

玄海原子力発電所 3号機 C 充てんポンプの  
主軸折損の調査結果 (概要)

1. 調査結果

(1) 主軸に関する調査

- ・主軸折損部の破面観察の結果、破面は全体的に平坦であり、繰り返し力が作用した場合に破面に現れる模様の一つである複数のビーチマーク (貝殻模様) や組織状模様が認められており、疲労破壊の様相を示していたことから、応力集中、過大応力及び流体振動による疲労が、主軸折損の発生要因と考えられる。
- ・主軸割りリング溝部のコーナ R 部の曲率半径 (以下、「コーナ R 部」という。) を測定した結果、製作時の図面指示値 (0.8mm) より小さい値 (0.44 ~ 0.70mm) であることを確認した。  
なお、A 充てんポンプについても図面指示値より小さい値 (0.51 ~ 0.69mm) であることを確認した。
- ・割りリング (6 段) と主軸の接触痕が認められたことから、羽根車焼きばめに伴う割りリングと主軸の接触による応力が発生したと考えられる。
- ・羽根車 (1 段) 吸込部の軽微な面荒れ (エロージョン) が今回の調査で初めて認められた。なお、このような面荒れは前回の分解点検時までは認められていない。

(2) プラントの運転状況に関する調査

- ・主軸折損部の破面観察の結果、破面は疲労破壊の様相を示していたことから、振動に関する要因を調査した結果、体積制御タンクからポンプへのガス流れ込みがひとつの要因として推定された。
- ・体積制御タンクからポンプへのガス流れ込みによる影響を確認するため、メーカ研究施設の試験装置で試験を行った結果、体積制御タンクが低水位となる状態が継続した場合、同タンクから気泡 (ガス) が持ち込まれることによりポンプ入口の水平配管部にガス溜まりが発生し、このガスがポンプへ流入することを確認した。
- ・現在実施中の第 13 回定期検査 (平成 22 年 12 月から開始) においては、過去の定期検査と比較して、体積制御タンクを低水位で運転した期間が長いこと (通常の定期検査の約 1 日に対して、今回の定期検査では約 8 ヶ月であった) を確認した。そのうち、C 充てんポンプを運転した期間は約 2 ヶ月であった。
- ・以上のことから、体積制御タンクからポンプへのガス流れ込みにより主軸に振動が発生したと推定した。

(3) 事象発生時期の推定

- ・主軸が振動する要因となる体積制御タンクを低水位で長期間運転した実績は今回の定期検査時のみであること、これまでの分解点検まで確認されていなかった羽根車 (1 段) 吸込部の軽微な面荒れ (エロージョン) が、今回認められたことから、き裂は今回の定期検査時に発生したものと考えられる。

2. 主軸折損の推定原因

調査結果から、以下のとおり主軸折損の原因を推定した。

- ・主軸製作時、割りリング溝部の加工方法により、コーナ R 部が小さく、応力が集中する状態となっていた。さらに、羽根車焼きばめに伴う割りリングと主軸の接触により、主軸折損部 (割りリング溝部) に応力が発生していた。
- ・今回の定期検査では、体積制御タンクを低水位で長期間運転したことにより、ポン

プ入口の水平配管部にガス溜まりが発生し、このガスの流れ込みで生じた振動により主軸の割りリング溝部に応力が発生した。

- ・これらが重畳することによって、主軸に過大な応力が加わり、主軸材料の疲労限度を超え、初期き裂が発生し、その後のガスの断続的な流れ込みにより発生する振動によってき裂が進展し、主軸が折損したと推定される。

### 3. 過去の事例との関連性

四国電力伊方発電所3号機及び当社川内原子力発電所1号機においても同様なポンプ（充てんポンプ及び充てん/高圧注入ポンプ）の主軸折損の事例があることから、今回の主軸折損との関連性について検討を行った。

#### （1）四国電力伊方発電所3号機の事例

コーナR部が小さい（0.3mm）ことによる応力集中、羽根車焼きばめに伴う割りリング（スプリットリング）と主軸の接触による応力の発生及び定期検査中の体積制御タンク大気開放運転によるミニフローラインからのポンプへの気泡（ガス）の流れ込みによる機械振動の発生が重畳し、主軸折損に至ったと推定された。

このため、充てんポンプ運転時に体積制御タンクを加圧し、充てんポンプにガスの流れ込みがないようにするとともに、新たに製作する主軸については、加工方法を見直し、コーナR部を大きく（1.2mm）すること及び焼きばめ時の主軸の温度管理を行い、応力集中及び応力発生を抑制した対策品とすることとした。

#### （2）当社川内原子力発電所1号機の事例

コーナR部が小さい（0.2mm）ことによる応力集中及び小流量運転（ミニフロー運転等）時のポンプ内の不均一流れに起因した振動により主軸の割りリング溝部での曲げ応力の発生が重畳し、主軸折損に至ったと推定した。

このため、全ての充てん/高圧注入ポンプの主軸を、加工方法を見直し、コーナR部を大きくした対策品へ取り替えるとともに、主軸に振動が発生する時間をできるだけ抑制するため、充てん/高圧注入ポンプの運転手順を変更し、小流量運転の時間短縮を行った。

#### （3）今回の事象との共通要因

コーナR部が小さいことによる応力集中、羽根車焼きばめに伴う割りリングと主軸の接触による応力の発生及びポンプへのガス流れ込みによる振動の発生の重畳が共通要因として挙げられた。

### 4. 過去の事例に対する玄海3号機の対応状況

過去の事例と今回の事象での共通要因に対する玄海3号機での対応状況を以下のとおり確認した。

#### （1）伊方3号機に対する玄海3号機の対応状況

- ・玄海3号機への水平展開を行う際、ガス流れ込みに関しては、体積制御タンク大気開放運転によるミニフローラインからのガス流れ込みの防止に重点を置いた検討を行った。

また、主軸の継続使用の検討において、コーナR部及び割りリングと主軸の接触については、伊方3号機で確認された条件（コーナR部が小さく割りリングと主軸の接触あり）としたが、ガス流れ込みについては、体積制御タンク大気開放運転であっても、ガスの量がごくわずかであったことから、ポンプへの流れ込みは無視できることを確認し、ガス流れ込みによる主軸の振動は発生しないとの条件

で応力評価を行い、主軸折損の可能性はないとの結果が得られた。このことから、主軸の取り替えは不要と判断した。

(2) 川内1号機の事例に対する玄海3号機の対応状況

- ・玄海3号機への水平展開を行う際、小流量運転時のポンプ内の不均一流れに関しては、ポンプの起動時・停止時に小流量になることは避けられないため、運転手順を変更し、小流量運転の時間を短くすることにした。

また、主軸の継続使用の検討において、コーナR部については、川内1号機で確認された条件(コーナR部が小さい)とし、小流量運転時のポンプ内の不均一流れがあるとの条件で応力評価を行ったが、主軸に過大な力が加わることがなく、主軸折損の可能性はないとの結果が得られた。このことから、主軸の取り替えは不要と判断した。

(3) 過去の対応を踏まえ検討すべき項目

- ・ミニフローライン以外からのガス流れ込みの可能性等、主軸の振動が発生する要因を十分に検討せず、抽出しなかったこと。
- ・主軸を新規に取り替えを行うものについては、コーナR部を大きくするなど、強度を確保できている対策品に交換するとしていたが、継続使用の既存品については、主軸の振動発生要因が十分に抽出されずに評価し、主軸のコーナR部が図面指示値より小さいものでも問題ないと判断し、使用したこと。

5. 対策の検討

今回、主軸折損に至った直接原因及び過去の事例の対応を踏まえ、以下のとおり対策を検討した。

(1) 主軸割りリング溝部の応力集中及び過大応力に対する検討

主軸については、何らかの要因により振動が発生したとしても折損に至らないよう対策することが必要である。

玄海3号機の主軸折損を踏まえた応力評価では、主軸の応力を評価する上で最も厳しい条件となる主軸の最大振れを想定し、コーナR部が図面指示値(0.8mm)以上に管理されていれば、主軸の健全性は確保されることを確認した。

また、羽根車焼きばめ時に主軸の温度を室温近くまで冷却した状態で焼きばめを実施することにより、主軸の収縮に伴う割りリング溝部に発生する応力を抑制することができる。

このことから、主軸を対策品に取り替えることで、応力集中及び応力発生を抑制を行うことができる。

(2) ガス流れ込み等による主軸の振動の抑制に対する検討

主軸の対策を行う一方、主軸の振動を可能な限り抑制することが必要である。

各運転手順を再確認し、ガス流れ込みによる主軸の振動に対する検討を行った結果、定期検査時に体積制御タンクの低水位運転を長期間実施しないことで、ポンプへのガス流れ込みを防止できることを確認した。また、吸い込み圧力や小流量運転等、他の振動要因についても再確認を実施し問題ないことを確認した。

更に、万全を期して充てんポンプ入口にガスを抜くベントラインを設置することで、運転状態に係らず充てんポンプへのガス流れ込みを防止することができる。

( 3 ) 主軸の継続使用に対する検討

応力集中及び応力発生抑制を行った対策を施していない主軸を継続して使用する場合は、評価上最も厳しい条件である主軸の最大振れを想定した評価を行うことにより、主軸自体の強度を確保できていることを確認する必要がある。また、図面指示値等を満たさない影響を慎重に評価する必要がある。

6 . 対 策

( 1 ) 主軸の対策品への取り替え

玄海3号機の全ての充てんポンプの主軸を、割りリング溝部コーナR部の寸法公差を定め、図面指示どおりの曲率半径で製作し、羽根車焼きばめ時の温度管理を実施し、強度を確保した対策品に現在実施中の第13回定期検査で取り替える。

( 2 ) 主軸の振動抑制対策

a . 体積制御タンク水位に関する運用改善

定期検査時においては、ガスの流れ込みの要因となる体積制御タンクの低水位運転を長期間実施しないことを運転手順に反映する。

b . 充てんポンプ入口ベントラインの設置

充てんポンプへのガス流れ込み防止に万全を期する観点から、充てんポンプ入口にベントラインを現在実施中の第13回定期検査で設置する。

( 3 ) 安全上重要なポンプに対する対策

a . 今後の主軸の調達にあたっては、以下の事項をメーカーへ要求し、応力集中及び応力発生抑制について、要求どおりに製作されたものであることを記録により確認する。

- ・ 割りリング溝部コーナR部の寸法公差を定めること。
- ・ 割りリング溝部コーナR部に不連続を生じさせない加工方法により、図面指示どおりの曲率半径で製作すること。
- ・ 羽根車焼きばめ時の温度管理を実施し、主軸と割りリングの接触を防止すること。
- ・ 主軸の応力評価においては、割りリング溝部コーナR部の値として寸法公差の下限値を用いること。

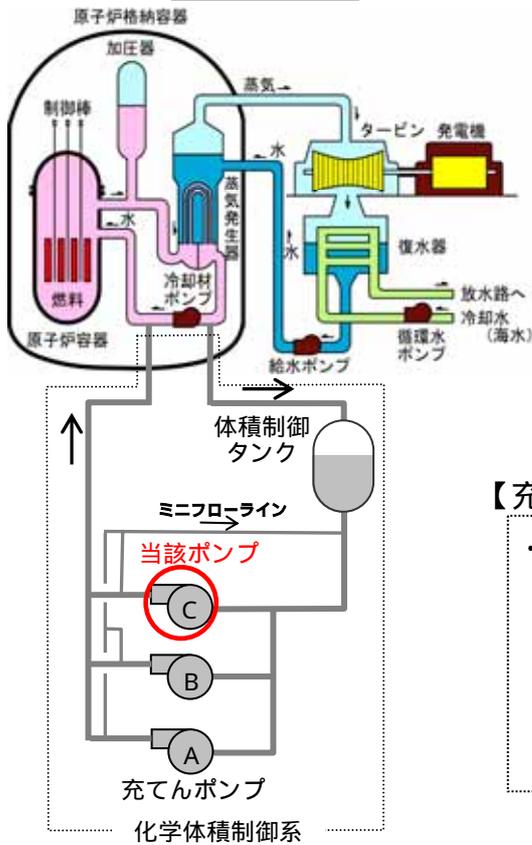
b . 今後のトラブル事象において、水平展開の対象となったポンプの対応の検討を行う場合は、事象発生の可能性のある全ての要因を洗い出し、最も厳しくなる条件を想定した評価を行い、主軸自体の強度が確保できていることを確認する。

なお、同仕様である玄海4号機充てんポンプについても、主軸の対策品への取り替えを実施し、体積制御タンクの低水位運転を長期間実施しない運用とするとともに、充てんポンプ入口ベントラインを現在実施中の第11回定期検査で設置する。

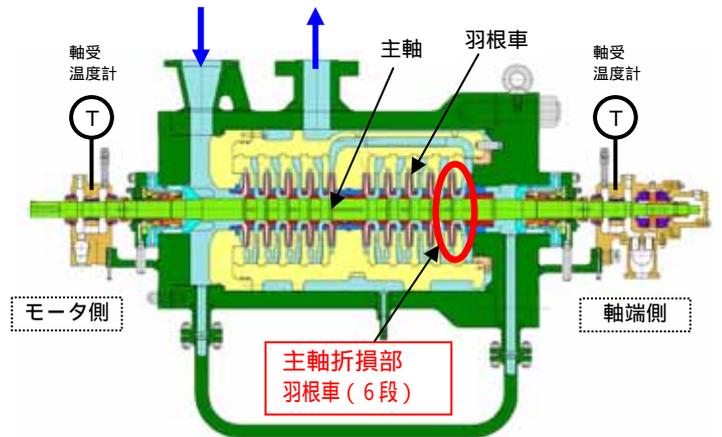
以 上

# 玄海原子力発電所 3号機 充てんポンプ 主軸折損事象の概要

概略系統図



充てんポンプ構造図



## 【充てんポンプ】

・1次冷却材系統から抽出した1次冷却材の浄化やほう素濃度の調整を行った後、冷却材を再び1次冷却材系統に戻すためのポンプ

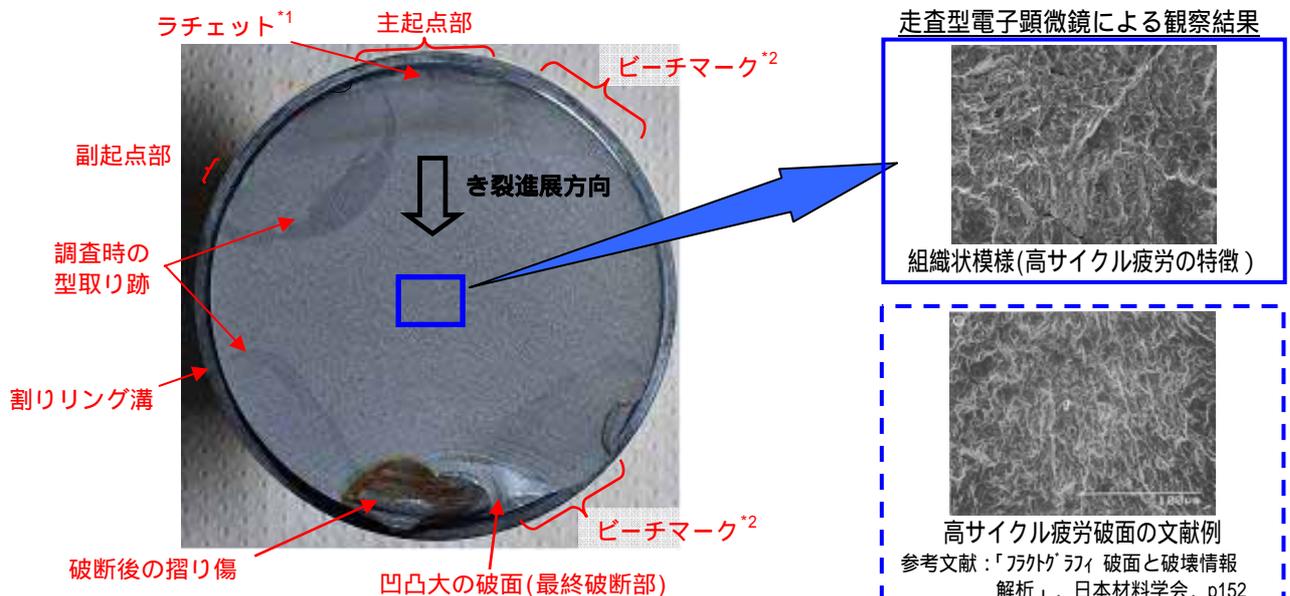
型式 : 横置うず巻式  
台数 : 3台  
本体材料 : ステンレス鋼 (接液部)  
容量 : 45.4 m<sup>3</sup>/h  
揚程 : 1,770 m

A, B, Cの3台設置しており、そのうち1台を運転している

## 主軸折損状況



## 主軸破面の観察結果



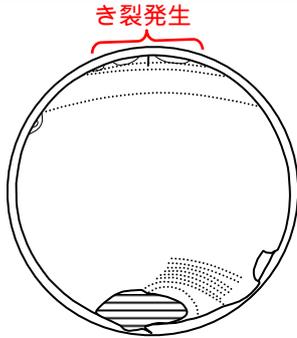
\*1: 複数のき裂発生起点の破面が合体して生じた段差

\*2: 疲労破面に観察される特徴的な破面模様の1つ

## 事象発生 の 推定メカニズム

### 1. 初期き裂発生

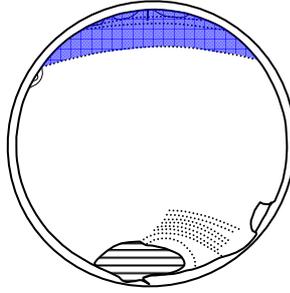
体積制御タンクを低水位で長期間運転したことによりポンプへのガス流れ込みが生じ、主軸に振動が発生し応力増加  
6段割りリング溝部でき裂発生



初期き裂発生

### 2. き裂進展

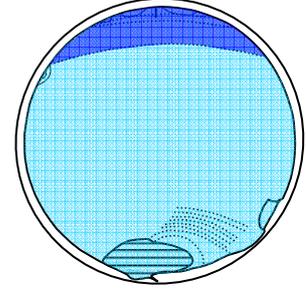
体積制御タンク低水位運転時のポンプへのガス流れ込みにより応力増加  
き裂が徐々に進展



き裂進展

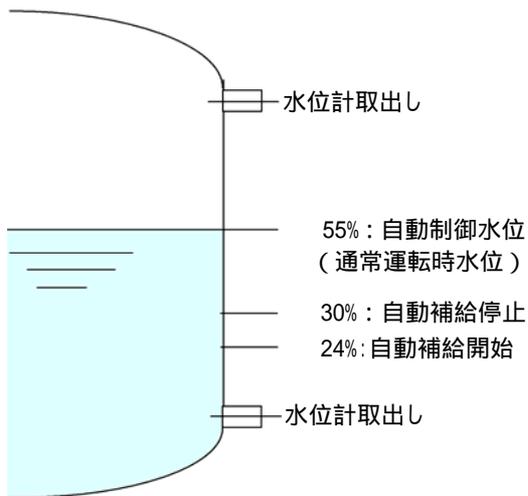
### 3. 主軸折損

き裂が大きくなり折損  
主軸折損



主軸折損

## 体積制御タンクの水位設定値



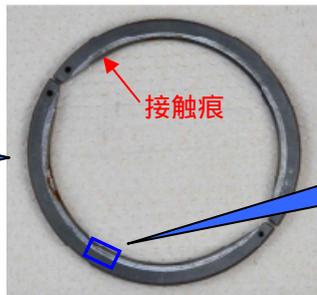
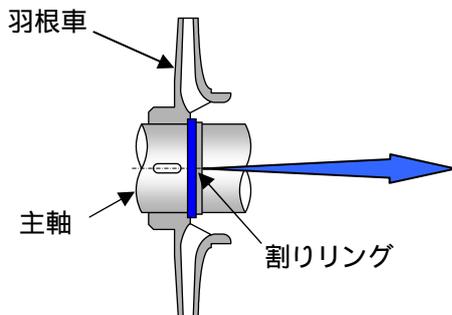
### 長期間低水位状態となった理由

定期検査時は、1次冷却材のサンプリング等により冷却材の一部が系統外へ取り出されるため、体積制御タンクの水位が低下する。この結果、タンク水位は自動補給・停止水位で保持されることとなった。

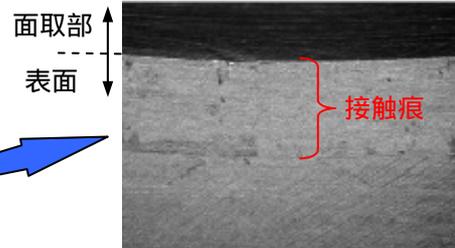
### <参考>

通常運転時は、燃料の反応度が低下する分を補うため、1次冷却材のほう素濃度を調整する補給操作等を行うことから、水位は自動補給・停止水位より高めに調整され、体積制御タンクが低水位状態で長期間運転されることはない。

## 割りリングと主軸の接触



割りリング(6段)軸端側



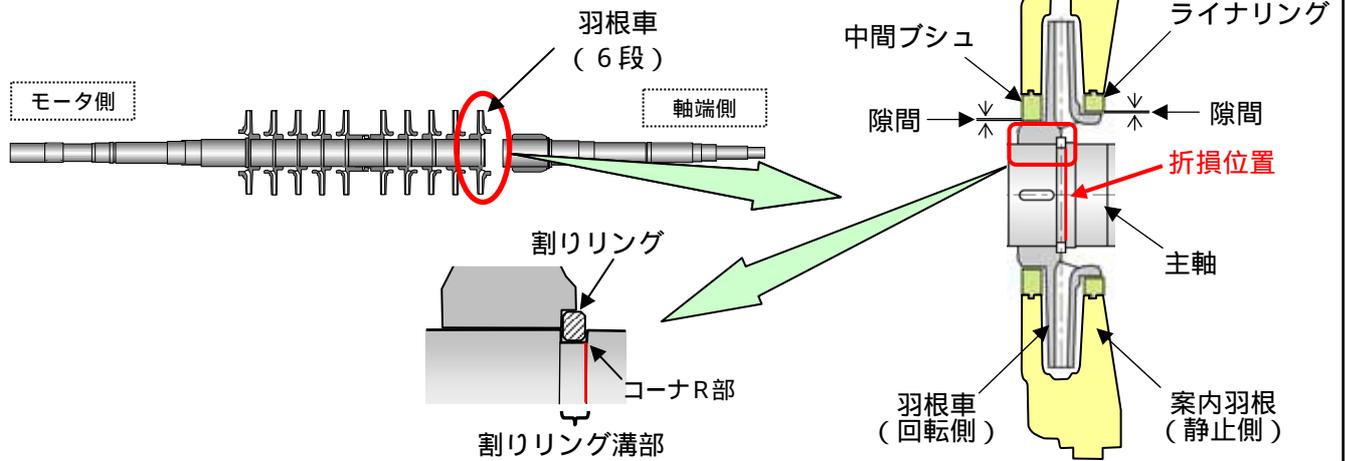
割りリング(6段)と主軸の接触痕が認められたことから、割りリングと主軸の接触による過大な応力が発生したと考えられる。

### <参考>

主軸との接触による過大な応力が発生していない割りリングには接触痕が認められない。

< 推定原因と対策 >

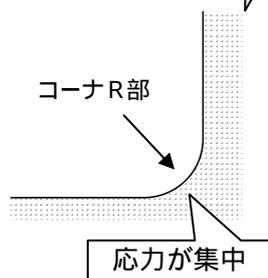
主軸全体及び折損部の構造図



割りリング溝部の形状

当該ポンプのコーナR部は、製作時に、図面指示より小さく加工され、応力集中が大きくなったと考えられる。

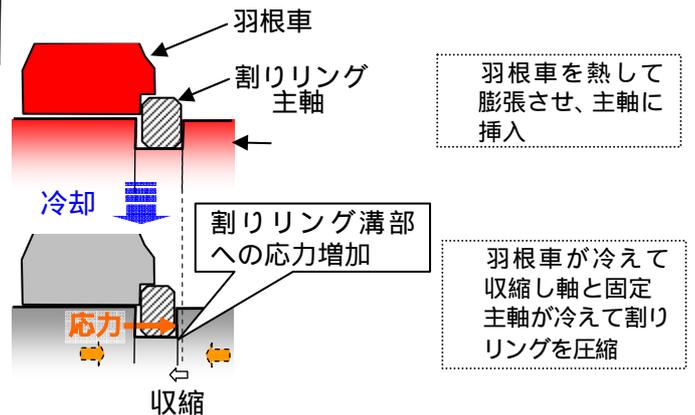
割りリング溝部の加工方法により、コーナR部が小さくなる可能性がある。



**対策:** コーナR部の寸法公差を定め、加工方法を見直し、図面指示どおりの曲率半径で製作する。

羽根車焼きばめに伴う割りリングと主軸の接触

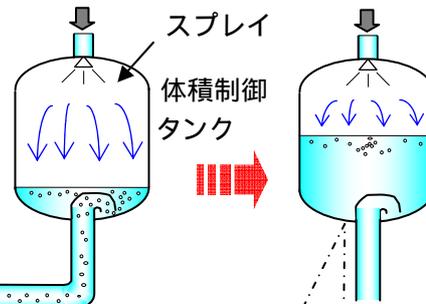
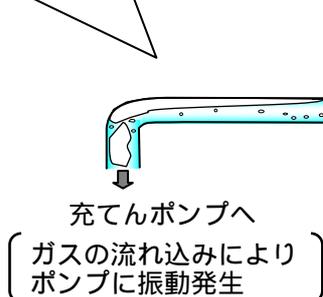
羽根車焼きばめ時に温められた主軸が冷却される過程で割りリングを圧縮し、応力が発生したと考えられる。



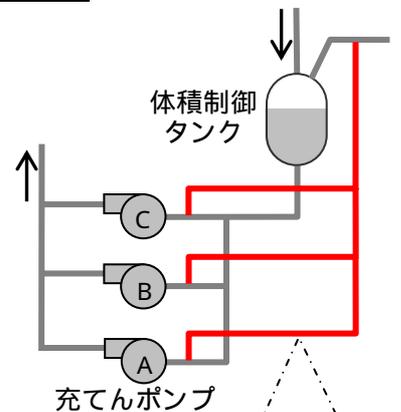
**対策:** 羽根車焼きばめ時の温度管理を行うことにより、主軸が十分冷えた状態で羽根車を挿入する。

充てんポンプへのガス流れ込みの状況概略図

定期検査時、低水位で長期間運転したことに伴いガスが水平配管に流入  
水平配管の上層にガスの滞留が発生し、溜まったガスが充てんポンプに流れ込む



**対策:** 低水位運転を長期間実施しない。



**対策:** ガスを抜くためのベントラインを設置する。