伊方発電所3号機 スチームコンバータの不具合について

令和5年11月四国電力株式会社

1. 件 名

伊方発電所3号機 スチームコンバータの不具合について

2. 事象発生の日時

令和5年5月1日 14時35分

3. 事象発生の設備

3号機 蒸気タービン設備 スチームコンバータ

4. 事象発生時の運転状況

3号機 第16回定期事業者檢查中

5. 事象発生の状況

伊方発電所3号機は第16回定期事業者検査中のところ、スチームコンバータ^{*1}の加熱管の非破壊検査を実施した結果、5月1日14時35分、加熱管の広範囲に施栓^{*2}基準^{*3}を超える外面からの減肉^{*4}を確認し、当該加熱管の施栓が必要となり当該設備が必要な能力^{*5}を有していないと判断した。

なお、本事象による環境への放射能の影響はなかった。

(添付資料-1、2)

※1 スチームコンバータ

純水を2次系の蒸気(放射性物質を含まない)で沸騰させ、プラント補助設備(空調設備、洗濯設備、廃液蒸発装置など)を運転するための補助蒸気を供給する設備。プラント補助設備への補助蒸気の供給は、補助ボイラとスチームコンバータにて供給可能。

※ 2 施栓

減肉が進んだ加熱管に蒸気を通気しない(使用しない)ように、対象の加熱管の入口と出口をプラグ(栓)で塞ぐこと。

※3 施栓基準

減肉量に応じて加熱管を使用しない処置(施栓)を行う基準。 (当該スチームコンバータの施栓基準:約0.74mm)

※4 減肉

加熱管の厚みが減っている状態。

※5 必要な能力

設計仕様である発生蒸気量30t/hの蒸気を生成する能力。

6. 事象の時系列

2月23日 0時20分 伊方発電所3号機 送電停止

3月13日~14日 スチームコンバータ加熱管について渦電流探傷検

査^{**6}(以下「ECT」という。)を実施したところ、加熱管全数156本について施栓基準を超える外面からの減肉および目視にて加熱管内外面全

般にスラッジ*7を確認

3月30日~31日 スラッジ除去のため、加熱管内外面を高圧水で洗

浄実施

4月 5日~ 6日 再度、ECTを実施したが、1回目と同様の結果

であることを確認

4月19日~5月1日 超音波水浸探傷検査**8(以下「水浸UT」とい

う。)を実施したが、ECTと同様の結果であり、 5月1日にスチームコンバータが必要な能力を有

していないことを判断

※6 渦電流探傷検査(ECT)

材料の微小な欠陥などを検出するための非破壊検査で、材料表面に渦電流を流して、材料に発生する電磁誘導の変化から検査対象のきずとその深さを検出する手法。

※ 7 スラッジ

経年使用により加熱管表面等に形成された酸化被膜や汚れ。

※8 超音波水浸探傷検査(水浸UT)

材料の微細な欠陥などを検出するための非破壊検査で、水で満たされた 管内にセンサーを挿入し、管内面より管壁に垂直に超音波を入射し管内壁 と管外壁からのエコーの時間間隔から管肉厚を測定する手法。

7. 調査結果

スチームコンバータ加熱管の減肉について、以下の調査を実施した。

(1) 現地調査

a. 渦電流探傷検査(ECT)

加熱管のECTを実施した結果、加熱管全数156本について#3~#4 支持板間**9で施栓基準以上の外面からの減肉が認められた。

(添付資料-3)

※9 #3~#4支持板間

蒸気室側より3番目と4番目に配置された支持板の間。 (加熱管は一定の間隔に配置された全4つの支持板で支えられている。)

b. 超音波水浸探傷檢查(水浸UT)

ECTと異なる検査方法である水浸UTを実施したところ、ECTと同様に、加熱管全数156本に減肉を確認した。

(2) 詳細調査

加熱管全数156本の内、加熱管の位置により減肉の状況に違いがあるか最外周および中央部の6本について、各支持板間(4箇所)を抜管し、以下の詳細調査を実施した。

なお、詳細調査の a. b. については、当該 6 本全てに同様の調査結果が確認されたため、当該 6 本のうち、7. (1) a. にて最も加熱管の厚みが減少していた最外周部の 6 列 1 番加熱管の調査結果を記載する。また、c. d については、b. にて最も加熱管の厚みが減少していた最外周部の 6 列 1 番加熱管のみを調査しており、その調査結果を記載する。

(添付資料-4)

a. 外面および内面目視調査

加熱管外面は、全ての支持板間で黒褐色のスラッジが確認された。これに加えて、#3~#4支持板間の加熱管外面については、茶褐色のスラッジが確認され、茶褐色のスラッジには膜状に剥離した箇所が認められた。

加熱管は銅合金製であり、内面はその素材に近い黄土色のごく薄い皮膜が確認された。

また、内外面いずれも、くぼみ、ひび割れ等の損耗は認められなかった。 今回調査した他の5本の加熱管についても、同様の傾向が確認された。

(添付資料-5)

b. 断面調查

非破壊検査で著しい外面からの減肉が認められた#3~#4支持板間の輪切り断面において、内面の減肉は確認されなかったことに対し、外面はなめらかな凸凹状の減肉(公称厚さ 1.24mm に対し、1.10~0.40mm までの減肉)が確認された。

また、7. (2). a にて外面に黒褐色のスラッジが確認された箇所では、著しい減肉は確認されず、茶褐色のスラッジが確認された箇所では減肉が認められた。

今回調査した他の5本の加熱管についても、同様の傾向が確認された。

(添付資料-6)

c. 光学顕微鏡および電子プローブマイクロアナライザー(EPMA) *10 による拡大観察

茶褐色のスラッジが確認された箇所について拡大観察した結果、管外面が 減肉しており、その表面に茶褐色のスラッジが層状に付着していた。なお、 内面側に腐食などは認められなかった。

(添付資料-7)

※10 電子プローブマイクロアナライザー (EPMA)

真空中で細く絞られた電子線を材料の表面に照射し、発生する特性 X線を分析することで、材料に含まれる元素やその量を測定する装置。

d. 加熱管付着物成分分析

茶褐色および黒褐色のスラッジの成分分析を実施した結果、主成分は亜酸 化銅(茶褐色)および酸化銅(黒褐色)であった。

(添付資料-8)

e. 加熱管成分分析

加熱管 (同一ロットで製造されている加熱管の一部(1列3番加熱管(管板~#1支持板間)))の化学成分を分析した結果、JIS規格値内であり、加熱管の組成に異常は認められなかった。

(添付資料-8)

(3) 当該機器の点検内容と実績調査

スチームコンバータについては、伊方発電所3号機運転開始時(平成6年度)より使用しており、第4回定期検査時(平成11年11月)に開放点検および加熱管全数の漏えい検査、非破壊検査(ECT)を実施し問題ないことを確認している。

なお、第4回定期検査時のECT結果に問題はなく約5年間の運転で異常が無いこと、および故障時には補助ボイラによる補助蒸気の供給が可能であることを踏まえ、定期的な非破壊検査(ECT)は取り止めその後は実施していなかった。

また、第12回定期検査時(平成22年1月)では開放点検および加熱管全数の漏えい検査、第14回定期検査時(平成29年10月)では開放点検を実施し、加熱管の外表面にスラッジが見られたものの顕著な異常は確認されていない。

(4) 運転状況調査

第13回定期検査(平成28年8月)から第16回定期検査(令和5年2月)までの運転パラメータを確認したが、特に異常と思われる有意な変化は確認されなかった。

(5) 同様事例調査

加熱管の減肉事象は、伊方発電所と同材質(銅合金)の加熱管を採用している他の発電所(他社を含む)においても発生しているが、定期的なECTによって減肉状況を監視し、多数の加熱管で施栓基準を超える減肉が発生する前に施栓・加熱管取り替え等の適切な保全が実施されていることを確認した。

また、他の発電所においても、加熱管の減肉は給水入口部(伊方発電所のスチームコンバータにおける「#3~#4支持板間エリア」)で著しくなっていることを確認した。

(6)類似機器の調査

最高使用圧力、温度、加熱管の材質等が同じで使用環境が若干異なるスチームコンバータドレン冷却器(加熱管:69本)は、第16回定期検査時(令和5年2月)にてECTを実施し減肉は認められなかった。

8. 推定原因

調査結果より、以下のプロセスで加熱管外面が減肉したと推定した。

- (1) スチームコンバータ上部よりスチームコンバータ内に供給された水(純水)が、加熱管の周囲に貯水され、加熱管内部を通る加熱蒸気と熱交換を行い蒸気となる。
- (2) 供給された水には溶存酸素が含まれており、加熱管(銅)と溶存酸素が反応し銅の酸化物が生成される。
- (3) 給水入口部に近い「#3~#4支持板間エリア」は、スチームコンバータ内に 供給される水の流れにより銅の酸化物の被膜が剥離され、加熱管(銅)の外面に 新たな銅の酸化物が生成される。

経年使用により銅の酸化物の生成、剥離が繰り返され、加熱管外面の減肉が 徐々に進展し施栓基準以上の減肉となる。

なお、加熱管の減肉を検知できるECTは第4回定期検査時(平成11年度) 以降実施しておらず、この減肉の進展が把握できなかった。

(4)給水入口部から離れるほど、水の流れが緩やかとなるため、銅の酸化物が剥離せず亜酸化銅が酸化銅になるまで残り、減肉が進展しない。

9. 対策

(1) スチームコンバータ加熱管全数156本に施栓基準以上の外面減肉を確認したことから、次回定期検査(令和6年度)にてスチームコンバータ加熱管の取り替えを実施する。

なお、加熱管取り替えまでの間、プラント補助設備で使用する補助蒸気については、補助ボイラにより供給することから、プラントの運転に問題はない。

(2) 加熱管の減肉状態を監視できるように、加熱管のECTを4定検毎に実施するよう保全計画を見直した。

なお、点検頻度は、本事象が経年使用により減肉が徐々に進展する事象であり、 第4回定期検査における約5年間運転した後のECT結果で急激な減肉の進展 がなかったことを踏まえ、4定検毎に設定した。

(3)類似機器であるスチームコンバータドレン冷却器について、約30年間の運転で減肉は認められなかったが、今後は減肉状態を定期的に監視するために、8定検毎に計画している開放点検に合わせてECTを実施するよう保全計画を見直した。

以 上

添付 資料

添付資料-1 伊方発電所3号機 スチームコンバータ概略系統図

- 添付資料-2 スチームコンバータ構造図

 添付資料-3 スチームコンバータ渦電流探傷検査(ECT) 外面減肉箇所の位置および状況図

 添付資料-4 詳細調査対象の位置図

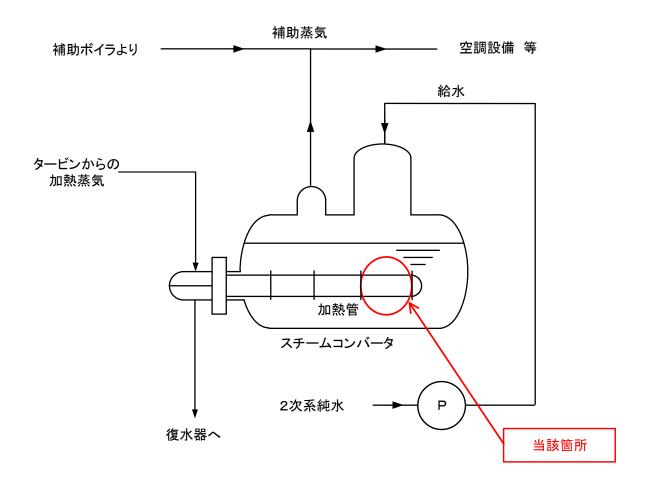
 添付資料-5 加熱管外面および内面状況
- 添付資料-7 光学顕微鏡および電子プローブマイクロアナライザー (EPMA) による拡大観察

加熱管肉厚測定結果および断面状況

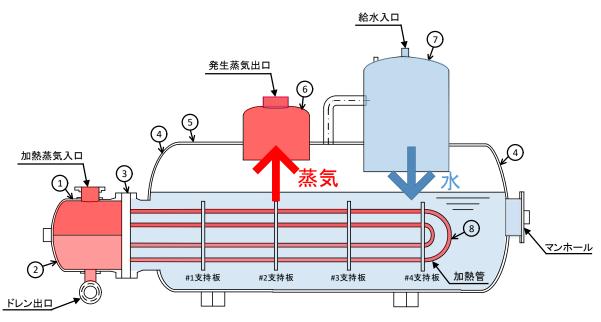
添付資料-8 加熱管付着物および加熱管成分分析結果

添付資料-6

伊方発電所3号機 スチームコンバータ概略系統図



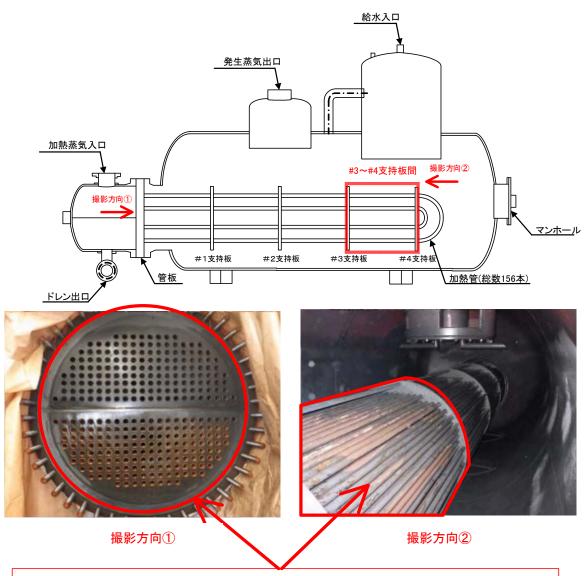
スチームコンバータ構造図



	主 要 仕 様			
種類	横置 U 字管式			
加熱管本数	銅合金管	本	156	
最高使用圧力	加熱蒸気側(蒸気室側)	kg/cm ²	31. 5	
	発生蒸気側(胴側)	kg/cm ²	9.5	
最高使用温度	加熱蒸気側(蒸気室側)	$^{\circ}$	240	
	発生蒸気側 (胴側)	$^{\circ}$	180	

	主要材料						
1	蒸気室胴板	SB46:ボイラ及び圧力容器用炭素鋼					
2	蒸気室鏡板	SB46:ボイラ及び圧力容器用炭素鋼					
3	管板	SB46:ボイラ及び圧力容器用炭素鋼					
4	胴鏡板	SB46:ボイラ及び圧力容器用炭素鋼					
⑤	胴本体	SB46:ボイラ及び圧力容器用炭素鋼					
6	分離室	SB46:ボイラ及び圧力容器用炭素鋼					
7	脱気室	SB46:ボイラ及び圧力容器用炭素鋼					
8	加熱管	C 7 0 6 0 T - O:銅合金管					

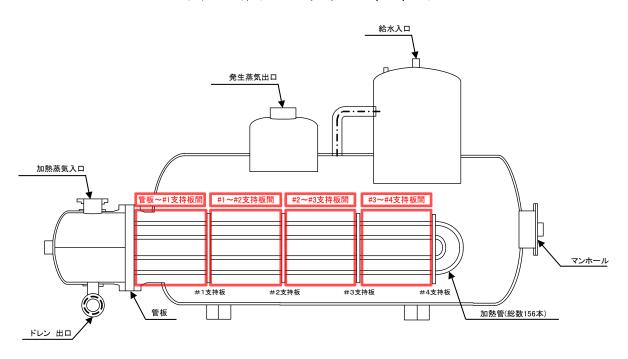
スチームコンバータ渦電流探傷検査(ECT) 外面減肉箇所の位置および状況図

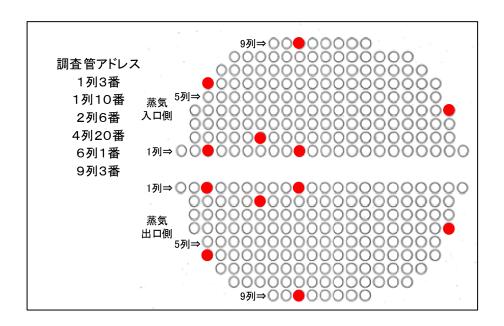


渦電流探傷検査にて#3~#4支持板間の加熱管全数に外面減肉が確認された。

添付資料-4

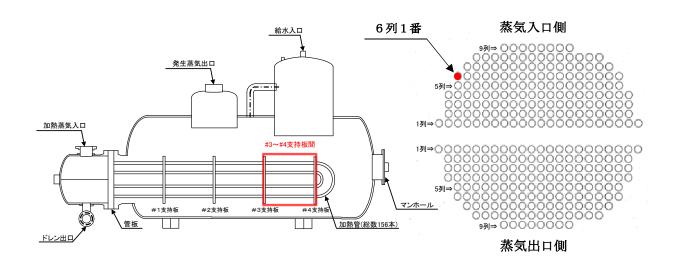
詳細調査対象の位置図





加熱管の位置により減肉の状況に違いがあるか最外周および 中央部の6本について、各支持板間(4箇所)を抜管し、詳細調 査を実施した。

加熱管外面および内面状況

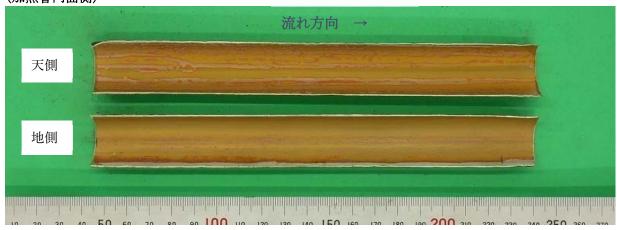


<6列1番(#3~#4支持板間)>

(加熱管外面側)

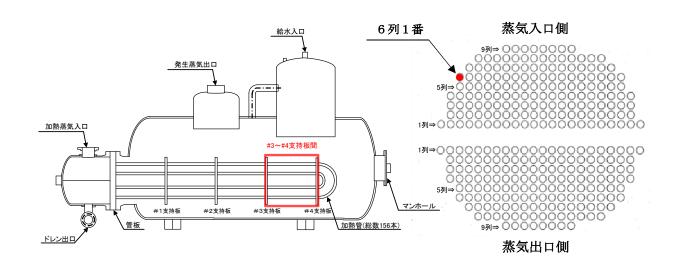


(加熱管内面側)



今回調査した他の5本の加熱管についても同様の傾向が確認された。

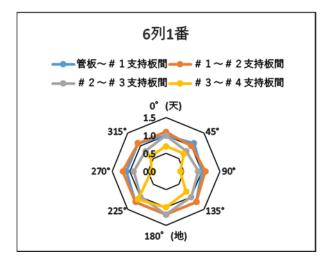
加熱管肉厚測定結果および断面状況

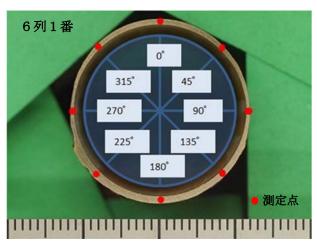


<6列1番> (mm)

位置	0°(天)	45°	90°	135°	180°(地)	225°	270°	315°	平均
管板~#1支持板間	1.0	1.1	1.0	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.11
#1~#2支持板間	1.1	1.0	1.1	1.2	1.2	1.2	1.2	1.1	1.14
#2~#3支持板間	1.0	0.8	0.9	1.0	1.2	1.0	0.9	0.8	0.95
#3~#4支持板間	0.7	0.7	0.4	0.8	1.0	1.1	0.4	0.6	0.71

加熱管公称厚さ:1.24mm 施栓基準:0.74mm





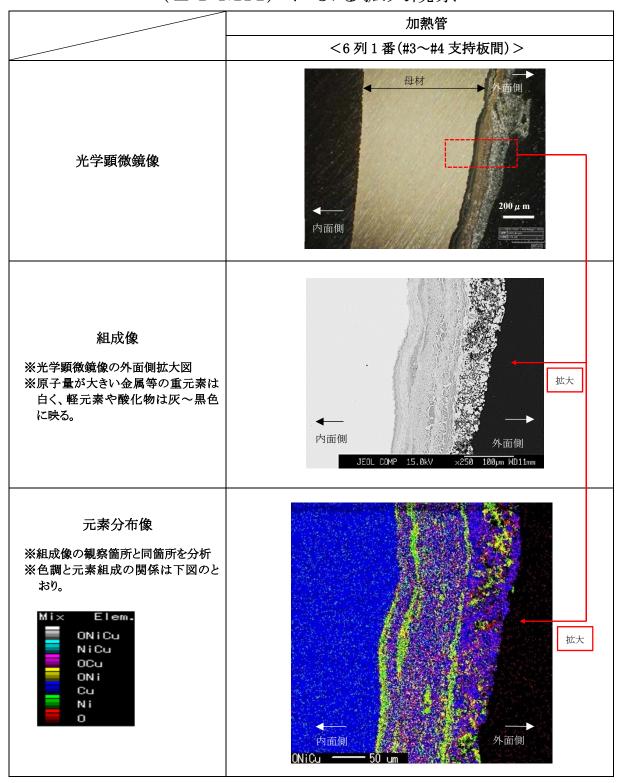
加熱管肉厚測定結果

加熱管断面(#3~#4 支持板間 下流側)

今回調査した他の5本の加熱管についても同様の傾向が確認された。

光学顕微鏡および電子プローブマイクロアナライザー

(EPMA) による拡大観察

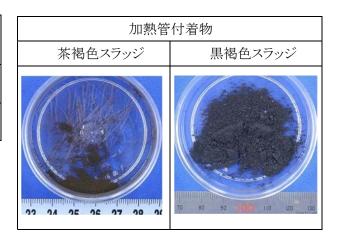


加熱管付着物および加熱管成分分析結果

1. 加熱管付着物成分分析結果

<6列1番(#3~#4支持板間)>

		結晶性化合物 (主成分)
加熱管	茶褐色スラッジ	Cu ₂ O(亜酸化銅)
	黒褐色スラッジ	CuO(酸化銅)



2. 加熱管成分分析結果

<1列3番(管板~#1支持板間)>

単位:%

	Pb	Fe	Zn	Mn	Ni	Cu+Fe+Mn+Ni
分析値	< 0.01	1. 17	< 0.01	0.70	9. 72	99. 9
規格値 JIS H 3300 (C7060T)	≦ 0. 02	1.00~ 1.80	≦ 0.50	0.20~ 1.00	9.00~ 11.00	≧ 99. 5