

伊方発電所第 1 号機

湿分分離加熱器 1 B 蒸気整流板溶接部の割れについて

平成 1 8 年 6 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 .事象発生の施設	1
4 .事象発生時の運転状況	1
5 .事象発生の状況	1
6 .時 系 列	1
7 .状況調査	2
8 .詳細調査	2
9 .疲労評価	6
1 0 .推定原因	6
1 1 .その他の同じ箇所の調査	7
1 2 .湿分分離加熱器の溶接部の健全性調査	8
1 3 .対 策	8
1 4 .伊方2、3号機の対応	8

1. 件名

伊方発電所第1号機湿分分離加熱器1B蒸気整流板溶接部の割れについて

2. 事象発生の日時

平成18年6月5日 10時30分(確認)

3. 事象発生の施設

蒸気タービン設備 湿分分離加熱器1B

4. 事象発生時の運転状況

定格熱出力一定運転中

5. 事象発生の状況

伊方発電所第1号機(定格電気出力566MW)は、定格熱出力一定運転中(以下、「運転中」という。)のところ、6月5日10時30分、保守員が湿分分離加熱器1Bの内部からの異常音を確認したため、プラントを停止し、内部点検を行った。

この結果、蒸気整流板の溶接部に割れが発生していることを確認した。

(添付資料 - 1、2)

6. 時系列

6月5日

7時10分～7時35分 運転員によるパトロール実施(異常なし)

9時30分～9時40分 運転員が異音を検知

10時30分 保守員が異常音を確認

10時50分 負荷降下開始

11時49分 解列(発電機停止)

11時54分 タービン停止

18時37分 原子炉停止

6月6日

9時30分 マンホール開放および内部冷却開始

6月7日

5時49分 内部点検調査開始

7時10分 蒸気整流板溶接部の割れを確認

6月8日

15時55分 蒸気整流板溶接部の割れ部の切出し終了

7. 状況調査

異常音が確認された湿水分離加熱器 1 B について、外部および内部の目視点検等により状況を調査した。

(1) 外部点検調査

a . 外観点検

運転中において、外観の目視点検を行った結果、保温材の外れ等の異常および蒸気漏えい等のないことを確認した。

b . 異常音調査

異常音の騒音レベルの測定および聴診の結果、胴側マンホール付近より「カカタ」という連続した異常音を確認された。

(添付資料 - 3)

(2) 内部点検調査

湿水分離加熱器 1 B 内部の目視点検を行った結果、2 個ある蒸気整流板のうち入口ノズルから見て右側の蒸気整流板の溶接部に長さ約 4 5 c m (A 部) と約 3 5 c m (B 部) の割れを確認した。

なお、その他に、異常音の原因となるような部品脱落、割れの発生等の異常は認められなかった。

(添付資料 - 4、5)

8. 詳細調査

状況調査の結果、蒸気整流板の溶接部に割れが発生していたことから、この原因を究明するため、割れの詳細調査を要因分析図に従い実施した。

(添付資料 - 6)

(1) 設計および製作・施工調査

湿水分離加熱器 1 B は、平成 1 8 年 4 月に取替工事を実施しており、蒸気整流板の設計および製作・施工状況について調査を実施した。取り替えた湿水分離加熱器は、取り替え前のものとは異なる製作会社から購入したが、海外で使用実績のある設計に基づき製作されている。なお、蒸気整流板はこの設計に基づき海外で製作されたものである。

a . 設計調査

蒸気整流板の設計においては、設計会社の実績のある標準設計が採用されていることを確認した。

b . 製作・施工状況調査

製作記録を調査した結果、蒸気整流板の製作・施工に問題はなく、寸法・構造は、設計仕様どおりであることを確認した。

(添付資料 - 7)

c . 材料調査

蒸気整流板の材料について、材料証明書を確認した結果、所定の材料が使用されていること、および規格値を満足しており問題のないことを確認した。

(添付資料 - 7)

d . 溶接施工状況調査

蒸気整流板は、蒸気整流板本体(以下、「本体」という。)と内部プレートを溶接にて接続している。また、当該溶接部は溶接事業者検査対象外であることを確認した。

溶接施工状況を調査した結果、当該溶接部は、当該部製作会社にて社内認定された溶接士により、製作図面や溶接施工方法を明確にした溶接施工要領に基づき、施工されていた。溶接に係る検査については、検査手順書が定められており、これに基づき溶接方法、溶接材料、非破壊検査(浸透探傷検査)の実施、記録作成ならびに開先検査の実施が規定されているが、開先検査の記録を残すことまでは規定されていなかった。また、溶接検査記録を調査した結果、溶接方法、溶接材料および非破壊検査(浸透探傷検査)に問題ないことを確認したが、開先加工の状況は確認できなかった。

(添付資料 - 7)

また、湿分分離加熱器 1 B の調達に当たり、溶接事業者検査対象に関しては製作会社に対し品質監査を実施し、溶接施工管理について詳細な監査を行った結果、問題のないことを確認しているが、当該溶接部については製作会社が実施した溶接施工要領等の承認状況の確認にとどまっていた。

(2) 運転履歴調査

湿分分離加熱器 1 B の運転パラメータ(加熱蒸気流量・温度、蒸気圧力等)を調査した結果、問題のないことを確認した。

(3) 金属調査

蒸気整流板の割れ部の切出しを行い、金属調査を実施した。

a . 外観観察

(a) A 部

溶接部に、蒸気入口部の端部から長さ約 49 c m の割れが認められた。また、蒸気入口部には、内部プレートと本体とのこすれ跡が確認された。

(b) B部

母材および溶接部に、蒸気入口部の端部から長さ約37cmの割れが認められた。また、蒸気入口部には、内部プレートと本体とのこすれ跡が確認された。

(添付資料 - 8)

b . 破面観察

(a) A部

- ・全体的に破面どうしがぶつかりあったことによる打撃および摺動により摩耗した破面が認められた。
- ・内部プレートにおいては、蒸気入口部の端部から約3mmの範囲を除き、ルートフェイスと開先面が連続しており、開先先端部に未溶着部分が生じていることが認められた。
- ・破面に、蒸気の流れ方向と平行に連続した段差が付いていることが認められた。

(b) B部

- ・全体的に破面どうしがぶつかりあったことによる打撃および摺動により摩耗した破面が認められた。
- ・内部プレートにおいては、蒸気入口部の端部から約50mmの範囲を除き、ルートフェイスと開先面が連続しており、開先先端部に未溶着部分が生じていることが認められた。
- ・蒸気入口部の端部から約50mmの範囲は、内部プレートの母材部に割れが生じており、残る部分は溶接部の割れであった。
- ・破面に、蒸気の流れ方向と平行に連続した段差が付いていることが認められた。

(添付資料 - 9)

c . 断面ミクロ観察

(a) A部

- ・割れは、枝分かれの無い粒内割れであり、材料欠陥、腐食ピットは認められなかった。
- ・溶接部に、溶け込み不良が認められた。
- ・溶接部について、設計仕様では開先角度45度、深さ4.8mmのところ、開先角度は約30度、開先深さは最大約4mmであった。
- ・溶接部ののど厚寸法は、約4mmであった。
- ・2つの割れが接近し破断したことを示す屈曲（破面観察での段差）が確認されたことより、割れ進展部の起点は、溶け込み不良部および溶接外表面にあることが確認された。

(b) B 部

- ・割れは、枝分かれのない粒内割れであり、材料欠陥、腐食ピットは認められなかった。
- ・溶接部に、溶け込み不良が認められた。
- ・溶接部について、設計仕様では開先角度 45 度、深さ 4.8 mm のところ、開先角度は約 30 度、開先深さは最大約 4 mm であった。
- ・溶接部ののど厚寸法は、約 6 mm であった。
- ・2 つの割れが接近し破断したことを示す屈曲（破面観察での段差）が確認されたことより、割れ進展部の起点は、溶け込み不良部および溶接外表面にあることが確認された。

（添付資料 - 10、11）

d . 破面 S E M 観察

(a) A 部

割れの蒸気入口部および最終端部の溶接部にストライエーション状の模様が認められた。また、材料欠陥、羽毛状の組織は認められなかった。

(b) B 部

割れの間部および最終端部の溶接部にストライエーション状の模様が認められた。また、材料欠陥、羽毛状の組織は認められなかった。

（添付資料 - 12）

e . E D X （エネルギー分散型 X 線分光法）による分析

破面の元素分析を行った結果、鉄鋼材料に有害な不純物は、ごく微量であり問題ないことを確認した。

（添付資料 - 13）

f . 硬度測定

問題となる硬化は認められなかった。

（添付資料 - 14）

以上の金属調査により、考察できる事項は以下のとおりである。

- ・破面は、枝分かれのない粒内割れであり、破面の一部にストライエーション状の模様が認められたことから、疲労による割れの特徴を示している。
- ・溶接部は、溶け込み不良が認められるとともに、割れは、溶け込み不良部および溶接外表面から生じている。
- ・破面 S E M 観察結果から、応力腐食割れの特徴は認められなかった。
- ・硬度測定結果および断面ミクロ観察結果より、割れ発生の要因となるような異常な硬化組織は認められず、金属組織に問題はない。

(4) 付着塩分量測定

蒸気整流板の付着塩分量を測定した結果、判定値を満足しており問題は認められなかった。

(添付資料 - 15)

9. 疲労評価

詳細調査により、蒸気整流板溶接部の割れは疲労によるものと推定されるため、疲労評価を実施した。

評価の手順として、まず汎用流体解析コード (Fluent) を用いて、蒸気整流板に作用する流体加振力を算出する。次に、汎用構造解析コード (NASTRAN) を用いて、この流体加振力を板要素でモデル化した蒸気整流板に入力し、全体系の振動応答を算出する。その結果、大きな応力が生じた箇所を、汎用構造解析コード (ABAQUS) を用いて詳細にモデル化し算出した変動応力と、疲労限とを比較し、疲労損傷が発生する可能性を評価した。

その結果、高サイクルの圧力変動が生ずることが分かり、これにより高サイクル疲労が生ずる可能性があることを確認した。

高サイクル疲労は、流体加振力の繰返し数に加えて、流体加振力により溶接部に発生する変動応力が疲労限 (繰返し数が十分高い場合でも疲労き裂が発生しないとされる変動応力のしきい値) を上回る場合に発生する。蒸気整流板溶接部の変動応力の大きさを評価した結果、この変動応力は疲労限を上回ることを確認した。

以上より、蒸気整流板溶接部に疲労損傷が発生する可能性があることを確認した。

(添付資料 - 16)

評価箇所	変動応力 (MPa)	疲労限 (MPa)
蒸気整流板溶接部	307	188

10. 推定原因

以上の調査結果より、

- ・蒸気整流板は、運転中、蒸気の流れによる高サイクルの流体加振力が作用すること
- ・溶け込み不良により当該溶接部ののど厚が設計仕様より小さいこと
- ・溶接部ののど厚寸法は、B部に比べA部が小さいこと

から、A部には疲労限を上回る高サイクルの変動応力が発生することにより、疲労が累積し、疲労強度を超えた時点 (約 1.5 ヶ月以内) で蒸気入口部の溶接部から割れが発生・進展したものと推定される。

さらに、B部は、A部の割れの発生・進展に伴い、振動が増加し、割れが発生・進展したものと推定される。

一方、溶け込み不良となる部分が発生したのは、当該溶接部の開先角度が設計仕様より狭く加工されたことから、開先先端部に未溶着部分が生じ内部に空洞が残ったものと考えられる。

さらに、当該溶接部の開先角度が設計仕様より狭かったのは、

- ・ 検査の記録を作成していない場合、検査漏れが生じやすいこと
- ・ 当該部製作会社の溶接部の検査手順書に開先検査の実施は規定されているが、開先検査の記録を残すことまでは規定されていなかったこと

から、当該部の検査漏れが生じ開先確認が不十分となったためと推定される。

なお、運転中に確認された異常音は、割れの進展により蒸気整流板の内部プレートが振動し、割れた溶接部等がお互いに衝突することにより発生したものと推定される。

(添付資料 - 17)

1.1. その他の同じ箇所の調査

湿分分離加熱器 1 B の蒸気整流板溶接部の割れに鑑み、湿分分離加熱器 1 B の入口ノズルから見て左側の蒸気整流板および、湿分分離加熱器 1 A、1 C、1 D の、湿分分離加熱器 1 B の割れのあった溶接部と同じ箇所の溶接部について調査を実施した。

(1) 溶接施工状況調査

溶接検査記録を確認した結果、溶接材料、施工方法および検査に問題のないことを確認した。

ただし、割れが発生した蒸気整流板と同様に、開先加工の開先検査記録は確認できなかった。

なお、2号機湿分分離加熱器の蒸気整流板溶接部の溶接検査記録を確認した結果、1号機と同様に開先検査記録は確認できなかった。

(2) 外観点検

溶接部を目視点検および浸透探傷検査を行なった結果、割れ等の異常は認められなかった。

(添付資料 - 18)

なお、湿分分離加熱器 1 A、1 C、1 D 内部の上記以外の箇所についても、湿分分離加熱器 1 B と同様の内部点検調査（目視点検）を実施し、異常のないことを確認した。

1 2 . 湿分分離加熱器の溶接部の健全性調査

湿分分離加熱器の溶接部全数について、割れが発生した蒸気整流板溶接部と同様な割れ発生の可能性の観点から、類似箇所抽出フローに基づき、開先検査の有無、開先形状、開先加工方法等により抽出した結果、溶け込み不良が発生する可能性のある 11 種類の溶接部が抽出された。

この抽出された 11 種類の溶接部について疲労評価を行なった結果、割れの発生した蒸気整流板の当該溶接部以外の 10 種類の溶接部に発生する流体加振力による変動応力は疲労限を下回っており、疲労損傷の発生する可能性がないことを確認した。

(添付資料 - 19)

1 3 . 対 策

(1) 当該蒸気整流板については、新品に取り替えることとした。

なお、取替にあたり、当該溶接部の施工において開先検査を実施し、設計仕様どおり開先加工が行なわれていることを確認することとした。

(添付資料 - 20)

(2) その他の蒸気整流板については、点検により割れは認められていないが、疲労に対する十分な強度を確保するために当該溶接部の補強を行うこととした。

なお、次回定検にて新品に取り替えることとした。

(添付資料 - 20)

(3) 溶接部の開先確認が不十分であることが原因と推定されることから、原子力安全や運転影響の観点から重要な機器のうち、当該部と同様に流体加振力の影響を受ける内部構造物については、溶接事業者検査の対象外であっても、開先検査等の検査を確実に実施し、その記録を維持するよう調達要求事項を明確化するとともに、これらの実施について確認することとし、品質保証活動を強化することとした。

1 4 . 伊方 2、3 号機の対応

(1) 伊方 2 号機

2 号機の湿分分離加熱器については、1 号機と同様の構造で、同様に製作されている。

現在、2 号機の湿分分離加熱器からの異常音の発生はないことを確認しているが、念のため 1 号機が運転再開した後、計画的に 2 号機を停止し、湿分分離加熱器の蒸気整流板溶接部の補強を行なうこととした。

また、2 号機停止までの期間については、運転員による巡視点検を強化するとともに、異常音発生を直ちに検知できるように音響監視装置を設置して異常音の有無を連続監視し、異常音を検知した場合には 1 号機と同様に停止し、対応するものとした。また、次回定検にて新品に取り替えることとした。

(添付資料 - 21)

なお、蒸気整流板の溶接部が割れて内部プレートが外れたことを想定して、その影響を評価した。今回のような疲労による破損の場合、材質が延性に富んだステンレス鋼であり、内部プレートが細かい小片になることは考えにくい。ため、脱落した内部プレートが一体となって流出した場合、下流側の構造物への影響が最も大きいと考えられることから、その評価を実施した。

評価の結果、下流側の構造物は破損することは無く、内部プレートは蒸気整流板内に留まる。従って、脱落した内部プレートが下流側の低圧タービンに流入する可能性がないこと、および、原子炉の安全性に影響を及ぼすこともなく、また、湿水分離加熱器の耐圧部に衝突し損壊する恐れもないため、機器の安全性や作業員の労働安全上の問題はない。

(添付資料 - 22)

(2) 伊方3号機

3号機の湿水分離加熱器については、構造が1、2号機と異なり蒸気整流板がないことより、蒸気整流板に係る対応は不要である。

以上

【添 付 資 料】

- 1 . 湿分分離加熱器 1 B 廻り概略系統図
- 2 . 湿分分離加熱器 1 B 構造図
- 3 . 湿分分離加熱器 1 B 外部点検調査結果
- 4 . 湿分分離加熱器 1 B 内部点検調査結果
- 5 . 湿分分離加熱器 1 B 蒸気整流板割れ状況調査結果
- 6 . 湿分分離加熱器 1 B 蒸気整流板溶接部の割れに係る要因分析図
- 7 . 製作履歴調査結果
- 8 . 金属調査結果（外観観察）
- 9 . 金属調査結果（破面観察）
- 10 . 金属調査結果（断面ミクロ観察）
- 11 . 金属調査結果（のど厚測定）
- 12 . 金属調査結果（破面SEM観察）
- 13 . 金属調査結果（EDX分析）
- 14 . 金属調査結果（硬度測定）
- 15 . 付着塩分量測定結果
- 16 . 疲労による割れの発生に関する評価
- 17 . 事象発生の推定メカニズム
- 18 . その他の同じ箇所の調査結果
- 19 . 湿分分離加熱器の溶接部の健全性調査結果
- 20 . 蒸気整流板復旧概要
- 21 . 伊方2号機 音響監視装置構成計画図
- 22 . 蒸気整流板が破損した場合の影響について

【参 考 資 料】

用語説明