

金属調査結果 (EDX分析)

EDX: エネルギー分散型X線分光法

(単位: 重量%)

項目	Cl	Na	Ca	S	Si	その他
A部 割れ	0.14	1.48	-	0.08	0.59	97.71
B部 割れ	-	0.93	-	-	0.45	98.62

(参考)

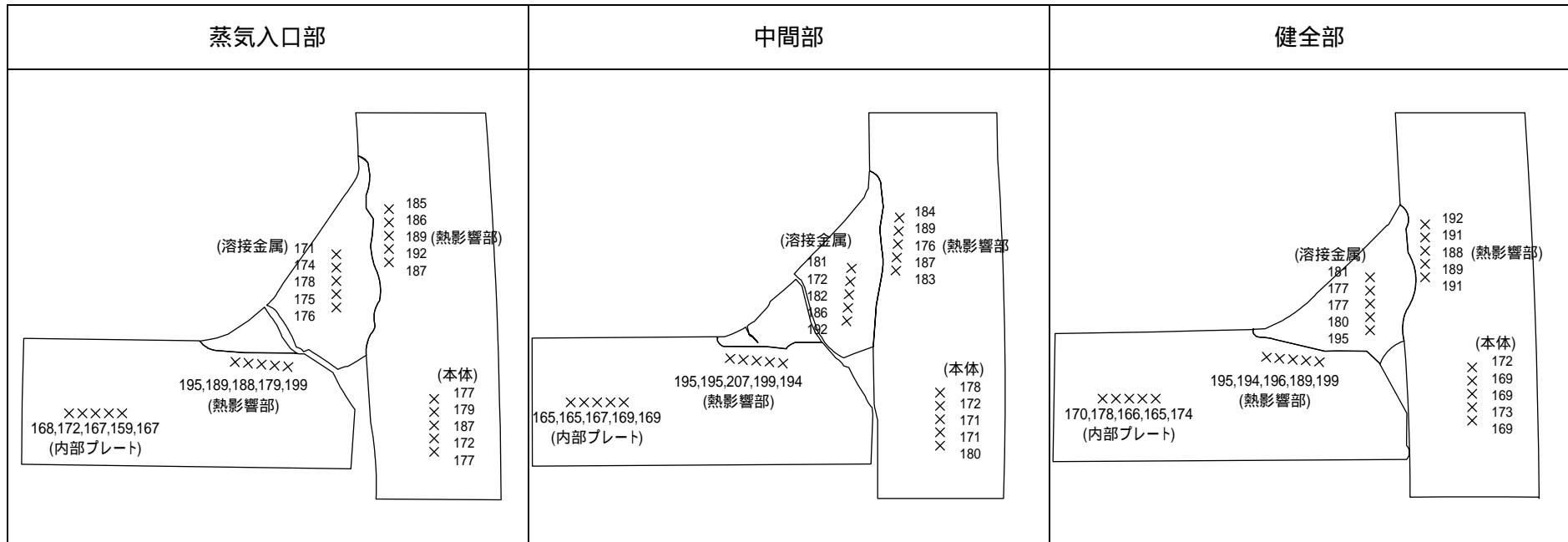
(単位: 重量%)

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

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

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

金属調査結果(硬度測定)(割れB部)



硬度測定結果(ビッカース硬さ)

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

硬さ換算表

ブリネル硬さ	ビッカース硬さ
200	210
209	220

(出典) JIS 鉄鋼 ハンドブック

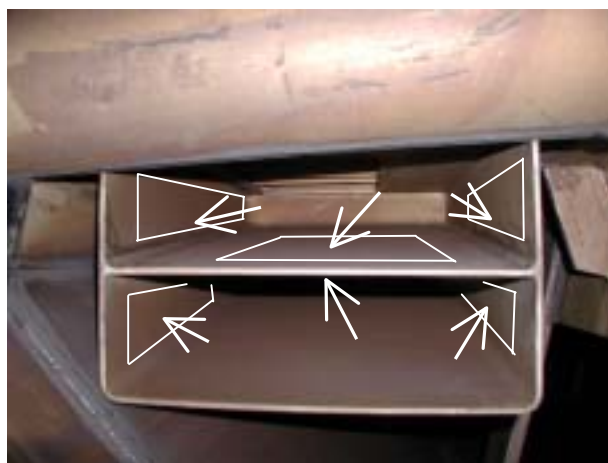
規格値(素材)

ブリネル硬さ	ビッカース換算
201 以下	211 以下

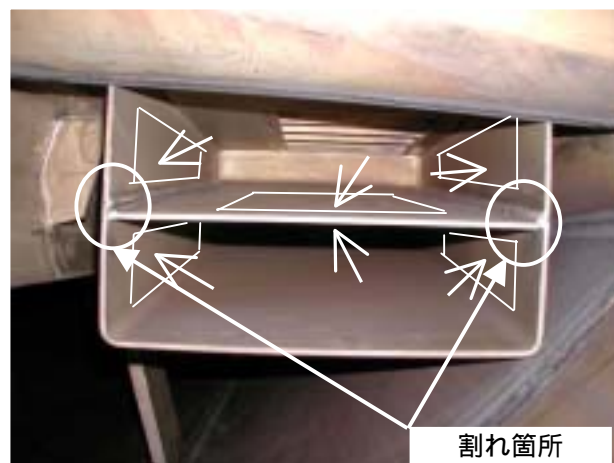
割れB部近傍の硬度を測定した結果、規格値に対して、問題となる硬化は認められなかった。

付着塩分量測定結果

測定箇所



左側蒸気整流板



右側蒸気整流板

測定結果

採取番号	試料採取箇所		付着塩分量 (mg as Cl/m ²)	判定値 (mg as Cl/m ²)
	右側 蒸気整流板	1段表面	1	100
		1段左側面	< 1	
		1段右側面	< 1	
		1段裏面	< 1	
		2段左側面	< 1	
		2段右側面	< 1	
	左側 蒸気整流板	1段表面	< 1	
		1段左側面	< 1	
		1段右側面	3	
		1段裏面	< 1	
		2段左側面	< 1	
		2段右側面	3	

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

疲労による割れの発生に関する評価

1. 目的

蒸気整流板の割れ発生部の詳細調査結果から、割れの発生要因として疲労によるものと推定されることから、蒸気整流板に作用する流体加振力による振動で発生する変動応力を算出し、疲労評価を実施する。

2. 検討項目

(1) 振動による変動応力の算出

a. 流体加振力算出

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

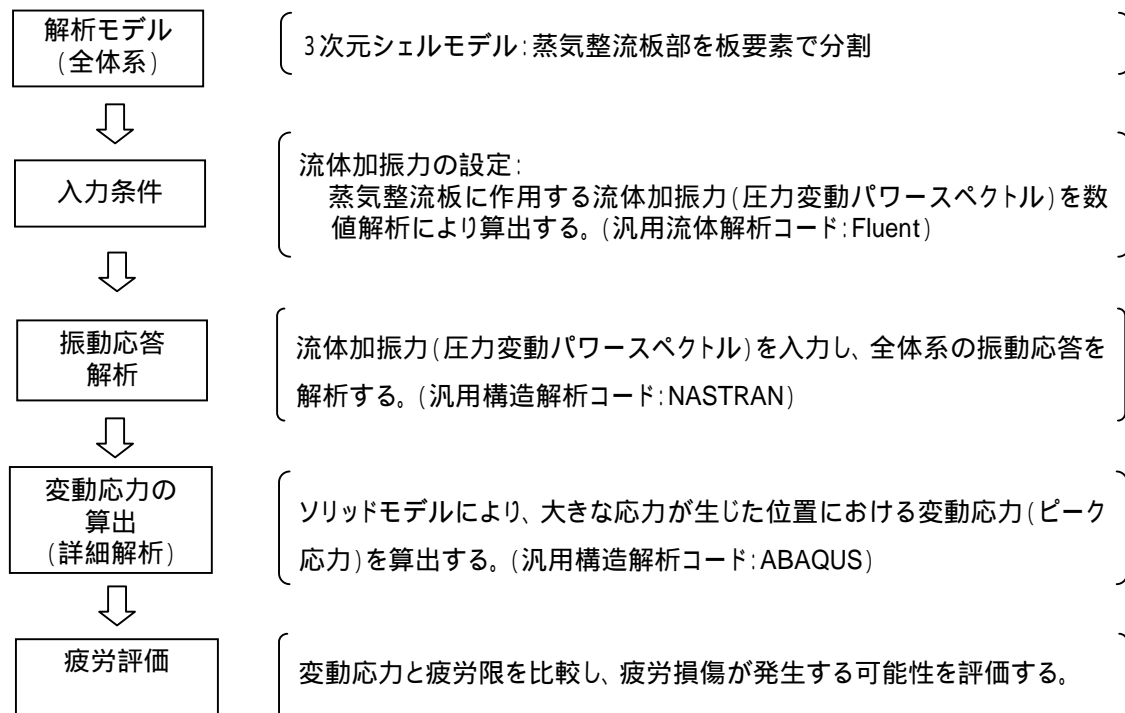
b. 変動応力算出

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

(2) 疲労評価

変動応力と疲労限を比較し、疲労損傷が発生する可能性を評価する。

[検討フロー]



3. 評価結果

(1) 解析モデル

蒸気整流板を対象に、3次元シェル（板）要素にてモデル化した。

拘束条件として、モデル上面（溶接部）を固定とし、本体と内部プレートとの溶接部の厚さは、溶込み不足によるのど厚の減小を考慮した。

解析モデル図を図1に示す。

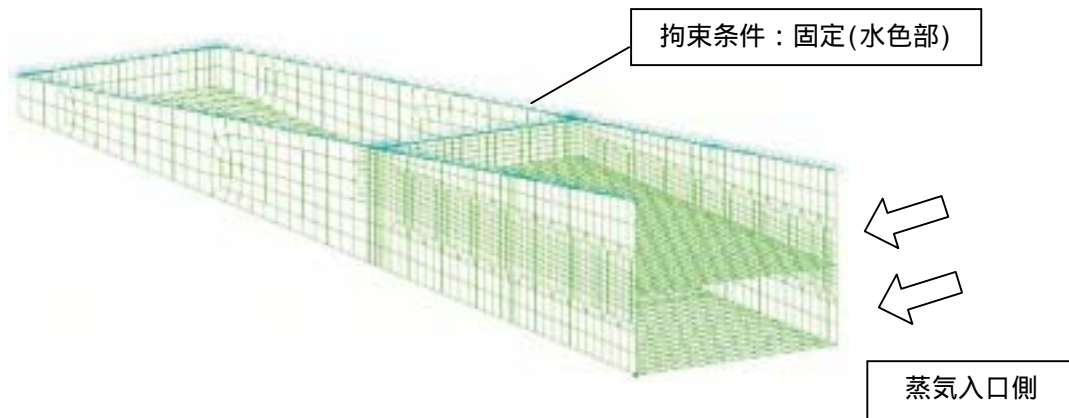


図1 解析モデル図

(2) 入力条件

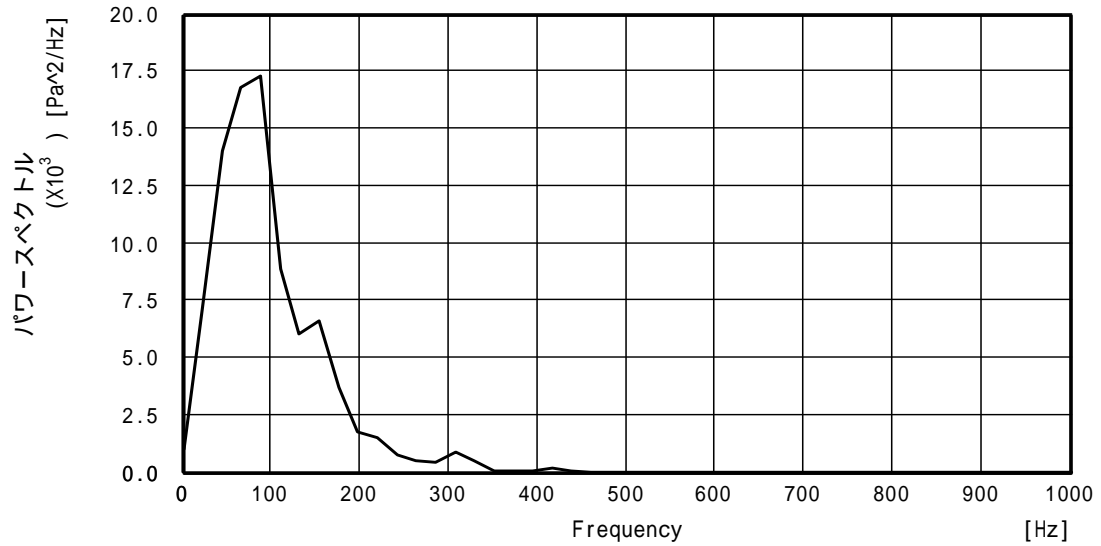
運転中、蒸気整流板には、蒸気の流れによるランダムな圧力変動が生じる。この圧力変動を算出するため、汎用流体解析コード（Fluent）を用いて非定常流れの数値解析を実施し、振動応答解析に用いる圧力変動パワースペクトルを算出した。

計算諸元を表1に、圧力変動パワースペクトルを図2に示す。

表1 流体解析における計算諸元

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

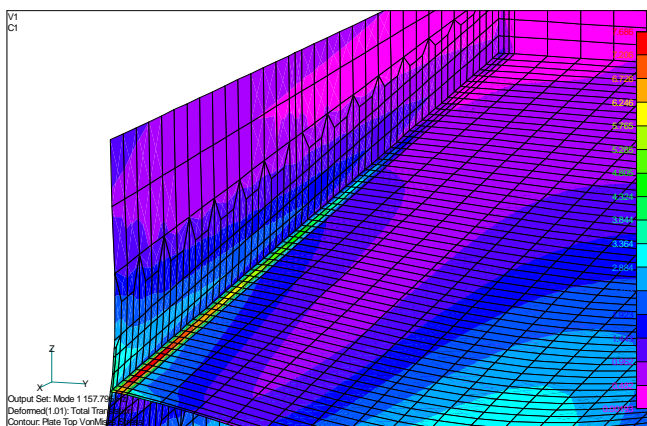
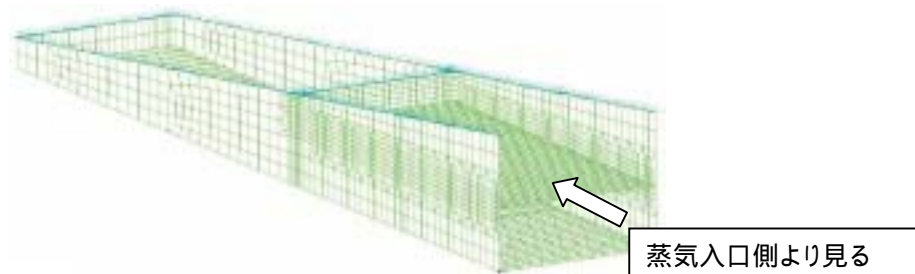
図2 圧力変動パワースペクトル



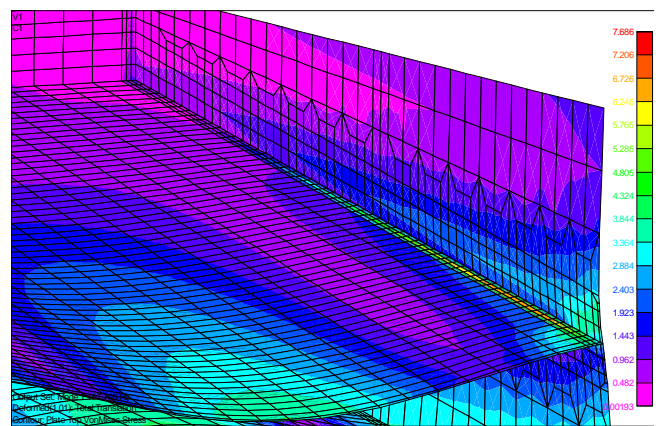
(3) 振動応答解析

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

応力コンター図 (無次元量) を図 3 に示す。



蒸気整流板左側



蒸気整流板右側

図3 応力コンター図(無次元量)

(4) 変動応力の算出

振動応答解析の結果、最も大きな応力が生じた位置(蒸気整流板左側、入口より 35mm) について、ソリッド要素でモデル化し、汎用構造解析コード (ABAQUS) により変動応力を算出した。

解析結果を図 4 に示す。

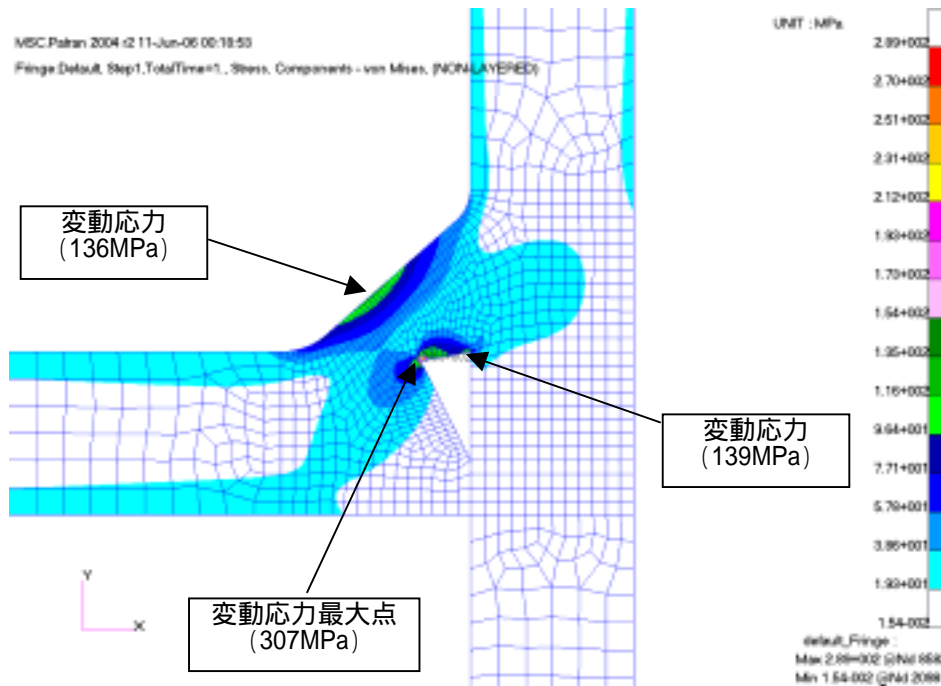


図 4 変動応力解析結果

(5) 疲労評価

算出された変動応力は疲労限を上回り、疲労損傷が発生し得ることを確認した。

評価結果を表 2 に示す。

表 2 疲労評価結果

変動応力(MPa)	疲労限(MPa)	疲労損傷の可能性
307	188	有

: 図 5 に示す疲労線図における繰返し数 10^{11} に相当する変動応力値

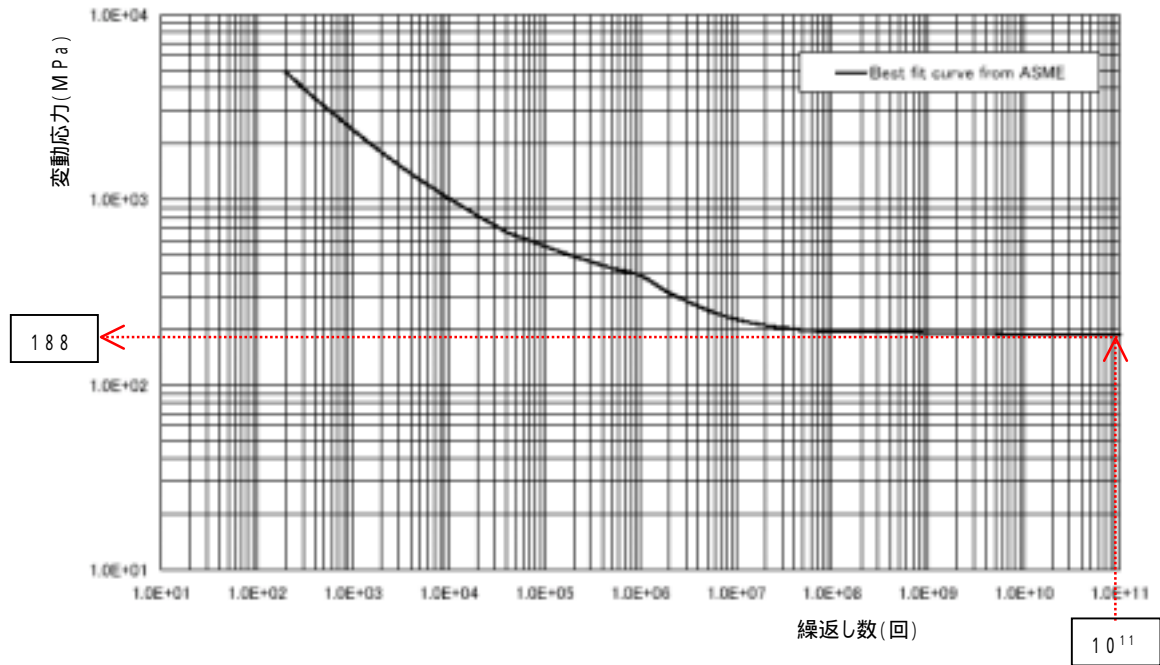
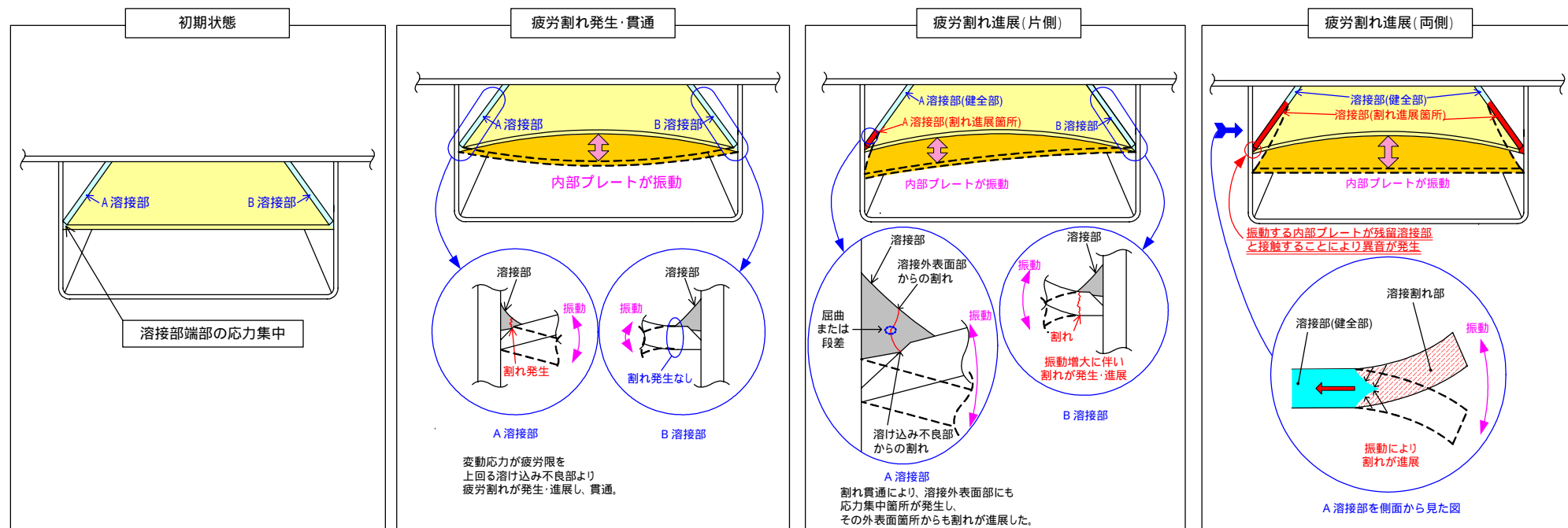
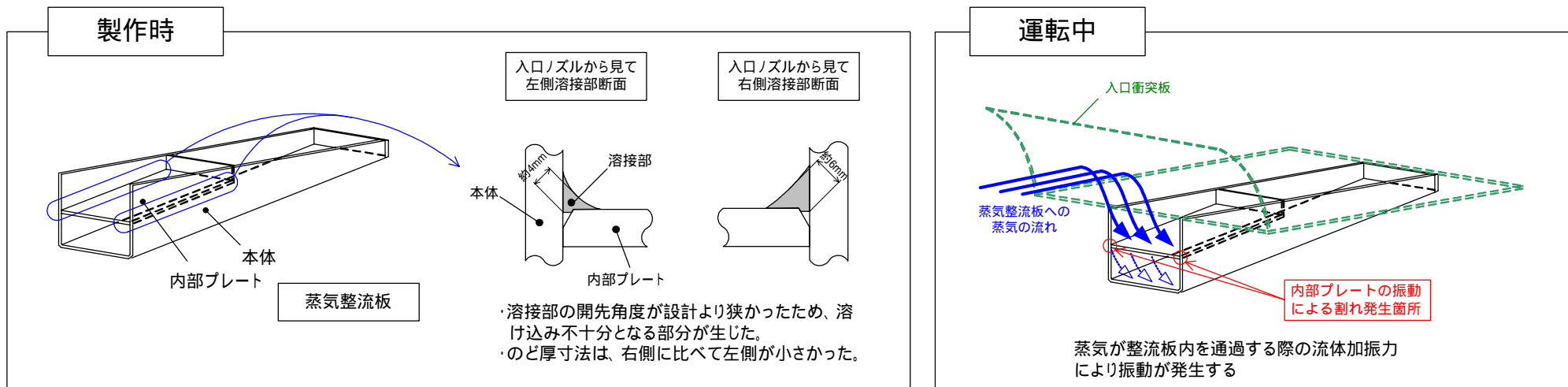


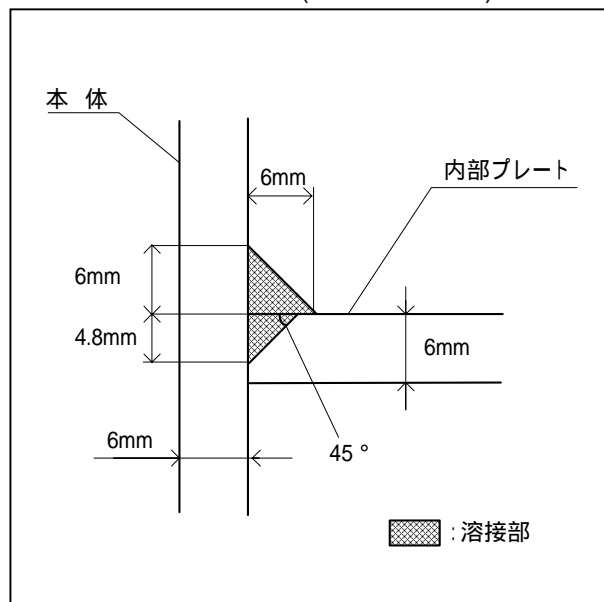
図5 疲労線図 (ASME Sec. Division 2 Best fit curve)
 (オーステナイト系ステンレス鋼)

事象発生 の 推定メカニズム



その他の同じ箇所の調査結果

溶接施工状況調査結果(製作履歴調査)



項目	内容	調査方法	結果
溶接方法 (非耐圧部)	レ形開先+すみ肉 連続溶接	製作図面 溶接施工記録等	問題なし
	炭酸ガスアーク溶接		
溶接材料	ステンレス鋼 (308L)	材料証明書	問題なし
非破壊検査	浸透探傷検査	浸透探傷検査記録	問題なし

:開先加工後の施工記録なし

外観点検(現地での点検)

溶接部の目視点検および浸透探傷検査

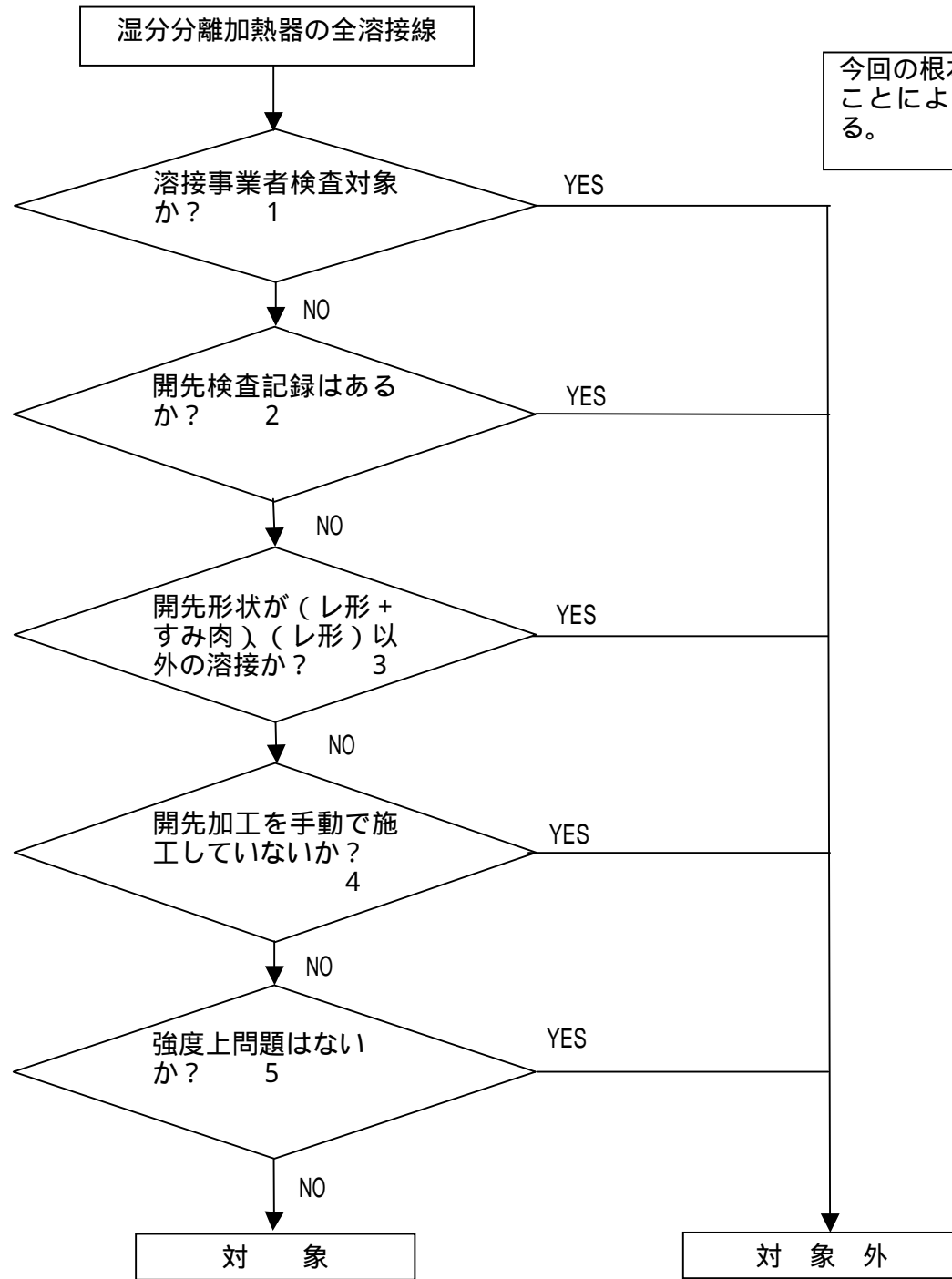
【製作履歴調査結果】

- ・溶接施工方法は、製作図面および溶接施工記録等により問題のないことを確認した。ただし、開先加工の状況は確認できなかった。
- ・溶接材料は、ステンレス鋼であり、材料は規格値を満足しており、問題のないことを確認した。
- ・溶接部は、浸透探傷検査を実施しており、問題のないことを確認した。

【現地での点検結果】

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

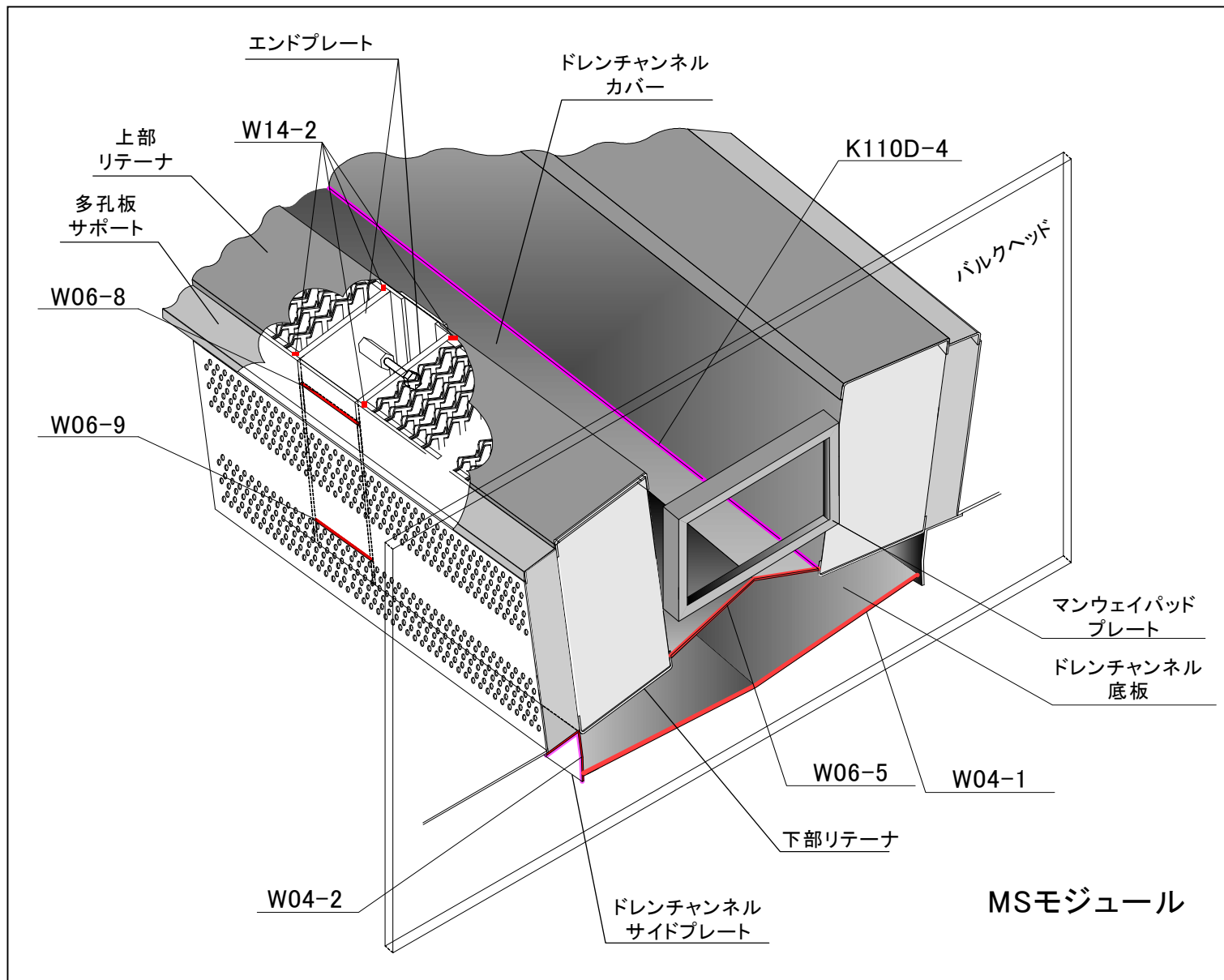
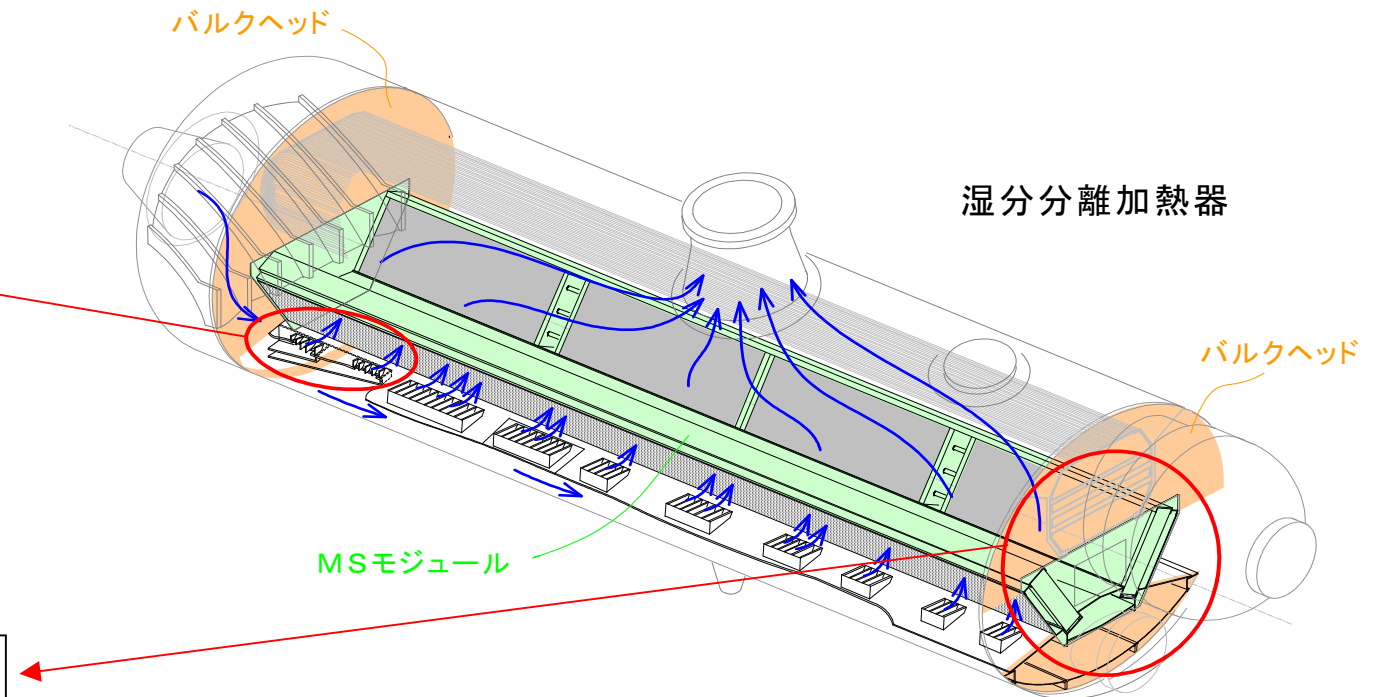
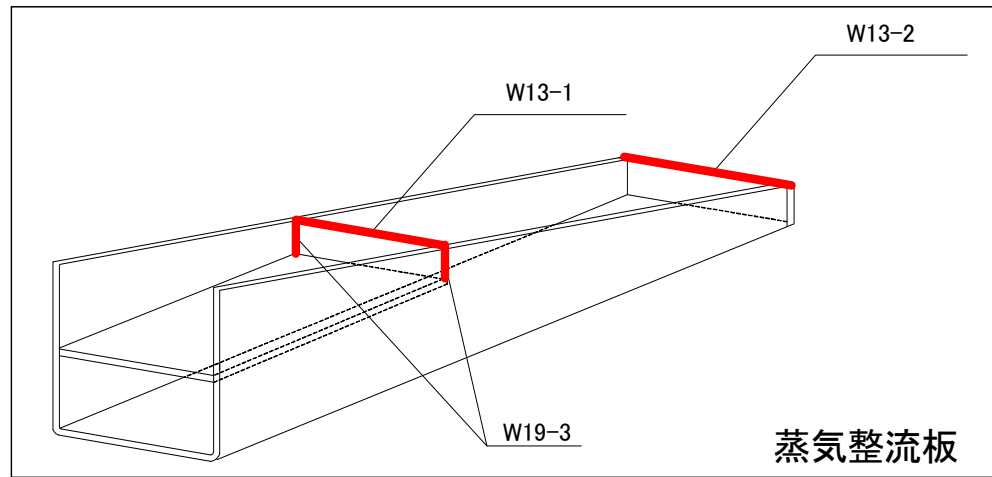
湿分分離加熱器の溶接部の健全性調査結果（類似箇所抽出フロー）



今回の根本原因は、開先角度が狭かったことによる溶接部の溶け込み不良である。

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

湿水分離加熱器溶接部の健全性調査結果（類似箇所抽出）



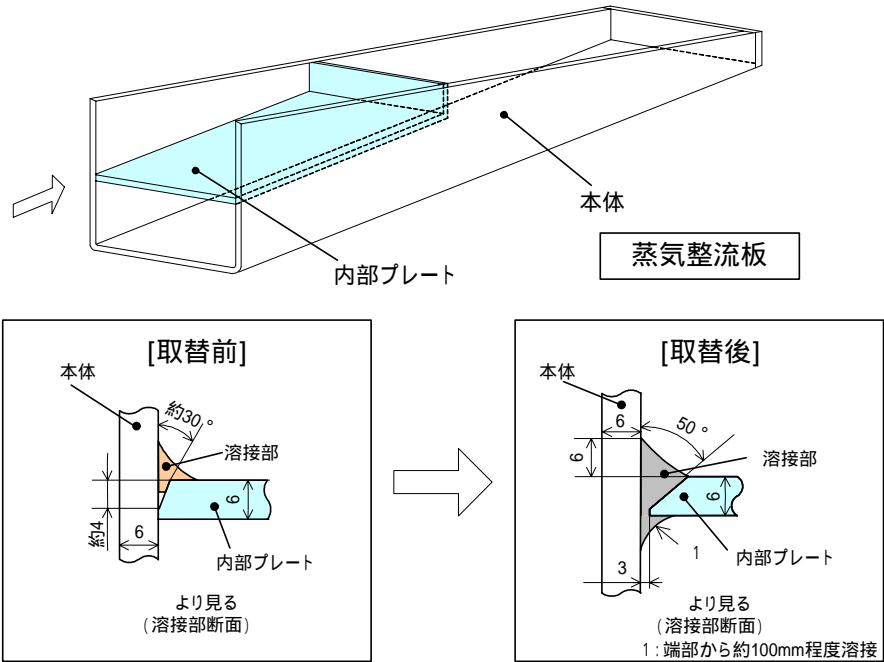
疲労評価結果

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

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

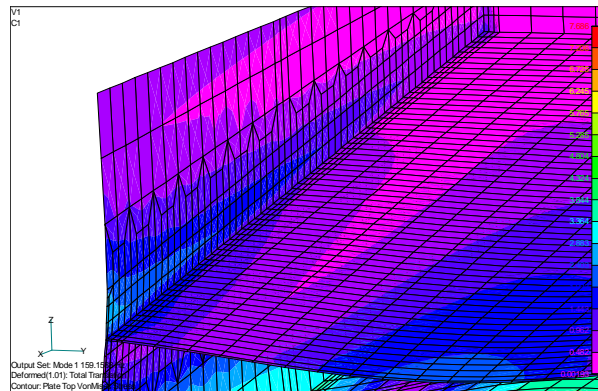
蒸気整流板復旧概要 (当該蒸気整流板)

1. 復旧概要図

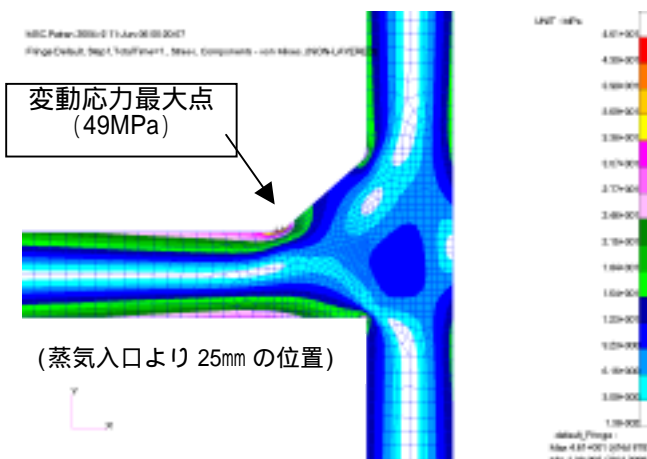


2. 強度評価

評価方法：添付資料 - 16「疲労による割れの発生に関する評価」による。



応力コンター図(無次元量)



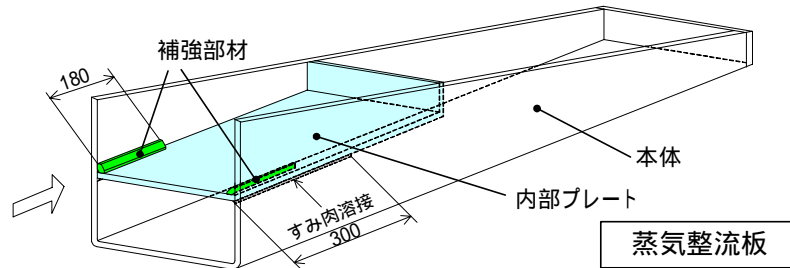
疲労評価結果

変動応力 [MPa]	疲労限 [MPa]
49	188

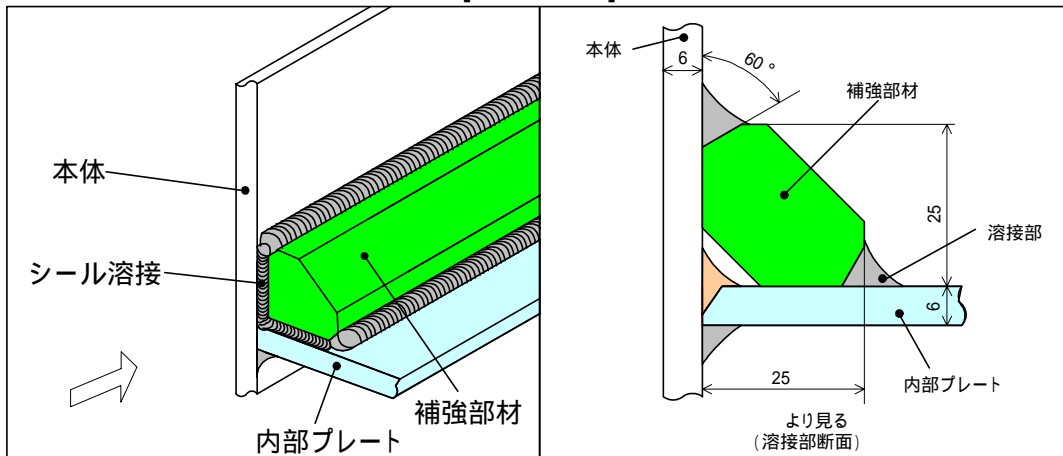
変動応力は疲労限以下であり、強度に問題はない。

蒸気整流板復旧概要(その他の蒸気整流板)

1. 復旧概要図



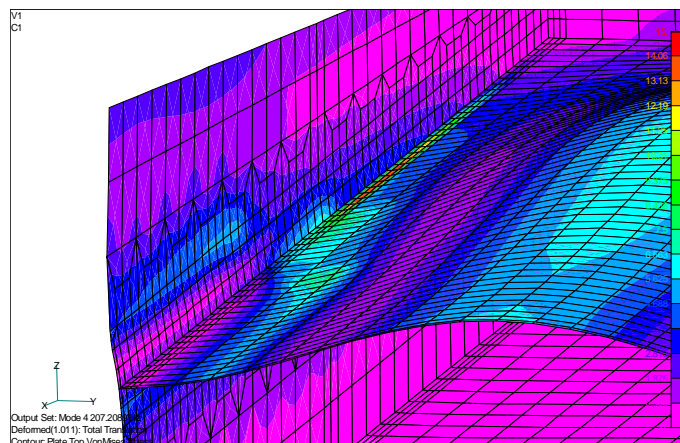
[補強後]



2. 強度評価

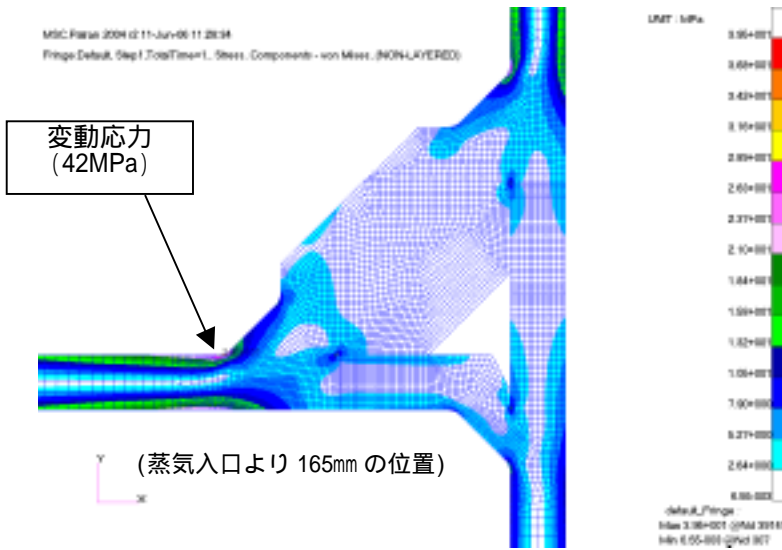
評価方法：添付資料 - 16「疲労による割れの発生に関する評価」による。

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



応力コンター図(無次元量)

補強部材箇所

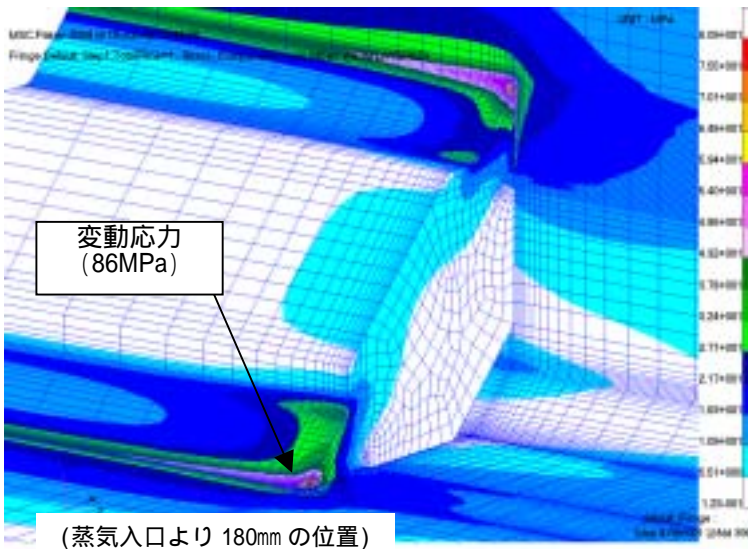


変動応力解析結果 (平坦部)

疲労評価結果

変動応力 [M P a]	疲労限 [M P a]
42	188

変動応力は疲労限以下であり、強度に問題はない。



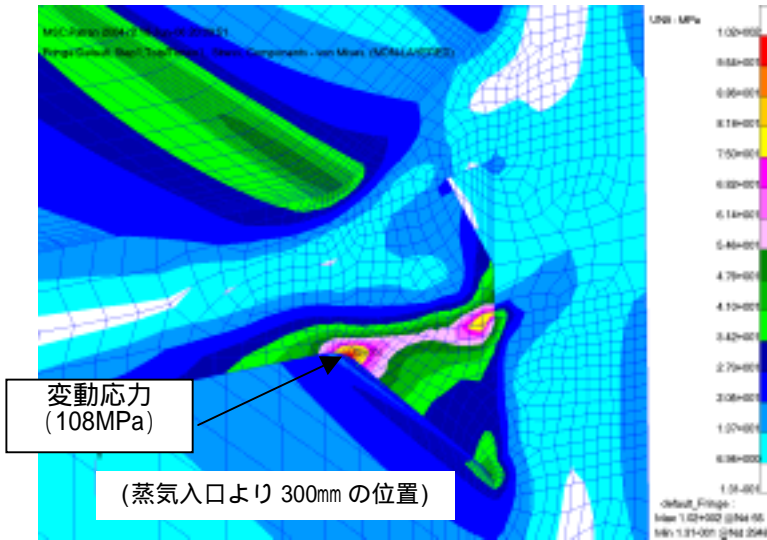
変動応力解析結果 (端部)

疲労評価結果

変動応力 [M P a]	疲労限 [M P a]
86	188

変動応力は疲労限以下であり、強度に問題はない。

すみ肉溶接箇所



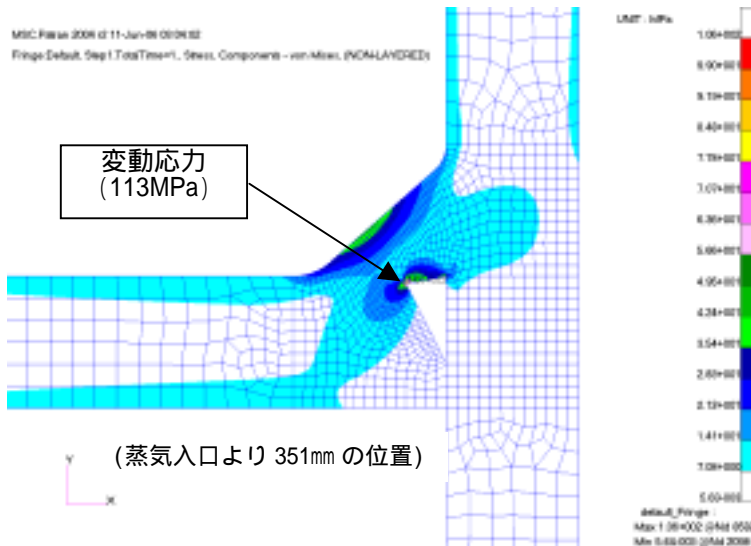
変動応力解析結果

疲労評価結果

変動応力 [MPa]	疲労限 [MPa]
108	188

変動応力は疲労限以下であり、強度に問題はない。

補強箇所以外



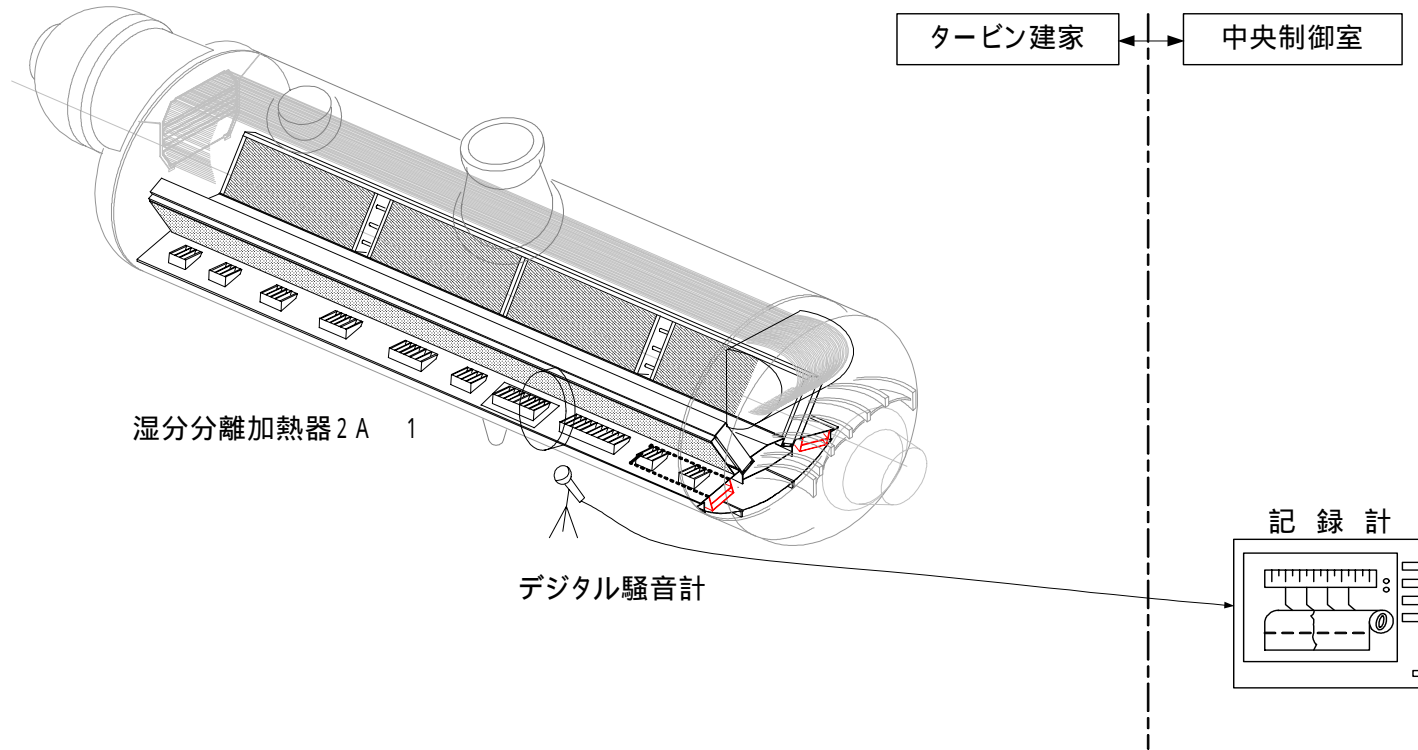
変動応力解析結果

疲労評価結果

変動応力 [MPa]	疲労限 [MPa]
113	188

変動応力は疲労限以下であり、強度に問題はない。

伊方2号機 音響監視装置構成計画図



1: 湿分離加熱器2B ~ 2Dについても同様に、異常音の監視を行う。

蒸気整流板が破損した場合の影響について

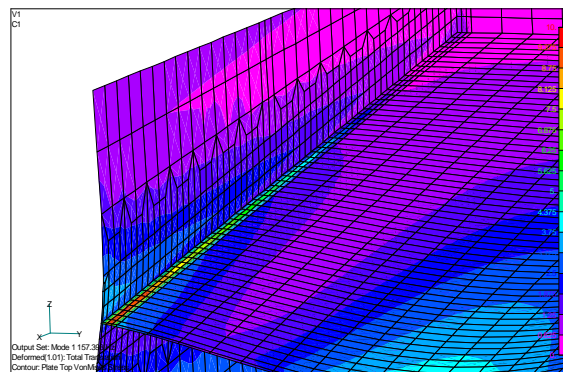
蒸気整流板溶接部に溶込み不良があり、疲労損傷が発生し蒸気整流板が破損した場合の影響を評価する。

1. 破損部の形状

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

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

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

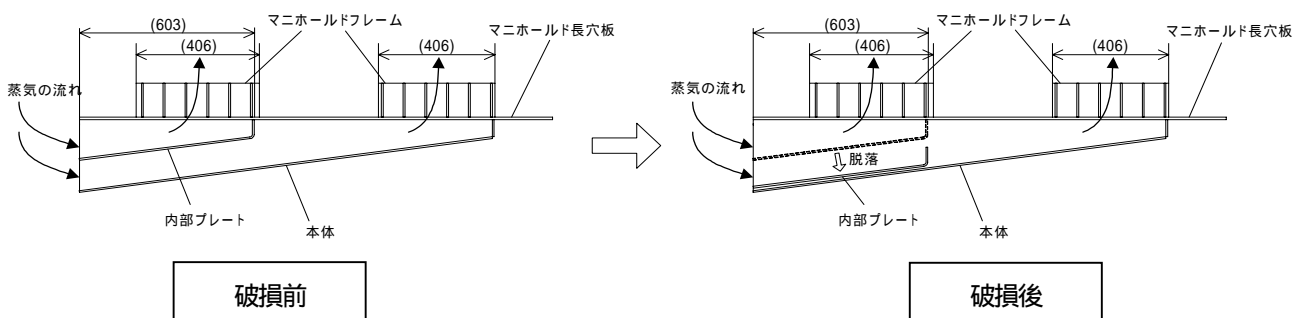


のど厚 3mm の場合の応力コンター図

2. 影響評価

(1) 破損部の挙動

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



(2) 破損部の移動を想定した場合の影響評価

a. 評価方法

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

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

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

b. 評価結果

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

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

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

以上