

# (案)

## 高浜発電所4号機の定期検査状況について (蒸気発生器伝熱管損傷に関する点検状況の続報)

2021年1月14日  
関西電力株式会社

高浜発電所4号機（加圧水型軽水炉 定格電気出力87万キロワット、定格熱出力266万キロワット）は、2020年10月7日から第23回定期検査を実施しており、3台ある蒸気発生器（SG）の伝熱管全数<sup>※1</sup>について渦流探傷検査（ECT）<sup>※2</sup>を実施した結果、A-SGの伝熱管1本、C-SGの伝熱管3本の管支持板<sup>※3</sup>部付近に外面（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ました。

小型カメラを用いて有意な信号指示があった伝熱管の外観を調査した結果、きずの大きさは、幅約1mm以下、周方向に4mmでした。また、A-SG伝熱管の信号指示箇所に着着物（附着物A：スケールA）を確認し、工場では化学成分分析、外観観察等の詳細調査を実施した結果、附着物A<sup>※4</sup>には、接触痕と光沢が認められました。

C-SGの3本の伝熱管には、信号指示箇所に幅約1mmもしくは1mm以下、周方向に約2mmから7mmのきずを確認しました。このうち、1本の伝熱管において、伝熱管と管支持板の間に附着物（附着物C：スケールC1）を確認しました。附着物Cは、回収時に管支持板と伝熱管の間に挟まっていた部分が粉碎したものの、残りの部分<sup>※5</sup>を回収し詳細調査を実施した結果、接触痕や光沢は確認できませんでした。

附着物Aは直径約22.5mm、附着物Cは、約21.9mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管（円筒）の外周（直径約22.2mm）に近い形状であることを確認しました。

附着物Aを拡大観察した結果、筋状痕を確認し、伝熱管との摺動によりできたものと推定しました。附着物Cには、表面の一部に平滑な面がありましたが、筋状痕は確認できませんでした。

また、主成分はマグネタイトであり、SG内で発生するスラッジと同成分であることを確認しました。附着物Aでは、伝熱管の主成分であるニッケルおよびクロムの成分を検出したことから、この附着物が伝熱管をきずつけた可能性が高いと推定しました。一方、附着物Cでは、表面の一部にニッケルをわずかに検出しましたが、クロムは検出されませんでした。

これらのことから、回収した附着物はプラント運転に伴い、SG伝熱管外表面に生成された鉄酸化物（スケール）と推定しました。

※1 過去に有意な信号指示が認められ、施栓した管等を除きA-SGで3,244本、B-SGで3,247本、C-SGで3,256本、合計9,747本。

※2 高周波電流を流したコイルを、伝熱管に接近させることで対象物に渦電流を発生させ、対象物のきず等により生じた渦電流の変化を電気信号として取り出すことができず等を検出する検査であり、伝熱管の内面（1次側）より、伝熱管の内面（1次側）と外面（2次側）の両方を検査している。

※3 伝熱管を支持する部品。

※4 幅約15mm、長さ約9mm、厚さ約0.2~0.3mm、重さ約0.1g

※5 幅約5mm、長さ約3mm、厚さ約0.4mm、重さ約0.02g

[2020年11月20日、25日、12月15日お知らせ済み]

スケールが伝熱管を傷つけるメカニズムを調査するため、C-SGにおいて損傷が確認された3本の伝熱管周辺の第1、第2管支持板上から約300個のスケールを回収し、その性状等の確認を行いました。その過程で、C-SGの伝熱管を損傷させた可能性のあるスケールを回収しました。これらの調査状況については以下の通りです。

## 1. C-SGより回収したスケールの調査

回収したスケールの外観観察等の結果、2つのスケール（スケールC2、スケールC3）の外表面に接触痕が認められたことから、工場において化学成分分析、外観観察等の詳細調査を実施した結果、以下のことを確認しました。

### (1) 外観観察結果

スケールC2（幅約18mm、長さ約10mm、厚さ約0.3mm、重さ約0.19g）、およびスケールC3（幅約23mm、長さ約11mm、厚さ約0.3mm、重さ約0.25g）には、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位に接触痕があることを確認しました。

スケールC2、スケールC3の形状を計測した結果、スケールC2は直径約22.3mmの円筒状、スケールC3は直径約22.6mmの円筒状に沿った形状であり、伝熱管（円筒）の外周（直径約22.2mm）に近い形状であることを確認しました。

### (2) 電子顕微鏡による観察結果

スケールC2、スケールC3について、伝熱管減肉部と接触していたと想定される部位を電子顕微鏡で拡大観察した結果、筋状痕を確認しました。

また、その他に局所的に平滑な面が認められましたが、拡大観察した結果、筋状痕は確認できませんでした。

### (3) 成分分析結果

スケールC2、スケールC3の化学成分分析の結果、主成分はマグネタイトであることを確認し、SG内で発生するスケールと同成分であることを確認しました。

また、スケールC2、スケールC3の筋状痕が認められた部位に伝熱管の主成分であるニッケルおよびクロムの成分が検出され、局所的に認められた平滑な面では、管支持板の材料に多く含まれるクロムの成分を検出しました。

#### (4) 管支持板下面へのスケールの付着状況の想定

スケールC2、スケールC3の形状について、C-SGのきずと、きず近傍の管支持板表面の接触痕の位置関係が一致するか確認を行いました。その結果、スケールC2ではX55-Y8、スケールC3ではX21-Y8のきずに対して、スケールの筋状痕が認められた箇所ときずの位置関係、平滑な面と管支持板表面の接触痕の位置関係等が一致することを確認しました。

### 2. AおよびC-SGから回収したスケールの断面性状の確認

A-SGの伝熱管きず近傍より回収した付着物（スケールA）およびスケールC2、スケールC3の一部を切断して断面を観察した結果、酸化鉄が密着した稠密層<sup>※6</sup>が大部分を占めていました。

※6 密度の高い酸化鉄の層

### 3. 伝熱管の場所ごとのスケール付着状況の確認

運転時間約9万時間の時点で、高浜3号機SG伝熱管の健全性確認を目的とした抜管調査を実施しており、その調査記録等を確認した結果、伝熱管の場所によりスケールの性状が異なり、伝熱管上部のスケールほど粗密で厚く、下部ほど稠密で薄いスケールが生成されることを確認しました。

このため、現時点の高浜4号機においても上記の付着状況と同様であることを確認するため、高浜4号機の今回の定期検査においてSGの上部（第7管支持板上）から1個、下部（第2管支持板から管板上の間）から1個スケールを採取し、断面観察を行った結果、上部のスケールは粗密層<sup>※7</sup>が主体で厚く、下部のスケールは稠密層が主体で薄いことを確認しました。

※7 比較的密度の低い酸化鉄の層

### 4. スケールによる伝熱管外面摩耗減肉の可能性調査

#### (1) 過去の摩耗試験結果

高浜4号機および高浜3号機において、至近の定期検査において蒸気発生器伝熱管損傷が発生したことを踏まえ、その調査の過程で、スケールに起因する可能性を調査するため、SG内からスケールを採取して摩耗試験を行っています。

その際、スケールの厚さが大きいほどスケールが折損しにくいいため、摩耗試験に使用するスケールは比較的厚いものを中心（約0.6～1.0mmの比較的厚いものを7個、約0.3～0.4mmの比較的薄いものは2個）に選定していましたが、いずれもスケールが先に摩滅したため、スケールが伝熱管を有意に減肉させる可能性は低いと推定しました。

## (2) 今回の摩耗試験結果

今回、伝熱管をきずつけた可能性が高いスケールA、スケールC 2、スケールC 3の性状は、スケール厚さが約0.2~0.3mmであり、稠密層が主体であった。このため、SG内から回収されたスケールのうち、厚さが0.2~0.3mm程度かつ稠密層が主体のスケールを3個選定して摩耗試験を行いました。その結果、伝熱管に与える減肉量がスケール摩滅量よりも大きくなることを確認し、稠密なスケールが伝熱管に繰り返し接触することにより、伝熱管に有意な減肉が生じる可能性があることを確認しました。

以上の調査結果から、稠密層が主体であるスケールA、スケールC 2およびスケールC 3が伝熱管にきずをつけた可能性が高いと推定したため、引き続き摩耗試験を実施し、データの拡充を行います。

## 5. SGの運転履歴調査

スケールの生成には、SGへの鉄イオンや鉄微粒子の持ち込み量が関係していることから、運転時間や水質管理の状況について調査を行いました。

### (1) 運転時間

高浜4号機のSGは、運転開始以降22.2万時間の運転を行ってきました。また、高浜3号機のSGも同様に、22.3万時間の運転実績があり、他のプラントよりも運転時間が長いことを確認しました。

### (2) 2次側水質管理履歴

2次系水質管理に関しては、溶存酸素、電気伝導率等を管理し、またpHを高く維持することで給水設備からの溶出による鉄イオンや鉄の微粒子の持ち込みを抑制してきており、現在の水質管理に問題がないことを確認しました。

しかしながら、高浜3、4号機は他プラントに比べ運転年数も長く、運転初期には鉄の持ち込み量の多くなる比較的低いpHで水質管理を行っていた期間が長かったことから、SGへ持ち込まれた鉄分の積算量が多いことを確認しました。

なお、大飯3号機および4号機は、SG出口圧力やSG伝熱性能などのプラント性能指標の回復を目的として、SG内の薬品洗浄を実施しており、その結果、スケールの除去、粗密化が図られています。

## 6. 他プラントのSG伝熱管スケールとの性状比較

SGの運転履歴を調査した結果、高浜4号機および高浜3号機は運転時間がほぼ同じであることや、他プラントは、これらのプラントと比較して運転時間が短く、SG内への鉄の持ち込み量は少ない状況であることを確認しました。

高浜2号機および大飯4号機のSG伝熱管下部からスケールを採取し、断面観察を行い、その性状を確認した結果、高浜4号機SG内から採取したスケールと比べて、稠密層の割合が少ないことを確認しました。また、高浜2号機のSG伝熱管下部では、伝熱管へのスケール付着がごく軽微であり、採取できるほどの厚みがないことを確認しました。

他プラントのスケールを用いて摩耗試験を行いました。試験にあたっては、データ充実のため大飯4号機に加え、大飯3号機のスケールを用いました。その結果、試験開始直後にスケールが折損するか、伝熱管よりも先にスケールが摩滅しました。

## 7. 原因調査状況のまとめ

今回の調査により、以下のことを確認しました。

### (1) スケールの性状

高浜4号機SG内のスケールには、SG下部で発生する稠密なもの、SG上部で発生する粗密なものが存在しており、伝熱管にきずをつけた可能性が高いスケールA、スケールC2およびスケールC3は稠密であることを確認しました。また、稠密なスケールを用いた摩耗試験では、伝熱管に与える減肉量がスケール摩滅量よりも大きくなることを確認しました。

### (2) 鉄の持ち込み量

高浜3、4号機では、運転初期には比較的低いpHで水質管理を行っていた実績があり、かつ、他プラントに比べ低いpHでの運転年数も長いことから、SGへ持ち込まれた鉄分の積算量が多いことを確認しました。

### (3) 他プラントとの比較

高浜3、4号機以外のスケールは、採取できるほどの厚みがない若しくは、採取できた場合でも稠密層が薄く、摩耗試験においてもスケールが折損または摩滅し、伝熱管に有意な減肉を与える可能性は低いと推定しました。

8. 今後の予定

引き続き、回収したスケールの分析や摩耗試験等を行い、原因調査を進めるとともに、再発防止策について検討を行います。

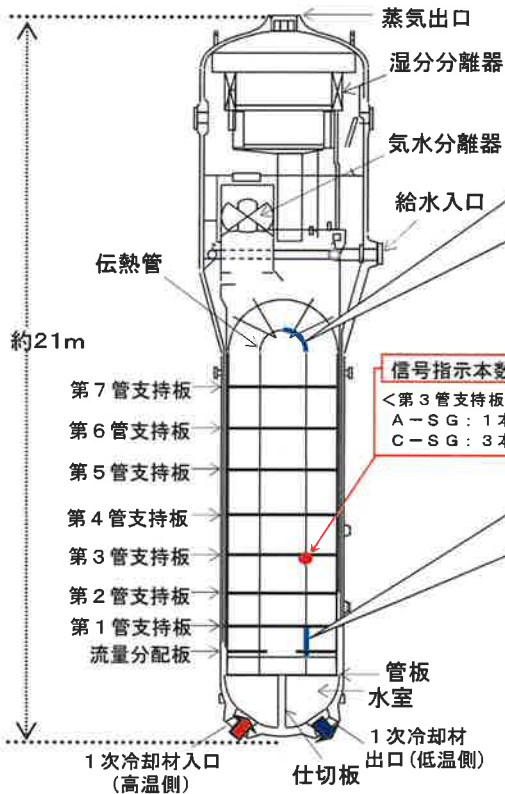
以 上

添付資料：高浜発電所4号機の定期検査状況について  
(蒸気発生器伝熱管損傷に関する点検状況の続報)

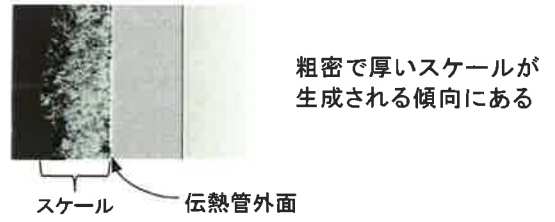
## 高浜発電所4号機の定期検査状況について (蒸気発生器伝熱管損傷に関する点検状況の続報)

発生箇所

### 蒸気発生器の概要図



#### 伝熱管上部のスケール性状※



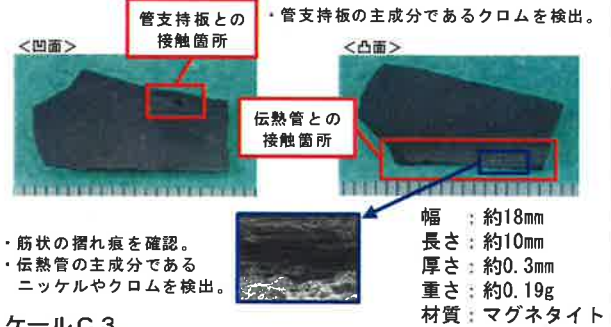
#### 伝熱管下部のスケール性状※



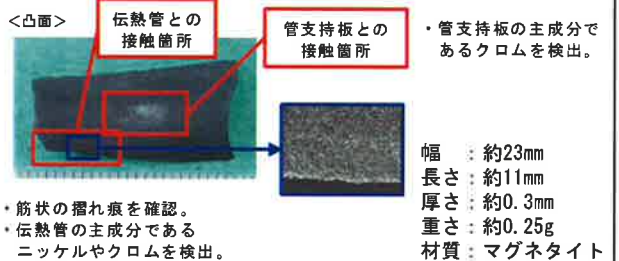
※過去の記録調査知見より

### C-SGで回収したスケールの分析結果

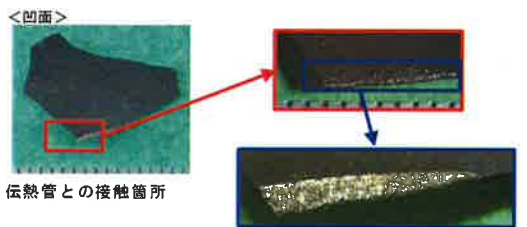
#### スケールC2



#### スケールC3



### A-SGで回収したスケールの分析結果



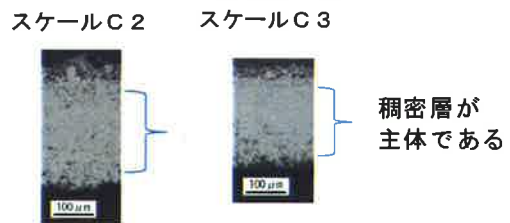
幅 : 約15mm  
長さ : 約9mm  
厚さ : 約0.2mm~0.3mm  
重さ : 約0.1g  
材質 : マグネタイト

・伝熱管との接触箇所に光沢を確認。  
(電子顕微鏡による観察の結果、筋状の摺れ痕を確認。)  
・伝熱管の主成分であるニッケルやクロムを検出。

#### 断面観察結果



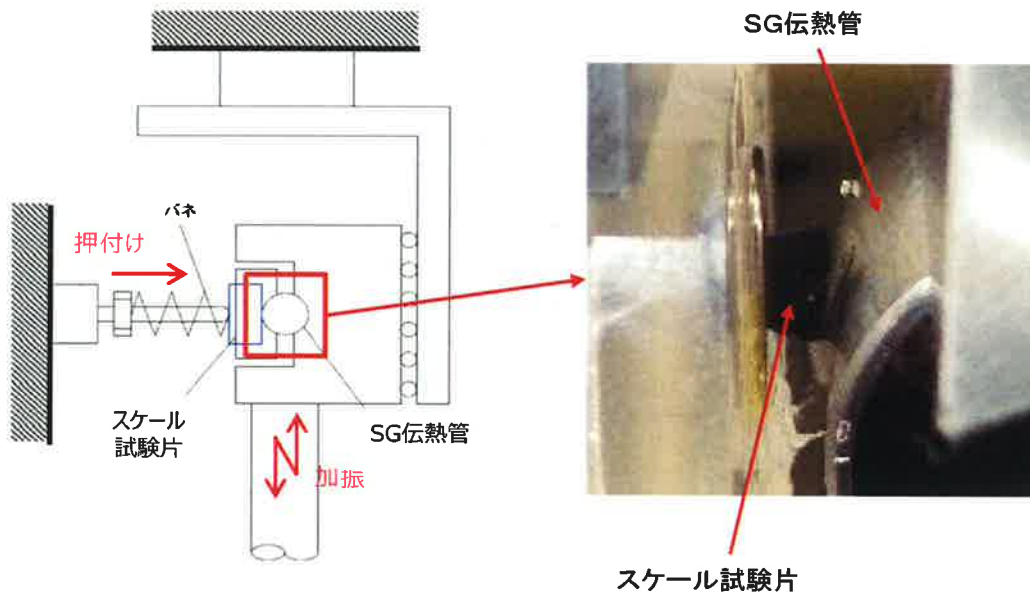
#### 断面観察結果



## 摩耗試験の状況

### 【摩耗試験概要】

工場において、試験装置により、SG内から回収したスケールを伝熱管（実機と同材料）に押し付けた状態で加振し、摩耗減肉を与える可能性についての確認を行いました。



### 【これまでの摩耗試験の結果】

＜高浜4号機SG内から回収したスケール＞  
伝熱管に摩耗減肉を与える影響が大きい。

＜大飯4号機SG内から回収したスケール＞  
伝熱管に摩耗減肉を与える影響が小さい。

## これまでの調査実績と今後の予定

	11月	12月	1月
SG器内点検	■	■	
SG器外点検	■	■	□
摩耗試験	■	■	□
薬品洗浄効果の確認			■ □

■ : 実績 □ : 予定

## (参考)SG内への鉄の持ち込み量とSGの運転時間

ユニット	鉄持ち込み量(kg)	運転時間(万時間)
高浜4号機	2,490	22.2
高浜3号機	2,620	22.3
大飯3号機	1,850	17.0
大飯4号機	1,950	17.2
高浜1号機	680	10.9
高浜2号機	940	12.5
美浜3号機	780	9.0