

[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(4月16日分)**

19.5.14
原子力安全対策推進監
(内線2352)

1 四国電力(株)から、伊方発電所で平成19年4月16日に発生した伊方1号機湿分分離加熱器1Bの蒸気整流板の割れについて原因と対策の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	湿分分離加熱器1Bの蒸気整流板の割れ (1号機)	19.4.16	<p>昨年の復旧時に、切断した天板を溶接により復旧したが、その際、天板の溶接部の影響に関する検討が不足し、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ことから、溶接ひずみが生じ、当該箇所に大きな応力が発生したこと</p> <p>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</p> <p>昨年の復旧時に、溶接施工場所が狭隘で作業性が悪かったため、溶接部に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</p> <p>これら3つの条件が重畳したことにより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。</p> <p>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。</p>	<p>当該蒸気整流板及び天板を新品に取り替える。取替えに当たっては、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う、天板は製作時の溶接部の範囲まで取り替える。また、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。さらに、取替の際には、溶接部の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。</p> <p>湿分分離加熱器1A～1D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、同様の溶接方法で施工する。</p> <p>溶接施工性については、実機と同じ寸法、同じ施工環境の模型を用いて溶接部を切断し、十分な溶け込みが得られていることを確認するとともに、この模型を用いて、事前に溶接士の訓練を実施する。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 <p>2号機湿分分離加熱器については、第19回定期検査にて蒸気整流板を取り替えており、天板復旧溶接のない場合の疲労評価により今回と同様の割れが発生しないことを確認している。</p> <p>3号機湿分分離加熱器については、1、2号機と異なり蒸気整流板がない構造である。</p>

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等について確認しています。

原子力発第07031号
平成19年 5月14日

愛媛県知事
加戸守行 殿

四国電力株式会社
取締役社長 常盤 百樹

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係る
報告書の提出について

平成19年4月16日に発生しました伊方発電所第1号機湿分分離加熱器1B蒸気整流板の割れにつきまして、その後の調査結果がまとまりましたので、安全協定第11条第2項に基づき、別添のとおり報告いたします。

今後とも伊方発電所の安全・安定運転に取り組んでまいりますので、ご指導賜りますようお願い申し上げます。

以 上

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
1 0 . 推定原因	.....	8
1 1 . 対 策	.....	9
1 2 . 2、3号機の対応	.....	1 0

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、保守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

割れの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にて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 90° 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。

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。

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。

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。

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 1 2 5 mm 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 1 2 5 mm 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 - 1 0)

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 2 0 mm、4 0 mm、1 7 5 mm 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 2 0 mm 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 4 0 mm 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 1 7 5 mm 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 - 1 1)

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 2 0 mm 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 - 1 2)

e . 破面 S E M 観察

(a) 溶接部割れ - 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 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 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 - 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
- ・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
- ・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、

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

溶接の電流不足など溶接条件が適切でない場合

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。

及び 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。

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 1 0 0 mm 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 - 2 0)

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。

1 2 . 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 1 8 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 1 9 回定期検査(平成 1 8 年 1 0 月から平成 1 9 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

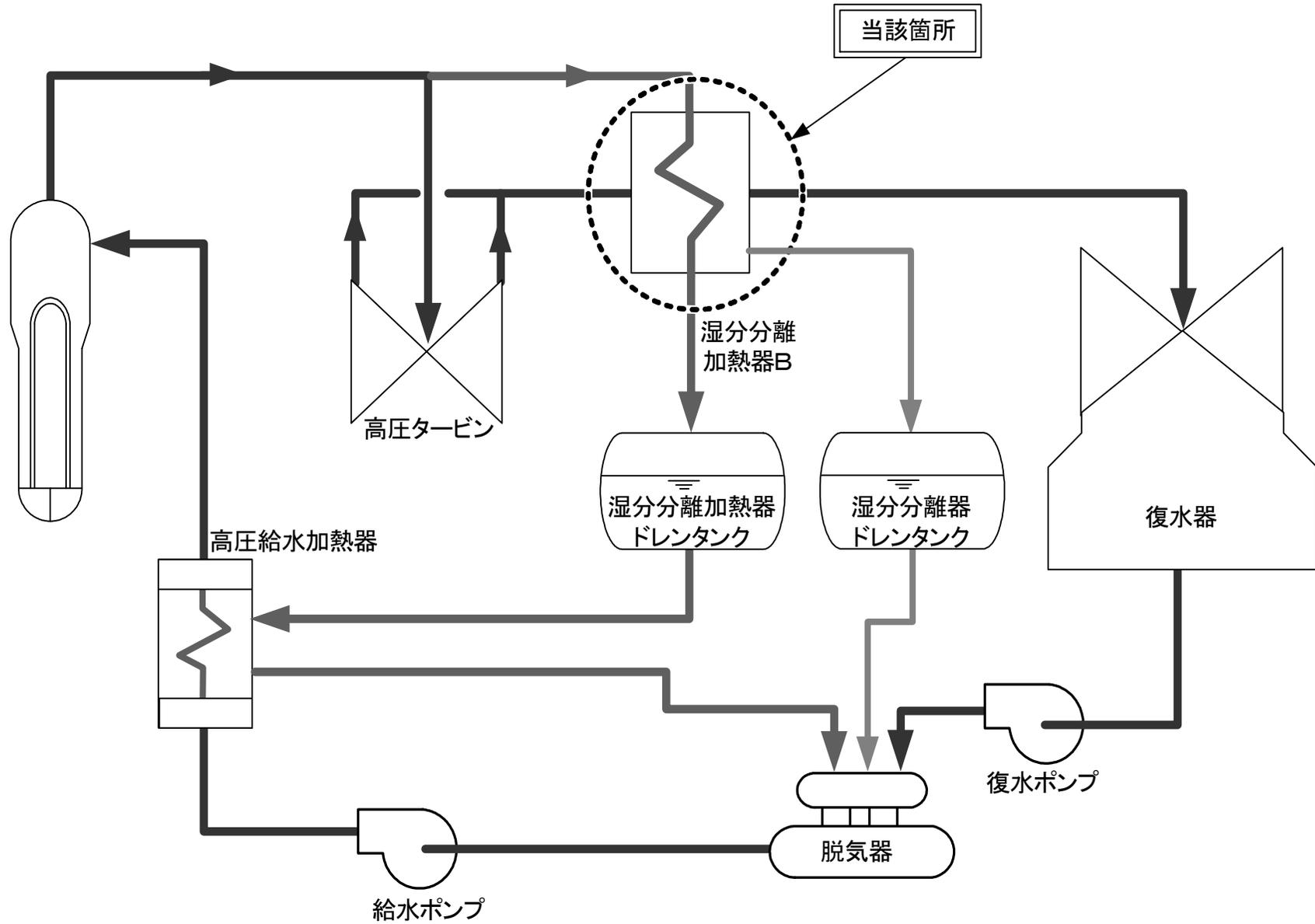
【添 付 資 料】

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 蒸気整流板割れ状況調査結果
4. 湿分分離加熱器 1 B 蒸気整流板の割れに係る要因分析図
5. 天板の溶接による変形量の測定結果
6. 製作履歴調査結果
7. 湿分分離加熱器 1 B 蒸気整流板取替要領
8. 付着塩分量調査結果
9. 金属調査結果（外観観察）
10. 金属調査結果（破面観察）
11. 金属調査結果（断面ミクロ観察）
12. 金属調査結果（のど厚測定）
13. 金属調査結果（破面SEM観察）
14. 金属調査結果（EDX分析）
15. 金属調査結果（硬度測定）
16. 疲労による割れの発生に関する評価
17. 天板復旧溶接のない場合の疲労評価
18. 伊方2号機湿分分離加熱器蒸気整流板取替概要
19. 事象発生の推定メカニズム
20. 当該蒸気整流板及び天板取替概要

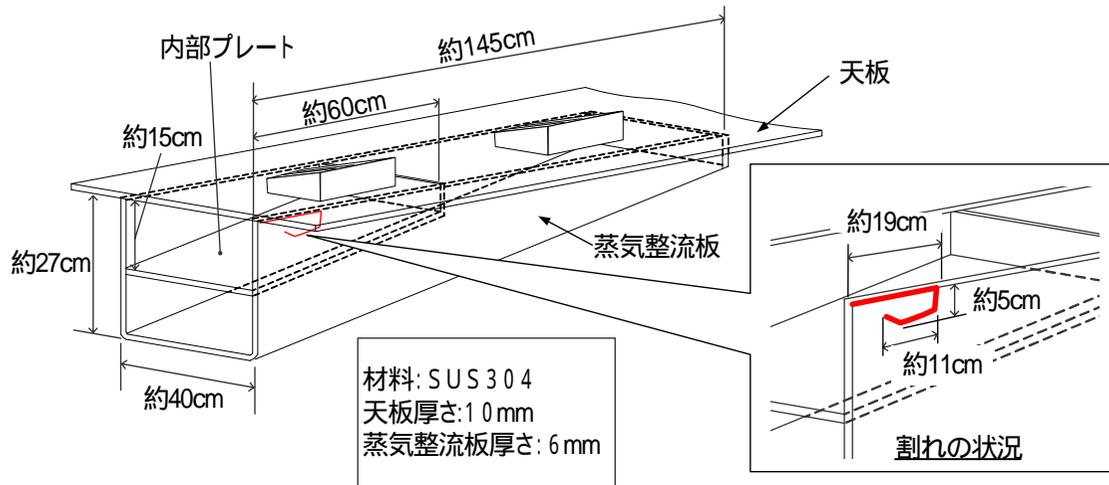
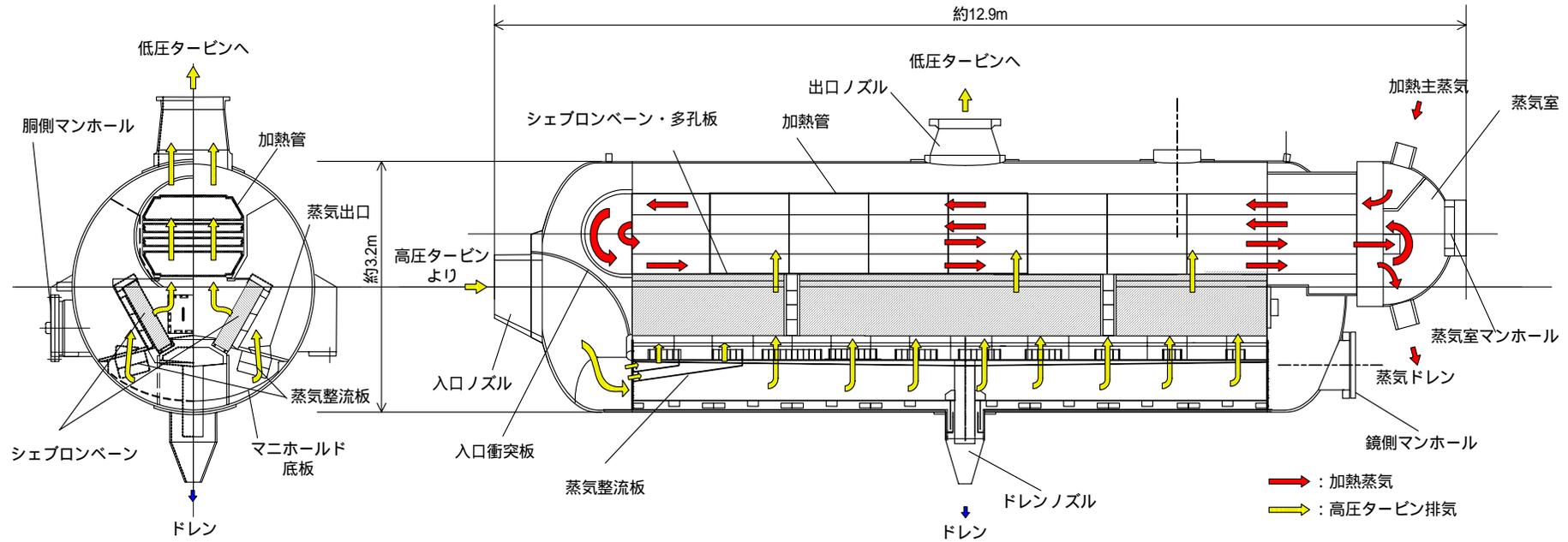
【参 考 資 料】

用 語 説 明

湿分分離加熱器1B廻り概略系統図



湿分分離加熱器 1 B 構造図

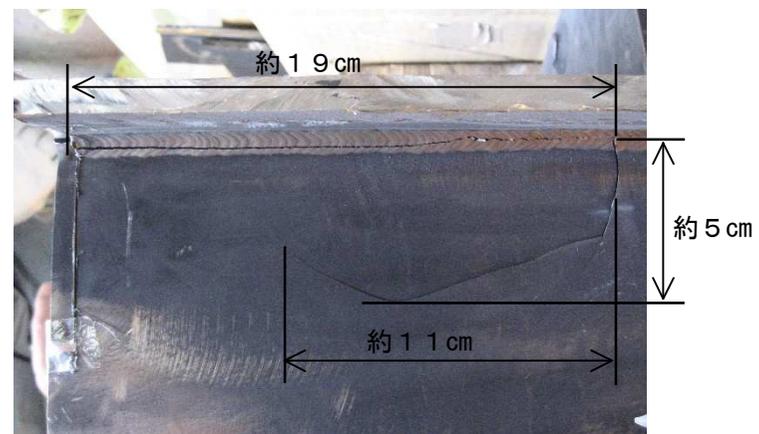
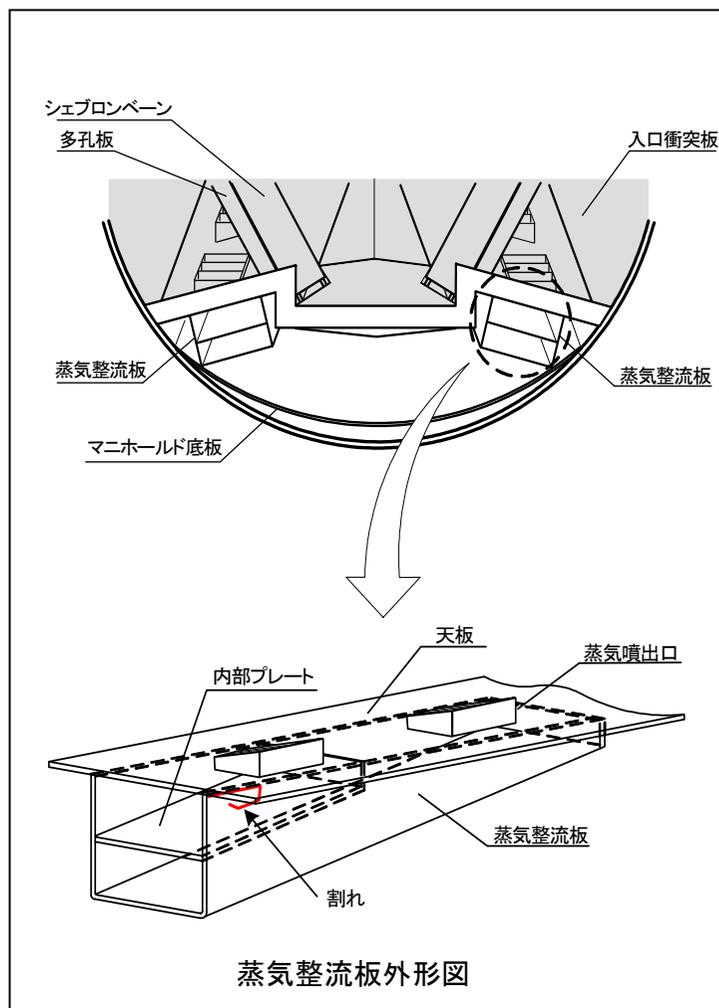


蒸気整流板概要図

湿分分離加熱器 仕様

種類	横置1段加熱U字管式	
温度	入口	約180
	出口	約270
最高使用温度	蒸気室側	約290
	胴側	約270
最高使用圧力	蒸気室側	約7.5MPa
	胴側	約1.2MPa

湿分分離加熱器1B蒸気整流板 割れ状況調査結果



蒸気整流板外側



蒸気整流板内側

割れは、蒸気整流板と天板の溶接部に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、蒸気整流板本体に湾曲して約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。

湿水分離加熱器1B蒸気整流板の割れに係る要因分析図

[備考]
 △：可能性あり。
 ×：可能性なし。

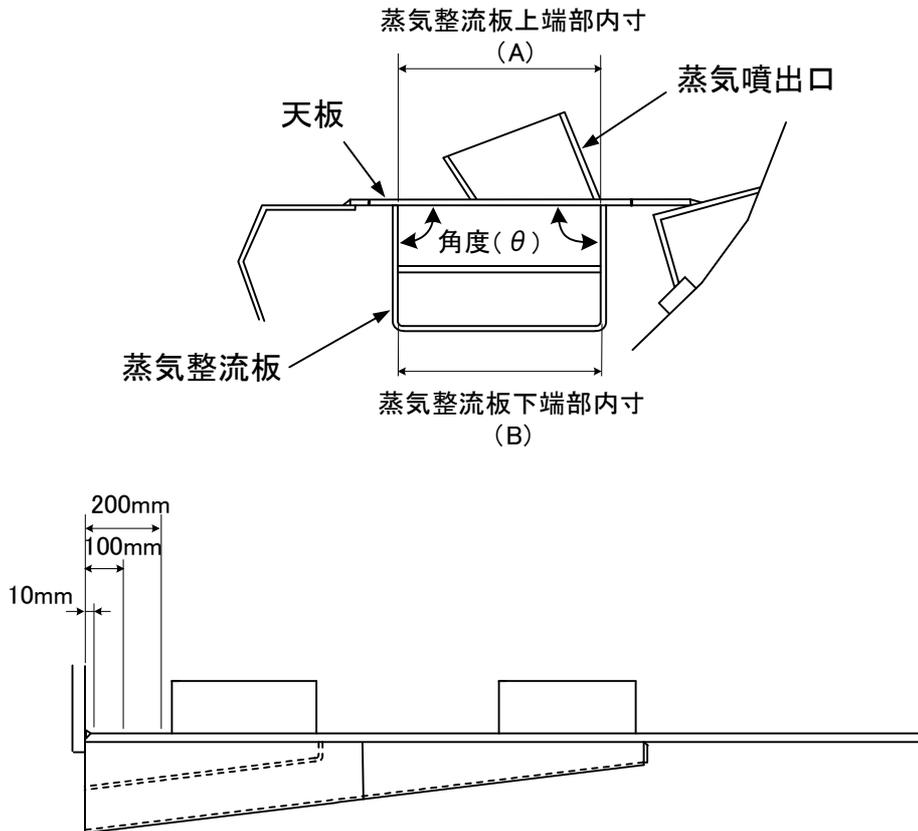
事象	要因	因子	調査内容	調査方法・結果	評価	添付資料				
湿水分離加熱器 1B蒸気整流板 の割れ	強度不足	延性割れ	過大応力	設計資料等の調査	・蒸気整流板の設計は、実績のある標準設計と変更のないことを確認した。	×	—			
				製作・施工状況調査	・製作記録調査により、蒸気整流板の製作に問題はなく、寸法・構造は設計仕様どおりであることを確認した。	×	6			
				据付状況の調査	・前回不具合事象の箇所については、念のため約100mmの廻し溶接を行ったが、今回割れのあった当該部においては、特に問題がなかったため廻し溶接までは必要と考えなかった。 ・蒸気整流板は、取替前と同じ寸法、形状に復旧しており、また、各工程毎に、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。	△	7			
				運転履歴調査	・運転履歴調査により、運転パラメータに問題はないことを確認した。	×	—			
				金属調査	・外観観察の結果、蒸気整流板と天板との溶接部に沿って約19cm、蒸気整流板の母材にあつては鉛直方向に約5cm、水平方向に約11cmの割れを確認した。 ・金属調査（破面観察、断面ミクロ観察、SEM、硬度測定、EDX）の結果、 ○疲労破面の特徴であるストライエーション状の模様が認められたこと ○溶接部に溶け込み不足があり金属組織の流れが認められたこと ○応力腐食割れ及び介在物、腐食ピットも認められなかったこと ○異常な硬化組織は認められず、金属組織に問題はなかったことを確認した。	×	9, 10, 11 12, 13, 14 15			
				材料不良	材料仕様の調査	・材料証明書により、蒸気整流板及び天板の材料は設計仕様どおりであることを確認した。 ・また、溶接材料は、材料証明書により、ステンレス鋼であり問題ないことを確認した。	×	6		
	疲労割れ	温度・圧力過渡	振動	運転履歴調査	・運転履歴調査により、運転パラメータに問題はないことを確認した。	×	—			
				金属調査	・外観観察の結果、蒸気整流板と天板との溶接部に沿って約19cm、蒸気整流板の母材にあつては鉛直方向に約5cm、水平方向に約11cmの割れを確認した。 ・金属調査（破面観察、断面ミクロ観察、SEM、硬度測定、EDX）の結果、 ○疲労破面の特徴であるストライエーション状の模様が認められたこと ○溶接部に溶け込み不足があり金属組織の流れが認められたこと ○応力腐食割れ及び介在物、腐食ピットも認められなかったこと ○異常な硬化組織は認められず、金属組織に問題はなかったことを確認した。	△	9, 10, 11 12, 13, 14 15			
				疲労評価	・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。	△	16			
				天板溶接のひずみ	変形量の測定	・変形量の測定の結果、蒸気整流板は天板取付部が外側に広がっていることを確認した。 ・天板は、中央部が高いことを確認した。	△	5		
				溶接不良	溶接欠陥	施工不良	溶接施工調査	・溶接施工記録等により、溶接材料、施工方法および検査に問題ないことを確認した。	×	6
							金属調査	・外観観察の結果、蒸気整流板と天板との溶接部に沿って約19cm、蒸気整流板の母材にあつては鉛直方向に約5cm、水平方向に約11cmの割れを確認した。 ・金属調査（破面観察、断面ミクロ観察、SEM、硬度測定、EDX）の結果、 ○疲労破面の特徴であるストライエーション状の模様が認められたこと ○溶接部に溶け込み不足があり金属組織の流れが認められたこと ○応力腐食割れ及び介在物、腐食ピットも認められなかったこと ○異常な硬化組織は認められず、金属組織に問題はなかったことを確認した。	△	9, 10, 11 12, 13, 14 15
材料不良	材料仕様の調査	・材料証明書により、蒸気整流板及び天板の材料は設計仕様どおりであることを確認した。 ・また、溶接材料は、材料証明書により、ステンレス鋼であり問題ないことを確認した。	×	6						

[備考]
 △：可能性あり。
 ×：可能性なし。

事象	要因	因子	調査内容	調査方法・結果	評価	添付資料
腐食	応力腐食割れ	材料 環境 応力	金属調査 付着塩分量調査等	<ul style="list-style-type: none"> ・外観観察の結果、蒸気整流板と天板との溶接部に沿って約19cm、蒸気整流板の母材にあつては鉛直方向に約5cm、水平方向に約11cmの割れを確認した。 ・金属調査（破面観察、断面マイクロ観察、SEM、硬度測定、EDX）の結果、 <ul style="list-style-type: none"> ○疲労破面の特徴であるストライエーション状の模様が認められたこと ○溶接部に溶け込み不足があり金属組織の流れが認められたこと ○応力腐食割れ及び介在物、腐食ピットも認められなかったこと ○異常な硬化組織は認められず、金属組織に問題はなかったことを確認した。 	×	9, 10, 11 12, 13, 14 15
				<ul style="list-style-type: none"> ・付着塩分量測定により、いずれも判定値を満足しており問題ないことを確認した。 	×	8
	その他腐食	全面腐食 局部腐食	金属調査	<ul style="list-style-type: none"> ・外観観察の結果、蒸気整流板と天板との溶接部に沿って約19cm、蒸気整流板の母材にあつては鉛直方向に約5cm、水平方向に約11cmの割れを確認した。 ・金属調査（破面観察、断面マイクロ観察、SEM、硬度測定、EDX）の結果、 <ul style="list-style-type: none"> ○疲労破面の特徴であるストライエーション状の模様が認められたこと ○溶接部に溶け込み不足があり金属組織の流れが認められたこと ○応力腐食割れ及び介在物、腐食ピットも認められなかったこと ○異常な硬化組織は認められず、金属組織に問題はなかったことを確認した。 	×	9, 10, 11 12, 13, 14 15

天板の溶接による変形量の測定結果(1/2)

○測定箇所



○測定結果

蒸気整流板内寸

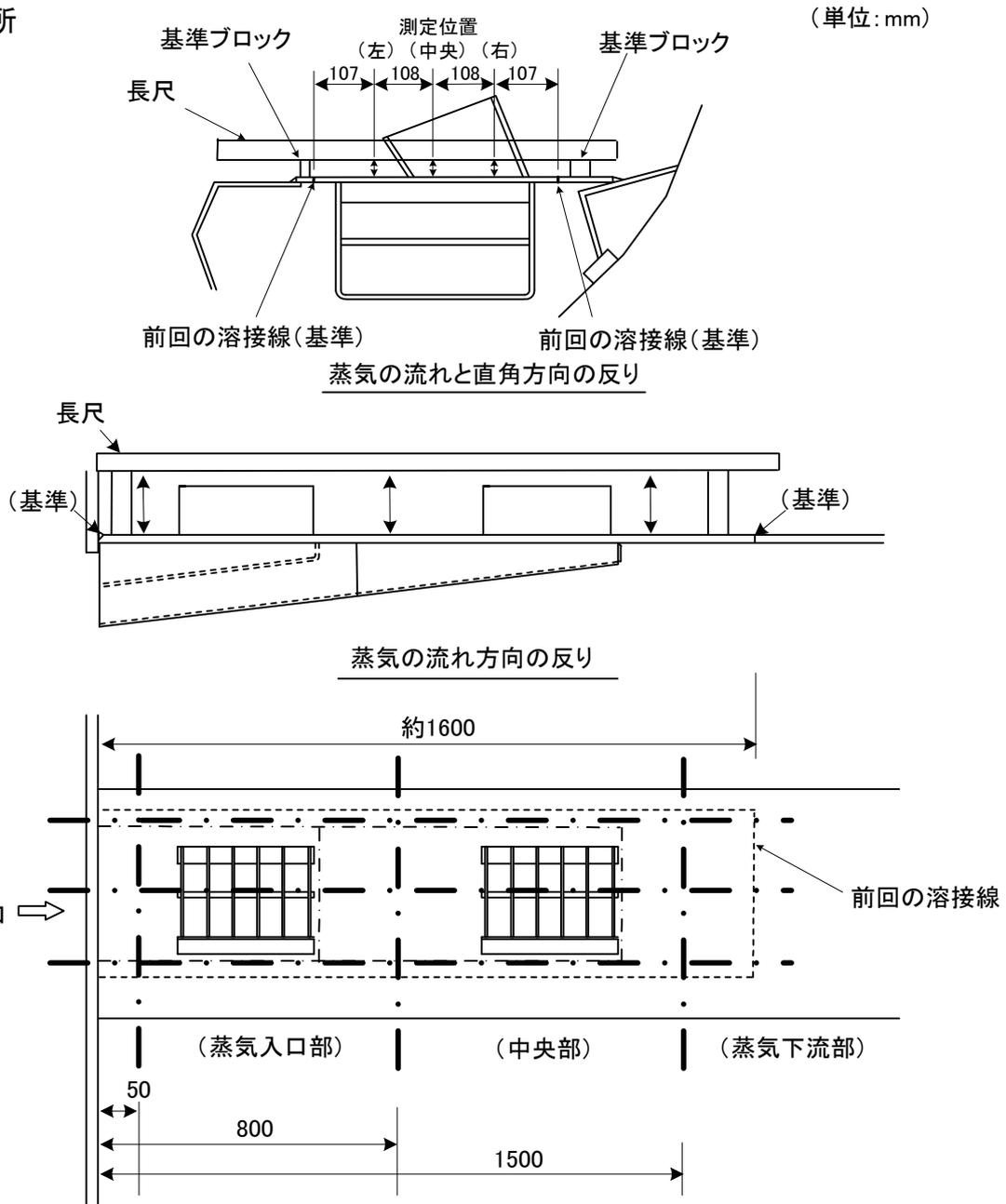
	蒸気入口側からの寸法		
	10mm	100mm	200mm
上端内寸(A)	394mm	394mm	393mm
下端内寸(B)	397mm	397mm	398mm
(B) - (A)	3mm	3mm	5mm

蒸気整流板内角度

	蒸気入口側からの寸法					
	20mm		100mm		200mm	
	左	右	左	右	左	右
角度(θ)	94°	92°	93°	92°	測定不可	測定不可

天板の溶接による変形量の測定結果(2/2)

○測定箇所



○測定結果

蒸気の流れと直角方向の反り(mm)

	蒸気入口側から見た位置				
	左(基準)	左	中央	右	右(基準)
蒸気側入口から50mm	0	-1	-3	-1.5	0
蒸気側入口から800mm	0	-2	-5	-2	0
蒸気側入口から1500mm	0	+4	+3	+4	0

+: 下方向(低い)、-: 上方向(高い)

蒸気の流れ方向の反り(mm)

	蒸気入口側からの寸法(mm)				
	入口側(基準)	50	800	1500	奥側(基準)
蒸気側入口から見て右側	0	0	-5	+1	0
蒸気側入口から見て中央	0	0	-6	0	0
蒸気側入口から見て左側	0	0	-7	+1	0

+: 下方向(低い)、-: 上方向(高い)

基準はいずれも、前回の溶接線とした。

製作履歴調査結果(材料・寸法調査)

○材料調査

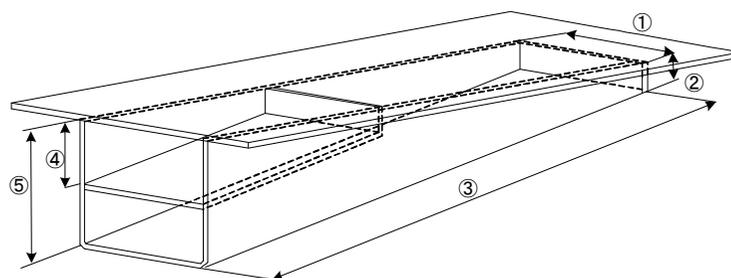
・蒸気整流板本体

項目	化学成分(重量%)							引張強さ (MPa)	伸び(%)	硬さ
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni			
規格値 (JIS SUS304)	MAX 0.08	MAX 1.00	MAX 2.00	MAX 0.045	MAX 0.030	18.0 ~20.0	8.0 ~10.5	MIN 520	MIN 40	MAX 90 (HRB90)
材料証明書記載値	0.06	0.42	0.77	0.026	0.006	18.05	8.10	694	53	89

・天板

項目	化学成分(重量%)							引張強さ (MPa)	伸び(%)	硬さ
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni			
規格値 (SA-240-TYPE304L)	MAX 0.08	MAX 0.75	MAX 2.00	MAX 0.045	MAX 0.030	18.0 ~20.0	8.0 ~10.5	MIN 515	MIN 40	MAX 92 (HRB92)
材料証明書記載値	0.03	0.34	1.60	0.028	0.002	18.03	8.27	610	51	89

○寸法調査

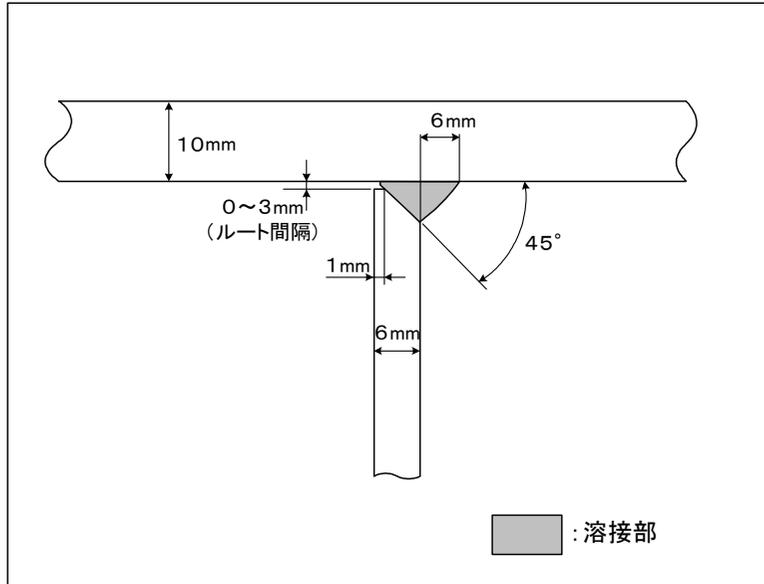


単位:mm

測定位置	設計寸法	許容値	測定値
①	394	±3	395.5
②	71	±3	71
③	1,442	±5	1,439
④	146	±3	143
⑤	273	±3	272

- ・材料証明書より、規格値を満足しており、問題ないことを確認した。
- ・製作記録により、各部の寸法・構造は設計仕様どおりであり、問題ないことを確認した。

製作履歴調査結果(溶接施工状況調査)

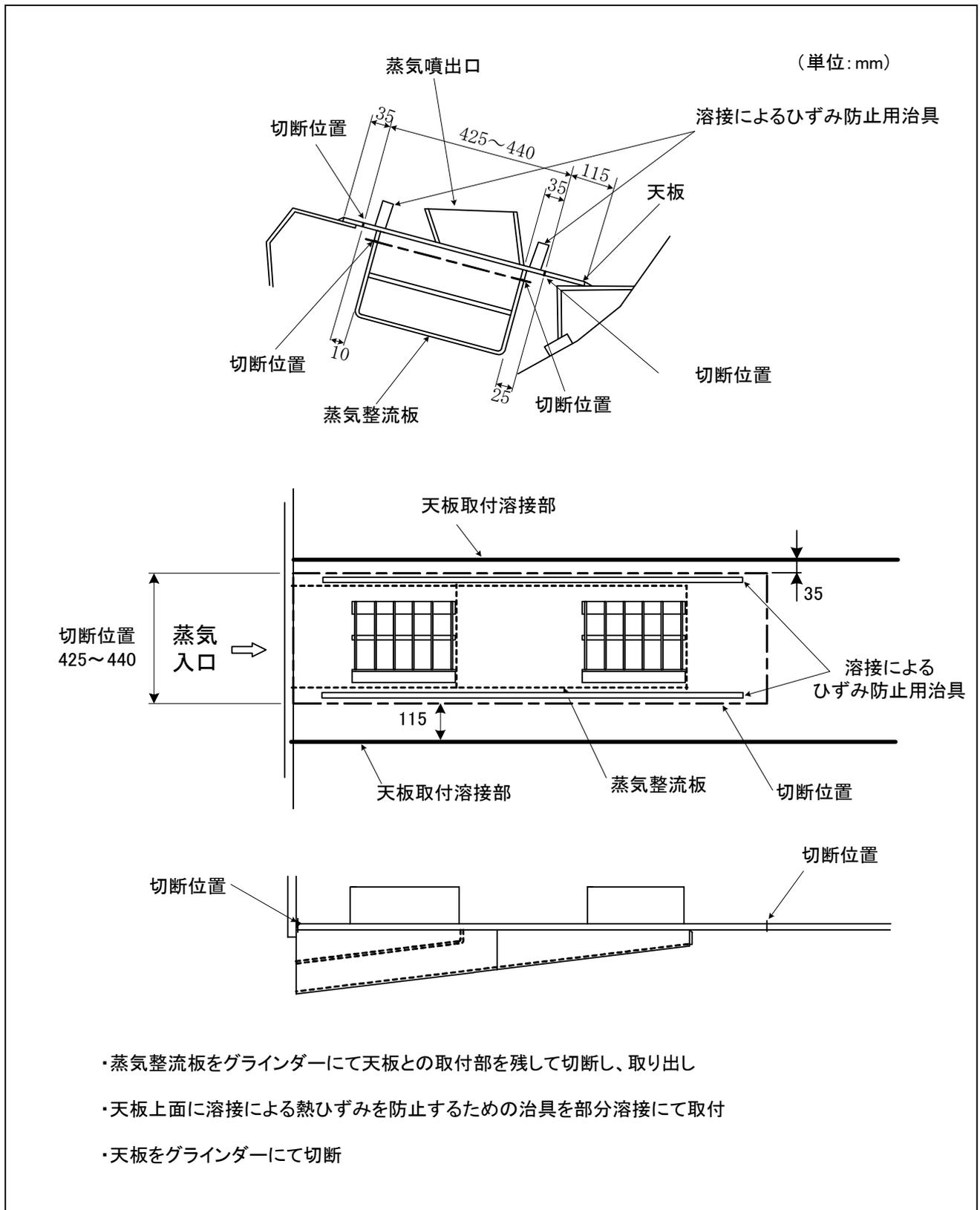


項目	内容	調査方法	結果
溶接方法 (非耐圧部)	レ形開先+すみ肉 連続溶接	製作図面 溶接作業検査記録	問題なし
	ティグ溶接		
溶接材料	ステンレス鋼 (308)	材料証明書	問題なし
開先	外観・寸法 (開先角度等)	開先検査記録	問題なし
溶接部	外観・寸法 (脚長)	外観検査記録	問題なし
	浸透探傷検査	浸透探傷検査記録	

- ・溶接施工方法は、溶接作業検査記録により問題のないことを確認した。
- ・溶接材料は、ステンレス鋼であり、材料は規格値を満足しており、問題のないことを確認した。
- ・開先は、開先検査記録により、問題のないことを確認した。
- ・溶接部は、外観検査記録および浸透探傷検査記録により、問題のないことを確認した。

湿分分離加熱器1B蒸気整流板取替要領(1/2)

① 蒸気整流板切断、天板切断



湿分分離加熱器1B蒸気整流板取替要領(2/2)

② 天板反転、蒸気整流板の残り部分の除去

蒸気整流板取付部

切断位置

- ・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 蒸気整流板取付け

"A"

"A"

溶接によるひずみ防止用具

外側を溶接PT

整流板(側板)

天板

A部

- ・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

"B"

"C"

溶接PT

B部

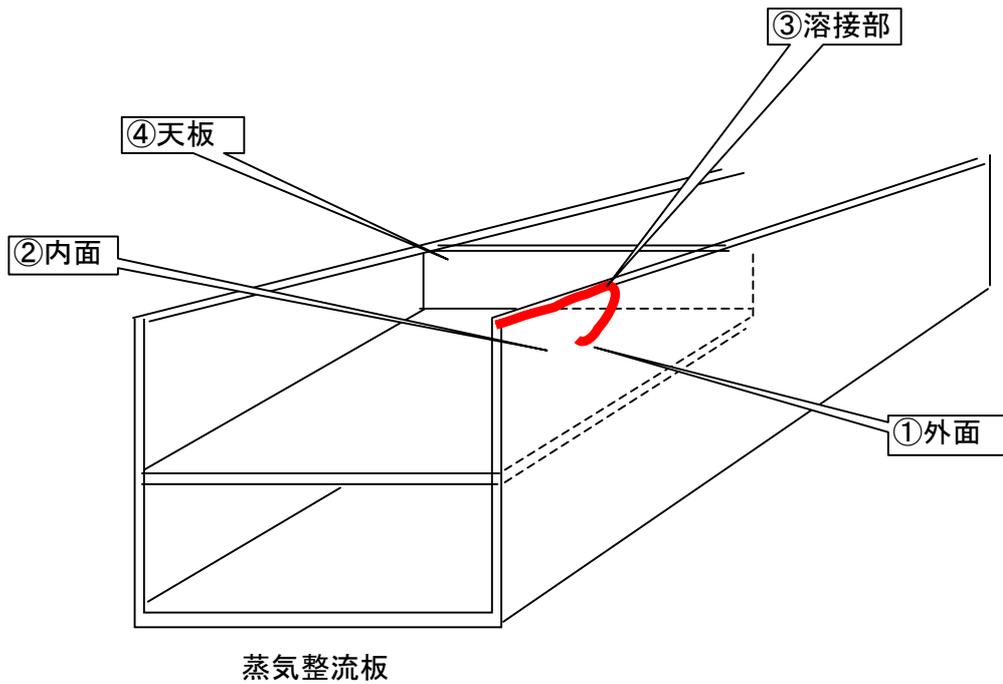
溶接PT

C部

- ・天板を反転し、天板合わせ部の開先検査
- ・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具を取り外し、部分溶接箇所の浸透探傷検査を実施

付着塩分量調査結果

○測定箇所

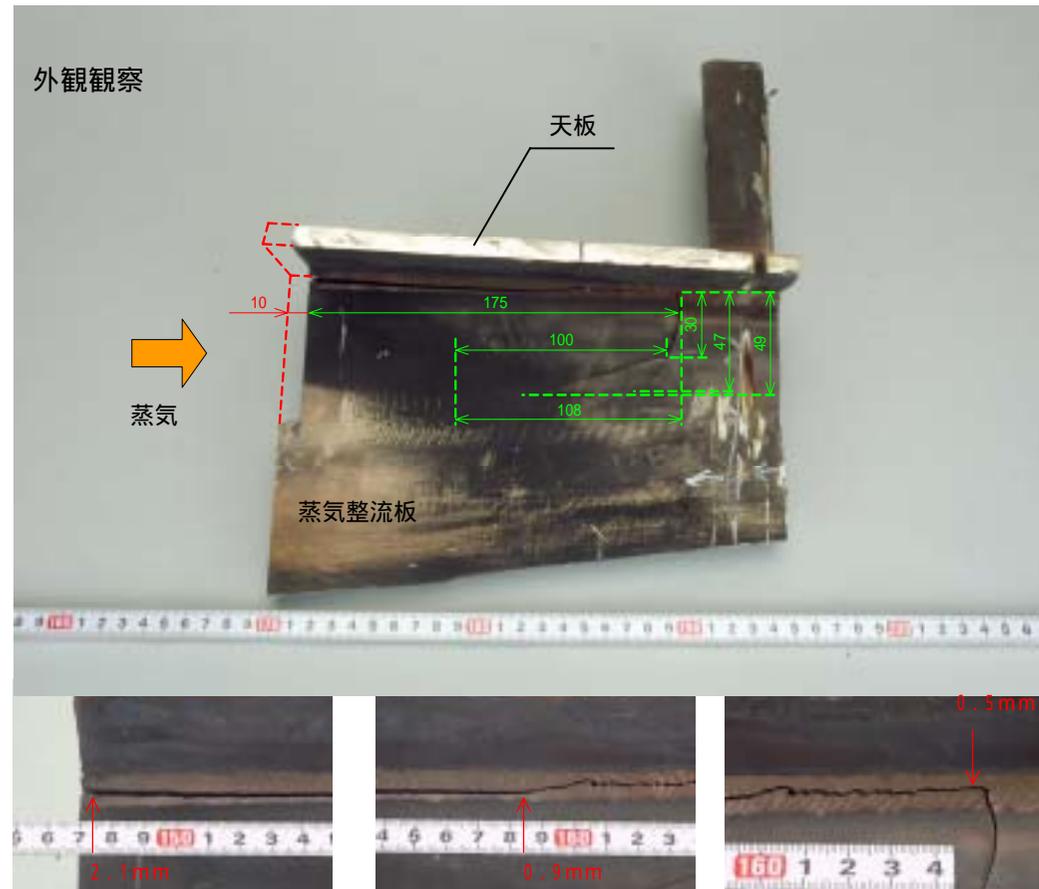
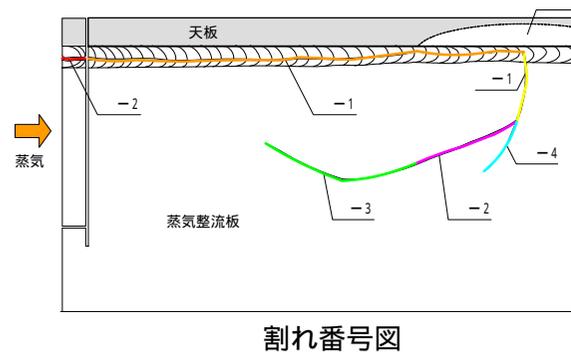
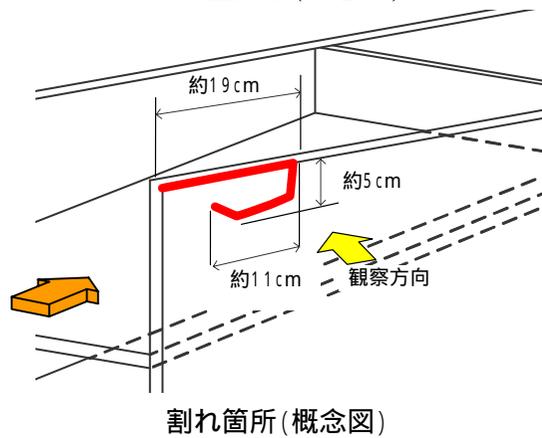
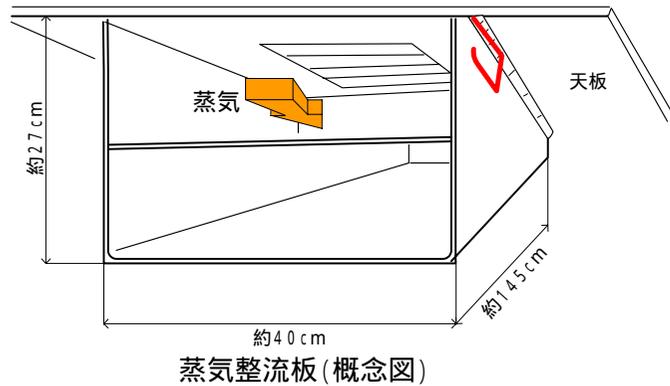


○測定結果

採取番号	試料採取箇所	付着塩分量 (mg as Cl/m ²)	判定値 (mg as Cl/m ²)
①	蒸気整流板外面	<1	100
②	蒸気整流板内面	<1	
③	蒸気整流板取付溶接部	<1	
④	天板上面	<1	

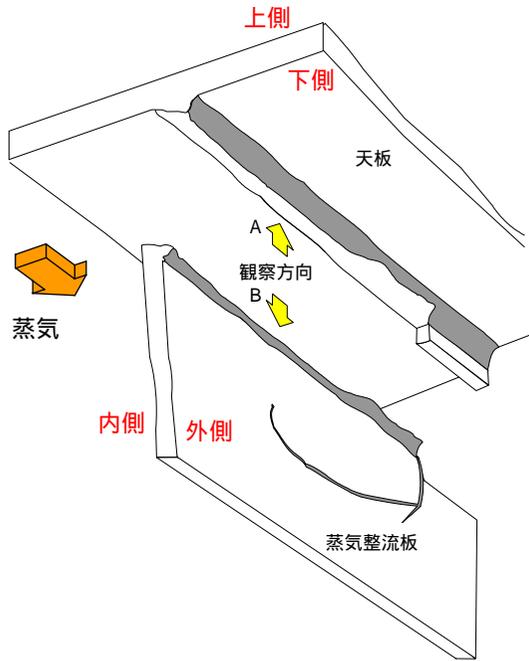
蒸気整流板の付着塩分量を測定した結果、判定値を満足しており問題ないことを確認した。

金属調査結果(外観観察)

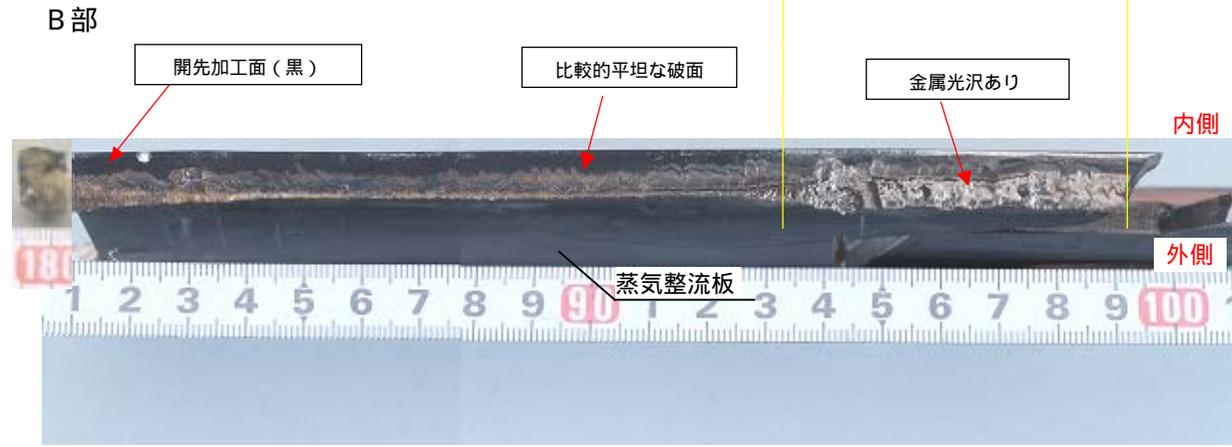
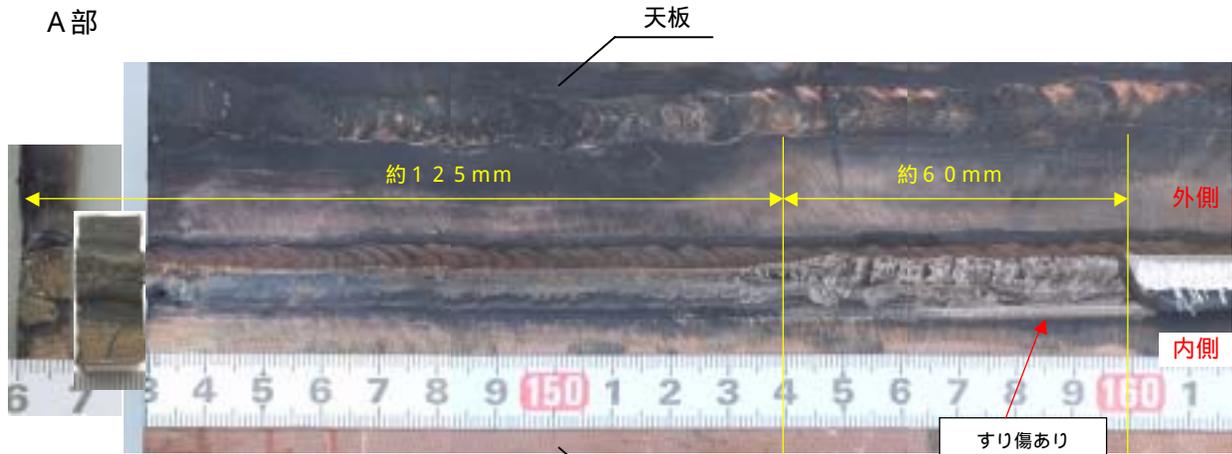


- ・割れは溶接部および蒸気整流板本体の母材部に生じていた。
- ・溶接部では蒸気入口部の端部から約19 cm連続した溶接部に沿った割れが認められた。
- ・蒸気整流板本体では鉛直方向に約5 cmの割れ及び水平方向に約11 cmの割れが認められた。
- ・蒸気入口部近傍の割れ開口幅は約2.1 mm、中間部の割れ開口幅は約0.9 mm、最終端部近傍の割れ開口幅は約0.5 mm、蒸気入口部近傍の開口幅が大きかった。

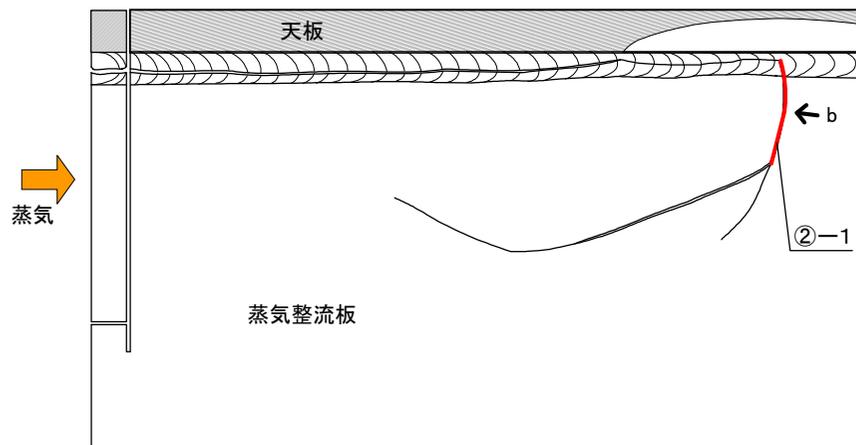
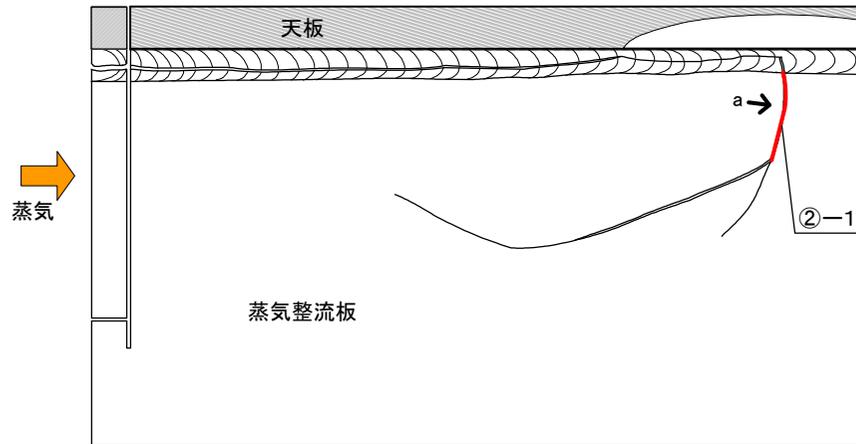
金属調査結果(破面観察)



- ・割れは貫通していた。
- ・溶接部の破面は、蒸気入口部の端部から約125mmまでの範囲において、比較的平坦であることが認められた。
- ・溶接部の破面は、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。

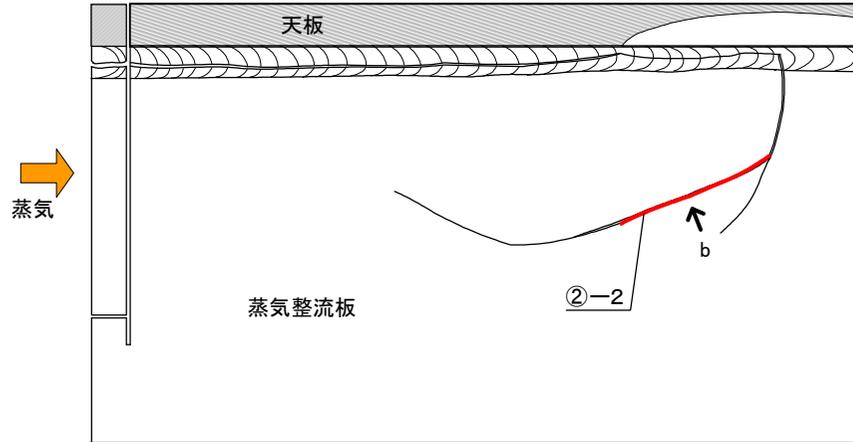
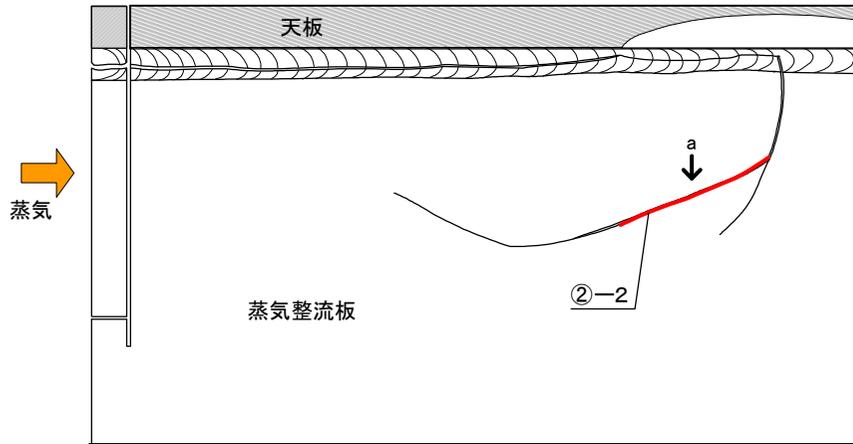


金属調査結果(②-1破面観察)

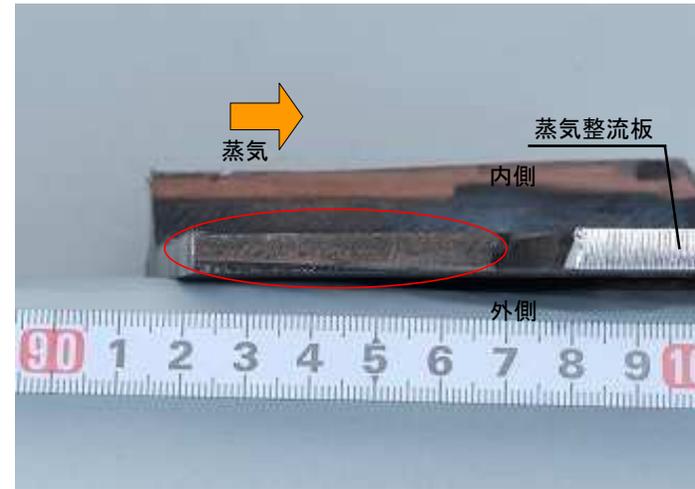


- ・割れは貫通していた。
- ・破面は、ほぼ平坦であり、き裂前縁の形状は半だ円状であることが認められた。

金属調査結果(②-2破面観察)



a

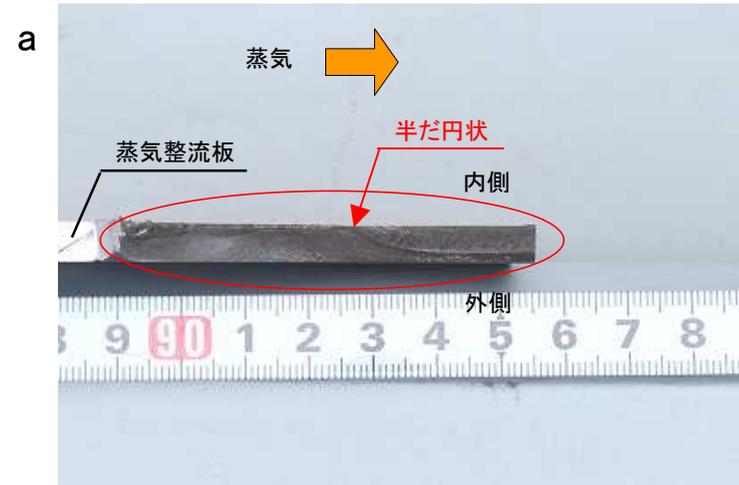
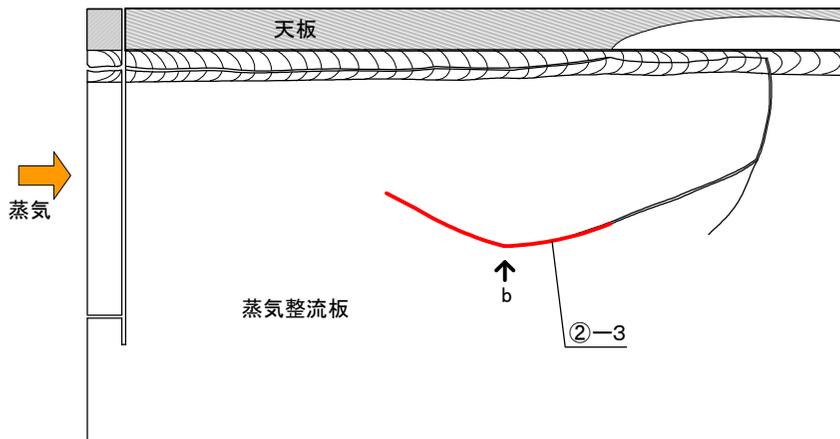
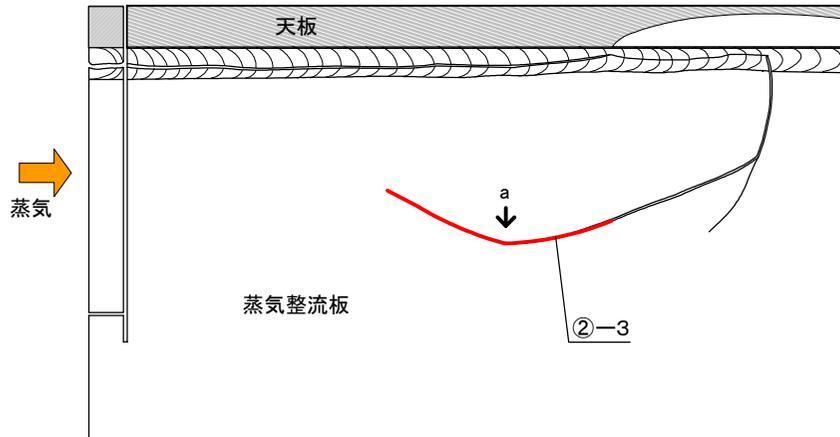


b



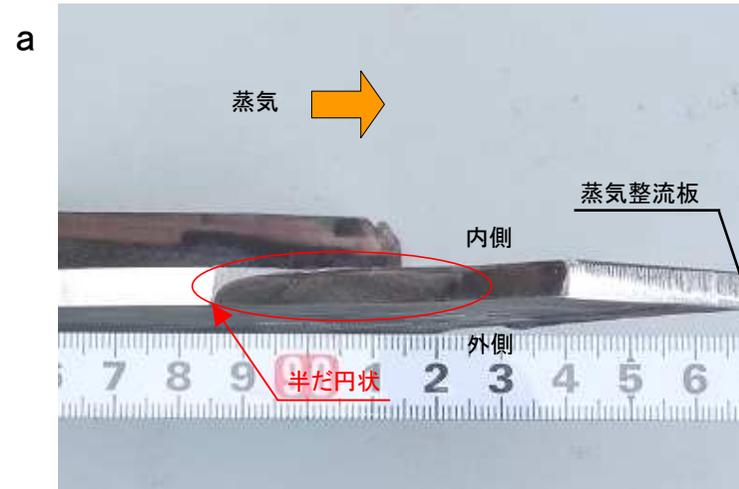
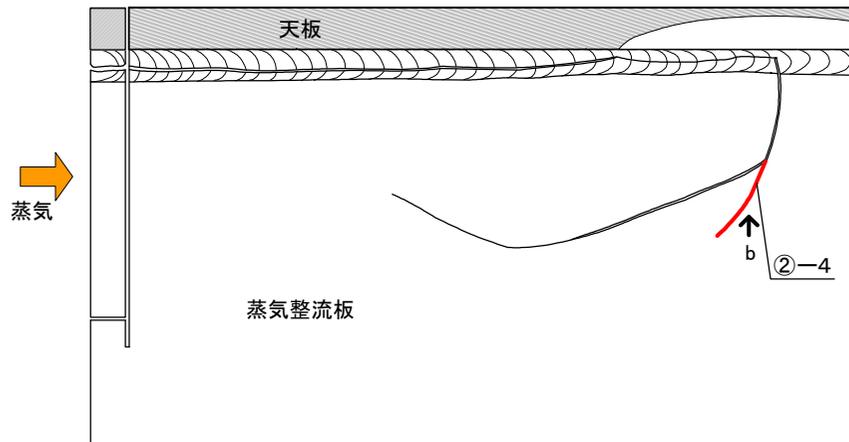
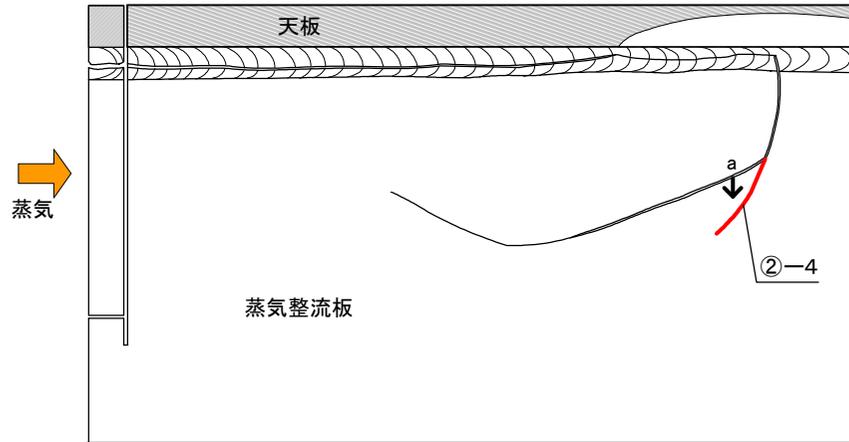
- ・割れは貫通していた。
- ・破面は、ほぼ平坦であることが認められた。

金属調査結果(②-3破面観察)



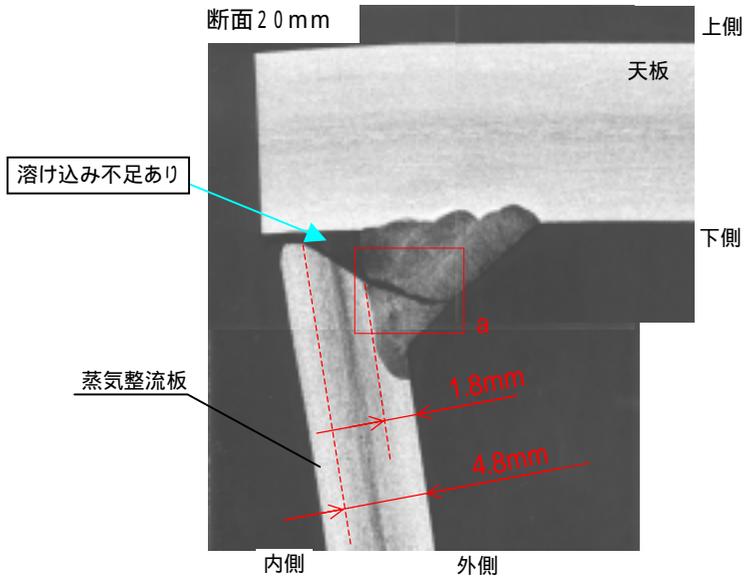
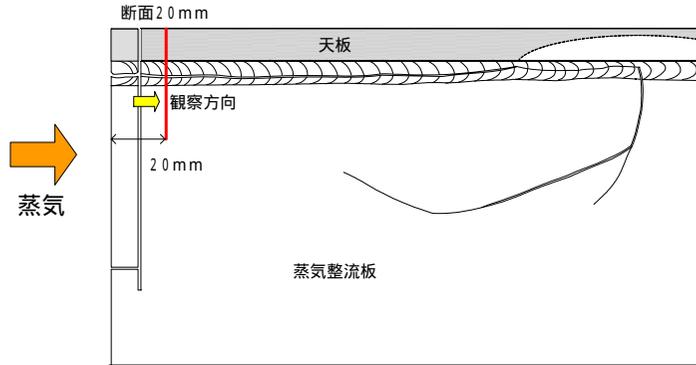
- ・割れは貫通していた。
- ・破面は、ほぼ平坦であり、き裂前縁の形状は半だ円状であることが認められた。

金属調査結果(②-4破面観察)

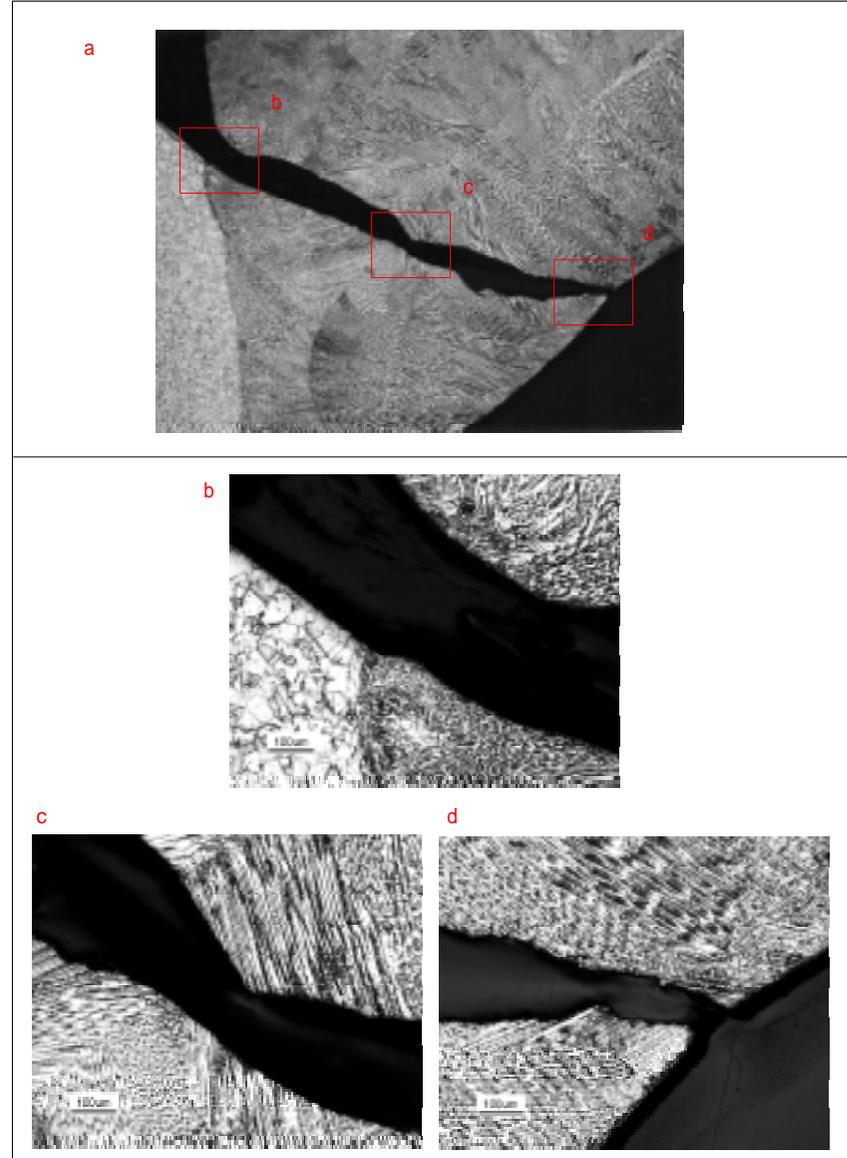


- ・割れは貫通していた。
- ・破面は、ほぼ平坦であり、き裂前縁の形状は半だ円状であることが認められた。

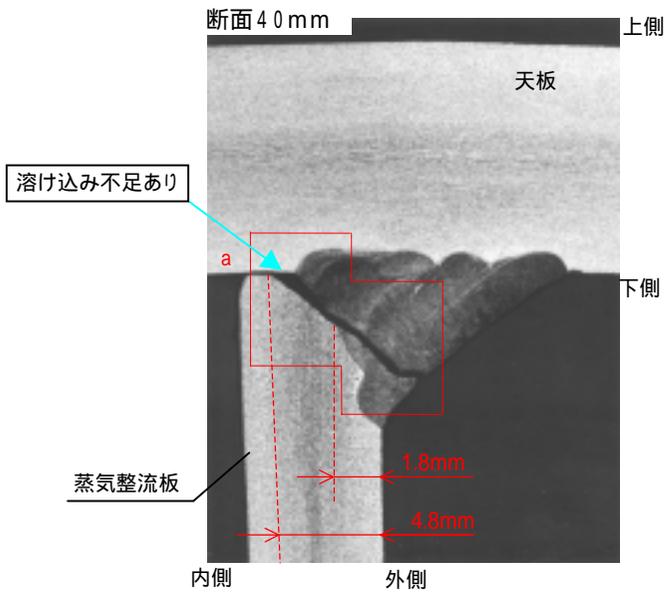
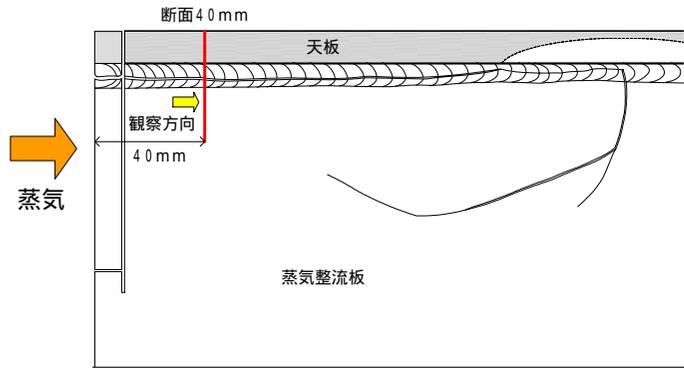
金属調査結果(断面ミクロ観察(断面 20mm))



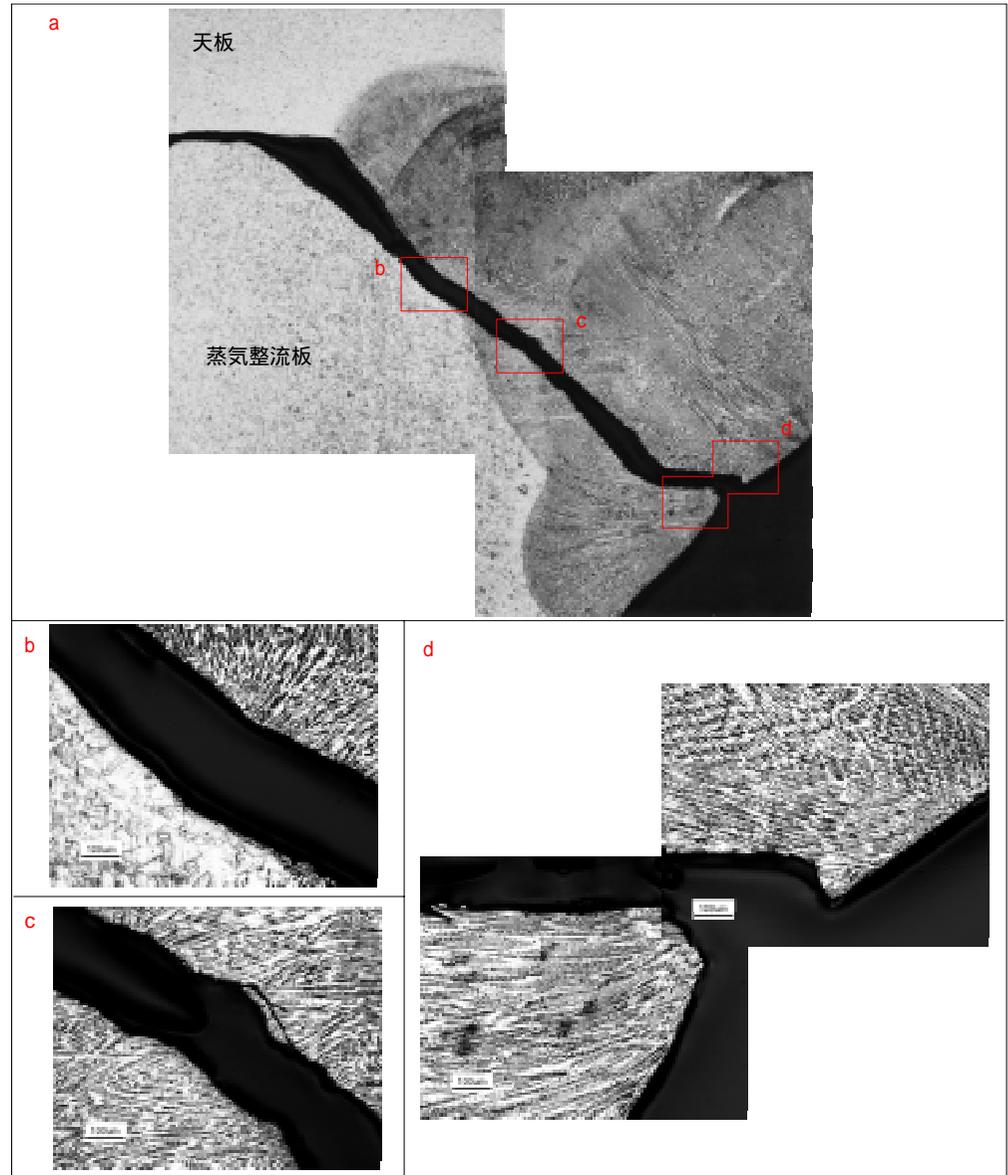
- ・断面の割れ形状は凹凸が少なく滑らかであることが認められた。
- ・割れは枝分かれがほとんどなく、粒内割れであることが認められた。
- ・介在物や腐食ピットは認められなかった。
- ・溶接の溶け込みが不足していることが認められた。



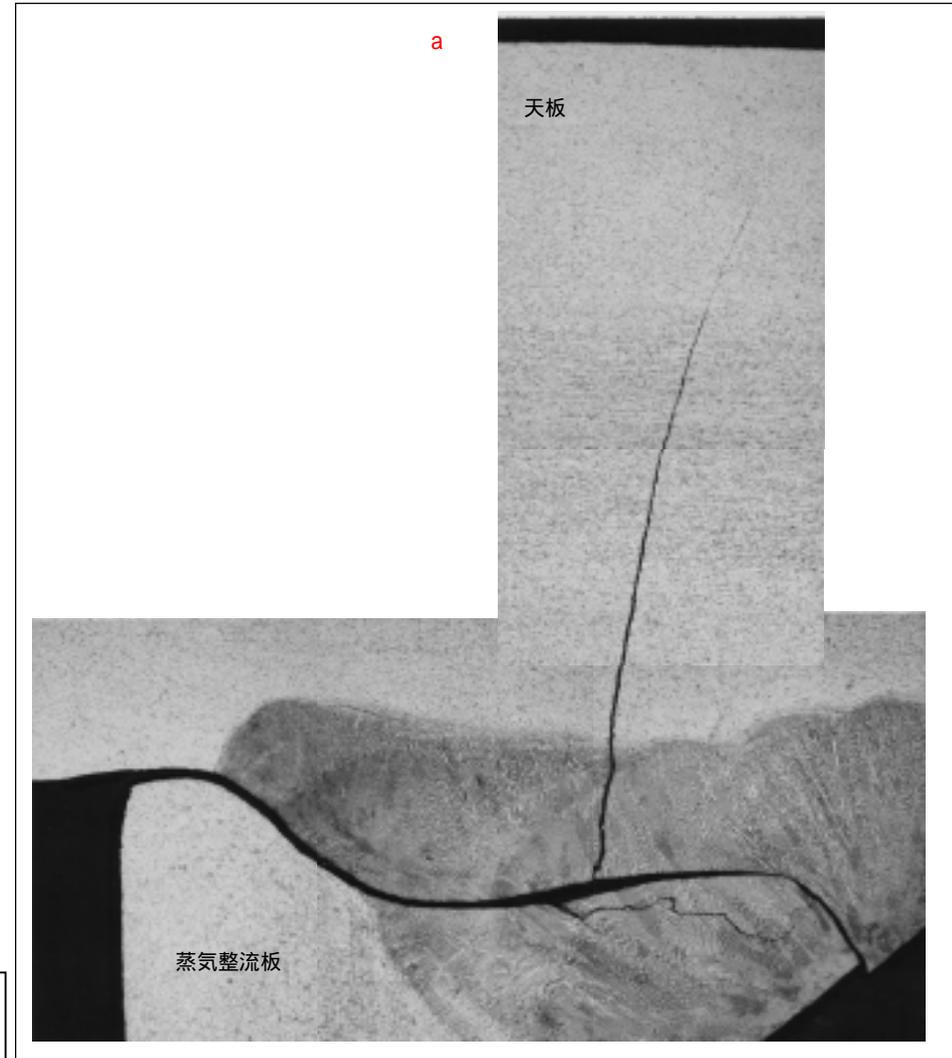
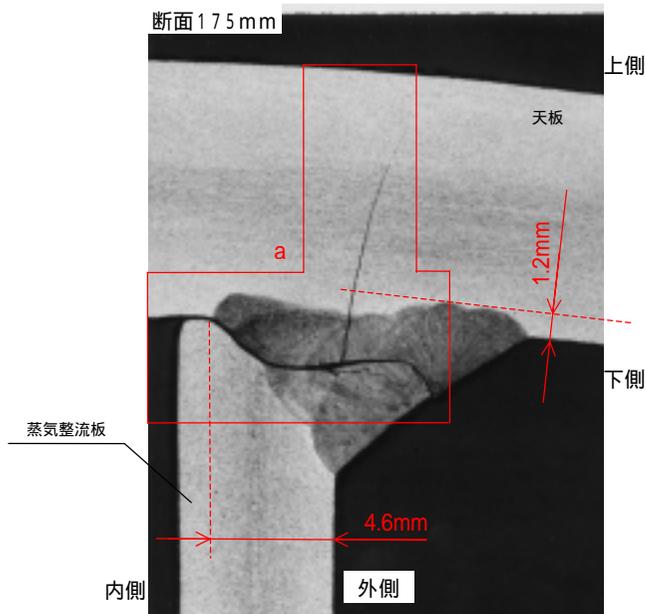
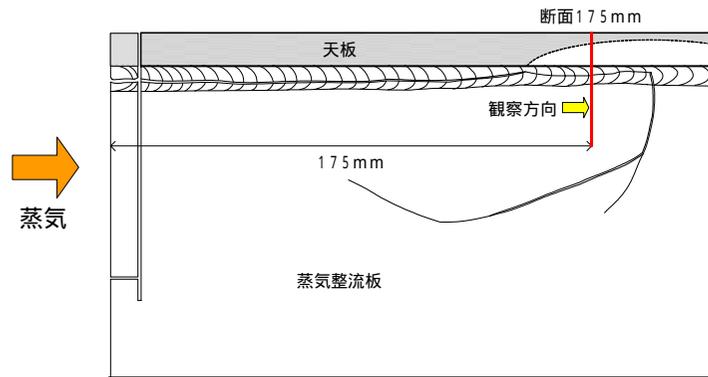
金属調査結果(断面ミクロ観察(断面 40mm))



- ・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、粒内割れであることが認められた。
- ・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。

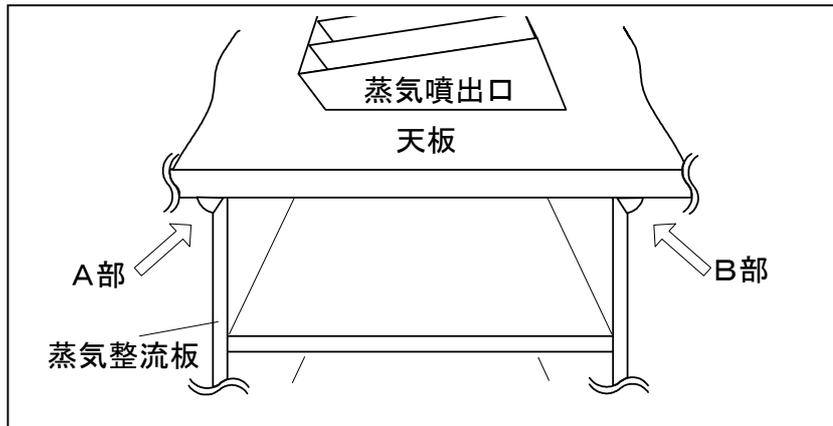


金属調査結果(断面ミクロ観察(断面 175mm))



- ・断面の割れ(主き裂)形状は凹凸が少なく滑らかであることが認められた。
- ・溶接部の割れは枝分かれがほとんどなく、粒内割れであることが認められた。
- ・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。
- ・天板の割れは、枝分かれがない粒内割れであることが認められた。
- ・介在物や腐食ピットは認められなかった。

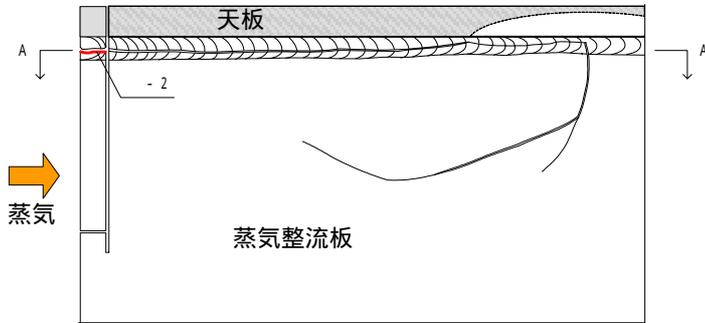
金属調査結果(のど厚測定)



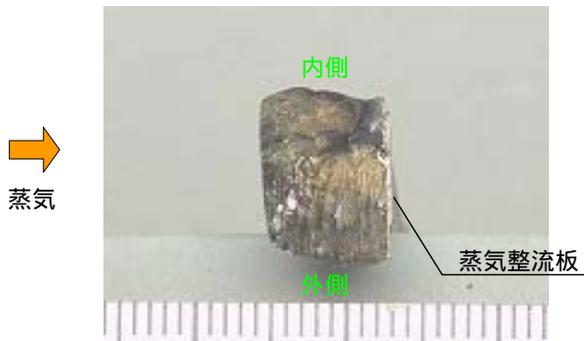
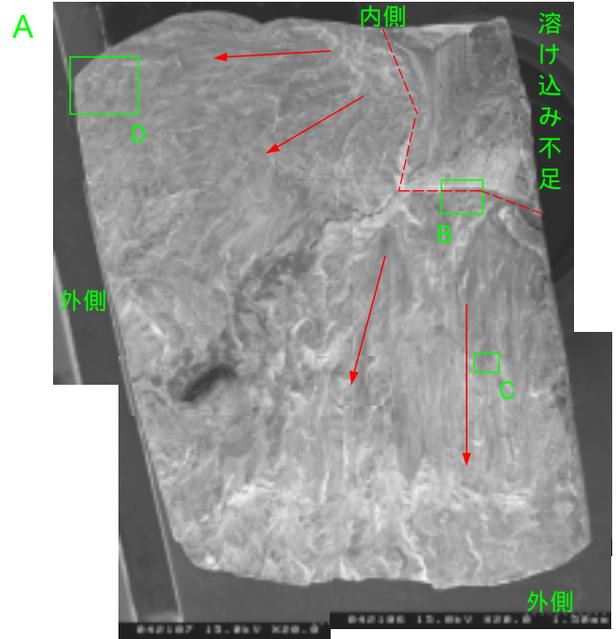
A部	B部
<p>健全箇所</p>	<p>溶接部割れ箇所</p>
<p>のど厚約6.5mm</p>	<p>のど厚約4.1mm</p>

断面マイクロ観察により、蒸気入口近傍の溶接部ののど厚寸法を測定した結果、A部に比べB部の寸法が小さいことを確認した。

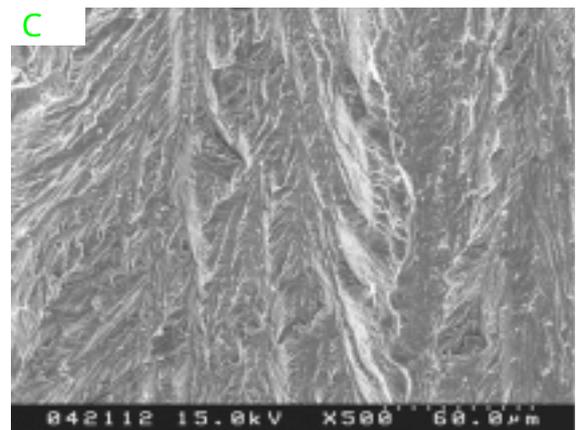
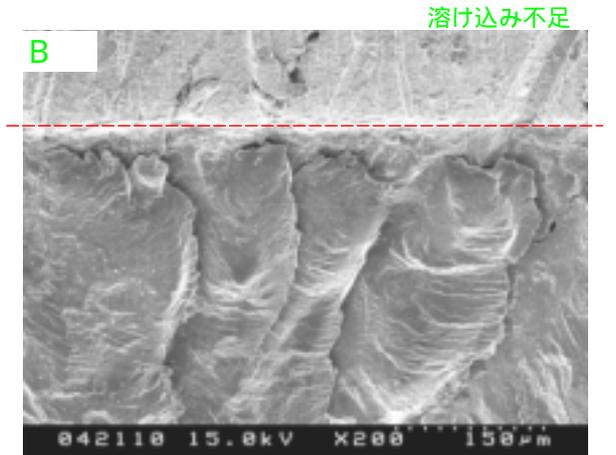
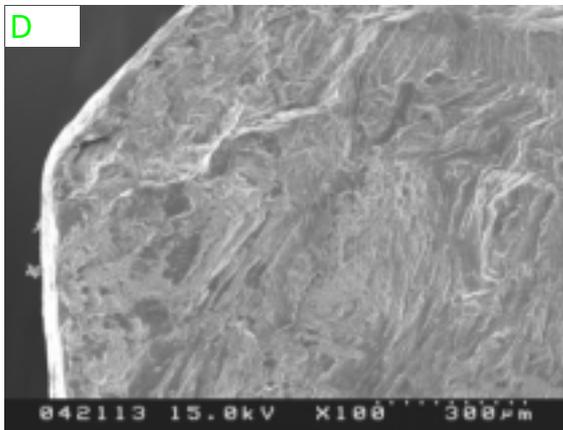
金属調査結果(破面SEM観察(溶接部割れ - 2 蒸気入口部))



→ : 矢印は金属組織の流れ方向を示す

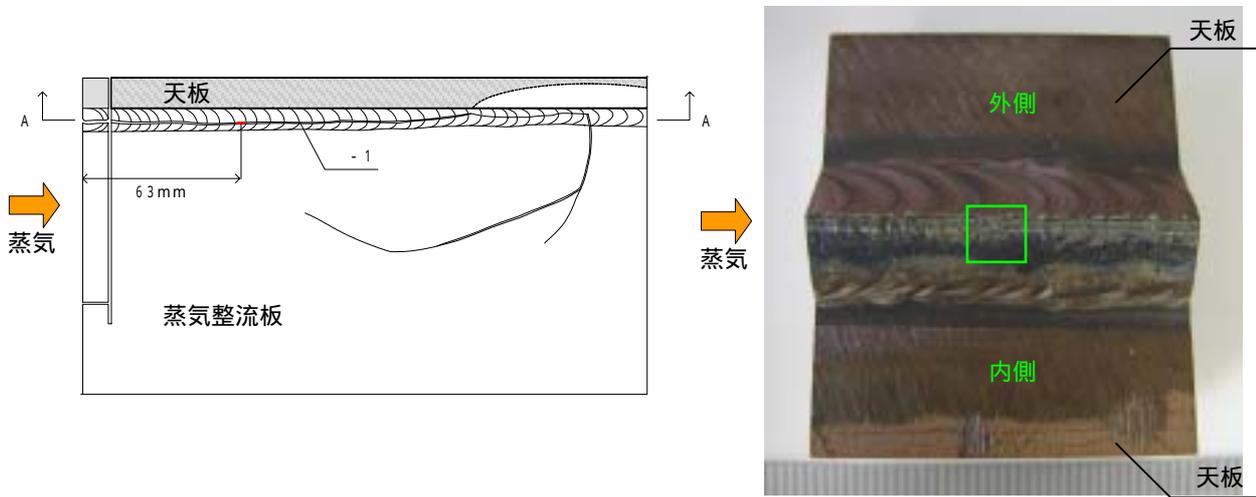


A - A 矢視

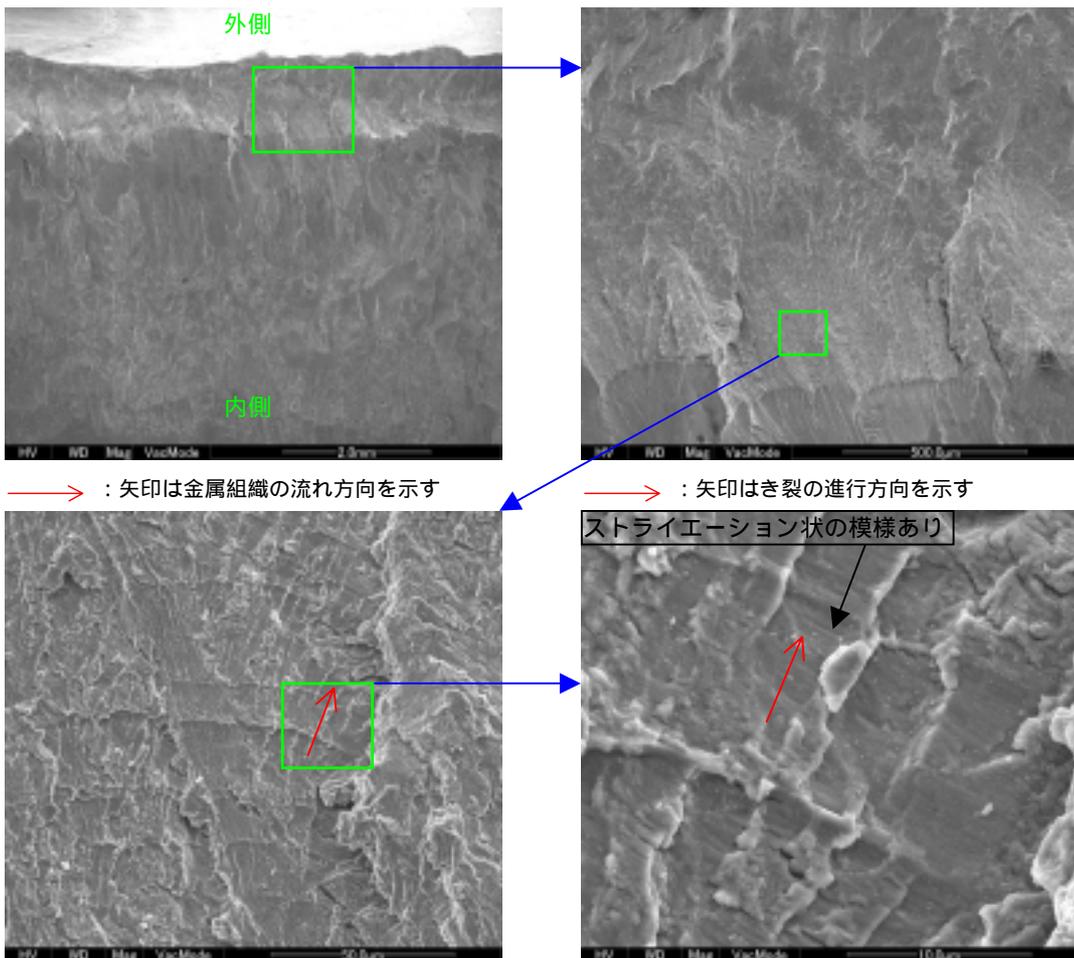


・内側の一部において、溶け込み不足部が認められ、溶け込み不足部から外側に向かう金属組織の流れ模様が認められた。
 ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(破面SEM観察(溶接部割れ - 1 中間部))



A - A 矢視

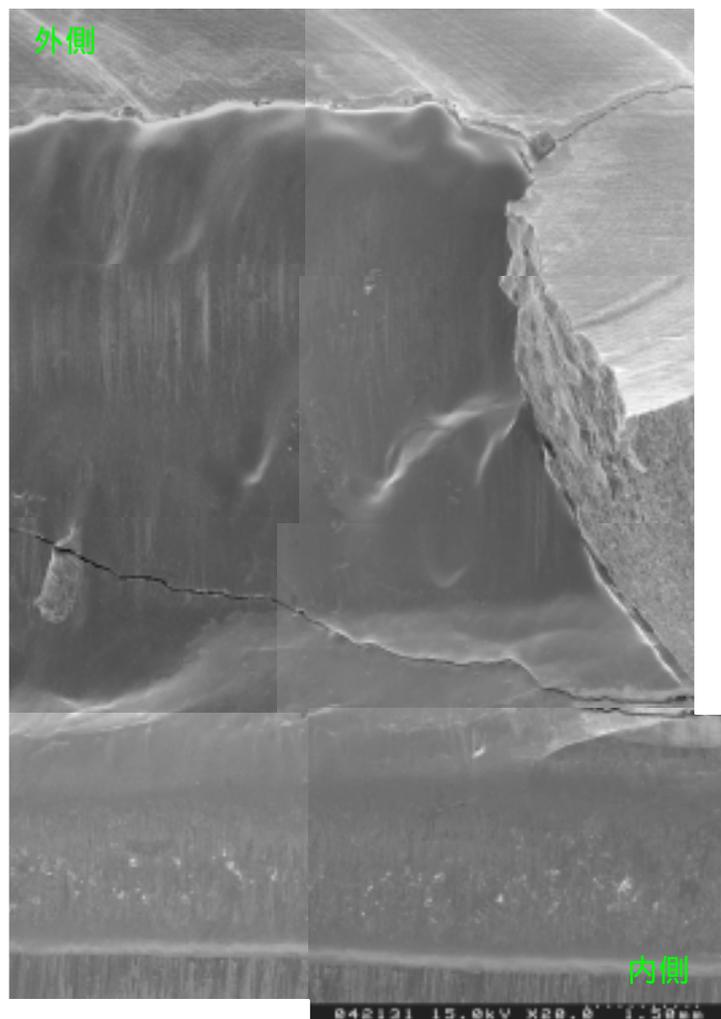
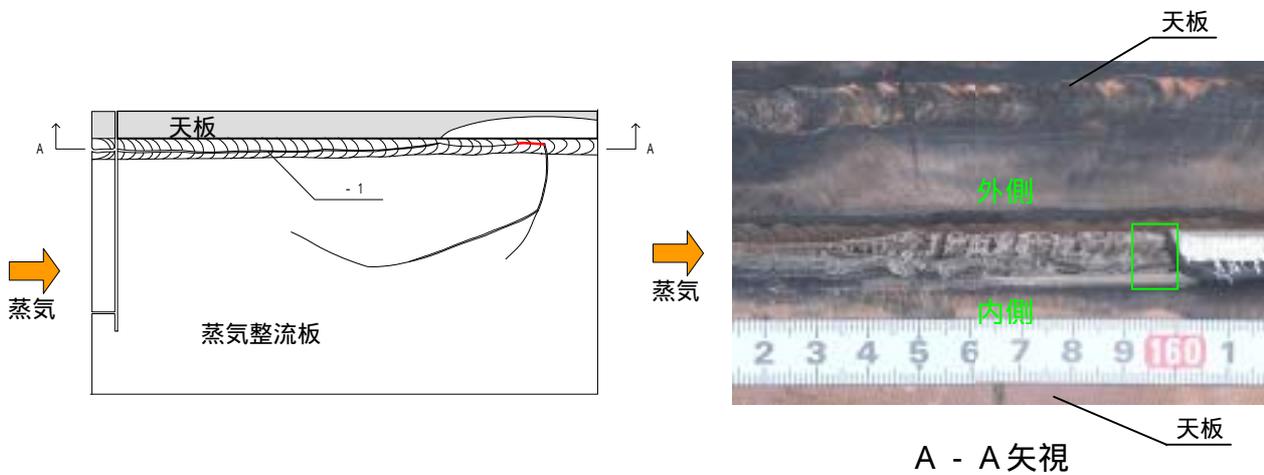


→ : 矢印は金属組織の流れ方向を示す

→ : 矢印はき裂の進行方向を示す

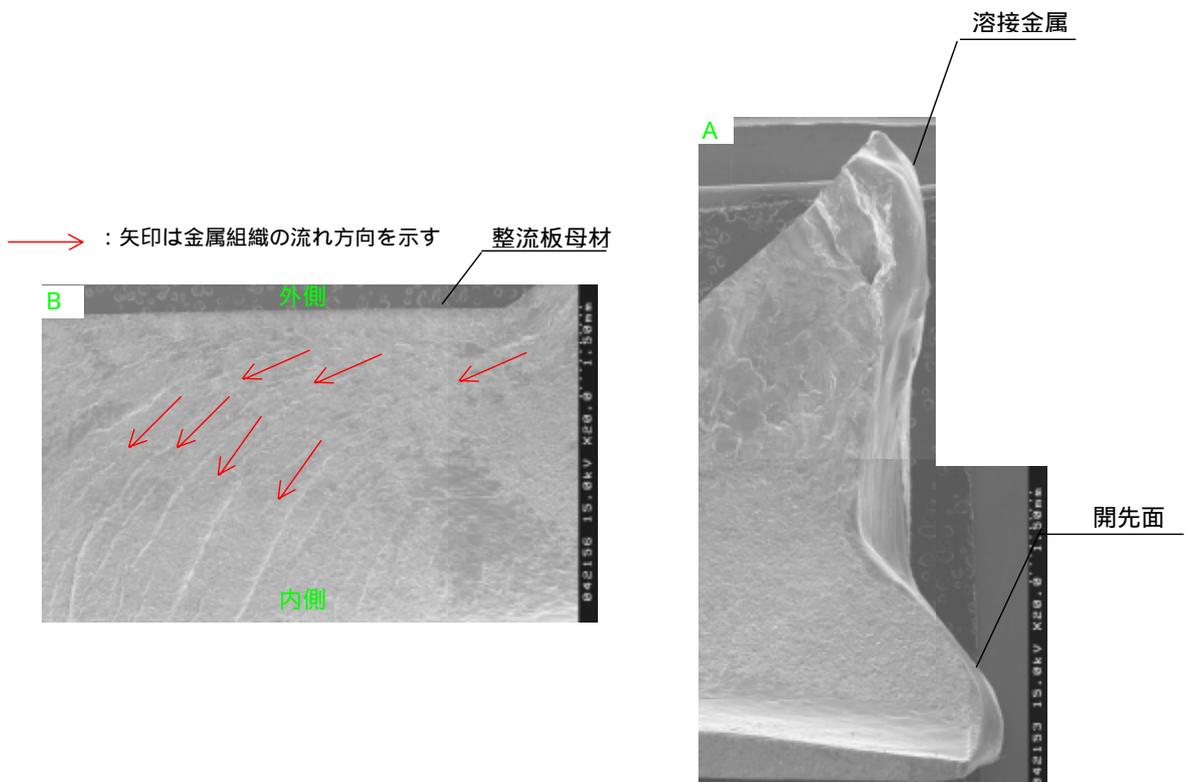
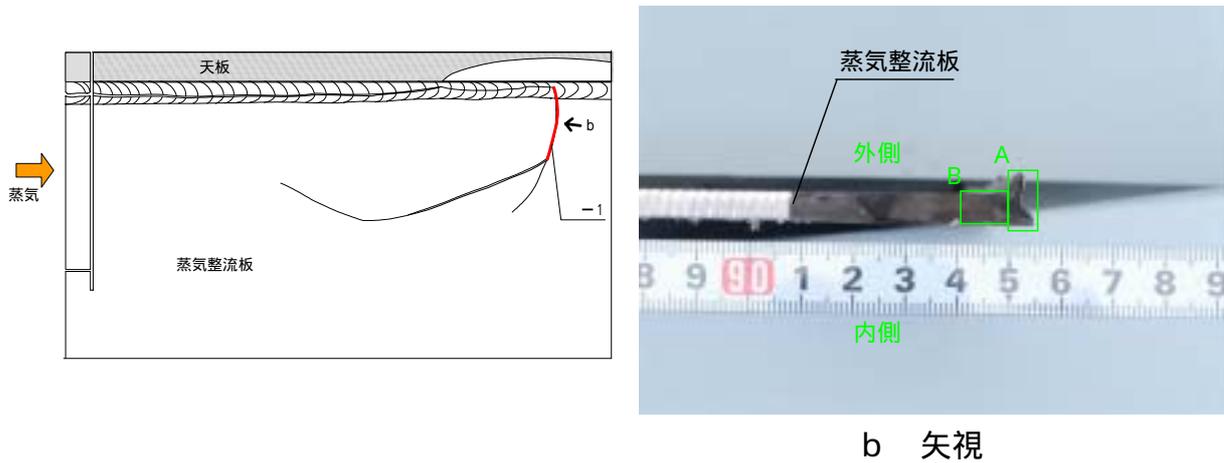
- ・破面には、疲労破面に特有なストライエーション状の模様が認められた。
- ・最終端部方向に溶接金属の内側から斜めに進展した金属組織の流れ模様が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果 (破面SEM観察 (溶接部割れ - 1最終端部))



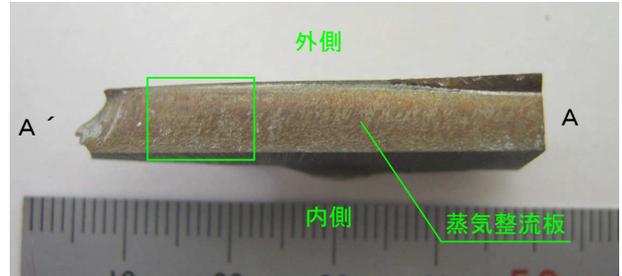
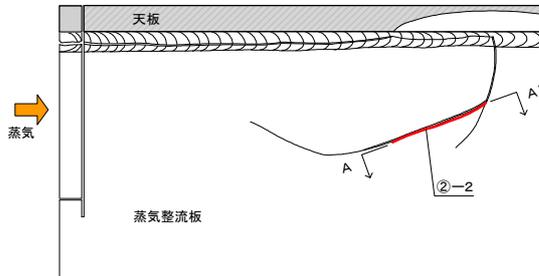
- ・破面は、打撃およびこすれにより、損傷していることが認められた。
- ・天板の割れは、溶金部から整流板へ折れ曲がった割れの角を通っていることが認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(破面SEM観察(蒸気整流板本体母材部割れ - 1))



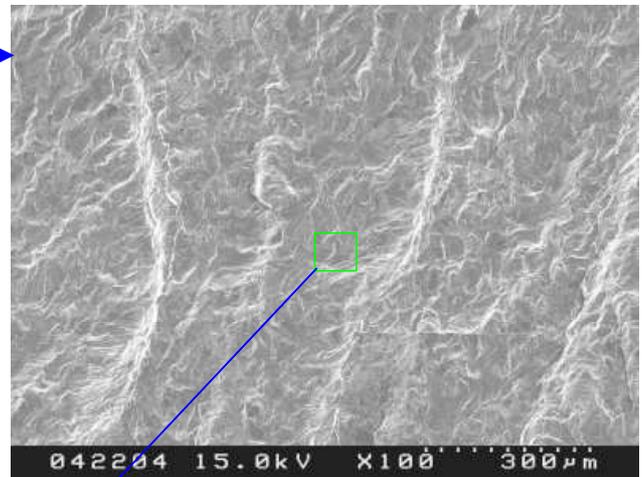
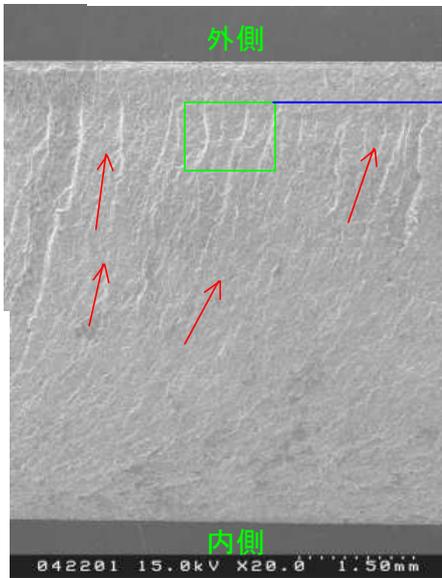
- 溶接金属側から整流板本体母材側へ向かって、金属組織の流れが認められた。
- 羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(破面SEM観察(蒸気整流板本体母材部割れ②-2))

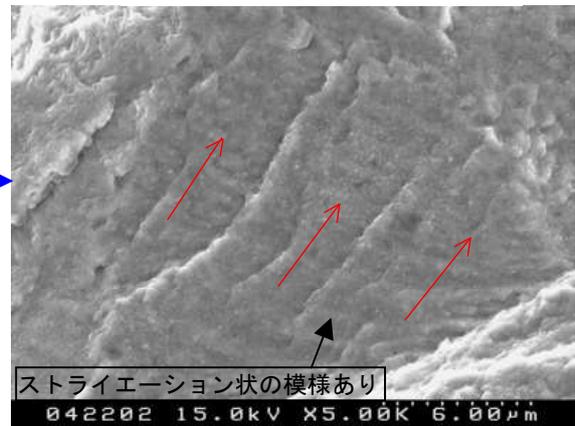
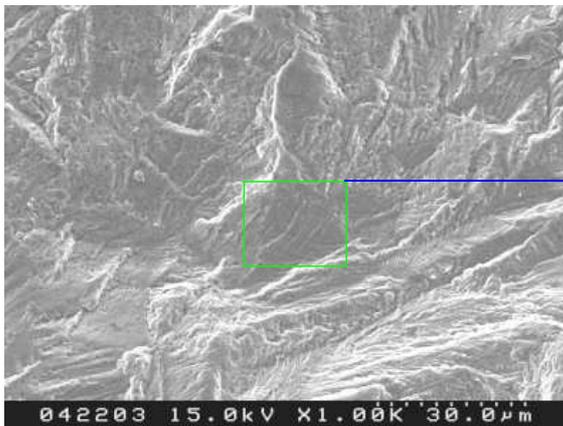


A-A' 矢視

→ : 矢印は金属組織の流れ方向を示す



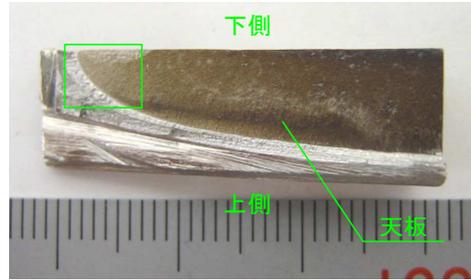
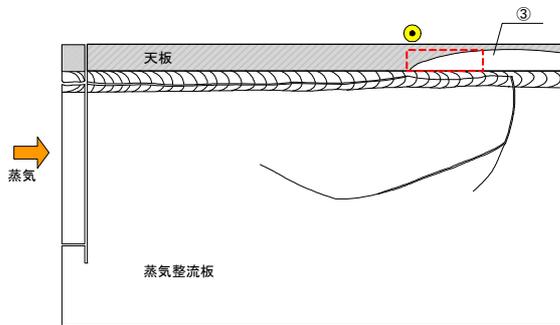
→ : 矢印はき裂の進展方向を示す



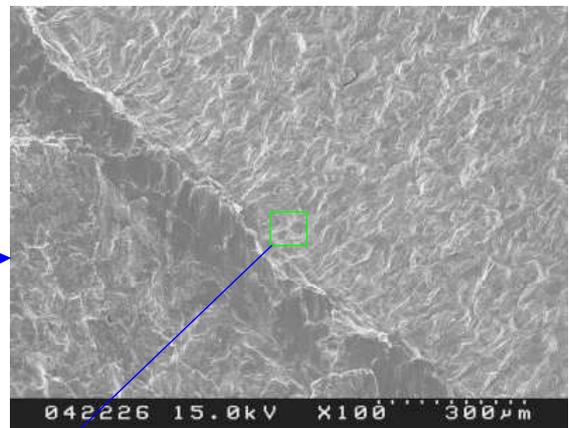
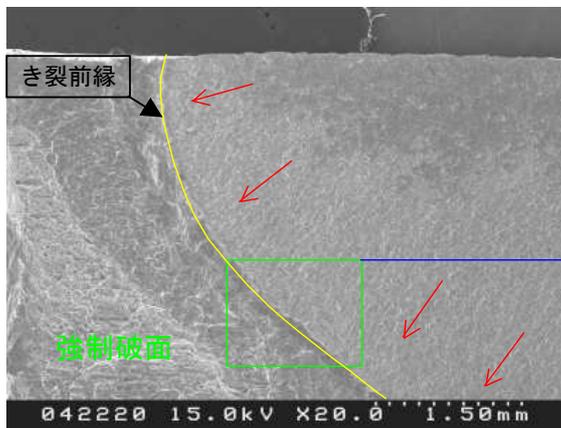
ストライエーション状の模様あり

- ・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。

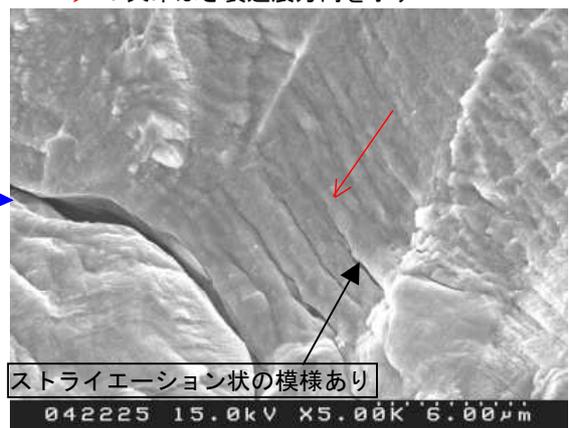
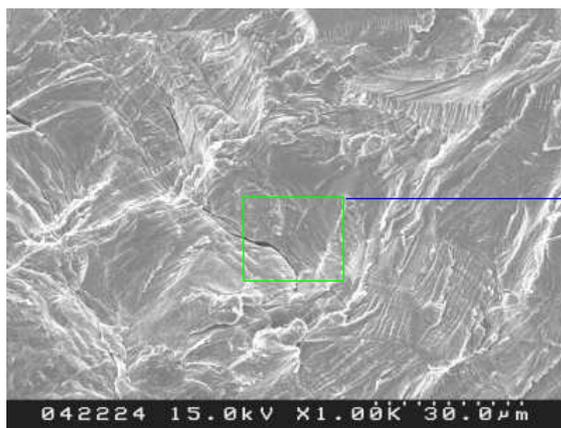
金属調査結果(破面SEM観察(天板部割れ③))



→ : 矢印は金属組織の流れ方向を示す



→ : 矢印はき裂進展方向を示す



- ・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。

金属調査結果(EDX分析)

EDX:エネルギー分散型X線分光法

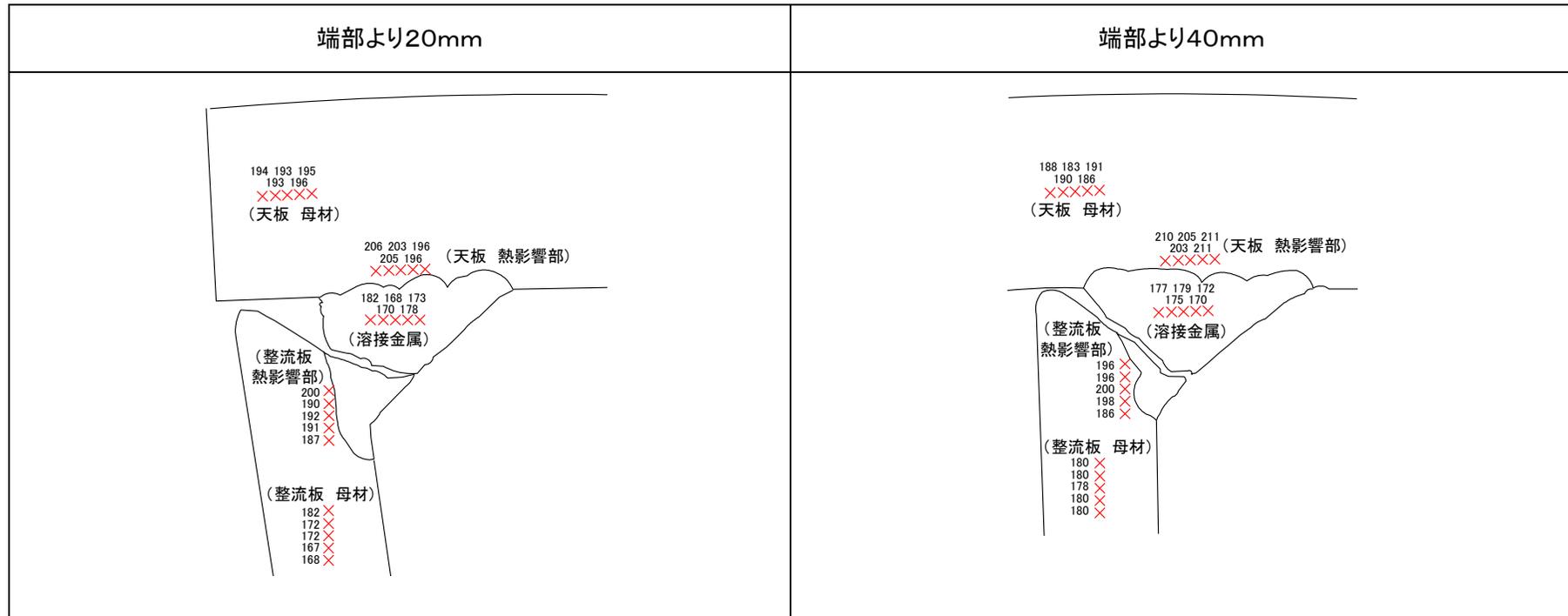
(単位:重量%)

項目	Cr	Fe	Ni	Si
破面	22.1	68.5	8.9	0.5

他の元素は検出限界0.1重量%以下であった。

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。

金属調査結果(硬度測定)



硬度測定結果(ピッカース硬さ:HV)

		天板		溶接金属	整流板	
		母材	熱影響部		熱影響部	母材
端部より 20mm	平均	195	202	175	192	173
	最高	196	206	182	200	182
端部より 40mm	平均	188	208	175	196	180
	最高	191	211	179	200	180

規格値*1

	HV
天板(母材)	200 以下
整流板(母材)	203 以下*2

*1: 溶接金属及び熱影響部は規格値なし

*2: 規格値ロックウェル硬さ B 92 以下を HV 換算した値

- ・母材は、規格値を満足しており問題はなかった。
- ・熱影響部および溶接金属は、母材の規格値に対して問題となる硬化は認められなかった。

疲労による割れの発生に関する評価

1. 目的

蒸気整流板の割れ発生部の詳細調査結果から、割れの発生要因として疲労によるものと推定されることから、蒸気整流板に作用する流体加振力による振動で発生する変動応力と天板復旧溶接によるひずみから生じる平均応力から等価応力振幅を算出し、疲労評価を実施する。

2. 検討項目

(1) 振動による変動応力の算出

a. 流体加振力算出

- ・蒸気整流板に作用する流体加振力（圧力変動パワースペクトル）を流体の数値解析により算出する。

b. 変動応力算出

- ・蒸気整流板と天板を板要素でモデル化し、流体加振力を入力としたランダム応答解析により、全体系の振動応答を算出する。
- ・大きな応力が生じた箇所について、ソリッド要素で詳細にモデル化し、静解析により変動応力を算出する。

(2) ひずみから生じる平均応力の算出

天板復旧溶接によるひずみから生じる平均応力を弾塑性解析により算出する。

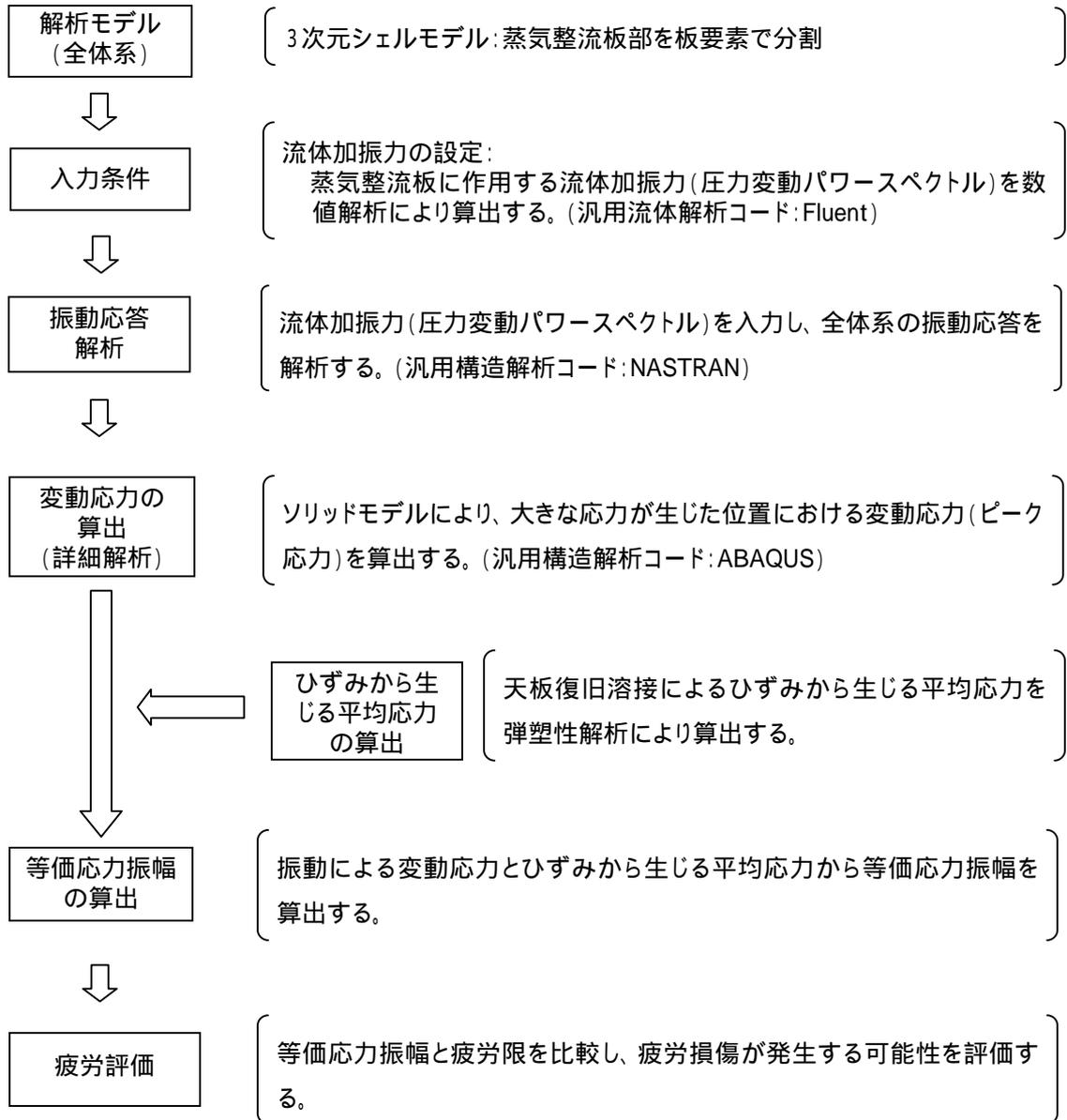
(3) 等価応力振幅の算出

振動による変動応力とひずみから生じる平均応力から等価応力振幅を算出する。

(4) 疲労評価

等価応力振幅と疲労限を比較し、疲労損傷が発生する可能性を評価する。

[検討フロー]



3. 評価結果

(1) 解析モデル

蒸気整流板と天板を対象に、3次元シェル(板)要素にてモデル化した。

拘束条件として天板の幅方向両端および手前側は溶接されていることから完全拘束、天板の奥側は実際には天板が続いていることから対称境界とし、蒸気整流板と天板との溶接部の厚さは、溶込み不足によるのど厚の減小を考慮した。

解析モデル図を図1に示す。

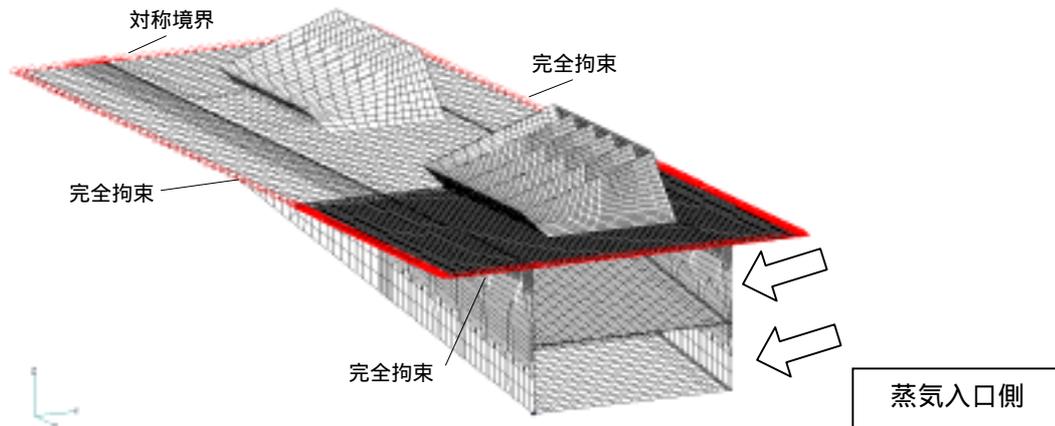


図1 解析モデル図

(2) 入力条件

運転中、蒸気整流板には、蒸気の流れによるランダムな圧力変動が生じる。この圧力変動を算出するため、汎用流体解析コード(Fluent)を用いて非定常流れの数値解析を実施し、振動応答解析に用いる圧力変動パワースペクトルを算出した。

計算諸元を表1に、圧力変動パワースペクトルを図2に、蒸気整流板廻りの形状および流れの様相を図3、図4に示す。

表1 流体解析における計算諸元

項目	単位	数値
流速	m/s	28
迎え角	°	70
板厚さ	mm	6
板間隔	mm	146

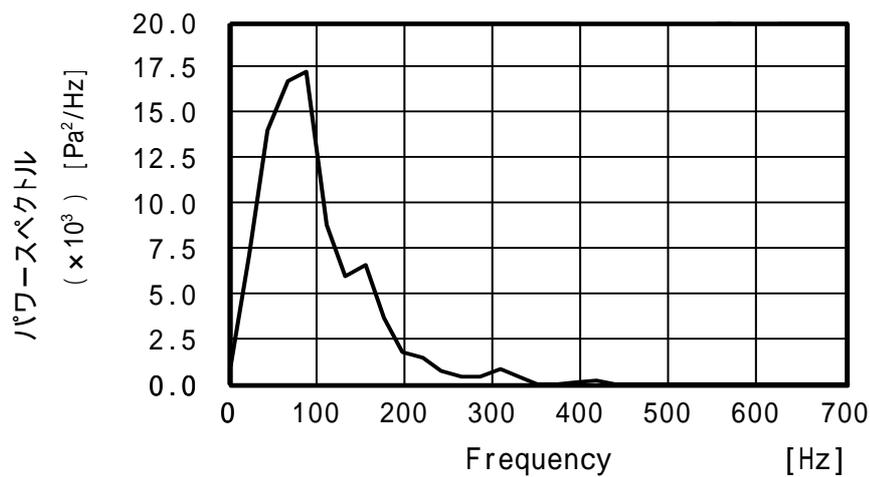


図2 圧力変動パワースペクトル

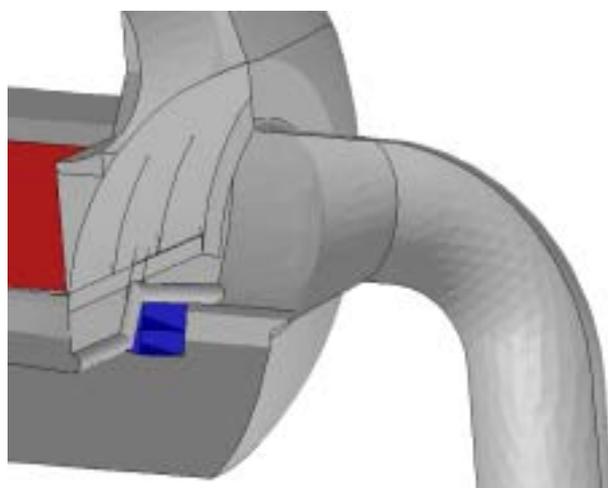


図3 入口管台および蒸気整流板廻り形状図

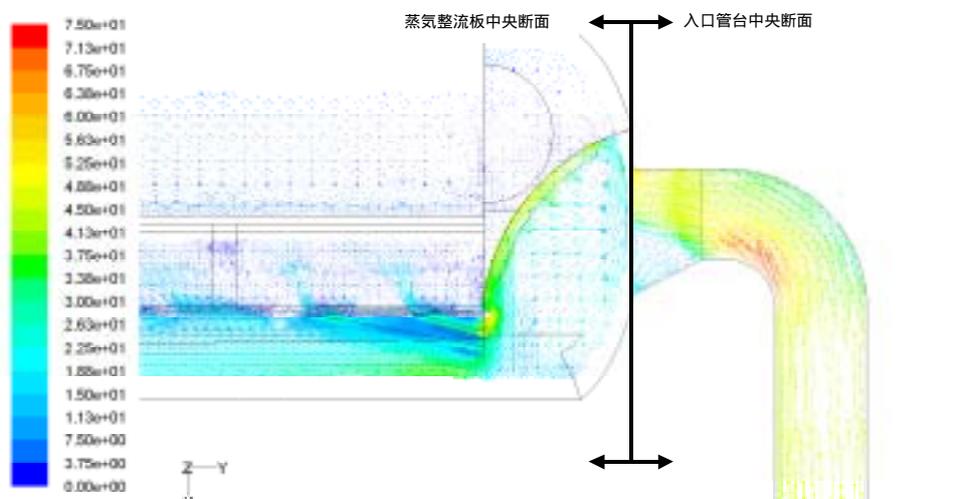
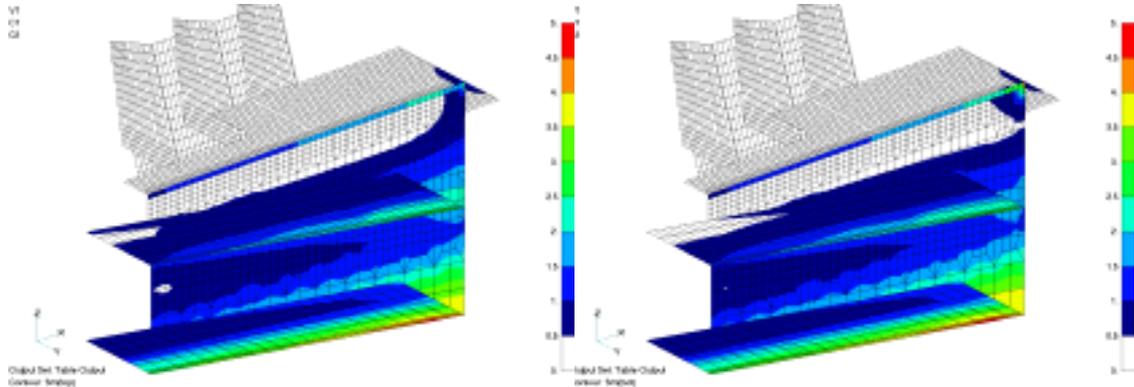


図4 入口管台および蒸気整流板断面流速ベクトル

(3) 振動応答解析

上記の圧力変動パワースペクトルを解析モデルに入力し、汎用構造解析コード (NASTRAN) を用いて振動応答解析を実施した。

応力コンター図 (無次元量) を図 5 に示す。



側板：外面、天板：上面の応力

側板：内面、天板：下面の応力

図 5 応力コンター図(無次元量)

(4) 変動応力の算出

振動応答解析の結果、最も大きな応力が生じた位置 (入口より 3mm) について、ソリッド要素でモデル化し、汎用構造解析コード (ABAQUS) により算出した。

解析結果を図 6 に示す。

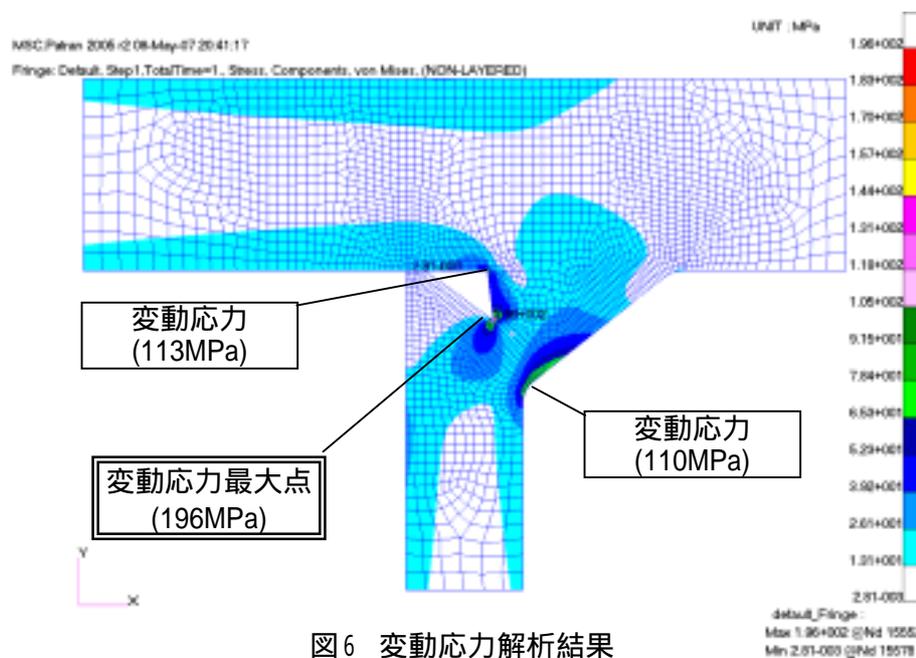


図 6 変動応力解析結果

(5) ひずみから生じる平均応力の算出

図7に示すモデル図を用いて、破損箇所の天板復旧溶接によるひずみにより蒸気整流板と天板との溶接部に生じる応力を弾塑性解析により算出した。

解析結果を図8に示す。

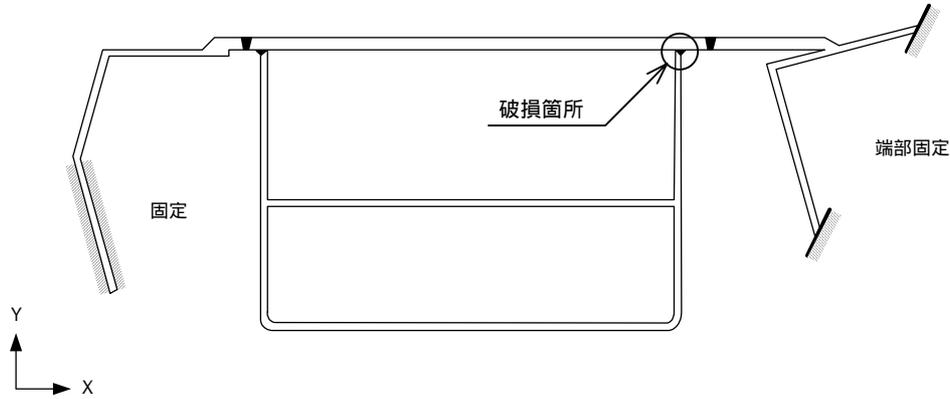


図7 解析モデル図

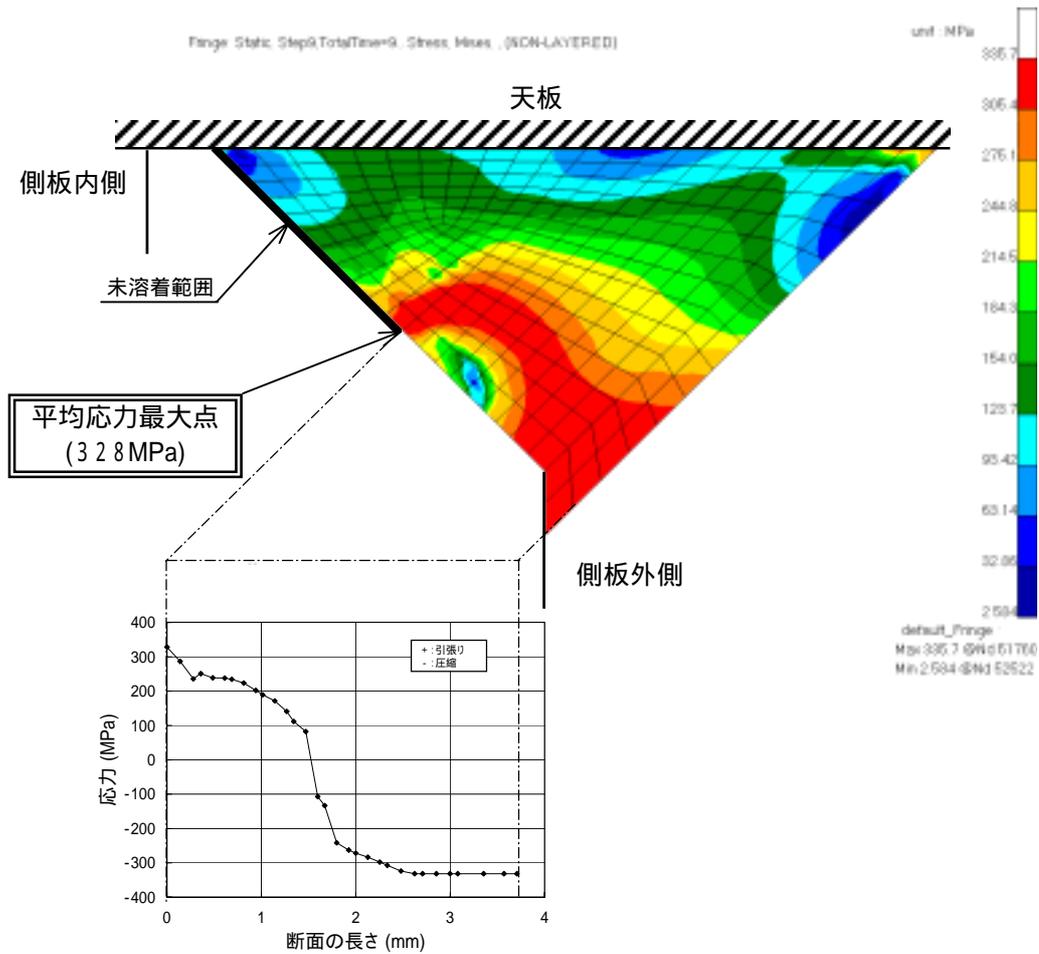


図8 溶接断面応力分布図

(6) 等価応力振幅の算出

振動による変動応力とひずみから生じる平均応力から等価応力振幅を算出した。

算出結果を表2に示す。なお、表中に示す等価応力振幅は、実機使用温度を考慮してヤング率補正係数(1.06)を乗じた値である。

表2 等価応力振幅算出結果

変動応力(MPa)	平均応力(MPa)	等価応力振幅(MPa)
196	328	218

: 等価応力振幅 $Seq = (E/Ea) \cdot Sa / (1 - ((Sy - Sa) / Su)^2)$

ヤング率補正 $(E/Ea) = 195000 / 183900 = 1.06$

Su: 引張り強さ (610MPa)

Sy: 平均応力

Sa: 変動応力

(7) 疲労評価

算出された等価応力振幅は疲労限を上回り、疲労損傷が発生し得ることを確認した。

評価結果を表3に示す。

表3 疲労評価結果

等価応力振幅(MPa)	疲労限(MPa)	疲労損傷の可能性
218	214	有

: 図9に示す疲労線図における繰返し数 10^{11} に相当する変動応力値

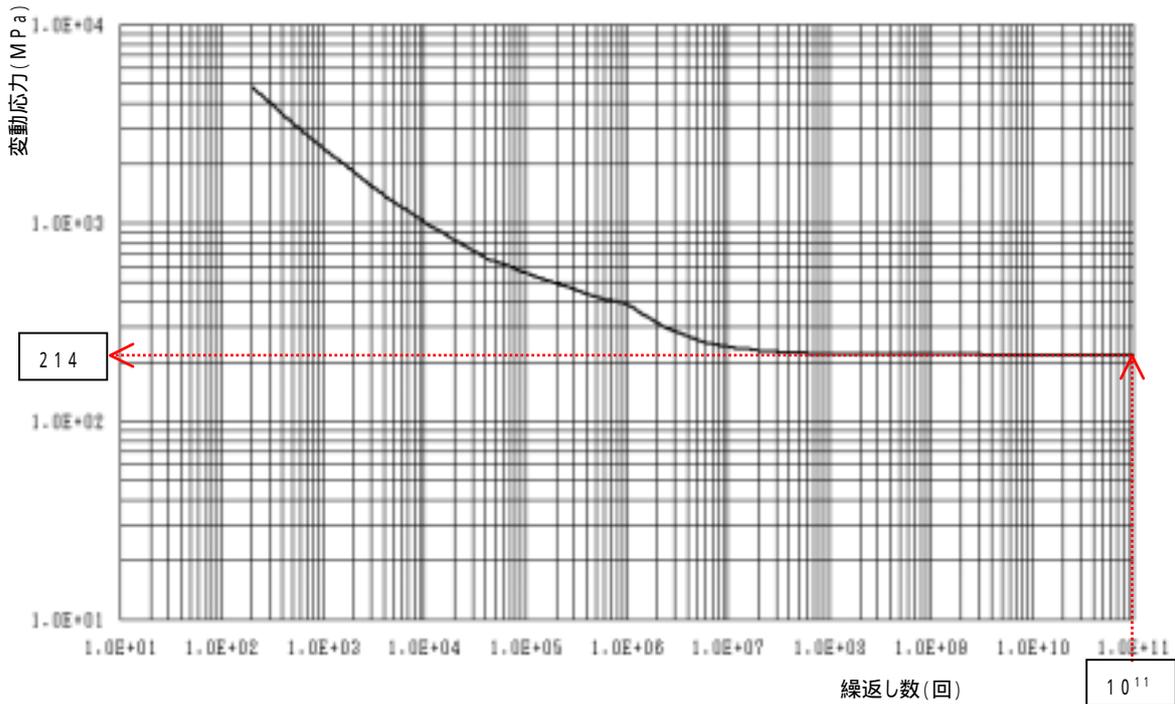


図9 疲労線図(ASME Sec. Division 2 Best fit curve、平均応力による補正前)
(オーステナイト系ステンレス鋼)

(8) 疲労割れ発生における溶け込み不足の影響評価

疲労割れ発生における溶け込み不足の影響を評価するため、天板復旧溶接によるひずみから生じる平均応力は作用するが、溶け込み不足は無い場合の等価応力振幅を算出した。

算出された等価応力振幅は疲労限以下であり、溶け込み不足が無ければ強度に問題はないことを確認した。

評価結果を表4、表5に示す。なお、表中に示す等価応力振幅は、実機使用温度を考慮してヤング率補正係数(1 . 0 6)を乗じた値である。

表4 等価応力振幅算出結果

変動応力(MPa)	平均応力(MPa)	等価応力振幅(MPa)
74	328	95

表5 疲労評価結果

等価応力振幅(MPa)	疲労限(MPa)	疲労損傷の可能性
95	214	無し

: 図9に示す疲労線図における繰返し数 10^{11} に相当する変動応力値

(9) 疲労割れ発生における平均応力の影響評価

疲労割れ発生における天板復旧溶接によるひずみの影響を評価するため、溶け込み不足はあるが、天板復旧溶接によるひずみから生じる平均応力が無い場合の変動応力を算出した。

算出された変動応力は疲労限以下であり、天板復旧溶接によるひずみから生じる平均応力が無ければ、強度に問題はないことを確認した。

評価結果を表6に示す。なお、表中に示す変動応力は、実機使用温度を考慮してヤング率補正係数(1.06)を乗じた値である。

表6 疲労評価結果

変動応力(MPa)	疲労限(MPa)	疲労損傷の可能性
208	214	無し

: 図9に示す疲労線図における繰返し数 10^{11} に相当する変動応力値

天板復旧溶接のない場合の疲労評価

1. 目的

天板復旧溶接が原因で割れが発生するかどうかを確認するため、天板復旧溶接によるひずみから生じる平均応力は考慮せず、蒸気整流板に作用する流体加振力による振動で発生する変動応力を用い、疲労評価を実施する。

2. 検討項目

(1) 振動による変動応力の算出

a. 流体加振力算出

- ・蒸気整流板に作用する流体加振力（圧力変動パワースペクトル）を流体の数値解析により算出する。

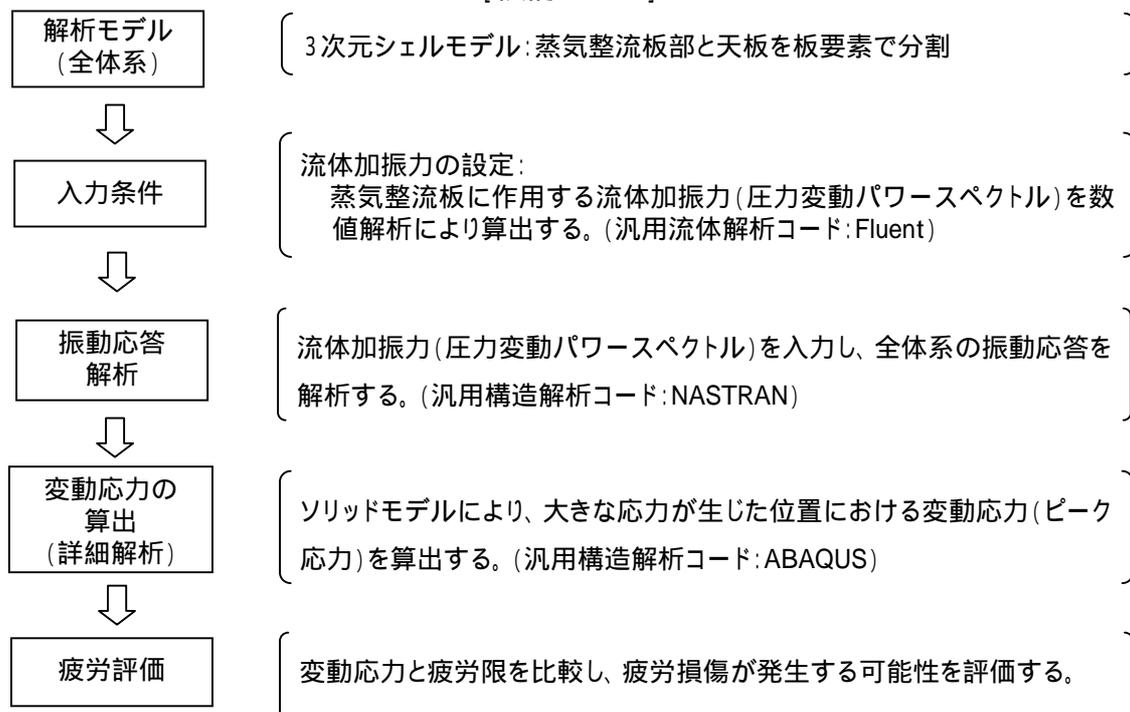
b. 変動応力算出

- ・蒸気整流板と天板を板要素でモデル化し、流体加振力を入力としたランダム応答解析により、全体系の振動応答を算出する。
- ・大きな応力が生じた箇所について、ソリッド要素で詳細にモデル化し、静解析により変動応力を算出する。

(2) 疲労評価

変動応力と疲労限を比較し、疲労損傷が発生する可能性を評価する。

[検討フロー]



3. 評価結果

(1) 解析モデル

蒸気整流板と天板を対象に、3次元シェル(板)要素にてモデル化した。

拘束条件として天板の幅方向両端および手前側は溶接されていることから完全拘束、天板の奥側は実際には天板が続いていることから対称境界とし、蒸気整流板と天板との溶接部の厚さは、溶込み不足によるのど厚の減小を考慮した。また、蒸気入口側から100mmは内側に隅肉溶接が施工されているものを模擬した。

解析モデル図を図1に示す。

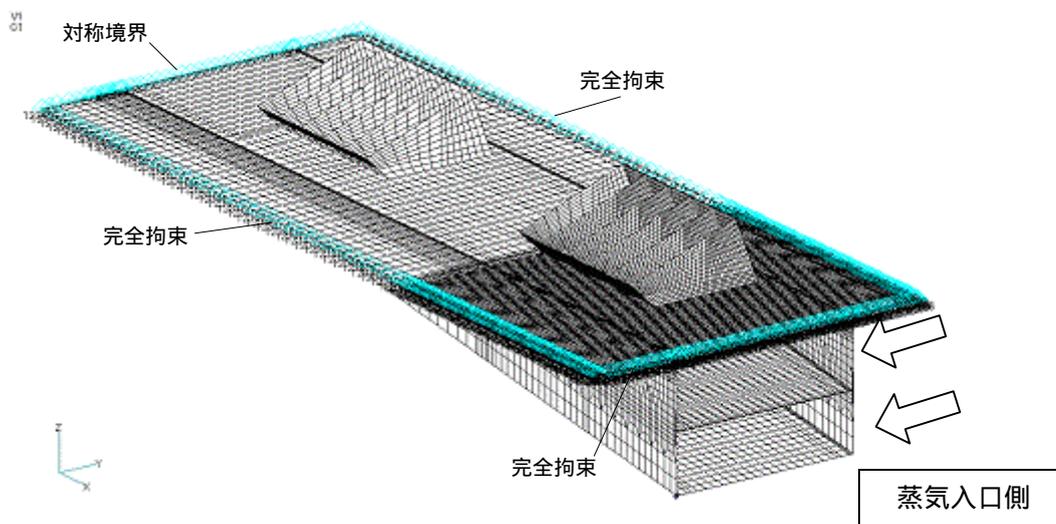


図1 解析モデル図

(2) 入力条件

運転中、蒸気整流板には、蒸気の流れによるランダムな圧力変動が生じる。この圧力変動を算出するため、汎用流体解析コード(Fluent)を用いて非定常流れの数値解析を実施し、振動応答解析に用いる圧力変動パワースペクトルを算出した。

計算諸元を表1に、圧力変動パワースペクトルを図2に、蒸気整流板廻りの形状および流れの様相を図3、図4に示す。

表1 流体解析における計算諸元

項目	単位	数値
流速	m/s	28
迎え角	°	70
板厚さ	mm	6
板間隔	mm	146

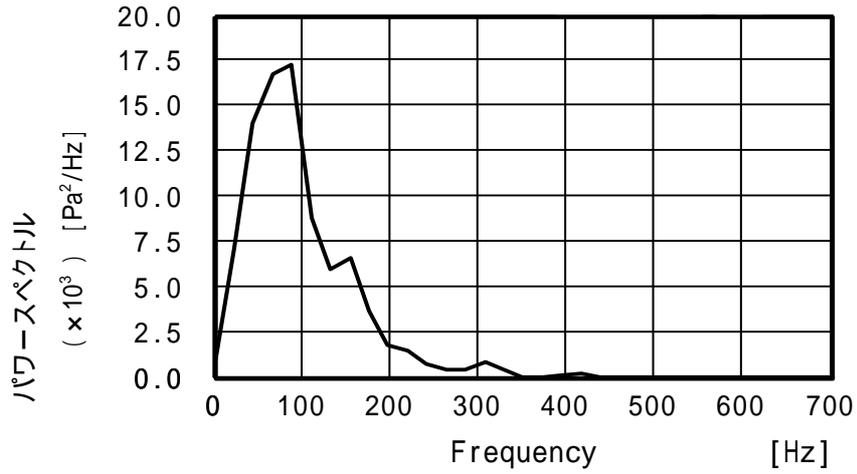


図2 圧力変動パワースペクトル

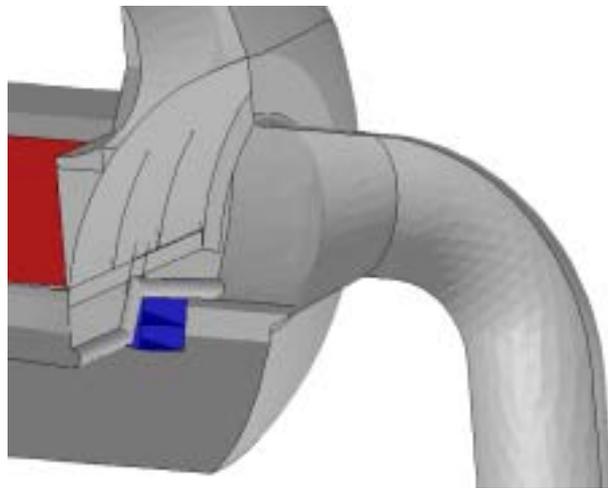


図3 入口管台および蒸気整流板廻り形状図

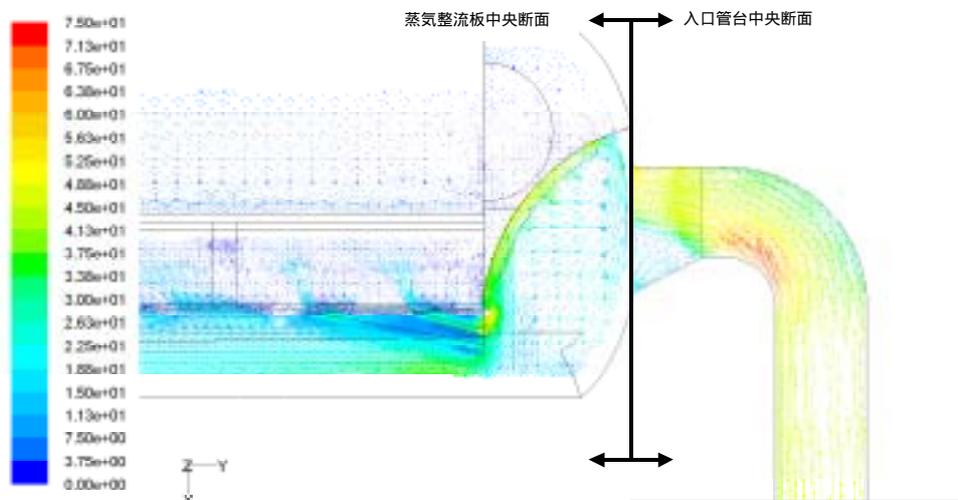


図4 入口管台および蒸気整流板断面流速ベクトル

(3) 振動応答解析

上記の圧力変動パワースペクトルを解析モデルに入力し、汎用構造解析コード (NASTRAN) を用いて振動応答解析を実施した。

応力コンター図 (無次元量) を図5 に示す。

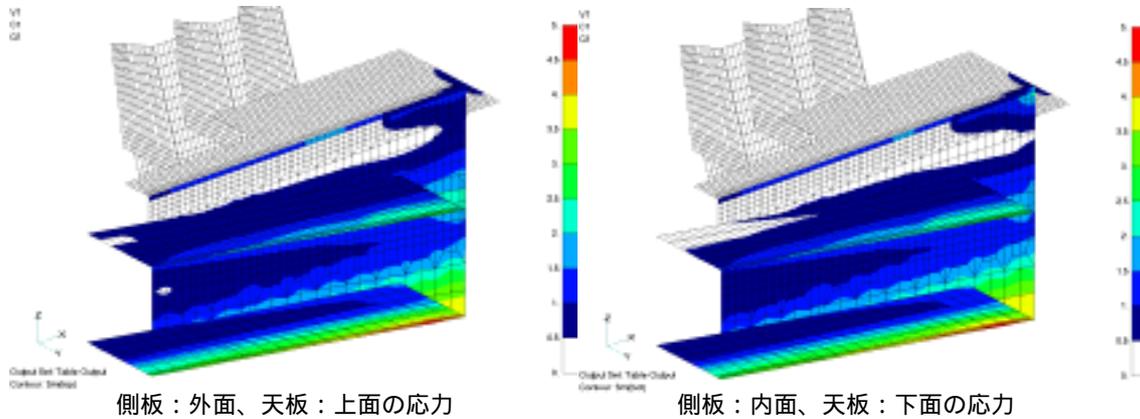


図5 応力コンター図(無次元量)

(4) 変動応力の算出

蒸気入口側より 3mm の内側に隅肉溶接がある箇所および蒸気入口側より 100mm の内側に隅肉溶接がない箇所について、ソリッド要素でモデル化し、汎用構造解析コード (ABAQUS) により変動応力を算出した。

解析結果を図6、図7に示す。なお、図中に示す変動応力は、実機使用温度を考慮してヤング率補正係数 (1.06) を乗じた値である。

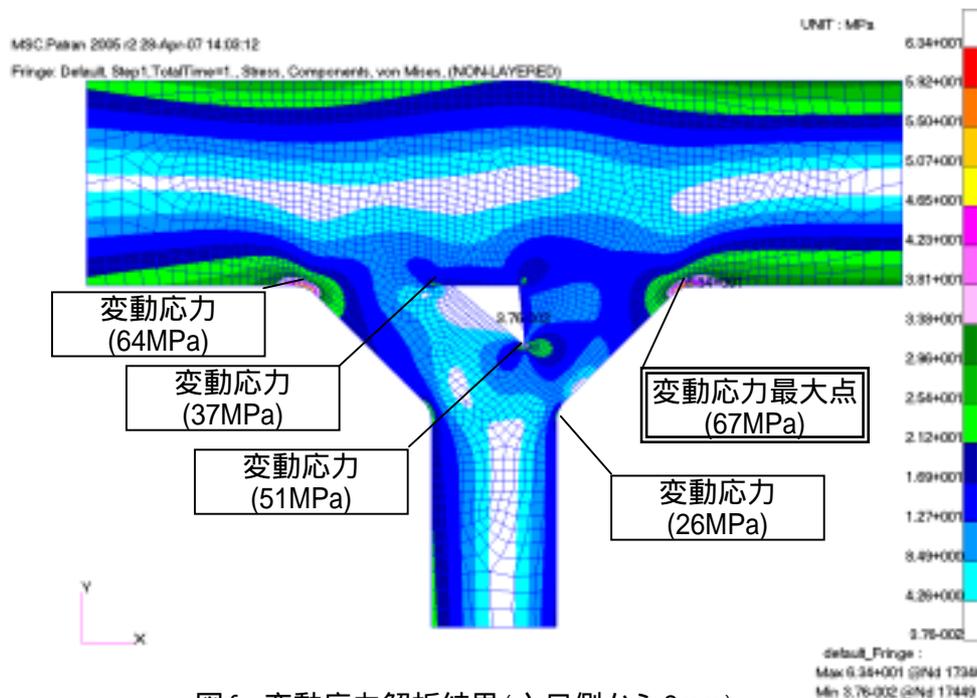


図6 変動応力解析結果 (入口側から 3mm)

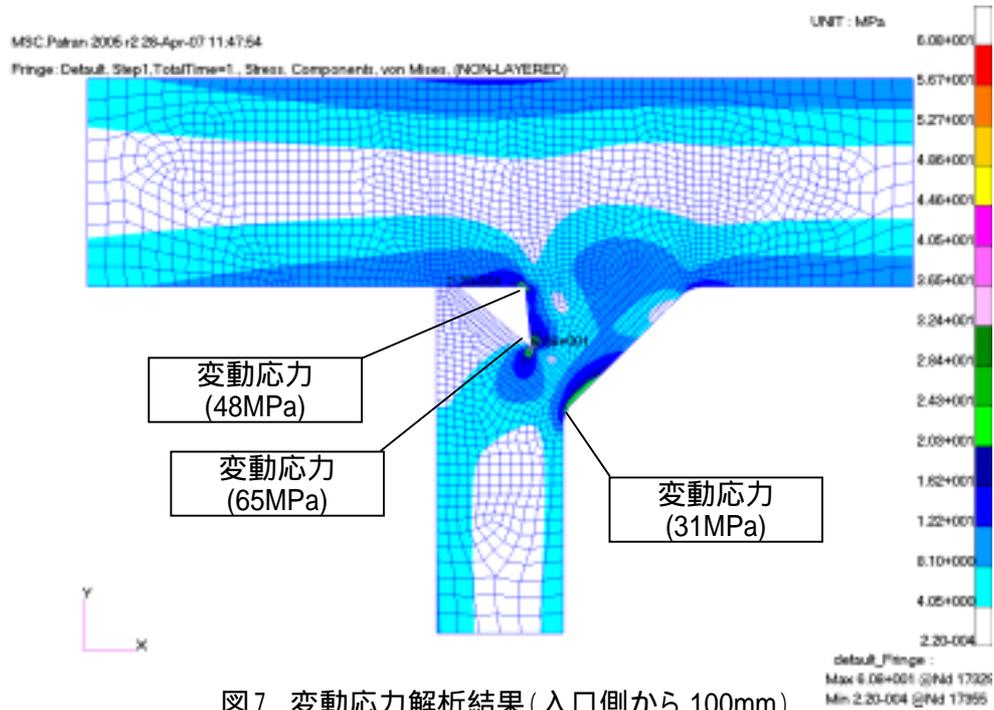


図7 変動応力解析結果(入口側から 100mm)

(5) 疲労評価

算出された変動応力は疲労限以下であり、強度に問題はないことを確認した。

評価結果を表 2 に示す。

表2 疲労評価結果

変動応力(MPa)	疲労限 (MPa)	疲労損傷の可能性
6.7	9.4	無し

: 図8 に示す疲労線図における繰返し数 10^{11} に相当する変動応力値

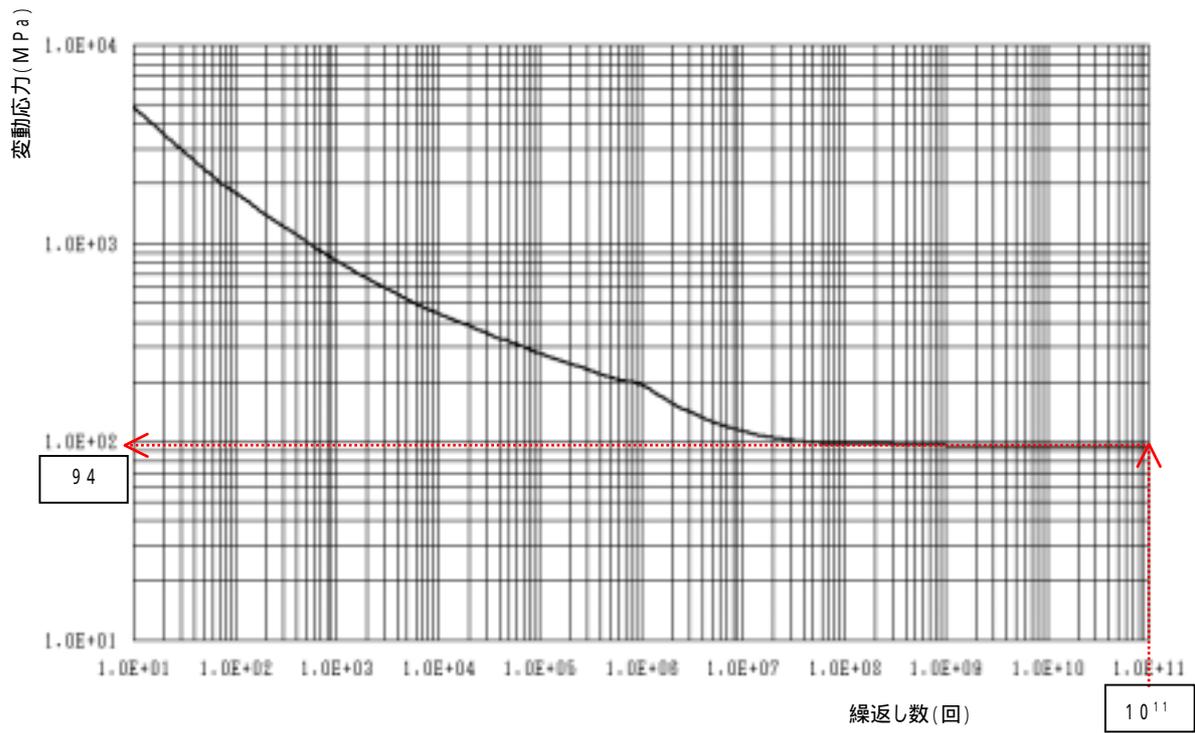
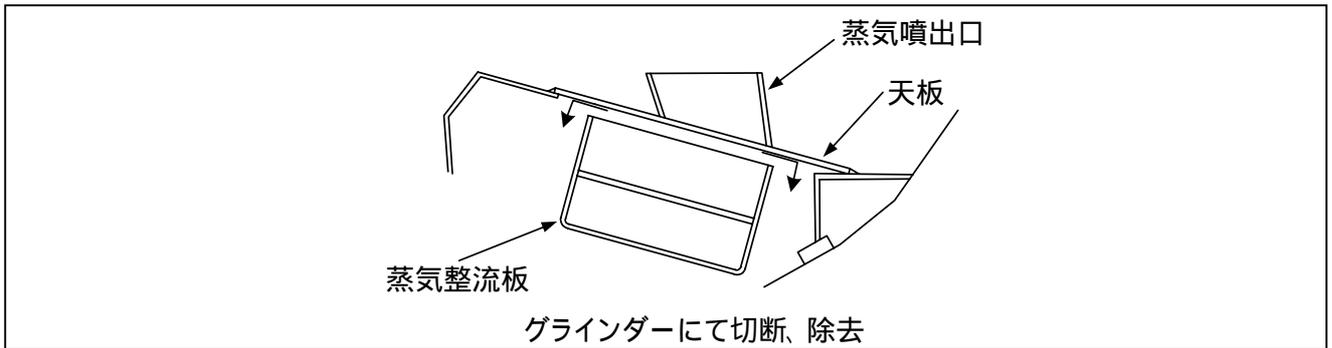


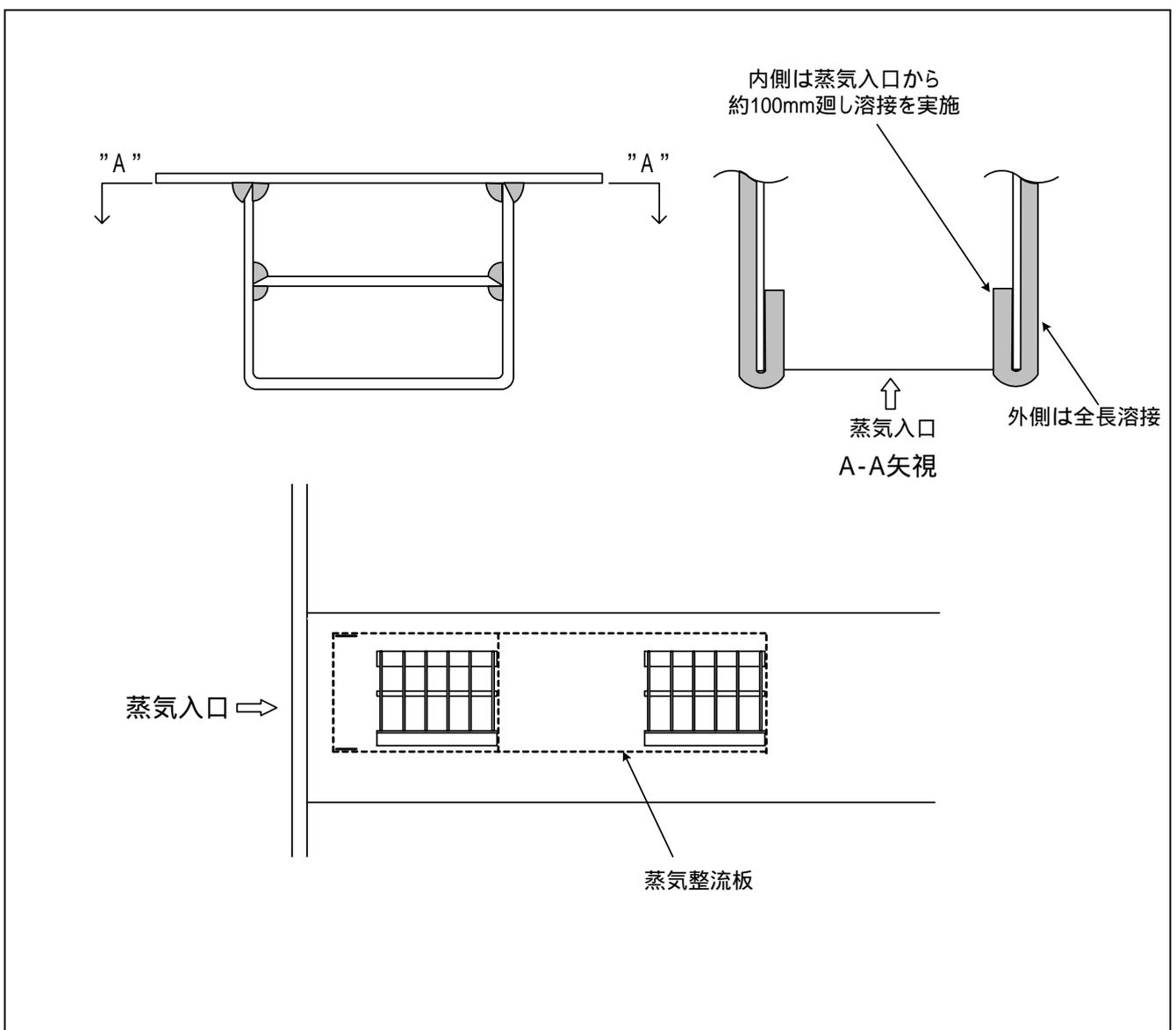
図8 疲労線図(ASME Sec. Division 2 C curve)
(オーステナイト系ステンレス鋼)

伊方2号機 湿分分離加熱器蒸気整流板取替概要

蒸気整流板切断(グラインダーにて切断、除去)



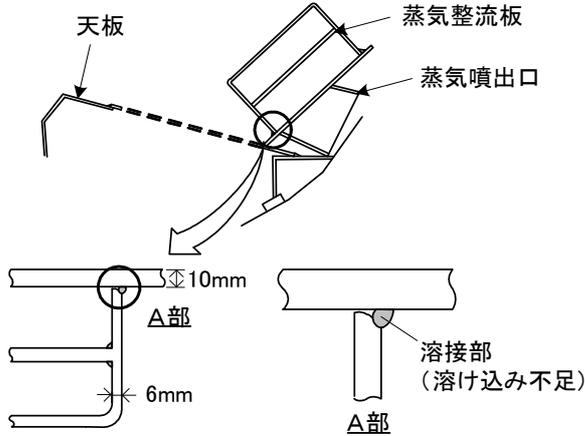
蒸気整流板取付け(溶接・PT)



事象発生 の 推定メカニズム

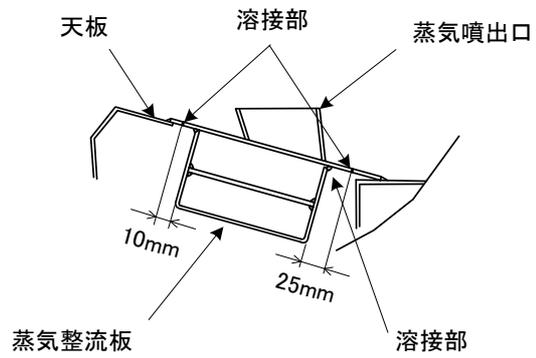
① 蒸気整流板取付

[蒸気整流板取付]



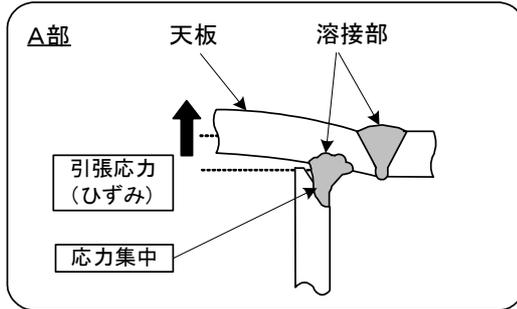
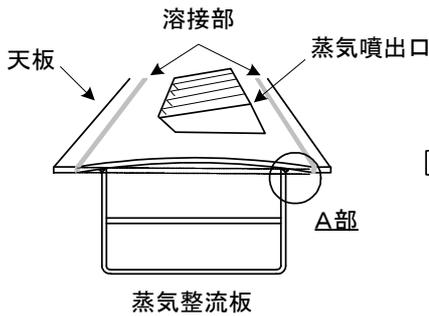
器内の狭隘な場所での作業であったため溶接部の一部に溶け込み不足となる部分が生じた。

[天板取付]



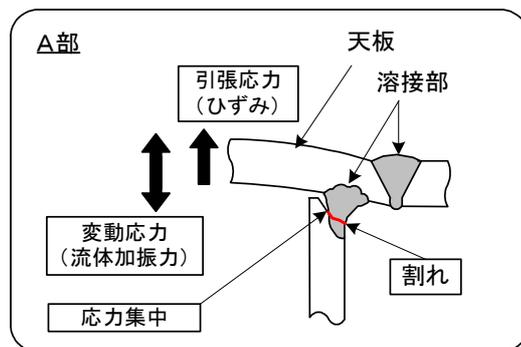
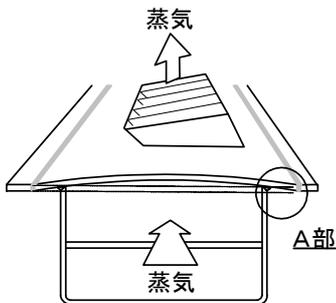
天板の復旧溶接により天板にひずみが生じた。

② 蒸気整流板取付後



- 天板のひずみの影響により、蒸気整流板の溶接部に引張応力が生じた。
- 当該溶接部に溶け込み不足による応力集中部位が生じた。

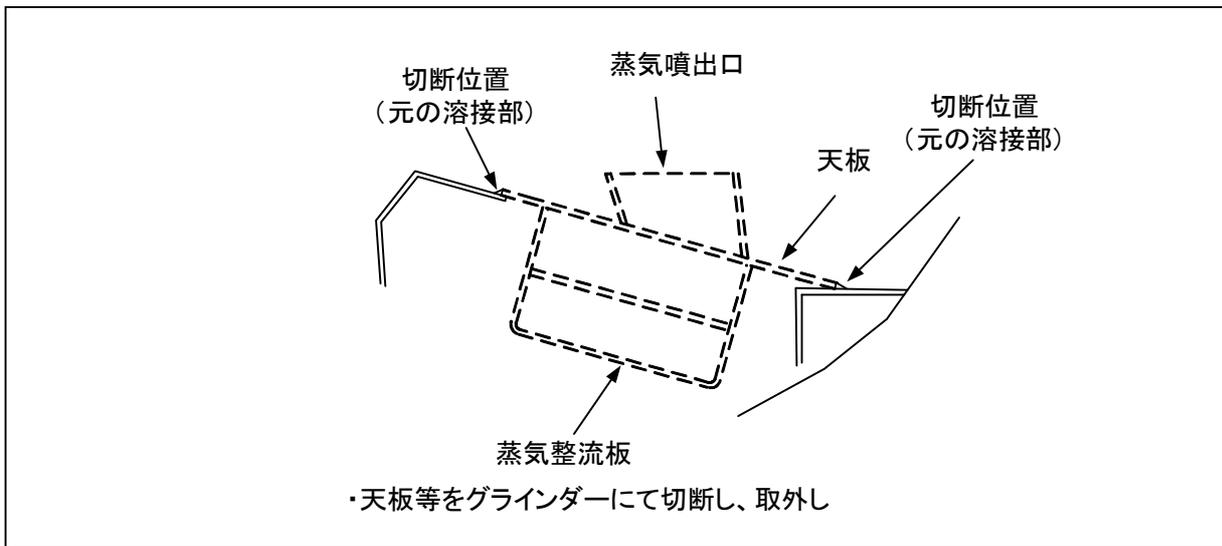
③ 運転状態(割れ発生・進展)



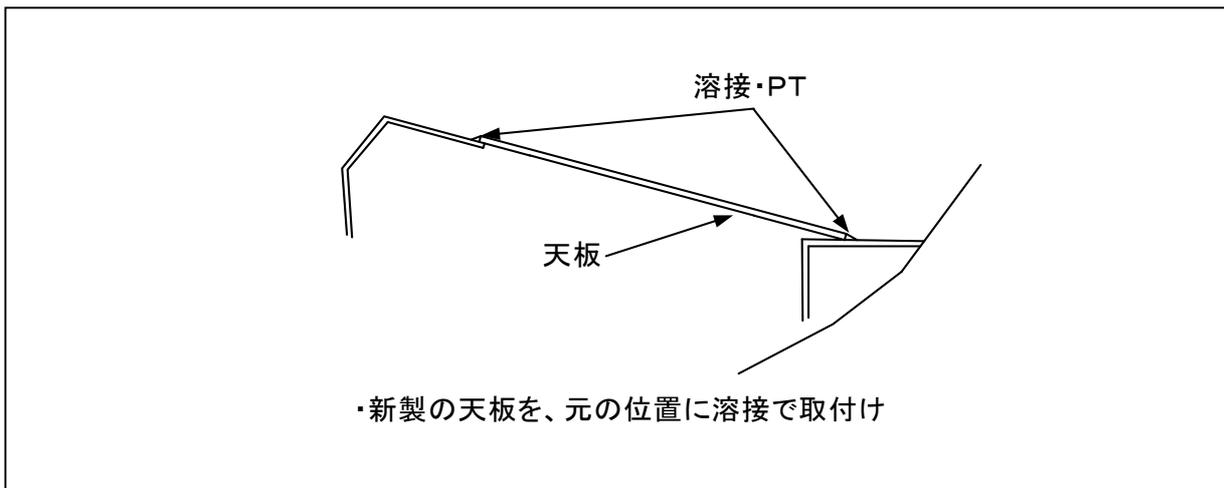
蒸気の流れによる流体加振力が作用し、溶接部の応力集中部位に疲労限を上回る応力がかかり、割れが発生・進展した。

当該蒸気整流板及び天板取替概要(1/2)

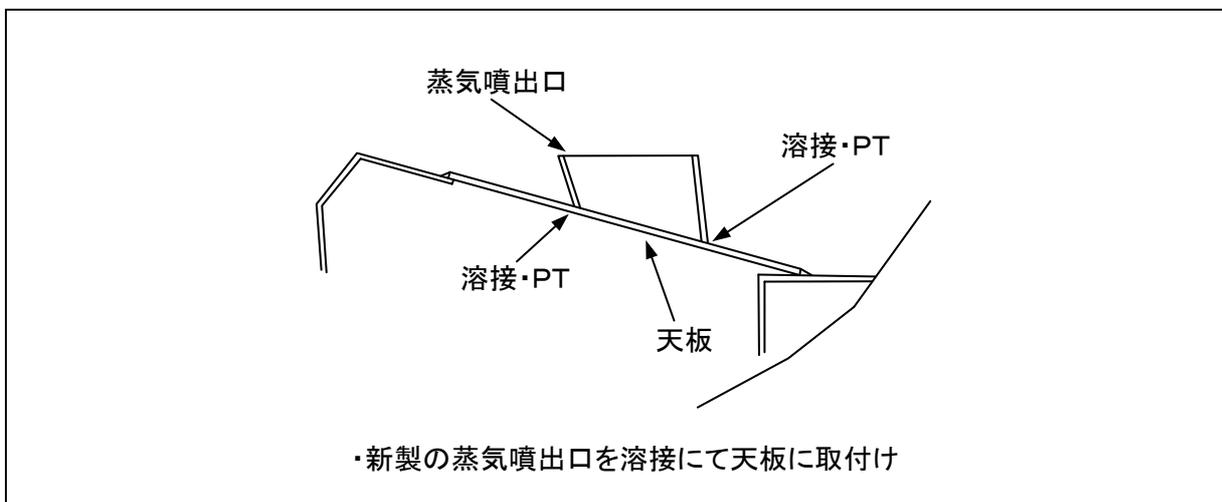
① 天板・蒸気整流板・蒸気噴出口の除去



② 天板取付け

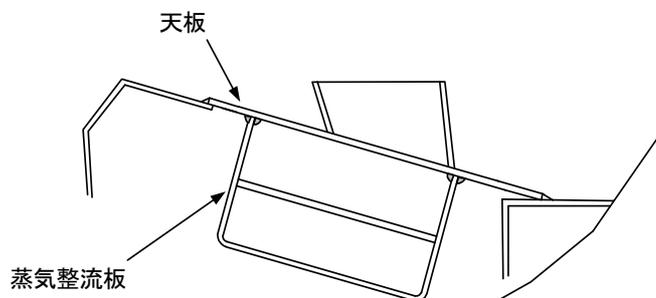


③ 蒸気噴出口取付け(溶接、PT)



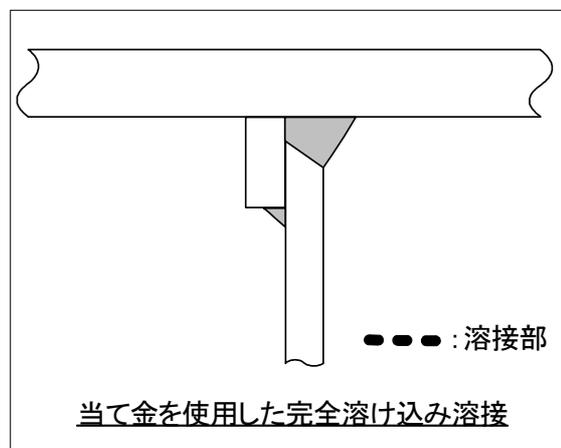
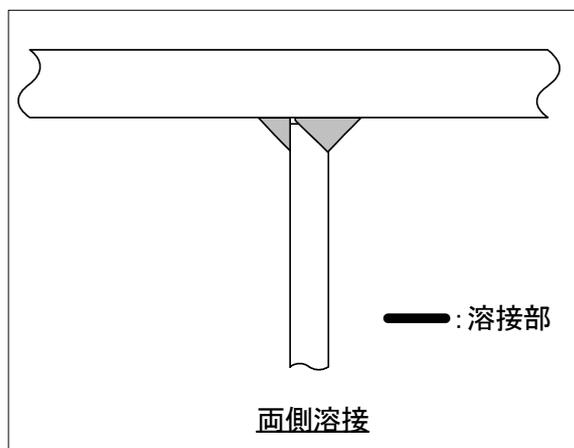
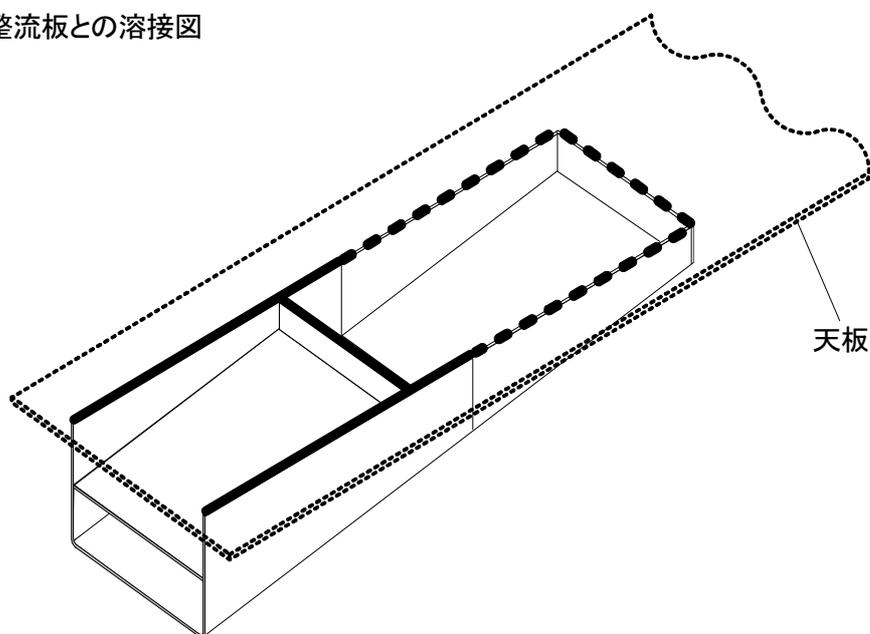
当該蒸気整流板及び天板取替概要(2/2)

④ 蒸気整流板の取付け



・新製の蒸気整流板を溶接にて天板に取付け

・天板と蒸気整流板との溶接図



用語説明

1. 湿分分離加熱器
2. 蒸気整流板
3. 目視点検
4. 要因分析図
5. 浸透探傷検査(PT)
6. 破面観察
7. 断面マイクロ観察
8. 粒内割れ
9. 腐食ピット
10. 破面SEM観察
11. ストライエーション
12. 羽毛状の組織
13. EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy:エネルギー分散型 X 線分光法)
14. 硬度測定(ビッカース硬さ)
15. ステンレス鋼
16. すみ肉溶接
17. 溶け込み不足
18. のど厚
19. ルート部
20. ティグ溶接
21. 疲労
22. 延性
23. 高サイクル疲労
24. 変動応力
25. 等価応力振幅
26. 疲労限
27. コンター図
28. パワースペクトル
29. 弾塑性解析
30. グラインダー
31. モックアップ

1. 湿水分離加熱器
高圧タービンで使用した蒸気を低圧タービンで使用する前に、蒸気の湿分を取り除き、温度を上げる設備。A、B、C、D4台設置している。
2. 蒸気整流板
高圧タービンで使用した蒸気を湿水分離加熱器にて効率よく加熱するために、加熱器部分へ流れる蒸気量を均一に分散するためのもの。
3. 目視点検
肉眼にて対象物を点検すること。
4. 要因分析図
事象の原因を特定するために、考えられる要因を抽出し評価を行うための図。
5. 浸透探傷検査(PT)
供試体表面に開口している傷を目で見やすくするため、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。
6. 破面観察
材料の破断面を調べることにより、破断原因に関する情報を得るため、破断面の表面状態、模様等を観察すること。
7. 断面ミクロ観察
金属の断面を鏡面になるまでに研磨し、適切な液を用いて腐食すると金属組織により腐食の程度が異なり、表面に凹凸が生じる。これを高倍率で観察すると金属組織が観察できる。
8. 粒内割れ
割れが結晶粒を貫通している場合のこと。
9. 腐食ピット
腐食でできたくぼみ。
10. 破面SEM観察
損傷部位の破面を走査型電子顕微鏡(SEM: Scanning Electron Microscope)にて観察することにより、割れがどのような損傷モードで生じたかを調べる調査(破面形状、割れ先端形状の確認)。
11. ストライエーション
走査型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。繰り返し荷重のサイクルに対応しており、その数や間隔からき裂成長過程の情報が得られる。

12. 羽毛状の組織

ステンレス鋼の応力腐食割れの形態としては、粒内割れと粒界割れがあるが、塩化物応力腐食割れは、前者の形態を示し、割れ破面に特有な羽毛状形態で、き裂進展方向に放射状に広がった金属組織のこと。

13. EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy:エネルギー分散型 X 線分光法)

試料にX線を照射し発生する元素固有の特性X線のエネルギーを分析することで、試料を構成する元素の種類や含有量を調べる分析手法。

14. 硬度測定(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(材料硬度異常の確認)。

15. ステンレス鋼

クロムを12%以上含む鉄-クロム(フェライト系)および鉄-クロム-ニッケル(オーステナイト系)合金のこと。鉄にクロムを12%以上加えると、耐食性が向上し、錆が生じにくくなる。

オーステナイト系ステンレス鋼は、面心立方構造であるため、極低温に至るまで脆性破壊は発生せず優れたじん性を示す。

16. すみ肉溶接

すみ肉溶接とは、T継手、十字継手などにおいて、ほぼ直交する2つの面を三角状の断面で溶接する溶接。

17. 溶け込み不足

母材の接合部(レ形開先)に溶接が溶け込んでいないことで空洞が生じている状態。

18. のど厚

すみ肉溶接において、その断面に内接する直角三角形を描いた時、ルート部から底辺までの垂直距離を示し、溶接の強度を評価する値。

19. ルート部

開先底部の立ち上がった面

20. ティグ溶接

アルゴンまたはヘリウムなどの不活性ガス雰囲気中で、タングステン電極と母材との間にアークを発生させ、そのアーク中に溶加材を挿入して溶接する方法で、アークを発生させる溶接器具をトーチという。

21. 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。

22. 延性

物体が、その弾性の限界を超えても破壊されずに引き伸ばされる性質。

23. 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はなくても、材料の形状等によっては、繰り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、破壊までの繰り返し回数が1万～10万回以上の場合を高サイクル疲労と言う。

24. 変動応力

疲労破壊を起こす可能性のある繰返し応力振幅をいう。

25. 等価応力振幅

材料に平均応力(ひずみによる拘束応力)等がある場合に疲労強度に対する影響を考慮して補正した変動応力をいう。

26. 疲労限

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。

27. コンター図

データの図形表現法で、値が場所によって変化する様子を同じ値をもつ地点をつないだ曲線の集まりで表現した図である。

本報告書では、色により応力の大きさを示している。

28. パワースペクトル

時間的または空間的に変動する量の二乗平均値を振動数成分の分布として表したものである。

29. 弾塑性解析

金属材料の弾性と塑性を考慮して材料の応力・変形量を計算する手法

30. グラインダー

砥石(刃)の部分が回転して金属を研磨・切断する工具

31. モックアップ

実物とほぼ同様(構成材料含む)に作られた模型