



平成11年10月7日
日本原子力発電株式会社

敦賀発電所2号機一次冷却水漏えいに係る原因について

平成11年7月12日に格納容器内での一次冷却水漏えいにより手動停止しました、当社敦賀発電所2号機（加圧水型軽水炉：定格出力116.0万KWe）につきましては、原因究明のために、当該連絡配管や再生熱交換器に関する発電所並びに民間調査機関等での調査並びに損傷原因調査計画に基づく解析評価を実施してまいりました。

また、8月30日には、それまで実施してきた調査・解析状況から、割れは高サイクル熱疲労による可能性が高いと考えられるとの中間取りまとめを行い、その内容をお知らせしました。

その後、再生熱交換器中段胴内の流動状況把握等のために流動模擬試験を行い、そこで得られた流況や温度変動に関するデータを用いて詳細に熱流動解析や変動応力解析を実施するとともに、再生熱交換器中段胴本体の調査（切断した試験片の民間調査機関での詳細調査及び発電所における中段胴部内面についての浸透探傷試験）を行った結果、当該連絡配管及び再生熱交換器中段胴の割れが発生した原因は、高サイクル熱疲労によるものであると特定するに至りました。

今後、この原因を踏まえ、再発防止対策について詳細検討を進めてまいります。

以上

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（添付資料１－１、１－２）

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 （添付資料２）

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 （添付資料３）

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） （添付資料４）

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 （添付資料5）

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 （添付資料6）

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 （添付資料7）

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（約12kgf/mm²）、胴部で約167MPa（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98MPa(約10kgf/mm²)から約147MPa(約15kgf/mm²)、胴部で約147MPa(約15kgf/mm²)から約167MPa(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。

添付資料1-1 割れの詳細調査(1)

添付資料1-2 割れの詳細調査(2)

添付資料2 再生熱交換器の構造と特徴

添付資料3 損傷メカニズムの推定

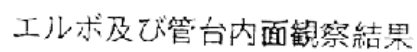
添付資料4 流動模擬試験

添付資料5 流動模擬試験

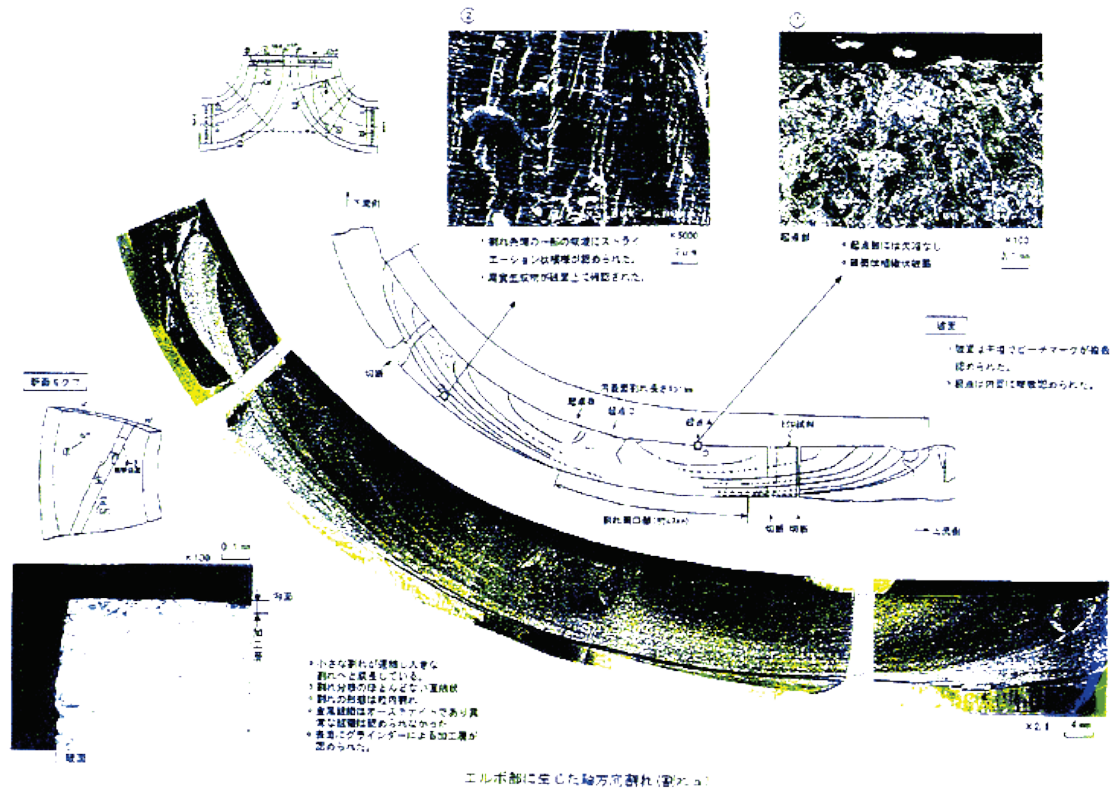
添付資料6 フローパターン変動シミュレーション

添付資料7 変動応力解析

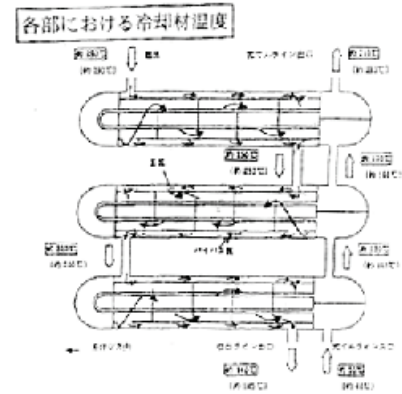
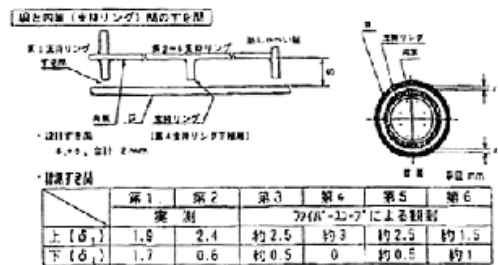
(添付資料-1-1)



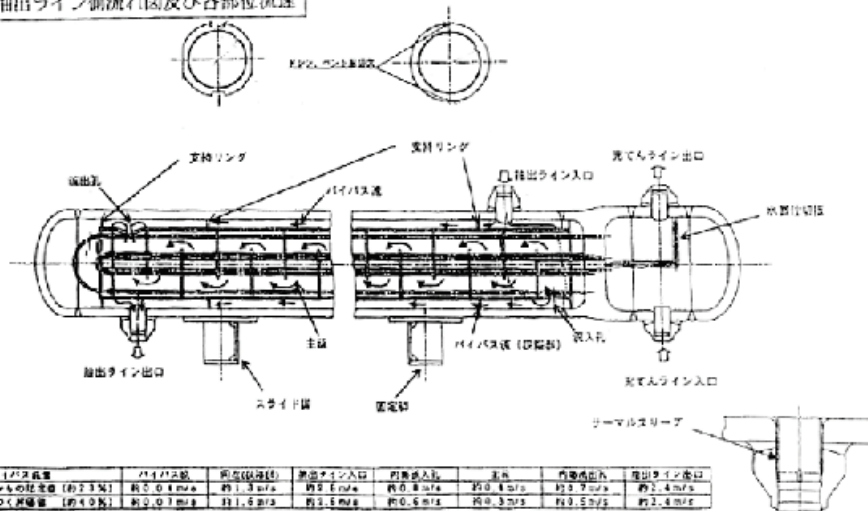
割れの詳細調査（２）



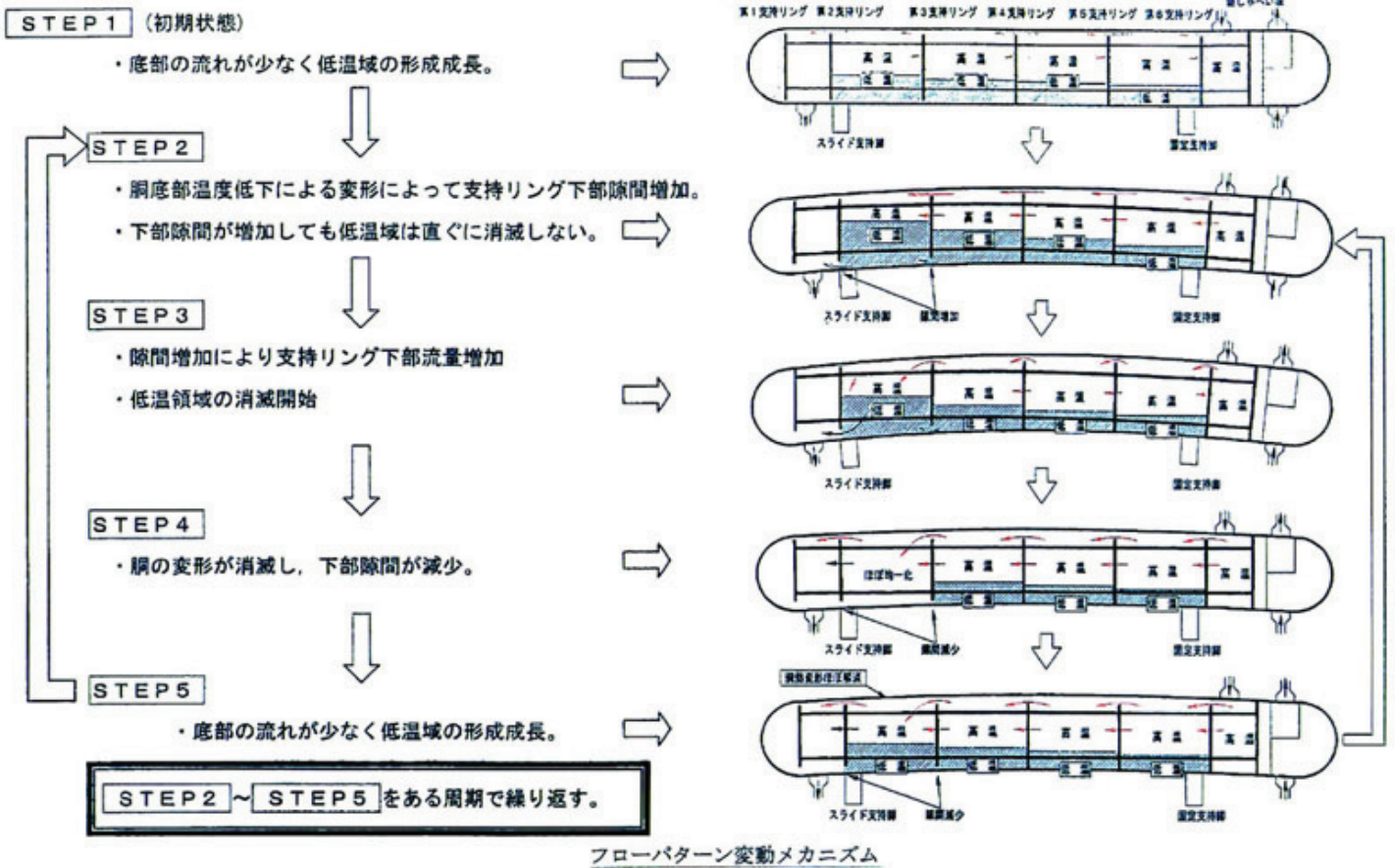
再生熱交換器の構造と特徴



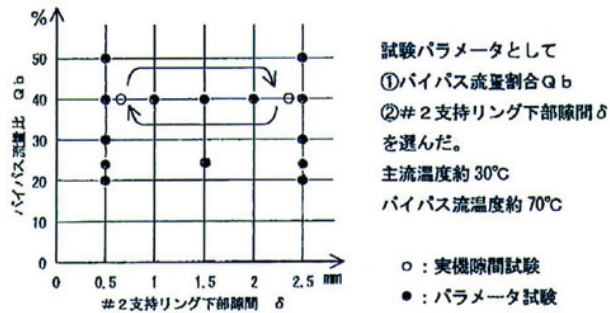
抽出ライン側流れ図及び各部位流速

[illegible]

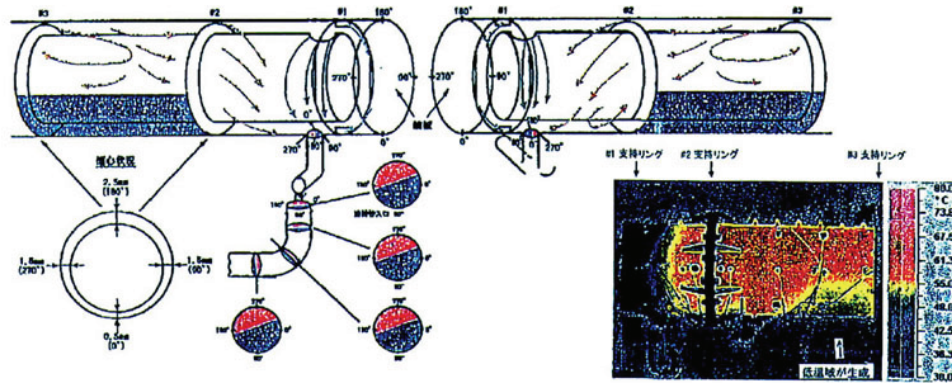
損傷メカニズムの推定



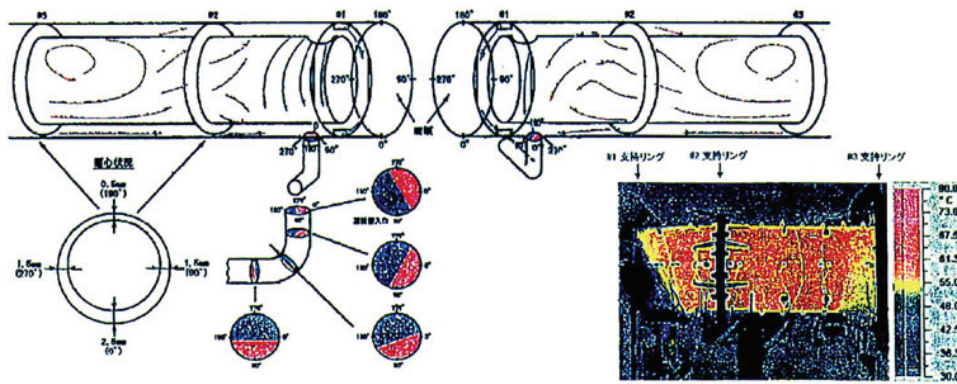
流動模擬試験



試験パラメータ



フローパターン1の流況図



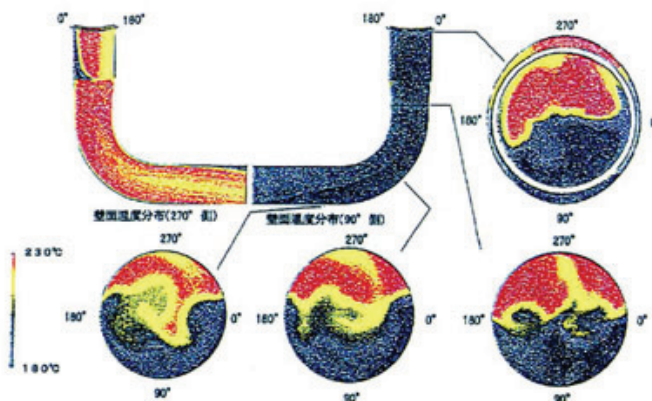
フローパターン2の流況図

流動模擬試験

エルボ部熱流動解析結果

フローパターン1

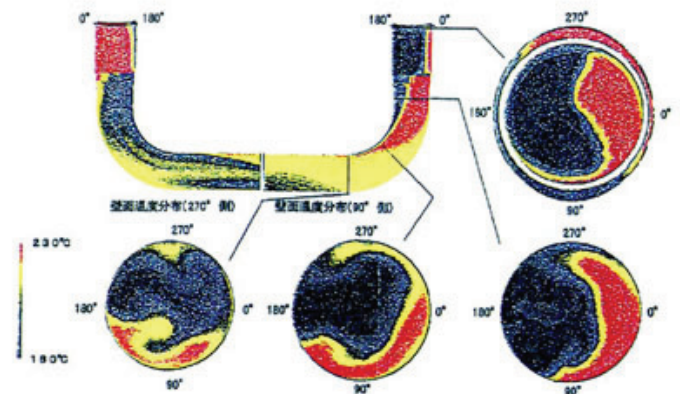
(#2支持リング下偏心時)



- 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

フローパターン2

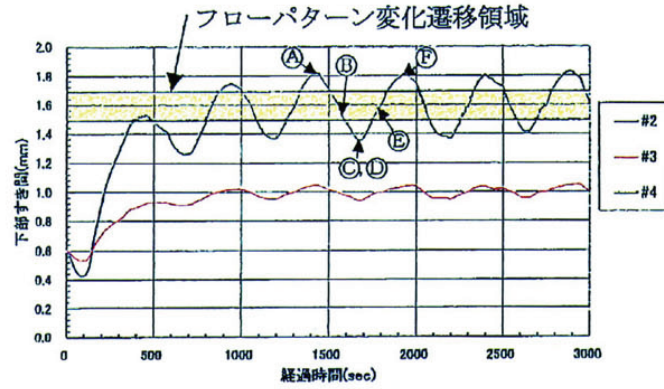
(#2支持リング上偏心時)



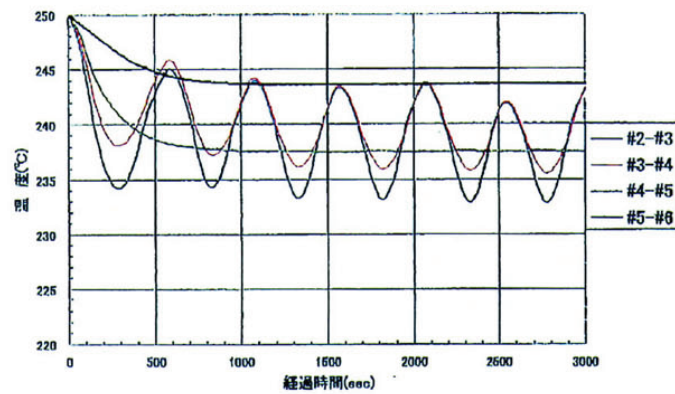
- 1) 高温水域は0°側、低温水は180°側
2) エルボ入口から下流側にかけて温度域が変化する。(高温水が片側から入り込むため回転成分が付与されるため)

エルボ割れ発生位置：高温域と低温域が逆転する

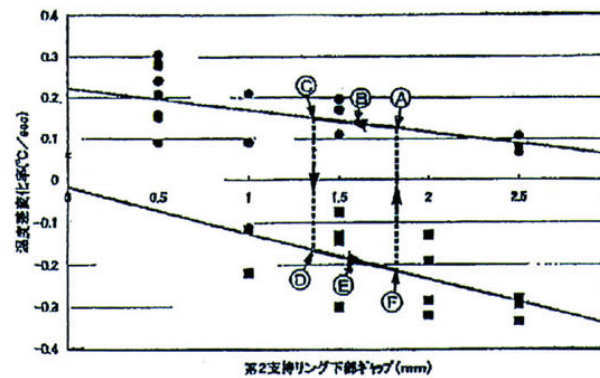
フローパターン変動シミュレーション



支持リング下部隙間履歴



下部金属温度履歴



温度差変化率と第2支持リング下部隙間の関係

下部隙間履歴，金属温度履歴及び温度差変化率—下部隙間関係

変動応力解析

