

## 関西電力株式会社からの高浜発電所 4 号機 蒸気発生器伝熱管の損傷に係る報告内容について

令和 3 年 2 月 2 4 日  
原子力規制庁

### 1. 経緯

関西電力株式会社（以下「関西電力」という。）は、第 2 3 回定期検査中の高浜発電所 4 号機において、3 台の蒸気発生器（以下「SG」という。）の全ての伝熱管<sup>1</sup>に対して渦流探傷試験（ECT）<sup>2</sup>を実施したところ、A-SG の伝熱管 1 本及び C-SG の伝熱管 3 本の管支持板部<sup>3</sup>付近に、外面（2 次側）からの減肉とみられる有意な信号指示が認められた。なお、本事象に伴う外部への放射能の影響はなかった。

関西電力は、令和 2 年 1 1 月 2 0 日、本事象が実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第 1 3 4 条第 3 号に定める報告事項<sup>4</sup>に該当すると判断し、原子力規制委員会に報告した<sup>5</sup>。

原子力規制庁は、関西電力から本事象の原因と対策に関する報告<sup>6</sup>を令和 3 年 1 月 2 5 日（同年 2 月 1 9 日補正）に受けた。

令和 3 年 2 月 1 0 日第 5 6 回原子力規制委員会において、本件の推定原因について報告するよう指示があったことから、同年 2 月 5 日及び 1 6 日の原子力施設等における事故トラブル事象への対応に関する公開会合で関西電力から説明を受けた資料により報告するものである。

以上

### 添付資料

- 別添 1：原子力施設等における事故トラブル事象への対応に関する公開会合及び面談資料抜粋（第 1 5 回資料 1-1、第 1 6 回資料 1、面談資料）
- 別添 2：第 1 5 回原子力施設等における事故トラブル事象への対応に関する公開会合資料 1-1「高浜発電所 4 号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について（概要版）」
- 別添 3：第 1 6 回原子力施設等における事故トラブル事象への対応に関する公開会合資料 1「高浜発電所 4 号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について（実機によるスケール脆弱化効果の確認結果のご報告および 2 月 5 日公開会合でのご質問回答）」

<sup>1</sup> 材料はニッケル基合金（インコネル 6 0 0 合金）を使用している。

<sup>2</sup> 高周波電流を流したコイルを伝熱管に挿入することで伝熱管に渦電流を発生させ、伝熱管の欠陥により生じる渦電流の変化を電気信号として取り出すことで欠陥を検出する試験。

<sup>3</sup> 伝熱管を支持する部品。

<sup>4</sup> 「実用発電用原子炉及びその附属設備の技術基準に関する規則第 1 8 条及び第 5 6 条に適合していないと認められたとき」に該当すると判断。

<sup>5</sup> 令和 2 年 1 1 月 2 5 日原子力規制委員会「原子力施設等におけるトピックス」参照。

<sup>6</sup> 報告の詳細は「[https://www.nsr.go.jp/activity/bousai/trouble/houkoku\\_new/220000041.html](https://www.nsr.go.jp/activity/bousai/trouble/houkoku_new/220000041.html)」を参照。

原子力施設等における事故トラブル事象への対応に  
関する公開会合及び面談 資料抜粋  
(第15回資料1-1、第16回資料1、面談資料)

# 1. 事象の概要 (減肉伝熱管 2次側からの確認結果)

E C Tで減肉とみられる信号指示が認められた伝熱管を、2次側から小型カメラにて点検した結果、摩耗減肉痕とみられる箇所を確認した。なお、E C Tの信号指示による位置およびサイズと相違はなかった。

また、A - S G (X51,Y4) およびC - S GのうちX55,Y3の信号指示部付近において付着物を確認したことから、付着物を回収した。

○ A - S G

第三管支持板：長さ約4.0mm、幅 1.0mm以下 (X51,Y4) 減肉率：約33%

○ C - S G

第三管支持板：長さ約2.0mm、幅約1.0mm (X55,Y3) 減肉率：約25%

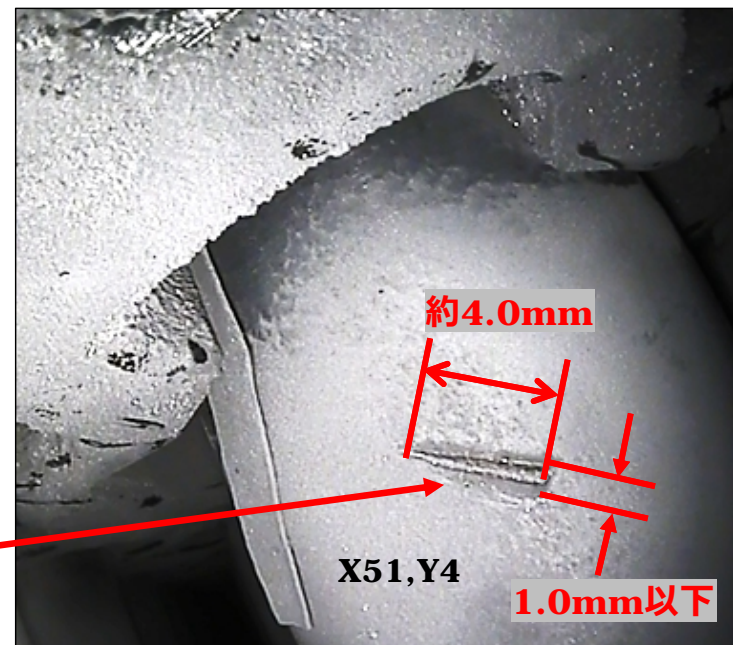
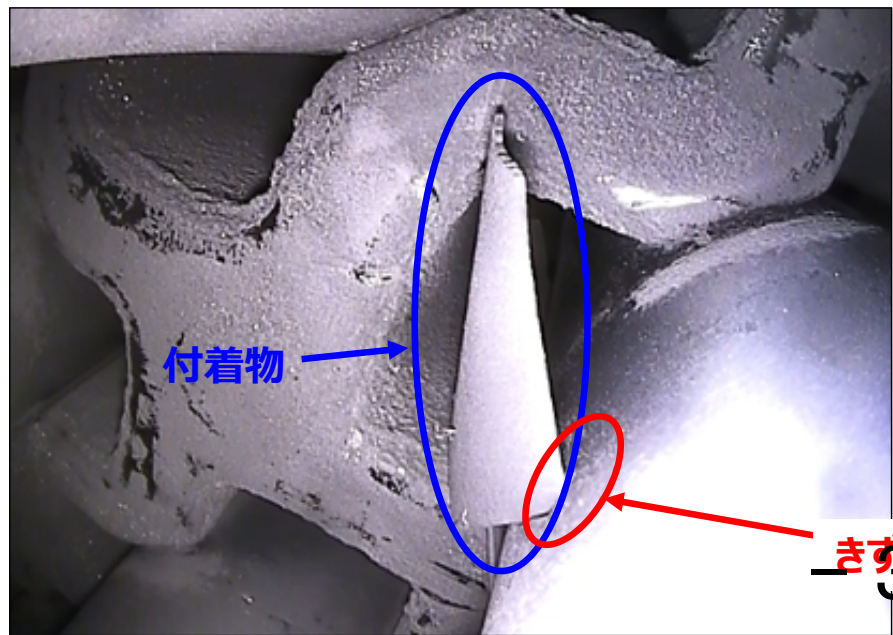
第三管支持板：長さ約6.0mm、幅 1.0mm以下 (X55,Y8) 減肉率：約32%

第三管支持板：長さ約7.0mm、幅 1.0mm以下 (X21,Y8) 減肉率：約36%

A - S G ( X 5 1 , Y 4 )

付着物回収前

付着物回収後

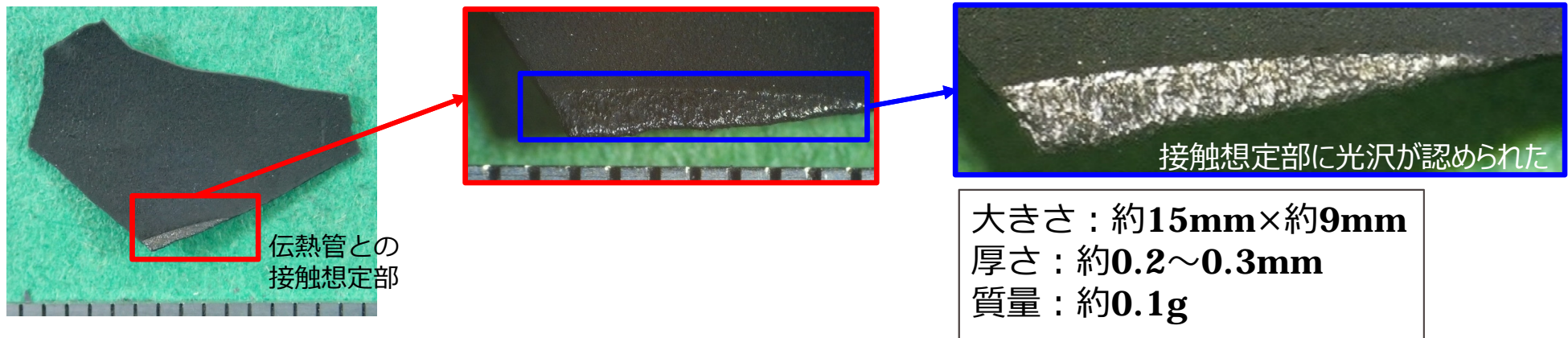


きず  
3

< A - S Gで確認した付着物（X51, Y4 第三管支持板下面） >

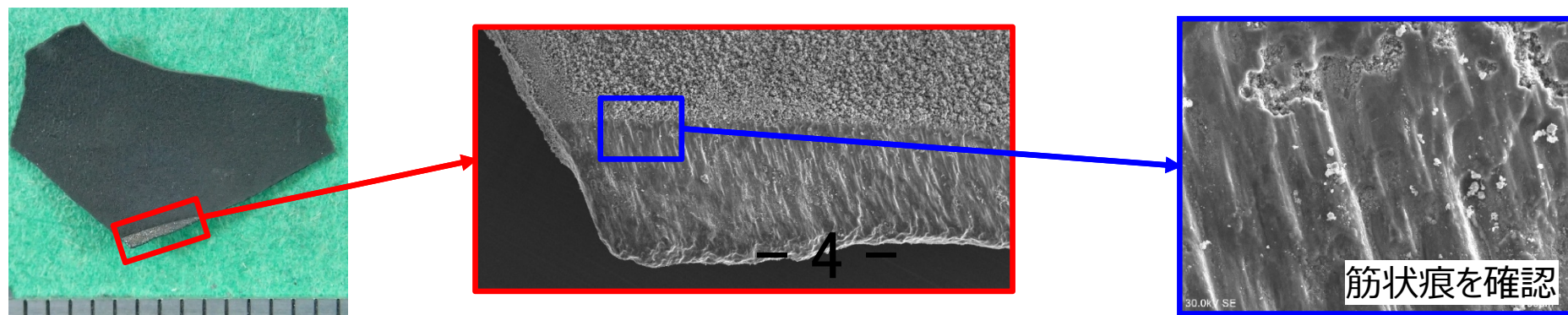
### ① 外観観察結果

- 伝熱管減肉部と付着物の接触想定部（角部）には、接触痕があり、光沢が認められた。
- 形状（**R**形状）を計測した結果、直径約22.5mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。



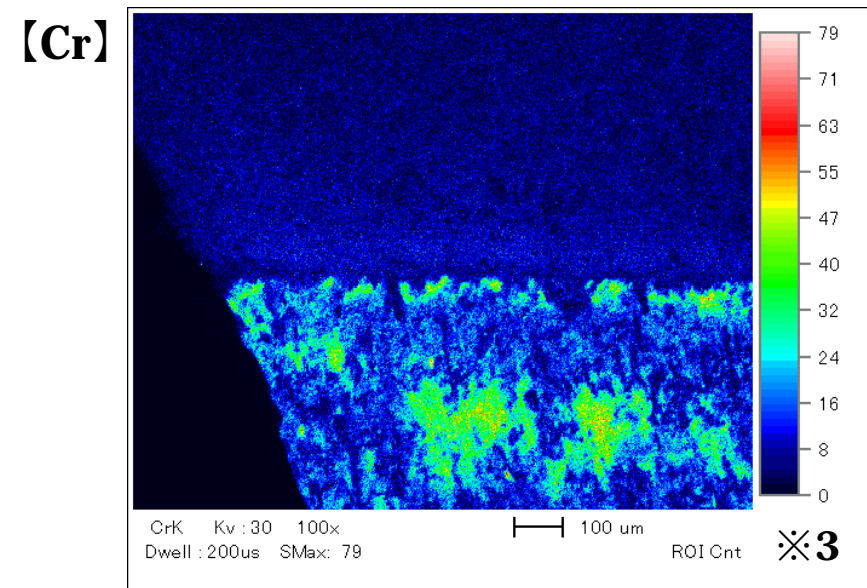
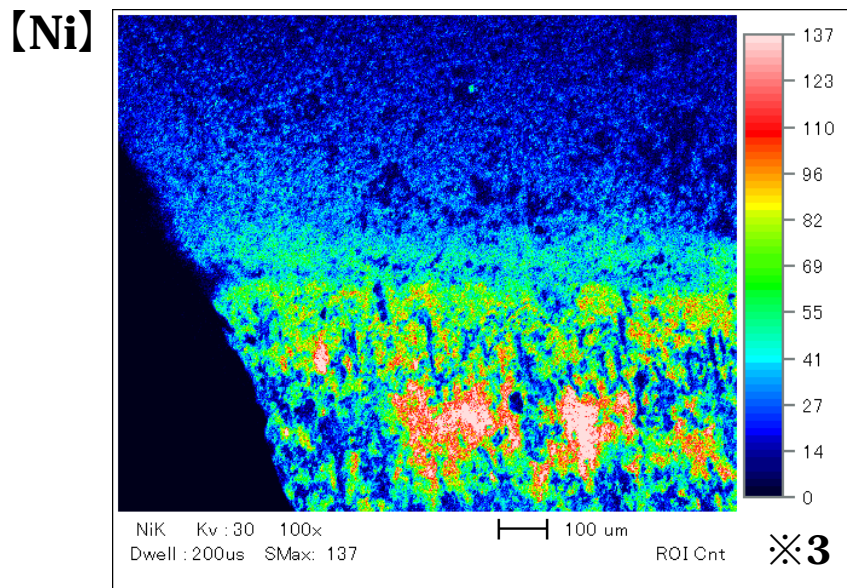
### ② 走査型電子顕微鏡による観察（以下、SEM観察）

- 接触想定部（角部）を拡大観察した結果、筋状痕を確認した。



### ③ 成分分析（X線回折※1、EDS※2）

- 表面の化学成分分析を実施した結果、中央部の主成分が酸化鉄（主にマグネタイト）であったことから、スケールであると推定した。（以下、スケールA）
- 接触想定部（角部）の成分分析した結果、伝熱管の母材のNiおよびCrの成分を検出した。

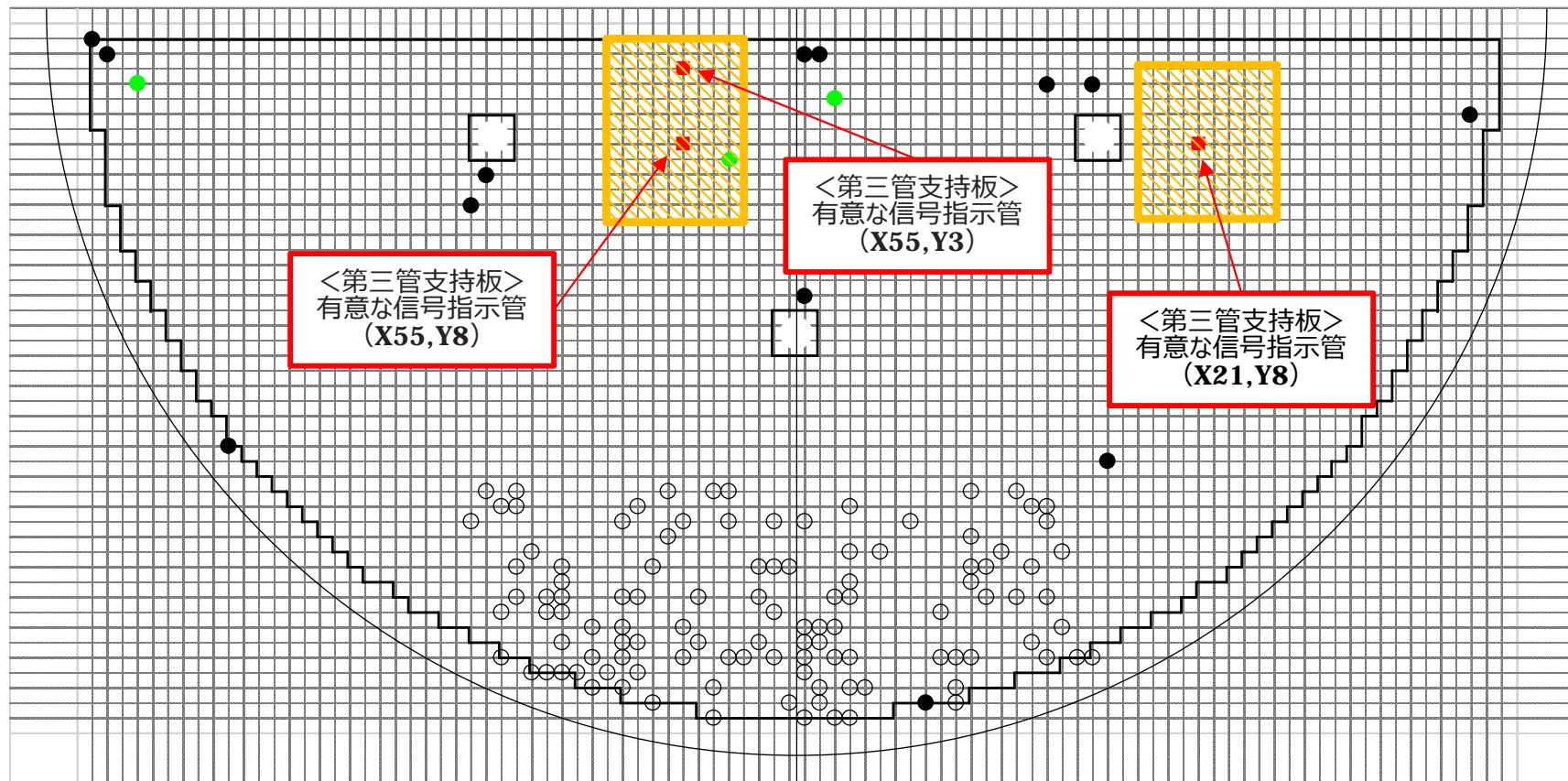


※1：試料にX線を照射し、X線の散乱・干渉を解析することで、構成成分の同定をする分析方法

※2：エネルギー分散型X線分析（**Energy Dispersive X-ray Spectroscopy**）のこと。電子線照射により発生する特性X線のエネルギーと強度から構成元素を分析する装置

※3：分析した成分のX線の反射強度での、1秒当たりのX線カウント数（含有元素の濃度が高いほど大きくなる）

○ C - S G 伝熱管の減肉を発生させたと考えられる異物等を発見していないことを踏まえ、C - S G の減肉を確認した伝熱管を中心にXおよびY方向に約 10 列ずつを範囲として、減肉箇所下方の第二および第一管支持板上にあるスケールを約 300 個回収し、確認した。



凡例

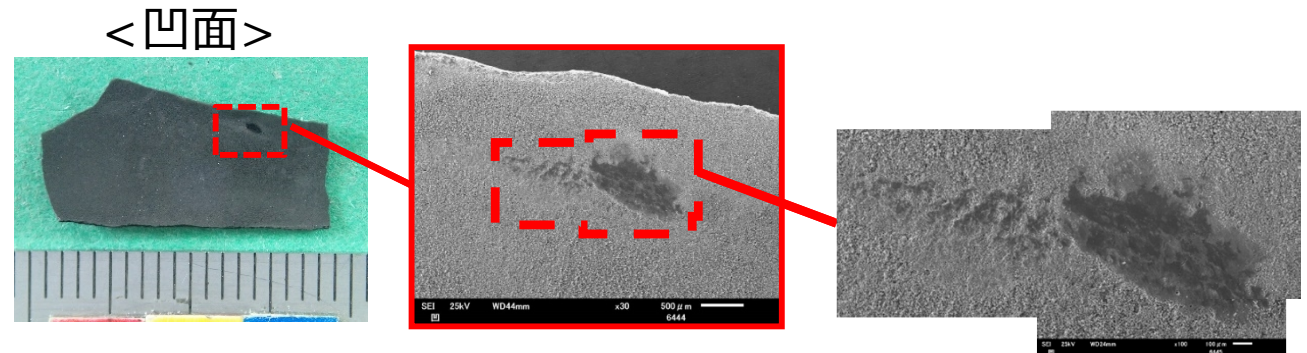
<span style="color: red;">■</span> : 有意な信号指示管	<span style="color: green;">●</span> : 既施栓箇所（外面減肉）	<span style="color: black;">●</span> : 既施栓管（拡管部応力腐食割れ）
<span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; padding: 2px;">○</span> : 既施栓管（拡管部応力腐食割れ以外）	<span style="background-color: yellow; border: 1px solid black; padding: 2px;">▨</span> : スケール回収範囲	

減肉が認められたX55,Y8の第三管支持板部の下方、X54-55,Y3第二管支持板上面で回収したスケール（以下、スケールC2）を分析した結果は、次のとおりである。

### ① 外観観察結果

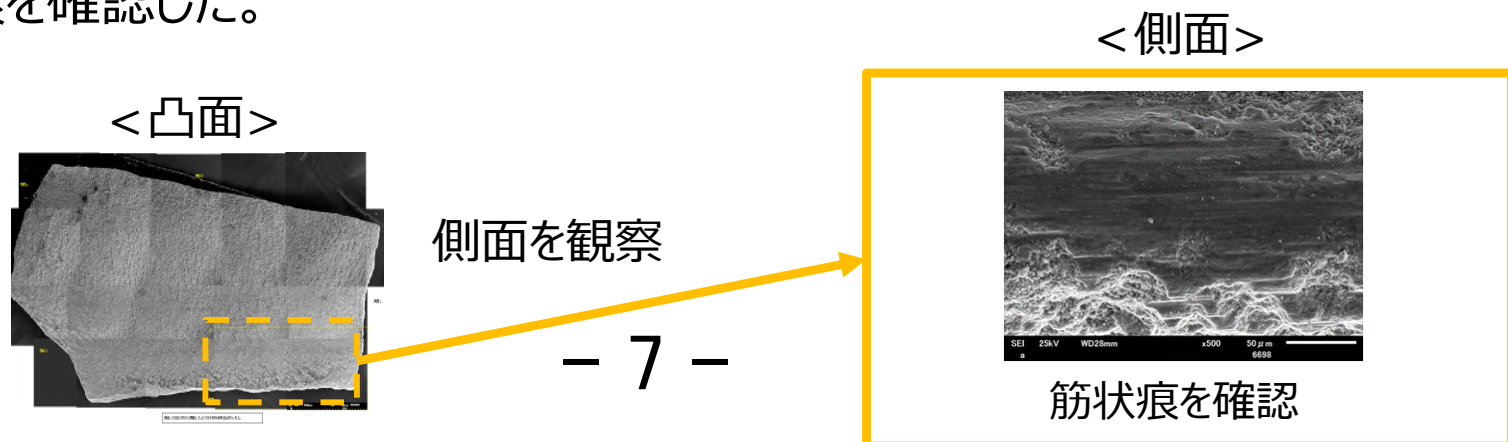
- スケールC2の表面を観察した結果、凹面の一部に接触痕を確認した。また、側面にも一部に接触痕を確認した。形状（R形状）を計測した結果、直径約22.3mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。

大きさ：約18mm×約10mm  
厚さ：約0.3mm  
質量：約0.19g



### ② SEM観察結果

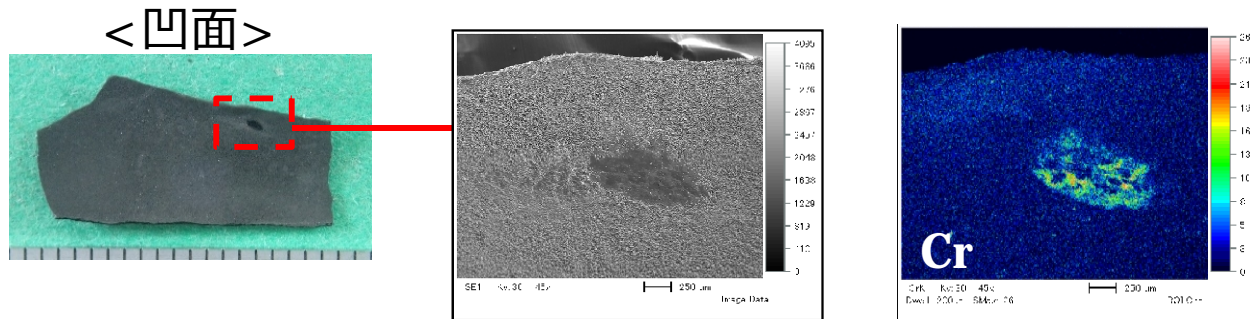
- 拡大観察した結果、凹面の接触痕には筋状痕が確認できなかったものの、側面の接触痕では筋状痕を確認した。



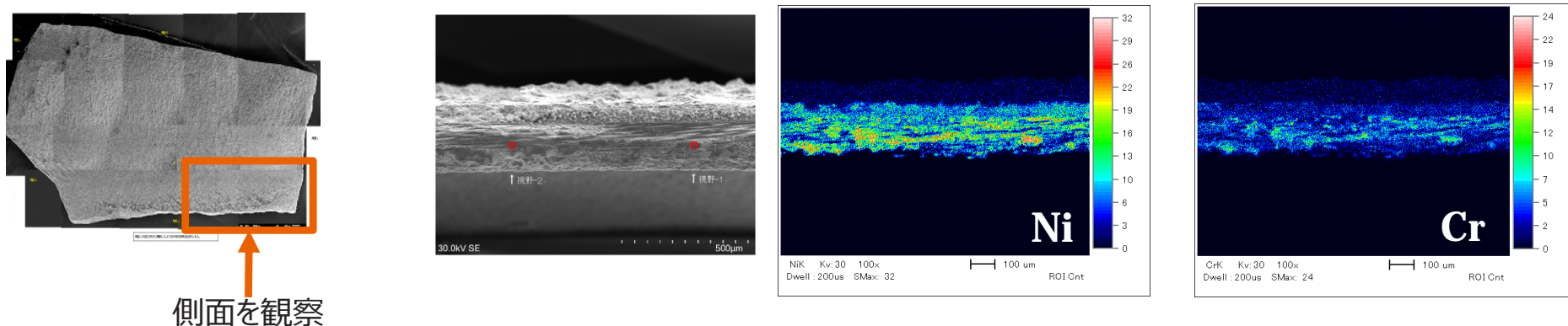
## ③ 成分分析（X線回折※1、EDS※2）

○スケールC 2凹面の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析を実施した結果、管支持板（SUS405）の主成分であるCr成分を検出した。

※1：試料にX線を照射し、X線の散乱・干渉を解析することで、構成成分の同定をする分析方法  
 ※2：エネルギー分散型X線分析（Energy Dispersive X-ray Spectroscopy）のこと。電子線照射により発生する特性X線のエネルギーと強度から構成元素を分析する装置



○スケールC 2側面の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析の結果、伝熱管（インコネル600）の主成分であるNi成分とCr成分を検出した。



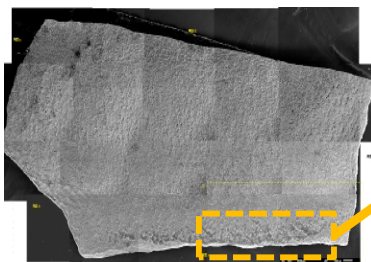
スケールC 2は、管支持板下面と接触しながら、伝熱管に減肉を与えた可能性があると推定した。



## ④ 減肉箇所との関係

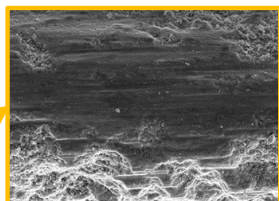
○スケールC 2の形状や筋状痕、接触痕の位置は、以下の通りX55, Y8の減肉箇所や周辺の第三管支持板表面の接触痕の位置と一致することを確認した。

<凸面>



<側面>

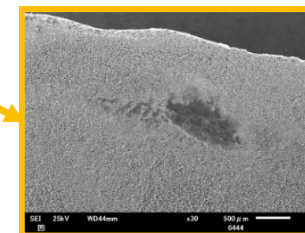
筋状痕



<凹面>



接触痕



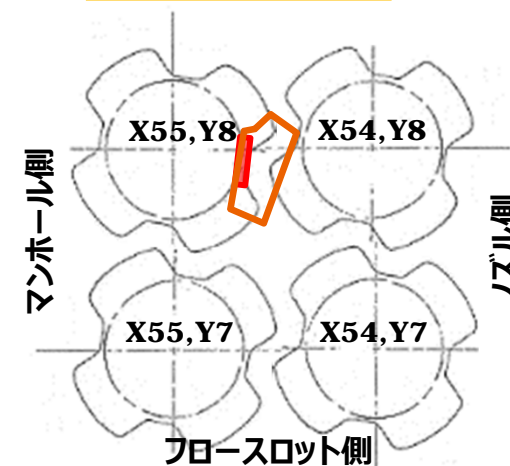
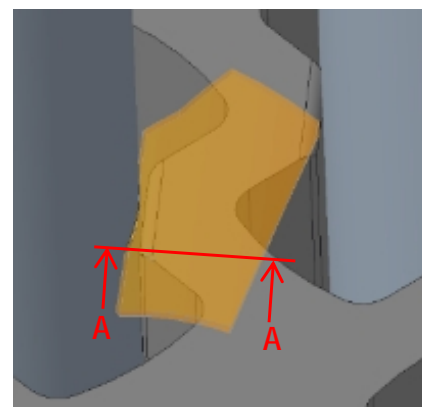
X55, Y8

X54, Y8

筋状痕と減肉部の位置  
関係が一致

凹面の接触痕と、第  
三管支持板 B E C  
穴ランド部の接触痕  
の位置関係が一致

第三管支持板表面の接  
触痕の位置関係と一致



A-A断面

減肉部と接触

第三管支持板 B E C 穴ランド部と接触

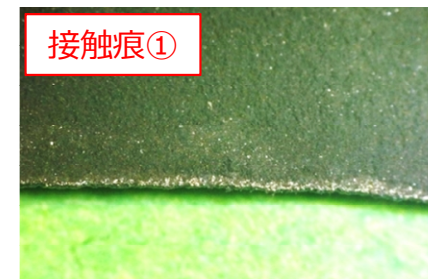
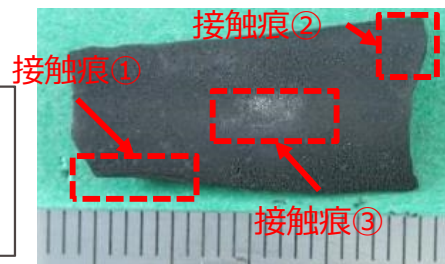
第三管支持板表面と接触

減肉が認められたX21,Y8の第三管支持板部の下方、X21-22,Y12第一管支持板上面で回収したスケール（以下、スケールC3）を分析した結果は、次のとおりである。

### ① 外観観察結果

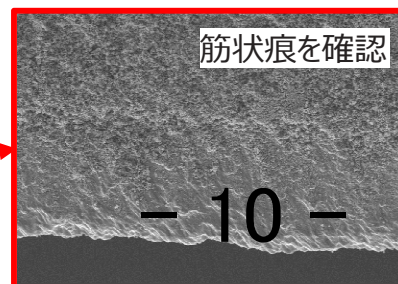
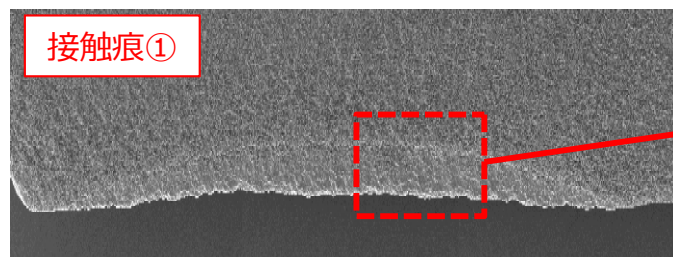
- スケールC3の表面を観察した結果、凸面および側面に接触痕を確認した。また、形状（R形状）を計測した結果、直径約22.6mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。

大きさ：約23mm×約11mm  
厚さ：約0.3mm  
質量：約0.25g



### ② SEM観察結果

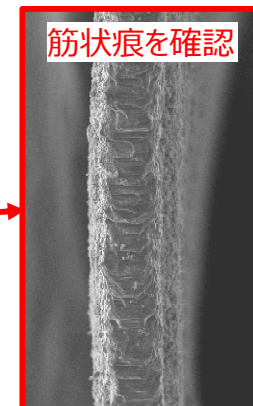
- 接触痕を拡大観察した結果、凸面の接触痕③には筋状痕が確認できなかったが、側面の接触痕①、②に筋状痕を確認した。



接触痕②（側面）



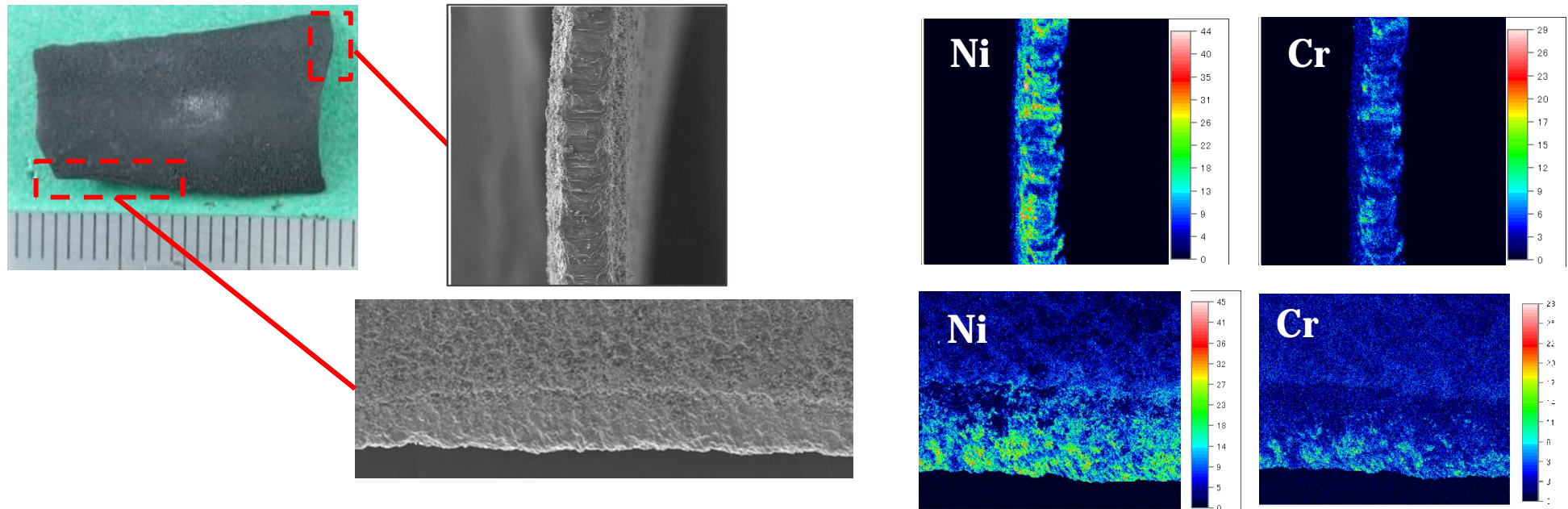
筋状痕を確認



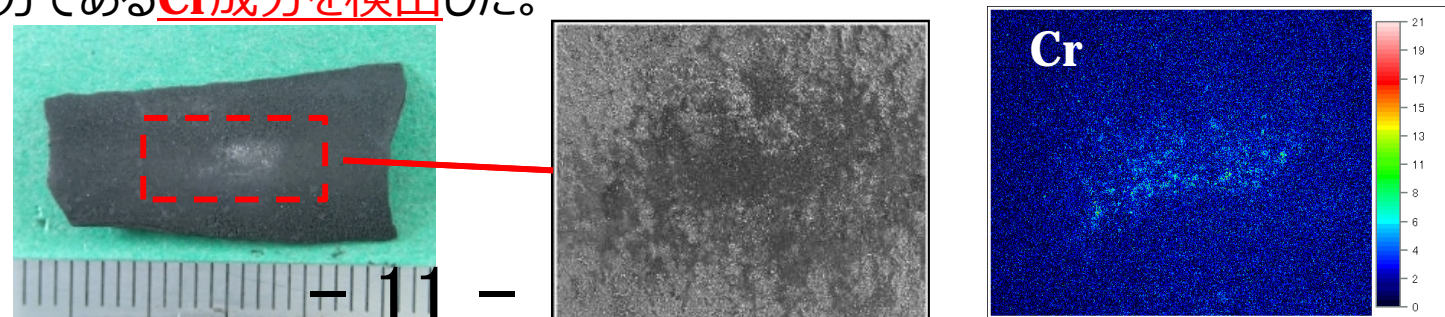
### ③ 成分分析（X線回折※1、EDS※2）

○スケールC3側面の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析を実施した結果、伝熱管（インコネル600）の主成分であるNi成分とCr成分を検出した。

※1：試料にX線を照射し、X線の散乱・干渉を解析することで、構成成分の同定をする分析方法  
※2：エネルギー分散型X線分析（Energy Dispersive X-ray Spectroscopy）のこと。電子線照射により発生する特性X線のエネルギーと強度から構成元素を分析する装置



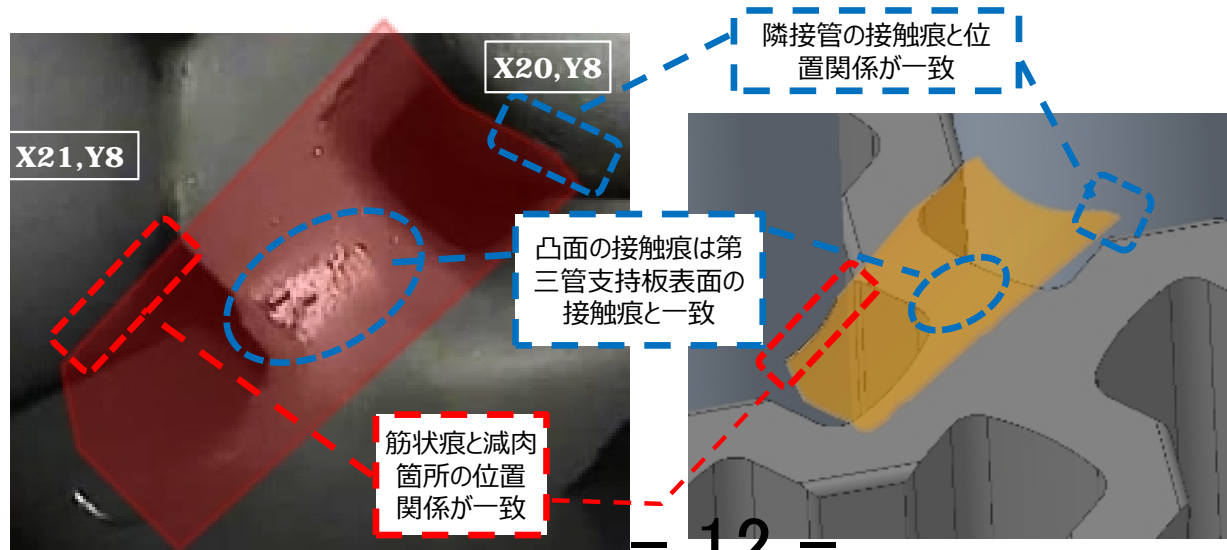
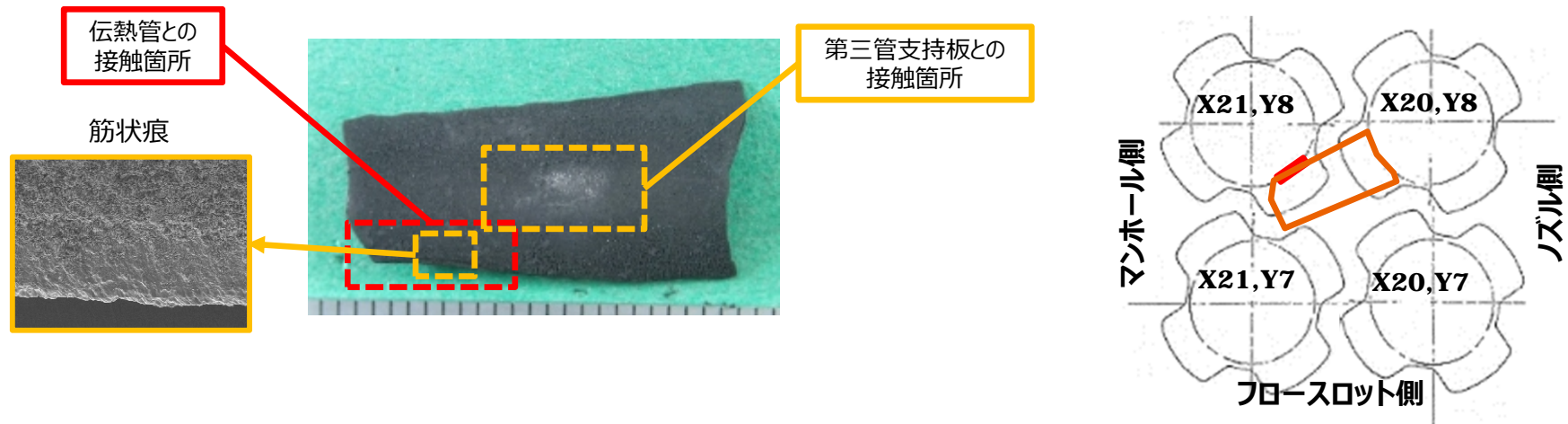
○スケールC3の凸面の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析を実施した結果、管支持板（SUS405）の主成分であるCr成分を検出した。



スケールC3は、管支持板下面と接触しながら、伝熱管に減肉を与えた可能性があるかと推定した。

## ④ 減肉箇所との関係

○スケールC3の形状や筋状痕、接触痕の位置は、以下の通りX21,Y8の減肉箇所および周辺の第三管支持板表面並びに隣接管 (X20,Y8) の接触痕の位置と一致することを確認した。



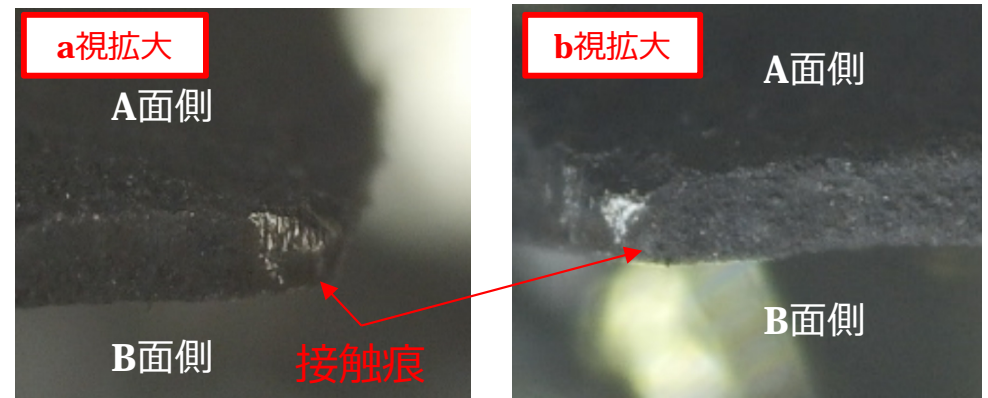
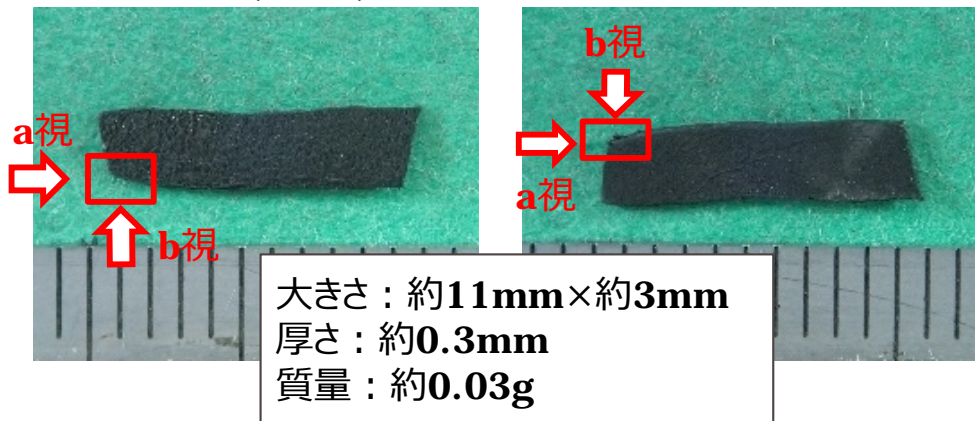
減肉が認められたX55,Y3の第三管支持板部の下方、X55-56,Y4第二管支持板上面で回収したスケール (以下、スケールC4) を分析した結果は、次のとおりである。

## ① 外観観察結果

○スケールC4の表面を観察した結果、角部に接触痕を確認した。また、形状 (R形状) を計測した結果、直径約22.2mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。

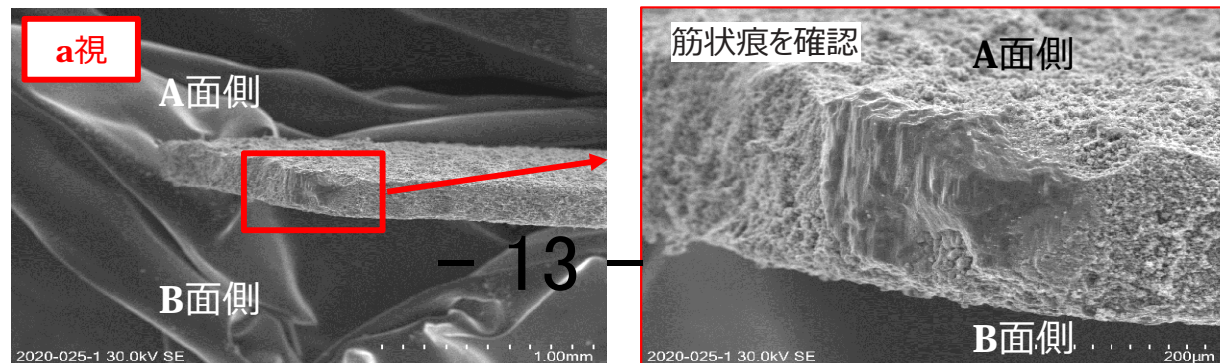
<A面(表面)>

<B面(裏面)>



## ② SEM観察結果

○接触痕を拡大観察した結果、筋状痕を確認した。

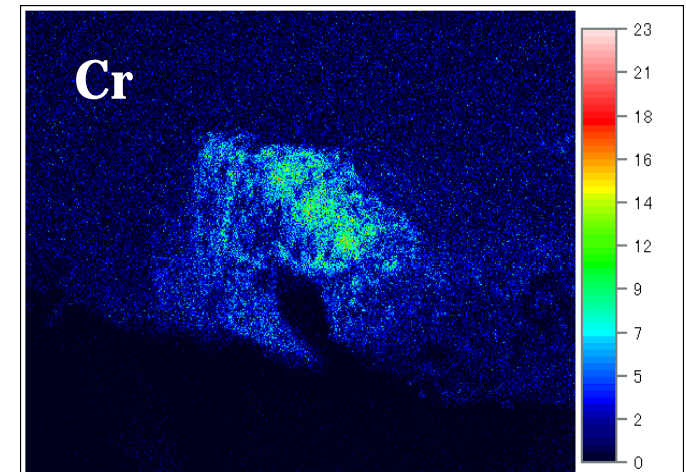
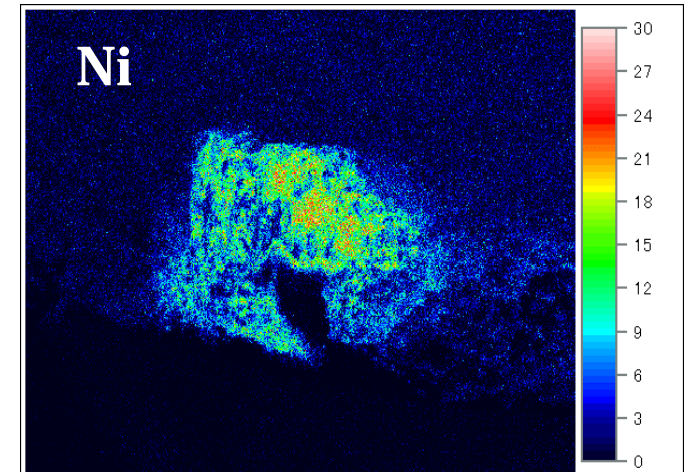
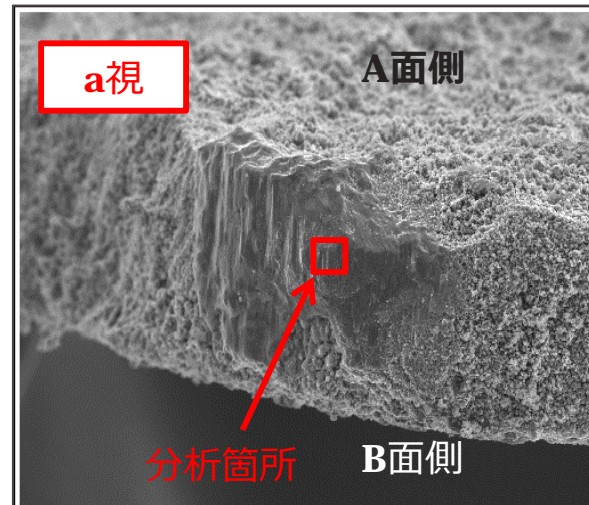
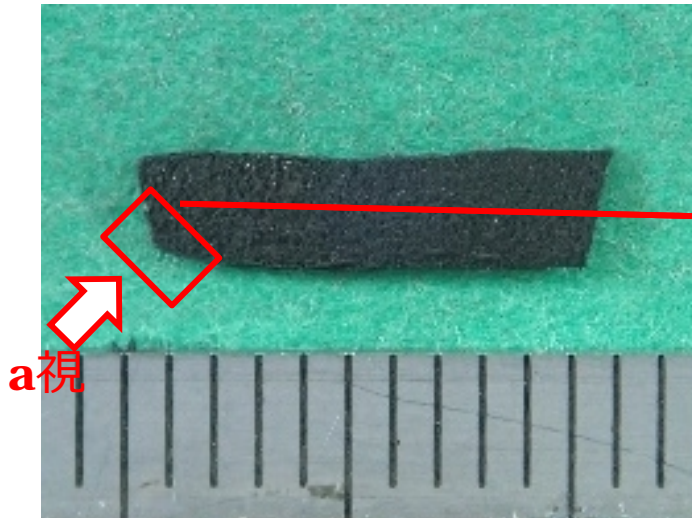


### ③ 成分分析（X線回折※1、EDS※2）

○スケールC4角部の接触痕が認められた部分の表面の化学成分分析を実施した結果、伝熱管（インコネル600）の主成分であるNi成分とCr成分を検出した。

※1：試料にX線を照射し、X線の散乱・干渉を解析することで、構成成分の同定をする分析方法  
※2：エネルギー分散型X線分析（Energy Dispersive X-ray Spectroscopy）のこと。電子線照射により発生する特性X線のエネルギーと強度から構成元素を分析する装置

<A面(表面)>

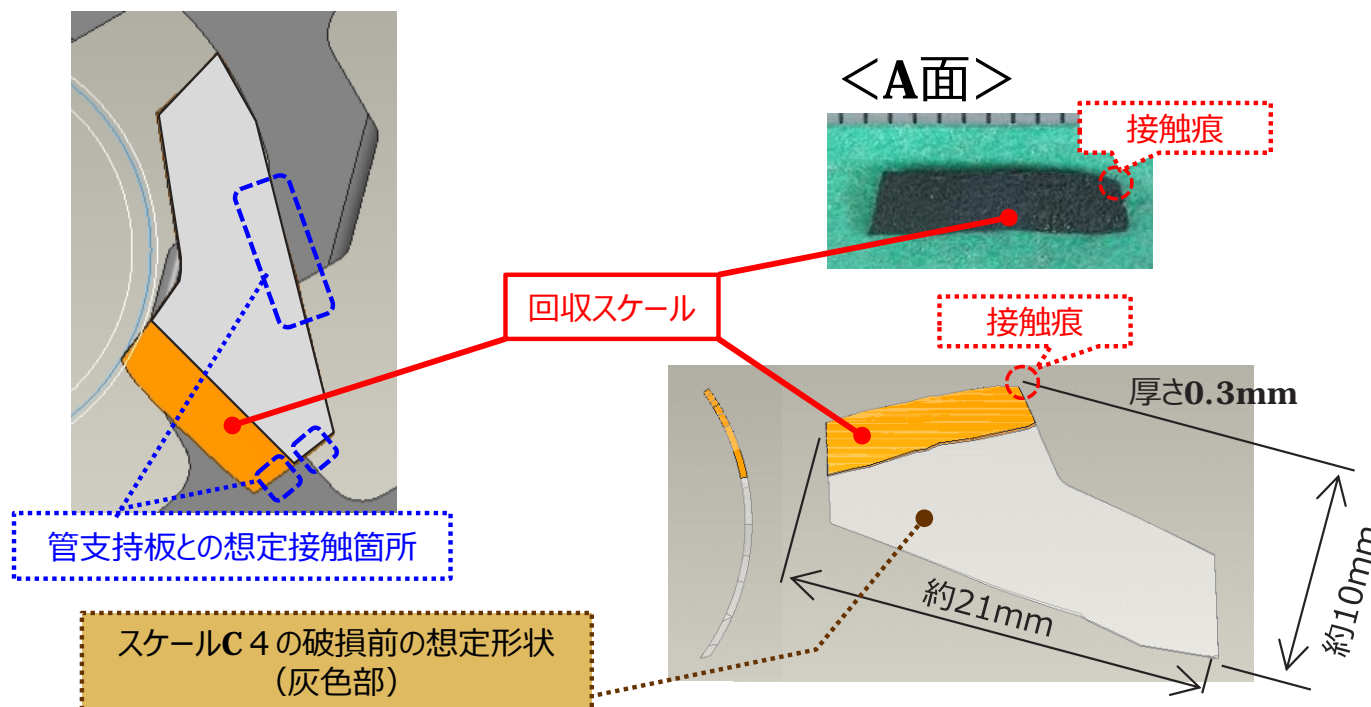
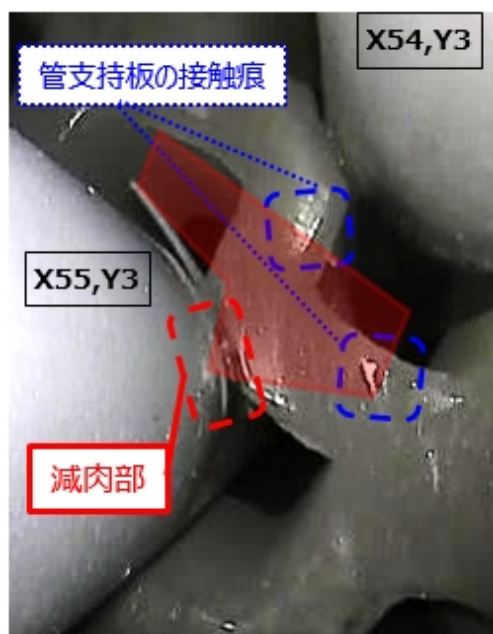
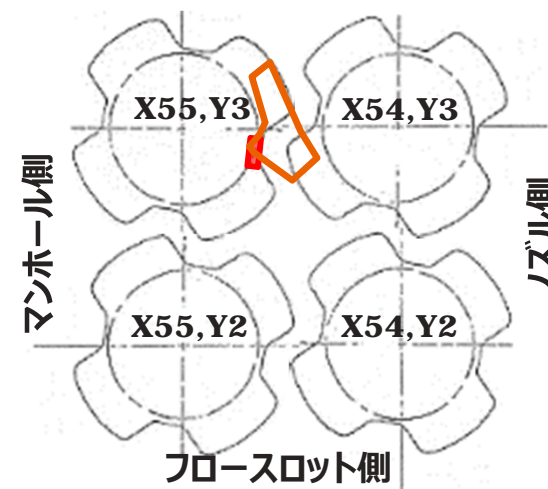


- 14 -

スケールC4は、管支持板下面と接触しながら、伝熱管に減肉を与えた可能性があると推定した。

## ④ 減肉箇所との関係

- スケールC 4の角部に接触痕が確認されたことから、減肉形状が三角型と推定されるX55, Y3伝熱管との接触条件を検討。
- スケールの一部（伝熱管との接触部以外の箇所）が破損したとすると、スケールC 4の破損前の想定形状が管支持板接触痕の位置と一致することを確認した。



減肉を発生させるスケールの生成メカニズムおよび伝熱管を損傷させる可能性について、調査および検討を実施した。

## ○スケールの生成メカニズム

これまでの水化学に関する知見※から、2次系構成機器の流れ加速型腐食等で生じる鉄イオンや鉄の微粒子が、給水とともにS G 2次側へ持ち込まれることにより、次の2つの現象が発生することでS G伝熱管表面にスケールとして付着する。

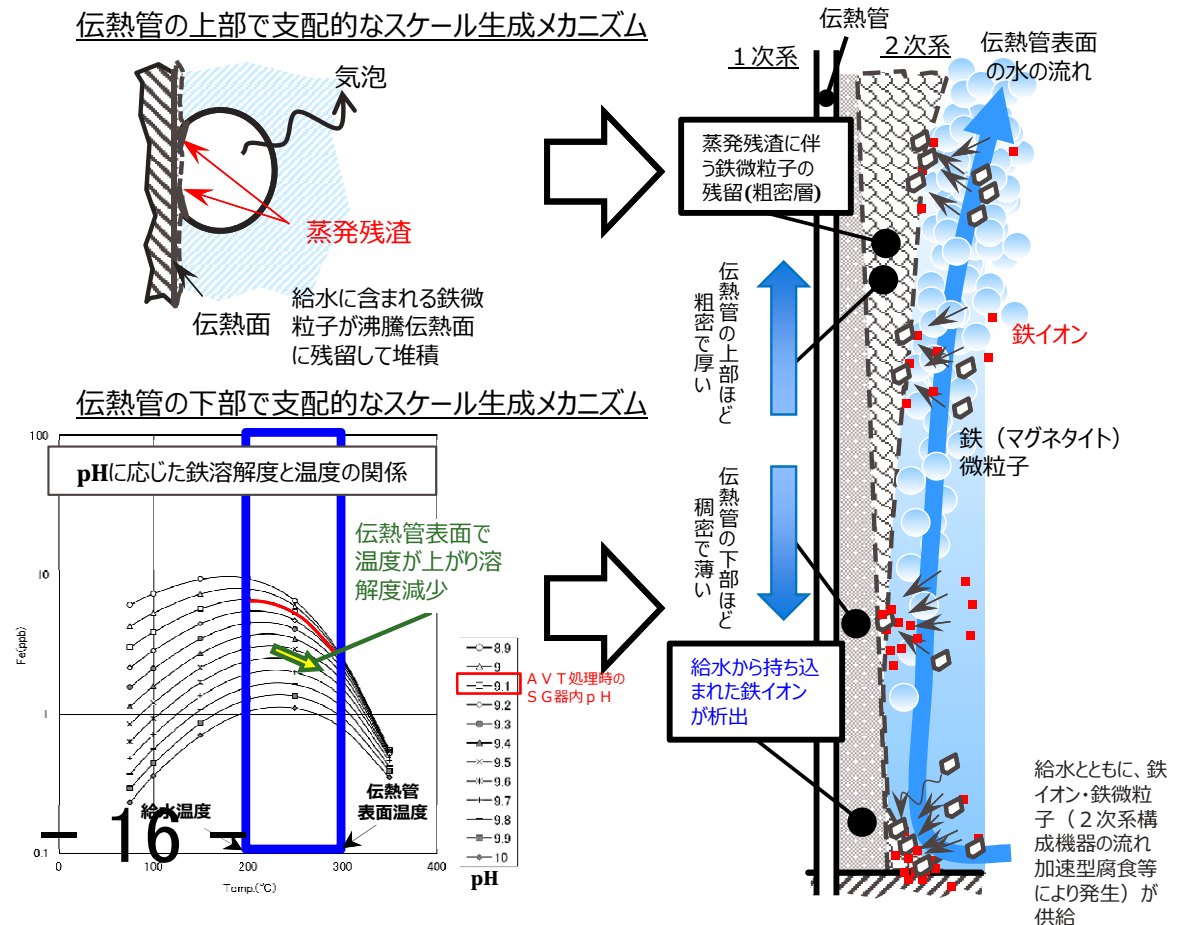
※出典：PWR 5 電力委託調査「2次系機器のスケール付着挙動評価に係る調査」(平成15年) 他

### ・析出付着

給水とともにS G 2次側へ持ち込まれる鉄イオンは、S G 2次側温度域においては、高温ほど溶解度が小さくなるため、より高温となる伝熱管下部において、溶解度の減少幅が大きく、鉄イオンがマグネタイトとして析出付着する。そのため、伝熱管の下部に付着するスケールは稠密で薄い傾向がある。

### ・蒸発残渣

伝熱管の上部では、沸騰現象が顕著であることから、鉄イオンの析出付着よりも、鉄の微粒子が蒸発残渣として伝熱管表面に残留、堆積する現象が主体である。そのため、伝熱管の上部に付着するスケールは、粗密な傾向がある。また、蒸発残渣によって残留、堆積する鉄の微粒子の方が析出付着する鉄イオンに比べて粒径が大きいことから、伝熱管の上部で生成するスケールの方が伝熱管の下部より粗密で厚い傾向がある。



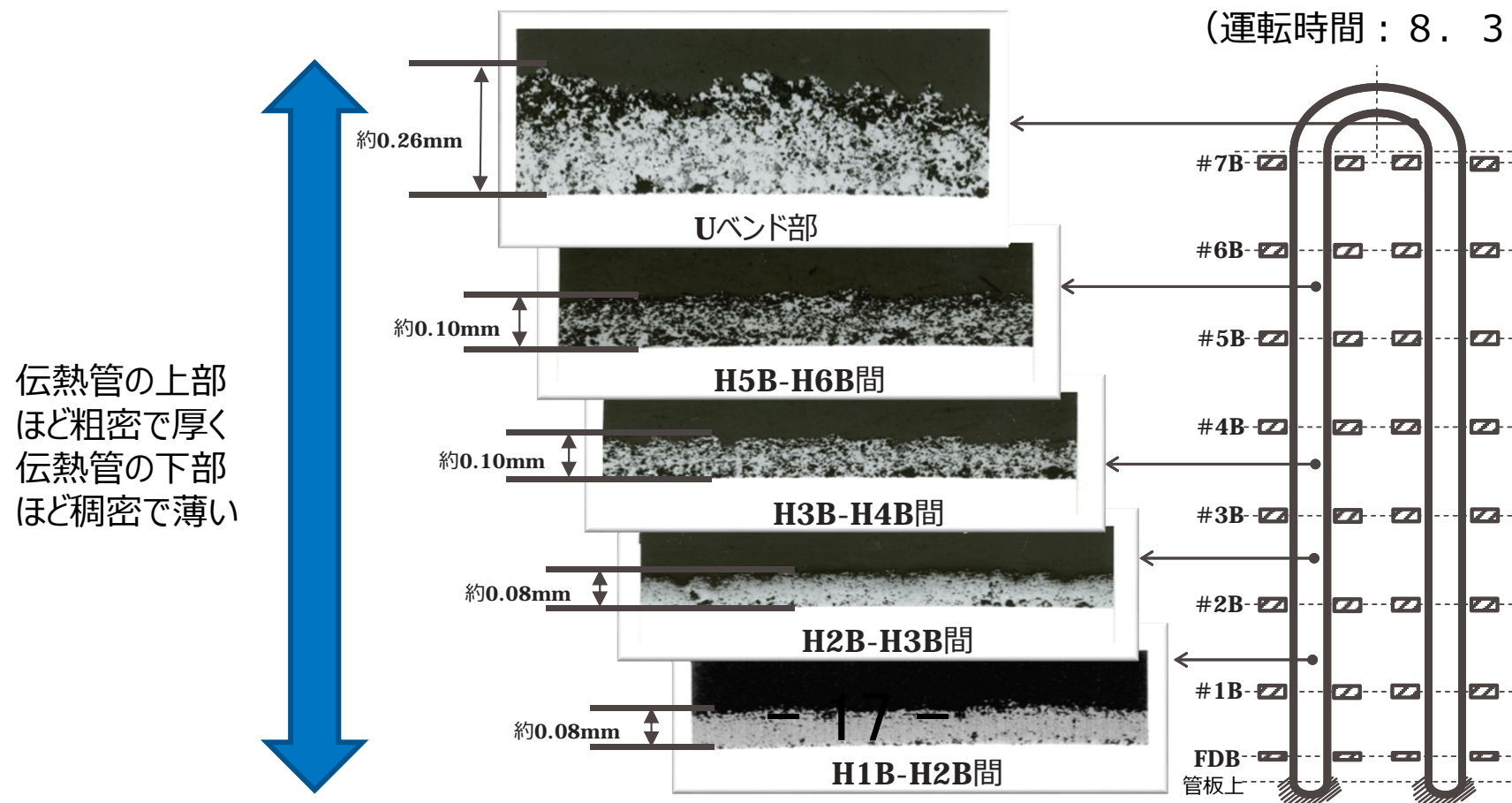


## ○スケールの性状の実機調査 (過去の調査での知見)

平成8年に高浜発電所3号機第9回定期検査で健全性確認を目的に伝熱管の抜管調査を実施した際、伝熱管各部位 (SG上方からUバンド部、第六から第五管支持板の間、第四から第三管支持板の間、第三から第二管支持板の間、第二から第一管支持板の間) のスケールについて、断面マイクロ観察を実施している。その結果、伝熱管の上部のスケールほど粗密で厚く、伝熱管の下部ほど稠密で薄いということを確認した。

(高浜発電所3号機 抜管調査時 断面マイクロ観察)

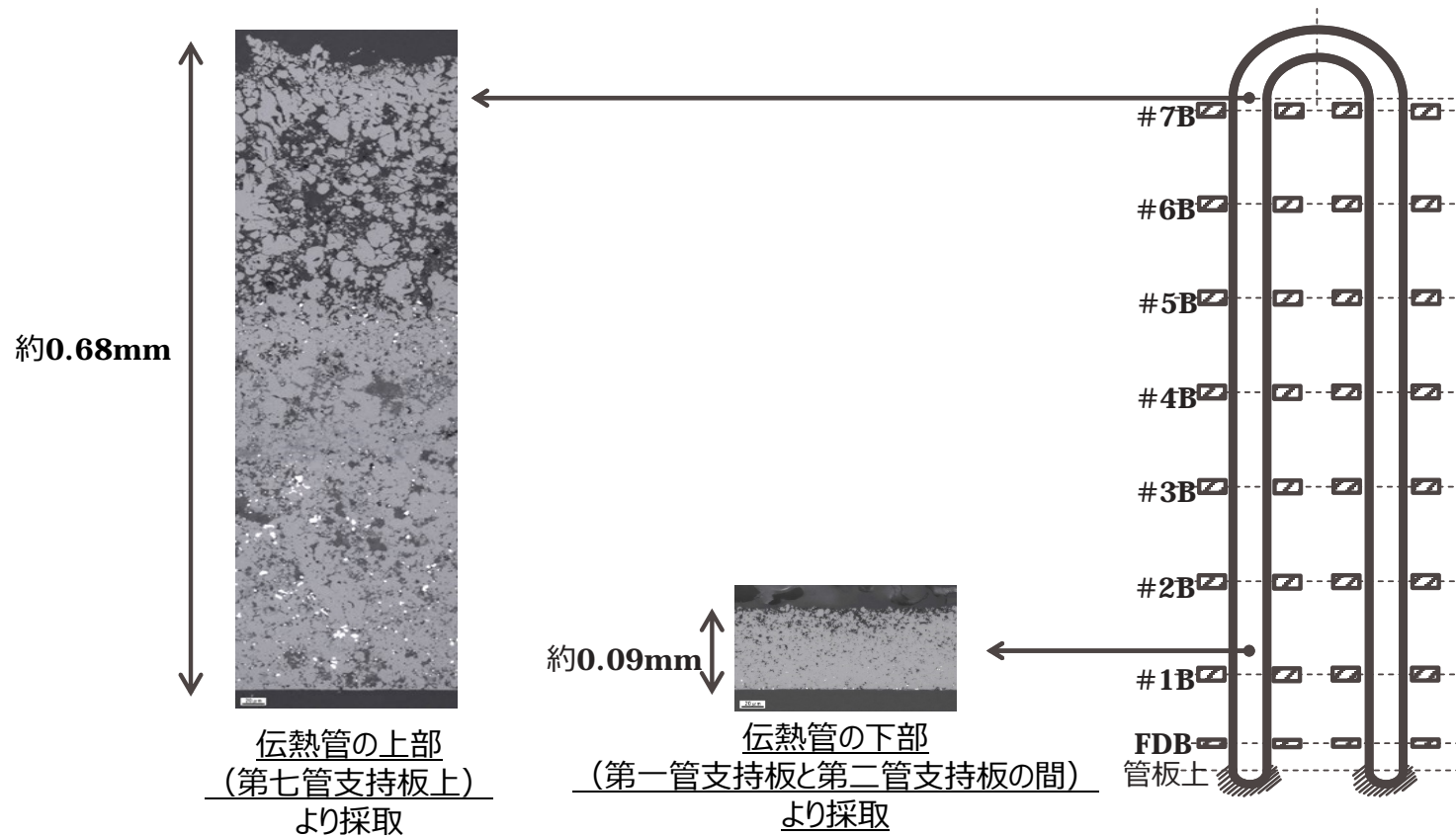
(運転時間: 8.3万時間時点)



## ○スケールの性状の実機調査 (高浜発電所 4号機におけるスケール調査)

高浜発電所 4号機今回 (第23回) 定期検査において、伝熱管の上部 (第七管支持板上) および伝熱管の下部 (第一管支持板と第二管支持板の間) から1サンプルずつスケールを回収し、性状を確認した結果、伝熱管の上部 (第七管支持板上) のスケールは粗密で厚く、伝熱管の下部 (第一管支持板と第二管支持板の間) では稠密で薄いということを確認した。

(高浜発電所 4号機におけるスケール調査実績)



以上の調査結果から、稠密なスケールは伝熱管の下部で発生し、粗密なスケールは伝熱管の上部で発生することを確認した。



○ 2次系の水質管理調査 (水処理履歴、運転時間)

高浜発電所4号機の各水処理における給水中の鉄含有量は実測データより、pHの低い水処理方法ほど給水中の鉄含有量が多いことが分かっている。

処理方法	給水中鉄含有量	処理方法	運転時間
A V T 処理	約 5 ~ 10 p p b	A V T 処理	約 9.8 万時間
E T A 処理	約 3 p p b	E T A 処理	約 8.0 万時間
高 E T A 処理	約 1 p p b	高 E T A 処理	約 2.0 万時間
高アンモニア処理	約 1 p p b	高アンモニア処理	約 2.4 万時間

○ 2次系の水質管理調査 (鉄の持ち込み量 / 1 S G あたり)

上記水処理期間の鉄の持ち込み量と、合計の鉄の持ち込み量を算出した結果は次のとおり。

処理方法	鉄の持ち込み量
A V T 処理	約 1,680 k g
E T A 処理	約 650 k g
高 E T A 処理	約 70 k g
高アンモニア処理	約 90 k g
合計	約 2,490 k g

以上の調査結果から、水処理方法に応じた量の鉄が経年的に持ち込まれていることを確認した。

AおよびC – S Gで回収したスケールが今回のS G伝熱管損傷事象を発生させた可能性を検証するため、回収したスケールの性状を確認し、次の試験等を実施した。

## ○回収したスケールの性状

AおよびC – S Gで回収したスケール（スケールA, C 2, C 3およびC 4）については、伝熱管と接触が想定される部分に接触痕や光沢があり、また、伝熱管の主成分であるNiとCrを検出した。このことから、減肉を発生させる可能性のあるスケール性状を把握するため、断面マイクロ観察を実施した結果、空隙率5%以下の稠密層が形成されていることを確認した。➡

40

回収場所	A-SG スケールA 第二管支持板下部	C-SG スケールC2 第二管支持板上	C-SG スケールC3 第一管支持板上	C-SG スケールC4 第二管支持板上	【参考】B-SG 第七管支持板上
断面マイクロ観察結果	<p>空隙率5%以下の稠密層の範囲</p> <p>約0.2~0.3mm</p> <p>伝熱管界面</p>	<p>約0.3mm</p> <p>伝熱管界面</p>	<p>約0.3mm</p> <p>伝熱管界面</p>	<p>約0.3mm</p> <p>伝熱管界面</p>	<p>約0.68mm</p> <p>伝熱管界面</p>
性状	稠密層が主体	稠密層が主体	稠密層が主体	稠密層が主体	粗密層が主体
厚さ	約0.2~0.3mm	約0.3mm	約0.3mm	約0.3mm	約0.68mm
伝熱管を きず付ける可能性	あり	あり	あり	あり	なし
運転時間	- 21 - 22.2万時間				

○回収スケールと同等性状のスケールによる伝熱管との摩耗試験

今回回収したAおよびC - S Gのスケールは稠密であることから、同等の稠密さ（空隙率5%以下の稠密層が主体）、厚さ（約0.2～0.3mm）のスケールを3個用い、押し付け力や振動数の実機条件を模擬した試験条件にて、伝熱管との摩耗試験を行った。

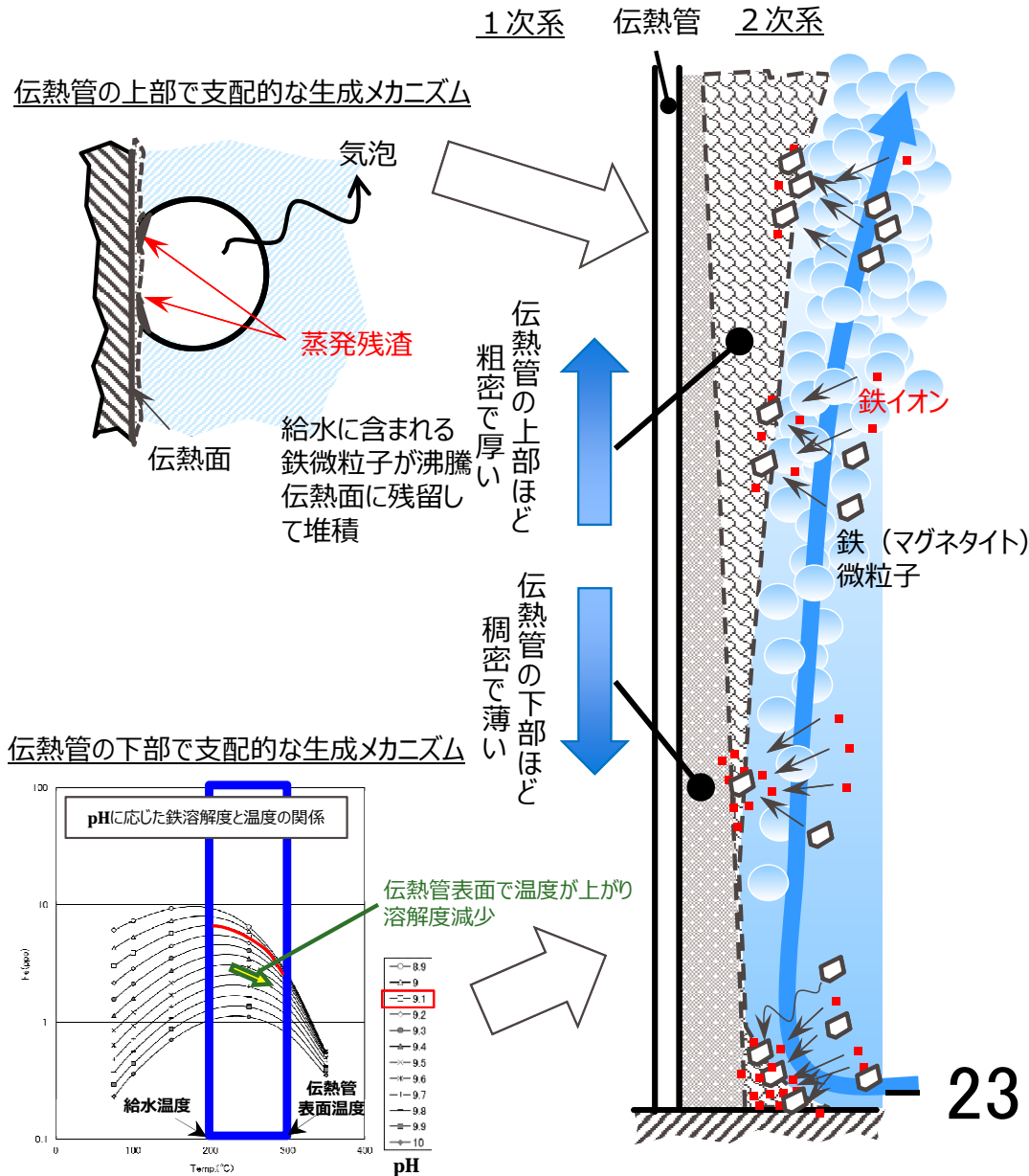
伝熱管とスケールの摩耗比（体積比）は最大1：0.5となり、伝熱管の方が早く摩耗した。

試験片	全厚 (mm)	稠密層厚さ (mm)	伝熱管減肉体積 (mm <sup>3</sup> )	スケール片減肉体積 (mm <sup>3</sup> )	減肉摩耗比 (伝熱管：スケール)	摩耗試験時間 (hr)
ケース1	約0.2	約0.18	約0.009	約0.006	1：0.7	約116
ケース2	約0.2	約0.18	約0.004	約0.002	1：0.5	約94
ケース3	約0.3	約0.14	約0.023	約0.014	1：0.6	約90

高浜発電所3号機前回（第24回）定期検査の事象では、スケールの稠密さではなく厚さに着目し、主に伝熱管の上部から回収したスケールを供試体として選定したため、摩耗試験の結果、摩耗体積比は最大でも1：4であり、スケールの方が早く摩滅したことから、スケールが原因の可能性は低いとしていた。なお、前回試験では、空隙率5%を超える領域が主体であったのに対し、今回回収したスケールは空隙率5%以下の領域が主体であったことから、以降では、空隙率5%以下の領域を稠密層と定義する。

伝熱管に減肉を与える可能性があるスケール性状については、稠密さが重要であり、稠密なスケールは、伝熱管と接触することで減肉を発生させる可能性が高いと考える。

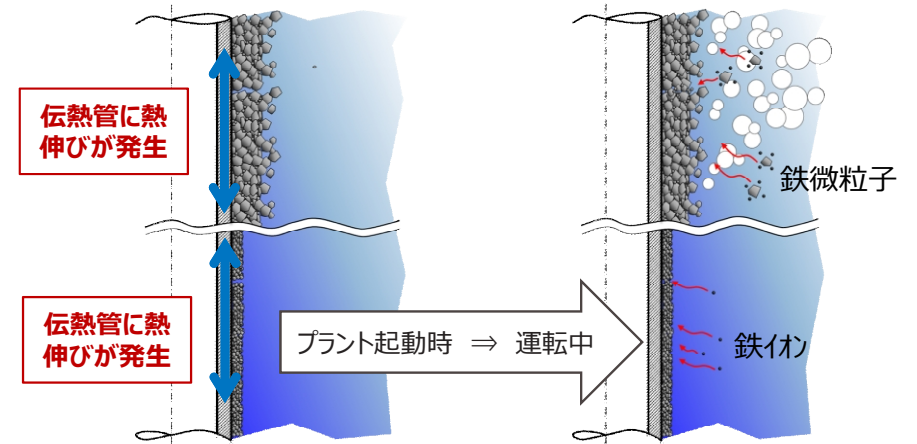
① プラント運転中に給水とともに持ち込まれる鉄イオンおよび鉄微粒子が、析出付着、蒸発残渣として伝熱管表面にスケールが生成される。



② 生成されたスケールは、プラントの起動停止による熱伸びおよび収縮により剥離する。

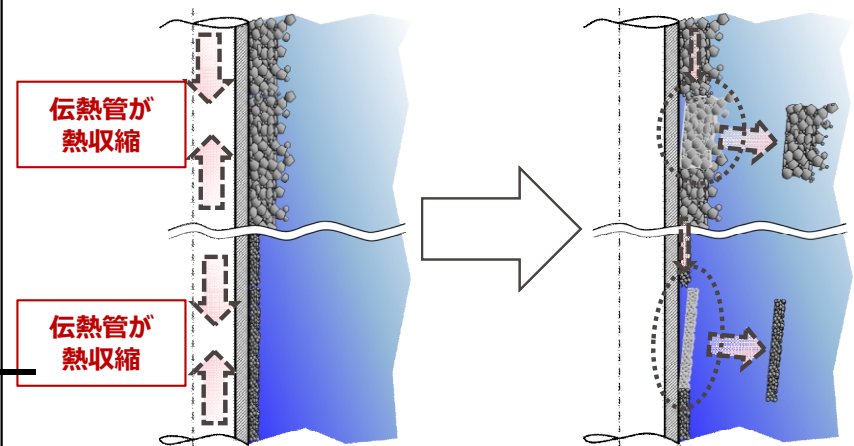
【プラント起動からプラント運転中】

- プラント起動に伴う伝熱管の熱伸びにより伝熱管表面に密着しているスケールに引張力が働き、割れが発生。
- プラント運転中の給水に含まれる鉄イオンおよび鉄微粒子が割れた箇所へ供給され、割れが一部修復。



【プラント停止時】

- プラント停止に伴う伝熱管の熱収縮により伝熱管表面のスケールに圧縮力が作用し、界面の密着が弱い箇所では剥離が発生。



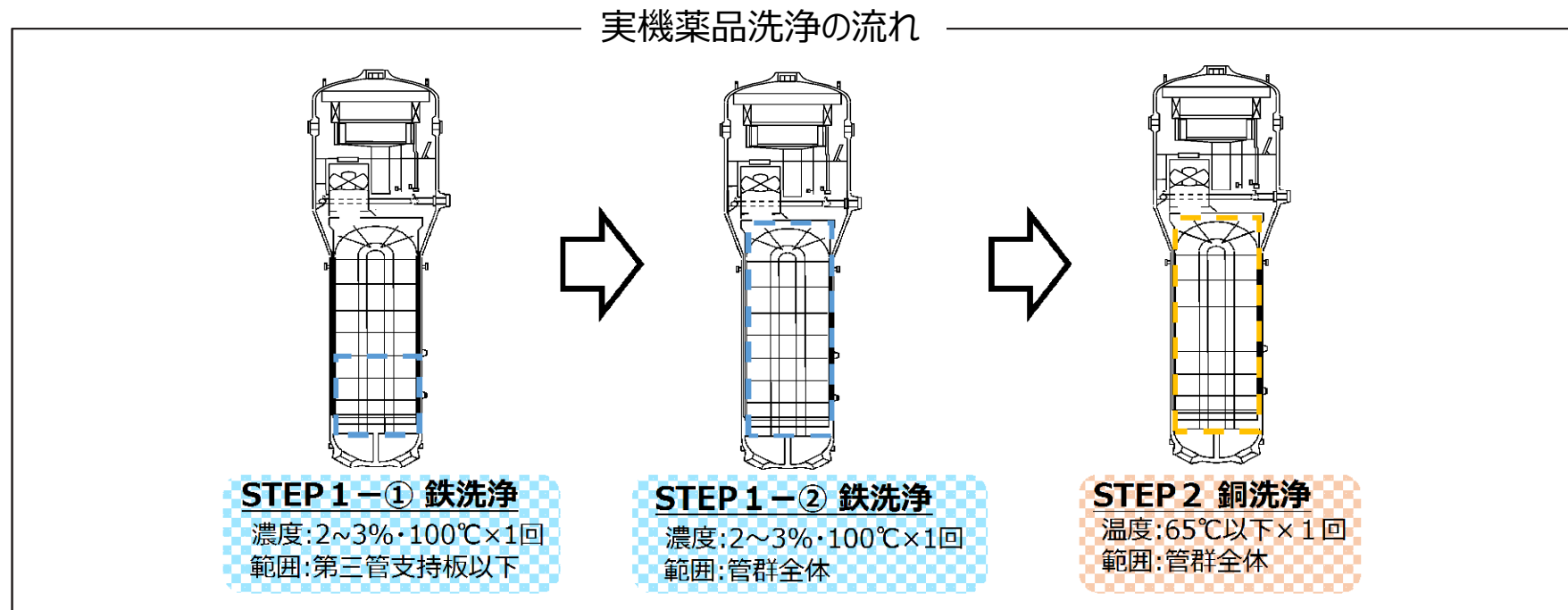
## <実機洗浄方法>

### ○洗浄条件

洗浄試験の結果から、実機洗浄条件については、薬品濃度は2%～3%、洗浄温度は100℃とする。なお、その他洗浄に係る諸条件は、これまでの国内施工実績と同様とする。

### ○洗浄範囲

洗浄範囲については、管群全体を対象とする。なお、今後のプラント運転に更なる万全を期すため、スケールの生成メカニズムから下部ほど稠密で薄く、上部ほど粗密で厚いことが分かっていることから、第三管支持板以下については、更に1回追加洗浄を行うこととする。



## <実機によるスケール脆弱化効果の確認>

高浜発電所4号機での対策実施に先立ち、同程度のスケールが蓄積していると考えられる高浜発電所3号機において薬品洗浄を実施後にスケールを回収し、スケールが脆弱化されていることを確認する。



# 1. 実機によるスケール脆弱化効果の確認結果 (2 / 4)

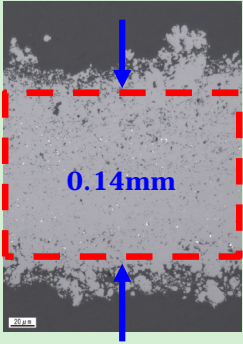
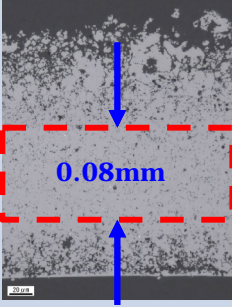
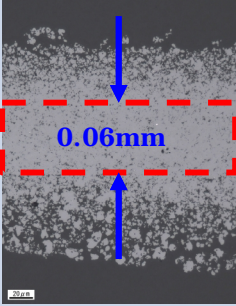
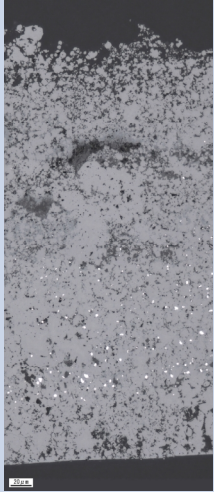
○薬品洗浄後のスケールと伝熱管との摩耗試験について


高浜発電所3号機にて薬品洗浄を実施した後、SG器内からスケールを採取し、断面マイクロ観察および摩耗試験を実施した結果、いずれのスケールも稠密層厚さが0.1mm未満であり、試験片製作時にスケールが欠損、摩耗試験開始直後にスケールが欠損、または有意に摩滅することを確認した。

No	回収場所	スケール厚さ※ (mm)	稠密層厚さ (mm)	摩耗体積比 (伝熱管/スケール)
1	A-SG 第一管支持板上	0.2	0.08	試験開始直後に欠損
2	A-SG 第一管支持板上	0.2	0.08	試験開始直後に欠損
3	A-SG 第二管支持板上	0.2	0.04	試験開始直後に欠損
4	A-SG 第一管支持板上	0.2	0.02	試験開始直後に欠損
5	B-SG 第一管支持板上	0.3	0.04	試験開始直後に欠損
6	C-SG 第一管支持板上	0.2	0.06	0.02
7	C-SG 第一管支持板上	0.3	0.06	試験開始直後に欠損
8	C-SG 第一管支持板上	0.2	0.06	試験片製作時に欠損
9	C-SG 第一管支持板上	0.3	0.04	0.01
10	C-SG 第一管支持板上	0.3	0.06	0.01
参考	C-SG 第七管支持板上	0.5- 25 -	0.00	0.01

※：ノギスにより計測

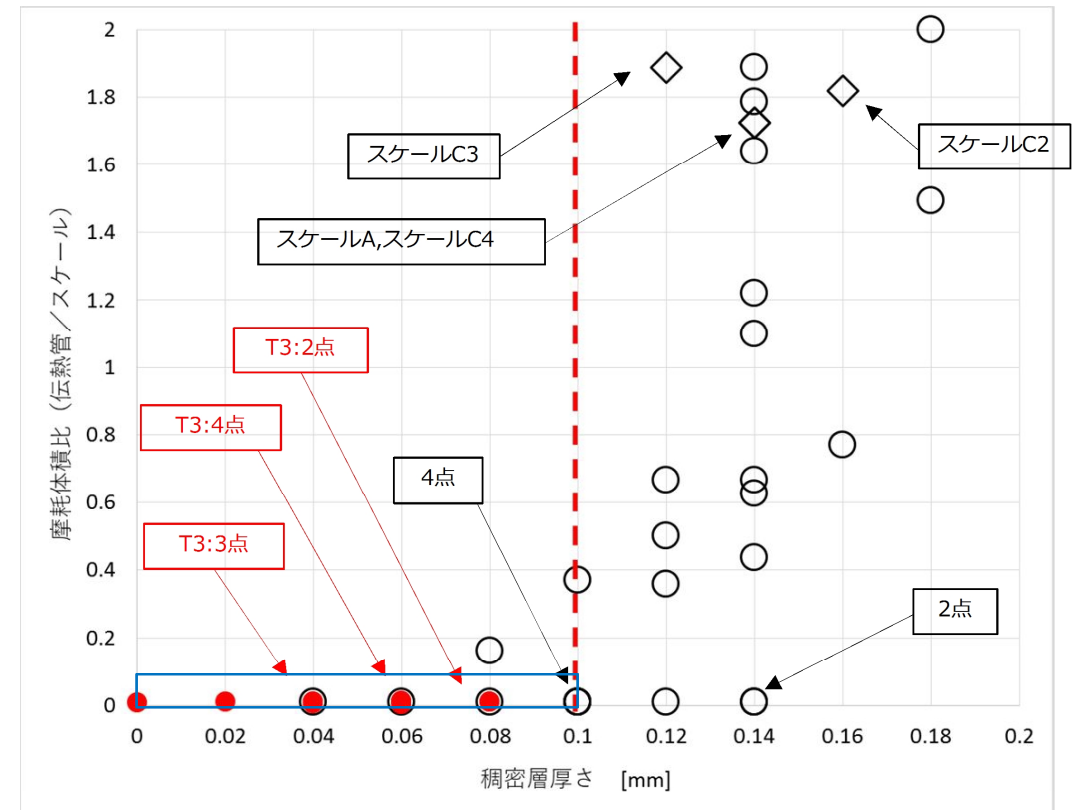
○薬品洗浄後のスケール稠密層厚さについて（以下に代表例を示す。）

回収場所	<薬品洗浄前> C-SG 回収スケール 第一管支持板上	<薬品洗浄後> A-SG 回収スケール 第一管支持板上 (ケース2)	<薬品洗浄後> C-SG 回収スケール 第一管支持板上 (ケース6)	<薬品洗浄後> C-SG 回収スケール 第七管支持板上 (参考)
断面ミクロ観察結果				
稠密層厚さ (mm)	0.14	0.08	0.06	0.00
スケール厚さ※ (mm)	0.2	0.2	0.2	0.5

※：ノギスにより計測  
：稠密層の範囲

○ S G 伝熱管に付着するスケールに対し、薬品洗浄の頻度に関する保全指標については、以下のとおり。

Ⅰ 高浜発電所 3 号機および 4 号機については、毎定期検査時にスケールを回収し、スケールの稠密層厚さの確認および摩耗試験を行う。なお、確認および摩耗試験を実施するスケールは 3 頁の考え方のとおり選定する。  
稠密層厚さ 0.1 mm 未満、  
摩耗体積比 0.1 未満であることを確認し、それを超えた場合は、薬品洗浄を実施する。



Ⅰ なお、高浜発電所 3 号機および 4 号機の S G については、T T 6 0 0 合金製の伝熱管に応力腐食割れが認められていることから、本事象も踏まえ、今後も引き続き、S G 取替 (以下、S G R) に係る検討を進めていく。

### 3. 他プラントへの水平展開について

- 他プラントについては、今回代表プラントでスケールを回収し、いずれも稠密層厚さが**0.1mm**未満であることおよび減肉体積比が十分小さいこと（**0.1**未満）を確認している。
- また、現在の鉄持込み量は約**30kg**／サイクルと十分低く抑えられている。
- 従って、至近で薬品洗浄を行う必要はないと考えているが、高浜発電所3号機および4号機の水平展開として、以下のとおり、実機スケールによる監視を行っていく。

#### <スケール監視方法>

プラント		鉄持込み量※	頻度	確認内容	備考
S G R 未実施 プラント	大飯3	<b>1,850kg</b>	2定検毎	稠密層厚さ及び摩耗体積比を確認	薬品洗浄を実施済みであり、高浜3, 4と同等の鉄持ち込み量まで計算上 <b>10</b> 定検以上となるが、実機スケールを確認し確実に発生を防止するとともに、データの蓄積を図る。
	大飯4	<b>1,950kg</b>	同上	同上	
S G R プラント	高浜1	<b>680kg</b>	—	—	S G Rプラントで鉄持込み量が最大の高浜2について、今回採取できるスケールはない状況であったが、念のため、高浜2を代表プラントとしてスケールの確認を行う。
	高浜2	<b>940kg</b>	2定検毎	スケールの有無を確認	
	美浜3	<b>780kg</b>	—	—	

※高浜3, 4号機の最初の外面減肉発生時の鉄持ち込み量は約**2,400kg**

#### <薬品洗浄実施時期>

- 薬品洗浄については、蓄積したデータの傾向を踏まえ、従来の電気出力維持の観点に加え、摩耗減肉に対する予防保全の観点で、適切なタイミングで行うこととする。

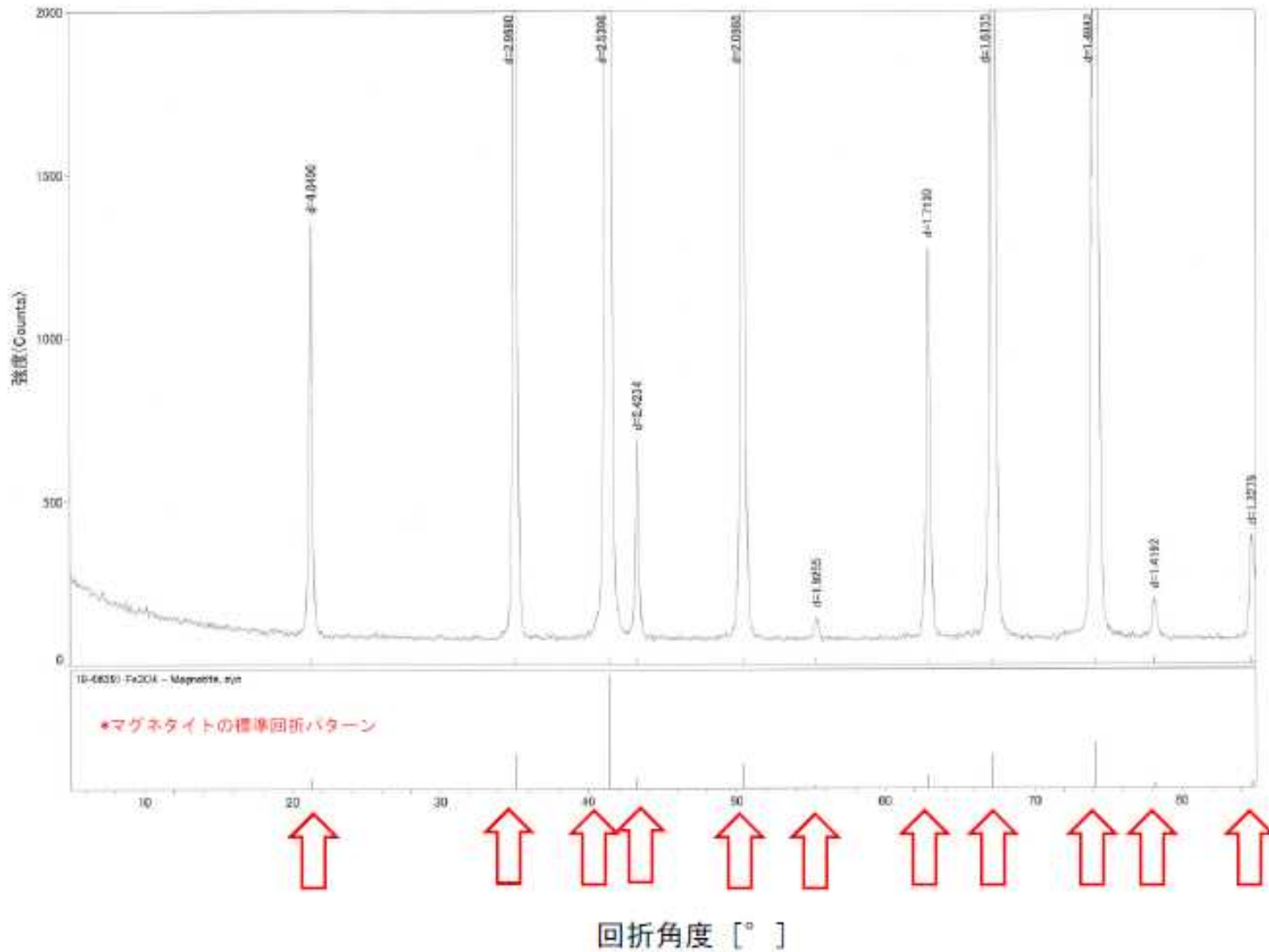


図 A-SG伝熱管付着物(スケール)のXRD分析結果



Fig. 5. Phenomena governing SG deposits.

図 スケール付着現象イメージ

出典:「Guangze Yang, Veronique Pointeau, Etienne Tevissen, Alexandre Chagnes, “A review on clogging of recirculating steam generators in Pressurized – Water Reactors”, Progress\_in\_Nuclear\_Energy, 97, 182(2017).」※の関係箇所抜粋

※: 著者の所属は仏国のCEA(Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternative, 原子力・代替エネルギー庁)

資料 1 - 1

第15回原子力施設等における事故トラブル  
事象への対応に関する公開会合 資料1-1

高浜発電所4号機  
蒸気発生器伝熱管の損傷について  
(概要版)

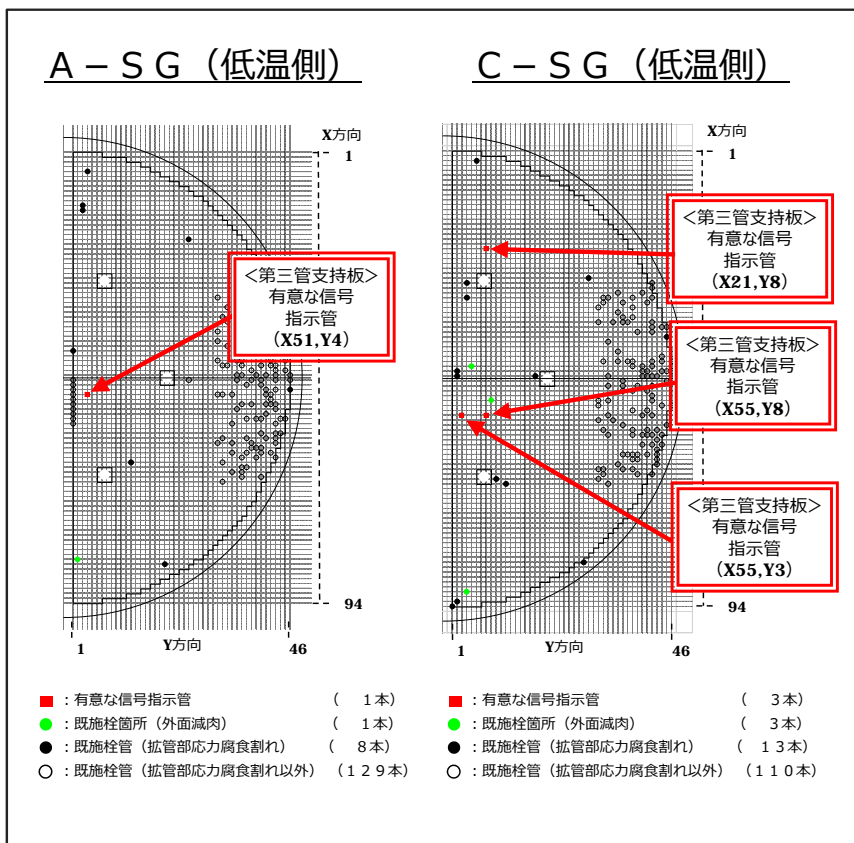
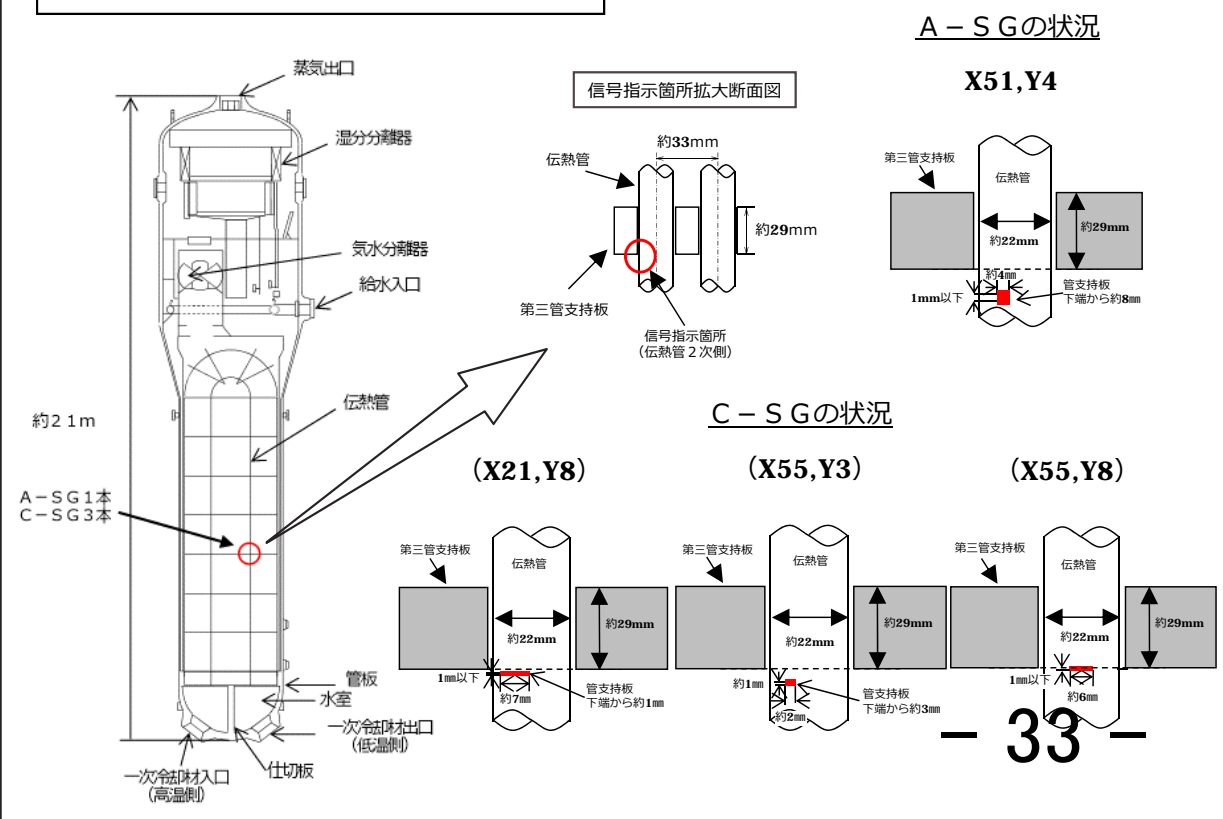
2021年2月5日

説明項目		ページ番号
1	事象の概要	3
2	原因調査	9
3	減肉メカニズム	3 3
4	推定原因	5 7
5	対策検討	5 9
6	対策	6 3



2020年10月7日からの高浜発電所4号機第23回定期検査において、3台ある蒸気発生器（以下、SG）の伝熱管の健全性を確認するため渦流探傷試験（以下、E実実）を実施した。その結果、A-SGの伝熱管1本およびC-SGの伝熱管3本の伝熱管4本について、管支持板部付近に、外面からの減肉とみられる有意な信号指示を確認したことから、実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則第18条並びに第56条に適合しておらず、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条に該当することを、11月20日13時00分に判断した。

SG伝熱管信号指示箇所概要図

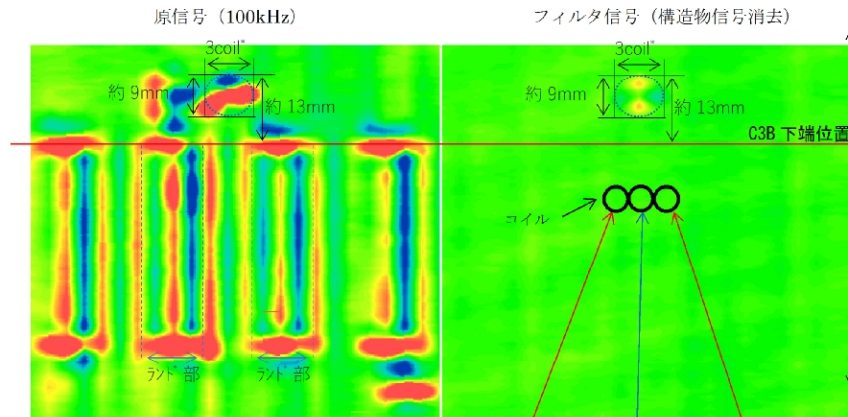


# 1. 事象の概要 (SG-ECT結果: A-SG)

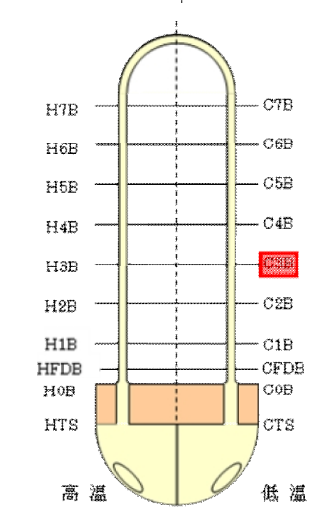
ECTデータを分析した結果、伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

A-SG低温側第三管支持板 (X51, Y4) のECT結果

減肉率: 約33%



\*1coil: 約3mm ※内側から見たイメージ



軸	C1(1)	MK	軸	C24(24)	MK	軸	C25(25)	MK
軸方向	0.20	0.22	0.15	0.12	0.14	0.18	0.20	0.21
周方向	0.12	0.14	0.18	0.20	0.21	0.22	0.23	0.24

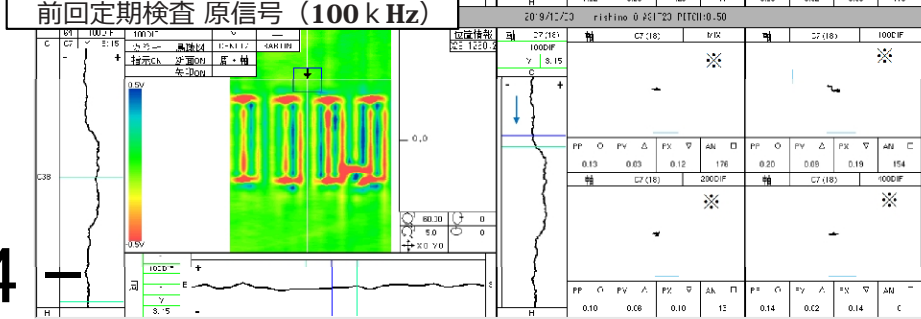
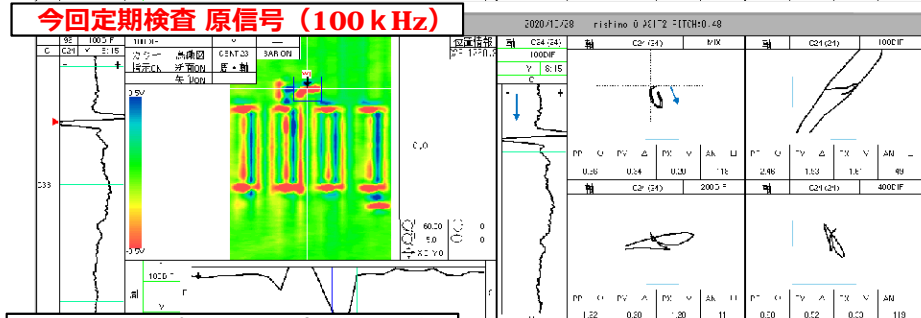
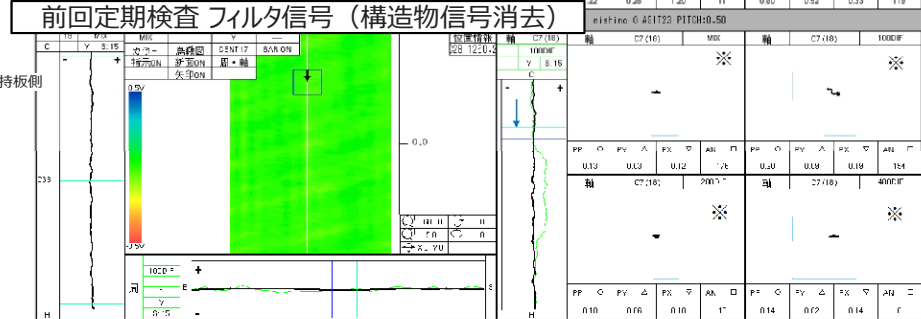
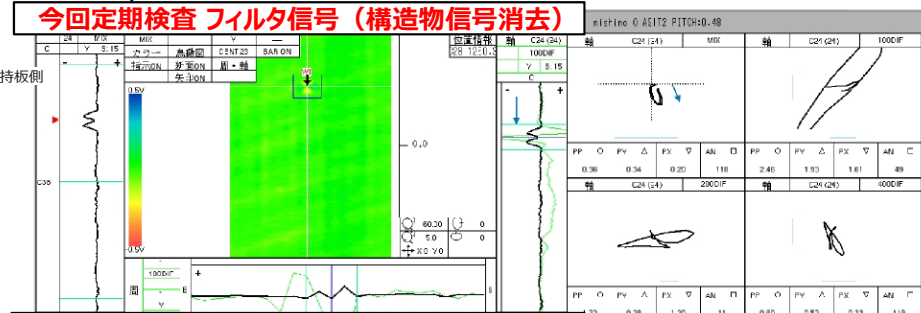
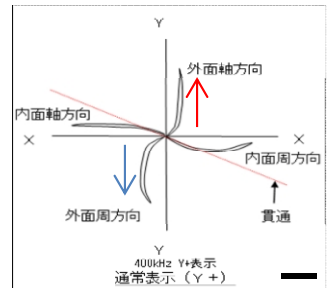
### [A-SG X51-Y4] リサーチ波形

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)



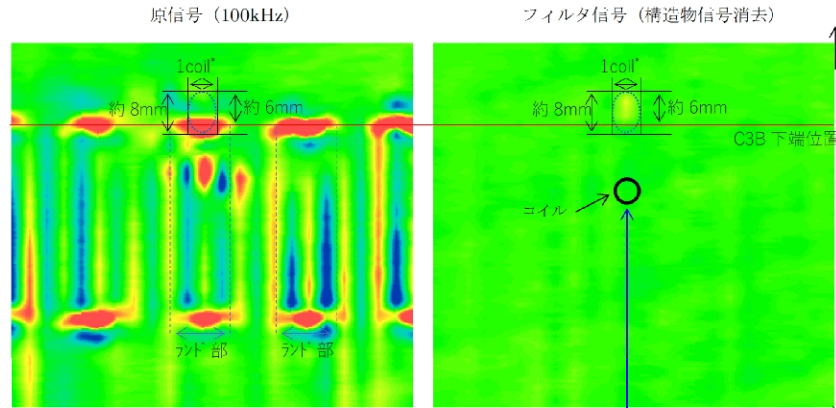
※特異な信号がないため任意の位置で表示。

# 1. 事象の概要 (SG-ECT結果: C-SG 1/3)

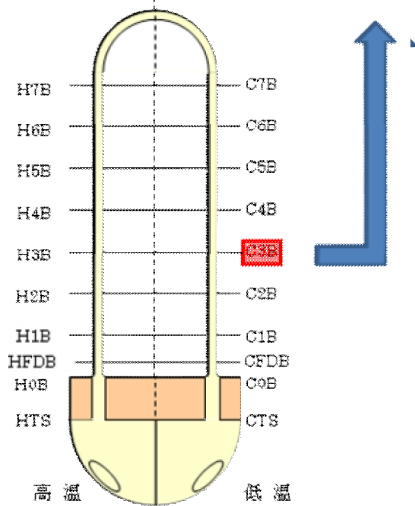
ECTデータを分析した結果、伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

C-SG低温側第三管支持板 (X55, Y3) のECT結果

減肉率: 約25%



\*1coil: 約3mm ※内側から見たイメージ



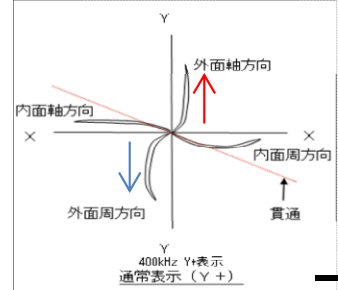
【C-SG X55-Y3 リサーチ波形】

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

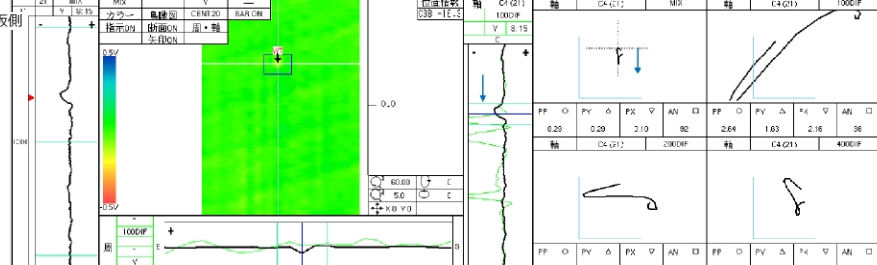
波形評価

- ・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・周方向成分の特徴を持っている。

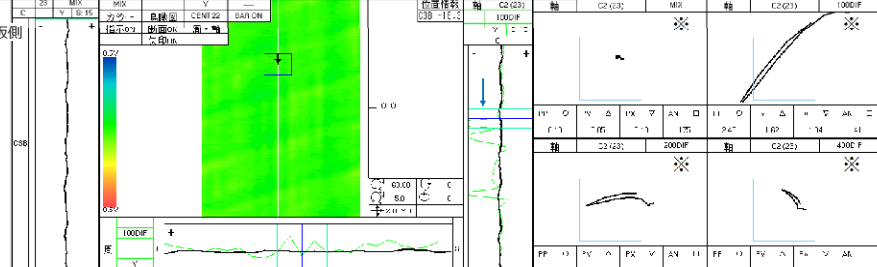
上記の通り軸方向成分および周方向成分の両方の成分が読み取れるため、広がりを持つ減肉と評価する。(下図参照)



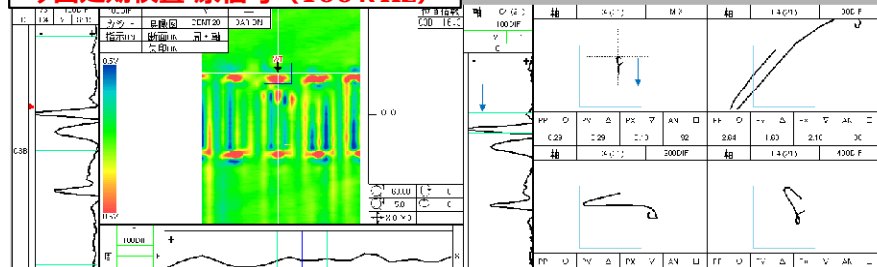
今回定期検査 フィルタ信号 (構造物信号消去)



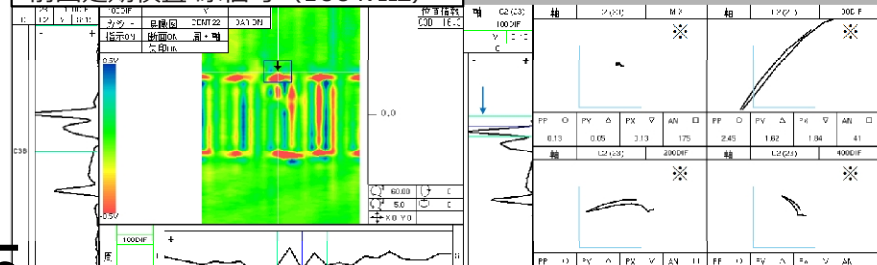
前回定期検査 フィルタ信号 (構造物信号消去)



今回定期検査 原信号 (100kHz)



前回定期検査 原信号 (100kHz)



※特異な信号がないため任意の位置で表示。

# 1. 事象の概要 (SG-ECT結果: C-SG 2/3)

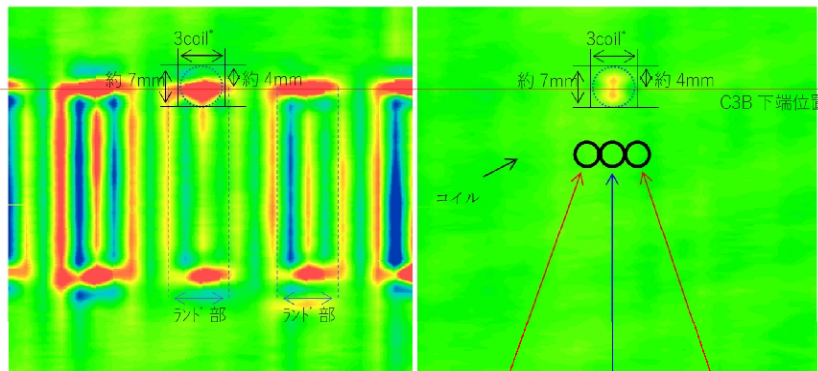
ECTデータを分析した結果、伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

C-SG低温側第三管支持板 (X55, Y8) のECT結果

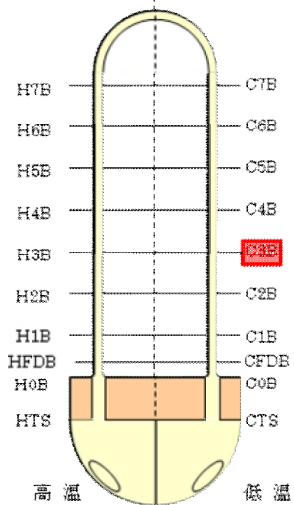
減肉率: 約32%

原信号 (100kHz)

フィルタ信号 (構造物信号消去)



\*1coil: 約3mm ※内側から見たイメージ



軸	25.01	98	71.04	98	25.01	98
軸方向	0.18	0.17	0.17	0.26	0.35	0.24
周方向	0.03	0.04	0.04	0.03	0.03	0.03

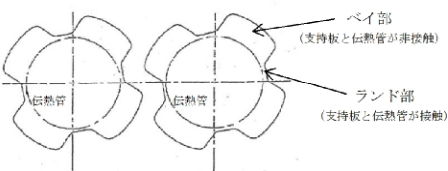
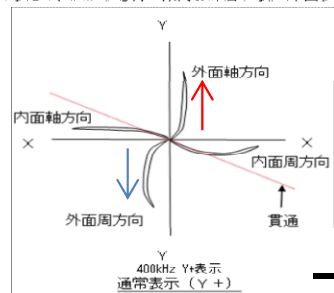
【C-SG X55-Y8 リサージュ波形】

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

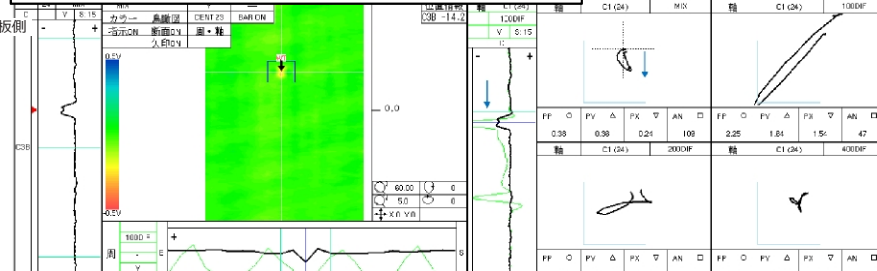
### 波形評価

- ・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。

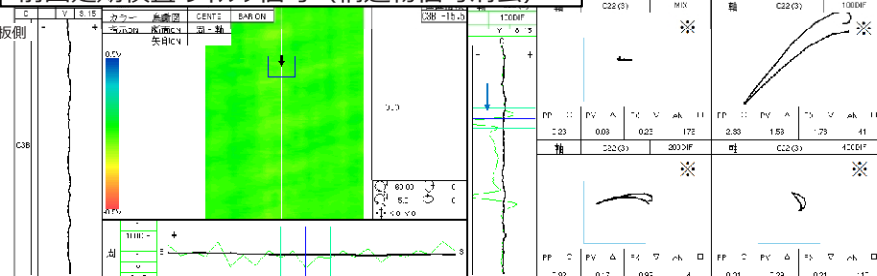
上記の通り軸方向成分および周方向成分の両方の成分が読み取れるため、広がりを持つ減肉と評価する。(下図参照)



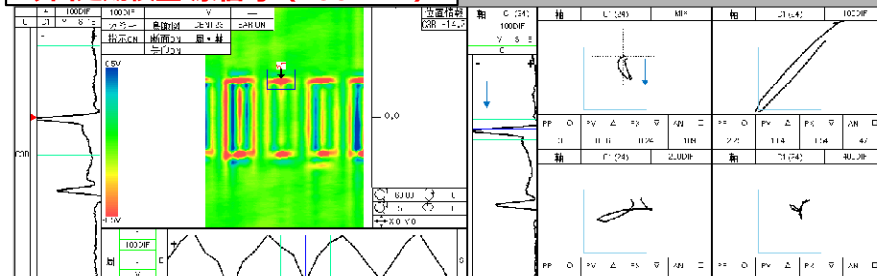
### 今回定期検査 フィルタ信号 (構造物信号消去)



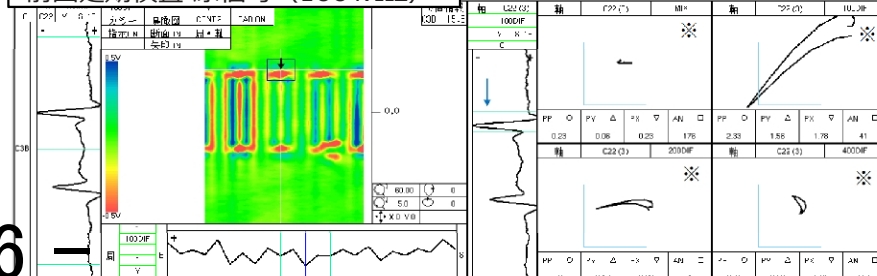
### 前回定期検査 フィルタ信号 (構造物信号消去)



### 今回定期検査 原信号 (100 kHz)



### 前回定期検査 原信号 (100 kHz)



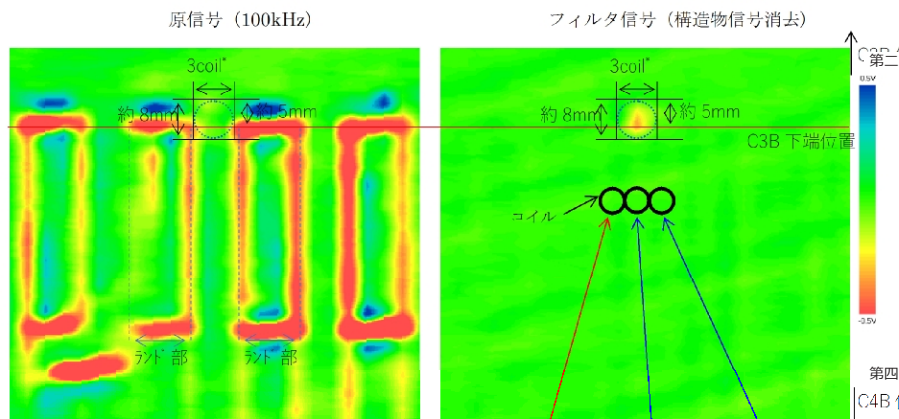
※特異な信号がないため任意の位置で表示。

# 1. 事象の概要 (SG-ECT結果: C-SG 3/3)

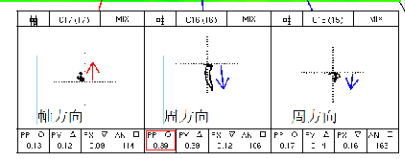
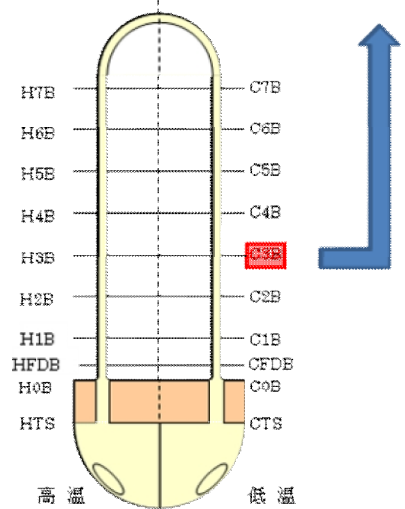
ECTデータを分析した結果、伝熱管外面の周方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

C-SG低温側第三管支持板 (X21, Y8) のECT結果

減肉率: 約36%



\*1coil: 約3mm ※内側から見たイメージ



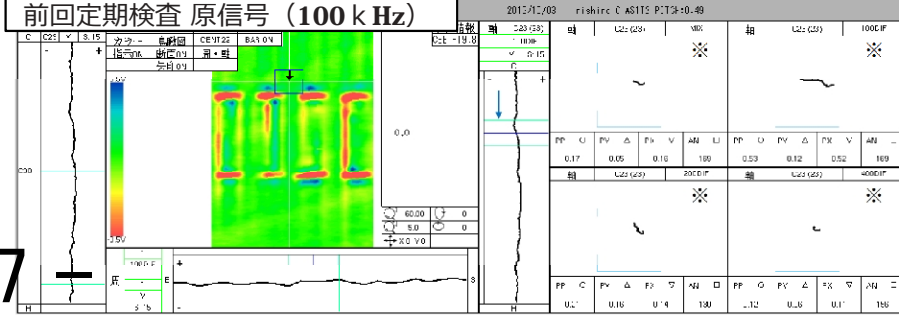
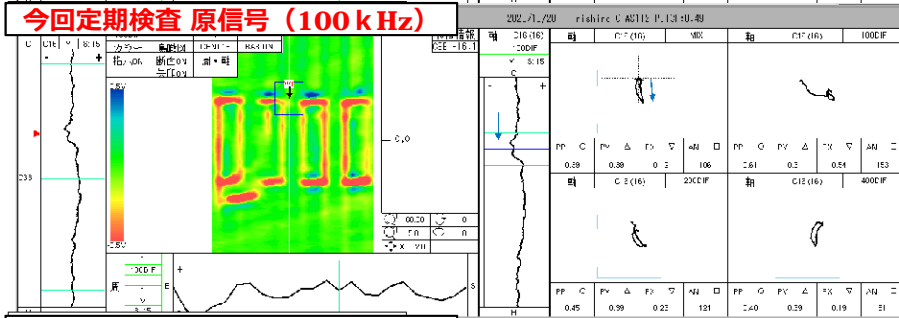
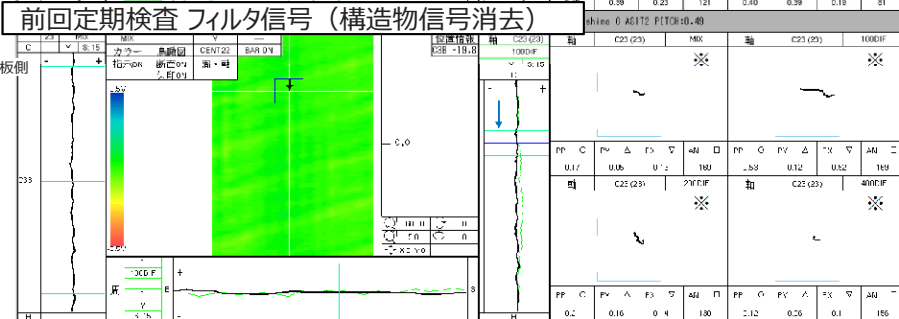
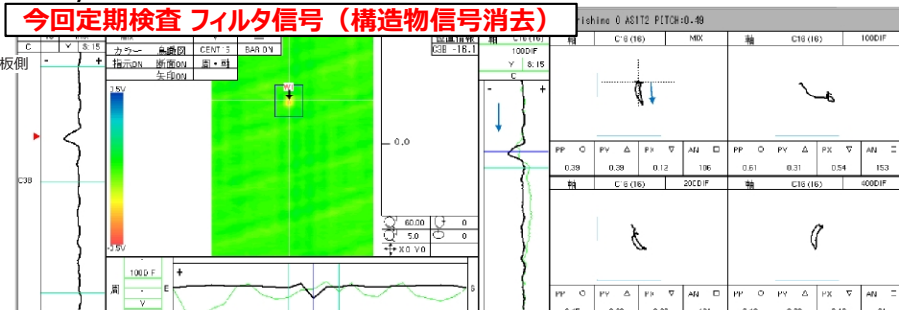
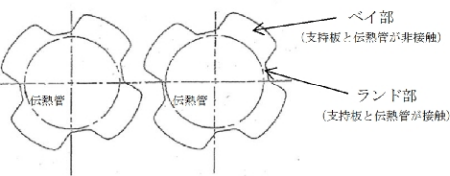
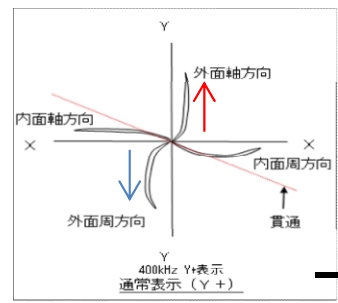
【C-SG X21-Y8】リサージュ波形

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)



※特異な信号がないため任意の位置で表示。

# 1. 事象の概要 (減肉伝熱管 2次側からの確認結果)

E C Tで減肉とみられる信号指示が認められた伝熱管を、2次側から小型カメラにて点検した結果、摩耗減肉痕とみられる箇所を確認した。なお、E C Tの信号指示による位置およびサイズと相違はなかった。

また、A - S G (X51,Y4) およびC - S GのうちX55,Y3の信号指示部付近において付着物を確認したことから、付着物を回収した。

○ A - S G

第三管支持板：長さ約4.0mm、幅1.0mm以下 (X51,Y4) 減肉率：約33%

○ C - S G

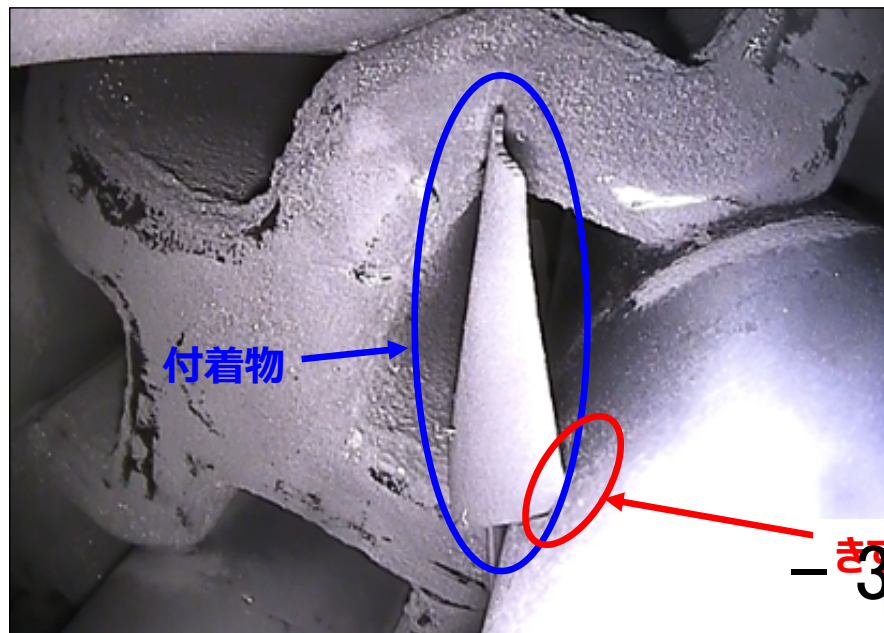
第三管支持板：長さ約2.0mm、幅約1.0mm (X55,Y3) 減肉率：約25%

第三管支持板：長さ約6.0mm、幅1.0mm以下 (X55,Y8) 減肉率：約32%

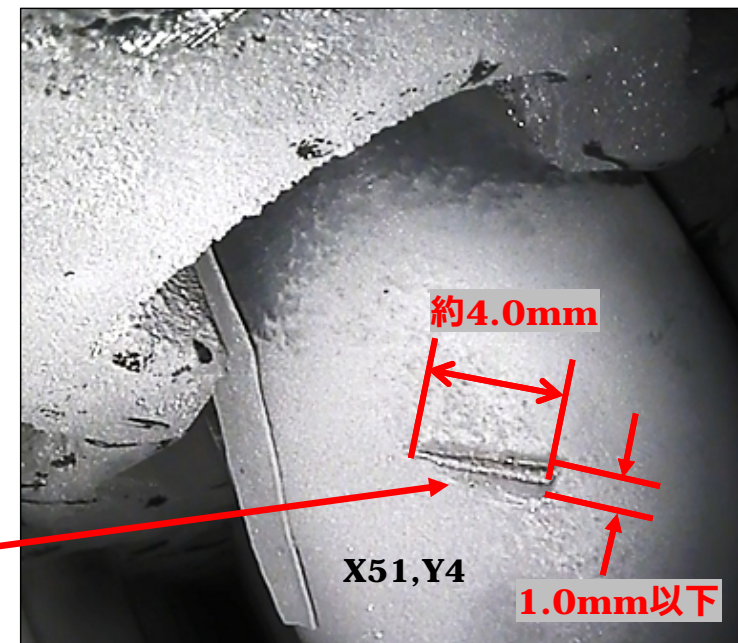
第三管支持板：長さ約7.0mm、幅1.0mm以下 (X21,Y8) 減肉率：約36%

A - S G ( X 5 1 , Y 4 )

付着物回収前



付着物回収後



- 38 -

## 2. 原因調査（要因分析に基づく調査）

### ○ S G伝熱管内面（1次側）からの損傷

E C Tの信号指示を確認した結果、伝熱管内面（1次側）にきずがないことを確認した。

### ○ S G伝熱管外面（2次側）からの損傷

- 粒界腐食割れ、ピitting、リン酸減肉発生の可能性について確認した結果、高浜発電所4号機では良好な水質が維持されており、発生の可能性はない。また、カメラによる外観観察結果からも、これらの損傷ではないことを確認した。
- 管支持板との接触による摩耗減肉は、E C T結果から周方向に4ヶ所の減肉指示を確認していないことから、管支持板との接触・摩耗によって発生した減肉ではない。
- E C Tの信号指示を確認した結果、デンティングではない。
- 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、流体振動による疲労損傷は発生しない。
- 当該部流速は約[ ]であり、かつ、T T 6 0 0合金は耐エロージョン性が高いことから（室温条件では約/ 0 / / 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。
- S G器外流入物による減肉について、カメラによる目視点検等を実施した結果、異物は確認できなかった。⇒ [ 1 0 ] ~ [ 1 6 ]
- S G器内流入物のうち、S G内部品の脱落について、設計図書により確認した結果、内部品の脱落がないことを確認した。⇒ [ 1 7 ]
- S G器内流入物のうち、AおよびC - S Gの伝熱管に付着したスケールおよびC - S Gの減肉を確認した伝熱管周辺で回収したスケールについて成分分析等を実施した結果、A - S Gに付着したスケールおよびC - S G伝熱管周辺で回収したスケールが減肉を発生させたと考える。⇒ [ 1 8 ] ~ [ 3 2 ]

### ○ 損傷以外のE C T信号指示

局所的なスケールの剥離は、減肉と識別できる[ 3 9 ]から、今回の信号はスケールの剥離ではない。

[ ] : 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。

高浜発電所4号機前回（第22回）定期検査において、以下の異物混入対策を実施しており、異物混入の可能性がないことを確認した。

なお、異物混入対策の内容については、高浜発電所3号機第24回定期検査における異物混入対策と同等の実施内容である。

- 機器内部へ立ち入る作業では直前に作業服の着替えや靴カバーを着用し、機器内部へ立ち入っていることから、異物が混入する可能性は極めて低い。
- 直接目視にて異物確認ができない範囲は小型カメラを用いて点検した結果、異物が混入していないことを確認している。
- 開口部に周辺作業と隔離したエリアを設けることで、異物の混入対策を図っており、異物が混入する可能性は極めて低い。
- 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しており、異物が混入する可能性は極めて低い。
- 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対応を実施しており、異物が混入する可能性は極めて低い。



## 2. 原因調査（過去事象を踏まえた点検調査 2 / 2）

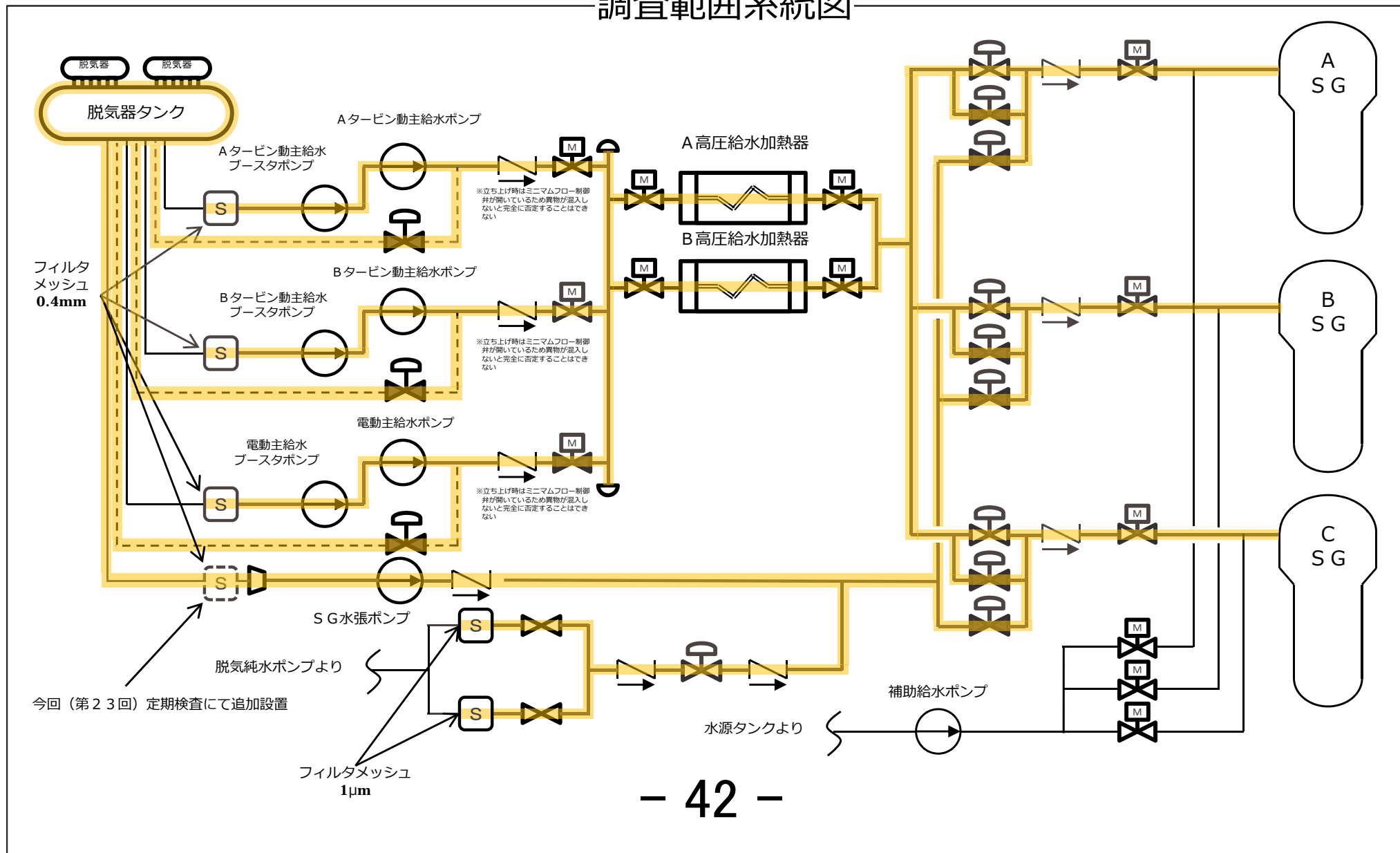
	機器立入	垂直配管取付弁	その他
（前回） 高浜発電所 3 号機 第 2 4 回定期検査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・機器内部に立ち入る前に、器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用する。</li> <li>・機器内部に立ち入る作業前に、作業服、靴等に異物の付着がないことを本人以外が確認する。</li> <li>・開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・弁点検時は、弁箱内部に使用する機材（ウエス含む）に異物の付着がないことを確実に事前確認する。</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>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> <li>・機器を開放した時点でうず巻きガスケット等の金属製の消耗品に損傷を確認した場合は、当社工事担当者に報告することに加え、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。</li> <li>・S G 水張ポンプ入口仮設ストレーナ設置した。</li> </ul>
（前回） 高浜発電所 4 号機 第 2 2 回定期検査	<ul style="list-style-type: none"> <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>・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>・開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。</li> </ul>	<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>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・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。</li> </ul>
（前々回） 高浜発電所 3 号機 第 2 3 回定期検査	<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>	<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>	—
（従前） 高浜発電所 3 号機 第 2 3 回定期検査以前 高浜発電所 4 号機 第 2 1 回定期検査以前	<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>	<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>	—

今回、S G 器内および器外点検の結果、異物は確認できなかったことから異物混入対策は有効であったと判断する。今後も引き続き同様の異物混入対策を実施する。

## 2. 原因調査 (異物流入調査 1 / 2)

- S Gに異物が流入する可能性のある系統について調査した。
- 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。

調査範囲系統図

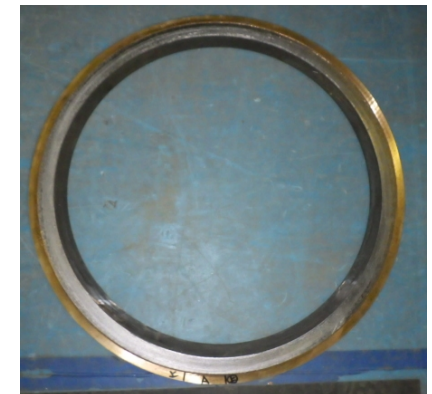


- S Gに異物が流入する可能性のある系統のうち点検している全ての対象機器 3 1 0 箇所について機器の健全性および異物管理状況を確認した結果、異物混入の可能性はないことを確認した。
- 今回 (第 2 3 回) の定期検査で、異物は確認していないものの、3号機第 2 4 回定期検査で S G器内でガスケットパッキンの一部を確認したことを受け、念のため以下の調査を実施した。
  - ・ 今回 (第 2 3 回) の定期検査で開放した機器について、ガスケットパッキン等が健全であることを確認した。(2 4 箇所)
  - ・ 渦巻きガスケットを使用している機器のうち、構造上流出の可能性のある機器について、過去の点検記録により異常のないことを確認した。(2 0 箇所)

開放点検箇所分類	箇所数	機器の健全性	異物混入の可能性
ポンプ	7	○	なし
容器	1	○	なし
フランジ	2 1	○	なし
ストレーナ	3	○	なし
弁	2 7 8	○	なし
合計	3 1 0	○	なし
人の立ち入りがある点検箇所 (再掲)	4	- 43 -	なし

### 調査結果例 健全性を確認

タービン動主給水  
ブースタポンプ入口フランジ



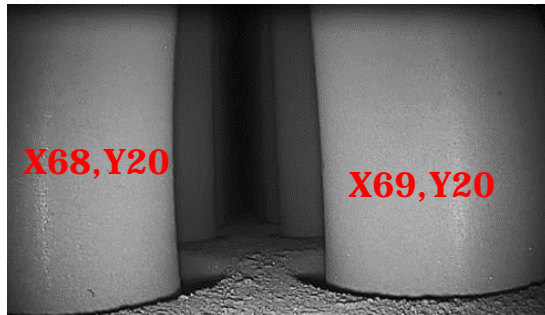
内径 : 約 5 0 0 mm

AおよびC - S G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減肉が認められた伝熱管近傍の第三管支持板の下面について目視点検を実施した。また、念のため、AおよびC - S Gの第三管支持板以上の管支持板上面の全ての範囲の目視点検を実施した。

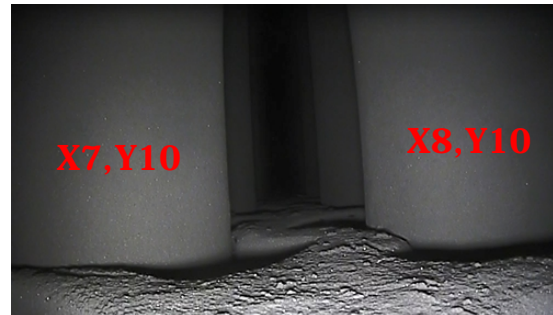
なお、伝熱管の減肉を確認していないB - S Gについても同様に目視点検を実施した。

- 伝熱管から剥離したスケールおよびスラッジ以外の異物は確認できなかった。

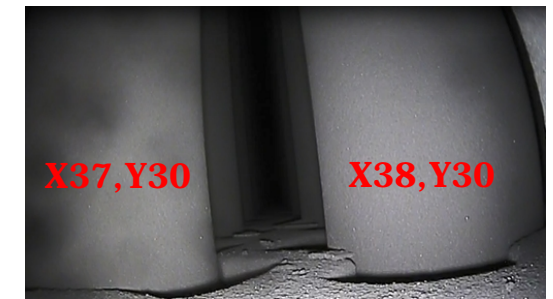
### A - S G点検結果の例



流量分配板上

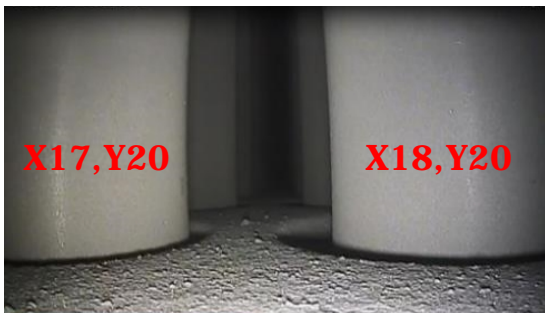


第一管支持板上

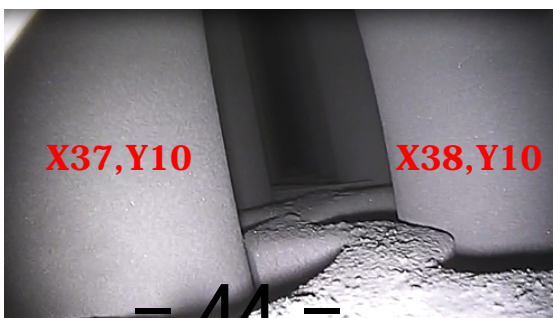


第二管支持板上

### C - S G点検結果の例



流量分配板上

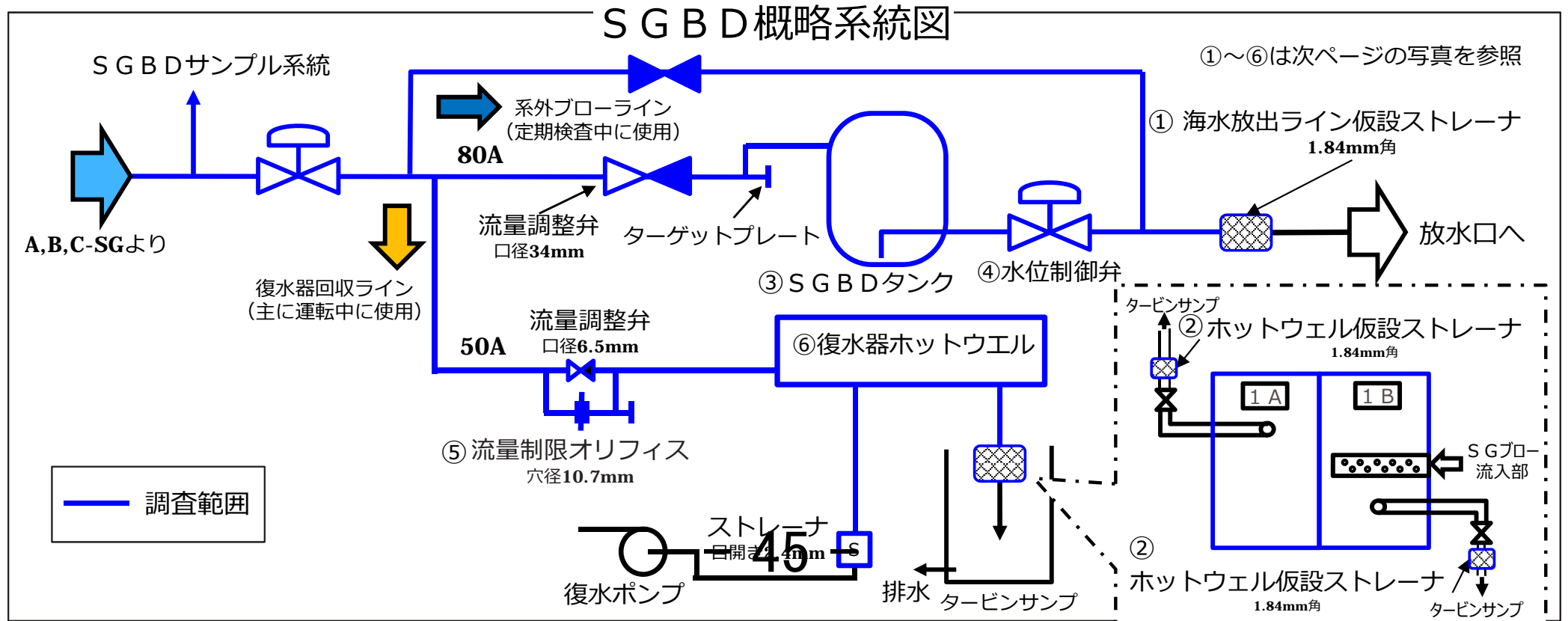


第一管支持板上



第二管支持板上

- 高浜発電所3号機第24回定期検査時のSG伝熱管損傷事象を踏まえ、SGブローの前に海水放出ラインおよび復水器ホットウェルブローラインに仮設ストレーナを設置し、SGブロー後に開放点検を実施した。
- 系外ブローラインにおいて異物が滞留する可能性がある機器のSGBDタンク、水位制御弁およびSGBD配管等について、開放点検を実施した。
- 復水器回収ラインにおいて流量調整弁をバイパスするオリフィスのライン（分岐ライン）から異物が復水器に流入する可能性が否定できないことから、復水器回収ラインの流量制限オリフィス、復水器ホットウェル、復水ポンプ入ロストレーナ等について、開放点検を実施した。



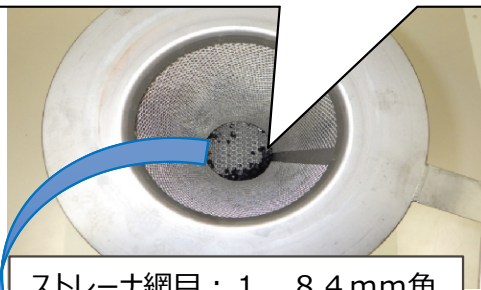
- 仮設ストレーナを確認した結果、スラッジおよび鉄さびを確認したが異物は確認できなかった。
- 系外ブローラインを確認した結果、異物は確認できなかった。
- 復水器回収ラインを確認した結果、異物は確認できなかった。

## 点検結果の例

### 【仮設ストレーナ】

① 海水放出ライン

内部に少量の回収物が認められた。



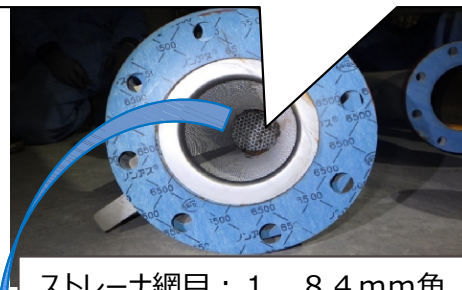
ストレーナ網目：1.84mm角



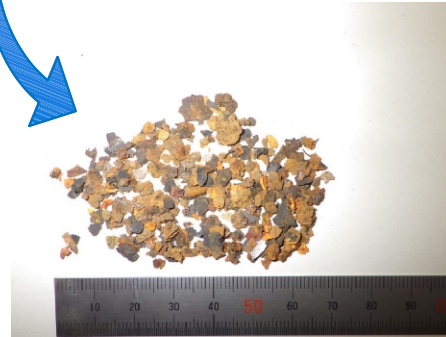
回収物の大きさ (最大)  
約6.5mm×5.0mm×厚さ約1.0mm  
回収量：約7.0g  
回収物はスラッジと思われる。

② 1Aホットウェルブローライン

内部に少量の回収物が認められた。



ストレーナ網目：1.84mm角



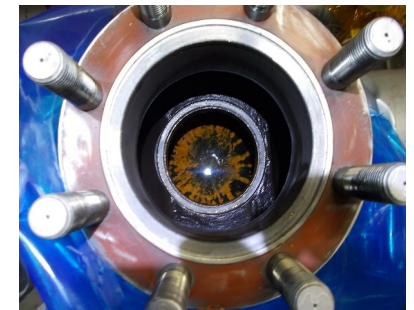
回収物の大きさ (最大)  
約6.0mm×6.0mm×厚さ約2.0mm  
回収量：約2.9g  
回収物は鉄さびと思われる。

### 【系外ブローライン】

③ SGBDタンク



④ 水位制御弁内部

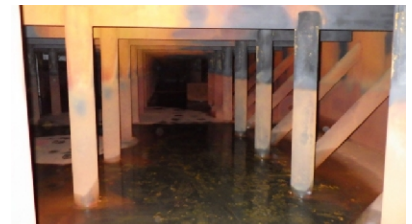


### 【復水器回収ライン】

⑤ 流量制限オリフィス



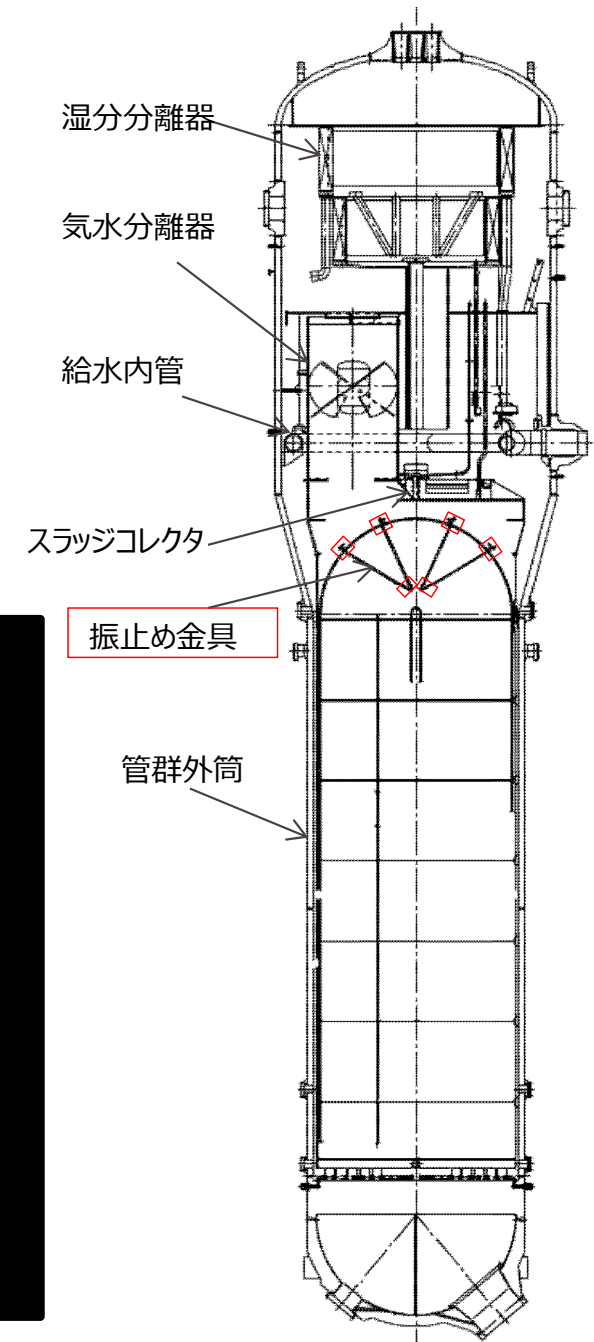
⑥ 復水器ホットウェル



## 2. 原因調査 (S G 内部品の脱落調査)

- 薄片形状のS G 内部品が脱落し、伝熱管を減肉させる可能性を設計図書により確認した。
- ・振止め金具のキー固定板等が、内部品として使用されていることを確認した。
  - ・これらの内部品は、溶接止めされていること、または周囲を溶接止めされた構造物に囲まれており、万が一、脱落したとしても周囲の構造物の外にはでないことから、内部品の脱落の可能性はないと考えられる。

内部品	部品名	サイズ(mm)
振止め金具	キー固定板	
振止め金具	板ばね	

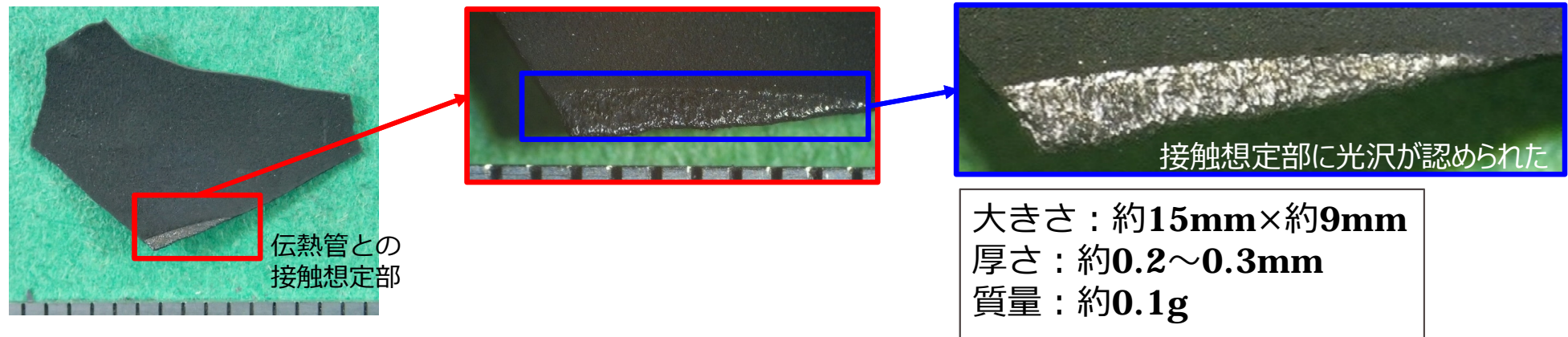


： 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

< A - S Gで確認した付着物（X51, Y4 第三管支持板下面） >

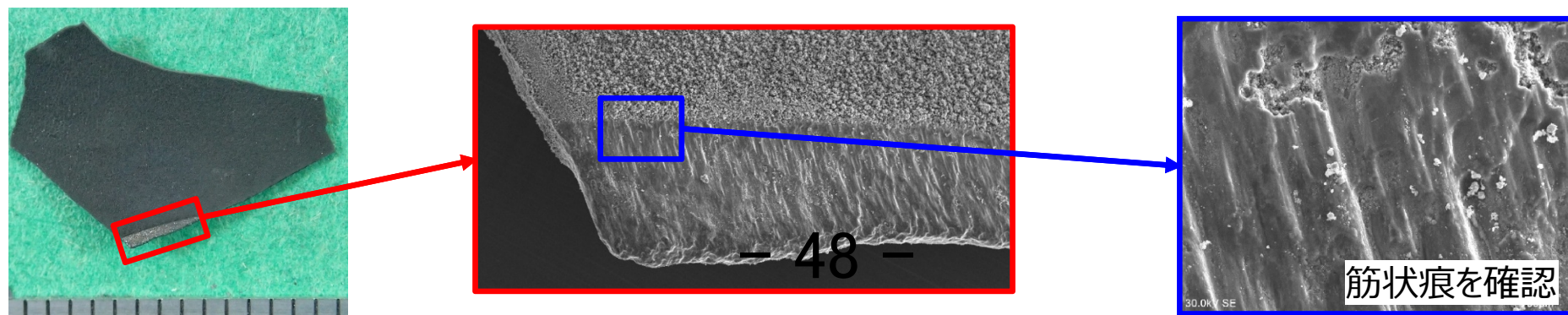
### ① 外観観察結果

- 伝熱管減肉部と付着物の接触想定部（角部）には、接触痕があり、光沢が認められた。
- 形状（**R**形状）を計測した結果、直径約22.5mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。



### ② 走査型電子顕微鏡による観察（以下、SEM観察）

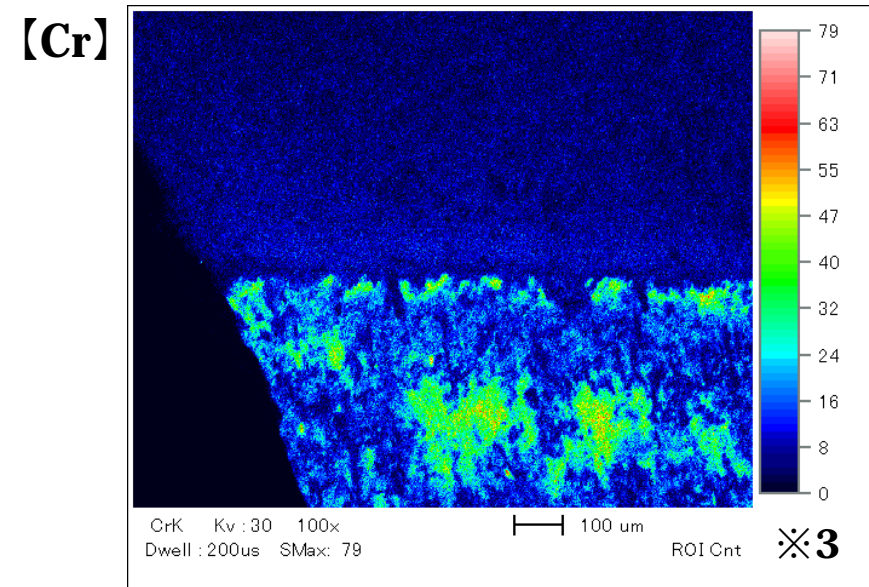
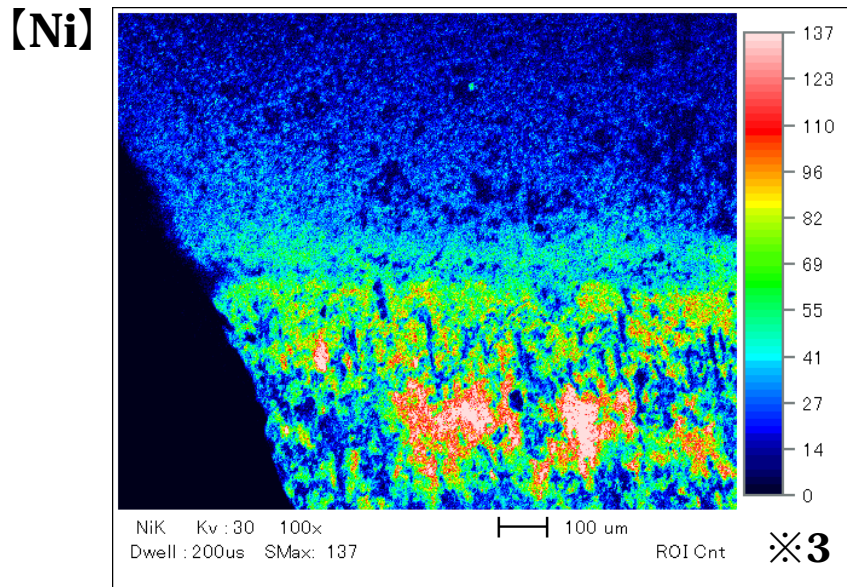
- 接触想定部（角部）を拡大観察した結果、筋状痕を確認した。





### ③ 成分分析（X線回折※1、EDS※2）

- 表面の化学成分分析を実施した結果、中央部の主成分が酸化鉄（主にマグネタイト）であったことから、スケールであると推定した。（以下、スケールA）
- 接触想定部（角部）の成分分析した結果、伝熱管の母材のNiおよびCrの成分を検出した。



※1：試料にX線を照射し、X線の散乱・干渉を解析することで、構成成分の同定をする分析方法

※2：エネルギー分散型X線分析（**Energy Dispersive X-ray Spectroscopy**）のこと。電子線照射により発生する特性X線のエネルギーと強度から構成元素を分析する装置

※3：分析した成分のX線の反射強度での、1秒当たりのX線カウント数（含有元素の濃度が高いほど大きくなる）

< C - S Gで確認した付着物（X55, Y3 第三管支持板下面） >

### ① 外観観察結果

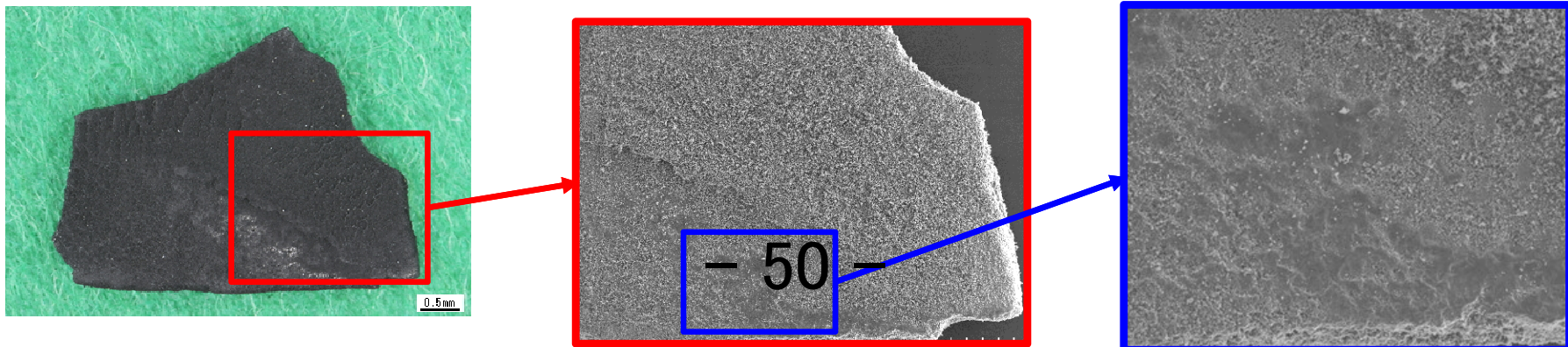
- 付着物の表面を観察した結果、接触痕および光沢は確認できなかった。
- 形状（**R**形状）を計測した結果、直径約21.9mmの円筒状に沿った形状であり、これは伝熱管の外径22.23mmに近い形状である。



大きさ：約5mm×約3mm  
厚さ：約0.4mm  
質量：約0.02g

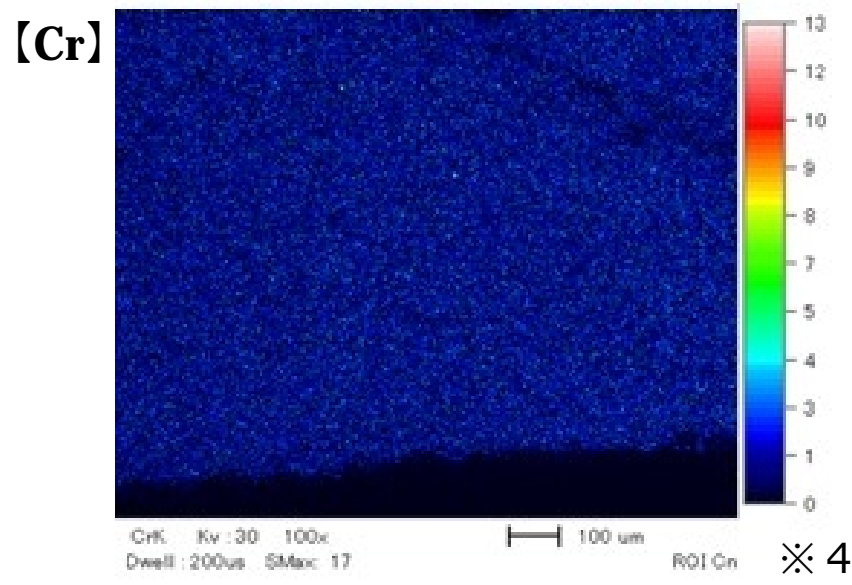
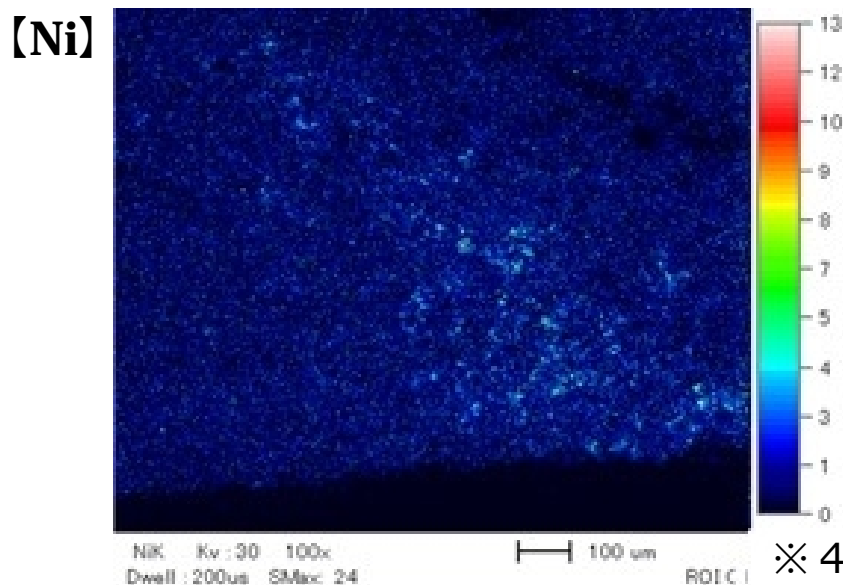
### ② SEM観察

- 拡大観察した結果、凹面の一部に接触痕はあったが、筋状痕は確認できなかった。



### ③ 成分分析（X線回折※1、EDS※2）

- 表面の化学成分分析を実施した結果、中央部の主成分が酸化鉄（主にマグネタイト）であったことから、スケールであると推定した。（以下、スケールC1）
- 凹面の接触痕を成分分析した結果、伝熱管の母材のNiは僅かに検出したが、Crは検出できなかった※3。



※1：試料にX線を照射し、X線の散乱・干渉を解析することで、構成成分の同定をする分析方法

※2：エネルギー分散型X線分析（**Energy Dispersive X-ray Spectroscopy**）のこと。電子線照射により発生する特性X線のエネルギーと強度から構成元素を分析する装置

※3：Ni成分は3%以下、Cr成分は検出限界以下

※4：分析した成分のX線の反射強度での、1秒当たりのX線カウント数（含有元素の濃度が高いほど大きくなる）