

原子力発第04268号
平成17年 1月28日

愛媛県知事
加戸守行 殿

四国電力株式会社
取締役社長 大西 淳

伊方発電所第1号機補助建家排気筒のひび割れに係る
報告書の提出について

平成16年12月23日に発生しました伊方発電所第1号機補助建家排気筒のひび割れにつきまして、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
補助建家排気筒のひび割れについて

平成17年1月

四国電力株式会社

【目 次】

1. 件 名	1
2. 事象発生の日時	1
3. 事象発生 of 原子炉施設	1
4. 事象発生時の運転状況	1
5. 事象発生 of 状況	1
6. 時 系 列	1
7. 状況調査	2
8. 詳細調査	3
9. 損傷要因 of 推定	9
10. 推定原因	11
11. 対 策	11
12. 2, 3号機 of 対策	12

1. 件 名

伊方発電所第1号機補助建家排気筒のひび割れについて

2. 事象発生の日時

平成16年12月24日 10時（最終確認）

3. 事象発生の原子炉施設

補助建家排気筒

4. 事象発生時の運転状況

第22回定期検査中（平成16年9月5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22回定期検査において、補助建家排気筒（以下、「A／B排気筒」という。）の点検口設置工事に伴い、点検口周辺の内部点検を行ったところ、12月23日15時にA／B排気筒水平ダクト部にひび割れを確認した。

その後、更に当該部近傍の点検を行った結果、翌24日10時、内面に12箇所のひび割れがあり、この内、4箇所について貫通していることを確認した。

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－1～3）

6. 時系列

12月23日 A／B排気筒水平ダクト部にひび割れを確認

12月23日 調査開始

12月24日 A／B排気筒水平ダクト部に12箇所のひび割れ、うち4箇所の貫通を確認

12月26日 A／B排気筒水平ダクト部に新たに3箇所の指示を確認
（浸透探傷検査）

12月28日

～ 29日 A／B排気筒水平ダクト部のひび割れ箇所のサンプル切出し

12月29日 A／B排気筒鉛直ダクト部に新たに5箇所のひび割れを確認
（目視観察）

12月30日 格納容器排気筒（以下、「C／V排気筒」という。）水平ダクト部に1箇所のひび割れを確認（目視観察）

12月30日 A／B排気筒鉛直ダクト部およびC／V排気筒水平ダクト部のひび割れ箇所のサンプル切出し

7. 状況調査

ひび割れの認められたA／B排気筒水平ダクト部等について調査を実施し、ひび割れの状況を確認した。

7. 1 A／B排気筒水平ダクト部

A／B排気筒水平ダクト部の内外面視視観察を行った結果、12箇所でひび割れが認められた。

これらは、接続鋼材等の断続すみ肉溶接部（以下、「断続溶接部」という。）の近傍に11箇所(①～⑪)、A／B排気筒水平ダクト部と鉛直ダクト部の接続鋼材全周シール溶接部（以下、「シール溶接部」という。）に1箇所(⑫)であり、この内、4箇所(①、②、④、⑩)の貫通または漏えいが認められた。

また、ひび割れの認められた断続溶接部近傍について、浸透探傷検査（以下、「PT」という。）を実施した結果、新たに3箇所で有意な指示が認められ、内面の指示が2箇所(⑬、⑭)、外面の指示が1箇所(⑮)であった。

なお、これらの3箇所のひび割れは、目視でも確認できるものであった。

ひび割れ(①～⑪、⑬～⑮)の長さは、最小で約20mm、最大のもので約400mmであり、ひび割れ⑫は、シール溶接部に沿った、上面約2,500mm、側面約230mmの連続した長さのものであった。

ひび割れ⑫の外面周辺には腐食が認められ、また、ひび割れ範囲と著しく腐食している範囲がほぼ一致していた。

（添付資料－4）

7. 2 A／B排気筒鉛直ダクト部およびC／V排気筒

A／B排気筒鉛直ダクト部および隣接し構造が類似するC／V排気筒について調査を実施した。

(1) A／B排気筒鉛直ダクト部

テレビカメラ等による内外面視視観察を行った結果、補強鋼材の断続溶接部近傍で5箇所のひび割れ(⑯～⑳)が認められた。ひび割れの長さは、最小で約60mm、最大のもので約150mmであった。

なお、ひび割れが認められた断続溶接部近傍のPTを行った結果、新たに有意な指示は認められなかった。

（添付資料－4）

(2) C／V排気筒

C／V排気筒水平ダクト部の内外面視視観察を行った結果、A／B排気筒シール溶接部とほぼ同じ位置に、シール溶接部に沿った上面約1,370mmのひび割れ1箇所(㉑)が認められたが、当該箇所の漏えいは確認されなかった。

また、ひび割れの外面周辺に腐食が認められ、ひび割れ範囲と著しく腐食している範囲がほぼ一致していた。

（添付資料－5）

なお、C/V排気筒鉛直ダクト部について、テレビカメラ等による内外
面目視観察を行った結果、ひび割れは認められなかった。

8. 詳細調査

8. 1 A/B排気筒

状況調査の結果、A/B排気筒のひび割れは、断続溶接部近傍で19
箇所、シール溶接部に1箇所発生していた。

この原因を究明するため、ひび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・施工調査結果

a. 設計調査

設計図書を確認した結果、排気筒支持構造物の設計方針に問題はなかった。

b. 製作履歴調査

製作記録を調査した結果、排気筒の製作に問題はなかった。

(添付資料－7)

c. 施工状況調査

- ・ひび割れが認められた排気筒水平ダクト部および鉛直ダクト部の寸法・構
造について調査した結果、設計仕様どおりであった。
- ・排気筒水平ダクト部の補強鋼材の間隔を確認した結果、約1,400mm
であり、他の部位より間隔が長かった。調査の結果、当初設計では、現行
の接続鋼材間の外周コンクリート貫通部内に補強鋼材が取り付けられる
予定であったが、外周コンクリート貫通部が狭隘であったことから、現場
設置の段階で補強鋼材のないものを使用していた。
- ・排気筒鉛直ダクト部の支持構造物の施工状況を確認した結果、支持構造物
が適切に取付けられていた。

(添付資料－7)

(2) 材料調査

排気筒水平ダクト部および鉛直ダクト部鋼板の材料について、材料証明書
を確認した結果、設計仕様どおりSUS304であり規格値を満足していた。

接続鋼材、補強鋼材および溶接金属の材料証明書はなかったため、電子線
マイクロアナライザー(EPM)による材料調査を実施した結果、

- ・接続鋼材および補強鋼材は炭素鋼である
 - ・接続鋼材とダクト部鋼板との溶接金属はステンレス鋼である
 - ・接続鋼材部のシール溶接金属は炭素鋼である
- ことが確認され設計仕様どおりであった。

(添付資料－8)

(3) 溶接施工状況調査

排気筒水平ダクト部および鉛直ダクト部の断続溶接部は、施工上の目安である間隔150～200mm、溶接長さ30mmで施工されていた。

なお、溶接施工記録はなかったが、聞き取り調査の結果、工場製作および現地据付工事の溶接施工箇所については、目視による異常の有無を確認しており溶接欠陥の可能性は低いと考えられる。

(添付資料－9)

(4) 金属調査結果

20箇所のひび割れ部についてサンプルの切出しを行い、ひび割れの発生原因を推定するため、破面マクロ観察を実施した。

断続溶接部近傍のひび割れ19箇所(①～⑪、⑬～⑳)については、

- ・全てのひび割れは溶接部の端部を通っており、端部を挟んで外面側が大きい半楕円形状が認められる
- ・ひび割れの破面には、一部不明瞭なものもあるがビーチマーク状の模様が認められる
- ・全てのひび割れの溶接部の端部周辺の破面において、平坦な部分が認められる
- ・ひび割れ⑦⑧⑩については、先端部でやや平坦でない部分も認められる
- ・ひび割れ⑰については、最終先端部前縁は、内面側が大きい半楕円形状である

ことが確認された。

シール溶接部のひび割れ1箇所(⑫)については、

- ・溶接金属のほぼ中央を貫通しており、破面表面は腐食により変色している
- ・接続鋼材も著しい腐食を受けている

ことが確認された。

(添付資料－10)

断続溶接部近傍のひび割れ(①～⑪、⑬～⑳)については、全てのひび割れに疲労破面の特徴^(注1)が認められたことから、ひび割れ発生の起点、ひび割れ発生後の進展状況の確認を行うため、全サンプルのうち、ビーチマークが明瞭であるものから1箇所(③：排気筒水平ダクト部)、ビーチマークが不明瞭であるものから1箇所(⑳：排気筒鉛直ダクト部)を選定し、詳細破面マクロ観察、断面ミクロ観察、破面SEM観察等を実施した。

(注1) 疲労破面のき裂進展部では、一般的に以下の状況が特徴的に認められる。

- ・ビーチマーク
- ・平坦で滑らかな破面
- ・き裂前縁が半楕円状

(参考：「フラクトグラフィ(破面と破壊情報解析)」, P11, 2.4.3 マクロ破面形態からの情報, 日本材料学会フラクトグラフィ部門委員会編, 丸善株式会社)

また、ひび割れ⑦⑧⑩のやや平坦でない部分、ひび割れ⑰の内面側が大きい半楕円形状部等については、損傷モードを特定するため、詳細に破面SEM観察を実施した。

さらに、シール溶接部のひび割れ⑫については、腐食の特徴が認められるが、詳細に確認するため、断面ミクロ観察、破面SEM観察等を実施した。

a. ひび割れ③⑫の詳細調査

(a) 詳細破面マクロ観察

溶接端部の外表面にひび割れの起点となり得る形状変化が認められた。
(添付資料－11－1)

(b) 断面ミクロ観察

ひび割れは、平坦な破面で進展し、枝分かれの無い粒内割れであること、また、材料欠陥がないことが確認された。

(添付資料－11－2)

(c) 破面SEM観察

ひび割れには、形状変化部において溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ（ひび割れの進展方向に対応）が認められた。また、ひび割れの破面は粒内割れであり、外面側からの進展を示すビーチマーク状模様およびオーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が確認された。

なお、ストライエーション、羽毛状の組織や材料欠陥等は認められなかった。

(添付資料－11－3)

(d) 硬度測定

ひび割れ周辺の排気筒水平ダクト部（ステンレス鋼）の硬度測定を実施した結果、ひび割れの起点部付近は、熱影響を受けていない一般部に比べて高く、かつ、起点部においては外表面付近が最も高いことが確認された。

(添付資料－11－4)

(e) EPMAによる分析

ひび割れ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一般部とほぼ同等であることが確認された。

(添付資料－11－5)

b. ひび割れ⑦⑧⑩⑬の詳細調査（破面SEM観察）

(a) ひび割れ⑦⑧⑩

- ・ ひび割れ貫通後の進展において、溶接端部の外表面を起点とした進展から内面側からの進展に移行する部位（先端部、進展部）では、応力状態が変化した時に観察される複雑な破面が観察された。
- ・ 破面は粒内割れであり、ビーチマーク状模様およびオーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。

(添付資料－12－1～3)

(b) ひび割れ⑬

- ・溶接端部の外表面を起点とした進展により、進展部（両側）には外面側が大きい半楕円形状の平坦な破面が観察されているが、それ以降の進展では、先端部（両側）で内面側からの進展を示す内面側が大きい半楕円形状の破面が観察された。
- ・破面は粒内割れであり、ビーチマーク状模様およびオーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。

(添付資料－１２－４)

c. ひび割れ⑭の詳細調査

(a) 断面ミクロ観察

ひび割れ断面には、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が不規則に認められた。

(添付資料－１３－１)

(b) 破面SEM観察

ひび割れは、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が認められた。

(添付資料－１３－２)

(c) 硬度測定

ひび割れ近傍の溶接金属部の硬度を測定した結果、硬化した部位が認められた。

(添付資料－１３－３)

(d) EPMA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一般部とほぼ同等であることが確認された。

(添付資料－１３－４)

以上のことから、

ひび割れ①～⑪、⑬～⑳については、

- ・形状変化部において、溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ（ひび割れの進展方向に対応）が認められた
- ・破面は粒内割れであり、外面側からの進展を示すビーチマーク状模様およびオーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が確認された
- ・ストライエーション、羽毛状の組織や材料欠陥等は認められなかったことから、ひび割れ発生は溶接端部を起点とした外面側からの低応力高サイクル疲労割れによるものと推定される。

ひび割れ⑫については、
・破面には、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が不規則に認められたことから、シール溶接部において腐食が発生し、内外面を貫通するひび割れに至ったと推定される。

なお、ひび割れ⑦⑧⑩⑬に見られる特徴的な破面が観察された理由は、
・ひび割れ貫通後の進展において、ひび割れ先端での応力状態が変化したため、複雑な破面になるとともにひび割れ進展方向が切り替わったものと考えられる。

(添付資料－ 1 4)

(5) 断続溶接部近傍の残留応力測定結果

ひび割れ③、⑫に隣接する健全部の断続溶接部近傍の残留応力を測定した結果、降伏応力程度の残留応力が発生し得ることを確認した。

(添付資料－ 1 5)

(6) 運転履歴調査結果

補助建家排気ファンの排気風量等の運転パラメータを確認した結果、問題のないことを確認した。

(7) 保守履歴調査結果

A／B排気筒の保守履歴を確認した結果、フレキシブルジョイントやダクト等の取替実績がないことを確認した。

また、当該部が狭隘であることから、十分な外観点検が実施されていなかった。

(8) 振動計測結果

A／B排気筒水平ダクト部および鉛直ダクト部の振動計測（変位の両振幅）を行った結果、ひび割れが認められた水平ダクト部上面は最大で1, 800 μm 、鉛直ダクト部正面は最大で1, 300 μm であった。

また、ひび割れの認められなかった箇所振動値は小さかった。

(添付資料－ 1 6)

8. 2 C/V排気筒

C/V排気筒の状況調査の結果、ひび割れ②①の発生部位、発生状況等がA/B排気筒シール溶接部のひび割れ②と酷似していることから、腐食に関する金属調査、保守履歴調査、振動計測を実施した。

(1) 金属調査結果

a. 破面マクロ観察

シール溶接部のひび割れ②①の破面マクロ観察を行った結果、

- ・溶接金属のほぼ中央を貫通しており、破面表面は腐食により変色している
- ・接続鋼材も著しい腐食を受けている

ことが認められた。

(添付資料－17－1)

b. 断面ミクロ観察

ひび割れ②①の断面には、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が不規則に認められた。

(添付資料－17－2)

c. 破面SEM観察

ひび割れ②①は、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が認められた。

(添付資料－17－3)

d. 硬度測定

ひび割れ②①近傍の溶接金属部の硬度を測定した結果、硬化した部位が認められた。

(添付資料－17－4)

e. EPMAによる分析

ひび割れ②①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一般部とほぼ同等であることが確認された。

(添付資料－17－5)

(2) 保守履歴調査結果

C/V排気筒の保守履歴を確認した結果、フレキシブルジョイントやダクト等の取替実績がないことを確認した。

また、当該部が狭隘であることから、十分な外観点検が実施されていなかった。

(3) 振動計測結果

C/V排気筒水平ダクト部および鉛直ダクト部の振動計測（変位の両振幅）を行った結果、ひび割れが認められた水平ダクト部上面は最大で90 μm 、鉛直ダクト部正面は最大で71 μm であった。

また、ひび割れの認められなかった箇所の振動値は小さかった。

（添付資料－17－6）

8. 3 A/B排気筒およびC/V排気筒に接続される排気ダクト

念のため、A/B排気筒およびC/V排気筒に接続されている同様な構造の排気ダクトについて目視確認を実施した結果、異常は認められなかった。

9. 損傷要因の推定

以上のとおり、今回のひび割れは、断続溶接部については疲労、シール溶接部については腐食によるものと推定されることから、これらについて損傷要因を検討した。

9. 1 断続溶接部近傍のひび割れ

A/B排気筒水平ダクト部および鉛直ダクト部の断続溶接部近傍のひび割れは、溶接端部を起点とした低応力高サイクル疲労によるものと考えられるため、振動発生観点からA/B排気筒の構造上の特徴等について検討するとともに、溶接端部についての疲労評価を実施した。

(1) 構造上の特徴等

A/B排気筒は、大容量の空気を排気するため、設計風速（約20m/秒）を大きくし、大口径（2,500mm×1,000mm）で薄肉（板厚1.5mm）のステンレス鋼板の構造としており、隣接するC/V排気筒（口径：1,500mm×1,000mm）に比べ剛性が低いものとなっている。

また、ステンレス鋼板に補強鋼材等を断続溶接により取付け、薄肉構造を補強するとともにステンレス鋼板の振動も抑制している。

このため、断続溶接部は、外面に溶接残留応力が発生するとともに応力集中箇所となる。

また、配置上の特徴は、

- ・ 水平ダクト部は、曲がり部の後流部であり、圧力変動が発生しやすく、また、補強鋼材の間隔が長く振動が大きくなりやすい。
- ・ 鉛直ダクト部は、短い間隔で連続した曲がり部の後流部であり、圧力変動が増加し振動が大きくなりやすい。

更に、ひび割れが発生した箇所は、圧力変動が発生しやすい範囲^{（注2）}にあり、振動計測結果と同様な傾向を示している。

（注2） 猫本・西村ほか、空調ダクトの動的設計手法の開発、日本機械学会 2001 年度年次大会講演

なお、曲がり部から $5 \times D$ (D :ダクト短辺長さ) 程度離れば圧力変動は小さくなるとされており、これについても振動計測結果とほぼ同様な傾向を示している。

(添付資料－ 1 8)

(2) 疲労評価

排気筒の構造上の特徴から、ひび割れが発生した箇所は、圧力変動が発生しやすい範囲にあるため、実機の圧力変動を用いた疲労評価を実施した。

疲労評価は、詳細調査で求めた硬度測定データ等があることから、ひび割れ③および⑳について実施した。

その結果、断続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、疲労破壊が発生することが確認された。

(添付資料－ 1 9)

評価部位	変動応力 (MPa)	疲労限 (MPa)
水平ダクト部上面板 (ひび割れ③)	50	43
鉛直ダクト部正面板 (ひび割れ⑳)	47	43

9. 2 シール溶接部のひび割れ

A/B排気筒およびC/V排気筒のシール溶接部のひび割れは、腐食によるものであると考えられることから、環境、材料・構造および保守状況について検討を実施した。

(1) 環 境

1号機格納容器外周コンクリート(以下、「外周コンクリート」という。)は、天井開口型であり、雨天時には、当該部が濡れる状態となり、また、排気筒の最下部に位置することから、日光も当たらず、付着した雨水が乾燥しにくい環境である。

(2) 材料・構造

接続鋼材部は炭素鋼であり、環境条件により腐食しやすく、また、外面は隙間の存在する断続溶接であり、内面は全周シール溶接であることから、雨水が浸入し滞留する構造である。

(3) 保守状況

接続鋼材部は、通常は立入らないことや当該部が狭隘であることから、十分な外観点検が実施されていなかった。

10. 推定原因

今回のA／B排気筒およびC／V排気筒のひび割れ事象は、以下の2つの原因によるものであると推定される。

(1) 断続溶接部近傍のひび割れ（A／B排気筒）の原因

A／B排気ファンの運転に伴い、ダクト曲がり部の後流部については、圧力変動が発生しやすく、水平ダクト部は、補強鋼材の間隔が長く振動が大きくなりやすい。

また、鉛直ダクト部は、短い間隔で連続した曲がり部の後流部であり、圧力変動が増加し振動が大きくなりやすい。

このため、溶接残留応力があり、応力が集中する形状である断続溶接部において、変動応力が疲労限を超えたことから、ステンレス鋼板外面よりひび割れが発生し進展したものと推定される。

(添付資料－20)

(2) シール溶接部のひび割れ（A／B排気筒およびC／V排気筒）の原因

排気筒は雨天時に濡れる構造であることから、雨水が断続溶接部の隙間から浸入し、滞留した雨水により腐食が発生し、腐食がシール溶接部を進展したため、内外面を貫通するひび割れが発生したものと推定される。

(添付資料－21)

11. 対 策

(1) A／B排気筒およびC／V排気筒の水平ダクト部については、補強鋼材を追設したものに取替える。

また、A／B排気筒鉛直ダクト部については、ひび割れ発生箇所を撤去し、同種・同材のステンレス鋼板で復旧するとともに、振動低減を図るための振動抑制用サポートを追設する。

(添付資料－22)

(2) A／B排気筒およびC／V排気筒の水平ダクト部について、屋外部にある断続溶接部間の隙間は、雨水による腐食防止を図るためシール材を塗布する。

また、定期検査時に外観点検を行う等排気筒の点検要領を定め適切に管理する。

(添付資料－22)

1 2. 2, 3号機の対策

(1) 2号機A／B排気筒およびC／V排気筒

- ・振動による損傷が認められた水平ダクト部および鉛直ダクト部はいずれも補強鋼材の間隔が1号機よりも短く、振動しにくい構造となっており、外観点検を実施したが、異常は認められなかった。
なお、外周コンクリート貫通部は狭隘で外側からの点検が困難なため、次回定検時に外観点検を行う。また、類似箇所以外の原子炉格納容器に沿った緩やかな曲がり部については、念のため、次回定検時に外観点検を行う。
- ・腐食損傷が認められた水平ダクト接続鋼材部は外周コンクリートに囲まれて雨水が浸入しない環境となっており、外観点検を実施したが、異常は認められなかった。

(2) 3号機A／B排気筒およびC／V排気筒

- ・振動による損傷が認められた類似箇所は各排気筒ともダクト配置、形状、板厚等が1号機とは異なり、強度が高い構造となっており、外観点検を実施したが、異常は認められなかった。
なお、C／V排気筒の建屋貫通部は狭隘で外側からの点検が困難なため、次回定検時に外観点検を行う。また、類似箇所以外の外周コンクリートに沿った緩やかな曲がり部についてはダクト形状が丸型となっており、角ダクトのような振動による損傷は考えられないが、念のため、今後排気筒の補修塗装を行う際に外観点検を行う。
- ・腐食損傷が認められた接続鋼材部は雨水が浸入しないよう全て全周シール溶接となっており、外観点検を実施したが、異常は認められなかった。

以 上

用語説明

○補助建家排気筒

主として原子炉補助建家内の換気のため設置しているダクト状の通気管。原子炉補助建家内の空気は、フィルタ、排気筒モニタを通して補助建家排気筒より地上約68m(伊方発電所第1号機の場合)の高さから大気へ放出される。

○格納容器排気筒

主として原子炉格納容器、アニュラス、放射線管理室の換気のため設置しているダクト状の通気管。原子炉格納容器等の内の空気は、フィルタ、排気筒モニタを通して格納容器排気筒より地上約68m(伊方発電所第1号機の場合)の高さから大気へ放出される。

○目視観察

肉眼にて対象物を点検すること。

○断続すみ肉溶接

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で、断続すみ肉溶接は、溶接した部分と溶接しない部分が交互に存在するすみ肉溶接。

○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、念の為にを行う溶接。

○浸透探傷検査(PT)

供試体表面に開口している傷を目でみやすくするため、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である。

○腐食

金属材料が使用環境中の物質と反応して金属イオンまたは非金属の化合物となって摩耗していく現象。

○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。

○外周コンクリート

格納容器鋼板の外周を取り囲んでいるコンクリート。

○溶接金属

溶接熱により溶かされた溶接材料及び母材の一部と融合して凝固した金属。

○電子線マイクロアナライザー(EPM A: Electron Probe Micro Analyzer)

非常に細かく絞った電子線を試料に照射し、分析エリアから発生する各元素に特有なX線(特性X線)を検出することで、試料の微量分析(元素同定、定量分析及び化合物特定等)を行う装置。

○炭素鋼

二パーセント以下の炭素を含有する鉄。加工が容易で、プレス成形用薄板や各種工具に用いられる。その含有量が高いほど鋼は硬くなるがもろくなる。

○ステンレス鋼

クロムを12%以上含む鉄-クロムおよび鉄-クロム-ニッケル合金のこと。鉄にクロムを12%以上加えると、常温の大気中で使用した場合、肉眼で見えるような錆をほとんど生じなくなる。

○溶接欠陥

溶接時に溶接継手に生じる欠陥であり、主なものに「溶接割れ」「内部欠陥（ガス成分によるブローホール等）」「ビード形状不良（溶け込み不良等）」がある。

○破面マクロ観察

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。

○ビーチマーク

ビーチマークは、疲労破面に観察される特徴的な破面模様の1つで、破面上においてき裂の進展方向に対して垂直な曲線状の模様である。疲労き裂の進展過程で作用応力や環境などき裂の進展速度に影響を及ぼす何らかの条件変化が生じた場合に形成され、ビーチマークの形状は条件変化が生じた時点でのき裂先端形状を表す。

したがって、実機の疲労破面において観察されるビーチマークは、運転条件等の変化に対応していると考えられることから、運転履歴が明確な場合には、き裂進展速度や作用応力が推定できることもある。

○溶接始端部

溶接ビード（溶着部分にできる帯状の盛り上がりのこと）の始まり部。

○溶接終端部

溶接ビード（溶着部分にできる帯状の盛り上がりのこと）の終わり部。

○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。これを高倍で観察すると金属組織が観察できる。

○粒内割れ

割れが結晶粒を貫通している場合のこと。

○破面SEM観察

損傷部位の破面を走査型電子顕微鏡（SEM: Scanning Electron Microscopy）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）。

○組織状模様

疲労破面に現れるミクロ的破面模様の一種であり、金属材料をエッチングした時に観察される金属組織模様に類似していることから名付けられたものである。一般に、この組織状模様は、ストライエーションが現れる領域に比べてき裂進展速度が小さい領域において特徴的に観察される。

○羽毛状組織

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拡がった金属組織のこと。

○硬度（ビッカース硬さ）測定

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）。

○応力

物体に外から力を加えたとき、外力に応じて物体の内部に生じる抵抗力。

○残留応力

引張・圧縮・曲げ・熱処理などの外力に対して物体内部に生じ、外力を除いたあとにも保留される応力。

○降伏応力

延性金属を引張っていくと、はじめは弾性変形をし、この弾性領域では、金属内に生じている応力とその伸び率が直線的に変化するが、その応力がある値になった時、金属は弾性的な挙動から外れてくる。（塑性域に入る）その時の応力を降伏応力という。

○変動応力

疲労破壊を起こす繰返し応力から「平均応力」を差し引いた値の 1/2 を「変動応力 ($\Delta \sigma$)」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。

○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。

○延性割れ

延性のある金属が伸びきって引きちぎられるように破壊すること。

○塩化物応力腐食割れ

Cl⁻イオン、水分および酸素の存在下で応力が作用するステンレス鋼に割れが発生・進行する現象。

< 応力腐食割れ >

特定の腐食環境中におかれた金属材料が、持続的な引張応力のもとで時間依存型の脆性的破壊を起こす現象をいう。

一般に合金は割れ易いが、純金属では極めて割れにくい。応力と腐食作用が同時に働くことが必要条件で、応力のみ、あるいは弱い腐食環境中でも割れが発生する。発生原因は、材料、環境、応力の3つの要因が重複した場合である。

○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。

○低応力高サイクル疲労

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、破壊までの繰返し数が $10^4 \sim 10^6$ 回以上の場合を低応力高サイクル疲労と言う。

○疲労割れ

振動等により応力が繰返し加えられることにより発生するひび割れ。

○平均応力

疲労破壊を起こすには繰返し応力が必要である。繰返し応力の上限と下限応力の絶対値が等しくない場合、上限と下限応力の平均値を「平均応力 (σ_m)」と定義している。

「平均応力」が引張応力の場合には、疲労強度を低下させる。

○引張強さ

材料に引張力を加え、これを徐々に増加させると、材料の変形はますます大きくなる。弾性限度、比例限度、降伏点、その材料が耐えられる最大応力を示し、これを極限強さ、または引張強さという。

○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。

○応力集中係数

穴や切欠きを持つ板などに荷重が負荷されると、穴や切欠き先端の付近では穴や切欠きのない箇所に比べ高い応力が発生する。穴や切欠き先端近くの局所的な最大応力と全断面積に作用する応力の比を、応力集中係数という。

○疲労破壊

振動等により応力が繰返し加えられることにより発生するひび割れ。

○溶接残留応力

溶接時の部材の入熱による膨張・冷却による収縮によって生じ、溶接後も、構造物または溶接部に残留している応力。

○応力集中

部材の断面形状や寸法の急変箇所、溝、孔などによって応力分布が一様でないところでは応力状態が乱され局部的に高い応力を生じる。このような現象をいう。

○ガスモニタ

施設内にある排気筒から排出されるガス濃度、主として Ar-41、Kr-85 などの不活性ガスを連続に測定する放射線監視設備。

○野外モニタ

周辺監視区域境界付近の空間放射線量率を測定する放射線監視設備。

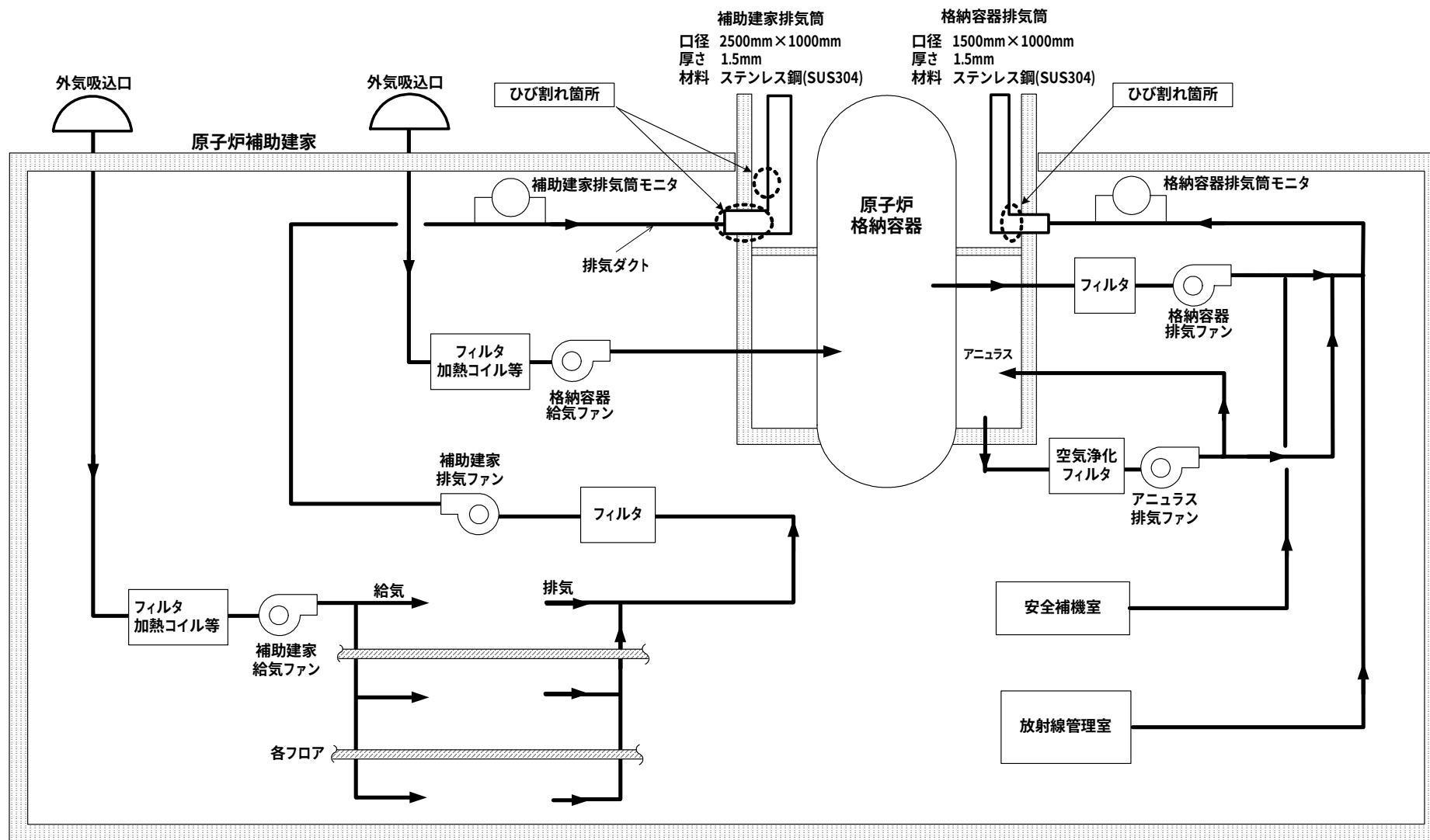
○腐食ピット

腐食でできたくぼみ。

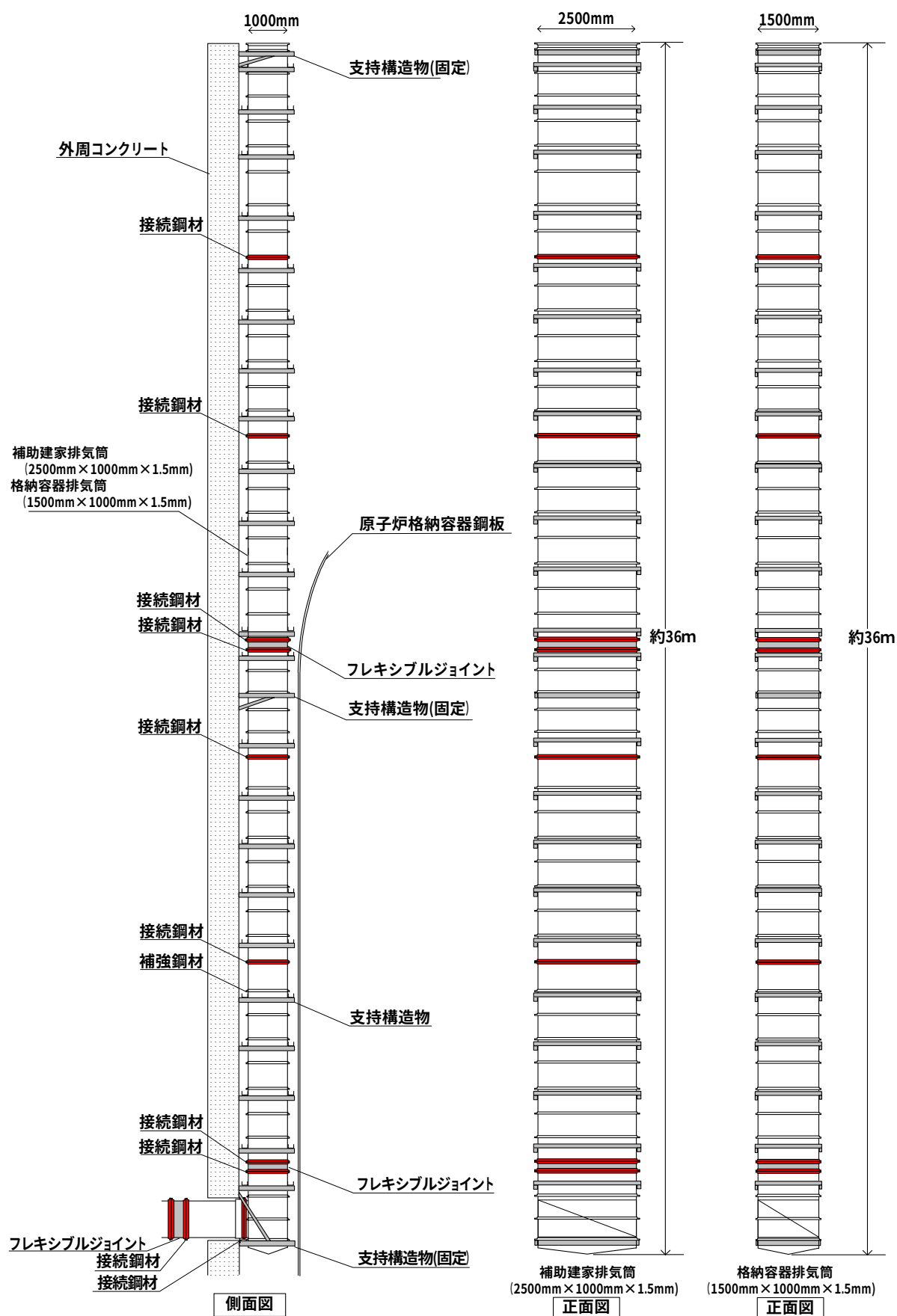
[添 付 資 料]

1. 補助建家排気筒・格納容器排気筒概略系統図
2. 補助建家排気筒・格納容器排気筒構造図
3. モニタチャート
4. 補助建家排気筒状況調査結果
5. 格納容器排気筒状況調査結果
6. 補助建家排気筒のひび割れに係る要因分析図
7. 補助建家排気筒の製作・施工調査結果
8. 補助建家排気筒の材料調査結果
9. 補助建家排気筒の溶接施工状況調査結果
10. 破面マクロ観察結果
11. ひび割れ③②⑩の詳細調査結果
12. ひび割れ⑦⑧⑩⑩⑩の詳細調査結果
13. ひび割れ⑫の詳細調査結果
14. ひび割れ⑦、⑧および⑩のやや平坦でない破面が形成された推定メカニズム
15. 断続溶接部近傍の残留応力測定結果
16. 補助建家排気筒の振動計測結果
17. 格納容器排気筒調査結果
18. 補助建家排気筒の配置上の特徴
19. 高サイクル疲労によるひび割れの発生に関する評価結果
20. 事象発生の推定メカニズム（疲労損傷）
21. 事象発生の推定メカニズム（腐食損傷）
22. 補助建家排気筒・格納容器排気筒復旧概要図

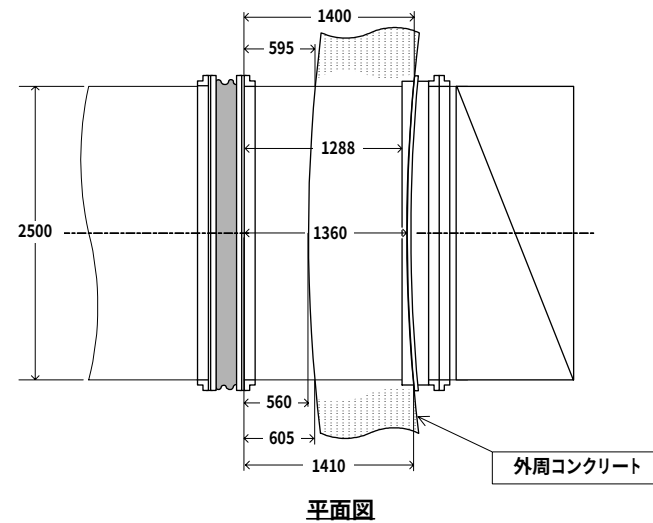
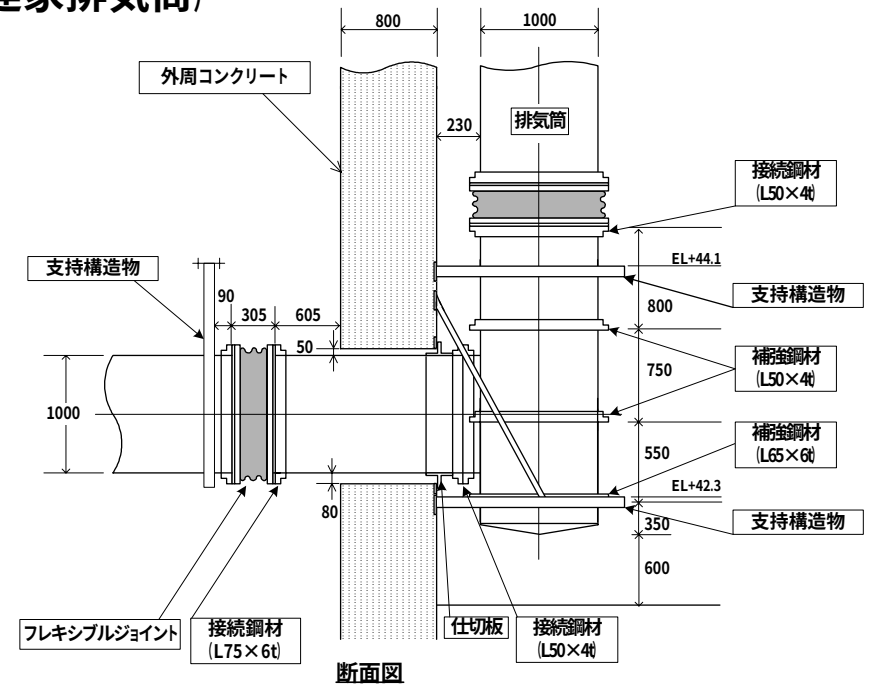
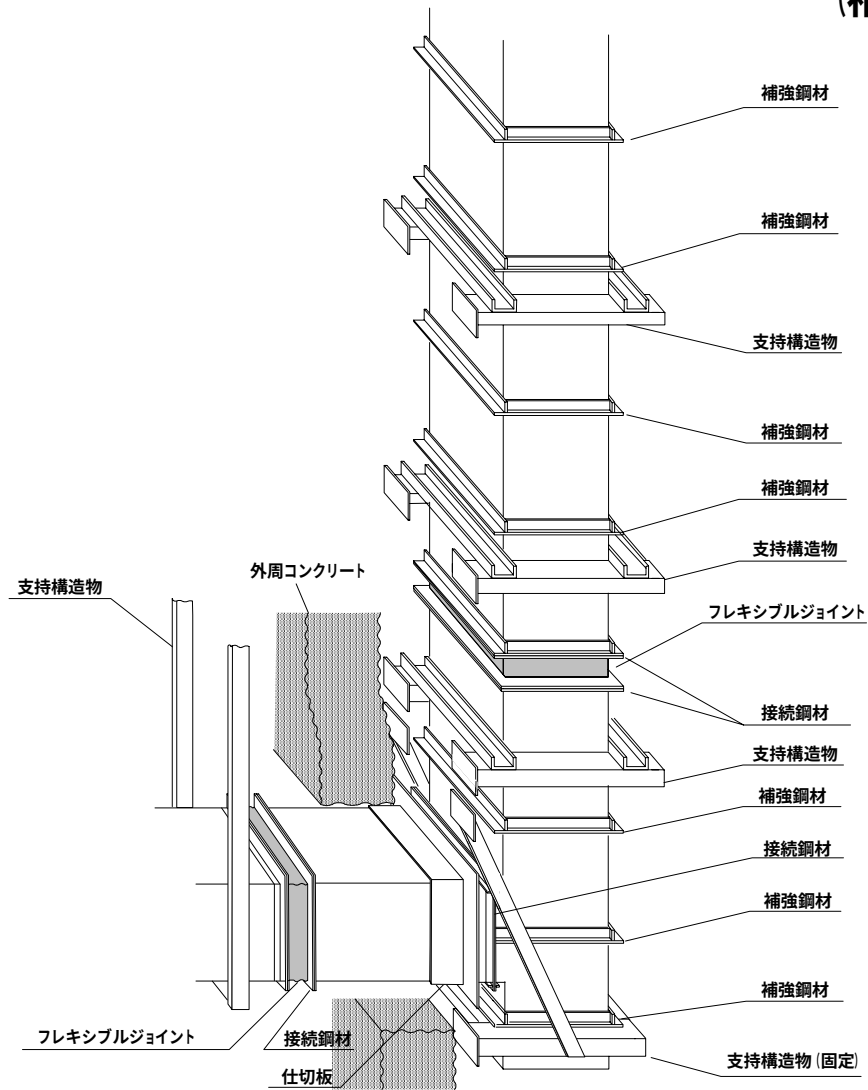
補助建家排気筒・格納容器排気筒概略系統図



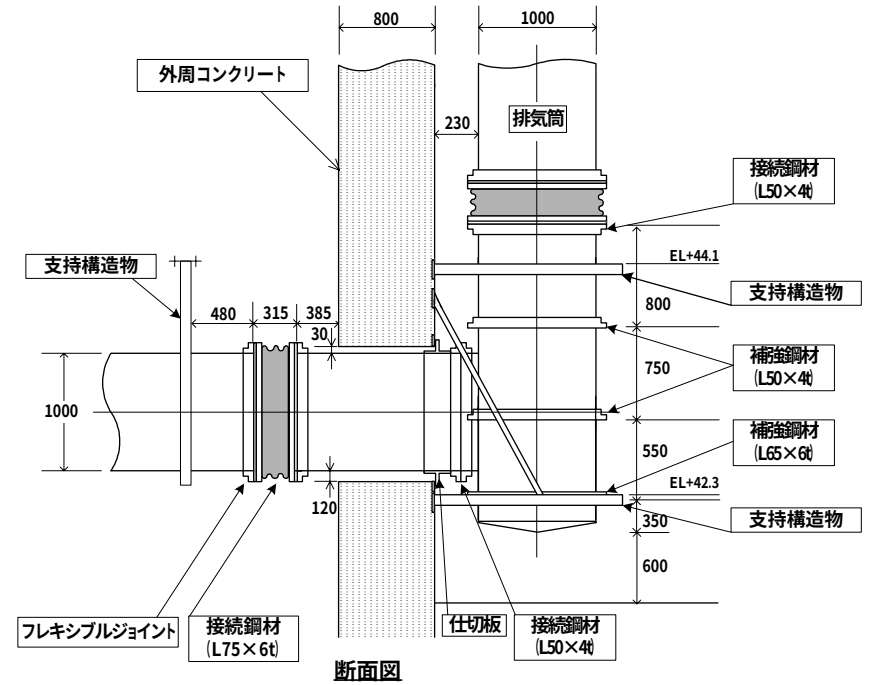
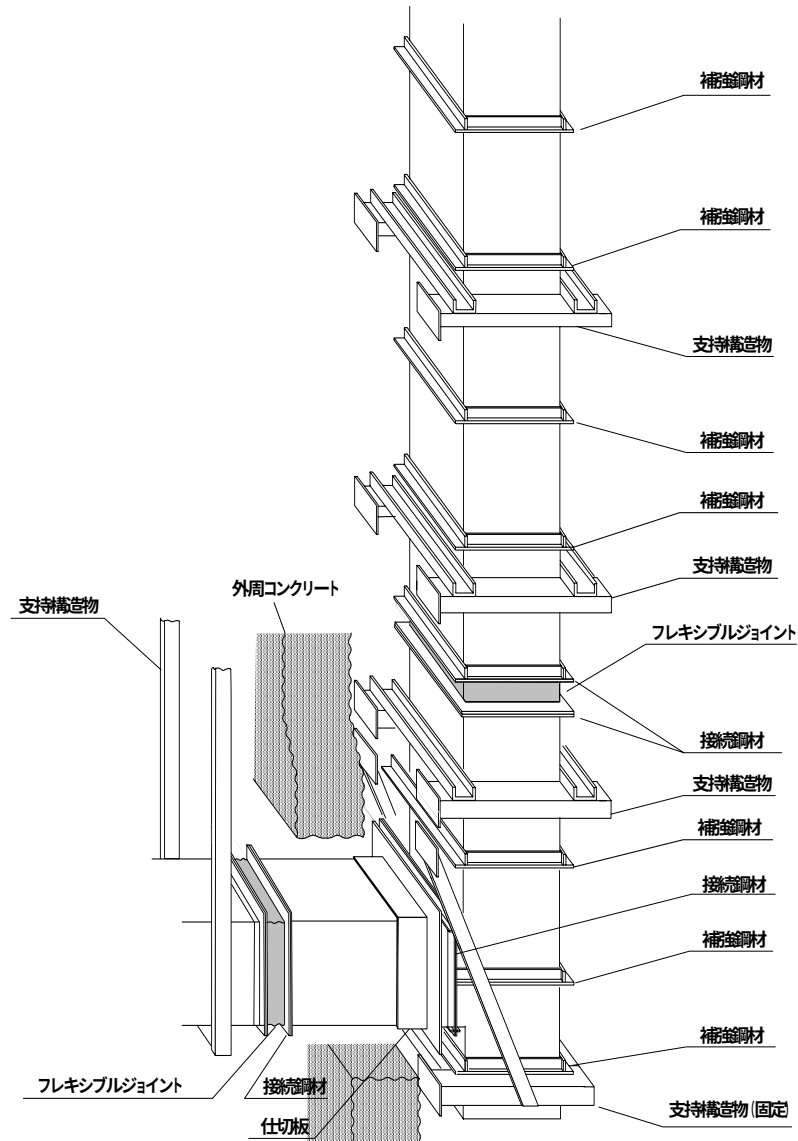
補助建家排気筒・格納容器排気筒構造図



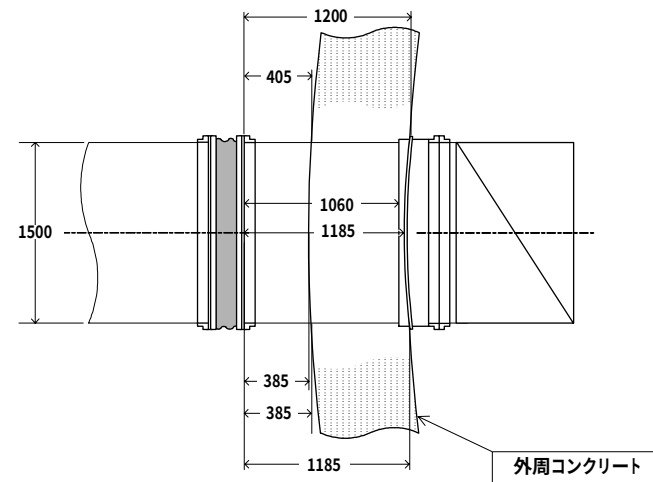
補助建家排気筒・格納容器排気筒構造図 (補助建家排気筒)



補助建家排気筒・格納容器排気筒構造図 (格納容器排気筒)

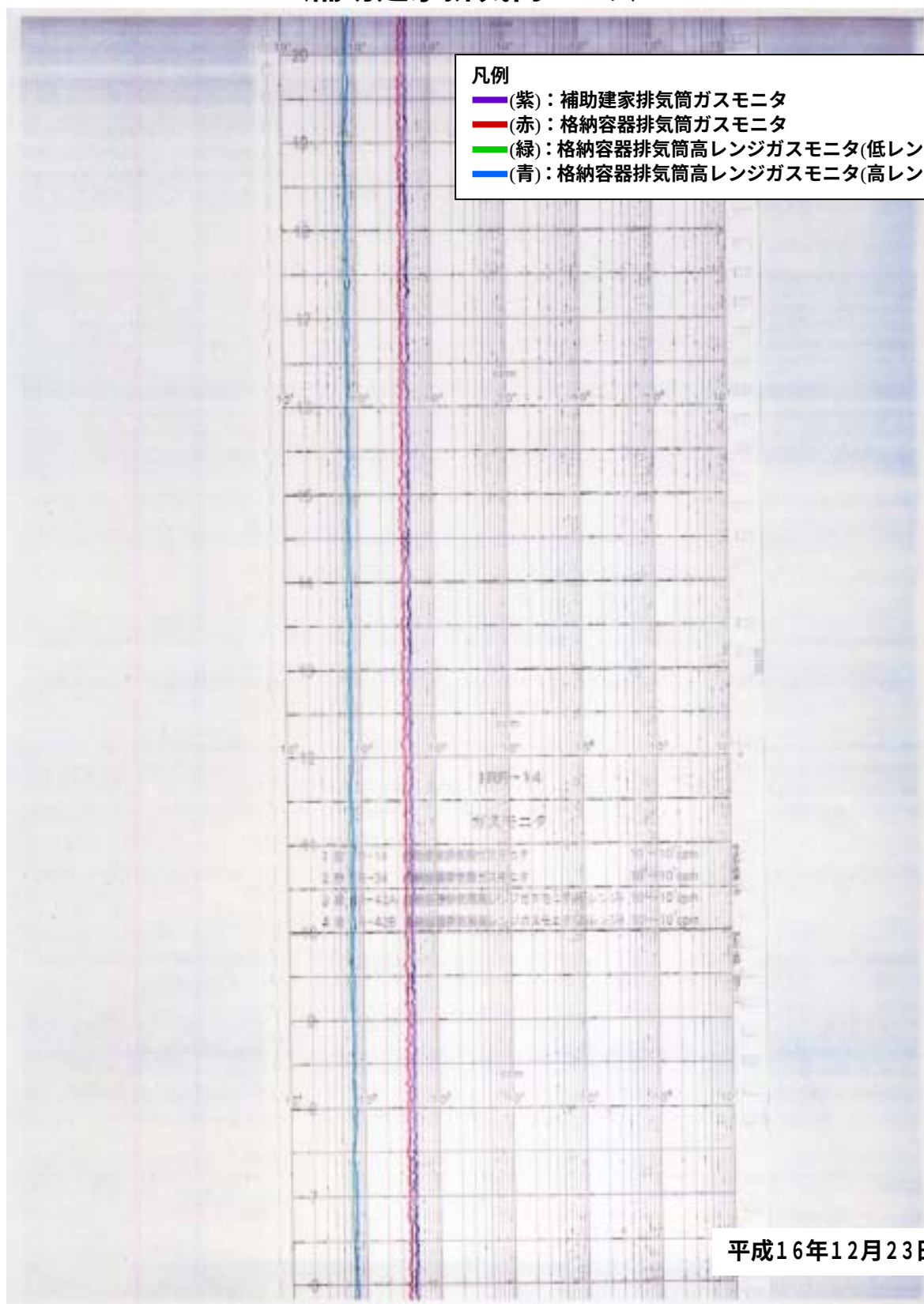


断面図

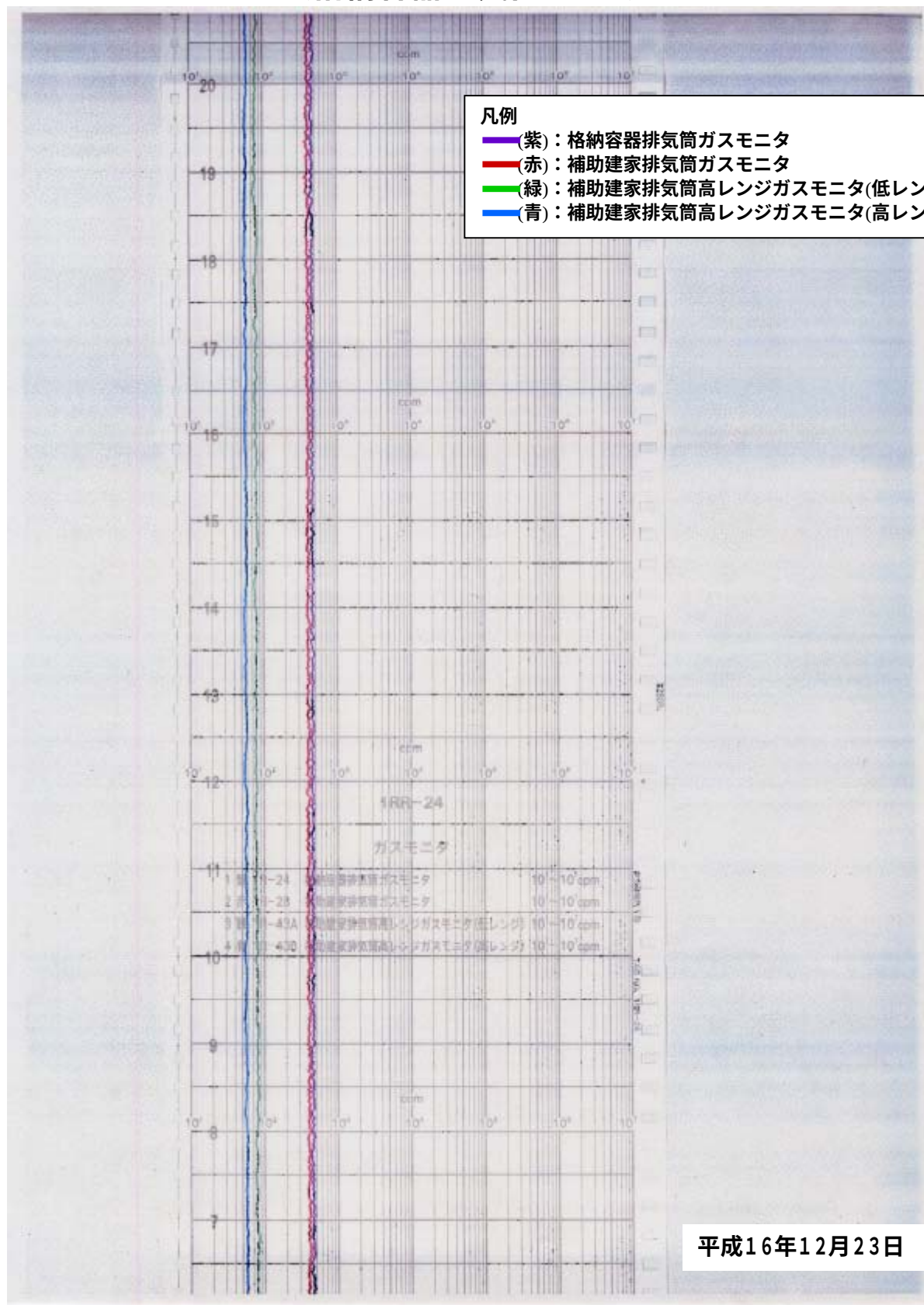


平面図

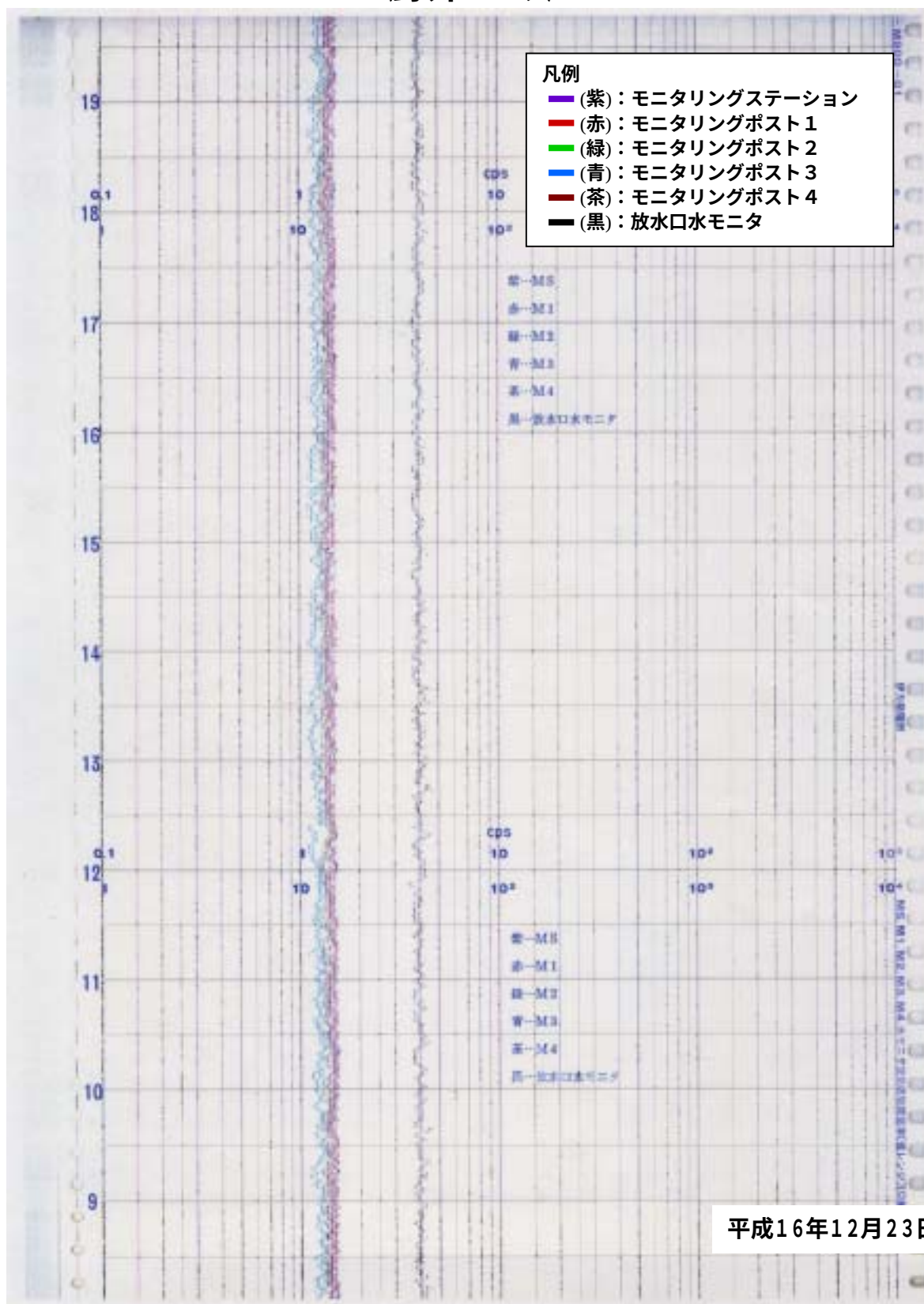
モニタチャート (補助建家排気筒モニタ)



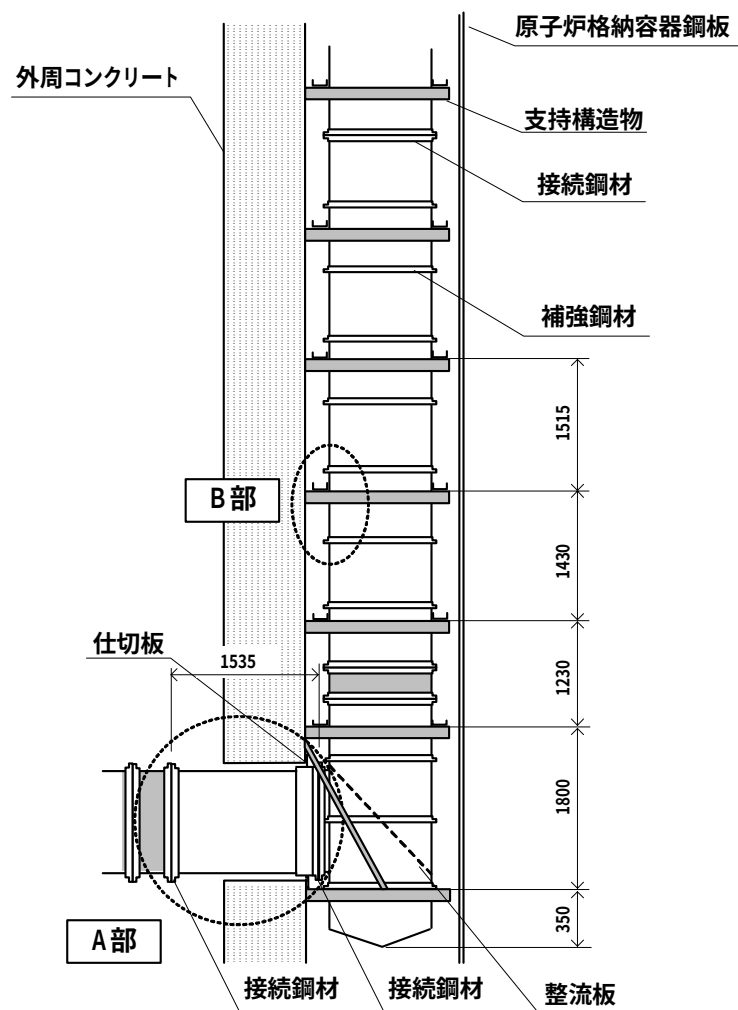
モニタチャート (格納容器排気筒モニタ)



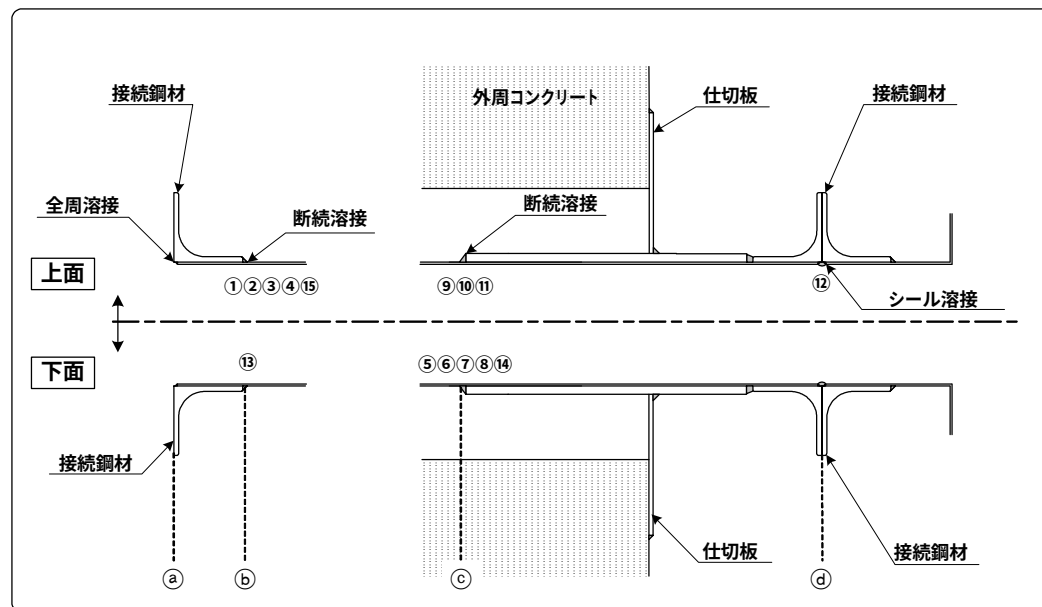
モニタチャート (野外モニタ)



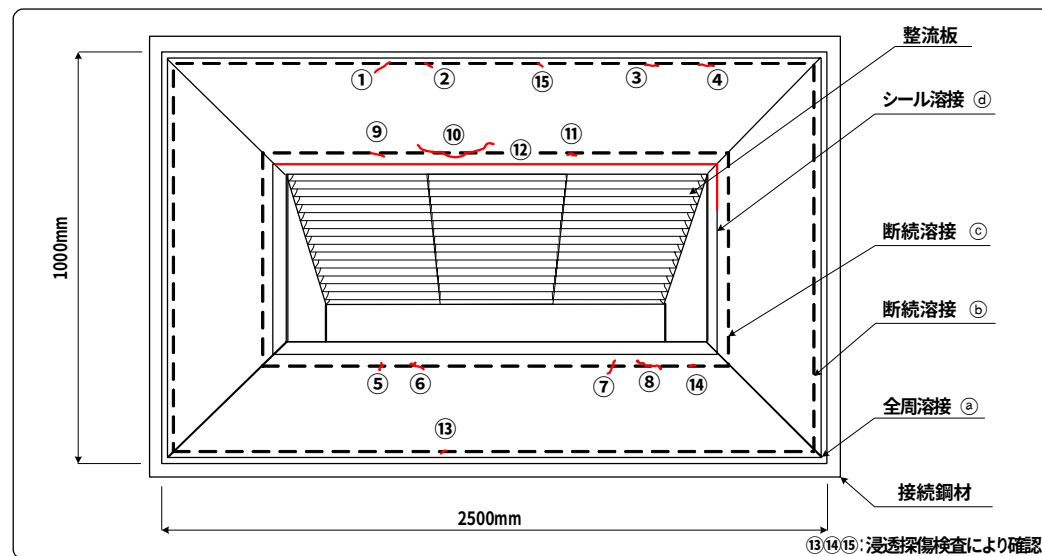
補助建家排気筒状況調査結果 (水平ダクト部ひび割れ箇所)



排気筒水平ダクト部内外面状況調査の結果、15箇所のひび割れを確認した。

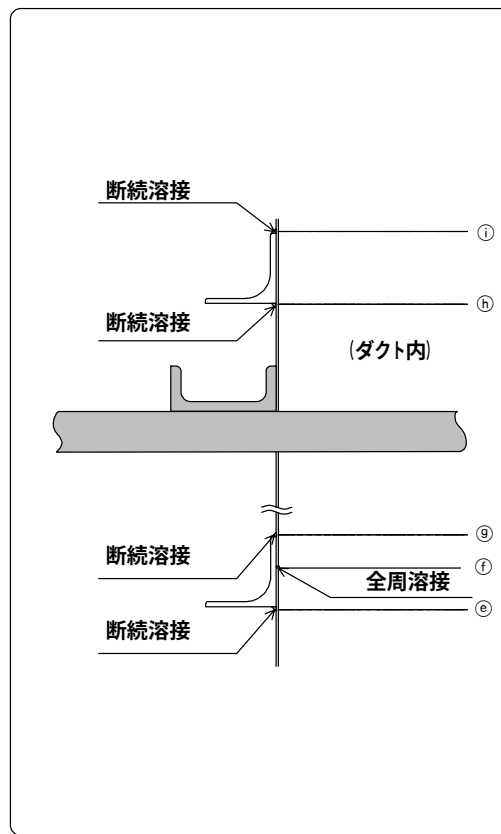
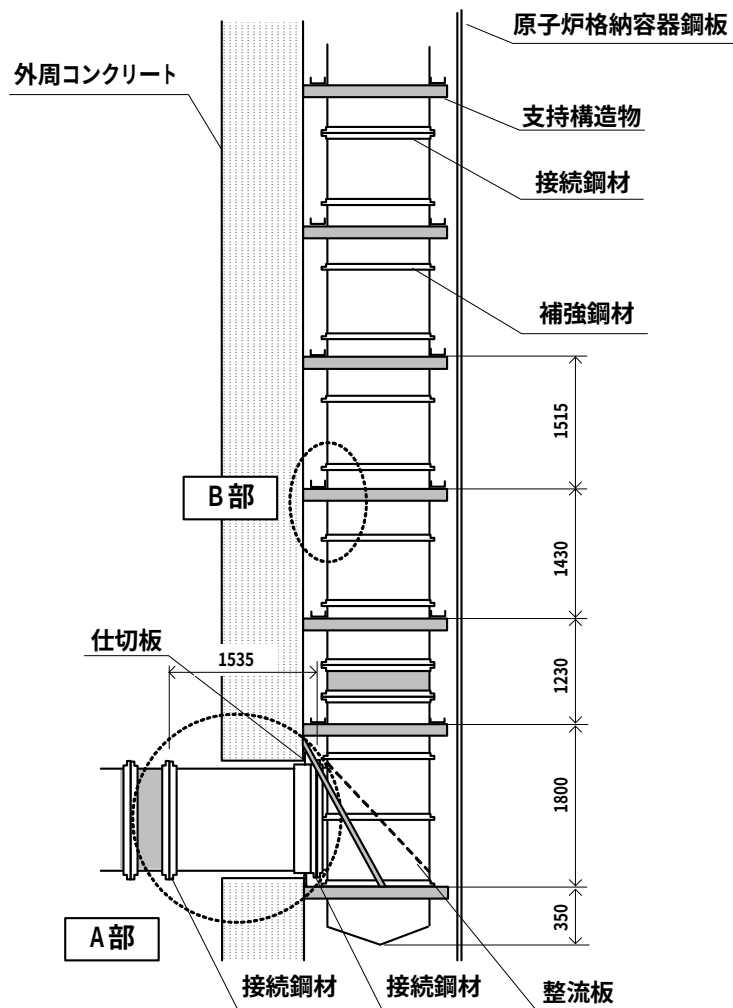


A部断面図

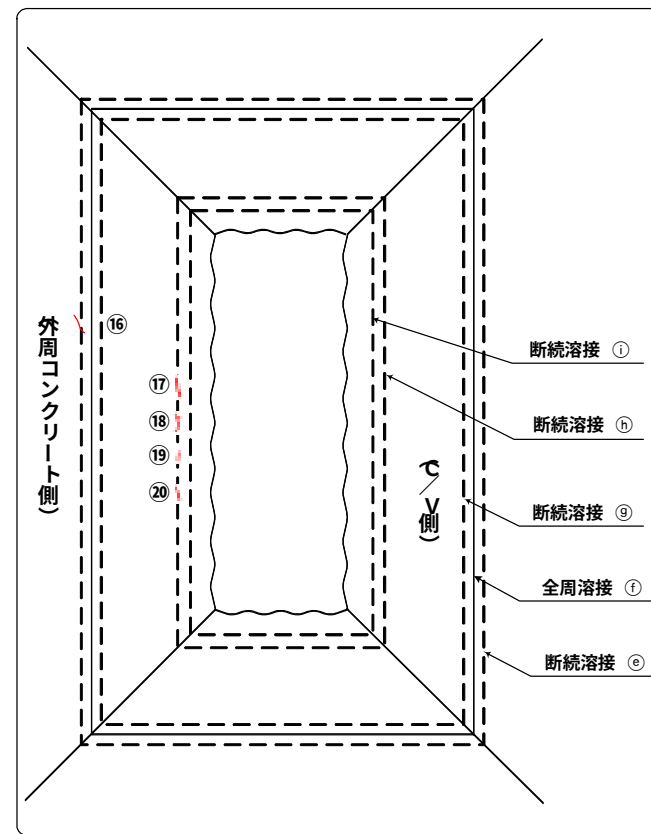


A部 (排気筒水平ダクト部(ひび割れ①～⑮))
(上流側から下流側を見る)

補助建家排気筒状況調査結果 (鉛直ダクト部ひび割れ箇所)



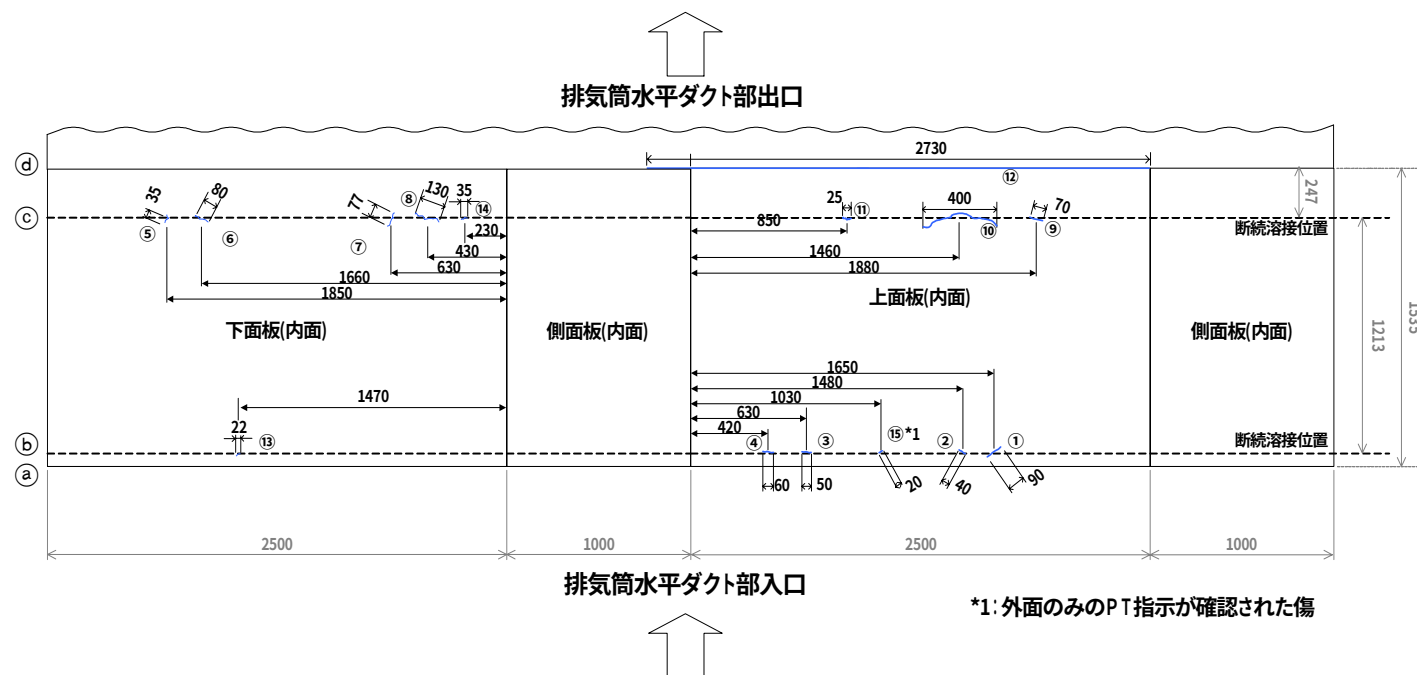
B部断面図



B部 (排気筒鉛直ダクト部 (ひび割れ①②③④⑤))
(下部より上部を見る)

排気筒鉛直ダクト部内外面状況調査の結果、5箇所のひび割れを確認した。

補助建家排気筒状況調査結果 (水平ダクト部 ひび割れ状況①～④)



ひび割れ①
(ダクト内面)



ひび割れ②
(ダクト内面)



ひび割れ③
(ダクト内面)



ひび割れ④
(ダクト内面)

補助建家排気筒状況調査結果 (水平ダクト部 ひび割れ状況⑤～⑮)



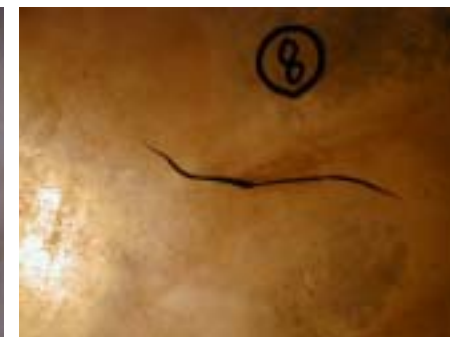
ひび割れ⑤
(ダクト内面)



ひび割れ⑥
(ダクト内面)



ひび割れ⑦
(ダクト内面)



ひび割れ⑧
(ダクト内面)



ひび割れ⑨
(ダクト内面)



ひび割れ⑩
(ダクト内面)



ひび割れ⑪
(ダクト内面)



ひび割れ⑫
(ダクト内面)



ひび割れ⑬
(ダクト内面)

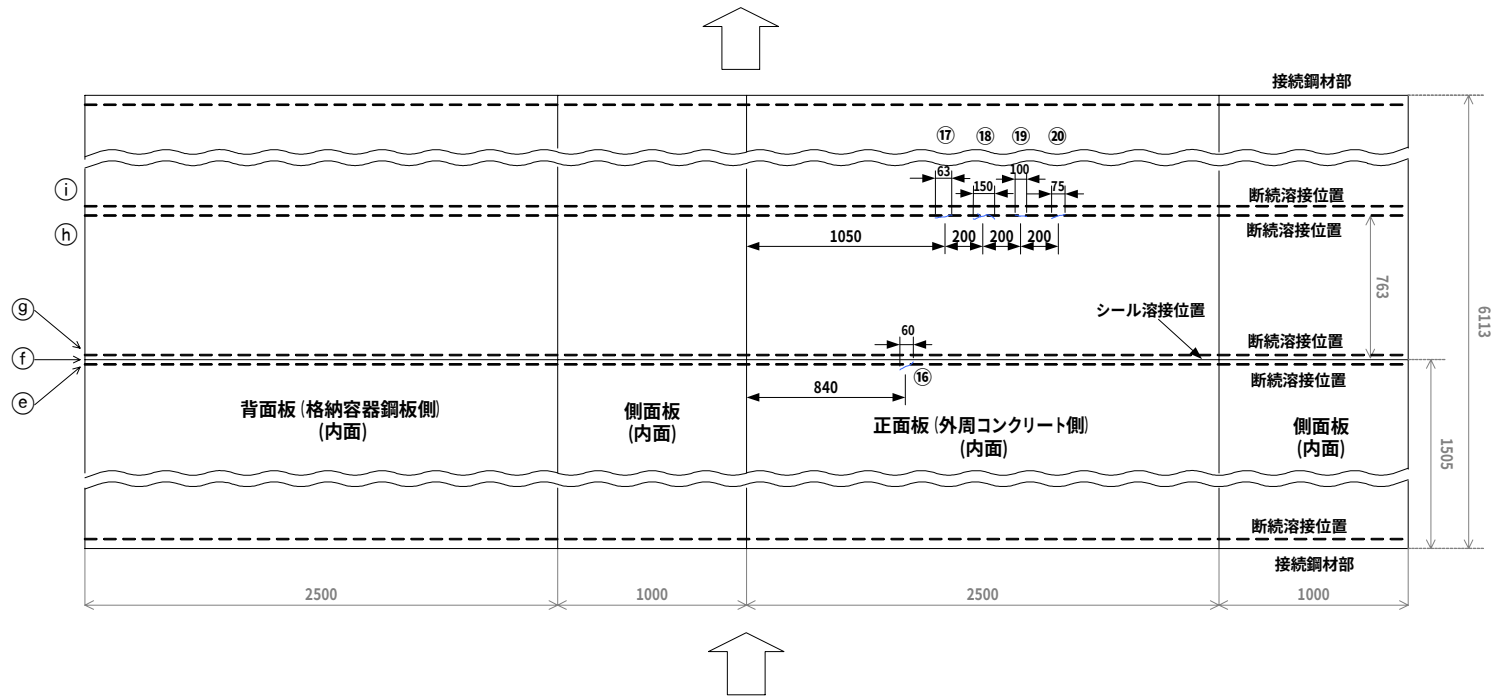


ひび割れ⑭
(ダクト内面)



ひび割れ⑮
(ダクト外面)

補助建家排気筒状況調査結果 (鉛直ダクト部 ひび割れ状況①⑥～②①)



ひび割れ①⑥
(ダクト内面)



ひび割れ①⑦
(ダクト内面)



ひび割れ①⑧
(ダクト内面)

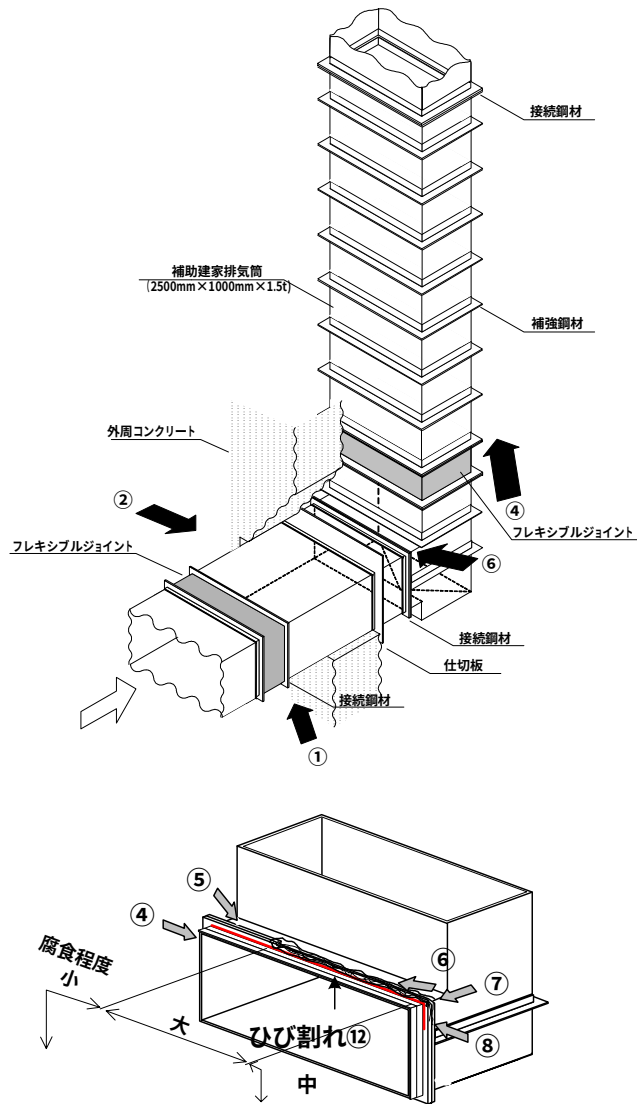


ひび割れ①⑨
(ダクト内面)



ひび割れ②①
(ダクト内面)

補助建家排気筒状況調査結果 (外観調査結果)



外面の接続鋼材部の腐食とひび割れの位置



①排気筒水平ダクト部
(原子炉補助建家内)



②排気筒水平ダクト部
(原子炉補助建家内)



③排気筒鉛直ダクト部
(外周コンクリート内側)



④排気筒水平・鉛直ダクト部の接続
鋼材部 (外周コンクリート内側)



⑤排気筒水平・鉛直ダクト部の接続
鋼材部 (外周コンクリート内側)



⑦排気筒水平・鉛直ダクト部の接続
鋼材部 (外周コンクリート内側)



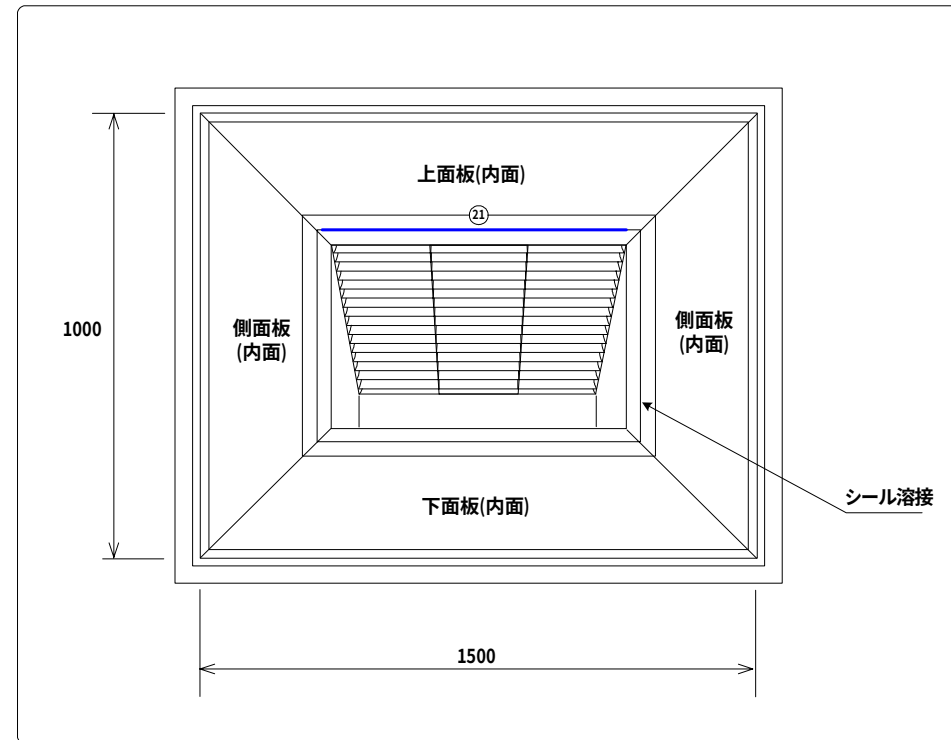
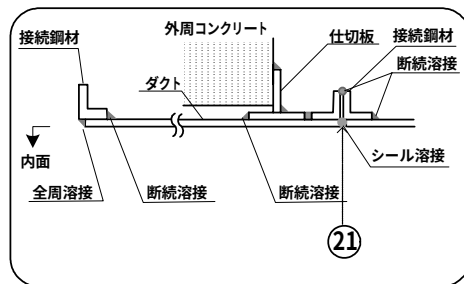
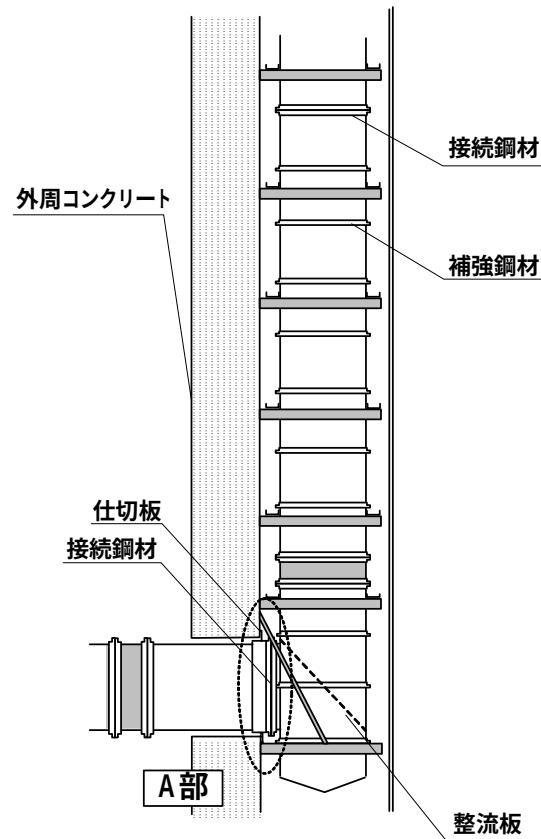
⑧排気筒水平・鉛直ダクト部の接続
鋼材部 (外周コンクリート内側)



⑥排気筒水平・鉛直ダクト部の接続
鋼材部 (外周コンクリート内側)

外周コンクリート内側の排気筒水平・鉛直ダクト部の接続鋼材部に著しい腐食が認められ、ひび割れ⑫の範囲と、外面の接続鋼材の腐食している範囲がほぼ一致していた。

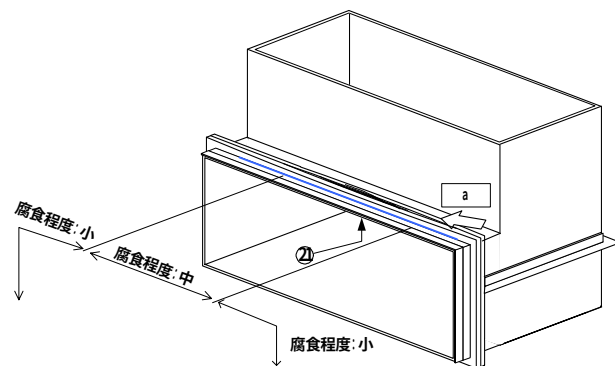
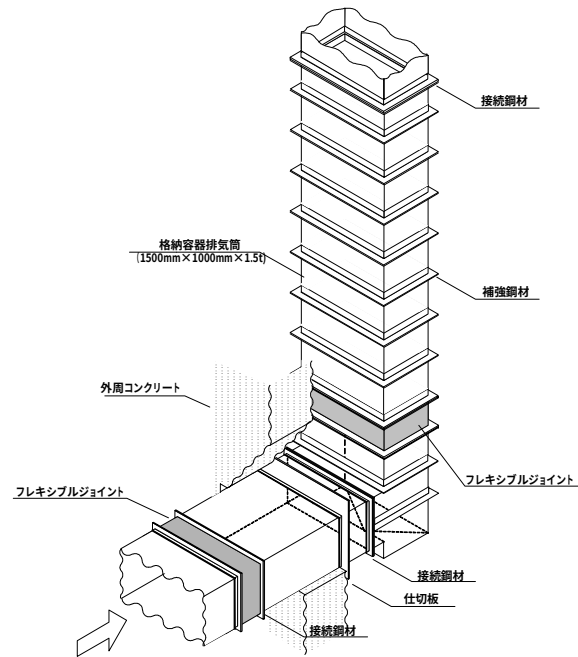
格納容器排気筒状況調査結果 (ひび割れ箇所)



A部 (排気筒水平ダクト部)
(上流側から下流側を見る)

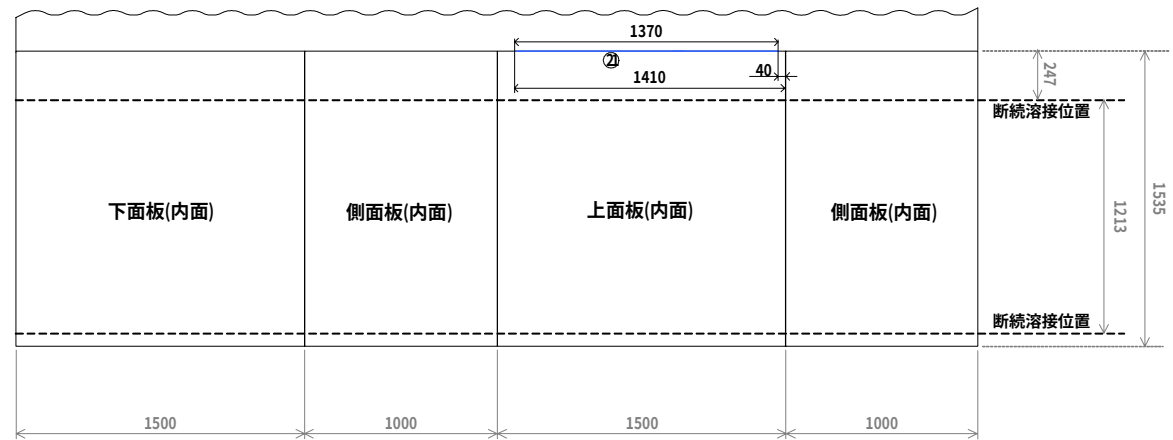
排気筒内外面状況調査の結果、水平ダクト部に1箇所のひび割れを確認した。

格納容器排気筒状況調査結果 (ひび割れ②) 状況



外面の接続鋼材部の腐食とひび割れの位置

排気筒水平ダクト部出口



排気筒水平ダクト部入口



排気筒水平・鉛直ダクト部の接続鋼材部 (a 視) (外周コンクリート内側)



ひび割れ ② (ダクト内面)

外周コンクリート内側の排気筒水平・鉛直ダクト部の接続鋼材部に著しい腐食が認められ、ひび割れ範囲と、当該外面の接続鋼材部の腐食している範囲がほぼ一致していた。

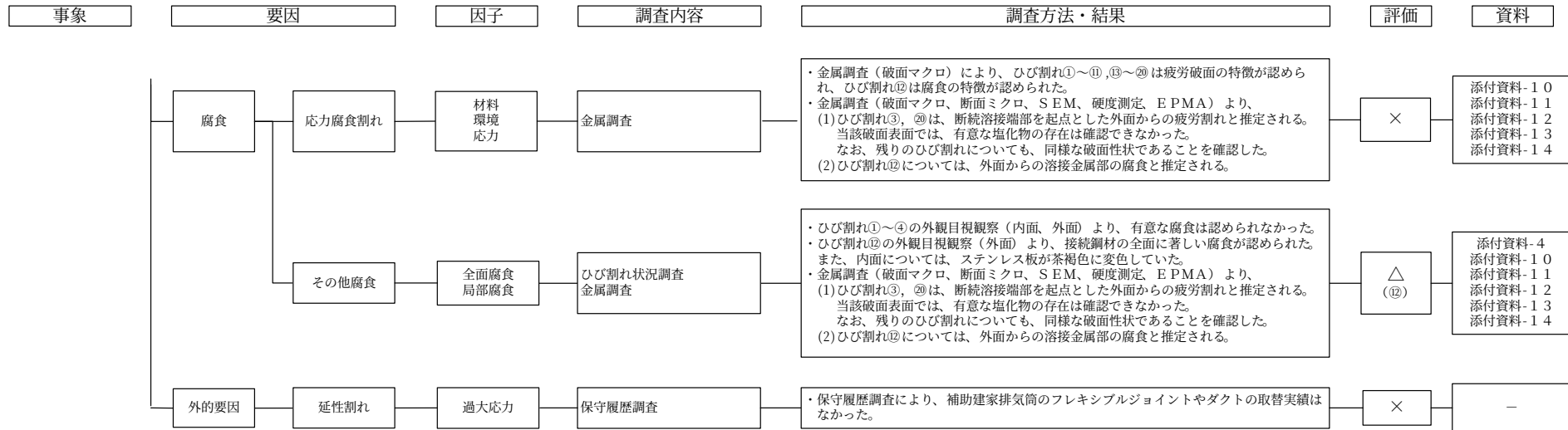
補助建家排気筒のひび割れに係る要因分析図

[備考]
△：可能性あり。
×：可能性なし。

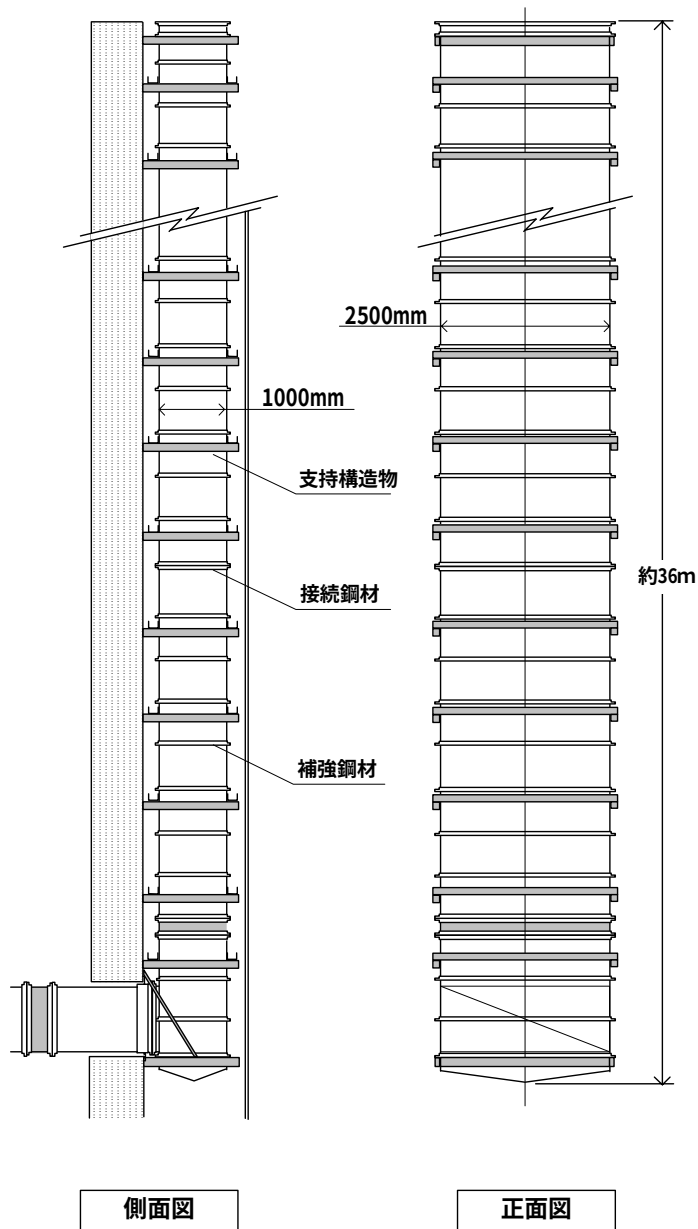


補助建家排気筒のひび割れに係る要因分析図

[備考]
△：可能性あり。
×：可能性なし。



補助建家排気筒の製作・施工調査結果



項 目		調 査 結 果
製作履歴	ダクト(接続鋼材、補強鋼材含む。)支持構造物	外観・据付検査記録を確認した結果、問題は認められなかった。
施工状況	ダクト	寸法、構造を確認した結果、設計仕様どおりであった。
	補強鋼材 接続鋼材	排気筒水平ダクト部の補強鋼材の間隔を確認した結果、約1,400mmであり、他の部位より間隔が長かった。調査の結果、当初設計では、現行の接続鋼材間の外周コンクリート貫通部内に補強鋼材が取り付けられる予定であったが、外周コンクリート貫通部が狭隘であったことから、現場設置の段階で補強鋼材のないものを使用していた。
	支持構造物	排気筒鉛直ダクト部の支持構造物の施工状況を確認した結果、支持構造物が適切に取付けられていた。
	その他	フレキシブルジョイント位置等を確認した結果、適切であった。

・製作記録を調査した結果、排気筒の製作に問題は認められなかった。
・排気筒水平ダクト部の補強鋼材の間隔を確認した結果、約1,400mmであり、他の部位より間隔が長かった。

補助建家排気筒の材料調査結果

○ダクト部鋼板 (材料証明書)

単位:重量%

項 目	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
規格値 (SUS304)	MAX 0.08	MAX 1.00	MAX 2.00	MAX 0.040	MAX 0.030	8.00 ~10.50	18.00 ~20.00
材料証明書記載値	0.06	0.50	0.93	0.032	0.013	9.06	18.47

項 目	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	硬さ
規格値 (SUS304)	MIN 53	MIN 40	MAX HV200
材料証明書記載値	62.8	59.4	154

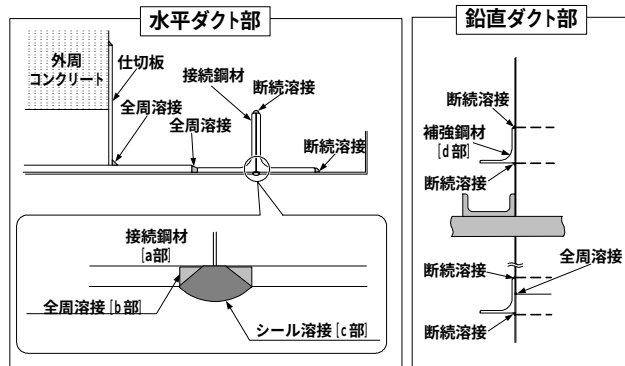
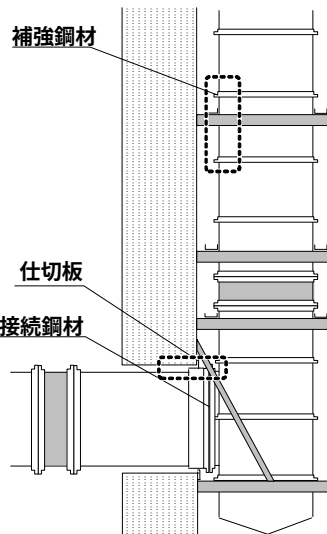
○接続鋼材、補強鋼材、溶接金属 (EPMA分析結果)

単位:重量%

部 位			Fe	Cr	Ni	その他	備 考
⑫	接続鋼材	[a部]	92.6	0.2	0.4	6.8	ひび割れ⑫近傍の接続鋼材
	溶接金属 (全周溶接)	[b部]	66.1	16.0	10.1	7.8	ひび割れ⑫のダクト部鋼板と接続鋼材との溶接部
	溶接金属 (シール溶接)	[c部]	89.0	1.8	1.3	7.9	ひび割れ⑫のシール溶接部
⑳	補強鋼材	[d部]	84.9	0.2	0.3	14.6	ひび割れ⑳近傍の補強鋼材

(参考)

項 目	Fe	Cr	Ni	その他
溶接用ステンレス鋼(Y309 規格値)	Bal.	23.00~25.00	12.00~14.00	MAX3.33
炭素鋼(SS41 規格値)	Bal.	—	—	MAX0.10



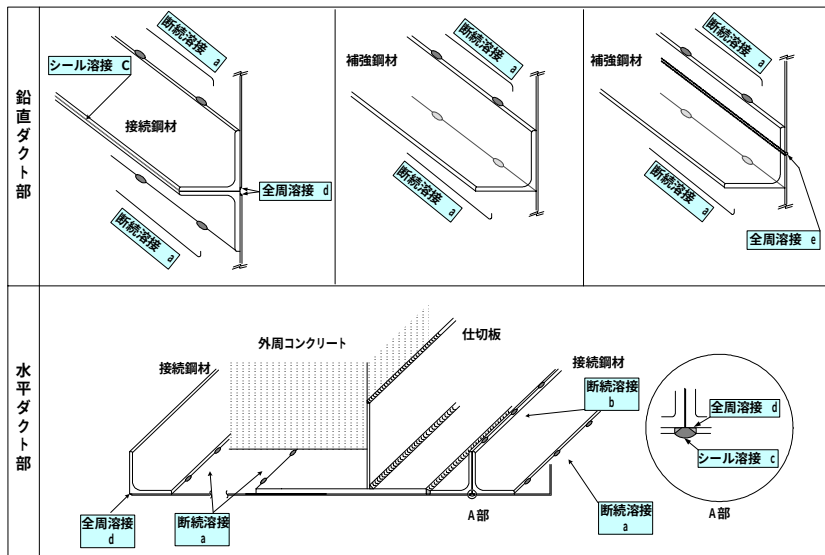
ダクト部鋼板の材料を材料証明書により調査した結果、規格値を満足していた。

EPMAによる材料調査を実施した結果、設計仕様どおりであった。

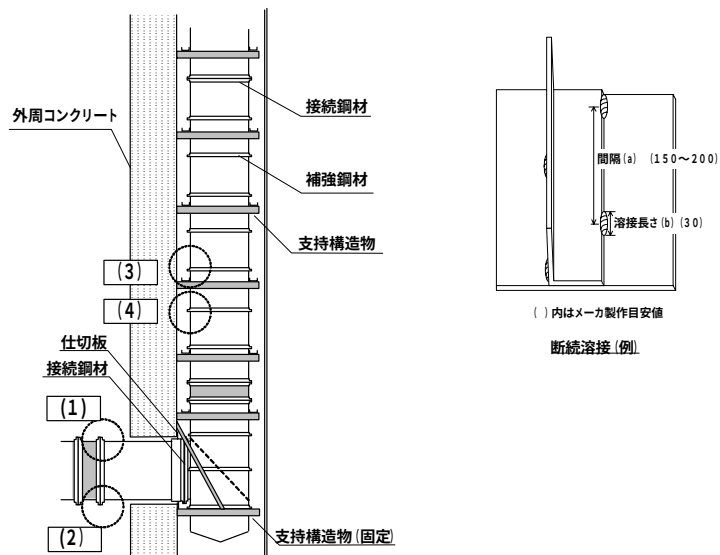
- ・接続鋼材および補強鋼材は、ステンレス鋼の成分元素である Cr および Ni が、微量しか検出されていないため、炭素鋼であると推定される。
- ・接続鋼材とダクト部鋼板との溶接金属は、ステンレス鋼の成分元素である Cr および Ni が十分存在するため、ステンレス鋼であると推定される。
- ・接続鋼材部のシール溶接金属は、ステンレス鋼の成分元素である Cr および Ni が、微量しか検出されていないため、炭素鋼であると推定される。

補助建家排気筒の溶接施工状況調査結果

○施工方法



溶接施工方法

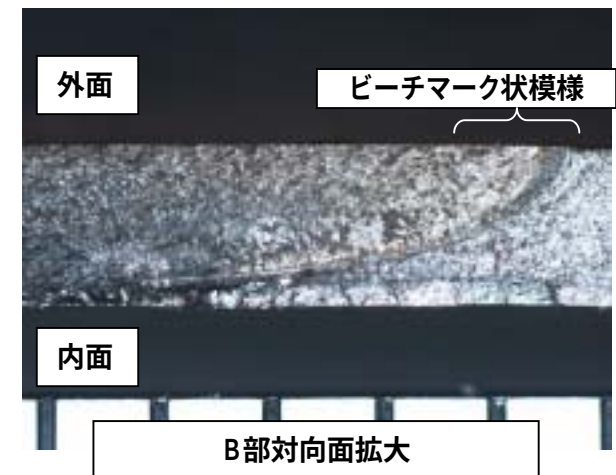
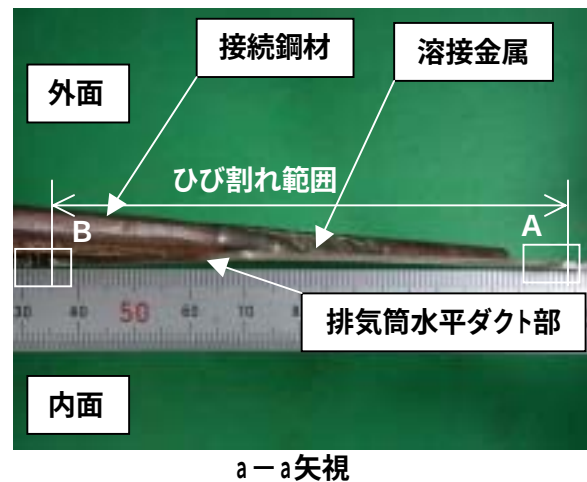
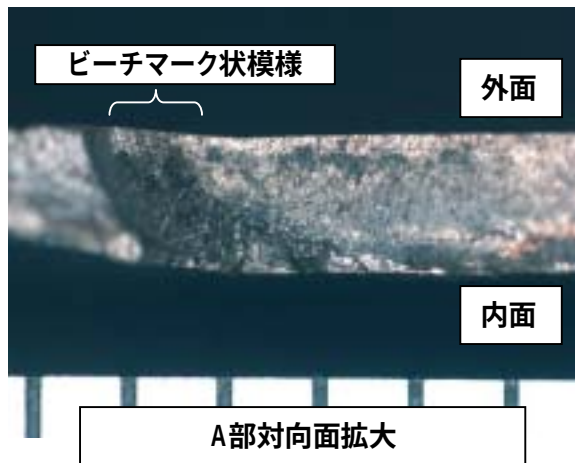
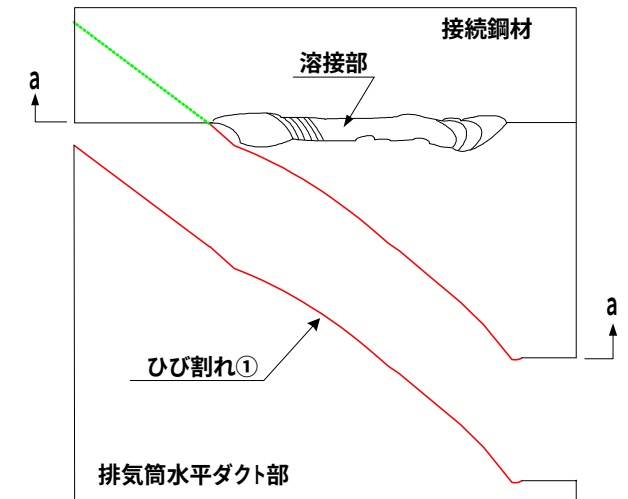


○施工状況(断続溶接)

ひび割れ発生部位			箇所数	計測結果	
水平ダクト部 ：接続鋼材とダクト部鋼板との断続溶接部	上面	(1)	13	(a) (b)	202.5～210 35～45
	下面	(2)	13	(a) (b)	200～217.5 35～50
鉛直ダクト部 ：補強鋼材とダクト部鋼板との断続溶接部	—	(3)	13	(a) (b)	200～208.5 26～35
		(4)	13	(a) (b)	172.5～225 25～40

現地施工状況調査等により、施工方法に問題は認められなかった。
また、ひび割れの確認された断続溶接部は、施工上の目安の間隔、溶接長さで施工されていた。

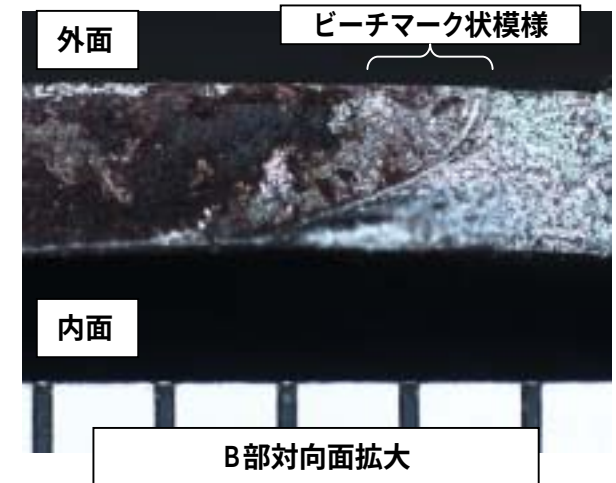
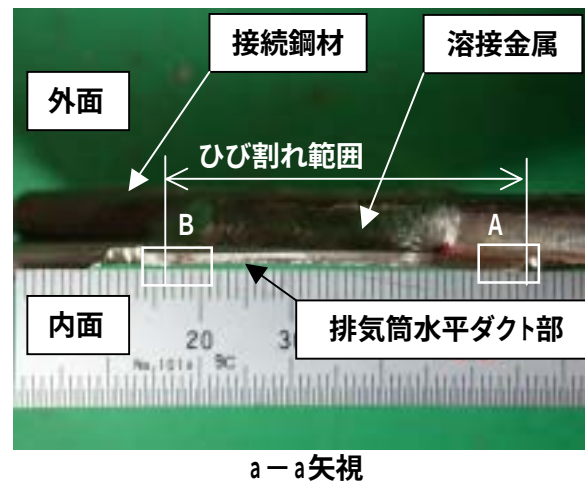
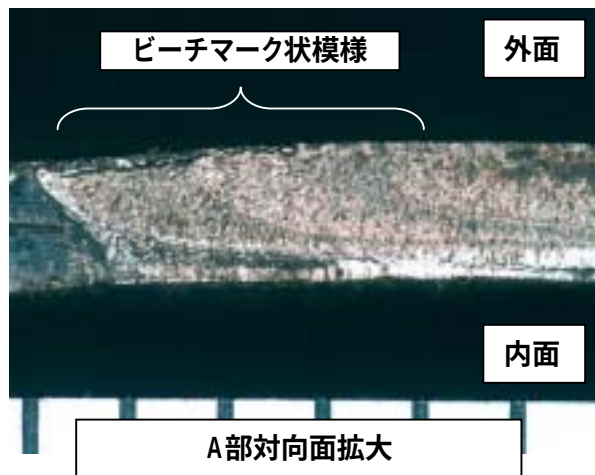
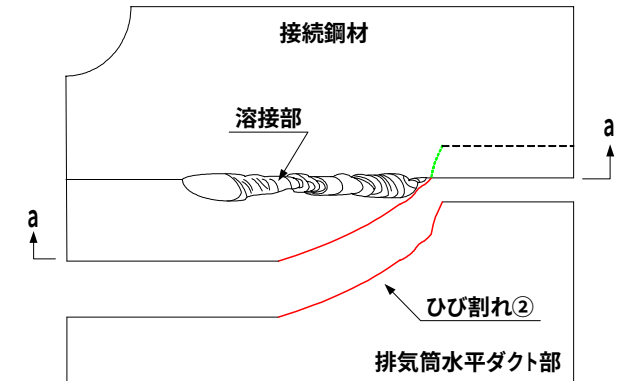
破面マクロ観察結果 (ひび割れ①)



【観察結果】

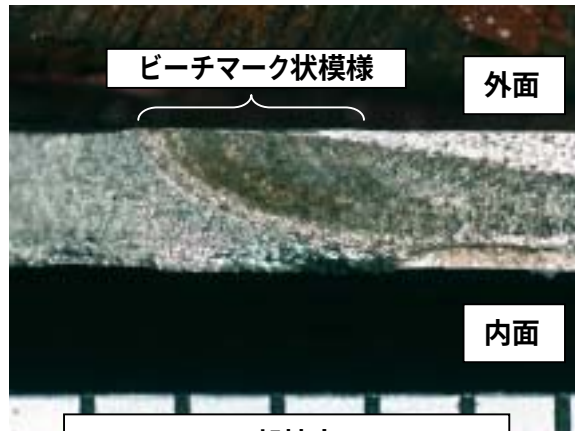
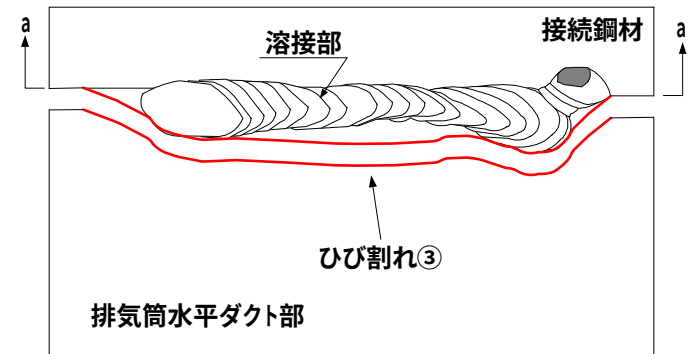
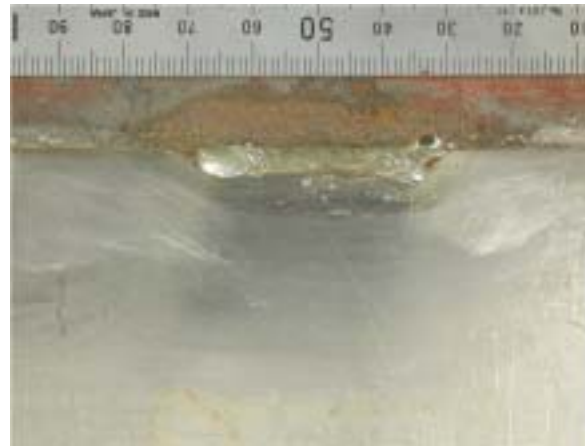
- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・ひび割れの各先端部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・破面にはビーチマーク状の模様が認められた。
- ・破面は平坦である。

破面マクロ観察結果 (ひび割れ②)

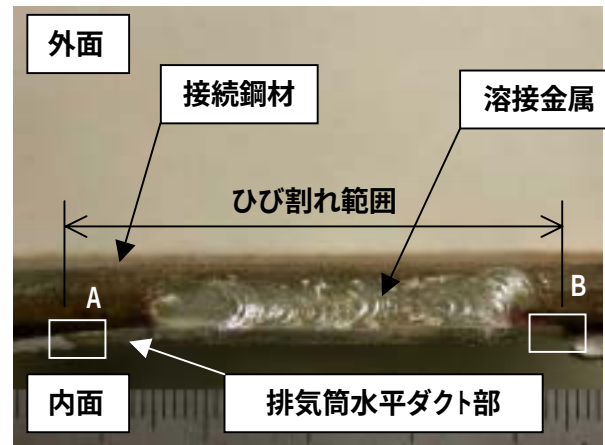


- 【観察結果】
- ・ひび割れは貫通していた。
 - ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
 - ・ひび割れの各先端部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
 - ・破面にはピーチマーク状の模様が認められた。
 - ・破面は平坦である。

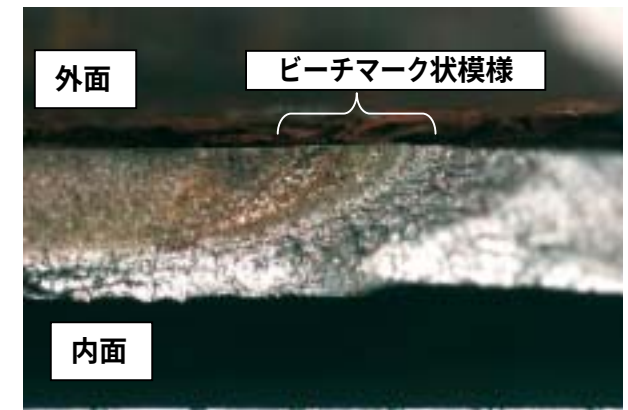
破面マクロ観察結果 (ひび割れ③)



A部拡大



a-a矢視

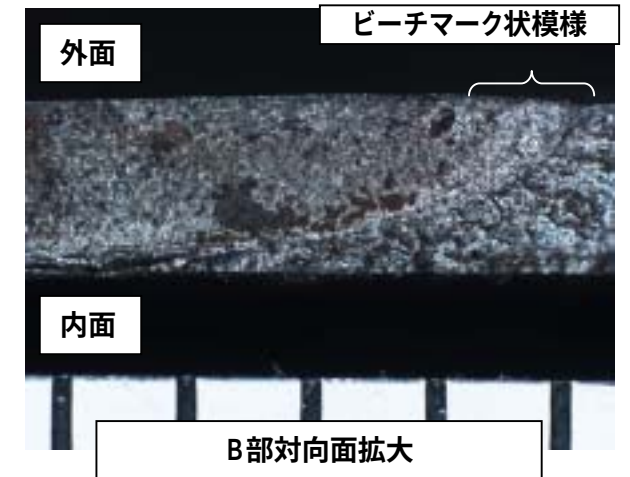
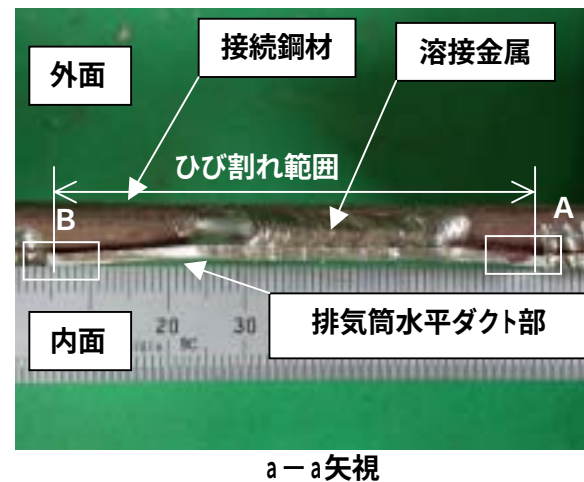
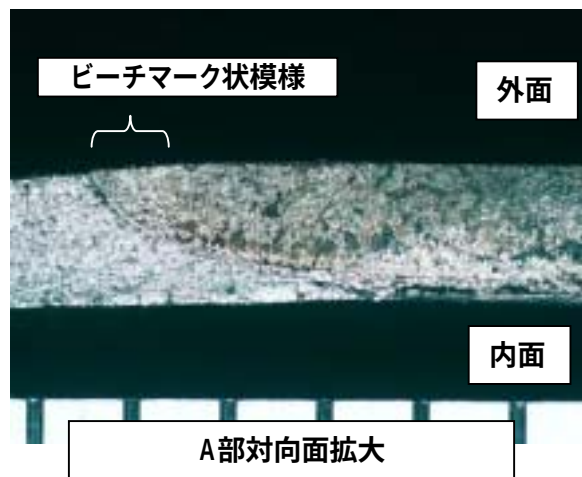
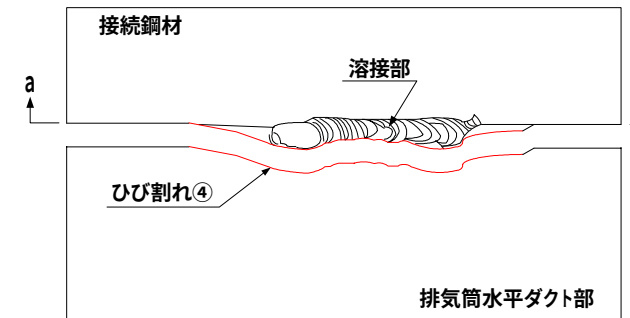


B部拡大

【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・ひび割れの各先端部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・破面にはビーチマーク状の模様が認められた。
- ・破面は平坦である。

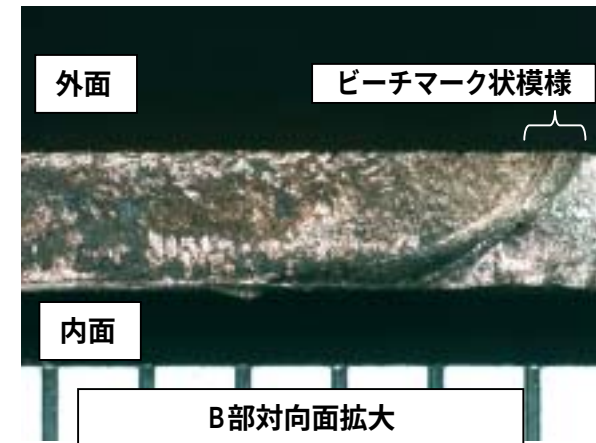
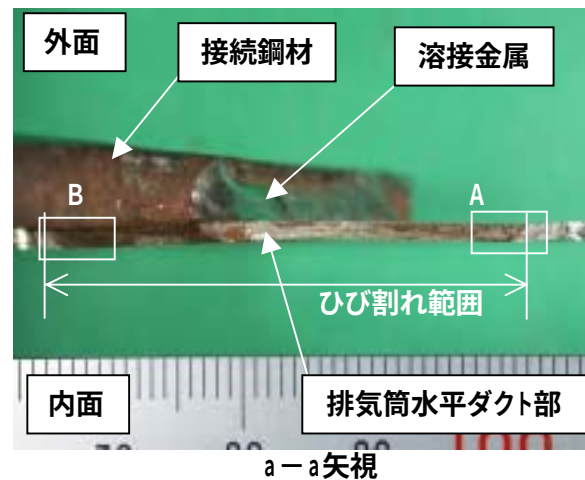
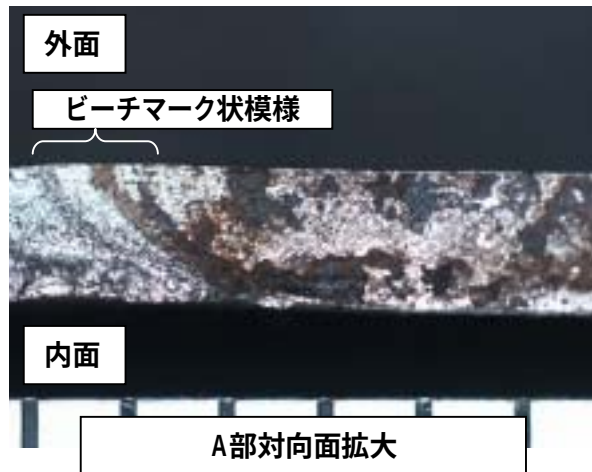
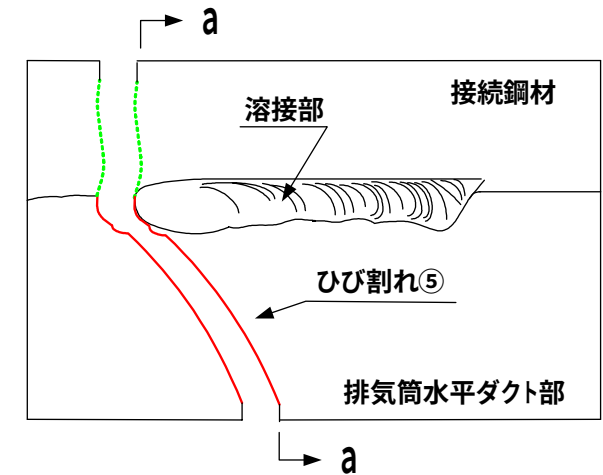
破面マクロ観察結果 (ひび割れ④)



【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・ひび割れの各先端部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・破面にはビーチマーク状の模様が認められた。
- ・破面は平坦である。

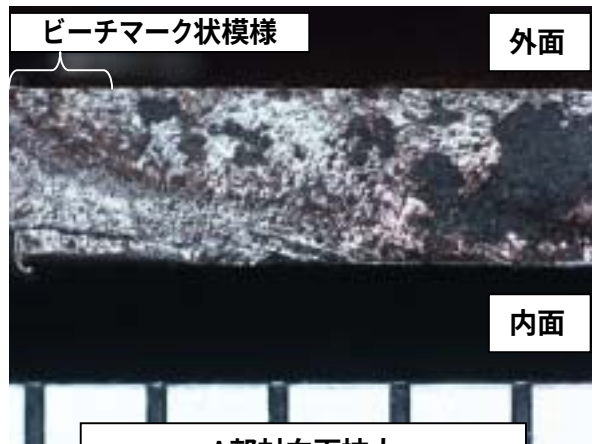
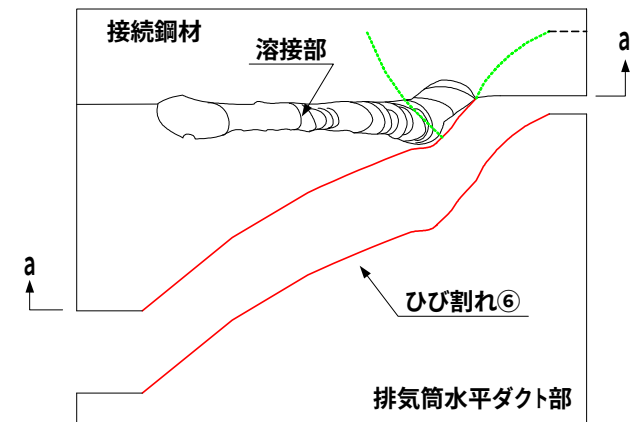
破面マクロ観察結果 (ひび割れ⑤)



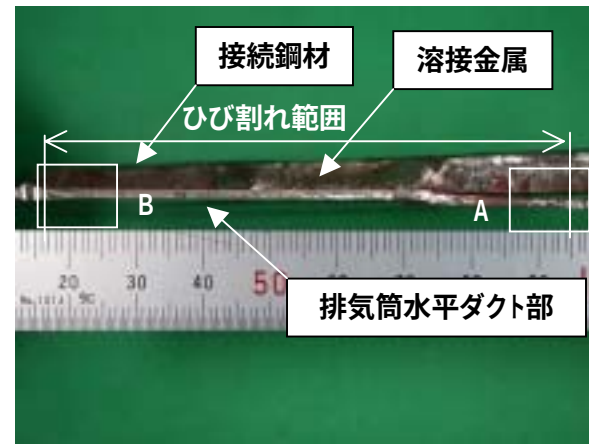
【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・ひび割れの各先端部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・破面にはビーチマーク状の模様が認められた。
- ・破面は平坦である。

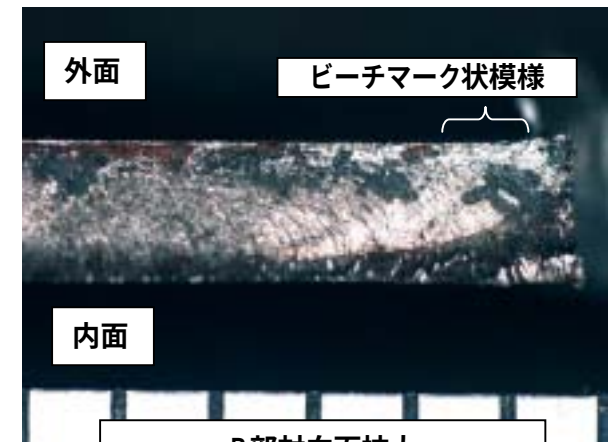
破面マクロ観察結果 (ひび割れ⑥)



A部対向面拡大



a-a矢視

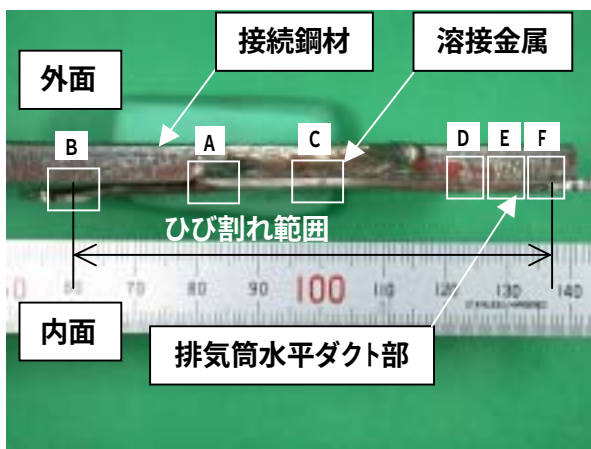
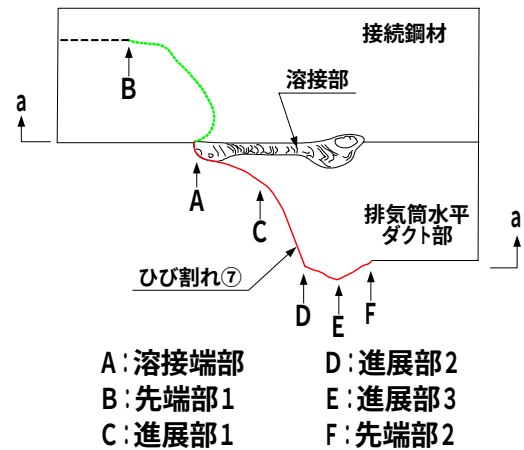
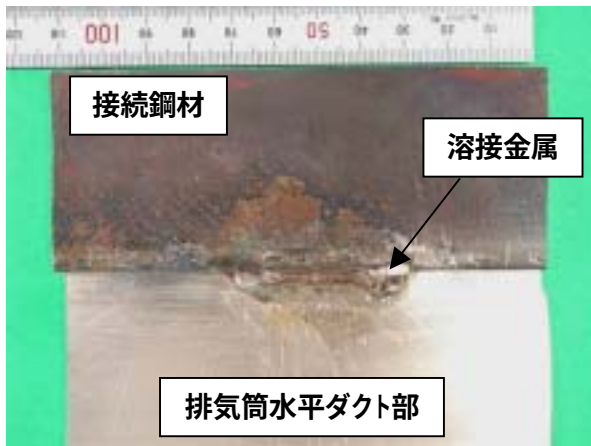


B部対向面拡大

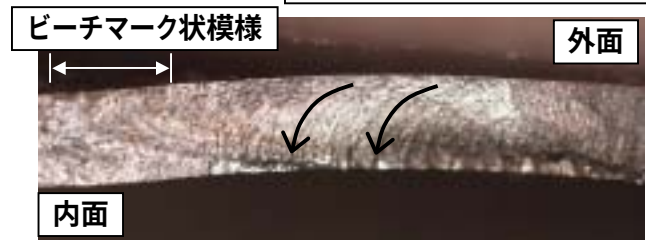
【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・ひび割れの各先端部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・破面にはビーチマーク状の模様が認められた。
- ・破面は平坦である。

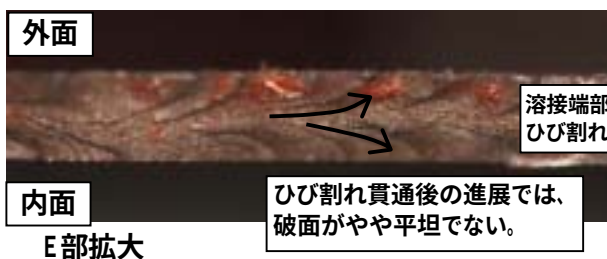
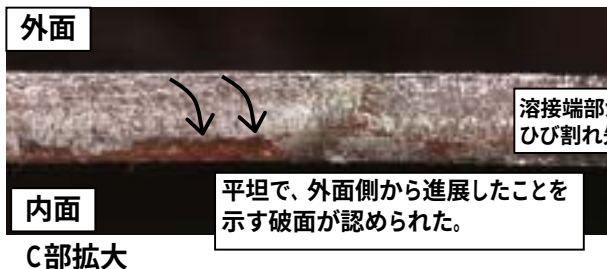
破面マクロ観察結果 (ひび割れ⑦)



a-a矢視



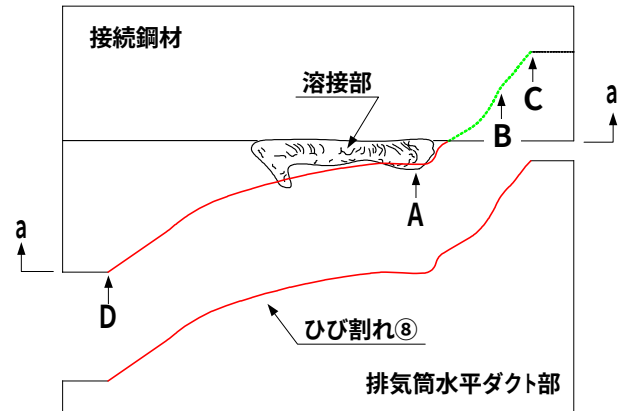
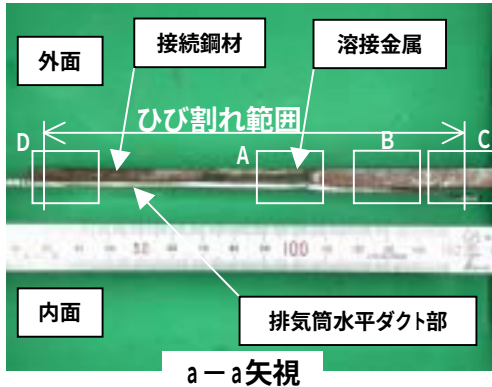
B部拡大



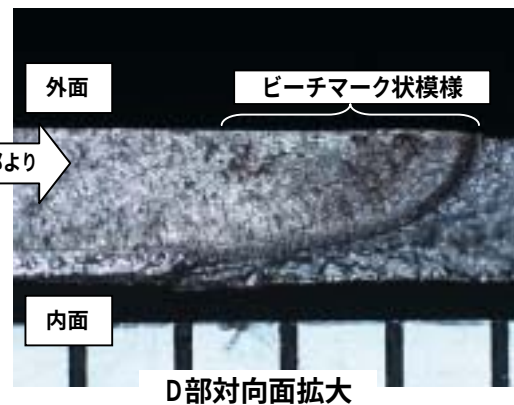
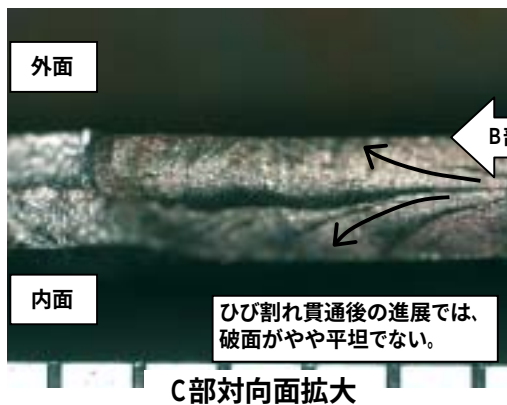
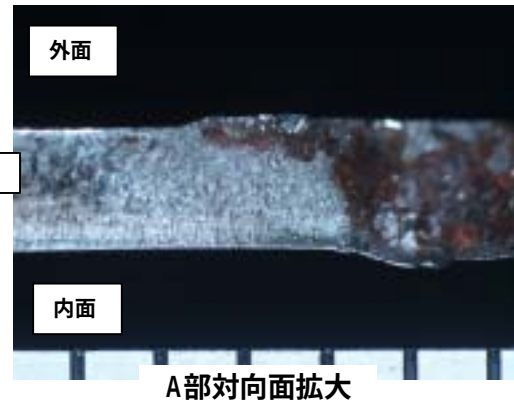
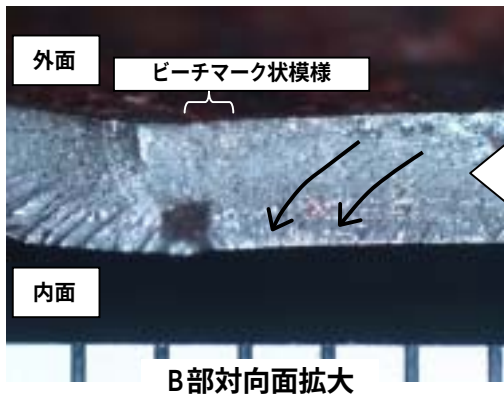
[観察結果]

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通っていた。
- ・ひび割れの発生は、外面側が大きい半楕円形状で開始し、進展も外面側からであった。
- ・ひび割れ貫通後の進展では、内外面側からの進展が競合する部位 (D-E間: 進展部) 及び内面側からの進展に移行する部位 (F: 先端部2) が観察された。
- ・破面は平坦である。(一部 (D-E間: 進展部) ひび割れ貫通後の進展では、やや平坦でない破面が観察された。)
- ・破面にはビーチマーク状の模様が認められた。

破面マクロ観察結果 (ひび割れ⑧)



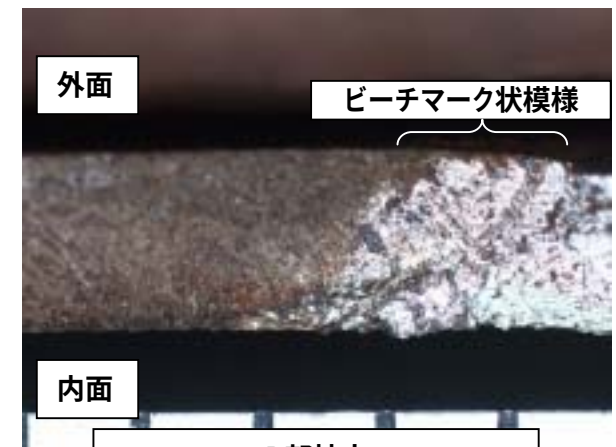
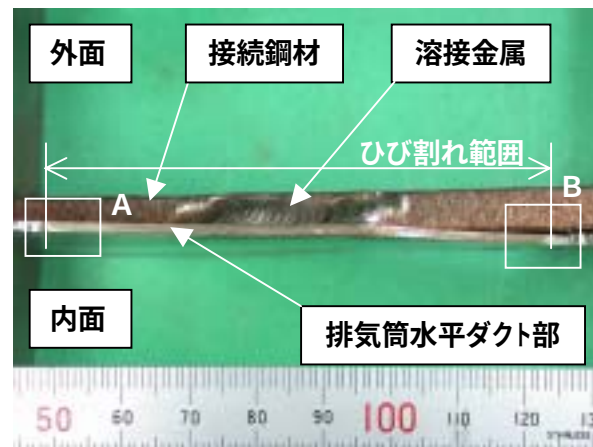
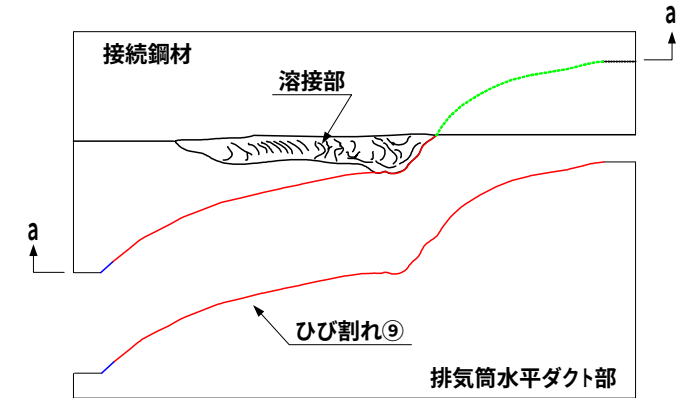
← : 金属組織の流れ方向 (ひび割れの進展方向) を示す



【観察結果】

- ・ひび割れは溶接端部 (終端部) を通っていた。
- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れ発生は、外面側が大きい半楕円形状で開始し、進展も外面側からであった。(外面側からの進展を示すビーチマーク状の模様が観察された。)
- ひび割れ貫通後の進展では、内外面側からの進展が競合する部位 (C部: 先端部1) が観察された。
- ・破面は平坦である。(一部 (C部: 先端部1)、ひび割れ貫通後の進展では、やや平坦ではない破面が観察された。)

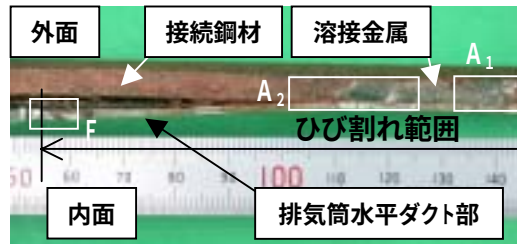
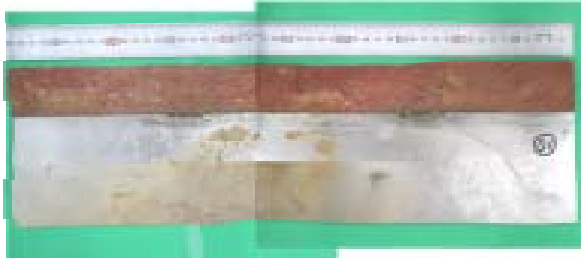
破面マクロ観察結果 (ひび割れ⑨)



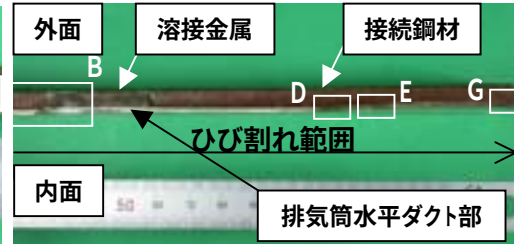
【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・ひび割れの各先端部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・破面にはビーチマーク状の模様が認められた。
- ・破面は平坦である。

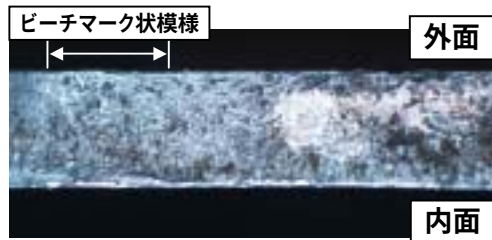
破面マクロ観察結果 (ひび割れ⑩) (1 / 2)



⑩左側



⑩右側



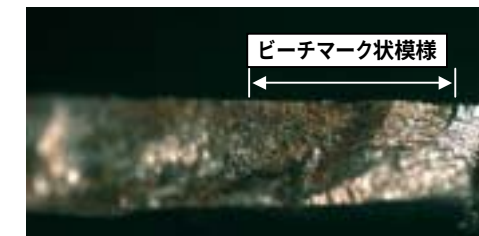
C部対向面拡大



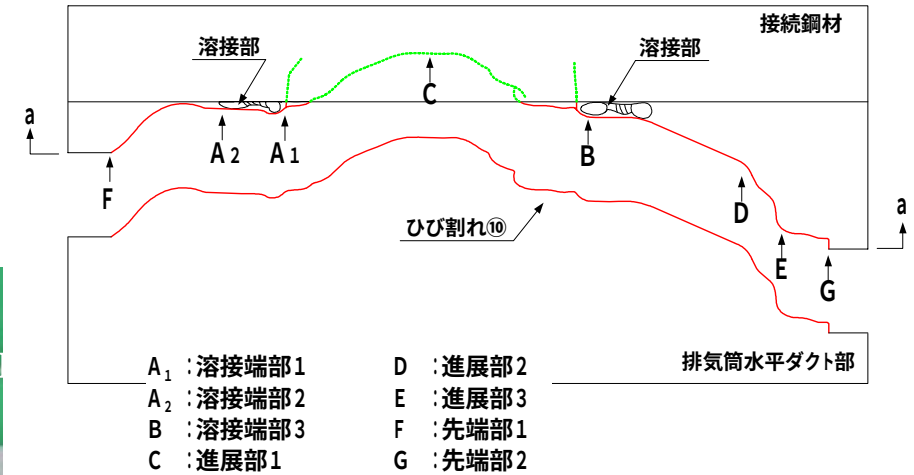
A₁部対向面拡大



A₂部対向面拡大



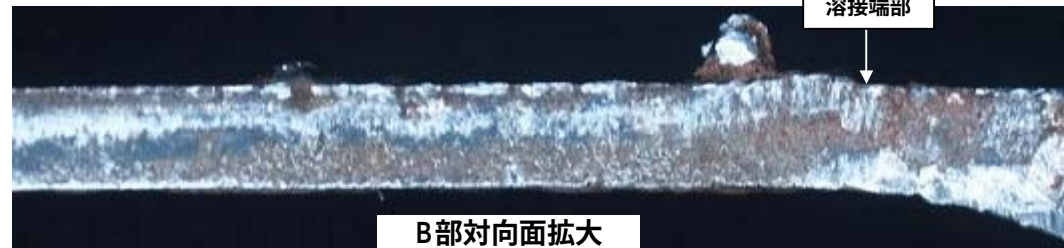
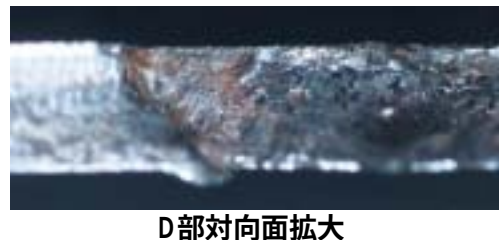
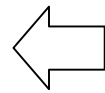
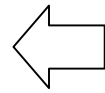
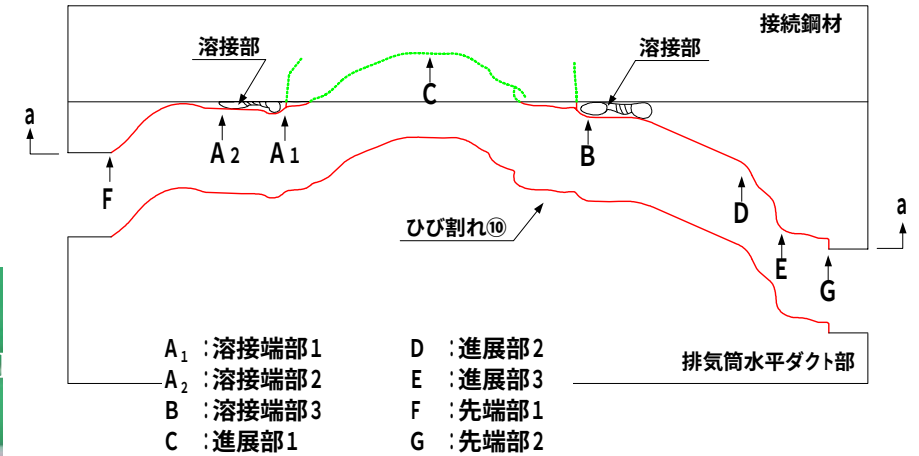
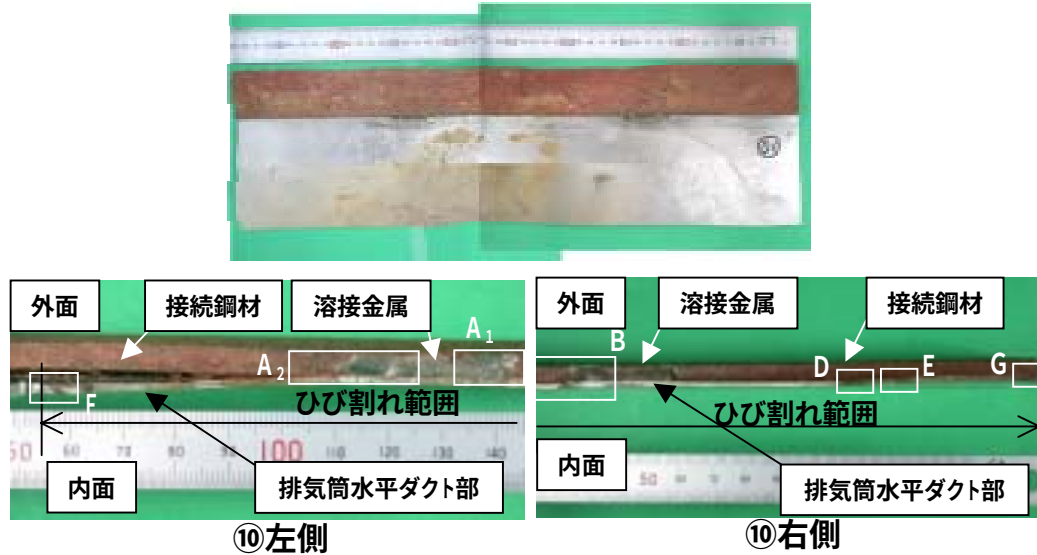
F部対向面拡大



【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・進展部1 (C部) および先端部1 (F部) では、ひび割れの先端部 (進展部) 前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・破面にはビーチマーク状の模様が認められた。
- ・破面は平坦であった。

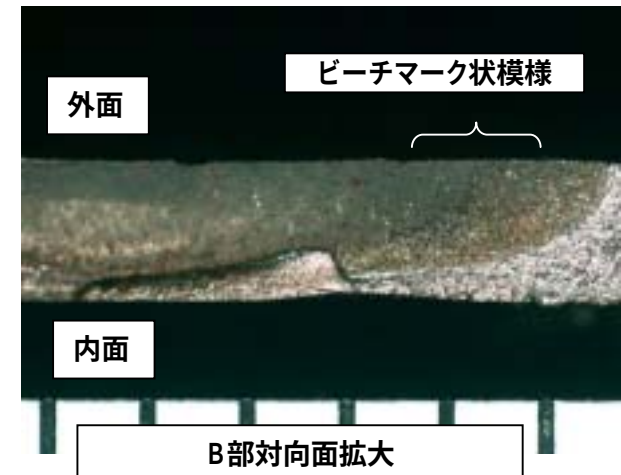
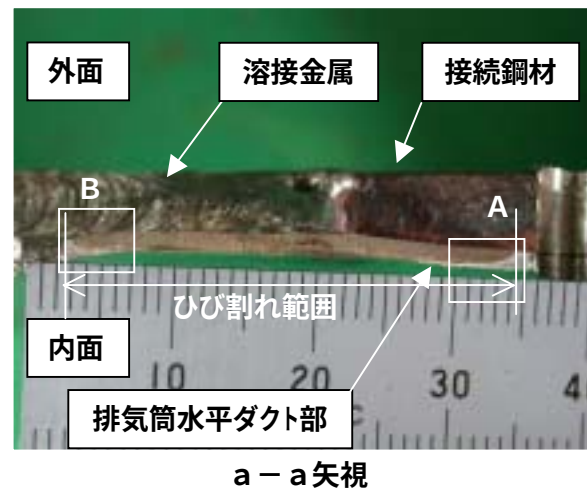
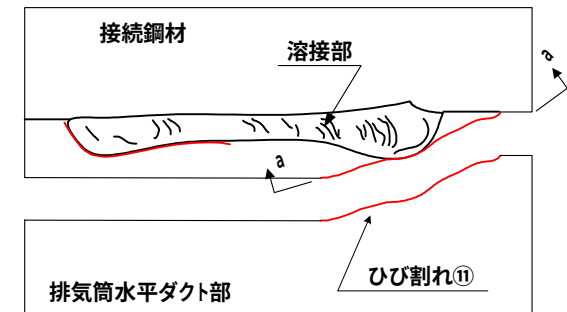
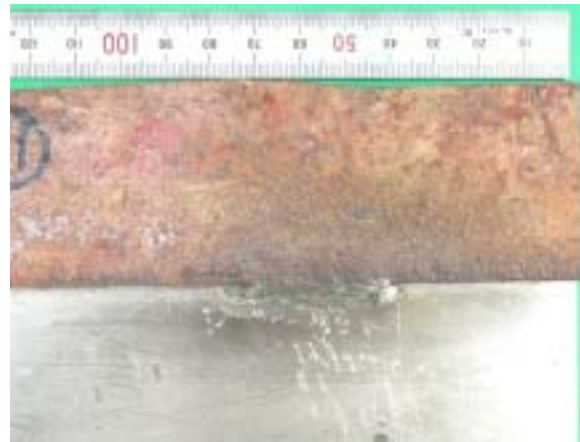
破面マクロ観察結果 (ひび割れ⑩) (2 / 2)



【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・進展部2 (D部) では、ひび割れの進展部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・先端部2 (G部) では、内外面からの進展が競合する部位が観察された。
- ・溶接端部付近の破面は平坦であるが、ひび割れ貫通後の進展では、やや平坦ではない破面が観察された。

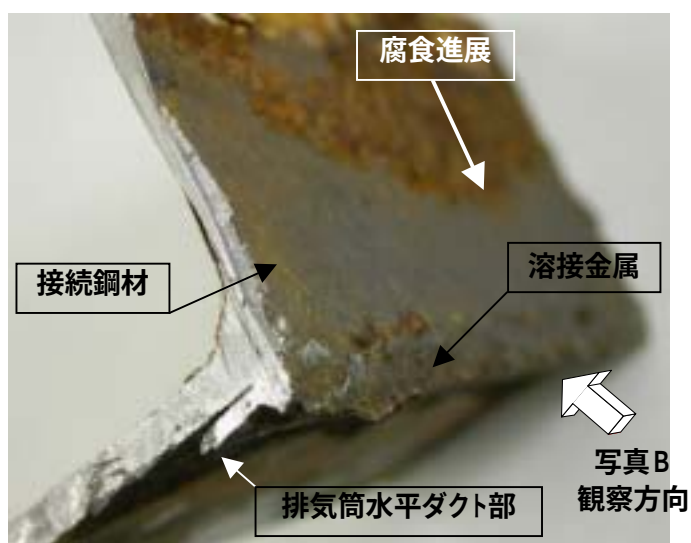
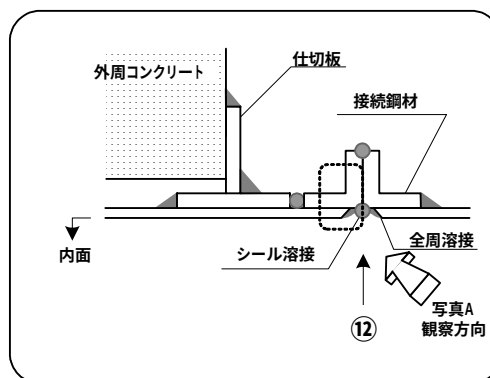
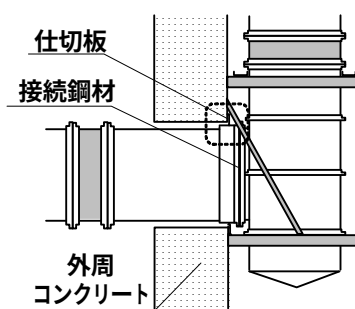
破面マクロ観察結果 (ひび割れ⑪)



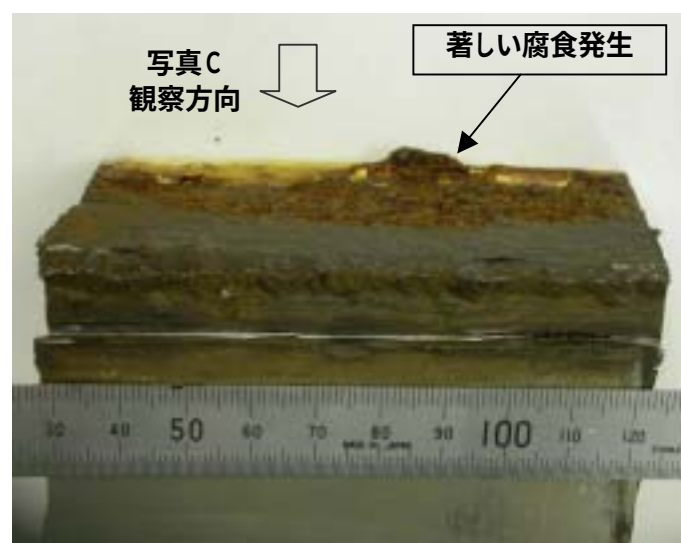
【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・ひび割れの各先端部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・破面にはビーチマーク状の模様が認められた。
- ・破面は平坦である。

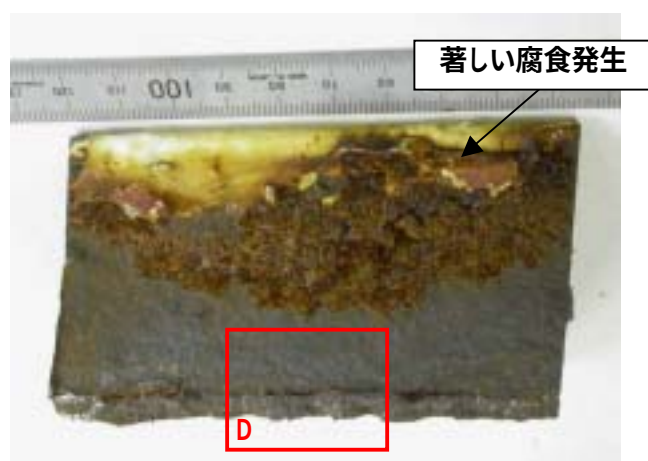
破面マクロ観察結果 (ひび割れ⑫)



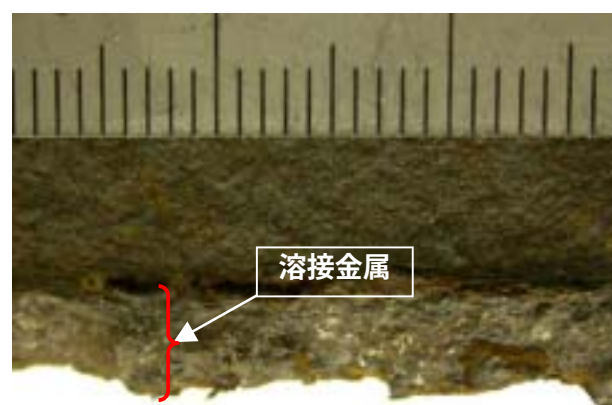
写真A



写真B



写真C

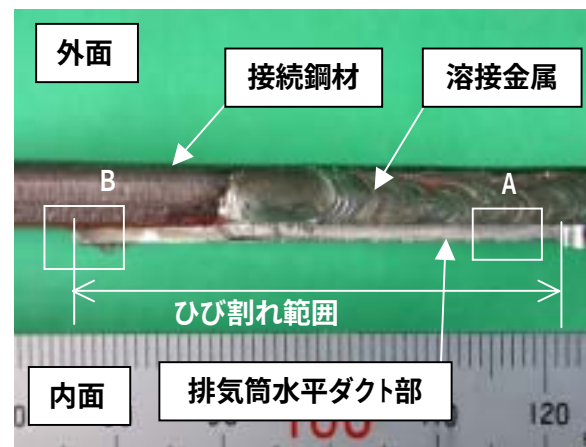
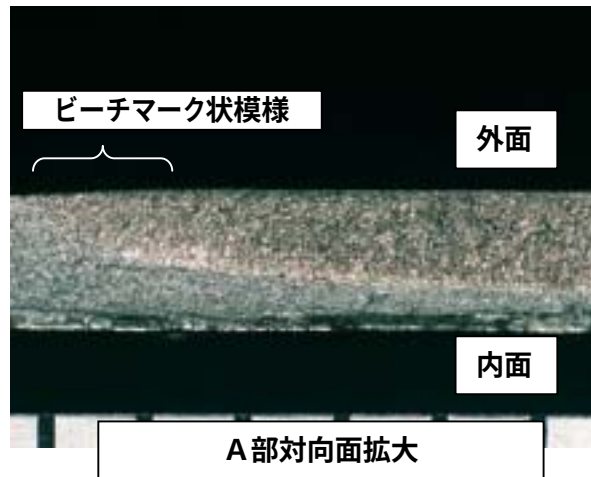
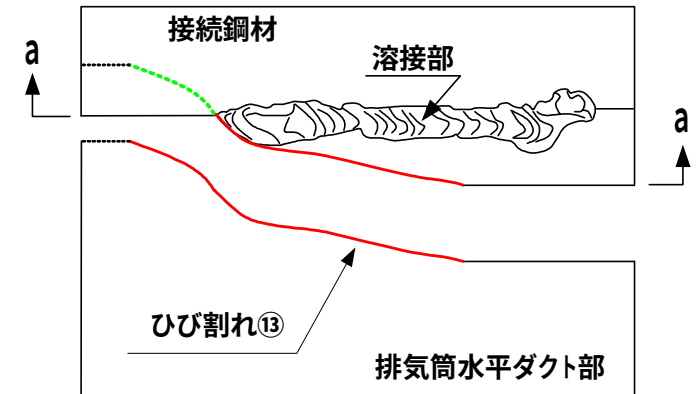


D部拡大

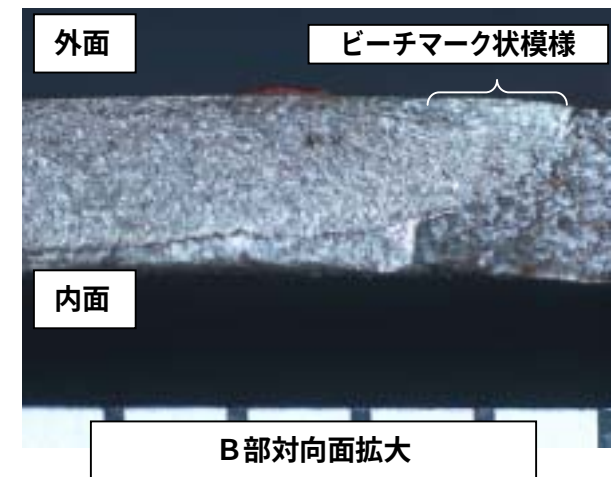
[観察結果]

- ・ひび割れ⑫は、溶接金属のほぼ中央を貫通しており、破面表面は腐食により変色している。
- ・シール溶接金属部の接続鋼材も著しい腐食を受けている。

破面マクロ観察結果 (ひび割れ⑬)



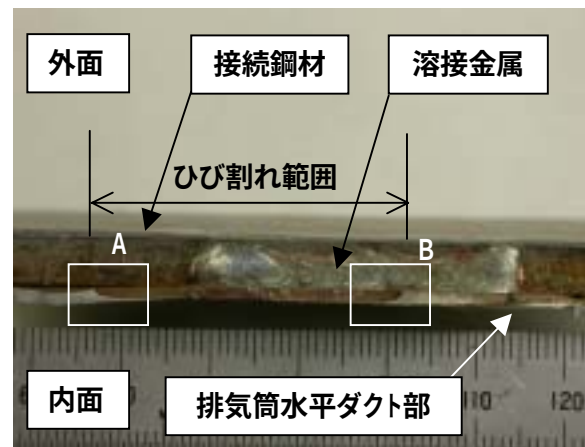
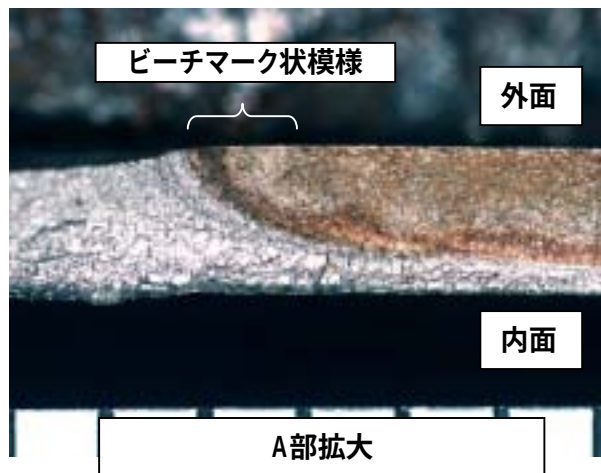
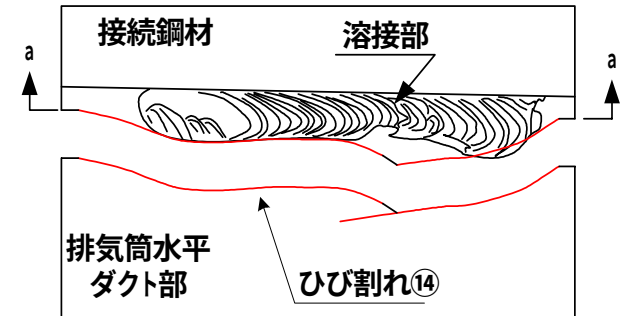
a - a 矢視



【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・ひび割れの各先端部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・破面にはビーチマーク状の模様が認められた。(腐食等の影響でやや不明瞭となっている。)
- ・破面は平坦である。

破面マクロ観察結果 (ひび割れ⑭)



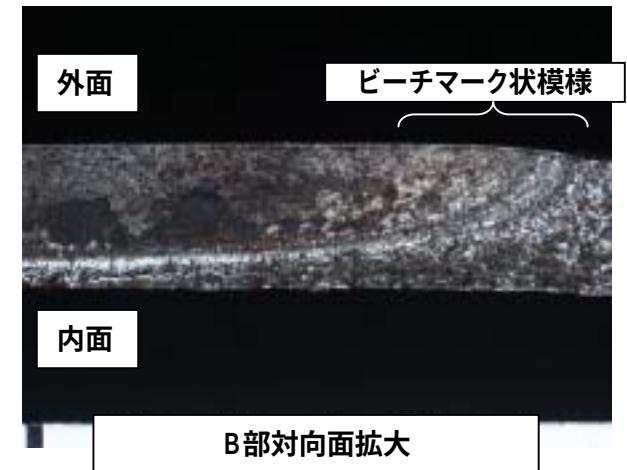
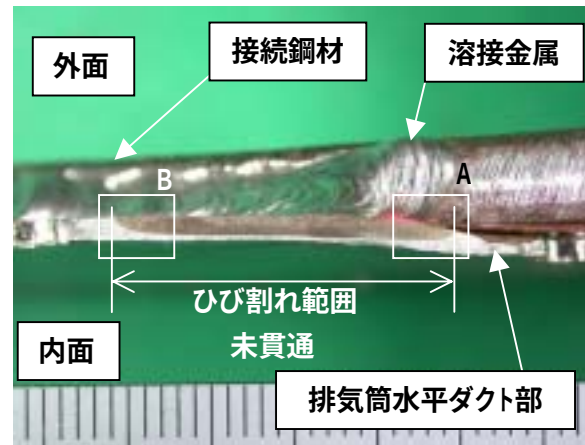
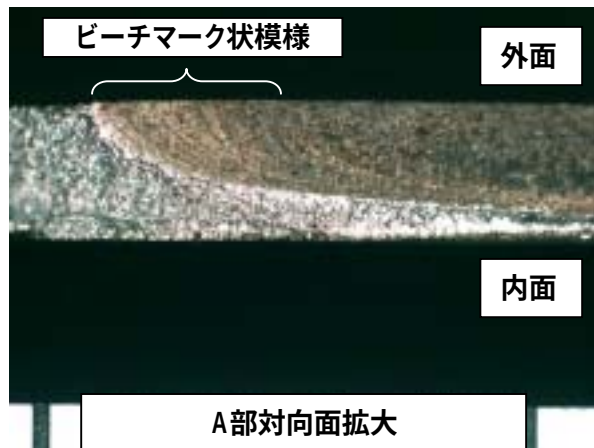
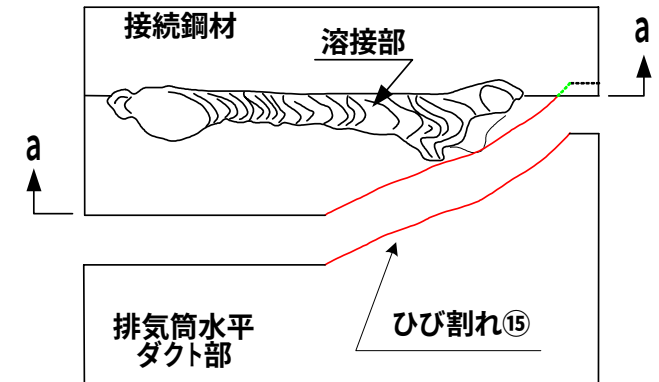
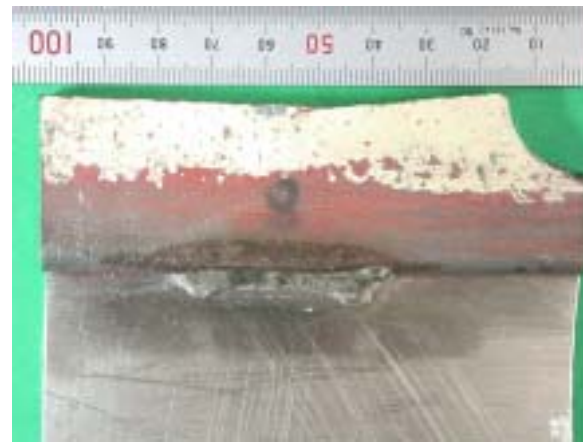
a - a 矢視



【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・ひび割れの各先端部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・破面にはビーチマーク状の模様が認められた。
- ・破面は平坦である。

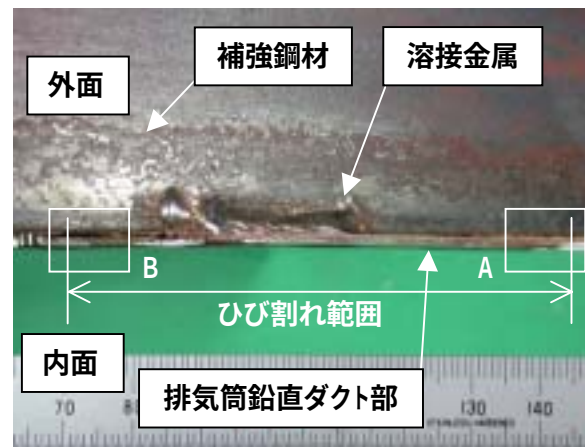
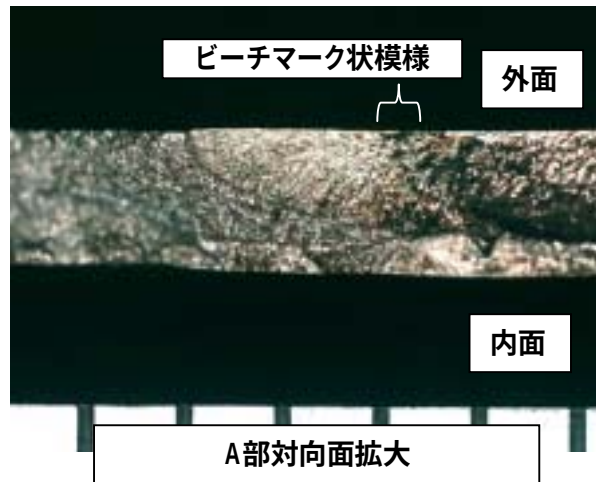
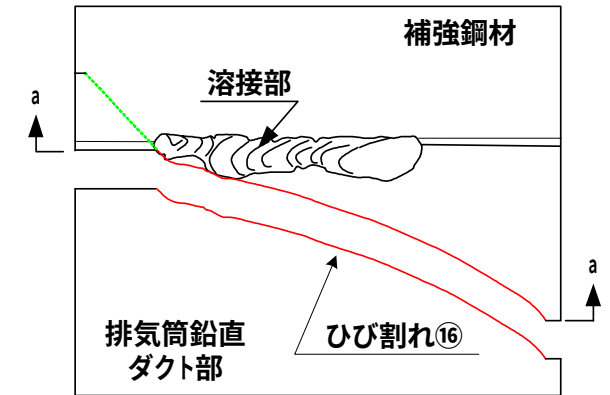
破面マクロ観察結果 (ひび割れ⑮)



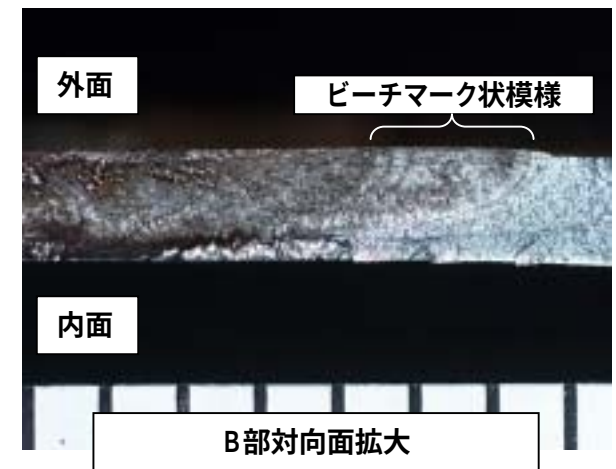
【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していない。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・ひび割れの各先端部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・破面にはビーチマーク状の模様が認められた。
- ・破面は平坦である。

破面マクロ観察結果 (ひび割れ⑬)



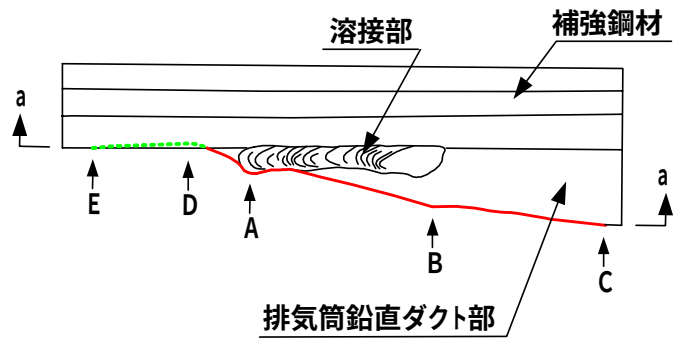
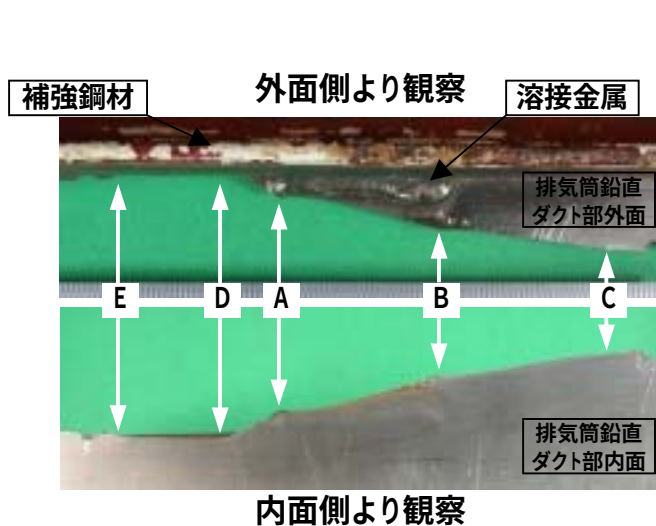
a - a 矢視



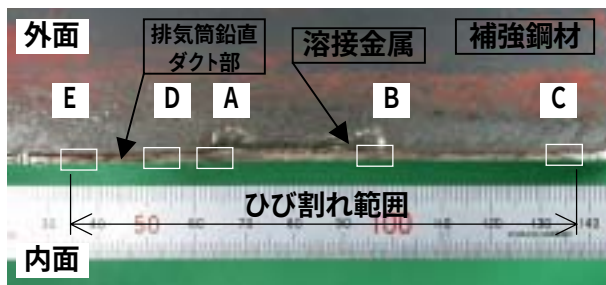
【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・ひび割れの各先端部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・破面にはビーチマーク状の様子が認められた。
- ・破面は平坦である。

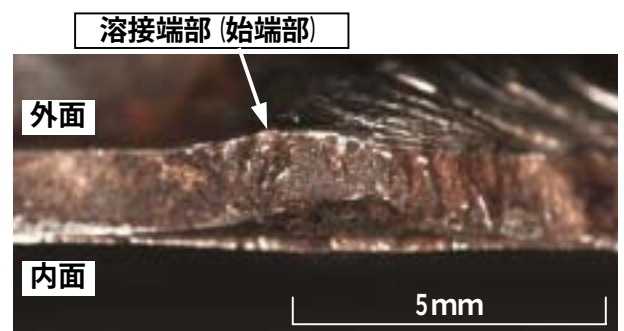
破面マクロ観察結果 (ひび割れ⑬)



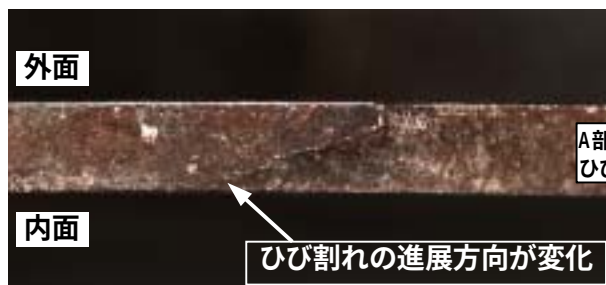
A: 溶接端部
B: 進展部1
C: 先端部1
D: 進展部2
E: 先端部2



a-a矢視



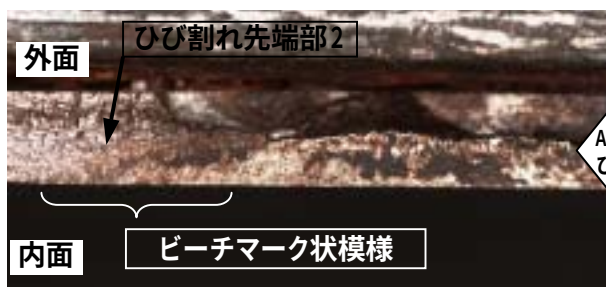
A部拡大



B部拡大



C部拡大



E部拡大

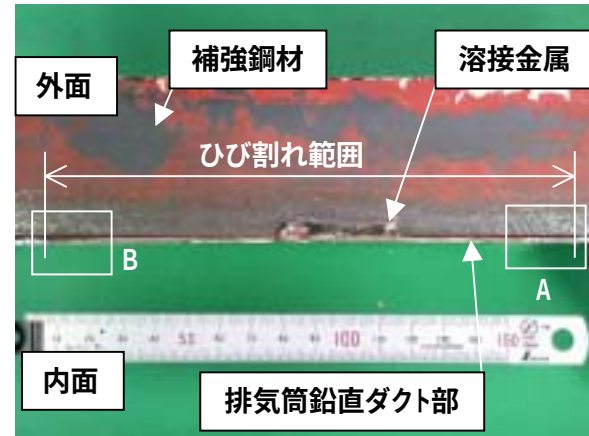
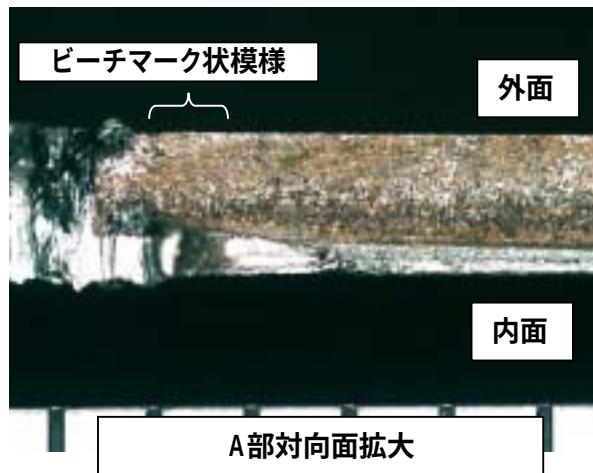
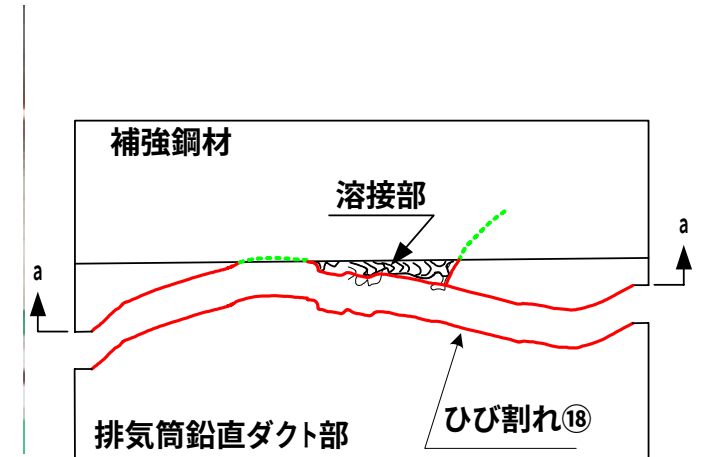
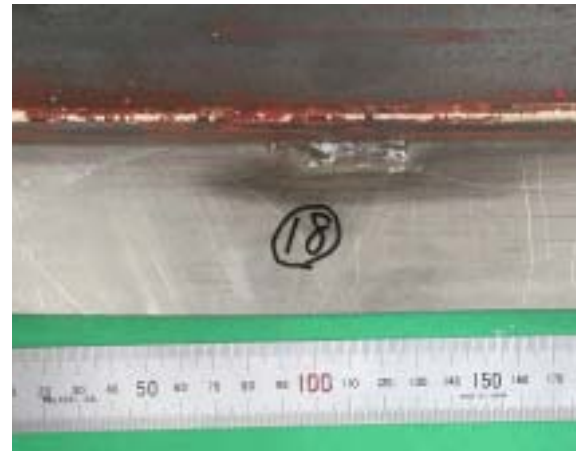


D部拡大

【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・破面は平坦であった。
- ・進展部 (両側: B, D部) には外面側が大きい半楕円形状の部位が観察されているが、それ以降の進展では、先端部 (両側: C, E部) で内面側が大きい半楕円形状の破面が観察された。
- ・先端部1, 2 (C, E部) の破面にはビーチマーク状の模様が認められた。

破面マクロ観察結果 (ひび割れ⑮)



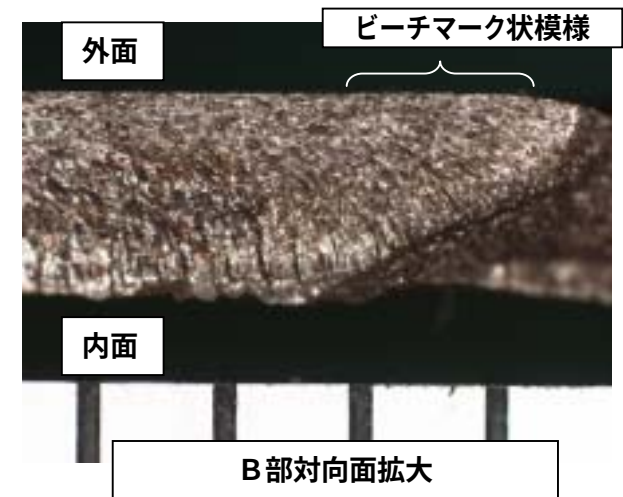
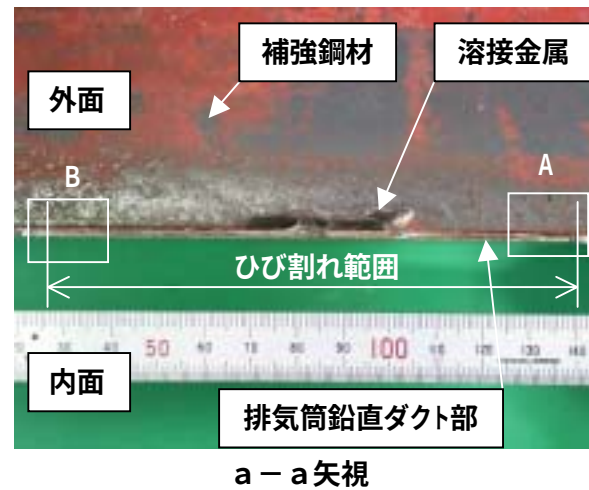
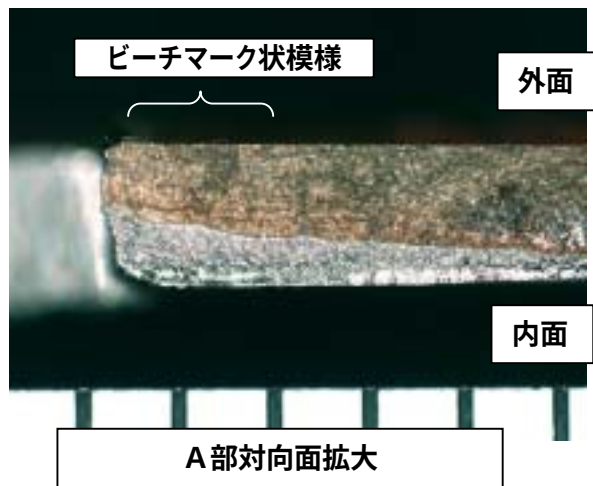
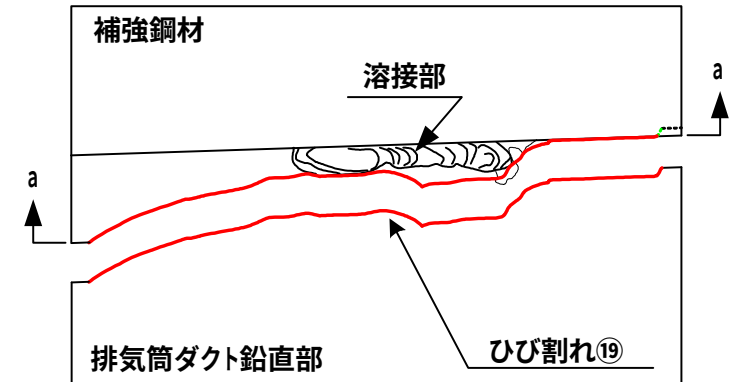
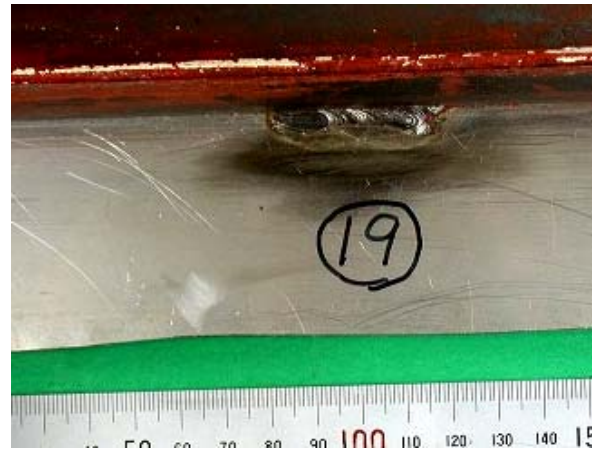
a - a 矢視



【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・ひび割れの各先端部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・破面にはビーチマーク状の模様が認められた。(腐食等の影響でやや不明瞭となっている。)
- ・破面は平坦である。

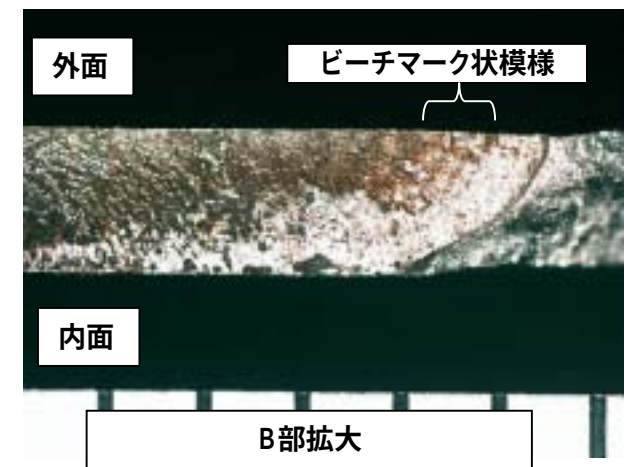
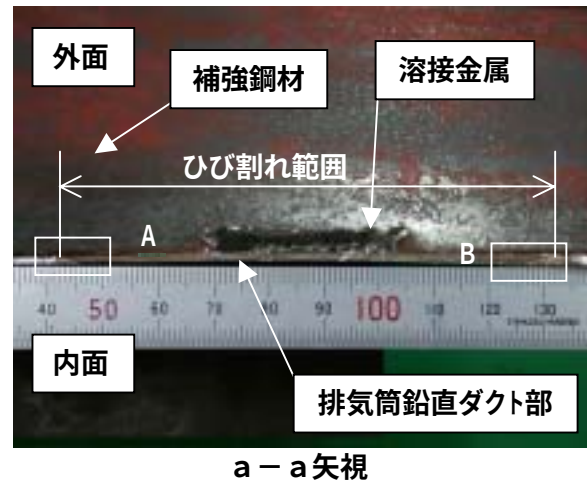
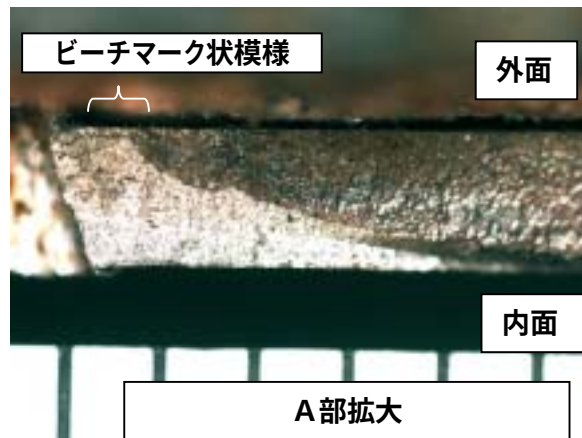
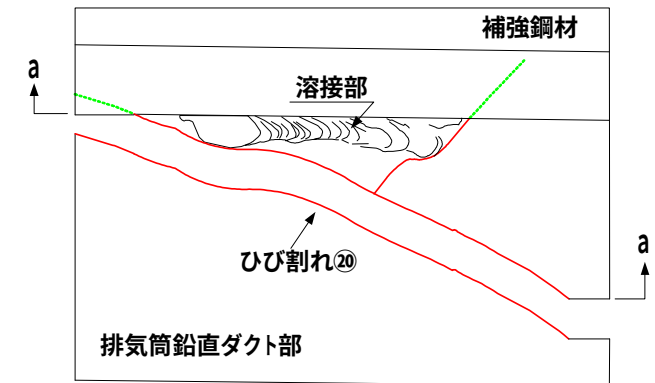
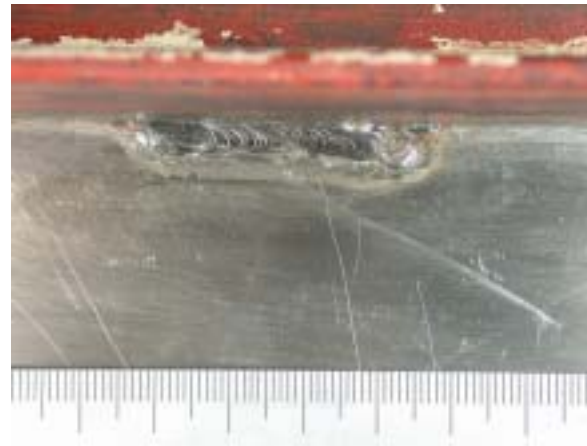
破面マクロ観察結果 (ひび割れ①⑨)



【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・ひび割れの各先端部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・破面にはビーチマーク状の模様が認められた。(腐食等の影響でやや不明瞭となっている。)
- ・破面は平坦である。

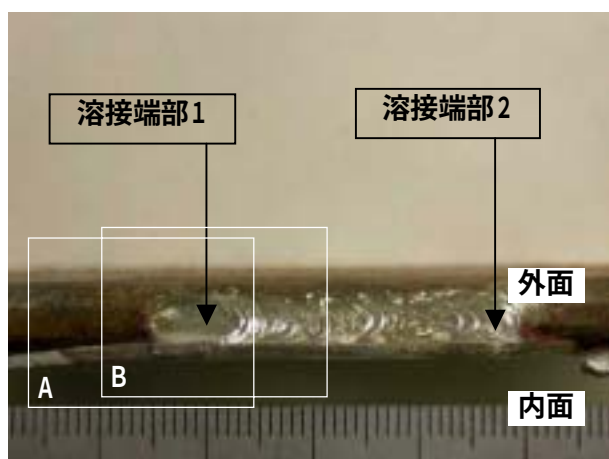
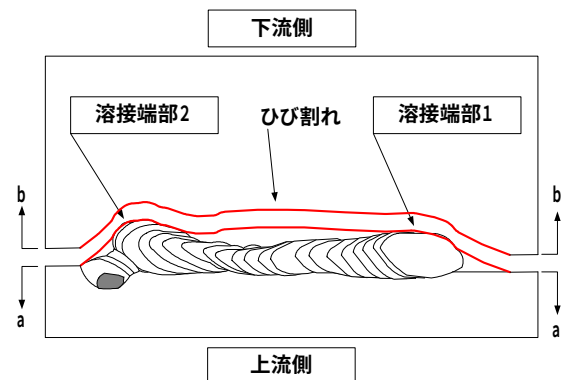
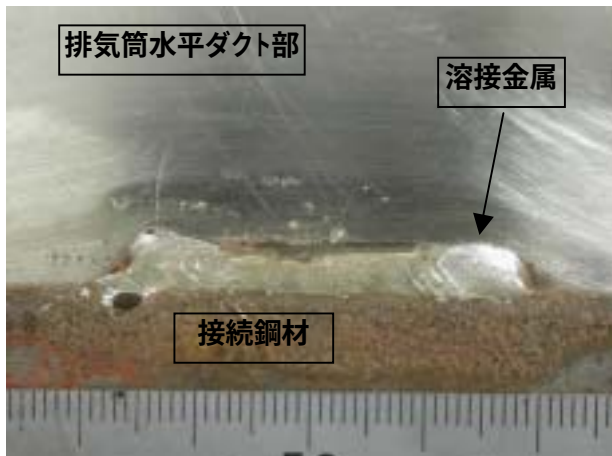
破面マクロ観察結果 (ひび割れ②)



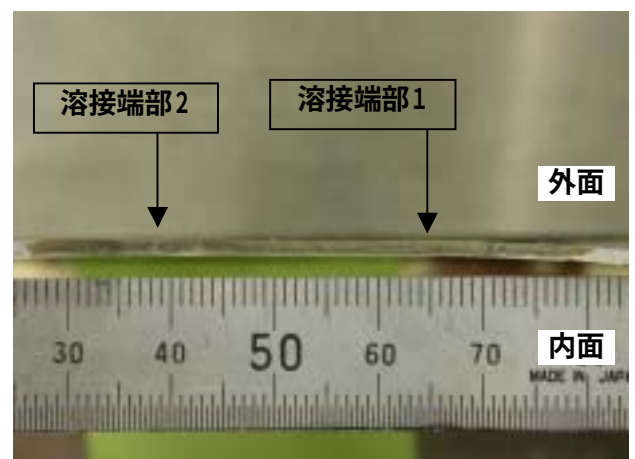
【観察結果】

- ・ひび割れは貫通していた。
- ・ひび割れは溶接端部を通過していた。
- ・ひび割れの各先端部前縁は外面側が大きい半楕円形状である。
- ・破面にはビーチマーク状の模様が認められた。(腐食等の影響でやや不明瞭となっている。)
- ・破面は平坦である。

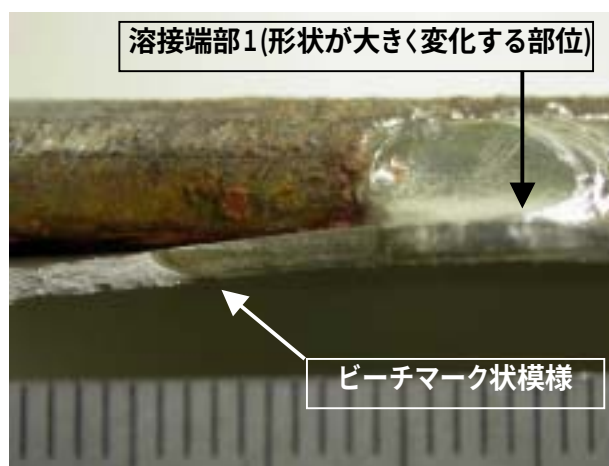
ひび割れ③②①の詳細調査結果 詳細破面マクロ観察 (ひび割れ③)



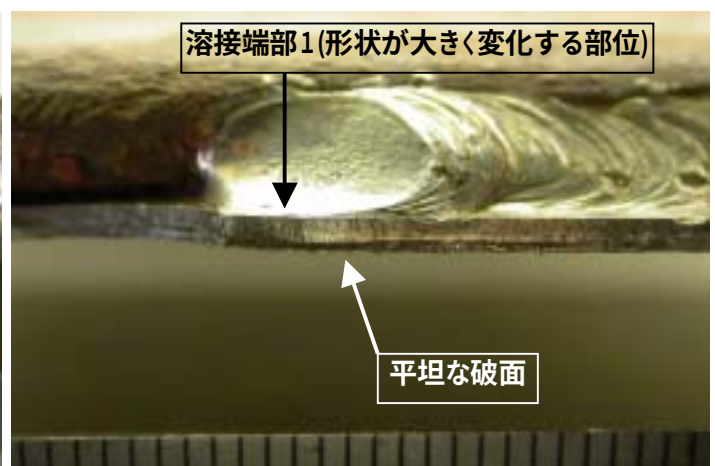
a-a矢視 (上流側)



b-b矢視 (下流側)



A部拡大

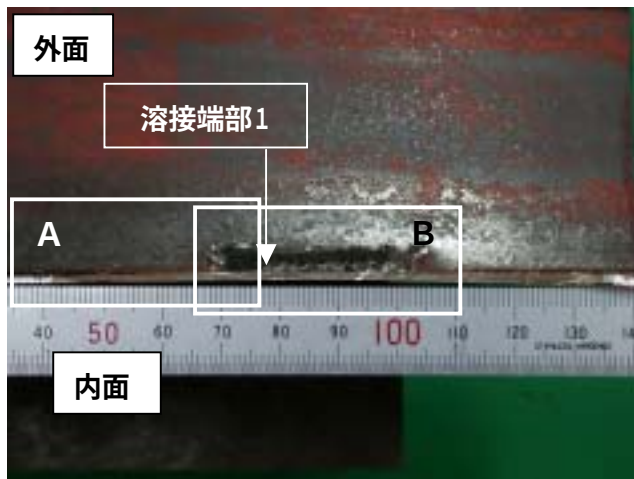
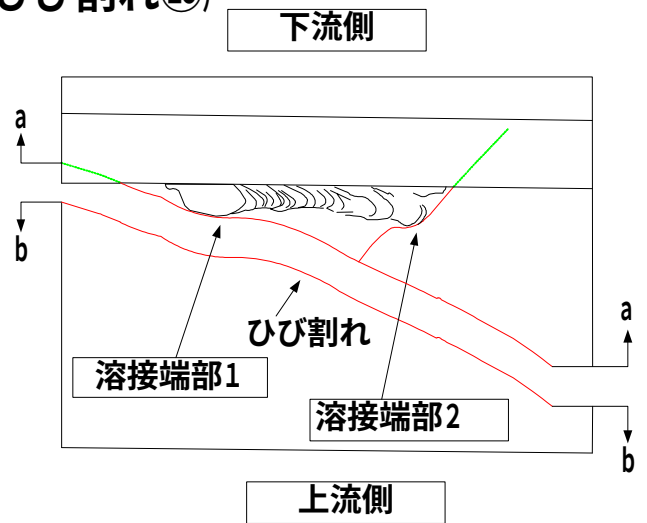
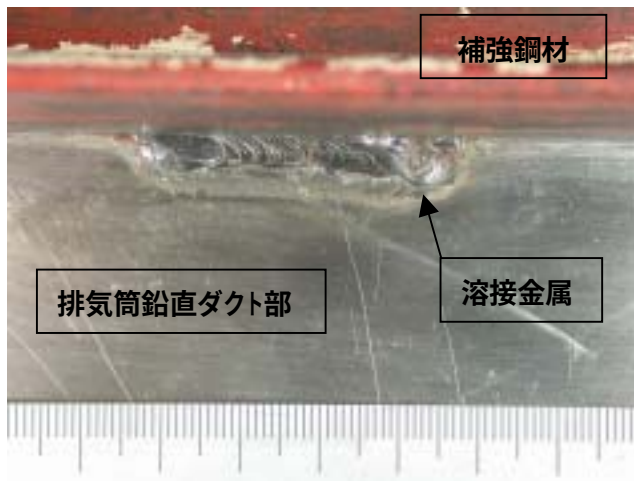


B部拡大

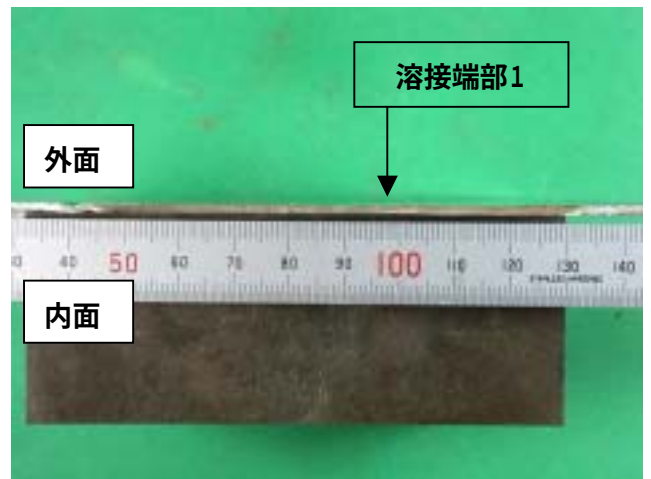
【観察結果】

・溶接端部の外表面にひび割れの起点となりうる形状変化が認められた。

ひび割れ③②①の詳細調査結果 詳細破面マクロ観察 (ひび割れ②①)



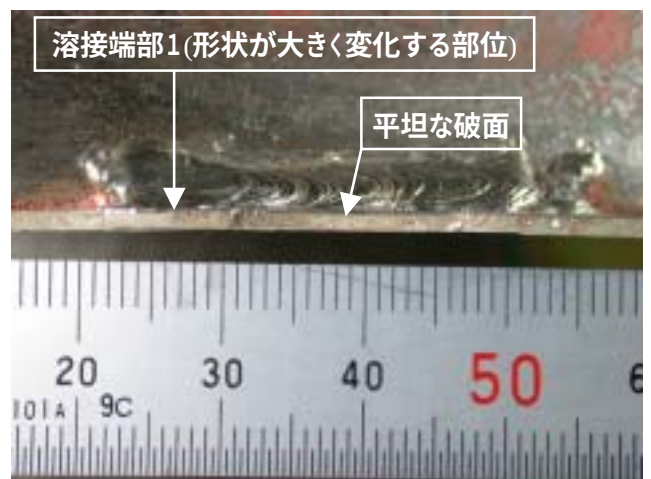
a－a矢視 (下流側)



b－b矢視 (上流側)



A部拡大



B部拡大

【観察結果】

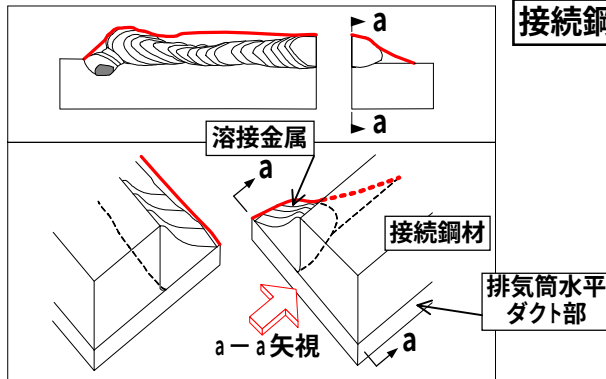
・溶接端部の外表面にひび割れの起点となりうる形状変化が認められた。

ひび割れ③②①の詳細調査結果 断面ミクロ観察 (ひび割れ③)

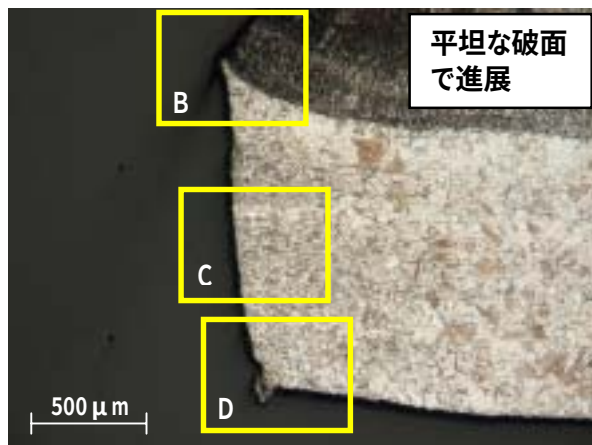
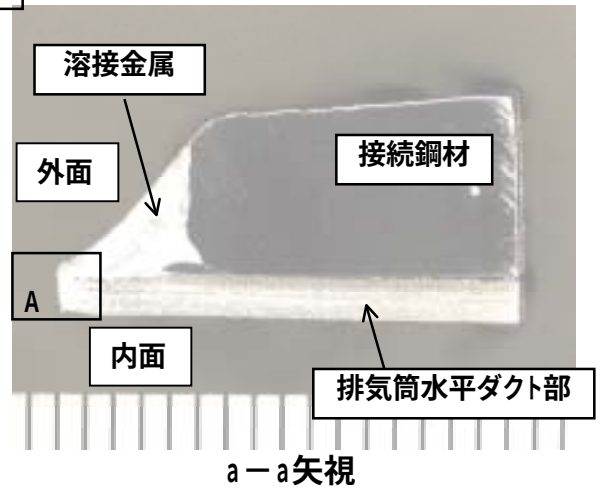
排気筒水平ダクト部



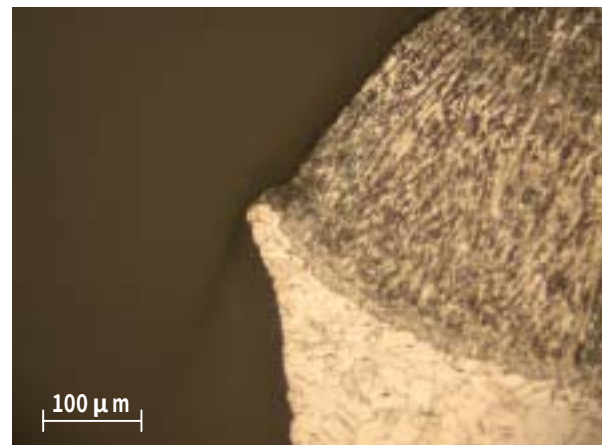
溶接金属



ひび割れ③断面ミクロ観察位置



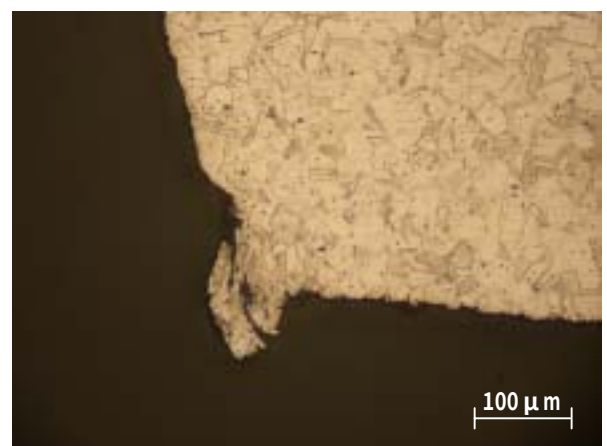
A 部



B 部



C 部

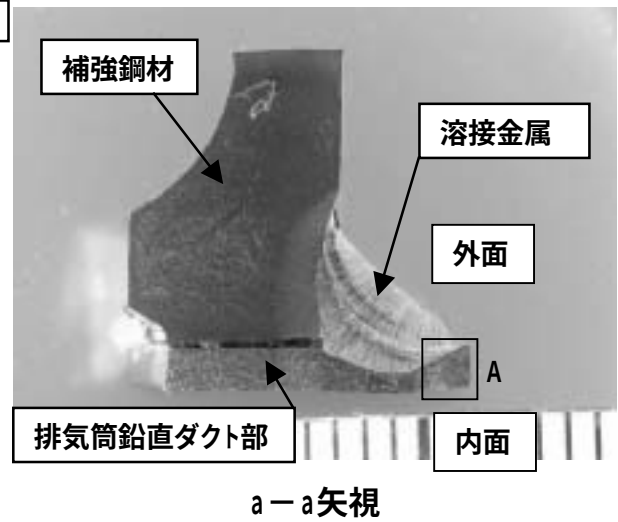
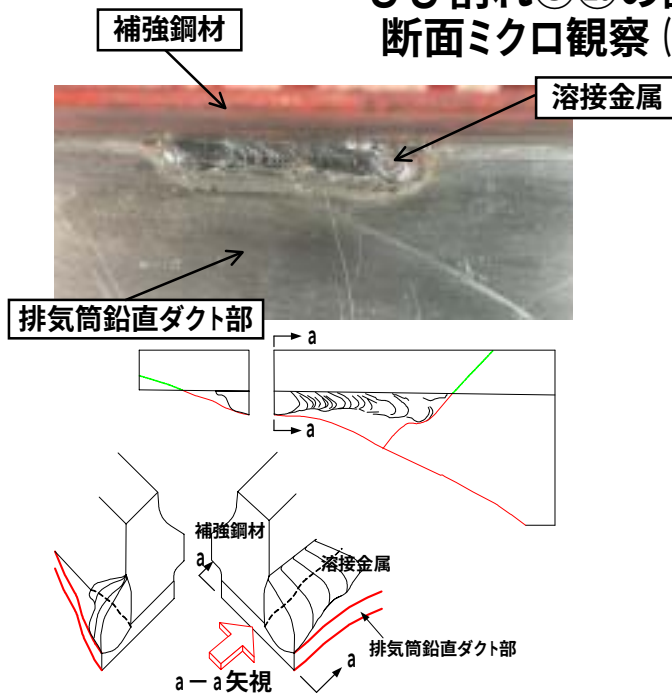


D 部

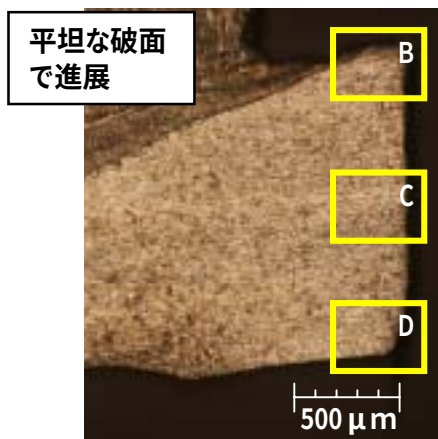
【観察結果】

- ・ひび割れは、平坦な破面で進展していた。
- ・ひび割れは、枝分かれしていない。
- ・ひび割れは、粒内割れである。
- ・ひび割れ近傍には、材料欠陥等の異常は認められなかった。

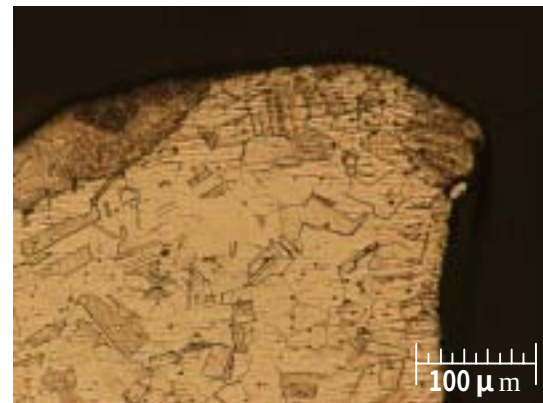
ひび割れ③②①の詳細調査結果 断面ミクロ観察 (ひび割れ②)



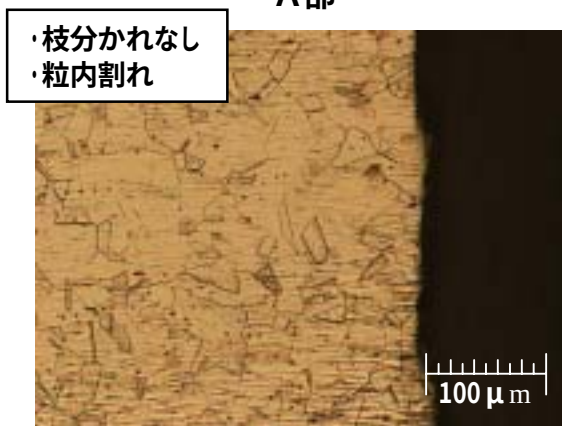
ひび割れ②断面ミクロ観察位置



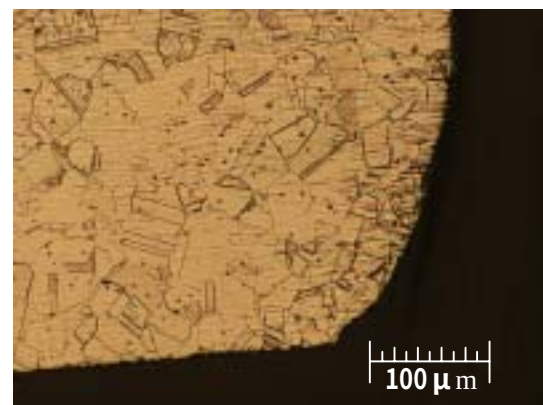
A部



B部



C部



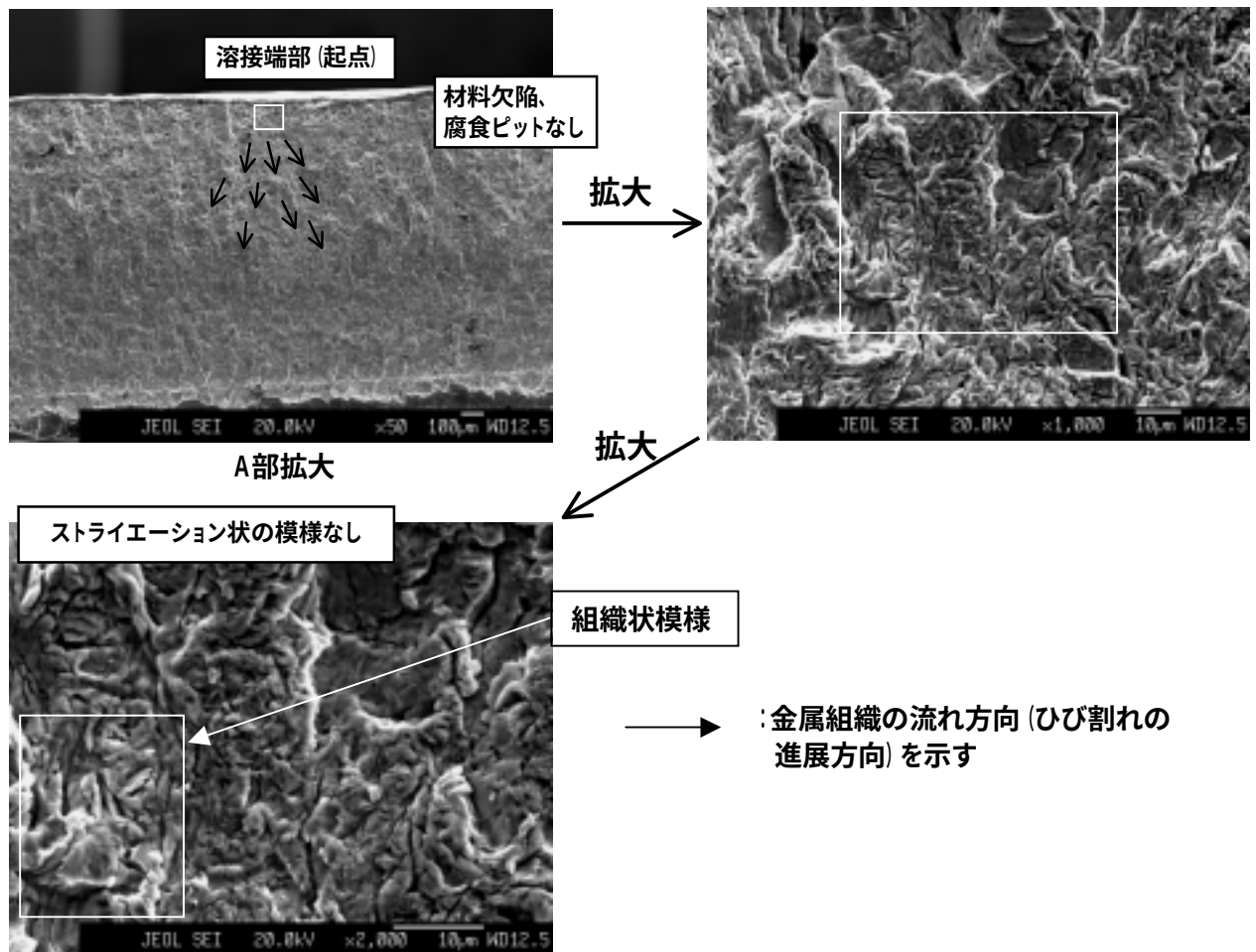
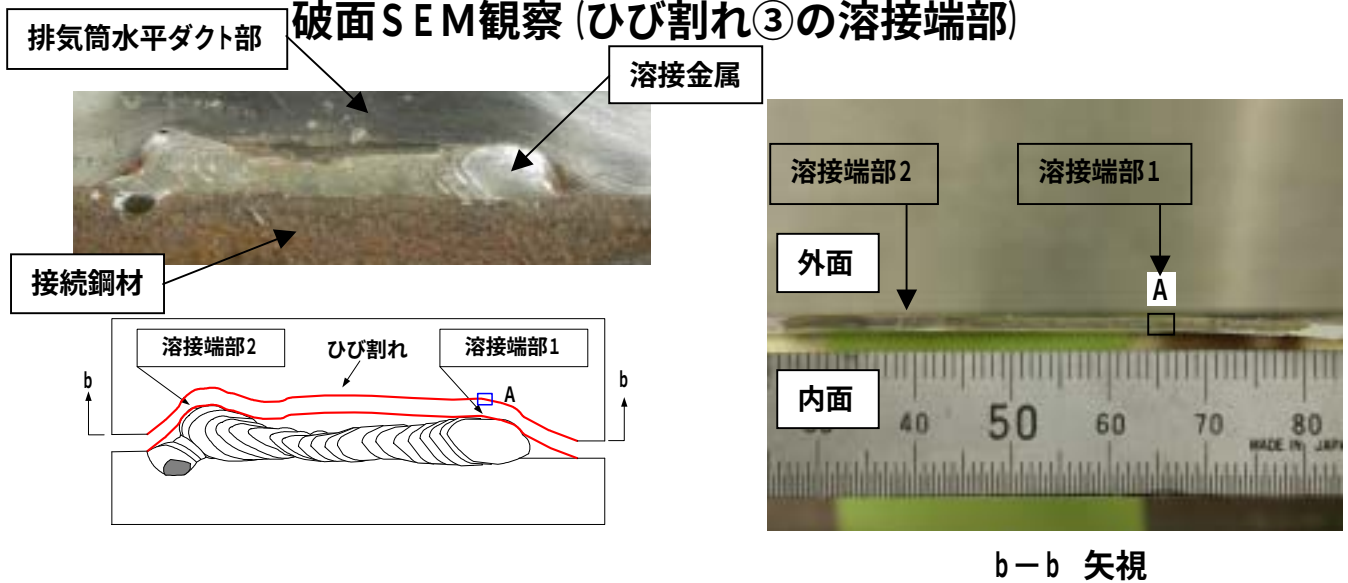
D部

【観察結果】

- ・ひび割れは、平坦な破面で進展していた。
- ・ひび割れは、枝分かれしていない。
- ・ひび割れは、粒内割れである。
- ・ひび割れ近傍には、材料欠陥等の異常は認められなかった。

ひび割れ③②①の詳細調査結果

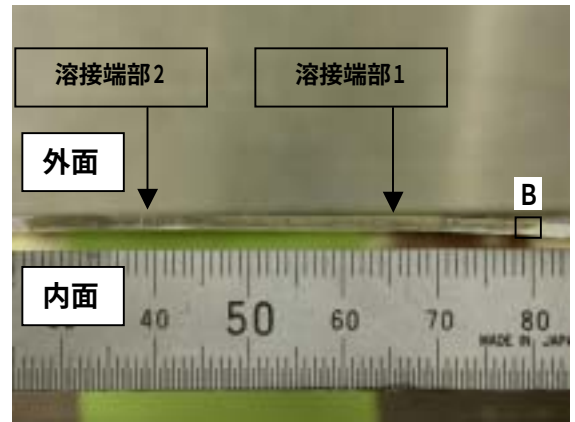
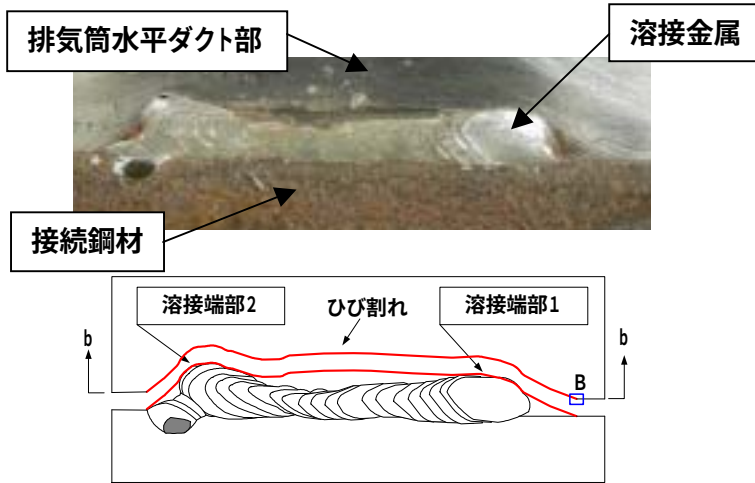
破面SEM観察(ひび割れ③の溶接端部)



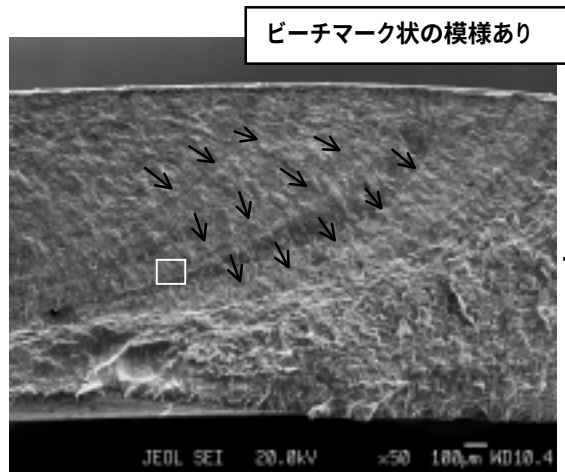
【観察結果】

- ・溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ(ひび割れの進展方向に対応)が認められた。
- ・溶接端部の外表面において、材料欠陥、腐食ピット等は認められなかった。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が認められた。
- ・ストライエーション状の模様は認められなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

ひび割れ③②①の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ③の先端近傍部)

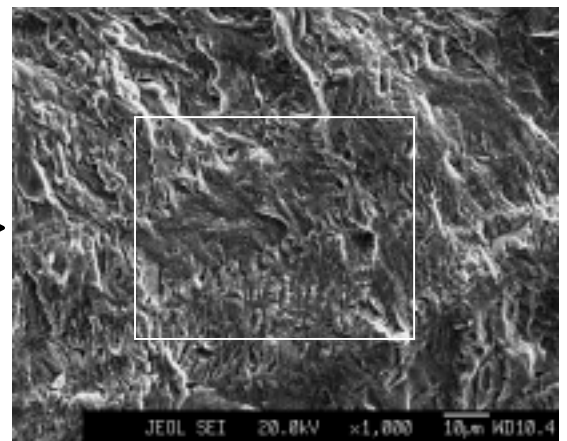


b－b 矢視

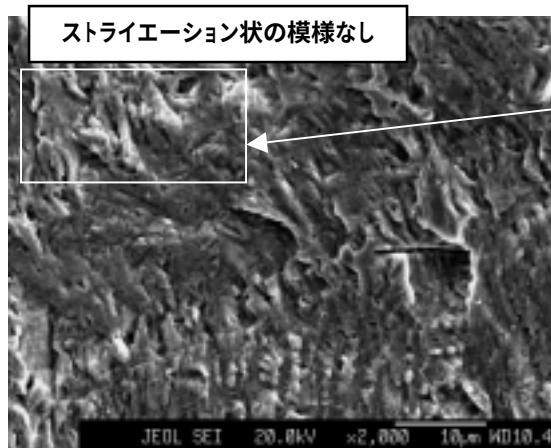


B部拡大

拡大



拡大



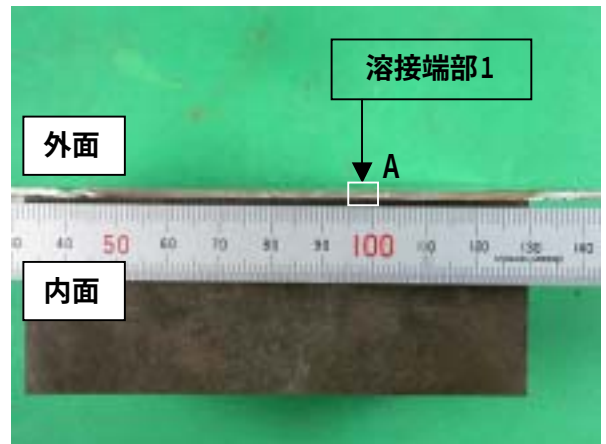
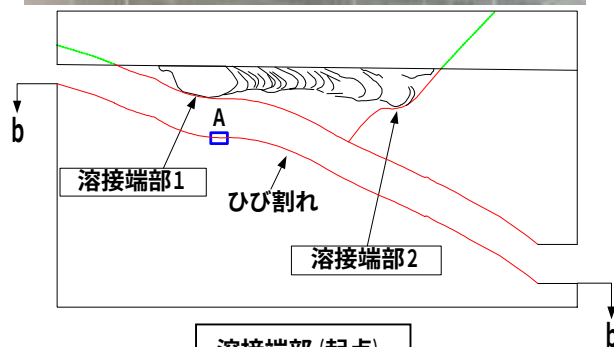
組織状模様

→ 金属組織の流れ方向(ひび割れの進展方向)を示す

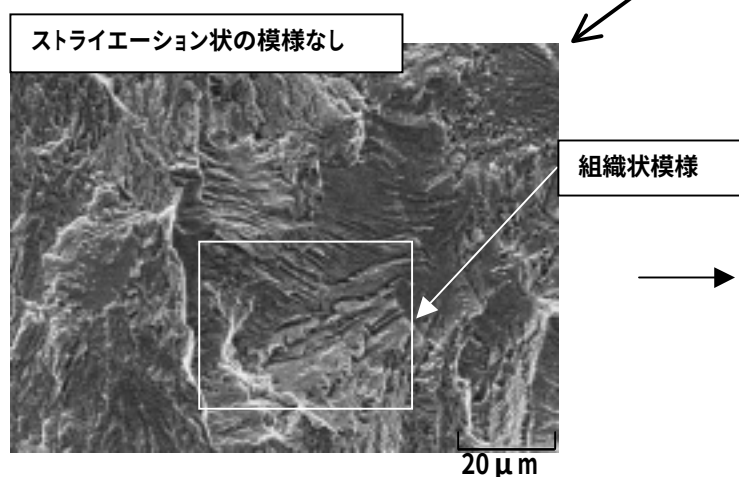
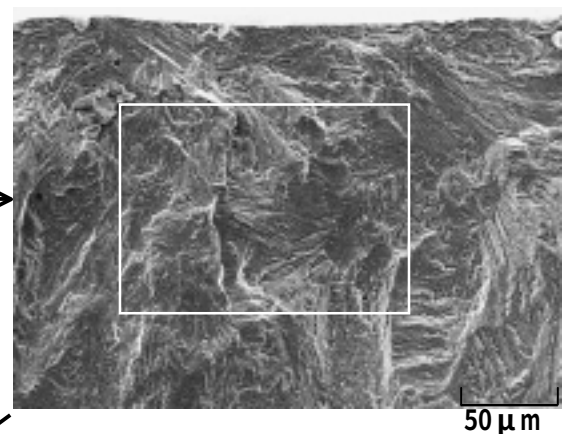
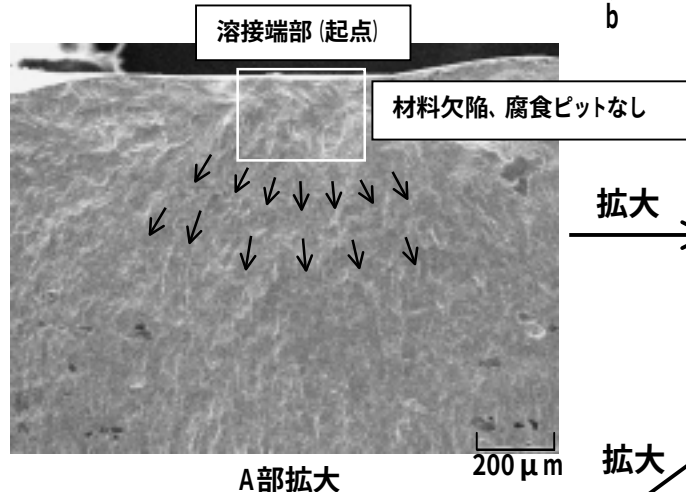
【観察結果】

- ・ひび割れの先端近傍部では、外面側からのひび割れ進展を示すビーチマーク状の模様が観察された。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が認められた。
- ・ストライエーション状の模様は認められなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

ひび割れ③②①の詳細調査結果 破面SEM観察 (ひび割れ②①の溶接端部)



b－b 矢視

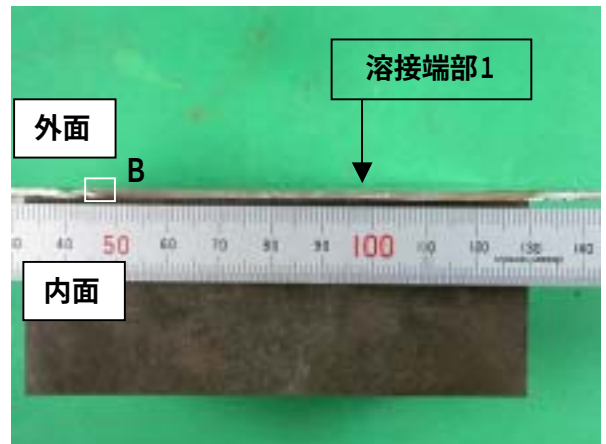
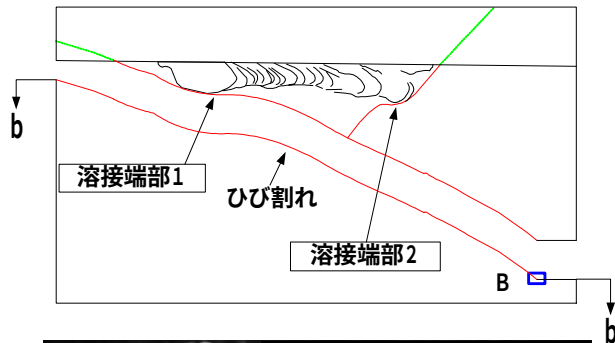


→ 金属組織の流れ方向 (ひび割れの進展方向) を示す

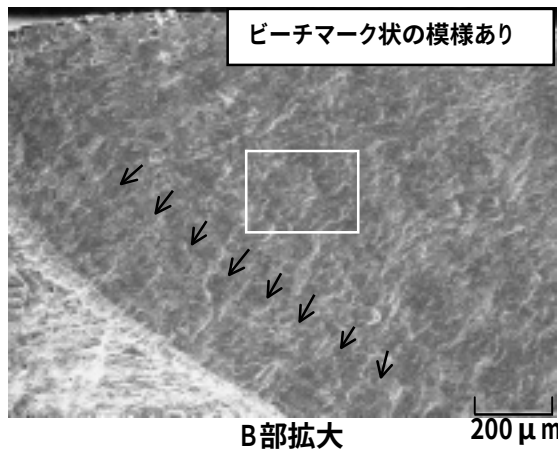
【観察結果】

- ・溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ (ひび割れの進展方向に対応) が認められた。
- ・溶接端部の外表面において、材料欠陥、腐食ピット等は認められなかった。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が認められた。
- ・ストライエーション状の模様は認められなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

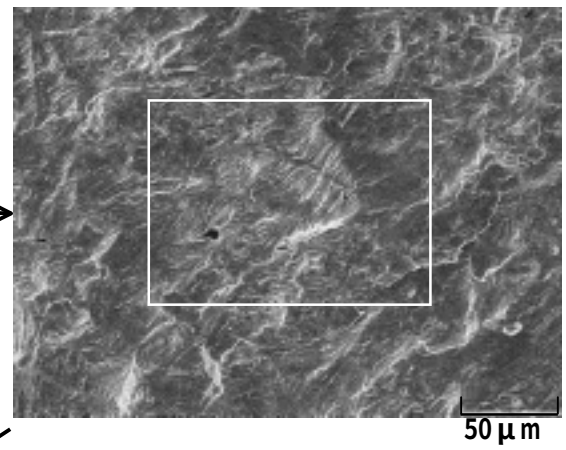
ひび割れ③②①の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ②①の先端近傍部)



b－b 矢視



拡大



拡大

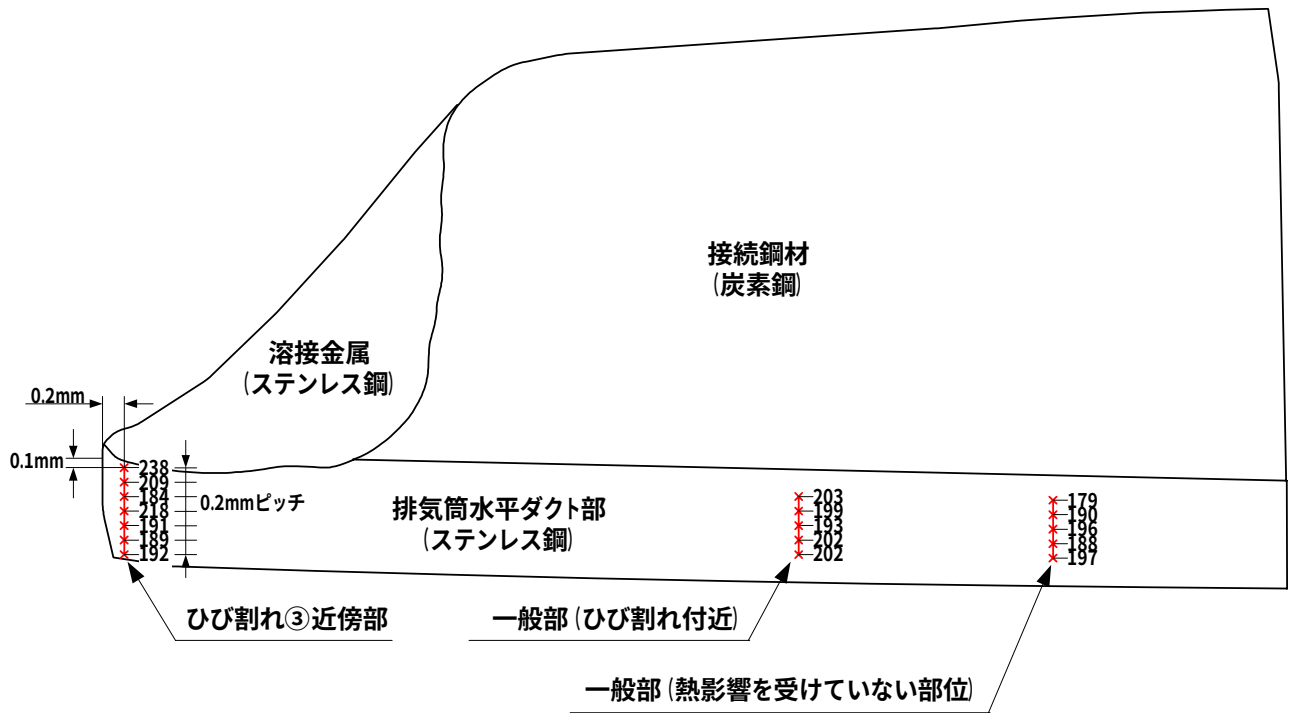


→ 金属組織の流れ方向(ひび割れの進展方向)を示す

【観察結果】

- ・ひび割れの先端近傍部では、外面側からのき裂進展を示すビーチマーク状の模様が観察された。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が認められた。
- ・ストライエーション状の模様は認められなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

ひび割れ③②①の詳細調査結果
硬度測定 (ひび割れ③)

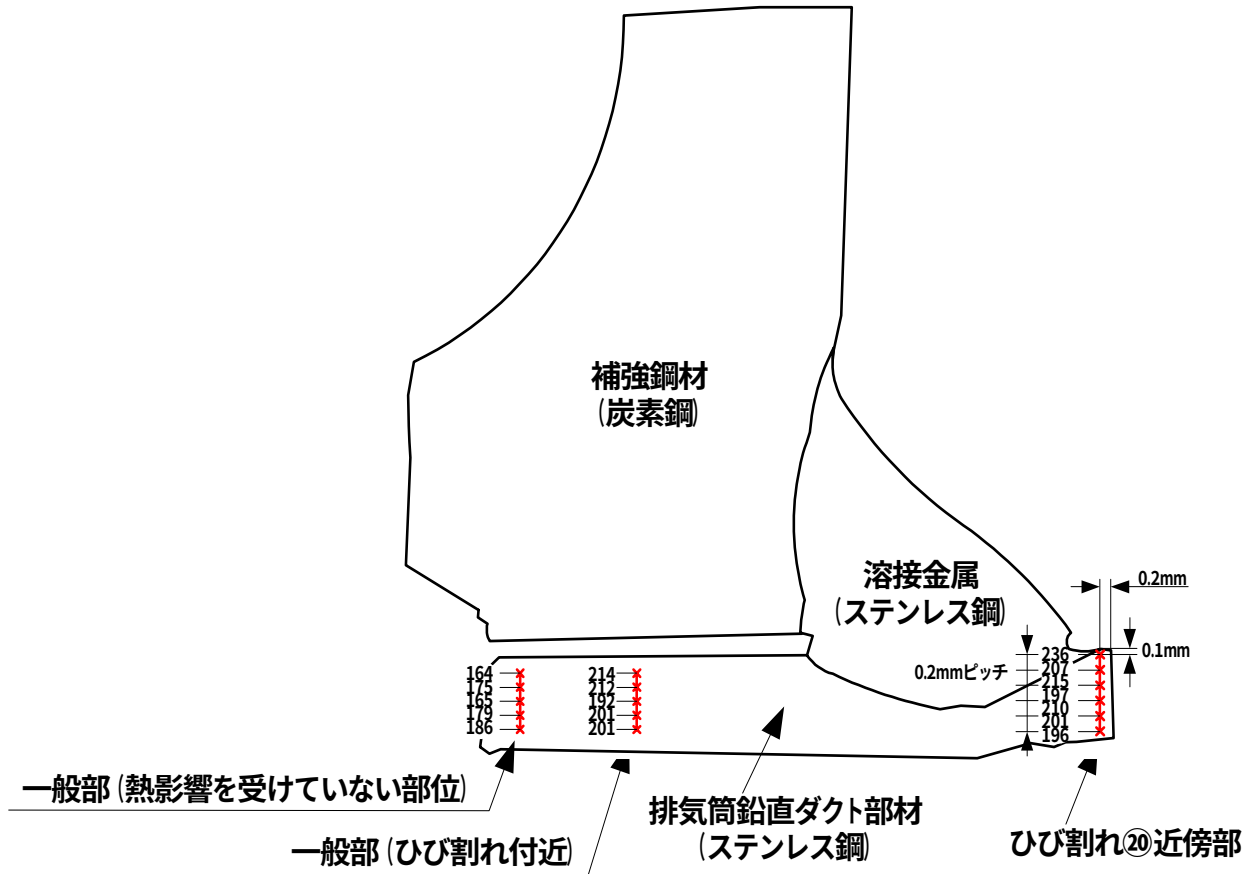


		硬度 (ビッカース換算)	
		平均	最高
測定値	ひび割れ③近傍部	203	238
	一般部 (ひび割れ付近)	200	203
	一般部 (熱影響を受けていない部位)	190	197
参考	ステンレス鋼 SUS304 規格値	—	200

[測定結果]

- ・ひび割れ付近は熱影響を受けていない一般部に比べて硬度が高い。
- ・ひび割れ近傍部は外表面付近が最も硬度が高い。

ひび割れ③②①の詳細調査結果 硬度測定 (ひび割れ②①)



		硬度 (ビッカース換算)	
		平均	最高
測定値	ひび割れ②①近傍部	209	236
	一般部 (ひび割れ付近)	204	214
	一般部 (熱影響を受けていない部位)	174	186
参考	ステンレス鋼 SUS304 規格値	—	200

[測定結果]

- ・ひび割れ付近は熱影響を受けていない一般部に比べて硬度が高い。
- ・ひび割れ近傍部は外表面付近が最も硬度が高い。

ひび割れ③②①の詳細調査結果
E P M Aによる分析 (ひび割れ③、②①の破面元素分析)

[単位:重量%]

	C l	Na	Mg	Ca	P	S	S i	その他
ひび割れ③	0.20	3.04	2.14	0.53	0.75	0.72	2.15	90.47
ひび割れ②①	0.28	3.16	1.59	0.16	0.48	0.56	1.89	91.88

(参考)

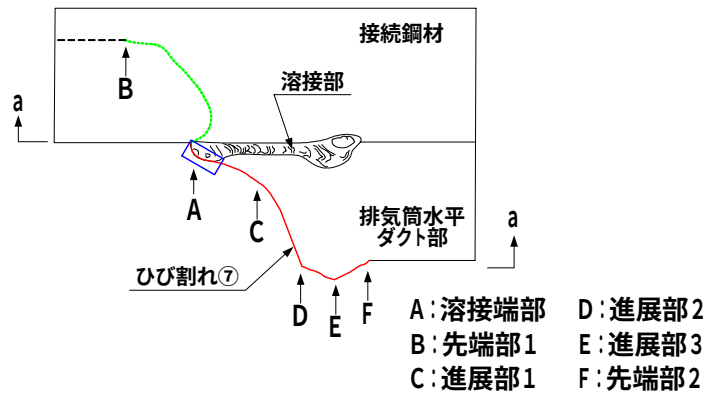
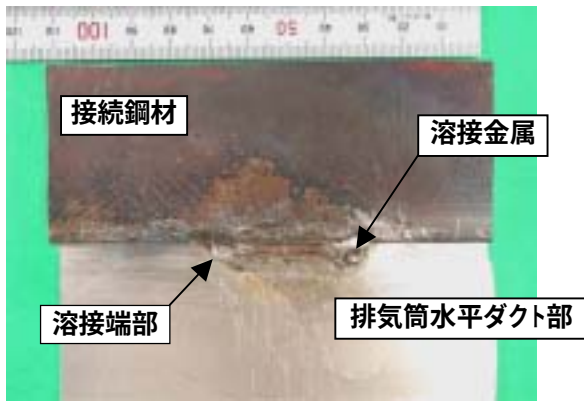
[単位:重量%]

	C l	Na	Mg	Ca	P	S	S i	その他
一般部 (ステンレス鋼)	0.21	2.04	1.37	0.07	0.64	0.63	1.37	93.69

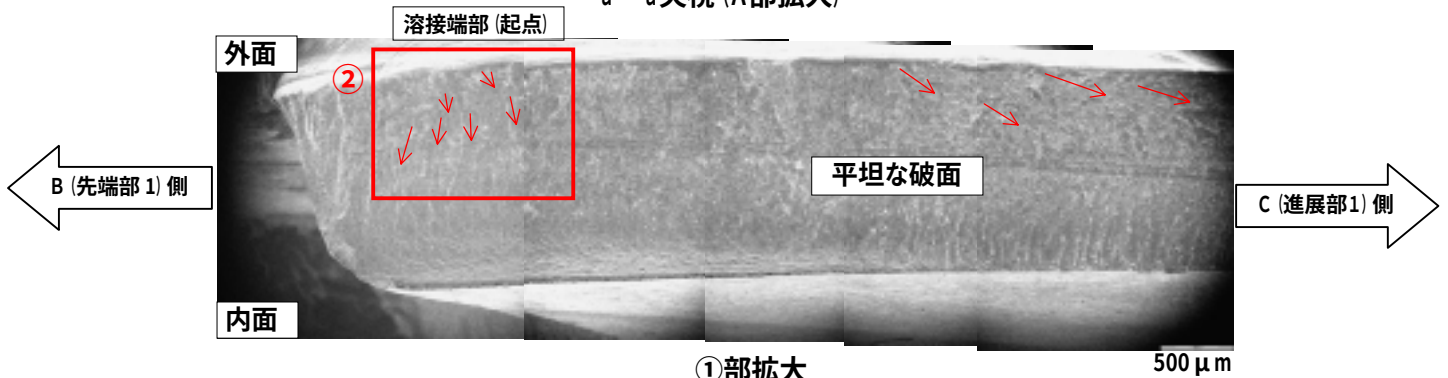
【分析結果】

ひび割れ③、②①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一般部とほぼ同等であることが確認された。

ひび割れ⑦⑧⑩⑪の詳細調査結果 破面SEM観察 (ひび割れ⑦溶接端部)

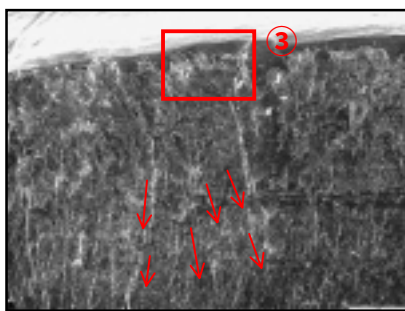


a－a矢視 (A部拡大)



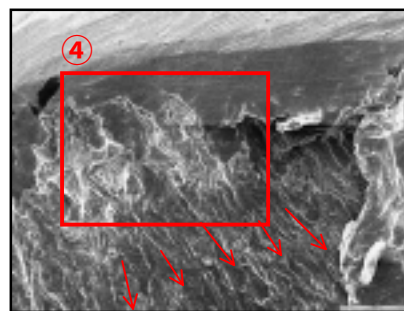
①部拡大

500 μm



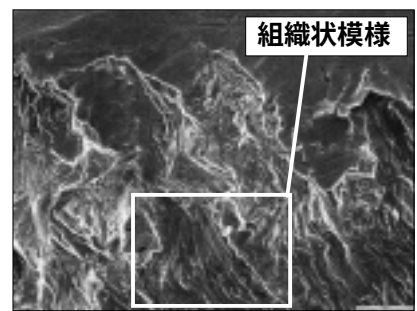
②部拡大

200 μm



③部拡大

50 μm



④部拡大

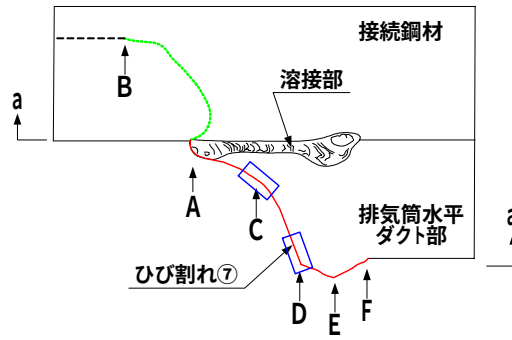
20 μm

→ : 金属組織の流れ方向 (ひび割れの進展方向) を示す。

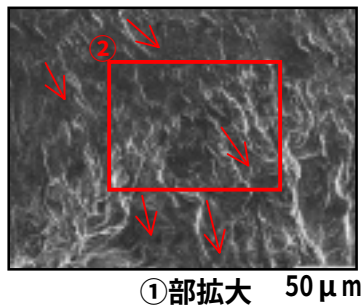
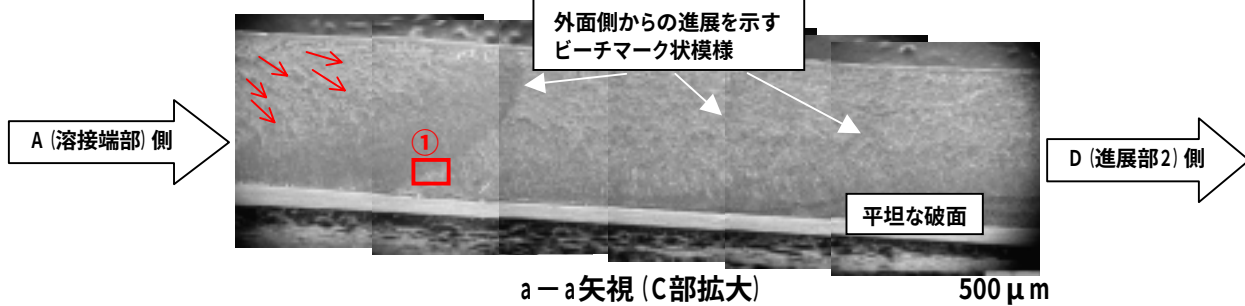
【観察結果】

- ・溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ (ひび割れの進展方向に対応) が認められた。
- ・破面は平坦であり、外面側からの進展を示す金属組織の流れが観察された。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。
- ・ストライエーション状の模様は観察されなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

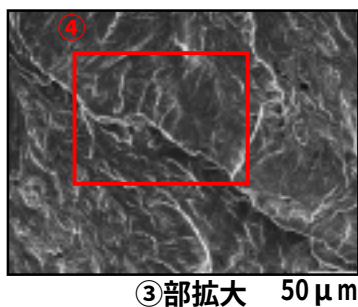
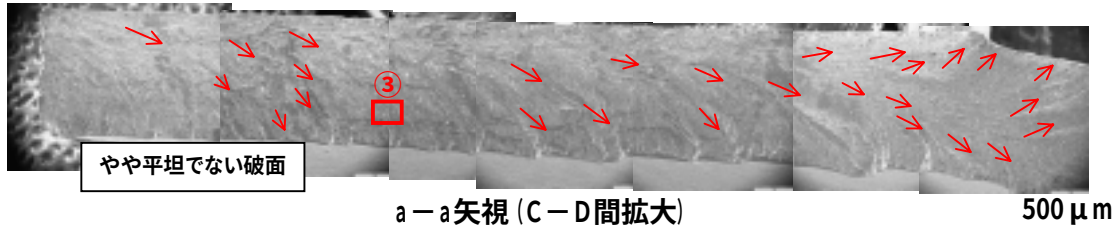
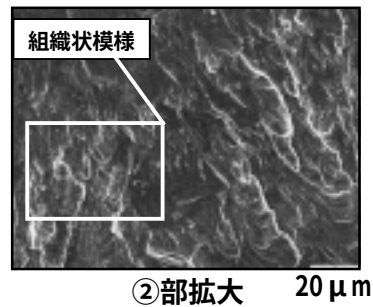
ひび割れ⑦⑧⑩⑬の詳細調査結果 破面SEM観察 (ひび割れ⑦進展部 (その1))



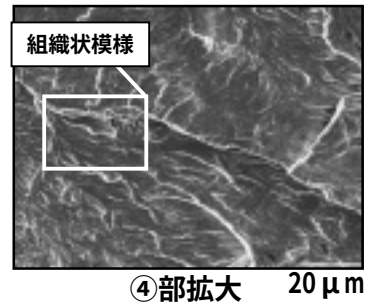
A: 溶接端部
B: 先端部1
C: 進展部1
D: 進展部2
E: 進展部3
F: 先端部2



拡大→



拡大→

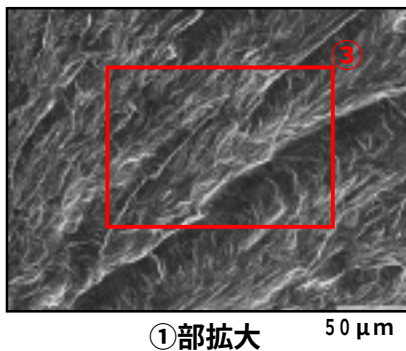
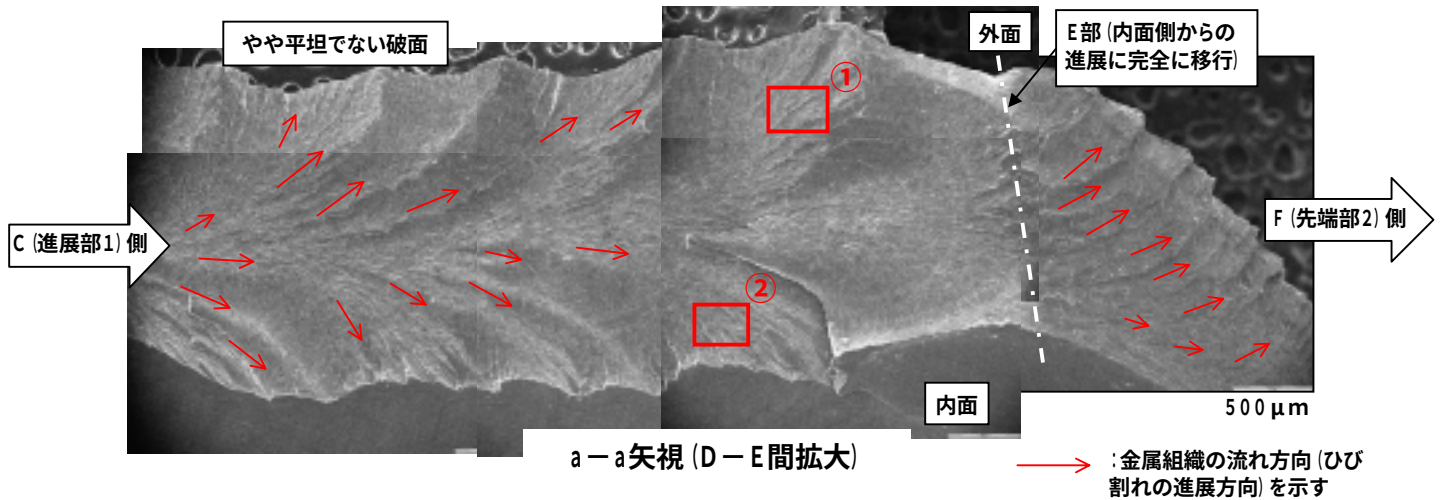
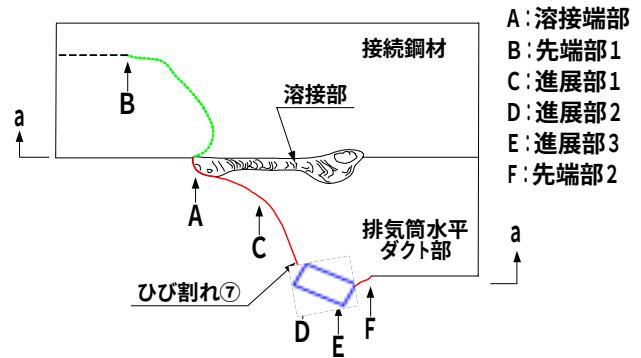
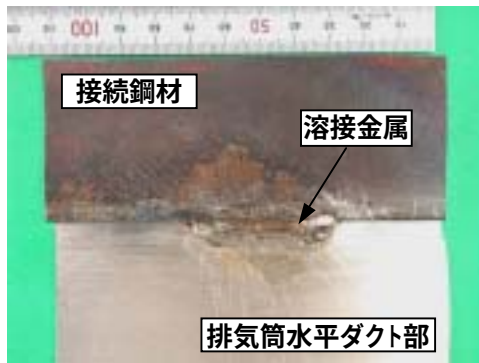


→ : 金属組織の流れ方向 (ひび割れの進展方向) を示す

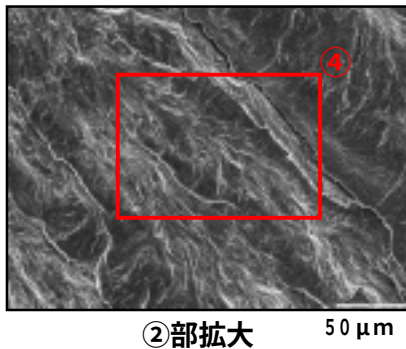
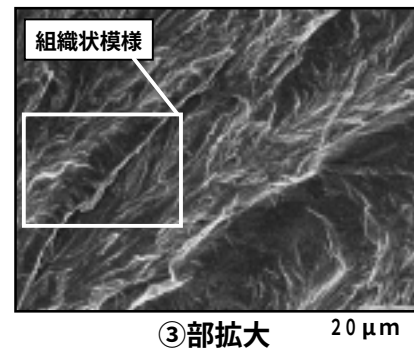
【観察結果】

- ★進展部1 (C部) は平坦な破面であり、外面側からの進展を示すビーチマーク状の模様が観察された。
- ★進展部 (C-D間) では、ひび割れが外面側から進展後、外面および内面側からの進展が競合する部位に移行している。
- ★ひび割れ貫通後の進展において、溶接端部の外表面を起点とした進展から、内面側からの進展に移行する部位 (C-D間) に、応力状態が変化した時に観察されるやや平坦でない破面が観察された。
- ★いずれの破面も粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。

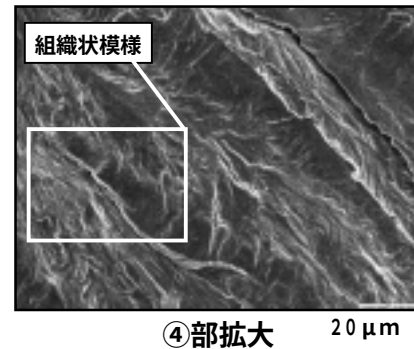
ひび割れ⑦⑧⑩⑪の詳細調査結果 破面SEM観察 (ひび割れ⑦進展部 (その2))



拡大→



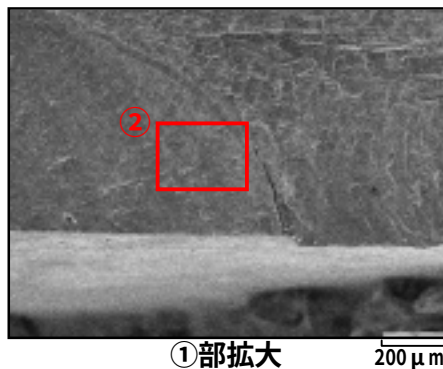
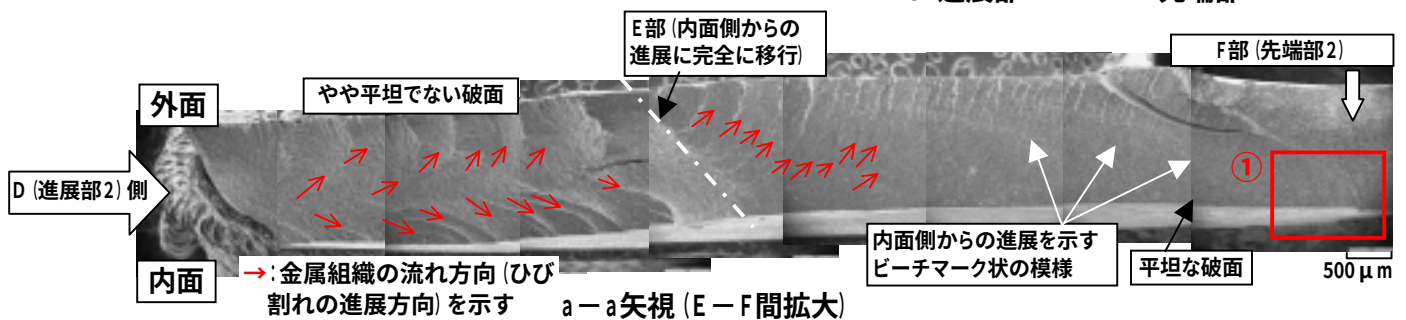
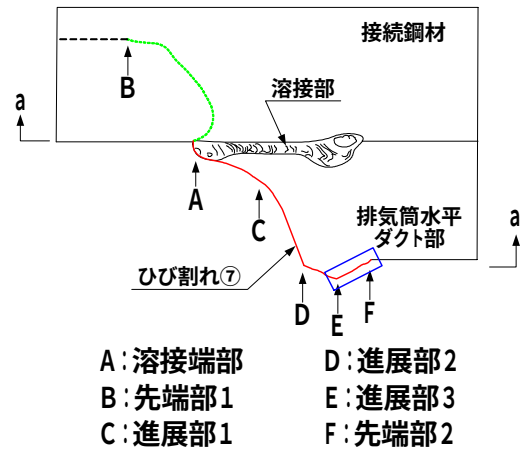
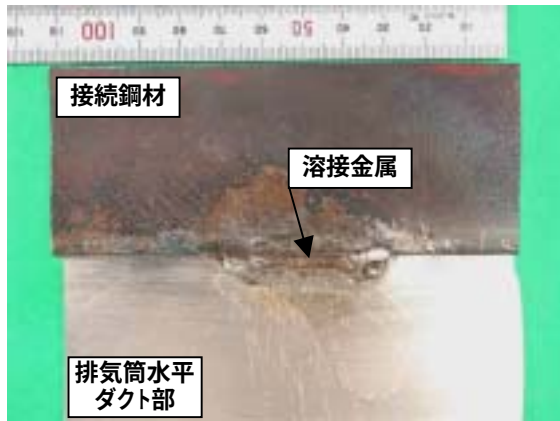
拡大→



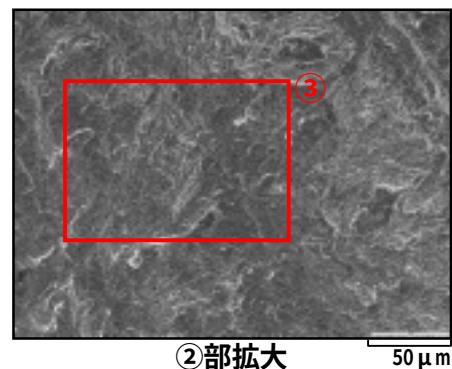
【観察結果】

- ★外面側からの進展と内面側からの進展が競合している部位 (D-E間) が観察された。
- ★右端 (F部側: 先端部2) に向かって、内面側からの進展に完全に移行する部位が観察された。
- ★ひび割れ貫通後の進展において、溶接端部の外表面を起点とした進展から、内面側からの進展に完全に移行する部位 (D-E間) に、応力状態が変化した時に観察されるやや平坦でない破面 (ファクトリーーフ状の破面) が観察された。
- ★破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。

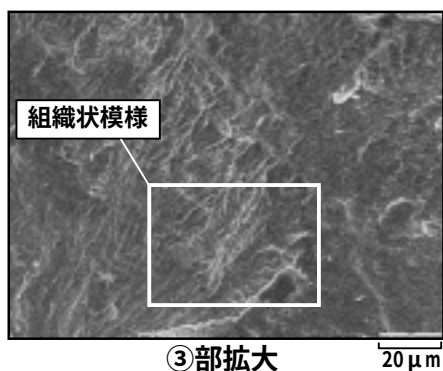
ひび割れ⑦⑧⑩⑪の詳細調査結果 破面SEM観察 (ひび割れ⑦の先端部)



拡大



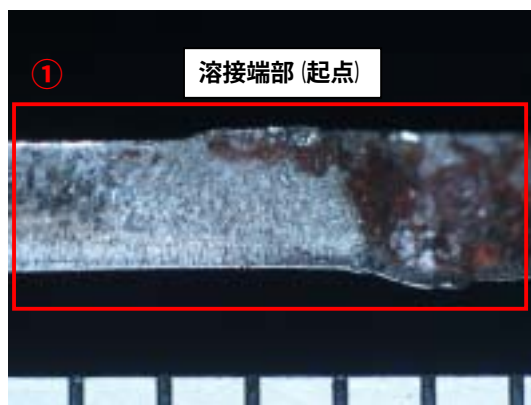
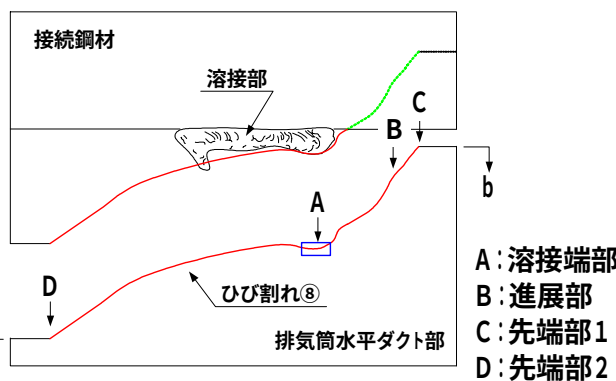
拡大



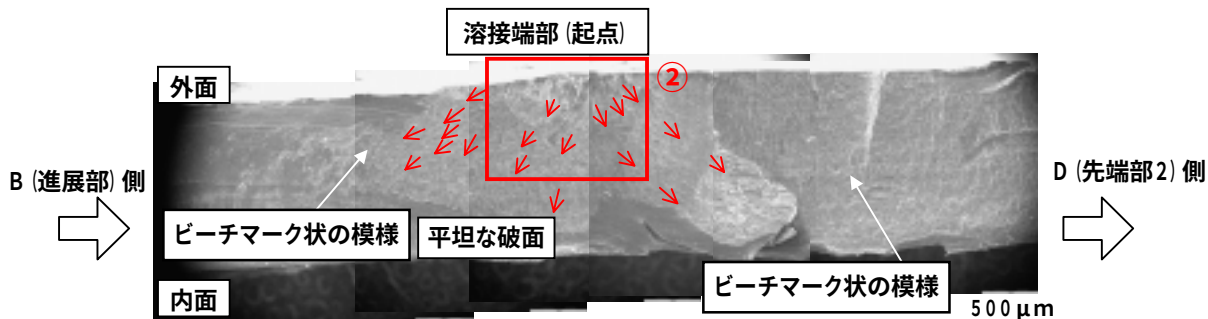
【観察結果】

- ★内外面への進展が競合している部位 (D-E間) から内面側からの進展に完全に移行していた。
- ★ひび割れ貫通後の進展において、溶接端部の外表面を起点とした進展から、内面側からの進展に完全に移行する部位 (D-E間) に、応力状態が変化した時に観察されるやや平坦でない破面が観察された。
- ★先端部2 (F部) 周辺は平坦な破面であり、内面側からの進展を示すピーチマーク状の模様が観察された。
- ★破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労に特有の組織状模様が観察された。

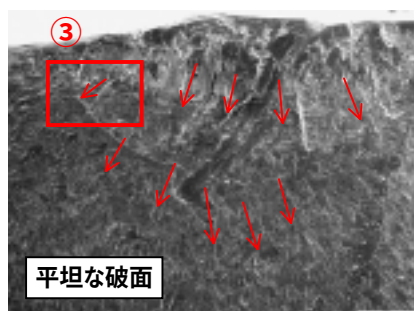
ひび割れ⑦⑧⑩⑪の詳細調査結果 破面SEM観察 (ひび割れ⑧の溶接端部)



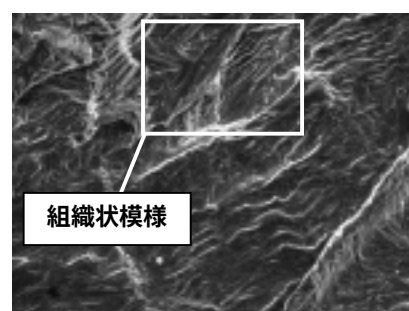
b－b矢視 (A部拡大)



①部拡大 → : 金属組織の流れ方向 (ひび割れの進展方向) を示す



②部拡大

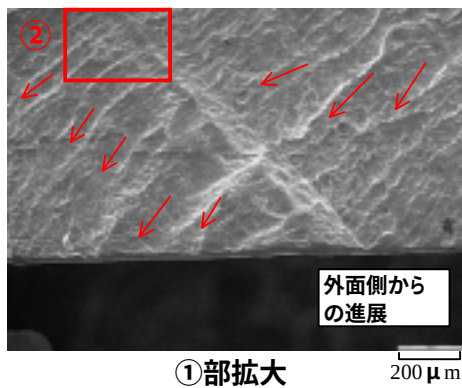
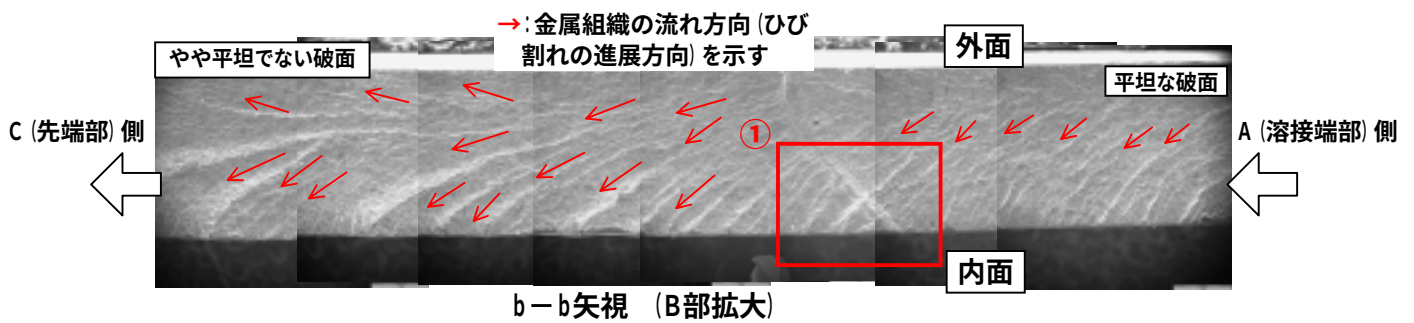
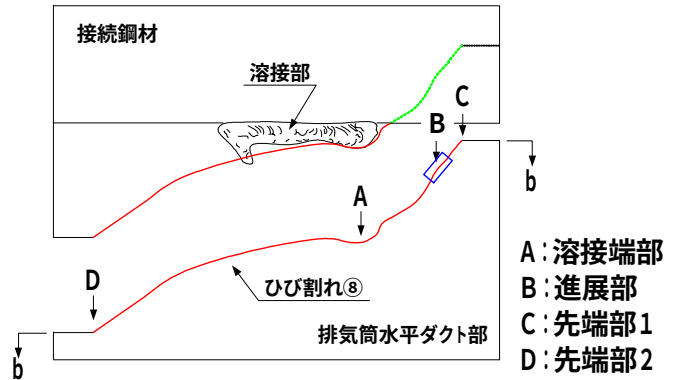
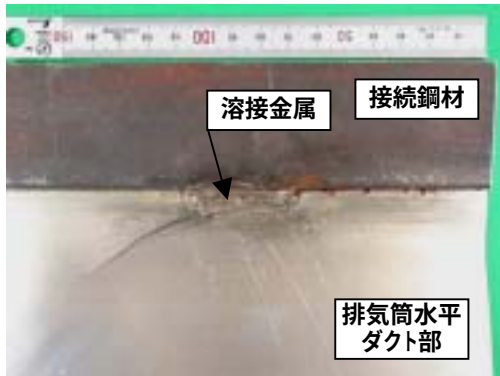


③部拡大

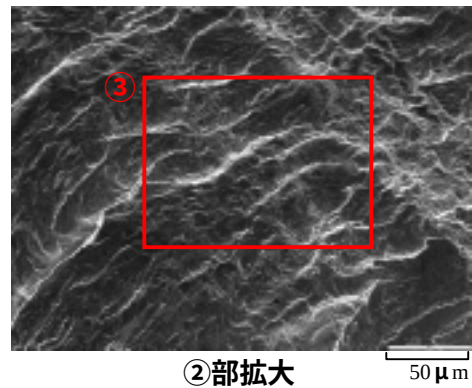
【観察結果】

- ・溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ (ひび割れの進展方向に対応) が認められた。
- ・破面は平坦であり、外面側から内面側への進展を示すピーチマーク状の模様が観察された。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。
- ・ストライエーション状の模様は観察されなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

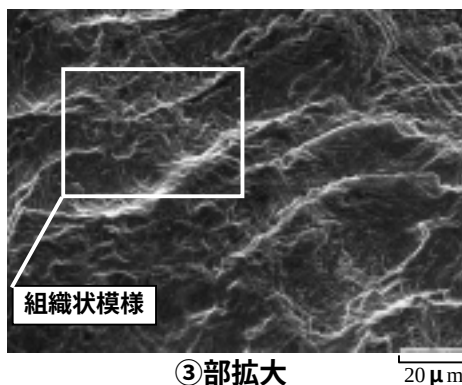
ひび割れ⑦⑧⑩⑪の詳細調査結果 破面SEM観察 (ひび割れ⑧の進展部)



拡大



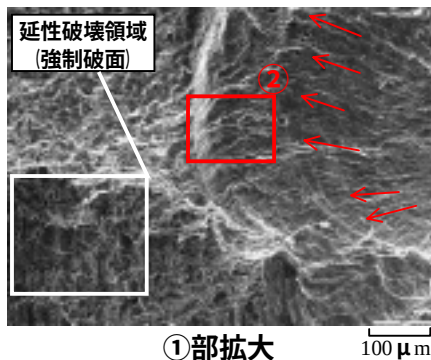
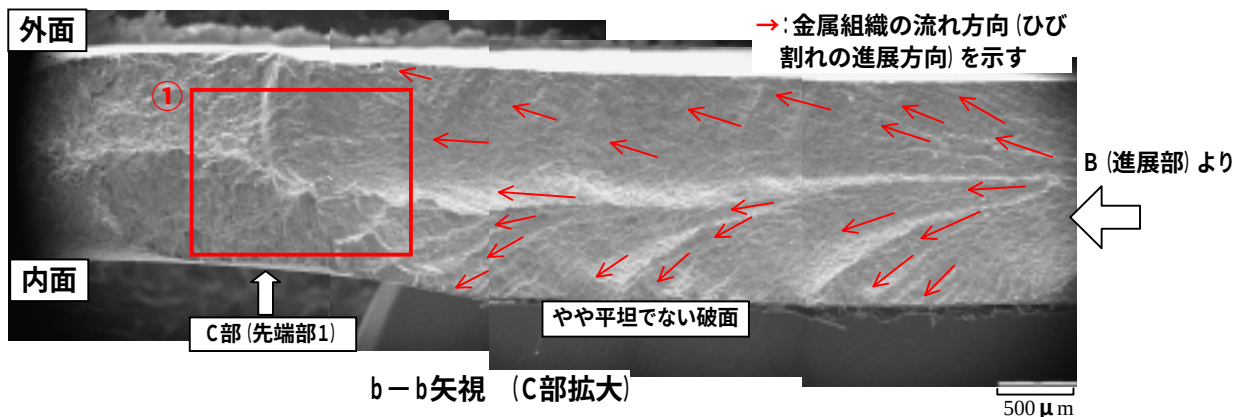
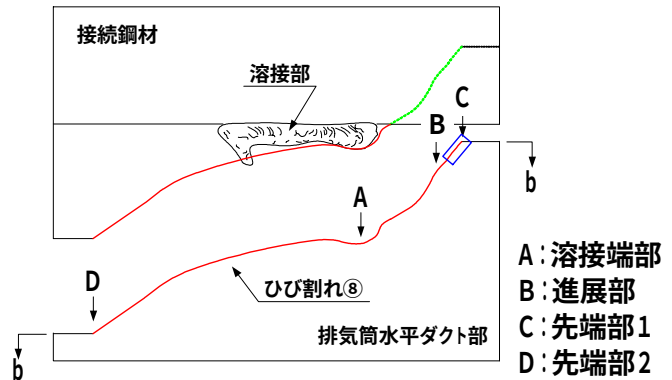
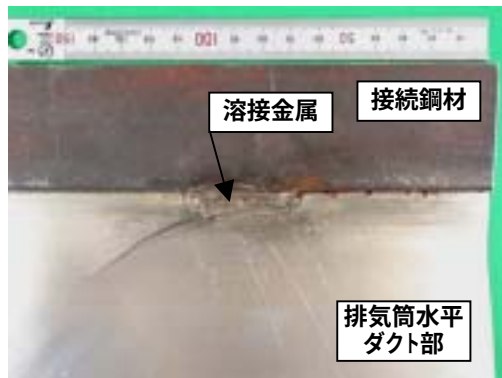
拡大



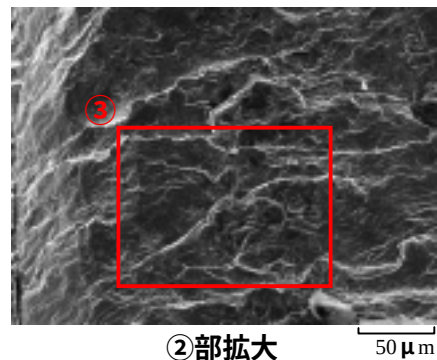
【観察結果】

- ★外面側からの進展と内面側からの進展が競合している部位 (B部: 進展部) が観察された。
- ★ひび割れ貫通後の進展において、溶接端部の外表面を起点とした進展から、内面側からの進展に移行する部位 (B部: 進展部) に、応力状態が変化した時に観察されるやや平坦でない破面が観察された。
- ★破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。

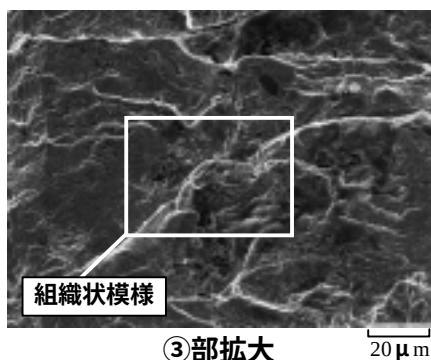
ひび割れ⑦⑧⑩⑪の詳細調査結果 破面SEM観察 (ひび割れ⑧の先端部)



拡大→



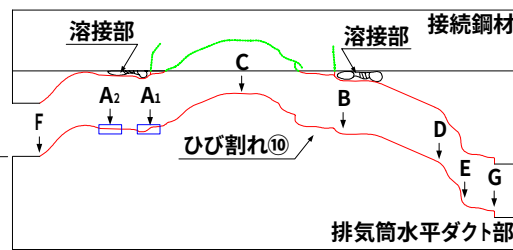
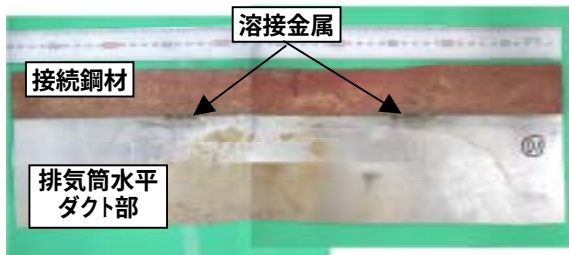
拡大↙



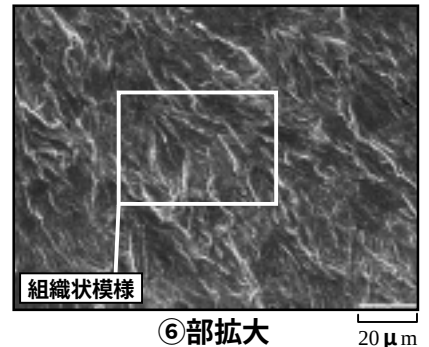
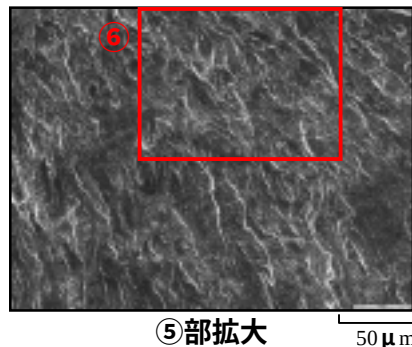
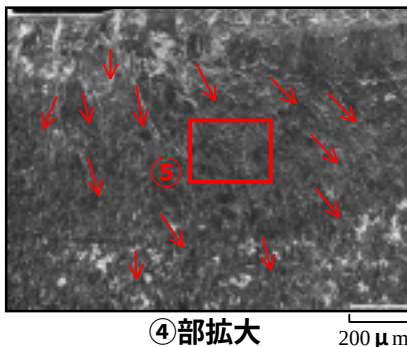
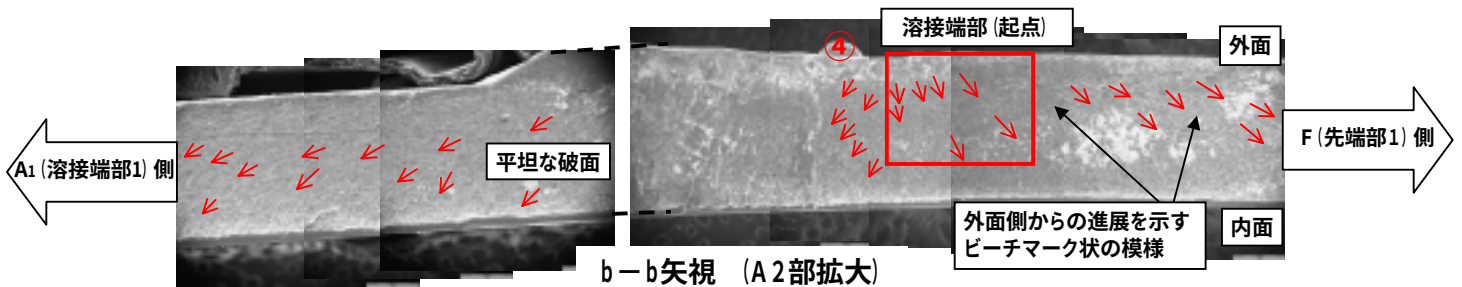
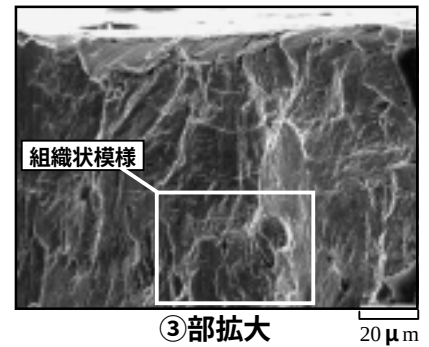
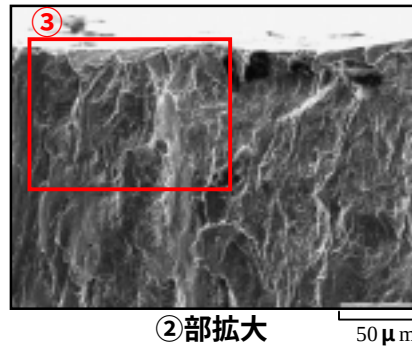
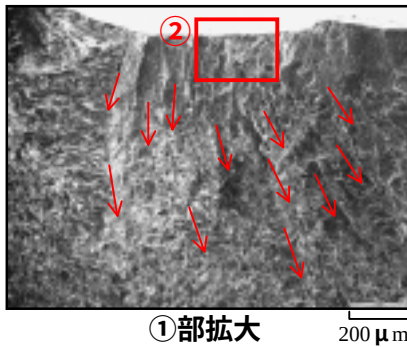
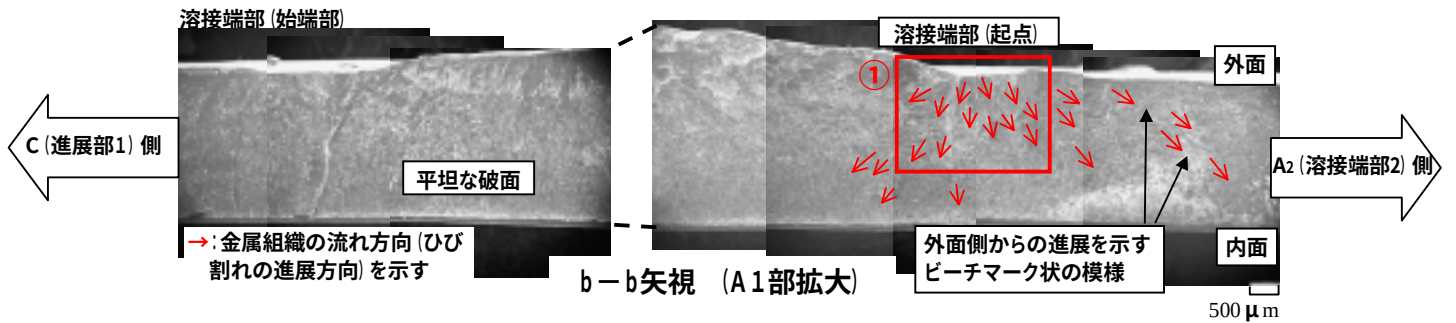
【観察結果】

- ★先端部1 (C部) は、外面側からの進展と内面側からの進展が競合する破面が観察された。
- ★ひび割れ貫通後の進展において、溶接端部の外表面を起点とした進展から、内面側からの進展に移行する部位 (C部: 先端部1) に、応力状態が変化した時に観察されるやや平坦でない破面 (ファクトリーーフ状の破面) が観察された。
- ★破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有な組織状模様が観察された。

ひび割れ⑦⑧⑩⑬の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ⑩の溶接端部(その1))



A₁: 溶接端部1
A₂: 溶接端部2
B: 溶接端部3
C: 進展部1
D: 進展部2
E: 進展部3
F: 先端部1
G: 先端部2

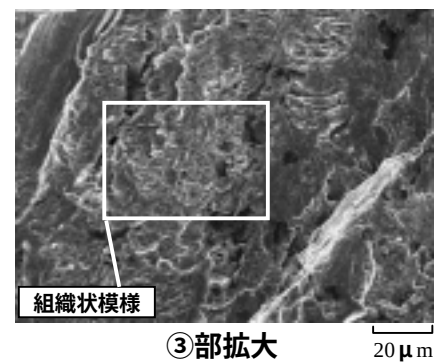
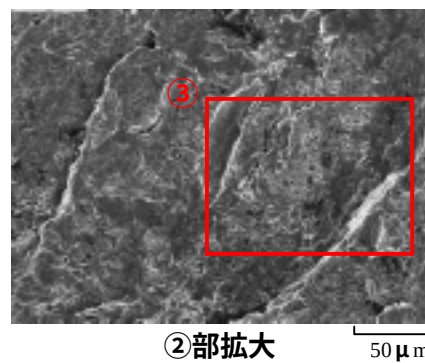
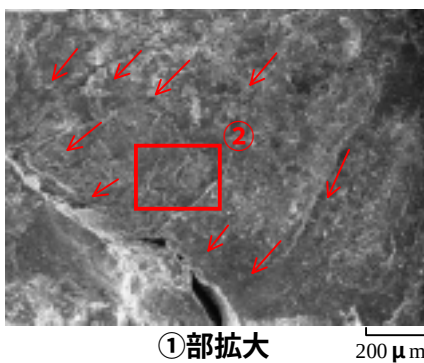
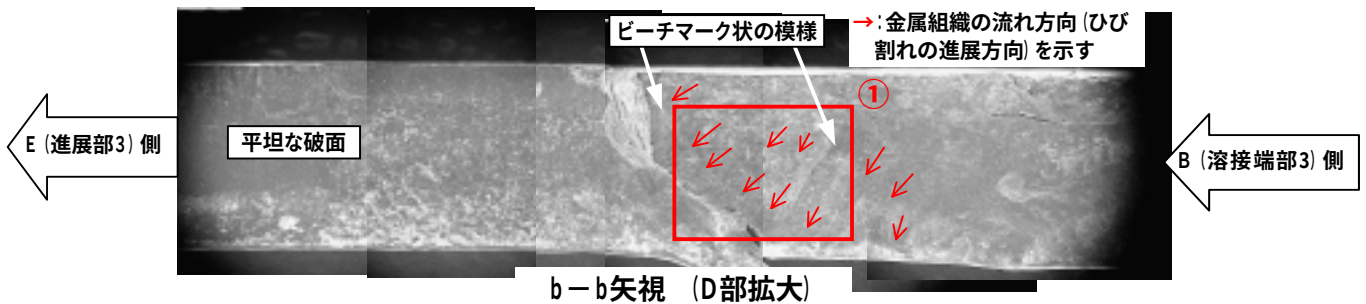
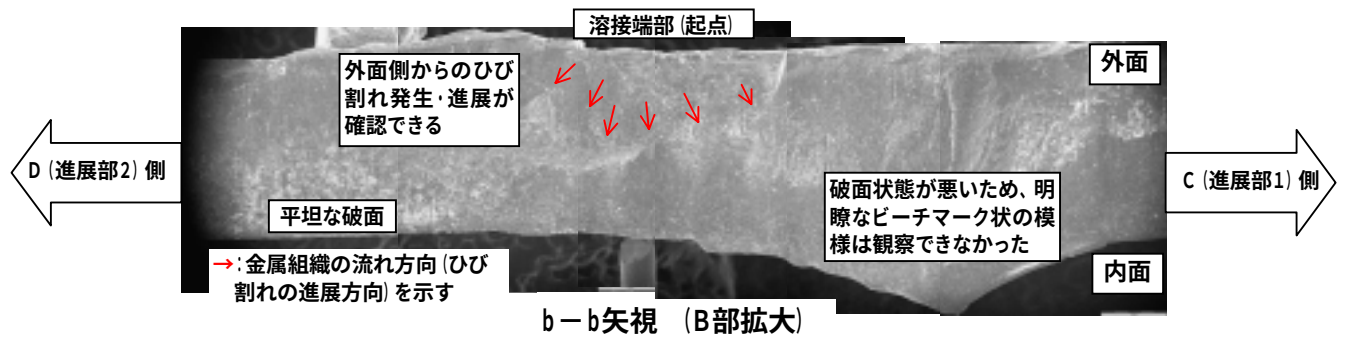
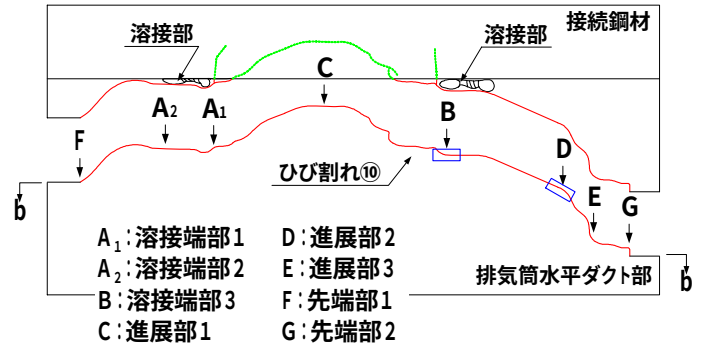
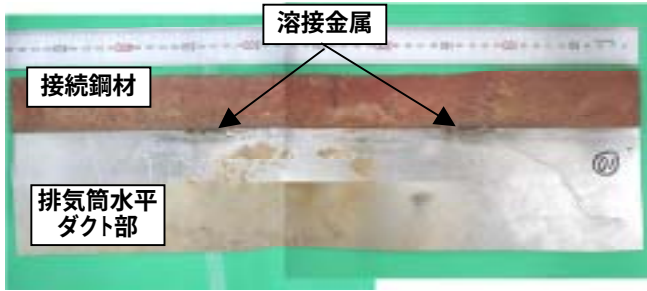


【観察結果】

- ・溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ(ひび割れの進展方向に対応)が認められた。
- ・破面は平坦であり、外面側からの進展を示すビーチマーク状の模様が観察された。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。
- ・ストライエーション状の模様は観察されなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

ひび割れ⑦⑧⑩⑬の詳細調査結果

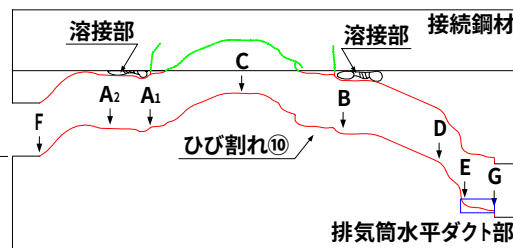
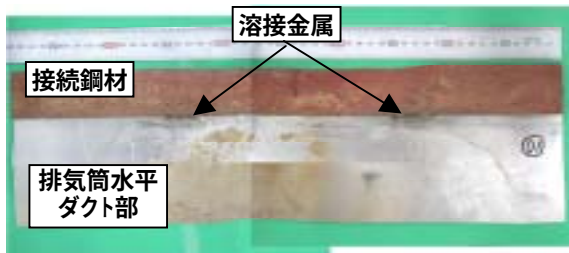
破面SEM観察 (ひび割れ⑩の溶接端部 (その2) , 進展部)



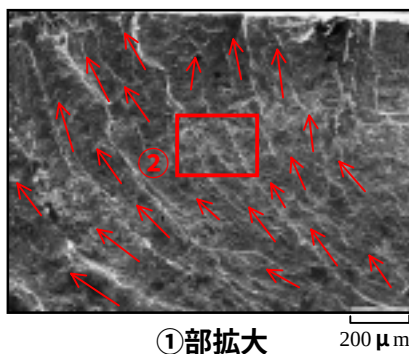
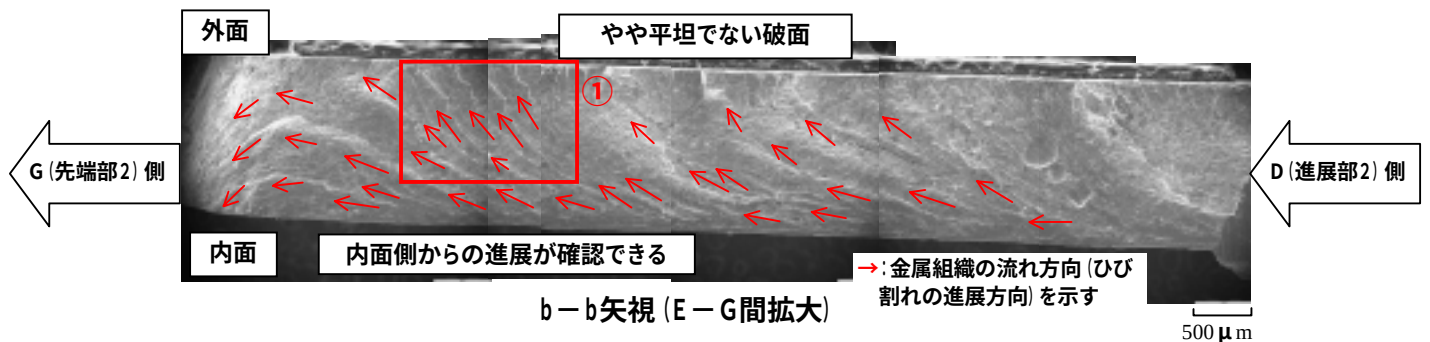
【観察結果】

- ・溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ (ひび割れの進展方向に対応) が認められた。
- ・破面状態が悪かったため、外面側からの進展を示すビーチマーク状の模様は観察できなかった。しかしながら、破面で観察される金属組織の流れより、外面側からの進展と判断される。
- ・溶接端部からの進展は、進展部2 (D部) で観察されるビーチマーク状の模様より、外面側からの進展と判断される。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。

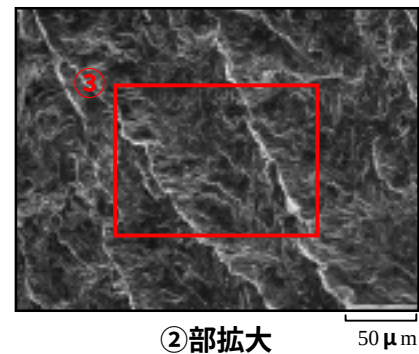
ひび割れ⑦⑧⑩⑪の詳細調査結果 破面SEM観察(ひび割れ⑩の進展部(その2))



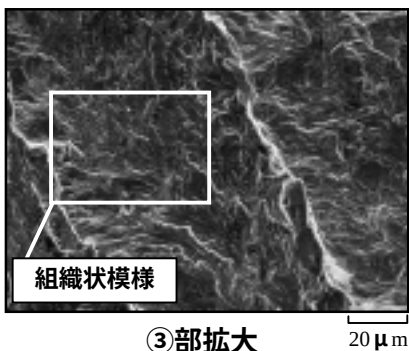
A₁: 溶接端部1
A₂: 溶接端部2
B: 溶接端部3
C: 進展部1
D: 進展部2
E: 進展部3
F: 先端部1
G: 先端部2



拡大



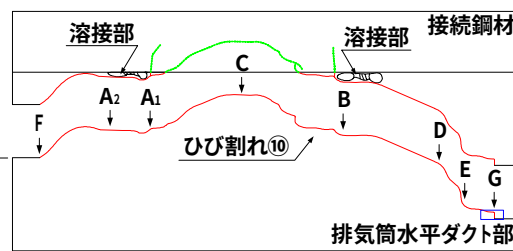
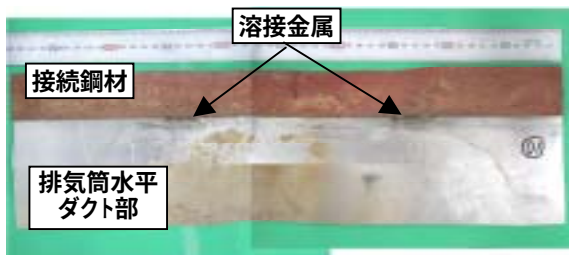
拡大



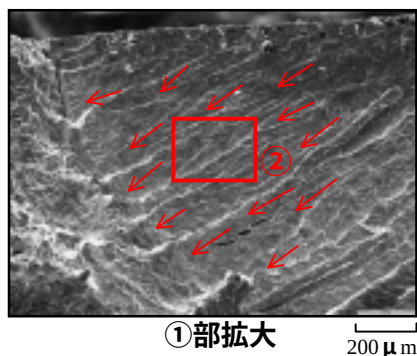
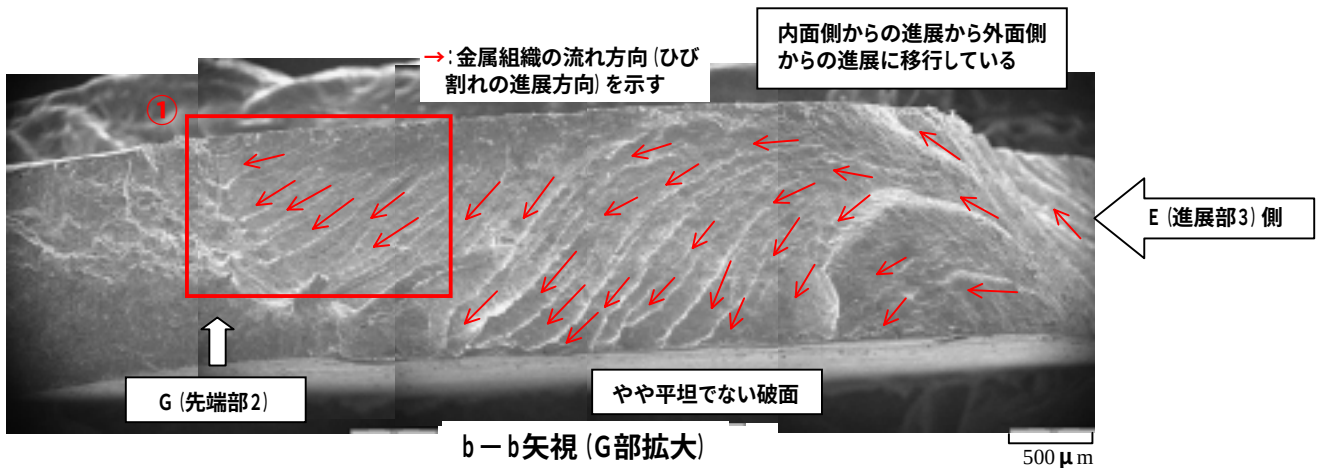
【観察結果】

- ★ ひび割れの進展方向は、進展部2 (D部) からの途中で外面側から内面側からの進展に完全に移行しており、進展部3 (E部) では全て内面側からの進展である。
- ★ ひび割れ貫通後の進展において、溶接端部の外表面を起点とした進展から、内面側からの進展に完全に移行する部位 (E部: 進展部3) に、応力状態が変化した時に観察されるやや平坦でない破面 (ファクトリールーフ状の破面) が観察された。
- ★ 破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。

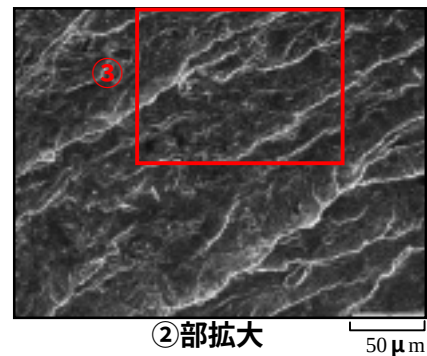
ひび割れ⑦⑧⑩⑪の詳細調査結果 破面SEM観察 (ひび割れ⑩の先端部)



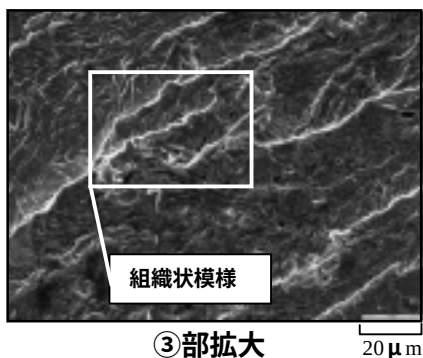
A₁: 溶接端部1
A₂: 溶接端部2
B: 溶接端部3
C: 進展部1
D: 進展部2
E: 進展部3
F: 先端部1
G: 先端部2



拡大



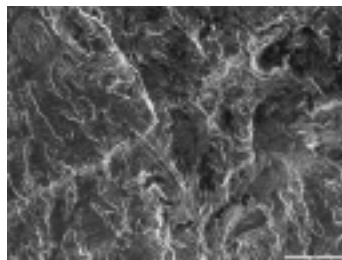
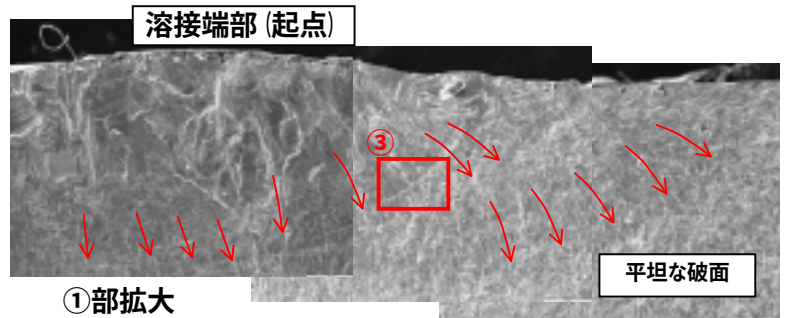
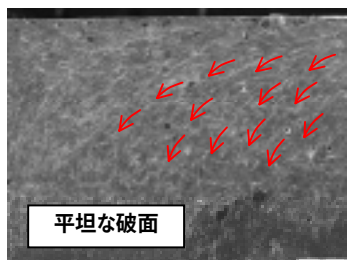
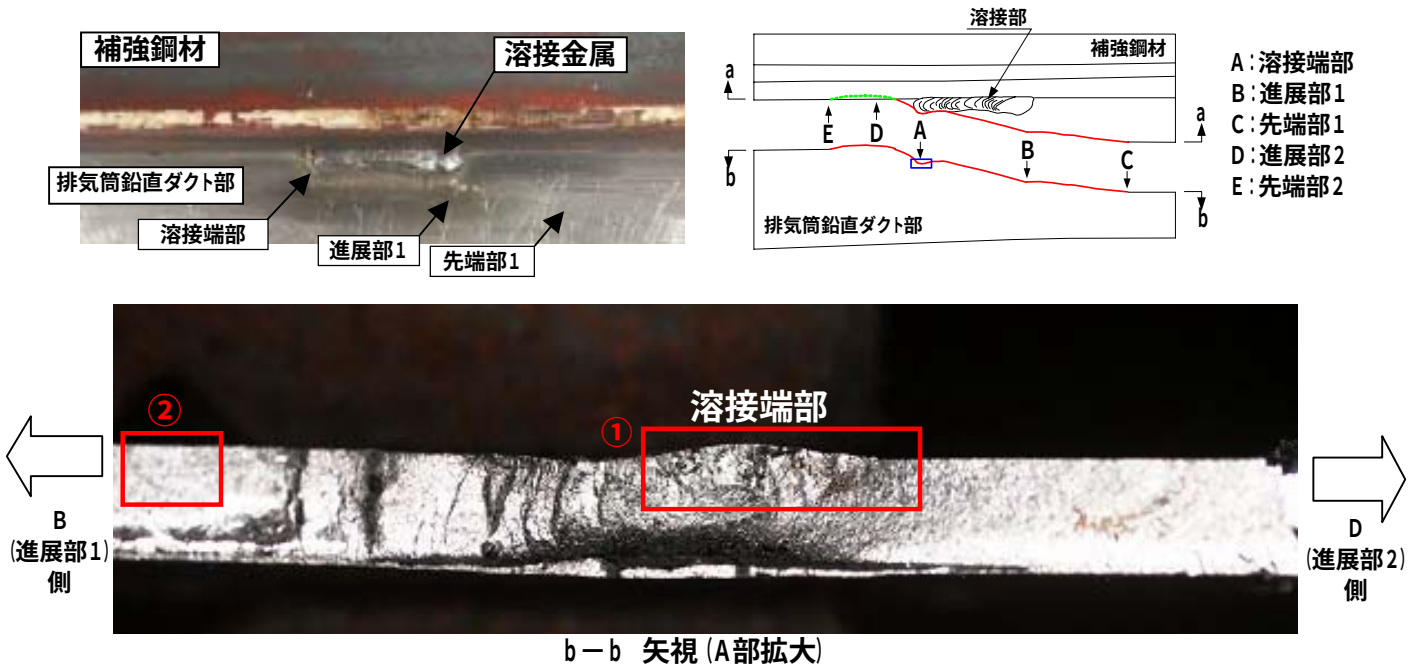
拡大



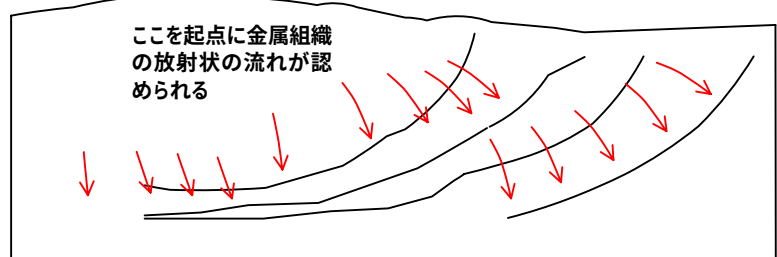
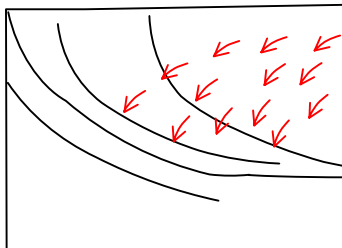
【観察結果】

- ★進展部3 (E部) から先端部2 (G部) にかけて、内面側からの進展から外面側からの進展に移行している。
- ・先端部2 (G部) は、外面側からの進展が観察された。
- ★ひび割れ貫通部後の進展では、応力状態が変化した時に観察されるやや平坦でない破面が観察された。
- ★破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。

ひび割れ⑦⑧⑩⑪の詳細調査結果 破面SEM観察（ひび割れ⑪の溶接端部）



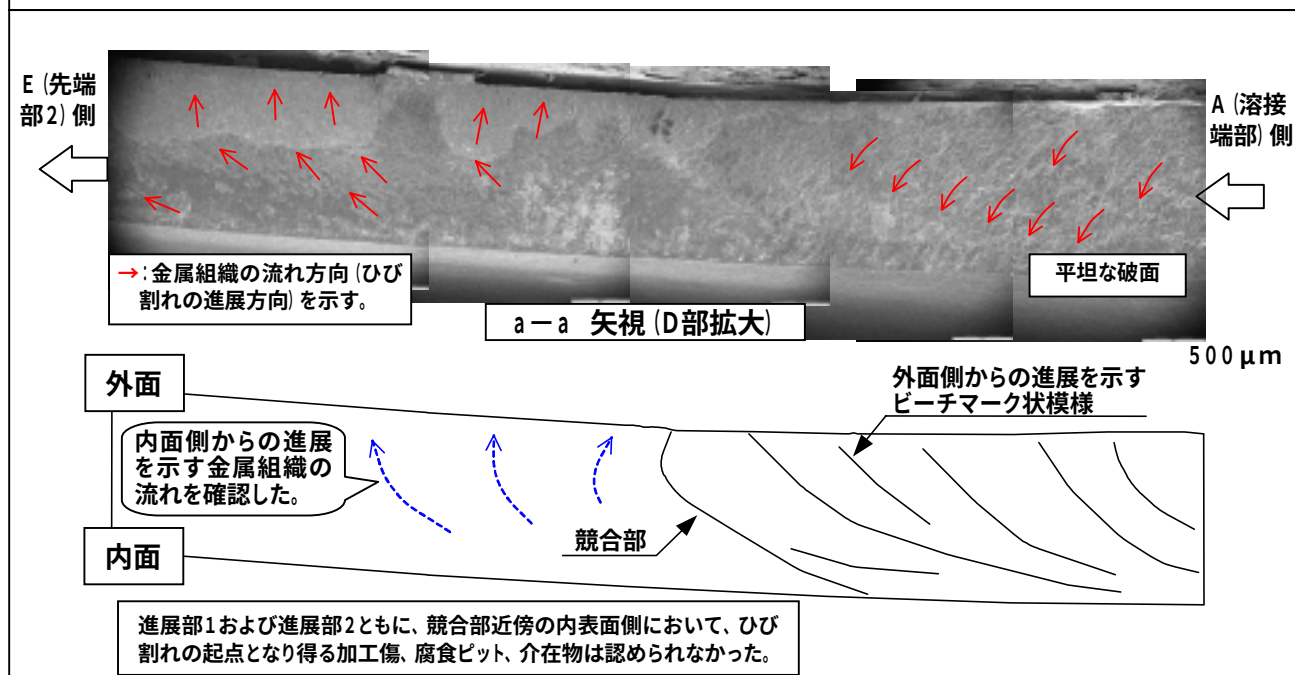
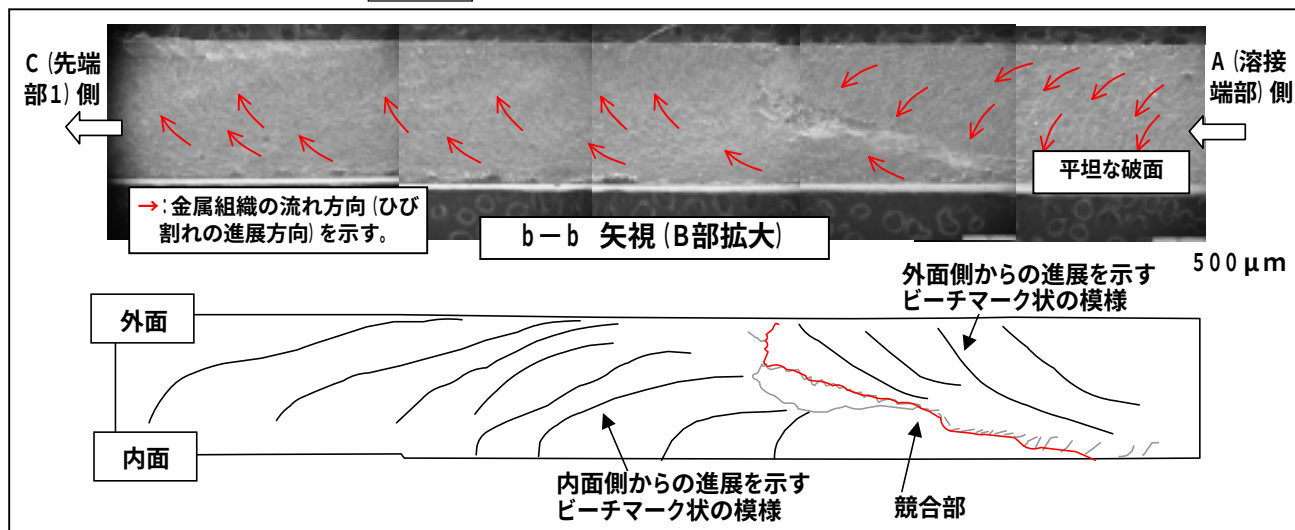
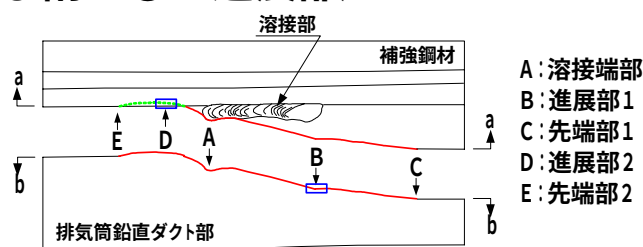
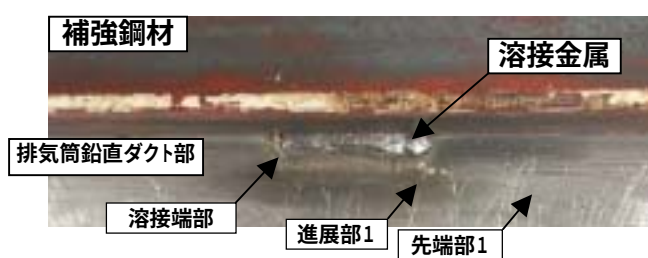
→: 金属組織の流れ方向 (ひび割れの進展方向) を示す。



【観察結果】

- ・溶接端部の外表面を起点とした金属組織の流れ (ひび割れの進展方向に対応) が認められた。
- ・破面は平坦であり、外面側からの進展を示すビーチマーク状の模様が溶接端部の両側に認められた。
- ・破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。
- ・ストライエーション状の模様は観察されなかった。
- ・塩化物応力腐食割れ破面に特有の羽毛状の組織は観察されなかった。

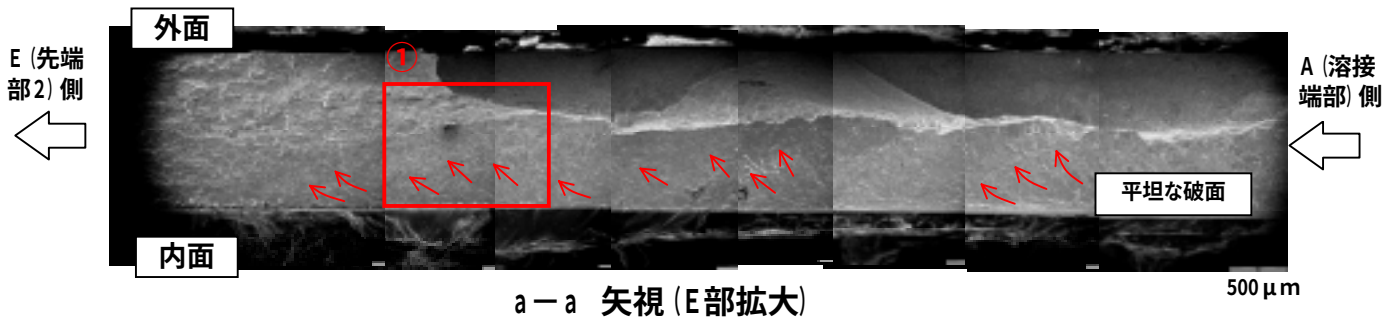
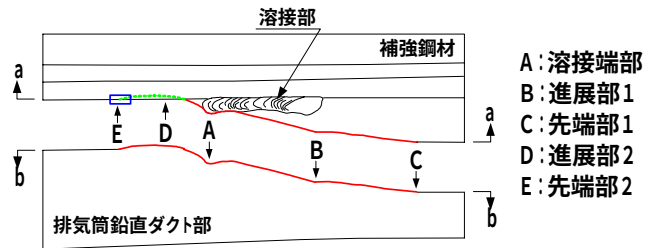
ひび割れ⑦⑧⑩⑪の詳細調査結果 破面SEM観察 (ひび割れ⑪の進展部)



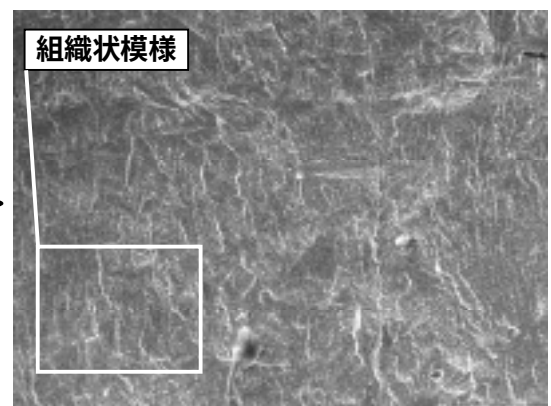
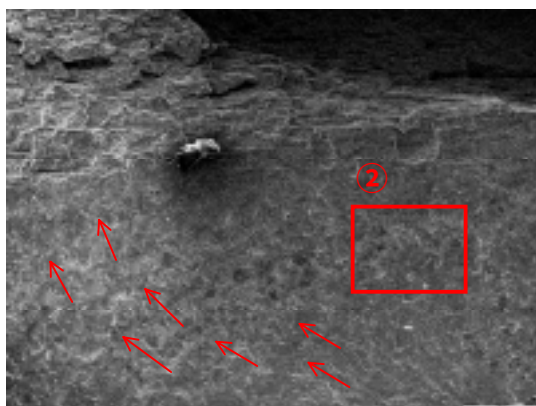
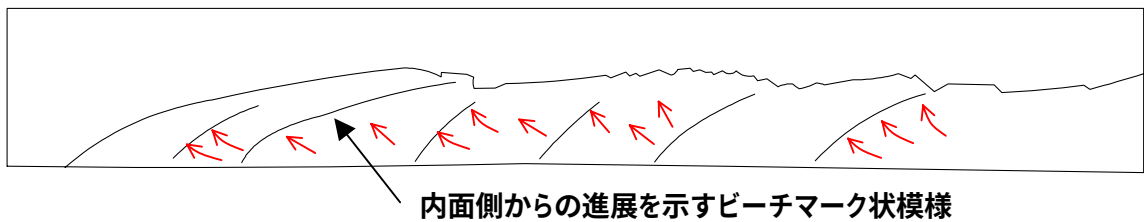
【観察結果】

- ★進展部1, 2 (B, D部) では、外面側および内面側からの進展が競合していた。
- ★進展部1 (B部) では、内面側からの進展を示すビーチマーク状の模様は、外面側からの進展を示すビーチマーク状の模様には侵入していない。(外面側からの進展が先行していたことを示す。)
- ★進展部2 (D部) では、外面側からの進展を示すビーチマーク状の模様は、競合部でも途切れていない。(外面側からの進展が先行していたことを示す。)
- ★先端部1, 2 (C, E部) で観察された内面側からの進展は、外面側からの進展に引き続いて生じたものである。
- ★破面は平坦であった。

ひび割れ⑦⑧⑩⑪の詳細調査結果 破面SEM観察（ひび割れ⑪の先端部）



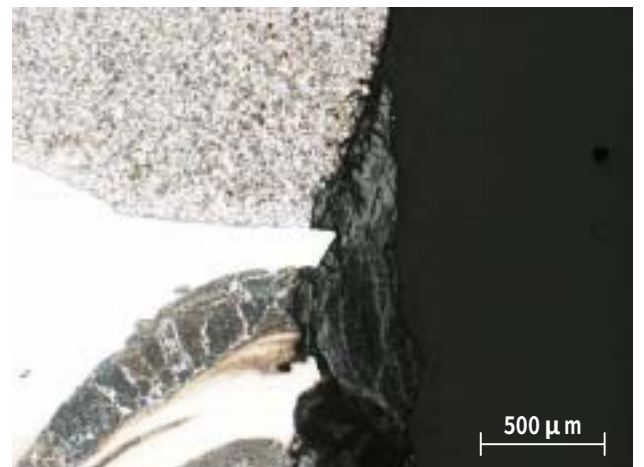
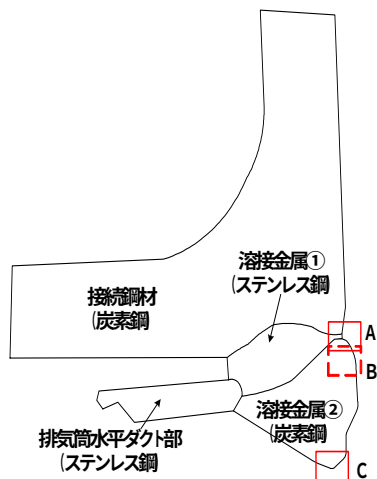
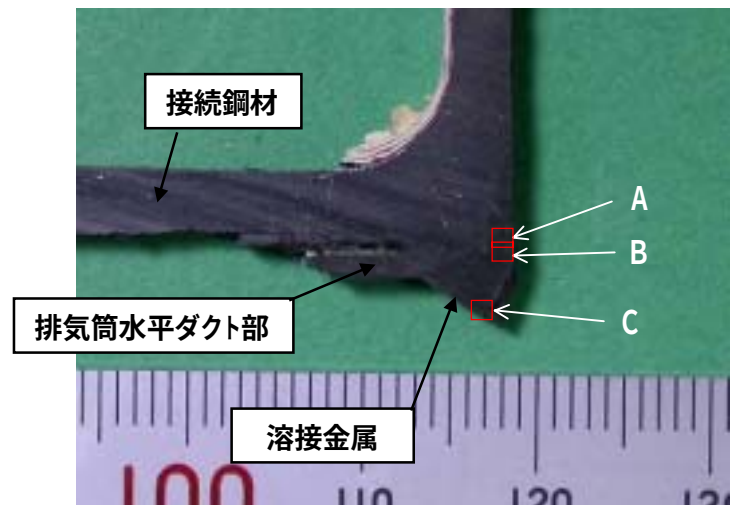
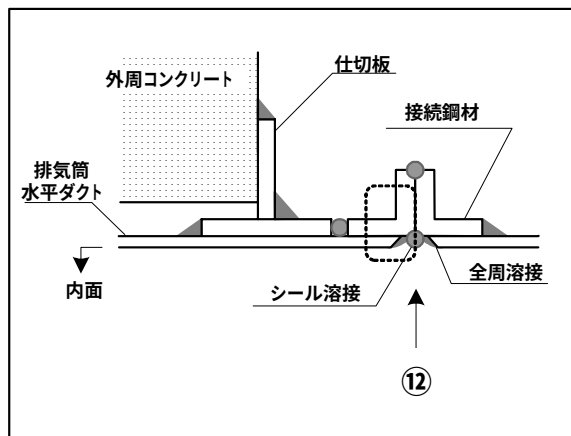
→ : 金属組織の流れ方向（ひび割れの進展方向）を示す。



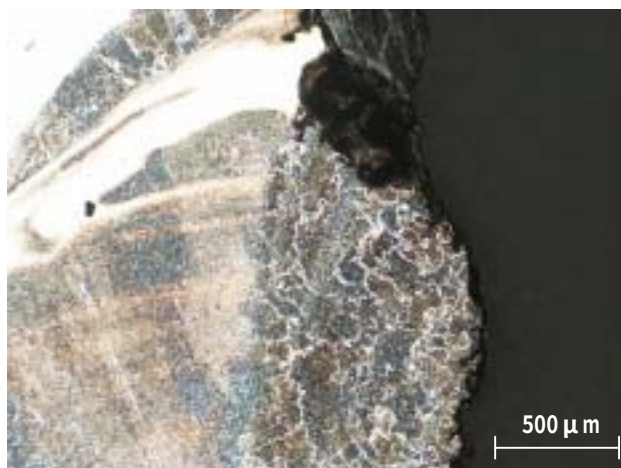
【観察結果】

- ★先端部2（E部）は、内面側からの進展を示すビーチマーク状の模様が観察された。
- ★先端部2（E部）は、内面側が大きい半楕円形状の破面が観察された。
- ★内面側からの進展を示す金属組織の流れが観察された。
- ★破面は粒内割れであり、オーステナイト系ステンレス鋼の低応力高サイクル疲労破面に特有の組織状模様が観察された。
- ★破面は平坦であった。

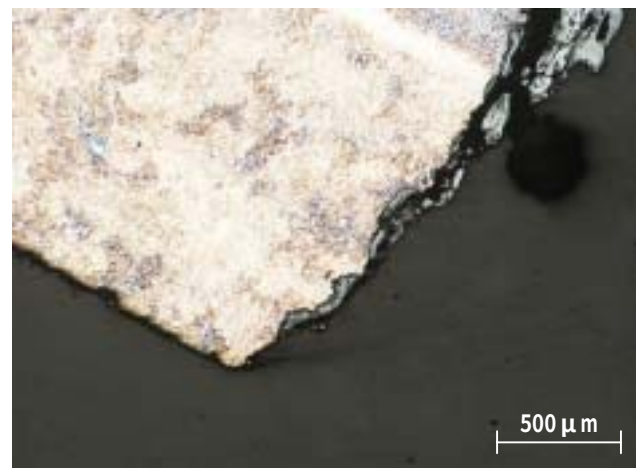
ひび割れ⑫の詳細調査結果 断面ミクロ観察



A部



B部

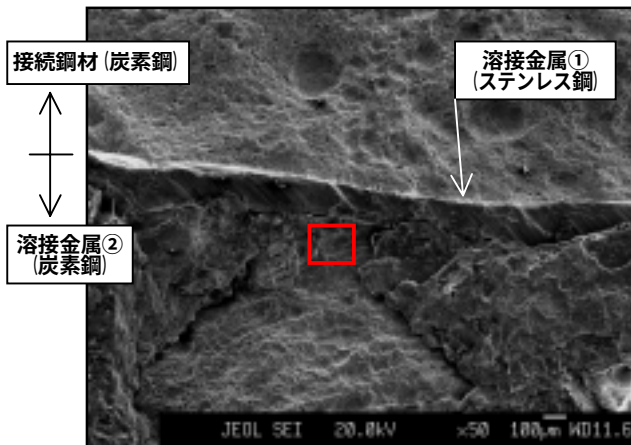
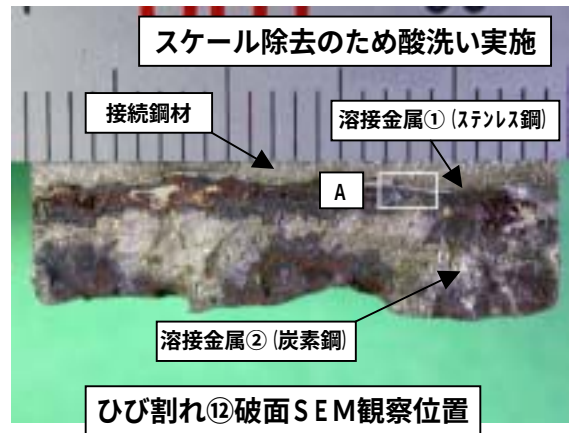
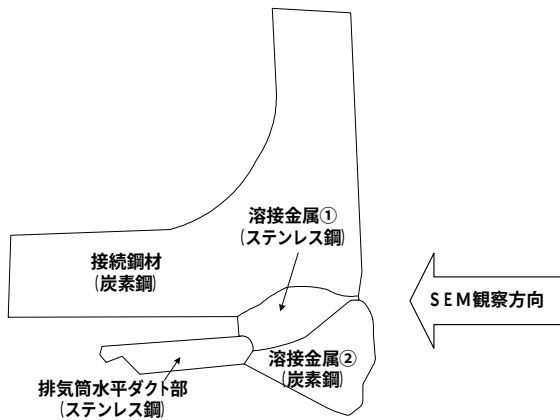


C部

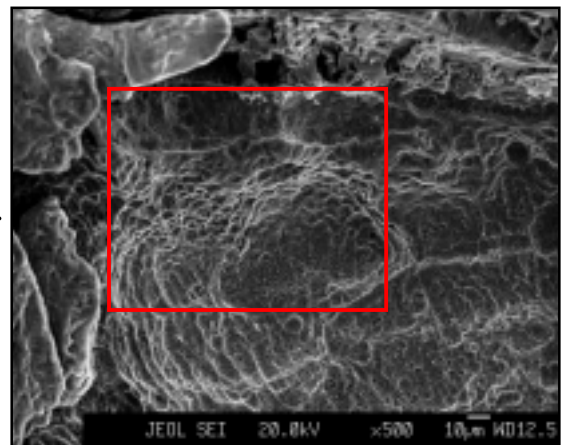
【観察結果】

・ひび割れ⑫の断面は、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が不規則に認められる。

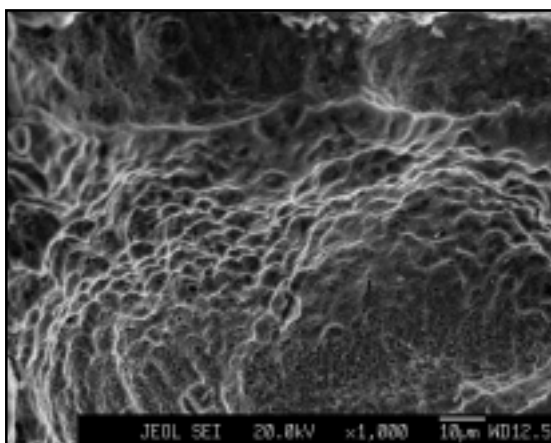
ひび割れ⑫の詳細調査結果 破面SEM観察 (接続鋼材側)



拡大



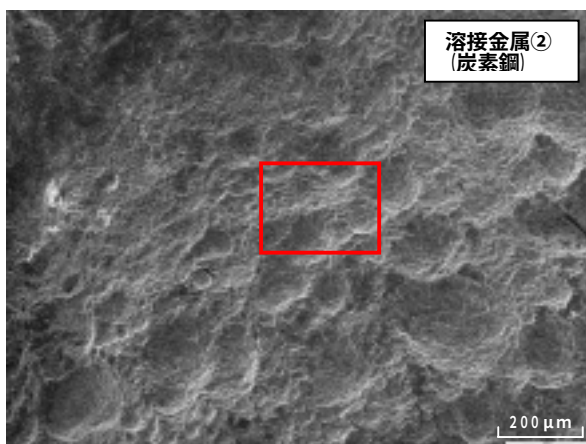
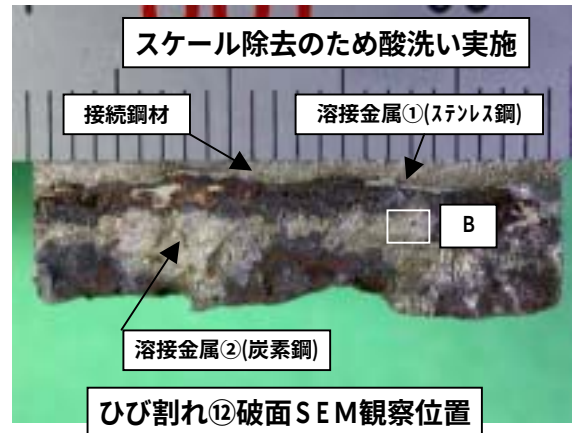
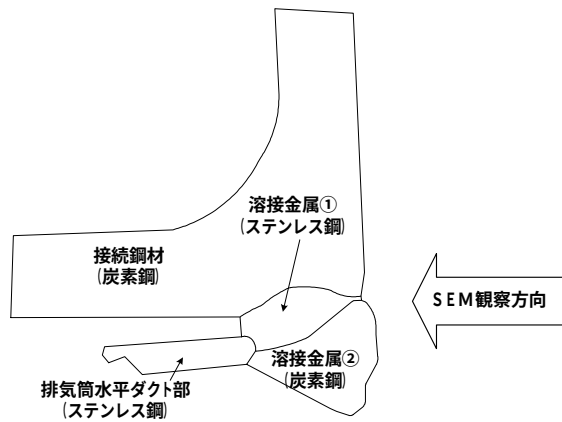
拡大



[観察結果]

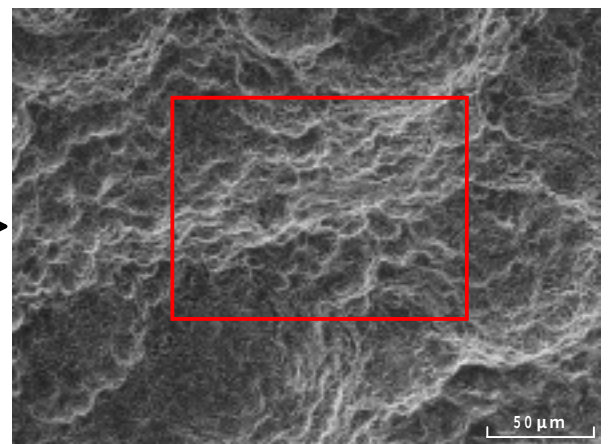
・ひび割れ⑫破面は、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が認められる。

ひび割れ⑫の詳細調査結果 破面SEM観察 (中央部)

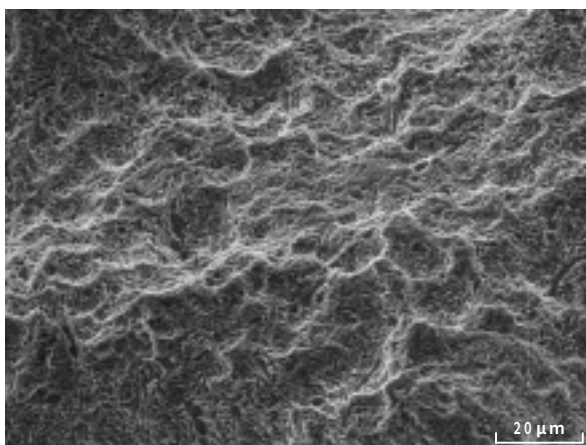


B部拡大

拡大



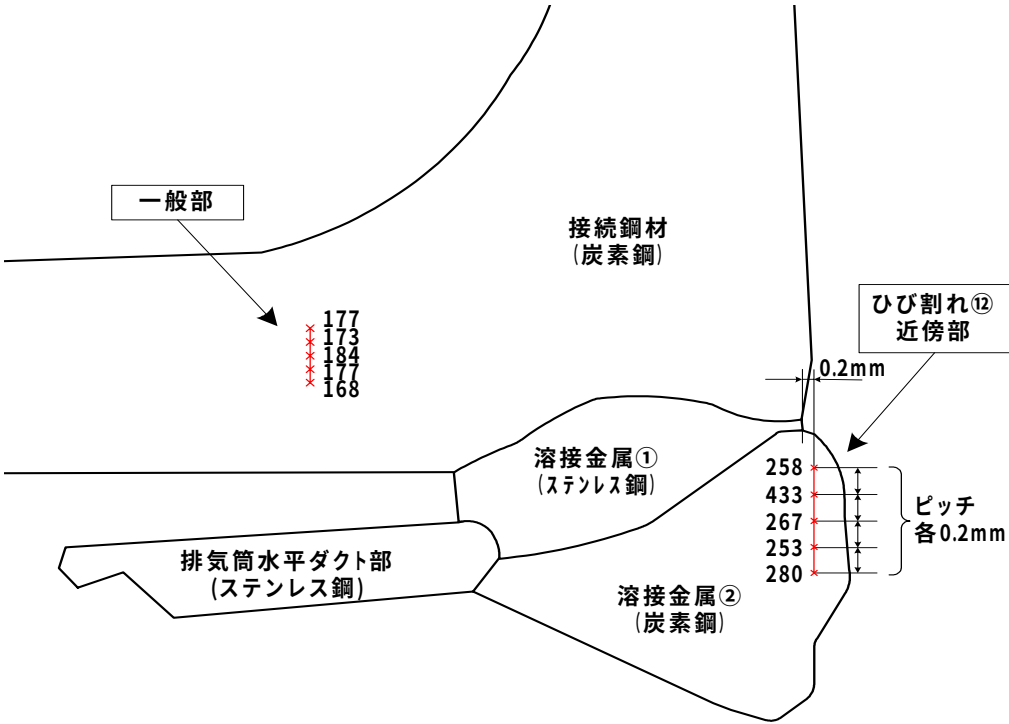
拡大



【観察結果】

・ひび割れ⑫破面は、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が認められる。

ひび割れ⑫の詳細調査結果
硬度測定



		硬度 (ビッカース換算)	
		平均	最高
測定値	ひび割れ⑫近傍部	約 300	433
	一般部	約 180	185

炭素鋼 (SS41) の硬さ規格値はなし。

【測定結果】

・ひび割れ⑫近傍の溶接金属部の硬度を測定した結果、硬化した部位が認められた。

ひび割れ⑫の詳細調査結果
EPMAによる分析 (ひび割れ⑫の破面元素分析)

[単位:重量%]

	Cl	Na	Mg	Ca	P	S	Si	その他
ひび割れ⑫	0.30	2.09	1.12	0.38	0.42	0.31	1.13	94.24

(参考)

[単位:重量%]

	Cl	Na	Mg	Ca	P	S	Si	その他
一般部 (炭素鋼)	0.08	2.16	1.62	0	0.75	0.50	1.31	93.58

[分析結果]

・ひび割れ⑫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一般部とほぼ同等であることが確認された。

ひび割れ⑦、⑧および⑩のやや平坦でない破面が形成された推定メカニズム

1. ひび割れの進展モード

ひび割れの状態	外力の状況	主応力ひび割れ進展状況
貫通前 補強材 断続溶接 1.5mm 振動	モードⅠ 外力 y z x	主応力 外力 進展方向
貫通後の長いひび割れ 補強材 断続溶接 1.5mm 振動	モードⅠ 外力 y z x + モードⅢ 外力 y z x a b	主応力 外力 進展方向 + 主応力 外力 進展方向 a b

2. 各モードの進展挙動

- モードⅠ型
ひび割れ先端には、ひび割れに垂直な主応力が作用するので、ひび割れは主応力に垂直方向に進み、平坦な破面になる。
- モードⅢ型
ひび割れ先端にはひび割れに45°の主応力が作用するので、ひび割れの面外に斜めに進む傾向が生じる。
- モードⅠ＋Ⅲ型
元のひび割れに対して斜めの面が組み合わさったような破面（ファクトリーループ）で進展する。このとき、破面上のスジはひび割れの進展方向を示す。

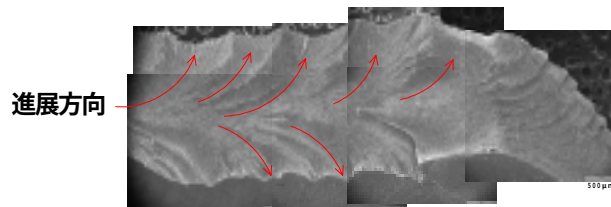
(参考文献)
モードⅠ＋Ⅲの複合破面



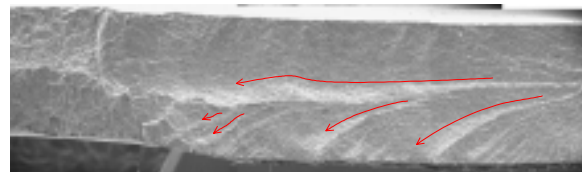
MIXED MODE (I+III) FATIGUE THRESHOLDS IN A FORGING STEEL
J. B. YOUNG and E. J. MURPHY
Department of Mechanical Process Engineering, University of Sheffield, Sheffield S1 4BT, England
Fatigue Fract. Engng Mater. Struct., Vol. 13, No. 5, pp. 259-270, 1990

3. ひび割れ⑦、⑧および⑩のやや平坦でない破面

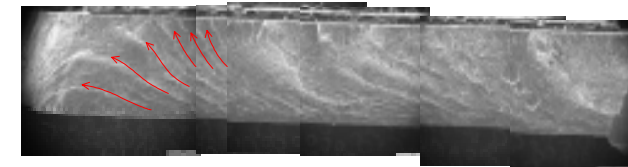
ひび割れ⑦、⑧および⑩の長さが大きくなった領域で、破面にスジ状の模様が観察される。以下の外観写真から判るように、凹凸を有し、文献ほど明確でないがファクトリーループ状の破面を呈しており、モードⅠにⅢが重畳したことを示唆している。なお、場所により模様の形や明瞭度が異なるが、これはモードⅠに対するⅢの寄与度が場所により異なるものと考えられる。



ひび割れ⑦

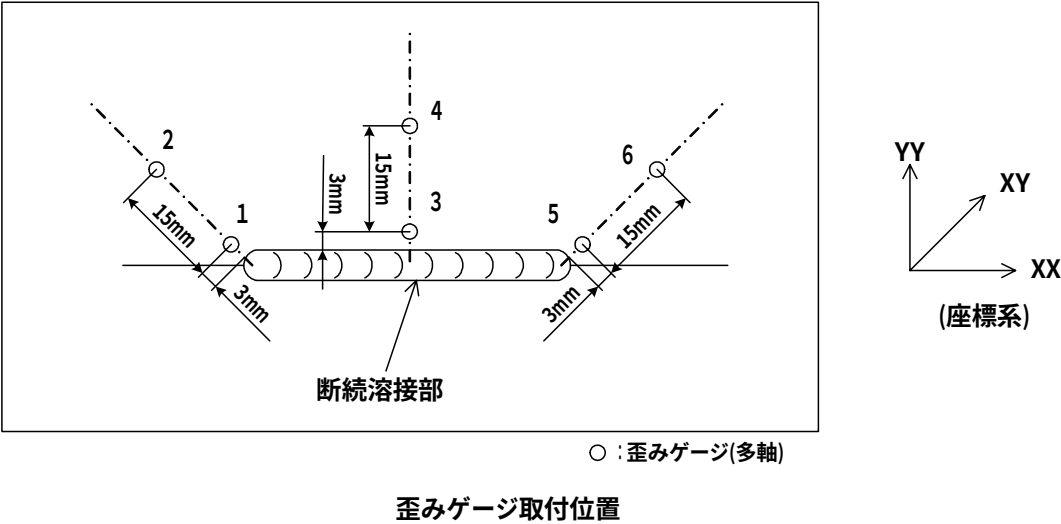


ひび割れ⑧



ひび割れ⑩

断続溶接部近傍の残留応力測定結果
(ひび割れ③, ②⑩に隣接する健全部)



断続溶接部近傍の残留応力測定結果

[応力値単位: MPa]

測定部位	歪みゲージNo. 残留応力 (注)	溶接左端部		溶接中央部		溶接右端部	
		1	2	3	4	5	6
ひび割れ③ 近傍	σ_{XX} 方向 (溶接方向)	82	31	-39	111	64	63
	σ_{XY} 方向 (溶接方向に対し45°)	80	-51	35	30	51	79
	σ_{YY} 方向 (溶接方向に対し90°)	188	37	220	48	89	19
ひび割れ②⑩ 近傍	σ_{XX} 方向 (溶接方向)	29	21	65	29	221	54
	σ_{XY} 方向 (溶接方向に対し45°)	62	38	109	75	54	34
	σ_{YY} 方向 (溶接方向に対し90°)	215	108	168	8	231	78

(注) 残留応力の符号

- 正: 引張応力成分
負: 圧縮応力成分

応力値は計測された歪みより、一般的な材料定数を元に計算した値

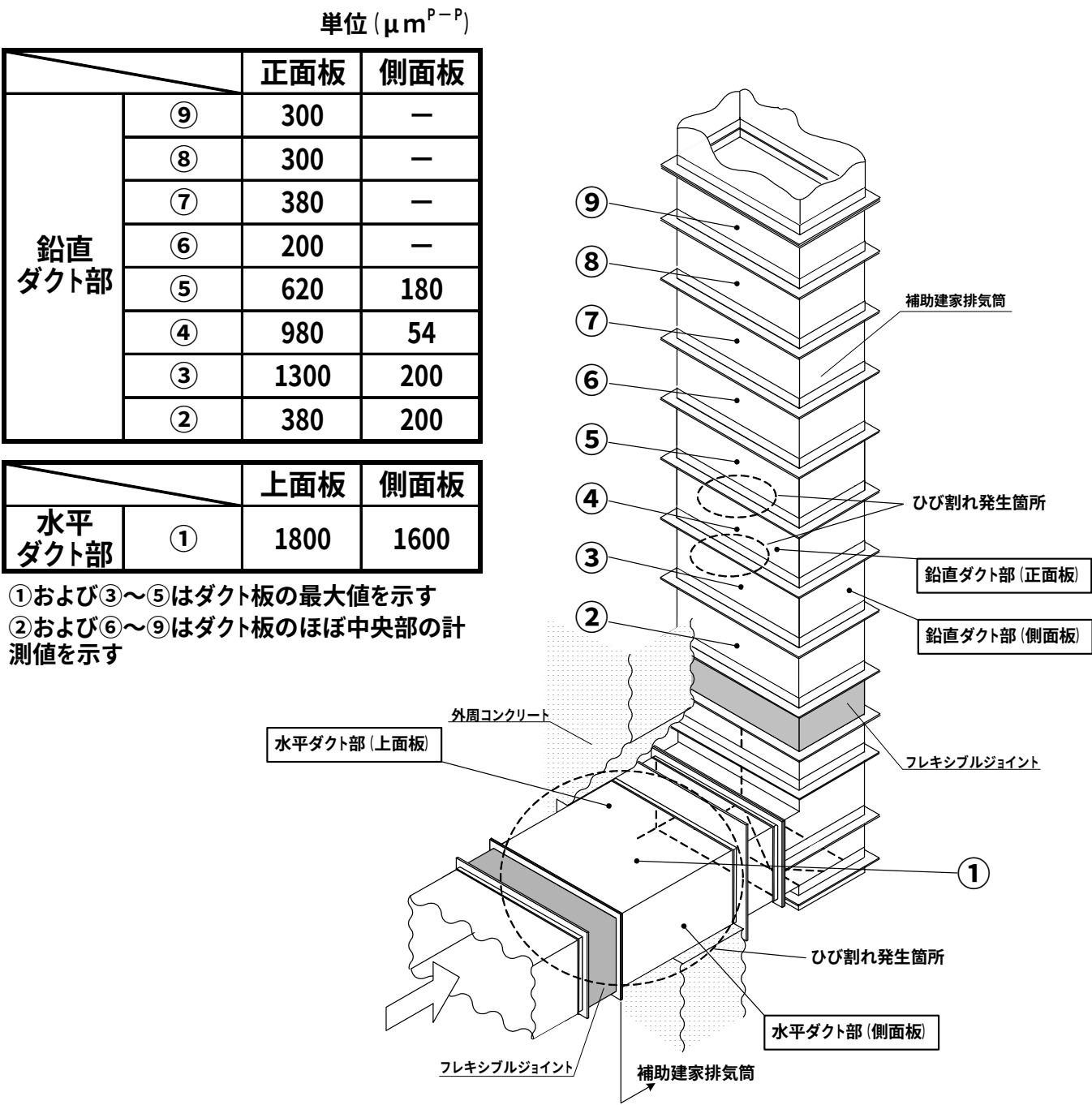
ひび割れ③, ②⑩に隣接する健全部の断続溶接部近傍の残留応力を測定した結果、降伏応力程度の残留応力が発生し得る (降伏歪み程度の残留歪みが発生し得る) ことを確認した。

(参考)

ステンレス鋼 (SUS304) の降伏応力: $\sigma_{0.2}=205\text{MPa}$ [規格値]

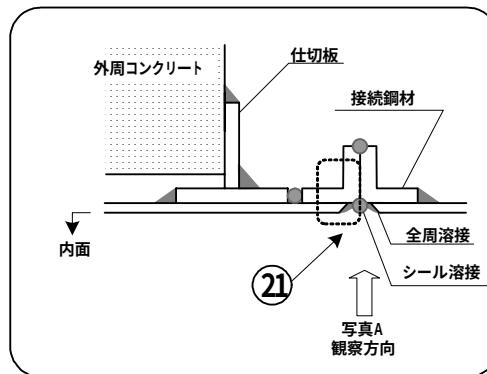
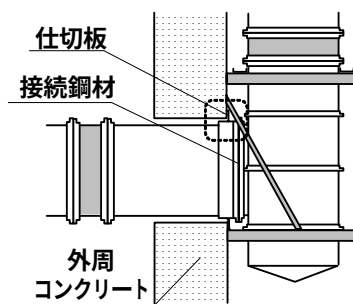
補助建家排気筒の振動計測結果

補助建家排気筒水平ダクト部及び鉛直ダクト部について、ひび割れを確認した付近の振動計測(変位計測)を実施した。

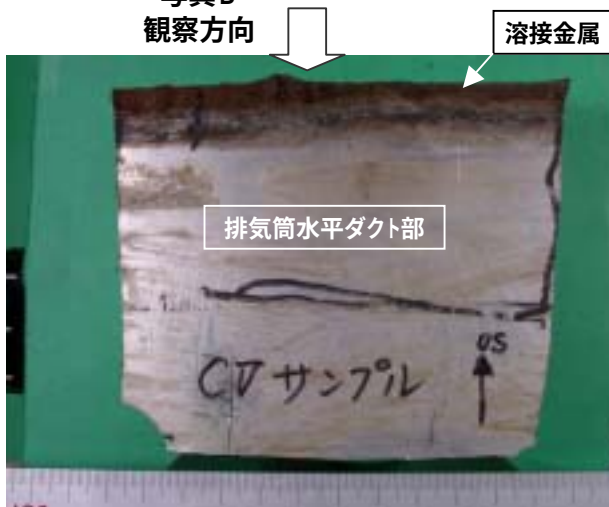


補助建家排気筒ダクト振動計測位置(概要図)

格納容器排気筒調査結果 破面マクロ観察（ひび割れ②）



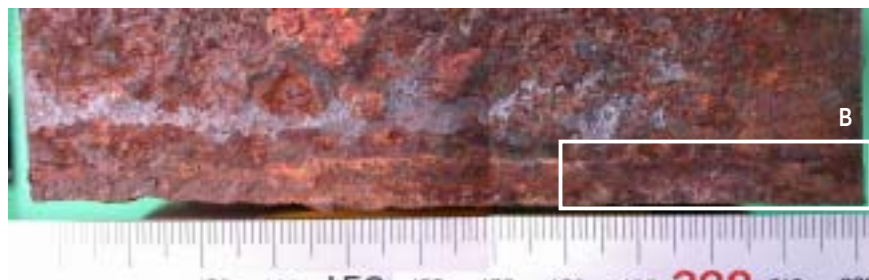
写真B
観察方向



写真A



写真B



A部拡大

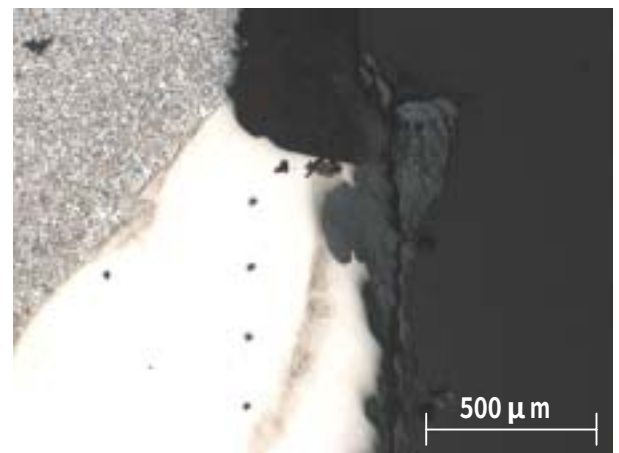
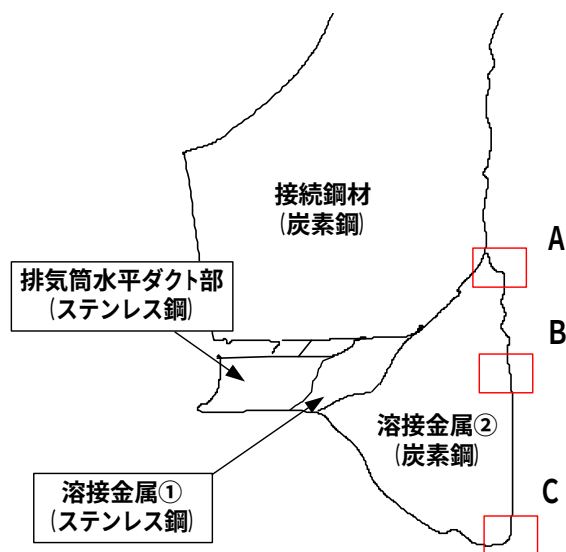
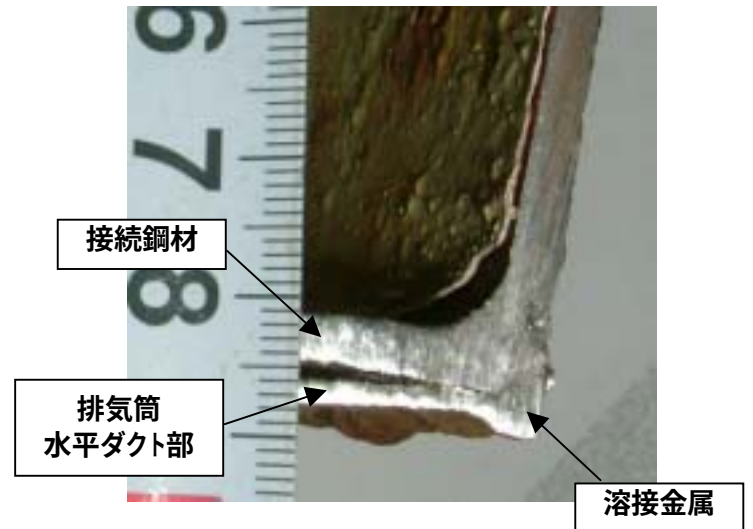
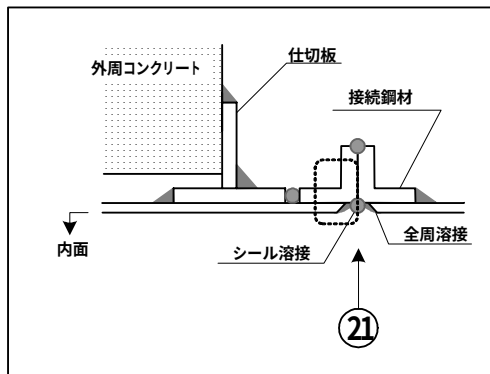


B部拡大

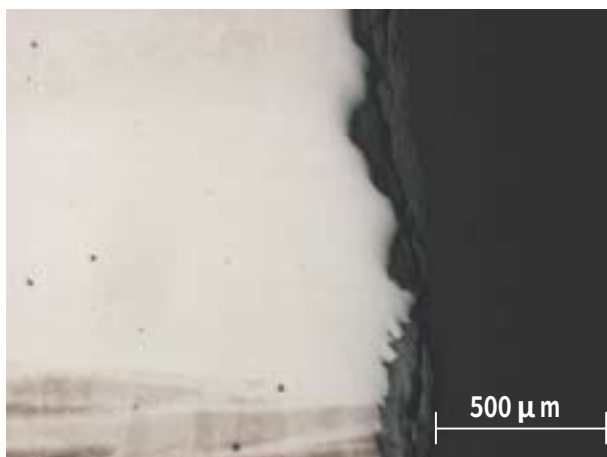
【観察結果】

- ・ひび割れ②は、溶接金属のほぼ中央を貫通しており、破面表面は腐食により変色している。
- ・シール溶接金属部の接続鋼材も著しい腐食を受けている。

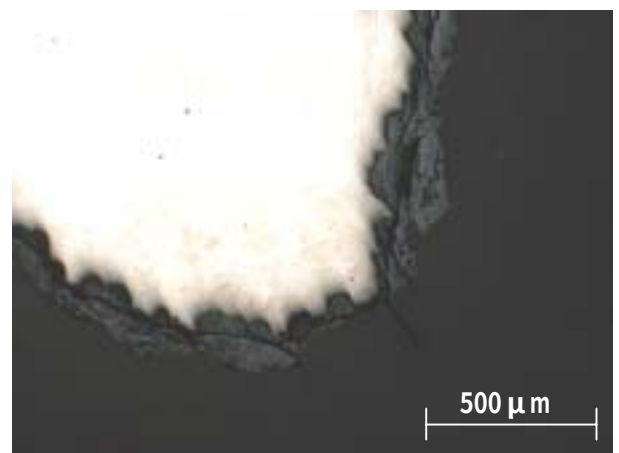
格納容器排気筒調査結果 断面ミクロ観察 (ひび割れ ㉑)



A部



B部



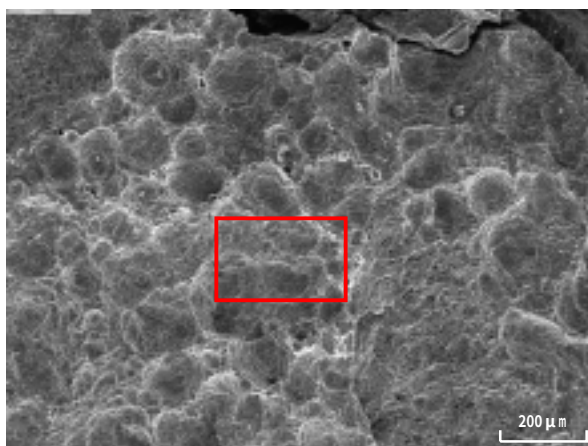
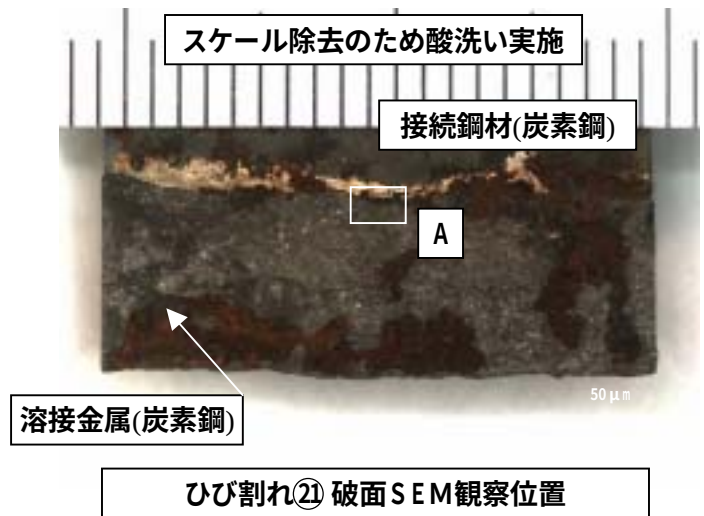
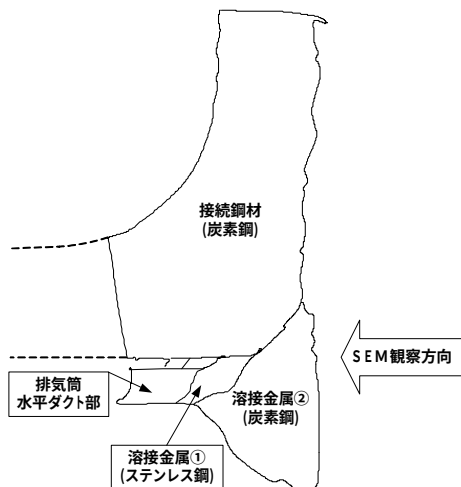
C部

【観察結果】

・ひび割れ㉑の断面は、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が不規則に認められる。

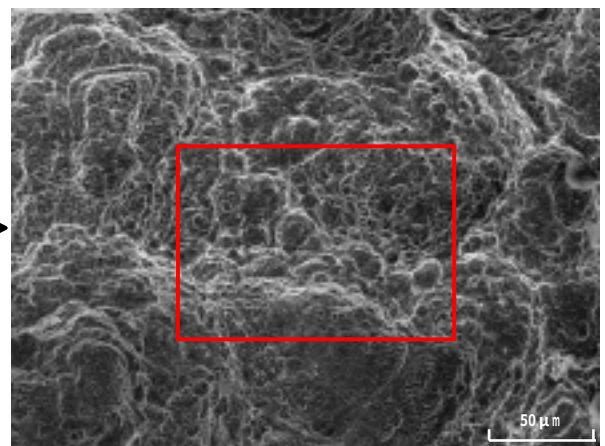
格納容器排気筒調査結果

破面SEM観察(ひび割れ②) 接続鋼材側)

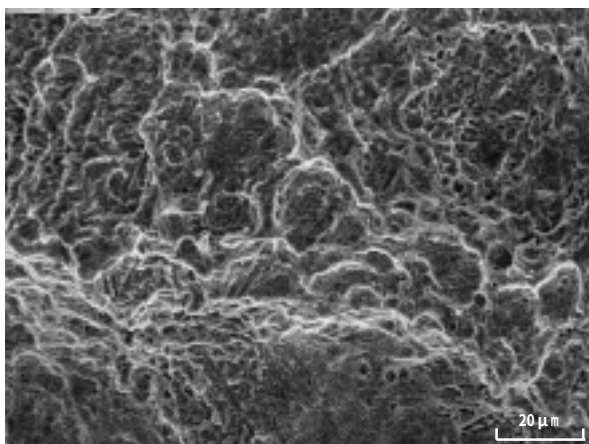


A部拡大

拡大



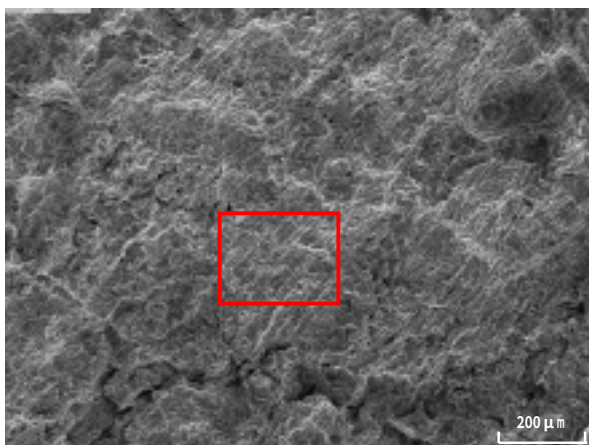
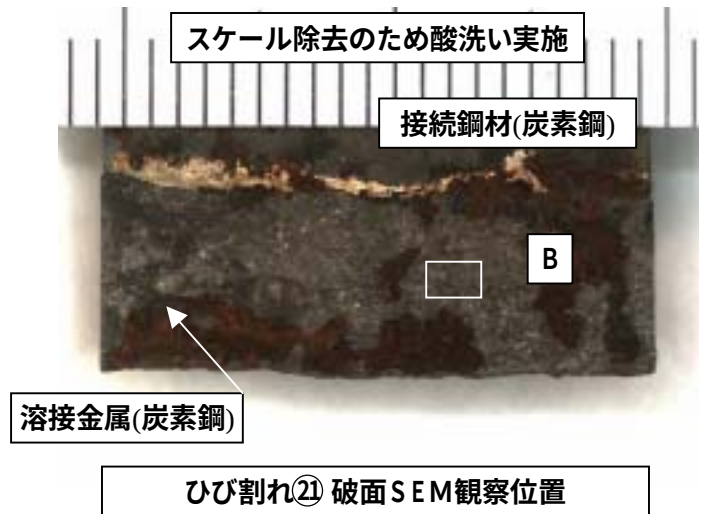
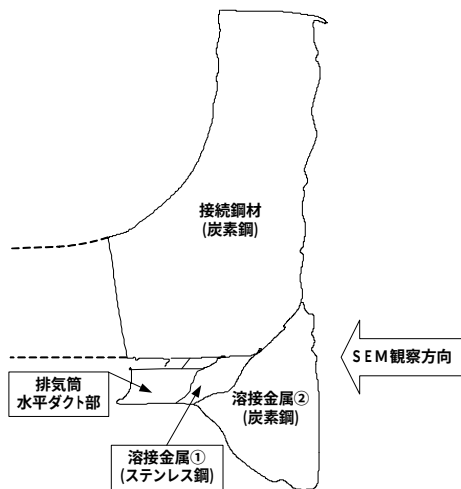
拡大



[観察結果]

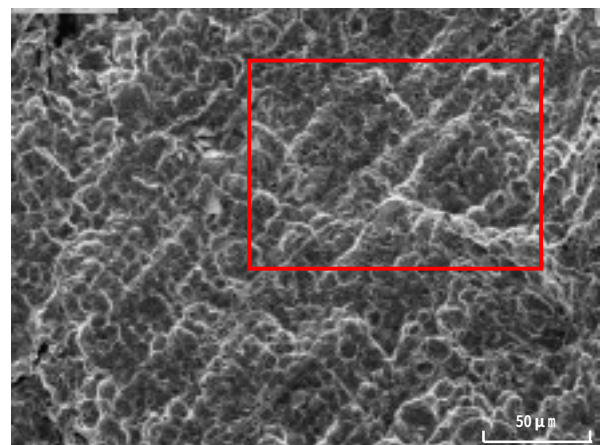
・ひび割れ②破面は、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が認められる。

格納容器排気筒調査結果 破面SEM観察 (ひび割れ ② 中央部)

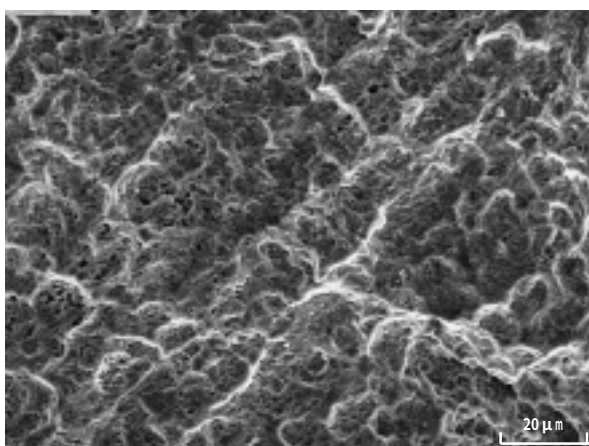


B部拡大

拡大



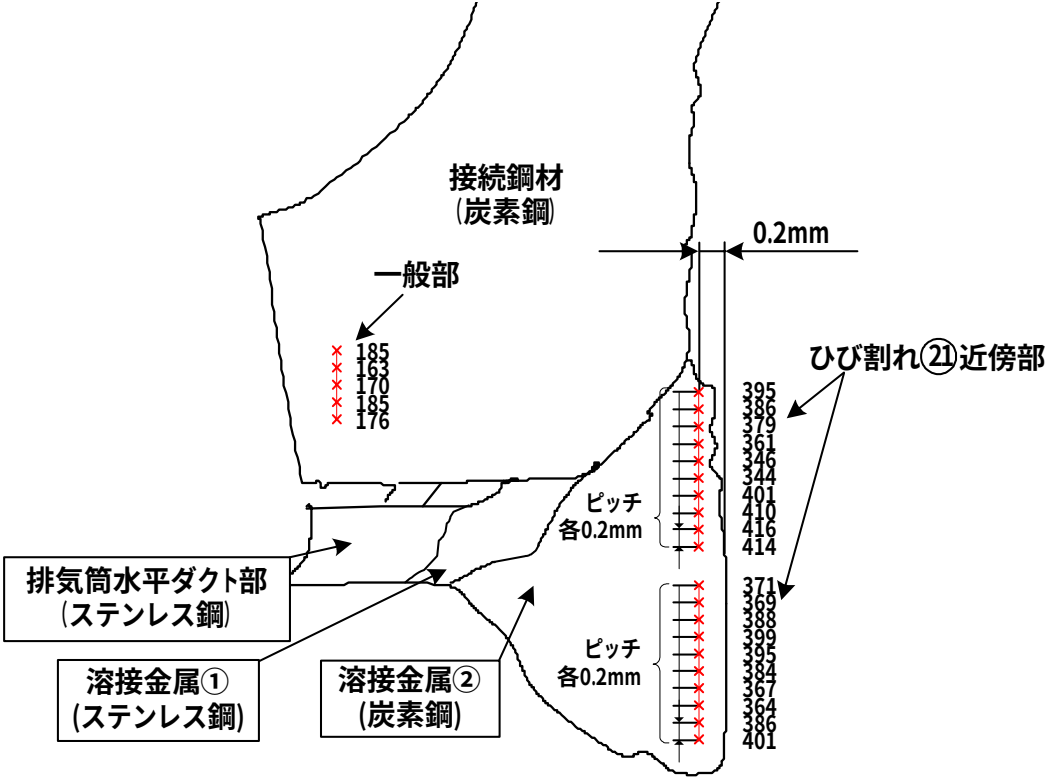
拡大



【観察結果】

・ひび割れ②破面は、腐食の際に現れる滑らかな凹凸が認められる。

格納容器排気筒調査結果
硬度測定（ひび割れ②）



		硬度（ビッカース換算）	
		平均	最高
測定値	ひび割れ② 近傍部	約 385	416
	一般部	約 175	185

炭素鋼（SS41）の硬さ規格値はなし。

〔測定結果〕

・ひび割れ② 近傍の溶接金属部の硬度を測定した結果、硬化した部位が認められた。

格納容器排気筒調査結果
E P M Aによる分析 (ひび割れ ②① の破面元素分析)

[単位:重量%]

	C l	Na	Mg	Ca	P	S	S i	その他
ひび割れ②①	0.25	2.21	1.33	0.72	0.44	0.37	1.01	93.66

(参考)

[単位:重量%]

	C l	Na	Mg	Ca	P	S	S i	その他
一般部 (炭素鋼)	0.29	2.04	1.63	0.07	0.64	0.53	1.34	93.46

[分析結果]

・ひび割れ②①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一般部とほぼ同等であることが確認された。

格納容器排気筒の振動計測結果

格納容器排気筒水平ダクト部および鉛直ダクト部について、ひび割れを確認した付近の振動計測（変位計測）を実施した。

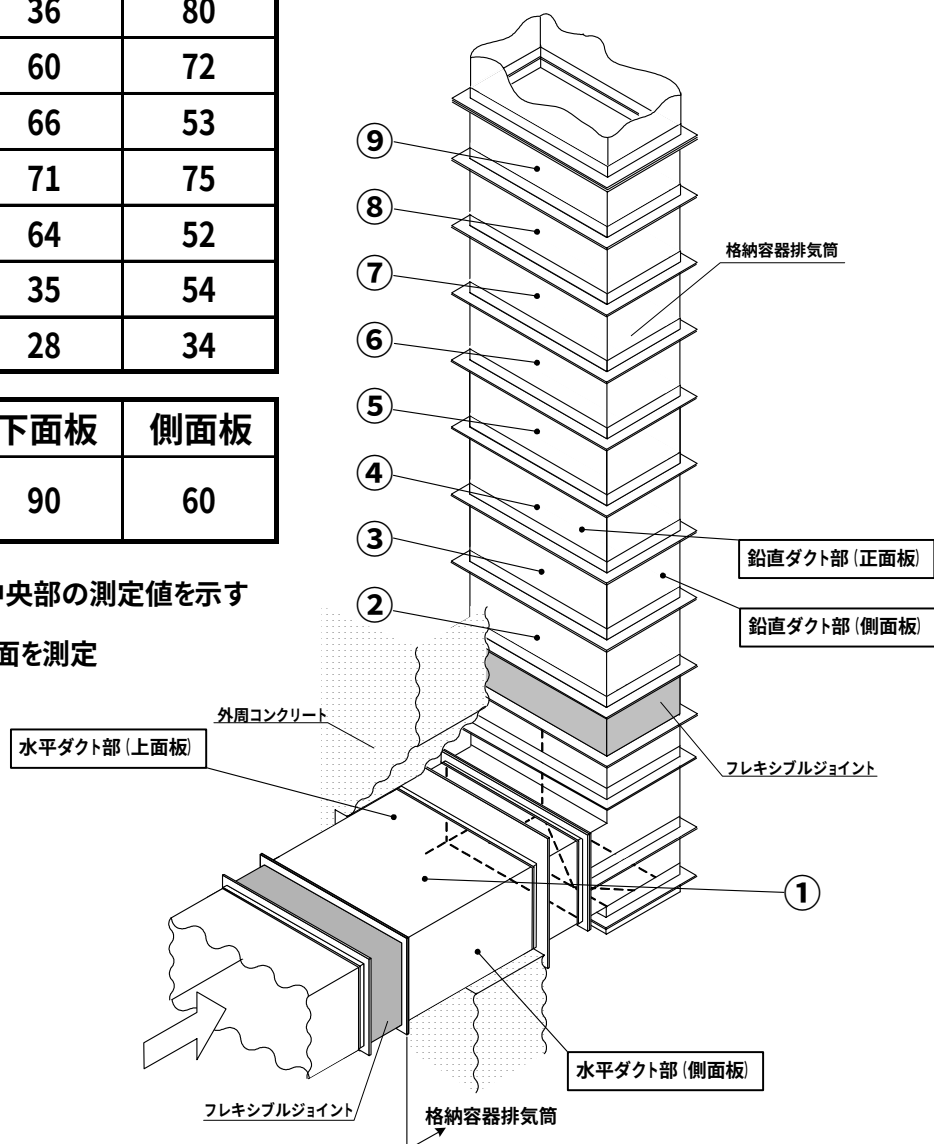
単位（ $\mu\text{m}^{\text{P-P}}$ ）

		正面板	側面板
鉛直 ダクト部	⑨	56	66
	⑧	36	80
	⑦	60	72
	⑥	66	53
	⑤	71	75
	④	64	52
	③	35	54
	②	28	34

		下面板	側面板
水平 ダクト部	①	90	60

①～⑨全てダクト板のほぼ中央部の測定値を示す

①の上面板は狭隘なため下面を測定



格納容器排気筒ダクト振動計測位置（概要図）

格納容器排気筒の断続溶接部に関する考察

格納容器排気筒 (以下、「C/V排気筒」という) の断続溶接部については、補助建家排気筒 (以下、「A/B排気筒」という) で認められた低応力高サイクルによるひび割れは確認されていない。

この要因について検討した結果、C/V排気筒については、

- a. 口径は1,500mm×1,000mmであり、A/B排気筒 (口径2,500mm×1,000mm) に比べて小さく剛性が高い
- b. 設計風速は約18m/秒であり、A/B排気筒 (約20m/秒) に比べて小さい
- c. C/V排気筒の振動計測 (変位の両振幅) を行った結果、水平ダクト部下面は最大で90 μ m、鉛直ダクト部正面は最大で71 μ mであり、A/B排気筒の約1/20程度と小さい

ことから、C/V排気ファンの運転に伴い発生する変動応力は小さく、ひび割れが認められなかったと推定される。

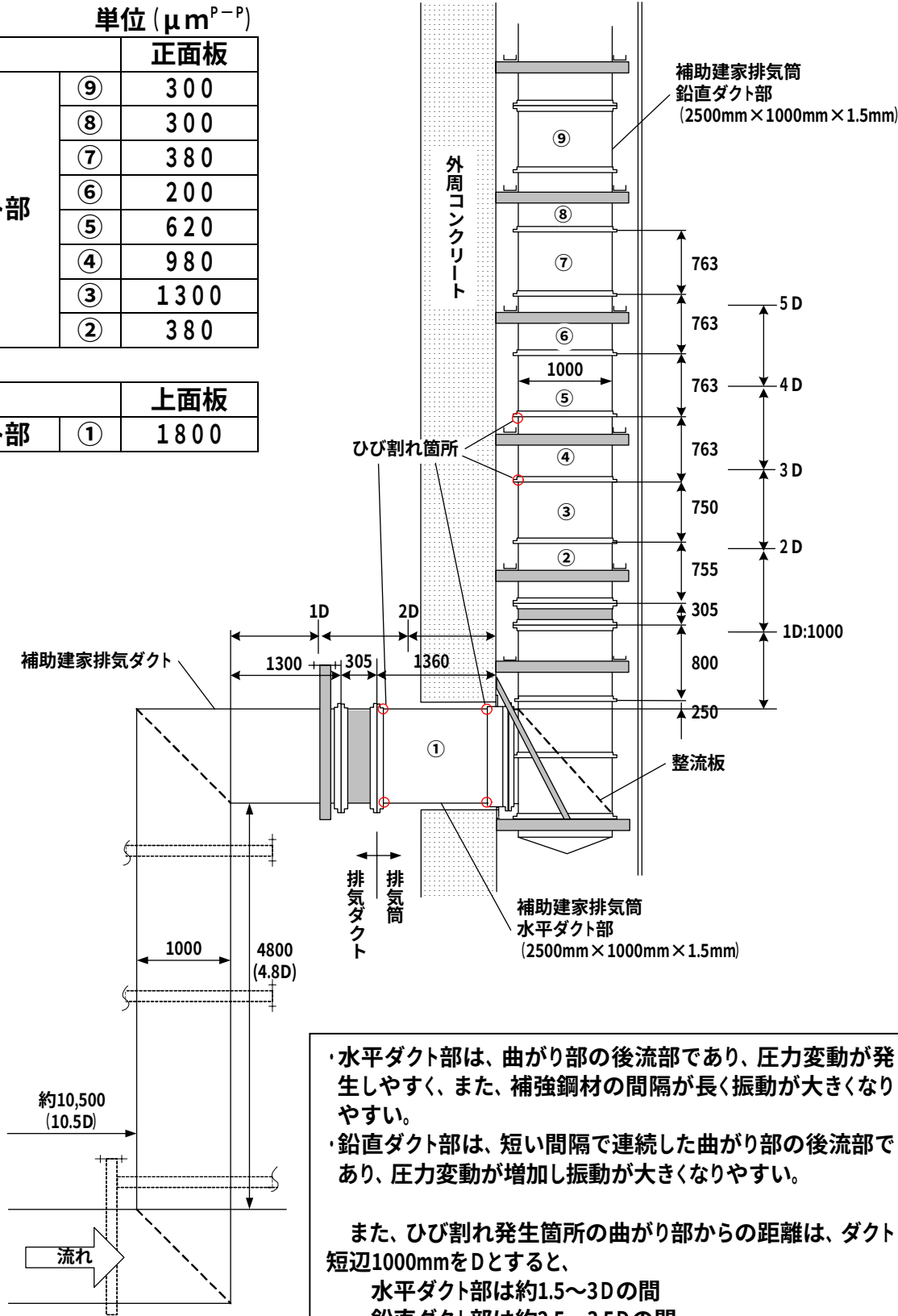
補助建家排気筒の配置上の特徴

<振動計測結果>

単位 (μm^{P-P})

正面板	
⑨	300
⑧	300
⑦	380
⑥	200
⑤	620
④	980
③	1300
②	380

上面板	
水平ダクト部 ①	1800



- ・水平ダクト部は、曲がり部の後流部であり、圧力変動が発生しやすく、また、補強鋼材の間隔が長く振動が大きくなりやすい。
- ・鉛直ダクト部は、短い間隔で連続した曲がり部の後流部であり、圧力変動が増加し振動が大きくなりやすい。

また、ひび割れ発生箇所の曲がり部からの距離は、ダクト短辺1000mmをDとすると、
水平ダクト部は約1.5～3Dの間
鉛直ダクト部は約2.5～3.5Dの間
であり、圧力変動が生じやすい範囲にあり、これは振動計測結果ともほぼ一致している。

高サイクル疲労によるひび割れの発生に関する評価結果 (ひび割れ③部および②部)

1. 目的

補助建家排気筒の水平ダクト部および鉛直ダクト部のひび割れ発生部の詳細調査結果から、ひび割れの発生要因として、低応力高サイクル疲労が抽出されたことから、ダクト内の圧力変動による振動で発生する変動応力を算出するとともに疲労限を推定し、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. 振動応答解析

- ・ダクト内の圧力変動を規格化した圧力変動パワースペクトルと実機のダクト内の圧力計測結果より、実機解析用圧力変動パワースペクトルを設定する。
- ・対象ダクトを板要素でモデル化し、実機解析用圧力変動パワースペクトルを入力としたFEM解析により、ひび割れ③部および②部の変動応力（公称応力）を算出する。

b. 変動応力推定

- ・上記で得られた公称応力に、断続溶接部周辺をソリッド要素でモデル化したFEM解析から得られた断続溶接部の形状不連続による応力割増を考慮して、変動応力を算出する。

(2) 疲労限の推定

- ・詳細調査で得られた硬さにおける材料強度（0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ および引張強さ σ_B ）を求める。
- ・引張強さ σ_B より定まる疲労限 S_w に断続溶接部の応力集中（応力集中係数 K_t ）を考慮し、疲労限 $\sigma_w (= S_w / K_t)$ を求める。
- ・以上の材料強度から修正グッドマン線図により、平均応力 σ_m （詳細調査で得られた残留応力、内圧・自重による応力）を考慮した疲労限 σ_w' を求める。

(3) 疲労評価

- ・変動応力と疲労限を比較し、疲労破壊の可能性を評価する。

3. 結果

解析および評価を実施し、以下の結果を得た。

(1) 振動による変動応力の算出……………《別紙1》

a. 振動応答解析結果

- ・ ひび割れ③部変動応力（公称応力）：31.2 MPa
- ・ ひび割れ⑳部変動応力（公称応力）：29.3 MPa

b. 変動応力推定結果

- ・ 形状不連続による応力割増係数：1.6……………《別紙1 参考資料》
- ・ ひび割れ③部変動応力：50 MPa
- ・ ひび割れ⑳部変動応力：47 MPa

(2) 疲労限の推定……………《別紙2》

- ・ ひび割れ③部：43 MPa
- ・ ひび割れ⑳部：43 MPa

(3) 疲労評価

水平ダクト部上面板および鉛直ダクト部正面板の断続溶接部に発生する変動応力は、疲労限を上回り疲労破壊が発生し得ることを確認した。

疲労評価結果

	変動応力 (MPa)	疲労限 (MPa)	疲労破壊の 可能性
ひび割れ③部	50	43	有り
ひび割れ⑳部	47	43	有り

振動による変動応力の算出結果 (ひび割れ③部および②⑩部)

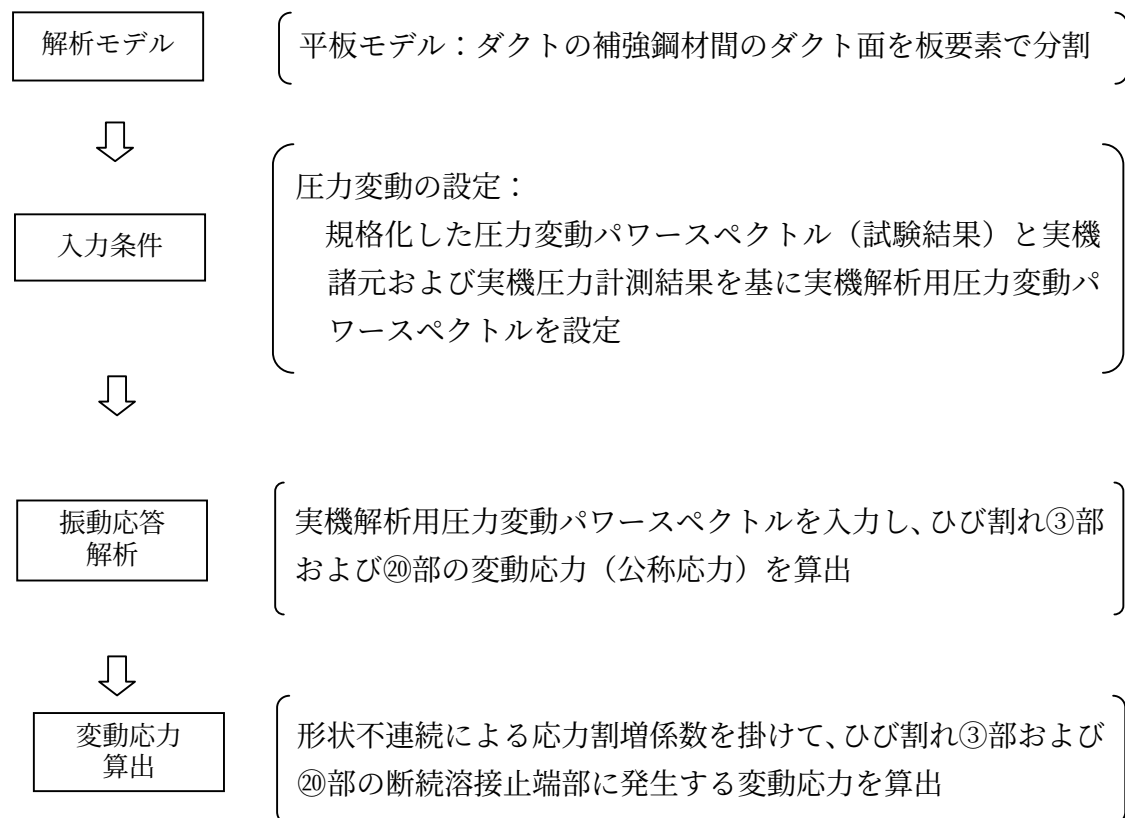
1. 概要

補助建家排気筒の水平ダクト部および鉛直ダクト部のひび割れ発生部について、ダクト内の圧力変動による振動で発生する断続溶接部の変動応力を算出する。

2. 解析方法

(1) 解析フロー

解析は対象ダクトを板要素でモデル化し、ダクト曲がり部に発生する圧力変動をメーカ試験結果より規格化した圧力変動パワースペクトルと実機圧力計測結果を基に実機解析用圧力変動パワースペクトルを設定し、振動応答解析を実施する。振動応答解析で得られた変動応力（公称応力）に形状不連続による応力割増を考慮し、ひび割れ③部および②⑩部の溶接止端部に発生する変動応力を算出する。解析フローを以下に示す。



(2) 解析モデル

ダクトの補強鋼材間のダクト面を対象に、板要素を用いてダクト面を平板にモデル化した。

拘束条件として、ダクト板と補強鋼材の断続溶接部およびダクト板コーナ部を固定とした。解析箇所および解析モデル図（水平ダクト部上面板、鉛直ダクト部正面板）を図1に示す。

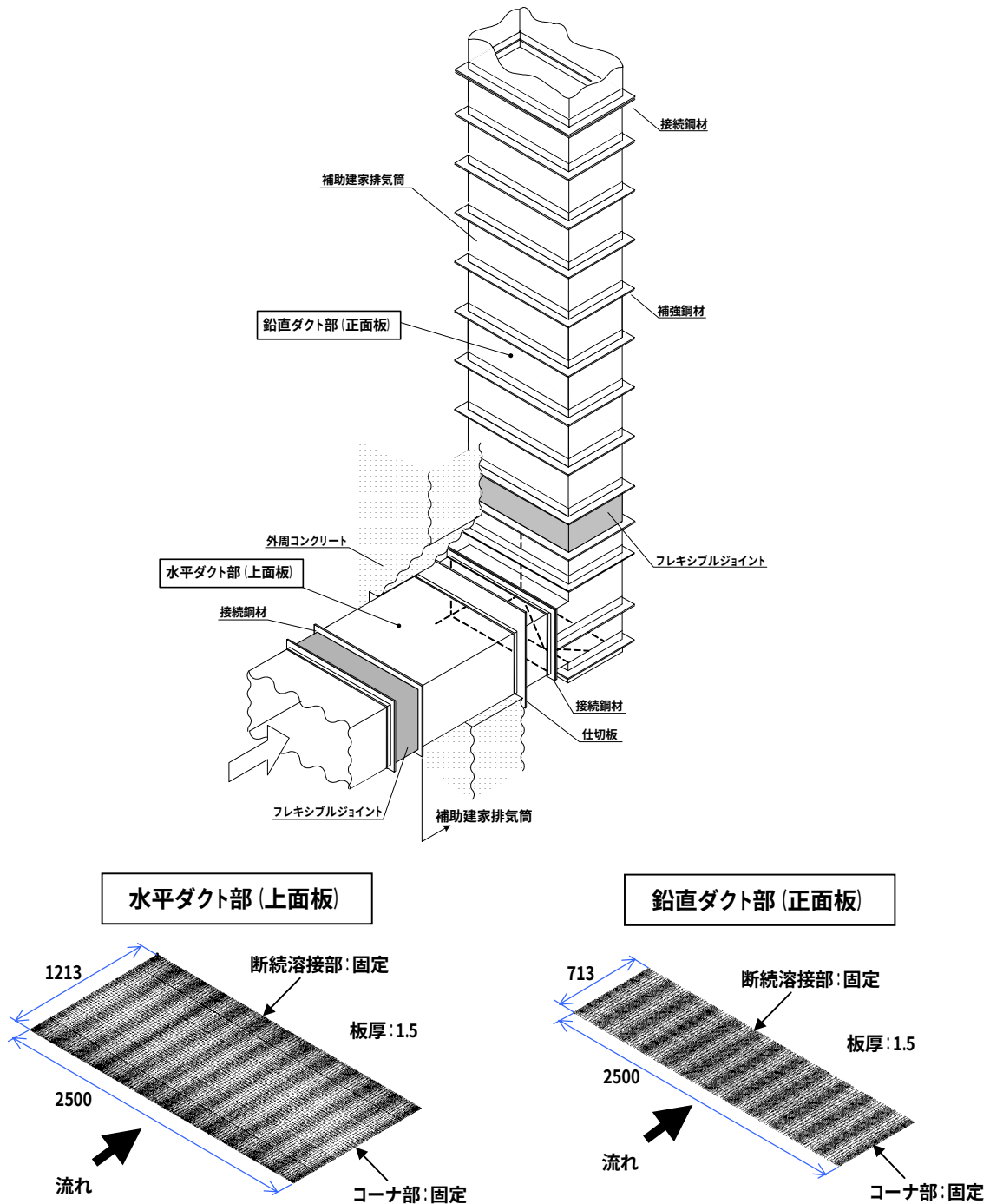


図1 解析箇所および解析モデル図

(3) 解析条件

a. 入力条件

ダクト内においては、ダクトの曲がり、拡大等によって風の流れが乱れ、ランダムな圧力変動が生じる。この圧力変動はメーカ試験結果から規格化した圧力変動パワースペクトルとして以下の式¹⁾で整理されている。これを基に実機諸元および実機圧力計測結果を反映した実機解析用圧力変動パワースペクトルを設定した。

圧力変動パワースペクトル

$$\phi(\omega)U/p^2D = c^2/(fD/U+X)^2$$

ここで、 $\phi(\omega)$ ：圧力変動パワースペクトル

U ：平均流速

$\sqrt{p^2}$ ：変動圧力の RMS 値

f ：振動数

D ：ダクト代表幅

c ：係数 (=0.65)

X ：定数 (=0.2)

解析に用いた圧力変動パワースペクトルを図2に示す。

表1 圧力変動の入力諸元

項目	諸元
平均流速 U	20 m/s
ダクト代表幅 D	1 m
変動圧力の RMS 値 $\sqrt{p^2}$ (実機圧力計測結果より)	水平ダクト部：21.5Pa 鉛直ダクト部：24.9Pa

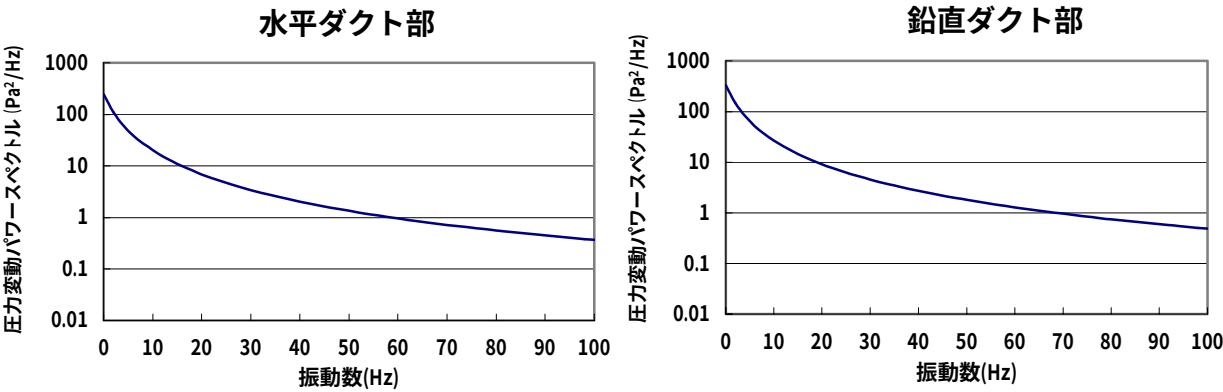


図2 圧力変動パワースペクトル

1) 猫本・西村ほか、空調ダクトの動的設計手法の開発、日本機械学会 2001 年度年次大会講演論文集 V (2001)

3. 振動応答解析結果

実機解析用圧力変動パワースペクトルを入力し、ダクト板のスペクトル応答解析により変動応力（公称応力）を算出した。（表2参照）

4. 変動応力算出結果

振動応答解析で得られた変動応力（公称応力）に形状不連続による応力割増係数を考慮して、断続溶接止端部に発生する変動応力を算出した。（表2参照）

発生する変動応力は、

ひび割れ③部：50MPa

ひび割れ②⑩部：47MPa

と推定された。

表2 振動による変動応力の算出結果

項目		単位	評価箇所		備考
			ひび割れ③部	ひび割れ②⑩部	
振動応答解析による変動応力（公称応力）		MPa	31.2	29.3	(A)
変動応力推定	応力割増係数	—	1.6	1.6	(B)
	実機変動応力	MPa	50	47	(A×B)

形状不連続による応力割増係数について

1. 概要

断続溶接部近傍は形状不連続により一般部より応力が大きくなる。このため、断続溶接部をFEM解析（ソリッド要素）によりモデル化し、

$$\text{形状不連続による応力割増係数} = \frac{\text{形状不連続による局部応力}}{\text{公称応力}}$$

を求める。

2. 評価手法

シェルモデルの振動応答解析結果から得られる1次モードの振動変位により断続溶接止端部に発生する応力について、シェルモデルおよびソリッドモデルによる解析結果の比較を行い、形状不連続による応力割増係数を評価する。

3. シェルモデルによる応力解析

水平ダクト部上面板の応力解析に使用した解析モデル（シェルモデル）により、1次モードに対する変位および発生応力を求めた。

1次モードで正規化された変位に対する最大応力は8.5MPaとなった。

4. ソリッドモデルによる応力解析

(1) 解析モデル

シェルモデルの中央位置の断続溶接部（すみ肉溶接）について接続鋼材部を含めモデル化し、応力を算出した。解析モデルを図1に、境界条件を図2に示す。

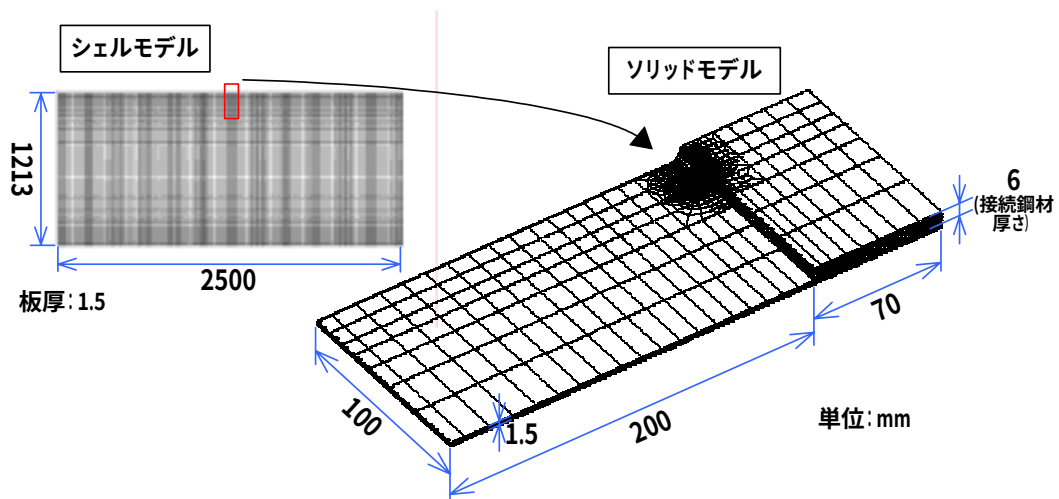


図1 解析モデル

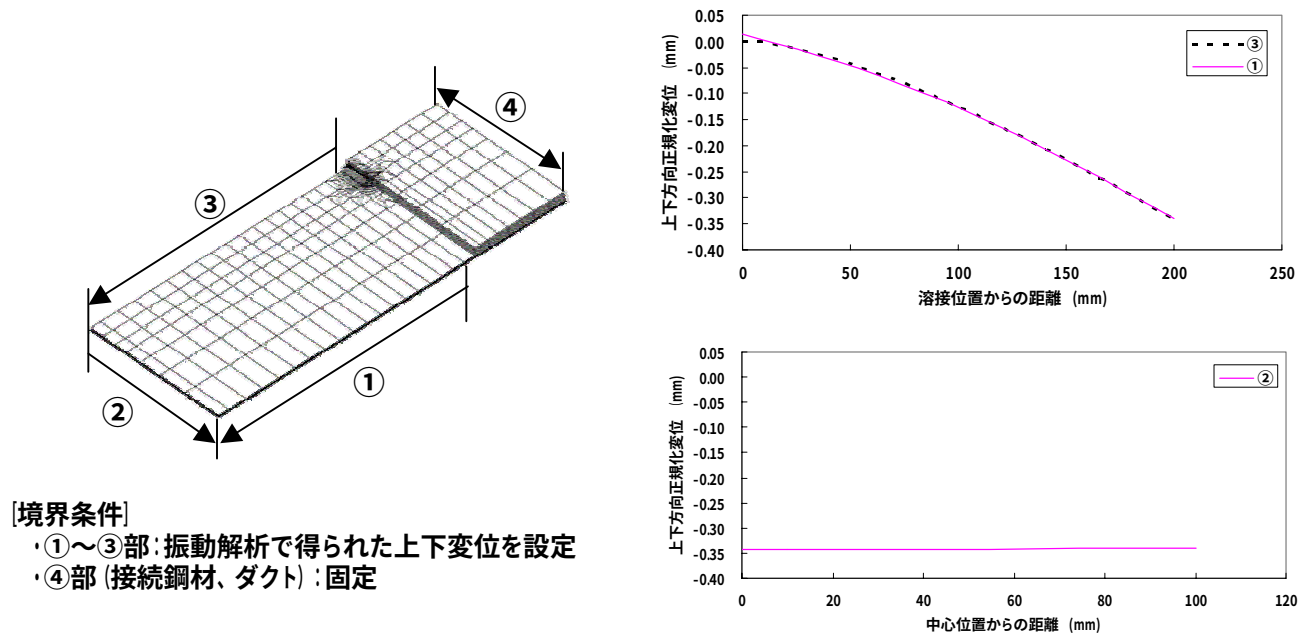


図2 境界条件

(2) 解析方法

シェルモデルによる振動応答解析（1次モード）で得られた変位により断続溶接部に発生する応力を算出する。

5. 形状不連続による応力割増係数

4. ソリッドモデルによる応力解析により得られた応力分布を図3に示す。最大応力は 17.2MPa であるが、これには断続溶接部の応力集中効果が含まれていると考えられるため、断続溶接止端部の局部最大応力は 13.7MPa とし、3. シェルモデルの最大応力値と比較した。

その結果は表1に示すとおりであり、形状不連続による応力割増係数は 1.6 程度と考えられる。

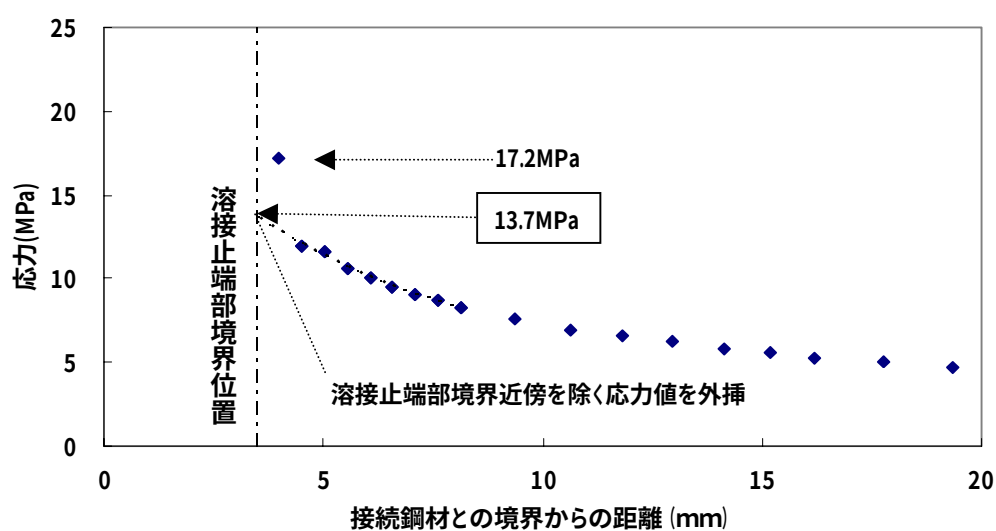


図3 ソリッドモデルによる応力分布

表1 最大応力の比較

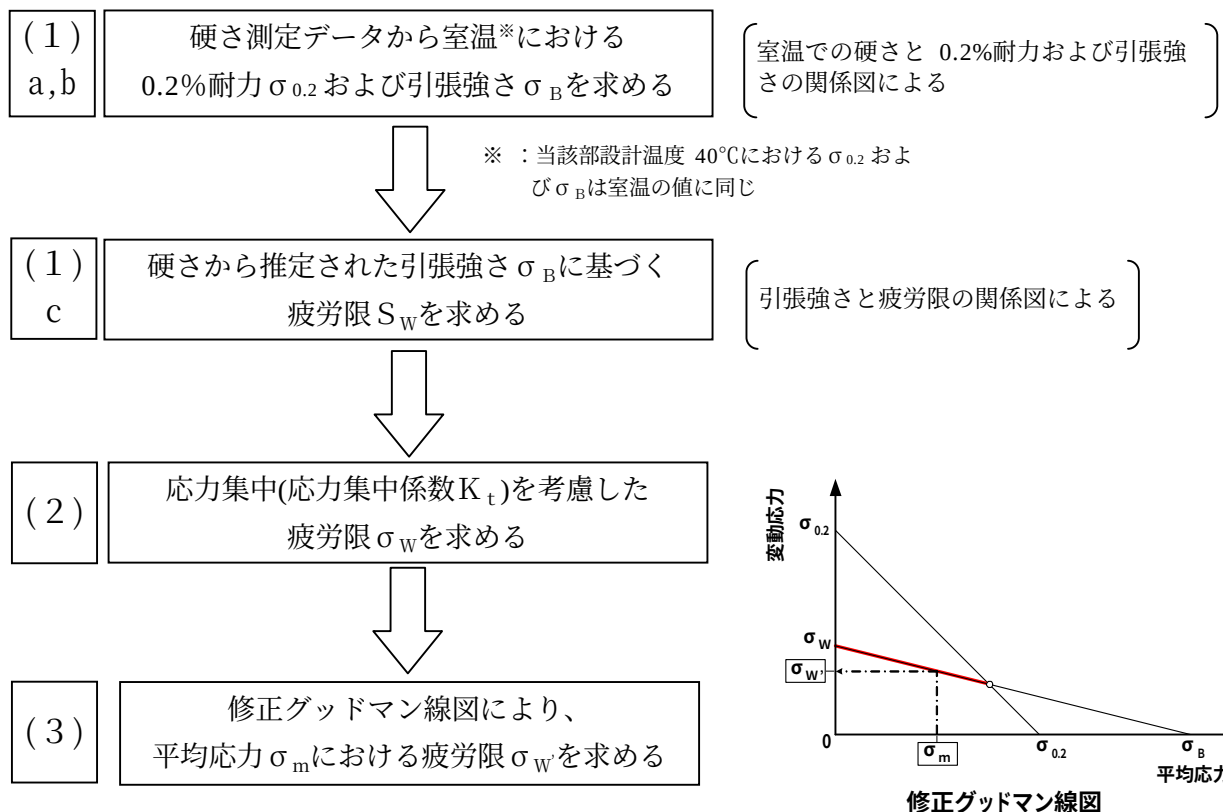
解析モデル	最大応力[MPa]	応力割増係数
シェルモデル	[A] 8.5	[B/A] 1.6
ソリッドモデル	[B] 13.7	

断続溶接部の疲労に関する検討結果 (ひび割れ③部および②部)

1. 疲労限の求め方

疲労限は、材料の硬さ、使用温度、応力集中係数および平均応力に影響を受ける。
以下に、上記各要因を考慮した疲労限を求める手順を記載する。

- (1) 材料強度から疲労限の推定
 - a. 硬さ測定データから室温の引張強さを推定する。
 - b. 使用温度での引張強さを求める。
 - c. 引張強さと疲労限の関係から、使用温度での疲労限を推定する。
- (2) 応力集中の影響を考慮した疲労限 ((1) cで求めたもの) の補正
- (3) 平均応力の影響を考慮した疲労限 ((2) で求めたもの) の補正



2. 材料強度からの疲労限の推定

材料強度から疲労限の評価を行うには、損傷部の使用温度における引張強さのデータが必要である。

しかしながら、損傷部の使用温度における引張強さを直接的に求めることはできないので、下記の手順で推定する。

- (1) ひび割れ③部、⑳部の金属調査において測定した硬度測定データ（ひび割れ近傍部の硬さ）から、図1より引張強さを推定する。なお、図1は室温にて採取されたデータである。
- (2) 損傷部の設計温度は40℃※である。告示第501号別表10に記載のSUS304(冷間圧延ステンレス鋼板及び帯板)の設計引張強さは-30～40℃において同じ値であるため、ひび割れ部の使用温度での引張強さは（1）で求めた値を用いる。
※：補助建家排気筒ダクトの設計温度は40℃である。これは補助建家の設計温度(40℃)から定められている。
- (3) (2) の引張強さから図2より使用温度での疲労限を推定する。

材料強度からの疲労限の推定結果を表1に示す。

表1 硬さから求めた疲労限

	硬さ (HV)	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$ (MPa)	引張強さ σ_B (MPa)	硬さから求めた 疲労限 S_w (MPa)
ひび割れ③部	238	530	770	284
ひび割れ⑳部	236	523	766	284

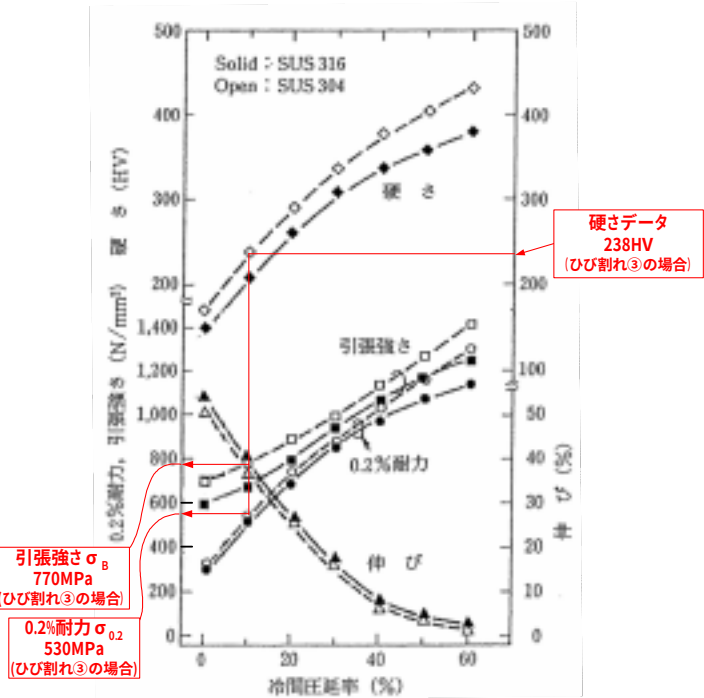


図1 室温での硬さと0.2%耐力および引張強さの関係
(出典：ステンレス鋼便覧 第3版)

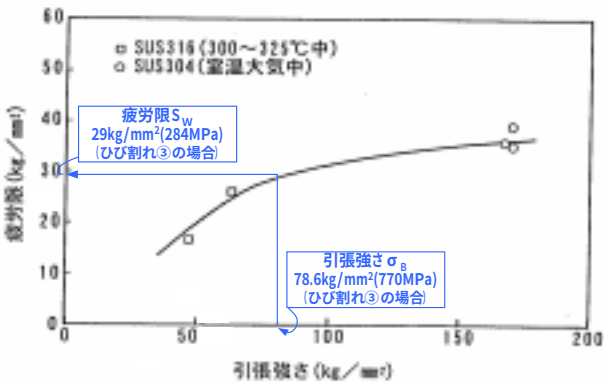


図2 引張強さと疲労限の関係
(出典：材料学会「金属材料疲労限データ集」
および三菱重工業(株)社内データ)

3. 応力集中の影響を考慮した疲労限の補正

溶接部のように材料表面に不連続部がある場合には、応力集中による疲労限の低下を考慮する必要がある。1項で求めた疲労限を応力集中係数 K_t で除したものが、補正後の疲労限 σ_w となる。補正後の疲労限 σ_w を表2に示す。

表2 応力集中の影響を考慮した疲労限

	硬さから求めた 疲労限 S_w (MPa)	応力集中係数 K_t	応力集中を考慮した 疲労限 σ_w (MPa)
ひび割れ③部	284	2.6	109
ひび割れ②⑩部	284	2.6	109

4. 平均応力の影響を考慮した疲労限の補正

4. 1 平均応力として考慮すべきもの

ひび割れが発生した断続溶接部に平均応力として作用するものは、(1)残留応力、(2)内圧および自重による応力がある。

(1) 残留応力

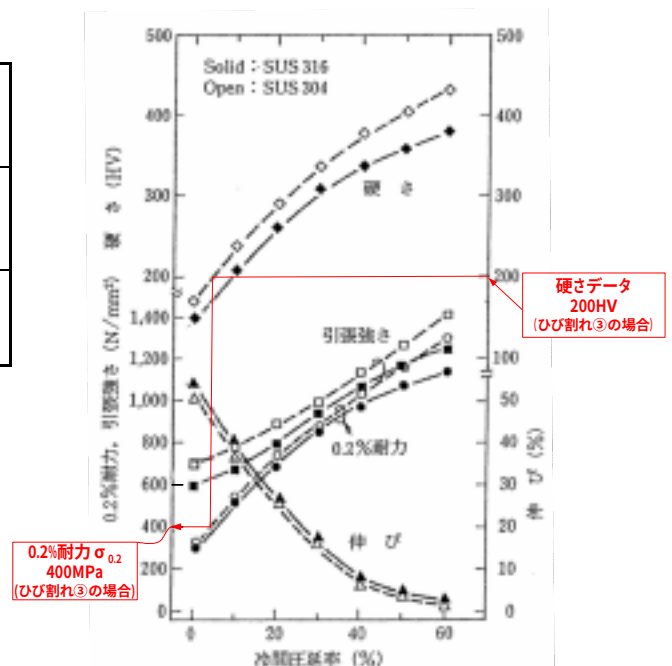
ひび割れ③部、②⑩部に隣接する健全部の断続溶接部近傍の残留応力測定結果から、当該部には降伏応力程度の残留応力が発生し得ることを確認した。これより、当該部の残留応力について、硬度測定結果を考慮して推定した結果を表3に示す。

表3 残留応力推定結果

	硬さ※1 (HV)	残留応力※2 (MPa)
ひび割れ③部	200	400
ひび割れ②⑩部	204	420

※1：ひび割れ③部、②⑩部の一般部（ひび割れ付近）の測定硬度平均値

※2：硬さから定まる0.2%耐力（降伏応力相当）を右図から求めた



室温での硬さと0.2%耐力および引張強さの関係

(出典：ステンレス鋼便覧 第3版)

(2) 内圧および自重による応力

運転時内圧およびダクトの自重により断続溶接部に発生する応力は、運転時内圧によるダクト板面の挙動による応力評価、ダクトの支持構造を考慮して求めた。この結果、内圧および自重による応力はひび割れ③部で 63MPa、ひび割れ②部で 44MPa であった。

以上より平均応力を纏めると表 4 のとおりとなる。

表4 平均応力の纏め

	[A] 残留応力 (MPa)	[B] 内圧および自重 による応力 (MPa)	[A] + [B] 平均応力 σ_m (MPa)
ひび割れ③部	400	63	463
ひび割れ②部	420	44	464

4. 2 平均応力の影響を考慮した疲労限の補正方法

平均応力は疲労限を低下させることから、その影響を修正グッドマン線図にて補正した。修正グッドマン線図※による補正方法の概要を以下に示す。

※：疲労限に影響を及ぼす平均応力の影響は、図3のようにX軸に平均応力を、Y軸に平均応力が零の時の疲労限 σ_w をとって、右下がりの直線で表される。この直線を「修正グッドマン線図」という。
そこで、任意の平均応力 σ_m での疲労限 $\sigma_{w'}$ は、その平均応力値に立てた垂線が修正グッドマン線図と交わる高さで与えられる。

- 平均応力を考慮した疲労限 ($\sigma_{w'}$) は下式で求められる。

$$\sigma_{w'} = \sigma_w \times ((\sigma_B - \sigma_m) / \sigma_B) \cdots \cdots \text{①式 (図3 直線①)}$$

- ただし、平均応力 (σ_m) を考慮した疲労限 ($\sigma_{w'}$) と平均応力 (σ_m) の和が 0.2% 耐力 ($\sigma_{0.2}$) を超えることはない (塑性領域に入るため)。

$$\sigma_{w'} + \sigma_m \leq \sigma_{0.2} \cdots \cdots \text{②式 (図3 直線②と X, Y 軸で囲まれる範囲)}$$

- したがって、①式を②式に代入することにより、平均応力の最大値 (σ_{m0}) が求まる。

$$\sigma_{m0} = \sigma_B \times (\sigma_{0.2} - \sigma_w) / (\sigma_B - \sigma_w)$$

- 平均応力 (σ_m) が平均応力の最大値 (σ_{m0}) を超える場合には、 $\sigma_m = \sigma_{m0}$ として平均応力を考慮した疲労限 ($\sigma_{w'}$) を求める。

$$\sigma_{w'} = \sigma_w \times (\sigma_B - \sigma_{0.2}) / (\sigma_B - \sigma_w)$$

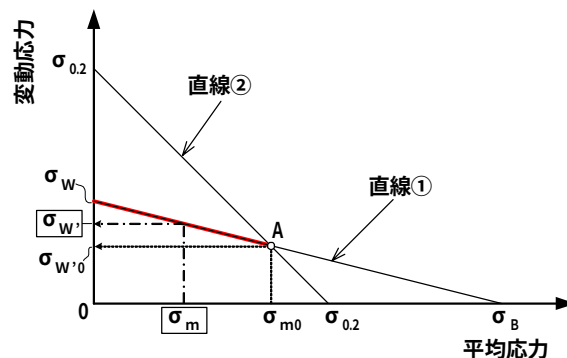


図3 修正グッドマン線図

4. 3 平均応力の影響を考慮した疲労限の補正結果

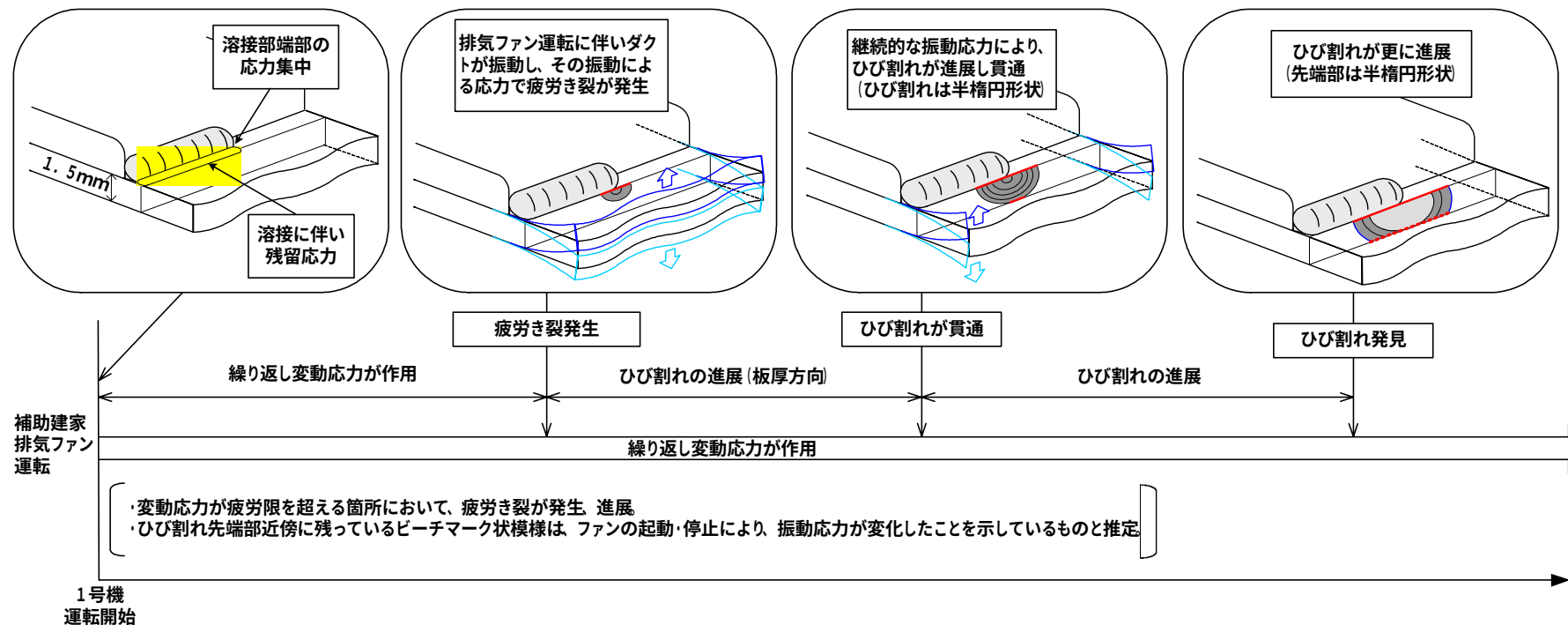
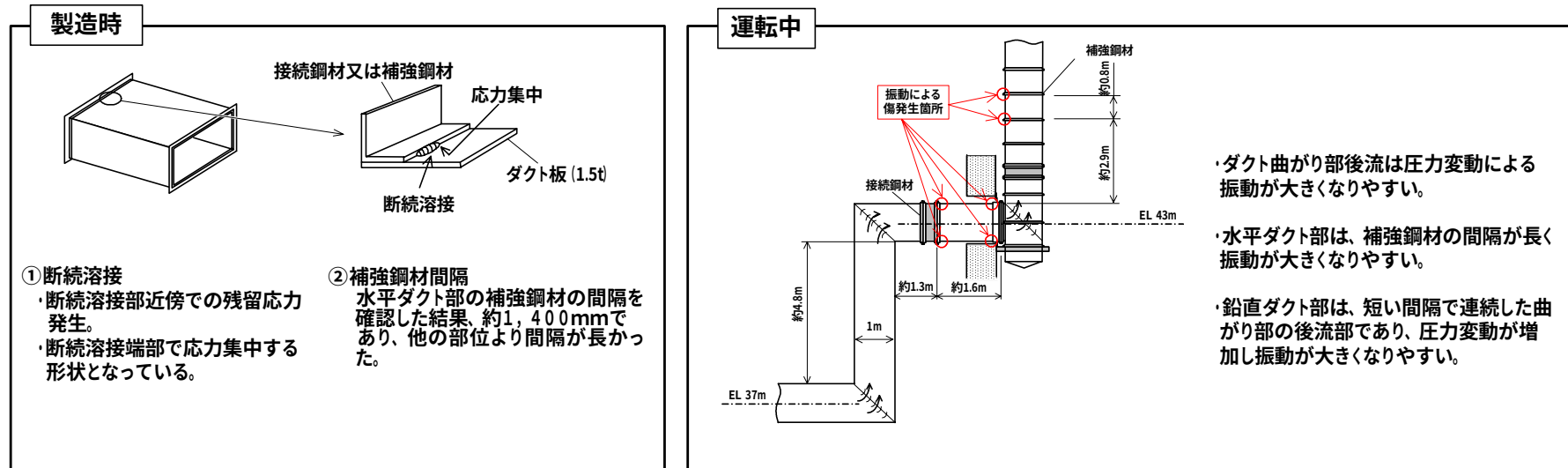
平均応力の影響を考慮した疲労限の補正結果を表5に示す。

表5 平均応力の影響を考慮した疲労限

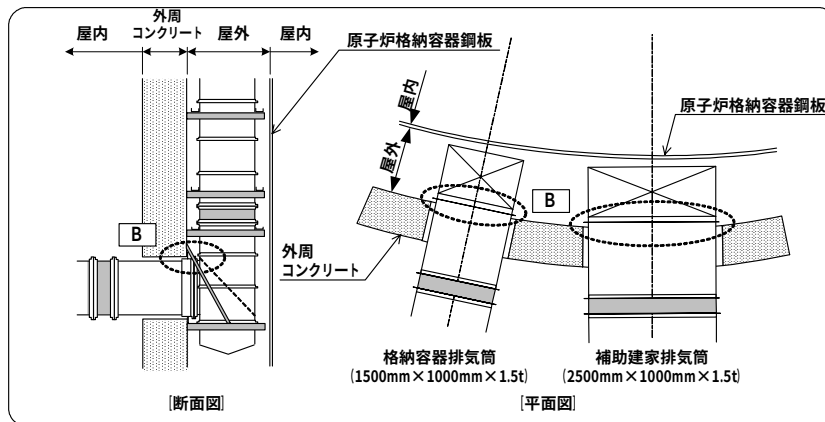
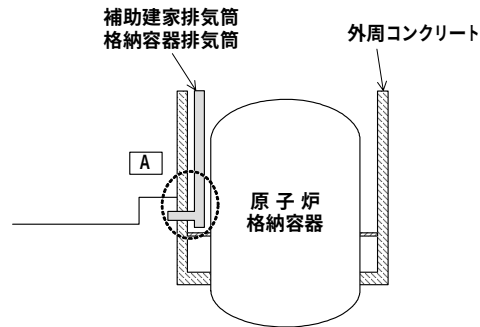
	応力集中を考慮した疲労限 σ_w^{*1} (MPa)	平均応力 σ_m (MPa)	平均応力を考慮した疲労限 $\sigma_{w'}$ (MPa)
ひび割れ③部	109	463	43
ひび割れ②⑩部	109	464	43

※：平均応力を考慮しない疲労限

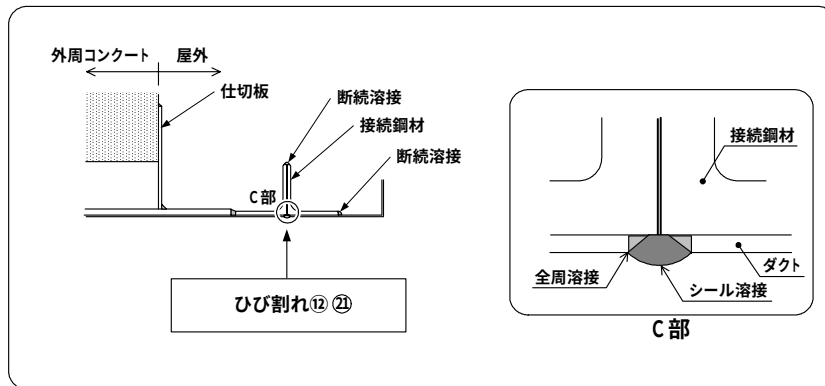
事象発生 の 推定メカニズム (疲労損傷) (ひび割れ①～⑪、⑬～⑳)



事象発生の推定メカニズム (腐食損傷) (ひび割れ⑫⑪)



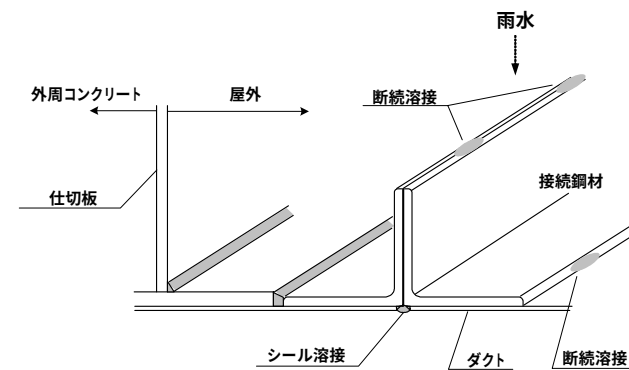
A 部



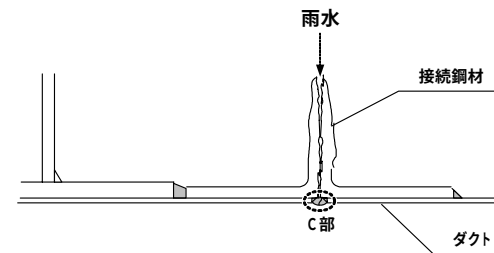
B 部

初期状態

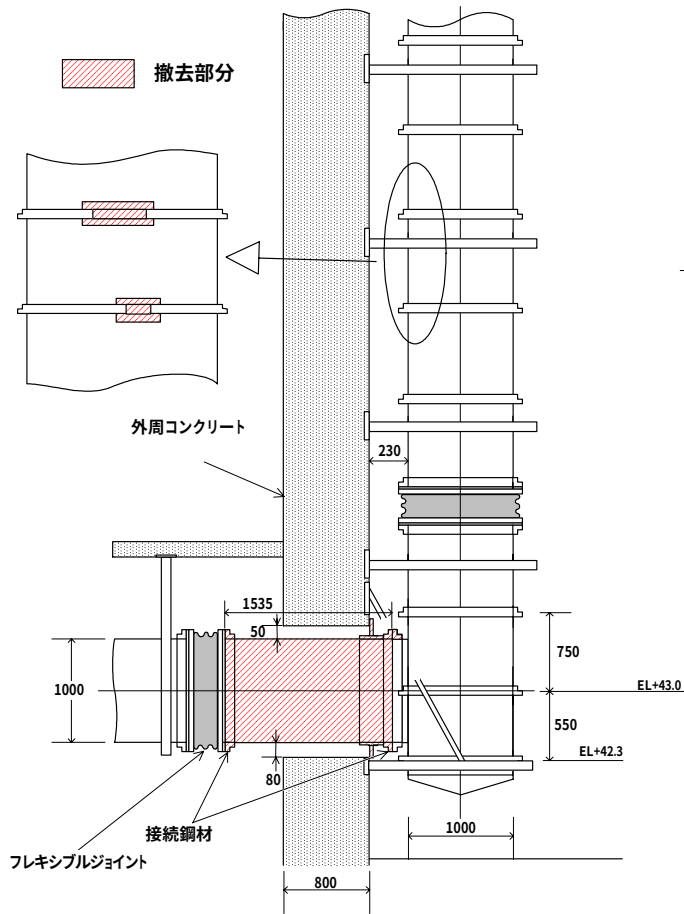
屋外であり、ダクト上面部の接続鋼材(炭素鋼)の断続溶接部の隙間から雨水が浸入



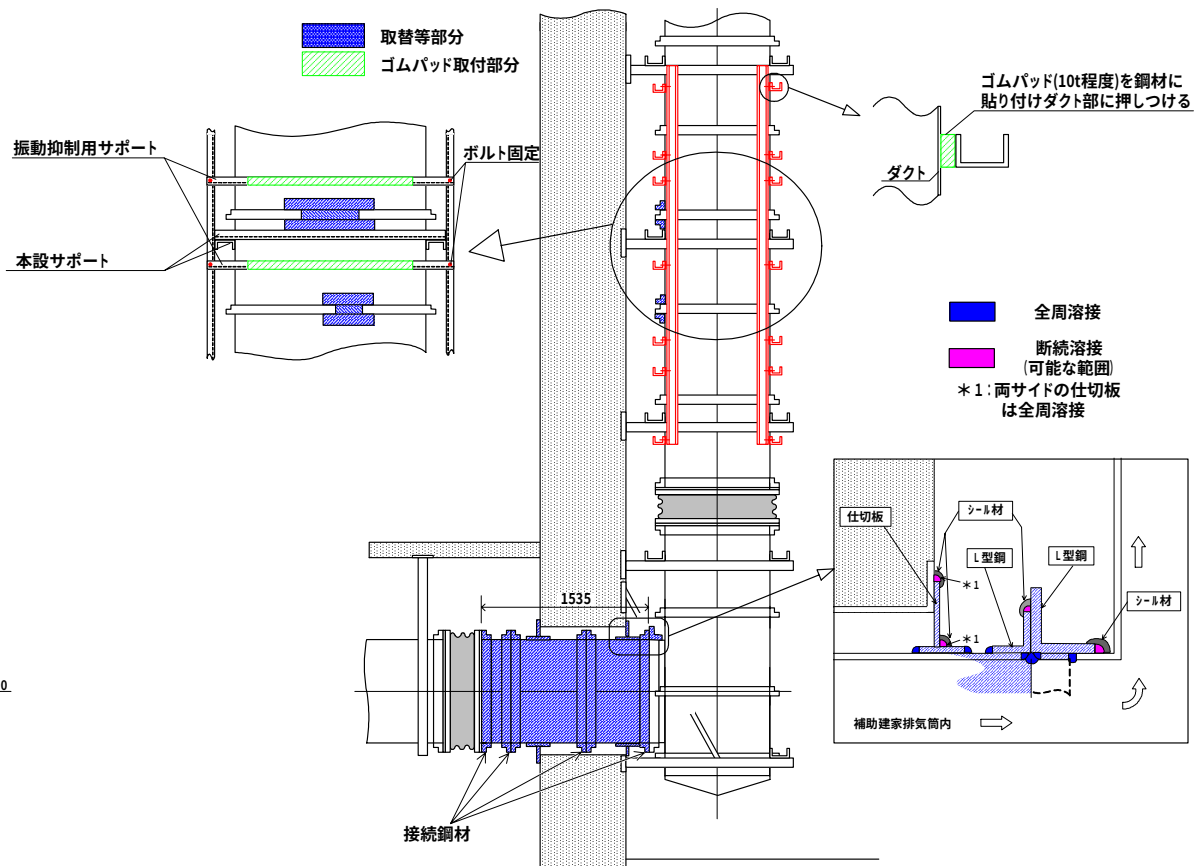
滞留した雨水により、接続鋼材およびシール溶接部(炭素鋼)の腐食が発生し、腐食がシール溶接部を進展



補助建家排気筒・格納容器排気筒復旧概要図 (補助建家排気筒)

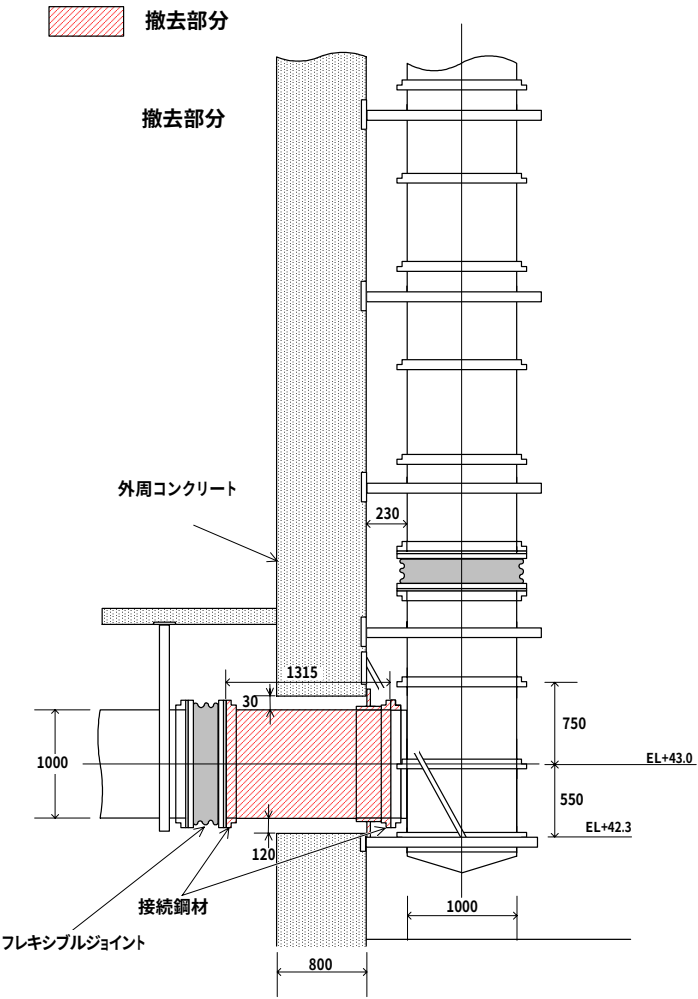


既設設備図
(撤去部分図)

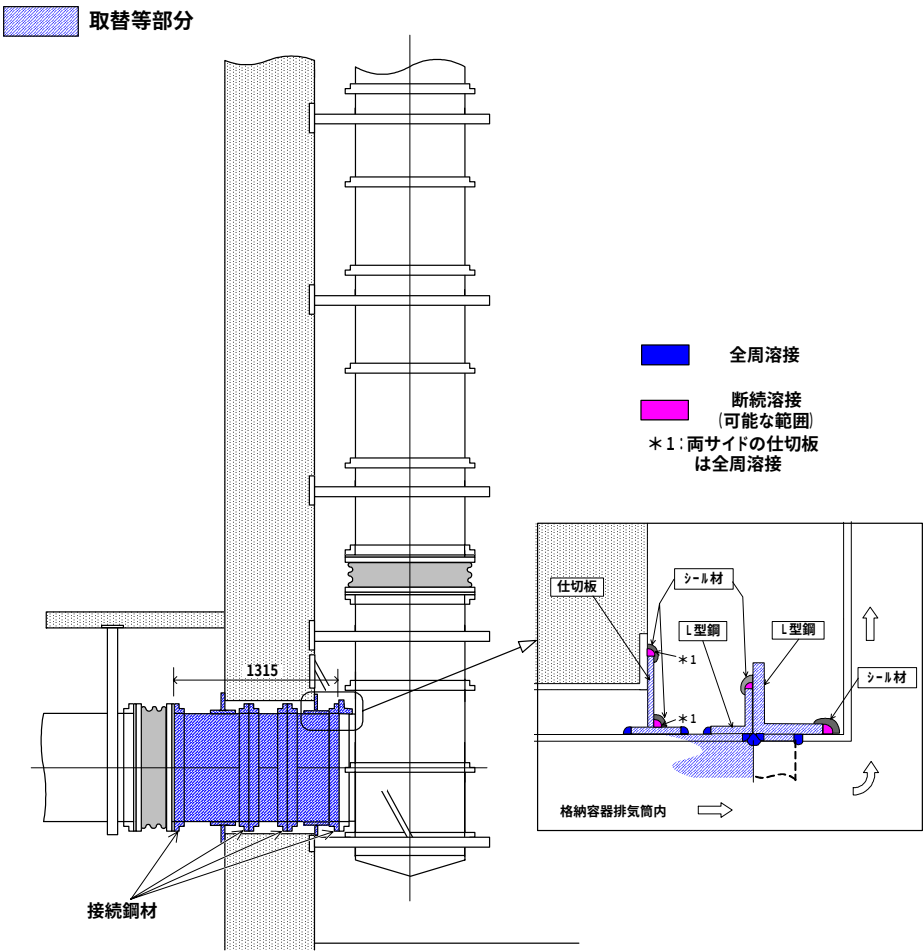


復旧設備図
(取替等部分図)

補助建家排気筒・格納容器排気筒復旧概要図
(格納容器排気筒)



既設設備図
(撤去部分図)



復旧設備図
(取替等部分図)