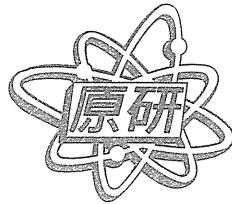


JAERI-Tech
2005-009



JP0550102



HTTR水素製造システム実規模単一反応管試験装置
触媒粉塵用フィルタノズル部損傷の
原因調査と再発防止対策に関する報告
(受託研究)

2005年3月

森崎 徳浩・林 光二・稲垣 嘉之・加藤 道雄
藤崎 勝夫・前田 幸政・水野 貞男*

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。

入手の問合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越しください。なお、このほかに財団法人原子力弘済会資料センター（〒319-1195 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 〒319-1195, Japan.

©Japan Atomic Energy Research Institute, 2005

編集兼発行 日本原子力研究所

H T T R 水素製造システム実規模单一反応管試験装置

触媒粉塵用フィルタノズル部損傷の

原因調査と再発防止対策に関する報告

(受託研究)

日本原子力研究所大洗研究所核熱利用研究部

森崎 徳浩・林 光二・稻垣 嘉之・加藤 道雄・藤崎 勝夫・前田 幸政・水野 貞男*

(2005年1月19日受理)

本報告書は、実規模单一反応管試験装置において発生した触媒粉塵用フィルタ損傷に関する原因究明と、再発防止のため改修および水平展開についてまとめたものである。

実規模单一反応管試験装置の第5回試験終了後の点検において、平成15年12月11日に、常温状態で窒素ガスによる漏洩試験（発泡試験）により、触媒粉塵用フィルタのノズルフランジと鏡の溶接部近傍に損傷（き裂）が発生していることを確認した。

この損傷発生に関し、大洗研究所安全審査委員会を設置し、損傷の原因調査及び再発防止対策等について審議検討を行った。

損傷の原因是、内面側から発生した応力腐食割れ(SCC)によるものと推定された。

このため、触媒粉塵用フィルタ内の凝縮水発生防止、溶接残留応力低減、溶接鋭敏化低減を行うためのフィルタの改修を行った。また、試験装置の類似継ぎ手構造部の健全性確認を実施した結果、いずれの箇所にも欠陥は検出されず、健全性が確保されていることを確認した。

本報告書は、文部科学省からの受託研究「核熱利用システム技術開発」の成果である。

大洗研究所：〒311-1394 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀 3607

*株式会社日立製作所

Cause Investigation and Repair of Breakage of Catalyst Dust Filter on
Mock-up Model Test Facility with a Full-scale Reaction Tube for HTTR
Hydrogen Production System
(Contract Research)

Norihiro MORISAKI, Koji HAYASHI, Yoshiyuki INAGAKI, Michio KATO,
Katsuo FUJISAKI, Yukimasa MAEDA and Sadao MIZUNO*

Department of Advanced Nuclear Heat Technology
Oarai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Oarai-machi, Higashibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received January 19, 2005)

This report is summaries the cause investigation and the repair of breakage of the catalyst dust filter of the mock-up model test facility with a full-scale reaction tube.

The breakage of the catalyst dust filter was found at the nozzle flange, which was welded onto the end plate of the filter, by the bubbling test using nitrogen gas at the inspection carried out after the fifth operation.

The safety review committee was constituted to investigate the cause of breakage and to devise a repairing method.

The cause of the breakage was the stress corrosion cracking (SCC) generated from the inside of the filter.

The filter was repaired based on the following countermeasures such as reduction of condensed water in the filter, tensile stress and sensitization at welding joints. Furthermore, the inspection was carried out to investigate the structural integrity of the welding joints in the test facility of which structure, material and operating condition were similar to the filter. As the results, it was confirmed that the structural integrity was maintained.

Keywords: Mock-up Model Test Facility with a Full-scale Reaction Tube, Catalyst Dust Filter, Stress Corrosion Cracking, Tensile Stress, Sensitization at Welding

Present study is entrusted from Ministry of Education, Culture, Sport, Science and Technology.

* Hitachi, Ltd.

目次

1. はじめに	1
2. 損傷原因の検討	6
2.1 材料不適	6
2.2 運転条件不適	6
2.3 過大応力	6
2.4 疲労	6
2.5 溶接不良	7
2.6 応力腐食割れ (SCC)	7
2.7 水素割れ	8
2.8 炭酸腐食・アルカリ腐食	8
3. 応力腐食割れの検討	12
3.1 き裂の形状	12
3.2 SCC 発生要因	12
3.3 き裂の原因	15
4. フィルタの改修方法	27
5. 水平展開	29
6. まとめ	34
謝辞	34
参考文献	34
付録A 安全審査票	35
付録B 安全審査委員会委員名簿	37

Contents

1.	Introduction	1
2.	Examination of the Cause of Damage	6
2.1	Material Mismatch.....	6
2.2	Operation Conditions Mismatch	6
2.3	Excessive Stress	6
2.4	Fatigue	6
2.5	Poor Welding.....	7
2.6	Stress Corrosion Cracking (SCC)	7
2.7	Hydrogen Crack.....	8
2.8	Carbonic Acid Corrosion and Alkali Corrosion.....	8
3.	Examination of SCC.....	12
3.1.	Form of a Crack.....	12
3.2.	The Factor of SCC	12
3.3	The Cause of a Crack	15
4.	The Repair of a Filter.....	27
5.	Prevention Disposal	29
6.	Conclusion.....	34
	Acknowledgement	34
	References.....	34
	Appendix A	35
	Appendix B	37

1. はじめに

本報告書は、実規模単一反応管試験装置(以下、試験装置)において発生した触媒粉塵用フィルタ(以下、フィルタ)のノズルフランジと鏡の溶接部近傍の損傷(き裂)に関する原因究明のための材料検査、その他の関連調査、損傷原因の検討、さらに再発防止のためフィルタ改修および水平展開についてまとめたものである。

本試験装置は、原子炉と水素製造システムを安定に運転するための制御技術の開発、動特性解析コードの検討、水素製造システムの動特性挙動の研究、等を目的としたもので、電気ヒータで原子炉を模擬している。試験装置は、原料ガスと水蒸気を反応させて水素を製造するための水蒸気改質器、熱源となるヘリウムガスを水蒸気改質器に供給するヘリウムガス供給設備、水蒸気改質器に原料を供給するための原料ガス供給設備及び水蒸気供給設備、起動及び停止時に水蒸気改質器に窒素ガスを供給するための不活性ガス供給設備、水蒸気改質器で製造された水素等の生成ガスを燃焼処分するための後処理設備の他、冷却水設備、計測制御設備、電気設備等で構成している。図1.1に試験装置の概略系統構成とフィルタの設置位置を示す。

フィルタは後処理設備に設置した機器で、水蒸気改質器に収蔵された触媒から放出される微細な粉塵を捕集するフィルタである。フィルタの外形図を図1.2に、機器設計仕様書を表1.1に示す。

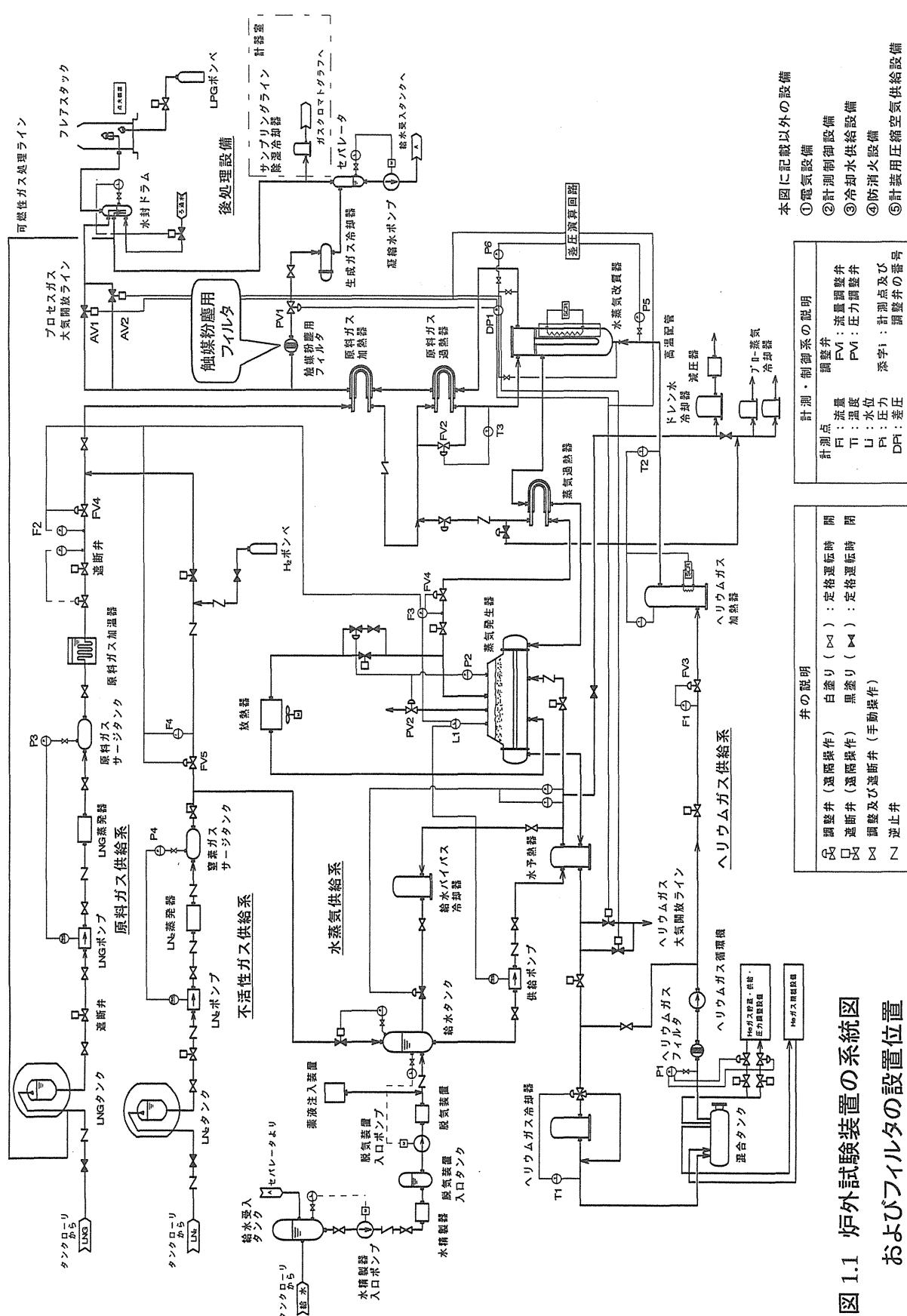
試験装置は、第5回試験終了後の平成15年12月11日に、常温状態で窒素ガスによりフィルタ容器内を約4MPaまで加圧し発泡試験を行ったところ、フィルタのノズルフランジと鏡の溶接部近傍に損傷(き裂)が発生していることを確認した。発泡試験の様子を図1.3に、損傷部の写真を図1.4に示す。

この損傷の発生に関して当該設備における今後の安全確保の観点から、大洗地区安全衛生管理規則第40条に基づき、大洗研究所長から安全審査委員会に試験装置の触媒粉塵用フィルタノズル部の損傷にかかる原因調査及び損傷ノズル部と類似継ぎ手構造部の健全性確認について答申がなされ、3回の安全審査委員会を開催し、審議を行った。

損傷の原因是、内面側から発生した応力腐食割れ(SCC)によるものと推定された。

この結果に基づいて、1) フィルタ内の凝縮水発生防止、2) 溶接残留応力低減、3) 溶接銛敏化低減を行うためのフィルタの改修を行い、平成16年5月に高圧ガス保安法の完成検査に合格した。

また、試験装置の類似継ぎ手構造部の健全性確認を実施した結果、いずれの箇所にも欠陥は検出されず、健全性が確保されていることを確認した。



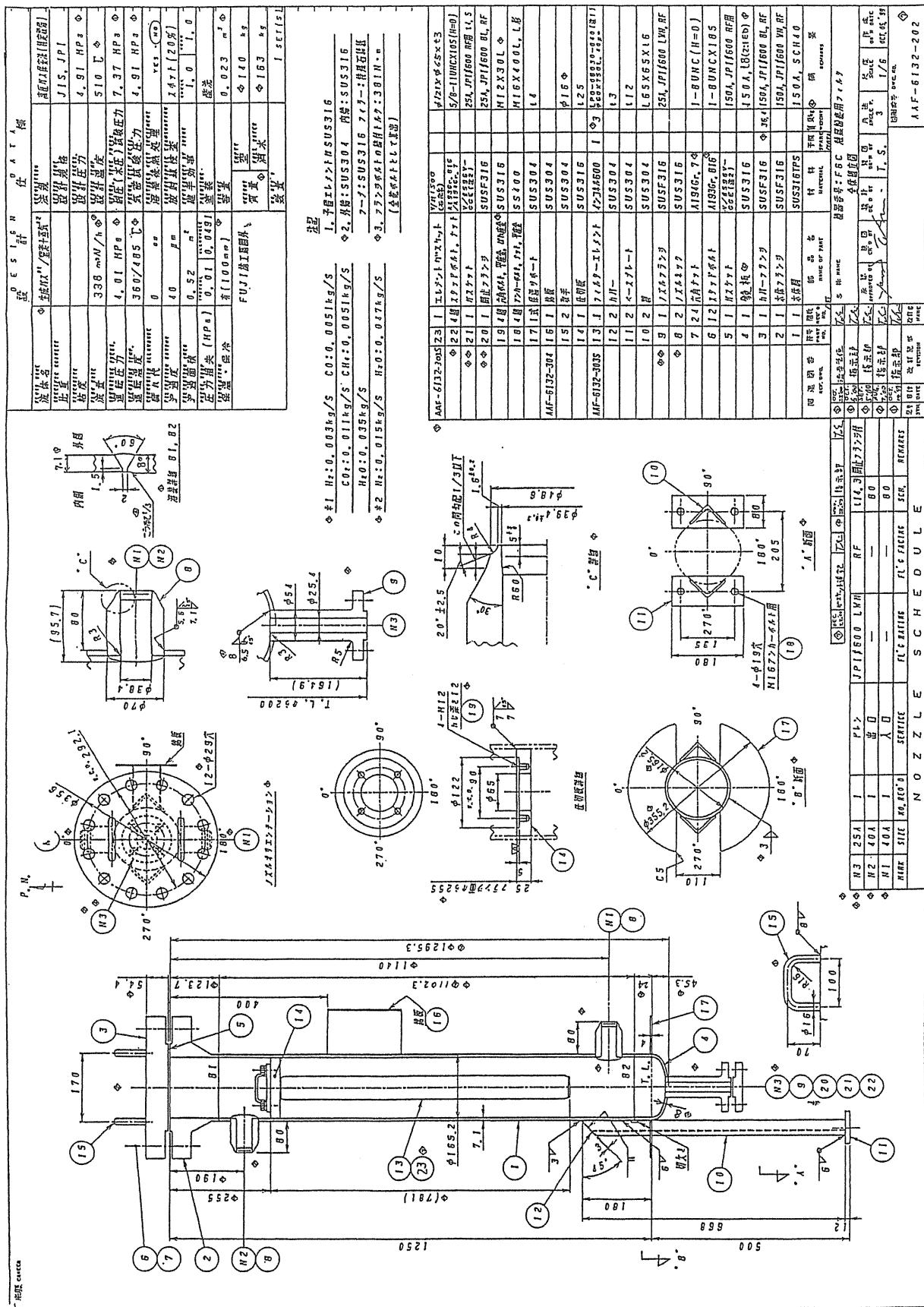


図 1.2 触媒粉塵用フィルタ外形図

表 1.1 触媒粉塵用フィルタ機器設計仕様書

項目		名称 単位	仕様	
機器番号		—	F 6 C	
機器名称		—	触媒粉塵用フィルタ	
形 式		—	縦型円筒容器 短管カートリッジ型	
基 数		—	1	
設計圧力		MPa	4.91	
設計温度		°C	510	
使 用 条 件	内包物質名		—	生成ガス*1／窒素+蒸気*2
	圧 力		MPa	4.01
	温 度		°C	360／485
フィルタメッシュ径		μm	40	
交 換 周 期		日	60	
適 用 法 規		—	高压ガス保安法 特定設備	
主 要 寸 法	胴	内 径	mm	151
		板 厚	mm	7.1
		鏡板厚さ	mm	8.0
		長 さ	mm	1280
	全 長	mm	約 1800	
材 料	胴	—	SUS316TP	
	鏡 板	—	SUS316	
	フィルタエレメント	—	インコネル 600	
質 量	据 付	kg/基	140	
	運 転	kg/基	140	
支 持 構 造		—	レグ支持	
備 考	*1 生成ガス構成 $H_2 : 0.003\text{kg/s}$ 、 $CO : 0.0051\text{ kg/s}$ 、 $CO_2 : 0.011\text{ kg/s}$ 、 $CH_4 : 0.0051\text{ kg/s}$ 、 $H_2O : 0.035\text{ kg/s}$			
	*2 窒素+蒸気構成 $N_2 : 0.015\text{kg/s}$ 、 $H_2O : 0.047\text{ kg/s}$			

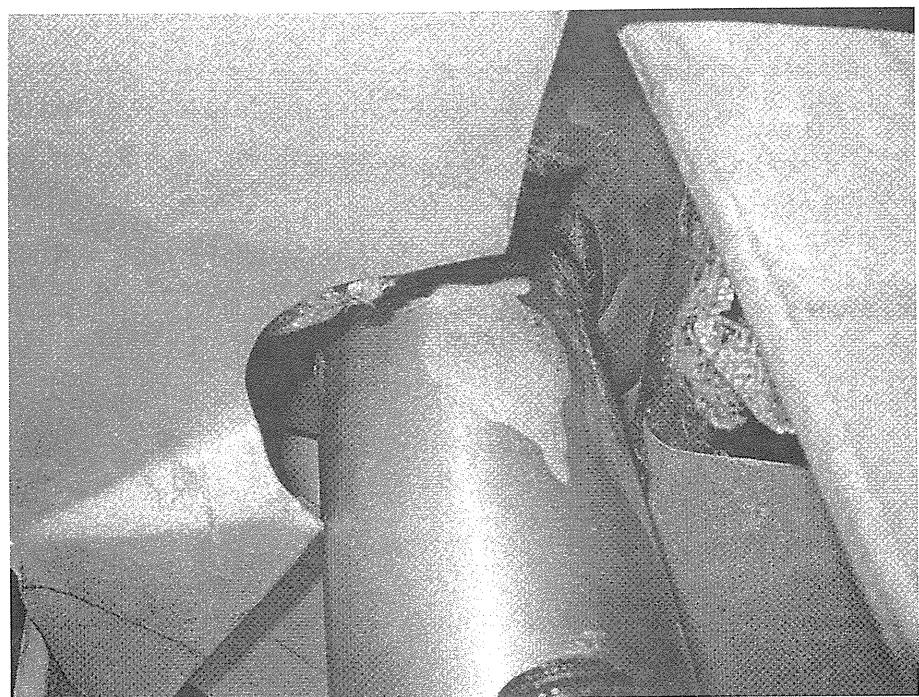


図 1.3 発泡試験での発泡



図 1.4 損傷部

2. 損傷原因の検討

き裂発生の原因となり得る事象及びその特定に関わる検討結果を図 2.1 に示す。想定される原因事象である材料不適、運転条件不適、過大応力、疲労、溶接不良、応力腐食割れ(以下 SCC)、水素割れ、炭酸腐食・アルカリ腐食について検討を行った。

2.1 材料不適

フィルタの主な構成材料は、ノズルフランジが SUSF316、鏡と出入口ノズルが SUS316、胴部が SUS316TPS であった。材料について記録検査を実施し、ミルシートから設計通りであることを確認した。また、製造履歴や検査結果にも異常は見られなかった。更に、ノズルフランジについては、金属組織、硬さ測定、化学分析を行い、材料不適ではないことを確認した。

2.2 運転条件不適

フィルタの設計条件と運転履歴を調査し、表 2.1 に示すように、プラント全体として異常な温度・圧力は加わっていないことを確認した。

2.3 過大応力

1) 配管拘束過大

ノズルフランジはサポートによる拘束ではなく、配管反力（機械的外荷重）はない。

2) 運転応力过大

運転応力として内圧応力及び熱による応力の 2 つが考えられ、それぞれ応力評価を行った。

内圧による応力は、運転履歴での最大圧力 4.1MPa の条件で計算し、7.8MPa であった。

熱による引張応力については、定格運転の実測値である入口温度 270°C の条件で温度解析及び応力解析を ANSYS コードにより実施した。フィルタ内に凝縮水の滞留があったことから、解析は凝縮水が滞留する場合と滞留しない場合の 2 ケースについて行った。

それらの解析結果を図 2.2 及び図 2.3 に示す。凝縮水が滞留しない場合 22.5MPa、滞留する場合 24.2MPa であり、両者に大きな差は見られなかった。また、鏡部の応力は内圧応力による 50MPa である。

以上の結果から、許容引張応力 70.2MPa に対して、十分小さな値であり、過大な運転応力は発生しない。

2.4 疲労

1) 高サイクル機械疲労

フィルタ近傍に振動を発生する機器は接続されておらず、高サイクル機械疲労は問題とならない。

2) 低サイクル機械疲労

起動停止運転並びに保安検査の気密試験等による圧力の昇降サイクルは保守的に見て

25回である。運転応力に対する許容繰り返し回数は、 10^6 回以上であり、昇降サイクル数は十分小さい。また、破面観察の結果、疲労による割れの特徴であるストライエーションと呼ばれる細かい縞模様（貝殻状の模様）が見られなかつたことからも、低サイクル機械疲労による割れでないと考えられる。

3) 低サイクル熱疲労

起動停止運転並びに試験条件の変更による温度変動サイクルは保守的に見て25回である。運転応力に対する許容繰り返し回数は、 10^6 回以上であり、温度変動サイクル数は十分小さいこと、および、破面に疲労による割れの特徴であるストライエーションと呼ばれる細かい縞模様が見られなかつたことからも、低サイクル熱疲労による割れでないと考えられる。

4) サーマルストライピング（高サイクル熱疲労）

フィルタ内の凝縮水はガス流れの滞留部にあり、かつ、ガス流速が胴部0.3m/s、配管吹込み部4.2m/s程度であるので、水運動は小さいと考えられる。また、図2.2及び図2.3に示したANSYSコードによる温度解析結果により、凝縮水滞留の有無による鏡及び胴の温度変化は小さいため、サーマルストライピングの影響がないと考えられる。

サーマルストライピングによる割れの特徴は、表面層だけに亀甲状（網目状）の割れとなる。これに対し、フィルタの割れはいずれも線状の割れであり、サーマルストライピングとは考えられない。

2.5 溶接不良

1) 溶接欠陥

記録検査を実施し、製造履歴や成績書は異常が無いことを確認した。また、外観検査、PT等においても異常が無いことを確認した。

2) 高温割れ

高温割れは約1000°C以上で生じる割れであり、フィルタにおいては、溶接時にしかこの温度は発生しない。溶接時の検査により異常が確認されておらず、高温割れは考えられない。

2.6 応力腐食割れ（SCC）

1) 外部からの SCC

保温材分析及び外部付着物の分析結果より、塩素が検出されたが、運転中はフィルタ本体が高温であり、常に外面に水分が付くことはない。また、き裂の内外面観察の結果、き裂は内面から外面に向かって進展しており、外部からのSCCがガス漏洩の原因とは考えられない。ただし、漏洩を生じた後にその内部から水が染み出し保温材との隙間に残留することにより外面に2次的なSCCを発生したと考えられる箇所が観察された。

2) 内部からの SCC

検討の結果、き裂は内面から外面へ進展したことが明らかであり、ガス漏洩を引き起こしたき裂は内部からのSCCが原因と考えられる。検討結果の詳細は3章で述べる。

2.7 水素割れ

水素割れは、高温高圧下で水素が鋼中の炭化物と反応してメタン等のガスを生成し水素脆化を起こす。ステンレス鋼ではこの現象は起き難いとされる⁽¹⁾。

2.8 炭酸腐食・アルカリ腐食

炭酸腐食については、材料がオーステナイト系ステンレス鋼では問題とならない。アルカリ腐食については、pH が 13 以上でアルカリ腐食の発生、 $6 < \text{pH} < 13$ で保護被膜による防食状態となる⁽²⁾が、フィルタ内部の凝縮水を分析した結果、pH は約 12 であった。凝縮水の水質は運転条件、停止期間などにより変化することから、必ずしもアルカリ腐食の可能性を完全には否定できない。しかし、アルカリ腐食の可能性は後述の塩化物の寄与による SCC に比べてはるかに小さいものと考えられる。

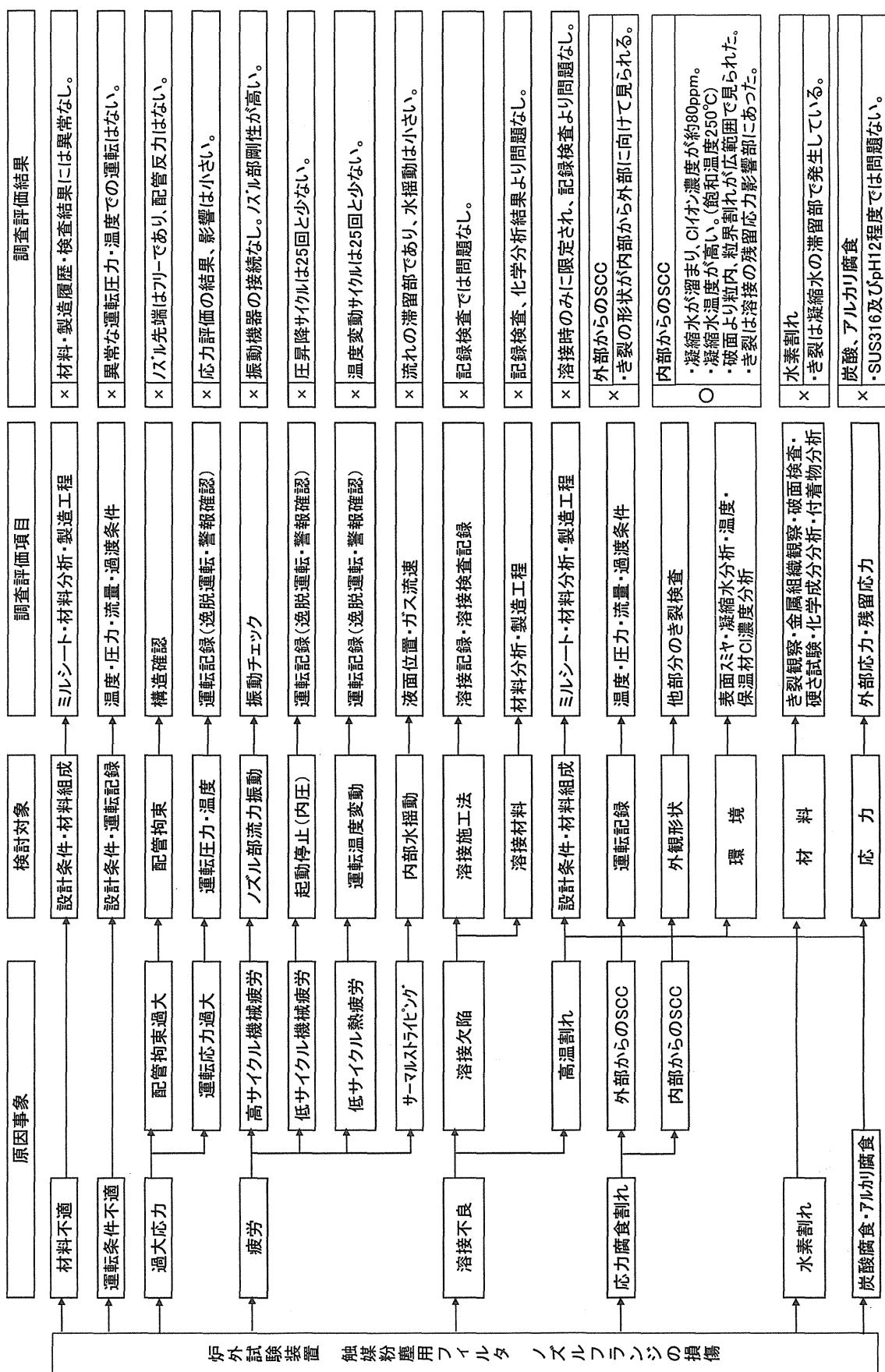


図 2.1 き裂発生の原因となり得る事象とその特定に関する検討項目

表 2.1 触媒粉塵用フィルタの運転履歴

(a) 原料ガス加熱器出口生成ガス温度(フィルタ部温度)

	最大値 °C	累積時間			温度 サイクル (回)
		100°C以上 200°C未満 (時間)	200°C以上 300°C未満 (時間)	300°C以上 最大値以下 (時間)	
機能試験1	296	229.8	12.6	0.0	5
機能試験2	301	103.4	50.0	0.2	1
第1回試験	52	0.0	0.0	0.0	0
第2回試験	301	66.4	2.2	0.2	2
第3回試験	331	294.6	236.2	23.4	4
第4回試験	363	295.0	424.8	211.8	9
第5回試験	375	132.4	14.2	199.4	4
合計	-	1,121.6	740.0	435.0	25

触媒粉塵フィルタの設計温度: 510°C

(b) 水蒸気改質器出口圧力(フィルタ部圧力)

	最大値 MPa	1MPa以上 累積時間 (時間)	圧力 サイクル (回)
機能試験1	3.56	790.2	1
機能試験2	4.08	373.0	1
第1回試験	3.20	311.4	1
第2回試験	3.79	334.8	2
第3回試験	4.07	1,056.2	5
第4回試験	4.11	1,079.4	3
第5回試験	4.06	601.8	2
特定設備検査	7.73	-	1
完成検査	7.73	-	2
変更検査	4.91	-	1
保安検査	4.91	-	2
自主検査	4.91	-	4
合計	-	4,546.8	25

触媒粉塵フィルタの設計圧力: 4.91 MPa

(c) 運転累積時間及び停止期間

	水蒸気 通気 累積時間 (時間)	水素製造 累積時間 (時間)	運転終了後の 停止期間	
			(日)	(時間)
機能試験1	9.2	2.8	29	696
機能試験2	50.0	49.4	27	648
第1回試験	0.0	0.0	112	2,688
第2回試験	2.2	1.6	102	2,448
第3回試験	259.4	253.4	159	3,816
第4回試験	634.0	541.6	114	2,736
第5回試験	212.6	21.4	-	-
合計	1,167.4	870.2	543	13,032

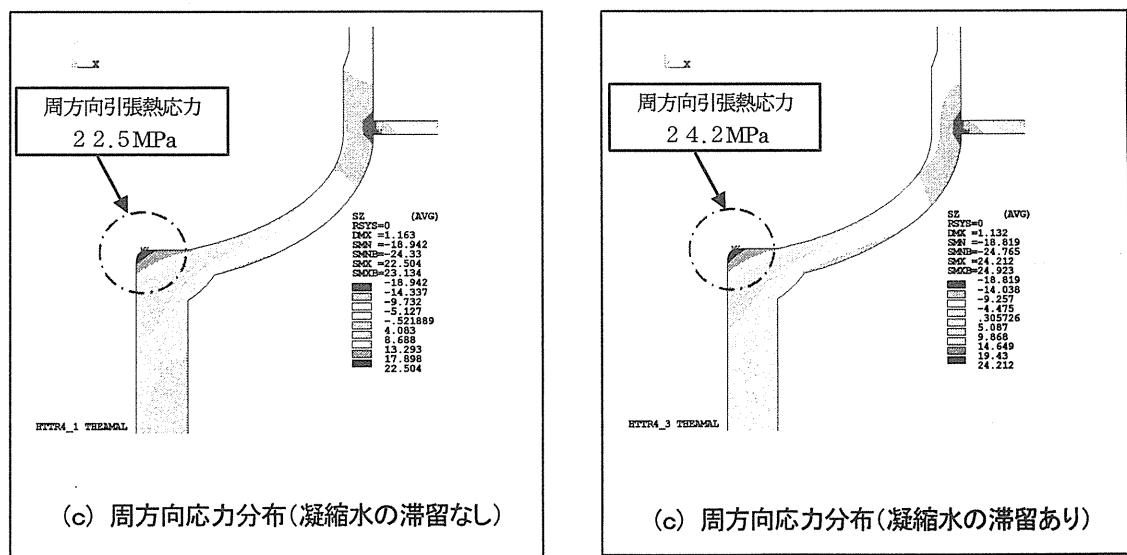
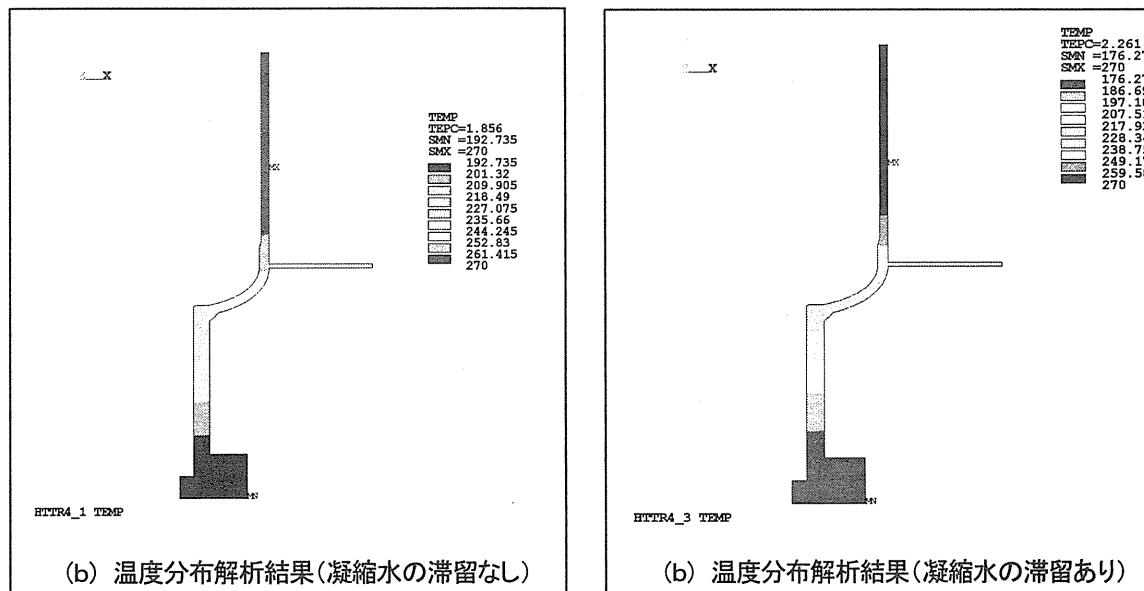
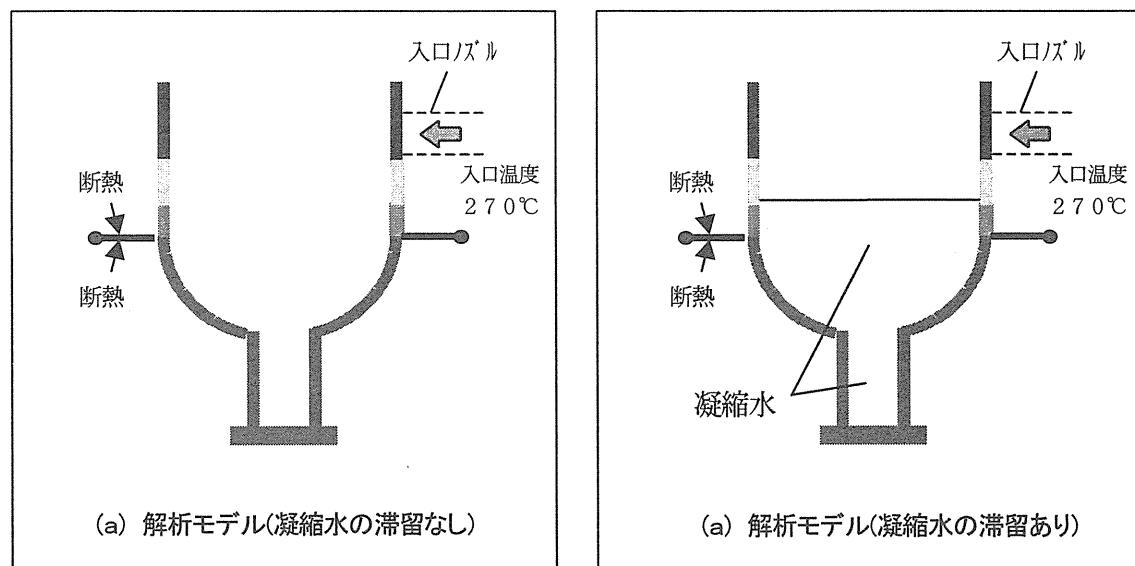


図 2.2 温度と応力解析結果(その 1)

図 2.3 温度と応力解析結果(その 2)

3. 応力腐食割れの検討

以下に応力腐食割れ(SCC)について検討する。

3.1 き裂の形状

発泡試験によりノズルフランジのき裂は厚さ約 14mm の部材を貫通していることが確認された。この他、胴部切断後の内面 PT 検査において鏡と胴部の溶接部近傍の内面で厚さ約 7~8mm の部材に対し深さ 3 から 4mm のき裂が観察された。このき裂は鏡側のみに発生しており胴側は健全であることを確認している。また入口ノズル内面にも PT 検査においてき裂が観察された。入口ノズルと溶接された配管側は健全であることを確認した。

図 3.1 にノズルフランジ外面のき裂のレプリカ観察結果を示す。溶接部を起点にき裂は細かく分岐して進展している。このき裂の右側約 10mm の点を軸方向に切断した時の断面マクロ観察（縦断）の結果を図 3.2 に示す。図中、ノズルフランジ内で黒く見える部分は切断時の金属片脱落部である。この脱落はき裂が生じていたことによる。外面からは観察できなかつたが、ノズルフランジ上面の肉盛部に接する部分において大きなき裂が観察された。また、その下部においても内面から外面へと進展したき裂が観察された。

このノズルフランジの上面の肉盛は設計仕様と異なっており、今回の調査で断面を観察したことにより初めて明らかになった。なお、フィルタの圧力容器の製作を行った業者の検査成績書からもこのような施工の判別は不可能であった。

図 3.3 は、図 3.2 で観察したものとは別のき裂について行った破面 SEM 観察（走査型電子顕微鏡観察）の結果であり、粒界割れ及び粒内割れが観察された。また、図 3.4 はき裂の断面ミクロ写真（横断）である。き裂は管内面側から外側に向けて分岐していることが観察されることから、き裂は内部から外部に向けて進展したと考えられる。

次に、胴と鏡の溶接部近傍のき裂について破面 SEM 観察を行ったが、図 3.5 に示すように粒界割れを確認した。また、入口ノズルで観察されたき裂も、図 3.6 のレプリカ観察結果から粒界割れを発生していたものと考えられる。

3.2 SCC 発生要因

フィルタの材料であるオーステナイト系ステンレス鋼は、以下の 3 つの因子が重畠する場合に SCC を起こす。

- ① 環境因子： 金属表面が水に接し、水中に塩化物、苛性ソーダ(ナトリウムイオン)などが存在すること。なお、およその目安として、塩化物については濃度が 10ppm 以下では SCC は発生しにくい、また苛性ソーダではき裂が起るには 100ppm 以上が必要であると言われている⁽³⁾。ただし、SCC 感受性は温度が高くなれば高くなる。
- ② 応力因子： 金属中に引張応力があること。大部分の場合には溶接残留応力であると言われている⁽³⁾。

③ 材料因子： 使用している材料が、SCC 感受性を有していること。ただし、塩化物イオンなど環境因子の濃度が低い場合には、溶接の熱影響による鋭敏化、すなわち熱影響により粒界に Cr 炭化物が析出しその周辺の Cr 欠乏層で耐食性が劣化する現象が必要である。

なお、環境因子の濃度が低い場合には、破面は粒界割れを示し、濃度が高い場合（液面近傍など、乾湿を繰り返すところ）には粒内割れを示す。後者は、オーステナイト系ステンレス鋼（SUS316 など）では鋭敏化がなくても、環境因子と応力因子だけで粒内型 SCC を生じる。粒界型となるか粒内型となるのかは、金属の不働態皮膜の安定性や再不働態化速度・粒界の腐食速度などによって変わる。⁽⁴⁾

（1）環境因子

フィルタ容器から約 1.1 リットルの凝縮水が採取されており、その水位は鏡と胴部の溶接線より約 1 cm 上にあたる。ノズルフランジと鏡と胴の溶接部近傍のき裂は、この凝縮水中にあったと考えられる。ノズルフランジは流れが淀む箇所であり、入口ノズルから流入するガスの熱が伝わりにくい。このため、図 2.2 の温度分布に示すように、ノズルフランジは水蒸気の飽和温度（4.0MPa での飽和温度：251°C）以下になっており、水蒸気が凝縮した水が滞留したものと考えられる。

採取した凝縮水からは、表 3.1 に示すように SCC の環境因子である塩化物イオン約 80ppm、ナトリウムイオン約 2000ppm が検出された。フィルタの下流に設置されているセパレータ内の凝縮水の分析記録においては、塩化物イオン 0.71ppm、ナトリウムイオン 0.08ppm であった。したがって、フィルタ内で塩化物イオン等の濃縮が起きたものと考えられる。また、入口ノズルについては、上流に計装配管があり、ここで発生した凝縮水が入口ノズルに流入し、壁面で蒸発することにより、塩化物イオン等の濃縮が起こったと考えられる。

調査した結果、これらのイオンの供給源として以下のことが考えられる。

水蒸気の原料である純水には 4~12 ppb の塩素が含まれている。また、試験装置の運転中に、定期的に蒸気発生器から水を採取し、専門業者に依頼して分析を行っており、その結果、水中の塩化物イオン濃度が約 5 ppb と小さいことを確認してきた。さらに、水蒸気改質器の開放点検において内部の PT 検査を実施していたが、PT 検査液（浸透液、現像液、洗浄液）には 5~6 ppm の塩素が含まれていた。このほか、試験装置の開放点検時や水蒸気改質器の触媒交換時等に大気中の海塩が系統内に侵入した可能性もある。

一方、凝縮水の水質分析ではナトリウムイオンが検出されているが、苛性ソーダの存在は直接確認された訳ではない。しかし、水質分析の結果 pH が 12 とアルカリ性であったこと、および図 3.7 に示すフィルタのき裂表面析出物の SEM-EDX による成分分析で、ナトリウム、酸素が検出されたことなどから、苛性ソーダが凝縮水に含まれていたと考えられる。による。苛性ソーダの存在については、試験装置の製作時にはその供給源が見当たらず、アルカリ型 SCC は想定していなかった。

その後、触媒特性の評価のために行った触媒の成分分析により、触媒中に 500~800ppm のナトリウムが含まれていることが確認された。したがって、凝縮水中のナトリウムイオンは触媒中のナトリウムが質量移動したことが考えられる。また、塩化物イオンと同様に試験装置の開放点検時や水蒸気改質器の触媒交換時等に大気中の海塩が系統内に侵入した可能性がある。

また、き裂発生の原因調査中に、一般の水蒸気改質プラントにおいて、生成ガス中の CO、CO₂ が通気するところに凝縮水が存在することによる SCC の例が報告されていることを確認した⁽⁵⁾。このことから、CO、CO₂ が寄与した可能性も考えられる。

試験装置においては、給水中には酸素が存在しているが、流体は水素を含む還元性ガスであるため、酸素は水蒸気改質器や配管内で水素と反応して直ちに水になり酸素は存在せず、その凝縮水中にも溶存酸素は無い。したがって溶存酸素による SCC は考えられない。

試験装置の製作時には、塩化物イオンについては蒸気の原料である純水に含まれる量が微量であること、また、苛性ソーダ(ナトリウムイオン)については供給源が見当たらないことから、SCC は問題ないと判断していた。しかし、上述したように、フィルタ内での塩化物イオン等の濃縮により、SCC が発生したものと考えられる。

(2) 応力因子

ノズルフランジの溶接部の残留応力をひずみゲージ法並びに X 線回折法により測定した。試験結果を図 3.8 に示す。ノズルフランジに発生したき裂により残留応力が開放されたため、明確に残留応力を測定することができなかった。

残留応力の測定は困難であったが、本機器の製作時に行った溶接作業の後に応力除去焼鈍がなされてないため、溶接部付近には残留応力が存在していたと考えられる。図 3.2 に示す断面マクロ写真では、溶接部の近傍でき裂が発生しており、特にノズルフランジ上面ではき裂の度合いが大きいことから、肉盛溶接に伴う熱影響による引張残留応力がき裂の進展を促進したと考えられる。

鏡と胴の溶接線と入口ノズル配管の溶接部についても、応力除去焼鈍がなされてないため、溶接部付近には残留応力が存在すると考えられる。

入口ノズルと配管のき裂はノズル側のみに見られ、配管側にはき裂は見られない。これは、ノズル側が厚肉トランジション構造となっており、配管側と比較して入口ノズル側に大きな引張残留応力を生じる溶接であったためと考えられる。

鏡と胴の溶接線近傍のき裂は、鏡側のみに見られ、胴側には見られない。これも、入り口ノズルと同様に鏡側が厚肉トランジション構造となっており、胴側と比較して鏡側に大きな引張残留応力を生じる溶接であったためと考えられる。

(3) 材料因子

オーステナイト系ステンレス鋼 (SUS316 など) は、塩化物イオンを含む環境で使用すると SCC を発生する可能性がある。また、低炭素型ステンレス鋼でない場合には、溶接の熱影響により銳敏化を生じて粒界型 SCC の感受性が高まることも知られている。

材料の熱影響と鋭敏化を確認するため、ノズルフランジについて硬さ測定ならびに粒界近傍の成分分析を行った。

硬さ測定を行った結果を図3.9に示す。ノズルフランジの素材の硬さは、ミルシートでは151（ビッカース硬さの値。ミルシートのブリネル硬さ144を換算）、健全部の測定結果では145から149であるのに対し、溶接部付近では160から200程度に硬化していることが判る。溶接金属の端から約30mmの範囲が熱影響部であると考えられる。しかし、鋭敏化の情報は得られなかった。

次に、この熱影響部について、透過型電子顕微鏡を用い、エネルギー分散型X線検出器により粒界近傍の成分分析を行い、Cr欠乏の評価を行った。その結果では図3.10に示すように、粒界に析出物やCr欠乏層が明確に検知されていないため、鋭敏化部分は狭い範囲で生じたと考えられる。これは、破面観察により粒界型のSCCがごく一部にのみ観察されたことと合致している。

以上の測定結果から鋭敏化についての明確な情報は得られなかつたが、ノズルフランジ部のひび割れは、広範囲に及びかつ粒内型のSCCがほとんどであり、材料因子としては塩化物イオンを含む環境でSCC感受性を持つSUS316を使用したことが挙げられる。

3.3 き裂の原因

2章及び3.1節及び3.2節の検討結果から、き裂は3つの因子すなわち環境因子、応力因子及び材料因子が重畠したことにより内面側から発生したSCCと判断される。環境因子としては凝縮水、塩化物イオン、苛性ソーダ、CO/CO₂などの存在、応力因子としては溶接残留応力、材料因子としてはオーステナイト系ステンレス鋼(SUS316)が用いられていたことが挙げられる。総合的に判断すると水分と塩化物イオン等の存在がSCCの最大の発生原因となったといえる。

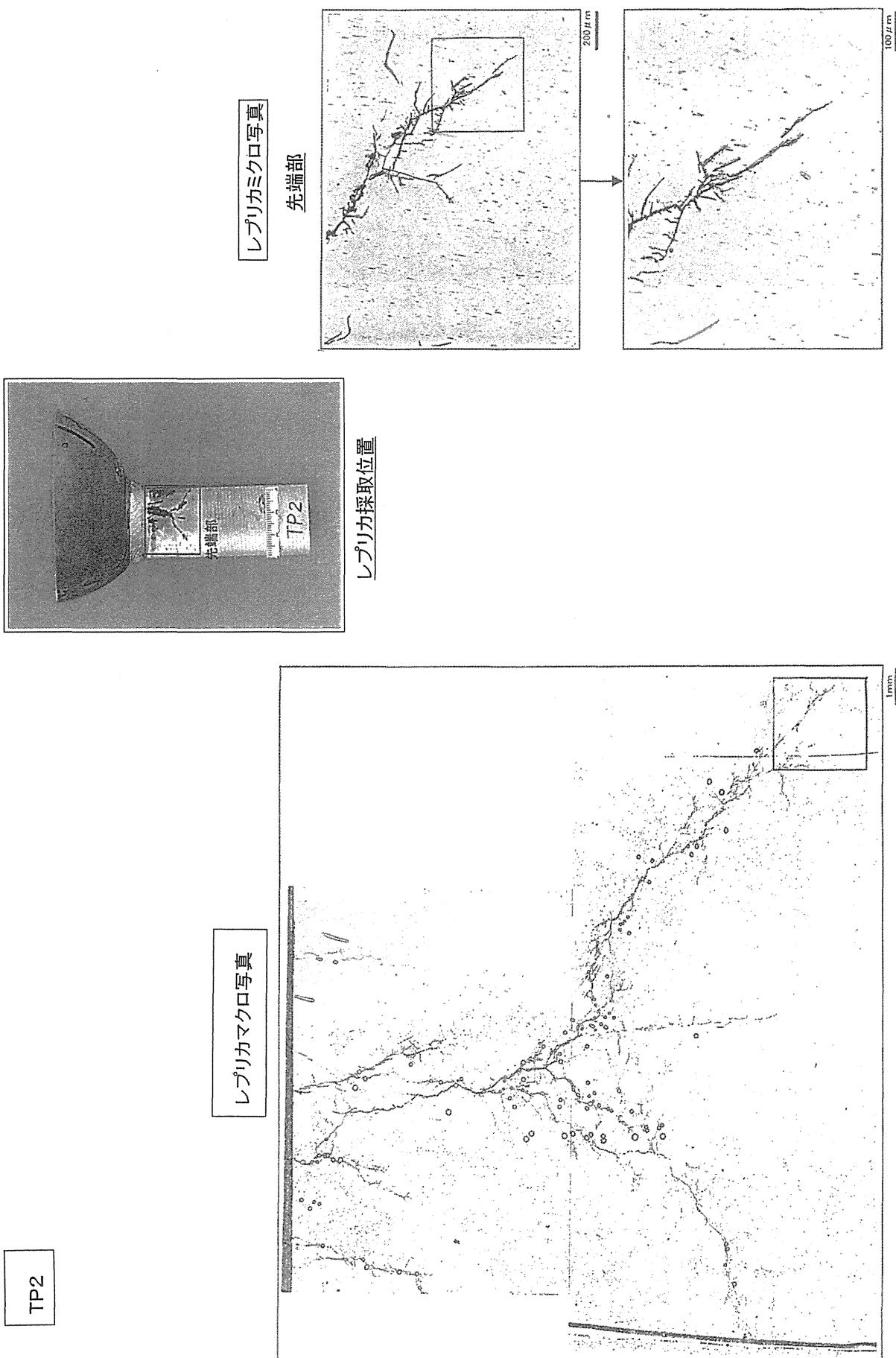


図 3.1 ノズルフランジ外面き裂のレプリカ観察 (TP2)

試料名:鏡部TP. 2(切斷後 縦断)

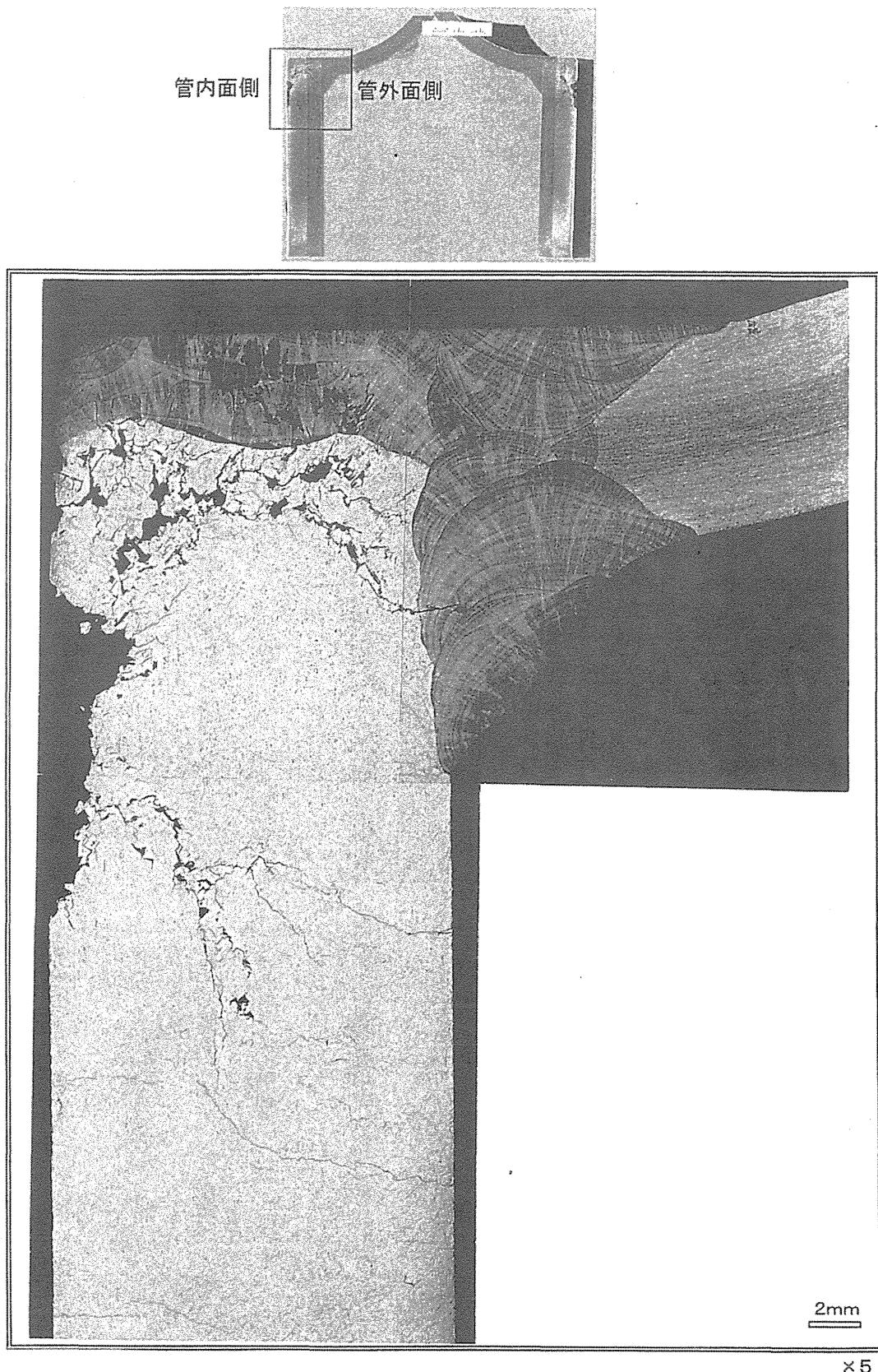


図 3.2 断面マクロ写真 (TP 2、縦断)

試料名：鏡部TP1

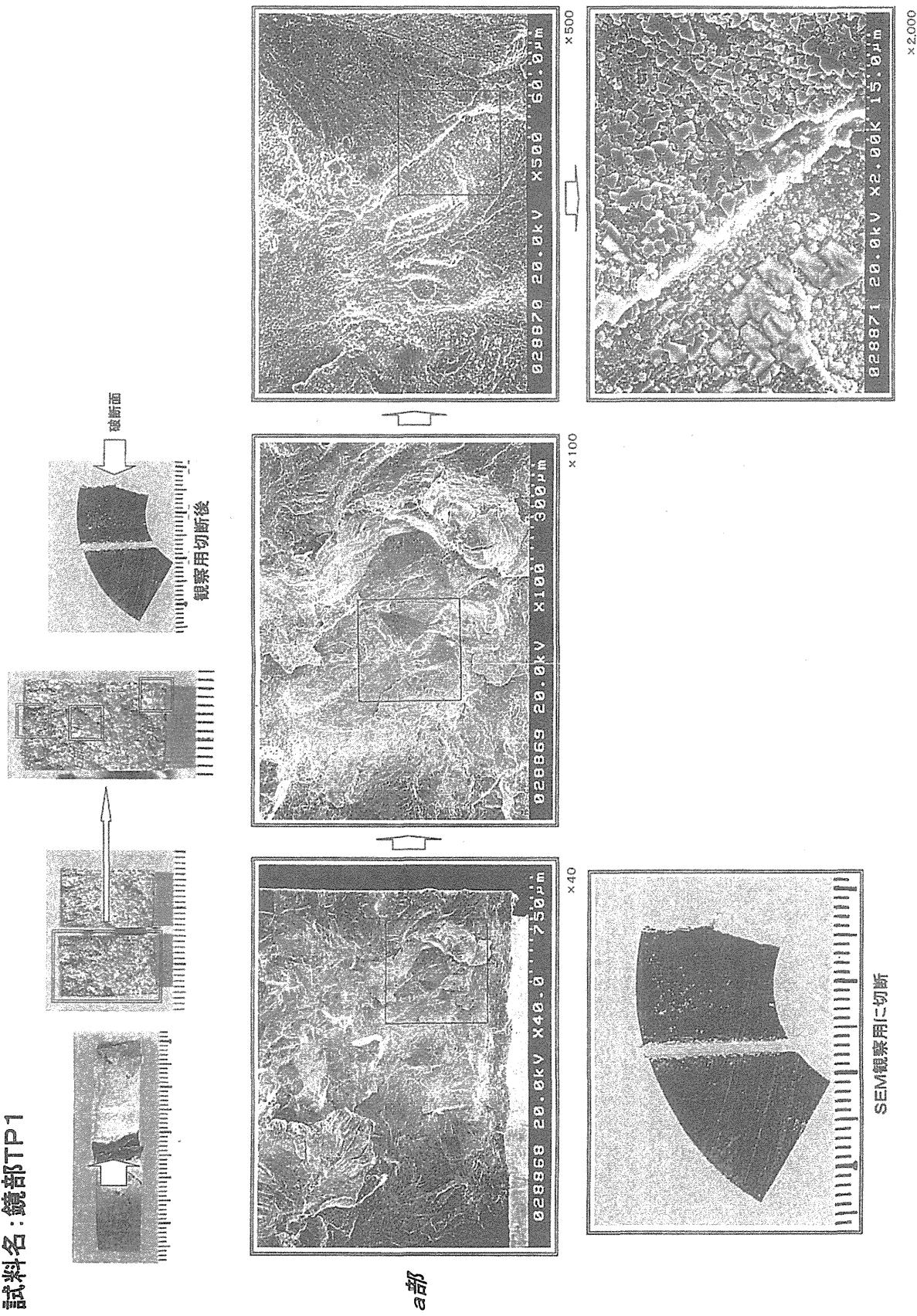


図 3.3 破面 SEM 観察 (TP1)

試料名:鏡部TP. 2(切断後 横断)

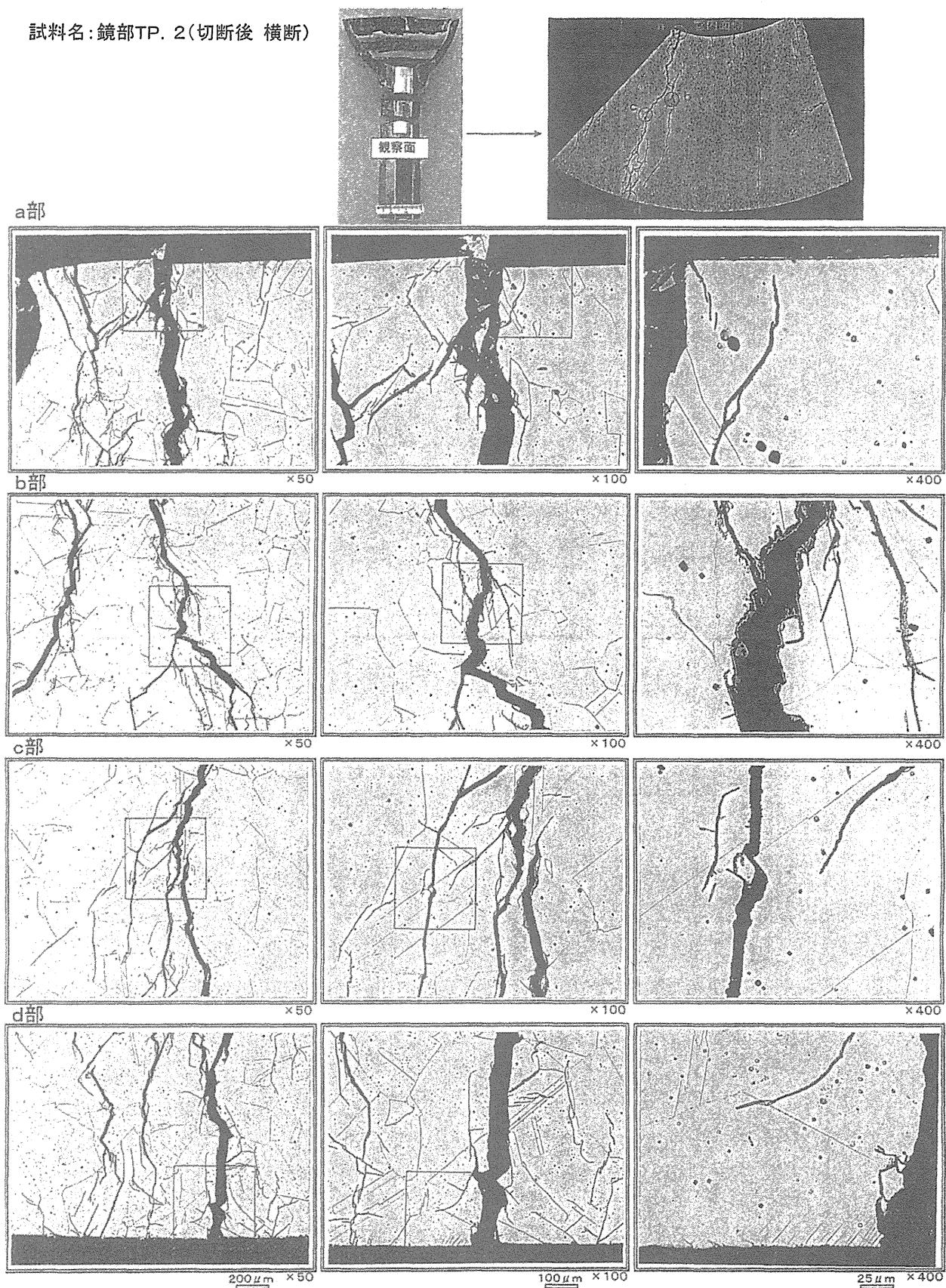


図 3.4 断面ミクロ写真 (TP. 2、横断)

試料名：脣部TP6

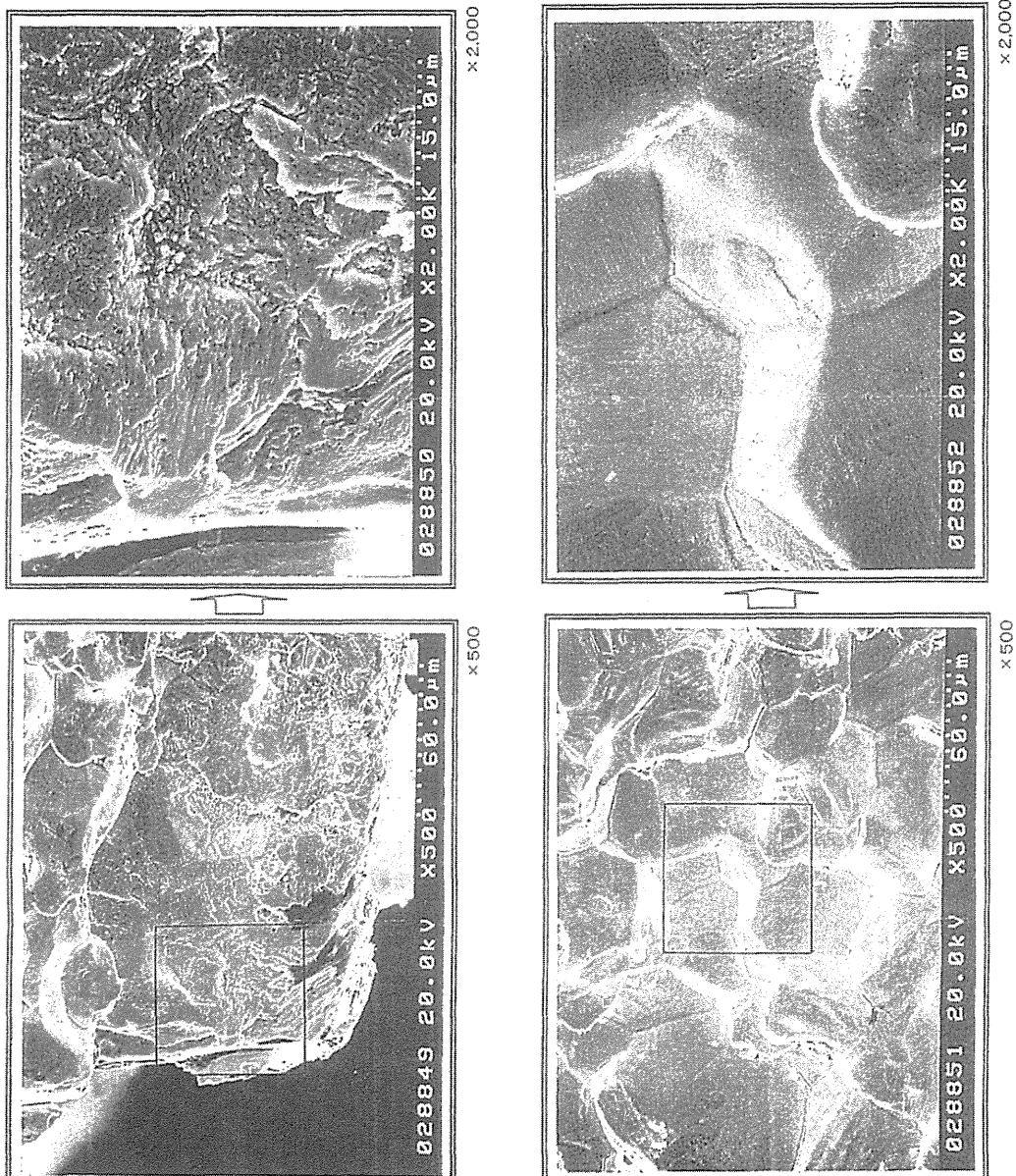
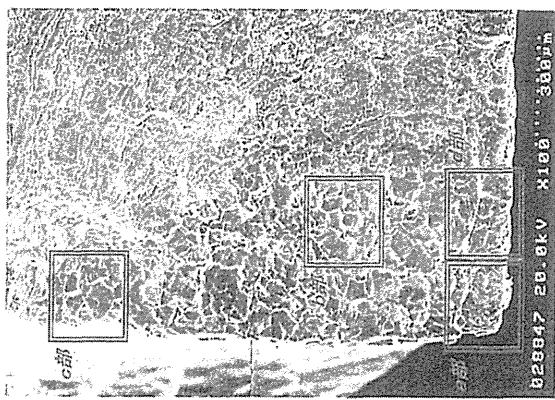
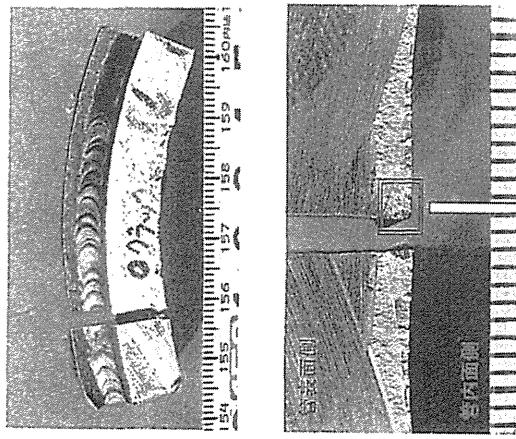


図 3.5 破面 SEM観察 (TP6)

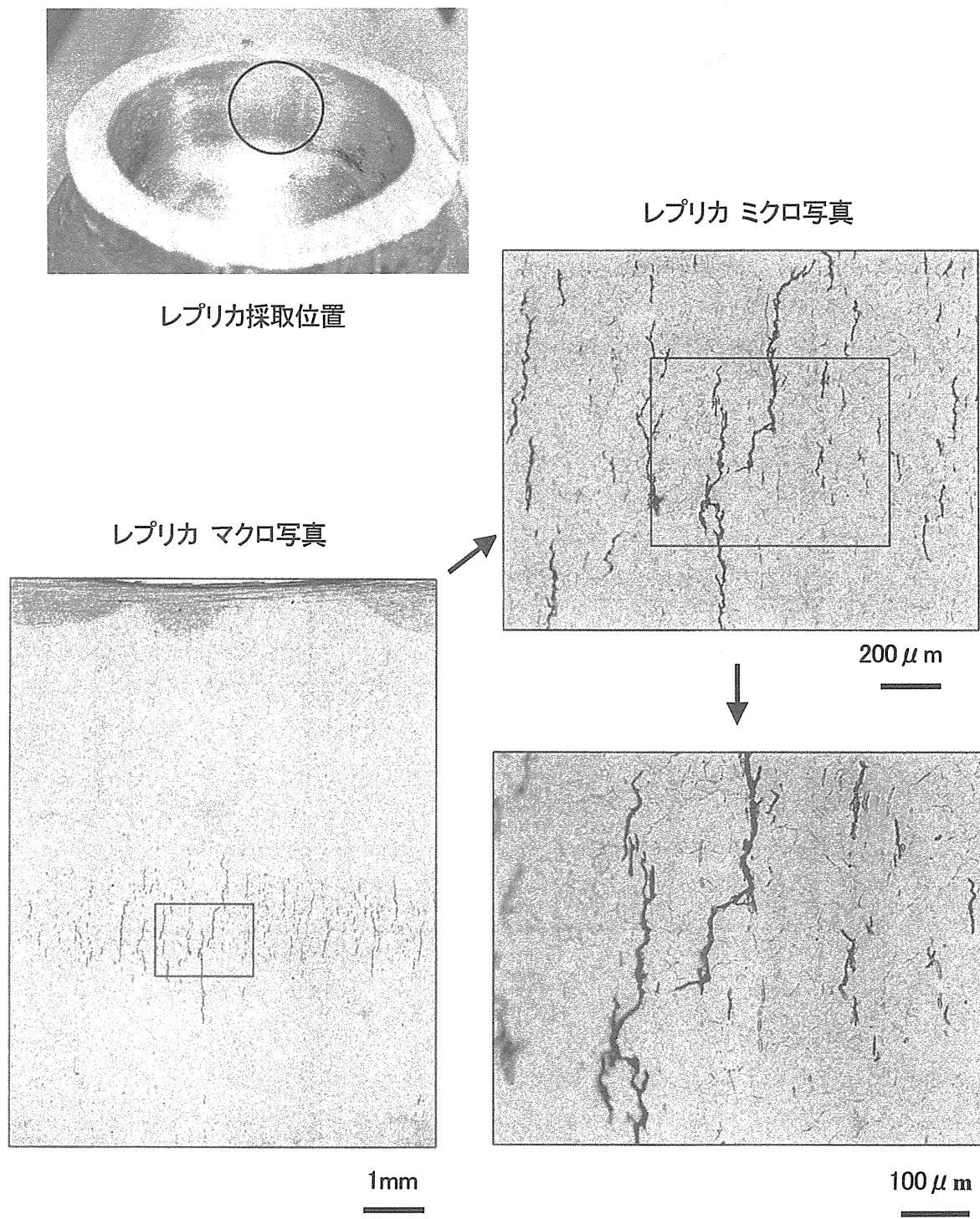


図 3.6 入口ノズル内面のき裂レプリカ観察

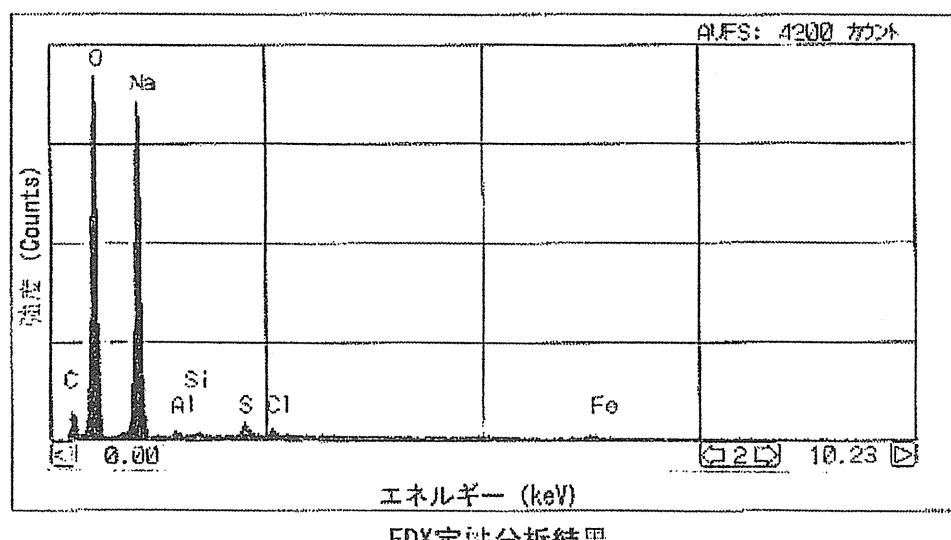
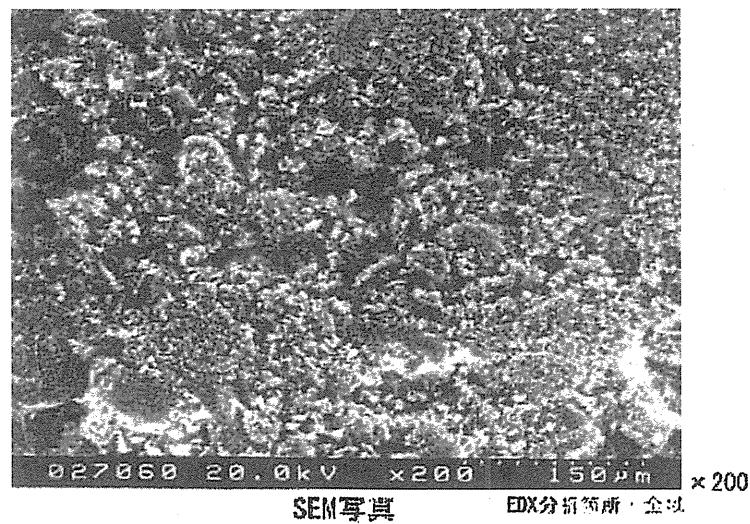


図 3.7 ノズルフランジ外表面白色析出物の SEM-EDX 分析結果

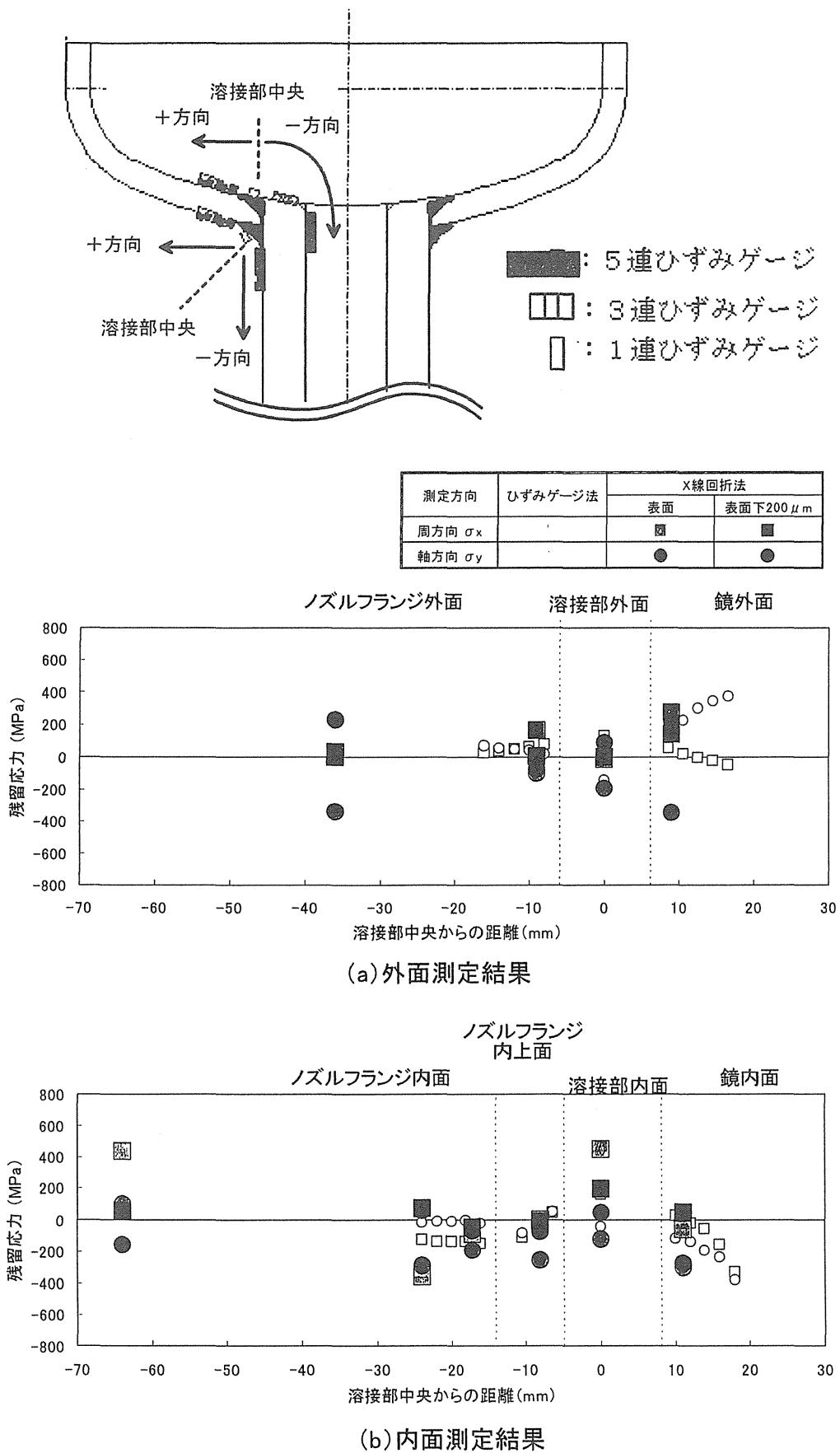


図3.8 ひずみゲージ及びX線回折による残留応力測定結果

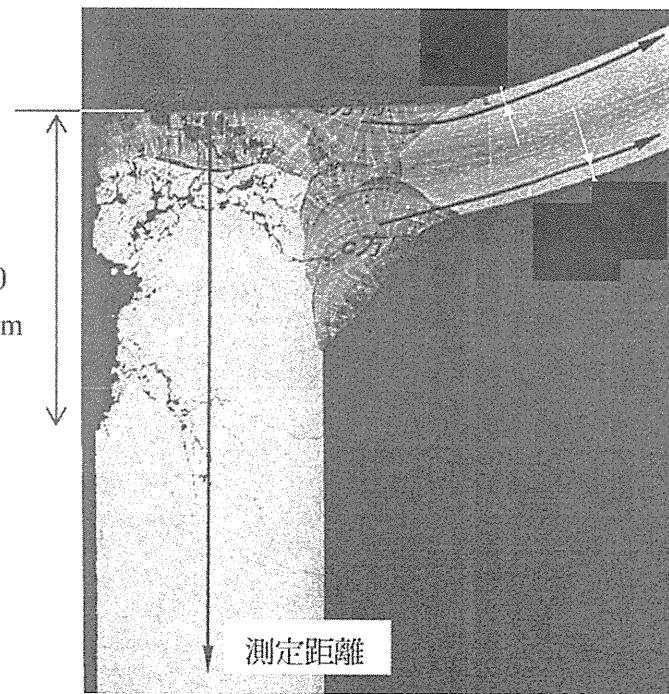
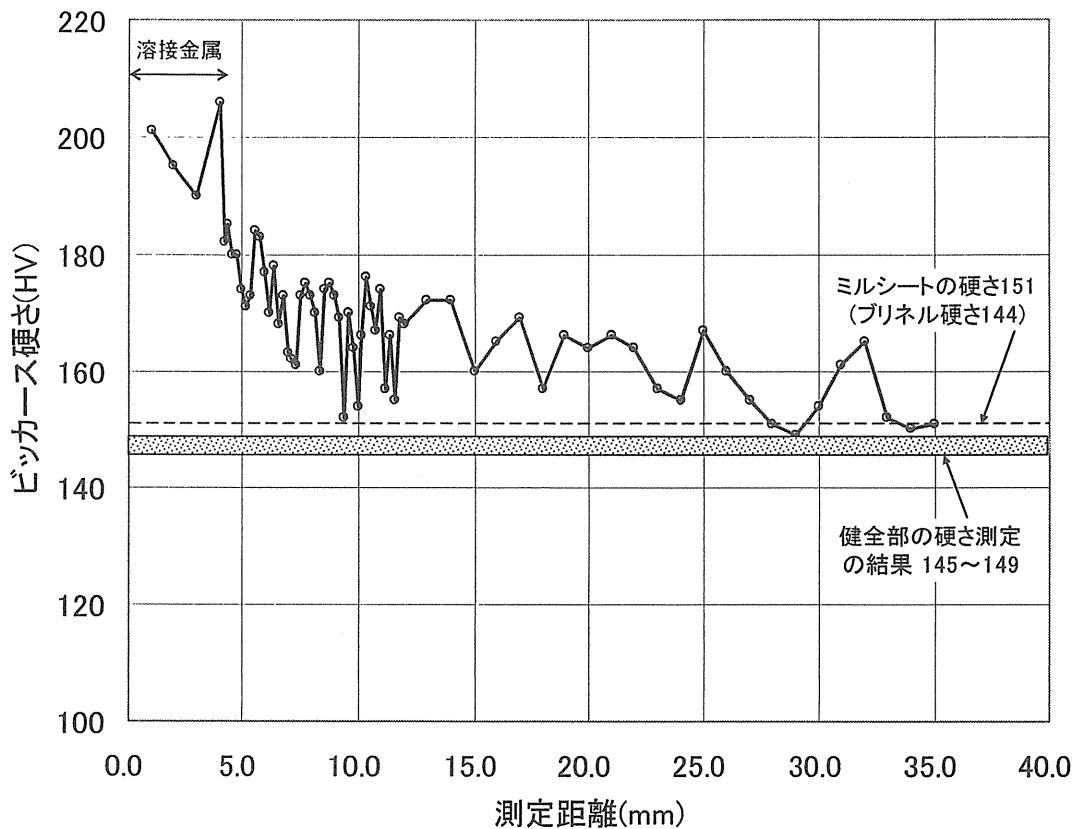


図 3.9 ノズルフランジ部の軸方向硬さ測定の結果

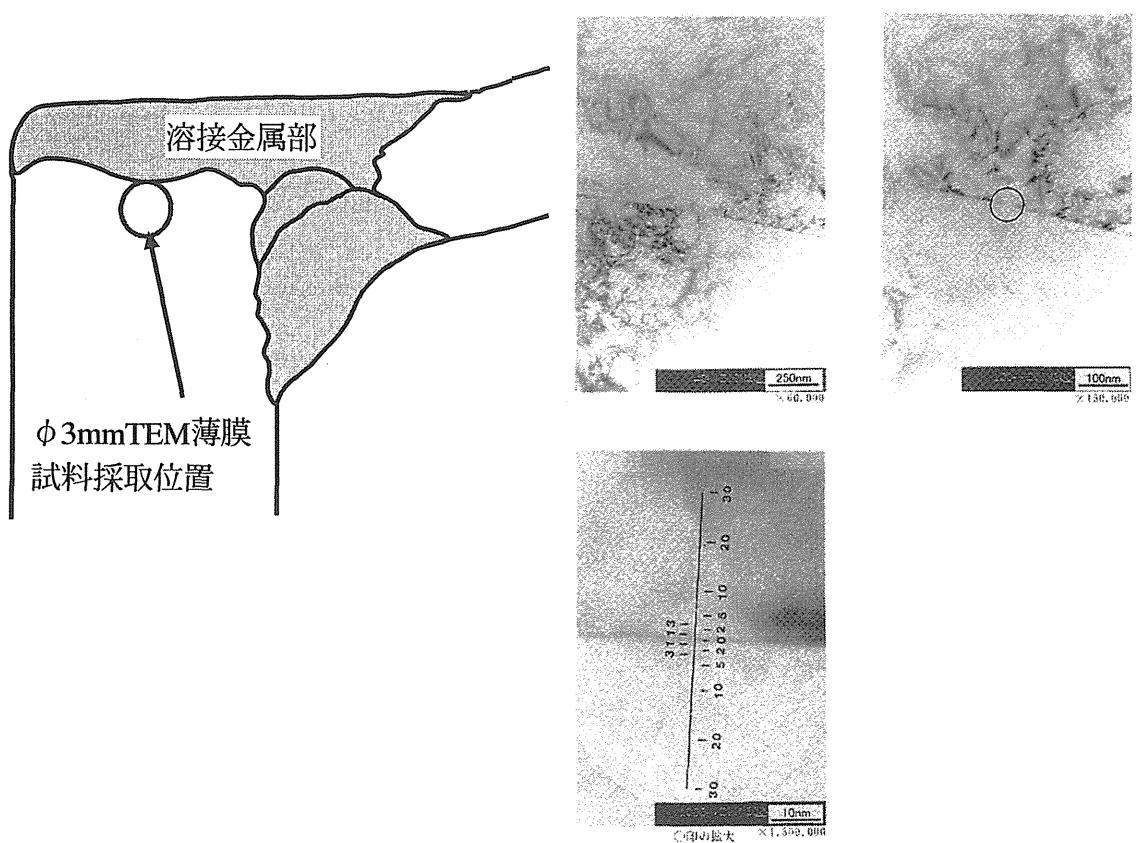
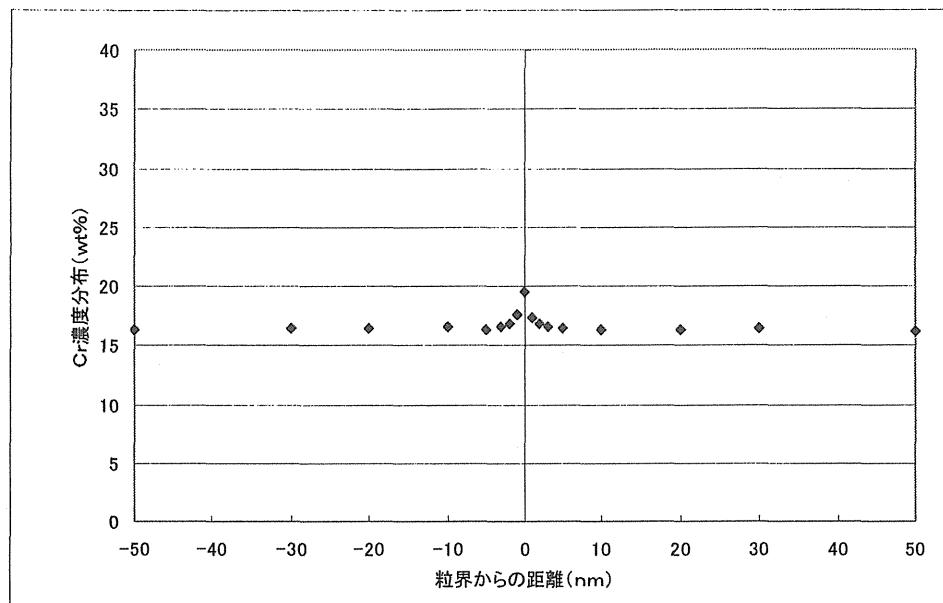


写真 S U S 3 1 6 材(熱影響部)の T E M 観察結果

図 3.10 成分分析結果

表 3.1 触媒粉塵フィルタ内部残留水の分析結果

容器 No.	No.1	No.2	No.3	計量方法	
採取月日	H15.12.16			(単位:mg/l)	
分析月日	H16.1.14	H16.2.4			
測定項目	電気伝導率(mS/m)	832	860	880	導電率計
	pH(at 25°C)	12.2	12.0	12.0	pH計
	カルシウム硬度(CaCO ₃)	3	5	7	原子吸光光度計
	塩化物イオン	70~80	80	85	イオンクロマトグラフィ
	硫酸イオン	148	—	—	比濁法
		—	160	165	イオンクロマトグラフィ
	シリカ(SiO ₂)	26	25	30	吸光光度法
	りん酸イオン	10	<1	<1	イオンクロマトグラフィ
	鉄	21	—	—	原子吸光光度計
		—	21	21	ICP-MS
	アンモニウムイオン	0.8	<1	<1	イオンクロマトグラフィ
	亜硝酸イオン	1.0 未満	<1	<1	イオンクロマトグラフィ
	ナトリウム	1800	1900	2000	原子吸光光度計
		—	2350	2400	イオンクロマトグラフィ

4. フィルタの改修方法

SCC は 3 つの発生因子が同時に存在する場所に発生することから、その発生要因を 1 つ以上低減する方針とする。すなわち、

- a) フィルタ内の凝縮水の発生を極力防止する。(環境因子の低減)
- b) 溶接残留応力を低減する。(応力因子の低減)
- c) 溶接鋸敏化を低減する。(材料因子の低減)

具体的には、図 4.1 に示す対策を施す。

発生因子 a)に対する対策として、以下の対策を実施する。

- ① ノズルフランジを削除し、放熱を低減する。
- ② フィルタ内にガイド管を設け、入口ノズルから流入するガスを鏡の底面へ導き、鏡の高温化を図る。
- ③ 胴と支持脚の間に断熱材を設け、支持脚からの放熱を低減する。
- ④ 鏡並びに配管の断熱を強化し、放熱を低減する。

また、発生因子 b)及び c)に対する対策として、以下の対策を実施する。

- ⑤ 上記①にてノズルフランジを削除したことにより、溶接部が無くなる。
- ⑥ 入口ノズルを改良し、溶接残留応力及び溶接鋸敏化を低減する。具体的には、入口ノズルの厚肉トランジション構造から配管肉厚と同じ厚さの管を配管肉厚の 2 倍以上設け、配管と溶接する。

上記の対策を行ったときの鏡の温度分布（定格運転の解析結果）を図 4.1 に示す。鏡の温度は蒸気の飽和温度（4.0MPa での飽和温度：251℃）以上となっており、フィルタ内の凝縮水の滞留は防止できると考えられる。

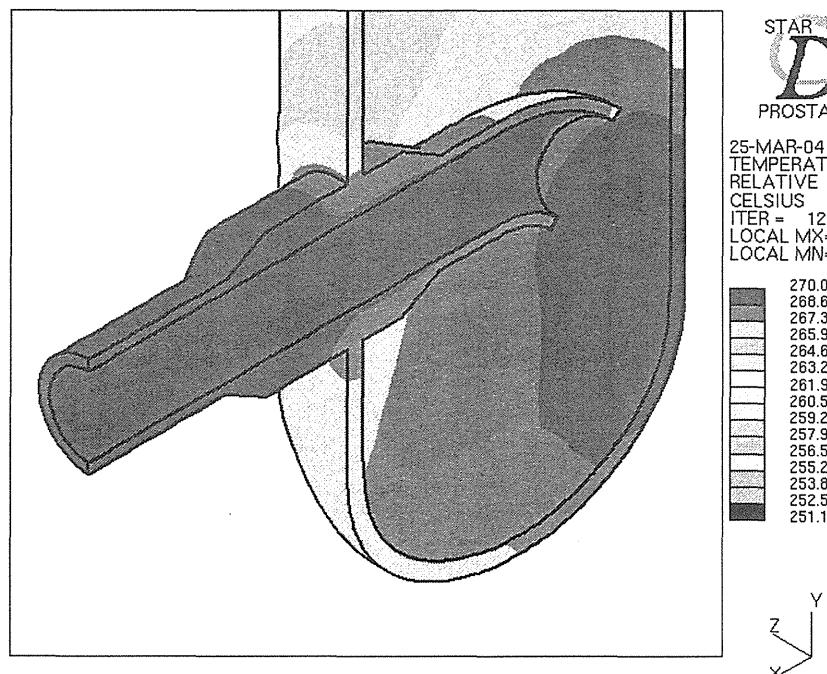
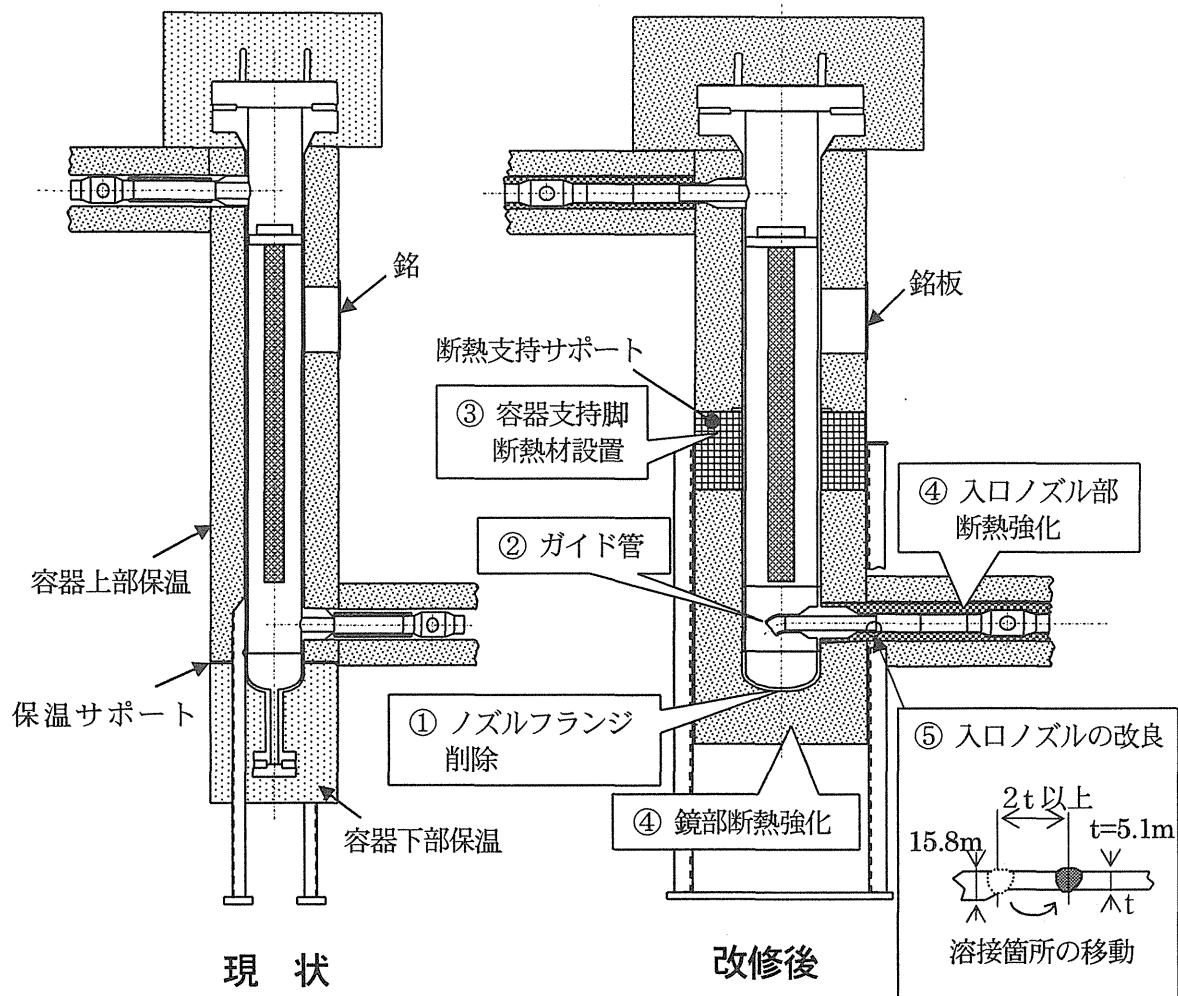


図 4.1 触媒粉塵用フィルタ改修図

5. 水平展開

試験装置において、フィルタの他に SCC の可能性がある箇所について検討を行ったが、フィルタのような塩化物イオン及びナトリウムイオンが高濃度の凝縮水となり滞留する機器及び配管は見当たらなかった。しかし、入口ノズルに見られたように凝縮水の滞留が発生しなくても SCC が起こり得たことから、入口ノズルと同等の条件となる以下の 2 つの条件を同時に満たす箇所について検査を実施することとした。

- ① オーステナイト系ステンレス鋼を使用している溶接部及びその近傍
- ② 凝縮水が存在する可能性がある箇所

なお、フィルタより下流では、フィルタ計装配管以外では生成ガス冷却器まで凝縮水が発生する箇所が見当たらない。また、生成ガス冷却器では凝縮水が発生するが凝縮水中の塩化物イオン及びナトリウムイオンの濃度はセパレータと同じであり十分低い。従って、生成ガス冷却器の下流では SCC の発生はないと考えられる。

以上の検討から、検査対象は次の場所とした。系統図上の位置を図 5.1 に示す。

- (a) 原料ガス過熱器バイパスライン
- (b) フィルタ計装配管
- (c) 原料ガス加熱器出口安全弁の配管
- (d) 後処理系大気開放ライン

上記の部分については、機器及び配管の溶接線について超音波探傷検査 (UT) を実施し、健全性確認を行った。検査対象となる溶接線を表 5.1 に示す。作業写真を図 5.2 に示す。

- ・作業日時：平成 16 年 4 月 8 日
- ・使用機材：日立建機製 DT3000 型

超音波探傷検査の結果を図 5.3 に示す。いずれの箇所にも欠陥は検出されず、健全であることが確認された。

表 5.1 検査対象溶接線

	対象箇所	検査対象溶接線	
		図面番号	継手番号
1	原料ガス過熱器バイパスライン	7M2H259-492	W16Y W23Y
		7M2H259-493	W15Y
2	フィルタ計装配管	7M2H259-499	W21 W12
		7M2H259-501	W3Y W12
3	原料ガス加熱器出口安全弁の配管	7M2H259-499	W9Y W14
4	後処理系大気開放ライン	7M2H259-499	W1Y W7Y
		7M2H259-500	W1Y W2Y W3 W11 W12Y W4Y

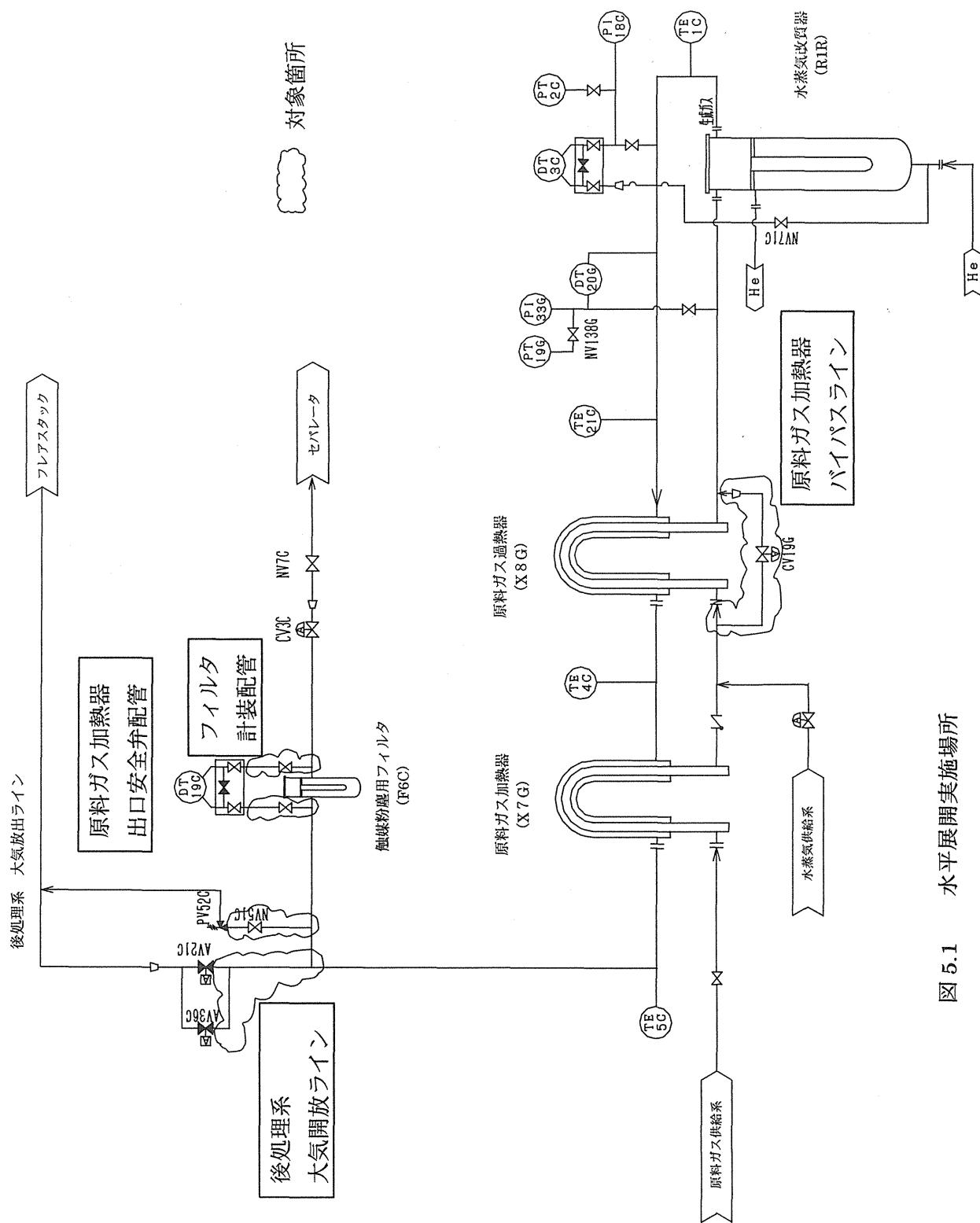


図 5.1 水平展開実施場所

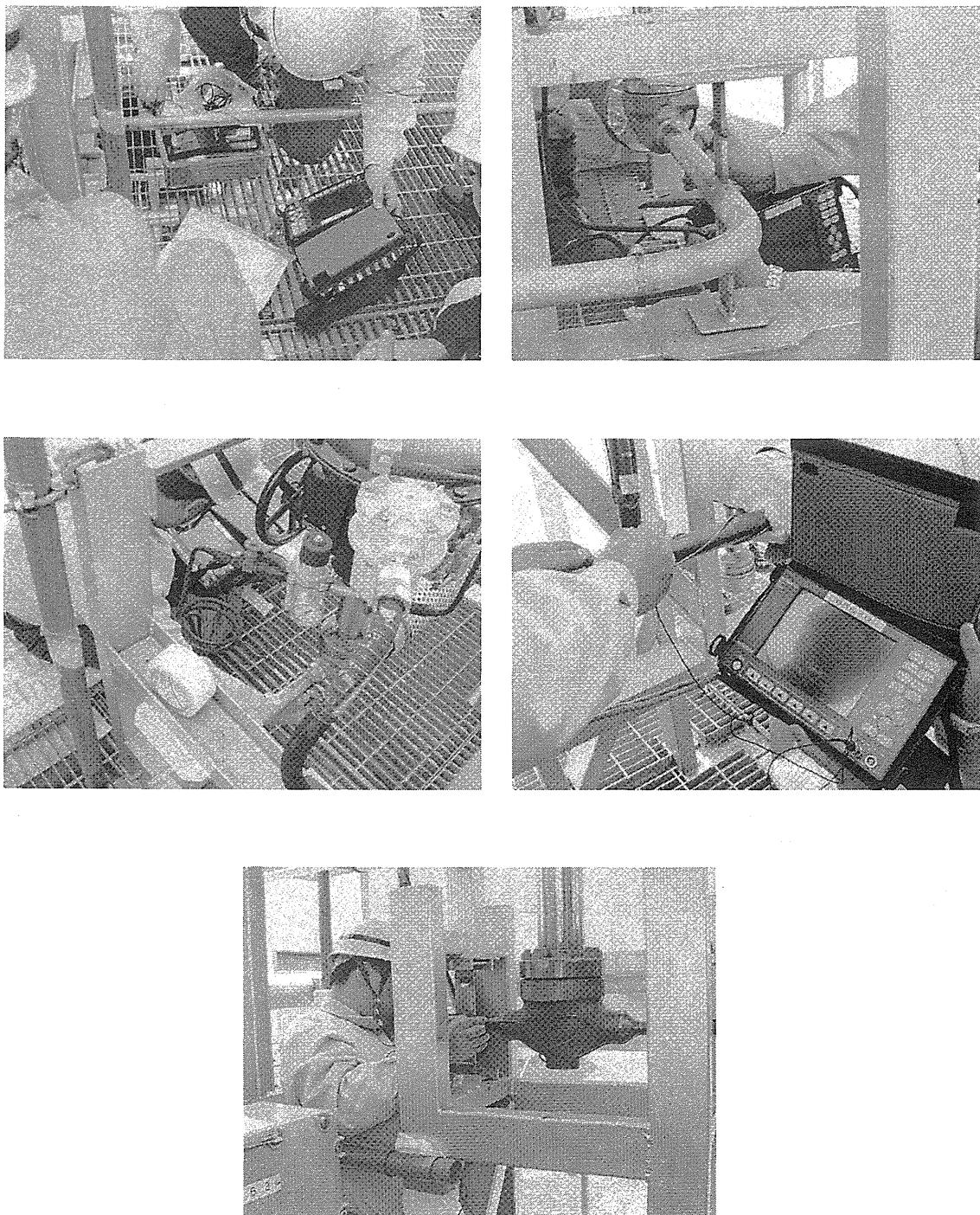


図 5.2 超音波探傷検査 (UT) 作業写真

超音波探傷試験成績表

品名	HTTR炉外試験設備	顧客名	日本原子力研究 大洗研究所 HTTR 殿
部品名	ステンレス配管及びティーズ	検査年月日	2004年 4月 8日

1. 探傷条件

探傷器	日立建機 製 DT3000型	感度補正	対比試験片「SUS304-20A-6t」に設けてあるスリット深さ0.5mmを直射にて検出した時の最大値をピラカン管の全目盛の80%となるように感度を調整設定した。
探傷方法	斜角70°	および	
探傷周波数	5 MHz	探傷器の調整	
接触媒質	ソニコート	探傷表面状態	素材のまま

2. 探傷位置

図面番号	継手番号	板厚(mm)	口径	探傷結果	備考
7M2H259-492	W 2 3 Y	4.0	20A	良	
	W 1 6 Y	4.5	25A	良	
7M2H259-493	W 1 5 Y	4.0	20A	良	
7M2H259-500	W 1 Y	4.0	20A	良	
	W 1 2 Y	4.5	25A	良	
	W 4 Y	4.5	25A	良	
	W 3	4.5	25A	良	
	W 1 1	4.5	25A	良	
	W 2 Y	4.5	25A	70° / 45° 良 / 良	注)
7M2H259-499	W 1 Y	4.5	25A	70° / 45° 良 / 良	注)
	W 7 Y	5.1	40A	良	
	W 9 Y	5.1	40A	良	
	W 1 4	4.0	15A	良	
	W 1 2	5.1	40A	良	
	W 2 1	4.0	15A	良	
7M2H259-501	W 1 2	4.0	15A	良	
	W 3 Y	5.1	40A	良	

注) 70° 探傷時にエコーを検出した箇所については、角度を変えて探傷した。

3. 探傷結果 : 上記

4. 判定 : 合格

判定基準 : 溶接熱影響部に割れのないこと

承認	照査	検査

株式会社 日立製作所

図 5.3 超音波探傷検査結果

6. まとめ

フィルタ損傷の原因は、内面側から発生した SCC によるものと推定された。SCC 発生の主要因は、フィルタ底部において引張り応力（溶接時の残留応力）がある鏡とノズルフランジの溶接部に凝縮水が溜まり、その凝縮中に SCC の起因となる塩化物イオン、苛性ソーダ、CO/CO₂などが存在したことによる。

このため、1) フィルタ内の凝縮水発生防止、2) 溶接残留応力低減、3) 溶接鋸敏化低減を目的として、平成 16 年 3 月からフィルタの改修を行い、平成 16 年 5 月に高圧ガス保安法の完成検査に合格した。

また、水平展開として、試験装置の類似継ぎ手構造部の健全性確認を実施した結果、いずれの箇所にも欠陥は検出されず、健全性が確保されていることを確認した。

謝辞

フィルタの損傷原因の調査及び再発防止対策の策定にあたっては、大洗研究所安全審査委員会委員長である保安管理室長吉田真氏、委員である保安管理課長池島義昭氏、前工務課長長谷川進氏、材料試験炉部原子炉第 2 課長本間健三氏、高温工学試験研究炉開発部 HTTR 試験室室長代理石仙繁氏、核熱利用研究部熱利用システム研究グループリーダー武田哲明氏、材料試験炉部ホットラボ課副主任研究員石井敏満氏、JMTR ブランケット照射開発室土谷邦彦氏、高温工学試験研究炉開発部 HTTR 試験室冷却器第 1 グループリーダー大田幸丸氏、オブザーバであるエネルギーシステム研究部複合環境材料研究グループ加治芳行氏に多大なるご支援をいただいた。また、エネルギーシステム研究部複合環境材料研究グループリーダー塙田隆氏、耐食材料研究グループ本岡隆文氏、加藤千明氏に有益なご助言をいただいた。ここに深く謝意を表します。

本報告書の作成に貴重なご助言いただいたエネルギーシステム研究部耐食材料研究グループ井岡郁夫氏に謝意を表します。

参考文献

- (1) 高圧ガス保安協会、“高圧ガス保安技術”、高圧ガス保安協会、p.80 (1992)
- (2) 住友金属ホームページ 一般配管の腐食より
- (3) 下平三郎、“腐食・防食の材料科学”、アグネ技術センター、p.239～240 (1995)
- (4) 村田雅人、“構造材料の損傷と破壊”、日刊工業新聞社、p.68～69 (1995)
- (5) 日本機械学会、“機械・構造物の破損事例と解析技術”、日本機械学会、p.159 (1984)

付録A 安全審査票

別表第5（第40条関係） 安全審査票

平成16年5月21日

大洗研究所長 殿

大洗研究所安全審査委員会委員長 吉田 真義


本件の安全審査について（答申／意見具申）します。

- 審査結果 安全性は確保されたものと認めます。
 査所見欄及び総合所見欄に記載した措置が必要です。

安全審査票

審査件名	炉外試験装置の触媒粉塵用フィルタノズル部の損傷について	実施主管箇所	核熱利用研究部	担当者
			高温機器開発試験グループ	林 光二
			平成15年12月25日	

区分	審査項目	審査所見
VIその他の事項	(1) 炉外試験装置の触媒粉塵用フィルタノズル部の損傷に係る原因調査	「き裂発生の原因となり得る事象とその特定にかかる検討項目」を策定し、これに基づき材料検査、記録検査、環境検査、応力評価等の調査・検討を行い、原因事象の絞込みを行っており妥当である。 調査の結果、応力腐食割れ(SCC)が発生する3つの要因、すなわち、環境因子としての凝縮水、塩化物イオン等の存在、ならびに材料因子としてSCCに感受性のあるSUS316の使用を確認している。また、応力因子としては、き裂の観察結果等から溶接残留応力が存在したと推定している。さらに、材料検査やその他の検討の結果を総合して、原因是塩化物等による内部からのSCCであると結論付けているのは妥当である。

区分	審査項目	審査所見
VIその他の事項	(2) 炉外試験装置に係る損傷ノズル部と類似の継ぎ手構造部の健全性確認	<p>全系統を検討した結果、当該フィルタのように高濃度の塩化物イオン等を含む凝縮水が滞留して、SCC が起きる可能性のある機器及び配管は無いと考えられる。水平展開として、健全性確認の対象を、オーステナイト系ステンレス鋼を使用し凝縮水が存在する可能性があるすべての部位としているのは十分と認める。</p> <p>検査方法として、機器及び配管の溶接線近傍の内部欠陥を検出できる超音波探傷検査（UT）を採用しており妥当である。</p> <p>検査の結果、いずれの箇所にも欠陥は検出されず、健全性が確保されていると認める。</p> <p>* 詳細は別添参照</p>
総合所見		<p>フィルタの改修においては、SCC の発生要因である環境因子、応力因子、材料因子の観点から、それぞれの因子を低減させる対策となっており、再発防止策として妥当と認める。</p> <p>上記のとおり改修すれば、運転の再開に際し安全上の問題はないと認める。</p>

区分 I、II、III、IV、Vについては、該当しないため記載を省略する。

審議過程

(1) 本委員会

第 1 回委員会 (平成 16 年 1 月 15 日)
 第 2 回委員会 (平成 16 年 3 月 30 日)
 第 3 回委員会 (平成 16 年 5 月 17 日)

(2) 専門部会

第 回部会 (平成 年 月 日)
 第 回部会 (平成 年 月 日)
 第 回部会 (平成 年 月 日)
 専門部会長 _____ 印

付録B 安全審査委員会委員名簿

1. 安全審査委員会委員名簿

区分	氏名	所属・職位	備考
委員長	吉田 真	保安管理室長	
委員	池島 義昭	保安管理室 保安管理課長	
〃	長谷川 進	管理部 工務課長	
〃	本間 建三	材料試験炉部 原子炉第2課長	
〃	石仙 繁	高温工学試験研究炉開発部 HTTR 試験室 室長代理	
〃	武田 哲明	核熱利用研究部熱利用システム研究グループリーダー 主任研究員	
〃	石井 敏満	材料試験炉部ホットラボ課 副主任研究員	核熱対応特命委員
〃	土谷 邦彦	材料試験炉部プランケット照射開発室 副主任研究員	核熱対応特命委員
〃	太田 幸丸	高温工学試験研究炉開発部 HTTR 試験室 冷却機器第1グループリーダー	核熱対応特命委員
オペレーター	加治 芳行	東海研 エネルギーシステム研究部 複合環境材料研究グループ	

事務局；保安管理室 保安管理課 佐藤孝幸

2. 審査過程

第1回委員会（平成16年 1月15日開催）

- 原因調査計画について審議

第2回委員会（平成16年 3月30日開催）

- 原因究明結果と対策並びに改修計画について審議

第3回委員会（平成16年 5月17日開催）

- 水平展開並びに最終報告について審議

This is a blank page.

国際単位系(SI)と換算表

表1 SI基本単位および補助単位

量	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd
平面角	ラジアン	rad
立体角	ステラジアン	sr

表3 固有の名称をもつSI組立単位

量	名称	記号	他のSI単位による表現
周波数	ヘルツ	Hz	s ⁻¹
圧力、応力	ニュートン	N	m·kg/s ²
エネルギー、仕事、熱量	パスカル	Pa	N/m ²
工率、放射束	ジュール	J	N·m
電気量、電荷	ワット	W	J/s
電位、電圧、起電力	クロン	C	A·s
静電容量	ボルト	V	W/A
電気抵抗	ファラード	F	C/V
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V
磁束	ウェーバ	Wb	V·s
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A
セルシウス温度	セルシウス度	°C	
光束	ルーメン	lm	cd·sr
照度	ルクス	lx	lm/m ²
放射能	ベクレル	Bq	s ⁻¹
吸収線量	グレイ	Gy	J/kg
線量当量	シーベルト	Sv	J/kg

表2 SIと併用される単位

名 称	記 号
分、時、日	min, h, d
度、分、秒	°, ′, ″
リットル	l, L
トントン	t
電子ボルト	eV
原子質量単位	u

$$1 \text{ eV} = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

表4 SIと共に暫定的に維持される単位

名 称	記 号
オングストローム	Å
バーン	b
バール	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レンタゲン	R
ラド	rad
レム	rem

$$1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ b} = 100 \text{ fm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 0.1 \text{ MPa} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Gal} = 1 \text{ cm/s}^2 = 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$$

$$1 \text{ rad} = 1 \text{ cGy} = 10^{-2} \text{ Gy}$$

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{ Sv}$$

表5 SI接頭語

倍数	接頭語	記号
10^{18}	エクサ	E
10^{15}	ペタ	P
10^{12}	テラ	T
10^9	ギガ	G
10^6	メガ	M
10^3	キロ	k
10^2	ヘクト	h
10^1	デカ	da
10^{-1}	デシ	d
10^{-2}	センチ	c
10^{-3}	ミリ	m
10^{-6}	マイクロ	μ
10^{-9}	ナノ	n
10^{-12}	ピコ	p
10^{-15}	フェムト	f
10^{-18}	アト	a

(注)

- 表1～5は「国際単位系」第5版、国際度量衡局1985年刊行による。ただし、1 eVおよび1 uの値はCODATAの1986年推奨値によった。
- 表4には海里、ノット、アール、ヘクタールも含まれているが日常の単位なのでここでは省略した。
- barは、JISでは流体の圧力を表わす場合に限り表2のカテゴリーに分類されている。
- EC閣僚理事会指令ではbar、barnおよび「血圧の単位」mmHgを表2のカテゴリーに入れている。

換 算 表

力	N(=10 ⁵ dyn)	kgf	lbf
1	0.101972	0.224809	
9.80665	1	2.20462	
4.44822	0.453592	1	

$$\text{粘度 } 1 \text{ Pa}\cdot\text{s}(N\cdot\text{s}/\text{m}^2) = 10 \text{ P(ポアズ)}(\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s}))$$

$$\text{動粘度 } 1 \text{ m}^2/\text{s} = 10^4 \text{ St(ストークス)}(\text{cm}^2/\text{s})$$

圧	MPa(=10 bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062×10^3	145.038
0.0980665	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
0.101325	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
1.33322×10^{-4}	1.33322×10^{-4}	1.35951×10^{-3}	1.31579×10^{-3}	1	1.93368×10^{-2}
6.89476×10^{-3}	6.89476×10^{-3}	7.03070×10^{-2}	6.80460×10^{-2}	51.7149	1

エネルギー・仕事・熱量	J(=10 ⁷ erg)	kgf·m	kW·h	cal(計量法)	Btu	ft · lbf	eV	1 cal = 4.18605 J(計量法)	
								1	cal = 4.18605 J(熱化学)
9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹	= 4.1855 J (15 °C)		
3.6×10^6	3.67098×10^5	1	8.59999×10^5	3412.13	2.65522×10^6	2.24694×10^{25}	= 4.1868 J(国際蒸気表)		
4.18605	0.426858	1.16279×10^{-6}	1	3.96759×10^{-3}	3.08747	2.61272×10^{19}	仕事率 1 PS(仏馬力)		
1055.06	107.586	2.93072×10^{-4}	252.042	1	778.172	6.58515×10^{21}	= 75 kgf·m/s		
1.35582	0.138255	3.76616×10^{-7}	0.323890	1.28506×10^{-3}	1	8.46233×10^{18}	= 735.499 W		
1.60218×10^{-19}	1.63377×10^{-20}	4.45050×10^{-26}	3.82743×10^{-20}	1.51857×10^{-22}	1.18171×10^{-19}	1			

放射能	Bq	Ci
	1	2.70270×10^{-11}
	3.7×10^{10}	1

吸収線量	Gy	rad
	1	100
	0.01	1

照射線量	C/kg	R
	1	3876
	2.58×10^{-4}	1

線量当量	Sv	rem
	1	100
	0.01	1

(86年12月26日現在)

HTR水素製造システム実規模单一反応管試験装置触媒粉塵用フィルタノズル部損傷の原因調査と再発防止対策に関する報告(受託研究)

R100

古紙配合率100%
白色度70%再生紙を使用しています。