	: 有 × : 無
使用済燃料ピットポンプ	2	1	×	×	×	×
モニタタンクポンプ	2	1	×	×	×	×
ほう酸回収装置給水ポンプ	2	1	×		×	×
格納容器冷却材ドレンポンプ	2	1	×	×	×	×
格納容器サンプポンプ	2	1	×	×	×	×
廃液給水ポンプ	2	1	×		×	×
廃液蒸留水ポンプ	2	1	×	×	×	×
洗浄排水ポンプ	2	1	×	×	×	×
補助建屋サンプタンクポンプ	2	3	×	×	×	×
強酸ドレンポンプ	1	1	×	×	×	×
洗浄排水モニタタンクポンプ	2	1	×	×	×	×
燃料検査ピットポンプ	1	1	×	×	×	×
燃料取替用キャナルポンプ	1	1	×	×	×	×
ガス圧縮装置 封水循環ポンプ	2	1	×	×	×	×
水素再結合ガス圧縮装置 封水循環ポンプ	1	1	×	×	×	×
ほう酸回収装置 濃縮液ポンプ	2	1	×		×	×
ほう酸回収装置 蒸留水ポンプ	2	1	×	×	×	×
廃液蒸発装置 濃縮液ポンプ	2	1	×	×	×	×
廃液蒸発装置 蒸留水ポンプ	2	1	×	×	×	×
洗浄排水処理装置 高圧ポンプ	2	(往復動)	×	×	×	×
洗浄排水処理装置 透過水ポンプ	2	1	×	×	×	×
セメント固化装置 濃縮廃液供給ポンプ	2	1	×	×	×	×
セメント固化装置 濃縮器循環ポンプ	1	1	×	×	×	×
セメント固化装置 予備濃縮液ポンプ	1	1	×	×	×	×
セメント固化装置 前処理タンクポンプ	1	(ねじ式)	×	×	×	×
セメント固化装置 上澄水ポンプ	1	1	×	×	×	×
セメント固化装置 機器洗浄水ポンプ	1	(ねじ式)	×	×	×	×
セメント固化装置 機器洗浄水上澄水ポンプ	1	1	×	×	×	×

(調査台数 : 46 台)

その他の放射能を含むポンプ調査表 (1号機)

名 称	設置 台数	段数	スプリット リング溝の 有無	減圧オリフィス の有無	オリフィス後 配管の戻り先	対策要否
			: 有 × : 無	: 有 × : 無	: ポンプ入口 × : タンク 又はライン無	: 有 × : 無
ほう酸濃縮液ポンプ	2	1	×	×	×	×
冷却材貯蔵タンク循環ポンプ	1	1	×	×	×	×
モニタタンクポンプ	2	1	×	×	×	×
ほう酸回収装置給水ポンプ	2	1	×		×	×
使用済燃料ビットポンプ	2	1	×	×	×	×
使用済燃料ビットスキマポンプ	1	1	×	×	×	×
格納容器冷却材ドレンポンプ	2	1	×	×	×	×
補助建家冷却材ドレンポンプ	2	1	×	×	×	×
格納容器サンプAポンプ	1	1	×	×	×	×
格納容器サンプBポンプ	2	1	×	×	×	×
廃液給水ポンプ	3	1	×		×	×
廃液蒸留水ポンプ	2	1	×	×	×	×
洗浄排水ポンプ	2	1	×	×	×	×
薬品ドレンポンプ	2	1	×	×	×	×
補助建家サンプタンクポンプ	2	1	×	×	×	×
補助建家機器ドレンタンクポンプ	2	1	×	×	×	×
強酸ドレンポンプ	1	1	×	×	×	×
ガス圧縮装置 封水循環ポンプ	2	1	×	×	×	×
ほう酸回収装置 濃縮液ポンプ	2	1	×		×	×
ほう酸回収装置 蒸留水ポンプ	2	1	×		×	×
廃液蒸発装置 濃縮液ポンプ	4	1	×	×	×	×
廃液蒸発装置 蒸留水ポンプ	4	1	×		×	×

(調査台数 : 45 台)

その他の放射能を含むポンプ調査表 (2号機)

名 称	設置 台数	段数	スプリット リング溝の 有無	減圧オリフィス の有無	オリフィス後 配管の戻り先	対策要否
			: 有 × : 無	: 有 × : 無	: ポンプ入口 × : タンク 又はライン無	: 有 × : 無
ほう酸濃縮液ポンプ	2	1	×	×	×	×
冷却材貯蔵タンク循環ポンプ	1	1	×	×	×	×
モニタタンクポンプ	2	1	×	×	×	×
ほう酸回収装置給水ポンプ	2	1	×		×	×
使用済燃料ピットポンプ	2	1	×	×	×	×
使用済燃料ピットスキマポンプ	1	1	×	×	×	×
格納容器冷却材ドレンポンプ	2	1	×	×	×	×
補助建家冷却材ドレンポンプ	2	1	×	×	×	×
格納容器サンプAポンプ	1	1	×	×	×	×
格納容器サンプBポンプ	2	1	×	×	×	×
廃液給水ポンプ	3	1	×		×	×
廃液蒸留水ポンプ	2	1	×	×	×	×
補助建家サンプタンクポンプ	2	1	×	×	×	×
補助建家機器ドレンタンクポンプ	4	1	×	×	×	×
ドラミングパッチタンクポンプ	2	1	×	×	×	×
再生廃液中和ポンプ	1	1	×	×	×	×
洗浄排水蒸留水ポンプ	2	1	×	×	×	×
水素廃ガス貯蔵タンクドレンポンプ	1	1	×	×	×	×
水素廃ガス真空ポンプ	1	1	×	×	×	×
ほう酸回収装置 濃縮液ポンプ	2	1	×	×	×	×
ほう酸回収装置 蒸留水ポンプ	2	1	×	×	×	×
廃液蒸発装置 濃縮液ポンプ	4	1	×	×	×	×
廃液蒸発装置 蒸留水ポンプ	4	1	×	×	×	×
洗浄排水蒸発装置 濃縮液ポンプ	2	1	×	×	×	×
洗浄排水蒸発装置 蒸留水ポンプ	2	1	×	×	×	×
アスファルト固化装置 廃液供給ポンプ	2	1	×	×	×	×
アスファルト固化装置 復水ポンプ	2	1	×	×	×	×
アスファルト固化装置 洗浄廃液ポンプ	1	(往復動)	×	×	×	×
アスファルト固化装置 溶剤ポンプ	1	1	×	×	×	×

(調査台数 : 57台)