

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次冷却水が漏れ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ーで、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ー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