

# 4. 異物流入に関する調査

## (国内外における異物による外面からのS G伝熱管損傷事象)

国内外で報告されている異物によるS G伝熱管損傷事象を調査し、国内では4件、海外では多数の事例があることを確認した。

○国内：4件（～2020年の調査）

| プラント  | 事象発生年 | 原因となった異物        | 備考                       |
|-------|-------|-----------------|--------------------------|
| 高浜4号機 | 2019年 | 保温材外装板の切れ端等（推定） | 法令報告対象                   |
| 高浜3号機 | 2018年 | ステンレス鋼等の金属片（推定） | 法令報告対象外                  |
| 美浜3号機 | 2000年 | 溶断作業で発生した2次生成物  | 法令報告対象                   |
| 玄海1号機 | 1975年 | 鋼製巻尺            | 原子力施設情報公開ライブラリー（ニューシア）より |

○海外：件（2000年～2019年の調査）※1

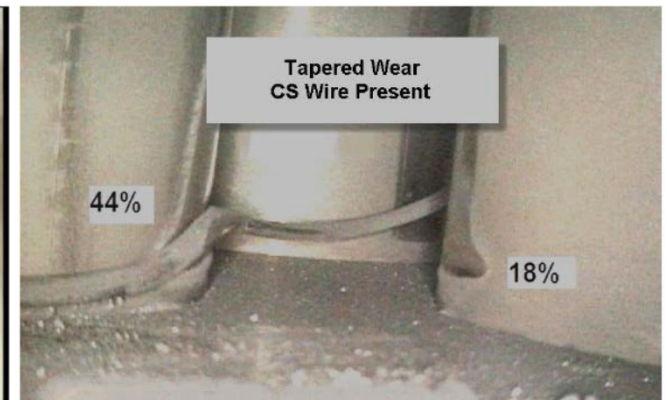
2000年～2019年の年別報告件数※1

Palo Verde 3（米国）の例※2

米国の別のプラントの例※3



ガスケット片による減肉発生  
(2013年)



ワイヤによる減肉発生

※1：米国電力研究所（EPRI）の蒸気発生器劣化データベースより

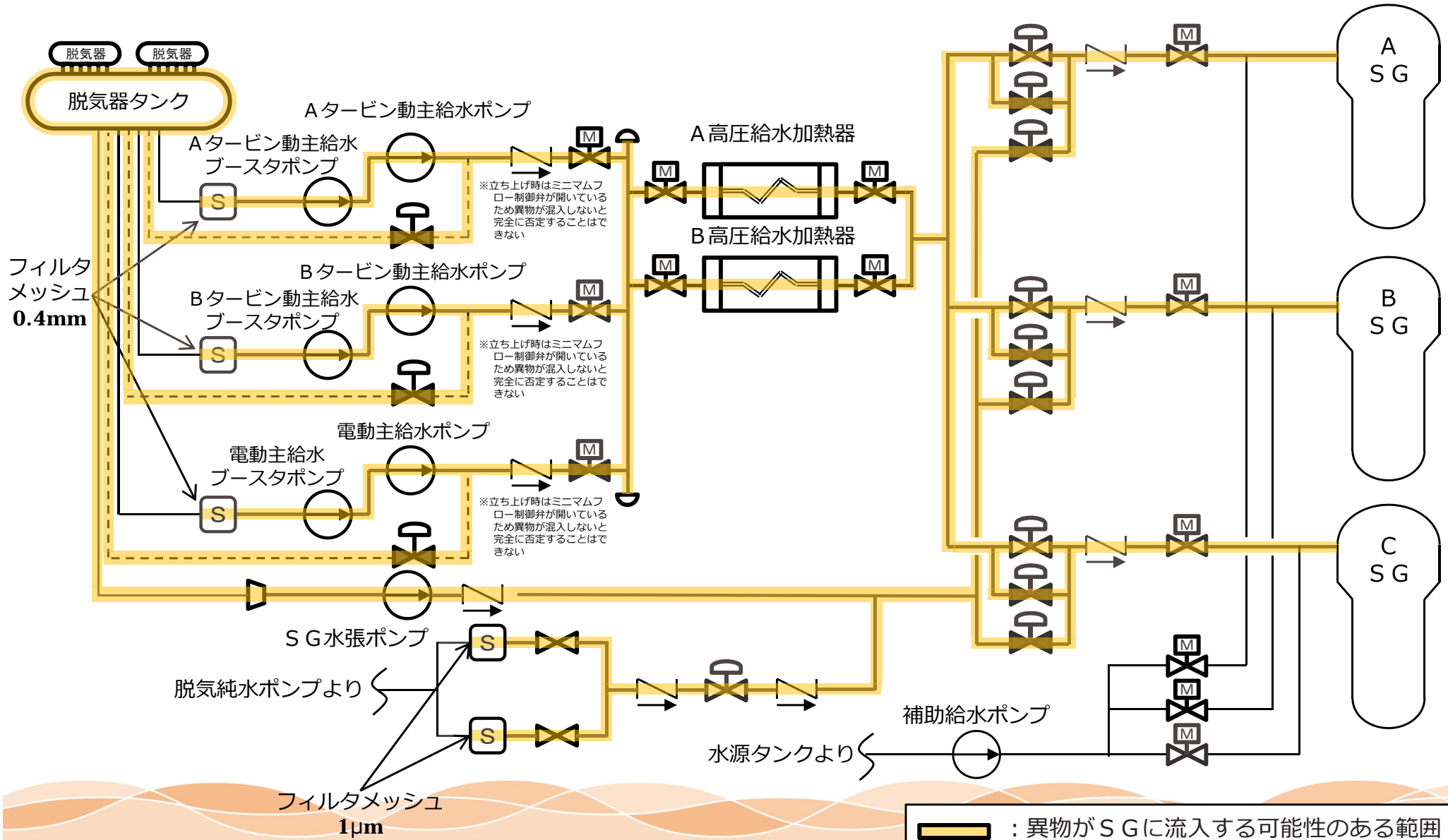
※2：米国原子力規制委員会（NRC）のホームページより

※3：EPRIレポート（1020631）より

：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

# 4. 異物流入に関する調査（異物流入経路）

- **異物がS Gに流入する可能性がある範囲**を調査した。
- 範囲は以下のとおり、主給水系統およびS G水張系統である。



# 4. 異物流入に関する調査（2次系機器内部構成品の脱落）

○異物流入経路の系統範囲にある2次系機器の内部構成部品が脱落し、異物となってSGへ流入する可能性がある機器を確認した結果、想定異物と類似形状を持つうず巻きガスケットを抽出した。

| No | 機器名称                              | 類似形状の有無 | 評 価  |   |
|----|-----------------------------------|---------|--|---|
| 1  | 主給水ブースタポンプ                        | 無       | ステンレス製の薄板(1mm未満)のワッシャを使用しているが円形であり、想定形状と異なる。         | × |
| 2  | タービン動主給水ポンプ                       | 無       | ステンレス製の薄板(1mm未満)のワッシャを使用しているが円形であり、想定形状と異なる。         | × |
| 3  | 電動主給水ポンプ                          | 無       | ステンレス製の薄板(1mm未満)のワッシャを使用しているが円形であり、想定形状と異なる。         | × |
| 4  | SG水張ポンプ                           | 無       | 薄板状(1mm未満)の部品はない。                                    | × |
| 5  | 主給水ブースタポンプ<br>入口ストレーナ             | 無       | ステンレス製のストレーナを使用しているが外観目視点検の結果損傷は認められない。              | × |
| 6  | 脱気器タンク                            | 無       | 薄板状(1mm未満)の部品はない。                                    | × |
| 7  | 高圧給水加熱器                           | 無       | 薄板状(1mm未満)の部品はない。                                    | × |
| 8  | 弁                                 | 無       | 薄板状(1mm未満)の部品はない。                                    | × |
| 9  | 配管                                | -       | 薄板状(1mm未満)の部品はない。                                    | × |
| 10 | <u>弁、配管等に使用しているうず巻きガスケット(消耗品)</u> | 有       | <u>ステンレス製の金属フープがあり、系統内に流出した場合は異物となり得る可能性は否定できない。</u> | △ |

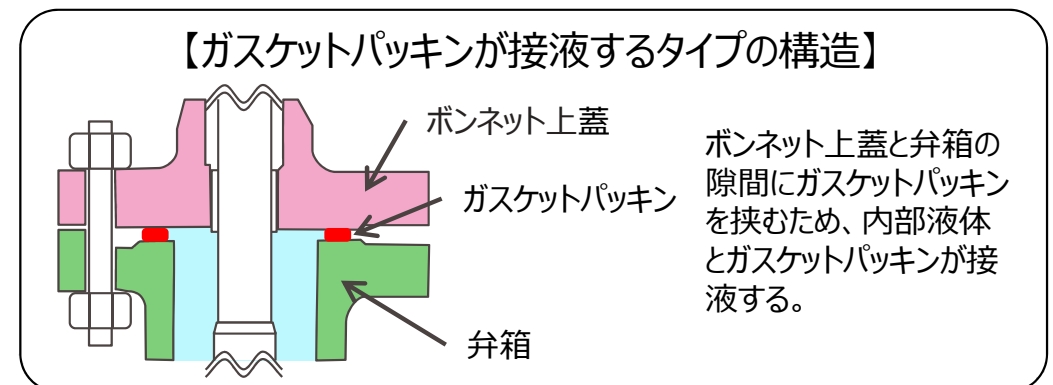
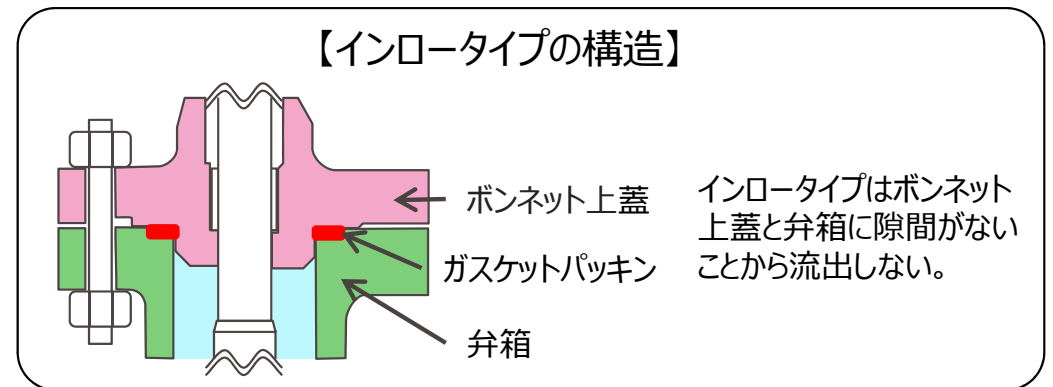
うず巻きガスケットの調査範囲（20箇所）については、以下の考え方を元に対象を選定した。

○ガスケットパッキンが破損し、SGへ流入した場合、サイズを問わず伝熱管を摩耗減肉させる可能性がある。

○点検対象範囲（脱気器～SG）の機器に使用しているガスケットパッキンのサイズは約3mm（3.2mm）と約5mm（4.5mm、4.8mm）である。

○約3mmのガスケットパッキンは部品同士が噛み合うインロータイプ（構造上流出しない）であり、運転中にガスケットパッキンが破損してもSGへ流入する可能性はない。

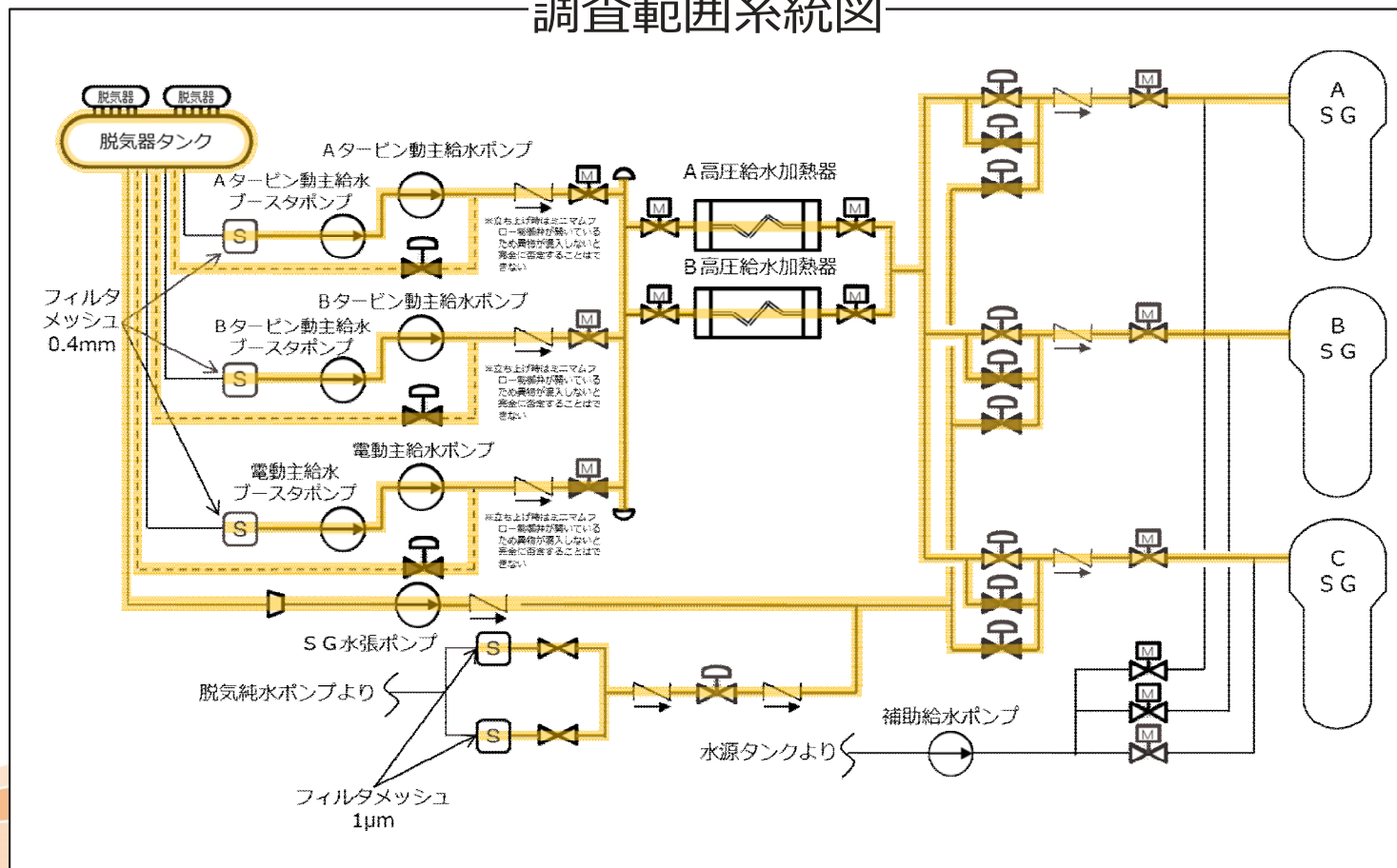
○以上より、約5mmのガスケットパッキンが接液するタイプを使用している機器について点検を実施した。





- 今回 (第24回) の定期検査で開放した機器について、ガスケットパッキングが健全であることを確認した。(2箇所)
- 今回 (第24回) の定期検査で開放していない機器を追加で開放し、ガスケットパッキングが健全であることを確認した。(18箇所)
- 過去にガスケットパッキングが損傷していた事例がないか、工事記録で確認したが損傷していたという記録はなかった。

調査範囲系統図



調査結果例

タービン動主給水  
プースタポンプ入口フランジ



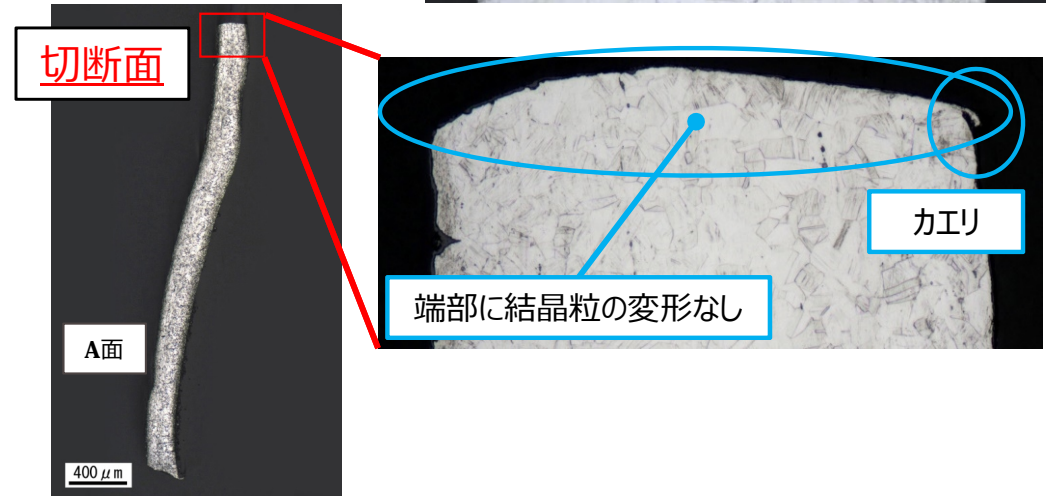
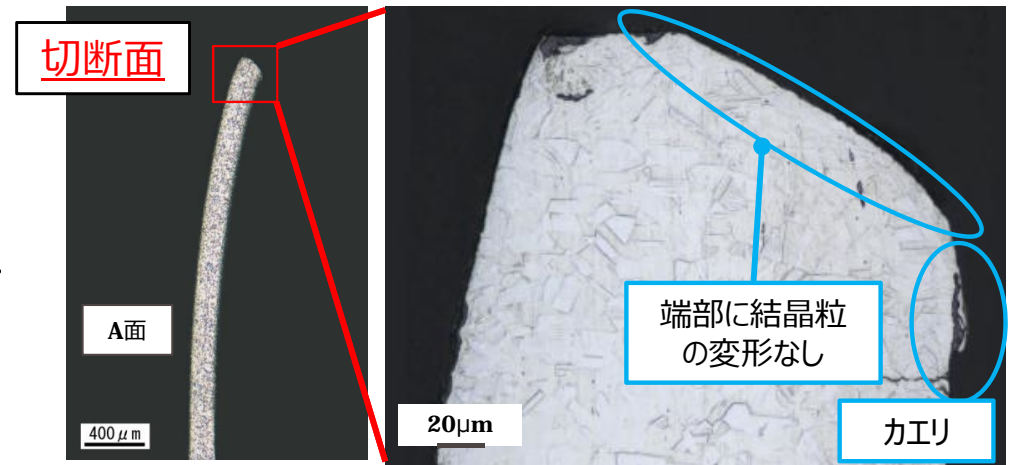
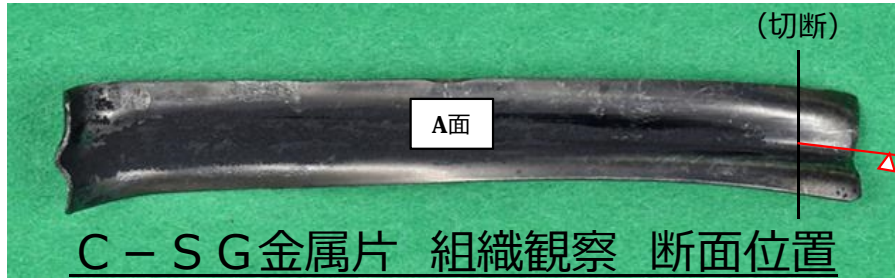
内径：約500mm

主給水制御弁バイパス管  
ブローズル前管台フランジ



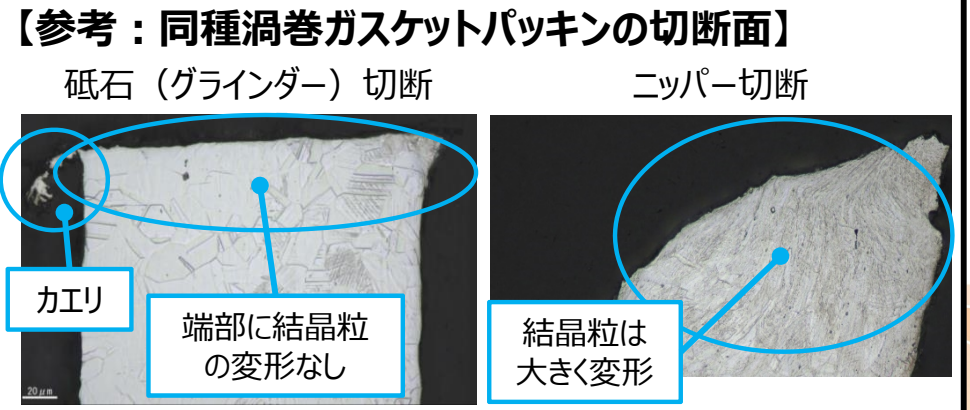
内径：約100mm

- 回収した金属片の端部の組織観察のため、破壊調査を実施 (結果は右図)



- 端部の結晶組織には変形が認められずまたカエリが残っていることから、せん断破壊や低サイクル疲労のように過大な荷重により塑性変形を伴う破壊モードではなく、砥石切断のように結晶組織に塑性変形を伴わない破壊モードで小片状になったと推定

⇒金属片はニッパーで細断されたものではない



### <現場作業聞き取り調査結果>

- ガスケットパッキンは機器に固着し剥がれにくい場合もあるが、その際はスクレパー（ヘラ）やニッパーを使用し取り外しを行っている。その際にフープが外れ広がることはあるが短く切断することはない。
- ガスケットパッキンは分解点検の都度新品に交換することから使用済のガスケットパッキンは廃棄している。
- 使用済ガスケットパッキンはそのままの形で廃棄しており、作業現場（開口部）で廃棄のために細断することはない。



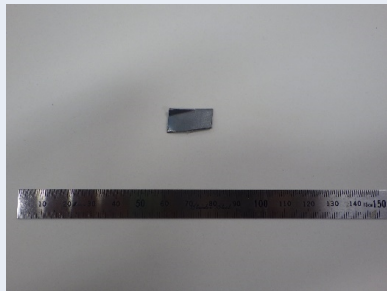



⇒使用済ガスケットパッキンを作業現場でニッパー等により細断することはない。

ただし、構外を含む作業現場から離れた場所において、細断され廃棄した際にガスケットパッキンの小片等が発生した可能性は否定できない。



## （1）金属片以外の異物混入の可能性

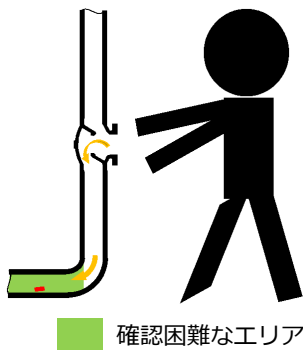
○発電所の作業において、想定異物と類似する異物が発生する可能性の有無を確認した結果、以下のような資材の切れ端等が発生し、想定異物と類似した形状となることは否定できないことを確認した。

| 資材等             |   | 現場における作業状況   |   |
|-----------------|---|--|---|
| 保温材外装板の切れ端      |    | 配管や機器に取り付ける保温材は、ステンレスやアルミの外装板で覆われている。配管や機器サポートの近傍においては、外装板形状やサイズの調整を行う。                        |    |
| 配管識別表示等のバンドの切れ端 |   | 配管識別表示等の現場表示には、金属製のバンドで配管等に固定されているものがある。このバンドには、ステンレスの薄板が用いられている場合があり、取付け時には、必要に応じ、バンド長さを調整する。 |   |
| 配管の切削くず         |  | 配管の取替えにおいては、既設配管の切断を行う必要がある。現地合わせの溶接部においては、開先加工を行う。  |  |

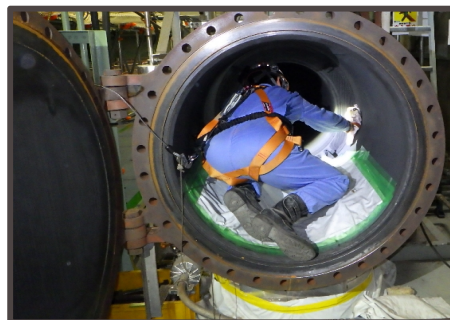
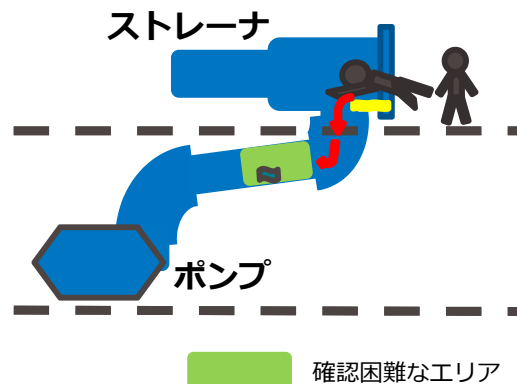
高浜3号機において、異物がSGに流入する可能性のある開放点検対象機器（351箇所）を確認したところ、67箇所については小型カメラを用いない目視確認では最終異物確認が困難な範囲があり、異物混入の可能性は否定できないことを確認した。

以下、異物混入の可能性が否定できない作業。

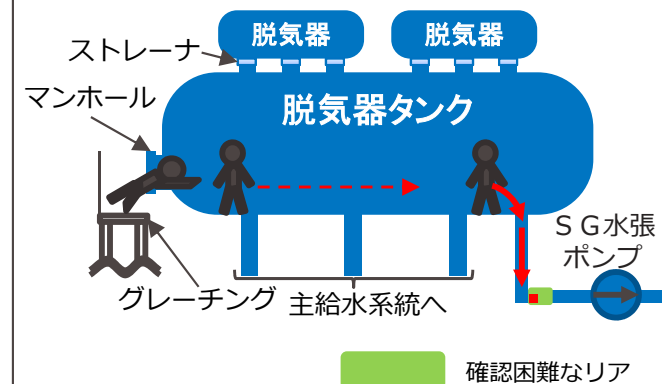
### 弁分解点検作業



### ストレーナ開放点検作業



### 脱気器タンク開放点検作業



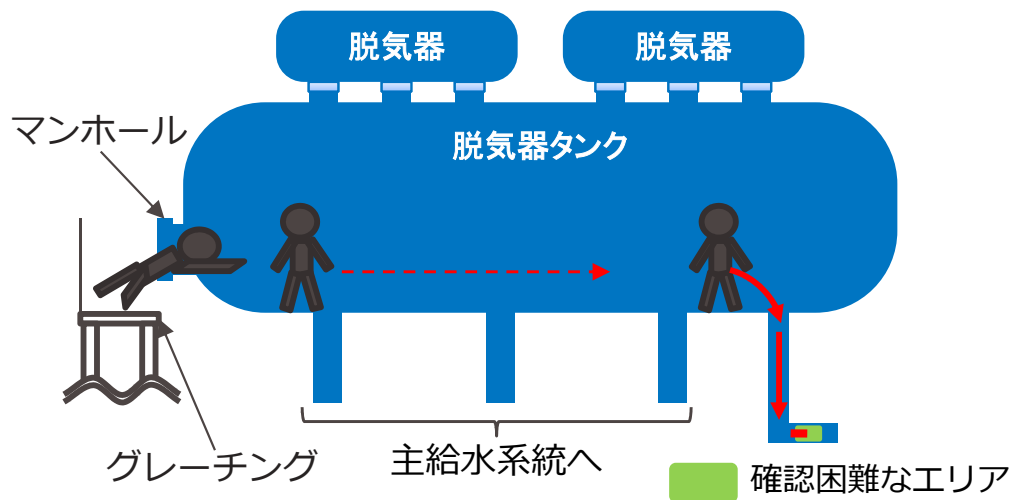


# 4. 異物流入に関する調査（異物混入の時期）

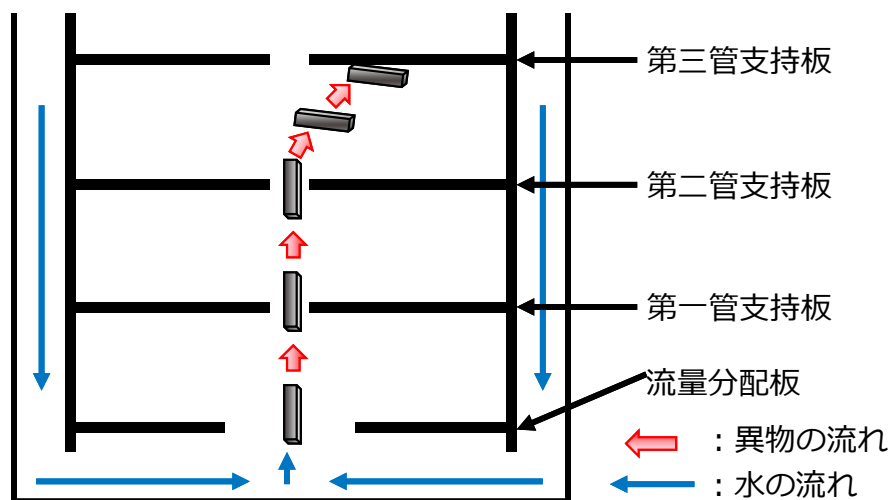
- 異物管理の変遷については下表のとおりである。
- 異物は3号機前回（第23回）定期検査以前にSG水張系統から混入したか、3号機前々回（第22回）定期検査以前に主給水系統またはSG水張系統から混入したものと考えられる。

|         | 従前の対策<br>(高浜3号機第22回定検以前)<br>(高浜4号機第21回定検以前)  | 前回(高浜3号機第23回定検)対策   | 前回(高浜4号機第22回定検)対策  |
|---------|--|---|--|
| 機器立入対策  | <ul style="list-style-type: none"> <li>機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを確認する(本人でも可)。</li> </ul> <p>3号機前回(第22回)での対策を実施していないため主給水系統およびSG水張系統からの混入の可能性がある。</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。</li> </ul> <p>3号機前回(第23回)では、SG水張ラインからはSGに移動しないと評価し、対策の対象外としていたため、SG水張ラインからの混入の可能性がある。</p>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。</li> <li>機器内部に立ち入る前に、器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。</li> <li>開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。</li> </ul>                              |
| 垂直配管取付弁 | <ul style="list-style-type: none"> <li>最終異物確認は直接目視にて実施(手鏡等を使用)</li> </ul> <p>3号機前回(第22回)での対策を実施していないため主給水系統およびSG水張系統からの混入の可能性がある。</p>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>弁点検時は、弁箱内部に使用する機材(ウエス含む)に異物の付着がないことを確実に事前確認する。</li> <li>最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、小型カメラで確認する。【自主対応】</li> </ul> <p>3号機前回(第23回)では、SG水張ラインからはSGに移動しないと評価し、対策の対象外としていたため、SG水張ラインからの混入の可能性がある。</p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>弁点検時は、弁箱内部に使用する機材(ウエス含む)に異物の付着がないことを確実に事前確認する。</li> <li>最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、小型カメラで確認する。</li> <li>ウエスは、新ウエスを使用する。</li> <li>新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。</li> </ul> |
| その他     | —  | —   | <ul style="list-style-type: none"> <li>保温材の切れ端等の清掃・片づけは、作業一片づけを徹底し、作業服、靴の異物付着確認を行う。</li> <li>異物混入防止対策が作業手順書通りに実施されていることを、現場パトロール等で管理強化する。</li> </ul>   |

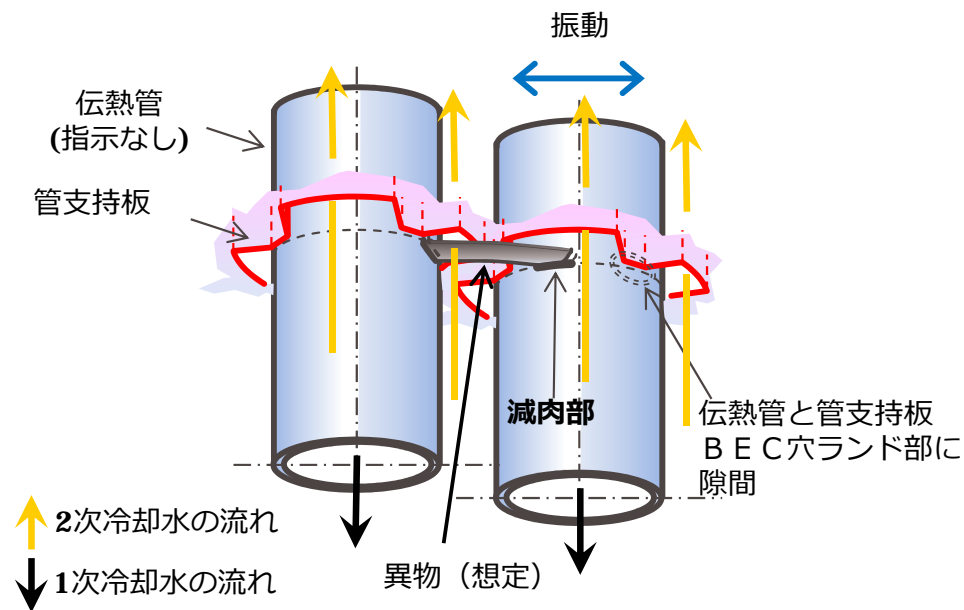
①前回（第23回）定期検査以前にSG水張系統もしくは前々回（第22回）定期検査以前に主給水系統またはSG水張系統から金属片またはその他異物が混入し、目視確認が困難な場所に残留した。



②残留した金属片またはその他の異物はSGに到達し、前回運転サイクル中に、第三管支持板下面で伝熱管と接触した。



③伝熱管と接触した異物は、運転中に生じる伝熱管の振動によって、伝熱管外表面を摩耗させ、伝熱管外面にきずをつけた。



減肉メカニズム概要

○減肉伝熱管の施栓【従前からの対応】

○S G器内への異物流入対策

I 3号機前回（23回）定期検査で実施した異物管理を継続【従来からの対応】

- ・作業員の立ち入る作業前に作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。
- ・垂直配管に取り付けられている弁の点検時は、弁箱内部に使用する機材に異物の付着がないことを確実に確認する。また、最終異物確認時において直接目視にて異物の有無の確認ができない範囲については、小型カメラによる目視点検を行う。

I 4号機前回（22回）定期検査で実施した異物管理を追加【3号機では新規】

- ・作業員が機器内部に立ち入って作業を行う場合は、機器内部へ立ち入る直前に器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。
- ・開口部に周辺作業と隔離したエリアを設けることで、異物の混入防止を図る。
- ・ウエスを使用する場合は新しいウエスに限るものとし、新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。
- ・作業中に発生した保温材の切れ端等の清掃・片づけについては一作業一片づけを徹底するとともに、作業服、靴に異物が付着していないか確認することにより、異物の拡散を防止する。
- ・当該作業における異物混入防止対策が作業手順書通りに実施されていることを確認するため、現場パトロールの実施等による管理強化を図る。

## ○ S G器内への異物流入対策（続き）

### I その他の対策【新規】

- ・ S G水張系統からの異物混入対策として、S G水張ポンプ入口にストレーナを設置する。
- ・ 今回、うず巻きガスケットの小片をS G器内で発見したことを踏まえ、機器開放時におけるうず巻きガスケットの破損状況の不具合、懸案事項の確認や異物管理、施工管理を徹底する観点から記録を取得すべきであるため、今後機器を開放した時点でうず巻きガスケットに損傷を確認した場合は、工事報告書に必要事項を記載することを調達要求文書に定める。

なお、起動前の2次系クリーンアップにおいて、通常よりも通水量の増加および時間の延長により、可能な限り異物除去効果を向上させる。

## (1) 減肉伝熱管の施栓

損傷が認められたSG伝熱管について、高温側および低温側のSG管板部で施栓し、供用外とする。

**蒸気発生器の概要図**

**施栓方法**

機械式栓を伝熱管に挿入し、施栓装置の先端部を引き下げることにより、中子も同時に引き下がり、機械式栓を押し広げ施栓する

表 施栓本数

|                 | A-SG<br>(3,382本) | B-SG<br>(3,382本) | C-SG<br>(3,382本) | 合計<br>(10,146本) |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|
| 今回施栓本数          | 0                | 1                | 1                | 2               |
| 累積施栓本数<br>[施栓率] | 110<br>[3.3%]    | 135<br>[4.0%]    | 121<br>[3.6%]    | 366<br>[3.6%]   |



## (2) 3号機前回（第23回）定期検査で実施した異物管理対策の継続実施

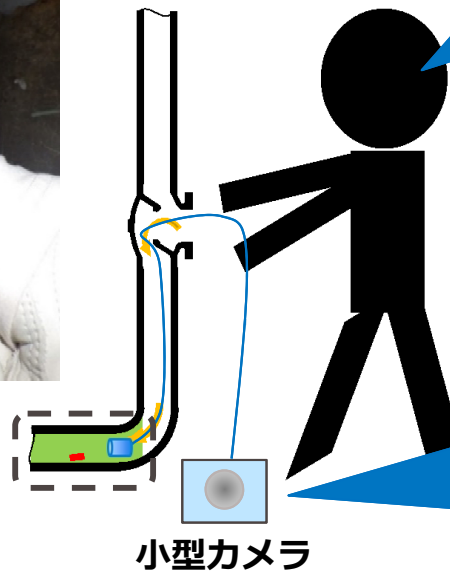
- 作業員の立ち入る作業前に作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。
- 垂直配管に取り付けられている弁の点検時は、弁箱内部に使用する機材に異物の付着がないことを確実に確認する。
- 最終異物確認時において直接目視にて異物の有無の確認ができない範囲については、小型カメラによる目視点検を行う。

### 対策イメージ

- ・ 垂直配管に取り付けられている弁の点検



直接目視確認  
ができない範囲



小型カメラ

弁箱内部に使用する機材に  
異物の付着がないことを確  
実に確認する。

最終異物確認時において直  
接目視にて異物の有無の確  
認ができない範囲につい  
ては、小型カメラによる確認を  
行う。

## (3) 4号機前回（第22回）定期検査で実施した異物管理対策の継続実施

- 作業員が機器内部に立ち入って作業を行う場合は、機器内部へ立ち入る直前に器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。
- 開口部に周辺作業と隔離したエリアを設けることで、異物の混入防止を図る。

### 対策イメージ

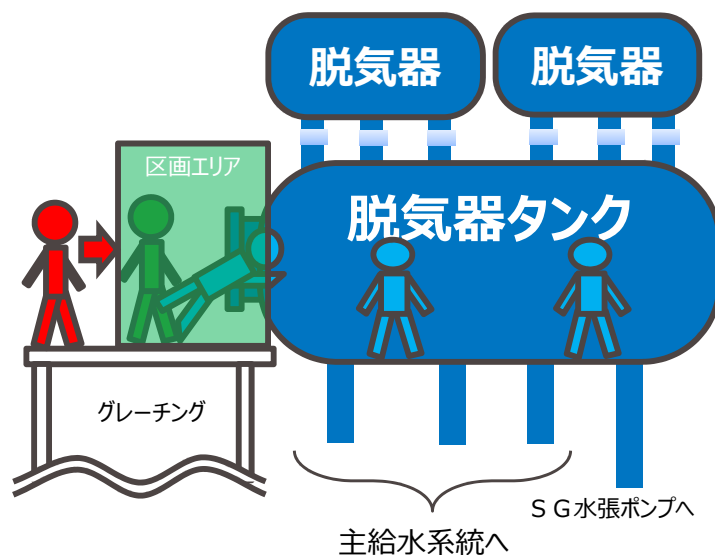
- ・作業員の立ち入る機器の点検

機器の開口部に周辺作業と隔離した区画エリアを設けることで、異物の混入防止を図る。



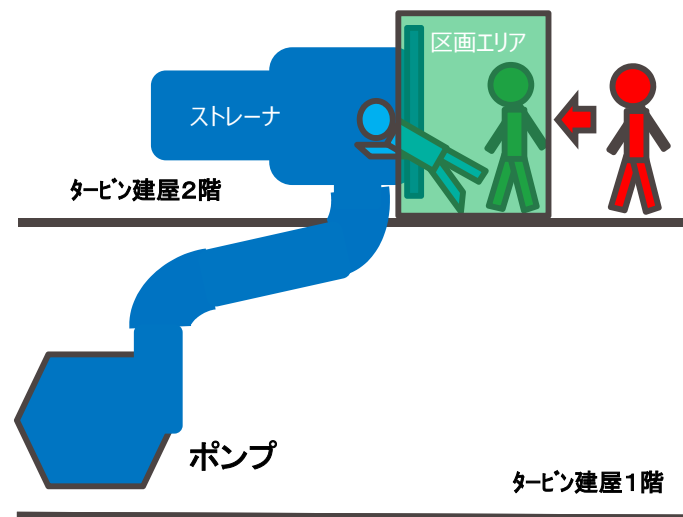
### (脱気器タンクの例)

機器内部へ立ち入る直前に器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。



### (主給水ブースタポンプ入口ストレーナの例)

機器内部へ立ち入る直前に器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。

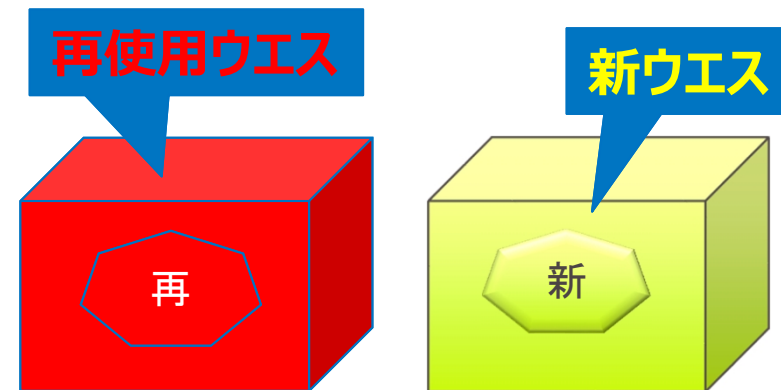


(3) 4号機前回（第22回）定期検査で実施した異物管理対策の継続実施（つづき）

- ウエスを使用する場合は、新しいウエスに限るものとし、新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。
- 作業中に発生した保温材の切れ端等の清掃、片づけについては一作業一片づけを徹底するとともに、作業服、靴に異物が付着していないか確認することにより、異物の拡散を防止する。
- 当該作業における異物混入防止対策が作業手順書通りに実施されていることを確認するため、現場パトロールの実施等による管理強化を図る。

## 対策イメージ

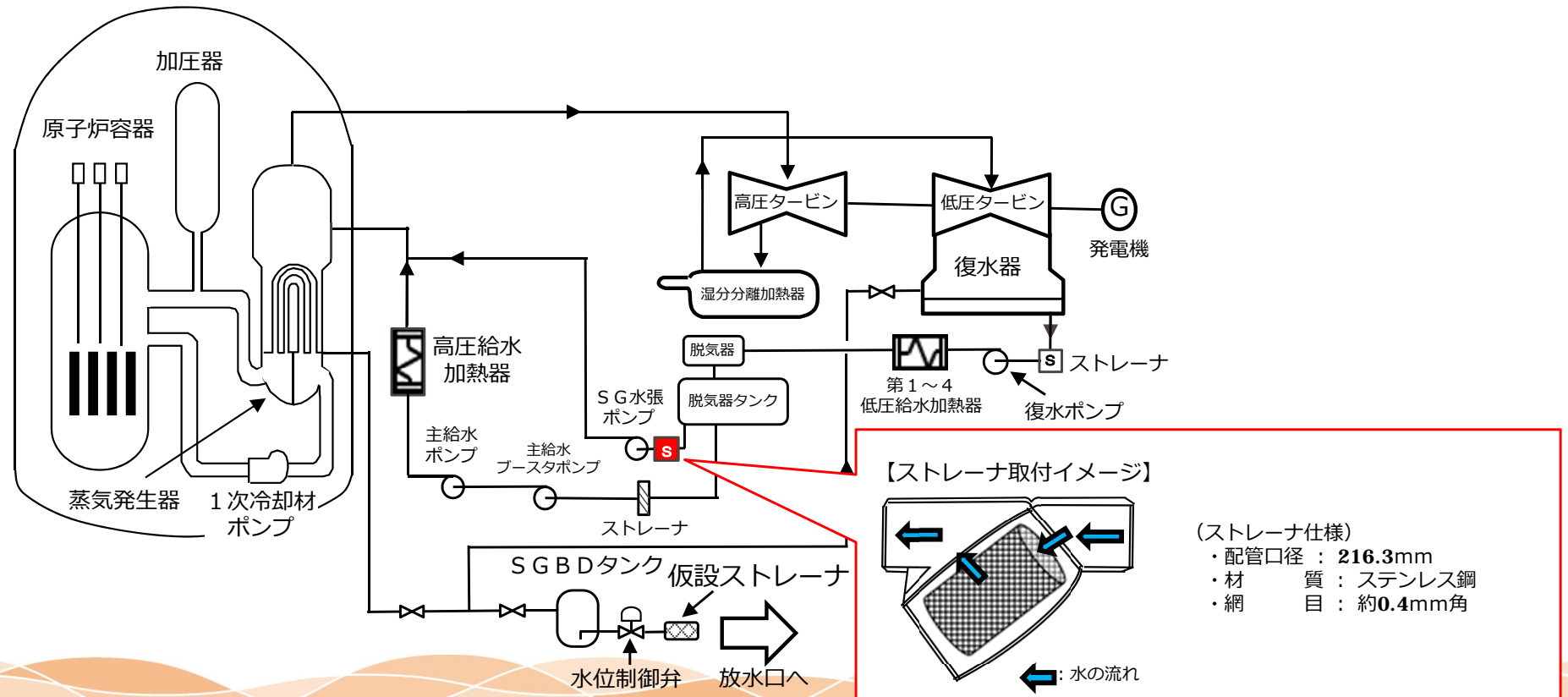
ウエス使用時は、新しいウエスに限るものとし、新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。



ウエス収納箱

## (4) その他の対策

- S G水張系統からの異物混入対策として、S G水張ポンプ入口にストレーナを設置する。
- 今回、うず巻きガスケットの小片をS G器内で発見したことを踏まえ、機器開放時におけるうず巻きガスケットの破損状況の不具合・懸案事項の確認や異物管理・施工管理を徹底する観点から記録を取得すべきであるため、今後機器を開放した時点でうず巻きガスケットに損傷を確認した場合は、工事報告書に必要事項を記載することを調達要求文書に定める。



# 参考資料

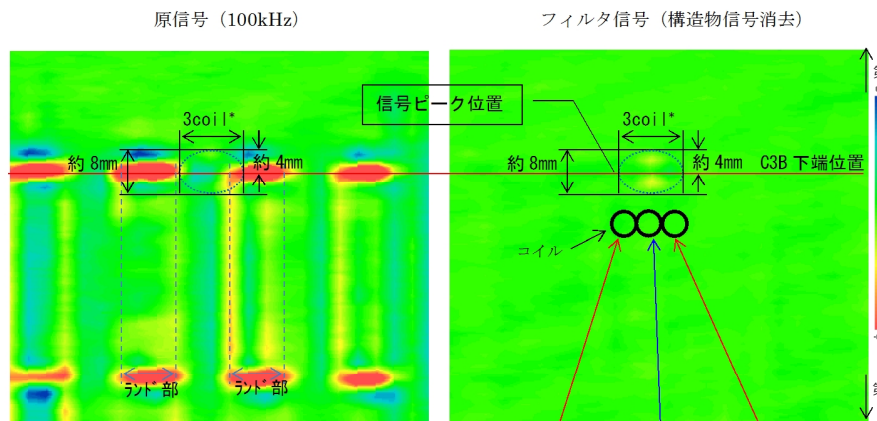




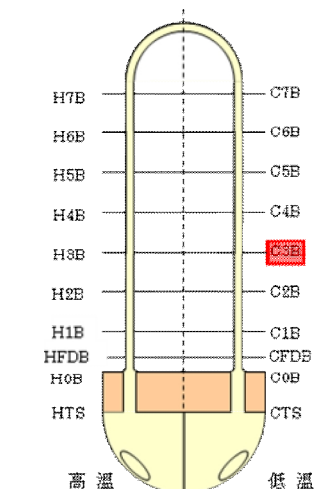
E C Tデータを分析した結果、伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

## B-SG低温側第三管支持板 (X54, Y4) のECT結果

減肉率：約32%



\*1coil : 約3mm ※内側から見たイメージ



| 軸方向      | 周方向      | 軸方向      |
|----------|----------|----------|
| PP 0.23  | PY 0.09  | PX 0.175 |
| AN 0.22  | AV 0.24  | AS 0.22  |
| AP 0.120 | AP 0.022 | AP 0.120 |
| AN 0.15  | AV 0.19  | AS 0.27  |

【B-SG X54-Y4 リサーチ波形】

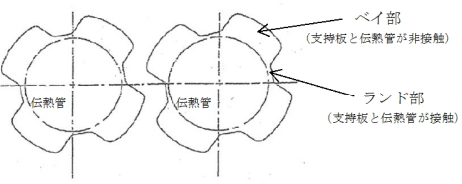
きずの端部の軸方向成分 (赤色矢印) を検出  
きずの中心部の周方向成分 (青色矢印) を検出

**波形評価**

- ・位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
- ・指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向成分の特徴を持っている。

上記の通り軸方向成分及び周方向成分の両方の成分が読み取れるため、広がりを持つ減肉と評価する。(下図参照)

400Hz Y+表示  
通常表示 (Y+)



信号評価

**今回定期検査 フィルタ信号 (構造物信号消去)**

**前回定期検査 フィルタ信号 (構造物信号消去)**

**今回定期検査 原信号 (100 kHz)**

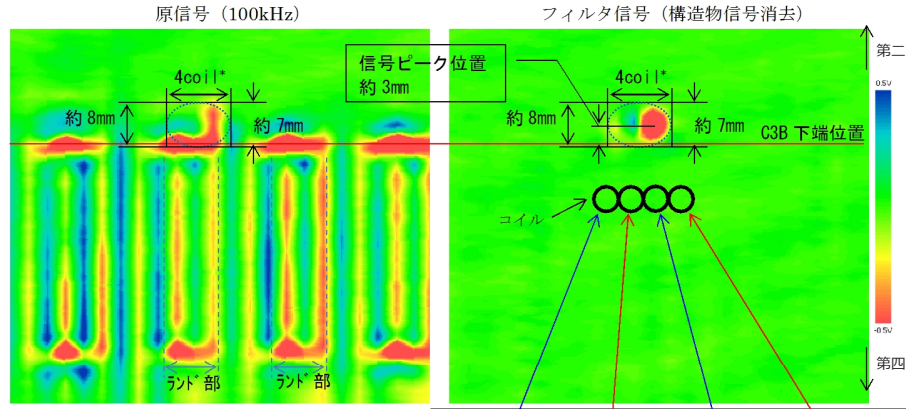
**前回定期検査 原信号 (100 kHz)**

※特異な信号がないため任意の位置で表示。

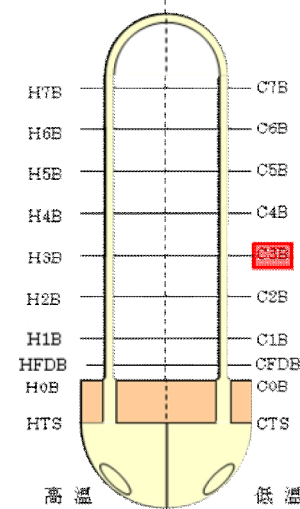
前回と今回の比較

ECTデータを分析した結果、伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

C-SG低温側第三管支持板 (X38, Y3) のECT結果 減肉率：約56%、約28%



\*1coil: 約3mm ※内側から見たイメージ



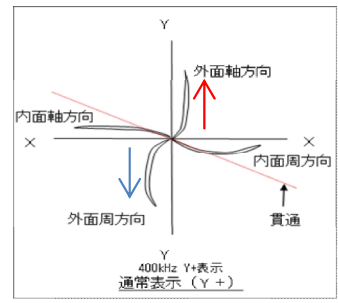
| 軸 | C5(20) | MIX  | 軸    | C6(18) | MIX  | 軸    | C7(16) | MIX  | 軸    | C8(12) | MIX  |      |      |      |      |      |
|---|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|--------|------|------|------|------|------|------|
| 周 | 0.23   | 0.23 | 0.15 | 0.99   | 0.52 | 0.45 | 0.35   | 1.00 | 1.69 | 1.55   | 0.70 | 1.14 | 0.26 | 0.21 | 0.23 | 1.49 |

【C-SG X38-Y3 リサージュ波形】

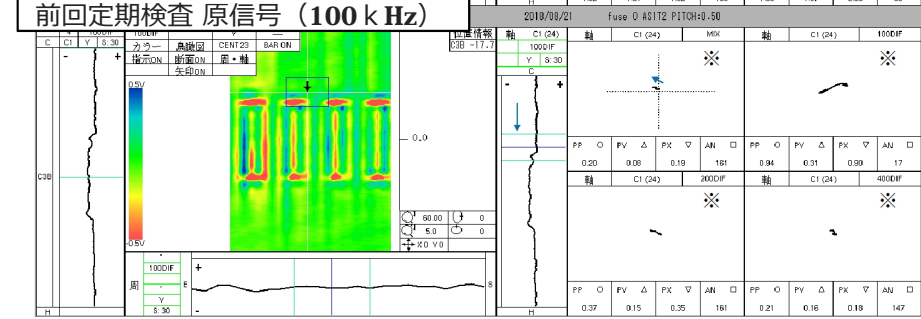
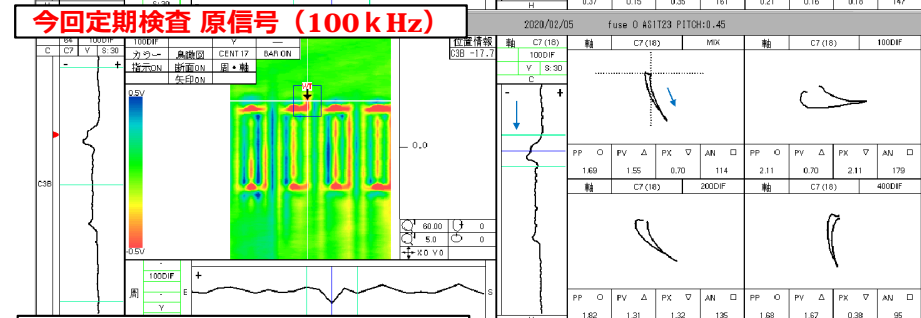
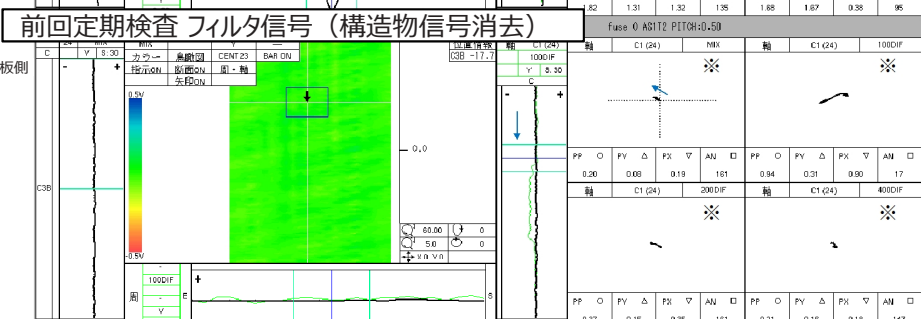
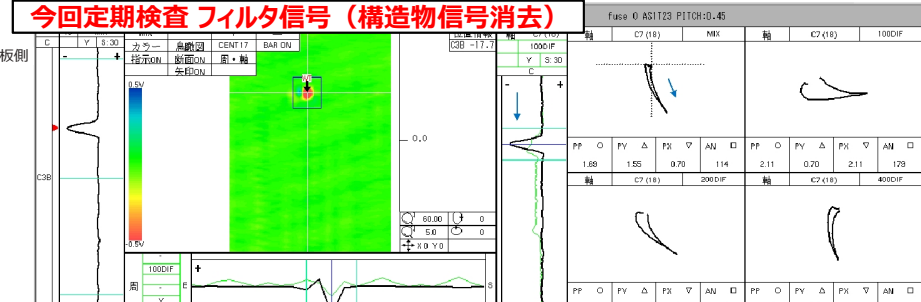
きずの端部の軸方向成分 (赤色矢印) を検出  
きずの中心部の周方向成分 (青色矢印) を検出

### 波形評価

- ・位相角評価から、外面指示の特徴を持っている。
  - ・指示は複数のコイルで検出されており、指示の中心部のコイルは周方向成分、両端部のコイルでは軸方向・周方向成分の特徴を持っている。
- 上記の通り軸方向成分および周方向成分の両方の成分が読み取れるため、広がりを持つ減肉と評価する。(下図参照)



信号評価

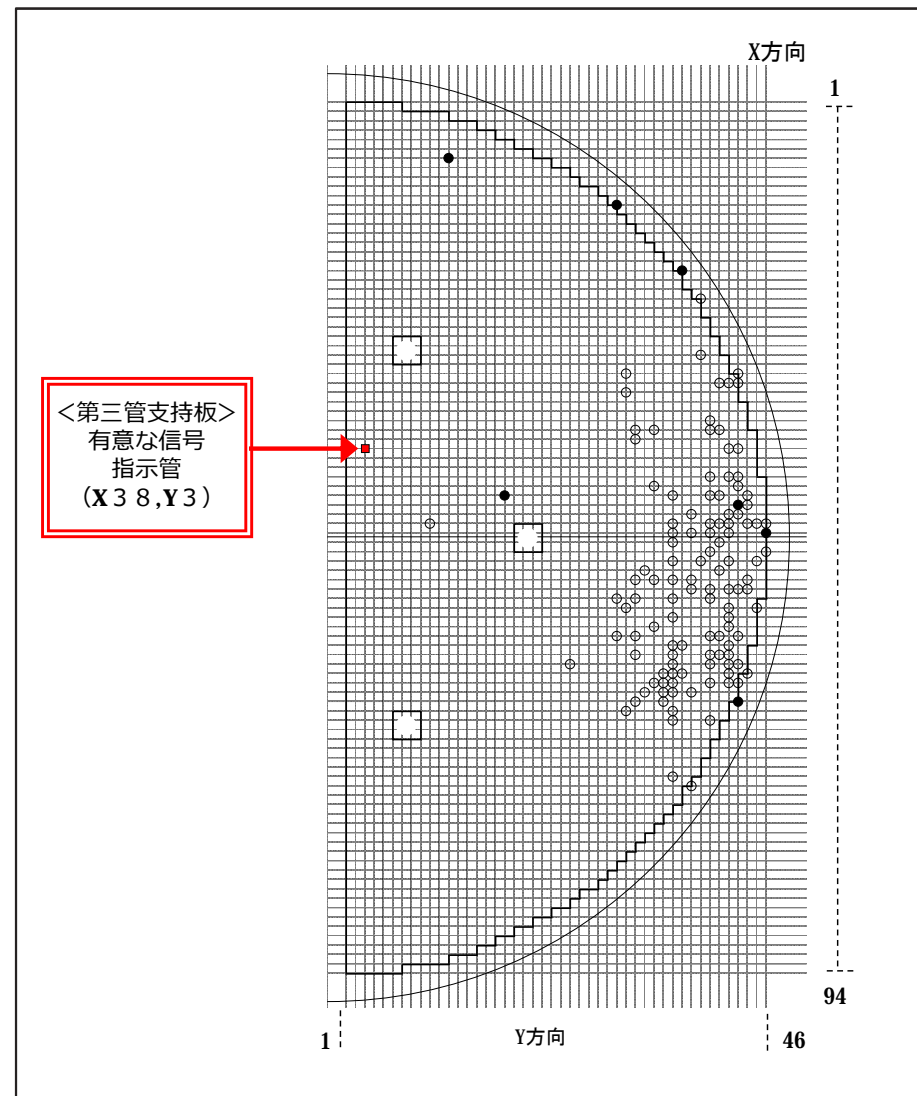
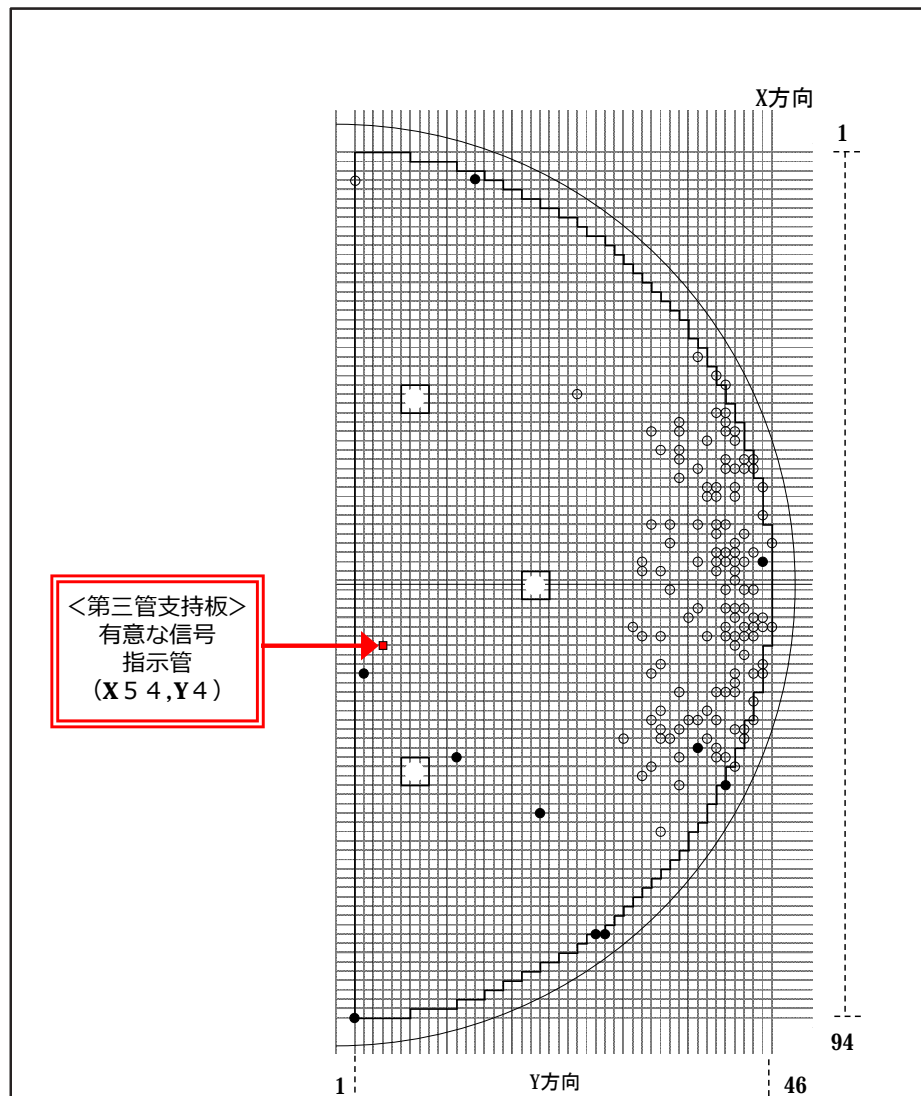


※特異な信号がないため任意の位置で表示。

前回と今回の比較

B-S G (低温側) の状況

C-S G (低温側) の状況



＜第三管支持板＞  
有意な信号  
指示管  
(X 5 4, Y 4)

＜第三管支持板＞  
有意な信号  
指示管  
(X 3 8, Y 3)

- : 有意な信号指示管 ( 1 本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) ( 1 0 本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) ( 1 2 4 本)

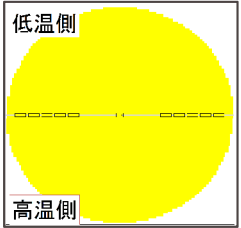
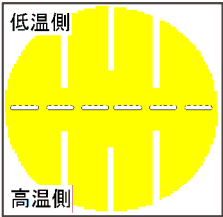
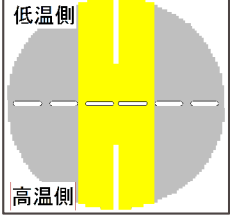
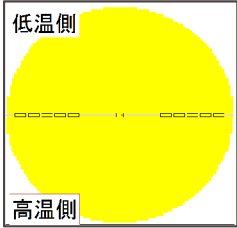
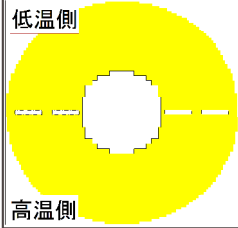
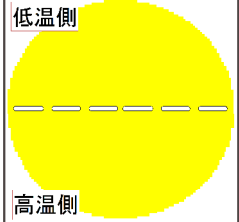
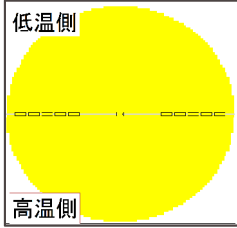
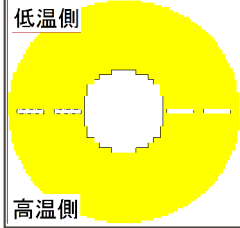
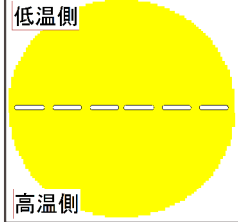
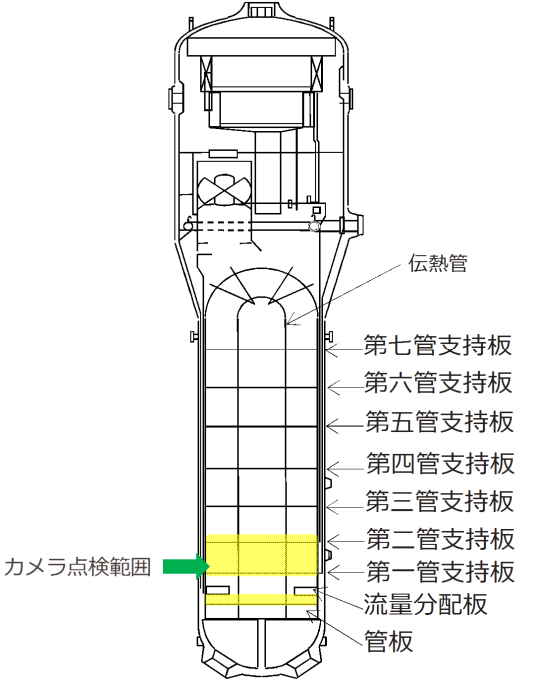
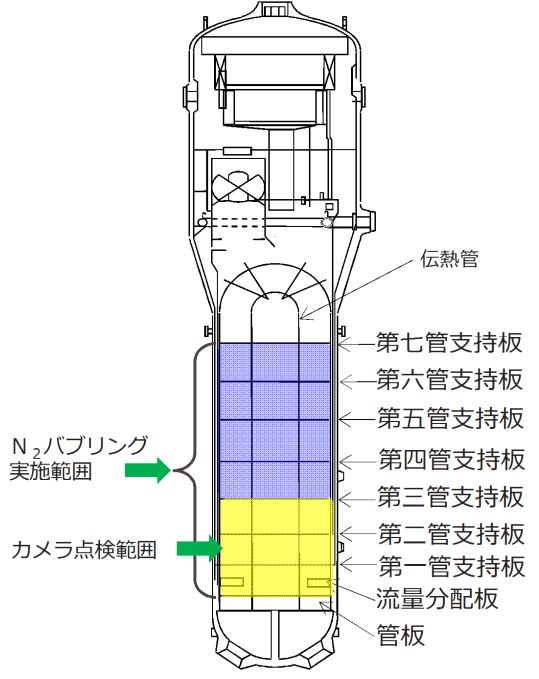
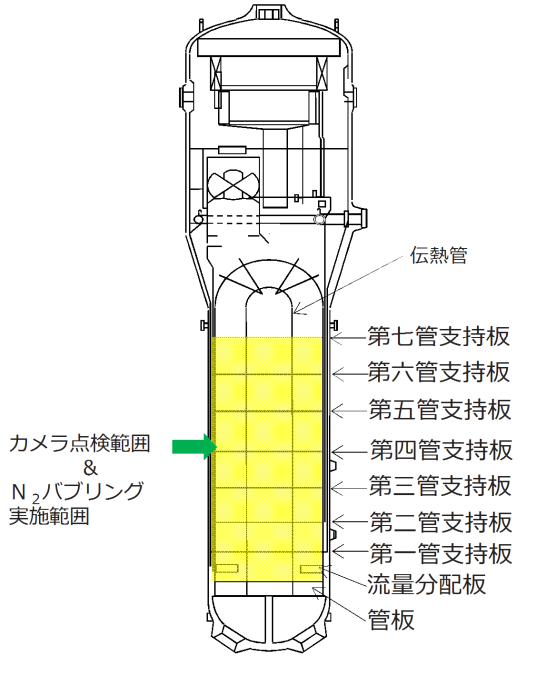
- : 有意な信号指示管 ( 1 本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) ( 7 本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) ( 1 1 3 本)

| 要因        |              | 調査項目   | 評価   |  |   |
|-----------|--------------|--|--|--|---|
| 減肉指示      | 1次側からの損傷     | ECT信号  | ECTの信号指示により、伝熱管内面(1次側)にきずがないことを確認した。 ×   |  |   |
|           | デンティング       | ECT信号  | ECTの信号指示を確認した結果、デンティングではないと考えられる。* ×   |  |   |
|           | 粒界腐食割れ (IGA) | 使用環境   | 過去にSG2次側環境においてアルカリ環境と酸化銅等による酸性性雰囲気を経験したプラントで、粒界腐食割れが発生した実績があるが、高浜発電所3号機のようなアンモニアとヒドラジンによるAVT処理を実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考えられる。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響によるものと考えられる減肉であることから、粒界腐食割れの可能性はないと考えられる。* ×                          |  |   |
|           | ピitting      | 使用環境   | 過去にSG2次側環境において海水リーク等による塩化物環境と酸化銅等による酸性性雰囲気を経験したプラントで、ピittingが発生した実績があるが、高浜発電所3号機のような塩素濃度が十分低く管理され、かつ、アンモニアとヒドラジンによるAVTを実施し、良好な還元性雰囲気が維持されているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考えられる。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響によるものと考えられる減肉であることから、ピittingの可能性はないと考えられる。* × |  |   |
|           | リン酸減肉        | 使用環境   | 過去の2次系水処理において、リン酸を使用していたプラントでリン酸による減肉が発生した実績があるが、高浜発電所3号機のようなアンモニアとヒドラジンによるAVTを実施しているプラントでは発生していないことから、発生の可能性はないと考えられる。また、小型カメラによる目視点検結果から機械的な影響によるものと考えられる減肉であることから、リン酸減肉の可能性はないと考えられる。* ×  |  |   |
|           | 2次側からの損傷     | 摩耗減肉   | 管支持板との接触   | 設計評価   | 管支持板との接触により摩耗減肉が発生したのであれば、4箇所(管支持板ランド部)に減肉が生じることになるが、目視点検の結果からは4か所の管支持板ランド部の減肉は確認できなかったため、管支持板との接触・摩耗によって発生した減肉ではないと考えられる。 ×  |
|           |              |  | SG器内発生物との接触  | 内部品が脱落して接触   | 設計評価  |
|           |              | スラッジとの接触   |  | 設計評価   | SG器内から回収したスラッジの断面観察を実施した結果、スラッジ内には空隙が存在しており、構造上脆いと判断されるものの、スラッジによる伝熱管摩耗試験を実施した。試験条件については、スラッジの伝熱管への押付力を実機相当の1Nとし、摺動速度や接触角度については保守的にスラッジが摩滅しにくくなるよう調整した。その結果、スラッジに対する伝熱管の摩滅体積比が最も大きいものでも、スラッジの摩滅体積が約0.014mm <sup>3</sup> に対し、伝熱管の摩滅体積は約0.004mm <sup>3</sup> であり、スラッジの方が伝熱管よりも十分早く摩滅していくことから、スラッジによって判定基準を超える減肉が発生することは考え難い。以上のことから、スラッジにより今回の摩耗減肉が生じた可能性は低いと考えられる。 ×   |
|           |              | SG器外流入物との接触  | 目視点検   | 目視点検   | SG器内の目視点検を実施した結果、A、C-SGの流量分配板上に、それぞれ1つずつ金属片を確認したことから、SEMIによる表面観察を行った結果、2つの金属片には複数箇所筋状の擦れ跡や摩耗、打痕を確認した。また、成分分析の結果、2つの金属片はオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304相当)であった。更に、形状の類似性から、金属片は渦巻きガスカートの一部であると推定した。上記金属片以外については、目視点検およびスラッジランシング、並びにN2バブリングを実施した結果、スラッジ以外に異物は確認できなかった。SGブローダウン系統の仮設ストレーナ、タンク、水位制御弁および異物が滞留し得る配管等について目視点検等を実施した結果、異物は確認できなかった。A、C-SGで確認した金属片に部分的な筋状の擦れ跡、打痕、摩耗等を確認したこと、また、一部に板厚の減少が認められたことから、有意な信号指示を確認したC-SGについては、この金属片が伝熱管にきずを付けた可能性は否定できない。有意な信号指示を確認したB-SGでは異物が確認されていないことから、SGブローダウン系統へ流出した異物が復水器回収ラインを通じて復水器ホットウェルに流入し、タービンサンプへ異物が流出した可能性は否定できない。 △ |
|           | 設計評価         |  |  | 減肉メカニズムについて検討した結果、C-SGで回収した金属片またはその他の想定異物は、SG器内へ持ち込まれ当該の管支持板下面まで到達すれば、伝熱管との接触により今回の外面減肉を発生させた可能性があると考えられる。 △ |   |
| 流体振動による疲労 | 設計評価         | 管支持板部の流れによる伝熱管の管支持板部の応力は、疲労限に比べ非常に小さく、疲労損傷は発生しないと考えられる。* ×                                   |  |  |   |
| エロージョン    | 設計評価         | 当該部流速は約3m/sであり、かつ、TT600合金は耐エロージョン性が高いことから(室温条件下では約70m/s以上がエロージョン発生領域)、エロージョンの発生はないと考えられる。* × |  |  |   |
| ECT探傷     | 損傷以外の信号      | 局所的な異物等の付着・剥離  | ECT信号  | 局所的なスケールの剥離は、減肉と識別できることから、今回の信号指示は、スケールの剥離ではないと考えられる。 ×  |   |

\*:きずの形状からも本要因でないと判断できる。

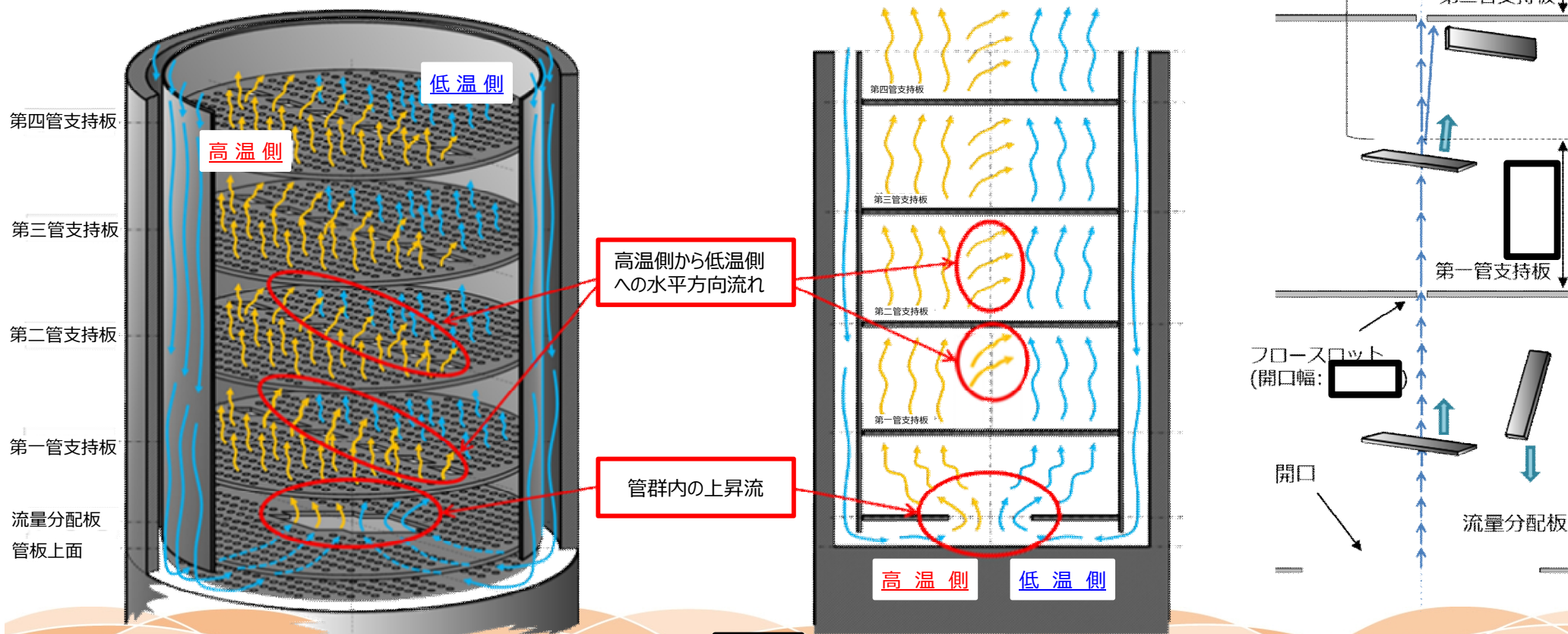
△:可能性は否定できない。  
×:要因の可能性なし。



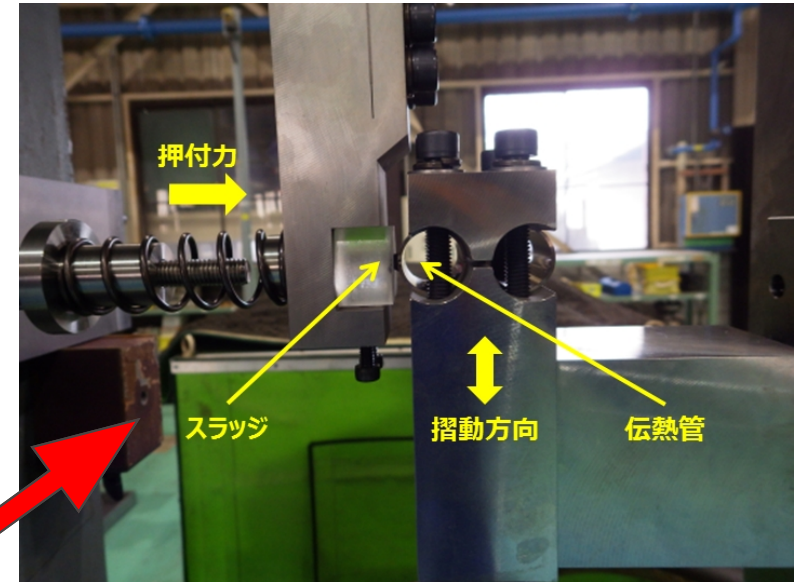
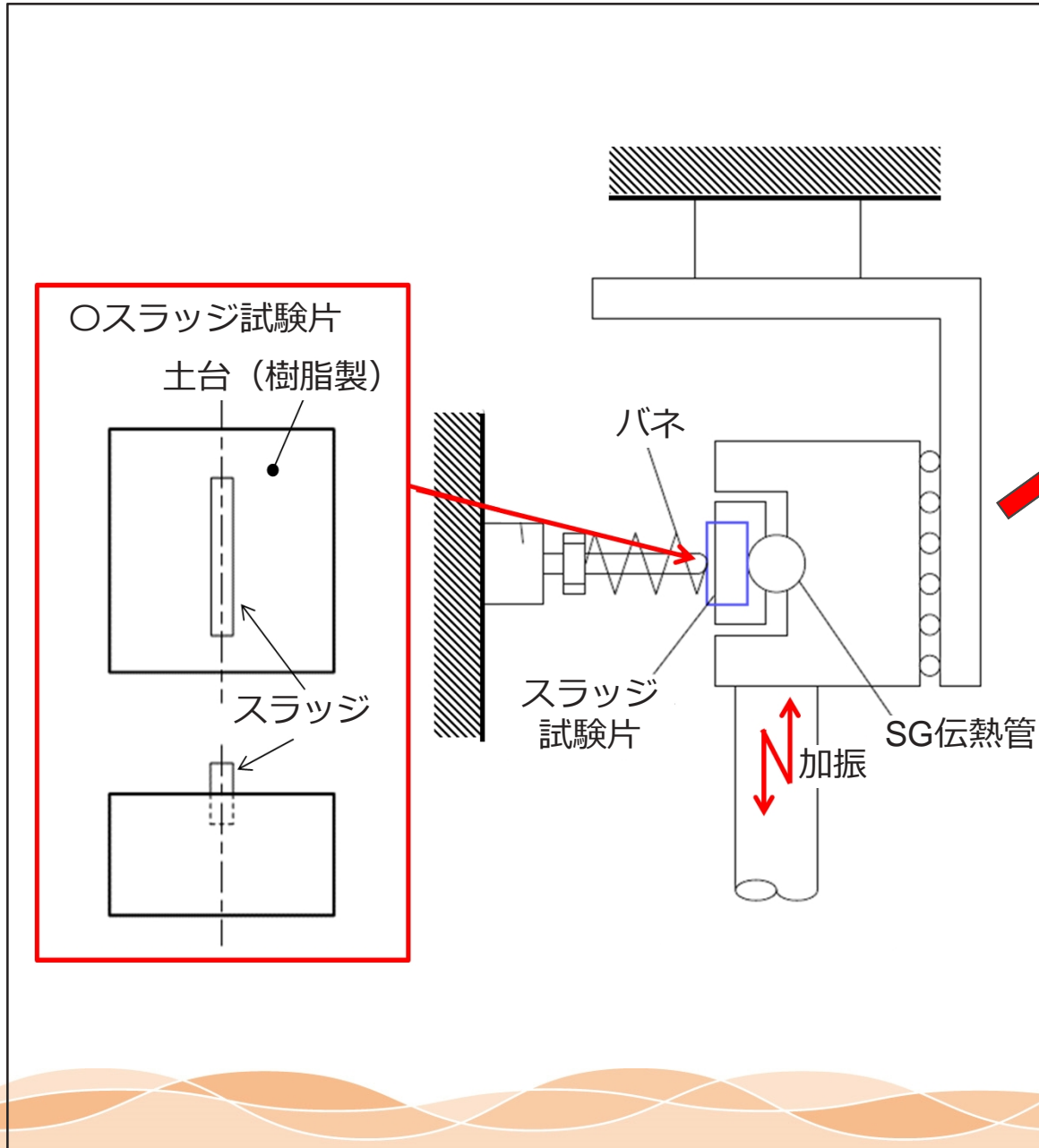
|   | T 3 前回 ( 2 3 回 ) 定期検査   | T 4 前回 ( 2 2 回 ) 定期検査   | T 3 今回 ( 2 4 回 ) 定期検査   |
|---|---|---|---|
| S<br>G<br>器<br>内<br>カ<br>メ<br>ラ<br>点<br>検<br>範<br>囲 | <p style="text-align: center;">&lt;管板上面&gt;</p>  <p style="text-align: center;">&lt;第一管支持板上面&gt;</p>  <p style="text-align: center;">&lt;第二管支持板上面&gt;</p>  | <p style="text-align: center;">&lt;管板上面&gt;</p>  <p style="text-align: center;">&lt;流量分配板上面&gt;</p>  <p style="text-align: center;">&lt;第一～二管支持板上面&gt;</p>  | <p style="text-align: center;">&lt;管板上面&gt;</p>  <p style="text-align: center;">&lt;流量分配板上面&gt;</p>  <p style="text-align: center;">&lt;第一～七管支持板面&gt;</p>  |
| 点<br>検<br>／<br>調<br>査<br>範<br>囲                     |  <p style="text-align: center;">外面減肉 A : 1 本 ( 微小減肉 )</p>   |  <p style="text-align: center;">外面減肉 A : 1 本 / B : 1 本 / C : 3 本</p>   |  <p style="text-align: center;">外面減肉 B : 1 本 / C : 1 本</p>  |



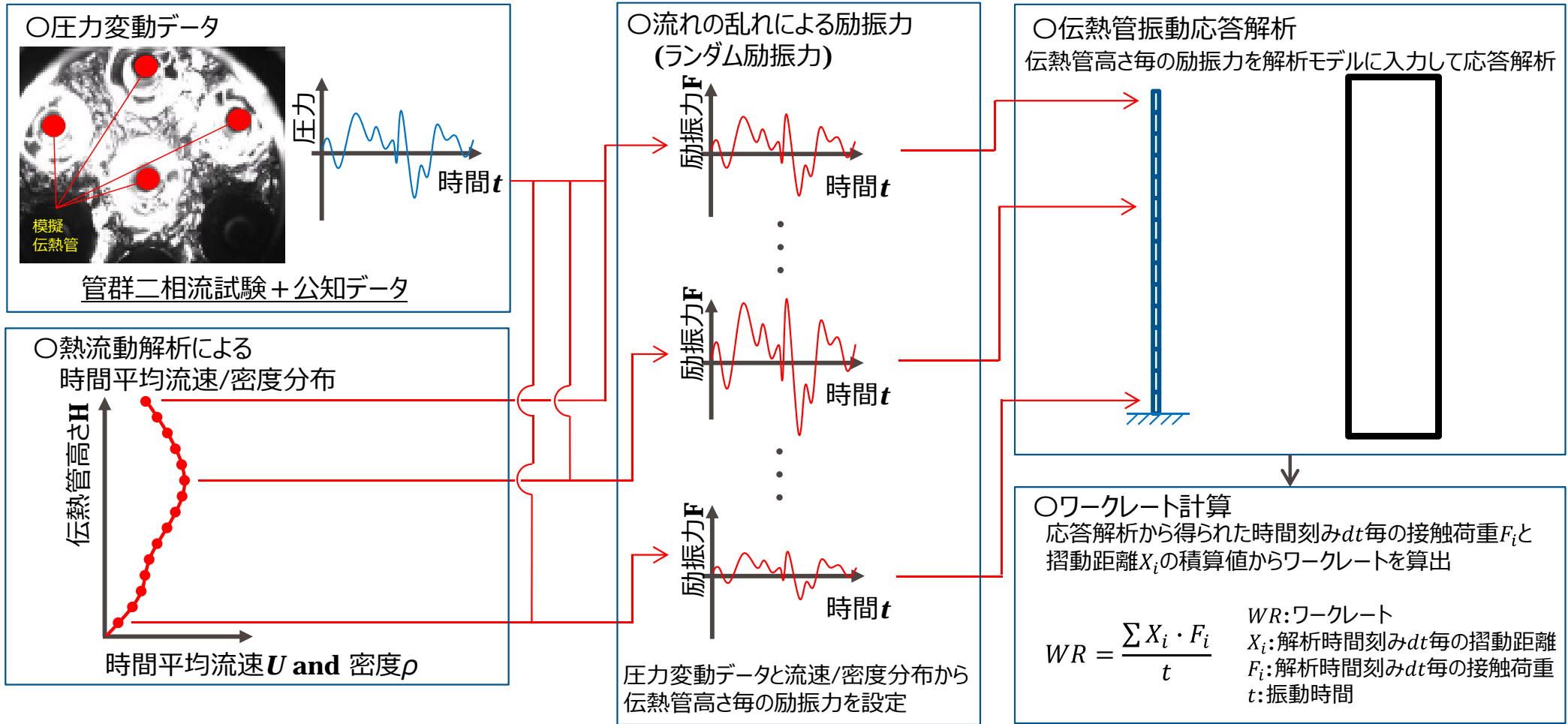
- 3次元熱流動解析を実施した結果、異物はS G器内に流入後管板上へ到達し、管群内の上昇流に乗って流量分配板および各管支持板フロー SLOT部を通過したと考えられる。
- 第一管支持板より上方では、上昇流に加え高温側から低温側への水平方向流があることから低温側へ流れ、第二管支持板の低温側下面、又は第三管支持板の低温側下面に至ったものと推定される。



## 加振装置概念図



## 試験結果の例



: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



## 強度評価

国P J「蒸気発生器信頼性実証試験」（(財)発電用熱機関協会、昭和50年度～昭和55年度）では、局部減肉を有する伝熱管の内圧強度評価手法を確立するため、内圧による高温破壊試験を実施している。その試験結果から導出された内圧破断評価式※を用いて、運転中および事故時を包絡する内外差圧による破断圧力を算出した。

得られた破断圧力について、通常運転時および事故時の最大内外差圧に対する余裕を確認することにより、減肉管の強度を評価した。

| 減肉深さ (%) (注1) | 破断圧力 $P_B$ (MPa) | 事故時を包絡する作用内外差圧 (MPa) (注2) | 余裕                   |
|---------------|------------------|---------------------------|----------------------|
| 56            | 30.06            | <input type="text"/>      | <input type="text"/> |

(注1) 最大減肉深さのC-SGで代表

(注2) 設計基準事故時および重大事故等時を包絡する内外差圧

※本評価式は、過去の高浜3, 4号機 蒸気発生器伝熱管の旧振止め金具による局部減肉の特殊設計施設認可申請においても用いられており、下式にて表される。

$$P_B = \sigma_f \frac{t}{R} \left( \frac{1 - a/t}{1 - a/t \cdot 1/m} \right)$$

<今回の計算条件>

$P_B$  : 局部減肉を有する伝熱管の破断圧力 (MPa)

$\sigma_f$  : インコネル600合金の流動応力 = 343.8MPa (@361.3°C)

$t$  : 板厚 =  (最小板厚を考慮)

$R$  : 平均半径 =

$a$  : 減肉深さ =  (=  × 0.56)

$m$  : Foliasのバルジ係数 (=  $(1 + 1.05 \cdot c^2/R/t)^{1/2}$ )

$2c$  : 減肉幅 = 5mm

破断圧力は**30.06MPa**であり、通常運転時および事故時の最大内外差圧MPaに対し、十分な余裕があることを確認した。

**⇒減肉した伝熱管が運転中および事故時の内外差圧により破断することはない。**



## 耐震性評価

減肉を有する伝熱管の耐震性について、次のとおり評価した。

- ・ 既工認<sup>※1</sup>の基準地震動 $S_s$ による地震力および伝熱管全長モデル（右図）<sup>※2</sup>から、伝熱管直管部（管支持板部）に作用する力（部材力）を算出
- ・ 保守的に一様外面減肉と仮定し、伝熱管の断面積を減じた上で部材力から発生応力および疲労累積係数を算出し、許容値に対する裕度を確認

※1：既工認添付資料13-17-3-2-2「蒸気発生器内部構造物の耐震計算書」（原規規発第1508041号、平成27年8月4日認可）

※2：高浜3，4号機既工認（新規制基準工認）補足説明資料「高浜発電所第3号機 耐震性に関する説明書に係る補足説明資料 蒸気発生器伝熱管の評価について 関西電力株式会社 平成27年7月」

表 減肉を有する伝熱管の耐震性評価結果

| 応力分類     | 発生応力 <sup>※3</sup><br>および疲労累積係数 | 許容値     | 裕度   |
|----------|---------------------------------|---------|------|
| 一次一般膜応力  | 225 MPa                         | 334 MPa | 1.48 |
| 膜応力+曲げ応力 | 228 MPa                         | 434 MPa | 1.90 |
| 一次+二次応力  | 169 MPa                         | 492 MPa | 2.91 |
| 疲労累積係数   | 0.016                           | 1       | —    |

※3：最大減肉深さのC-SG（56%）で代表（最小板厚を考慮）

今回認められた減肉を考慮しても、発生応力および疲労累積係数に十分な裕度があること確認した。

**⇒減肉した伝熱管が地震により損壊することはない。**

伝熱管地震応答解析モデル



：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。



参考として更に評価条件を保守的にし、ECT誤差を考慮した場合の評価結果を示す。

## 強度評価

| 減肉深さ (%) (注1)        | 破断圧力 $P_B$ (MPa) | 事故時を包絡する作用内外差圧 (MPa) (注2) | 裕度                   |
|----------------------|------------------|---------------------------|----------------------|
| <input type="text"/> | 28.75            | <input type="text"/>      | <input type="text"/> |

(注1) 最大減肉深さ(56%)、最小板厚にECT誤差()%を考慮  
 (注2) 設計基準事故時および重大事故等時を包絡する内外差圧

破断圧力は**28.75MPa**であり、通常運転時および事故時の最大内外差圧MPaに対し、十分な裕度があることを確認した。

⇒ECT誤差を考慮しても、運転中および事故時の内外差圧で伝熱管が破断することはない。

## 耐震性評価

| 応力分類     | 発生応力 (注3)<br>および疲労累積係数 | 許容値     | 裕度   |
|----------|------------------------|---------|------|
| 一次一般膜応力  | 253 MPa                | 334 MPa | 1.32 |
| 膜応力+曲げ応力 | 257 MPa                | 434 MPa | 1.68 |
| 一次+二次応力  | 191 MPa                | 492 MPa | 2.57 |
| 疲労累積係数   | 0.027                  | 1       | -    |

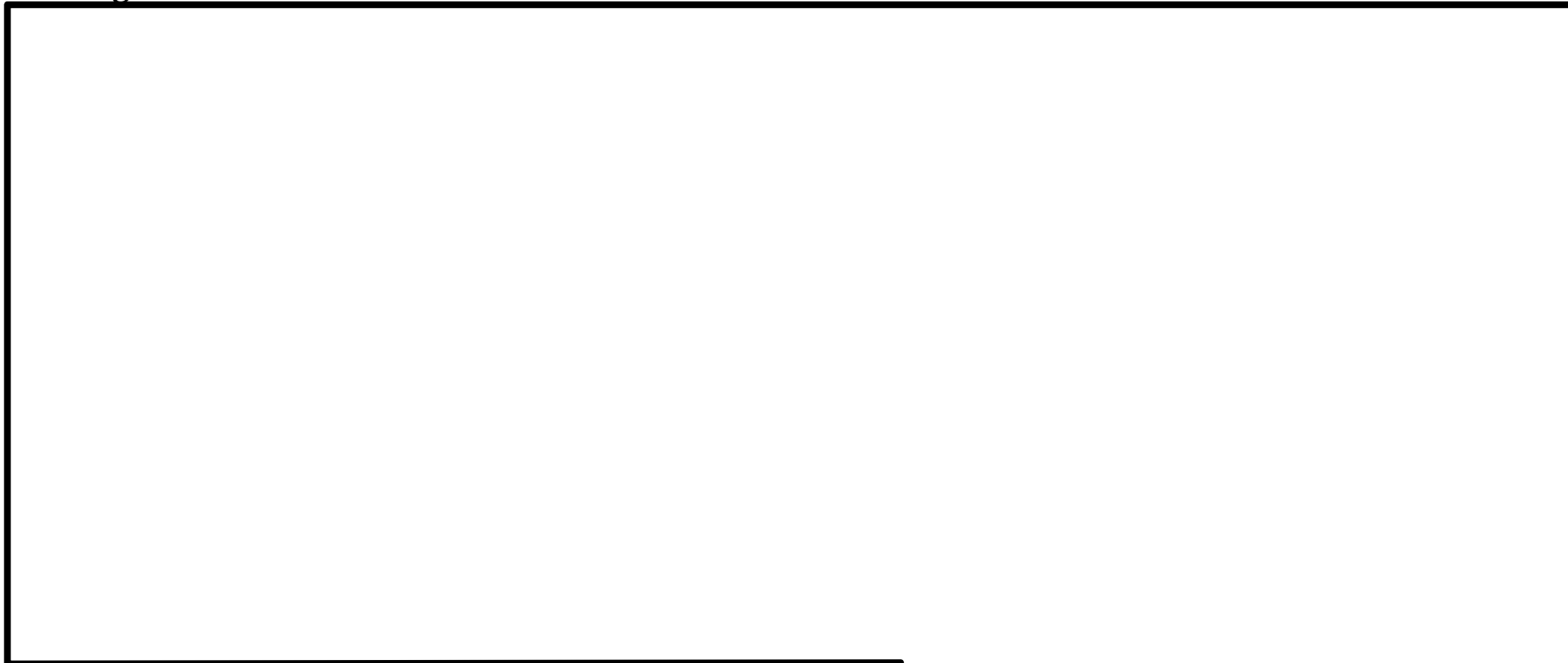
(注3) 最大減肉深さ(56%)、最小板厚にECT誤差)%を考慮

想定される最大深さの減肉を考慮しても、発生応力および疲労累積係数に十分な裕度があることを確認した。

⇒ECT誤差を考慮しても、伝熱管が地震により損壊することはない。



EPRIレポート「Steam Generator Integrity Assessment Guidelines」及び「Steam Generator Degradation Specific Management Flaw Handbook」に基づく構造健全性評価の概要は以下の通り。




## <評価結果>

|      | 減肉率 | 破断圧力        | 判定基準 (3ΔPNO) ※ | 結果 |
|------|-----|-------------|----------------|----|
| B-SG | 32% | 6,673.2 psi | 4,611psi       | OK |
| C-SG | 56% | 6,601.5 psi |                | OK |
|      | 28% | 6,746.7 psi |                | OK |

※高浜3号機の前回運転サイクル実績値より設定

評価の結果、破断圧力は判定基準に対して十分な裕度があることを確認した。

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

SDP評価のスクリーニング基準（3ΔPNO）と比較する破断圧力の評価式に、国PJ「蒸気発生器信頼性実証試験」（(財)発電用熱機関協会、昭和50年度～昭和55年度）で確立された内圧破断評価式\*を用いた場合の結果を以下に示す。

評価にあたっては、米国の評価条件と整合させるため、伝熱管板厚は公称値を用いるとともに、減肉深さにはECT誤差を考慮した。

| 減肉深さ (%) (注1) | 破断圧力P <sub>B</sub> (MPa) | 3ΔPNO (MPa) (注2) | 裕度   |
|---------------|--------------------------|------------------|------|
| □             | 32.78                    | 31.78            | 1.03 |

(注1) 今回認められた最大減肉深さ（56%）にECT誤差□%を考慮  
 (注2) 高浜3号機の前回運転サイクル実績値より設定

※本評価式及び計算条件は下記の通り。

$$P_B = \sigma_f \frac{t}{R} \left( \frac{1 - a/t}{1 - a/t \cdot 1/m} \right)$$

<計算条件>

P<sub>B</sub>：局部減肉を有する伝熱管の破断圧力 (MPa)

σ<sub>f</sub>：インコネル600合金の流動応力=343.8MPa (@361.3℃)

t：板厚=□ (最小板厚を考慮)

R：平均半径=□

a：減肉深さ=□ (=□ × □)

m：Foliasのバルジ係数 (= (1 + 1.05 · c<sup>2</sup>/R/t)<sup>1/2</sup>)

2c：減肉幅=5mm

破断圧力は**32.78MPa**であり、スクリーニング基準（3ΔPNO）の**31.78MPa**を満足することを確認した。



：枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

参考として、米国の評価条件から更に条件を保守的にした場合の結果を以下に示す。  
 評価ケースとして、伝熱管の板厚として最小板厚を考慮したケースと、最小板厚に更にECT誤差を考慮したケースを示す。

## <最小板厚ケース>

| 対象SG | 減肉深さ (%) | 破断圧力 $P_B$ (MPa) | $3\Delta PNO$ (MPa) (注1) | 裕度   |
|------|----------|------------------|--------------------------|------|
| B-SG | 32       | 34.72            | 31.78                    | 1.09 |
| C-SG | 56       | 30.37            |                          | 0.95 |
|      | 28       | 35.23            |                          | 1.10 |

(注1) 高浜3号機の前回運転サイクル実績値より設定

## <最小板厚+ECT誤差考慮ケース>

| 対象SG | 減肉深さ (%) (注2)        | 破断圧力 $P_B$ (MPa) | $3\Delta PNO$ (MPa) (注1) | 裕度   |
|------|----------------------|------------------|--------------------------|------|
| B-SG | <input type="text"/> | 34.01            | 31.78                    | 1.07 |
| C-SG | <input type="text"/> | 29.05            |                          | 0.91 |
|      | <input type="text"/> | 34.58            |                          | 1.08 |

(注2) ECT誤差  (%) を考慮

: 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

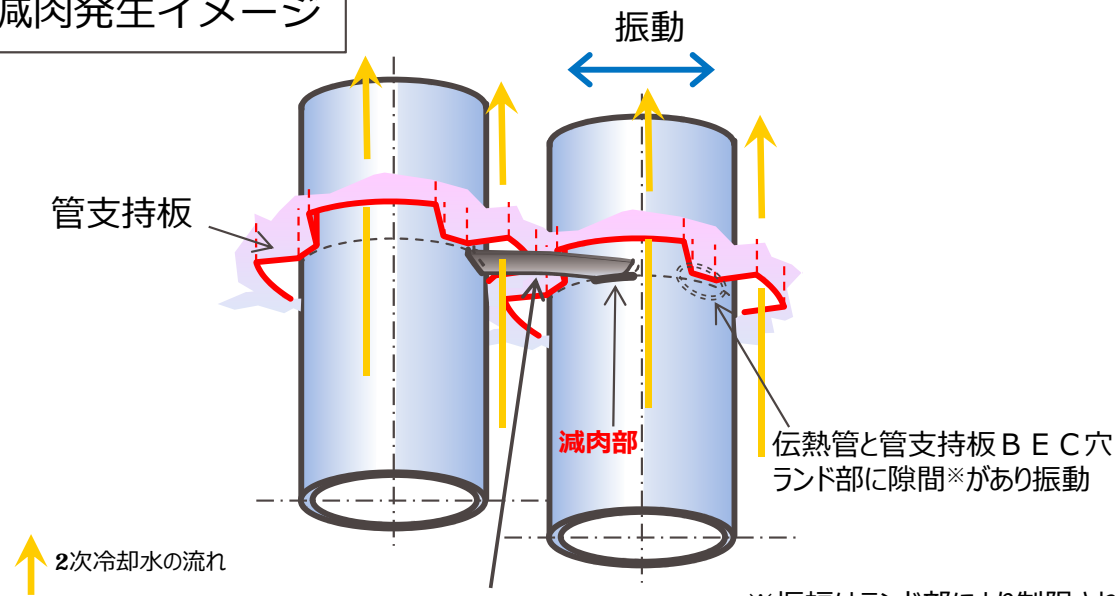
# 参考資料：A – S Gで確認した金属片が伝熱管にきずを付けた場合のリスク（影響）（1 / 2）

## ③最大減肉深さの評価

○金属片が管支持板の下面で保持され、伝熱管振動により摩耗減肉が進展した場合の最大深さを以下の通り評価した。

- ・伝熱管は、管支持板 B E C 穴のランド部に隙間があることでランダム振動し、金属片との接触部で減肉が発生する。
- ・ただし、振幅はランド部の寸法から制限（最大振幅 ）があるため、減肉深さにも上限がある。
- ・その結果、最大減肉深さは  となり、貫通には至らないことを確認した。

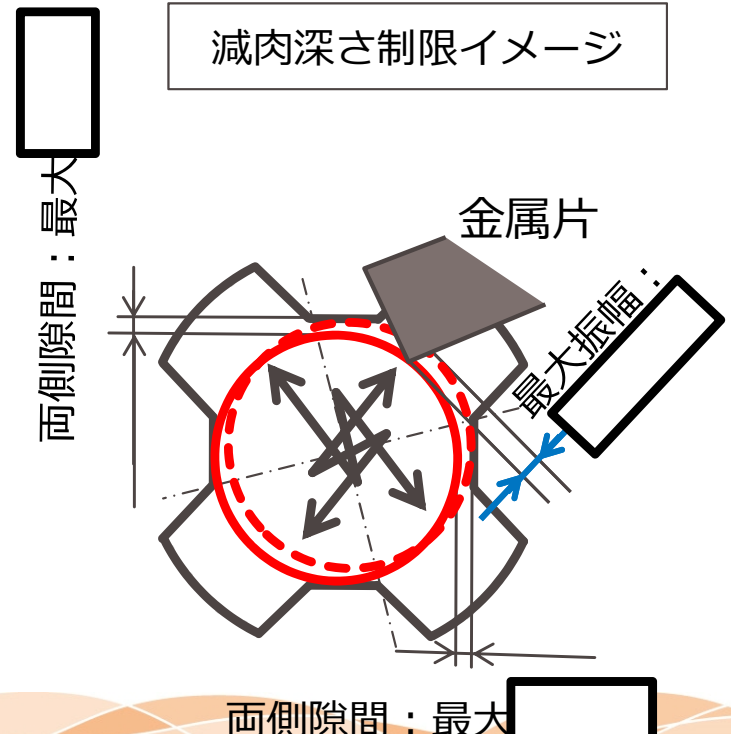
減肉発生イメージ



金属片  
(管支持板下面で保持)

※振幅はランド部により制限されており、減肉深さには上限がある。

減肉深さ制限イメージ



両側隙間：最大

# 参考資料：A – S Gで確認した金属片が 伝熱管にきずを付けた場合のリスク（影響）（2/2）

## ④伝熱管の健全性評価結果（強度）

| 減肉深さ（%）（注1） | 破断圧力 $P_B$ （MPa） | 事故時を包絡する作用内外差圧（MPa）（注2） | 裕度 |
|-------------|------------------|-------------------------|----|
| □           | 24.18            | □                       | □  |

（注1）想定される最大減肉深さ（最小板厚を考慮）

（注2）設計基準事故時および重大事故等時を包絡する内外差圧

破断圧力は**24.18MPa**であり、通常運転時および事故時の最大内外差圧□MPaに対し、十分な裕度があることを確認した。

⇒最大減肉深さを考慮しても、運転中および事故時の内外差圧で伝熱管が破断することはない。

## ④伝熱管の健全性評価結果（耐震性）

| 応力分類（注3） | 発生応力（注4）<br>および疲労累積係数 | 許容値     | 裕度   |
|----------|-----------------------|---------|------|
| 膜応力+曲げ応力 | 381 MPa               | 430 MPa | 1.12 |
| 一次+二次応力  | 287 MPa               | 492 MPa | 1.71 |
| 疲労累積係数   | 0.13                  | 1       | -    |

（注3）一次一般膜応力は**99%**が内圧による応力であり、強度評価に包絡

（注4）最小板厚を考慮

想定される最大深さの減肉を考慮しても、発生応力および疲労累積係数に十分な裕度があることを確認した。

⇒最大深さの減肉を有する伝熱管が地震により損壊することはない。



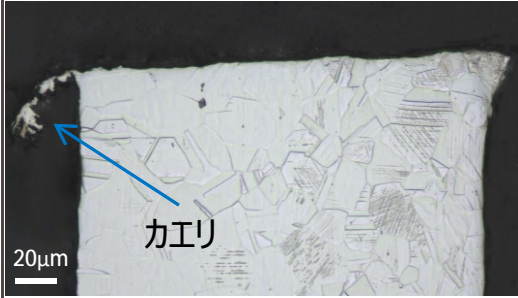
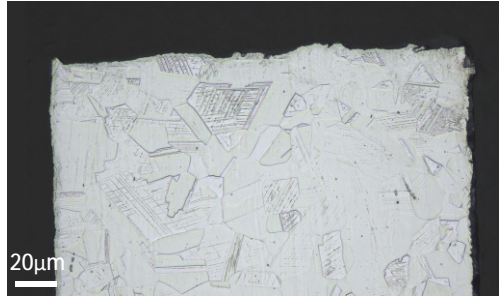
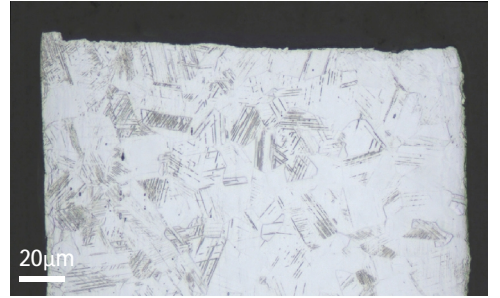
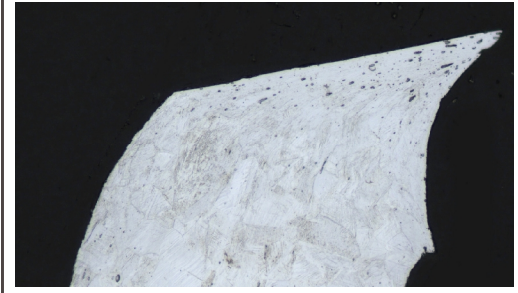
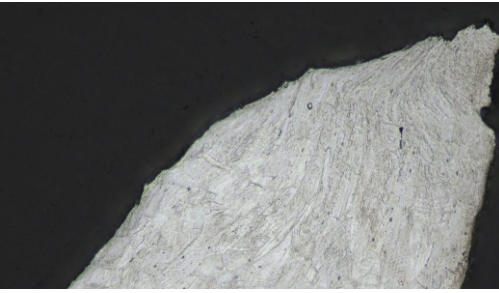
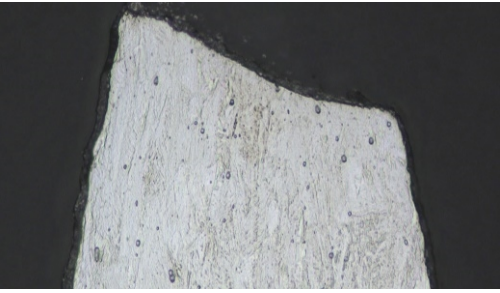
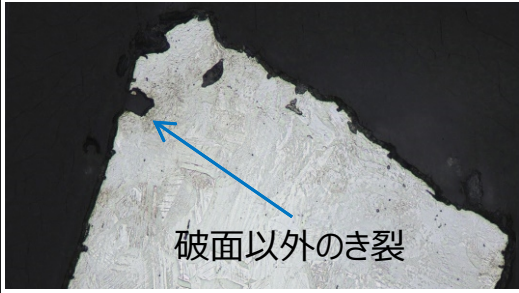


- S G器内において小型カメラを用いて伝熱管の外面観察を実施した際に確認された、摩耗痕に隣接した伝熱管の接触痕は、有意な減肉信号指示ではないことを確認した。



摩耗痕のある伝熱管と隣接した伝熱管の E C T 結果 (M I X : B - S G の例)

○ 金属片と同種の渦巻ガスケットを様々な方法で切断した破面の組織の様子は下表の通り

| 砥石切断   | 高サイクル疲労  |   | せん断  | 引張破断 | 低サイクル疲労 |
|--|--|---|--|------|---------|
|  | 引張   | 曲げ  |  |      |         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>塑性変形の痕（結晶粒の変形）は認められない</li> <li>切断時にカエリが残る場合あり</li> </ul>    | <ul style="list-style-type: none"> <li>塑性変形の痕（結晶粒の変形）は認められない</li> <li>疲労評価の結果、可能性低※</li> </ul>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>塑性変形の痕（結晶粒の変形）は認められない</li> <li>疲労評価の結果、可能性低※</li> </ul>   |  |      |         |
| 金切りはさみ   | ニッパー   |   |  |      |         |
| <ul style="list-style-type: none"> <li>切断方向に曲がり、板厚が減少</li> <li>破面一帯に塑性変形の痕（結晶粒の変形）あり</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>破面は全体的に大きく変形</li> <li>切断方向に曲がり、板厚が減少</li> <li>破面一帯に塑性変形の痕（結晶粒の変形）あり</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>破面は全体的に大きく変形</li> <li>破面一帯に塑性変形の痕（結晶粒の変形）あり</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>破面に局所的な凸凹あり</li> <li>曲げによる塑性変形の痕（結晶粒の変形）あり</li> <li>破面以外にもき裂あり</li> </ul>  |      |         |

※ A、C - S Gで回収した金属片は長さが約24～33mmと短く、給水系統の流体力では疲労限に至らないため、高サイクル疲労を起こす可能性は低い



○発電所の作業において、以下のような資材の切れ端が発生する。

| 資材等  | 現場状況  |  |
|--|---|--|
| <p data-bbox="123 422 414 518">保温材外装板の切れ端</p>            |   |   |
| <p data-bbox="100 1061 436 1157">配管識別表示等のバンドの切れ端</p>  |  |  |