

1 2月4日 公開会合の追加要求データ

補足資料

目次

No.	項目
①	加圧器スプレライン配管切断時の変位に基づく拘束力評価
②	当該管の内面外観（裏波部全周）写真
③	調査結果とUT指示長さの妥当性確認結果
④	裏波部の周方向断面写真
⑤	破面外観観察の結果
⑥	破面SEM観察の結果
⑦	付着物EDS分析の結果
⑧	溶接熱影響部の範囲の確認結果
⑨	断面観察（酸化皮膜分析）の結果
⑩	試験荷重の違いによる硬さの差異
⑪	SCCの発生・進展に係るデータ集

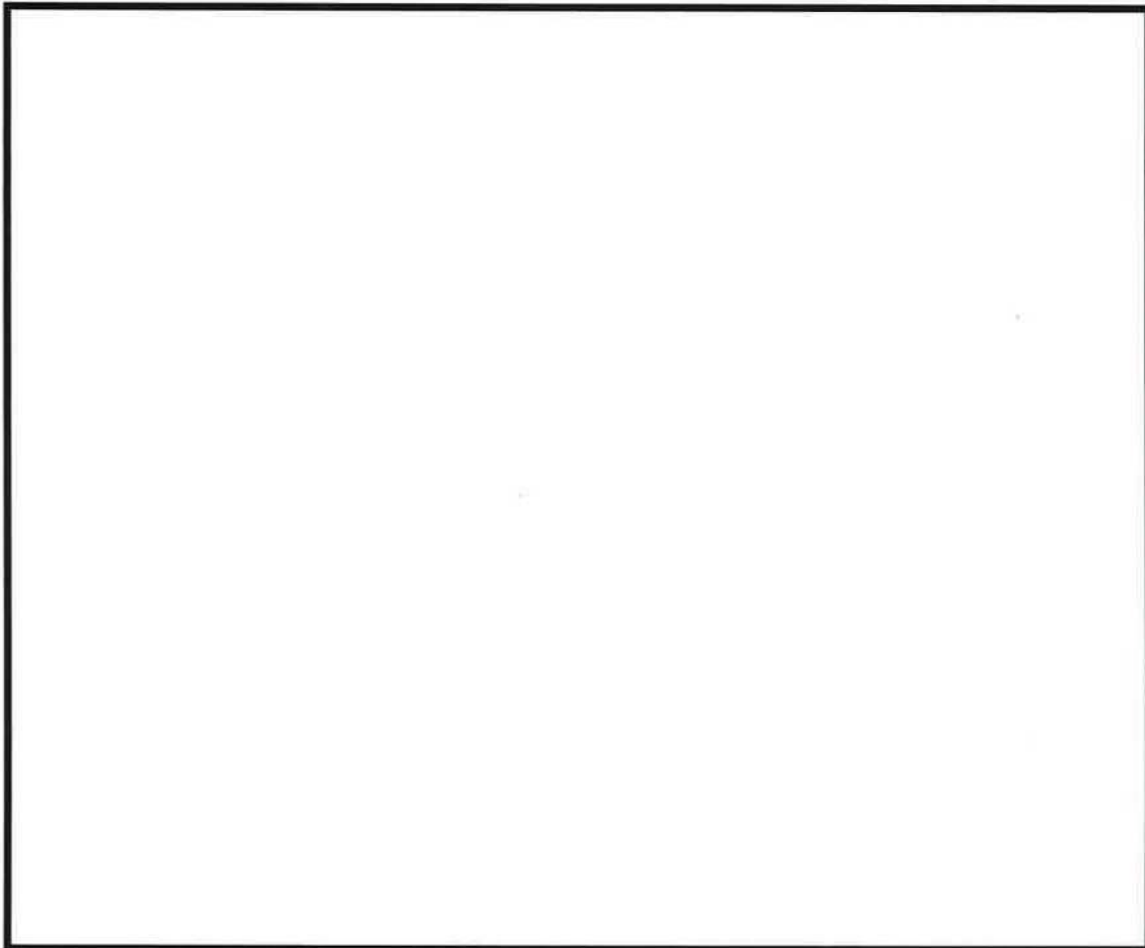
加圧器スプレイライン配管切断時の変位に基づく拘束力評価 (1/2)

補足①-1

1. 概要

今回の加圧器スプレイ配管切断時に計測された配管拘束変位(Z方向：-8mm)を基に、加圧器スプレイライン配管をモデル化し、応力評価を実施した。応力評価においては、一次一般膜応力、熱膨張及び管台変位による二次応力及び自重による一次曲げ応力により応力を算出し亀裂進展への影響を評価する。

2. 評価条件




解析条件

	主管	分岐管
外径	114.3mm	60.5mm
厚さ	13.5mm	8.7mm
材料	SUS316TP	

運転条件

	温度	圧力
出力運転時 (100%出力運転)		
冷態停止時 (モード外)		

 : 枠組みの範囲は機密に係る事項ですので公開することはできません。

3. 評価結果

配管切断時に確認された変位量 (Z:-8mm) を基に、切断前に当該配管に作用していた拘束力 (応力) は以下のとおり。

検討ケース	MCP管台 熱膨張変位量 (A,Dループ) (mm)	加圧器管台 熱膨張変位量 (mm)	強制変位量 (mm)	一次一般膜応力 Pm (MPa)	熱膨張及び管台変位による 二次応力Pe (MPa)		自重による 一次曲げ応力 Pb (MPa)	合計 (MPa)
冷温停止時 (モード外)	X:0 Y:0 Z:0	X:0 Y:0 Z:0	X:0 Y:0 Z:0	0.0	熱膨張 : 0.0 水平変位 : 0.0 鉛直変位 : 0.0	0.0	3.8	4
冷温停止時 + 配管拘束変位 (モード外)	X:0 Y:0 Z:0	X:0 Y:0 Z:0	X:0 Y:0 Z:-8	0.0	熱膨張 : 0.0 水平変位 : 0.0 鉛直変位 : 56.2	56.2	3.8	60
出力運転時 (100%出力)	X:+23.8 Y:-34.8 Z:+2.0	X:0 Y:0 Z:+79.8	X:0 Y:0 Z:0	32.7	熱膨張 : 7.4 水平変位 : 56.8 鉛直変位 : 14.1	62.8*	3.8	100
出力運転時 + 配管拘束変位 (100%出力)	X:+23.8 Y:-34.8 Z:+2.0	X:0 Y:0 Z:+79.8	X:0 Y:0 Z:-8	32.7	熱膨張 : 7.4 水平変位 : 56.8 鉛直変位 : 42.2	65.8*	3.8	103

*合計の応力については、各成分のモーメントを合成し、SRSSしたものを断面係数で除して算出しているため、個別応力の合計とは一致しない。

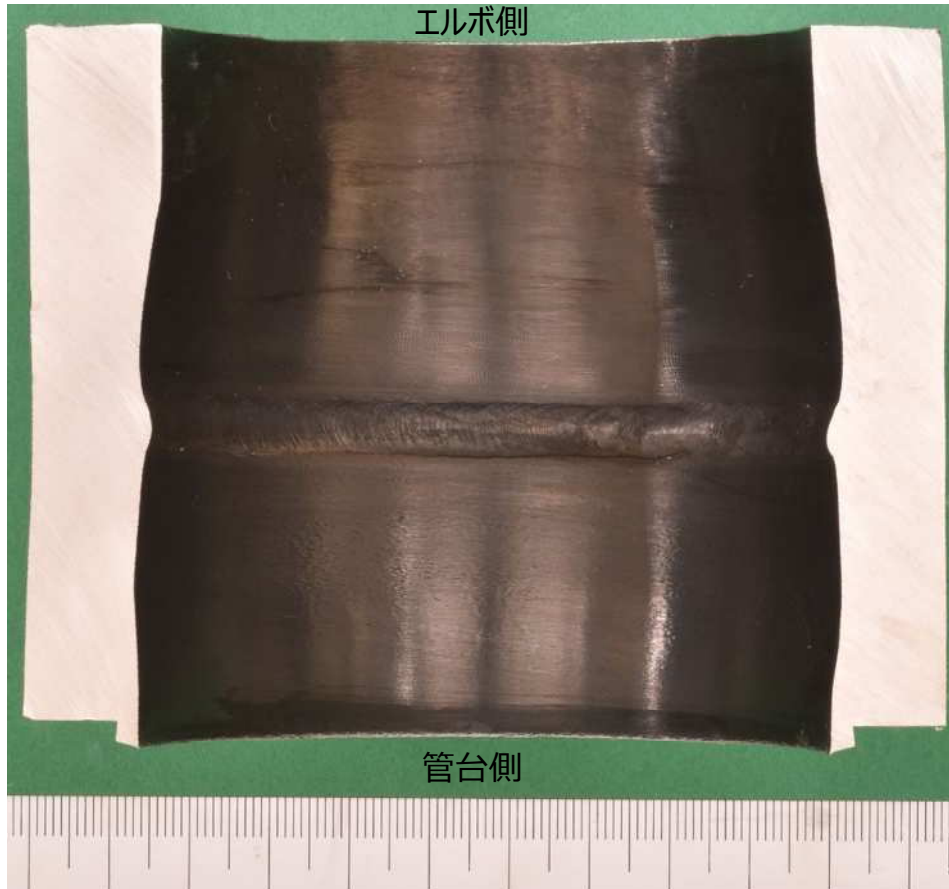
- 出力運転時の発生応力 約100MPaに対して、約8mmの配管拘束変位量を加味した場合の影響は、出力運転時において3MPa程度の上昇であり、亀裂の発生/進展に主たる影響を及ぼすものではないことを確認した。

当該管の内面外観（裏波部全周）写真（1/3）

補足②-1

当該管 半割切断後

90° — 0° — 270°



当該管 0°側 (90°-0°-270°)

270° — 180° — 90°



当該管 180°側 (270°-180°-90°)

180°側は残留応力計測のため
歪みゲージ貼り付け有り

当該管の内面外観（裏波部全周）写真（2/3）

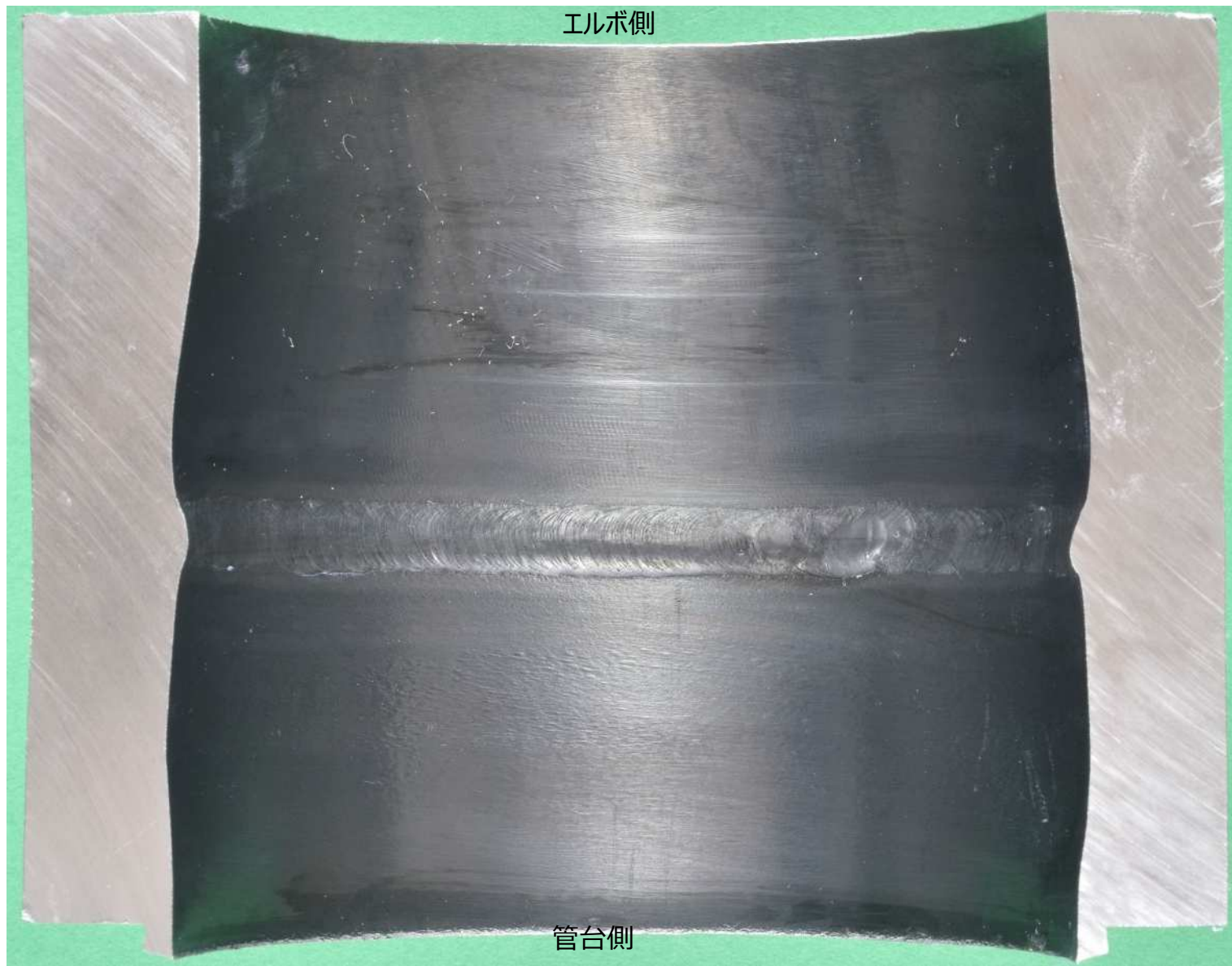
90°

—

0°

—

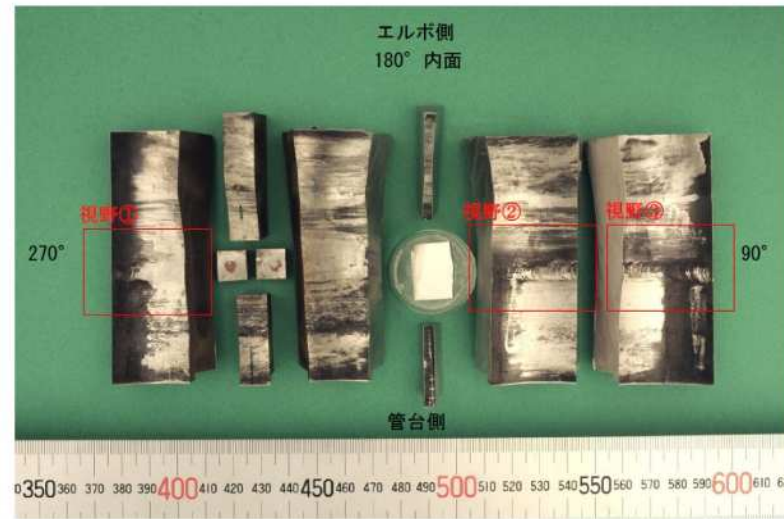
270°



当該管 0°側 (90°-0°-270°) 拡大

当該管の内面外観（裏波部全周）写真（3/3）

180°側から見た切断後の図



・ 180°側の内面は、残留応力測定での歪みゲージ貼り付けのために溶接ビードの研磨作業を一部で実施している。

・ 内面側の歪みゲージ貼り付け作業に伴う表面研磨により溶接部ビード形状の情報が一部欠落している。

視野①



視野②



視野③



当該管 180°側（270°-180°-90°）拡大

UT指示長さ51mmに対し、割れの長さ（PT指示長さ）は60mmであり、UT指示長さのばらつきを考慮して整合していたと評価する。

【指示長さの両端部における考察】

90°側：UT指示長さがPT指示長さより長い

ISIにおけるUTの周方向指示長さ測定はしきい値法(DAC20%)を用いている。90°側は超音波の拡がりのため、実際の割れ長さよりも幅広に検出したものとする。

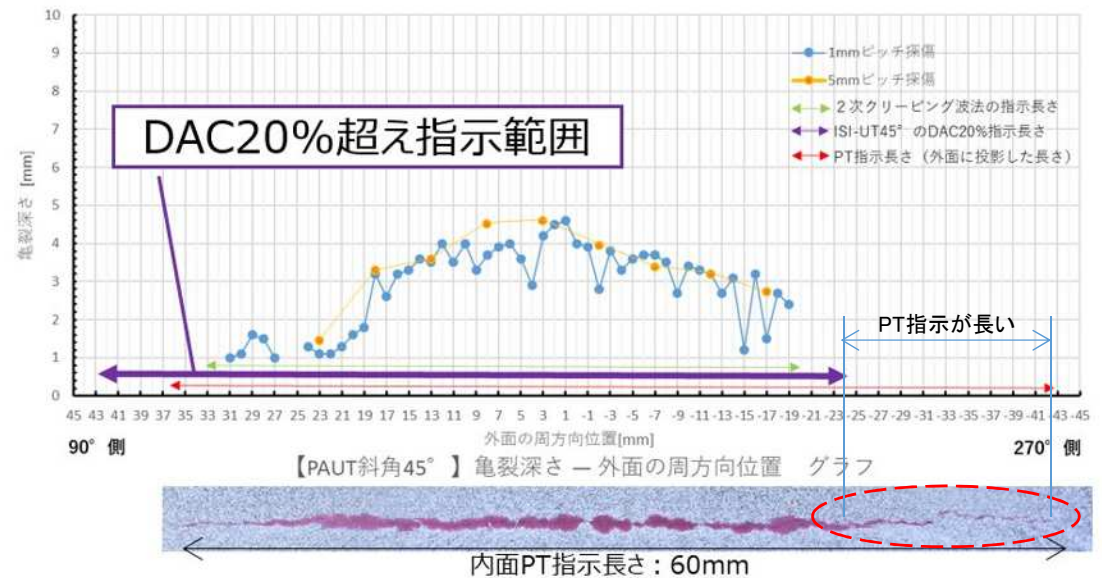
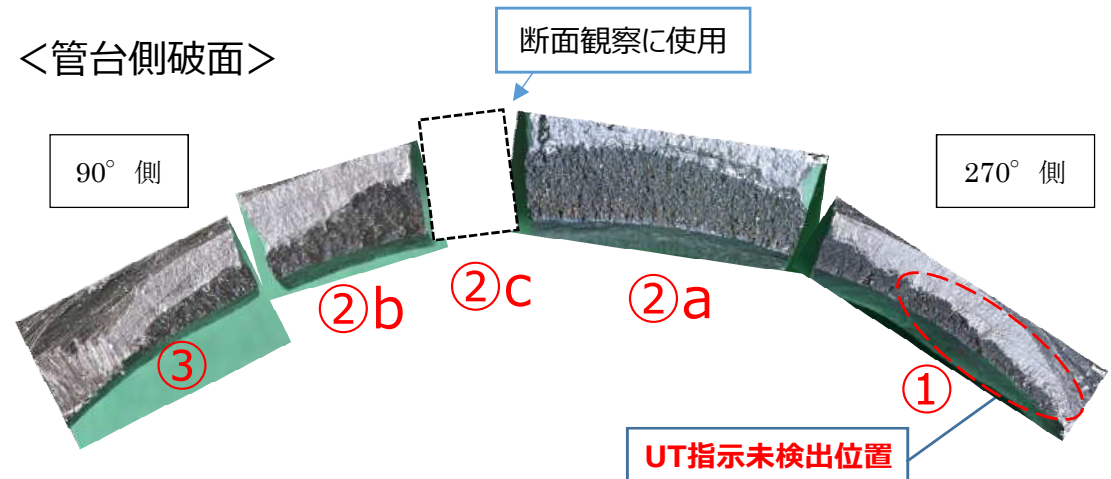
270°側：UT指示長さがPT指示長さより短い

1) 検出レベル以下の亀裂深さ

①における赤破線部では最大で1.8mm程度の浅く複雑なき裂のため、UTによる検出が困難であったものとする。なお、UTS※で報告された検出限界はSCCで2.8mmとされている（疲労き裂1.6mm）。

[各部位の亀裂深さ] ①：3.0mm ②a：4.4mm
②b：3.5mm ③：1.5mm

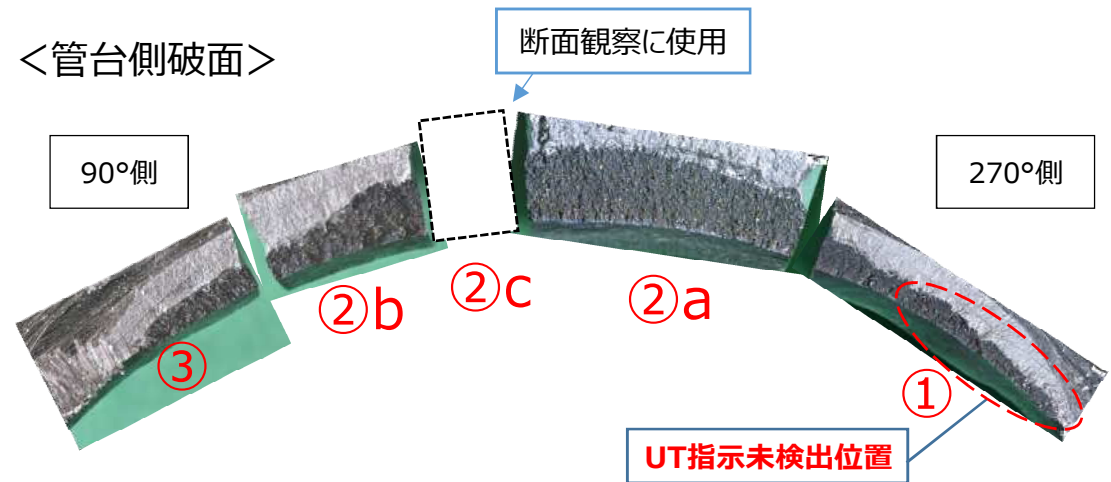
※：財団法人 発電設備技術検査協会「平成13年度 原子力発電施設検査技術調査等に関する事業報告書（非破壊的統一評価指標・基準の確立に関するもの）」


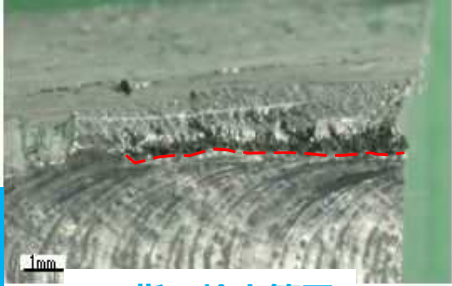
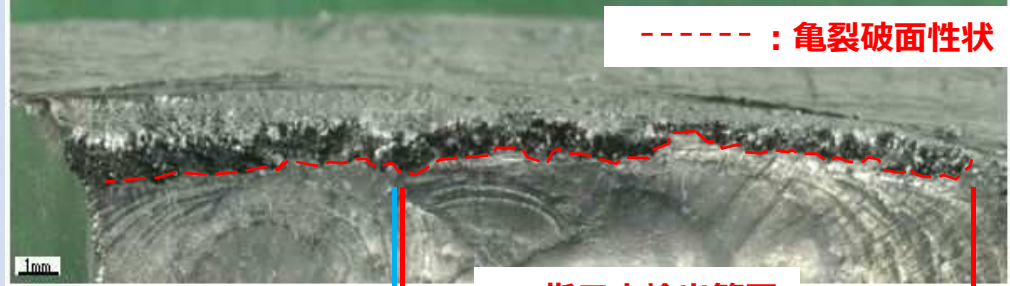
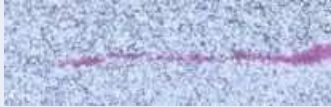
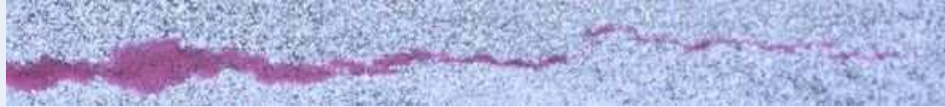


ISI-UT(45°)とPTの指示範囲比較

2) 亀裂破面性状の影響

① (270°側) の当該部破面性状を調査した結果、凹凸が多いことが確認された。その結果亀裂性状の影響により①は、UTによる検出が困難であったと考える。なお、③ (90°側) では滑らかな亀裂性状であり、UTによる指示を検出している。

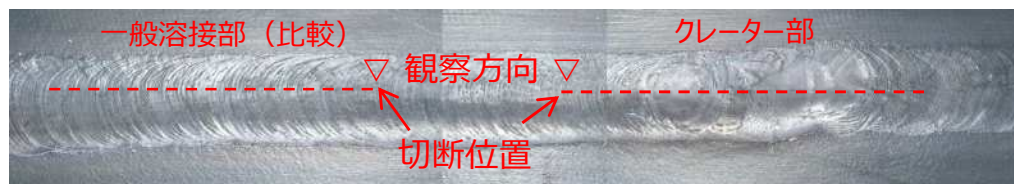


確認項目	③	①
外観観察  【斜め方向より撮影】		
PT指示詳細		
評価	滑らかな性状であったため、UTで幅広く検出されたと考えられる。	複雑な性状（凹凸）であったため、UTでは未検出となる範囲が生じ、PTでは指示が得られたものとする。

裏波部の周方向断面写真

補足④

周方向断面 切断位置



一般溶接部 (比較)



クレーター部



破面外観観察の結果 (1/6)

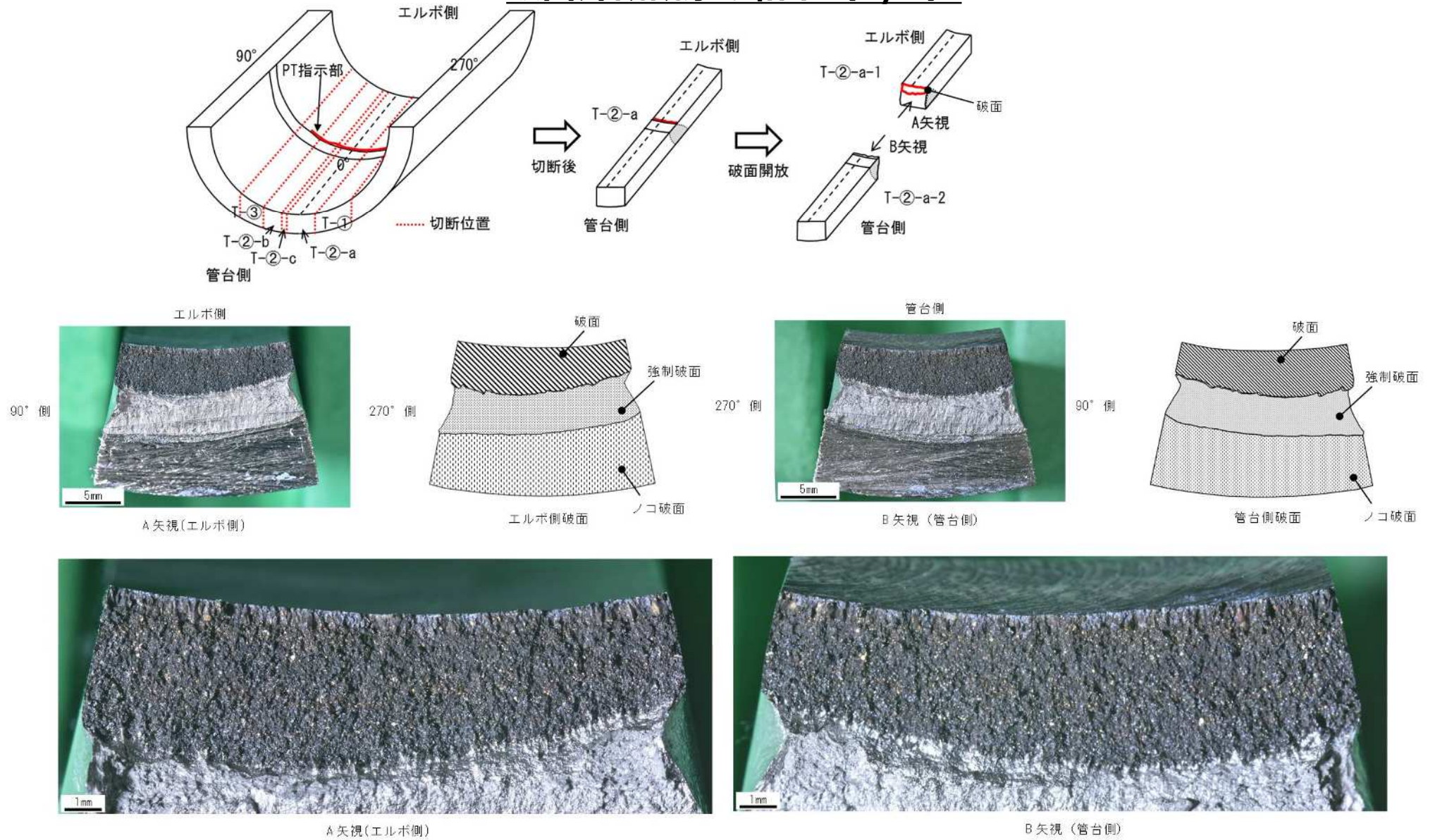


図1 加圧器スプレライン配管 当該管 破面外観結果 (サンプルT-②-a)

破面外観観察の結果 (2/6)

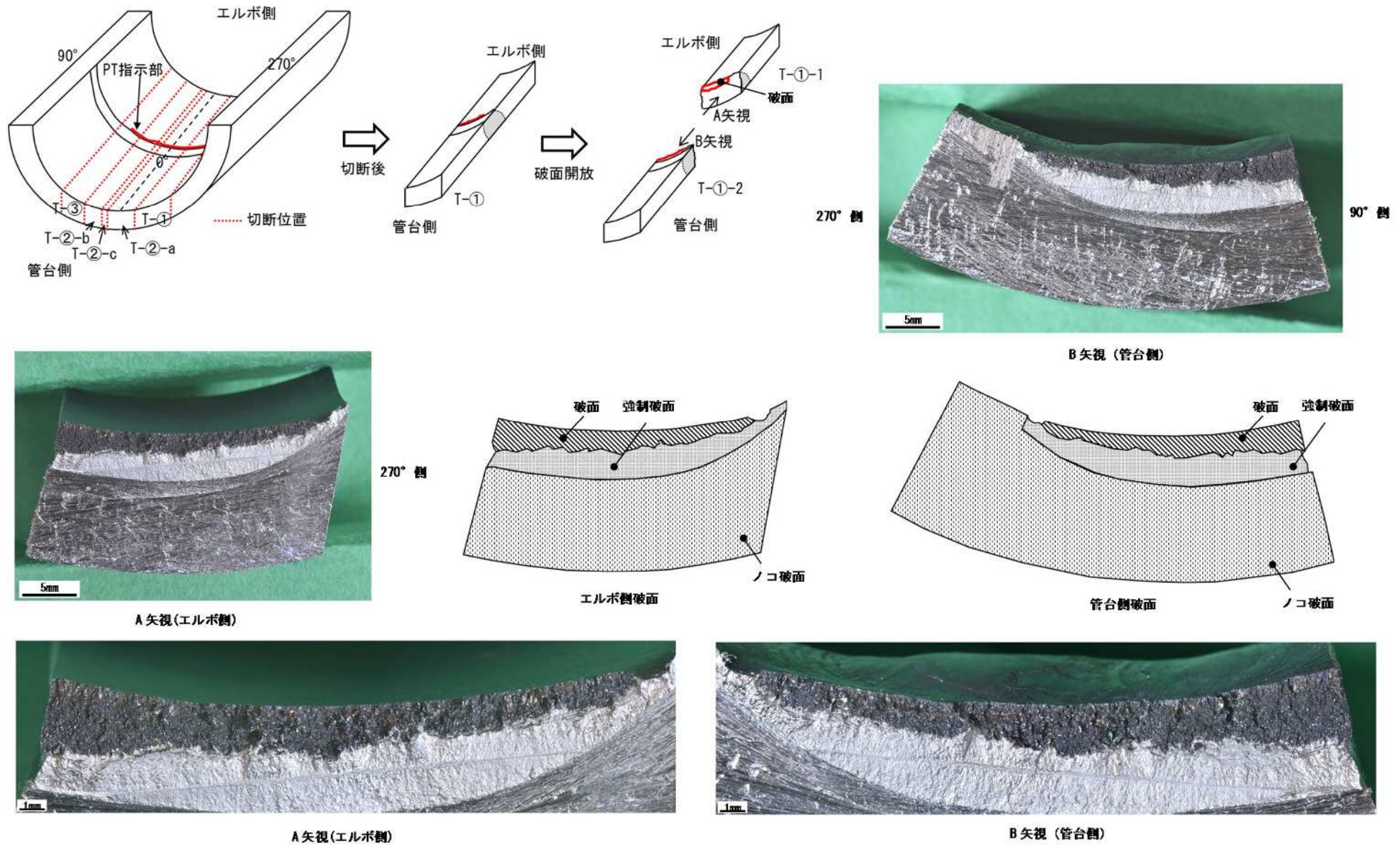


図2 加圧器スプレイライン配管 当該管 破面外観結果 (T-①)

破面外観観察の結果 (3/6)

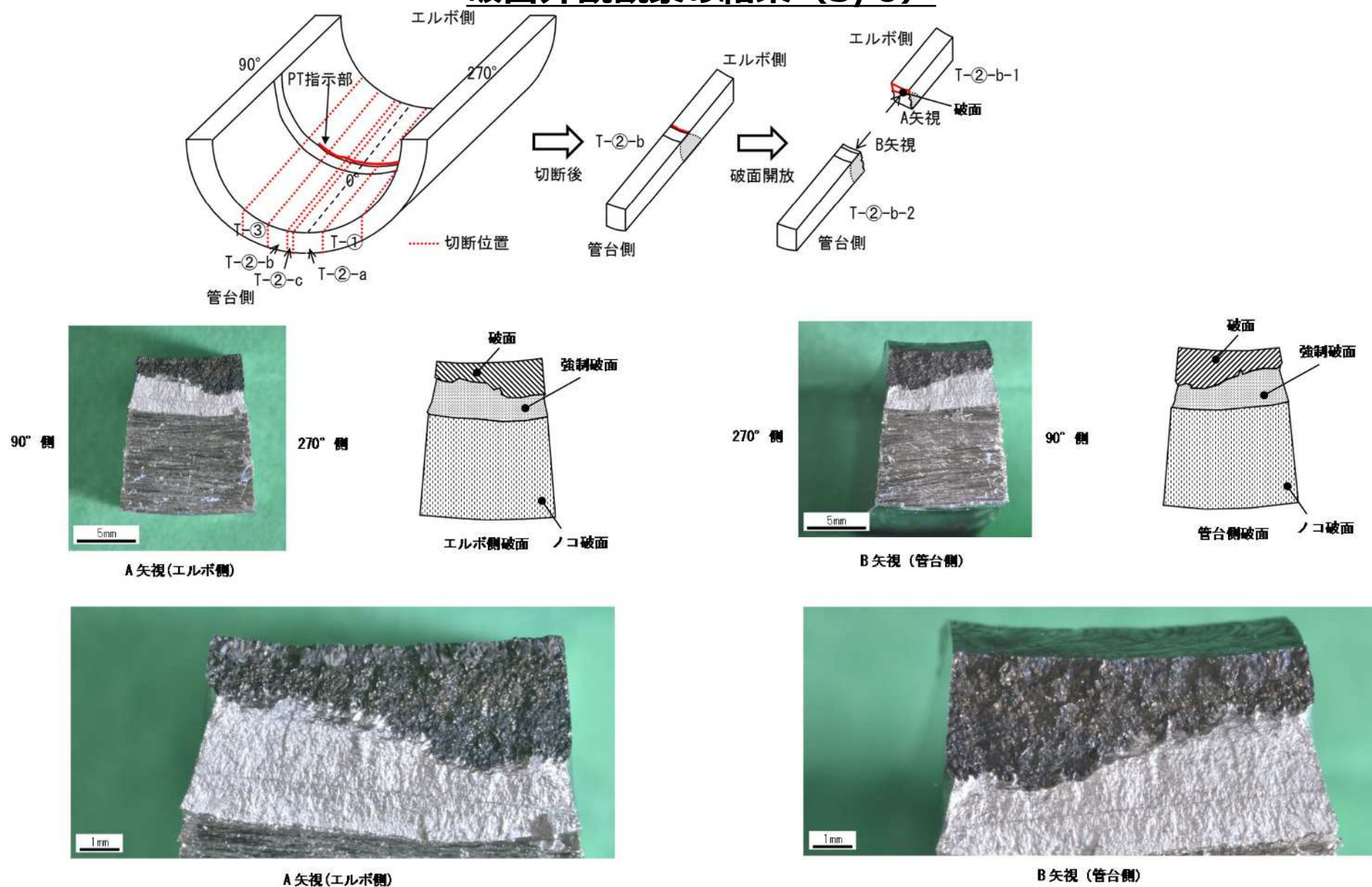
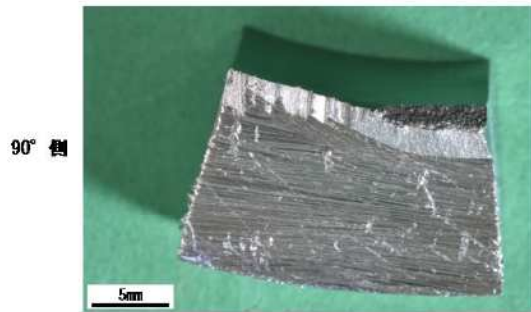
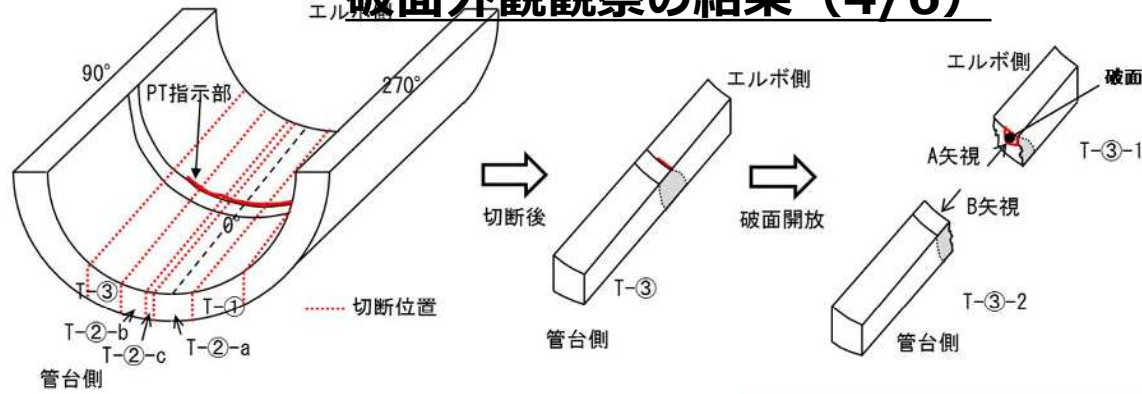
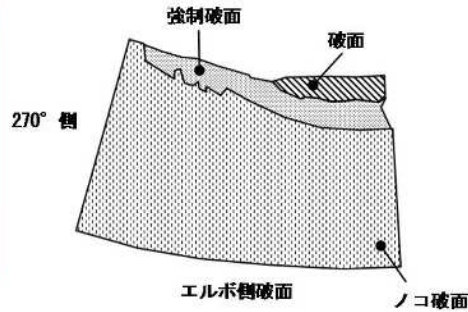


図3 加圧器スプレライン配管 当該管 破面外観結果 (T-②-b)

破面外観観察の結果 (4/6)

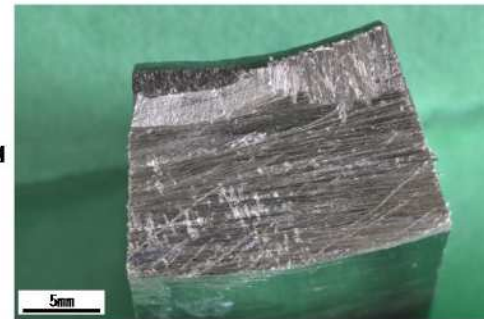


A 矢視 (エルボ側)

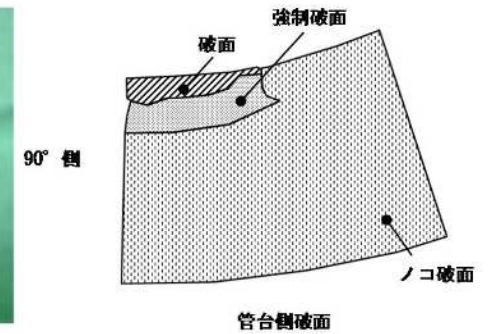


270° 側

270° 側

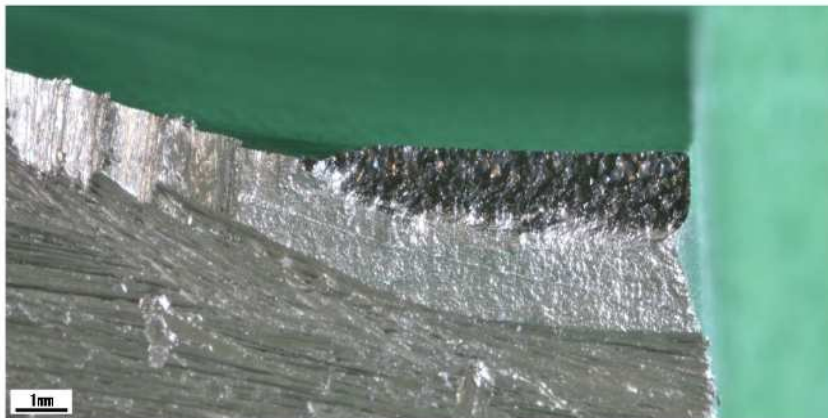


B 矢視 (管台側)

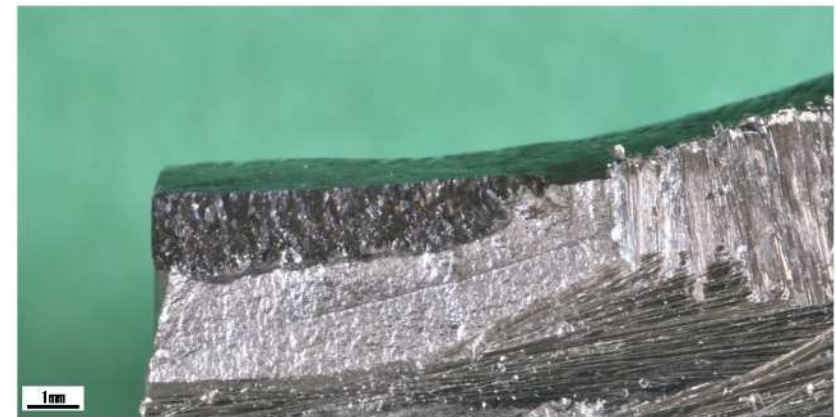


90° 側

管台側破面



A 矢視 (エルボ側)



B 矢視 (管台側)

図4 加圧器スプレイライン配管 当該管 破面外観結果 (T-3)

破面外観観察の結果 (5/6)

90° 側

270° 側

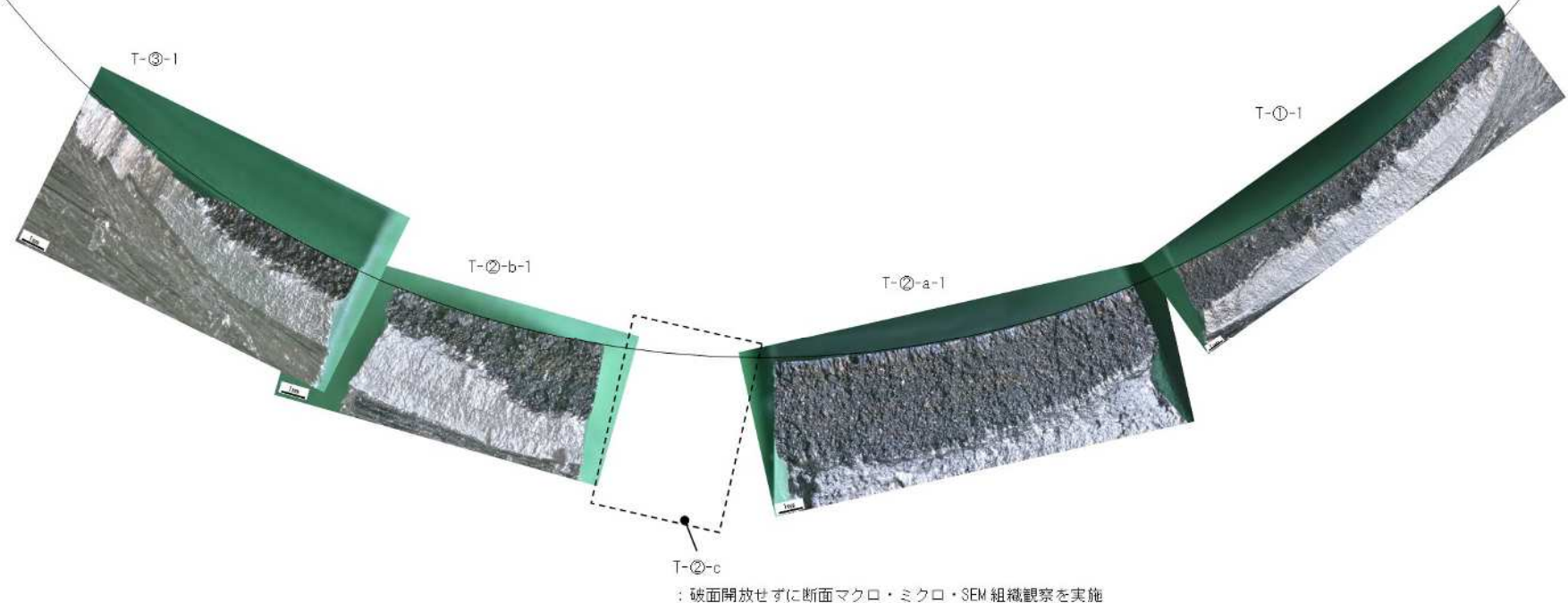
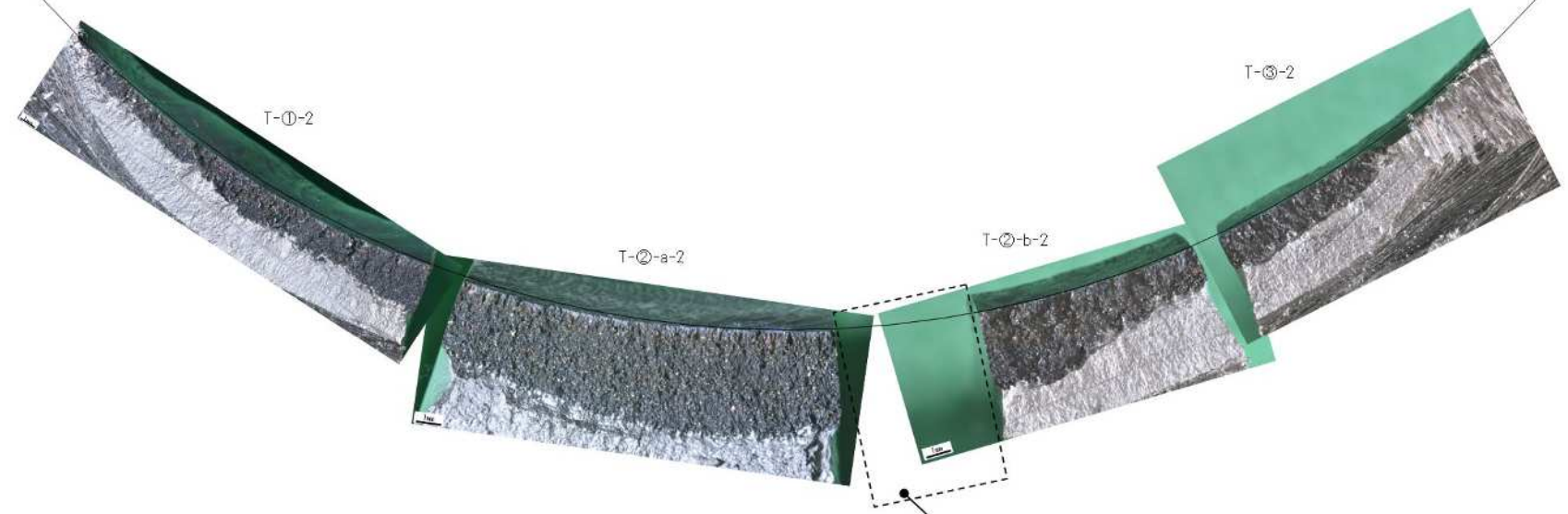


図5 加圧器スプレライン配管 当該管 破面外観結果 (破面全域 エルボ側)

破面外観観察の結果 (6/6)

270° 側

90° 側



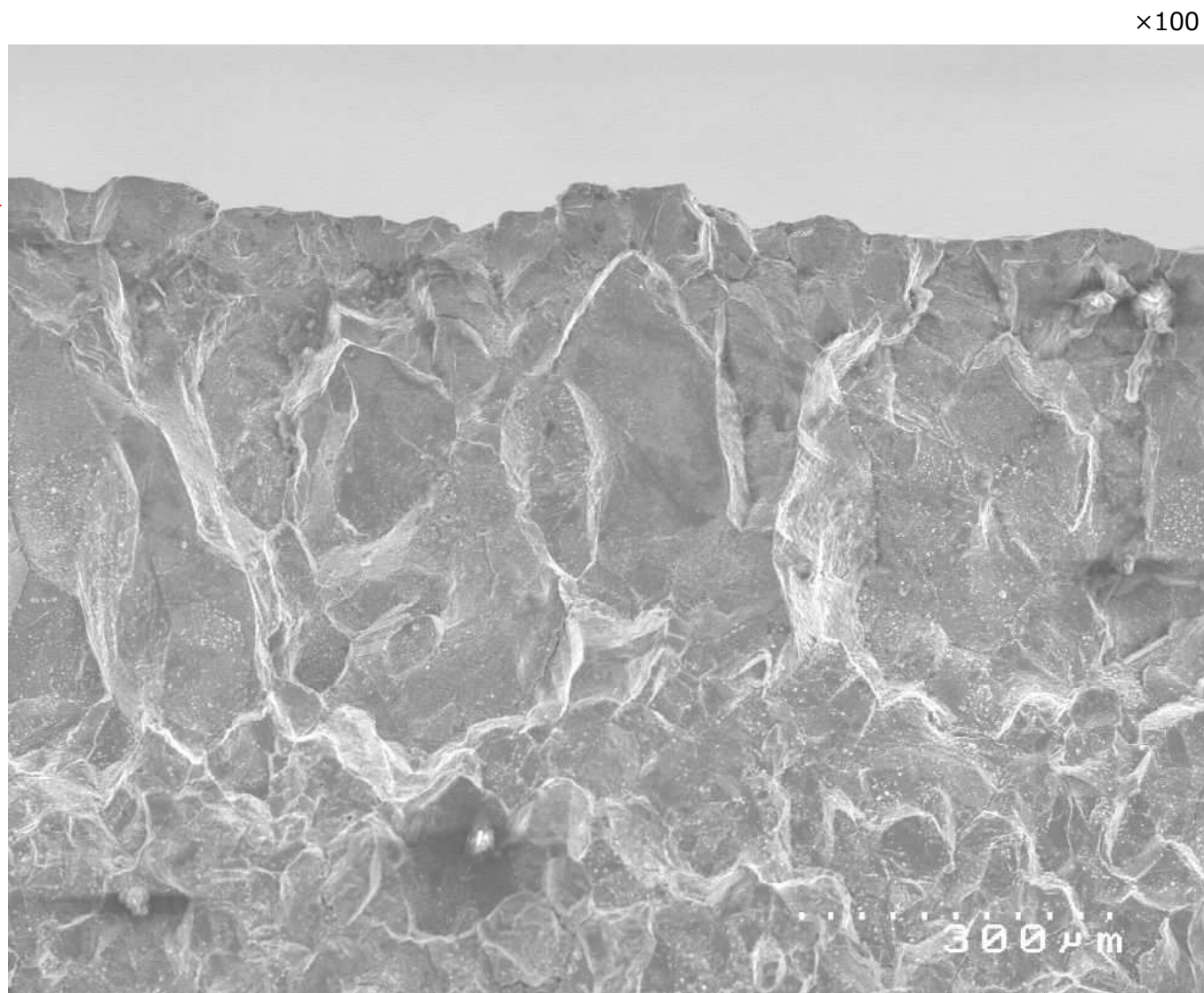
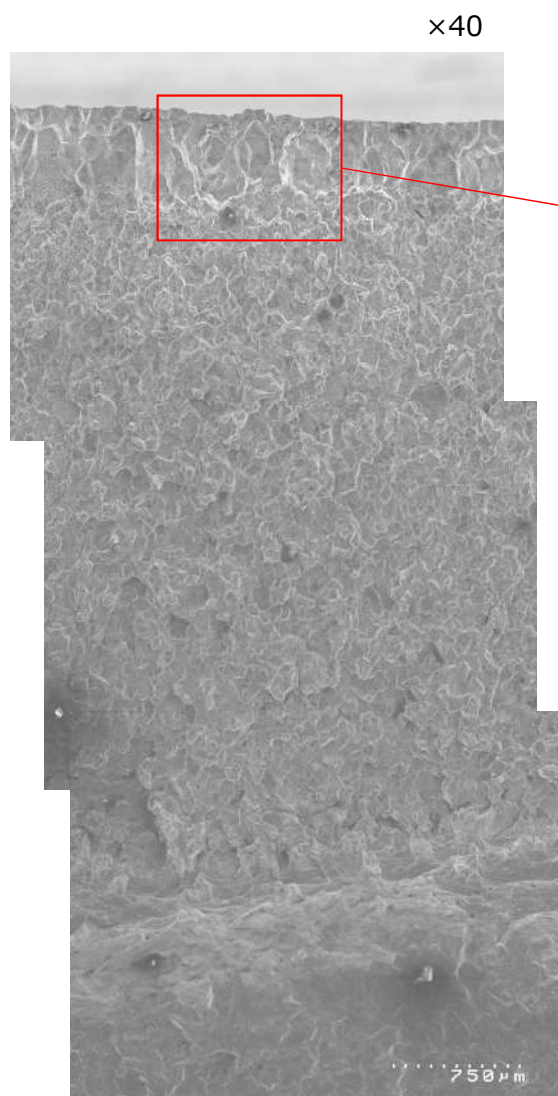
H-②-c
: 破面開放せずに断面マクロ・ミクロ・SEM 組織観察を実施

図6 加圧器スプレライン配管 当該管 破面外観結果破面外観結果 (破面全域 管台側)

破面SEM観察の結果 (1/14)

(内表面近傍拡大)

内表面近傍の破面を拡大観察し、表層近傍の破面も粒界割れの特徴を有することを確認。



破面SEM観察の結果 (2/14)

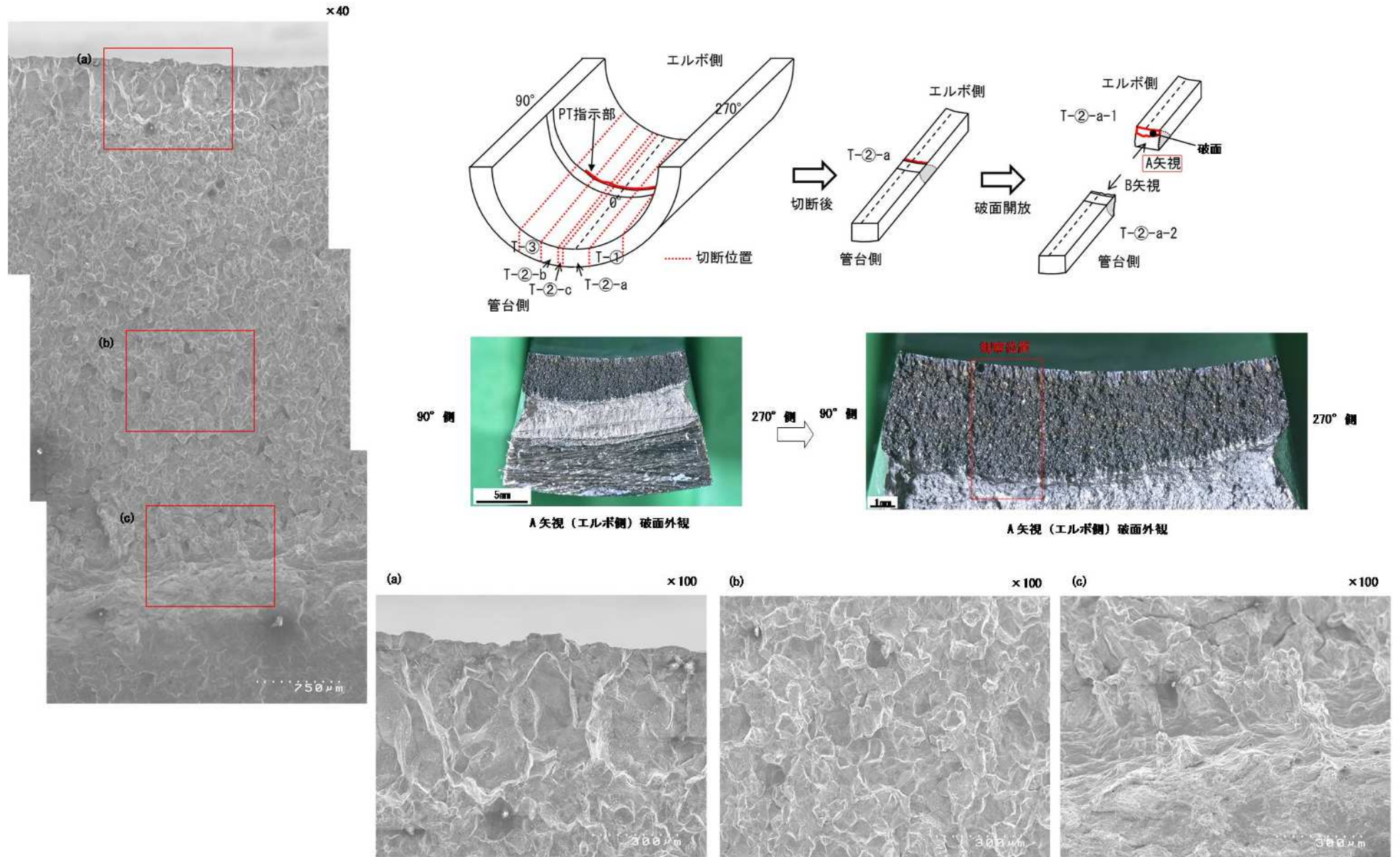


図1 加圧器スプレイライン配管 当該管 SEM破面観察結果 (サンプルT-②-a A矢視)

破面SEM観察の結果 (3/14)

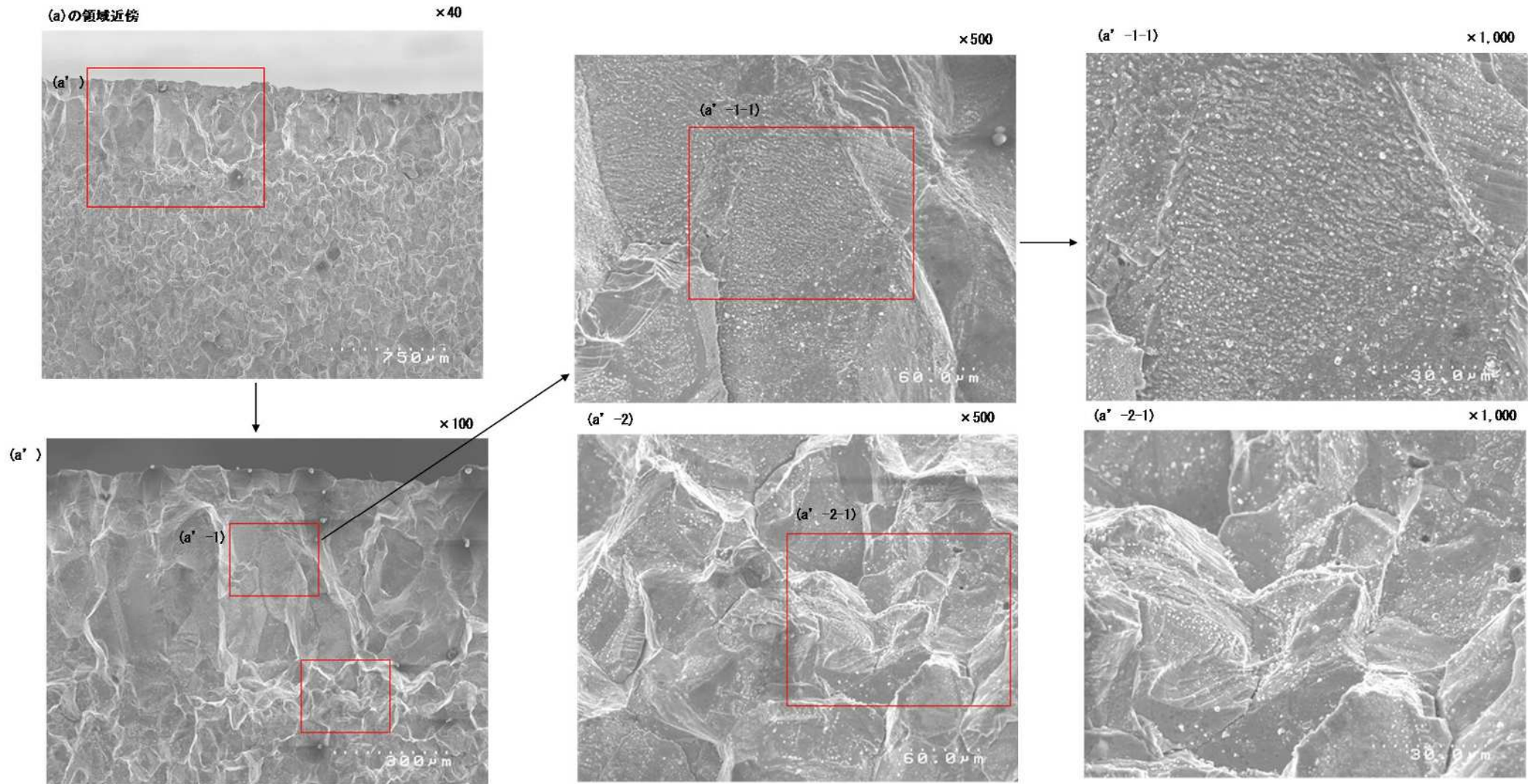


図2 加圧器スプレライン配管 当該管 SEM破面観察結果 (サンプルT-②)-a A矢視 高倍視野①)

破面SEM観察の結果 (4/14)

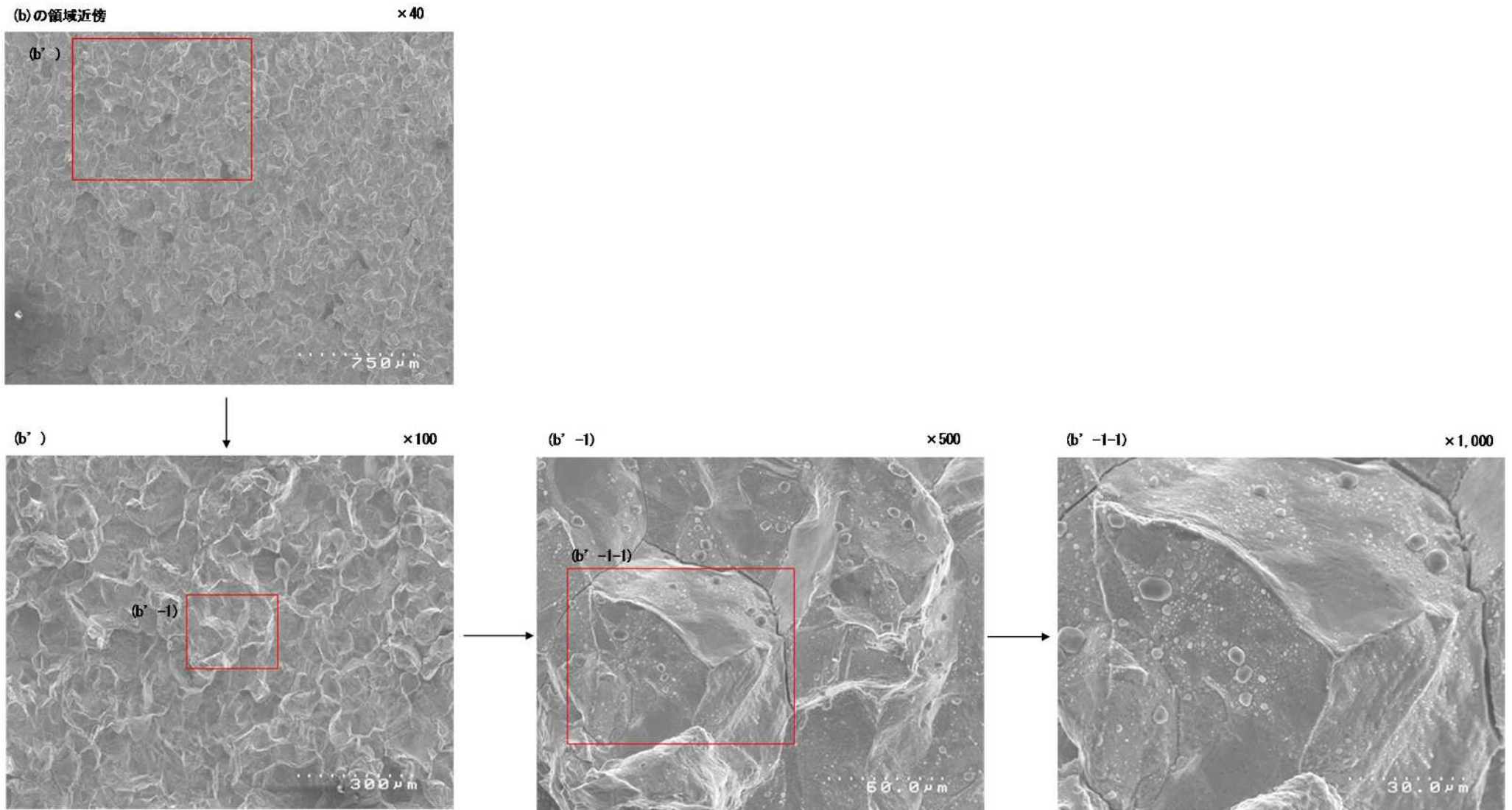


図3 加圧器スプレライン配管 当該管 SEM破面観察結果 (サンプルT-②-a A矢視 高倍視野②)

破面SEM観察の結果 (5/14)

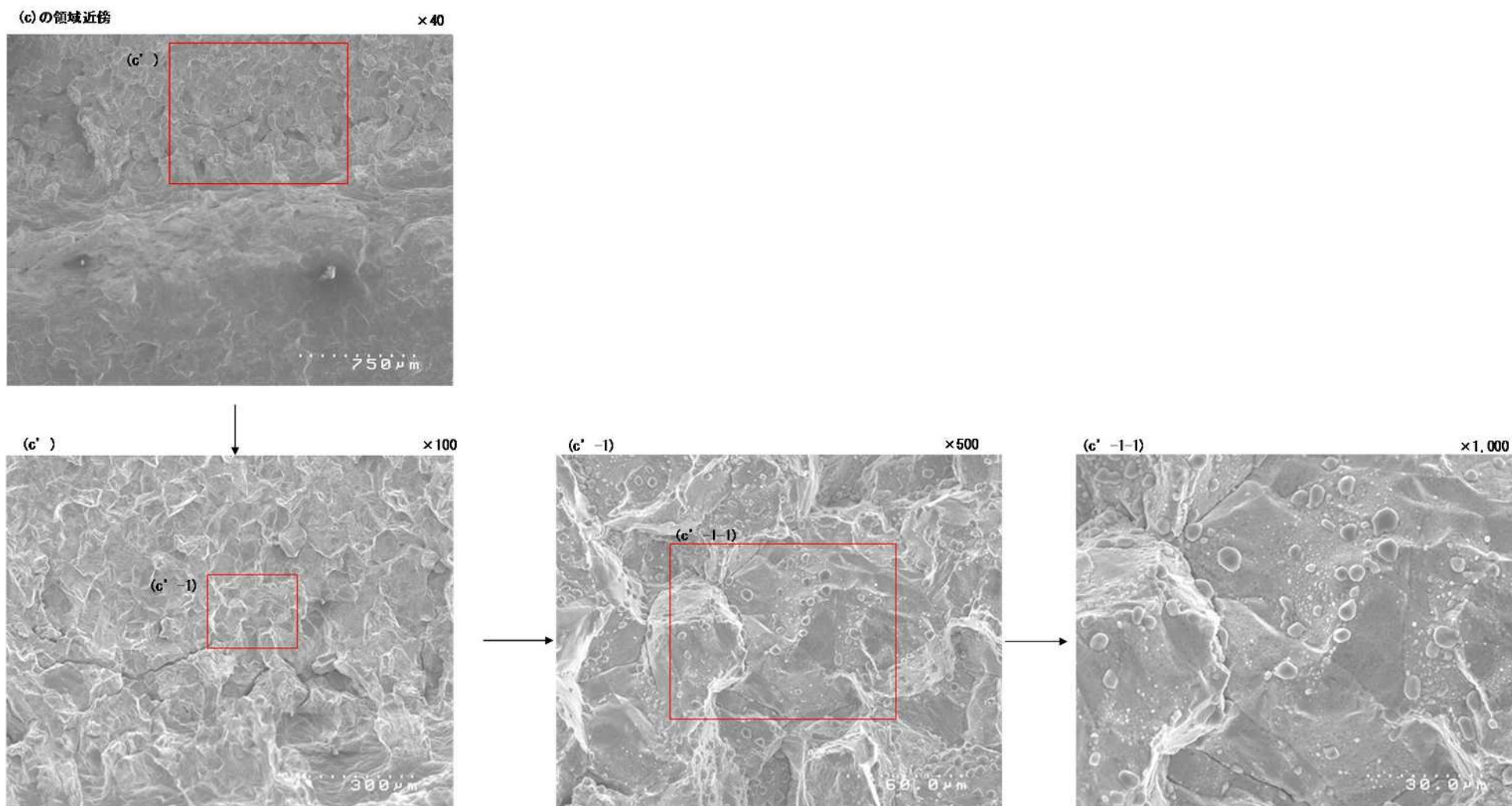


図4 加圧器スプレライン配管 当該管 SEM破面観察結果 (サンプルT-②-a A矢視 高倍視野③)

破面SEM観察の結果 (6/14)

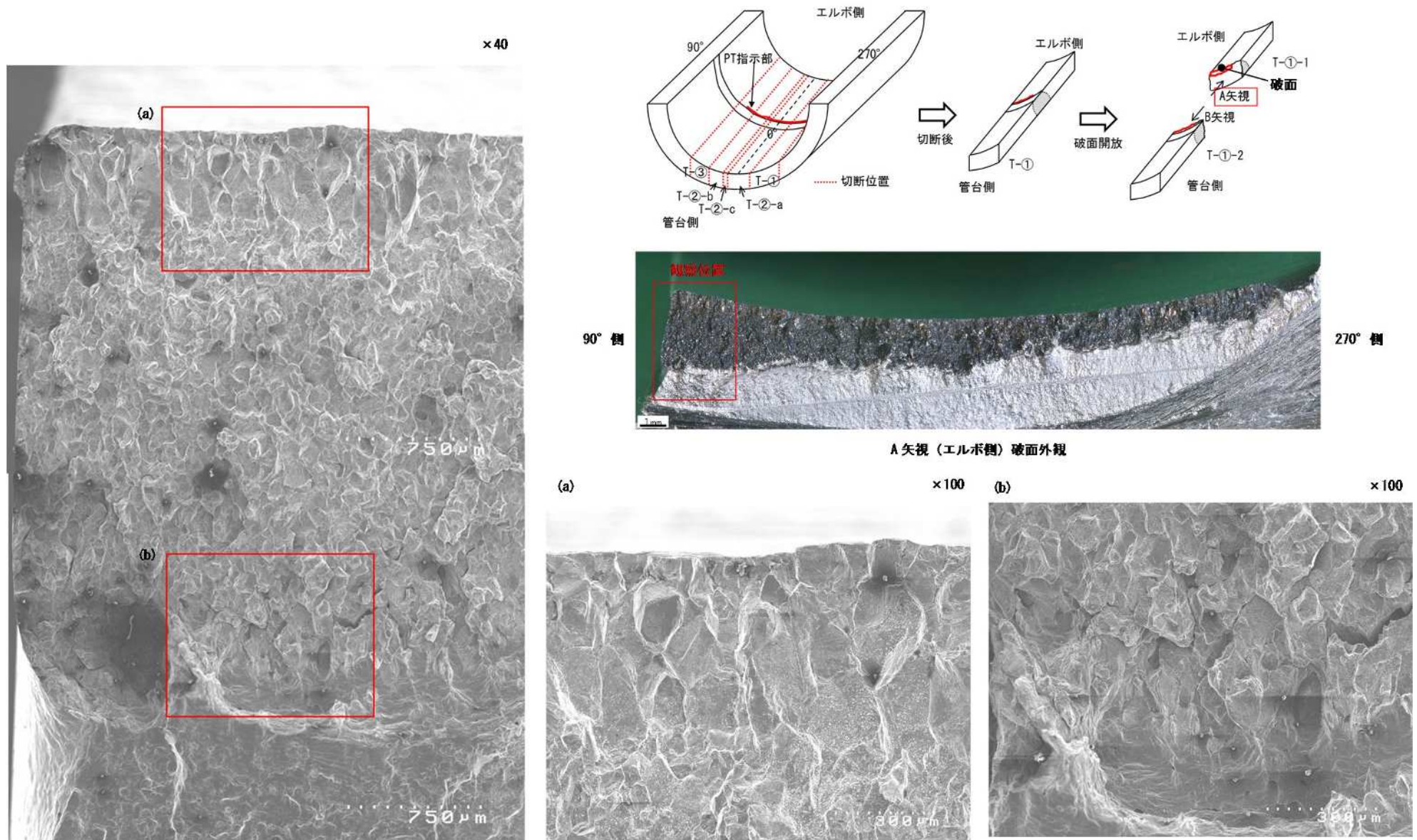


図5 加圧器スプレイライン配管 当該管 SEM破面観察結果 (T-① A矢視 視野①)

破面SEM観察の結果 (7/14)

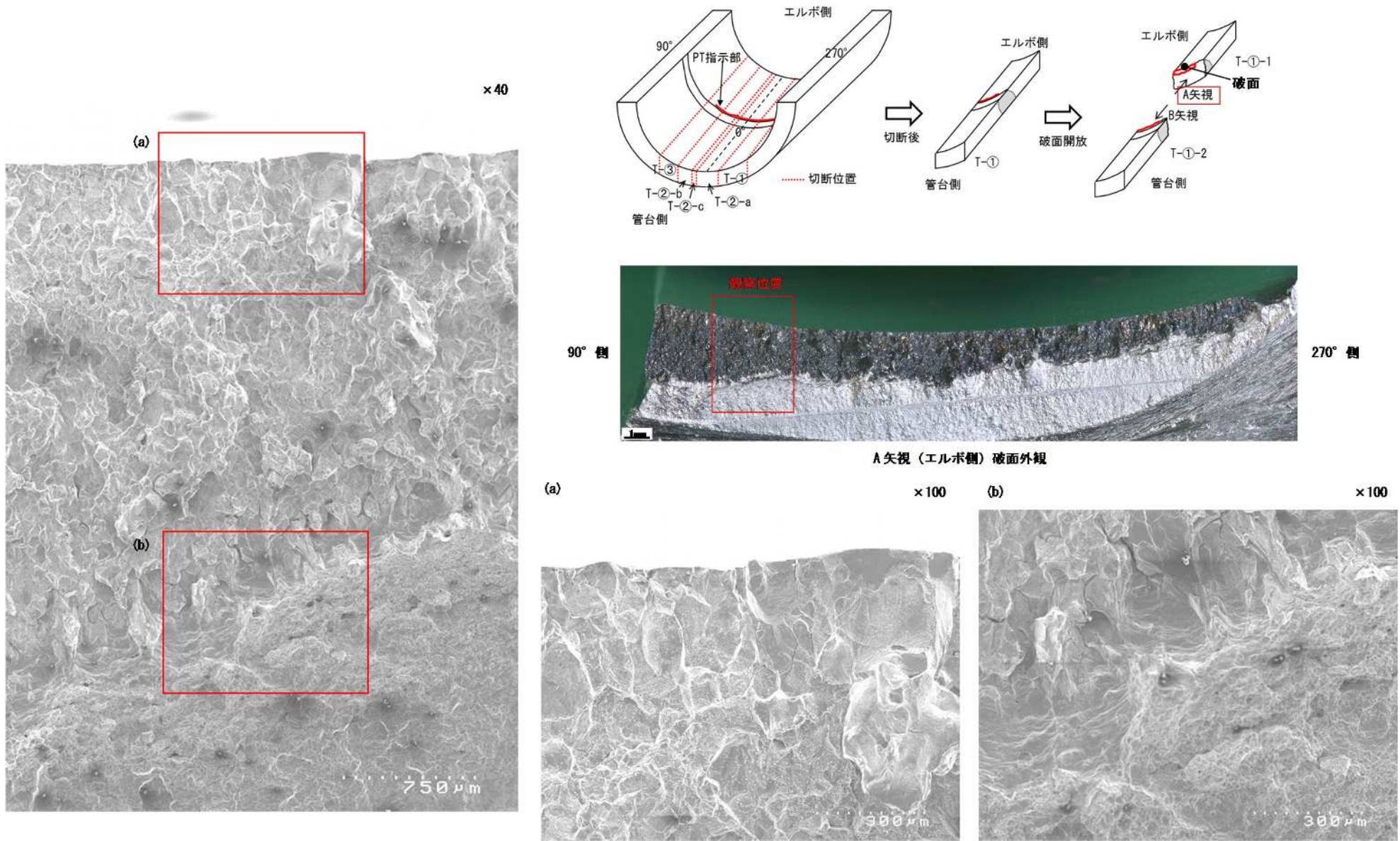


図6 加圧器スプレイライン配管 当該管 SEM破面観察結果 (T-① A矢視 視野②)

破面SEM観察の結果 (8/14)

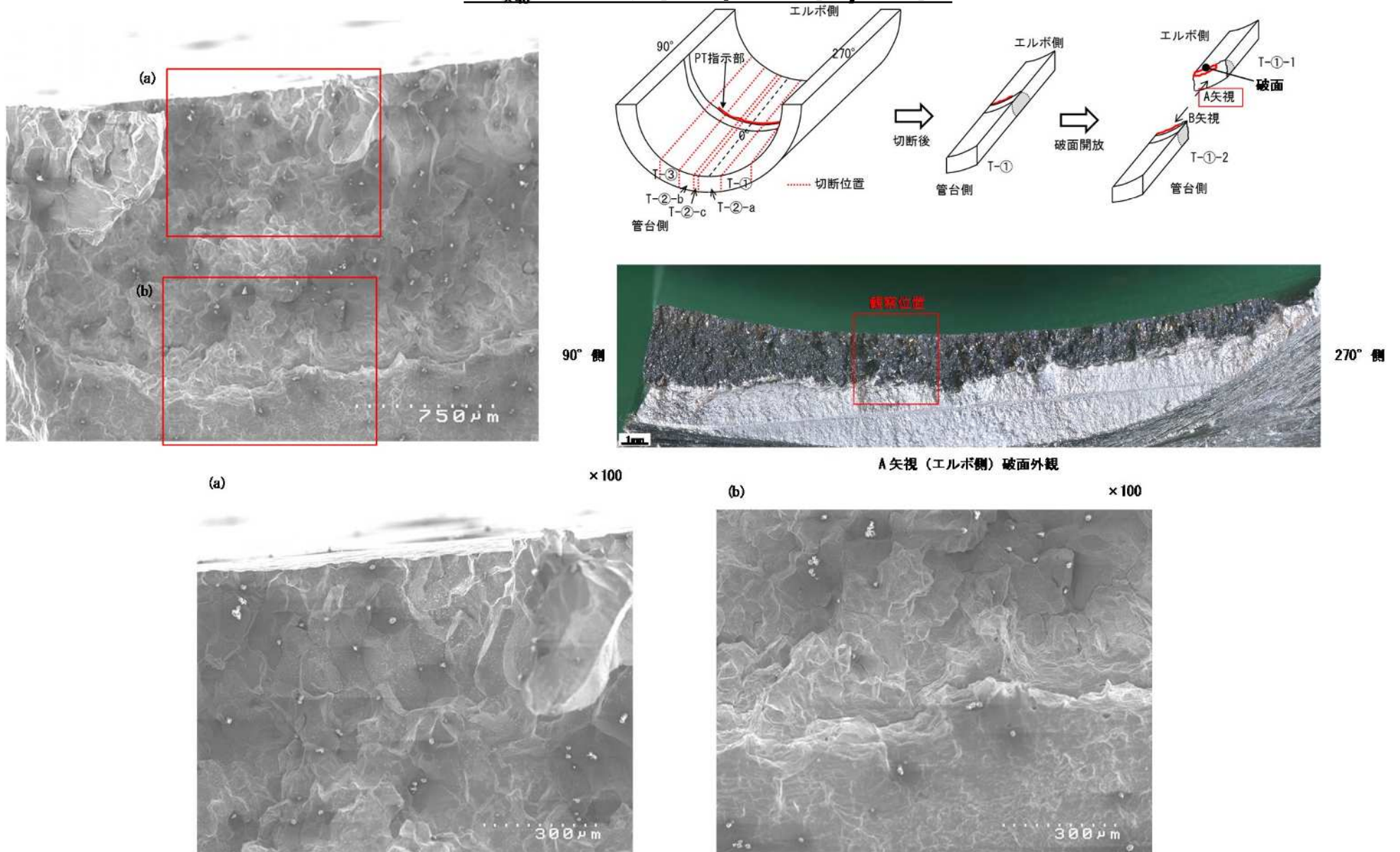
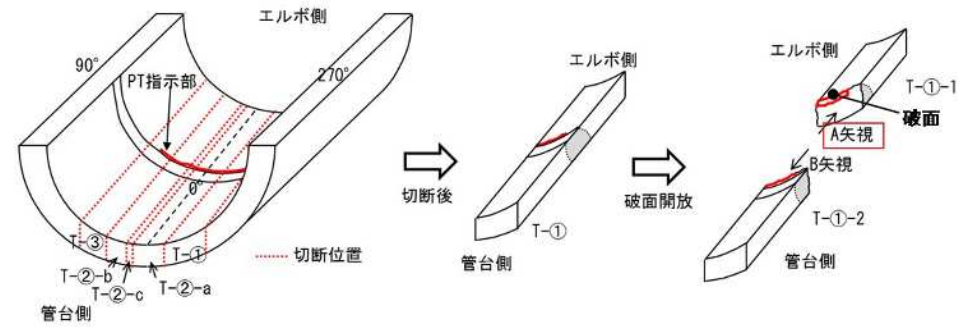
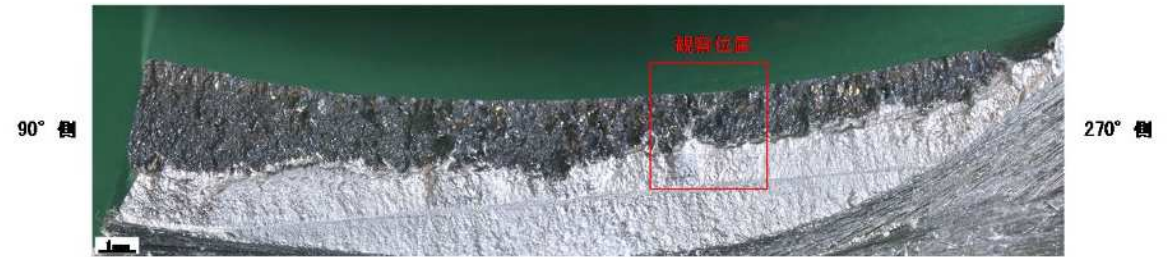
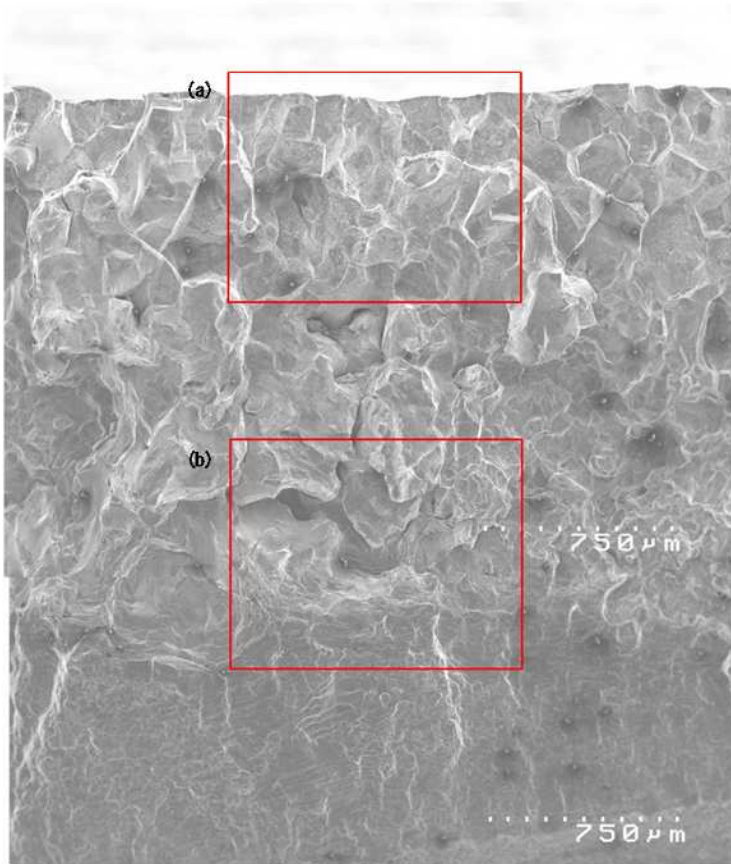


図7 加圧器スプレイライン配管 当該管 SEM破面観察結果 (T-1 A矢視 視野③)

破面SEM観察の結果 (9/14)



×40



A矢視 (エルボ側) 破面外観

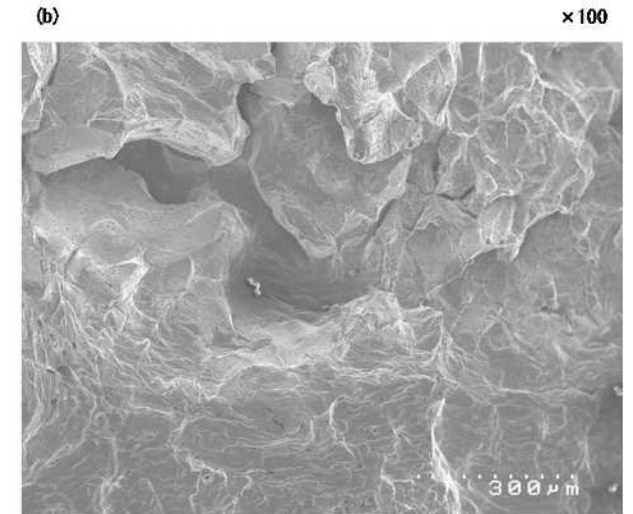
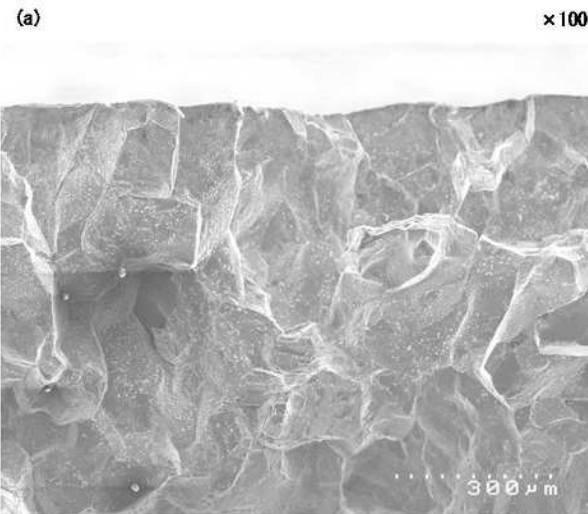


図8 加圧器スプレイライン配管 当該管 SEM破面観察結果 (T-① A矢視 視野④)

破面SEM観察の結果 (10/14)

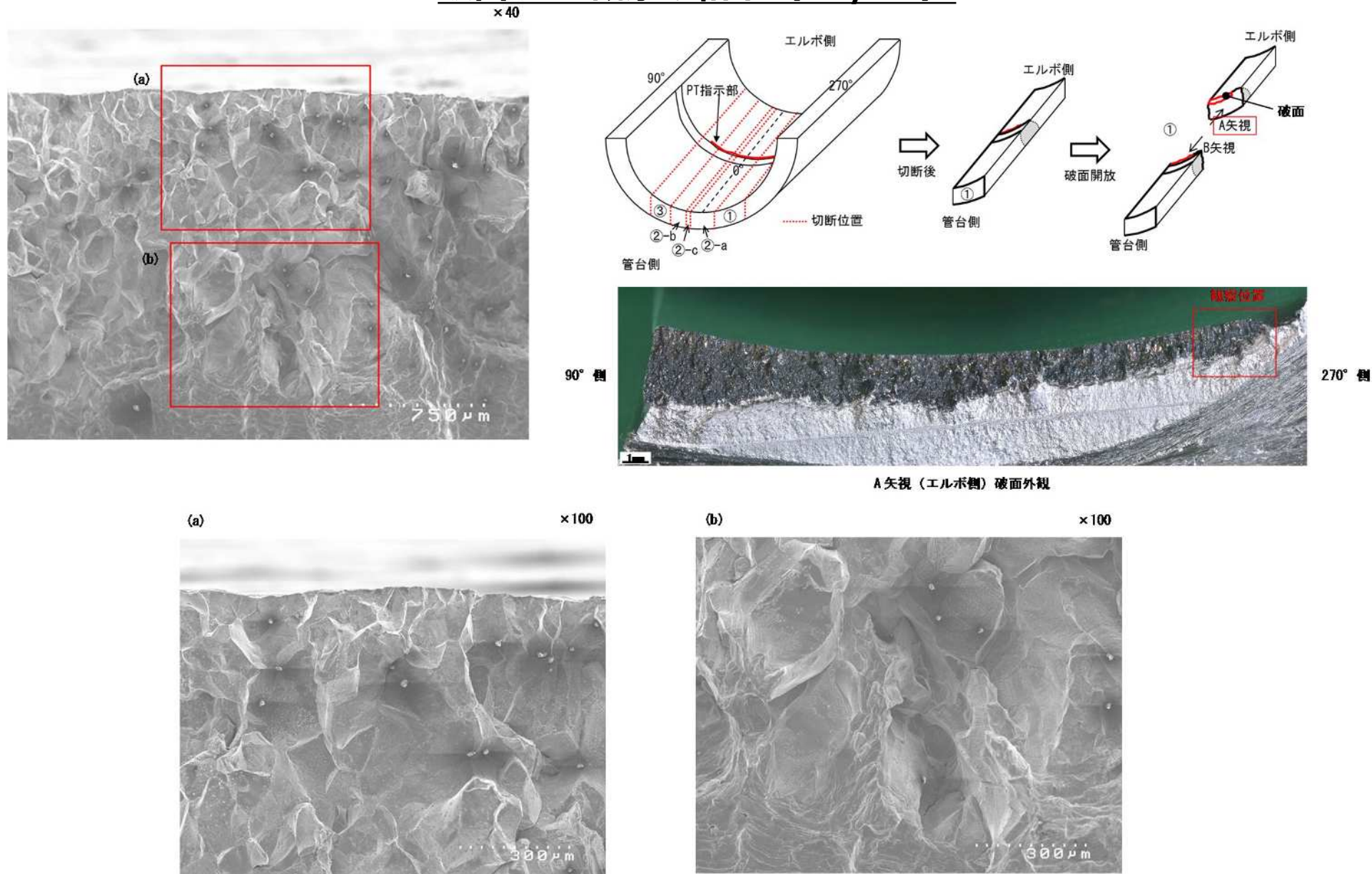


図9 加圧器スプレライン配管 当該管 SEM破面観察結果 (T-① A矢視 視野⑤)

破面SEM観察の結果 (11/14)

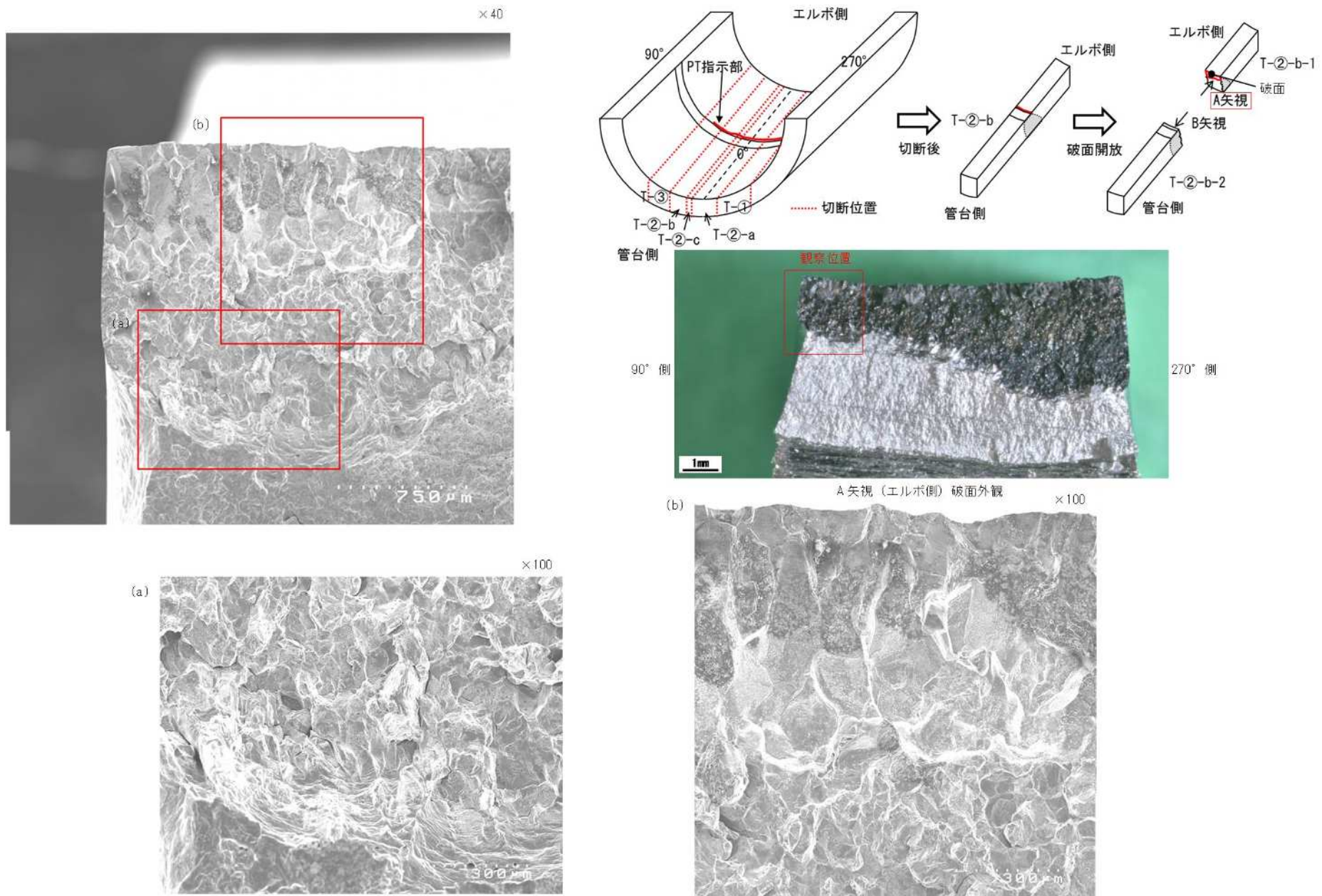


図10 加圧器スプレライン配管 当該管 SEM破面観察結果 (T-2-b A矢視 視野①)

破面SEM観察の結果 (12/14)

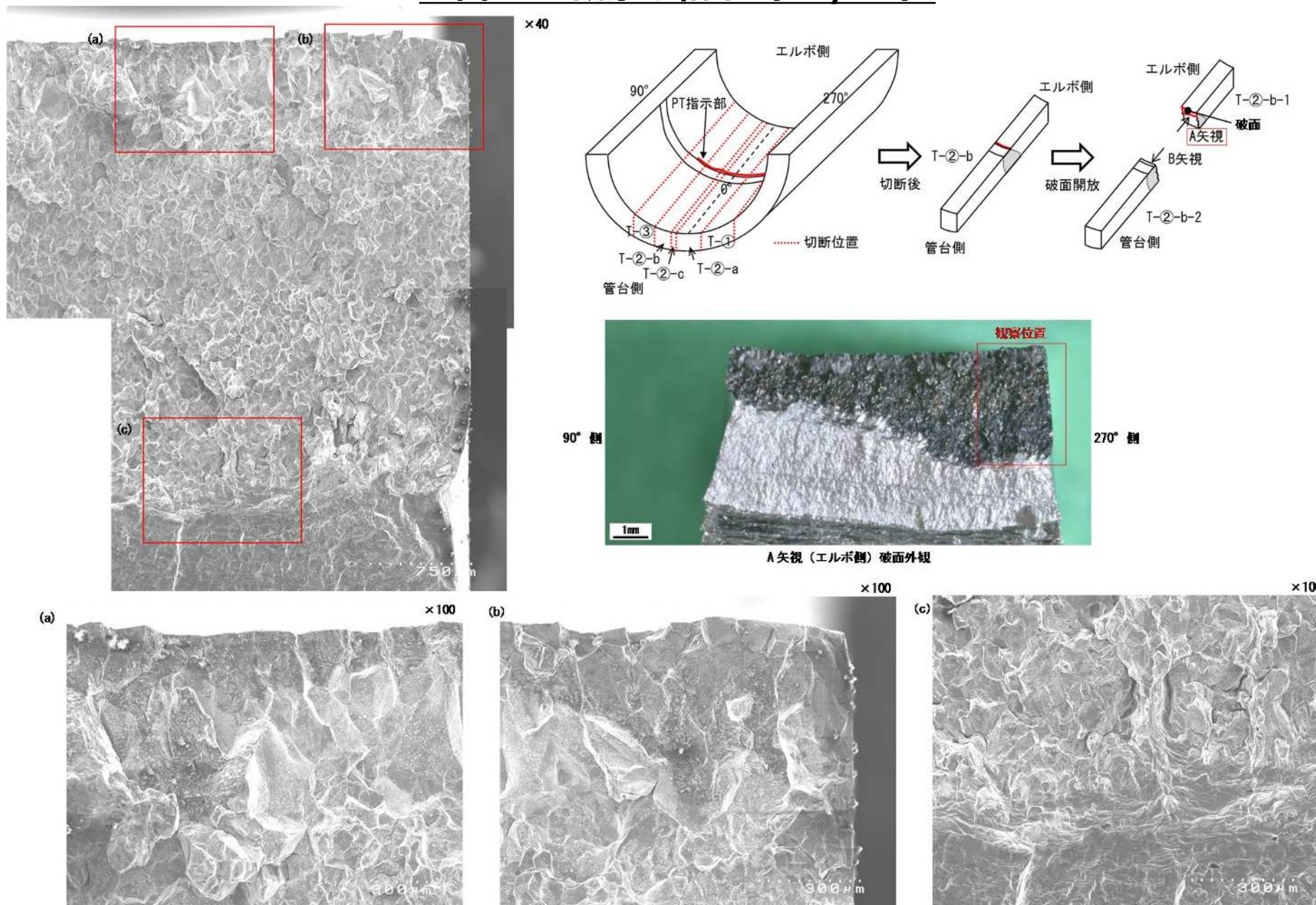


図11 加圧器スプレライン配管 当該管 SEM破面観察結果 (T-②-b A矢視 視野②)

破面SEM観察の結果 (13/14)

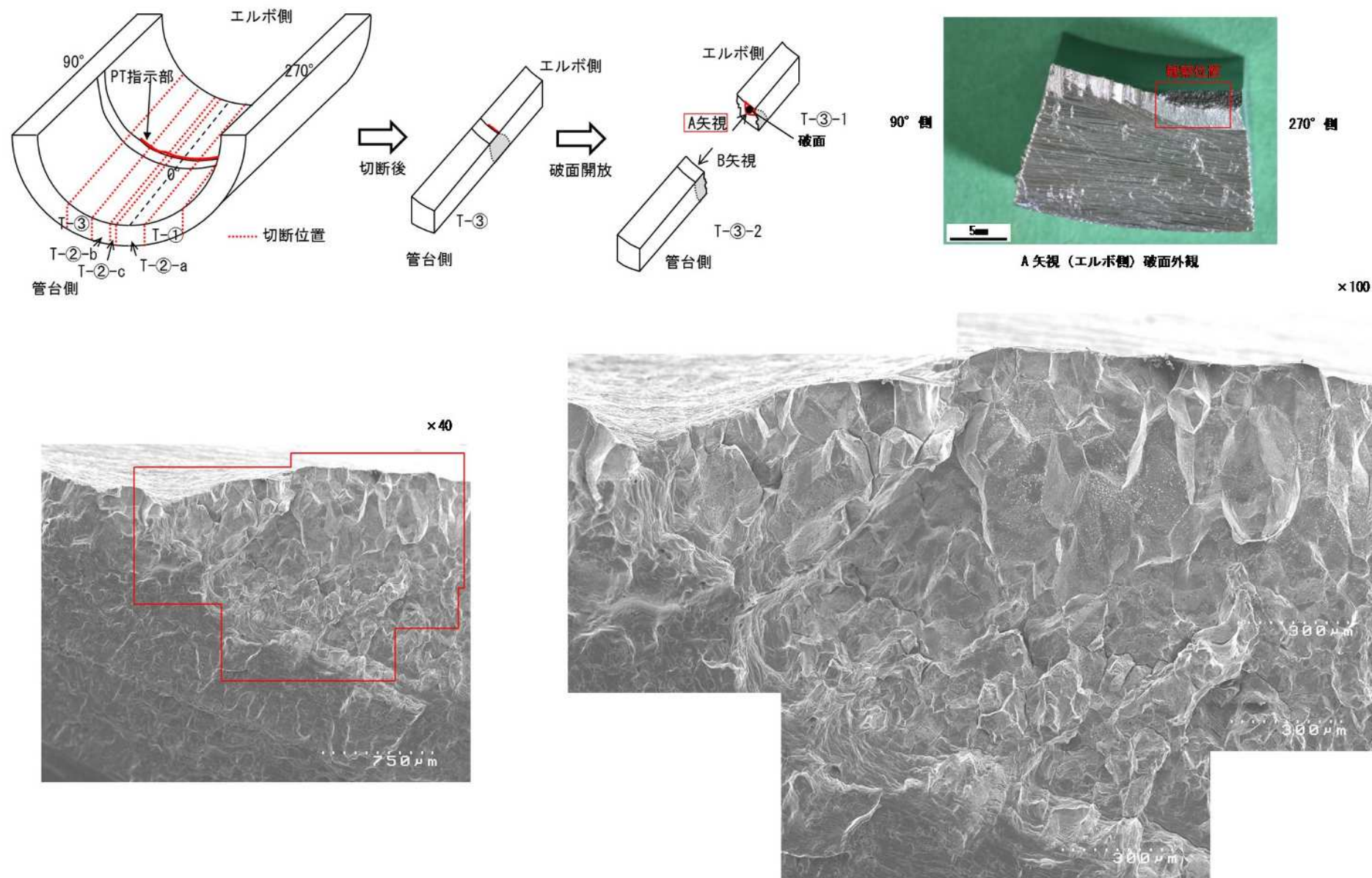


図12 加圧器スプレイライン配管 当該管 SEM破面観察結果 (T-3 A矢視 視野①)

破面SEM観察の結果 (14/14)

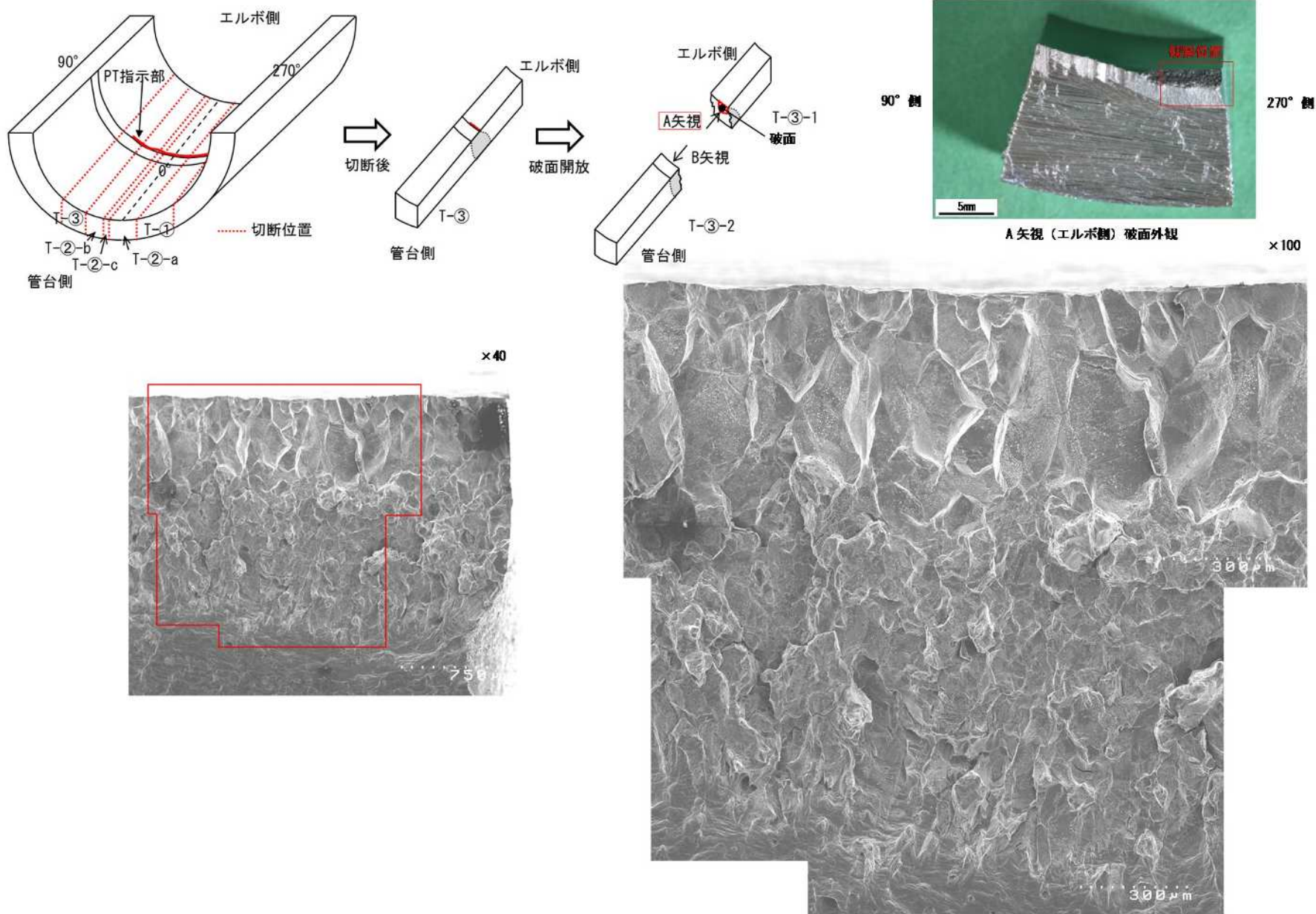


図13 加圧器スプレイライン配管 当該管 SEM破面観察結果 (T-3 A矢視 視野②)

付着物EDS分析の結果 (1/3)

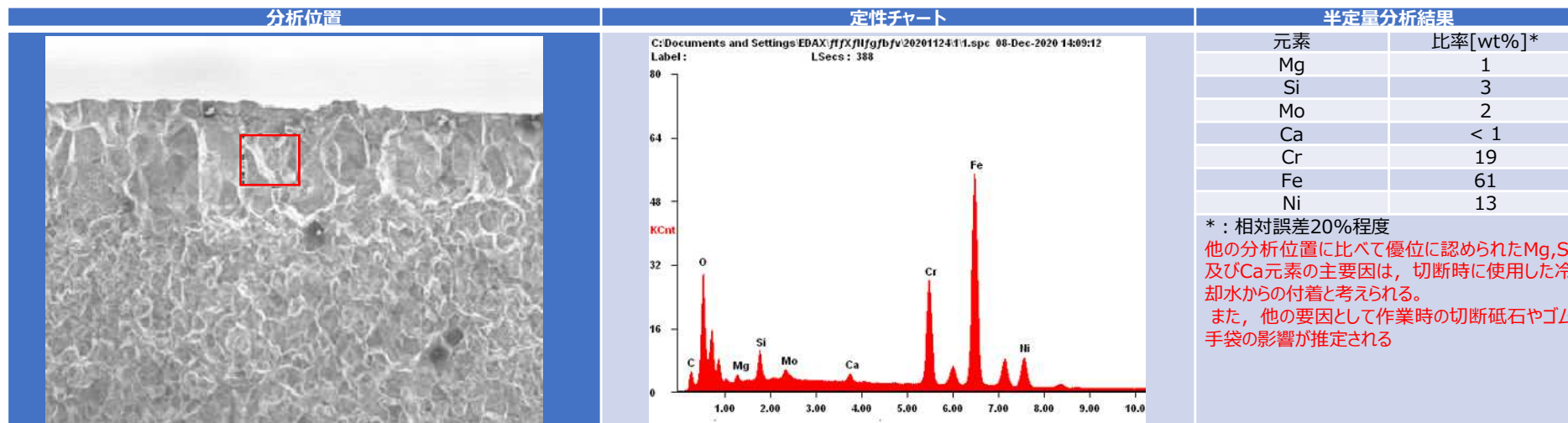


図1 : スペクトル図 (例 : 分析位置①)

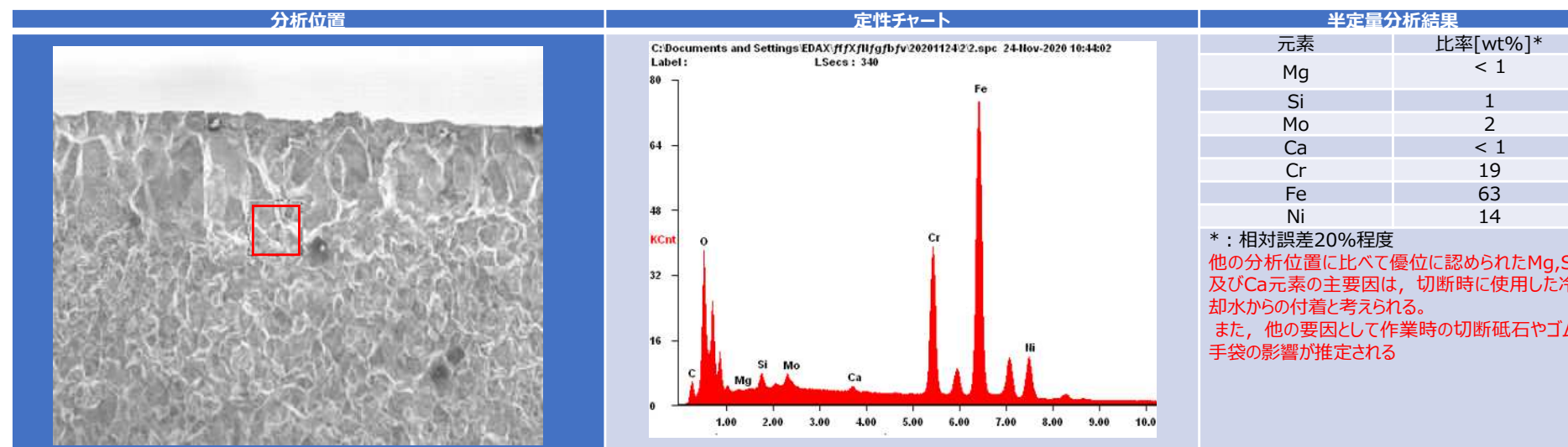


図2 : スペクトル図 (例 : 分析位置②)

付着物EDS分析の結果 (2/3)

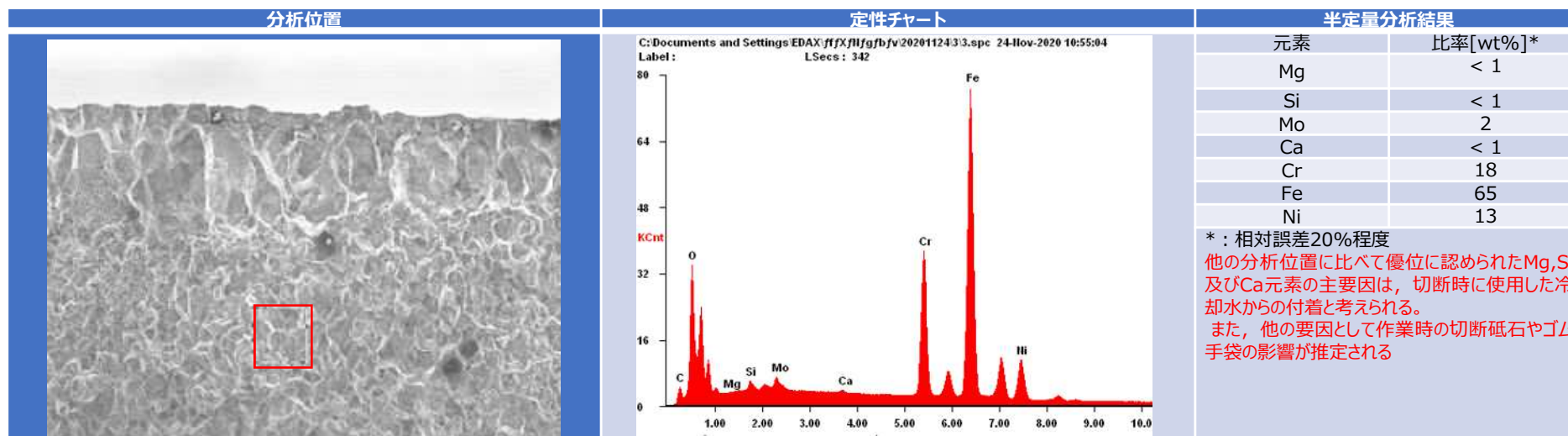


図3 : スペクトル図 (例 : 分析位置③)

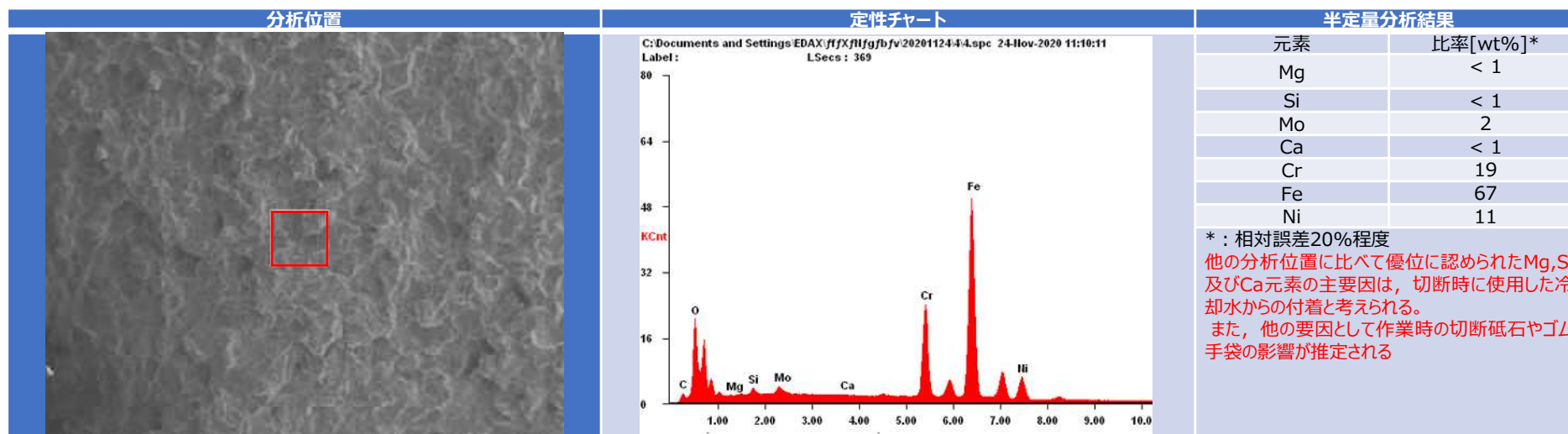


図4 : スペクトル図 (例 : 分析位置④)

付着物EDS分析の結果 (3/3)

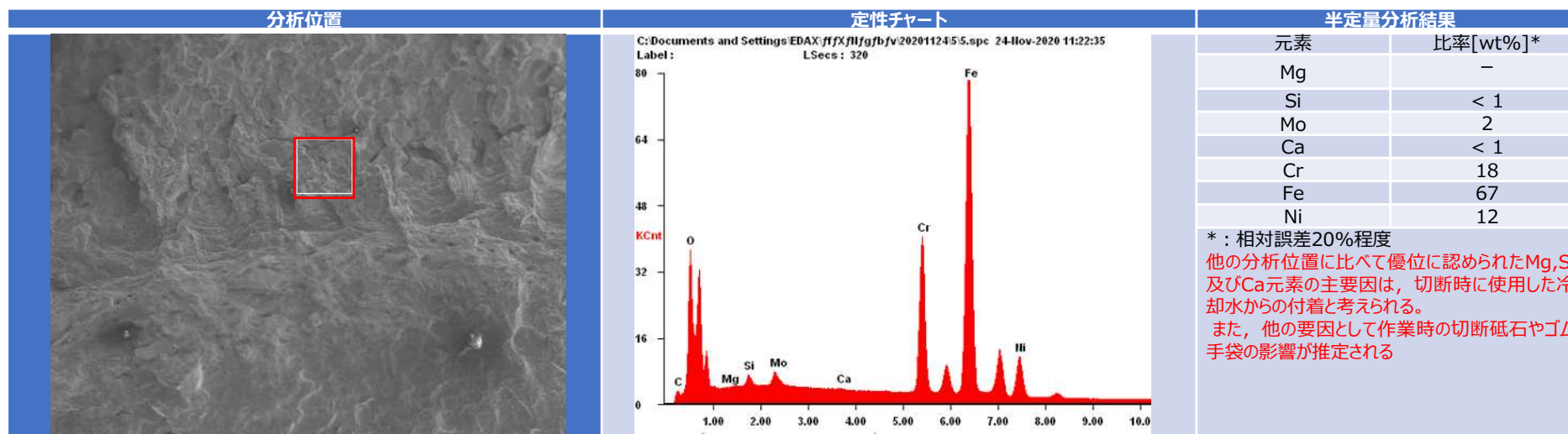


図5：スペクトル図（例：分析位置⑤）

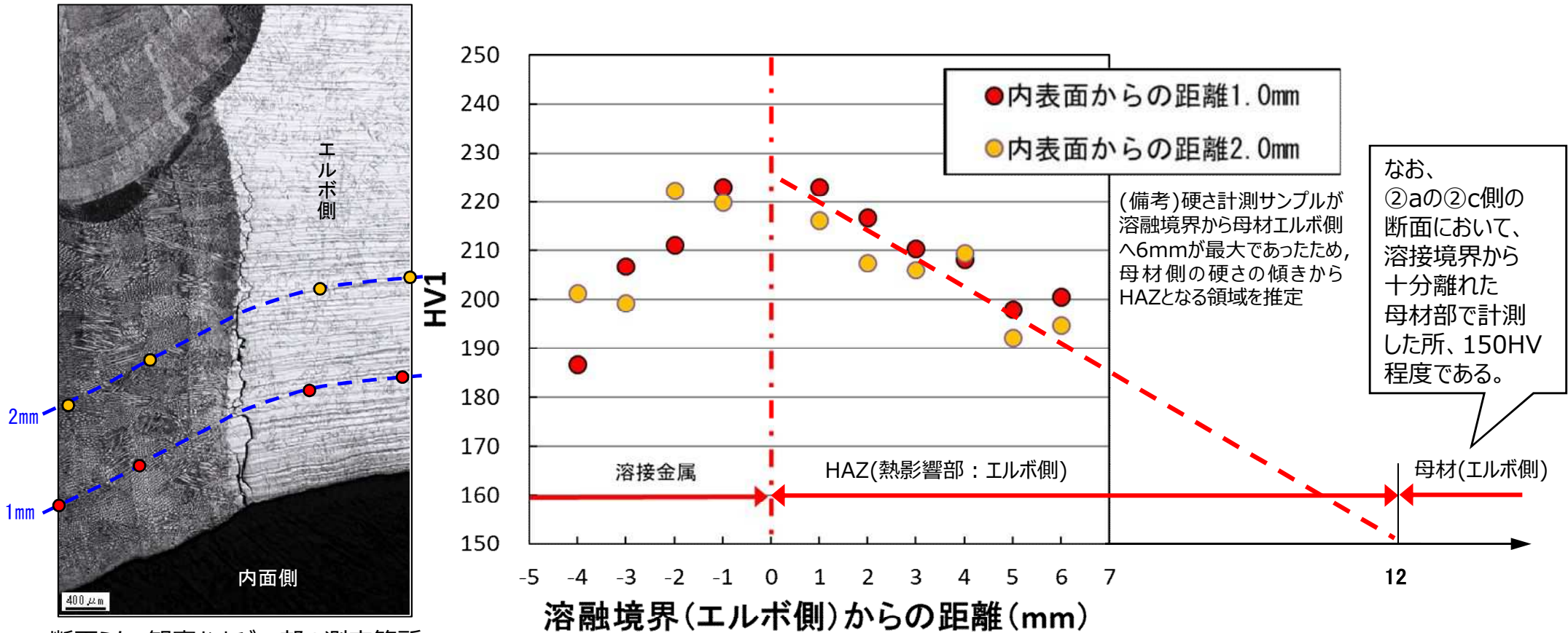
溶接熱影響部の範囲の確認結果

1. 調査内容

②cの断面でのエルボ側母材におけるHAZ(熱影響部)領域の範囲を、ビッカース計(1kg)を用いて計測した。

2. 調査結果

ビッカース硬さ計測結果から判断したHAZ範囲を以下に示す。

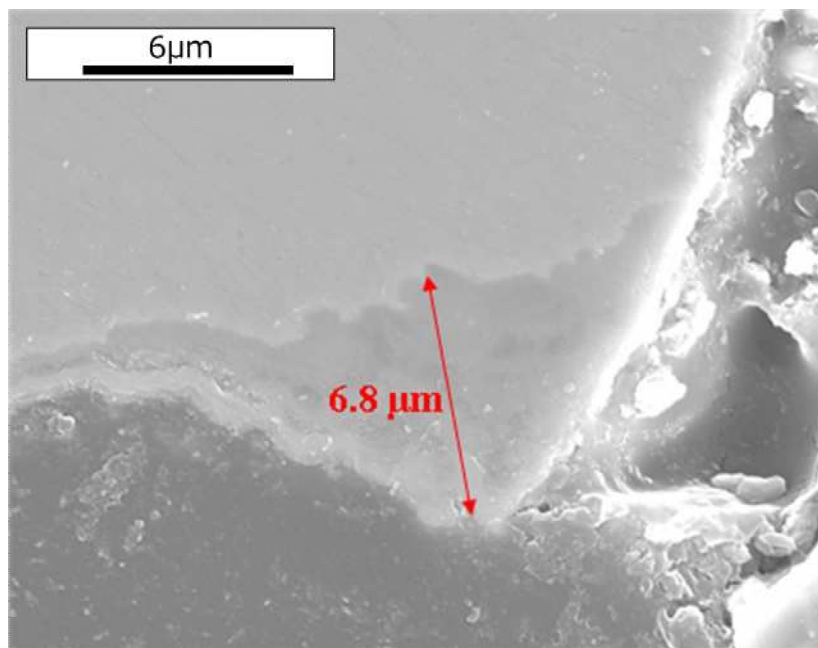


➤ エルボ側母材のHAZ(熱影響部)を硬さの変化傾向から推定すると、その範囲は溶融境界から約12mmであった。

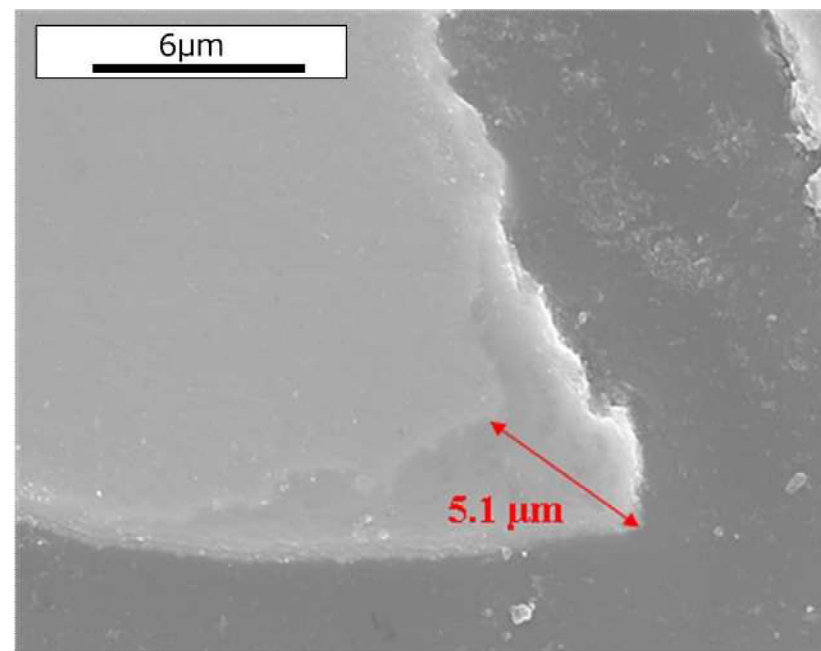
断面観察（酸化皮膜分析）の結果（1/2）

補足⑨ - 1

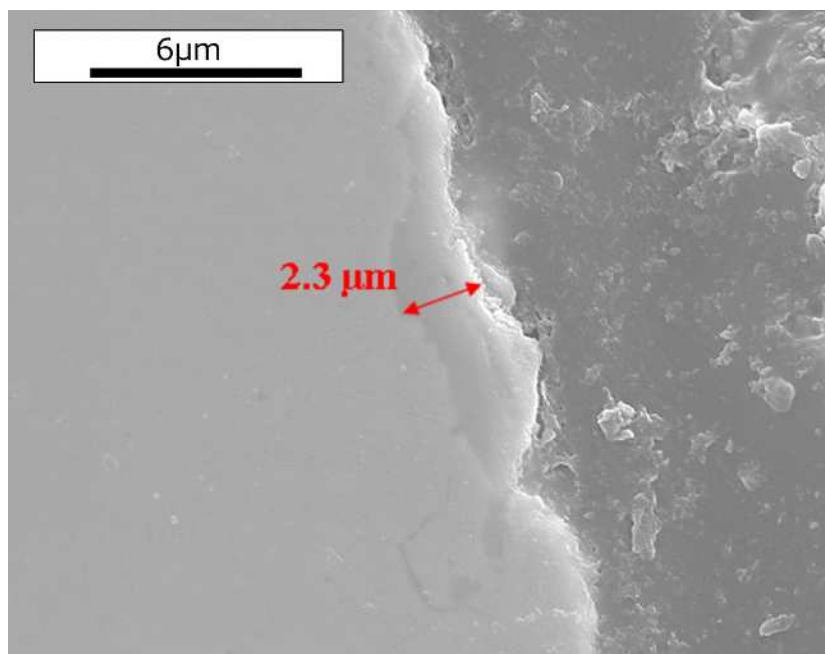
① 表層



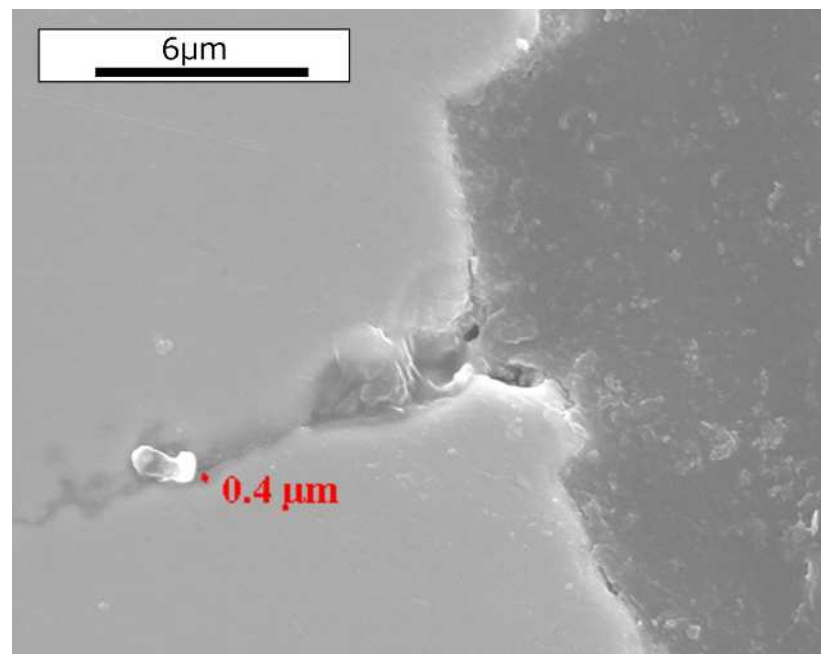
② 表層



③ 0.02mm深さ



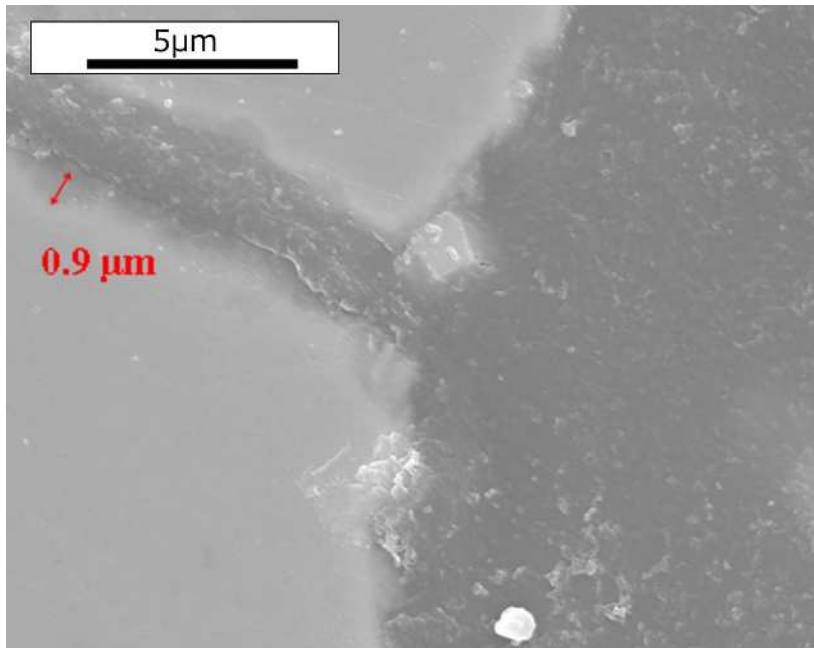
④ 0.11mm深さ



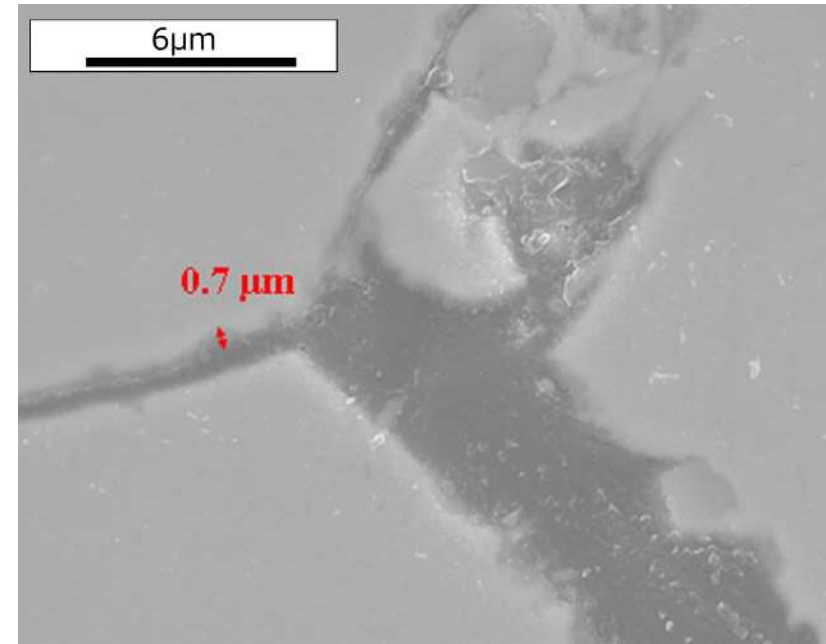
断面観察（酸化皮膜分析）の結果（2/2）

補足⑨-2

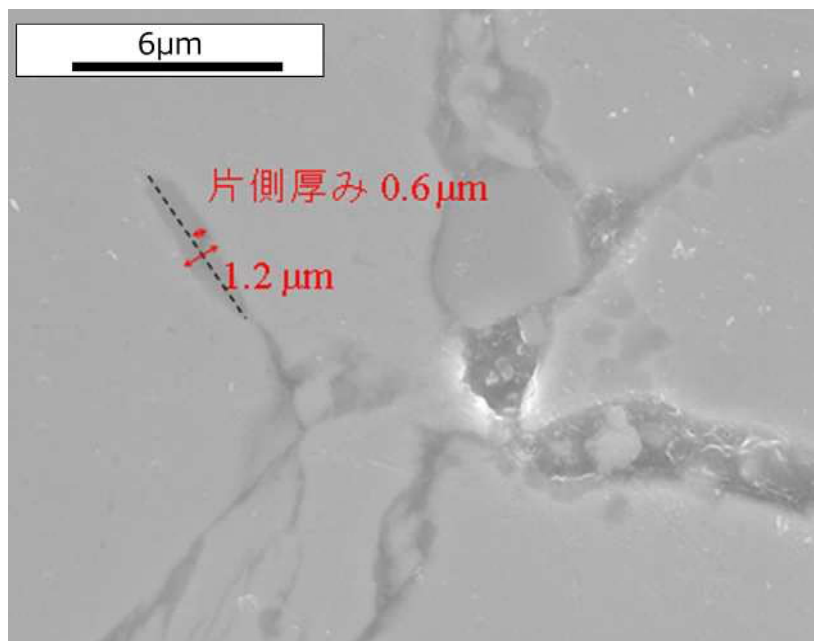
⑤ 0.88mm深さ



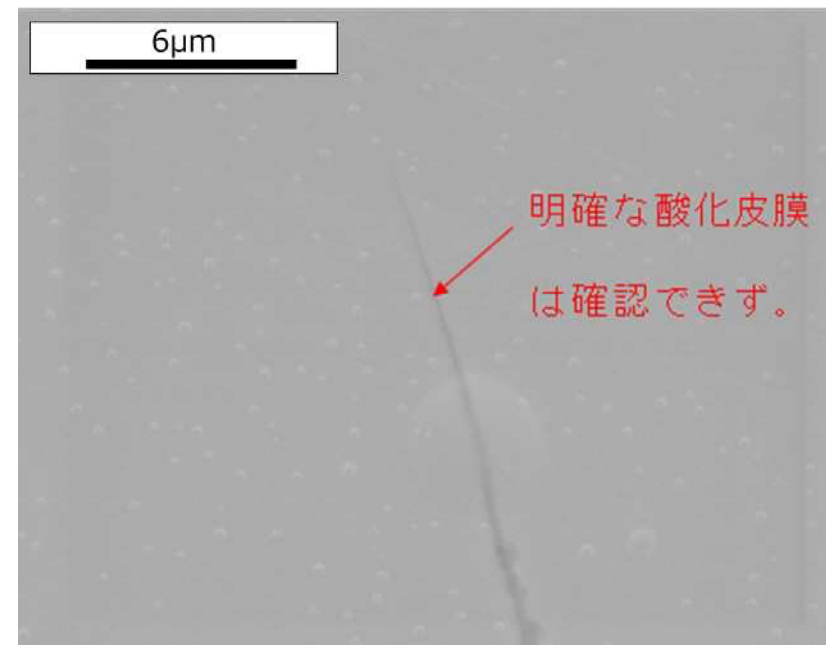
⑥ 1.68mm深さ



⑦ 2.12mm深さ



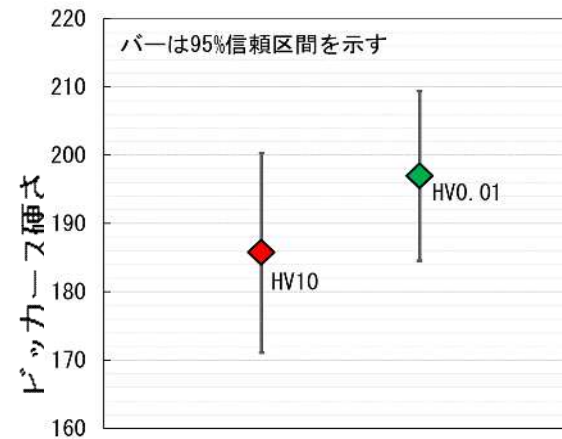
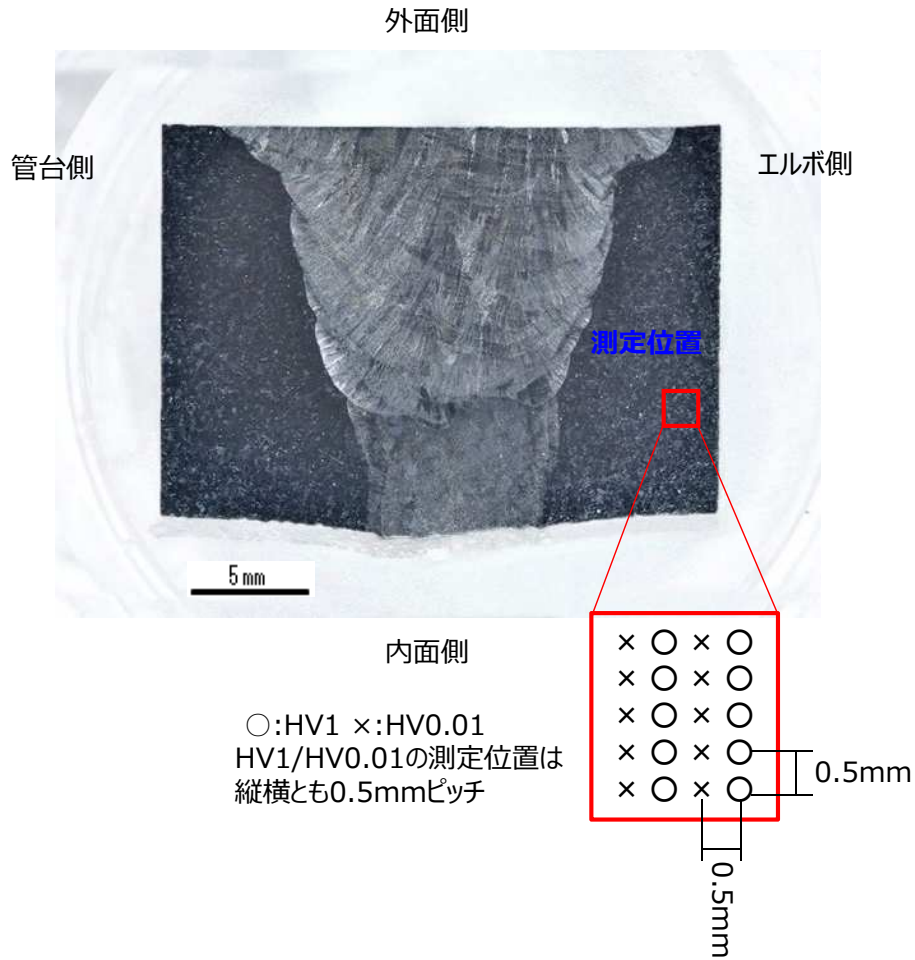
⑧ 3.65mm深さ



1. 調査内容

硬さのバラツキが少ない母材一般部において、1kgfと0.01kgfの試験荷重で硬さ試験を行い、試験荷重の違いによる硬さの差異を確認した。

測定位置	HV1	HV0.01
母材一般部	183	191
	176	199
	178	194
	179	203
	183	206
	200	189
	186	188
	194	197
	190	198
	189	203
平均	186	197
標準偏差	7	6

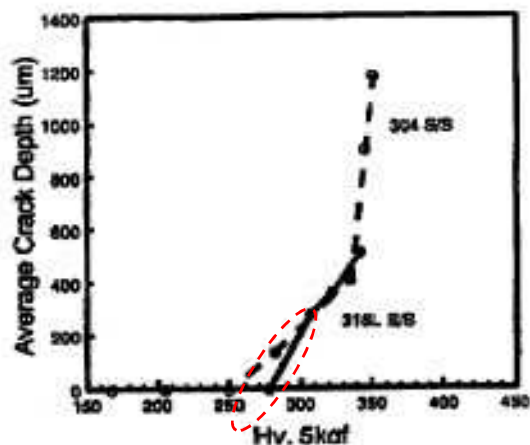


2. 調査結果

試験荷重1kgfでの硬さ試験結果は、試験荷重0.01kgfの試験結果に比べて、平均的に**約11**小さくなる。

硬度がSCC発生・進展の知見のある値

- 硬化に起因するSCC発生は、PWR環境下では知見がないものの、PWR環境よりSCCの感受性の高いBWR環境の知見として、概ね硬度300HV以上でSCC発生の可能性があるものとされている。
- 硬化に起因するSCCの進展は、電共研で取得した硬度依存性データをもとに195HV以下での亀裂進展が認められていない。
- したがって、表面硬度300HV以上、板厚内硬度195HVを超える硬さはSCCの発生・進展の可能性がある。



(1%ひずみ, 試験温度: 288℃, 溶存酸素濃度: 8ppm)

図3 BWR環境下でのSCC発生試験

図1 SCC発生の閾値

出典 ; M. Tsubota et al : The Effect Of Cold Work on the SCC Susceptibility of Austenitic Stainless Steels. "Proceeding of 7th International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems. Vol.1(1995)519-527

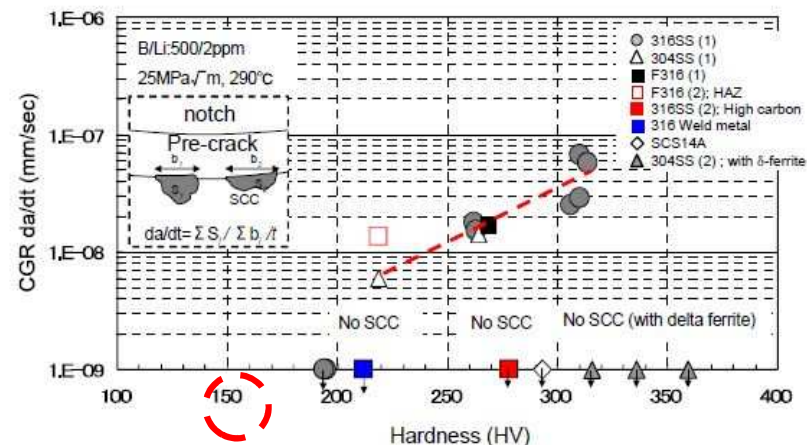


Fig. 6 Hardness / Material and Crack Growth Rate

図2 SCC進展速度の硬度依存性

出典 ; Matsubara.et.al 2010 Fontevraud7 O02-A099-T03 -Research Programs on SCC of Cold-worked Stainless Steel in Japanese PWR N.P.P.

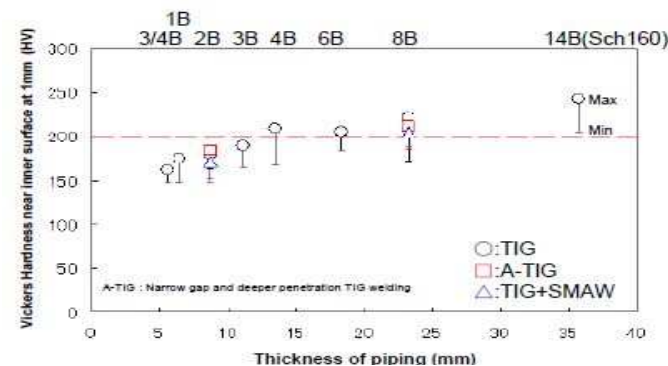


図3 配管板厚と硬度の関係

出典 ; Matsubara.et.al 2010 Fontevraud7 O02-A099-T03 - Research Programs on SCC of Cold-worked Stainless Steel in Japanese PWR N.P.P.

PWRの温度環境 (200℃) とSCC進展との関係

- 電共研において、PWR環境中のSCC亀裂進展速度の温度依存性を検証しており、200℃での進展速度は、硬度300HVの場合10年で2mm程度、250HVの場合100年で1mm程度の進展速度である。
- 配管板厚内部の硬さは、今回計測を行った実機のように、250HV程度以下であっても、200℃以上の温度環境においては、プラントライフを考慮した際にわずかながら傷が進展し、顕在化する可能性がある。

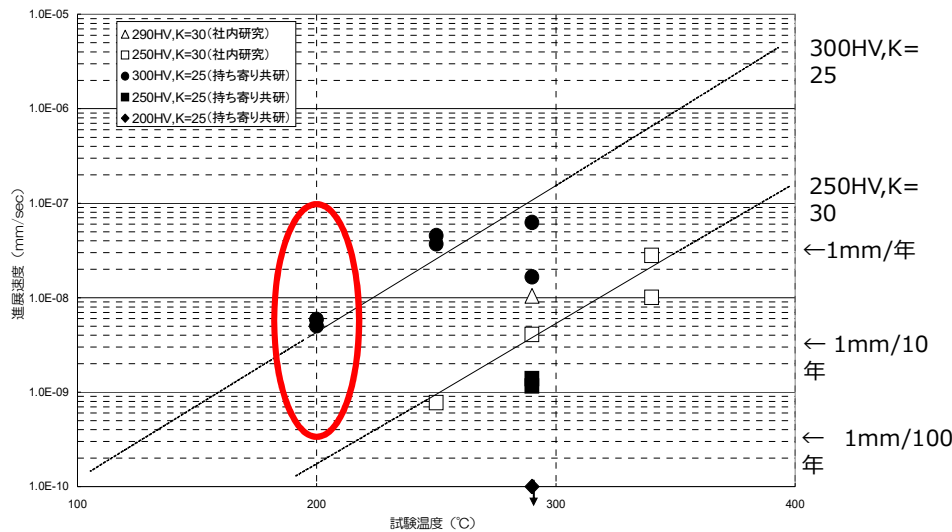


図1 SCC進展速度の温度依存性

出典；寄り共研「維持規格導入に向けたステンレス配管のSCC評価に関する研究」

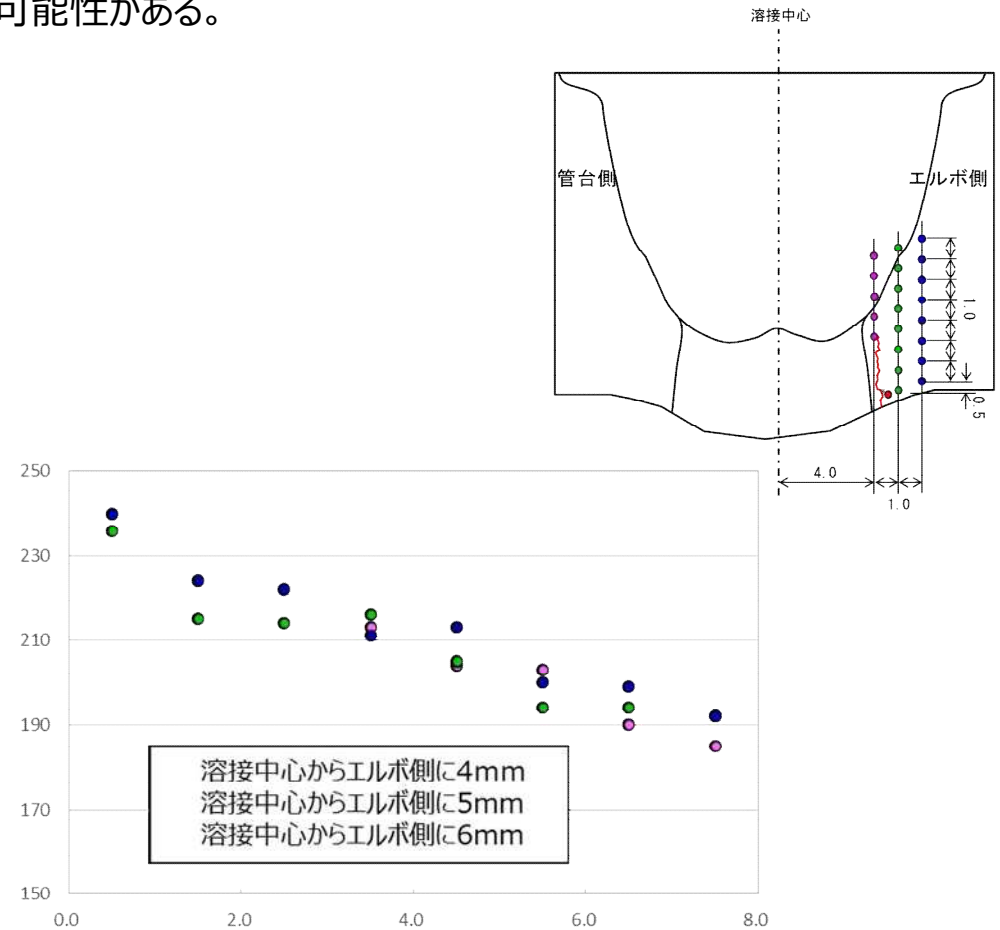


図2 実機硬さ計測結果 (溶接部近傍)

応力改善による残留応力の改善

- 応力改善（バフ研磨、ピーニング）を行うことで、表面の残留応力を圧縮側に改善することができる。

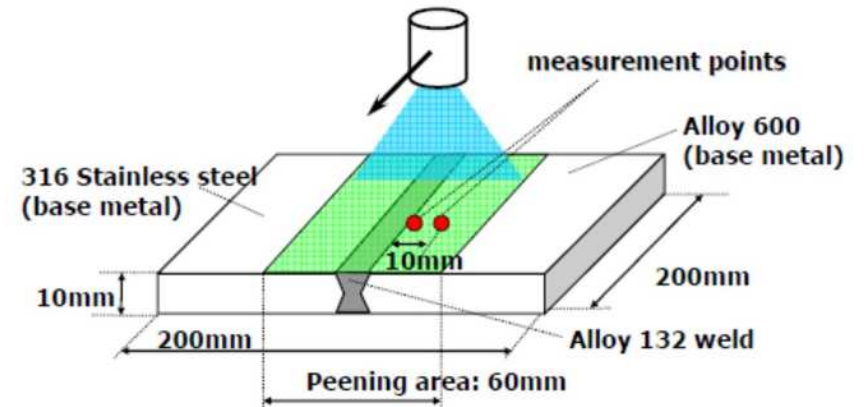
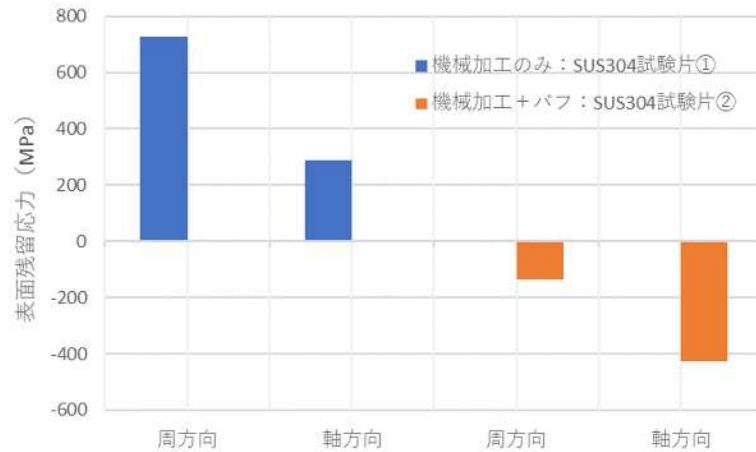


Fig.5 The mockup of butt weld for RV Nozzle safe-end



・本試験は管台内面の機加工である旋削を模擬した平板試験体の結果による。

図1 応力改善バフ研磨の効果 (三菱重工資料)

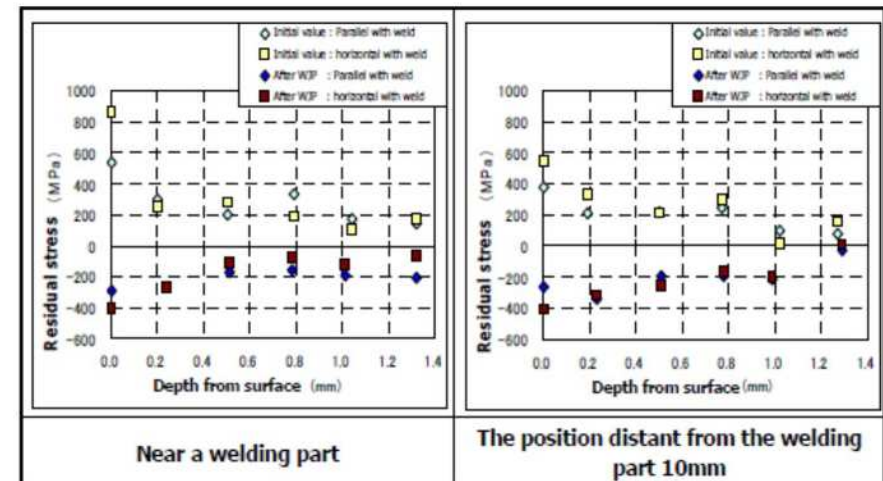


Fig.6 Results of residual stress improvement effect of butt

図2 応力改善W J Pの効果

出典 ; Koji Okimura, :ReLIABILITY OF WATER JET PEENING AS RESIDUAL STRESS IMPROVEMENT METHOD FOR ALLOY 600 PWSCC MITIGATION