

JAERI-Tech
2004-049

JP0450471



柏崎刈羽原子力発電所 1号機
再循環系配管サンプル(K1-PLR)に関する
調査報告書
(受託調査)

2004年6月

シュラウド・再循環系配管サンプル調査チーム

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）で複写による実費領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, 2004

編集兼発行 日本原子力研究所

柏崎刈羽原子力発電所1号機
再循環系配管サンプル(K1-PLR)に関する調査報告書
(受託調査)

日本原子力研究所東海研究所
シュラウド・再循環系配管サンプル調査チーム

(2004年3月9日受理)

東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所1号機(沸騰水型、定格出力 110 万 kW)において、定期検査における超音波探傷試験により、原子炉再循環系配管の溶接継手部にひび割れ(以下、き裂)が確認された。再循環系配管は、原子炉内と同じ高温高圧水を内包する原子炉圧力バウンダリを構成する重要な配管である。そこで、当該配管にき裂が発生した原因を把握するために、東京電力(株)は代表的と判断される部位についてサンプルを採取し詳細な調査を行った。

本調査は、東京電力(株)が日本核燃料開発(株)にて実施するき裂を含む材料サンプルの調査・評価に関して、日本原子力研究所(原研)が第三者機関として調査計画の策定段階から加わり、調査中に隨時試験データの評価や試験現場への立会を実施し、最終的に得られた調査データを入手し原研独自の調査報告書を作成することにより、調査の透明性を確保することを目的として実施した。

本調査により、以下のことが明らかとなった。

- (1) き裂は、管内表面の溶接部近傍に発生しており、深さは 7mm 程度であった。
- (2) き裂部破面のほぼ全体が粒界割れであった。
- (3) 管内表面のき裂開口部には深さ $100 \mu\text{m}$ 程度の範囲で粒内割れを含む部分があり、その部分には加工により形成された金属組織及び硬さの上昇が見られ、き裂は硬さの最も高い部分の付近で発生していた。
- (4) 材料中の化学成分元素の含有量は、JIS G 3214、SUS F316 を満足していたが、き裂近傍の結晶粒界近傍においてごくわずかに Cr 濃度が低下していた。

本調査の結果と、溶接によりき裂部付近で発生したと考えられる引張残留応力及び炉水中の溶存酸素濃度等を考慮すると、このき裂は応力腐食割れ(SCC)であり、材料の硬さと関係があると結論される。

本報告書は東京電力(株)からの受託調査による成果を含んでいます。本報告書の記載事項、図表類の複製、転載を希望する場合は、下記あてお申し込み下さい。

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白方白根 2-4)

Report of Examination of the Samples from Primary Loop Recirculation Piping (K1-PLR)
at Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station Unit-1
(Contract Research)

The Working Team for Examination of Samples from Core Shrouds
and Primary Loop Recirculation Piping

Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received March 9, 2004)

At the Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station Unit-1 (BWR, 1100MW) of the Tokyo Electric Co., Inc.(TEPCO), indications of cracks were identified in a weld joint portion of the primary loop recirculation piping by the ultrasonic inspection test during periodic inspections. The portion where cracks were found is in important piping consisting pressure boundary of nuclear reactor involving high pressure water. To investigate the cause of cracks, samples were cut from the representative portion judged by TEPCO. TEPCO has conducted a material examination with Nippon Nuclear Fuel Development Co. Ltd. (NFD) on the specimen including cracks. The present investigation was carried out with the objective to ensure transparency of the examination by attending the examination with NFD from the planning stage and providing JAERI's own evaluation report as a third party organization.

As the results of the present examination, the following findings were made;

- (1) A crack was observed near the weld region of the inner surface of piping and its depth was about 7 mm.
- (2) Intergranular cracking was observed at almost whole fracture surface.
- (3) At the crack opening region of the inner surface of piping, transgranular cracking was observed in the depth of about 100 μ m. Microstructure formed by cold work and increases of hardness were also observed in this region and the crack was initiated near the region where hardness value showed the highest.

This report contains results of the contract research with The Tokyo Electric Power Company. For reproductions of any part of this report such as contents, tables and figures, apply to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, 2-4, Shirakatahirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195, Japan.

(4) Chemical compositions of the material satisfied the material specification of Japanese Industrial Standard G 3214, SUS F316. However, Content of Cr was very slightly depleted in the vicinity of grain boundary.

The present observed cracks were concluded to be stress corrosion cracking related to hardened region of the sample surface, based on the above examination results with the expected tensile residual stress near the cracks and dissolved oxygen content in cooling water.

Keywords: Primary Loop Recirculation Piping, Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station Unit-1, SUS F 316, Stress Corrosion Cracking, Hardness, Residual Stress, Dissolved Oxygen

This is a blank page.

目 次

1.	緒言	1
2.	調査方法	1
2.1	調査サンプルの採取	1
2.2	材料調査実施場所	1
2.3	調査内容	1
2.4	方法	2
2.4.1	外観観察	2
2.4.2	破面観察	2
2.4.3	金属組織観察	2
2.4.4	硬さ試験	2
2.4.5	試料分析	3
3.	調査結果	3
3.1	外観観察	3
3.2	破面観察	3
3.3	金属組織観察	4
3.4	硬さ試験	4
3.5	試料分析	4
3.5.1	化学成分分析	4
3.5.2	粒界近傍組成分析	4
4.	結言	5
謝辞		5
付録	東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所1号機 再循環系配管のひび割れに関する調査の概要	35

Contents

1.	Introduction	1
2.	Investigation Method	1
2.	1 Specimen Extraction	1
2.	2 Examination Facility	1
2.	3 Examination Items	1
2.	4 Examination Method	2
2.	2.4.1 Visual Inspection	2
2.	2.4.2 Fractographic Observation	2
2.	2.4.3 Metallographic Observation	2
2.	2.4.4 Hardness Test	2
2.	2.4.5 Sample Analyses	3
3.	Results	3
3.	3.1 Visual Inspection	3
3.	3.2 Fractographic Observation	3
3.	3.3 Metallographic Observation	4
3.	3.4 Hardness Test	4
3.	3.5 Sample Analyses	4
3.	3.5.1 Chemical Compositions Analyses	4
3.	3.5.2 Grain Boundary Analyses	4
4.	Conclusions	5
	Acknowledgements	5
	Appendix Outline of Examination of Cracks on the Primary Loop Recirculation Piping at Kashiwazaki-Kariwa Nuclear Power Station Unit-1of Tokyo Electric Power Company	35

シュラウド・再循環系配管サンプル調査チーム

(解析)

塚田隆^{*1}、鈴木雅秀^{*2}、木内清^{*1}、加治芳行^{*1}、菊地正彦^{*1}、上野文義^{*1}、宇賀地浩和^{*1}、
中野純一^{*1}、三輪幸夫^{*1}、海老根典也^{*2}、西山裕孝^{*2}、本岡隆文^{*1}、加藤千明^{*1}

(事務局)

新谷文將^{*3}

(総括)

中島 甫^{*4}、柴田勝之^{*2}、塚田 隆^{*1}

^{*1}エネルギーシステム研究部、^{*2}原子炉安全工学部、^{*3}計画調査室、

^{*4}元、エネルギーシステム研究部（現、日本原子力発電株）

The Working Team for Examination of Samples from Core Shrouds and Primary Loop Recirculation Piping

(Analysis)

Takashi TSUKADA^{*1}, Masahide SUZUKI^{*2}, Kiyoshi KIUCHI^{*1}, Yoshiyuki KAJI^{*1},
Masahiko KIKUCHI^{*1}, Fumiyoishi UENO^{*1}, Hirokazu UGACHI^{*1}, Jyunichi NAKANO^{*1},
Yukio MIWA^{*1}, Noriya EBINE^{*2}, Yutaka NISHIYAMA^{*2}, Takafumi MOTOOKA^{*1},
Chiaki KATO^{*1}

(Secretary)

Fumimasa ARAYA^{*3}

(Supervision)

Hajime NAKAJIMA^{*4}, Katsuyuki SHIBATA^{*2}, Takashi TSUKADA^{*1}

^{*1}Department of Nuclear Energy System, ^{*2}Department of Reactor Safety Research,

^{*3}Planning and Analysis Division, ^{*4}Formerly Department of Nuclear Energy System (Presently
The Japan Atomic Power Co.)

1. 緒言

東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所1号機(沸騰水型、定格出力 110 万 kW)において、定期検査における超音波探傷試験により、原子炉再循環系配管の溶接継手部にひび割れ(以下、き裂)が確認された。再循環系配管は、原子炉内と同じ高温高圧水を内包する原子炉圧力バウンダリを構成する重要な配管である。そこで、当該配管に発生したき裂の原因を把握するために、東京電力(株)は代表的と判断される部位についてサンプルを採取し詳細な調査を行った。

本調査は、東京電力(株)が日本核燃料開発(株)にて実施する原子炉再循環系配管の溶接継手部から採取したき裂を含む材料サンプルの調査・評価に関して、日本原子力研究所(原研)が第三者機関として調査計画の策定段階から加わり、調査中には隨時試験データの評価や試験現場への立会を実施し、最終的に得られた調査データを入手し原研独自の調査報告書を作成することにより、調査の透明性を確保することを目的として実施したものである。本報告書は、原研が実施した調査結果をまとめたものである。

2. 調査方法

2.1 調査サンプルの採取

東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所1号機の再循環系配管の系統概要を図 2.1.1 に示す。調査サンプルの採取位置及びサンプルの切り出し方法を図 2.1.2 に示す。本調査に使用したサンプルは、東京電力(株)により、この図に示すように再循環配管から採取されたものである。

本配管材料、使用条件及びプラントの運転開始時期は、以下の通りである。

配管材料	JIS G3214 SUS F316(鍛造材)
使用条件 (原子炉定格運転時)	温度: 約 278°C 圧力: 約 70kg/cm ² (約 6.9MPa) 炉水溶存酸素濃度: 約 1(水素注入時)～280ppb 炉水導電率: 約 0.1 μS/cm (約 10 μS/m)
運転開始時期	運転開始日: 1985 年 9 月 18 日 定格負荷相当年数(EFPY): 14.13 年

また、本配管材料の化学組成(ミルシート値)を表 2.1.1 に示す。

2.2 材料調査実施場所

当該サンプルに関する下記の材料調査は、日本核燃料開発(株)にて実施された。

2.3 調査内容

き裂発生の原因究明のため、調査項目として、材料サンプルの表面状態及びき裂部の調査のため

の外観観察、割れ形態の調査のための破面観察、き裂形態調査のための金属組織観察、加工及び溶接の影響調査のための硬さ試験並びに化学組成調査のための試料分析を選定した。サンプルの調査手順を、図 2.3.1 に示す。また、サンプルの採取要領を図 2.3.2 に示す。

各項目の内容の概要は以下の通りである。

- (1) 外観観察：目視観察、浸透探傷試験、写真撮影
- (2) 破面観察：き裂部破面の走査型電子顕微鏡(SEM)観察
- (3) 金属組織観察：金属組織の光学顕微鏡観察
- (4) 硬さ試験：ビックカース硬さの測定
- (5) 試料分析：化学成分分析及び電界放出型透過電子顕微鏡(FE-TEM)による粒界近傍組成分析

2.4 方法

2.4.1 外観観察

細切断前に目視による外観観察を行い、その後、浸透探傷試験(PT)を行い、き裂の位置および長さを確認した。また、デジタルカメラにより写真撮影を行った。さらに、細切断後に、サンプル Aについて、断面マクロ観察を行った。

2.4.2 破面観察

破面観察のためサンプル B および C を細切断後、アセトンで超音波洗浄を実施し、サンプルの破面状態を SEM で観察した。

破面観察では、はじめに破面全体の低倍率写真観察を行い、特徴的な部位について 100 倍および 500 倍で高倍率写真観察を行った。き裂開口部近傍については、き裂発生原因特定のため破面形態を確認する目的で脱膜処理を行い、SEM 観察を実施した。

2.4.3 金属組織観察

き裂の伝播形態等を観察するために、細切断したサンプルを樹脂に埋め込み、エメリー、バフ研磨及びダイヤモンドペーストを用いて研磨した後、10% シュウ酸溶液を用いた電解エッチングを施し、洗浄及び乾燥後に、マクロ写真撮影を実施した。金属組織写真は光学顕微鏡により倍率を 100 倍、必要に応じて 400 倍で撮影した。

2.4.4 硬さ試験

加工及び溶接による材質変化、変形状況等を確認するために、サンプル A の金属組織観察面について、硬さ試験を実施した。負荷荷重は 10g として、ビックカース硬さを測定した。まず、深さ方向の分布を調べるため、溶接金属端から 0.05mm、4.15mm(き裂に沿って)および 30mm のそれぞれの位置から管内部方向に表面下 0.5mm まで測定した。また、表面近傍の分布を調べるため、内表面から深さ 0.02mm、0.05mm のそれぞれの位置で溶接金属端から管内表面に平行に硬さを測定した。それらの測定位置を図 2.4.4.1 に示す。さらに、深さ方向及び表面に平行な方向にそれぞれ 2mm ピッチで硬さ測定を行い、硬さ分布のマッピングを行った。

2.4.5 試料分析

本調査では、(1)調査サンプルが、SUS F316 の主要金属組成を有することを確認するため化学成分分析、(2)溶接による熱影響から生じた金属元素のミクロ偏析状況の把握として、FE-TEM による結晶粒界近傍の金属元素の濃度分布測定をそれぞれ行った。

2.4.5.1 化学成分分析

サンプル E から切粉を採取し、各元素について以下のように分析した。

- (1) Mn 及び Mo: 切粉を王水に溶解し、原子吸光光度計で分析した。
- (2) Ni: 切粉を王水で溶解後、Ni 分離→溶解→ニッケル鎖体生成→亜鉛滴定の手順で分析した。
- (3) Cr: 切粉を王水で溶解後、酸化→還元→過マンガン酸カリウム逆滴定の手順で分析した。
- (4) Si: 上記溶解液をろ過した時の残留物を焼いて SiO を作成した後、重量法で分析した。
- (5) C 及び S: 切粉を燃焼させ、発生したガスを非分散赤外分光装置で分析した。
- (6) P: 切粉を王水で溶解し、試薬で着色した後、吸光光度計で分析した。

2.4.5.2 粒界近傍組成分析

サンプル D の母材部及びき裂近傍の 2箇所について FE-TEM を用いて、Fe、Cr、Ni、Mo、P 及び Si の主要金属元素について粒界近傍の組成分布を測定した。

3. 調査結果

3.1 外観観察

図 3.1.1 に配管から切り出した、細切断前の試料外観、および PT 試験後の試料の写真を示す。PT 試験の結果、管内表面の直管付きティー側の溶接近傍に明瞭なき裂の指示を確認した。き裂は管内表面上で溶接線方向に入っており、その長さは約 22mm であった。

細切断後の試料について、断面マクロ観察を行った結果を図 3.1.2 に示す。直管付きティー側管内表面の溶接金属端から約 4mm の位置にき裂を確認した。

3.2 破面観察

サンプル B の SEM による破面観察結果について、破面全体を図 3.2.1、管内表面近傍及びその拡大をそれぞれ図 3.2.2 及び図 3.2.3、き裂中央部及びその拡大をそれぞれ図 3.2.4 及び図 3.2.5、き裂最深部及びその拡大をそれぞれ図 3.2.6 及び図 3.2.7、強制破断面及びその拡大をそれぞれ図 3.2.8 及び図 3.2.9 にそれぞれ示す。また、脱膜処理後のき裂開口部近傍の SEM 観察について図 3.2.10 に示す。これらの SEM 観察結果から、破面のほぼ全面に明瞭な粒界割れが観察され、また破面の管内表面近傍からき裂中央部にかけて腐食生成物が多く観察された。

3.3 金属組織観察

10%シュウ酸エッチング後におけるサンプル A のき裂部の金属組織観察写真を図 3.3.1 に、またき裂部全体の拡大写真を図 3.3.2 に示す。き裂は、溶接金属端から約 4mm の位置から発生し、溶接金属に向かうように約 7mm の深さまで伸びていた。

次にき裂の先端部、き裂中央部、管内表面近傍の各部の金属組織観察を図 3.3.3 に示す。管内表面近傍のき裂が発生した位置においては、深さ $100 \mu\text{m}$ 程度の範囲で粒内割れが見られた。き裂中央部においては、2次き裂を伴う粒界割れの様相を呈していた。観察した面においては、き裂先端部は溶接金属には達していなかった。

さらに、き裂から約 20mm 離れたティー側の金属組織観察結果を図 3.3.4～図 3.3.6 に示す。管内表面近傍にはすべり線を含んだ加工組織がみられ、その深さは約 $100 \mu\text{m}$ であった。それ以外の肉厚中心部及び管外表面近傍には加工組織は観察されなかった。

き裂開口部を含む表面近傍の金属組織を図 3.3.7 に示す。この図から分かるように、表面近傍において溶接金属端から約 3mm の範囲で溶接による再結晶組織が観察された。き裂は再結晶組織から約 1mm 離れたところから発生していた。

以上、金属組織観察結果から、き裂は再結晶組織から約 1mm 離れたところから粒内割れを生じ、その進展過程においては2次き裂を伴う粒界割れの様相を呈していたことがわかった。

3.4 硬さ試験

硬さの測定結果を図 3.4.1 及び図 3.4.2 に示す。図 3.4.1 から分かるように、管内表面近傍のき裂に沿った溶接金属端から 4.15mm の位置及び 30mm の位置には、深さ $100 \mu\text{m}$ 程度のビックアース硬さが 300 を上回る硬化層が存在していた。これは、断面金属組織観察結果において、表面近傍に加工組織が観察されたことと一致する。溶接金属に極めて近い 0.05mm の位置では、溶接の熱影響を受けたと考えられ、ビックアース硬さは 240 程度に軟化していた。また、図 3.4.2 に示すように、管内表面に沿っては、溶接金属から 4mm 以上離れた管内表面ではビックアース硬さは 300 以上であり、溶接金属に近い 0～4mm の範囲では熱影響により組織の再結晶化が生じたため軟化していた。さらに、図 3.4.3 に硬さの2次元的分布を示す。この図からも分かる通り、管内表面に沿って硬さが 300 以上の層が拡がり、溶接金属に近い部分では硬さが高くなっている。き裂は、硬さが 300 以上で溶接金属に最も近く、溶接による残留応力が高いと推定される部分から発生していた。

3.5 試料分析

3.5.1 化学成分分析

化学成分分析結果を JIS G3214 SUS F316 規格値と共に、表 3.5.1.1 に示す。いずれの元素も分析値は、表 2.1.1 のミルシート値とほぼ同じであり、規格値を満足していた。

3.5.2 粒界近傍組成分析

き裂近傍及び母材部の粒界近傍組成分析結果を図 3.5.2.1 の(a)および(b)にそれぞれ示す。(a)のき裂近傍の結晶粒界近傍において、ごくわずかに Cr 濃度が低下しているが、熱鋭敏化材にみられるような顕著な低下ではない。なお、粒界上で炭化物などの析出物は観察されなかった。

4. 結 言

本調査は、東京電力(株)が日本核燃料開発(株)にて実施する柏崎刈羽原子力発電所1号機の再循環系配管の溶接継手部から採取したき裂を含む材料サンプルの調査・評価に関して、日本原子力研究所が第三者機関として調査計画の策定段階から加わり、調査中には隨時試験データの評価や試験現場への立会を実施し、最終的に得られた調査データを入手し原研独自の調査報告書を作成することにより、調査の透明性を確保することを目的とした。本調査の結果、以下の結論を得た。

- (1) き裂は、管内表面の溶接部近傍に発生しており、深さは 7mm 程度であった。
- (2) き裂部破面のほぼ全体が粒界割れであった。
- (3) 管内表面のき裂開口部には深さ $100 \mu\text{m}$ 程度の範囲で粒内割れを含む部分があり、その部分には加工により形成された金属組織及び硬さの上昇が見られ、き裂は硬さの最も高い部分の付近で発生していた。
- (4) 材料中の化学成分元素の含有量は、JIS G 3214、SUS F316 を満足していたが、き裂近傍の結晶粒界近傍においてごくわずかに Cr 濃度が低下していた。

本調査の結果と、溶接によりき裂部付近で発生したと考えられる引張残留応力及び炉水中の溶存酸素濃度等を考慮すると、このき裂は応力腐食割れ(SCC)であり、材料の硬さと関係があると結論される。

謝 辞

本調査の遂行あたり有益な助言、指摘を頂いた関係各位及び原研企画室辻宏和調査役、更田豊志調査役（現、燃料安全研究室長）に感謝いたします。なお、本調査は、東京電力(株)からの受託調査として、日本原子力研究所が実施したものである。

表2.1.1 再循環系配管材料の化学組成(ミルシート値) (mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
0.014	0.56	1.84	0.025	0.008	16.88	12.7	2.70

表3.5.1.1 再循環系配管材料の化学成分分析結果 (mass%)

		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
JIS G 3214	最大値	0.08	1.00	2.00	0.040	0.030	18.00	14.00	3.00
	最小値	—	—	—	—	—	16.00	10.00	2.00
分析値		0.017	0.57	1.77	0.024	0.009	16.89	12.89	2.57

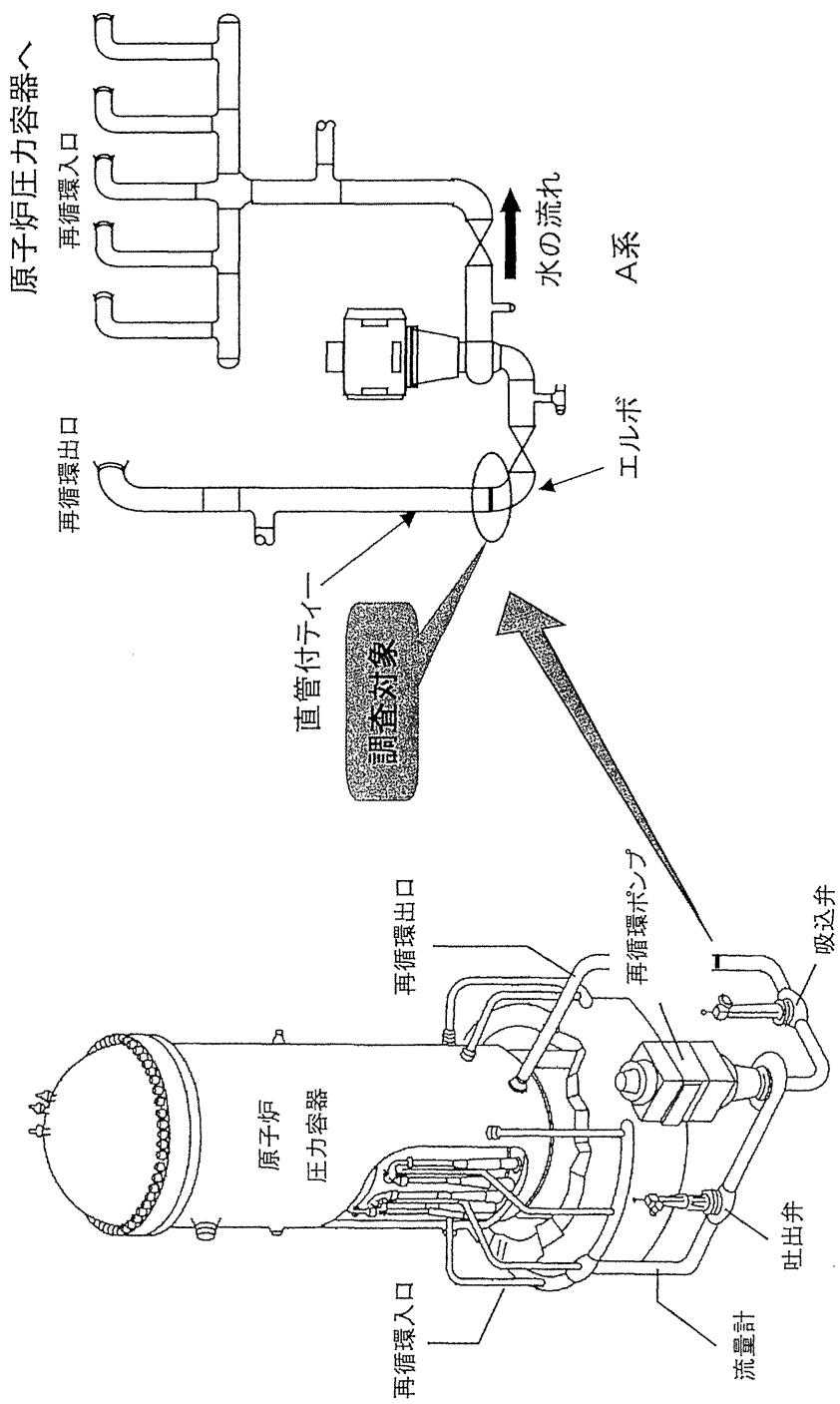


図2.1.1 柏崎刈羽原子力発電所1号機における再循環系配管の系統概要

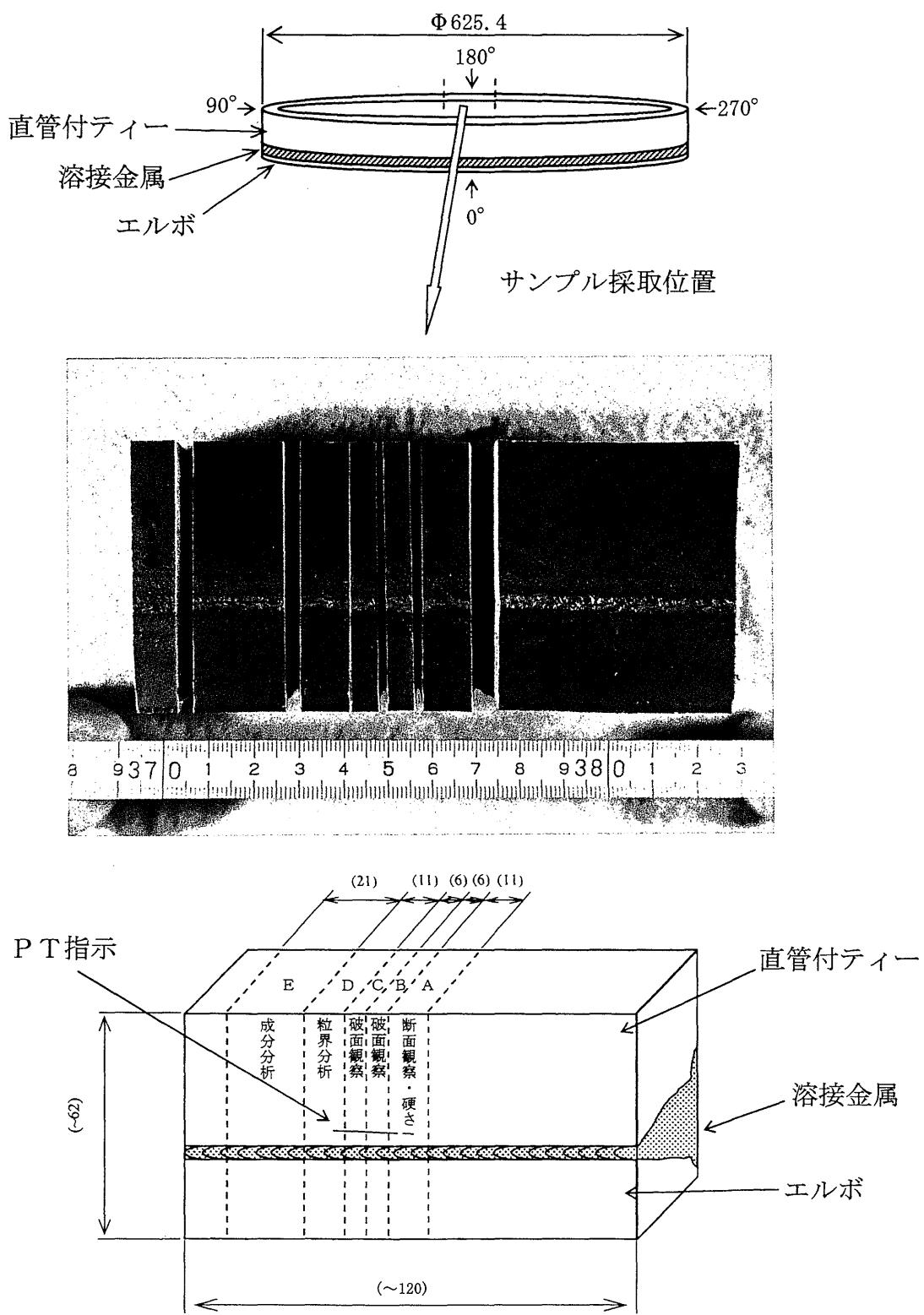
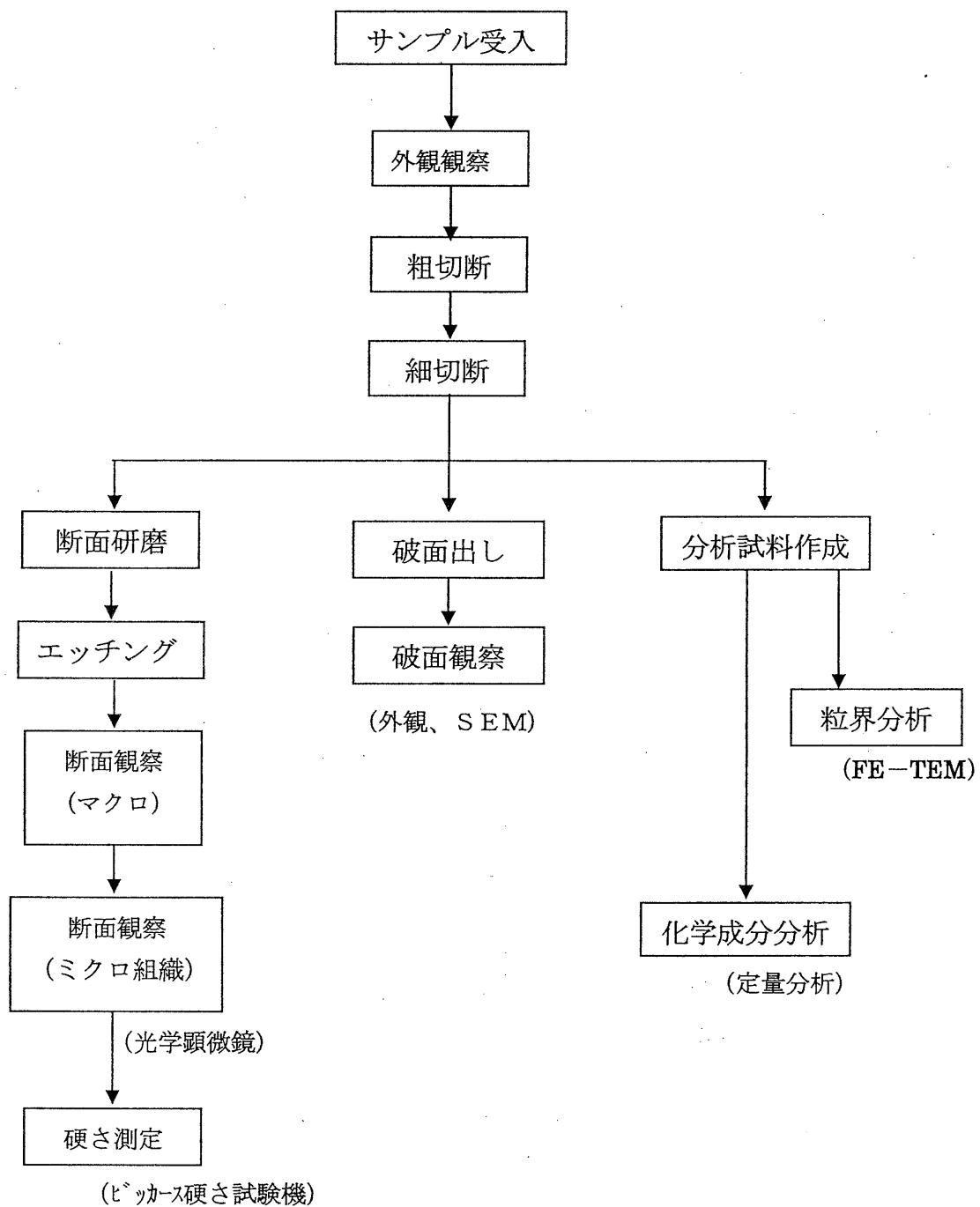


図2.1.2 調査サンプルの採取位置及びサンプルの切り出し方法



注)

- SEM : Scanning Electron Microscope (走査型電子顕微鏡)
- FE-TEM : Field Emission Type Transmission Electron Microscope (電界放出型透過電子顕微鏡)

図 2.3.1 サンプルの調査手順

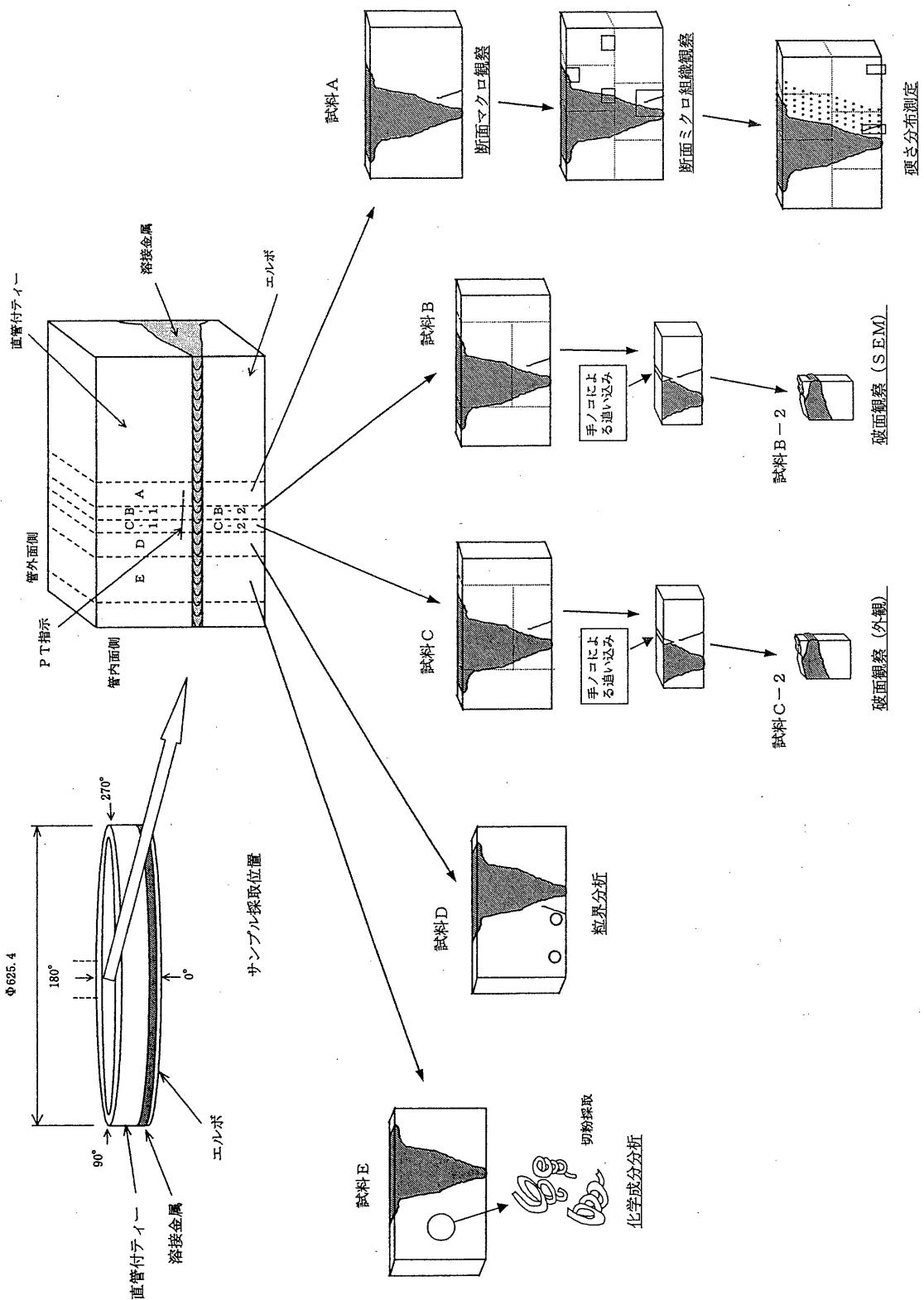


図2.3.2 サンプルの採取要領

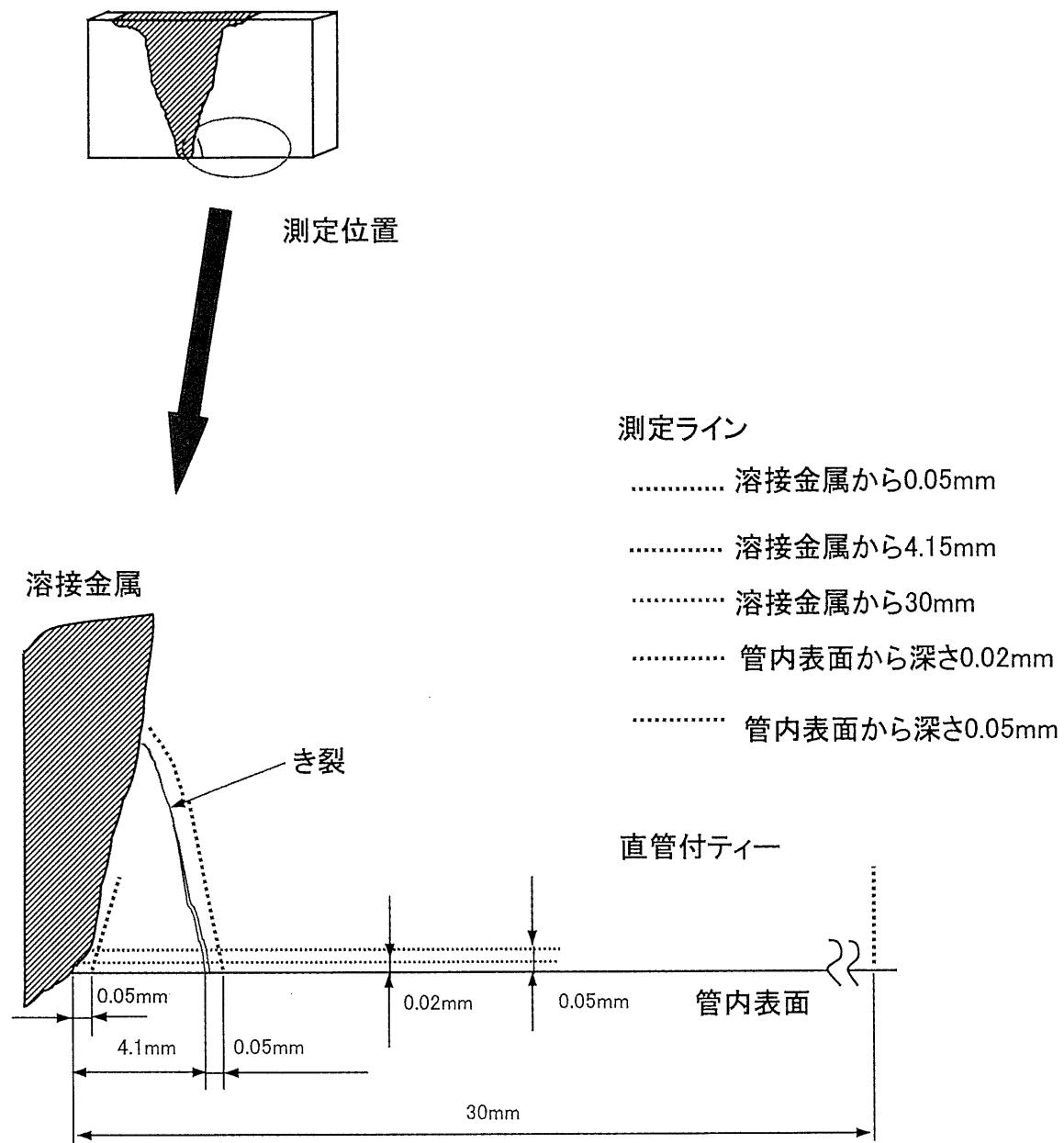


図 2.4.4.1 断面のビッカース硬さ測定位置

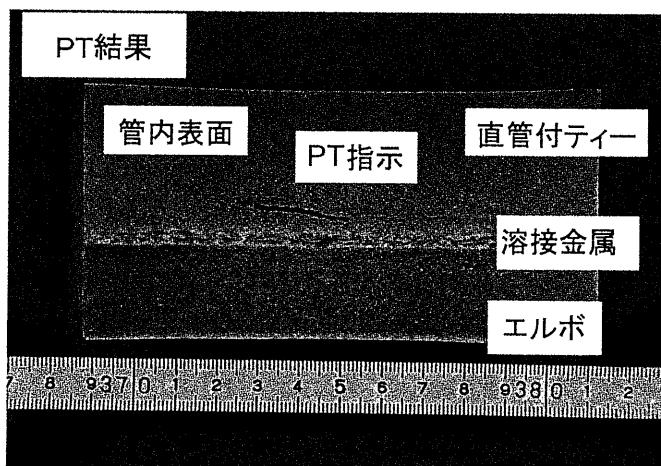
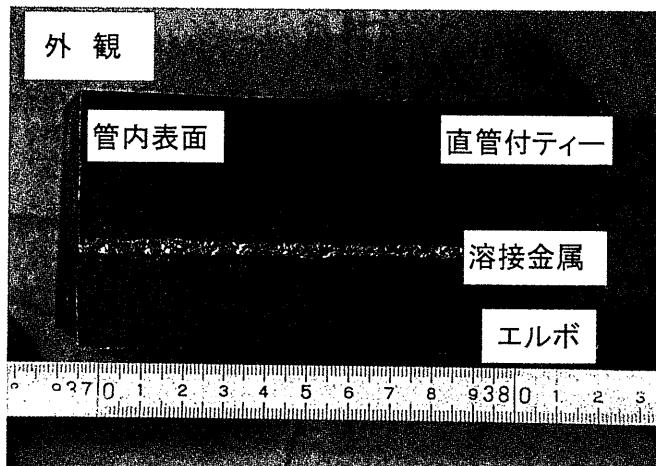


図 3.1.1 調査サンプルの外観写真、PT結果

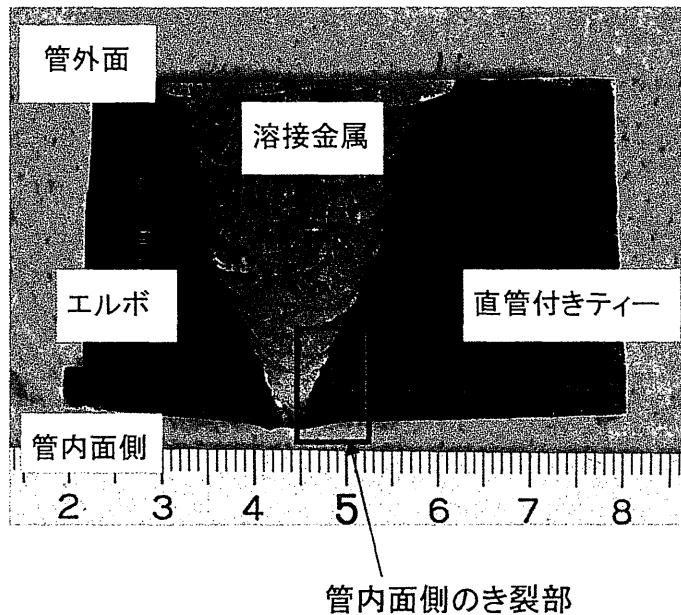


図 3.1.2 調査サンプルの断面マクロ観察結果

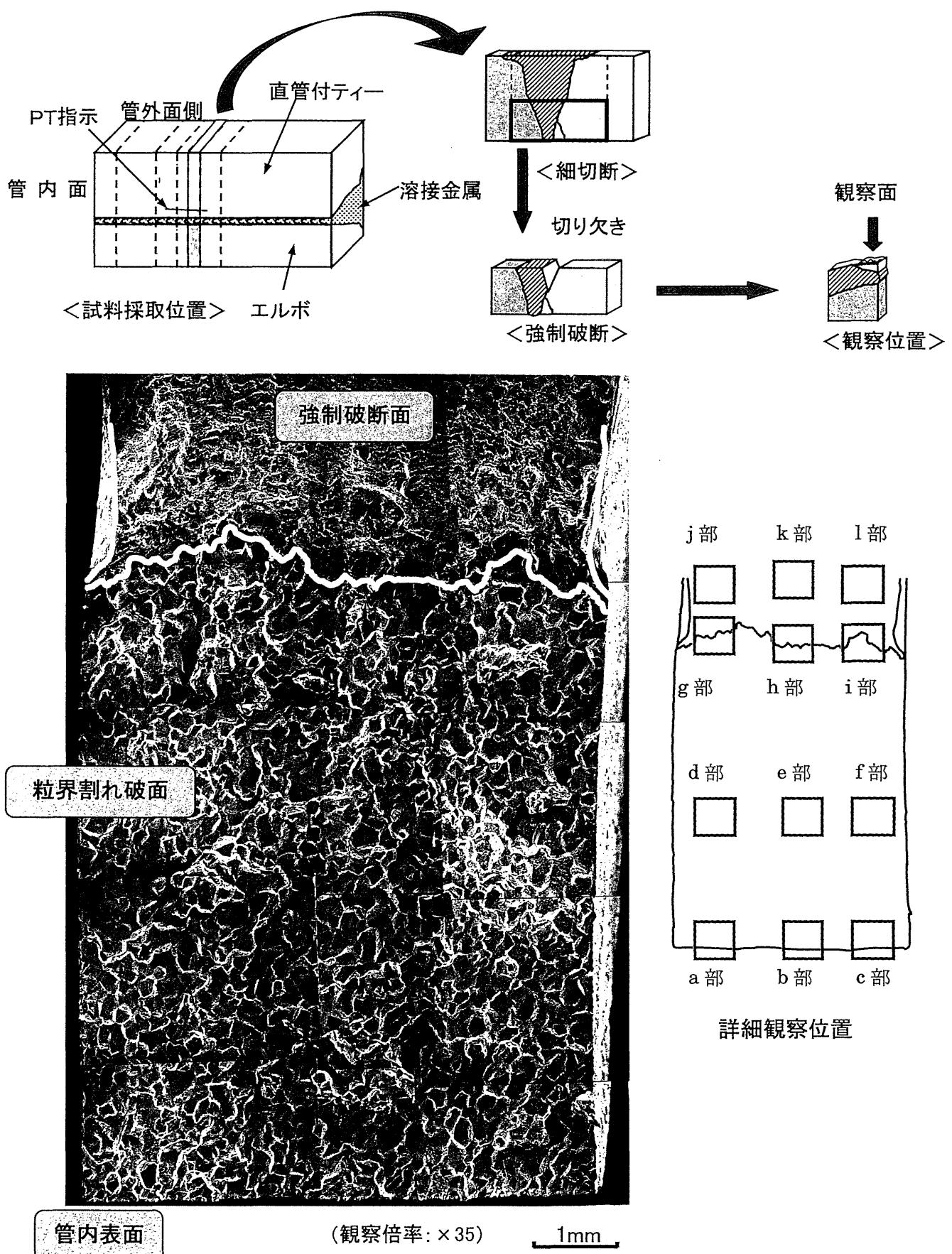


図 3.2.1 破面全体の SEM 観察結果

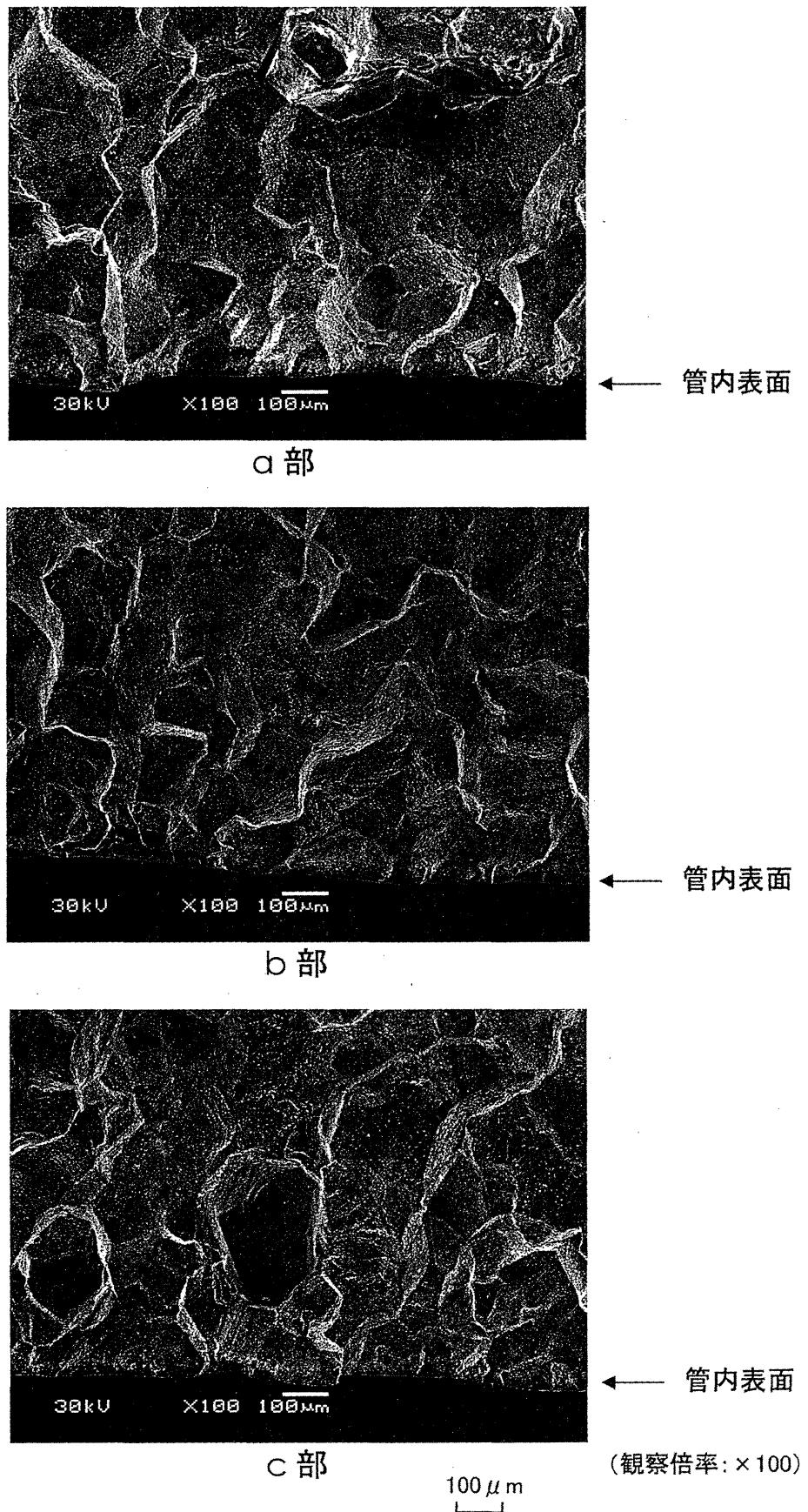


図 3.2.2 管内表面近傍の SEM 観察結果(その1)

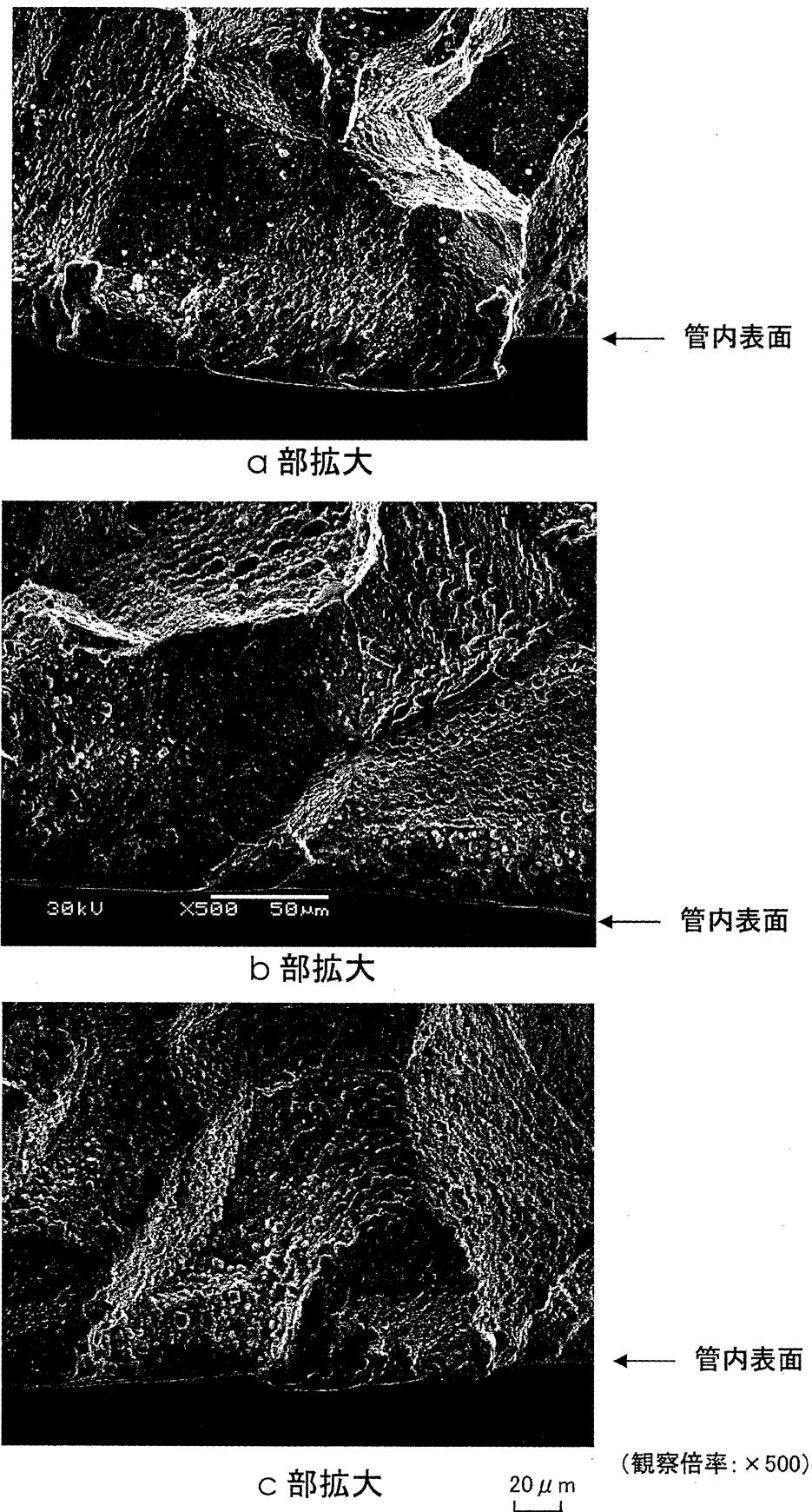
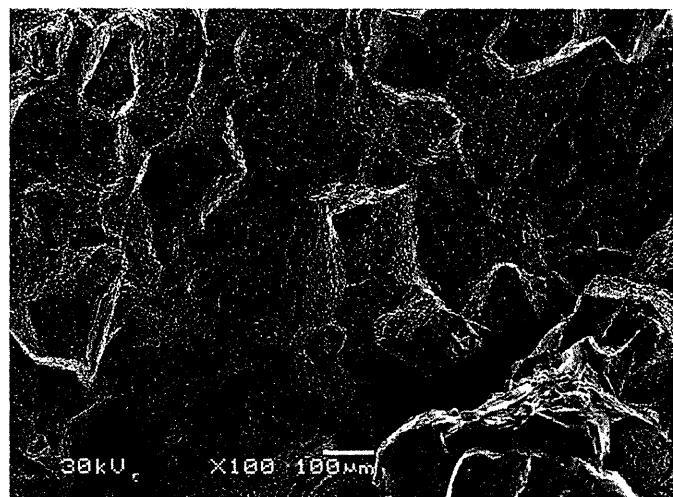
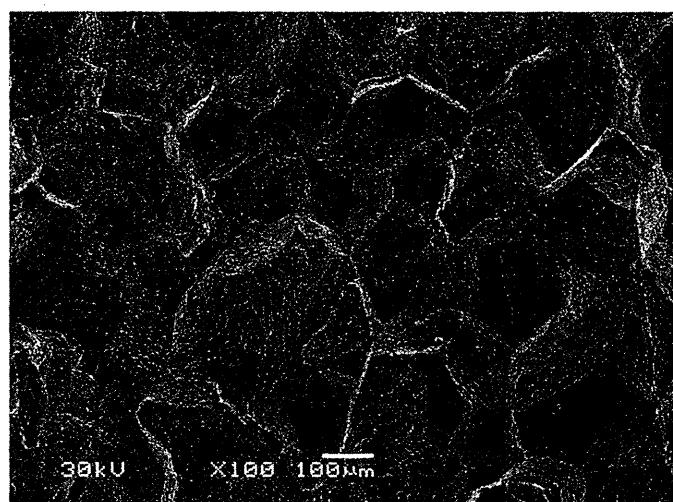


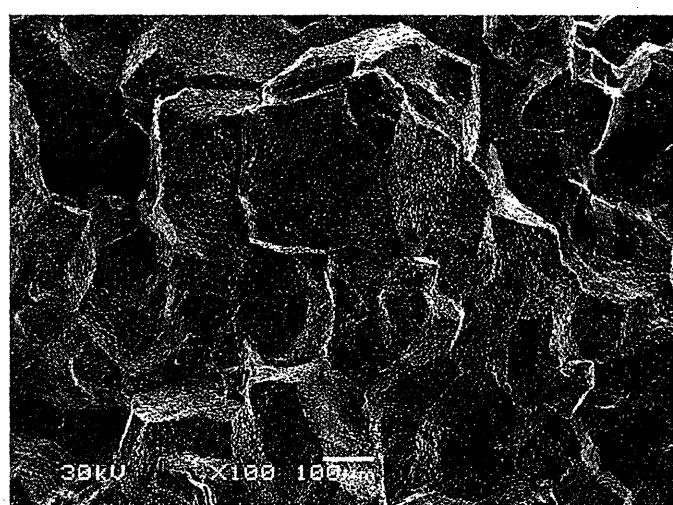
図 3.2.3 管内表面近傍の SEM 観察結果(その2)



d 部



e 部

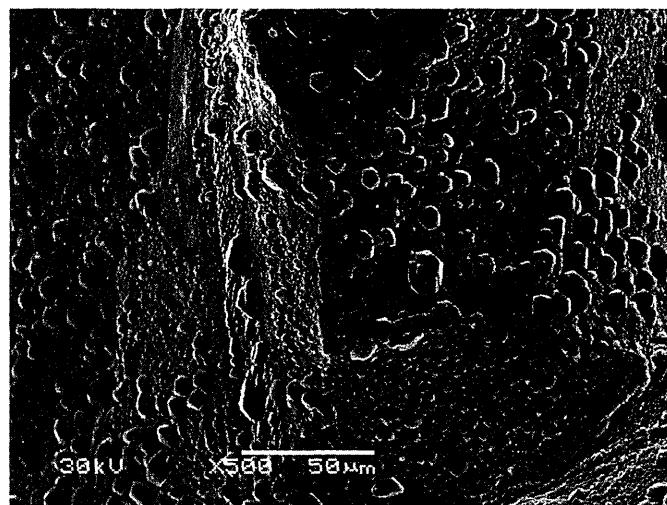


f 部

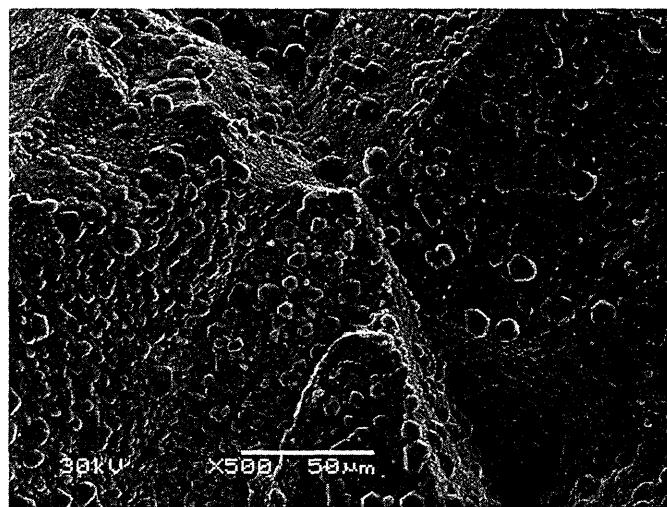
100 μm

(観察倍率: ×100)

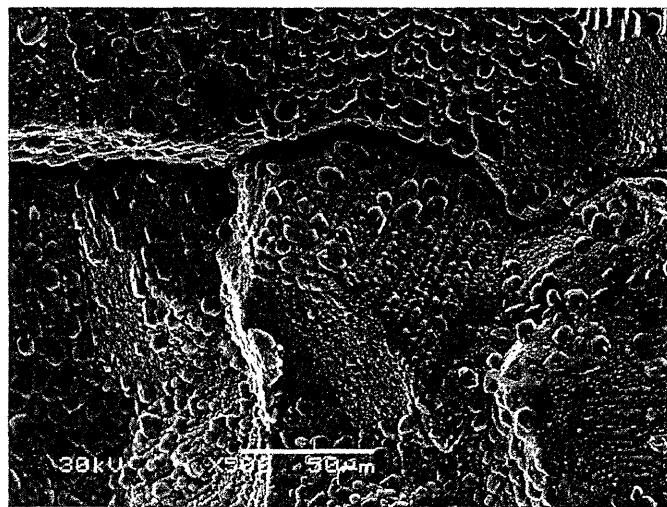
図 3.2.4 破面中央部の SEM 観察結果(その 1)



d 部拡大



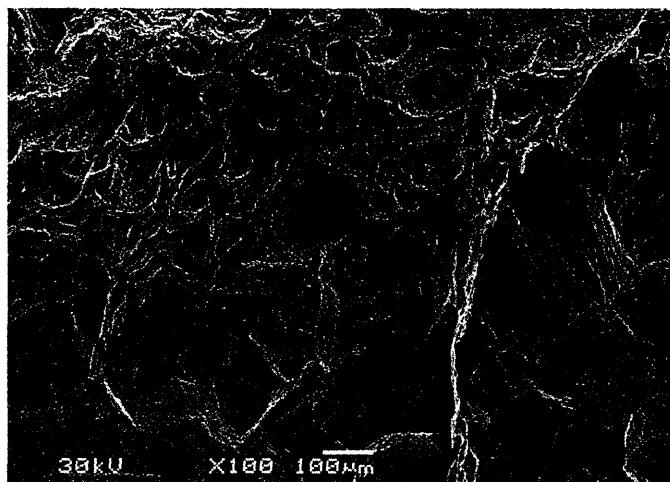
e 部拡大



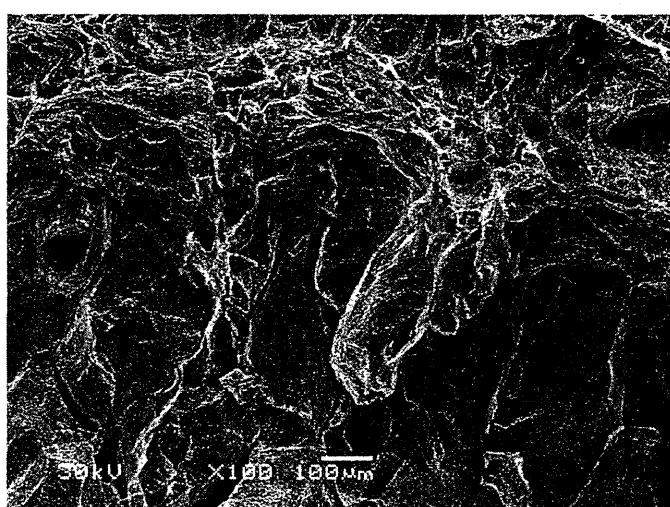
f 部拡大

(観察倍率: × 500)

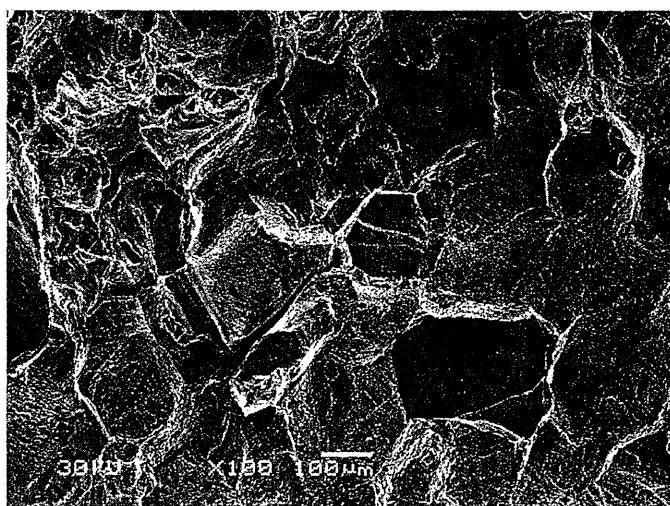
図 3.2.5 破面中央部の SEM 観察結果(その 2)



g部



h部

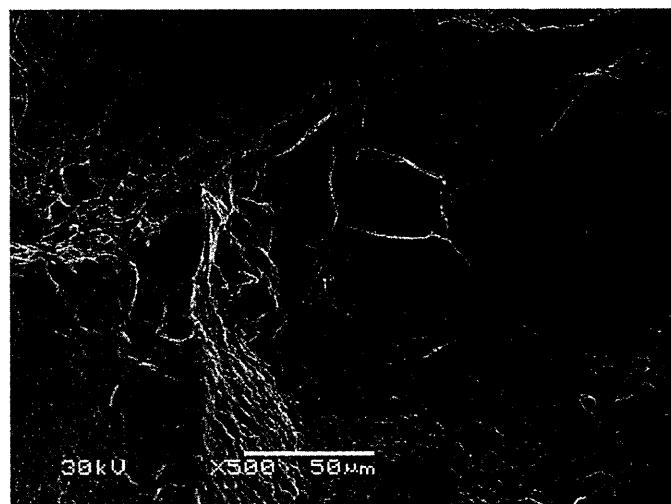


i部

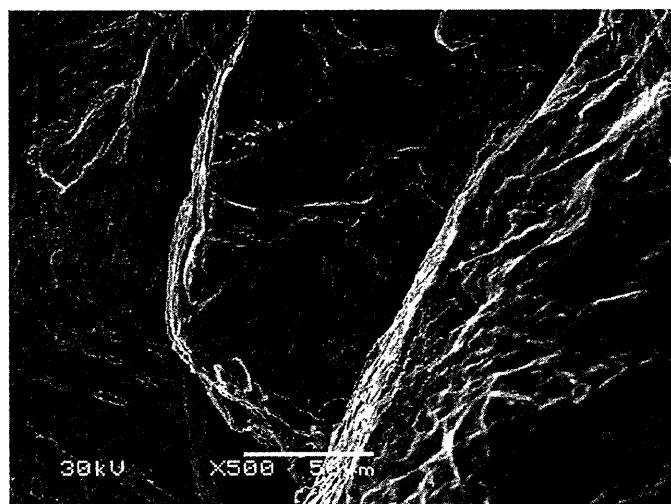
100 μm

(観察倍率: ×100)

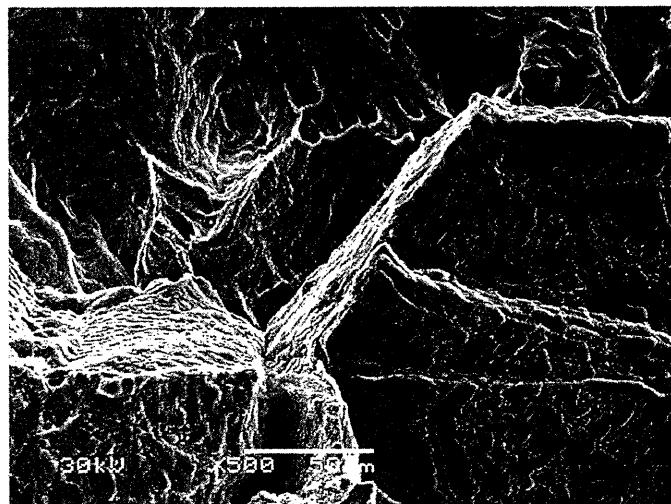
図 3.2.6 破面先端部の SEM 観察結果(その 1)



g部拡大



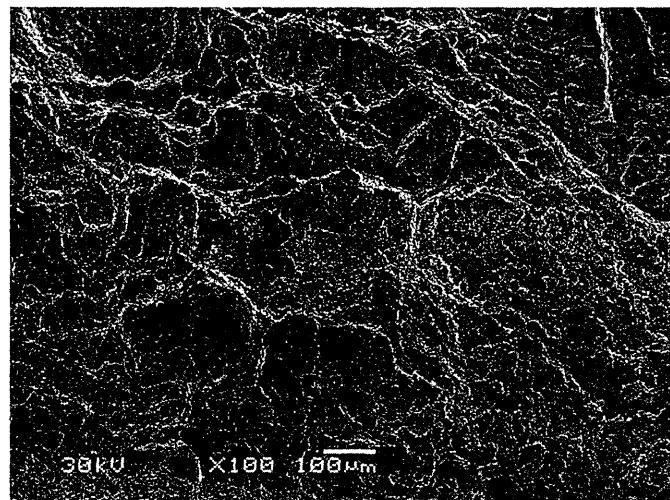
h部拡大



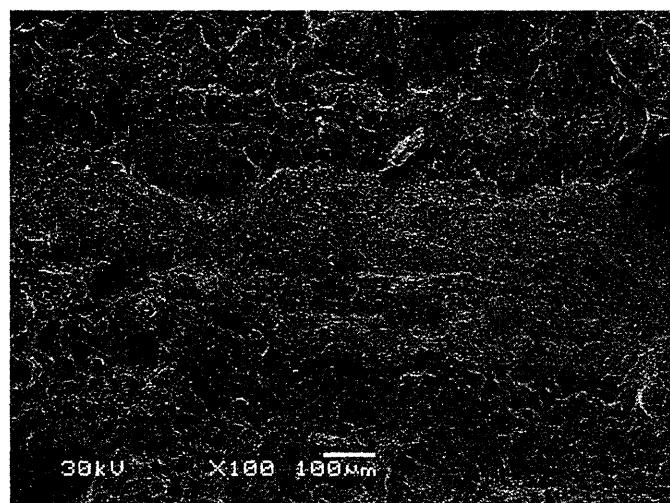
i部拡大

(観察倍率: × 500)
20 μm

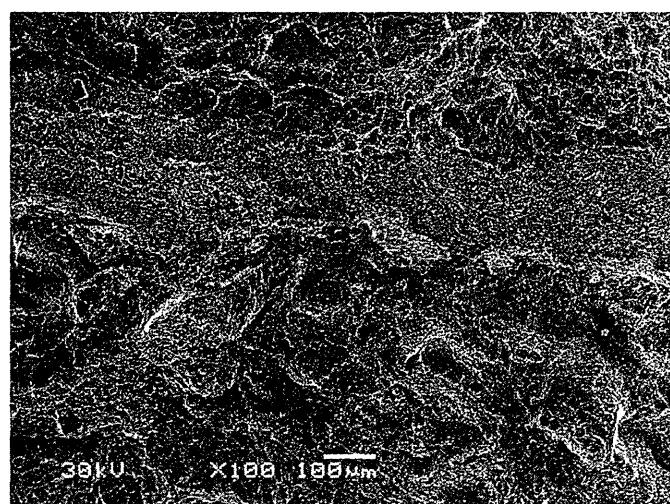
図 3.2.7 破面先端部の SEM 観察結果(その 2)



j 部



k 部

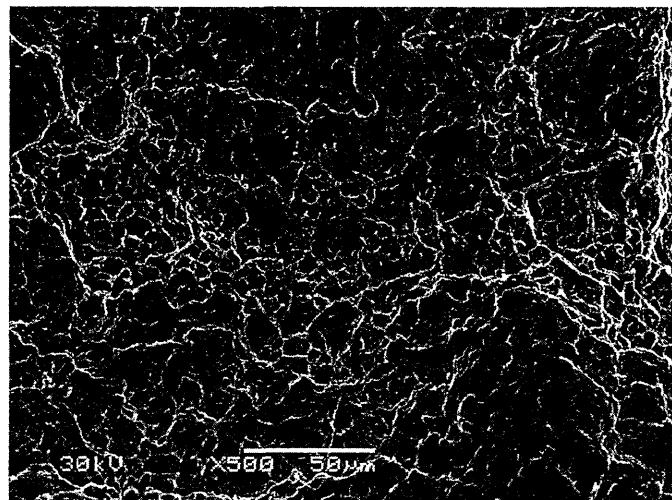


i 部

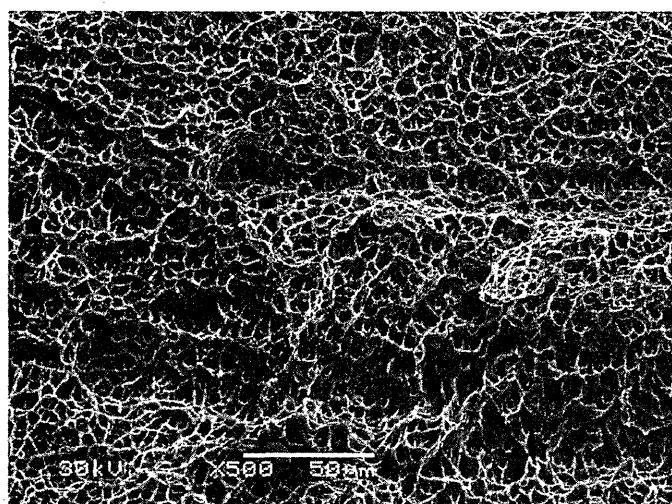
100 μ m

(観察倍率: $\times 100$)

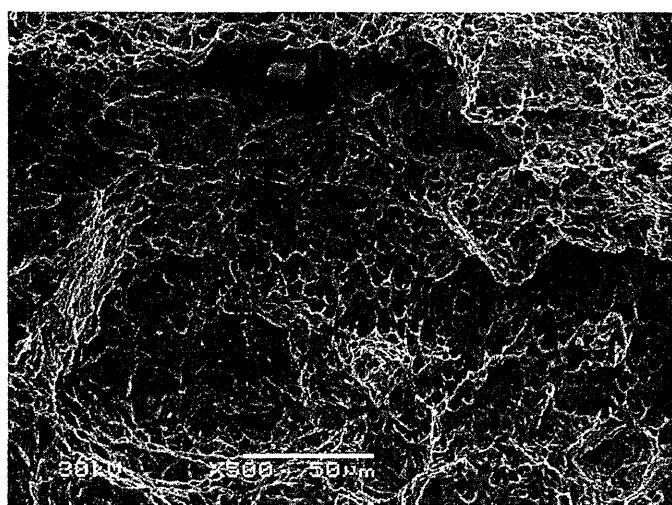
図 3.2.8 強制破断部の SEM 観察結果(その 1)



j 部拡大



k 部拡大

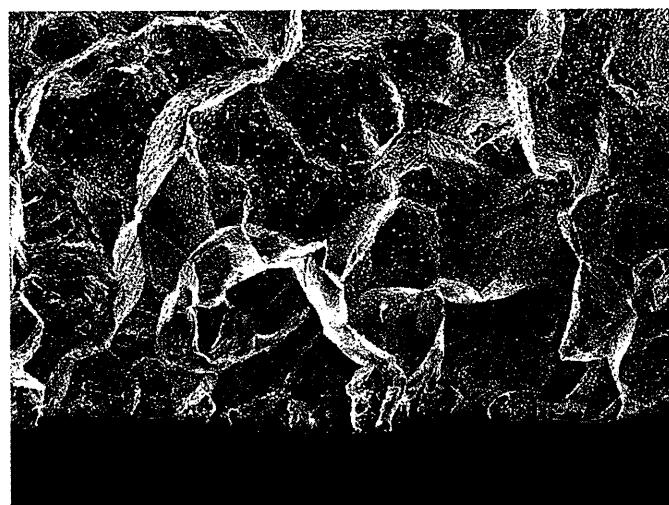


l 部拡大

20 μm

(観察倍率: × 500)

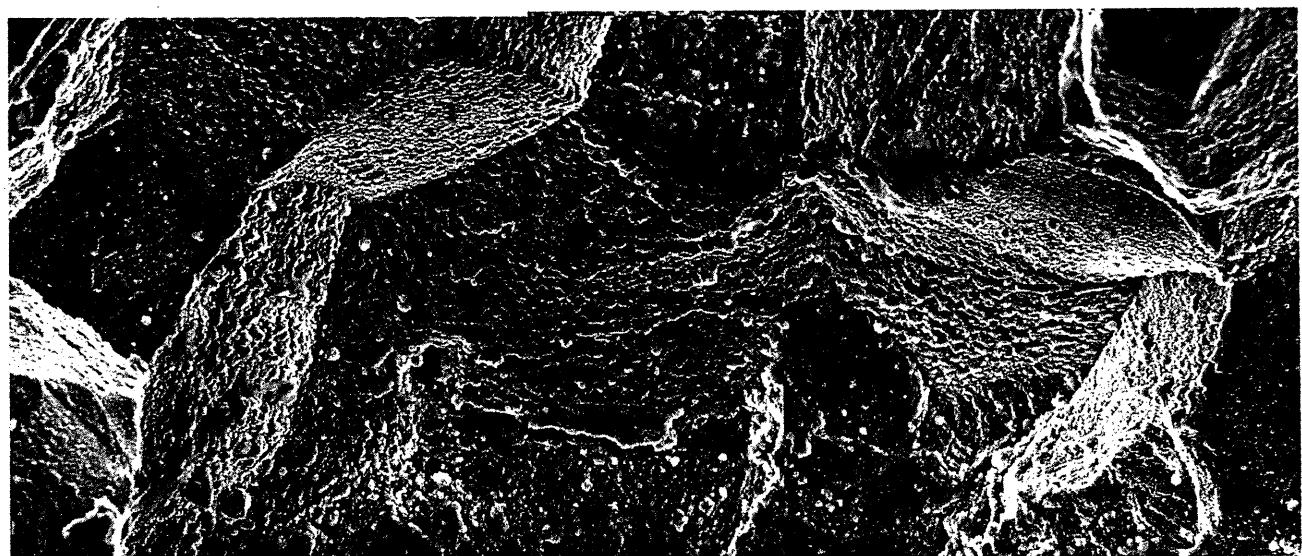
図 3.2.9 強制破断部の SEM 観察結果(その 2)



a部近傍

100 μm

(観察倍率: $\times 100$)



a部拡大

20 μm

(観察倍率: $\times 500$)

図3.2.10 脱膜後の管内表面近傍のSEM観察結果

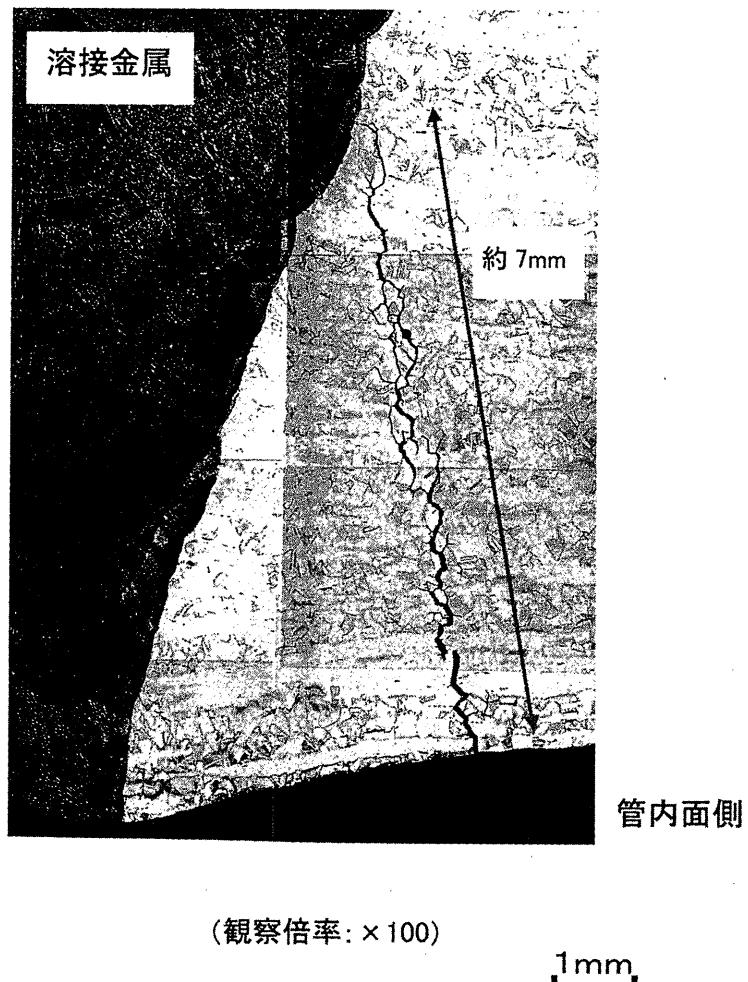


図 3.3.1 き裂部の金属組織(10%シュウ酸エッティング後)

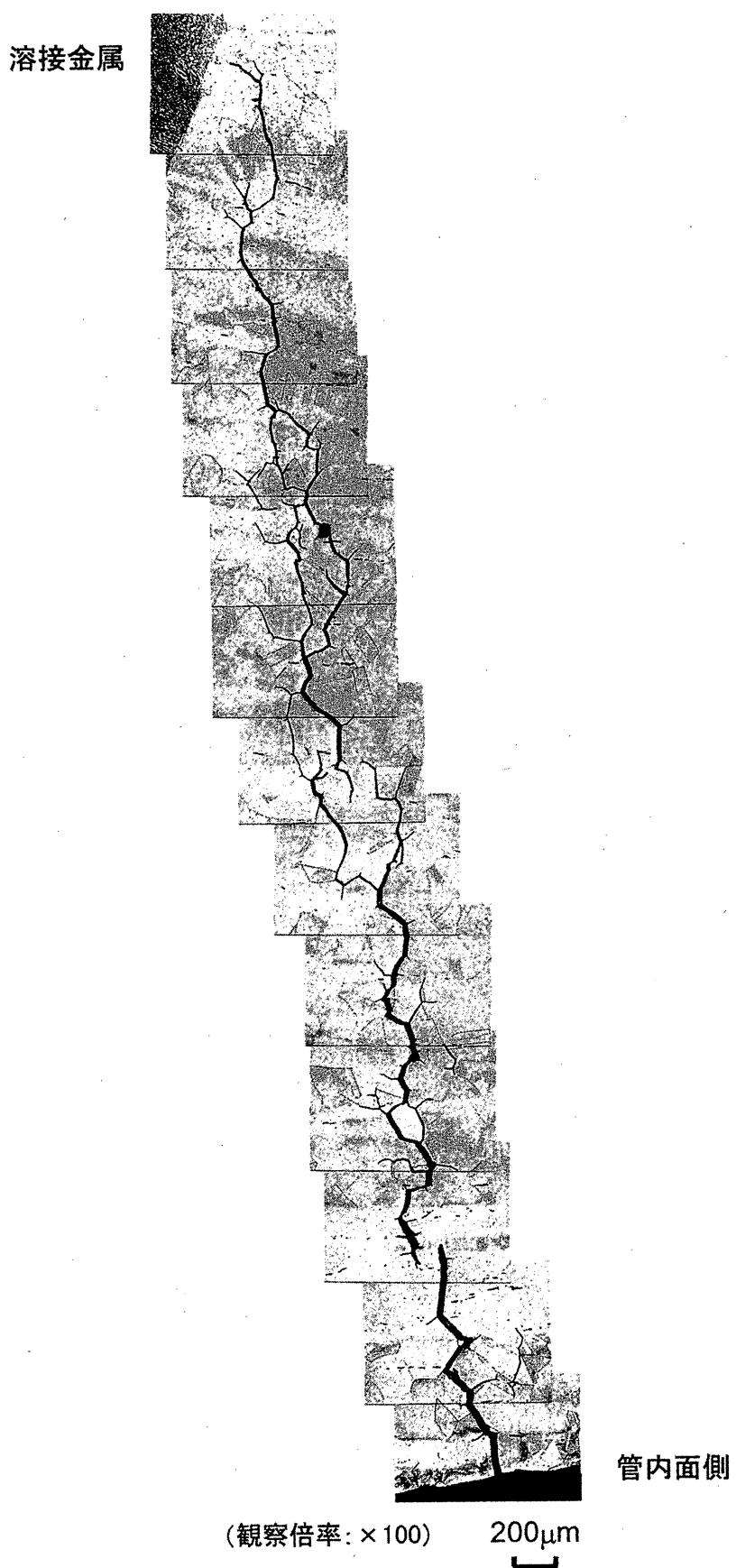


図 3.3.2 き裂部全体の拡大写真(10%シュウ酸エッチング後)

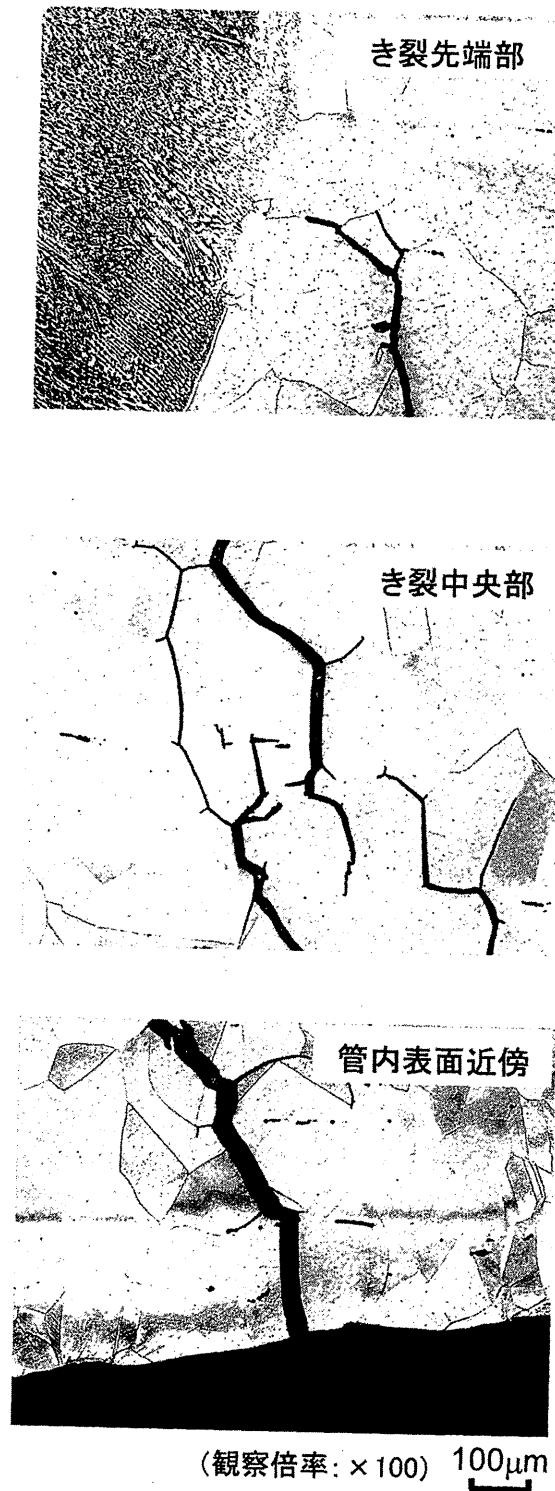


図 3.3.3 管内表面近傍のき裂各部の金属組織(10%シュウ酸エッティング後)

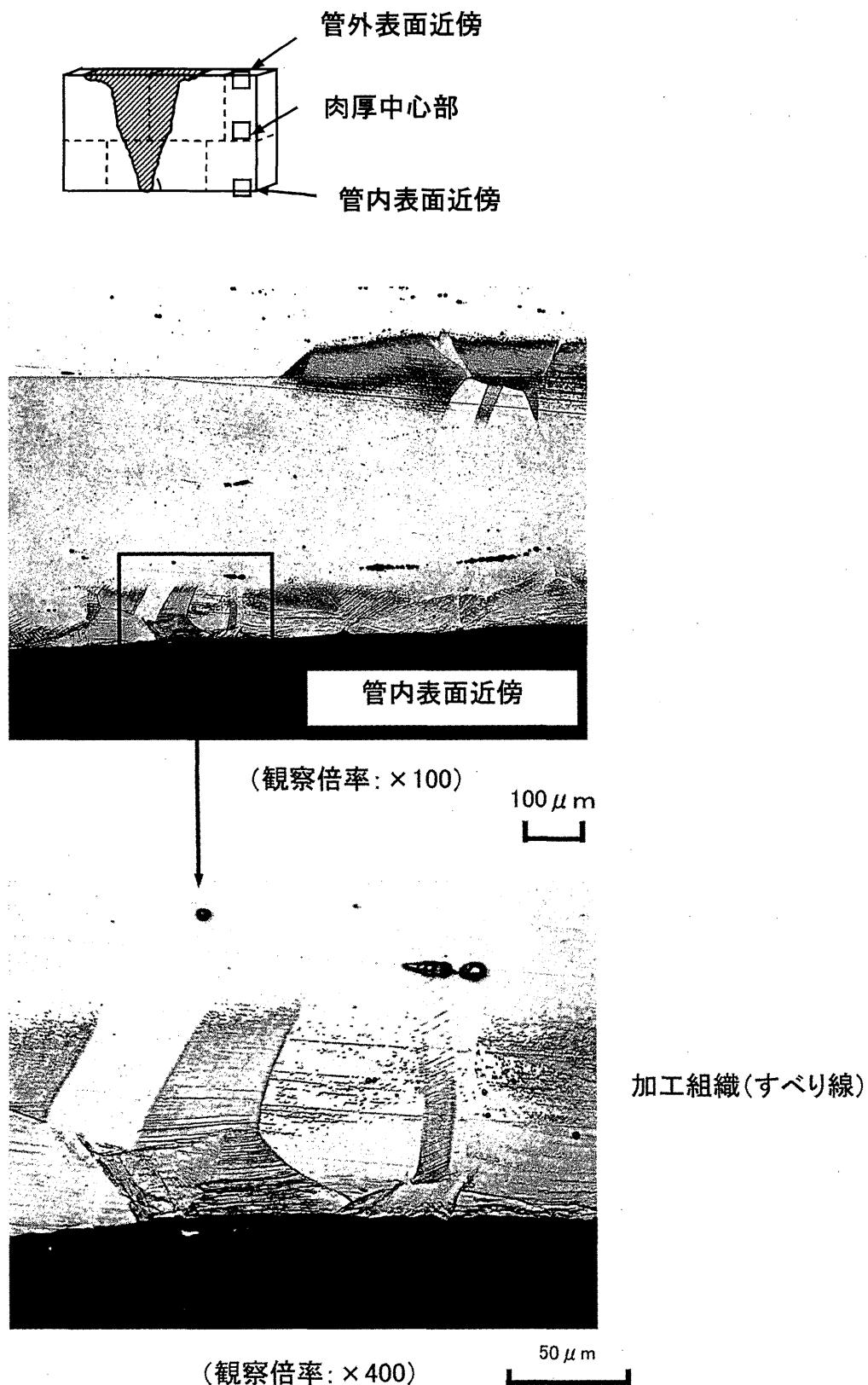


図 3.3.4 き裂から 20mm 離れたティー側の金属組織(管内表面近傍)
(10% シュウ酸エッチング後)

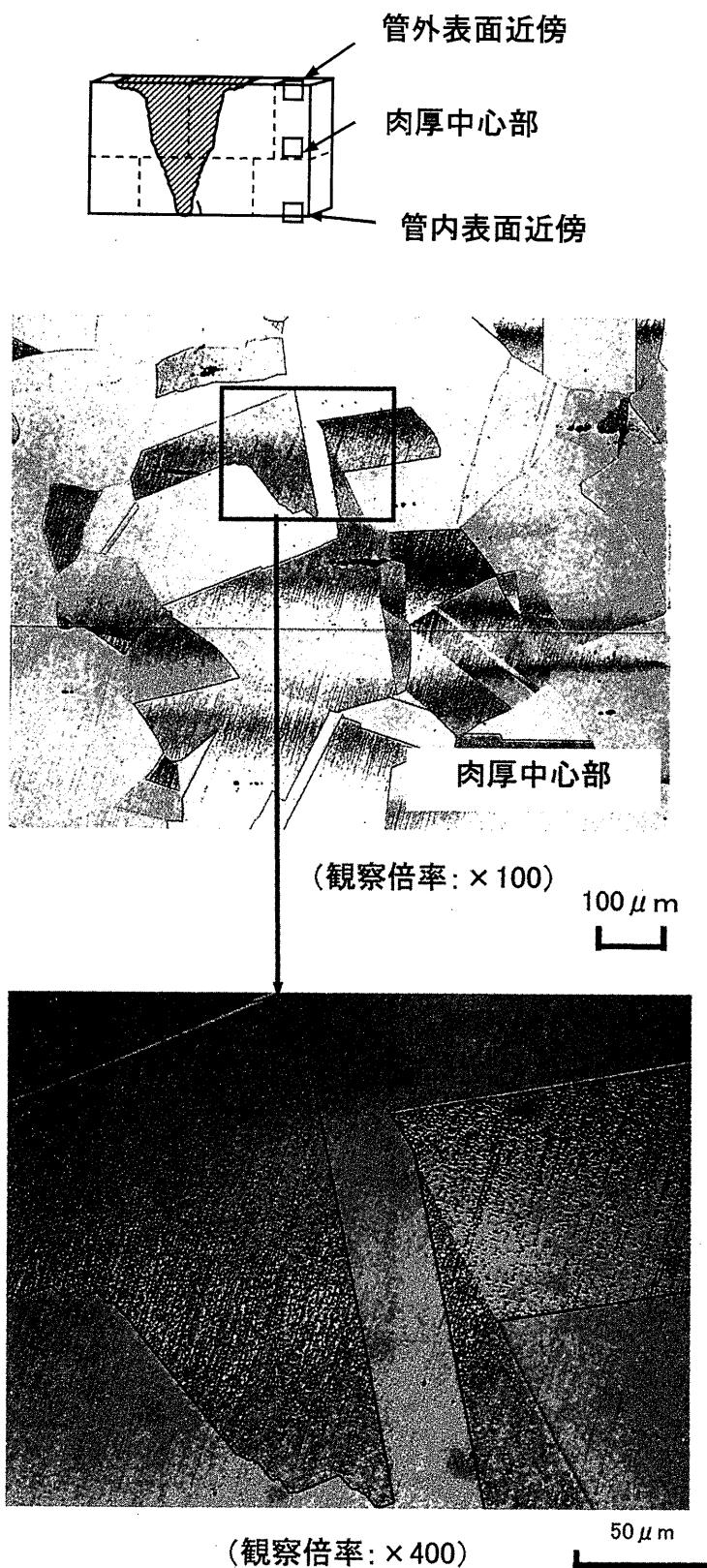


図 3.3.5 き裂から 20mm 離れたティ一側の金属組織(肉厚中心部)
(10% シュウ酸エッチング後)

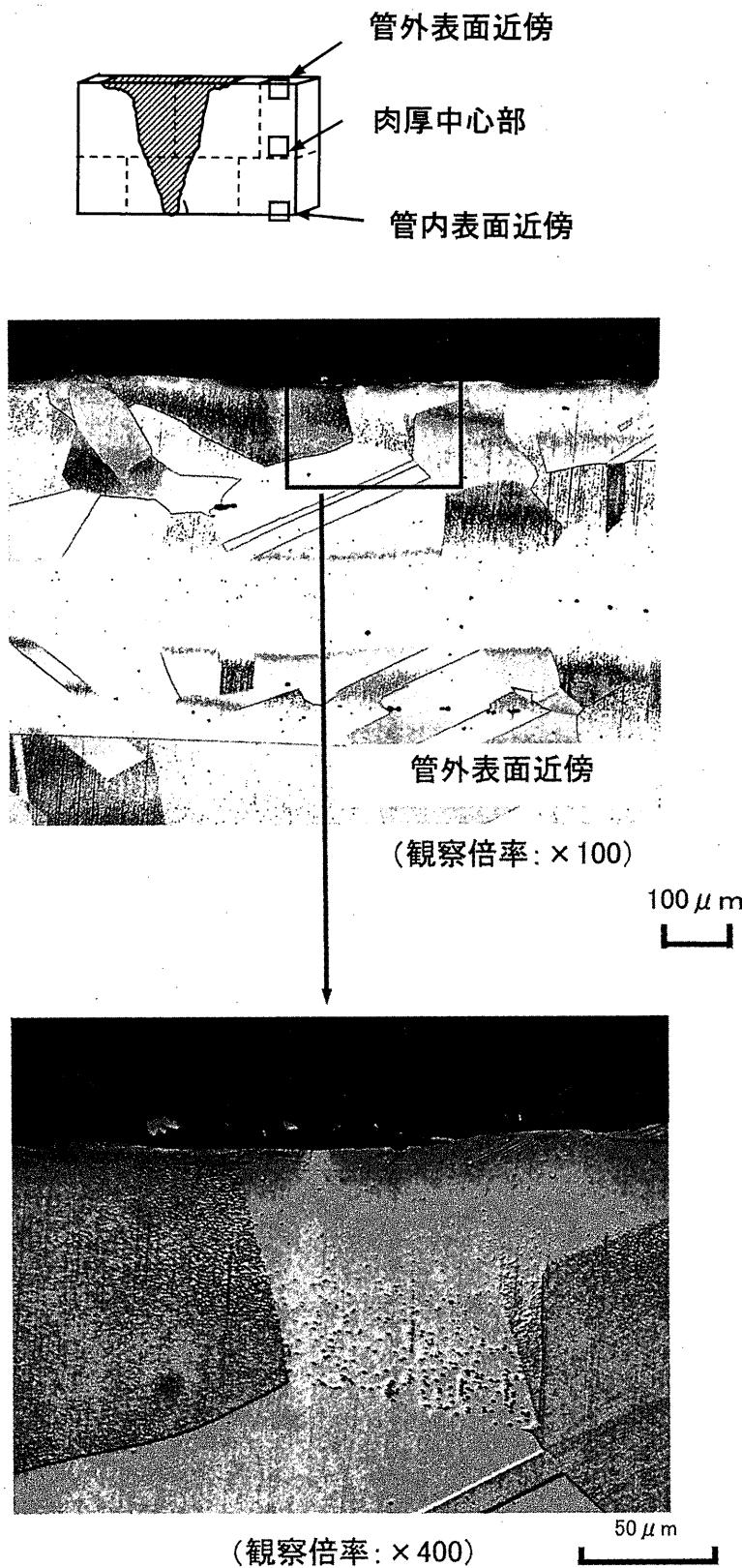


図 3.3.6 き裂から 20mm 離れたティ一側の金属組織(管外表面近傍)
(10% シュウ酸エッティング後)

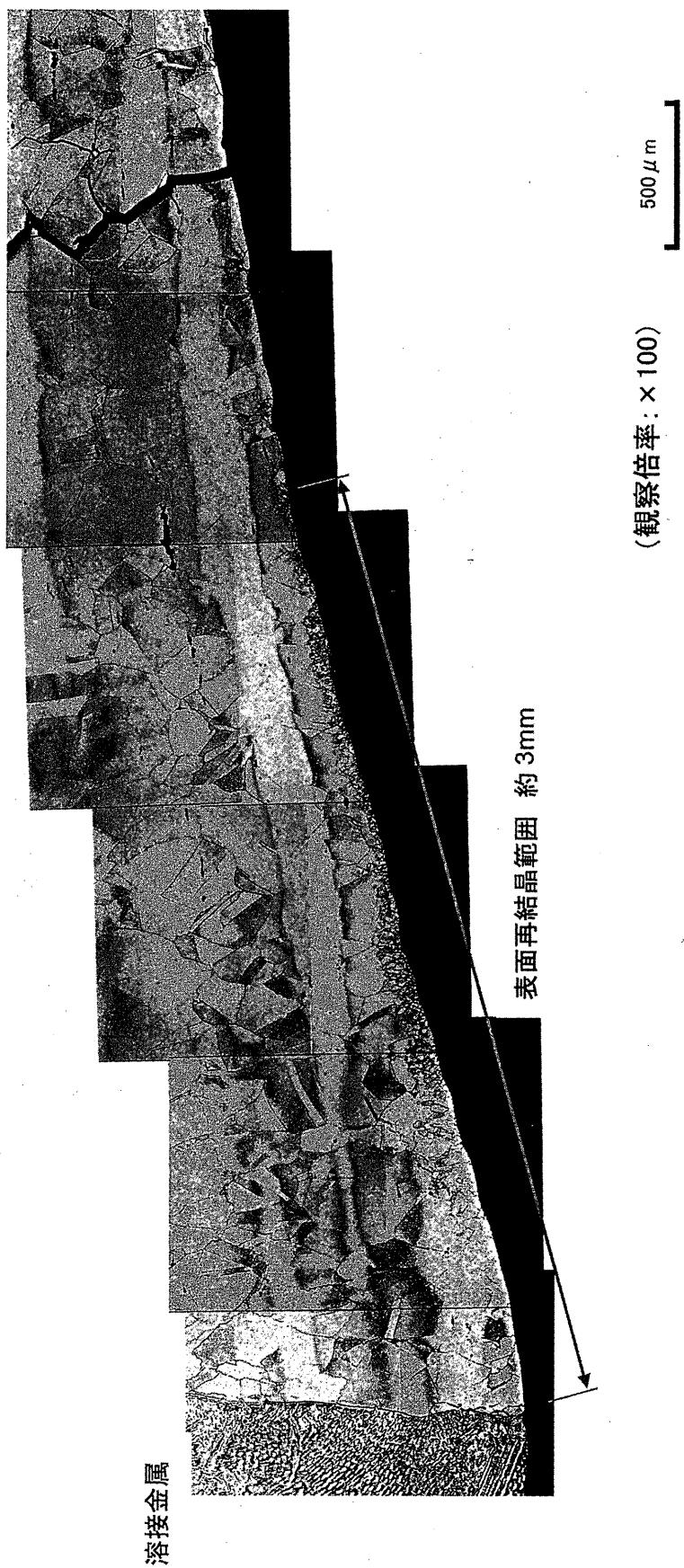


図 3.3.7 き裂開口部を含む表面近傍の金属組織 (10%シュウ酸エッチャング後)

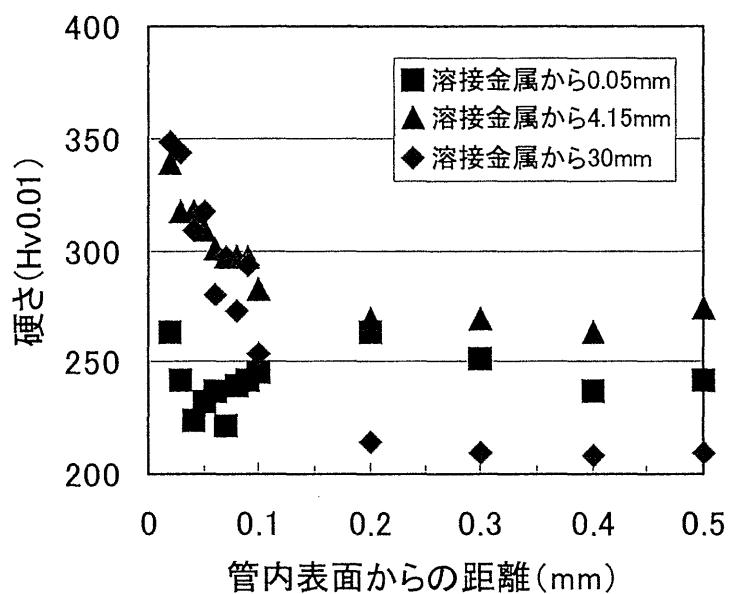


図 3.4.1 断面のビッカース硬さ測定結果(深さ方向の分布)

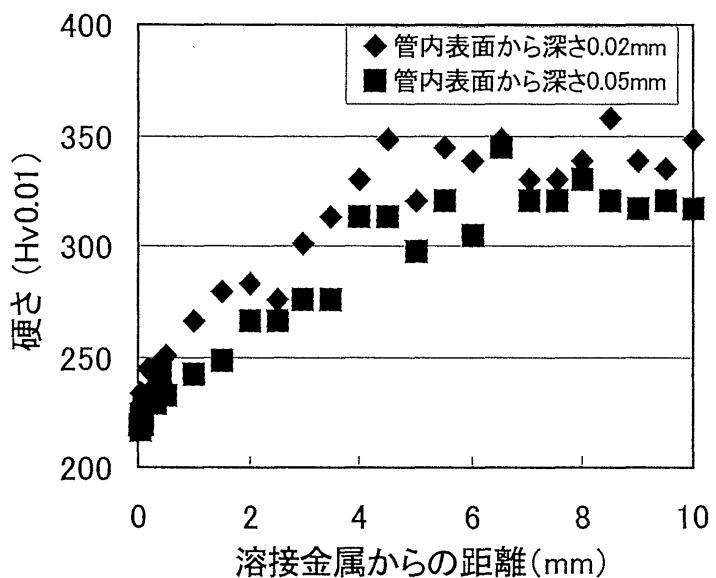


図 3.4.2 断面のビッカース硬さ測定結果(表面近傍の分布)

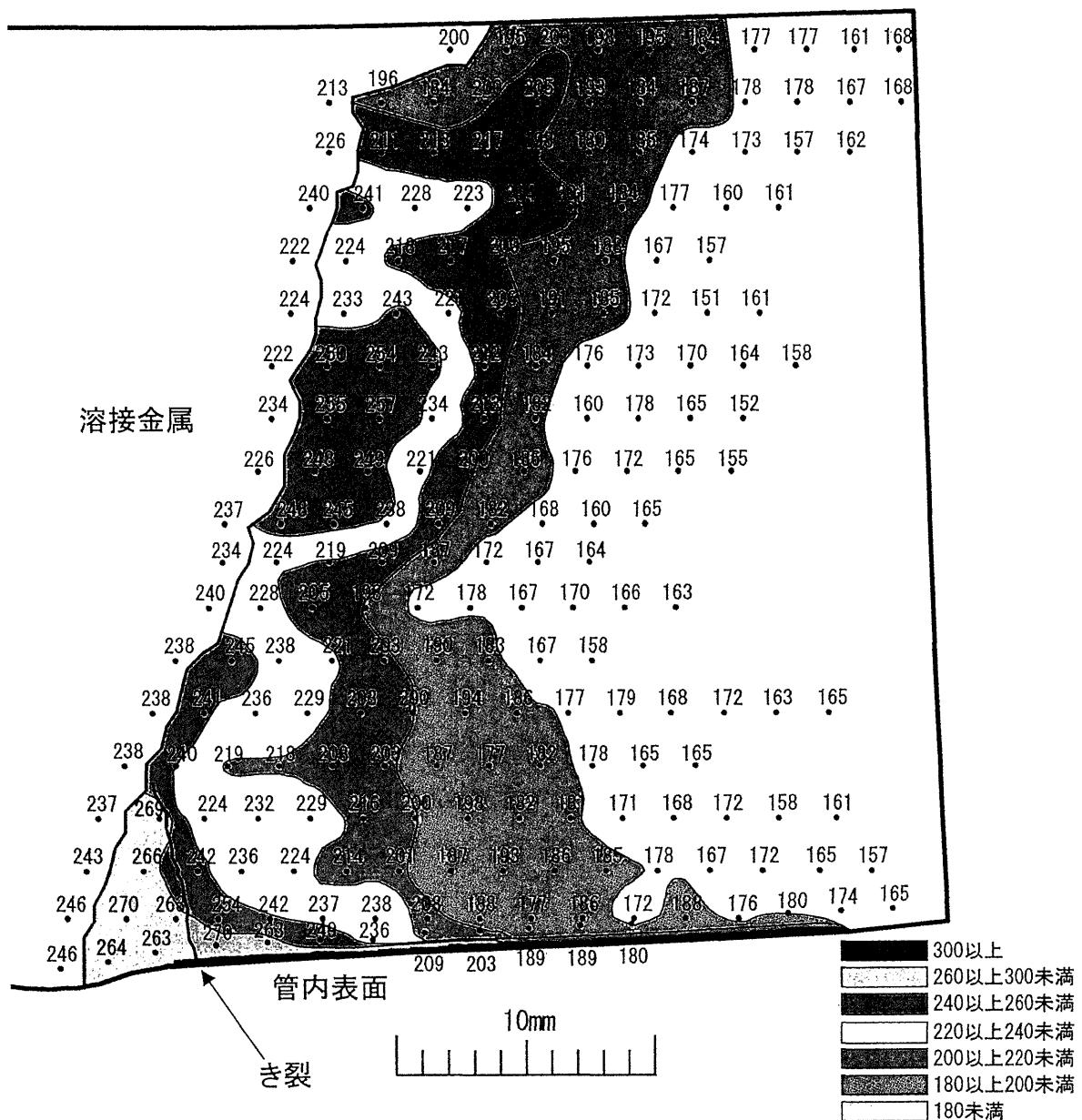


図 3.4.3 断面のビッカース硬さ(HV1)の2次元的分布

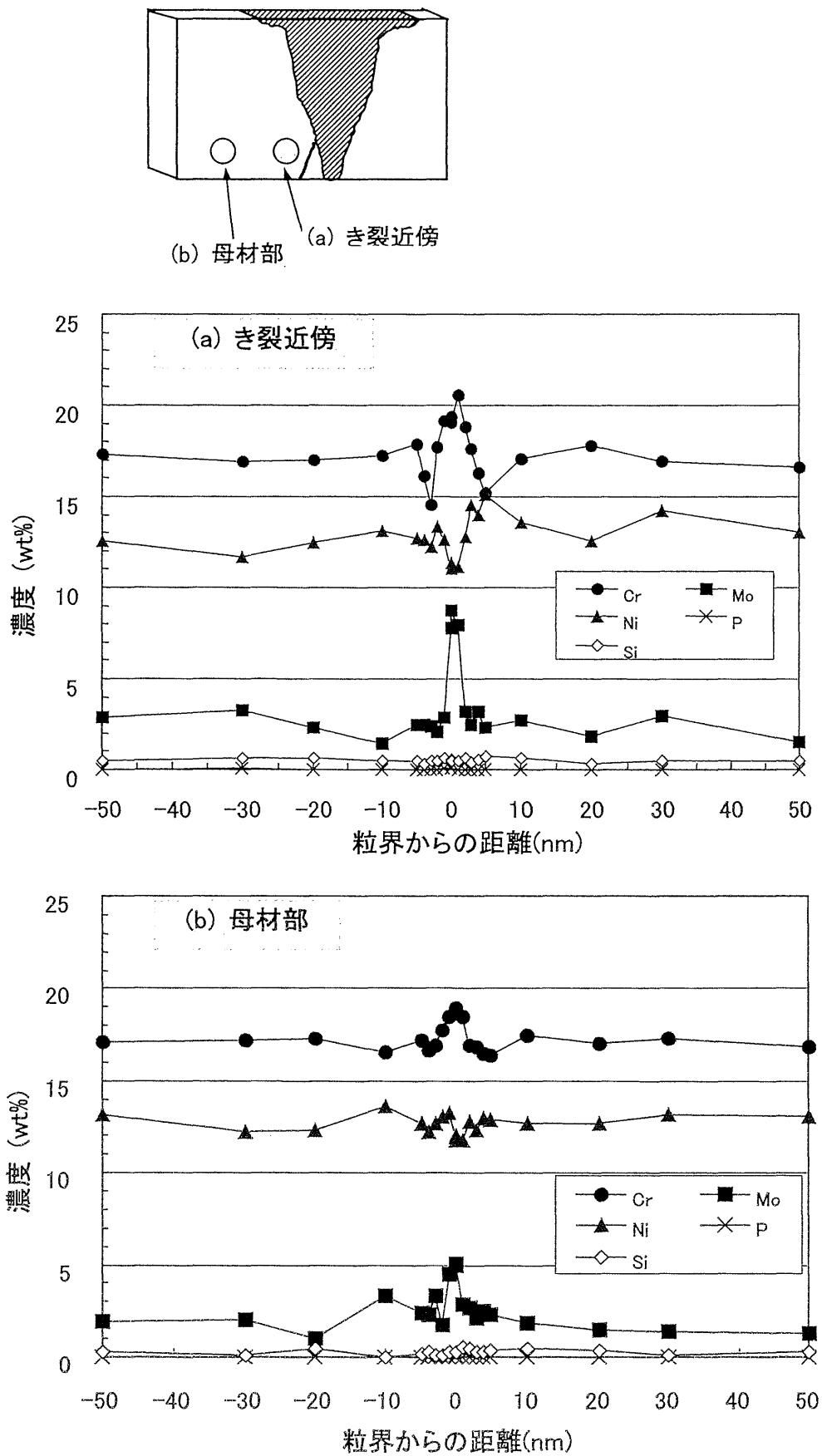


図 3.5.2.1 き裂近傍及び母材部の粒界近傍組成分析結果

付録

東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所 1号機
再循環系配管のひび割れに関する調査の概要
(東京電力(株)へ提出した中間報告書)

This is a blank page.

付録

東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所1号機再循環系配管のひび割れに関する調査の概要(1/4)

1. 目的 定期検査においてひび割れ(以下、き裂)が確認された原子炉再循環系配管溶接継手部から採取したサンプルの各種検査を実施し、き裂発生の原因究明に資する。

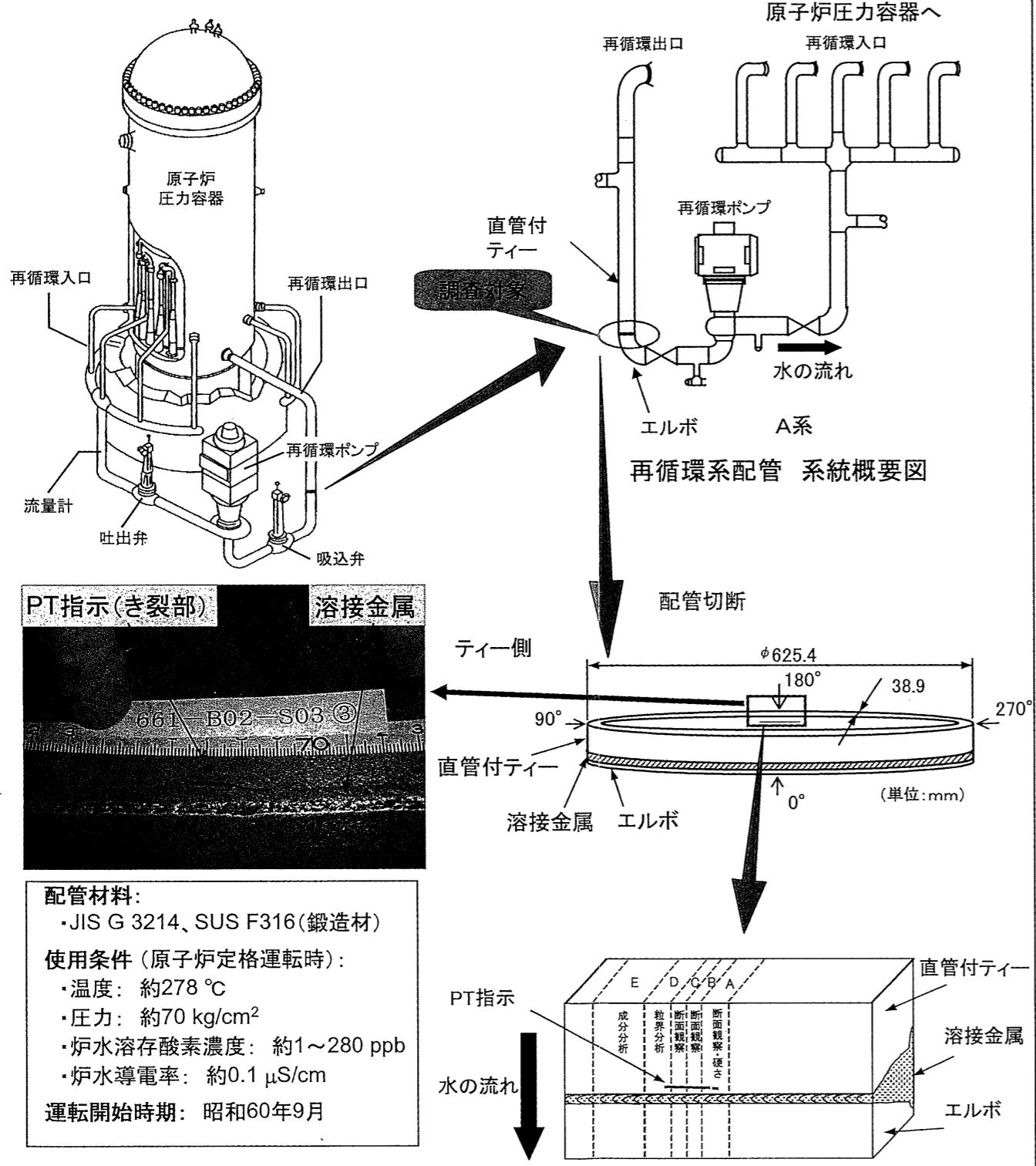


図1 調査サンプルの採取位置及びサンプル切り出し方

2. 調査内容

- (1) 外観観察 → 目視観察、写真撮影 (PT* 指示によるき裂位置の調査)
- (2) 破面観察 → き裂部破面の走査型電子顕微鏡(SEM)観察 (割れ形態の調査)
- (3) 金相観察 → 金属組織の光学顕微鏡観察 (き裂の伝播形態の調査)
- (4) 硬さ試験 → ビックタース硬さの測定 (加工及び溶接の影響の調査)
- (5) 試料分析 → 化学成分分析、FE-TEM**による粒界近傍組成分析(化学成分の調査)

* PT : 浸透探傷試験、** FE-TEM : 電界放射型透過電子顕微鏡

3. 調査結果

(1) 外観観察

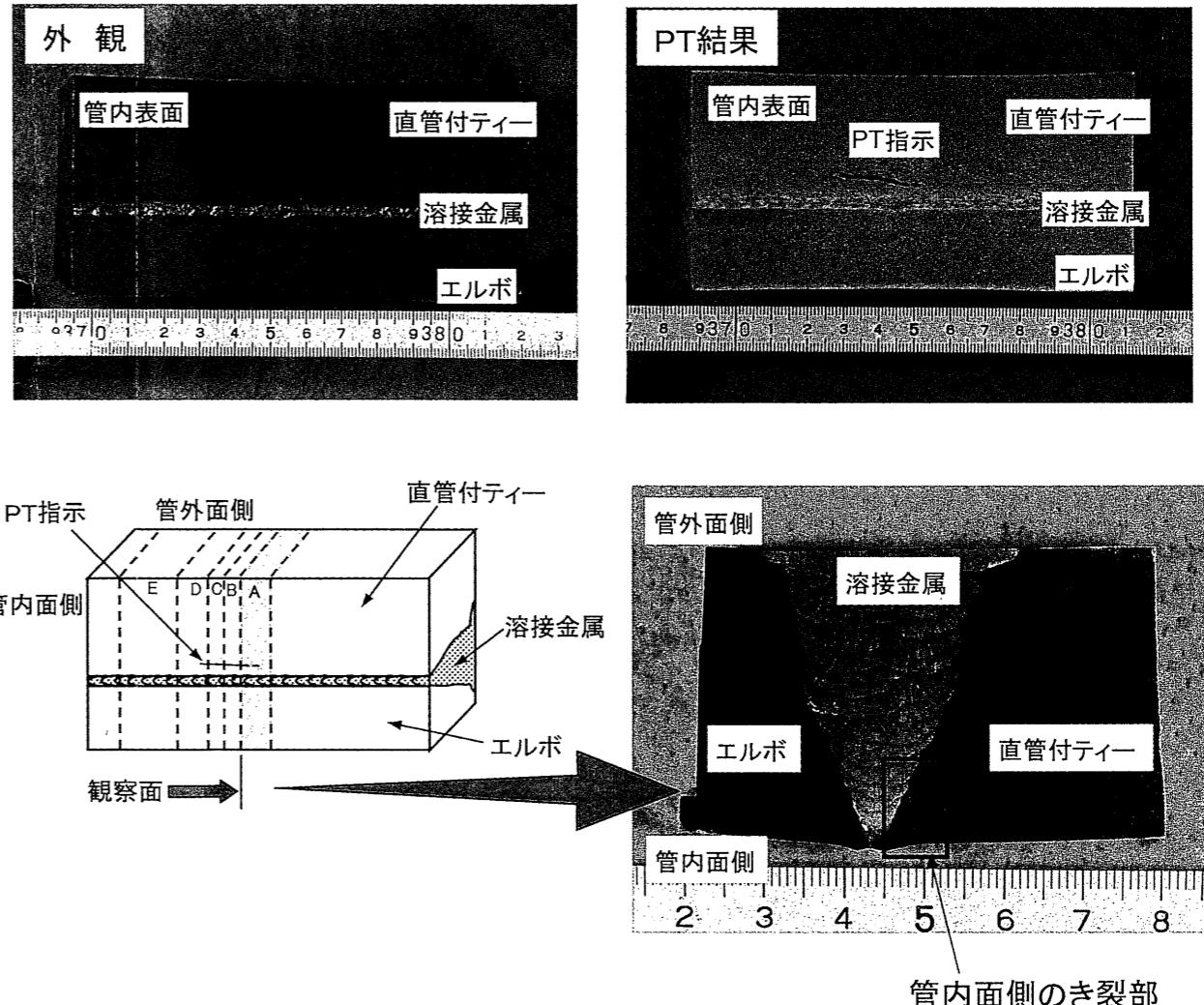


図2 調査サンプルの外観、PT結果、断面観察

まとめ: ・ティー側管内表面の溶接金属端から約4mmの位置にき裂を確認した。
・き裂は、管内表面上で長さ約22mmあった。

東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所1号機再循環配管ひび割れ部に関する調査の概要(2/4)

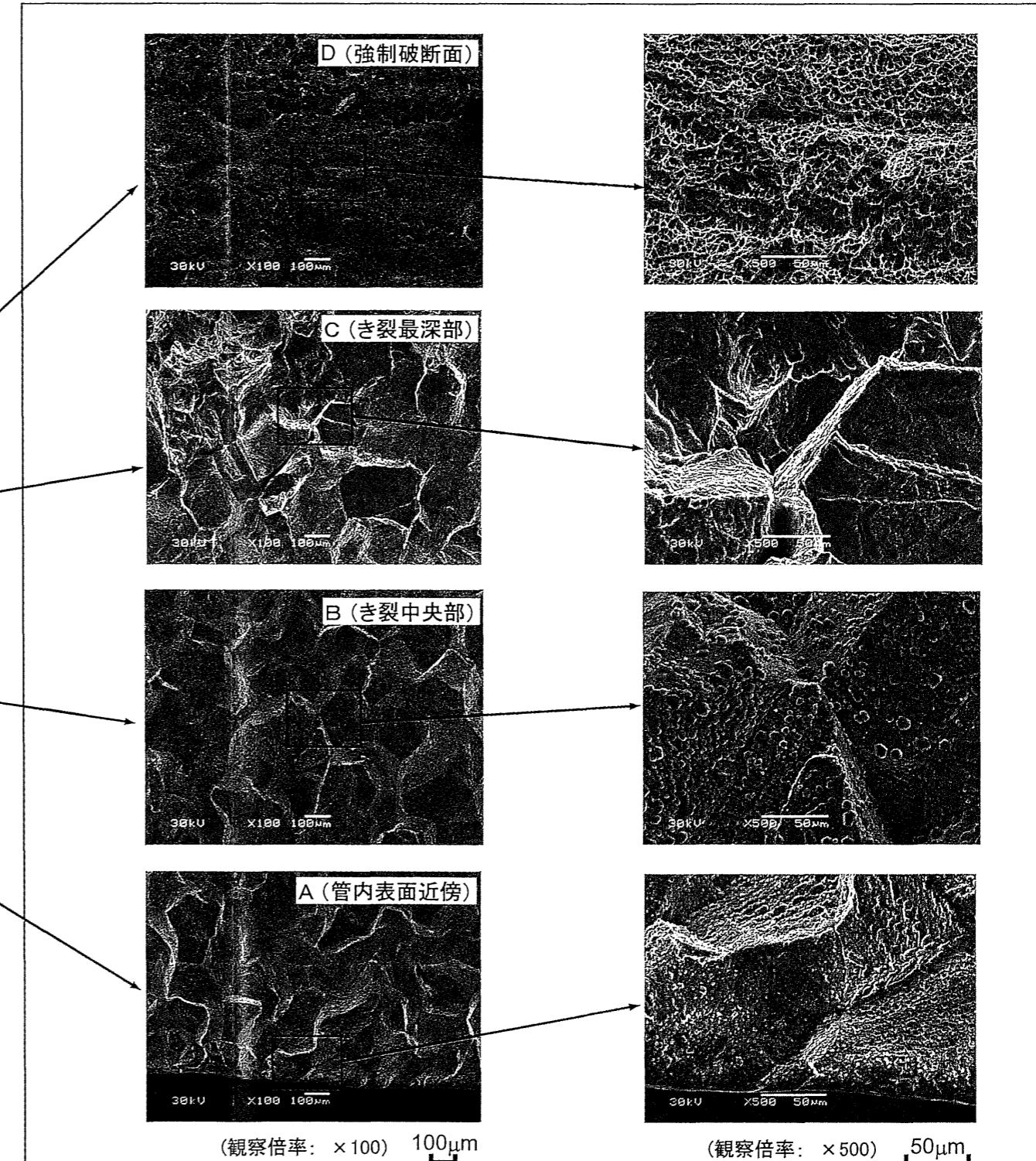
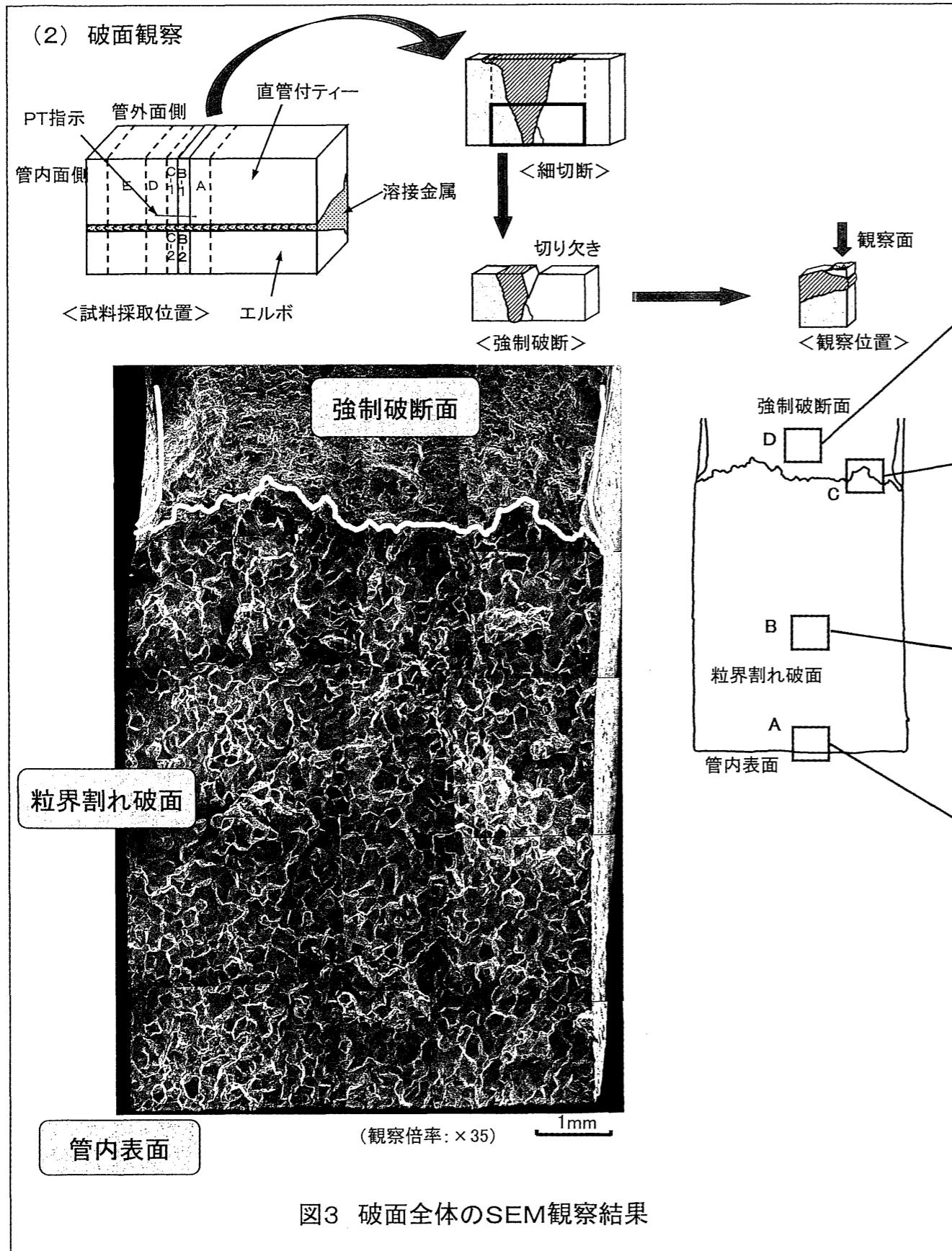
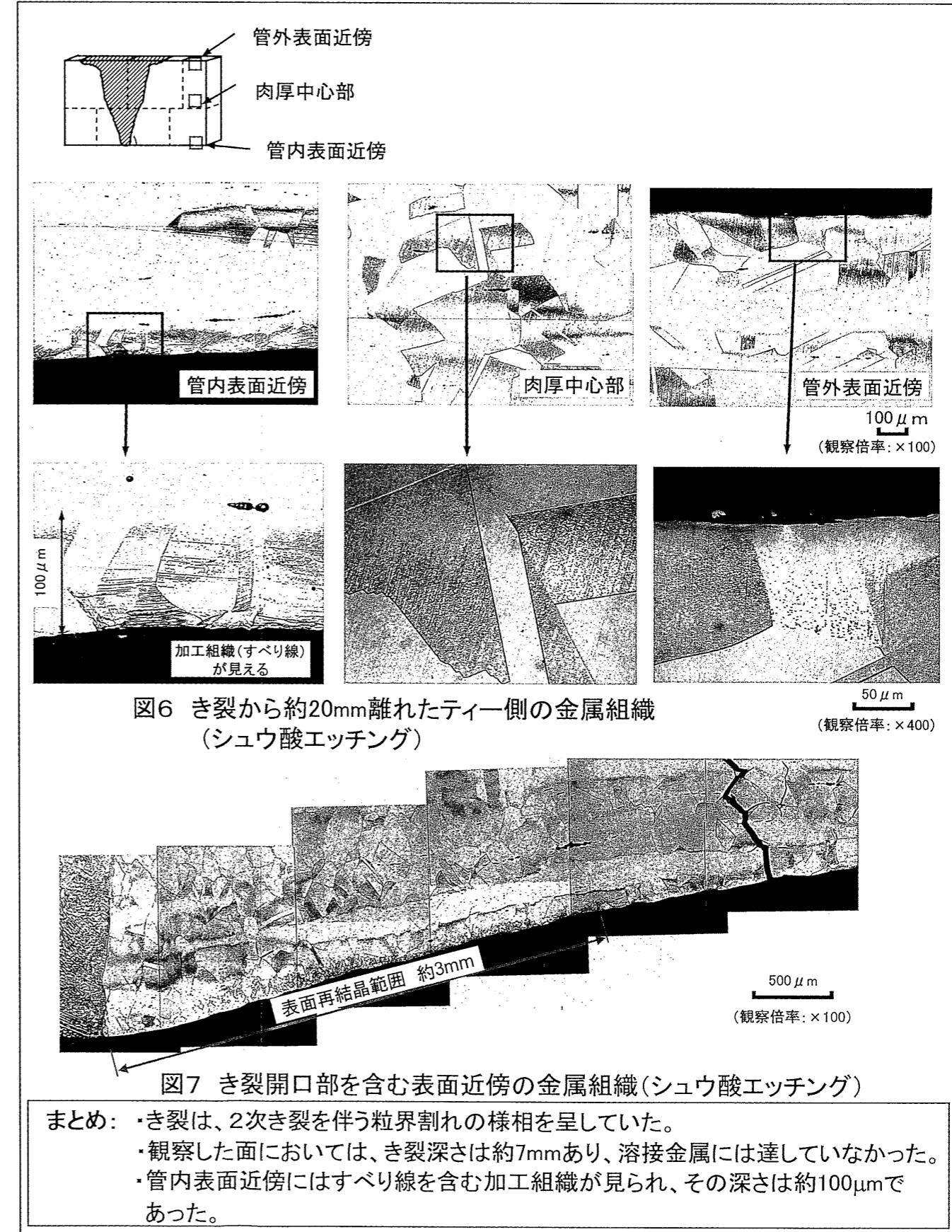
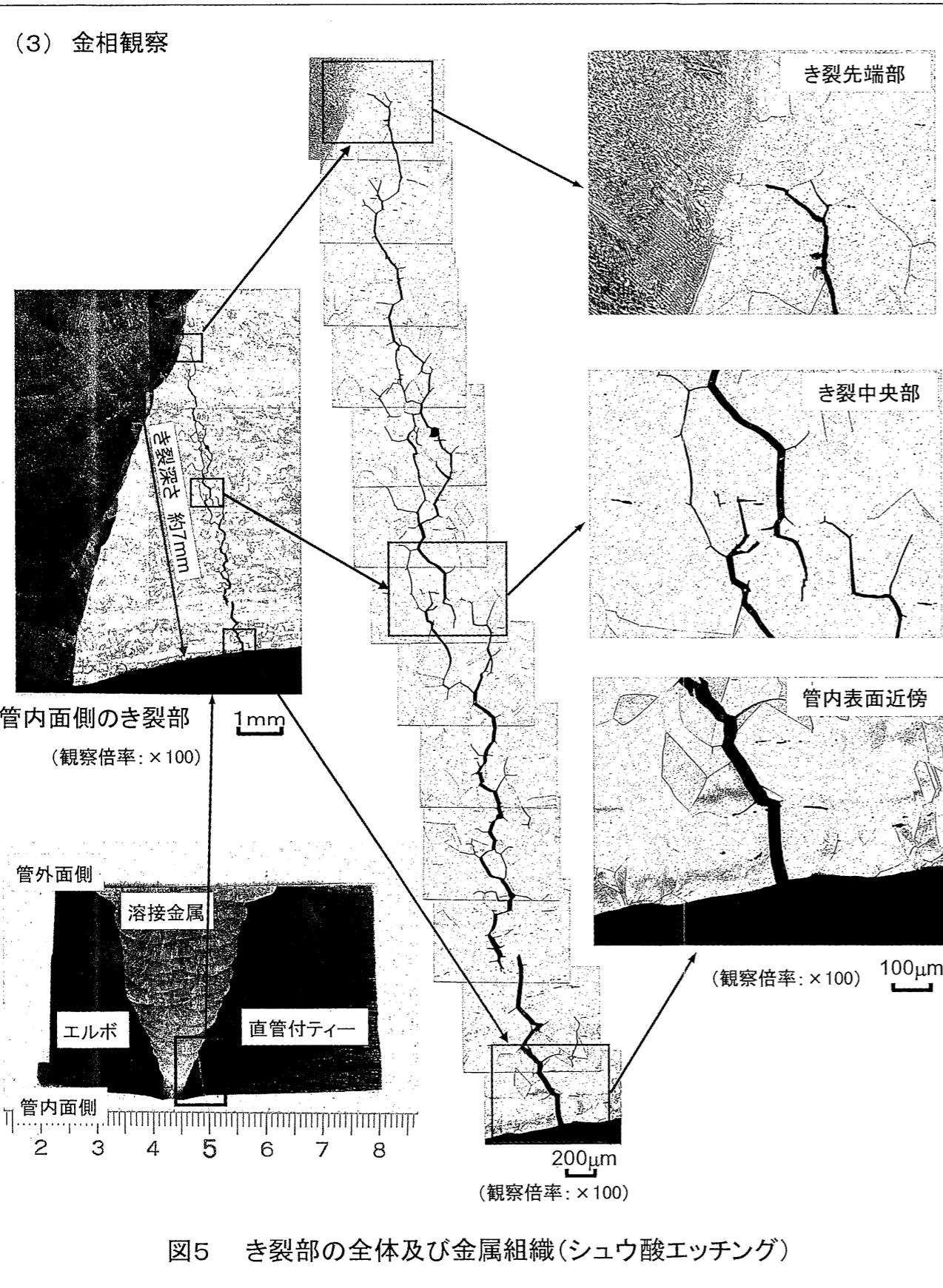


図4 破面各部のSEM観察結果

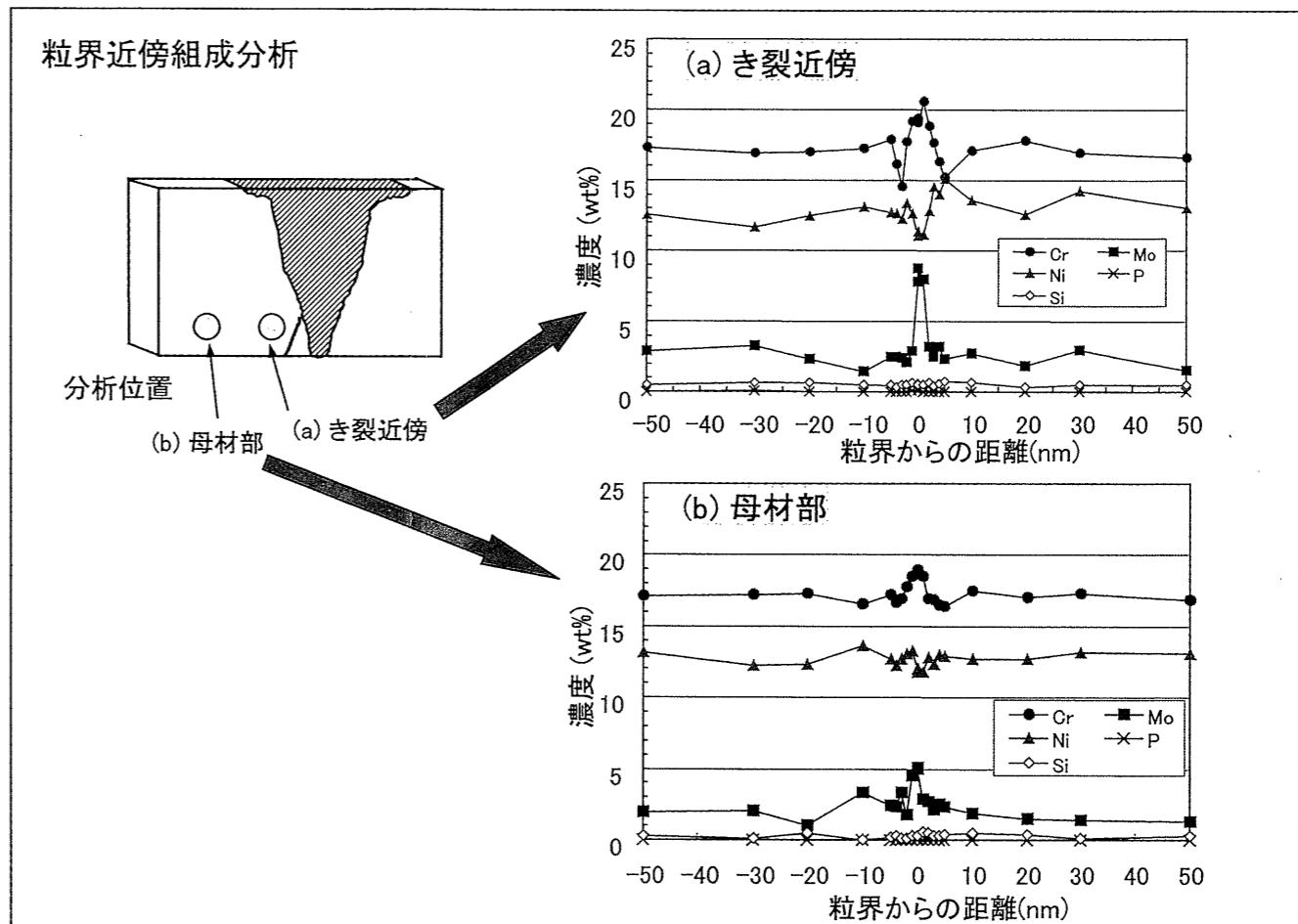
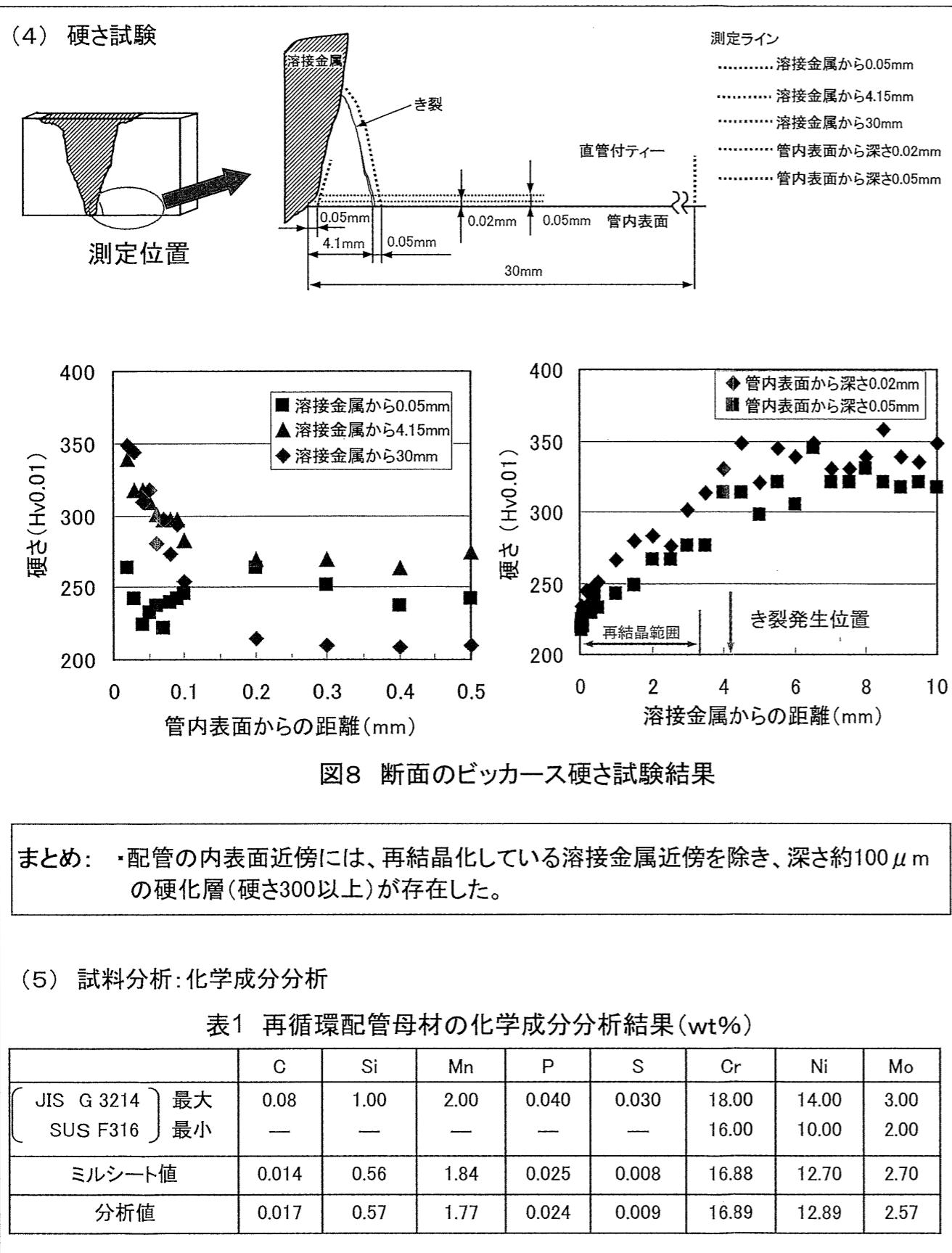
まとめ:

- ・破面のほぼ全面に、明瞭な粒界割れが観察された。
- ・破面の管内表面近傍からき裂中央部にかけて腐食生成物が多く見られた。

東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所1号機再循環配管ひび割れ部に関する調査の概要(3/4)



東京電力(株)柏崎刈羽原子力発電所1号機再循環配管ひび割れ部に関する調査の概要(4/4)



まとめ:

- 材料中の化学成分元素の含有量は、JIS G 3214、SUS F316を満足していた。
- き裂近傍の結晶粒界近傍において、ごくわずかにCr濃度が低下していた。

まとめ:

- 配管の内表面近傍には、再結晶化している溶接金属近傍を除き、深さ約 $100\mu\text{m}$ の硬化層(硬さ300以上)が存在した。

(5) 試料分析: 化学成分分析

表1 再循環配管母材の化学成分分析結果(wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
JIS G 3214 最大	0.08	1.00	2.00	0.040	0.030	18.00	14.00	3.00
SUS F316 最小	—	—	—	—	—	16.00	10.00	2.00
ミルシート値	0.014	0.56	1.84	0.025	0.008	16.88	12.70	2.70
分析値	0.017	0.57	1.77	0.024	0.009	16.89	12.89	2.57

4. 結論

- き裂は、管内表面の溶接部近傍に発生しており、深さは7mm程度であった。
- き裂部破面のほぼ全体が粒界割れであった。
- 管内表面には、加工により形成された金属組織及び硬さの上昇が見られ、き裂は硬さの高い部分に発生していた。
- 材料中の化学成分元素の含有量は、JIS G 3214、SUS F316を満足していたが、き裂近傍の結晶粒界近傍においてごくわずかにCr濃度が低下していた。
- 本調査の結果と、溶接によりき裂部付近で発生したと考えられる引張残留応力及び炉水中的溶存酸素濃度等を考慮すると、このき裂は応力腐食割れ(SCC)であり表面の硬さと関係があると推定される。

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
力	ニュートン	N	m·kg/s ²
圧力、応力	パスカル	Pa	N/m ²
エネルギー、仕事、熱量	ジユール	J	N·m
功率、放射束	ワット	W	J/s
電気量、電荷	クロン	C	A·s
電位、電圧、起電力	ボルト	V	W/A
静電容量	フーラド	F	C/V
電気抵抗	オーム	Ω	V/A
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	
光束度	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
線量等量	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	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)

1. 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、1eVおよび1uの値はCODATAの1986年推奨値によった。

2. 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。

3. 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。

4. 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。

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
バル	bar
ガル	Gal
キュリ	Ci
レントゲン	R
ラド	rad
レム	rem

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

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

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

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

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

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

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

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

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(=10bar)	kgf/cm ²	atm	mmHg(Torr)	lbf/in ² (psi)
力	1	10.1972	9.86923	7.50062 × 10 ³	145.038
	0.0980665	1	0.967841	735.559	14.2233
	0.101325	1.03323	1	760	14.6959
	1.33322 × 10 ⁻⁴	1.35951 × 10 ⁻³	1.31579 × 10 ⁻³	1	1.93368 × 10 ⁻²
	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 = 4.18605J (計量法)	
								= 4.184J (熱化学)	= 4.1855J (15°C)
	1	0.101972	2.77778 × 10 ⁻⁷	0.238889	9.47813 × 10 ⁻⁴	0.737562	6.24150 × 10 ¹⁸		
	9.80665	1	2.72407 × 10 ⁻⁶	2.34270	9.29487 × 10 ⁻³	7.23301	6.12082 × 10 ¹⁹		
	3.6 × 10 ⁶	3.67098 × 10 ⁵	1	8.59999 × 10 ³	3412.13	2.65522 × 10 ⁶	2.24694 × 10 ²⁵		
	4.18605	0.426858	1.16279 × 10 ⁻⁶	1	3.96759 × 10 ⁻³	3.08747	2.61272 × 10 ¹⁹		
	1055.06	107.586	2.93072 × 10 ⁻⁴	252.042	1	778.172	6.58515 × 10 ²¹		
	1.35582	0.138255	3.76616 × 10 ⁻⁷	0.323890	1.28506 × 10 ⁻³	1	8.46233 × 10 ¹⁸		
	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	吸収線量	Gy	rad	照射線量	C/kg	R	總量当量	Sv	rem
	1	2.70270 × 10 ⁻¹¹		1	100		1	3876		1	
	3.7 × 10 ¹⁰	1		0.01	1		2.58 × 10 ⁻⁴	1		0.01	1

(86年12月26日現在)

柏崎刈羽原子力発電所1号機再循環系配管サンプル(K-1-PLR)に関する調査報告書(受託調査)

