

関西電力株式会社高浜発電所 4号機で確認された蒸気発生器 伝熱管の損傷に係る対応について

平成30年6月27日
原子力規制庁

1. 経緯

平成30年6月22日、関西電力株式会社(以下「関西電力」という。)は、定期検査中において高浜発電所4号機の蒸気発生器3台の伝熱管¹全数について渦流探傷検査(ECT)²を実施したところ、1台の蒸気発生器の伝熱管2本の高温側管板部に、有意な信号指示が認められたことから、本事象は法令に基づき原子力規制委員会に報告する事象に該当する³と判断した。なお、本事象に伴う外部への放射能の影響はなかった。詳細は同6月25日に提出された別添報告書⁴のとおり。

2. 今後の対応

関西電力によると、本事象は、過去に経験した信号指示と同様に、伝熱管の高温側管板部をローラ拡管している上端部において、伝熱管内面の軸方向の傷を示す信号指示であることから、蒸気発生器製造時に高温側管板部で伝熱管を拡管する際、伝熱管内部で局所的に発生した引張り残留応力と運転時の内圧及び高温側の1次冷却材環境が相まって、伝熱管内面から応力腐食割れが発生・進展したものと推定しており、この対策としては、当該信号指示が認められた伝熱管2本について、高温側及び低温側の管板部で施栓を行い、使用しないこととしている。

原子力規制庁としては、本事象による人や環境への影響はないことが確認されていること、その状況から過去の事例⁵と同様の事象であると判断できること、並びに関西電力によるこれまでの調査を踏まえた推定原因及びその対策が妥当と考えられることから、今後、新たな知見などにより関西電力からの報告内容に変更がない限り、本報告書の提出をもって本事象の事故報告に係る対応を終了することとしたい⁶。

なお、INES(国際原子力・放射線事象評価尺度)評価については、INESレベル0の「安全上重要でない事象」と評価する。

¹ 材料はニッケル基合金(インコネル600合金)を使用している。

² 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。

³ 実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条(事故故障等の報告)第3号において定められている事項に該当。

⁴ 報告書の全文は、<https://www.nsr.go.jp/activity/bousai/trouble/houkoku/00000124.html> を参照。

⁵ 直近では、平成29年2月8日の原子力規制委員会において高浜発電所3号機での蒸気発生器伝熱管損傷事象を評価している。

⁶ 平成30年6月22日に提出された伝熱管の施栓に係る工事計画届出については、今後、当庁において確認していく。

実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則（抜粋）

（事故故障等の報告）

第百三十四条 法第六十二条の三の規定により、発電用原子炉設置者（旧発電用原子炉設置者等を含む。以下次条及び第百三十六条において同じ。）は、次の各号のいずれかに該当するときは、その旨を直ちに、その状況及びそれに対する処置を十日以内に原子力規制委員会に報告しなければならない。

- 一 核燃料物質の盗取又は所在不明が生じたとき。
- 二 発電用原子炉の運転中において、発電用原子炉施設の故障により、発電用原子炉の運転が停止したとき若しくは発電用原子炉の運転を停止することが必要となったとき又は五パーセントを超える発電用原子炉の出力変化が生じたとき若しくは発電用原子炉の出力変化が必要となったとき。ただし、次のいずれかに該当するときであって、当該故障の状況について、発電用原子炉設置者の公表があったときを除く。
 - イ 施設定期検査の期間であるとき（当該故障に係る設備が発電用原子炉の運転停止中において、機能及び作動の状況を確認することができないものに限る。）
 - ロ 運転上の制限を逸脱せず、かつ、当該故障に関して変化が認められないときであって、発電用原子炉設置者が当該故障に係る設備の点検を行うとき。
- ハ 運転上の制限に従い出力変化が必要となったとき。

三 発電用原子炉設置者が、安全上重要な機器等又は常設重大事故等対処設備に属する機器等の点検を行った場合において、当該安全上重要な機器等が技術基準規則第十七条若しくは第十八条に定める基準に適合していないと認められたとき、当該常設重大事故等対処設備に属する機器等が技術基準規則第五十五条若しくは第五十六条に定める基準に適合していないと認められたとき又は発電用原子炉施設の安全を確保するために必要な機能を有していないと認められたとき。

- 四 火災により安全上重要な機器等又は常設重大事故等対処設備に属する機器等の故障があったとき。ただし、当該故障が消火又は延焼の防止の措置によるときを除く。

（略）

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（抜粋）

（使用中の亀裂等による破壊の防止）

第十八条 使用中のクラス1機器、クラス1支持構造物、クラス2機器、クラス2支持構造物、クラス3機器、クラス4管、原子炉格納容器、原子炉格納容器支持構造物及び炉心支持構造物には、その破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥があってはならない。

2 使用中のクラス1機器の耐圧部分には、その耐圧部分を貫通する亀裂その他の欠陥があってはならない。

（使用中の亀裂等による破壊の防止）

第五十六条 使用中の重大事故等クラス1機器、重大事故等クラス1支持構造物、重大事故等クラス2機器及び重大事故等クラス2支持構造物には、その破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥があってはならない。

関原発 第 164 号
平成30年 6 月 25 日

原子力規制委員会 殿

大阪市北区中之島3丁目6番16号
関西電力株式会社
取締役社長 岩根 茂

高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について

実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第134条の規定により、別紙
のとおり取り纏めたので報告します。

発電用原子炉施設故障等報告書

平成30年 6月25日

関西電力株式会社

件名	高浜発電所4号機 蒸気発生器伝熱管の損傷について																				
事象発生の日時	平成30年6月22日 10時52分 (技術基準に適合していないと判断した日時)																				
事象発生の場所	高浜発電所4号機 原子炉格納容器内																				
事象発生の発電用原子炉施設名	原子炉冷却系統施設 一次冷却材の循環設備 蒸気発生器 (A)																				
事象の状況	<p>1. 事象発生の状況</p> <p>高浜発電所4号機(加圧水型軽水炉、定格電気出力87万kW、定格熱出力266万kW)は、平成30年5月18日より第21回定期検査中であり、3台ある蒸気発生器(以下「SG」という。)の伝熱管*1全数について、健全性を確認するため渦流探傷試験*2(以下「ECT」という。)を実施した。</p> <p>その結果、A-SGの伝熱管2本について、高温側の管板*3部に有意な信号指示*4が認められたことから、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、平成30年6月22日10時52分に判断した。</p> <p>なお、B、C-SG伝熱管については、ECTで有意な信号指示は認められなかった。</p> <p>*1 SGの中で1次冷却材(1次側)と給水(2次側)の熱交換を行う逆U字形の管群。1次冷却材は入口管板部(高温側)から入り、給水と熱交換後に出口管板部(低温側)へ流れる。</p> <p>*2 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(ECT; Eddy Current Test)。全周に対して渦電流の発生と検出を別々のコイルを用いた24組のコイルで伝熱管の欠陥による渦電流の変化を信号として検出する。</p> <p>*3 伝熱管が取り付けられている部品。伝熱管と管板で1次冷却材と給水の圧力障壁となる。</p> <p>*4 ノイズレベル(雑音信号レベル)を超える信号であって、SG管支持板等の外部構造物あるいは伝熱管の形状等に起因する信号(疑似信号)ではない信号指示。</p> <p>2. ECT結果</p> <p>(1) 検査期間 平成30年6月20日～平成30年6月22日(定期事業者検査終了日)</p> <p>(2) 検査範囲 SGの施栓*5済みの伝熱管を除く、全数の伝熱管についてECTを実施した。 (単位:本)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>SG</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>合計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>検査対象本数</td> <td>3,247</td> <td>3,248</td> <td>3,259</td> <td>9,754</td> </tr> </tbody> </table> <p>*5 伝熱管の1次側出入口部分に機械式栓を用いて栓をし、供用外とすること。</p> <p>(3) 検査結果 ECTデータを評価した結果*6、2本の伝熱管に有意な信号指示が認められた。有意な信号指示が認められた箇所は、高温側の管板部であった。 (単位:本)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>SG</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>合計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>指示管本数</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>2</td> </tr> </tbody> </table> <p>*6 一般社団法人日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格(2008年改訂版) JSME S NA1-2008 SG伝熱管に対する判定基準に従う。</p>	SG	A	B	C	合計	検査対象本数	3,247	3,248	3,259	9,754	SG	A	B	C	合計	指示管本数	2	0	0	2
SG	A	B	C	合計																	
検査対象本数	3,247	3,248	3,259	9,754																	
SG	A	B	C	合計																	
指示管本数	2	0	0	2																	

事 象 の 原 因

1. 原因調査

SG伝熱管のECTで有意な信号指示が認められた原因調査を実施した。

(1) 信号指示の状況

色調図表示^{*7}で分析した結果、伝熱管高温側管板部をローラ拡管している上端部^{*8} (22ピッチ) に有意な信号指示があることを確認した。

また、リサーチ表示^{*9} (信号表示) 並びに鳥瞰図表示^{*10}で分析した結果、いずれも伝熱管内面の軸方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

なお、今回の定期検査までのECTで、当該管には有意な信号指示が認められていないことを確認した。

^{*7} 24組分のコイルのチャートを平面状に並べ、信号振幅に応じて色調として表示させたもの。伝熱管全長についての信号指示の大きさや位置等の分析に用いる表示方法。

^{*8} 管板の穴に伝熱管を挿入し、伝熱管の内面から高い圧力 (水圧) で拡管した後に、管板下部から上端部に向かって機械式ローラで伝熱管を押し広げて伝熱管と管板を圧着した最終ピッチ部。

^{*9} 渦電流変化の電気信号を図で表したもの (水平成分および垂直成分を同一画面に表示)。

^{*10} 信号の波形を3次元的に表したもので、信号の分布 (イメージ) の詳細分析に用いる表示方法。

(2) 製造履歴調査

a. 製造時の検査記録による調査

SG伝熱管について建設時の製造記録を調査した結果、問題となる記録がないことを確認した。

b. 関係者への聞き取りによる調査

SGの製造手順について聞き取り調査を行った結果、管板に伝熱管の穴を加工した後に内面を目視で検査しているが、きずが認められた場合には専用の工具で手入れを行うことを確認した。

その後、伝熱管を管板の穴へ挿入し、伝熱管の内面から高い水圧をかけて拡管した後に、仕上げとして機械式ローラで伝熱管を更に拡管 (22ステップ) し、伝熱管を管板に密着固定させる手順で製造されていることを確認した。

(3) 運転履歴調査

a. 1次冷却材温度、圧力

運転開始以降、第21回定期検査開始までの間、1次冷却材温度・圧力変化の調査を行った結果、過大な応力を発生させる異常な温度・圧力の変化がないことを確認した。

b. 放射線監視装置

第21サイクルにおける各放射線監視装置指示値の調査を行った結果、各指示値に有意な変化はなく、SGの1次側から2次側への1次冷却材の漏えいがないことを確認した。

c. 1次冷却材の水質

運転開始以降、第21回定期検査開始までの間、1次冷却材中のpH、電気伝導率、塩素イオン、溶存酸素、溶存水素の調査を行った結果、各データに有意な変化はなく基準値の範囲内で推移していたことを確認した。

(4) 材料調査

当該部分における製造時のミルシートを調査した結果、材料の成分はSG製造メーカーの仕様どおりであり、伝熱管はインコネルTT600^{*11}製であることを確認した。

^{*11} ニッケルをベースとし、鉄、クロム等を含有するニッケル基合金の商標名。

(5) 設計図書調査

工事計画認可申請書の強度計算書を調査した結果、延性割れ^{*12}、疲労割れ^{*13}に対して、設計上考慮されていることを確認した。

^{*12} 材料に過大な応力がかかった時に発生する割れ (破壊)。

^{*13} 材料に応力が継続的に、あるいは繰り返し受け強度が低下した時に発生する割れ。

事 象 の 原 因

(6) 過去の知見調査

SGの伝熱管内面の損傷モードについて、過去の知見等の調査を実施した。

a. 粒界腐食割れ*¹⁴、ピitting*¹⁵について

1次冷却材環境下では塩素イオン、溶存水素、溶存酸素が適切な基準値に保たれていれば、伝熱管内では沸騰による不純物濃縮が起こることはなく、かつ還元性雰囲気を持てるため、粒界腐食割れ、ピittingは発生しないことを確認した。

*¹⁴金属の結晶粒の境目(粒界)に沿って進展する腐食。

*¹⁵塩素イオン等に起因する金属表面の被膜破壊によって起きる局所的な腐食。

b. 局所変形について

局所変形の場合、ECTのリサーチ表示で位相角が0°となり、リサーチ波形の巻きも大きくなるが、今回のECT信号指示は内面きずの特徴を示す位相角を有しており、リサーチ波形に巻きが認められないことから、局所変形による信号指示でないことを確認した。

c. エロージョン*¹⁶について

SGの伝熱管材料にエロージョンが発生する場合の限界流速は非常に速い(約70m/s以上)が、これに対して当該部分の流速は十分遅い(平均約6m/s)ことから、エロージョンは発生しないことを確認した。また、伝熱管内は流体が衝突する形状でないことを確認した。

*¹⁶管内を流れる水により配管内面が摩耗する現象。

d. PWSCCについて(高浜発電所の経験)

(a) 抜管調査結果

4号機の第11回定期検査(平成11年4月~平成11年7月)時におけるSG伝熱管のECTで、高温側管板部のローラ拡管上端部に有意な信号指示が認められ、当該部位の抜管調査を行った結果、有意な信号指示は伝熱管内面を起点とした1次側からと考えられる軸方向に沿った粒界割れであった。その原因は、インコネルTT600製の伝熱管が高温の1次冷却材中で応力腐食割れ*¹⁷(以下「PWSCC」という。)の感受性を有しており、伝熱管のローラ拡管の際に局所的に生じた引張り残留応力*¹⁸と運転中内圧が相まったことによりPWSCCが発生したと推定している。

また、3号機の第12回定期検査(平成12年2月~平成12年4月)時に、4号機の第11回定期検査と同じ部位に有意な信号指示が認められ、当該部位の抜管調査を行った結果、4号機第11回定期検査時の抜管調査と同様の結果を得ている。

*¹⁷1次系水質環境下で発生する加圧水型原子力発電所特有の応力腐食割れ(材料、環境、応力の3要素が重なって発生する割れ)。

*¹⁸伝熱管を管板と接合させた後に、伝熱管に外力が作用していないにも関わらず材料内に生じる単位面積当たりの内力。

(b) 抜管調査以降のECT結果

3号機および4号機では、抜管調査以降の定期検査時におけるSG伝熱管のECTで、同様の箇所(高温側管板部)に軸方向のきずの特徴を有した有意な信号指示が認められているが、発生要因の調査結果では、伝熱管のローラ拡管の際に局所的に生じた引張り残留応力と運転中内圧が相まったことによりPWSCCが発生したものと推定している。

3号機

- ・第13回定期検査(平成13年6月~平成13年8月)
- ・第21回定期検査(平成24年2月~平成28年2月)
- ・第22回定期検査(平成28年12月~平成29年6月)

4号機

- ・第12回定期検査(平成12年9月~平成12年11月)
- ・第13回定期検査(平成14年1月~平成14年3月)
- ・第14回定期検査(平成15年4月~平成15年6月)
- ・第18回定期検査(平成20年8月~平成20年12月)
- ・第19回定期検査(平成22年2月~平成22年5月)
- ・第20回定期検査(平成23年7月~平成29年5月)

事象の原因

e. 国内プラントの経験

他の国内プラントのインコネルTT600製のSG伝熱管のECTにおいても、4号機と同様に有意な信号指示が経年的に確認されている。この信号指示は、同様の部位(高温側管板部)において発生しており、PWSCCであることが認められている。

f. 過去の知見調査のまとめ

インコネルTT600製のSG伝熱管のECT結果で、高温側管板部のローラ拡管部において認められた内面の軸方向に沿ったきずの特徴を有した信号指示は、伝熱管のローラ拡管の際に局所的に生じた引張り残留応力と運転中内圧が相まったことにより発生したPWSCCと推定されている。

(7) ショットピーニング*¹⁹の効果

a. これまでの知見により、SG伝熱管内面のショットピーニングがPWSCCに対する予防保全策として有効であることが確認されていることから、4号機の伝熱管については、第13回定期検査時(平成14年1月～平成14年3月)にショットピーニングを施工した。

ショットピーニングの施工は、これまでの知見から適切な施工条件により実施した場合は、PWSCCの初期欠陥に有意な進展を生じないことが知られていることから、当該定期検査時の施工記録を調査した結果、その条件どおりに施工されていることを確認した。

*¹⁹伝熱管内面にビーズ(金属微粒子)を打ち付けることにより材料表面の残留応力を改善する手法。

b. 4号機では第13回定期検査時(平成14年1月～平成14年3月)にSG伝熱管内面のショットピーニングを施工した後は、第14回定期検査時(平成15年4月～平成15年6月)に2本、第18回定期検査時(平成20年8月～平成20年12月)に1本、第19回定期検査時(平成22年2月～平成22年5月)に1本、第20回定期検査時(平成23年7月～平成29年5月)に2本の伝熱管に有意な信号指示を認めている。ショットピーニング施工以降に、伝熱管のECTで有意な信号指示を検出した理由は以下のとおりと考えられる。

伝熱管の内面に施工したショットピーニングは、圧縮応力を約0.2mmの深さまで付与することが可能である。一方、ECTでは約0.5mm以上の深さのPWSCCによる信号指示を検出することが可能である。

よって、ショットピーニングを施工した時点で、圧縮応力の付与されない範囲にECTにより信号指示の検出が不可能なPWSCCが既に存在した場合は、ショットピーニング施工後もPWSCCが進展し、顕在化する可能性があることから、伝熱管のECTで確認された有意な信号指示もそれに該当すると考えられる。

2. 調査結果のまとめ

(1) SG伝熱管のECTで確認された有意な信号指示は、高温側管板部のローラ拡管上端部(22ピッチ)の位置であり、内面の軸方向に沿った非貫通のきずの特徴を有していた。

これは、過去に経験したECTの信号指示と同様であることから、従来からインコネルTT600製の伝熱管で経験しているPWSCCによるきずと考えられる。

(2) 設計・建設時の記録やプラントの運転履歴等の調査結果については、特に問題となるものはなかった。

(3) SGの伝熱管にショットピーニングを施工した時点で、圧縮応力の付与されない範囲にECTにより検出不可能なPWSCCが既に存在していた場合は、ショットピーニング施工後もPWSCCが進展し、顕在化する可能性がある。

3. 推定原因

今回SG伝熱管のECTで認められた有意な信号指示は、過去に経験した信号指示と同様に高温側管板部のローラ拡管上端部の位置で、伝熱管内面の軸方向に沿ったきずであることから、SG製造時に高温側の管板部で伝熱管を拡管する際、伝熱管内面で局所的に発生した引張り残留応力と運転時の内圧および高温の1次冷却材環境が相まって、伝熱管内面からPWSCCが発生・進展したものと推定される。

保護装置の種類及び動作状況	該当せず																														
放射能の影響	なし																														
被害者	なし																														
他に及ぼした障害	なし																														
復旧の日時	未定																														
再発防止対策	<p>1. ECTで有意な信号指示の認められたSG伝熱管については、高温側および低温側のSG管板部で施栓し供用外とする。 なお、補修内訳は下表のとおりであり、今回の施栓により、安全解析施栓率*²⁰10%を超えるものではない。</p> <p style="text-align: right;">(単位：本)</p> <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th>SG</th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>合計</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>今回施栓本数</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>既施栓本数</td> <td>135</td> <td>134</td> <td>123</td> <td>392</td> </tr> <tr> <td>総施栓本数</td> <td>137</td> <td>134</td> <td>123</td> <td>394</td> </tr> <tr> <td>設備本数</td> <td>3,382</td> <td>3,382</td> <td>3,382</td> <td>10,146</td> </tr> <tr> <td>施栓率 (%)</td> <td>4.1</td> <td>4.0</td> <td>3.6</td> <td>3.9</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: right;">[安全解析施栓率：10%]</p> <p>*²⁰原子力発電所の安全性を解析・評価する際の条件として設定している施栓率であり、高浜4号機では施栓率10%において安全性を確認している。</p> <p>2. 過去の知見調査の結果から、高温側管板部では検出が想定されることから、今後も定期検査毎に、SG伝熱管の全数について全長のECTを実施して健全性を確認していく。</p>	SG	A	B	C	合計	今回施栓本数	2	0	0	2	既施栓本数	135	134	123	392	総施栓本数	137	134	123	394	設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146	施栓率 (%)	4.1	4.0	3.6	3.9
SG	A	B	C	合計																											
今回施栓本数	2	0	0	2																											
既施栓本数	135	134	123	392																											
総施栓本数	137	134	123	394																											
設備本数	3,382	3,382	3,382	10,146																											
施栓率 (%)	4.1	4.0	3.6	3.9																											