

原子力発第06080号
平成18年6月23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蒸気整流板溶接部の割れに係る
報告書の提出について

拝啓 時下ますますご清栄のこととお慶び申し上げます。平素は、当社事業につきまして格別のご理解を賜り、厚く御礼申し上げます。

さて、18環政第312号「伊方1号機の原子炉手動停止に係る原因の究明と再発防止対策について」(平成18年6月7日付)にてご要請のありました原因究明及び再発防止対策を取りまとめましたので、安全協定第11条第2項に基づき、別添のとおりご報告申し上げます。

本報告書の内容を踏まえ、今回と同様なトラブルが生じないよう安全運転に万全を期すとともに、地元の皆様にご安心頂けるよう今回の報告の内容について、情報の公開や広報に努めてまいりますので、ご指導賜りますようお願い申し上げます。

敬 具

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 cm 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

割れの中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 - 2 2)

(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

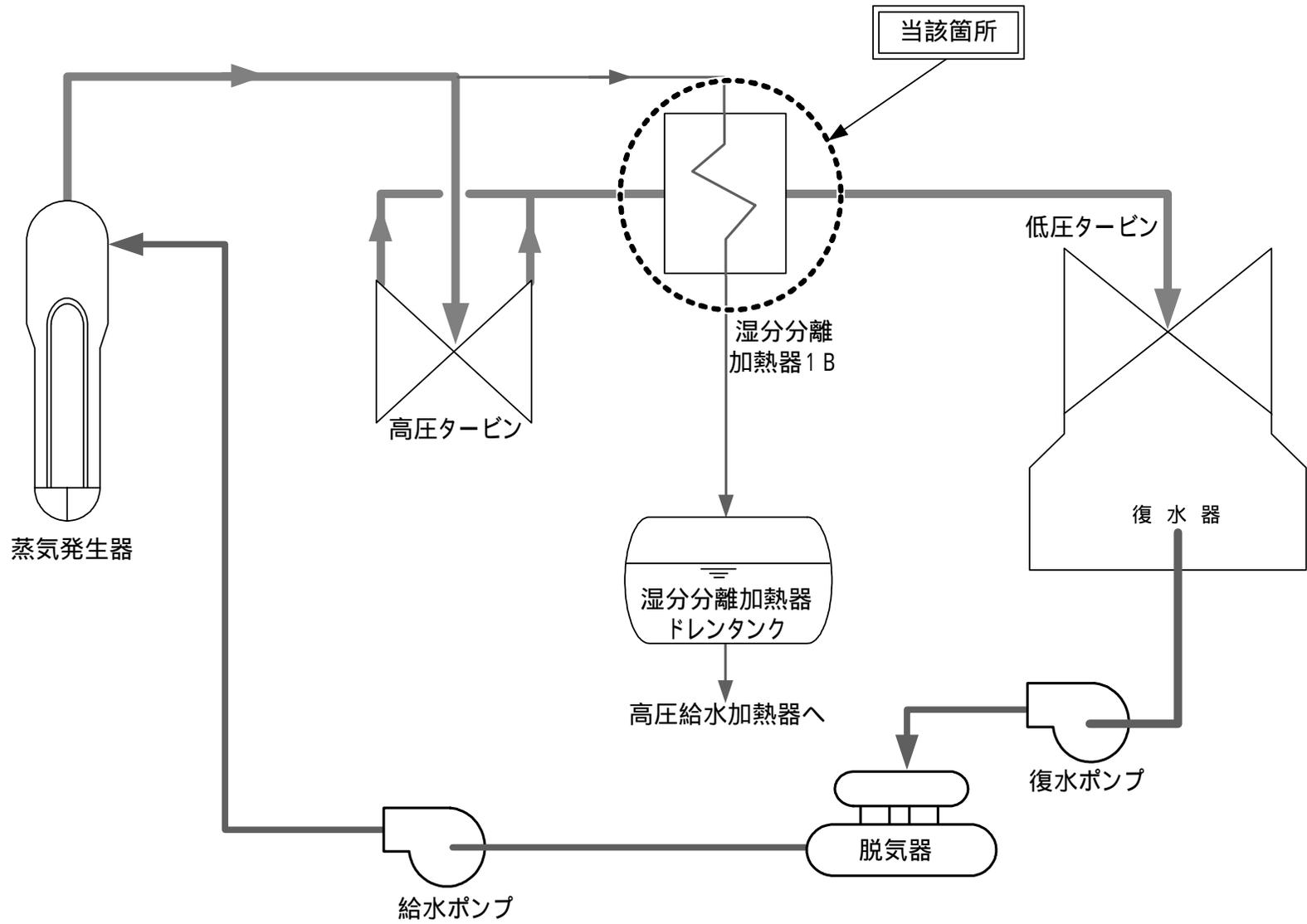
【添 付 資 料】

- 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

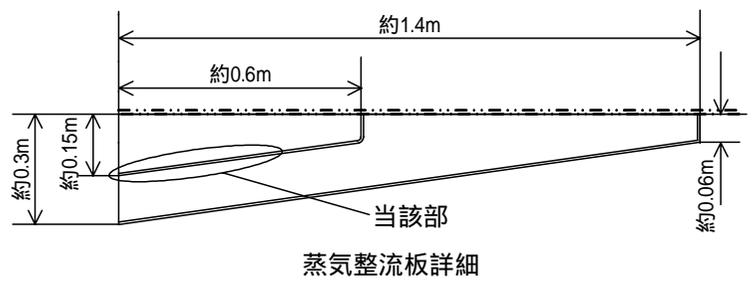
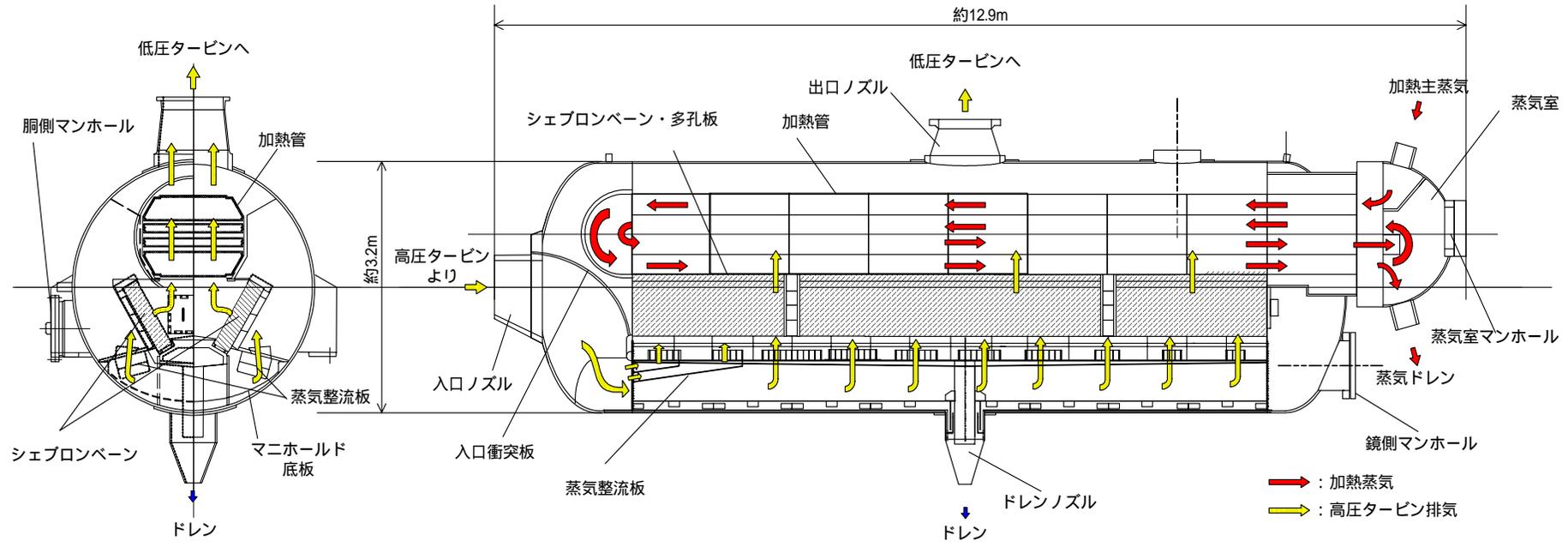
【参 考 資 料】

用語説明

湿分分離加熱器 1 B 廻り概略系統図



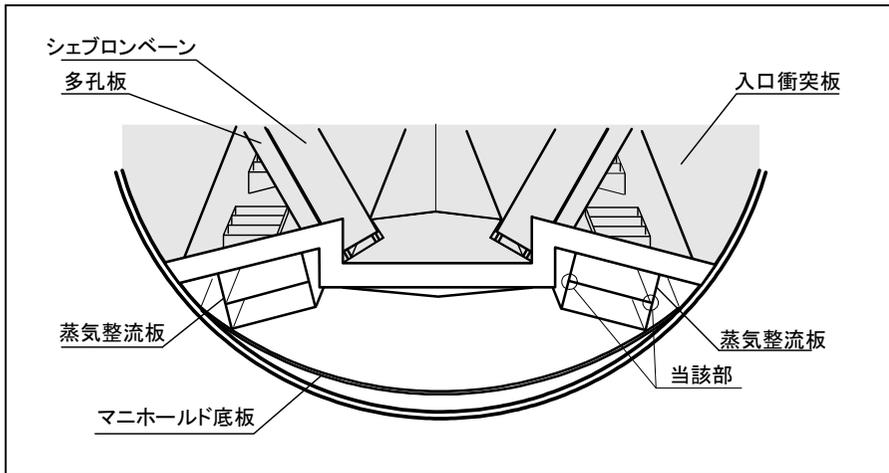
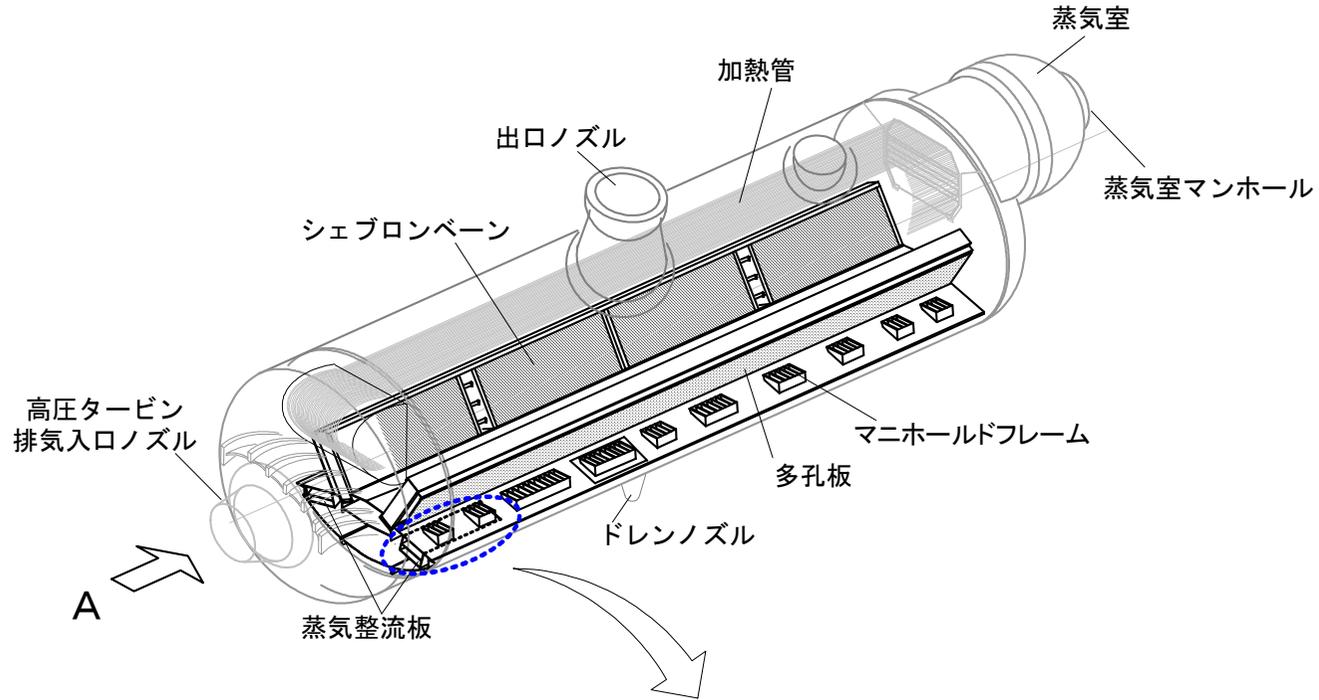
湿分分離加熱器1B構造図(1/2)



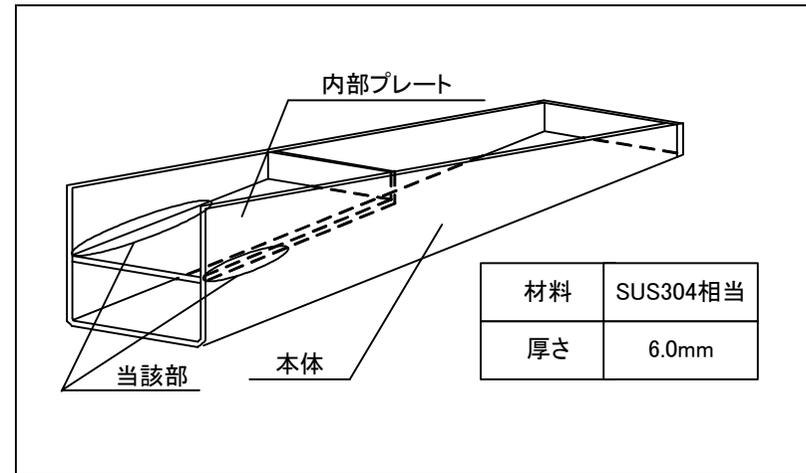
湿分分離加熱器 仕様

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構造図(2/2)



高圧タービン排気入口部(Aより)



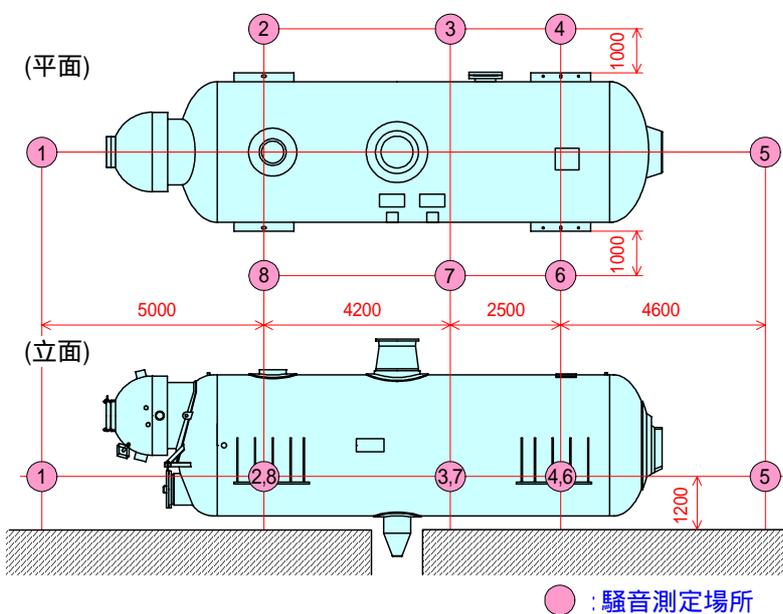
蒸気整流板構造図

湿水分離加熱器 1 B 外部点検調査結果

外観点検結果



異常音調査結果



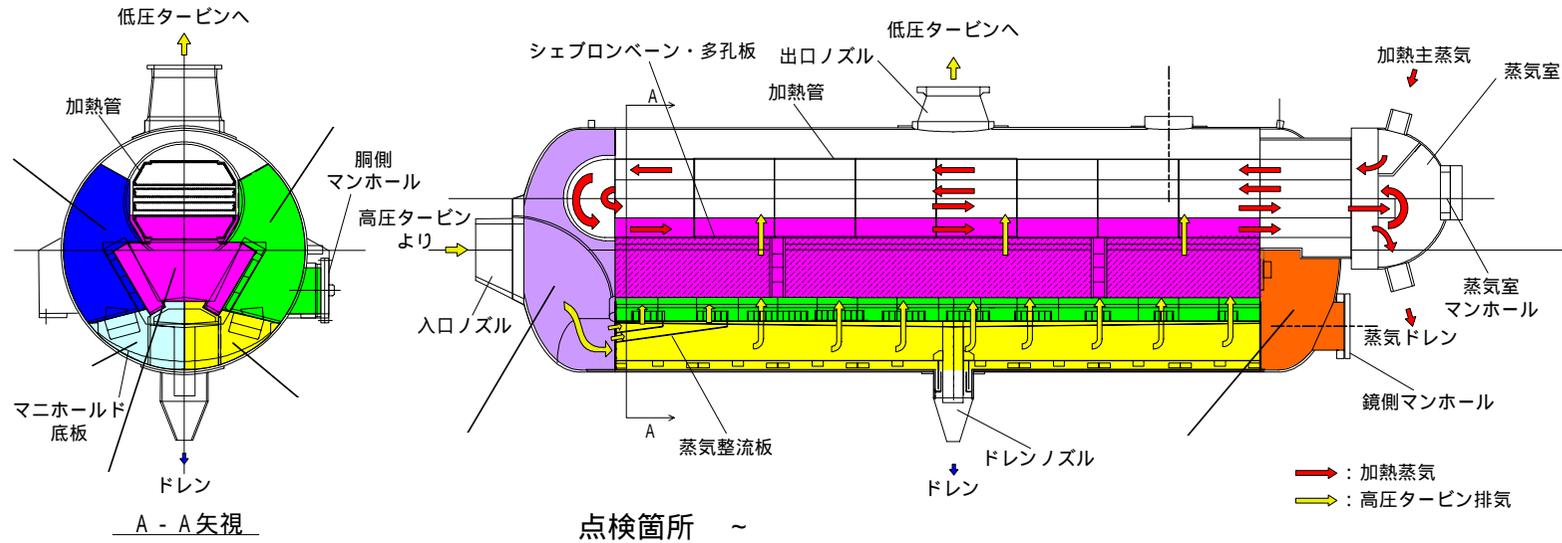
測定結果 (単位: dB)

測定箇所	湿水分離加熱器	
	1 B	1 D
	85.7	84.9
	88.6	85.7
	92.6	86.4
	90.4	86.8
	87.4	86.6
	88.5	85.7
	90.5	86.3
	87.4	86.6

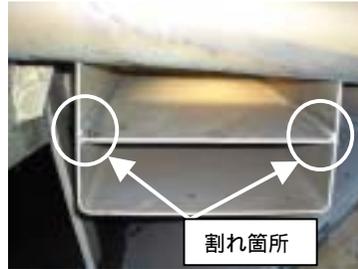
(1 Bの は、他と比べて若干音が大きく聞こえた)

- ・外観点検の結果、保温材の外れ、蒸気漏えい等の異常はなく、問題ないことを確認した。
- ・湿水分離加熱器 1 B および湿水分離加熱器 1 D 付近の騒音測定の結果、1 B のマンホール付近に「カタカタ」という他の箇所より若干高いレベルの連続の異常音を確認した。

湿分分離加熱器 1 B 内部点検調査結果



マニホールド付近点検状況
(点検箇所 も同様)



右側蒸気整流板付近点検状況

割れ箇所



シェロンペーンおよびジャッキ
ボルト点検状況



左側蒸気整流板付近点検状況



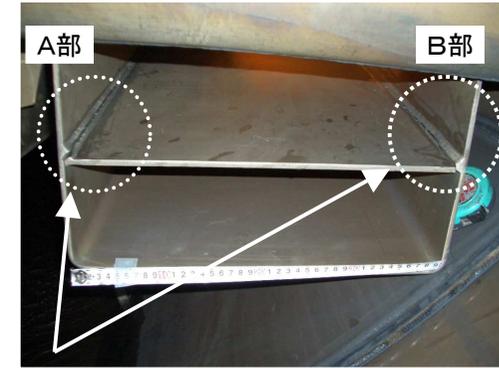
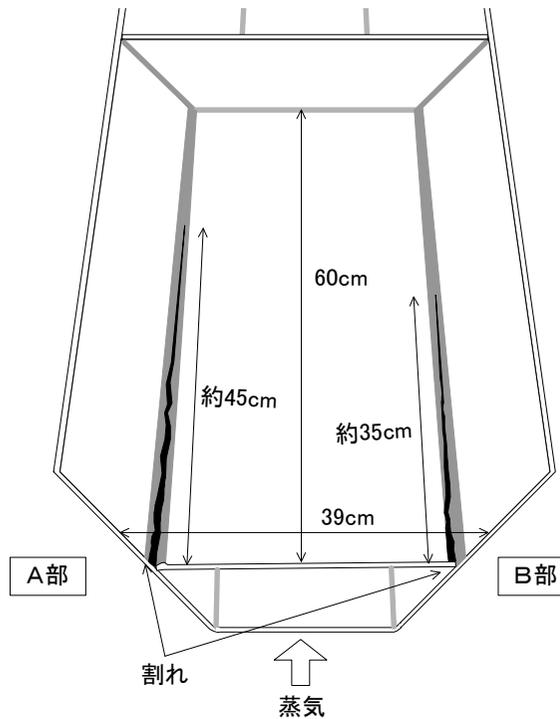
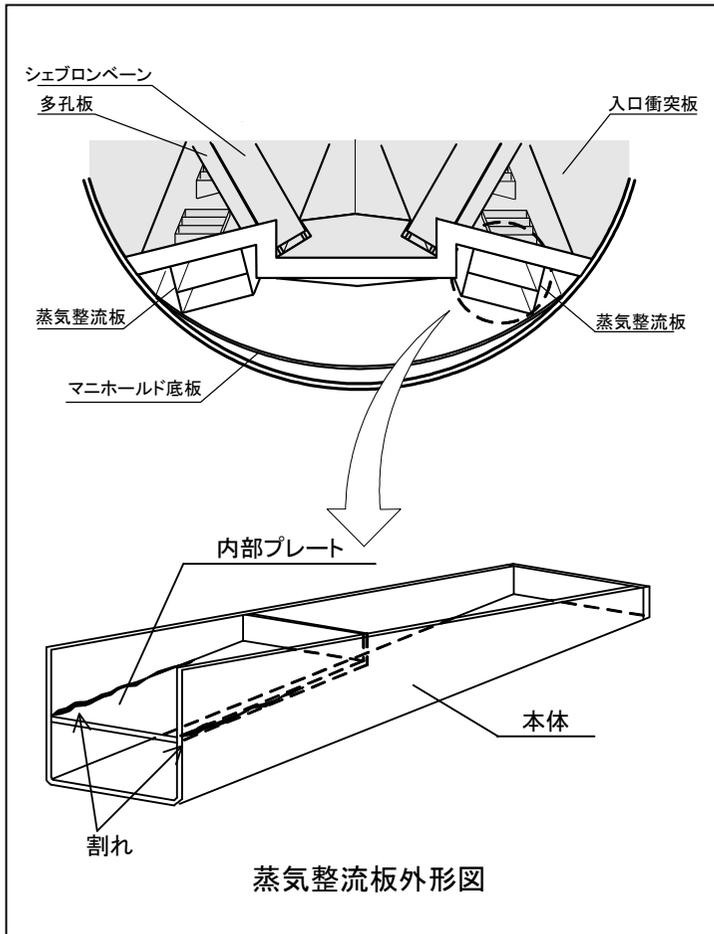
入口衝突板付近点検状況



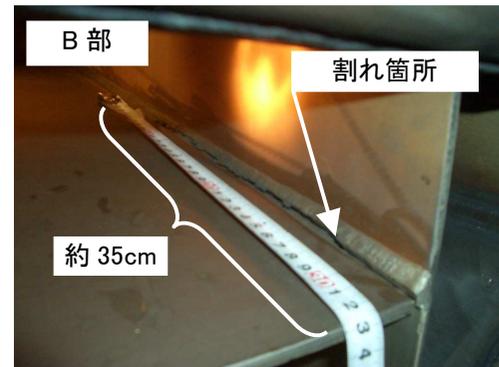
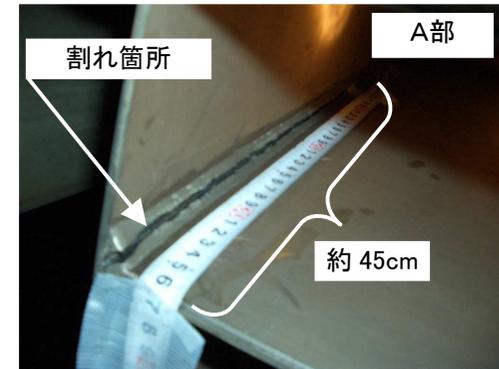
内部マンホール付近点検状況

内部点検調査の結果、入口ノズル部近傍における右側蒸気整流板の溶接部において、割れが確認された。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。

湿分分離加熱器1B蒸気整流板 割れ状況調査結果



・2箇所の割れ



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について、本体と内部プレートとの溶接部に長さ約 45cm(A部)および約 35cm(B部)の割れを確認した。

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

[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		
湿分分離加熱器 1 B 蒸気整流板 溶接部の割れ	強度不足	延性割れ	過大応力	設計資料等の調査	・蒸気整流板の設計において、実績のある標準設計が採用されていることを確認した。	×	-	
			過大応力	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・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。	×	7	
			過大応力	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。	×	-	
			過大応力	金属調査	・外観観察の結果、蒸気整流板本体と内部プレートとの溶接部に長さ約49cmおよび約37cm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 割れは枝分かれのない粒内割れであること 材料欠陥、腐食割れは認められないこと 溶接部内部に溶け込み不良部があること 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を確認した。	×	8, 9, 10 11, 12, 13 14	
	強度不足	延性割れ	材料不良	材料仕様の調査	・材料証明書により、蒸気整流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。	×	7	
			疲労割れ	温度・圧力過渡	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。	×	-
				温度・圧力過渡	金属調査	・外観観察の結果、蒸気整流板本体と内部プレートとの溶接部に長さ約49cmおよび約37cm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 割れは枝分かれのない粒内割れであること 材料欠陥、腐食割れは認められないこと 溶接部内部に溶け込み不良部があること 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を確認した。		8, 9, 10 11, 12, 13 14
			疲労割れ	振動	疲労評価	・蒸気の流れにより生じる変動応力を算出し、疲労評価を実施した結果、溶接部に発生すると推定される変動応力は、疲労限を上回り疲労損傷が発生する可能性があることを確認した。		16
	溶接不良	溶接欠陥	施工不良	溶接施工調査	・溶接施工記録により、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。 ただし、開先加工の状況は確認できなかった。 ・当該溶接部に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る。		7	
				施工不良	金属調査	・外観観察の結果、蒸気整流板本体と内部プレートとの溶接部に長さ約49cmおよび約37cm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 割れは枝分かれのない粒内割れであること 材料欠陥、腐食割れは認められないこと 溶接部内部に溶け込み不良部があること 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を確認した。		8, 9, 10 11, 12, 13 14
溶接不良			材料不良	材料仕様の調査	・材料証明書により、蒸気整流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。	×	7	

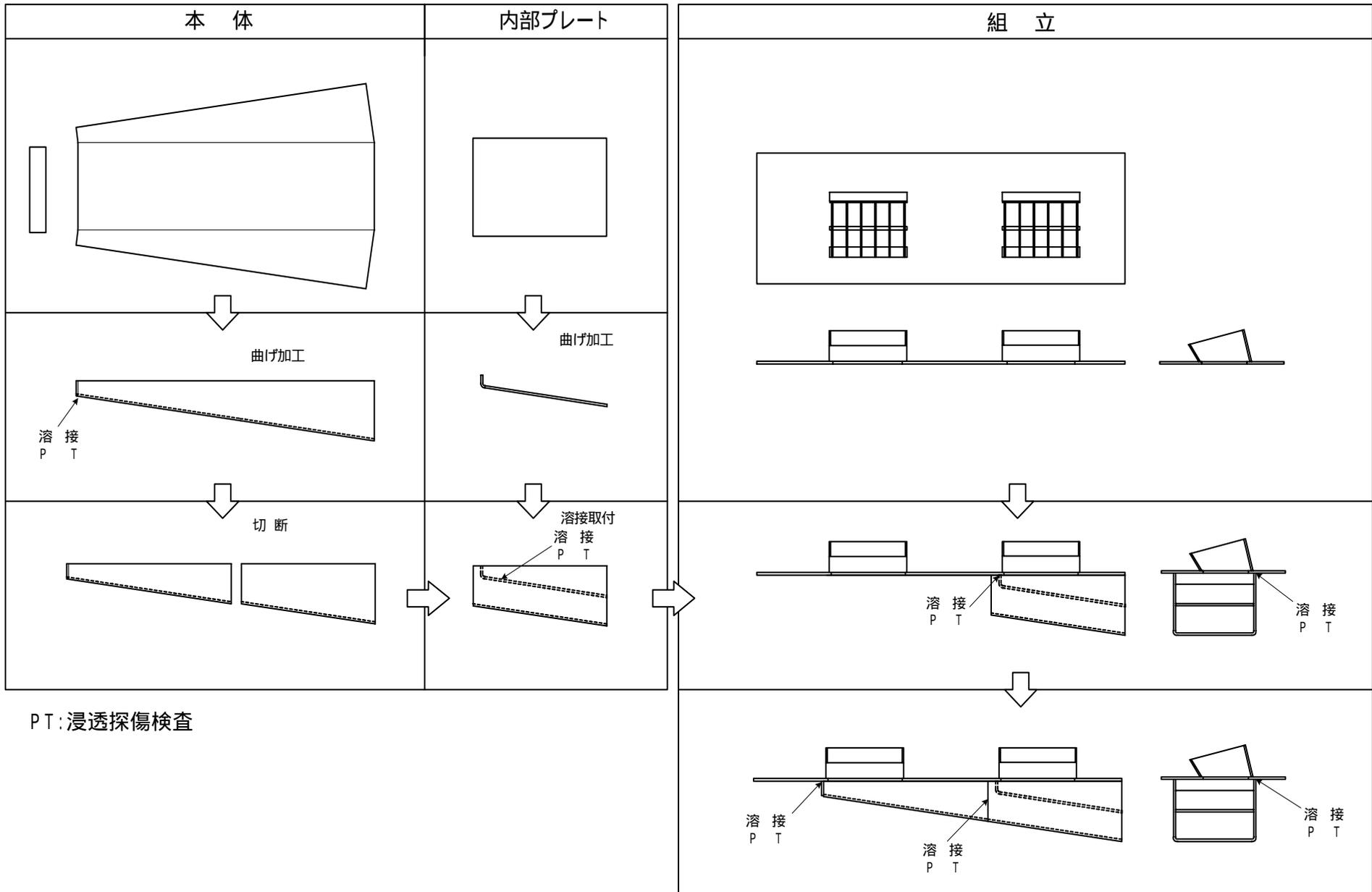
[備考]

:可能性あり。

x :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、蒸気整流板本体と内部プレートとの溶接部に長さ約4.9 cmおよび約3.7 cm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 割れは枝分かれない粒内割れであること 材料欠陥、腐食割れは認められないこと 溶接部内部に溶け込み不良部があること 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を確認した。 	x	8, 9, 10 11, 12, 13 14
			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。	x	15	
	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、蒸気整流板本体と内部プレートとの溶接部に長さ約4.9 cmおよび約3.7 cm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 割れは枝分かれない粒内割れであること 材料欠陥、腐食割れは認められないこと 溶接部内部に溶け込み不良部があること 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を確認した。 	x	8, 9, 10 11, 12, 13 14

製作履歴調査結果(製作フロー)



製作履歴調査結果(材料・寸法調査)

材料調査

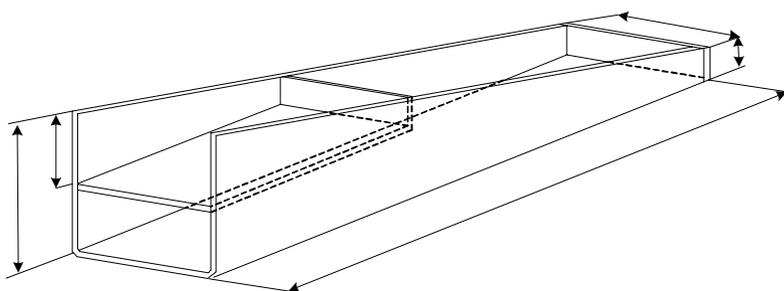
・蒸気整流板本体

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 (SA-240-TYPE304L)	MAX 0.030	MAX 0.75	MAX 2.00	MAX 0.045	MAX 0.030	18.0 ~ 20.0	8.0 ~ 12.0	MIN 485	MIN 40	MAX HB201
材料証明書記載値	0.021	0.38	1.77	0.038	0.001	18.3	8.2	605	54	165

・蒸気整流板内部プレート

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-TYPE304)	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 HB201
材料証明書記載値	0.05	0.49	1.67	0.027	0.001	18.1	8.1	615	55	167

寸法調査

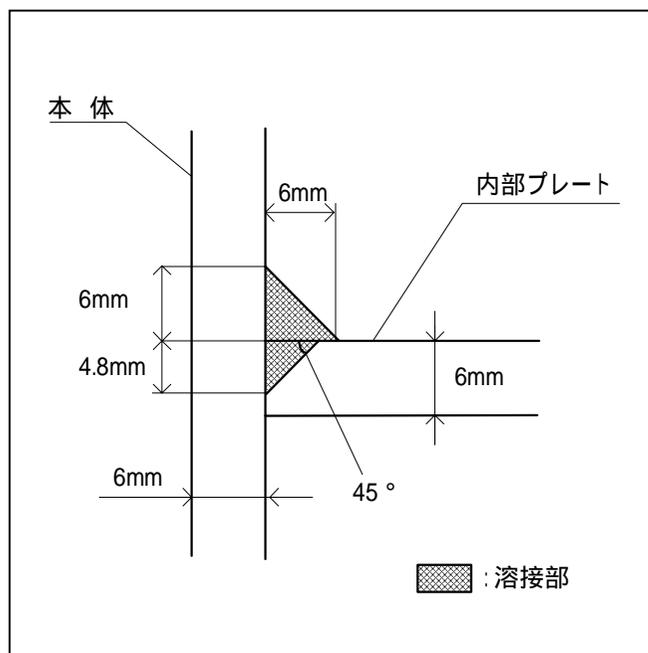


単位:mm

測定位置	設計寸法	許容値	測定値	
	394	± 3	393	394
	64	± 3	63	64
	1,448	± 5	1,450	1,449
	146	± 3	146	146
	273	± 3	273	273

- ・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)



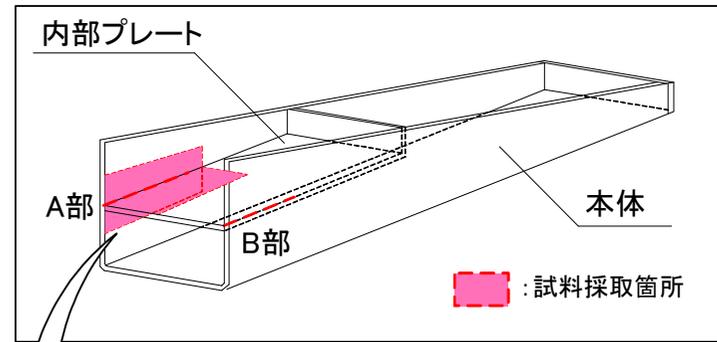
溶接部設計形状図(開先)

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 溶接施工記録等	問題なし
	炭酸ガスアーク溶接		
溶接材料	ステンレス鋼 (308L)	材料証明書	問題なし
非破壊検査	浸透探傷検査	浸透探傷検査記録	問題なし

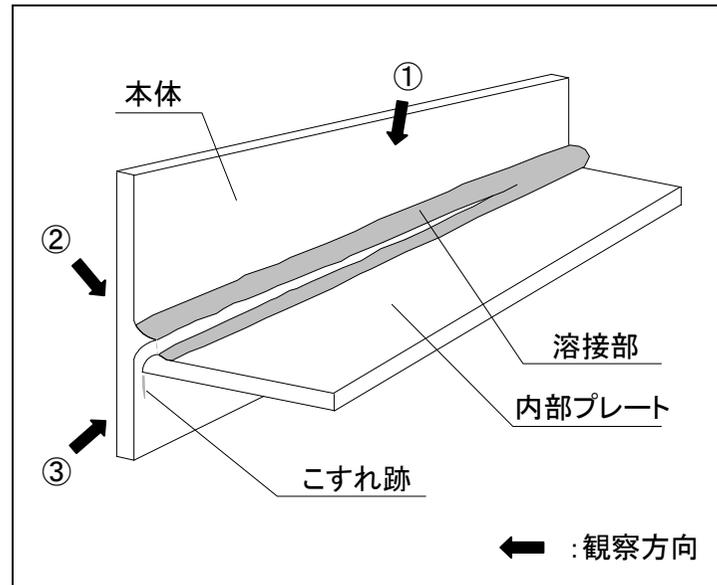
:開先加工後の施工記録なし

- ・溶接施工方法は、製作図面および溶接施工記録等により問題のないことを確認した。ただし、開先加工の状況は確認できなかった。
- ・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。
- ・溶接部は、浸透探傷検査を実施しており、問題のないことを確認した。

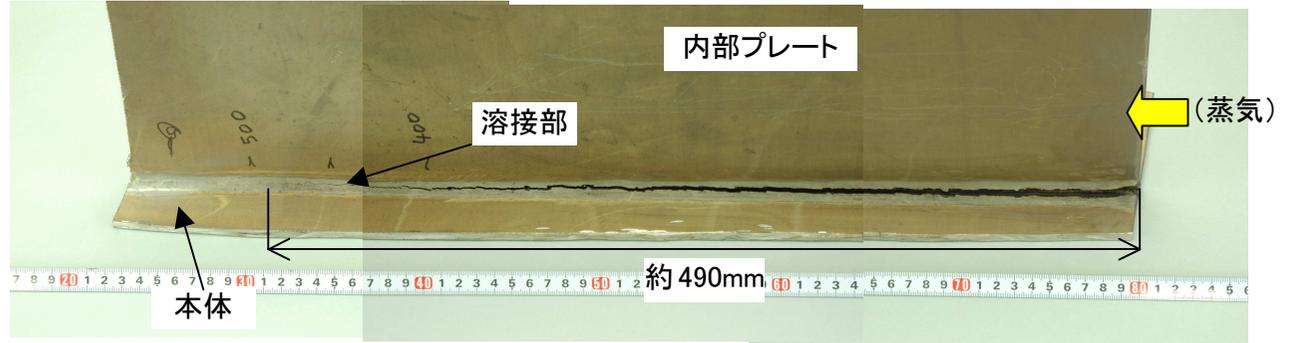
金属調査結果(外観観察(A部))



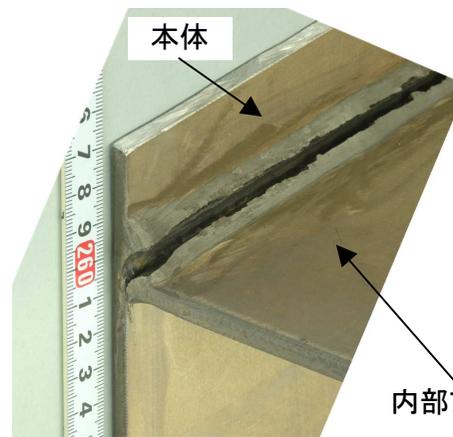
蒸気整流板外形図



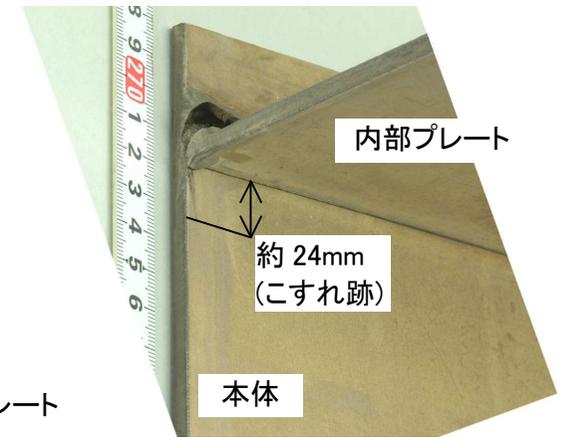
試料拡大図



①



②

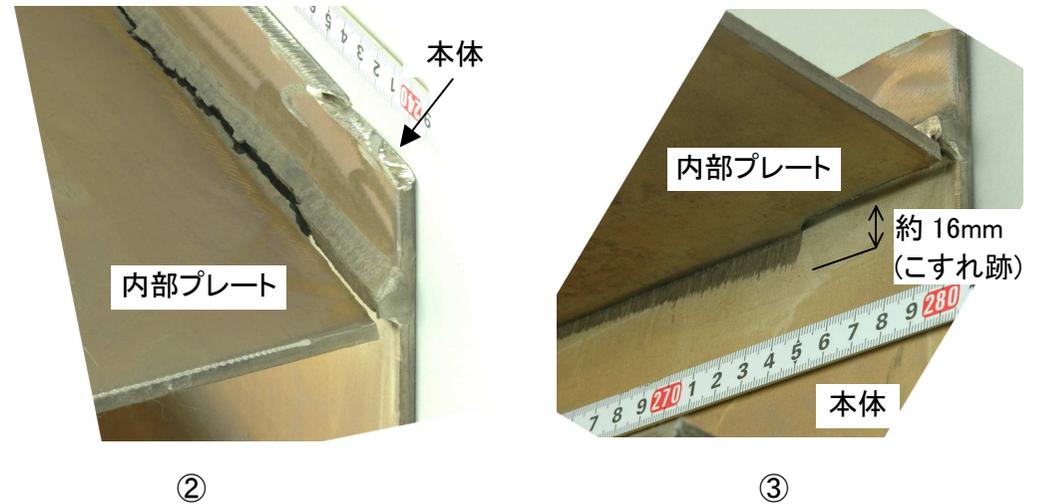
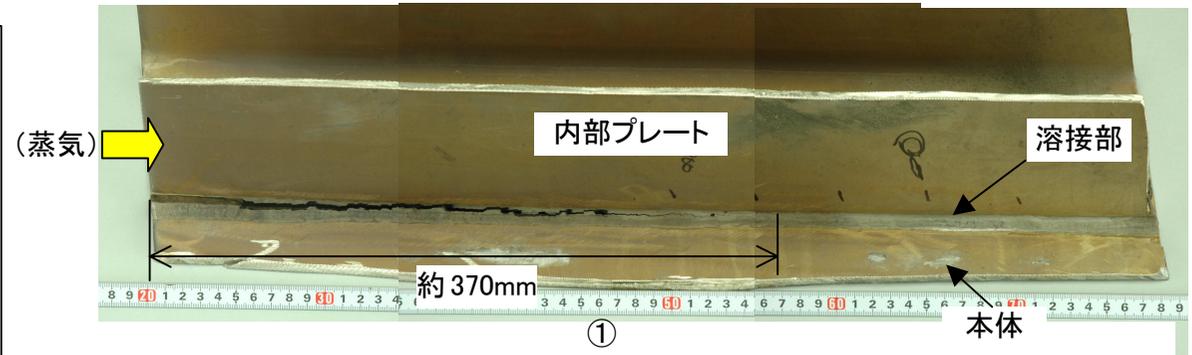
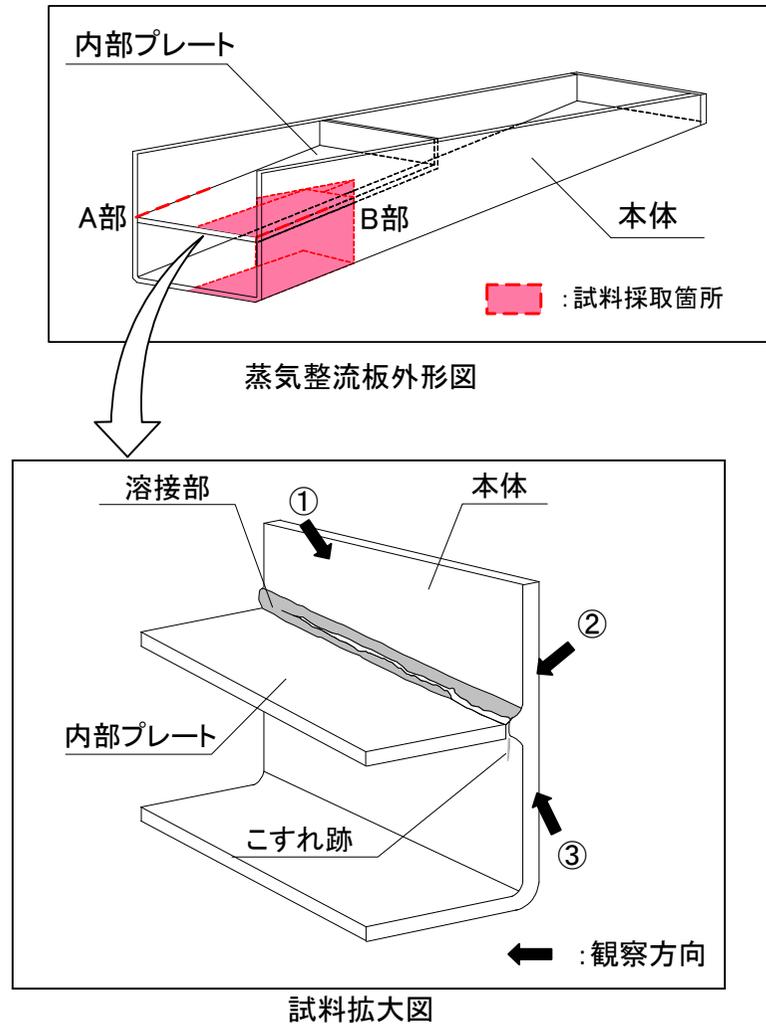


③

【外観観察結果】

- ・割れは長さ約490mmであった。
- ・割れは本体と内部プレートの溶接部にあった。
- ・本体に内部プレートのこすれ跡(長さ約24mm)があった。

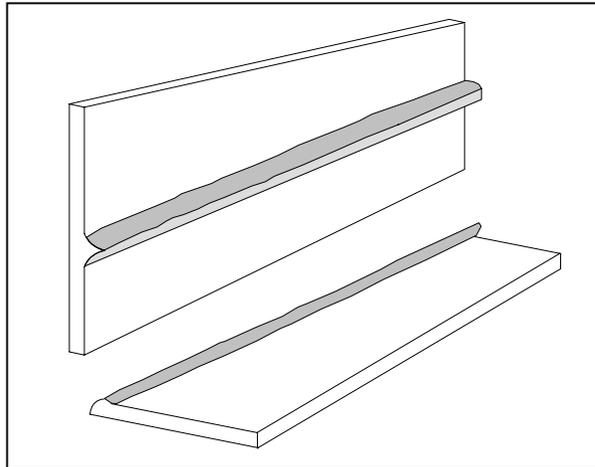
金属調査結果(外観観察(B部))



【外観観察結果】

- ・割れは長さ約370mmであった。
- ・割れは、内部プレートの母材部と溶接部の2箇所にあった。
- ・本体に内部プレートのこすれ跡(長さ約16mm)があった。

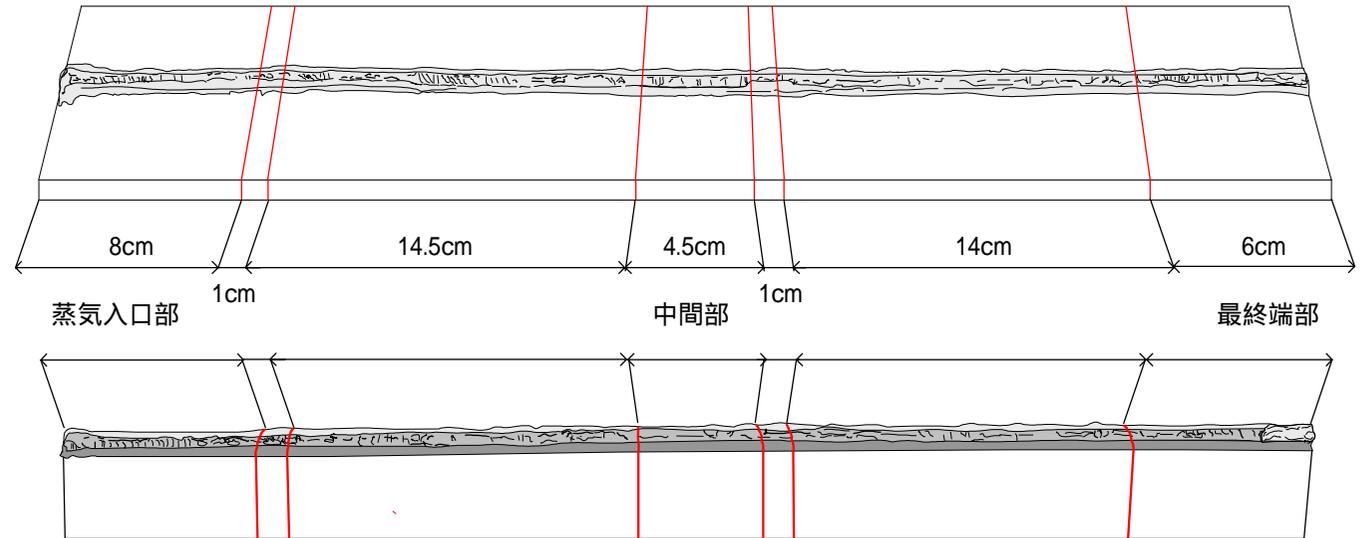
金属調査結果(破面観察(A部全体))



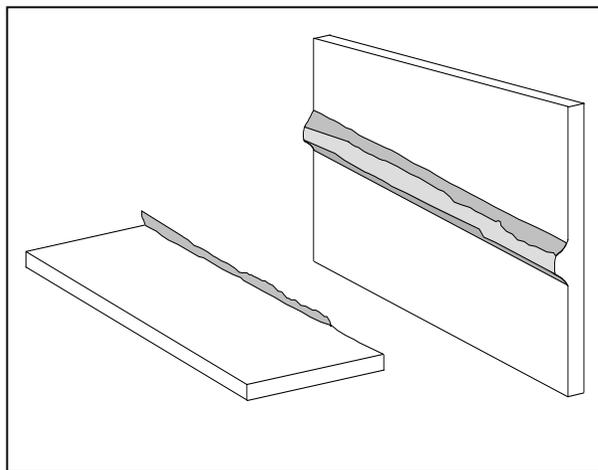
試料採取位置

【破面観察結果】

- ・割れは本体と内部プレートの溶接部を貫通する割れであった。
- ・破面全体に打撃および摺動により摩耗した金属光沢破面が認められた。



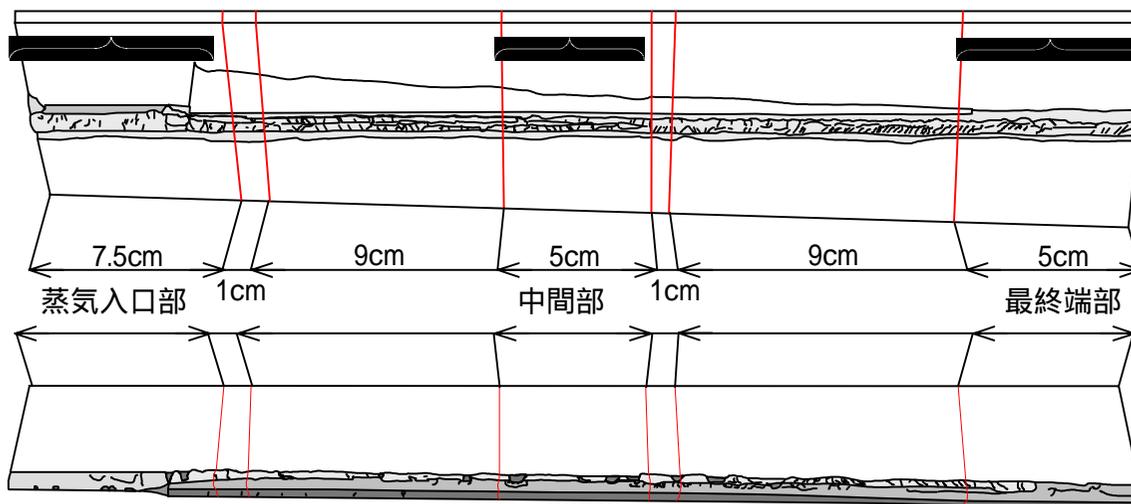
金属調査結果(破面観察(B部全体))



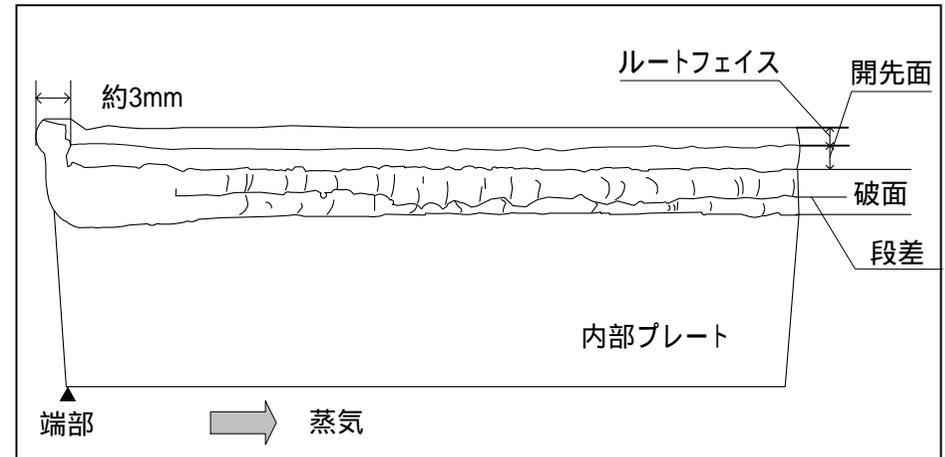
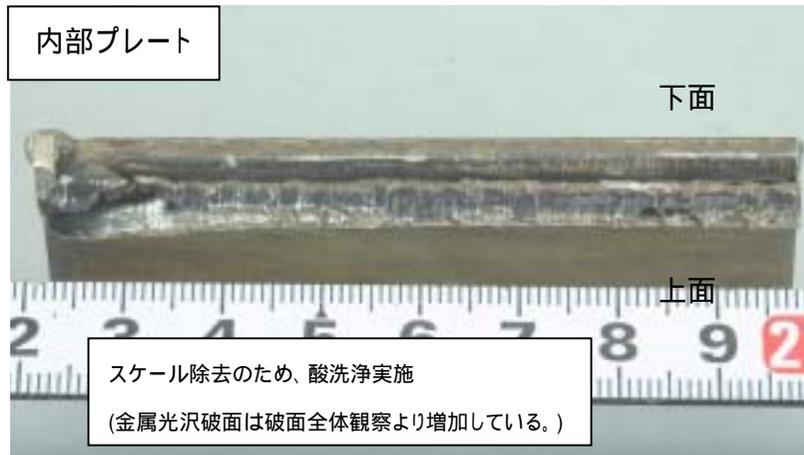
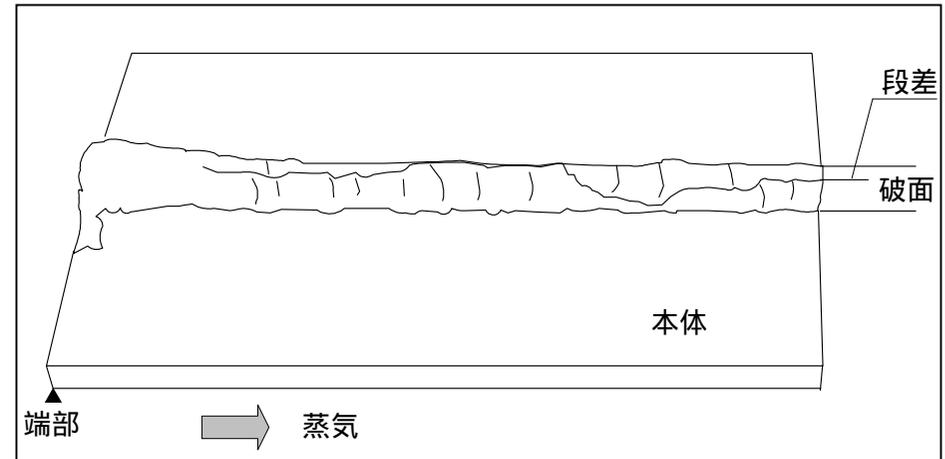
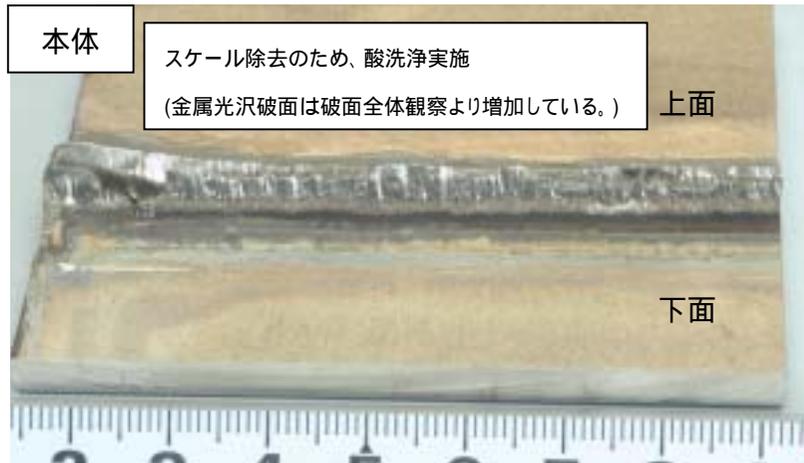
試料採取位置

【破面観察結果】

- ・破面全体に打撃および摺動による摩耗した金属光沢破面が認められた。
- ・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。



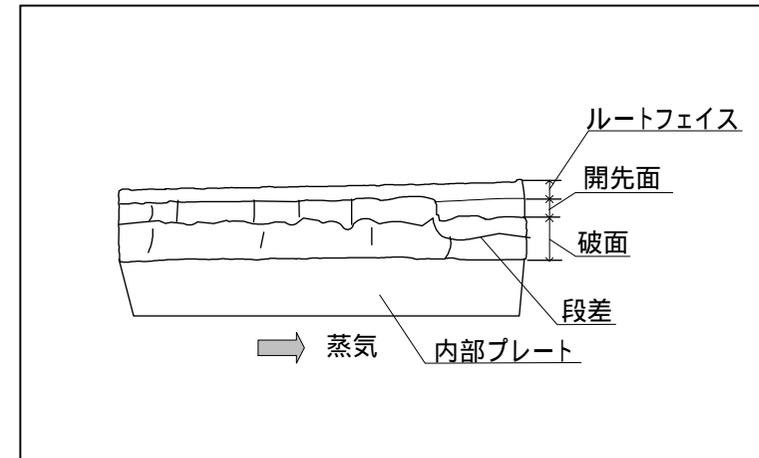
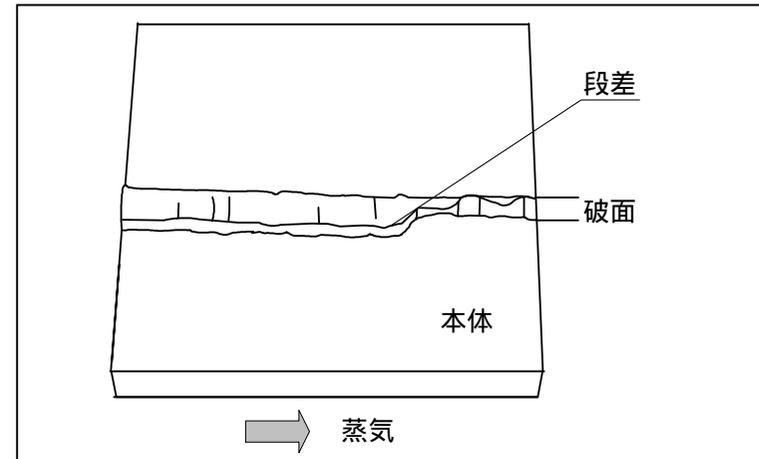
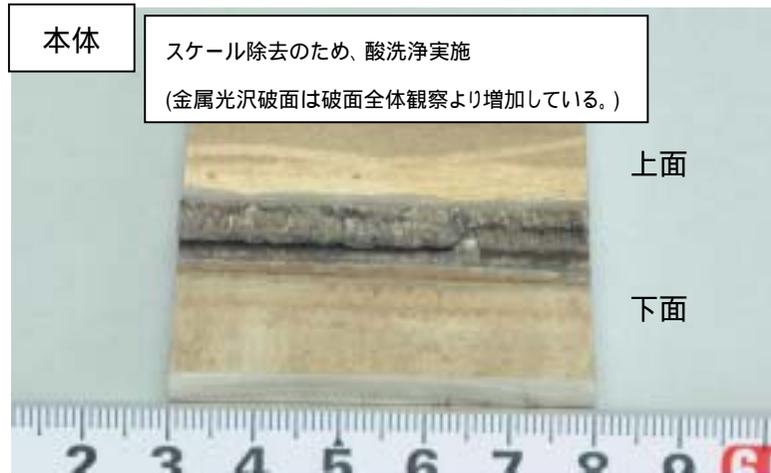
金属調査結果(破面観察(A部蒸気入口部))



【破面観察結果】

- ・内部プレート側に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。

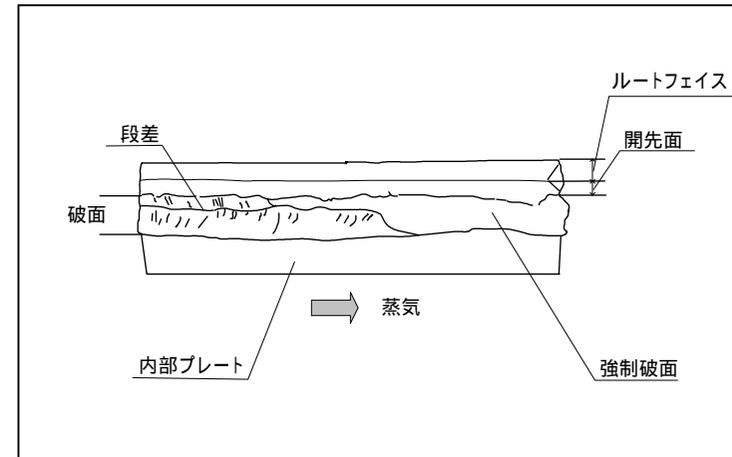
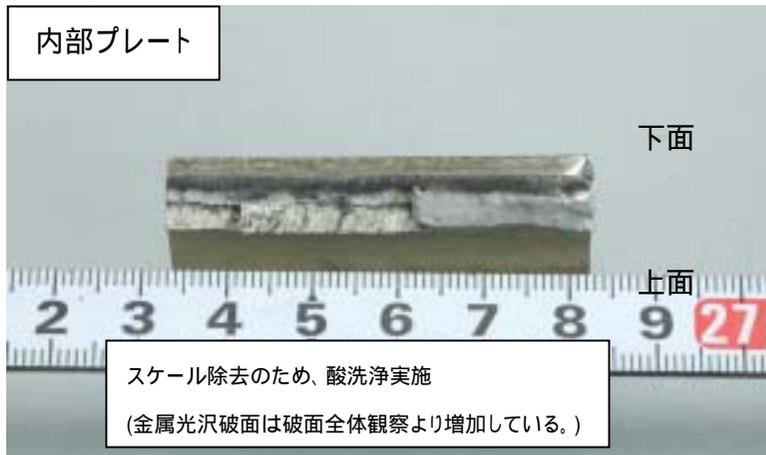
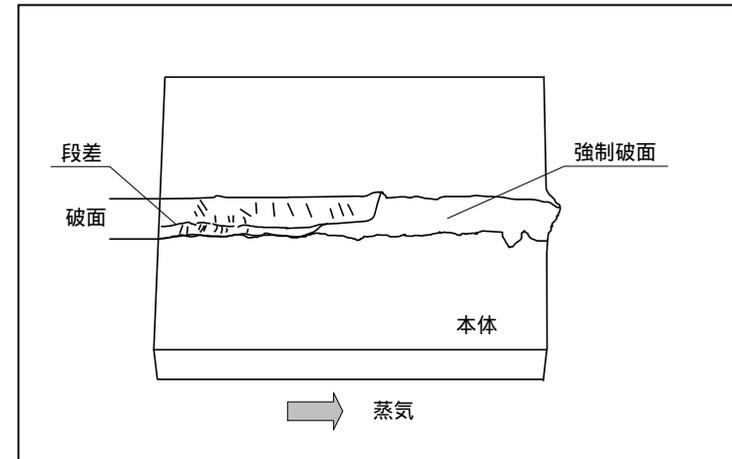
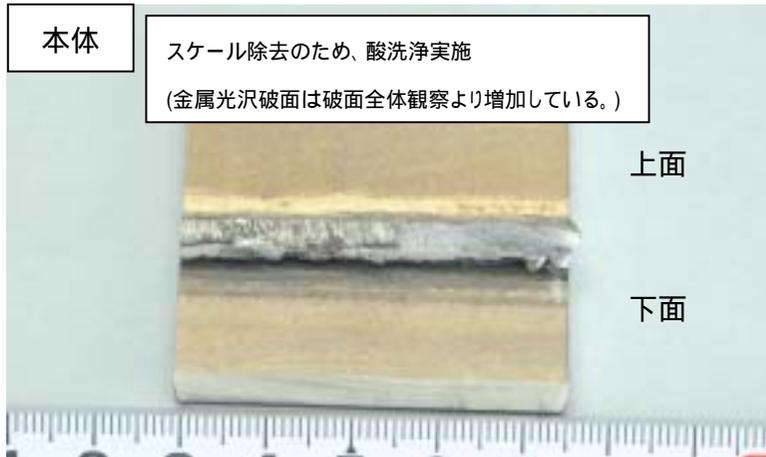
金属調査結果(破面観察(A部中間部))



【破面観察結果】

- ・内部プレート側には、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。

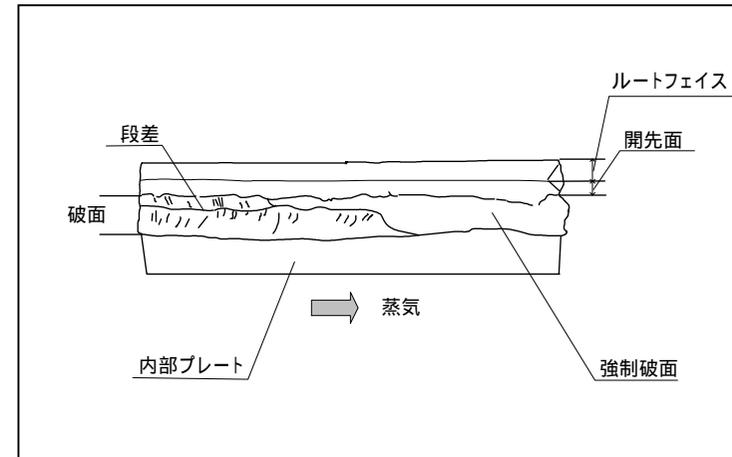
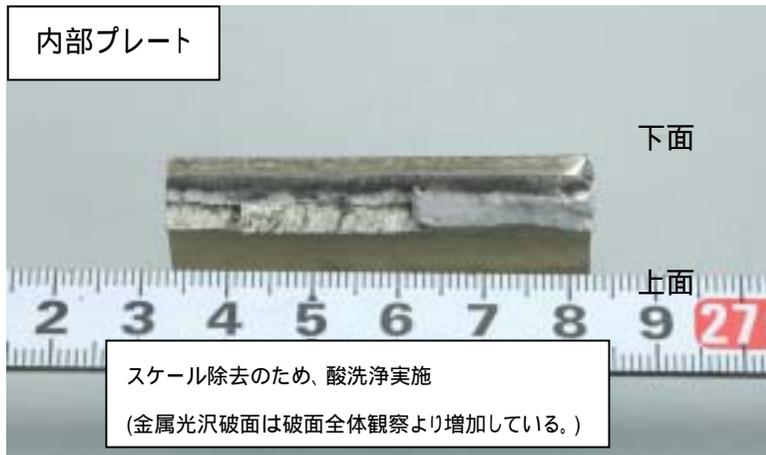
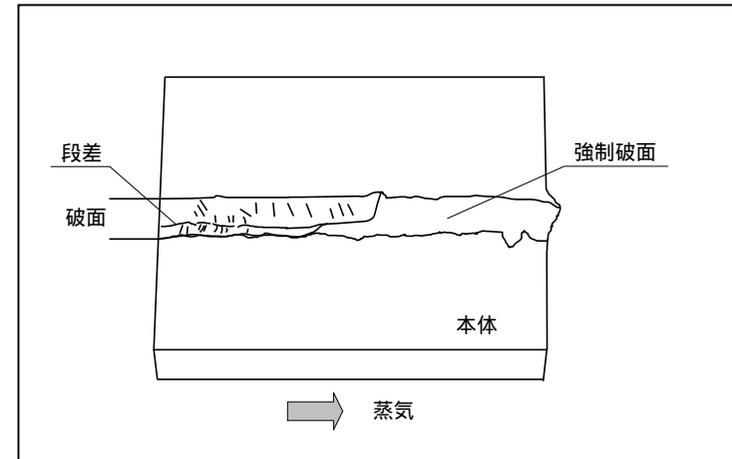
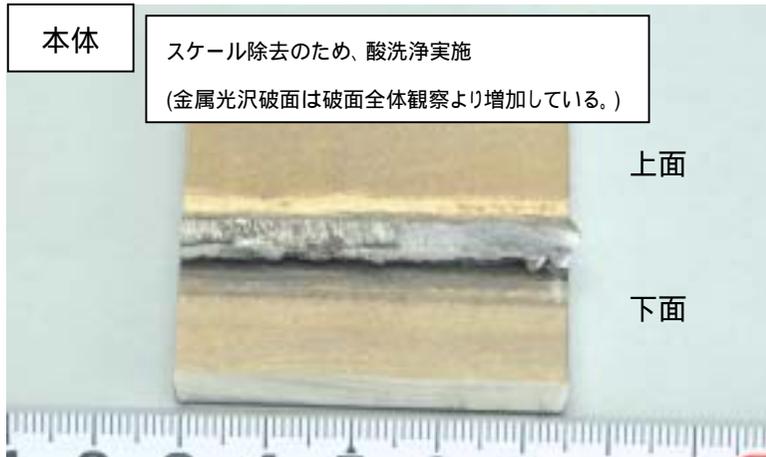
金属調査結果(破面観察(A部最終端部))



【破面観察結果】

- ・内部プレート側には、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。

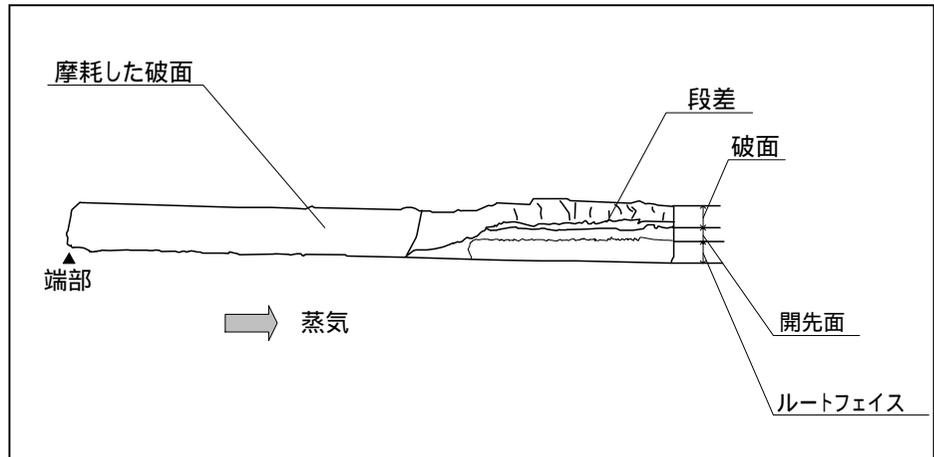
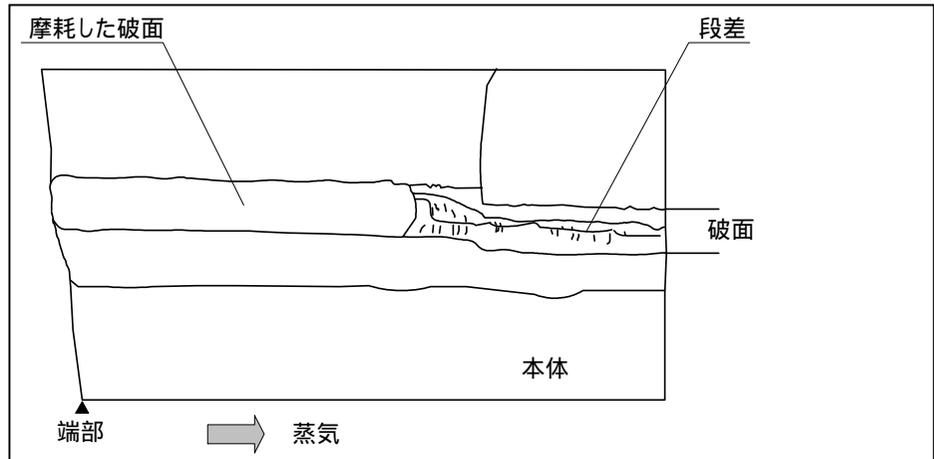
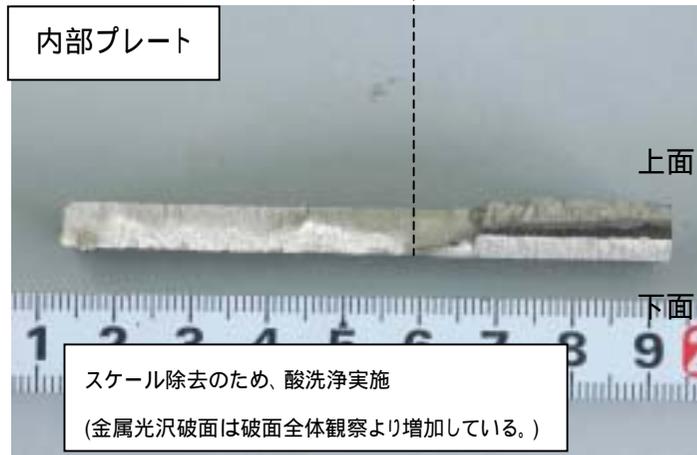
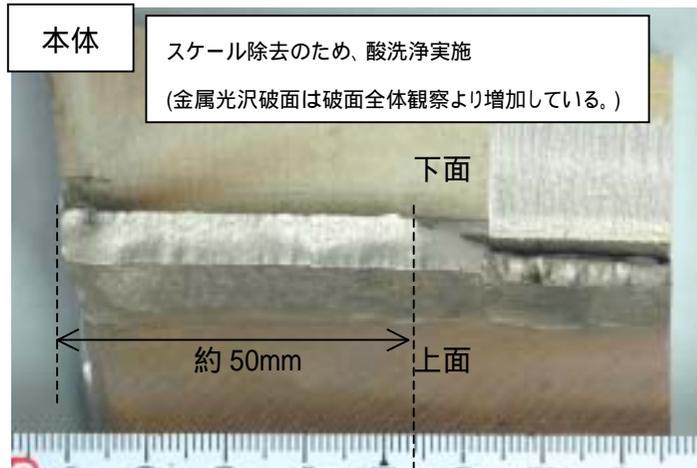
金属調査結果(破面観察(A部最終端部))



【破面観察結果】

- ・内部プレート側には、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。

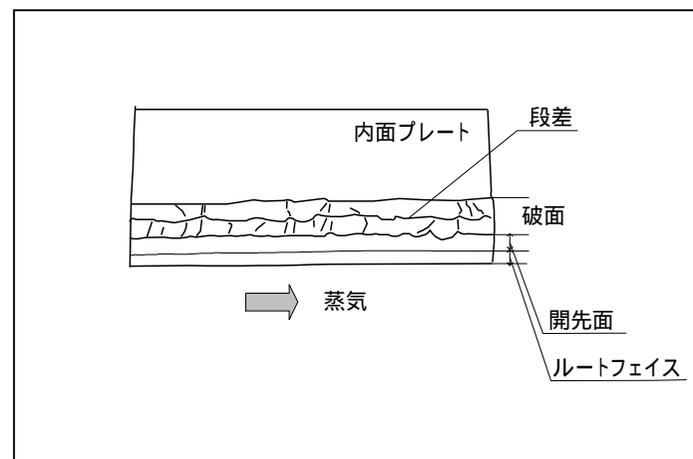
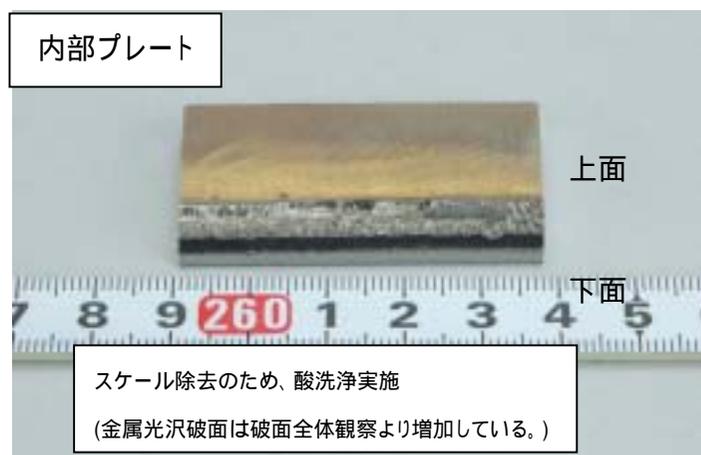
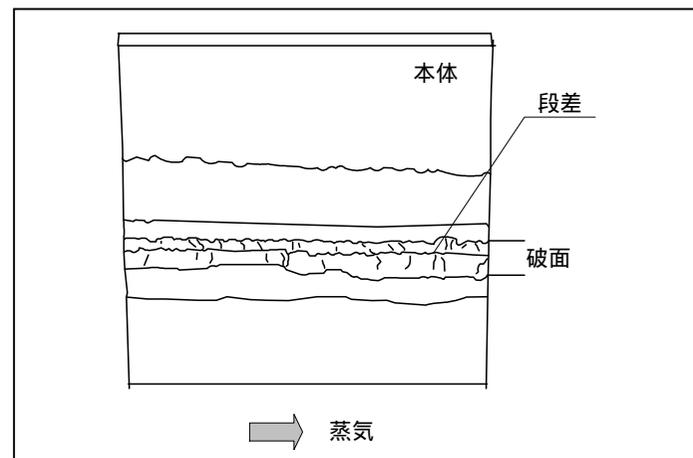
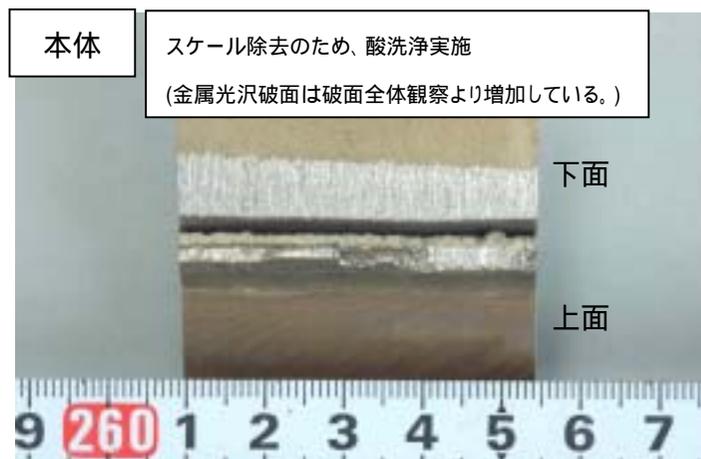
金属調査結果(破面観察(B部蒸気入口部))



【破面観察結果】

- ・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。
- ・溶接部の破面に、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。

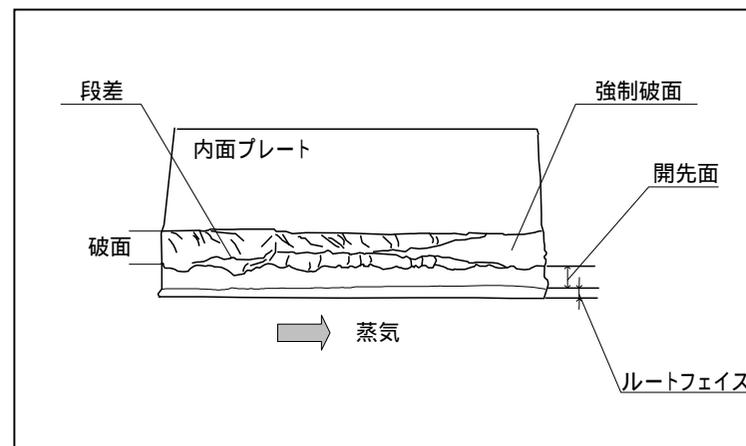
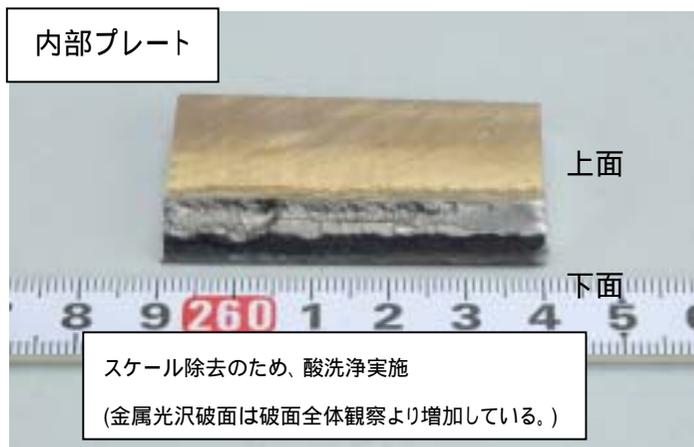
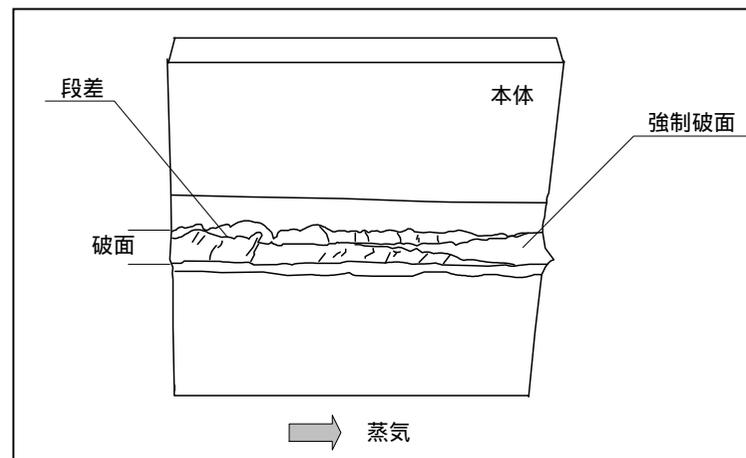
金属調査結果(破面観察(B部中間部))



【破面観察結果】

- ・内部プレート側には、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。

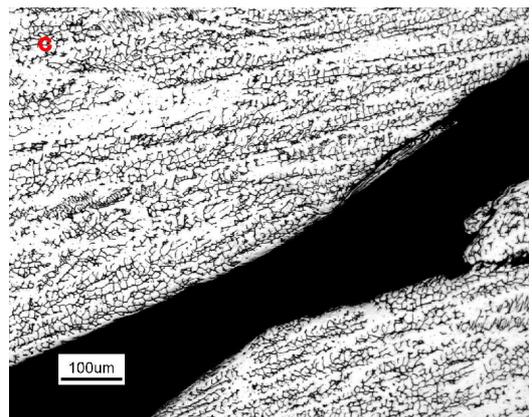
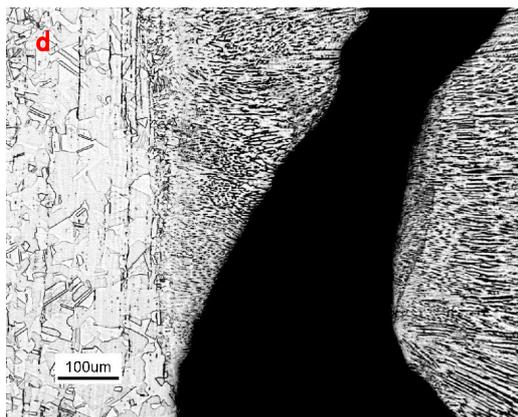
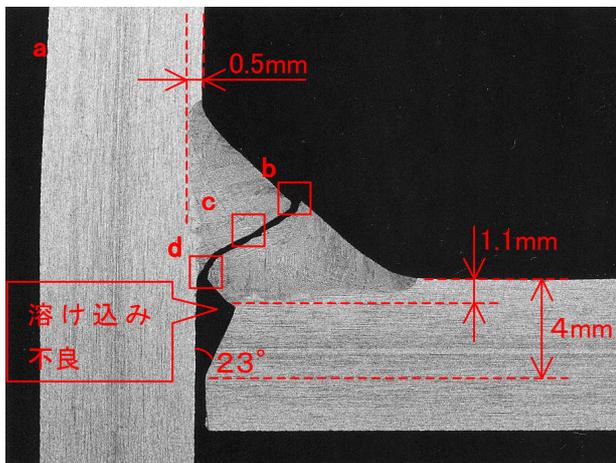
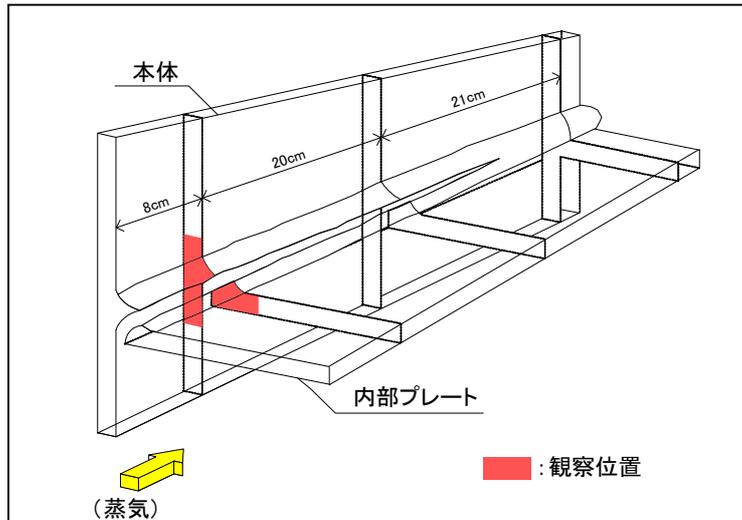
金属調査結果(破面観察(B部最終端部))



【破面観察結果】

- ・内部プレート側には、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。

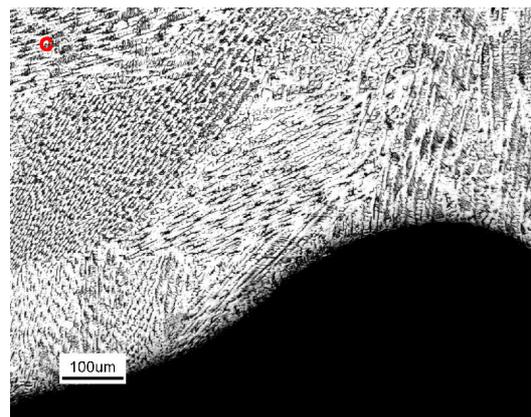
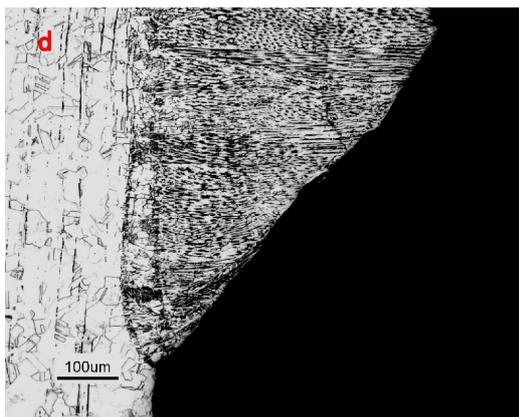
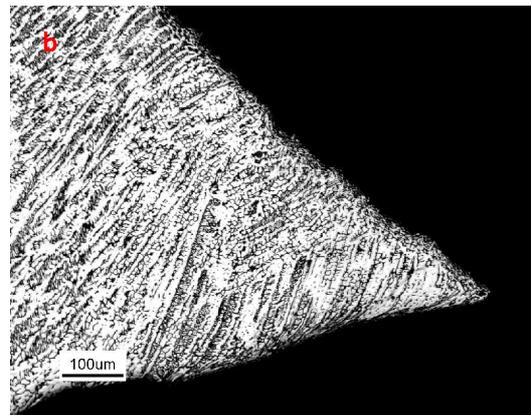
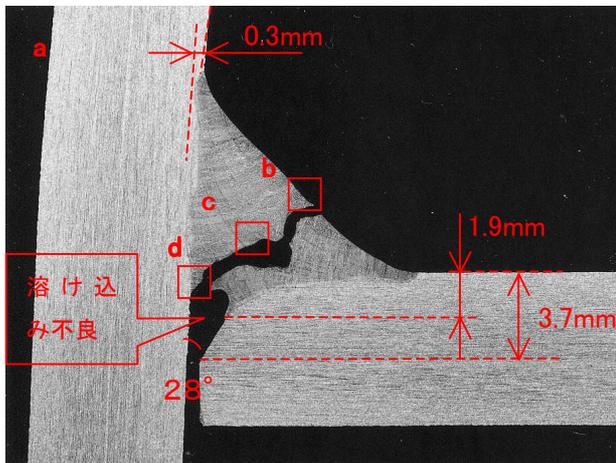
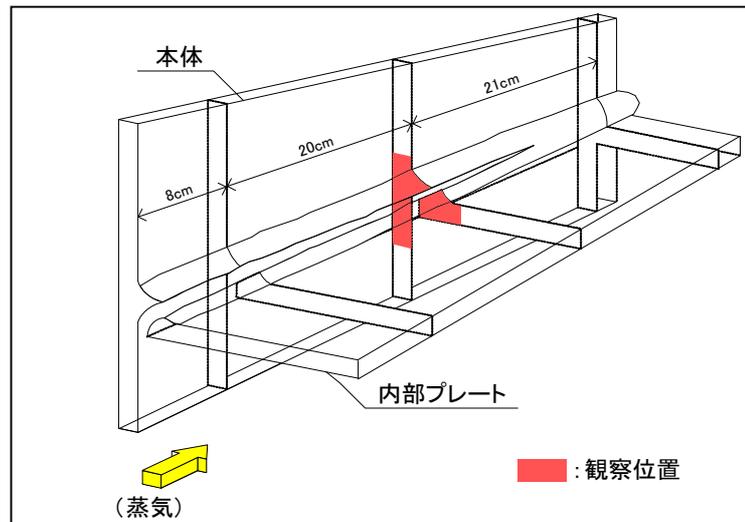
金属調査結果(断面ミクロ観察(A部))



【断面観察結果】

- ・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。
- ・割れが接近し破断したことを示す破面中央付近での屈曲が確認されたことより、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。
- ・溶け込み不良部の形状から、開先角度は約 23° 、開先深さは約4mmと推定される。(設計仕様：開先角度 45° 、開先深さ4.8mm)

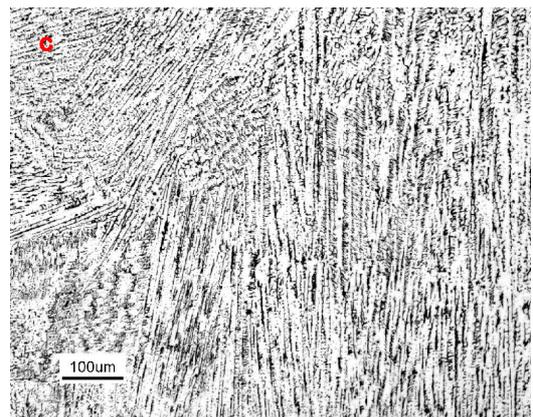
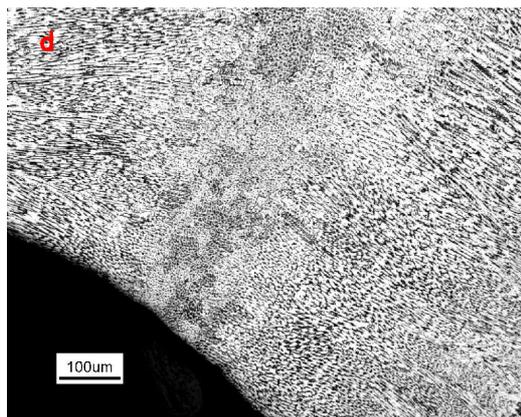
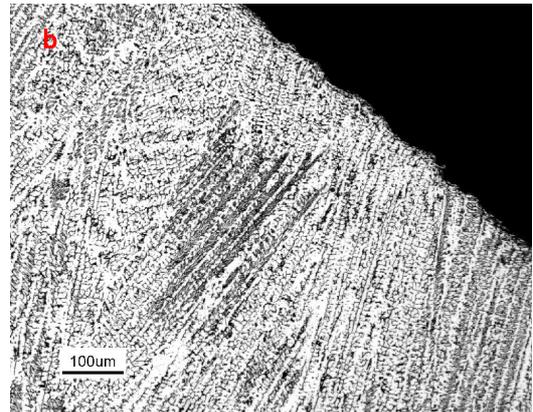
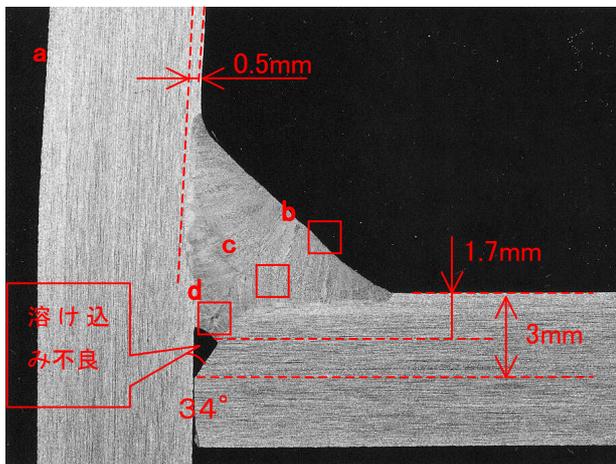
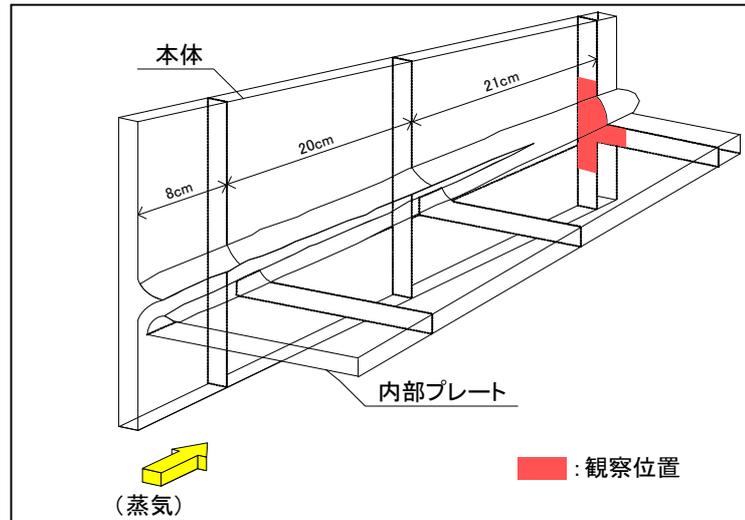
金属調査結果(断面ミクロ観察(A部))



【断面観察結果】

- ・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。
- ・割れが接近し破断したことを示す破面中央付近での屈曲が確認されたことより、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。
- ・溶け込み不良部の形状から、開先角度は約 28° で、開先深さは約3.7mmと推定される。

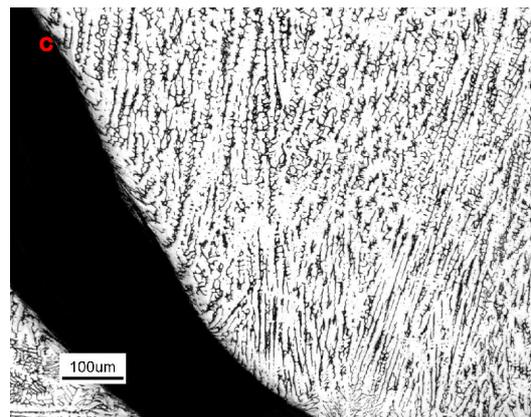
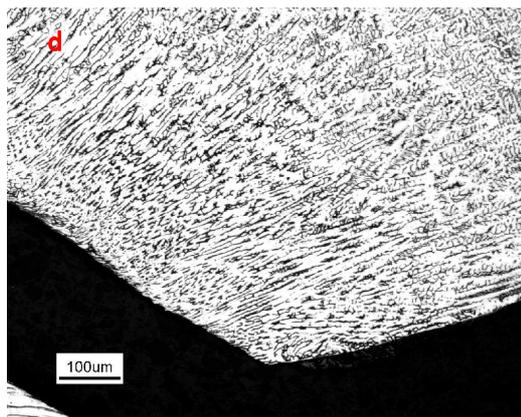
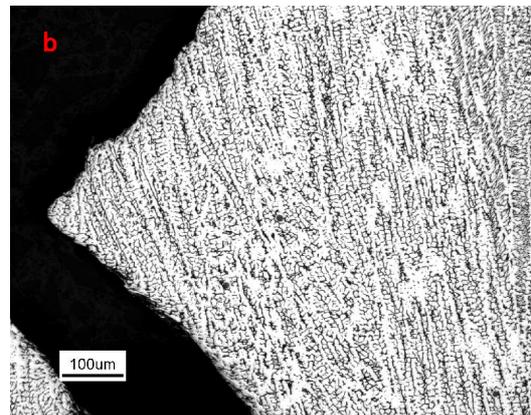
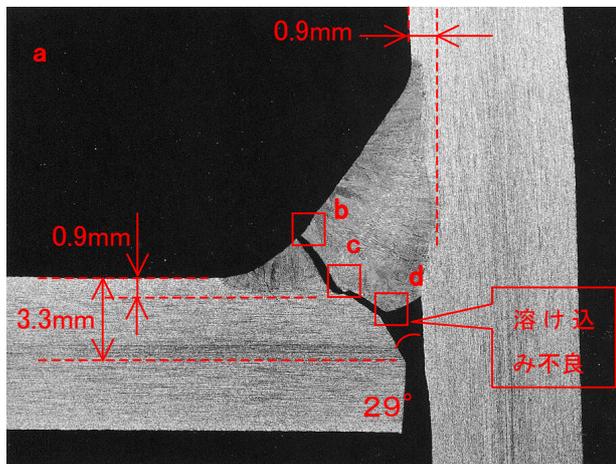
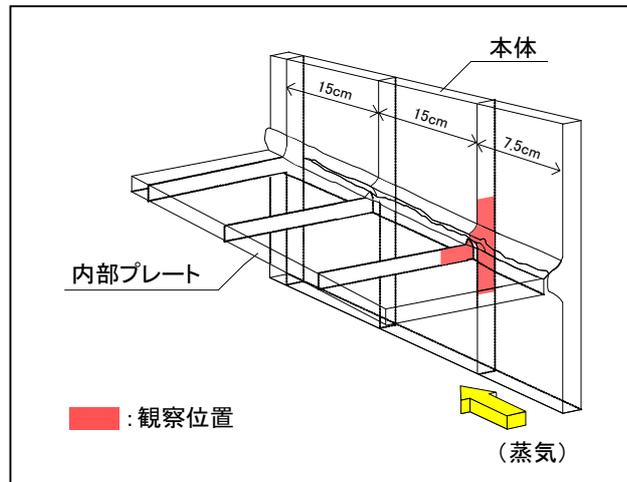
金属調査結果(断面ミクロ観察(A部))



【断面観察結果】

- ・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部が認められた。
- ・溶け込み不良部の形状から、開先角度は約 34° 、開先深さは約3mmと推定される。

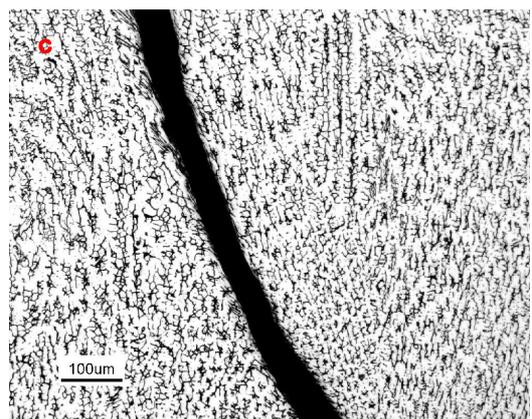
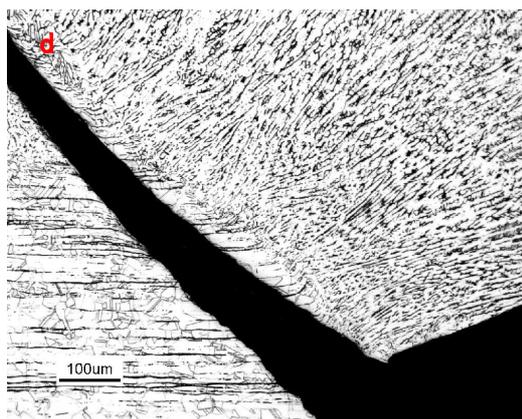
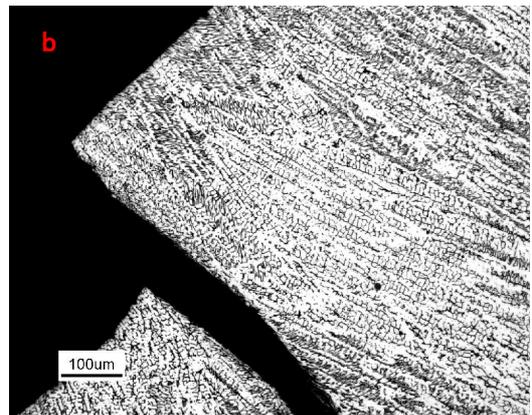
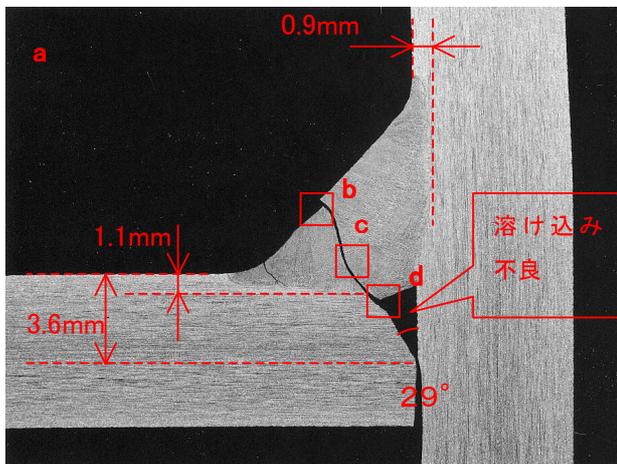
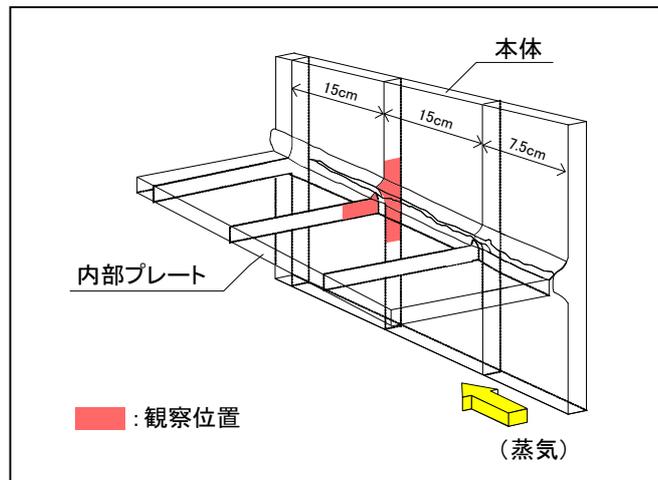
金属調査結果(断面ミクロ観察(B部))



【断面観察結果】

- ・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。
- ・割れが接近し破断したことを示す破面中央付近での屈曲が確認されたことより、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。
- ・溶け込み不良部の形状から、開先角度は約 29° 、開先深さは約3.3mmと推定される。(設計仕様: 開先角度 45° 、開先深さ4.8mm)

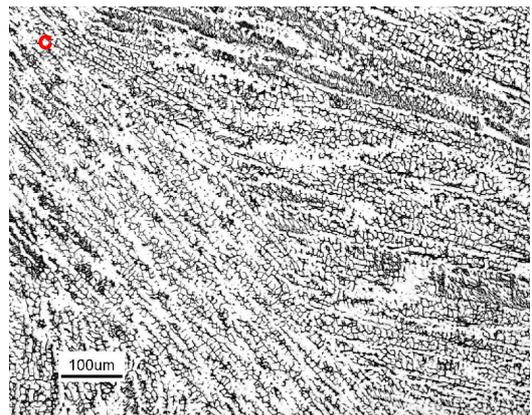
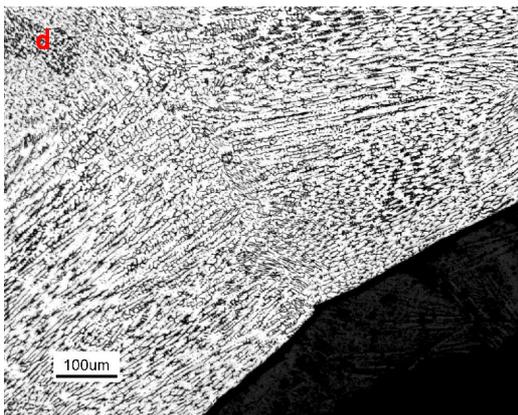
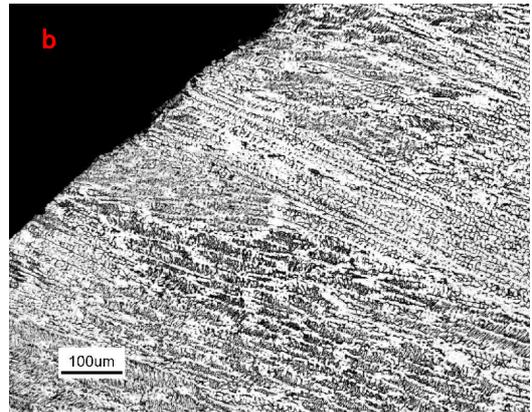
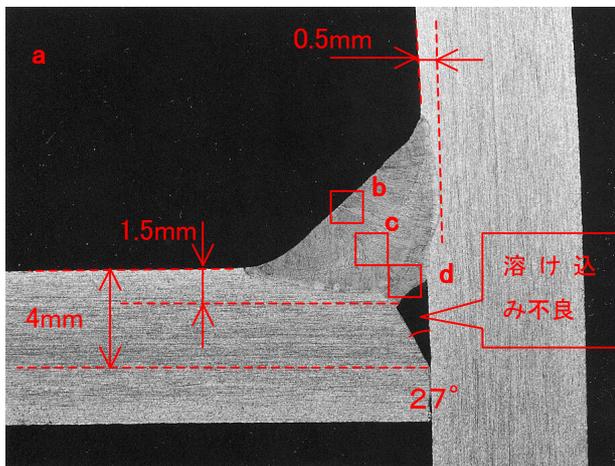
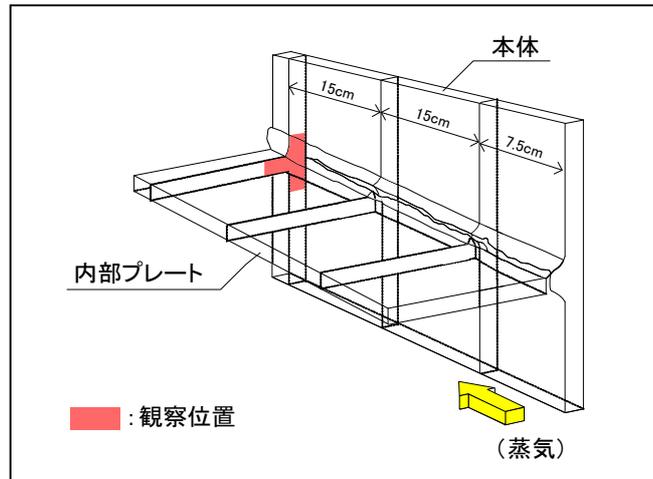
金属調査結果(断面ミクロ観察(B部))



【断面観察結果】

- ・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。
- ・割れが接近し破断したことを示す破面中央付近での屈曲が確認されたことより、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。
- ・溶け込み不良部の形状から、開先角度は約 29° で、開先深さは約3.6mmと推定される。

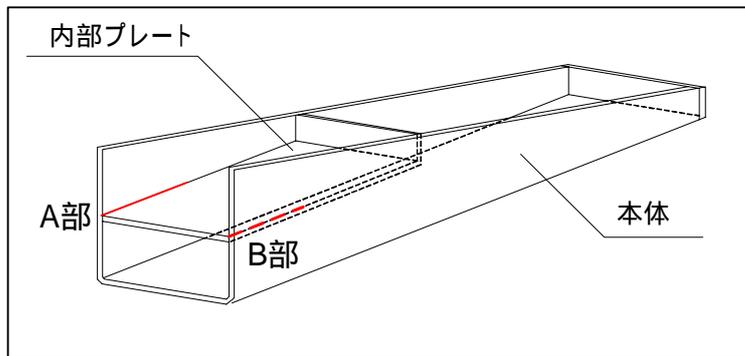
金属調査結果(断面ミクロ観察(B部))

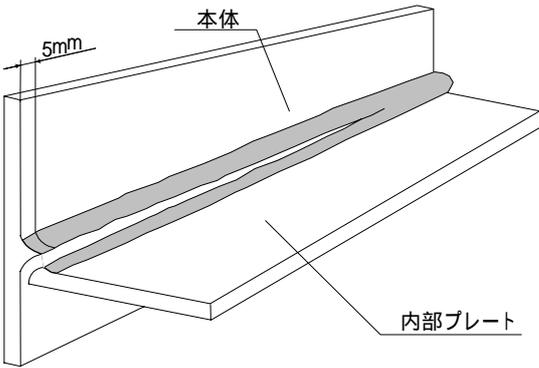
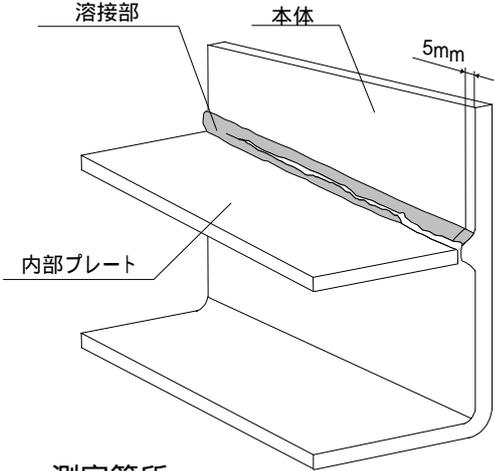
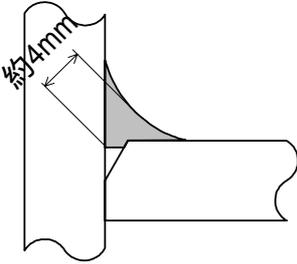
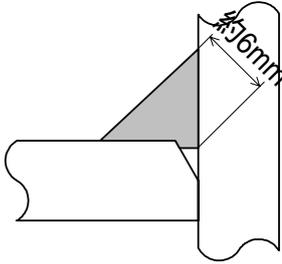


【断面観察結果】

- ・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部が認められた。
- ・溶け込み不良部の形状から、開先角度は約 27° 、開先深さは約4mmと推定される。

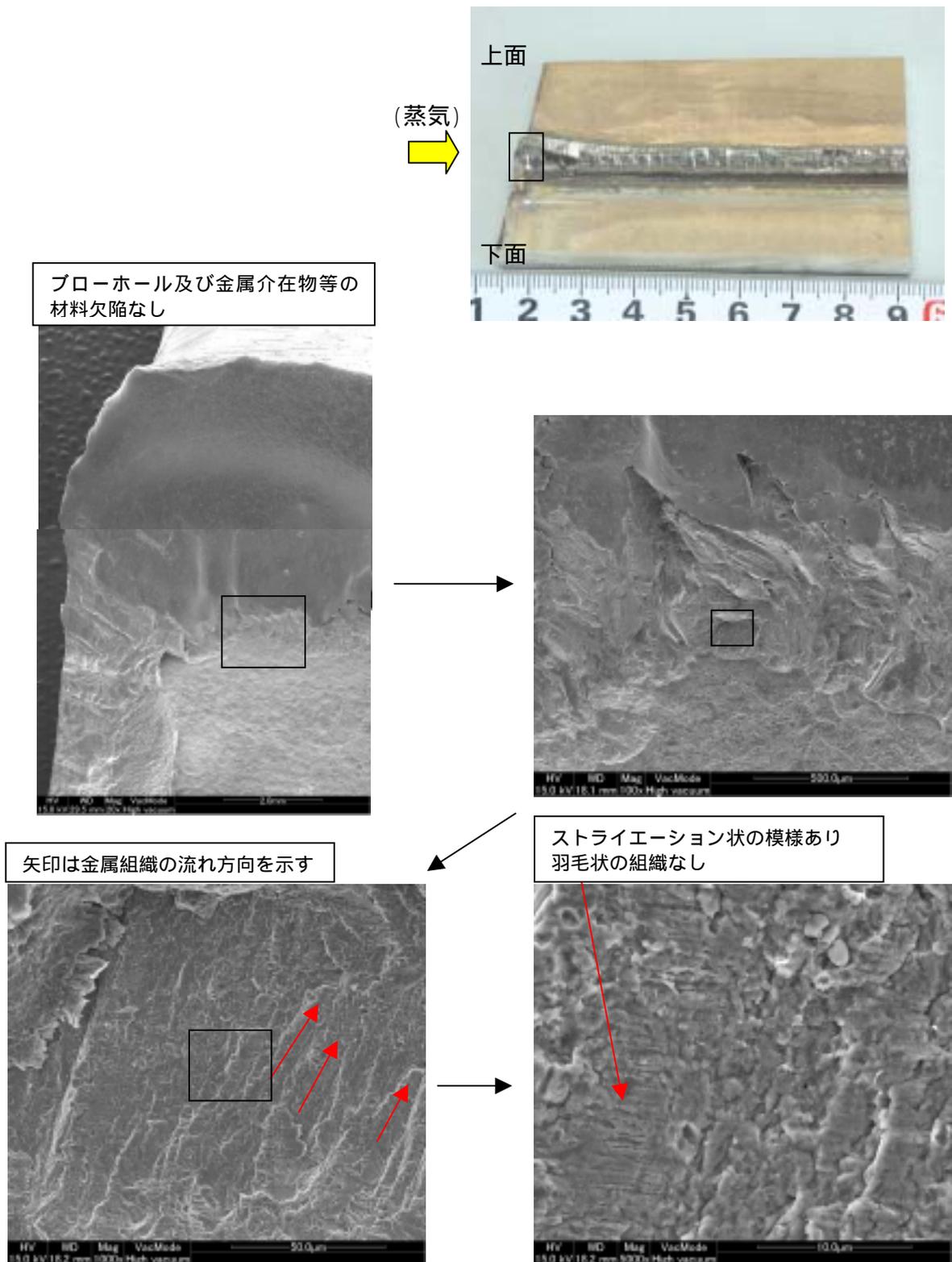
金属調査結果(のど厚測定)



A部	B部
 <p>測定箇所： 蒸気入口側端部から 5mm</p>	 <p>測定箇所： 蒸気入口側端部から 5mm</p>
 <p>溶接部割れ箇所</p>	 <p>母材割れ箇所</p>
<p>のど厚約 4mm</p>	<p>のど厚約 6mm</p>

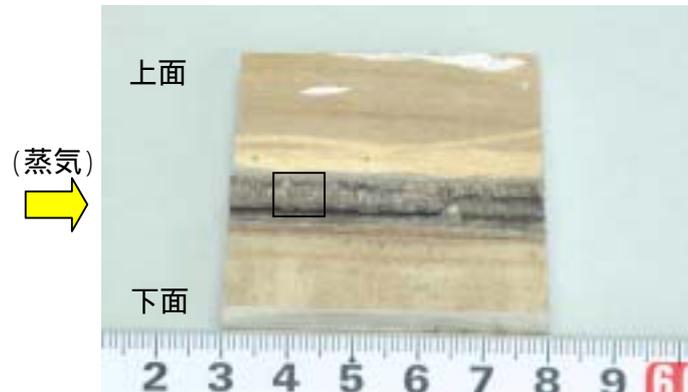
断面マイクロ観察により、蒸気入口近傍の溶接部ののど厚寸法を測定した結果、B部に比べA部の寸法が小さいことを確認した。

金属調査結果(破面SEM観察(A部蒸気入口部))

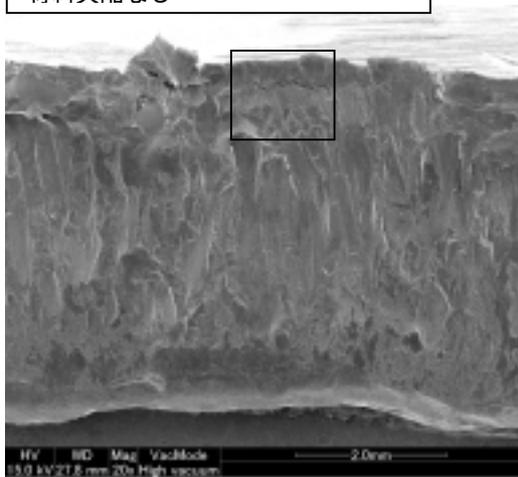


- ・破面には、疲労破面に特有なストライエーション状の模様が認められた。
- ・羽毛状の組織や材料欠陥等は認められなかった。
- ・破面には、割れ最終端方向に下面から斜めに進展した金属組織の流れ模様が認められた。

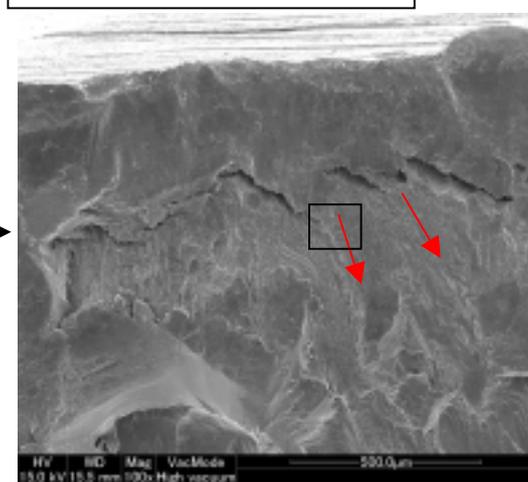
金属調査結果(破面SEM観察(A部中間部))



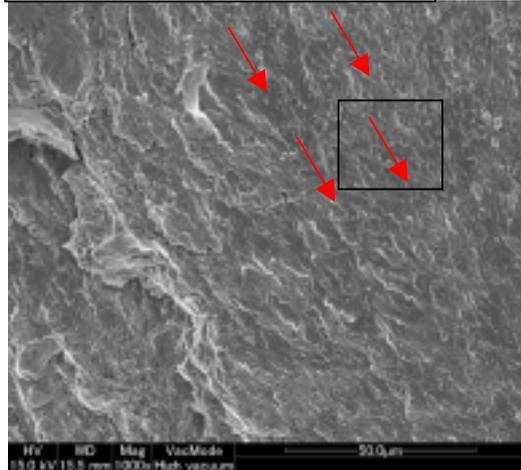
ブローホール及び金属介在物等の
材料欠陥なし



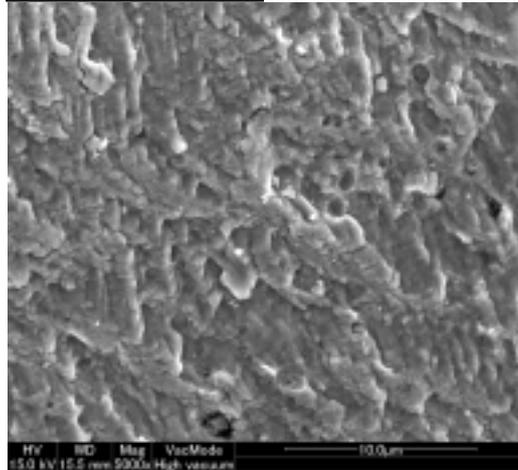
矢印は組織の流れ方向を示す



矢印は金属組織の流れ方向を示す

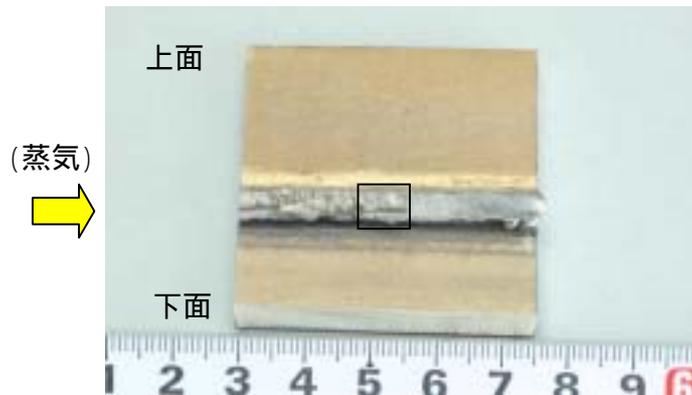


羽毛状の組織なし

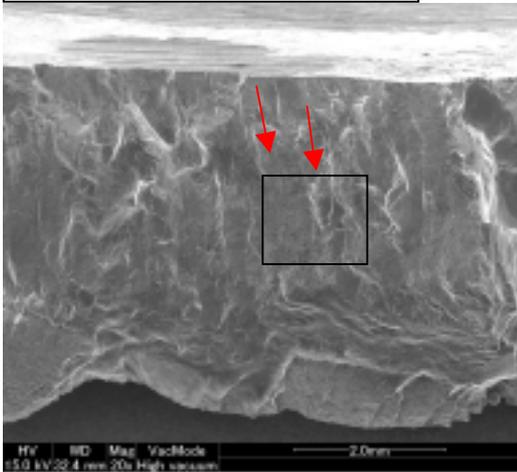


- ・破面には、割れ最終端方向に上面から斜めに進展した金属組織の流れ模様が認められた。
- ・羽毛状の組織や材料欠陥等は認められなかった。

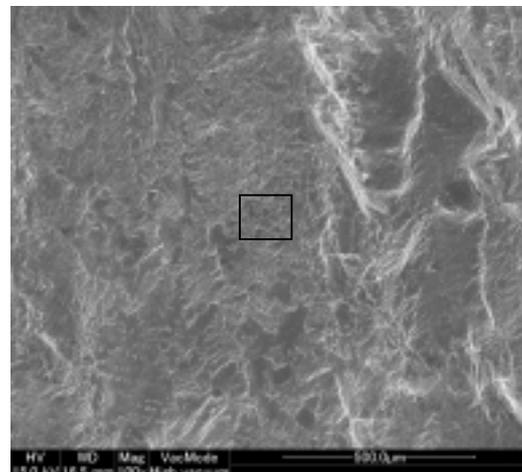
金属調査結果(破面SEM観察(A部最終端部))



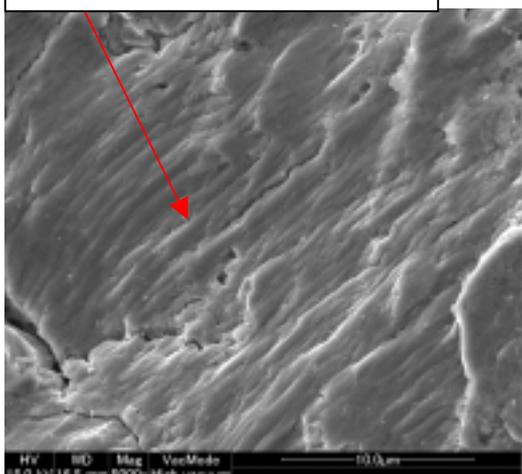
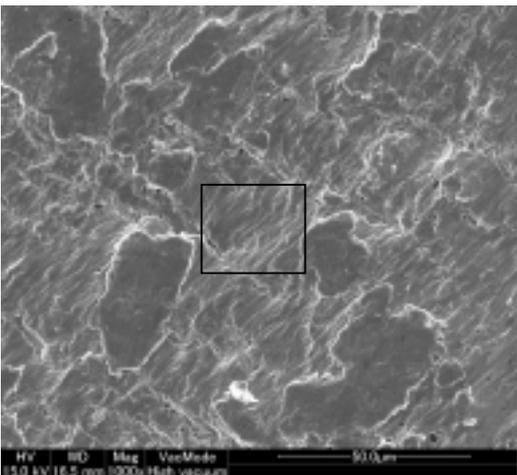
ブローホール及び金属介在物等の
材料欠陥なし



矢印は金属組織の流れ方向を示す

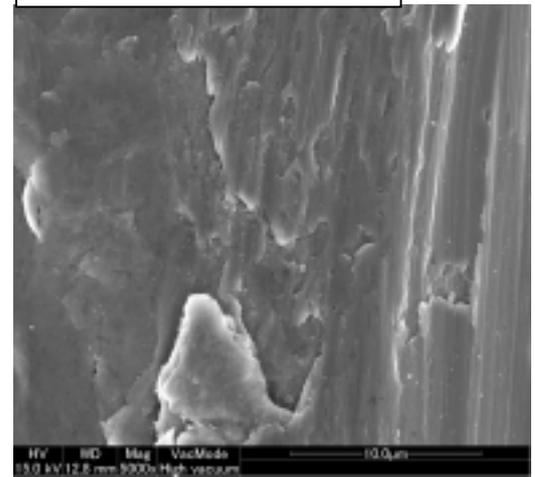
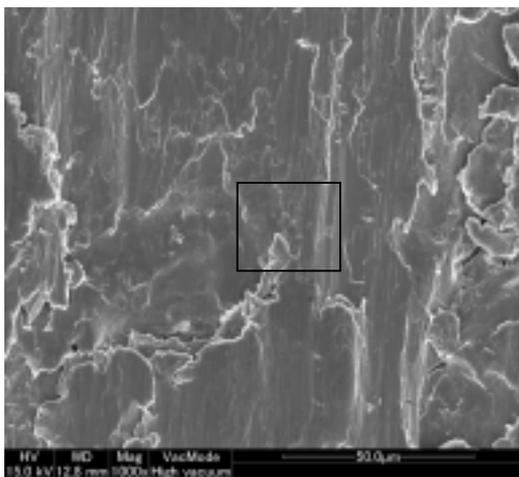
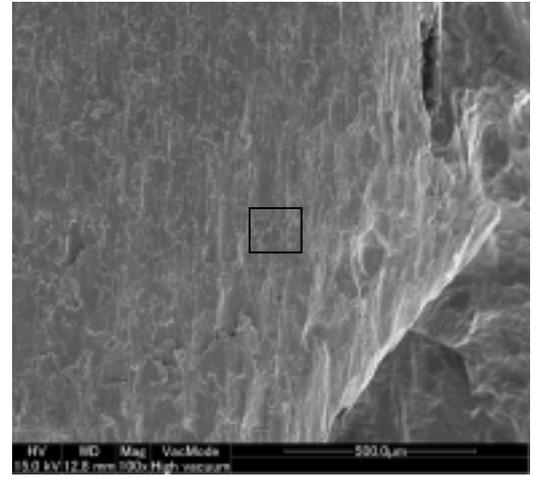
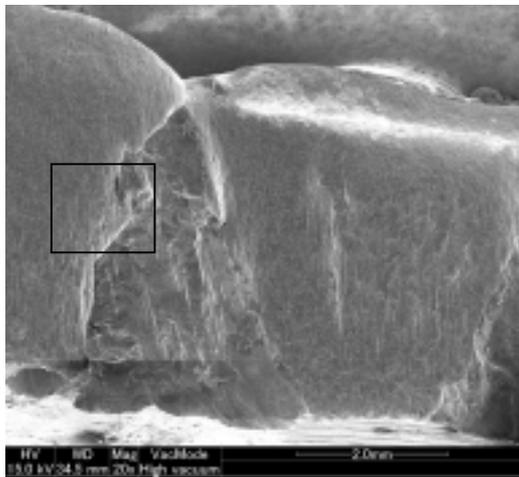
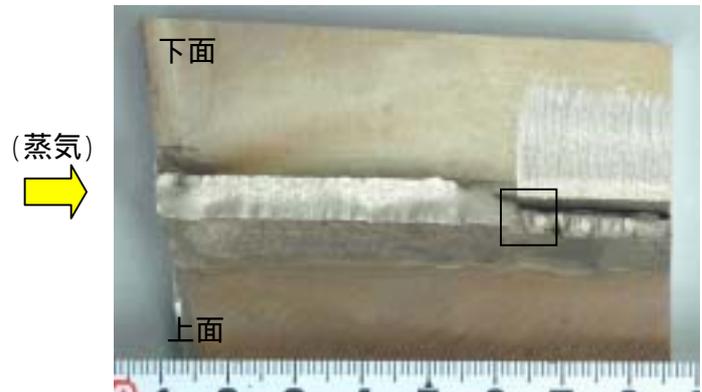


ストライエーション状の模様あり
羽毛状の組織なし



- ・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。
- ・羽毛状の組織や材料欠陥等は認められなかった。

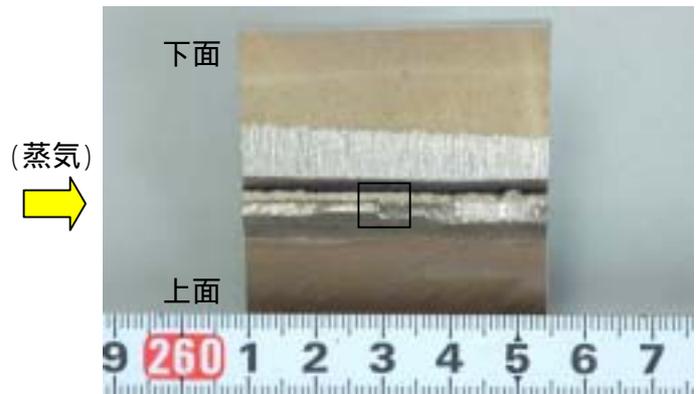
金属調査結果(破面SEM観察(B部蒸気入口部))



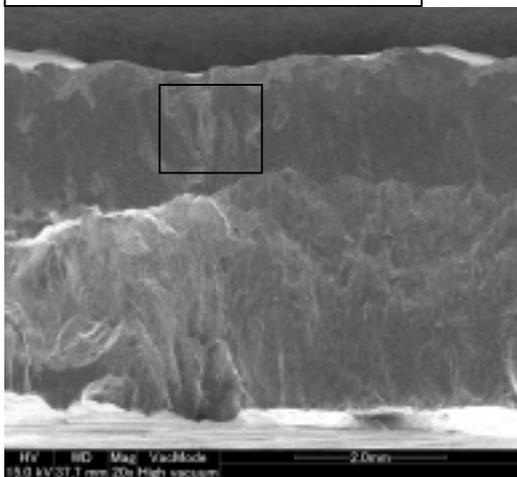
打撃および摺動により破面損傷

・破面は、打撃および摺動により損傷していた。

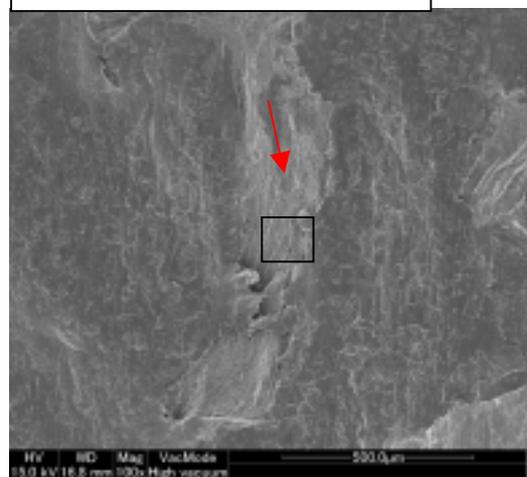
金属調査結果(破面SEM観察(B部中間部))



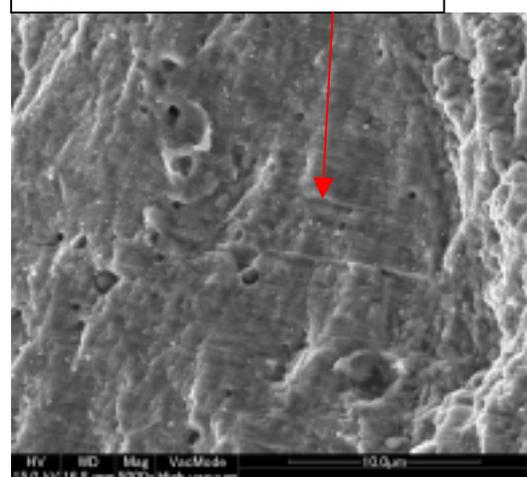
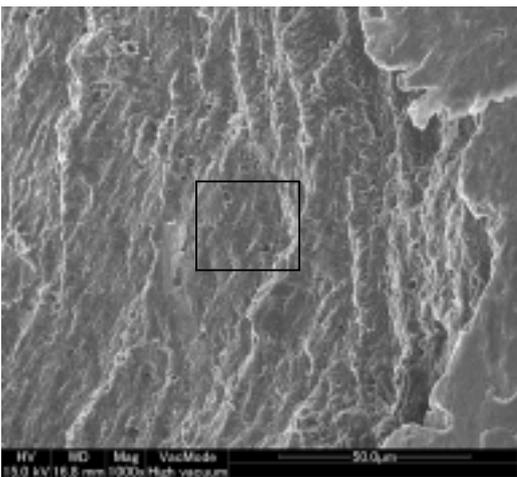
ブローホール及び金属介在物等の
材料欠陥なし



矢印は金属組織の流れ方向を示す

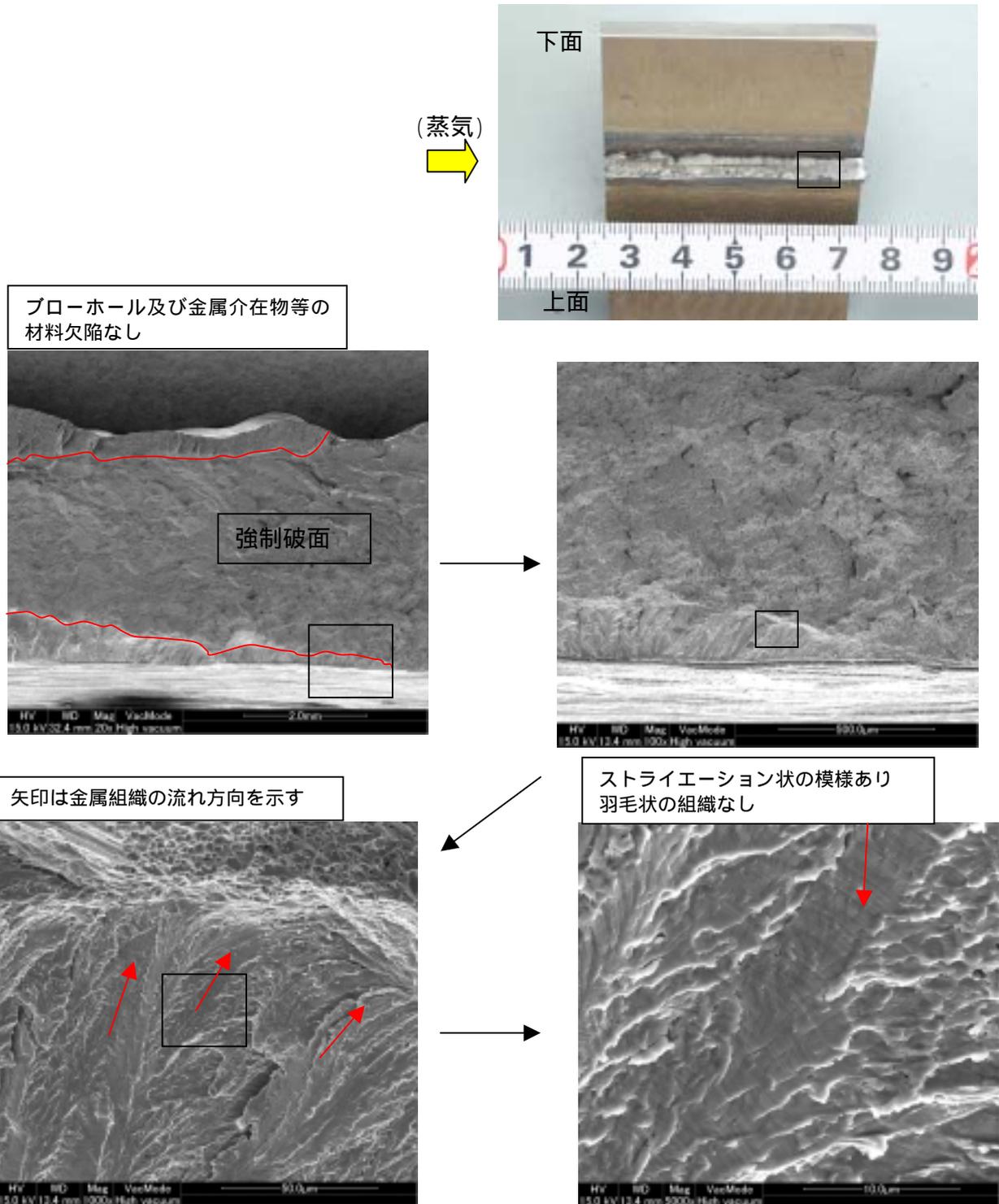


ストライエーション状の模様あり
羽毛状の組織なし



- ・破面には、上面から下面方向に進展した金属組織の流れ模様が認められた。
- ・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。
- ・羽毛状の組織や材料欠陥等は認められなかった。

金属調査結果(破面SEM観察(B部最終端部))



- ・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。
- ・破面には、割れ最終端方向に下面から斜めに進展した金属組織の流れ模様が認められた。
- ・羽毛状の組織や材料欠陥等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	Cl	Na	Ca	S	Si	その他
A部 割れ	0.14	1.48	-	0.08	0.59	97.71
B部 割れ	-	0.93	-	-	0.45	98.62

(参考)

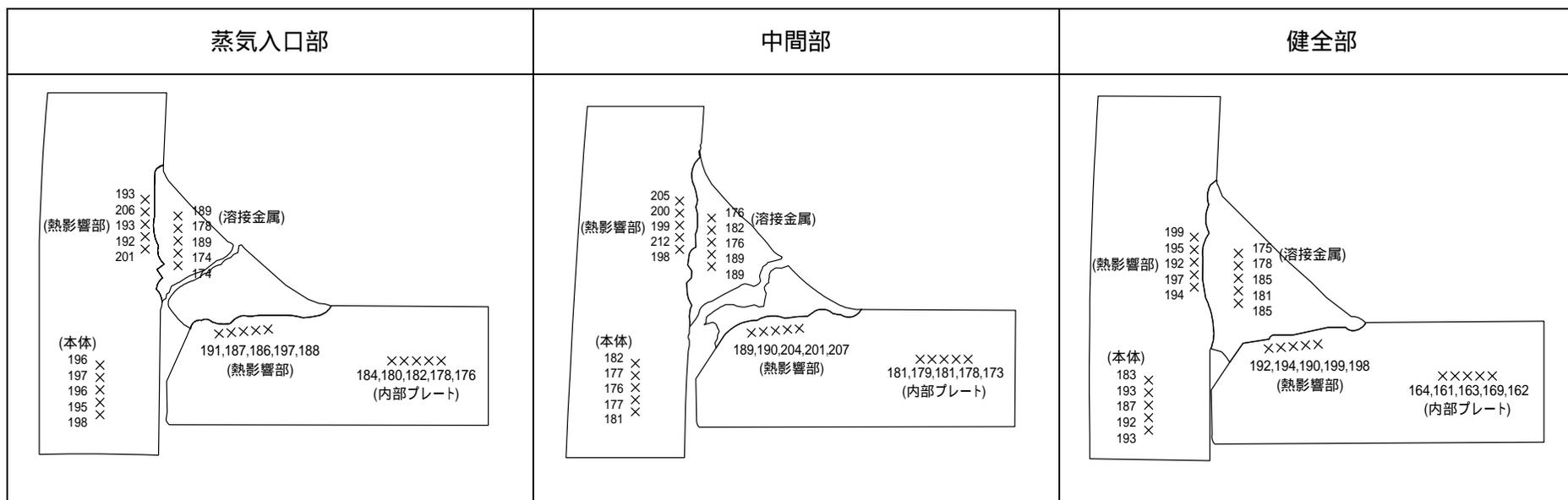
(単位:重量%)

項目	Cl	Na	Ca	S	Si	その他
一般部表面 (ステンレス鋼)	0.12	4.18	0.14	0.16	0.52	94.88

塩化物応力腐食割れでは、き裂先端において耐食性に有害なClが濃縮するため、割れ近傍の構造体表面よりも破面のCl量は高濃度となる傾向にある。本測定結果では、破面のCl量はごく微量で、かつ一般部表面とほぼ同等なことから、割れ発生の主要因として塩素は関与していない。

破面の元素分析を行った結果、鉄鋼材料の耐食性に有害な塩素はごく微量であり、また、その他の不純物は一般部とほぼ同等であった。

金属調査結果(硬度測定)(割れA部)



硬度測定結果(ビッカース硬さ)

		本体	内部プレート	熱影響部	溶接金属
蒸気入口部	平均	196	180	193	181
	最高	198	184	206	189
中間部	平均	179	178	201	182
	最高	182	181	212	189
健全部	平均	190	164	195	181
	最高	193	169	199	185

硬さ換算表

ブリネル硬さ	ビッカース硬さ
200	210
209	220

(出典) JIS 鉄鋼 ハンドブック

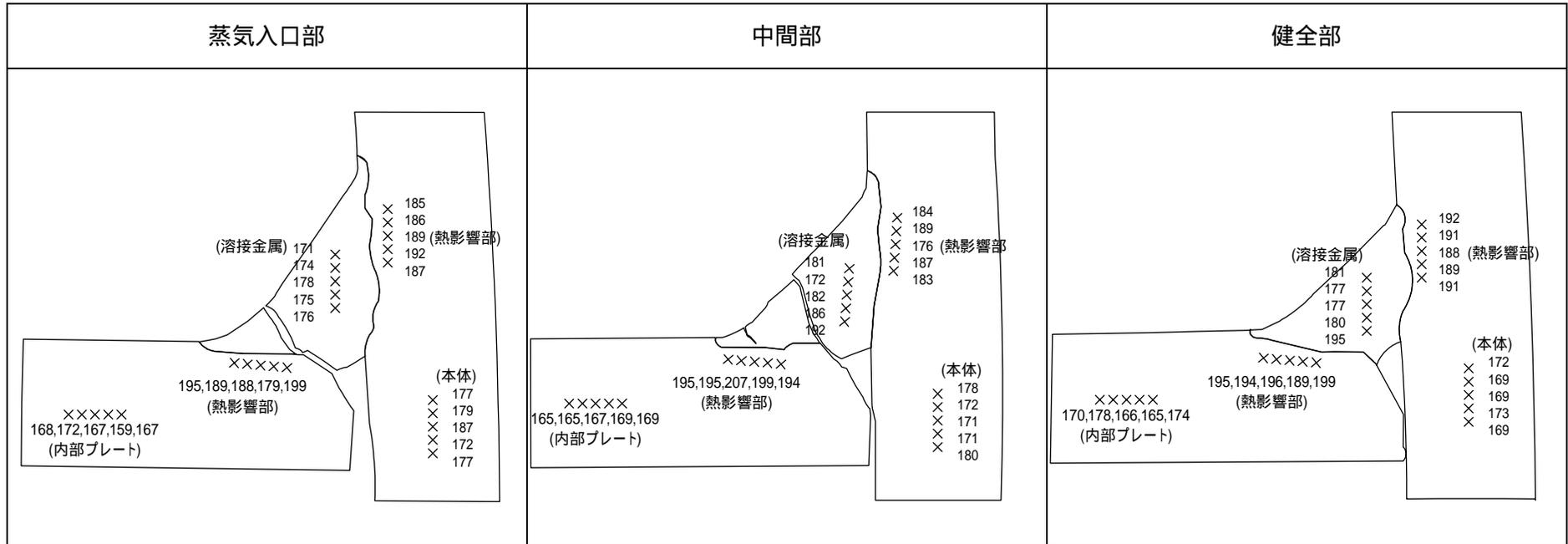
規格値(素材)

ブリネル硬さ	ビッカース換算
201 以下	211 以下

- ・規格値(素材)は、金属組織の均質化熱処理を施した素材に対するものである。
- ・熱影響部では溶接時の入熱により金属組織や残留応力が変化するため、熱影響部の硬さは一般的に高くなる個所も存在することが知られているが、本測定結果では、規格値(素材)とほぼ同等であることから問題はない。

割れA部近傍の硬度を測定した結果、規格値に対して、問題となる硬化は認められなかった。

金属調査結果(硬度測定)(割れB部)



硬度測定結果(ビッカース硬さ)

		本体	内部プレート	熱影響部	溶接金属
蒸気入口部	平均	178	167	189	175
	最高	187	168	199	178
中間部	平均	174	167	191	183
	最高	180	169	207	192
健全部	平均	170	171	192	182
	最高	173	178	199	195

硬さ換算表

ブリネル硬さ	ビッカース硬さ
200	210
209	220

(出典) JIS 鉄鋼 ハンドブック

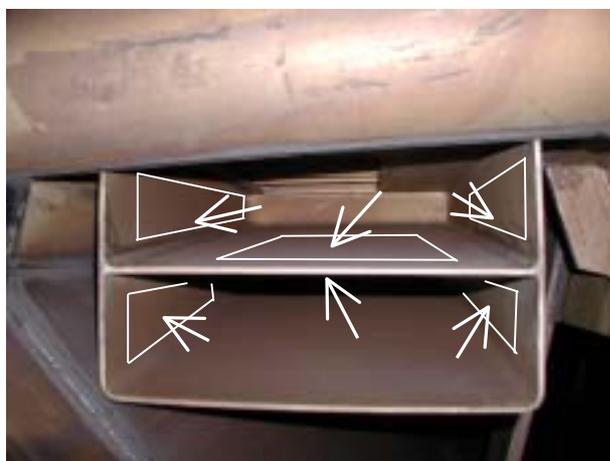
規格値(素材)

ブリネル硬さ	ビッカース換算
201 以下	211 以下

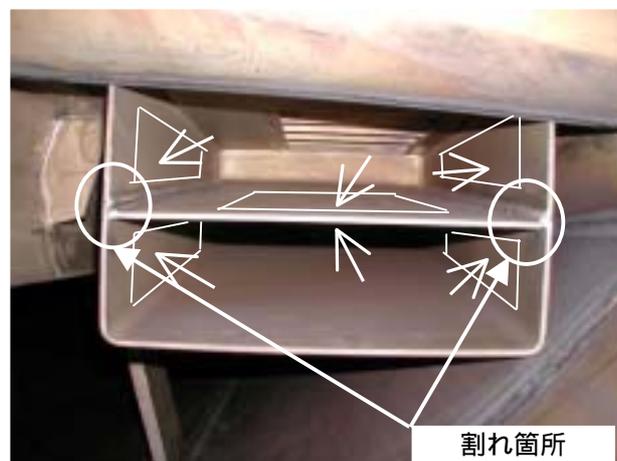
割れB部近傍の硬度を測定した結果、規格値に対して、問題となる硬化は認められなかった。

付着塩分量測定結果

測定箇所



左側蒸気整流板



右側蒸気整流板

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)
	右側 蒸気整流板	1段表面	1	100
		1段左側面	< 1	
		1段右側面	< 1	
		1段裏面	< 1	
		2段左側面	< 1	
		2段右側面	< 1	
	左側 蒸気整流板	1段表面	< 1	
		1段左側面	< 1	
		1段右側面	3	
		1段裏面	< 1	
		2段左側面	< 1	
		2段右側面	3	

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。

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。

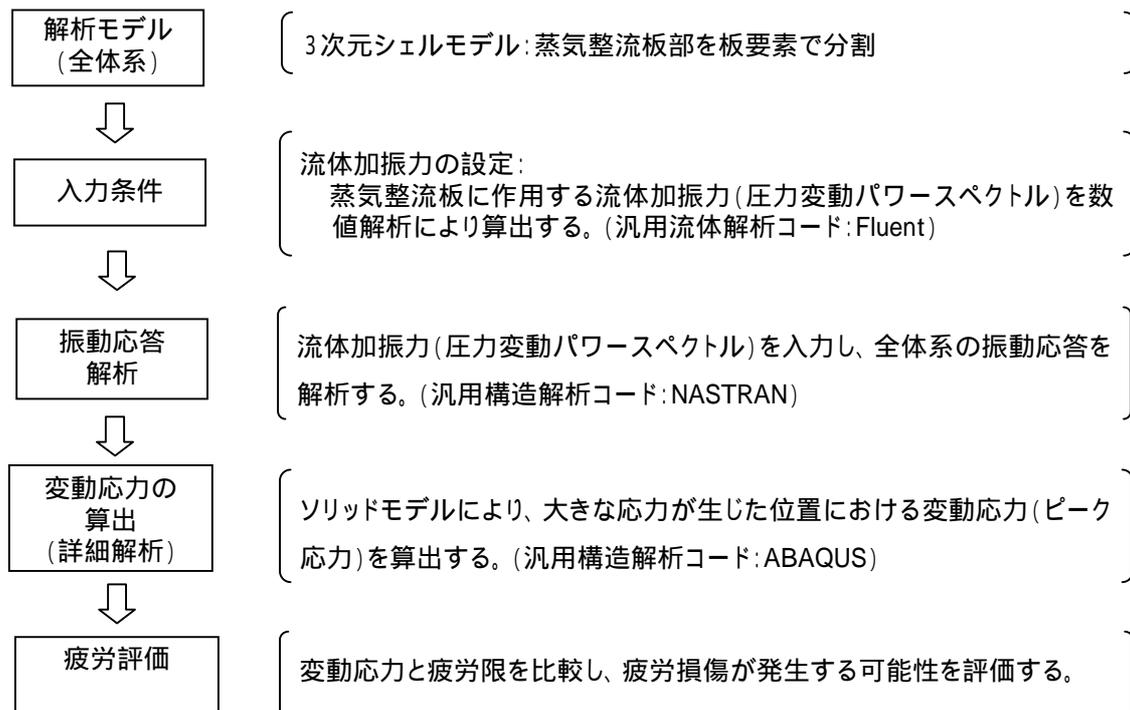
b. 変動応力算出

- ・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、モデル上面(溶接部)を固定とし、本体と内部プレート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。

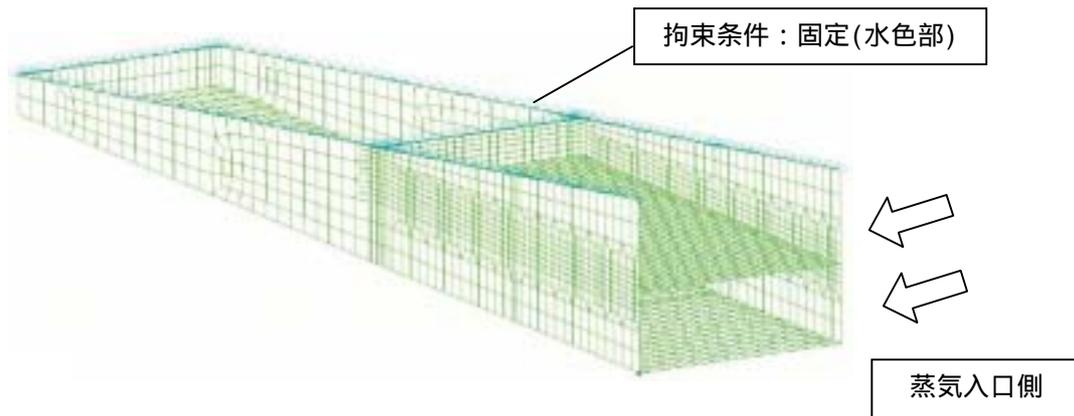


図1 解析モデル図

(2) 入力条件

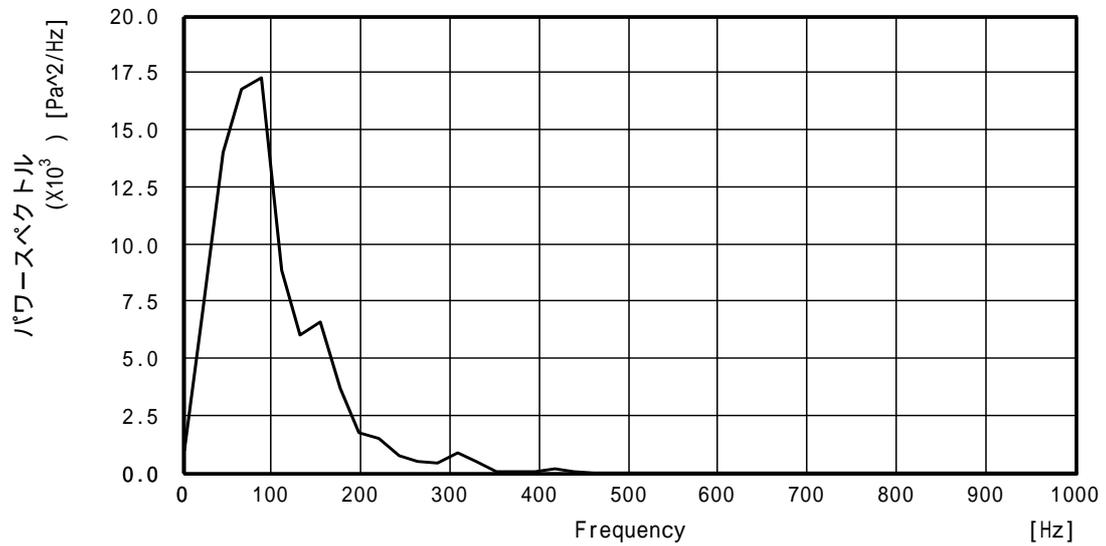
運転中、蒸気整流板には、蒸気の流れによるランダムな圧力変動が生じる。この圧力変動を算出するため、汎用流体解析コード(Fluent)を用いて非定常流れの数値解析を実施し、振動応答解析に用いる圧力変動パワースペクトルを算出した。

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

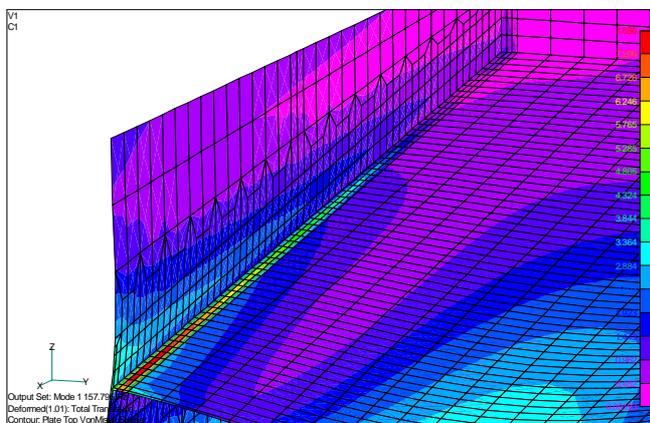
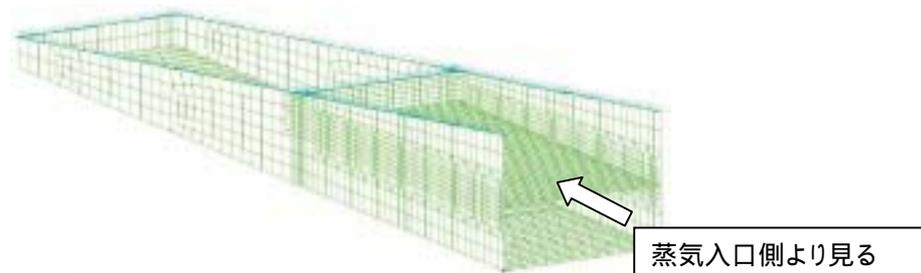
図2 圧力変動パワースペクトル



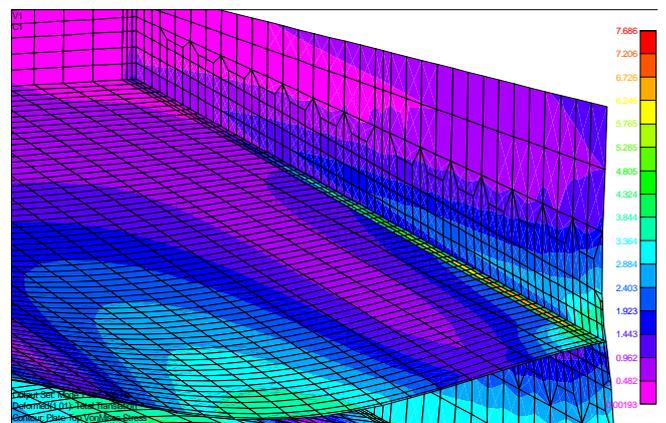
(3) 振動応答解析

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3に示す。



蒸気整流板左側



蒸気整流板右側

図3 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(蒸気整流板左側、入口より 35mm) 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 4 に示す。

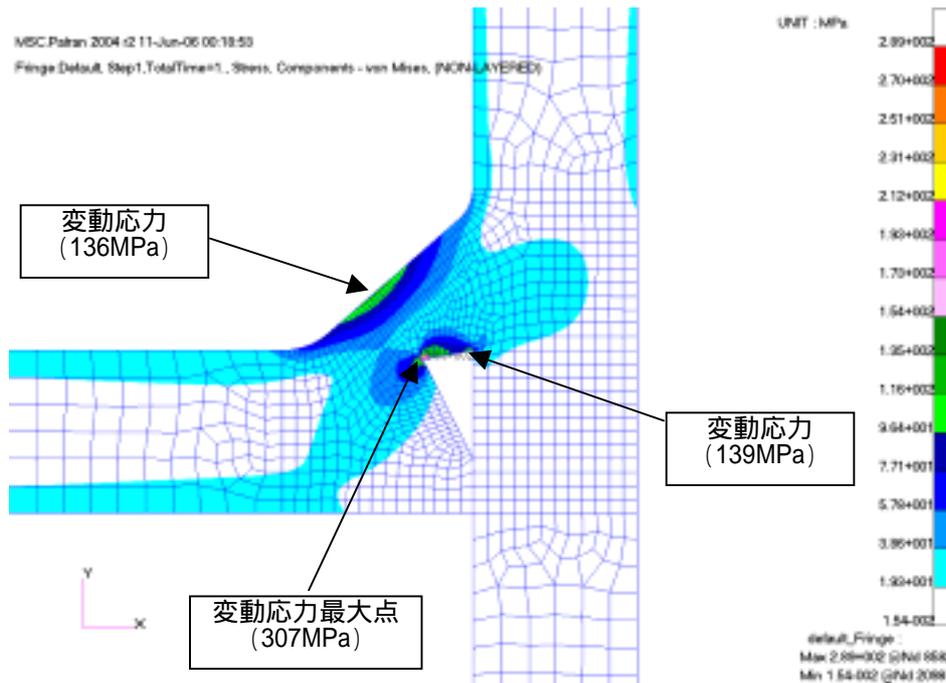


図 4 変動応力解析結果

(5) 疲労評価

算出された変動応力は疲労限を上回り、疲労損傷が発生し得ることを確認した。

評価結果を表 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
307	188	有

: 図 5 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

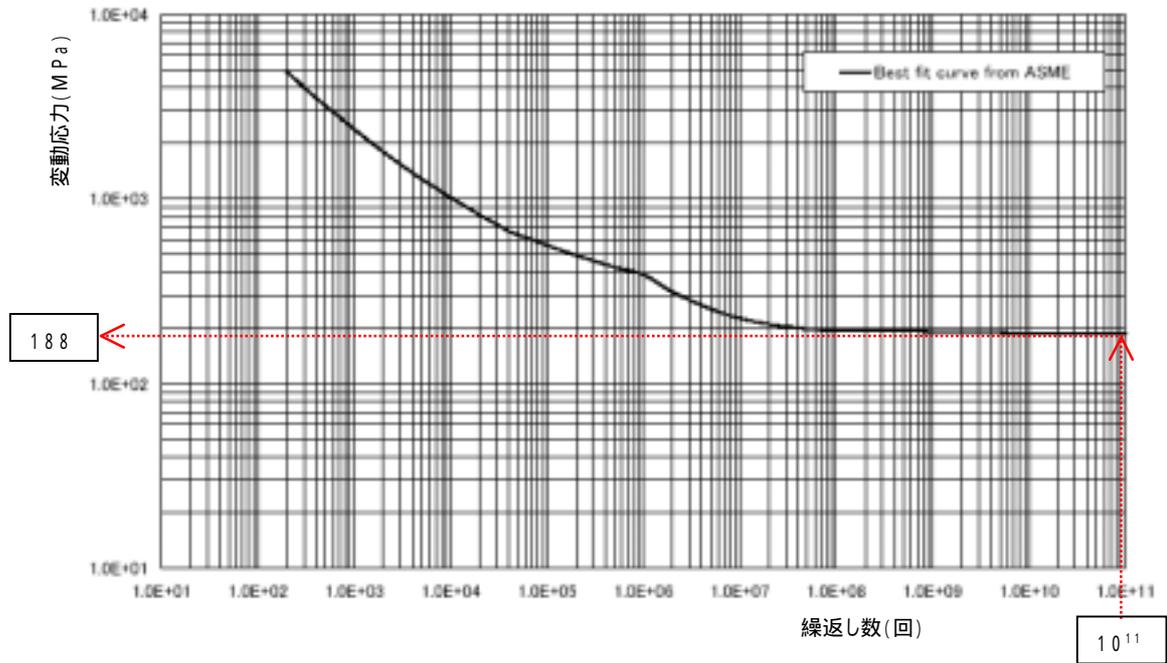
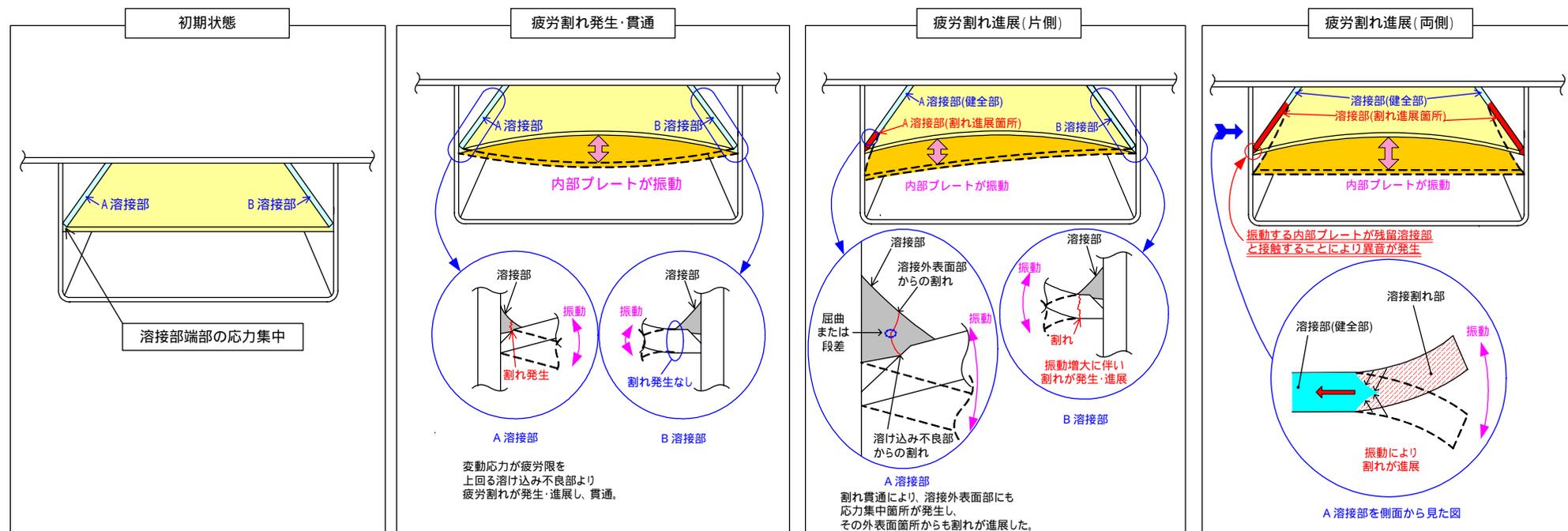
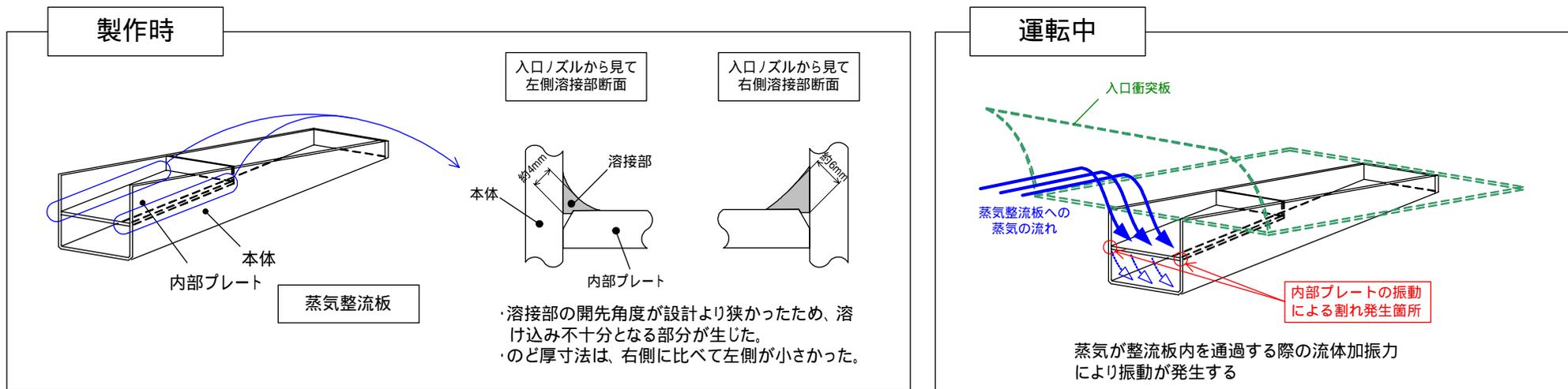


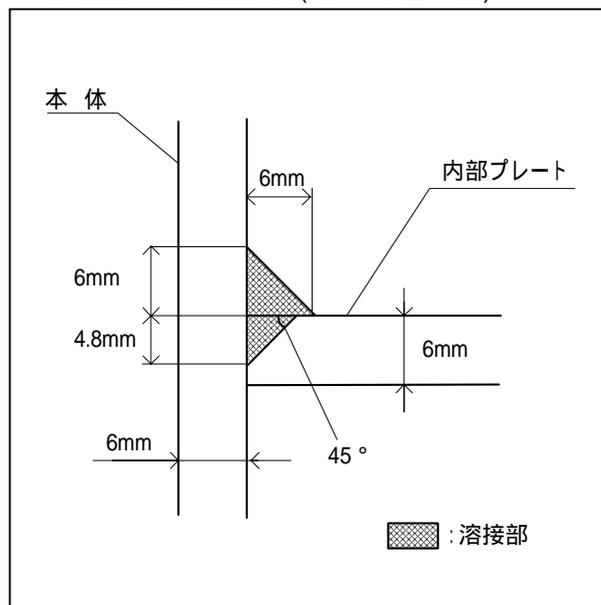
図5 疲労線図(ASME Sec. Division 2 Best fit curve)
(オーステナイト系ステンレス鋼)

事象発生 の 推定メカニズム



その他の同じ箇所の調査結果

溶接施工状況調査結果(製作履歴調査)



溶接部設計形状図(開先)

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 溶接施工記録等	問題なし
	炭酸ガスアーク溶接		
溶接材料	ステンレス鋼 (308L)	材料証明書	問題なし
非破壊検査	浸透探傷検査	浸透探傷検査記録	問題なし

:開先加工後の施工記録なし

外観点検(現地での点検)

溶接部の目視点検および浸透探傷検査

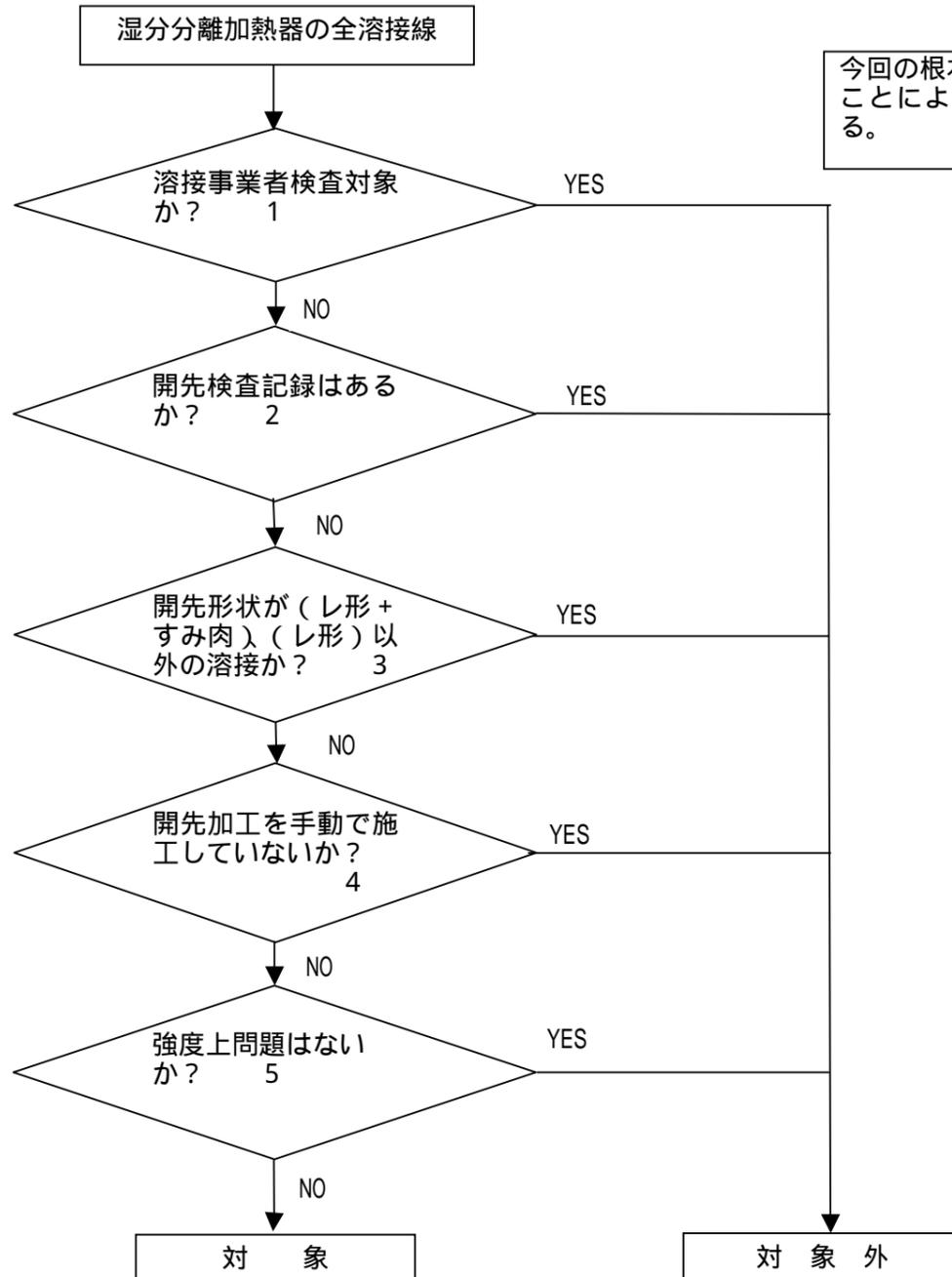
【製作履歴調査結果】

- ・溶接施工方法は、製作図面および溶接施工記録等により問題のないことを確認した。ただし、開先加工の状況は確認できなかった。
- ・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。
- ・溶接部は、浸透探傷検査を実施しており、問題のないことを確認した。

【現地での点検結果】

- ・溶接部の目視点検および浸透探傷検査を実施した結果、問題のないことを確認した。

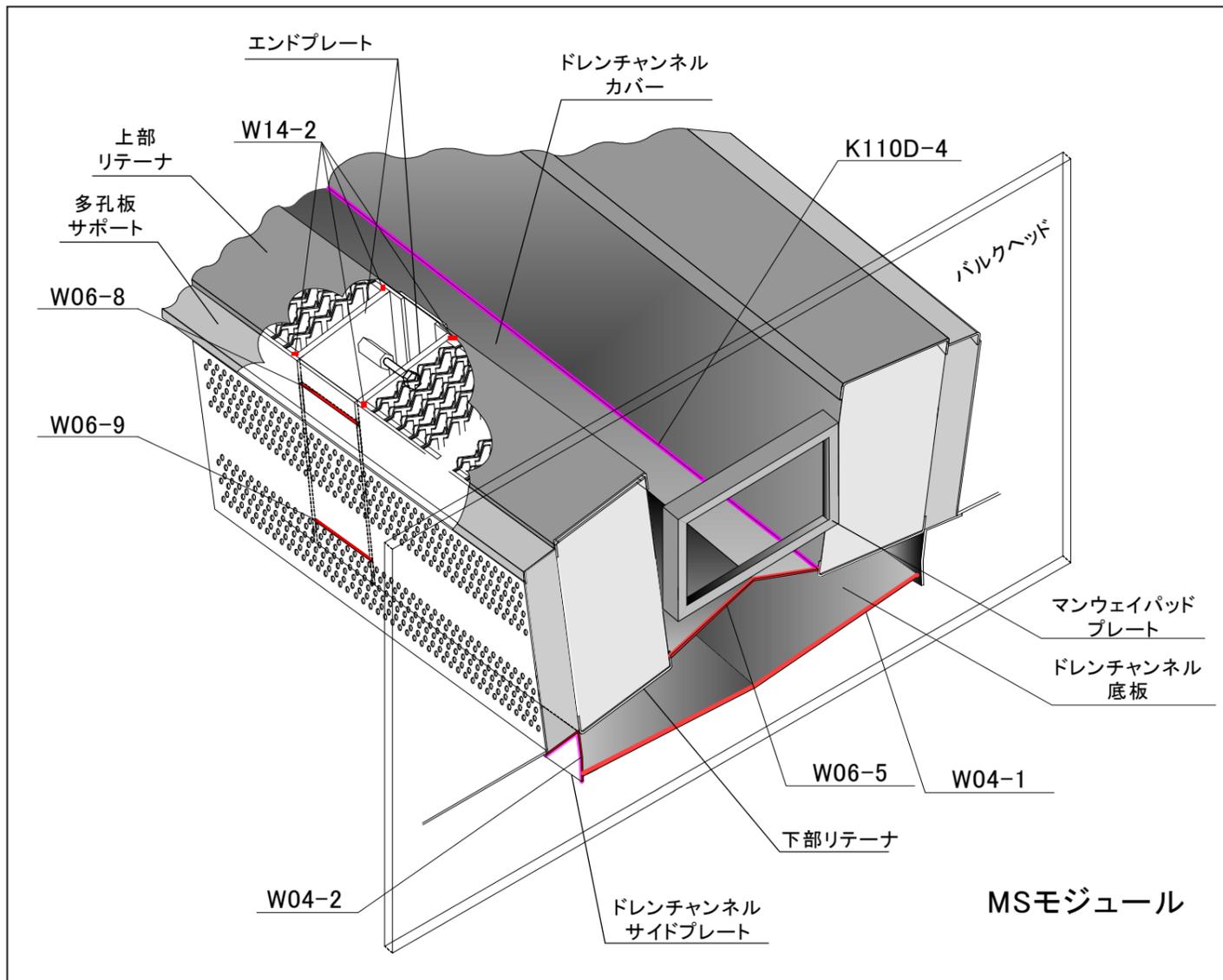
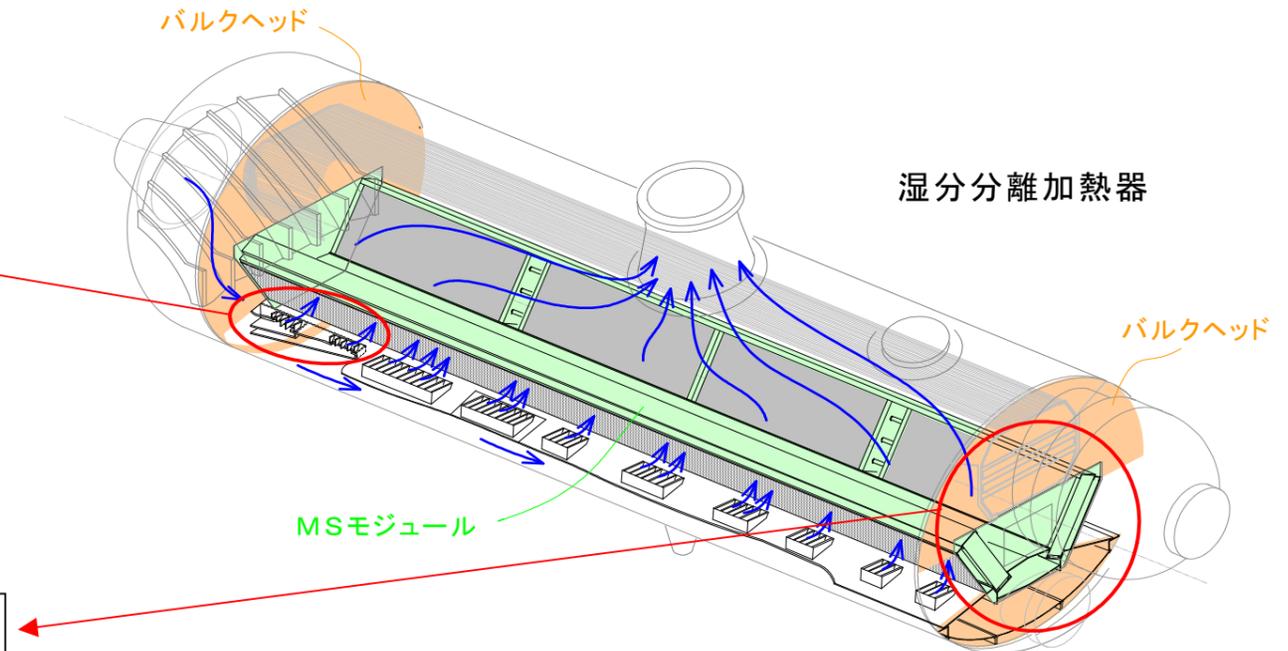
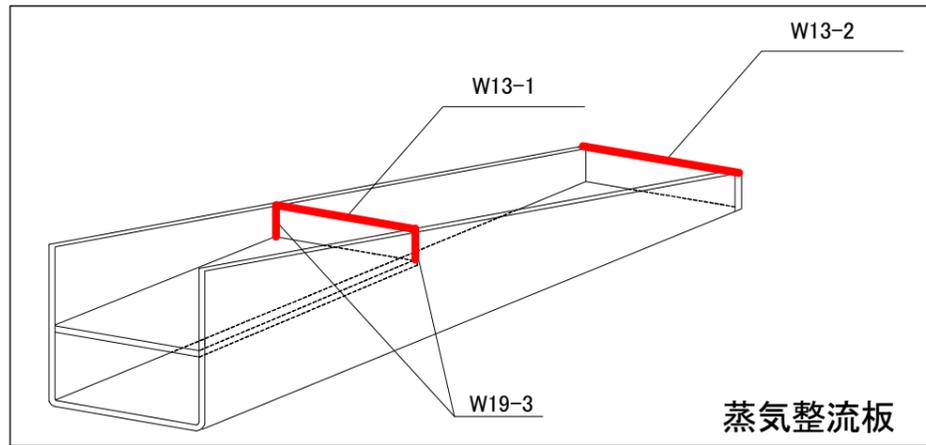
湿分分離加熱器の溶接部の健全性調査結果（類似箇所抽出フロー）



今回の根本原因は、開先角度が狭かったことによる溶接部の溶け込み不良である。

1	・溶接事業者検査対象の溶接部は、施工段階毎に入念な検査を実施していることから対象外とした。
2	・今回の溶け込み不良は開先加工の施工不良に起因するもので、健全な開先加工であれば溶接の信頼性が高いことから対象外とした。
3	・今回の溶け込み不良は開先加工の施工不良に起因するもので、左記の開先形状以外（すみ肉、完全溶け込み、V形等）の場合、信頼性が高いことから対象外とした。
4	・板を開先加工せず合わせることで開先を形成した場合、設計通りの開先角度で施工されることから対象外とした。 ・開先が機械加工されていれば、設計通りの開先角度で施工されることから対象外とした。
5	・解析による疲労評価の結果、強度に問題がなければ割れ等の発生の可能性はないことから対象外とした。 疲労評価は添付資料 - 19 (2/2) 参照

湿分分離加熱器溶接部の健全性調査結果（類似箇所抽出）



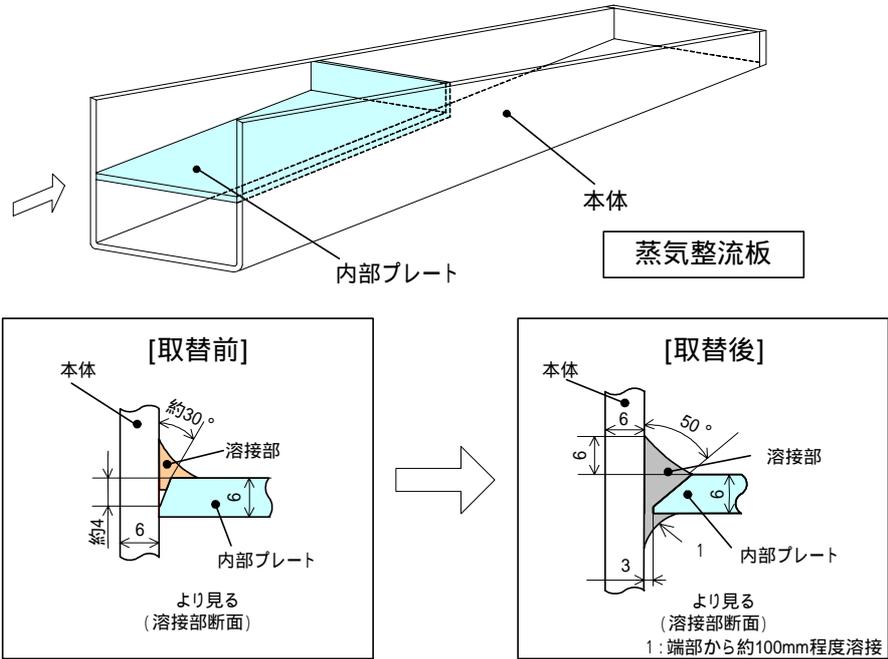
疲労評価結果

構造物名称	溶接線番号	変動応力 (MPa)	疲労限 (MPa)
蒸気整流板	W13-1	41	188
	W13-2	11	
	W19-3	13	
MSモジュール	W04-1	89	
	W04-2	61	
	W06-5	5	
	W06-8	2	
	W06-9	2	
	K110D-4	10	
	W14-2	1	

10種類の溶接部に発生する流体加振による変動応力は疲労限以下であり、強度に問題はない。

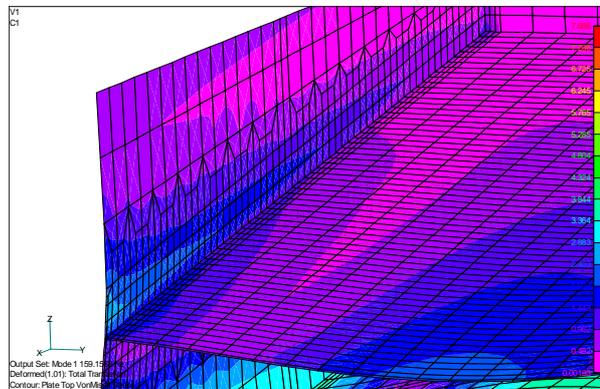
蒸気整流板復旧概要 (当該蒸気整流板)

1. 復旧概要図

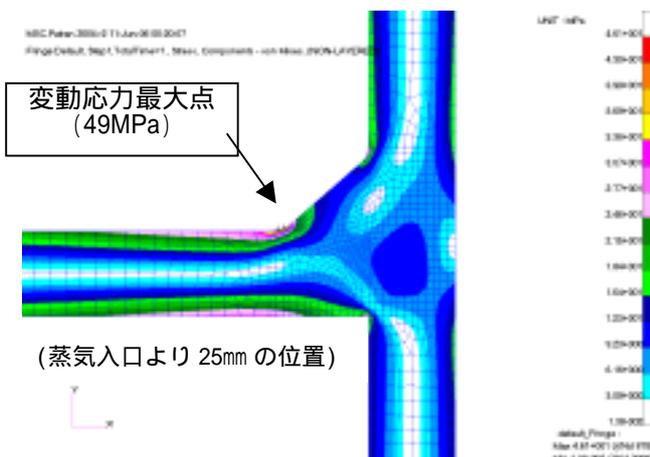


2. 強度評価

評価方法：添付資料 - 16「疲労による割れの発生に関する評価」による。



応力コンター図(無次元量)



変動応力解析結果

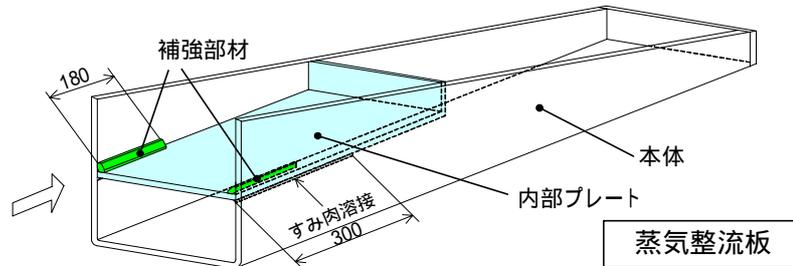
疲労評価結果

変動応力 [MP a]	疲労限 [MP a]
49	188

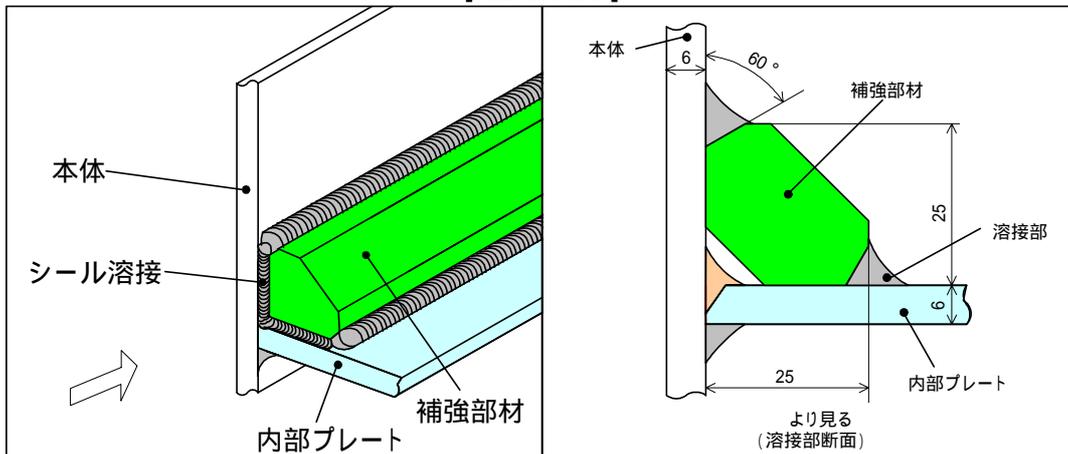
変動応力は疲労限以下であり、強度に問題はない。

蒸気整流板復旧概要(その他の蒸気整流板)

1. 復旧概要図



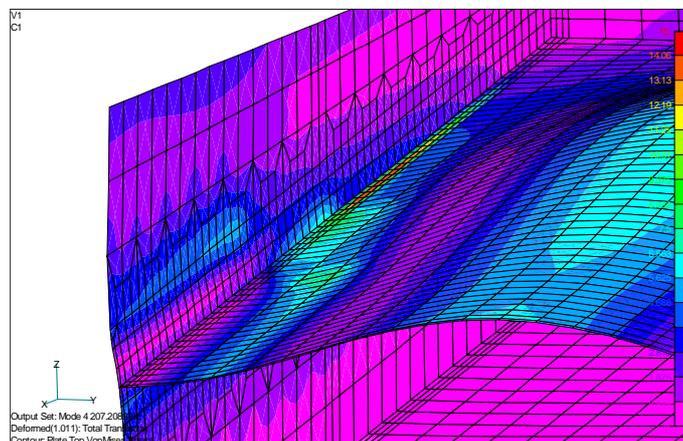
[補強後]



2. 強度評価

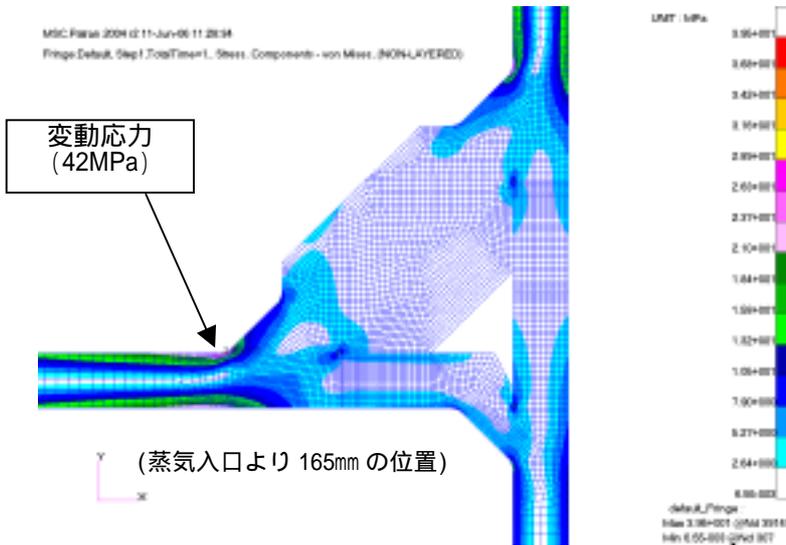
評価方法：添付資料 - 16「疲労による割れの発生に関する評価」による。

(補強部材による流路面積の変化は僅か(2%未満)であるため、補強前後の圧力変動パワースペクトルは同等とした。)



応力コンター図(無次元量)

補強部材箇所

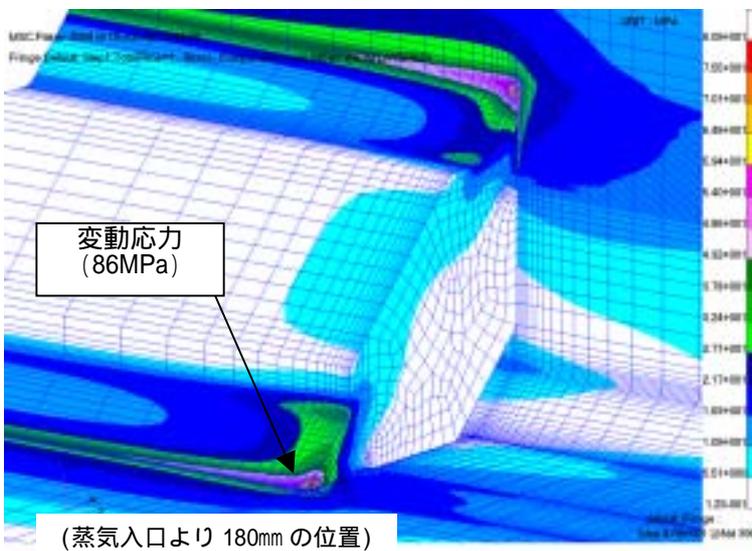


疲労評価結果

変動応力 [M P a]	疲労限 [M P a]
42	188

変動応力は疲労限以下であり、強度に問題はない。

変動応力解析結果 (平坦部)



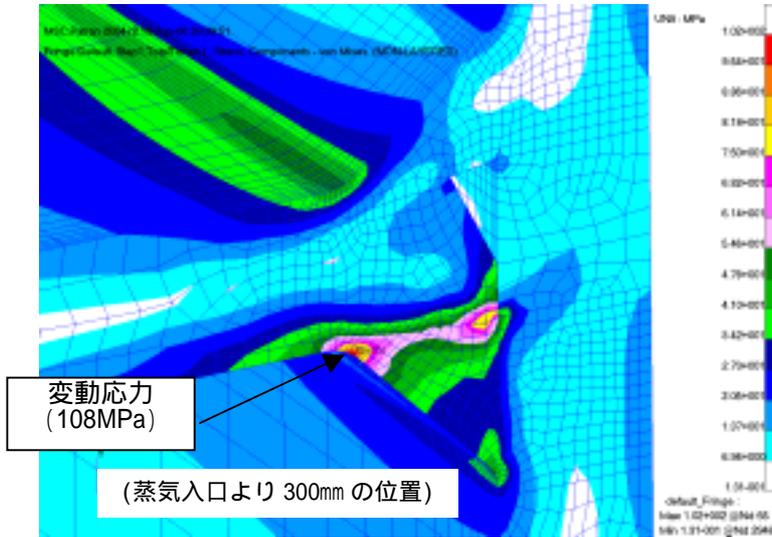
疲労評価結果

変動応力 [M P a]	疲労限 [M P a]
86	188

変動応力は疲労限以下であり、強度に問題はない。

変動応力解析結果 (端部)

すみ肉溶接箇所



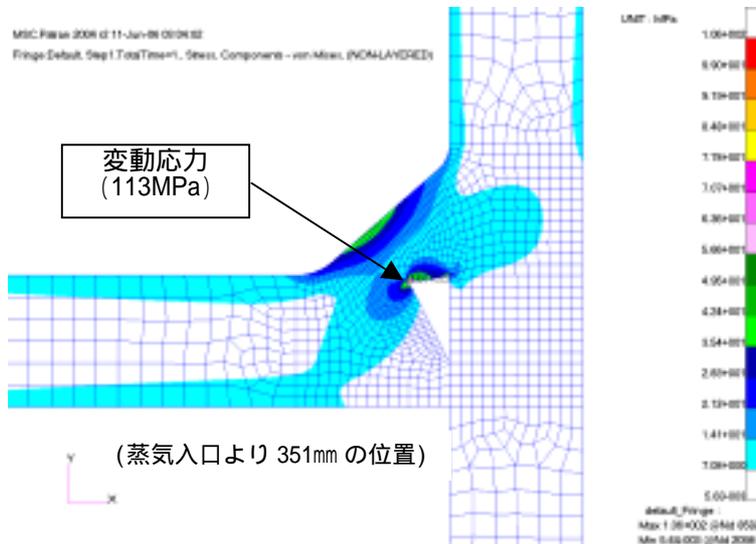
変動応力解析結果

疲労評価結果

変動応力 [MPa]	疲労限 [MPa]
108	188

変動応力は疲労限以下であり、強度に問題はない。

補強箇所以外



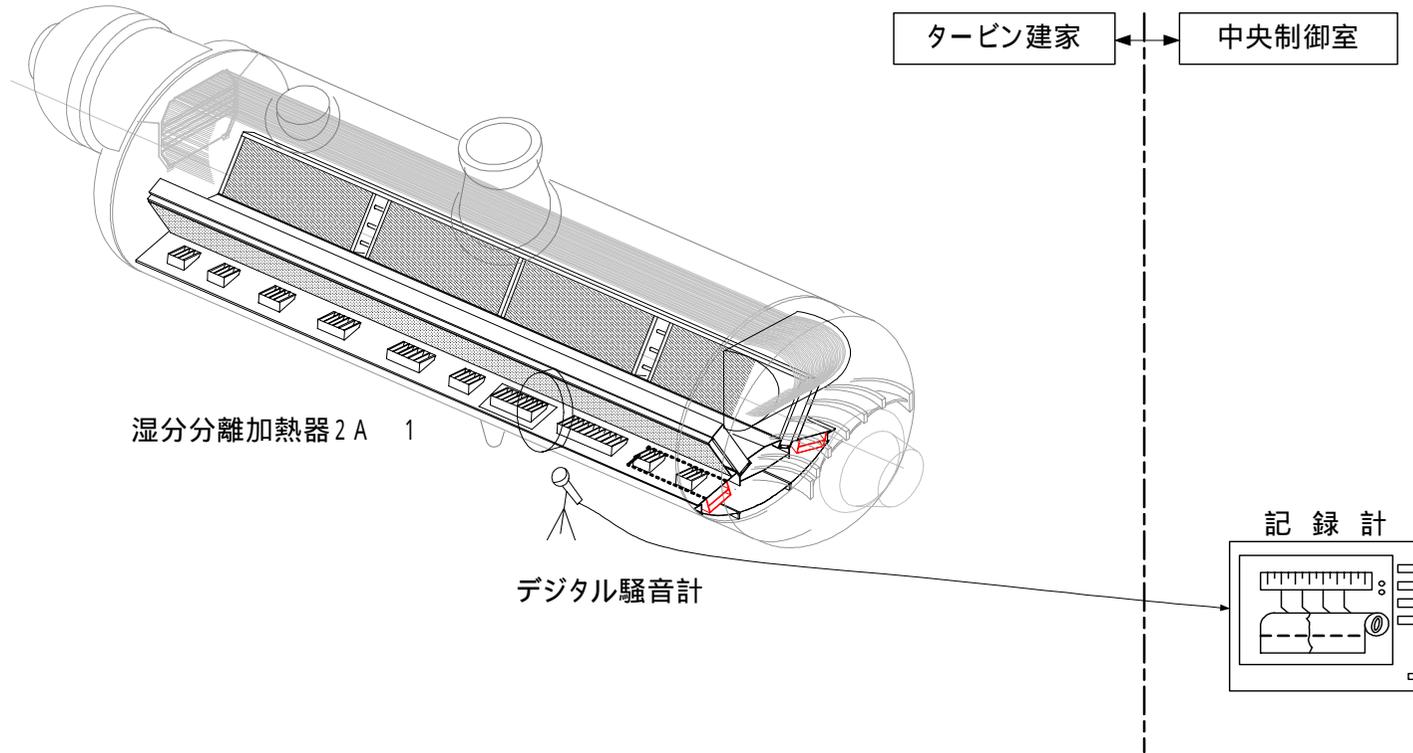
変動応力解析結果

疲労評価結果

変動応力 [MPa]	疲労限 [MPa]
113	188

変動応力は疲労限以下であり、強度に問題はない。

伊方2号機 音響監視装置構成計画図



1: 湿分分離加熱器 2 B ~ 2 D についても同様に、異常音の監視を行う。

蒸気整流板が破損した場合の影響について

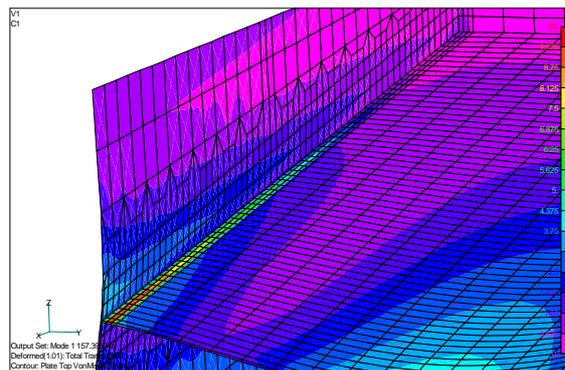
蒸気整流板溶接部に溶込み不良があり、疲労損傷が発生し蒸気整流板が破損した場合の影響を評価する。

1. 破損部の形状

運転中の流体加振力による溶込み不良部に発生した大きな変動応力による疲労損傷を想定する。

疲労割れは変動応力の大きな蒸気入口部に発生し、流体加振力による変動応力が下図に示すとおり母材に比べ溶接部の方が大きいため、割れは内部プレートと本体との溶接部を進展する。

このため、破損部の形状は、内部プレートの大きさの長方形板(659mm × 394mm)を想定する。

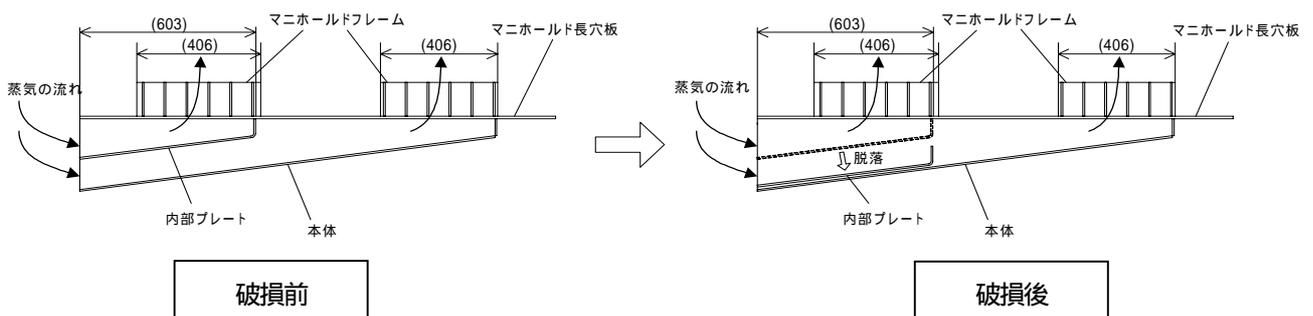


のど厚 3mm の場合の応力コンター図

2. 影響評価

(1) 破損部の挙動

蒸気は上方より70度の角度で下向きに蒸気整流板に流入するため、破損部は蒸気整流板本体に押し付けられ浮き上がり力が作用しないため停留し、下流側の構造物に影響を与えることはない。



(2) 破損部の移動を想定した場合の影響評価

a. 評価方法

上記のとおり破損部は本体内に停留するが、破損部の浮き上がり力として破損部下面に蒸気流が垂直に作用することを想定すると、破損部は作用する流体力により移動し、マニホールド長穴板下面に到達する。

この場合のマニホールド長穴板に作用する荷重を計算し、溶接部の発生応力を評価する。

なお、破損部の大きさは、マニホールド長穴板の開口部(352mm×229mm)よりも大きく開口部を通過しないため、荷重はマニホールド長穴板溶接部に作用するとした。

b. 評価結果

計算した結果、溶接部に発生するせん断応力は許容応力以下であり、強度上問題はない。

諸元		
項目	単位	数値
破損物形状	mm	659×394
重量	kg	13
流体流速	m/s	30

計算結果		
項目	単位	数値
作用荷重	kN	82
溶接部断面積	mm ²	5535
発生応力	MPa	15
許容応力	MPa	38
評価: 発生応力は許容応力以下であり、強度上問題はない。		

以上

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. ルートフェイス
8. 断面マイクロ観察
9. 粒内割れ
10. 腐食ピット
11. のど厚
12. 破面SEM観察
13. ストライエーション
14. 羽毛状の組織
15. EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy: エネルギー分散型 X 線分光法)
16. 硬度測定 (ビッカース硬さ)
17. 疲労
18. 高サイクル疲労
19. 変動応力
20. 疲労限
21. ステンレス鋼
22. 延性
23. すみ肉連続溶接
24. 炭酸ガスアーク溶接
25. ブローホール
26. プリネル硬さ
27. コンター図
28. パワースペクトル
29. ティグ溶接
30. シール溶接

1. 湿分分離加熱器
高圧タービンで使用した蒸気を低圧タービンでもう一度使えるように、蒸気の湿分を取り除き、温度を上げる設備。A、B、C、D 4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分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離するためのもの。
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為、破断面の表面状態、模様等を観察すること。
7. ルートフェイス
開先底部の立ち上がった面
8. 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、表面に凹凸差が生じる。これを高倍率で観察すると金属組織が観察できる。
9. 粒内割れ
割れが結晶粒を貫通している場合のこと。
10. 腐食ピット
腐食でできたくぼみ。
11. 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画いた時、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。
12. 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、割れがどのような応力下で生じたかを調べる調査(破面形状、割れ先端形状の確認)。

13. ストライエーション

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。

14. 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。

15. 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。

16. 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)。

17. 疲労

材料は繰り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。

18. 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、繰り返し替え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。

19. 変動応力

疲労破壊を起こす繰り返し応力から「平均応力」を差し引いた値の $1/2$ を「変動応力 ()」と定義している。「変動応力」はき裂の進展評価においても重要である。

20. 疲労限

疲労き裂は、繰り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り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。

21. 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。

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. すみ肉連続溶接

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で、すみ肉連続溶接は、すみ肉溶接を連続して行う溶接。

24. 炭酸ガスアーク溶接

シールドガスに炭酸ガスを用い、母材と電極の間にアークを発生させ、そのアーク熱によって母材および溶接金属(溶接ワイヤ、溶接棒)を溶融させて溶接する方法。

25. ブローホール

溶接欠陥の一つで、溶融金属中に発生したガスによって、凝固後の溶接金属部に生じたほぼ球状の空洞のこと。

26. ブリネル硬さ

鋼あるいは超硬合金製の球形圧子を用い、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得る硬さの値。比較的大きな試験片時に適用される。

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. 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。

30. シール溶接

拡管、ねじ接合等機械的な方法によって強度的に十分な接合性能(剛性)を有する部分に対して、更に漏れ止め性能の維持向上を目的として、念の為に行う溶接。