

再処理施設用ボイラの漏えいの原因と今後の対応について

平成 31 年 1 月 11 日
核燃料サイクル工学研究所
工務技術部

1. 漏えいの状況

再処理施設用として設置された 3 基のボイラのうち、平成 30 年 7 月 24 日に 3 号ボイラにおいて、平成 30 年 10 月 29 日に 1 号ボイラにおいてボイラ内の水位低下が発生した。

3 号ボイラについてはボイラ内部の目視及び水管内部の内視鏡での点検により、20 本の水管に腐食の痕跡を確認した。このうち、水圧試験にて 7 本の水管から水の漏えいを確認した。1 号ボイラについては、ボイラ内部の目視点検により、1 本の水管に腐食跡及び水の漏えいを確認した。また、水圧試験で当該水管以外に漏えいがないことを確認した。

1 号ボイラに関しては、漏えい確認された水管についてメーカーにて施栓処置を行い 11 月 6 日に仮復旧している。

2. 漏えい原因（別添-1）

(1) 水管の腐食

平成 23 年度及び平成 25 年度に 1 号ボイラの水管から漏えいが発生しており、当時の原因究明結果から、本漏えいは、水ドラム上部に燃料の重油成分に起因する硫酸塩を含有する堆積物が蓄積し、ボイラ停止期間中にこの堆積物がボイラ内空気中の水分を吸湿したことで堆積物中の硫酸塩による腐食性の水溶液が発生し、水管に局部腐食（硫酸腐食）を生じさせたものと評価した。この事象は古くから一般産業界において重油専焼ボイラにおける硫酸露点腐食として知られている事象であり、施栓処置、肉盛溶接及び水管交換等のような対応が取られている。1 号及び 3 号ボイラの水管の腐食状況や水管周辺の堆積物の状態から、今回も重油専焼ボイラに見られる硫酸露点腐食が発生しているものと評価する。

(2) 腐食要因の分析

過去の水管腐食事象に対し、是正処置としてこれまで堆積物への吸湿抑制のための運転方法の改善（1～3 号共通）、可能な範囲での堆積物の除去方策（1、2 号）をとってきたところであるが、複数のボイラが同時期にこの水管の腐食により漏えいが発生したことを重要視して複数同時故障の要因分析を行った。この結果、次のような要因を抽出した。

- ① 再処理用ボイラ 3 基は運転期間が同じになるように切り替えて運転していたため腐食の原因となる硫酸塩の堆積物の進行が同様に進むこととなった。
- ② 過去の 1 号ボイラの水管の腐食を受け、平成 25 年度に全ボイラの水管の肉厚測

定を実施したが、その一度だけでその後継続した測定を実施しておらずこまめな減肉傾向を把握していなかった。また、堆積物の確認についても耐火物の撤去など大掛かりな作業が必要となることからこれまで実施してきていなかった。

- ③ 1基故障しても残り2基あることから補修に十分な時間がかけられるという認識を持っていた。

各ボイラの状況の相違点として、1号ボイラは平成25年11月12日～14日、2号ボイラは平成26年3月3日～5日に堆積物を除去しており、2号ボイラについては除去装置のノズルを改良し広範囲に実施した。3号ボイラの堆積物除去については水管補修に合わせて丁寧に実施する考えであったためこれまで実施していない。

また、平成25年度に実施した各ボイラの水管の肉厚測定結果から2度漏えいが発生した1号ボイラでは他のボイラより多くの水管の減肉を確認している。

3. 今後の対応

1号及び3号ボイラで同時期に漏えい事象が発生し、ユーティリティの安定供給に影響を与えるおそれを生じさせたことを踏まえ、今後以下の対策をとることとする。

- ① 水管の腐食による漏えい事象が同時期に複数のボイラで発生しないよう、水管の腐食要因となった堆積物の蓄積等の腐食環境が同一とならないよう運転時間に差を設ける管理を実施する。
- ② 水管の肉厚測定を今後年次点検の項目として管理し、漏えいの可能性のある水管に対して計画的な補修ができるようにする。なお、これらの補修に合わせて腐食源である堆積物を少しでも低減化するために堆積物除去作業を行う。
- ③ 漏えい事象が再発した場合に備え、速やかに復旧可能な処置として水管の予備品を準備しておく。

これらの運転・保守管理方法については「中央運転管理室 ボイラー設備 運転管理要領書」（運転方法）、「ユーティリティ供給設備保守管理要領書」（保守方法）に反映し運転員への教育を行う。

以上

再処理施設用 1 号及び 3 号ボイラの漏えい原因について

1. 漏水原因の調査結果

中央運転管理室において、平成 30 年 7 月 24 日に 3 号ボイラ、10 月 29 日に 1 号ボイラの水位低下が発生したため、それぞれ漏えい箇所の調査を実施した。

3 号ボイラは 7 月 26 日から 10 月 20 日にかけて、水ドラム内部から水管内部の目視確認を行うとともに蒸気ドラムから水管に内視鏡を挿入し確認を行った。また、一部耐火物等の撤去を実施し水管外面から漏えい箇所を確認した。最終的に水圧試験にて漏えい水管を特定した。1 号ボイラについては 10 月 29 日に水ドラム内部から水管内部の目視確認を行うとともに、最終的に 11 月 5 日に水圧試験にて漏えい水管を特定した。

漏えい事象については、1 号ボイラにおいて平成 23 年度及び平成 25 年度に発生しており、当時の原因調査結果と今回の事象の比較検討により、今回の漏えい事象の原因を評価した。

(1) 水管の腐食状況 (写真 1、写真 2、写真 3)

3 号ボイラの漏えい箇所は、局部的に減肉した様相で水管外面からすり鉢状に腐食しており、水ドラム上方約 70mm の位置 (堆積物に覆われている位置、図-2 参照) に孔が確認された。また、同一配管において漏えい箇所以外にも局部的な減肉が複数箇所に認められた。なお、水管内面に腐食減肉している様相は全く認められなかった。

また、過去に 1 号ボイラで確認された腐食孔と比較すると腐食部位及び腐食形状等は類似している。



写真 1 3号ボイラ 漏水水管の外観
(右側壁蒸発管 CC46 下部)



写真 2 3号ボイラ 腐食孔
(右側壁蒸発管 CC46 下部)



写真 3 平成 23 年 1号ボイラ 腐食孔 (清掃後)
(水ドラム上方、約 20 mm～約 150 mmの範囲に発生)

(2) 水管への付着物、水ボイラ上部堆積物の状況

(写真4、写真5、写真6、写真7、写真8、写真9)

3号ボイラの水管表面に、過去に1号ボイラで確認されたものと同様な茶色のスケールが付着していることを確認した。(位置については図1、図2参照)

なお、過去に1号ボイラの水管表面に付着していた茶色のスケールを成分分析した結果は、主要成分としてFe、O、S、結晶質は Fe_2O_3 (酸化鉄)、 FeOHSO_4 (塩基性硫酸鉄)が検出されている。これは燃焼ガスによる酸化物、硫酸露点腐食の反応生成物及び重油(燃焼灰)成分が主体である。



写真4 3号ボイラ 水管表面の概観
(右側壁蒸発管下部 CC44~CC52)



写真5 3号ボイラ 水管表面拡大
(右側壁蒸発管下部 CC47,48)



写真6 平成23年1号ボイラ 隔壁蒸発管
(隔壁蒸発管下部 BB30周辺)

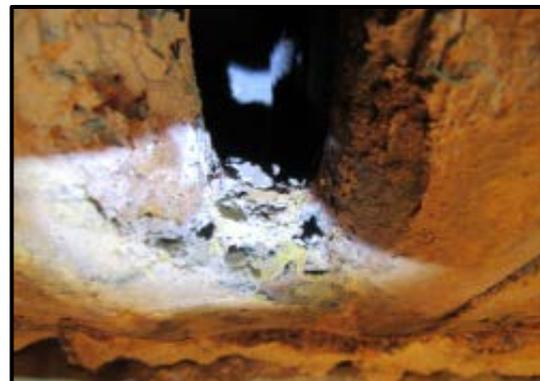


写真7 3号ボイラ 水ドラム上部の堆積物
(右側壁蒸発管下部 CC57,58)

また、今回3号ボイラでは、水ドラム上部(水管と水管の間)に最大深さ約80mmの堆積物を確認した。(位置については図1、図2参照)

過去の1号ボイラで調査時は、水ドラム上部(水管と水管の間)に最大深さ約60mmの堆積物が確認され、成分分析した結果、結晶質は FeOHSO_4 (塩基性硫酸鉄)、 $\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ (塩基性硫酸鉄ナトリウム)が検出された。これは水管の腐食生成物や重油燃焼灰が飛来して堆積した状態に漏水したボイラ水の薬品成分が析出して、これらの化合物になった状態と推定された。なお、この堆積物が吸水(湿)すると、その水溶液は硫酸イオンを多く含んだ強酸性の水質になる。

今回採取された堆積物は色や感触などから前回採取した堆積物と同じとみられることから、 FeOHSO_4 （塩基性硫酸鉄）及び $\text{NaFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ （塩基性硫酸鉄ナトリウム）であると推定する。



写真8 3号ボイラ 堆積物拡大



写真9 平成23年1号ボイラ
水ドラム上部の堆積物（破砕処理にて除去）

2. 漏えいの原因（直接原因）の評価結果

今回の1号及び3号ボイラの内面観察の結果得られた水管の腐食状況、水管への付着物及び水ドラム上部への堆積物の状況と平成23年及び平成25年に発生した1号ボイラにおける漏えい事象発生時の原因調査結果の比較から、今回発生した1号及び3号ボイラからの漏えいは、過去1号ボイラで発生したものと同様に、燃料中の硫黄成分が燃焼により水ドラム上面の水管表面に付着し、水分を含むことにより硫酸イオンを多く含んだ強酸性の水溶液となり水管表面を腐食したことによるものと評価する。

3. 発生要因の評価と是正処置計画

平成23年及び平成25年に1号ボイラで漏えいが発生したことに関し、原因となった水管の腐食に対してそれぞれ是正処置を策定し実施してきた。それぞれの是正処置の有効性を評価するとともに、今回、3号ボイラで新たに漏えい事象が発生したこと及び同じ時期に1号ボイラで漏えい事象が再発したことに伴って課題や要因を評価するとともに新たに是正処置計画を検討した。

(1) 平成23年に策定した是正処置

短期間のボイラ運転切替（7日運転・14日停止）に伴う、ボイラ内の水分の水管や水ドラム表面への水分の凝縮を抑制するため、ボイラ運転切替頻度の見直し（運転期間の延長）を実施した。具体的には「中央運転管理室 ボイラ設備 運転管理要領書」を改訂し、「1号・2号・3号ボイラについては、負荷及び設備の状態等により7～12日毎に切替運転を実施する。」としていたものを「1号・2号・3号ボイラについては、負荷及び設備の状態等により15日を目安に切替運転を実施する。」とした。

(2)平成 25 年度に実施した是正処置

1号ボイラにおける水管からの漏えいが再発したため、水分の凝縮を抑制する方法に加え、堆積物を除去することとし、水管材料を損傷しない方法としてアイスブラスト洗浄を実施した。アイスブラスト洗浄はペレット状のドライアイスで堆積物に圧縮空気により激しく当てて行うものである。

洗浄は平成 25 年 11 月 12 日～14 日で行ったが、水管は、横幅約 1.2m、縦幅約 5m の中に約 1,500 本（隔壁管が約 50 mm^φ、対流蒸発管約 38 mm^φ）配置されているが、作業者がアクセスできる範囲が限られているため、すべての箇所の除去はできていない。（写真 10、11、12、13、14、15）

1号ボイラの実施結果を反映し、ドライアイスを噴射するノズルを改良し、平成 26 年 3 月 3 日～5 日で行ったが、2号ボイラの堆積物除去を実施した。発生した堆積物量の評価をしていないため直接的な比較はできないが、同様な期間運転している 1号ボイラでの除去量は 18.4 kg、2号ボイラでの除去量は 26.8 kgであった。

3号ボイラの堆積物除去については、1号、2号ボイラの実績から水管更新に合わせ実施することとしていたためこれまで実施できていなかった。

(3)過去の是正処置計画の評価（別紙-1）

A 重油を燃料として用いる本タイプのボイラに関しては燃焼に伴い発生する硫化物の水管への付着、堆積は避けられないことから、過去実施した是正処置計画においては硫化物への吸湿抑制対策及び堆積した硫化物の除去作業を行うことを計画した。さらに、1号ボイラは平成 25 年 10 月 28 日～11 月 8 日、2号ボイラは平成 25 年 11 月 18 日～12 月 2 日、3号ボイラは平成 25 年 12 月 5 日～19 日の間で水管の右側壁蒸発管及び隔壁蒸発管のそれぞれ内側に 3 列と対流蒸発管の任意の部分の肉厚測定を行い腐食の進行状況調査を行った。この時の結果では漏えいの発生した 1号ボイラが 2号及び 3号ボイラに比べて腐食の進行した水管が数多く見られた。

平成 30 年度に新たに漏えいが発生した 3号ボイラに関しては切替頻度の見直しによる硫化物への吸湿抑制対策は取っていたものの、堆積した硫化物の除去作業を行ってなかったため今回腐食が進行し漏えいに至ったものと推定する。また、漏えいが再発した 1号ボイラに関しては硫化物への吸湿抑制対策を取り、限定的ではあるが堆積物の除去を行っていたものの、他のボイラに比べて水管の腐食が進行していたため今回漏えいが再発したものと推定する。

これまでの是正処置では硫化物への吸湿抑制対策及び堆積した硫化物の除去を行っても、硫化物は徐々に蓄積していくこと、堆積した硫化物の除去ができない部分がどうしても残存することから腐食は避けられない。（写真 10、11、12、13、14、15）

(4)今回の漏えい事象に対する要因の評価（別紙-2）

今回の 3号ボイラ及び 1号ボイラの漏えいで問題となるのは、同時期に 3基のうちの 2基のボイラから漏えいが発生し安定な蒸気の供給に影響を与えるおそれを生じさせた

ことにある。この要因をなぜなぜ分析で評価した。この結果、運転期間を平均化しているため硫化物の堆積と吸湿に基づく腐食の発生が同じように進んでいると考えられること、水管の目視確認や肉厚測定等の定期的な点検による漏えい発生時期の予想ができていないこと、予想ができていないため水管の準備を整えることができず復旧の遅延を招くことが挙げられた。

(5) 是正処置計画

今回の漏えい事象の課題に対する要因分析結果を基に以下の対策を実施する。

- ① 水管の腐食による漏えい事象が同時期に複数のボイラで発生しないよう、水管の腐食要因となった堆積物の蓄積等の腐食環境が同一とならないよう運転時間に差を設ける管理を実施する。
- ② 水管の肉厚測定を今後年次点検の項目として管理し、漏えいの可能性のある水管に対して計画的な補修ができるようにする。なお、これらの補修に合わせて腐食源である堆積物を少しでも低減化するために堆積物除去作業を行う。
- ③ 漏えい事象が再発した場合に備え、速やかに復旧可能な処置として水管の予備品を準備しておく。

これらの運転・保守管理方法については「中央運転管理室 ボイラー設備 運転管理要領書」(運転方法)、「ユティリティ供給設備保守管理要領書」(保守方法)に反映し運転員への教育を行う。

以上

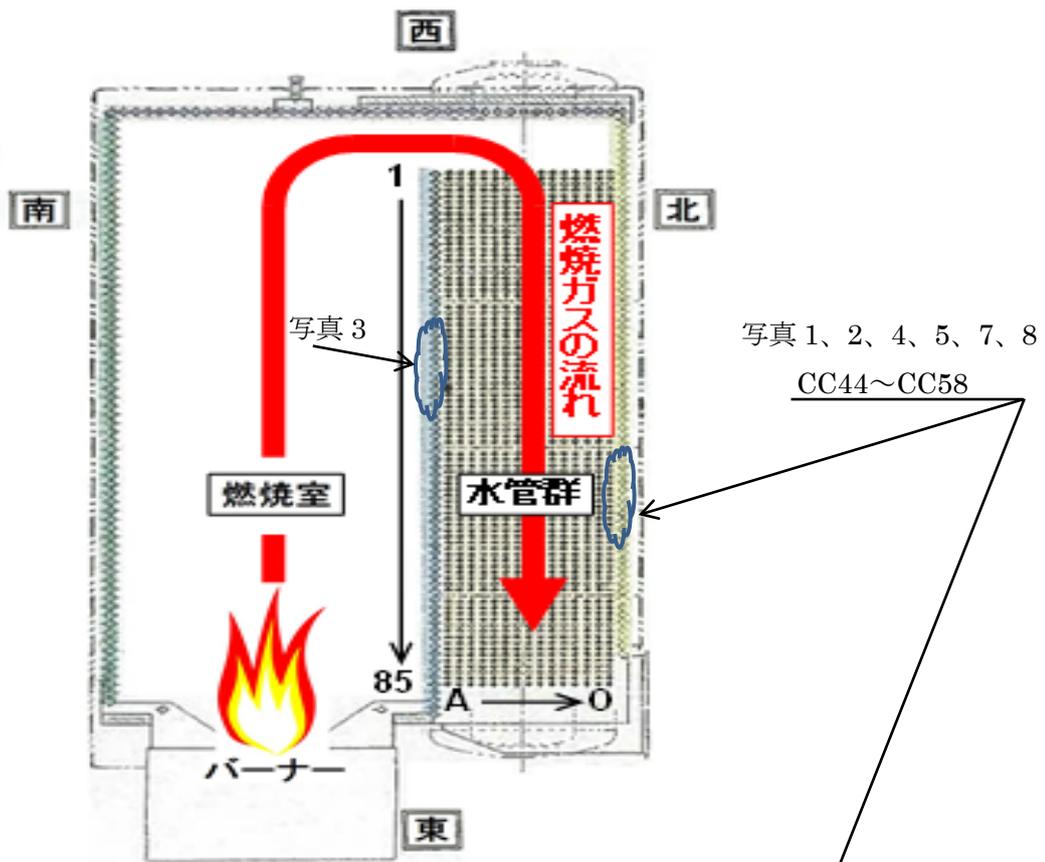


図1 ボイラ平面図

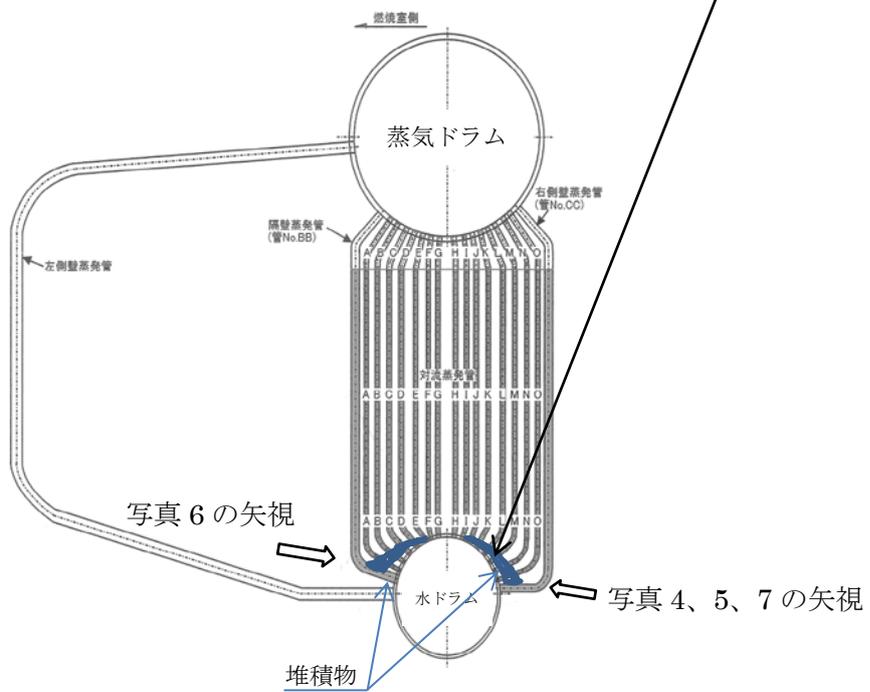


図-2 ボイラ断面図

過去実施した是正処置に対する1号、2号、3号ボイラの比較

	発停頻度見直し	堆積物除去	漏水が確認された水管の有無	H25年度実施の肉厚測定結果
1号ボイラ	H23年度の1号ボイラ水管からの漏えいを受け、ボイラ発停頻度の見直しを実施	H25年度の再発を受け堆積物の除去を実施したが水管群中央部は除去不可。 除去量：18.4 kg	H23.12.18 (1本) H25.6.6 (1本) H30.10.29 (1本) 漏水箇所はH23年度、H25年度、H30年度いずれも水ドラムから20～150mmの位置であり、堆積物の影響を受ける位置。	減肉が確認された水管：43本
2号ボイラ		改良ノズルにて実施し1号ボイラより除去範囲拡大。 除去量：26.8 kg	漏水無し。	減肉が確認された水管：1本
3号ボイラ		除去作業は実施していない。	H30.7.24 (7本) 漏水箇所は水ドラムから約70mmの位置であり、堆積物の影響を受ける位置。	減肉が確認された水管：4本



写真 10 除去前 A 部



写真 11 除去後 A 部



写真 12 除去前 B 部



写真 13 除去後 B 部



写真 14 除去前 C 部

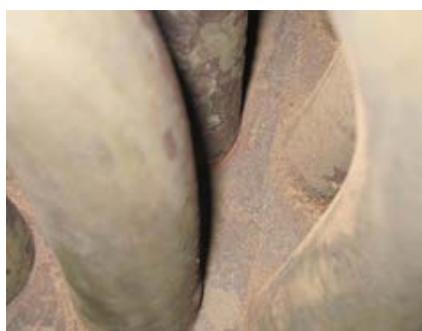
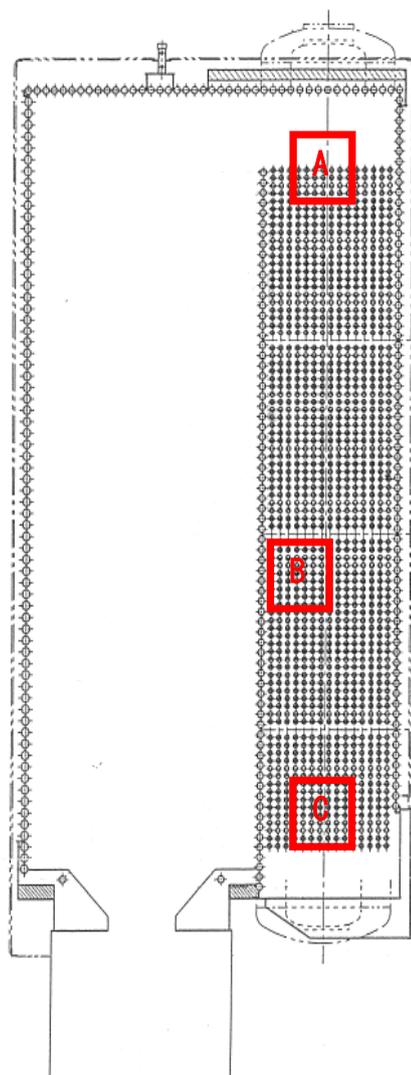


写真 15 除去後 C 部



ボイラ水管配置図及び写真の部位

蒸気の安定供給に影響を与えるおそれを生じさせた要因分析

事 象	原 因	要 因 ①	要 因 ②	要 因 ③	判 定 結 果	判 定
安定供給への影響のおそれ	複数ボイラから同時期に漏えい発生	3基のボイラを定期的に切替えし運転していたことから腐食環境が同等となっていた	パーナ清掃等の定期整備が必要なため定期的に切り替えていた		ボイラを運転させない限りパーナの定期整備は必要ない	×
			長期停止時のボイラ水の管理に手間がかかる	薬注量の調整が必要となる	長期停止時のボイラ水の管理方法を検討していない	○
			動的機器があるため、一定間隔で運転する必要があると考えた		維持管理の観点から動的機器を動かす必要はあるが、必ずしも一定間隔にする必要はない	×
			消耗部品等の交換を定期切替の時期を活用して実施することを考えていた		消耗部品の交換は定期切替時でなくても実施できる	×
		水管の腐食状態を確認していなかった	外観目視では容易に確認できない箇所がある	外観目視で確認するためには耐火物の撤去など大掛かりな作業となり点検期間が長期化する	定期的な切替運転において、外観目視による腐食評価は実施困難な状況である	×
			肉厚測定を過去一回実施したが、頻繁に実施する必要はないと認識していた		継続的な肉厚測定による腐食の傾向管理ができていない	○
		漏えいの原因となる堆積物の状態を確認していなかった	外観目視で容易に確認できない箇所がある	外観目視で確認するためには耐火物の撤去など大掛かりな作業となり点検期間が長期化する	定期的な切替運転において、外観目視による腐食評価は実施困難な状況である	×
			1号及び2号ボイラにおいては堆積物除去に合わせ堆積物の状況を可能な範囲での確認したが、3号ボイラでは実施していなかった	3号ボイラは水管交換に合わせて堆積物確認や除去を行うこととしていた	水管交換や堆積物除去作業時にあわせて実施しない限り外観目視による堆積物の確認は困難な状況である	×
		1基故障しても2基目が故障するまでの期間で復旧が可能と思っていた	水管の製作及び補修工期に長期間要する認識がなかった		速やかな復旧対応を考慮した水管の予備品確保ができていない	○

注) [判定の凡例] ○:不具合要因である △:不具合要因の可能性ある ×:不具合要因ではない、又は要因であるが実施が困難等