

平成11年 8 月 30 日
原子力安全対策課
(1 1 - 8 5)
<13時記者発表>

敦賀発電所 2 号機の 1 次冷却水の漏えいについて (原因調査状況)

このことについて、日本原子力発電株式会社から下記のとおり連絡を受けた。

記

敦賀発電所 2 号機（加圧水型軽水炉；定格出力 116.0 万 kW）は、7 月 12 日に発生した再生熱交換器連絡配管からの 1 次冷却水漏えいの原因調査を実施している。

<平成11年 7 月 12 日、13 日、16 日、19 日、22 日、8 月 2 日、12 日 記者発表済>

1. 発電所における調査状況

(1) 再生熱交換器本体の調査

- ・再生熱交換器（中段）の抽出側出口管台付近の本体胴について超音波探傷試験において、欠陥と判断される信号指示が内面で確認されたため、当該部を切断し、切断した胴および鏡板について内面の浸透探傷試験を実施した結果、胴内面に熱疲労割れに特有の亀甲状の指示が多数確認された。今後、切断した一部を試験施設に搬出し、外観観察等の詳細調査を実施する予定である。
- ・また、切断後、内筒第 2 支持リングと胴内側の間隙を測定した結果、上下方向、水平方向とも本体胴の内径に対して約 3 mm の間隙が計測された。

(2) 再生熱交換器下段の支持脚と架台の拘束状態の調査

- ・再生熱交換器下段の支持脚と架台の拘束状態の調査を行った結果、問題となる拘束はなく、支持脚はほぼ予測どおり移動することが確認された。

2. 試験施設での調査状況

- ・当該エルボおよび管台から引張り試験片を切出し、試験を実施した結果、耐力等の機械的性質は規格値内に入っており、異常のないことが確認された。
- ・管台サーマルスリーブは、周方向で内面の色合が異なっていたことから、

酸化膜厚さを測定した結果、酸化膜厚さに有意な差があることが認められた。このことから、サーマルスリーブの周方向で温度が異なっていた可能性があると考えられる。

3. 流動模擬試験、解析評価等の概要

これまでの調査の結果、今回の損傷原因は、熱疲労割れであると推定される。このため、損傷部には、定常的に作用する「平均応力」と温度変動で生じる「変動応力」が作用していたことが考えられ、平均応力については、応力解析や実測値から評価し、変動応力については、破面観察の結果や再生熱交換器内部の流動状況を模擬した試験の結果等を踏まえ、解析評価を実施している。

- ① 上段熱交換器から流れ込んだ抽出水（約 250℃）は、内筒内を流れる主流と、内筒支持リングと胴本体との隙間を流れるバイパス流とに別れ、下段側への出口部で合流（約 200℃）し、連絡配管内を流れ込む。バイパス流の比率は、実際の運転データ等から約40%（設計目標値約23%）と評価され、合流部の主流とバイパス流との温度差は約80℃（設計目標値約65℃）と評価された。

- ② 現在、再生熱交換器内部の流動模擬試験を実施中であるが、これまでに実施した予備的試験の結果では、バイパス流が存在するため抽出水出口付近に温度変動（高温水と低温水が混合する際の温度ゆらぎ）が認められている。

また、バイパス流の流れにより、再生熱交換器胴に対し内筒支持リングを下に偏心した状態では、胴内部下部に低温領域が生じ、上に偏心した状態では、低温領域が解消されるという現象が確認され、再生熱交換器内部の流動状況についても内筒支持リングの上下位置によって異なることが確認されている。

このことから、内筒支持リングが再生熱交換器胴本体に対し下に偏心すると、低温領域が生じて胴本体が熱変形するが、これにより、内筒支持リングが上に偏心していくことで、低温領域が解消され、胴本体の変形が元に戻り、内筒支持リングが再度下に偏心することが考えられる。すなわち、胴本体の変形により、内筒支持リングが胴本体に対して上下に繰り返し偏心することにより流動状況が変化し、温度分布が変化（スイッチング現象）したと推定されている。

- ③ 今後、バイパス流量や内筒支持リングの隙間を変化させて試験を実施し、再生熱交換器内部の流動状況の確認や各部の温度計測を実施する。また、模擬試験でのデータをもとに、さらに詳細な熱流動解析、応力解析、熱変形解析、疲労解析等を実施し、再生熱交換器内部で発生する温度変動（スイッチング現象）やその結果生じる各部の変動応力を評価するとともに、

今回のような損傷が発生し得るか、検討、評価する。

4. 再発防止対策についての検討

現在進めている原因調査結果を踏まえ、以下の項目等について再発防止対策の検討を行う。

- ・設計・施工 … 大きな温度変動が発生しにくい構造への改善等
- ・保守 … 亀裂の早期発見方法（点検・検査の充実等）
- ・運転管理 … 漏えい量を最小限化するための運転方法（漏えい箇所絞り込みのための監視方法の充実等）
- ・技術開発の推進 … 検査技術の高度化等

5. 今後の方針

再生熱交換器一式については、今後の原因調査を踏まえ、新しく設計・製作したものに取替えることとし、本年12月から予定している第10回定期検査については、開始時期を早めて実施する計画である。

敦賀発電所 2 号機の原因調査・解析状況について

本報告は、「損傷原因調査計画の全体概要」（別添 1）及び「再生熱交換器抽出側配管損傷要因分析図」（別添 2）に基づき実施している当該エルボ及び上流側管台の詳細調査結果、解析評価、流動模擬試験の予備的試験の実施状況等について取りまとめた。

1. 発電所における再生熱交換器に関する調査

(1) 再生熱交換器胴本体の超音波探傷試験等

再生熱交換器中段の抽出側出口管台付近の再生熱交換器胴について超音波探傷試験を実施した結果、5 箇所領域に指示が認められた。中段熱交換器胴はその後切断し、切断した胴及び鏡板について内面の浸透探傷試験を実施した結果、胴内面に熱疲労割れに特有の亀甲状の指示が多数認められた。また切断後、内筒第二支持リングと胴内側との間隙を測定した結果、上下左右とも直径で約 3 mm であった。

なお、再生熱交換器上段及び下段の抽出側出口管台付近の胴について超音波探傷試験を実施した結果、指示は認められなかった。

(2) 再生熱交換器下段支持脚と架台の拘束状態調査

再生熱交換器下段支持脚（摺動側）の拘束状態を確認するため、熱膨張による方法と油圧ジャッキによる方法で支持脚に荷重を加えた結果、支持脚が移動することを確認した。また、支持脚の締付けボルトの状態を確認した結果、過大締付け等の異常は無かった。

2. 民間調査機関等での調査

(1) 破面に関する調査

①再生熱交換器と同じ材質である SUS 316 について疲労試験を行い、き裂伝播速度と疲労破面の関係を観察した結果、き裂伝播速度が比較的遅い場合に損傷エルボ部の破面に認められた組織状模様等が生じることが確認された。

冷却材の漏えいに至った貫通割れは、定期検査時期に対応すると推測されるビーチマークが 8 本観察されていること等から、比較的長時間かかって割れが貫通に至ったと考えられる。

②貫通割れの破面の酸化膜厚さを測定した結果、割れの先端に行くに従って酸化膜は徐々に薄くなっていることがわかった。

(2) 引張り試験

当該エルボ及び管台から引張り試験片を切出し、試験を実施した結果、耐力等の機械的性質は規格値内に入っており、異常のないことがわかった。

(3) 管台サーマルスリーブに関する調査

当該エルボの上流側管台サーマルスリーブは、周方向で内面の色合が異なっているため、酸化膜厚さを測定した結果、酸化膜厚さに有意な差があることが認められた。このことから、サーマルスリーブの周方向で温度が異なっていた可能性があると考えられる。

3. 損傷要因分析の結果

これまで実施してきた敦賀発電所における調査や民間調査機関における破面調査等の結果を踏まえて検討評価した結果、今回の損傷は高サイクル熱疲労によるものである可能性が高いと考えられる。

4. 解析評価等

(1) 解析評価の考え方

- ①今回の損傷原因は、熱疲労割れであると推定されることから、当該部には、定常的に作用する「平均応力」と温度変動で生じる「変動応力」が作用していたことが考えられる。
- ②この「平均応力」と「変動応力」を区分して、それぞれ検討する。
- ③平均応力については、応力解析や実測値から評価する。
- ④変動応力については、破面観察の結果や再生熱交換器内部の流動状況を模擬した試験の結果等を踏まえ、熱流動解析、応力解析、熱変形解析、疲労解析、亀裂進展解析等を実施し、評価していく。

(2) 平均応力について

- ①定常的に作用する「平均応力」としては、下記が考えられる。
 - a. 圧力、熱によって生じる運転応力（運転応力）
 - b. スライド脚の拘束によって生じる応力（拘束応力）
 - c. 建設時の据付けによって生じる応力（据付応力）
 - d. 素材製造時の残留応力（素材/溶接残留応力）
- ②運転応力は、運転圧力と温度から有限要素法を用いた応力解析によって求める。
- ③拘束応力及び据付応力は、現地調査の結果を用いて、応力解析によって求める。
- ④素材/溶接残留応力は、実機のみでなく、同じ製造方法で製造されたものからデータを採取し、それらを踏まえて評価を行う。

(3) 変動応力について

- ①変動応力の発生メカニズムを確認するため、また、この変動応力の作用を前提とした疲労解析の妥当性を検証するため、再生熱交換器内部の流動模擬試験を実施中である。これまでに実施した予備的試験の結果では、バイパス流が存在するため抽出水出口付近に温度変動が認められること等が確認されている。特に、再生熱交換器胴に対し内筒支持リングを下に偏心させると、胴内部のバイパス流に低温領域が生じ、上に偏心させると、低温領域が解消されるという現象が、

また、内筒支持リングの上下位置によって再生熱交換器内部の流動状況が異なることなどが確認されている。

なお、実機データ等からバイパス流の評価を行ったところ、バイパス流量は約40%（設計目標値約23%）であり、主流とバイパス流の温度差は約80℃（設計目標値約65℃）であった。

これまでの試験結果から

- a. 内筒支持リングが下偏心すると、低温領域が生じて再生熱交換器胴の上下に温度差が生じ、胴本体が熱変形する。
- b. 胴本体が熱変形し、内筒支持リングが上偏心の状態に近づくと、低温領域が解消される。これにより、胴本体の変形が元に戻り、内筒支持リングが再度下偏心する。

となることが考えられる。すなわち、胴本体の変形により内筒支持リングが下偏心している場合と上偏心している場合が交互に生じ、これにより流動状況が変化し、温度変化（スイッチング現象）を与えると推定されるので、今後、詳細な流動模擬試験や解析評価を実施していく予定である。

- ②破面観察の結果、貫通に至った割れ等には明瞭なビーチマークが観察されている。このビーチマークの寸法をもとに、破壊力学を用いて変動応力を評価することが可能と考えられるので、今後、詳細検討を行う。

5. 運転履歴調査結果

敦賀発電所2号機の化学体積制御系再生熱交換器を含む充てん・抽出系統に関して、運転開始から平成11年7月（再生熱交換器からの漏えい発生）までの運転履歴について、運転関係記録類を対象に調査を行った。

調査の結果、充てん・抽出系統に対し、温度・圧力の急激な変化を与える異常・故障事象の実績はなかった。また、運転状態における温度・圧力の変化状況は、通常運転範囲であった。

6. 今後の主な調査計画

(1) 再生熱交換器胴本体の調査

再生熱交換器中段の胴からUT指示の最大エコー部1箇所を切断し、民間調査機関へ移送して詳細調査する。

(2) 解析評価

流動模擬試験で得られたデータを用いて、さらに詳細な熱流動解析、応力解析、熱変形解析、疲労解析等を実施し、再生熱交換器内部で発生する温度変動（スイッチング現象）やその結果生じる各部の熱応力を評価するとともに、今回のような損傷が発生し得るか、検討、評価する。

(3) 流動模擬試験

バイパス流量や内筒支持リングの隙間を変化させて試験を実施し、再生熱交換器内部の流動状況の確認や各部の温度計測を実施し、解析評価のデータベースとする。

7. 再発防止対策についての検討

現在進めている原因調査結果を踏まえ、以下の項目等について再発防止対策の検討を行う。

(1) 設計・施工

大きな温度変動が発生しにくい構造への改善等

(2) 保 守

亀裂の早期発見方法（点検・検査の充実等）

(3) 運転管理

漏えい量を最小限化するための運転管理面の見直し（漏えい箇所絞り込みのための監視方法の充実等）

(4) 技術開発の推進

検査技術の高度化等

以 上

損傷原因調査計画の全体概要

1. 製造履歴調査

- (1)再生熱交換器、エルボ、連絡配管の製造履歴
- (2)設計、製作、構造、材料、製造プロセス、等
- (3)施工プロセス等

2. 運転履歴調査

- (1)今回漏えい発生前後の運転パラメータ挙動調査
- (2)過去の運転履歴調査

3. 保修履歴調査

- (1)点検履歴調査
- (2)保守履歴調査

4. 損傷メカニズム調査

- (1)現地調査
 - 外観調査、寸法調査、拘束測定、等
- (2)ラボ調査
 - 破面調査、ミクロ組織観察、残留応力測定、等

5. 解析評価

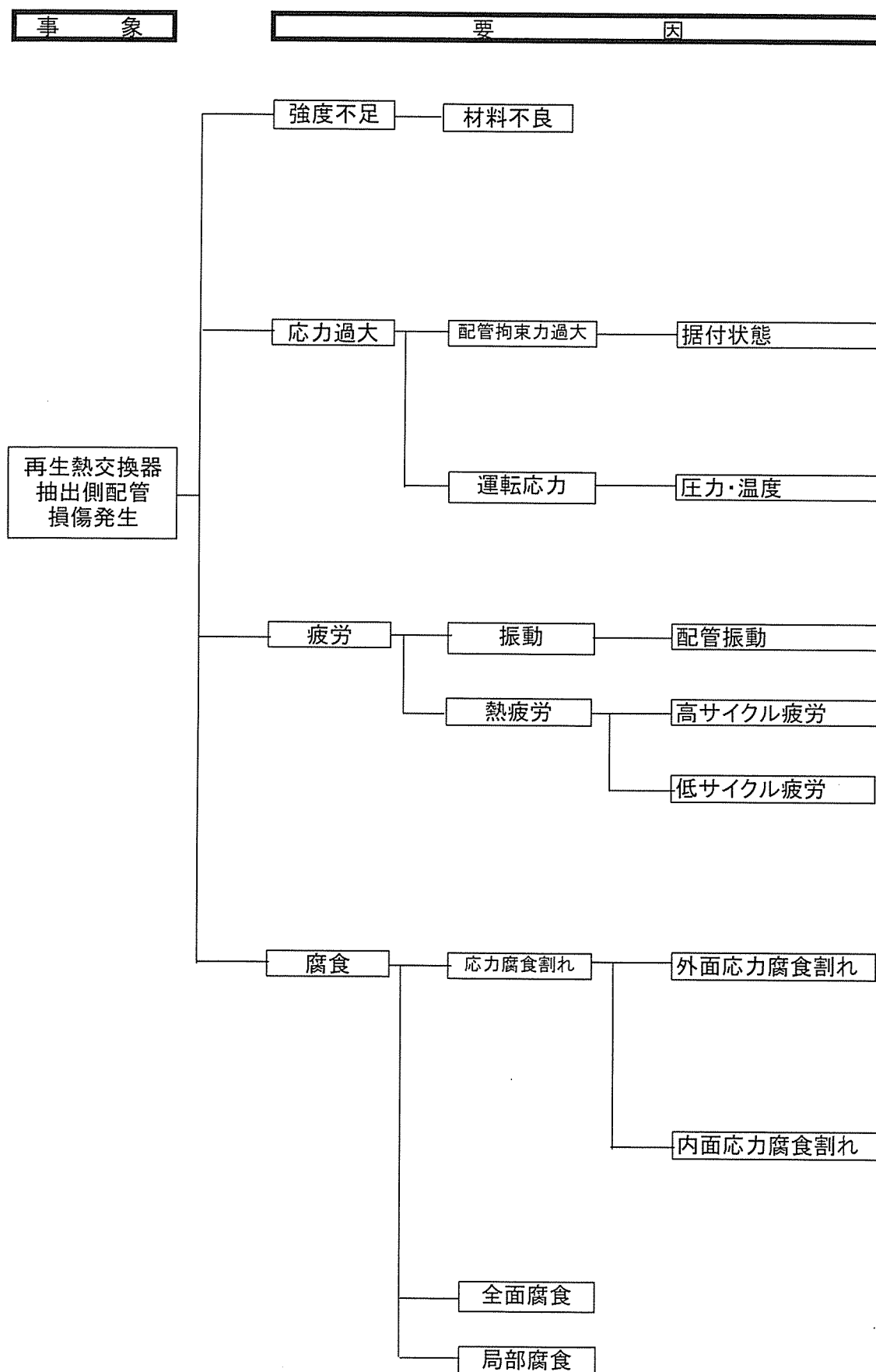
- (1)通常運転時発生応力評価
- (2)連絡配管拘束条件下での応力評価
- (3)疲労評価
- (4)疲労き裂進展解析
- (5)振動解析

6. 過去の事象との比較検証

7. 推定原因に関する検討評価

- 1～6を踏まえた推定原因に関する総合評価

再生熱交換器抽出側配管損傷要因分析図



添付資料リスト

資料1 発電所における再生熱交換器に関する調査

- (1) 再生熱交換器中段超音波探傷試験結果
- (2) 再生熱交換器中段胴部の浸透探傷試験結果
- (3) 再生熱交換器中段胴部の外観観察結果
- (4) 再生熱交換器中段胴鏡部の外観観察および浸透探傷試験結果
- (5) 再生熱交換器中段胴部内筒支持リング間隙測定結果
- (6) 再生熱交換器上段及び下段の超音波探傷試験結果
- (7) 再生熱交換器摺動側支持脚拘束状態調査結果

資料2 民間調査機関等での調査

- (1) SUS316のストライエーション間隔、き裂伝播速度と ΔK の関係
- (2) 当該エルボD部の割れaの破面上の酸化皮膜厚さ測定結果
- (3) エルボ及び管台引張試験結果
- (4) サーマルスリーブ内面観察及び酸化皮膜厚さ測定結果

資料3 損傷要因分析の結果

- (1) 再生熱交換器連絡配管損傷要因分析図

資料4 解析評価等

- (1) 割れ評価アプローチについて
- (2) 再生熱交換器の構造・設計について
- (3) 流動模擬試験について

資料5 運転履歴調査結果

発電所における再生熱交換器に関する調査

再生熱交換器中段

超音波探傷試験結果

1. 超音波探傷試験範囲

再生熱交換器中段 第1支持リングと第2支持リング間の胴本体全面
(但し、当板部を除く。)

2. 超音波探傷試験方法

供用期間中検査にて規定されている方法に準じ実施した。

(1) 探触子

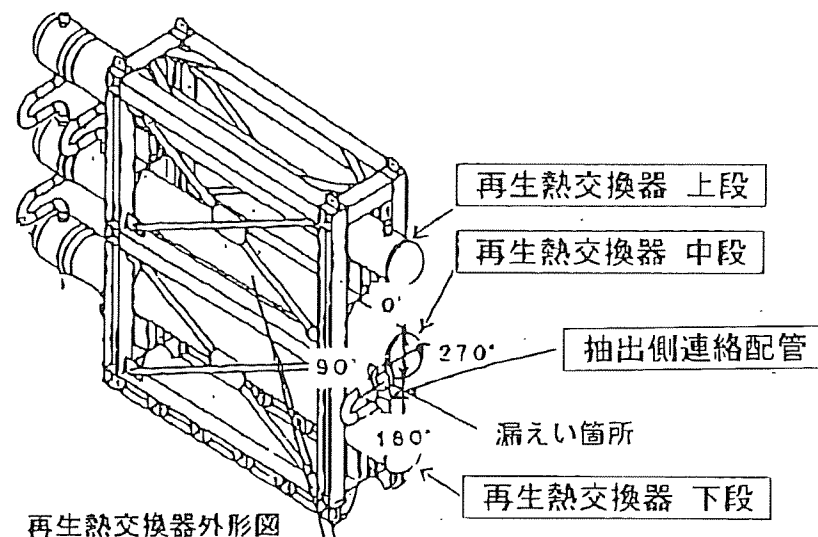
斜角 (45°)

(2) 基準感度

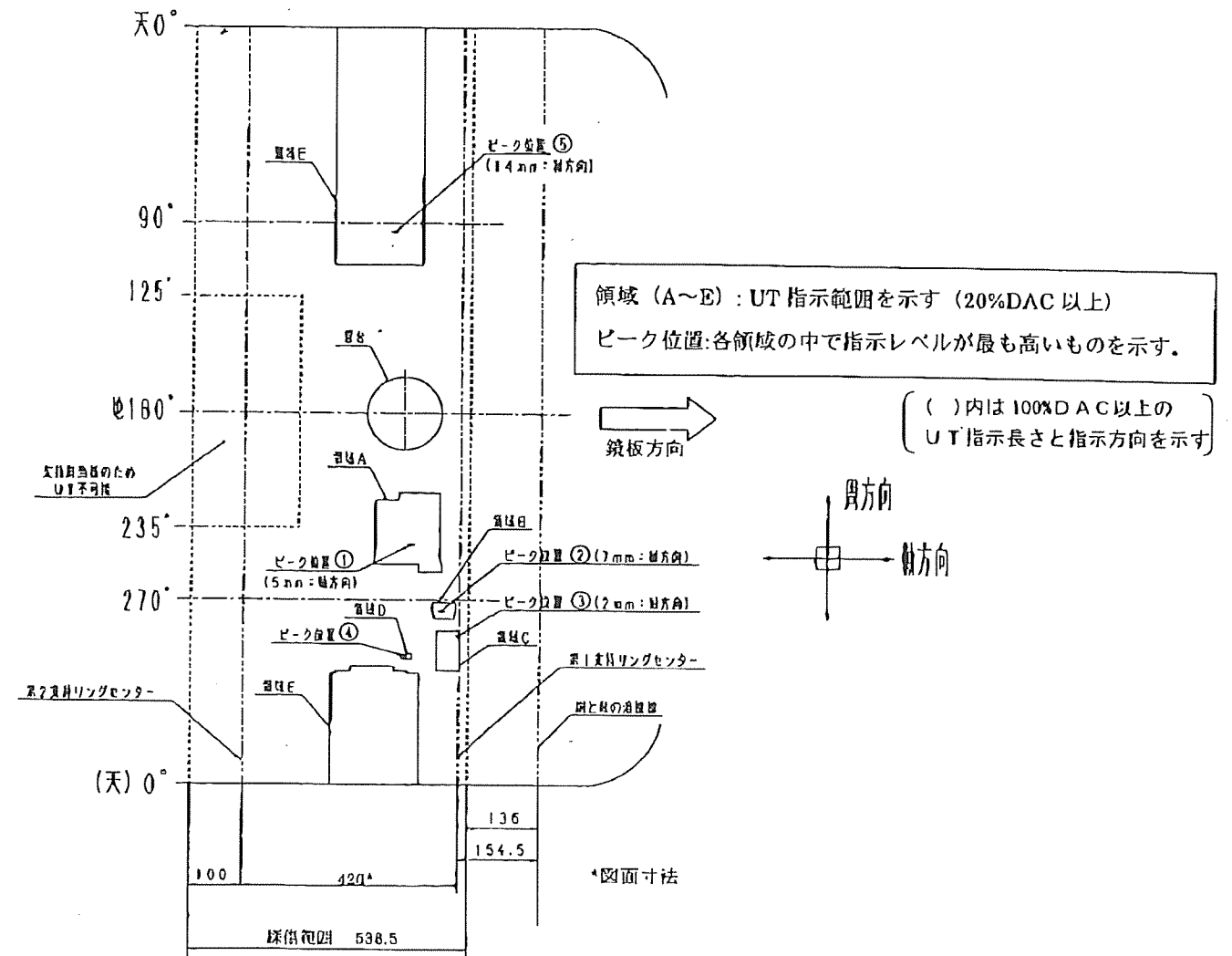
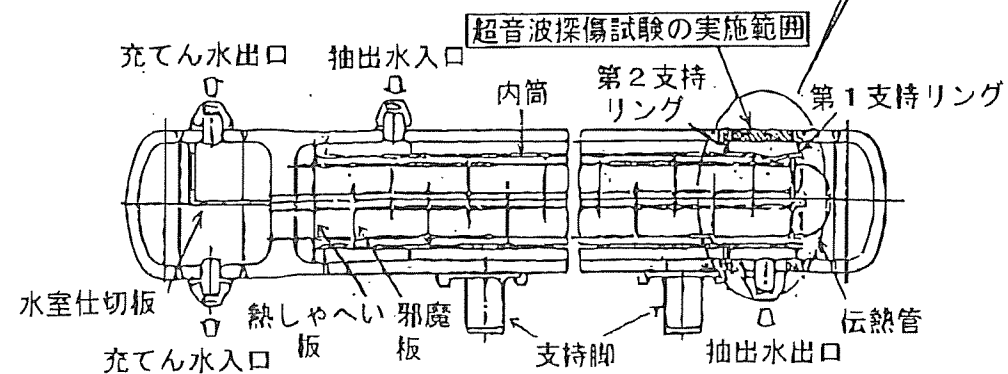
J A E G 4 2 0 7 (軽水炉型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験指針) に
基づき感度調整を行った。
(基準欠陥 3.2 mm 直径の丸穴)

(3) 探傷方法

周方向、軸方向について、それぞれ2方向より探傷



再生熱交換器 中段



3. 探傷結果

5つの領域 (A~E) に、有意な指示が確認された。

それぞれについては詳細確認の結果ひびと判断され、その方向は下表のとおり。

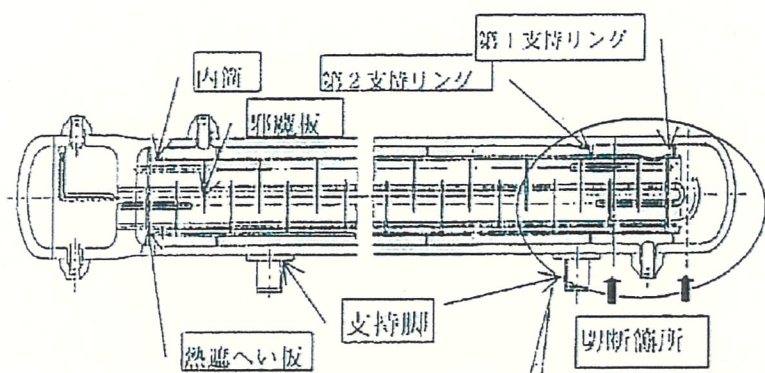
領域	検出指示方向
A	軸方向
B	軸方向
C	軸方向
D	軸方向
E	周方向及び軸方向が混在

(備考) 有意な指示レベルとは、J E A G 4 2 0 7 (軽水炉型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験指針) に準じ、20%DAC (注1) を超えるものを採用した。

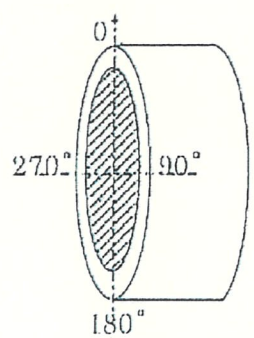
注1: DACとは、距離-エコー高さ補正曲線のことであり、有意な指示かどうかを判る基準となっているものである。

第3種機器では50%DACを超える指示を記録することが規定されているが、今回はより厳しく第1種機器の規程である20%DAC以上としている。

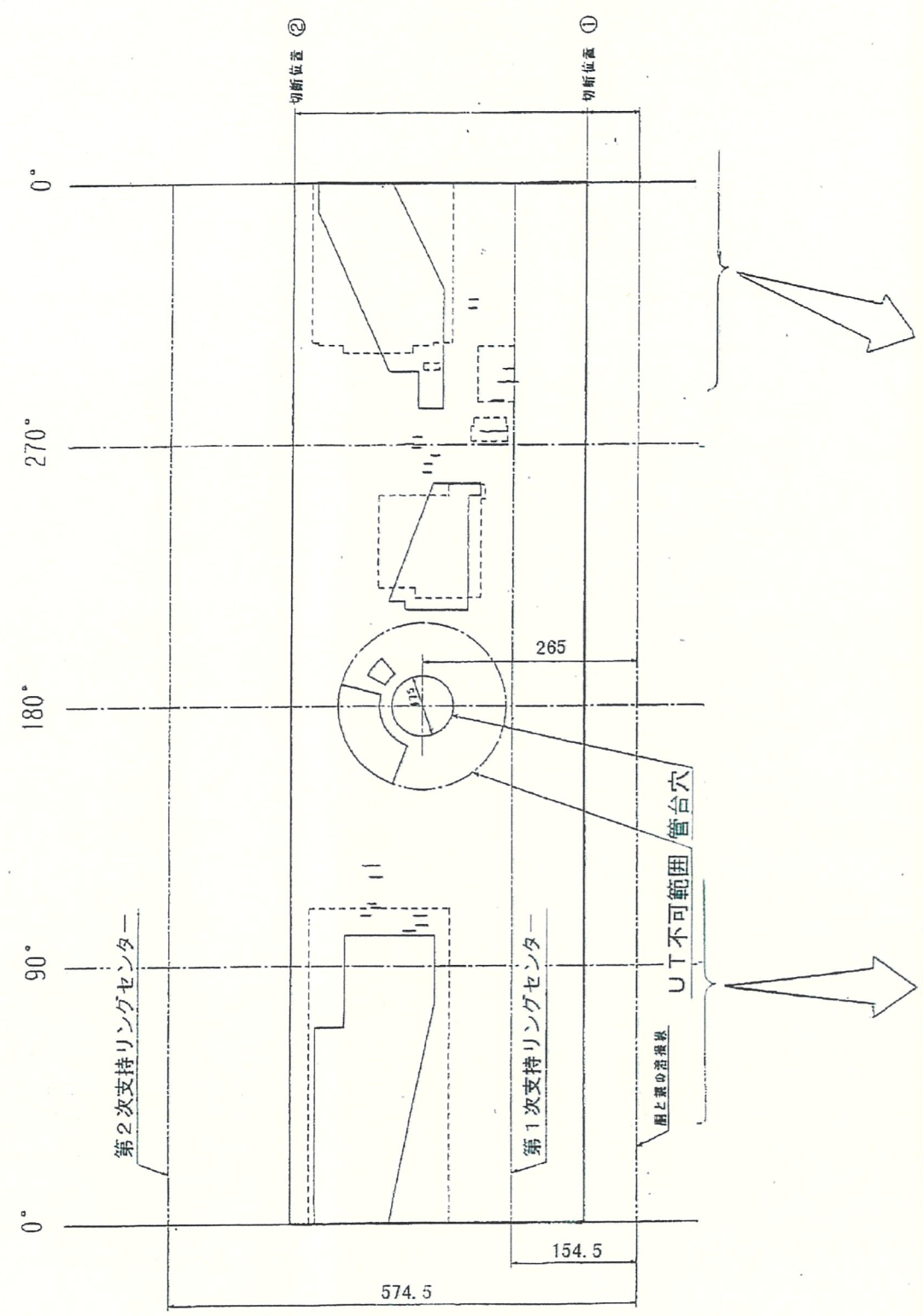
再生熱交換器中段胴部の浸透探傷試験結果



胴部切断



部：試験範囲

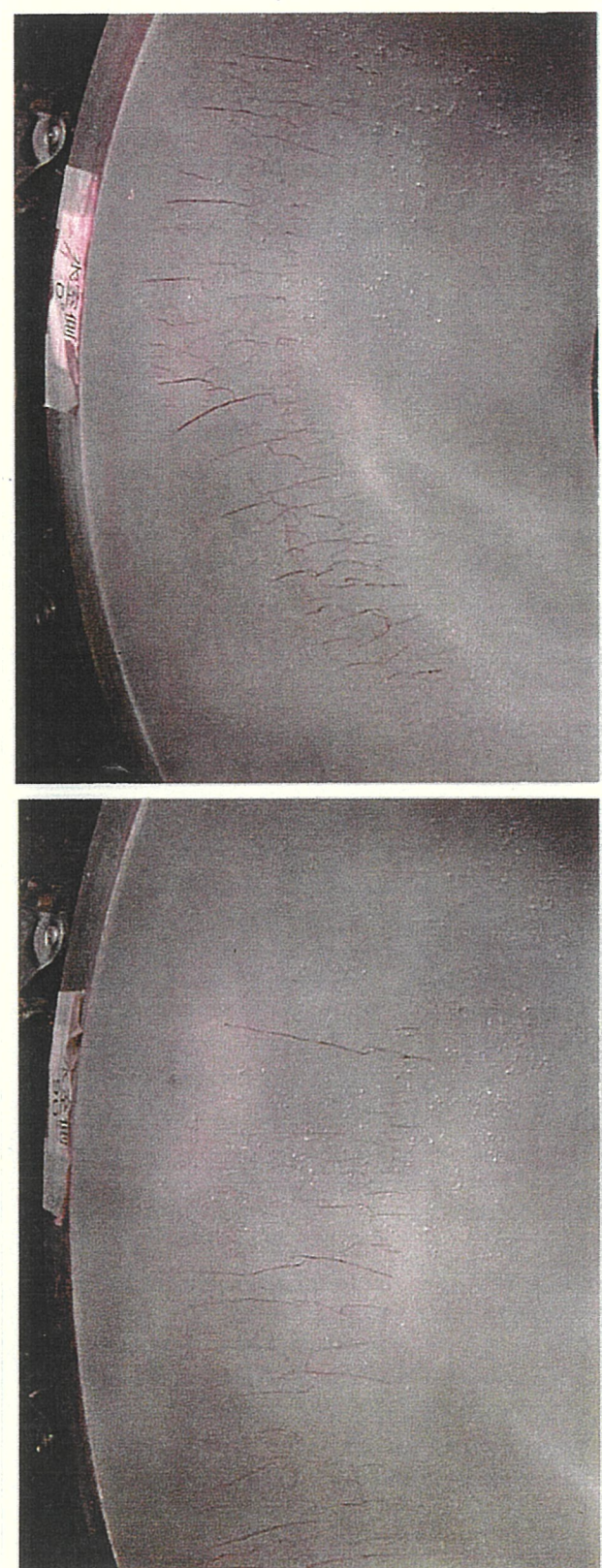


- : UT指示領域 (DAC 20%以上の指示が検出された領域)
- : PTで線状指示が多数検出された領域
- | : PTで単独の線状指示

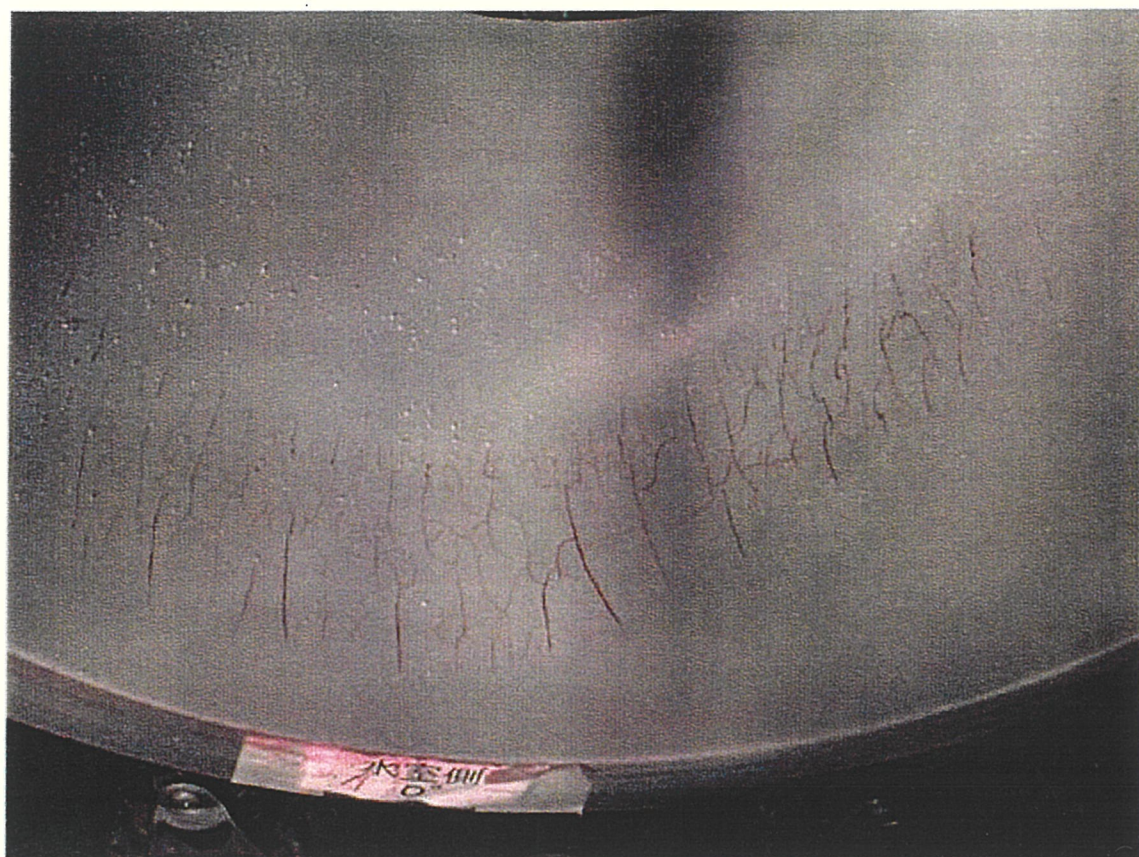
0 100 mm

P T 指示展開図 (内面視)

P T 指示部代表写真



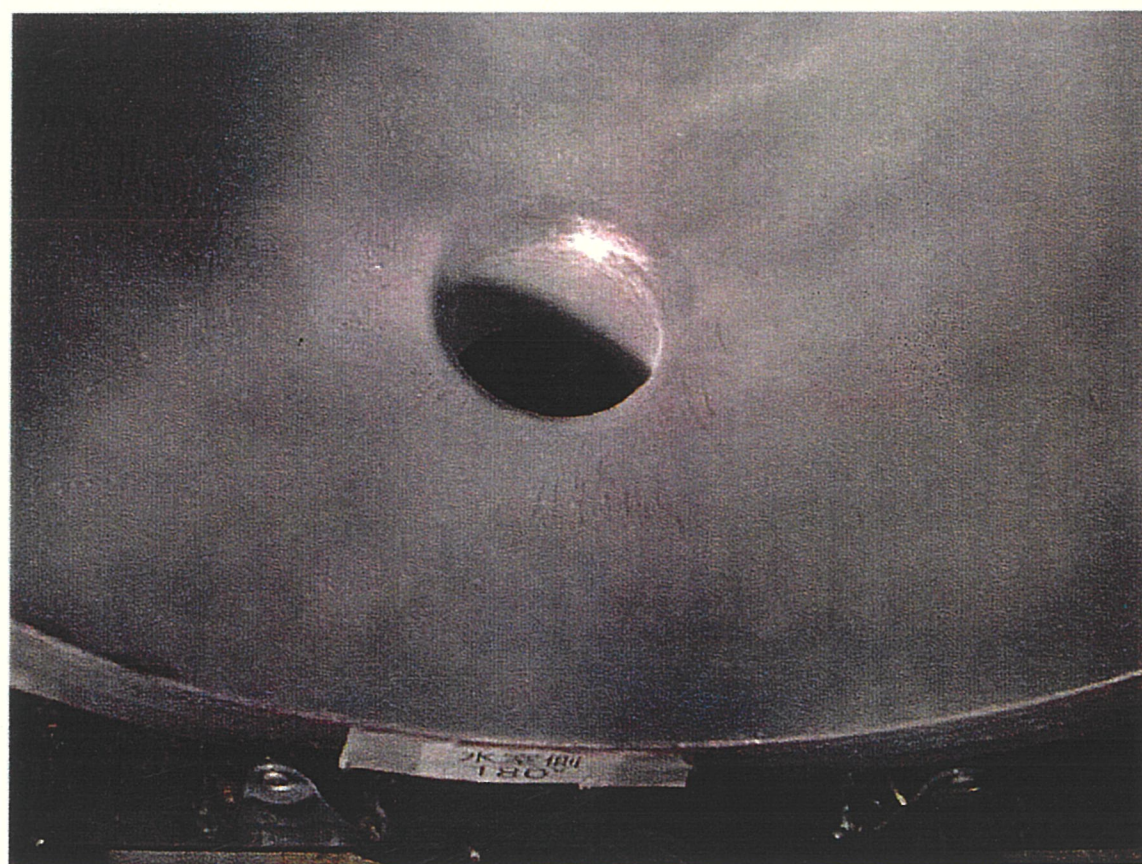
再生熱交換器 浸透探傷試験結果



水室側 0° 付近



水室側 90° 付近



水室側 180° 付近



水室側 270° 付近

中段胴切断調査：胴部 P T

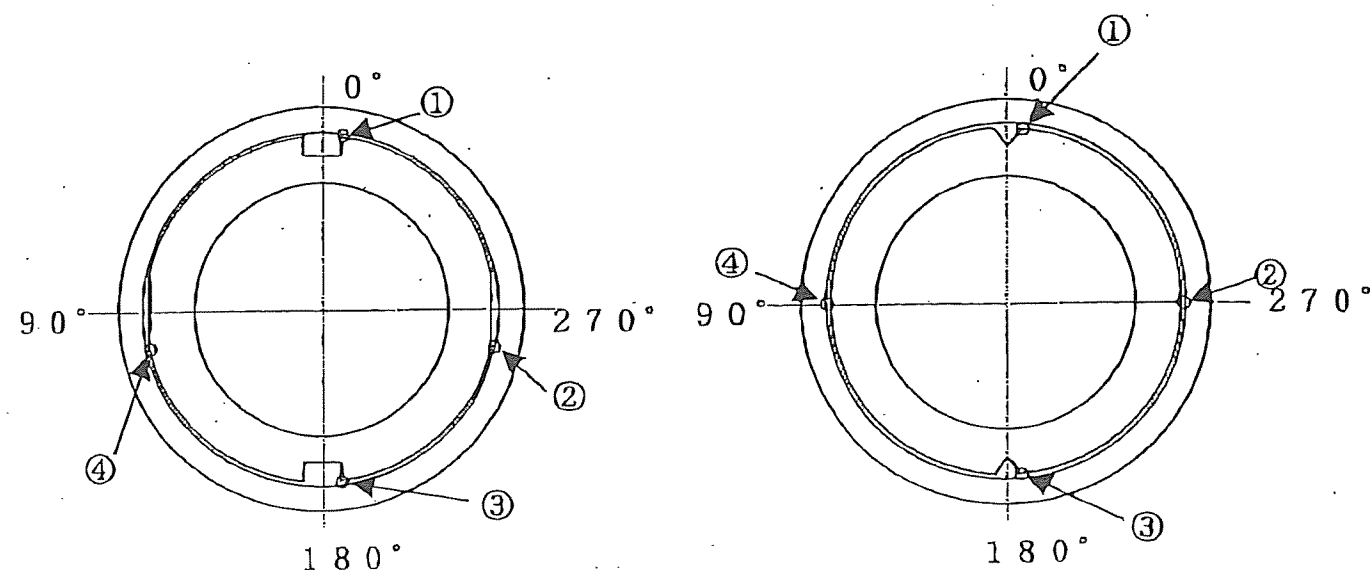
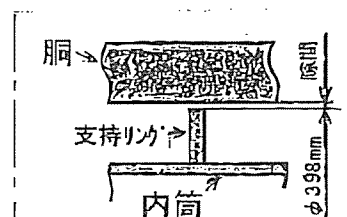
再生熱交換器中段胴部内筒支持リング隙間測定結果

隙間計測結果

(半径方向隙間)

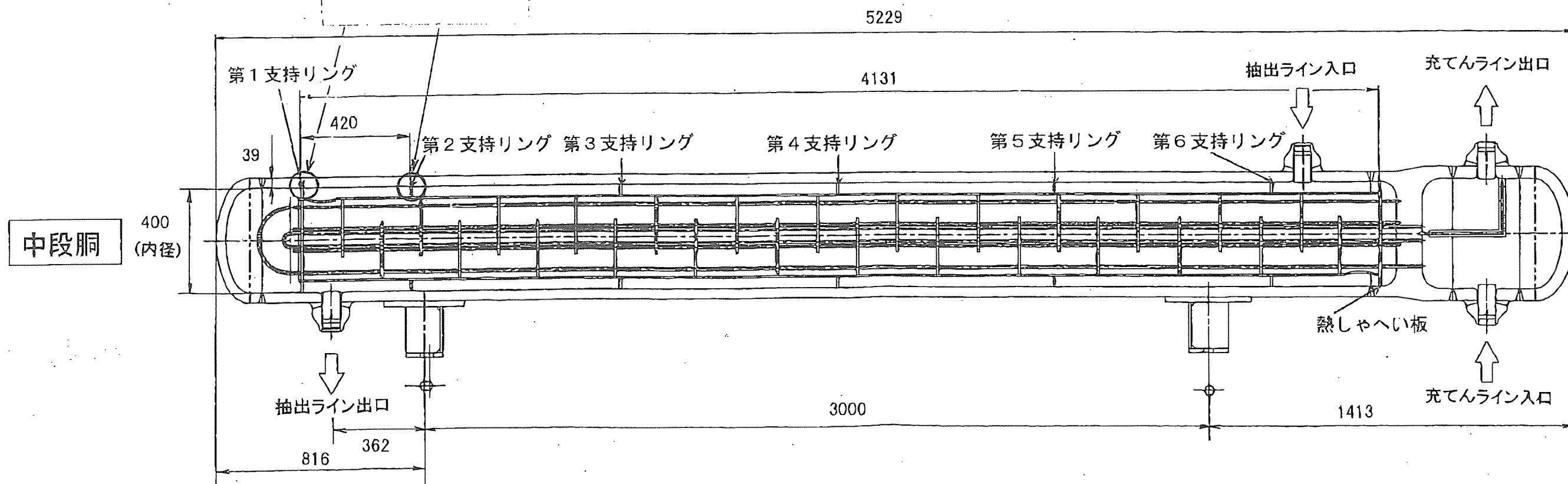
	第1支持リング	第2支持リング	設計目標値
①	1.9	2.4	約1
②	1.8	1.6	約1
③	1.7	0.6	約1
④	1.8	1.2	約1

単位 : mm



[第1支持リング] (1枚/胴)

[第2～第6支持リング] (5枚/胴)

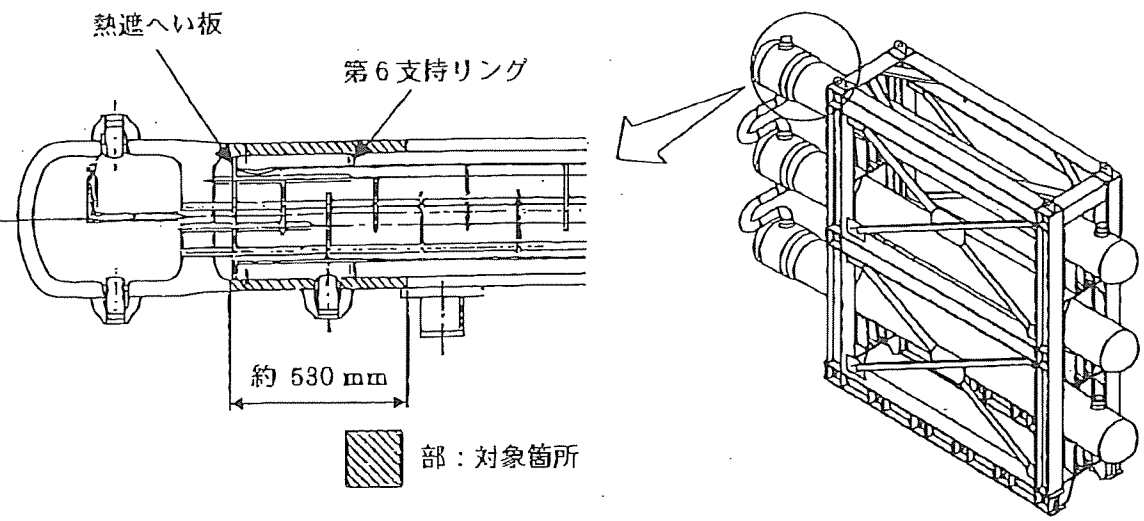


再生熱交換器上段及び下段の超音波探傷試験結果

上段胴部の超音波探傷試験結果

確認日：平成11年8月28日

- 1. 探傷方法
探傷方法：斜角探傷45°
探傷方向：軸方向および周方向の2方向
- 2. 探傷結果
指示は認められず
- 3. 探傷範囲
第6支持リング～熱遮へい板間廻りの胴部（下図参照）

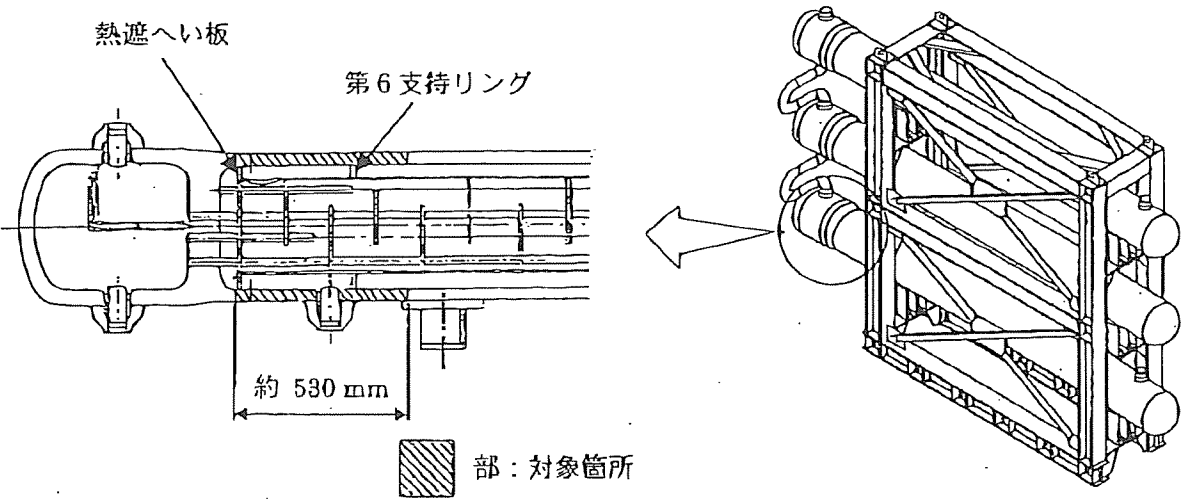


超音波探傷試験範囲図

下段胴部の超音波探傷試験結果

確認日：平成11年8月27日

- 1. 探傷方法
探傷方法：斜角探傷45°
探傷方向：軸方向および周方向の2方向
- 2. 探傷結果
指示は認められず
- 3. 探傷範囲
第6支持リング～熱遮へい板間廻りの胴部（下図参照）



超音波探傷試験範囲図

再生熱交換器摺動側支持脚拘束状態調査結果

1. 調査目的

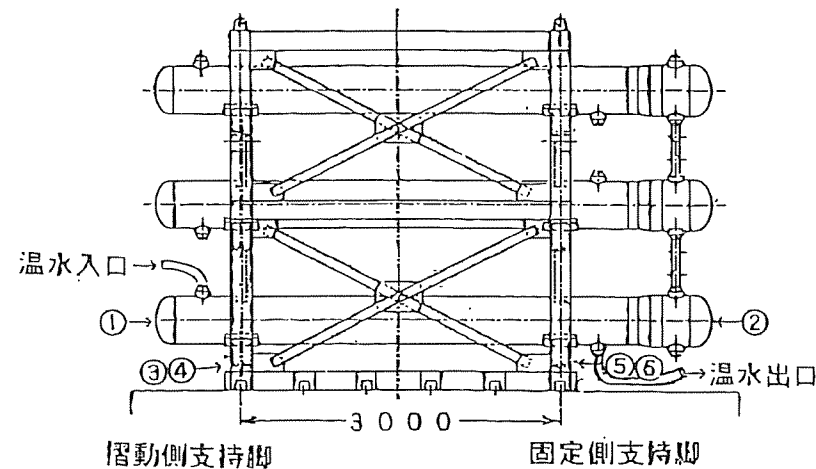
再生熱交換器下段摺動側支持脚の拘束状態を確認するために、胴部の熱膨張及び油圧ジャッキによりスライドの有無を確認する

2. 実施内容

温水循環方式

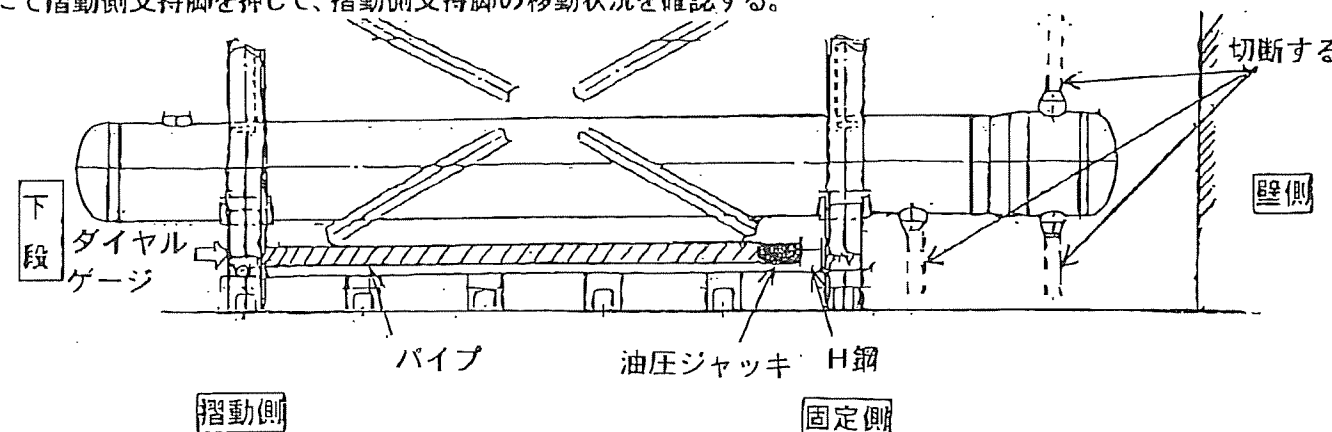
再生熱交換器下段の胴側の連絡管切断部及び出口ラインに仮設の加温設備を取付け、内部流体(温水)を循環させることにより熱交換器を昇温させ、胴の熱伸びによる摺動側支持脚の移動状況を確認する。

尚、再生熱交換器の胴部温度(固定支持脚側下部)の目標は80℃程度とする。



油圧ジャッキ方式

再生熱交換器下段につながる充てん側及び抽出側配管を切断し、固定側支持脚取付ボルトを取り外した後、油圧ジャッキにて摺動側支持脚を押して、摺動側支持脚の移動状況を確認する。



胴吊り上げによる固定ボルト及び支持脚部の摺動面の確認

固定側及び摺動側の支持脚ボルトの締付トルクを確認後ボルトを取外し、再生熱交換器下段を吊り上げ摺動側支持脚と架台の摺動面の状況を目視により確認する。

3. 確認結果

温水循環方式

測定箇所	移動距離	
	実測値(mm)	計算値(mm)
① 胴側鏡板部	3.54	3.38
② 管側鏡板部	1.01	1.25
③④ 摺動側支持脚	2.76	2.66
⑤⑥ 固定側支持脚	0.0	0.0

(初期温度 38.1℃, 最終温度 92.3℃, $\Delta T=54.2^{\circ}\text{C}$)

実測値は、ほぼ計算どおりの値であり、摺動側支持脚は設計どおり移動していることが確認された。

油圧ジャッキ方式

	実測値
全移動量	約11mm
移動開始時の荷重	約3.5ton
移動中の荷重	約2ton

通常運転時の想定移動量(約10mm)以上まで移動させた結果、移動開始後は特に大きな荷重の変化なく移動した。

支持脚取付ボルトの確認

固定側及び摺動側の取付ボルトについては変形・かじり等の損傷はなく、ほぼ設定値付近での締付となっていた。

	測定値	設定値
固定側	50~52kg・m	約40kg・m
摺動側	6~8kg・m	約10kg・m

支持脚部の摺動面の確認

面荒れ、異物のかみこみ等なく異常は認められなかった。

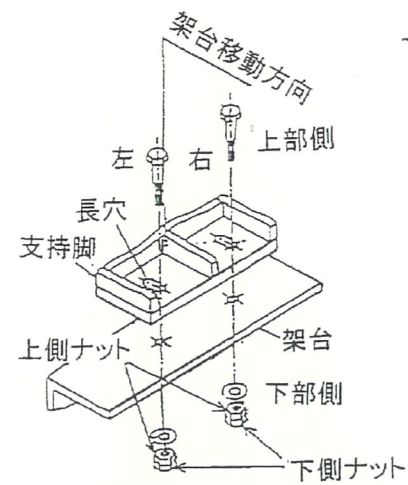
4. 評価

今回の計測により摺動側支持脚は熱交換器胴部の移動範囲において拘束するものではなく、当初設計通り摺動側支持脚が移動したものと推察されます。

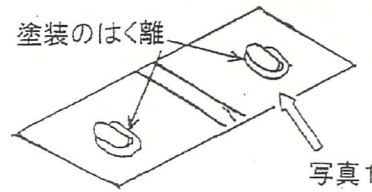
支持脚部の摺動面及び固定ボルトの状況

確認日：平成11年8月25日

支持脚部の摺動面の確認状況

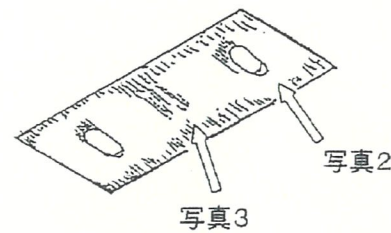


摺動側支持脚部詳細



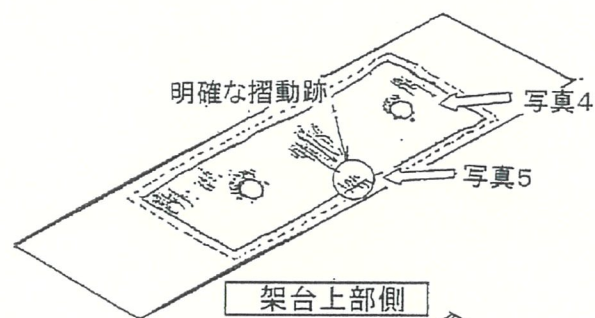
支持脚上部側

・長穴の廻りにボルト頭部との摺動による金属光沢が確認された。

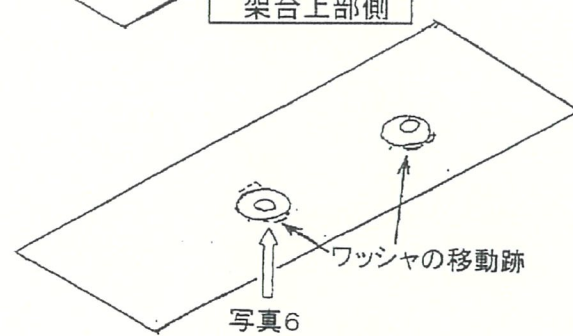


支持脚下部側

・支持脚の廻り及び中央部に摺動跡が確認され、また摺動面全体的に浮錆が確認された。



架台上部側



・ワッシャの移動からなる摺動跡が確認された。

→ : 撮影方向



写真1：支持脚上部側（右）



写真2：支持脚下部側（右）



写真3：支持脚下部側（中央）



写真4：架台上部側（右）



写真5：架台上部側（中央）



写真6：架台下部側（左）

摺動側支持脚固定ボルトの状況



写真7：左側(通路側)

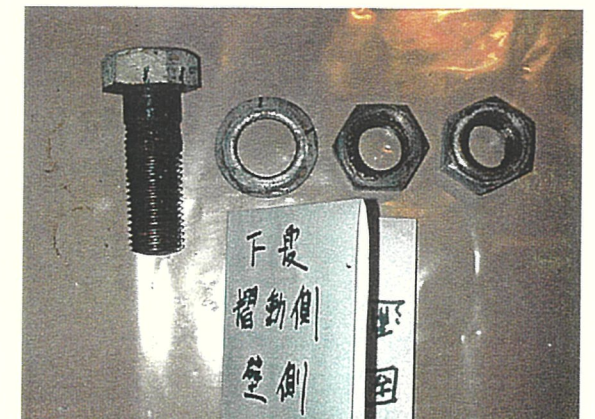
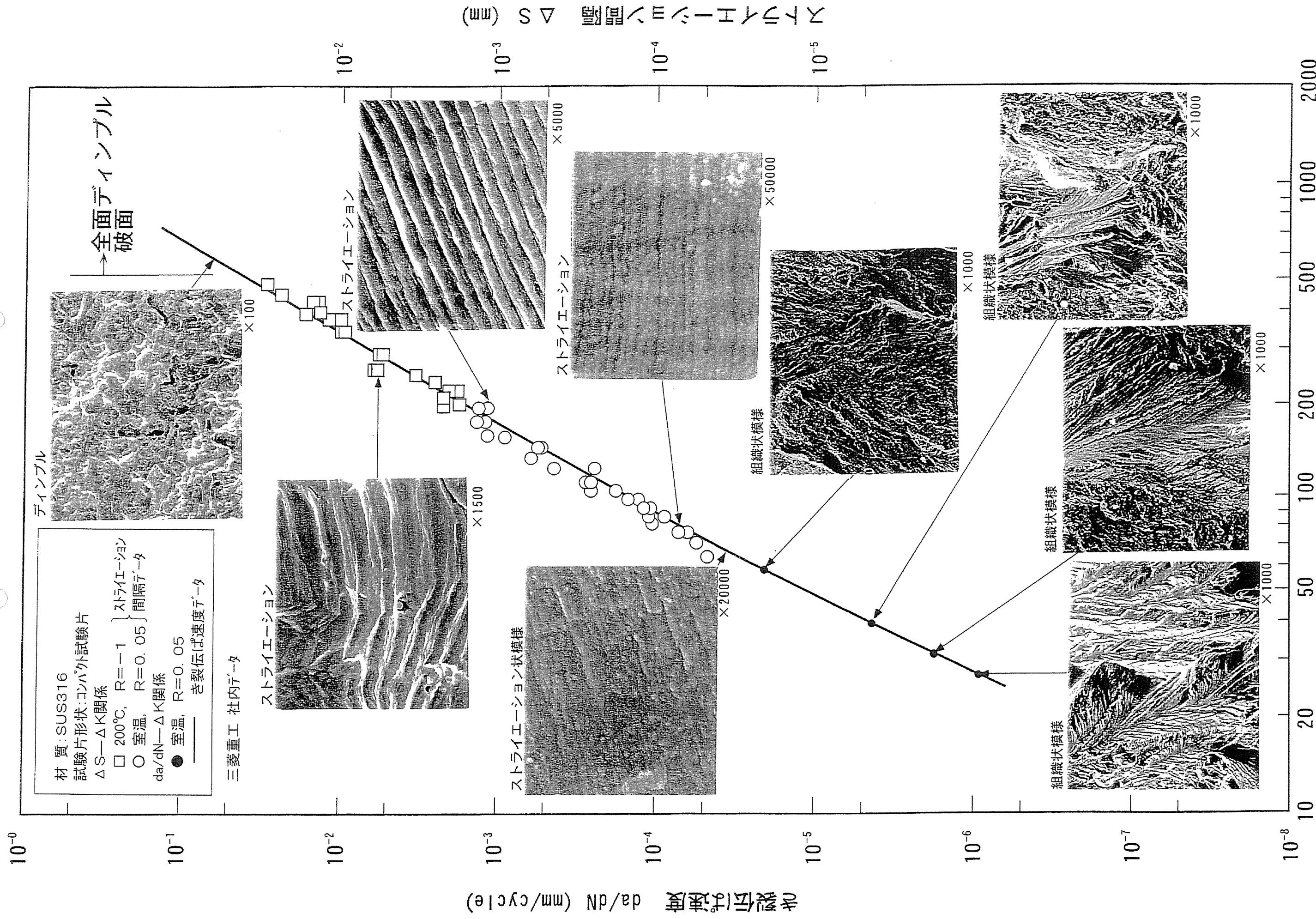
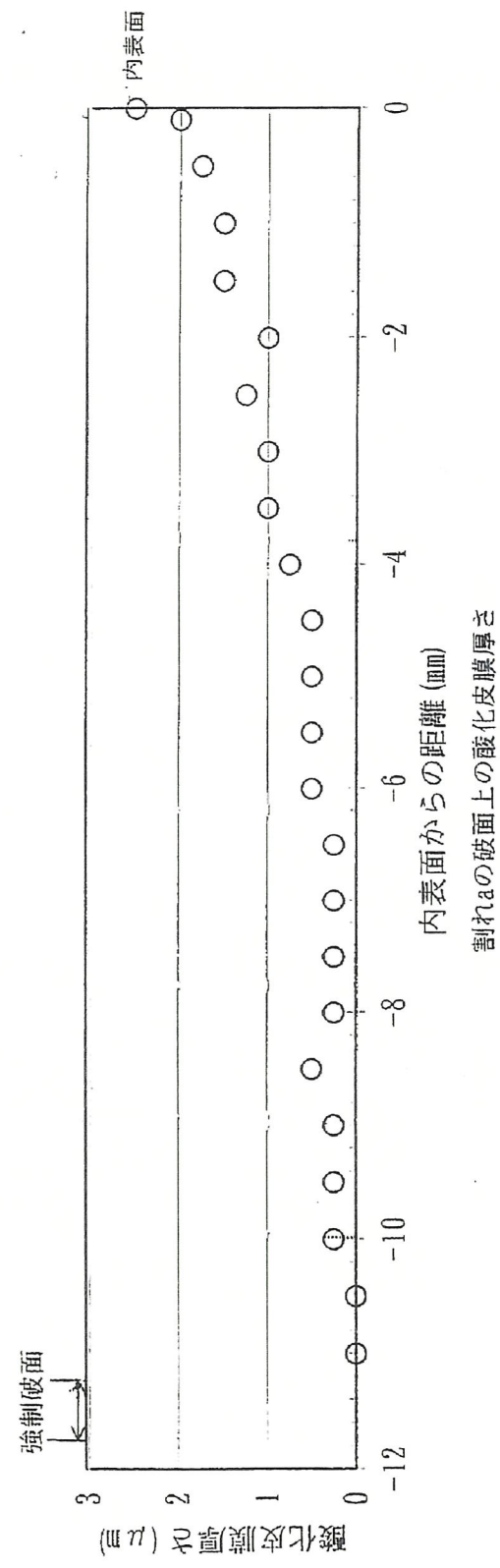
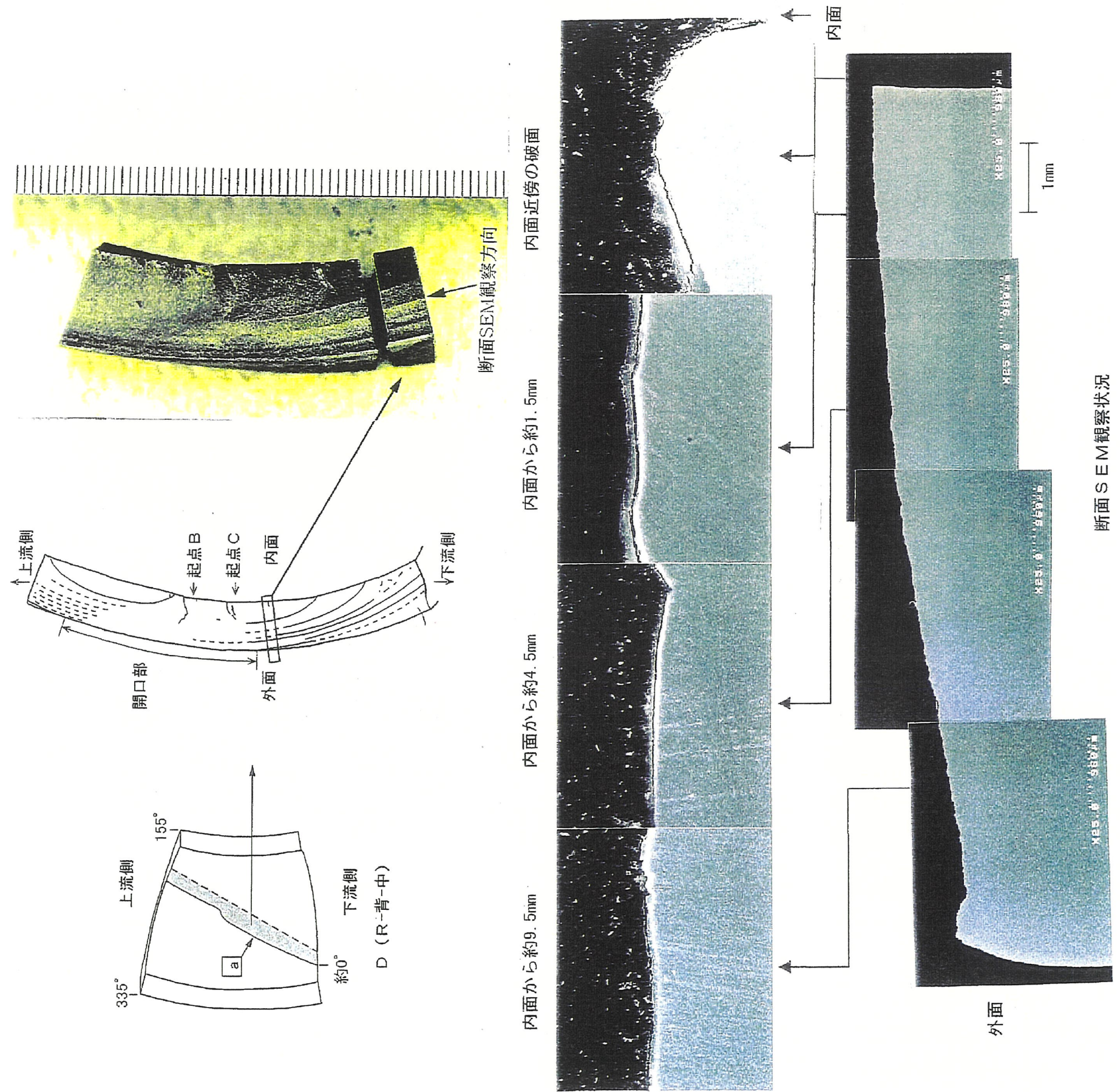


写真8：右側(壁側)

民間調査機関等での調査



SUS316のストライエーション間隔, ぎ裂伝ば速度と ΔK の関係
 応力拡大係数変動範囲 ΔK (kgf/mm^{3/2})



当該エルボD (R-背-中)部の割れaの破面上の酸化皮膜厚さ測定結果(割れa)

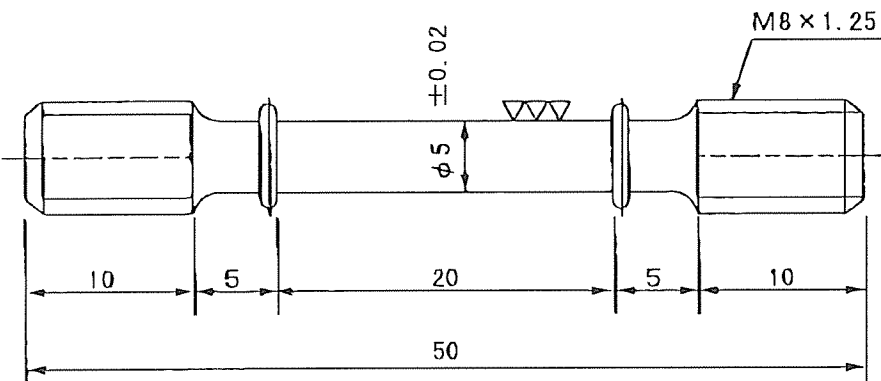
エルボ及び管台の引張試験結果

1. 目的

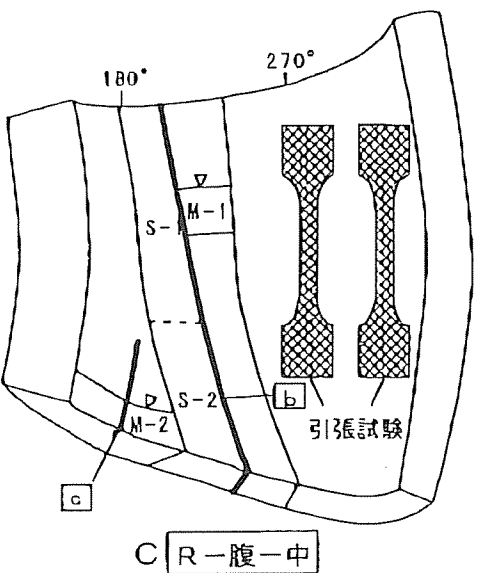
当該エルボ及び管台から採取した試料で引張試験を行い、機械的性質を確認する。

2. 試験要領

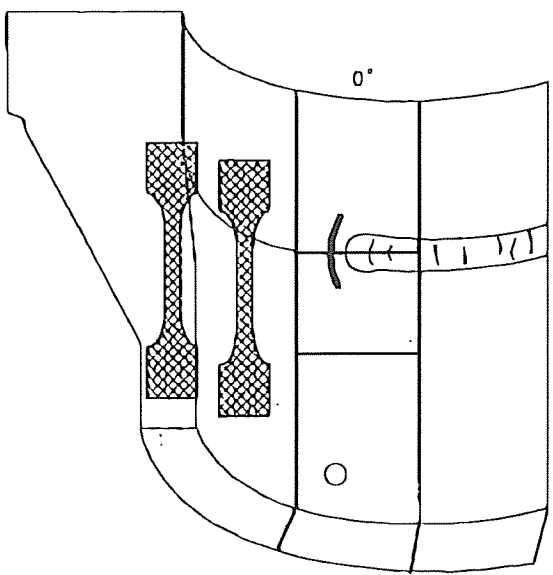
(1) 試験片形状(当該エルボ及び管台)



(2) 試験片採取位置



当該エルボ



管 台

3. 試験結果

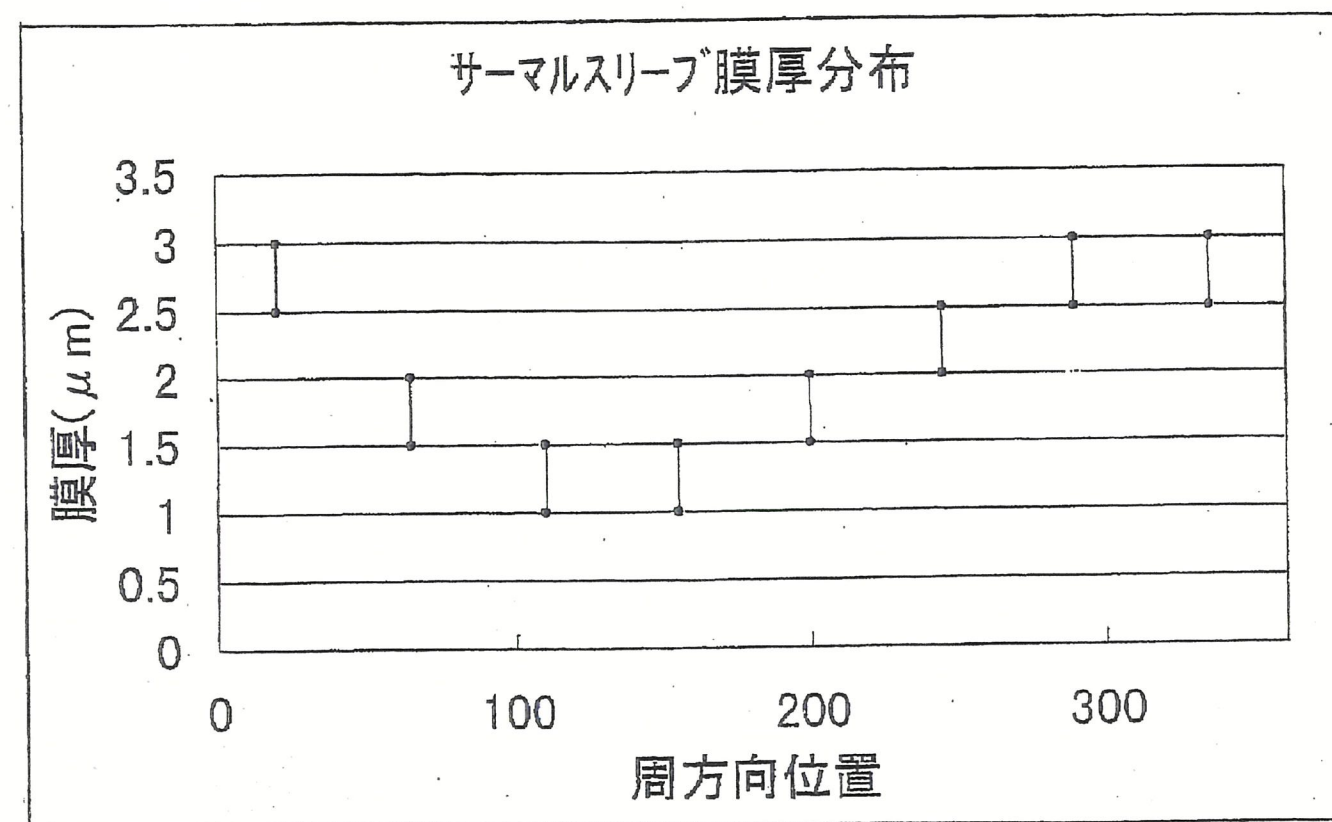
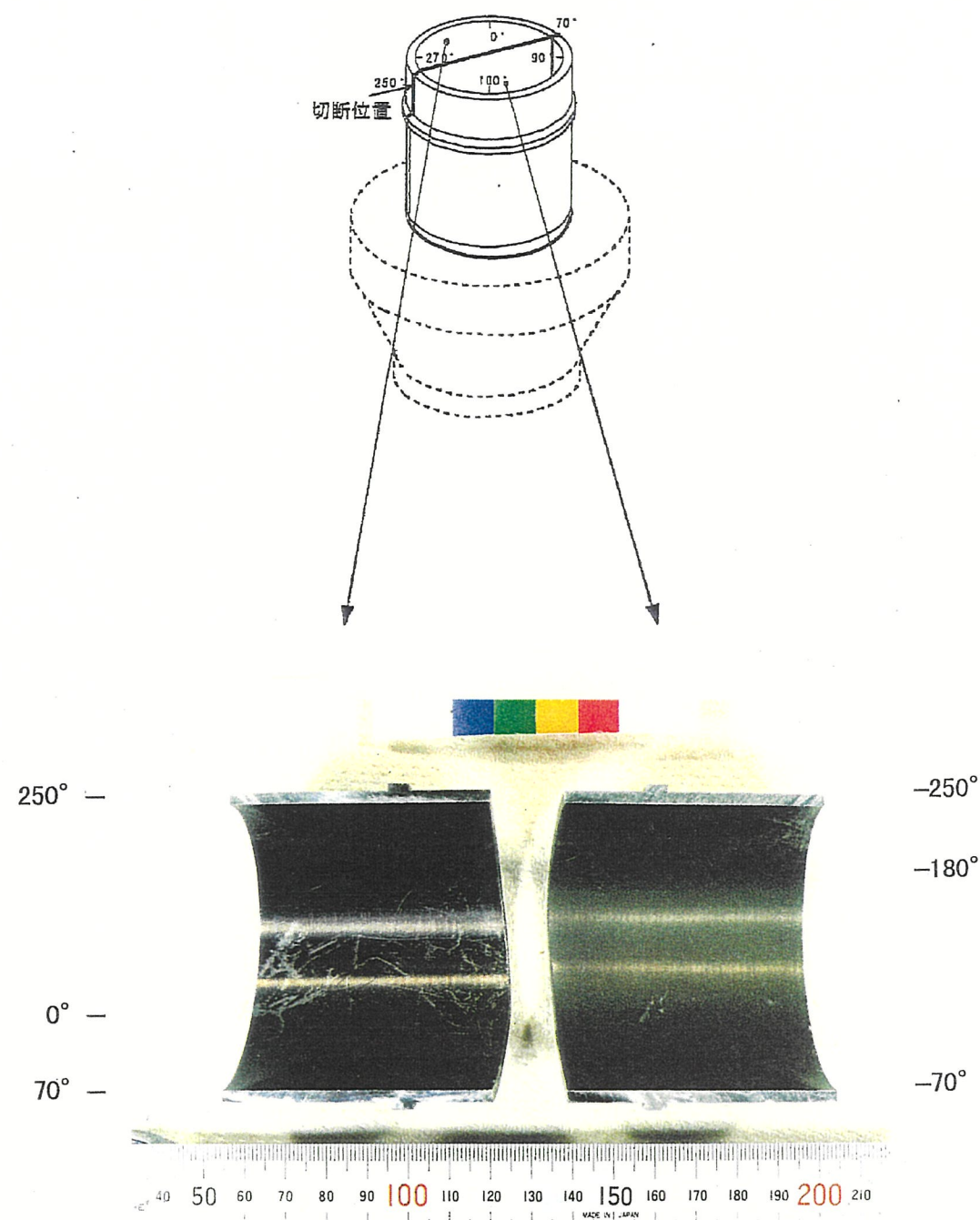
当該エルボと管台について機械的性質を調査した結果を以下に示す。

区 分		0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)
当該エルボ	試験 1	25.5	58.6	57.5	83.8
	試験 2	25.5	58.5	56.5	83.3
	規格値 JIS G3459 SUS316TP	≥21	≥53	≥35	—
管 台	試験 1	25.5	53.8	66.0	83.0
	試験 2	24.8	53.9	65.0	82.9
	規格値 JIS G3214 SUSF316	≥21	≥53	≥45	≥50

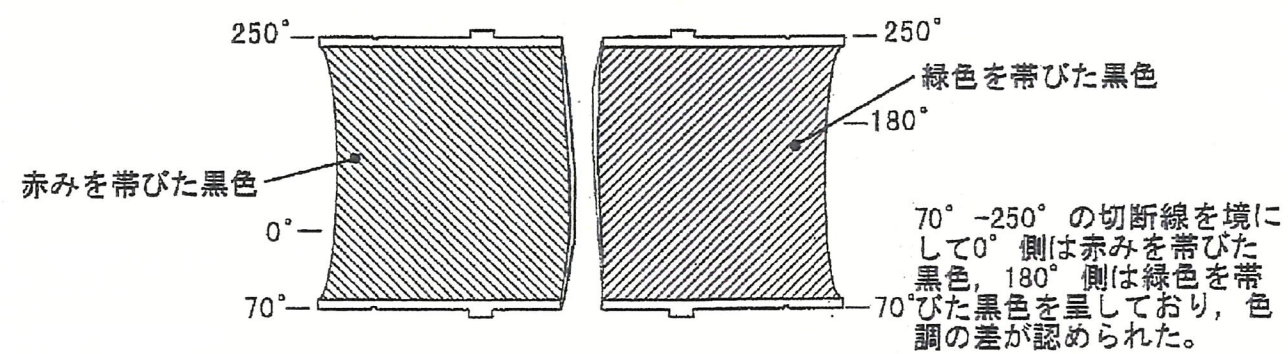
試験条件：室温大気中

4. まとめ

- ・当該エルボの0.2%耐力、引張強さ、伸びは規格値を満足していた。
- ・管台の0.2%耐力、引張強さ、伸び、絞りは、規格値を満足していた。



サーマルスリーブ内表面スケール厚さ測定結果



サーマルスリーブ内面観察及び酸化皮膜厚さ測定結果

損傷要因分析の結果

再生熱交換器連絡配管損傷 要因分析図

事象	要 因		調 査 結 果	評 価	
再生熱交換器抽出側配管損傷発生	強度不足	材料不良	・ 材料分析の結果では化学成分並びに機械的性質は規格値内であること及び組織的にも欠陥は認められなかったことから材料不良とは考えられない。	× 資料 3—1	
	応力過大	配管拘束力 過大	・ 再生熱交換器下段摺動側支持脚は、熱膨張による方法と油圧ジャッキによる方法により、支持脚が移動することを確認したことから、配管に過大な拘束力が作用したとは考えられない。 ・ 配管据付による内面周方向応力は、割れ a 部で -0.5kg/mm^2 と推定され、配管に過大な据付力が作用したとは考えられない。	× 資料—1 資料 4 (4—4)	
		運転応力	圧力・温度	・ 運転履歴調査の結果、圧力、温度は通常の運転範囲内であり、特に異常は認められなかったことから、運転応力過大とは考えられない。	× 資料 5
	疲労	振動	配管振動	・ 再生熱交換器の調査の結果、ポンプ、流体脈動との共振の可能性は極めて低い。 ・ 破面観察の結果、割れが全て内面で、方向も一定していないことから機械振動疲労とは考えにくい。	× 資料 3—2
		熱疲労	高サイクル 疲労	・ 破面観察の結果、疲労割れに特有なストライエーション状模様が認められ、かつ組織状模様が観察されていること及び破壊力学をベースとした評価より高サイクル疲労の可能性が高い。	
			低サイクル 疲労	・ 破面観察の結果、高サイクル疲労割れに特有な組織状模様及びストライエーション状模様が認められたため低サイクル疲労とは考えにくい。 ・ 起動・停止等による疲労損傷係数は 0.01 以下であり、許容値 1.0 に対して充分小さい。	資料 3—3
	腐食	応力腐食割れ	外面応力 腐食割れ	・ 調査の結果、内面からの割れであること及び配管外表面付着物調査で有意な塩素が検出されていないことから外面応力腐食割れとは考えられない。	× 資料 3—4
			内面応力 腐食割れ	・ 破面観察の結果、粒界割れが観察されず、さらに粒内型応力腐食割れに特徴的な分岐も観察されていないこと、また粒内型応力腐食割れを発生させる不純物元素である Cl 及び F も破面に観察されていない。 ・ 溶接熱影響部の鋭敏化領域でも粒内にき裂が成長していることから、鋭敏化に伴う粒界型応力腐食割れとは考えられない。	× 資料 3—5
		全面腐食		・ 目視観察の結果、グラインダ跡も明瞭に観察されたことから、全面腐食とは考えられない。	× 資料 3—5
		局部腐食		・ 目視観察の結果、孔食も認められないことから、局部腐食とは考えられない。	× 資料 3—5

×：要因として考えられないもの

再生熱交換器連絡管 材料調査結果

1. 化学成分分析結果

当該エルボ、比較エルボ、管台について化学成分分析を行った結果、ミルシート値とほぼ一致するとともに、規格値を満足している。

又、溶接金属の化学成分は規格値を満足している。

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
当該エルボ	0.041	0.54	1.52	0.026	0.004	12.9	16.4	2.10
比較エルボ	0.041	0.54	1.54	0.026	0.004	12.7	16.4	2.06
ミルシート値	0.04	0.52	1.52	0.025	0.004	12.95	16.15	2.08
規格値 JIS G3459 SUS316TP	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	10.00~ 14.00	16.00~ 18.00	2.00~ 3.00

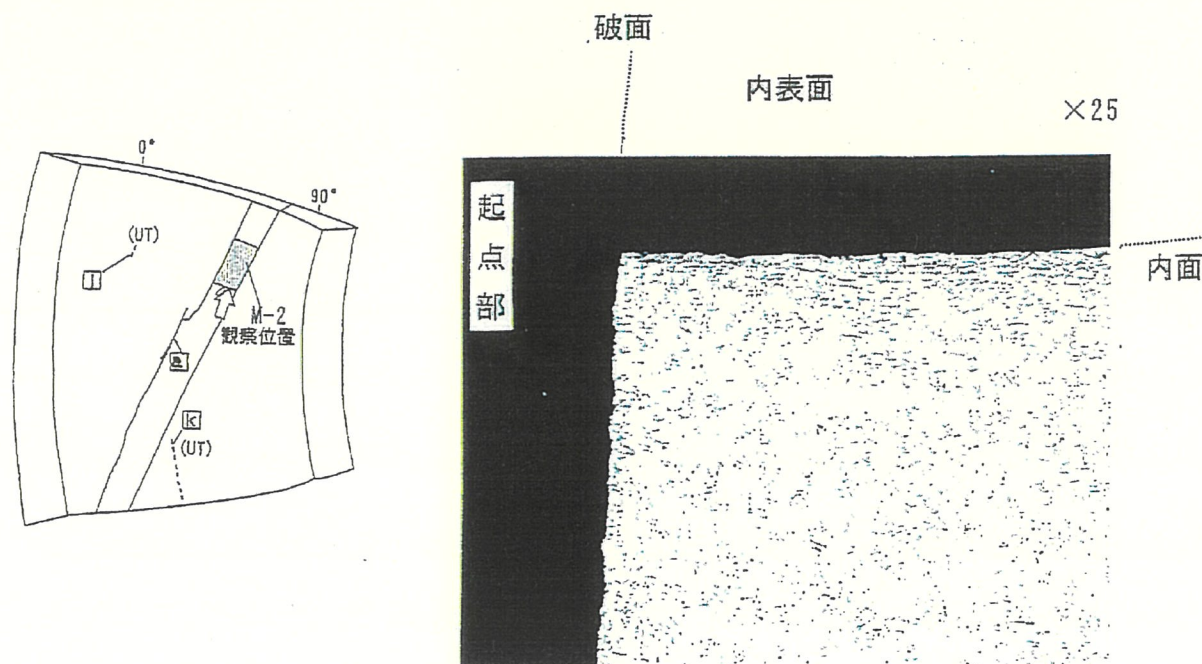
(注) 湿式化学分析

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
管台-当該エルボ溶接部	—	0.31	1.67	—	—	13.3	17.3	2.23
当該エルボ-直管溶接部	—	0.27	1.54	—	—	13.6	17.1	2.37
比較管-管台溶接部	—	0.29	1.65	—	—	13.2	17.5	2.33
規格値 JIS Z3221 D316	≤0.08	≤0.90	≤2.50	≤0.040	≤0.030	11.0~ 14.0	17.0~ 20.0	2.00~ 2.75

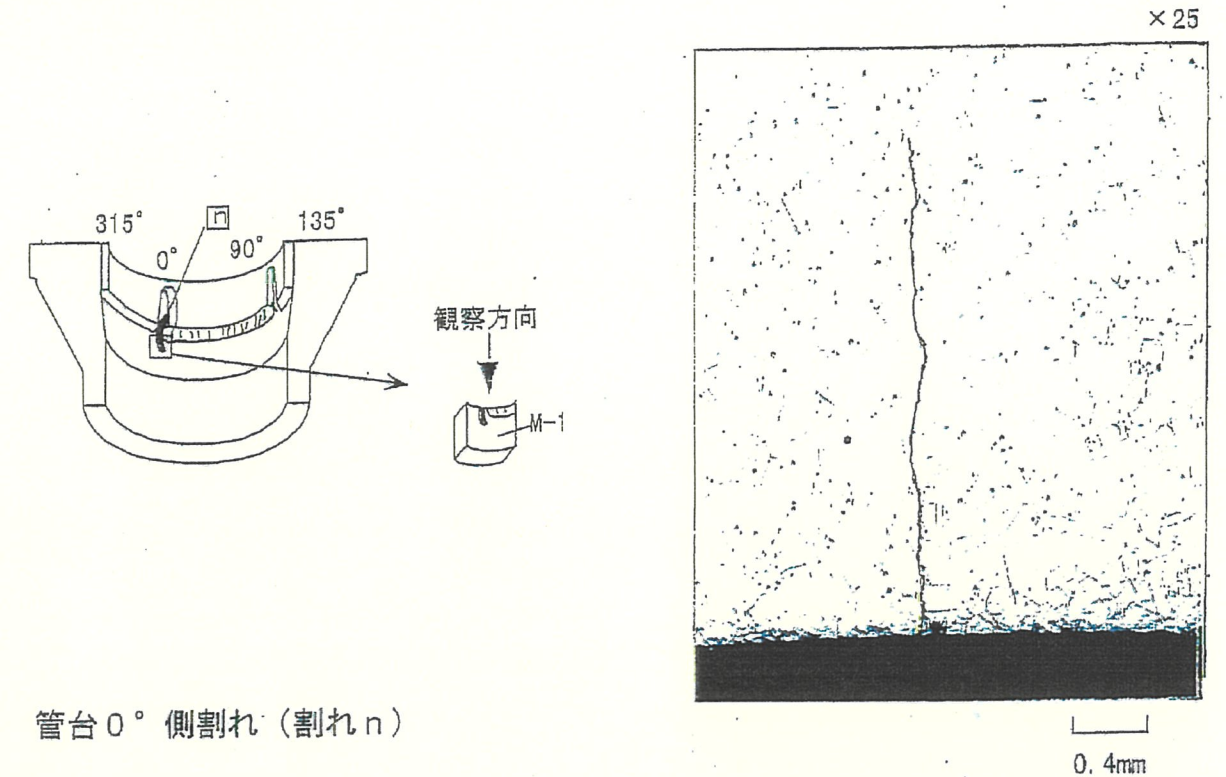
(注) EPMAにより分析

2. 組織観察結果

当該エルボ及び管台の全ての割れについて、断面ミクロ調査を実施した結果、金属組織はオーステナイト相であったことから、異常は認められなかった。



当該エルボ軸方向割れ（割れa）



管台0°側割れ（割れn）

3. 機械的性質

当該エルボと管台から採取した試験片を用いて機械的性質を調査した結果、下記の通り異常は認められなかった。

当該エルボと管台の引張試験結果

		0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	硬さ
当該 エルボ	試験1	25.5	58.6	57.5	83.8	130~158 (表層除く)
	試験2	25.5	58.5	56.5	83.3	
	規格値 JIS G3459 SUS316TP	≥21	≥53	≥35	—	—
管台	試験1	25.5	53.8	66.0	83.0	140~174 (表層除く)
	試験2	24.8	53.9	65.0	82.9	
	規格値 JIS G3214 SUSF316	≥21	≥53	≥45	≥50	—

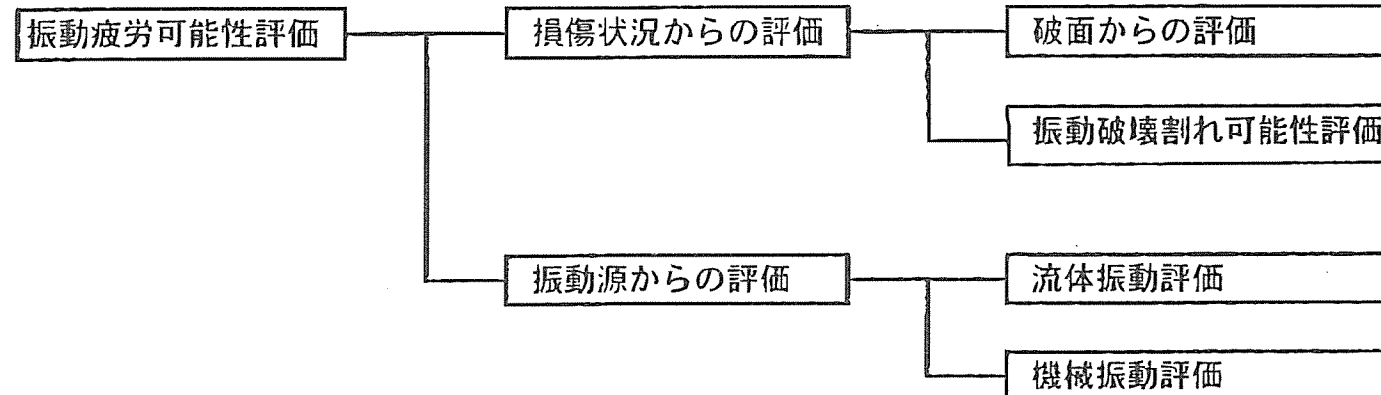
試験片: φ5mm—平行部長20mm 丸棒試験片、割れa 或いはd 近傍から採取
試験条件: 室温大気中

- ・当該エルボの0.2%耐力、引張強さは規格値を満足していた。
- ・管台の0.2%耐力、引張強さ、伸び、絞りは、規格値を満足していた。

振動疲労発生の可能性について

1 目的

今回の割れの原因が、振動を起因とする可能性があるか否かについて、要因を以下の通り抽出し、各々について可能性を検討した。

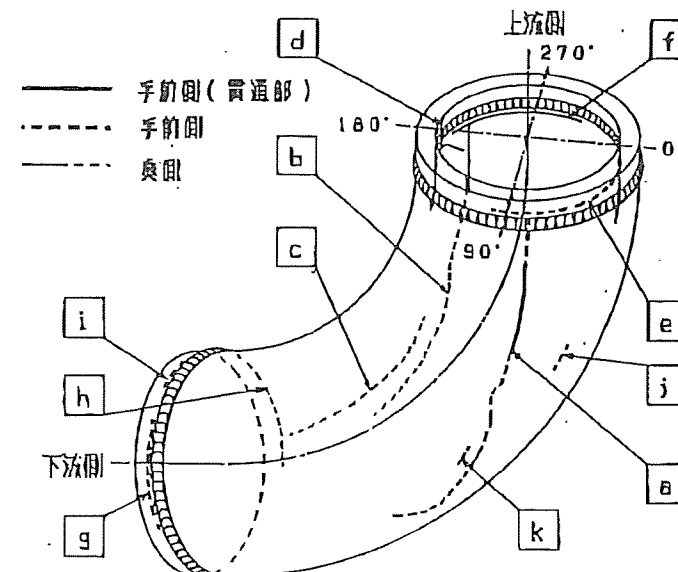


2 損傷状況から見た可能性

	評価対象	損傷状況	振動を起因とした場合の特徴	可能性
破面からの評価	破面起点の数	複数の微小き裂の進展、連結が見られる	振動の場合は、高応力部での単一起点が一般的	×
	破面起点の内外面位置	割れは全て内面より発生	振動の場合は、外面からも発生	
	割れ方向	割れの方法は一定していない	振動の場合は外力が一定方向であるため、割れも一定方向となる傾向	
振動破壊可能性評価	破損寿命	約10年間運転後に割れ発生	配管系固有振動数は100Hz以上のため、1年間で10'回となり、振動が起因であれば早期に発生	×
	き裂位置	配管系の支持点より離れたエルボの割れが主体	振動の場合、支持点に近い管台部周辺が厳しい	
	破損部材	連絡管としては当該の連絡管のみ	同一構造の上流側連絡管にも発生しうる	

3 振動源から見た可能性

	評価対象	実機状況	振動起因の可能性評価	可能性
流体振動評価	配管内流体力による振動	管内流速2.4m/sの流れによる流体力が全て外力として作用しても約2kgfの荷重	配管に作用する荷重としては十分小さく疲労強度上、問題となるレベル以下	×
	RCPによるポンプ脈動	抽出配管はRCP吸込側からつながり、当該部までは上段、中段の熱交換器胴あり	ポンプ吸込側につながり、途中に脈動の緩衝となる2つの熱交換器の胴があるため、ポンプ脈動の影響は除外可能	
	オリフィス、流量調整弁等による振動	オリフィス等は、当該連絡管の下流の下段胴の更に7m下流に設置	下流に十分離れて設置されており、上流の当該連絡管への振動伝播の可能性なし	
機械振動評価	RCP機械振動	RCPと熱交換器との間に、厚さ1.1mのコンクリート壁あり	RCPと熱交換器は分厚い壁で分離され、またRCP回転数20Hzに対し、熱交換器支持架台は30Hzと固有振動数が離れ、有意な振動の可能性なし	×



当該連絡管エルボ部割れ位置図

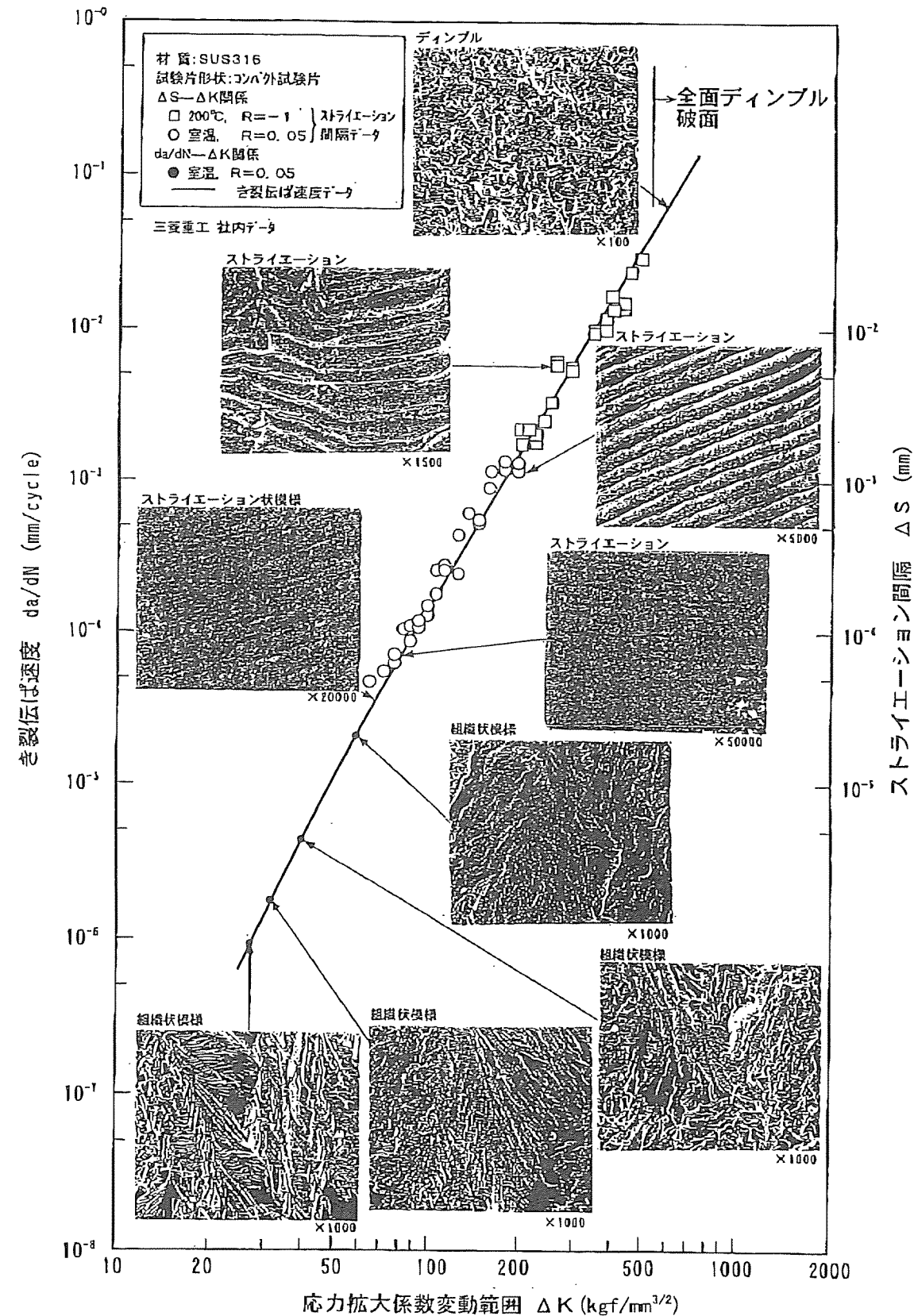
4 まとめ

破面の状況を含む損傷状況及び振動源の両面から振動疲労発生の可能性を評価した結果、いずれの面からも振動による疲労により今回の割れが発生した可能性は考えにくい。

1. 疲労破面の特徴

疲労破面をSEM等で拡大観察すると、下図に示す特徴が認められる。

- ①高荷重/高速伝播速度（低サイクル）領域にはストライエーションが観察される。
- ②低荷重/低速伝播速度（高サイクル）になると破面はストライエーション状模様、組織状模様へと変わる。



SUS316のストライエーション間隔、き裂伝ば速度と ΔK の関係

2. 実機破面観察結果

割れaの破面の観察結果を下図に示す。低荷重/低速伝播速度（高サイクル）に特有な組織状模様及びストライエーション状模様が認められた。

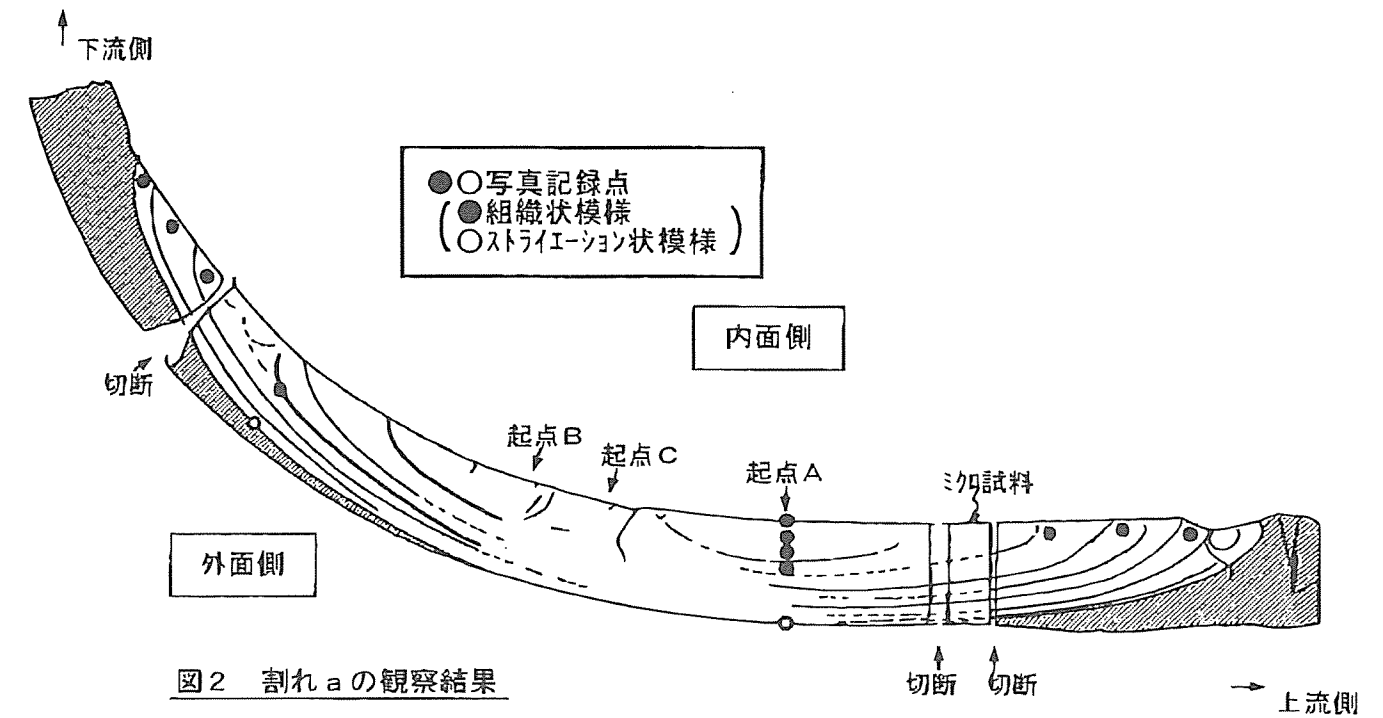


図2 割れaの観察結果

3. 低サイクル疲労評価結果

敦賀2号機の再生熱交換器が経験した過渡回数をカウントし、連絡管エルボ部での疲れ累積係数を算出した。その結果、疲れ累積係数は0.01以下であり、許容値1.0に対して充分小さい。

4. まとめ

以上より、破面の状況からは高サイクル疲労割れに特有な組織状模様が認められること、過渡変化回数が少なく、疲れ累積係数も0.01以下と充分小さいことから低サイクル疲労とは考えにくい。

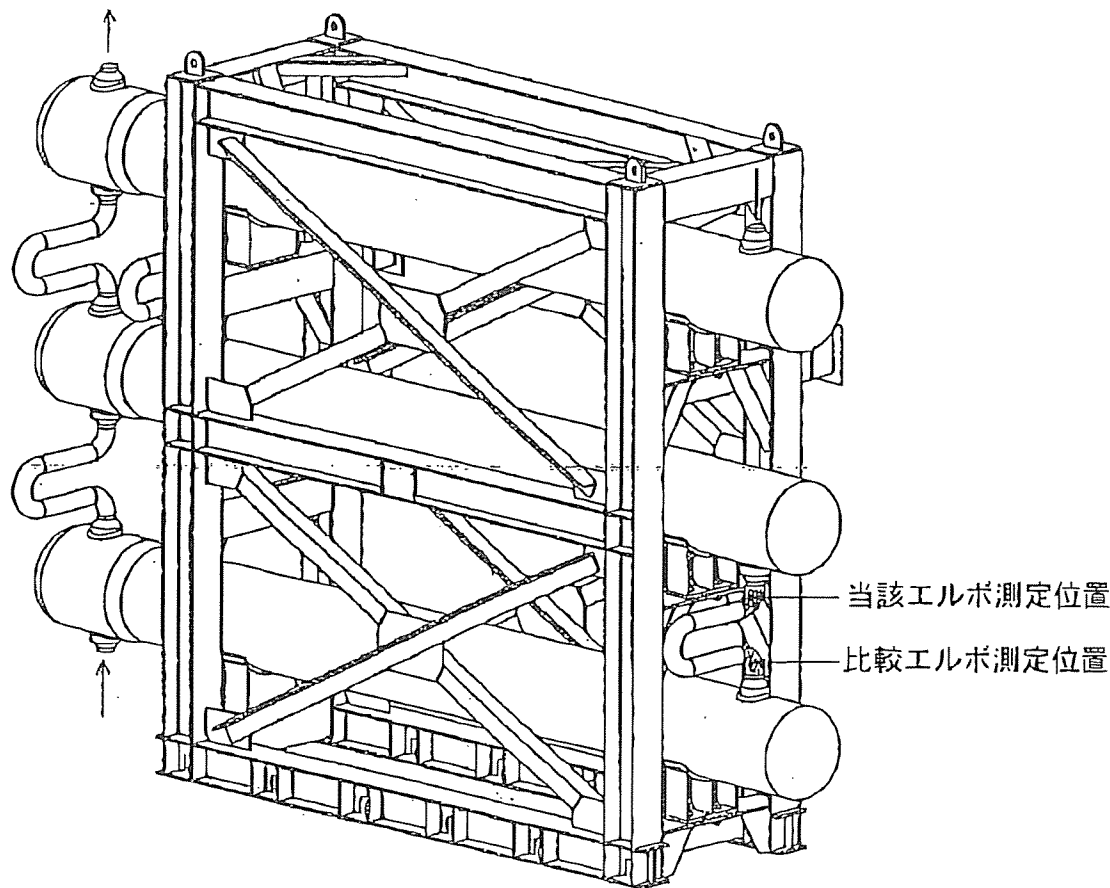
外面応力腐食割れの可能性について

エルボ外面スミヤ分析結果

- (1) 配管表面の不純物成分付着状況を調査するため、配管表面よりスミヤ試料を採取し、イオンクロマトグラフ法により化学分析を行った。
- (2) Cl については何れの部位も 0.4mg/m² 以下と低く問題ないものと判断する。Fは何れも検出限界以下であった。

測定位置	Cl		F	
	mg	mg/m ²	mg	mg/m ²
当該エルボ	0.02	0.4	<0.01	<0.2
比較エルボ	0.02	0.4	<0.01	<0.2

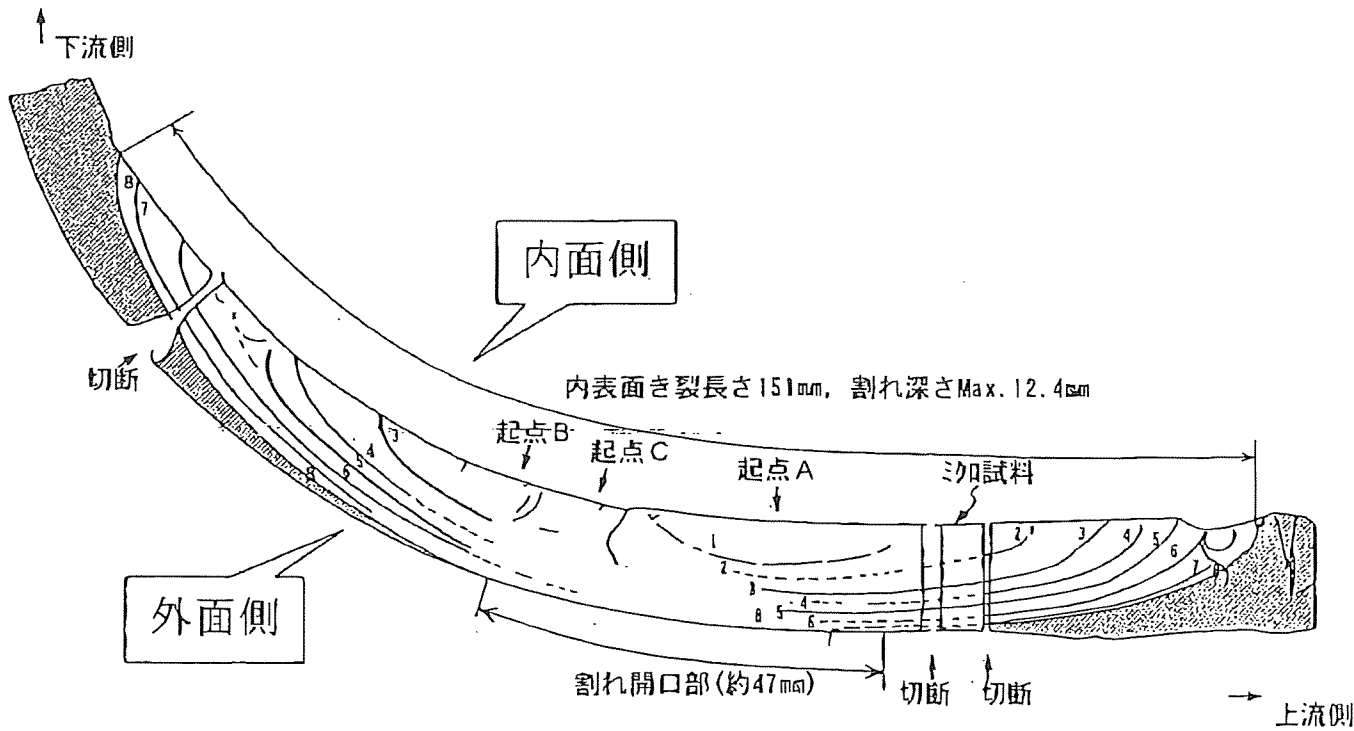
(抜き取り面積は約 0.05m²)



割れの発生起点

- (1) 全ての割れの発生起点は内面であった。

部 位	割れNo.	発 生 起 点	判 断 の 理 由
管 台	d	内面のスリブ溶接止端、管台平滑部	外面には割れなし
	n	内面の平滑部	外面には割れなし
	e	内面の溶接止端	外面には割れなし
エルボ	a	内面の平滑部	ビ-マーク形状より判断(下図参照)
	b	内面の平滑部	外面には割れなし
	c	内面の平滑部	外面には割れなし
	f	内面の溶接止端	外面には割れなし
	j	内面の平滑部	外面には割れなし
	k	内面の平滑部	外面には割れなし
直 管	g	内面の溶接止端	外面には割れなし
	h	内面の溶接止端	外面には割れなし
	i	内面の溶接止端	外面には割れなし



* ビーチマーク数 ; 8 本 (ビーチマーク番号は内面側より採番した。)
割れ a (貫通き裂) の全体形状

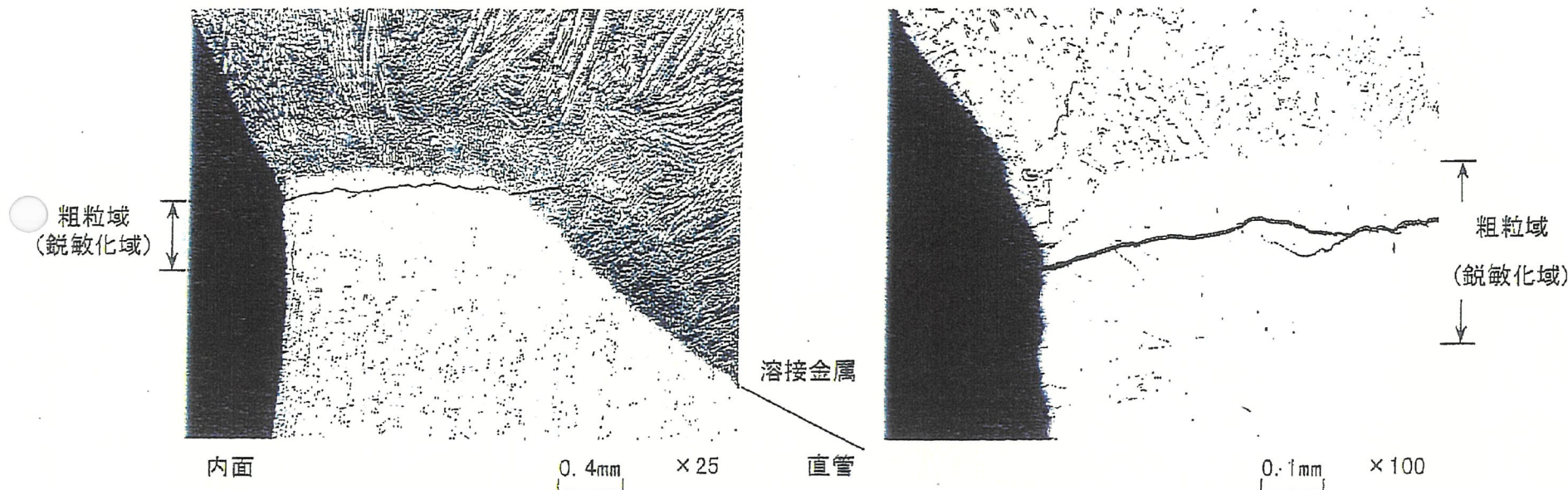
結論

- (1) 外面応力腐食割れの可能性はない。

(A) 応力腐食割れでない根拠

- 粒界型応力腐食割れが進展する鋭敏化粒界（粗粒域）を横切り，溶接金属内部まで進展している。
- 粒内型応力腐食割れの例に比べて，分枝がほとんどない。

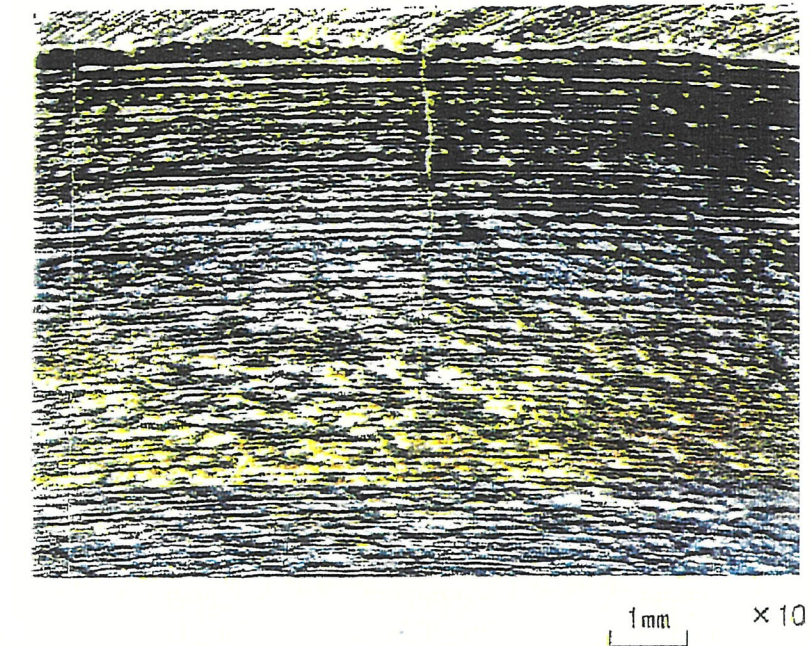
直管部周方向割れの断面ミクロ（割れh）



(B) 局所腐食及び全面腐食でない根拠

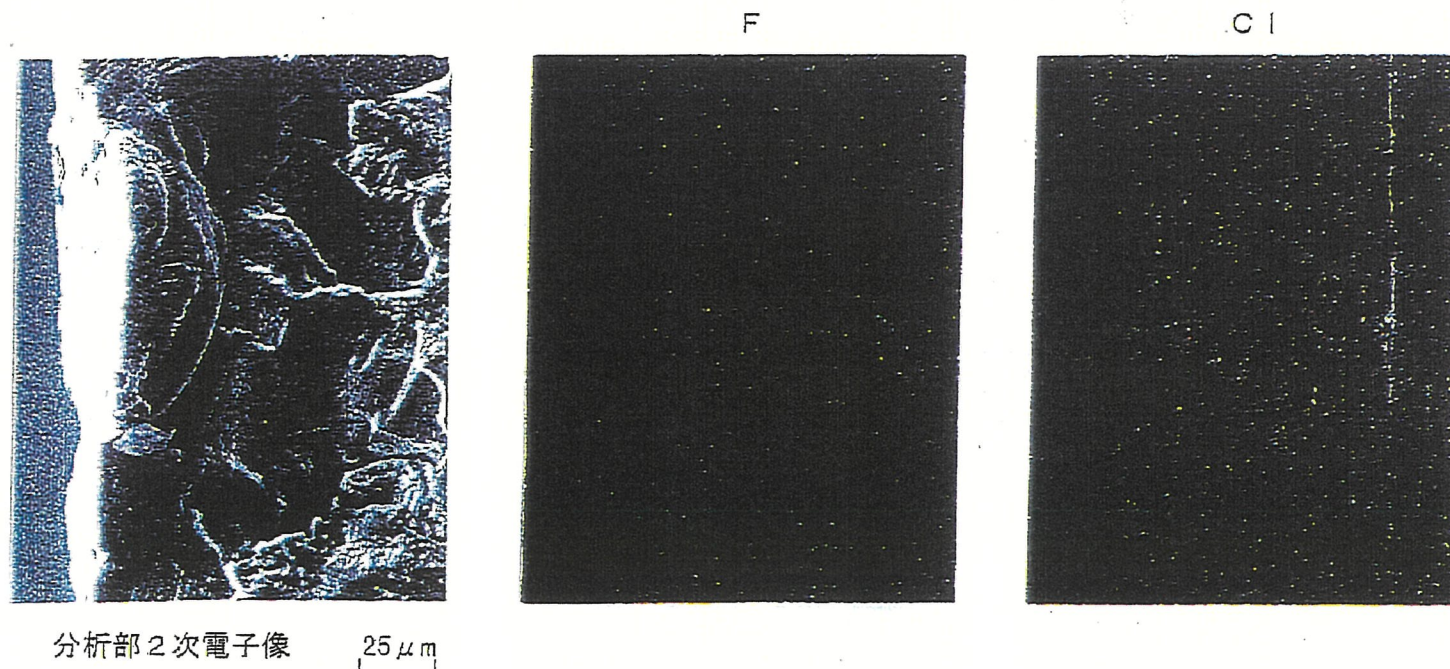
- 内面観察の結果，局所腐食及び全面腐食は認められなかった。

内面拡大観察結果（割れd近傍）

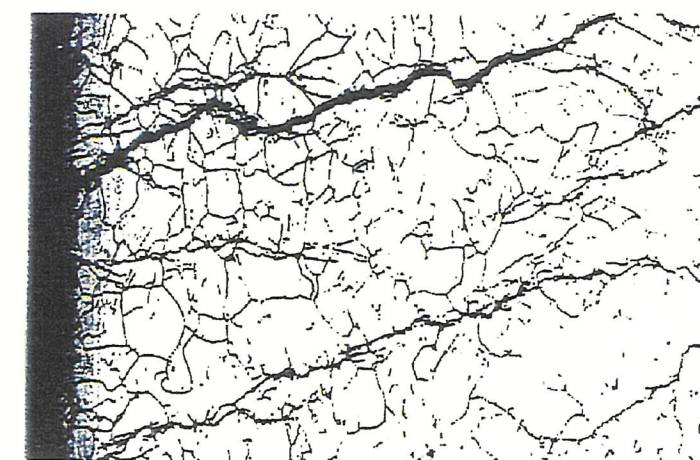


- SCC発生を助長させるような不純物（Cl，F）は破面上に認められなかった。

エルボ部軸方向割れ起点部のE PMA分析結果（割れb）

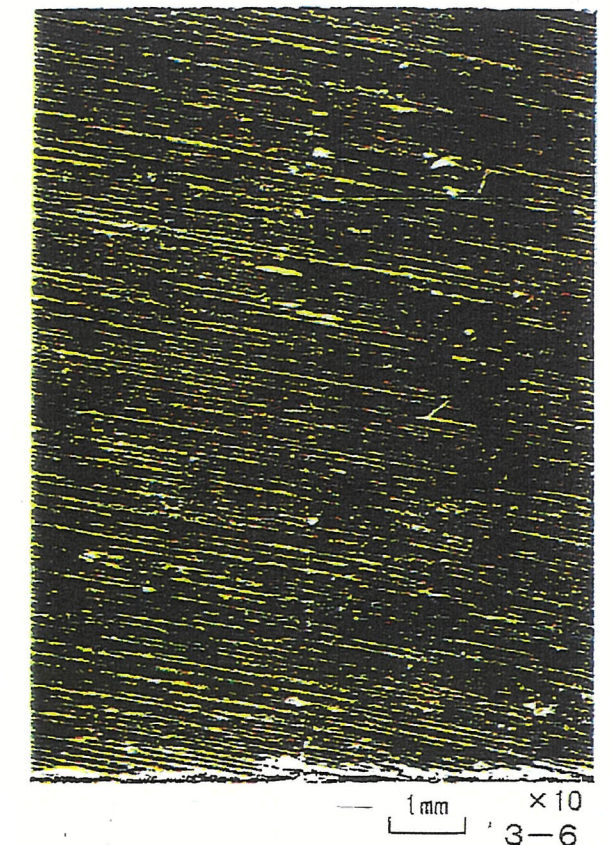


粒内型応力腐食割れの断面ミクロ例



304ステンレス鋼の沸騰45% MgCl_2 溶液（154°C）中における粒内応力腐食割れ（光学顕微鏡写真）×400

（割れc近傍）



解 析 評 価 等

- (1) 割れ評価アプローチについて
- (2) 再生熱交換器の構造・設計について
- (3) 流動模擬試験について

(1) 割れ評価アプローチについて

割れ評価アプローチについて

工場調査結果

- 高サイクル疲労に特有な破面（ビーチマーク・組織状模様・割れ先端近傍ではストライエーション状模様）
- 特に組織状模様は約 10^5 以上の繰返しが必要
- 外表面へいく程、ビーチマーク間隔狭
- 疲労以外の損傷要因（応力腐食割れ・局部腐食等）の可能性なし

高サイクル疲労割れ

要因	検討項目
繰返し応力（変動応力）の存在	変動応力源の検討
疲労限の低下	疲労限の検討（疲労限低下要因の検討）
変動応力 > 平均応力を考慮した疲労限	①割れ発生評価 ②割れ進展評価 ③破面観察結果との整合性

変動応力源の検討

再生熱交換器内部の流動模擬試験及び各種解析に基づき検討

破面観察結果との整合性

変動応力及び進展回数と破面観察結果の整合性を確認

ビーチマーク間隔からの変動応力の推定

$\Delta \sigma$ (曲げ応力の変動幅) パラメータ

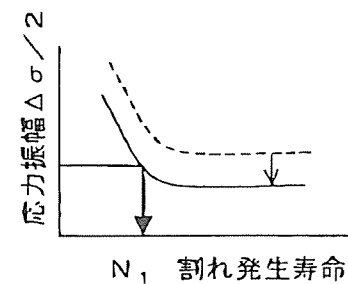
Raju-Newman 式による ΔK 値算出
 $\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} f(a, c)$
 ASME Sec.XI 式による進展評価
 $da/dN = C_n (\Delta K)^m$

a_5 迄繰返し計算

ビーチマーク条件との比較
 $c \approx c_5$ (実測), $\Delta K < 75 \text{ kg}/\text{mm}^{3/2}$

変動応力 $\Delta \sigma$ の推定

割れ発生評価



割れの発生

疲労限の検討

硬さに基づく材料強度

応力振幅 $\Delta \sigma / 2$

材料強度に基づく疲労限

0.2%耐力

平均応力を考慮した疲労限

平均応力
 ・内圧、熱応力
 ・素材残留応力
 ・据付残留応力

0.2%耐力 引張強さ

平均応力

平均応力を考慮した疲労限（修正 Goodman 線図）

割れ進展評価

初期割れ形状

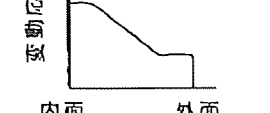
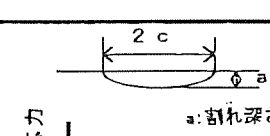
変動応力

割れ進展解析

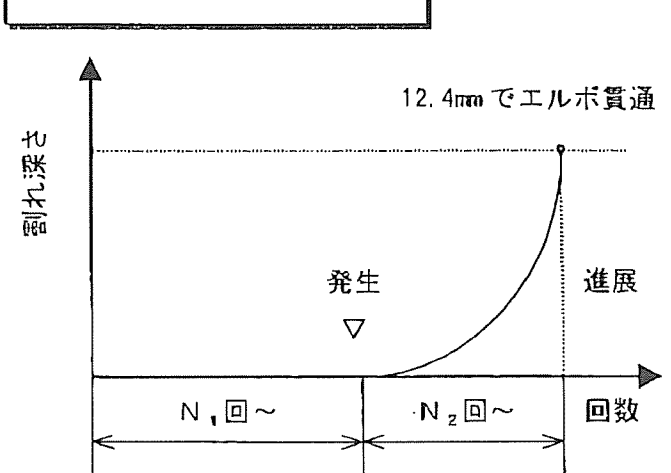
割れ進展

$a \geq a_i$

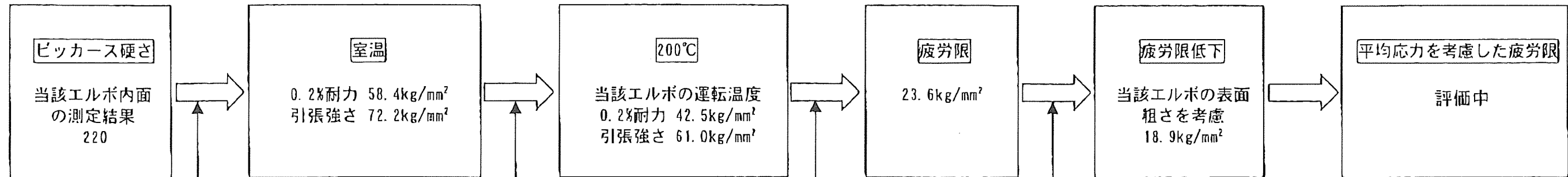
貫通までの繰返し数 N_2



割れ発生と進展のまとめ



エルボ割れ a の疲労限

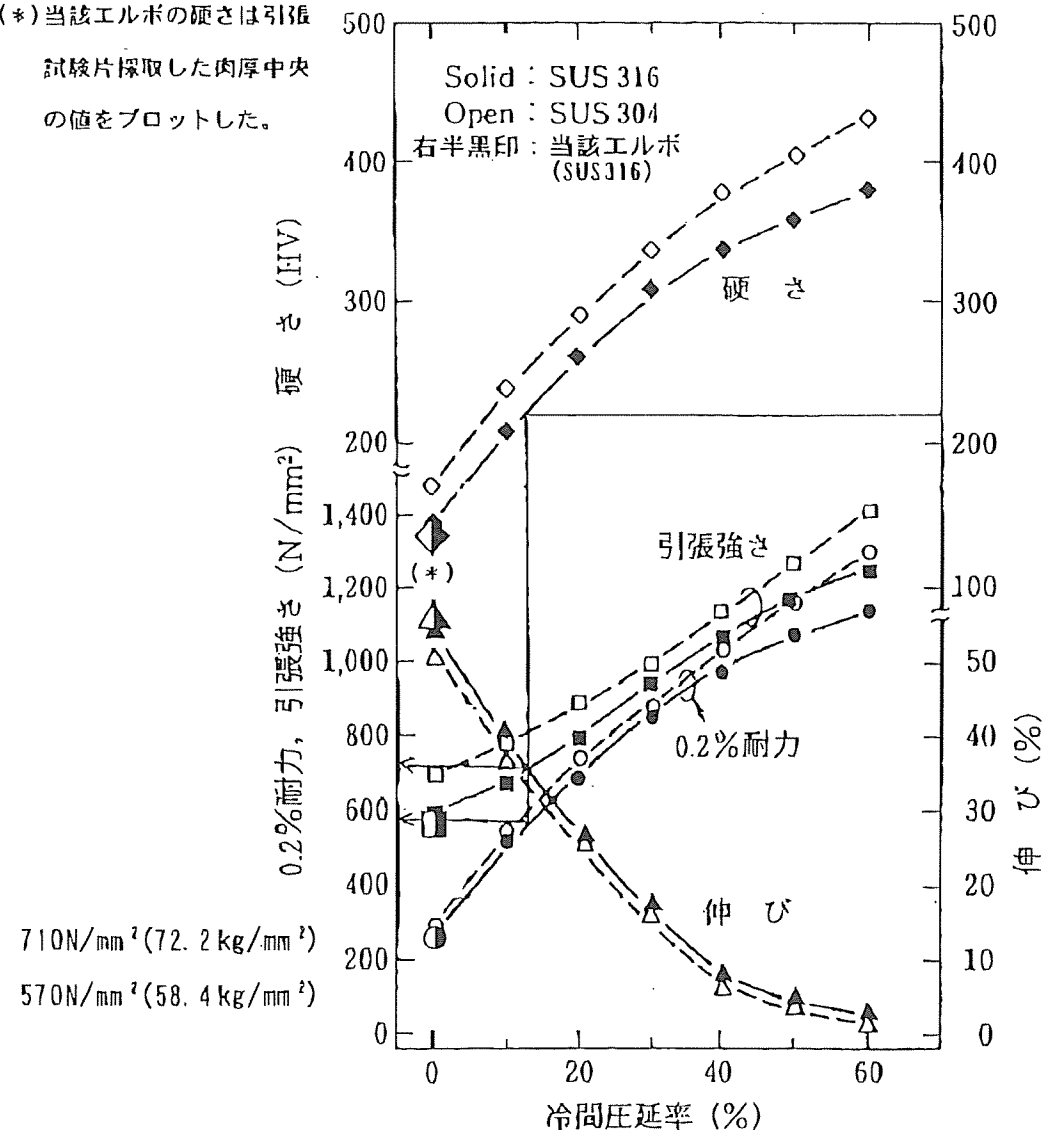


告示 501 号強度低下
別表 9, 10 による

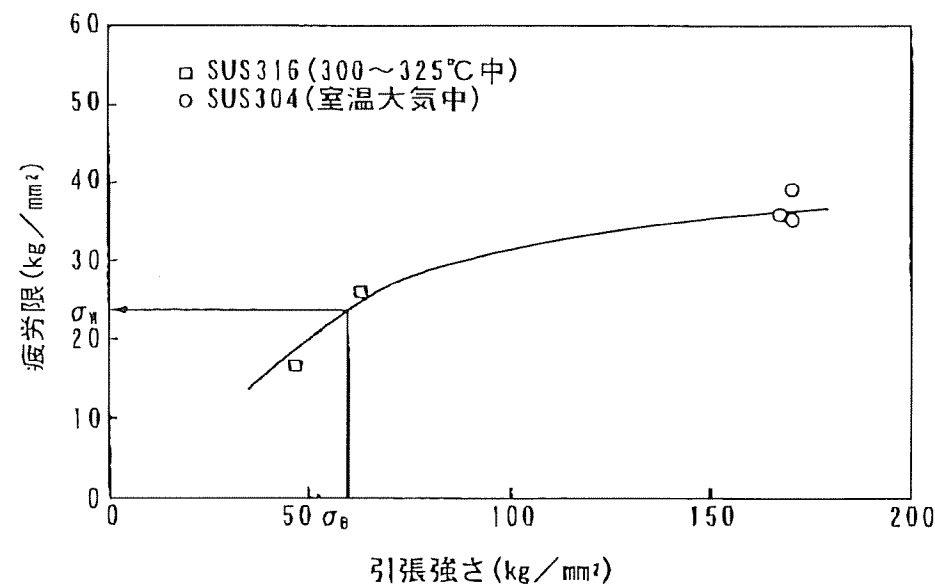
0.2%耐力	: 0.727
引張強さ	: 0.846

今回採取データを用いて
 $m=0.8$

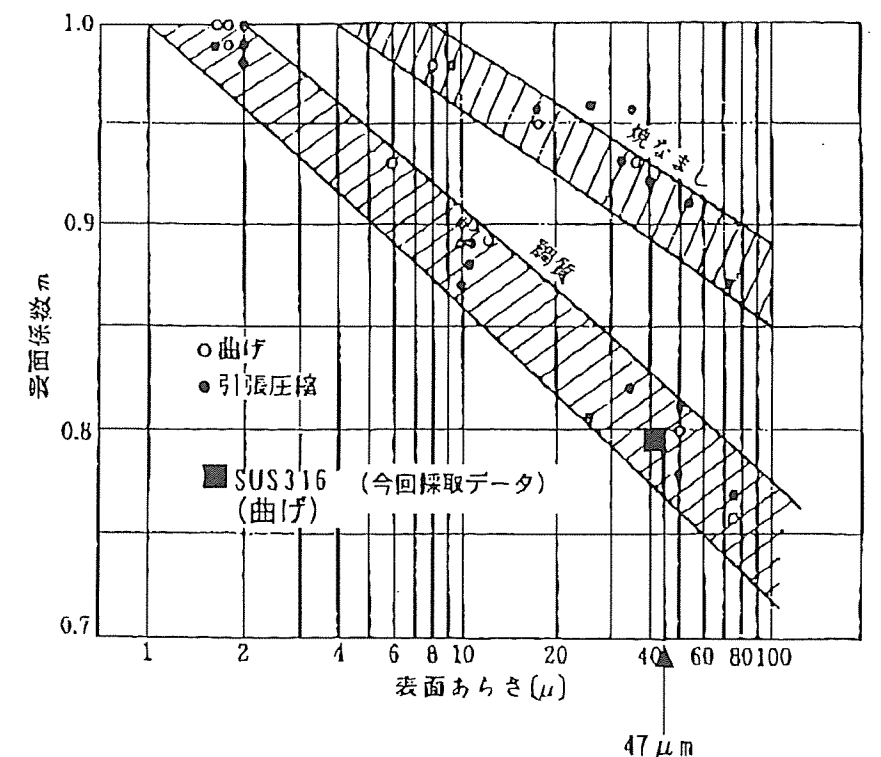
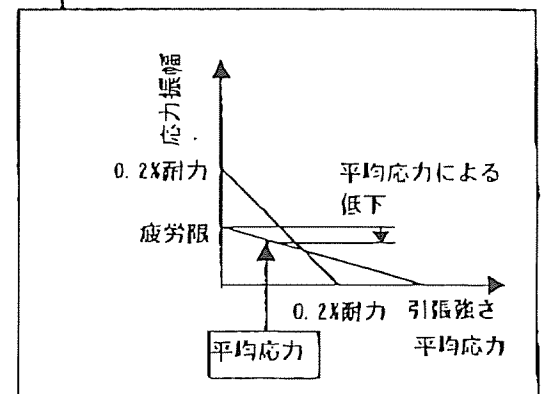
(*) 当該エルボの硬さは引張
試験片採取した肉厚中央
の値をプロットした。



硬さと 0.2%耐力, 引張強さの関係
出典 : ステンレス鋼便覧 第 3 版
及び今回採取データを追加



疲労限と引張強さの関係
出典 : 材料学会「金属材料疲労強度データ集」
および三菱重工業(株)社内データ



疲労限に及ぼす表面粗さの影響(炭素鋼及び低合金鋼)

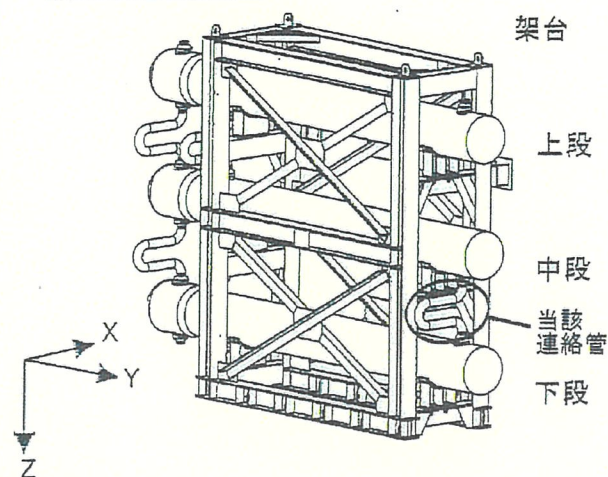
出典 : 河本実「金属の疲れと設計」
及び今回採取データを追加

内圧及び熱(通常運転時)による応力 (エルボ部)

目的

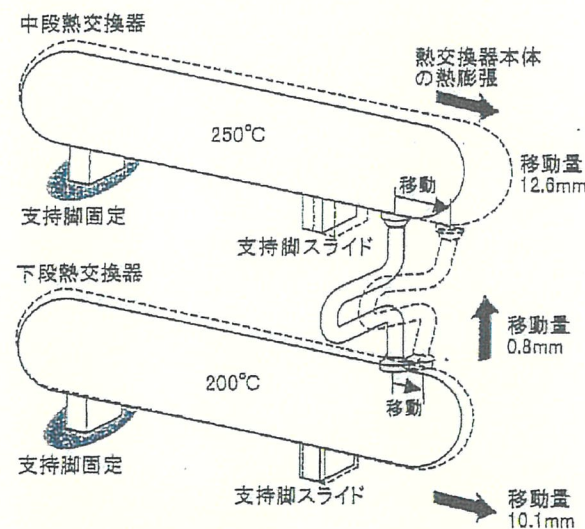
通常運転時の内圧、熱膨張による当該連絡管の応力を求める。

解析モデル



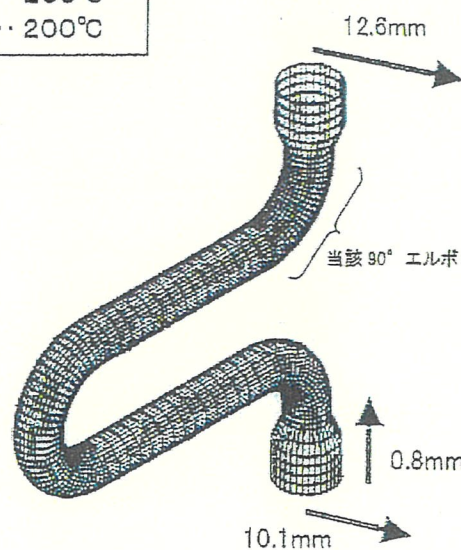
通常運転時の発生応力のしくみ

- ① 熱交換器軸方向(Y方向)相対変位による応力
 - ・ 連絡管は熱交換器本体の熱伸びにより図中Y方向へ移動。
 - ・ 中段と下段の熱交換器の温度が異なるため(約50℃)連絡管のY方向移動量が異なり、連絡管の上下でY方向に相対変位が生じ、応力発生。
- ② 上下方向(Z方向)相対変位による応力
 - ・ 運転中、各熱交換器の胴は、径方向に熱膨張するため、管台間の上下方向(Z方向)の距離が短縮し、応力が発生。
- ③ 連絡管の熱膨張
 - ・ 連絡管自身も熱膨張し上下方向へ伸びようとするが、熱交換器で止められているため、応力が発生。(②の応力と重畳される。)
- ④ 内圧による応力
 - ・ 運転圧力157kg/cm²により連絡管を押し広げる応力が発生。



中段熱交換器胴の温度 250℃
下段熱交換器胴の温度 200℃

- ・解析コード: ADINA
- ・使用要素: シェル要素
- ・メッシュ分割数
 - 周方向: 36 分割 10° ピッチ
 - 軸方向: 18 分割 5° ピッチ (当該 90° エルボ)
- ・メッシュ総数: 約 4000 メッシュ

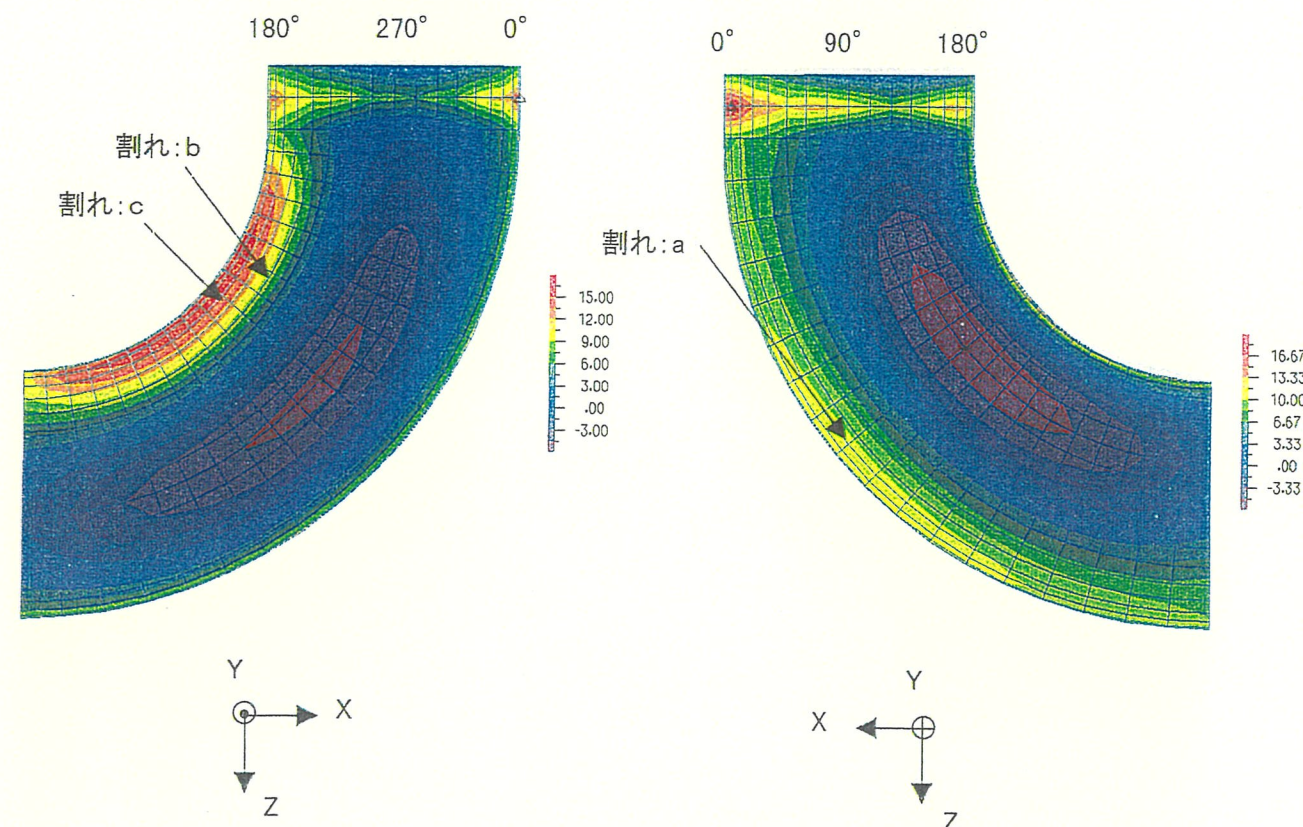


解析モデル

- 解析条件—
 - 配管温度 200℃
 - 通常運転圧力 157kg/cm²
 - 管台相対変位 左図参照
- 解析モデル—
 - FEM 解析(3D-シェルモデル)

解析結果

(1) 応力分布(内面の周方向応力を内側から見たコンタ図)



(2) 発生応力

エルボ部の割れ:a~c付近のエルボ内面における周方向応力(割れを開口させる方向の応力)は以下の通りである。

	(kg/mm ²)		
	割れ:a	割れ:b	割れ:c
内圧による応力	4.7	5.0	4.9
熱膨張による応力	6.1	6.2	6.5
合計	10.8	11.2	11.4

まとめ

通常運転時における内圧、熱膨張による応力を解析により求めた結果、エルボ部割れ付近における応力は約11kg/mm²程度と予想される。

連絡管据付による発生応力評価 (1/2)

1 目的

連絡管には据付施工に伴う応力が残留していた可能性があり、現地連絡管及びモックアップの切断試験により得られた変位、歪より据付時発生応力の検討を行った。

2 変位、歪計測

(1) 計測対象

現地当該連絡管、上流側連絡管及び工場モックアップ(2体)を切断し、以下を計測。

① 変位

- ・当該連絡管 : 下げ振り法
- ・上流側連絡管 : 下げ振り法
- ・モックアップ(2体) : 3次元光学計測

② 歪

下記を対象に右図断面の外面歪を計測。

- ・上流側連絡管
- ・モックアップ

(2) 計測結果

① 変位

- ・当該連絡管の変位の傾向は、上流側連絡管、モックアップ2体の傾向と異なる。
- ・当該連絡管の下げ振り法による変位より解析した結果では約 50 kg/mm^2 の応力が発生し過大。計測誤差が大きいと考えられる。
- ・モックアップの3次元光学計測変位を基にした解析応力は、計測応力と比較的よく一致。

② 歪

- ・計測歪を応力に換算すると 約 $-4 \sim 11 \text{ kg/mm}^2$ (上流側連絡管)、約 $-6 \sim 9 \text{ kg/mm}^2$ (モックアップ2体) となる。
- ・応力の円周方向分布の傾向は3者ともよく一致。

以上より、現地での下げ振り法による変位計測は誤差が大きく、歪計測に基づく応力が実態に近いと推定。

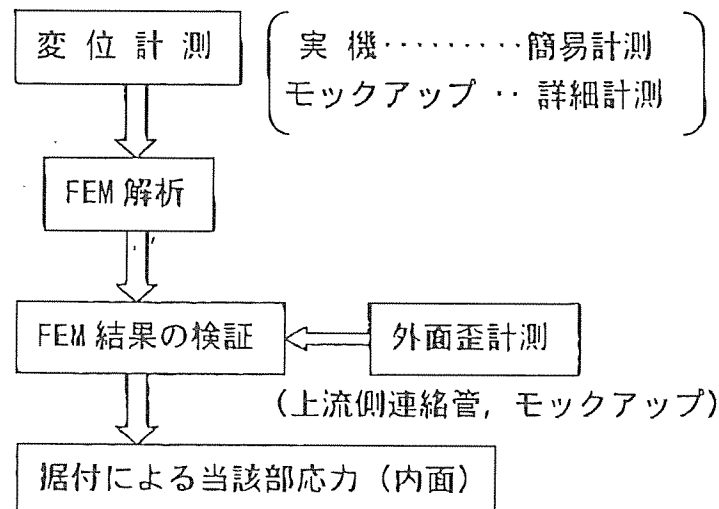
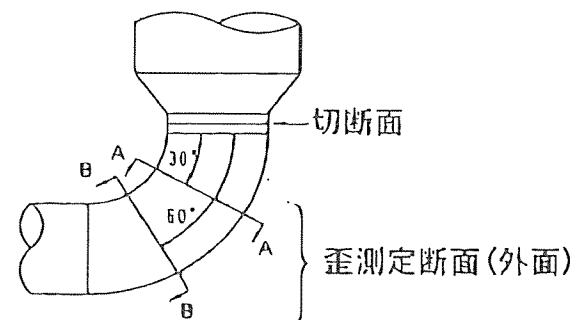


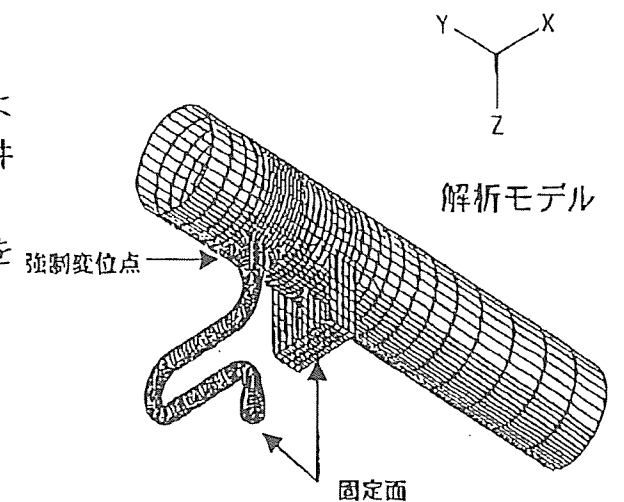
図-1 検討の流れ



3 当該連絡管応力評価

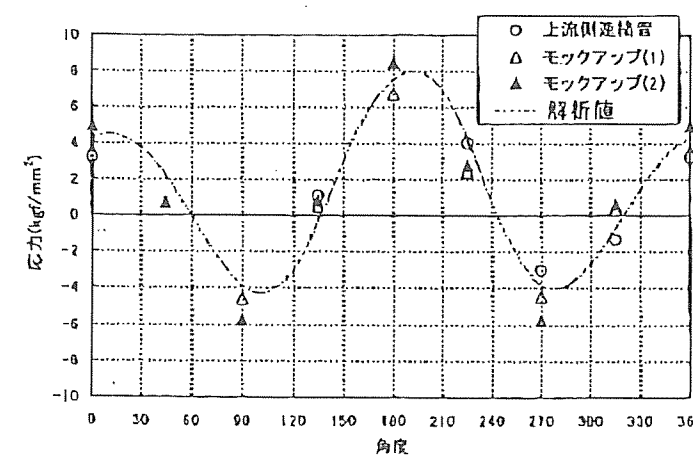
(1) 評価方法

- ・上流側連絡管、モックアップ2体の歪計測より求めた外面応力分布に合うように解析条件(強制変位)を設定。
- ・右図の解析モデルにより連絡管の応力解析を実施。
- ・各割れ部でのエルボ内面円周方向応力を算出。



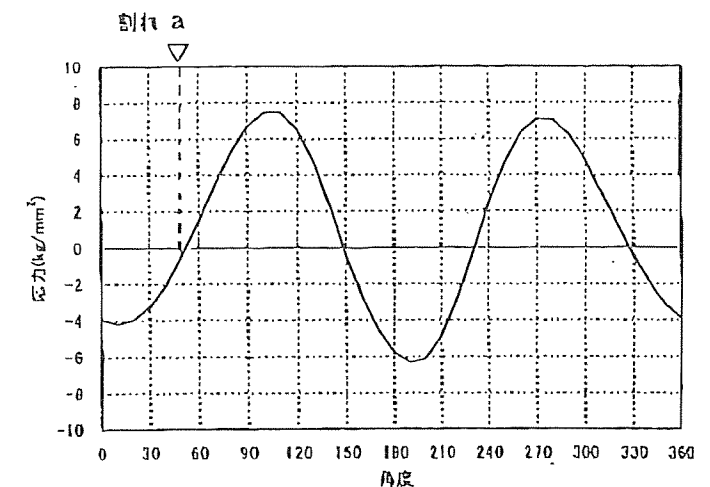
(2) 評価結果

エルボ外面の応力分布 (30°断面)



上流側連絡管、モックアップ2体の
応力計測結果と解析値は一致

エルボ内面の応力分布 (30°断面)



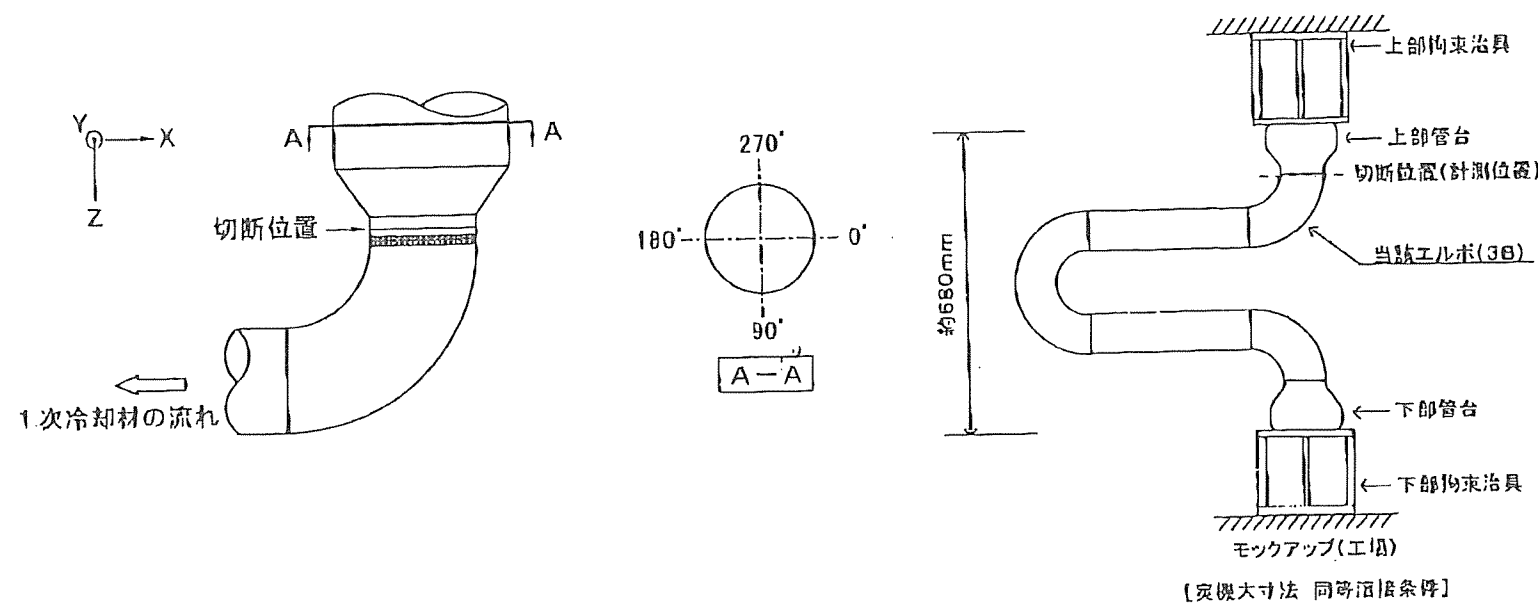
割れa位置での応力は
 -0.5 kg/mm^2 と推定

4 まとめ

据付によるエルボの割れa部での内面周方向応力は、 -0.5 kg/mm^2 と推定されるため、平均応力への寄与は小さい。

連絡管据付による発生応力評価 (2/2)

連絡管切断時変位計測結果

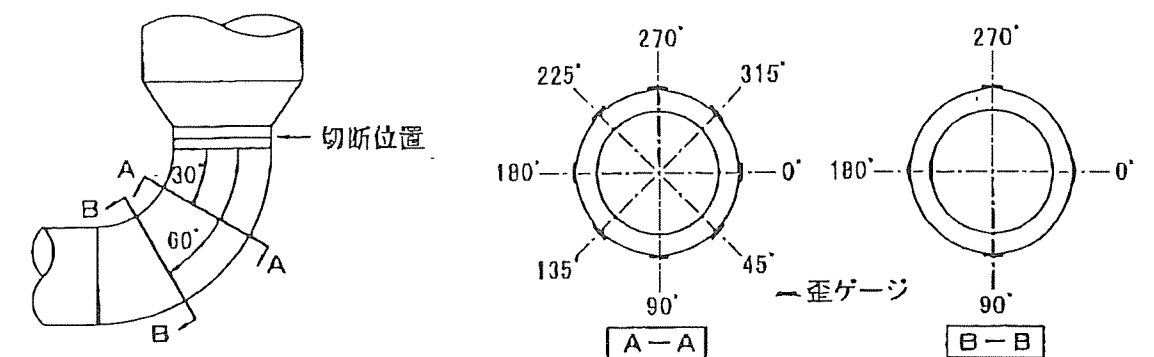


切断時変位計測結果(mm)

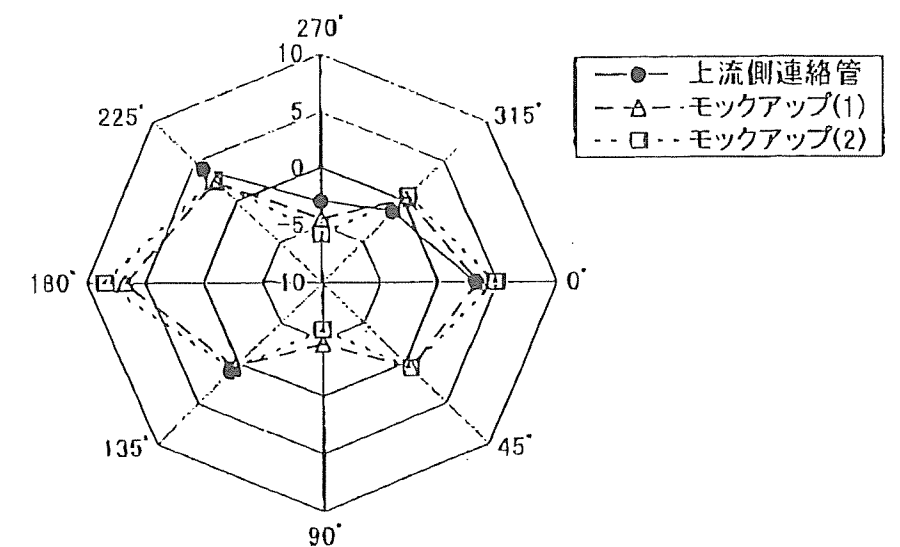
区分	対象	計測方法	X方向	Y方向	Z方向			
					0°	90°	180°	270°
現地	当該連絡管	下げ振り法	-1.0	-1.5	+3.0	+2.0	+1.0	+2.0
	上流側連絡管	下げ振り法	+0.5'	+2.25'	+2.5	+3.0	+4.0	+3.0
工場	モックアップ(1)	3次元光学計測	+0.7'	0'	+2.95	+2.99	+2.49	+2.72
	モックアップ(2)	3次元光学計測	-0.1'	+0.6'	+1.96	+2.02	+2.34	+2.10

* は平均値を示す。

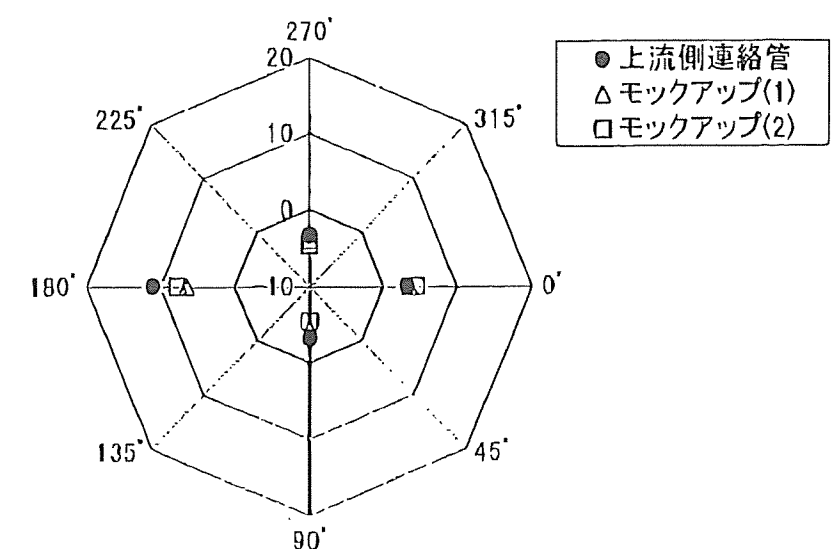
歪計測からの応力算出結果



A断面(30°断面)における周方向応力 (kg/mm²)

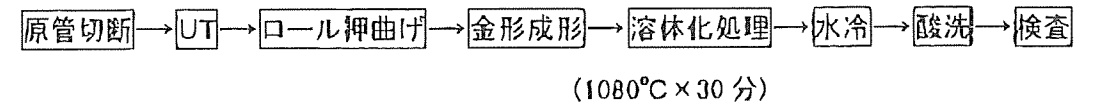


B断面(60°断面)における周方向応力 (kg/mm²)



エルボ製造の残留応力について

1. エルボ製造プロセス

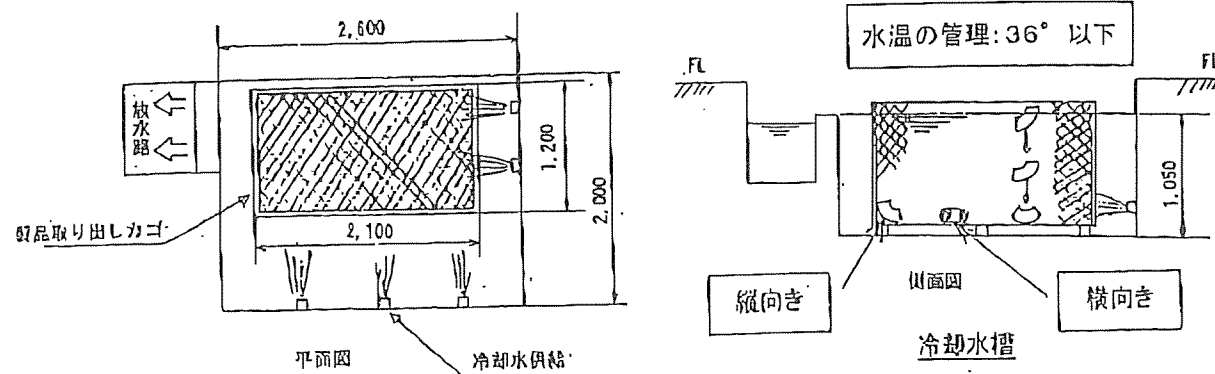
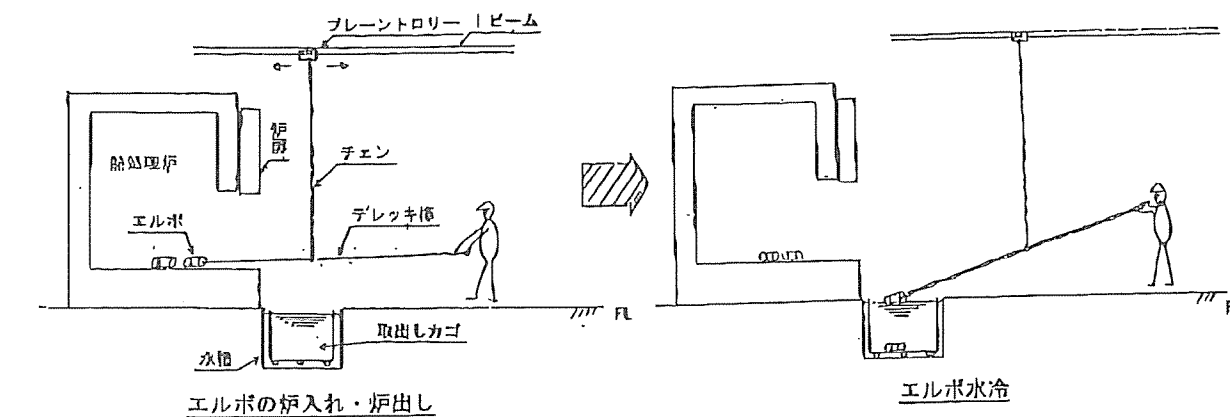


曲げ加工時歪み有

内部応力の発生(残留)

全断面の内部
応力は、ほぼ
ゼロ

エルボ水冷時の姿勢
冷却中のエルボは、横向き又は縦向きとなる可能性がある。

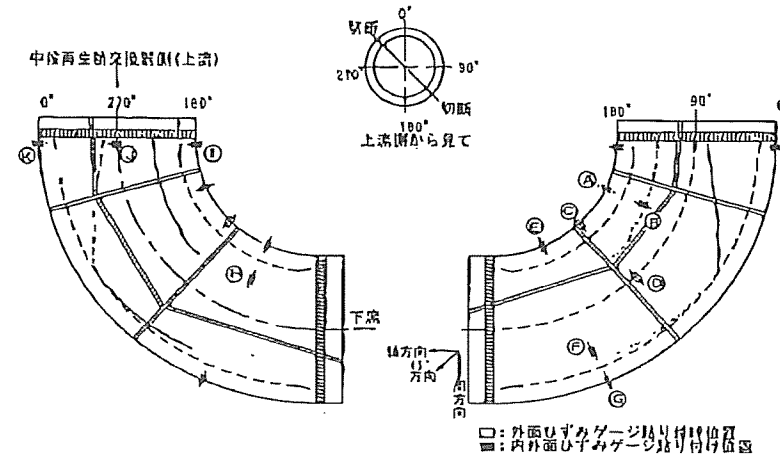


溶体化処理の為の熱処理後の水冷により、エルボ内蒸気の抜け状況に伴う内・外面の冷却速度の差により、残留応力が発生する。

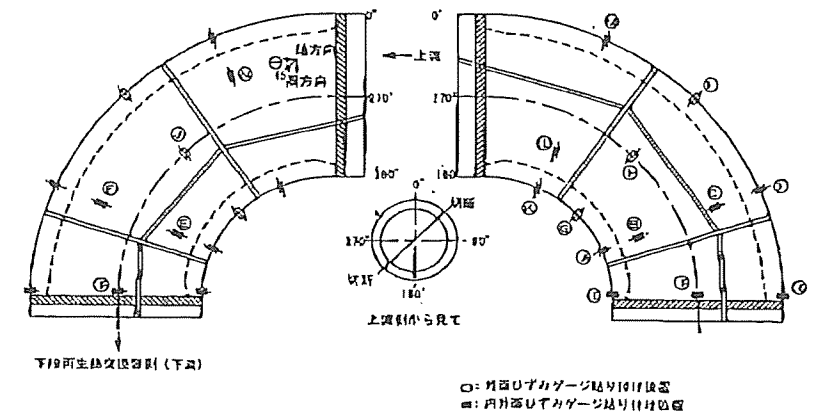
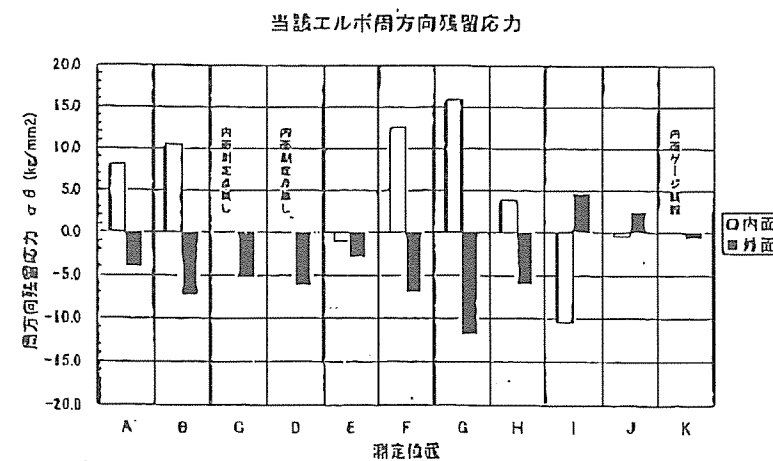
2. 民間機関での残留応力計測結果

損傷エルボ及び比較エルボ並びに同一製造法によるエルボの残留応力を計測した。

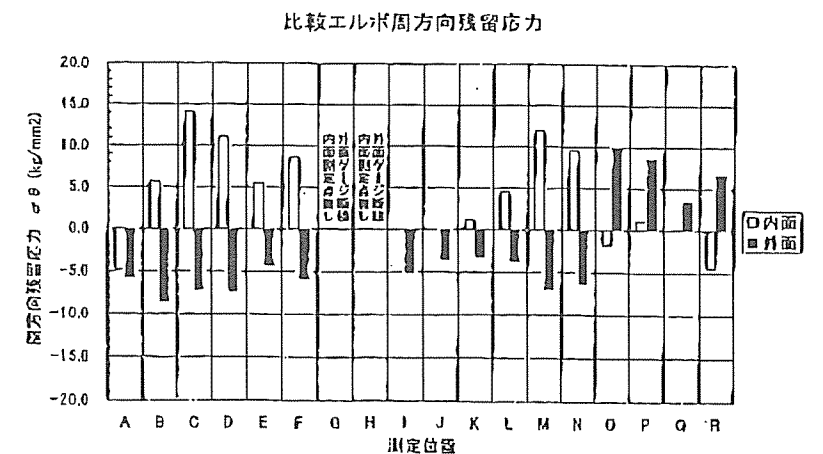
- (1) 実機連絡管損傷エルボ及び比較エルボは、ほぼ内面が引張、外面は圧縮の残留応力である。
- (2) 現状、測定結果は、エルボ素材の内面の周方向残留応力は約 $-10 \sim -17$ [kg/mm²]の範囲にあった。



当該エルボひずみゲージ貼付位置

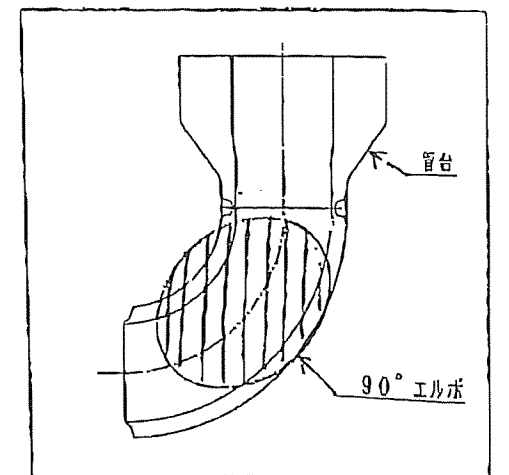


比較エルボひずみゲージ貼付位置(下流側エルボ)



3. 残留応力の評価

実機連絡管エルボは損傷を受けていることから、引張の残留応力を考慮し、計測結果から周方向残留応力は最大17kg/mm²であった可能性がある。

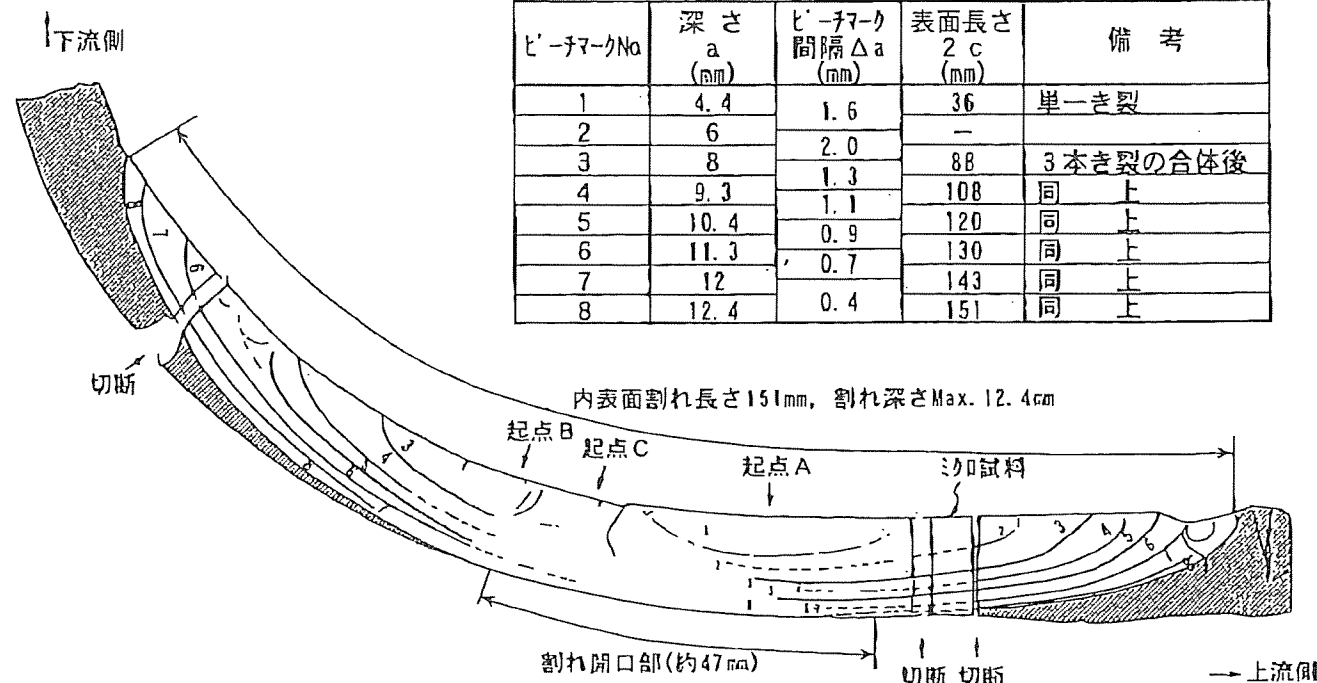


ビーチマーク間隔からの変動応力の推定

目的

民間調査機関における観察結果による主き裂(割れa)破面に対してき裂進展解析を行ない、作用した変動応力の推定を行なう。

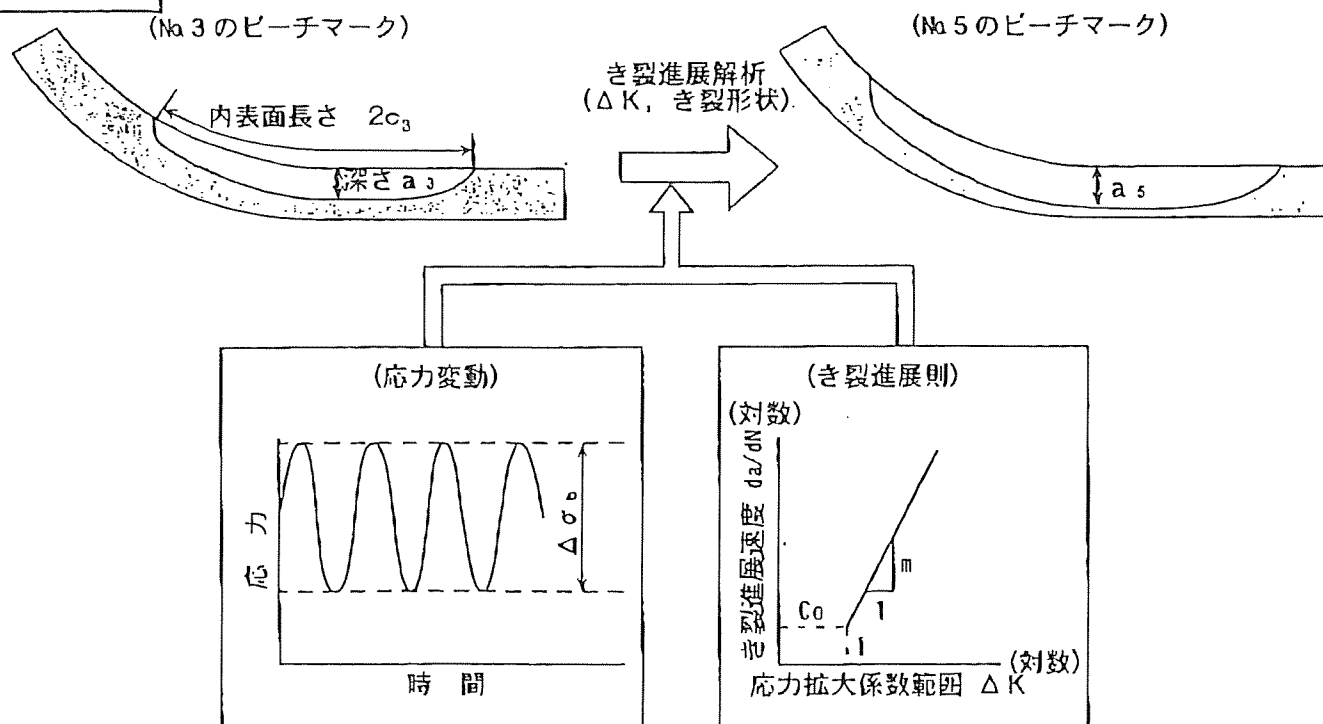
破面状況



* ビーチマーク数; 8本(ビーチマーク番号は内面側より採番した。)

図1 割れa(貫通き裂)の全体形状

前提条件(例)



Co, m: 材料等により決まる定数

(1) ΔK 算出式: Raju-Newman式

$$\Delta K = \Delta \sigma_b \cdot \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \cdot F\left(\frac{a}{c}, \frac{a}{t}, \phi\right) \quad (1)$$

ここで, a: き裂深さ, c: き裂表面半長, t: 肉厚, φ: き裂前縁位置(最深部: π/2, 表面部: 0), Q, F: 補正係数

(2) き裂進展速度: ASME Sec. XI Appendix Cの式

$$\frac{da}{dN} = C_0 (\Delta K)^m \quad (2)$$

ここで, Co, m: き裂進展定数 (Co = (1.0 ~ 3.4) × 10⁻¹⁰, m = 3.3)

(3) 応力モード: き裂が偏平であることから, 曲げ応力モードについて計算する。

き裂進展解析結果に基づく変動応力推定(代表例)

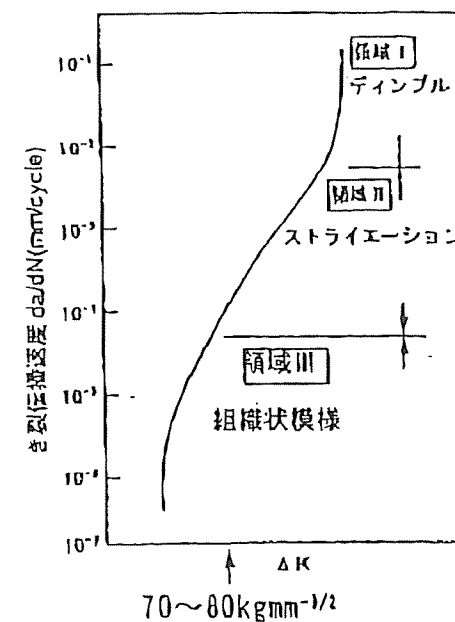
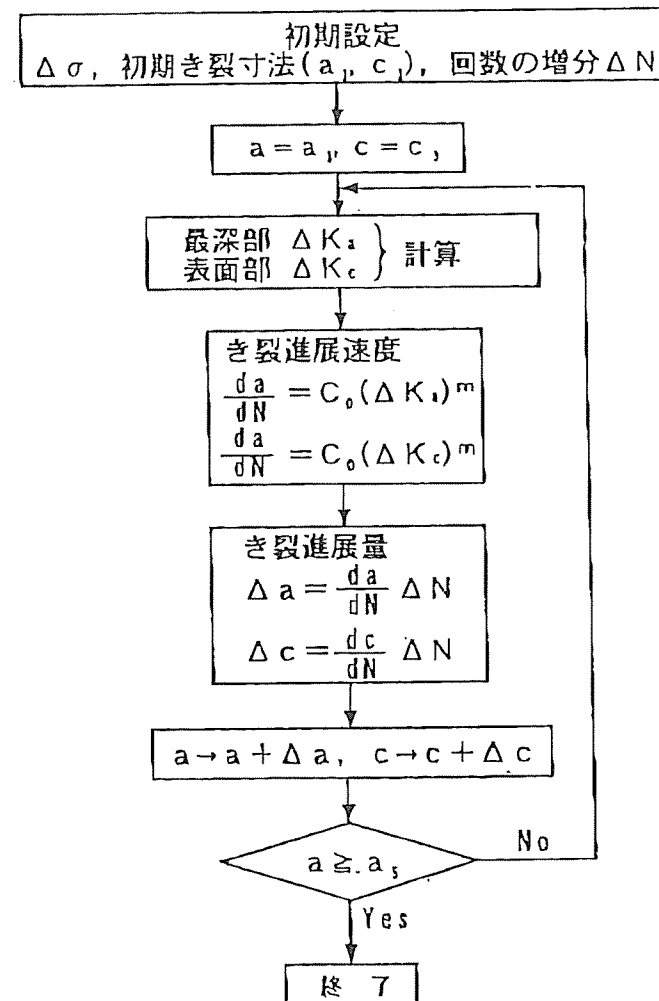
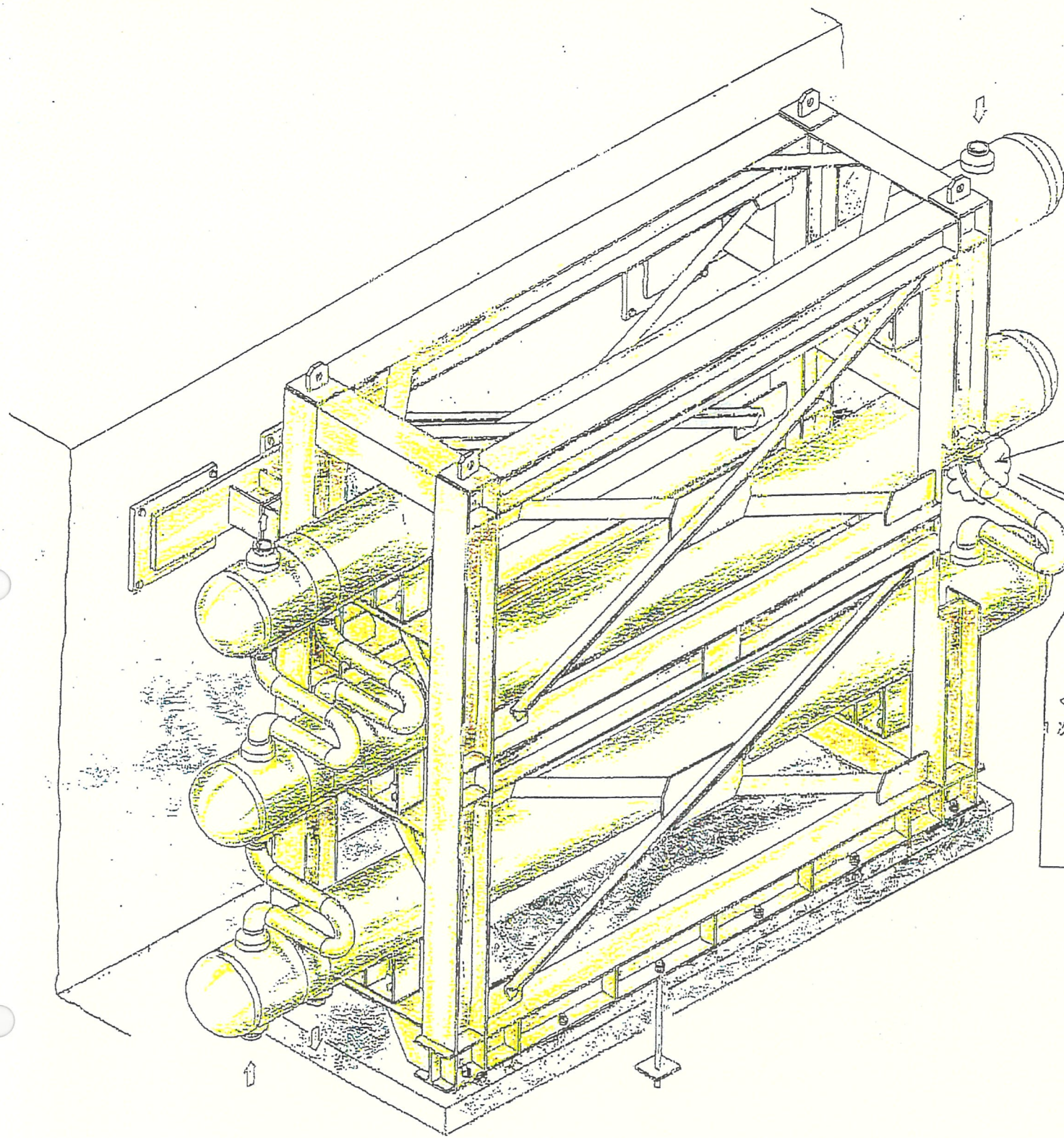


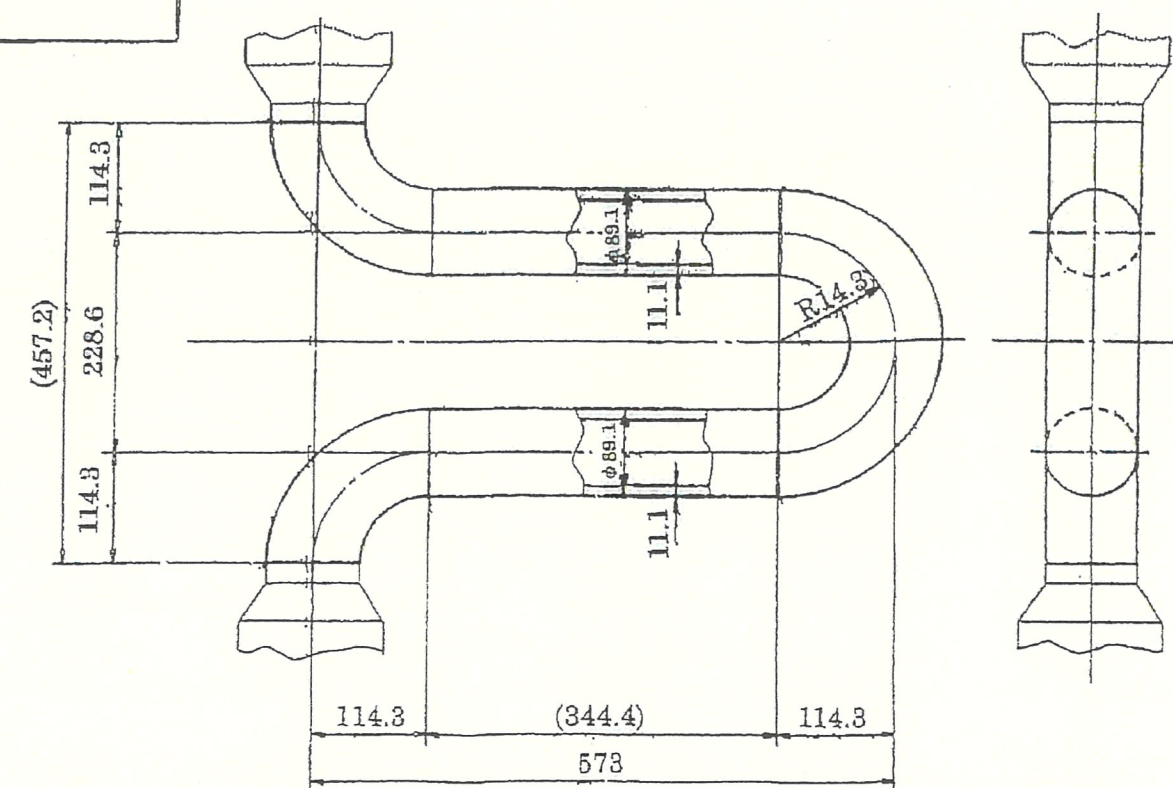
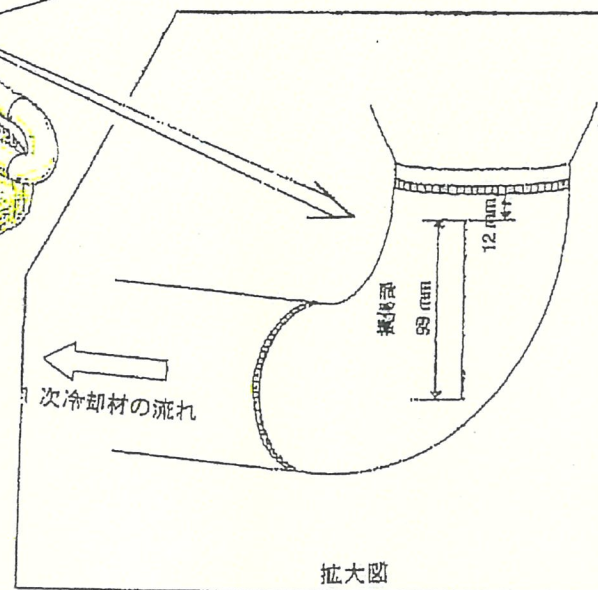
図4 破面の模様とΔKの関係

(2) 再生熱交換器の構造・設計について

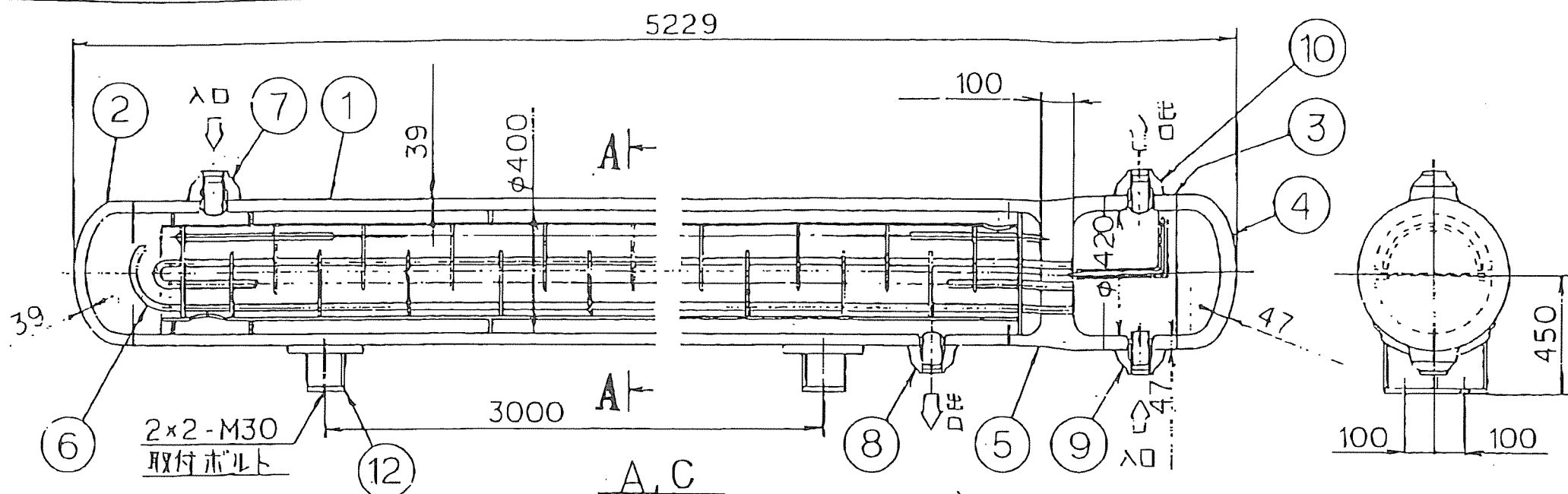


再生熱交換器（全体図）

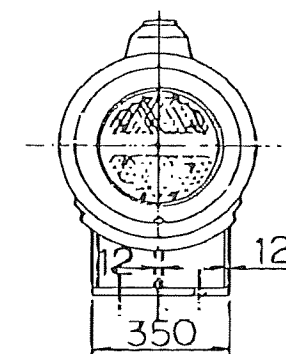
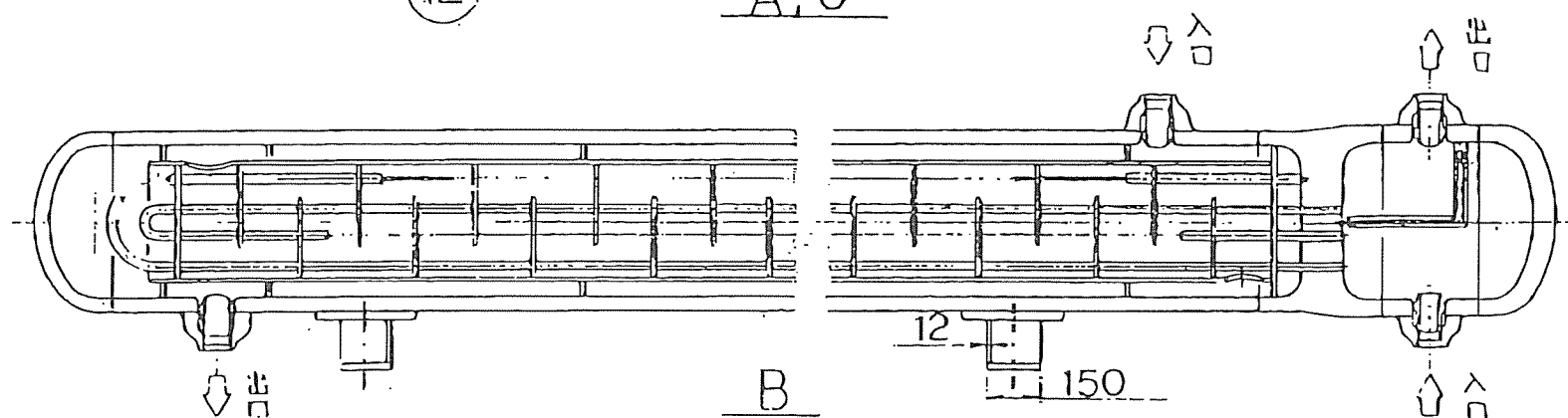
漏洩箇所



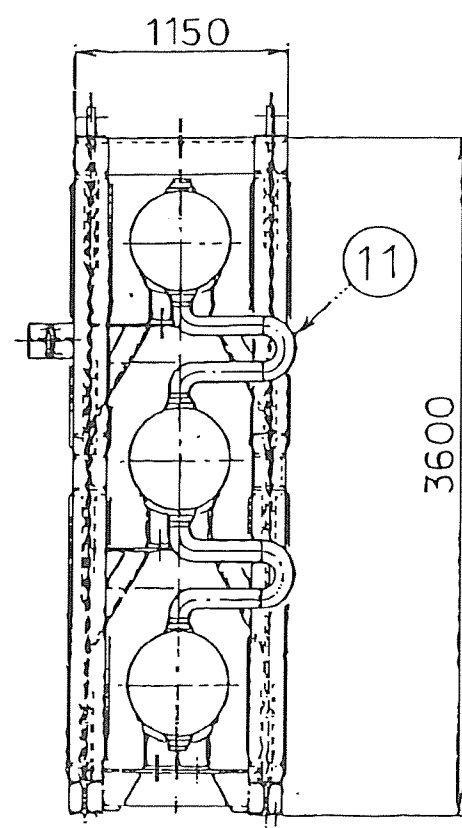
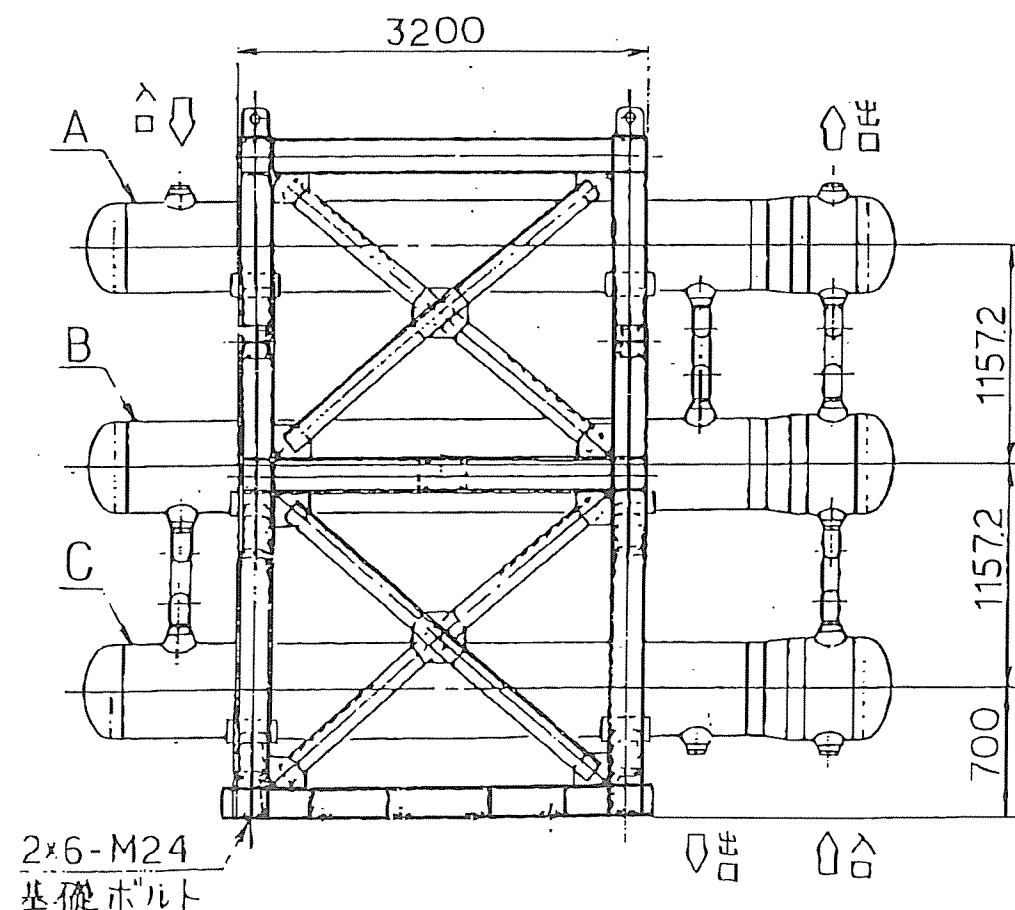
当該エルボ付近 寸法



主 要 目 表			
種 類	—	横置3胴U字管式	
容 量	kcal/h 個	$4.47 \cdot 10^6$	
最高使用圧力	kg/cm^2	(管側) 204	(胴側) 175
最高使用温度	$^{\circ}\text{C}$	(管側) 343	(胴側) 343
放射性物質濃度	$\mu\text{Ci/cm}^3$	(管側) 1以上	(胴側) 1以上
伝 熱 面 積	$\text{m}^2/\text{個}$	67.0	
重 量	空 の 時	kg	12700
	満 水 時	kg	14350
個 数	—	1	



断面A-A



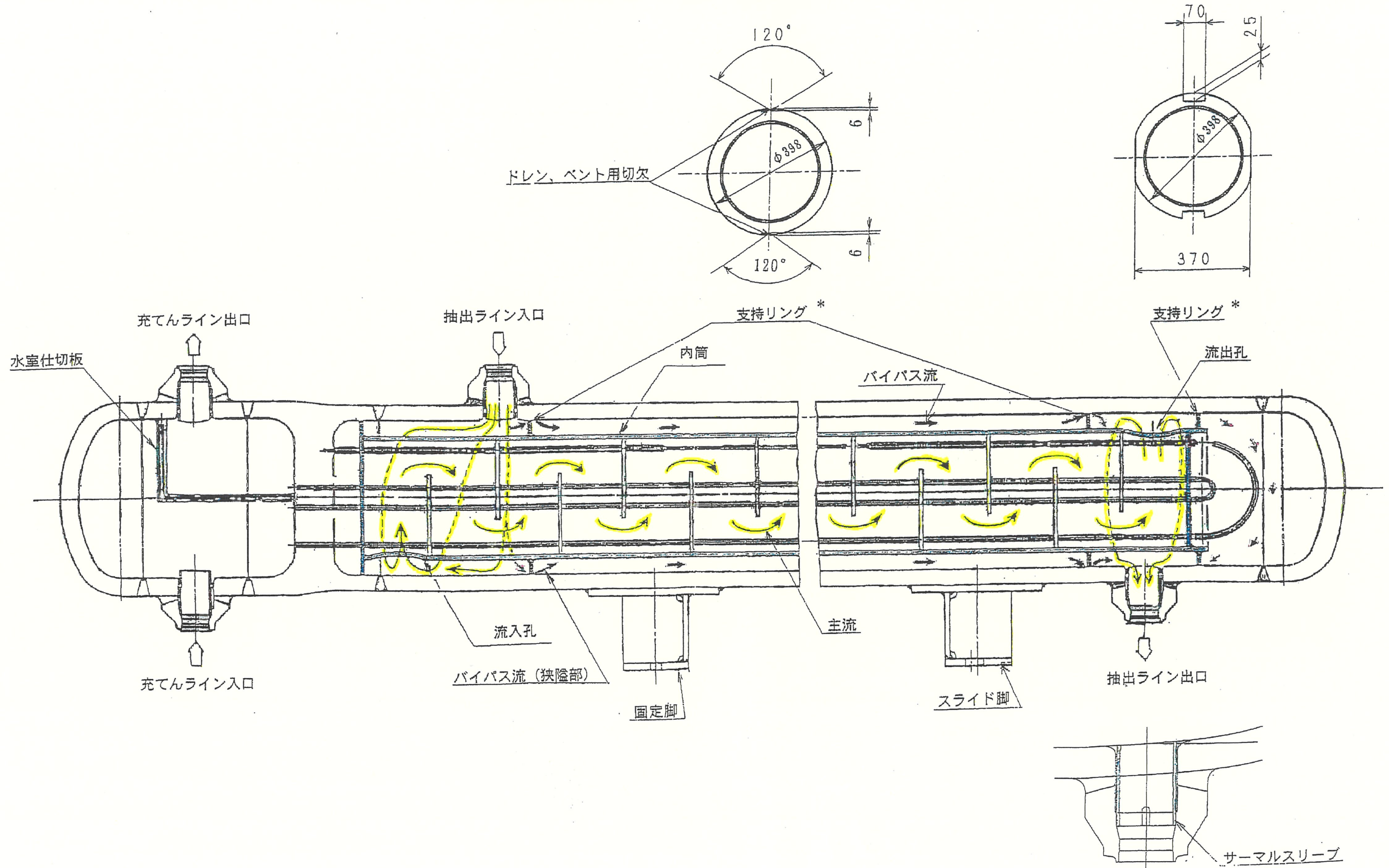
12	支 持 脚	SS41	—
11	管側胴側連絡管	SUSJ16TP	3 ϕ x Sch160
10	管側出口管台	SUSF316	3 ϕ x Sch160
9	管側入口管台	SUSF316	3 ϕ x Sch160
8	胴側出口管台	SUSF316	3 ϕ x Sch160
7	胴側入口管台	SUSF316	3 ϕ x Sch160
6	伝 熱 管	SUSJ16TB	12.7 ϕ x L2.2
5	管 板	SUSF316	—
4	管側鏡板	SUSF316	—
3	管側胴板	SUSJ16TP	—
2	胴側鏡板	SUSF316	—
1	胴側胴板	SUSJ16TP	—
番号	名 称	材 料	記 号

敦賀発電所2号機

原子炉冷却系統設備の構造図
(再生熱交換器)

日本原子力発電株式会社

再生熱交換器（中段）胴側流れ図

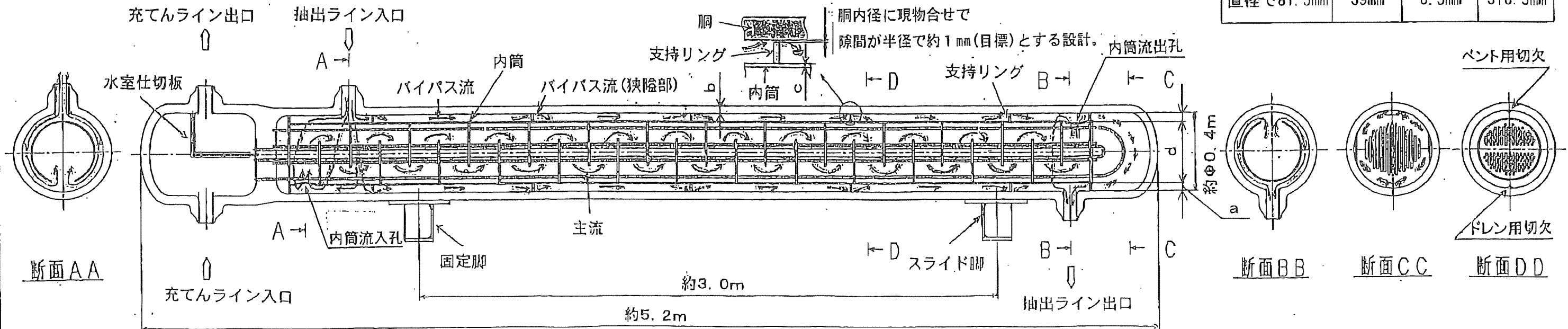


再生熱交換器の設計条件

流体の流れ（中段）

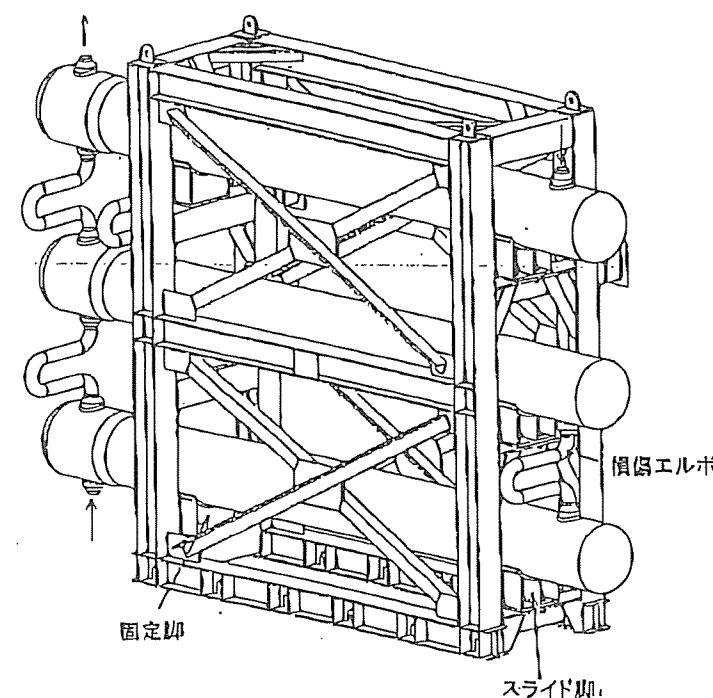
バイパス流量	バイパス流	同左（狭隘部）	抽出ライン入口	内筒流入孔	主流	内筒流出孔	抽出ライン出口
設計時圧損計算からの想定値（約23%）	約0.04 m/s	約1.3 m/s	約2.6 m/s	約0.8 m/s	約0.4 m/s	約0.7 m/s	約2.4 m/s
運転データに基づく評価値（約40%）	約0.07 m/s	約1.6 m/s	約2.6 m/s	約0.6 m/s	約0.3 m/s	約0.5 m/s	約2.4 m/s

内筒/胴内径 すきま（a）	胴板厚 （b）	内筒板厚 （c）	内筒外径 （d）
直径で81.5mm	39mm	6.5mm	318.5mm

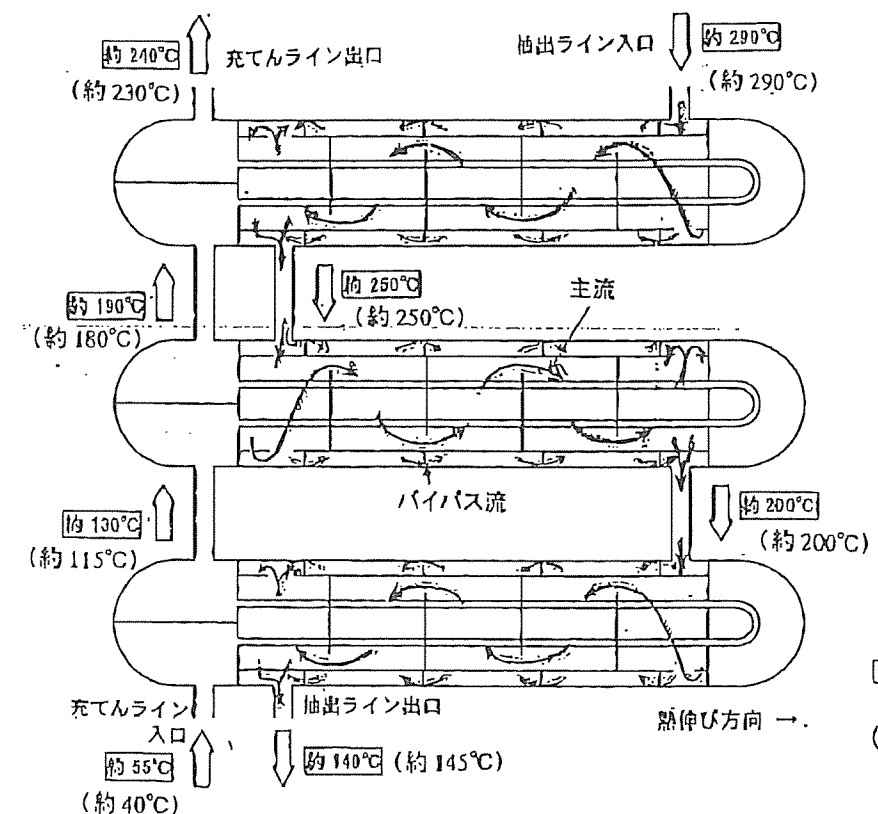


設計条件

設計条件		
種類	横置3胴U字管式	
交換熱量	4.47×10 ⁶ kcal/h	
	管側	胴側
最高使用圧力	204 kg/cm ²	175 kg/cm ²
最高使用温度	343 °C	343 °C
入口温度	54.4 °C	289.1 °C
出口温度	246.4 °C	137.6 °C
流量	2.26×10 ⁴ kg/h	2.71×10 ⁴ kg/h



各部の温度



□ は設計値
() は実機運転データに基づく評価値

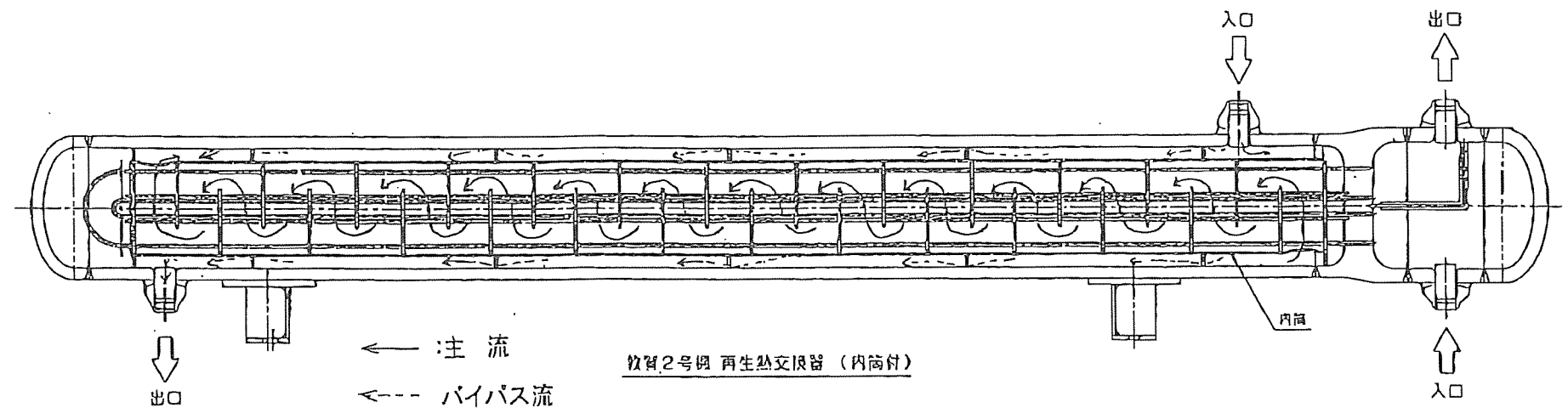
敦賀2号機 再生熱交換器 バイパス流の評価

1. 設計当時のバイパス流の考え方

バイパス流の評価

約23%と設定（圧損からの評価）

胴と内筒の間を流れるバイパス流は、内筒内を流れてきた主流と合流するが、入口から出口までの両方の流れの圧力損失が等しくなるようなフローバランスから算出した値。



2. 今回のバイパス流の評価

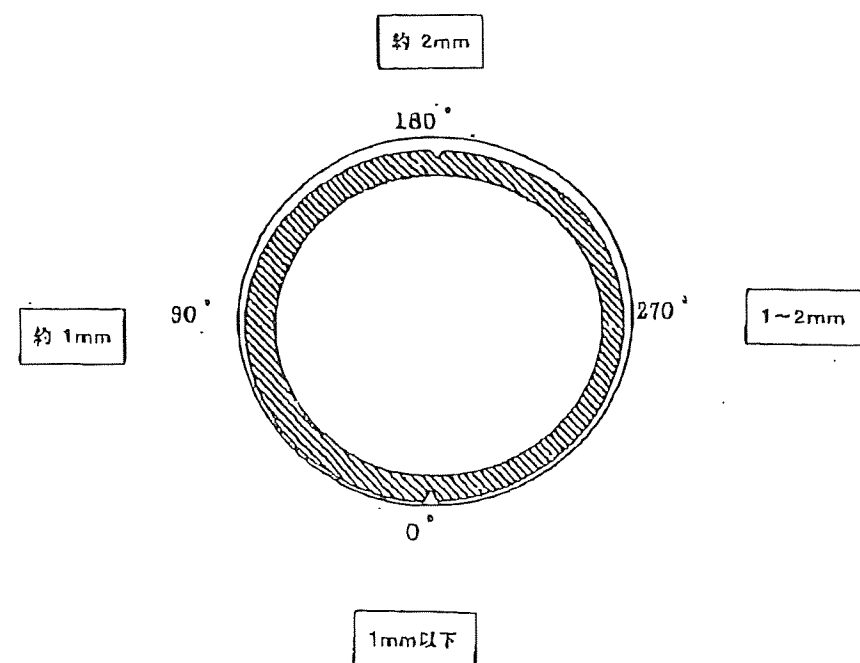
(1) 胴と内筒支持リングの隙間

① 製造履歴からの評価

内筒支持リングの外径と胴内径の隙間寸法は2mmと設定したが、加工公差等により2mm以上となっている可能性がある。

② 現地調査からの評価

現地調査結果から、胴内面と内筒支持リング間の隙間は約2～3mmと推定。



(2) バイパス流の評価

① 熱・流量の伝熱バランスからの評価

実機プラントパラメータ(温度・流量)と熱交換器の伝熱性能計算によりバイパス流量を求める。これにより計算した値は約40%である。

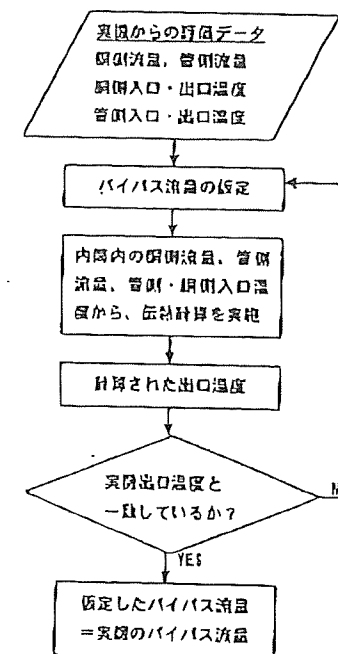
【解析コード】メーカ保有コード

〈計算手法は右のフロー参照〉

【入力条件】通常運転時の平均値

- ・胴側流量：約28.5t/h
- ・管側流量：約22.9t/h
- ・胴側入口温度：約290℃
- ・胴側出口温度：約145℃
- ・管側入口温度：約40℃*
- ・管側出口温度：約230℃

* 熱収支より設定



② 圧損からの評価

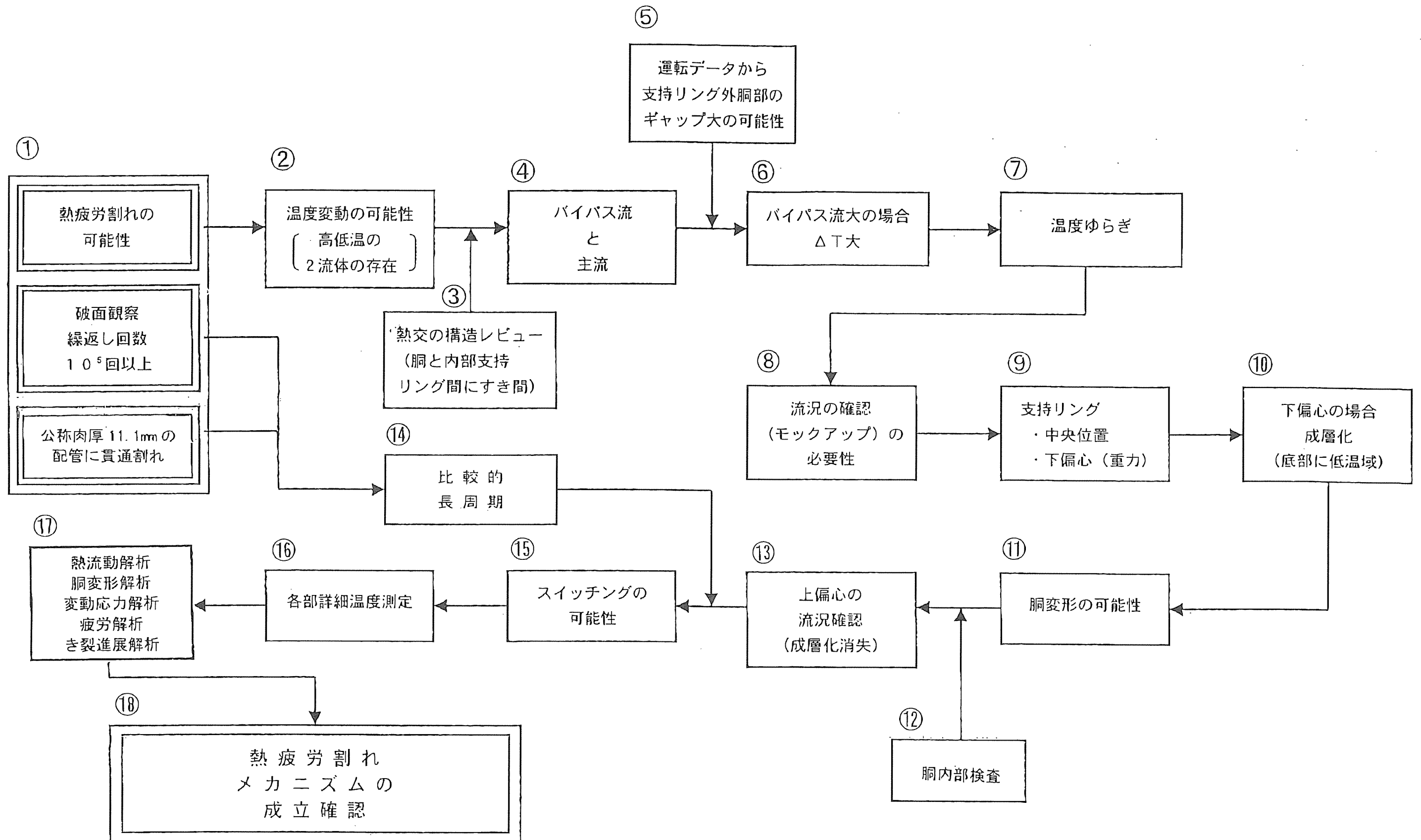
上記1. (2)で行った計算に加工状態を考慮して再評価を行う。
下記を考慮するとバイパス流量は約40%となる。

- ・支持リング先端の糸面取りによる影響
- ・隙間の寸法(2mm→3mm)による影響。

バイパス流量
約40%

製造及び現地調査の結果を踏まえ、熱・流量の伝熱計算及び圧損計算に誤差等を考慮した結果、約40%と評価。

(3) 流動模擬試験について



原因究明の検討プロセス

熱交換器内部流動模擬試験の状況について

1. モックアップ試験の目的

- ① 再生熱交換器内の流況及び温度分布の把握
- ② 数値流体力学解析とモックアップ試験結果を比較評価し、解析の妥当性を検証

2. 試験装置の考え方

- 遅い主流／バイパス流(流れの存在) ⇨ 慣性力
 - 主流／バイパス流に温度差 ⇨ 浮力
- (慣性力と浮力の支配する流れは、 Ri 数で特徴づけられる。)

リチャードソン数を実機にあわせ流況模擬
(相似則を成立させ模擬試験の結果から実機の流況を推定する。)

<実機>			<試験装置>		
主 流	流量	17.1m ³ /h	主 流	流量	6.8m ³ /h
	温度	170°C		温度	30°C
バイパス流	流量	11.4m ³ /h	バイパス流	流量	4.6m ³ /h
	温度	250°C		温度	70°C
密度変化率 ($\Delta\rho/\rho$)	0.112		密度変化率 ($\Delta\rho/\rho$)	0.018	
代表寸法*(D)	0.08m		代表寸法*(D)	0.08m	
代表流速*(u)	0.070m/s		代表流速*(u)	0.028m/s	
Ri	18		Ri	18	

Ri 数(リチャードソン数)
 $Ri = \frac{g\Delta\rho/\rho D}{u^2}$

* 外筒と内筒間のギャップを流れるバイパス流を代表寸法、流速とした。

- 実機と同一寸法・形状模擬
 - 対象部位は主流／バイパス流が混合する部位を中心にその近傍
- ↓
- 主流(冷水)とバイパス流(温水)との混合部熱交換状況を確認

3. 試験装置の概要及び試験条件

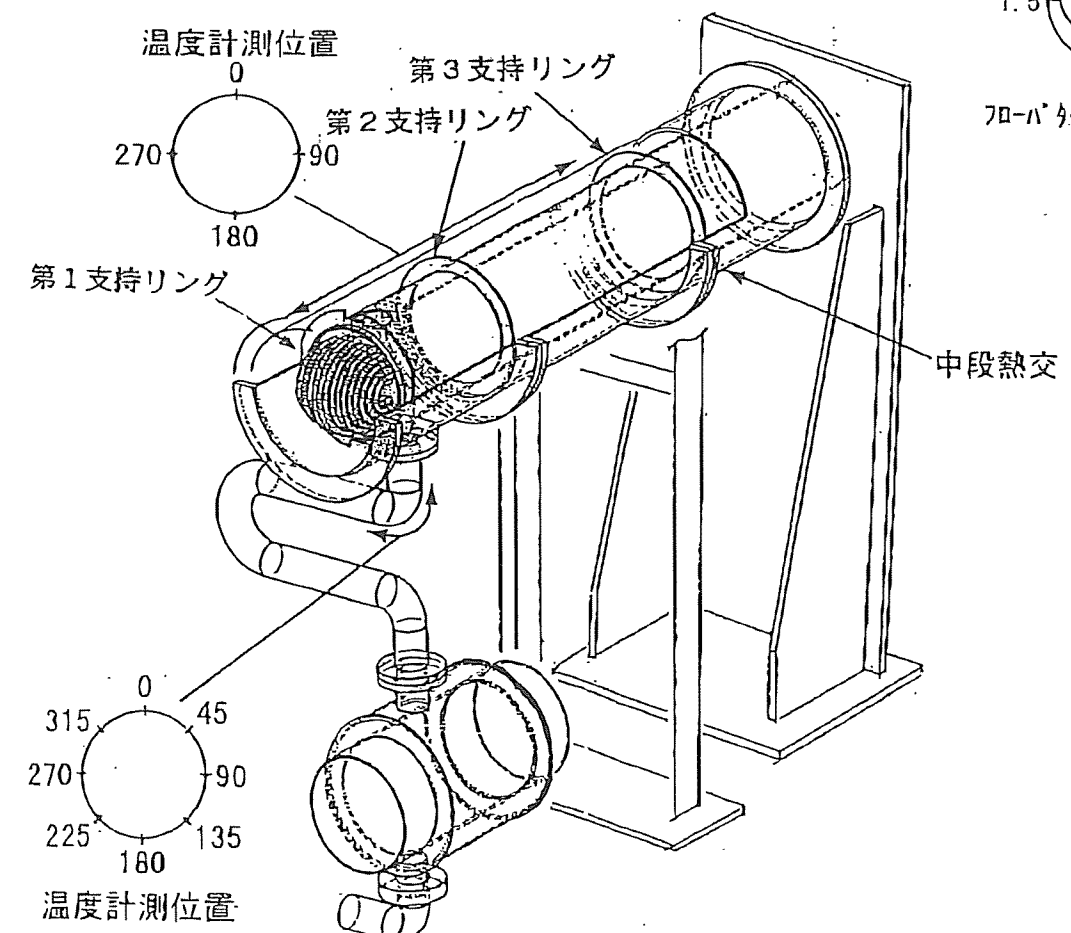
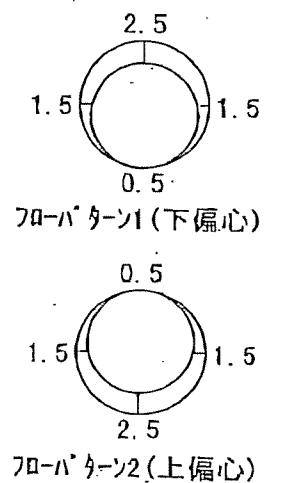
—試験装置—

- 内 筒: SUS → 実機と同一素材とし、熱交換を考慮
 - 胴 : アクリル → 流況可視化
 - エ ル ボ: アクリル → 流況可視化
 - 計測項目: ☆高温水／低温水流動状況…インクトレー及び可視化による目視観察
☆流体温度分布…(1) 胴部・エルボ部の温度計測(熱電対)
(2) サーモビューアーによる温度分布評価
- 実機の
1/1モデル

—試験条件—

	バイパス流	主流側
試験温度	70°C	30°C
試験流量	4.6m ³ /h	6.8m ³ /h
の 間 の 支 持 リ ン グ	70-パターン1	#1, #2, #3 支持リング: 下偏心
	70-パターン2	#1, #2, #3 支持リング: 上偏心

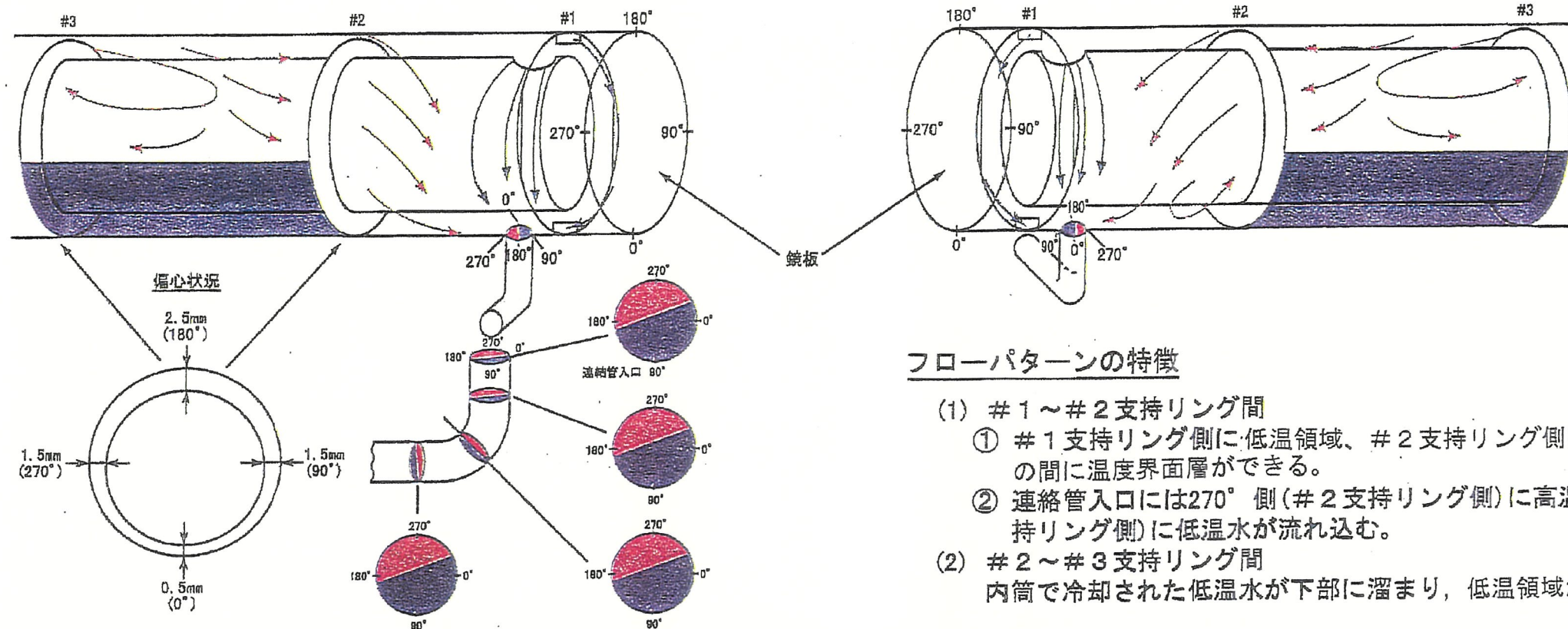
#2 支持リングの例



モックアップ試験装置

再生熱交内の流況について

フローパターン1



フローパターンの特徴

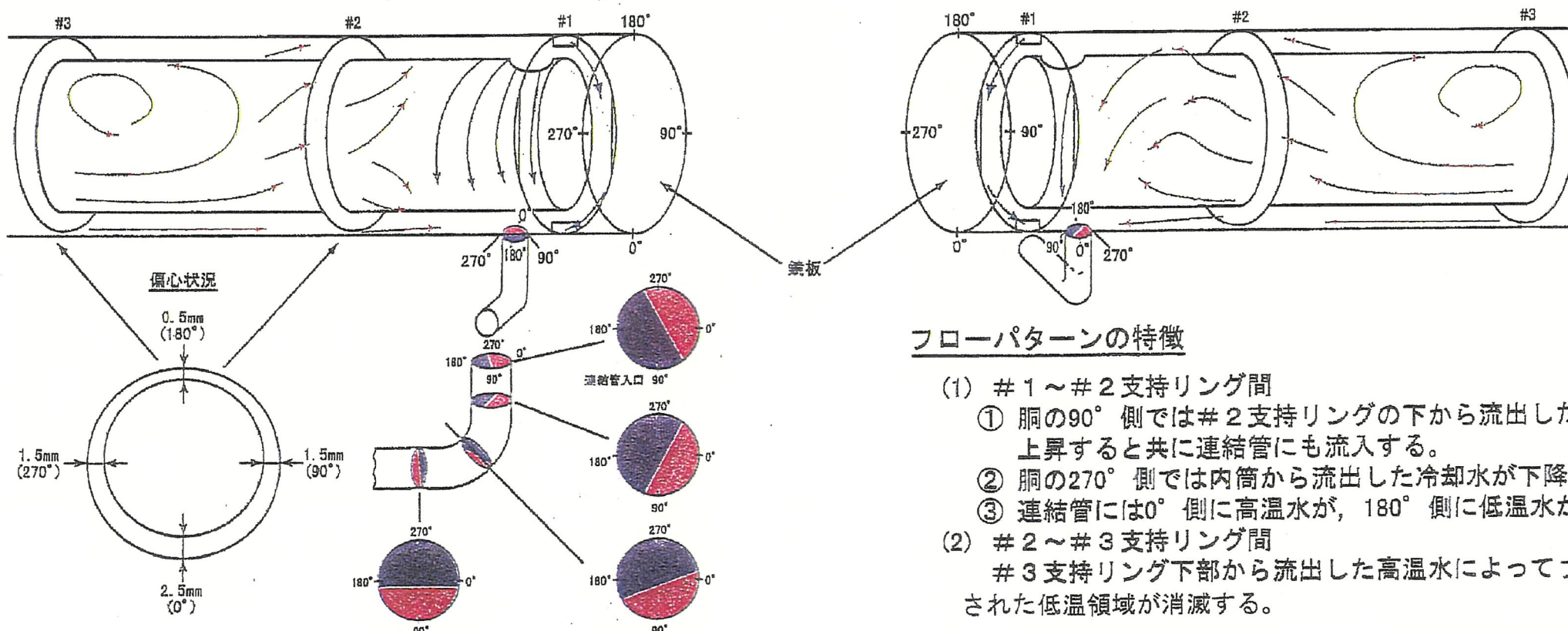
(1) #1～#2支持リング間

- ① #1支持リング側に低温領域、#2支持リング側に高温領域ができ、両者の間に温度界面層ができる。
- ② 連絡管入口には270°側(#2支持リング側)に高温水が、90°側(#1支持リング側)に低温水が流れ込む。

(2) #2～#3支持リング間

内筒で冷却された低温水が下部に溜まり、低温領域が形成される。

フローパターン2



フローパターンの特徴

(1) #1～#2支持リング間

- ① 胴の90°側では#2支持リングの下から流出した高温水は浮力によって上昇すると共に連絡管にも流入する。
- ② 胴の270°側では内筒から流出した冷却水が下降して連絡管に流入する。
- ③ 連絡管には0°側に高温水が、180°側に低温水が流れ込む。

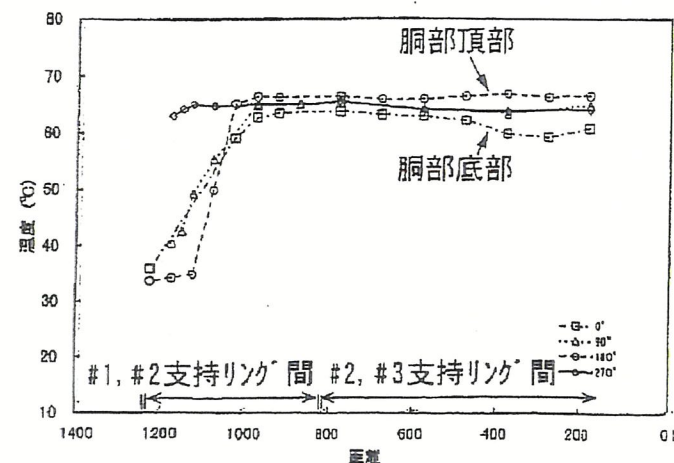
(2) #2～#3支持リング間

#3支持リング下部から流出した高温水によってフローパターン1で形成された低温領域が消滅する。

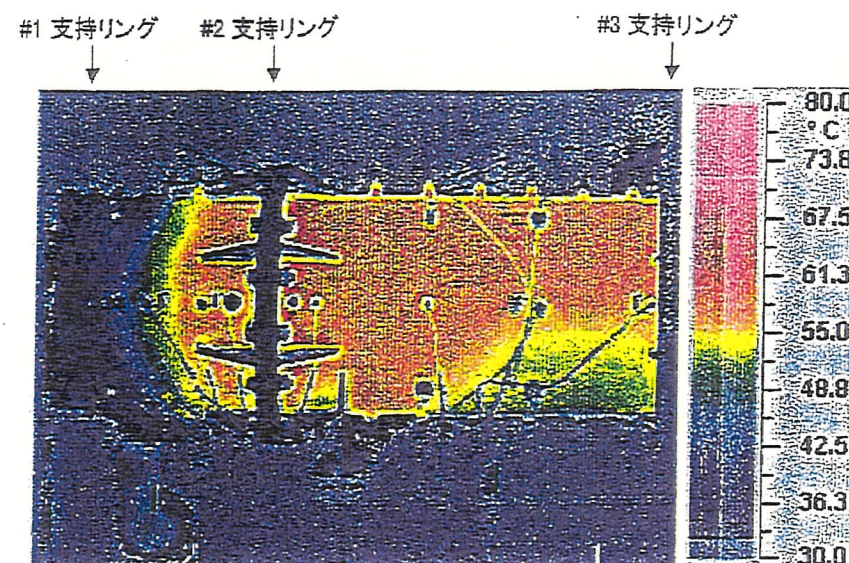
熱交換器内部流動模擬試験結果

フローパターン 1 (下偏心)

○ 胴部温度分布

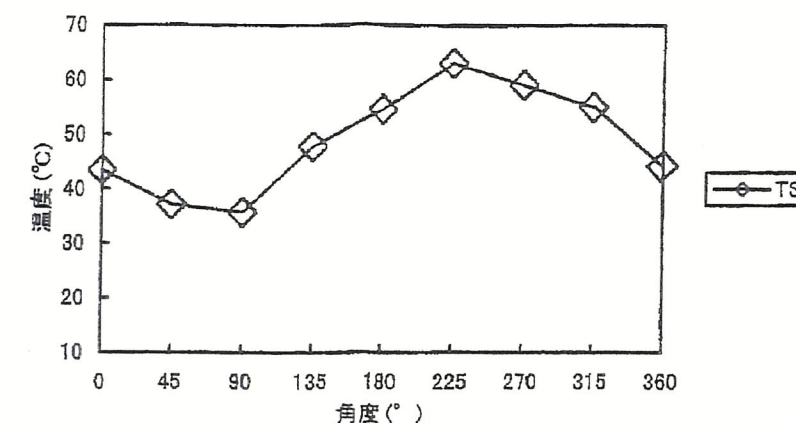


胴部温度分布



サーモビューアーによる温度分布 (90° 方向)

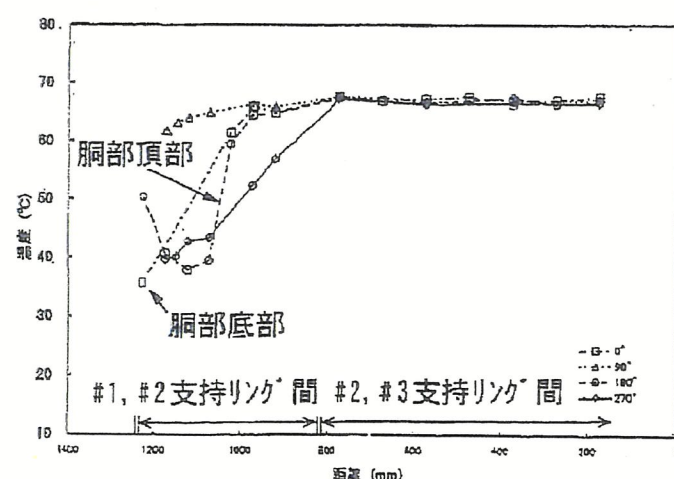
○ 抽出水出口管台入口付近の温度分布



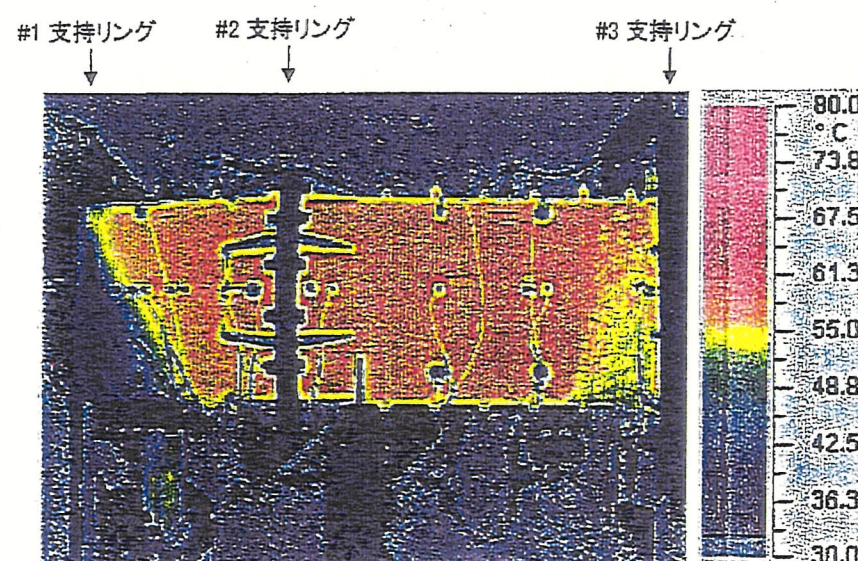
#2 支持リング側 (270°) に高温領域 #1 支持リング側 (90°) に低温領域が存在している。

フローパターン 2 (上偏心)

○ 胴部温度分布

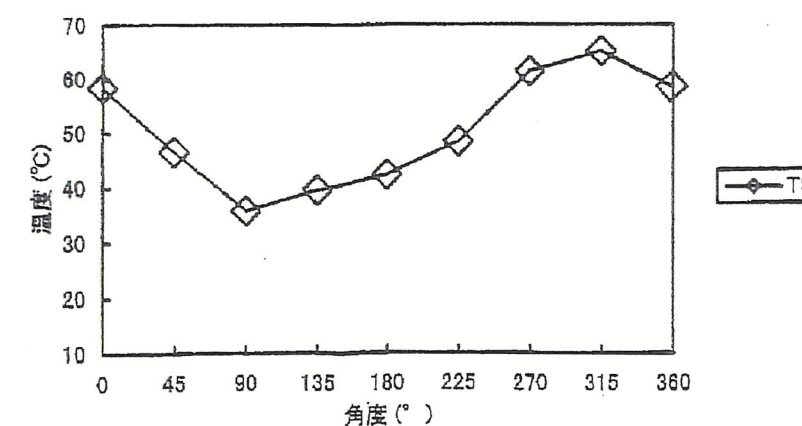


胴部温度分布



サーモビューアーによる温度分布 (90° 方向)

○ 抽出水出口管台入口付近の温度分布



フローパターン 1 と比較して、低温領域が管台入口部で 45° ~ 250° 位置に移動している。

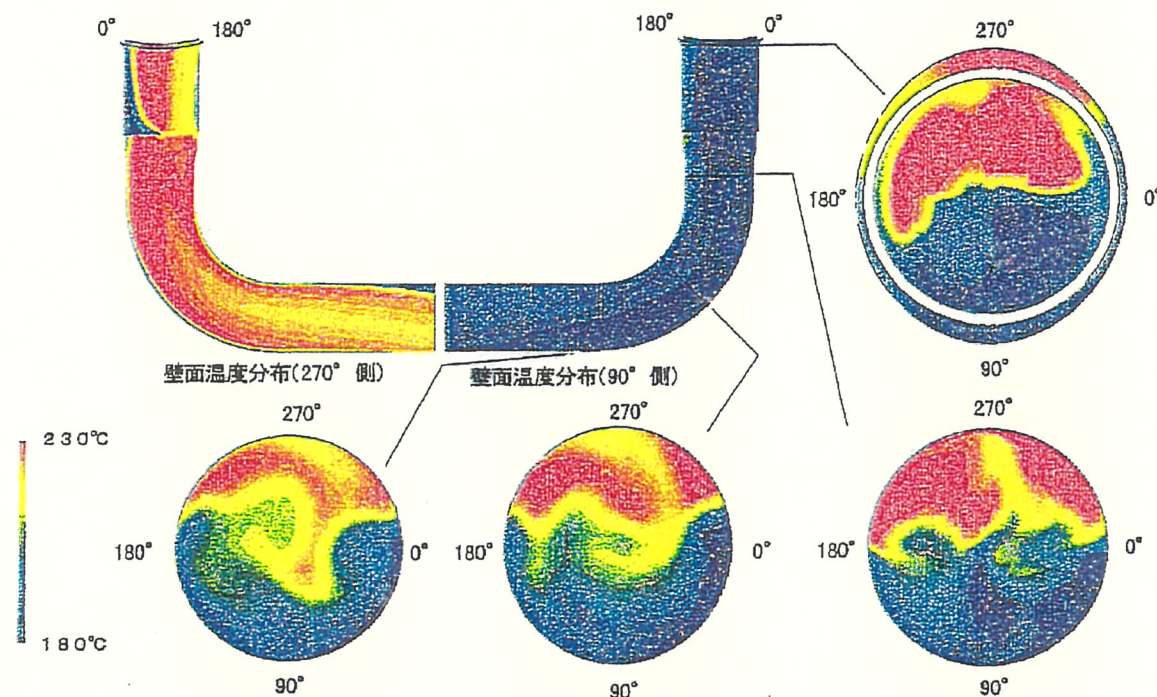
- (1) #2~#3 支持リング間では、#3 支持リング下部から流出した高温水によってパターン 1 で形成された低温領域が消滅する。
- (2) #1~#2 支持リング間では、胴の 90° 側では #2 支持リングの下から流出した高温水は浮力によって上昇すると共に連結管にも流入する。一方、胴の 270° 側では内筒から流出した冷却水が下降して連結管に流入する。

熱交換器連絡配管エルボ部熱流動解析結果について

1. フローパターン1（#2支持リング下偏心時）

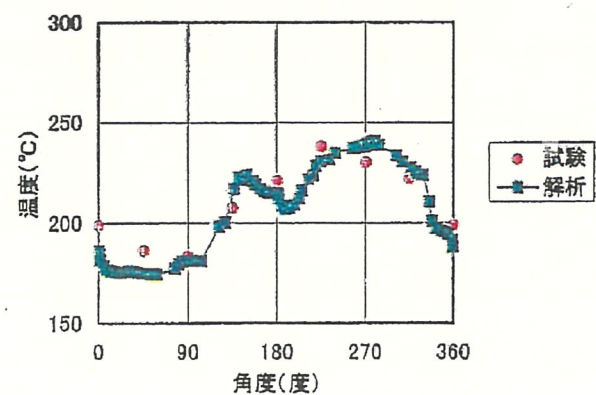
（1）連絡配管内温度分布

- ・壁面の温度分布は下流にいても余り変化しない。
- ・270°側に高温域が停滞する様子が分る。



（2）連絡配管入口近傍の温度分布の比較

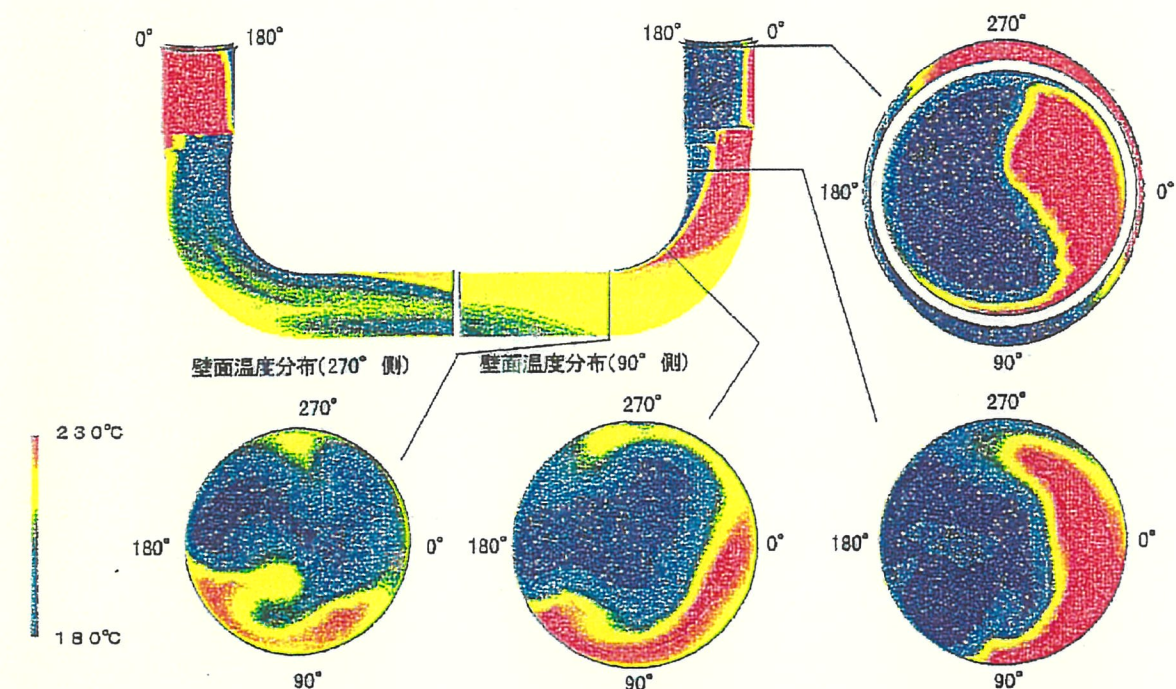
温度分布がピークを示す位置を解析は良く再現している。
なお、試験結果は実機換算値である。



2. フローパターン2（#2支持リング上偏心時）

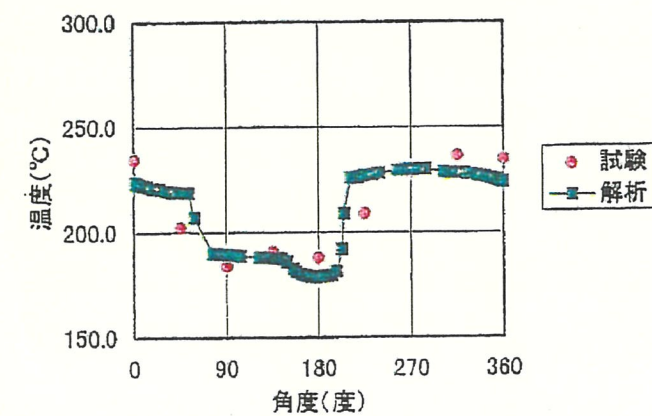
（1）連絡配管内温度分布

- ・壁面の温度分布は下流にいくに従い、時計方向に回転している様子が分る。

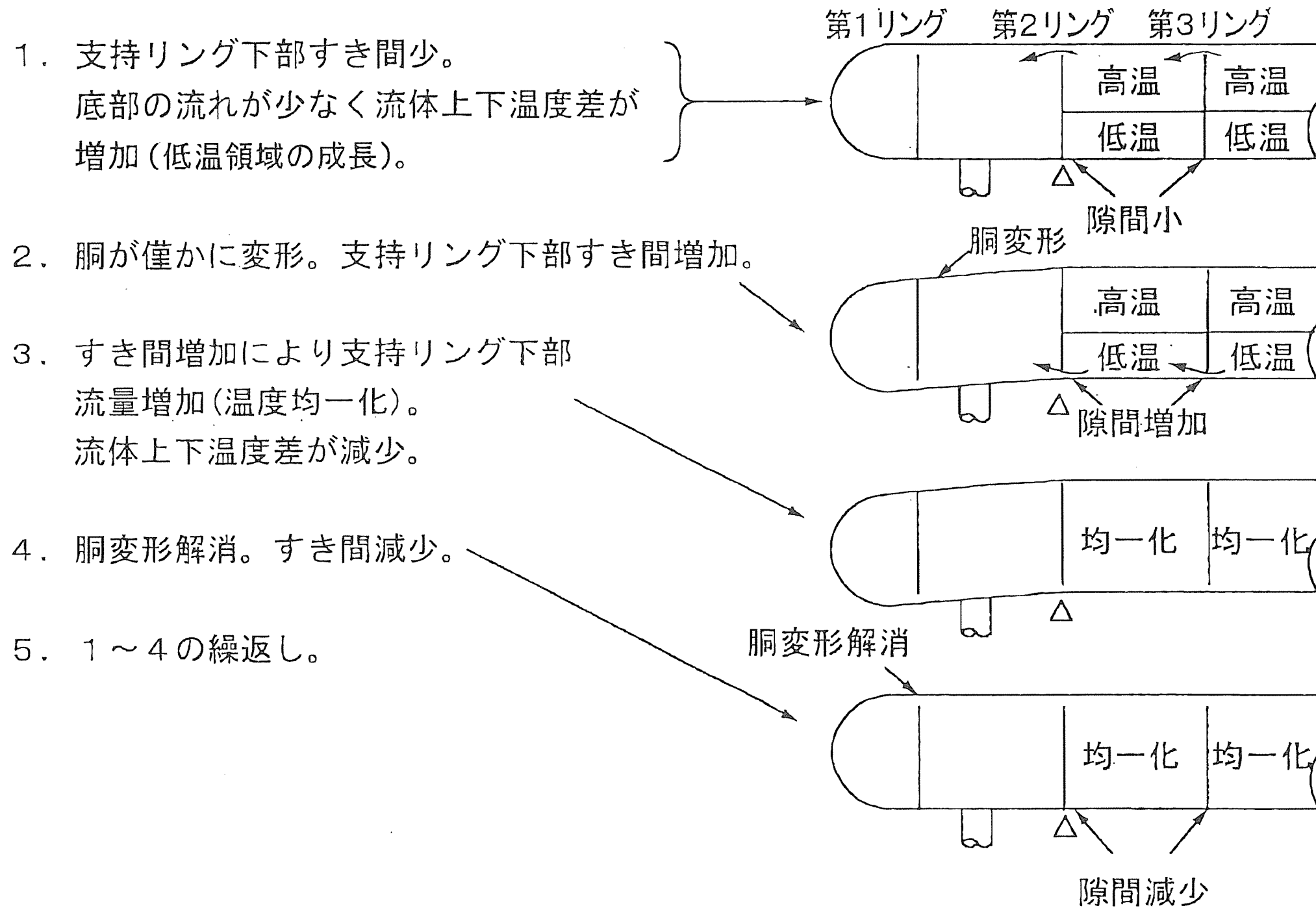


（2）連絡配管入口近傍の温度分布の比較

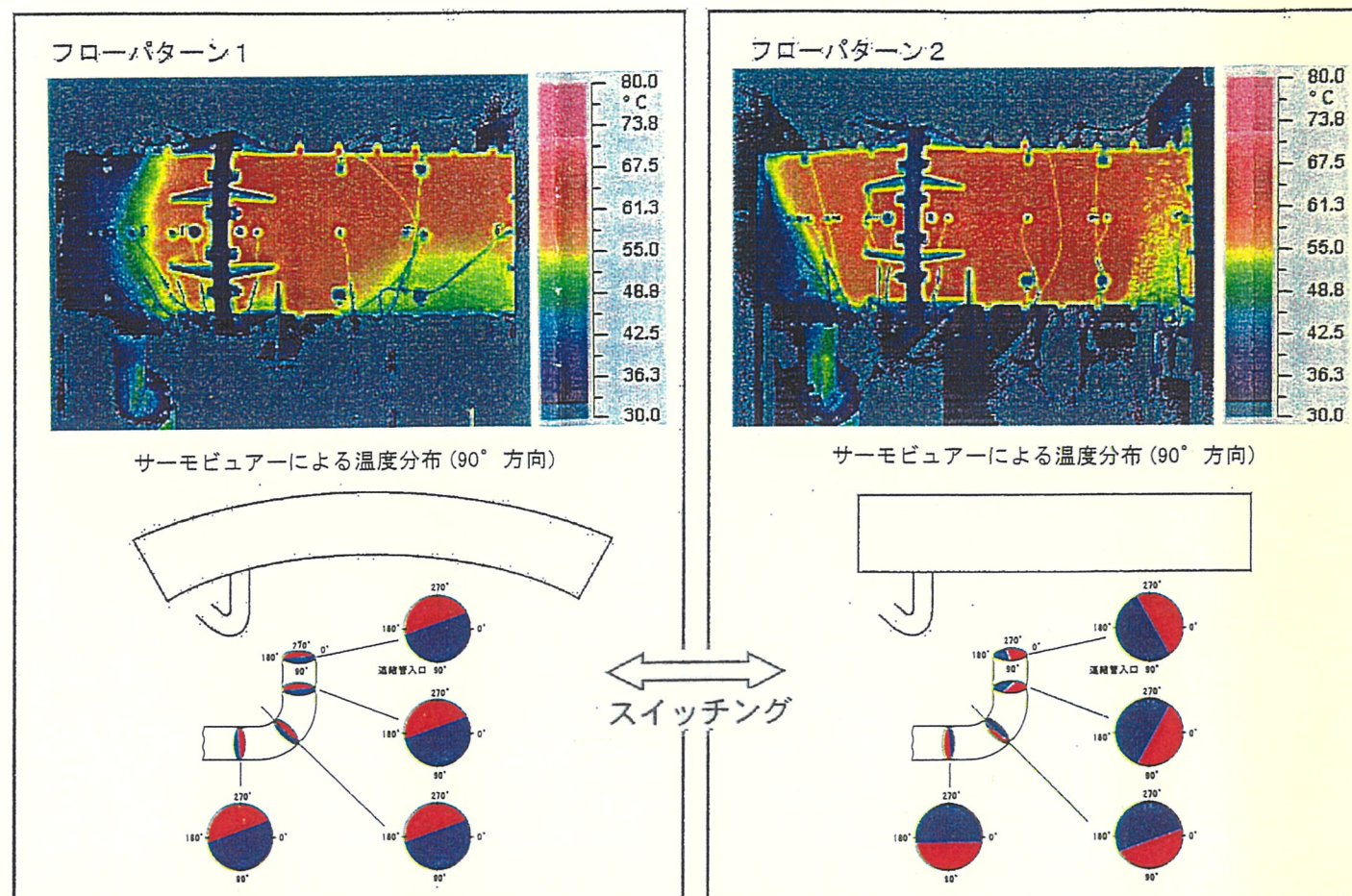
周方向の温度変化の傾向を解析は良く再現している。
なお、試験結果は実機換算値である。



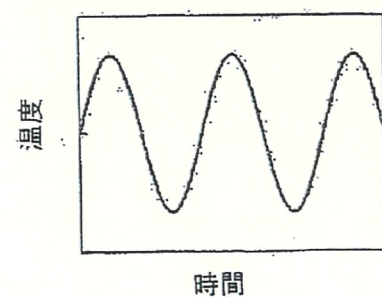
低温領域の生成と消滅によるスイッチングメカニズム



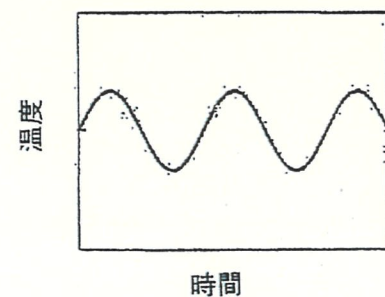
流況変動に伴う温度応力変動



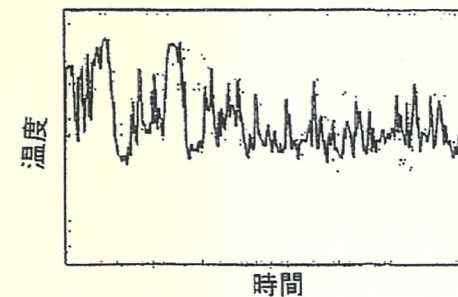
胴の長周期温度変動



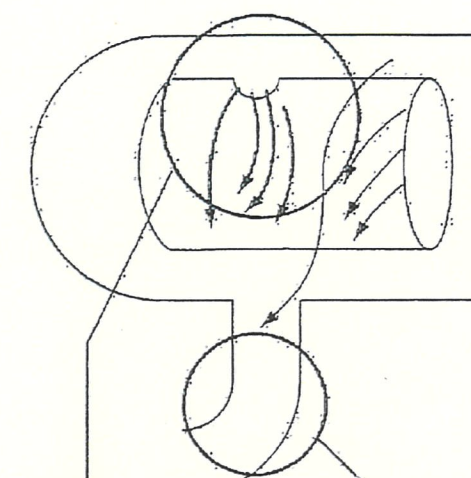
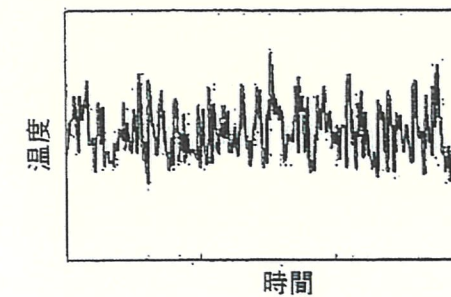
エルボの長周期温度変動



胴の短周期温度ゆらぎ



エルボの短周期温度ゆらぎ



胴

エルボ

高低温水の混合による
温度変動(実測値)

資料5

運 轉 履 歷 調 査 結 果

運転履歴調査結果について

敦賀発電所 2 号機の化学体積制御系の再生熱交換器を含む充てん・抽出系統に関して、運転開始から今回の再生熱交換器よりの漏えい事象発生(平成 11 年 7 月)までの運転履歴について、運転関係記録類を対象に調査を行った。

調査の結果、充てん・抽出系統に対し温度・圧力の急激な変化を与える機器の異常・故障実績はなく、運転状態における温度・圧力の変化状況も通常運転範囲であることを確認した。

(1) 異常・故障の有無

充てん・抽出系に急激な温度・圧力変化を与える機器の異常・故障発生有無について、運転日誌及び保修票発行状況より調査を行った結果、該当する実績はなかった。対象機器として、充てん系はポンプ及び弁について、抽出系は弁について異常・故障発生を示す記録の有無確認を行った。また、保修を要する不具合の発生状況確認の結果、運転開始以来発行された保修票約 1 4 0 0 件のうち、化学体積制御系に係わるものは、平成 8 年 1 2 月の抽出配管漏えいの他 5 件であったが、内容調査の結果いずれも充てん・抽出系の温度・圧力に急激な変化を与えるものではなかった。

添付－ 1

(2) 充てん・抽出系統における温度・圧力変化状況

①通常運転時

通常運転中の充てん・抽出系の温度・圧力変化実績(最大)を調査した結果、充てん／高圧注入ポンプの起動試験及び切替操作時にポンプ 2 台運転となるため、抽出水温度(熱交換器出口)で約 2 0℃上昇、充てん水温度(熱交換器出口)で約 1 0℃上昇する。また、この際の充てん水側圧力(充てん／高圧注入ポンプ出口)が約 1 4 kg/cm²上昇するが、抽出水圧力は変化しない。この変化程度は通常運転範囲内である。

なお、その他の運転操作では有意な変化はない。

添付－ 2

②起動・停止時

プラント起動・停止時に一次系圧力の上昇または降下に伴い通常的に抽出系の切替を行うが、この際に再生熱交換器の充てん水・抽出水温度変化が一時的に発生する。調査の結果、起動時は充てん水(熱交換器出口)で最大約 1 4 2℃上昇、抽出水(熱交換器出口)で最大約 1 0 4℃上昇があった。また、停止時は充てん水(熱交換器出口)で最大約 1 3 3℃降下、抽出水(熱交換器出口)で最大約 1 1 7℃降下であった。この変化は、いずれも通常運転範囲内である。

なお、起動・停止時再生熱交換器に加わる圧力は、抽出側、充てん側いずれも一次系圧力に追隨して変化するものと考えられ、急激な変化はない。

添付－ 3

以上

保修票点検結果

既発行分の保修票について、運転開始以降現在までの間を対象に充てん・抽出系に関する事項を抽出した結果、以下の計 6 件があった。

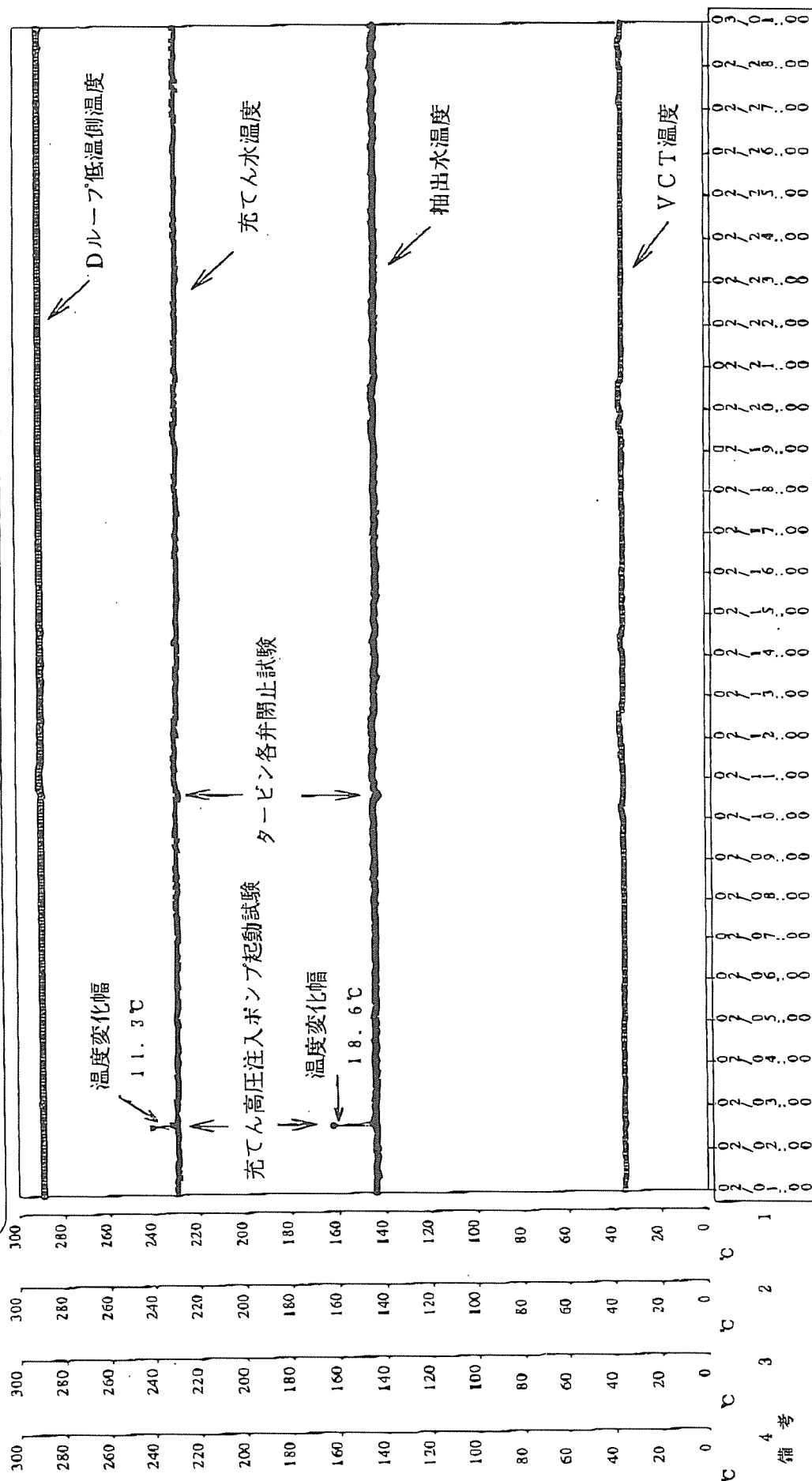
内容を確認した結果、いずれも充てん・抽出系統の温度・圧力に急激な変化を与えるものではなかった。

なお、全て運転中に発行したものであった。

No.	発行年月日	件 名	内 容
1.	S 62.12.27	充てんポンプ 過負荷リレー点検依頼	ポンプ運転中過負荷リレー 1 個が動作したため、当該リレーを点検実施。 結果、異常なし。
2.	H 1.6.13	充てんポンプ 出口ベント弁 点検依頼	当該弁のシートリークが認められたため、分解点検実施。
3.	H 2.12.4	充てんポンプ モータ側ベアリング 温度取出し部点検依頼	温度取出し部よりわずかに油漏れのため、当該シール部修理実施。
4.	H 5.12.17	充てん流量計点検依頼	通常値より若干低め指示のため、調整実施。
5.	H 8.12.24	抽出配管リーク	抽出配管より漏えいのため、取り替え実施。
6.	H 11.4.14	A 充てん/高圧注入ポンプ 補助油ポンプ 点検依頼	補助油ポンプ モータ軸受け部修理実施。

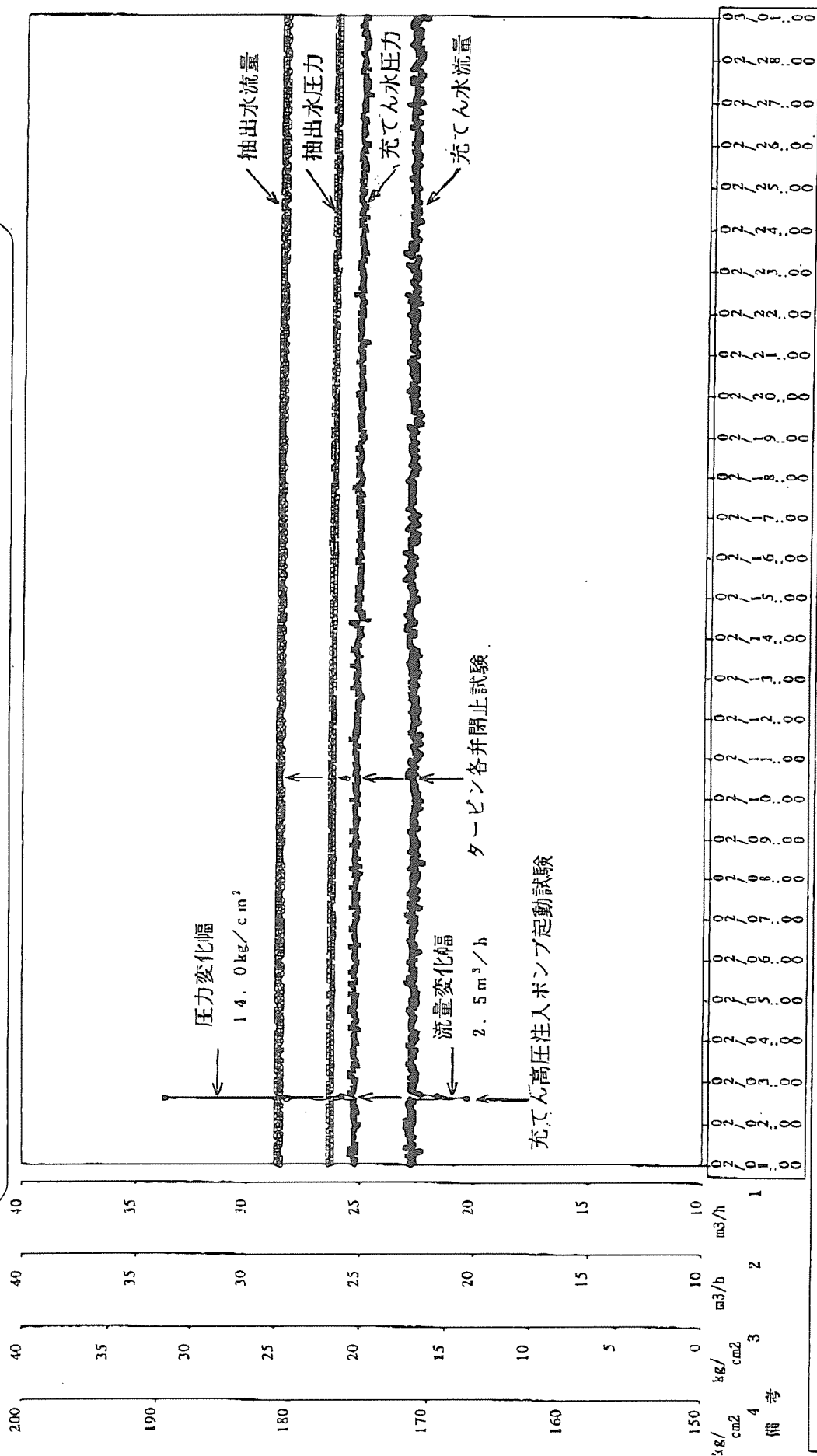
通常運転時温度状況

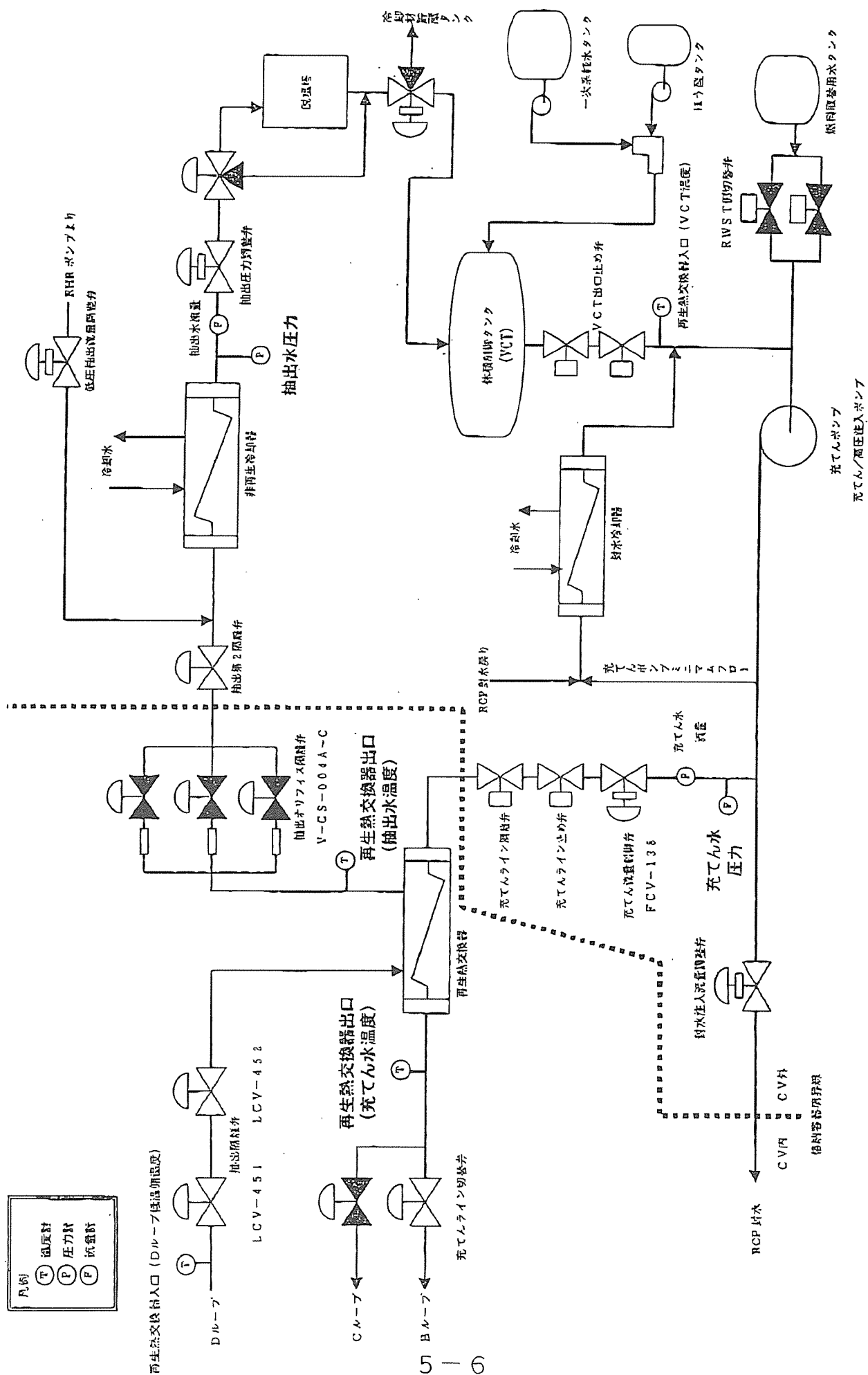
1	(98/02/01:00-98/03/01:00)	原子炉冷却材Dルーブ冷却材低温側温度
2	(98/02/01:00-98/03/01:00)	抽出水温度
3	(98/02/01:00-98/03/01:00)	VCT温度 (体積制御タンク出口温度)
4	(98/02/01:00-98/03/01:00)	充てん水温度



通常運転時圧力、流量状況

- 1 (98/02/01:00-98/03/01:00) 充電/抽出 抽出水流量
- 2 (98/02/01:00-98/03/01:00) 充電/抽出 充電水流量
- 3 (98/02/01:00-98/03/01:00) 抽出水圧力
- 4 (98/02/01:00-98/03/01:00) 充電水圧力





起動・停止時の充てん・抽出系温度変化について

プラント定期検査等に伴う起動・停止の際、抽出切替(通常抽出⇔低圧抽出)が実施されることより充てん・抽出系における温度変化について、運転記録より確認した。

1. 起動操作時(低圧抽出→通常抽出)

	最大温度変化 (°C/時)	
	充てん系	抽出系
第1回定期検査(S63.2)	88.9	98.7
第2回定期検査(H1.7)	121.2	87.4
第3回定期検査(H2.11)	117.3	77.7
第4回定期検査(H4.3)	131.3	85.6
第5回定期検査(H5.7)	102.4	57.0
第6回定期検査(H6.11)	113.3	69.9
第7回定期検査(H8.2)	99.4	50.4
トラブル後起動(H9.1)	141.9	104.4
第8回定期検査(H9.7)	121.0	86.0
第9回定期検査(H10.10)	108.1	68.4

2. 停止操作時(通常抽出→低圧抽出)

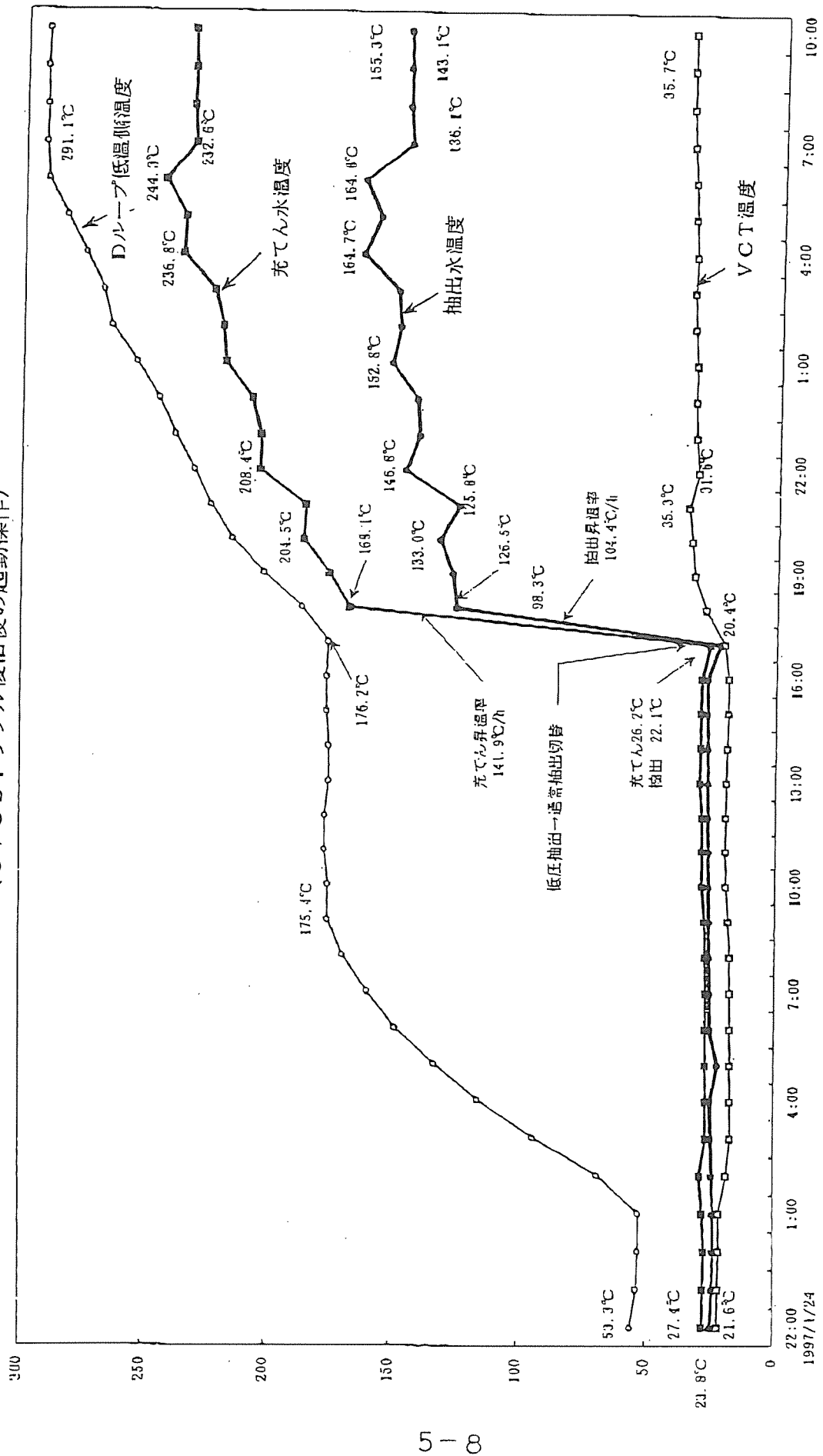
	最大温度変化 (°C/時)	
	充てん系	抽出系
第1回定期検査(S62.12)	124.1	20.1
第2回定期検査(H1.4)	97.3	65.9
第3回定期検査(H2.8)	78.7	41.0
第4回定期検査(H3.12)	121.6	104.0
第5回定期検査(H5.4)	126.7	117.7
第6回定期検査(H6.9)	98.6	54.5
第7回定期検査(H7.12)	132.9	116.9
トラブル 停止*(H8.12)	64.1	57.9
第8回定期検査(H9.4)	123.8	104.0
第9回定期検査(H10.9)	72.3	49.6

*：抽出配管漏えいに伴う停止(H8.12.24)

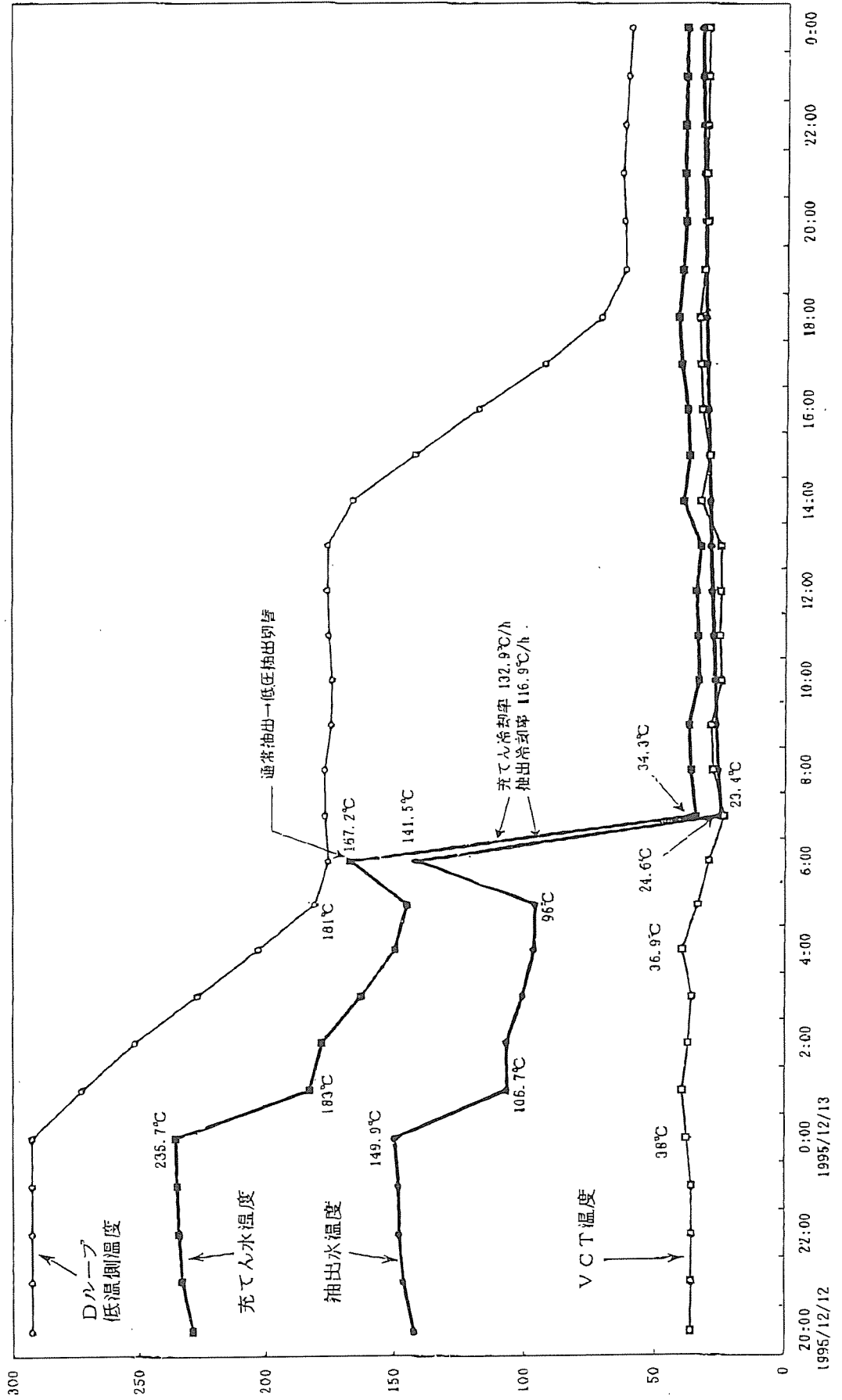
参考：化学体積制御系の抽出水は、通常運転時圧力が約157 kg/cm²の一次系水が再生熱交換器の下流側にある減圧設備を経由して流入(通常抽出)するが、プラント停止時に一次系圧力を降下させると圧力差が小さくなるため流入量が減少する。この時は余熱除去ポンプより抽出流量を確保(低圧抽出)する。この際、高温の抽出水が流入停止するため温度は低下する。この操作を抽出切替(通常抽出→低圧抽出)と称する。

この切替は手順に従い通常的に実施される操作であり、プラント起動時にはこの逆の系統状態に戻す操作を行う。

起動時温度状況
(CVCSトラブル復旧後の起動操作)

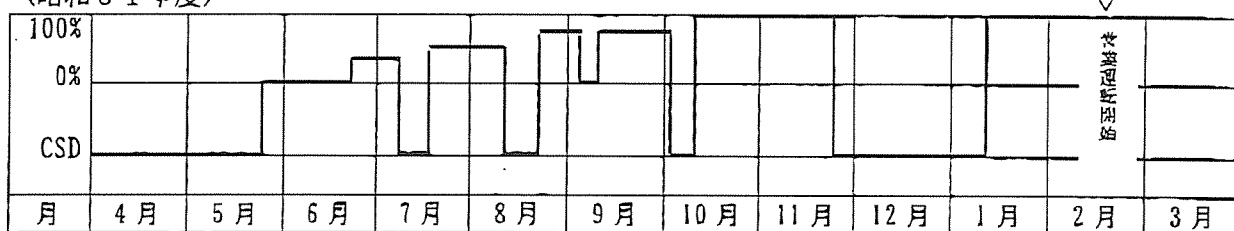


停止時温度状況
(第7回定検 停止操作)

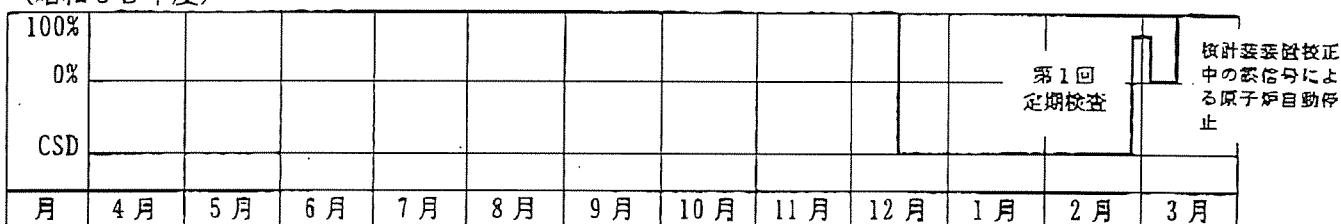


敦賀発電所2号機 運転履歴について

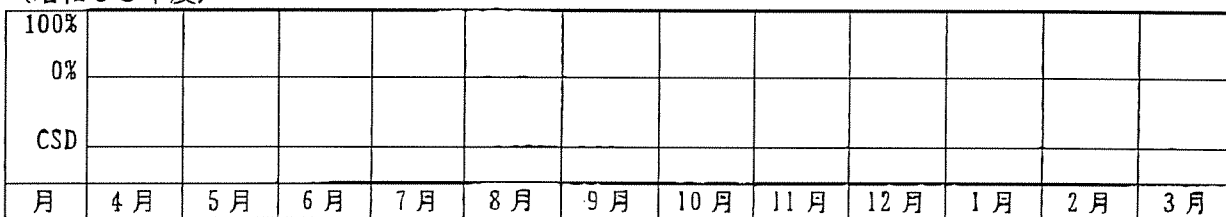
(昭和61年度)



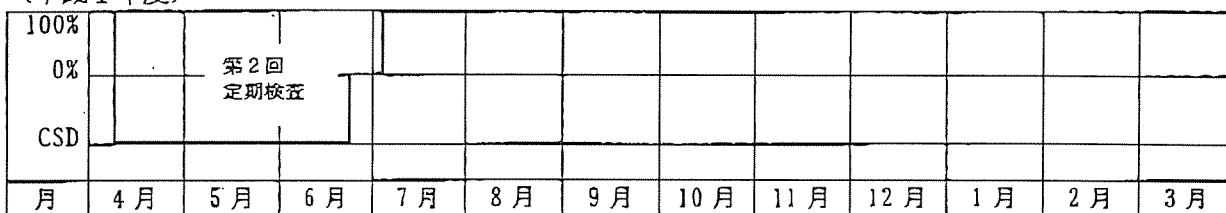
(昭和62年度)



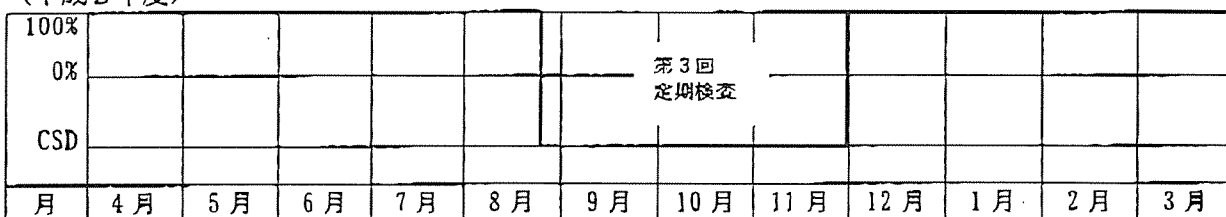
(昭和63年度)



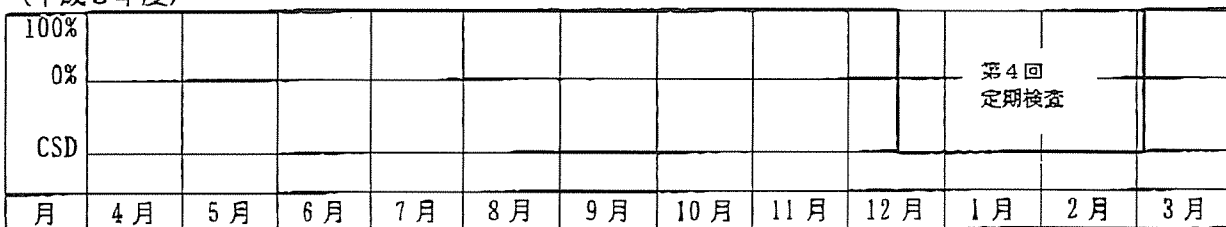
(平成1年度)



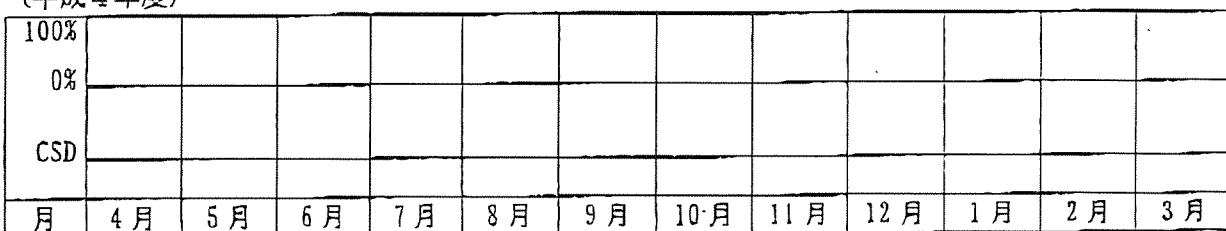
(平成2年度)



(平成3年度)



(平成4年度)



*CSD・低温停止状態

(平成5年度)

100%												
0%												
CSD												
月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月

(平成6年度)

100%												
0%												
CSD												
月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月

(平成7年度)

100%												
0%												
CSD												
月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月

(平成8年度)

100%												
0%												
CSD												
月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月

(平成9年度)

100%												
0%												
CSD												
月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月

(平成10年度)

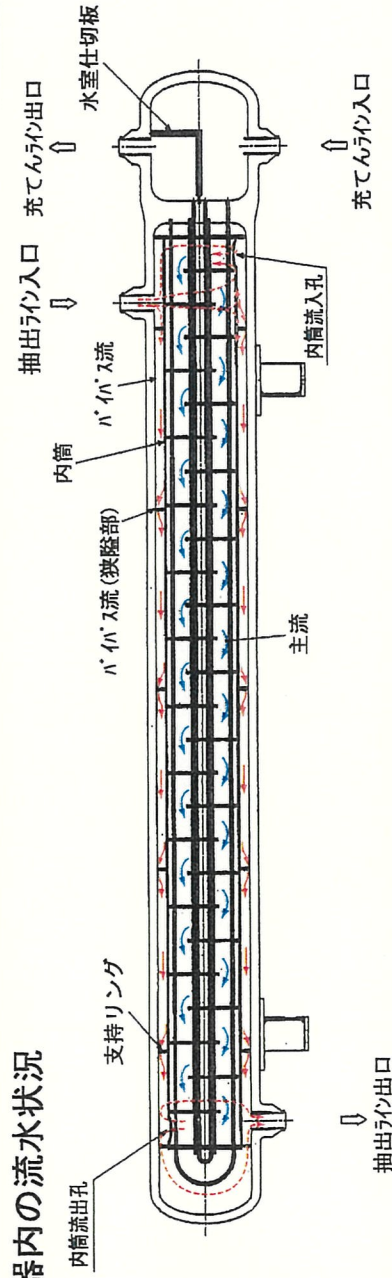
100%												
0%												
CSD												
月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月

(平成11年度)

100%												
0%												
CSD												
月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	1月	2月	3月

*CSD・温度停止状態、

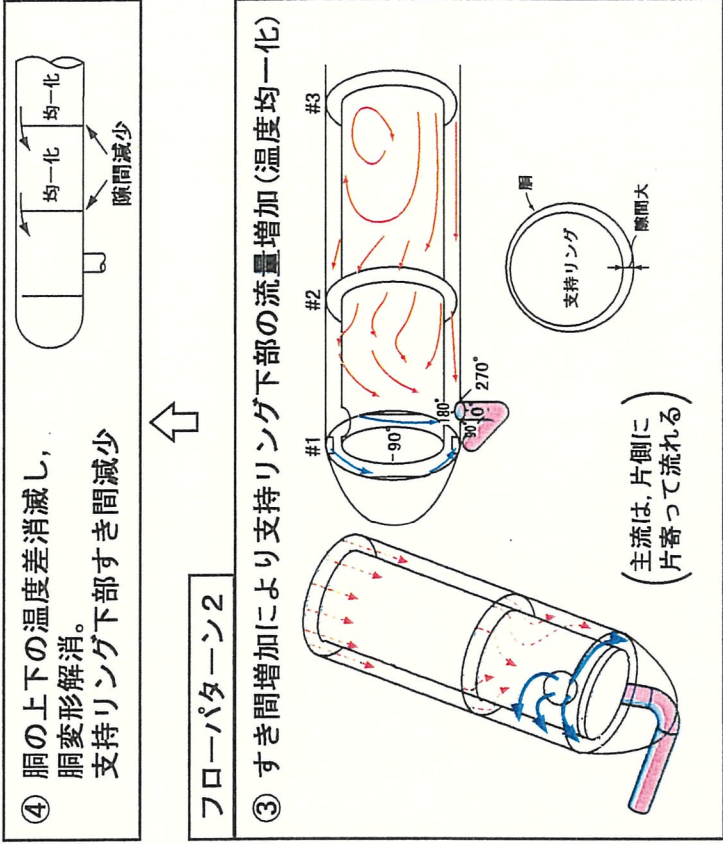
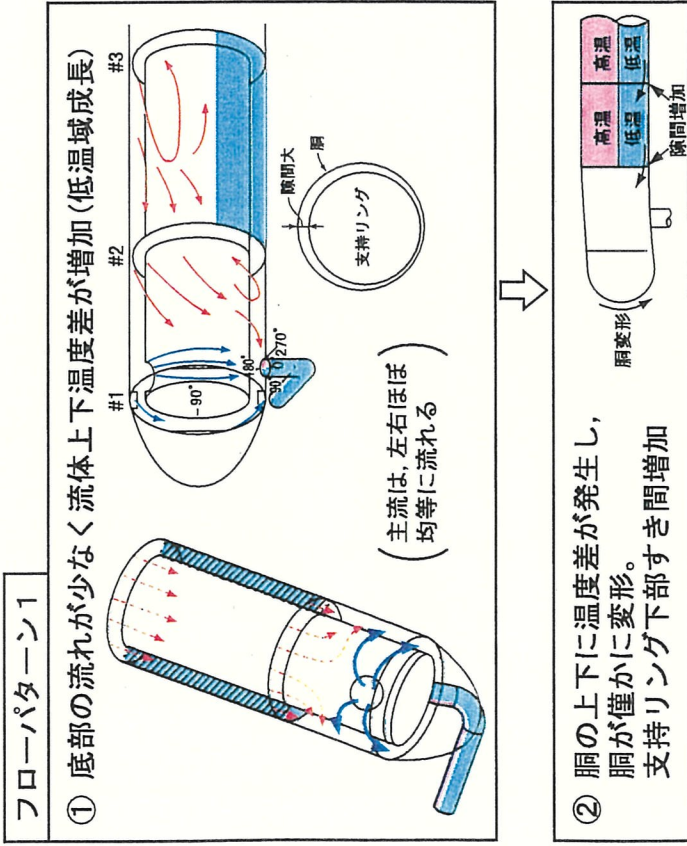
1 熱交換器内の流水状況



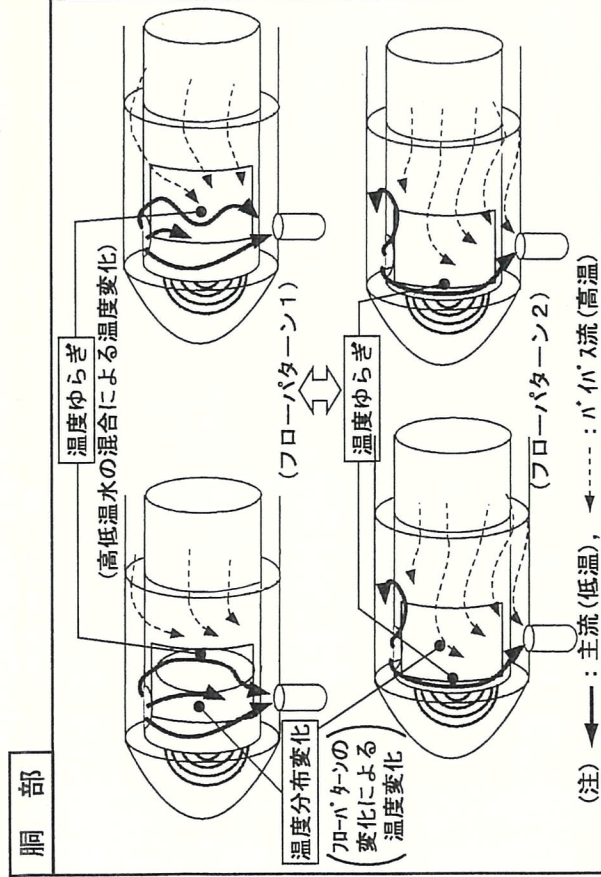
	設計	実績(*)
主 流	約77%	約60%
パイパス流	約23%	約40%
主流内筒出口温度	約185℃	約170℃
パイパス流温度	約250℃	約250℃

(*)パイパス流量が設計値よりも大きかったため、主流内筒出口温度とパイパス流の温度差が大きくなった。

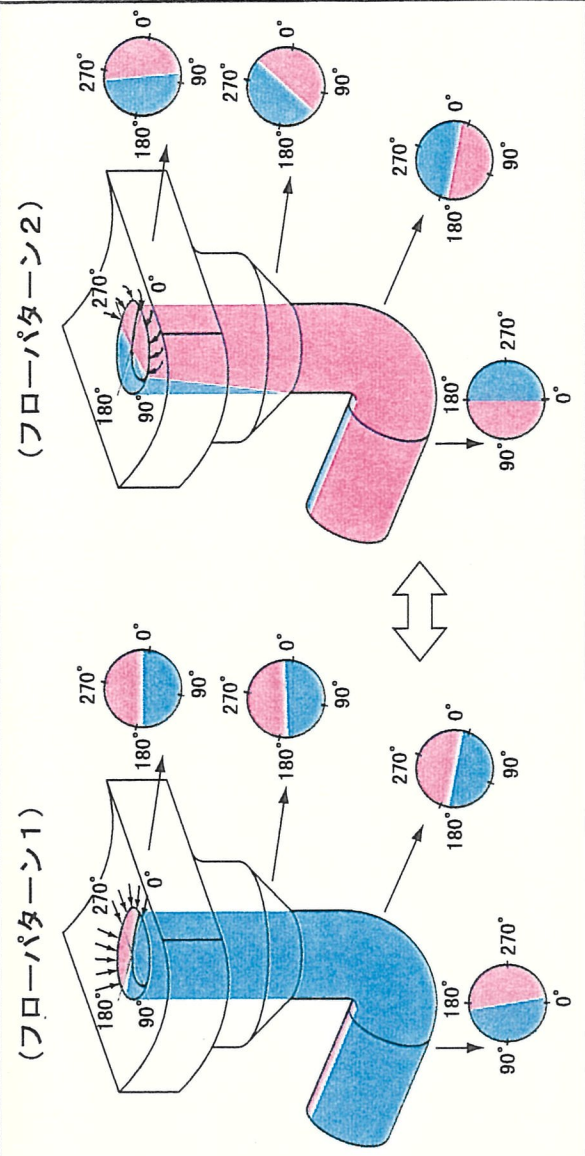
2 胴変形によるフローパターン変化状況



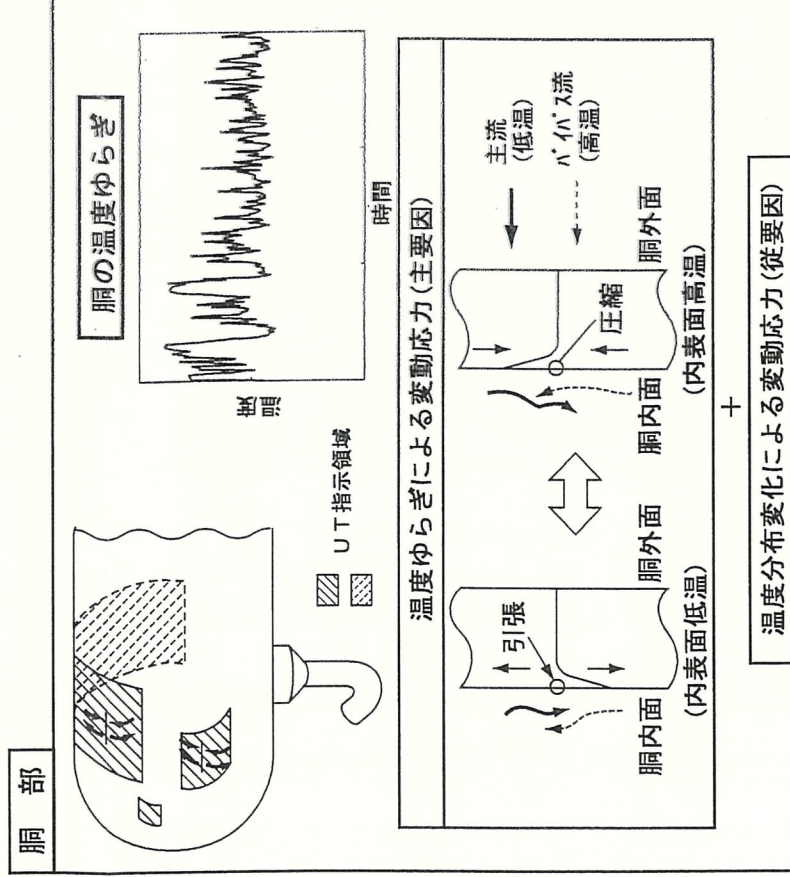
3 フローパターン変化に伴う温度分布状況



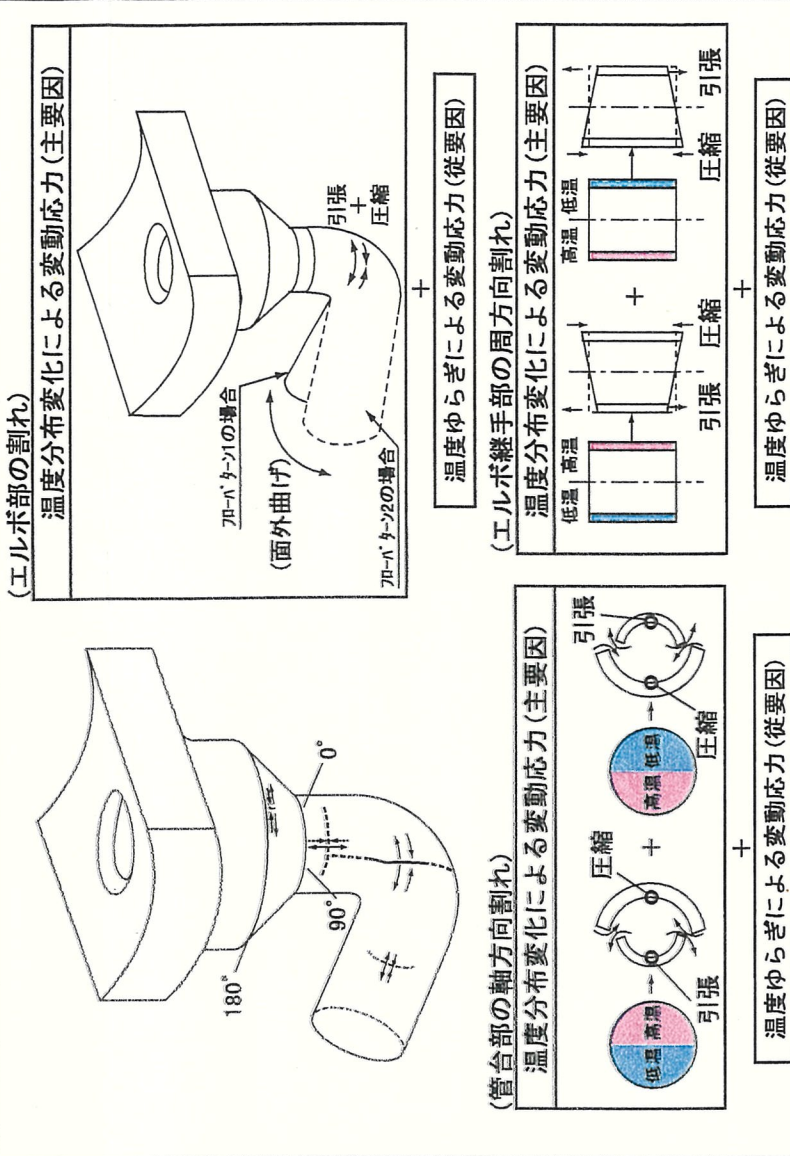
管台・エルボ部

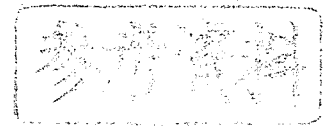


4 温度分布変化に伴う変動応力発生状況



管台・エルボ部





日本原子力発電(株)敦賀発電所2号機の手動停止について

(一次冷却材の漏えい)

平成11年8月30日
資源エネルギー庁

1. はじめに

日本原子力発電(株)敦賀発電所 2 号機の一次冷却材漏えいが生じた再生熱交換器抽出側配管エルボについては、8 月 2 日までに民間調査機関で調査が実施された割れ 5 箇所の破面観察状況及び発電所調査(再生熱交換器支持脚と架台との拘束力状態確認等)について原子力安全委員会に報告した後、当該エルボの破面などについて引き続き調査を実施する他、8 月 2 日に切断した当該損傷エルボ上部管台を民間調査機関において追加調査した。また、敦賀発電所において、8 月 5 日に再生熱交換器上段と中段の連絡配管(抽出側)を切断し、詳細調査を実施するとともに伝熱管の漏えい検査等を実施した。これらの結果については、8 月 12 日に再生熱交換器の製造履歴調査結果等とともに同委員会に報告した。

その後、敦賀発電所において再生熱交換器胴の超音波探傷試験等を実施する他、民間調査機関において上流側管台のサーマルスリーブなどを詳細調査した。また、損傷原因調査計画に基づき、解析評価を実施するとともに解析評価のベースとなる再生熱交換器内部の流動を模擬した試験等を実施中である。

本資料は、損傷原因調査計画及び再生熱交換器抽出側配管損傷要因分析図に基づき実施している上流側管台のサーマルスリーブ等の詳細調査結果、解析評価、模擬試験の実施状況等について整理したものである。

別紙 1

別紙 2

2. 発電所における再生熱交換器に関する調査

(1) 再生熱交換器胴本体の超音波探傷試験

再生熱交換器中段の抽出側出口管台付近の再生熱交換器胴について超音波探傷試験を実施した。その結果、5 箇所の領域に指示が認められた。中段熱交換器胴はその後切断し、切断した胴及び鏡板について内面の浸透探傷試験を実施した結果、胴内面に熱疲労割れに特有の亀甲状の指示が多数認められた。また切断後、内筒第二支持リングと胴内側との間隙を測定した結果、上下左右とも直径で約 3 mm であった。

なお、再生熱交換器上段及び下段の抽出側出口管台付近の胴について超音波探傷試験を実施した結果、指示は認められなかった。

(2) 再生熱交換器下段支持脚と架台の拘束状態調査

再生熱交換器下段支持脚(摺動側)の拘束状態を確認するため、熱膨張による方法と油圧ジャッキによる方法で支持脚に荷重を加えた。その結果、支持脚が移動することを確認した。また、支持脚の締付けボルトの

状態を確認した結果、過大締付け等の異常は無かった。

添付資料 1

3. 民間調査機関等での調査

(1) 破面に関する調査

①再生熱交換器と同じ材質であるSUS316について疲労試験を行い、き裂伝播速度と疲労破面の関係を観察した。その結果、き裂伝播速度が比較的遅い場合に損傷エルボ部の破面に認められた組織状模様等が生じることが確認された。

冷却材の漏えいに至った割れaは、定期検査時期に対応すると推測されるビーチマークが8本観察されていること等から、比較的長時間かかって割れが貫通に至ったと考えられる。

②割れaの破面の酸化皮膜厚さを測定した結果、割れの先端に行くに従って酸化膜は徐々に薄くなっていることがわかった。

(2) 引張り試験

当該エルボ及び管台から引張り試験片を切出し、試験を実施した。その結果、耐力等の機械的性質は規格値内に入っており、異常のないことがわかった。

(3) 管台サーマルスリーブに関する調査

当該エルボの上流側管台サーマルスリーブは、周方向で内面の色合が異なっているため、酸化皮膜厚さを測定した。その結果、酸化皮膜厚さに有意な差があることが認められた。このことから、サーマルスリーブの周方向で温度が異なっていた可能性があると考えられる。

添付資料 2

4. 損傷要因分析の結果

これまで実施してきた敦賀発電所における調査や民間調査機関における破面調査等の結果を踏まえて、検討評価した結果、今回の損傷は高サイクル熱疲労によるものである可能性が高いと考えられる。

添付資料 3

5. 解析評価等

(1) 解析評価の考え方

①今回の損傷原因は、熱疲労割れであると推定されることから、当該部には、定常的に作用する「平均応力」と温度変動で生じる「変動応力」が作用していたことが考えられる。

②この「平均応力」と「変動応力」を区分して、それぞれ検討する。

③平均応力については、応力解析や実測値から評価する。

④変動応力については、破面観察の結果や再生熱交換器内部の流動状況を模擬した試験の結果等を踏まえ、熱流動解析、応力解析、熱変形解析、疲労解析、亀裂進展解析等を実施し、評価していく。

(2) 平均応力について

①定常的に作用する「平均応力」としては、下記が考えられる。

- a) 圧力、熱によって生じる運転応力（運転応力）
- b) スライド脚の拘束によって生じる応力（拘束応力）
- c) 建設時の据付けによって生じる応力（据付応力）
- d) 素材製造時の残留応力（素材/溶接残留応力）

②運転応力は、運転圧力と温度から有限要素法を用いた応力解析によって求める。

③拘束応力及び据付応力は、現地調査の結果を用いて、応力解析によって求める。

④素材/溶接残留応力は、実機のみでなく、同じ製造方法で製造されたものからデータを採取し、それらを踏まえて評価を行う。

(3) 変動応力について

①変動応力の発生メカニズムを確認するため、また、この変動応力の作用を前提とした疲労解析の妥当性を検証するため、再生熱交換器内部の流動模擬試験を実施中である。これまでに実施した予備的試験の結果では、バイパス流が存在するため抽出水出口付近に温度変動が認められること等が確認されている。特に、再生熱交換器胴に対し内筒支持リングを下に偏心させると、胴内部のバイパス流に低温領域が生じ、上に偏心させると、低温領域が解消されるという現象が、また、内筒支持リングの上

下位置によって再生熱交換器内部の流動状況が異なることなどが確認されている。

なお、実機データ等からバイパス流の評価を行ったところ、バイパス流量は約40%（設計目標値約23%）であり、主流とバイパス流の温度差は約80℃（設計目標値約65℃）であった。

これまでの試験結果から

- a) 内筒支持リングが下偏心すると、低温領域が生じて再生熱交換器胴の上下に温度差が生じ、胴本体が熱変形する。
- b) 胴本体が熱変形し、内筒支持リングが上偏心の状態に近づくと、低温領域が解消される。これにより、胴本体の変形が元に戻り、内筒支持リングが再度下偏心する。

となることが考えられる。すなわち、胴本体の変形により内筒支持リングが下偏心している場合と上偏心している場合が交互に生じ、これにより流動状況が変化し、温度変化（スイッチング現象）を与えると推定されるので、今後、詳細な流動模擬試験や解析評価を実施していく予定である。

- ②破面観察の結果、割れa等には明瞭なビーチマークが観察されている。このビーチマークの寸法をもとに、破壊力学を用いて変動応力を評価することが可能と考えられるので、今後、詳細検討を行う。

添付資料4

6. 運転履歴調査結果

敦賀発電所2号機の化学体積制御系再生熱交換器を含む充てん・抽出系統に関して、運転開始から平成11年7月（再生熱交換器からの漏えい発生）までの運転履歴について、運転関係記録類を対象に調査を行った。

調査の結果、充てん・抽出系統に対し、温度・圧力の急激な変化を与える異常・故障事象の実績はなかった。また、運転状態における温度・圧力の変化状況は、通常運転範囲であった。

添付資料5

7. 他プラントにおける対応状況

- (1) 他プラントについても今回のトラブルを踏まえ、安全性を再確認するため、当面の措置として全ての電気事業者に対し監視の強化等必要な措置をとるよう指示を行った。

具体的には、運転中のプラントについては、各種のパラメータ（格納容器ガスモニタ、塵埃モニタ、格納容器内サンプ水位等）の監視を行うとともに、パトロールによる点検等に細心の注意を払うことを指示し、電気事業者においては、運転中の定期的に実施している格納容器内点検等において当該部の漏えいがないことの確認を徹底している。

(2) PWRプラントを有する電気事業者においては、中央制御室で監視可能な再生熱交換器監視用のカメラが設置された。

(3) 定期検査中であったPWRプラント4基（高浜4、大飯2、3、泊1）については、熱交換器の配管(エルボ部)について、超音波探傷試験等を実施し、異常が無かった旨の報告を受けている。

(4) 内筒を有する再生熱交換器を設置している他プラント5基（高浜3、4、川内2、泊1、2）については、今後、定期検査等において熱交換器本体を含め、超音波探傷試験を実施することとしている。

8. 今後の主な調査計画

(1) 再生熱交換器胴本体の調査

再生熱交換器中段の胴からUT指示の最大エコー部1箇所を切断し、民間調査機関へ移送して詳細調査する。

(2) 解析評価

流動模擬試験で得られたデータを用いて、さらに詳細な熱流動解析、応力解析、熱変形解析、疲労解析等を実施し、再生熱交換器内部で発生する温度変動（スイッチング現象）やその結果生じる各部の熱応力を評価するとともに、今回のような損傷が発生し得るか、検討、評価する。

(3) 流動模擬試験

バイパス流量や内筒支持リングの隙間を変化させて試験を実施し、再生熱交換器内部の流動状況の確認や各部の温度計測を実施し、解析評価のデータベースとする。

(4) 敦賀2号機と他プラントの相違点

内筒を有する他プラントの再生熱交換器の条件(構造、寸法等)と敦賀2号機の条件の比較や流動模擬試験結果の評価により、他プラントと敦賀

2号機の相違点を明確にする。

9. 再発防止対策についての検討

現在進めている原因調査結果を踏まえ、以下の項目等について再発防止対策の検討を行う。

(1) 設計・施工

大きな温度変動が発生しにくい構造への改善等

(2) 保守

亀裂の早期発見方法（点検・検査の充実等）

(3) 運転管理

漏えい量を最小限化するための運転管理面の見直し（漏えい箇所絞り込みのための監視方法の充実等）

(4) 他プラントにおける健全性確認

他プラントについても原因調査の結果を踏まえ、健全性を確認

(5) 技術開発の推進

検査技術の高度化等

以上

損傷原因調査計画の全体概要

1. 製造履歴調査

- (1) 再生熱交換器、エルボ、連絡配管の製造履歴
- (2) 設計、製作、構造、材料、製造プロセス、等
- (3) 施工プロセス等

2. 運転履歴調査

- (1) 今回漏洩発生前後の運転パラメータ挙動調査
- (2) 過去の運転履歴調査

3. 保修履歴調査

- (1) 点検履歴調査
- (2) 保守履歴調査

4. 損傷メカニズム調査

- (1) 現地調査
外観調査、寸法調査、拘束測定、等
- (2) ラボ調査
破面調査、ミクロ組織観察、残留応力測定等

5. 解析評価

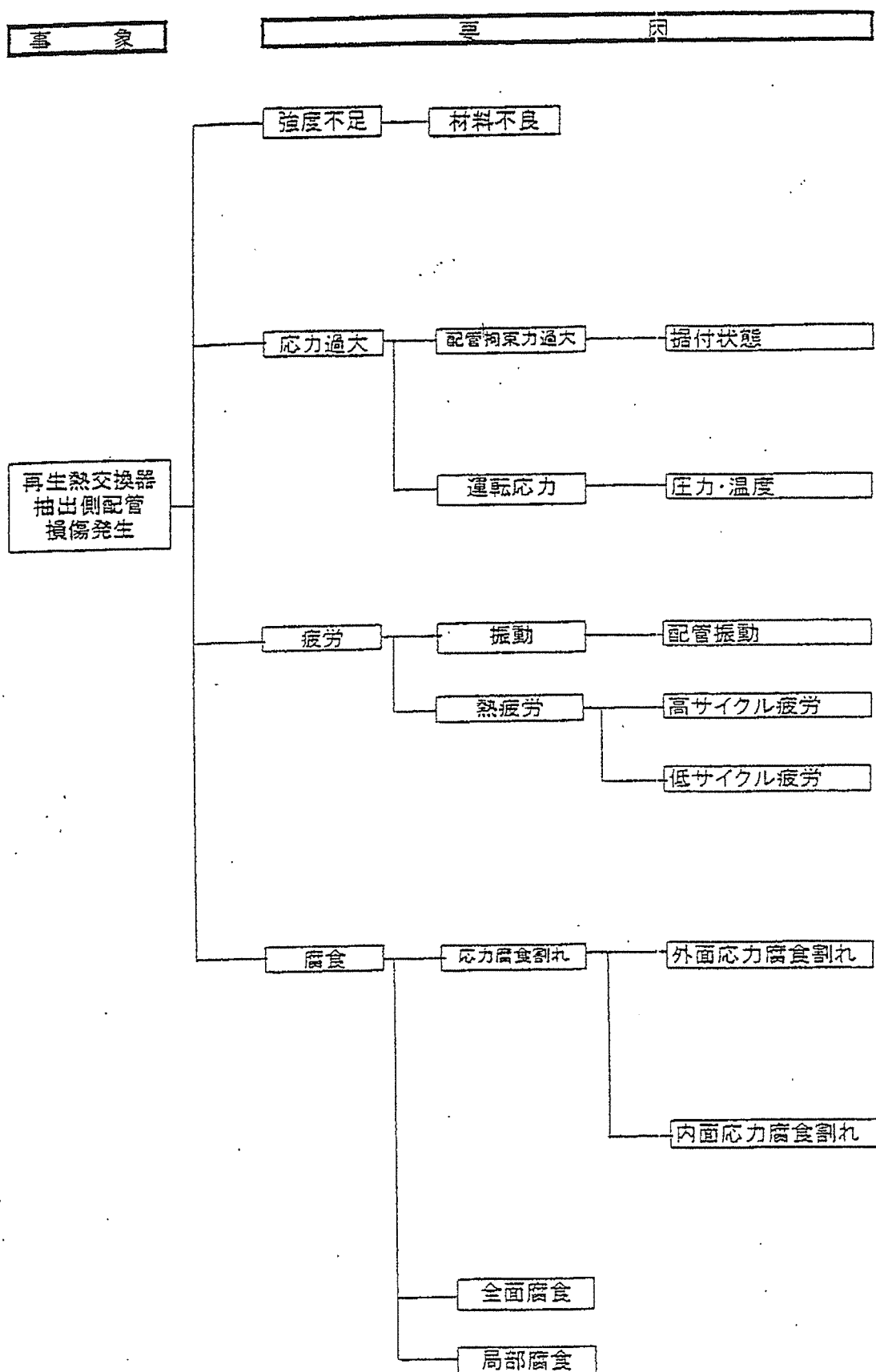
- (1) 通常運転時発生応力評価
- (2) 連絡配管拘束条件下での応力評価
- (3) 疲労評価
- (4) 疲労亀裂進展解析
- (5) 振動解析

6. 過去の事象との比較検証

7. 推定原因に関する検討評価

- 1～6を踏まえた推定原因に関する総合評価

再生熱交換器抽出側配管損傷要因分析図



添付資料リスト

資料1 発電所における再生熱交換器に関する調査

- (1) 再生熱交換器中段超音波探傷試験結果
- (2) 再生熱交換器中段胴部の浸透探傷試験結果
- (3) 再生熱交換器中段胴部内筒支持リング間隙測定結果
- (4) 再生熱交換器上段及び下段の超音波探傷試験結果
- (5) 再生熱交換器摺動側支持脚拘束状態調査結果

資料2 民間調査機関等での調査

- (1) SUS316のストライエーション間隔、き裂伝播速度と ΔK の関係
- (2) 当該エルボD部の割れaの破面上の酸化皮膜厚さ測定結果
- (3) エルボ及び管台引張試験結果
- (4) サーマルスリーブ内面観察及び酸化皮膜厚さ測定結果

資料3 損傷要因分析の結果

- (1) 再生熱交換器連絡配管損傷要因分析図

資料4 解析評価等

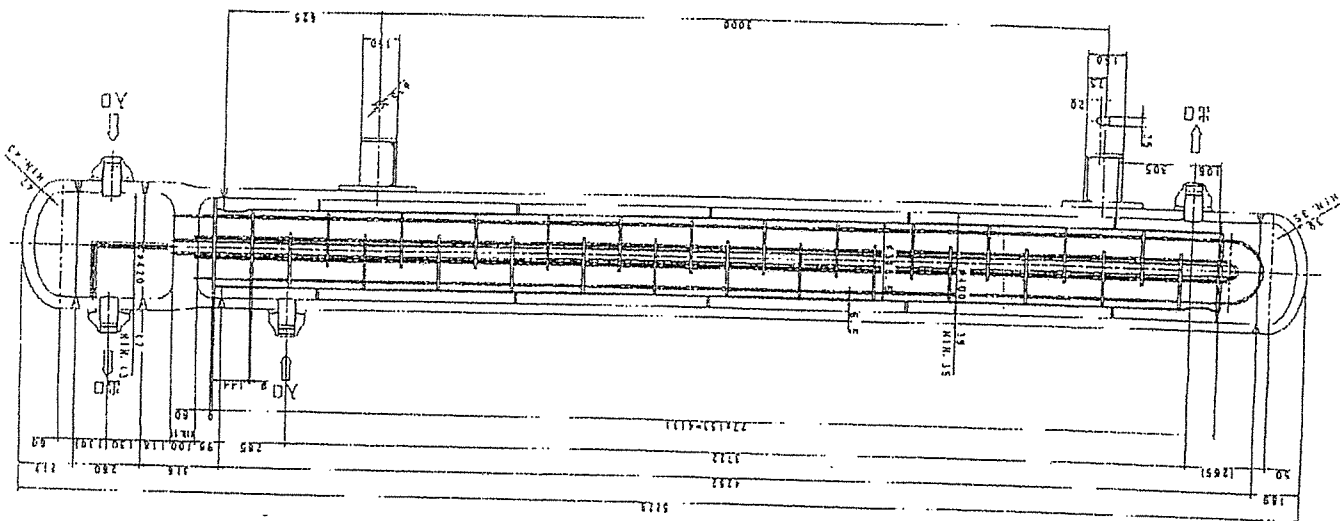
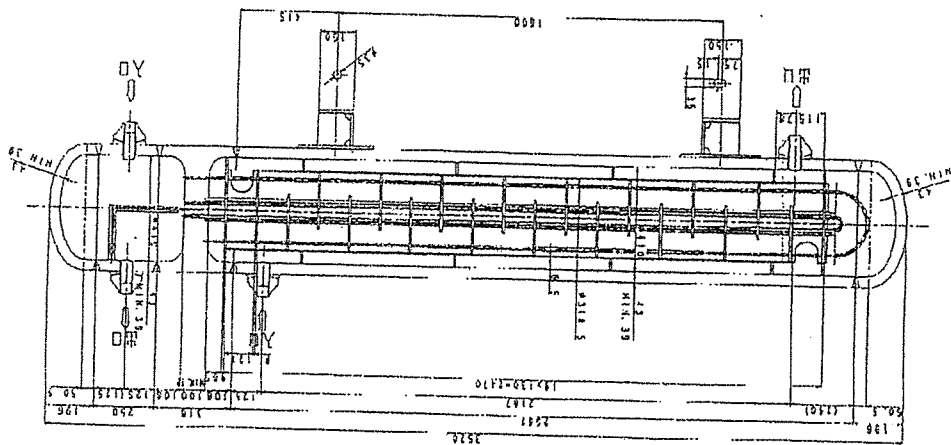
- (1) 割れ評価アプローチについて
- (2) 再生熱交換器の構造・設計について
- (3) 流動模擬試験について
- (4) 他プラントとの相違

資料5 運転履歴調査結果

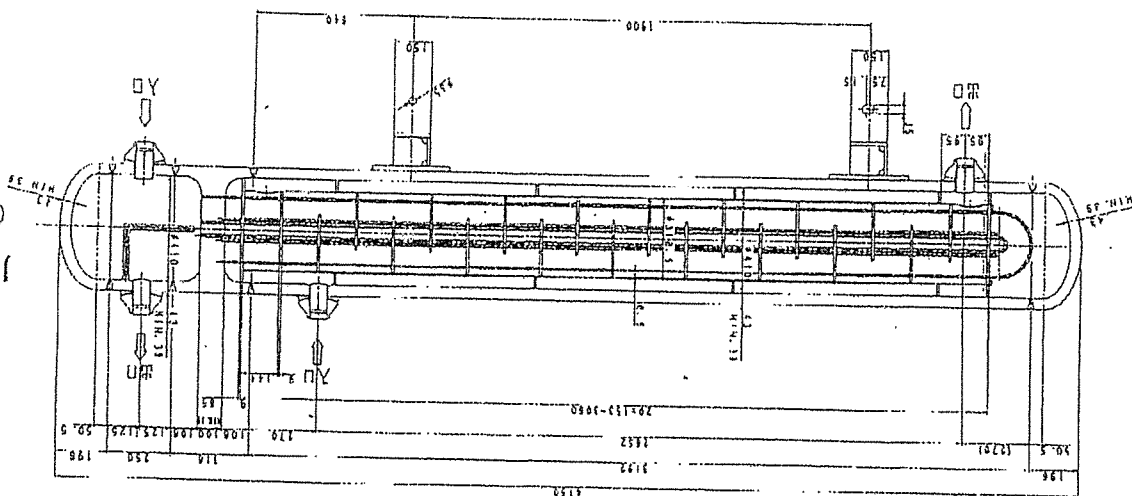
(4) 他プラントとの相違

再生熱交換器

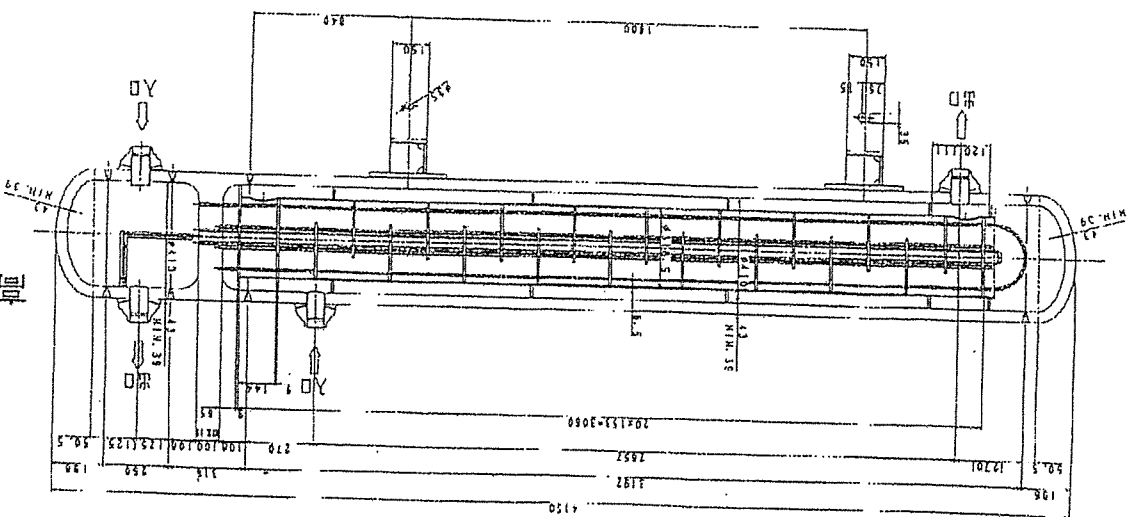
油1/2号 (タ172)



敦賀2



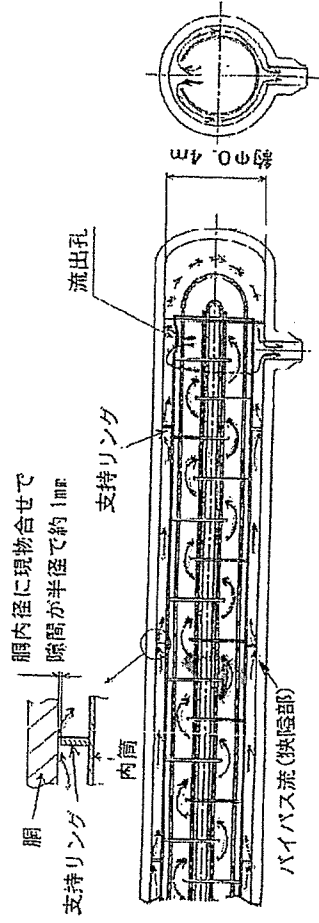
川内2号 (タ171)



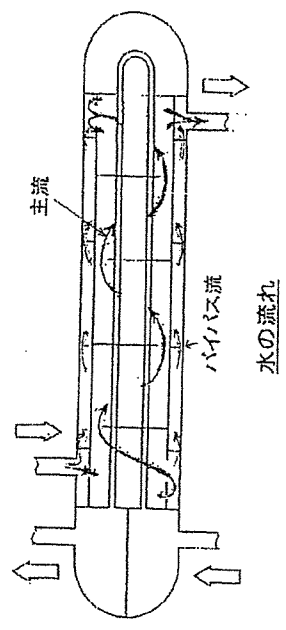
高浜3/4号 (タ171)

内筒付再生熱交換器のタイプ別比較

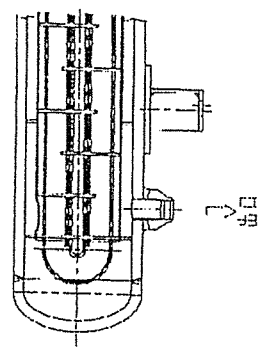
	敦賀2号機	他プラント (タイプ1)	他プラント (タイプ2)
1 定格抽出流量	27.1 t/h	13.5 t/h	10.1 t/h
2 外筒/支持リング隙間	約2~3 mm	約2 mm	約1 mm
3 主流とバイパス流の温度差	約80℃	約65℃	約60℃
4 バイパス流量 (実績値)	約40%	約30%	約25%
5 内筒吹き出し方向・形状 (穴径, 面積)	上方向・円形 (φ110 mm 約100 cm ²)	下方向・円形 (φ110 mm 約100 cm ²)	上方向・長穴 (90 mm×90° 約200 cm ²)
6 第1・第2支持リングの間隔	411 mm	231 mm 190 mm	191 mm
7 全 長	5,229 mm	4,150 mm	3,520 mm



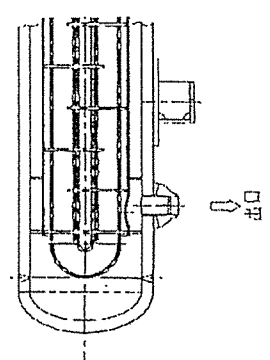
支持リングと胴の隙間



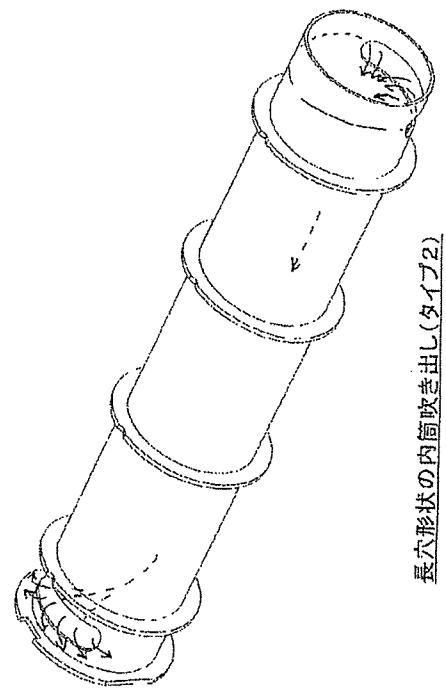
水の流れ



上方向内筒吹き出し（敦賀2号機、タイプ2）



下方向内筒吹き出し（タイプ1）



長六形状の内筒吹き出し（タイプ2）