

平成11年10月7日
原子力安全対策課
(11-102)
<14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、資源エネルギー庁、日本原子力発電株式会社および関西電力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、13日、30日記者発表済>

1. 実機模擬試験および解析評価結果

損傷原因として、再生熱交換器本体胴内部の構造およびバイパス流量の影響により、バイパス流のフローパターンが周期的に変動することなどにより、高サイクル熱疲労が発生したと推定されたことから、このメカニズムの確証のため、流動模擬試験および解析評価を実施した。

その結果、敦賀2号機の再生熱交換器では、バイパス流のフローパターンが周期的（約500秒）に変動する現象が発生し、それにより主流出口部でのバイパス流との混合が周期的に変動し、これが連絡配管へも影響し、この変動により発生する熱応力と、高温水（主流）と低温水（バイパス流）の混合に伴う温度ゆらぎ（数秒～20秒周期）による応力が重畳することにより、連絡配管および胴部で高サイクル熱疲労割れが発生したと推定された。

高浜3、4号機やそれ以外の内筒型再生熱交換器では、フローパターンが周期的に変動する現象が発生せず、熱疲労割れに至らないと推定された。

2. 再発防止策骨子（案）

国および日本原子力発電㈱では、今回の損傷原因を踏まえ、今後、

- ・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（き裂の早期発見方法（点検・検査の充実等））
- ・運転管理（漏えい量をより一層低減するための運転管理面の見直し）
- ・被ばく管理（作業性の改善）
- ・検査手法等の高度化（手法、手順等の高度化）

について、具体的な対策を検討していくこととしている。

原因究明調査の概要

1. 敦賀2号機の原因究明調査の概要

原因究明に関わる調査については、損傷した再生熱交換器中段の抽出側出口連絡配管エルボの破面等の詳細調査を行うとともに、その結果も踏まえ熱交換器内の流動状況把握等のための模擬試験や応力解析等を実施した。その全体概要を以下に述べるが、主な項目は次のとおりである。

- ①破面、断面、硬さ、粗さ等割れについての詳細調査
- ②再生熱交換器の他の連絡配管等に関する調査
- ③再生熱交換器の構造と特徴（損傷推定要因を踏まえた構造上の調査）
- ④流動模擬試験（熱交換器胴及び連絡配管の流動状況を模擬した可視化試験）
- ⑤熱流動解析（損傷部の応力解析に必要な入力条件の推定）
- ⑥フローパターン変動シミュレーション解析（損傷事象推定のための熱・構造を連成させたシミュレーション解析）
- ⑦応力解析（損傷に至る応力が当該部に発生し得ることの評価）

(1) 割れの詳細調査

損傷が確認された連絡配管（エルボ、管台、配管）及び胴の割れについて実施した詳細調査の主な結果は次のとおりである。

- ・連絡配管には軸方向と周方向の割れがあり、大小12の割れが確認された。
- ・割れは内面の複数起点から発生し、成長した痕跡が認められた。特に、複数の起点から割れが成長し、連結した痕跡が認められた。
- ・破面には組織状模様、ストライエーション状模様及びビーチマークが観察された。ビーチマークの間隔は割れ深さに伴い、徐々に狭くなっていた。
- ・胴部の割れは亀甲状の割れであった。
- ・材料の異常や全面腐食等は認められなかった。

以上の結果を総合し、連絡配管及び胴の割れはいずれも熱疲労割れによるものであると推定した。

(2) 他の連絡配管等に関する調査

再生熱交換器中段胴及び抽出側連絡配管の損傷を踏まえ、上下段再生熱交換器の他の連絡配管及び上下段再生熱交換器胴本体について非破壊試験を実施した結果、異常は認められな

かった。また伝熱管の耐圧漏えい検査を実施した結果、異常は認められなかった。さらに熱交換器下段のスライド脚側について、加温、ジャッキにより移動の有無を確認した結果、スライドすることを確認した。

(3) 再生熱交換器の構造と特徴

損傷原因として熱疲労が推定されたことから敦賀発電所2号機再生熱交換器の構造上の特徴について調査した。その結果、熱交換器胴には熱交換性能を改善するために内筒が設置されており、内筒内部を流れて伝熱管と熱交換し冷却される主流と、内筒と胴の隙間を流れる高温のバイパス流が存在し出口で混合される構造であった。

またバイパス流量は、内筒支持リングと胴との隙間の実測値が約3mmであり、これを考慮した圧力損失計算及び運転パラメータに基づく伝熱計算から約40%と評価された。(設計目標：隙間約2mm、バイパス流量約23%)

なお、胴切断後の内面点検で胴内面の上部に第1支持リングの接触跡が、胴内面の下部に第4支持リングの接触跡が認められた。

(4) 流動模擬試験（予備試験）

熱交換器で冷却された主流と高温のバイパス流の混合を模擬する熱流動模擬試験（予備試験）を実施した。

その結果、バイパス流は低流速（約7cm/s）であるため、内筒と胴の隙間を流れる間に内筒との熱交換により胴下部に低温領域が生成すること、及び支持リングと胴との隙間を上下に偏心させると、低温領域が生成・消滅する現象が発生するとともに低温の主流と高温のバイパス流の混合するフローパターンに変化のあることを確認した。この変化は管台入口の温度分布に変化を与え、下流の連絡配管の流況に影響を与えることを確認した。

(5) 損傷メカニズムの推定

以上の結果から、胴下部でのバイパス流低温領域の生成または消滅が熱交換器胴に変形を与え、それにより隙間が変動し、フローパターンが変動することによって温度分布が変化するという現象が繰り返し発生し、当該損傷部に熱疲労割れが発生した可能性があると考え、その後の試験及び解析を実施した。

(6) 流動模擬試験（本試験）

支持リングの位置及びバイパス流量が流況に与える影響を試験で確認した。その結果は次のとおりであった。

- ・第2支持リングが上偏心の状態にあるか、下偏心の状態にあるかで第1支持リングと第2支持リング間の主流とバイパス流の混合する流況は大きく変化するとともに、第2支

持リングと第3支持リング間の胴下部の低温領域が生成・消滅した。下偏心の状態では主流とバイパス流が内筒外側を対称的に流れ（フローパターン1）、上偏心の状態では支持リングのわずかな左右の偏心の影響から内筒外側を非対称に流れた（フローパターン2）。この混合状況は管台入口部にまで及んでおり、管台入口回りの温度分布は上偏心と下偏心で、約90°位相の違いが生じた。

- ・バイパス流量が大きくなると、上下の偏心で低温領域の生成と消滅が顕著になり、管台入口の温度分布の位相差も大きく変化した。
- ・高温のバイパス流と低温の主流が混合する領域（胴の第1、第2支持リング間及び連絡配管エルボ）で比較的短周期の温度ゆらぎが確認された。

(7) 熱流動解析

フローパターン1及び2の流動状況が繰返す場合、それによる応力解析に必要な各部位の温度分布を求めるため、第2支持リングを上下に偏心させた条件で、胴及び連絡配管エルボ部の熱流動解析を実施した。モデル範囲はバイパス流と主流の混合部位を模擬した第2支持リングから胴鏡部及び出口連絡配管とし、これに流動模擬試験で得られた管台入口温度分布を入力した。

その結果、支持リングの上下偏心で流動模擬試験と同様に2種類のフローパターンが胴部に発生し、連絡配管エルボ部入口の周方向温度分布には約90°位相が異なる温度パターンが発生した。

(8) フローパターン変動シミュレーション

以上の試験及び解析結果を踏まえ、バイパス流に低温領域が生成・消滅するとともに胴が熱変形することで隙間が変化し、フローパターンが周期的に変動する現象が発生するかを確認するため、コンピュータによるシミュレーションを実施した。シミュレーションの結果は次のとおりである。

- ・バイパス流量が40%の場合、胴と第2支持リングの隙間が周期的に変動し、フローパターン1と2が交互に繰返される現象が発生し得る。また、その変動周期は約500秒程度の比較的長い周期である。
- ・バイパス流量割合が30%以下ではフローパターン変動現象は発生しないと考えられる。

(9) 変動応力解析

フローパターン1と2の温度分布差による長周期変動応力及び流動模擬試験で得られた短周期の温度ゆらぎによる短周期変動応力を構造解析モデルに温度条件を入力することで推定した。その結果、長周期と短周期の温度変動による応力は連絡配管エルボ部で約118 MPa（約12kgf/mm²）、胴部で約167 MPa（約17kgf/mm²）等であった。

(10) 割れ発生・進展評価

損傷部位の疲労強度を平均応力を考慮して推定するとともに、上記変動応力と比較し、割れの発生の可能性を評価した。その結果、疲労強度は連絡配管エルボ部(割れa)で約 98 MPa (約 10 kgf/mm²) から約 147 MPa (約 15kgf/mm²)、胴部で約 147 MPa (約 15 kgf/mm²)から約 167 MPa(約 17kgf/mm²)となり、損傷部に加わっていたと推定される変動応力と比較すると、割れは発生し得ると評価される。また、割れ発生寿命は各損傷部で約 10⁵ 回以上であると推定された。

変動応力解析の結果を用いて割れ進展解析を実施した結果、各損傷部で割れの進展寿命は約 10⁵ 回のオーダーであった。

また、フローパターン変動シミュレーションで得られた変動周期約 500 秒程度と実機運転時間(約 9.5 万時間)を考慮して算出した変動回数は 10⁵ 回のオーダーであり、割れの発生・進展から評価した寿命と矛盾しない結果となった。

(11) まとめ

以上の調査結果は、

- ・熱交換器胴本体におけるバイパス流の低温領域の生成・消滅が熱交換器胴に変形を与え、
- ・それにより内筒支持リングと胴の隙間が変動し、
- ・フローパターンが変動することにより温度分布が変化するという現象が周期的に発生し、
- ・高温水と低温水の合流による短周期の温度ゆらぎと重畳することで、
- ・連絡配管及び胴本体に、疲労強度を上回る応力が繰り返し加わり、熱疲労割れが生じたとする推定原因を裏付けるものであった。

2. 他プラントにおける類似現象発生の可能性の有無

高浜 3 / 4 号機、川内 2 号機、泊 1 / 2 号機は、敦賀 2 号機と同様に内筒付き再生熱交換器を有していることから、これらの再生熱交換器についても、流動模擬試験、シミュレーション解析及び変動応力解析を実施することにより、再生熱交換器本体及び連絡配管における類似損傷発生の可能性について検討を行った。

流動模擬試験、シミュレーション解析、実機計測等の結果は以下のとおり。

- (1) 流動模擬試験の結果、第 1、第 2 支持リング間の流況は、第 2 支持リング位置の上下方向、左右方向変化にかかわらず安定しておりほとんど変化しない。このため、胴、連絡配管部での温度分布変動はほとんどない。
- (2) シミュレーション解析からは、隙間の周期的な変動は発生せず、フローパターンの周期的な変動現象も発生しない結果となった。

(1)、(2)により、熱応力評価として短周期の温度ゆらぎによる応力評価を実施した結果、いずれのプラントも応力振幅は許容される疲労強度を下回った。

(3) 代表プラントにおける実機胴部変位計測の結果、周期的な変動現象は発生しておらず、また既に数プラントにおいて当該部の超音波探傷試験を実施し、有意な指示は認められなかった。

3. 再発防止策骨子（案）

(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]

- ① 高サイクル熱疲労割れを防止する設計の採用（事業者）
- ② 工事計画認可等における設計・施工の確認（国）
- ③ 高サイクル熱疲労に関する統一的基準の検討（国、事業者）

(2) 保守 [き裂の早期発見方法（点検・検査の充実等）]

- ① 内筒構造を有するPWR再生熱交換器に対する検査の充実（事業者）
- ② 高サイクル熱疲労割れを考慮した検査の充実（事業者）
- ③ 念のため、第3種配管に関する検査の充実（事業者）
- ④ 定期検査等における確認（国）

(3) 運転管理 [漏えい量をより一層低減するための運転管理面の見直し]

- ① 漏えい箇所の早期特定および漏えい量の把握の円滑化（事業者）
- ② 一次冷却材漏えい時における減圧・冷却のための操作時間の短縮（事業者）

(4) 被ばく管理 [作業性の改善]

- ① 除染の機械化等（事業者）

(5) 検査手法等の高度化 [手法、手順等の高度化]

- ① UT検査の自動化、マニュアル化等（国、事業者）

敦賀発電所 2 号機

再生熱交換器疲労損傷発生メカニズムの原因調査

平成11年10月7日

日本原子力発電株式会社

再生熱交換器損傷メカニズムの確認

中段再生熱交換器の形状的特徴

- 内筒が取付られている
- ・外筒/支持リング間に隙間がある
- ・内筒吹出し方向が上方向
- ・全長が長い
- ・第1、第2支持リング間隔広い



模擬試験・解析

熱交換器内の流れの特徴

- 主流とバイパス流が出口部で合流
- 主流とバイパス流の温度差が大きい
- バイパス流の速度が比較的速い



模擬試験

(前回までの主な結果)

- ① 第1～第2支持リング間で流況の異なるフローパターン1と2の2種類が存在する
- ② 第2～第3支持リング間で支持リングが下偏心の時に胴下部に低温領域が発生する

(今回の主な結果)

- ① 第1～第2支持リング間の流況（～連絡管への流れ込み）は第2支持リング下部隙間の大小で決まる
- ② 第2～第3支持リング間の上下温度差は
 - a. 第2支持リング下部隙間が時間的に減少するとき増大する→低温領域が生成
 - b. 逆に下部隙間が時間的に増大するとき減少する→低温領域の消滅

今回の解析

フローパターン変動シミュレーション

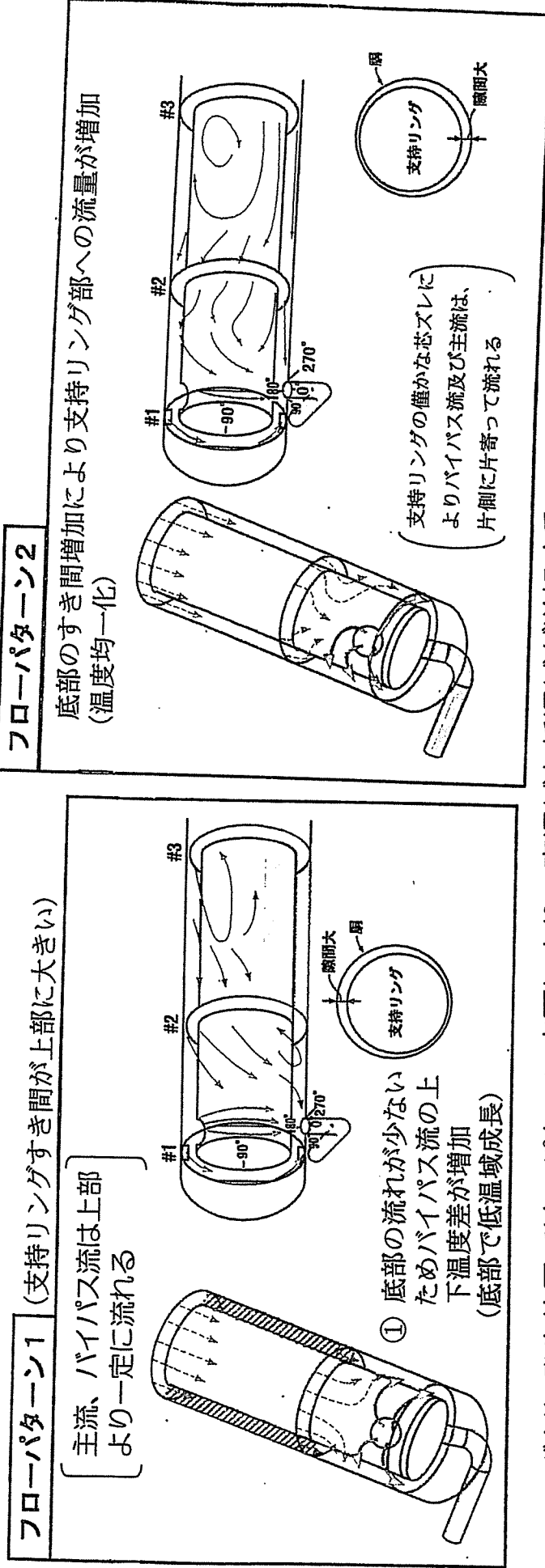
- ① 流動試験で得られた上下温度差の時間変化を用いて熱と構造の連成シミュレーション（温度変化、胴変形による隙間の変化）を実施
- ② その結果、今回の事象において第2支持リング下部隙間の時間変動が周期的（約500秒）に生じ、これによってフローパターン1と2の変化が発生することがわかった。

損傷推定メカニズム

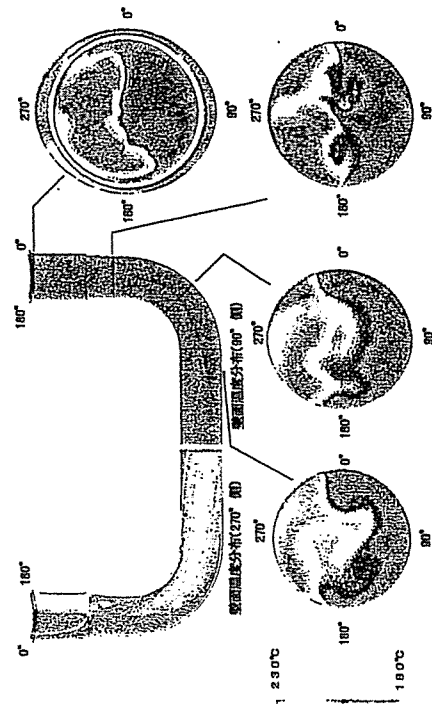
- 今回の損傷は、主流とバイパス流の流況が周期的に変化するため（フローパターンが変化するため）、胴及び連絡配管に繰返しの熱応力が発生し、高サイクル熱疲労により損傷が発生したことを、フローパターン変動シミュレーションで実証できたと推定。
- 今回発生していた熱疲労の応力としてはフローパターンの変化による長周期の温度変動と主流とバイパス流の混合に伴う短周期の温度ゆらぎが重なりあったものと推定。

これまでの流動模擬試験、解析の結果

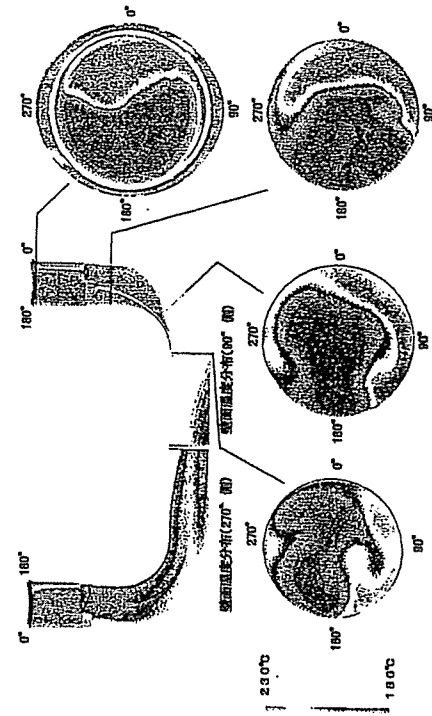
1. 第2支持リング隙間位置により、プロパターン1、2が交互に発生。



2. エルボ割れ発生位置では、パターン変更により、高温域と低温域が逆転する。



特徴 1) 高温水域は270°側、低温水は90°側
2) エルボ入口から下流側まで温度域は変化なし



1) 高温水域は0°側、低温水は180°側
2) エルボ入口から下流側にかけて温度域が変化する。(高温水が片側から入り込むため回転成分が付与されるため)

調査・試験の内容と結果

(1) 再生熱交換器胴本体の調査

中段熱交換器胴本体及び割れがあった抽出側出口付近について、現場及び民間調査機関にて詳細調査を実施した。

①民間調査機関調査結果

- ・割れは概ね長手方向であるが、板厚方向に深い割れと浅い割れが混在しており、熱疲労に特徴的な亀甲割れであった。
- ・割れは内面を起点とした粒内割れで、破面にビーチマーク、組織状模様及び先端部の一部にストライエーション状模様が認められ、疲労割れの特徴を有していた。
- ・材料組成は問題なく、応力腐食割れや全面腐食、局部腐食の痕跡は認められなかった。

②現場調査結果

- ・内面全体について浸透探傷試験を実施した結果、抽出側出口以外は指示は認められなかった。
- ・胴内面下部の第4支持リング位置では胴底面との接触跡が認められた。
- ・胴内部第3～第6支持リングの隙間を実測及び小型カメラにて観察した結果、いずれも直径で3mm程度であった。
- ・第1支持リングの上部に対応する胴内面に接触痕が認められた。

(2) 流動模擬試験

バイパス流量（流速）、内筒支持リングの隙間を変化させ、内部の流動状況の確認や各部の温度を計測し解析評価のデータベースとした。

① 支持リング隙間が流況に与える影響

- ・ 第2支持リングの位置が上または下に偏心することによって、主流と

バイパス流の混合する流況が大きく変化した。

下偏心：主流とバイパス流は、胴の左右で同じ（対称）に流れる。

（隙間が上に大） ⇒ フローパターン1

上偏心：主流とバイパス流は、胴の左右で非対称な流れとなる。

（隙間が下に大） ⇒ フローパターン2

この非対称な流れにより、管台入口部での温度分布は対称な流れの時とは約90°位相がずれた状態であった。

- ・ 第2支持リングの偏心を強制的に上・下に変化させると、第2と第3支持リング間の胴下部に低温領域の生成や消滅が生じた。
- ・ バイパス流と主流が混合する領域で、高温と低温が交番する短周期の温度ゆらぎが見られる。ゆらぎの周期は数秒～20秒であった。

② バイパス流量（流速）の影響

低温領域の生成・消滅に対するバイパス流量の影響及びバイパス流量の管台入口部の温度位相差に及ぼす影響を調べた。

- ・バイパス流量が大きい場合（約40％：流速が大）、上偏心と下偏心で低温領域の生成と消滅が顕著に現れる。
- ・バイパス流量が増加すると温度分布の位相差も大きくなる。
- ・バイパス流量が20％では、支持リングの上下偏心により、胴（バイパス流）上下の温度差は大きくなるが、低温領域の消滅は発生しない。
- ・バイパス流量40％の状態、第2支持リングを強制的に上下に移動させる（偏心）させると、フローパターン1から2、2から1へと変化するのが確認された。

③ フローパターンの遷移域

第2支持リングと胴底部との隙間が

1. 5mm 以下の場合ではフローパターン1、
1. 7mm 以上の場合ではフローパターン2 が確認された。

(3) フローパターン変動シミュレーション

バイパス流により低温領域が生成・消滅するとともに、胴が熱変形することで隙間が変化し、フローパターンが周期的に変動する現象が発生するかをバイパス流の温度変化（内筒への伝熱・温度差の変化率）やその温度での本体胴の変形等を経時的に数値解析し、確認する。

①バイパス流量が40%の場合、胴と第2支持リングの隙間が周期的に変動し、フローパターン1と2が交互に繰り返される。

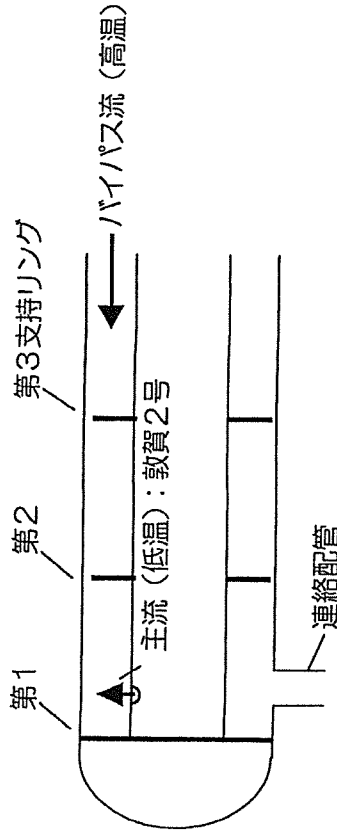
この変動周期は、概ね500秒の周期と推定された。

②バイパス流量が30%以下では、フローパターンの変動は発生しない。

(4) 割れ発生評価

損傷部位の疲労強度を平均応力を考慮して推定するとともに、変動応力と比較し、割れの発生の可能性を評価した。変動応力はフローパターン1と2の温度分布差による長周期変動応力及び流動模擬試験で得られた短周期の温度ゆらぎによる短周期変動応力を構造解析モデルに温度条件を入力することで推定した。その結果、長周期と短周期の温度変動による応力は連絡配管エルボ部で約118MPa、胴部で約167MPa等であった。疲労強度はエルボ部（割れa）で約98MPa、胴部で約147MPaとなり、損傷部に加わっていたと推定される変動応力と比較すると、割れが発生しうることが推定された。

原因究明の流れ



流動模擬試験結果

(第1～第2支持リング間)

- ①バイパス流速が大きい時 (バイパス流量が大) 第2支持リング下部の隙間の大小でフローパターンの変化が生じる。
- ②バイパス流速が小さい時や主流の出口が下向きの場合、フローパターンの変化は生じない。

(第2～第3支持リング間及びその上流)

- ①バイパス流速が小さい時、支持リングの偏心にかかわらず上下の温度差はつくが、消滅はしない。
- ②バイパス流速が大きい時、支持リングの上下偏心で上下温度差の生成と消滅現象が発生する。 ⇨
- ③バイパス流速が更に大きいと、支持リングの偏心にかかわらず上下の温度差は生じにくい。

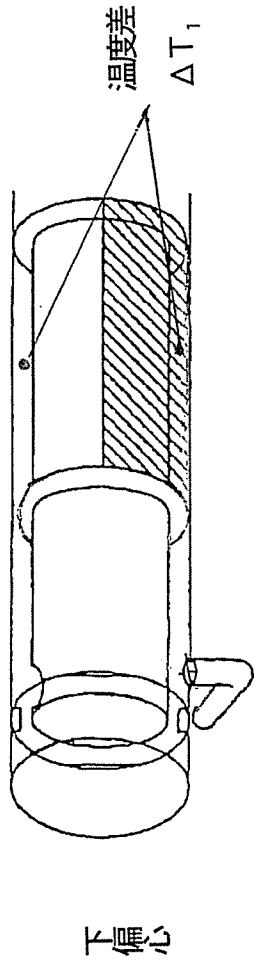
模擬試験で温度差変化率を求めた。



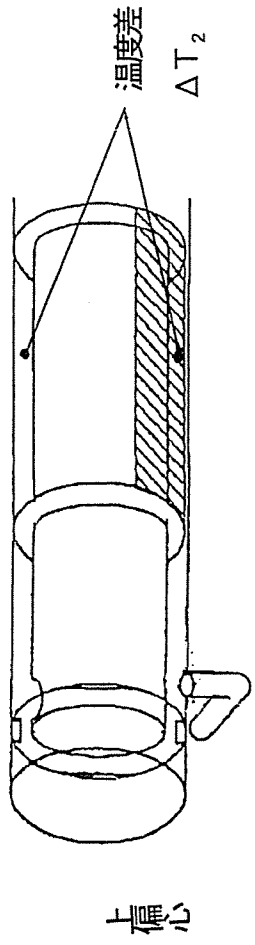
フローパターン変動シミュレーション

- ①流動模擬試験結果の温度差変化率を用いて、熱と構造連成シミュレーションを実施した。
- ②その結果、バイパス流量が40%の時、第2支持リング下部の隙間変動が周期的に生じ、これによってバイパス流のフローパターンの変化が発生することがわかった。
- ③この結果から、連絡配管内でフローパターンの変化による温度変化と主流とバイパス流の混合による温度ゆらぎに伴う変動応力が発生し、その応力値を評価すると疲労強度より大きいと推定されたことから、今回の原因がフローパターンの変化により発生したという推定が本シミュレーションで実証できた。

バイパス流速と胴上下温度差の関係



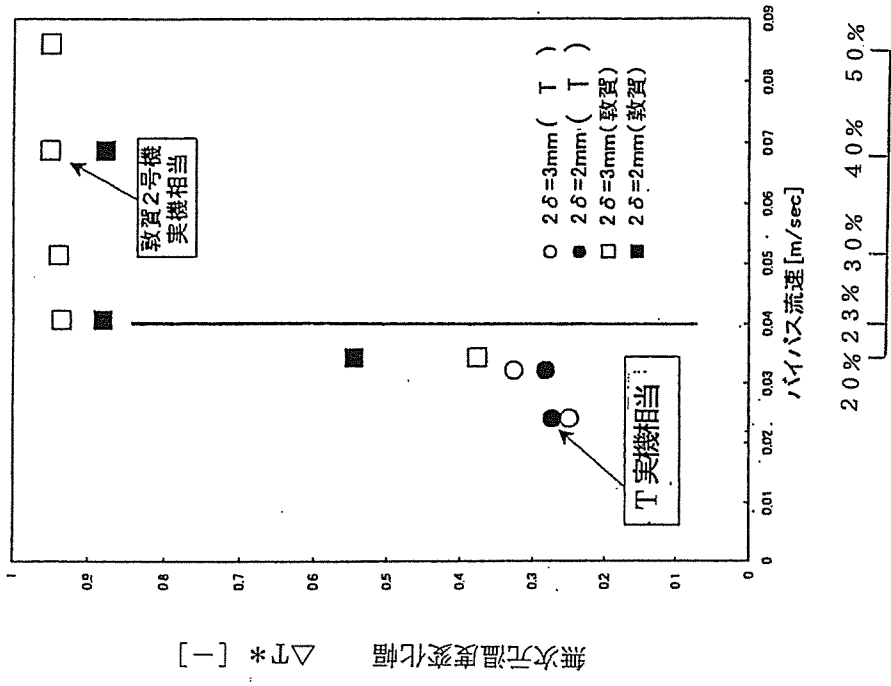
下偏心時の胴頂部と底部の温度差 ΔT_1



上偏心時の胴頂部と底部の温度差 ΔT_2

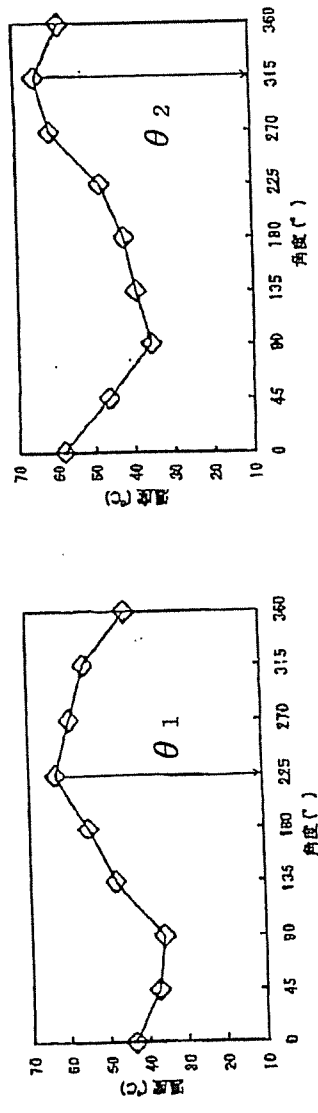
$$\text{無次元温度変化幅} \quad \Delta T^* = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\Delta T_1}$$

- ①バイパス流速が約0.04m/s以上では、上偏心時に胴底部の冷温領域を排出するため、 $\Delta T_2 \approx 0$ となり、 $\Delta T^* > 0.9$ となる。
- ②バイパス流速が約0.035m/s以下では、胴底部の冷温領域を排出する能力が低下し、上偏心時に ΔT_2 は零とはならず、バイパス流速の減少と共に ΔT_1 と ΔT_2 が近づき、 ΔT^* は小さくなる。

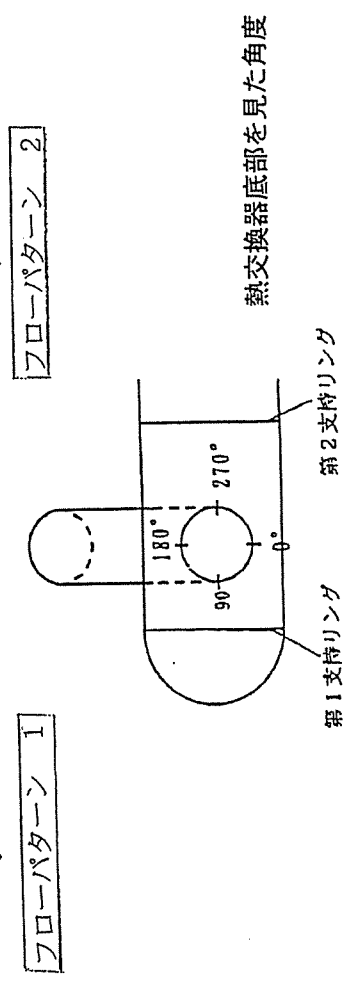


教賀2号機バイパス流量割合

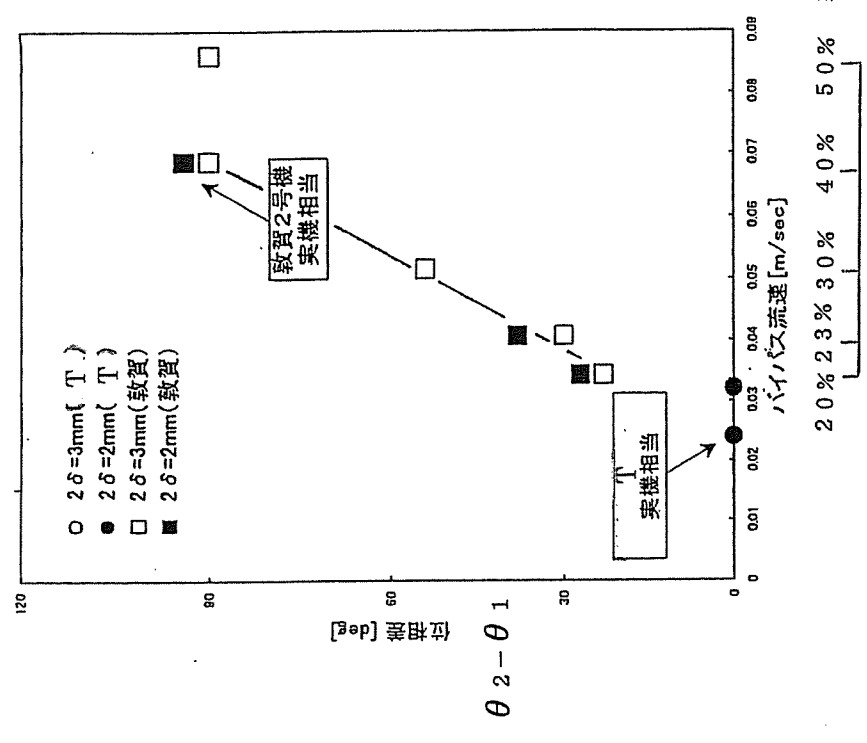
バイパス流速と連絡配管入り口温度分布



(a)下偏心時 (バイパス流量割合 40%) (b)上偏心時 (バイパス流量割合 40%)



- ①バイパス流量が40%の場合、連絡配管入り口の周方向温度分布は、下偏心時と上偏心時とで位相が異なり、その位相差は90°である。
- ②バイパス流速 (バイパス流量割合) の減少と共にその位相差は減少する。この主たる理由は、上偏心時に胴左右で非対称な流れとなるが (フローパターン2)、流速が小さいほどその非対称性が小さくなるためと推定される。
- ③バイパス流速が敦賀2号機に比べ小さく、且つ内筒吹き出し穴が下向き等であるときは、フローパターンの変化がなく、位相差は殆どなくなる。

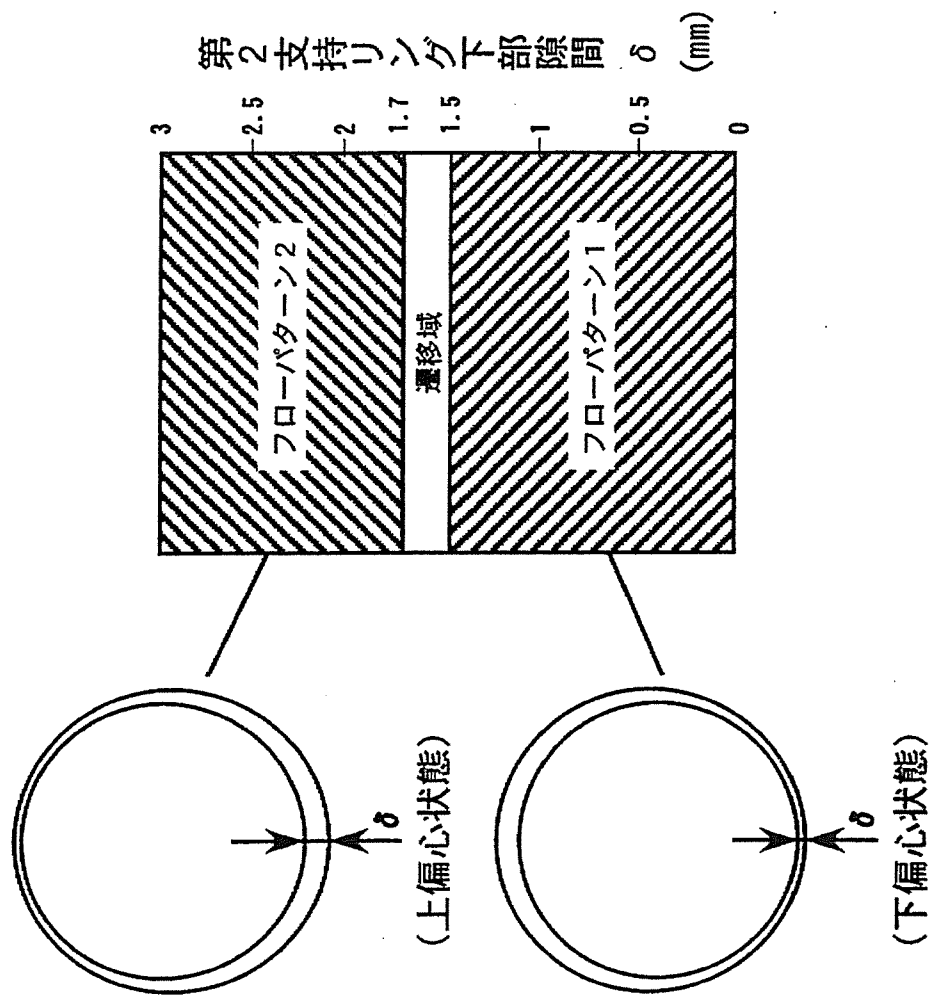


敦賀2号機バイパス流量割合

第2 支持リング隙間とフローパターンとの関係

δが1.7mmより大きい場合（上偏心状態の場合）、
下部隙間 > 上部隙間となり、
フローパターン2、すなわち胴部で上下温度差小となる。

δが1.5mmより小さい場合（下偏心状態の場合）、
下部隙間 < 上部隙間となり、
フローパターン1、すなわち胴部で上下温度差大となる。



STEP1 (初期状態)

- ・ バイパス流の底部での流れが少なく低温域が形成、成長。

STEP2

- ・ 胴底部の温度低下により、胴がわずかに変形し、第2、3支持リング下部隙間は増加。
- ・ 下部隙間が増加しても低温域は直ぐに消滅しない。

STEP3

- ・ 下部隙間の増加により、第2支持リング下部への流量が増加。
- ・ 低温領域の消滅が開始。

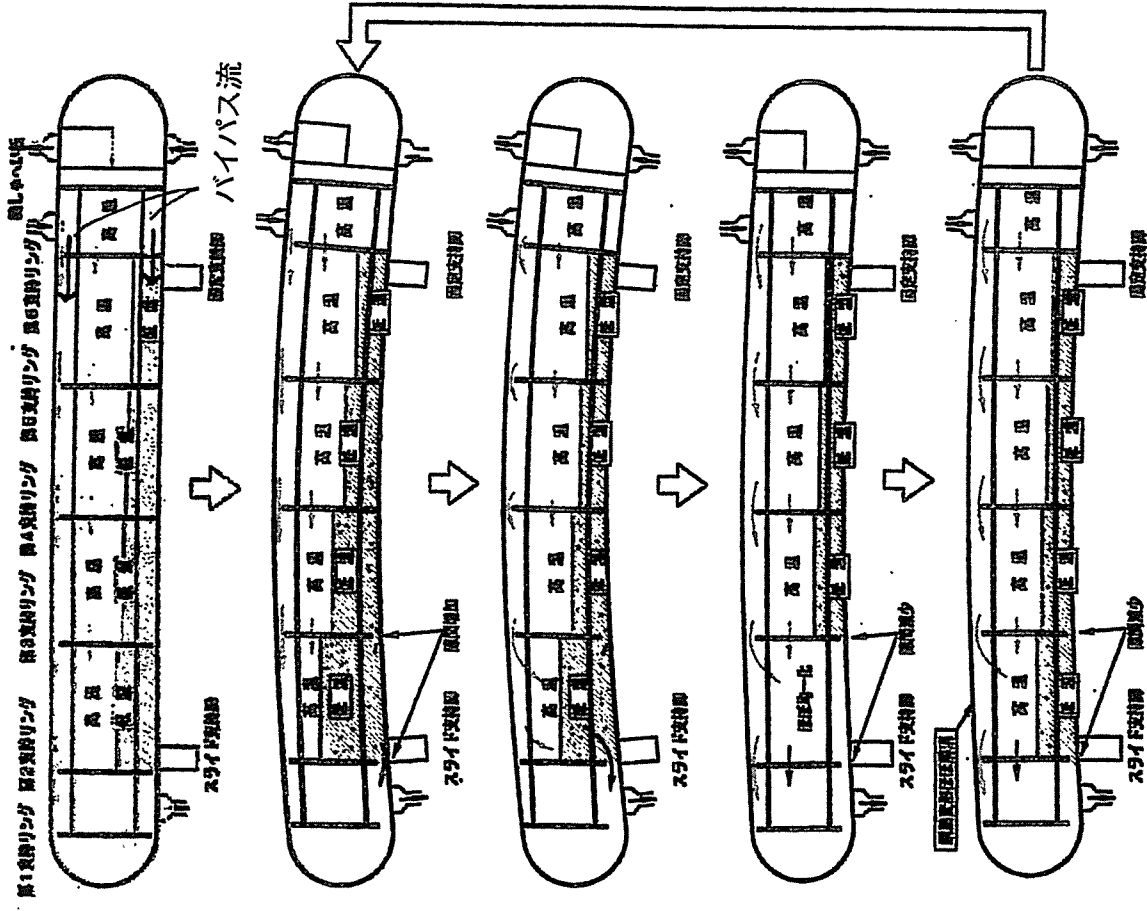
STEP4

- ・ 第2、3支持リング間の低温領域が消滅。
- ・ 胴の変形が解消され、下部隙間が減少。

STEP5

STEP2 ~ STEP5 をある周期で繰り返す。

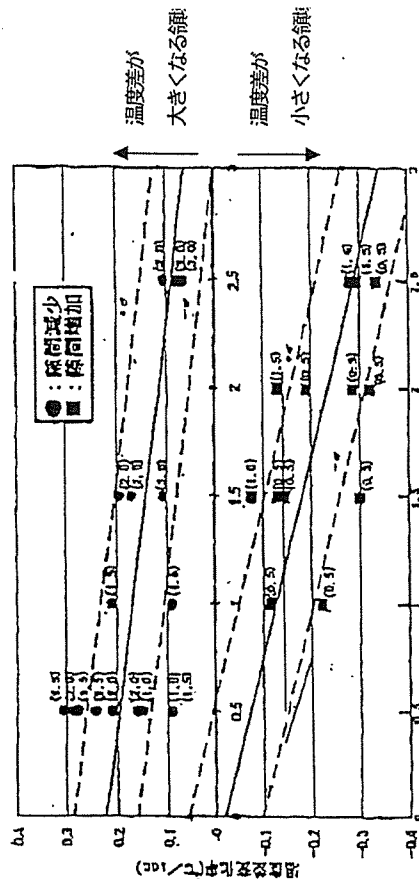
(第4支持リング下部は常に胴底部と接触)



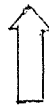
フローパターン変動メカニズム



第2支持リング下部係数(mm)

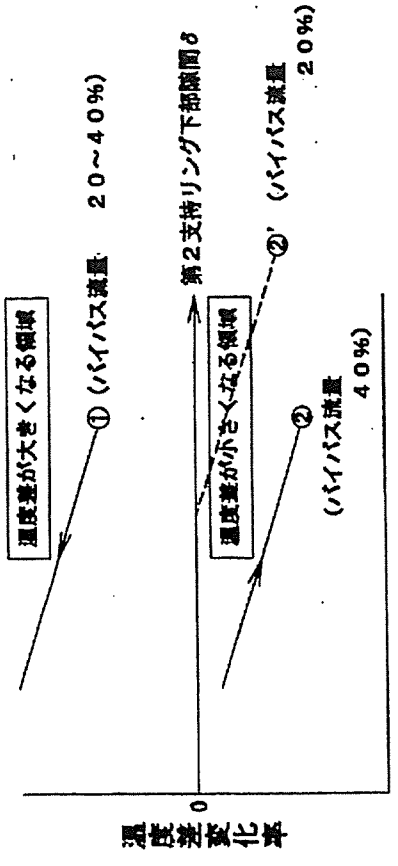
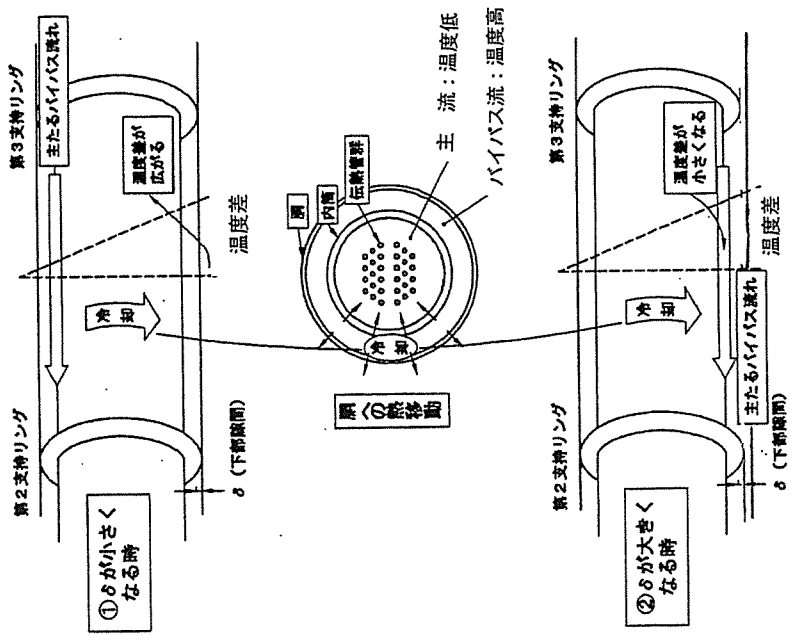


() 内の数値は、環境調整開始前の第2支持リング下部隙間の初期値



支持リングの移動方法

胴部上下温度差の時間変化（温度差変化率）（2/2）



・バイパス流に生じる温度差変化率は次のa、bの大小関係によって決まる。

- a. 低温主流（低温）の内筒を介しての冷却 → 胴下部に低温領域形成
- b. バイパス流れによる低温領域の下流側への排出

バイパス流量が40%の場合

・①δが小さくなる時、 $a > b$ となり、

上下の温度差が時間と共に大きくなる。→ 温度差変化率は正

・②δが大きくなる時、 $a < b$ となり、

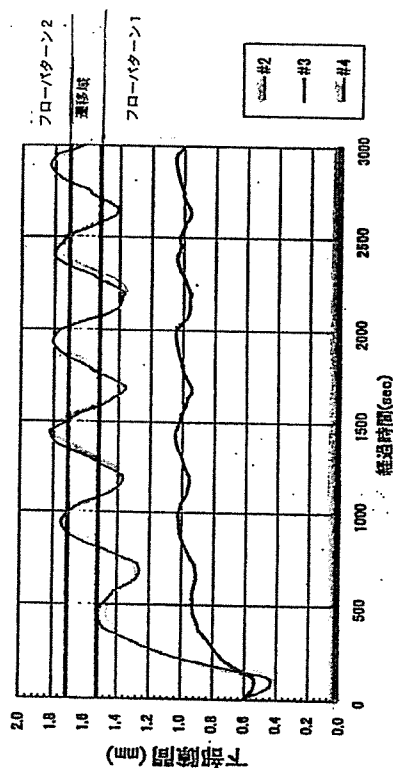
上下の温度差が時間と共に小さくなる。→ 温度差変化率は負

・バイパス流速が遅い場合（バイパス流量が20%の場合）、バイパス流量が40%に比べて、内筒を介しての冷却aはほぼ同等であるが、低温領域の排出能力が減少するため、負側の温度差変化率は40%の時より小さくなる。

フローパターン変動シミュレーション結果

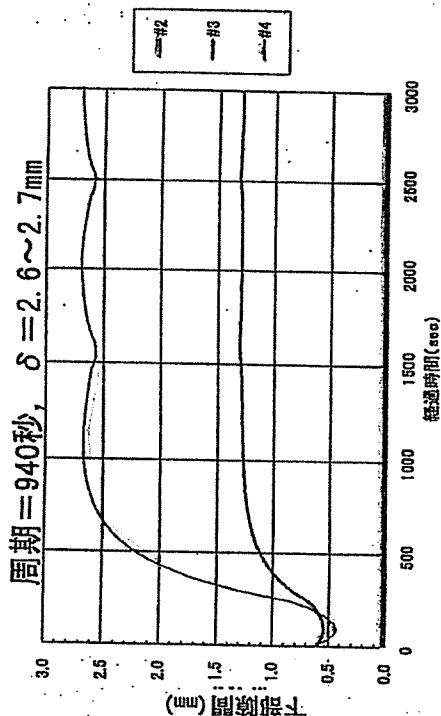
1 バイパス流量 : 40%

周期=520秒, $\delta = 1.4 \sim 1.8\text{mm}$



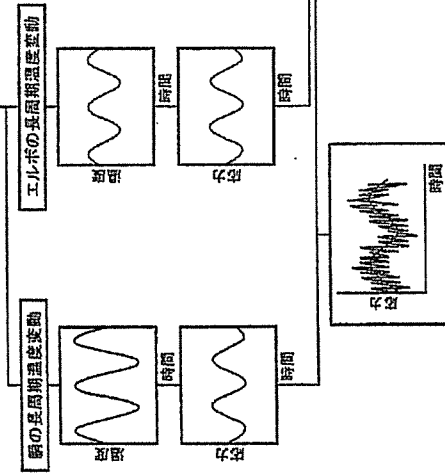
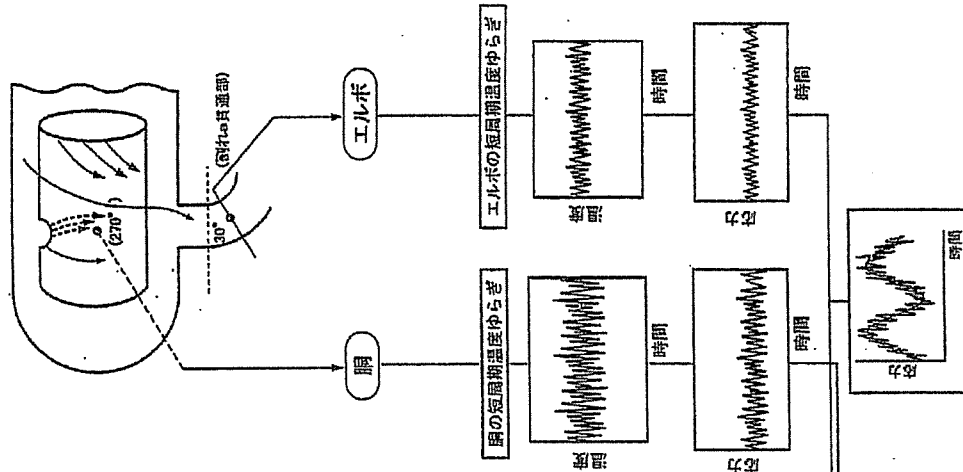
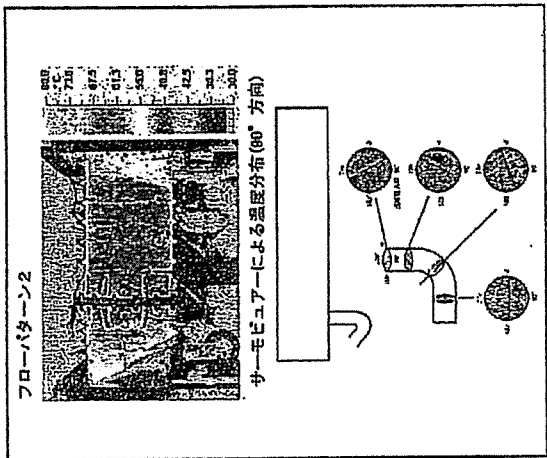
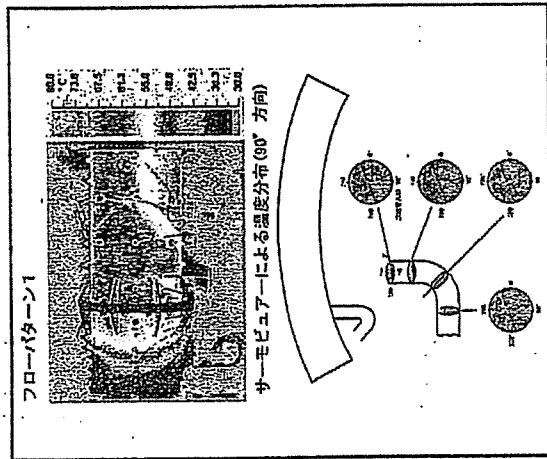
- ① 温度差変化率を用いて、熱と構造の連成解析から隙間が周期的に変化する結果が得られた。
- ② 下部隙間の変動周期は約500秒で、その幅はフローパターンの変化により生じ、隙間はフローパターン遷移域 (1.5~1.7mm) より大きい。
- ③ このことからフローパターン1とフローパターン2を交互に繰り返す現象が発生し得ることがわかった。

2 バイパス流量 : 20%

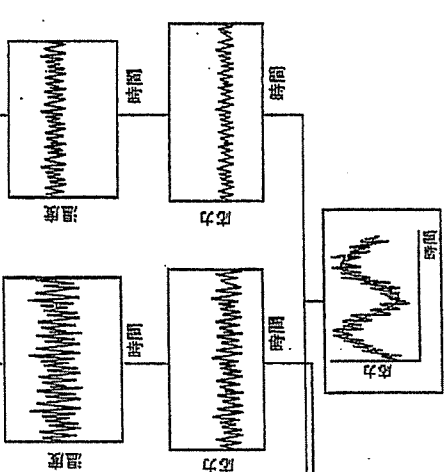


- ① 負の温度差変化率がい小さいため、上下温度差の解消がほとんど無いので隙間変動幅は小さい。
- ② このことからフローパターンの変化は生じない。

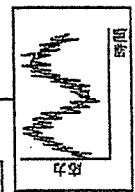
流況変動に伴う温度応力評価



応力振幅
約 16.7 MPa > 約 14.7 MPa
(約 1.7 kgf/mm²) (約 1.5 kgf/mm²)
[疲労強度]



応力振幅
約 11.8 MPa > 約 9.8 MPa
(約 1.2 kgf/mm²) (約 1.0 kgf/mm²)
[疲労強度]



再発防止対策骨子（案）

- (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]
 - ①高サイクル熱疲労割れを防止する設計の採用[事業者]
 - ②工事計画認可における設計・施工の確認[国]
 - ③高サイクル熱疲労に関する統一的基準の検討[国，事業者]
- (2) 保守[き裂の早期発見方法（点検・検査の充実）]
 - ①内筒構造を有するPWR再生熱交換器に対する検査の充実[事業者]
 - ②高サイクル熱疲労割れを考慮した検査の充実[事業者]
 - ③念のため，第3種配管に関する検査の充実[事業者]
 - ④定期検査等における確認[国]
- (3) 運転管理[漏えい量をより一層低減するための運転管理面の見直し]
 - ①漏えい箇所の早期特定及び漏えい量の把握の円滑化[事業者]
 - ②一次冷却材漏えい時における減圧・冷却のための操作時間の短縮[事業者]
- (4) 被ばく管理[作業性の改善]
 - ①除染の機械化[事業者]
- (5) 検査手法等の高度化[手法、手順等の高度化]
 - ①UT 検査の自動化，マニユアル化等[国，事業者]

高浜3／4号機 再生熱交換器流動模擬試験、応力評価について

1. 目 的

高浜3／4号機の内筒付再生熱交換器の流況および流体温度分布を流動模擬試験により評価し、それをもとに胴部および出口エルボ部の応力評価を実施し、健全性を確認した。

2. 流動模擬試験

1

実機を模擬した再生熱交換器で内筒を上偏心、下偏心させ流況および温度分布を測定した結果、敦賀2号機に比べフローパターンの変化による流況変化は小さく、有意な温度変化は認められなかったことから、フローパターン変動現象は発生しにくいものと推定された。

また、温度ゆらぎの幅は、敦賀2号機に比べ小さかった。

3. フローパターン変動現象の確認

(1) 解析評価

2

高浜3／4号機のフローパターン変動現象の発生可能性をコンピュータにより評価した結果、フローパターン変動現象は発生しないことが確認された。

(2) 実機測定

2

高浜4号機の再生熱交換器の中間胴について運転中に変位を測定した結果、周期的な変位変化は計測されなかった。

4. 応力評価

3

流動模擬試験、フローパターン変動現象の確認結果をもとに、胴部および出口エルボ部に発生する変動応力を解析的に評価した結果、胴部、出口連絡管エルボ部ともに、応力値は疲労強度に比べ、十分小さいものであった。

5. 総合評価

高浜3／4号機の内筒付再生熱交換器胴部および連絡配管においては、類似損傷は発生するとは考えられない。

6. 今後の取り組み

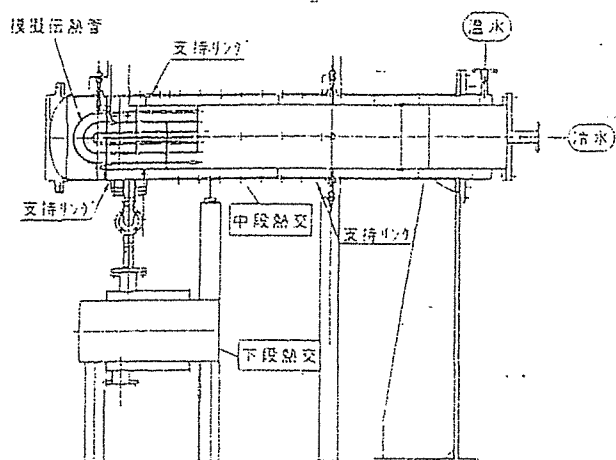
念のため、今後至近の定期検査等において当該部の超音波探傷試験を実施し、その健全性を確認する予定である。(高浜4号機連絡配管については、超音波探傷試験を実施し、健全性を確認している。[H11年7月])

高浜3／4号機 再生熱交換器流動模擬試験結果

1. 目的

高浜3／4号機の再生熱交換器の胴部および出口エルボ部における温度分布を流動模擬試験にて検討する。

2. 試験装置



【実機との相関】

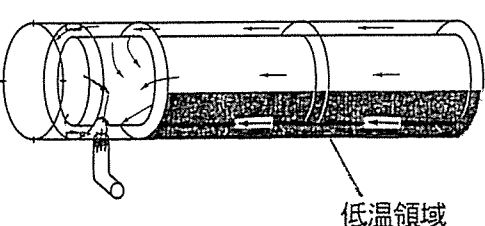
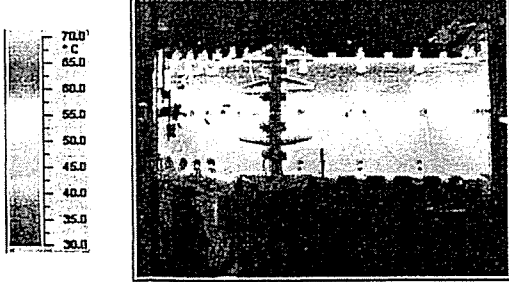
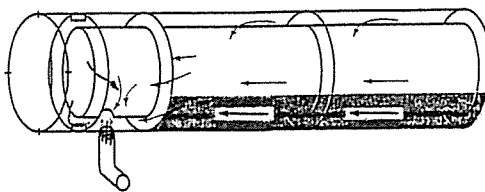
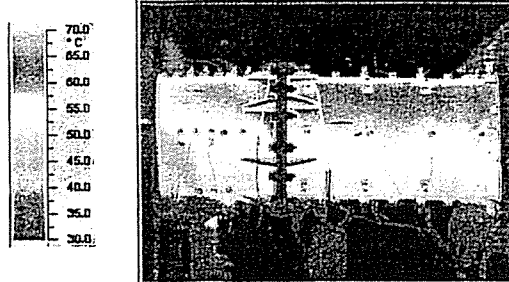
○ 寸法：1／1モデル（形状模擬）

		バイパス流	主流
実機	温度 (°C)	247	182
	密度 (kg/m³)	816	894
	流量 (m³/h)	4.56	10.64
試験	温度 (°C)	70	30
	密度 (kg/m³)	978	996
	流量 (m³/h)	6.8	
リチャードソン数		140	

3. 試験結果

上偏心の場合でも下偏心の場合でも、低温水領域が形成される流況となり、温度分布および流況の変化が小さく、温度ゆらぎの幅小さい。

また、バイパス流量および支持リングを変化させても、温度分布の変化は小さい。

	流況の結果（フローパターン）	サーモビューアによる温度分布結果 （第2、第3支持リング流況）
下 偏 心		
上 偏 心		

解析によるフローパターン変動現象シミュレーション

1. 目的

高浜3／4号機の内筒付再生熱交換器について、すき間変動現象およびフローパターン変動現象が発生するかどうかシミュレーションにて確認した。

2. 実施内容

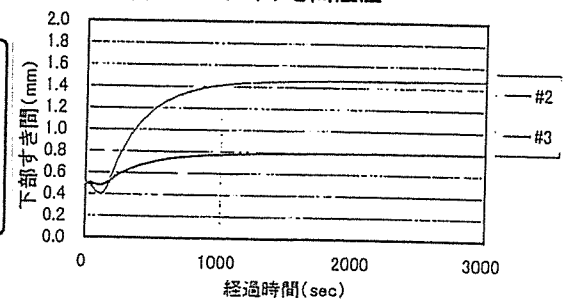
流動模擬試験にて得られた流体温度を入力条件として、熱交換器内の伝熱計算を実施し、胴部および内筒各部の温度分布を求め、胴の熱変形量をコンピュータ解析で求め、支持リング隙間の時間的变化を算出した。

3. 結果

高浜3／4号機の場合、すき間変動現象およびフローパターン変動現象ともに発生しない。

- ・ すき間変動現象
支持リング下部すき間の周期的な変動
- ・ フローパターン変動現象
すき間変動現象により支持リング下部すき間が遷移領域を上下することで生ずるフローパターンの周期的な変動

○ 支持リング下部すき間履歴



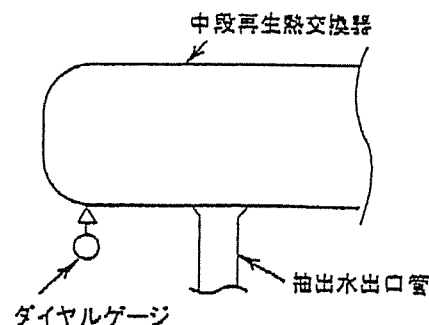
再生熱交換器変位量測定

1. 目的

運転中の再生熱交換器の変位量を実機の代表プラントで測定し、周期的な変位変化がないことを確認する。

2. 測定要領

対象プラント	高浜4号機
プラント状態	100%出力運転中
測定部位	中段再生熱交換器胴部鏡板付近
測定器具	ダイヤルゲージ（最小目盛1／100mm）
測定時間	2時間

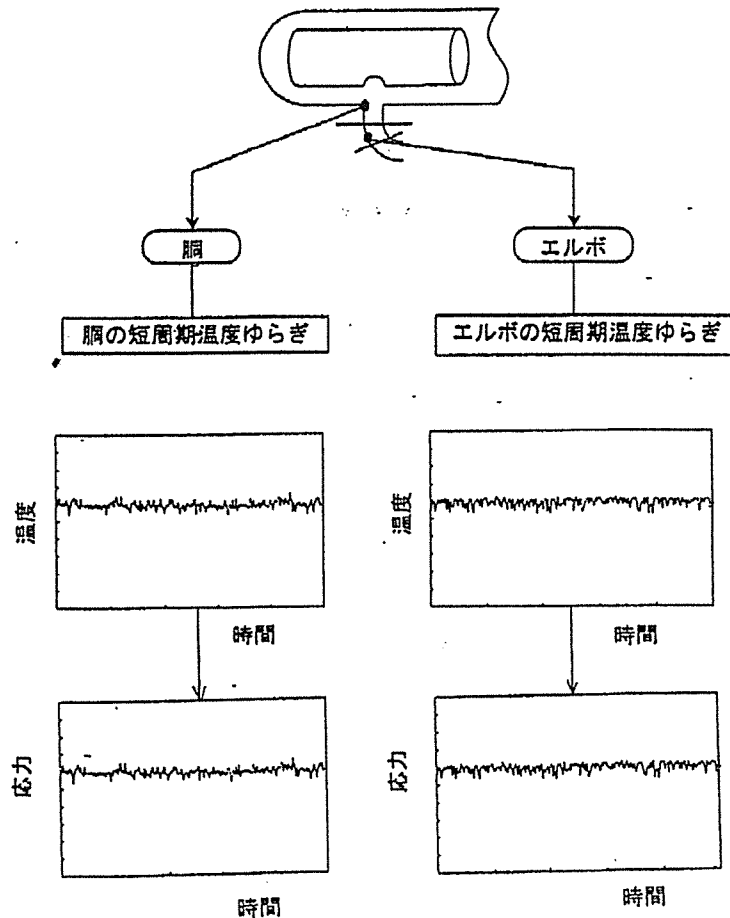


3. 測定結果

運転中の周期的な変位変化はなかった。

応力評価

1. 流況変動に伴う温度応力評価の考え方



2. 応力評価の結果

- 流動模擬試験結果から高浜3/4号機は流況に変化がなく、解析および実機計測結果からもフローパターン変動現象は発生せず、長周期温度変動による変動応力はないものと推定される。

- 応力評価結果

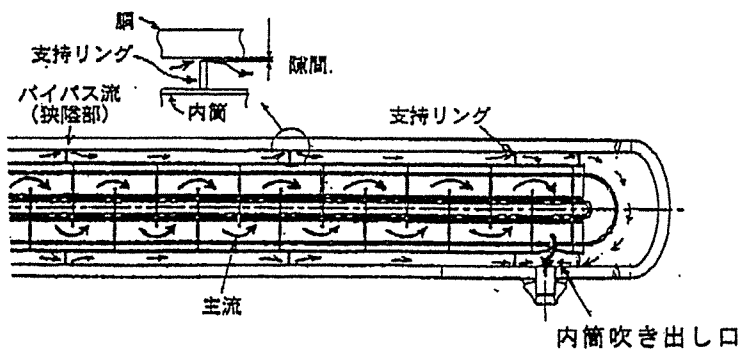
(単位: MPa)

	エルボ	胴
短周期温度ゆらぎ による変動応力	±18	±17

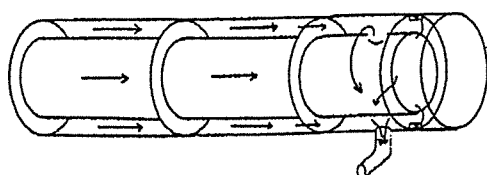
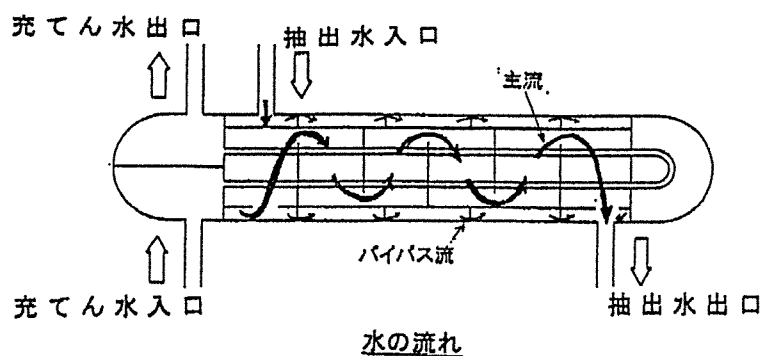
高浜3/4号機の温度ゆらぎ変動に伴う応力振幅は、エルボ、胴ともに疲労強度を十分下回る結果となった。

再生熱交換器の比較

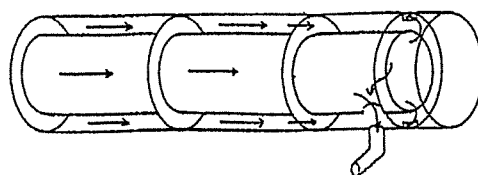
	高浜3／4号機	敦賀2号機
定格抽出流量 (m ³ /h)	15.2	28.5
バイパス流量 (m ³ /h)	4.6 (約30%)	11.4 (約40%)
バイパス流速 (m/sec)	0.02	0.07
主流とバイパスの温度差	約65℃	約80℃
支持リング隙間	約2mm (設計)	約3mm (実測)
内筒吹き出し方向	下方向	上方向
胴長さ	約4.2m	約5.2m



支持リングと胴の隙間



上方方向内筒吹き出し
(敦賀2号機)

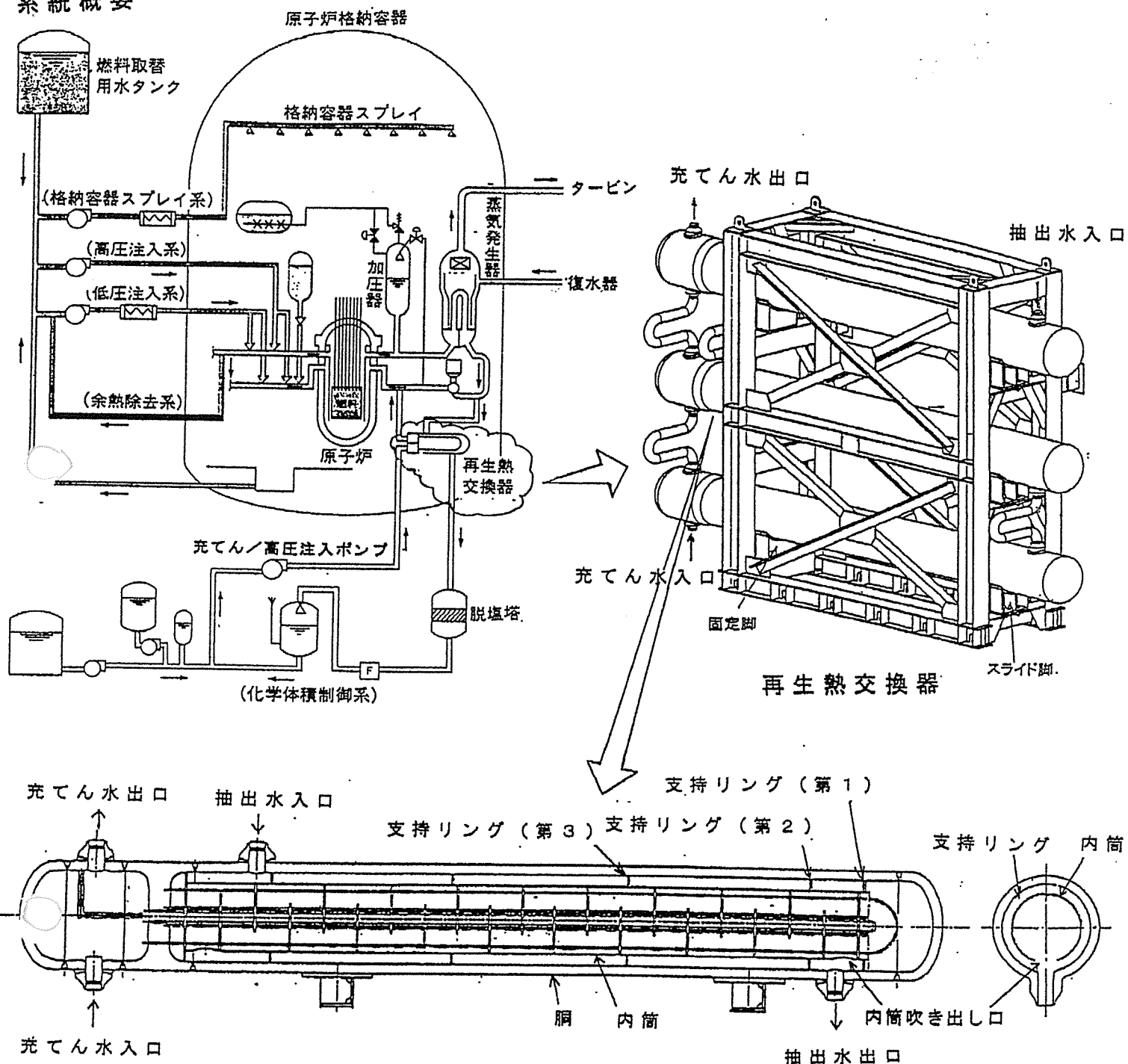


下方方向内筒吹き出し

高浜 3, 4 号機 再生熱交換器設備概要

参考

系統概要



種 類	横置3胴U字管式	
全 長	約4.2m	
胴外径	約0.5m	
主要材料	ステンレス316鋼	
	管側(充てん水)	胴側(抽出水)
最高使用圧力	18.8MPa (192kg/cm ²)	17.2MPa (175kg/cm ²)
最高使用温度	343℃	343℃