

伊方発電所第 3 号機
低圧給水加熱器伝熱管の損傷について

令和 2 年 9 月
四国電力株式会社

1. 件 名

伊方発電所第3号機 低圧給水加熱器伝熱管の損傷について

2. 事象発生の日時

令和2年 1月17日 11時25分（発見）

3. 事象発生の設備

3号機 蒸気タービン設備 第2低圧給水加熱器B号機

4. 事象発生時の運転状況

3号機第15回定期検査中

5. 事象発生の状況

伊方発電所第3号機は、第15回定期検査中のところ、令和元年12月26日の復水系統水圧試験^{※1}において、第2低圧給水加熱器^{※2}B号機の胴側のドレン量が他の低圧給水加熱器（第1低圧給水加熱器A、B号機、第2低圧給水加熱器A号機、第3低圧給水加熱器A、B号機、第4低圧給水加熱器A、B号機）に比べて若干多かったことから、伝熱管漏えいの疑いがあることが認められた。

そこで、令和2年1月16日および17日に第2低圧給水加熱器B号機の伝熱管真空リークテスト^{※3}を実施したところ、1月17日に伝熱管1本に漏えいがあることを保修員が確認した。

なお、本事象による環境への放射能の影響はなかった。

（添付資料－1、2）

※1 復水系統水圧試験

プラント停止後、低圧給水加熱器1次側（胴側）からのドレン水が減少するタイミングに合わせて、復水ポンプ等を起動し、復水系統全体を加圧した状態で低圧給水加熱器1次側（胴側）からのドレン量の変化を確認している。

復水系統の加圧により、ドレン量が増加傾向となった場合は、伝熱管から漏えいしている可能性が考えられることから、開放点検を計画する。

※2 低圧給水加熱器

タービンから排気される蒸気を利用して、蒸気発生器への給水を加熱する熱交換器。給水は内部で伝熱管内側（低圧給水加熱器2次側（水室側））を通過しながら蒸気で加熱される。熱交換された蒸気はドレン水となり低圧給水加熱器1次側（胴側）から排出している。

※3 伝熱管真空リークテスト

伝熱管の片側にゴム栓をして、反対側から真空引きを実施する。その状態で保持し、真空の低下状況により漏えいの有無を確認する。

6. 事象の時系列

令和元年12月26日

0時20分 伊方3号機解列

22時40分頃 復水系統水圧試験開始

令和元年12月27日

4時30分頃 第2低圧給水加熱器B号機の胴側のドレン量が他の低圧給水加熱器に比べて若干多いことを確認

令和2年 1月 8日～15日 マンホール開放、内部清掃等実施

令和2年 1月16日

9時00分頃 第2低圧給水加熱器B号機の伝熱管全数について伝熱管真空リークテスト開始

令和2年 1月17日

11時25分 伝熱管真空リークテストにおいて、伝熱管1本に漏えいがあることを確認

7. 調査結果

(1) 現地調査

第2低圧給水加熱器B号機の伝熱管真空リークテストを実施し、伝熱管1本（40列1番）に漏えいがあることを確認したことから、以下の調査を実施した。

(添付資料-3、4)

a. 渦電流探傷検査（E C T）※⁴

当該伝熱管の直管部およびU字管部の渦電流探傷検査（E C T）を実施した結果、給水入口側直管部のドレン冷却部にきずと思われる有意な指示が認められた。

（添付資料－5）

※4 渦電流探傷検査（E C T）

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

b. 胴側水張りテスト※⁵による漏えい位置の調査

胴側に水を張った状態で、C C Dカメラを当該伝熱管に挿入し、漏えい位置を調査した結果、当該伝熱管の給水入口側管板部の管端から約1,300mmの位置（第2邪魔板部近傍）で当該伝熱管の上部（天側）に長手方向のき裂が複数認められた。

（添付資料－6）

※5 胴側水張りテスト

低圧給水加熱器1次側（胴側）（伝熱管外面側）に水を張り、伝熱管内面側への漏えいの有無を確認する試験。

c. 真空発泡テスト※⁶

当該伝熱管拡管部※⁷について真空発泡テストを実施した結果、泡の発生はなく伝熱管拡管部からの漏えいは認められなかった。

※6 真空発泡テスト

検査対象部位に発泡液を塗布し、アクリル透明箱で覆って内部を真空状態にして、発泡液塗布部分の泡の発生状況から漏えい箇所を特定する試験。

※7 伝熱管拡管部

管板部に伝熱管を挿入した後、伝熱管を拡管し管板に固定している部位。

d. その他の伝熱管

第2 低圧給水加熱器B号機のその他の伝熱管について、渦電流探傷検査（ECT）を実施した結果、伝熱管1本（39列1番）の給水入口側直管部のドレン冷却部において、施栓基準以上のきずと思われる有意な指示が認められた。また、施栓基準には至らないきずと思われる有意な指示が、当該伝熱管と同様の最小R管※8 47本の給水入口側直管部のドレン冷却部に認められた。

さらに、胴側水張りテストおよび真空発泡テストを実施した結果、その他の伝熱管および伝熱管拡管部からの漏えいは認められなかった。

（添付資料－2、5）

※8 最小R管

低圧給水加熱器伝熱管の内、最中央部の伝熱管。

（2）工場調査

当該部を抜管し、以下の詳細調査を実施した。

a. 外観および内面調査

第2 邪魔板から第3 邪魔板側に当該伝熱管の上部（天側）から20°の位置を中心に管外面で減肉とき裂、管内面でき裂が確認された。

管外面の減肉は細かい凹凸状となっており、周方向は約20°の位置を中心に0°から40°の範囲、軸方向は第2 邪魔板近傍から約16mmの範囲で第3 邪魔板側に減肉が広がっていた。

また、管外面のき裂は天側から20°の位置において、第2 邪魔板近傍から第3 邪魔板側の減肉範囲に軸方向に伸びているのが確認された。

管内面のき裂は管外面の減肉範囲と概ね同じ位置にあった。また、複数箇所でき裂は発生し、いずれも軸方向に伸びており、き裂長さは最大で約16mmであった。

（添付資料－6、7）

b. 表面の走査型電子顕微鏡（SEM）による拡大観察

細かい粒状の凹凸が観察され一部に貫通およびき裂が認められた。

（添付資料－8）

c. 断面ミクロ組織観察

貫通部は管外面から強い力で中心側に押し潰されて変形した様相が確認された。また、貫通部近傍の管外面では細かい凹凸を伴う減肉が認められた。

（添付資料－9）

d. 付着物分析

伝熱管外面付着物の元素分析を実施したところ、腐食性のものは認められなかった。

e. 引張試験

J I S規格値内であり、異常は認められなかった。

(添付資料－10)

f. 化学成分分析

J I S規格値内であり、異常は認められなかった。

(添付資料－10)

(3) 至近の当該機器の点検内容と実績調査

第2 低圧給水加熱器B号機については、プラント運開時より使用しており、4 定検毎に開放点検および渦電流探傷検査（E C T）を行うことで計画している。至近では、3－1 2 定検（2010 年1 月開始）で開放点検および渦電流探傷検査（E C T）を実施している。また、復水系統水圧試験を毎定検実施しており、前回の3－1 4 定検（2017 年10 月開始）において異常は認められなかった。

(4) 運転状況調査

運転パラメータに有意な変化がないか確認したが、特に異常と思われる有意な変化は確認されなかった。

(5) 同様事例調査

他プラントにて、ドレン冷却部の最小R管において、応力腐食割れ、蒸気流入によるキャビテーション^{※9}、伝熱管振動による伝熱管の損傷事例を確認した。

※9 キャビテーション

蒸気が冷やされて凝縮し気泡がつぶれる現象。

(6) 邪魔板管穴調査

工場調査による伝熱管外面および内面状況ならびに他プラントの知見より、ドレン冷却部の最小R管において、蒸気流入によるキャビテーションが発生する可能性があることから、第3 邪魔板部の伝熱管と邪魔板との隙間を確認したところ、隙間の拡がり確認された。

(7) 類似機器の調査

3号機に設置している低圧給水加熱器の内、第2低圧給水加熱器B号機と同様にドレン冷却部を有する構造である他の低圧給水加熱器(第2低圧給水加熱器A号機、第3低圧給水加熱器A、B号機、第4低圧給水加熱器A、B号機)について渦電流探傷検査(ECT)を実施した。

その結果、第2低圧給水加熱器A号機についても、最小R管ドレン冷却部にきずと思われる有意な指示が認められた。

また、第4低圧給水加熱器B号機についても、最小R管ドレン冷却部にきずと思われる有意な指示が認められたが、過去にも経験のある伝熱管振動によるものであった。

(添付資料-11)

8. 推定原因

調査結果より、以下のプロセスで伝熱管が損傷したと推定した。

- (1) 伝熱管と各邪魔板には構造上隙間があり、第3邪魔板においては胴側とドレン冷却部との差圧(ドレン冷却部内の方が圧力が低い)により蒸気が第3邪魔板の管穴隙間よりドレン冷却部に流入。
- (2) 第2低圧給水加熱器の運転時における温度圧力条件での継続的使用状況において、第3邪魔板の管穴が蒸気の流入により経年的に減肉・拡大しドレン冷却部への蒸気流入量が増加。(ドレン冷却部内は下部より上部(最小R管側)の方が圧力が低く、最小R管および邪魔板部近傍に蒸気の気泡が滞留しやすい)
- (3) 最小R管付近に滞留した蒸気の気泡が、伝熱管表面で冷やされて凝縮することで崩壊し、キャビテーションが発生。
- (4) キャビテーションにより、伝熱管外面に強い押付けの力(衝撃力)が作用し、伝熱管中心側への変形、減肉が発生。
- (5) 管内面においても繰返しのキャビテーションによる管外面からの影響により、管内面の周方向に引張の繰返し応力が生じ、疲労き裂が発生、進展して貫通に至った。

(添付資料-12)

9. 対策

- (1) 漏えいの認められた第2低圧給水加熱器B号機伝熱管1本(40列1番)および施栓基準以上のきずと思われる有意な指示が認められた伝熱管1本(39列1番)について、施栓を実施した。

また、当該機器の最小R管にきずと思われる有意な指示が47本確認されたことから、最小R管全数(53本(漏えい伝熱管および施栓基準以上の伝熱管の計2本を除く))について念のため予防施栓を実施した。

なお、今回の対策を実施したことで、当該機器の伝熱管の施栓本数は、合計 55 本となるが、許容施栓本数（197 本）以下であり、機能上問題はない。

- (2) 類似機器である第 2 低圧給水加熱器 A 号機において、最小 R 管にきずと思われる有意な指示が 47 本確認されたことから、最小 R 管全数（54 本（既設施栓管 1 本を除く））について念のため予防施栓を実施した。

なお、今回の対策を実施したことで、当該機器の伝熱管の施栓本数は、予防施栓 54 本と既設施栓 1 本を合わせて合計 55 本となるが、許容施栓本数（197 本）以下であり、機能上問題はない。

また、第 4 低圧給水加熱器 B 号機において、施栓基準以上のきずと思われる有意な指示が 4 本確認されたことから施栓を実施する。（今回確認された 4 本については、当該事象の原因であるキャビテーションによるものではなかった。）

今回の対策を実施したことで、当該機器の伝熱管の施栓本数は、合計 4 本となるが、許容施栓本数（201 本）以下であり、機能上問題はない。

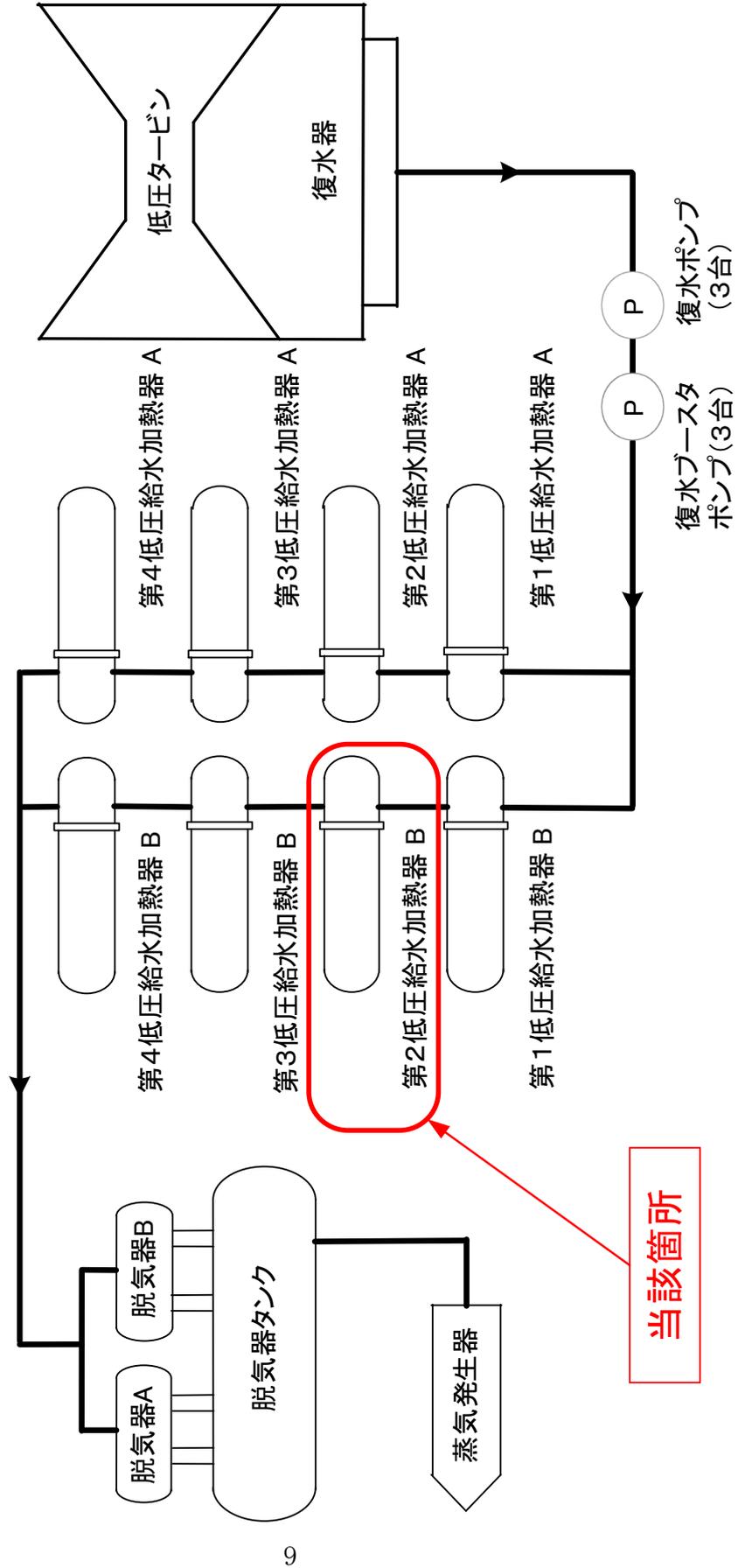
- (3) 最小 R 管全数を施栓した第 2 低圧給水加熱器 A 号機および B 号機について、毎定検 A 号機または B 号機のどちらかの状況が確認できるように、点検頻度を 4 定検毎から 2 定検毎へ見直しを行う。

以 上

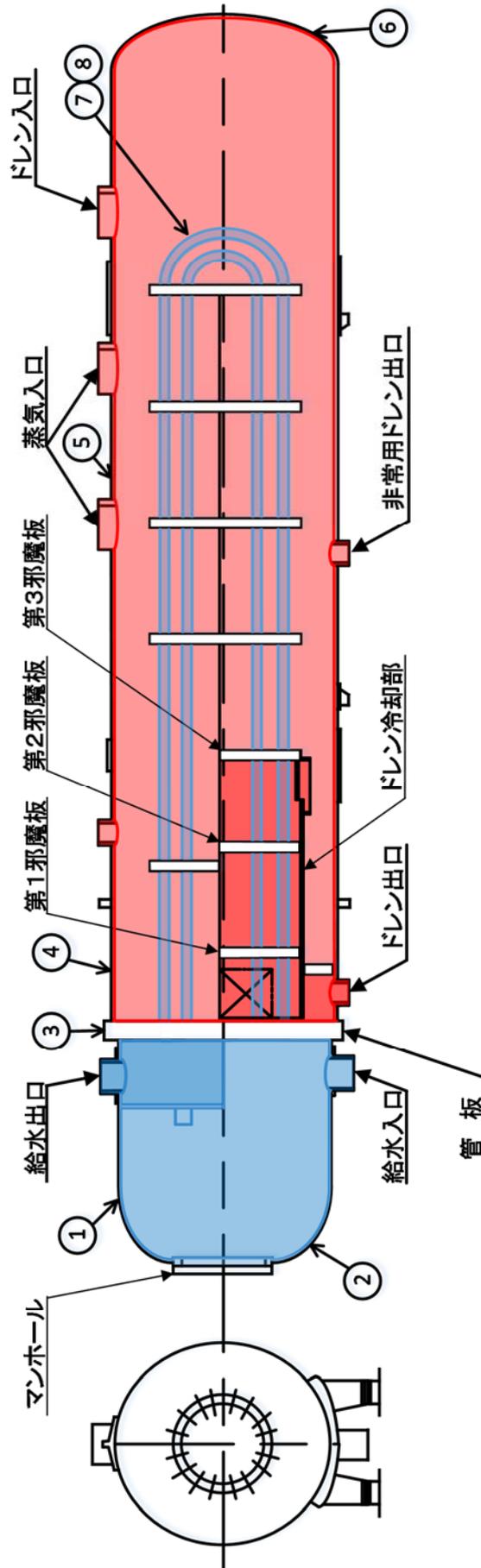
添 付 資 料

- 添付資料－ 1 伊方発電所 3 号機 復水系統概略図
- 添付資料－ 2 第 2 低圧給水加熱器構造図
- 添付資料－ 3 第 2 低圧給水加熱器 B 号機漏えい管位置図
- 添付資料－ 4 伝熱管真空リークテスト結果（伝熱管：40 列 1 番）
- 添付資料－ 5 第 2 低圧給水加熱器 B 号機渦電流探傷検査（E C T）
指示管位置図
- 添付資料－ 6 漏えい箇所の位置および状況図
- 添付資料－ 7 漏えい管外観および内面状況
- 添付資料－ 8 走査型電子顕微鏡（S E M）表面観察
- 添付資料－ 9 断面ミクロ組織観察
- 添付資料－ 10 漏えい管材料試験結果
- 添付資料－ 11 同構造の低圧給水加熱器渦電流探傷検査（E C T）結果
- 添付資料－ 12 事象発生メカニズム[推定]

伊方発電所3号機 復水系統概略図



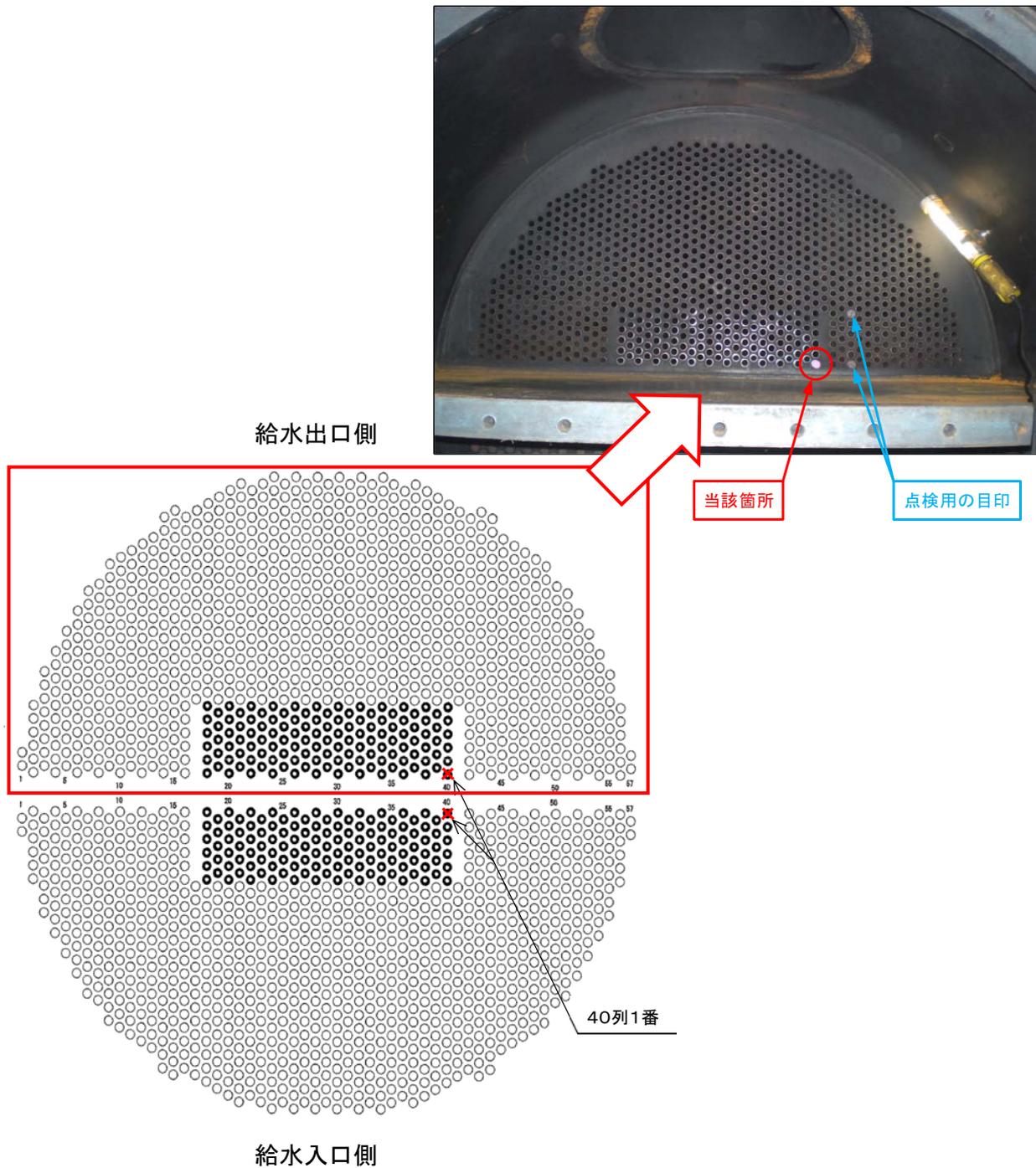
第2 低圧給水加熱器構造図



主要材料	
① 水室銅板	SB46：ボイラ及び圧力容器用炭素鋼
② 水室鏡板	SB46：ボイラ及び圧力容器用炭素鋼
③ 管板	SB46：ボイラ及び圧力容器用炭素鋼
④ 中間胴	SS41：一般構造用圧延鋼材
⑤ 胴本体	SS41：一般構造用圧延鋼材
⑥ 胴鏡板	SS41：一般構造用圧延鋼材
⑦ 伝熱管	C6871T-0：アルミニウム黄銅管
⑧ 伝熱管	SUS304TB：ステンレス管

主要目標		
種類	横置U字管式	
	アルミニウム黄銅管	
伝熱管本数	861本	
	ステンレス管	
最高使用圧力	合計	
	一次側 (胴側)	0.5 kg/cm ²
	二次側 (水室側)	39 kg/cm ²
	一次側 (胴側)	115 °C
最高使用温度	二次側 (水室側)	115 °C

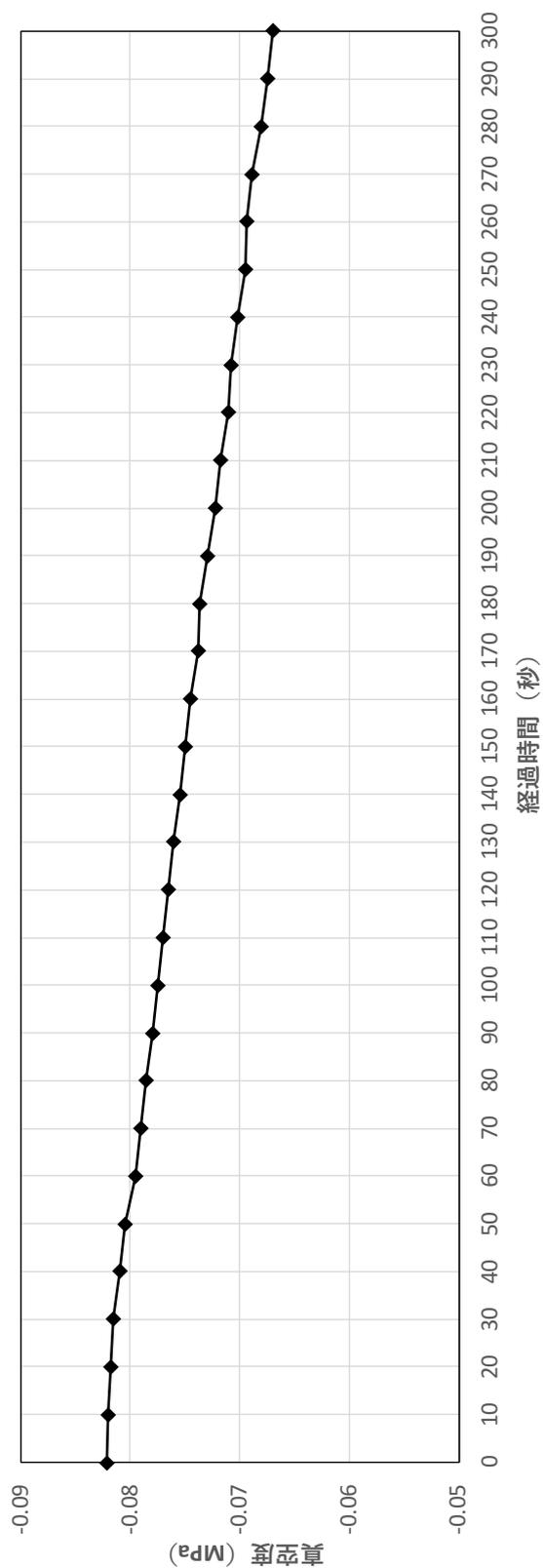
第2 低圧給水加熱器B号機漏えい管位置図



- ・・・アルミニウム黄銅管
- ・・・ステンレス管
- ⊗・・・漏えい管: 1本(位置: 40列1番)

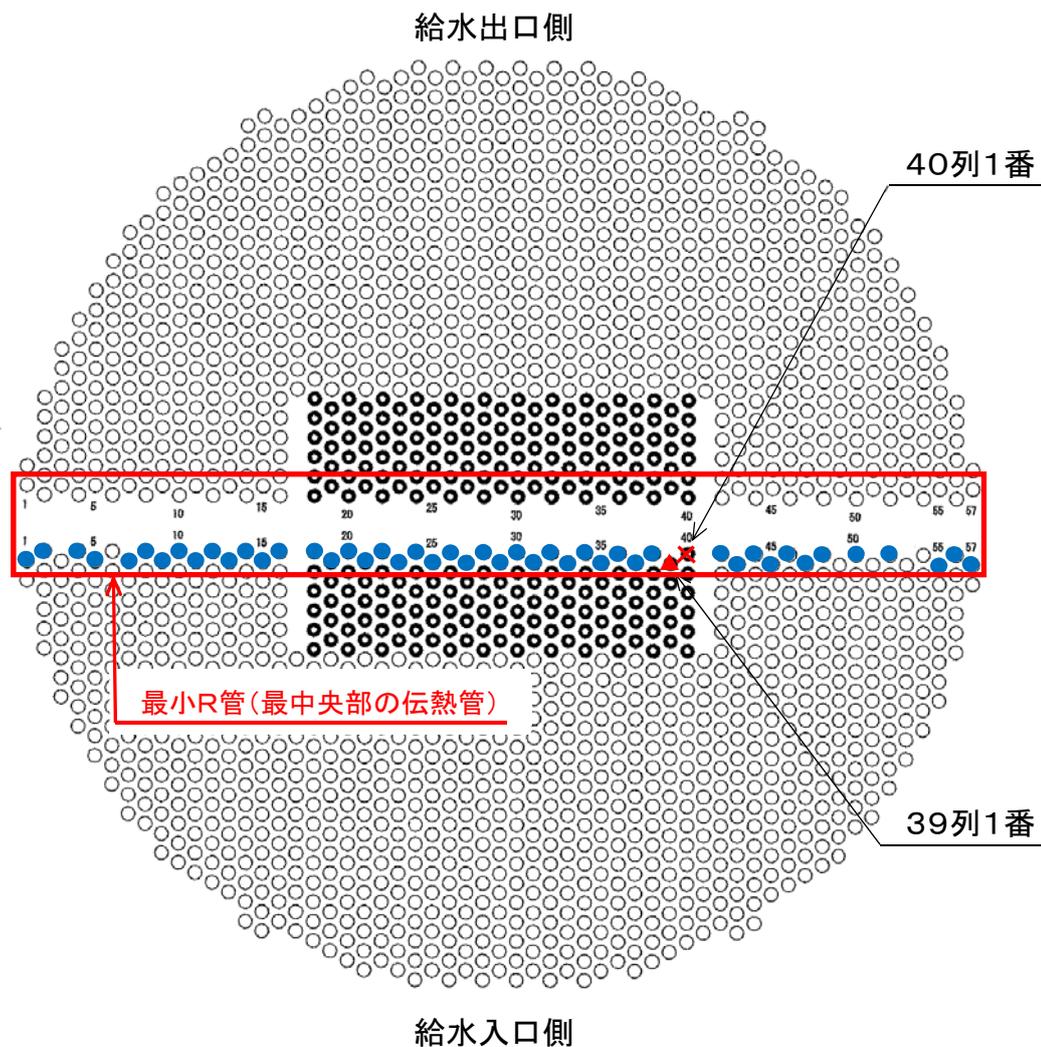
伝熱管真空リークテスト結果（伝熱管：40列1番）

経過時間[秒]	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
真空度[MPa]	-0.0821	-0.0820	-0.0818	-0.0815	-0.0810	-0.0805	-0.0795	-0.0790	-0.0785	-0.0780	-0.0775
経過時間[秒]	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	210
真空度[MPa]	-0.0770	-0.0765	-0.0760	-0.0755	-0.0750	-0.0745	-0.0738	-0.0736	-0.0729	-0.0722	-0.0718
経過時間[秒]	220	230	240	250	260	270	280	290	300		
真空度[MPa]	-0.0710	-0.0708	-0.0702	-0.0695	-0.0693	-0.0689	-0.0680	-0.0675	-0.0670		



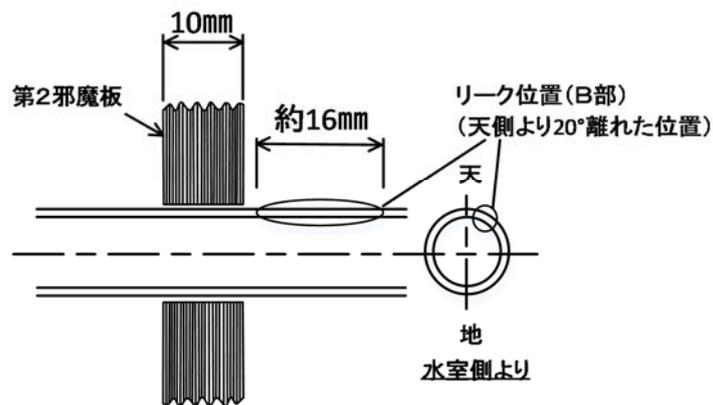
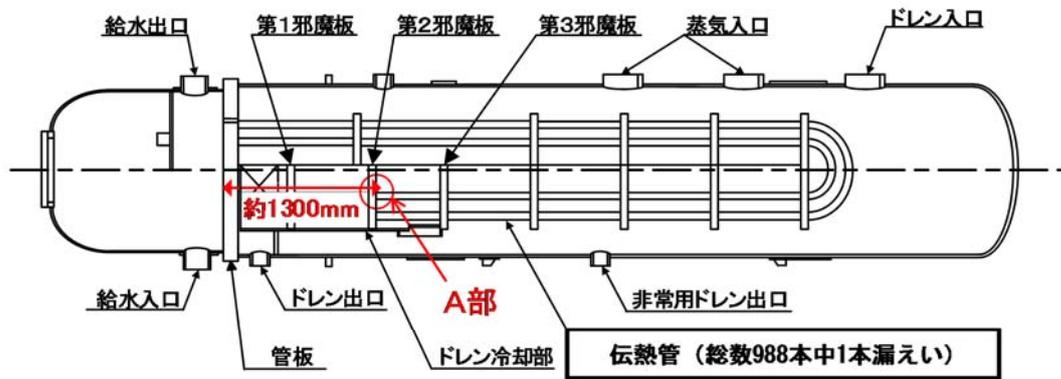
第2 低圧給水加熱器 B 号機

渦電流探傷検査（E C T）指示管位置図

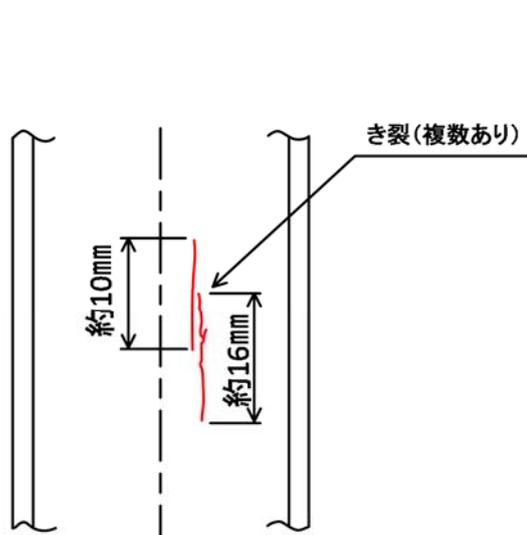


- …アルミニウム黄銅管
- …ステンレス管
- ⊗ …漏えい管: 1本
(位置: 40列1番_給水入口側)
- ▲ …施栓基準以上のきずと思われる有意な指示が認められた管: 1本
(位置: 39列1番_給水入口側)
- …施栓基準に至らないきずと思われる有意な指示が認められた管: 47本
(給水入口側)

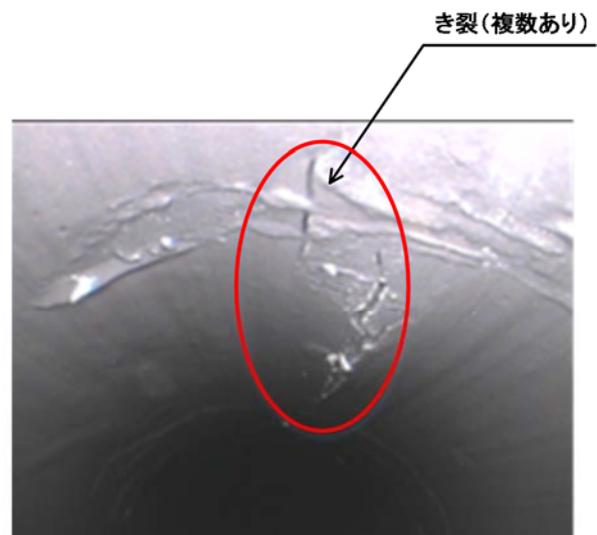
漏えい箇所の位置および状況図



A部詳細図

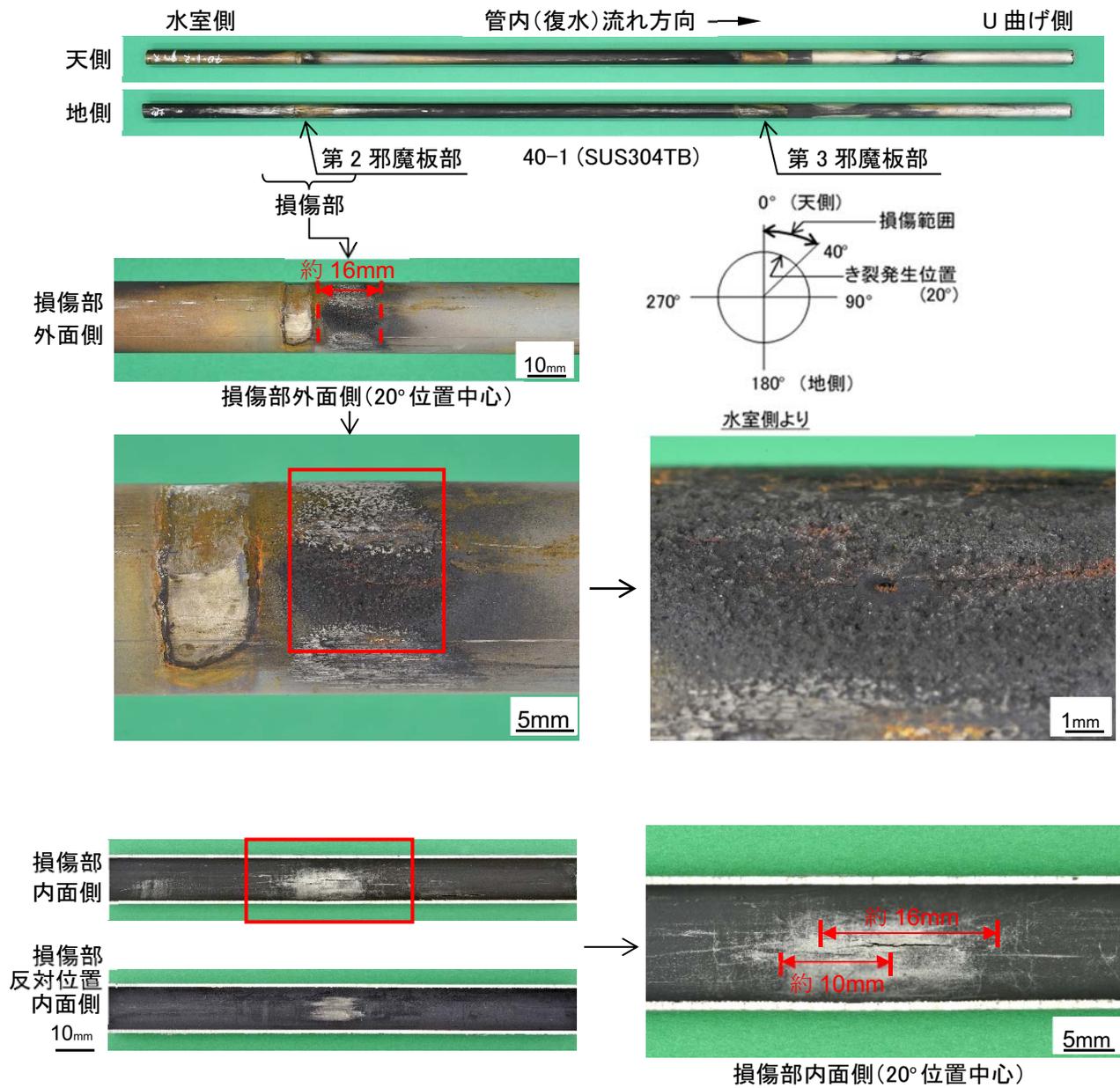


B部詳細図 (管内面より見る)

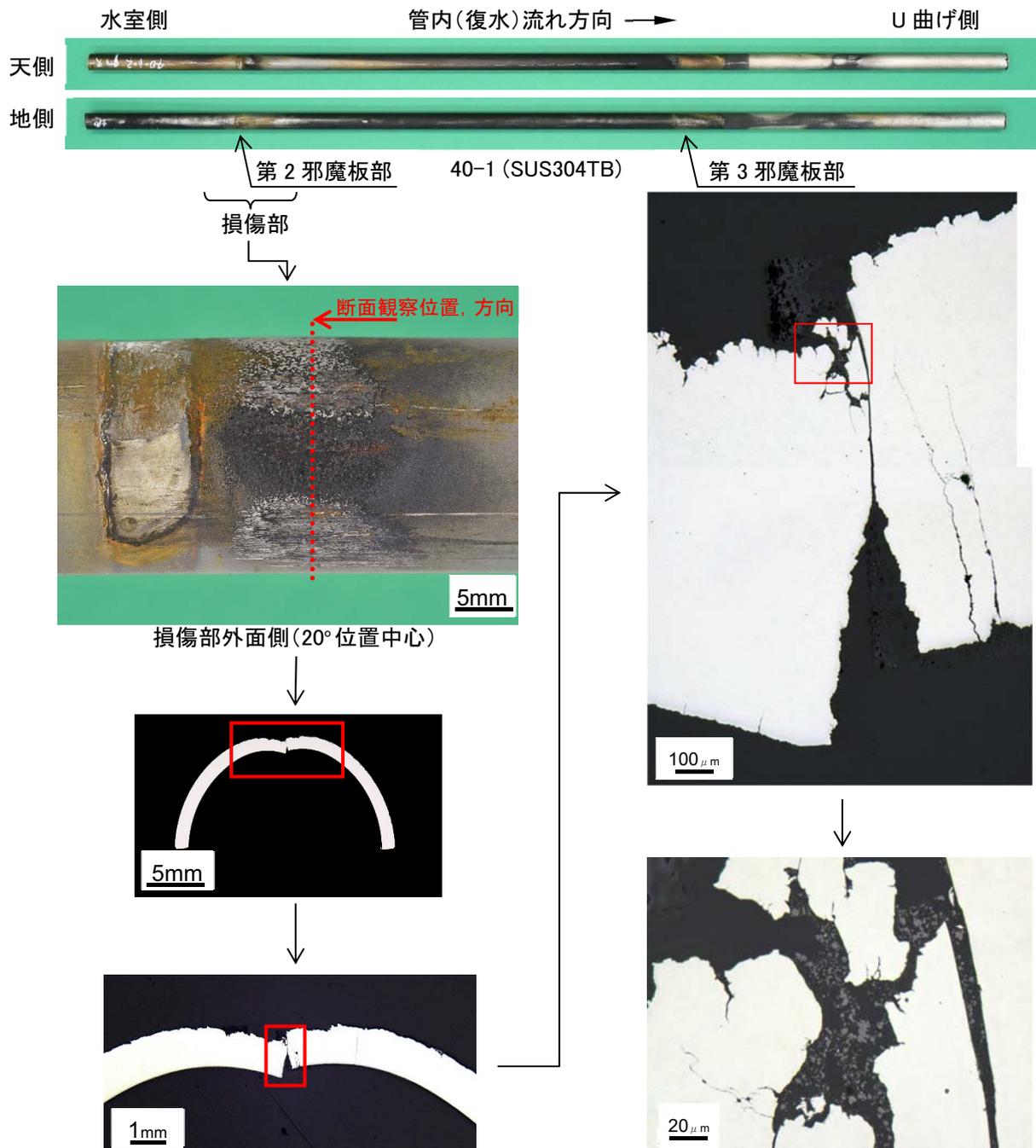


管内写真 (CCDカメラ)

漏えい管外観および内面状況



断面ミクロ組織観察



漏えい管材料試験結果

1. 引張試験結果

	引張強さ (N/mm ²)	耐力 (N/mm ²)	伸び (%)	へん平	押しひろげ
試験結果	648	326	55	平板間 7.65mm で割れなし	外径の 1.2 倍 で割れなし
規格値 JIS G 3463 (SUS304TB)	≥520	≥205	≥30	平板間 7.65mm で割れなし	外径の 1.2 倍 で割れなし

2. 化学成分分析結果

単位：%

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo
分析値	0.04	0.68	1.51	0.021	<0.001	9.54	18.5	0.10
規格値 JIS G 3463 (SUS304TB)	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.040	≤0.030	8.00～ 11.00	18.00～ 20.00	*

*必要に応じて Mo を添加する場合は、当該種類が他の種類の規定値を満たして種類の区別ができなくなるほど添加してはならない。(JIS G 3463 引用)

同構造の低圧給水加熱器 渦電流探傷検査（E C T）結果

	低圧給水加熱器	きずと思われる 有意な指示(最小R管)		最小R管総数	備考
		施栓基準以上	施栓基準未満		
(参考) 当該機器	第2給水加熱器B号機	1本	47本	54本	当該漏えい管 1本除く
同構造の 低圧給水加熱器	第2給水加熱器A号機	0本	47本	54本	施栓済み 1本除く
	第3給水加熱器A号機	0本	0本	55本	
	第3給水加熱器B号機	0本	0本	55本	
	第4給水加熱器A号機	0本	0本	55本	
	第4給水加熱器B号機	2本 [*]	0本	55本	最小R管以外 にも2本の 指示を確認

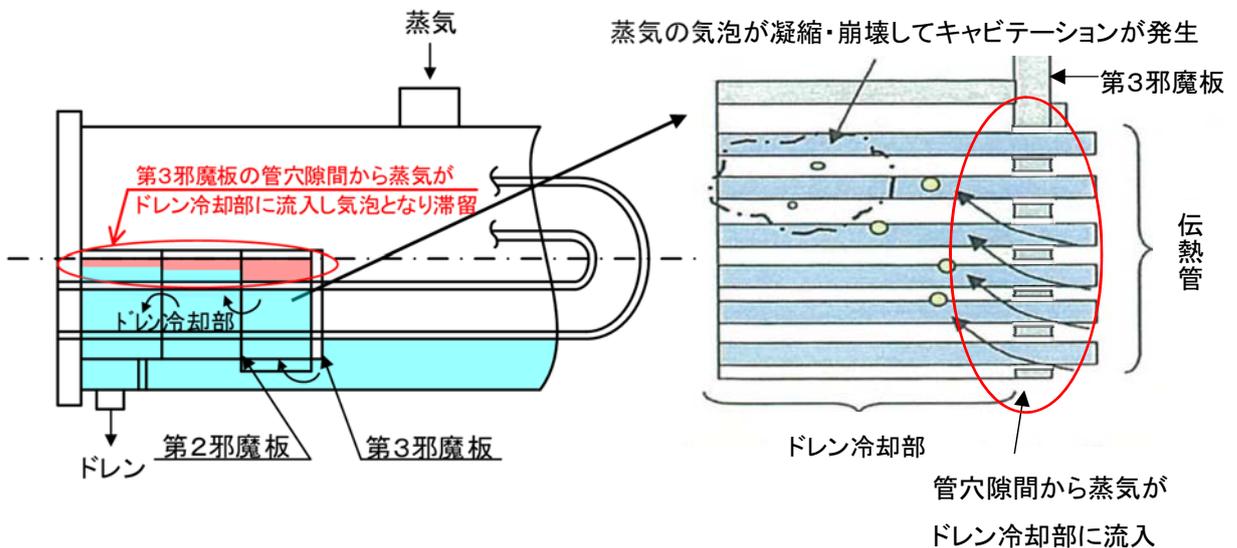
※邪魔板部に発生した伝熱管振動によるもの

(注) 第1低圧給水加熱器A号機およびB号機については、ドレン冷却部を有しておらず当該機器とは異なる構造である。

事象発生メカニズム[推定]

1. ドレン冷却部への蒸気流入メカニズム

- (1) 蒸気入口より供給される蒸気の熱を伝熱管が受け取り、蒸気は温水に変化する。胴側の底に貯まった温水はサイフォン現象により、ドレン冷却部を通りドレン出口から排出されるため、ドレン冷却部内は通常満水状態となる。
- (2) 伝熱管と各邪魔板には構造上隙間があり、第3邪魔板においては胴側とドレン冷却部との差圧（ドレン冷却部の方が圧力が低い）により蒸気が第3邪魔板の管穴隙間よりドレン冷却部に流入していく。
- (3) 第3邪魔板の管穴が蒸気の流入により経年的に減肉・拡大しドレン冷却部への蒸気流入量が増加する。（ドレン冷却部内は下部より上部（最小R管側）の方が圧力が低く、最小R管および邪魔板部近傍に蒸気の気泡が滞留しやすい）
- (4) 最小R管付近に滞留した蒸気の気泡が、伝熱管表面で冷やされて凝縮することで崩壊しキャビテーションが発生する。



2. キャビテーションによる伝熱管損傷メカニズム

(1) 以下の流れにより伝熱管が損傷したものと推定される。

- ①最小R管付近に滞留した蒸気の気泡が、伝熱管表面で凝縮・崩壊しキャビテーションが発生
- ②キャビテーションにより、管外面に変形を伴う強い押付けの力（衝撃力）が作用
- ③管外面中心側への変形、減肉と共に、管内面で周方向に変形を伴う引張の繰返し応力が発生して疲労き裂が発生
- ④減肉およびき裂が進展して繋がり、貫通の過程を経て漏えいが発生

