

原子力発第08063号
平成20年 6月 9日

愛媛県知事
加戸守行 殿

四国電力株式会社
取締役社長 常盤 百樹

伊方発電所第1号機 湿分分離加熱器蒸気噴出口溶接部の割れ
他2件に係る報告書の提出について

平成20年4月30日に発生しました伊方発電所第1号機 湿分分離加熱器蒸気噴出口溶接部の割れ他2件につきまして、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。

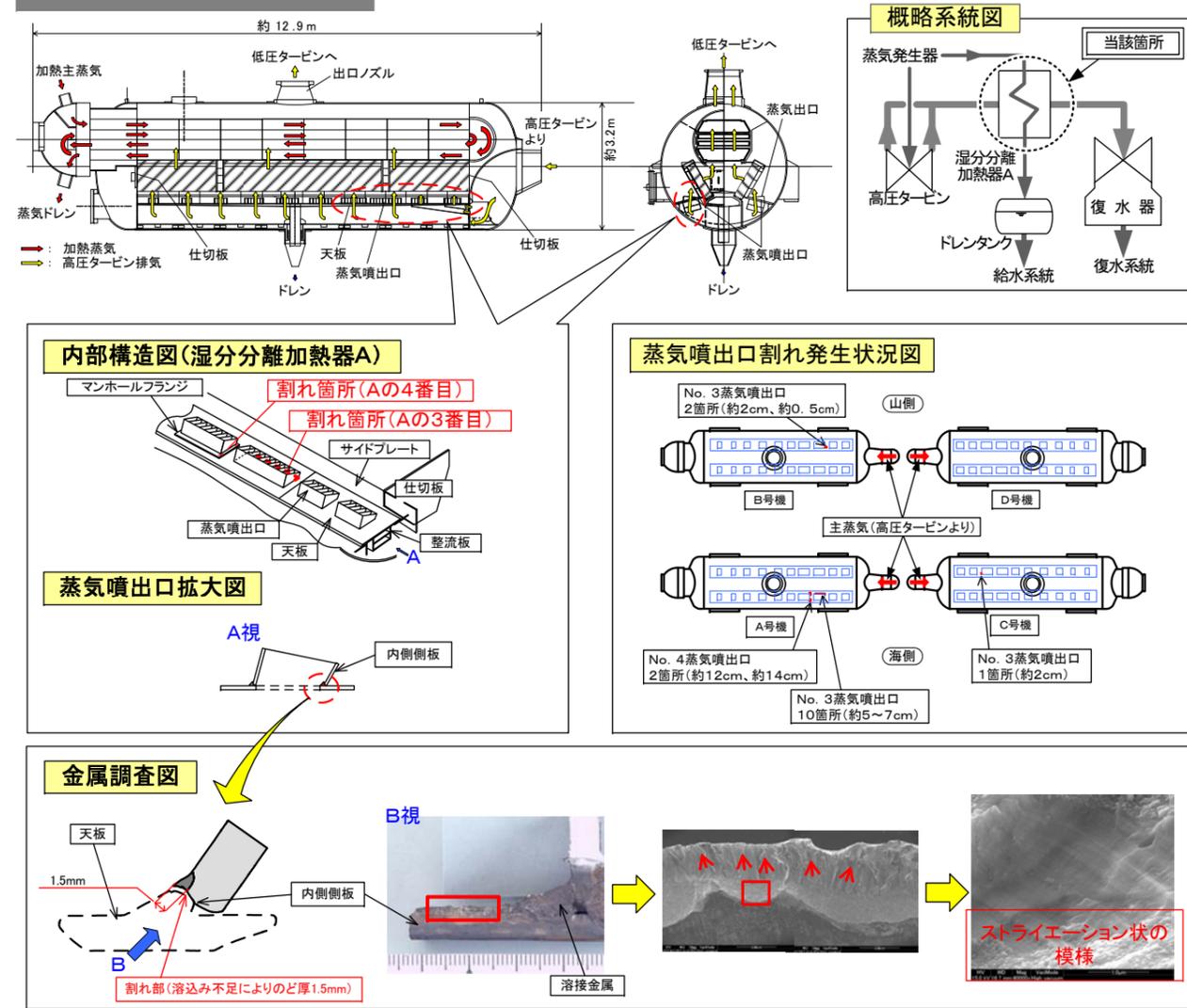
以 上

伊方発電所1号機 湿分分離加熱器蒸気噴出口溶接部の割れについて

事象発生概要

伊方発電所1号機(定格出力566MW)は、第25回定期検査中のところ、2号機の前回定期検査時の天板割れ対応としての総点検実施中に、4月30日10時40分、保修員が目視にて湿分分離加熱器Aの蒸気入口から3番目の蒸気噴出口の溶接部に割れを確認した。その後、他の蒸気噴出口の浸透探傷検査等を実施した結果、湿分分離加熱器Aの4番目、湿分分離加熱器B、Cの3番目に割れがあることを確認した。

蒸気噴出口の割れの状況



推定原因

溶接作業性が悪い内側側板と天板の溶接部に十分な溶込みが得られにくい溶接方法を採用したことから、溶込み不足が発生し、十分など厚が確保されなかった。

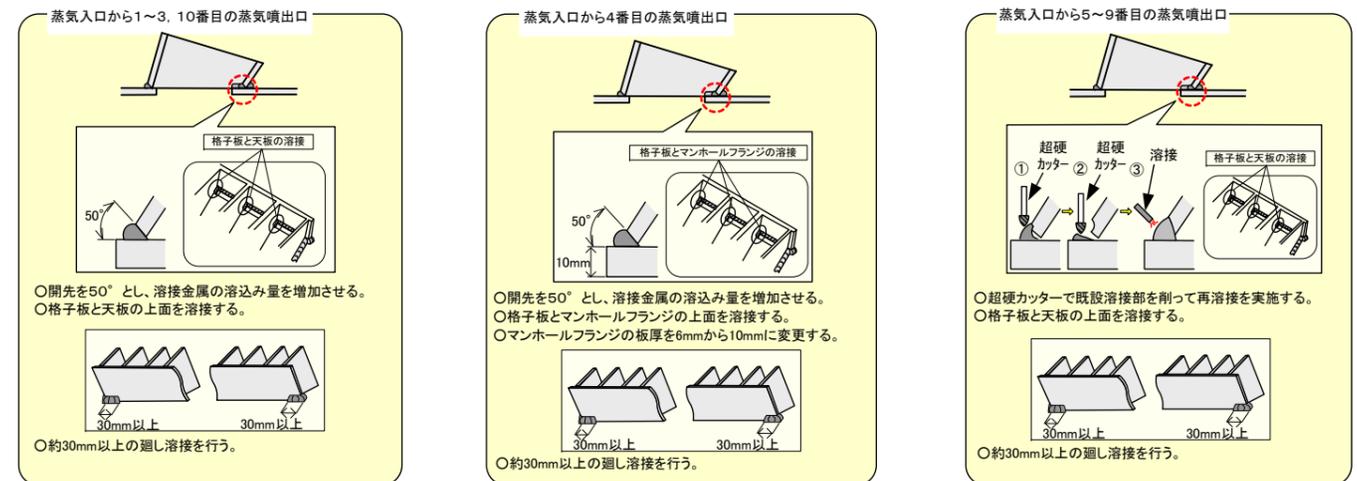
運転中の天板には、蒸気の流れによる高サイクルの流体加振力が作用する。

これらの条件が重畳したことにより、疲労限を上回る高サイクルの変動応力が発生し、疲労が累積して、割れが発生した。

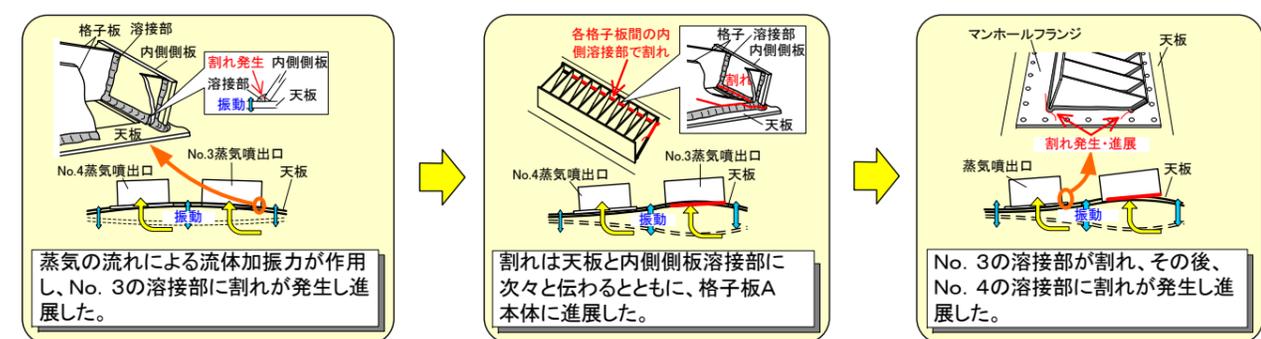
対策

- 割れのあった蒸気噴出口も含め3, 4番目(16個)を新品に取り替える。取替の際には、取替予定の1, 2, 10番目の蒸気噴出口(24個)も含めて、溶込み不足を解消するために十分な溶込みが得られるティグ溶接を行うとともに、補強等を行う。残りの蒸気噴出口(40個)は、運転中の流体加振力による疲労に対し十分な強度が確保できるよう、溶接部の補修をティグ溶接で行い、さらに補強等を実施する。
- 運転中に割れの発生が考えられる流体加振力が作用する範囲において、浸透探傷検査が可能な全ての溶接部を検査し割れ等の異常がないことを確認した。なお、流体加振力が作用する範囲で十分な溶込みが得られにくい溶接部のうち浸透探傷検査が出来ない4基で8部位については、強度に余裕を持たせる観点から補強を実施する。また、2号機の天板割れの対応として、天板16箇所の取替と総点検を実施し、溶接部の健全性を確認するとともに、念のため4基で20部位の補強を実施する。
- 今後の発注において、溶接作業性の悪い狭隘箇所溶接を施工する場合は、溶込み不足が発生しないような実施方法を選定するよう発注仕様書で要求する。

取替・補強方法



割れ発生メカニズム



2, 3号機の対応

2号機については、1号機と同様の構造で同様の溶接施工のため、2号機としては新たにアコースティックエミッションを設置するとともに、音響監視装置等による監視強化を行い、次回定期検査において、1号機と同様の対策を実施する。3号機については、構造が1, 2号機と異なり、同様の蒸気噴出口がないこと等から、対策は不要である。

今後の対応

長期的な健全性に万全を期し安心感の醸成を図るとの観点から、1, 2号機の湿分分離加熱器全台について新たに製作し、平成22年度から23年度にかけて取り替えることで、今後検討を行う。また、新たな製作に当たっては、当社社員を工場に駐在させる等品質管理に万全を期す。

伊方発電所第1号機

湿分分離加熱器蒸気噴出口溶接部の割れについて

平成20年6月

四国電力株式会社

【目 次】

1. 件 名	1
2. 事象発生の日時	1
3. 事象発生の施設	1
4. 事象発生時の運転状況	1
5. 事象発生の状況	1
6. 時 系 列	1
7. 状況調査	2
8. 他の蒸気噴出口溶接部の状況調査	2
9. 詳細調査	2
10. 疲労評価	6
11. 推定原因	7
12. 湿分分離加熱器の溶接部の健全性調査	8
13. 対 策	9
14. 2、3号機の対応	10
15. 今後の対応	10

1. 件名

伊方発電所第1号機湿分分離加熱器蒸気噴出口溶接部の割れについて

2. 事象発生の日時

平成20年4月30日 10時40分（確認）

3. 事象発生の施設

蒸気タービン設備 湿分分離加熱器

4. 事象発生時の運転状況

第25回定期検査中（平成20年4月26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25回定期検査中のところ、2号機の前回定期検査時（平成20年1月から4月）の天板割れの対応として湿分分離加熱器内の総点検中に、4月30日10時40分頃、保修員が目視にて湿分分離加熱器1Aの蒸気入口から見て左側3番目（1A-No.3）の蒸気噴出口溶接部に割れがあることを発見した。

また、他の蒸気噴出口溶接部の浸透探傷検査等を実施した結果、湿分分離加熱器1Aの蒸気入口から見て左側4番目（1A-No.4）、1Bの蒸気入口から見て右側3番目（1B-No.3）、および1Cの蒸気入口から見て左側3番目（1C-No.3）に割れがあることを確認した。

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、2、3）

6. 時系列

4月30日

10時40分 湿分分離加熱器1Aの総点検中に、目視にて1A-No.3の蒸気噴出口溶接部に割れがあることを発見

5月1日

17時30分 蒸気噴出口の割れ部の切出開始

5月2日

11時00分 蒸気噴出口の割れ部の切出終了

5月3日～5日

他の蒸気噴出口溶接部の浸透探傷検査等を実施した結果、湿分分離加熱器1A-No.4、1B-No.3、1C-No.3に割れがあることを確認

5月6日

11時00分 他の蒸気噴出口の割れ部の切出開始

18時00分 他の蒸気噴出口の割れ部の切出終了

7. 状況調査

総点検にて割れが確認された湿分分離加熱器 1 A - No. 3 蒸気噴出口について、外観目視点検等により状況を調査した。

(1) 外観目視点検

湿分分離加熱器 1 A - No. 3 蒸気噴出口溶接部の割れの状況について目視点検を実施した結果、蒸気噴出口を天板に取り付けている溶接部のうち、内側側板と天板の溶接部 10 箇所の中の 9 箇所の割れ（内側側板割れ①～⑨）及び内側側板・格子板 A と天板の溶接部に割れ（格子板 A 割れ）を確認した。

内側側板割れの①～⑧は溶接部のほぼ全長（溶接部全長約 7 c m）の割れであり、⑨は長さ約 5 c m の割れであることを確認した。格子板 A 割れは、内側側板と天板の溶接部及び格子板 A と天板の溶接部に発生しており、全長約 5 c m の連続した割れであることを確認した。

なお、その他には異常は認められなかった。

（添付資料－ 4）

(2) 非破壊検査

当該蒸気噴出口について、割れが確認された溶接部以外の溶接部の浸透探傷検査を実施した結果、割れ等の異常は認められなかった。

8. 他の蒸気噴出口溶接部の状況調査

他の蒸気噴出口溶接部の浸透探傷検査等を実施した結果、湿分分離加熱器 1 A - No. 4、1 B - No. 3、1 C - No. 3 の蒸気噴出口に割れがあることを確認した。

1 A - No. 4 蒸気噴出口溶接部の割れは、蒸気入口側の内側側板側と外側側板側に認められた。内側側板側の割れは、内側側板とマンホールフランジの溶接部及びマンホールフランジ本体に長さ約 1 2 c m 発生していた。外側側板側の割れは、外側側板とマンホールフランジの溶接部近傍及びマンホールフランジ本体に長さ約 1 4 c m 発生していた。マンホールフランジの裏面を外観目視点検にて確認した結果、マンホールフランジ表面とほぼ同じ位置に、寸法・形状もほぼ同じ割れがあることを確認した。

1 B - No. 3 蒸気噴出口溶接部の割れは、内側側板と天板の溶接部に発生しており、長さ約 2 c m と約 0. 5 c m の割れであることを確認した。

1 C - No. 3 蒸気噴出口溶接部の割れは、内側側板と天板の溶接部及び格子板 A と天板の溶接部に発生しており、合計すると全長約 2 c m の連続した割れであることを確認した。

（添付資料－ 4）

9. 詳細調査

状況調査の結果、蒸気噴出口溶接部及びマンホールフランジに割れが発生していたことから、この原因を究明するため、割れの詳細調査を要因分析図に従い実施した。

（添付資料－ 5）

(1) 設計及び製作・施工調査

湿水分離加熱器は、前々回の第23回定期検査時（平成18年2月から5月）に全体取替工事を実施しており、その際の蒸気噴出口、天板及びマンホールフランジの設計並びに製作・施工状況について調査を実施した。また、取り替えた湿水分離加熱器は、海外で使用実績のある設計に基づき製作されていた。

なお、全体取替工事後の第24回定期検査時に発生した「湿水分離加熱器1B蒸気整流板溶接部の割れ」事象時（平成19年4月16日発生）に、1Bの蒸気入口から見て右側の1番目と2番目の蒸気噴出口及び天板は取り替えているが、それ以外の蒸気噴出口及び天板は据付時の状態であった。

a. 設計調査

蒸気噴出口、天板及びマンホールフランジの基本的な設計は、設計会社にて実績のある標準設計が採用されていることを確認した。

b. 材料調査・寸法調査

蒸気噴出口、天板、マンホールフランジ及び溶接材料について、材料証明書及び製作記録を確認した結果、製作は設計図面を用いており、所定の材料（ステンレス鋼）及び板厚が使用されていること、並びに規格値を満足しており問題のないことを確認した。

また、製作寸法・構造も、設計仕様通りであることを確認した。

(添付資料－6)

c. 溶接設計・溶接施工状況調査

当該溶接部は、設計会社の図面では、内側側板と天板（又はマンホールフランジ）の溶接はレ形開先（開先角度の指定はなし）＋すみ肉溶接、格子板と天板（又はマンホールフランジ）の溶接はすみ肉溶接（開先加工なし）であり、当該部製作会社は、設計会社の図面に基づいて施工していた。当該部の溶接施工状況を調査した結果、当該部製作会社にて社内認定された溶接士により、半自動アーク溶接にて施工されており、溶接の非破壊検査（外観検査及び浸透探傷検査）に問題はないことを確認したが、内側側板と格子板に囲まれた狭隘な箇所もあった。

(添付資料－6)

(2) 運転履歴調査

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

(3) 金属調査

側板と天板の溶接部、側板とマンホールフランジの溶接部、格子板と天板の溶接部、格子板本体及びマンホールフランジ本体に発生した割れの詳細調査を目的に試験片の切出しを行い、金属調査を実施した。

a. 外観観察

(a) 1A－No. 3蒸気噴出口

詳細に外観観察をしたところ、格子板A割れは、天板と格子板Aの溶接金属部及び格子板A本体に渡って生じており、長さ約15cmであった。内側側板割れ①～⑧はそれぞれ両側の格子板間で連続しており、長さは約7cmであった。内側側板割れ⑨は蒸気下流側の格子板J付近には認められず、長さ約5cmであった。

(b) 1 A-No. 4 蒸気噴出口

割れは上流側の内側側板及び外側側板のコーナー部（溶接部の端部）に生じていた。内側側板コーナー部の割れは、マンホールフランジ本体及び内側側板とマンホールフランジの溶接部に長さ約16cm発生していた。外側側板コーナー部の割れは溶接金属とマンホールフランジ本体の境界付近を通る連続割れであり、長さ約14cmであった。

(c) 1 B、1 C-No. 3 蒸気噴出口

1 B-No. 3 内側側板割れは上流側の内側側板と天板の溶接のコーナー部（溶接部の端部）に長さ約2cm発生していた。1 C-No. 3 内側側板割れは上流側の内側側板と天板の溶接金属のコーナー部（溶接部の端部）に長さ約2cm発生していた。

(添付資料-7)

b. 破面観察

(a) 1 A-No. 3 蒸気噴出口

格子板A割れ及び内側側板割れ①～⑨全ての破面観察を行った。このうち格子板A割れ及び内側側板割れ①、③、⑤、⑨の合計5箇所の破面については、

- ・割れは貫通し、ほぼ平坦であった。
- ・溶接部の割れの溶接裏側に溶込み不足が認められた。
- ・格子板A本体（母材部）の割れの破面は、き裂前縁の形状が半だ円状であることが認められた。
- ・破面の厚さは、蒸気上流側の割れ①が割れ⑤と比較して薄かった。

なお、他の内側側板割れ②、④、⑥、⑦及び⑧の破面は、内側側板割れ①、③、⑤とほぼ同様な状況であった。

(b) 1 A-No. 4 蒸気噴出口

内側側板及び外側側板のコーナー部の割れの破面観察を行った。

- ・割れは貫通し、ほぼ平坦であった。
- ・破面はき裂前縁の形状が半だ円状であることが認められた。

(c) 1 B、1 C-No. 3 蒸気噴出口

1 B及び1 C内側側板のコーナー部の割れの破面観察を行った。

- ・割れは貫通し、ほぼ平坦であった。
- ・溶接部の割れの溶接裏側に溶込み不足が認められた。
- ・破面はき裂前縁の形状が半だ円状であることが認められた。

(添付資料-8)

c. 断面ミクロ観察

1 A-No. 3 蒸気噴出口の内側側板割れ①及び⑨について断面ミクロ観察を行った。

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

(添付資料-9)

d. のど厚測定

1 A－No. 3 蒸気噴出口の内側側板割れ①及び③の溶接部について、格子板間の中央部の位置でののど厚を断面マイクロ観察及び型取りにより測定した結果、約1.5 mmの箇所があることが確認された。

(添付資料－10)

e. 破面SEM観察

(a) 1 A－No. 3 蒸気噴出口

破面観察の結果、内側側板割れ①から⑧は8箇所ともほぼ同様な状況であることから、代表部分として蒸気上流側の内側側板割れ①を選定し破面SEM観察を行った。また、格子板A割れ及び蒸気下流側の格子板に到達していなかった内側側板割れ⑨について初期き裂発生箇所等の確認を目的に破面SEM観察を行った。

- ・破面は、ほぼ平坦であり、粒内割れが認められた。
- ・内側側板の母材と溶接金属の境界部付近から溶接表面に向かう金属組織の流れが認められた。
- ・破面には、疲労破面に特有なストライエーション状の模様が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物及び腐食ピットは認められなかった。

(b) 1 A－No. 4 蒸気噴出口

内側側板及び外側側板のコーナー部の割れについて初期き裂発生箇所等の確認を目的に破面SEM観察を行った。

- ・破面は、ほぼ平坦であり、粒内割れが認められた。
- ・内側側板の母材と溶接金属の境界部付近からマンホールフランジ上面に向かう金属組織の流れが認められた。
- ・破面には、疲労破面に特有なストライエーション状の模様が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物及び腐食ピットは認められなかった。
- ・溶接部の割れの溶接裏側に溶込み不足が認められた。

(c) 1 B、1 C－No. 3 蒸気噴出口

内側側板のコーナー部の割れについて初期き裂発生箇所等の確認を目的に破面SEM観察を行った。

- ・破面は、ほぼ平坦であり、粒内割れが認められた。
- ・内側側板の母材と溶接金属の境界部付近から溶接表面に向かう金属組織の流れが認められた。
- ・1 Cの破面に、疲労破面に特有なストライエーション状の模様が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物及び腐食ピットは認められなかった。

(添付資料－11)

f. EDX (エネルギー分散型X線分光法) による分析

破面の元素分析を実施した結果、耐食性に影響を与える塩素は認められなかった。

(添付資料－12)

g. 硬度測定

溶接金属、溶接熱影響部及び内側側板母材部において、問題となる硬化は認められなかった。

(添付資料-13)

以上の金属調査により、考察できる事項は以下の通りである。

- ・破面はほぼ平坦かつ滑らかで粒内割れであること、及び1 Bの割れ以外の破面にはストライエーション状の様子が認められたことから、割れは疲労による特徴を示している。
- ・1 A-No. 3 蒸気噴出口の内側側板と天板の溶接部ののど厚は約1.5 mmの箇所が観察され、溶接部の割れの溶接裏側には溶込み不足が認められたことから、十分なのど厚が確保できていなかったと推定される。
- ・内側側板と天板又はマンホールフランジの溶接金属の境界部付近から溶接表面に向かう金属組織の流れが認められたことより、母材部（内側側板）と溶接金属の境界部付近からき裂が発生し、進展したと推定される。
- ・1 A-No. 3 蒸気噴出口の内側側板割れについては、最も蒸気下流側の割れ（内側側板割れ⑨）が途中で止まっていたこと、割れ①の破面の厚さは、蒸気下流側の⑤より薄く、割れやすかったことから、内側側板割れ①の近傍に割れが発生し、蒸気上流側から次々と蒸気下流側の格子板間に割れが伝わりとともに、格子板A本体に割れが進展していったものと推定される。
- ・破面SEM観察結果では、応力腐食割れの特徴である羽毛状の組織、及び介在物、腐食ピットも認められなかった。
- ・硬度測定結果及び断面ミクロ観察結果より、割れ発生の原因となるような異常な硬化組織は認められず、金属組織に問題はなかった。

10. 疲労評価

詳細調査により、内側側板と天板との溶接部の割れは疲労によるものと推定されるため、今回の事象に対する疲労評価を実施した。

評価の手順として、まず汎用流体解析コード（Fluent）を用いて、天板の加振源である蒸気整流板に作用する流体加振力を算出する。次に、汎用構造解析コード（NASTRAN）を用いて、この流体加振力を3次元シェル要素でモデル化した天板（蒸気噴出口、蒸気整流板を含む）に入力し、全体系の振動応答を算出する。その結果、大きな応力が生じた箇所を、汎用構造解析コード（ABAQUS）を用いて詳細にモデル化し、算出した変動応力と疲労限を比較し、疲労損傷が発生する可能性を評価した。なお、詳細モデルでは、金属調査結果から溶接部形状（No. 3 蒸気噴出口内側側板と天板との溶接部ののど厚：1.5 mm）を設定した。

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

高サイクル疲労は、流体加振力の繰返し数に加えて、流体加振力により溶接部に発生する変動応力が疲労限（繰返し数が十分高い場合でも疲労き裂が発生しないとされる変動応力のしきい値）を上回る場合に発生する。1 A-No. 3 蒸気噴出口の内側側板と天板の溶接部の変動応力の大きさを評価した結果、この変動応力は疲労限を上回ることを確認した。

以上より、1 A－No. 3 蒸気噴出口の内側側板と天板の溶接部に疲労損傷が発生する可能性があることを確認した。

評価箇所	変動応力 (MP a)	疲労限 (MP a)
1 A－No. 3 蒸気噴出口の内側側板と天板の溶接部	2 3 3	2 1 3

(添付資料－1 4)

なお、1 A－No. 4 蒸気噴出口の内側側板と天板の溶接部には、疲労限をわずかに下回る変動応力が発生するよう評価されたが、No. 3 の割れが発生し、その後疲労損傷が発生したものと推定される。

1 1. 推定原因

以上の調査結果より、1 A－No. 3 の蒸気噴出口の割れの原因は、

- ・内側側板と天板の溶接部に溶込み不足が発生し、応力集中が生じる形状で、十分な厚が確保されなかったこと
- ・運転中の天板には、蒸気の流れによる高サイクルの流体加振力が作用すること

の条件が重畳したことにより、No. 3 の蒸気噴出口の内側側板と天板との溶接部に疲労限を上回る高サイクルの振動が生じ、疲労が累積して割れが発生し、蒸気上流側から次々と蒸気下流側の格子板間に割れが伝わるとともに、格子板 A 本体に割れが進展していったものと推定される。

なお、1 B と 1 C の No. 3 の割れも 1 A－No. 3 と同様に、上記条件が重畳したことにより発生したものと推定される。

また、

- ・1 B、1 C では No. 3 の蒸気噴出口のみ割れが発生していること
- ・1 A－No. 3 蒸気噴出口の内側側板割れについては、蒸気上流側から下流側に割れが伝わっていったものと推定されること

から、1 A については、まず No. 3 の蒸気噴出口の溶接部に割れが発生し、その後 No. 3 の下流側にある No. 4 の蒸気噴出口の割れが発生したものと推定される。

(添付資料－1 5)

一方、当該溶接部に溶込み不足が発生した要因としては、溶接作業性の悪い狭隘な箇所の溶接部に、十分な溶込みが得られにくい溶接方法を採用したためと推定される。

当該溶接部には半自動アーク溶接が用いられているが、一般的には「大電流での溶接が可能であり、溶接効率が良い」、半面「溶接の溶込みが浅い」ことや「ビードの形状が滑らかさを欠く」傾向があり、さらに狭隘な箇所においては、溶接トーチが大きく溶接トーチの操作性が劣り、トーチの角度を調整するのが比較的困難なものとされている。このことから、溶接作業性の悪い狭隘な箇所の溶接部に半自動アーク溶接を適用したことが要因として推定することができる。

なお、湿分分離加熱器の流体加振力が作用する範囲に用いられている溶接方法としてティグ溶接があるが、ティグ溶接は半自動アーク溶接に比べ溶接効率が劣るものの、溶接金属の清浄度が高く、十分な溶込みが得られるものである。
(添付資料－ 1 6)

1 2. 湿分分離加熱器の溶接部の健全性調査

(1) 今回の事象に対する健全性調査

今回の事象の原因は、蒸気の流れによる高サイクルの流体加振力が作用することと、溶接作業性の悪い狭隘な箇所には十分な溶込みが得られにくい溶接方法を適用したことにより溶込み不足が発生し、溶接部に十分な厚が確保されなかったことが重畳したものと推定される。

このことから、湿分分離加熱器溶接部の流体加振力が作用する範囲で、狭隘な箇所限定せず、十分な溶込みが得られにくい溶接方法を実施している溶接線を対象として調査を実施した結果、いずれも実機調査及び応力評価などにより問題ないことを確認した。

(添付資料－ 1 7)

さらに、これまでの不具合は流体加振力が作用した箇所では割れが発生したことより、流体加振力の作用する範囲において、2号機天板割れへの対応として、今回取り替える天板及び蒸気整流板の溶接部を除く浸透探傷検査が可能な全ての溶接部を検査し割れ等の異常がないことを確認した。なお、流体加振力が作用する範囲で、浸透探傷検査が出来ない1基あたり3つの部位(合計12部位)があったが、このうちの1つの部位(合計4部位)は、十分な溶込みが得られるティグ溶接であり目視により問題のないことを確認した。他の2つの部位(合計8部位)は十分な溶込みが得られにくい溶接方法を用いた溶接部であったため、応力評価により問題のないことを確認した。

(添付資料－ 1 8、1 9)

(2) 2号機の天板割れへの対応

2号機の天板割れへの対応として、1号機においても設計会社の図面と製作会社の図面の不一致箇所である天板と仕切板との溶接部については、2号機と同様に16箇所の取替えを実施するが、その他の図面の不一致箇所については、実際に現場で溶接部の施工状態を確認するなどにより健全性を確認した。

また、湿分分離加熱器4基の全溶接部(1379部位)に対する総点検として、実機にて目視確認できる溶接部のすべての範囲について今回割れが認められた箇所以外に割れ等の異常のないこと、ならびに確認可能な溶接施工記録により施工が設計と合致していること又は応力評価等により問題のないことを確認した。なお、流体加振力の作用する範囲の溶接部のうち、脚長が一部少ない等の6つの部位(合計20部位：A号機5部位、B号機5部位、C号機5部位、D号機5部位)があったが、これらについても応力評価により問題のないことを確認した。

(添付資料－ 2 0)

以上の結果から、流体加振力の作用する範囲の全ての溶接部の健全性が確認できた。なお、それ以外の流体加振力が作用しない範囲の溶接部については、今回実施した総点検および検査記録にて問題のないことを可能な範囲で確認したが、流体加振力が作用せず変動応力が十分に小さいため、疲労による割れは発生しないと考えられる。

(添付資料－ 2 1)

1 3. 対 策

(1) 当該蒸気噴出口及びマンホールフランジについては新品に取り替える。

取り替えに当たっては、溶接方法はティグ溶接を用いるとともに、念のため、内側側板と天板（No. 4 蒸気噴出口にあつてはマンホールフランジ）の溶接部の両端に約 3 c m の廻し溶接を行うこと等で強度を向上させることとする。

(添付資料－ 2 2)

また、割れのなかった 3 番目の蒸気噴出口（5 個）及び 4 番目の蒸気噴出口（マンホールフランジを含む：7 個）並びに 2 号機の対応として天板を取り替える箇所の 1 番目、2 番目、1 0 番目の蒸気噴出口（計 2 4 個）については、同様な方法にて新品に取り替える。

その他の蒸気噴出口（5 番目～9 番目の計 4 0 個）については、疲労に対する十分な強度を持たせるために、内側側板と天板の溶接部の補修溶接を行い、さらに廻し溶接等の補強も行う。

これらの溶接作業においては、経験者又はモックアップを用いて事前に訓練を実施した溶接士が実施することとする。

(添付資料－ 2 2)

(2) 流体加振力が作用する範囲で十分な溶込みが得られにくい溶接方法を用いている溶接部のうち浸透探傷検査が出来ない 1 基あたり 2 つの部位（合計 8 部位）及び脚長が一部少ない箇所等の 6 つの部位（合計 2 0 部位：A 号機 5 部位、B 号機 5 部位、C 号機 5 部位、D 号機 5 部位）については、念のため強度に余裕を持たせる観点から補強等を実施する。

(添付資料－ 1 9、2 0)

(3) 今回の事象の原因が、溶接作業性の悪い狭隘な箇所に十分な溶込みが得られにくい溶接方法を適用したことであつたことから、当社の発注仕様書において、溶接作業性の悪い狭隘な箇所の溶接を施工する場合には、溶込み不足が発生しないような具体的な溶接の実施方法を選定するよう要求するとともに、その旨を調達管理内規に記載する。その実施状況について必要に応じ当社が監査等により確認することとする。

1 4. 2、3号機の対応

(1) 伊方2号機

今回の事象を踏まえ、以下の対応を実施している。

- ・音響監視装置による監視
- ・運転パラメータの監視
- ・運転員による巡視点検頻度の増加
- ・設備に精通している保修員による巡視点検の実施
- ・アコースティックエミッションによる監視

特に、今回判明した流体加振力が作用し、溶接作業性の悪い狭隘な箇所に半自動アーク溶接を適用している部位のうち最も大きな流体加振力が作用する部位について、2号機としては新たにアコースティックエミッションによるデータの詳細な分析を実施するとともに、音響監視装置による監視強化を行う。万一、音響監視装置により異常音を認めた場合には、プラントの停止を含めた適切な対応を講じることとする。

さらに、2号機の湿分分離加熱器については、1号機と同様な構造であり、同様な溶接施工が行われていることから、平成21年2月開始予定の次回定期検査において、点検結果に係わらず、1号機と同様な対策を行うこととする。

(添付資料-23)

(2) 伊方3号機

3号機の湿分分離加熱器については、構造が1、2号機と異なり、同様な蒸気噴出口がないこと、及び順調に運転をしていることより、対策は不要である。

1 5. 今後の対応

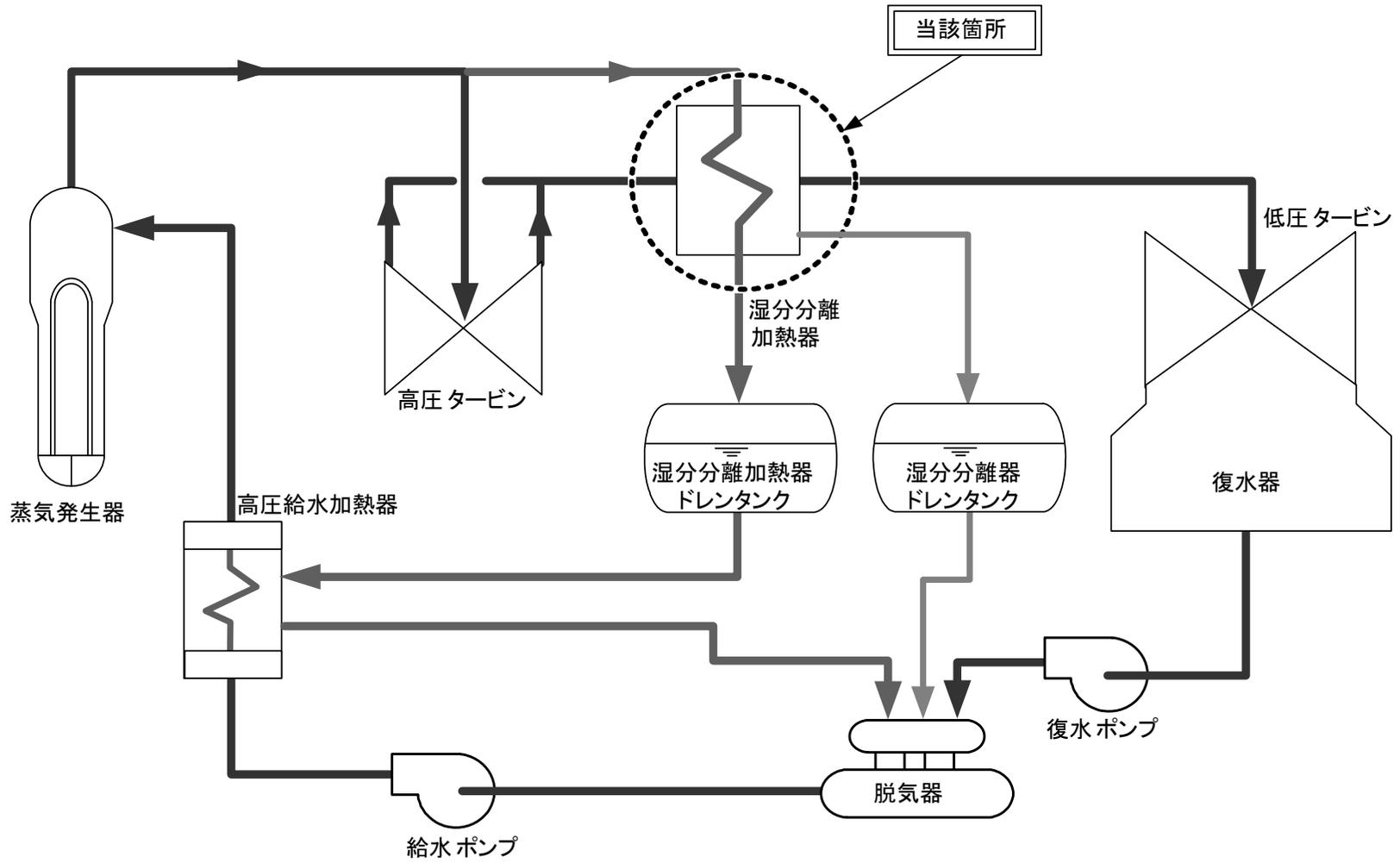
伊方1、2号機の湿分分離加熱器については、その都度対策を実施してきたが、これまで溶接に関する4回のトラブルが続いたことを踏まえ、長期的な健全性に万全を期し安心感の醸成を図るとの観点から、1、2号機の湿分分離加熱器全台について新たに製作し、平成22年度から23年度にかけて取り替えることで、今後検討を行う。また、新たな製作に当たっては、当社社員を工場に駐在させる等品質管理に万全を期す。

以 上

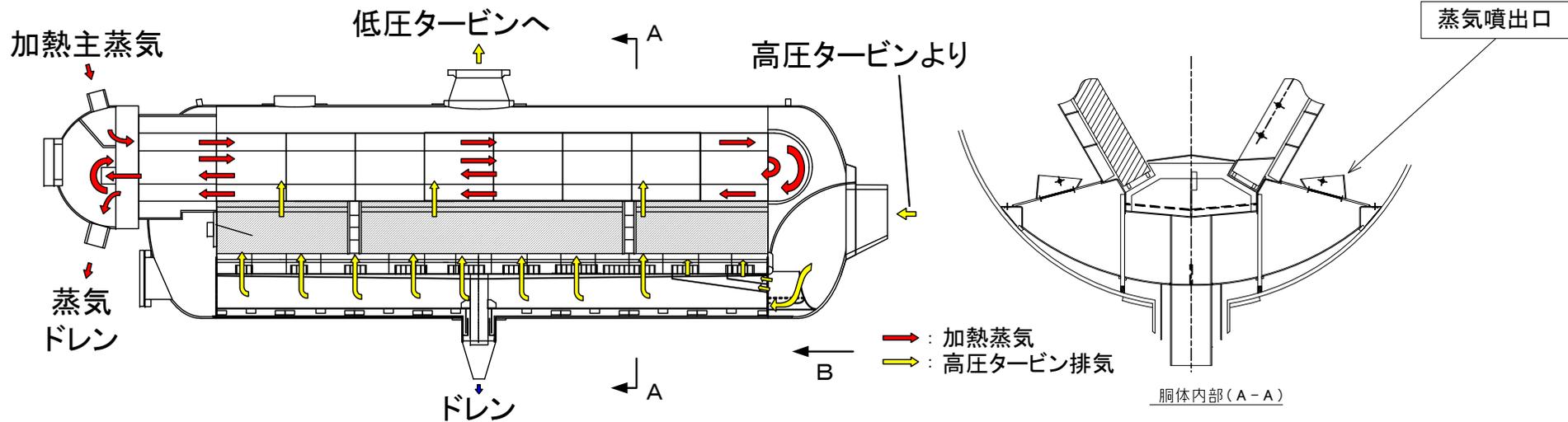
【添 付 資 料】

1. 湿分分離加熱器廻り概略系統図
2. 湿分分離加熱器構造図
3. 湿分分離加熱器 1 A～1 C 蒸気噴出口割れ箇所図
4. 湿分分離加熱器蒸気噴出口 割れ状況調査結果
5. 湿分分離加熱器蒸気噴出口の割れに係る要因分析図
6. 湿分分離加熱器 製作履歴調査結果
7. 金属調査結果（外観観察）
8. 金属調査結果（破面観察）
9. 金属調査結果（断面ミクロ観察）
10. 金属調査結果（のど厚測定）
11. 金属調査結果（破面SEM観察）
12. 金属調査結果（EDX分析）
13. 金属調査結果（硬度測定）
14. 疲労による割れの発生に関する評価
15. 湿分分離加熱器蒸気噴出口割れ発生推定メカニズム
16. 半自動アーク溶接とティグ溶接との比較
17. 今回の事象に対する健全性調査（水平展開フロー）
18. 湿分分離加熱器内部の流体加振力が作用する範囲
19. 湿分分離加熱器 溶接部補強実施箇所（今回の対応）
20. 湿分分離加熱器 溶接部補強実施箇所（2号機の天板割れへの対応）
21. 湿分分離加熱器 流体加振力の作用しない範囲の健全性調査
22. 蒸気噴出口の復旧概要図
23. 伊方2号機 監視装置構成図

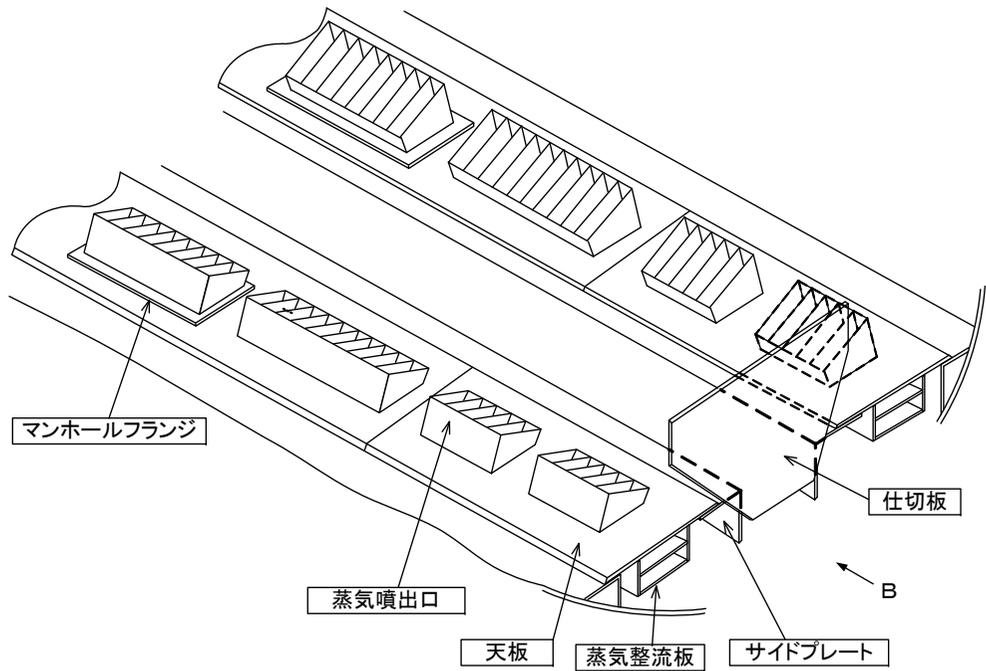
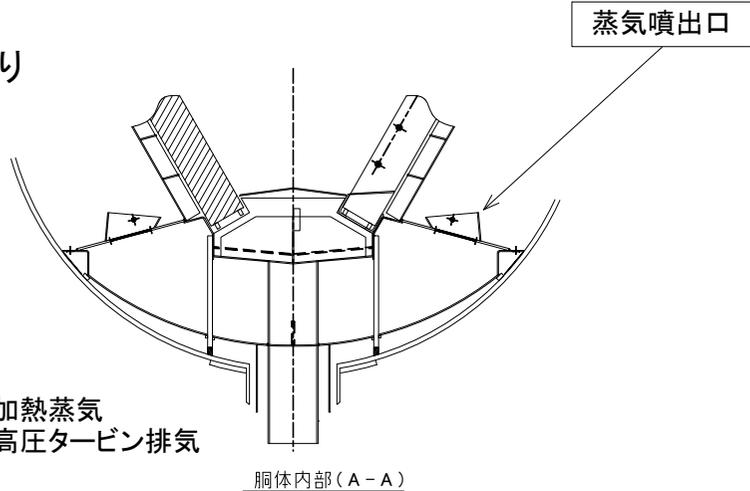
湿分分離加熱器廻り概略系統図



湿水分離加熱器構造図



→ : 加熱蒸気
→ : 高圧タービン排気



湿水分離加熱器 仕様

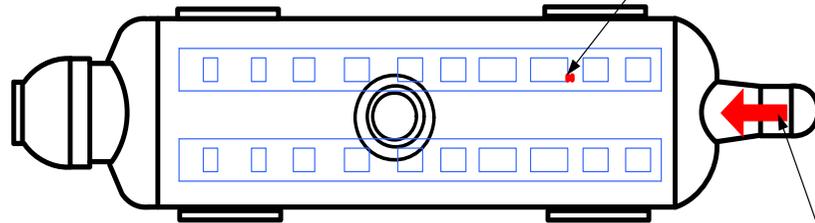
種類	横置1段加熱U字管式	
温度	入口	約180°C
	出口	約270°C
最高使用温度	蒸気室側	約290°C
	胴側	約270°C
最高使用圧力	蒸気室側	約7.5MPa
	胴側	約1.2MPa

[蒸気噴出口]
 材料:SUS304、厚さ:6mm
 [天板]
 材料:SUS304、厚さ:10mm
 [マンホールフランジ]
 材料:SUS304、厚さ:6mm

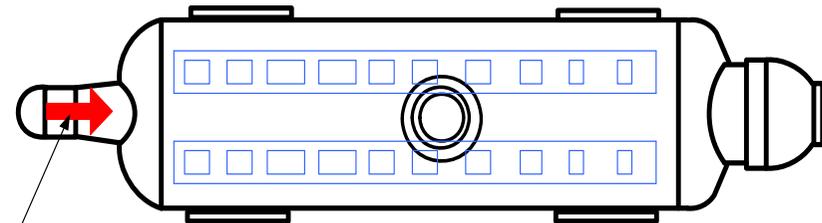
湿分分離加熱器1A～1C蒸気噴出口割れ箇所図

〔5月3～5日に確認〕

1B-No.3蒸気噴出口(蒸気入口から見て右側3番目)
2箇所(約2cm、約0.5cm)

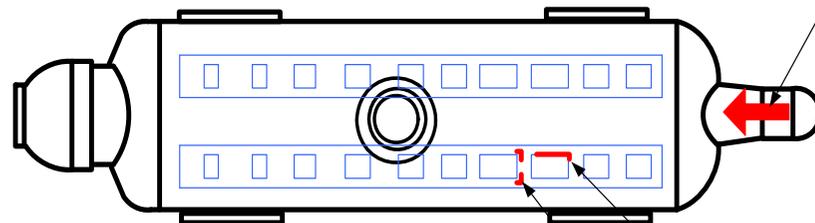


B号機

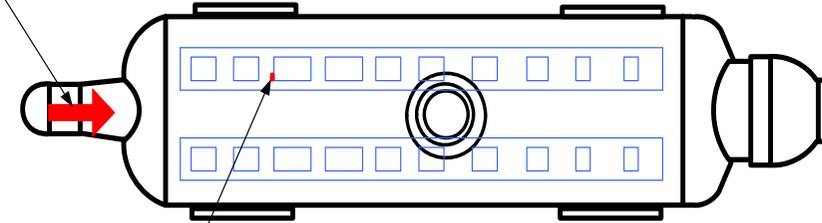


D号機

蒸気(高圧タービンより)



A号機



C号機

〔5月3～5日に確認〕

1A-No.4蒸気噴出口(蒸気入口から見て左側4番目)
2箇所(約12cm、約14cm)

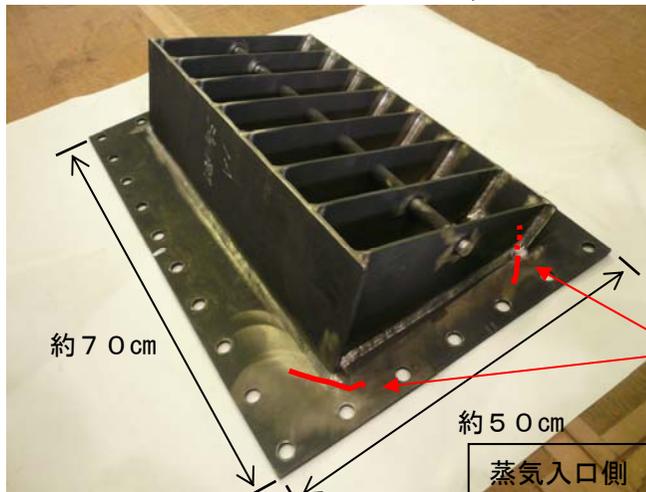
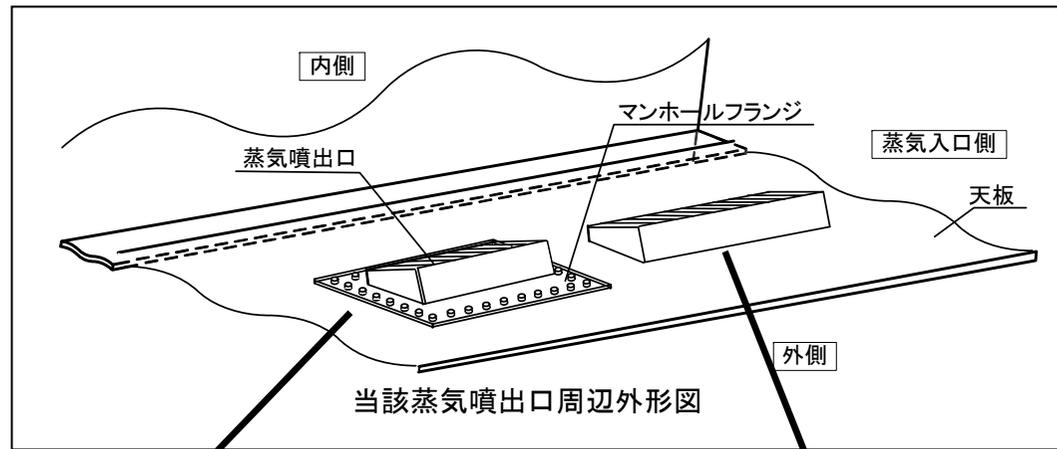
〔4月30日に発見〕

1A-No.3蒸気噴出口(蒸気入口から見て左側3番目)
10箇所(約5cm～約7cm)

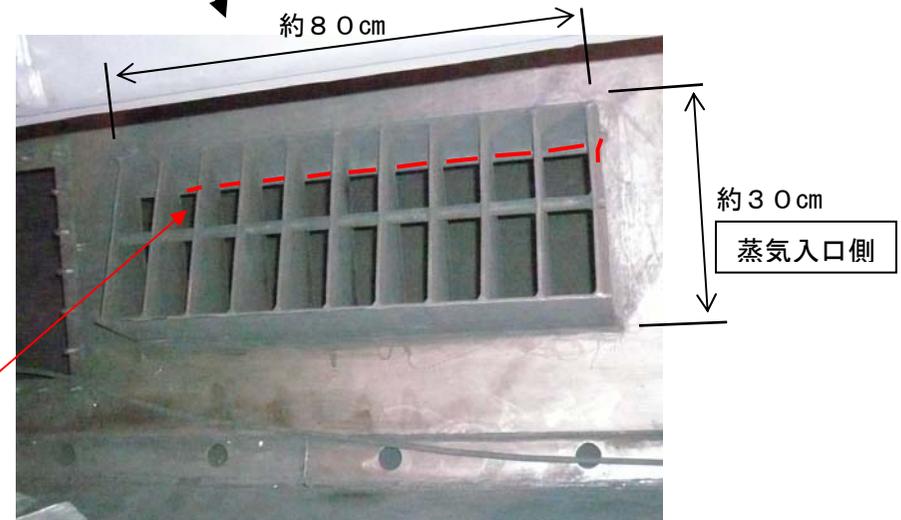
〔5月3～5日に確認〕

1C-No.3蒸気噴出口(蒸気入口から見て左側3番目)
1箇所(約2cm)

湿分分離加熱器蒸気噴出口 割れ状況調査結果(1A-No.3及びNo.4蒸気噴出口)



No. 4 蒸気噴出口

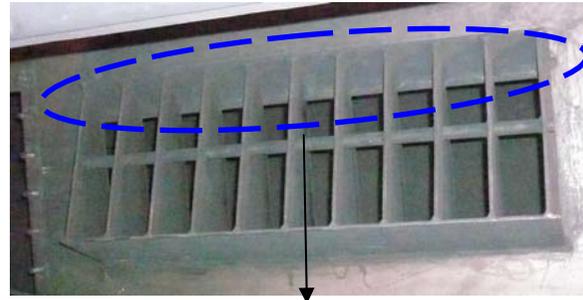


No.3蒸気噴出口

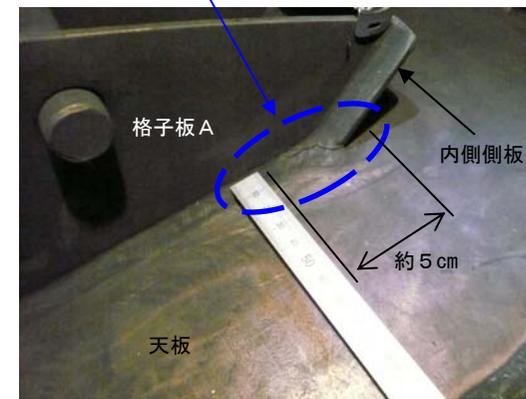
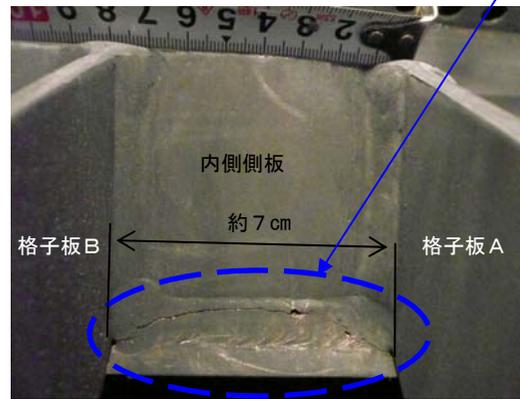
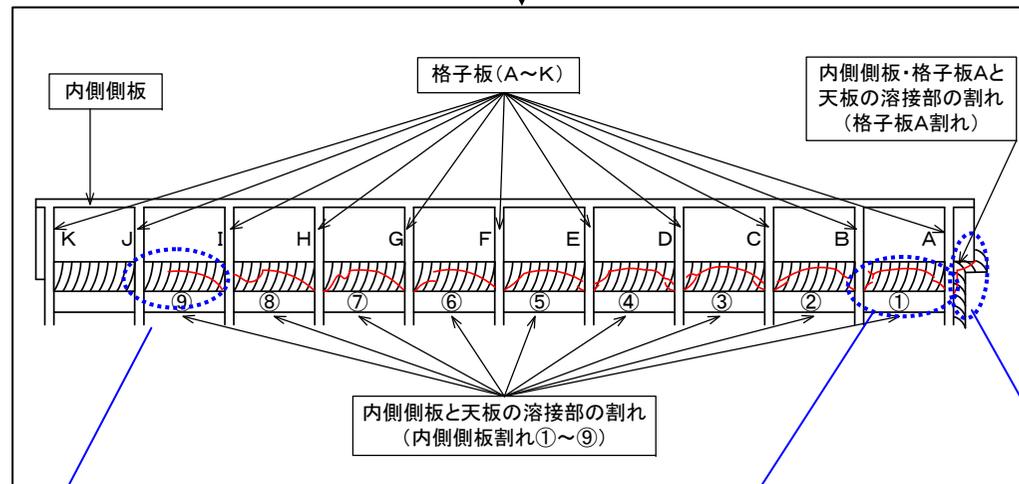
割れ箇所

割れは、No.3及びNo.4蒸気噴出口の溶接部に沿っており、No.3蒸気噴出口では約5cm～7cmの割れが10箇所、No.4蒸気噴出口では約14cm及び約12cmの割れが各1箇所発生していることを確認した。

湿分分離加熱器蒸気噴出口 割れ状況調査結果(1A-No.3蒸気噴出口)

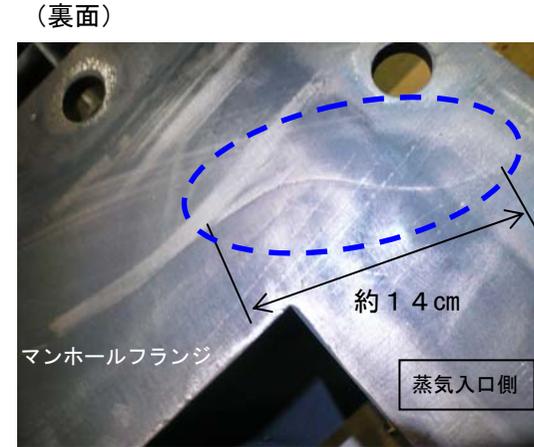
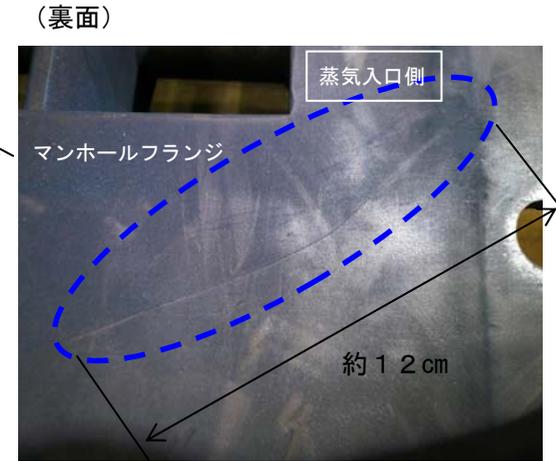
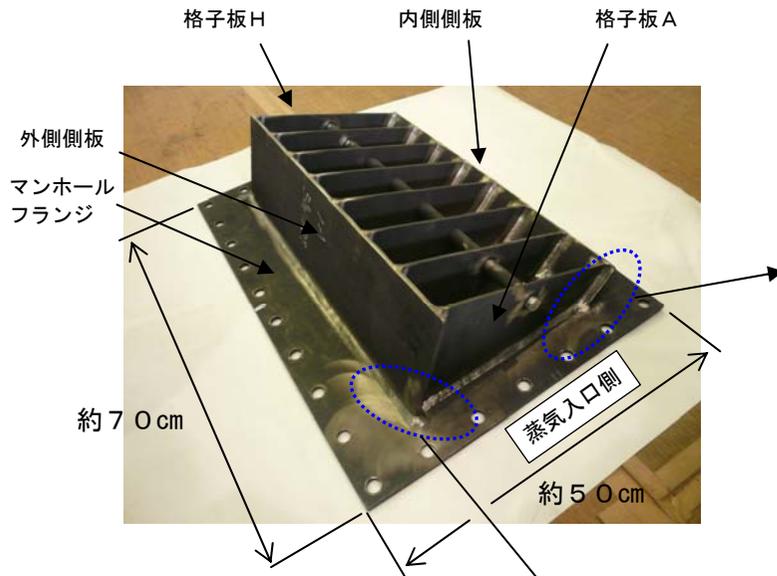


蒸気入口側



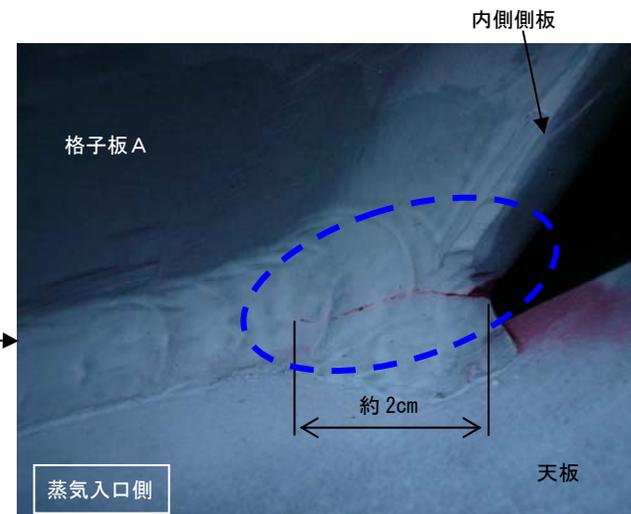
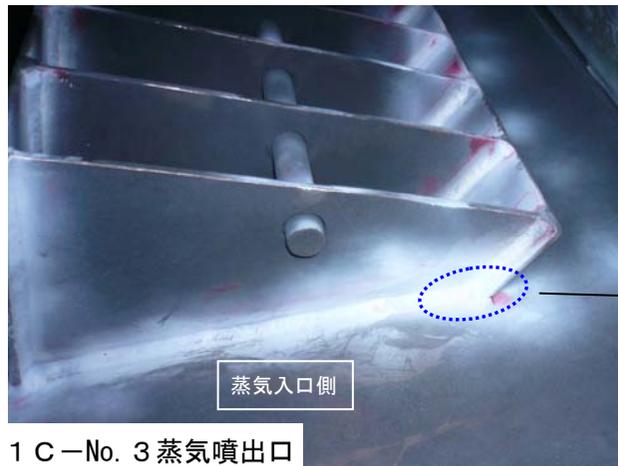
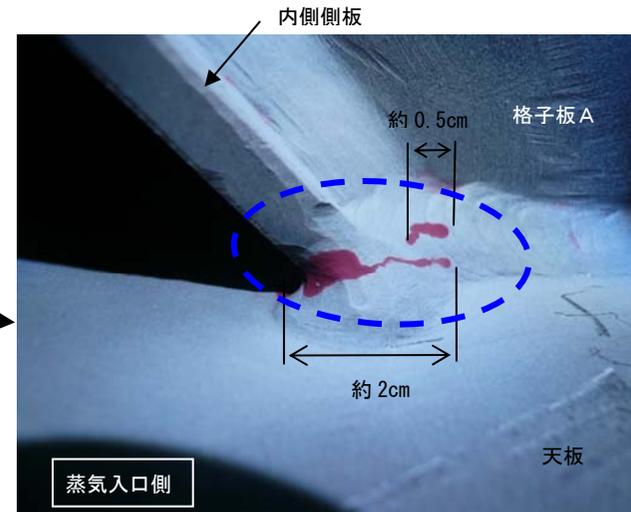
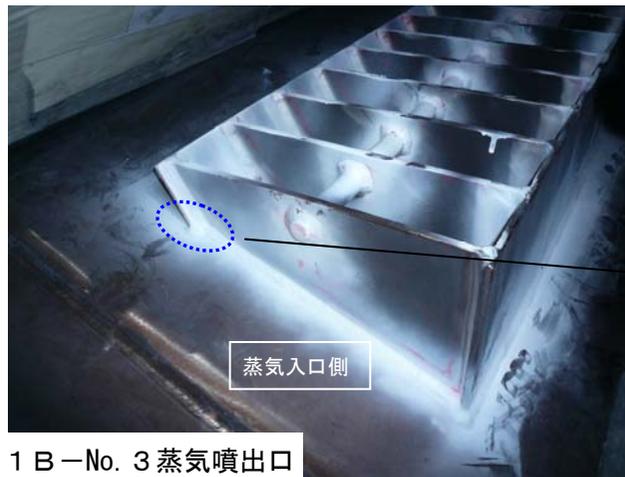
内側側板と天板の溶接部の割れのうち①～⑧は溶接部のほぼ全長(溶接部全長約7cm)の割れであり、⑨は長さ約5cmの割れであることを確認した。内側側板・格子板Aと天板の溶接部の割れは、内側側板と天板の溶接部及び格子板Aと天板の溶接部に発生しており、合計すると長さ約5cmの連続した割れであることを確認した。

湿分分離加熱器蒸気噴出口 割れ状況調査結果(1A-No.4蒸気噴出口)



蒸気入口側の内側側板側の割れは、内側側板とマンホールフランジの溶接部及びマンホールフランジ本体に長さ約12cm 発生していた。蒸気入口側の外側側板側の割れは外側側板とマンホールフランジの溶接部近傍及びマンホールフランジ本体に長さ約14cm 発生していた。マンホールフランジの裏面を外観目視点検にて確認した結果、マンホールフランジ表面とほぼ同じ位置に、寸法・形状もほぼ同じ割れがあることを確認した。

湿水分離加熱器蒸気噴出口 割れ状況調査結果(1B-No.3及び1C-No.3蒸気噴出口)



1Bの割れは、内側側板と天板の溶接部に発生しており、長さ約2cmと約0.5cmの割れであることを確認した。
1Cの割れは、内側側板と天板の溶接部及び格子板Aと天板の溶接部に発生しており、合計すると長さ約2cmの連続した割れであることを確認した。

湿分分離加熱器蒸気噴出口の割れに係る要因分析図

[備考]
 △：可能性あり。
 ×：可能性なし。

事象	要因	因子	調査内容	調査方法・結果	評価	添付資料	
湿分分離加熱器 蒸気噴出口の割れ	強度不足	延性割れ	過大応力	設計調査	・蒸気噴出口、天板及びマンホールフランジの基本的な設計は、設計会社にて実績のある標準設計が採用されていることを確認した。	×	—
			材料調査・寸法調査	・蒸気噴出口、天板、マンホールフランジ及び溶接材料について、材料証明書及び製作記録にて問題のないことを確認した。 ・製作寸法・構造は、設計仕様通りであることを確認した。	×	6	
			溶接設計・溶接施工状況調査	・当該部製作会社は、設計会社の図面に基づいて施工していることを確認した。 ・当該部製作会社にて社内認定された溶接士により、半自動アーク溶接にて施工されており、溶接の非破壊検査（外観検査及び浸透探傷検査）に問題はないことを確認した。 ・内側側板と格子板に囲まれた狭隘な箇所もあった。	△	6	
			運転履歴調査	・運転履歴調査により、運転パラメータに問題はないことを確認した。	×	—	
			金属調査	・外観観察の結果、湿分分離加熱器 1A-No. 3、1A-No. 4、1B-No. 3、1C-No. 3 の蒸気噴出口に割れがあることを確認した。 ・金属調査（破面観察、断面マイクロ観察、のど厚測定、SEM等）の結果、 ○破面はほぼ平坦かつ滑らかで粒内割れであることを確認した。 ○ストライエーション状の様相が認められた。 ○1A-No. 3 蒸気噴出口の割れの溶接裏側には溶込み不足が認められた。 ○羽毛状の組織、介在物及び腐食ピットは認められなかった。 ○問題となる硬化は認められなかった。	×	7～13	
	疲労割れ	材料不良	材料調査	・蒸気噴出口、天板、マンホールフランジ及び溶接材料について、材料証明書及び製作記録にて問題のないことを確認した。	×	6	
			運転履歴調査	・運転履歴調査により、運転パラメータに問題はないことを確認した。	×	—	
		温度・圧力過渡	金属調査	・外観観察の結果、湿分分離加熱器 1A-No. 3、1A-No. 4、1B-No. 3、1C-No. 3 の蒸気噴出口に割れがあることを確認した。 ・金属調査（破面観察、断面マイクロ観察、のど厚測定、SEM等）の結果、 ○破面はほぼ平坦かつ滑らかで粒内割れであることを確認した。 ○ストライエーション状の様相が認められた。 ○1A-No. 3 蒸気噴出口の割れの溶接裏側には溶込み不足が認められた。 ○羽毛状の組織、介在物及び腐食ピットは認められなかった。 ○問題となる硬化は認められなかった。	△	7～13	
			振動	疲労評価	・3次元シェル要素でモデル化した天板（蒸気噴出口、蒸気整流板を含む）に、流体加振力を入力して全体系の振動応答を算出し、1A-No. 3 蒸気噴出口の内側側板と天板の溶接部の変動応力の大きさを評価した結果、この変動応力は疲労限を上回ることを確認した。	△	14

〔備考〕

△：可能性あり。

×：可能性なし。

事象	要因	因子	調査内容	調査方法・結果	評価	添付資料
溶接不良	溶接欠陥	施工不良	溶接設計・溶接施工状況調査	<ul style="list-style-type: none"> 当溶接製作会社は、設計会社の図面に基づいて施工していることを確認した。 当溶接製作会社にて社内認定された溶接士により、半自動アーク溶接にて施工されており、溶接の非破壊検査（外観検査及び浸透探傷検査）に問題のないことを確認した。 内側則板と格子板が囲まれた狹益な箇所もあった。 	△	6
			金属調査	<ul style="list-style-type: none"> 外観観察の結果、湿分分離加熱器 1A-No. 3、1A-No. 4、1B-No. 3、1C-No. 3の蒸気噴出口に害状があることを確認した。 金属調査（破面観察、断面マイクロ観察、のど厚測定、SEM等）の結果 <ul style="list-style-type: none"> 破面はほぼ平坦かつ滑らかで粒が磨削であることを確認した。 ストライエーション状の模様は認められた。 1A-No. 3蒸気噴出口の害状の溶接問題は溶込み不足が認められた。 羽毛状の組織、介在物及び腐食ピットは認められなかった。 問題となる硬化は認められなかった。 	△	7～13
		材料不良	材料調査	<ul style="list-style-type: none"> 蒸気噴出口、天板、マンホールフランジ及び溶接材料について、材料証明書及び製作記録にて問題のないことを確認した。 	×	6
腐食	応力腐食割れ	材料環境応力	金属調査 附着塩分量調査等	<ul style="list-style-type: none"> 外観観察の結果、湿分分離加熱器 1A-No. 3、1A-No. 4、1B-No. 3、1C-No. 3の蒸気噴出口に害状があることを確認した。 金属調査（破面観察、断面マイクロ観察、のど厚測定、SEM等）の結果 <ul style="list-style-type: none"> 破面はほぼ平坦かつ滑らかで粒が磨削であることを確認した。 ストライエーション状の模様は認められた。 1A-No. 3蒸気噴出口の害状の溶接問題は溶込み不足が認められた。 羽毛状の組織、介在物及び腐食ピットは認められなかった。 問題となる硬化は認められなかった。 	×	7～13
				<ul style="list-style-type: none"> 破面の元素分析を実施した結果、耐食性に影響を与える塩素は認められなかった。 	×	12
	その他腐食	全面腐食 局部腐食	金属調査	<ul style="list-style-type: none"> 外観観察の結果、湿分分離加熱器 1A-No. 3、1A-No. 4、1B-No. 3、1C-No. 3の蒸気噴出口に害状があることを確認した。 金属調査（破面観察、断面マイクロ観察、のど厚測定、SEM等）の結果 <ul style="list-style-type: none"> 破面はほぼ平坦かつ滑らかで粒が磨削であることを確認した。 ストライエーション状の模様は認められた。 1A-No. 3蒸気噴出口の害状の溶接問題は溶込み不足が認められた。 羽毛状の組織、介在物及び腐食ピットは認められなかった。 問題となる硬化は認められなかった。 	×	7～13

湿分分離加熱器 製作履歴調査結果（材料・寸法調査 1/2）

○蒸気噴出口材料調査

・No. 3、No. 4 蒸気噴出口（側板）（ステンレス鋼、厚さ 6mm）

項目	化学成分(重量%)								引張強さ (MPa)	降伏点 (MPa)	伸び(%)	硬さ
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N				
規格値 (SA-240-TYPE304)	MAX 0.08	MAX 0.75	MAX 2.00	MAX 0.045	MAX 0.030	18.0 ~20.0	8.0 ~10.5	MAX 0.10	MIN 515	MIN 205	MIN 40	MAX 201 (HB201)
材料証明書記載値(1A,1B,1C)	0.05	0.49	1.67	0.027	0.001	18.1	8.1	0.051	615	279	55	171

・No. 3、No. 4 蒸気噴出口（格子板）（ステンレス鋼、厚さ 6mm）

項目	化学成分(重量%)								引張強さ (MPa)	降伏点 (MPa)	伸び(%)	硬さ
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N				
規格値 (SA-240-TYPE304)	MAX 0.08	MAX 0.75	MAX 2.00	MAX 0.045	MAX 0.030	18.0 ~20.0	8.0 ~10.5	MAX 0.10	MIN 515	MIN 205	MIN 40	MAX 201 (HB201)
材料証明書記載値(1A,1B,1C)	0.05	0.51	1.67	0.026	0.003	18.4	8.1	0.048	629	290	54	169

・No. 3 天板（ステンレス鋼、厚さ 10mm）

項目	化学成分(重量%)								引張強さ (MPa)	降伏点 (MPa)	伸び(%)	硬さ
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N				
規格値 (SA-240-TYPE304)	MAX 0.08	MAX 0.75	MAX 2.00	MAX 0.045	MAX 0.030	18.0 ~20.0	8.0 ~10.5	MAX 0.10	MIN 515	MIN 205	MIN 40	MAX 92 (HRB92)
材料証明書記載値(1A,1B,1C)	0.030	0.335	1.601	0.028	0.002	18.033	8.274	0.057	609.81	319.85	51.46	89.00

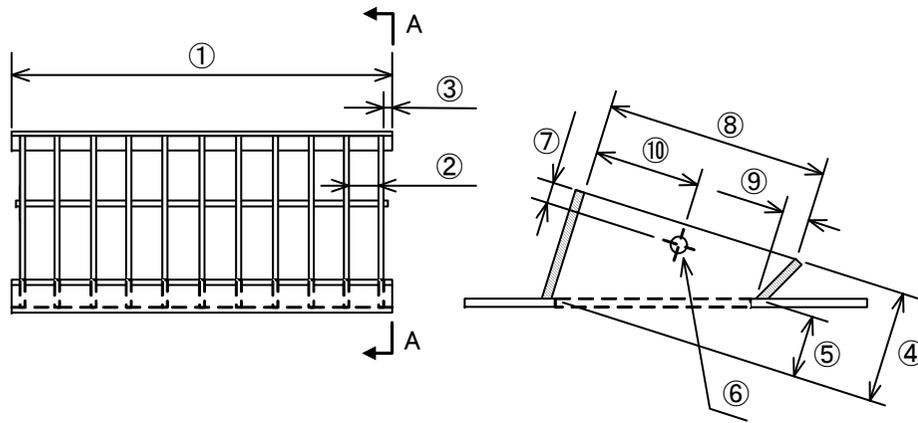
・No. 4 マンホールフランジ（ステンレス鋼、厚さ 6mm）

項目	化学成分(重量%)								引張強さ (MPa)	降伏点 (MPa)	伸び(%)	硬さ
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N				
規格値 (SA-240-TYPE304)	MAX 0.08	MAX 0.75	MAX 2.00	MAX 0.045	MAX 0.030	18.0 ~20.0	8.0 ~10.5	MAX 0.10	MIN 515	MIN 205	MIN 40	MAX 201 (HB201)
材料証明書記載値(1A)	0.05	0.49	1.67	0.027	0.001	18.1	8.1	0.051	615	279	55	171

・材料証明書により、所定の材料（ステンレス鋼）および板厚であること、ならびに規格値を満足しており、問題ないことを確認した。

湿分分離加熱器 製作履歴調査結果 (材料・寸法調査 2/2)

○No. 3 蒸気噴出口寸法調査[表1]

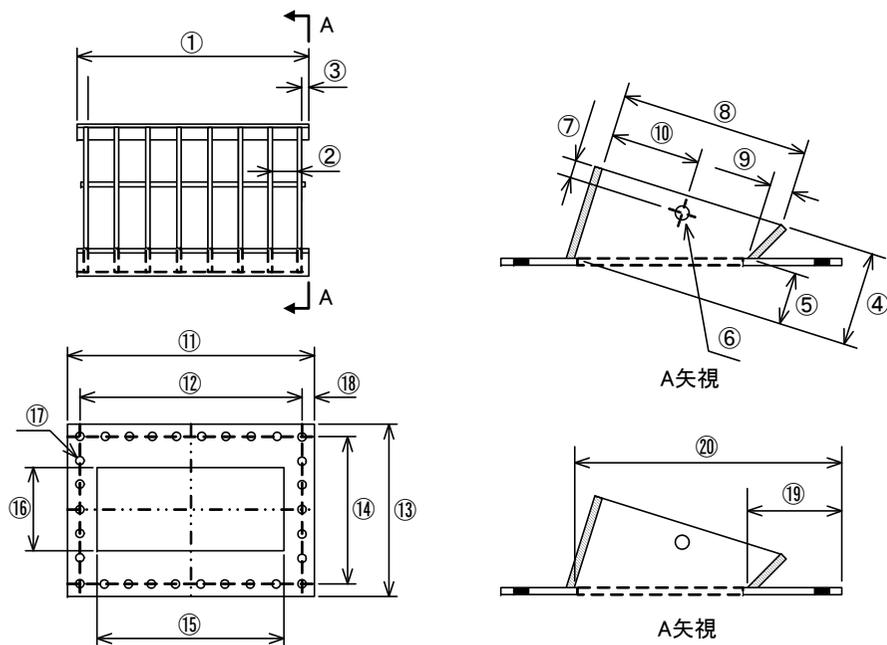


[表1]

単位:mm

測定位置	設計寸法	許容値	測定値 (1A左側)	測定値 (1B右側)	測定値 (1C左側)
①	787	±3	787	787	788
②	76	±3	76	76	76
③	10	±3	10	10	10
④	152	±3	152	152	152
⑤	91	±3	91	91	91
⑥	22.2	±3	22.2	22.2	22.2
⑦	25	±3	25	25	25
⑧	278	±3	278	277	278
⑨	29	±3	29	28	29
⑩	139	±3	139	139	139

○No. 4 蒸気噴出口寸法調査[表2]



[表2]

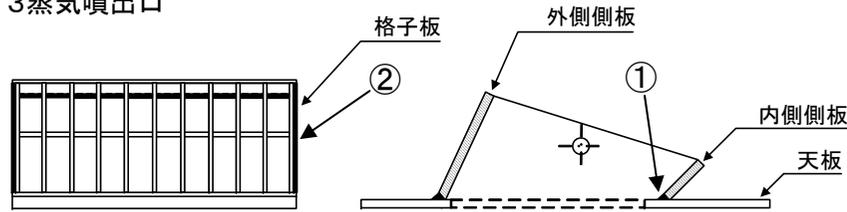
単位:mm

測定位置	設計寸法	許容値	測定値 (1A左側)
①	559	±3	559
②	76	±3	76
③	10	±3	10
④	152	±3	152
⑤	91	±3	91
⑥	22.2	±3	22.2
⑦	25	±3	25
⑧	278	±3	278
⑨	29	±3	29
⑩	139	±3	139
⑪	667	±3	667
⑫	629	±3	628
⑬	457	±3	457
⑭	419	±3	418
⑮	519	±3	519
⑯	229	±3	229
⑰	φ 16	±3	φ 16
⑱	19	±3	19
⑲	96	±3	96
⑳	361	±3	361

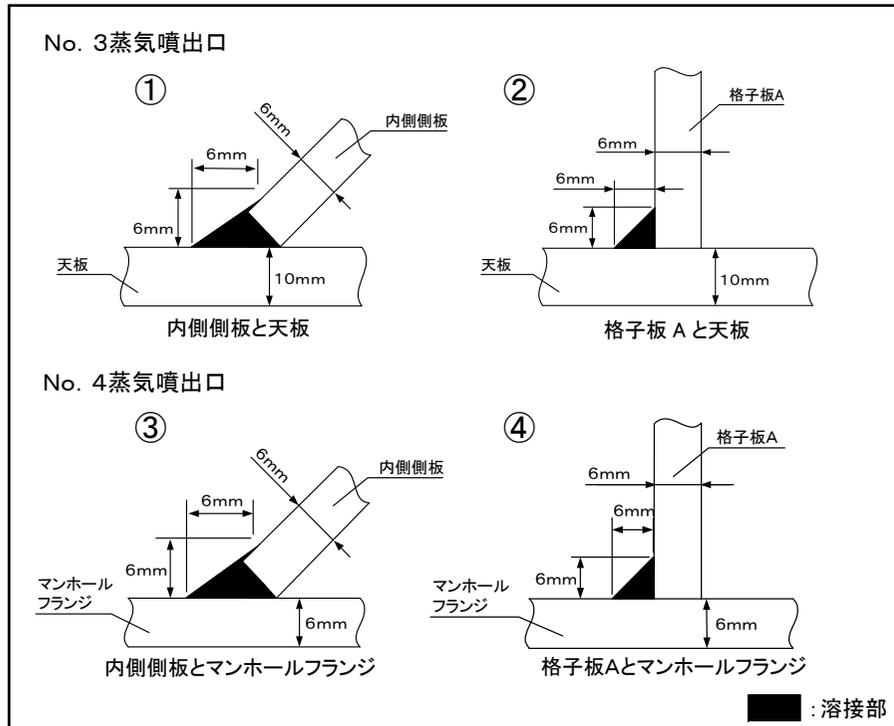
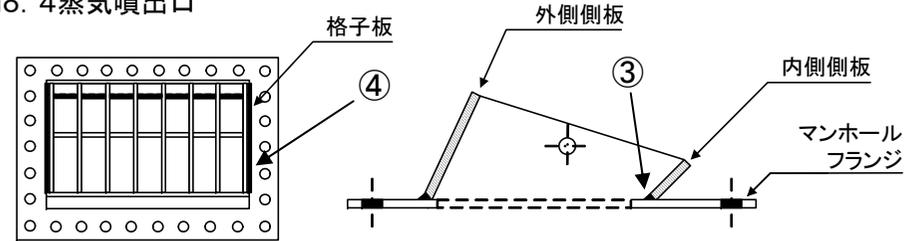
・製作記録により、各部の厚さ・寸法・構造は設計仕様通りであり、問題ないことを確認した。

湿分分離加熱器 製作履歴調査結果(溶接設計・施工状況調査)

No. 3 蒸気噴出口



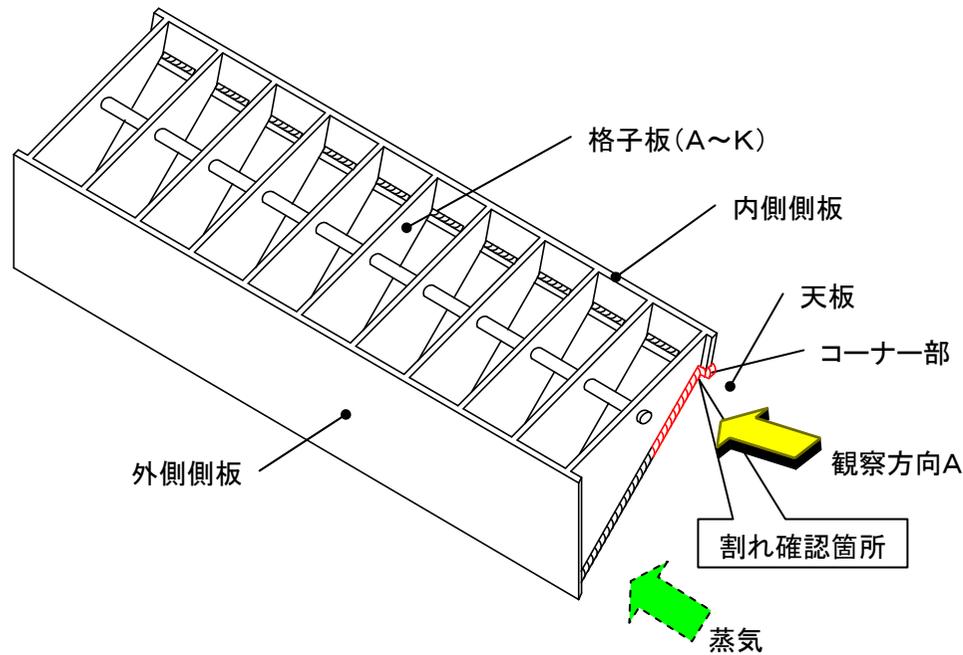
No. 4 蒸気噴出口



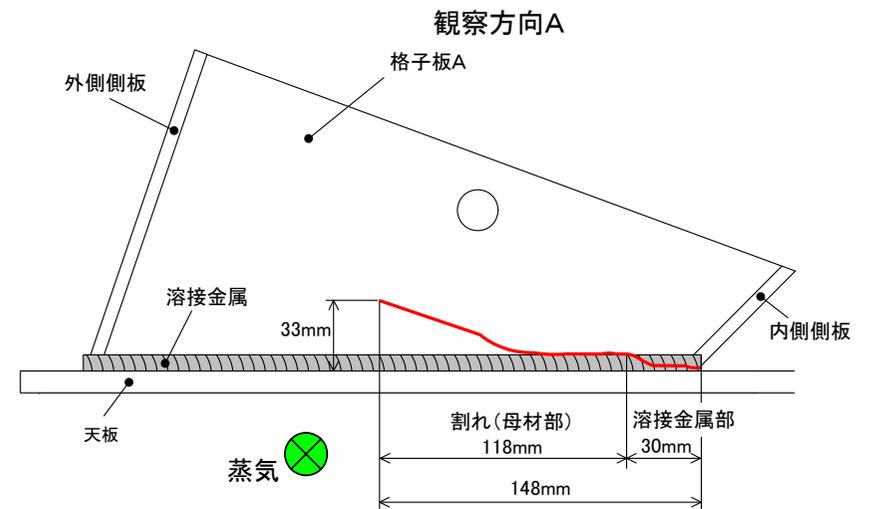
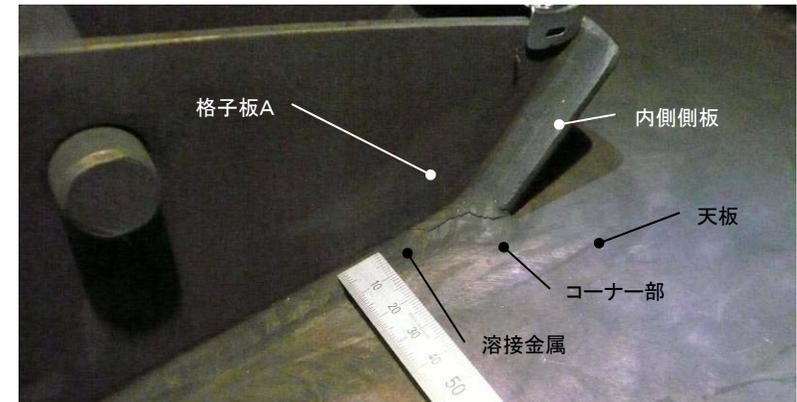
項目	内容	調査方法	結果	
溶接方法 (非耐圧部)	蒸気噴出口内側側板と天板(又はマンホールフランジ)	レ形開先+すみ肉溶接	製作図面 溶接施工記録等	問題なし
	蒸気噴出口格子板と天板(又はマンホールフランジ)	すみ肉(開先なし)溶接		
	FCAW(半自動アーク溶接)			
溶接材料	ステンレス鋼(E308LT1-1)	材料証明書	問題なし	
溶接部	外観	外観検査記録	問題なし	
	浸透探傷検査	浸透探傷検査記録		

・溶接材料は、E308LT1-1であり、材料は規格値を満足しており、問題のないことを確認した。
 ・溶接部は、外観検査記録および浸透探傷検査記録により、問題のないことを確認した。

金属調査結果（外観観察） [1A-No.3 格子板A割れ]



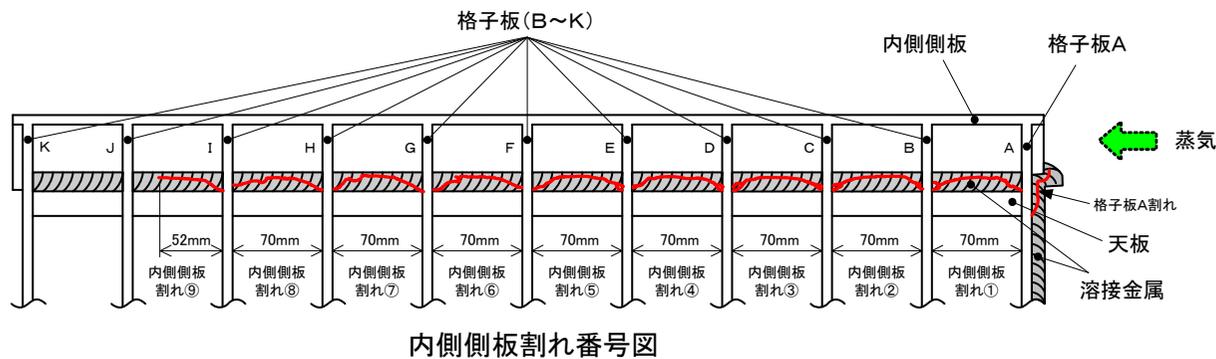
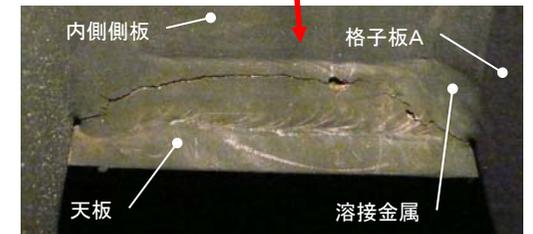
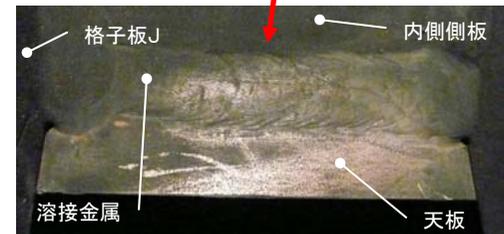
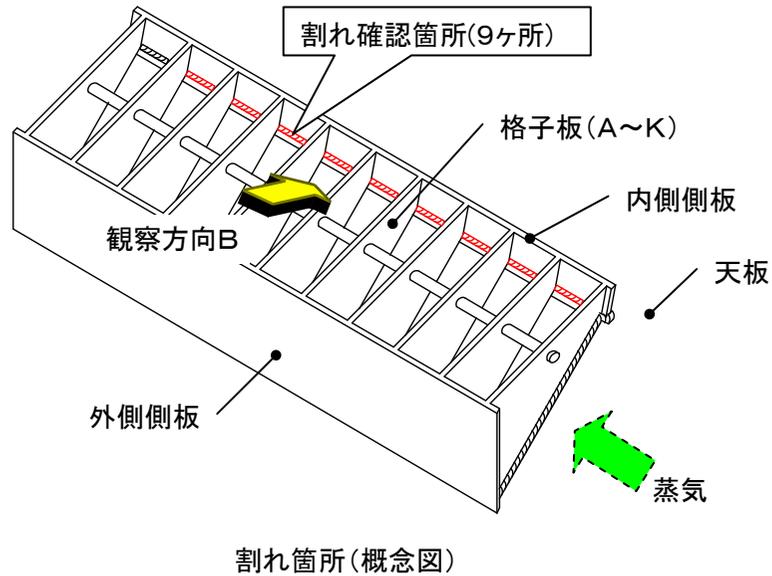
割れ箇所(概念図)



格子板A割れ寸法

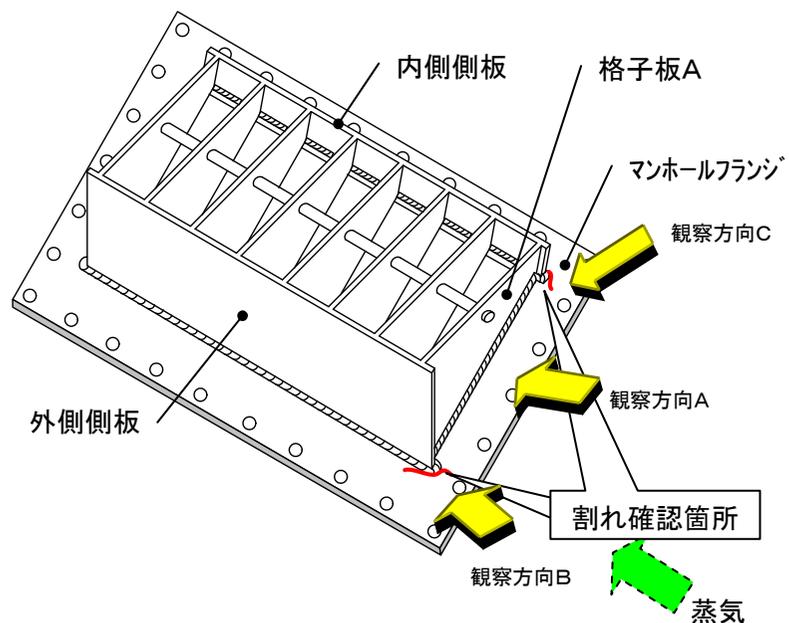
- ・ 割れは上流側の内側側板コーナー部、天板と格子板Aの溶接金属部及び格子板A本体に渡って生じていた。
- ・ 具体的には溶接金属部の割れ(長さ30mm)、格子板A本体の割れ(長さ118mm)が認められた。

金属調査結果（外観観察） [1A-No.3 内側側板割れ]

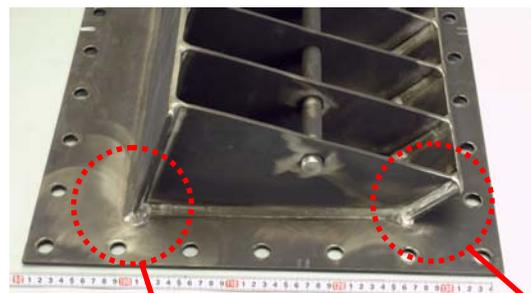


- ・ 割れは天板と内側側板の溶接金属に9箇所(最大長さ 70mm、割れ⑨は 52mm)生じていた。
- ・ 内側側板割れ①～⑧は格子板間で連続しており、長さ約 70mm であった。
- ・ 内側側板割れ⑨は蒸気下流側の格子板 J 付近には認められず格子板 J には到達していなかった。

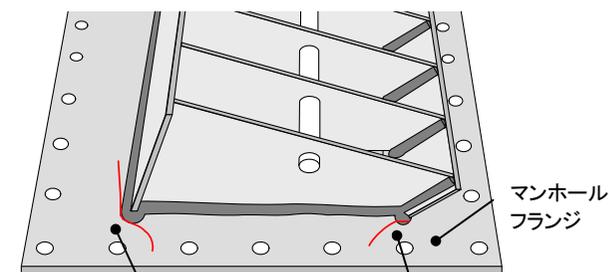
金属調査結果（外観観察） [1A-No.4 コーナー部の割れ]



割れ箇所（概念図）



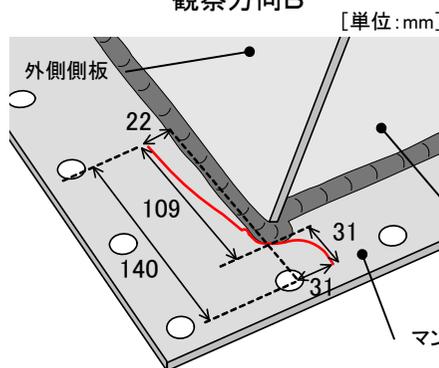
観察方向A



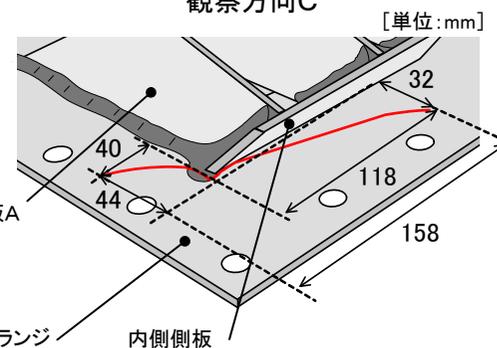
観察方向B



観察方向C



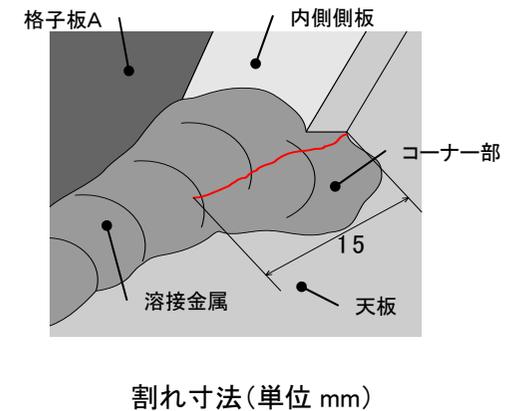
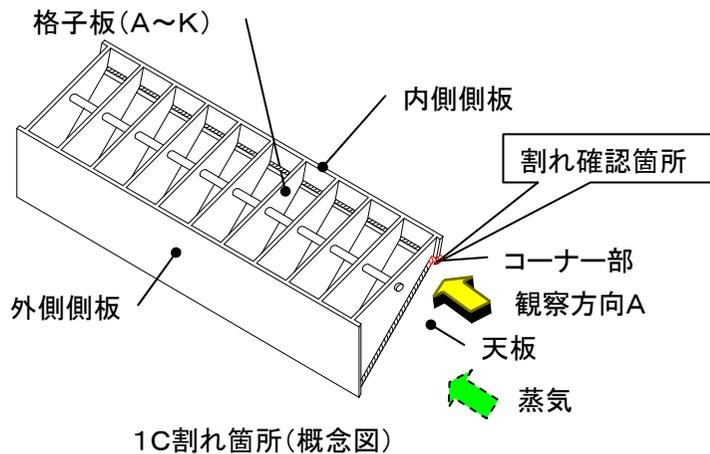
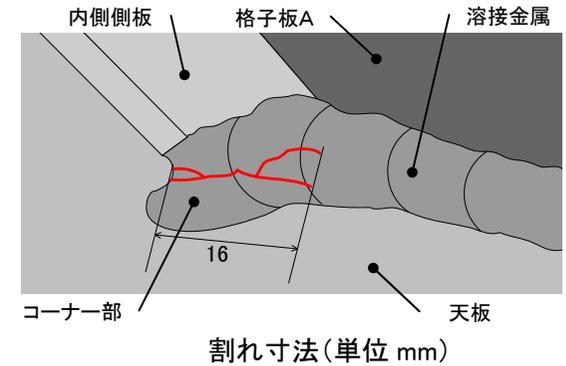
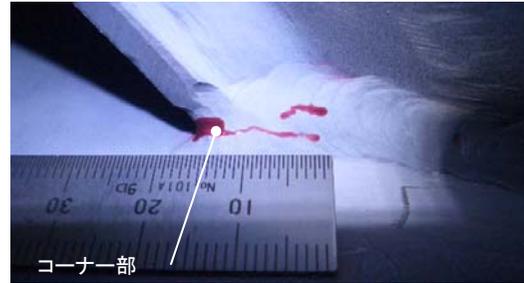
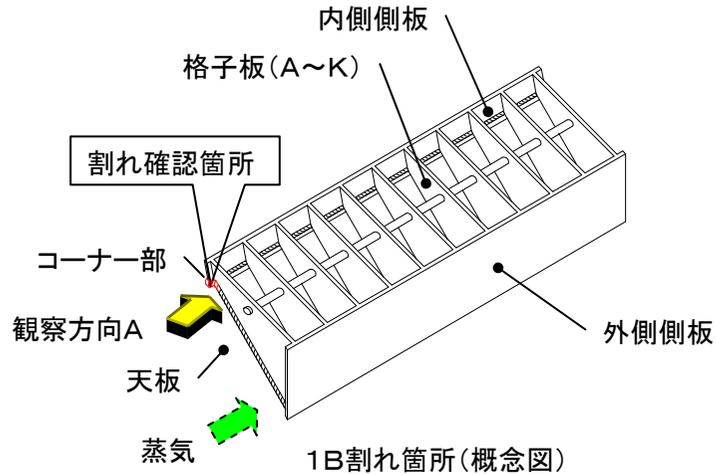
外側側板コーナー部の割れ寸法



内側側板コーナー部の割れ寸法

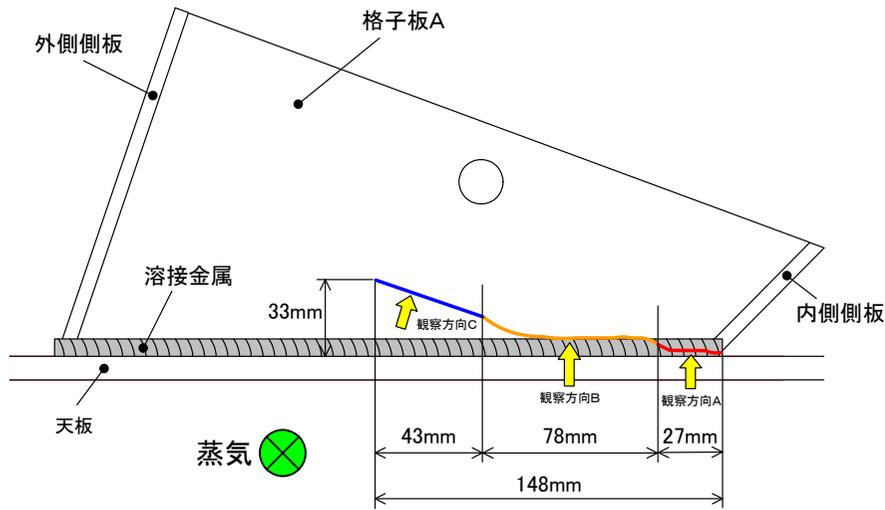
- ・割れは上流側の内側側板コーナー部及び外側側板コーナー部に生じていた。
- ・内側側板コーナー部の割れは、マンホールフランジ本体、及び内側側板とマンホールフランジの溶接金属部に長さ約 158mm の割れが発生していた。
- ・外側側板コーナー部の割れは、溶接金属とマンホールフランジ本体の境界付近を通る連続割れであり、長さ約 140mm の割れがあった。

金属調査結果（外観観察） [1B, 1C-No.3 内側側板コーナ一部分の割れ]

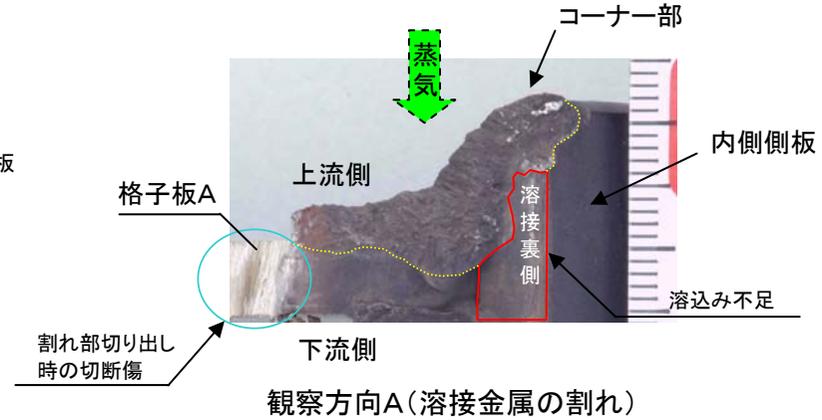


- ・ 割れは上流側の内側側板と天板の溶接のコーナ一部分に生じていた。
- ・ 具体的には 1B-No.3 の割れは内側側板のコーナ一部分に1箇所(長さ 16mm)、1C-No.3 の割れは内側側板と天板の溶接のコーナ一部分に1箇所(長さ 15mm)認められた。

金属調査結果(破面観察)[1A-No.3 格子板A割れ]



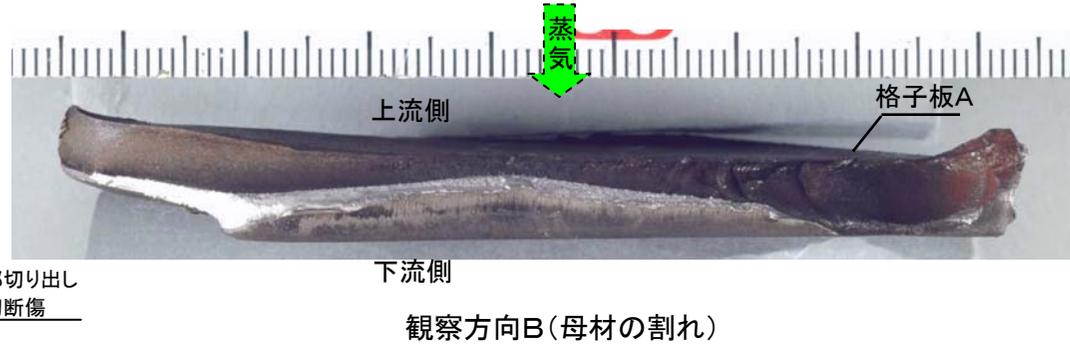
格子板A割れの状況図



観察方向A(溶接金属の割れ)



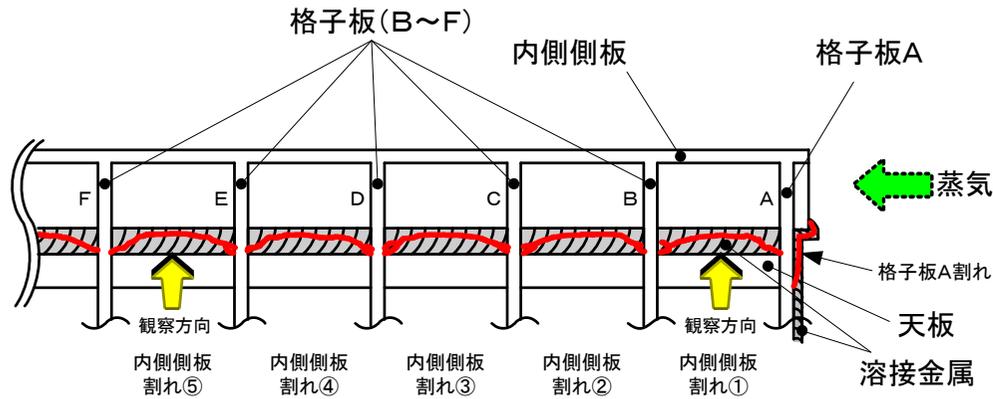
観察方向C(母材の割れ)



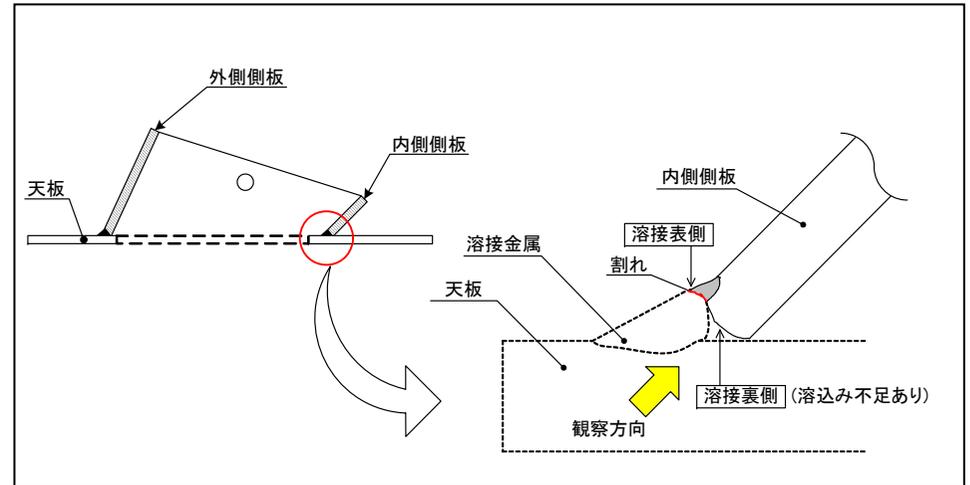
観察方向B(母材の割れ)

- ・格子板A割れは貫通していた。
- ・格子板A割れの破面は、全面に渡ってほぼ平坦であることが認められた。
- ・格子板A割れの母材部の破面は、き裂前縁の形状が半だ円状であることが認められた。
- ・格子板A割れの溶接裏側に溶込み不足が認められた。

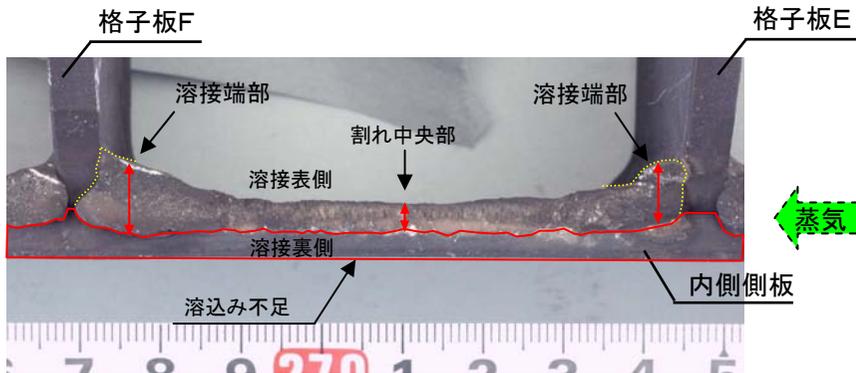
金属調査結果(破面観察)[1A-No.3 内側側板割れ①, ⑤]



内側側板割れの状況図

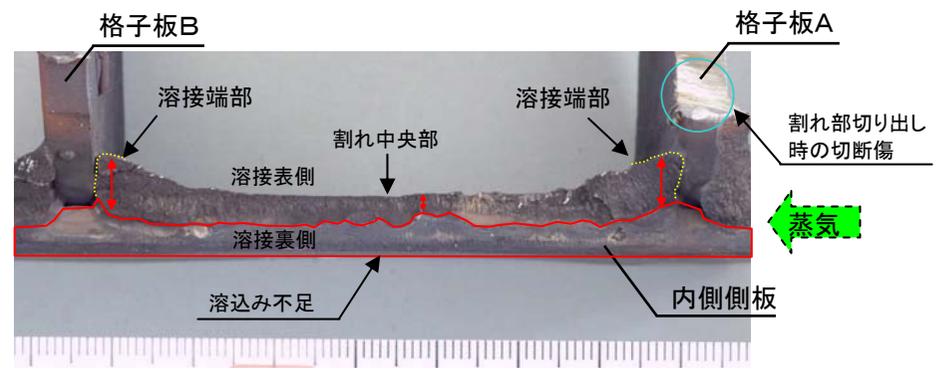


観察方向概念図



内側側板割れ⑤

↑↓: 破面の厚さ

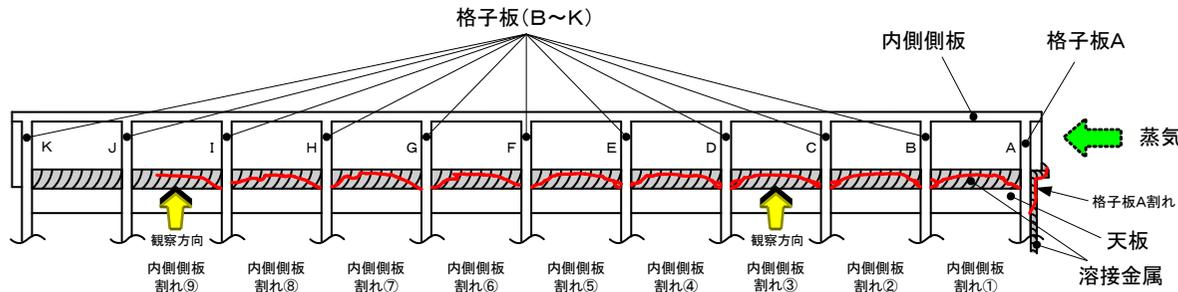


内側側板割れ①

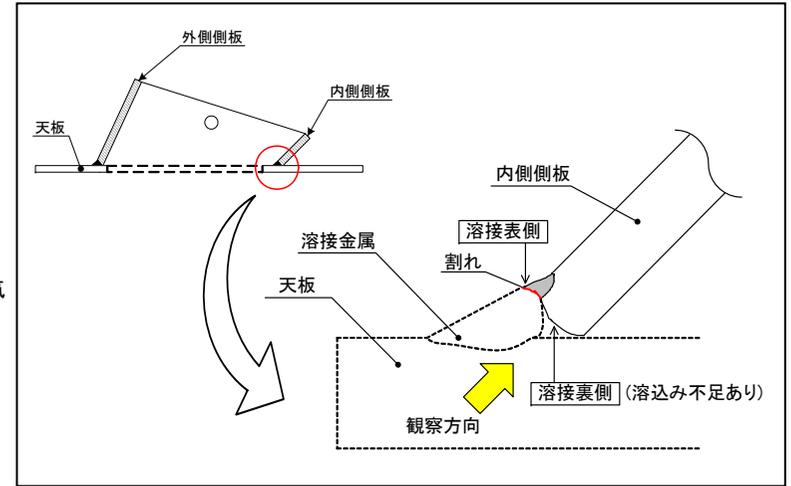
↑↓: 破面の厚さ

- ・内側側板割れ①及び⑤は貫通していた。
- ・内側側板割れ①及び⑤の破面は、ほぼ平坦であることが認められた。
- ・内側側板割れの破面の厚さは、蒸気上流側の割れ①は割れ⑤と比較して薄かった。
- ・内側側板割れ①及び⑤の溶接裏側に溶込み不足が認められた。

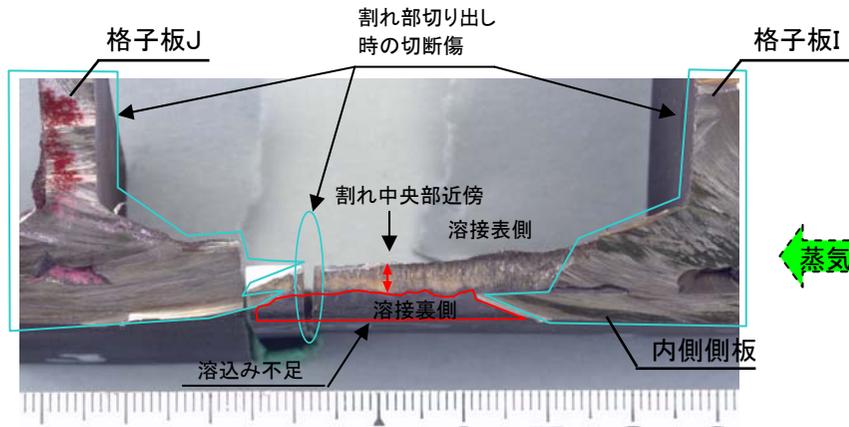
金属調査結果(破面観察)[1A-No.3 内側側板割れ③, ⑨]



内側側板割れの状況図

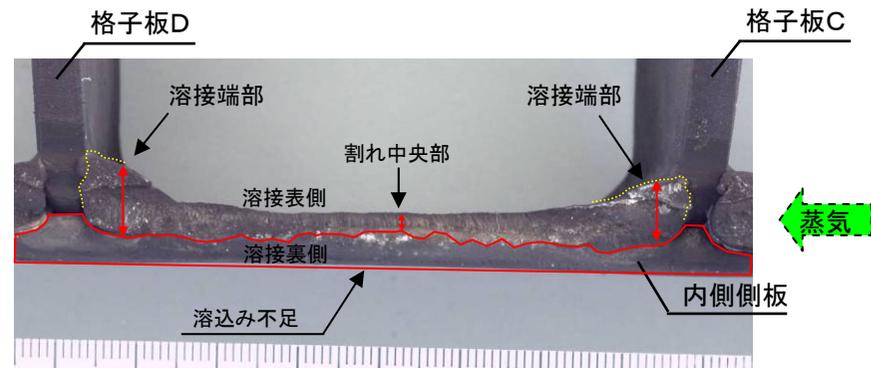


観察方向概念図



内側側板割れ⑨

↑↓: 破面の厚さ

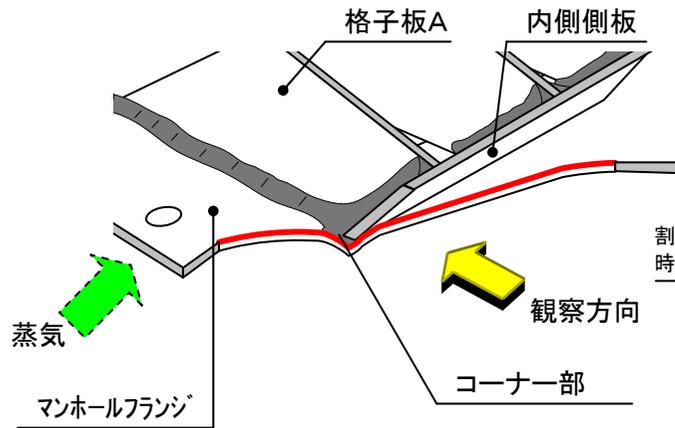


内側側板割れ③

↑↓: 破面の厚さ

- ・内側側板割れ③及び⑨は貫通していた。
- ・内側側板割れ③及び⑨の破面は、ほぼ平坦であることが認められた。
- ・内側側板割れ③及び⑨の溶接裏側に溶込み不足が認められた。
- ・内側側板割れ⑨の破面は、蒸気下流側の格子板 J 付近には認められず格子板 J には到達していなかった。

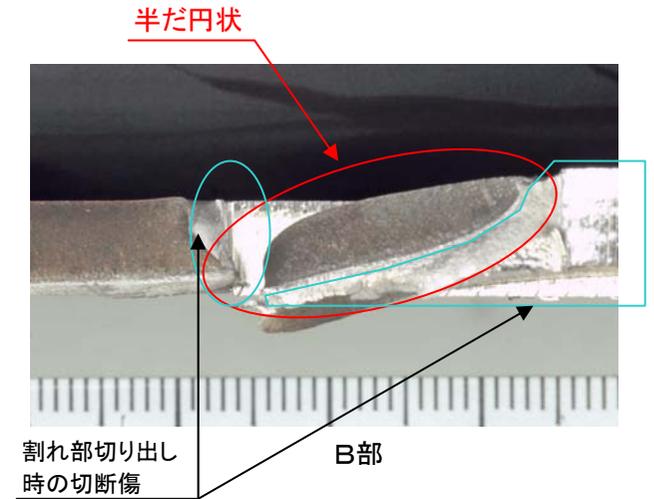
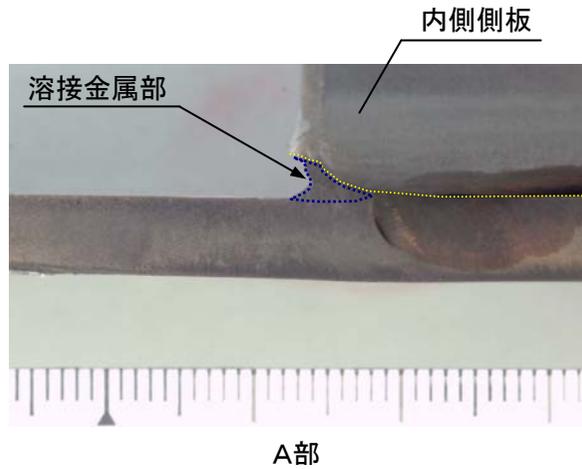
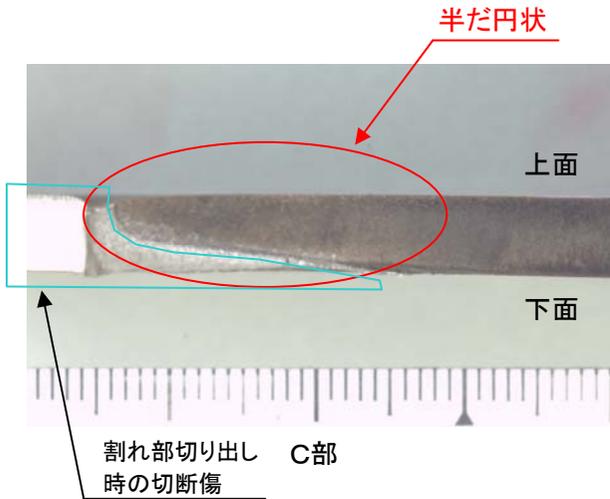
金属調査結果(破面観察)[1A-No.4 内側側板コーナー部の割れ]



内側側板のコーナー部の割れの状況図

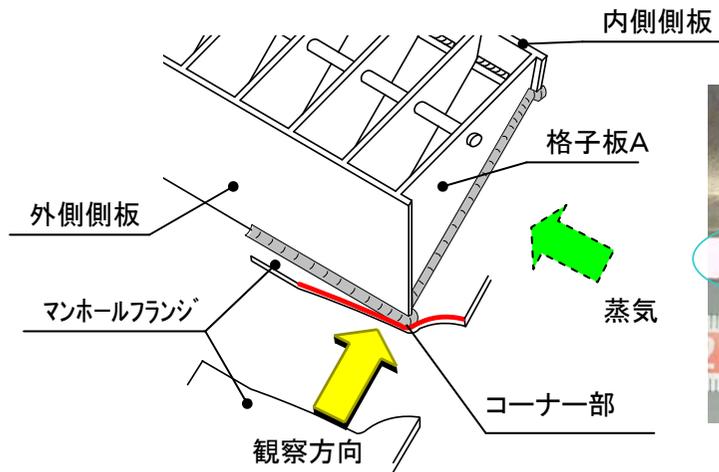


内側側板のコーナー部の割れ

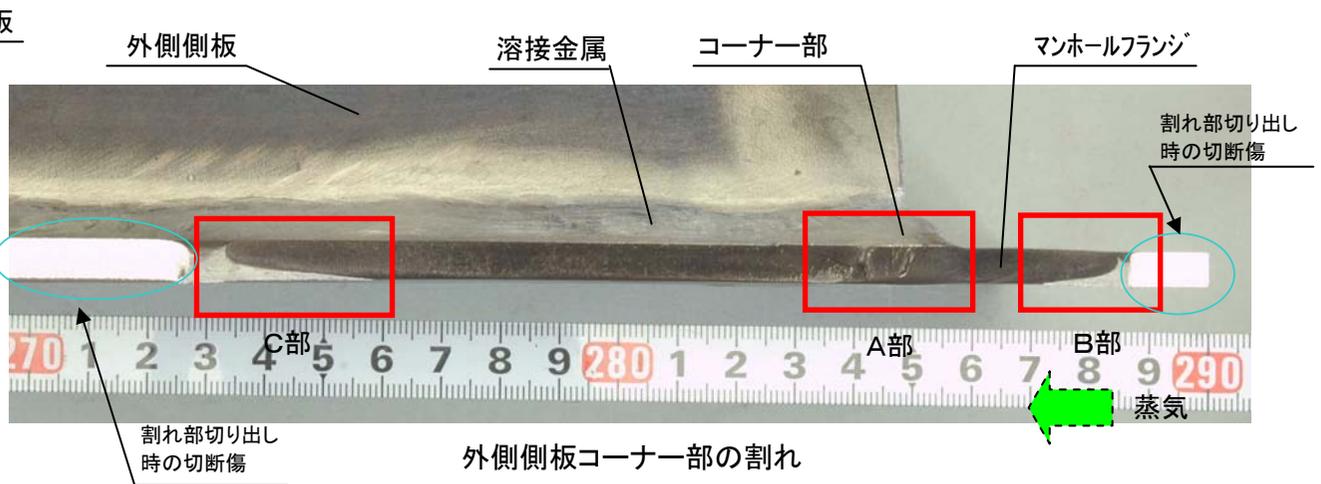


- ・内側側板コーナー部の割れは貫通していた。
- ・内側側板コーナー部の割れの破面は、ほぼ平坦であることが認められた。
- ・内側側板コーナー部の割れの破面は、き裂前縁の形状が半だ円状であることが認められた。

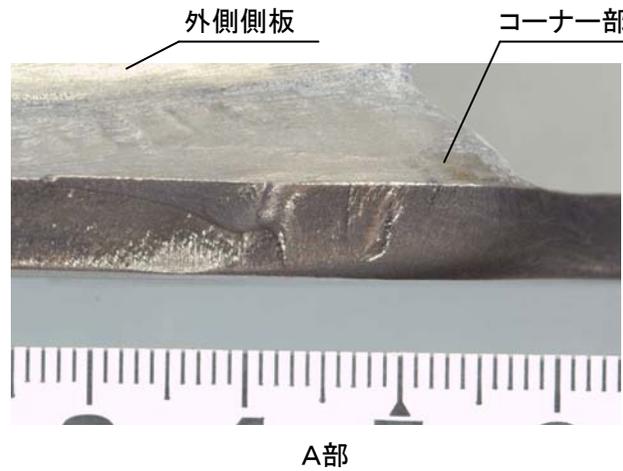
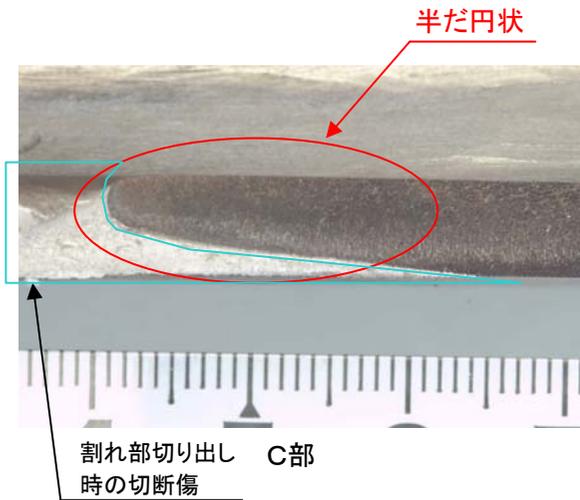
金属調査結果(破面観察)[1A-No.4 外側側板コーナー部の割れ]



外側側板コーナー部の割れの状況図

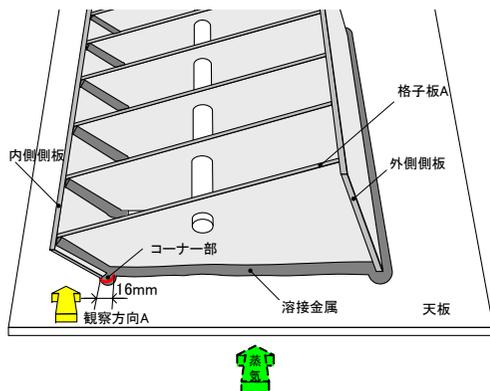


外側側板コーナー部の割れ



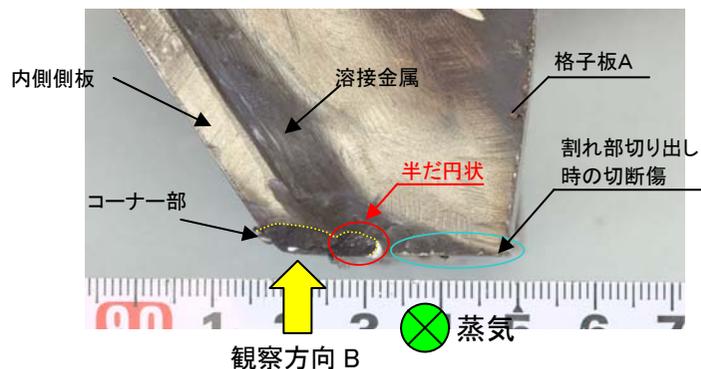
- ・外側側板コーナー部の割れは貫通していた。
- ・外側側板コーナー部の割れの破面は、ほぼ平坦であることが認められた。
- ・外側側板コーナー部の割れの破面は、き裂前縁の形状が半だ円状であることが認められた。

金属調査結果(破面観察)[1B,1C-No.3 内側側板コーナー部の割れ]

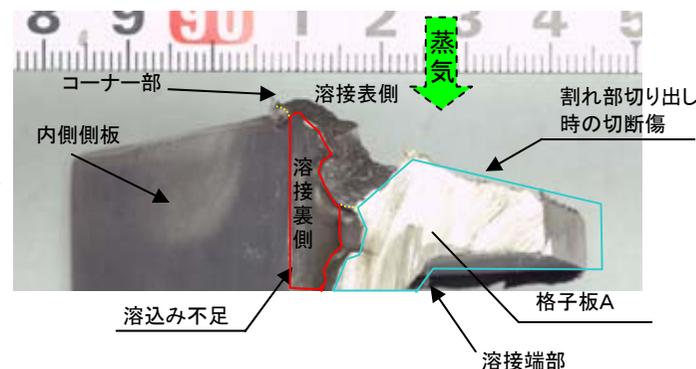


1B内側側板コーナー部の割れの状況図

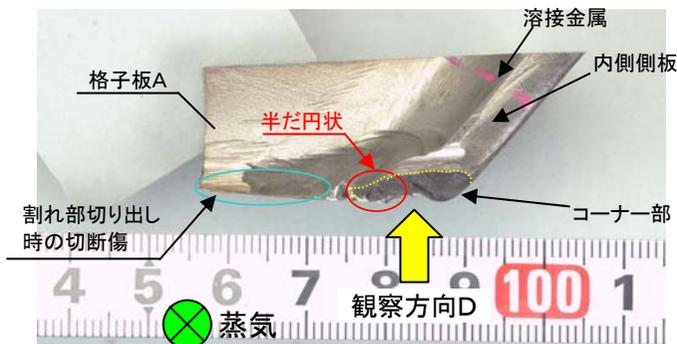
観察方向A(溶接金属の割れ)



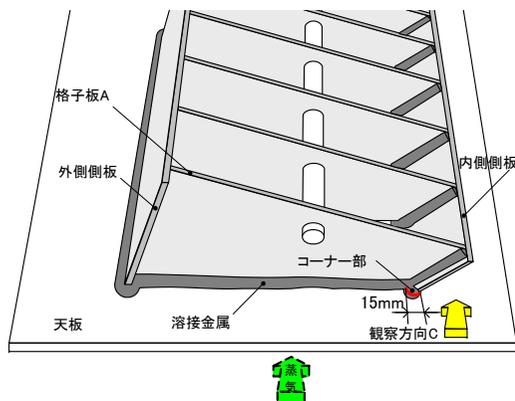
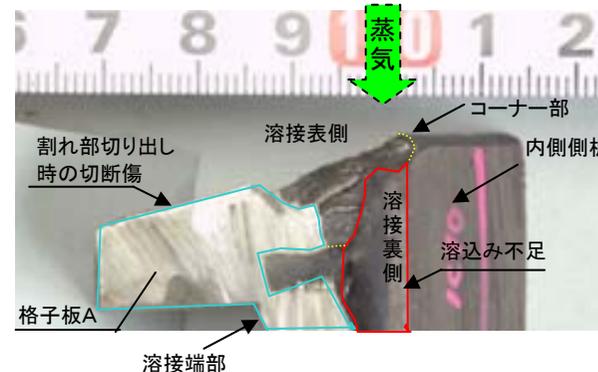
観察方向B(溶接金属の割れ)



観察方向C(溶接金属の割れ)



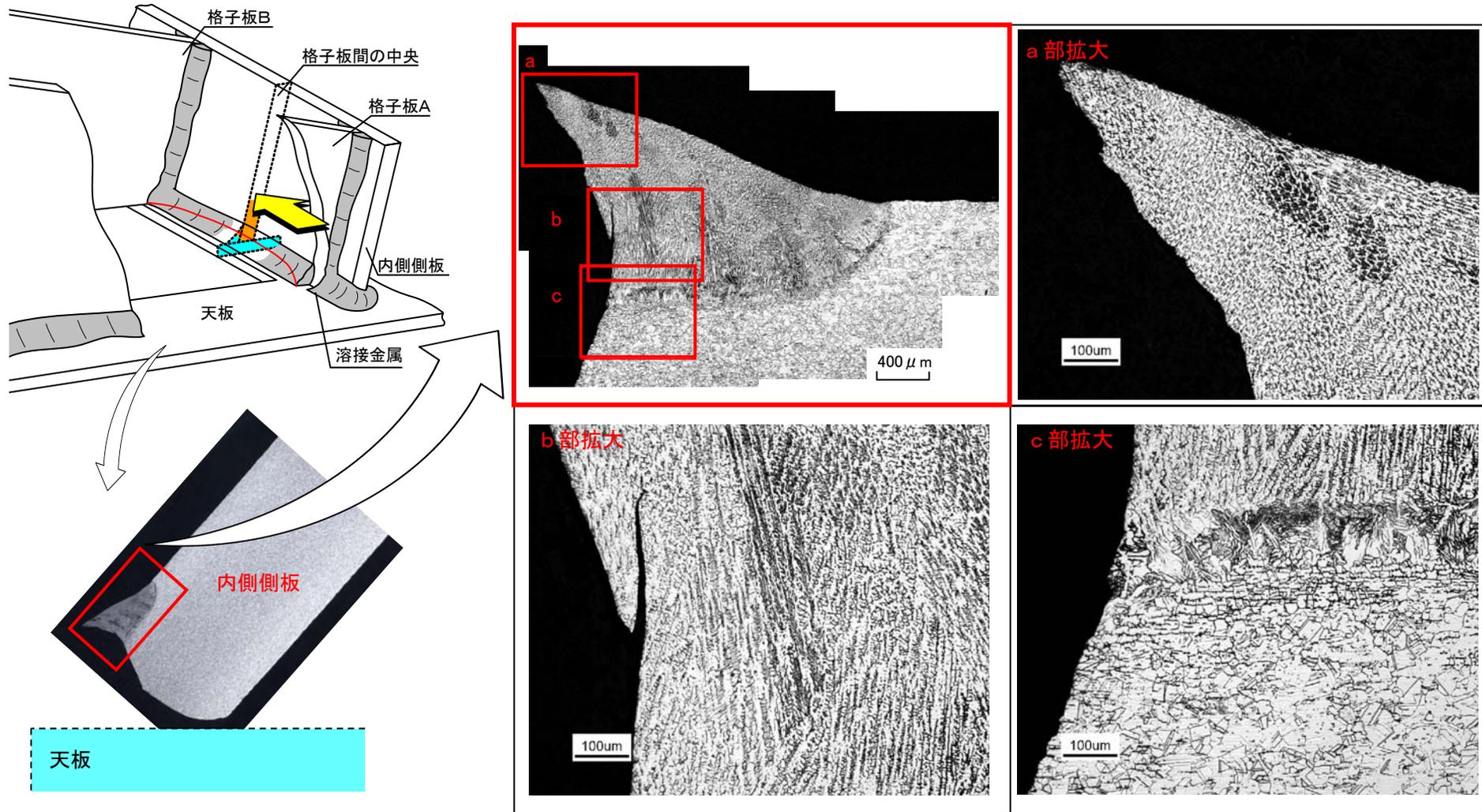
観察方向D(溶接金属の割れ)



1C内側側板コーナー部の割れの状況図

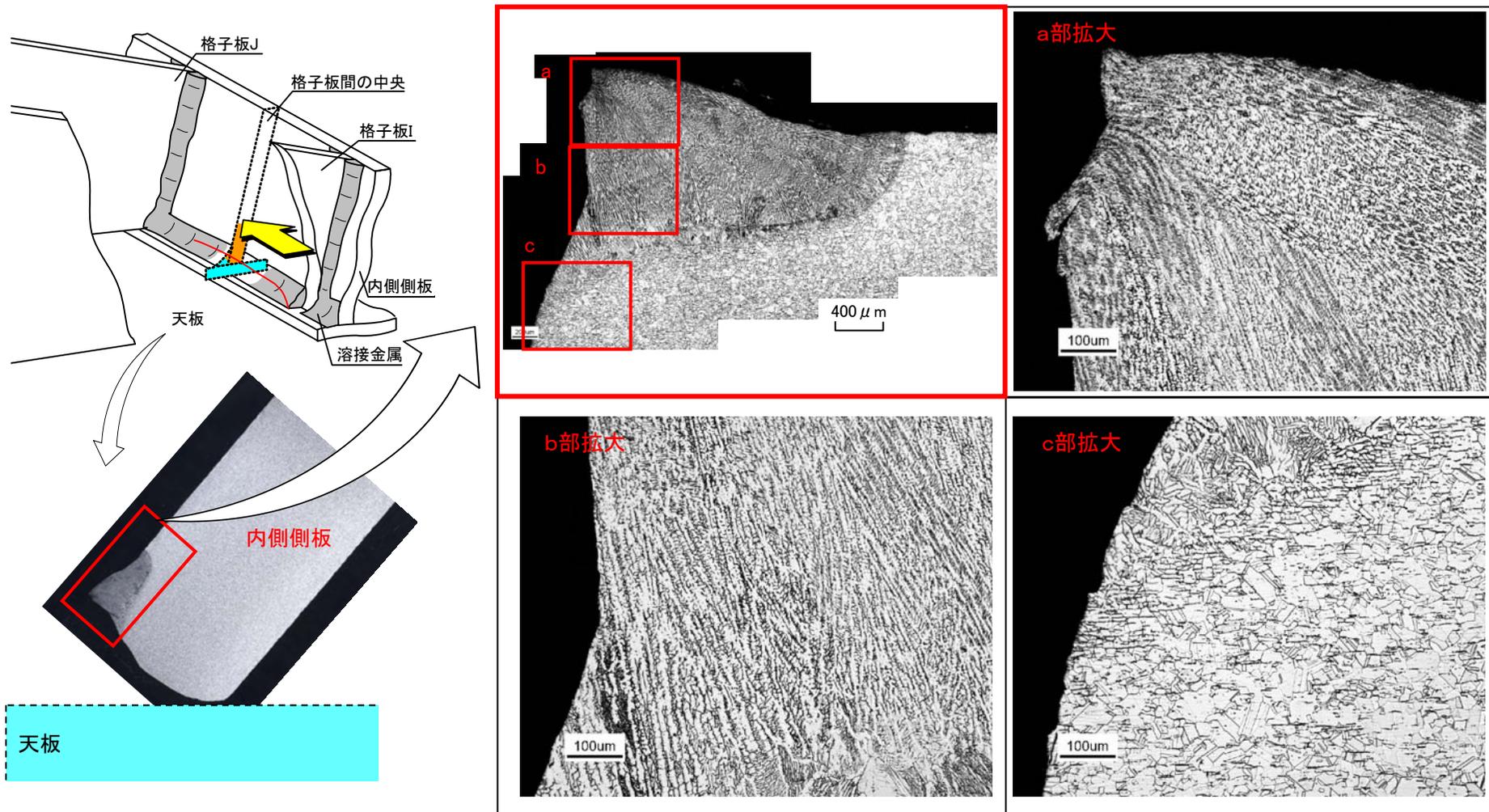
- ・1B, 1C の割れは貫通していた。
- ・1B, 1C の割れの破面はほぼ平坦であることが認められた。
- ・1B, 1C の割れの破面は、き裂前縁の形状が半だ円状であることが認められた。
- ・1B, 1C の割れの溶接裏側に溶込み不足が認められた。

金属調査結果(断面ミクロ観察)[1A-No.3 内側側板割れ①]



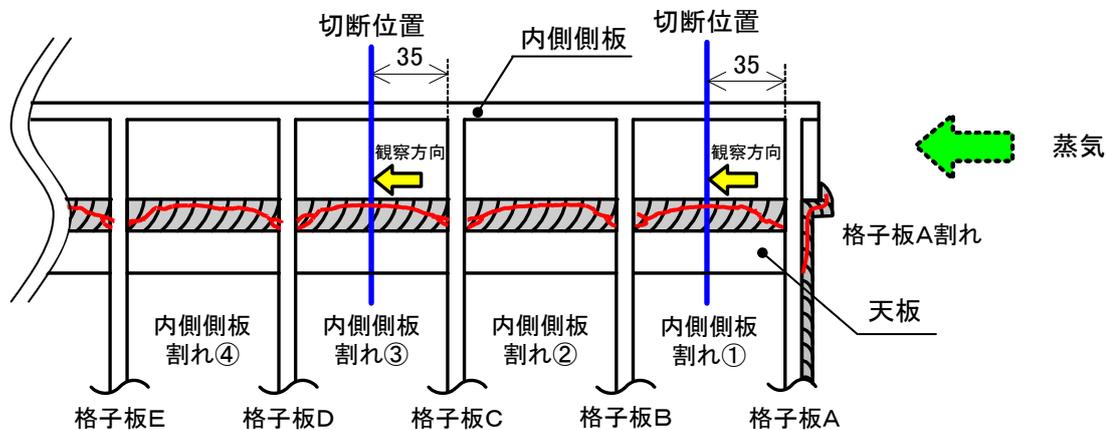
- ・断面の割れ形状は凹凸が少なく滑らかであることが認められた。
- ・割れは枝分かれがほとんどなく、粒内割れであることが認められた。
- ・介在物や腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(断面ミクロ観察)[1A-No.3 内側側板割れ⑨]

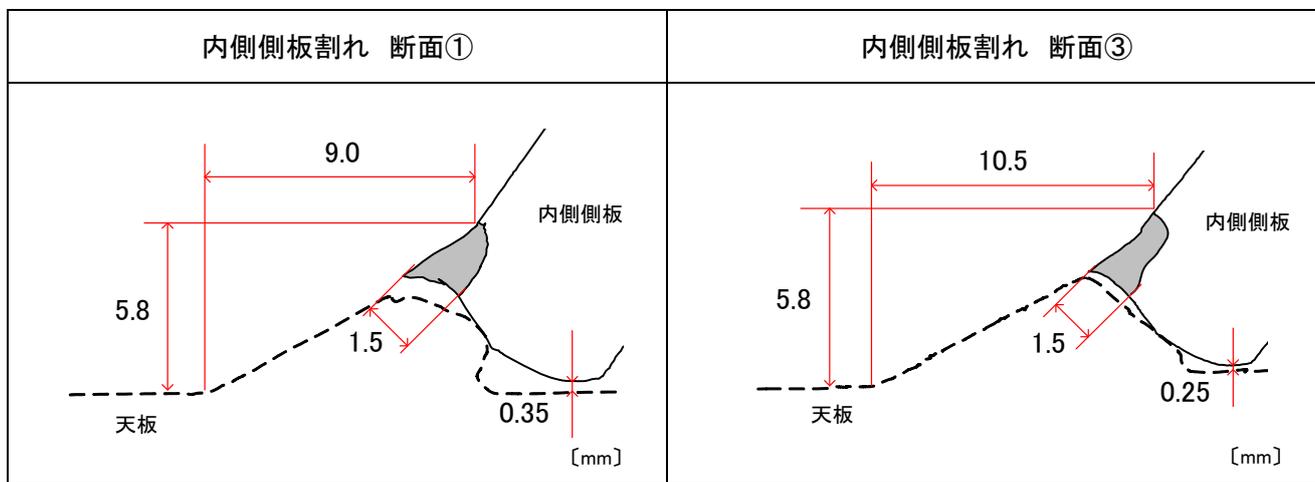


- ・断面の割れ形状は凹凸が少なく滑らかであることが認められた。
- ・割れは枝分かれがほとんどなく、粒内割れであることが認められた。
- ・介在物や腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(のど厚測定) [1A-No.3 内側側板割れ]



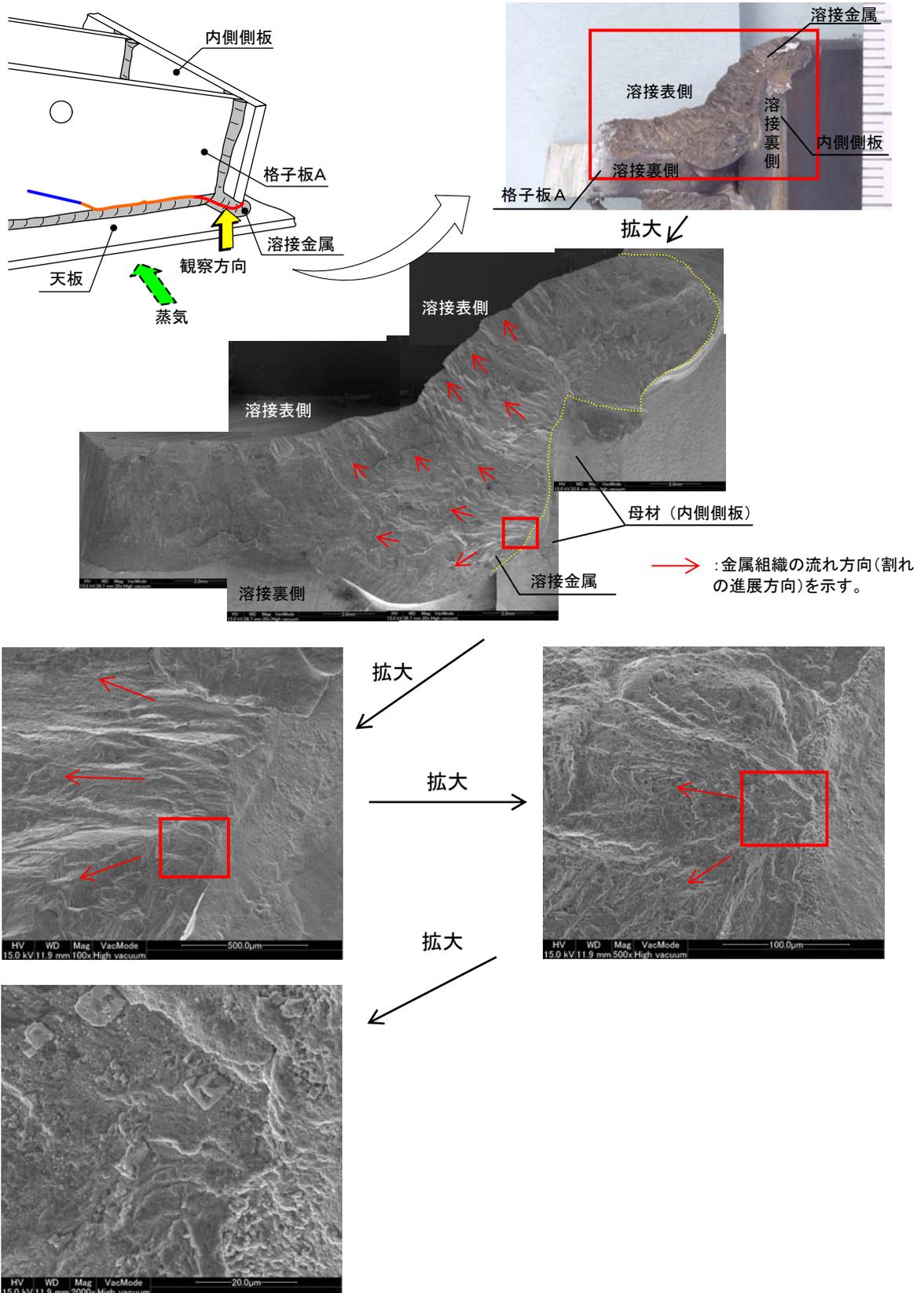
割れ番号図 [mm]



のど厚測定結果

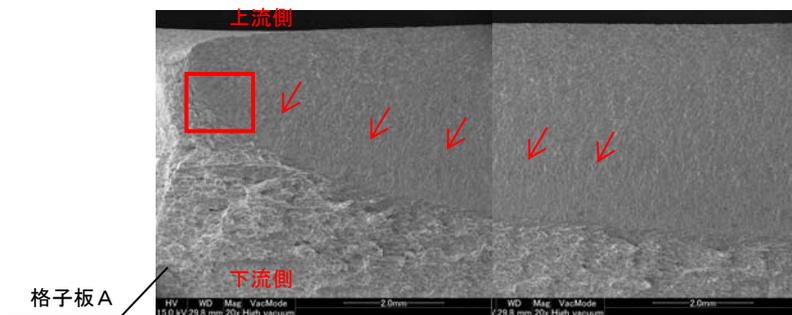
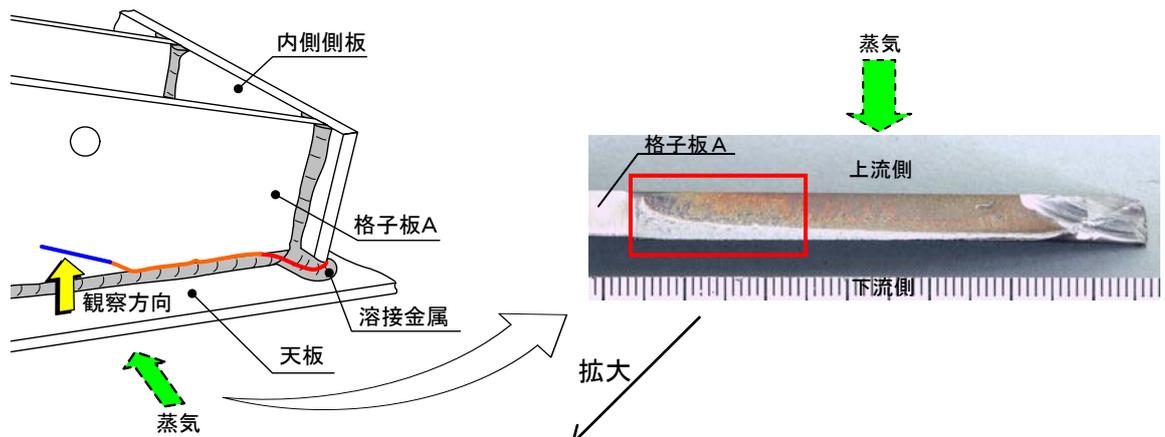
溶接部の割れ貫通部について、断面マイクロ観察及び型取りを行い、のど厚を測定した結果、約 1.5mm の箇所があった。

金属調査結果(破面SEM観察) [1A-No.3 格子板A割れ(溶接金属部)]



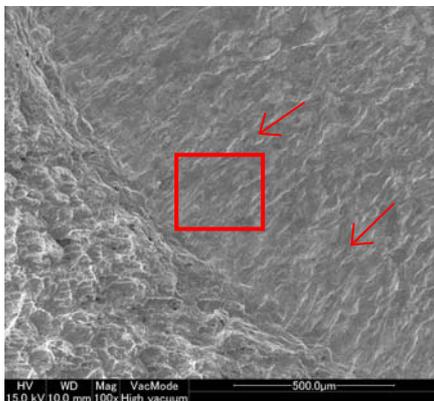
- ・破面はほぼ平坦であり、粒内割れが認められた。
- ・母材(内側側板)と溶接金属の境界部付近から溶接表側に向かう金属組織の流れ(割れの進展方向)が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(破面SEM観察) [1A-No.3 格子板A割れ(母材部)]

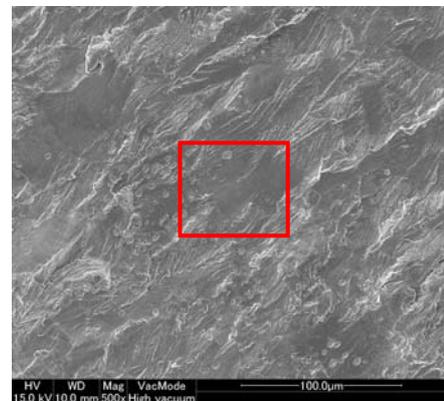


拡大

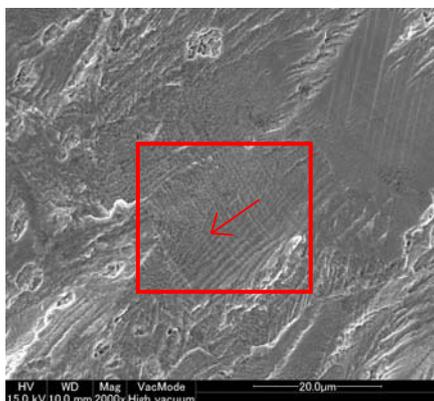
→ : 金属組織の流れ方向(割れの進展方向)を示す。



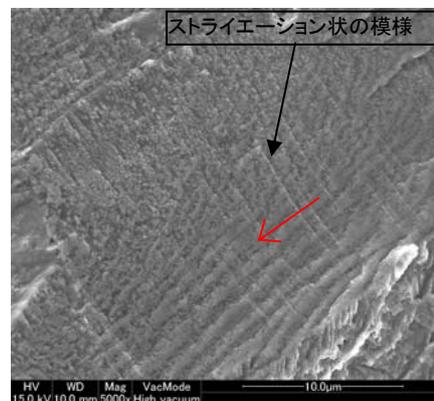
拡大



拡大

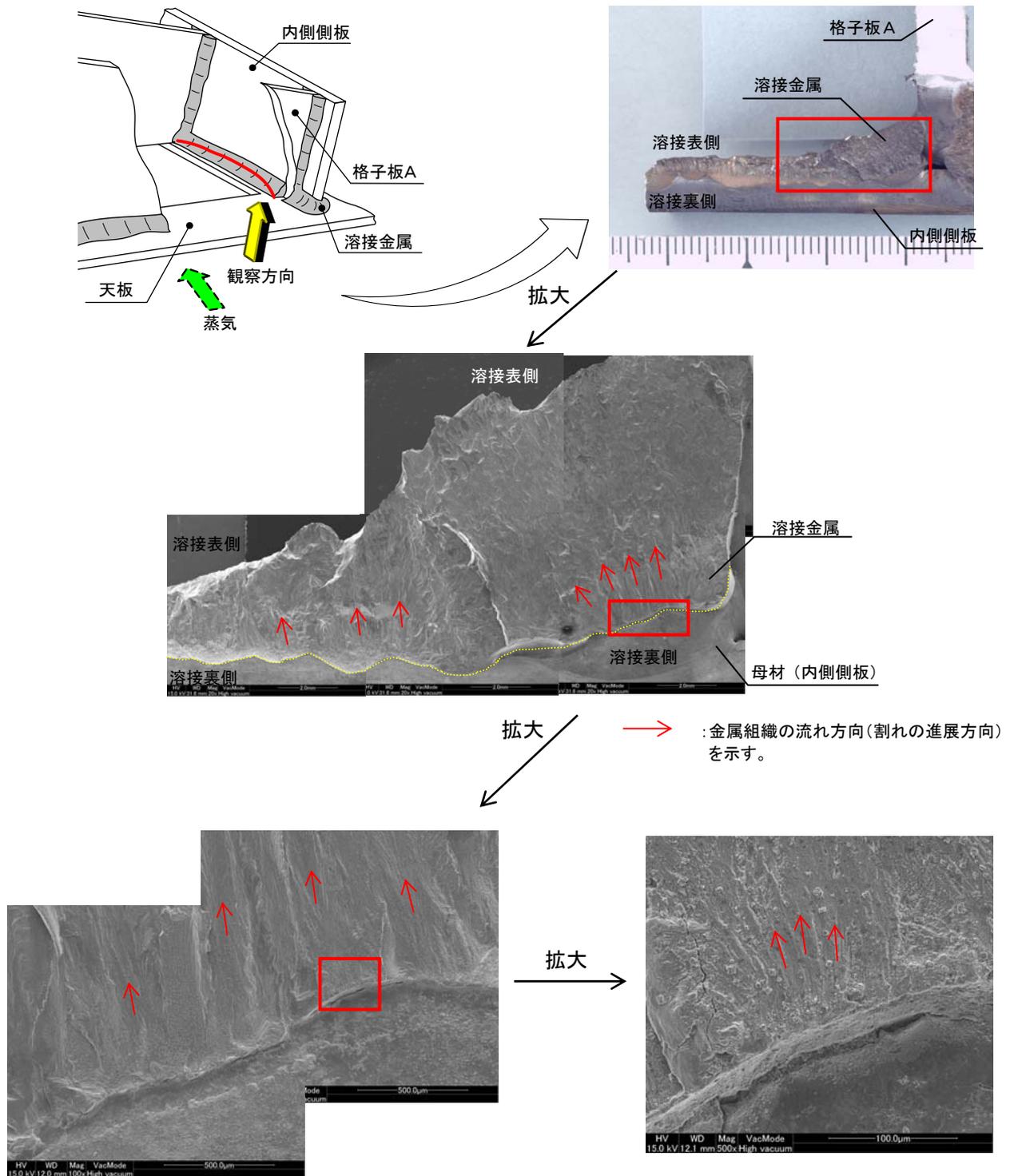


拡大



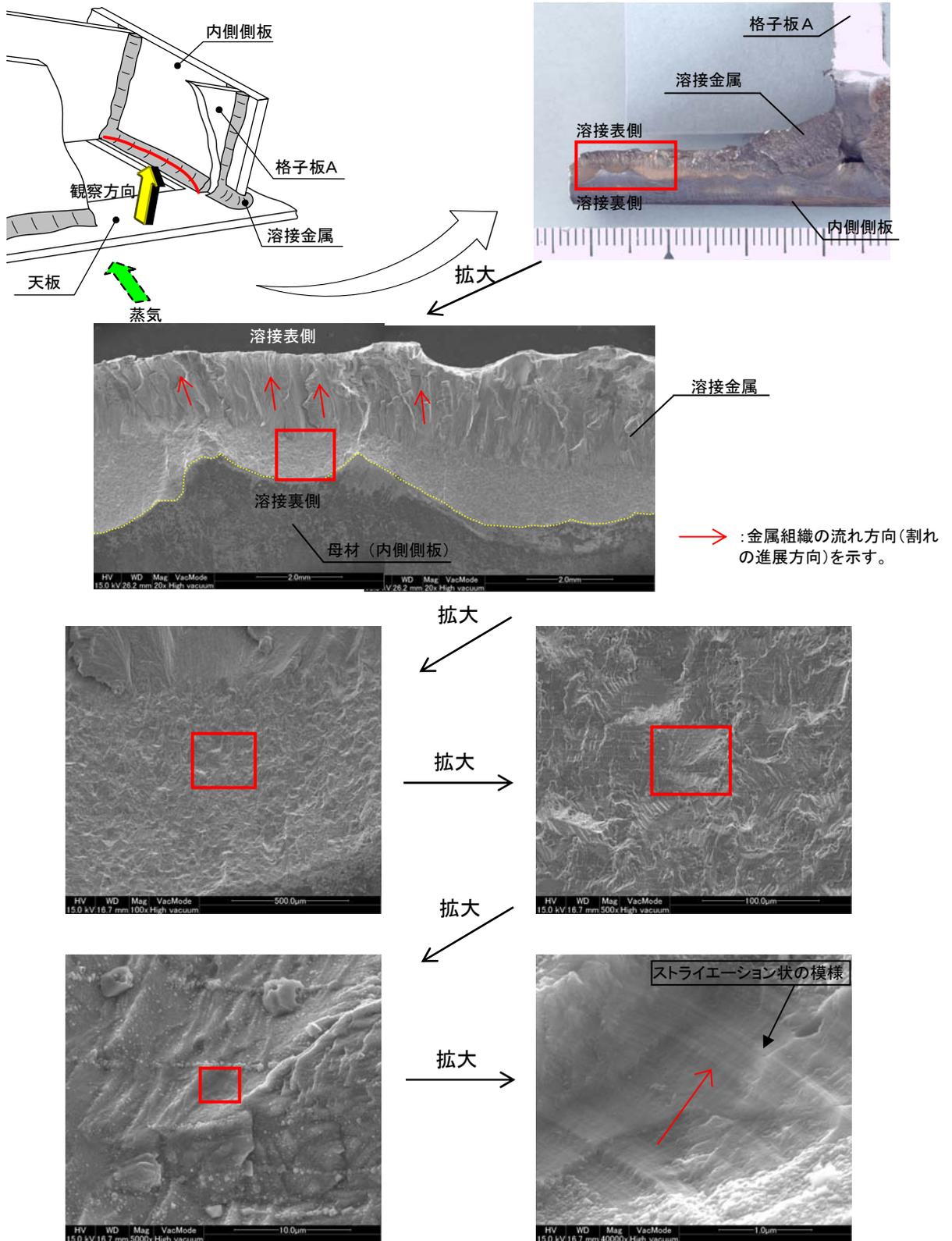
- ・破面は平坦であり、粒内割れが認められた。
- ・破面には、格子板A上流側から下流側に向かう金属組織の流れ(割れの進展方向)が認められた。
- ・破面には、疲労破面に特有なストライエーション状の模様が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(破面SEM観察) [1A-No.3 内側側板割れ①(溶接端部)]



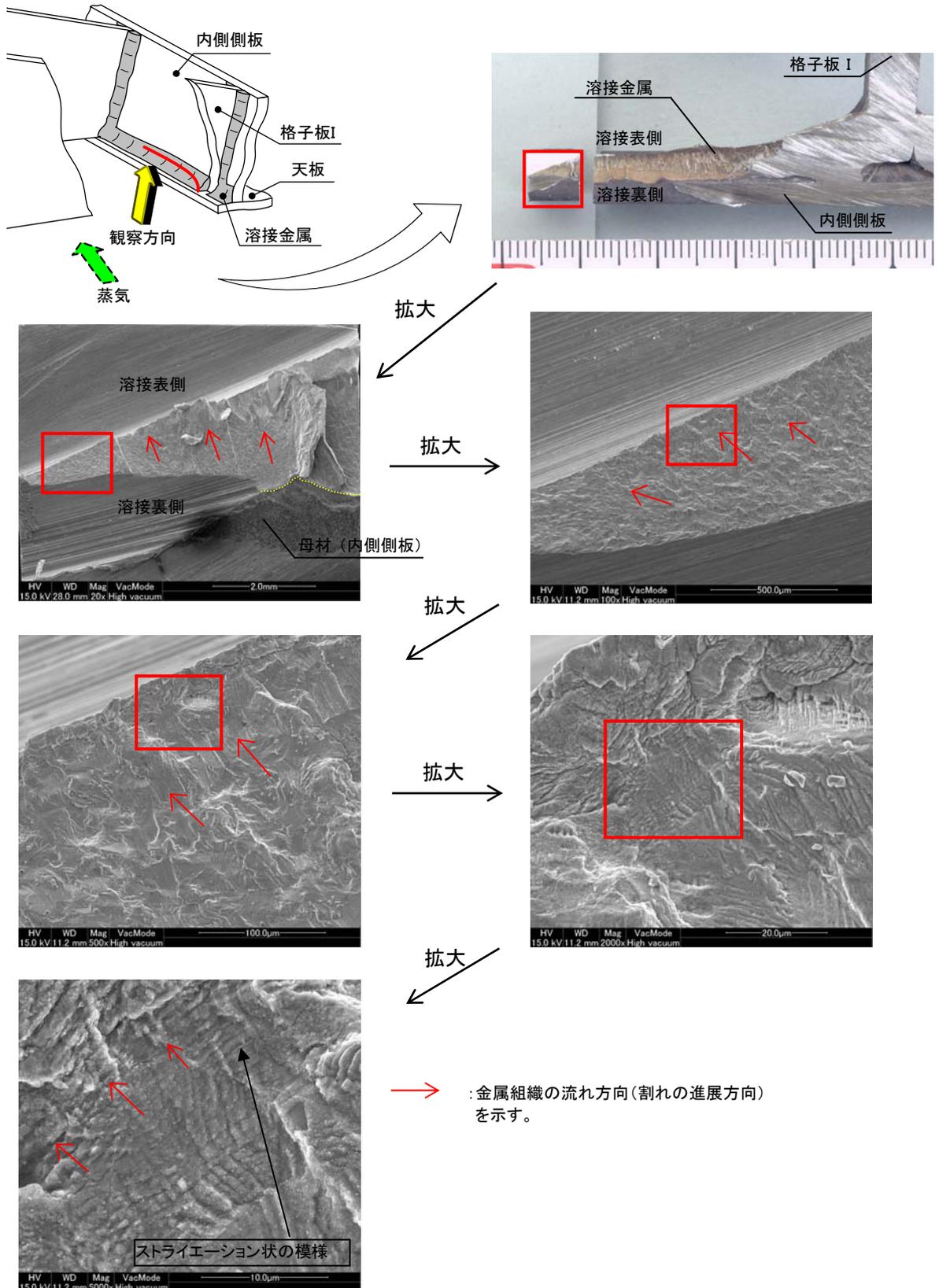
- ・破面はほぼ平坦であり、粒内割れが認められた。
- ・母材(内側側板)と溶接金属の境界部付近から溶接表側に向かう金属組織の流れ(割れの進展方向)が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(破面SEM観察) [1A-No.3 内側側板割れ①(割れ中央部)]



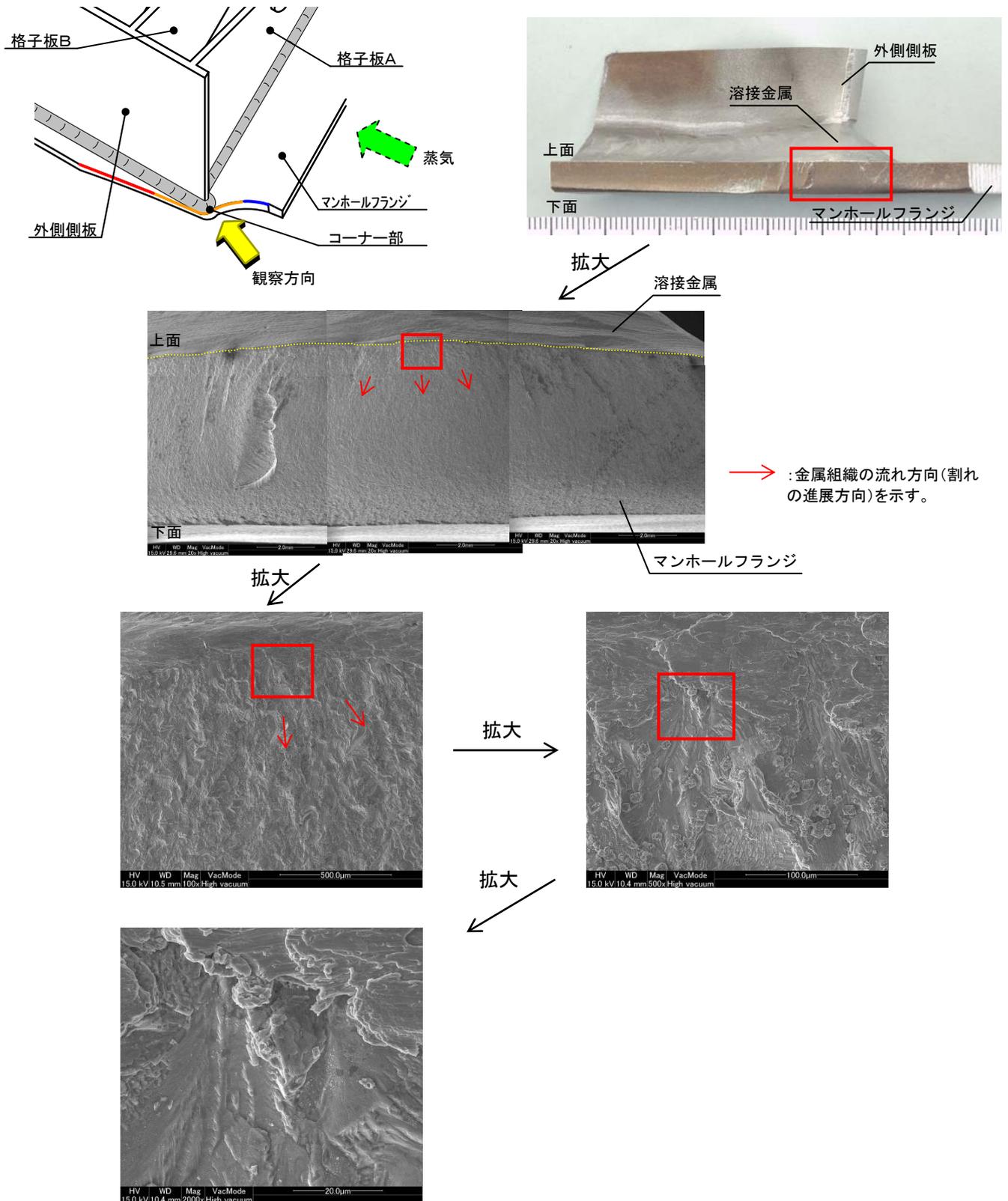
- ・破面はほぼ平坦であり、粒内割れが認められた。
- ・母材(内側側板)と溶接金属の境界部付近から溶接表側に向かう金属組織の流れ(割れの進展方向)が認められた。
- ・破面には、疲労破面に特有なストライエーション状の模様が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(破面SEM観察) [1A-No.3 内側側板割れ⑨]



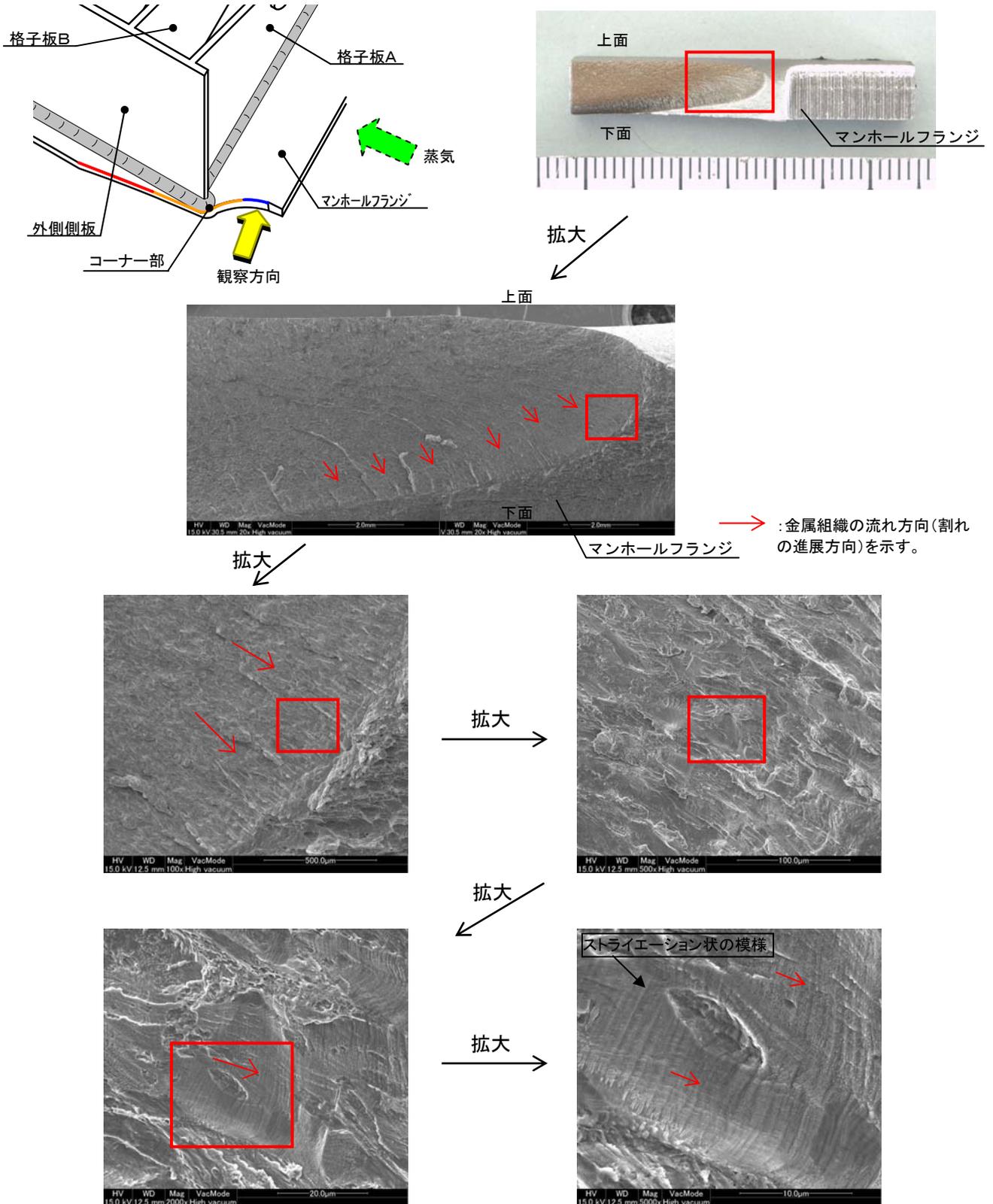
- ・破面はほぼ平坦であり、粒内割れが認められた。
- ・母材(内側側板)と溶接金属の境界部付近から溶接表側に向かう金属組織の流れ(割れの進展方向)が認められた。
- ・破面には、疲労破面に特有なストライエーション状の模様が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(破面SEM観察) [1A-No.4 外側側板コーナー部の割れ(溶接金属部近傍)]



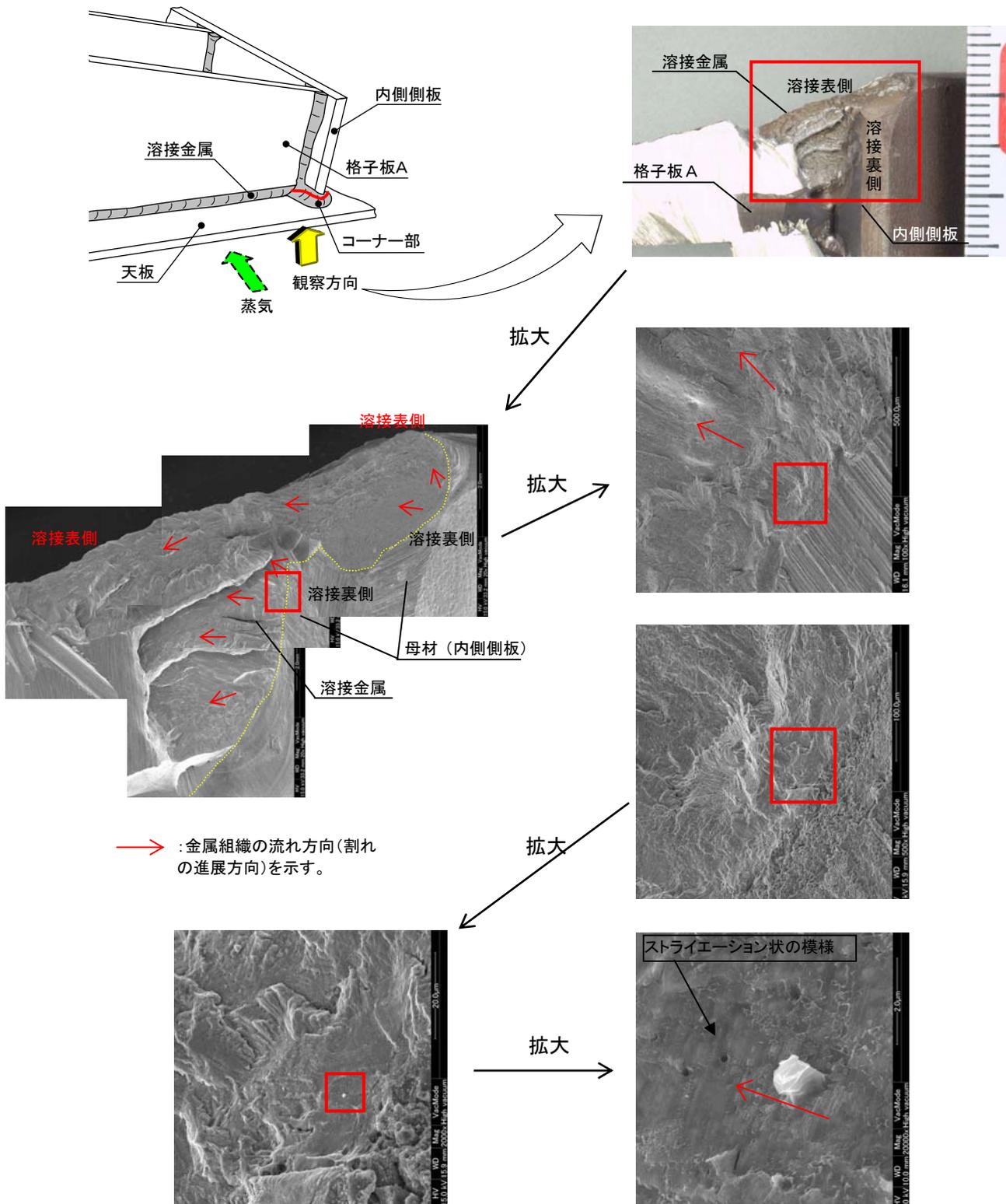
- ・破面はほぼ平坦であり、粒内割れが認められた。
- ・母材(マンホールフランジ)と溶接金属表面の境界部付近からマンホールフランジ下面に向かう金属組織の流れ(割れの進展方向)が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(破面SEM観察) [1A-No.4 外側側板コーナー部の割れ(母材部)]



- ・破面はほぼ平坦であり、粒内割れが認められた。
- ・マンホールフランジ上面から下面に向かう金属組織の流れ(割れの進展方向)が認められた。
- ・破面には、疲労破面に特有なストライエーション状の模様が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(破面SEM観察) [1C-No.3 内側側板コーナー部の割れ]



- ・破面はほぼ平坦であり、粒内割れが認められた。
- ・母材(内側側板)と溶接金属の境界部付近から溶接表側に向かう金属組織の流れ(割れの進展方向)が認められた。
- ・破面には、疲労破面に特有なストライエーション状の様子が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(EDX分析)

EDX:エネルギー分散型X線分光法

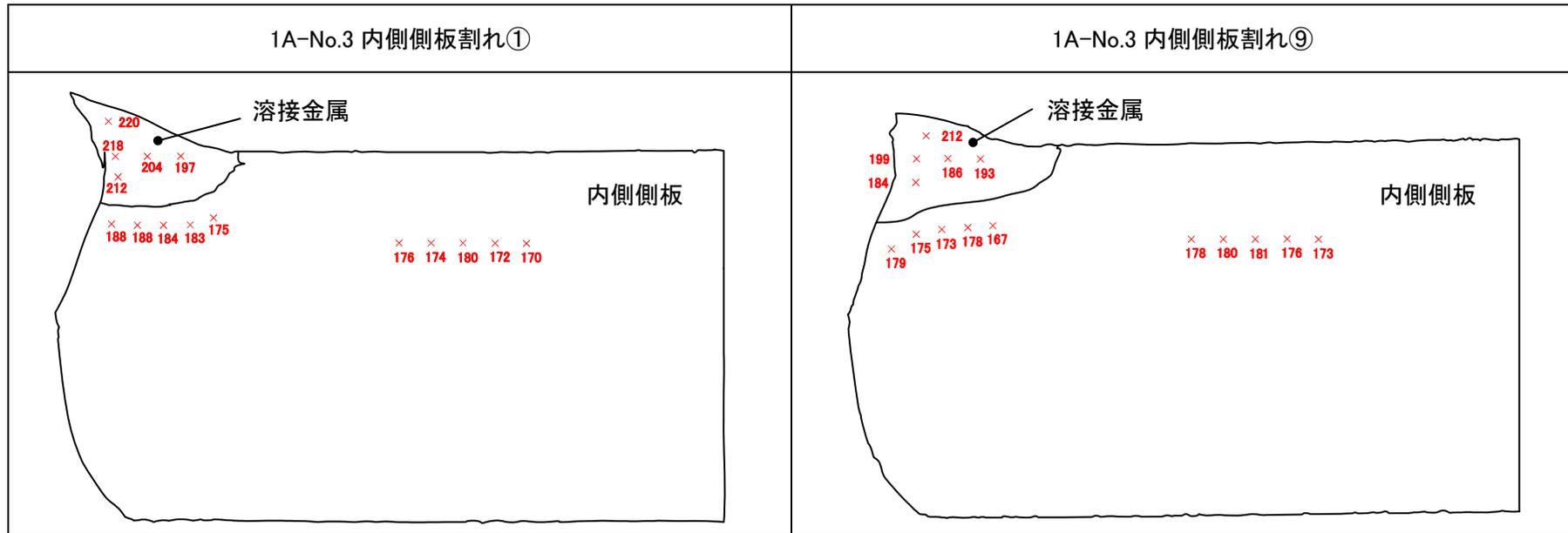
(単位:重量%)

項目	Cl	Na	K	Ca	Mg	Si	P	S	その他
破面	—	—	—	—	—	0.34	0.18	—	99.48

※ —は検出限界(0.5重量%)未満を示す。

・破面の元素分析を実施した結果、耐食性に影響を与える塩素は認められなかった。

金属調査結果(硬度測定)



硬度測定結果(ビッカース硬さ:HV)

		内側側板		溶接金属
		母材	熱影響部	
1A-No.3 内側 側板割れ①	平均	174	184	210
	最高	180	188	220
1A-No.3 内側 側板割れ⑨	平均	178	174	195
	最高	181	179	212

規格値*1

		HV
内側側板(母材)		203 以下*2

* 1: 溶接金属、熱影響部は規格値なし

* 2: 規格値ロックウェル硬さ B 92 以下を HV 換算した値

- ・母材は、規格値を満足しており問題はなかった。
- ・溶接金属及び熱影響部では、問題となる硬化は認められなかった。

疲労による割れの発生に関する評価

1. 目的

天板と蒸気噴出口の溶接部の割れ発生部の詳細調査結果から、割れの発生要因は疲労によるものと推定されることから、蒸気整流板および天板（以下「蒸気整流板等」という）に作用する流体加振力による振動により天板と蒸気噴出口の溶接部に発生する変動応力を算出し、疲労評価を実施する。

2. 検討項目

(1) 振動による変動応力の算出

a. 流体加振力算出

- ・蒸気整流板等に作用する流体加振力を流体の数値解析により算出する。

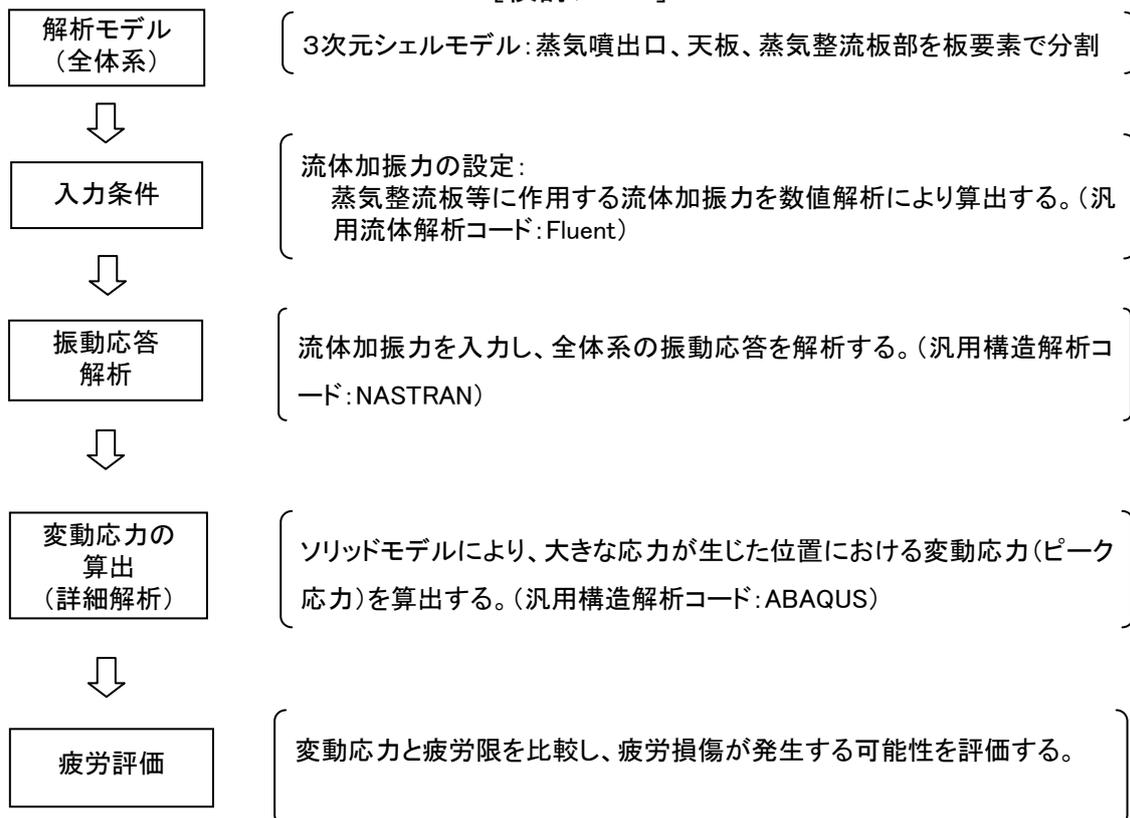
b. 変動応力算出

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

(2) 疲労評価

変動応力と疲労限を比較し、疲労損傷が発生する可能性を評価する。

[検討フロー]



3. 評価結果

(1) 解析モデル

蒸気噴出口、蒸気整流板および天板を対象に、3次元シェル（板）要素にてモデル化した。

拘束条件として天板の幅方向両端および仕切板側は溶接されていることから完全拘束とし、蒸気噴出口と天板との溶接部の厚さは、溶込み不足によるのど厚の減小を考慮した。

解析モデル図を図1に示す。

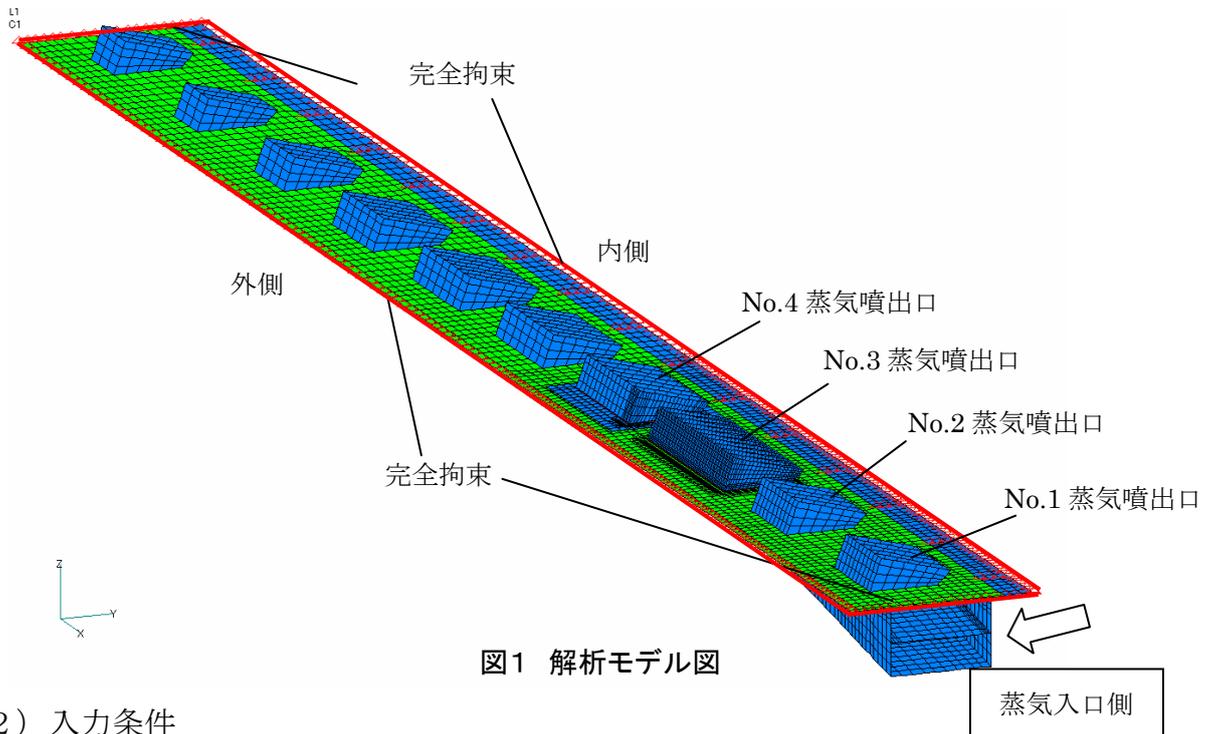


図1 解析モデル図

(2) 入力条件

運転中、蒸気整流板等には、蒸気流のランダムな圧力変動による流体加振力が生じる。この流体加振力を算出するため、汎用流体解析コード（Fluent）を用いて非定常流れの数値解析を実施し、振動応答解析に用いる流体加振力を算出した。

計算諸元を表1に、蒸気噴出口、蒸気整流板等廻りの形状および流れの様相を図2、図3に示す。

表1 流体解析における計算諸元

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

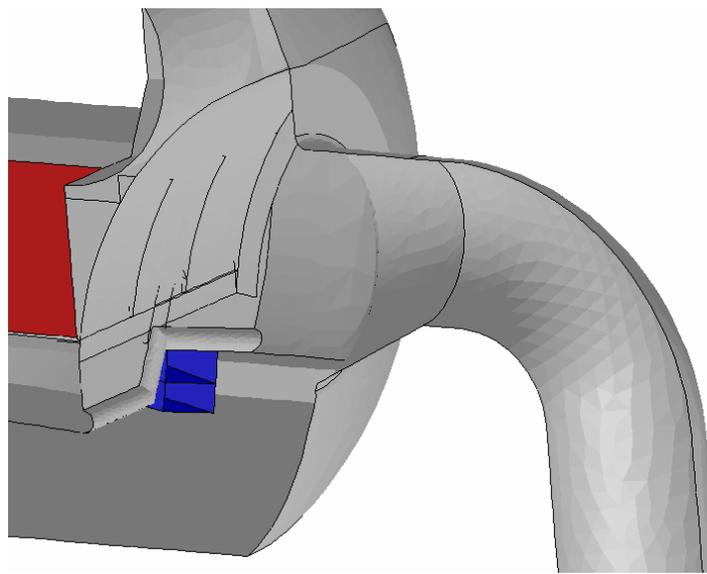


図2 湿水分離加熱器入口部の形状図

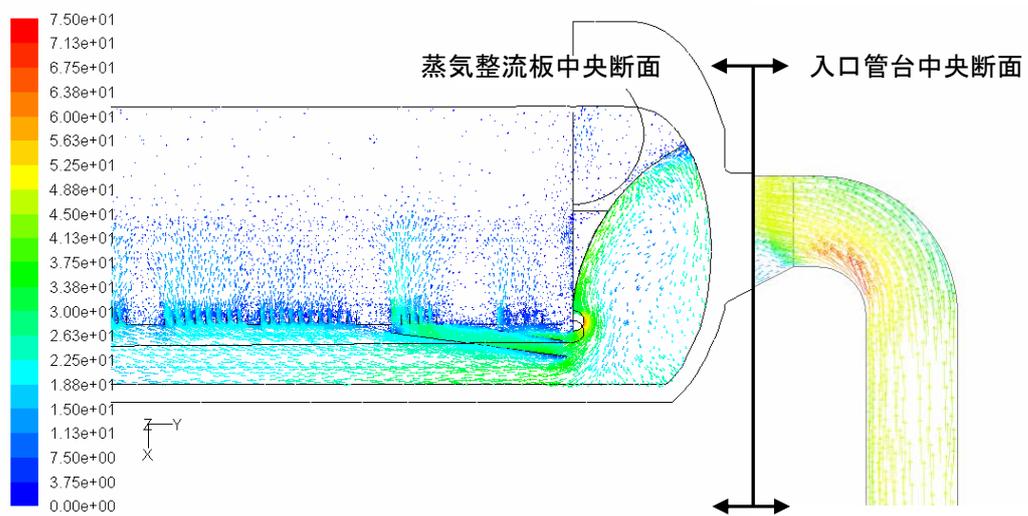


図3 入口管台、蒸気整流板、蒸気噴出口廻りの断面流速ベクトル

(3) 振動応答解析

上記の流体加振力を解析モデルに入力し、汎用構造解析コード(NASTRAN)を用いて振動応答解析を実施した。

応力コンター図(無次元量)を図4、図5に示す。

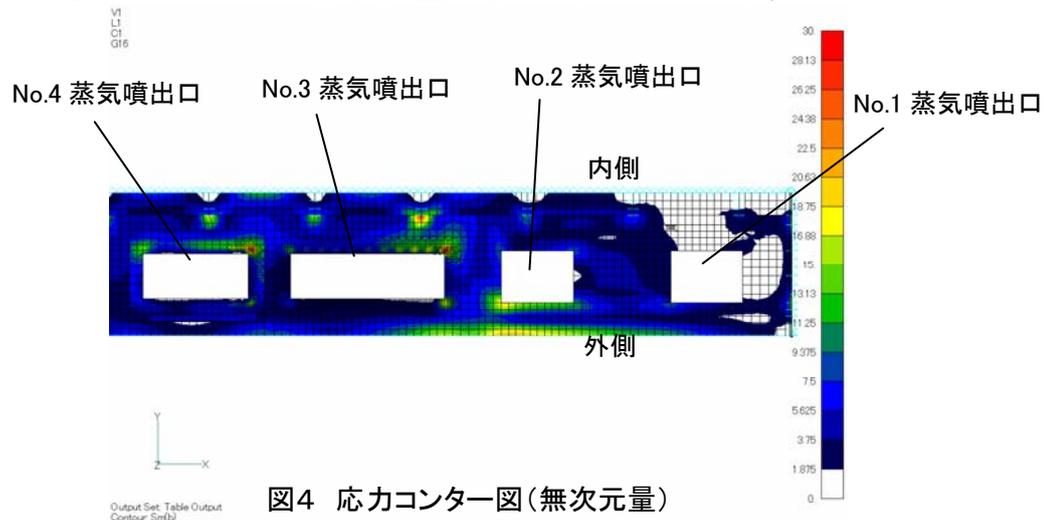


図4 応力コンター図(無次元量)

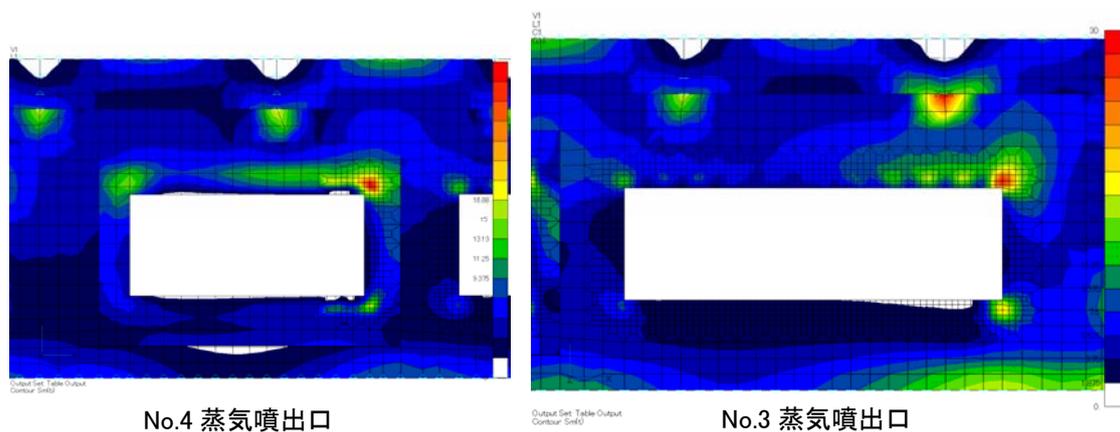


図5 応力コンター図(No. 3、4蒸気噴出口)

(4) 変動応力の算出

振動応答解析の結果、割れの生じた蒸気噴出口内側側板と天板の溶接部について、ソリッド要素でモデル化し、汎用構造解析コード(ABAQUS)により算出した。

No. 3蒸気噴出口の内側側板と天板の溶接部の解析結果を図6、図7に、No. 4蒸気噴出口の内側側板とマンホールフランジの溶接部の解析結果を図8、図9に示す。

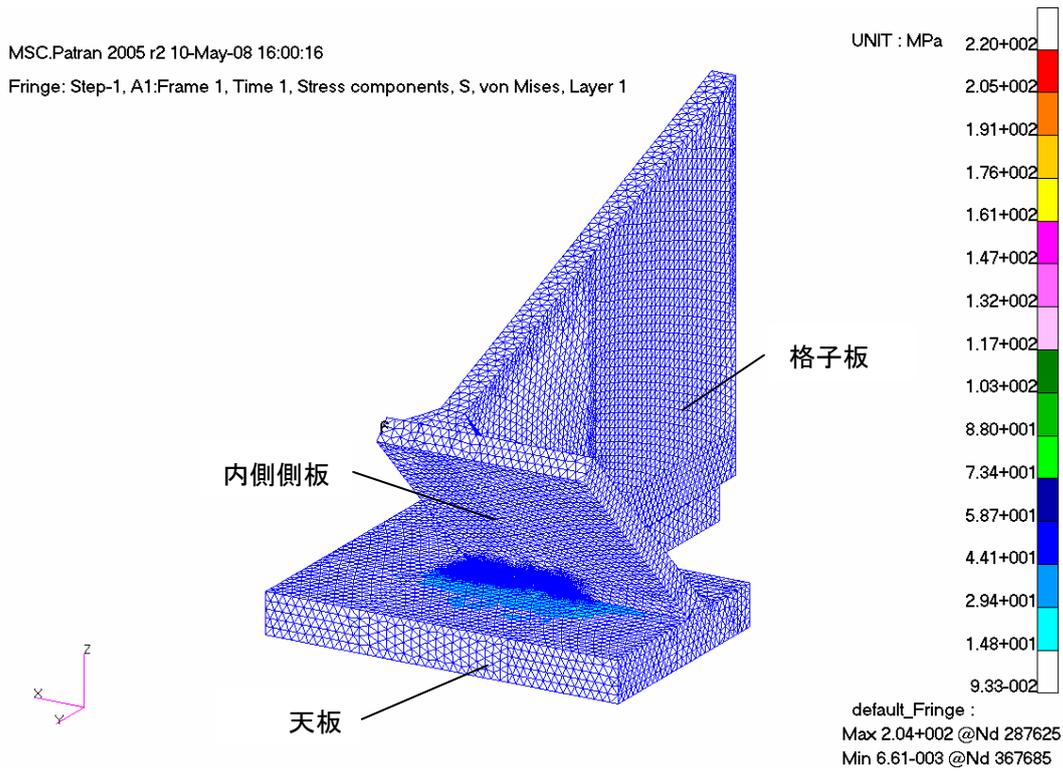


図6 変動応力解析結果(No. 3蒸気噴出口内側側板と天板の溶接部)

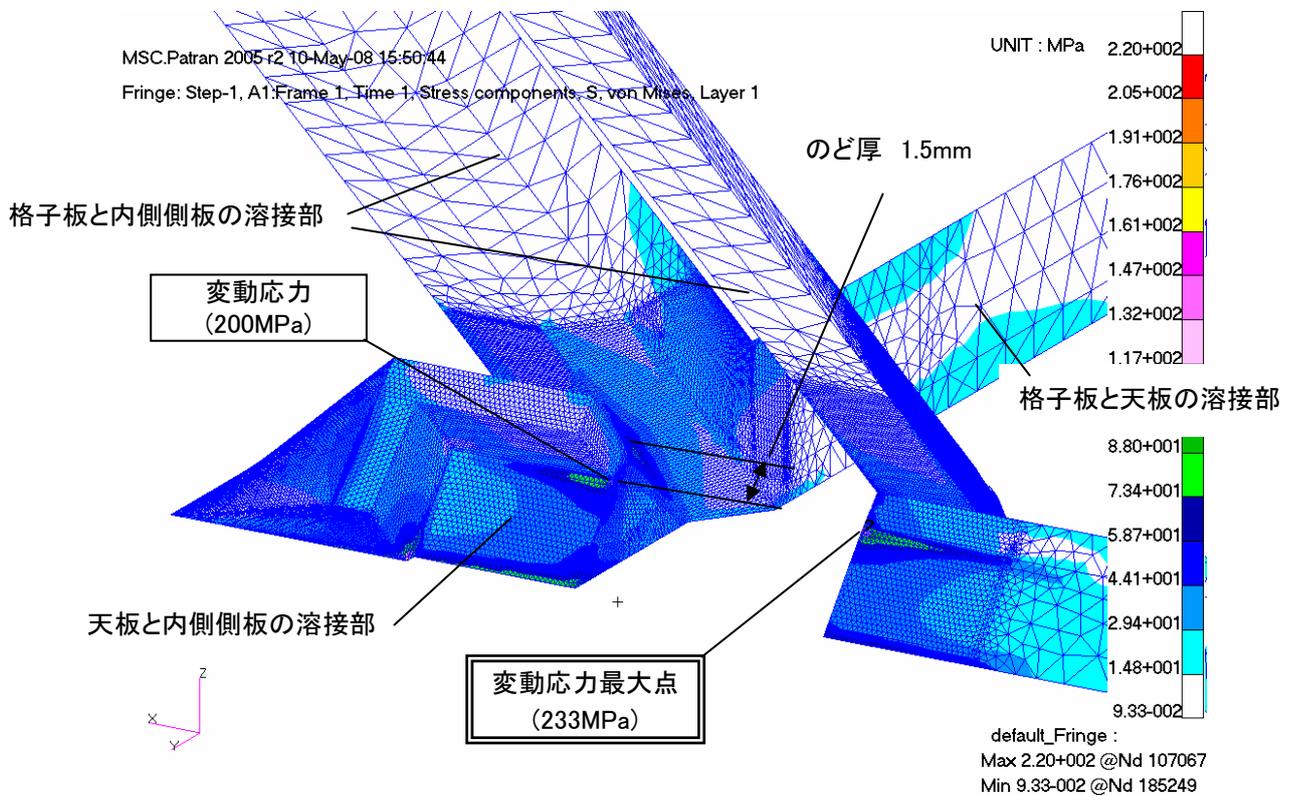


図7 変動応力解析結果(No. 3蒸気噴出口内側側板と天板の溶接部)

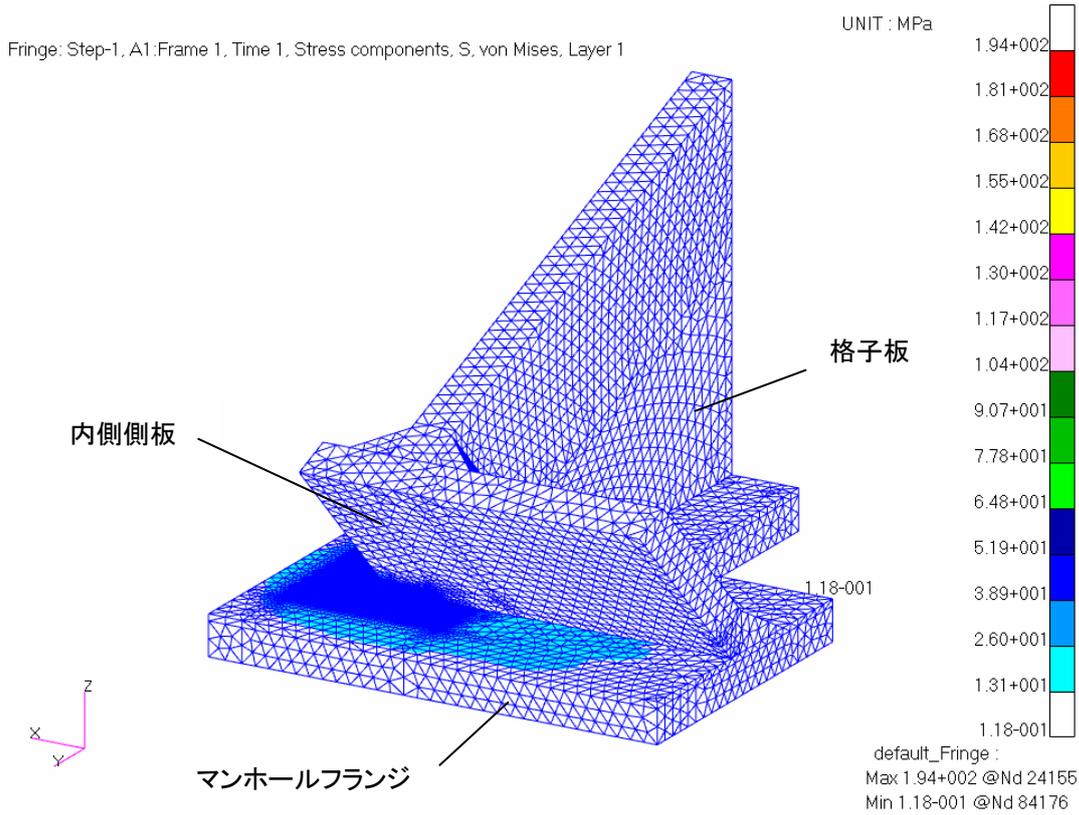


図8 変動応力解析結果 (No. 4蒸気噴出口内側側板とマンホールフランジの溶接部)

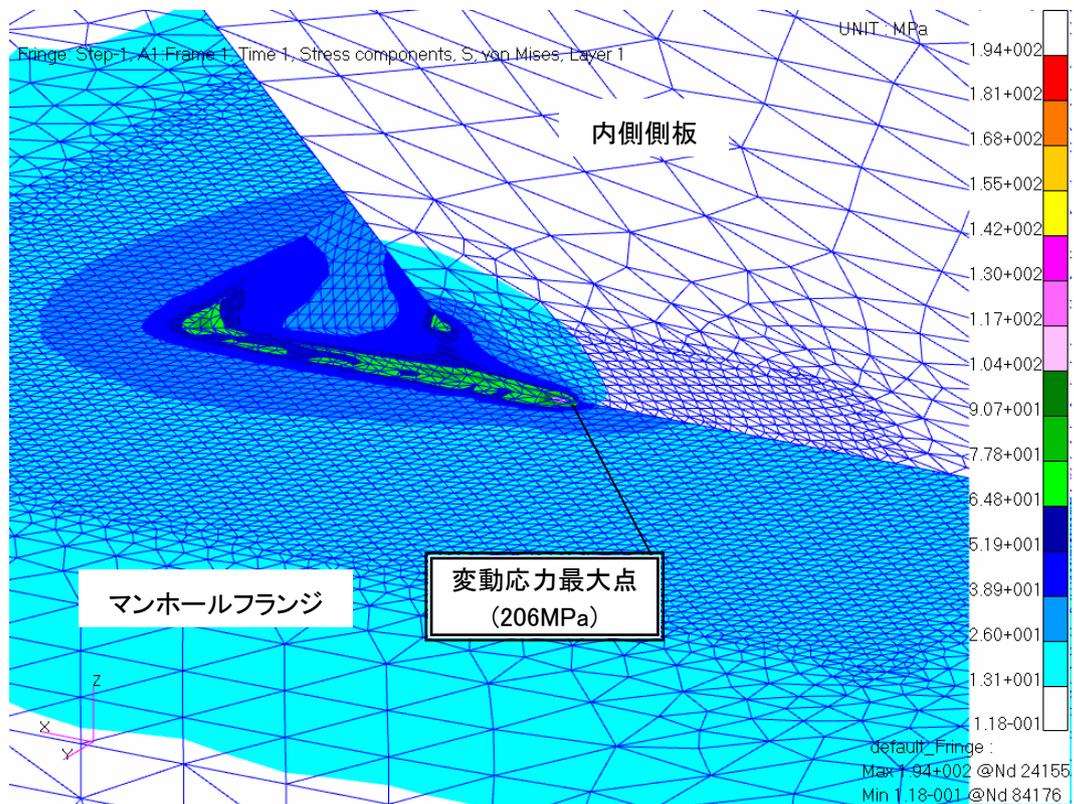


図9 変動応力解析結果 (No. 4蒸気噴出口内側側板とマンホールフランジの溶接部)

(5) 疲労評価

算出された 1A-No. 3 蒸気噴出口の内側側板と天板との溶接部の変動応力は疲労限を上回り、疲労損傷が発生し得ることを確認した。また、1A-No. 4 蒸気噴出口の内側側板とマンホールフランジとの溶接部の変動応力は疲労限をわずかに下回ることを確認した。

評価結果を表 2 に示す。なお、表中に示す変動応力は、実機使用温度を考慮してヤング率補正係数 (1.06) を乗じた値である。

表 2 疲労評価結果

評価箇所	変動応力(MPa)	疲労限(MPa) [※]	疲労損傷の可能性
1A-No.3 蒸気噴出口の内側側板と天板との溶接部	233	213	○
1A-No.4 蒸気噴出口の内側側板とマンホールフランジの溶接部	206	213	△

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

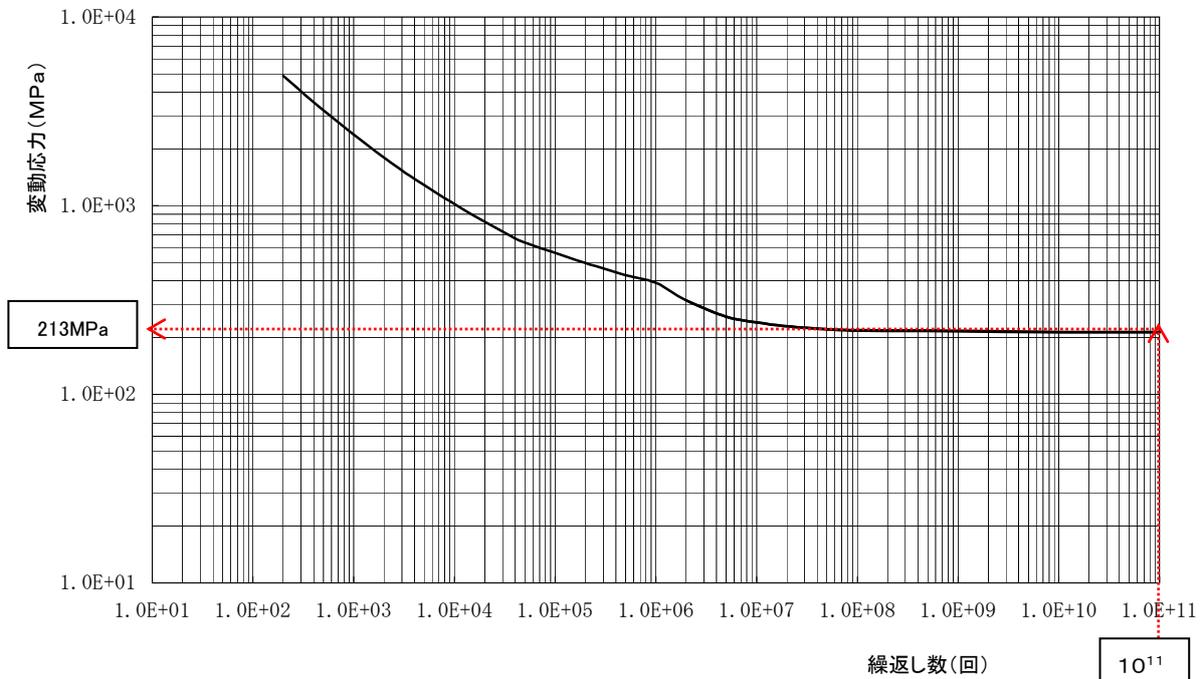
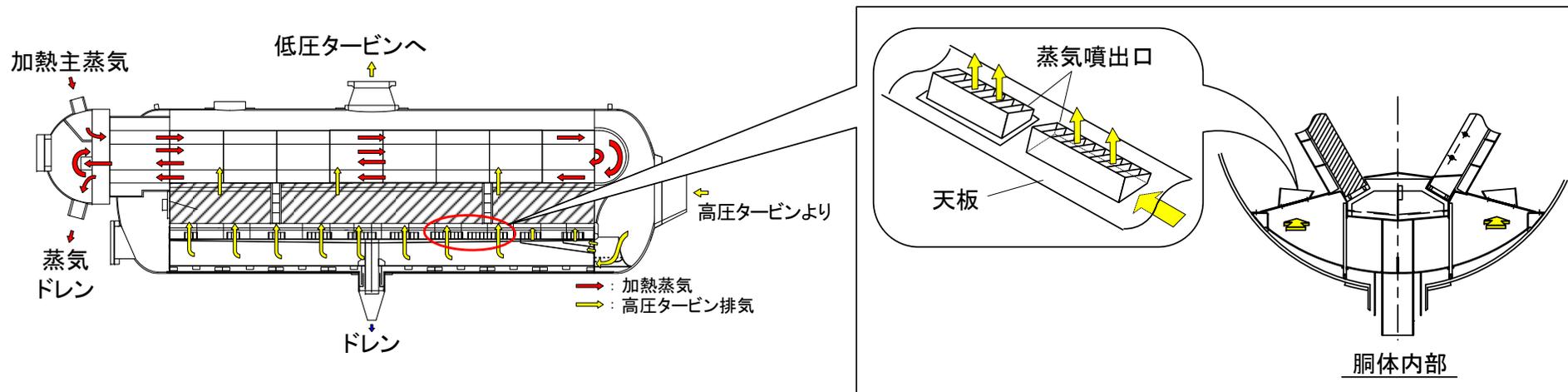
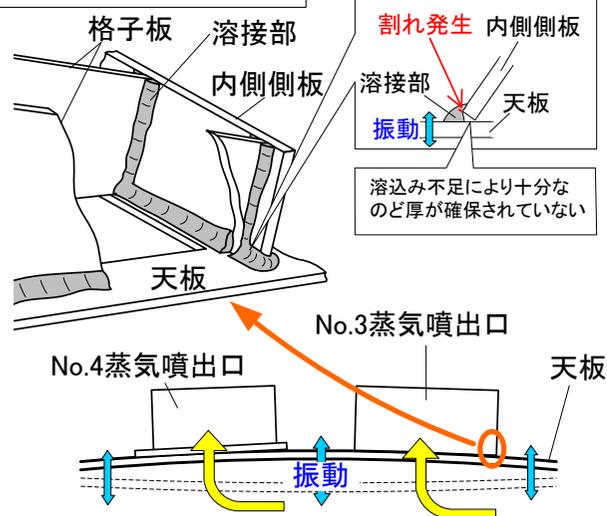


図 10 疲労線図 (ASME Sec.VIII Division 2 Best fit curve)
(オーステナイト系ステンレス鋼)

湿分分離加熱器蒸気噴出口割れ発生推定メカニズム

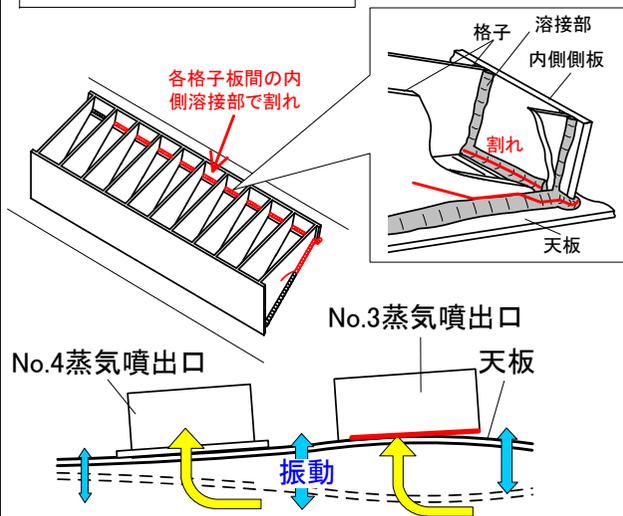


①初期の割れ発生(A号機)



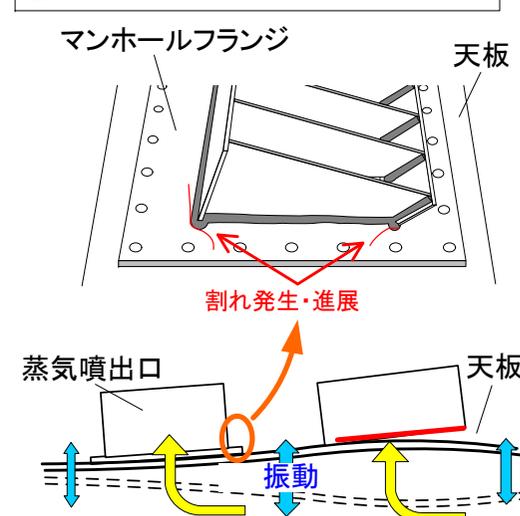
蒸気の流れによる流体加振力が作用し、内側側板と天板との溶接部に疲労限を上回る高サイクルの振動が生じ、疲労が累積して割れが発生。

②溶接部割れ進展(A号機)



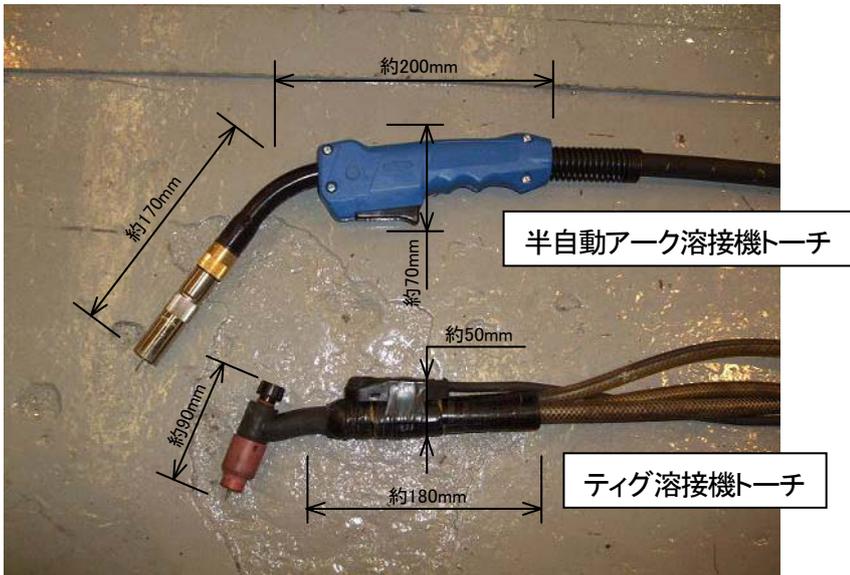
内側側板と天板の溶接部(各格子板間)及び格子板A本体に徐々に進展した。

③他蒸気噴出口への割れ発生(A号機)

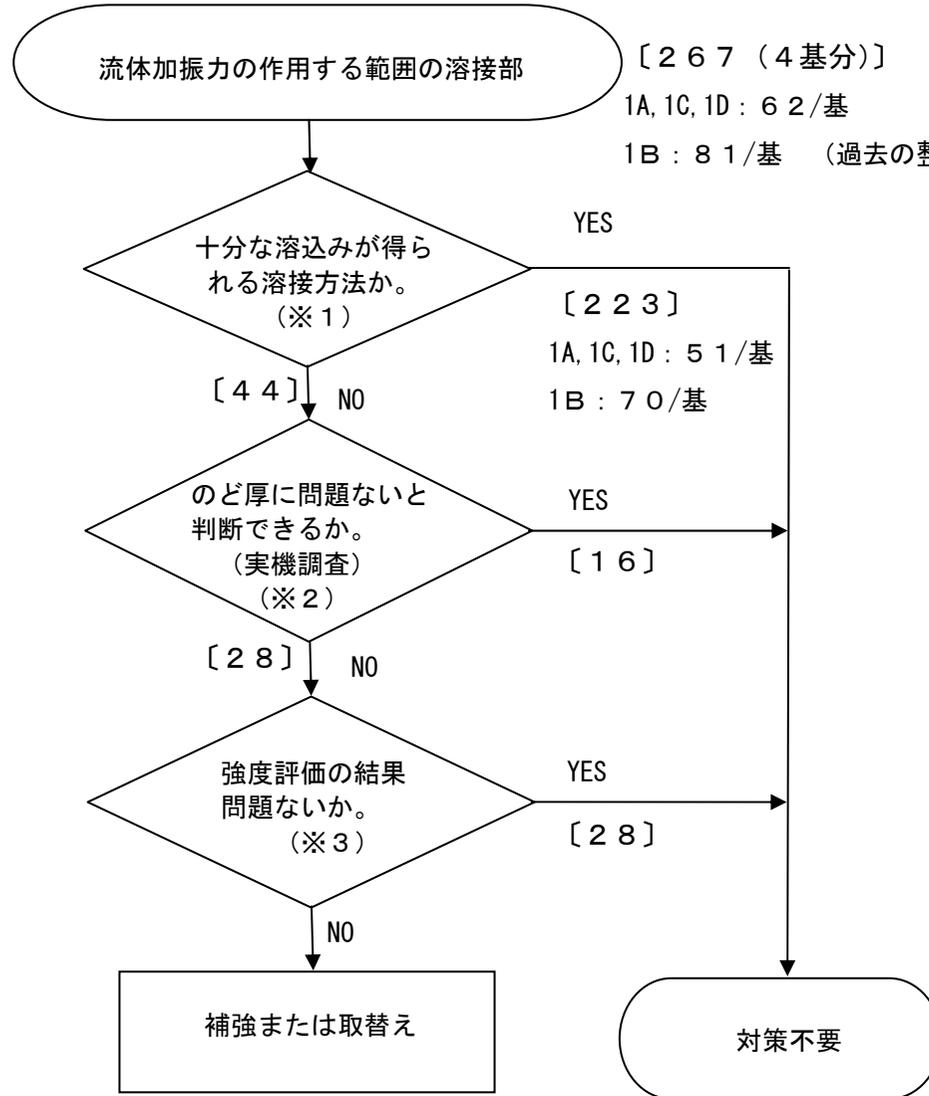


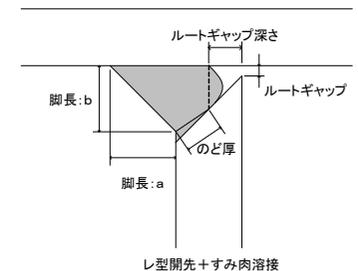
その後No.3の下流側にあるNo.4蒸気噴出口溶接部に割れが発生し進展した。

半自動アーク溶接とティグ溶接との比較

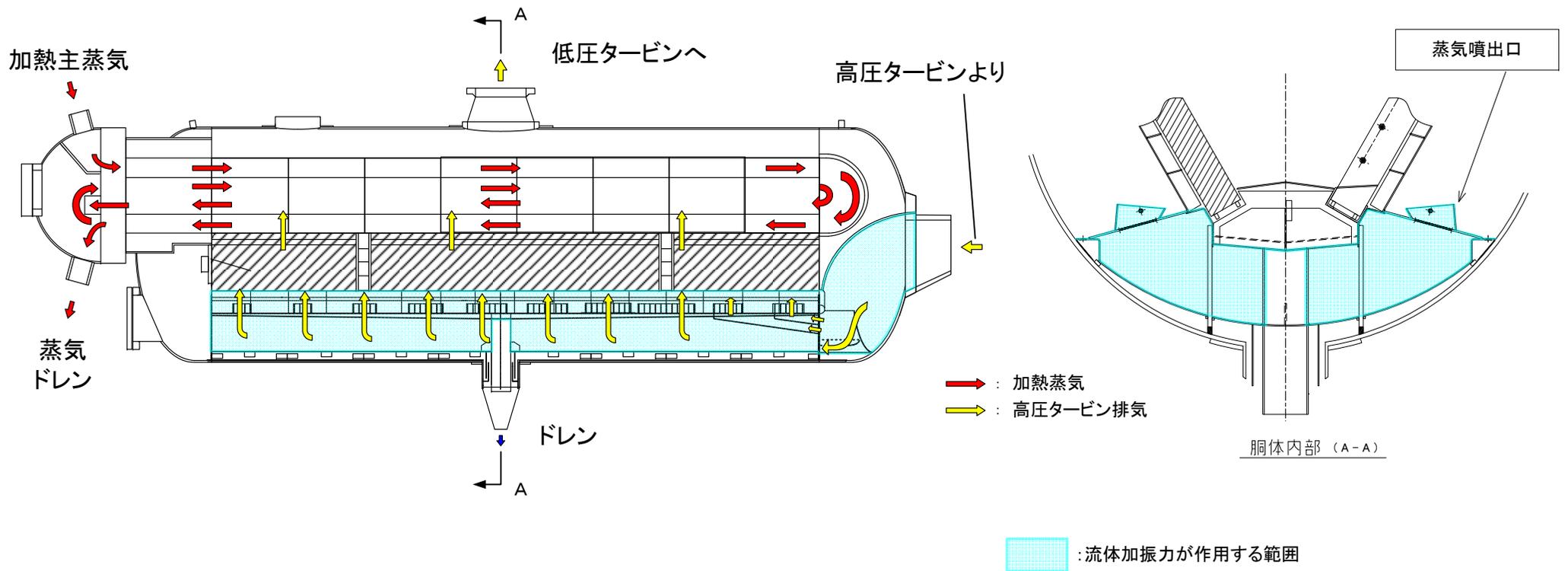
	半自動アーク溶接	ティグ溶接
操作方法	コイル状に巻いた長い溶接ワイヤが電極（アークを発生）であり溶接棒である。このワイヤを自動で送りながら溶接をする。	片方の手で電極（アークを発生）を取り付けたトーチを持ち、他方の手に溶接棒を持って、手動でアーク柱に溶接棒を入れていく施工法である。
特徴	溶接棒自身が電極として母材との間にアークを発生させ、溶接棒が溶融しながら母材へ移行するため、母材表面が高温のアークに直接接触している部分が少なく、母材表面が融けにくい。	電極と母材の間でアークを発生させ、母材の表面を直接溶融するので、母材表面が融けやすい。
	溶接トーチは、ティグ溶接機と比べ大きく、狭隘な箇所においては溶接トーチの操作性が劣り、トーチの角度を調整するのが困難である。	溶接トーチは、半自動アーク溶接機と比べ小さく、狭隘部での溶接に対し操作性に優れる。
	大電流での溶接が可能であり、溶接効率が良い反面、ティグ溶接と比べ溶接の溶込みが浅くなることやビードの形状が滑らかさを欠く傾向がある。	他のアーク溶接法に比べ溶接効率は劣るが高品質の溶接金属が得られる。
トーチ写真 (半自動アーク溶接機トーチについては、蒸気噴出口製作時と同等のもの)	 <p>半自動アーク溶接機トーチ</p> <p>ティグ溶接機トーチ</p>	
当該溶接部の施工状況 (モックアップ写真)		

今回の事象に対する健全性調査(水平展開フロー)



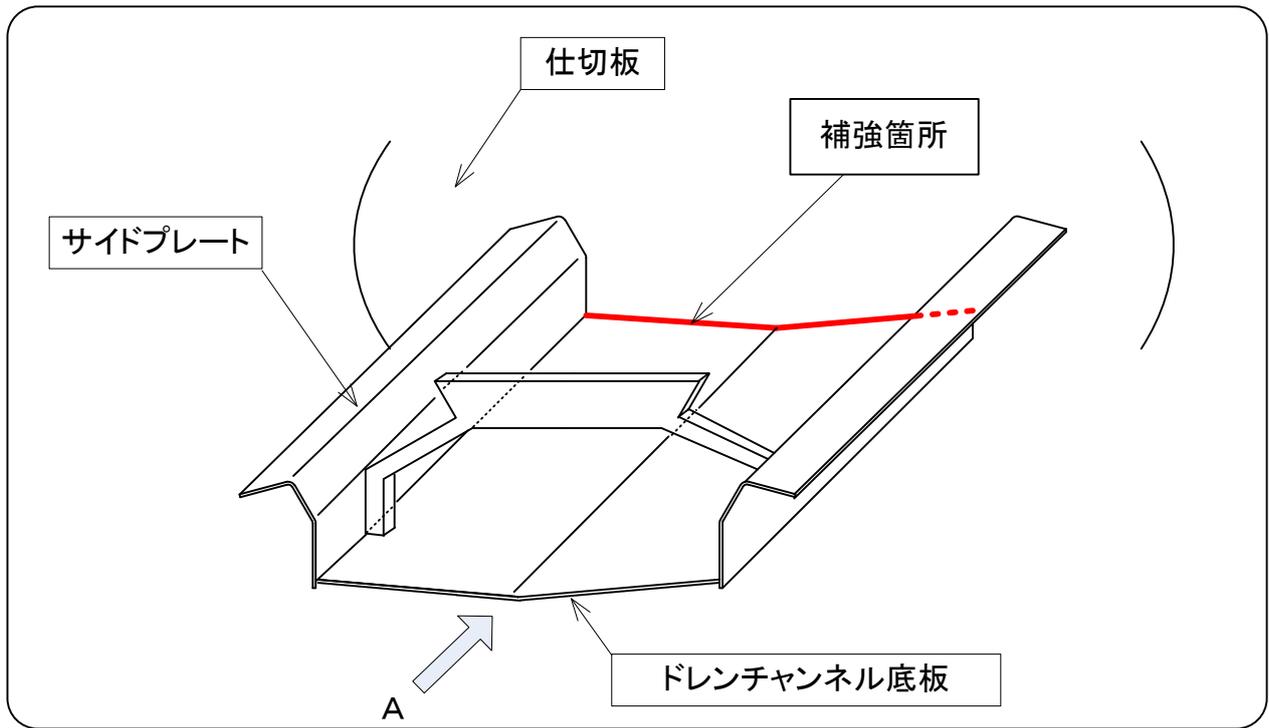
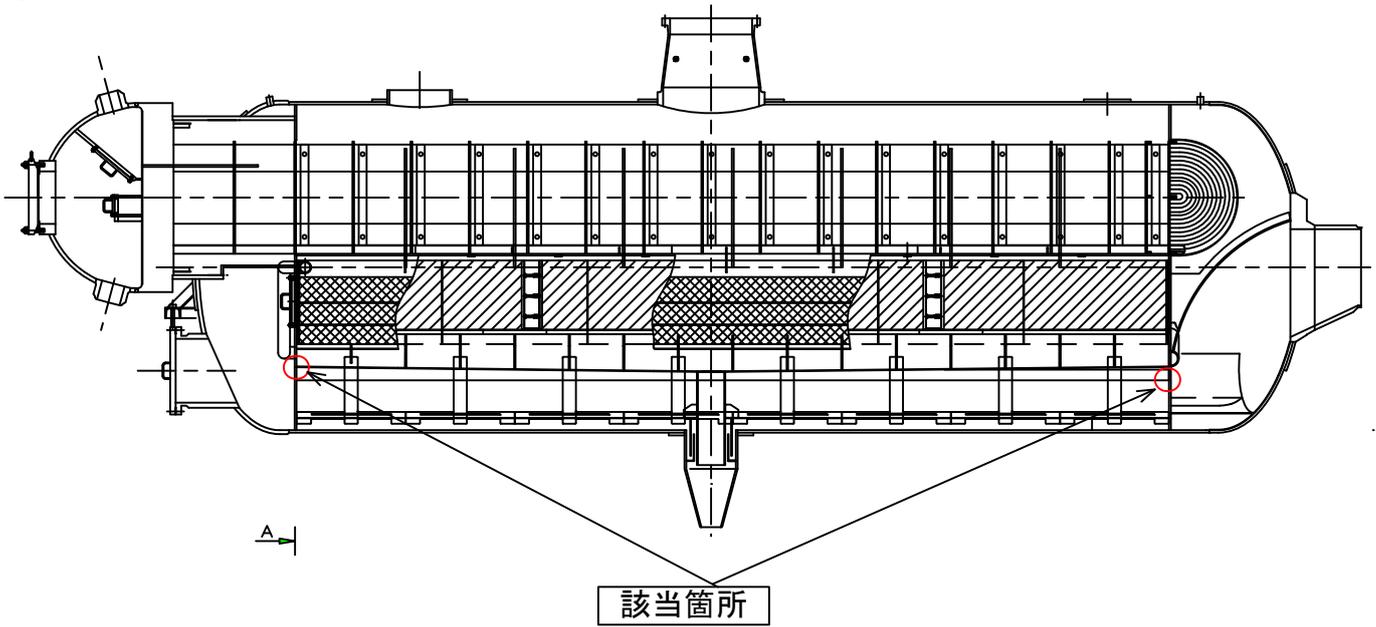
※1	<ul style="list-style-type: none"> 溶込み不足が発生した要因は、狭隘な箇所には十分な溶込みが得られにくい溶接方法(半自動アーク溶接)を採用したことであるが、今回は狭隘な箇所に限定せず、十分な溶込みが得られにくい溶接方法を採用している溶接線を対象として調査を実施した。
※2	<ul style="list-style-type: none"> 脚長、ルートギャップ、ルートギャップ深さ等の溶接の状況を調査する。 その結果のど厚に問題がないと判断できるものは対策不要とした。 <div style="text-align: center;">  </div>
※3	<ul style="list-style-type: none"> 実機調査に基づくのど厚で評価した結果、問題ないものは対策不要とした。

湿水分離加熱器内部の流体加振力が作用する範囲



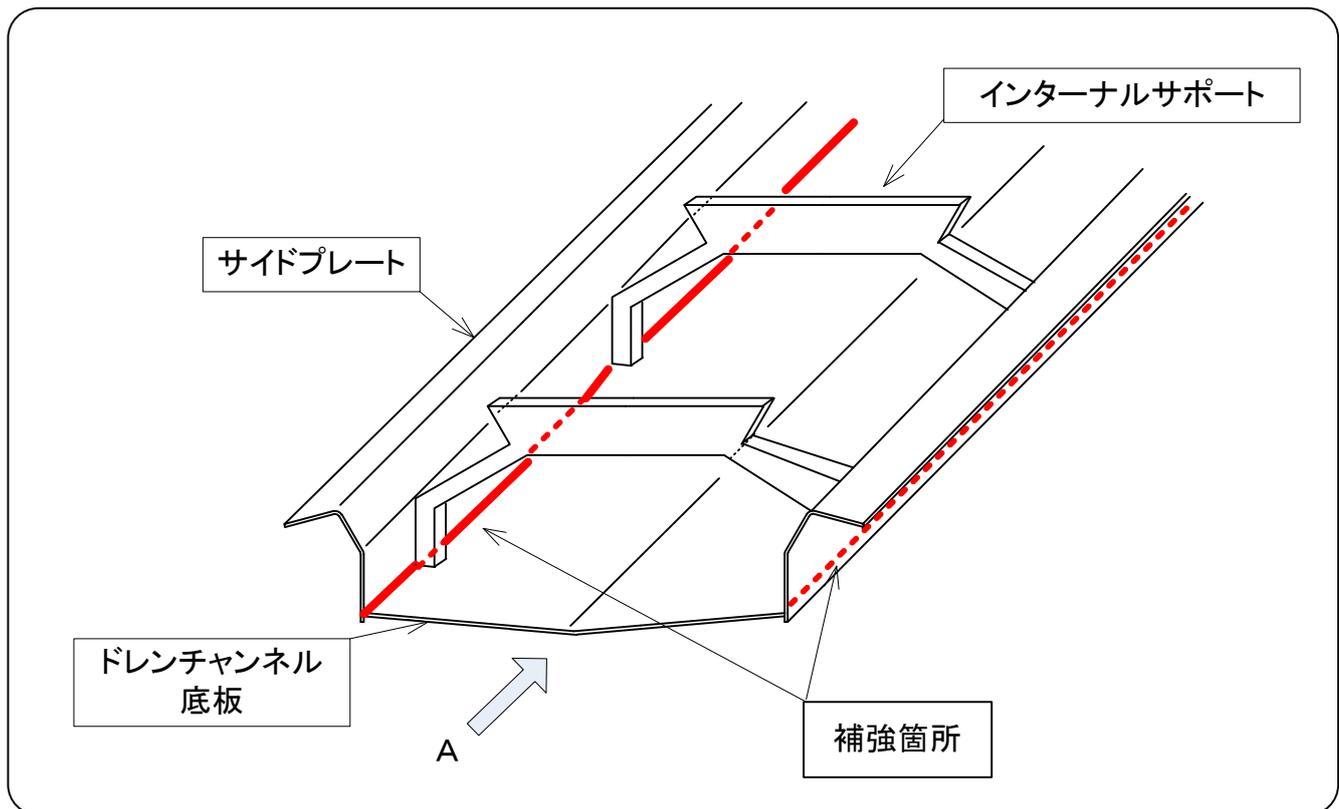
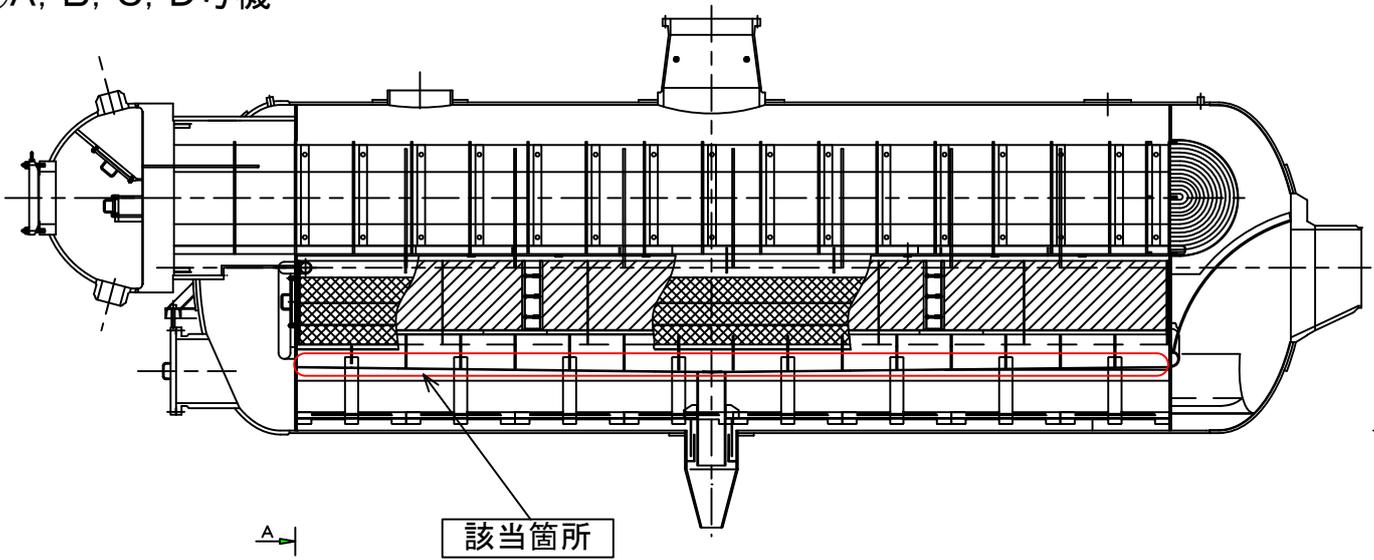
湿分分離加熱器 溶接部補強実施箇所 (今回の対応)

①A, B, C, D号機



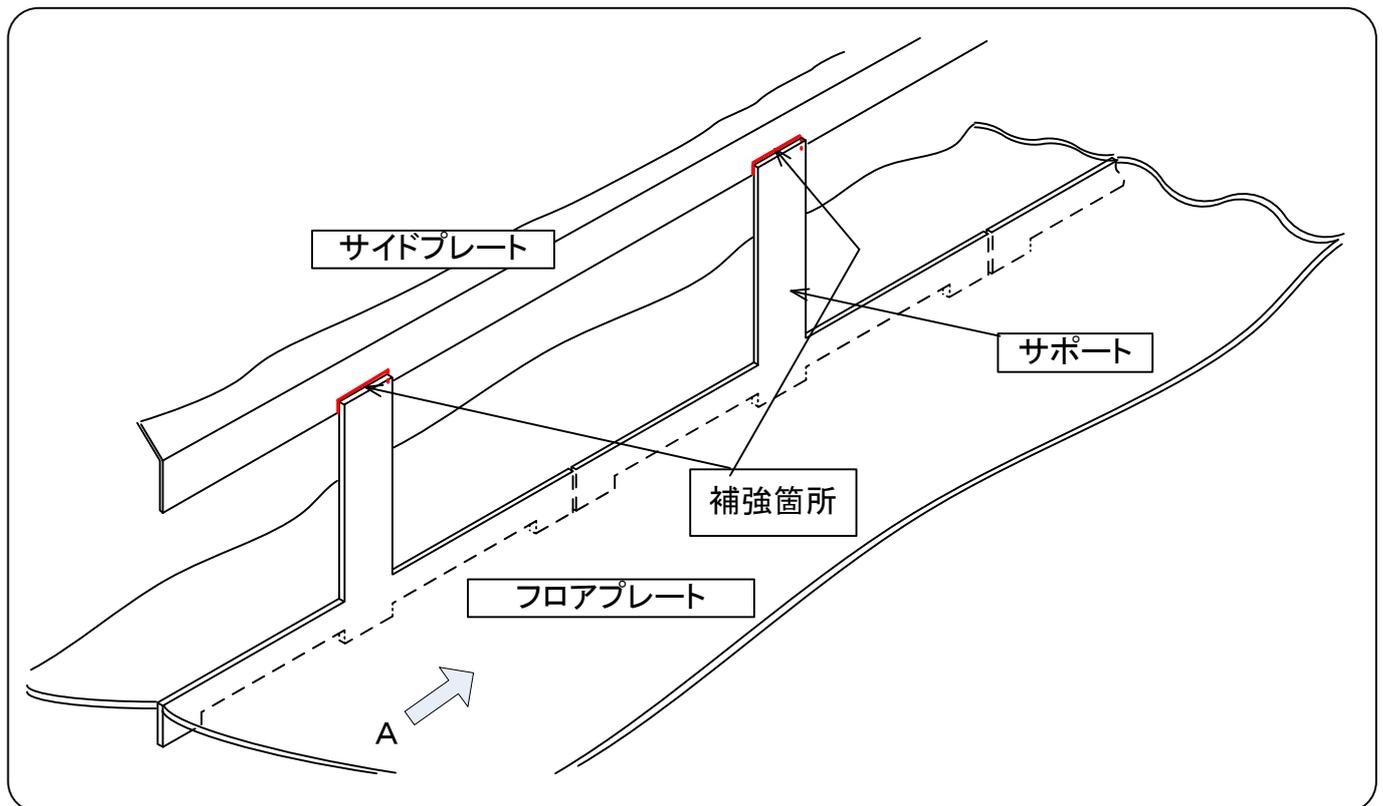
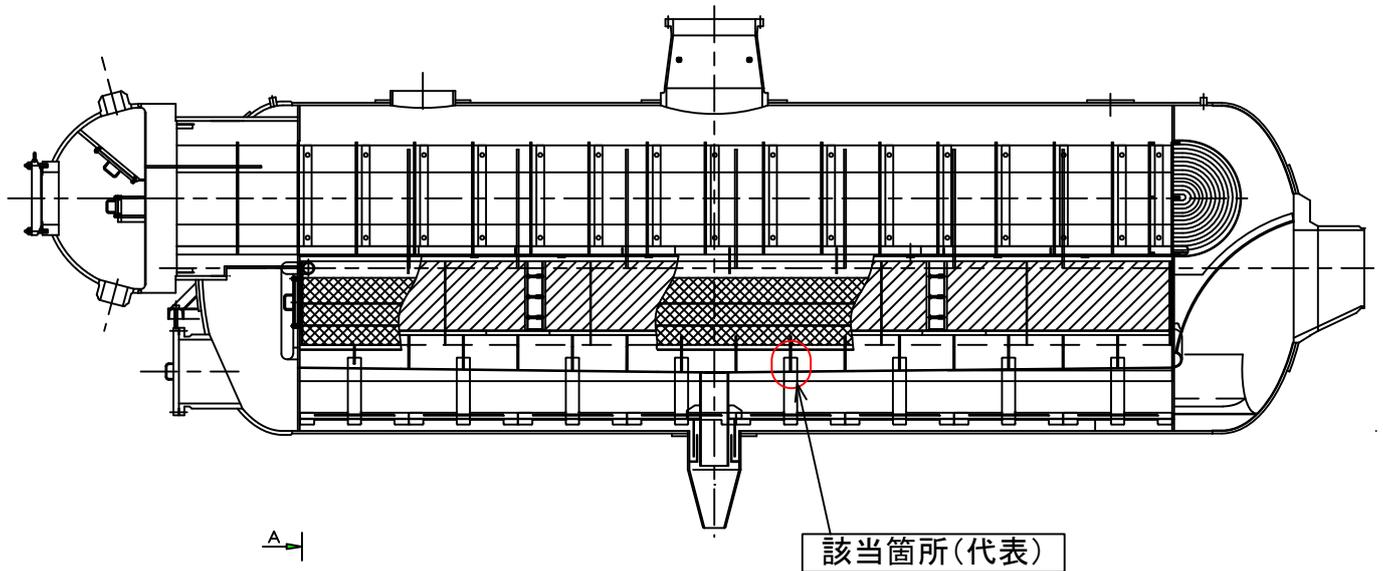
湿分分離加熱器 溶接部補強実施箇所
(今回の対応)

②A, B, C, D号機



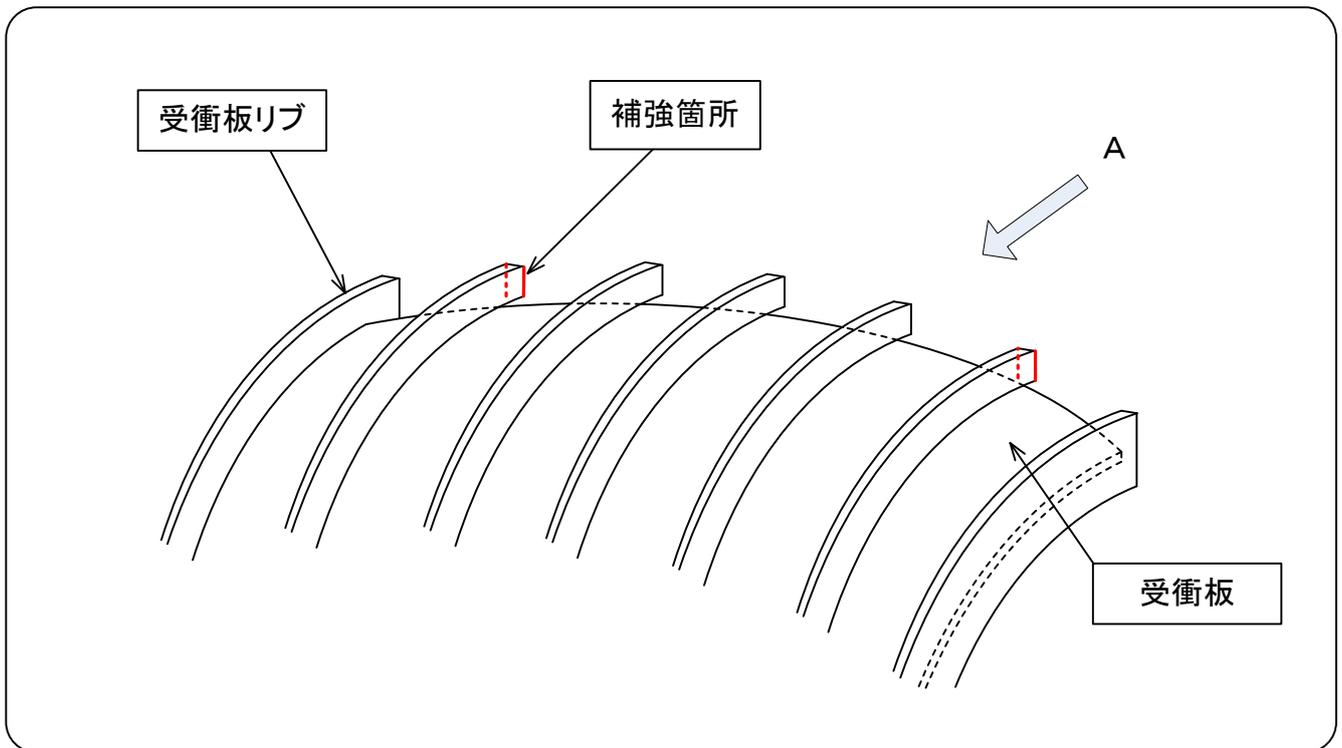
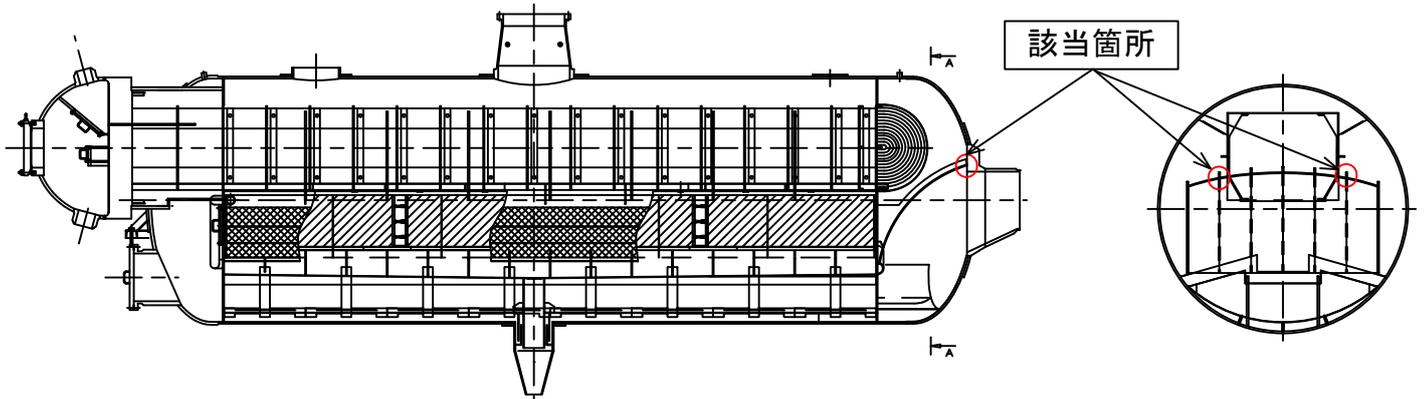
湿水分離加熱器 溶接部補強実施箇所
(2号機の天板割れへの対応)

①A, B, C, D号機



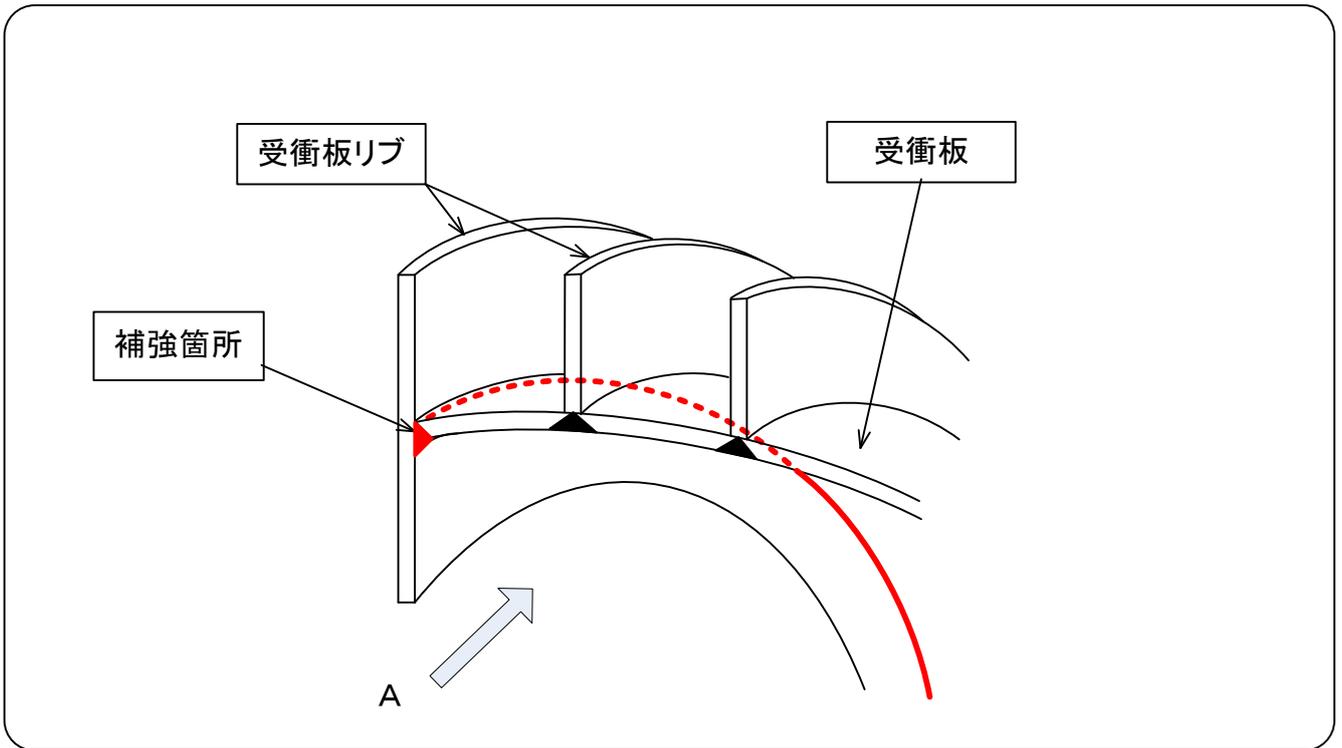
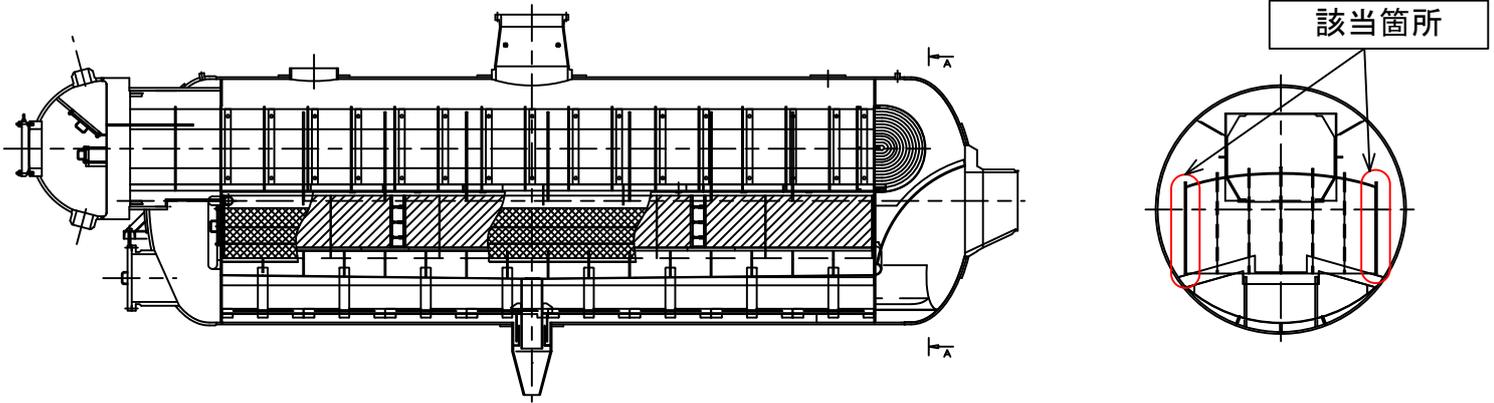
湿水分離加熱器 溶接部補強実施箇所
(2号機の天板割れへの対応)

②A号機



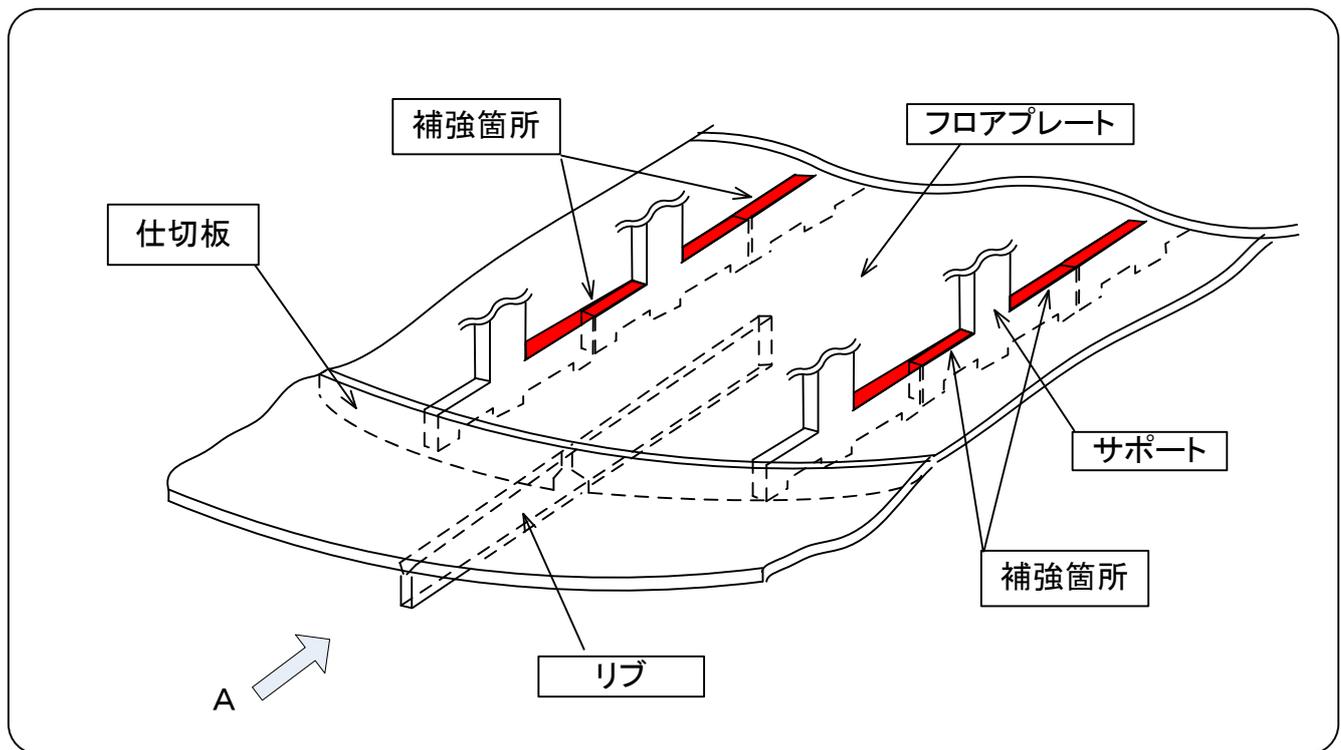
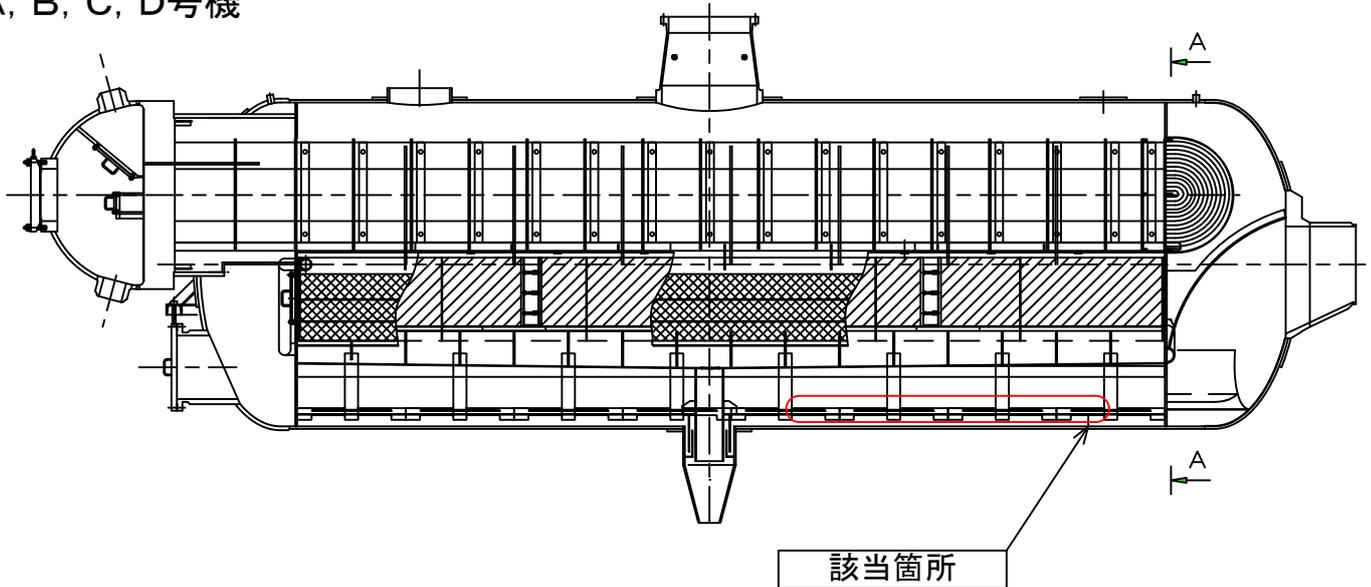
湿水分離加熱器 溶接部補強実施箇所
(2号機の天板割れへの対応)

③A, B, C, D号機



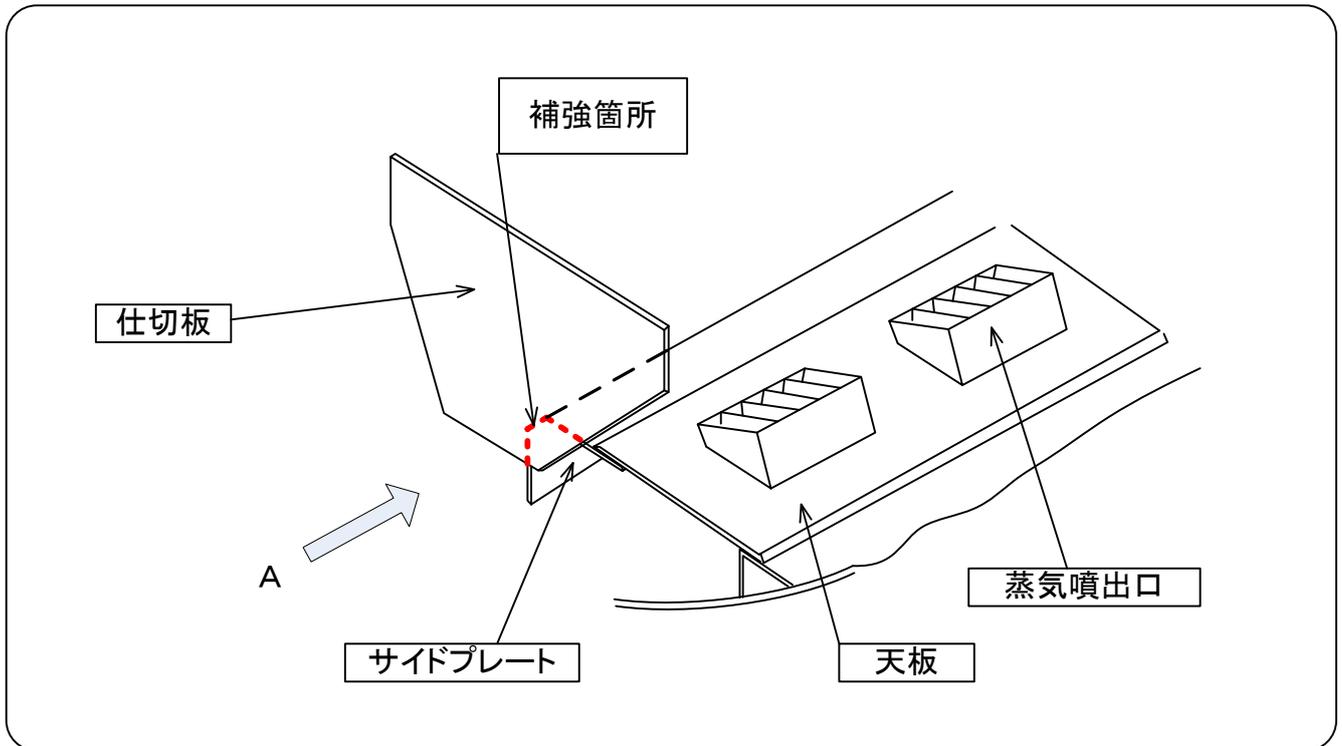
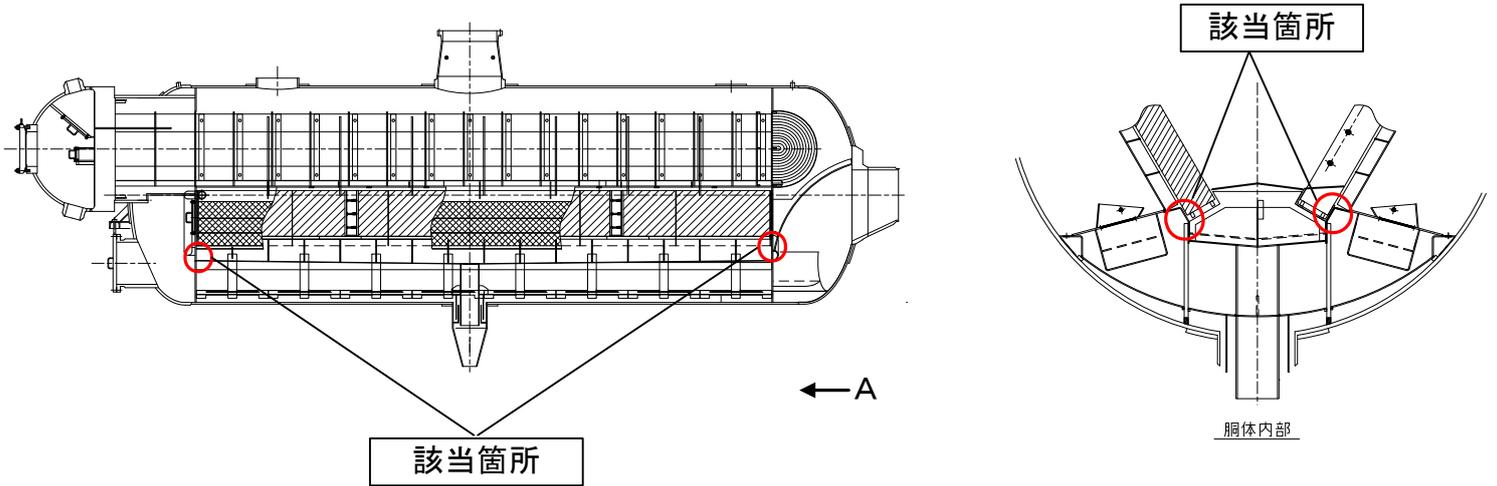
湿分分離加熱器 溶接部補強実施箇所
(2号機の天板割れへの対応)

④A, B, C, D号機



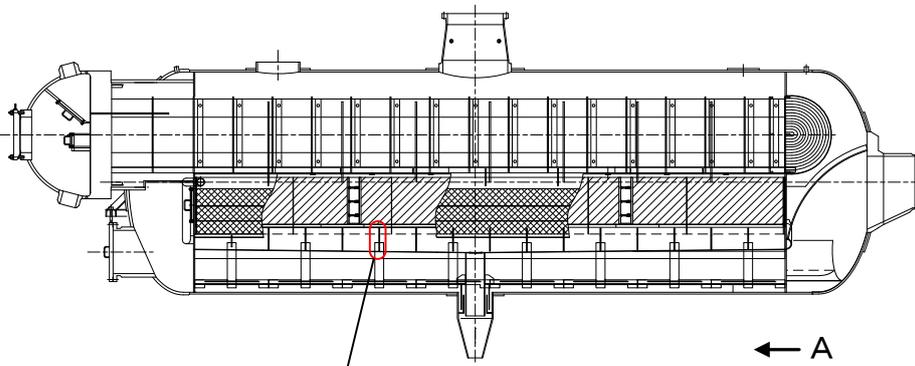
湿水分離加熱器 溶接部補強実施箇所 (2号機の天板割れへの対応)

⑤A, B, C, D号機

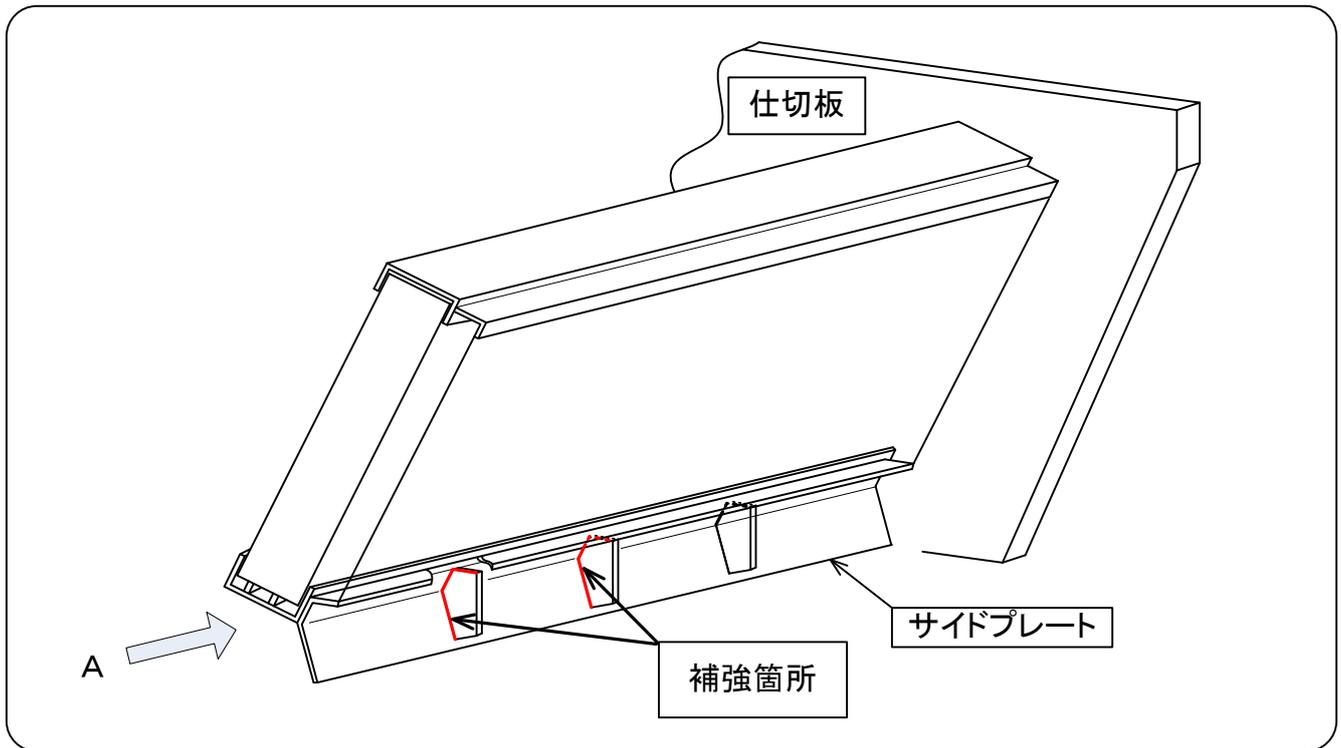
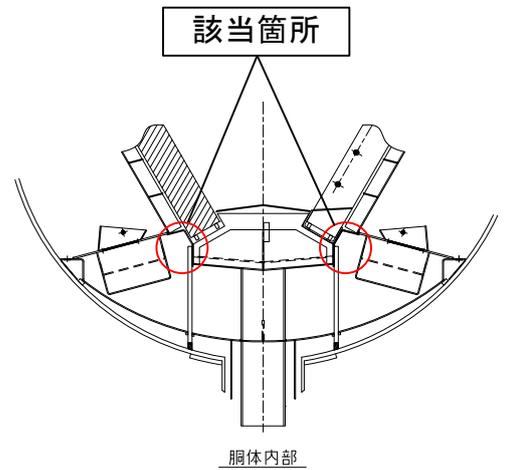


湿水分離加熱器 溶接部補強実施箇所
(2号機の天板割れへの対応)

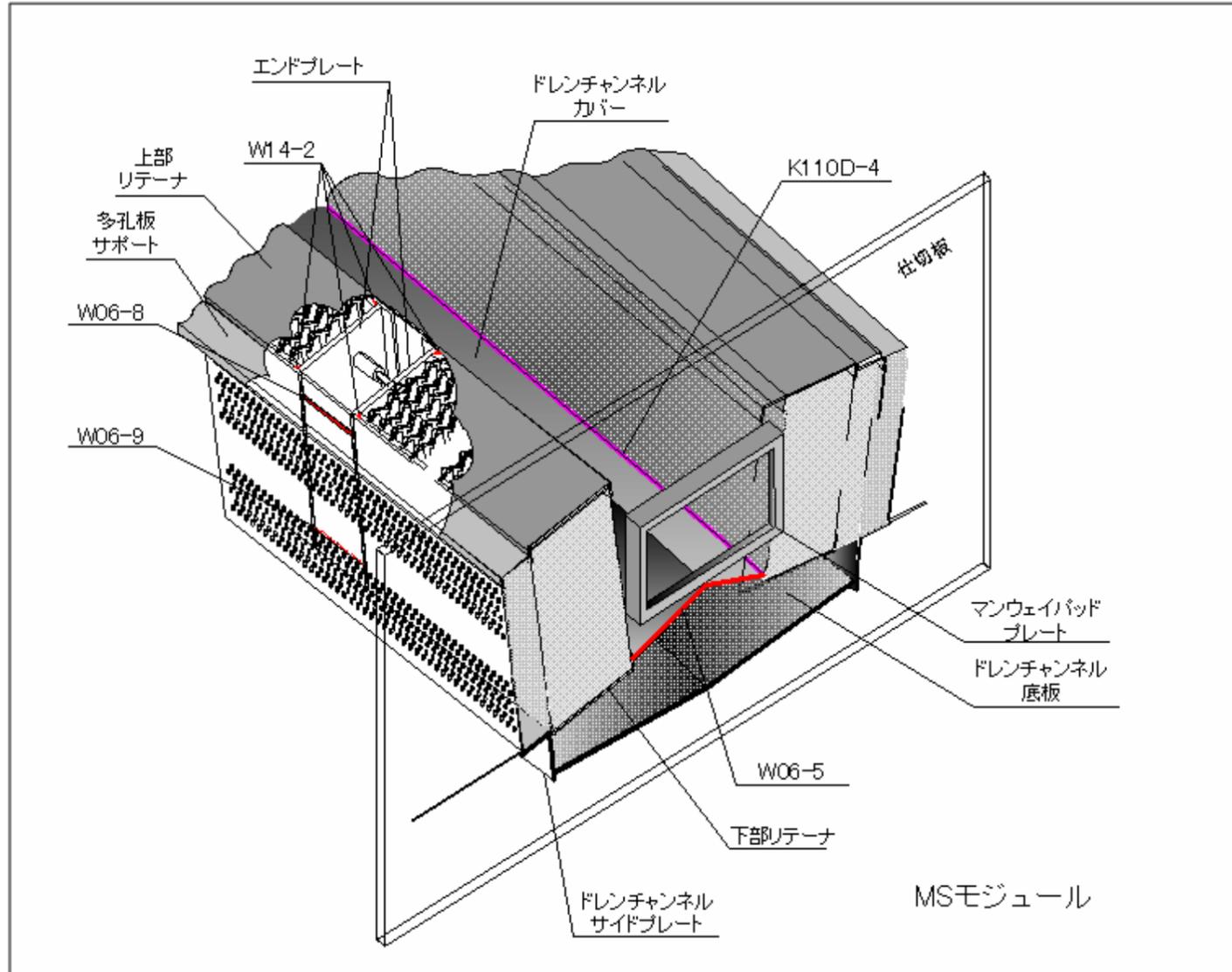
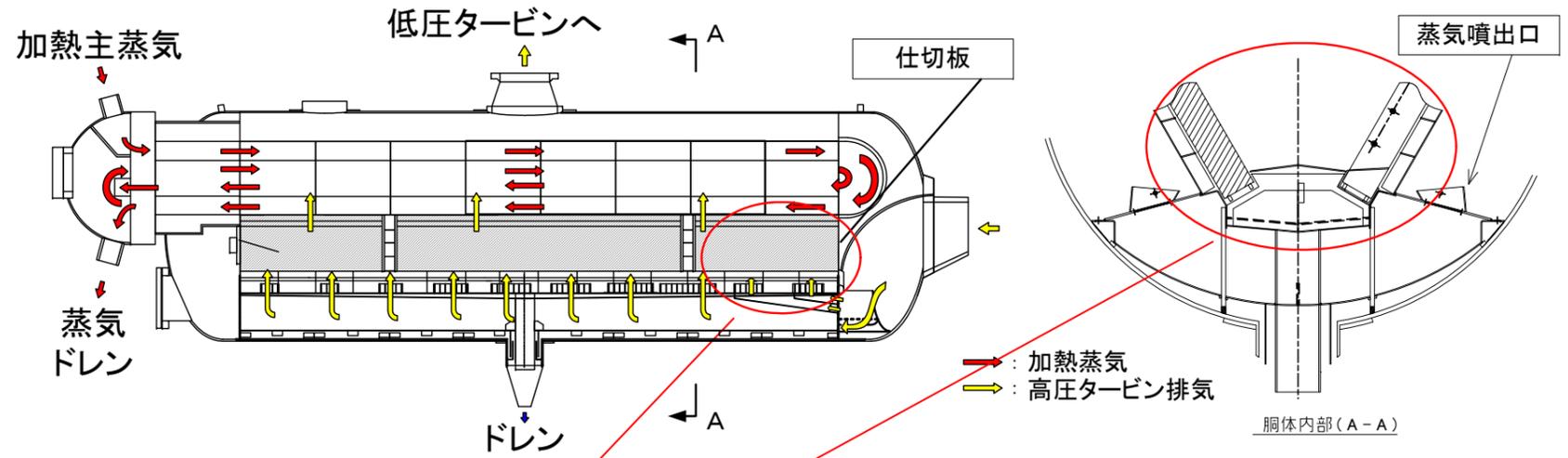
⑥B, C, D号機



該当箇所(代表)



湿分分離加熱器 流体加振力の作用しない範囲の健全性調査



疲労評価結果(のど厚を 1.5mm にて計算)

構造物名称	溶接線 番号	変動応力 (MPa)	疲労限※ (MPa)
MSモジュール	W06-5	10	48
	W06-8	2	94
	W06-9	2	
	K110D-4	13	
	W14-2	1	

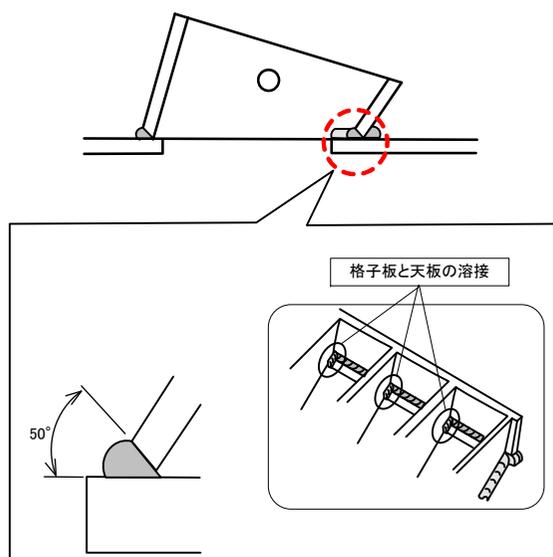
流体加振力による変動応力は疲労限以下であり、強度に問題はない。

※ オーステナイト系ステンレス鋼 : 94 MPa
炭素鋼 : 48 MPa

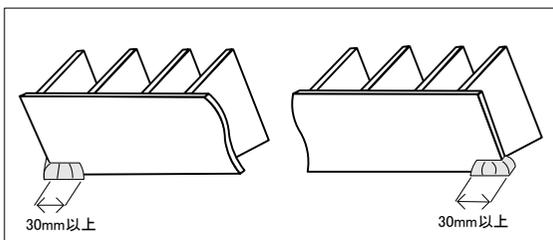
蒸気噴出口の復旧概要図

- 溶接工法を変更し、溶込みとどの厚を確保する(半自動アーク溶接からティグ溶接へ)。
- 内側側板と天板の両端に約30mm以上の廻し溶接を行い、強度を向上させる。
- 格子板と天板の上面を溶接し、強度を向上させる。
- 開先角度を50° (1~4、10番目)に変更し、溶接金属の溶込み量を増加させる。
- 5~9番目の蒸気噴出口については、内側側板と天板の溶接部の補修溶接を行う。

蒸気入口から1~3、10番目の蒸気噴出口

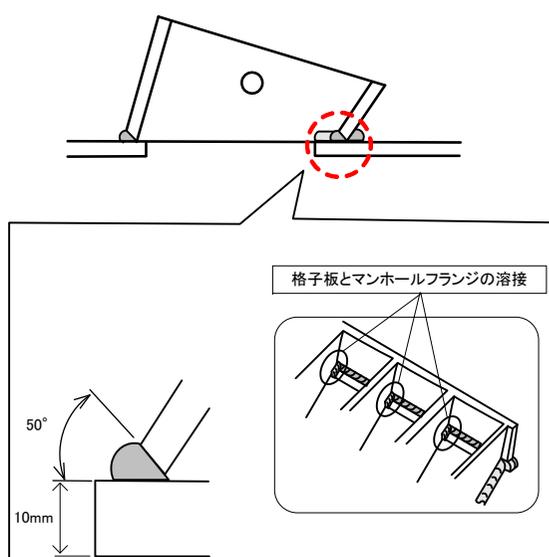


- 開先を50° とし、溶接金属の溶込み量を増加させる。
- 格子板と天板の上面を溶接し、強度を向上させる。

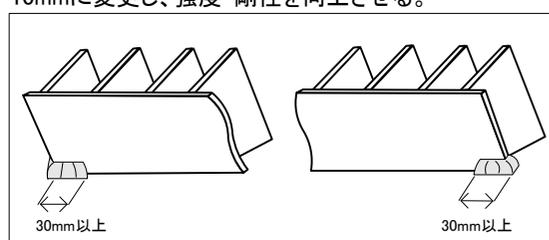


- 内側側板の天板との取り付け溶接部の両端を外から約30mm以上の廻し溶接を行い、強度を向上させる。

蒸気入口から4番目の蒸気噴出口

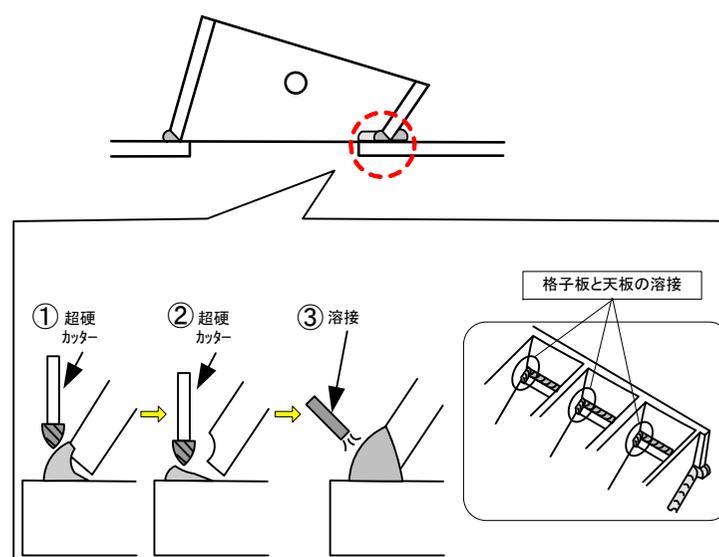


- 開先を50° とし、溶接金属の溶込み量を増加させる。
- 格子板とマンホールフランジの上面を溶接し、強度を向上させる。
- 念のため、マンホールフランジの厚さを6mmから10mmに変更し、強度・剛性を向上させる。

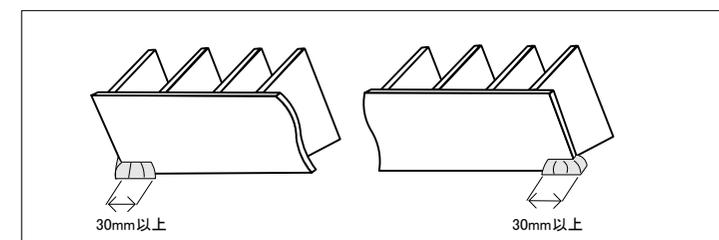


- 内側側板の天板との取り付け溶接部の両端を外から約30mm以上の廻し溶接を行い、強度を向上させる。

蒸気入口から5~9番目の蒸気噴出口

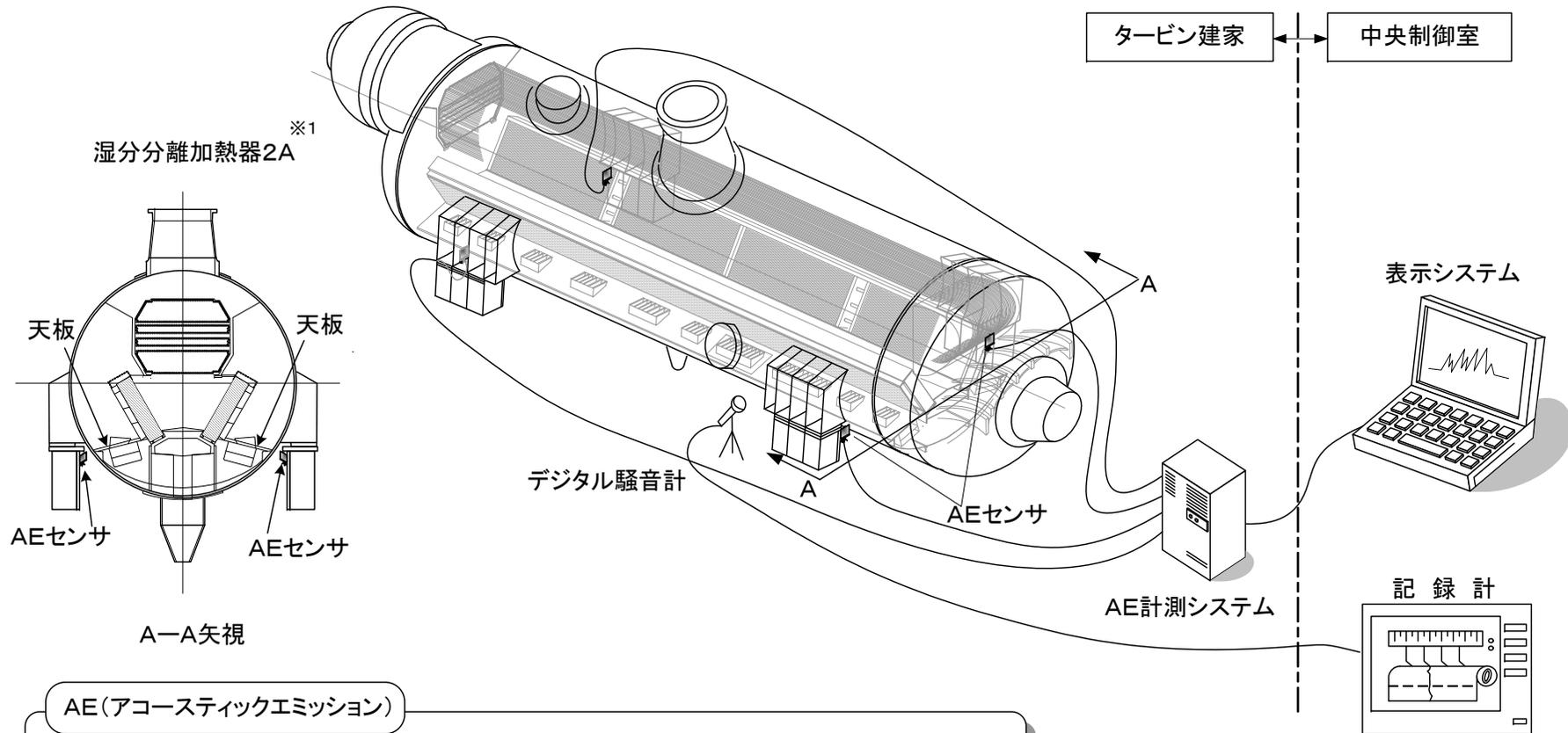


- 超硬カッターで既設溶接部を削って再溶接を実施し、強度上必要な溶接厚みを確保する。
- 格子板と天板の上面を溶接し、強度を向上させる。



- コーナーの既溶接部を超硬カッターで削って、内側側板の天板との取り付け溶接部の両端を外から約30mm以上の廻し溶接を行い、強度を向上させる。

伊方2号機 監視装置構成図



AE(アコースティックエミッション)

AEとは、き裂が発生したり、進展等により材料の内部に蓄えられたエネルギーを弾性波として放出する現象であり、それを検出することにより、材料の破壊過程を把握することができる。

※1: 湿分離加熱器2B~2Dについても同様に、異常音の監視を行う。