



高浜発電所 3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷
および

大飯発電所 3号機 加圧器スプレイライン配管溶接部における
有意な信号指示

2020年10月27日

高浜発電所 3号機 蒸気発生器伝熱管の損傷

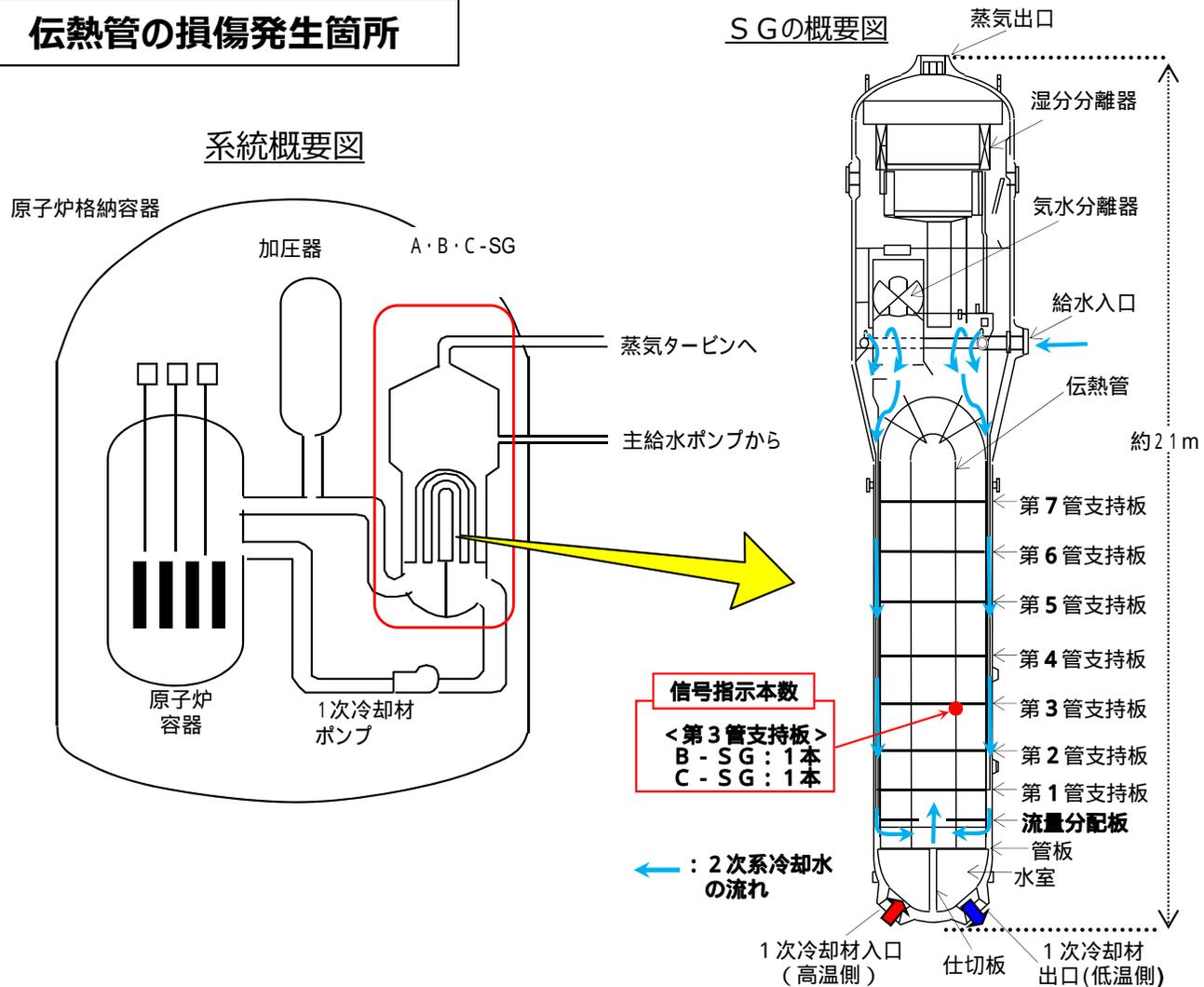
蒸気発生器伝熱管の損傷発生状況(1/2)

事象の概要

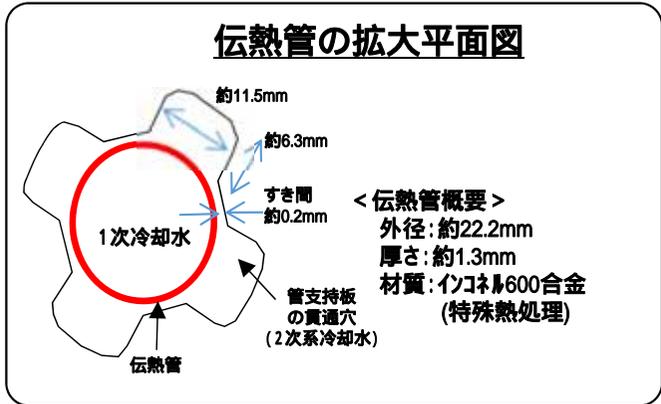
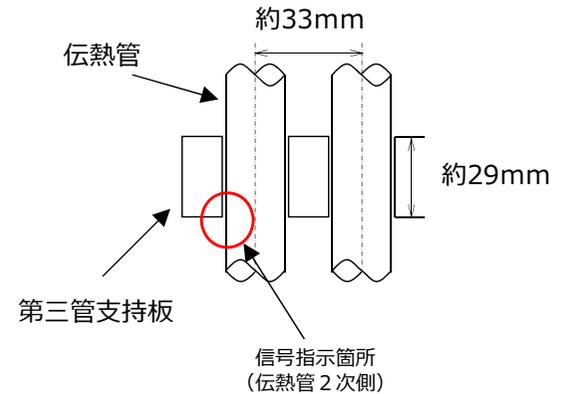
○2020年1月6日からの第24回定期検査において、3台ある蒸気発生器（以下、「SG」と言う）の伝熱管の健全性を確認するため渦流探傷試験（以下、「ECT」と言う）を実施した。

○その結果、2月18日にB-SGの伝熱管1本およびC-SGの伝熱管1本の伝熱管2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。

伝熱管の損傷発生箇所



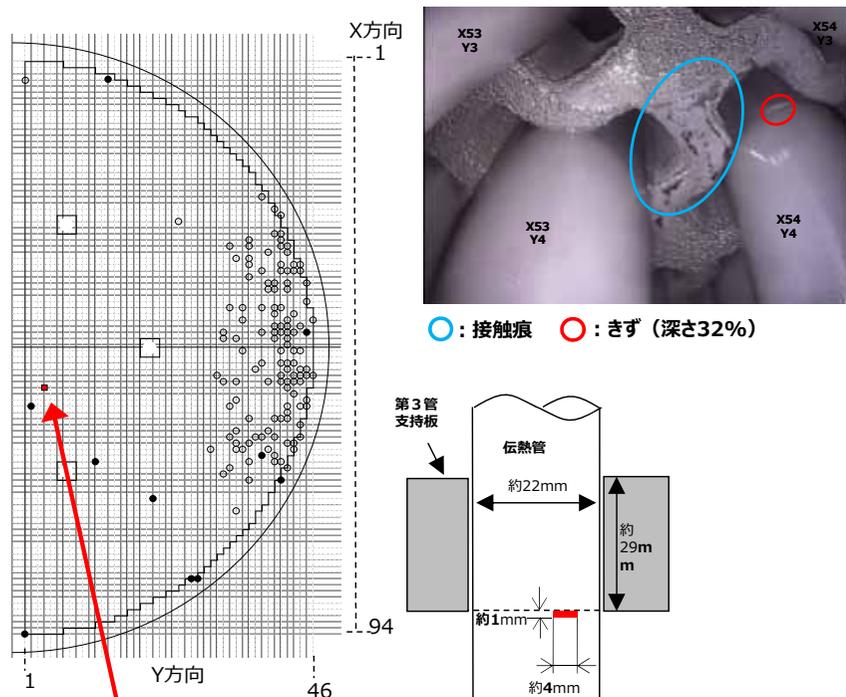
信号指示箇所拡大断面図



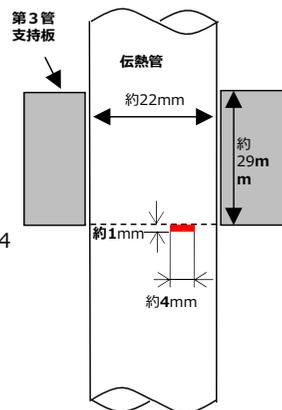
蒸気発生器伝熱管の損傷発生状況(2/2)

伝熱管の状況

B - SG伝熱管 (低温側) の状況



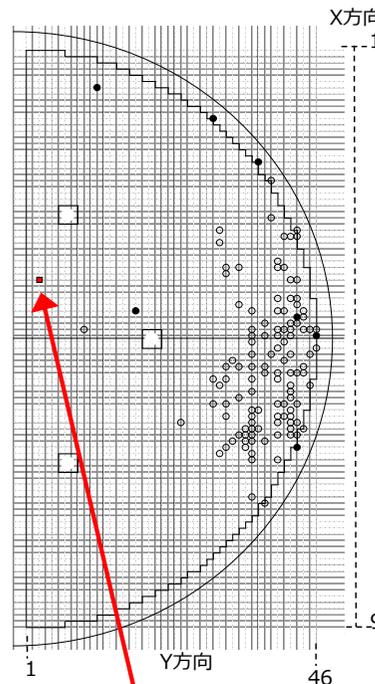
○: 接触痕 ○: きず (深さ32%)



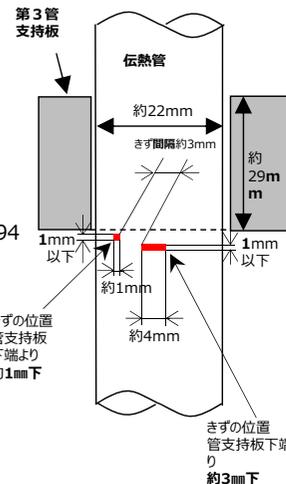
<第3管支持板>
有意な信号
指示管 (X54Y4)

- : 有意な信号指示管 (1本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (10本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (124本)

C - SG伝熱管 (低温側) の状況



○: 接触痕 ○: きず (①深さ56%, ②深さ28%)



<第3管支持板>
有意な信号
指示管 (X38Y3)

- : 有意な信号指示管 (1本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ) (7本)
- : 既施栓管 (拡管部応力腐食割れ以外) (113本)

損傷の観察結果

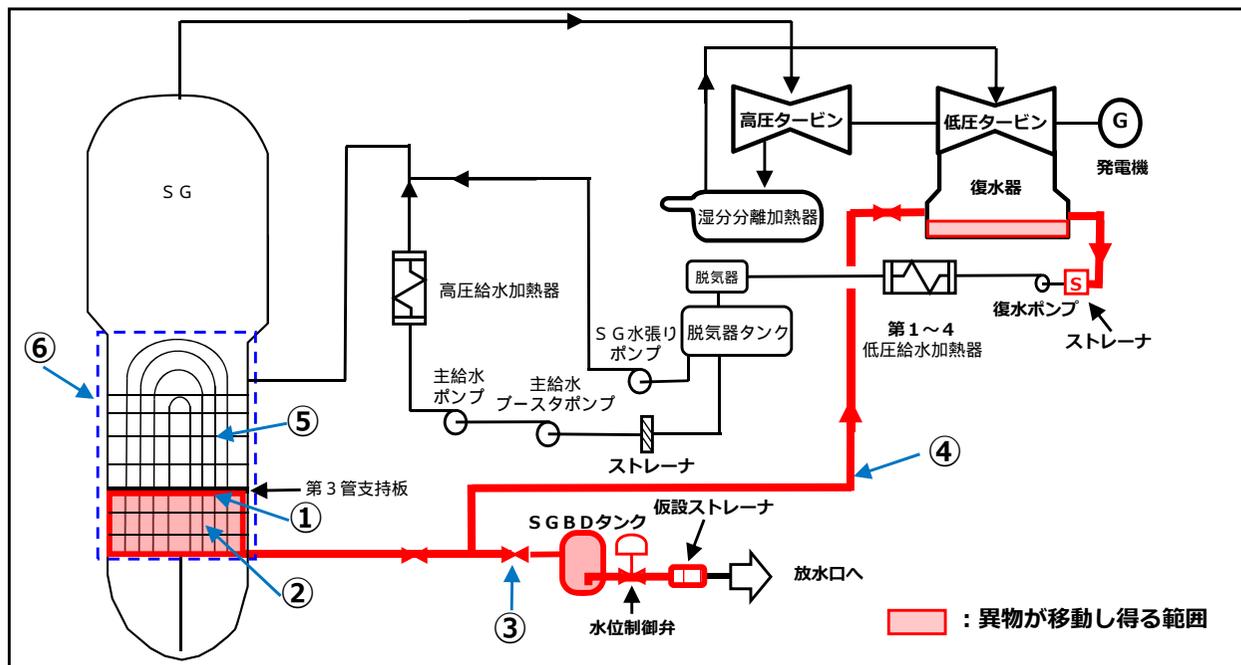
- ・ B, C - SGともに低温側で周方向のきずがあることを確認。
 - ・ C - SGでは摩耗減肉に特徴的な金属光沢が見られたが、B - SGでは表面にスケールが付着しており金属光沢は見られなかった。
 - ・ しかし、両者ともきずの表面状態・形状から、化学的な腐食ではなく機械的な摩耗による減肉であることは明らか。
- ⇒ ECTで得られた信号波形も踏まえ、異物の接触によるものと推定。

原因調査（異物点検フロー）

【点検フロー】

【異物点検の目的・理由】

E C T 信号及び摩耗痕の目視点検結果より、伝熱管損傷の原因は、異物によるものと推定されたことから、右の点検フローに従い以下の通り点検を実施した。



プラント停止後のSG器内水張替えのため、SGBDシステムの復水器回収ラインから放水口ラインへ切替を行う。

① 第3管支持板下面の減肉伝熱管周辺

↓ 減肉指示を確認した伝熱管周辺部（第3管支持板の下面）を小型カメラで目視点検

② 異物が落下する可能性のある範囲

↓ 管板、流量分配板、第1から第2管支持板の上面の全ての範囲を小型カメラで目視点検

③ SGBDタンク(以下、「BD」と言う) 系統のうち異物滞留箇所

↓ SGBD系統のうち異物が滞留しやすい構造となっている制御弁等を開放点検

④ SGBD系統の配管

↓ 異物が滞留する可能性は低いものの、配管内を小型カメラで目視点検

⑤ 第3から第7管支持板上面

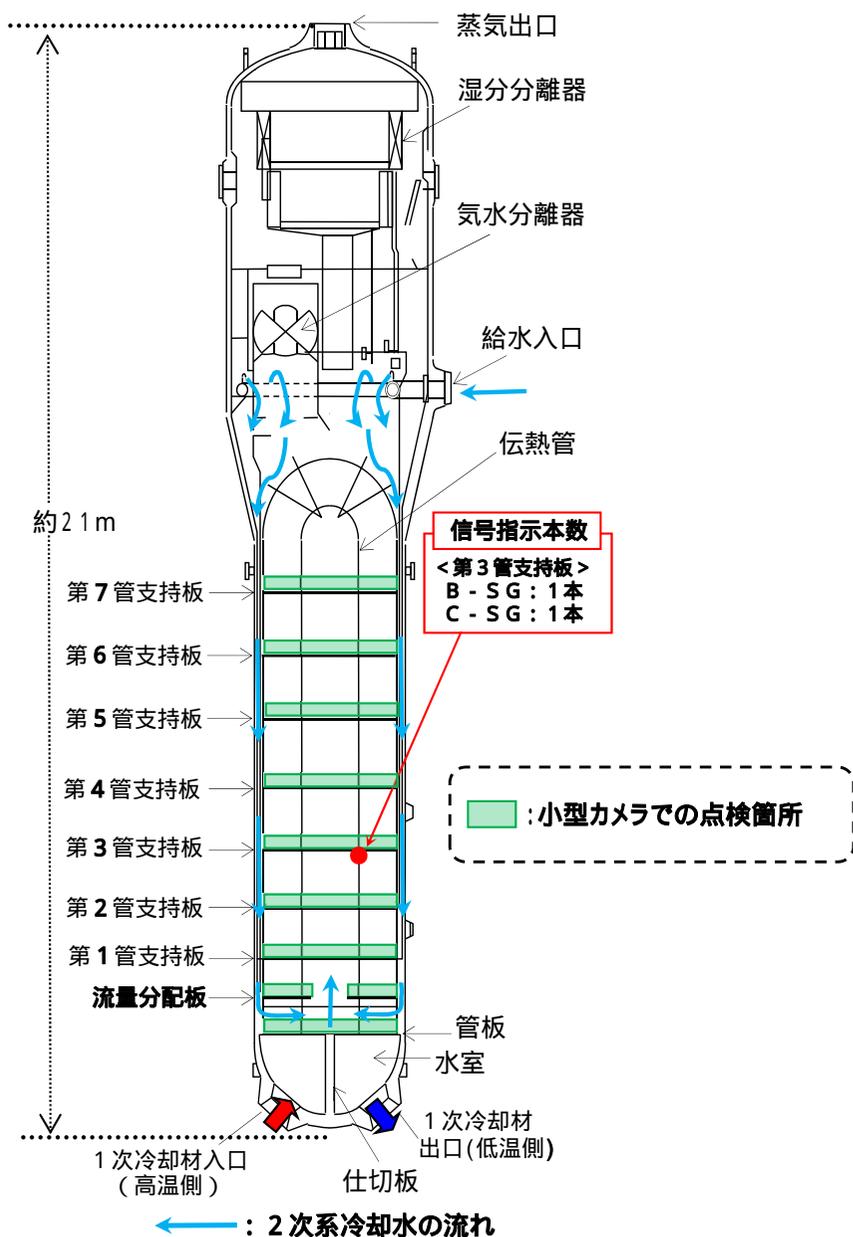
↓ 異物がないことを確認するため、第3管支持板から第7管支持板上面を小型カメラで目視点検

⑥ N₂バブリング

更なる調査として、SG器内の底部からN₂を噴射させ、その後水を抜き管板上を点検

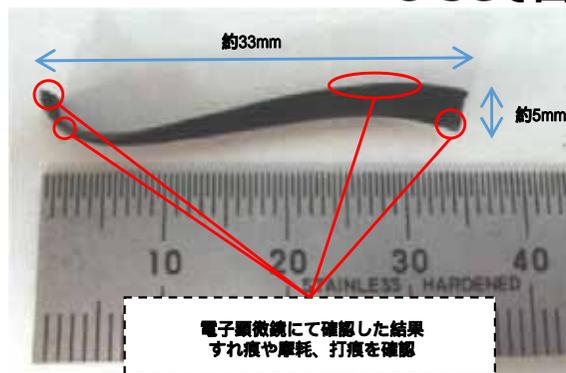
原因調査 (A,C-蒸気発生器で回収された金属片)

SGの概要図



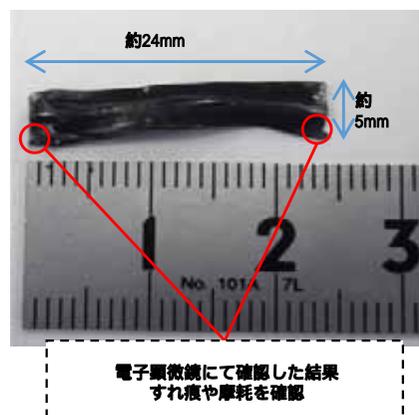
回収した金属片

C-SGで回収した金属片



縦 : 約33mm 横 : 約5mm
厚さ : 約0.2mm 重さ : 約0.3g
材質 : ステンレス鋼(SUS304相当)

A-SGで回収した金属片



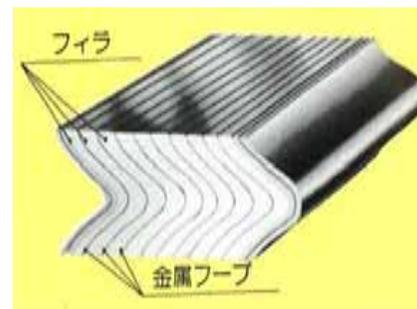
縦 : 約24mm 横 : 約5mm
厚さ : 約0.2mm 重さ : 約0.2g
材質 : ステンレス鋼(SUS304相当)

渦巻きガスケットイメージ



金属片の推定

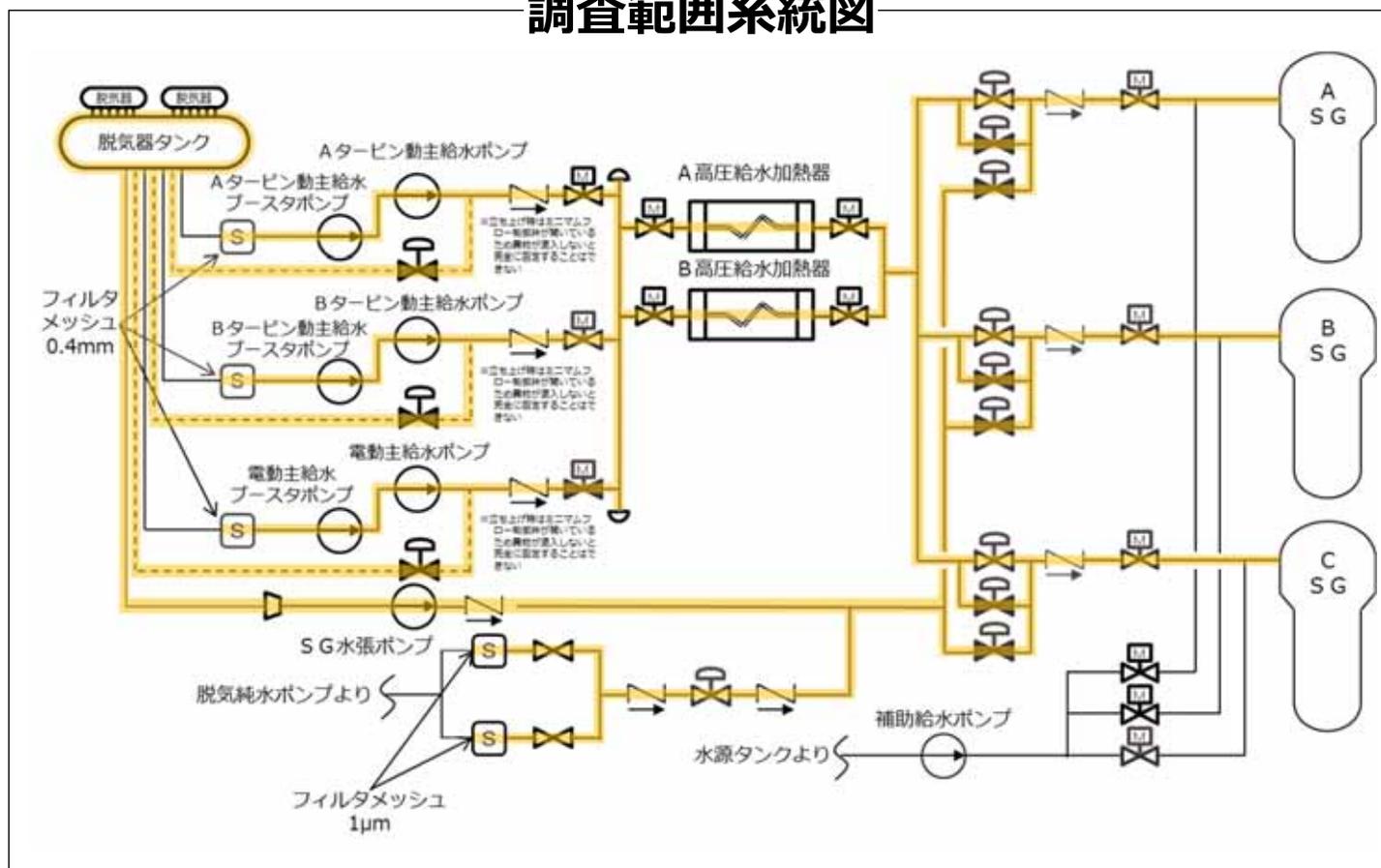
回収した金属片の形状、材質から渦巻きガスケットの一部である金属フープと推定した。



原因調査（ガスケットの調査）

- 今回（第24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が健全であることを確認した。（2箇所）
- 今回（第24回）の定期検査で開放していない機器を追加で開放し、ガスケットパッキンが健全であることを確認した。（18箇所）
- 過去にガスケットパッキンが損傷していた事例がないか、工事記録で確認したが損傷していたという記録はなかった。

調査範囲系統図



調査結果例

タービン動主給水
ブースタポンプ入口フランジ



内径：約500mm

主給水制御弁バイパス管
フローノズル前管台フランジ



内径：約100mm

高浜3, 4号機 蒸気発生器外面減肉に係る調査内容の比較

調査項目		高浜3号機 (2018年)	高浜4号機 (2019年)	高浜3号機 (2020年、今回)
概要	伝熱管損傷箇所	内面応力腐食割れ C : 1本 外面減肉 A : 1本 (微小減肉)	内面応力腐食割れ なし 外面減肉 A : 1本、B : 1本、 C : 3本	内面応力腐食割れ なし 外面減肉 B : 1本、C : 1本
	発見異物	なし	A - S G : 第1管支持板上 20mm×10mm×0.6mm ステンレス鋼 (SUS304相当) ⇒ 伝熱管をきずつけていないと評価	A - S G : 流量分配板上 24mm×5mm×0.2mm ステンレス鋼 (SUS304相当) C - S G : 流量分配板上 33mm×5mm×0.2mm ステンレス鋼 (SUS304相当) ⇒ いずれも、うず巻ガスケットの一部と推定
	伝熱管をきずつけた異物の大きさ (想定)	11.5mm×2.5mm×0.65mm	18~24mm×6~8mm×1mm以下	15~25mm×4~7mm×1mm以下
S G 器内	カメラによる目視点検	管板上 第1管支持板上 (ほぼ全面)、 第2管支持板上 (一部)	管板上 流量分配板上 第1管支持板~第2管支持板上	管板上 流量分配板上 第1管支持板~第2管支持板上 第3管支持板~第7管支持板上 (追加)
	N ₂ バブリングの有無 (○:あり、×:なし)	×	○	○
S G 器外	S G B D 系統系外ブローラインの点検箇所	S G B D タンク 弁	S G B D タンク 弁	S G B D タンク 弁 配管 (直管部) (追加) 仮設ストレーナ (追加)
	S G B D 系統復水器回収ラインの点検箇所	-	弁	弁 オリフィス (追加) 配管 (追加) 復水器ホットウエル (追加) 復水ポンプ入口ストレーナ (追加)

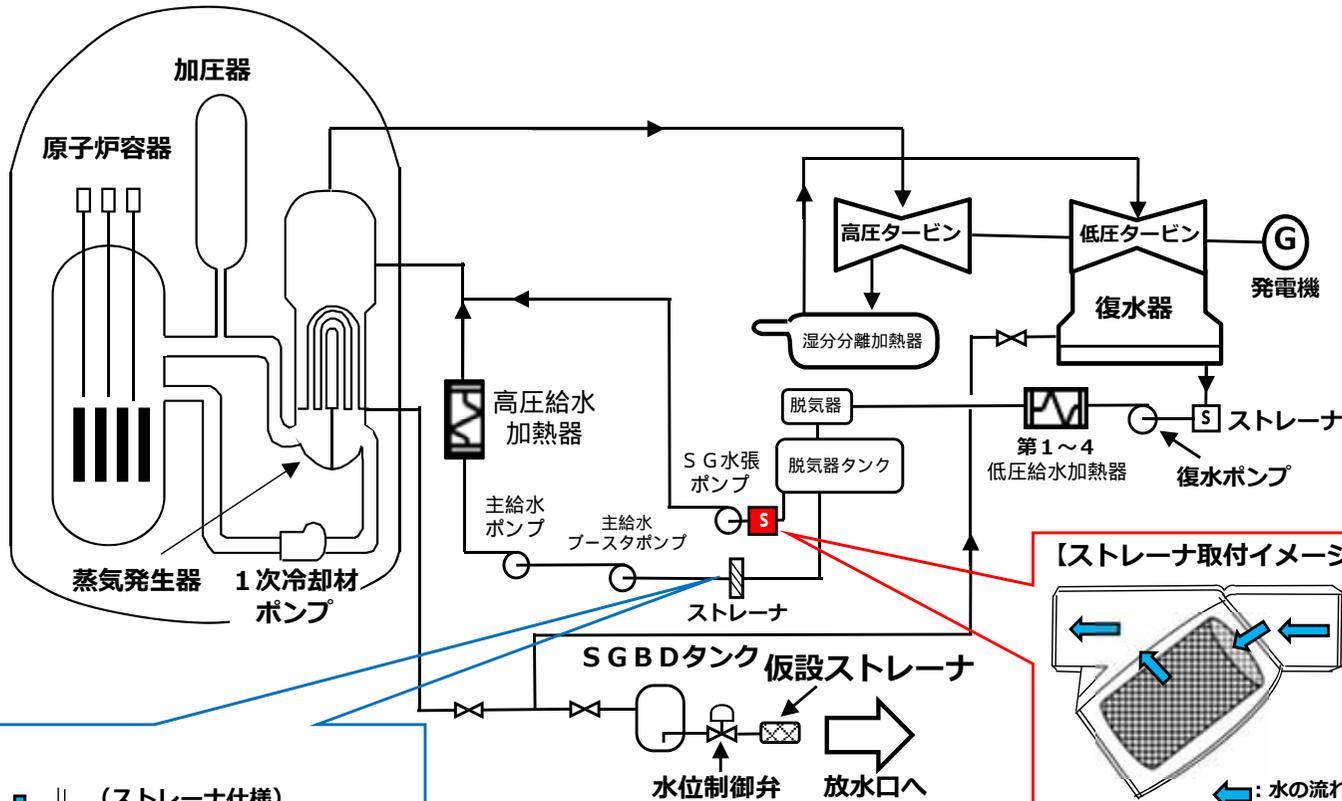
異物混入対策(1/2)

- 異物管理の変遷については下表のとおりである。
- 異物は3号機前回（第23回）定期検査以前にS G水張系統から混入したか、3号機前々回（第22回）定期検査以前に主給水系統またはS G水張系統から混入したものと考えられる。

	従前の対策	高浜3号機第23回定検時の対策 (2018年)	高浜4号機第22回定検時の対策 (2019年)
機器立入対策	<ul style="list-style-type: none"> ● 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）。 	<ul style="list-style-type: none"> ● 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<u>本人以外が確認する。</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 機器内部に立ち入る作業前に、<u>器内作業用の作業服に着替え、靴カバーを着用すると共に、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。</u> ● <u>開口部に周辺作業と隔離したエリアを設ける。</u>
垂直配管取付弁	<ul style="list-style-type: none"> ● 最終異物確認は直接目視にて実施（手鏡等を使用） 	<ul style="list-style-type: none"> ● 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<u>確実に事前確認する。</u> ● 最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、<u>小型カメラで確認する。</u> 	<ul style="list-style-type: none"> ● 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<u>確実に事前確認する。</u> ● 最終異物確認時に直接目視で異物確認できない範囲は、<u>小型カメラで確認する。</u> ● <u>ウエスは、新ウエスを使用する。</u> ● <u>新ウエスは再使用ウエスと区別して管理する。</u>
その他	-	-	<ul style="list-style-type: none"> ● <u>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。</u> ● <u>異物混入防止対策が作業手順書通りに実施されていることを、現場パトロール等で管理強化する。</u>

異物混入対策(2/2)

○ S G水張系統からの異物混入対策として、S G水張ポンプ入口にストレーナを設置する。



【既設ストレーナ】

(ストレーナ仕様)

- ・配管口径：660.4mm
- ・材質：ステンレス鋼
- ・網目：約0.4mm

←: 水の流れ

【ストレーナ取付イメージ】

←: 水の流れ

(ストレーナ仕様)

- ・配管口径：216.3mm
- ・材質：ステンレス鋼
- ・網目：約0.4mm

原子力規制委員会の評価

- ❑ 再発防止対策については推定原因を踏まえ、妥当と評価された。
- ❑ 今後、定期事業者検査の結果及び異物混入防止対策の実施状況について、原子力規制検査で確認が行われる。

蒸気発生器伝熱管の補修来歴（高浜3号機）

	A-蒸気発生器 (3,382本)	B-蒸気発生器 (3,382本)	C-蒸気発生器 (3,382本)	合計 (10,146本)	施 栓 理 由 ()内は、実施した対策
使用前	0	0	1	1	製作時の傷
第4回定検 (1989.10～1990.1)	7	12	4	23	振止め金具部の摩耗減肉
第5回定検 (1991.2～5)	1	1	0	2	振止め金具部の摩耗減肉 (改良型振止め金具へ取替え)
第9回定検 (1996.3～6)	0	1	1	2	健全管の抜管調査
第12回定検 (2000.2～4)	1	3	0	4	管板拡管部応力腐食割れ
第13回定検 (2001.6～8)	5	7	5	17	管板拡管部応力腐食割れ (ショットピーニング施工)
第15回定検 (2003.12～2004.3)	94	110	107	311	旧振止め金具部の摩耗減肉検出 (新型のECT装置を適用)
第21回定検 (2012.2～2016.2)	0	0	1	1	管板拡管部応力腐食割れ
第22回定検 (2016.12～2017.6)	1	0	0	1	管板拡管部応力腐食割れ
第23回定検 (2018.8～2018.11)	1	0	1	2	C:管板拡管部応力腐食割れ A:微小な減肉信号
第24回定検 (2020.1～)	0	1	1	2	外面からの摩耗減肉
累積施栓本数	110	135	121	366	
[施栓率]	[3.3%]	[4.0%]	[3.6%]	[3.6%]	

← 今回施栓実施

○蒸気発生器1基あたりの伝熱管本数: 3,382本

○定検回数の下部に記載しているカッコ内の年月は、解列～並列

○安全解析施栓率は10%

(伝熱管の施栓率が10%の状態において、プラントの安全性に問題がないことが確認されている)

大飯発電所 3 号機
加圧器スプレイライン配管溶接部における
有意な信号指示

加圧器スプレイライン配管溶接部における有意な信号指示確認箇所

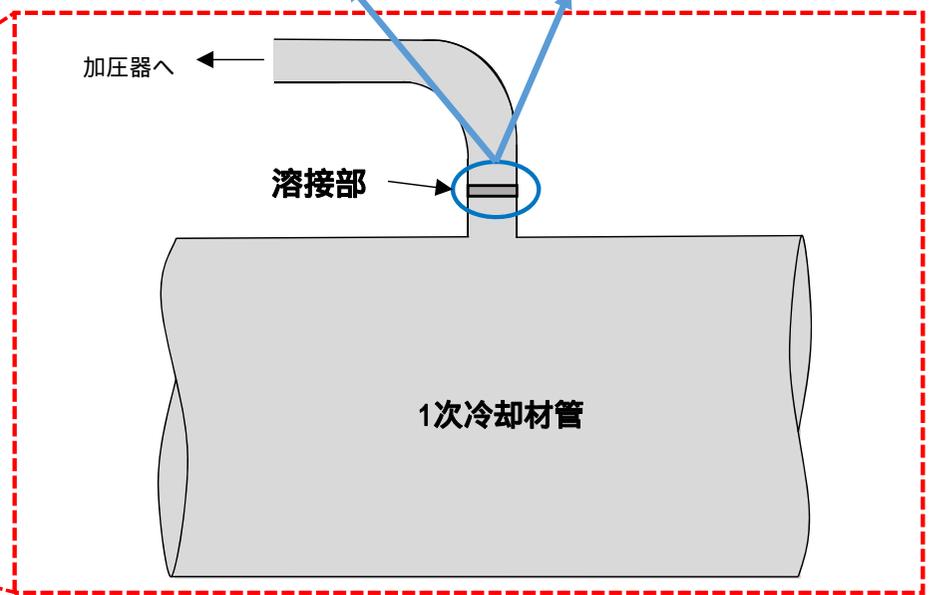
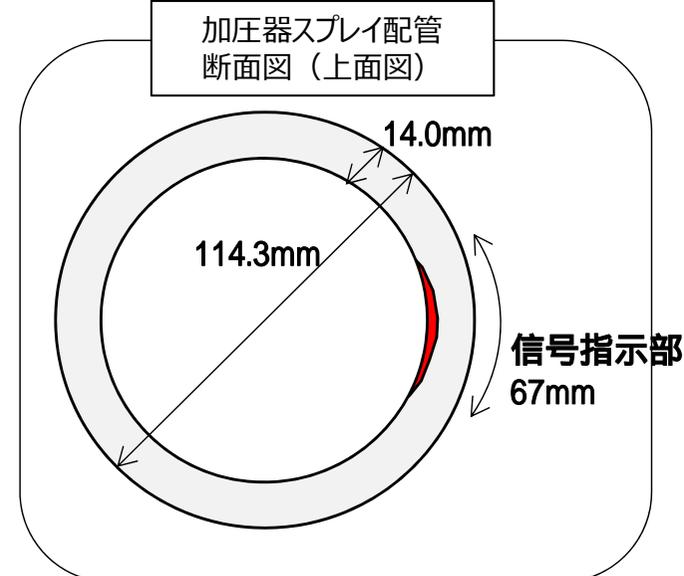
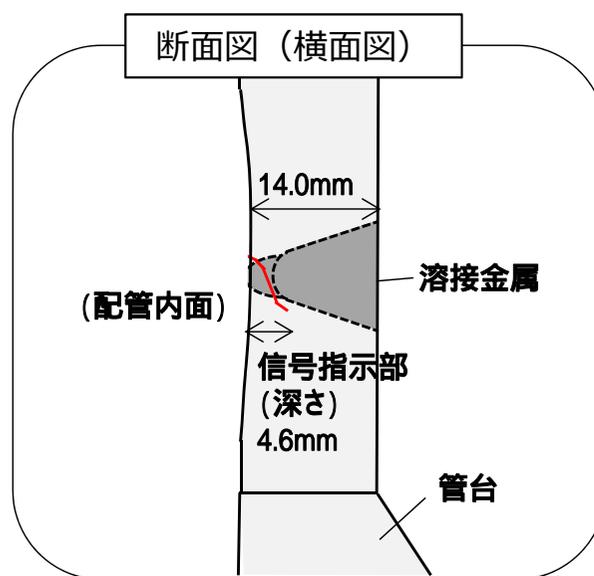
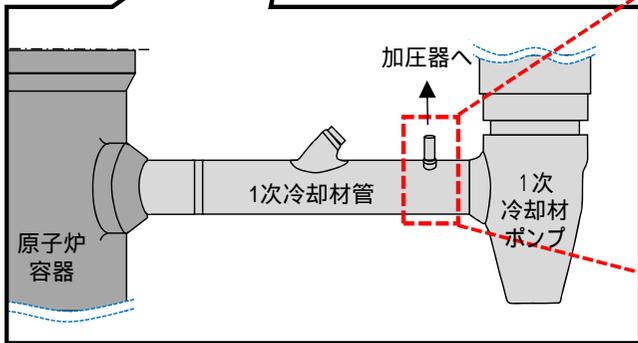
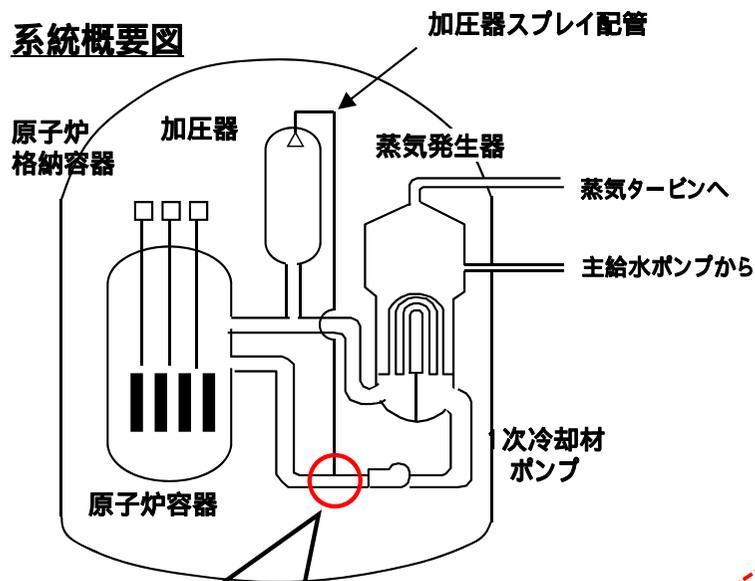
事象の概要

2020年8月31日に配管の健全性を確認するために、加圧器スプレイ配管の超音波探傷検査を実施したところ、1次冷却材管と加圧器スプレイ配管の接続部付近において有意な信号指示が認められた。

その後、9月1日に当該部の詳細な検査を行ったところ、加圧器スプレイ配管の溶接部付近に傷があることを確認した。

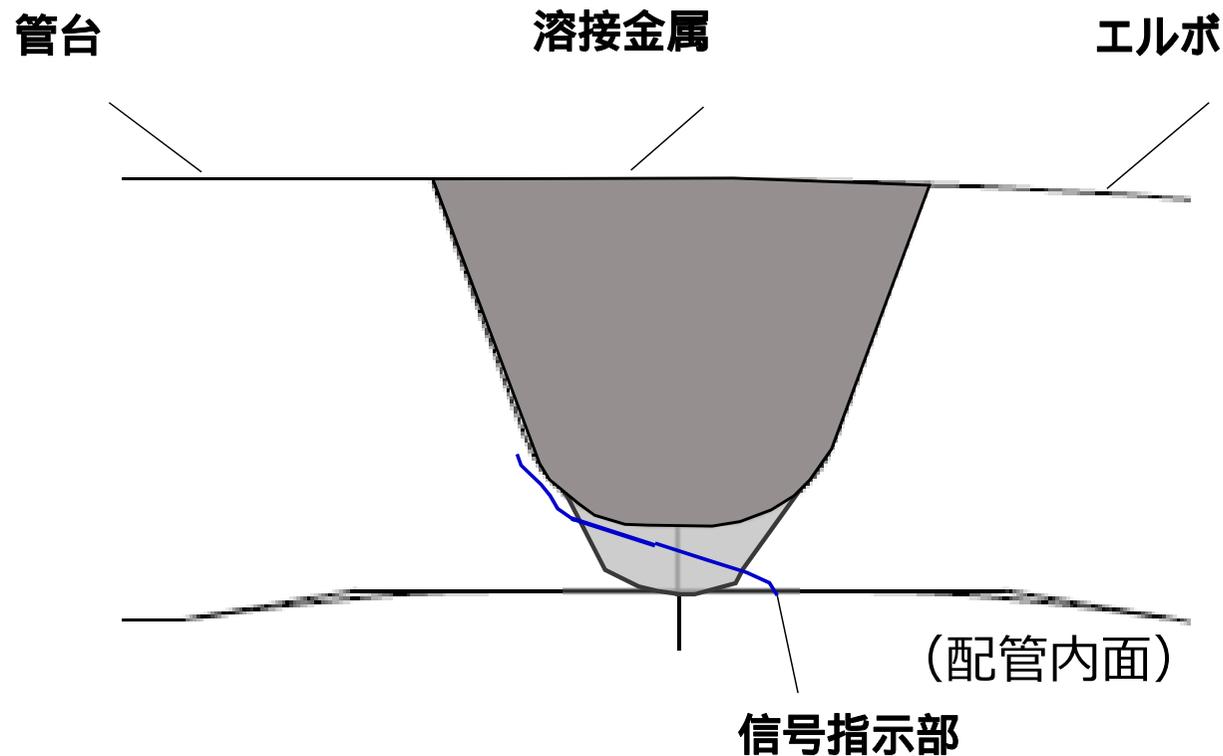
損傷発生箇所

系統概要図



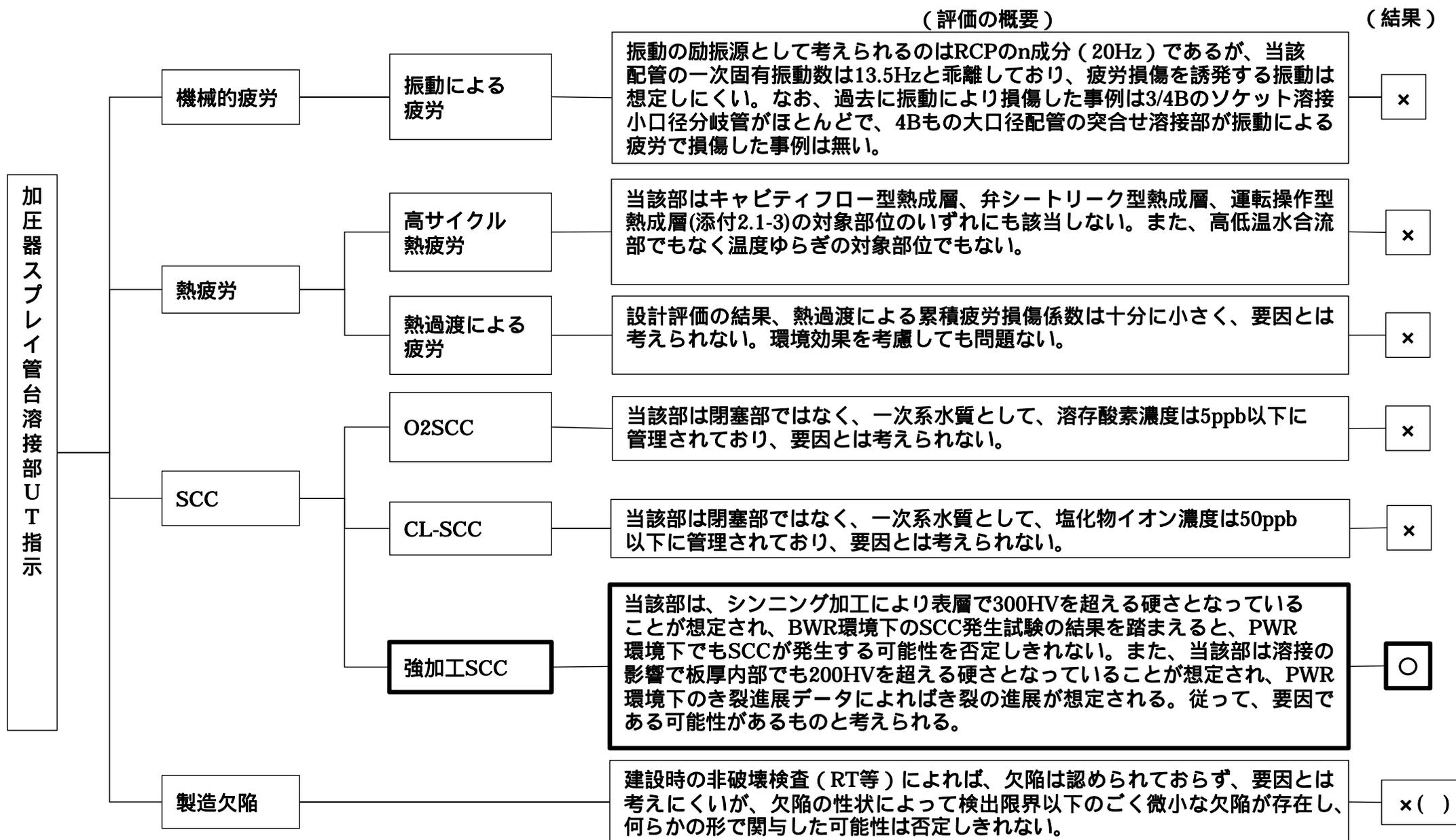
信号指示部概要

- 当該部は溶接時の開先合わせのために内表面をシンニング（切削）加工している。
- シンニング加工により、配管内表層のごく表層で硬化層が形成されたと推定される。



断面拡大図

信号指示の要因は、シニング加工により配管内表層のごく表層で硬化層が形成されたことによる強加工 SCC と推定される。



※SCC:応力腐食割れ

凡例 ○ ; 可能性が考えられる、 ; 関与した可能性は完全には否定しきれない、 × ; 可能性は考えられない

対応の背景

- 供用期間中検査において有意な欠陥指示が確認された際、規格基準に基づく欠陥評価を行うことで、評価期間内の継続運転が認められている。
- BWRにおいては、規格基準に取り込まれた手法を用いることで、これまで継続運転を実施してきたが、PWRでは規格基準に取り込まれた手法がないことから、欠陥評価結果の妥当性を示すためには、使用する手法の妥当性についても示す必要がある。

これまでの当社の対応

- 当該部は必要最小厚さを満足しているとともに、亀裂が13ヵ月以上の運転後においても技術基準に適合していることをご理解いただけるように、これまでの電共研成果や、新たにモックアップから取得したデータ等を用いた亀裂の進展評価、破壊評価を実施し、ご説明してきた。

10月2日の公開会合のご指摘

- モックアップで取得したデータを用いた新たな評価の妥当性の判断には、技術評価的な議論が必要であり時間を要すること
- 今回は供用期間中検査の中の事象であり、検査の範囲で妥当性を確認する必要があること
関西電力として、どのように進めていくのかを検討すること

検討結果

- モックアップデータ等を用いた評価に基づき技術基準には適合しており、次回定期検査までの安全性は説明できると考えるが、より説明性を高めるためには実機からより詳細なデータを取得・充実させる必要があると判断し、**今定期検査において当該配管の取替を行うこととする。**

本事象の扱いについて

- 現時点の欠陥形状（深さ4.6mm、長さ67mm）については、技術基準第17条（材料及び構造）及び第18条（使用中の亀裂等による破壊の防止）に適合していると考えている。
- 当該部位の定期事業者検査を再検査し、取替えることで検査を完了させる。
- また、核原料物質、核燃料物質及び原子炉の規制に関する法律第43条の3の16に基づく亀裂の評価結果の報告については、すみやかに提出する。

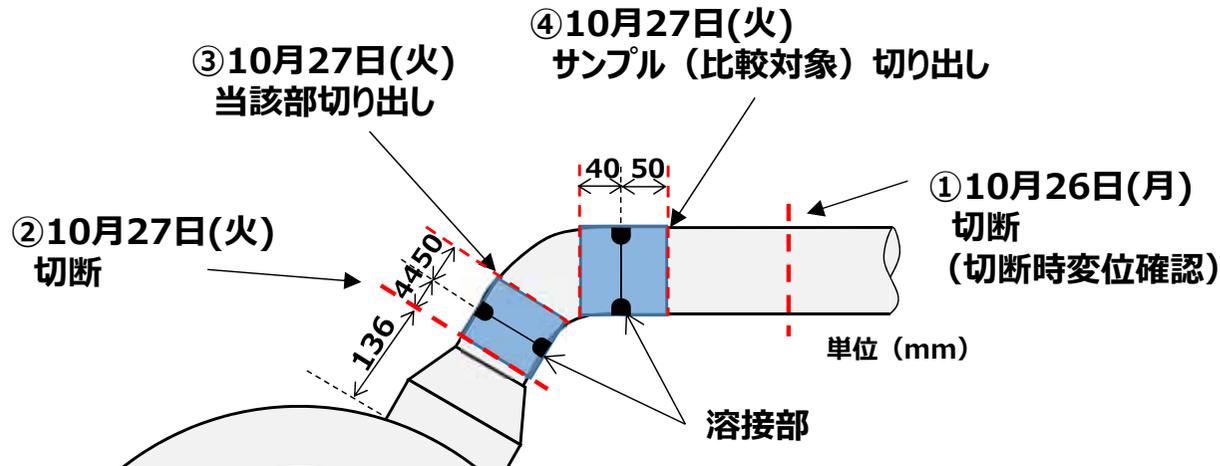
今後の調査について

- BWRの評価手法と同様に、PWRにおいても亀裂進展の評価手法を確立し規格基準へ取り込む必要があると考える。
- 切り出した配管にて当該亀裂の破面調査等を行い、今回評価に用いた手法の検証を行う。なお、亀裂の調査結果については、判明次第、別途報告を行う。
- 今後、規格基準の技術評価の中でPWRの評価手法の妥当性確認をお願いしたい。

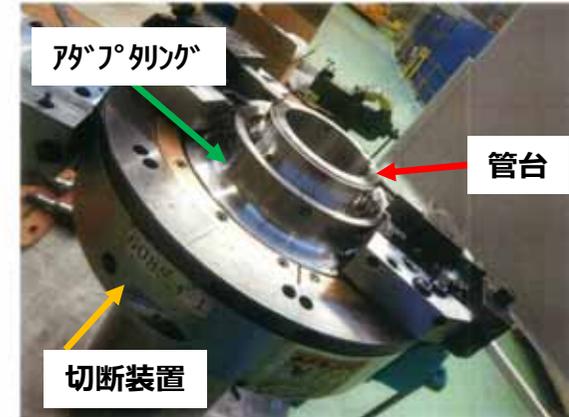
原子力規制委員会の評価

- 「詳細調査が実施されていないため、亀裂進展評価等の前提条件の妥当性等が確認できず、想定する運転期間中、技術基準適合性が維持されると判断できない。」とされた。
- 今後、亀裂の詳細調査による発生原因の特定結果等について、公開会合で確認が行われる。

加圧器スプレイ配管 現地切断方法



【切断工具写真】



【管台部 切断工程】

第1工程	第2工程	第3工程
<p>切断仕上げ位置のマーキング</p>	<p>切断加工 (肉厚 2 mm 残し) ・2つ割れアダプタリングを介して、切断装置を2分割で取付する。</p>	<p>ローラカッターによる押切加工 ・肉厚を約2mm程度残した状態でローラカッターに交換し、押切を実施する。</p>

1次冷却材管

※加圧器スプレイ配管管台部 表面線量当量率
(10月20日測定)
約4.200mSv/h
約0.540mSv/h at 0.5m
約0.240mSv/h at 1.0m

1次冷却材管や当該配管に影響がないよう従前より使用している機械的な方法 (バイト、ローラカッター) により切断する

調査項目一覧

	項目	内容
現地	切断時変位確認	配管切断時に拘束応力の解放による配管の変位量を確認する。
ホットラボ	外観観察	目視により判別できる傷、変形、腐食の状態を確認する。
	寸法計測	配管の寸法を計測する。(内外形、板厚等)
	UT、PT検査 (調査部位切り出し)	UTを実施し、亀裂長さ、亀裂深さを確認する。 配管内表面にPTを実施し、亀裂長さ確認する。
	破面外観観察	光学顕微鏡を用いて、亀裂の形状および進展経路を確認する。
	破面SEM観察	SEM(走査型電子顕微鏡)を用いて、亀裂発生位置、進展経路の確認を行う。
	付着物EDS分析	破面の付着物を分析し、腐食因子がないか確認する。
	断面マクロ・ミクロ・ 組織観察	断面のマクロ観察にて、溶接欠陥や異常組織の有無を確認する。 断面のミクロ観察にて、亀裂進展経路、金属組織(δフェライト)等を確認する。
	フェライト量計測	フェライトメーターまたは画像処理を用いて、亀裂進展領域のフェライト量を計測する。
	硬さ計測	ビッカース硬さ計測を行い、亀裂進展領域、シンニング部の硬さを計測する。
	化学成分分析	母材、溶接金属の化学成分に異常がないかを確認する。
	残留応力測定	配管内外表面の溶接部近傍について、残留応力を測定する。 ホットラボでの切断時にひずみゲージを用いて残留応力解放によるひずみ変位量を確認する方法、または、X線を用いる方法で測定する。

參考資料

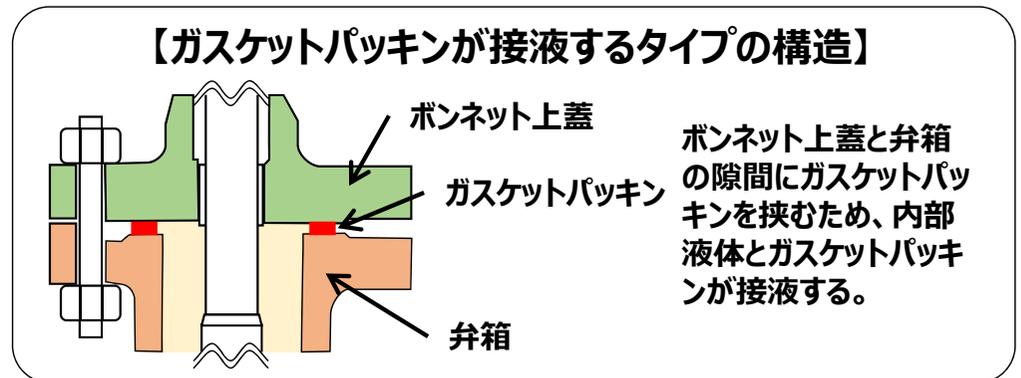
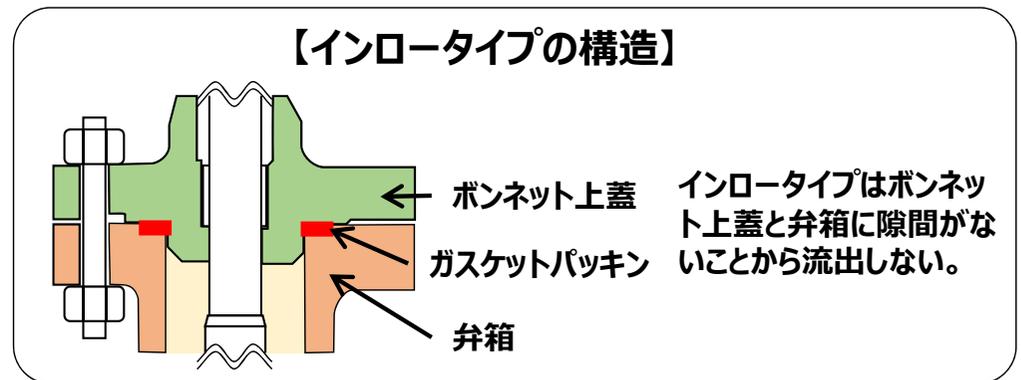
うず巻きガスケットの調査範囲（20箇所）については、以下の考え方を元に対象を選定した。

○ガスケットパッキンが破損し、S Gへ流入した場合、サイズを問わず伝熱管を摩耗減肉させる可能性がある。

○点検対象範囲（脱気器～SG）の機器に使用しているガスケットパッキンのサイズは約3mm（3.2mm）と約5mm（4.5mm、4.8mm）である。

○約3mmのガスケットパッキンは部品同士が噛み合うインロータイプ（構造上流出しない）であり、運転中にガスケットパッキンが破損してもS Gへ流入する可能性はない。

○以上より、約5mmのガスケットパッキンが接液するタイプを使用している機器について点検を実施した。



異物により減肉した国内外事例(1/2)

国内外で報告されている異物による外面減肉事象を調査し、国内では4件、海外では多数の事例があることを確認した。

○国内：4件（～2020年の調査）

プラント	事象発生年	原因となった異物	備考
高浜4号機	2019年	保温材外装板の切れ端等(推定)	法令報告対象
高浜3号機	2018年	ステンレス鋼等の金属片(推定)	法令報告対象外
美浜3号機	2000年	溶断作業で発生した2次生成物	法令報告対象
玄海1号機	1975年	鋼製巻尺	原子力施設情報公開ライブラリー(ニューシア)より

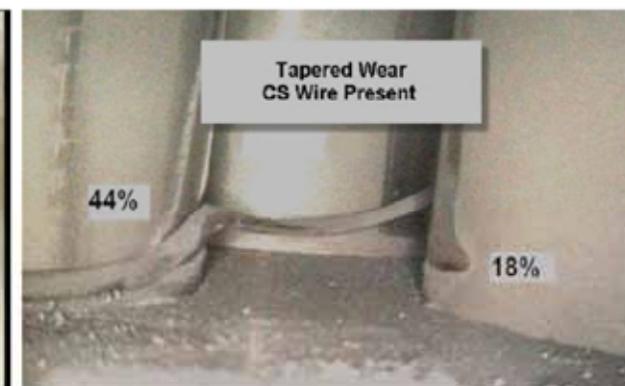
○海外： 件（2000年～2019年の調査）※1
2000年～2019年の年別報告件数※1

Palo Verde 3(米国)の例※2

米国の別のプラントの例※3



ガスケット片による減肉発生(2013年)



ワイヤによる減肉発生

※1: 米国電力研究所(EPRI)の蒸気発生器劣化データベースより

※2: 米国原子力規制委員会(NRC)のホームページより

※3: EPRIレポート(1020631)より

異物により減肉した国内外事例(2/2)

参考3

複数SGの伝熱管外面が異物により減肉した海外事例を公開情報から調査した結果、2000年以降で少なくとも10件あることを確認した。

○海外事例一覧※

プラント	SG数	事象発生年	異物により減肉した伝熱管本数
V.C. Summer 1	3	2018年	A-SG : 2本、B-SG : 2本
Palisades	2	2014年	A-SG : 2本、B-SG : 1本
Salem 1	4	2013年	SG12 : 1本、SG13 : 3本、SG14 : 1本
Byron 2	4	2011年	A-SG : 1本、C-SG : 1本、D-SG : 2本
Palisades	2	2010年	A-SG : 2本、B-SG : 2本
Calvert Cliffs 2	2	2009年	SG21 : 2本、SG22 : 6本
Millstone 2	2	2008年	SG 1 : 8本、SG 2 : 2本
Robinson 2	3	2007年	B-SG : 5本、C-SG : 1本
ANO 2	2	2005年	A-SG : 8本、B-SG : 5本
Robinson 2	3	2004年	B-SG : 5本、C-SG : 2本

※ NRCのホームページ上に公開されているレポートより