

高浜発電所 3号機
蒸気発生器伝熱管の損傷について
(7月22日公開会合でのご質問内容の確認)

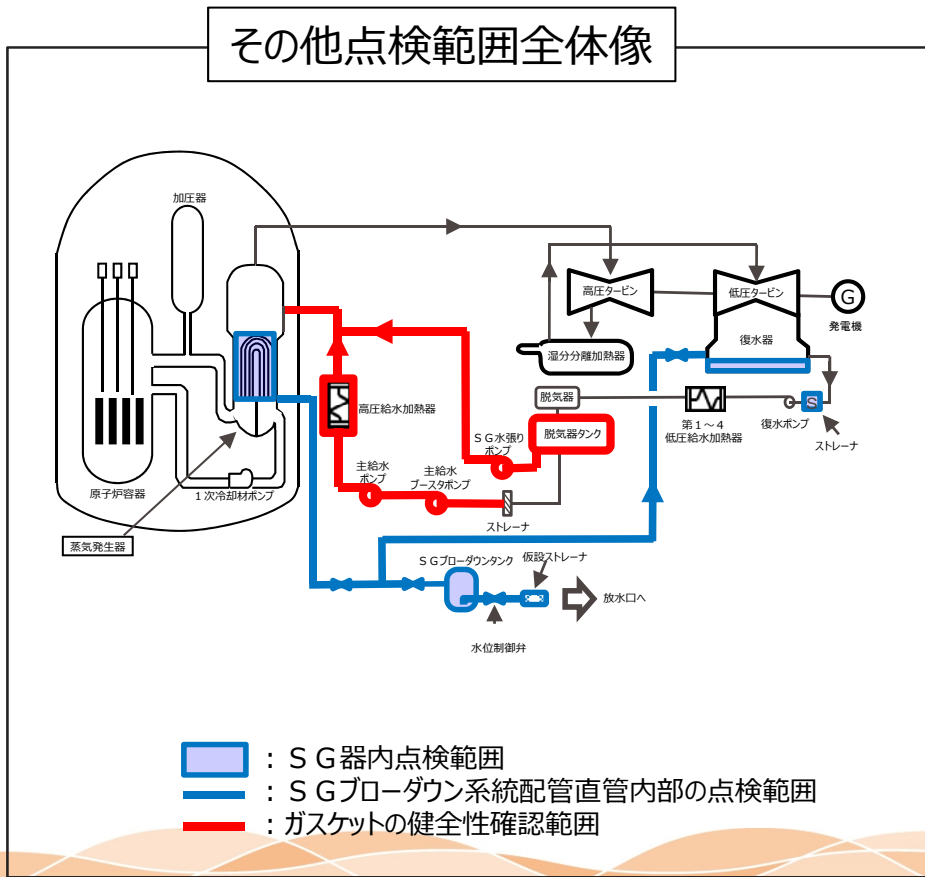
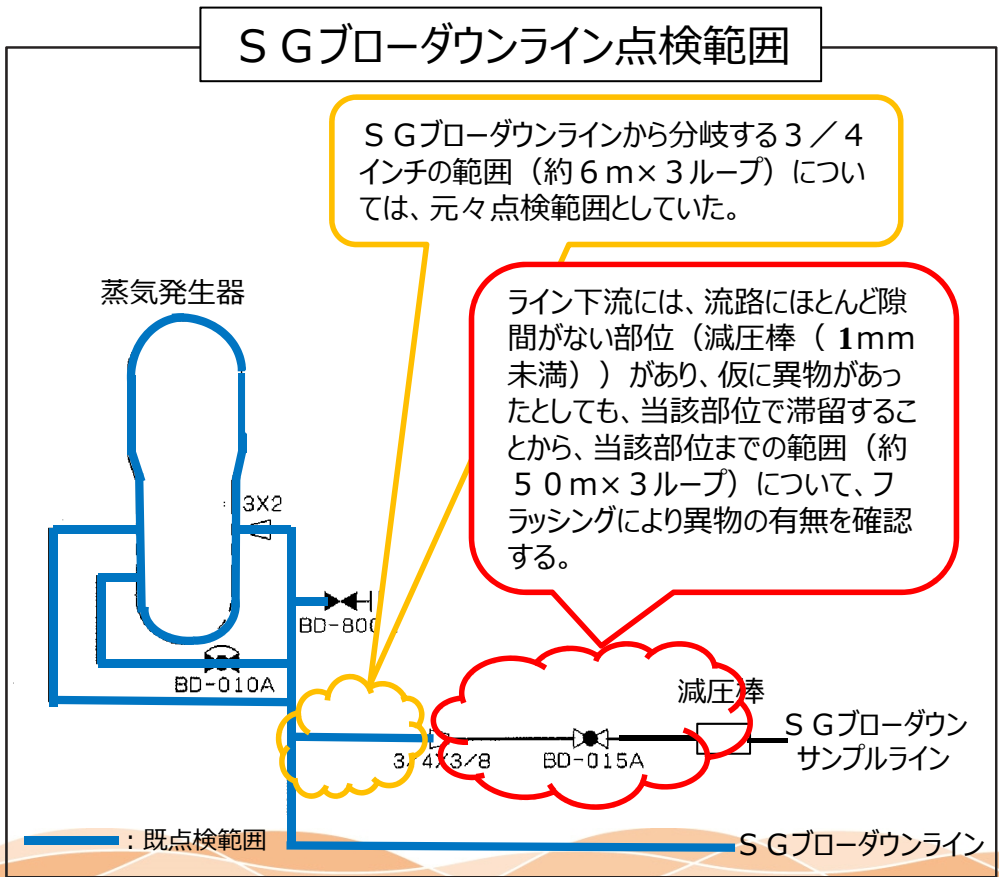
2020年8月24日



説明項目		ページ 番号
1	S Gブローダウンサンプルライン調査	3
2	ガスケットパッキン交換時の記録整備の必要性について	5
3	金属片への伝熱管成分付着有無の確認	6
4	5 mm程度未満のガスケットパッキンを点検対象範囲外とした理由	7
5	A – S Gで確認した異物のリスク評価と前回（2 3回）定期検査で減肉を確認した伝熱管（X 5 9 Y 4）を損傷させた可能性について	8
6	異物管理の3号機と4号機の違い	1 3
7	今回（2 4回）定期検査で確認したスラッジと4号機前回（2 2回）定期検査で確認した金属片の映像比較	1 4
8	C – S Gで確認した金属片がX 3 8 Y 2に支持されない場合に減肉するか	1 5
9	ガスケットパッキンが異物になり得る作業の有無	1 6

異物が入り得る可能性のある範囲は網羅的に対応すること

- SGブローダウンサンプルラインについては、点検開始当初から、異物が流入する可能性が考えられる3 / 4インチ※¹以上の配管を対象とし小型カメラでの点検範囲としていたが、異物が流入する可能性は極めて低いものの、3 / 8インチ※²配管についても念のため空気でのフラッシングによる確認を行った。
- SGブローダウンラインについて、その他異物が流入する可能性のあるラインはなく、分岐管含めて網羅的に確認した。



※1 : 外径27.2 mm、内径16.2 mmの配管、※2 : 外径9.53 mm、内径6.23 mmの配管

○ SGブローダウンサンプルラインについて、小型カメラでの点検および空気でのフラッシング※による確認を行った結果、異物は確認できなかった。

小型カメラを用いた点検

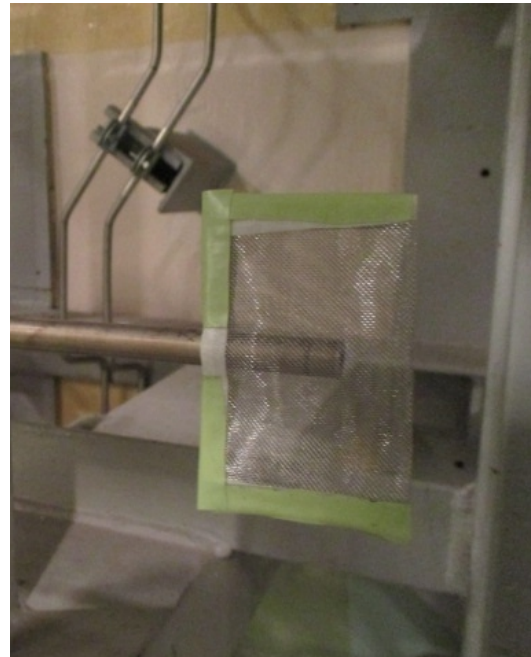
3/4インチ以上の配管（レジャーサ含む）について、小型カメラでの点検を実施した結果、異物は確認できなかった。



(C—SGの例)

空気でのフラッシング

3/8インチ配管（約50m×3ループ）について、空気でのフラッシングによる確認を実施した結果、異物は確認できなかった。



(フラッシングの様子)



(フラッシング後のフィルタ)

※：空気ボンベからホースを用い、圧縮空気を3/8インチ配管に流し込んでフラッシングする方法

今回、ガスケットパッキンと推定する金属片を発見したことから、
故障情報を記録整備の対象としては

- 今回、ガスケットパッキンの小片をSG器内で発見したことを踏まえ、開放時における破損状況の不具合・懸案の観点および異物管理・施工管理を徹底する観点から記録を取得すべきと判断した。
- 以上から、今後機器を開放した時点でガスケットパッキン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とする。

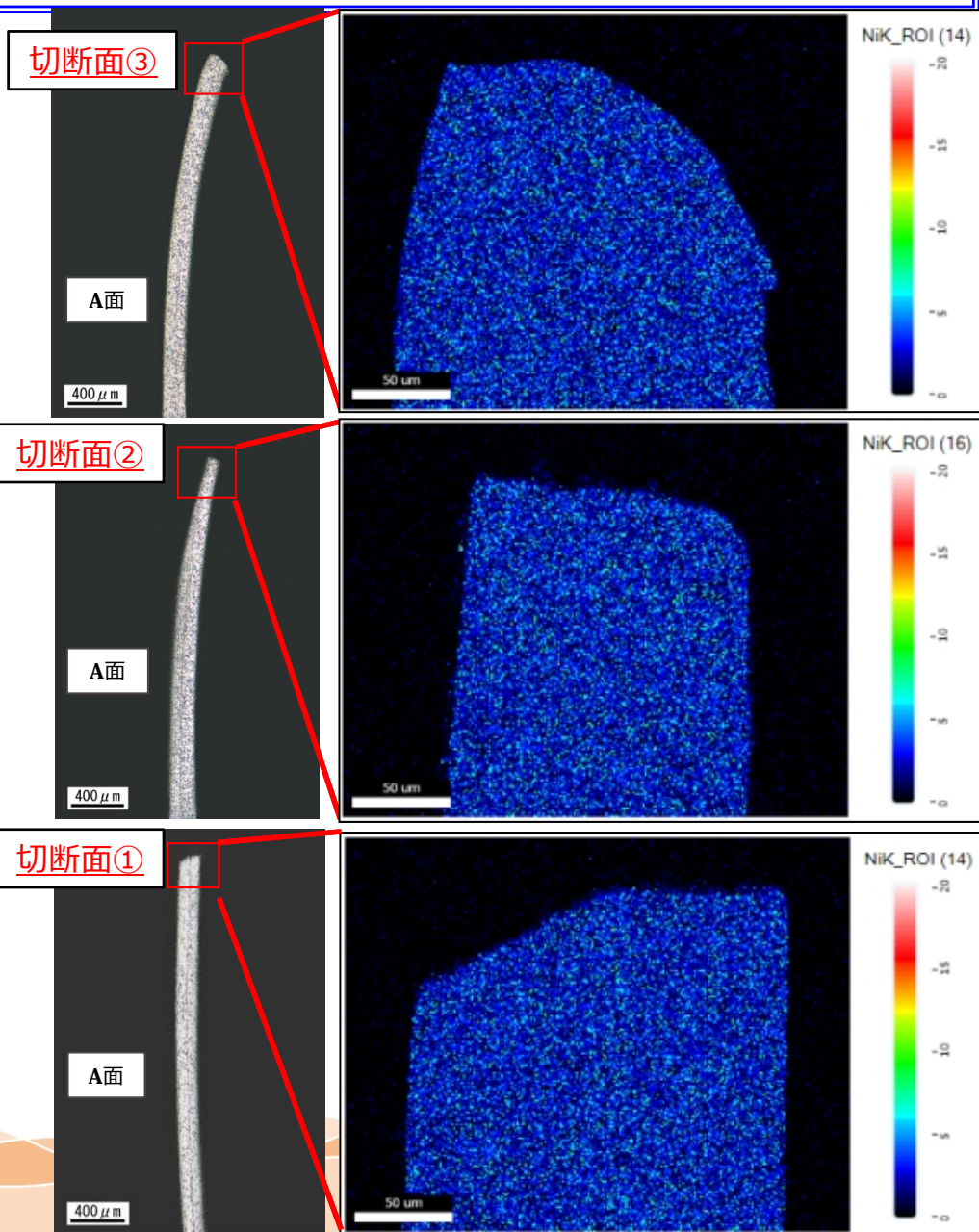
3. 金属片への伝熱管成分付着有無の確認

金属片に伝熱管の成分が付着しているか

- C-SGの金属片の伝熱管と接触したと推定される角部に伝熱管の主成分であるニッケル (Ni) の付着があるかどうかを調査するため、角部を切断して断面の化学分析を実施



- 化学分析の結果、どの切断面においても、表層には伝熱管の成分と考えられるNi成分は検出されなかった。
なお、過去の美浜3号機の異物によるSG伝熱管外面の摩耗減肉事象（2000.9.1損傷確認）のように、原因となった異物の表面の付着物分析を行った結果、スラッジの主成分であるマグネタイト以外は認められなかった事例はある。



5 mm程度のガスケットパッキンを使用している機器を対象に点検を実施中だが、他のサイズのガスケットパッキンを使用している機器の点検要否

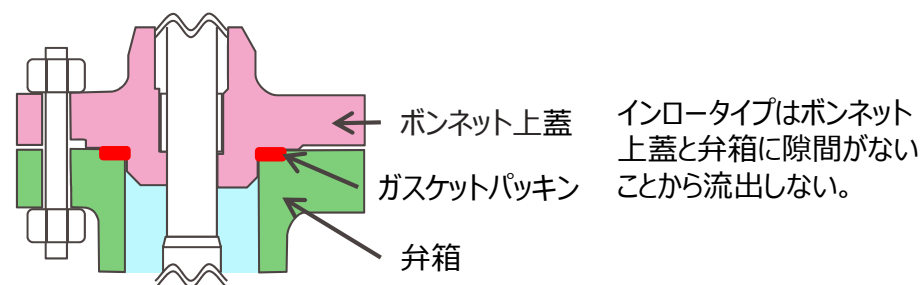
○ ガスケットパッキンが破損し、SGへ流入した場合、サイズを問わず伝熱管を摩耗減肉させる可能性がある。

○ 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3 mm（3.2mm）と約5 mm（4.5mm、4.8mm）である。

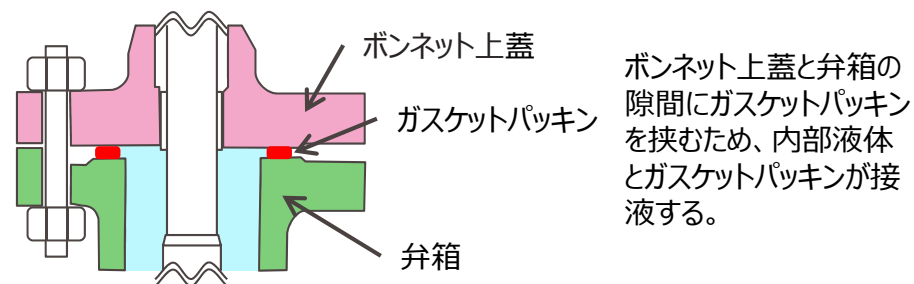
○ 約3 mmのガスケットパッキンは部品同士が噛み合うインロータイプ（構造上流出しない）であり、運転中にガスケットパッキンが破損してもSGへ流入する可能性はない。

○ 以上より、約5 mmのガスケットパッキンを使用している機器に点検を実施したものである。（全て健全であることを確認済）

【インロータイプの構造】



【ガスケットパッキンが接液するタイプの構造】



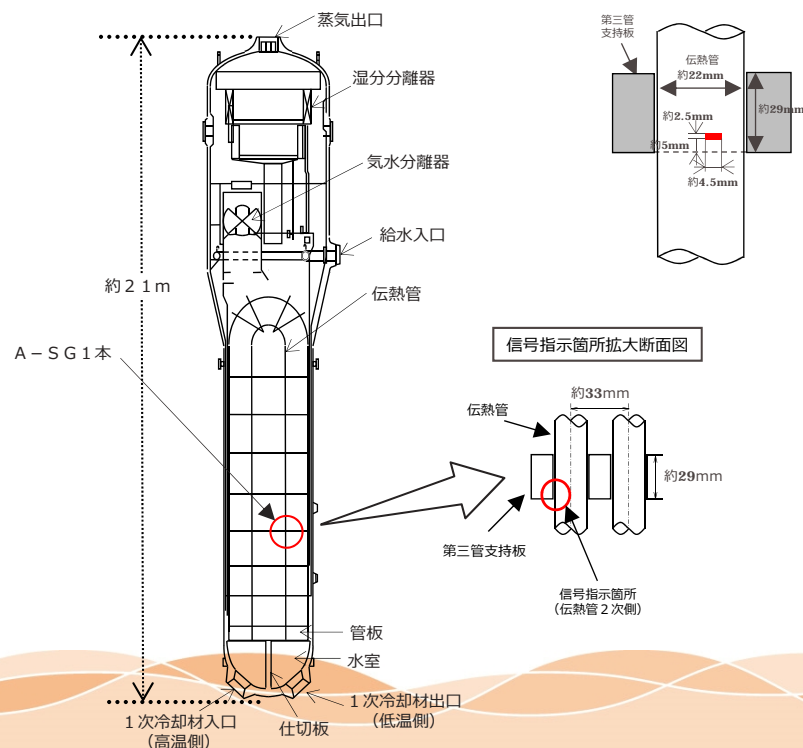
5. A-SGで確認した異物のリスク評価と 前回(23回)定期検査で減肉を確認した伝熱管(X59Y4)を 損傷させた可能性について(1/5)

前回(23回)定期検査時に確認したきずと、 今回確認した金属片に関連性があるか

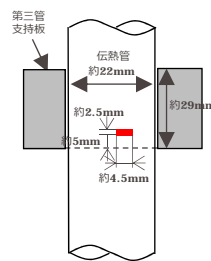
<事象の概要>

- 高浜3号機前回第23回定期検査では、A-SGの第三管支持板下面近傍において有意な信号指示ではないものの、深さ20%未満の微小減肉が認められた。
- 今回第24回定期検査でA-SGより回収した金属片が、前回定期検査で認められた微小減肉の原因である可能性について調査した結果を、次頁以降に示す。

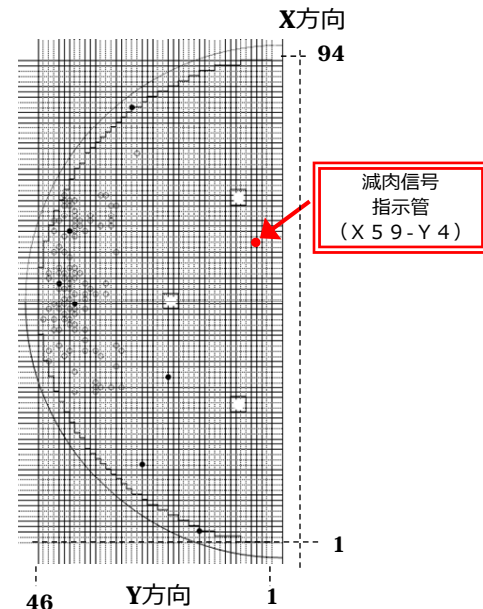
SG伝熱管信号指示箇所概要図



減肉位置状況

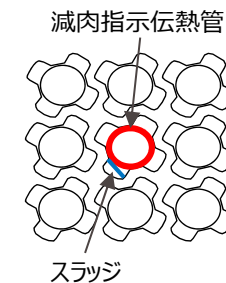


A-蒸気発生器(低温側)上部より 見た伝熱管位置を示す図

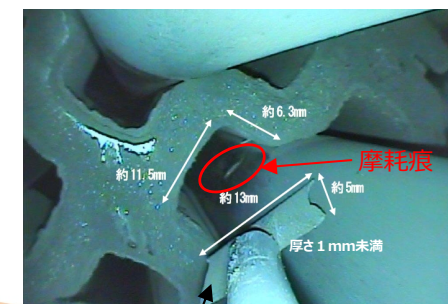


- : 既施設管 (前回微小減肉指示が認められた位置) (1本)
- : 既施設管 (高温側管板部の応力腐食割れ) (7本)
- : 既施設管 (高温側管板部の応力腐食割れ以外) (102本)

信号指示箇所拡大平面図



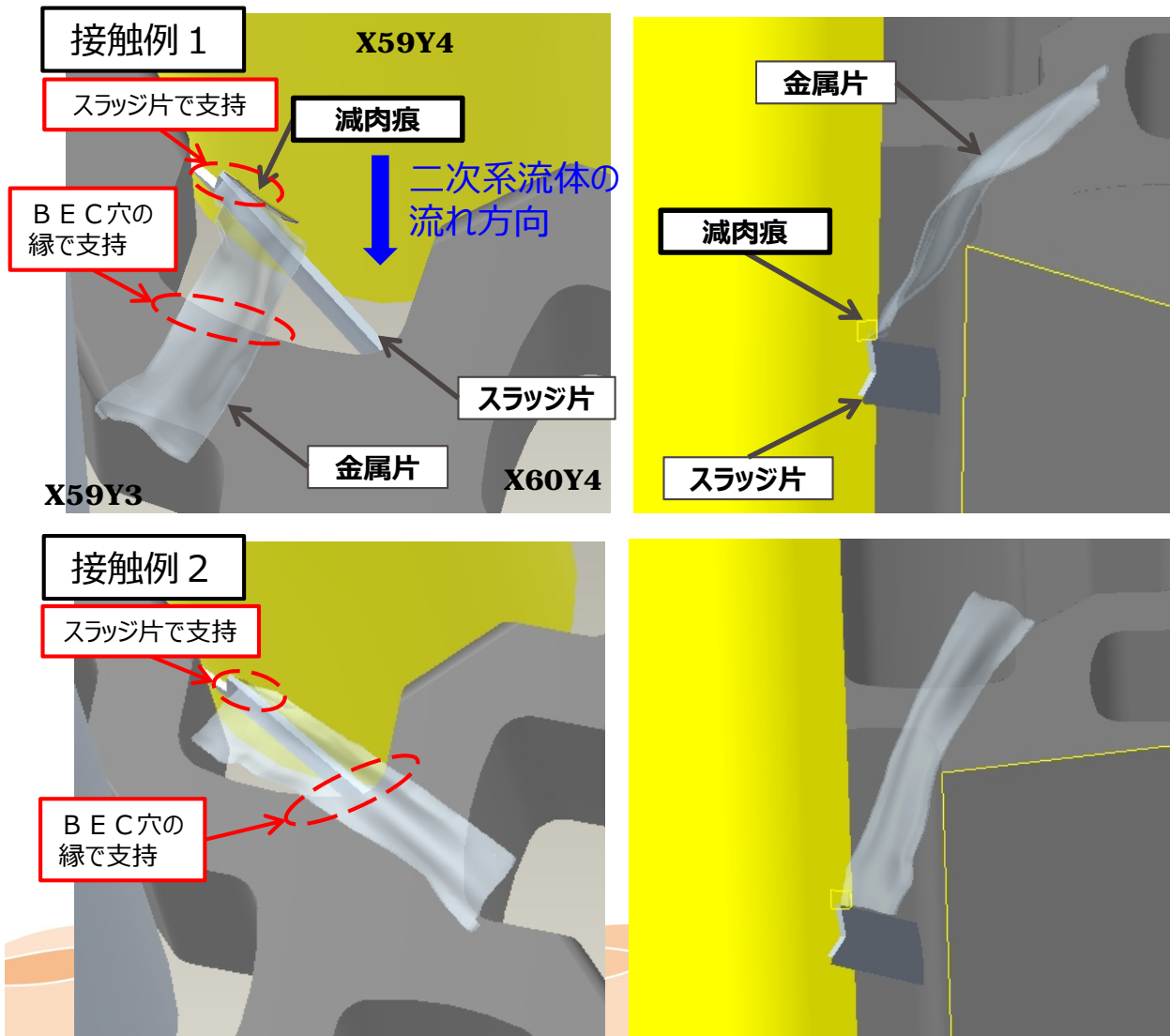
摩耗痕の写真



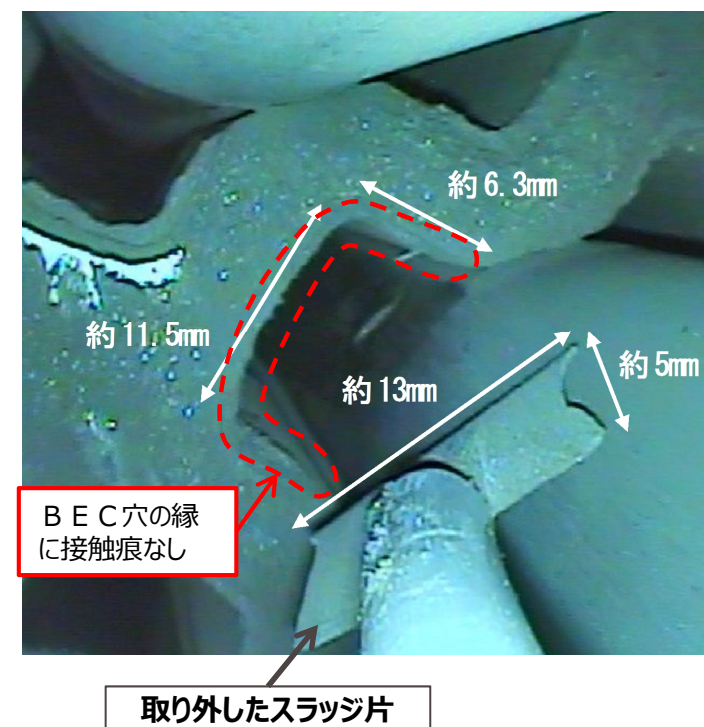
取り外したスラッジ

5. A-SGで確認した異物のリスク評価と 前回（23回）定期検査で減肉を確認した伝熱管（X59Y4）を 損傷させた可能性について（2/5）

- A-SGの金属片が前回定期検査で認められた減肉痕の位置（BEC穴下面よりも約5mm上側）で伝熱管と接触するには、金属片が管支持板BEC穴の縁で支持される姿勢（接触例1もしくは2）をとる必要があるが、当該BEC穴周辺に接触痕は認められていない。
- 従って、当該金属片が前回の減肉事象の原因である可能性は低いと考える。



前回定期検査で減肉痕が認められた伝熱管周辺の管支持板の外観



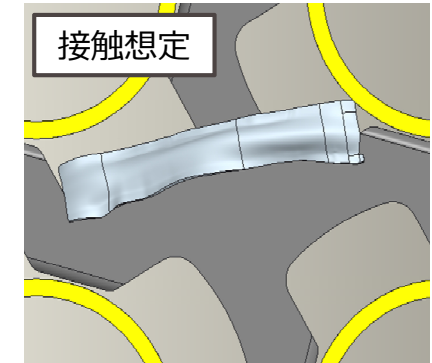
5. A-SGで確認した異物のリスク評価と 前回（23回）定期検査で減肉を確認した伝熱管（X59Y4）を 損傷させた可能性について（3/5）

A-SGで確認した金属片が伝熱管にきずを付けた場合、 どの程度のリスク（影響）があったのか

- A-SGでは今回有意な信号指示は検出されなかったが、ここでは、A-SGで発見した金属片が伝熱管に減肉を与えた場合を想定し、その最大減肉深さを評価する。
- また、最大深さの減肉を有する状態での伝熱管の健全性（強度・耐震性）を評価する。

①伝熱管との接触状態の想定

・金属片の形状、重量から、金属片はSG器内を上昇流で浮き上がり、運転中は管支持板下面で保持された状態で伝熱管と接触すると想定（右図）



②摩耗形態の選定

- ・金属片と伝熱管のどちらの振動で有意な摩耗減肉が生じるかを確認
- ・両者の摩耗の仕事率（ワークレート）を解析により算出した結果、金属片振動ではワークレートは小さく有意な摩耗減肉は発生しないことを確認
- ・一方、伝熱管振動では金属片振動に比べて十分大きなワークレートが得られることを確認

③最大減肉深さの評価

- ・②の摩耗形態で生じうる最大の減肉深さを評価

④伝熱管健全性の評価

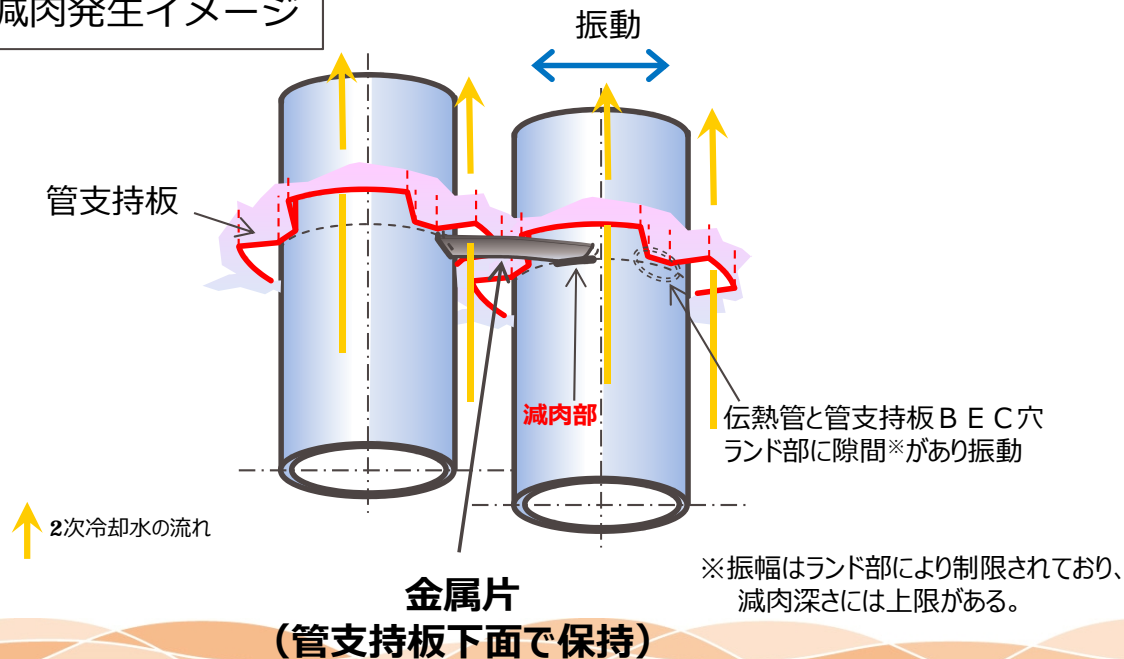
- ・③の最大減肉深さでの伝熱管の強度・耐震性の評価を実施

5. A-SGで確認した異物のリスク評価と 前回（23回）定期検査で減肉を確認した伝熱管（X59Y4）を 損傷させた可能性について（4/5）

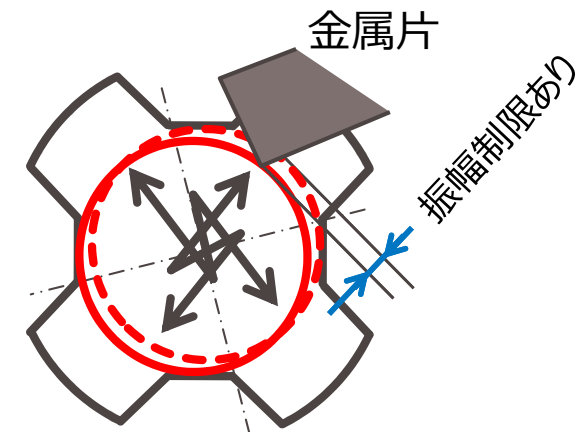
③最大減肉深さの評価

- 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があるため、減肉深さにも上限がある。
- その結果、減肉深さには上限があり、貫通には至らないことを確認した。

減肉発生イメージ



減肉深さ制限イメージ



5. A – S Gで確認した異物のリスク評価と 前回（23回）定期検査で減肉を確認した伝熱管（X59Y4）を 損傷させた可能性について（5 / 5）

④伝熱管の健全性評価結果（強度）

想定される最大減肉深さを有する伝熱管の破断圧力は、通常運転時および事故時に伝熱管に作用する最大内外差圧に対して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）

想定される最大深さの減肉を考慮しても、地震時に発生する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。

3号機と4号機での異物管理の違いは

○ 異物管理の違いについては下表のとおりであり、3号機と4号機の差は下線で示した内容である。

	従前の対策 (高浜3号機第22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"> 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)。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 【補足】 高浜3号機前回(23回)では、SG水張ラインからはSGに移動しないと評価していたため、対策の対象外としていた。 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。
垂直配管取付弁	<ul style="list-style-type: none"> 最終異物確認は直接目視にて実施(手鏡等を使用) 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、ファイバースコープで確認する。【自主対応】 	<ul style="list-style-type: none"> 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。 最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、ファイバースコープで確認する。 ウエスは、新ウエスを使用する。 新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。
その他	—	—	<ul style="list-style-type: none"> 保温材の切れ端等の清掃・片づけは一作業一片づけを徹底し、作業服、靴の異物付着確認を行う。 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。

7. 今回（24回）定期検査で確認したスラッジと 4号機前回（22回）定期検査で確認した金属片の映像比較

金属片の場合とスラッジの場合の写真の写り方について比較すること

- 4号機前回（22回）定期検査で確認した金属片の写真と、3号機今回（24回）定期検査でのスラッジ写真を示す。
- スラッジか否かの判断は、形状（厚み、R形状など）および金属光沢により実施しており、スケールであれば伝熱管から剥がれ落ちたものであるため、直線あるいは瓦状の形状を有しており、金属光沢は見られない。
- 金属片（異物）とスラッジの違いは小型カメラにより十分判別できると考えているが、判断に迷った場合は回収して確認している。

4号機22回定期検査
金属片



4号機22回定期検査
スラッジ



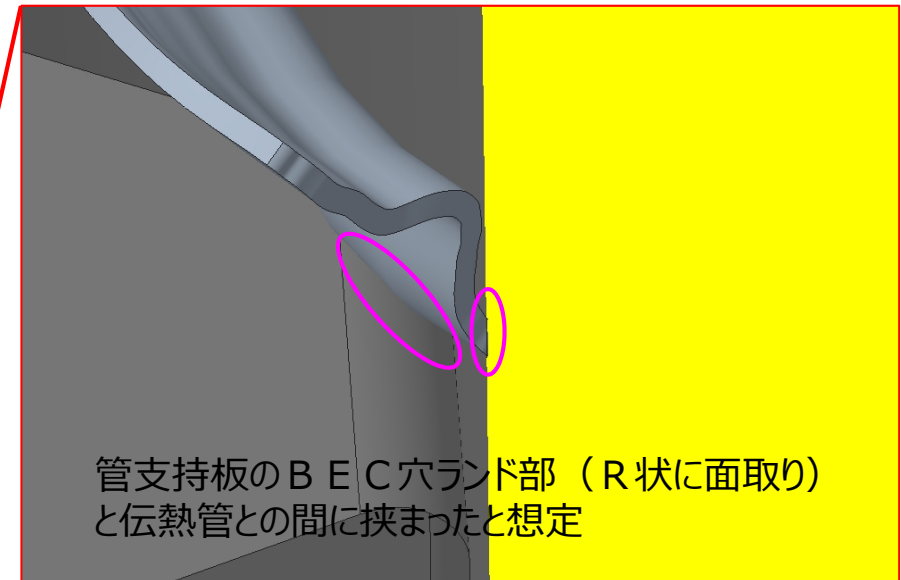
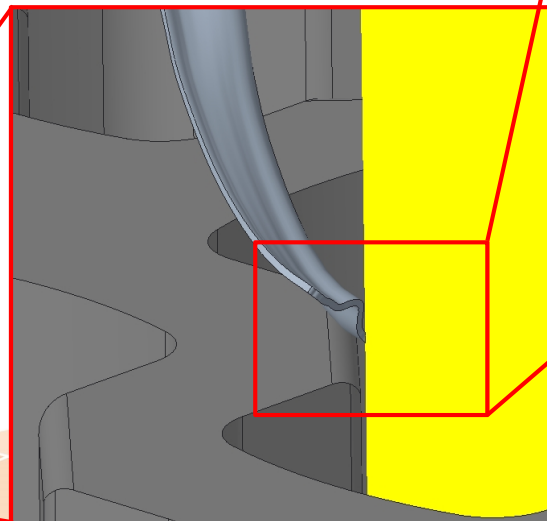
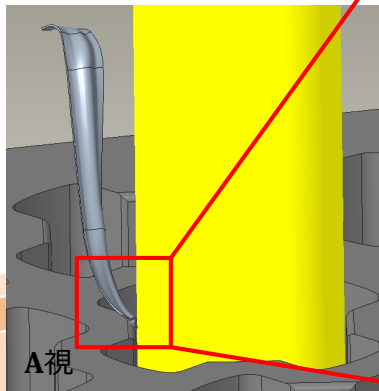
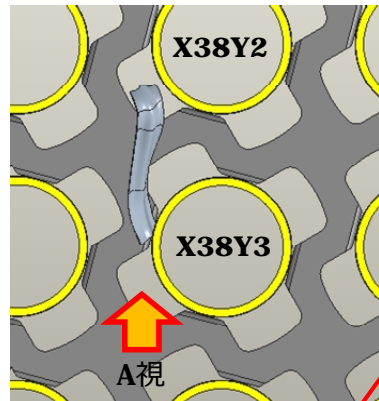
3号機24回定期検査
スラッジ



8. C-SGで確認した金属片が X38Y2に支持されない場合に減肉するか

減肉メカニズムの検証において、金属片の片側が拘束されない状況下で 金属片が伝熱管（X38Y3）に固定されるのか

- 管支持板B E C穴のランド部は、角部にR状の面取りが施されており、また、ランド部と伝熱管の間には隙間がある。
- 金属片の厚みは約**0.2mm**であることから、幾何学的にこの隙間に挟まることが可能であり、またランド部の角部はR状であることから、金属片は管支持板に対して角度を持った状態で挟まることが可能である。
- 従って、C-SGで回収した金属片については、高浜4号機前回（22回）定検で想定された異物のように、流体力の作用で管支持板表面に押さえつけられなくとも、端部がB E C穴ランド部と伝熱管の隙間に挟まった状態で支持され、管支持板下面に保持された可能性もあると考えられる。



ガasketパッキンの交換時に古いものを外すが、
その際に一部切れることや、処分の際に細断し混入する可能性はないか

〈現場作業聞き取り調査結果〉

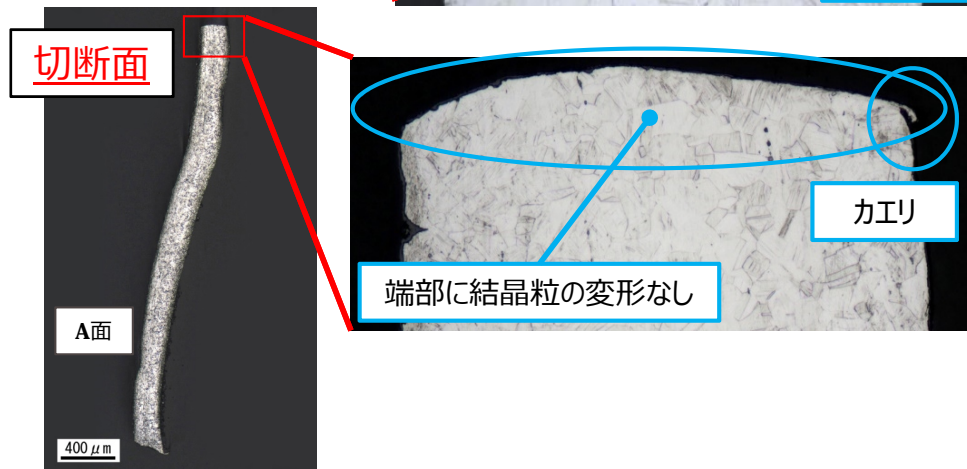
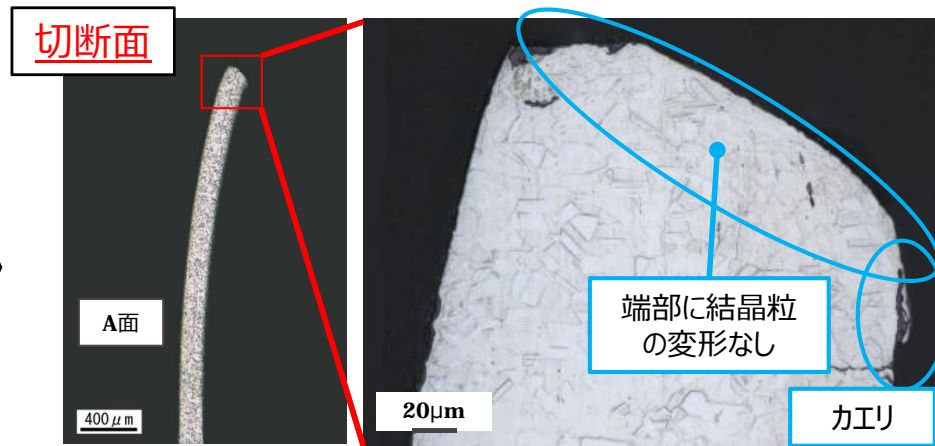
- ガasketパッキンは機器に固着し剥がれにくい場合もあるが、その際はスクレパー（ヘラ）やニッパーを使用し取り外しを行っている。その際にフープが外れ広がることはあるが短く切断することはない。
- ガasketパッキンについては、分解点検の都度新品に交換することから使用済のガasketパッキンは廃棄することとなる。
- 使用済ガasketパッキンはそのままの形で廃棄しており、作業現場（開口部）で廃棄のために細断することはない。

⇒使用済ガasket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ものの、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発生した可能性は否定できない。

なお、回収した金属片がニッパーにより細断されたものでないことは、次頁の通り確認を行った。

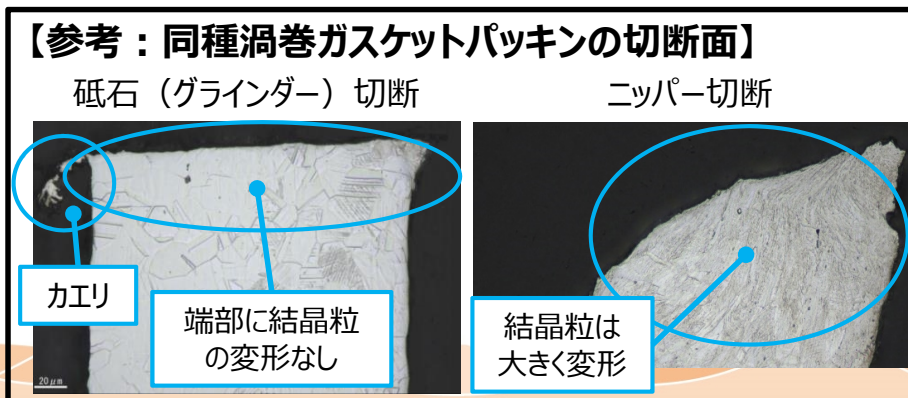
9. ガスケットパッキングが異物になり得る作業の有無 (2/2)

○ 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



以降、7月22日公開会合資料抜粋

資料 1

高浜発電所3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について

2. 原因調査 (SG器内発生物・SG器外流入物の調査 1/3)

資料1

9

19

SG器内の管板、流量分配板、第一および第二管支持板の上面の全ての範囲ならびに第三管支持板の下面の減肉指示を確認した伝熱管周辺部についてカメラによる目視点検を実施した。

- 伝熱管から剥離したスケール（以下、スラッジという。）をSG器内の各所で確認した。
- A-SGの流量分配板上（X54-55、Y44）にて金属片を確認した。
- C-SGの流量分配板上（X2-3、Y5-6）にて金属片を確認した。
なお、C-SGの金属片を確認した位置は、減肉を確認した位置から約3.5m下方、約1.2m半径方向に離れた場所であった。
- B-SG器内にはスラッジ以外の異物はなかった。

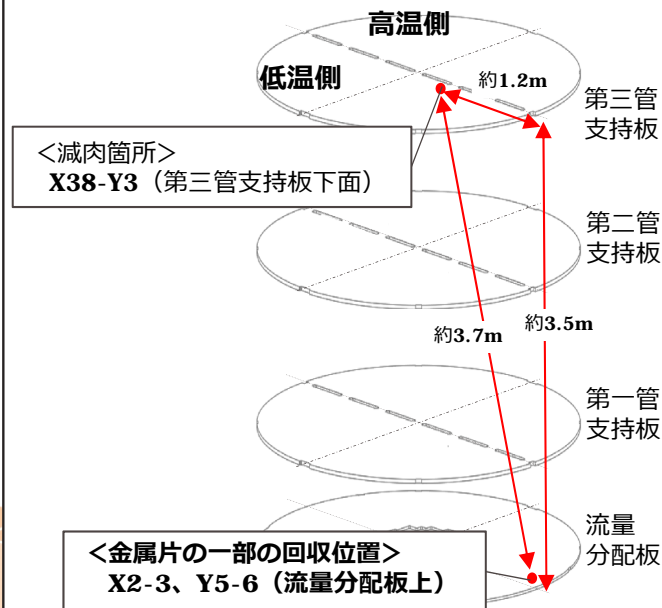
スラッジ確認結果の例

(A-SG 第一管支持板上)



スラッジ

C-SG伝熱管の減肉箇所と
金属片の回収位置



金属片の観察結果の例

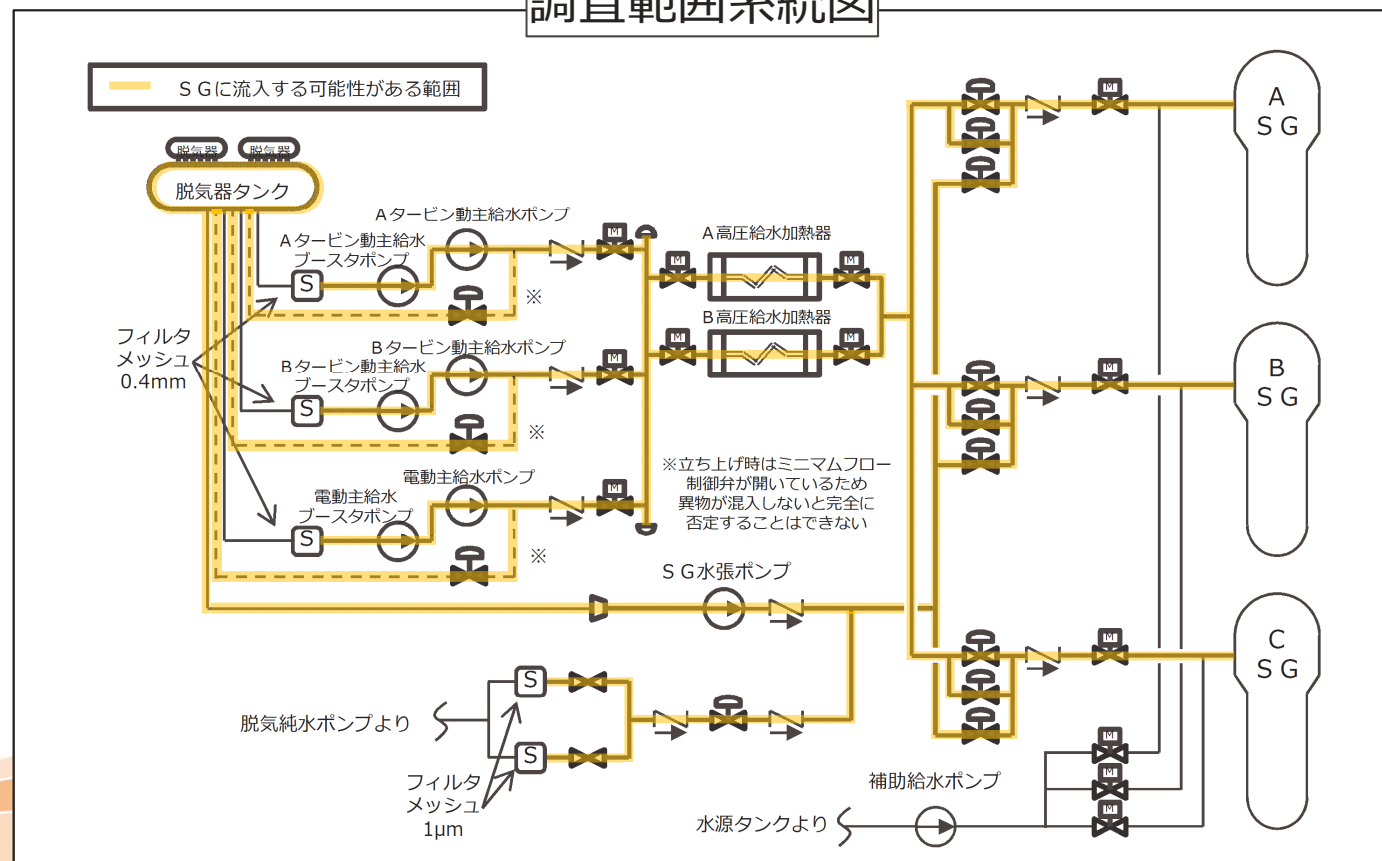


2. 原因調査（金属片の発生源調査結果）

A-SGおよびC-SG器内に金属片（うず巻きガスケットの一部と推定）が確認されたことから、その発生源を調査した。

- 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
ブースタポンプ入口フランジ



内径：約500mm

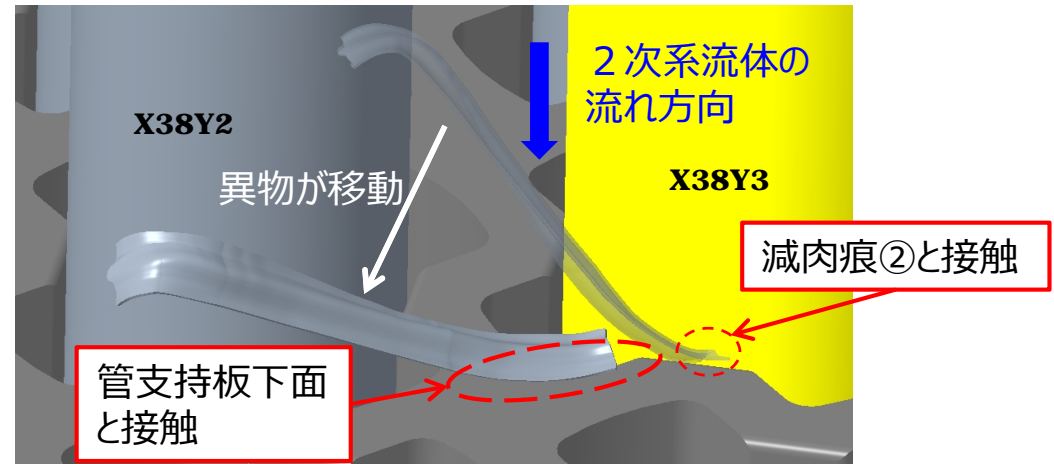
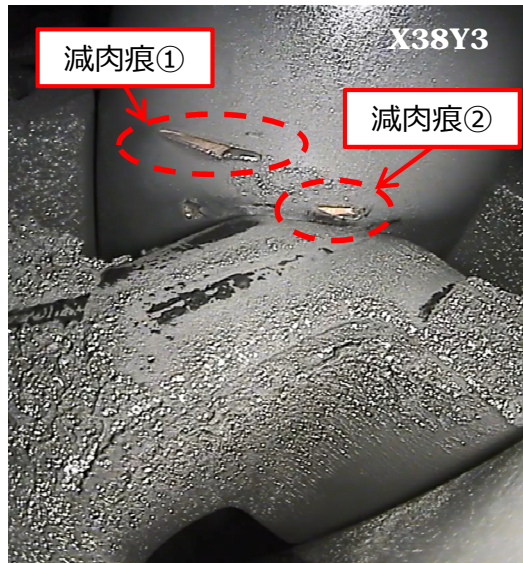
主給水制御弁バイパス管
フローノズル前管台フランジ



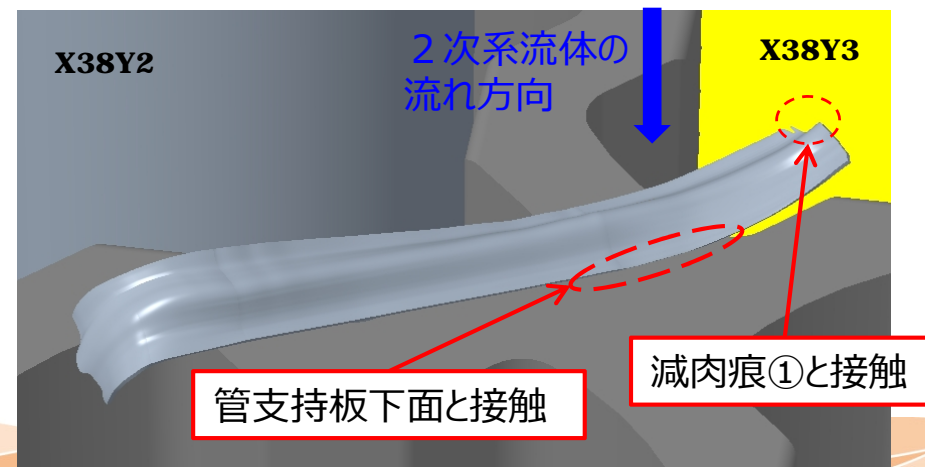
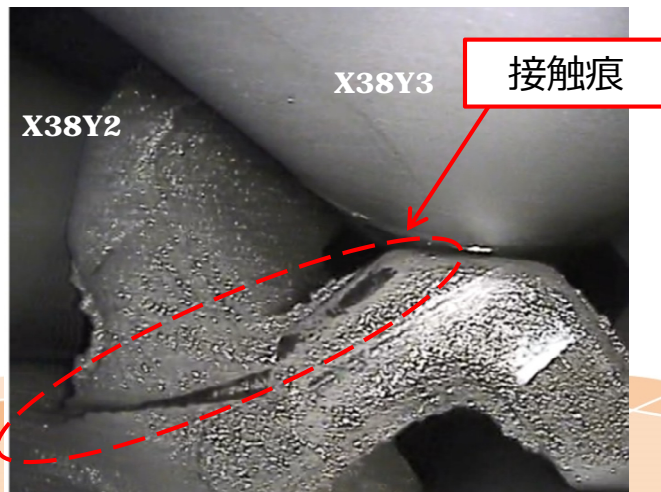
内径：約100mm

3. 減肉メカニズム (①減肉痕との接触状態の推定)

- 次の通り、C-SGの金属片が2箇所での減肉痕と接触するには、2つの姿勢をとる必要があると推定。
- 最初に金属片の角部が②の位置で接触（伝熱管と管支持板の隙間に挟まり拘束）し、管支持板に対して角度を持った姿勢が維持された。
 - ②の位置で減肉深さが進展すると金属片の拘束は緩和され、金属片はより安定な姿勢（管支持板下面に張り付く状態）に変化し②の減肉痕を与えた角部が①の位置に接触位置を変えた。

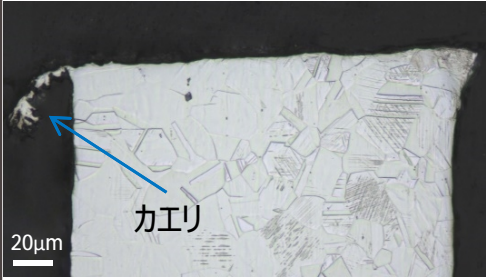
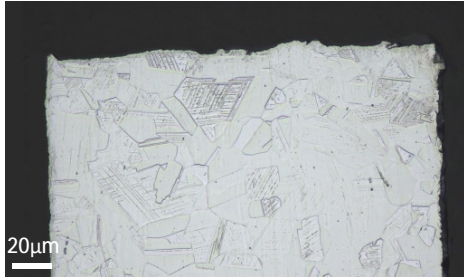
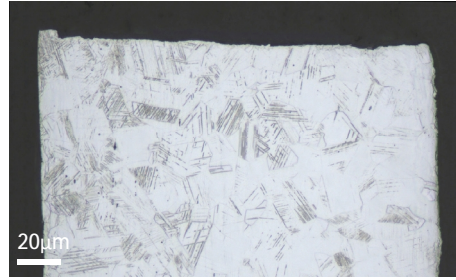
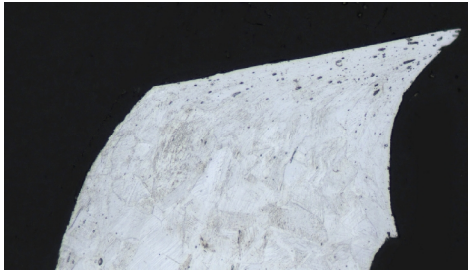
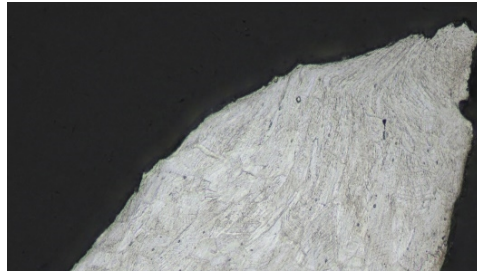
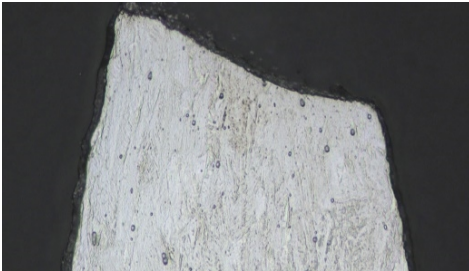
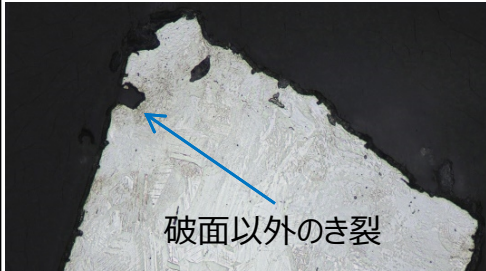


1. 減肉痕②と接触した状態から、伝熱管/管支持板の拘束が外れた状態へと変化



2. 流体力により安定した姿勢となった状態 (減肉痕①と接触した状態)

○ 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"> 塑性変形の痕（結晶粒の変形）は認められない 切断時にカエリが残る場合あり 	<ul style="list-style-type: none"> 塑性変形の痕（結晶粒の変形）は認められない 疲労評価の結果、可能性低※ 	<ul style="list-style-type: none"> 塑性変形の痕（結晶粒の変形）は認められない 疲労評価の結果、可能性低※ 	<ul style="list-style-type: none"> 切断方向に曲がり、板厚が減少 破面一帯に塑性変形の痕（結晶粒の変形）あり 	<ul style="list-style-type: none"> 破面は全体的に大きく変形 切断方向に曲がり、板厚が減少 破面一帯に塑性変形の痕（結晶粒の変形）あり 	<ul style="list-style-type: none"> 破面は全体的に大きく変形 破面一帯に塑性変形の痕（結晶粒の変形）あり 	<ul style="list-style-type: none"> 破面に局所的な凸凹あり 曲げによる塑性変形の痕（結晶粒の変形）あり 破面以外にもき裂あり 

※ 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