

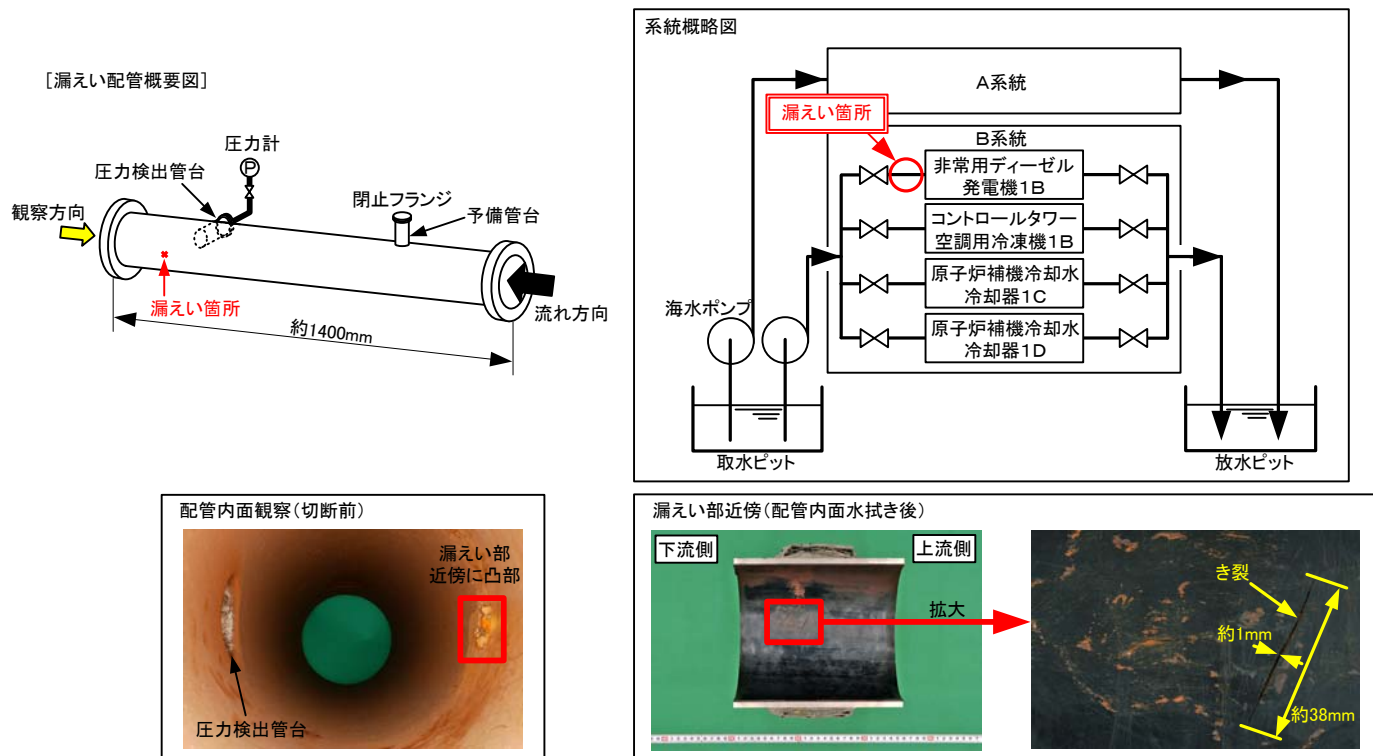
伊方発電所1号機 原子炉補機冷却海水設備配管からの漏えいについて

I. 非常用ディーゼル発電機1B冷却用海水供給配管からの漏えい

① 事象発生概要

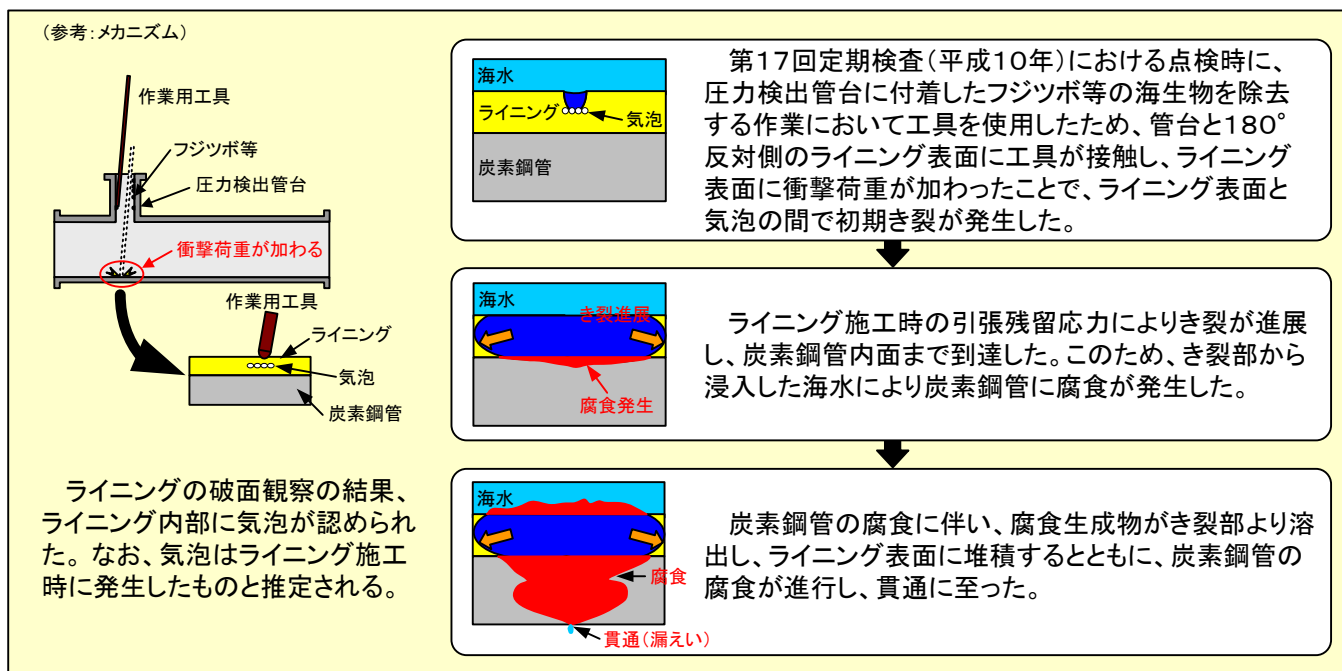
伊方発電所1号機(定格電気出力566MW)は、通常運転中のところ、4月27日11時45分、原子炉補助建家1階(管理区域外)において、保修員が非常用ディーゼル発電機1Bの冷却用海水供給配管に僅かな海水の漏えい(にじみ)があることを確認した。

② 配管調査の状況



③ 推定原因

当該配管の保守点検作業において、配管内面のポリエチレンライニングの内表面近傍に内在していた気泡の直上部に作業用具の接触による衝撃荷重が加わったことにより、初期き裂が発生した結果、ライニング施工時の残留応力により炭素鋼管までき裂が進行し、き裂部から浸入した海水により炭素鋼管が腐食して貫通に至ったものと推定された。



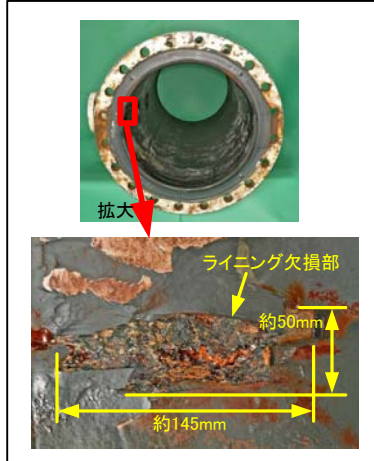
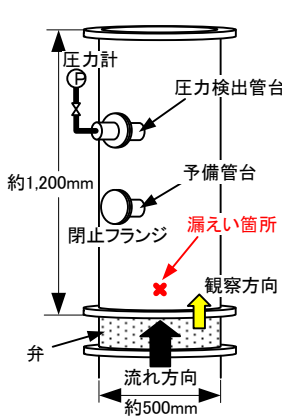
II. 原子炉補機冷却水冷却器1A冷却用海水供給配管からの漏えい

① 事象発生概要

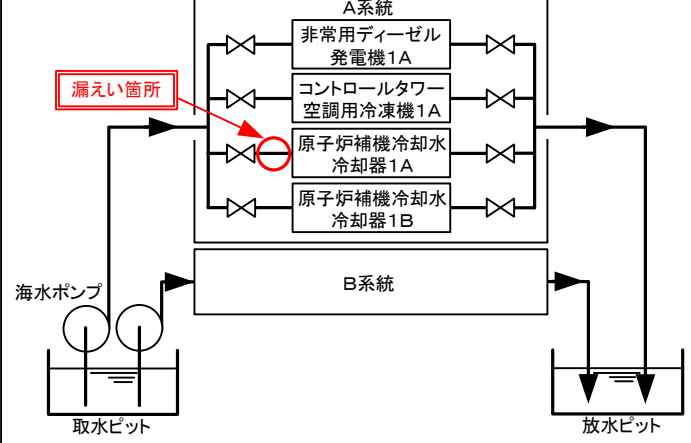
伊方発電所1号機(定格電気出力566MW)は、定期検査中のところ、6月11日7時45分、原子炉補助建家地下1階(管理区域内)において、原子炉補機冷却水冷却器1Aの冷却用海水供給配管から海水の漏えいがあることを確認した。

② 配管調査の状況

[漏えい配管概要図]



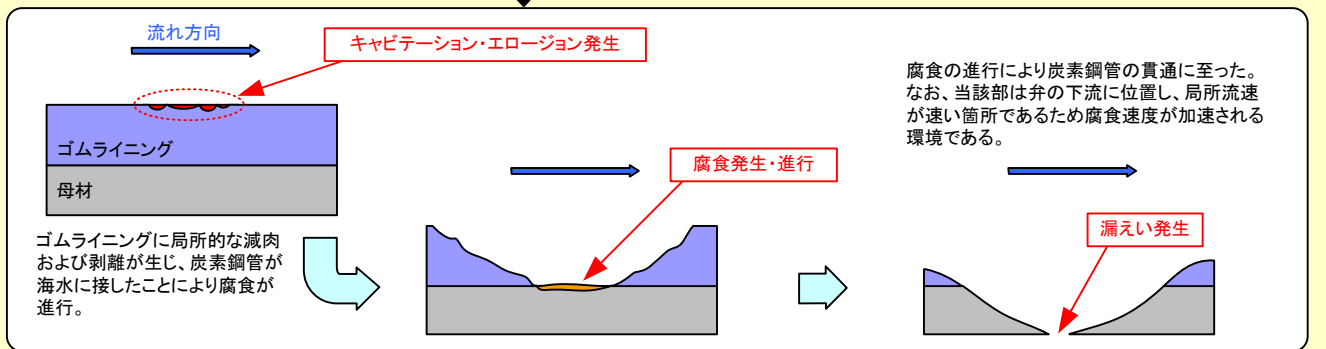
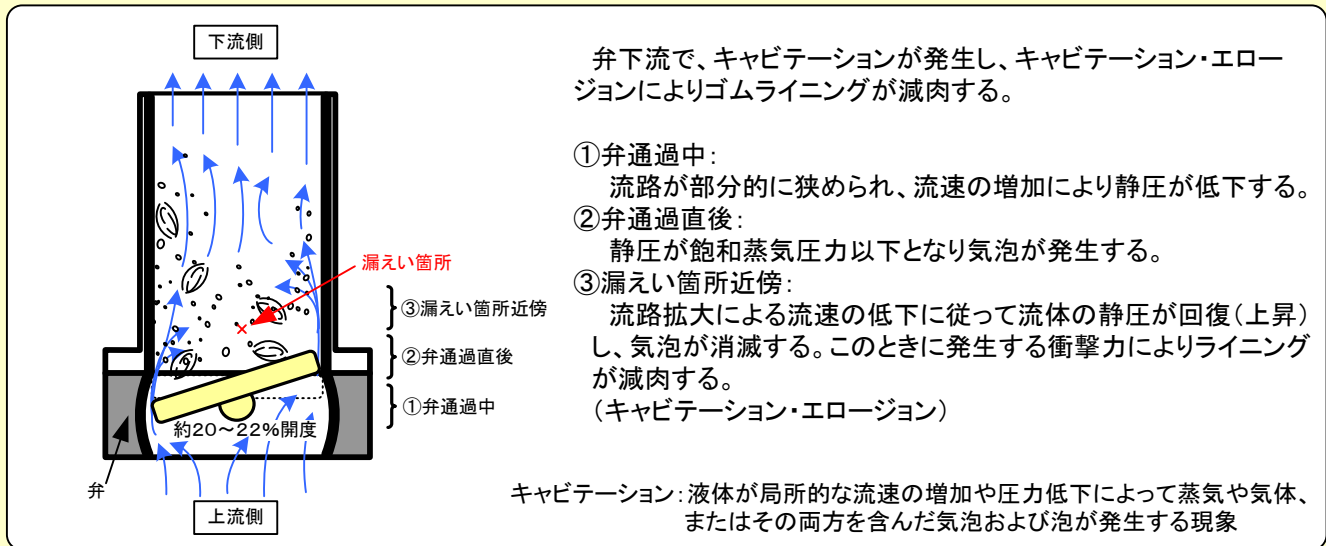
系統概略図



③ 推定原因

当該配管の上流の弁で海水流量を調整しており、当該弁の開度による流速の急激な変化によりキャビテーションが発生して当該配管内面のゴムライニングに局所的な減肉および剥離が発生した結果、炭素鋼管が配管内の海水により腐食して貫通に至ったものと推定された。

(参考:メカニズム)

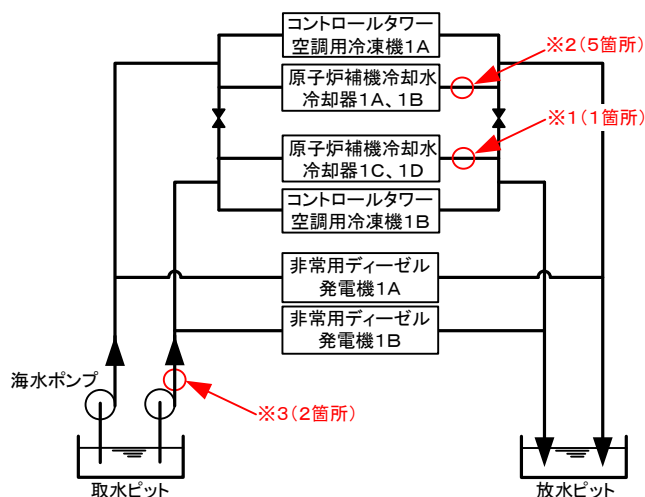


Ⅲ. 今回の原子炉補機冷却海水設備等の点検結果

原子炉補機冷却海水設備配管等の全数についてライニングの点検を行い、健全性を確認した。

このうち、これまでフランジ開放部から可視範囲について点検を実施してきた小口径、中口径配管については、目視、ファイバースコープ、CCDカメラ、遠隔操作管内点検ロボットによるライニング面全面の点検を実施した。

点検の結果、ポリエチレンライニング管のうち、原子炉補機冷却水冷却器冷却用海水戻り配管6箇所（※1）のライニング面にき裂が認められた。また、厚膜形エポキシ樹脂塗装管のうち、海水供給母管2箇所（※3）に塗膜の割れ、膨れ、炭素鋼管の腐食が認められた。



※1の状況



(ポリエチレンライニング)

※2の状況例



(ポリエチレンライニング)

※3の状況例



(厚膜形エポキシ樹脂塗装)

(推定原因)

- ・ポリエチレンライニングのき裂(※1、※2)については、以下の要因の何れかが重畳して発生し、進展したものと推定された。
 - ・製造時よりライニングに生じている引張残留応力
 - ・製造時よりライニング中に存在している気泡による応力集中
 - ・水蒸気の浸透によるライニングの剥離
 - ・点検時の重量物取扱い作業等において生じたと考えられる大きな外力
- ・厚膜形エポキシ樹脂塗装の割れ等(※3)については、塗装前の下地処理が十分でなかったために生じた炭素鋼管と塗膜との剥離によるものと推定された。

Ⅳ. 対策

① 漏えいの認められた非常用ディーゼル発電機1Bおよび原子炉補機冷却水冷却器1Aの冷却用海水供給配管について、新しい配管に取り替えた。

② 原子炉補機冷却海水設備配管等の全数について、点検を実施した。
結果、ライニングにき裂が認められた6箇所のポリエチレンライニング管および2箇所の厚膜形エポキシ樹脂塗装管については、再ライニング、ライニング補修、または新しい配管への取替えを行った。

③ ライニングの損傷および損傷の兆候を早期に発見し、適切な処置を行えるよう、配管内へ立入っての内面点検ができない小口径および中口径配管の点検方法および点検周期を以下のとおり変更し、次回の定期検査より計画的に点検を実施する。

(点検頻度)

点検頻度を増やし、知見の拡充を図ることとし、当面、これまでの12定検に1回以上から、6定検に1回以上に変更する。また、キャビテーションが発生する可能性がある範囲に設置されている配管を抽出するとともに、これらについては、12定検に1回以上から、2定検に1回に変更する。

(点検方法)

従来から実施しているフランジ開放部からの目視点検に加え、直接目視できない範囲については、ファイバースコープ、CCDカメラ、遠隔操作管内点検ロボットによる内面点検を実施する。

また、従来、代表箇所点検によりライニングの状況確認を実施している非常用ディーゼル発電機室内の機器周り配管についても、上記と同様にライニング全面点検を実施する。

④ 保守点検作業時に、ライニング表面に衝撃荷重を与えない観点から、作業要領書に以下の注意事項を反映する。
また、作業着手前の要領書読み合わせ等において、関係者全員に周知徹底を図る。

- ・除貝作業等で止むを得ず工具を使用する場合の工具とその使用方法に関すること
- ・万一、ライニング表面に衝撃荷重を与えた場合の適切な処置に関すること
- ・作業終了後のライニング表面の健全性確認に関すること

⑤ 点検結果を今後の保守管理に適切に反映するため、ライニング点検の結果について、点検対象、点検の着眼点、結果を明確化した点検記録を作成するよう作業要領書に反映する。

原子力発第10097号
平成22年 7月 8日

愛媛県知事
加戸守行 殿

四国電力株式会社
取締役社長 千葉 昭

伊方発電所第1号機 非常用ディーゼル発電機冷却用海水配管および
原子炉補機冷却用海水配管からの漏えいに係る報告書の提出について

平成22年4月27日に発生しました伊方発電所第1号機非常用ディーゼル発電機冷却用海水配管および原子炉補機冷却用海水配管からの漏えいにつきまして、その後の調査結果がまとまりましたので、安全協定第11条第2項に基づき、別添のとおり報告いたします。

今後とも伊方発電所の安全・安定運転に取り組んでまいりますので、ご指導賜りますようお願い申し上げます。

以 上

伊方発電所第1号機
非常用ディーゼル発電機冷却用海水配管および
原子炉補機冷却用海水配管からの漏えいについて

平成22年7月
四国電力株式会社

目 次

〔第1編〕 非常用ディーゼル発電機 1 B 冷却用海水供給配管からの漏えいについて	
1-1. 件 名	1-1
1-2. 事象発生の日時	1-1
1-3. 事象発生の原子炉施設	1-1
1-4. 事象発生時の運転状況	1-1
1-5. 事象発生の状況	1-1
1-6. 時 系 列	1-2
1-7. 安全性への影響について	1-3
1-8. 詳細調査	1-3
1-9. ライニングのき裂発生、進展要因に係る評価	1-9
1-10. ライニングへの荷重要因に係る検討	1-10
1-11. 推定原因	1-10
〔第2編〕 原子炉補機冷却水冷却器 1 A 冷却用海水供給配管からの漏えいについて	
2-1. 件 名	2-1
2-2. 事象発生の日時	2-1
2-3. 事象発生の原子炉施設	2-1
2-4. 事象発生時の運転状況	2-1
2-5. 事象発生の状況	2-1
2-6. 時 系 列	2-2
2-7. 安全性への影響について	2-2
2-8. 詳細調査	2-2
2-9. キャビテーション発生状況に係る評価	2-6
2-10. 類似配管の調査	2-8
2-11. 推定原因	2-8
〔第3編〕 原子炉補機冷却海水設備配管等の保守管理について	
3-1. 原子炉補機冷却海水設備配管等の保守管理の考え方	3-1
3-2. これまでの保守管理について	3-1
3-3. 今回の原子炉補機冷却海水設備配管等の点検結果	3-3
3-4. 対 策	3-5

〔第 1 編〕

非常用ディーゼル発電機 1 B 冷却用海水
供給配管からの漏えいについて

1-1. 件名

伊方発電所第1号機

非常用ディーゼル発電機1B冷却用海水供給配管からの漏えいについて

1-2. 事象発生の日時

平成22年4月27日 14時00分（技術基準を満足していないと判断）

1-3. 事象発生の原子炉施設

非常用ディーゼル発電機1B冷却用海水供給配管

- ・外径：219.1mm
- ・呼び厚さ：8.2mm
- ・必要最小厚さ：3.8mm
- ・材質：炭素鋼（内面ポリエチレンライニング〔膜厚2mm〕）

1-4. 事象発生時の運転状況

定格熱出力一定運転中

1-5. 事象発生の状況

伊方発電所第1号機（定格電気出力566MW）は、定格熱出力一定運転中のところ、4月27日11時45分、原子炉補助建家1階（管理区域外）において、保守員が非常用ディーゼル発電機*¹1Bの冷却用海水供給配管に僅かな海水の漏えい（にじみ）があることを確認した。なお、40秒に1滴程度の漏えいであり、漏えい量は約200mlと推定された。

当該配管は安全上重要な機器であり、技術基準に適合していないと認められたことから、14時00分、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第19条の17第3号に該当するものと判断した。当該配管の流量、圧力を確認した結果、管理値を十分満足しており、非常用ディーゼル発電機1Bの機能に影響を及ぼすものではなかった。

その後、非常用ディーゼル発電機1Bを待機除外状態とし、保安規定に定める運転上の制限*²逸脱状態とした後、当該配管の漏えいが確認された箇所に接着材による応急補修を行い、4月28日に海水の漏えいがないことを確認した。

さらに、5月2日、当該配管を同材質配管に取替え、非常用ディーゼル発電機1Bを待機状態とし、保安規定に定める運転上の制限逸脱状態から復帰させた。

なお、本事象によるプラント運転への影響および環境への放射能の影響はなかった。

（添付資料1-1、1-2）

* 1 : 非常用ディーゼル発電機

発電所の運転中に外部電源が喪失し、所内に電気が供給できなくなった場合に、安全にプラントを停止するのに必要な機器（高圧注入ポンプ、海水ポンプ等）に電気を供給するための設備で、2基設置している。

* 2 : 運転上の制限

原子力発電所を運用するために、運転管理、保守管理、燃料管理、緊急時の処置などの遵守すべき基本的事項を定めたもの。

1-6. 時系列

4月27日

- 10時04分 当直員が床面に直径10cm程度の水溜り跡を確認
- 11時45分 保修員が非常用ディーゼル発電機1Bの冷却用海水供給配管から海水が漏えいしていることを確認
- 14時00分 当該配管が技術基準に適合していないと認められたため、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第19条の17第3号に該当するものと判断
- 17時44分 非常用ディーゼル発電機1Bを待機除外とし、当該配管の隔離・水抜きを開始
(保安規定に定める運転上の制限を逸脱)
- 23時35分 応急補修作業開始

4月28日

- 9時25分 応急補修作業完了、隔離復旧・水張りを開始
- 10時10分 水張り完了後、当該配管に海水の漏えいがないことを確認

5月 2日

- 2時16分 当該配管の隔離・水抜き実施
- ～8時55分
- 9時38分 同材質配管への取替え実施
- ～14時00分
- 14時22分 隔離復旧・水張り実施
- ～17時53分
- 18時08分 非常用ディーゼル発電機1B起動試験開始
- 18時51分 非常用ディーゼル発電機1B起動試験終了、待機除外解除
(保安規定に定める運転上の制限逸脱状態から復帰)

1-7. 安全性への影響について

外部電源が喪失した場合に、原子炉の安全停止に必要な補機を運転するため、非常用ディーゼル発電機2基が設置されており、1基で原子炉を安全に停止するために必要な補機を運転するのに十分な容量を有している。非常用ディーゼル発電機1Bを待機除外としていた期間においては、保安規定に定めている頻度（運転上の制限を満足していないことを確認後4時間以内に1回、その後の1日に1回）で、残り1基（非常用ディーゼル発電機1A）が動作可能であることを確認している。

この非常用ディーゼル発電機の運転に必要な冷却水を、原子炉補機冷却海水設備から供給しており、非常用ディーゼル発電機が待機状態にあっても、冷却用海水は常時通水している。事象発生時、非常用ディーゼル発電機1Bは、当該配管により海水が供給され待機状態にあった。

漏えい発生後においても、非常用ディーゼル発電機1B通水流量は約228 m³/hであることを確認しており、伊方発電所内で定める、非常用ディーゼル発電機1Bの運転に必要な通水流量の管理値(>220 m³/h)を満足していたことから、非常用ディーゼル発電機1Bの機能に直ちに影響を及ぼすものではなかった。

1-8. 詳細調査

当該配管から漏えいが発生した原因について、要因分析図に基づきメーカー工場等において詳細調査を行った。

(添付資料1-3)

(1) 外観観察

a. 配管外面

当該配管の外面について外観観察を行った結果、割れや著しい腐食等の異常は認められなかった。

漏えい部周辺に施工していた応急補修用接着剤を取り除き外観観察を行った結果、直径約4mmの漏えい孔が認められた。

なお、取り除いた応急補修用接着剤の裏面の漏えい部接触箇所には、漏えい孔を塞いでいたと思われる塗膜の一部が付着していた。

漏えい部周辺には、割れや著しい腐食等の異常は認められなかった。

(添付資料1-4)

b. 配管内面

- 切断前の状態で母管内面について外観観察を行った結果、漏えい部近傍の配管内面に凸部が1箇所認められ、当該部は圧力検出管台のほぼ正面に位置していた。

他の範囲には、付着物、割れ、へこみ、膨れ等の異常は認められなかった。

(添付資料1-5)

- ・ 詳細観察のため配管を切断したところ、凸部は作業時の振動により剥離した。付着していた部分の状況を確認した結果、長さ約38mm、開口幅約1mmのき裂が認められた。

また、剥離した付着物の大きさは、周方向約32mm、軸方向約37mm、最大厚さ約7mmであった。

なお、他の範囲には、割れ、へこみ、膨れ等の異常は認められなかった。

(添付資料1-6)

c. 圧力検出管台、予備管台内面

圧力検出管台、予備管台の内面について外観観察を行った結果、ライニング表面にフジツボの付着が認められたが、割れ、へこみ、膨れ等の異常は認められなかった。

(添付資料1-7)

d. 炭素鋼管内面

ライニングをき裂に沿って一部剥離し、炭素鋼管の状況を確認した結果、き裂直下の炭素鋼管は、ほぼ円形に減肉部が広がっており、減肉部には腐食生成物と思われる固形物が詰まっていた。

(添付資料1-8)

(2) 付着物等の成分分析

当該配管内面のき裂部付近の付着物、および炭素鋼管減肉部で認められた固形物の性状について、X線回折*³による分析を行った結果、主成分は何れも腐食生成物であるオキシ水酸化鉄(FeOOH)であった。

このことから、当該配管内面に認められた付着物は、炭素鋼管の腐食、進展に伴いライニングき裂部より溶出し、堆積したものと推定される。

(添付資料1-9)

* 3 : X線回折

試料にX線を照射して、X線の回折現象を利用して試料の結晶構造を解析する手法。

(3) 断面観察

当該配管の漏えい部を切り出し、き裂部の断面マクロ観察を行った結果は、以下のとおりであった。

- ・ ライニングき裂部を中心に炭素鋼管の腐食が認められ、炭素鋼管外面の漏えい部は、ライニングき裂部のほぼ真下に認められた。

- ・ 炭素鋼管の腐食は、内面から外面に向かってつぼ状に腐食部が狭まっており、ライニングき裂部を起点として内面から外面に向かって腐食が進行

し貫通したことを示していた。

(添付資料 1 - 1 0)

また、フジツボの付着跡が認められた圧力検出管台、予備管台およびその他の健全部について断面マクロ観察を行った結果、炭素鋼管の腐食およびライニングの剥離や割れ等の異常は認められなかった。

(4) 断面EDS*⁴ (エネルギー分散型X線分析装置) 分析

マクロ観察を行ったき裂部の断面についてEDS分析を行った結果、ライニングと炭素鋼管の間に生成した腐食生成物中には鉄、酸素および海水成分である塩素の存在が認められた。

一方、ライニング中には、ライニング成分である炭素が認められたが、海水成分である塩素やナトリウムは認められなかった。

(添付資料 1 - 1 1)

* 4 : EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometer)

細かく絞った電子線を試料表面に照射し、そこから発生する特性X線を検出して試料の元素分析を行う装置。

(5) ライニング破面観察

a. ライニング破面マクロ観察

ライニングのき裂部よりサンプルを採取し、破面の拡大観察を行った結果、ライニング破面は比較的平坦であり、中央部には気泡が認められた。

なお、気泡直上部のライニング表面には微小な窪みが認められた。

また、微小な窪みを環状に取り巻く円弧状模様が認められた。

この円弧状模様は、き裂の進展過程で応力状況が変化し、き裂の進行速度が著しく変化した場合に現れる模様であり、起点を環状に取り巻く特徴を有する。

このことから、起点は微小な窪み近傍であると推定される。

(添付資料 1 - 1 2)

b. ライニング破面SEM*⁵ (走査型電子顕微鏡) 観察

ライニング破面のSEM観察を行った結果、

破面のほぼ全域に、き裂が進展する過程で形成され、き裂の進展方向を示す筋状模様が観察され、ライニング表面と気泡との間の部分には、筋状模様がほとんどない平滑な領域が認められた。

この平滑な領域は、高分子材料に衝撃荷重が加わり、破壊が急速に進行したときに見られるものであり、き裂の起点となった可能性が考えられる。

また、平滑な領域からライニングき裂の両先端(0°側と180°側)へ向かう筋状模様が認められたため、推定起点部であるライニング表面と気泡

との間の部分で生じた初期き裂が、徐々に進展したものと考えられる。

(添付資料 1 - 1 3)

* 5 : SEM (Scanning Electron Microscope)

細かく絞った電子線を試料表面に照射し、その部分からはね返ってくる二次電子像や反射電子組成像を観察するもの。

(6) ライニングの健全性調査

当該配管のライニングについて、以下の検査および調査を行った。

a. ピンホール検査

ライニングの貫通欠陥の有無を確認するため、貫通部近傍を除く当該配管全面について、ピンホール検査を行った結果、ライニングに貫通部は認められなかった。

b. ライニング膜厚測定

ライニングの摩耗や表面剥離等による膜厚減少の有無を確認するため、代表部位 4 箇所について、ライニングの膜厚測定を行った結果、工場製作時の基準値を満足しており、膜厚の著しい減少は認められなかった。

(添付資料 1 - 1 4)

c. 機械的特性調査

ライニングの機械的特性の状況調査を行った結果は、以下のとおりであった。

(添付資料 1 - 1 5)

i) ライニング硬さ

き裂部近傍および健全部のライニングについて、硬度測定を行った結果、き裂部近傍、健全部とも、硬度はほぼ同等であり、き裂部近傍に特異な硬化は認められなかった。

ii) ライニング接着力

き裂部近傍および健全部のライニングについて、接着力を測定した結果、き裂部近傍、健全部とも、接着力は確保されており、き裂部近傍に特異な接着力の低下は認められなかった。

iii) 引張強さ・伸び

き裂部近傍および健全部のライニングについて、引張強さおよび伸びを計測した結果、き裂部近傍、健全部とも、引張強さおよび伸びはほぼ同等であり、き裂部近傍に特異な引張特性の低下は認められなかった。

d. ライニングの海水遮断機能調査

ライニングの海水遮断機能を確認するため、健全部のライニングを剥離して炭素鋼管表面を観察した結果、金属光沢が残っており錆の発生は認められなかった。

また、断面EDS分析の結果、ライニング中には、海水成分である塩素やナトリウムは認められていないことから、ライニングは良好な海水遮断機能を有していることを確認した。

(添付資料1-16)

e. 赤外分光分析*⁶

ライニングの化学的特性を確認するため、赤外分光分析を行った結果、き裂部近傍、健全部ともにポリエチレン樹脂と同定された。

また、高分子材料が酸化して生成されるカルボニル基が僅かに認められたが、機械的特性調査の結果、き裂部近傍と健全部で有意な違いは認められないこと、き裂部EDS分析結果より、ライニング中にナトリウムイオンや塩素イオンは認められていないことから、き裂発生およびライニングの海水遮断機能への影響はないと考えられる。

(添付資料1-17)

*6：赤外分光分析

測定対象の物質に赤外線を照射し、透過（あるいは反射）光を分光することでスペクトルより対象物の分子構造や状態を知る手法。

f. ライニングの分子量測定

断面GPC*⁷（ゲル浸透クロマトグラフ）分析にて分子量を測定した結果、ライニング破面と健全部断面の分子量はほぼ同等であり、疲労破壊が起こった場合に現れる分子量の低下は認められなかった。

以上より、疲労破壊は生じていないことを確認した。

(添付資料1-18)

*7：GPC分析

GPC（Gel Permeation Chromatography）とは、分析しようとする物質と同程度の大きさの細孔をもつ粒状ゲル（固形状多孔性物質）を充填させた容器に、試料成分を溶解させた液体を通過させ、通過速度により分子の大きさ（分子量）を求める手法。

(7) 製造履歴調査

製造段階における記録等を調査した結果は、以下のとおりであった。

なお、当該配管は1号機建設時に製作、据付され、これまで継続使用しているものであった。

(添付資料1-19)

a. 炭素鋼管

- ・ 検査成績書を調査した結果、規格に適合した材料が使用されており、配管厚さは設計寸法を満足していることを確認した。

b. ライニング

- ・ 当該ライニングは、粉末ポリエチレンを使用して施工されたものである。
- ・ 赤外分光分析の結果、ポリエチレン樹脂であることを確認した。
- ・ ライニング厚さについて、検査成績書を調査した結果、基準値を満足していることを確認した。
- ・ ライニング施工メーカーへの聞き取り調査を行った結果、
 - i) き裂発生部は、万一、補修作業が必要となっても母管フランジ部から離れた位置であること、圧力検出管台開口寸法が小さいことから、手直し補修が行われる可能性はないこと
 - ii) 粉末ポリエチレンを用いたライニング施工においては、施工上、ライニング材中に気泡が発生することを完全には排除できず、また、ピンホール検査、膜厚検査等においても微小な気泡の存在を確認することができないことを確認した。

(添付資料1-20)

(8) 運転履歴調査

a. 運転流速

運転流速を調査した結果、当該配管の流速は2.0～2.3 m/sで、設計流速(3.5 m/s)以下であることから、ポリエチレンライニングの健全性に影響を及ぼすものではないことを確認した。

b. 水質

海水系統に注入している以下の薬品の影響について調査した結果、ポリエチレンライニングの劣化に影響を及ぼすものではないことを確認した。

i) 次亜塩素酸ソーダ

メーカーデータによれば濃度15%の次亜塩素酸ソーダに対する耐性を有しており、注入濃度(約0.3 ppm(塩素))は十分低く問題ない。

ii) 硫酸第一鉄

メーカーデータによれば濃度60%の硫酸に対する耐性を有しており、注入濃度(初期皮膜形成時に約0.05 ppm、通常時は約0.01 ppm)は十分低く問題ない。

(9) 保守履歴調査

a. 当該ポリエチレンライニング管の保守管理内容

当該ポリエチレンライニング管についての保守管理内容は以下のとおりである。

- ・ 定期的な内面視点検により、ライニングの健全性確認を行っており、点検頻度は、12定検に1回以上としている。
- ・ 目視によるライニング状況確認は、ライニング全面ではなく、フランジ開放部から可視範囲について実施している。

b. 当該配管の取替え、補修実績

保守履歴について調査を行った結果、当該配管はこれまで取替えおよび補修を行っていないことを確認した。

c. 当該配管の点検実績

過去の点検実績を確認した結果、直近での点検実績は以下のとおりであった。

i) 第15回定期検査（平成7年）

母管下流フランジ部を開放し、開放部より可視範囲（母管部ライニング面）の目視点検を実施。

ii) 第17回定期検査（平成10年）

圧力検出管台フランジ部を開放し、開放部より可視範囲（圧力検出管台部ライニング面、および母管部ライニング面のうち、き裂発生部を含む圧力検出管台正面の一部）の目視点検を実施。

また、上記定期検査時の点検記録を確認した結果、ライニングに異常がなかったことを確認した。

（添付資料1-21）

1-9. ライニングのき裂発生、進展要因に係る評価

詳細調査結果を踏まえ、ライニングのき裂発生、進展の要因について評価を行った。

(1) 初期き裂発生に係る検証

詳細調査で確認された初期き裂の発生要因を特定するため、当該配管から採取したライニングの衝撃試験を行った結果、気泡を内在するライニングについては、衝撃荷重が加わった場合、き裂が発生する可能性があることを確認した。

（添付資料1-22）

(2) き裂進展に係る評価

当該配管から採取したライニングの残留ひずみを測定した結果、ライニング

には引張応力が作用していたものと推定され、き裂が進展する可能性がある応力場であったものと考えられる。

(添付資料 1 - 2 3)

1 - 1 0. ライニングへの荷重要因に係る検討

ライニング表面に衝撃荷重が加わる要因について調査を行った結果は、以下のとおりであった。

(1) 工場製作時

工場製作時の作業手順、要領についてライニング施工メーカーへの聞き取り調査を行った結果、製作工程中に当該部に衝撃荷重が加わる可能性はないことを確認した。

(添付資料 1 - 2 0)

(2) 保守点検作業時

海水配管点検の作業要領書を調査した結果、作業要領上、当該部に衝撃荷重が加わる可能性のある作業手順は確認できなかった。

しかしながら、工事関係者への聞き取り調査を行った結果、ライニング面に海生物の付着が認められた場合、配管口径が小さく作業員が手を挿入できない部位については、作業用工具を使用して海生物の除去および清掃作業を実施する場合があるとのことであり、過去の保守点検時に作業用工具の接触による衝撃荷重が加わった可能性は否定できない。

なお、他プラントで発生した不具合から得られた知見については、必要に応じて反映してきており、その結果、平成 2 1 年 2 月改訂の作業要領書には、ライニング面の取扱いに関する注意事項等を記載していた。

(添付資料 1 - 2 4)

(3) 通常運転中

通常運転中、当該部に衝撃荷重が加わることは考えられない。

1 - 1 1. 推定原因

以上の調査結果から、漏えいが発生した原因は、

- ・ 当該配管の保守点検作業時、ライニング施工時からポリエチレンライニング表面近傍に存在していた気泡の直上部に、作業用工具の接触による衝撃荷重が加わったことにより初期き裂が発生した
- ・ その後、ポリエチレンライニング施工時の残留応力によりき裂が進展し、炭素鋼管内面に達したため、き裂部から浸入した海水により炭素鋼管の内面から外面に向かって腐食が進行し、炭素鋼管の貫通に至った

ものと推定される。

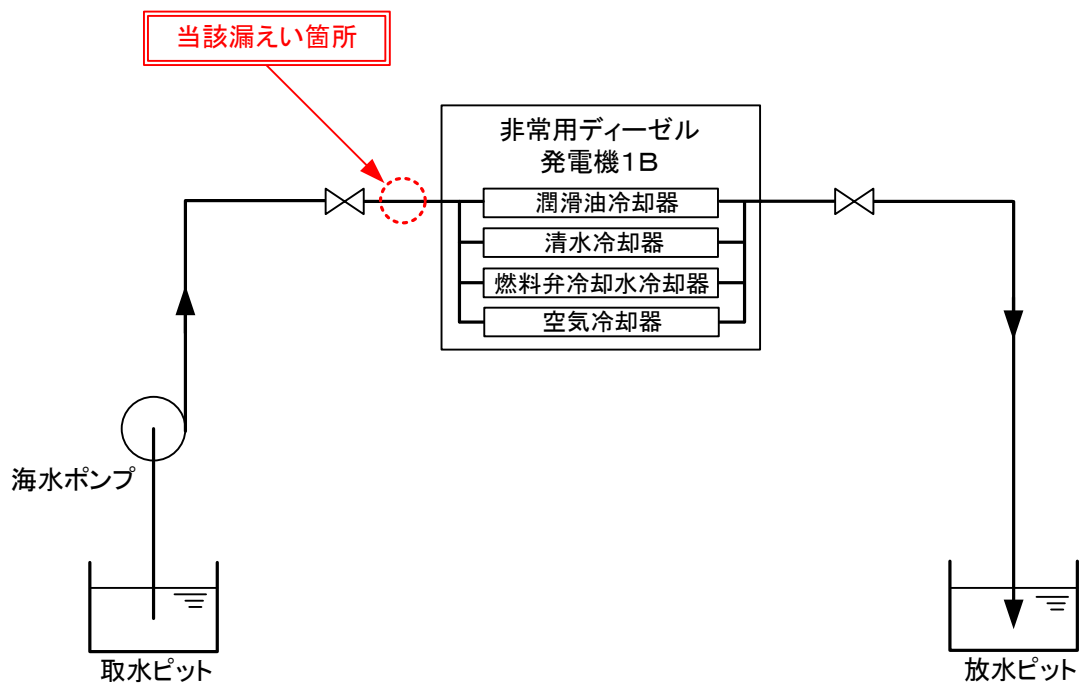
(添付資料 1 - 2 5)

以 上

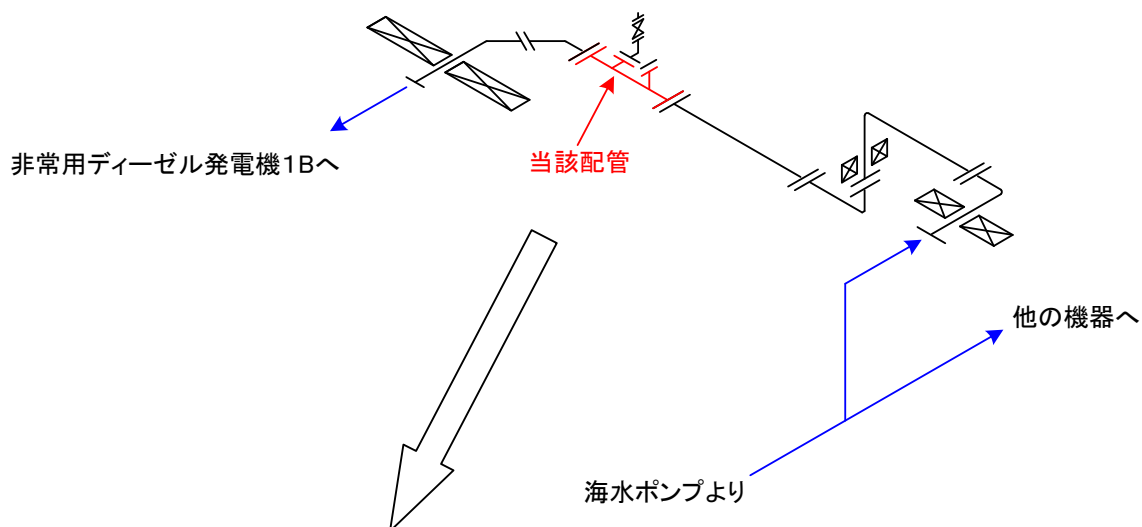
【添 付 資 料】

- 1-1. 非常用ディーゼル発電機1B冷却用海水供給配管概略系統図
- 1-2. 非常用ディーゼル発電機1B冷却用海水供給配管概略図
- 1-3. 非常用ディーゼル発電機1B冷却用海水供給配管からの漏えいに関する要因分析図
- 1-4. 外観観察結果（配管外面）
- 1-5. 外観観察結果（配管内面 切断前）
- 1-6. 外観観察結果（配管内面 切断後）
- 1-7. 外観観察結果（圧力検出管台、予備管台内面）
- 1-8. 外観観察結果（炭素鋼管内面）
- 1-9. 腐食生成物堆積のメカニズム
- 1-10. 断面マクロ観察結果
- 1-11. 断面EDS分析結果
- 1-12. ライニング破面マクロ観察結果
- 1-13. ライニング破面SEM観察結果
- 1-14. ライニング膜厚測定結果
- 1-15. ライニングの機械的特性調査結果
- 1-16. ライニングの海水遮断機能調査結果
- 1-17. ライニングの赤外分光分析結果
- 1-18. ライニングの断面GPC分析結果
- 1-19. 製造履歴調査結果
- 1-20. ポリエチレンライニング管の製作フローの概要
- 1-21. 保守履歴調査結果
- 1-22. ライニングの初期き裂発生に係る検証試験
- 1-23. ライニングの残留ひずみ計測結果
- 1-24. 作業用工具の調査結果
- 1-25. 推定メカニズム

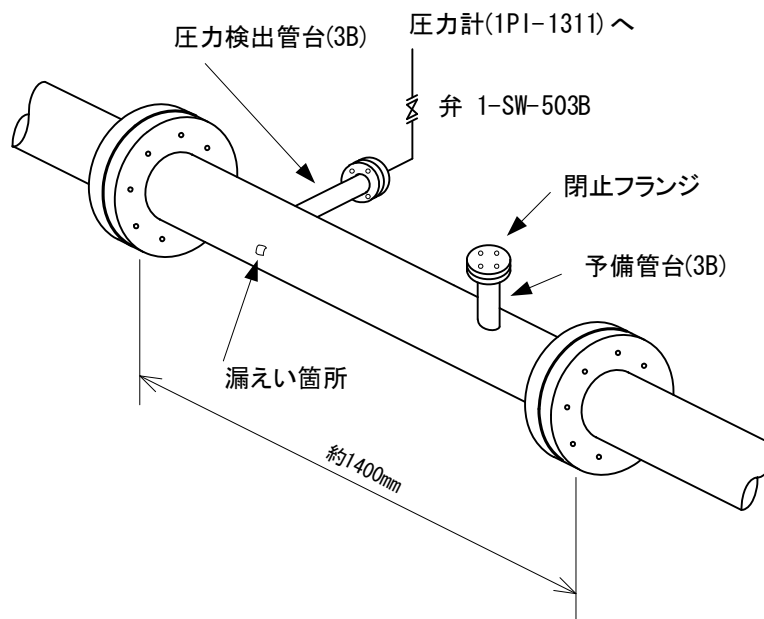
非常用ディーゼル発電機 1 B 冷却用海水供給配管概略系統図



非常用ディーゼル発電機 1 B 冷却用海水供給配管概略図



当該配管の漏えい箇所および仕様



当該配管の仕様

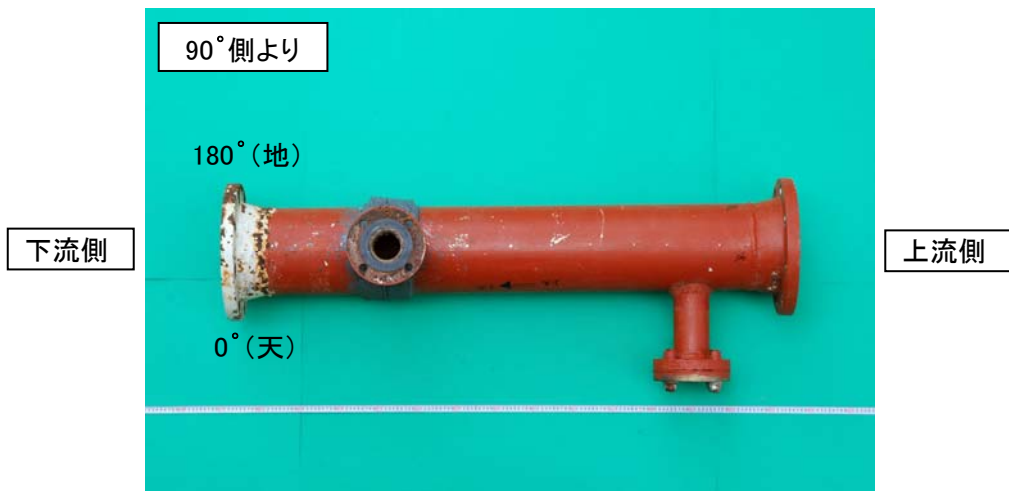
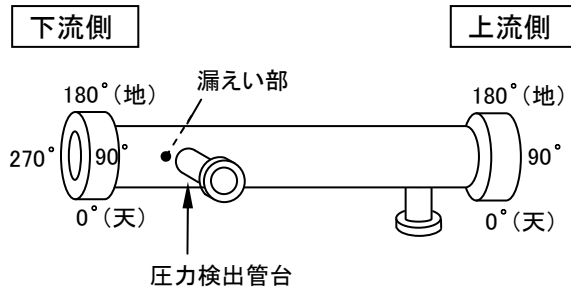
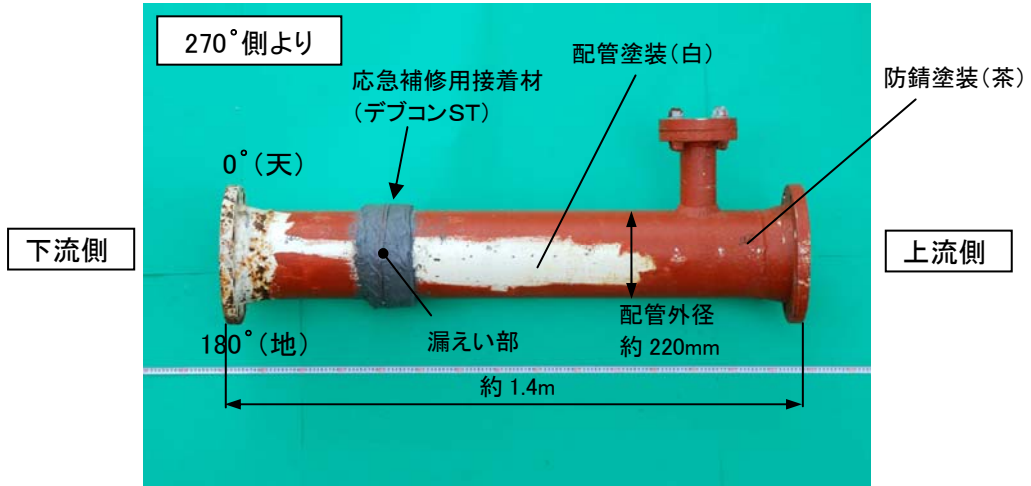
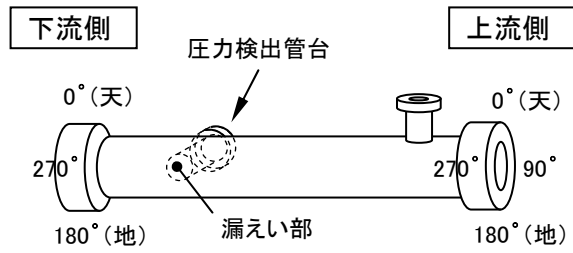
- 外 径 : 219.1mm
- 呼び 厚 さ : 8.2mm
- 必要最小厚さ : 3.8mm
- 材 質 : 炭素鋼 (STPT42)
- 配 管 内 面 : ポリエチレンライニング
- 最高使用温度 : 40°C
- 最高使用圧力 : 0.65MPa (6.6kg/cm²)

非常用ディーゼル発電機 1 B 冷却用海水供給配管からの漏えいに関する要因分析図

△：可能性あり
×：可能性なし

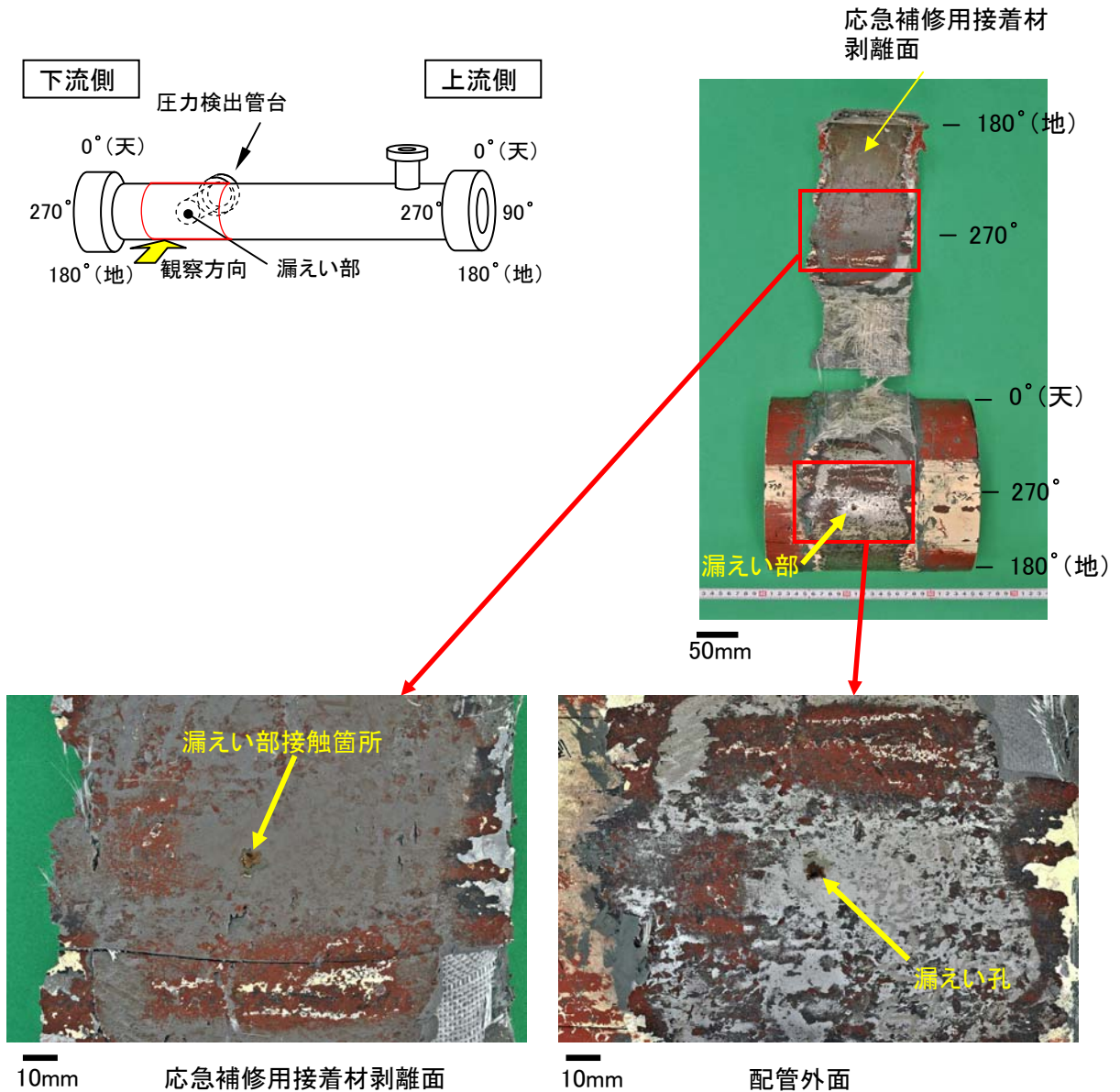
事象	要因	調査内容	調査結果	評価	添付資料			
非常用ディーゼル発電機 1 B 冷却用海水供給配管からの漏えい	配管	材料不良	化学成分不良	・製造履歴調査 ・検査成績書を調査した結果、規格に適合した材料が使用されていることを確認した。	×	1-19		
		製作・施工不良	寸法・形状不良	・製造履歴調査 ・検査成績書を調査した結果、配管厚さは設計寸法を満足していることを確認した。	×	1-19		
		腐食等	外面腐食	・外観観察	・漏えい部周辺には割れや著しい腐食等の異常は認められなかった。	×	1-4	
			海水による腐食	・外観観察 ・付着物等の成分分析 ・断面観察 ・断面 EDS 分析	・外観観察の結果、配管内面のライニング材き裂直下の炭素鋼管は、ほぼ円形に減肉部が広がっており、減肉部には腐食生成物と思われる固形物が詰まっていた。 ・成分分析の結果、き裂部付近の付着物および炭素鋼管減肉部で認められた固形物の主成分は何れも腐食生成物であった。 ・断面観察の結果、炭素鋼管の腐食は、内面から外面に向かってつぼ状に腐食部が狭まっており、ライニングき裂部を起点として内面から外面に向かって腐食が進行し、貫通したことを示していた。 ・断面 EDS 分析の結果、ライニングと炭素鋼管の間に生成した腐食生成物中には鉄、酸素および海水に含まれる塩素の存在が認められた。	△	1-5 1-6 1-7 1-8 1-9 1-10 1-11	
			応力腐食割れ	・断面観察	・断面観察の結果、割れ等の異常はなく、応力腐食割れではないことを確認した。	×	1-10	
			エロージョン	・外観観察	・外観観察の結果、配管内面のライニング材き裂直下の炭素鋼管は、ほぼ円形に減肉部が広がっており、減肉部には腐食生成物と思われる固形物が詰まっていた。(エロージョン痕は認められなかった。)	×	1-8	
		ライニング	材料不良	化学成分不良	・ライニング健全性調査 ・赤外分光分析の結果、ポリエチレン樹脂であることを確認した。	×	1-17	
			製作・施工不良	寸法不良	・製造履歴調査 ・ライニング厚さについて、検査成績書を調査した結果、基準値を満足していることを確認した。 ・ライニング施工メーカーへの聞き取りの結果、き裂発生部は、万一、補修作業が必要となっても母管フランジ部から離れた位置、圧力検出管台開口寸法が小さいことから手直し補修が行われる可能性はないことを確認した。また、粉末ポリエチレンを用いたライニング施工においては、施工上、ライニング材中に気泡が発生することを完全には排除できず、また、ピンホール検査、膜厚検査等においても微小な気泡の存在を確認することができないことを確認した。	×	1-19 1-20	
			外的要因	外力の負荷	・外観観察 ・ライニング破面観察	・配管内面の外観観察の結果、漏えい部近傍の配管内面に凸部が1箇所認められ、当該部は圧力検出管台のほぼ正面に位置していた。他の範囲には、付着物、割れ、へこみ、膨れ等の異常は認められなかった。 ・凸部が付着していた配管内面の状況を確認した結果、長さ約38mm、開口幅約1mmのき裂が認められた。 ・破面観察の結果、ライニング破面は比較的平坦であり、中央部には気泡が認められた。なお、気泡直上部のライニング表面には微小な窪みが認められた。また、微小な窪みを環状に取り巻く円弧状模様が認められた。この円弧状模様は、起点を環状に取り巻くことから、起点は微小な窪み近傍であると推定される。 ・破面 SEM 観察の結果、破面のほぼ全域にき裂の進展方向を示す筋状模様が観察され、ライニング表面と気泡との部分には、筋状模様がほとんどない平滑な領域が認められた。この平滑な領域は、高分子材料に衝撃荷重が加わり、破壊が急速に進行したときに見られるものであり、き裂の起点となった可能性が考えられる。	△	1-5 1-6 1-12 1-13
					・外観観察	・配管内面の外観観察の結果、漏えい部近傍の配管内面に凸部が1箇所認められ、当該部は圧力検出管台のほぼ正面に位置していた。他の範囲には、付着物、割れ、へこみ、膨れ等の異常は認められなかった。(海生物の付着は認められなかった。)	×	1-5
	磨耗等		海生物による影響	・外観観察	・配管内面の外観観察の結果、漏えい部近傍の配管内面に凸部が1箇所認められ、当該部は圧力検出管台のほぼ正面に位置していた。他の範囲には、付着物、割れ、へこみ、膨れ等の異常は認められなかった。(海生物の付着は認められなかった。)	×	1-5	
			運転流速による影響	・運転履歴調査	・運転流速を調査した結果、当該配管の流速は2.0~2.3m/sであり、設計流速(3.5m/s)以下であることからポリエチレンライニングの健全性に影響を及ぼすものではないことを確認した。	×		
			薬品による影響	・運転履歴調査	・海水系統に注入している薬品の影響を調査した結果、ポリエチレンライニングの劣化に影響を及ぼすものではないことを確認した。	×		
			海水遮断機能の有意な低下	・断面 EDS 分析 ・ライニング健全性調査	・断面 EDS 分析の結果、ライニング中には、海水成分である塩素やナトリウムは認められなかった。 ・膜厚測定の結果、工場製作時の基準値を満足しており、膜厚の有意な減少は認められなかった。 ・機械的特性(硬さ、接着力、引張強さ・伸び)を調査した結果、き裂部近傍に特異な変化は認められなかった。 ・化学的特性を確認するため、赤外分光分析を行った結果、き裂部近傍・健全部ともにポリエチレン樹脂と同定され、高分子材料が酸化して生成されるカルボニル基が僅かに認められた。 ・海水遮断機能を確認するため、健全部のライニング材を剥離して炭素鋼管表面を観察した結果、金属光沢が残っており錆の発生が認められないことから、ライニングは良好な海水遮断機能を有していることを確認した。	×	1-11 1-14 1-15 1-16 1-17	
	保守管理		保守不良	疲労	・ライニング分子量測定	・断面 GPC 分析の結果、ライニング破面と健全部断面の分子量はほぼ同等であり、疲労破壊が起こった場合に現れる分子量の低下は認められなかった。	×	1-18
				エロージョン	・外観観察	・配管内面の外観観察の結果、漏えい部近傍の配管内面に凸部が1箇所認められ、当該部は圧力検出管台のほぼ正面に位置していた。他の範囲には、付着物、割れ、へこみ、膨れ等の異常は認められなかった。(エロージョン痕は認められなかった。)	×	1-5
		保守履歴調査		・保守履歴調査	・当該ポリエチレンライニング管については、12定検に1回以上の頻度で目視によるライニング状況確認を行っており、ライニング状況確認は、ライニング全面ではなく、フランジ開放部から可視範囲について実施している。 ・保守履歴を調査した結果、当該配管は、これまで取替えおよび補修を行っていないことを確認した。 ・点検実績を確認した結果、直近の点検結果(第15回および第17回定検)では異常は認められていなかったことを確認した。	×	1-21	

外観観察結果 (配管外面)



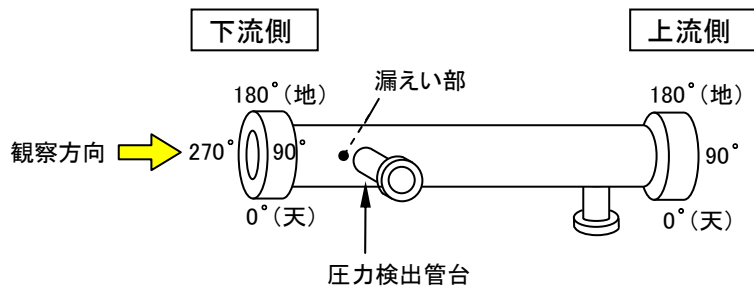
・配管外面の外観観察を行った結果、割れや著しい腐食等の異常は認められなかった。

外観観察結果 (配管外面 接着材除去後)



- ・ 漏えい部周辺に施工していた配管外面の応急補修用接着材を取り除き、外観観察を行った結果、直径約4mmの漏えい孔が認められた。
- ・ 取り除いた応急補修用接着剤の裏面の漏えい部接触箇所には、漏えい孔を塞いでいたと思われる塗膜の一部が付着していた。
- ・ 漏えい部周辺には、割れや著しい腐食等の異常は認められなかった。

外観観察結果（配管内面 切断前）



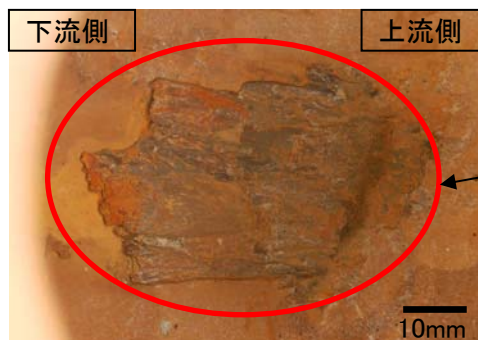
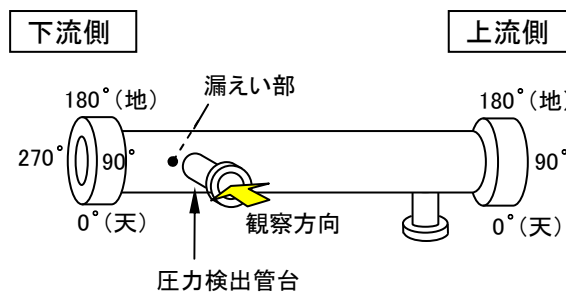
圧力検出管台



凸部拡大



180° (地)

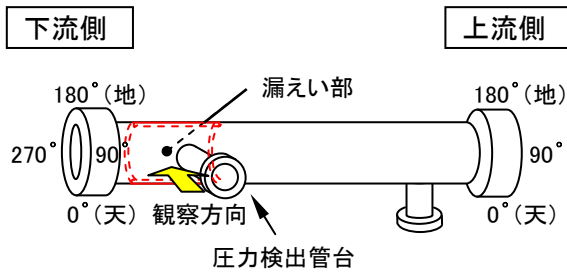


圧力検出管台のほぼ正面に漏えい部近傍の凸部が認められた

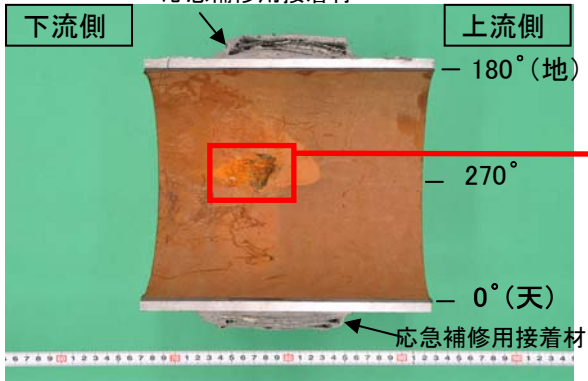
圧力検出管台の開口部から撮影

- ・配管内面の外観観察を行った結果、漏えい部近傍の配管内面に凸部が1箇所認められ、圧力検出管台のほぼ正面に位置していた。
- ・他の範囲には、割れ、へこみ、膨れ等の異常は認められなかった。

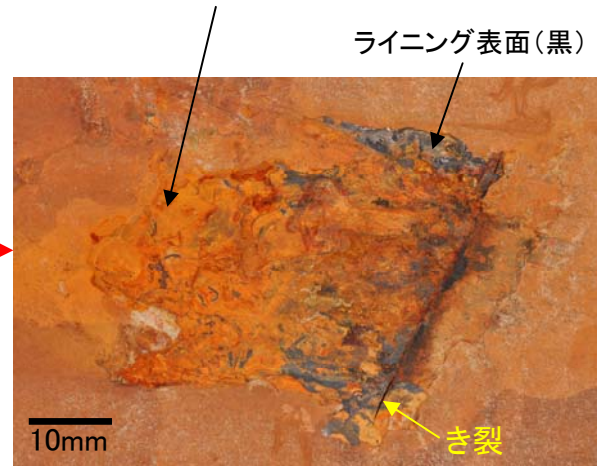
外観観察結果（配管内面 切断後）



水拭き前

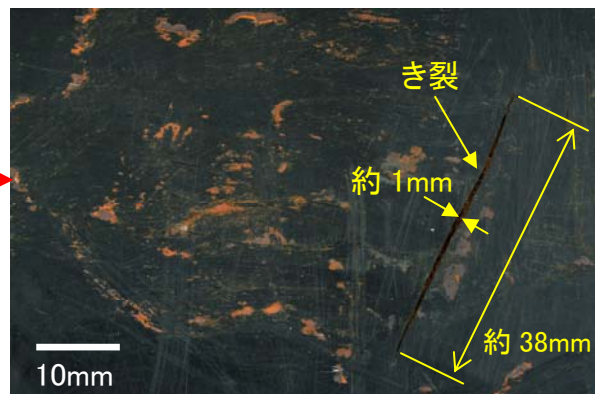
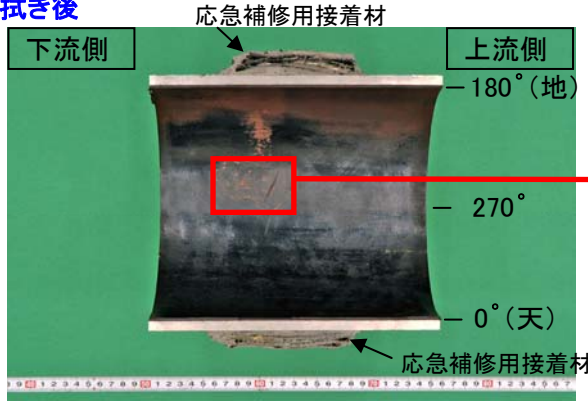


漏えい部近傍の配管内面を詳細観察するために当該部近傍を切り出した。
切断作業の振動により、凸部が剥離した。



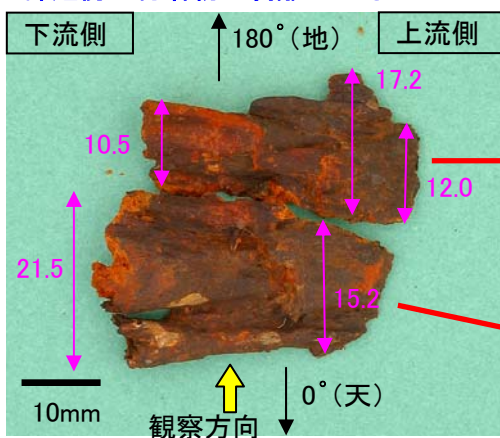
漏えい部近傍(付着物が剥離した状態)

水拭き後

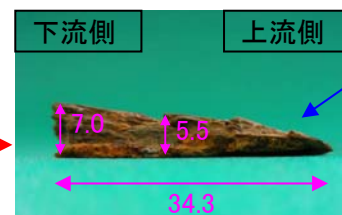


漏えい部近傍(水拭き後)

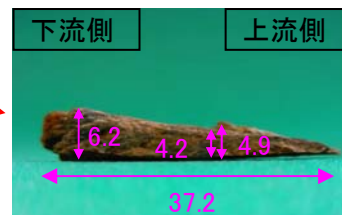
漏えい部近傍の付着物が剥離したものの



側面観察



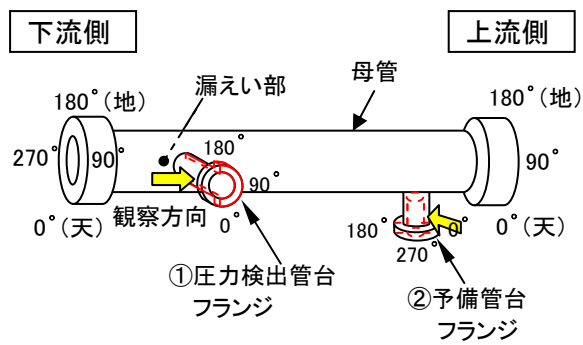
側面観察



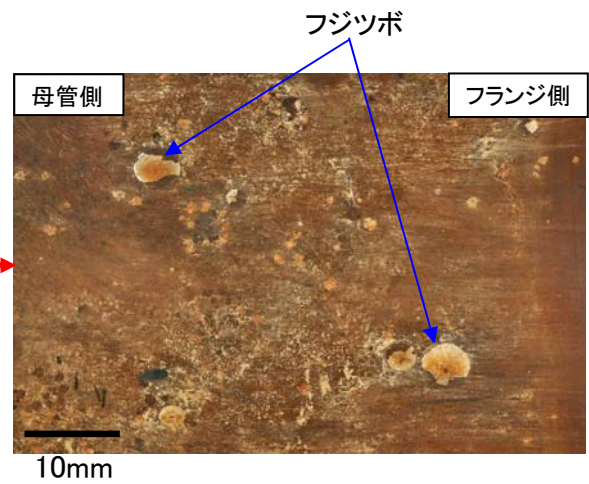
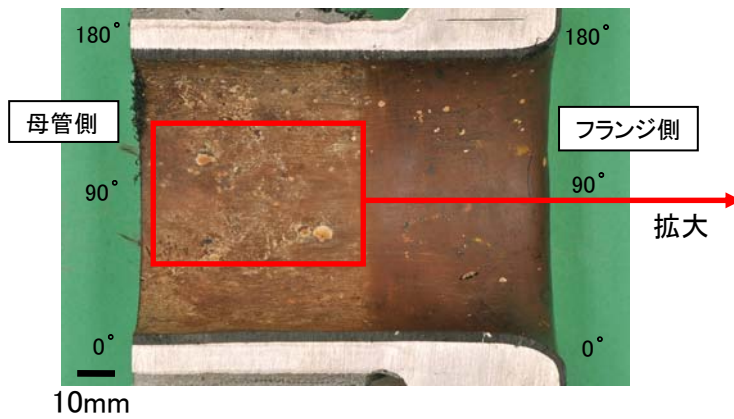
X線回折にて分析した結果、
主成分は FeOOH であった。

- ・ 詳細観察するために当該配管を切断したところ、漏えい部近傍の凸部は切断作業の振動により剥離した。水拭き後、凸部が付着していた部分の配管内面の外観観察を行った結果、漏えい部近傍に長さ約 38mm、開口幅約 1mm のき裂が認められた。
- ・ 剥離した付着物の大きさは、周方向約 32mm、軸方向約 37mm、最大厚さ約 7mm であり、厚さは上流側が薄く、下流側ほど厚くなっていた。

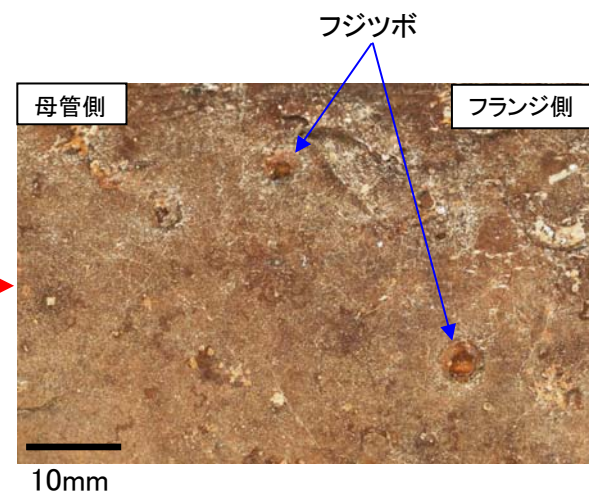
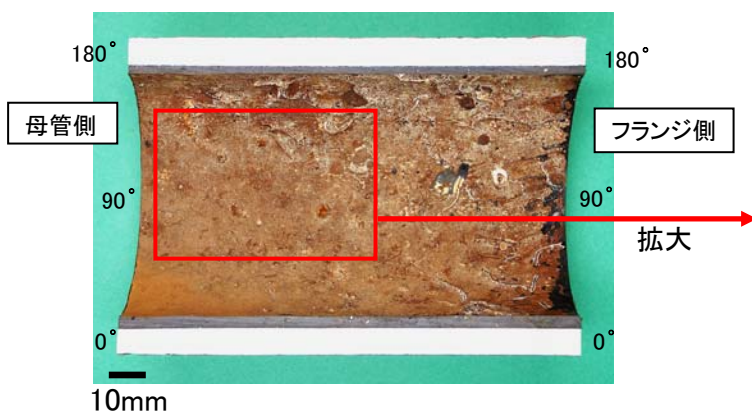
外観観察結果（圧力検出管台、予備管台内面）



① 圧力検出管台内面

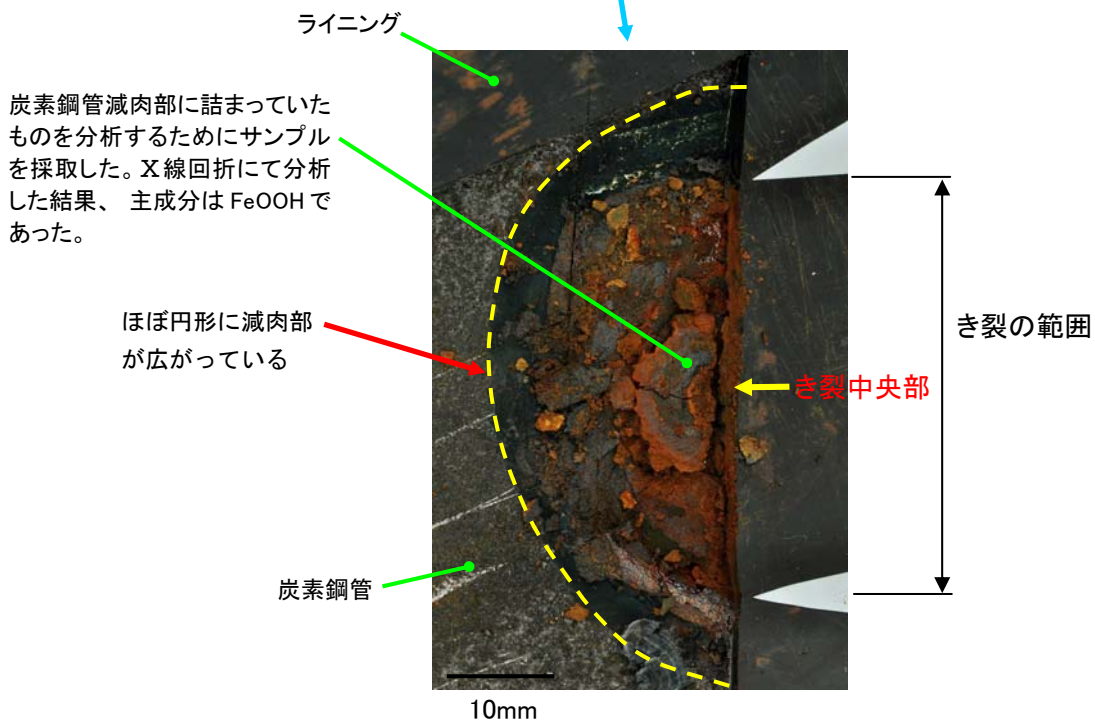
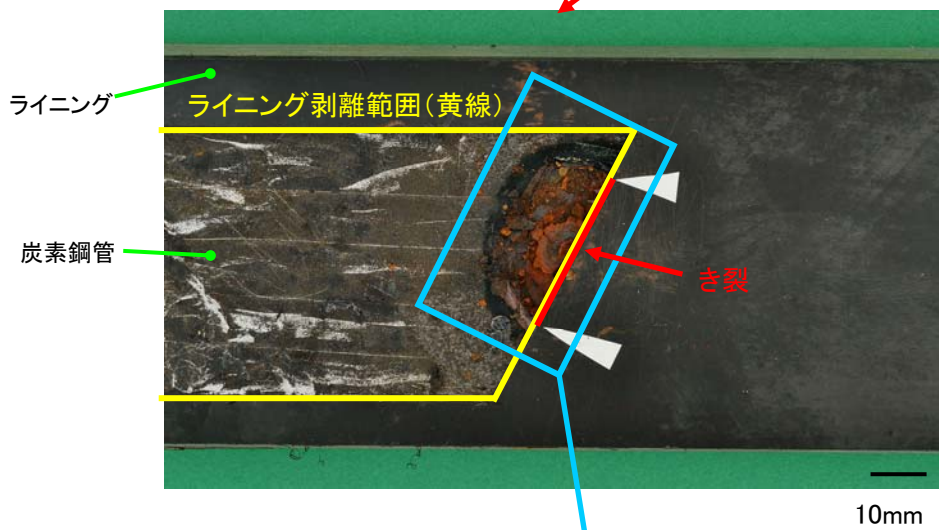
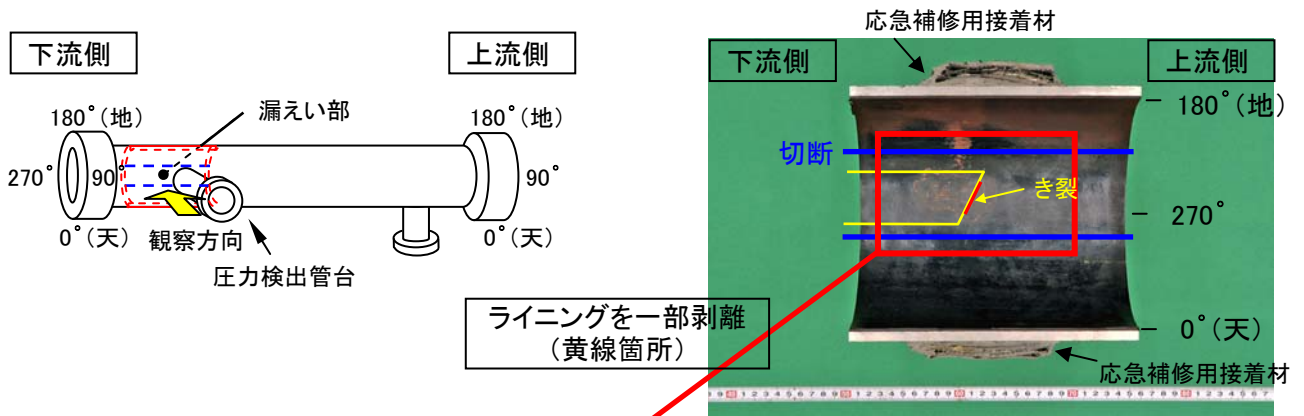


② 予備管台内面



- ・ 圧力検出管台、予備管台内面の外観観察を行った結果、フジツボの付着が認められた。
- ・ 割れ、へこみ、膨れ等の異常は認められなかった。

外観観察結果（炭素鋼管内面）



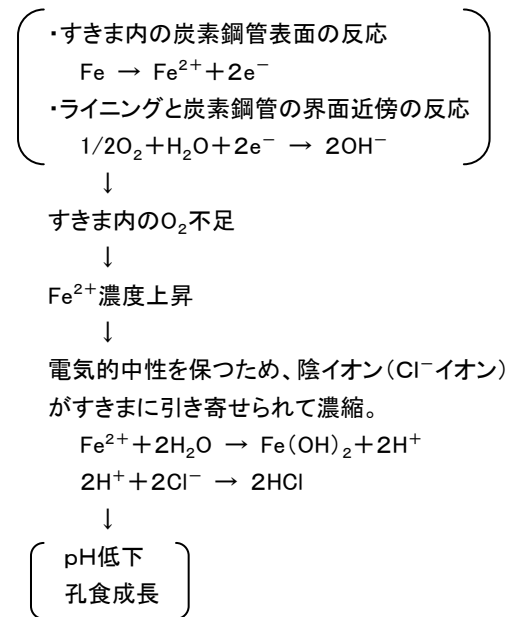
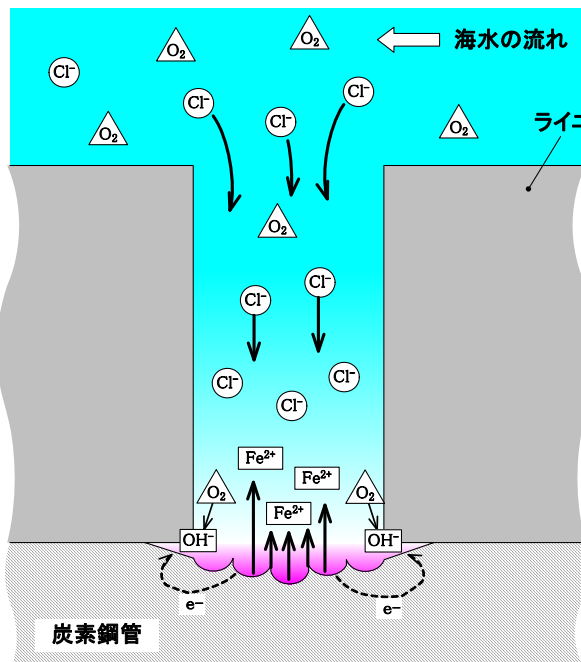
・ライニングをき裂に沿って一部剥離し、炭素鋼管内面の外観観察を行った結果、き裂直下の炭素鋼管は、ライニングき裂中央部を中心に、ほぼ円形に減肉部が広がっており、減肉部には腐食生成物と思われる固形物が詰まっていた。

腐食生成物堆積のメカニズム

1. ライニングき裂が炭素鋼管に到達直後の腐食状況

ライニング間のすきま内で腐食が進行すると、下記反応により、すきま内の酸素が不足し Fe^{2+} 濃度が増加する。このように陽イオン濃度が上昇し、すきま内の電気的バランスがくずれると、電気的中性を保つために、陰イオン (Cl^- イオン) が引き寄せられて塩酸が生じる。このため、すきま内の pH は低下し、腐食の進展が加速する。

これは一般的なすきま腐食で見られる事象と同様である。

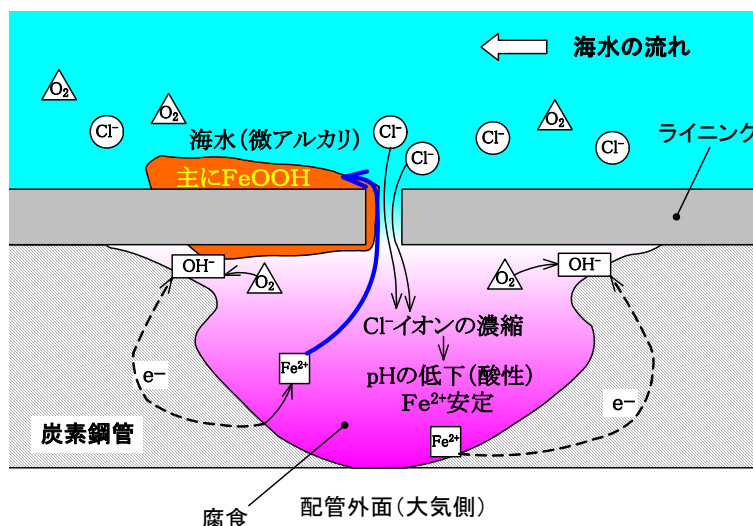


2. 炭素鋼管が腐食減肉により漏えい間近の状況

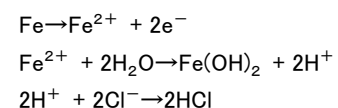
炭素鋼管が腐食減肉により漏えい間近の状況では、下記反応により腐食が進行して $\text{Fe}(\text{OH})_2$ が生成する。 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ は溶解度が高いため、 Fe^{2+} としてき裂内に存在する。

き裂内部で生成された $\text{Fe}(\text{OH})_2$ は、水中の酸素により酸化され溶解度の低い FeOOH が生成されることにより、き裂開口部に腐食生成物が堆積する。

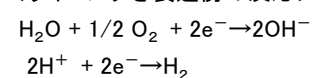
これは一般的な孔食で見られる事象と同様である。



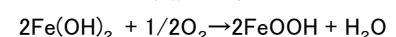
<ライニングき裂内部の反応>



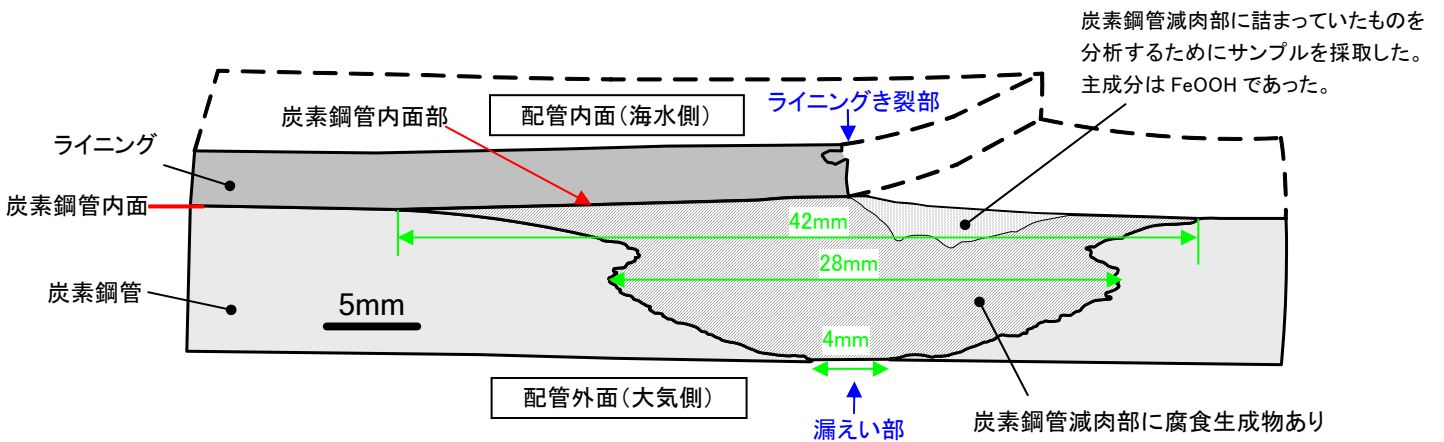
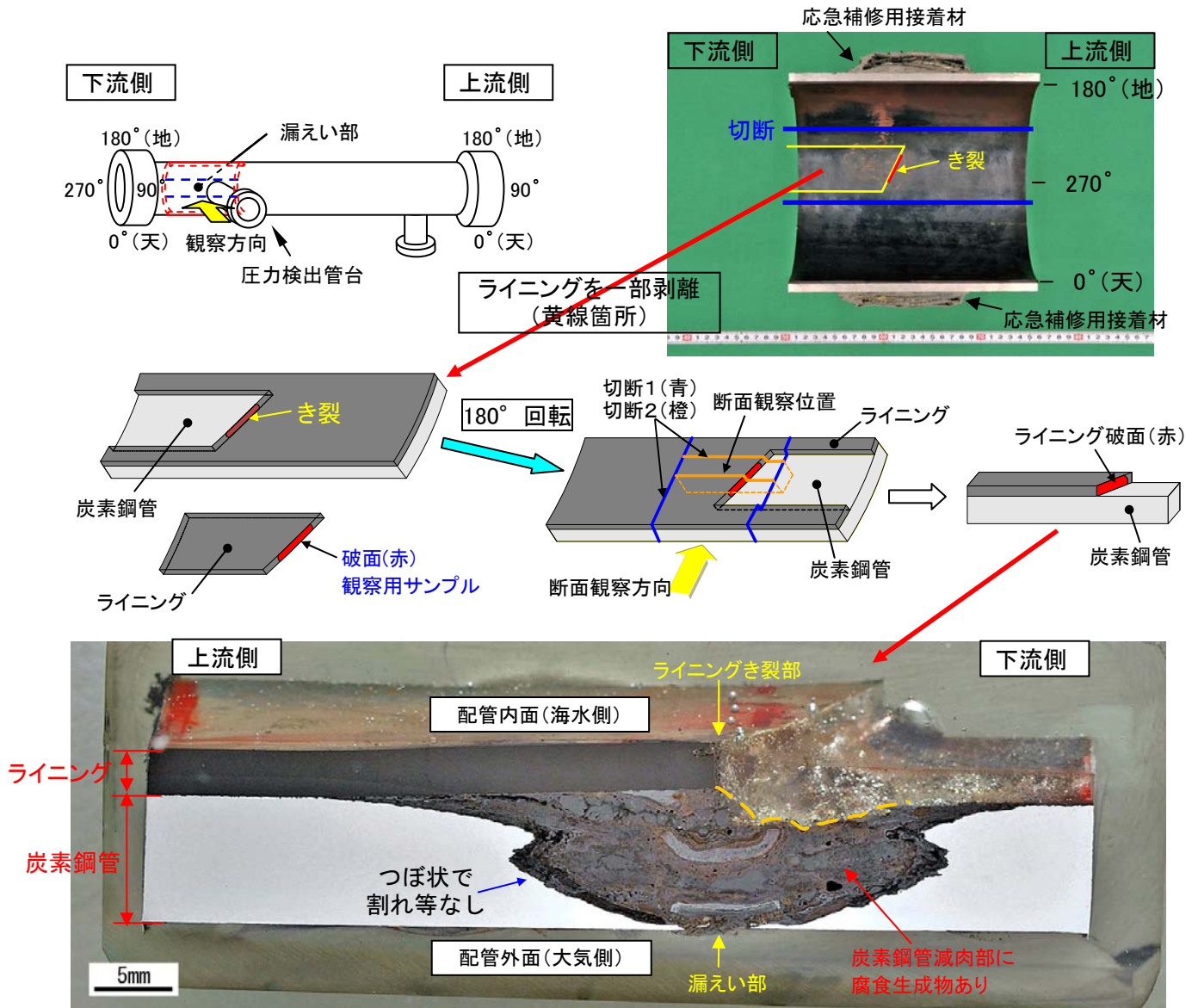
<ライニングき裂近傍の反応>



<ライニングき裂開口部の反応>

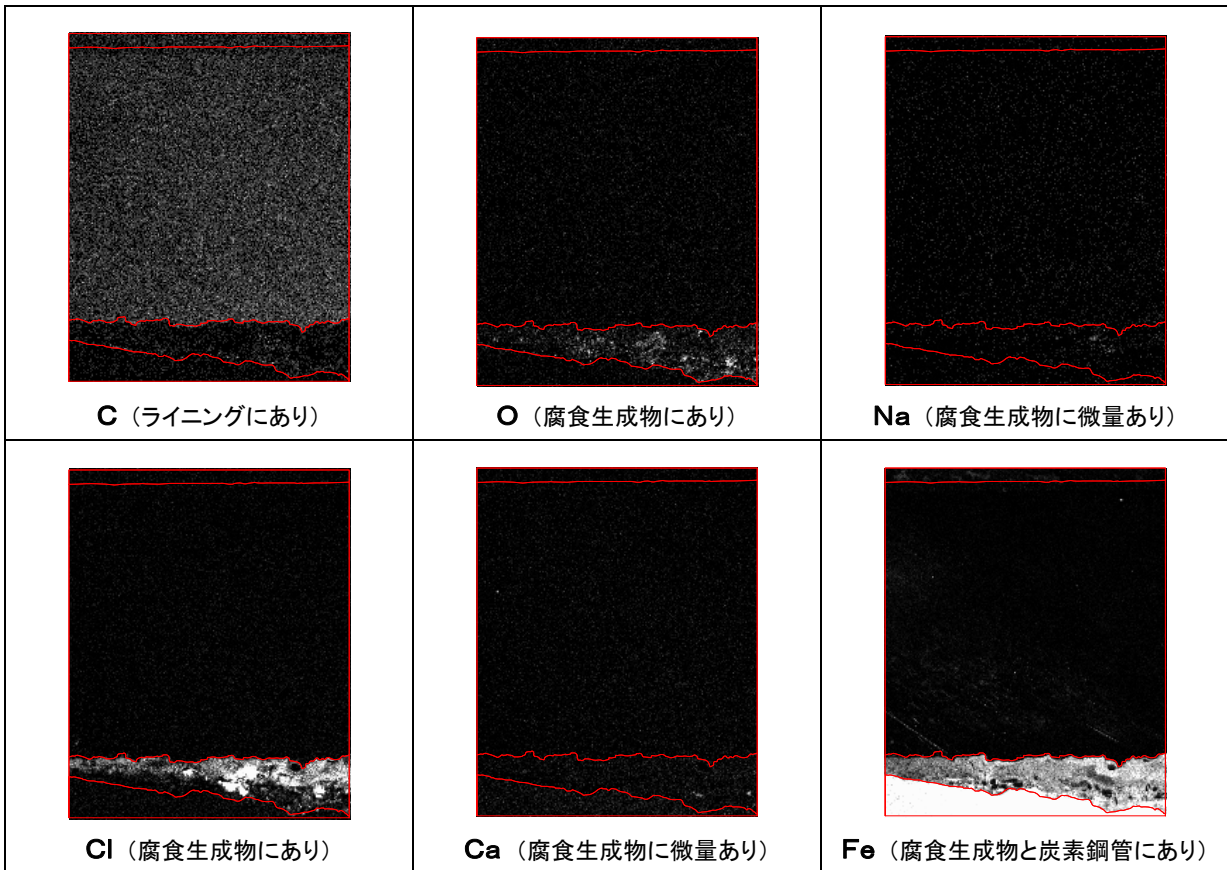
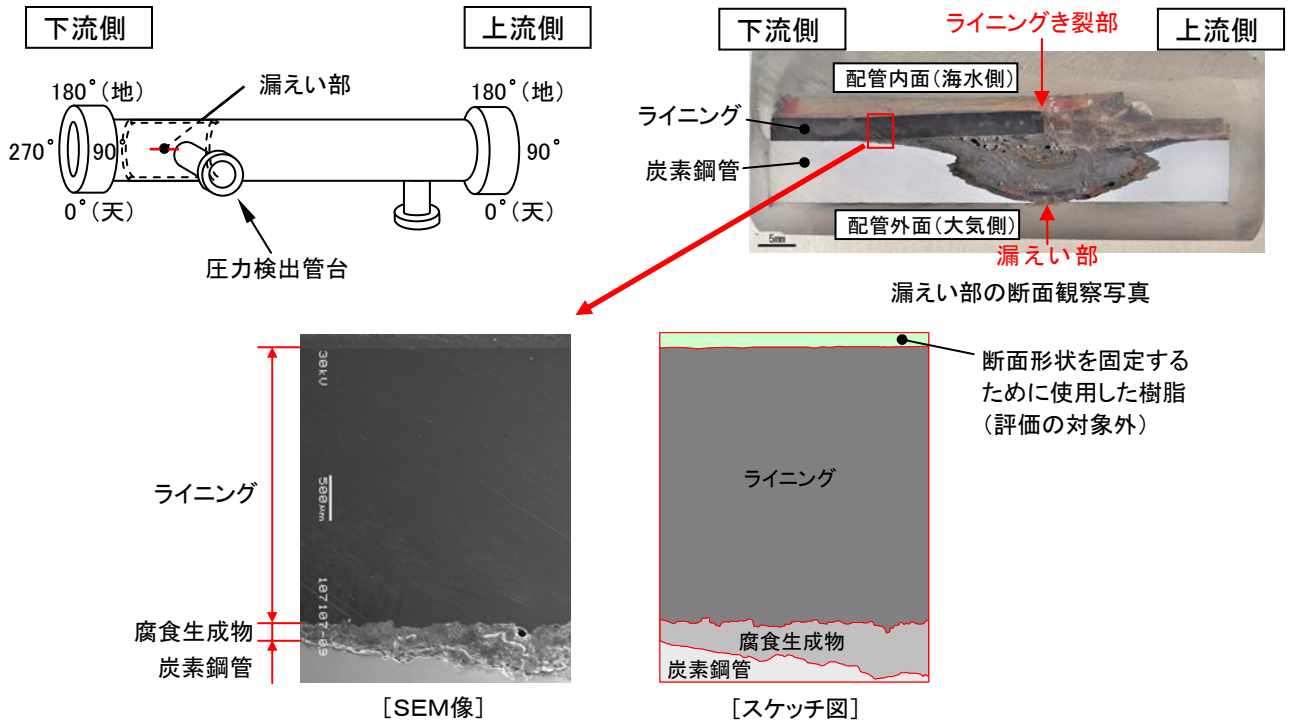


断面マクロ観察結果



- ・ライニングき裂部を中心に炭素鋼管の腐食が認められ、配管外面の漏えい部は、ライニングき裂部のほぼ真下に認められた。
- ・炭素鋼管の腐食は、内面から外面に向かってつぼ状に腐食部が狭まっており、ライニングき裂部を起点として、内面から外面に向かって腐食が進行し貫通したことを示していた。
- ・なお、割れ等の異常は認められず、応力腐食割れではないことを確認した。

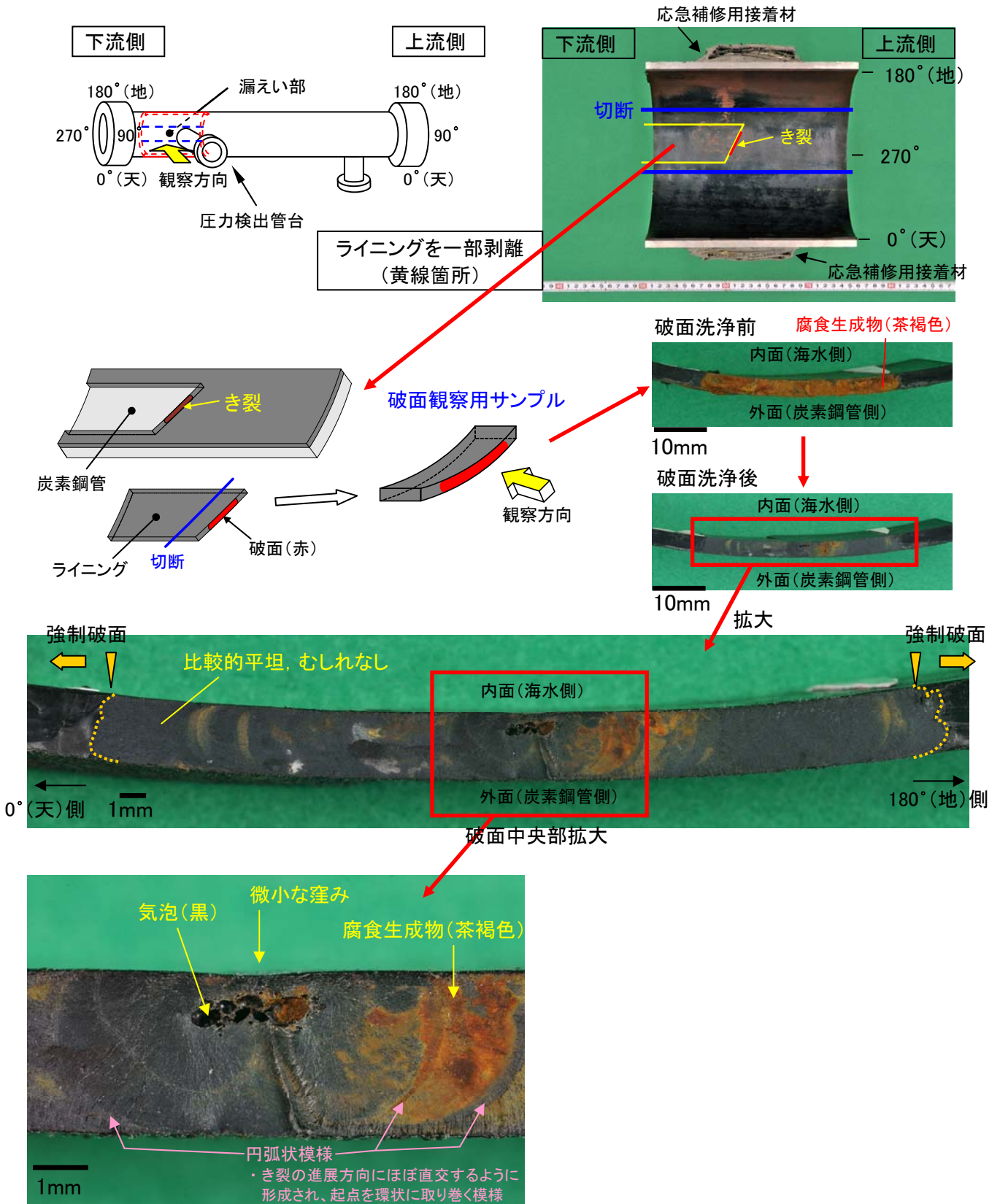
断面 E D S 分析結果



※白いほど当該元素の含有率が高い。

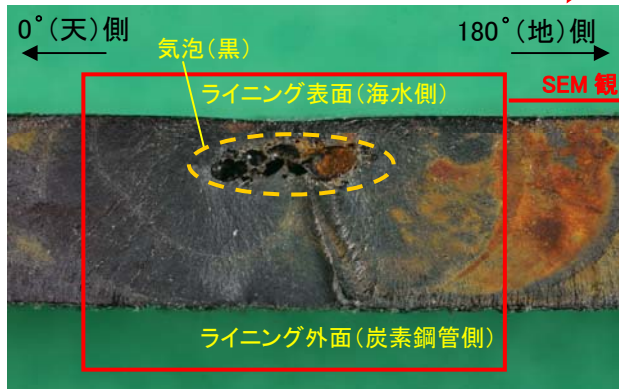
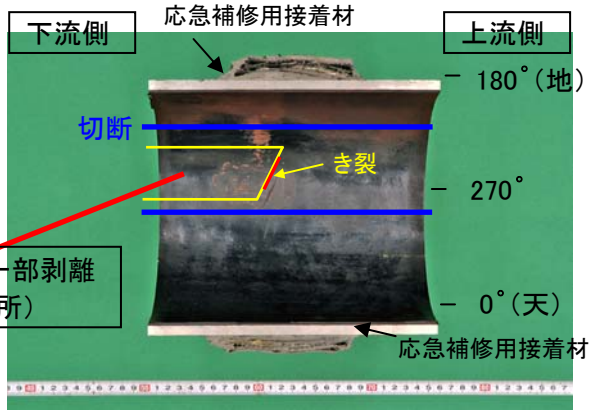
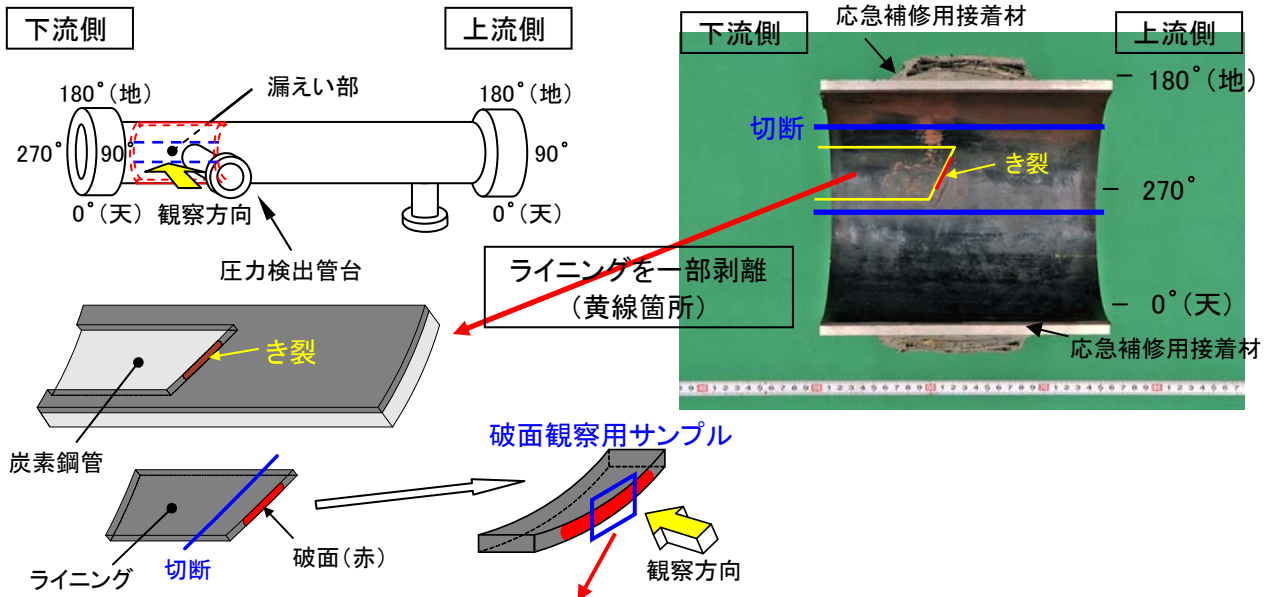
- 腐食生成物からは、海水成分である塩素が検出され、鉄、酸素も検出されたことから、海水によって炭素鋼管が腐食したものと推定される。
- ライニングからは、ライニング成分である炭素が検出され、海水成分である塩素やナトリウムは認められなかった。

ライニング破面マクロ観察結果

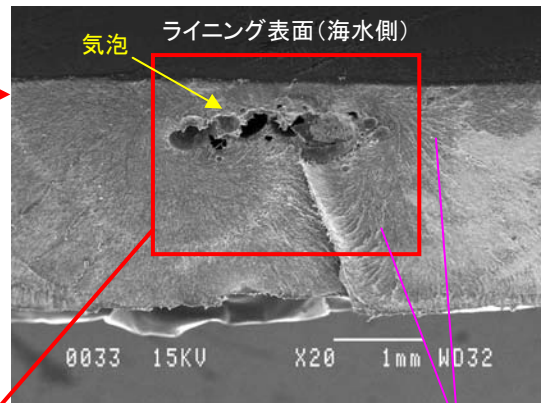


- ・ライニングのき裂部よりサンプルを採取し、破面の拡大観察を行った結果、ライニング破面は比較的平坦であり、中央部には気泡が認められた。
- ・なお、気泡直上部のライニング表面には微小な窪みが認められた。
- ・また、微小な窪みを環状に取り巻く円弧状模様が認められた。この円弧状模様は、き裂の進展過程で応力状況が変化し、き裂の進行速度が著しく変化した場合に現れる模様であり、起点を環状に取り巻く特徴を有する。このことから、起点は微小な窪み近傍であると推定される。

ライニング破面SEM観察結果

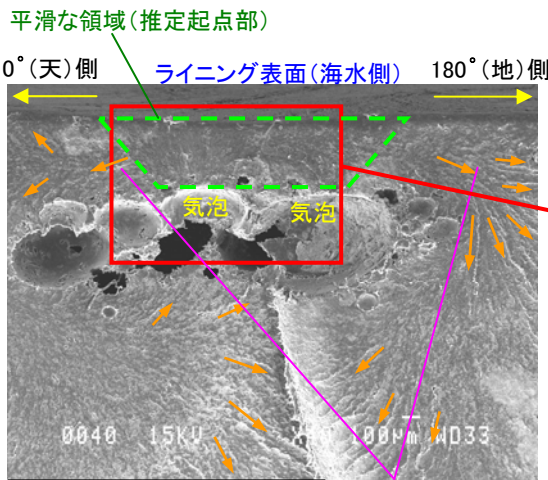


破面観察状況(ライニング中央部)



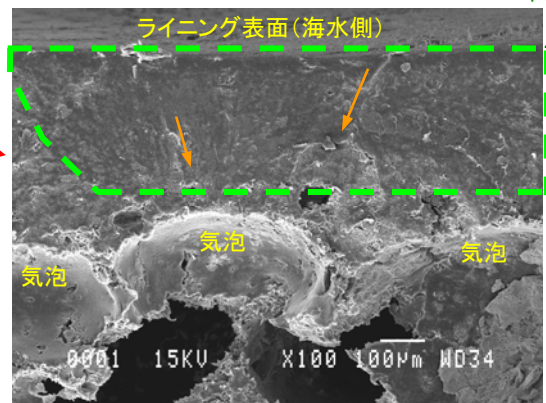
拡大

筋状模様
・き裂の進展方向を示す模様



← ;き裂の進展方向を示す矢印

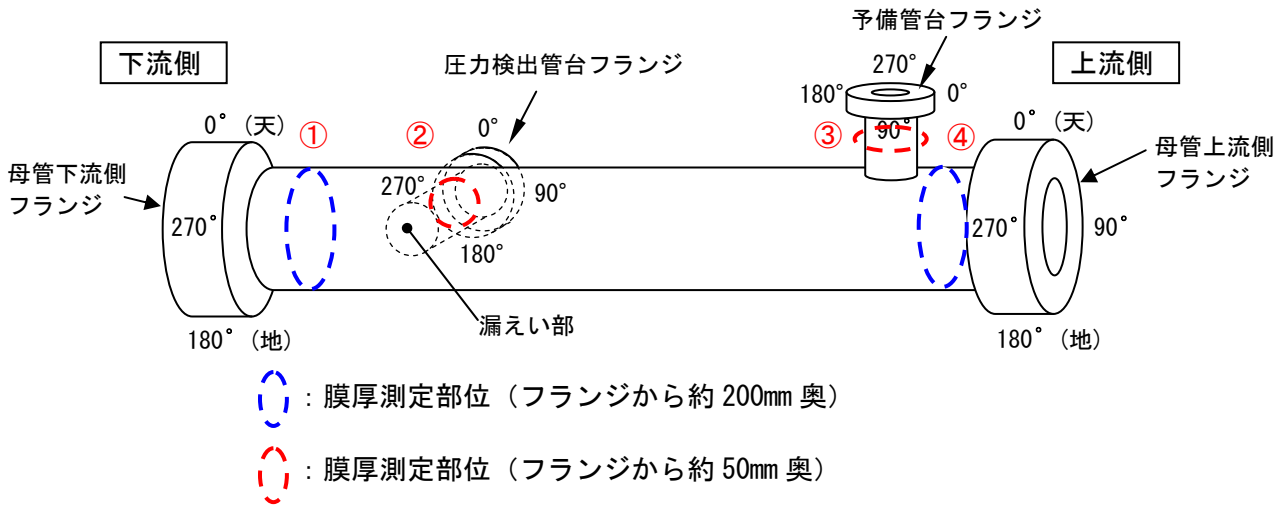
筋状模様
・き裂の進展方向を示す模様



← ;き裂の進展方向を示す矢印

- ・破面のほぼ全域に、き裂が進展する過程で形成され、き裂の進行方向を示す筋状模様が観察され、ライニング表面と気泡との部分には、筋状模様がほとんどない平滑な領域が認められた。
- ・この平滑な領域は、高分子材料に衝撃荷重が加わり、破壊が急速に進行したときに見られ、き裂の起点となった可能性が考えられる。
- ・また、平滑な領域からライニングき裂の両先端 (0° 側と 180° 側) へ向かう筋状模様が認められたため、推定起点部であるライニング表面と気泡との部分で生じた初期き裂が、徐々に進展したものと考えられる。

ライニング膜厚測定結果



電磁式膜厚計によるライニング膜厚測定結果

(単位: mm)

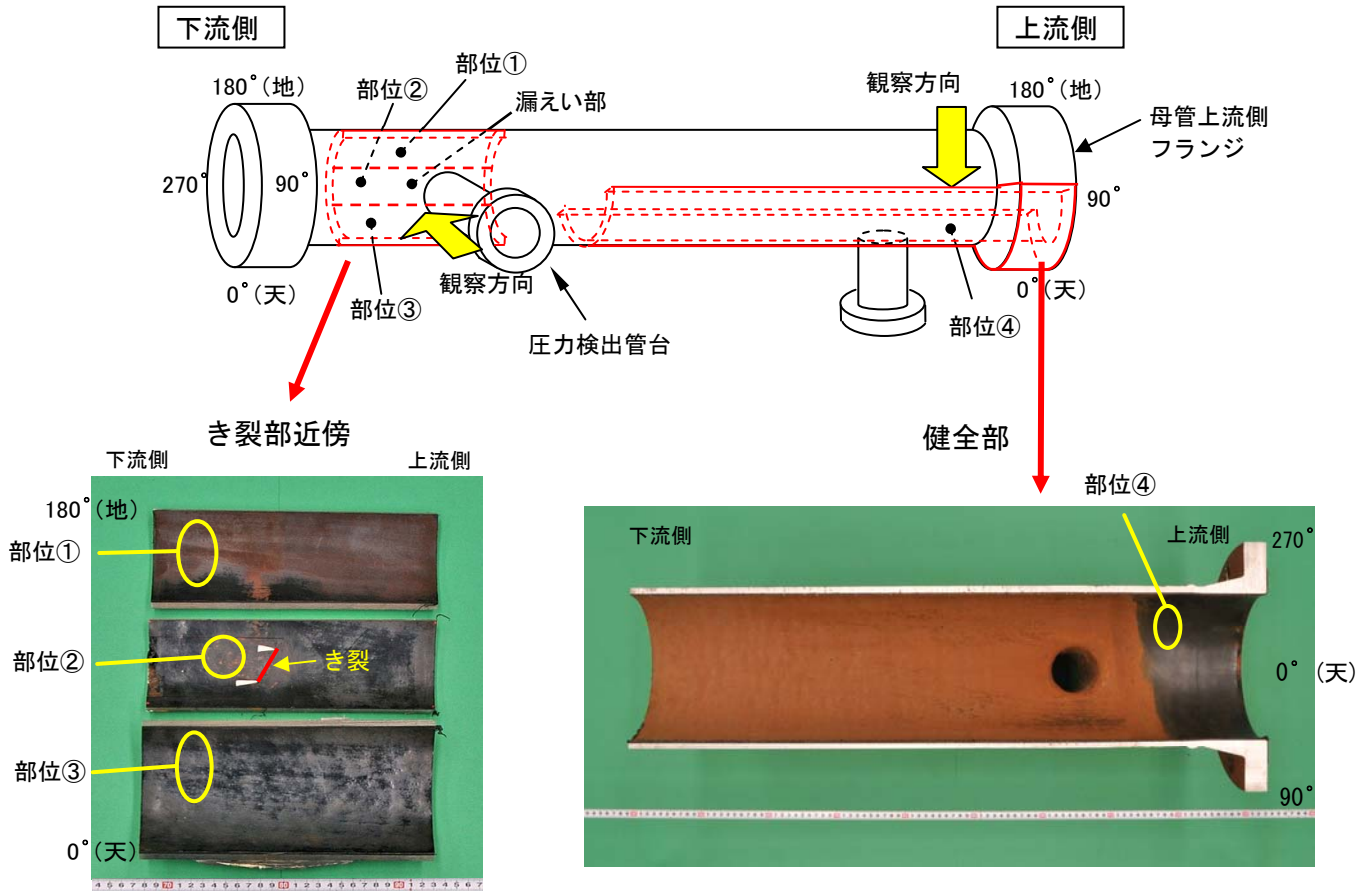
測定部位	測定値				平均値 (最小~最大)
	0°	90°	180°	270°	
①母管下流側フランジ近傍	3.0	3.0	3.2	3.3	2.5 (1.6~3.3)
②圧力検出管台フランジ近傍	2.6	2.4	2.0	3.1	
③予備管台フランジ近傍	2.2	2.0	2.5	3.0	
④母管上流側フランジ近傍	2.2	1.9	1.6	1.9	

※ 工場製作時の基準値 : 1.2mm~3.5mm

※ JIS K 5600-1-7「塗料一般試験方法—第1部: 通則—第7節: 膜厚」に準拠

・ライニングの膜厚測定を行った結果、膜厚は工場製作時の基準値を満足し、問題ないことを確認した。

ライニングの機械的特性調査結果 (硬度測定)



ライニング硬度測定結果※1

(単位:HDD)※2

測定部位		測定値			平均値 (最小~最大)
		1	2	3	
き裂部近傍	部位①	52	52	51	51.8 (51~52)
	部位②	52	52	52	
	部位③	52	52	51	
健全部	部位④	48	49	50	49.0 (48~50)

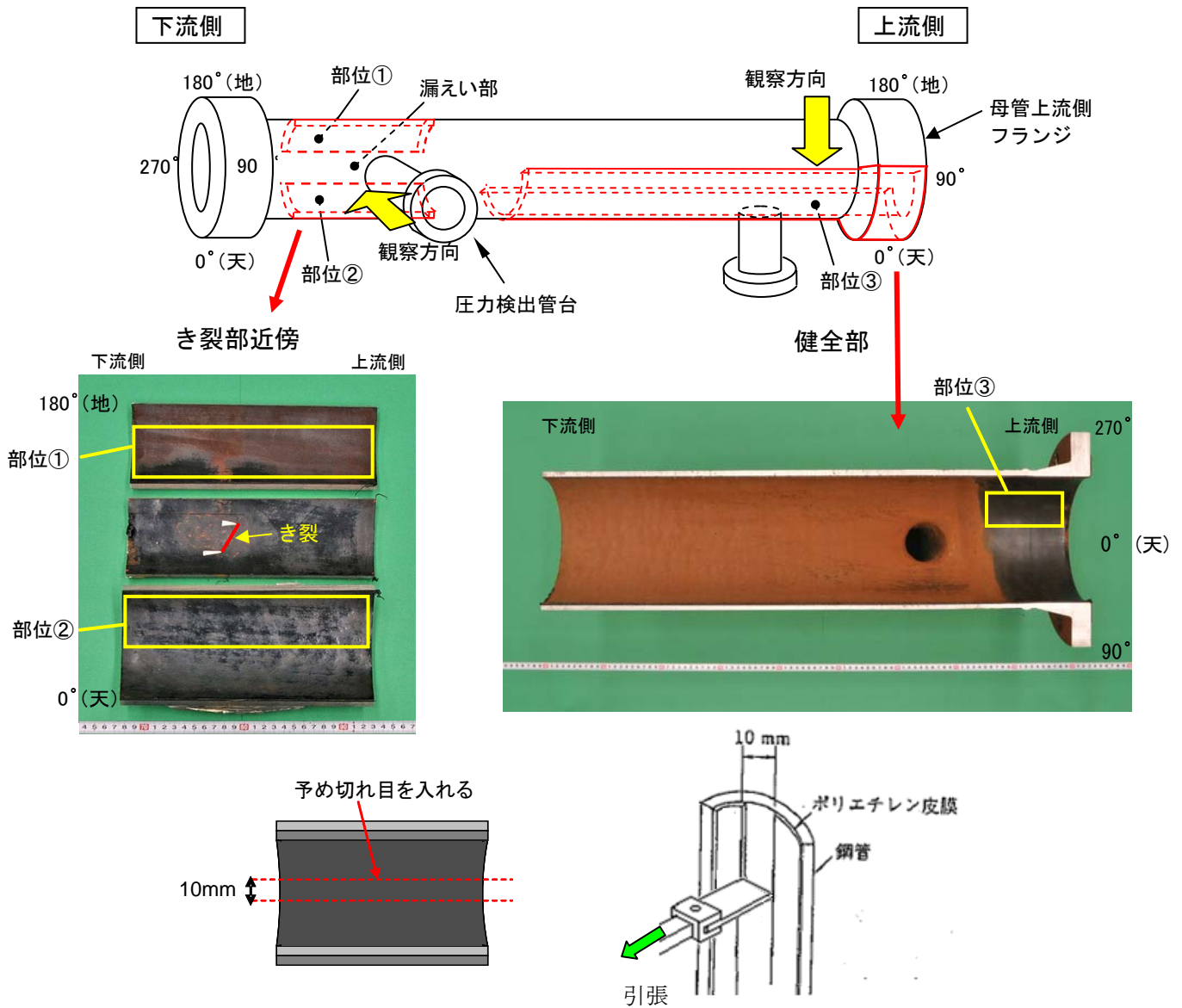
※1 JIS K 6253 に準拠

※2 デュロメータ硬さ

各種ゴム、エラストマー、プラスチック製品の硬度を表すパラメータ。決められた形の押針をスプリングの力で試料の表面に押しつけて変形を与え、試料の抵抗力とスプリングの力がバランスした状態での押針の「試料への押し込み深さ」をもとに硬度を測定する。

・ライニングの硬度を測定した結果、き裂部近傍・健全部ともに約 50 (HDD) とほぼ同等であり、き裂部近傍に特異な硬化は認められなかった。

ライニングの機械的特性調査結果 (接着力測定)



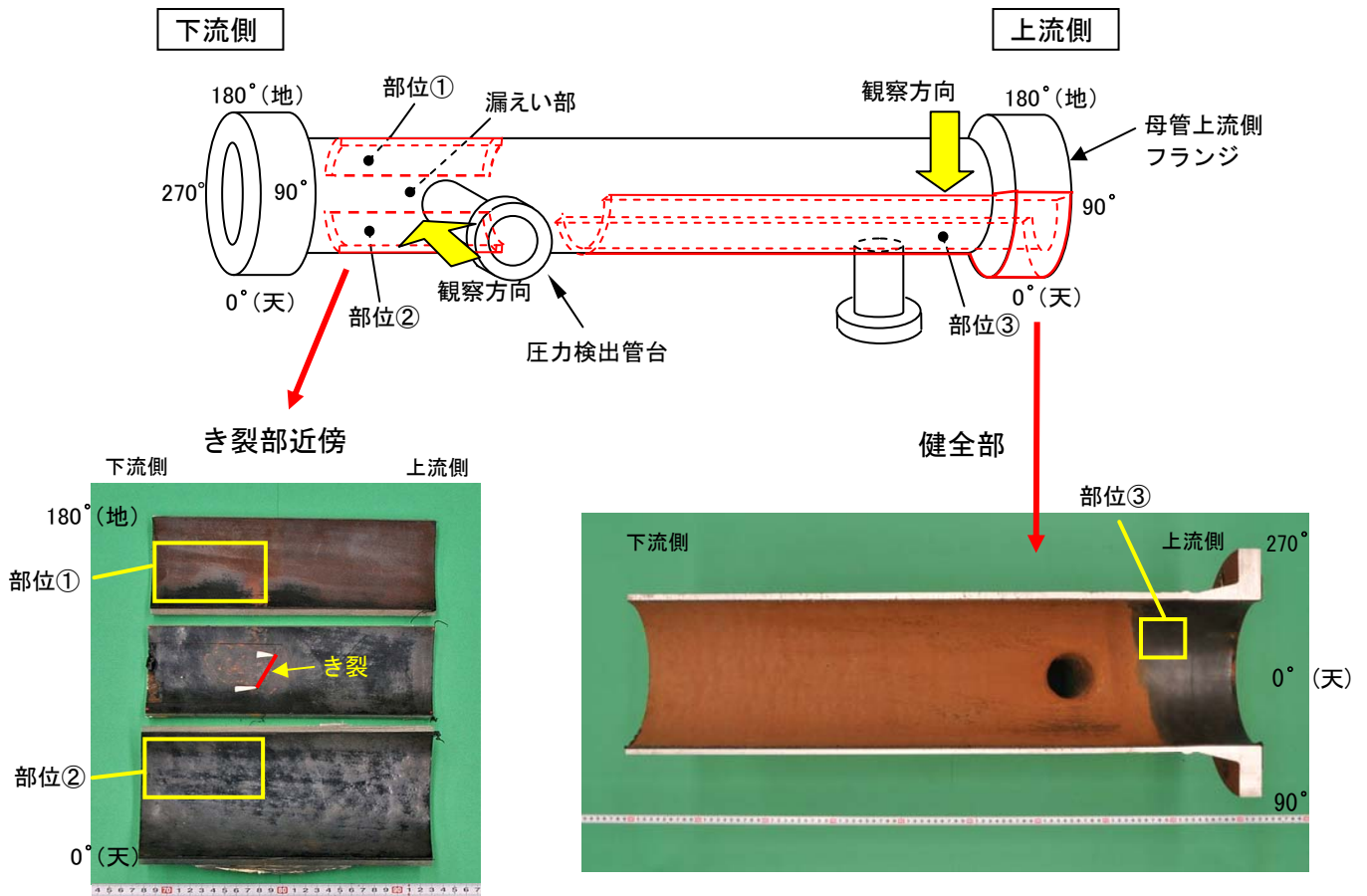
ライニング接着力測定結果 (単位: N/10 mm)

測定部位		測定値※	平均値 (最小~最大)
き裂部近傍	部位①	16.0	16.4 (14.6~18.5)
	部位②	18.5	
		14.6	
健全部	部位③	20.7	22.0 (20.7~23.0)
		23.0	
		22.4	

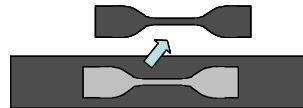
※ 60℃、1時間恒温槽内にて試料全体を加熱後、恒温槽から取り出して、JIS K 6256-2「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム-接着性の求め方 第2部：剛板との90°剥離」に準拠して、90°方向に引張って測定。

・ライニングの接着力を測定した結果、き裂部近傍・健全部ともに接着力は確保されており、き裂部近傍に特異な接着力の低下は認められなかった。

ライニングの機械的特性調査結果 (引張試験)



ダンベル試験片を打ち抜き
引張試験へ



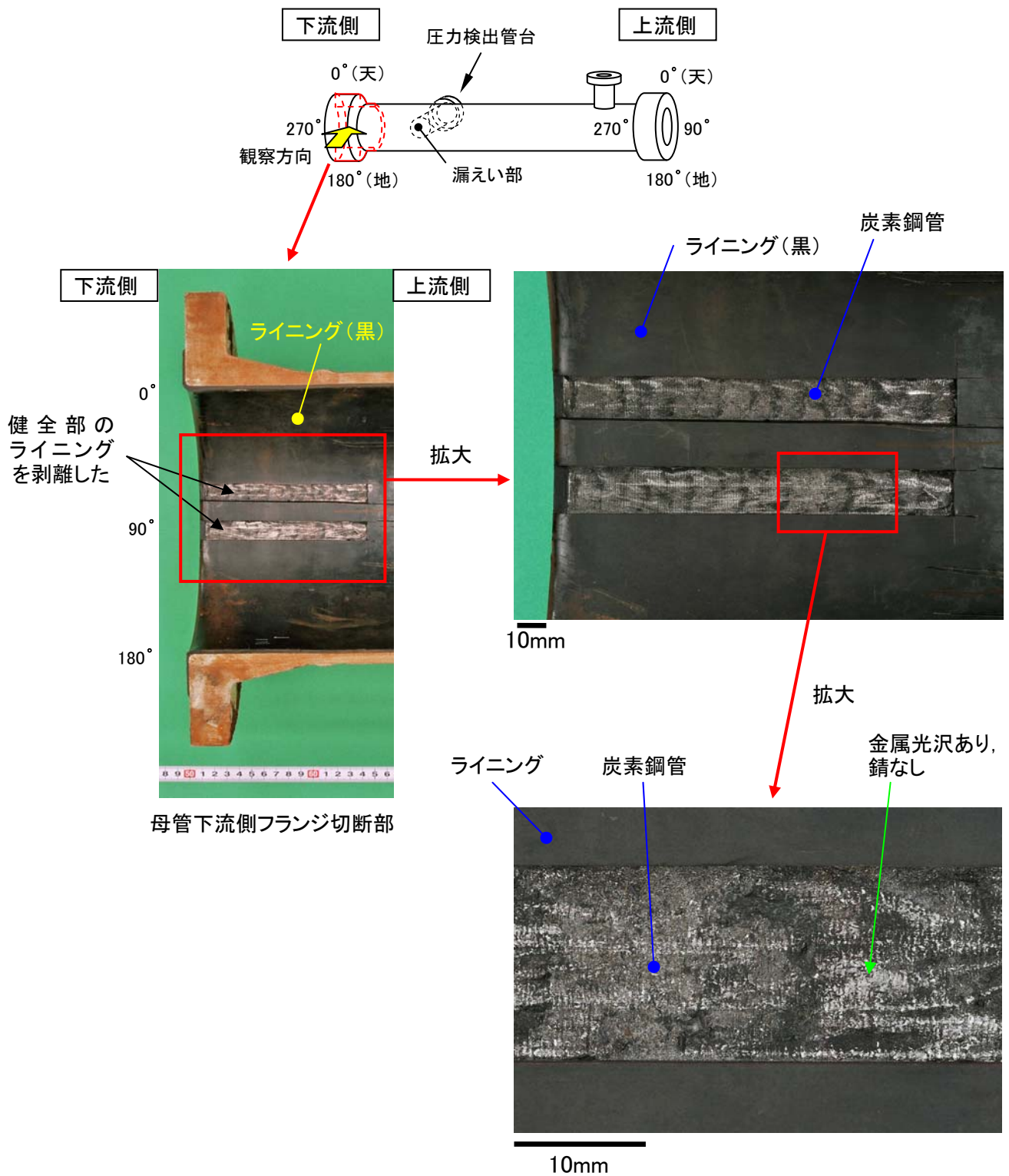
引張強さ・伸び計測結果※

測定部位		引張強さ (MPa)		伸び (%)	
		測定値	平均値 (最小~最大)	測定値	平均値 (最小~最大)
き裂部近傍	部位①	11.5	11.4 (11.2~11.6)	55	58.3 (50~70)
	部位②	11.6 11.2		70 50	
健全部	部位③	10.2	10.4 (10.1~10.9)	70	80.0 (70~100)
		10.9		70	
		10.1		100	

※ JIS K7161 に準拠

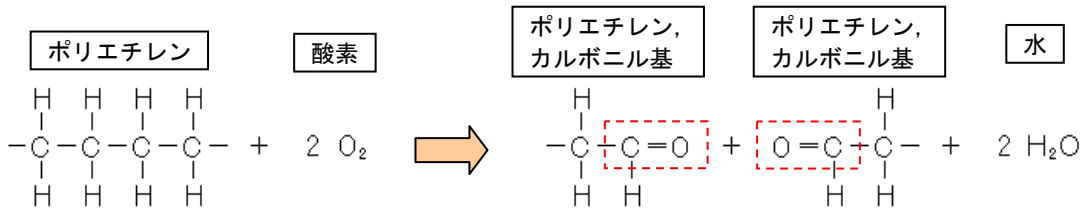
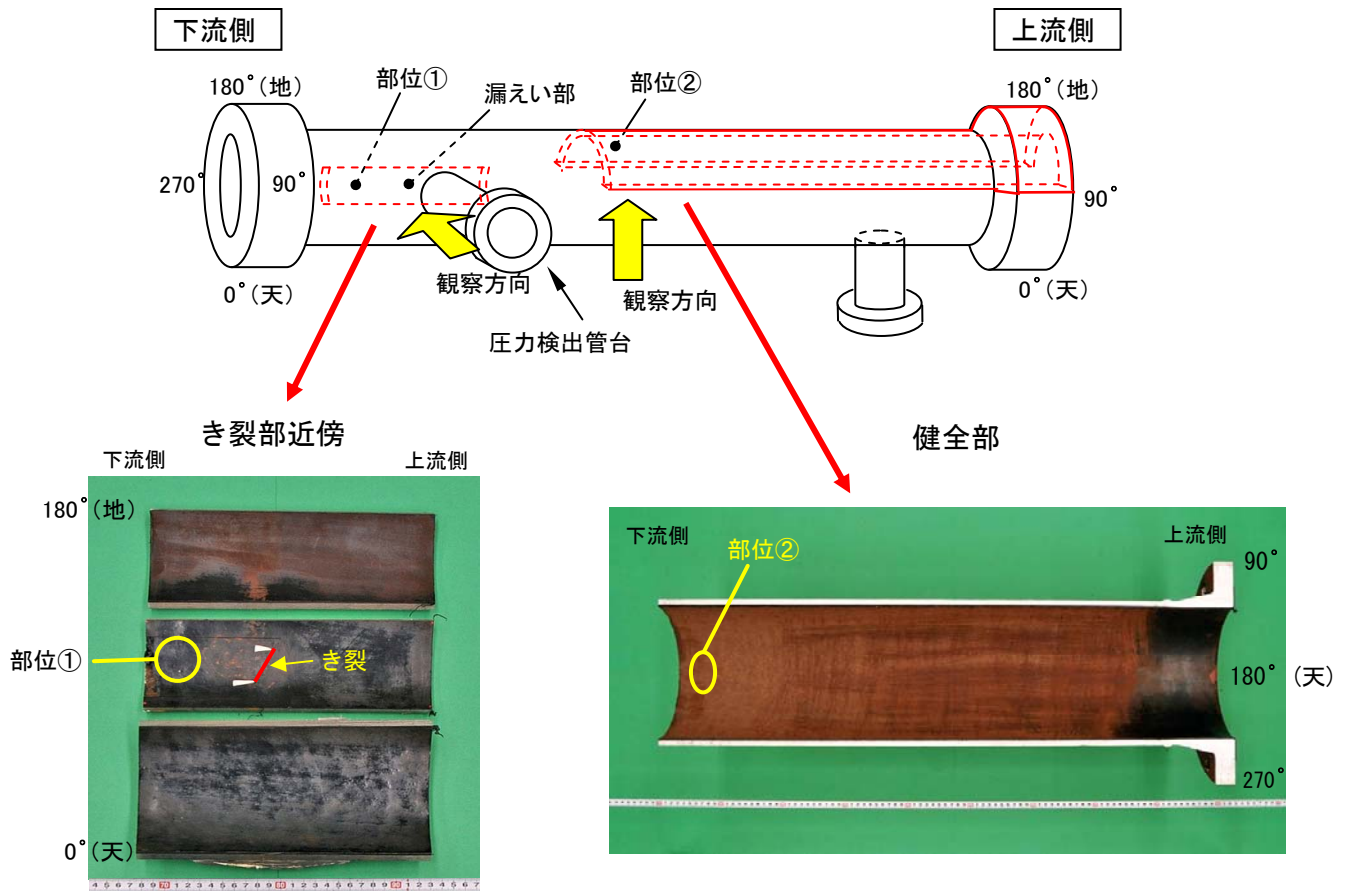
・ライニングの引張試験を実施した結果、き裂部近傍・健全部ともに、引張強さが約 10 MPa、伸びが 70%前後とほぼ同等であり、き裂部近傍に特異な引張特性の低下は認められなかった。

ライニングの海水遮断機能調査結果



・ライニング健全部を剥離して炭素鋼管表面を観察した結果、金属光沢が残っており、錆の発生が認められないことから、ライニングは良好な海水遮断機能を有していることを確認した。

ライニングの赤外分光分析結果



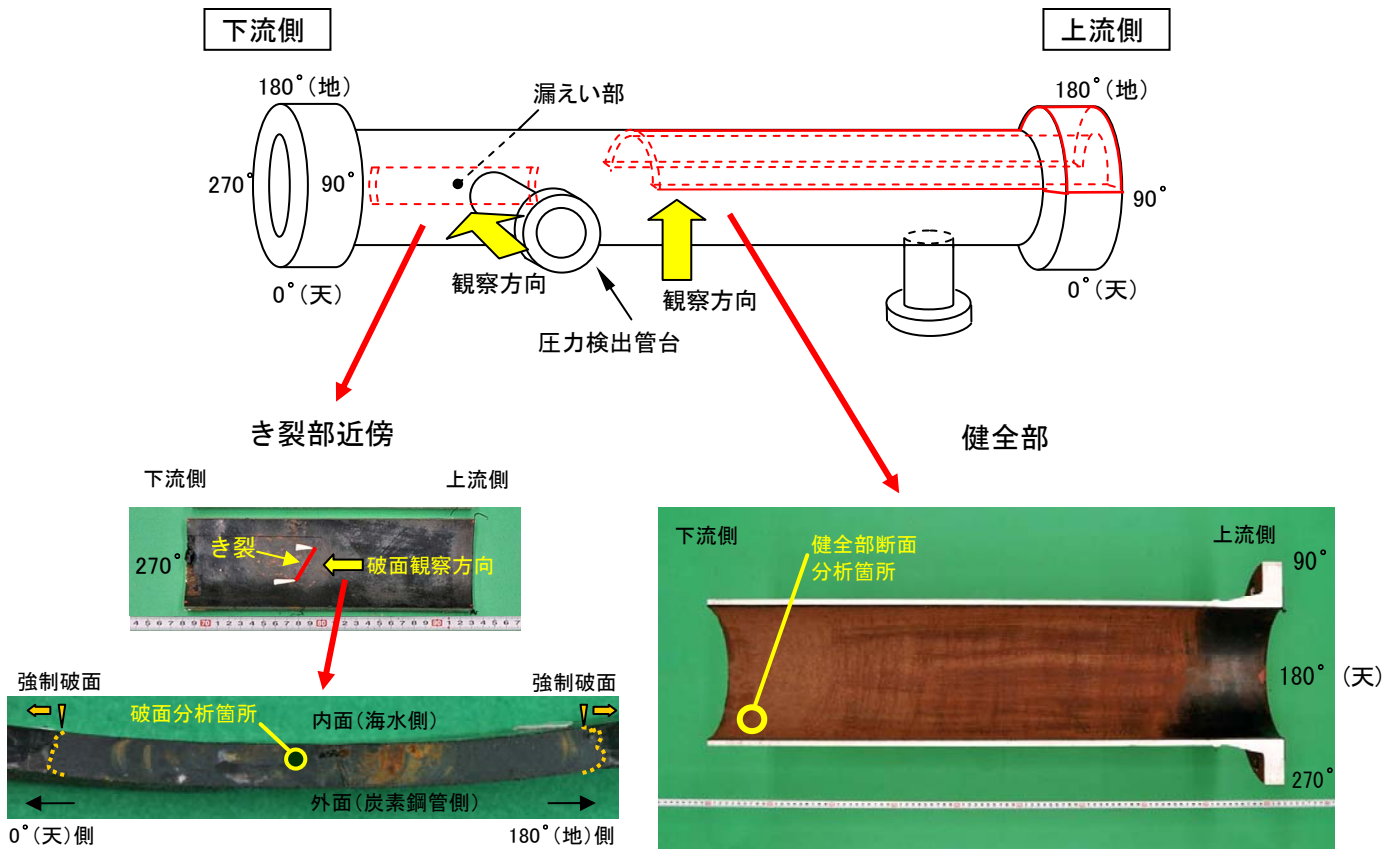
赤外分光分析結果

測定部位	同定成分	備考
き裂部近傍	ポリエチレン樹脂	・ポリエチレンの主成分であるC-Hの吸収が確認された。 ・C=Oの吸収が僅かに認められた。
健全部	ポリエチレン樹脂	

※ 酸化した場合、カルボニル基 (C=O) の吸収ピークが確認される。

・ライニングの赤外分光分析を実施した結果、き裂近傍・健全部ともに、ポリエチレン樹脂と同定され、高分子材料が酸化して生成されるカルボニル基 (C=O) が僅かに認められたが、機械的特性調査の結果、き裂部近傍と健全部で有意な違いは認められないこと、き裂部近傍の断面EDS分析結果より、ライニング中に塩素やナトリウムは認められていないことから、き裂発生およびライニングの海水遮断機能への影響はないと考えられる。

ライニング断面の分子量測定結果



分子量測定結果※1

測定箇所	分子量 (Mn)※2	
	測定値	平均
破面	16100	16200
	16300	
健全部断面 (270°)	16300	16400
	16400	

※1 GPC (Gel Permeation Chromatography) とは、分析しようとする物質と同程度の大きさの細孔をもつ粒状ゲル (固形状多孔性物質) を充填させた容器に、試料成分を溶解させた液体を通過させることで、細孔より小さい分子は粒状ゲル中にしみこむため容器通過速度が遅く、細孔より大きい分子は粒状ゲル中にしみこまないため容器を通過する速度が速いことを利用して、通過速度により分子の大きさ (分子量) を求める手法。

※2 Mn は、全ての分子の分子量を全部足し合わせたものを、全ての分子数で割ったものである。なお、疲労によりき裂が発生した場合、ポリエチレンの主鎖 (C-C) の切断が起こるため、Mn が健全部よりも低下することになる。

ライニングの断面GPC分析にて分子量を測定した結果、

・ライニング破面と健全部断面の分子量はほぼ同等であり、疲労破壊が起こった場合に現れる分子量の低下は認められなかった。

以上より、疲労破壊は生じていないことを確認した。

製造履歴調査結果

○炭素鋼管（8B）

・材料調査

項目		化学成分 (%)						降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)
		C	Si	Mn	P	S	Cu			
規格値 STPT42 (JIS G3456-3)	最小	0.18	0.10	0.30	—	—	—	25	42.2	30
	最大	0.25	0.35	1.00	0.35	0.35	0.20	—	—	—
材料証明書記載値		0.19 ～ 0.20	0.29 ～ 0.31	0.59 ～ 0.60	0.18 ～ 0.19	0.11 ～ 0.13	0.02	35	50～52	33～35

・寸法調査

項目	外径 (mm)		厚さ (mm)	
	公称値	許容値	公称値	許容値
設計寸法	219.1	+1.6 -0.8	8.2	-12.5%
検査成績書記載値	218.9 ~ 220.0		7.34 ~ 9.06	

○ポリエチレンライニング

・寸法調査

項目	膜厚 (mm)
基準値	2.0 +1.5 -0.8
検査成績書記載値	1.6 ~ 2.5

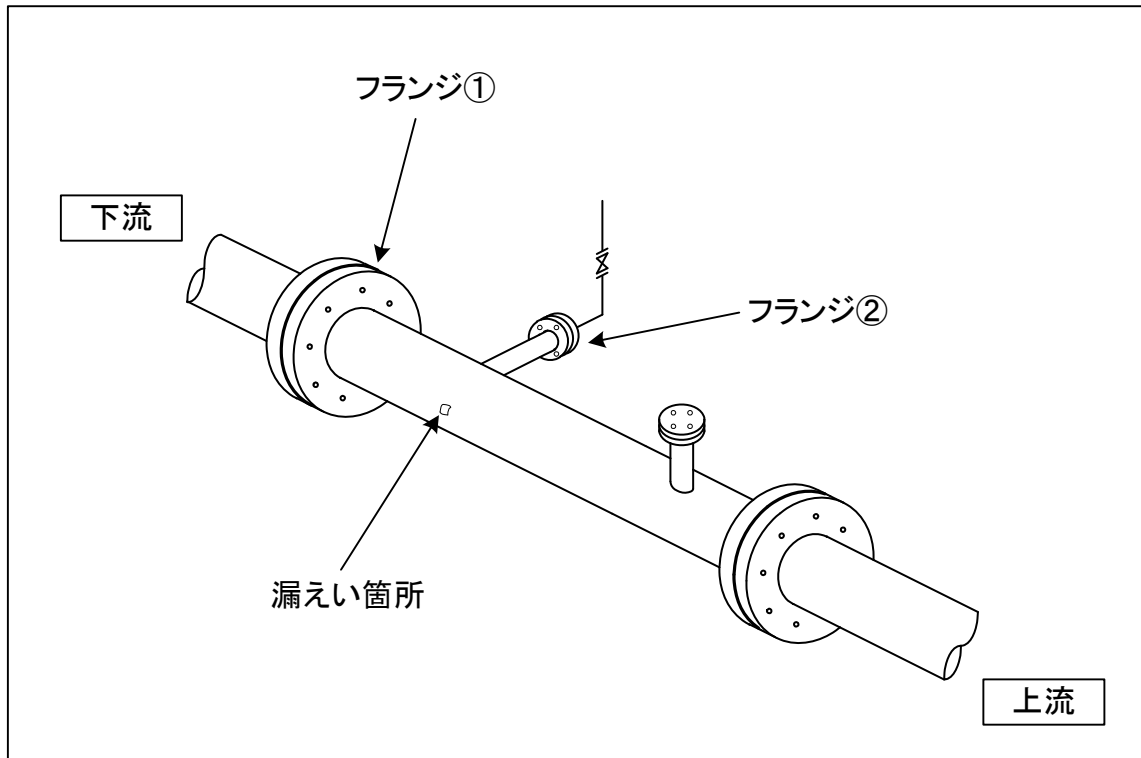
・ライニング施工記録調査

項目	検査チェックシートの確認結果
受入検査	問題なし
下地処理	問題なし
加工温度	問題なし
厚み、ピンホール、外観	問題なし
外面塗装	問題なし
梱包	問題なし

ポリエチレンライニング管の製作フローの概要

製作フロー	作業ポイント	当該部に衝撃荷重が加わる可能性
①配管受入検査	<ul style="list-style-type: none"> ・配管受け入れ ・外観検査 配管のライニング施工が可能であることを確認する。割れ、変形、溶接部の内面に突起等有害なものがないことを目視にて確認する。 	—
②下地処理 	<ul style="list-style-type: none"> ・スチールグリットによるブラスト処理を行う。 ・下地処理後 12 時間以内にライニングを行う。 ・下地処理後、圧縮空気の下地処理面の清掃を行い、下地処理面の検査を行う。 	—
③加熱 	<ul style="list-style-type: none"> ・加熱 ライニング施工するために電気炉を用いて管を加熱する。電気炉が設定温度であることを確認する。 	—
④ライニング施工 	<ul style="list-style-type: none"> ・温度管理 対象管が規定温度であることを温度チョークで確認する。 ・ライニング施工 樹脂タンクに専用治具を用いて取付け、配管口径、寸法、形状毎に規定された樹脂投入量、回転数（正転反転）、保持時間等に基づきライニング施工を実施する。 	—
⑤ライニング後処理 (フランジ面処理) 	<ul style="list-style-type: none"> ・放冷/水冷 ライニング粒子が完全に溶融し表面に光沢ができるまで自然放冷後、触手できる程度まで管外面から水冷する。 ・仕上げ 端面の仕上げを行う。フランジ面外周のバリ取り、フランジガスケット接触面の平面出しを行う。 	フランジ面の仕上げ作業であり、可能性なし
⑥ライニング検査  ピンホール検査  膜厚検査	<ul style="list-style-type: none"> ・外観検査 内面に有害な欠陥がないことを目視にて検査を行う。 ・ピンホール検査 ライニング面全面を高電圧試験機によりピンホールのないことを確認する。 ・膜厚検査 規定の膜厚が確保されていることを電磁膜厚計にて測定する。当該管の場合、シート面および管長手方向の代表箇所において周上 4 箇所を計測する。 	検査作業であり、可能性なし
⑦外面塗装	<ul style="list-style-type: none"> ・下地処理（ただしこの下地処理は②の時点で一括実施） 	内面は養生しており、可能性なし
⑧梱包・出荷	<ul style="list-style-type: none"> ・管端をビニールスポンジ、ベニヤ板で保護対策を施し、ボルト締めして全周梱包用ビニールテープで包装を行う。 	可能性なし

保守履歴調査結果



当該配管の点検実績

定検回	実施時期	フランジ①	フランジ②
第 6 回	昭和 5 9 年	内面点検	—
第 9 回	昭和 6 3 年	内面点検	—
第 1 0 回	平成元年	—	内面点検
第 1 2 回	平成 3 年	内面点検	—
第 1 5 回	平成 7 年	内面点検	—
第 1 7 回	平成 1 0 年	—	内面点検

ライニングの初期き裂発生に係る検証試験

1. 目的

初期き裂の発生要因を特定するため、当該配管から採取したライニングの衝撃試験を行う。

2. 試験要領

(1) 試験片

- ・ 漏えいのあった当該配管の健全部を切り出す。
- ・ 試験片は空孔有り と 空孔なし を作成する。

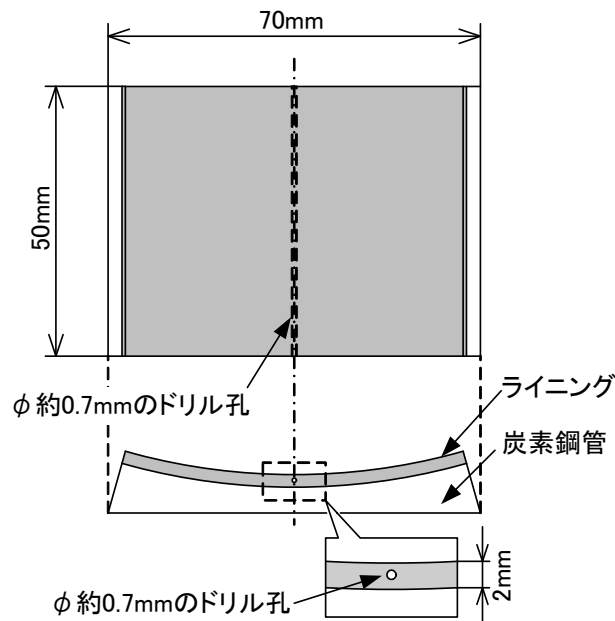


図1 落球衝撃試験片（空孔有りの場合）

(2) 落球衝撃試験（JIS K5600-5-3）

- ・ 直径 12.7mm の衝撃試験撃ち型を用いる。
- ・ 1kg のおもりを 50cm の高さから落下させる。

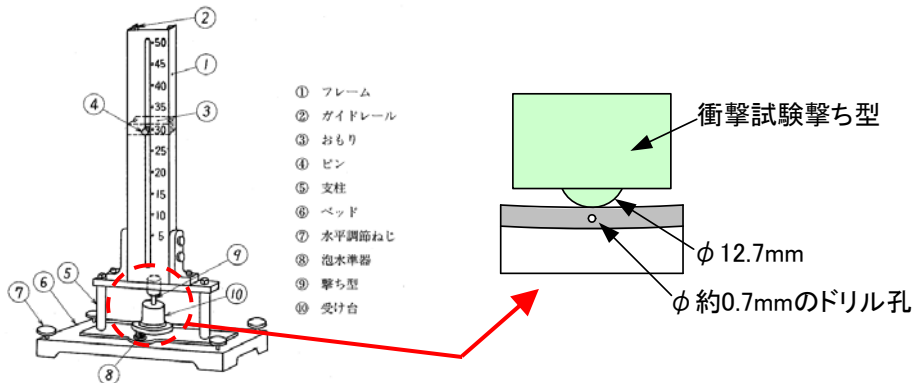


図2 落球衝撃試験実施概要

3. 試験結果

空孔有りのライニングにはき裂が発生するが、空孔なしのライニングにはき裂が発生しなかった。このため、気泡を内在するライニングについては、衝撃荷重が加わった場合、き裂が発生する可能性があることを確認した。

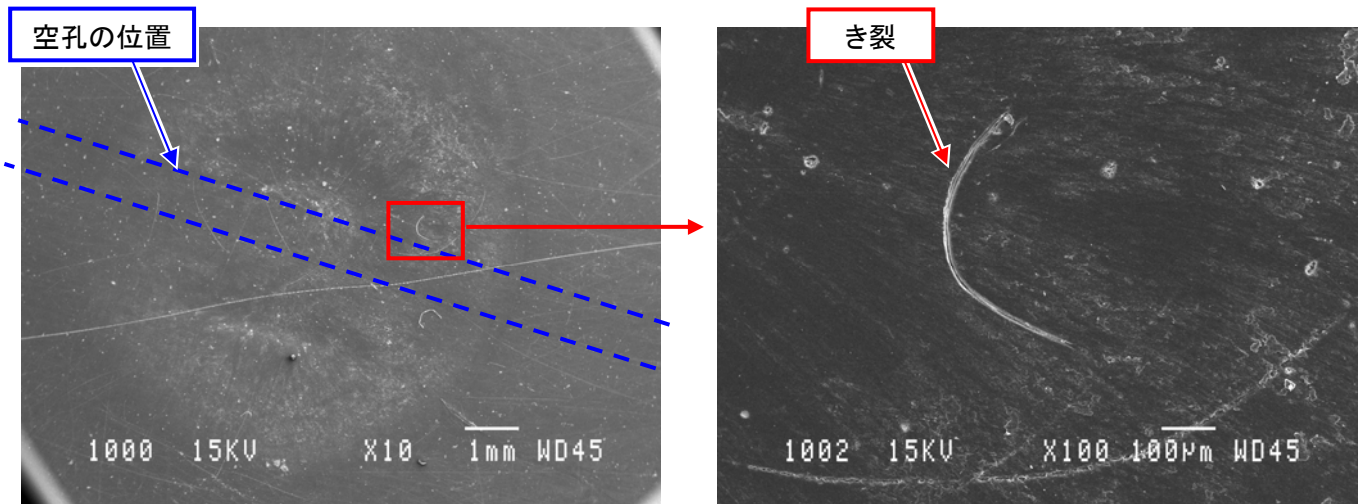


図3 落球衝撃試験SEM観察結果（空孔有りのライニング）

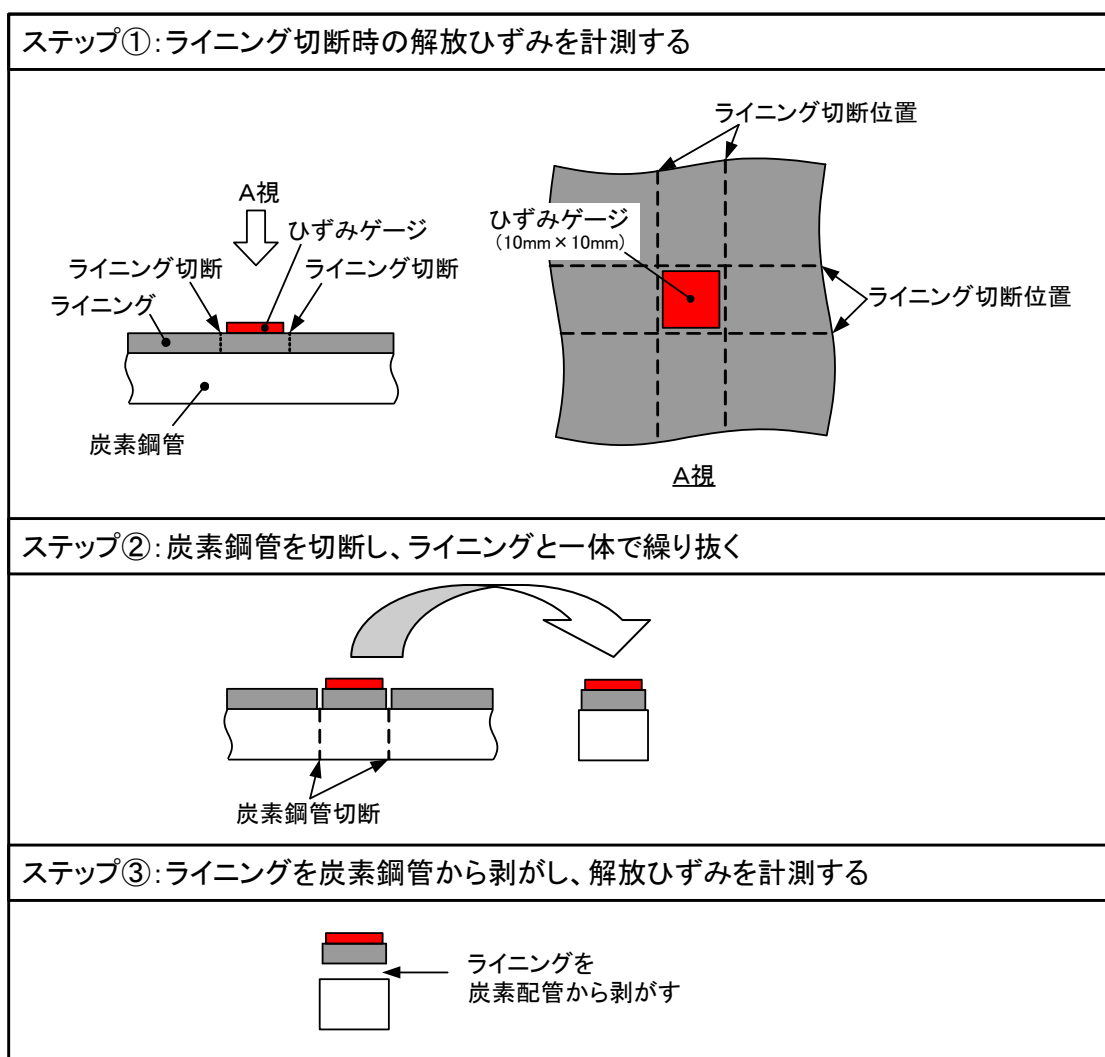
ライニングの残留ひずみ計測結果

1. 目的

ライニング鋼管の製造工程におけるライニング施工～冷却の過程において、炭素鋼管とライニングの熱膨張差から発生していると考えられるライニングの残留ひずみについて、当該配管にひずみゲージを貼り付けて計測する。

2. 計測概要

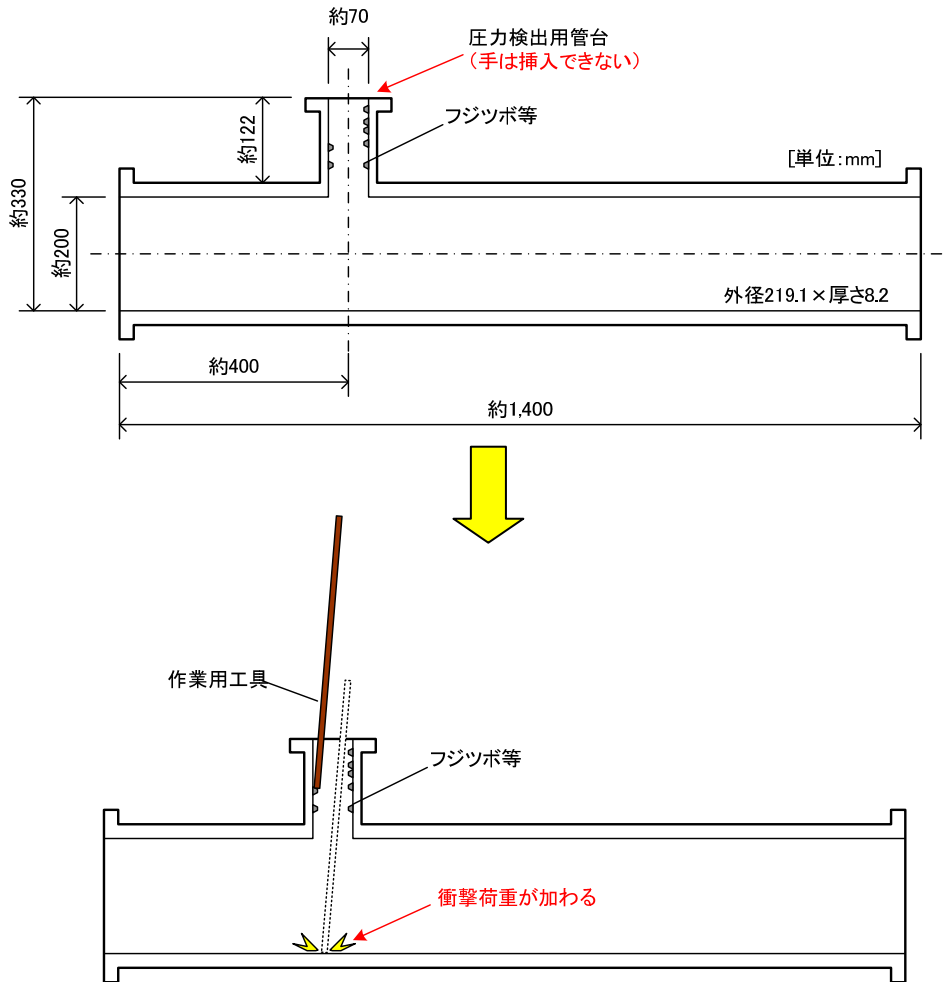
ライニング表面にひずみゲージを貼り付けた後、ひずみゲージ周辺のライニングを切断し、炭素鋼管から剥がすことにより解放されるひずみ量を計測する。計測手順を図1に示す。



3. 計測結果

計測されたライニングの解放ひずみは、約 $-6,000 \sim -8,000 \mu$ であった。残留ひずみは解放ひずみの符号を逆にしたものなので、ライニングの残留ひずみは引張であり、ライニングには引張応力が作用していたものと推定され、き裂が進展する可能性がある応力場であったと考えられる。

作業用工具の調査結果



フランジの開放・復旧および除貝作業に使用する可能性のある工具等の例

工具	用途	長さ
ヘラ	除貝作業	約 200mm
金尺、巻尺、ノギス	各種計測	約 180mm (金尺) 約 290mm (ノギス)
ブラシ	フランジ面等の手入れ	約 280mm
両口ラチェットレンチ (M30×M24)	当該配管のフランジ (8B、3B) の開放作業	約 400mm (右図参照) [約 1kg]
ハンマー	同上	約 350mm～400mm

圧力検出管台フランジ面から母管き裂部までは約 330mm あることから、工具の長さが 400mm 程度あれば、き裂部に接触する可能性がある。
上の工具の例では、ラチェットレンチやハンマーが該当する。

[ラチェットレンチ]



- ・ 内部清掃作業時に作業用工具を使用した場合、作業用工具の衝撃荷重が加わった可能性は否定できない。

推定メカニズム

時系列	模式図	メカニズム説明
製造時 ～		<p>当該配管は伊方 1 号機建設時に製作された。工場でポリエチレンライニング施工を行ったが、その際、ライニング表面近傍に気泡が生じた。</p> <p>当該配管は現地にて据付後、これまで取替えおよび補修を行っていない。</p>
第 17 回 定期検査 時		<p>第 17 回定期検査における点検時に、圧力検出管台に付着したフジツボ等の海生物を除去する作業において工具を使用したため、管台と 180° 反対側のライニング表面に工具が接触し、ライニング表面に衝撃荷重が加わった。</p> <p>この際に、ライニング表面と気泡との間の領域で初期き裂が発生した。</p>
第 17 回 定期検査 以降～		<p>ライニング施工時の引張残留応力によりき裂が進展した。</p>
		<p>ライニング中のき裂が進展し、炭素鋼管管内面まで到達。き裂部から浸入した海水により炭素鋼管の腐食が発生した。</p>
		<p>炭素鋼管の腐食に伴い、腐食生成物がライニングき裂部から溶出し、ライニング表面に堆積していった。</p> <p>炭素鋼管の内面から外面に向かって腐食が進行し、炭素鋼管の貫通に至った。</p>

[第2編]

原子炉補機冷却水冷却器 1 A 冷却用海水供給配管から
の漏えいについて

2-1. 件名

伊方発電所第1号機

原子炉補機冷却水冷却器1A冷却用海水供給配管からの漏えいについて

2-2. 事象発生の日時

平成22年6月11日 7時45分（技術基準を満足していないと判断）

2-3. 事象発生の原子炉施設

原子炉補機冷却水冷却器1A冷却用海水供給配管

- ・外径：508.0mm
- ・呼び厚さ：12.7mm
- ・必要最小厚さ：3.8mm
- ・材質：炭素鋼（内面ゴムライニング〔膜厚3mm〕）

2-4. 事象発生時の運転状況

第27回定期検査中（平成22年5月14日より）

2-5. 事象発生の状況

伊方発電所第1号機（定格電気出力566MW）は、第27回定期検査中のところ、6月11日7時45分、原子炉補助建家地下1階（管理区域内）において、保修員が運転中の原子炉補機冷却水冷却器*1 1Aの冷却用海水供給配管から海水が漏えいしていることを確認した。なお、漏えい量は最大で約80ℓと推定された。

当該配管は安全上重要な機器であり、技術基準に適合していないと認められたことから、実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第19条の17第3号に該当するものと判断した。当該配管の流量を確認した結果、管理値を十分満足しており、原子炉補機冷却水冷却器1Aの機能に影響を及ぼすものではなかった。

なお、本事象によるプラント運転への影響および環境への放射能の影響はなかった。

（添付資料2-1、2-2）

*1：原子炉補機冷却水冷却器

1次系のポンプ、熱交換器等の冷却のための水を海水により冷却する設備で、4基設置されている。

2-6. 時系列

6月11日

- 7時20分頃 当直員が運転中の原子炉補機冷却水冷却器1A冷却用海水入口弁付近より水が漏れていることを確認
- 7時45分 保修員が運転中の原子炉補機冷却水冷却器1A冷却用海水供給配管から海水が漏れいしていることを確認
当該配管が技術基準に適合していないと認められたため、
実用発電用原子炉の設置、運転等に関する規則第19条の
17第3号に該当するものと判断
- 7時47分 原子炉補機冷却水冷却器の運転システムを1Aから1Bに切り替えるため、原子炉補機冷却水ポンプ1Bを起動、1Aを停止
- 7時53分 当該配管の隔離完了

2-7. 安全性への影響について

原子炉施設の運転に必要なポンプ等の補機類の冷却は、原子炉補機冷却水設備にて行っている。さらに、この原子炉補機冷却水を4基の原子炉補機冷却水冷却器を介して原子炉補機冷却海水設備にて冷却を行っている。

事象発生時、原子炉補機冷却水冷却器1基で必要な補機類の冷却に十分な容量を有しており、4基の原子炉補機冷却水冷却器のうち原子炉補機冷却水冷却器1Aのみで補機類を冷却していた。原子炉補機冷却水冷却器1Aは、当該配管により海水が供給されていたが、事象発生後、原子炉補機冷却水冷却器1Bへ切り替えを実施したことから、補機類の冷却に問題はなかった。

漏えい発生後においても、原子炉補機冷却水冷却器1A通水流量は約1,250 m³/hであることを確認しており、伊方発電所内で定める、原子炉補機冷却水冷却器1Aに必要な通水流量の管理値(>1,100 m³/h)を満足していたことから、原子炉補機冷却水冷却器1Aの機能に直ちに影響を及ぼすものではなかった。

2-8. 詳細調査

当該配管から漏えいが発生した原因について、要因分析図に基づきメーカー工場等において詳細調査を行った。

(添付資料2-3)

(1) 外観観察

a. 配管外面

配管外面について外観観察を行った結果、割れや著しい腐食等の異常は認められなかった。

漏えい部近傍の配管の塗料を取り除いた結果、直径2～3mmの漏えい孔が認められた。

(添付資料2-4)

b. 配管内面

- 配管内面について外観観察を行った結果、漏えい部近傍に軸方向約145mm、周方向約50mmのライニング欠損部が認められ、海水に接液していた炭素鋼管表面は腐食生成物で覆われていた。
- ライニング欠損部近傍には、凹凸状のエロージョン痕が認められ、その近傍にはライニング補修跡が認められた。
また、ライニング欠損部と軸対称位置のライニングにも同様のエロージョン痕と補修跡が認められた。

(添付資料2-5)

- ライニングの状況を確認するため、配管切断後、配管内面のエロージョン痕を観察した結果、エロージョン痕は0°周辺の上流側で認められた。
また、バタフライ弁に近い上流側ほどエロージョン痕が顕著であり、特に上流側フランジ近傍で補修材がない領域に凹凸状の著しいエロージョン痕が確認された。
180°周辺および下流側フランジ近傍には、エロージョン痕はほとんど認められなかった。

(添付資料2-6)

(2) 断面観察

炭素鋼管の損傷状況を確認するため、以下の観察を行った。

a. 断面マクロ観察

ライニング欠損部周辺のライニングを剥ぎ取った後、断面マクロ観察を行った結果、ライニング欠損部は、ほぼ全面に渡って減肉が認められたが、表面には金属地肌は出ておらず、腐食生成物に覆われていた。

炭素鋼管の腐食は、内面から外面に向かって腐食部が狭まっており、内面から外面に向かって腐食が進行し貫通したことを示していた。

また、減肉部に腐食生成物は詰まっておらず、減肉量に比べ腐食生成物の付着量が少ない傾向にあった。

(添付資料2-7)

b. 断面ミクロ観察

炭素鋼管の漏えい孔近傍の断面ミクロ観察を行った結果、漏えい孔近傍の表面は比較的なめらかで、薄い腐食生成物が認められた。

また、漏えい孔近傍に、腐食ピット状の箇所が認められた。

(添付資料2-8)

以上のことから、炭素鋼管の減肉は腐食主体で進行していたが、流れの影響により、腐食生成物の付着が阻害され、腐食速度が上昇したと考えられる。

(3) 断面EDS（エネルギー分散型X線分析装置）分析

ライニングからは、ライニング成分である炭素と塩素が検出されたが、海水成分であるナトリウムは検出されなかった。

また、ライニングと炭素鋼管の境界に酸素は検出されなかったことから、炭素鋼管内面は腐食していないと判断できる。

以上のことから、ライニングは良好な海水遮断機能を有していることを確認した。

(添付資料2-9)

(4) ライニングの健全性調査

当該配管のライニングについて、以下の検査および調査を行った。

a. ピンホール検査

ライニングの貫通欠陥の有無を確認するため、ライニング欠損部を除く当該配管全面について、ピンホール検査を行った結果、ライニングに貫通部は認められなかった。

b. ライニング膜厚測定

ライニングの摩耗や表面剥離等による膜厚減少の有無を確認するため、健全部のライニングの膜厚測定を行った結果、工場製作時の基準値と比較して、膜厚の著しい減少は認められなかった。

(添付資料2-10)

c. 機械的特性調査

ライニングの機械的特性の状況調査を行った結果は、以下のとおりであった。

(添付資料2-11)

i) ライニング硬さ

欠損部近傍および健全部のライニングについて、硬度測定を行った結果、欠損部近傍、健全部とも、硬度はほぼ同等であり、欠損部近傍に特異な硬化は認められなかった。

ii) 引張強さ・伸び

欠損部近傍および健全部のライニングについて、引張強さおよび伸びを計測した結果、欠損部近傍、健全部とも、引張強さおよび伸びはほぼ同等であり、欠損部近傍に特異な引張特性の低下は認められなかった。

d. 赤外分光分析

ライニングの化学的特性を確認するため、赤外分光分析を行った結果、クロロブレンゴムと同定された。

また、上流側フランジ近傍の補修材は、エポキシ系樹脂と同定された。

(添付資料 2 - 1 2)

(5) ライニング材選定の考え方に関する調査

1号機建設時のライニング材選定の考え方を調査した結果、流動条件が厳しい範囲については、耐エロージョン性に優れたゴムライニングを適用することとしており、流量調整弁として使用するバタフライ弁下流に配置される当該配管についてもゴムライニング管を適用することとしていた。

(6) 製造履歴調査

製造段階における記録等を調査した結果は、以下のとおりであった。

なお、当該配管は1号機建設時に製作、据付され、これまで継続して使用しているものであった。

(添付資料 2 - 1 3)

a. 炭素鋼管

- ・ 検査成績書を調査した結果、規格に適合した材料が使用されており、配管厚さは設計寸法を満足していることを確認した。

b. ライニング

- ・ 赤外分光分析の結果、クロロプレンゴムであることを確認した。
- ・ 検査成績書を調査した結果、ライニング厚さは基準値を満足していること、その他の工場検査結果に問題がないことを確認した。

(7) 運転履歴調査

a. 運転流速

通常運転中および定期検査中の運転流速を調査した結果、当該配管の流速は1.8～1.9 m/sで、設計流速(3.5 m/s)以下であることから、ゴムライニングの健全性に影響を及ぼすものではないことを確認した。

b. 水質

海水系統に注入している以下の薬品の影響について調査した結果、ゴムライニングの劣化に影響を及ぼすものではないことを確認した。

i) 次亜塩素酸ソーダ

文献調査の結果、低濃度の次亜塩素酸ソーダについてのデータは確認できなかったが、注入濃度(約0.3 ppm(塩素))程度の低濃度であれば、実運用上問題はない。

ii) 硫酸第一鉄

メーカーデータによれば濃度60%の硫酸に対する耐性を有しており、注入濃度(初期皮膜形成時に約0.05 ppm、通常時は約0.01 ppm)は十分低く問題ない。

(8) 保守履歴調査

a. 当該ゴムライニング管の保守管理内容

当該ゴムライニング管についての保守管理内容は以下のとおりである。

- ・ 定期的な内面視点検により、ライニングの健全性確認を行っており、点検頻度は、12定検に1回以上としている。

なお、当該配管のように弁と取り合う箇所については、弁の点検周期（当該配管と取り合うバタフライ弁の場合、3～6定検に1回）に合わせて内面点検を行っている。

- ・ 目視によるライニング状況確認は、ライニング全面ではなく、フランジ開放部から可視範囲について実施している。

なお、今回、ライニング欠損が認められた箇所は、上流側フランジを開放した際に容易に目視可能な部位であった。

- ・ 当該配管は、流動条件が厳しい部位にあるものの、特別な損傷モードが考えられる部位として抽出し、それに着目した点検頻度の設定は、なされていなかった。

b. 当該配管の取替え、補修実績

保守履歴について調査を行った結果、当該配管はこれまで取替えは行っていなかったが、第1回定期検査時（昭和53年）に補修を行っていた。

なお、具体的な補修理由、範囲等の記録は残されていなかったが、2-8. 詳細調査の(1)外観観察および(4)ライニングの健全性調査の結果から、周方向に約半周、長手方向に約60cm以上の比較的広範囲にわたって、ライニングの上から、エポキシ樹脂を塗り重ね、補修が実施されていたものと推定される。

c. 当該配管の点検実績

過去の点検実績を確認したところ、直近では、第22回定期検査（平成16年）において、当該配管を取外し、フランジ部から可視範囲の目視点検を実施しており、点検記録を確認した結果、ライニングに異常がなかったことを確認した。

なお、第22回定期検査以前は、上流のバタフライ弁を比較的短い周期で点検しており、これに伴い当該配管についても同じ頻度で点検が実施されていた。

(添付資料2-14)

2-9. キャビテーション*²発生状況に係る評価

これまで、キャビテーションが発生する可能性がある箇所については、流量調整方法の変更、オリフィスの追加等を行い、キャビテーションの発生そのものを抑制する対策を行っている。

しかしながら、系統構成上、または配管レイアウト上、これらの対策が困難な箇所があり、これらについては、定期的にライニング面の状況を確認し、必要に応じて補修等を行うことで対応をしてきた。当該配管はこのような箇所に該当する。

当該配管は、バタフライ弁下流に接続しており、流動条件が厳しいこと、また詳細調査の結果、ライニング面にエロージョン痕が認められたことから、漏えい部におけるキャビテーションの発生状況について評価を行った。

* 2 : キャビテーション

液体が局所的な流速の増加や圧力低下によって蒸気や気体、またはその両方を含んだ気泡および泡が発生する現象。

(1) 運転条件調査

一般に、弁を用いて水流の調整を行う場合、弁の開度が小さいほど（流路を絞るほど）キャビテーションが発生しやすくなることが知られている。

このため、キャビテーション発生に影響を及ぼす当該配管上流側バタフライ弁の開度設定について調査した結果は、以下のとおりであった。

- ・ 当該バタフライ弁は、原子炉補機冷却水冷却器 1 A の通水流量を調整しており、定期検査毎に流量調整を実施している。
- ・ 当該バタフライ弁の開度設定については、弁開度ではなく、流量目標値（ $1,200\text{ m}^3/\text{h}$ ）に合わせるよう開度を設定している。
- ・ 当該バタフライ弁については、定期検査毎に若干異なるものの、20～22%の開度であった。

(2) キャビテーション係数評価

前記の弁開度等の運転条件に基づき、当該配管上流のバタフライ弁においてキャビテーションが発生するか否かを文献を用いて評価した結果、キャビテーション発生のある可能性のある運転条件であることを確認した。

(添付資料 2-15)

以上のことから、当該配管は、通常運転中、キャビテーションが発生し、キャビテーション・エロージョン*³により、ライニング上に施工されていた補修材、続いてライニングが徐々に損傷した可能性が考えられる。

* 3 : キャビテーション・エロージョン

キャビテーションにさらされ続けたことによる材料の変形、欠損、破損。

2-10. 類似配管の調査

当該配管と同様の運転条件となる原子炉補機冷却水冷却器 1 B、1 C、1 D 入口のバタフライ弁下流側配管について、ライニングの点検を実施した。

その結果、ライニング面の一部に僅かな肌荒れ等が認められたが、顕著なものではなく、現状において有害なキャビテーションはほとんど生じていないものと考えられる。

なお、これらの配管についても、当該配管と同様に第 1 回定期検査時にライニングの補修を行っていたことから、当該配管と同様にかつてはキャビテーション・エロージョンによるライニングの損傷が発生していたものと推定される。

2-11. 推定原因

以上の調査結果から、漏えいが発生した原因は、

- ・ 当該配管の上流のバタフライ弁で海水の流れが絞られた際、当該弁下流でキャビテーションが発生し、キャビテーション・エロージョンにより、当該配管のライニング上に施工されていた補修材、続いてゴムライニングに局所的な減肉および剥離が生じた
- ・ 炭素鋼管が海水に暴露されたことにより、炭素鋼管の内面から外面に向かって腐食が進行し、炭素鋼管の貫通に至ったものと推定される。

(添付資料 2-16)

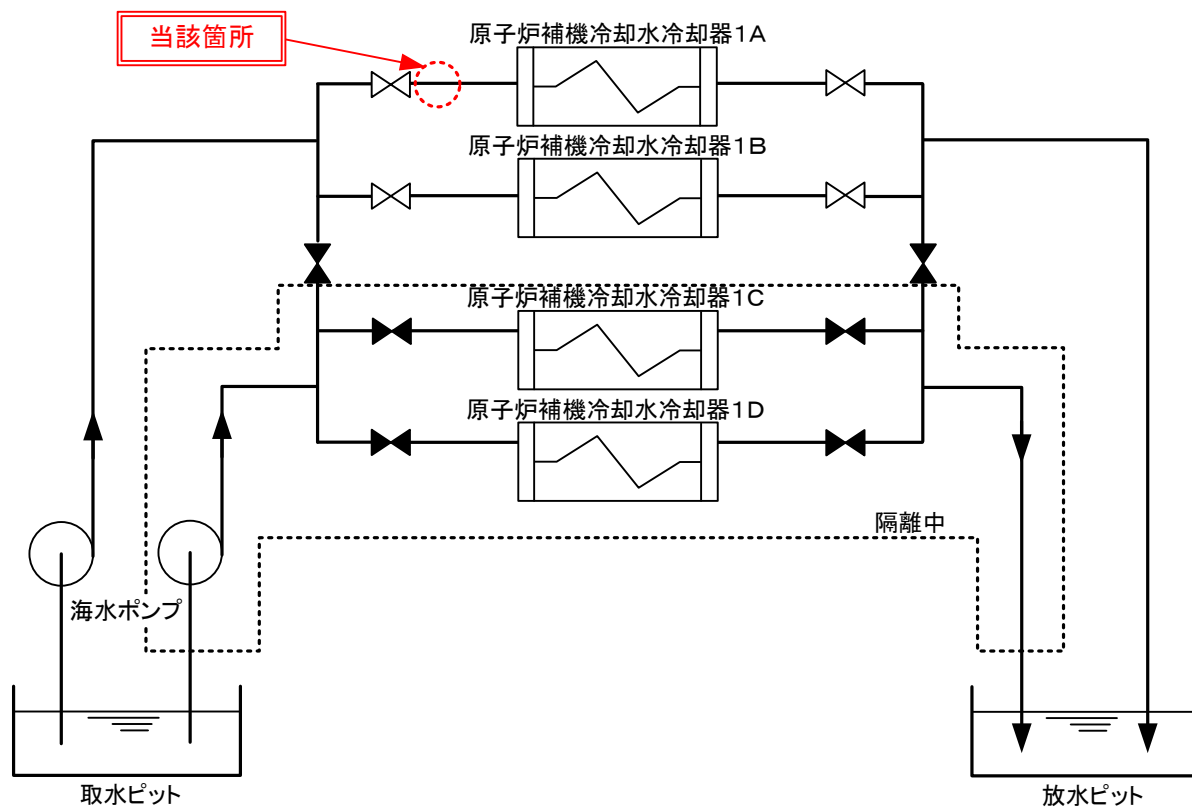
また、当該配管は、流動条件が厳しい部位にあるものの、キャビテーションのような特別な損傷モードが考えられる部位として抽出し、それに着目した点検頻度の設定がなされていなかったことが、異常の兆候を早期に発見できなかった原因となったものと推定される。

以 上

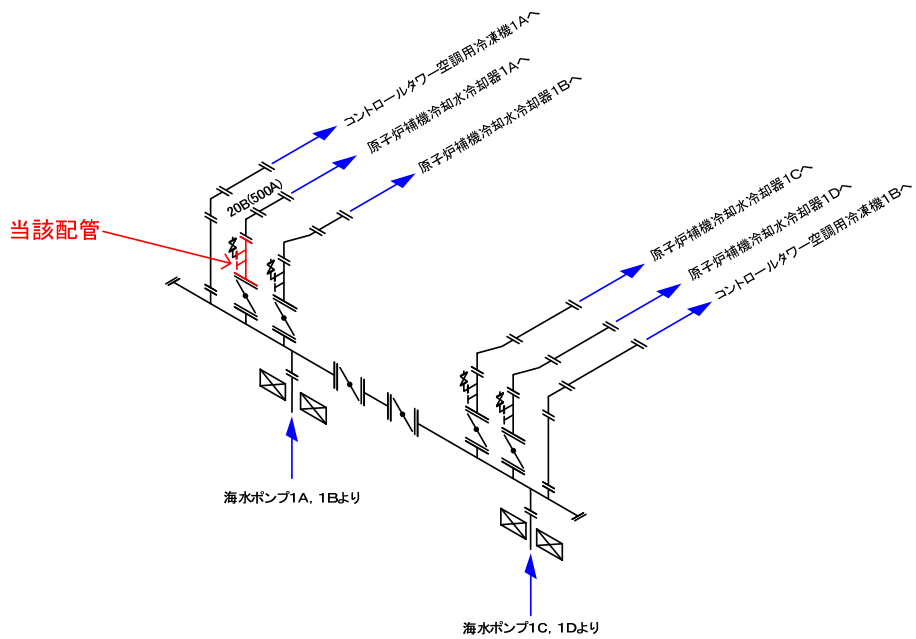
【添 付 資 料】

- 2-1. 原子炉補機冷却水冷却器 1 A冷却用海水供給配管概略系統図
- 2-2. 原子炉補機冷却水冷却器 1 A冷却用海水供給配管概略図
- 2-3. 原子炉補機冷却水冷却器 1 A冷却用海水供給配管からの漏えいに関する要因分析図
- 2-4. 外観観察結果（配管外面）
- 2-5. 外観観察結果（配管内面）
- 2-6. 外観観察結果（エロージョン痕のマップ）
- 2-7. 断面マクロ観察結果
- 2-8. 断面ミクロ観察結果
- 2-9. 断面EDS分析結果（ライニング健全部）
- 2-10. ライニング膜厚測定結果
- 2-11. ライニングの機械的特性調査結果
- 2-12. ライニングの赤外分光分析結果
- 2-13. 製造履歴調査結果
- 2-14. 保守履歴調査結果
- 2-15. キャビテーション発生評価結果
- 2-16. 推定メカニズム

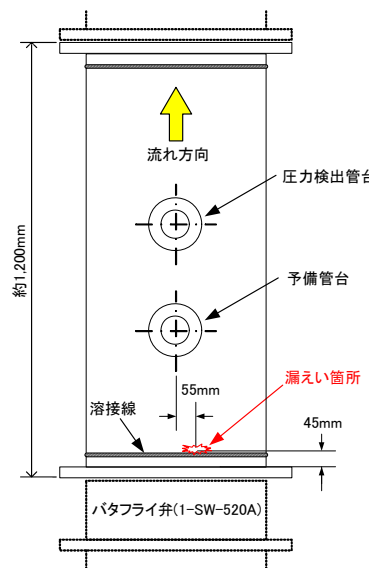
原子炉補機冷却水冷却器 1 A 冷却用海水供給配管概略系統図



原子炉補機冷却水冷却器 1 A 冷却用海水供給配管概略図



当該配管の漏えい箇所および仕様



当該配管の仕様

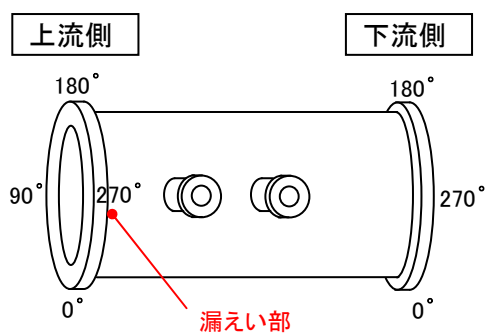
- 外 径 : 508.0mm
- 呼 び 厚 さ : 12.7mm
- 必要最小厚さ : 3.8mm
- 材 質 : 炭素鋼 (STPY41)
- 配 管 内 面 : ゴムライニング
- 最高使用温度 : 40°C
- 最高使用圧力 : 0.65MPa (6.6kg/cm²)

原子炉補機冷却水冷却器 1 A 冷却用海水供給配管からの漏えいに関する要因分析図

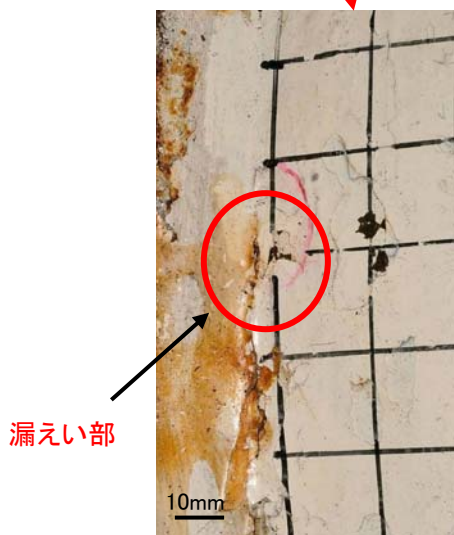
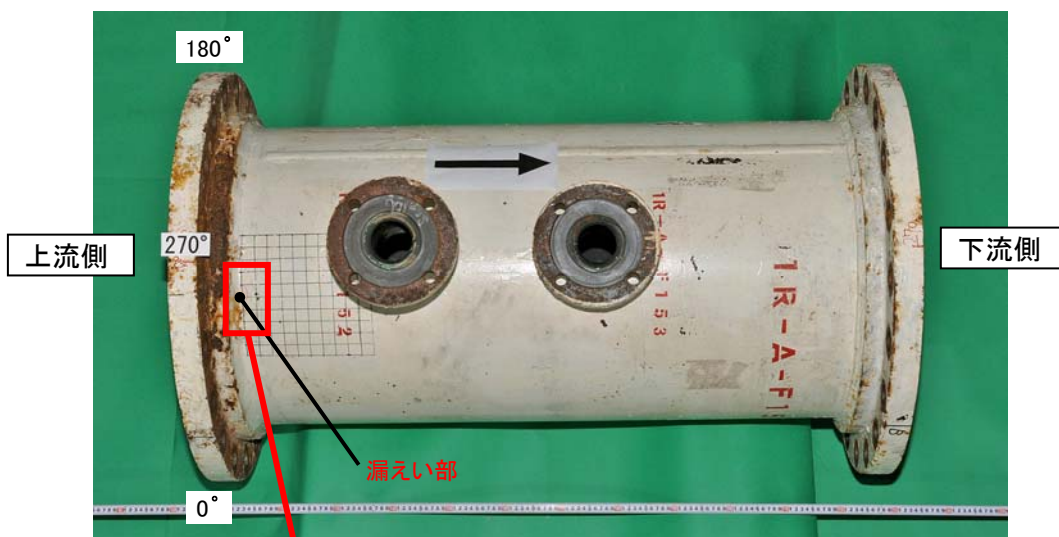
△：可能性あり
×：可能性なし

事象	要因	調査内容	調査結果	評価	添付資料		
原子炉補機冷却水冷却器 1 A 冷却用海水供給配管からの漏えい	配管	材料不良	化学成分不良 ・製造履歴調査	・検査成績書を調査した結果、規格に適合した材料が使用されていることを確認した。	×	2-13	
		製作・施工不良	寸法・形状不良 ・製造履歴調査	・検査成績書を調査した結果、配管厚さは設計寸法を満足していることを確認した。	×	2-13	
		腐食等	外面腐食	・外観観察	・配管外面について外観観察を行った結果、漏えい孔が認められたが、割れや著しい腐食等の異常は認められなかった。	×	2-4
			海水による腐食	・外観観察 ・断面観察	・配管内面について外観観察を行った結果、漏えい部近傍にライニングの部分的欠損が認められ、海水に接液していた炭素鋼管表面は腐食生成物で覆われていた。 ・断面マクロ観察の結果、ライニング欠損部は、ほぼ全面に渡って減肉が認められたが、腐食生成物に覆われていた。また、減肉部に腐食生成物は詰まっておらず、減肉量に比べ腐食生成物の付着量が少ない傾向にあった。	△	2-5 2-7
			応力腐食割れ	・断面観察	・断面観察の結果、割れ等の異常はなく、応力腐食割れではないことを確認した。	×	2-7
	エロージョン	・外観観察 ・断面観察	・配管内面について外観観察を行った結果、漏えい部近傍にライニングの部分的欠損が認められ、海水に接液していた炭素鋼管表面は腐食生成物で覆われていた。 ・断面ミクロ観察の結果、漏えい孔近傍の表面は比較的なめらかで、薄い腐食生成物が認められた。また、漏えい孔近傍に、腐食ピット状の箇所が認められたことから、炭素鋼管の減肉は腐食主体で進行していたと推定される。	×	2-5 2-8		
	ライニング	材料不良	化学成分不良 ・ライニング健全性調査	・赤外分光分析の結果、クロロブレンゴムであることを確認した。	×	2-12	
		製作・施工不良	寸法不良 ・製造履歴調査	・検査成績書を調査した結果、ライニング厚さは基準値を満足していること、その他の工場検査結果に問題がないことを確認した。	×	2-13	
		外的要因	外力の負荷 ・外観観察	・ライニング欠損部近傍には、凹凸状のエロージョン痕が認められ、その近傍にはライニング補修跡が確認された。（外力が負荷された痕跡は認められなかった。）	×	2-5	
		磨耗等	海生物による影響	・外観観察	・配管内面について外観観察を行った結果、漏えい部近傍にライニングの部分的欠損が認められ、海水に接液していた炭素鋼管表面は腐食生成物で覆われていた。（海生物の付着は認められなかった。）	×	2-5
			運転流速による影響	・運転履歴調査	・運転流速を調査した結果、当該配管の流速は 1.8 ~ 1.9 m/s であり、設計流速 (3.5 m/s) 以下であることからゴムライニングの健全性に影響を及ぼすものではないことを確認した。	×	
			薬品による影響	・運転履歴調査	・海水系統に注入している薬品の影響を調査した結果、ゴムライニングの劣化に影響を及ぼすものではないことを確認した。	×	
		海水遮断機能の有意な低下	・断面 EDS 分析 ・ライニング健全性調査	・断面 EDS 分析の結果、ライニング中には、海水成分であるナトリウムは認められず、ライニングは良好な海水遮断機能を有していることを確認した。 ・ピンホール検査の結果、ライニング欠損部を除く当該配管全面に貫通部は認められなかった。 ・膜厚測定の結果、工場製作時の基準値と比較して、膜厚の著しい減少は認められなかった。 ・機械的特性（硬さ、引張強さ・伸び）を調査した結果、欠損部近傍・健全部ともほぼ同等であり、欠損部近傍に特異な変化は認められなかった。 ・化学的特性を確認するため、赤外分光分析を行った結果、クロロブレンゴムと同定され、上流側フランジ近傍の補修材は、エポキシ樹脂と同定された。	×	2-9 2-10 2-11 2-12	
		疲労	・外観観察	・ライニング欠損部近傍には、凹凸状のエロージョン痕が認められた。（疲労破壊の様相は認められなかった。）	×	2-5	
	エロージョン	・外観観察	・ライニング欠損部近傍には、凹凸状のエロージョン痕が認められ、その近傍にはライニング補修跡が認められた。また、ライニング欠損部と軸対称位置のライニングにも同様のエロージョン痕と補修跡が認められた。 ・配管内面のエロージョン痕を観察した結果、エロージョン痕は 0° 周辺の上流側で認められた。また、バタフライ弁に近い上流側ほどエロージョン痕が顕著であり、特に上流側フランジ近傍で補修材がない領域に凹凸状の著しいエロージョン痕が確認された。	△	2-5 2-6		
保守管理	保守不良	・保守履歴調査	・保守履歴を調査した結果、第 1 回定期検査時 (昭和 53 年) にライニングの補修を行っていたが、具体的な補修理由、範囲等の記録は残されていなかった。また、取替えは行っていない。 ・ライニングの健全性調査の結果から、周方向に約半周、長手方向に約 60cm 以上にわたって、ライニングの上から、エポキシ樹脂を塗り重ね、補修が実施されていたと推定された。 ・点検実績を確認した結果、直近の点検結果 (第 2 回定検) では異常は認められていないことを確認した。 ・なお、第 2 回定期検査以前は、上流のバタフライ弁を比較的短い周期で点検しており、これに伴い当該配管についても同じ頻度で点検が実施されていた。 ・キャビテーションのような、特別な損傷モードが考えられる部位を抽出し、それに着目した点検頻度の設定がなされていなかった。	△	2-14		

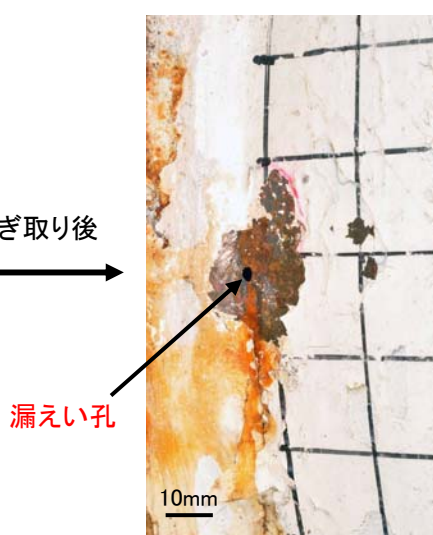
外観観察結果（配管外面）



270°側より撮影

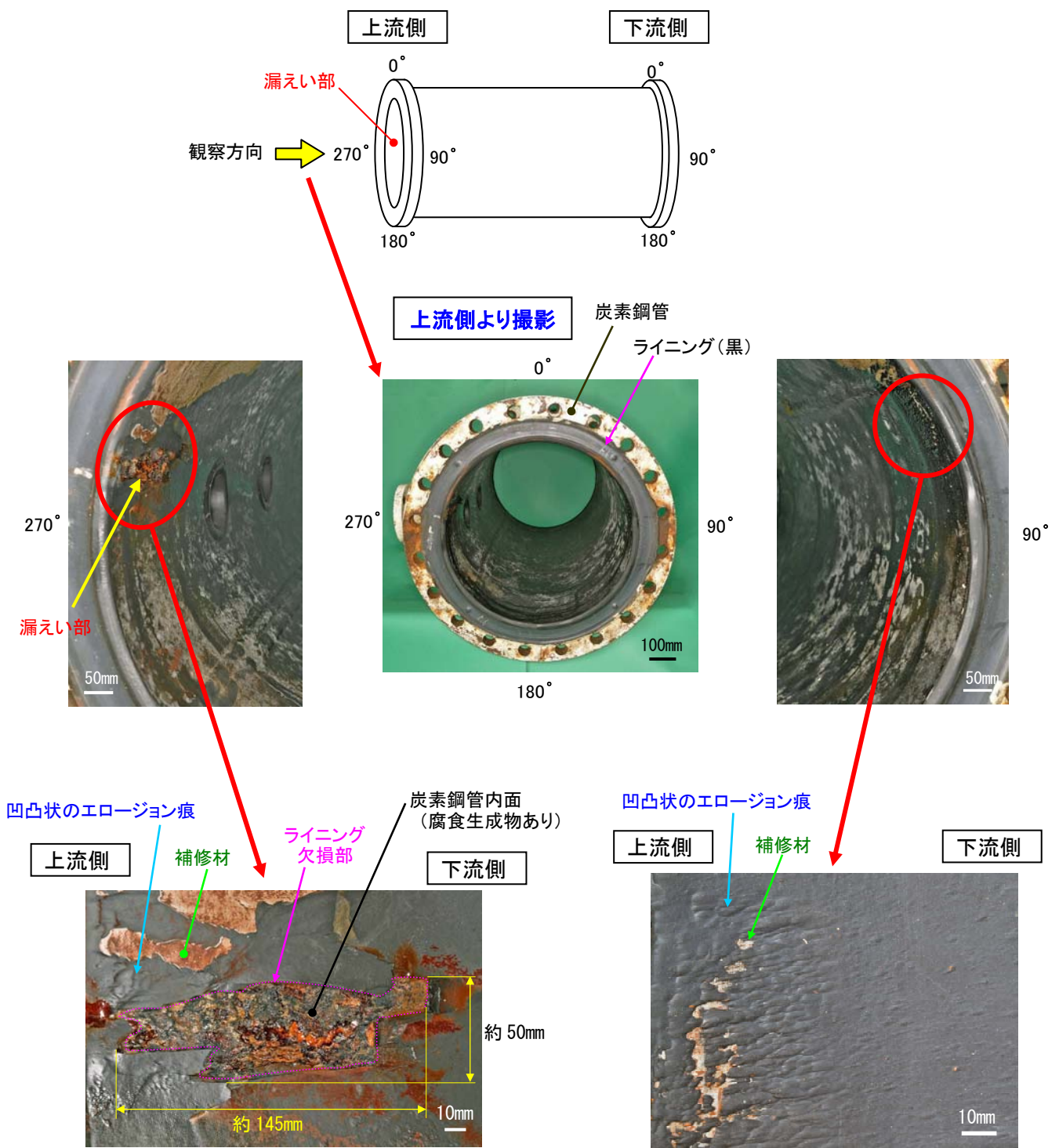


塗装剥ぎ取り後



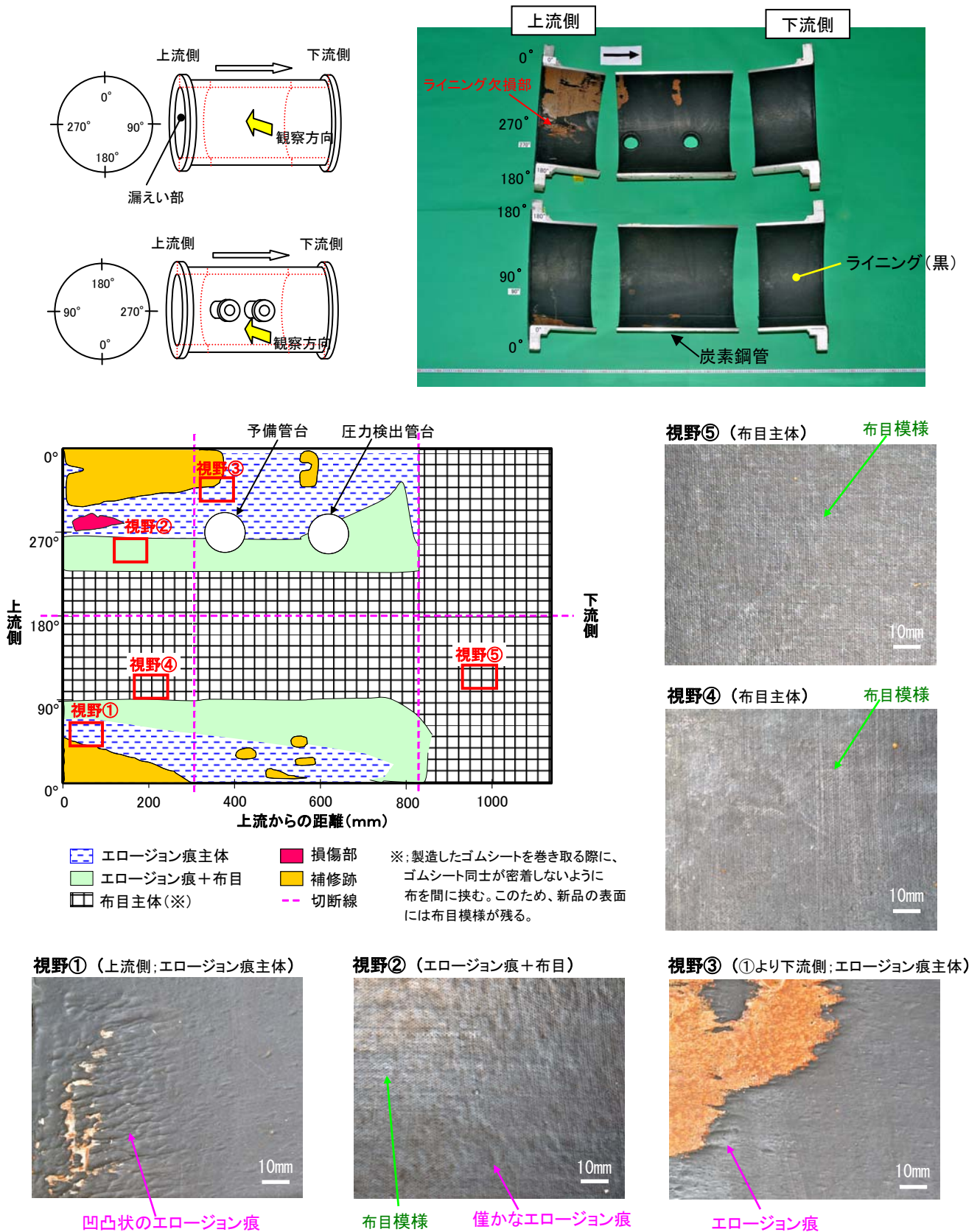
- ・ 配管外面の外観観察を行った結果、割れや著しい腐食等の異常は認められなかった。
- ・ 漏えい部近傍の配管の塗料を取り除いた結果、上流側 270° 付近に直径 2~3mm の漏えい孔が認められた。

外観観察結果（配管内面）



- ・配管内面の外観観察を行った結果、漏えい部近傍に、軸方向約 145mm・周方向約 50mm のライニング欠損部が認められ、海水に接液していた炭素鋼管表面は腐食生成物で覆われていた。
- ・ライニング欠損部近傍には、凹凸状のエロージョン痕が認められ、その近傍にはライニング補修跡が確認された。
- ・ライニング欠損部と軸対称位置のライニングに、凹凸状のエロージョン痕と補修跡が認められた。

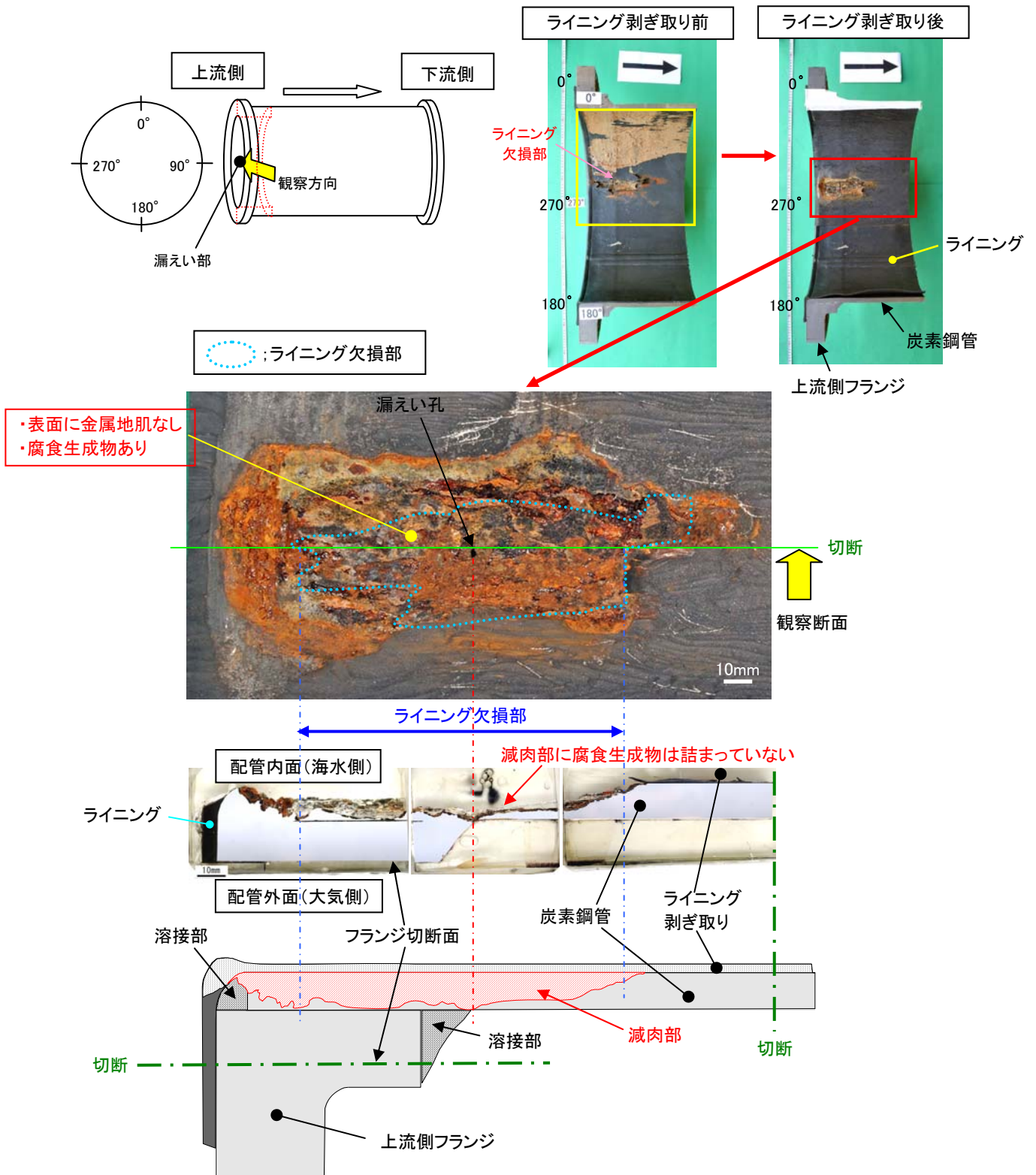
外観観察結果（エロージョン痕のマップ）



ライニング状況を確認するため、配管切断後、配管内面のエロージョン痕を観察した結果、

- ・エロージョン痕は、0° 周辺(90°~0°~270°)の上流側で認められた。また、バタフライ弁に近い上流側ほどエロージョン痕が顕著となり、特に上流側フランジ近傍で補修材がない領域に、凹凸状の著しいエロージョン痕が確認された。
- ・180° 周辺および下流側フランジ近傍には、エロージョン痕はほとんど認められなかった。

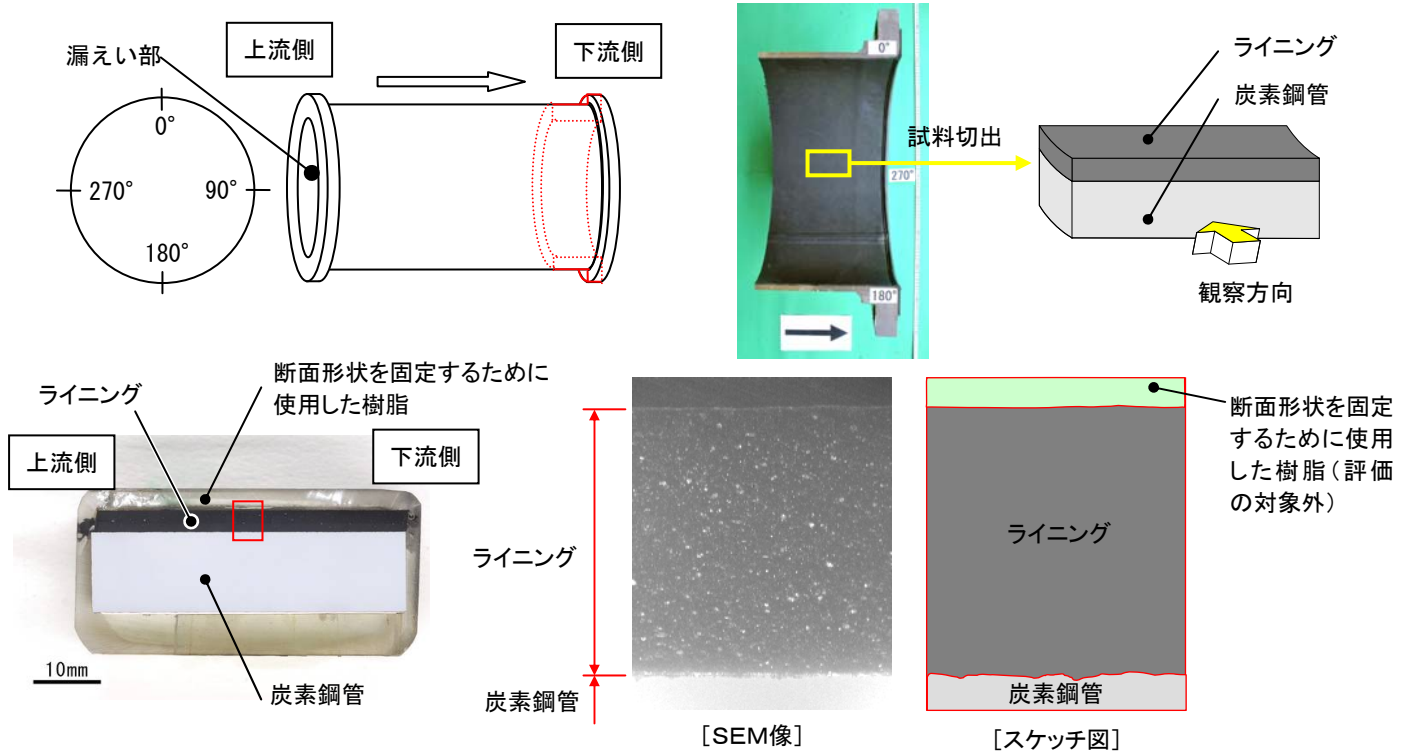
断面マクロ観察結果



炭素鋼管の損傷状況を確認するため、ライニング欠損部周辺のライニングを剥ぎ取り後、断面マクロ観察を行った結果、

- ・ライニング欠損部は、ほぼ全面に渡って減肉が認められたが、表面には金属地肌は出ておらず、腐食生成物に覆われていた。
- ・炭素鋼管の腐食は、内面から外面に向かって腐食部が狭まっており、内面から外面に向かって腐食が進行し貫通したことを示していた。
- ・減肉部に腐食生成物は詰まっておらず、減肉量に比べ腐食生成物の付着量が少ない傾向にあったことから、流れの影響により、腐食生成物の付着が阻害され腐食速度が上昇したと考えられる。
- ・なお、割れ等の異常は認められず、応力腐食割れでないことを確認した。

断面 EDS 分析結果 (ライニング健全部)



C (ライニングと炭素鋼管にあり)	O (なし)	Na (なし)
Cl (ライニングにあり)	Ca (なし)	Fe (炭素鋼管にあり)

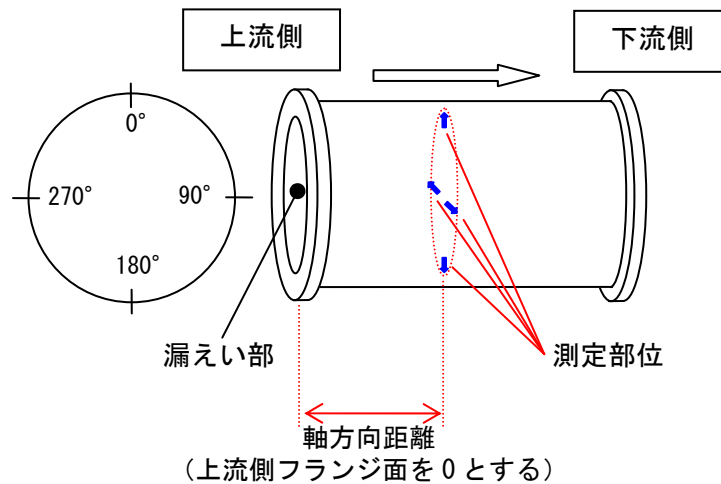
※白いほど当該元素の含有率が高い。

ライニングに異常な元素がないかを確認するため、断面 EDS 分析を行った結果、

- ・ライニングからは、ライニング成分である炭素と塩素が検出されたが、海水成分であるナトリウムは検出されなかったことから、ライニングへの海水の浸透はなかった。
- ・ライニングと炭素鋼管との境界に酸素が検出されなかったことから、炭素鋼管内面は腐食していなかった。

以上より、ライニングは良好な海水遮断機能を有していることを確認した。

ライニング膜厚測定結果



電磁式膜厚計によるライニング膜厚測定結果

(単位 mm)

軸方向距離 (mm)	測定値				最小～最大
	0°	90°	180°	270°	
100	3.7 ^{※1}	3.3	2.9	3.1	2.7～3.7 ^{※1}
200	3.3	3.2	2.9	2.9	
300	3.6 ^{※2}	2.9	2.9	2.8	
400	3.0	3.0	3.2	3.2	
500	3.2	3.2	3.2	3.2	
600	2.8	2.9	3.0	2.9	
700	2.9	2.9	2.8	2.8	
800	2.8	2.9	2.8	2.9	
900	2.8	2.8	2.7	2.9	
1000	2.8	2.9	2.8	2.8	
1100	2.9	3.2	2.8	2.9	

※1 補修箇所の上から測定

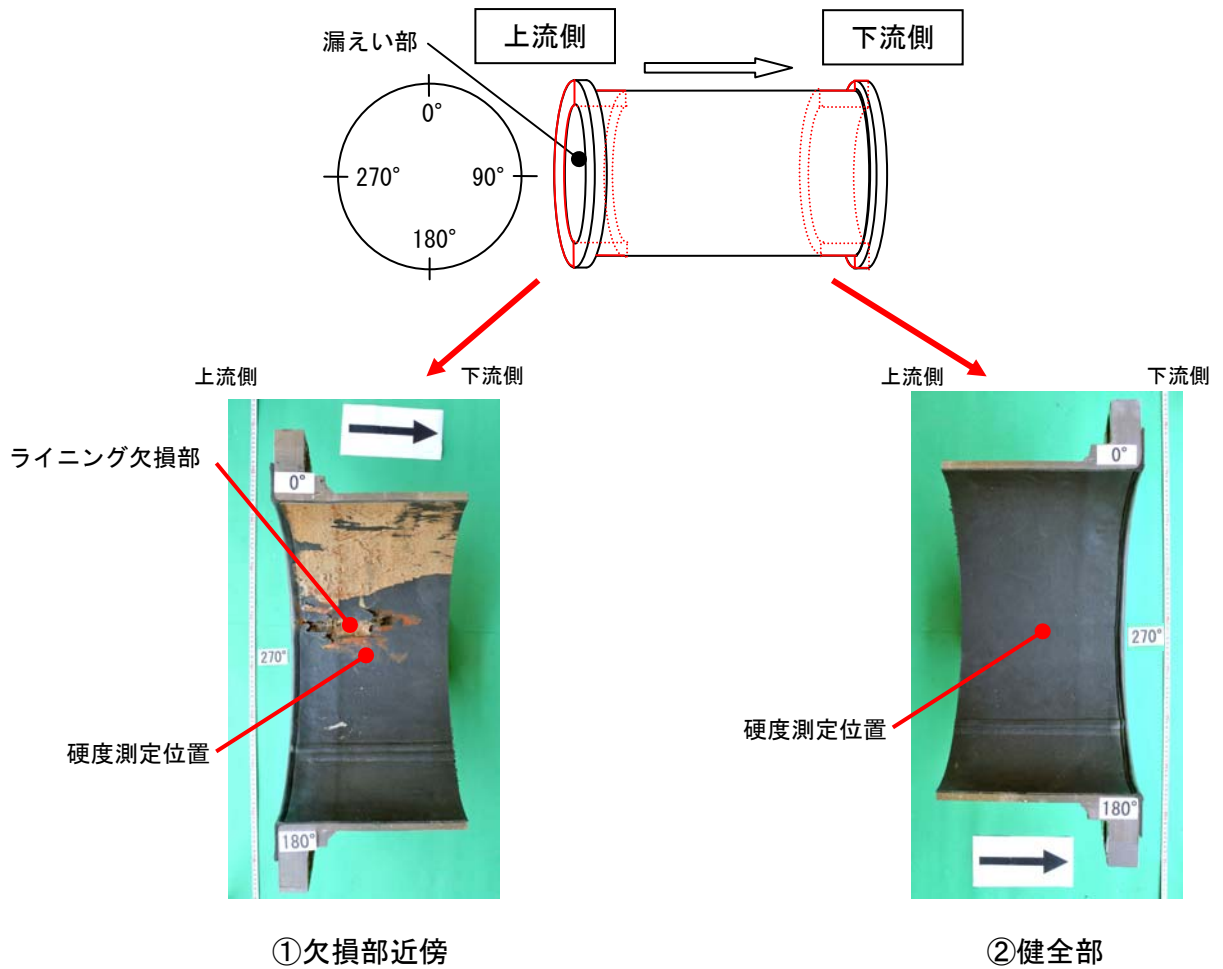
※2 補修箇所（一部補修剥がれ有）の上から測定

※3 ライニング工場製作時の膜厚基準値 $3.0^{+0.9}_0$ mm

※4 JIS K 5600-1-7「塗料一般試験方法—第1部：通則—第7節：膜厚」に準拠

・ライニングの膜厚測定を行った結果、膜厚は工場製作時の基準値と比較して、膜厚の著しい減少は認められなかった。

ライニングの機械的特性調査結果 (硬度測定)



ライニング硬度測定結果※1

(単位:HDD)※2

測定部位	測定値
①欠損部近傍	75
②健全部	78

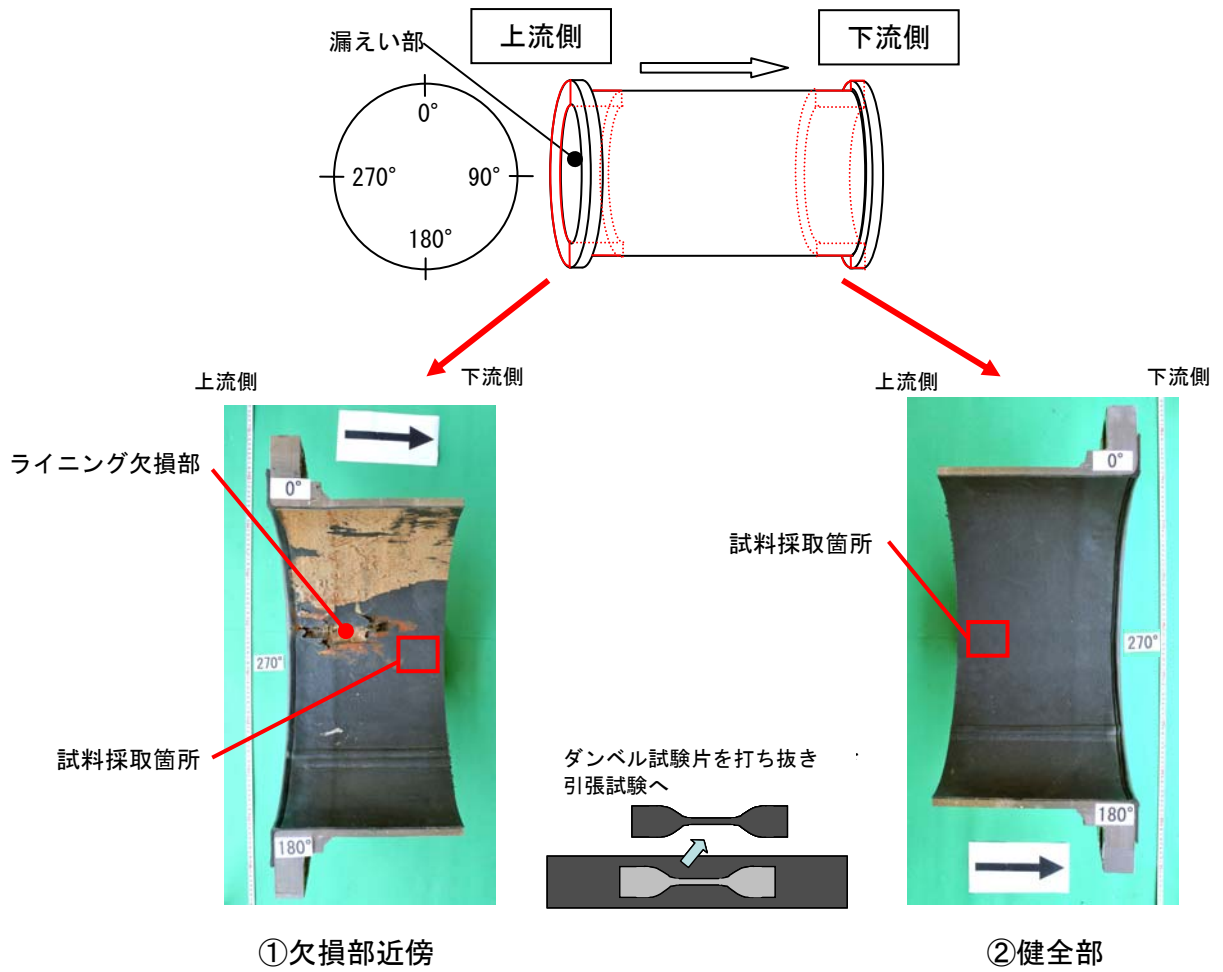
※1 JIS K 6253「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—硬さの求め方」に準拠

※2 デュロメータ硬さ

各種ゴム、エラストマー、プラスチック製品の硬度を表すパラメータ。決められた形Aの押針をスプリングの力で試料の表面に押しつけて変形を与え、試料の抵抗とスプリングの力がバランスした状態での押針の「試料への押込み深さ」をもとに硬度を測定する。

・ライニングの硬度を測定した結果、欠損部近傍・健全部ともに、ほぼ同等であり、欠損部近傍に特異な硬化は認められなかった。

ライニングの機械的特性調査結果 (引張試験)



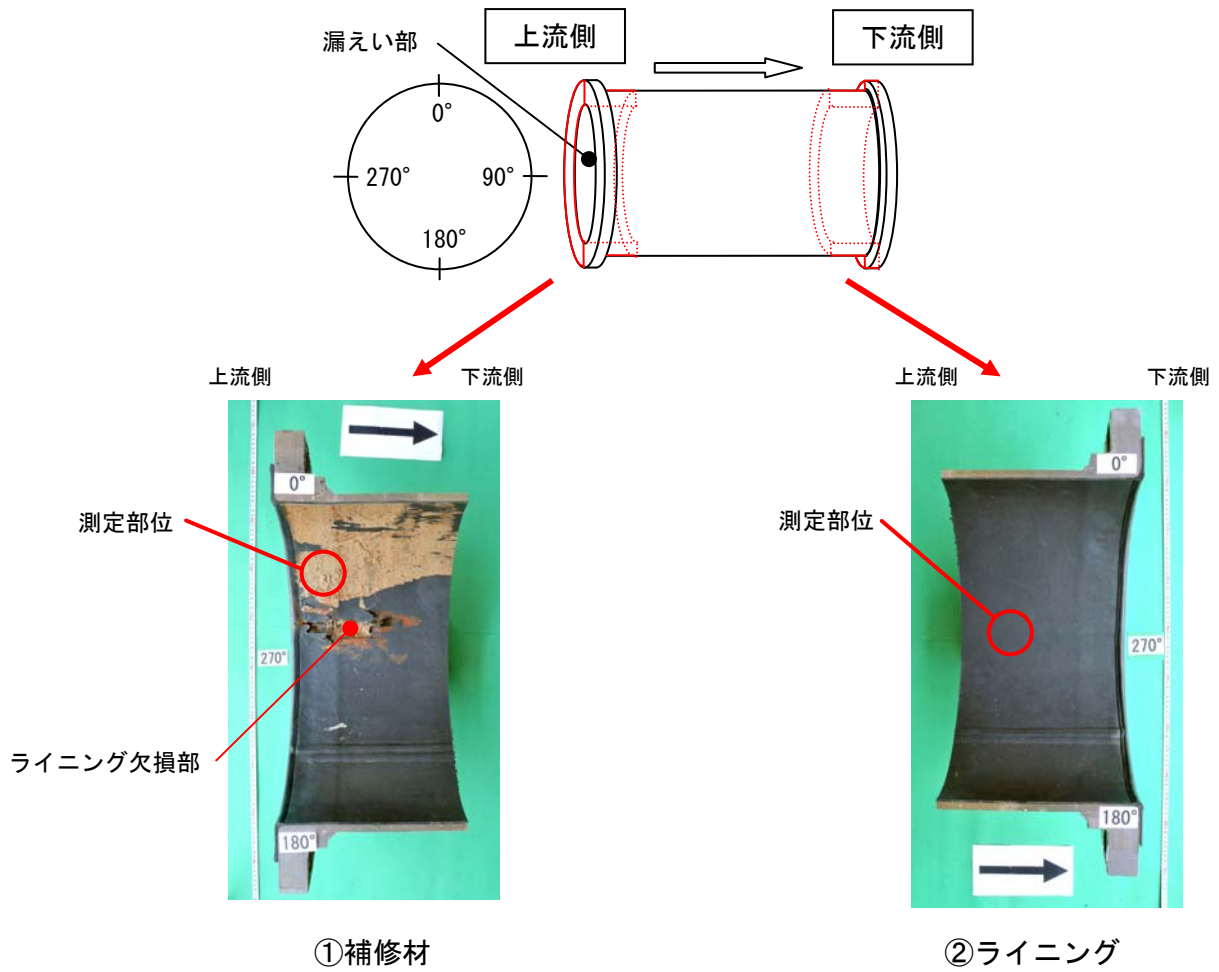
引張強さ・伸び計測結果※1

供試試料	引張強さ (MPa)		伸び (%)	
	測定値	平均値 (最小~最大)	測定値	平均値 (最小~最大)
①欠損部近傍	7.7	7.5 (7.2~7.8)	270	256 (240~270)
	7.4		250	
	7.8		260	
	7.6		260	
	7.2		240	
②健全部	7.1	7.2 (7.1~7.5)	250	252 (240~260)
	7.2		250	
	7.5		260	
	7.1		240	
	7.3		260	

※1 JIS K 6251「加硫ゴム及び熱可塑性ゴム—引張特性の求め方」に準拠

・ライニングの引張試験を実施した結果、欠損部近傍・健全部ともに、引張強さが約 7.5 MPa、伸びが 250%前後とほぼ同等であり、欠損部近傍に特異な引張特性の低下は認められなかった。

ライニングの赤外分光分析結果



赤外分光分析結果

測定部位	同定成分
①補修材	エポキシ系樹脂
②ライニング	クロロプレンゴム

・ライニングの赤外分光分析を実施した結果、ライニングはクロロプレンゴムと同定された。また、上流側フランジ近傍の補修材はエポキシ系樹脂と同定された。

製造履歴調査結果

○炭素鋼管（20B）

・材料調査

項目		化学成分(%)			降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)
		C	P	S			
規格値 STPY41 (JIS G3457)	最小	—	—	—	23	41	18
	最大	—	0.05	0.05	—	—	—
材料証明書記載値		0.18	0.026	0.021	35	49	37

・寸法調査（材料証明書の確認結果）

項目	外径(mm)	厚さ(mm)
設計寸法（公称値）	508.0	12.7
材料証明書の確認結果	問題なし	

○ゴムライニング

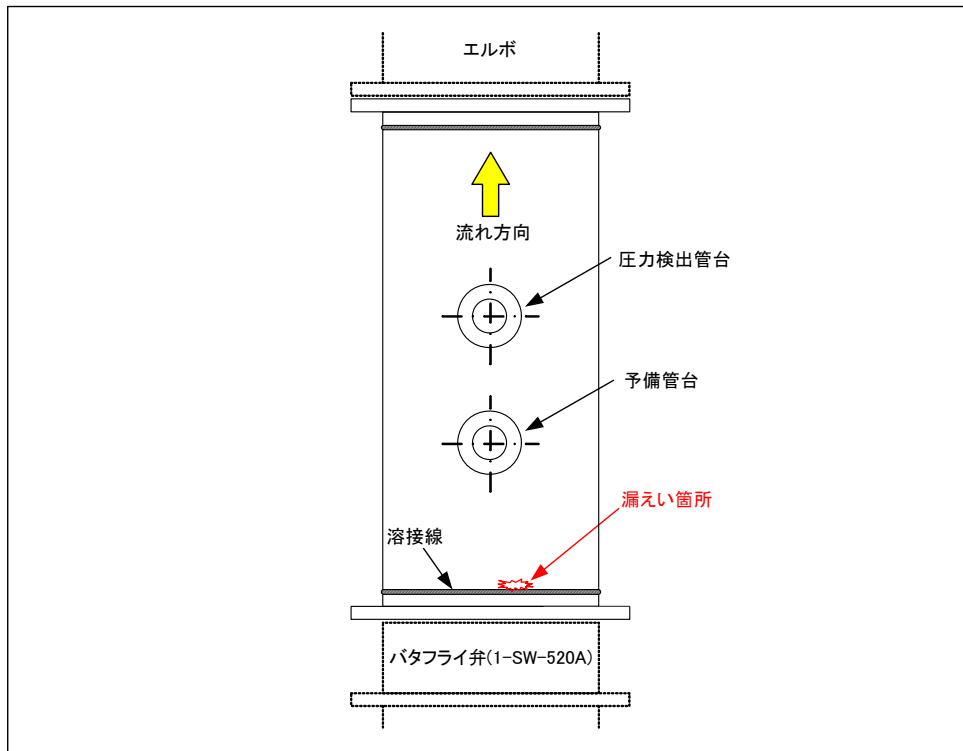
・寸法調査他

項目	膜厚(mm)		硬度検査
	管内面	フランジ面	
基準値	3.0+0.9 -0	5.0+0.9 -0	Hs65±5
検査成績書記載値	3.4 ~ 3.5	5.6 ~ 5.8	60~64

・検査成績書の確認結果

項目	検査成績書の確認結果
ピンホール検査	問題なし
下地処理検査	問題なし
外観検査	問題なし
梱包検査	問題なし
材質検査	問題なし

保守履歴調査結果



当該配管およびバタフライ弁の点検実績

定検回	実施時期	当該配管	バタフライ弁
第 1 回	昭和 5 3 年	内面点検 (ライニング補修)	分解点検 (弁体取替)
第 2 回	昭和 5 4 年	内面点検	分解点検 (弁体取替)
第 3 回	昭和 5 5 年	内面点検	分解点検 (弁体取替)
第 6 回	昭和 5 9 年	内面点検	分解点検
第 9 回	昭和 6 3 年	内面点検	分解点検
第 1 2 回	平成 3 年	内面点検	分解点検 (弁箱ライニング補修)
第 1 5 回	平成 7 年	内面点検	分解点検 (弁一式取替)
第 1 8 回	平成 1 1 年	内面点検	分解点検
第 2 2 回	平成 1 6 年	内面点検	分解点検

キャビテーション発生評価結果

1. 評価要領

バタフライ弁（1-SW-520A）のキャビテーション発生状況についての評価を行う。弁のキャビテーションの発生状況は、(1)式に示す弁の使用条件から決まるキャビテーション係数（ σ ）と、弁の形状から決まる限界キャビテーション係数（ σ_{CR} ）を比較することにより判断できる。

$$\sigma = \frac{P_d - P_v}{P_u - P_d} \dots (1) \text{式}^{[1]}$$

P_d : 弁出口圧力 (MPa) [abs]
 P_u : 弁入口圧力 (MPa) [abs]
 P_v : 弁入口温度に於ける飽和蒸気圧力 (MPa) [abs]

$\sigma \geq \sigma_{CR}$: キャビテーションの観点では特に問題とならない領域

$\sigma < \sigma_{CR}$: キャビテーション上厳しい環境と判断される領域

2. キャビテーション発生の評価

キャビテーション係数評価の結果によれば、現在運用している弁開度約18～20度（約20～22%）においては、キャビテーションが発生する可能性がある。

表 弁の使用条件とキャビテーションの発生

	通常運転	備考
流量 (m ³ /h)	1,200	設計流量とし一定とする
弁入口圧力 P_u (MPa) [abs]	0.42	弁出口圧力 P_d に流量、弁開度から求めた圧損を加えた値
弁入口温度 (°C)	20	20°Cと仮定する
弁入口温度における飽和蒸気圧力 P_v (MPa) [abs]	0.0023392	日本機械学会 蒸気表 1999
弁出口圧力 P_d (MPa) [abs]	0.1813	1PI-1330計測値 (H21.7.27) を使用 (0.08MPa[gage])

弁開度 (度)	キャビテーション係数 σ
18	0.94
20	1.19
25	3.29

(注) 流量、入口圧力、温度は一定に保持されるものとして算出。

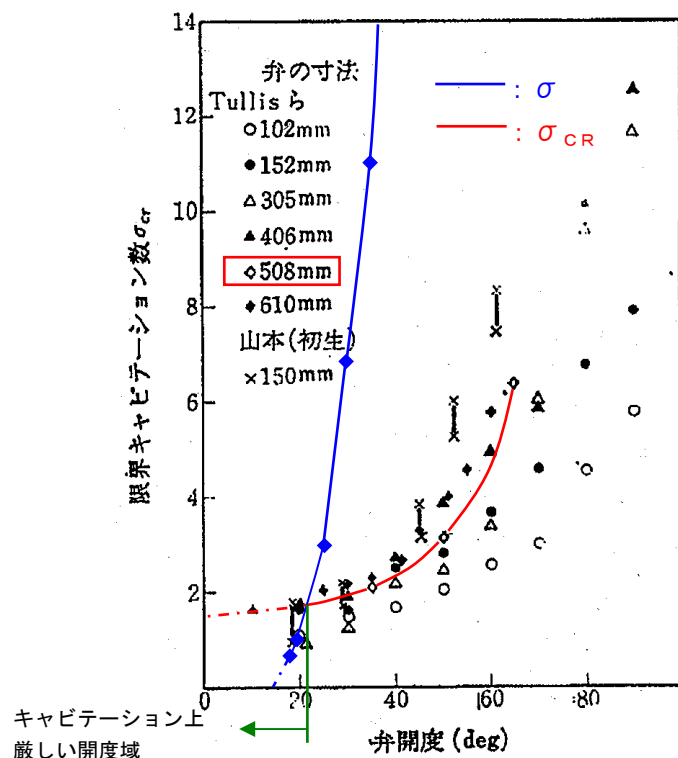
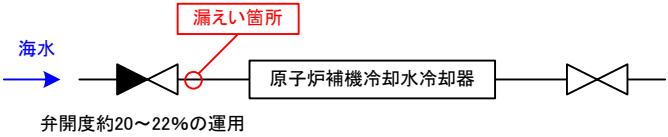
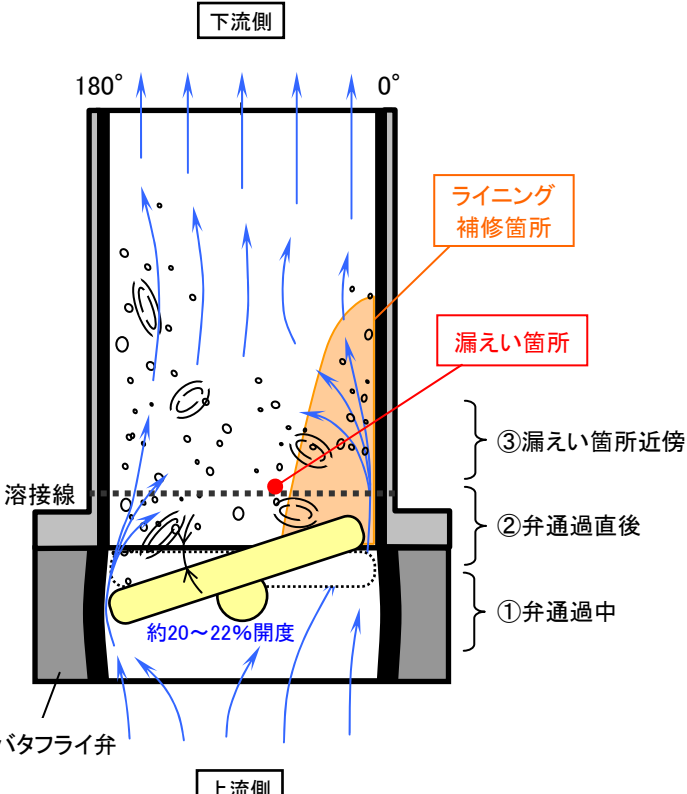
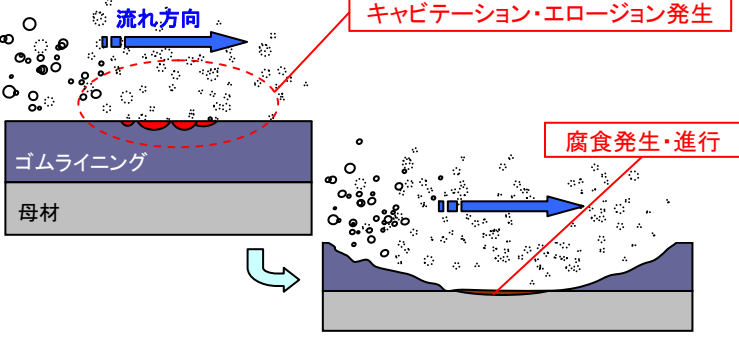
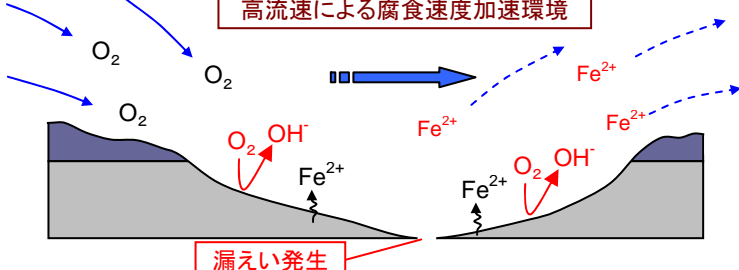


図1: キャビテーション係数 σ と限界キャビテーション係数 σ_{CR} の比較^[1]
 (出典) [1]キャビテーション (増補版), 槇書店, 加藤洋治

推定メカニズム

時系列	模式図	メカニズム説明
弁の運用		<p>冷却水供給流量調整のため当該バタフライ弁は弁開度約 20~22%にて運用をしていた。</p>
キャビテーション発生		<p>バタフライ弁下流で、キャビテーションが発生し、キャビテーション・エロージョンによりゴムライニングが減肉する。</p> <p>① 弁通過中： 流路が部分的に狭められ、流速の増加により静圧が低下する。</p> <p>② 弁通過直後： 静圧が飽和蒸気圧以下となり気泡が発生する。</p> <p>③ 漏えい箇所近傍： 流路拡大による流速の低下に従って流体の静圧が回復（上昇）し、気泡が消滅する。このときに発生する衝撃力によりライニングが減肉する。 (キャビテーション・エロージョン)</p>
ゴムライニング減肉／剥離により腐食が進行		<p>ゴムライニングに局所的な減肉および剥離が生じ、炭素鋼管が海水に暴露されたことにより腐食が進行。</p>
腐食による漏えい		<p>腐食の進行により炭素鋼管の貫通に至った。なお、当該部はバタフライ弁下流に位置し、局所流速が速い箇所であるため腐食速度が加速される環境である。</p>

〔第3編〕

原子炉補機冷却海水設備配管等の
保守管理について

3-1. 原子炉補機冷却海水設備配管等の保守管理の考え方

海水系配管は、非常に厳しい腐食環境となるため、炭素鋼管の内面にライニングを施工し、炭素鋼管と海水の接触を抑制することで、炭素鋼管の腐食・減肉を防止しており、ライニングが健全であれば炭素鋼管の健全性は確保される。

このため、保守管理にあたっては、定期的にライニングの健全性を確認するとともに、必要に応じてライニングの補修を行うことにより、炭素鋼管の健全性を担保している。

なお、ライニング材として、伊方1号機では、

- ・ 22B以上の大口徑配管については、タールエポキシ樹脂塗装を採用している。また、近年より耐久性に優れた厚膜形エポキシ樹脂塗装が開発され、26B以上の管については、再施工を完了している。
- ・ 22B未満の中口径配管および小口径配管については、ポリエチレンライニング管を採用している。
- ・ なお、上記のうち、流動条件が厳しい範囲にある配管については、耐エロージョン性に優れたゴムライニングを適用している。

(添付資料3-1)

3-2. これまでの保守管理について

(1) 点検方法

配管口径に応じ、以下の方法で点検を実施している。

a. 小口径配管、中口径配管（24B未満 配管内への作業員立入り不可）

配管フランジを開放し、配管内を覗き込み、ライニング面に割れ、傷および変形等の異常がないことを確認している。

点検範囲は、フランジ開放部から可視範囲としており、ライニング全面の確認は行っていない。

b. 大口徑配管（24B以上 配管内への作業員立入り可）

マンホール、またはフランジ開放部から作業員が配管内に立入り、目視によりライニング面について、割れ、傷および変形等の異常がないことを確認している。

点検範囲は、作業安全上、接近できない箇所を除き、ライニング全面としている。

(2) 点検頻度

ライニング材の種別に応じ、以下の頻度で点検を実施している。

a. ポリエチレンライニング管、ゴムライニング管

非常用ディーゼル発電機室内の機器周り配管を除く全配管について、接続するフランジ、弁の点検にあわせ、12定検に1回以上の頻度でライニング面の状況を確認している。

非常用ディーゼル発電機室内の機器周り配管については、代表箇所として、非常用ディーゼル機関に付属する機器の点検に伴い取外す配管を選定し、2～4定検に1回の頻度でライニング面の状況を確認している。

b. 厚膜形エポキシ樹脂塗装管

2定検に1回の頻度でライニング全面の状況を確認している。

c. タールエポキシ樹脂塗装管

フランジ構造であり、容易に点検が実施できるタービン建家内設置範囲を代表箇所として、毎定検ライニング面の状況を確認している。

なお、その他の範囲については、12定検に1回の頻度でライニング面の状況を確認している。

(3) 点検実績

以上の点検方法および頻度により実施してきた点検の結果は以下のとおりであった。

a. ポリエチレンライニング管

保守点検作業によるものと思われるフランジ面のすり傷等の発生に伴う補修実績はあるが、ライニングの剥離や割れ等の有意な損傷は認められていなかったことから、12定検に1回以上の頻度で点検を実施していた。

b. ゴムライニング管

保守点検作業によるものと思われるフランジ面のすり傷の他、軽微な変形等が認められることがあるが、都度補修を実施することで対応可能な程度であったことから、12定検に1回以上の頻度で点検を実施していた。

c. 厚膜形エポキシ樹脂塗装管

変更前のタールエポキシ樹脂塗装と比較すると、塗膜の膨れや割れ等の発生頻度は極めて少なく、都度補修を実施することで対応可能な程度であったことから、2定検に1回の頻度で点検を実施していた。

d. タールエポキシ樹脂塗装管

点検の都度、塗膜の膨れ、剥離等の補修塗装を実施していたため、大口径配管は、厚膜形エポキシ樹脂塗装に変更済である。施工性から、厚膜形エポキシ樹脂塗装への変更ができない配管については、これまで代表箇所の点検を毎定検実施しているが、フジツボ等の海生物による損傷を受けやすいことから、ポリエチレンライニング管への取替えを計画的に進めている。

なお、ライニング点検においては、点検の結果、何も異常がない場合、配管毎の点検記録は作成しておらず、有意な異常が認められた場合のみ特記事項として工事記録にその内容を記録することとしていた。

3-3. 今回の原子炉補機冷却海水設備配管等の点検結果

今回の事象を踏まえ、原子炉補機冷却海水設備配管および2次系設備の軸受冷却水冷却器冷却用海水配管全数についてライニングの目視点検を実施した。

このうち、これまでフランジ開放部から可視範囲について点検を実施してきた小口径、中口径配管については、目視、ファイバースコープ、CCDカメラ、遠隔操作管内点検ロボットによるライニング面全面の点検を実施した。

点検の結果は、以下のとおりであった。

(添付資料3-2)

(1) ポリエチレンライニング管

原子炉補機冷却水冷却器冷却用海水戻り配管（安全上重要な機器に該当しない）のうち、6箇所（箇所のライニング面にき裂が認められた。

6箇所のうち、き裂部周辺に比較的大きな腐食生成物の付着が認められた1箇所（原子炉補機冷却水冷却器1B冷却用海水戻り配管の逃がし弁2次側配管であり工事計画対象外配管）については、炭素鋼管の腐食が認められ、呼び厚さ3.9mmに対し、残存厚さが1.9mmであったが、これ以外の5箇所については、炭素鋼管の腐食は軽微であった。

また、き裂部の状況を確認し、考察した結果、これらのき裂は、以下の要因の何れかが重畳し発生、進展したものと推定された。

- ・ 製造時よりライニングに生じている引張残留応力
- ・ 製造時よりライニング中に存在している気泡による応力集中
- ・ 水蒸気の浸透によるライニングの剥離
- ・ 点検時の重量物取扱い作業等において生じたと考えられる大きな外力

なお、これらのライニング面にき裂が認められた配管については、再ライニング、エポキシ樹脂塗料によるライニング補修または新品の配管への取替を行った。

(2) ゴムライニング管、厚膜形エポキシ樹脂塗装管およびタールエポキシ樹脂塗装管

厚膜形エポキシ樹脂塗装管のうち、海水供給母管（安全上重要な機器に該当する）、2箇所（箇所に塗膜の割れ、膨れ、炭素鋼管の腐食が認められたため、技術基準に定める必要最小厚さが確保されていることを確認し、肉盛り補修のうえ、補修塗装を行った。

原因は、塗装前の下地処理が十分でなかったために生じた炭素鋼管と塗膜との剥離によるものと推定された。

なお、従来から点検時に認められている程度のライニング面の軽微な変形、すり傷および膨れ等が一部の配管に認められた。

これらについてはライニング補修または補修塗装等を行った。

(3) 保守管理の評価

ポリエチレンライニング管で認められたき裂に着目し、現状の点検方法につ

いて評価した結果は、以下のとおりである。

- ・ き裂部近傍の腐食生成物の付着量がわずかで、き裂寸法が10mm～20mm程度の小さなものについては、フランジ開放部から可視範囲での目視点検によるこれまでの点検方法では、今回認められたものと同様の腐食の起因となるようなき裂を検知することは難しいものと考えられる。
- ・ き裂部周辺に比較的大きな腐食生成物の付着が認められた原子炉補機冷却水冷却器1B冷却用海水戻り配管の逃がし弁2次側配管については、口径が2Bであり内面の視認性が悪いこと、また、海水の流動がない部位であり海生物が付着しており、腐食生成物との識別が難しいことから、これまでの点検方法で検知することは難しいと考えられる。

また、これらは、今回の点検において有意な異常が認められなかったゴムライニング管についても同様の問題点であると考えられる。

なお、大口徑配管(厚膜形エポキシ樹脂塗装管およびタールエポキシ樹脂塗装管)については、今回の点検で、従来と同程度の軽微な変形、すり傷および膨れ等しか認められていないことから、これまでの保守管理を継続することにより、ライニングの健全性を維持することができると考えられる。

(4) 今後の保守管理への反映事項

今回の一連の事象に対する調査、検討結果を踏まえ、今後、原子炉補機冷却海水設備配管等の保守管理については、以下のとおりとする。

a. 点検方法

今回の調査の結果から、ファイバースコープ、CCDカメラ、遠隔操作管内点検ロボットを活用した点検を実施することにより、これまで検知できなかったライニングの損傷および損傷の兆候を検知できることが確認できたことから、今後、ライニング全面について同様の方法による点検を定期的の実施する。

b. 点検頻度

今回、ポリエチレンライニング管の全数についてライニング全面点検を行い、現状において異常のないことが確認できているが、さらに、点検頻度を増やし、知見の拡充を図ることとし、

- ・ 今後、6定検でライニング管全数の全面点検を計画する。
- ・ 点検の実施にあたっては、各定検に分割し計画的に進めていく。
- ・ この知見を踏まえ、点検頻度をさらに見直していく。

また、キャビテーションが発生する可能性がある範囲に設置されている配管を抽出するとともに、これらについては、12定検に1回以上から、2定検に1回に変更する。

c. その他

以上のことを確実に実施し、その結果を今後の保守管理に適切に反映するため、ライニング点検の結果について、点検対象、点検の着眼点、結果を明確化した点検記録を作成するよう作業要領書に反映する。

3-4. 対 策

(1) 漏えいの認められた

- ・非常用ディーゼル発電機 1 B 冷却用海水供給配管
 - ・原子炉補機冷却水冷却器 1 A 冷却用海水供給配管
- を新品の配管に取り替えた。

(2) 原子炉補機冷却海水設備配管等の全数について、ライニングの点検を行ない、健全性を確認した。

点検の結果、ライニングにき裂が認められた 6 箇所のパリエチレンライニング管および 2 箇所の厚膜形エポキシ樹脂塗装管については、再ライニング、ライニング補修または新品の配管への取替えを行った。

(3) ライニングの損傷および損傷の兆候を早期に発見し、適切な処置を行なえるよう、配管内へ立入っての内面点検が実施できない小口径および中口径配管の点検方法および点検周期を以下のとおり変更し、次回定期検査より計画的に点検を実施する。

a. 点検頻度

点検頻度を増やし、知見の拡充を図ることとし、当面、これまでの 1 2 定検に 1 回以上から、6 定検に 1 回以上に変更する。

また、キャビテーションが発生する可能性がある範囲に設置されている配管を抽出するとともに、これらについては、1 2 定検に 1 回以上から、2 定検に 1 回に変更する。

(添付資料 3-3)

b. 点検方法

従来から実施しているフランジ開放部からの目視点検に加え、直接目視できない範囲については、ファイバースコープ、CCDカメラ、遠隔操作管内点検ロボットによる内面点検を実施する。

また、従来、代表箇所点検によりライニングの状況確認を実施している非常用ディーゼル発電機室内の機器周り配管についても、上記と同様にライニング全面点検を実施する。

(4) 保守点検作業時に、ライニング表面に衝撃荷重を与えない観点から、作業要領書に以下の注意事項を反映する。また、作業着手前の要領書読み合わせ等に

において、関係者全員に周知徹底を図る。

- ・ 除貝作業等で止むを得ず工具を使用する場合の工具とその使用方法に関すること
- ・ 万一、ライニング表面に衝撃荷重を与えた場合の適切な処置に関すること
- ・ 作業終了後のライニング表面の健全性確認に関すること

(5) 点検結果を今後の保守管理に適切に反映するため、ライニング点検の結果について、点検対象、点検の着眼点、結果を明確化した点検記録を作成するよう作業要領書に反映する。

以 上

【添 付 資 料】

- 3－1．ライニング種別と適用範囲
- 3－2．原子炉補機冷却海水設備配管等の点検結果
- 3－3．原子炉補機冷却海水設備配管等の点検頻度

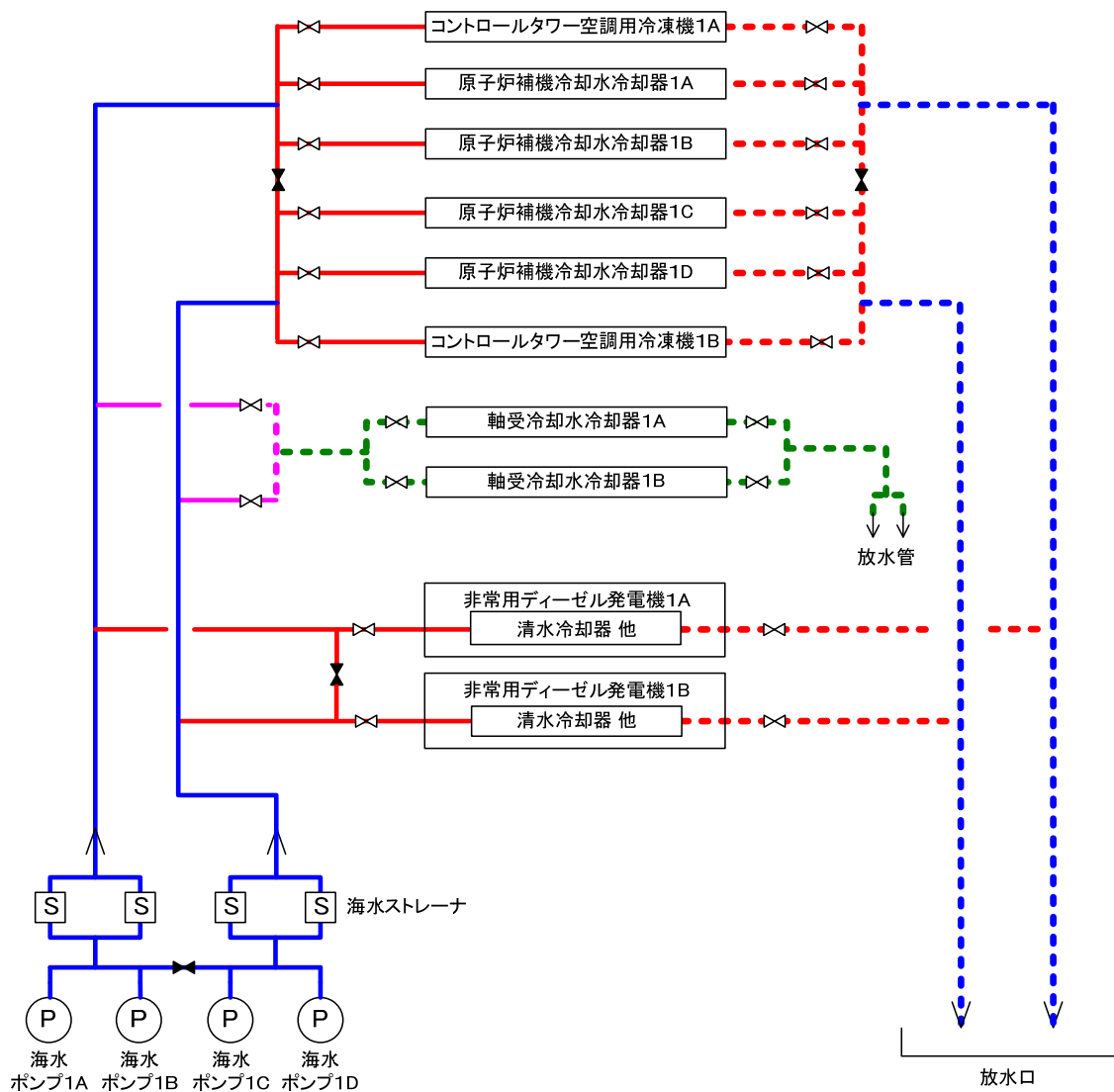
ライニング種別と適用範囲

ライニング	※1 凡例	適用範囲の考え方(1号機)	特 徴
厚膜形エポキシ樹脂塗装		※2 ・26B 以上の大口径配管	・H11 年以降にタールエポキシ樹脂塗装の代替として使用 ・タールエポキシ樹脂塗装より耐久性に優れる
タールエポキシ樹脂塗装		※2 ・22B 以上の大口径配管	・現地施工が可能 ・フジツボ等の海生物による損傷を受けやすい
ポリエチレン		※2 ・22B 未満の小、中口径配管	・耐久性および海水遮断機能に最も優れる ・工場施工となるため、配管はフランジ接合となる
ゴム		・流動条件が厳しい範囲にある配管	・耐エロージョン性に優れる ・工場施工となるため、配管はフランジ接合となる

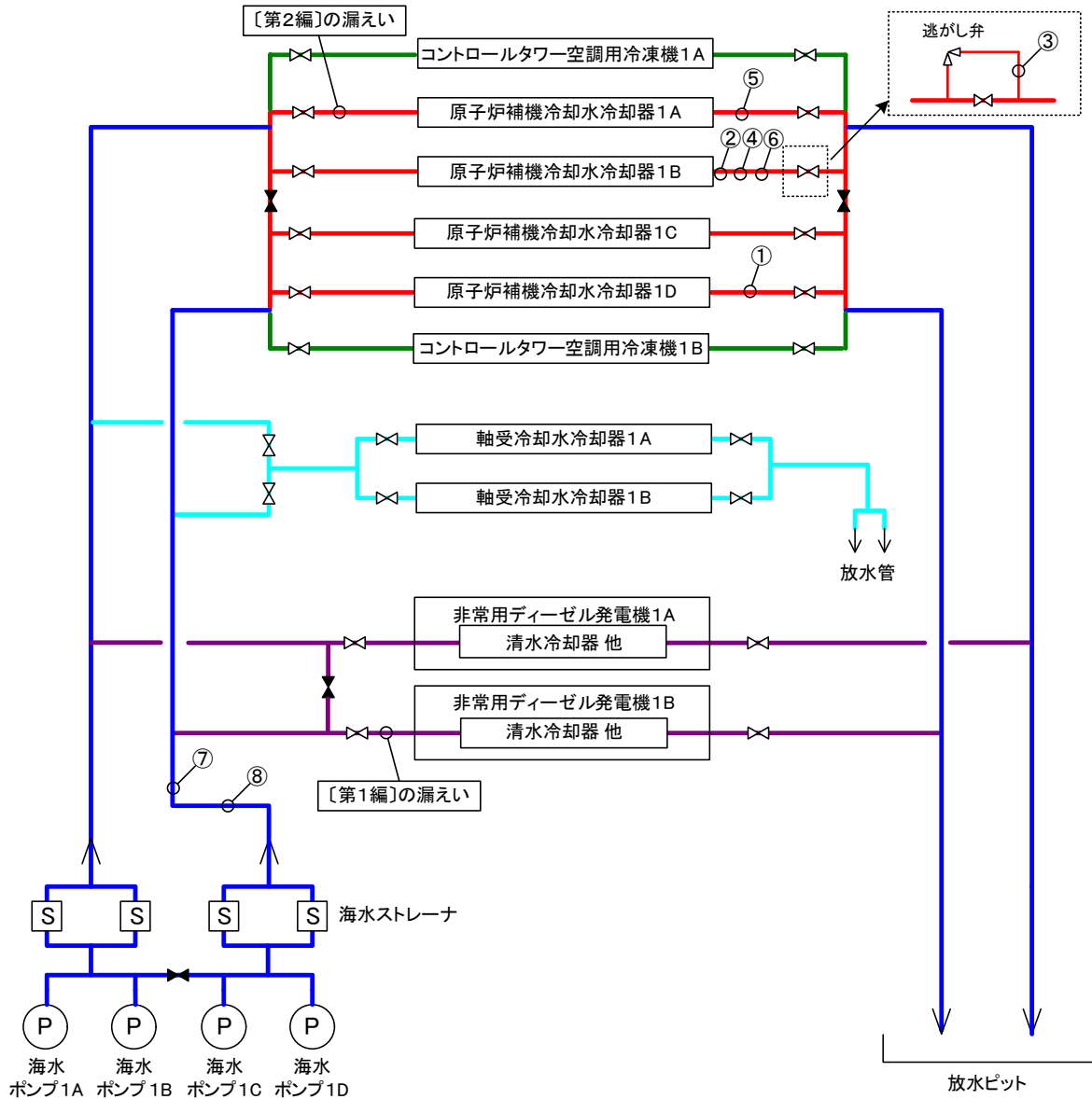
※1 : 安全上重要な機器に該当する配管

: 安全上重要な機器に該当しない配管

※2 : 流動条件が厳しい範囲についてはゴムライニングを適用



原子炉補機冷却海水設備配管等の点検結果



海水管名称	凡例	ライニング	点検結果(※)
・供給母管 (海水ポンプ～各機器への供給配管) ・戻り母管 (各機器～放水口)	—	厚膜形エポキシ樹脂塗装	塗膜の割れ等あり (⑦、⑧)
		ゴム	異常なし
・原子炉補機冷却水冷却器 1 A～1 D 冷却用海水供給配管・戻り配管	—	ポリエチレン	き裂等あり (①～⑥)
		ゴム	異常なし
・コントロールタワー空調用冷凍機 1 A、1 B 冷却用海水供給配管・戻り配管	—	ポリエチレン	異常なし
		ゴム	異常なし
・非常用ディーゼル発電機 1 A、1 B 冷却用海水供給配管・戻り配管	—	ポリエチレン	異常なし
		ゴム	異常なし
・軸受冷却水冷却器 1 A、1 B 冷却用海水供給配管・戻り配管	—	タールエポキシ樹脂塗装	異常なし
		ゴム	異常なし

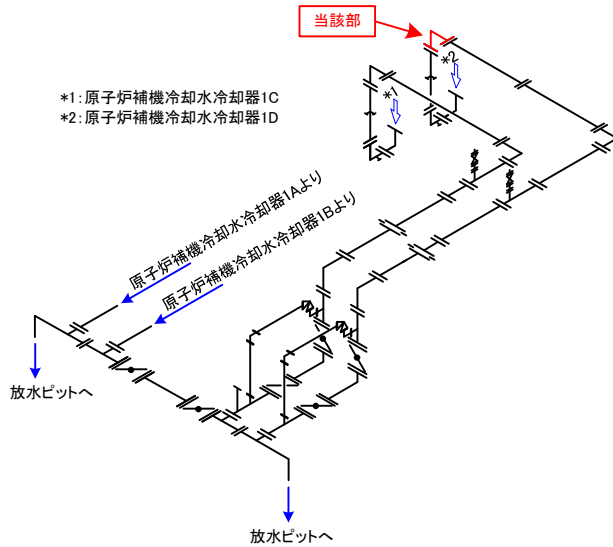
※：従来からの点検時に認められている程度の状態であったものを除く

原子炉補機冷却海水設備配管等の点検結果

事象	系 統	安全上重要な機器	配管形状	配管外径	ライニング種別	状 況	処 置	添付資料番号
①	原子炉補機冷却水冷却器1D 冷却用海水戻り配管	該当しない	エルボ	508.0mm	ポリエチレン	・ライニング面にき裂が認められた ・炭素鋼管には著しい腐食および減肉は認められなかった ・全面腐食	再ライニングを実施	添付資料 3-2(3/10)
②	原子炉補機冷却水冷却器1B 冷却用海水戻り配管	該当しない	エルボ	508.0mm	ポリエチレン	・ライニング面にき裂が認められた ・炭素鋼管には著しい腐食および減肉は認められなかった ・全面腐食	再ライニングを実施	添付資料 3-2(4/10)
③	原子炉補機冷却水冷却器1B 冷却用海水戻り配管 (逃がし弁2次側配管)	該当しない	直管	60.3mm	ポリエチレン	・ライニング面に比較的大きな腐食生成物(錆こぶ)が認められた ・炭素鋼管に孔食が見られた	新管取替を実施	添付資料 3-2(5/10)
④	原子炉補機冷却水冷却器1B 冷却用海水戻り配管	該当しない	直管	508.0mm	ポリエチレン	・ライニング面にき裂が認められた ・炭素鋼管には著しい腐食および減肉は認められなかった ・全面腐食	再ライニングを実施	添付資料 3-2(6/10)
⑤	原子炉補機冷却水冷却器1A 冷却用海水戻り配管	該当しない	エルボ (45度)	508.0mm	ポリエチレン	・ライニング面にき裂が認められた ・現地補修を実施したため、詳細な観察はできなかった	エポキシ樹脂塗料によるライニング補修を実施	添付資料 3-2(7/10)
⑥	原子炉補機冷却水冷却器1B 冷却用海水戻り配管	該当しない	エルボ	508.0mm	ポリエチレン	・ライニング面にき裂が認められた ・現地補修を実施したため、詳細な観察はできなかった	エポキシ樹脂塗料によるライニング補修を実施	添付資料 3-2(8/10)
⑦	供給母管B系統(海水ポンプ～各機器への供給配管)	該当する	直管	762.0mm	厚膜形エポキシ樹脂塗装	・塗膜に割れ、膨れが認められた ・炭素鋼管には著しい減肉は認められなかった ・全面腐食	肉盛り補修のうえ補修塗装を実施	添付資料 3-2(9/10)
⑧	供給母管B系統(海水ポンプ～各機器への供給配管)	該当する	直管	762.0mm	厚膜形エポキシ樹脂塗装	・塗膜に膨れが認められた ・炭素鋼管には著しい減肉は認められなかった ・全面腐食	肉盛り補修のうえ補修塗装を実施	添付資料 3-2(10/10)

事象① (原子炉補機冷却水冷却器 1D 冷却用海水戻り配管)

・ 概略系統および配管仕様



○ 外 径	: 508.0mm
○ 呼 び 厚 さ	: 12.7mm
○ 必要最小厚さ	: 3.8mm
○ 材 質	: 炭素鋼 (SS41)
○ 配 管 内 面	: ポリエチレンライニング
○ 最高使用温度	: 40℃
○ 最高使用圧力	: 0.65MPa
○ 前回点検時期	: 第15回定期検査

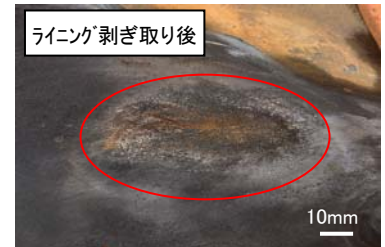
・ 当該配管およびき裂部の写真



・き裂部は上流側フランジから約 450mm の横腹



・錆こぶなし
 ・き裂は周方向に約 50mm
 ・き裂部に外力が加わった跡なし



・ライニングは広範囲に剥離
 ・炭素鋼管内面に全面腐食(ほとんど減肉なし)
 ・炭素鋼管内面に割れ等の異常はなし

所見

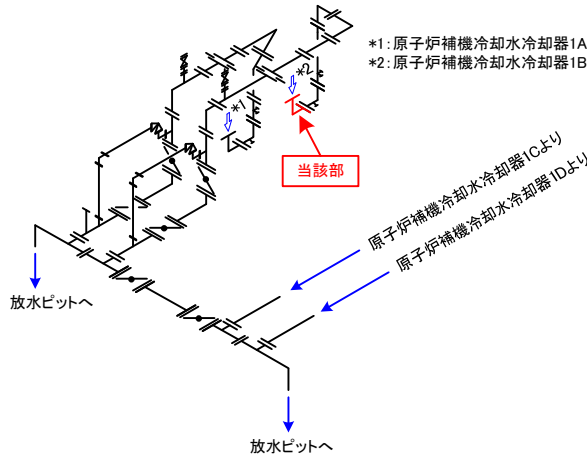
- ・ 広範囲にライニングの剥離が認められた。
- ・ ライニングのき裂は内在していた気泡を起点に進展していた。
- ・ ライニングき裂部に外力が加わったような跡は認められなかった。
- ・ 炭素鋼管内面には広範囲に全面腐食が認められたが、減肉はほとんど認められなかった。

考察

- ・ 水蒸気透過等の影響により接着力が徐々に低下することと、製作時から発生している引張残留応力によりライニングが剥離した。
- ・ 残留応力や内圧等による応力が気泡に力集中するため、剥離したライニング内部にき裂が発生し、そのき裂の進展により、最終的に貫通き裂となり、海水が浸入した。
- ・ ライニング下部は海水の入れ替わりが殆どない止水状態であるため、海水浸入初期に炭素鋼表面が全面に渡り僅かに腐食して、浸入海水中の溶存酸素が消費された後は腐食は進行しなかったと推定される。

事象② (原子炉補機冷却水冷却器 1 B 冷却用海水戻り配管)

概略系統および配管仕様



- 外 径 : 508.0mm
- 呼び厚さ : 12.7mm
- 必要最小厚さ : 3.8mm
- 材 質 : 炭素鋼 (SS41)
- 配管内面 : ポリエチレンライニング
- 最高使用温度 : 40℃
- 最高使用圧力 : 0.65MPa
- 前回点検時期 : 第26回定期検査

当該配管およびき裂部の写真



・き裂部は下流側フランジから約 435mm の横腹



・錆こぶなし
 ・き裂は軸方向に約 10mm
 ・き裂部に外力が加わった跡なし



・ライニングは局部的に剥離
 ・炭素鋼管内面に全面腐食(ほとんど減肉なし)
 ・炭素鋼管内面に割れ等の異常はなし

所見

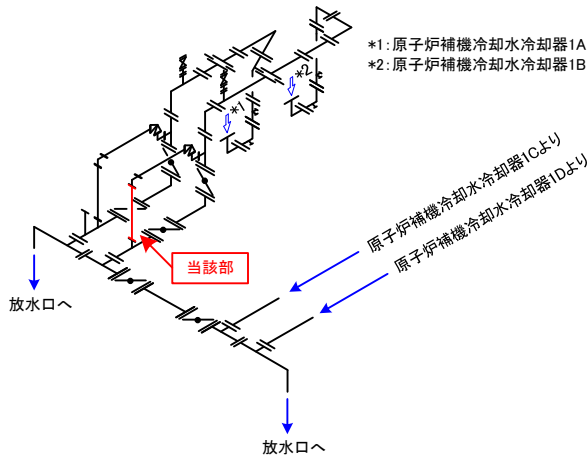
- ・ ライニングき裂部直下に局所的な剥離が認められた。
- ・ ライニングのき裂は内在していた気泡を起点に進展していた。
- ・ ライニングき裂部に外力が加わったような跡は認められなかった。
- ・ 炭素鋼管内面には僅かな全面腐食が認められたが、減肉はほとんど認められなかった。

考察

- ・ 水蒸気透過等の影響により接着力が徐々に低下することと、製作時から発生している引張残留応力によりライニングが局部的に剥離した。
- ・ 主に残留応力が気泡に応力集中するため、剥離したライニング内部にき裂が発生し、そのき裂の進展により、最終的に貫通き裂となり、海水が浸入した。
- ・ ライニング下部は海水の入れ替わりが殆どない止水状態であるため、海水の浸入初期に炭素鋼管表面が全面に渡り僅かに腐食して、浸入海水中の溶存酸素が消費された後は腐食は進行しなかったと推定される。

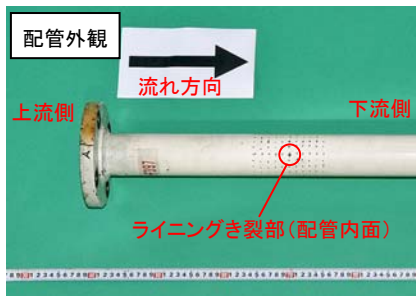
事象③ (原子炉補機冷却水冷却器 1B 冷却用海水戻り配管 (逃がし弁 2 次側配管))

- 概略系統および配管仕様

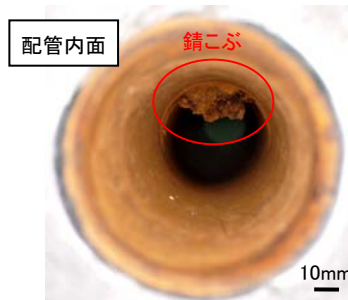


- 外 径 : 60.3mm
- 呼 び 厚 さ : 3.9mm
- 材 質 : 炭素鋼 (STPT38)
- 配 管 内 面 : ポリエチレンライニング
- 最高使用温度 : 40℃
- 最高使用圧力 : 0.65MPa
- 前回点検時期 : 第 26 回定期検査

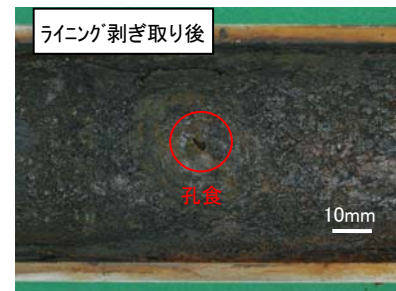
- 当該配管およびき裂部の写真



・き裂部は上流側フランジから約 300mm



- ・錆こぶあり
- ・錆こぶ直下に約 25mm のき裂あり



- ・ライニングは広範囲に剥離
- ・炭素鋼管内面に全面腐食および孔食
- ・炭素鋼管内面に割れ等の異常はなし

所見

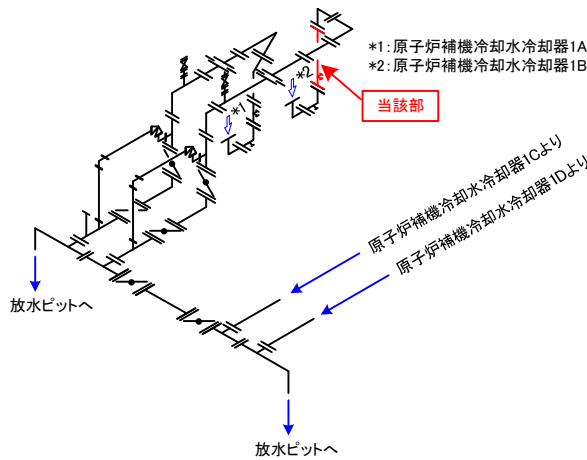
- ・ライニングはほぼ全域剥離しており、錆こぶが 2 箇所認められた。錆こぶ直下のライニングには 2 箇所ともき裂が認められた。
- ・ライニングのき裂は内在していた気泡を起点に進展していた。
- ・滞溜部になるため、配管内面にフジツボの付着が認められた。また、錆こぶが強固に付着していたため、ライニングき裂部に外力が加わったような跡の確認はできなかった。
- ・錆こぶ直下の炭素鋼管内面に孔食が認められたが、その他の範囲については全面腐食であった。

考察

- ・水蒸気透過等の影響により接着力が徐々に低下することと、製作時から発生している引張残留応力によりライニングが剥離した。
- ・残留応力と内圧等による応力が気泡に応力集中するため、剥離したライニング内部にき裂が発生し、そのき裂の進展により、最終的に貫通き裂となり、海水が浸入した。
- ・き裂部周辺のライニングが完全に剥離したため、き裂から剥離した領域に海水が浸入し全面腐食が発生した。同時にき裂部直下では、海水の入れ替わりが可能な状況であったため、き裂部直下の炭素鋼管では僅かな局部腐食が起こったと推定される。

事象④ (原子炉補機冷却水冷却器 1 B 冷却用海水戻り配管)

・ 概略系統および配管仕様



○ 外 径	: 508.0mm
○ 呼 び 厚 さ	: 12.7mm
○ 必要最小厚さ	: 3.8mm
○ 材 質	: 炭素鋼 (STPY41)
○ 配 管 内 面	: ポリエチレンライニング
○ 最高使用温度	: 40℃
○ 最高使用圧力	: 0.65MPa
○ 前回点検時期	: 第26回定期検査

・ 当該配管およびき裂部の写真



・き裂部は上流側フランジから約 20mm



・錆こぶなし
 ・右側のき裂は軸方向に約 25mm
 ・左側のき裂は軸方向に約 20mm
 ・き裂部周辺に比較的大きな外力が加わった跡あり

ライニングを強制的に剥離した後に発生した錆



・ライニングは局部的に剥離
 ・炭素鋼管内面に全面腐食(ほとんど減肉なし)
 ・炭素鋼管内面に割れ等の異常はなし

所見

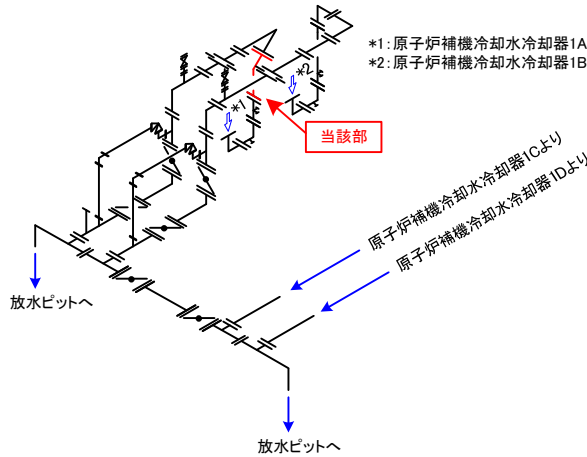
- ・ ライニングき裂部直下に局所的な剥離が認められた。
- ・ ライニングき裂の起点部近傍に、気泡は認められなかった。
- ・ ライニングき裂部周辺に比較的大きな外力が加わったような跡が認められた。
- ・ 炭素鋼管内面には僅かな全面腐食が認められたが、減肉はほとんど認められなかった。

考察

- ・ フランジパッキン取替作業時に何らかの比較的大きな外力が加わったため、ライニング表面に微小き裂が発生した。
- ・ 主に残留応力が初期き裂に応力集中するため、そのき裂の進展により、最終的に貫通き裂となり、海水が浸入した。
- ・ ライニング下部は海水の入れ替わりが殆どない止水状態であるため、海水の浸入初期に炭素鋼管表面が全面に渡り僅かに腐食して、浸入海水中の溶存酸素が消費された後は腐食は進行しなかったと推定される。

事象⑤ (原子炉補機冷却水冷却器 1 A 冷却用海水戻り配管)

概略系統および配管仕様



- 外 径 : 508.0 mm
- 呼 び 厚 さ : 12.7 mm
- 必要最小厚さ : 3.8 mm
- 材 質 : 炭素鋼 (SS41)
- 配 管 内 面 : ポリエチレンライニング
- 最高使用温度 : 40°C
- 最高使用圧力 : 0.65 MPa
- 前回点検時期 : 第26回定期検査

当該配管およびき裂部の写真



・き裂部はフランジから約 340mm の横腹



- ・錆こぶなし
- ・き裂は周方向に約 12mm
- ・き裂部に外力が加わった跡なし



- ・ライニングは局部的に剥離
- ・炭素鋼管内面にほとんど減肉なし (腐食はほとんど発生していない)
- ・炭素鋼管内面に割れ等の異常はなし

所見

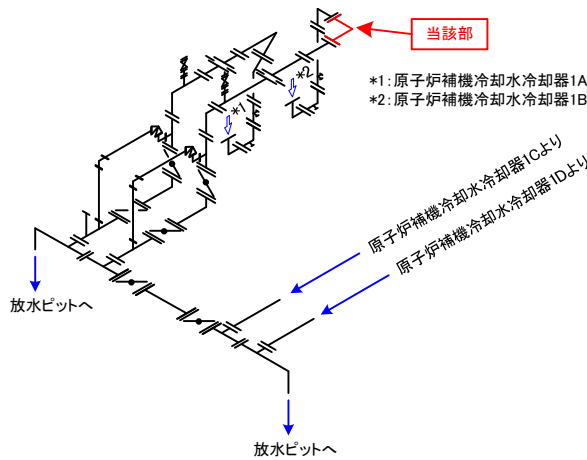
- ・ライニングき裂部周辺をタッピングした結果、ライニングの剥離は認められなかった。
- ・補修作業のため、ベルトサンド (サンドペーパーを回転させて表面を切削する工具) にてライニングを取り除いたことから、ライニング破面や炭素鋼管内面の観察はできなかった。
- ・ライニングき裂部に外力が加わったような跡は認められなかった。
- ・肉厚測定の結果、減肉はほとんど認められなかった。

考察

- ・ライニングの剥離状況、腐食生成物の付着状況から、事象② (原子炉補機冷却水冷却器 1 B 冷却用海水戻り配管の事象) と同様のメカニズムで損傷に至ったものと推定される。

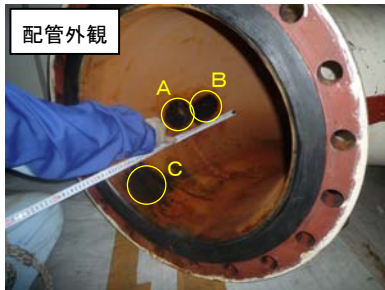
事象⑥ (原子炉補機冷却水冷却器 1 B 冷却用海水戻り配管)

概略系統および配管仕様



○ 外 径	: 508.0mm
○ 呼 び 厚 さ	: 12.7mm
○ 必要最小厚さ	: 3.8mm
○ 材 質	: 炭素鋼 (SS41)
○ 配 管 内 面	: ポリエチレンライニング
○ 最高使用温度	: 40℃
○ 最高使用圧力	: 0.65MPa
○ 前回点検時期	: 第26回定期検査

当該配管およびき裂部の写真



A・き裂部はフランジから約 360mm の背側
 B・き裂部はフランジから約 480mm の背側
 C・き裂部はフランジから約 85mm の背側



ライニング剥取り・手入れ後



ライニング剥取り・手入れ後



ライニング除去後



A・き裂は軸・周方向に約 20mm×3
 B・き裂は軸方向に約 20mm
 C・き裂は周方向に約 10mm
 A, B, Cともに、
 ・錆こぶなし
 ・き裂部に外力が加わった跡なし

A, B, Cともに、
 ・ライニングは局部的に剥離
 ・炭素鋼管内面にほとんど減肉なし
 (腐食はほとんど発生していない)
 ・炭素鋼管内面に割れ等の異常はなし

所見

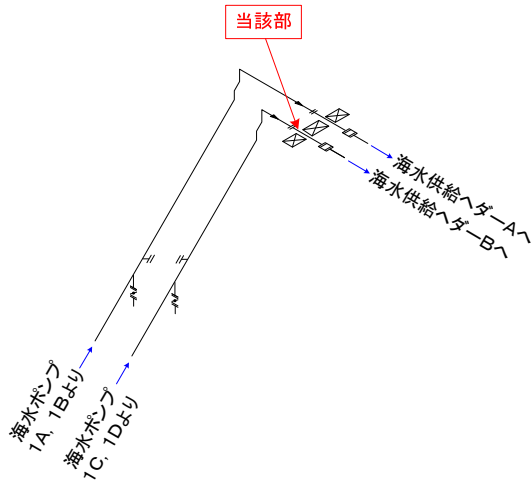
- ・ ライニングき裂部周辺をタッピングした結果、ライニングの剥離は認められなかった。
- ・ A、Bについては、ライニングに切り目を入れたところ、若干浮いていた箇所があったので、ライニングを剥ぎ取った。Cについては、補修作業のため、ベルトサンド (サンドペーパーを回転させて表面を切削する工具) にてライニングを取り除いたことから、ライニング破面や炭素鋼管内面の観察はできなかった。
- ・ ライニングき裂部に外力が加わったような跡は認められなかった。
- ・ 炭素鋼管内面を観察した結果、Aについては傷3箇所のうち1箇所に、またBについてはき裂部近傍に、僅かな全面腐食が認められたが、簡単な手入れによりなくなった。
- ・ A、Bとも肉厚測定の結果、減肉はほとんど認められなかった。

考察

- ・ ライニングの剥離状況、腐食生成物の付着状況から、事象② (原子炉補機冷却水冷却器 1 B 冷却用海水戻り配管の事象) と同様のメカニズムで損傷に至ったものと推定される。

事象⑦ (供給母管B系統 (海水ポンプ～各機器への供給配管))

- 概略系統および配管仕様



- 外 径 : 762.0mm
- 呼び厚さ : 12.7mm
- 必要最小厚さ : 3.8mm
- 材 質 : 炭素鋼 (STPY41)
- 配管内面 : 厚膜形エポキシ樹脂塗装
- 最高使用温度 : 40℃
- 最高使用圧力 : 0.65MPa
- 前回点検時期 : 第25回定期検査

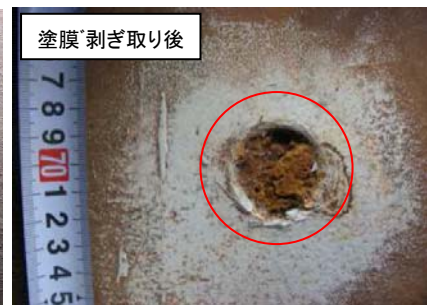
- 当該配管および損傷部の写真



・損傷部は上流側フランジから約700mm



・錆こぶあり
 ・錆こぶ直下の塗膜に直径約35mmの円形状の膨れあり



・塗膜は直径約35mmで剥離
 ・炭素鋼管内面に全面腐食 (一部に孔食が認められた)

所見

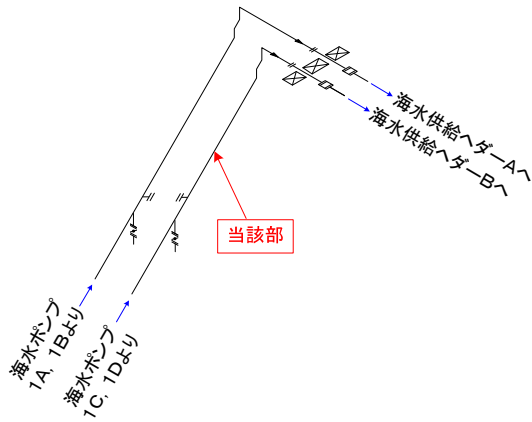
- 塗膜に直径約35mmの円形状の膨れが認められ、その上に錆こぶが2箇所確認された。錆こぶを除去したところ膨れた塗膜の一部に割れが認められた。
- 膨れ部近傍に補修跡は認められなかった。
- 炭素鋼管内面の大部分は全面腐食であったが、一部に孔食が認められた。
- 炭素鋼管は貫通には至っておらず、最小残存肉厚は9.8mmであった。

考察

- 塗装工事時に、下地ブラスト処理後、塗装を行うまでの間で、炭素鋼管表面の清浄度が低下したため、炭素鋼管と塗膜との付着力が低下し、そこに水蒸気透過に伴う水が溜まり膨れが生じた。
- 膨れの成長により塗膜の膨れ部に傷が入り、その傷から海水が内部に侵入し、炭素鋼管の腐食に至ったものと推定される。
- 塗膜表面に確認された錆状付着物は、ディーゼル発電機1B冷却用海水供給配管の事象と同様に、炭素鋼管の腐食進展に伴い塗膜のき裂部より溶出し、堆積したものと推定される。

事象⑧ (供給母管B系統 (海水ポンプ～各機器への供給配管))

- 概略系統および配管仕様



- 外 径 : 762.0mm
- 呼 び 厚 さ : 12.0mm
- 必要最小厚さ: 3.8mm
- 材 質 : 炭素鋼 (SS41)
- 配 管 内 面 : 厚膜形エポキシ樹脂塗装
- 最高使用温度: 40℃
- 最高使用圧力: 0.65MPa
- 前回点検時期: 第25回定期検査

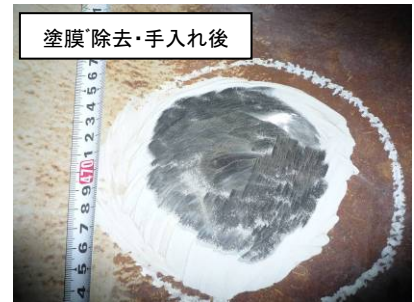
- 当該配管および損傷部の写真



・損傷部はマンホールから約4,720mm



・錆こぶなし
・直径約30mmの円形状の膨れあり



・塗膜は直径約30mmで剥離
・炭素鋼管内面に全面腐食
(一部に孔食が認められた)

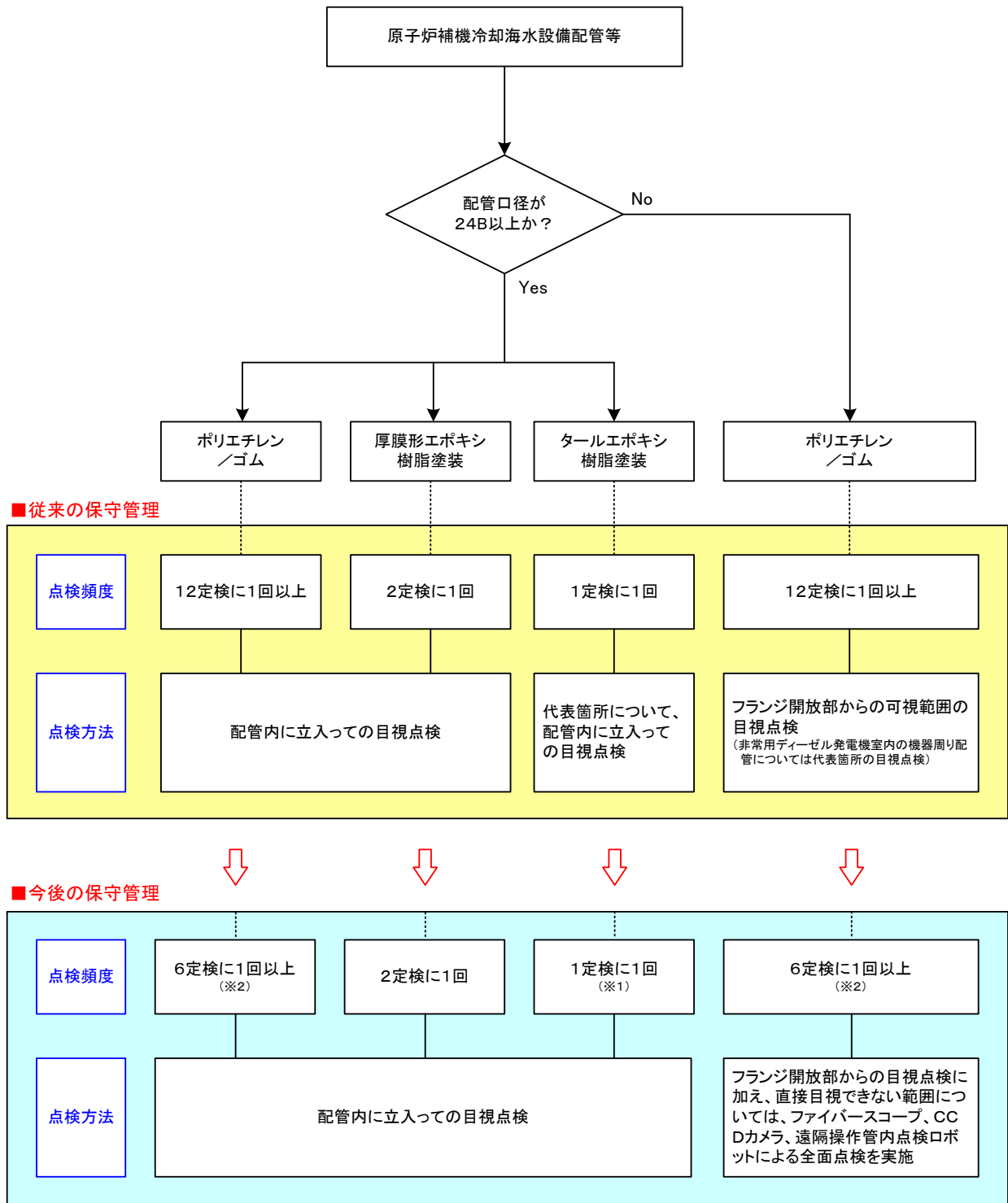
所見

- ・塗膜に直径約30mmの円形状の膨れが確認された。
- ・膨れ部近傍に補修跡は認められなかった。
- ・補修作業のため、グラインダで塗膜を除去したところ、炭素鋼管内面の大部分は全面腐食であったが、一部に微小な孔食が認められた。
- ・炭素鋼管は貫通には至っておらず、最小残存肉厚は10.0mmであった。

考察

- ・塗膜の膨れ状況、炭素鋼管内面の腐食状況から、事象⑦ (供給母管B系統 (海水ポンプ～各機器への供給配管)) と同様のメカニズムで損傷に至ったものと推定される。

原子炉補機冷却海水設備配管等の点検頻度



※1: タールエポキシ樹脂塗装管については、今後計画的にポリエチレンライニング管に取替を実施する。
 ※2: キャビテーションが発生する可能性がある範囲に設置されている配管については2定検に1回とする。