

[原因と対策の報告の公表文（様式2）]

伊方発電所から通報連絡のあった異常に係る原因と対策の報告について（平成16年3月9日分）

16. 4. 5

原子力安全対策推進監

(内線2352)

1 伊方発電所から3月9日に異常通報連絡のあった伊方3号機の充てんポンプの異常については、四国電力(株)に対し、早急な原因究明と再発防止対策の徹底を要請していたところですが、本日、別添のとおり報告がありましたので、お知らせします。

[報告書の概要]

県の公表区分	異常事項	発生年月日	推定原因等	対策
A	充てんポンプの異常(3号機)	16. 3. 9	<p>①工場製作段階の第7段スプリットリング(位置決めリング)溝部加工時に、加工用刃先形状が連続加工により変化したため、溝部コーナーのR止まり(丸めの終端部)の曲率半径が小さく、応力集中係数が大きい状態で製作された。</p> <p>②羽根車焼嵌(熱膨張させた羽根車に主軸を挿入し冷やして接合する方法)に伴い、当該部スプリットリングと主軸の接触により、当該溝部に応力が発生。</p> <p>③これに加えて、定期検査時に、体積制御タンクを大気開放にした状態で当該ポンプの運転を行ったため、オリフィス部で気泡が発生し、気泡のポンプへの流れ込みで生じた振動により、当該溝部に応力が発生。</p> <p>・以上の3つの要因が重畳したことから、第7段スプリットリング溝部に発生した応力が疲労限度を超えたため、初期き裂が発生。</p> <p>・その後の定期検査において、同様のメカニズムによりき裂が進展</p> <p>・第7回定期検査終了時点では、通常の運転中の変動応力でもき裂が進展する深さに達したため、通常運転中にき裂が進展し、主軸が折損。</p> <p>・主軸折損により、主軸(継手側)が移動</p>	<p>○当該充てんポンプ3Cの主軸を予備品と取り替える。</p> <p>○充てんポンプの運転については、必ず体積制御タンクを加压した状態で運転することとし、内規の改定を行う。</p> <p>○充てんポンプ3A、3Bについては、主軸の改良及び羽根車焼嵌時の主軸の温度管理等、製作段階における品質管理強化を行ったうえ、次回定期検査終了までに順次取り替える。それまでの間は、電流、振動等の運転監視強化を継続する。</p> <p>○1, 2号機を含め、3号機の充てんポンプ以外に、左記3つの発生要因が重畳する安全上重要な</p>

		し、継手側封水部を損傷させ、1次冷却水の漏えいに至ったものと推定される。	ポンプ及び放射能を含む系統のポンプはない。
--	--	--------------------------------------	-----------------------

2 県としては、伊方発電所に職員を派遣し、四国電力の報告内容及び対策の実施状況等について確認することとしています。

[○伊方発電所第3号機充てんポンプ3C主軸の損傷について（鑑書）](#)

[○伊方発電所第3号機充てんポンプ3C主軸の損傷について（本文）](#)

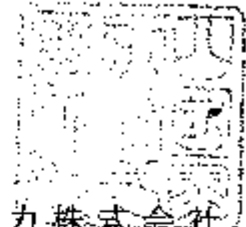
[○伊方発電所第3号機充てんポンプ3C主軸の損傷について（添付資料）](#)

[○伊方発電所第3号機充てんポンプ3C主軸の損傷について（参考資料）](#)

原子力発 第03273号

平成16年 4月 5日

愛媛県知事
加戸守行 殿



四国電力株式会社

取締役社長 大西 淳



伊方発電所第3号機充てんポンプ30主軸の損傷に係る
報告書の提出について

拝啓 時下ますますご清栄のこととお慶び申し上げます。平素は、当社事業につきまして格別のご理解を賜り、厚くお礼申し上げます。

さて、15環政第1182号「伊方3号機充てんポンプの異常に係る再発防止対策等について」(平成16年3月11日付)にてご要請のありました調査結果及び再発防止対策を取りまとめましたので、安全協定第11条第2項に基づく報告とあわせて、別添のとおりご報告申し上げます。

本報告書の内容を踏まえ、伊方1,2号機においても、今回と同様なトラブルが生じないよう安全運転に万全を期すとともに、地元の皆様にご安心頂けるよう今回の報告の内容について、情報の公開や広報に努めてまいりますので、ご指導賜りますようお願い申し上げます。

敬 具

伊方発電所第3号機
充てんポンプ3C主軸の損傷について

平成16年 4月
四国電力株式会社

目 次

1 . 件 名	1
2 . 事象発生の日時	1
3 . 事象発生 of 原子炉施設	1
4 . 事象発生時の運転状況	1
5 . 事象発生 of 状況	1
6 . 時系列	2
7 . 状況調査	2
8 . 詳細調査	3
9 . 損傷要因 of 推定	6
10 . 充てんポンプ 3 A , 3 B of 調査	8
11 . 推定原因	10
12 . 対 策	10
13 . 3号機充てんポンプ以外 of ポンプ of 調査	11

1. 件名

伊方発電所第3号機 充てんポンプ3C主軸の損傷について

2. 事象発生の日時

平成16年3月15日 9時30分(確認)

3. 事象発生の原子炉施設

原子炉冷却系統設備 化学体積制御設備 充てんポンプ

4. 事象発生時の運転状況

定格熱出力一定運転

5. 事象発生の状況

伊方発電所第3号機(定格電気出力890MW)は、定格熱出力一定運転中(電気出力929MW)のところ、平成16年3月9日9時57分頃、1次冷却材ポンプへの封水注入系統の流量低下を示す信号が発信した。このとき、充てんポンプ3Cを点検中の保修員が、当該ポンプの封水部から1次冷却水が漏えいしていることを確認したため、直ちに充てんポンプ3B(予備ポンプ)を起動し、当該ポンプを停止した。

その後、3月11日より充てんポンプ3Cを点検した結果、3月15日9時30分、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で折損していることを確認した。

また、補助建屋排気筒ガスモニタの指示値が一時的に上昇したが、発電所周辺に設置しているモニタリングポストには有意な変動はなく、本事象による外部への放射能の影響はなかった。

(添付資料 - 1 ~ 6)

6. 時系列

3月9日

9時57分頃 「RCP封水注入流量低」警報発信
充てんポンプ3C室でポンプの振動状況を点検していた
保修員が封水部からの漏えいを確認し中央制御室へ連絡

10時00分 充てんポンプ3B起動
「RCP封水注入流量低」警報復帰

10時01分 充てんポンプ3C停止

10時12分 充てんポンプ3C隔離開始

10時14分 補助建屋排気筒ガスモニタ(3R-14, 3R-28)
指示値上昇確認

10時21分 充てんポンプ3C隔離完了

10時40分 漏えい停止
補助建屋排気筒ガスモニタ(3R-14, 3R-28)
指示値復帰確認

3月15日

9時30分 充てんポンプ3C主軸の折損を確認

7. 状況調査

分解前の充てんポンプ3Cの外観点検を行うとともに、損傷状況を確認した。

(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、油切りのフィンの変形が認められたほか、主軸ジャーナル部等に摺動傷が
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。

なお、ポンプ内部ケーシング等に粉状、薄膜状の金属粉の付着が認められた
が、ポンプ出口配管等に異物はなく異常は認められなかった。

(添付資料 - 7)

(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。

(添付資料 - 7)

8 . 詳細調査

状況調査の結果、主軸継手側の封水部および軸受部等に損傷が認められたが、これらの損傷は主軸が折損し、軸継手方向に移動したことに起因すると考えられる。

このことから、事象の発生原因である主軸折損の詳細調査を要因分析図に従い実施した。

(添付資料 - 8)

(1) 破面等調査

主軸折損部の破断状況を把握するため、破面観察等による詳細調査を行った結果、以下のことを確認した。

a . 破断部

- ・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、また、破面上にき裂の起点になったと考えられる部分が2箇所(き裂Aおよびき裂B)あり、その近傍には疲労破壊に特有のビーチマークが認められた。
- ・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箇所認められた。
- ・起点部および最終破断部を除く破面では、粒界および粒内割れが混在した破面が認められた。

b . 起点部

- ・2箇所の起点部において、材料欠陥、顕著な機械加工傷等は認められなかった。
- ・起点部にはストライエーションは認められず、低応力高サイクル疲労破壊に特徴的な粒内割れが認められた。

c . その他

- ・硬度および化学成分については、異常は認められなかった。

(添付資料 - 9 ~ 13)

以上の調査結果から、当該ポンプ主軸に発生したき裂には、平坦な破面、粒内割れおよびビーチマーク等が観察され、また、変動応力が比較的大きい場合に観察されるストライエーションが認められなかったことから、低応力高サイクル疲労によるものであることが分かった。

(2) 材料・製作・施工調査

材料、製作および施工が問題なく行われていたかどうか確認した。

a . 材料の評価

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。

b . 製作不良の評価

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。

c . 施工不良の評価

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。

(3) 疲労発生の調査

折損部の形状、接触痕の有無、運転に係る履歴等を調査し、疲労の要因となるような変動応力発生の有無を確認した。

a . 応力集中

第7段スプリットリング溝部の型取測定を実施した結果、継手側（折損部の反対側）溝部コーナの曲率半径が設計値 0.8mm に対し、R 止まりでは 0.3~0.6mm 程度であった。これは、工場での製作段階において、スプリットリング溝加工用バイトの刃先形状が連続加工により変化したためと考えられる。

このことから、折損部においても同様に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。

(添付資料 - 1 4)

b . 過大応力

第7段スプリットリングの詳細調査の結果、当該リングの軸端側の面に接触痕が認められた。このことから、第7段スプリットリングと主軸の接触による溝部への応力発生の可能性がある。これは、羽根車焼嵌時に温められた主軸が冷却過程で収縮することにより、当該リングに圧着し、当該リングの軸端側の面に荷重がかかったものと考えられる。

(添付資料 - 1 4)

c . 流体振動

運転記録を確認した結果、各種パラメータに問題は認められなかったが、定期検査中に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ていたことから、ミニマムフローラインの流量制限オリフィスの背圧が低下したことにより、多量に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。

(添付資料 - 15 , 16)

d . 機械振動

定期検査記録等を確認した結果、運転時の振動は規定値内にあり、静止部と回転部との接触および内部の異物による振動の増加はなく、異常は認められなかった。

e . フレツティング

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なかった。

(4) 腐食の評価

材料証明書を確認した結果、SUS403相当材であった。

また、運転記録を確認した結果、運転温度は45 程度であり、応力腐食割れの可能性はない。

(5) 温度・圧力異常の評価

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。

(6) 保守不良の評価

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。

9 . 損傷要因の推定

主軸折損の詳細調査結果から、低応力高サイクル疲労が発生要因と考えられることから、応力の発生要因について検討した結果、(1) 破断した第 7 段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、(2) 第 7 段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、(3) 定期検査中の体積制御タンク大気開放により発生した気泡のポンプへの流入に起因する機械振動の発生が考えられる。

以上、抽出された応力の発生因子について低応力高サイクル疲労き裂の発生および進展に対する評価等を以下のとおり実施した。

(1) き裂の発生評価

上述のとおり、曲率半径が小さいこと、主軸との接触、機械振動の発生が考えられたので、以下のとおり検討した。

a . 応力集中係数

スプリットリング溝部コーナの曲率半径が型取測定結果から、設計値より小さかったことから、最小曲率半径を 0.3mm として 3 次元 F E M 解析により応力集中係数を算出した。

その結果、応力集中係数は、引張応力 3.84 , 曲げ応力 3.59 , ねじり応力 3.52 であり、曲率半径 0.8mm の場合に比べて 1.25 ~ 1.76 倍であった。

(添付資料 - 1 7)

b . スプリットリングと主軸の接触による発生応力

第 7 段スプリットリングの軸端側の面に接触痕があることから、当該スプリットリングを介して溝部に荷重が作用していたものと考えられる。

評価にあたっては、スプリットリング溝部に作用する荷重の最大値が羽根車焼嵌グリップ力相当と想定し、発生応力を評価した結果、第 7 段スプリットリング溝部の発生応力は $128\text{N}/\text{mm}^2$ であった。

(添付資料 - 1 7)

c . 定期検査時の体積制御タンク大気開放時の発生応力

定期検査時の体積制御タンク大気開放時には、気泡の流入に伴う機械的振動の発生により、特に第 7 段スプリットリング部では大きな繰り返し応力となることが判明し、このときの振動による発生応力を評価した結果、第 7 段スプリットリング溝部での発生応力は $238\text{N}/\text{mm}^2$ であった。

(添付資料 - 1 7)

d . 発生応力および疲労強度評価

通常のポンプの運転により発生する流体力、自重、ねじり力等による応力に加え、上記 a、b、c を考慮し、各段のスプリットリング溝部の発生応力を評価した。

評価の結果、第7段スプリットリング溝部の平均応力は 185N/mm^2 、変動応力は 279N/mm^2 となり、設計値を上回る過大な応力が発生する可能性があることから、体積制御タンク大気開放時の充てんポンプ運転時に、溝部表面に応力が集中し繰り返されたことで、き裂が発生する可能性があることが確認された。

なお、その他の段のスプリットリング溝部の発生応力ではき裂は生じないことが判明した。

(添付資料 - 17)

(2) き裂の進展評価

定期検査中の体積制御タンクの大気開放中に発生する応力等によりき裂が発生したものと推定され、次にき裂の進展と破断に至る過程について評価した。

a . 定期検査中の発生応力による進展

9 . (1) d . にて算定した応力が、定期検査中における体積制御タンク大気開放時の充てんポンプ運転に伴いスプリットリング溝部に加わると、主軸の疲労限度を上回ることから、き裂が最終ビーチマークの深さである 7.6mm まで進展したものと考えられる。

b . 通常運転中の発生応力による進展

き裂深さが 7.6mm に達すると、「き裂深さ」と「疲労き裂進展限界変動応力」の関係からスプリットリング溝部に 10N/mm^2 以上の変動応力が加わるとき裂が進展する。

一方、充てんポンプの通常運転によりスプリットリング溝部に発生する変動応力は 10N/mm^2 であることから、き裂が 7.6mm となった時点からは、通常運転中の応力によってもき裂が進展するものと推定された。

(添付資料 - 18)

(3) まとめ

損傷要因の推定結果から、損傷が発生した第7段スプリットリング溝部コーナで、定期検査中の体積制御タンク大気開放運転中に、気泡が充てんポンプに流れ込み、発生した応力等により、き裂が発生し、定期検査毎の応力で徐々に進展し、第7回定期検査終了時点で主軸表面より7.6mmの深さまで進展したものと推定された。

さらに、第7回定期検査後の通常運転中に主軸に発生する応力によって、き裂が進展し主軸折損に至ったものと推定された。

(添付資料 - 19)

10. 充てんポンプ3A, 3Bの調査

(1) 製造履歴、運転・保守状況、配管系統等の調査結果

充てんポンプ3Cの主軸が折損したことを受け、念のため、3A, 3Bの製造履歴、運転・保守状況、配管構成等について調査を実施した結果、

- ・ 製造履歴を調査した結果、3A, 3Bのロータ振れ計測値は、3Cに比べ極めて小さく良好であった
- ・ 運転・保守状況調査において、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は、3Cが3A, 3Bに比べ短い
- ・ 配管構成を調査した結果、3Cのポンプ入口側配管ルートは直管であるのに対し、3A, 3Bは3C側配管からの分岐ルートである

ことが分かった。

今回の事象は、充てんポンプ3Cにおいて、

- ・ 製造時、第7段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
- ・ 製造時、第7段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大気開放により発生した気泡のポンプへの流入に起因する機械振動に伴う発生応力

の厳しい条件が偶発的に重畳して発生したものである。

一方、充てんポンプ3A, 3Bについては、羽根車焼嵌時に無理な力が加わるような状態ではロータ振れが大きくなるが、ロータ振れは極めて小さく良好であり、スプリットリング溝部への過大な応力は発生していないと考えられる。

(添付資料 - 20)

(2) 運転状況の監視強化

充てんポンプ 3 A , 3 B 運転状況の監視強化を図るため、今回の事象発生前の各種運転パラメータを詳細に評価した結果、

- ・ 事象発生約 5 時間前より、ポンプ 3 C の電流値が漸増することが認められ、約 1 5 分前には電流値がステップ状に上昇していることが認められる
- ・ 事象発生約 5 時間前より、封水注入ライン流量の低下および充てんライン圧力の低下が認められる
- ・ 事象発生約 2 時間前には、運転員のパトロールによりポンプの振動が通常より若干大きいことが認められる

ことが判明した。

このため、3 A , 3 B については、運転状態での異常兆候をすみやかに検知するため、

- ・ ポンプ電流値、封水注入ライン流量、充てんライン圧力
- ・ 新規に設置した振動計の振動値、振動の周波数分析
- ・ その他ポンプ運転に関連する運転パラメータ

による監視強化を図っている。

したがって、3 A , 3 B ポンプ運転時の異常兆候をすみやかに検知し、万一、兆候が認められれば、直ちに充てんポンプを停止する運用としていることから、今回と同様な事象による環境への放射性物質の放出はない。

なお、現在運転中の 3 A については、監視強化をしている運転パラメータに異常兆候は認められていない。

(添付資料 - 2 1)

1 1 . 推定原因

今回の原因は、

- ・ 工場製作段階において、第7段スプリットリング溝部の加工時に、加工用バイトの刃先形状が連続加工により変化したため、溝部コーナのR止まりの曲率半径が小さく、応力集中係数が大きい状態で製作された
- ・ 羽根車焼嵌に伴い、当該部スプリットリングと主軸の接触により、当該溝部に応力が発生した
- ・ これに加えて、定期検査時に体積制御タンクを大気開放にした状態で充てんポンプの運転を行ったため、ミニマムフローラインのオリフィス部で気泡が発生し、この気泡の流れ込みで生じた振動により当該溝部に応力が発生した

ことの要因が重畳したことから、第7段スプリットリング溝部に発生した応力が疲労限度を超えたため、初期き裂が発生したと推定される。

その後の定期検査において同様のメカニズムによりき裂が進展し、第7回定期検査終了時点では、通常の運転中の変動応力でもき裂が進展するき裂深さに達したため、通常運転中にき裂が進展し主軸が折損したと推定される。

また、当該主軸の折損により、主軸（継手側）が移動し、継手側封水部を損傷させ、1次冷却水の漏えいに至ったものと推定される。

1 2 . 対 策

- (1) 折損した充てんポンプ3Cの主軸は予備品と取り替える。
- (2) 充てんポンプの運転については、必ず体積制御タンクを加圧した状態で運転することとし、内規の改定を行う。
- (3) 充てんポンプ3A, 3Bについては、念のため、主軸の改良および羽根車焼嵌時の主軸の温度管理等、製作段階における品質管理の強化を行ったうえ、次回定期検査終了までに順次取り替える。なお、それまでの間は、電流、振動等の運転監視強化を継続し、安全運転に万全を期す。

13. 3号機充てんポンプ以外のポンプの調査

(1) 1, 2号機充てんポンプ

1, 2号機の充てんポンプの形式は往復動形であり、3号機のうず巻形とは異なるため、同様の事象が発生することはない。

(2) 充てんポンプ以外のポンプ

充てんポンプ以外の安全上重要なポンプについて、

- ・ スプリットリング溝の有無
- ・ 空気の発生源となる減圧オリフィスの有無
- ・ オリフィス後の配管がポンプ入口配管に接続されている系統の有無

を調査した結果、3つの発生要因が重畳するポンプがないことを確認した。

また、その他の放射能を含む系統のポンプについても、同様の調査を実施した結果、問題のないことを確認した。

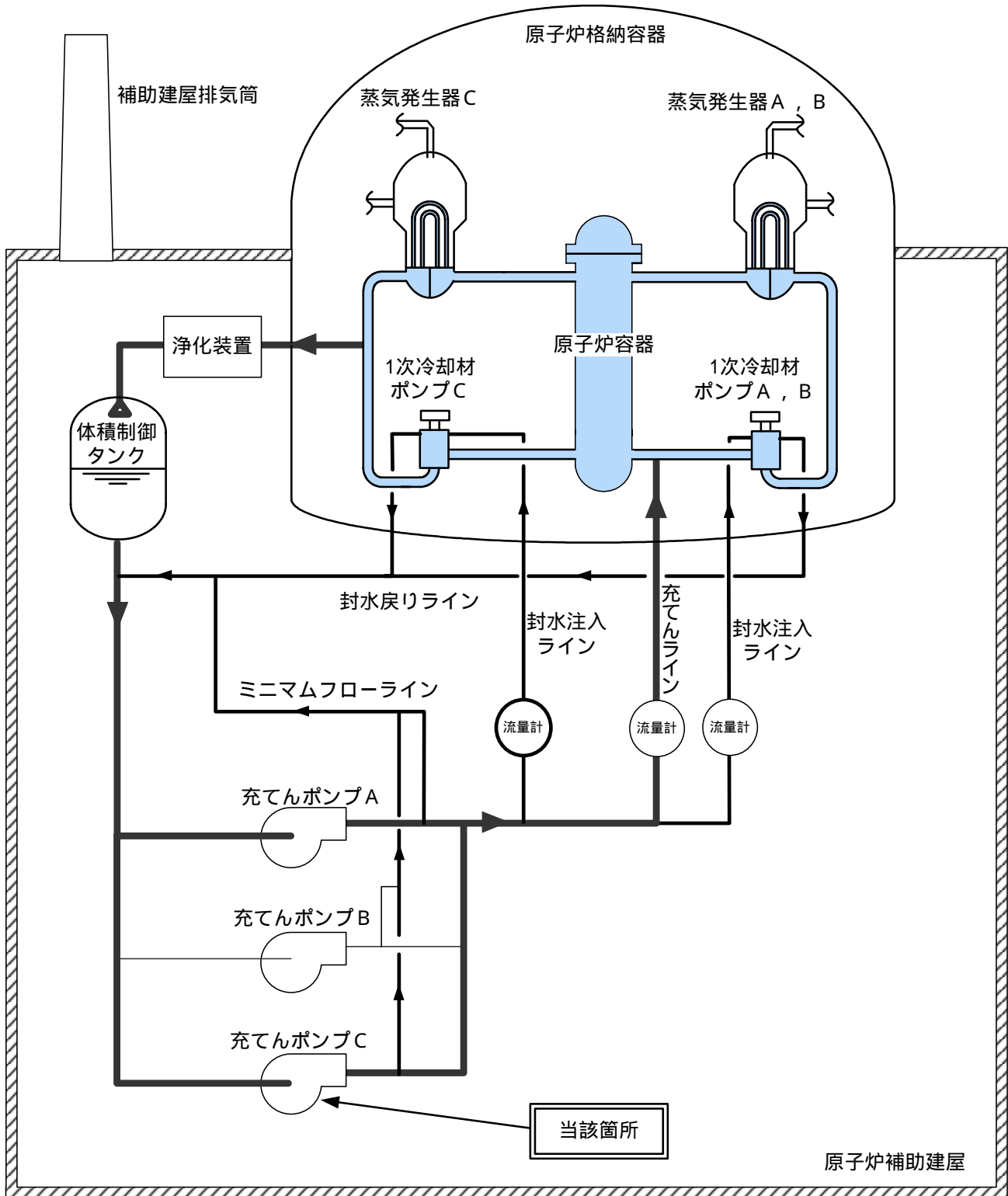
(添付資料 - 22)

以上

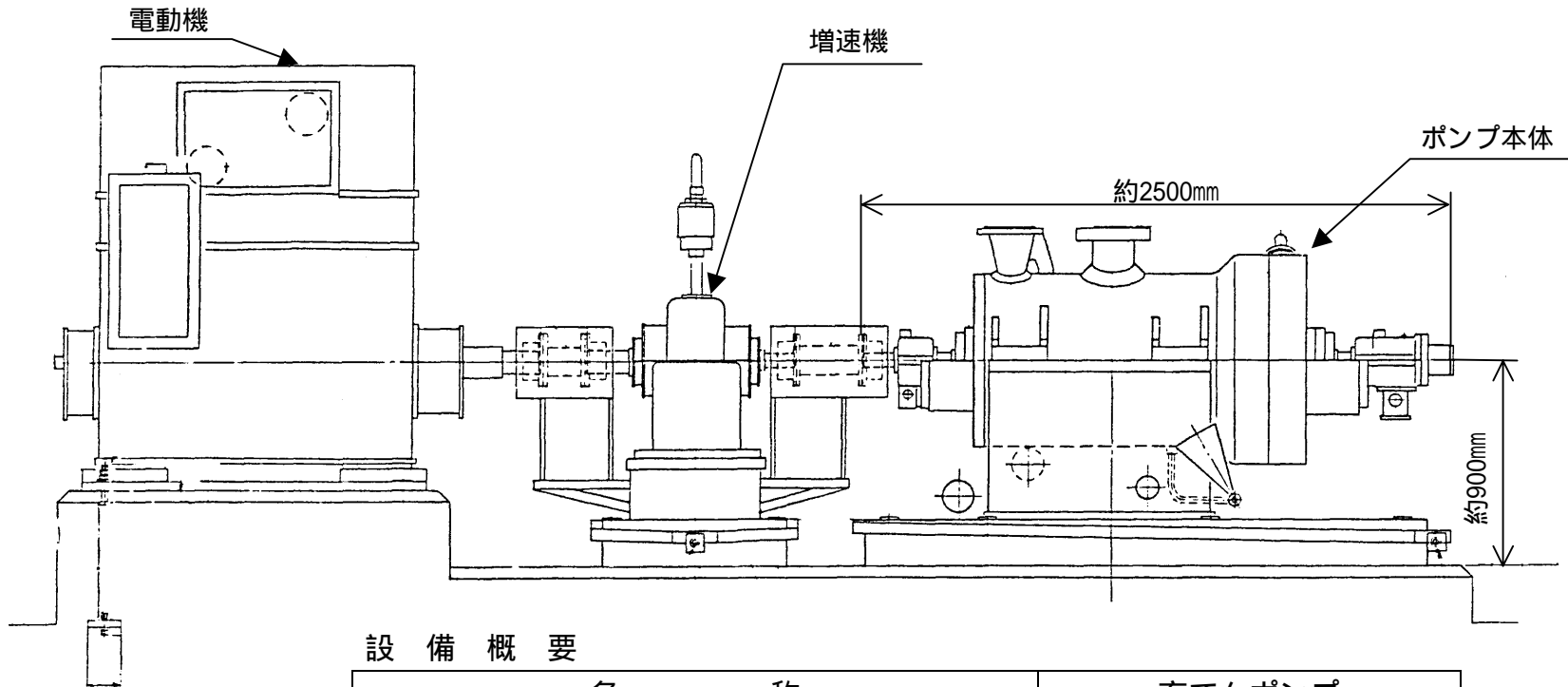
添 付 資 料

- 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



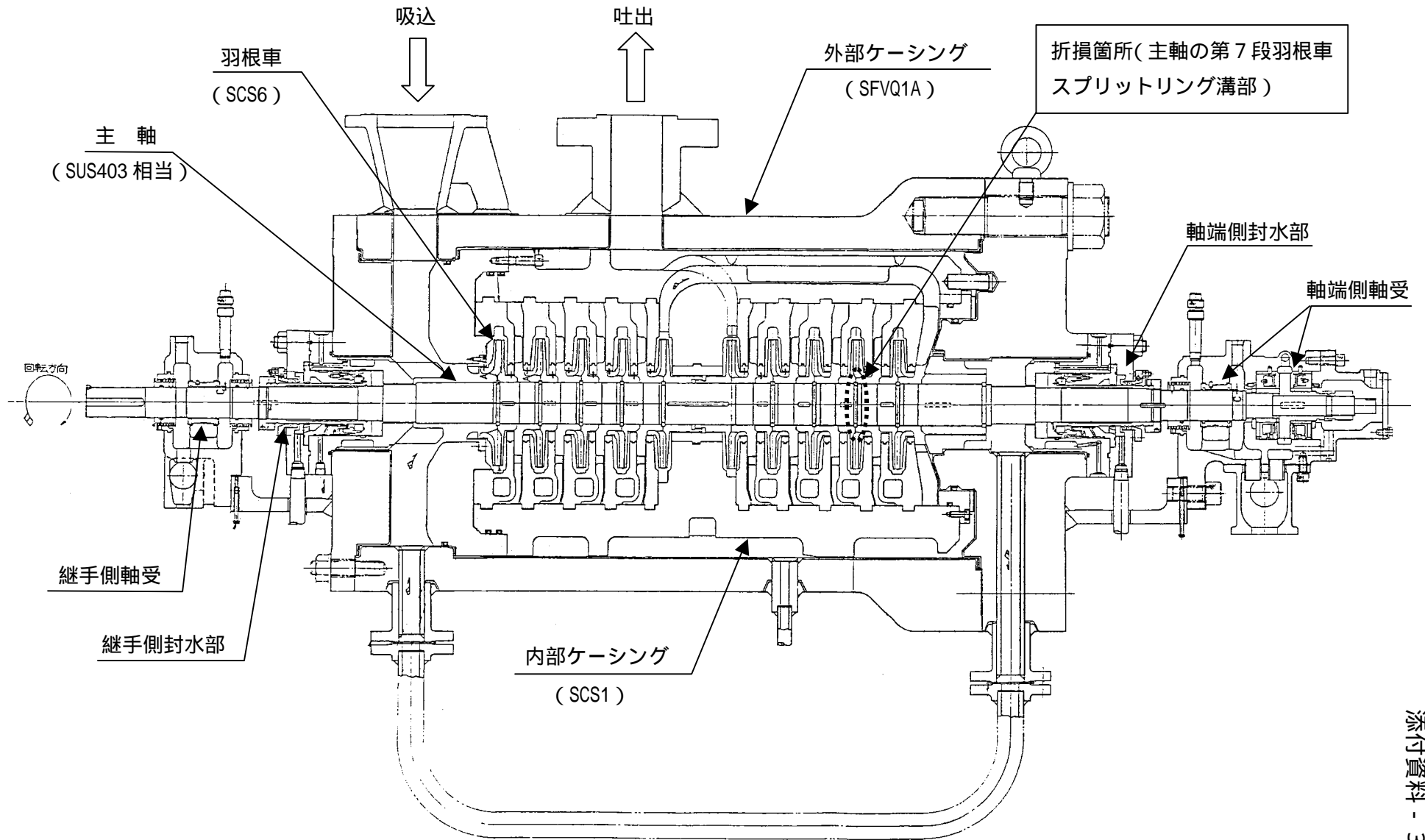
伊方3号機 充てんポンプ外形図



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	

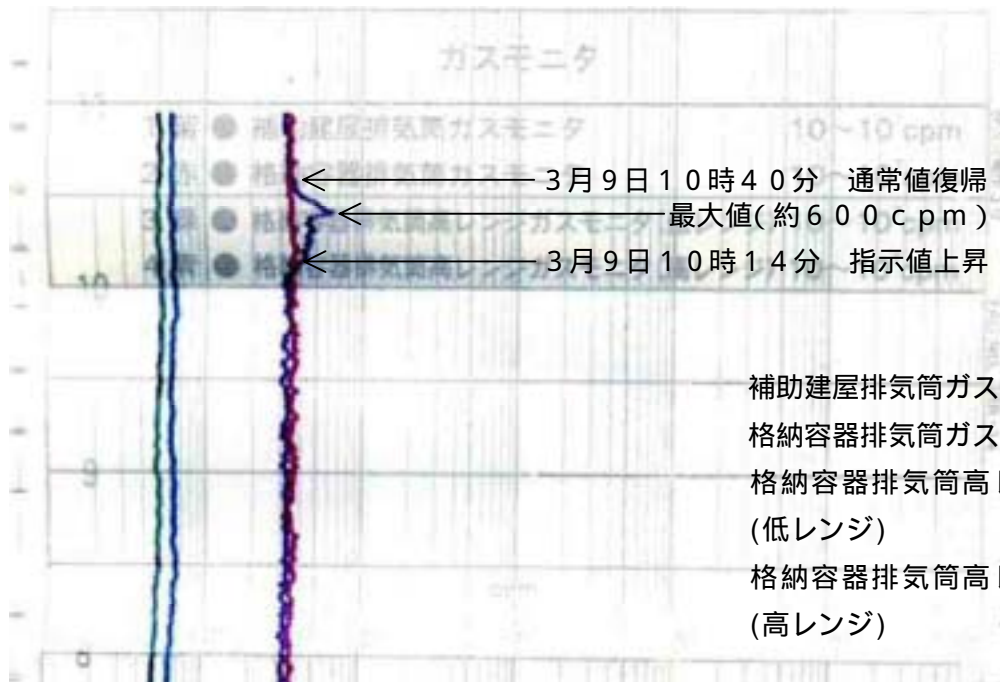
伊方3号機 充てんポンプ構造図



補助建屋排気筒ガスモニタ記録 (チャート)

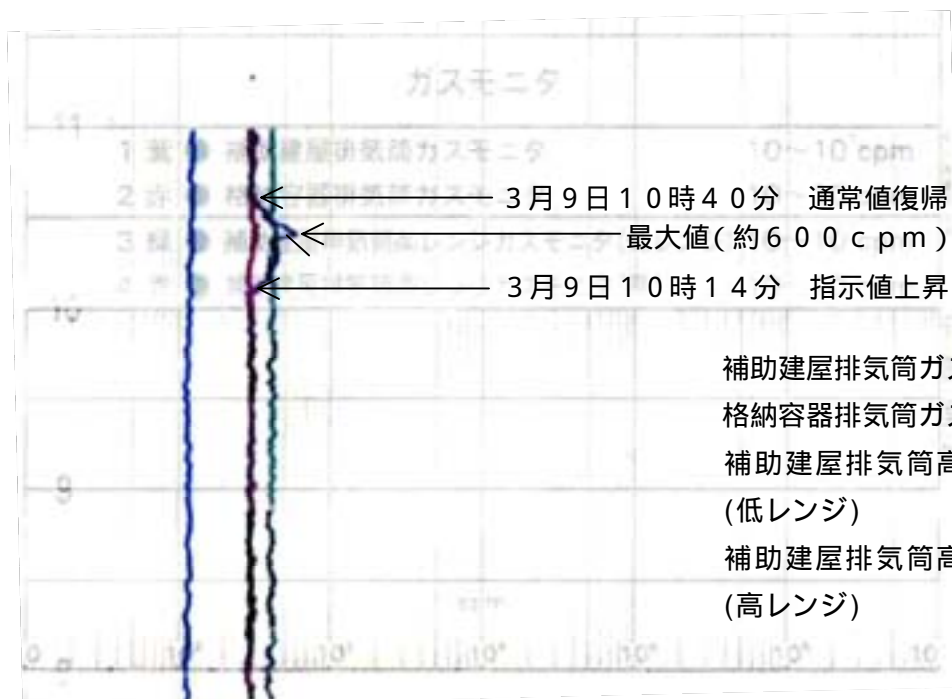
補助建屋排気筒ガスモニタ (3 R - 1 4)

[3月9日8時~11時]



補助建屋排気筒ガスモニタ (3 R - 2 8)

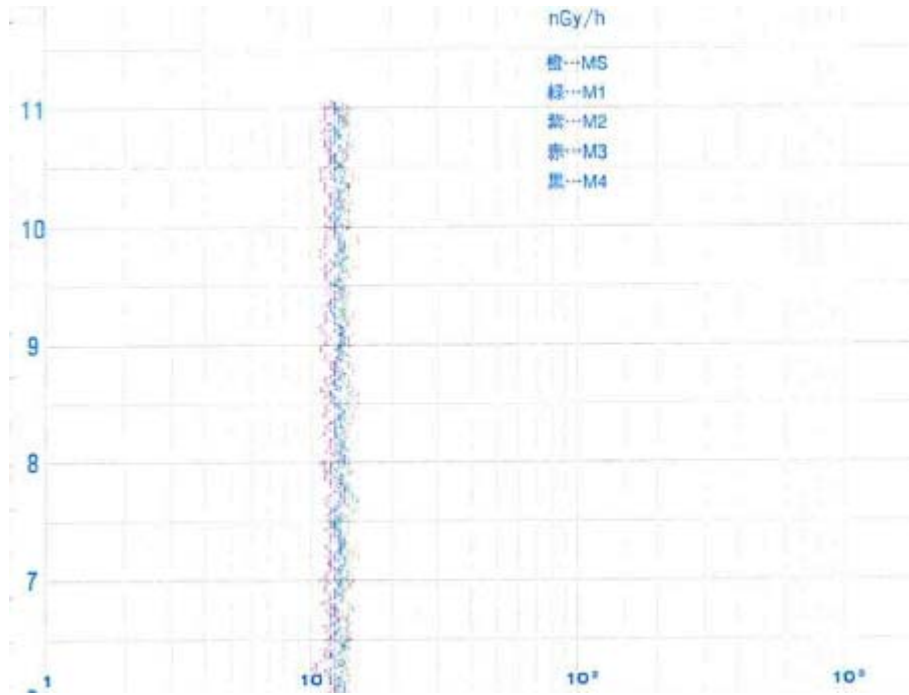
[3月9日8時~11時]



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

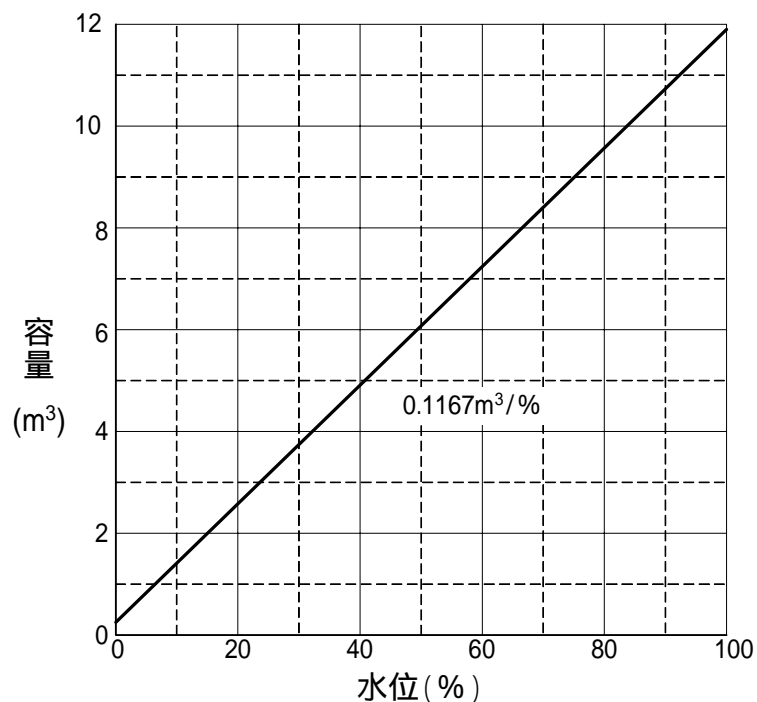
1 . 漏えい量評価

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)



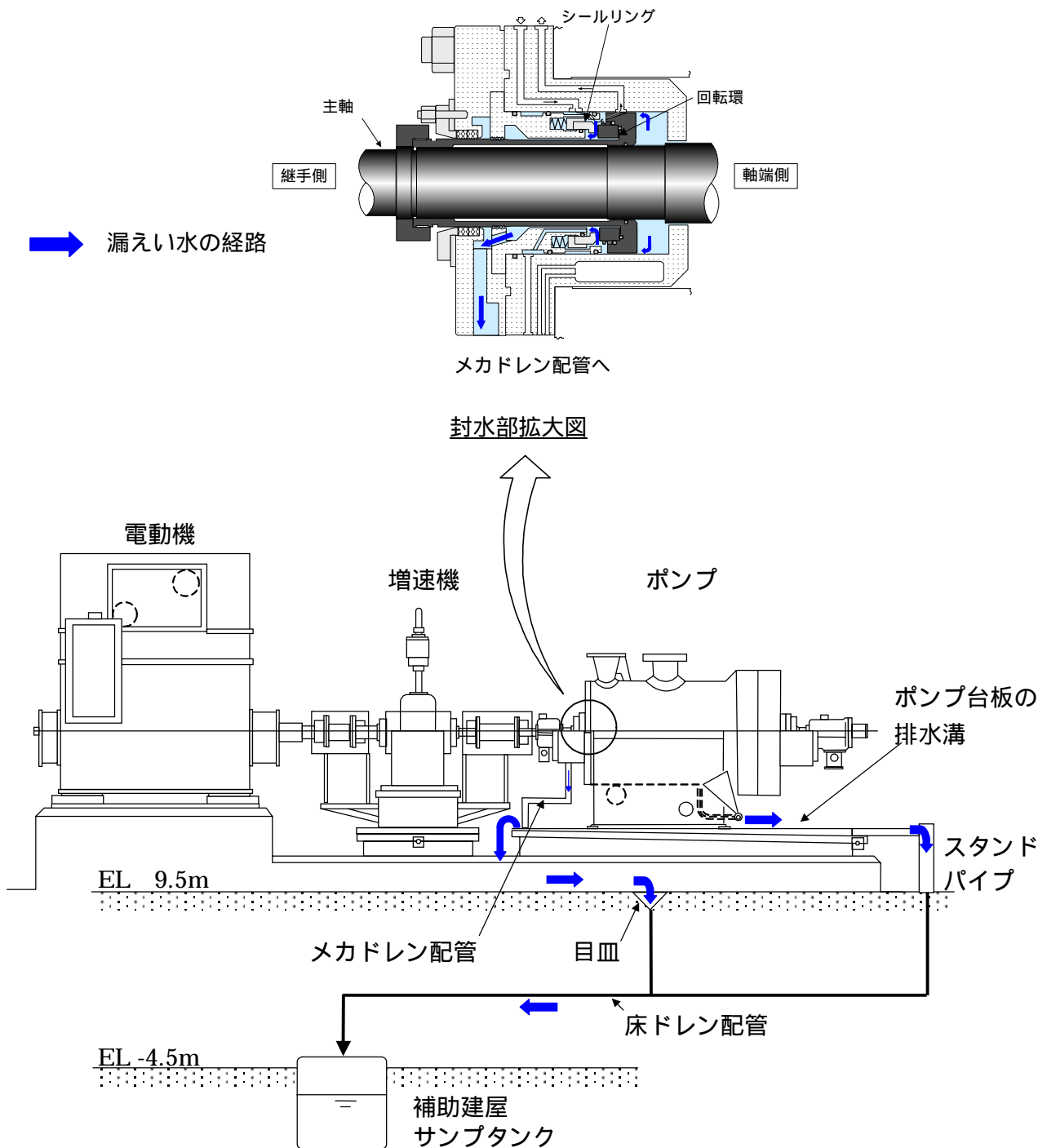
補助建屋サンプタンク水位容量曲線

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

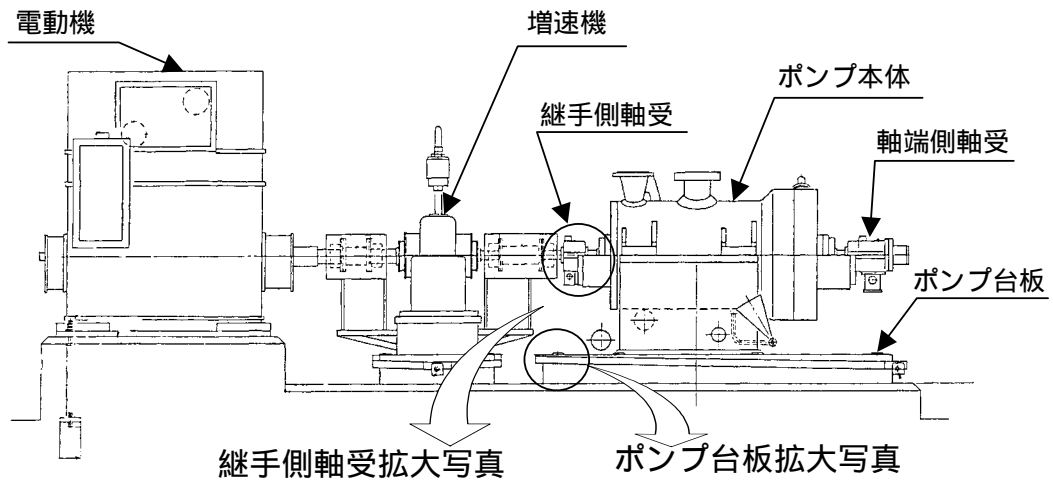
目的	<p>充てんポンプ 3 C の分解前状況および分解後の各部損傷状況を外観点検等により確認する。</p>
内容	<p>1 . 調査項目</p> <p>(1) 分解前の点検 ポンプ本体、増速機、電動機等の分解前状況を外観点検により確認する。</p> <p>(2) 分解点検 ポンプを分解し、主軸・羽根車、外部・内部ケーシング、軸受部、封水部および潤滑油供給装置の損傷状況を確認する。</p> <p>(3) 浸透探傷検査 折損部以外のスプリットリング溝部の浸透探傷検査を実施する。</p> <p>(4) 周辺配管等の点検 金属粉の影響調査のため当該ポンプ出口ラインの配管、弁の内部点検およびブラッシングを実施する。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。</p> <p style="text-align: right;">《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。</p> <p style="text-align: right;">《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。</p> <p style="text-align: right;">《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
--------	--

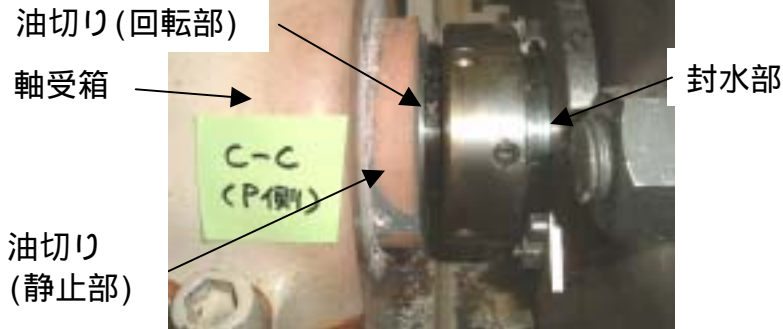
項目	分解前の点検結果 (ポンプ本体他)
点 検 結 果	<p>1 . 外観点検結果</p> <ul style="list-style-type: none">・継手側軸受のポンプ側油切り部で回転部と静止部の接触による変色が認められた。・油切りの上下半合わせ面が約 1mm 程度開いていた。・ポンプ台板の排水溝に粉状の金属粉の堆積物が認められた。 <p>2 . 増速機 - ポンプ継手結合状態</p> <ul style="list-style-type: none">・増速機 - ポンプ間継手の軸方向の隙間が約 3mm 狭くなっていた。 <p>3 . その他</p> <ul style="list-style-type: 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)

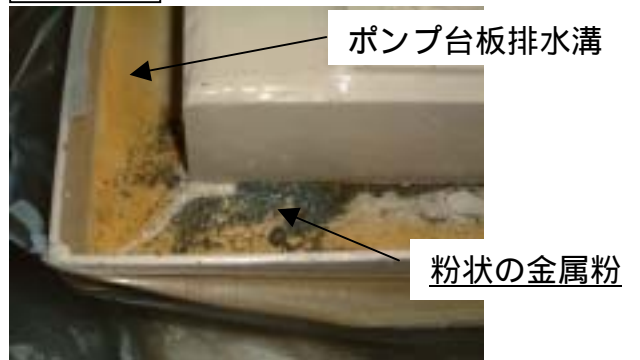


写真



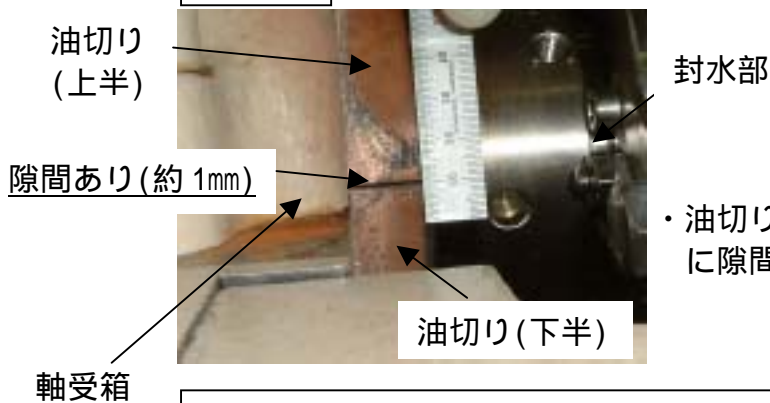
- ・油切り付近が変色
- ・油切り(回転部)が移動

写真



- ・ポンプ台板の排水溝に粉状の金属粉の堆積物

写真

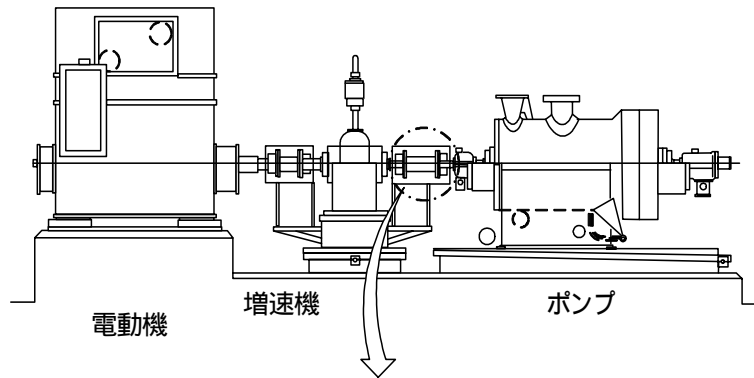


- ・油切り(ポンプ側)の上下合わせ面に隙間あり

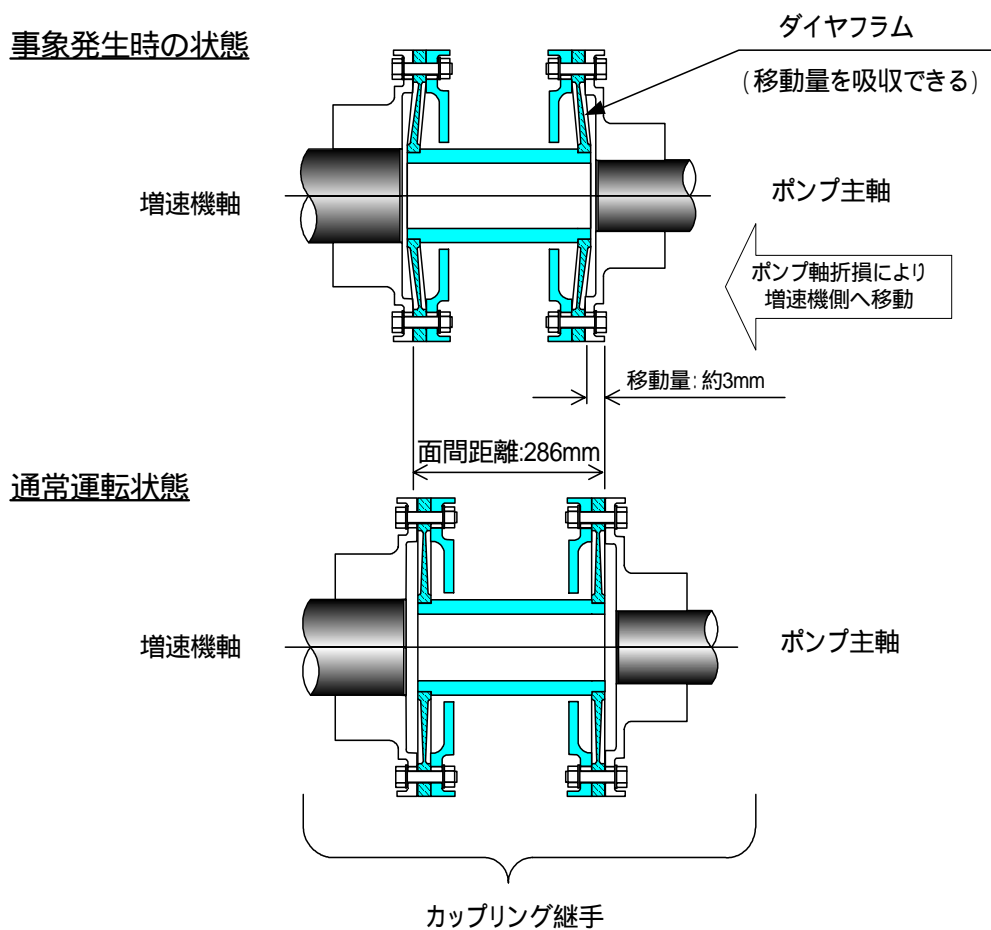
点検結果

- ・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



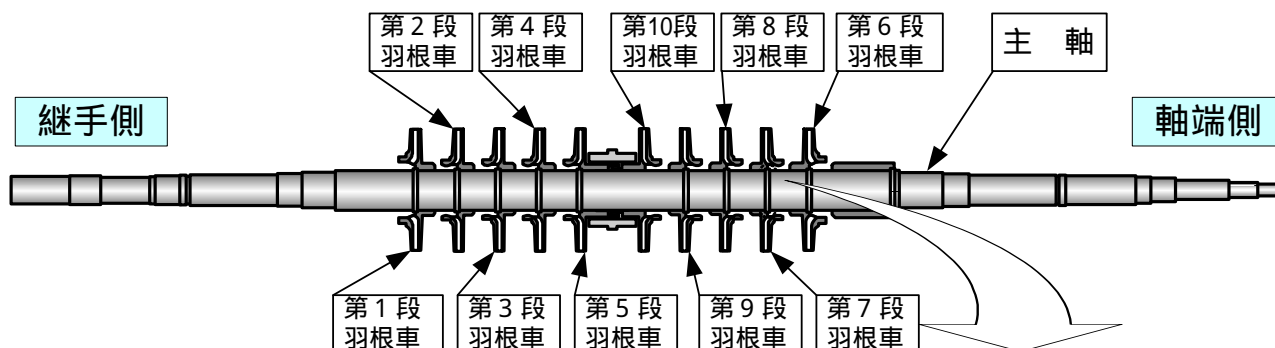
点検結果

- ・ 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。

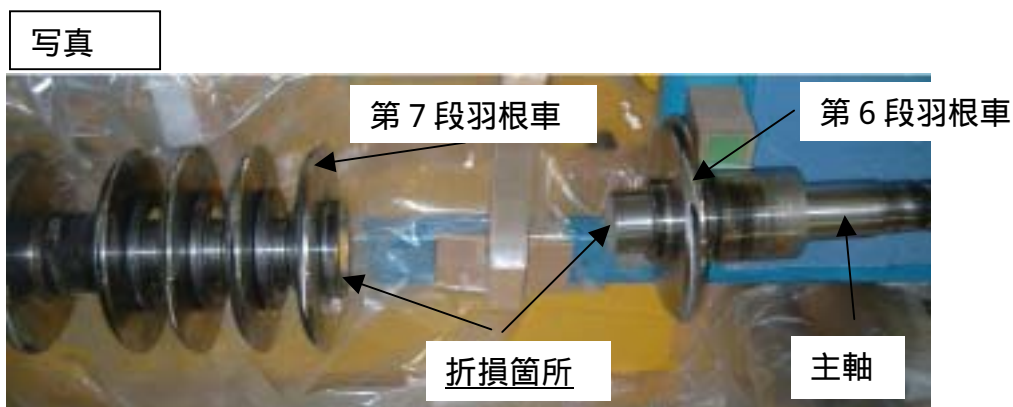
項目	分解点検結果 (主軸 ・ 羽根車)
点 検 結 果	<ol style="list-style-type: none">1 . 第 7 段羽根車部<ul style="list-style-type: none">・ 主軸が、軸端側から 2 枚目の羽根車 (第 7 段) のスプリットリング溝部で折損していた。 2 . 第 1 段羽根車部<ul style="list-style-type: none">・ 羽根車の吸込部に接触による摺動傷が認められた。 3 . センターブッシュ部<ul style="list-style-type: none">・ 接触による摺動傷が認められた。 4 .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

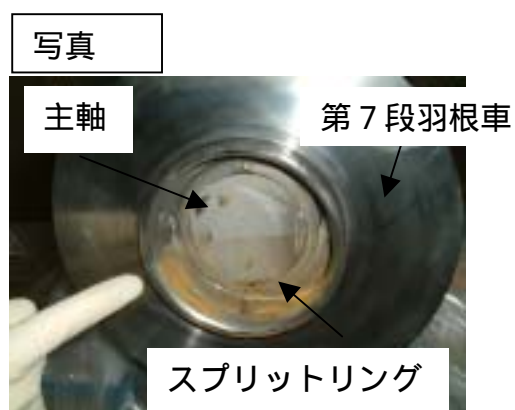
(第 7 段羽根車部)



主軸折損箇所拡大写真



・主軸の折損状況



・継手側折損面

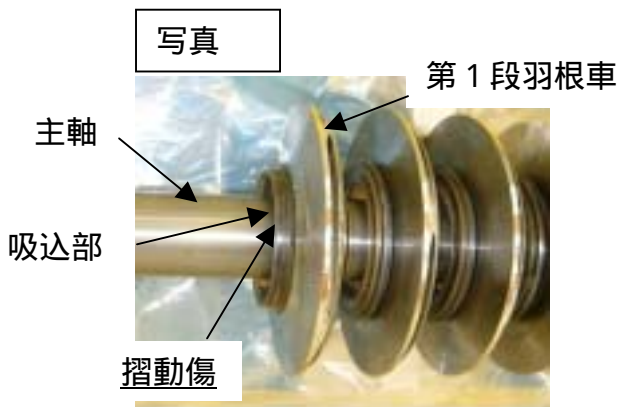
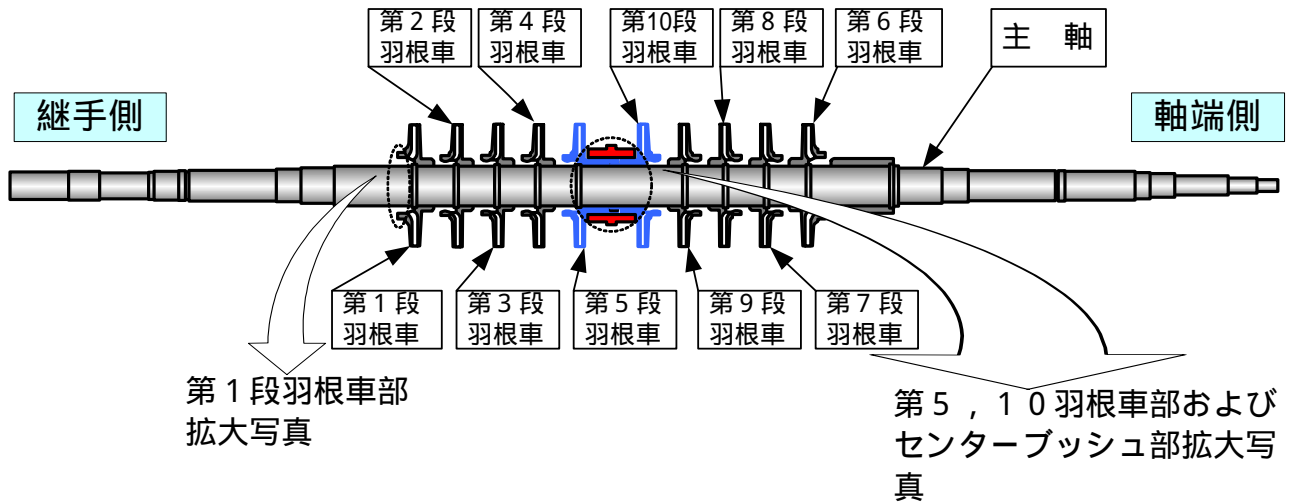


・軸端側折損面

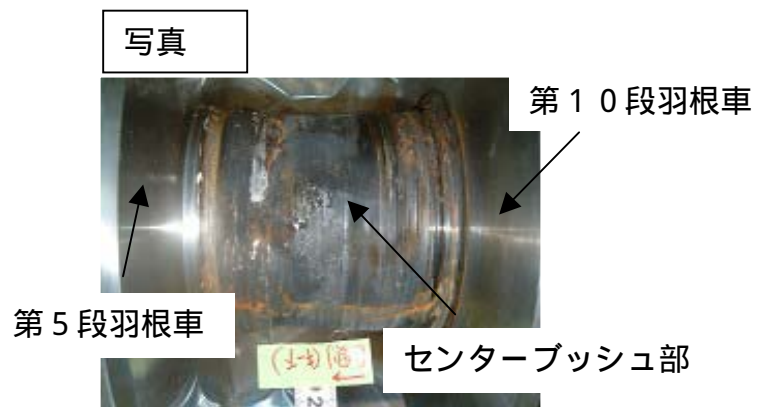
点検結果

- ・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。

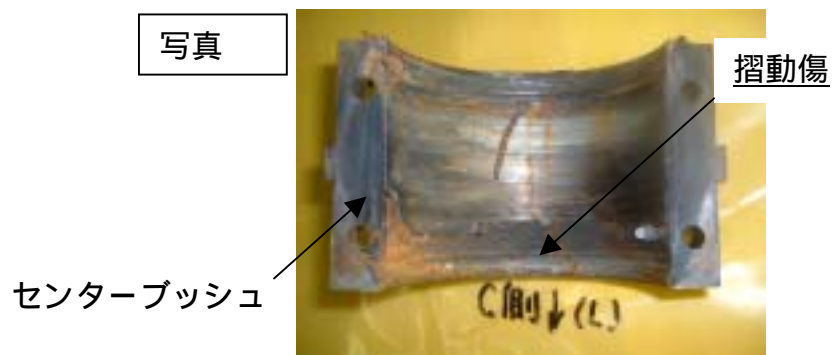
主軸・羽根車点検結果 (第1段羽根車部およびセンターブッシュ部)



・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



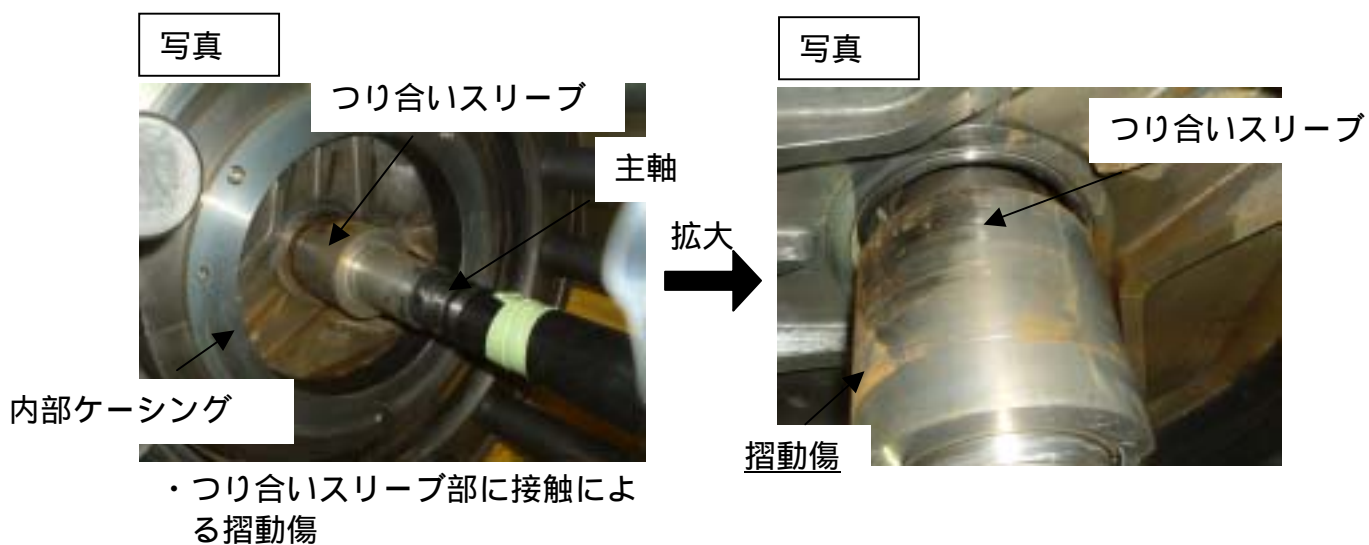
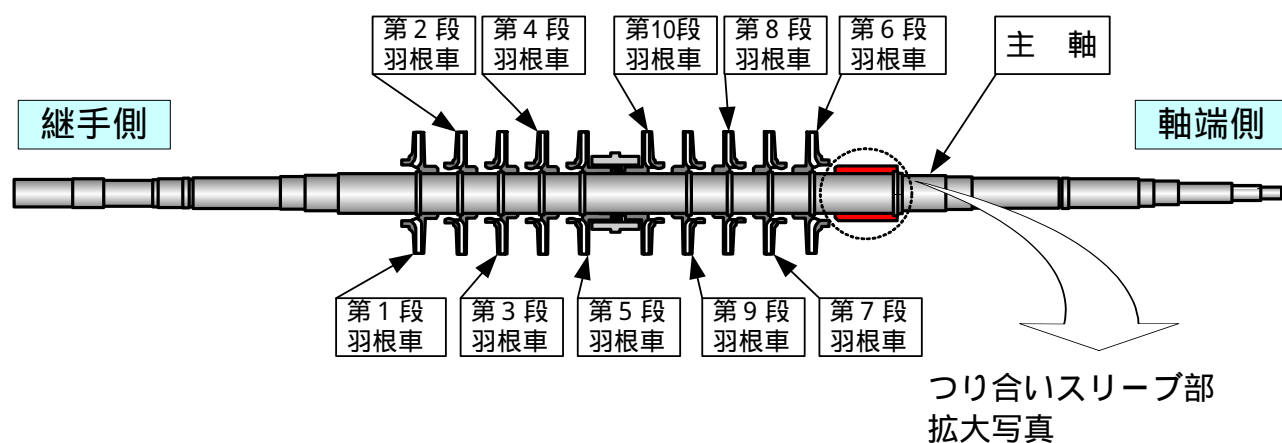
・センターブッシュ内面の接触による摺動傷

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)

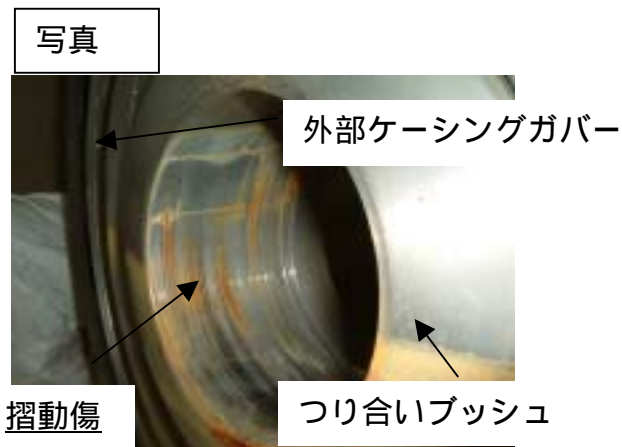
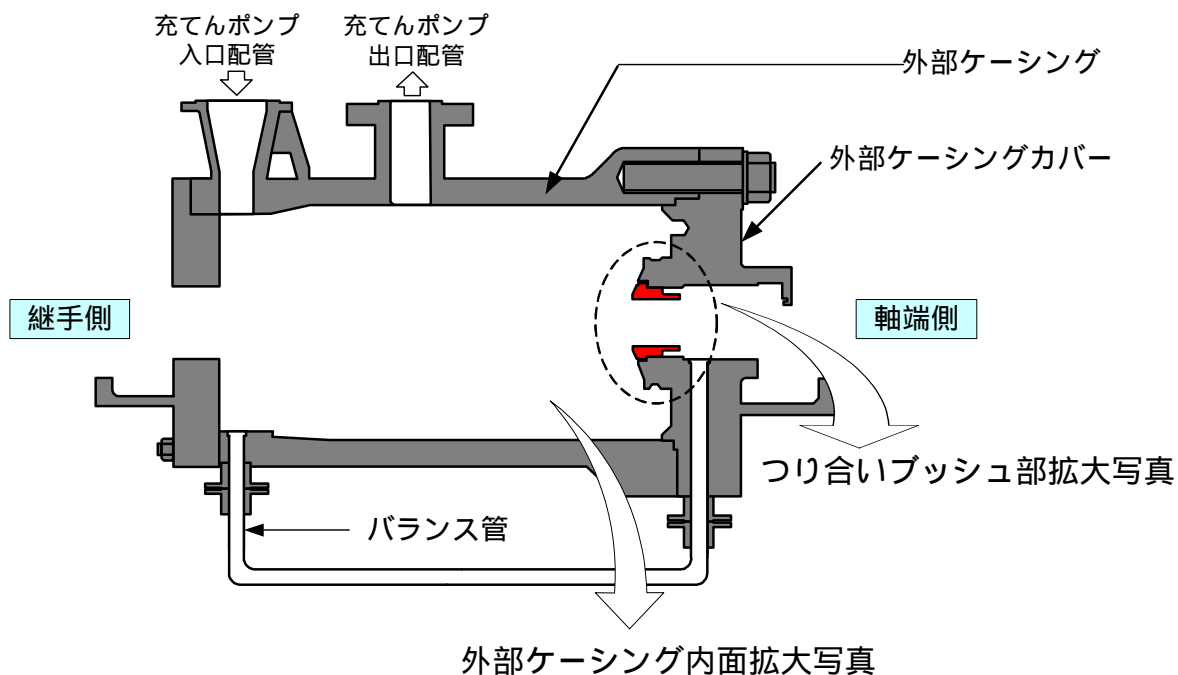


点検結果

- ・ 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)



・ つり合いブッシュ部に接触による摺動傷



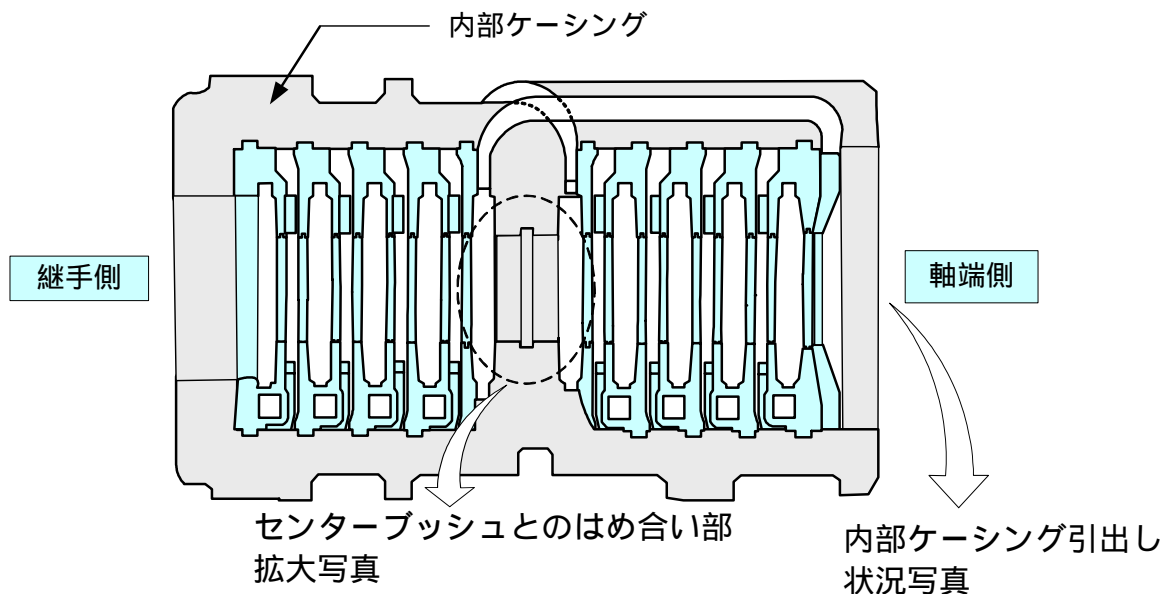
・ 粉状の金属粉が付着

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)

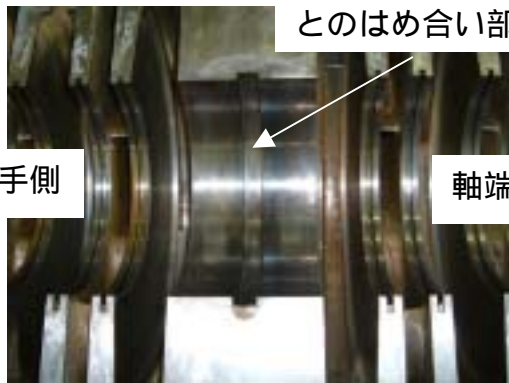


写真

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



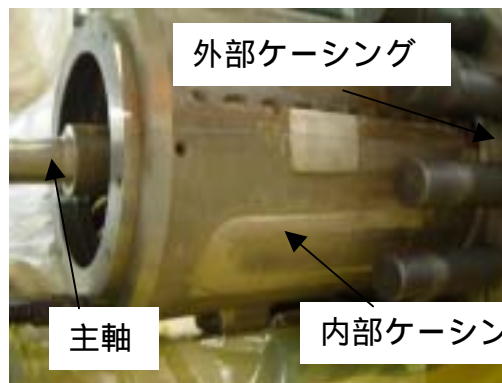
- ・ 上下半のセンターブッシュとのはめ合い部が変色(写真は下半)

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

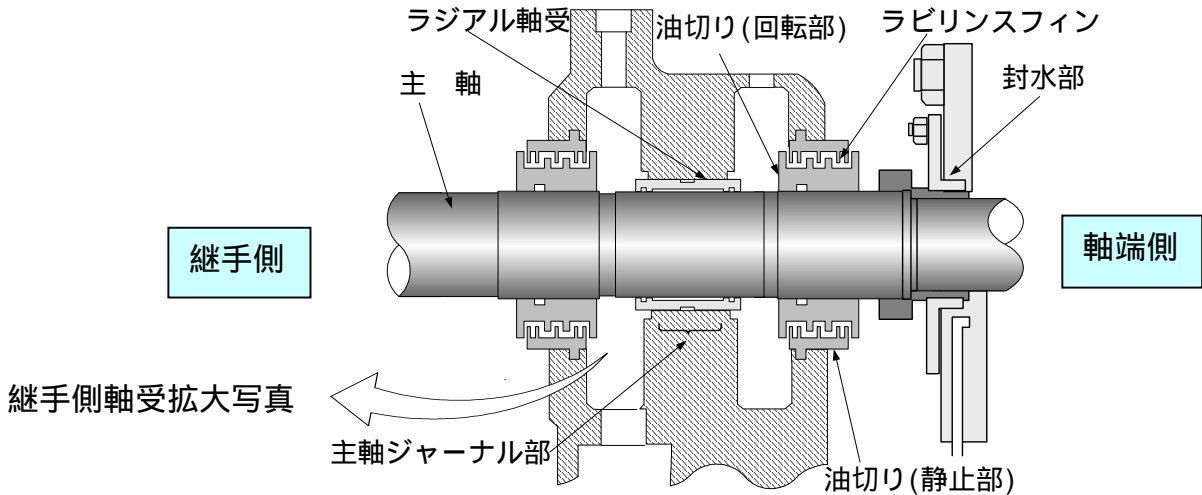
点検結果

- ・ 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。

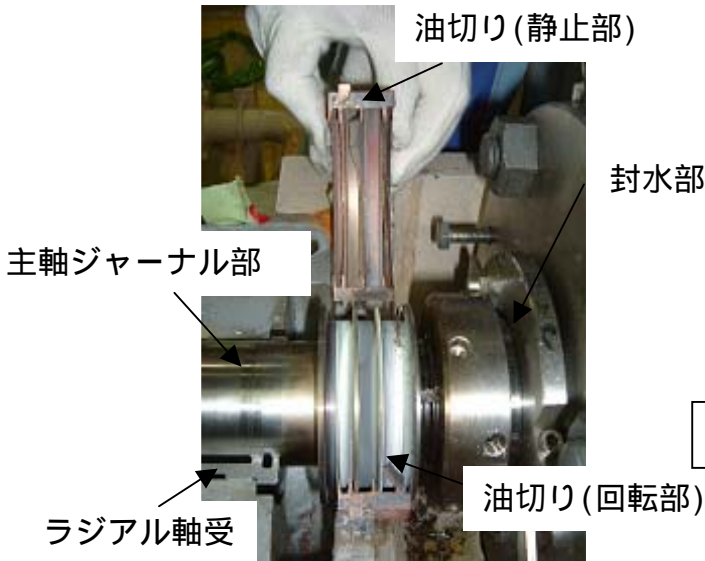
項目	分解点検結果(軸受部および封水部)
点 検 結 果	<p>1. 軸受部</p> <p>(1) 継手側軸受部</p> <ul style="list-style-type: none">・油切り部の静止部ラビリンスフィンが、回転部との接触により変形しその一部が内部で脱落していた。・軸受メタルの内表面および主軸ジャーナル部には摺動傷が認められた。 <p>(2) 軸端側軸受部</p> <ul style="list-style-type: none">・スラスト軸受構成品、ラジアル軸受メタル内表面、主軸ジャーナル部および油切り部に異常は認められなかった。 <p>2. 封水部</p> <p>(1)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

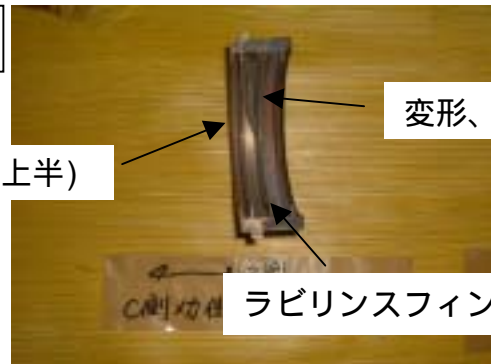


写真



- ・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



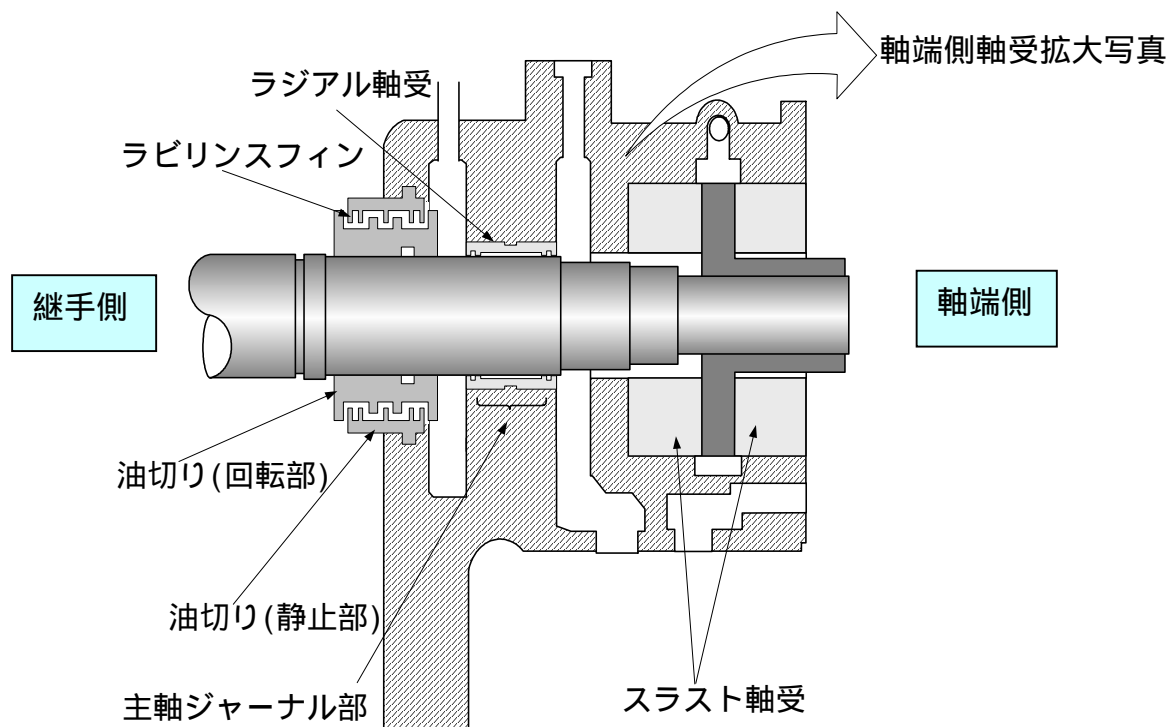
- ・軸受メタルの内表面に摺動傷

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)

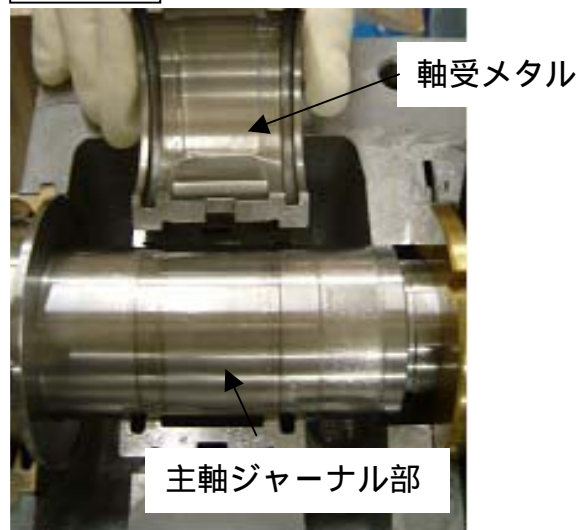


写真



・異常なし

写真

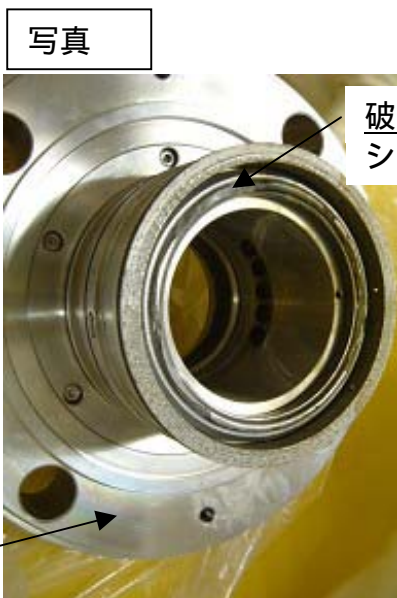
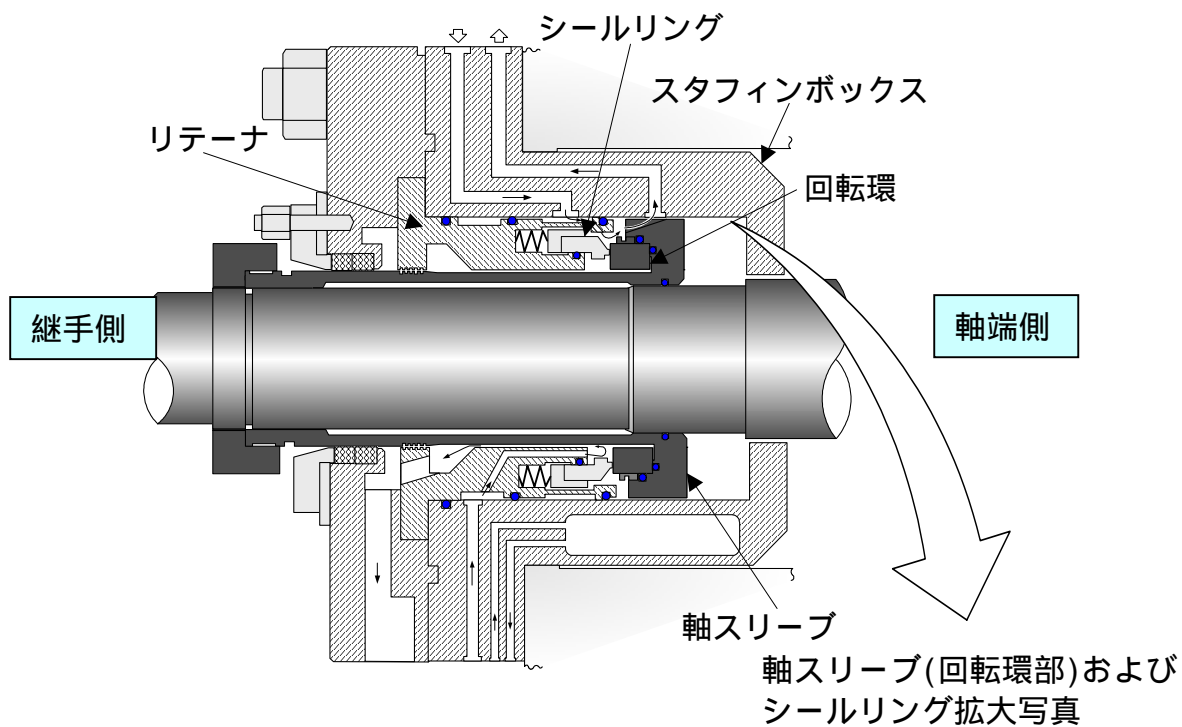


・異常なし

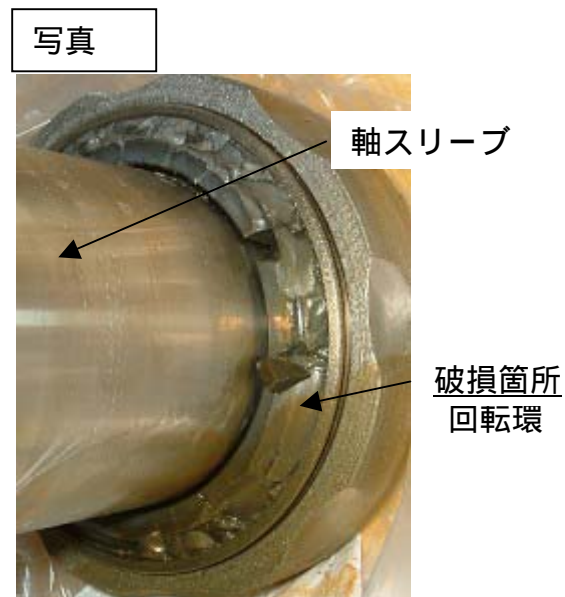
点検結果

- ・ 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

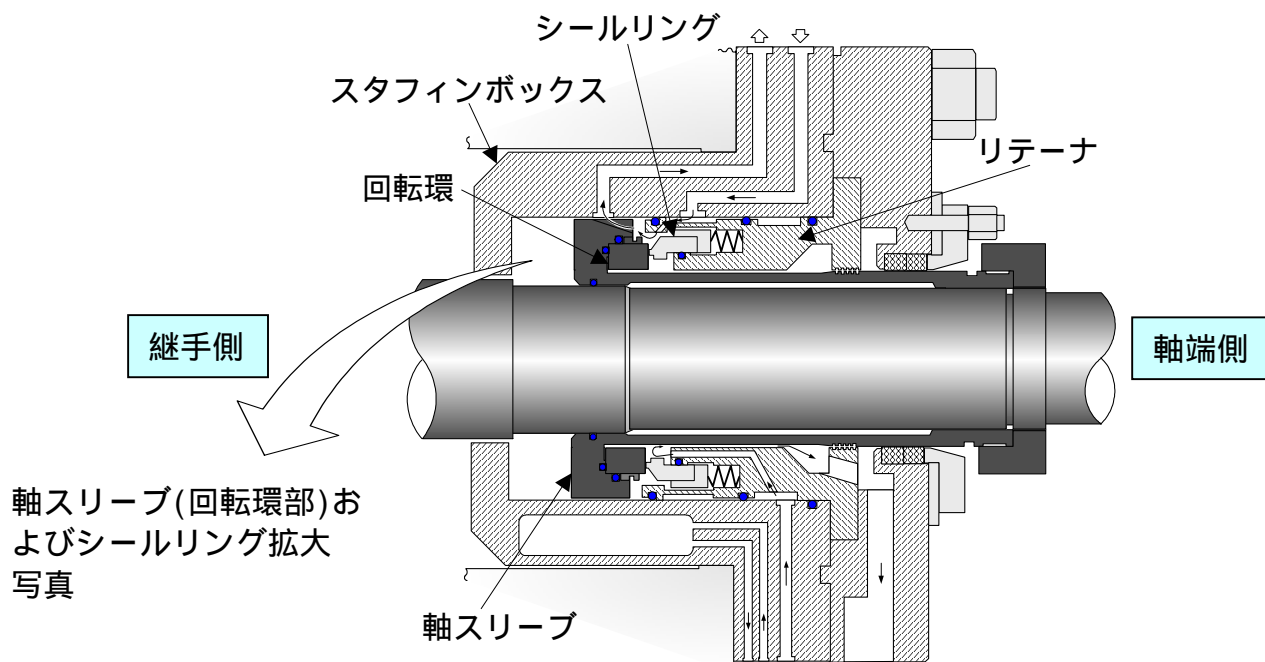


・回転環が破損

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

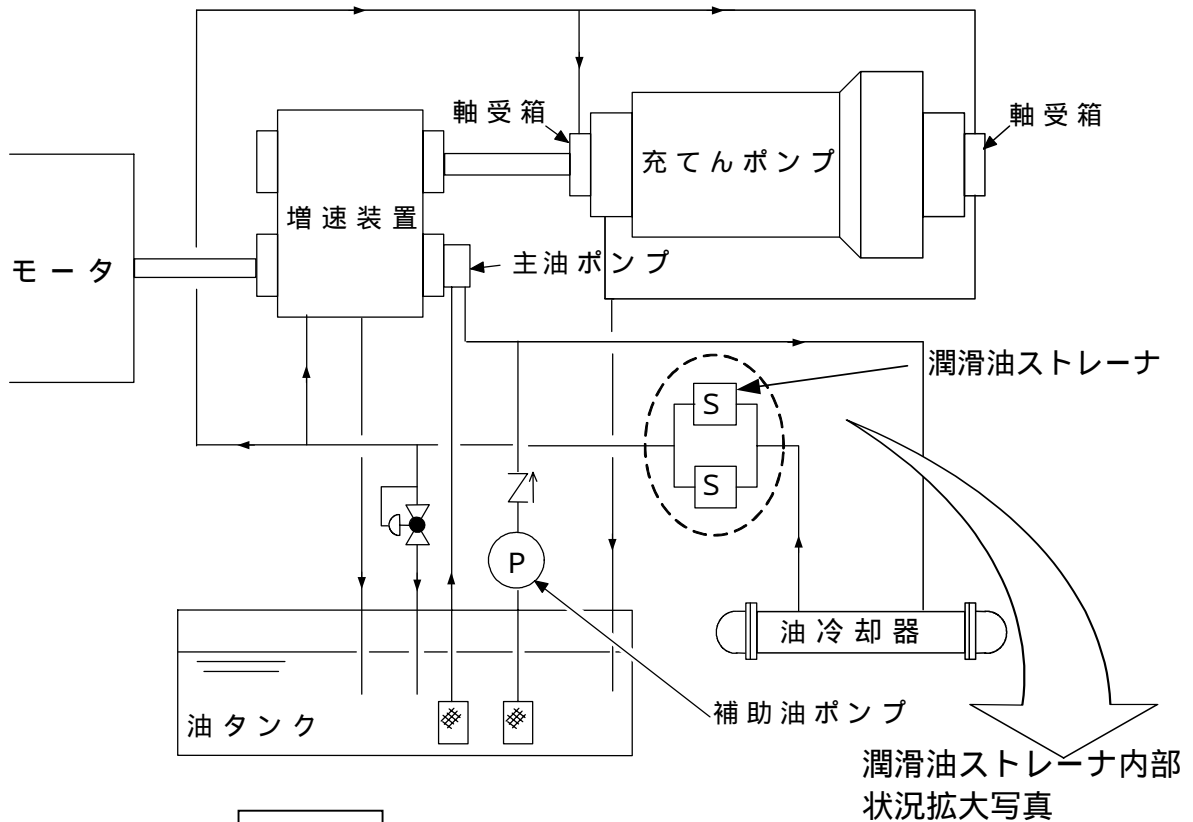
点検結果

・軸端側メカニカルシール構成部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

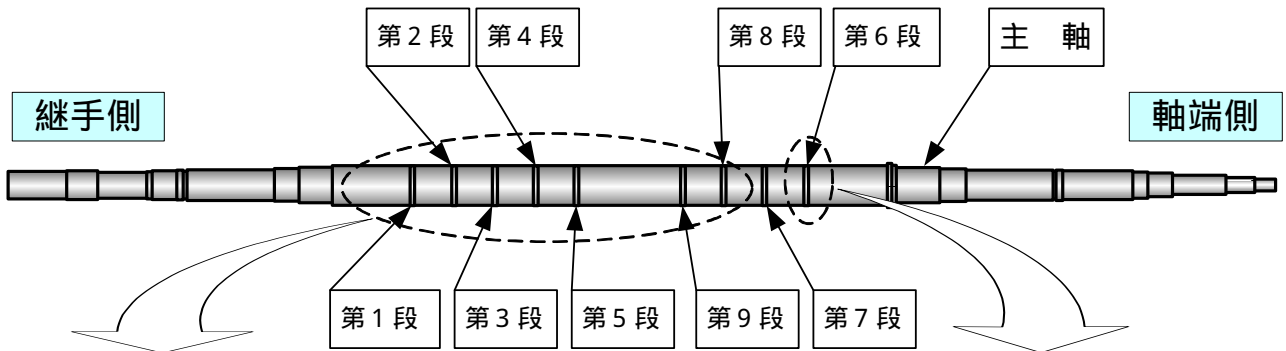
- ・潤滑油ストレーナ の金網等に損傷は認められず、ストレーナ内部に微量の金属粉が回収されていた。

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>

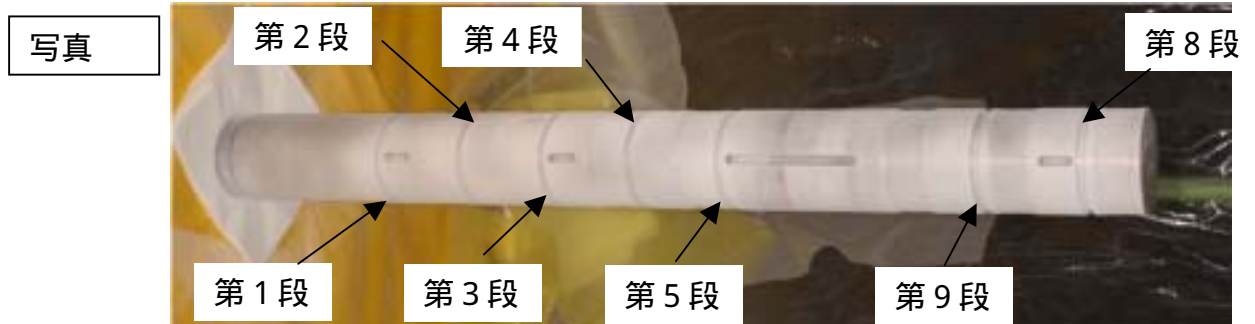
主軸スプリットリング溝部点検結果

(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。



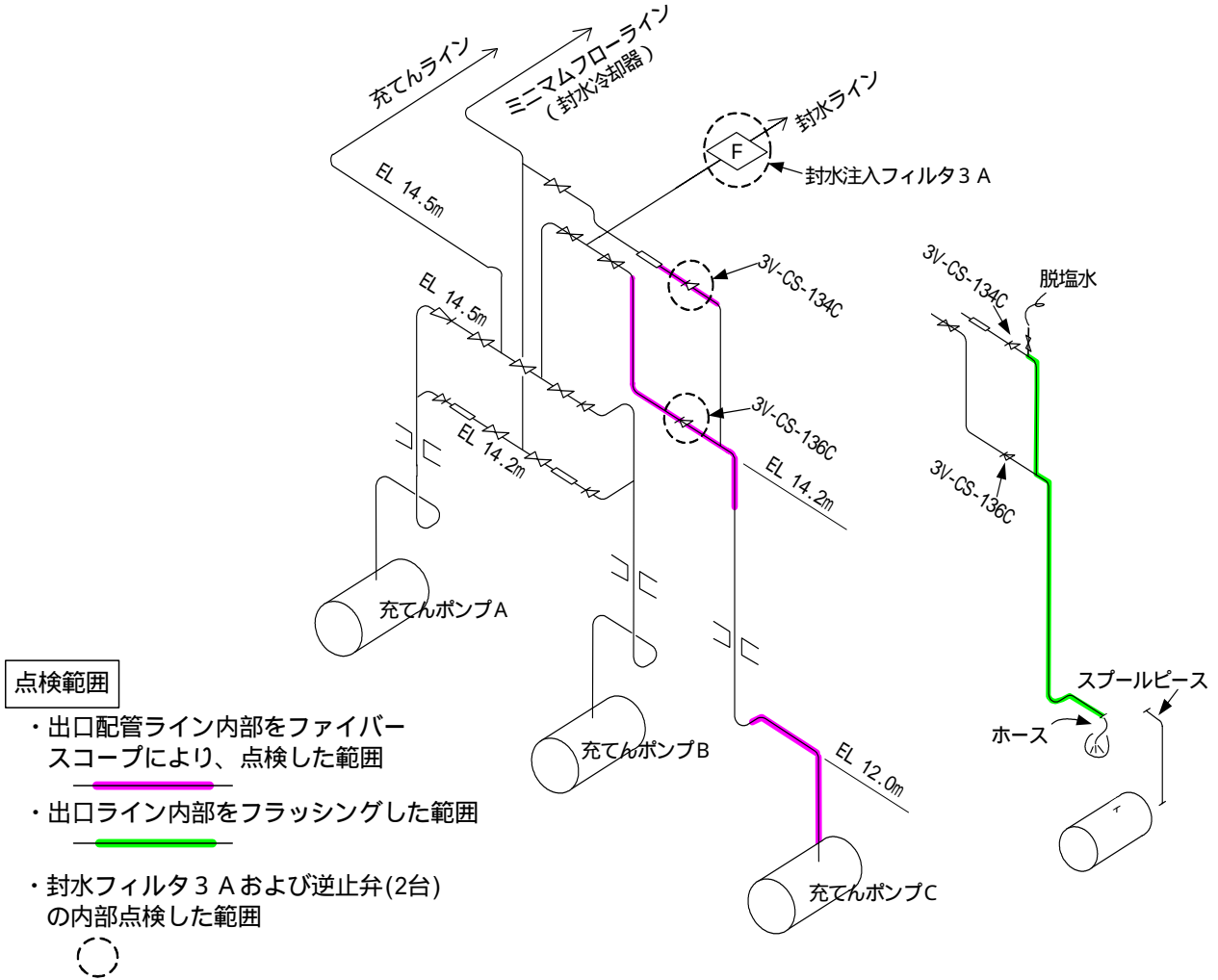
・ 有意な指示は認められなかった。

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	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	・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。	×		

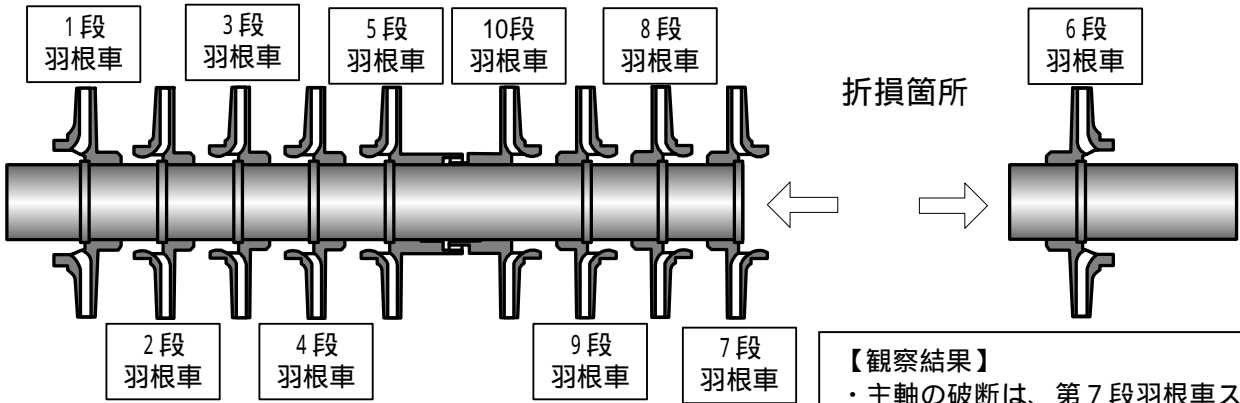
破面観察結果

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)

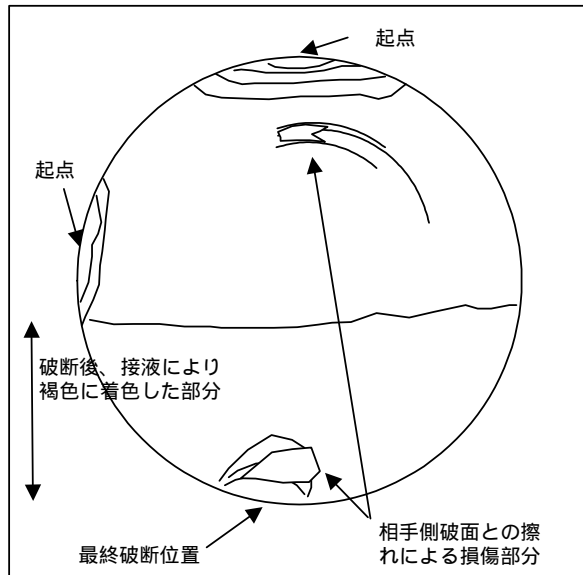
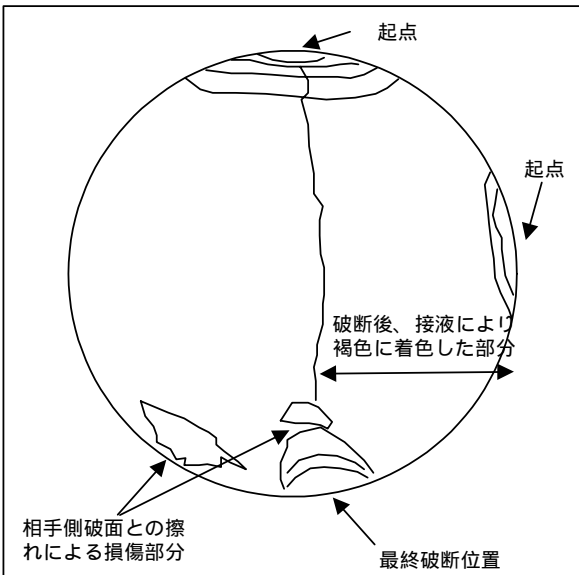
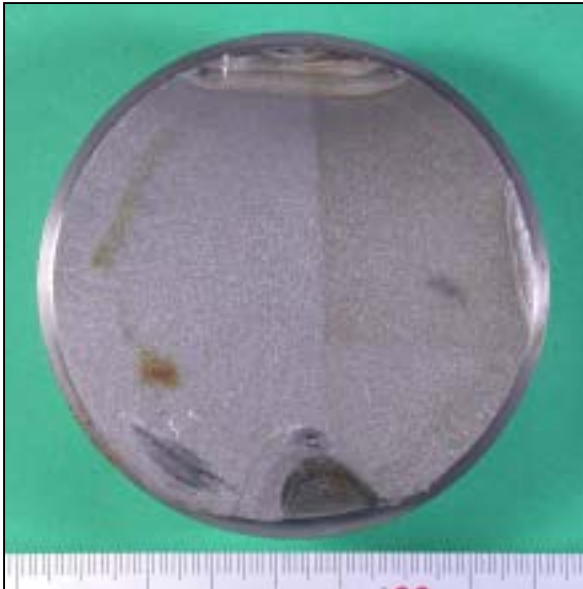
(軸端側)



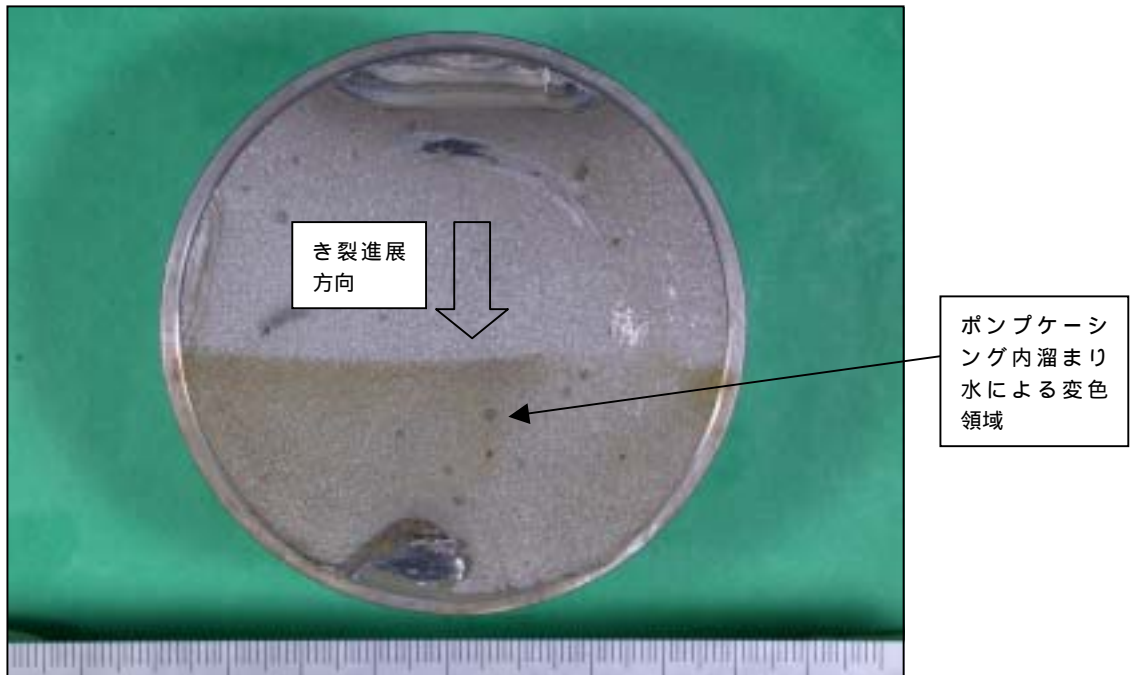
【観察結果】
 ・主軸の破断は、第7段羽根車スプリットリング溝部の軸端側で生じていた。

継手側

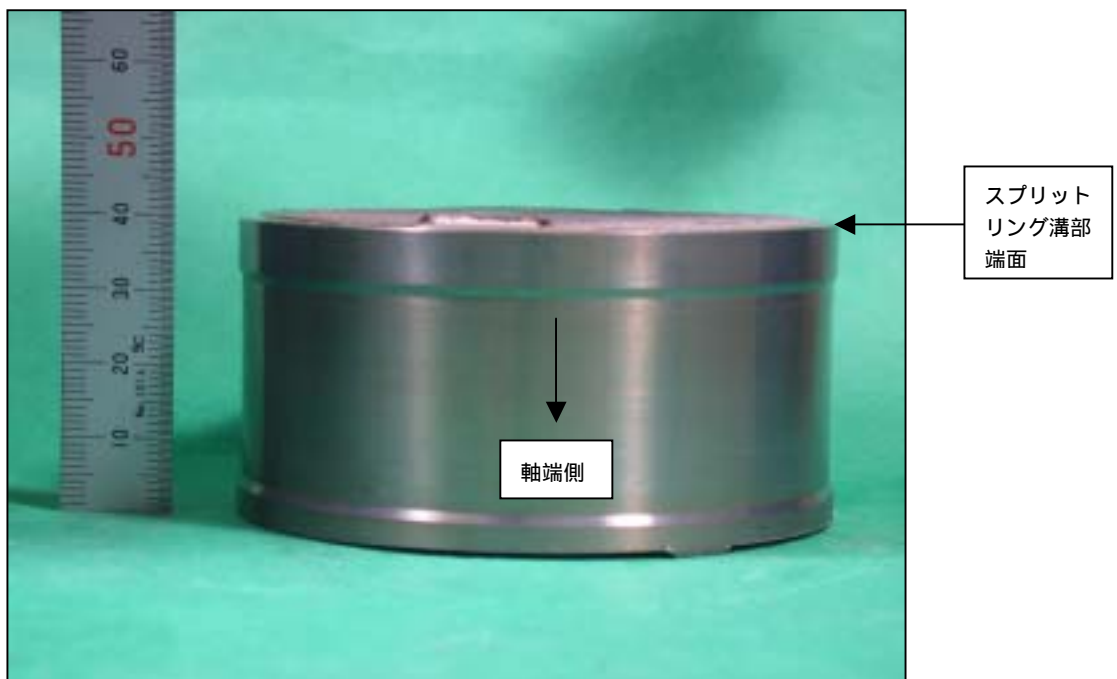
軸端側



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)

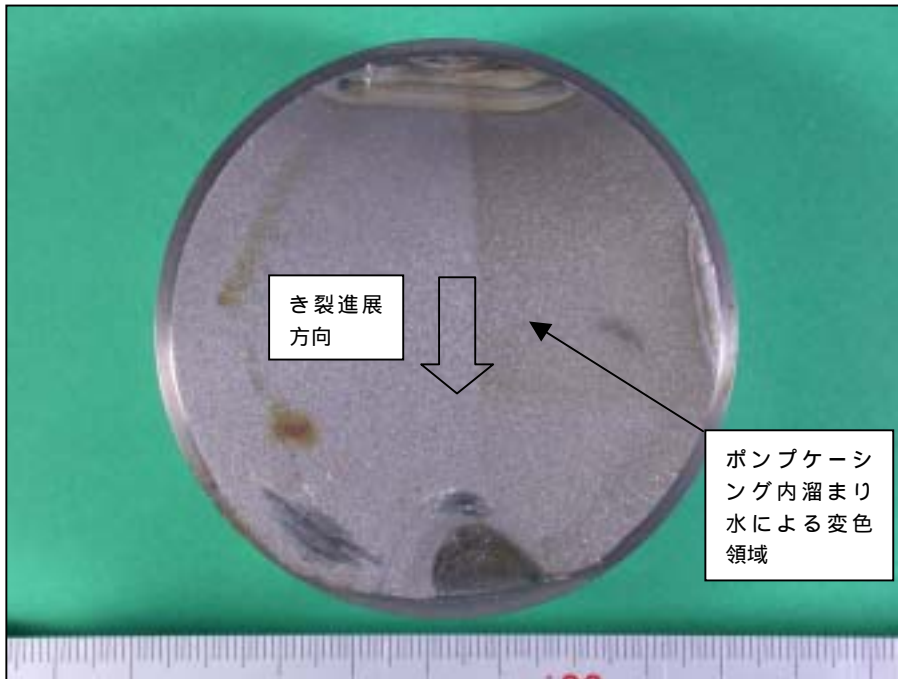


充てんポンプ 3 C 主軸破面状況図 (軸直角方向より)

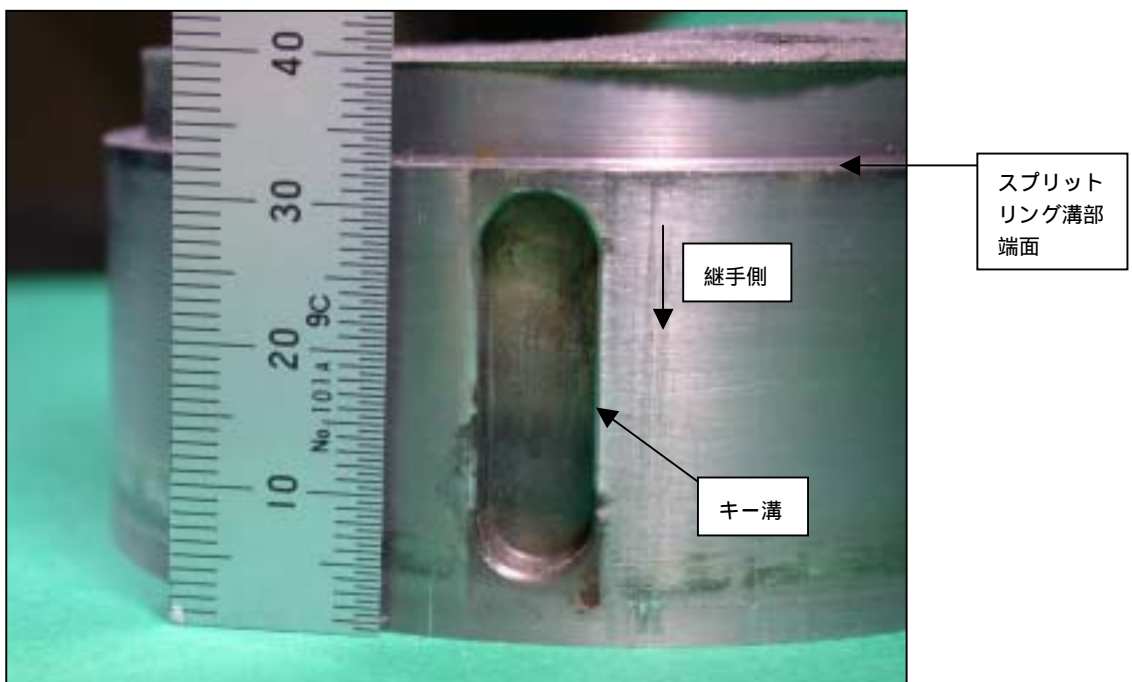
【観察結果】

- ・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)

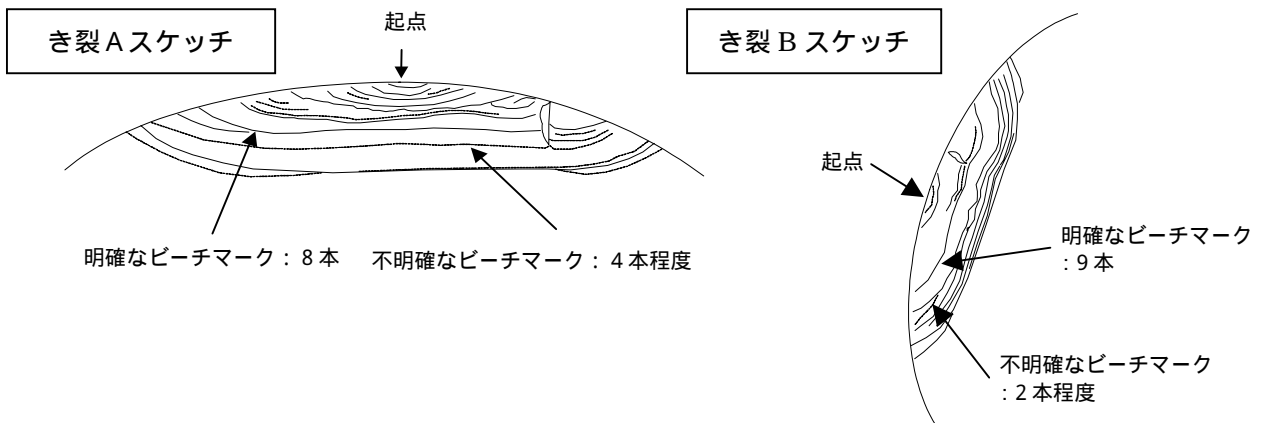
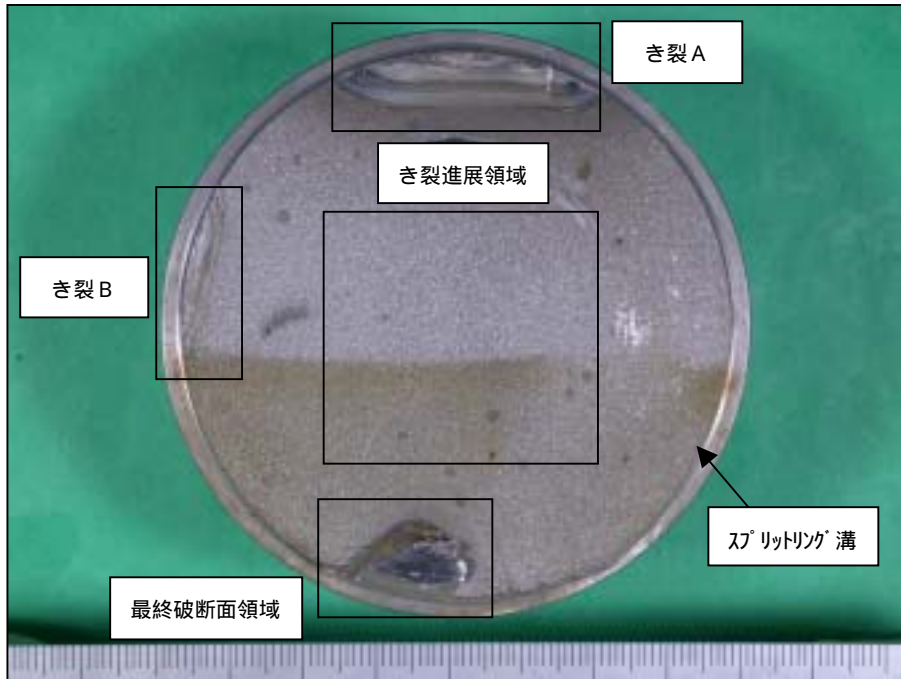


充てんポンプ3C主軸破面状況図(軸直角方向より)

【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。

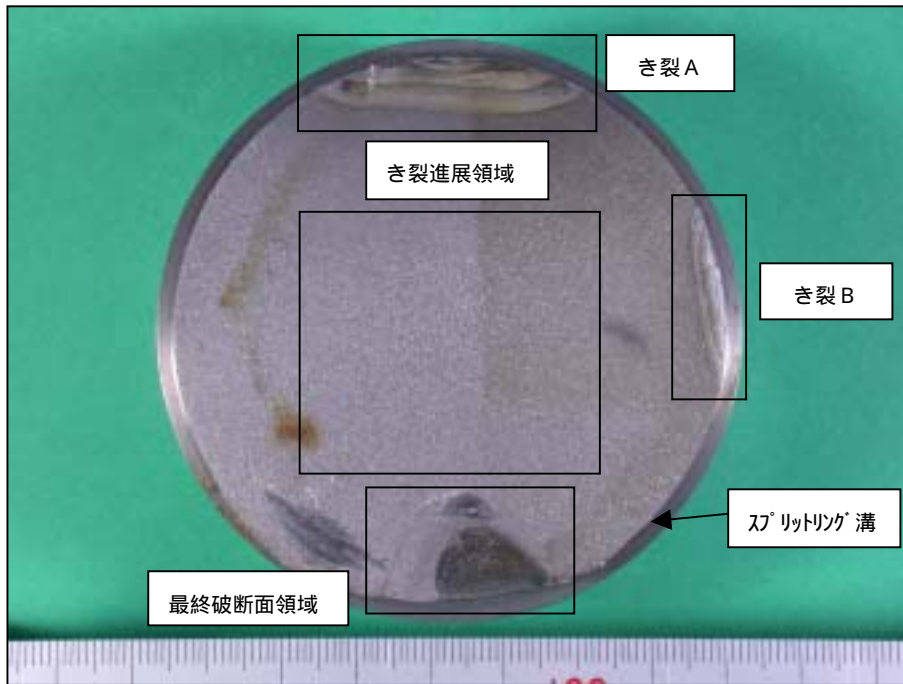
主軸破断面拡大図(外観検査)[軸端側]



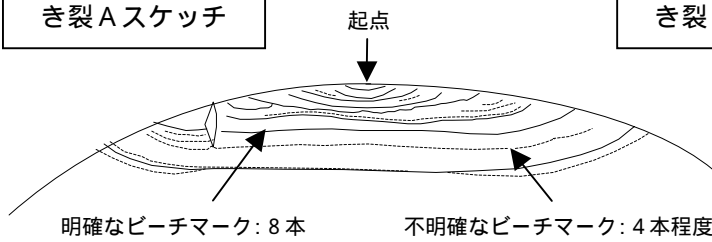
【観察結果】

- ・ 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。

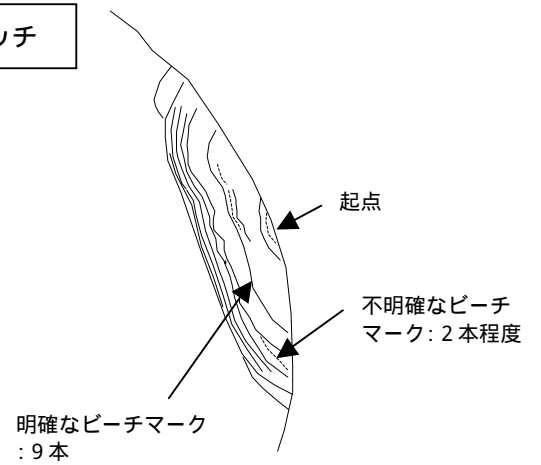
主軸破断面拡大図(外観検査)[継手側]



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]

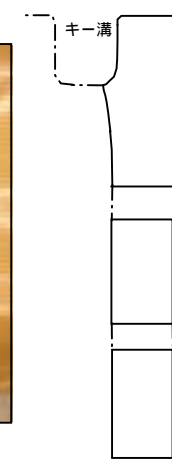
断面ミクロ組織観察結果



[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

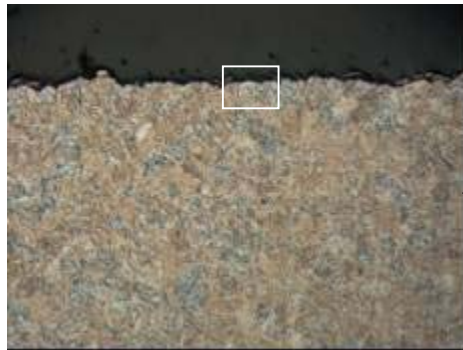


【観察結果】

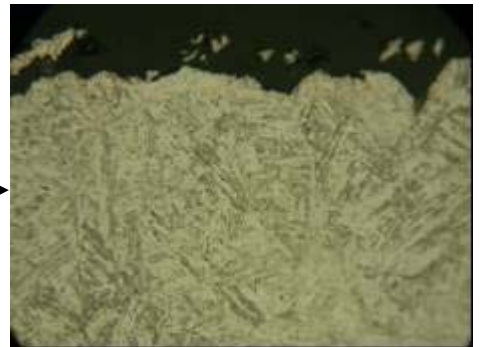
- ・き裂の起点部においては、材料欠陥や変形等の異常は認められなかった。
- ・主軸破断面では、本鋼種に特徴的なマルテンサイト組織が観察されており、組織性状の異常は認められなかった。

き裂進展方向

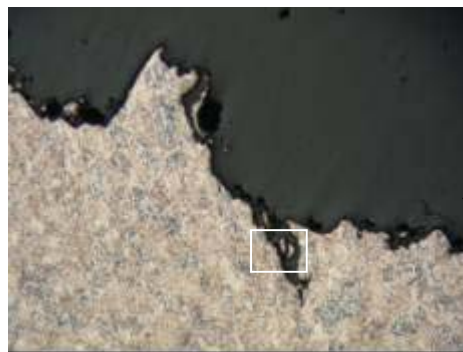
き裂中央部
表面



拡大



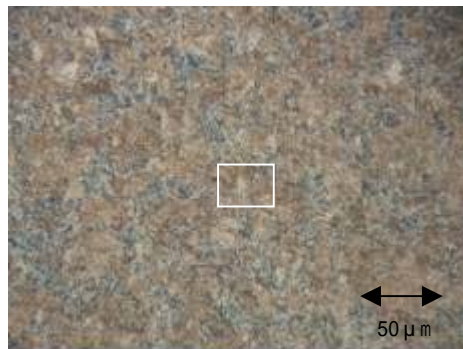
破断部



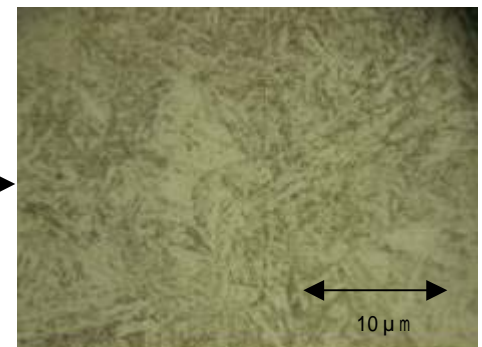
拡大



一般部



拡大

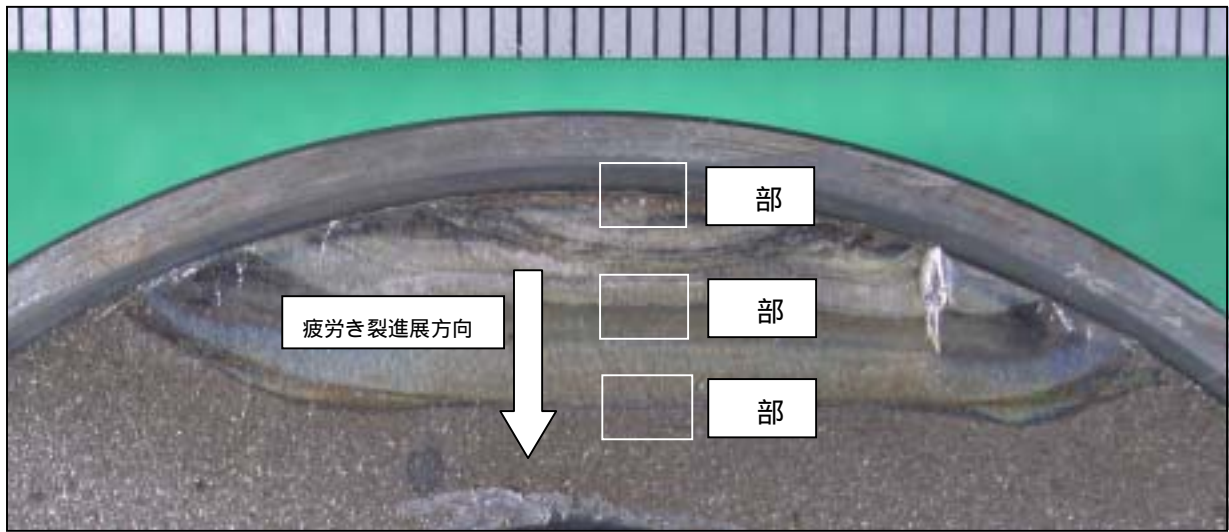


破面 S E M 観察結果

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>

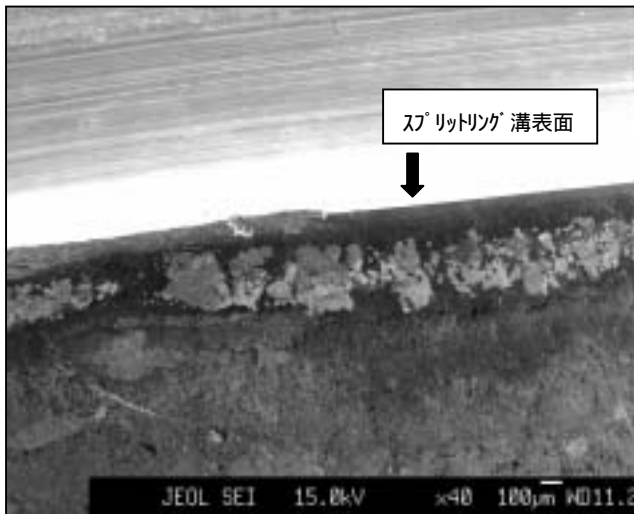
き裂 A 状況図 [軸端側]



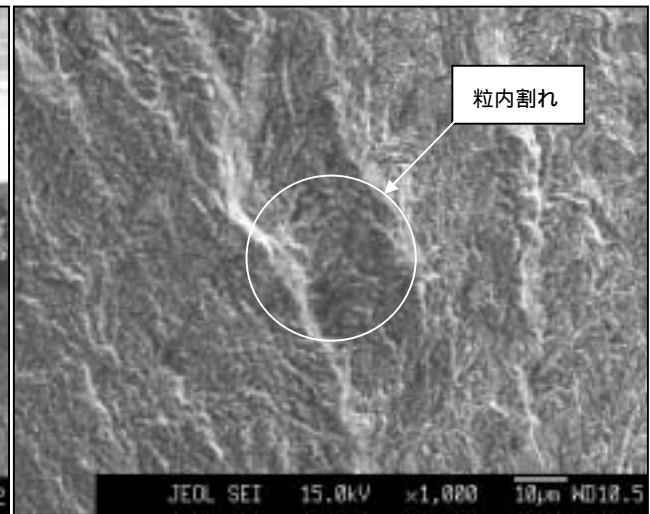
【観察箇所の選定方針】

- ・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。

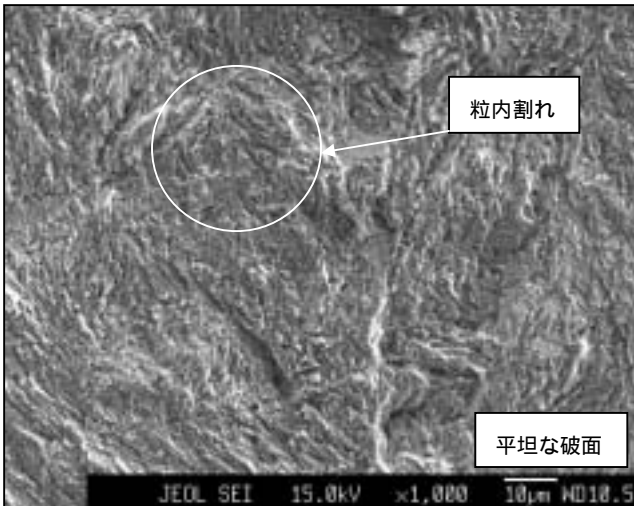
部観察結果 [き裂 A 起点部]



部観察結果 [き裂 A 進展部]



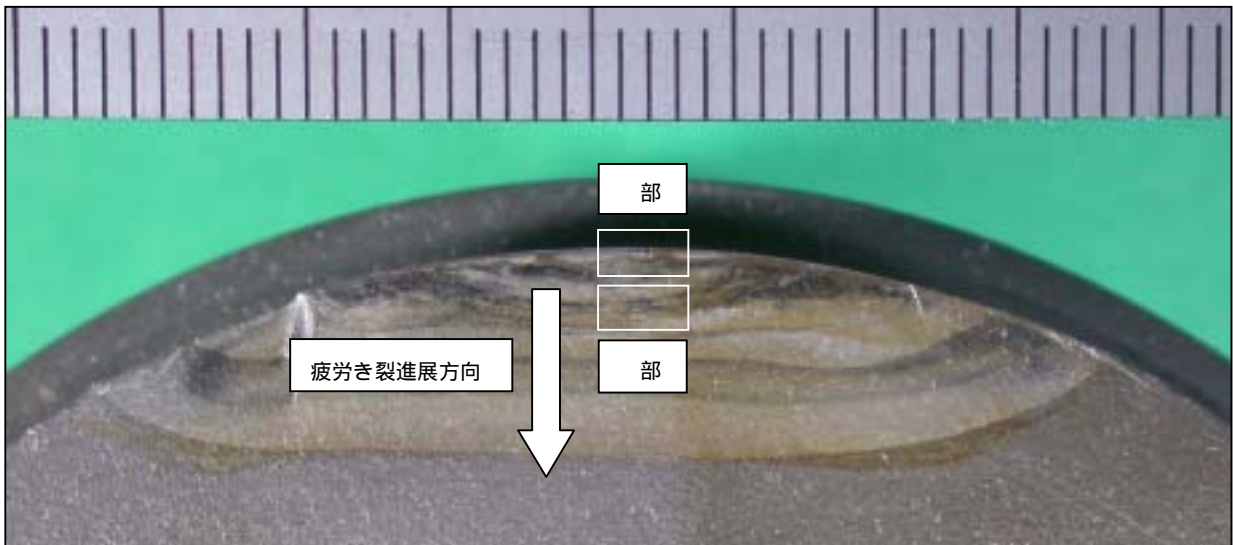
部観察結果 [き裂 A 進展部]



【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。

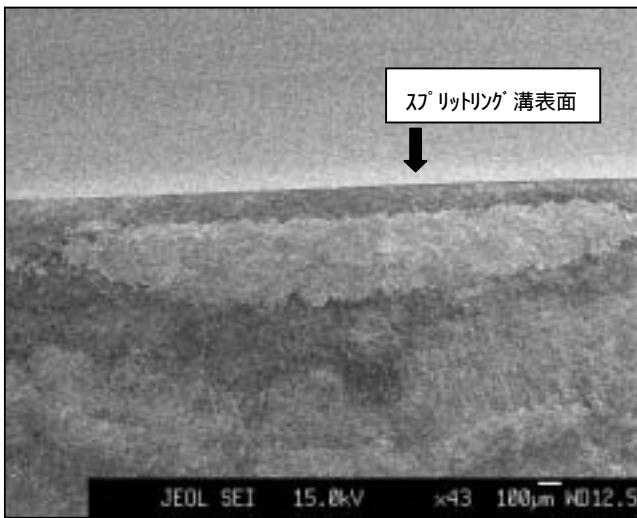
き裂 A 状況図 [継手側]



【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。

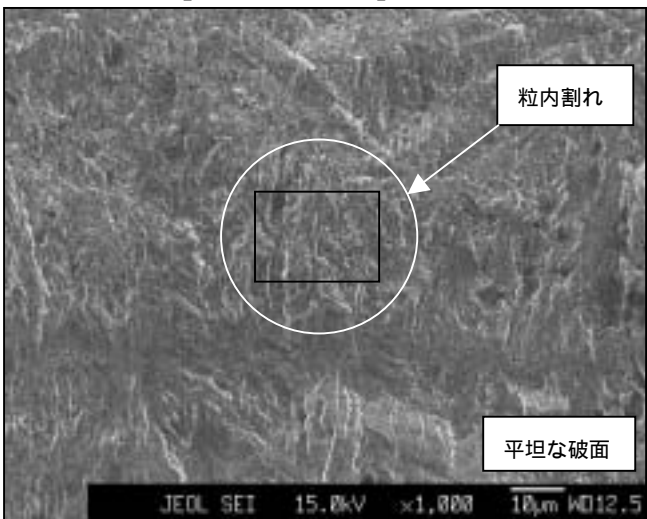
部観察結果 [き裂 A 起点部]



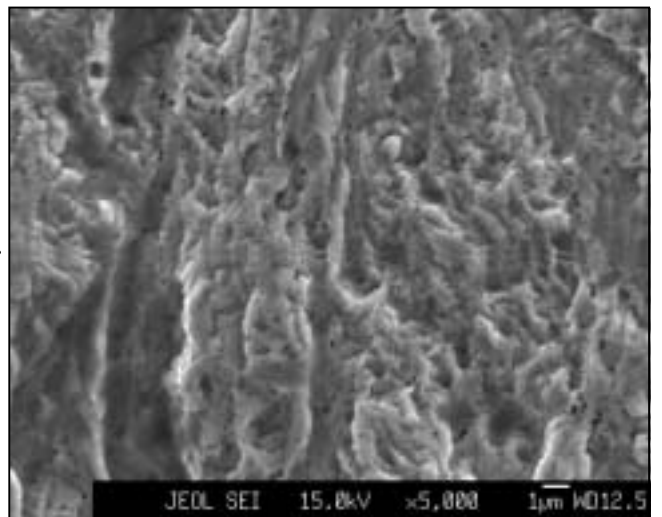
【観察結果】

- ・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。

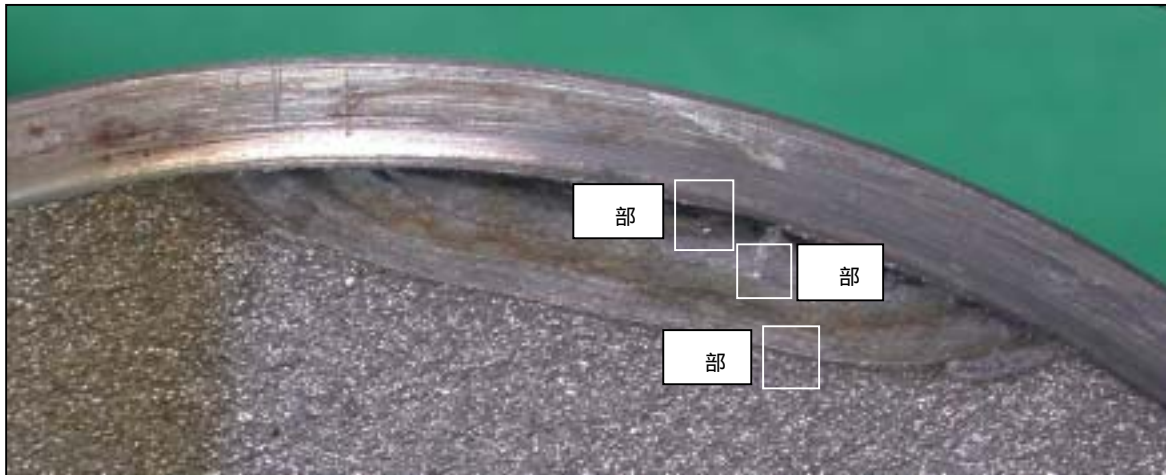
部観察結果 [き裂 A 進展部]



拡大
→



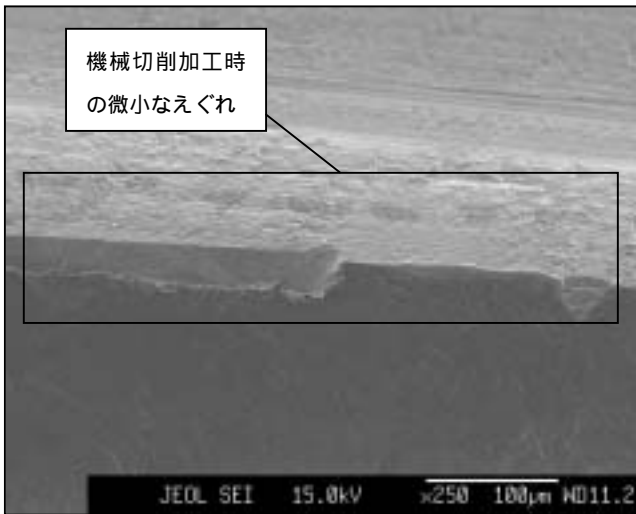
き裂B状況図 [軸端側]



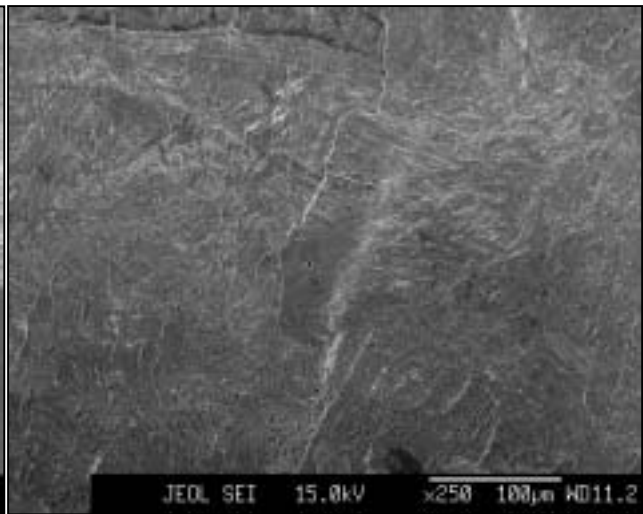
【観察箇所の選定方針】

- ・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。

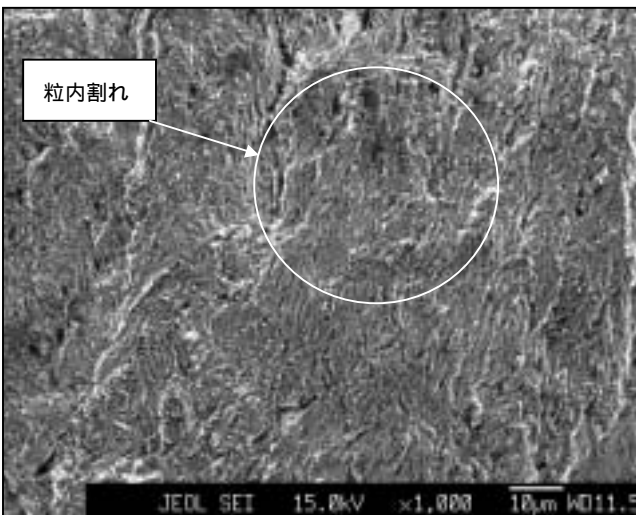
部観察結果 [き裂B起点部]



部観察結果 [き裂B進展部]



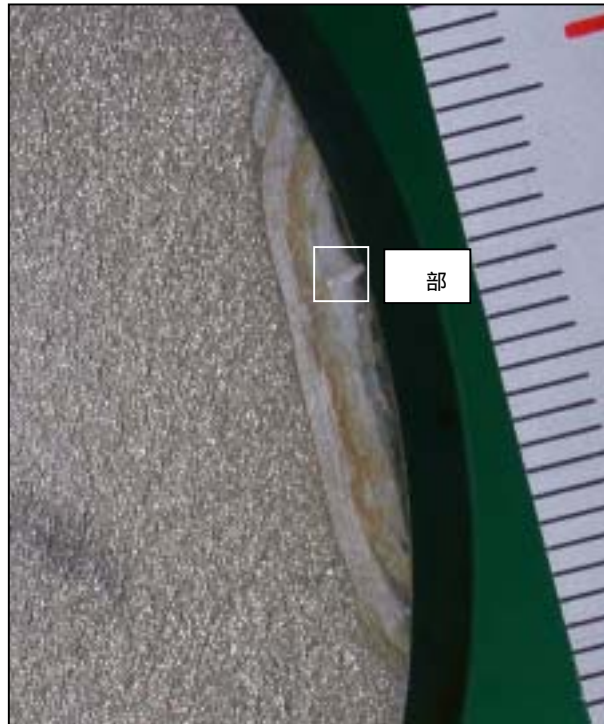
部観察結果



【観察結果】

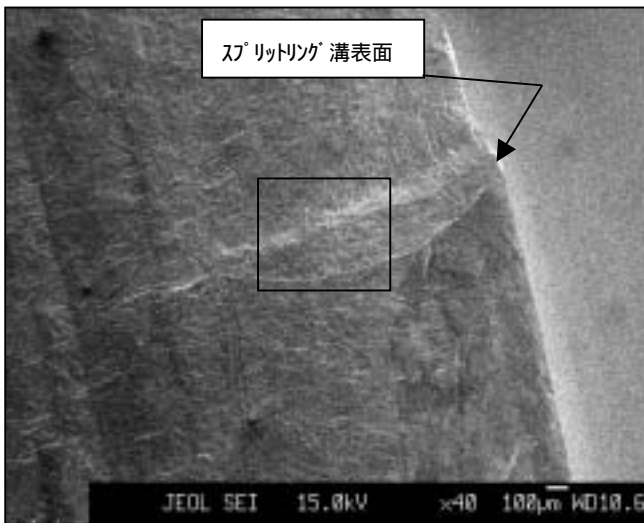
- ・き裂B起点部において、機械切削加工時の微小なえぐれと考えられるものが見られたが、材料欠陥、顕著な機械加工傷、フレッティング痕(こすれ痕)、腐食ピット等は確認できなかった。
- ・マルテンサイト系ステンレス鋼の疲労破面では、変動応力が比較的大きい場合にはストライエーションが観察されるが、き裂Bではストライエーションは観察されず、特徴的な粒内割れが確認されたため、低応力高サイクル疲労破壊と推定された。

き裂 B 状況図 [継手側]

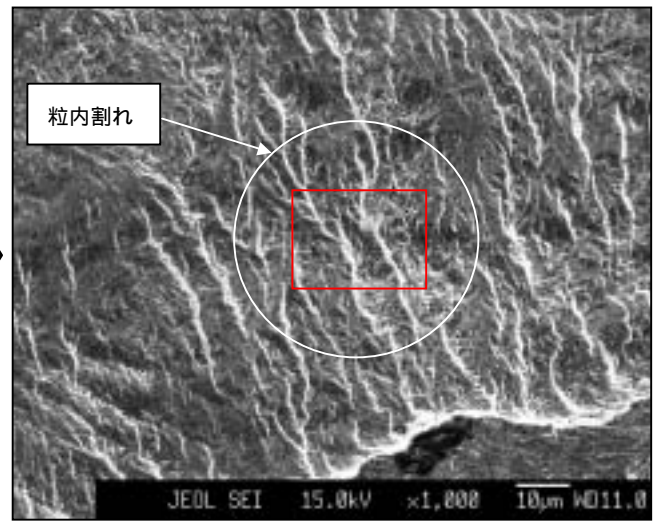


【観察箇所の選定方針】
 ・き裂 B 起点のスプリットリング溝表面近傍での初期欠陥等の有無及び破面状況を詳細に調査するため、「部」を選定した。

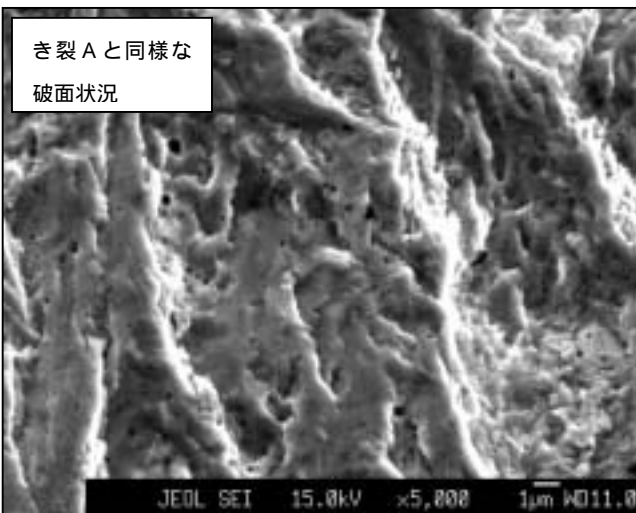
部観察結果 [き裂 B 起点部]



拡大

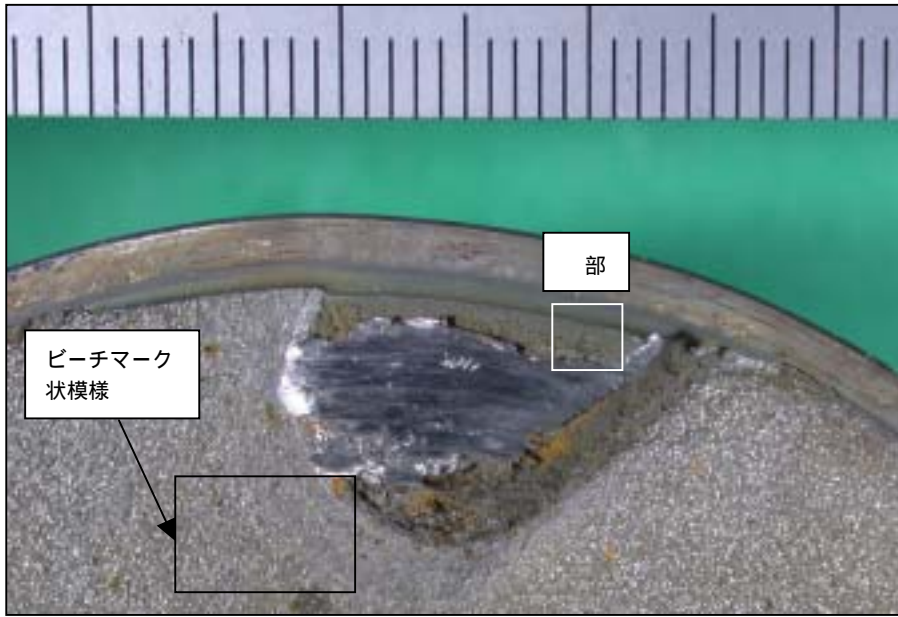


拡大



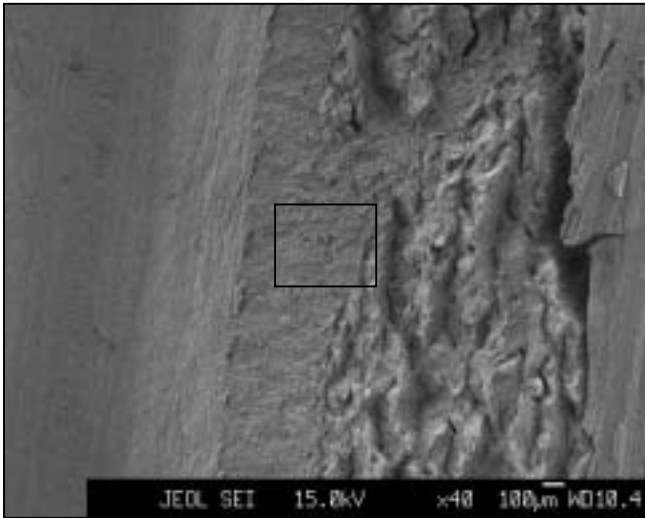
【観察結果】
 ・き裂 B 起点部において、材料欠陥、顕著な機械加工傷、フレットング痕（こすれ痕）、腐食ピット等は確認できなかった。
 ・マルテンサイト系ステンレス鋼の疲労破面では、変動応力が比較的大きい場合にはストライエーションが観察されるが、き裂 B ではストライエーションは観察されず、特徴的な粒内割れが確認されたため、低応力高サイクル疲労破壊と推定された。

最終破断面領域状況図 [軸端側]

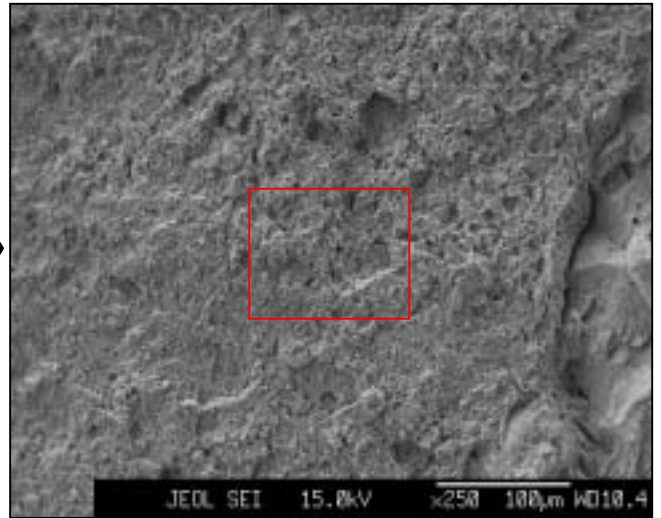


【観察箇所の選定方針】
・最終破断面領域のスプリットリング溝表面近傍での破面状況を詳細に調査するため、「部」を選定した。

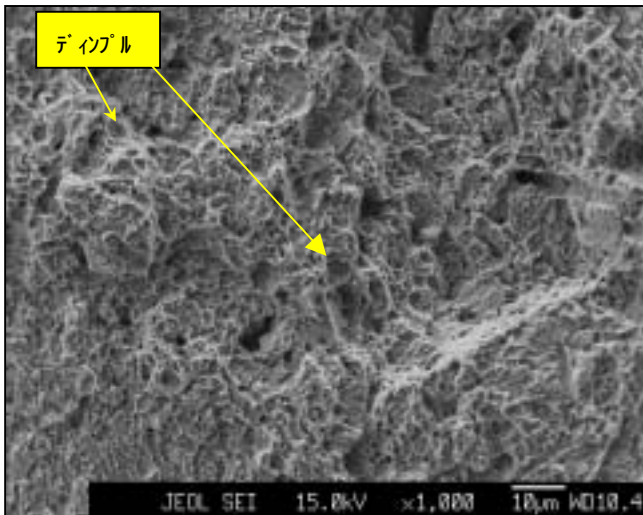
部観察結果



拡大
→

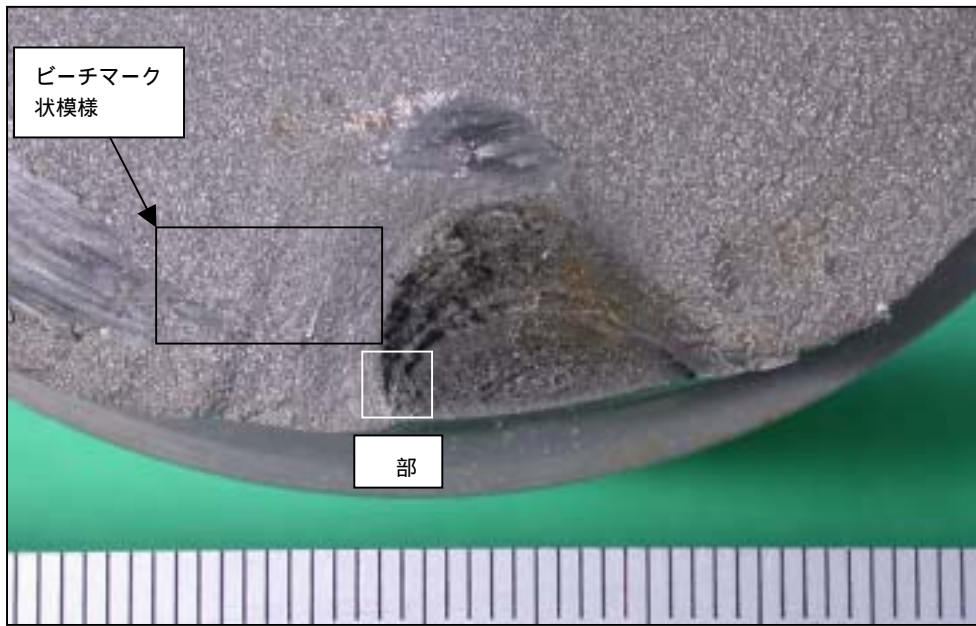


拡大
→



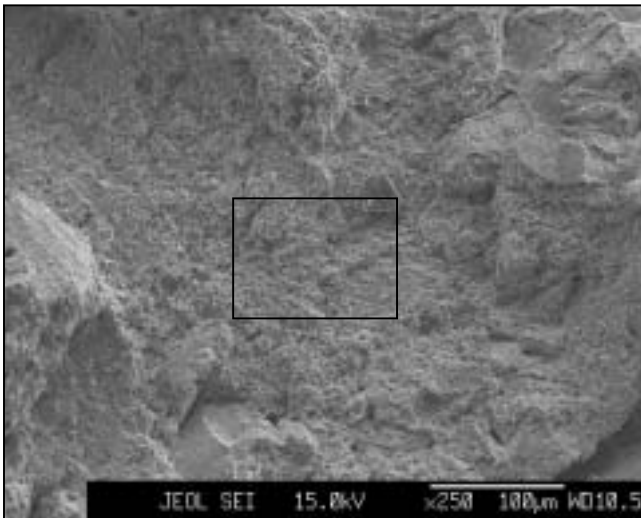
【観察結果】
・最終破断面領域には、延性破面に特有なディンプルが全面に確認された。

最終破断面領域状況図 [継手側]

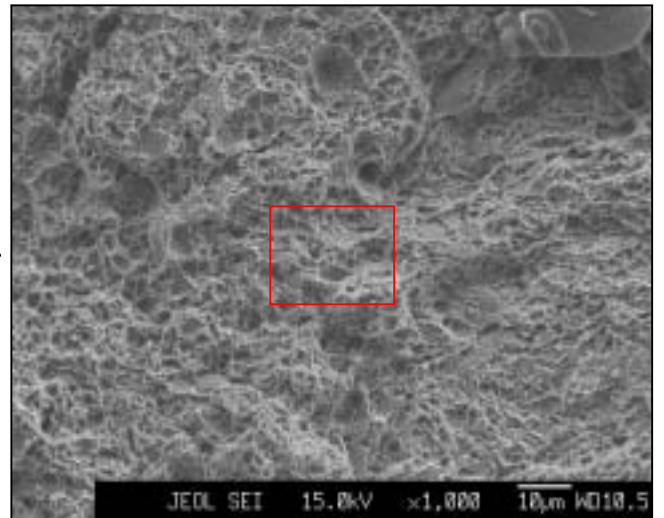


【観察箇所の選定方針】
・最終破断面領域の主軸内部側の破面状況を詳細に調査するため、「部」を選定した。

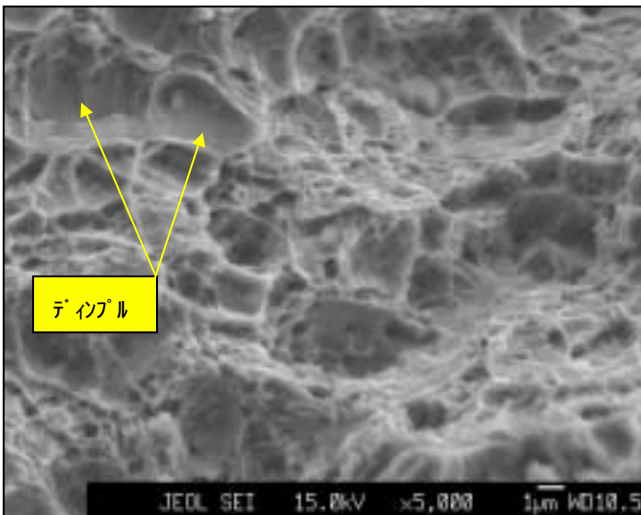
部観察結果



拡大
→

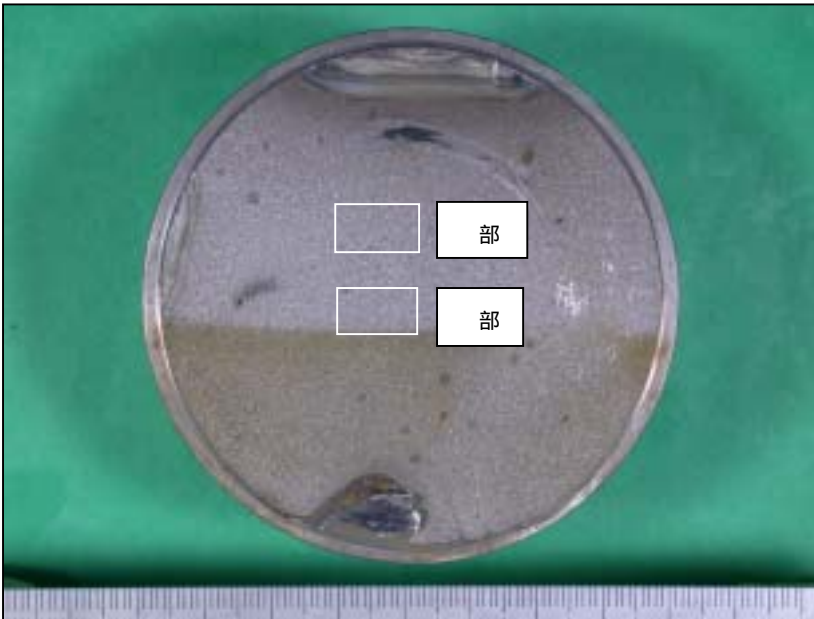


拡大
↓



【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。

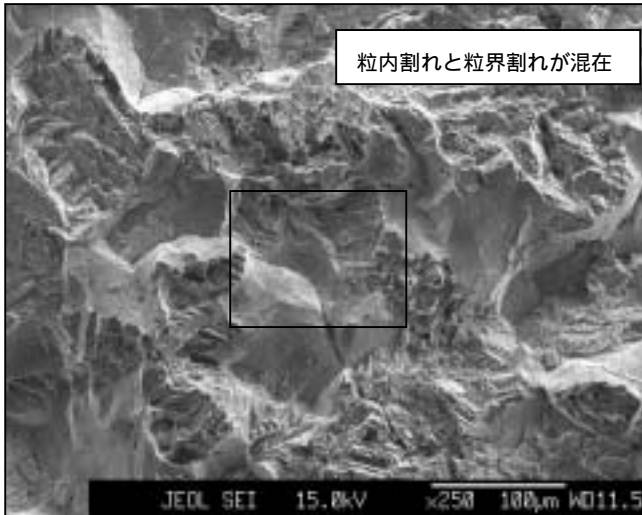
き裂進展領域状況図 [軸端側]



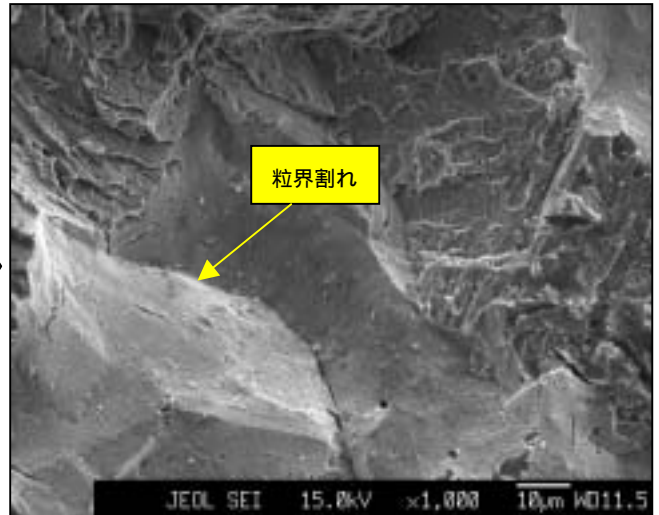
【観察箇所の選定方針】

- ・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。

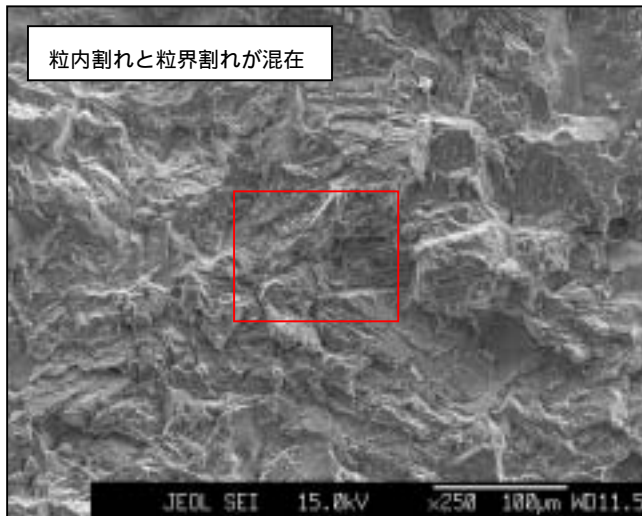
部観察結果



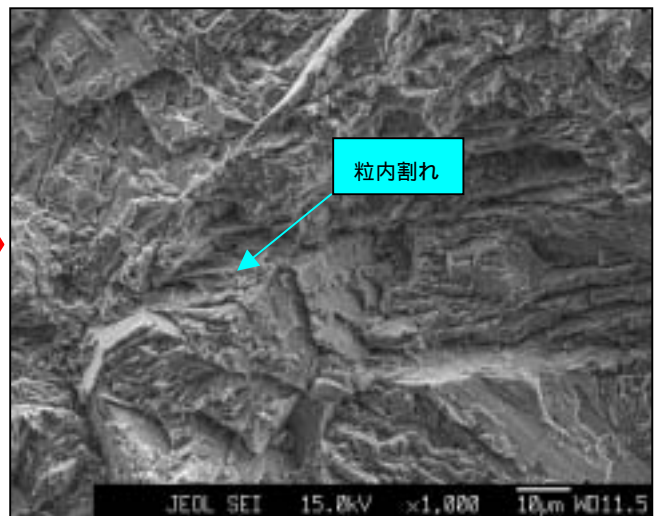
拡大



部観察結果



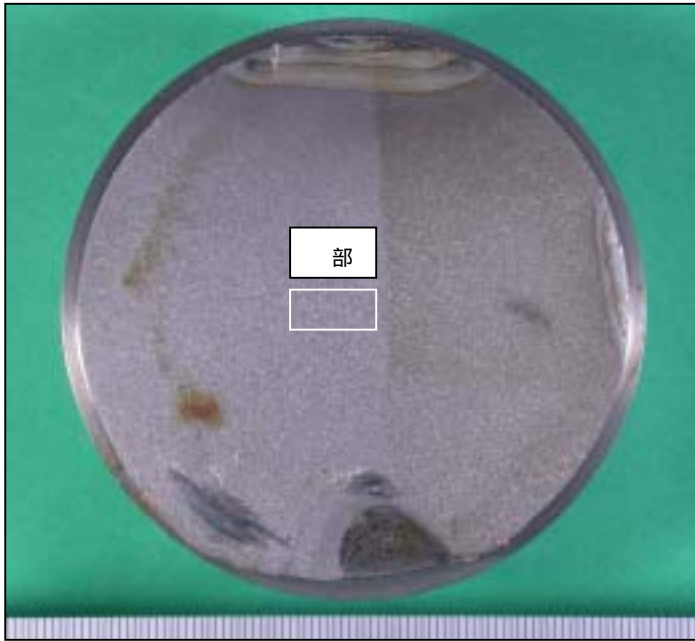
拡大



【観察結果】

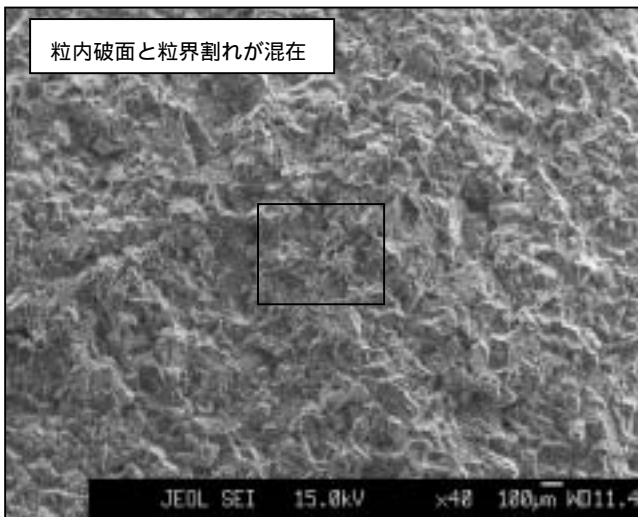
- ・起点部および最終破断面領域を除く破面では、粒界および粒内割れが混在した破面が確認された。

き裂進展領域状況図 [継手側]

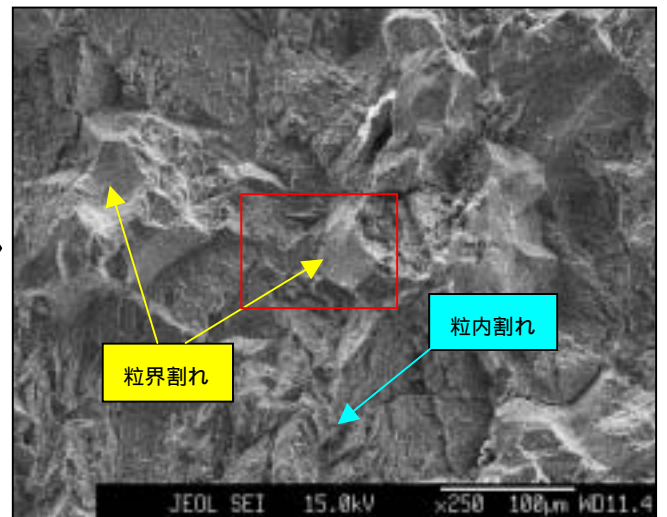


【観察箇所の選定方針】
・き裂進展領域の破面状況を詳細に調査するため、主軸中央付近の「部」を選定した。

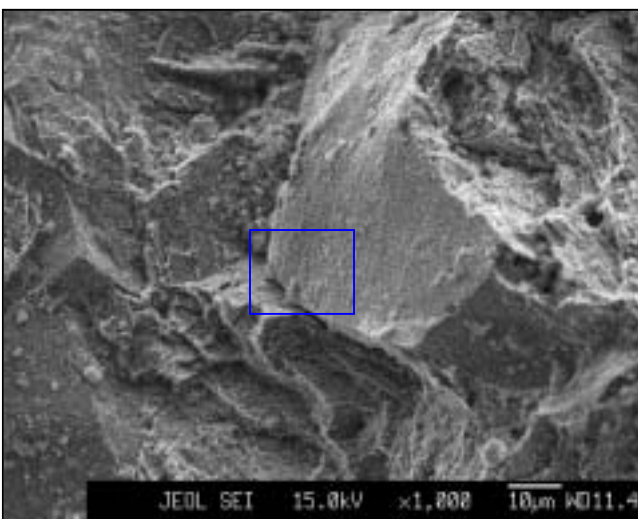
部観察結果



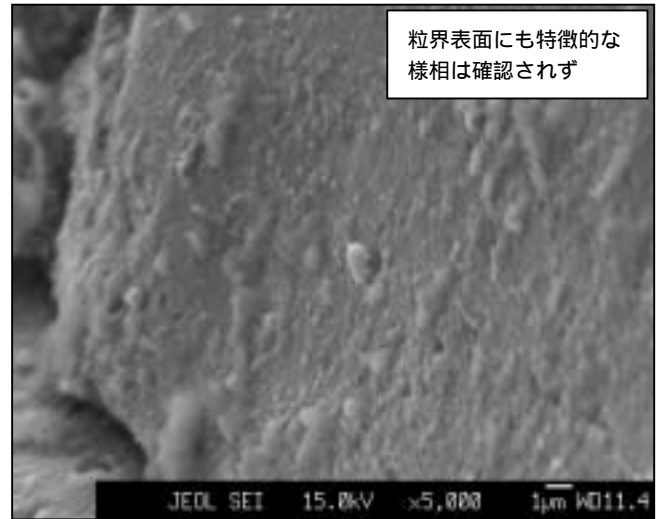
拡大
→



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。

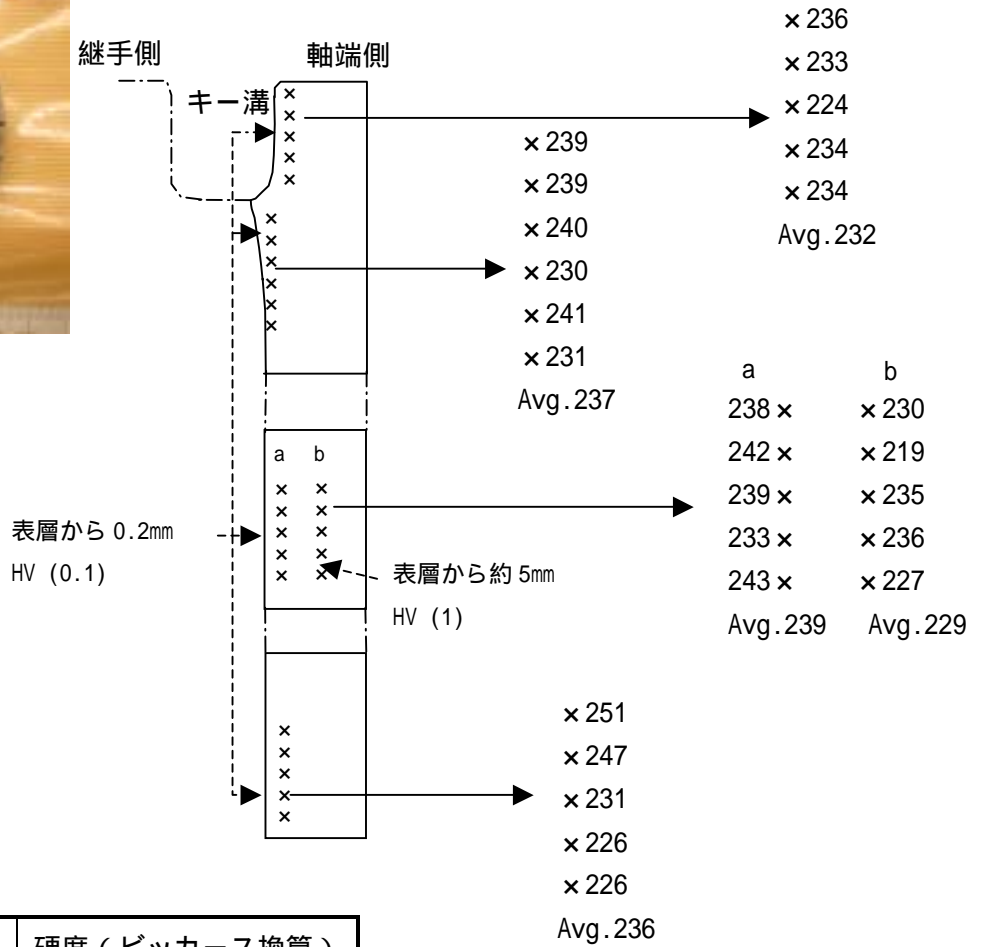
硬度測定結果

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 229 ~ 239 であり、規定値 (217 ~ 252) 範囲内であった。

元素分析結果

目的	<p>主軸破断面上に有害な元素がないことを確認する。</p>
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	<p>(1) 元素分析結果 [軸端側]</p>

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

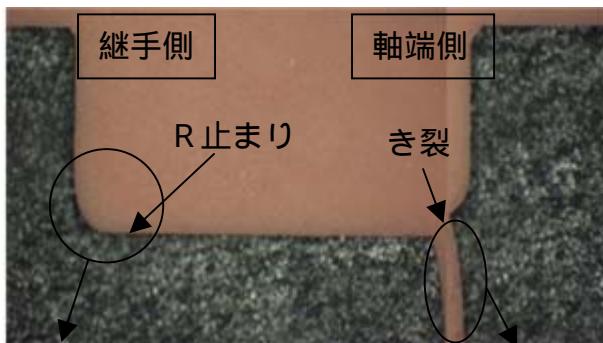
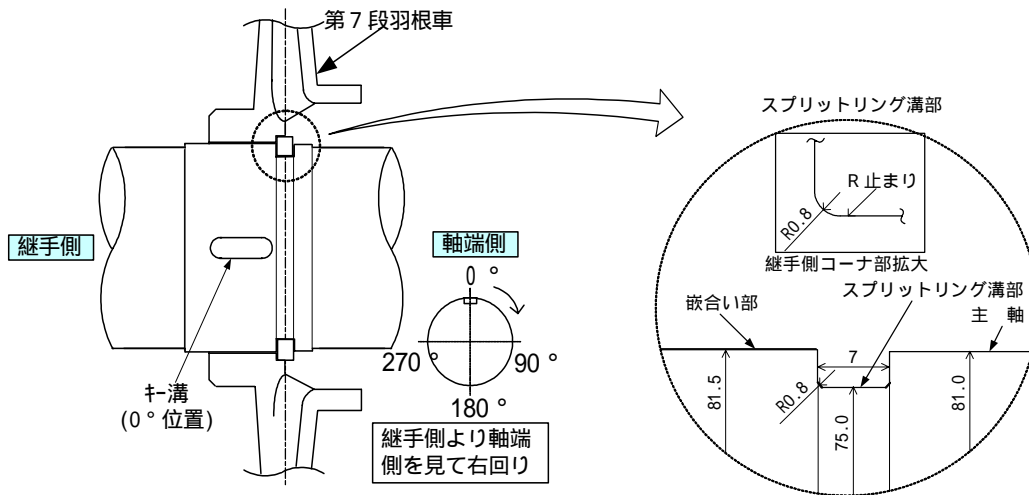
【元素分析結果】

- ・ 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</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°

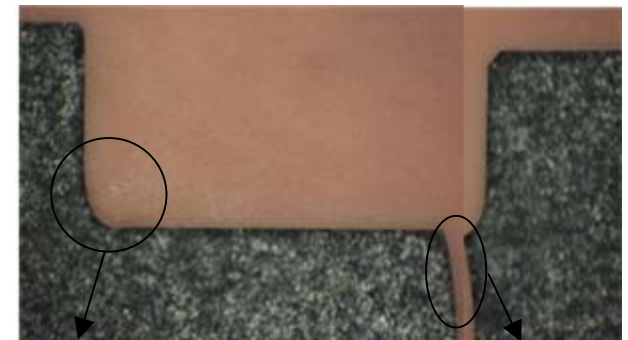
き裂 A部



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

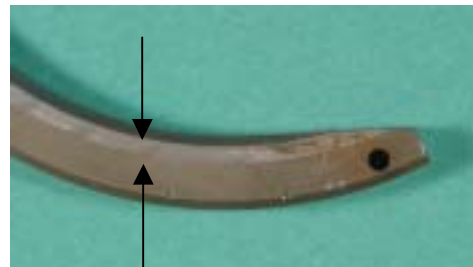


軸端側の面

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。

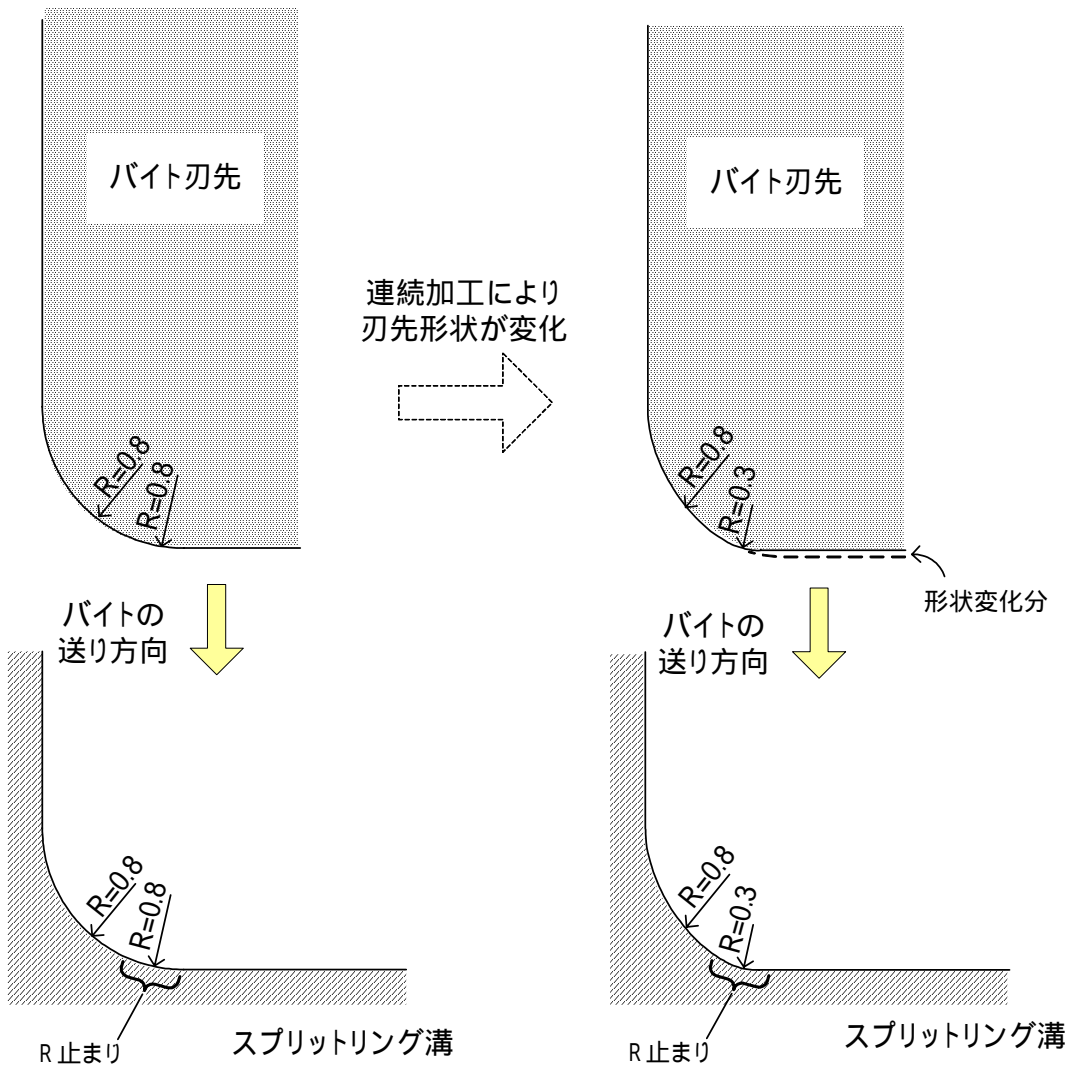
スプリットリング溝コーナ加工状況

(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

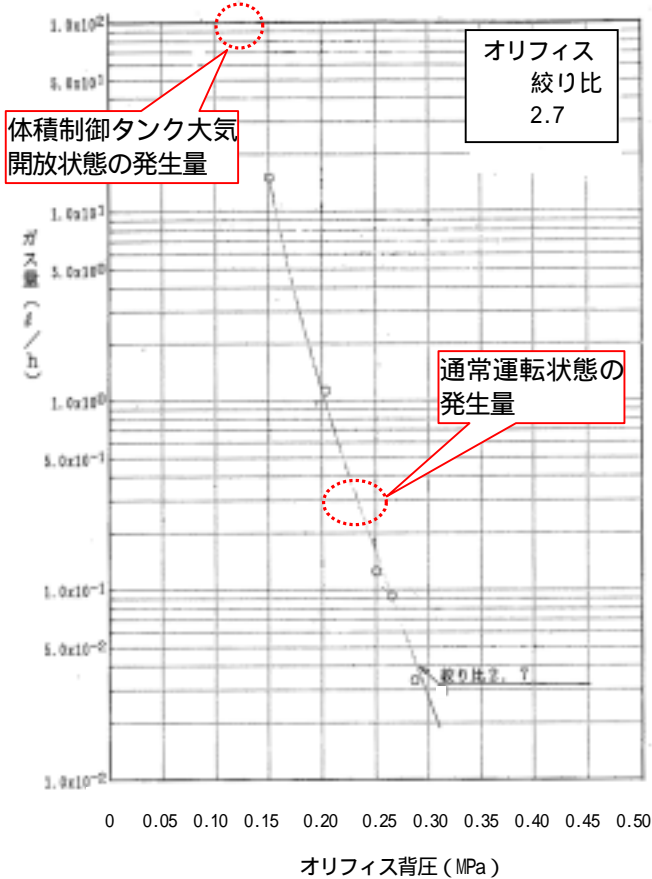


体積制御タンク大気開放時の気泡発生量評価および挙動調査

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。 <p style="margin-left: 40px;">通常運転時：0.3 ℓ/h程度の気泡発生量（微量）</p> <p style="margin-left: 40px;">大気開放時：100 ℓ/h以上の気泡発生量（多量）</p> <div style="border-left: 1px solid black; border-right: 1px solid black; border-bottom: 1px solid black; padding: 5px; margin-left: 20px;"> <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-bottom: 1px solid black; padding: 5px; margin-left: 20px;"> <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



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。

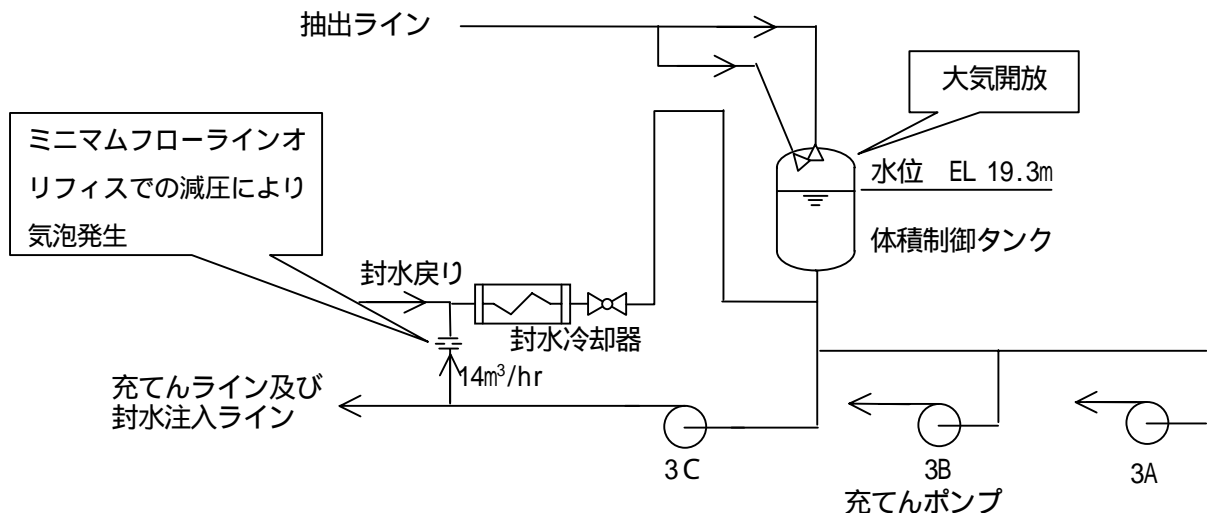
結果:

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。

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

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>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>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>3 B</p> <p>4 B</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>充てんポンプへ</p> <p>体積制御タンクから</p>	<p>3 B</p> <p>4 B</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>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=0.3mm) 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/mm² 《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/mm² 《別紙(3)》</p> <p>(4) 発生応力: 平均応力 185N/mm²、変動応力 279N/mm² 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。

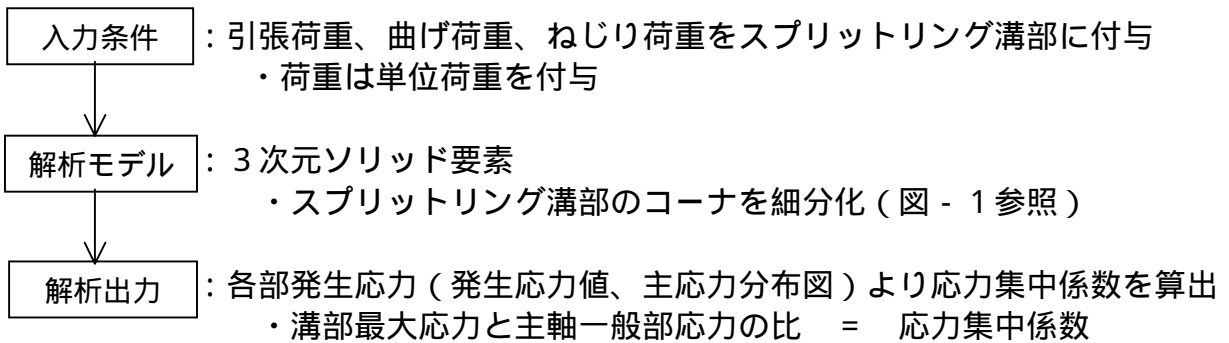
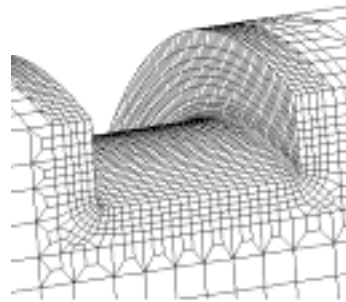
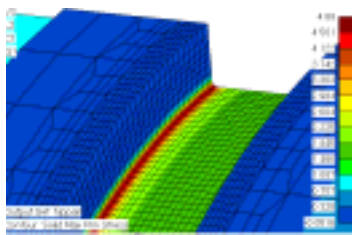


図 - 1 FEM解析モデル図
(第7段スプリットリング溝部)

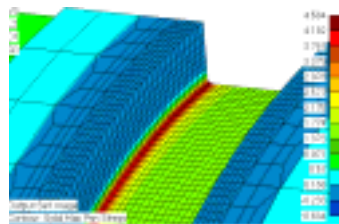


2. 解析結果

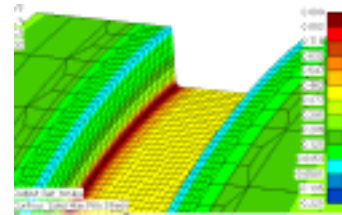
引張応力、曲げ応力、ねじり応力に対する応力集中係数の解析結果を以下に示す。



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。

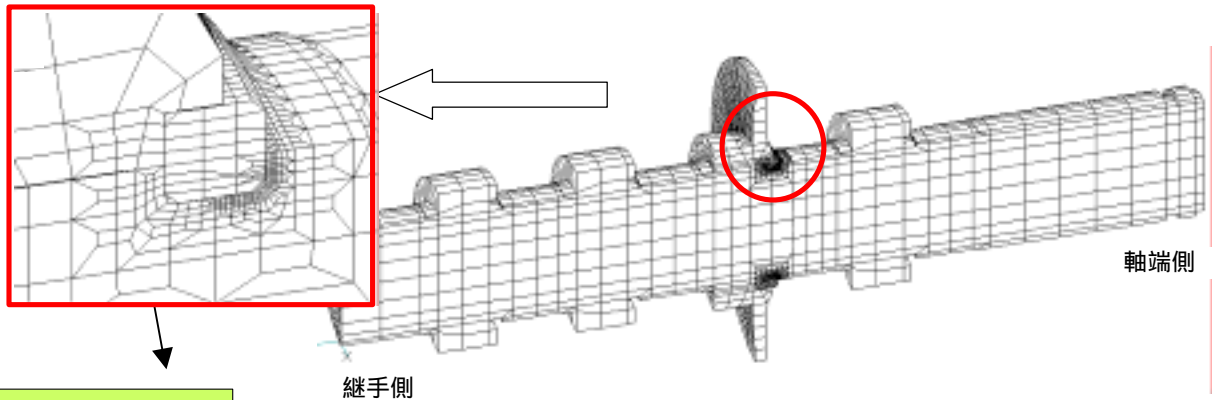
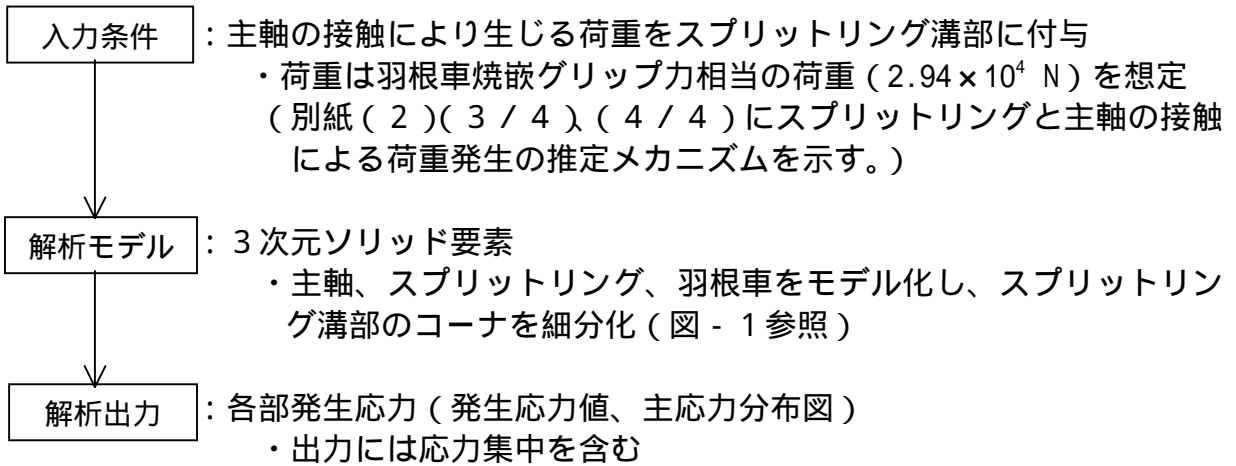
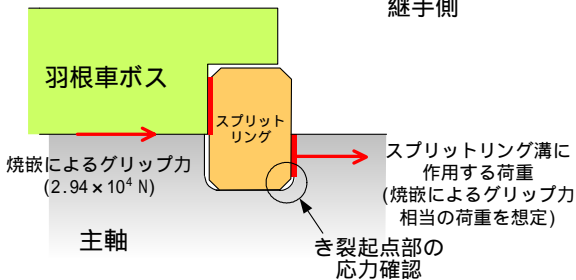


図-1
解析モデル図

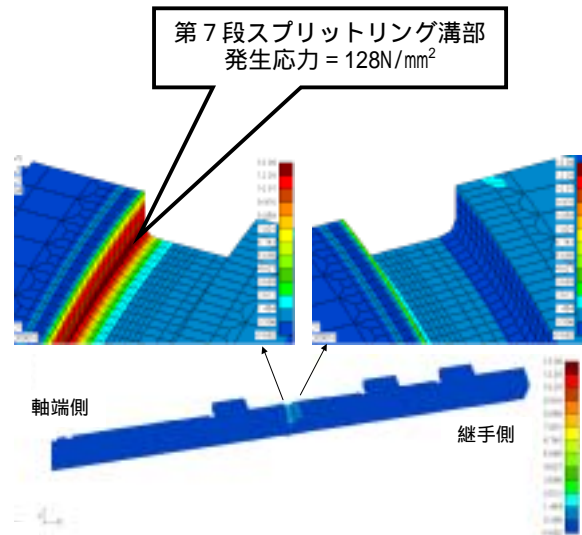


スプリットリングと主軸の接触模式図

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]

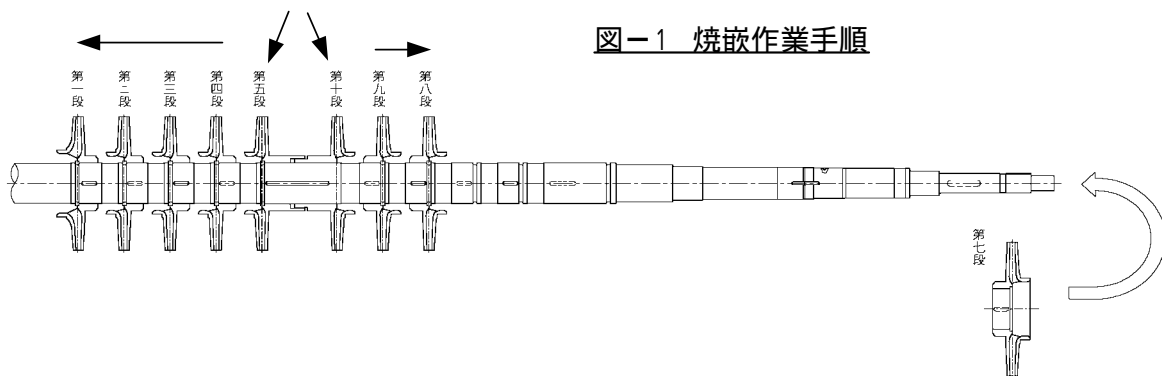


図-2
焼嵌直後の状態

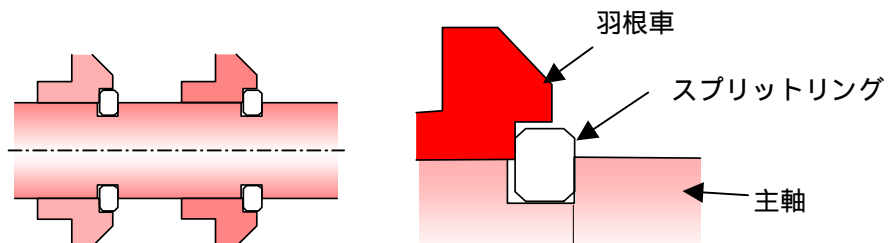
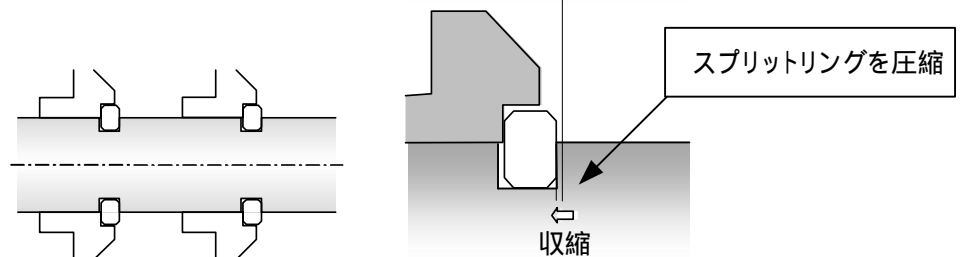


図-3
主軸冷却後の状態



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

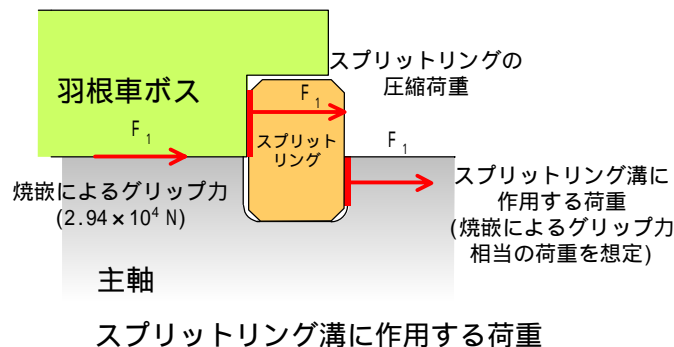
$$L_1 = \frac{F_1 \times L}{E \times A} = 2.07 \times 10^{-3} \text{ [mm]} \quad \dots\dots\dots (2)$$

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。

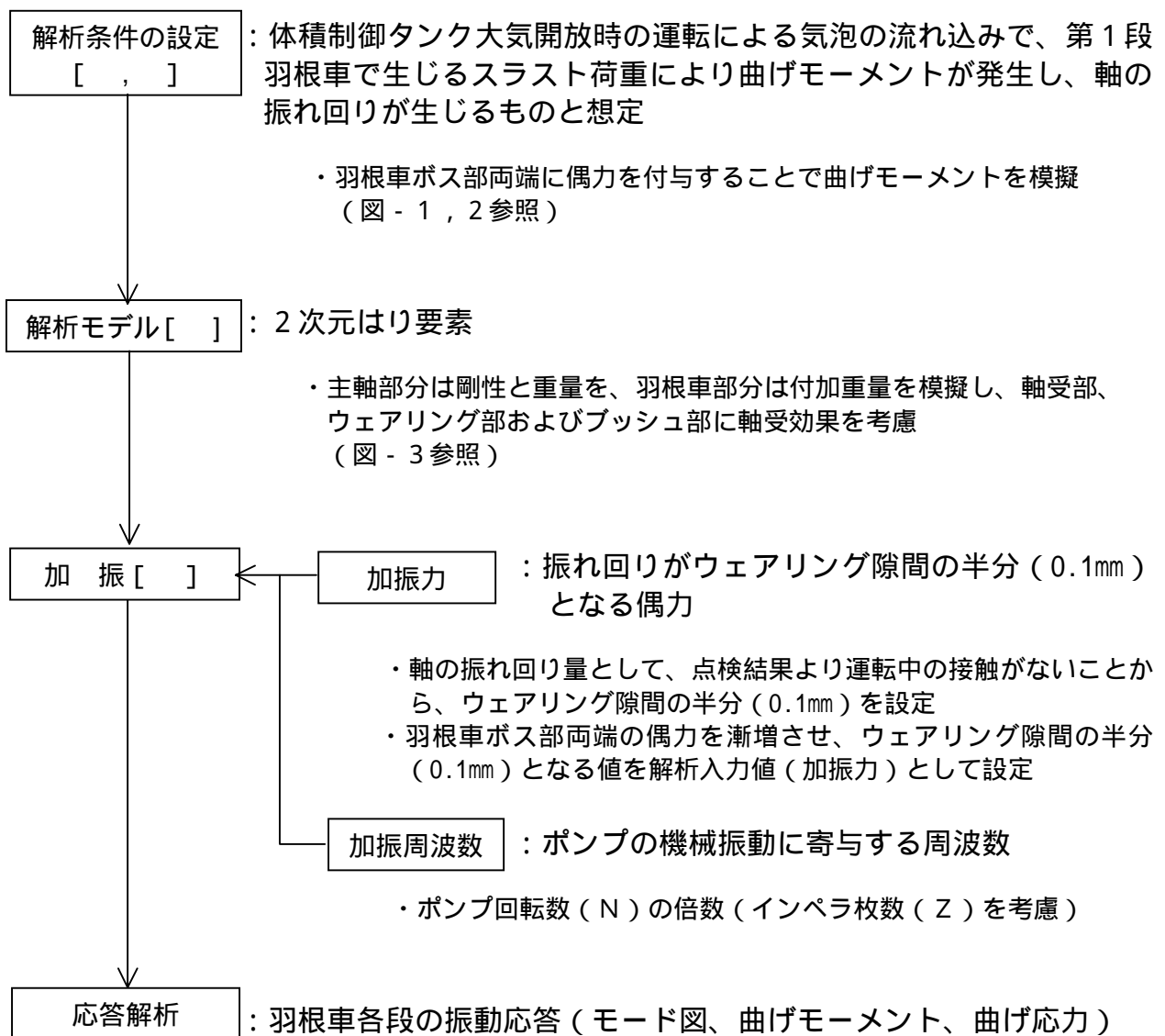


気泡の流れ込みで生じる振動による発生応力

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]

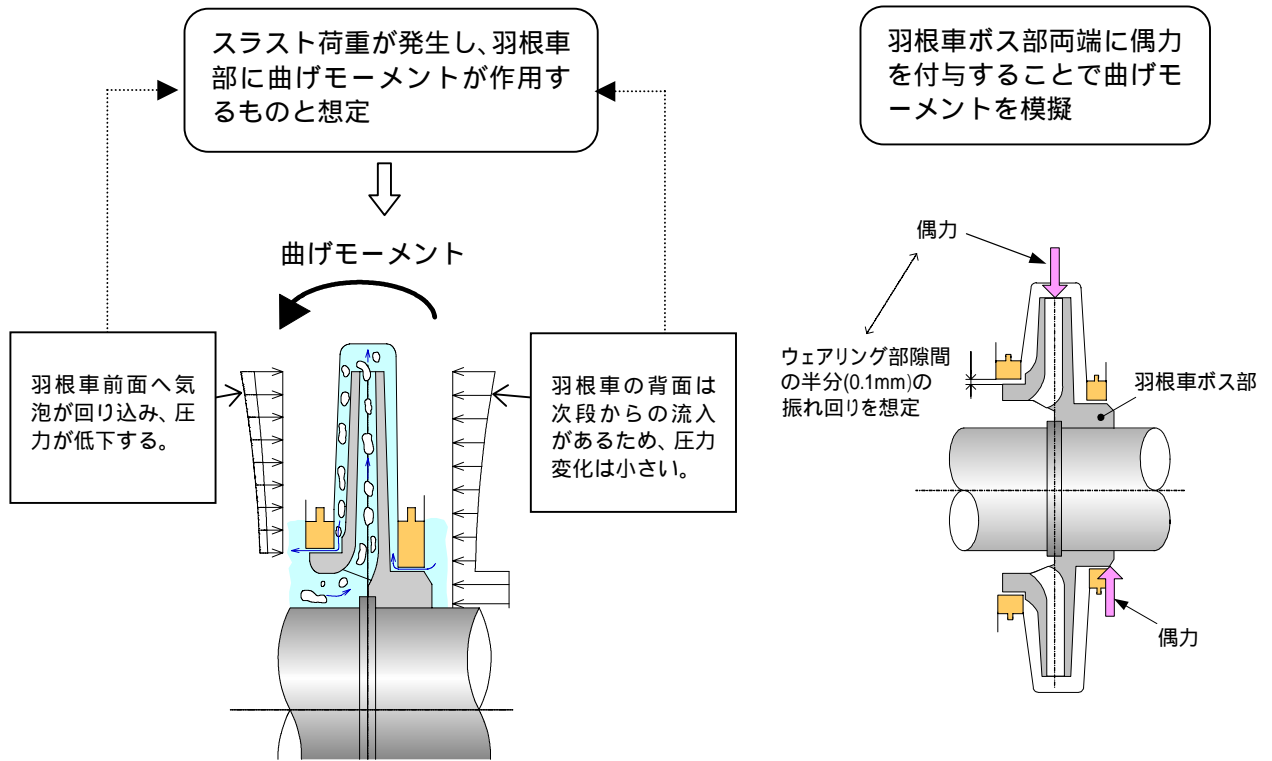


図 - 1
気泡の流れ込みによる曲げモーメントの発生

図 - 2
曲げモーメント模擬状況

[解析モデル]

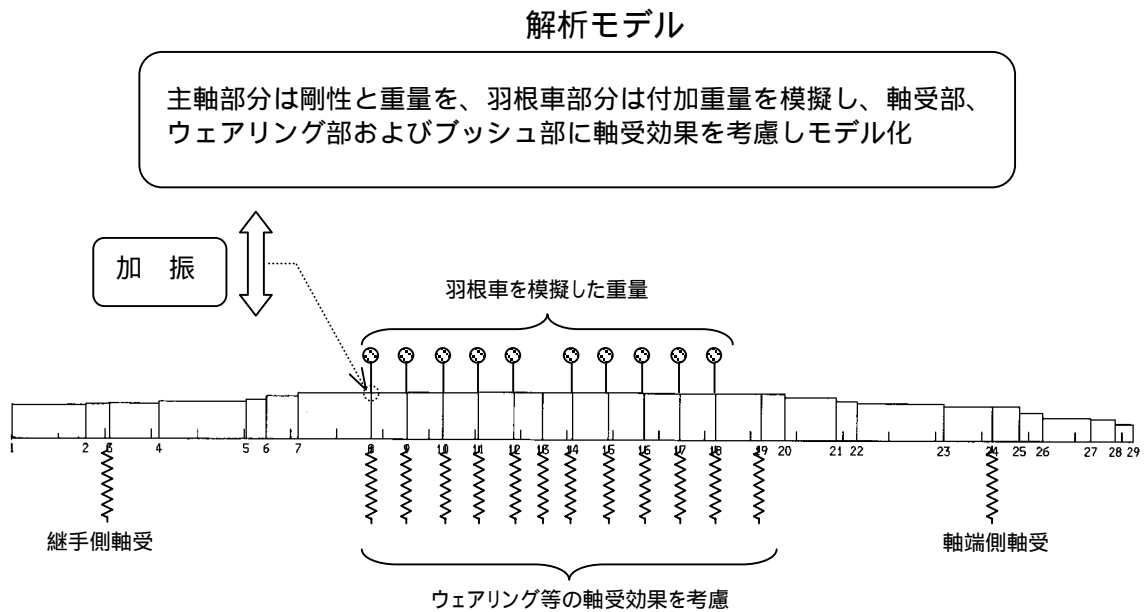


図 - 3 解析モデル図

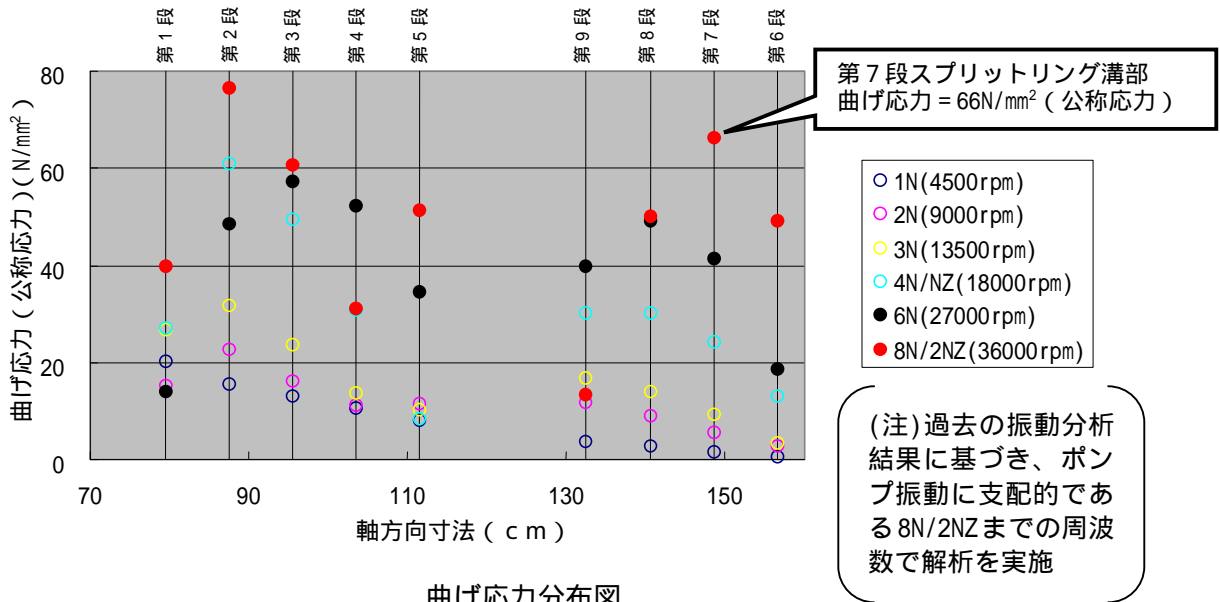
2. 解析結果

主軸各部の発生応力を以下に示す。

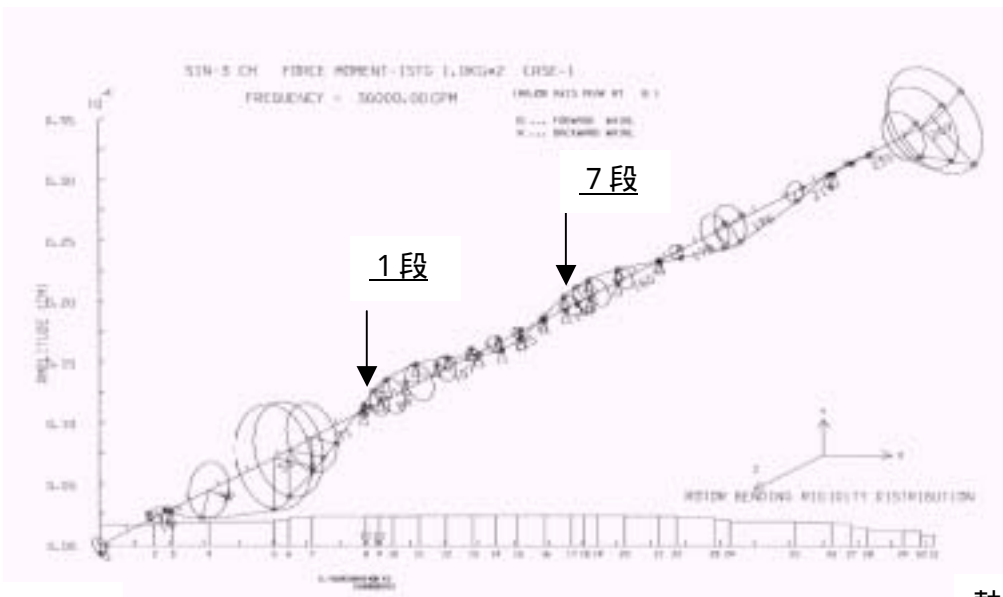
第7段スプリットリング溝部には 238N/mm² の曲げ応力 (公称応力 66N/mm² に応力集中係数 3.59 を考慮) が発生する。

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

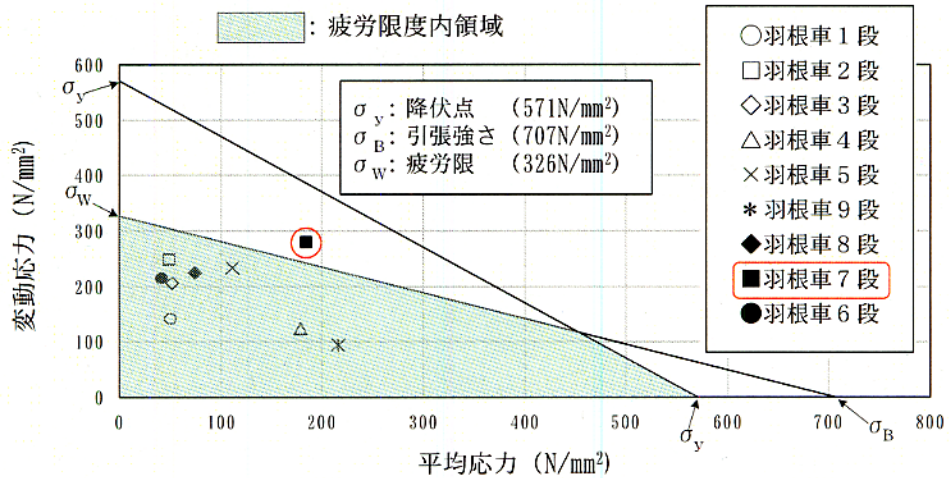
- ・引張応力 : 体積制御タンク大気開放時の運転流量で生じる羽根車スラスト荷重により発生する引張応力 [メーカー設計値] に、応力集中係数 [3.84] を乗じ平均応力を算出。変動応力は、平均応力の 10% [メーカー設計値] とした。
- ・曲げ応力 : 主軸、羽根車の自重および体積制御タンク大気開放時の運転流量で生じる羽根車の半径方向荷重により発生する曲げ応力 [メーカー設計値] に応力集中係数 [3.59] を乗じ算出。(回転曲げ応力のため変動応力に整理)
- ・ねじり応力 : 体積制御タンク大気開放時の運転流量で生じる軸トルクにより発生するねじり応力 [メーカー設計値] に応力集中係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

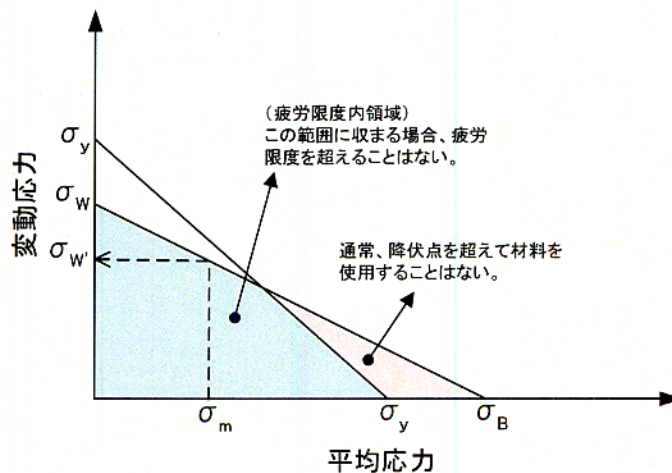
修正グッドマン線図について

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。

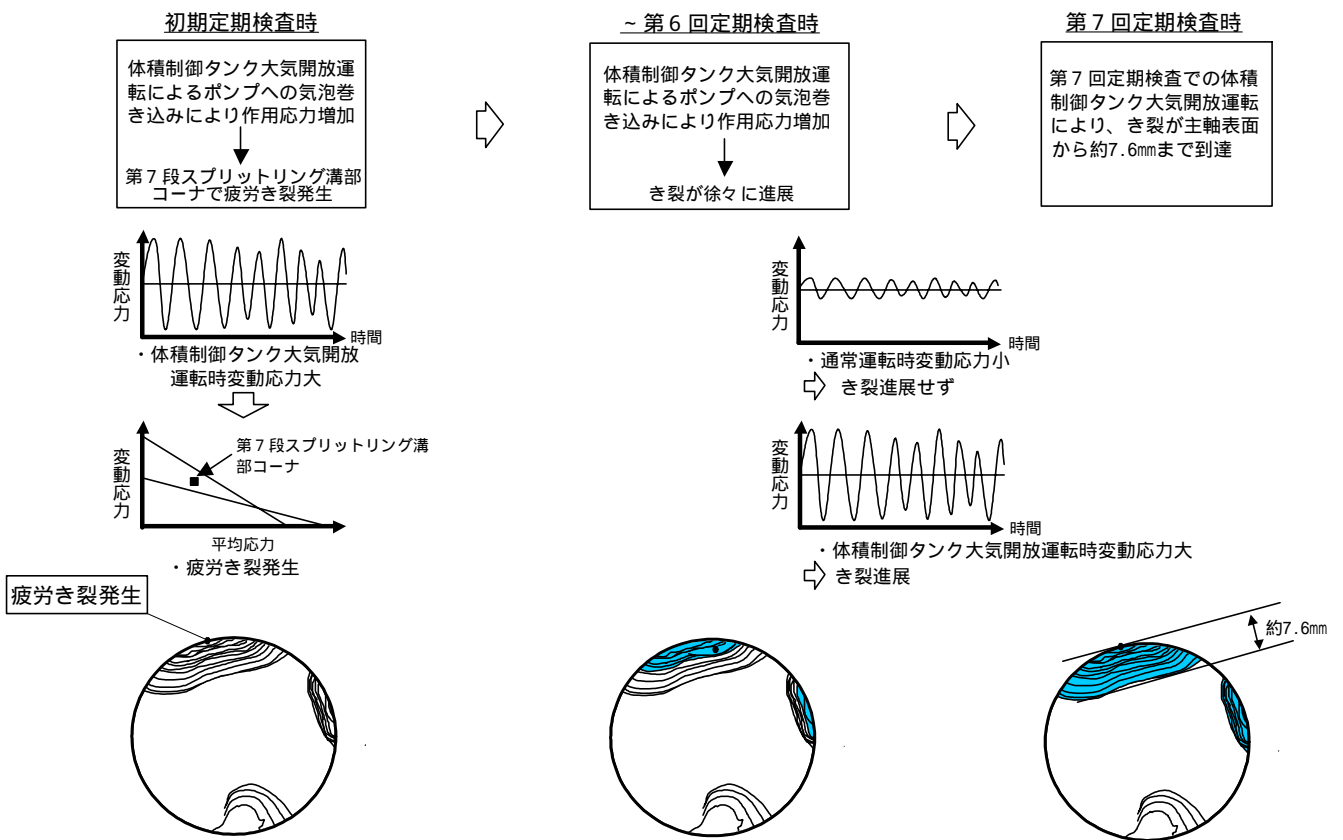


図1 体積制御タンク大気開放運転時のき裂進展状況

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。

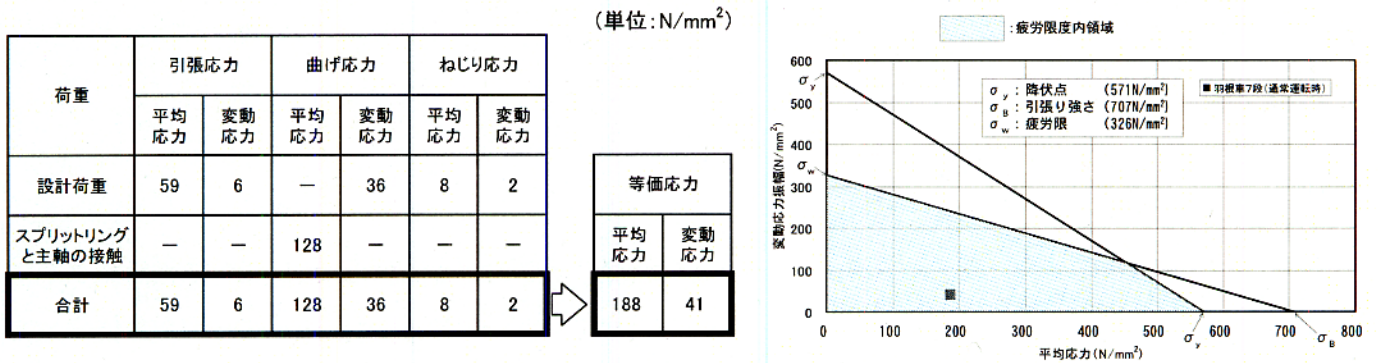


図2 疲労強度評価結果(通常運転時)

(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、 $K > \Delta K_{th}$

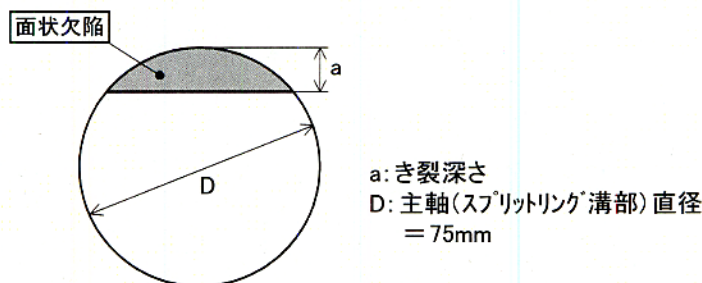
$$\left[\begin{array}{l} K : \text{応力拡大係数} \\ \Delta K_{th} : \text{疲労き裂の進展に対する下限界の応力拡大係数範囲} \end{array} \right]$$

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。

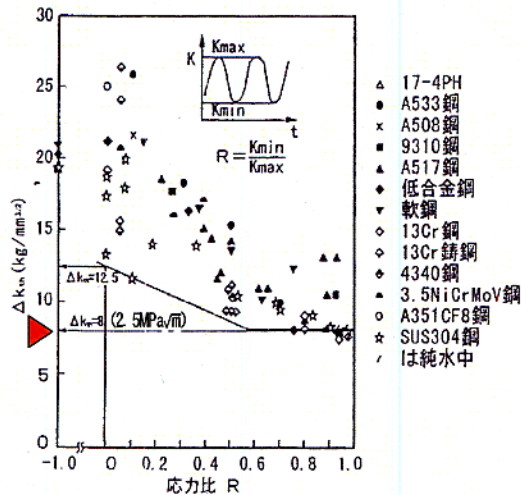


図4 疲労き裂進展下限界値データ^[2]

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。

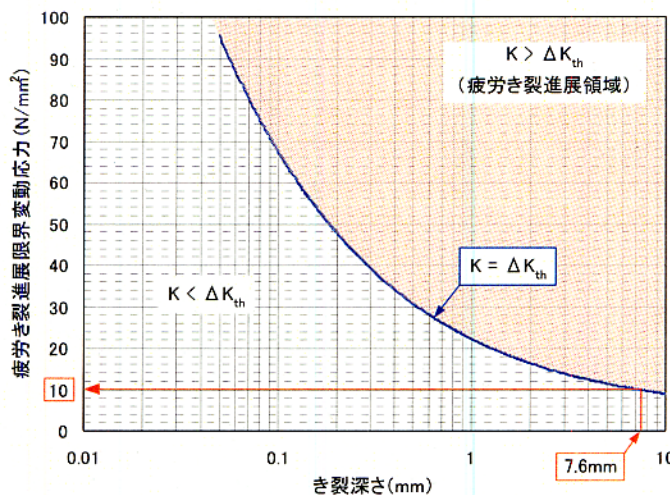


図5 き裂深さと疲労き裂進展限界変動応力の関係

^[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 $10\text{N}/\text{mm}^2$ 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 $10\text{N}/\text{mm}^2$ (通常運転時曲げ変動応力 $36\text{N}/\text{mm}^2$ / 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。

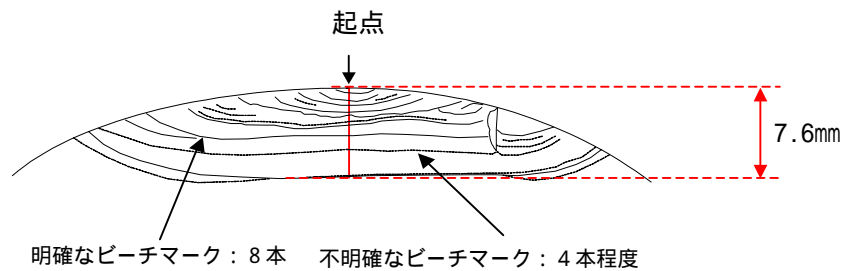


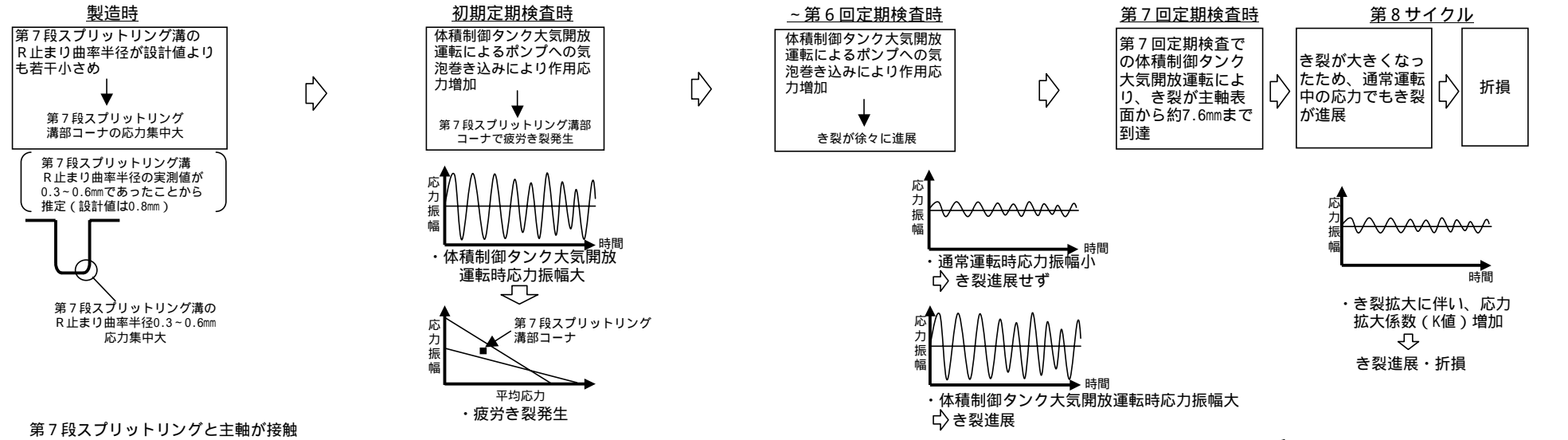
図6 主軸破断面 き裂A部の状況

[3] 添付 - 17 別紙(1) 参照

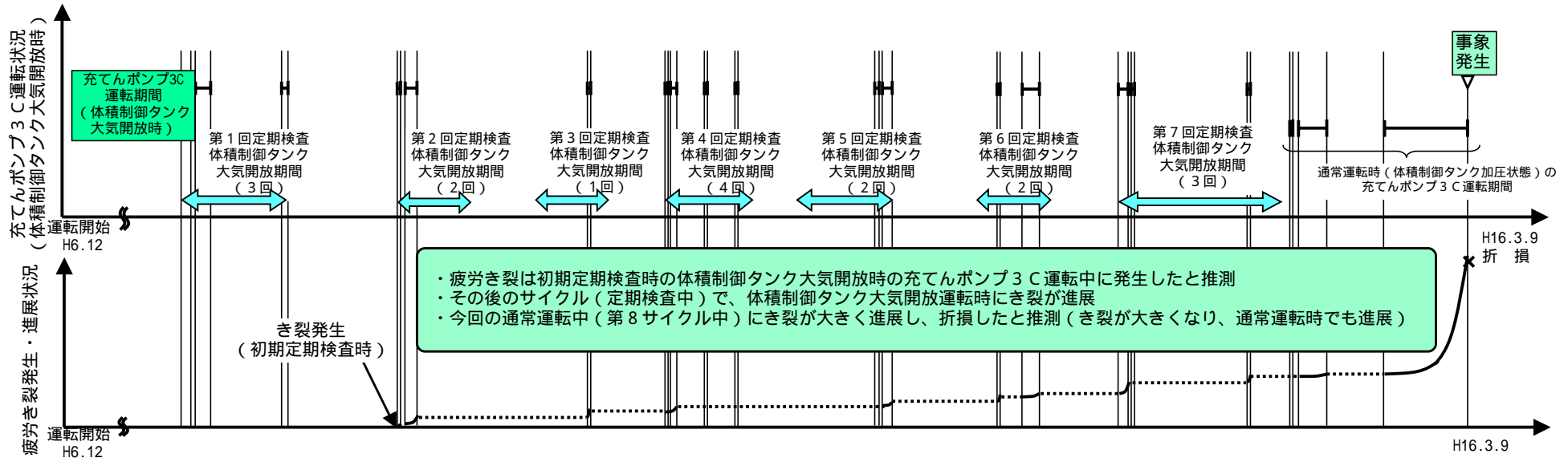
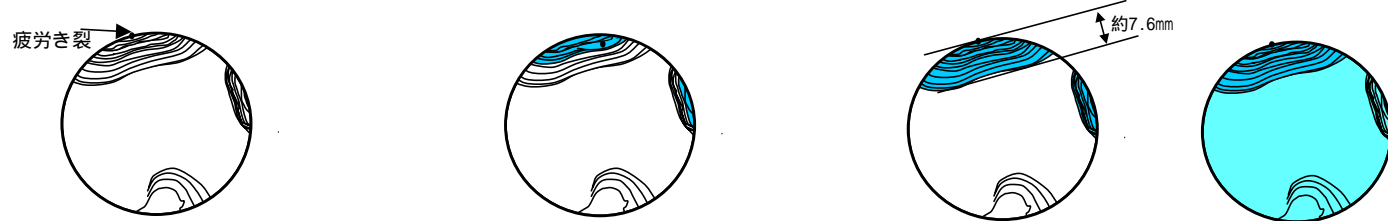
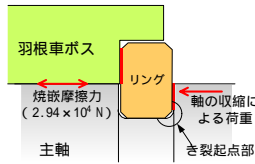
事象発生 の 推定メカニズム

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

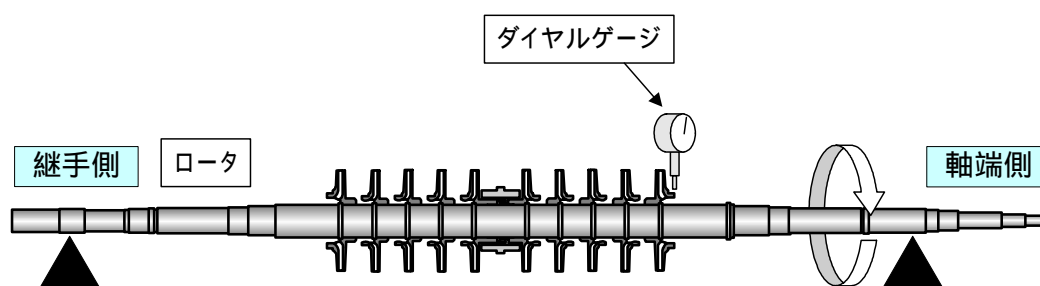
・ 製造時期

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

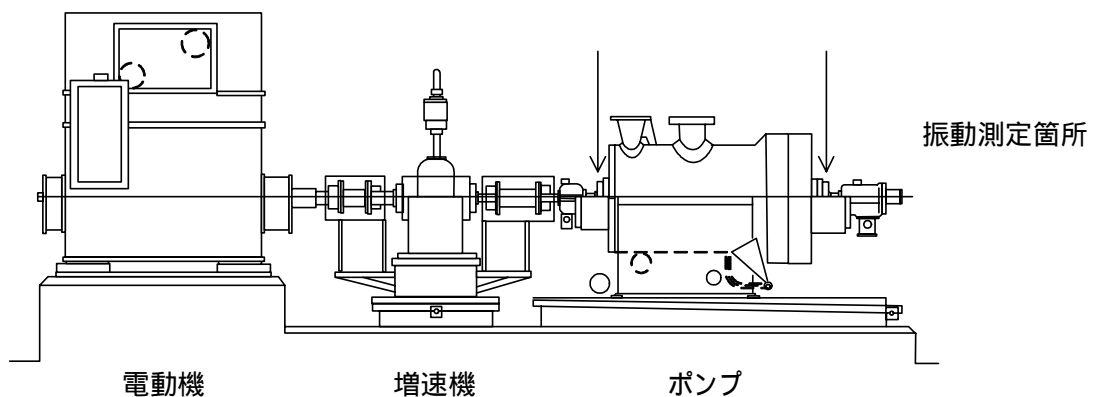
項目		3 A	3 B	3 C
大気開放 運転時間 (hr)	累計	約 1,720	約 1,180	約 1,040
通常 運転時間 (hr)	第7回定期 検査以降	約 1,600	約 1,500	約 1,200
	第7回定期 検査まで	約 43,200	約 43,100	約 40,800
	合計	約 44,800	約 44,600	約 42,000
運転回数 (回)	大気開放運転	23	14	17
	上記以外	48	44	46
	合計	71	58	63

(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

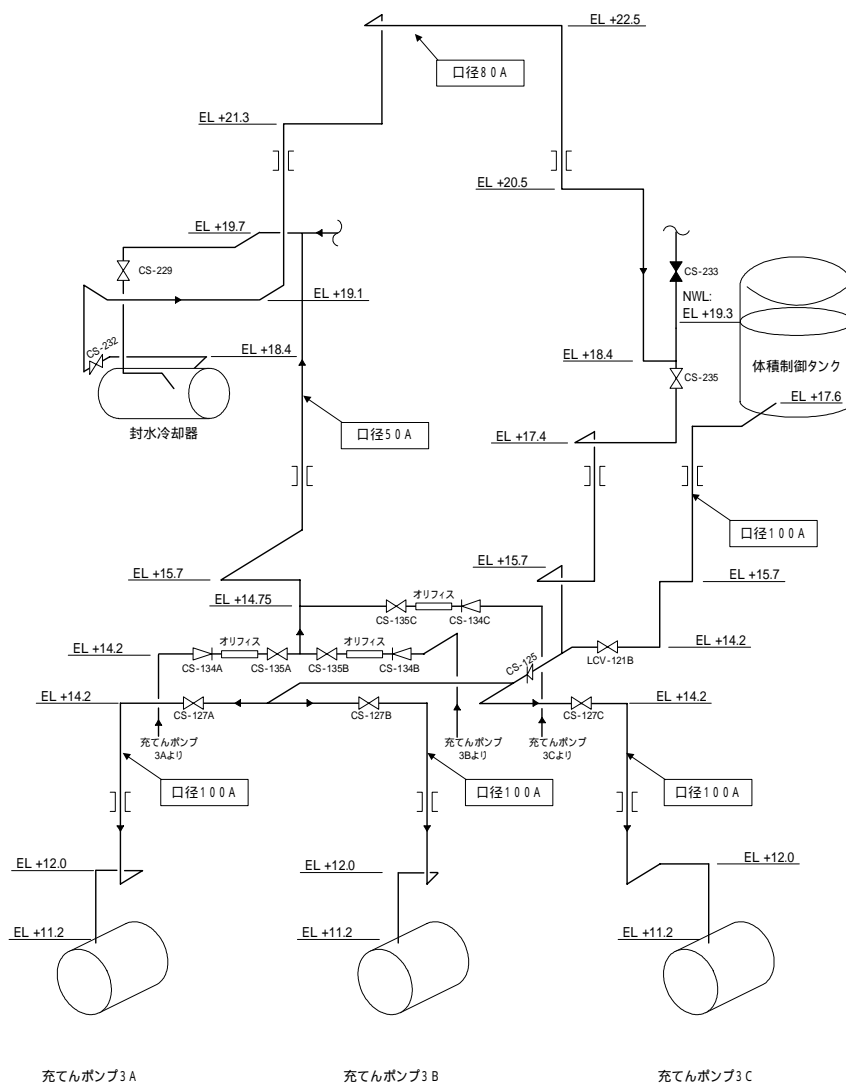
サイクル	状態	パラメータ	3 A	3 B	3 C
第 1	大気開放	電 流 (A)	48	-	50
		充てん流量 (m ³ /h)	22	-	29
	通常	電 流 (A)	45	45	45
		充てん流量 (m ³ /h)	39 / 2 台	39 / 2 台	39 / 2 台
第 2	大気開放	電 流 (A)	50	50	52
		充てん流量 (m ³ /h)	28	28	38
	通常	電 流 (A)	45	45	45
		充てん流量 (m ³ /h)	37 / 2 台	37 / 2 台	37 / 2 台
第 3	大気開放	電 流 (A)	-	52	-
		充てん流量 (m ³ /h)	-	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

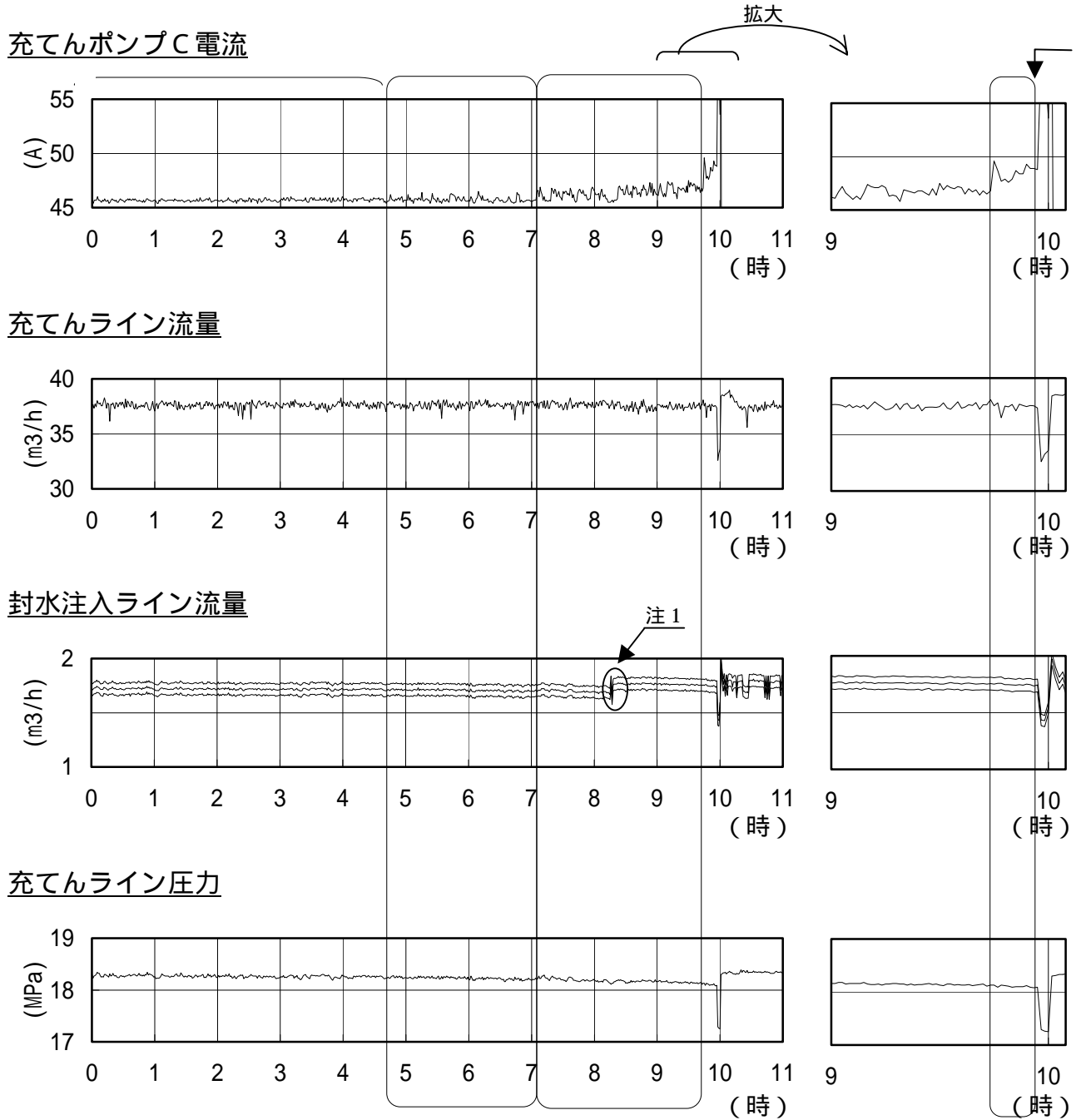
- ・ 充てんポンプ 3 A , 3 B の入口配管は 3 C 入口配管側から分岐しており、配管圧力損失は、充てんポンプ 3 C に比べ、3 A , 3 B の方が大きいことが分かった。

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; text-align: center;"> <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> <tr> <th style="text-align: left;">時刻</th> <th>4:45以前</th> <th>4:45頃～7:05頃</th> <th>7:05頃～9:45頃</th> <th>9:45頃～9:57頃</th> <th>9:57頃</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="text-align: left;">充てんポンプC電流</td> <td>安定</td> <td>漸増</td> <td>増加 振れ大</td> <td>ステップ状に増加</td> <td>急増</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">充てんライン流量</td> <td>安定</td> <td>変動なし</td> <td>変動なし</td> <td>低下</td> <td>急減</td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">封水注入ライン流量</td> <td>安定</td> <td>わずかに低下</td> <td>低下</td> <td>低下</td> <td>急減 <small>（「RCP封水注入流量低」 警報発信（設定値1.5m³/h））</small></td> </tr> <tr> <td style="text-align: left;">充てんライン圧力</td> <td>安定</td> <td>わずかに低下</td> <td>低下</td> <td>低下</td> <td>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 <small>（「RCP封水注入流量低」 警報発信（設定値1.5m³/h））</small>	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 <small>（「RCP封水注入流量低」 警報発信（設定値1.5m³/h））</small>																																
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)

参考資料目次

- 1．用語集
- 2．充てん / 高圧注入ポンプ軸損傷の海外事例

用語集

用語	解説
え	
延性破面	延性のある金属が伸びきって引きちぎられた時に観察される破面
お	
応力拡大係数 (K 値)	ひびの割れの形状とひび割れの先端に加わる引張力 (荷重条件) によって決まる数値で、この数値とひび割れの進展速度を関係付けることにより、ひび割れの進展を予測するのに用いられる。 クラック先端付近に分布する応力の強さの程度を示す係数であり、下式で示される。 $K = \sqrt{\frac{\sigma}{a}}$ ここで、 σ : 応力, a : クラック深さである。
応力集中係数	穴や切欠きを持つ板などに荷重が負荷されると、穴や切欠き先端の付近では穴や切欠きのない箇所に比べ高い応力が発生する。穴や切欠き先端近くの局所的な最大応力と全断面積に作用する応力の比を、応力集中係数という。
応力腐食割れ	特定の腐食環境におかれた金属材料が、持続的な引張応力のもとで時間依存型の脆性的割れを起こす現象をいう。一般に合金は割れ易いが、純金属では極めて割れにくい。応力と腐食作用が同時に働くことが必要条件で、応力のみ、あるいは弱い腐食環境中でも割れが発生する。発生原因は、材料、環境、応力の3つの要因が重複した場合である。
オリフィス	管路の途中に取り付けて、流量や圧力を制限する装置
か	
化学体積制御設備	加圧水型原子炉において、1次冷却材の一部を1次冷却材低温側配管から抽出し、充てんラインを経て、他の1次冷却材低温側配管に戻すシステムであり、 1次冷却材保有量を適正に調節する。 反応度制御のため、1次冷却材中のホウ素濃度を調整する。 1次冷却材中の核分裂生成物、腐食生成物等の不純物を除去し、 1次冷却材の水質を維持する。 などの機能を有する。
ガスモニタ	施設内にある排気筒から排出されるガス濃度、主として Ar-41、Kr-85 などの不活性ガスを連続に測定する放射線監視設備。
硬さ (ビッカース硬さ)	正四角錐ダイヤモンド圧子を用い、試験片の表面にくぼみをつけたとき、くぼみの対角線の長さを測り表面積を求め、荷重をこの表面積で割った単位面積当たりの荷重をもって硬さとする試験において得られる値。

用 語 集

用 語	解 説
き	
曲率半径	曲線上の各点の近くで曲線をできるだけよく近似する円（曲率円）の半径。曲率半径は曲線の湾曲が穏やかなほど大きくなる。
く	
偶力	異なる作用線上にあって、大きさが等しく平行で逆向きの二つの力。物体を回転させるはたらきをもつ。
こ	
高サイクル疲労	それだけでは、材料に破壊をもたらすほどの応力でもなくとも、材料の形状等によっては、繰返して応力またはひずみを加えたことで発生する材料の破壊現象を疲労破断または疲労破壊と呼び、破壊までの繰返し数が1万～10万回以上の場合を高サイクル疲労と言う。
し	
充てんポンプ	1次冷却系統から抽出した1次冷却水を浄化した後、再び1次冷却系統へ戻すためのポンプ
浸透探傷検査（PT）	供試体表面に開口している傷を目でみやすくするため、蛍光物質または可視染料の入った高浸透性の液（浸透液）を浸透させた後、余分な浸透液を除去し現像剤により浸透指示模様として観察する方法である。
す	
ストライエーション	電子顕微鏡による疲労破面の観察において見られるしま模様。繰返し荷重のサイクルに対応しており、その数や間隔からひび成長過程の情報が得られる。
そ	
組織状模様	疲労破面に現れるミクロ的破面模様的一种であり、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。

用語集

用語	解説
た	
体積制御タンク	1次冷却材中の溶存水素濃度を制御するため通常運転中は水素で加圧している。化学体積制御設備の一部としてタンク気相部に1次冷却材をスプレーすることで、1次冷却材中に含まれている核分裂生成物を気相部に開放し、水素とともに気体廃棄物処理系統へ導き処理する。また、充てんポンプのヘッドタンクとしての機能を有する。
ダイヤルゲージ	測定する物に当てた測定棒のわずかな動きを歯車機構で拡大して指針の回転に変え、100分の1mm(高精度のものは1000分の1mm)の精度で指示する計器。
て	
ディンプル	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。
電子線マイクロアナライザー	EPMA : Electron Probe Micro Analyzer 非常に細く絞った電子線を試料に照射し、分析エリアから発生する各元素に特有なX線(特性X線)を検出することで、試料の微量分析(元素同定、定量分析および化合物特定等)を行う装置である。
と	
等価応力	材料証明書等に記載されている降伏応力、引張強さは、単軸の材料試験(引張試験等)から得られた値である。 しかしながら、実機部材に作用する応力は多軸応力であるので、単軸の材料試験から得られた疲労強度を用いて疲労評価を行うには、多軸応力を単軸の相当応力に換算する必要がある。 このように多軸応力を簡易に単軸応力に換算したものを「等価応力」という。
ね	
ねじり応力	材料をねじるように働くその物体内部に生ずる力。
は	
バイト	旋盤・平削盤などに用いる切削用の刃物。
破面観察	損傷部位の破面を観察することにより、割れがどのような条件で生じたかを調べる検査。

用語集

用語	解説
ひ	
ビーチマーク	<p>ビーチマークは、疲労破面に観察される特徴的な破面模様の1つで、破面上においてき裂の進展方向に対して垂直な曲線状の模様である。疲労き裂の進展過程で作用応力や環境などき裂の進展速度に影響を及ぼす何らかの条件変化が生じた場合に形成され、ビーチマークの形状は条件変化が生じた時点でのき裂先端形状を表す。</p> <p>したがって、実機の疲労破面において観察されるビーチマークは、運転条件等の変化に対応していると考えられることから、運転履歴が明確な場合には、き裂進展速度や作用応力が推定できることもある。繰返し加わる力により生じた破面に現れる巨視的な貝殻模様。</p>
引張応力	材料に引張荷重が加わった時にその物体内部に生ずる力。
疲労	材料は繰返し応力のもとでは、通常、静的強度よりはるかに低い応力によっても破壊を起こす。このような現象を材料の疲労という。
疲労強度	ある繰返し回数が加えられた時に、材料に割れが発生する応力振幅のことを言う。
疲労限(度)	疲労き裂は、繰返し負荷される変動応力(ひずみ)によって発生するが、負荷される変動応力(ひずみ)がある値以下になると繰返し回数がいくら大きくなってもき裂は発生しない。この変動応力(ひずみ)のしきい値を「疲労限(度)」という。
ふ	
封水注入(系統)	1次冷却材ポンプのシール部の潤滑と清浄度保護のため、高圧水を供給する系統。
封水注入フィルタ	封水注入系統に設置されているフィルタで、1次冷却材ポンプシール面に対し有害である浮遊物を取り除く。
封水戻り(系統)	1次冷却材ポンプのシール部の潤滑と清浄度保護を終えた注入水が冷却器を通して充てんポンプ入口ラインに戻ってくる系統。
腐食ピット	腐食(金属材料が使用環境中の物質と反応して金属イオンまたは非金属の化合物となって摩耗していく現象)でできたくぼみ。
フレットィング	<p>互いに押し付けられ、接触している2物体が相対的に微小振幅の繰返しすべり運動を行う現象を「フレットィング」という。</p> <p>2物体の接触面に外部荷重に起因する繰返し応力が作用した時、その応力の働いている方向や大きさによってはその部分に疲労割れが生じる。これを「フレットィング疲労割れ」という。</p>

用語集

用語	解説
へ	
平均応力	疲労破壊を起こすには繰返し応力が必要である。繰返し応力の上限と下限応力の絶対値が等しくない場合、上限と下限応力の平均値を「平均応力(σ_m)」と定義している。 「平均応力」が引張応力の場合には、疲労強度を低下させる。
変動応力	疲労破壊を起こす繰返し応力から「平均応力」を差し引いた値の 1/2 を「変動応力(σ_a)」と定義している。 「変動応力」はき裂の進展評価においても重要である。
ほ	
補助建屋サンプタンク	原子炉建屋および原子炉補助建屋内の床ドレン等の廃液を貯蔵するタンク
ま	
曲げ応力	部材に曲げモーメントが生じているときの部材内応力。材軸に垂直な断面では中立軸を境として、上下に引張応力あるいは圧縮応力となる。
マルテンサイト組織	鋼を高温から急冷(焼入れ)した時、その組織によって定まるMs点(マルテンサイト変態開始温度)以下の温度で生成する微細な針状組織を言う。SUS403は、Si, Crを下げて靱性、衝撃値を保証した低炭素マルテンサイト系ステンレス鋼である。
み	
ミニマムフローライン	ポンプの過熱や過大振動を防止するために、ポンプの最低流量を確保するためのライン。
も	
モニタリングポスト	周辺監視区域境界付近の空間放射線量率を測定する放射線監視設備。
り	
粒界割れ	割れが結晶粒界に沿って、進行している場合のこと。
粒内割れ	割れが結晶粒を貫通している場合のこと。
や	
焼嵌	鋼の熱膨張を利用した「機械的接合」。例えば穿孔穴を熱して膨張させ、そこに膨張寸法に合わせた棒を入れて穿孔穴を冷却すると、収縮した穴は棒を噛んで抜けなくなる。

用 語 集

用 語	解 説
ゆ	
有限要素法(FEM)	解析の対象となる物体を、三角形や四角形あるいは六面体などの「要素」に分割して計算し、これらの要素は単純な形状をしているので、外力が加わった際に要素がどのような形に変形するのかがコンピュータで計算する。こうして変形した要素を全部組み合わせることにより、複雑な形状をした物体の変形が計算できる。要素の数は数百個程度の場合もあり、場合によっては数十万個にもなる。
ろ	
ロータ	機械部品で回転するものの総称。主軸と羽根車が組み立てられた状態をさす。
R	
R 止まり	コーナ曲率が溝底と接する箇所
N	
N R C (Nuclear Regulatory Commission)	米国原子力規制委員会(1974年設立)。第1の使命は、原子炉、核物質、核廃棄物施設からの放射線から公衆の健康と安全ならびに環境を保護することであり、発電用原子炉、非発電用研究炉、試験炉、訓練炉などの原子炉、核燃料サイクル施設、核物質の医療・研究・工業利用、核物質の輸送・貯蔵、核物質と核廃棄物の処分などの規制を行う。

充てん / 高圧注入ポンプ軸損傷の海外事例

No	発生日時	プラント名称	事象概要	伊方発電所 3号機
1	1991年 2月18日	セコヤー 1号機	<p>運転中、充てんポンプ 1B-1 の流量低下とモータ電流の上昇のため原子炉停止。当該ポンプ羽根車肩部にひどい摩耗があり、第 11 段羽根車の近くの位置の軸に 280 度に渡ってき裂が発見された。</p> <p>直接原因：低応力高サイクル疲労 起回事象：特定されていない。</p>	原因の詳細情報がないため断定は出来ないが、伊方 3 号機との類似性は否定できない。
2	1992年 2月2日	キャロウェイ	<p>運転中、充てんポンプ吐出流量ゼロおよび R C P 封水圧力ゼロを検出。分解してみると、軸がバランスドラムロックナットとバランスドラム嵌合部の間で破断していることが分かった。</p> <p>直接原因：低応力高サイクル疲労 起回事象：過去に起きた吸い込み水喪失による動的荷重と推定</p>	伊方 3 号機においては、キャロウェイで発生したような約 7 分間の吸い込み水喪失の経験はない。
3	1993年 3月18日	シャロンハリス	<p>運転員は、充てん / 高圧注入ポンプ B の軸破損を示す兆候（モータ電流値高、充てん流量低、及び充てん圧力低）のため当該ポンプを切り替えた。点検の結果、ポンプ軸がバランスドラムロックナットの下で破断しているのが発見された。</p> <p>直接原因：低応力高サイクル疲労 起回事象：過去に起きた吸い込み配管中でのガス巻き込みによるウォーターハンマと推定</p>	伊方 3 号機においては、シャロンハリスで発生したようなウォーターハンマ事象の経験はない。
4	1994年 2月7日	セコヤー 2号機	<p>セコヤー 2 号機で充てん / 高圧注入ポンプ軸が破損し、保安規定の要求によりプラントを停止した。軸が破損したポンプは破損の前に劣化の兆候は全くなく、他の軸破損事例と同じように、バランスドラムロックナットの近傍で破損していた。</p> <p>直接原因：低応力高サイクル疲労 起回事象：過去に起きた吸い込み配管中でのガス巻き込みによる動的荷重と推定</p>	ガス巻き込み事象の詳細情報がないため断定は出来ないが、伊方 3 号機との類似性は否定できない。
5	1997年 9月12日	ピーパーバレー 2号機	<p>充てん / 高圧注入ポンプの定期運転中、性能規定を満足しないため点検した結果、ポンプ軸にき裂があることが分かった。</p> <p>直接原因：低応力高サイクル疲労 起回事象：吸い込み配管中でのガス巻き込みによる動的荷重と推定</p>	破損部位、ガス巻き込みの詳細情報がないため断定は出来ないが、伊方 3 号機との類似性は否定できない。

(NRC ホームページより抜粋)