

伊方発電所第 1 号機

湿分分離加熱器 1 B 蒸気整流板の割れについて

平成 1 9 年 5 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. 事象発生施設	1
4. 事象発生時の運転状況	1
5. 事象発生状況	1
6. 時 系 列	1
7. 状況調査	1
8. 詳細調査	2
9. 疲労評価	7
10. 推定原因	8
11. 対 策	9
12. 2、3号機の対応	10

1. 件 名

伊方発電所第1号機湿分分離加熱器1B蒸気整流板の割れについて

2. 事象発生の日時

平成19年4月16日 16時20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

第24回定期検査中（平成19年4月14日より）

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、第24回定期検査中のところ、4月16日16時20分頃、保修員が湿分分離加熱器1Bの蒸気整流板に割れがあることを発見した。

なお、本事象による周辺環境への放射能の影響はなかった。

（添付資料－1、2）

6. 時 系 列

4月16日

16時20分 湿分分離加熱器1Bの点検中に、蒸気整流板に割れがあることを発見

4月18日

14時20分 蒸気整流板の割れ部の切出開始

21時00分 蒸気整流板の割れ部の切出終了

7. 状況調査

割れが確認された蒸気整流板等について、外観目視点検等により状況を調査した。

（1）外観目視点検

湿分分離加熱器1B内部の目視点検を実施した結果、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と天板の溶接部及び蒸気整流板本体に割れを確認した。割れは、蒸気入口部の端部から溶接部に沿って奥へ長さ約19cmあり、そこから折れ曲がり蒸気整流板本体に約16cm発生しており、合計すると約35cmの連続した割れであることを確認した。

なお、その他に異常は認められなかった。

（添付資料－3）

(2) 非破壊検査

割れ of 天板上面への進展の有無を確認するため、天板上面の浸透探傷検査を実施した結果、割れ等の異常は認められなかった。

8. 詳細調査

湿分分離加熱器 1 Bは、前回の第 2 3 回定期検査時（平成 1 8 年 2 月から 5 月）に全体取替工事を実施したが、その後、運転中の平成 1 8 年 6 月 5 日に「湿分分離加熱器 1 B 蒸気整流板溶接部の割れ」事象（以下、「前回不具合事象」という。）が発生し、プラントを停止して、当該蒸気整流板の取替を実施している。今回、蒸気整流板に前回とは異なる位置に割れが発生した原因を究明するため、詳細調査を要因分析図に従い実施した。

（添付資料－ 4）

(1) 天板の溶接による変形量の測定

前回不具合事象時には、天板を切断し、蒸気整流板取替後に切断箇所 で天板の復旧溶接を実施しているため、天板の溶接ひずみによる影響も考えられることから、当該蒸気整流板及び天板の変形量の測定を実施した。

a. 蒸気整流板の変形量測定結果

蒸気整流板の開口部の上端部と下端部の内側の寸法測定を実施した結果、下端部は上端部に比べて約 3 mm～ 5 mm 広いことを確認した。

また、蒸気整流板の天板取付部の角度を測定した結果、図面指示角度 9 0 ° に対し、蒸気入口から見て左側は約 3 ° ～ 4 °、右側は約 2 ° 外側に広がっていることを確認した。

b. 天板の変形量測定結果

天板の反り確認のため、天板の蒸気入口部、中央部、蒸気下流部の 3 箇所について、変形量の測定を実施した結果、以下の通りであった。

- ・ 蒸気の流れと直角方向については、蒸気入口部及び中央部は、天板の中央部がその左右基準点に比べて約 3 mm～ 5 mm 高く、蒸気下流部は天板の中央部が約 3 mm 低いことを確認した。
- ・ 蒸気の流れ方向については、天板の中央部が蒸気入口部、蒸気下流部に比べて約 5 mm～ 7 mm 高いことを確認した。

（添付資料－ 5）

(2) 蒸気整流板取替時の設計、製作及び据付状況調査

前回不具合事象の際に取り替えた蒸気整流板の設計、製作及び据付状況について調査を実施した。なお、取替前の蒸気整流板は海外メーカーで製作したものであったが、取り替えた蒸気整流板は国内メーカーで製作したものであり、また、天板は再使用している。

a. 設計調査

蒸気整流板は、取替前と同じ材料、寸法であり、設計会社にて実績のある標準設計と変更のないことを確認した。

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。

また、溶接施工については、溶接作業検査記録、開先検査記録及び浸透探傷検査記録等で問題のないことを確認した。

(添付資料－6)

c. 材料調査

蒸気整流板、天板及び溶接の材料について、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、及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－6)

d. 据付状況調査

(a) 据付方法の検討状況

前回不具合事象時は、蒸気整流板の内部プレート取付溶接部が割れており、その対策として蒸気整流板を新品に取替を行うこととしたが、その際、

- ・蒸気整流板を直接下から天板に溶接することは、周辺の構造物の関係から手が届きにくい箇所があること
- ・新品の蒸気整流板を直接下から天板に溶接することは、上向き姿勢の溶接となり、下向き姿勢の溶接に比べて難しいこと

から、蒸気整流板のみ切断して取り替える工法は難しいものと考えた。

そこで、天板を切断して反転すれば、蒸気整流板と天板との溶接が下向きの良好な姿勢でできるため、天板を切断し、反転させた状態で新品の蒸気整流板を溶接し、その後天板を再び反転し、切断した位置に合わせて溶接する工法が最善であると判断した。

また、天板を新品に取り替える場合、器内に持ち込める部材の大きさがマンホールの寸法で制限され、蒸気噴出口も狭隘な器内において溶接で取り付ける必要が生じることから、器内での溶接作業を必要最小限とするために天板は再使用した。

なお、天板復旧時に溶接によるひずみにより天板自身が変形することが想定されたため、ひずみが発生しやすいと考えられた蒸気の流れ方向には、ひずみ防止治具を用いてその防止対策を実施していたが、蒸気流れの直交方向にはひずみ防止治具を使用していなかった。

また、蒸気整流板の内部プレート取付溶接部は、前回不具合事象の箇所であり、念のため約100mmの廻し溶接を行ったが、今回の割れのあった当該部においては、特に問題がなかったため廻し溶接までは必要と考えなかった。

(b) 据付状況

据付の施工状況を調査した結果、以下の通りであった。

①蒸気整流板切断、天板切断

- ・蒸気整流板をグラインダーにて天板との取付部を残して切断し、取り出し。
- ・天板上面に、溶接による熱ひずみを防止するための治具を部分溶接にて、取り付け。
- ・天板をグラインダーにて切断。

②天板反転、蒸気整流板の残り部分の除去

- ・天板を反転し、反転した状態で、天板に残っている蒸気整流板取付部をグラインダーにて除去し、平滑になるよう手入れを実施。
- ・手入れ箇所について、浸透探傷検査を実施。
- ・天板切断面をグラインダーにて開先加工を実施し、浸透探傷検査を実施。

③蒸気整流板取付

- ・新しい蒸気整流板を搬入し、天板との開先検査を実施。
- ・蒸気整流板を溶接にて天板に取り付け、溶接部の浸透探傷検査を実施。

④天板反転、天板の復旧

- ・天板を反転し、天板合わせ部の開先検査を実施。
- ・天板を溶接し、溶接部の浸透探傷検査を実施。
- ・溶接による熱ひずみ防止用治具を取り外し、部分溶接箇所の浸透探傷検査を実施。

蒸気整流板は、取替前と同じ寸法、形状に復旧しており、また、各工程毎に、開先検査などの所定の検査を実施し、問題のないことは確認していたが、天板は切断位置で溶接により復旧していることから、溶接部が増えていた。

(添付資料－ 7)

(3) 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。

(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がないことを確認した。

(添付資料－ 8)

(5) 金属調査

蒸気整流板及び天板の割れ部の切出を行い、金属調査を実施した。

a. 外観観察

蒸気整流板と天板との溶接部及び蒸気整流板本体に割れが認められた。溶接部では蒸気入口部の端部から約 19 cm 連続した溶接部に沿った割れがあり、そこから折れ曲がり蒸気整流板本体母材部で鉛直方向に約 5 cm、水平方向に約 11 cm の割れが認められた。

(添付資料－ 9)

b. 破面観察

- ・溶接部の蒸気入口部の端部から約125mmまでの範囲の破面は比較的平坦であることが認められた。
- ・溶接部の蒸気入口部の端部から約125mm以降の範囲においては、すり傷や金属光沢が認められた。
- ・蒸気整流板本体母材部の割れの破面は、ほぼ平坦で、き裂前縁の形状は半だ円状であることが認められた。
(添付資料－10)

c. 断面ミクロ観察

溶接部の割れについて、蒸気入口部の端部から20mm、40mm、175mmの位置について断面ミクロ観察を行った。

(a) 蒸気入口部の端部から20mmの断面

- ・断面の割れ形状は凹凸が少なく滑らかであることが認められた。
- ・割れは、枝分かれがほとんどなく粒内割れであり、介在物や腐食ピットは認められなかった。
- ・溶接の溶け込みが不足していることが認められた。

(b) 蒸気入口部の端部から40mmの断面

- ・断面の割れ形状は凹凸が少なく滑らかであることが認められた。
- ・割れは、枝分かれがほとんどなく粒内割れであり、介在物や腐食ピットは認められなかった。
- ・溶接の溶け込みが不足していることが認められた。

(c) 蒸気入口部の端部から175mmの断面

- ・溶接部の断面の割れ（主き裂：溶接部）形状は凹凸が少なく滑らかであることが認められた。
- ・溶接部の断面の割れは、枝分かれがほとんどなく粒内割れであり、介在物や腐食ピットは認められなかった。
- ・天板の割れは、溶接部の割れで止まっていることが認められた。
- ・天板への割れは、枝分かれの無い粒内割れであり、介在物や腐食ピットは認められなかった。

(添付資料－11)

d. のど厚測定

蒸気入口部から見て割れが認められなかった左側の溶接部（A部）と、割れが認められた右側の溶接部（B部）について、蒸気入口部の端部から20mmののど厚を測定した結果、A部に比べB部の寸法が小さいことが確認された。

(添付資料－12)

e. 破面SEM観察

(a) 溶接部割れ①－2 蒸気入口部

- ・内面の一部において、溶け込み不足部から外側に向かって金属組織の流れ模様が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

(b) 溶接部割れ①－1 中間部

- ・破面には、疲労破面に特有なストライエーション状の模様が認められた。
- ・最終端部方向に溶接金属の内側から斜めに進展した金属組織の流れ模様が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

(c) 溶接部割れ①－1 最終端部

- ・破面は、打撃及びこすれにより、損傷していることが認められた。
- ・天板の割れは、溶金部から整流板へ折れ曲がった割れの角を通っていることが認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

(d) 蒸気整流板本体母材部割れ②－1

- ・溶接金属側から蒸気整流板本体母材側へ向かって金属組織の流れが認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

(e) 蒸気整流板本体母材部割れ②－2

- ・破面には、疲労破面に特有なストライエーション状の模様が認められた。
- ・破面には、最終端方向に内側から斜めに進展した金属組織の流れ模様が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

(f) 天板部割れ③

- ・き裂前縁の形状は半だ円状であることが認められた。
- ・破面には、疲労破面に特有なストライエーション状の模様が認められた。
- ・破面には、き裂前縁に直交するように向かう金属組織の流れ模様が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

(添付資料－1 3)

f. 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、耐食性に有害な元素は認められなかった。

(添付資料－1 4)

g. 硬度測定

問題となる硬化は認められなかった。

(添付資料－1 5)

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。

- ・溶接部、蒸気整流板本体母材部及び天板の破面は、ほぼ平坦で滑らかであること、及びストライエーション状の模様が認められたことから、割れは疲労による特徴を示している。

- ・溶接部には溶け込み不足が認められ、蒸気入口部の端部の溶け込み不足部から外側に向かう金属組織の流れが認められたことより、溶け込み不足部からき裂が発生し、進展して行ったことが観察された。
- ・破面SEM観察結果から、応力腐食割れの特徴である羽毛状の組織が認められず、介在物、腐食ピットも認められなかった。
- ・硬度測定結果及び断面ミクロ観察結果より、割れの発生の要因となるような異常な硬化組織は認められず、また金属組織に問題はなかった。
- ・整流板本体母材部の割れは、溶接部から蒸気整流板本体母材側へ向かって金属組織の流れが認められた。

(6) その他の同じ箇所の調査

湿分分離加熱器1Bの蒸気入口ノズルから見て左側の蒸気整流板及び湿分分離加熱器1A、1C、1Dの当該溶接部について、外観目視点検及び浸透探傷検査を行った結果、割れ等の異常は認められなかった。

なお、前回不具合事象の際には、湿分分離加熱器1Bの割れがあった蒸気整流板以外は割れは認められなかったため、蒸気整流板内部プレート取付溶接部の補強を行い、蒸気整流板の取替及び天板の復旧のための溶接は実施していない。

9. 疲労評価

(1) 今回の事象に対する疲労評価

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、今回の事象に対する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、変動応力を算出する。振動による変動応力に、天板補修溶接によるひずみから生じる平均応力を考慮した等価応力振幅を算出し、これ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、流体加振力の繰り返し数に加えて、流体加振力により溶接部に発生する変動応力が疲労限（繰り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。

溶接部の溶け込み不足を模擬したモデルにて、天板復旧溶接のひずみから生じる平均応力を考慮すると、蒸気入口部の溶接部端部の溶け込み不足により応力集中が生じる構造の箇所で、等価応力振幅が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。

評価箇所	等価応力振幅 (MPa)	疲労限 (MPa)
蒸気整流板溶接部	218	214

なお、天板復旧溶接のひずみ、溶接部端部の溶け込み不足のどちらかがなければ、強度に問題はないことを確認した。

(添付資料－１６)

(２) 天板復旧溶接のない場合の疲労評価

天板の復旧溶接が原因で割れが発生するかどうかの確認を行うため、天板復旧溶接のない場合について疲労評価を実施した。

この評価の条件としては、平成１８年１０月、作業性を改善するため天板を切断しない工法で蒸気整流板取替工事を実施した２号機をモデルとし、今回の事象と同様に溶接部に溶け込み不足がある場合を想定した。なお、この工法の検討にあたっては、実機大でのモックアップ試験により溶接施工性の確認を実施していることから、溶け込み不足の想定は、今回の事象相当で十分であると考えられる。また、２号機では、天板と蒸気整流板の溶接部について、蒸気入口端部の内側に１００mmの廻し溶接を実施していることから、これも考慮した。

その結果、最大変動応力は６７MPaと疲労限に対して、十分低いことを確認した。

(添付資料－１７、１８)

１０．推定原因

以上の調査結果より、

- ・ 前回不具合事象復旧時に、天板は切断位置で溶接により復旧しているため、この溶接ひずみによって当該溶接部に大きな応力が発生していたこと
- ・ 運転中の蒸気整流板には、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
- ・ 当該溶接部には溶け込み不足があり、応力集中が生じる形状であったこと

の３つの条件が重畳したことにより、片側溶接を採用した当該箇所には疲労限を上回る高サイクルの振動が発生し、疲労が累積して、割れが発生、進展したものと推定される。

(添付資料－１９)

なお、蒸気整流板本体母材部及び天板の割れは、蒸気の流れによる振動により、溶接部の割れを起点として進展していったものと推定される。

一方、溶接ひずみによる当該溶接部の応力発生及び溶接部の溶け込み不足の要因は、以下によるものと推定される。

まず、天板復旧時の溶接ひずみによって当該溶接部に大きな応力が発生したことについての要因は、前回不具合事象の復旧方法の検討において、天板自身の変形も含めて施工性に着目した検討は十分に行っていたが、蒸気整流板に着目するあまり、復旧作業のために必要となった天板の溶接部の影響に関する検討が不足していたことによるものと考えられる。

このため、一般的な施工性の検討に留まり、それ以上の評価あるいはモックアップを用いた事前検証までは実施していなかった。

また、当該部のような溶接を実施した場合に溶け込み不足が発生する要因としては、

- ①前回不具合事象の原因である開先形状が適正でない場合
- ②溶接の電流不足など溶接条件が適切でない場合
- ③溶接施工場所が狭隘で作業性が悪く、溶接施工が適正でない場合

の3点が考えられる。

①及び②については当該部の溶接検査記録により問題ないことを確認した。

③については、当時の溶接士から聞き取りしたところ、溶接の終端部となった蒸気入口部において、溶接姿勢が幾分か不安定になった可能性もあるとのことであった。溶接姿勢が不安定になった要因としては、湿分分離加熱器据え付け後、初めての器内での補修作業であったこと、作業場所が狭隘であったこと、及び作業環境が高温多湿であったことが相乗したものと考えられる。しかしながら、作業計画時には、下向きの溶接姿勢が確保できていたため実機相当のモックアップ訓練までは不要と判断し、特別な訓練は実施しなかった。

1 1. 対 策

(1) 当該蒸気整流板及び天板を、新品に取り替える。

取替に当たっては、以下の通り、天板に発生するひずみを小さくする工法や手順で実施する。

- ・当該溶接部に影響を与えるような天板の溶接部を増やさないよう、天板は製作時の溶接部の範囲まで取り替える。
- ・当該部の天板のひずみによる影響がないようにするため、天板の溶接後に蒸気整流板を溶接する。

また、取替の際には、天板と蒸気整流板との溶接部は、蒸気入口部の端部の内側に約100mmの廻し溶接を行うことで十分な強度は確保できるが、念のためこの溶接線の全てにおいてより一層の強度向上を図る観点から、両側溶接又は当て金を使用した完全溶け込み溶接を行う。

(添付資料－20)

なお、湿分分離加熱器 1 A～1 D の当該整流板以外の 7 箇所については、蒸気整流板のみ取り替えることとし、天板と蒸気整流板との溶接は上記と同様に施工する。

(2) 溶接部の溶け込み不足に対する対策として、溶接施工性については、実機と同じ寸法、同じ施工環境のモックアップを用いて試験で以下の内容を確認するとともに、このモックアップを用いて、事前に溶接士の訓練を実施する。

- ・各溶接部を切断し、十分な溶け込みが得られていること
- ・天板は 2 分割して取り替えるが、その溶接も含めて変形の少ない組立（溶接作業）手順となっていること

また、実作業を行うにあたっては、溶接士に対する良好な作業環境に配慮する。

なお、各工程毎に、開先検査、寸法検査、浸透探傷検査を実施し、問題ないことを確認する。

(3) 原子力安全や運転影響の観点から重要な機器に関する溶接の管理について、以下のとおり実施するとともに社内マニュアルを改訂する。

- ・新たな改造を実施する場合には、溶接によるひずみの影響を小さくする工法や手順とする。
- ・機器の内部等狭隘な場所で溶接作業を実施する場合は、事前に溶接士の訓練を実施する。
- ・溶接作業において、高温多湿が予想される場合は、要求される品質を確保できるよう作業環境に配慮する。

12. 2、3号機の対応

(1) 伊方2号機

2号機湿分分離加熱器については、1号機前回不具合事象の反映として、平成18年6月にプラントを停止して、蒸気整流板内部プレート取付溶接部の補強を行うとともに、第19回定期検査（平成18年10月から平成19年1月）にて、蒸気整流板を新品に取り替えている。

天板を切断しない工法で蒸気整流板の取替を実施した2号機については、「9. (2) 天板復旧溶接のない場合の疲労評価」のとおり、今回と同様の割れは発生しない。

(2) 伊方3号機

3号機の湿分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、対応は不要である。

以 上