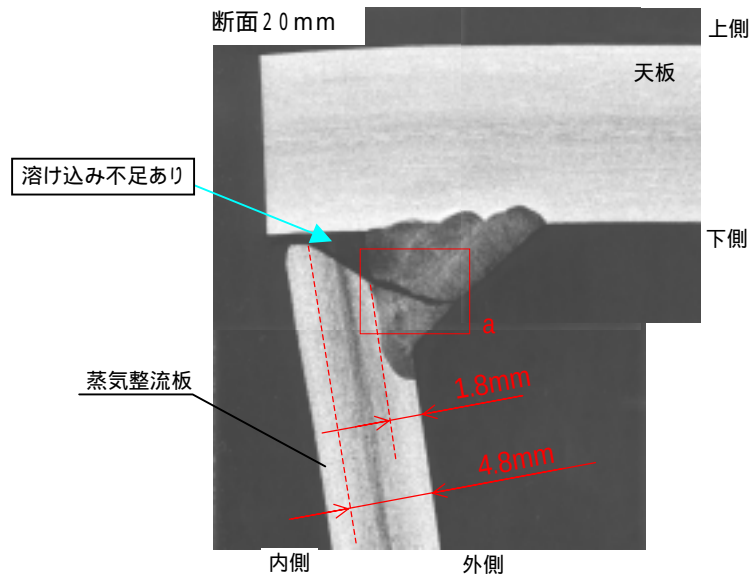
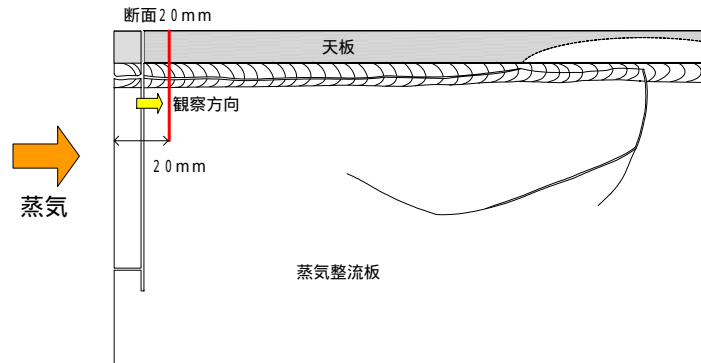
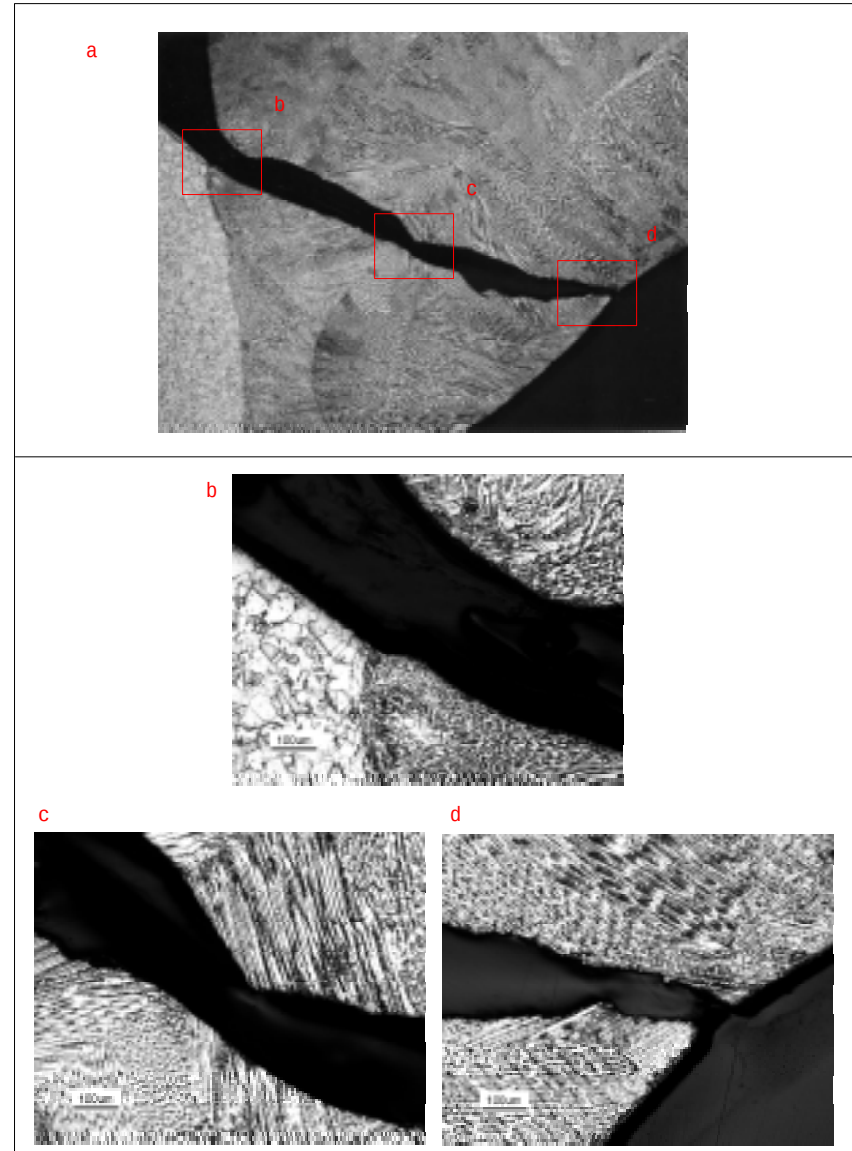


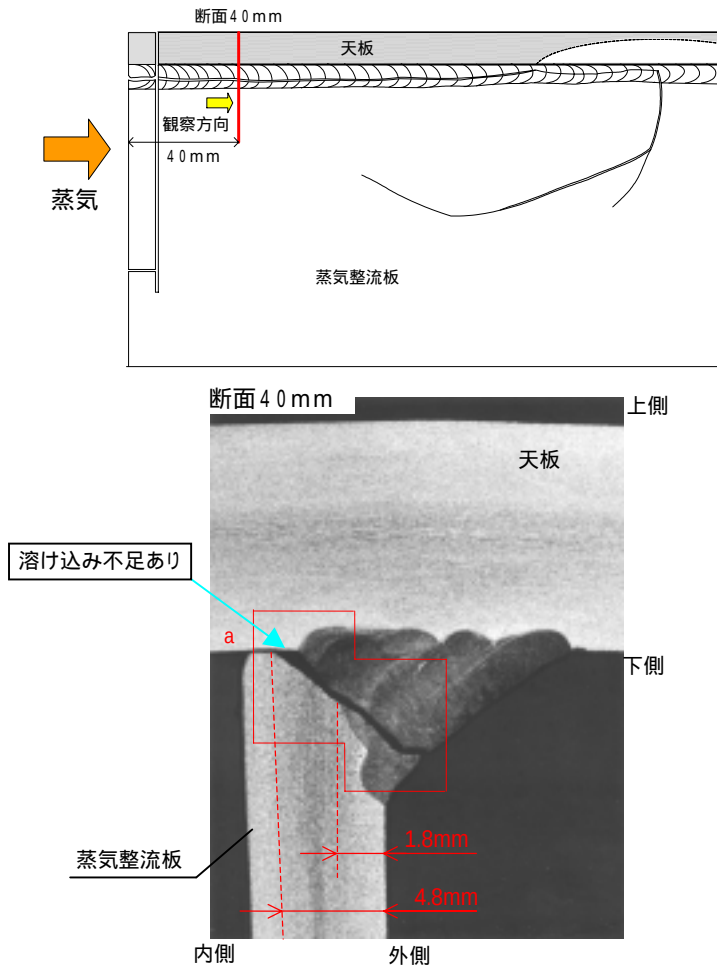
金属調査結果(断面ミクロ観察(断面 20mm))



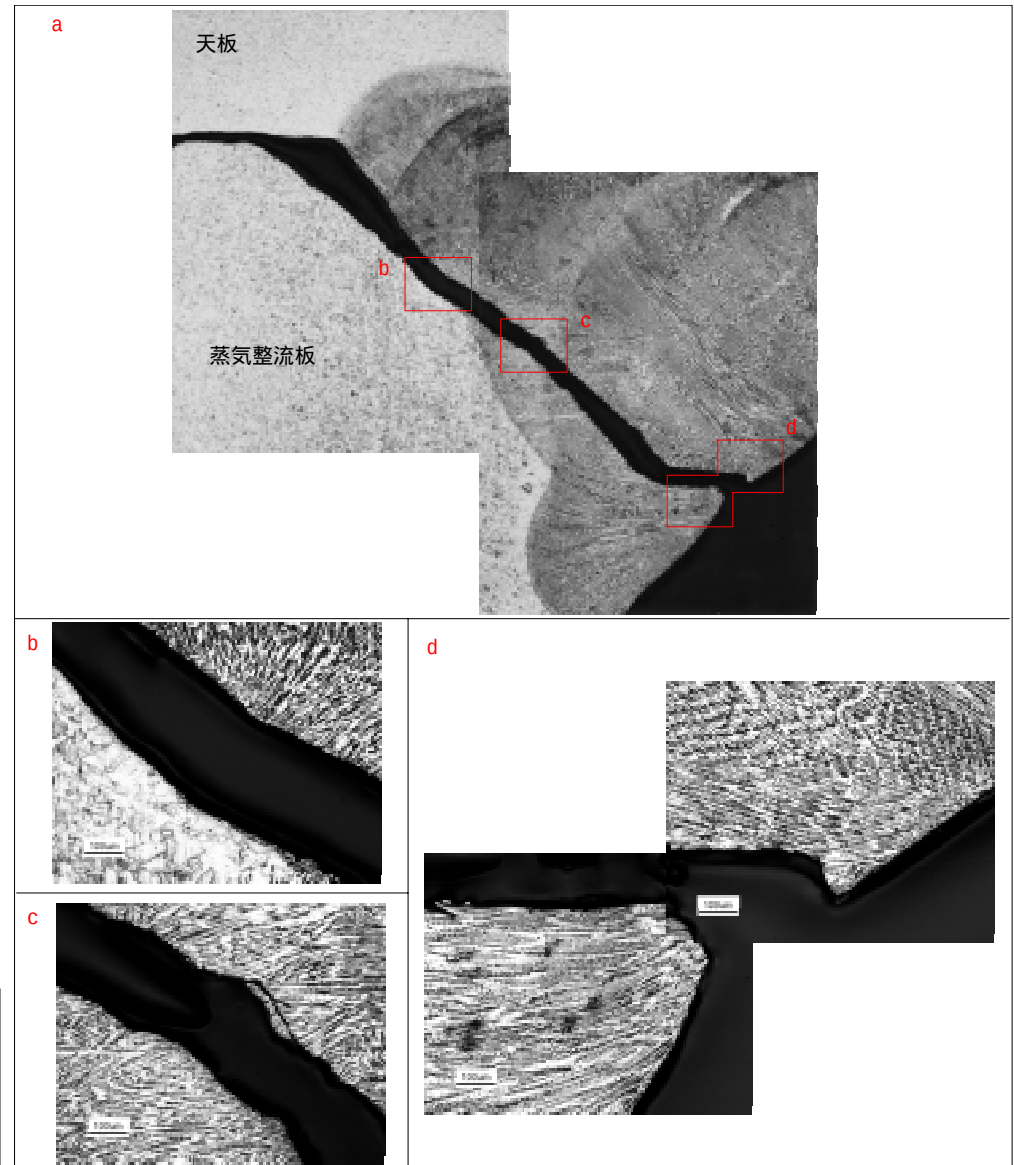
- ・断面の割れ形状は凹凸が少なく滑らかであることが認められた。
- ・割れは枝分かれがほとんどなく、粒内割れであることが認められた。
- ・介在物や腐食ピットは認められなかった。
- ・溶接の溶け込みが不足していることが認められた。



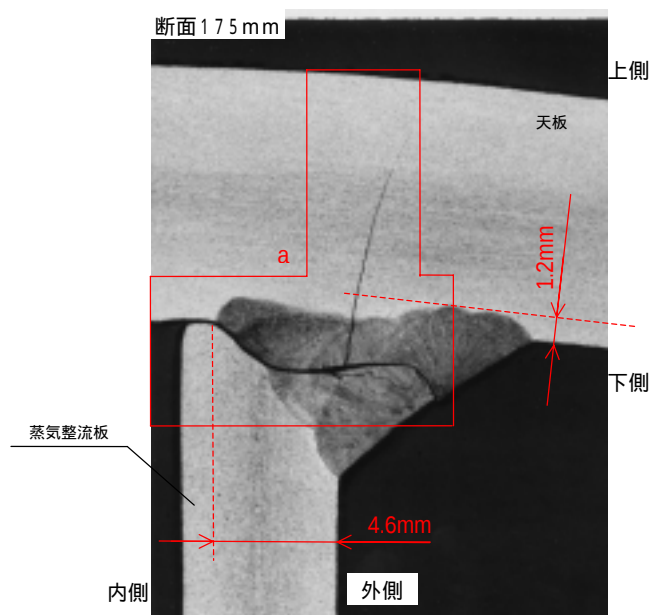
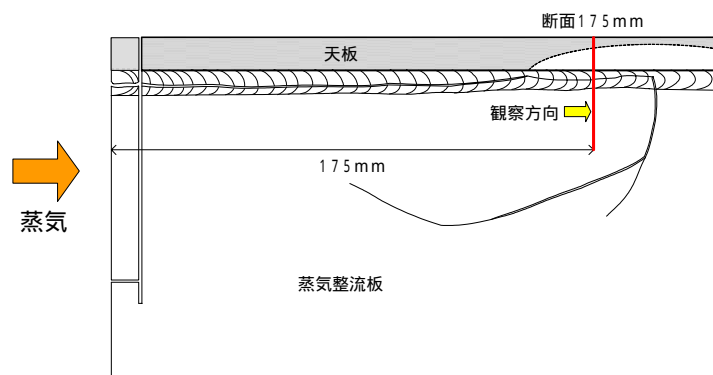
金属調査結果(断面ミクロ観察(断面 40mm))



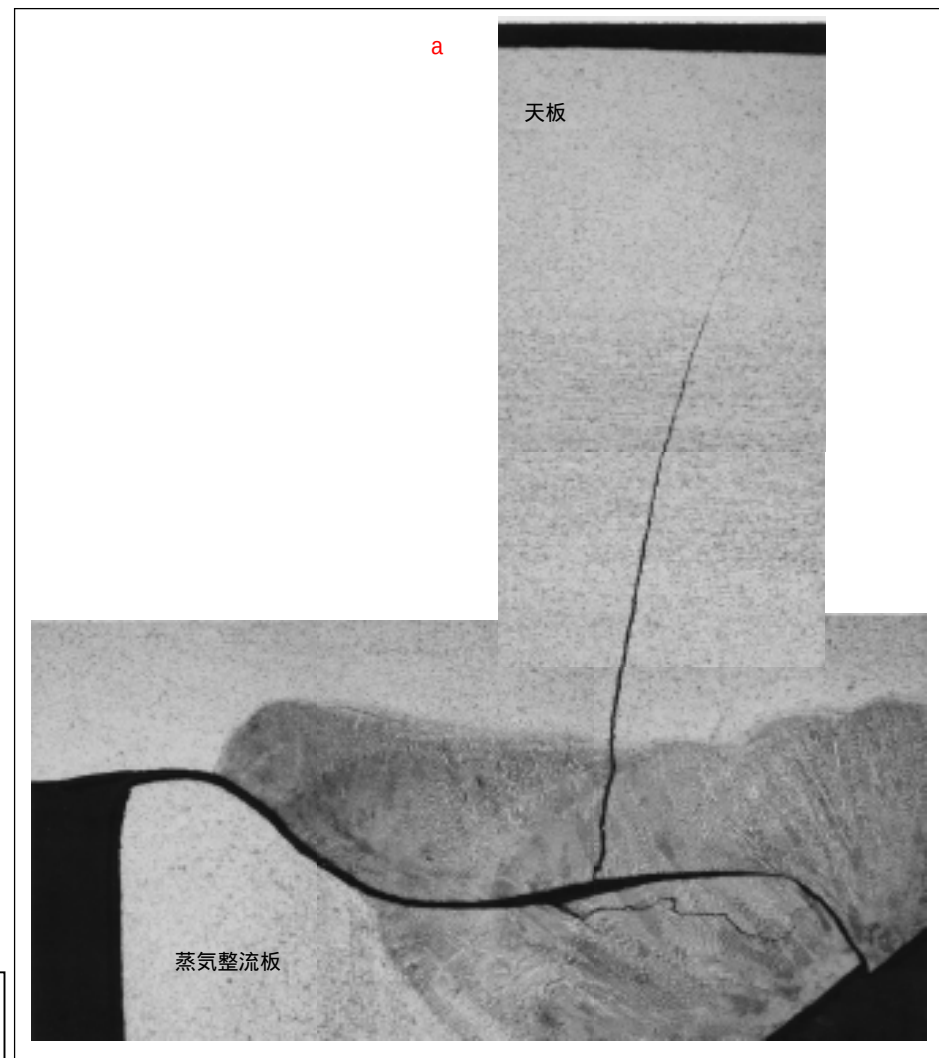
- ・断面の割れ形状は凹凸が少なく滑らかであることが認められた。
- ・割れは枝分かれがほとんどなく、粒内割れであることが認められた。
- ・介在物や腐食ピットは認められなかった。
- ・溶接の溶け込みが不足していることが認められた。



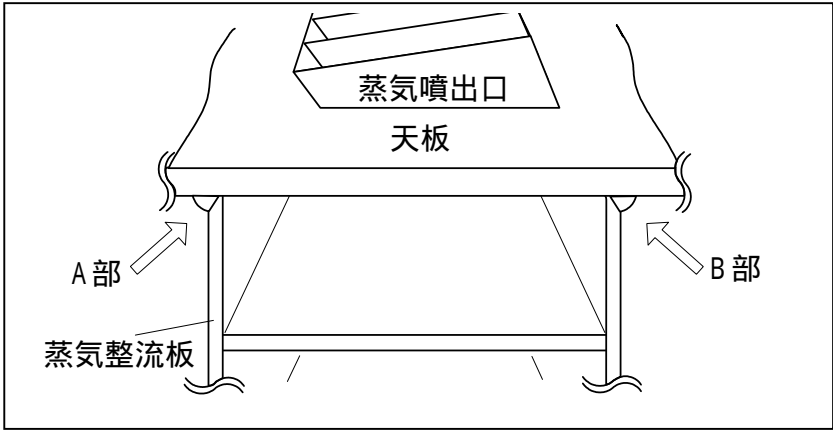
金属調査結果(断面ミクロ観察(断面 175mm))

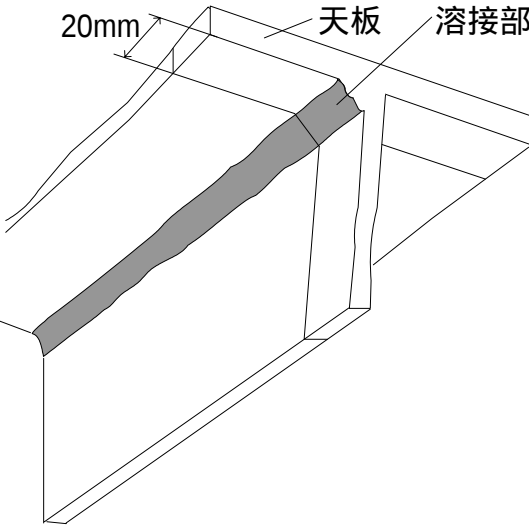
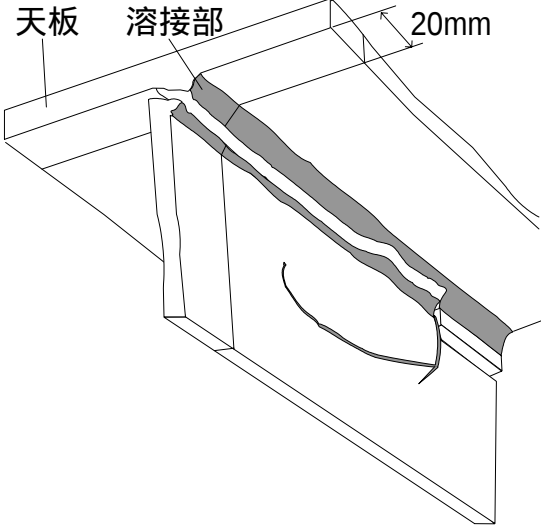
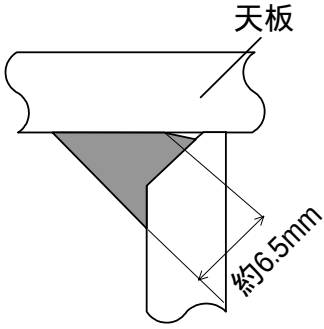
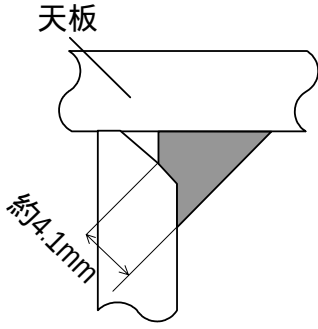


- ・断面の割れ(主き裂)形状は凹凸が少なく滑らかであることが認められた。
- ・溶接部の割れは枝分かれがほとんどなく、粒内割れであることが認められた。
- ・天板の割れは、溶接部の割れで止まっていることが認められた。
- ・天板の割れは、枝分かれがない粒内割れであることが認められた。
- ・介在物や腐食ピットは認められなかった。



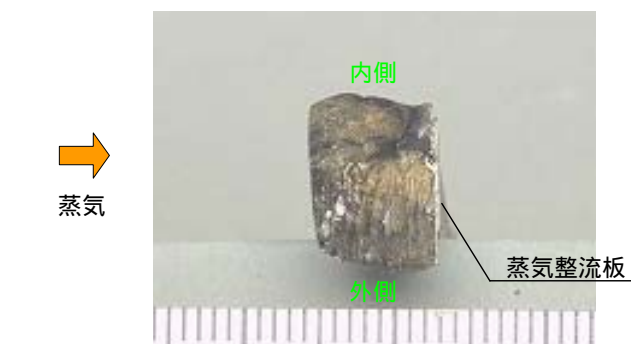
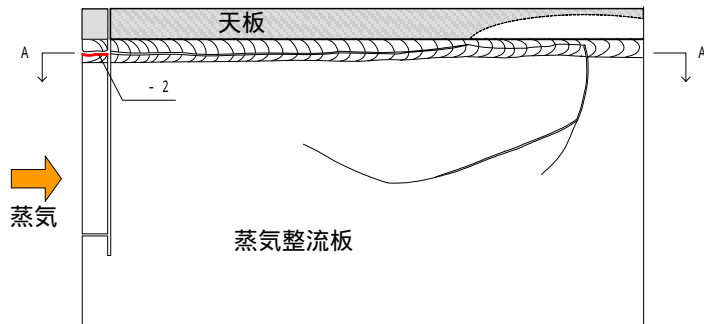
金属調査結果(のど厚測定)



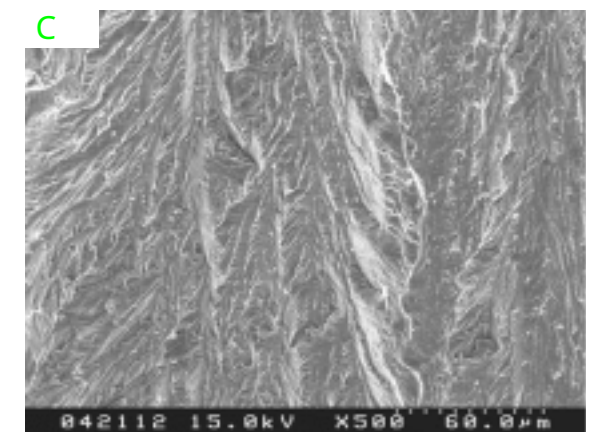
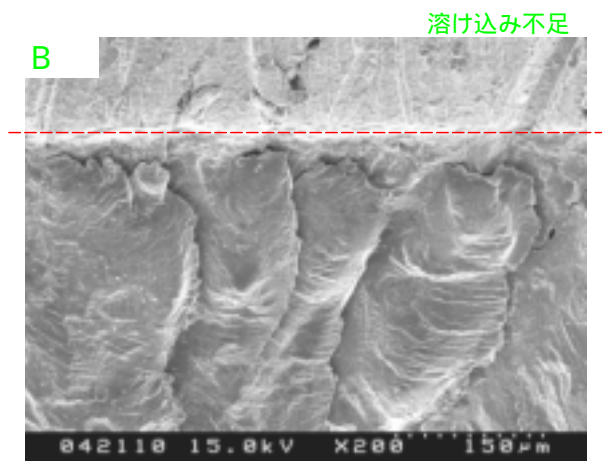
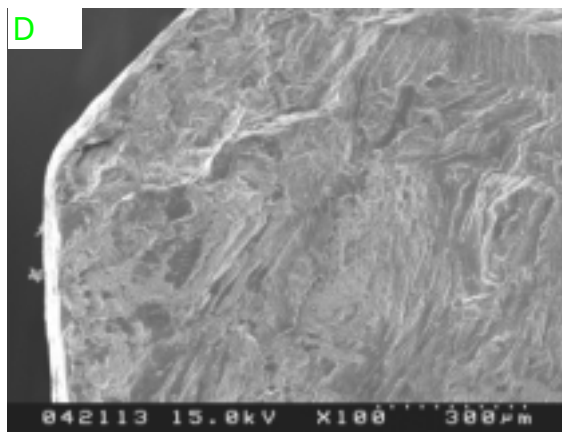
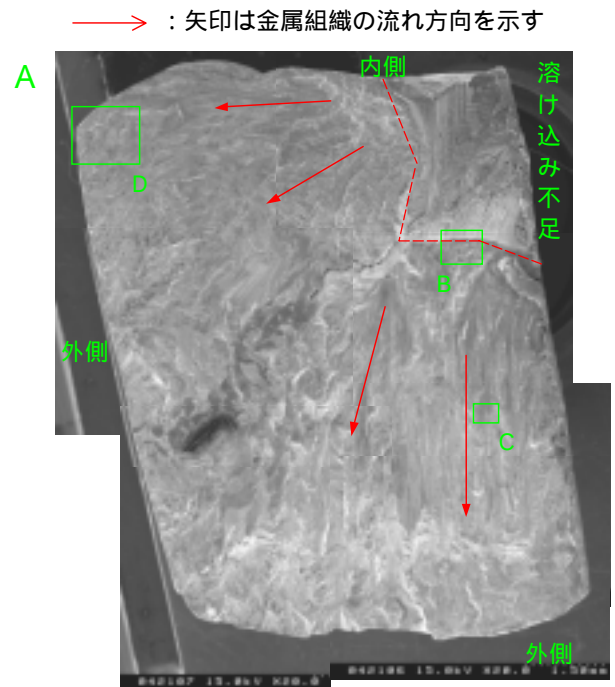
A部	B部
 20mm 天板 溶接部	 天板 溶接部 20mm
 天板 約6.5mm 健全箇所	 天板 約4.1mm 溶接部割れ箇所
のど厚約6.5mm	のど厚約4.1mm

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

金属調査結果(破面SEM観察(溶接部割れ - 2 蒸気入口部))

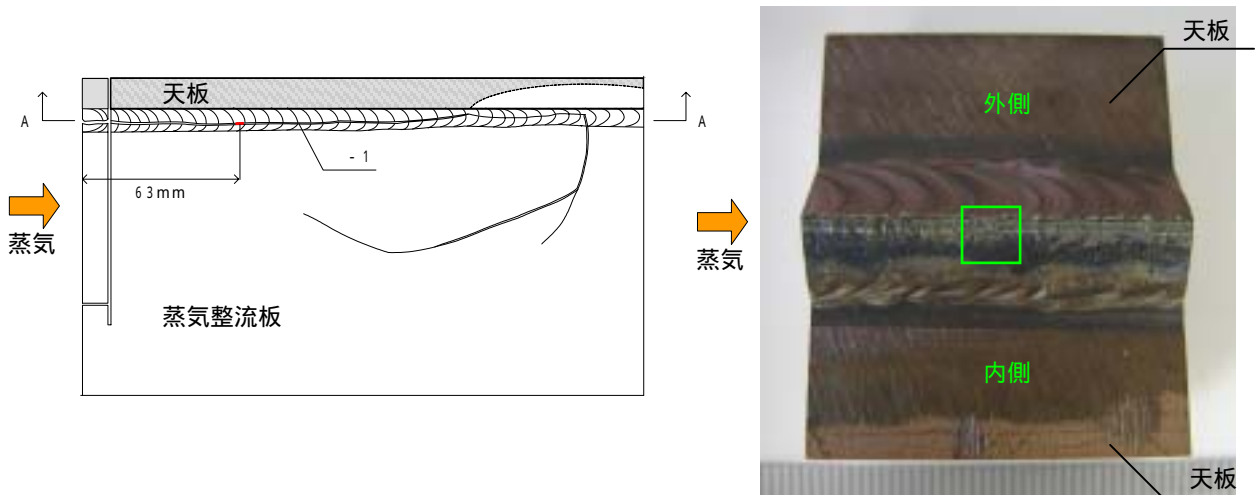


A - A 矢視

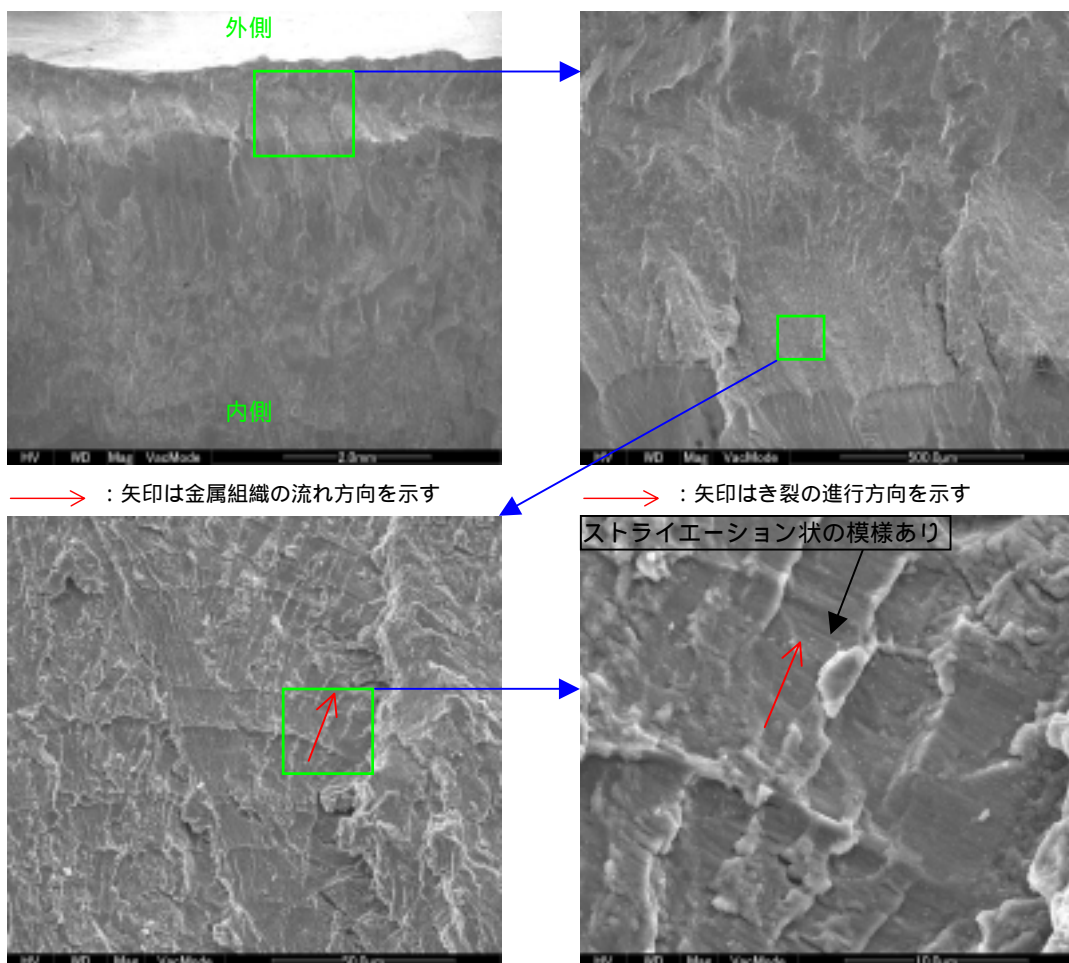


- ・内側の一部において、溶け込み不足部が認められ、溶け込み不足部から外側に向かう金属組織の流れ模様が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(破面SEM観察(溶接部割れ - 1 中間部))

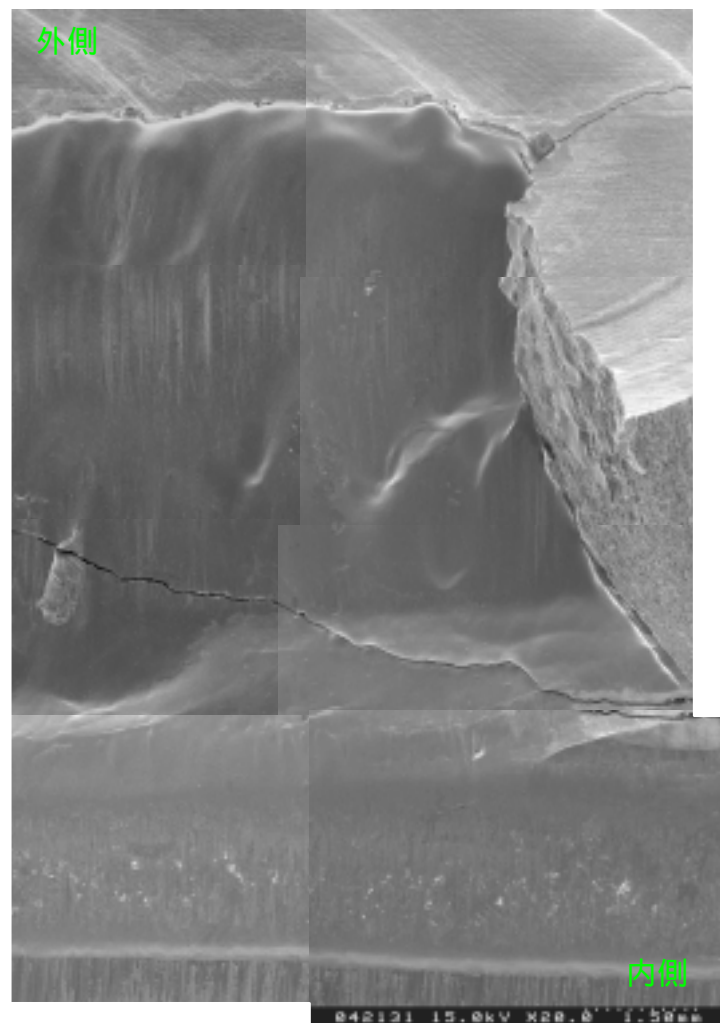
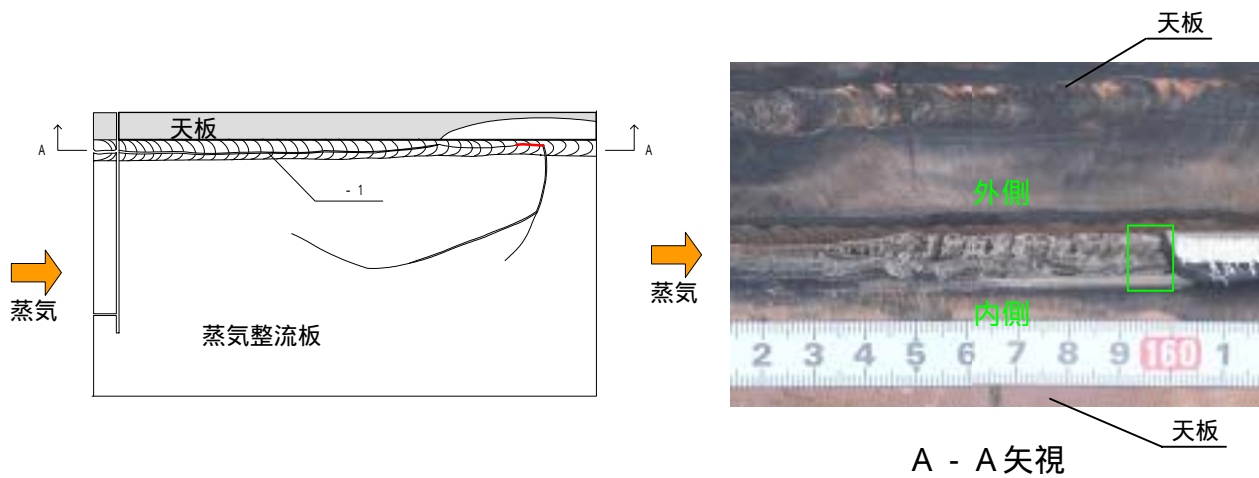


A - A 矢視



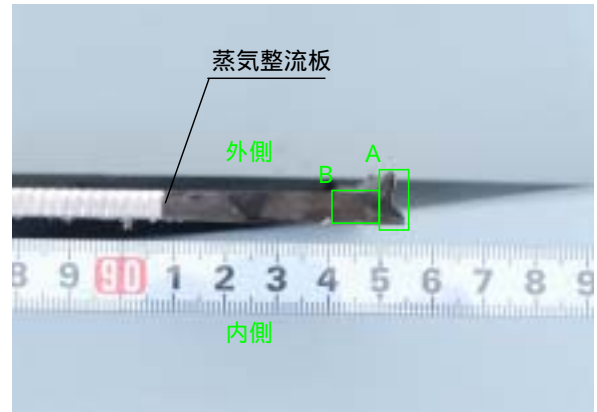
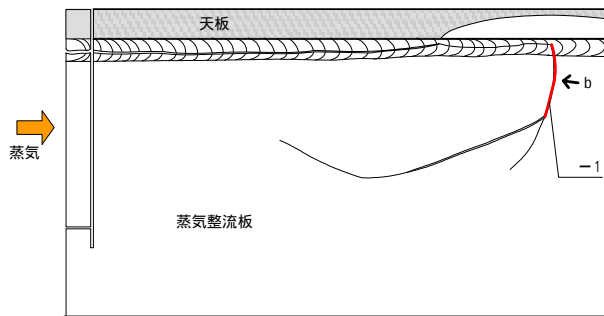
- ・破面には、疲労破面に特有なストライエーション状の模様が認められた。
- ・最終端部方向に溶接金属の内側から斜めに進展した金属組織の流れ模様が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(破面SEM観察(溶接部割れ - 1最終端部))

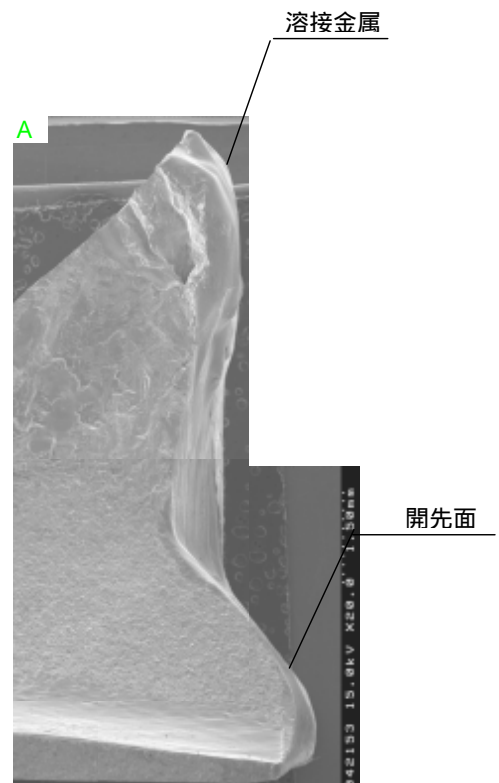
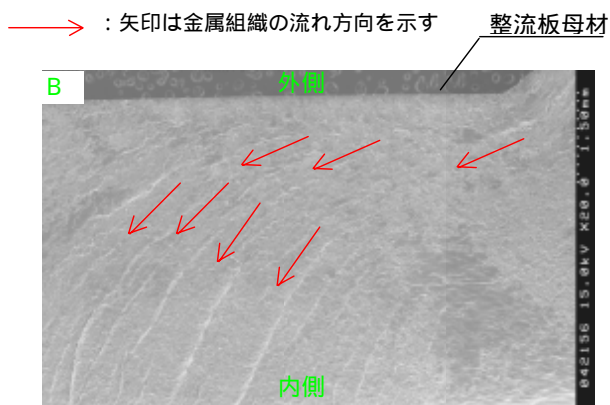


- ・破面は、打撃およびこすれにより、損傷していることが認められた。
- ・天板の割れは、溶金部から整流板へ折れ曲がった割れの角を通っていることが認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(破面SEM観察(蒸気整流板本体母材部割れ - 1))

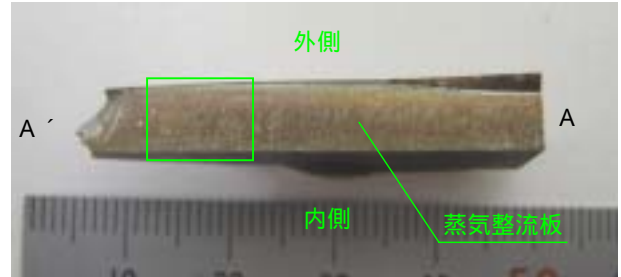
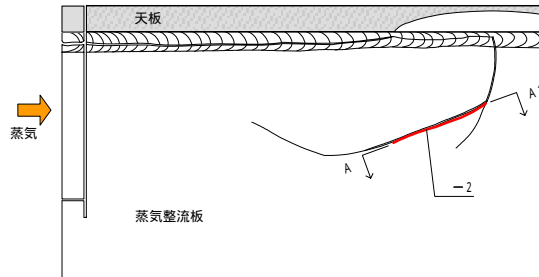


b 矢視



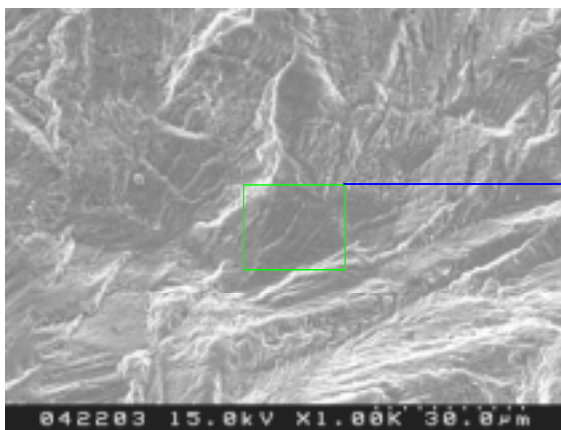
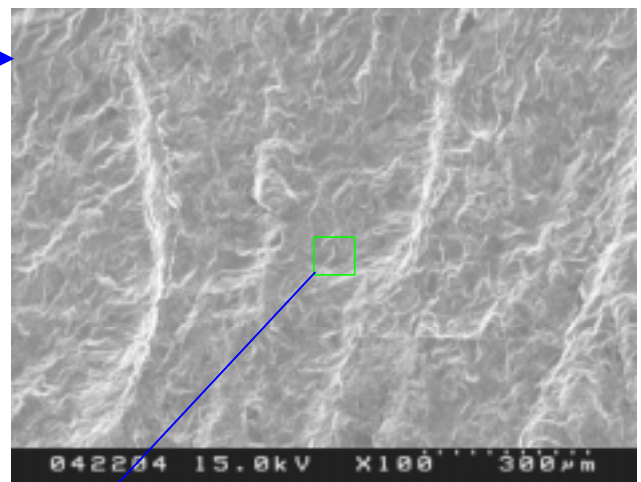
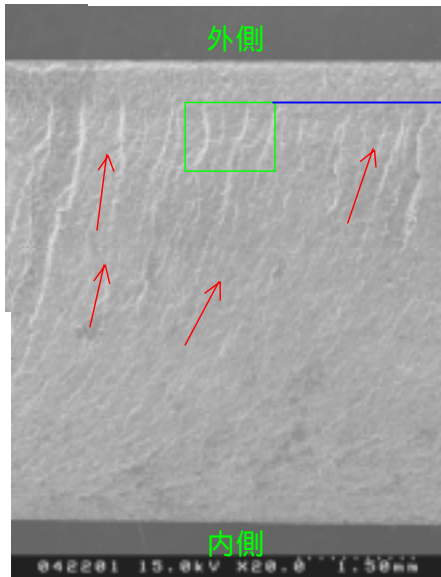
- ・ 溶接金属側から整流板本体母材側へ向かって、金属組織の流れが認められた。
- ・ 羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

金属調査結果(破面SEM観察(蒸気整流板本体母材部割れ - 2))

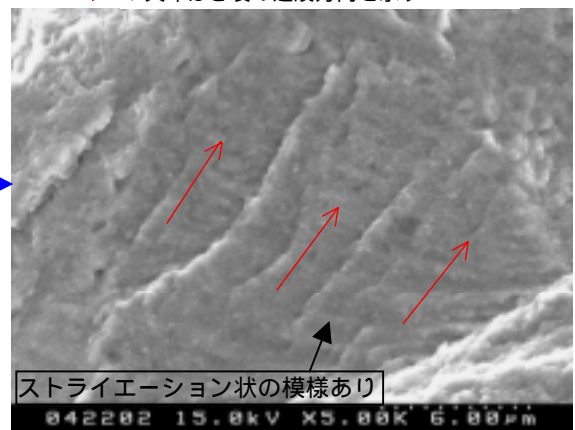


A - A' 矢視

→ : 矢印は金属組織の流れ方向を示す

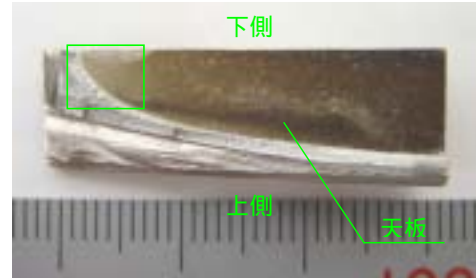
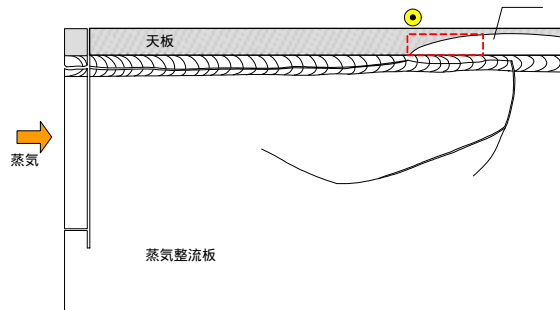


→ : 矢印はき裂の進展方向を示す

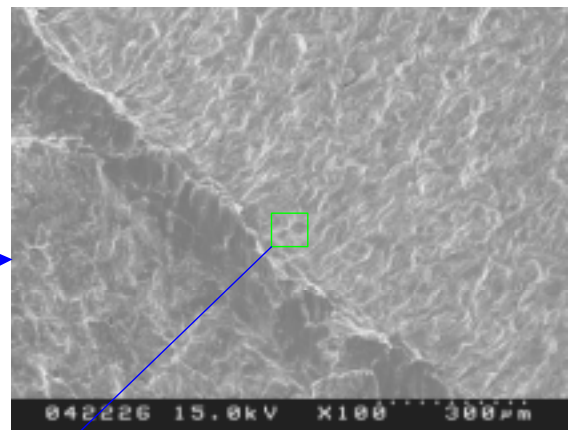
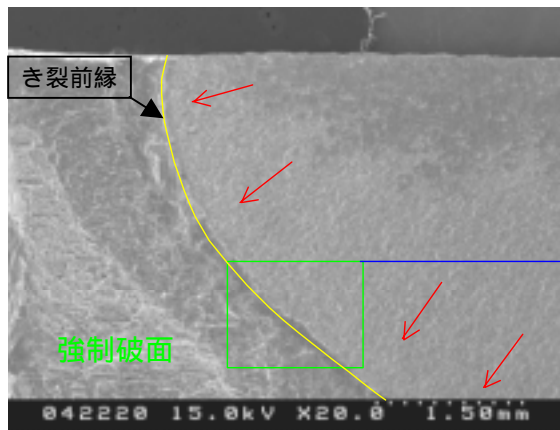


- ・破面には、疲労破面に特有なストライエーション状の模様が認められた。
- ・最終端方向に内側から斜めに進展した金属組織の流れ模様が認められた。
- ・羽毛状の組織、介在物、腐食ピットは認められなかった。

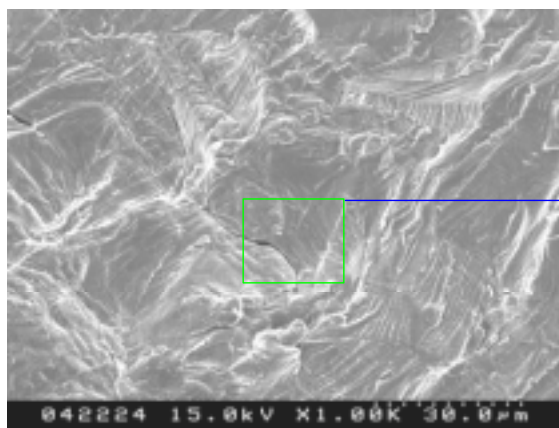
金属調査結果(破面SEM観察(天板部割れ))



→ : 矢印は金属組織の流れ方向を示す



→ : 矢印はき裂進展方向を示す



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

金属調査結果(EDX分析)

EDX:エネルギー分散型X線分光法

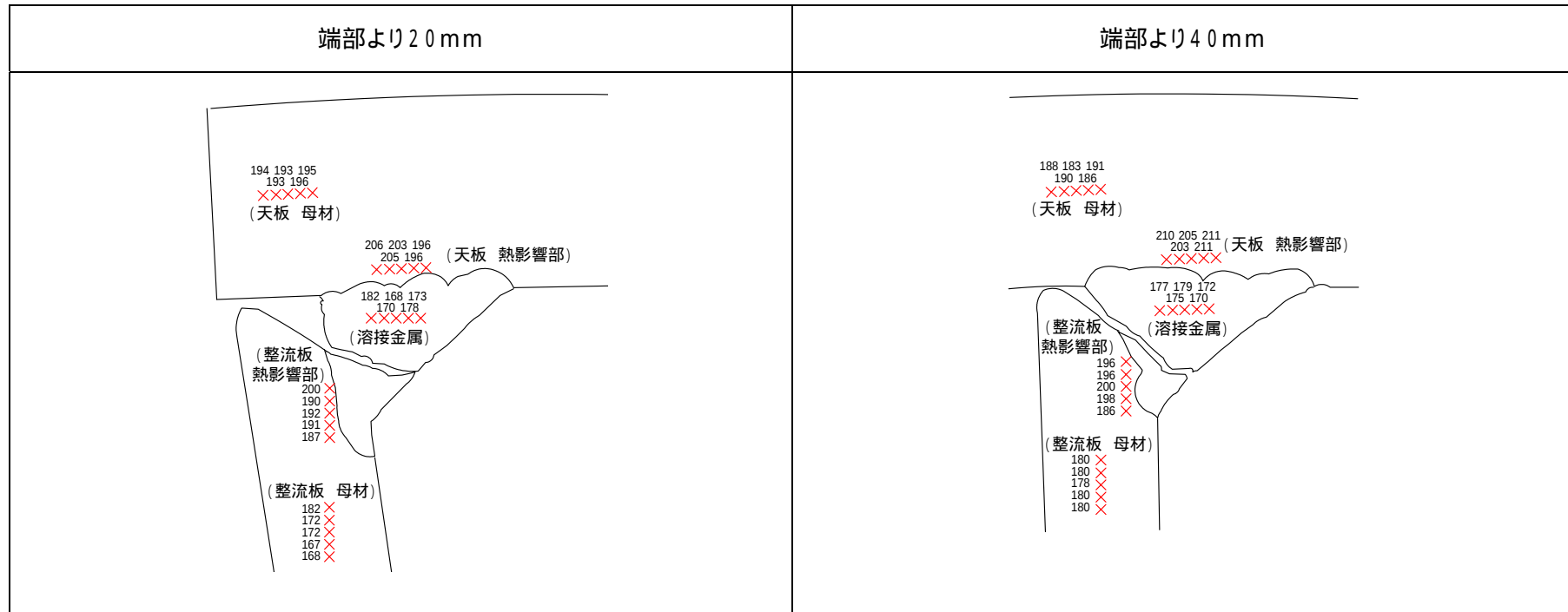
(単位:重量%)

項 目	Cr	Fe	Ni	Si
破面	22.1	68.5	8.9	0.5

他の元素は検出限界0.1重量%以下であった。

破面の元素分析を行った結果、耐食性に有害な元素は認められなかった。

金属調査結果(硬度測定)



硬度測定結果(ビッカース硬さ:HV)

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

規格値^{*1}

	HV
天板(母材)	200 以下
整流板(母材)	203 以下 ^{*2}

*1: 溶接金属及び熱影響部は規格値なし

*2: 規格値ロックウェル硬さ B 92 以下を HV 換算した値

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

疲労による割れの発生に関する評価

1 . 目的

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

2 . 検討項目

(1) 振動による変動応力の算出

a . 流体加振力算出

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

b . 変動応力算出

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

(2) ひずみから生じる平均応力の算出

天板復旧溶接によるひずみから生じる平均応力を弾塑性解析により算出する。

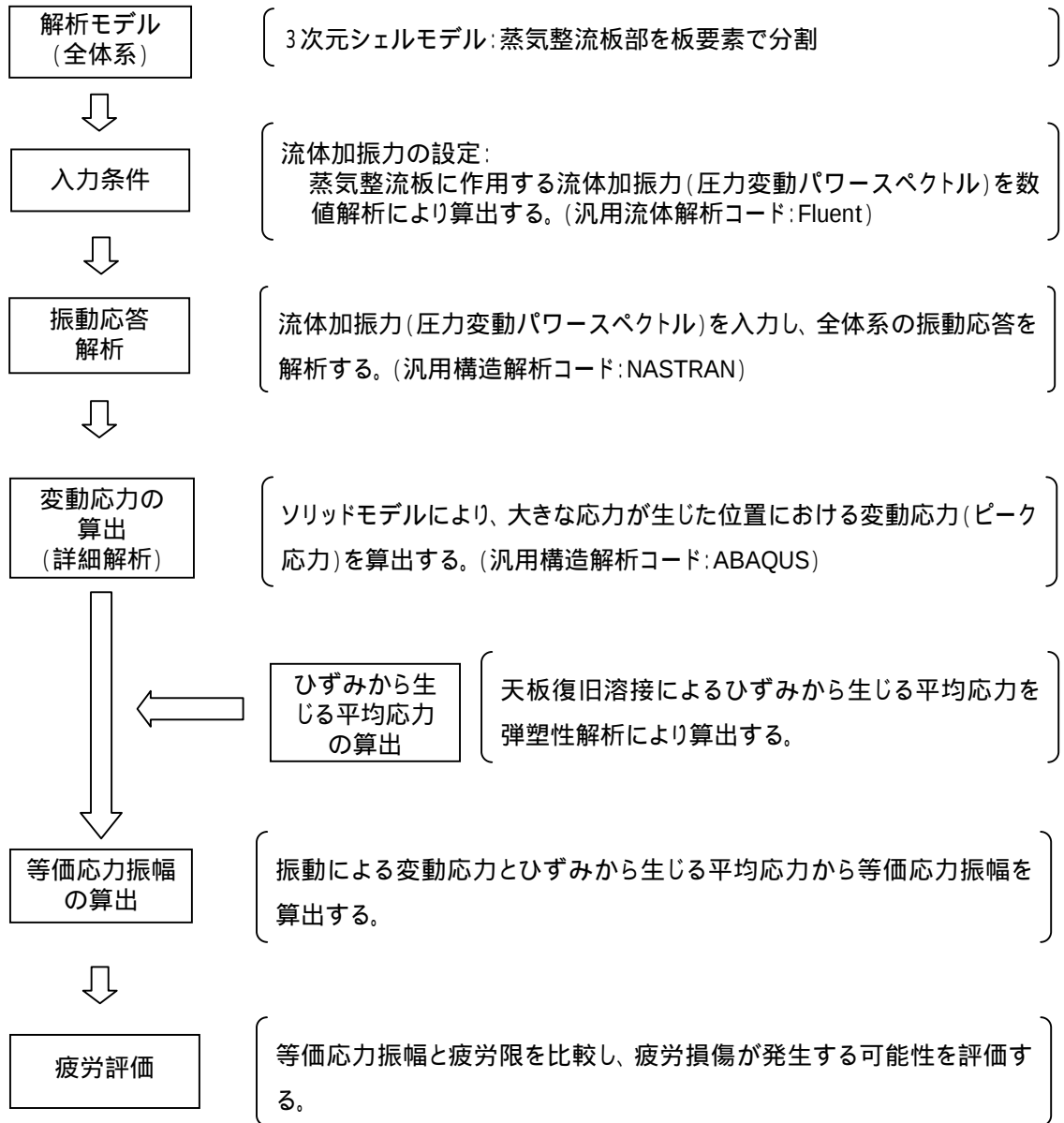
(3) 等価応力振幅の算出

振動による変動応力とひずみから生じる平均応力から等価応力振幅を算出する。

(4) 疲労評価

等価応力振幅と疲労限を比較し、疲労損傷が発生する可能性を評価する。

[検討フロー]



3 . 評価結果

(1) 解析モデル

蒸気整流板と天板を対象に、3次元シェル（板）要素にてモデル化した。

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

解析モデル図を図1に示す。

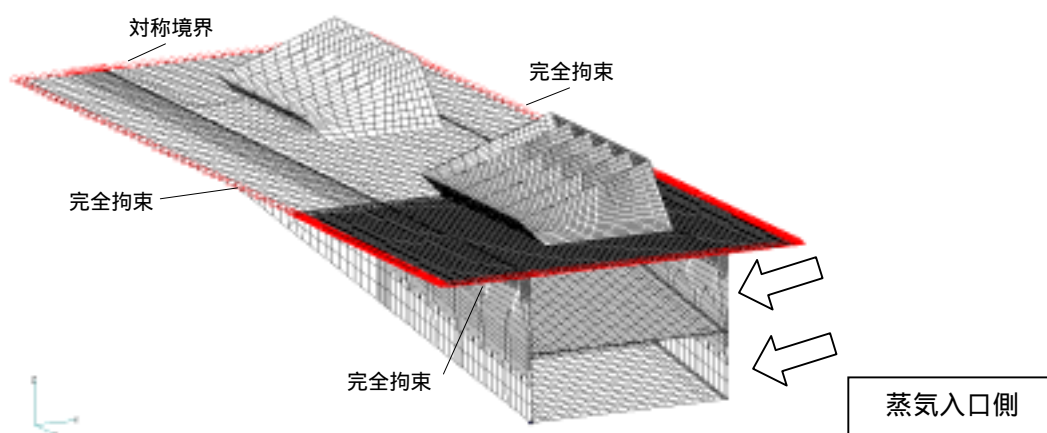


図1 解析モデル図

(2) 入力条件

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

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

表1 流体解析における計算諸元

項 目	単 位	数 値
流速	m/s	28
迎え角	°	70
板厚さ	mm	6
板間隔	mm	146

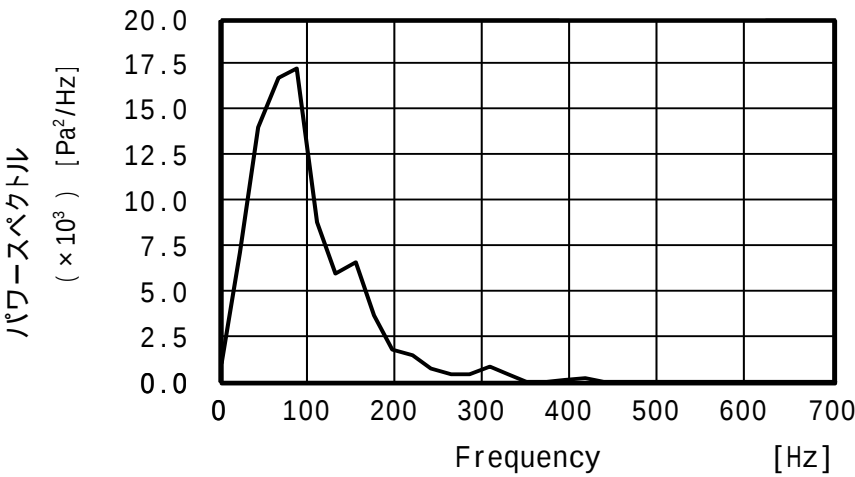


図2 圧力変動パワースペクトル

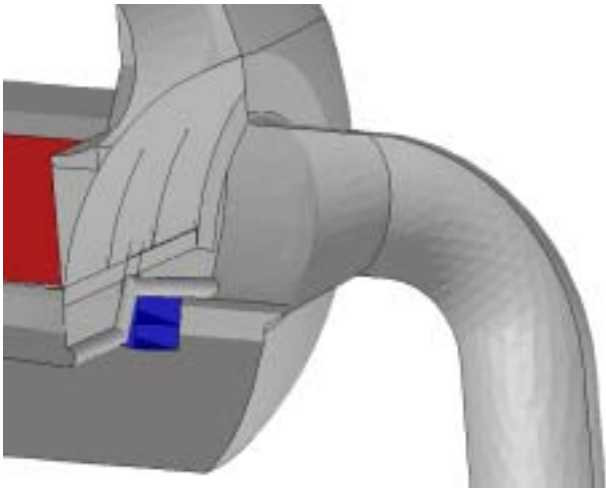


図3 入口管台および蒸気整流板廻り形状図

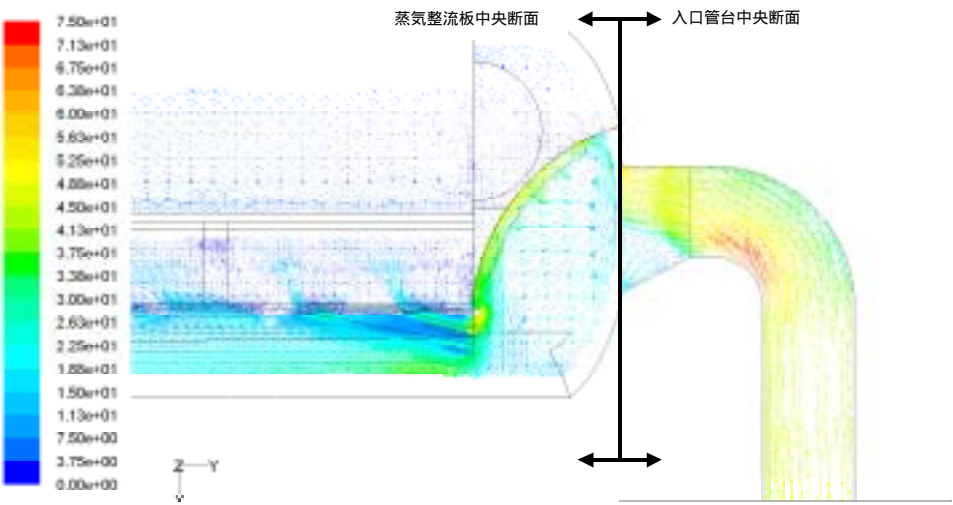
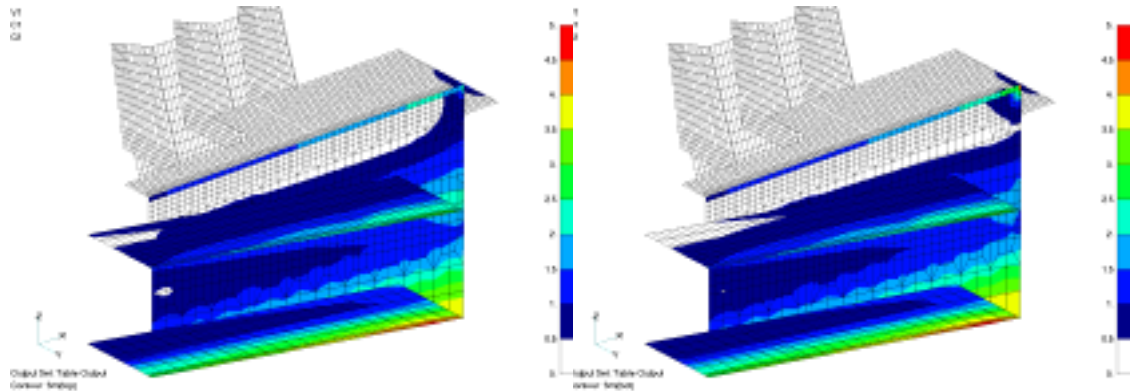


図4 入口管台および蒸気整流板断面流速ベクトル

(3) 振動応答解析

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

応力コンター図（無次元量）を図5に示す。



側板：外面、天板：上面の応力

側板：内面、天板：下面の応力

図5 応力コンター図(無次元量)

(4) 変動応力の算出

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

解析結果を図6に示す。

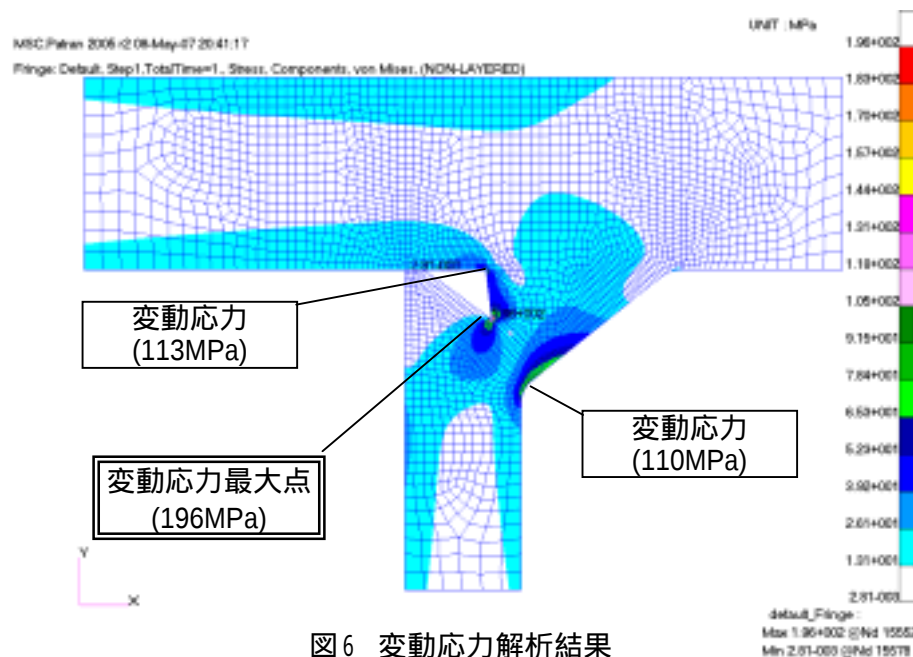


図6 変動応力解析結果

(5) ひずみから生じる平均応力の算出

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

解析結果を図 8 に示す。

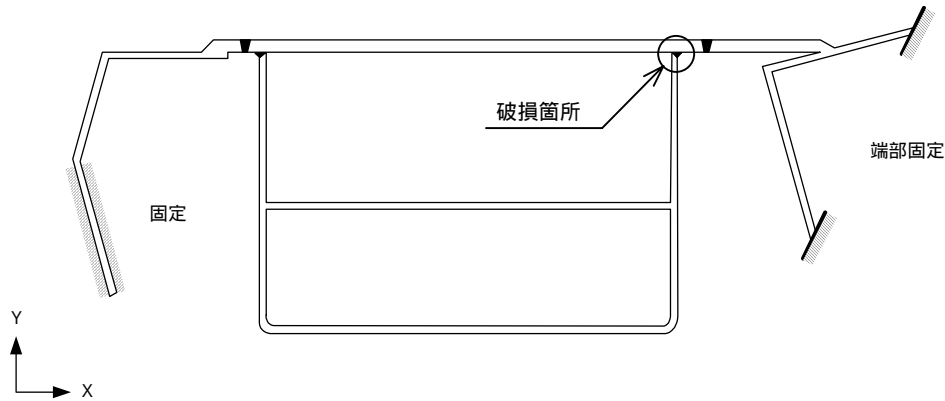


図 7 解析モデル図

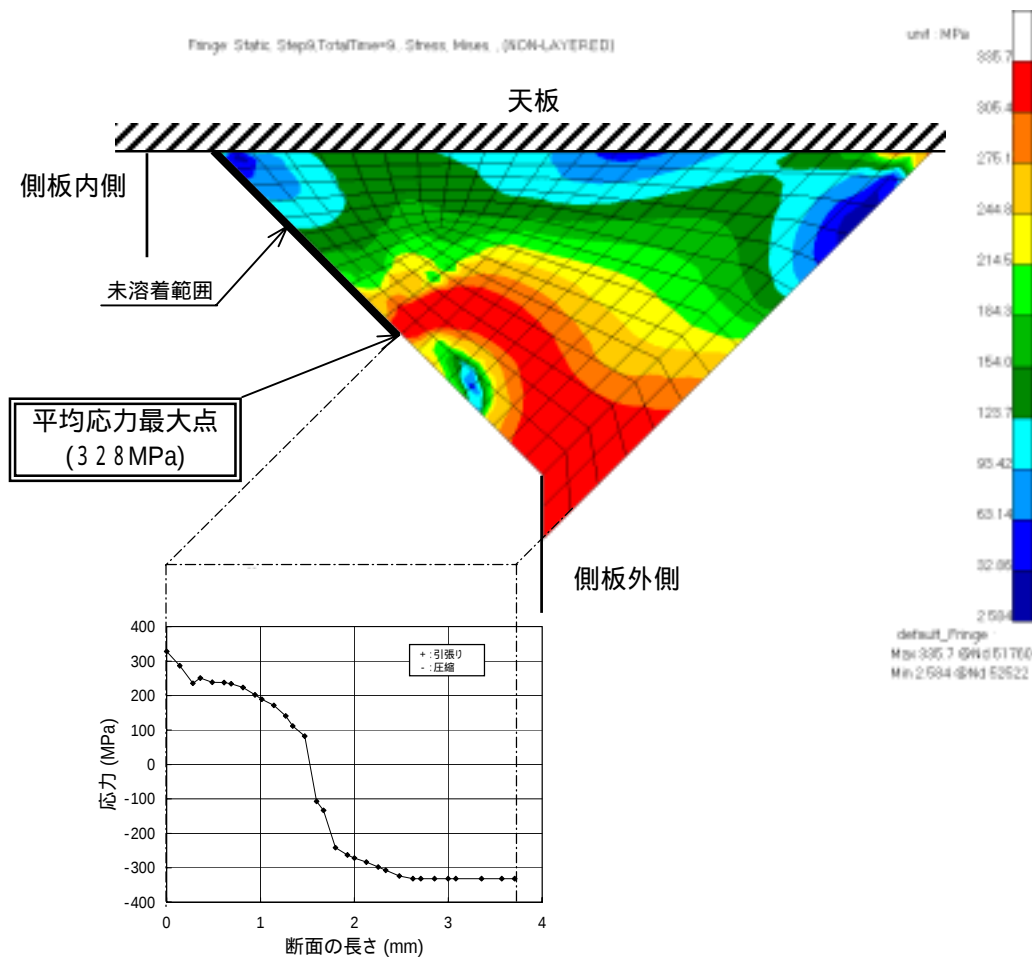


図 8 溶接断面応力分布図

(6) 等価応力振幅の算出

振動による変動応力とひずみから生じる平均応力から等価応力振幅を算出した。

算出結果を表 2 に示す。なお、表中に示す等価応力振幅は、実機使用温度を考慮してヤング率補正係数 (1 . 0 6) を乗じた値である。

表 2 等価応力振幅算出結果

変動応力(MPa)	平均応力 (MPa)	等価応力振幅(MPa)
1 9 6	3 2 8	2 1 8

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

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

Su : 引張り強さ (610MPa)

Sy : 平均応力

Sa : 変動応力

(7) 疲労評価

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

評価結果を表 3 に示す。

表 3 疲労評価結果

等価応力振幅(MPa)	疲労限 (MPa)	疲労損傷の可能性
2 1 8	2 1 4	有

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

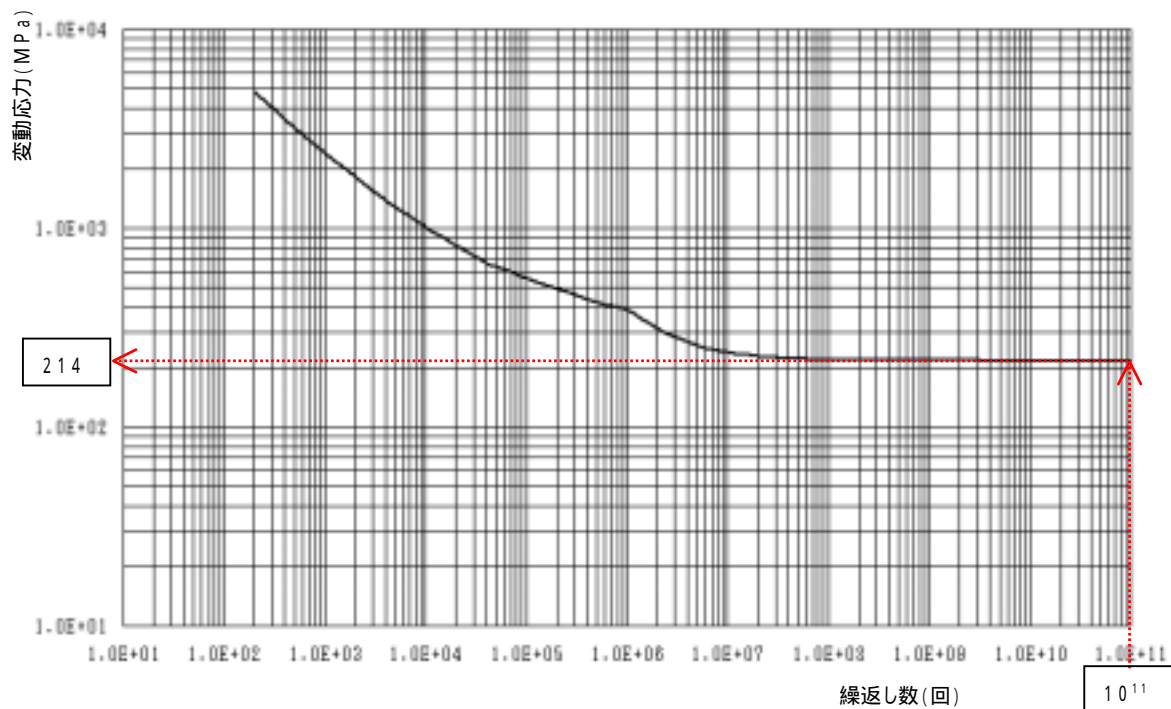


図9 疲労線図(ASME Sec. Division 2 Best fit curve、平均応力による補正前)
(オーステナイト系ステンレス鋼)

(8) 疲労割れ発生における溶け込み不足の影響評価

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

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

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

表4 等価応力振幅算出結果

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

表5 疲労評価結果

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

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

(9) 疲労割れ発生における平均応力の影響評価

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

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

評価結果を表 6 に示す。なお、表中に示す変動応力は、実機使用温度を考慮してヤング率補正係数 (1 . 0 6) を乗じた値である。

表 6 疲労評価結果

変動応力(MPa)	疲労限 (MPa)	疲労損傷の可能性
2 0 8	2 1 4	無し

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

天板復旧溶接のない場合の疲労評価

1. 目的

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

2. 検討項目

(1) 振動による変動応力の算出

a. 流体加振力算出

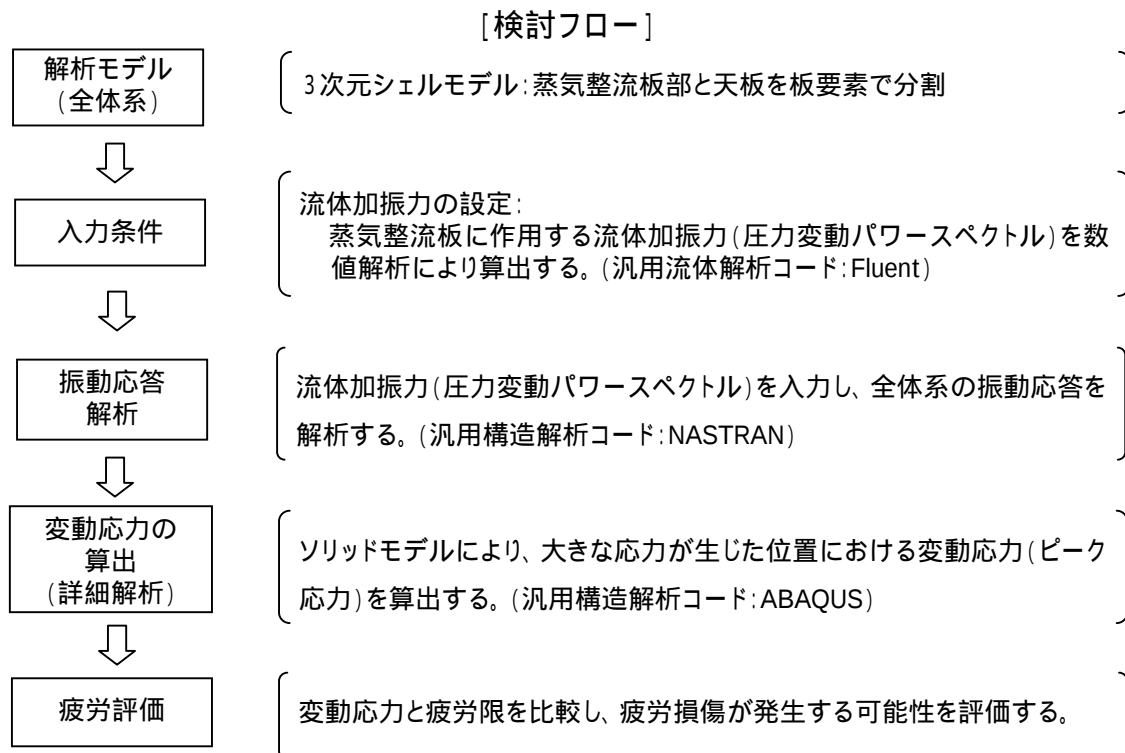
- ・ 蒸気整流板に作用する流体加振力（圧力変動パワースペクトル）を流体の数値解析により算出する。

b. 変動応力算出

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

(2) 疲労評価

変動応力と疲労限を比較し、疲労損傷が発生する可能性を評価する。



3 . 評価結果

(1) 解析モデル

蒸気整流板と天板を対象に、3次元シェル（板）要素にてモデル化した。

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

解析モデル図を図 1 に示す。

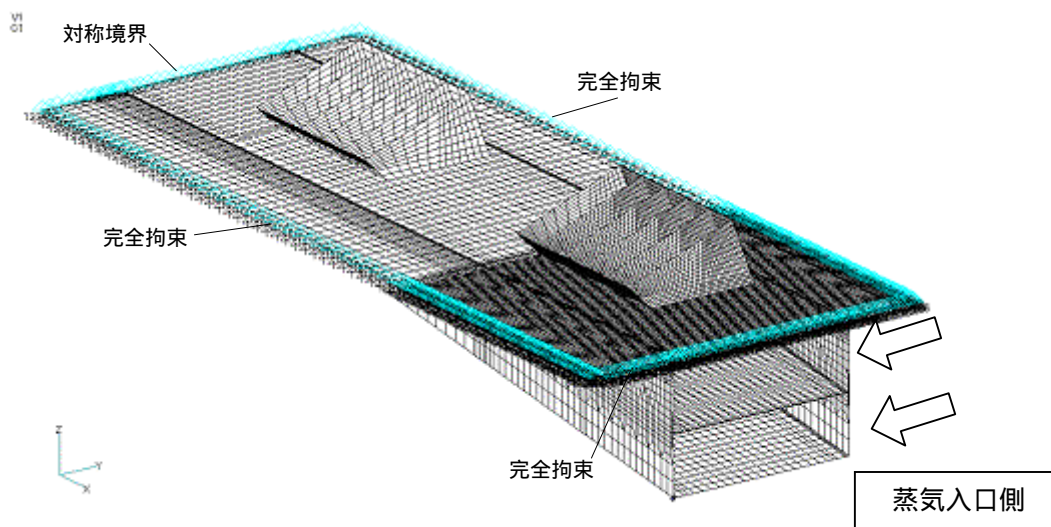


図1 解析モデル図

(2) 入力条件

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

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

表1 流体解析における計算諸元

項 目	単 位	数 値
流速	m/s	28
迎え角	°	70
板厚さ	mm	6
板間隔	mm	146

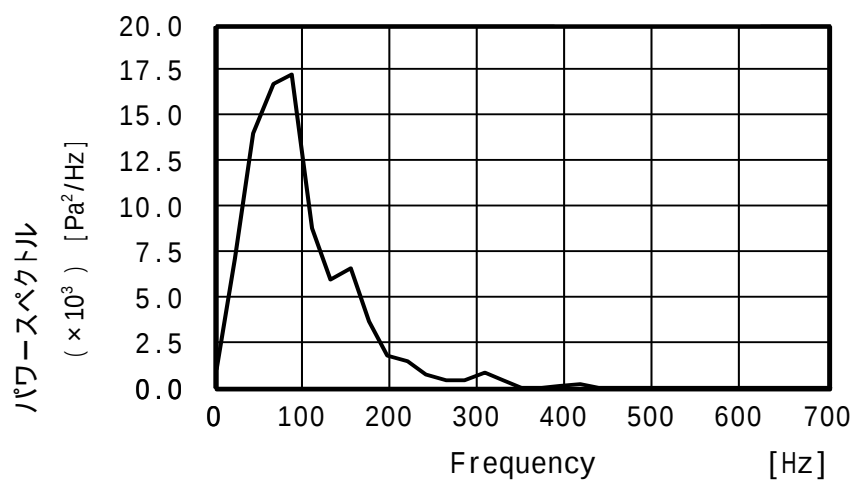


図2 圧力変動パワースペクトル

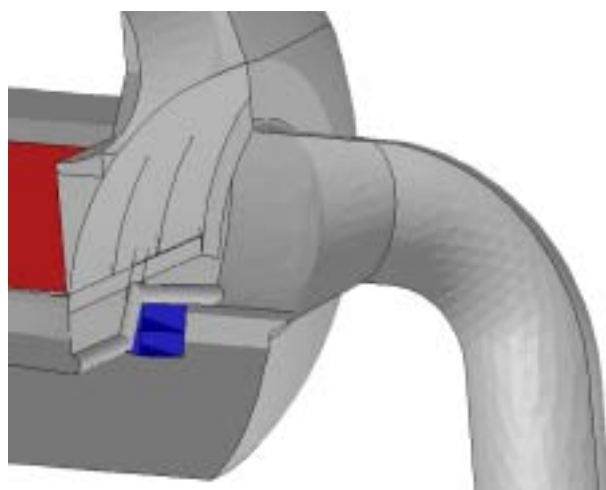


図3 入口管台および蒸気整流板廻り形状図

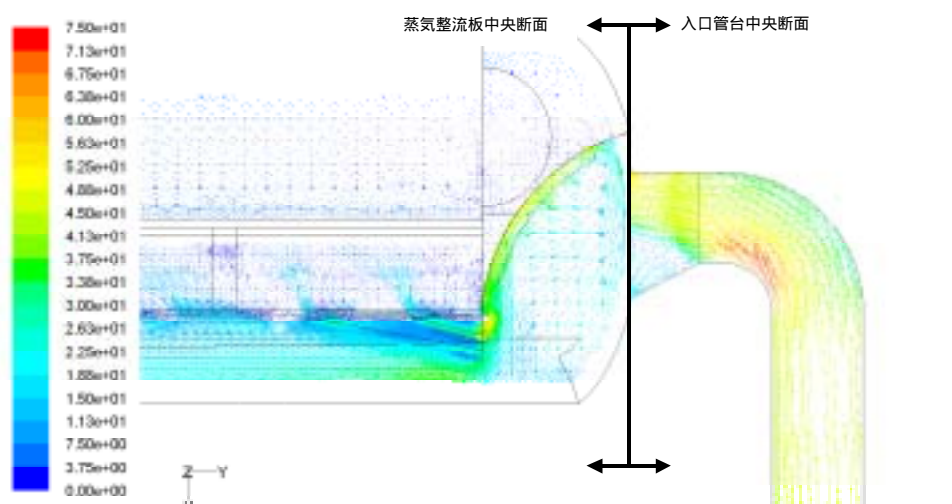


図4 入口管台および蒸気整流板断面流速ベクトル

(3) 振動応答解析

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

応力コンター図 (無次元量) を図 5 に示す。

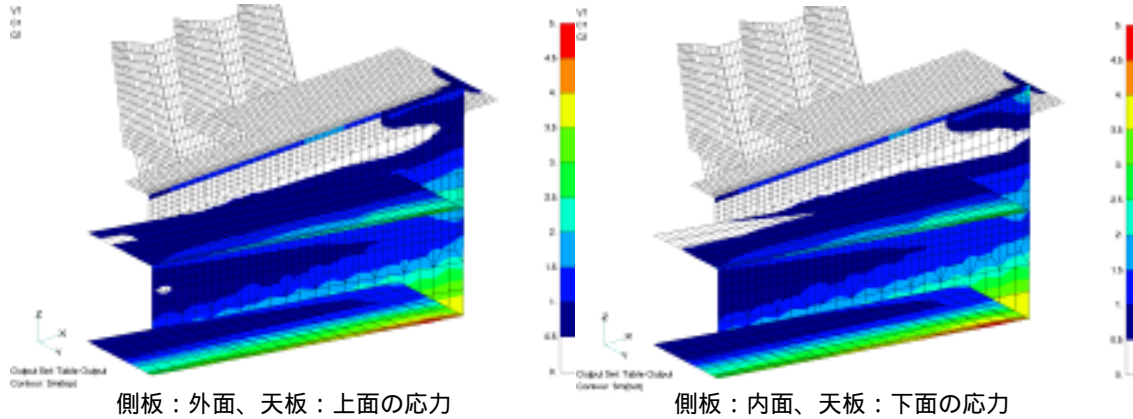


図 5 応力コンター図(無次元量)

(4) 変動応力の算出

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

解析結果を図 6、図 7 に示す。なお、図中に示す変動応力は、実機使用温度を考慮してヤング率補正係数 (1 . 0 6) を乗じた値である。

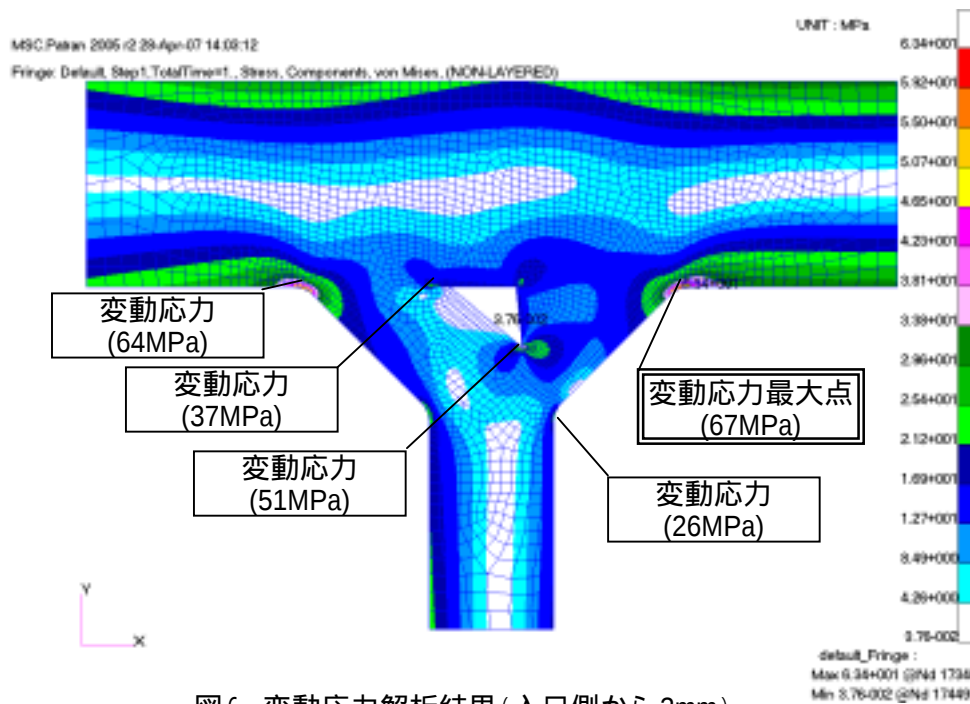


図 6 変動応力解析結果 (入口側から 3mm)

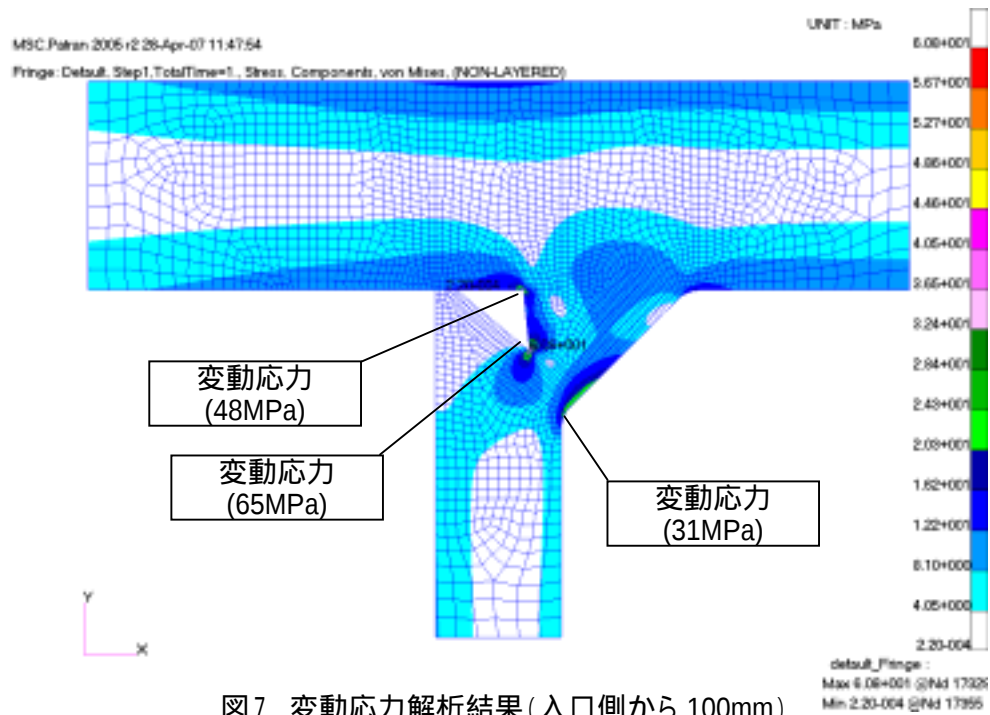


図7 変動応力解析結果(入口側から 100mm)

(5) 疲労評価

算出された変動応力は疲労限以下であり、強度に問題はないことを確認した。

評価結果を表 2 に示す。

表2 疲労評価結果

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

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

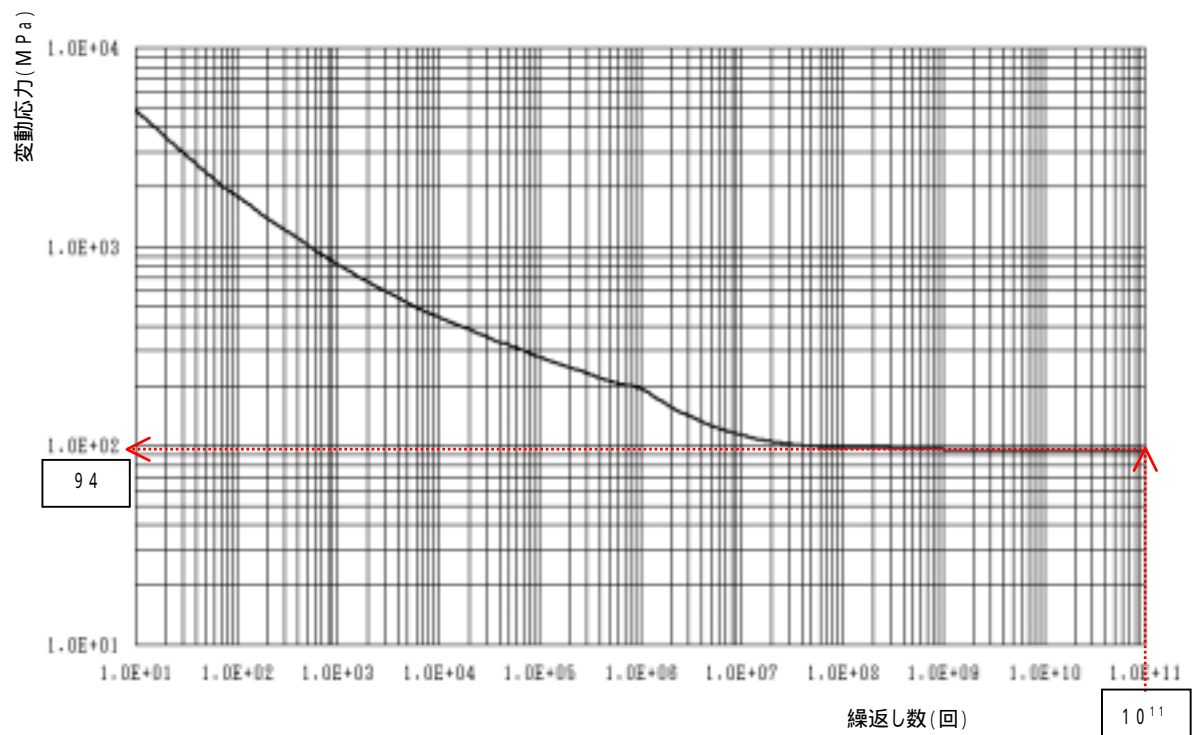
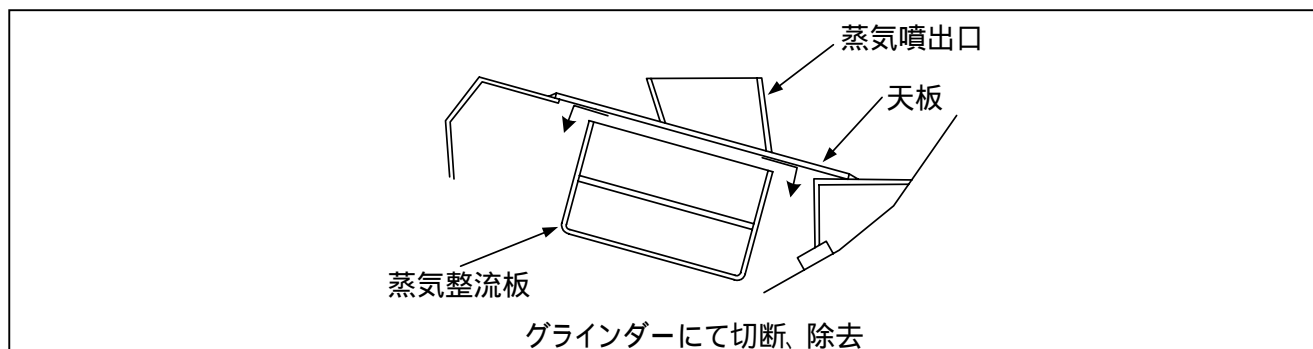


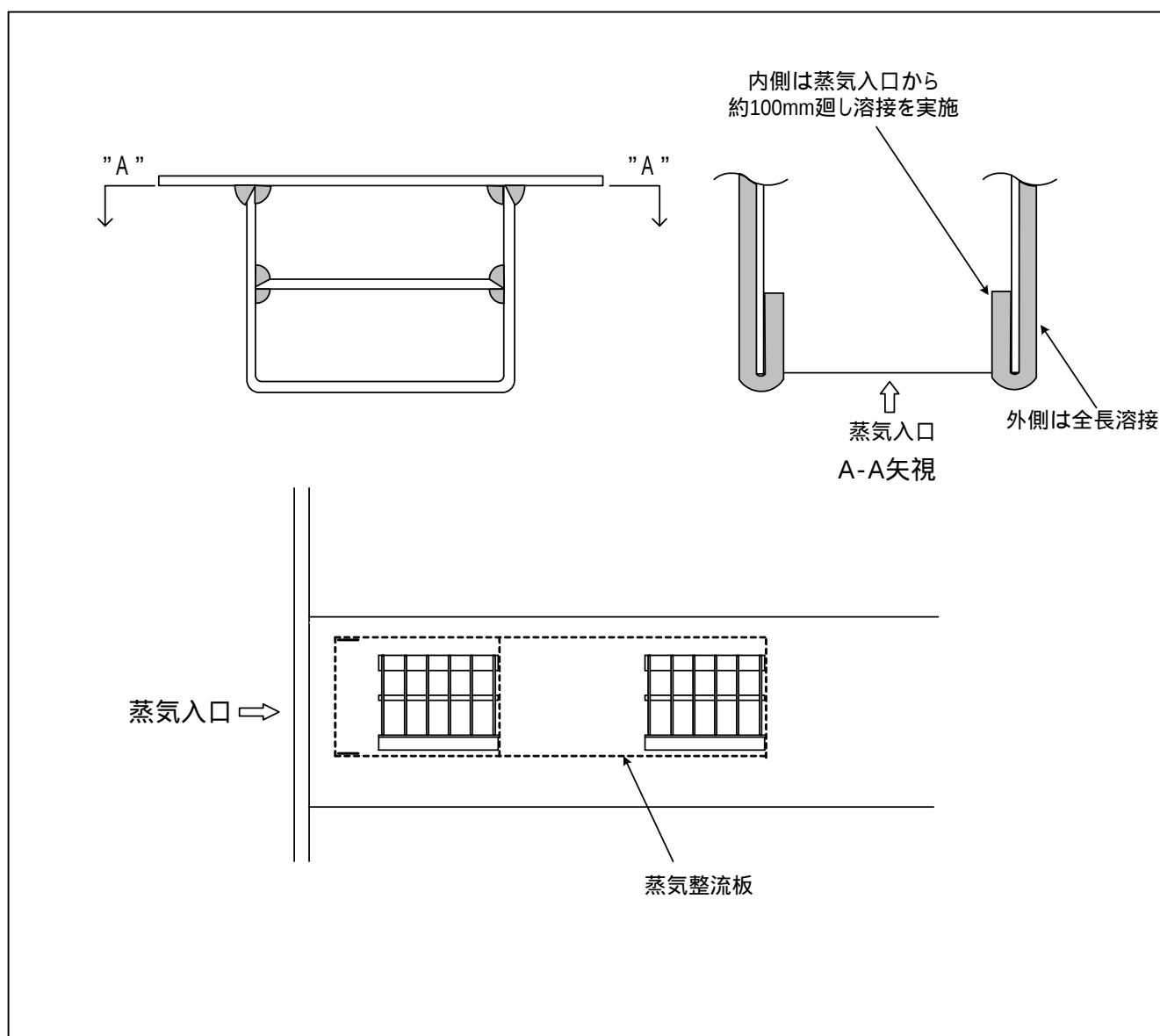
図8 疲労線図 (ASME Sec. Division 2 C curve)
(オーステナイト系ステンレス鋼)

伊方2号機 湿分分離加熱器蒸気整流板取替概要

蒸気整流板切断(グラインダーにて切断、除去)



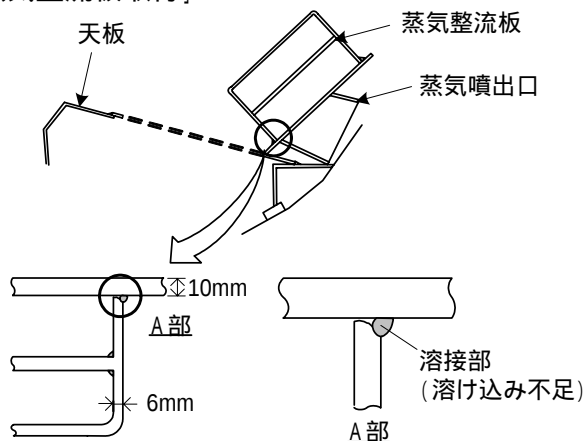
蒸気整流板取付け(溶接・PT)



事象発生 の 推定メカニズム

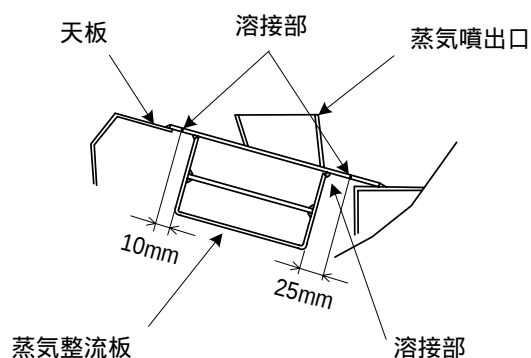
蒸気整流板取付

[蒸気整流板取付]



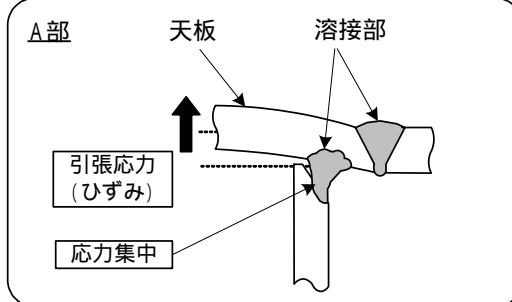
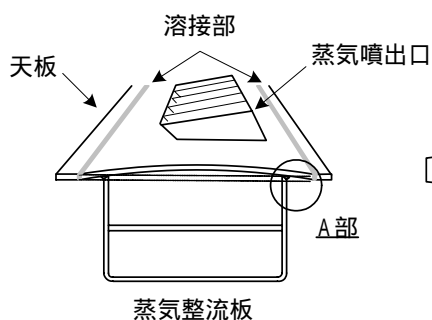
器内の狭隘な場所での作業であったため溶接部の一部に溶け込み不足となる部分が生じた。

[天板取付]



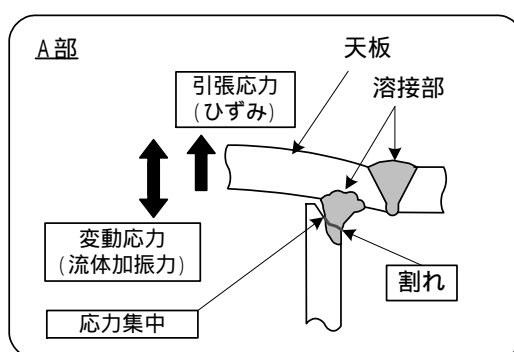
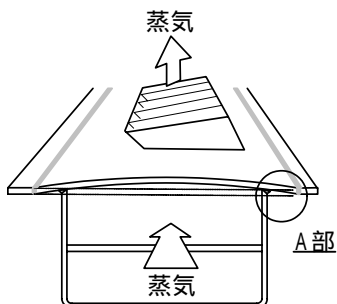
天板の復旧溶接により天板にひずみが生じた。

蒸気整流板取付後



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

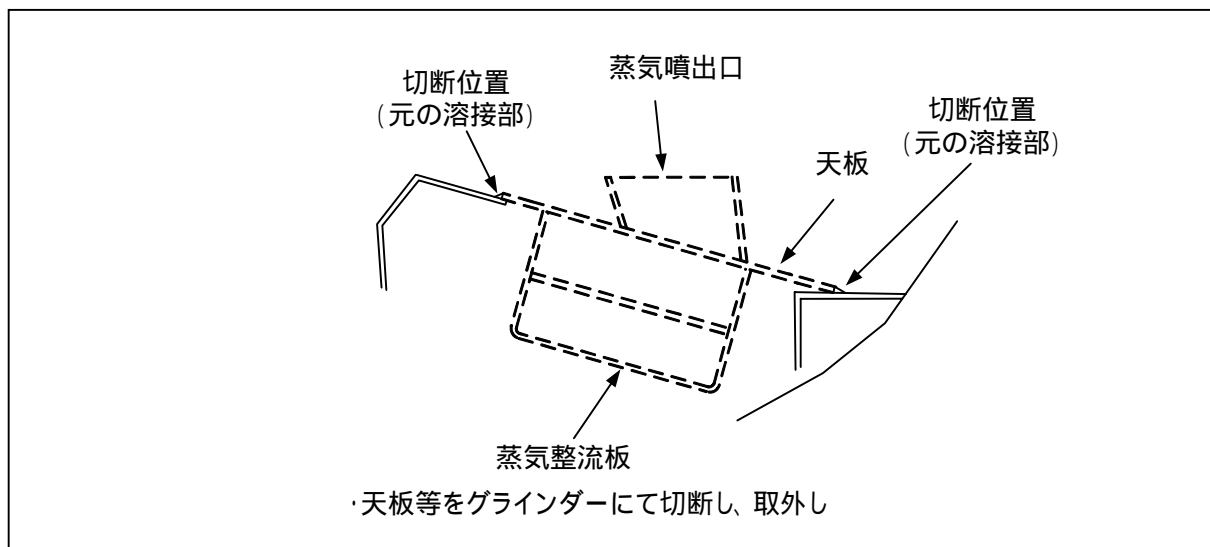
運転状態 (割れ発生・進展)



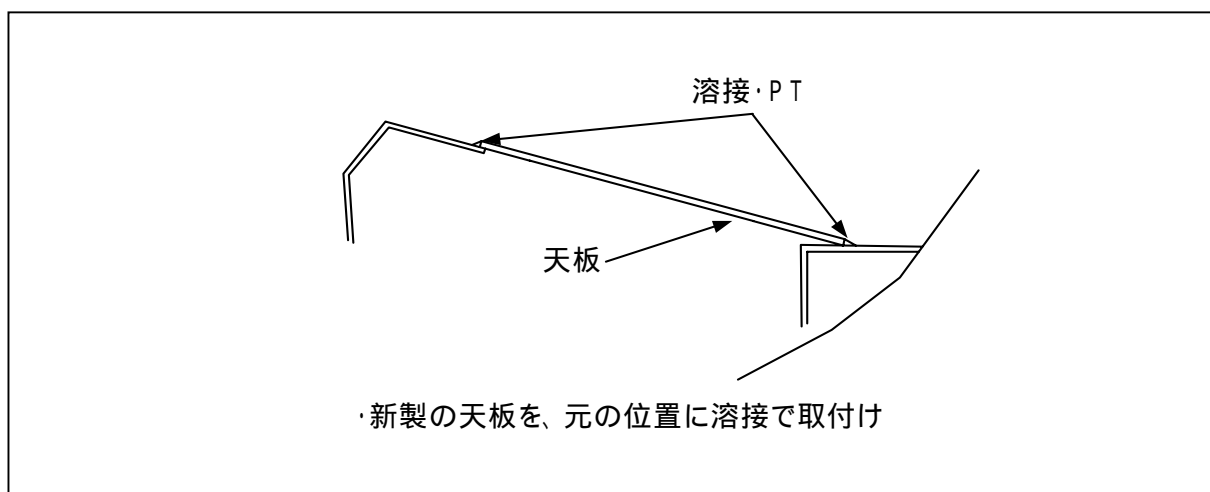
蒸気の流れによる流体加振力が作用し、溶接部の応力集中部位に疲労限を上回る応力がかかり、割れが発生・進展した。

当該蒸気整流板及び天板取替概要 (1 / 2)

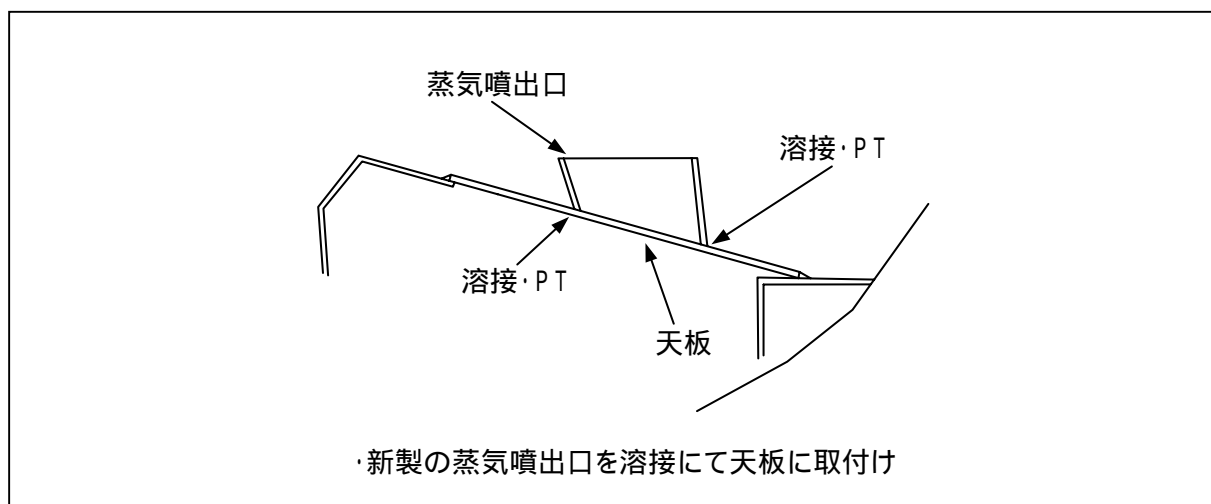
天板・蒸気整流板・蒸気噴出口の除去



天板取付け

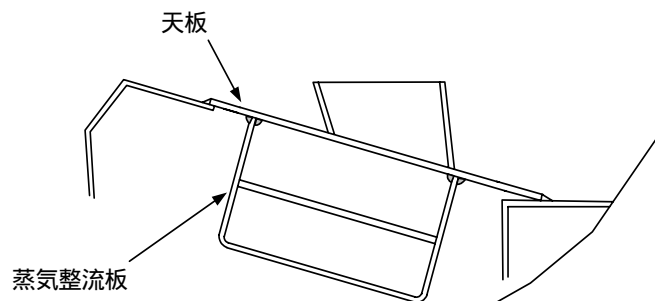


蒸気噴出口取付け (溶接、PT)



当該蒸気整流板及び天板取替概要 (2 / 2)

蒸気整流板の取付け



・新製の蒸気整流板を溶接にて天板に取付け

・天板と蒸気整流板との溶接図

