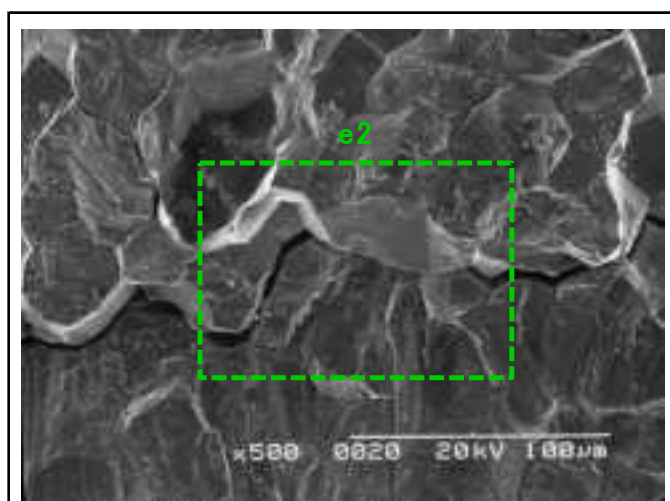


e部

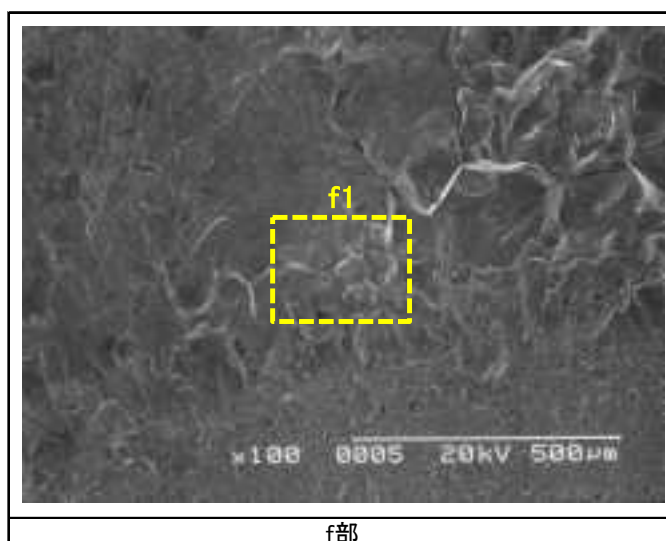


e1部

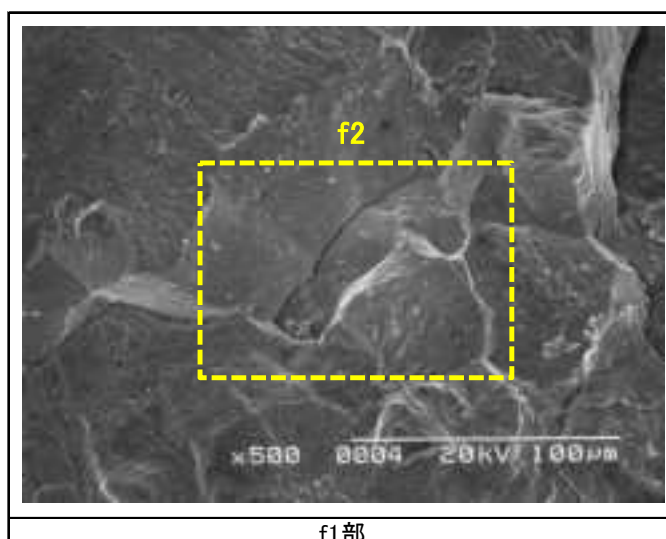


e2部

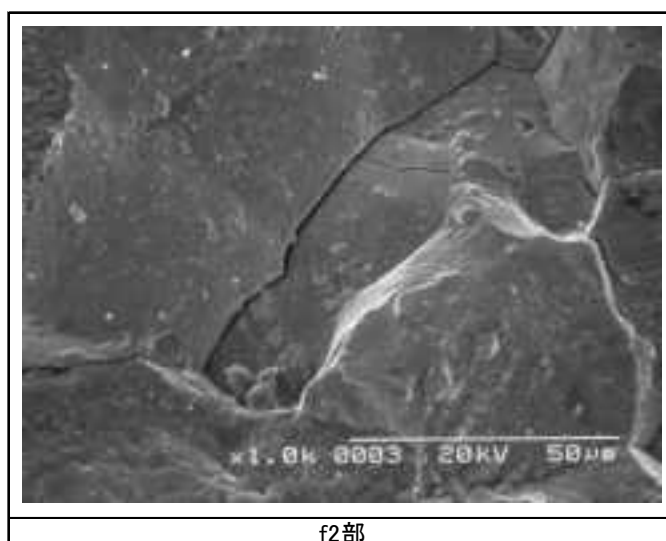
写真 5.2.3-7(e) 破面 SEM 観察写真(e 部拡大)



f部

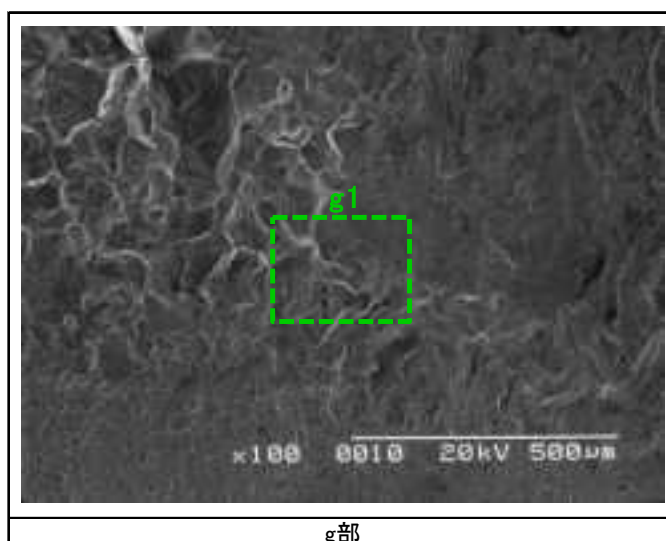


f1部

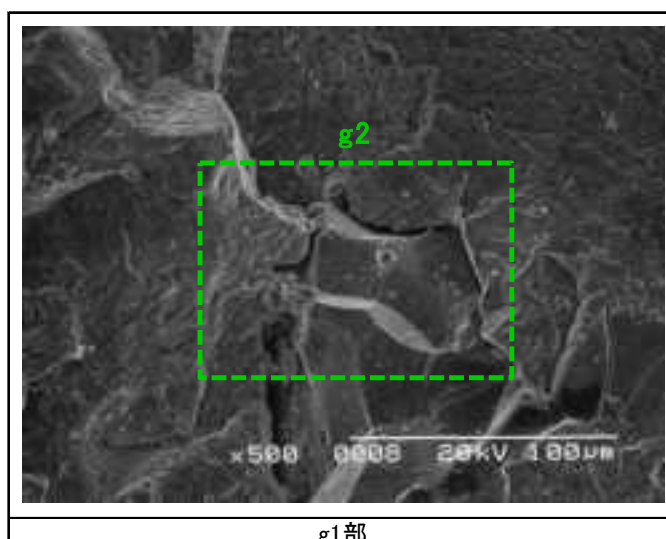


f2部

写真 5.2.3-7(f) 破面 SEM 観察写真(f部拡大)



g部

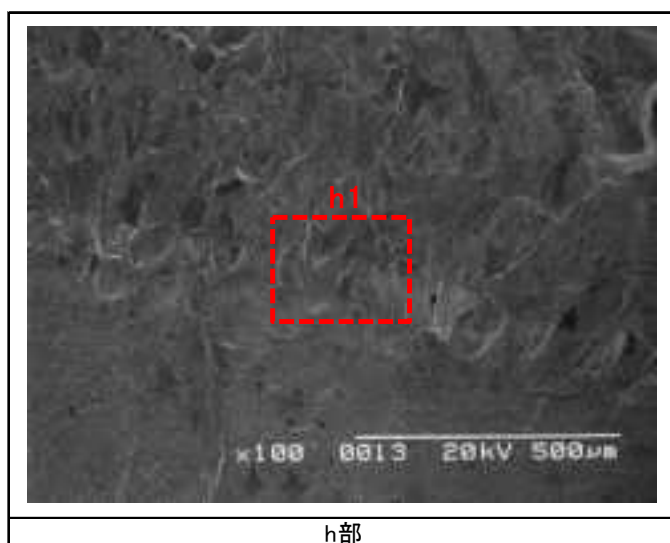


g1部

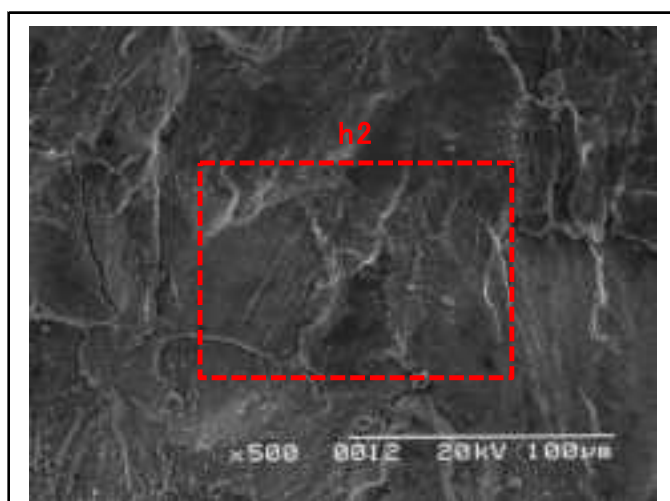


g2部

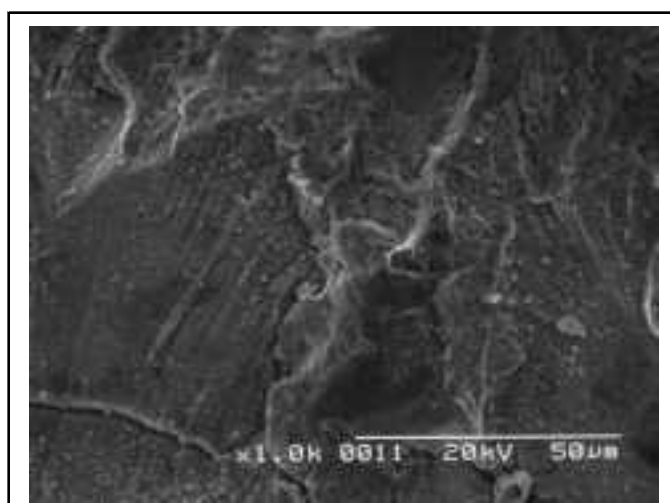
写真 5.2.3-7(g) 破面 SEM 観察写真(g 部拡大)



h部

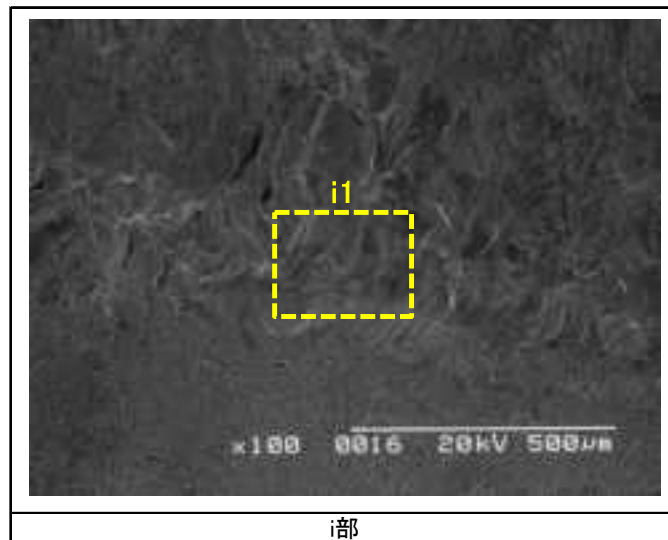


h1部

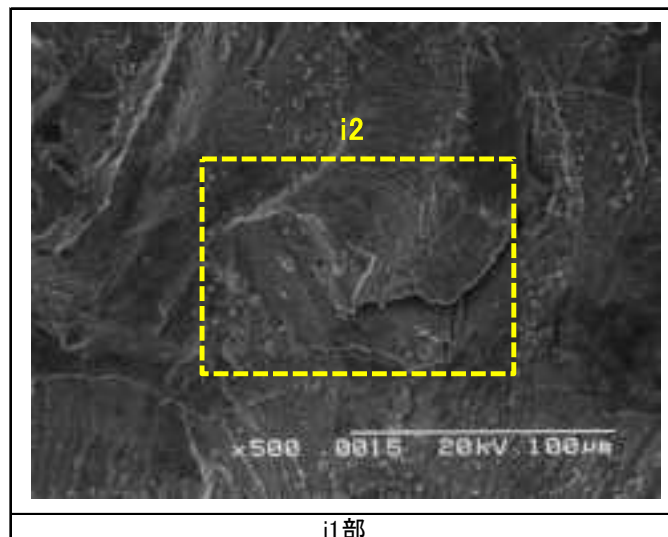


h2部

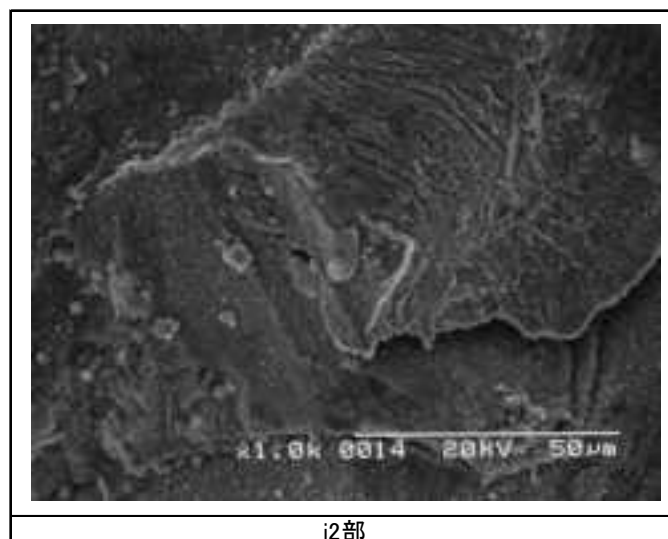
写真 5.2.3-7(h) 破面 SEM 観察写真(h 部拡大)



i部



i1部



i2部

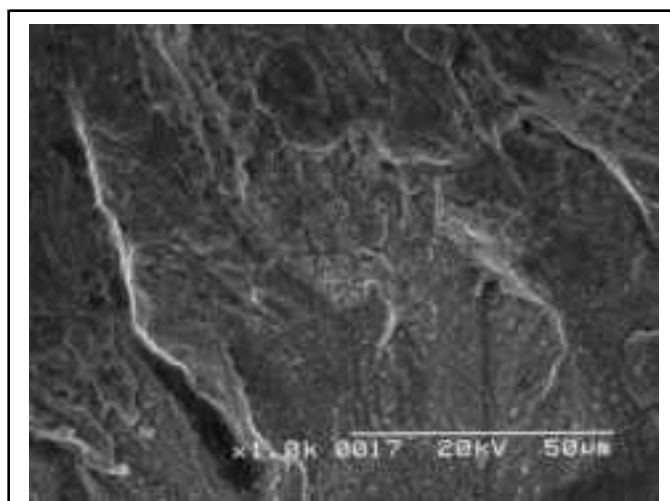
写真 5.2.3-7(i) 破面 SEM 観察写真(i 部拡大)



j部



j1部



j2部

写真 5.2.3-7(j) 破面 SEM 観察写真(j 部拡大)

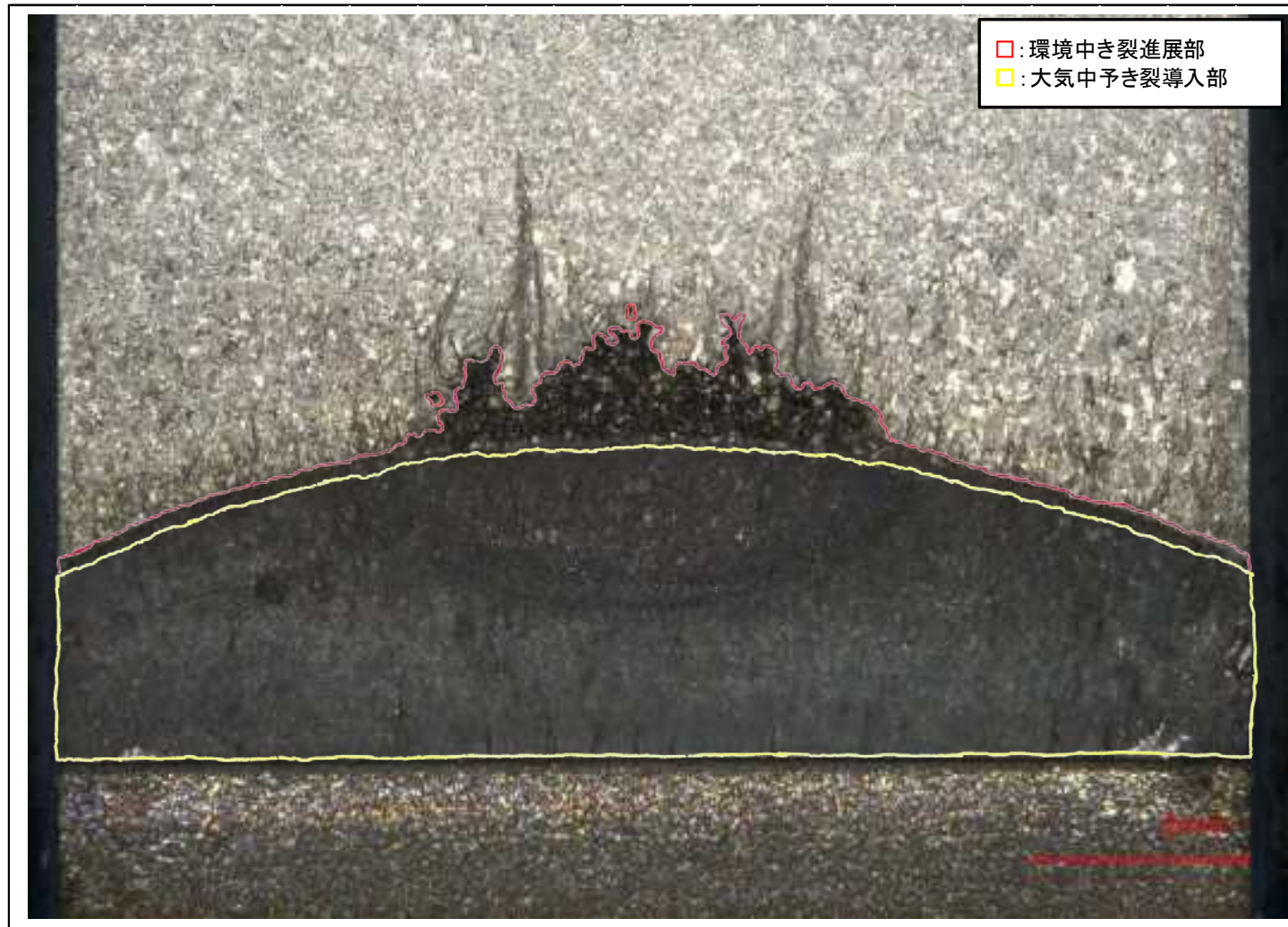


図 5.2.3-14 破面のトレース図

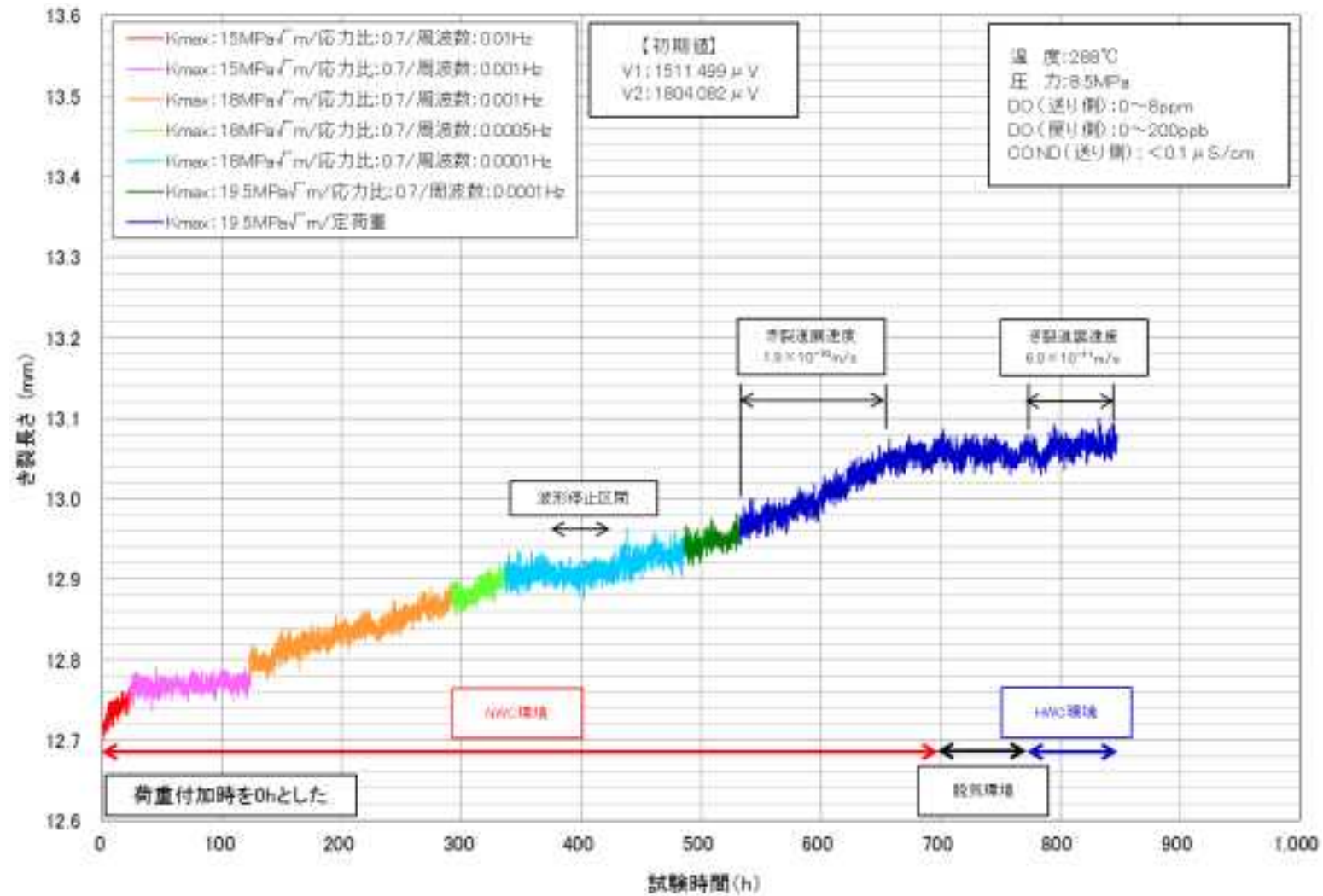


図 5.2.3-15 き裂長さの経時変化(破面補正後)

5.2.4 照射ステンレス鋼等の変形とき裂進展挙動への影響評価試験

(1)照射材の輸送

JMTR ホットラボと NFD ホットラボ間を、A 型輸送容器を用いて、照射材の支給及び支給材から加工した試験片を輸送した。

一回目の輸送は、平成 26 年 8 月 18 日に、JMTR ホットラボから NFD ホットラボへ支給材を輸送した。輸送した照射材のリストを表 5.2.4-1 に示す。図 5.2.4-1 に NFD ホットラボにおける受入状況を示す通り、所定の ID、員数の照射材であることを確認した。

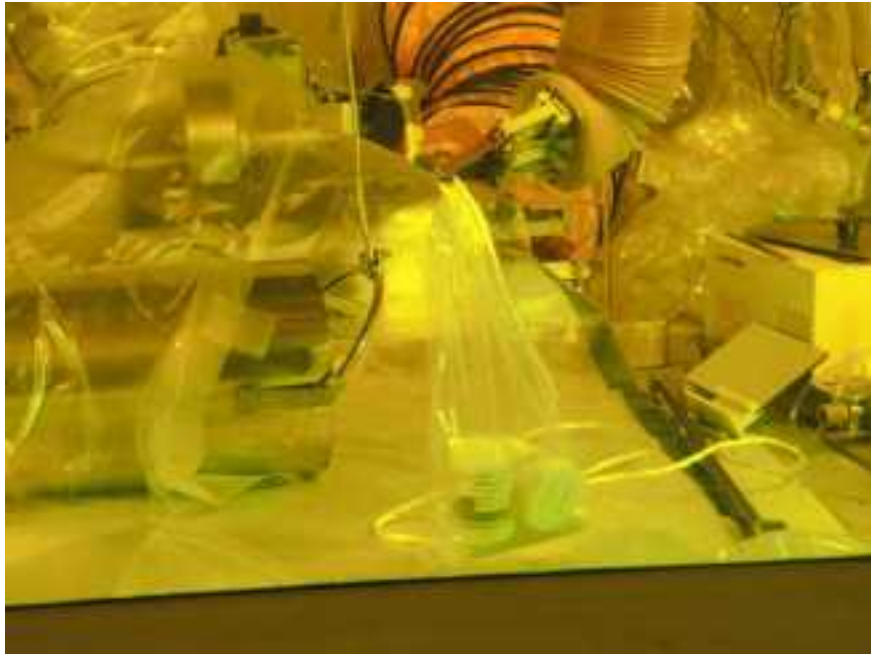
また二回目の輸送は、NFD ホットラボから JMTR ホットラボへの輸送を行った。輸送した照射材を表 5.2.4-2 に示す。一回目の輸送で支給した照射済シャルピー衝撃試験片から、NFD ホットラボで 0.16T-CT 試験片を 2 個加工し、これらを JMTR ホットラボに輸送した。また照射下き裂進展試験の比較データ取得を目的として、旧原子力安全基盤機構(JNES)事業「低炭素ステンレス鋼 SCC 進展への中性子照射影響実証」(ENI 事業：平成 19 年度～平成 25 年度)で中性子照射した 0.5T-CT 試験片の活用を図ることとし、JMTR ホットラボの高温水中き裂進展試験装置で試験に供するための中性子照射済 0.5T-CT 試験片を 8 個輸送した。図 5.2.4-2 に JMTR ホットラボにおける輸送した試験片の受け入れ状況を示す。

表 5.2.4-1 輸送した照射済試験片一覧(第一回輸送、JMTR ホットラボ→NFD)

鋼種	形状	員数	試験片 ID
オーステナイト系 ステンレス鋼	引張試験片	4	A435 A437 A439 R331(破断片)
	0.5T-CT 試験片	5	A410 A412 A413 A409 A425
低合金鋼	未使用シャルピー 衝撃試験片	1	BP34
	未使用シャルピー 衝撃試験片切断片	2	BP32(切断片 1 及び 2)

表 5.2.4-2 輸送した照射済試験片一覧(第二回輸送、NFD→JMTR ホットラボ)

鋼種	形状	員数	試験片 ID
オーステナイト系 ステンレス鋼	0.5T-CT 試験片	6	64HC402 64HC404 64HC406 64HC301 64HC305 64HC306
低合金鋼	0.16T-CT 試験片	2	B01 B02



(1)照射試験片容器の外観



(2)引張型試験片



(3)0.5T-CT 試験片

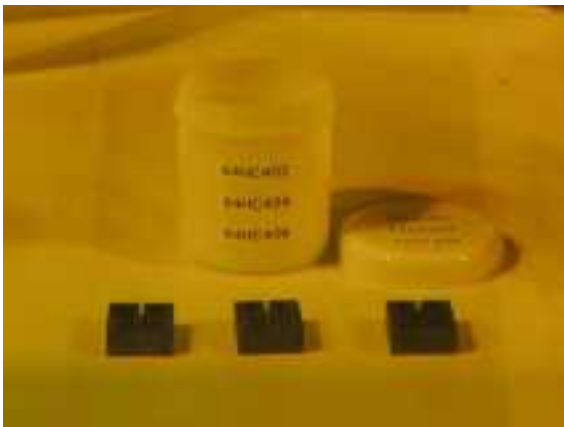


(4)シャルピー試験片

図 5.2.4-1 NFD ホットラボにおける受入状況(第一回輸送)



(1)照射試験片容器と照射試験片の外観



(2)0.5T-CT 試験片(その 1)



(3)0.5T-CT 試験片(その 2)



(4) 0.16T-CT 試験片

図 5.2.4-2 JMTR ホットラボにおける受入状況(第二回輸送)

(2)試験片加工

照射済ステンレス鋼より各種試験に用いるための試験片を加工した。試験片加工マトリクスを表 5.2.4-3 に示す。以下にそれぞれの試験片加工の結果について記載する。なお照射済シャルピー衝撃試験片から製作した 0.16T-CT 試験片については、5.1.1 項に詳述した。

a. 硬さ試験片

硬さ試験片の採取位置および試験片外観を図 5.2.4-3 に示す。いずれの硬さ試験片も、引張試験終了後の引張試験片を用いて、引張試験の荷重の影響が無いと思われるつかみ部(青色ハッチ部)より採取した。引張試験片のつかみ部より精密切断機を用いて短冊片を切り出し、樹脂埋め、機械研磨およびバフ研磨により鏡面仕上げした。

b. ミクロ組織観察試験片および粒界分析試験片

ミクロ組織観察試験片と粒界分析試験片の採取位置および試験片外観を図 5.2.4-4 に示す。いずれも、硬さ試験片と同様に、引張試験終了後の引張試験片またはき裂進展試験終了後の 0.5T-CT 試験片を用いて、荷重の影響が無いと思われる部分(引張試験片の青色ハッチ部及び 0.5T-CT 試験片の黄色部)より採取した。

加工は精密切断機により短冊板を採取した後、機械研磨により 0.15mm 厚さの薄板とした。この薄板からミクロ組織観察用に約 3mm ϕ 、また粒界分析用の 1 mm ϕ ディスクを打ち抜き、ジェット研磨法により薄膜化した。

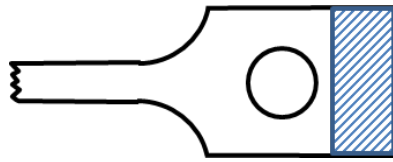
c. 引張試験片

変形組織観察用の引張試験片の採取位置および試験片外観を図 5.2.4-5 に示す。中性子照射した CT 試験片を切断して 2 枚の板状の供試材を採取後、ホットセル内に設置したフライス盤で引張試験片形状に加工した。試験片の寸法測定記録を表 5.2.4-4 に示す。なお、試験片の厚さ測定については、平行部の厚さ測定を行うことによって変形組織観察面に傷がついてしまうことを防止するため、変形試験後につかみ部の厚さを測定した。

引張試験片各部の寸法測定後、試験片の端面を研磨して面出しし、図 5.2.4-5 に赤線で示すように、2 枚の供試材が向き合う側の面のみを鏡面に仕上げた。

表 5.2.4-3 照射済ステンレス鋼からの試験片加工マトリクス

鋼種	ID	照射量(E>1MeV)	硬さ	マイクロ組織	粒界分析	引張	備考
SUS304	Z03	$6.3 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$			3		低フラックス
SUS316L	B3	$5 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$			3		
SUS316L	E134	$5.18 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$	1	1	3		
SUS316L	B5	$2 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$			3		
SUS304	R331	$2.16 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$	1				
SUS316L	A409	$7.02 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$				1	
SUS316L	A409	$7.02 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$				1	
SUS316L	A435	$7.26 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$	1		3		照射後焼鈍材、700°C×1h

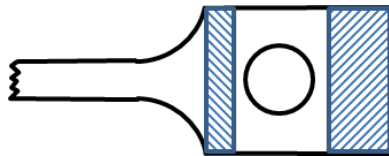


(1)採取位置(R331、E134、A435)
(青色ハッチ部)

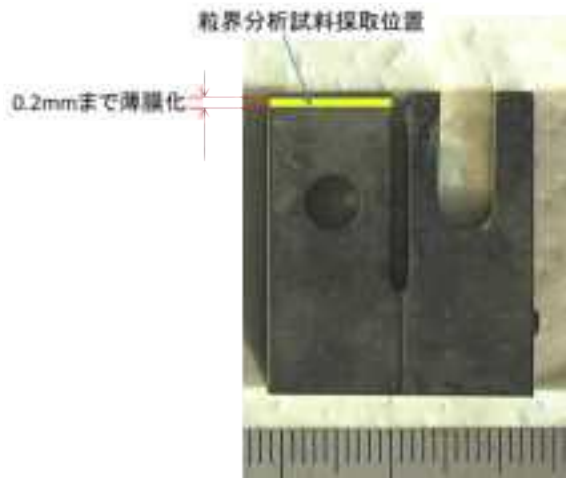


(2)試験片外観

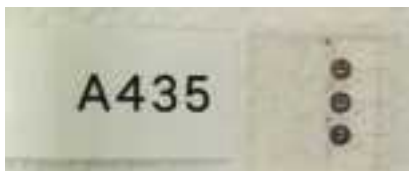
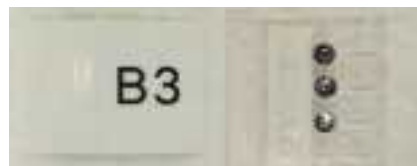
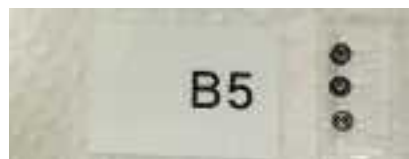
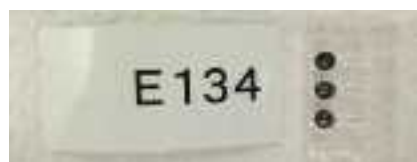
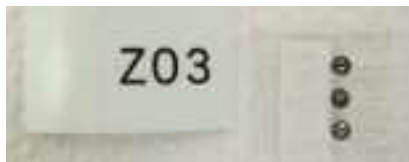
図 5.2.4-3 硬さ試験片の採取位置および試験片外観



(1)採取位置(B3、B5、E134、A435)
(青色ハッチ部)

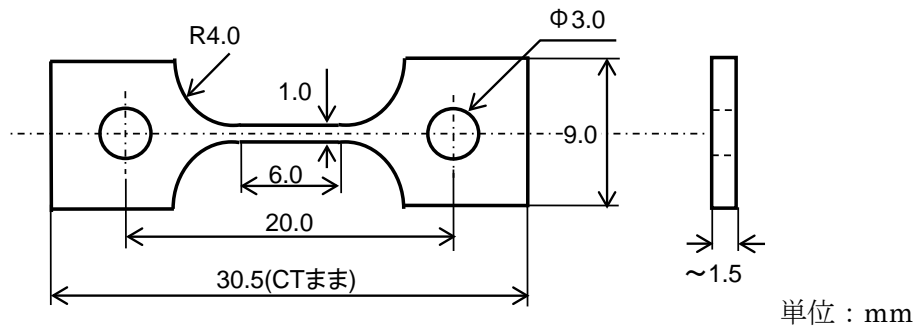


(2)採取位置(Z03)
(黄色部)

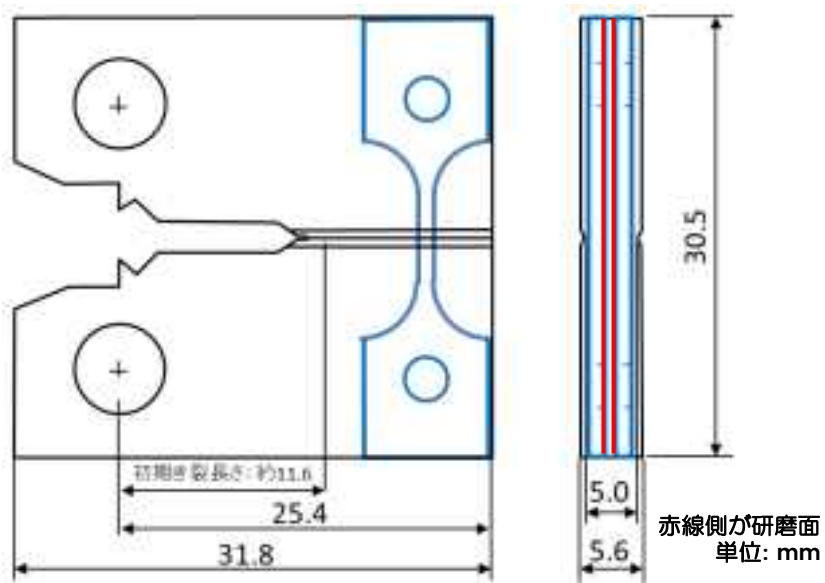


(3)試験片外観

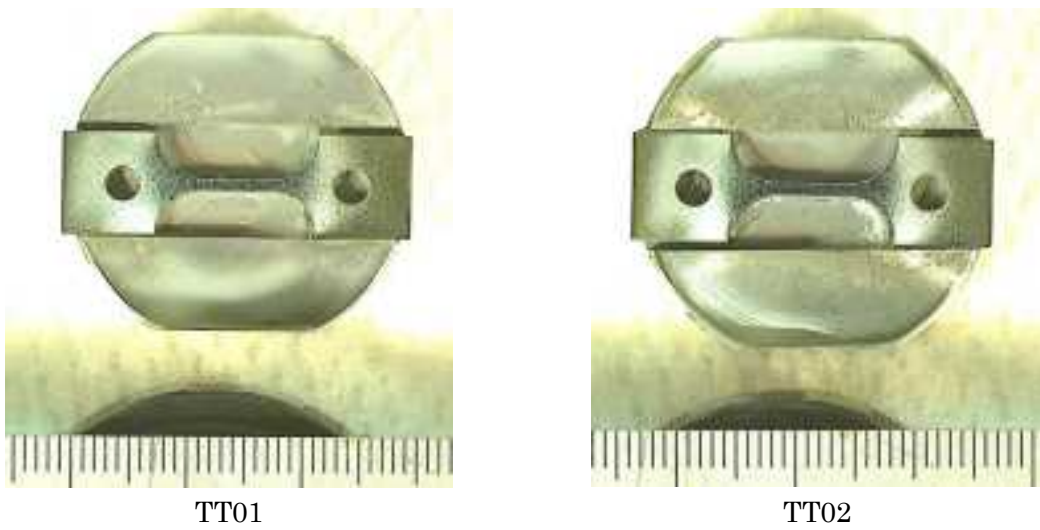
図 5.2.4-4 ミクロ組織観察および粒界分析用試験片の採取位置および試験片外観



(1)試験片形状



(2)採取位置



TT01

TT02

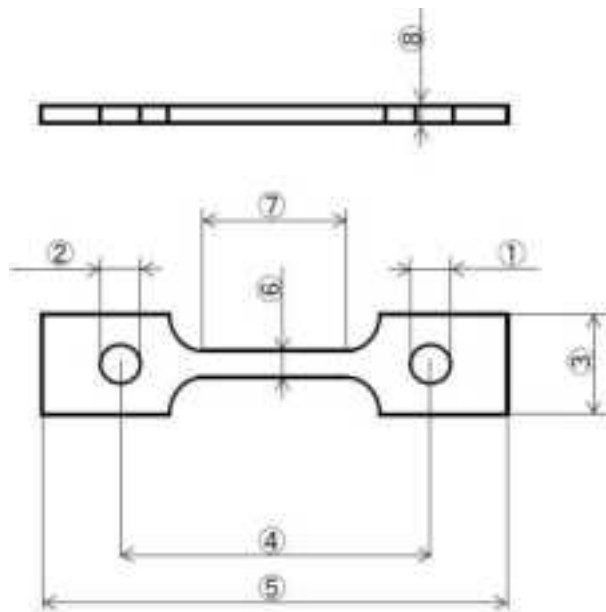
(3)試験片外観(研磨面側)

図 5.2.4-5 変形組織観察用引張試験片の採取位置および試験片外観

表 5.2.4-4 加工した引張試験片の寸法測定結果

単位: mm

測定箇所	図面寸法	図面公差	実測値	
			TT01	TT02
①	1.0	±0.1	3.0	3.0
②			3.0	3.0
③	9.0	±0.2	9.0	9.0
④	20.0	±0.2	20.0	19.9
⑤	30.5	±0.3	30.4	30.4
⑥	1.0	±0.1	1.1	1.1
⑦	6.0	±0.2	6.1	6.1
⑧	1.5		1.5	1.5



(3)JMTRにおける照射開始時の温度履歴が照射材特性に及ぼす影響評価試験

JMTR における照射開始時の温度履歴が照射材特性に及ぼす影響評価に関わる試験マトリックスを表 5.2.4-5 に示す。平成 26 年度は、引張試験、硬さ試験、マイクロ組織観察、粒界分析を実施した。以下に、それぞれの結果について記する。

a. 引張試験

(i)実験方法

引張試験には SUS316L のミルアニール(AR)材で中性子照射量 $5.18 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)の引張試験片(E134)を用いた。図 5.2.4-6 に引張試験片形状図を示す。試験は JIS Z2241 および JIS G 0567 に準拠し、温度 290℃の大気中で、ひずみ速度は $3 \times 10^{-4} \text{ s}$ とした。

(ii)結果

図 5.2.4-7 に引張試験前後の試験片の外観を示す。試験片は平行部内で破断していた。図 5.2.4-8 に応力-ひずみの関係と表 5.2.4-6 に引張試験の結果まとめを示す。また試験後の破面の SEM 観察結果を図 5.2.4-9(1)~(4)に示す。試験片破断部にはディンプル模様を呈する延性破面が観察された。

今回取得した SUS316L ミルアニール材とほぼ同等の条件で試験した溶体化熱処理(HT)材[5.2.4-1](試験片 ID A134)の応力-ひずみの関係を比較した結果を図 5.2.4-10 に示す。

ほぼ同条件で試験した溶体化(HT)材(A134)との比較に示す。本研究で取得したミルアニール材の 0.2%耐力は、同等の損傷量の HT 材に比べ 36 MPa 低い値であったが、引張強さや伸びに顕著な差は認められなかった。

表 5.2.4-5 JMTR における照射開始時の温度履歴が照射材特性に及ぼす影響評価試験マトリックス

鋼種	ID	照射量(E>1MeV)	引張試験	硬さ試験	組織観察	粒界分析	備考
SUS304	Z03	$6.3 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$				3	低フラックス照射材
SUS316L	B3	$5 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$				3	
SUS316L	E134	$5.18 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$	1	1	1	3	
SUS316L	B5	$2 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$				3	
SUS304	R331	$2.16 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$		1			

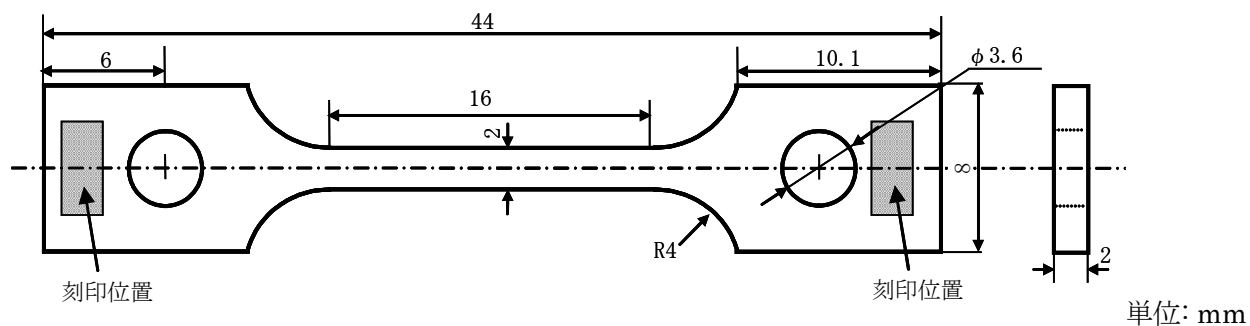


図 5.2.4-6 引張試験片形状図



試験前



試験後

図 5.2.4-7 290°C引張試験前後の試験片外観
(E134、SUS316L、0.86dpa、照射まま、290°C大気中、 3×10^{-4} /s)

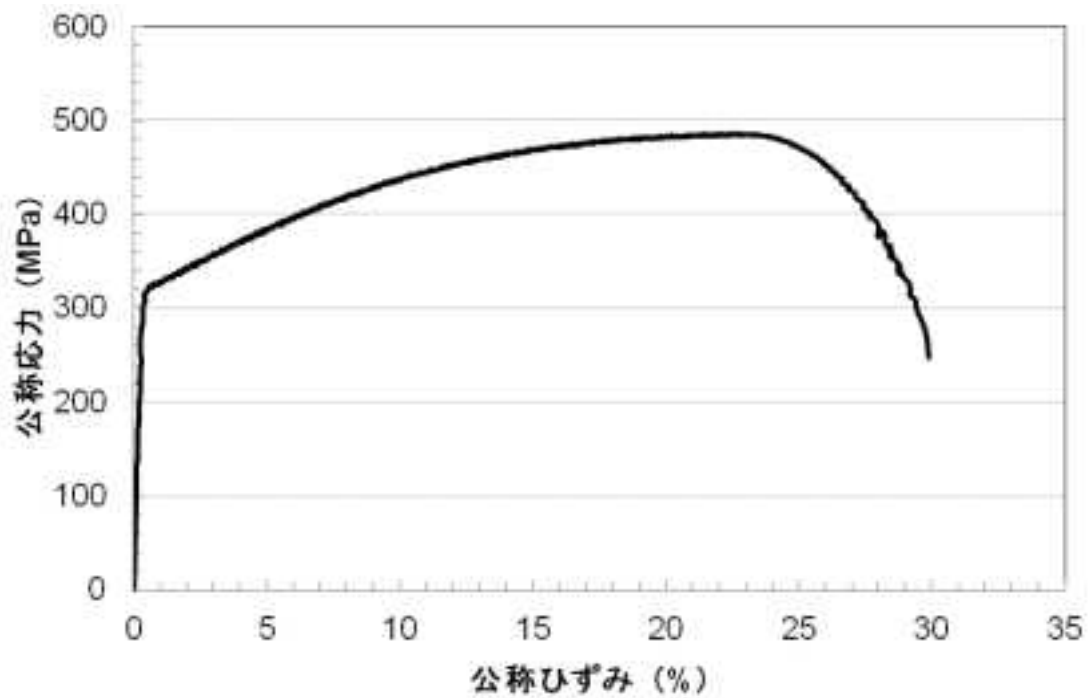


図 5.2.4-8 290°C引張試験の応力ひずみ曲線
(E134、SUS316L、0.86dpa、照射まま、290°C大気中、 3×10^{-4} /s)

表 5.2.4-6 SUS316L ミルアニール材(E134)の引張試験結果まとめ
(290℃大気中、ひずみ速度約 3×10^{-4} /s)

照射量(n/m ²) (E>1MeV)	損傷量 (dpa)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	破断伸び (%)	絞り (%)
5.18×10 ²⁴	0.86	319	486	22.1	29.6	64

伸びは伸び計変位より算出した

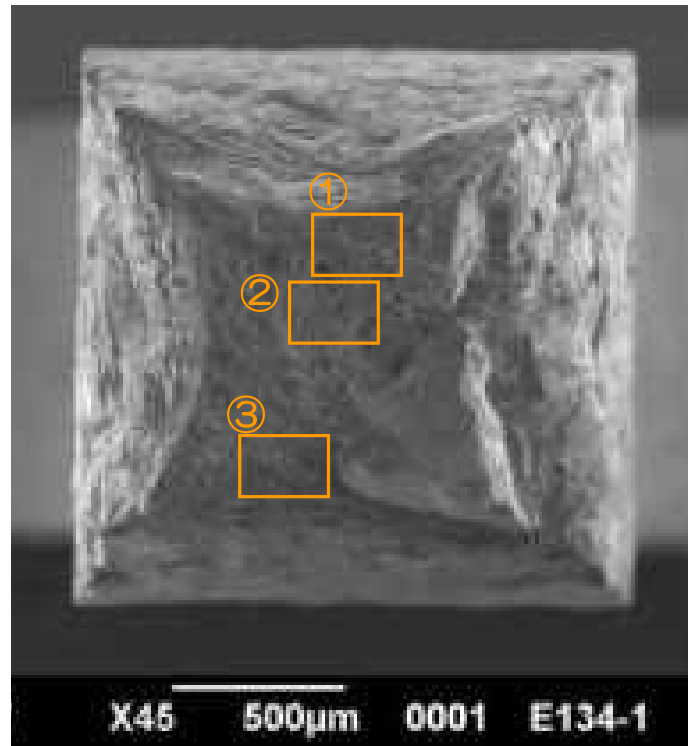


図 5.2.4-9(1) 引張試験後の試験片の破面 SEM 観察結果(全体)
 (E134、SUS316L、0.86dpa、照射まま 試験温度 290℃ ひずみ速度 $3 \times 10^{-4}/s$)

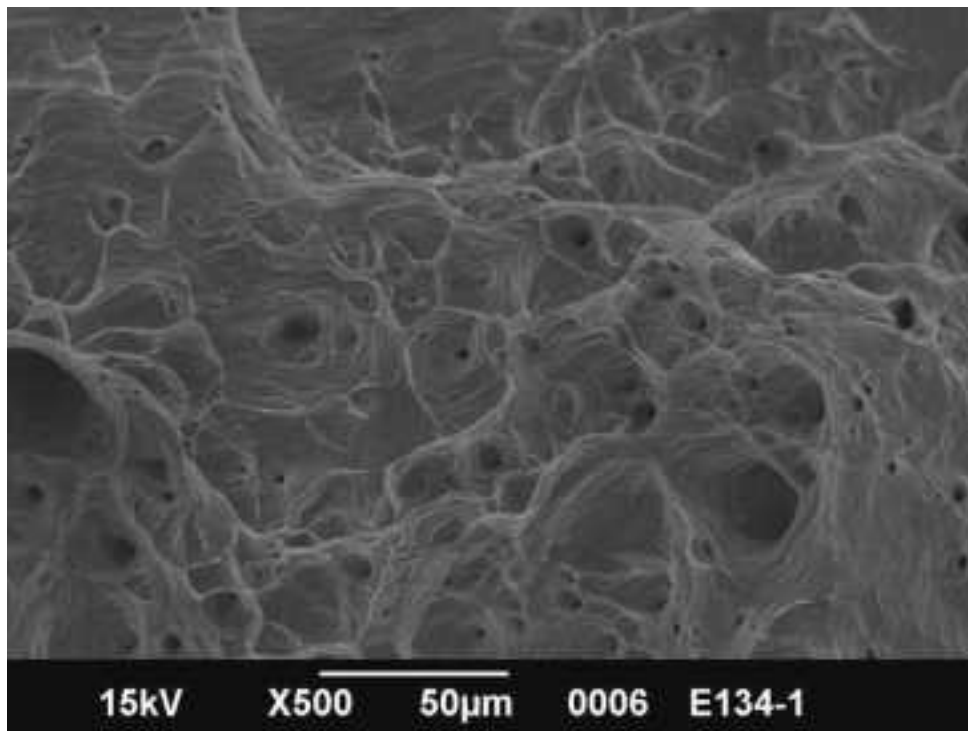


図 5.2.4-9(2) 引張試験後の試験片の破面 SEM 観察結果(全体)
 (E134、SUS316L、0.86dpa、照射まま 試験温度 290℃ ひずみ速度 $3 \times 10^{-4}/s$)

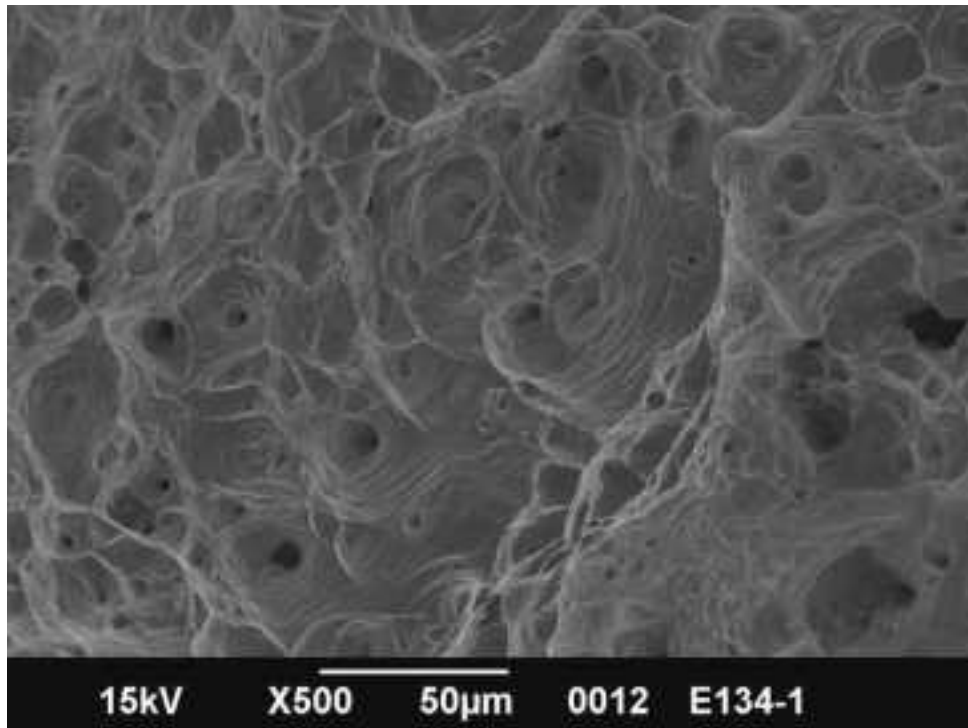


図 5.2.4-9(3) 引張試験後の試験片の破面 SEM 観察結果(全体)
(E134、SUS316L、0.86dpa、照射まま 試験温度 290℃ ひずみ速度 $3 \times 10^{-4}/s$)

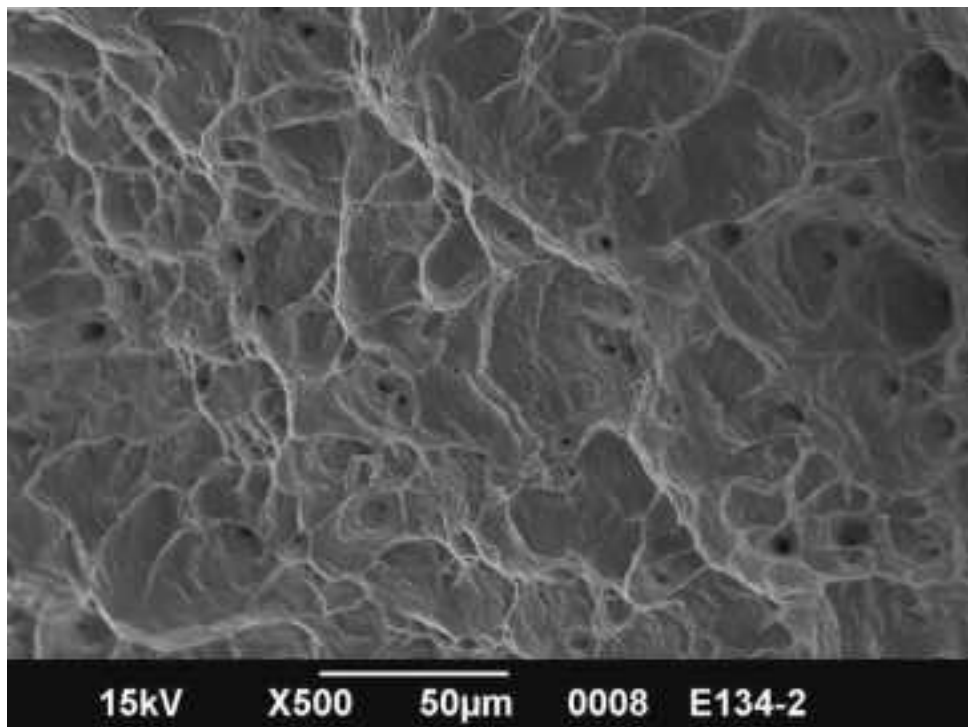


図 5.2.4-9(2) 引張試験後の試験片の破面 SEM 観察結果(全体)
(E134、SUS316L、0.86dpa、照射まま 試験温度 290℃ ひずみ速度 $3 \times 10^{-4}/s$)

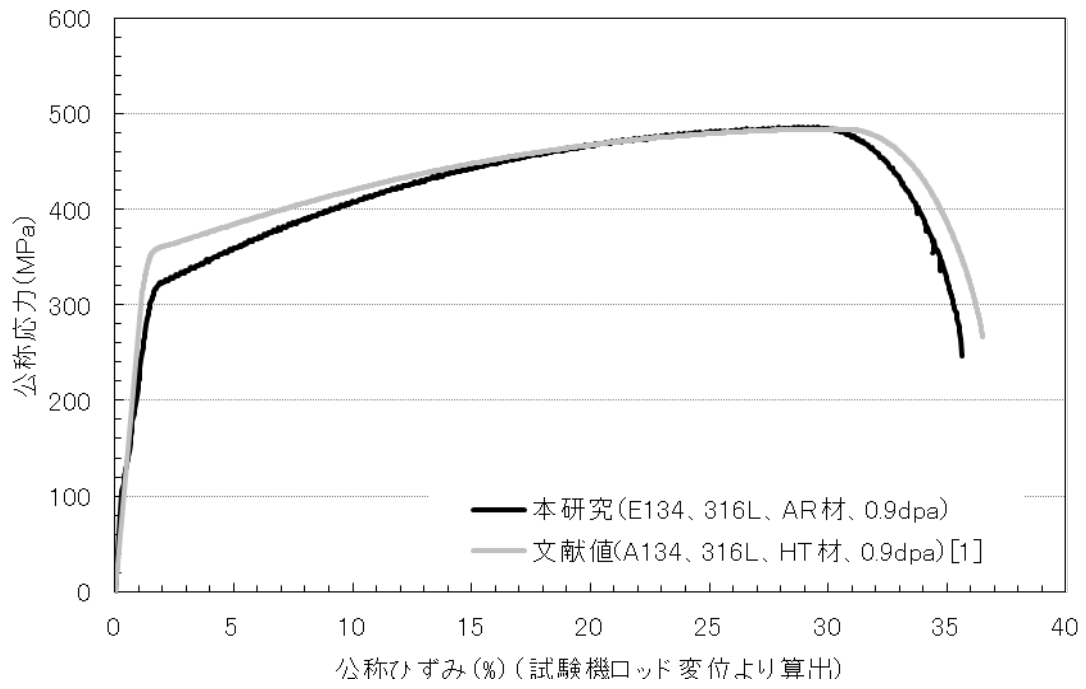


図 5.2.4-10 ほぼ同条件で試験した溶体化(HT)材(A134)との比較
(JNES IASCC 事業)[5.2.4-1]

b. ビッカース硬さ試験

(i) 実験方法

ビッカース硬さ試験には SUS316L のミルアニール(AR)材で中性子照射量 5.18×10^{24} n/m² (E>1MeV)(試験片 ID. E134)および SUS304 溶体化熱処理(HT)材で中性子照射量 2.16×10^{25} n/m²(E>1MeV)(試験片 ID. R331)を用いた。

前章に記載の硬さ試験片を用い、試験は、室温大気中で JIS Z 2244 に準拠し、試験力は 4.9 N(0.5 kgf)、保持時間 10 秒とし、10 点測定した。

(ii) 結果

硬さ測定結果を表 5.2.4-7 に示す。

今年度取得した結果を、昨年度までに取得した硬さ測定結果と既往のデータ[5.2.4-1]～[5.2.4-4]と比較した結果を図 5.2.4-11 に示す。SUS316L ミルアニール材(試験片 ID. E134)は既往のデータに比べてやや低い値となった。一方 SUS304 溶体化材(試験片 ID. R331)の硬さは、既往データとほぼ同等な値であることが判った。

表 5.2.4-7 硬さ測定結果(試験力 4.9N)

試験片 ID	E134	R331
損傷量(dpa)	0.86	3.6
測定No	1	220
	2	203
	3	205
	4	196
	5	219
	6	220
	7	224
	8	220
	9	217
	10	215
	平均	214

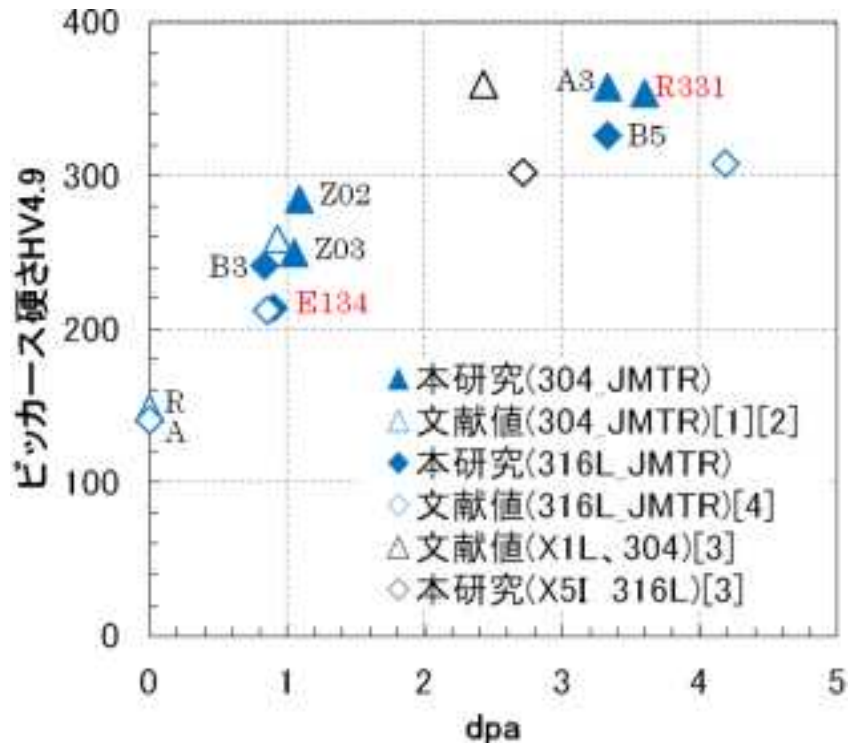


図 5.2.4-11 昨年度までに取得した既往データとの比較[5.2.4-1]~[5.2.4-4]

c. ミクロ組織観察

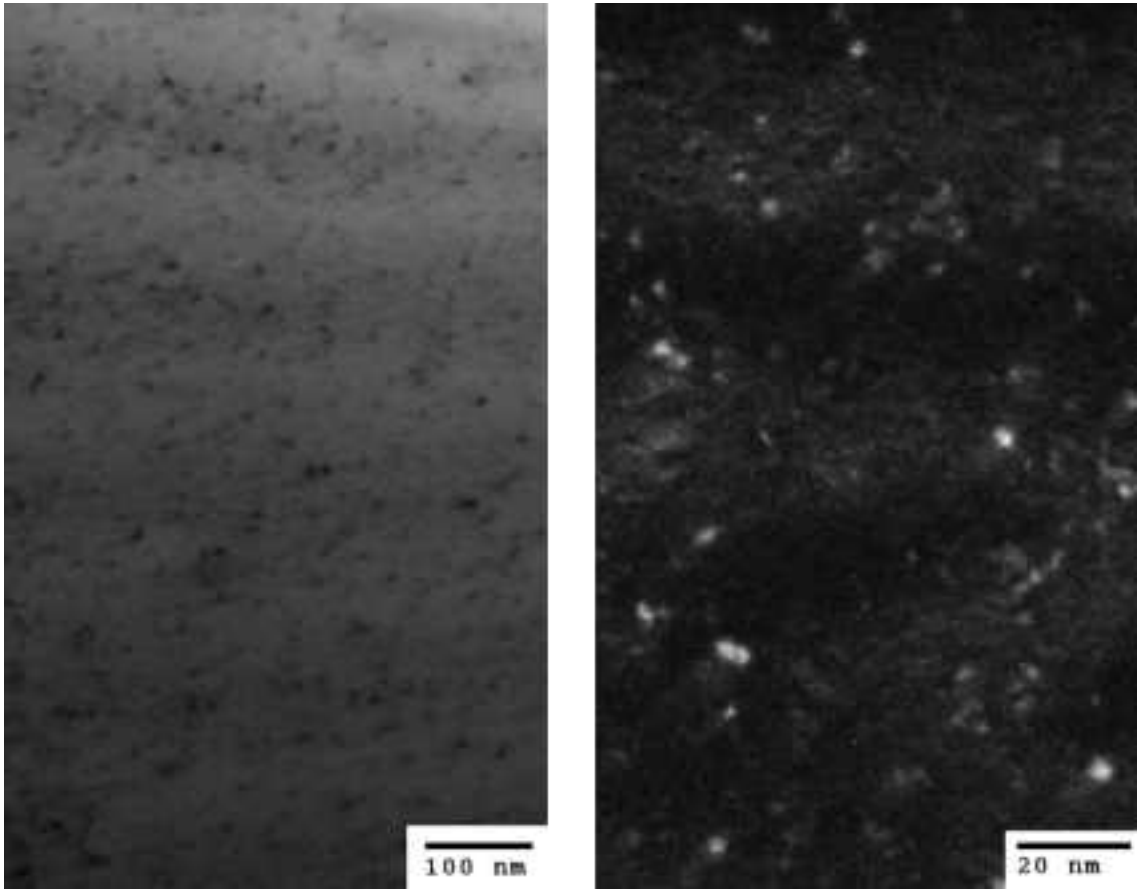
(i) 実験方法

ミクロ組織観察には SUS316L ミルアニール(AR)材で中性子照射量 $5.18 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)(試験片 ID. E134)の照射材を用いた。

ミクロ組織観察には FE-TEM(電解放出型透過電子顕微鏡)を用いた。ドット状欠陥および完全転位ループに対してはウィークビーム法を採用し、観察条件は入射方位 $Z = \langle 001 \rangle$ 、 $g = \{200\}$ 、 $g/3g$ とした。フランクループに対しては、観察条件は入射方位 $Z = \langle 011 \rangle$ 、 $g = \{311\}$ とし、 $\{111\}$ スポットから生じるストリークから結像した暗視野像で観察した。

(ii) 結果

図 5.2.4-12 に試験片 ID. E134 のミクロ組織観察結果を示す。照射により形成されたと考えられるドット状欠陥が多数観察された。一部、完全転位ループとみられるひずみ場が観察されたが、サイズが小さく、ドット状欠陥との分離は困難であった。また、フランクループ、析出物およびキャビティは観察されなかった。図 5.2.4-13 にドット状欠陥のサイズ分布を、表 5.2.4-8 に平均サイズおよび数密度をそれぞれ示す。欠陥のサイズは $1 \sim 9 \text{ nm}$ の範囲に分布しており、その平均値は 3.3 nm であった。また、その数密度は $1.0 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$ であった。



(a) 明視野像

(b) ウィークビーム暗視野像

図 5.2.4-12 試験片 ID. E134 のマイクロ組織観察結果

(a) 明視野像($z \parallel \langle 001 \rangle$ 、 $g = \{002\}$ 、 $s > 0$)

(b) ウィークビーム暗視野像($z \parallel \langle 001 \rangle$ 、 $g = \{002\}$ 、 $g/3g$)

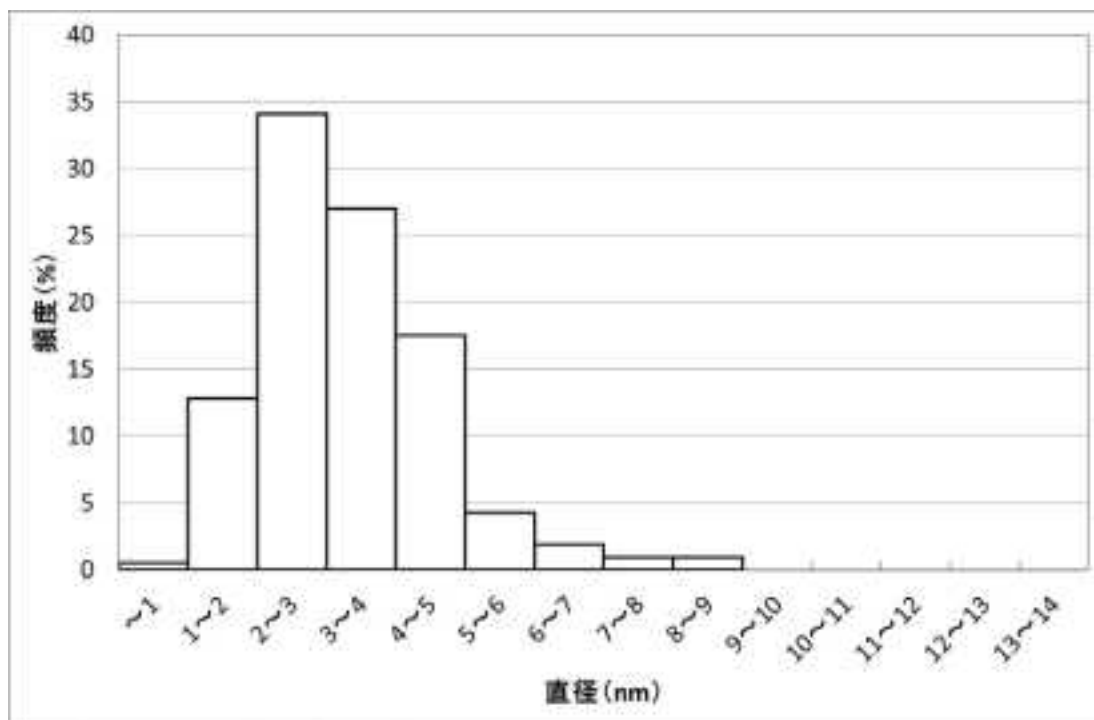


図 5.2.4-13 ドット状欠陥のサイズ分布

表 5.2.4-8 照射欠陥の数密度および平均サイズ(試験片 ID : 試験片 ID. E134)

	ドット状欠陥	フランクグループ
数密度	$1.0 \times 10^{23} \text{ m}^{-3}$	-
平均サイズ	3.3 nm	-

d. 粒界分析

(i) 実験方法

粒界分析には、以下の4種類の照射材を用いた。

- ・試験片 ID. Z03 SUS304 溶体化材
中性子照射量 $6.3 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$) (低フラックス照射)
- ・試験片 ID. E134 SUS316L ミルアニール(AR)材
中性子照射量 $5.18 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)
- ・試験片 ID. B3 SUS316L
中性子照射量 $5 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$) (Conventional 照射)
- ・試験片 ID. B5 SUS316L
中性子照射量 $2 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$) (Conventional 照射)

粒界分析にはFE-TEM(電界放出型透過電子顕微鏡)および付属のEDS(エネルギー分散型X線分析装置)を用い、粒界近傍の元素濃度を分析した。分析対象元素は、Fe、Cr、Ni、Si、P、Moの6元素(試験片ID. Z03はSUS304のためMoを除く5元素)とし、測定位置は、粒界上で3点、粒界から ± 1 、 ± 2 、 ± 3 、 ± 4 、 ± 5 、 ± 10 、 ± 15 、 ± 20 、 $\pm 50 \text{ nm}$ の位置で各1点とした。上記の測定位置において3粒界の分析を実施した。分析対象とした粒界は、電子線回折により両側の結晶粒の方位を確認し、双晶粒界等の粒界エネルギーの小さい粒界を避けて分析した。

(ii) 結果

(ア) 試験片 ID. Z03(SUS304、 $6.3 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)) (低フラックス照射)

分析を行った粒界の明視野像を図 5.2.4-14 に示す。いずれの粒界においても、粒界上に析出物は観察されなかった。分析結果を図 5.2.4-15 図 2.3(4)-2 に示す。ここでは、分析対象元素のうちCr、Ni、Si、Pのプロファイルを示した。Niについては、いずれの粒界においても濃縮が認められ、また、粒界近傍の \pm 数 nm の範囲において顕著な濃度変化が認められた。Crについては、粒界上では顕著な濃度変化は認められなかったが、粒界近傍の \pm 数 nm の範囲において、若干の濃度変化が認められた。

(イ) 試験片 ID. E134(SUS316L、ミルアニール材、 $5.18 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$))

分析を行った粒界の明視野像を図 5.2.4-16 図 2.3(4)-3 に示す。いずれの粒界においても、粒界上に析出物は観察されなかった。分析結果を図 5.2.4-17 に示す。ここでは、分析対象元素のうちCr、Ni、Si、P、Moのプロファイルを示した。粒界1および粒界3でNiの濃縮が認められ、粒界2でもわずかに認められた。Crについては、いずれの分析粒界においても粒界上での顕著な濃度変化は認められなかった。

(ウ) 試験片 ID. B3(SUS316L、 5×10^{24} n/m²(E>1MeV))

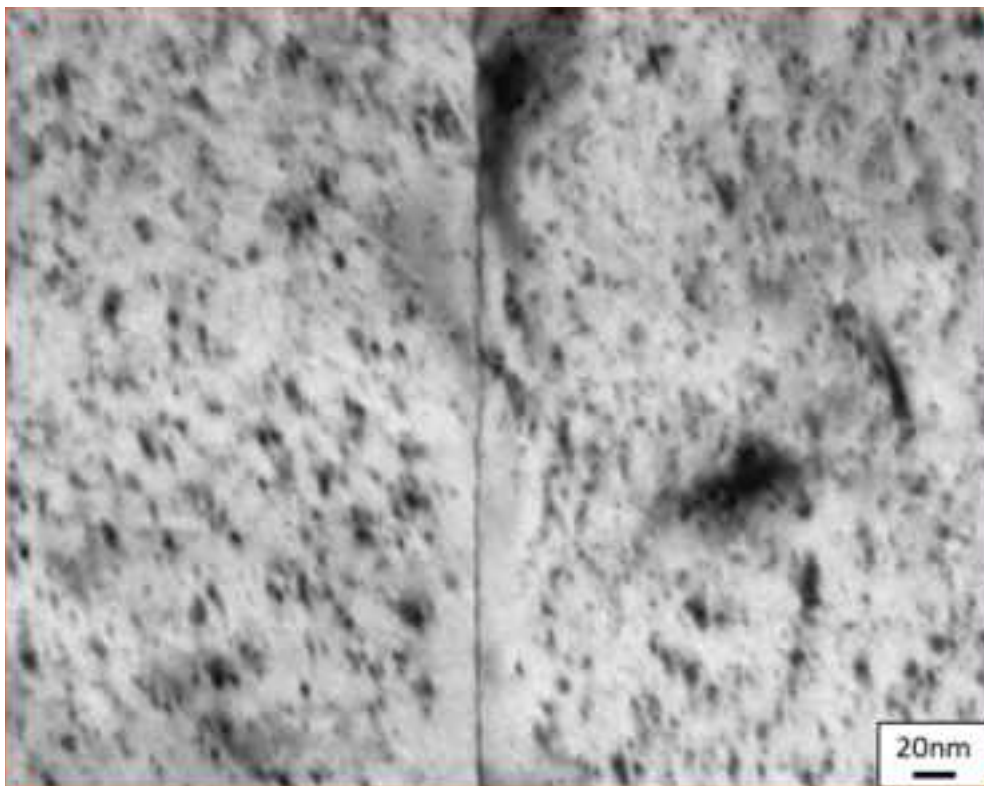
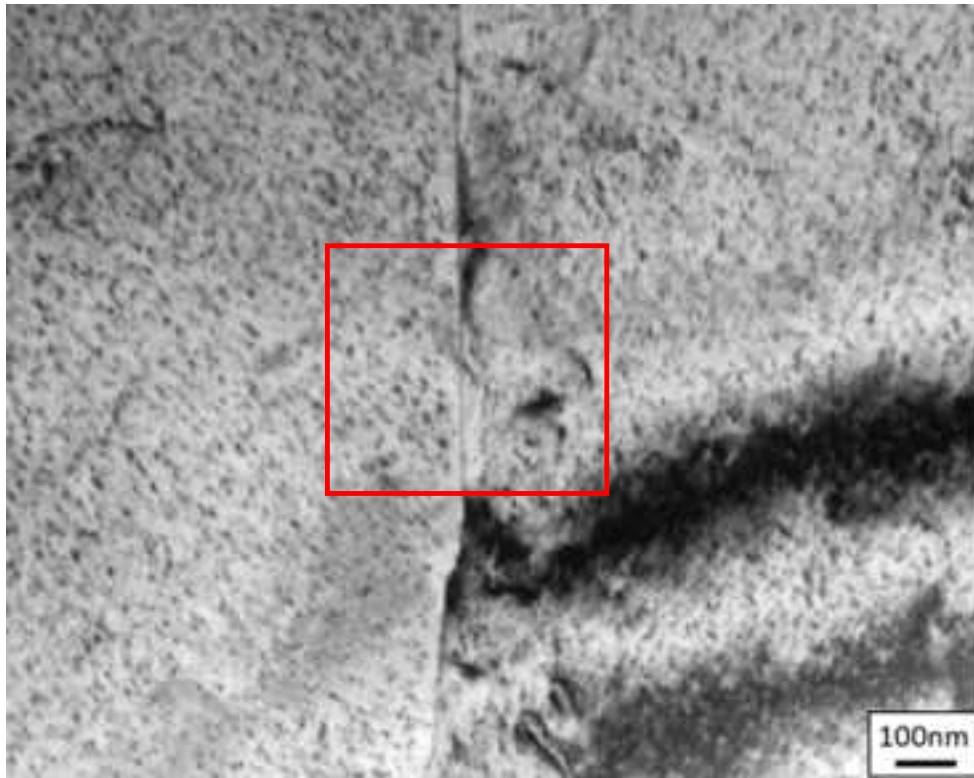
分析を行った 3 粒界の明視野像を図 5.2.4-18 図 2.3(4)-5 に示す。いずれの粒界においても、粒界上に析出物は観察されなかった。3 粒界の分析結果を図 5.2.4-19 に示す。ここでは、分析対象元素のうち Cr、Ni、Si、P、Mo のプロファイルを示した。粒界 3 で Ni の濃縮が認められ、粒界 1 でもわずかに認められた。Cr については、いずれの分析粒界においても粒界上での顕著な濃度変化は認められなかった。

(エ) 試験片 ID. B5(SUS316L、 2×10^{25} n/m²(E>1MeV))

分析を行った粒界の明視野像を図 5.2.4-20 に示す。いずれの粒界においても、粒界上に析出物は観察されなかった。分析結果を図 5.2.4-21 に示す。ここでは、分析対象元素のうち Cr、Ni、Si、P、Mo のプロファイルを示した。いずれの粒界においても、Cr の欠乏、Ni の濃縮および Mo の欠乏が認められた。また、粒界近傍の±数 nm の範囲において Cr の濃縮、Ni の欠乏および Mo の濃縮が認められた。

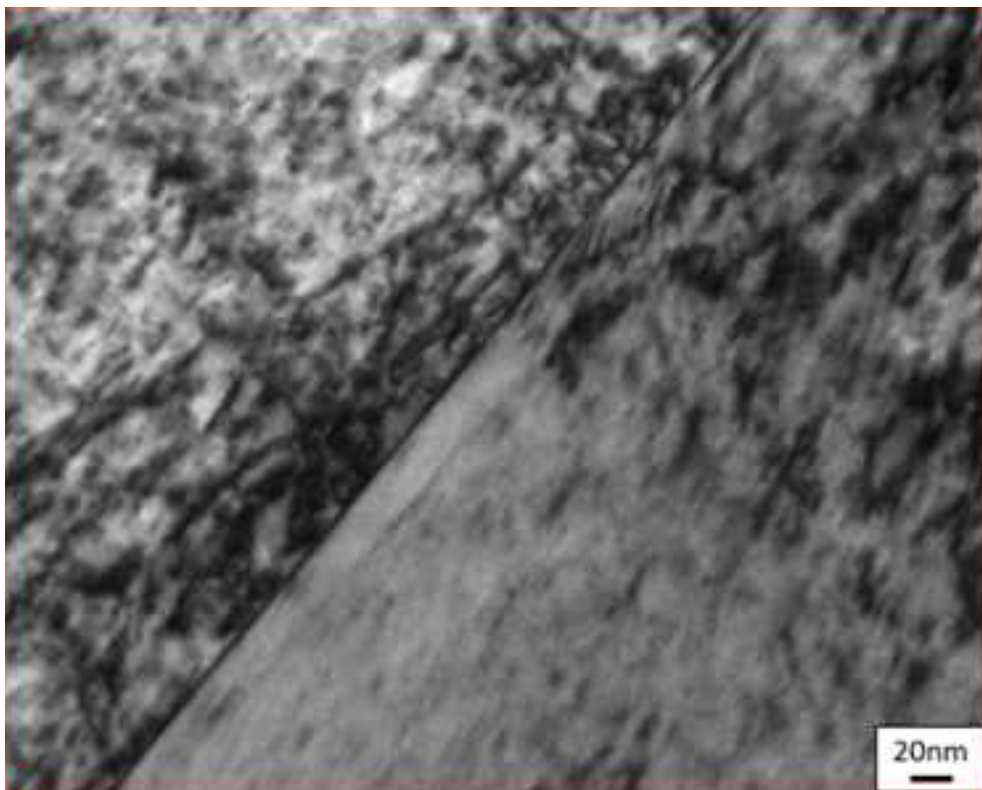
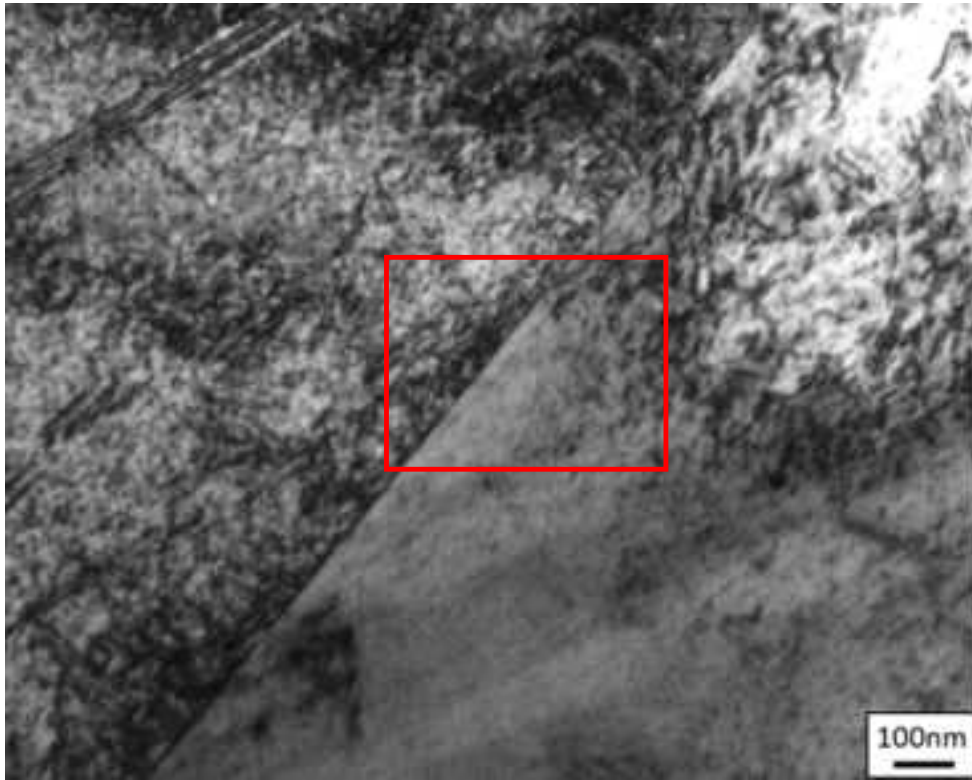
(オ) 結果の比較

表 5.2.4-9 にそれぞれの試験片について、各分析粒界における粒界偏析量を示す。本研究では、粒界分析により得られたプロファイルより、粒界上 3 点の平均値を粒界濃度とし、粒界から±20 nm と±50 nm 離れた 4 点の平均値を母相濃度として、その差(粒界濃度－母相濃度)を粒界偏析量と定義した。粒界偏析量と損傷量の関係を図 5.2.4-22 に示す。鋼種の影響を排除するため SUS316L のみとした。いずれの元素も Conventional 照射と Improved 照射で明確な違いは認められなかった。



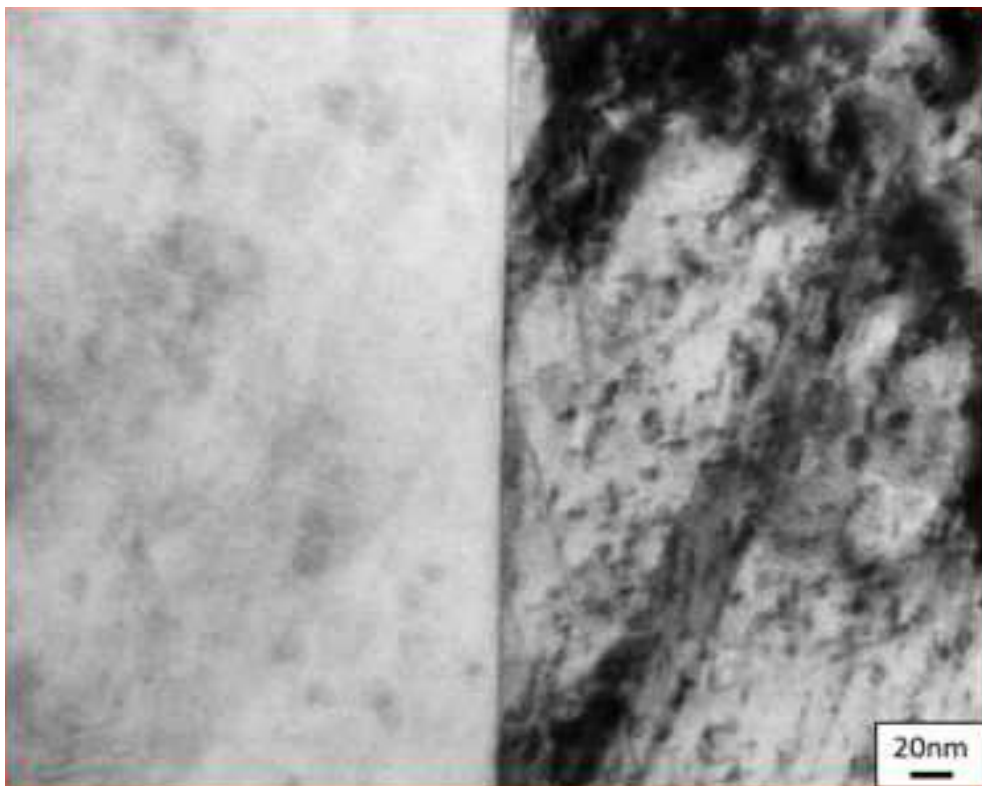
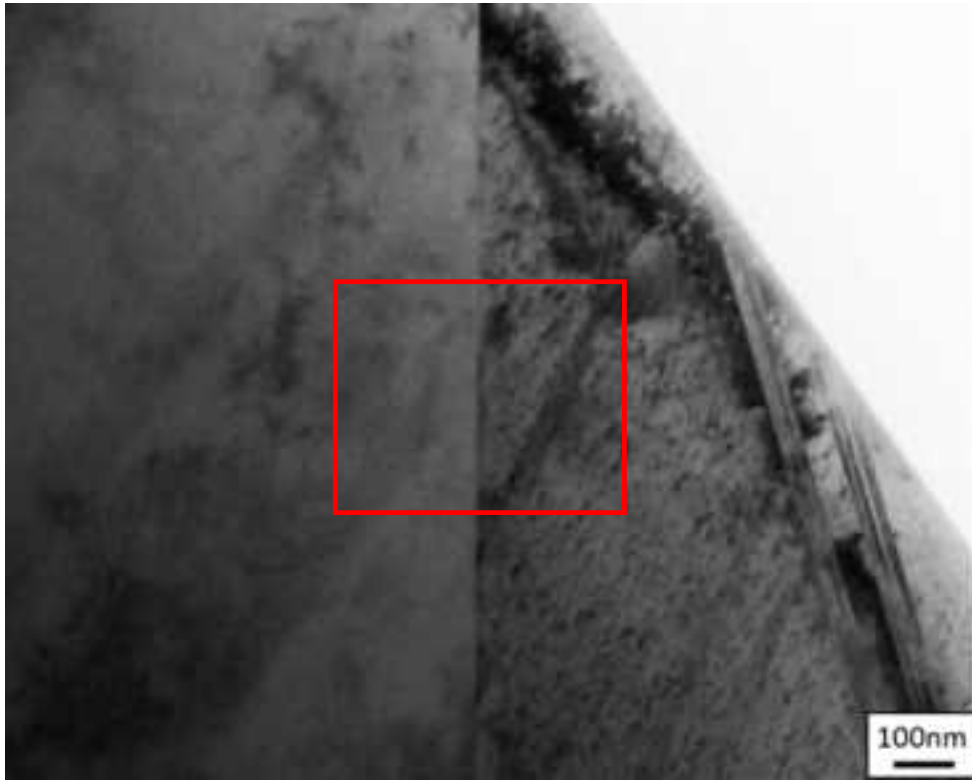
(a) 粒界 1

図 5.2.4-14(1) 分析した粒界の明視野像(試験片 ID. Z03)



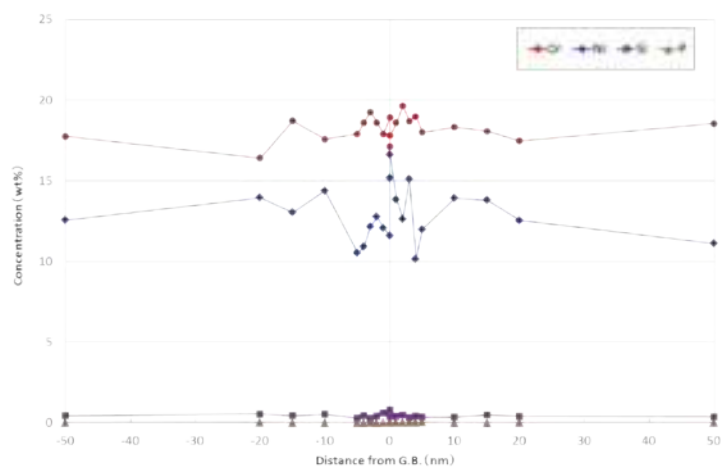
(b) 粒界 2

図 5.2.4-14(2) 分析した粒界の明視野像(試験片 ID. Z03)

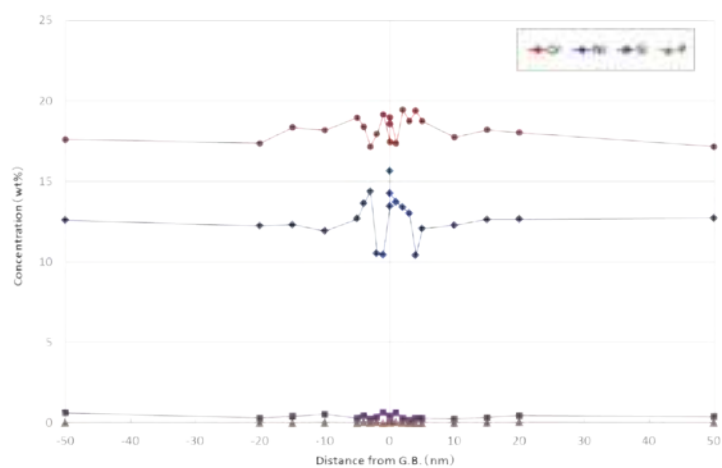


(c) 粒界 3

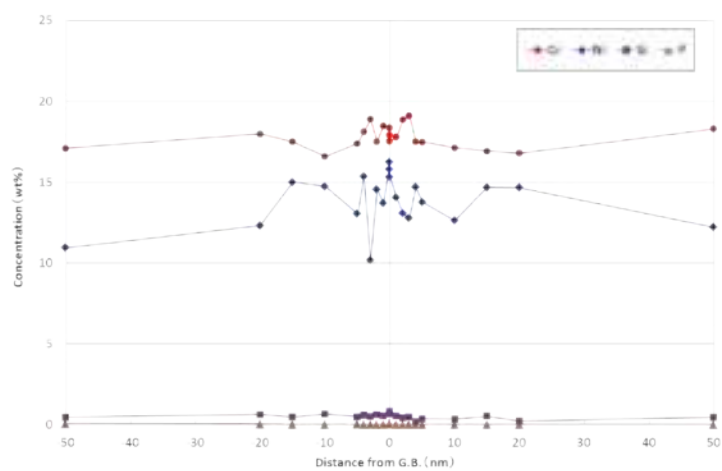
図 5.2.4-14(3) 分析した粒界の明視野像(試験片 ID. Z03)



(a) 粒界 1



(b) 粒界 2



(c) 粒界 3

図 5.2.4-15 粒界から ± 50 nm の範囲における各元素の濃度プロファイル(試験片 ID. Z03)

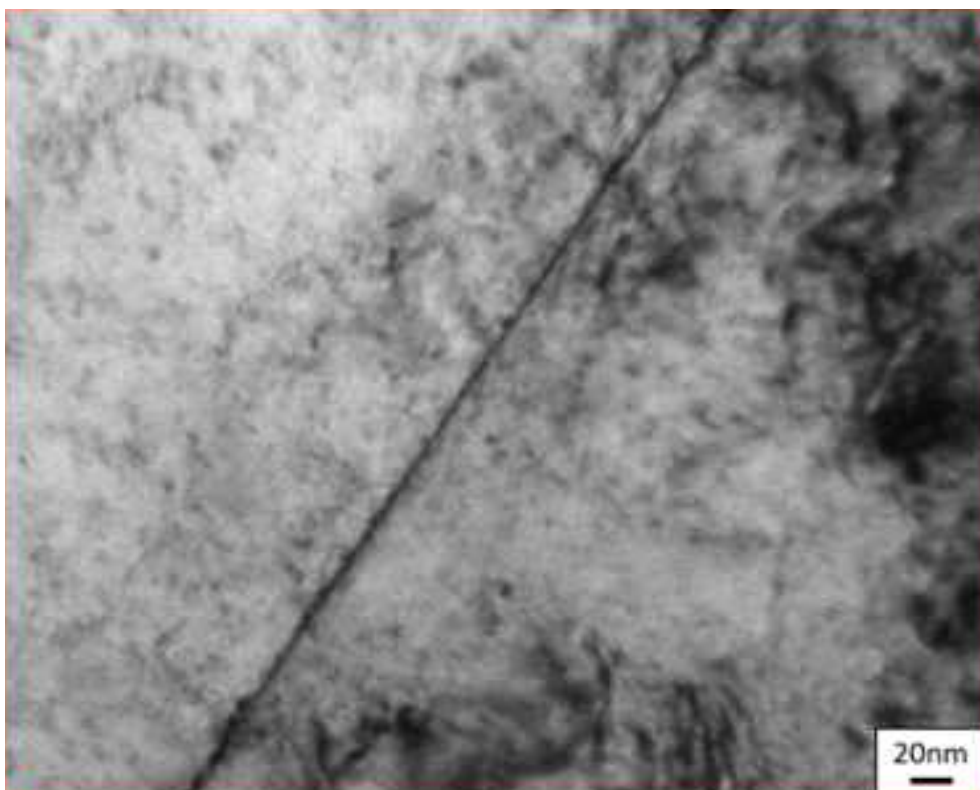
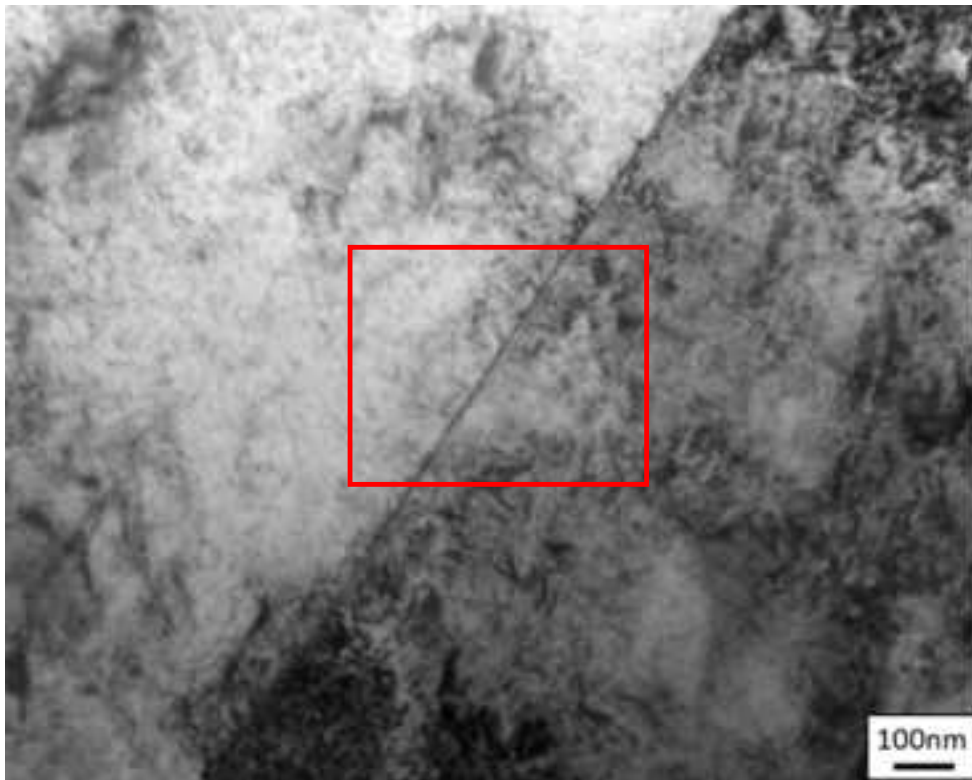


図 5.2.4-16(1) 分析した粒界の明視野像(試験片 ID. E134、粒界 1)(1/3)

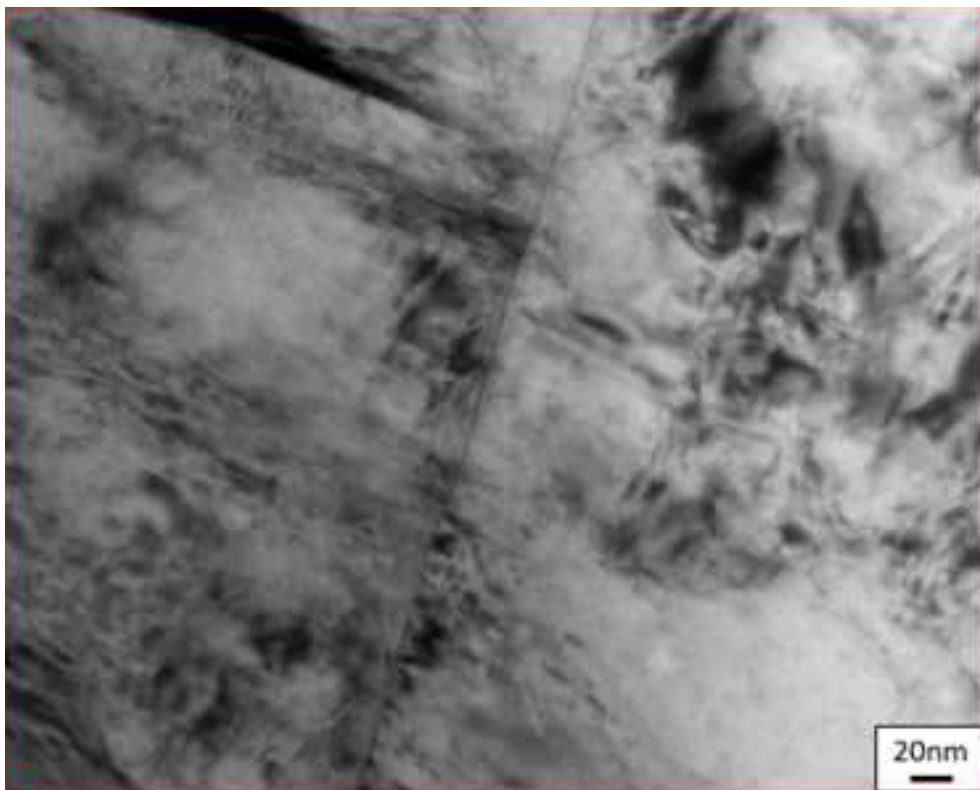
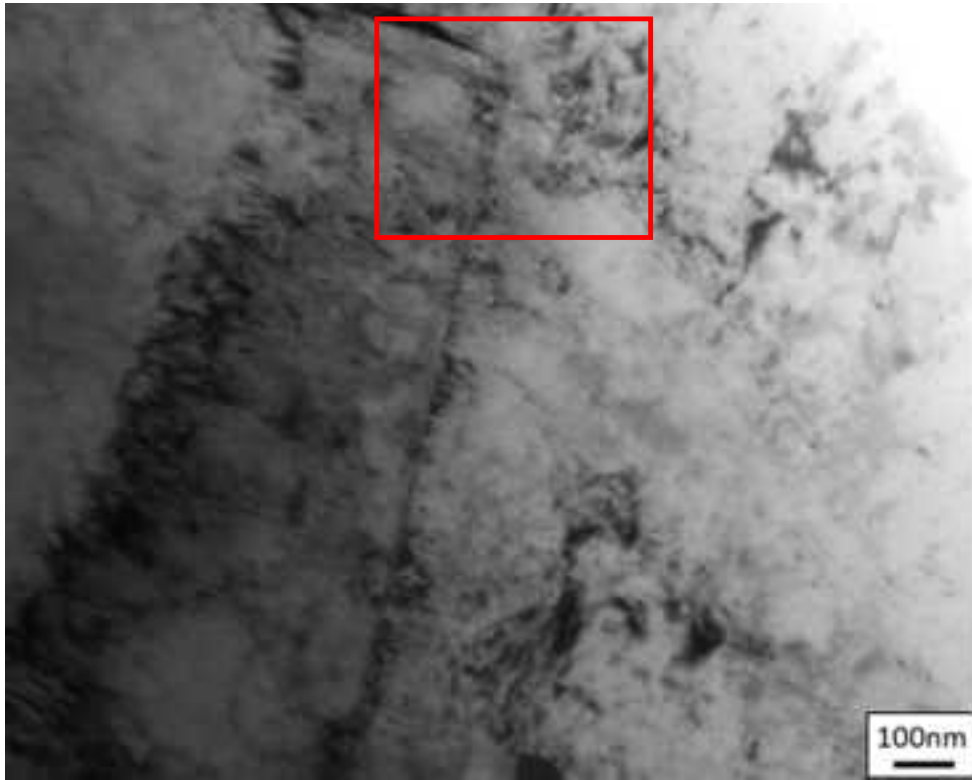


図 5.2.4-16(2) 分析した粒界の明視野像(試験片 ID. E134、粒界 2)(2/3)

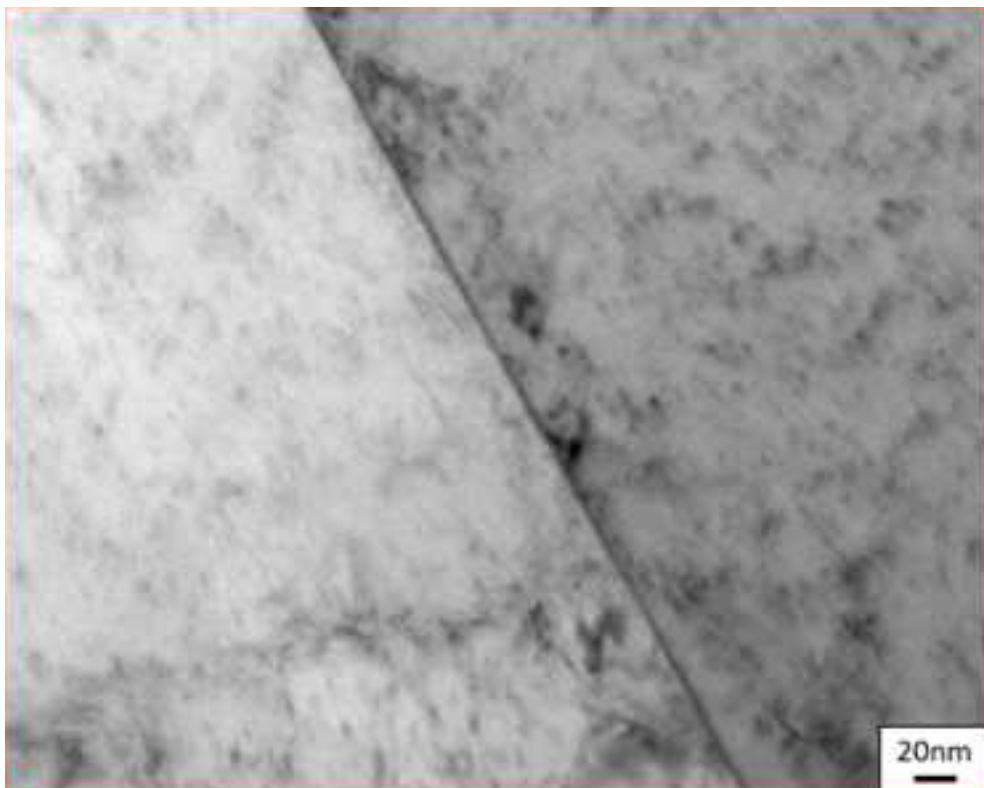
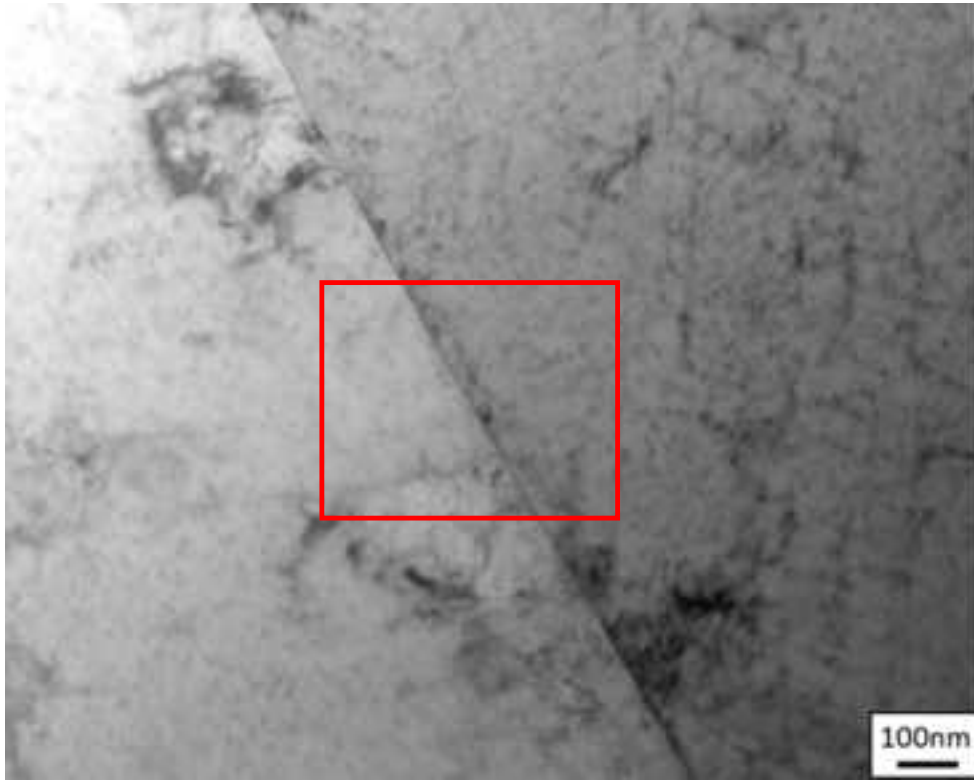
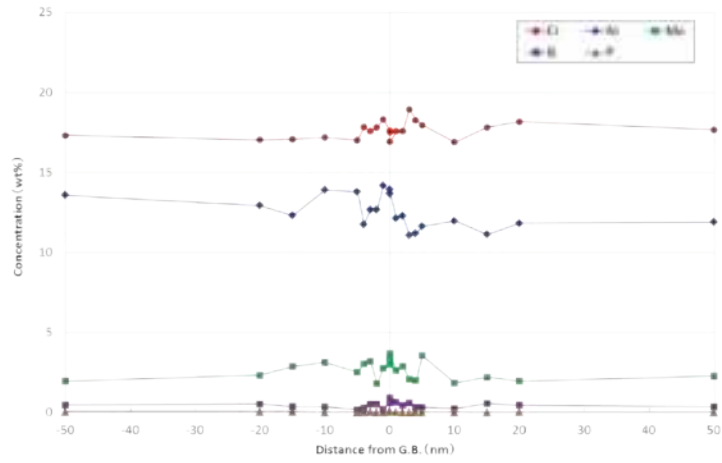
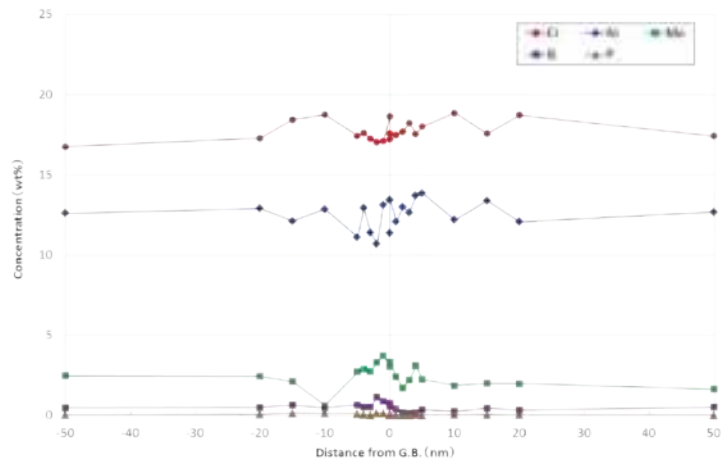


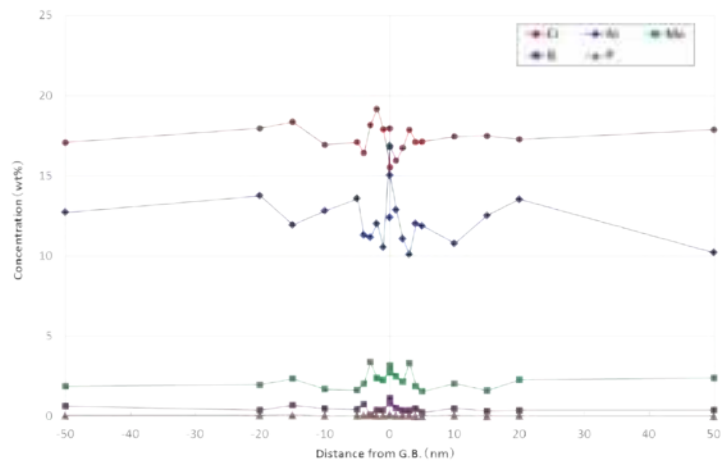
図 5.2.4-16(3) 分析した粒界の明視野像(試験片 ID. E134、粒界 3)(3/3)



(1)粒界 1

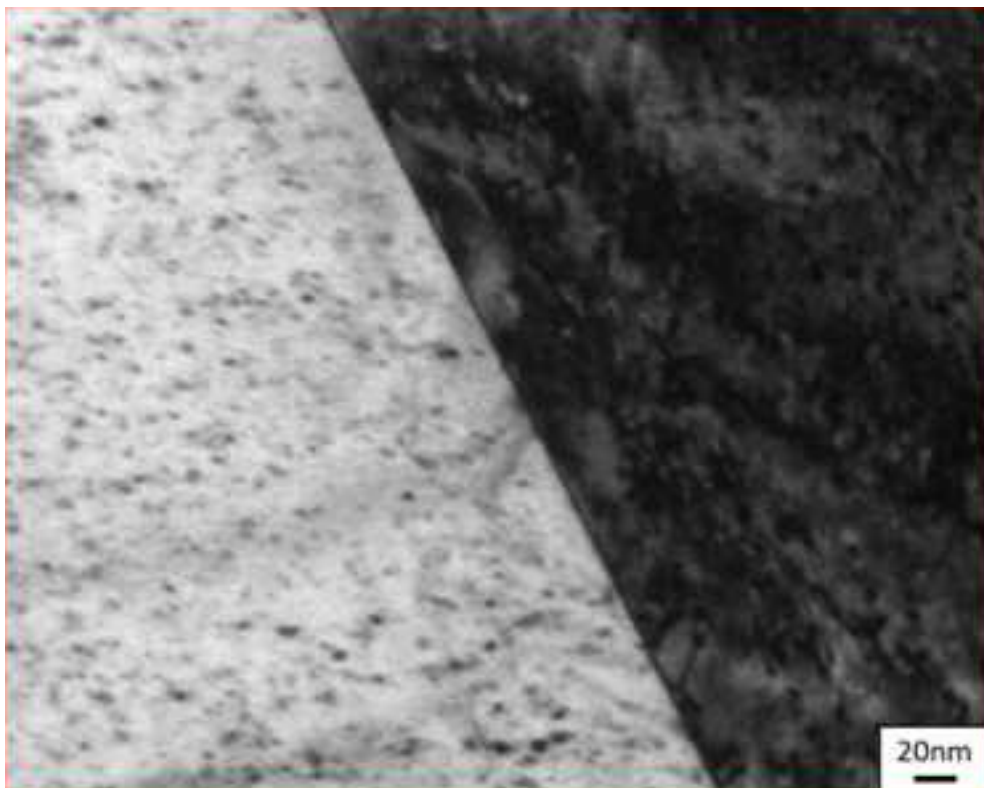
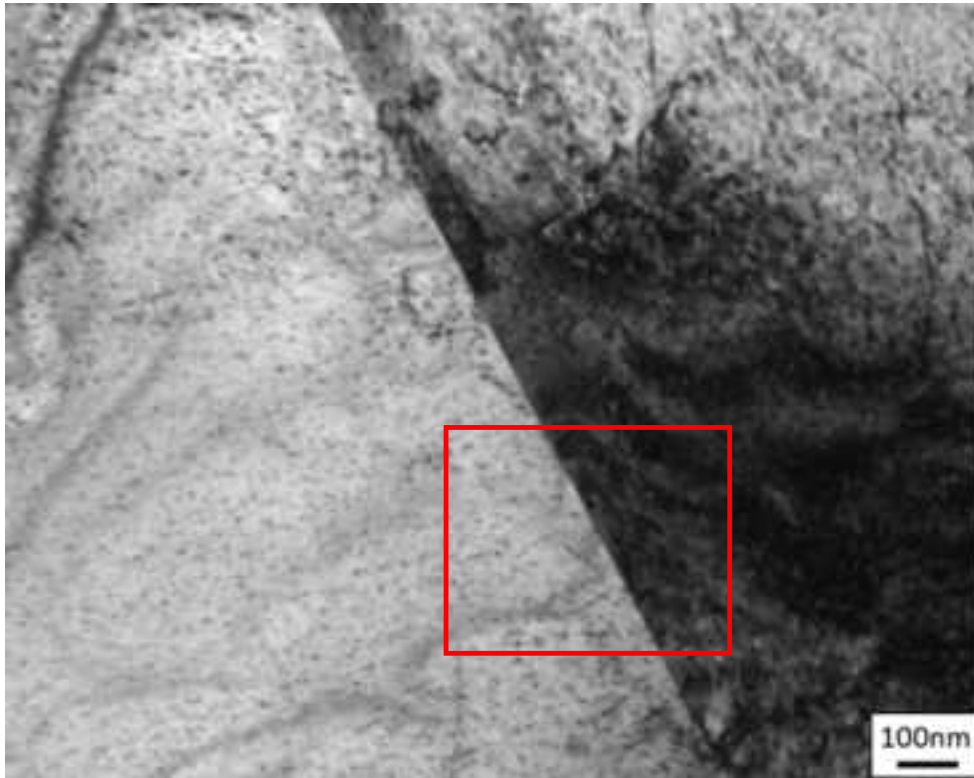


(2)粒界 2



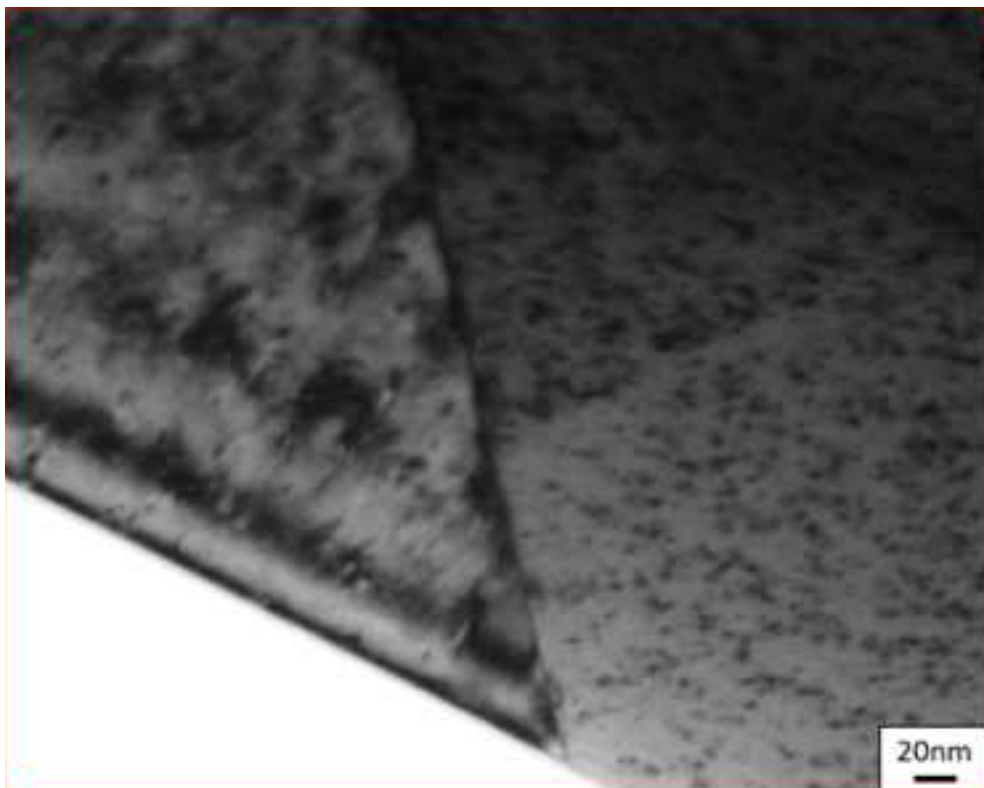
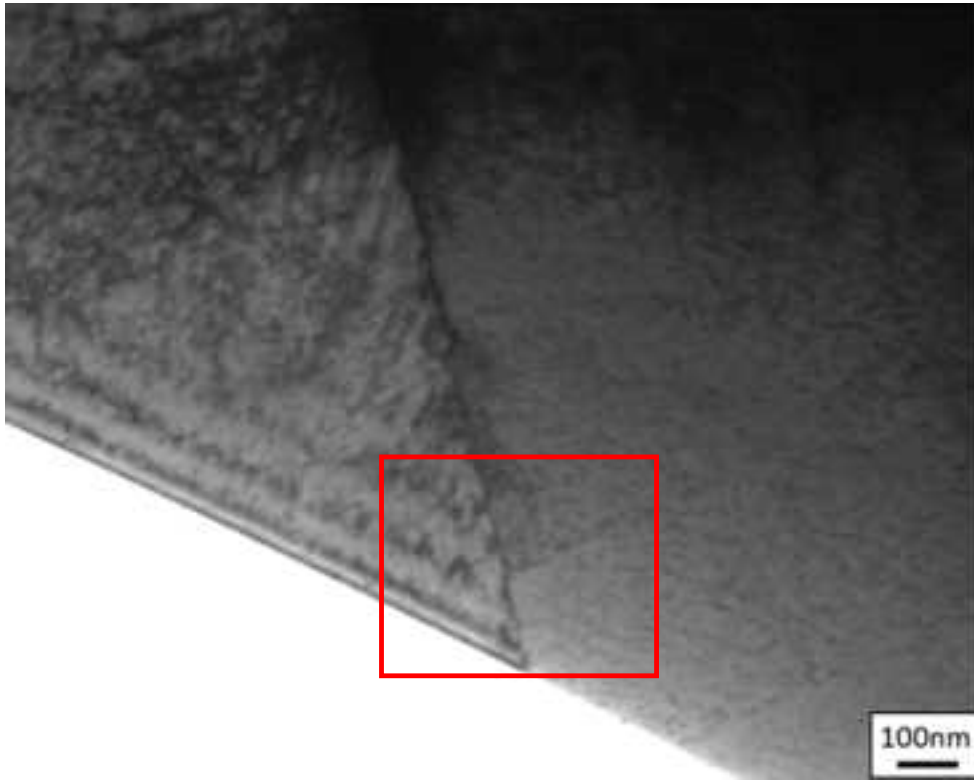
(3)粒界 3

図 5.2.4-17 粒界から±50 nm の範囲における各元素の濃度プロファイル
(試験片 ID. E134)



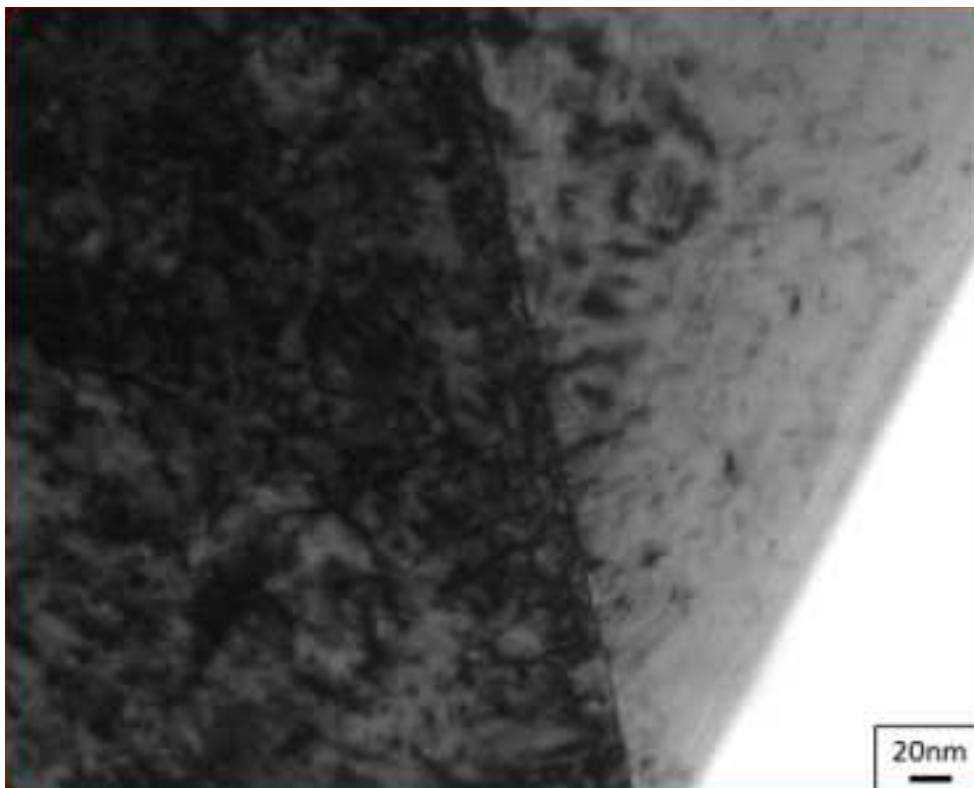
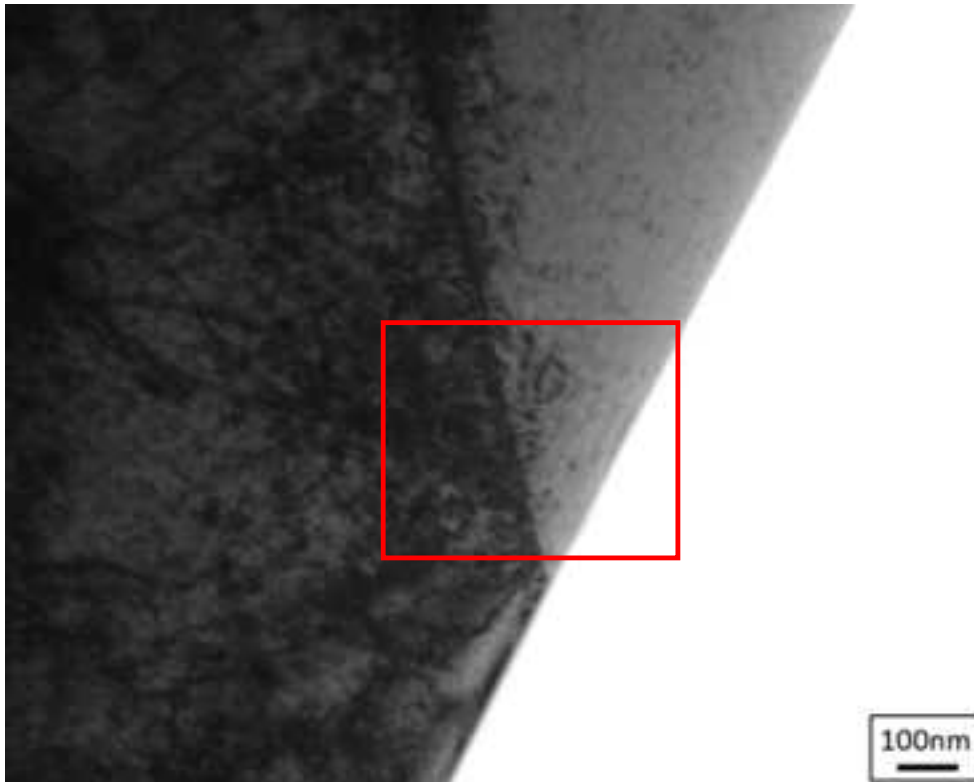
(a) 粒界 1

図 5.2.4-18(1) 分析した粒界の明視野像(試験片 ID. B3)(1/3)



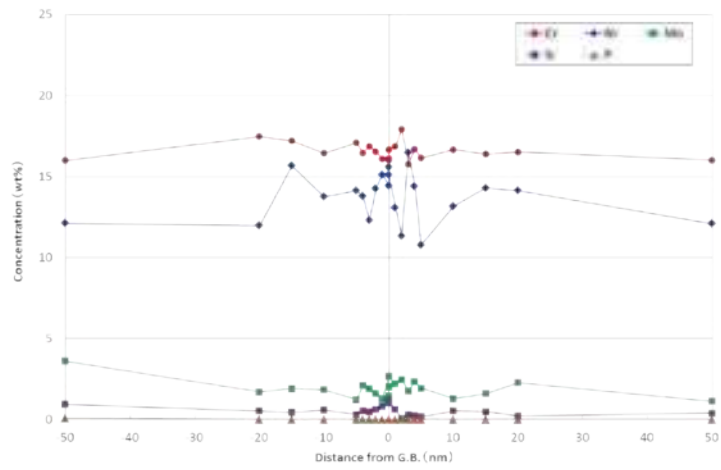
(b) 粒界 2

図 5.2.4-18(2) 分析した粒界の明視野像(試験片 ID. B3)(2/3)

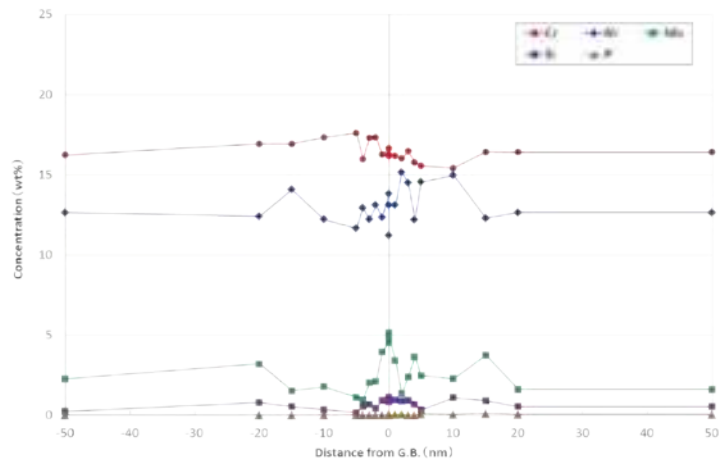


(c) 粒界 3

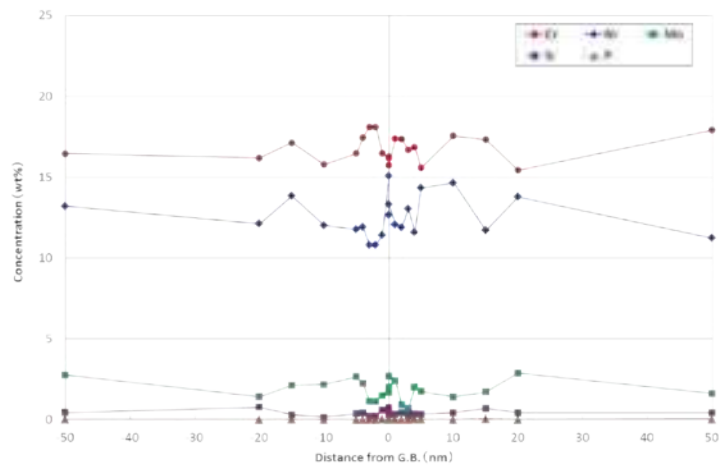
図 5.2.4-18(2) 分析した粒界の明視野像(試験片 ID. B3)(3/3)



(a) 粒界 1

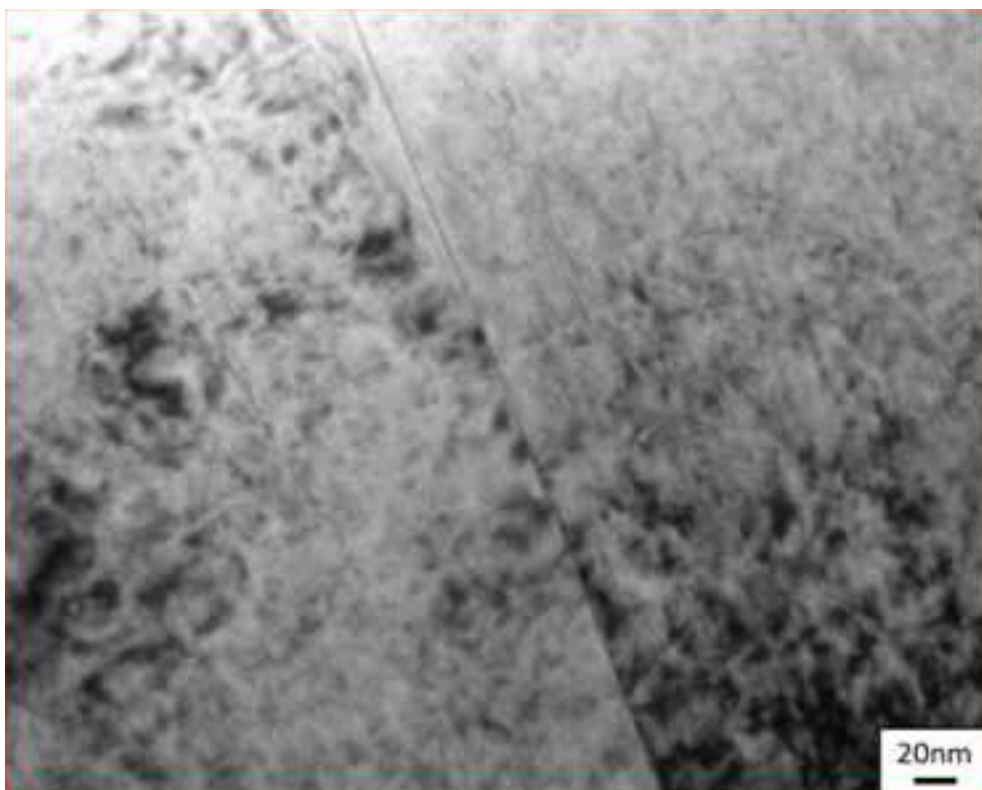
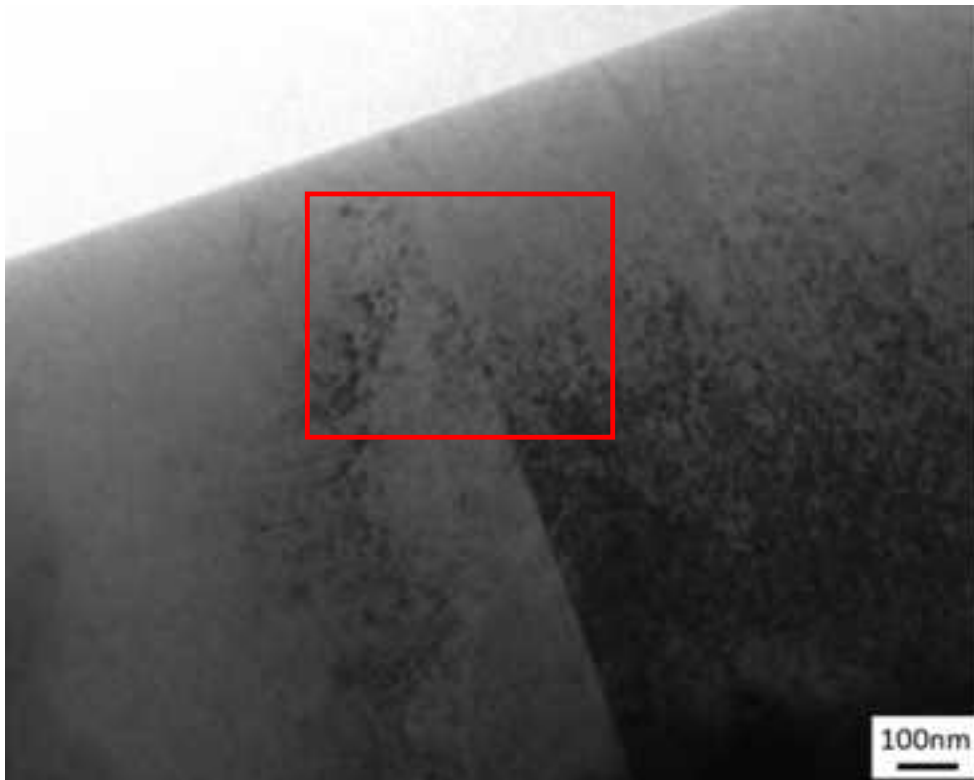


(b) 粒界 2



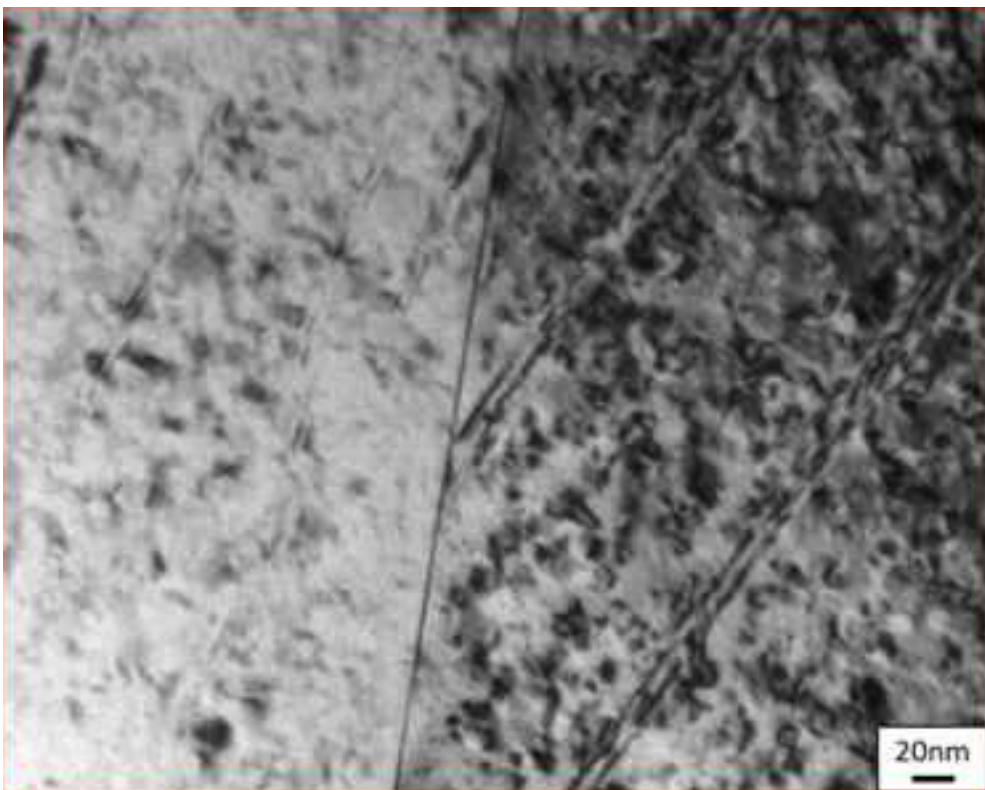
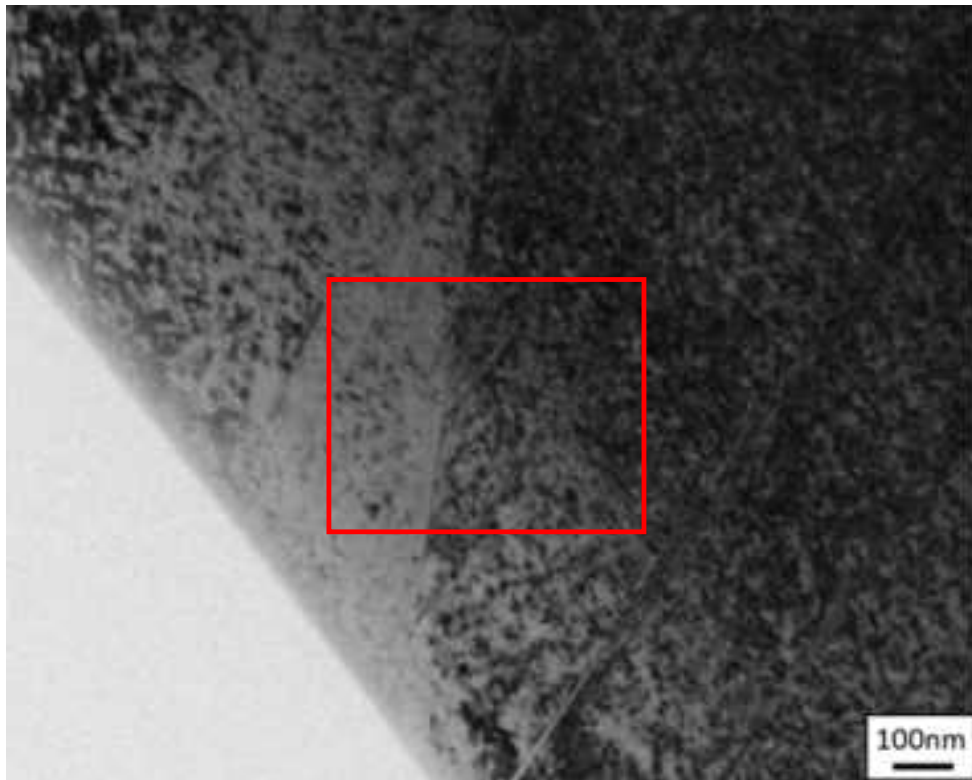
(c) 粒界 3

図 5.2.4-19 粒界から ± 50 nm の範囲における各元素の濃度プロファイル(試験片 ID. B3)



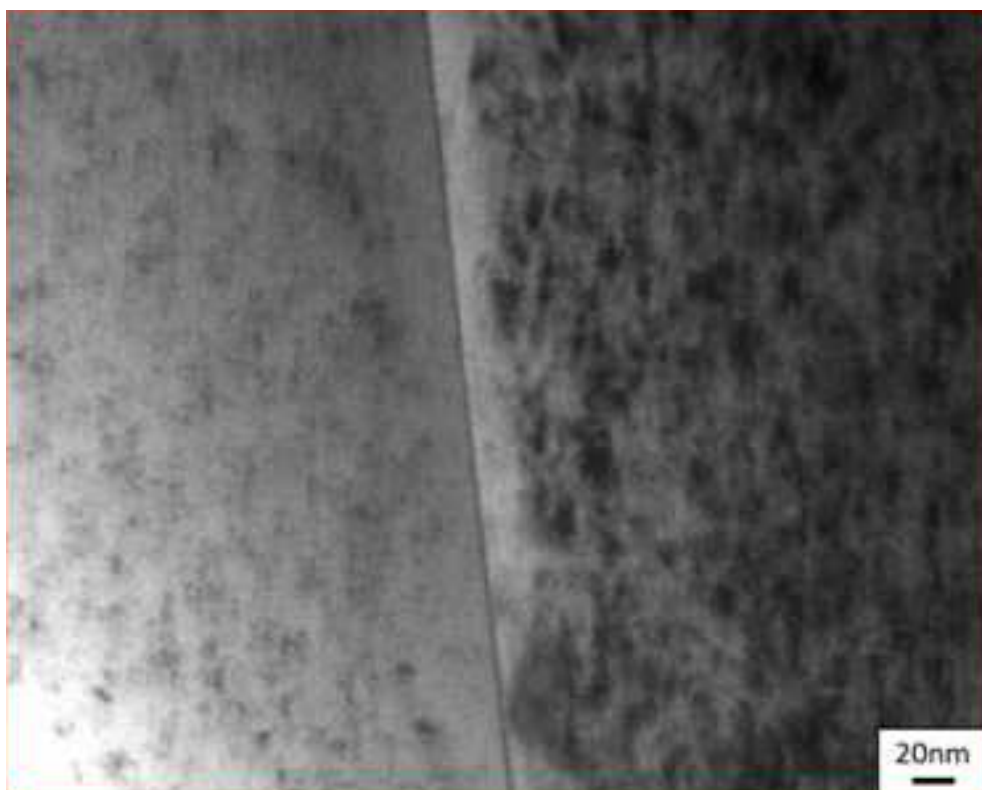
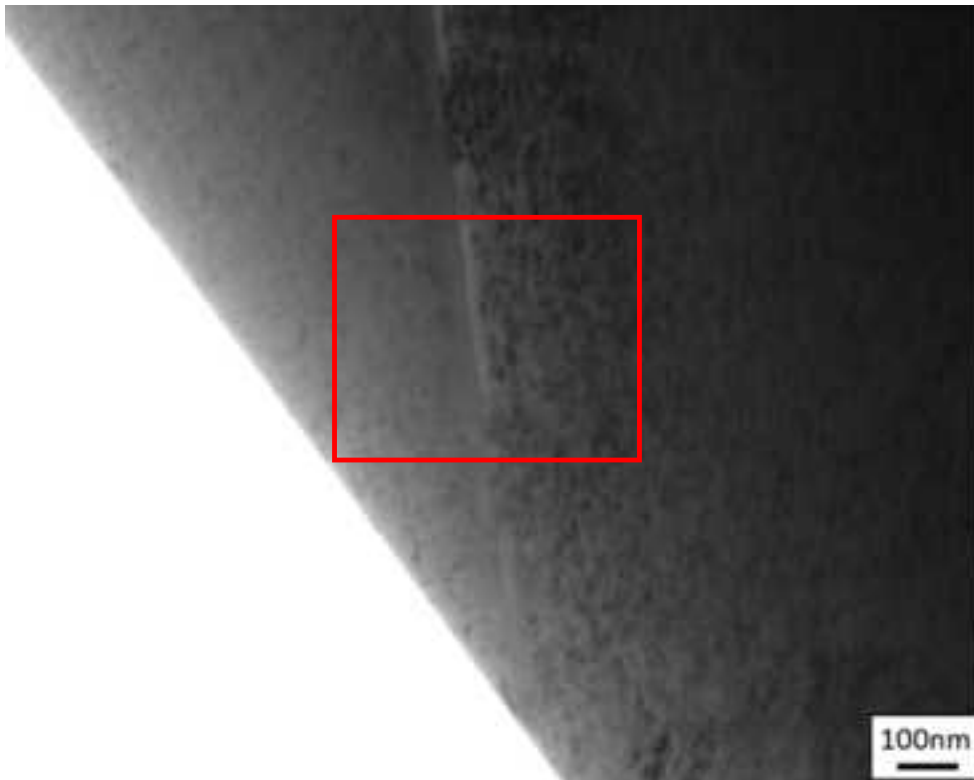
(a) 粒界 1

図 5.2.4-20(1) 分析した粒界の明視野像(試験片 ID. B5)(1/3)



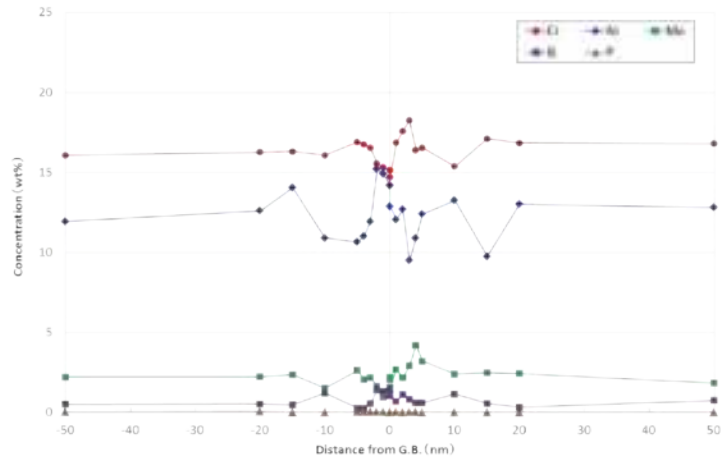
(b) 粒界 2

図 5.2.4-20(2) 分析した粒界の明視野像(試験片 ID. B5)(2/3)

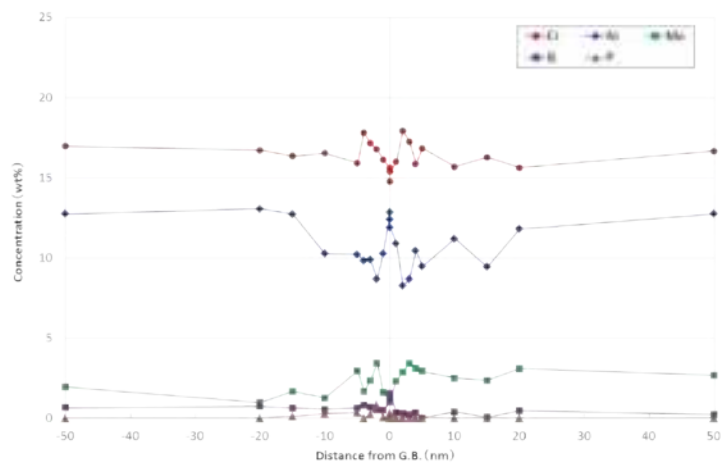


(c) 粒界 3

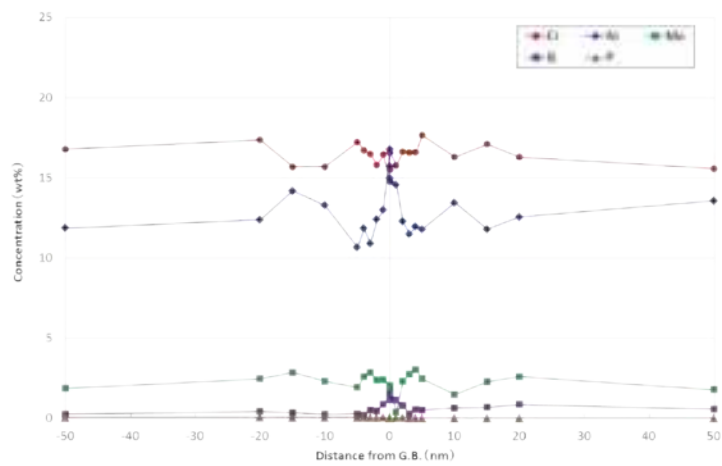
図 5.2.4-20(3) 分析した粒界の明視野像(試験片 ID. B5)(3/3)



(a) 粒界 1



(b) 粒界 2



(c) 粒界 3

図 5.2.4-21 粒界から ± 50 nm の範囲における各元素の濃度プロファイル
(試験片 ID. B5)

表 5.2.4-9 各分析位置における粒界偏析量

鋼種	試験片 ID	照射量(n/m ²) (E>1MeV)	熱処理	分析位置	粒界偏析量(wt%)					
					Fe	Cr	Ni	Si	P	Mo
SUS304	Z03	6.3×10 ²⁴ (低フラックス)	なし	粒界 1	-1.60	0.28	1.12	0.18	0.02	N/A
				粒界 2	-2.38	0.34	2.00	0.00	0.05	N/A
				粒界 3	-2.54	0.64	1.62	0.26	0.02	N/A
				平均	-2.17	0.42	1.58	0.14	0.03	N/A
SUS316L	E134	5.18×10 ²⁴	なし	粒界 1	-2.79	-0.19	1.71	0.28	0.02	0.97
				粒界 2	-1.17	-0.19	0.13	0.16	-0.01	1.08
				粒界 3	-2.28	-0.99	1.83	0.49	0.04	0.91
				平均	-2.08	-0.46	1.22	0.31	0.02	0.99
	B3	5×10 ²⁴	なし	粒界 1	-1.28	-0.62	1.02	0.69	0.00	0.19
				粒界 2	-2.22	-0.32	-0.15	0.31	0.01	2.37
				粒界 3	-0.43	-0.46	0.83	-0.03	-0.01	0.10
				平均	-1.31	-0.47	0.57	0.32	0.00	0.89
	B5	2×10 ²⁵	なし	粒界 1	-0.07	-1.64	1.40	0.75	-0.01	-0.43
				粒界 2	0.24	-0.99	0.63	0.75	0.10	-0.73
				粒界 3	-2.25	-1.01	3.11	0.77	0.00	-0.61
				平均	-0.69	-1.21	1.71	0.76	0.03	-0.59

(粒界偏析量=粒界濃度-母相濃度(粒界から±20 nm、50 nm 位置での平均))

N/A : 分析対象外

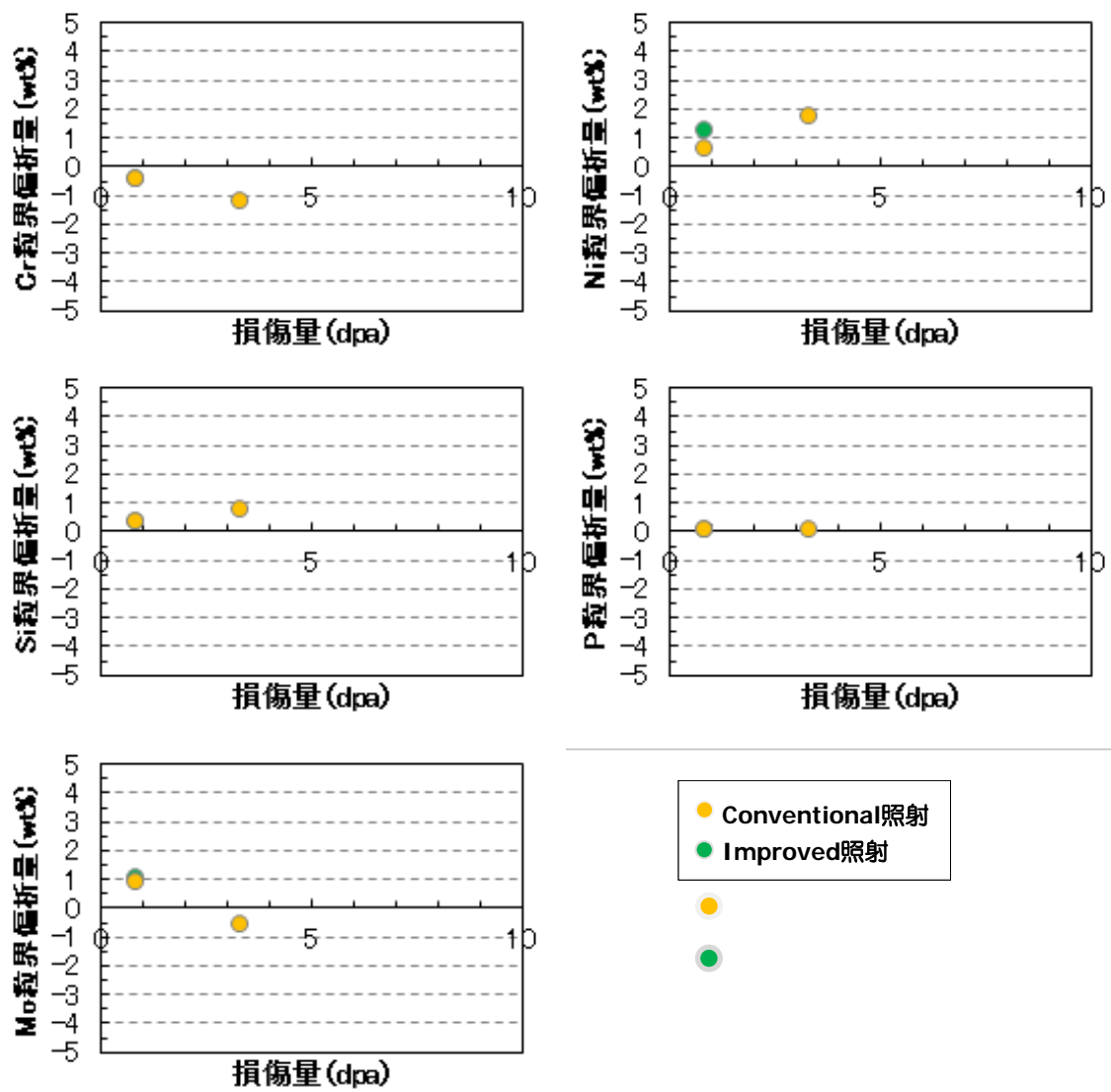


図 5.2.4-22 粒界偏析量と損傷量の関係

(4)照射材に特有の変形組織評価試験

照射材に特有の変形組織評価試験マトリクスを表 5.2.4-10 に示す。本年度は、引張試験、SEM 観察/EBSD 測定、マイクロ組織観察を実施した。

a.試験片へのひずみ付与

(i)実験方法

0.5T-CT 試験片の A409(SUS316L、HT 材、 $7.02 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$))から作製した引張試験片 2 個(TT01、TT02)を用い、変形組織評価試験を実施した。試験片加工については、前出の(2)章に詳述した通りである。引張試験片形状を図 5.2.4-23 に示す。平行部には、ビッカース硬さ試験機を用いてひずみ量を測定するための圧痕を 2 箇所導入した。

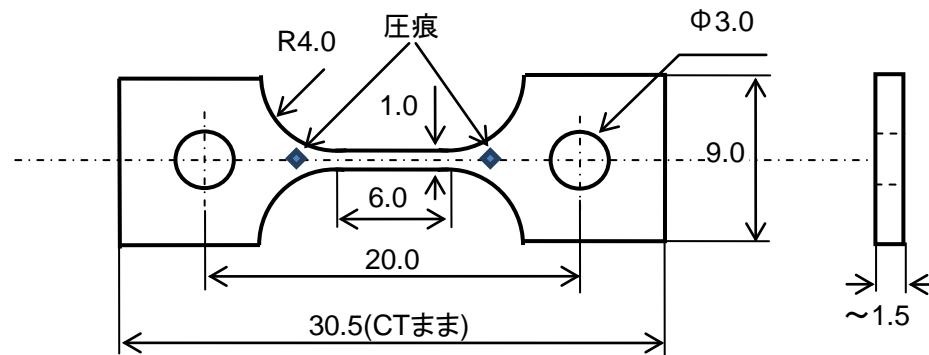
引張試験片 2 本について、大気中でひずみ速度約 $3 \times 10^{-4} \text{ s}$ で油圧サーボ試験機によりひずみを付与した。ひずみ付与中は、試験機ロッド変位の変化を確認しながら、約 2%のひずみが付与された時点で試験機を停止した。付与されたひずみ量は、試験機から試験片を取り外した後、圧痕間距離をビッカース硬さ試験機の光学系および移動ステージを用いて測定し、所定のひずみ量であることを確認した。

(ii)試験結果

ひずみ付与時の荷重と試験機ロッド変位の関係を図 5.2.4-24 に示す。塑性ひずみが約 2%導入された時点で除荷された。付与後の試験片外観を図 5.2.4-25 に示す。ひずみ付与前後の圧痕間距離の測定結果から、平行部に付与された塑性ひずみ量は TT01 が約 2.1%、TT02 が約 2.2%であった。

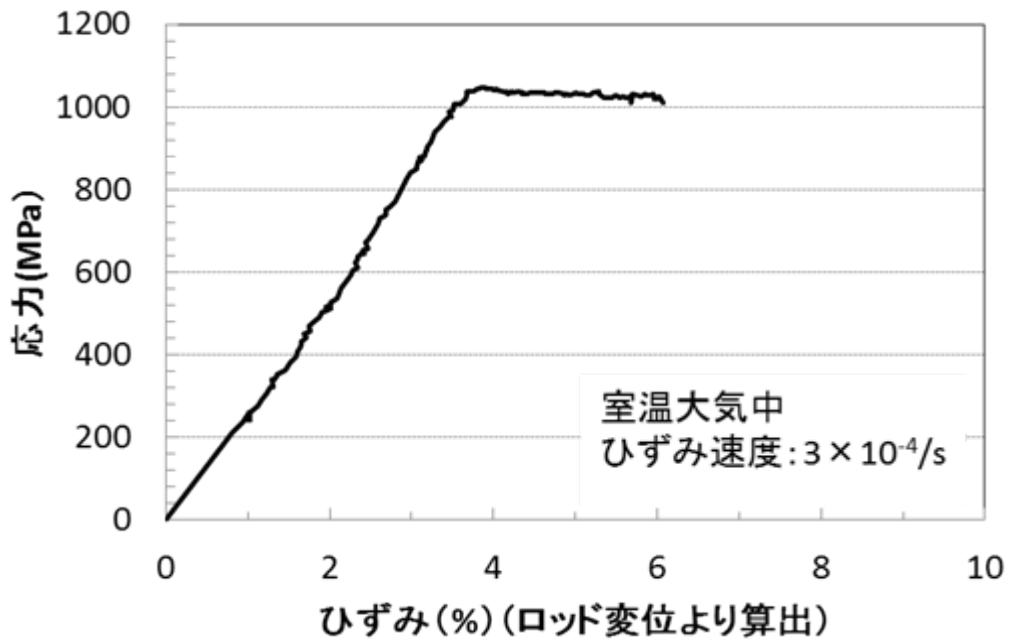
表 5.2.4-10 SUS316L の照射材に特有の変形組織評価試験マトリクス

照射量(n/m ²) (E>1MeV)	ひずみ量 (目標値)	ひずみ 付与温度	ひずみ付与	SEM 観察/ EBSD 測定	ミクロ 組織観察	備考
5.65×10 ²⁴	0.1%	室温	実施済	実施済	実施済	ミニ引張試験片 A135 より採取
	2%	室温	実施済	実施済	実施済	
6.95×10 ²⁵	0.1%	室温	実施済	実施済	実施済	ミニ引張試験片 A440 より採取
	2%	室温	実施済	実施済	実施済	
7.02×10 ²⁵	2%	室温	1	1	12 視野	A409 より採取
7.02×10 ²⁵	2%	290℃	1	1		

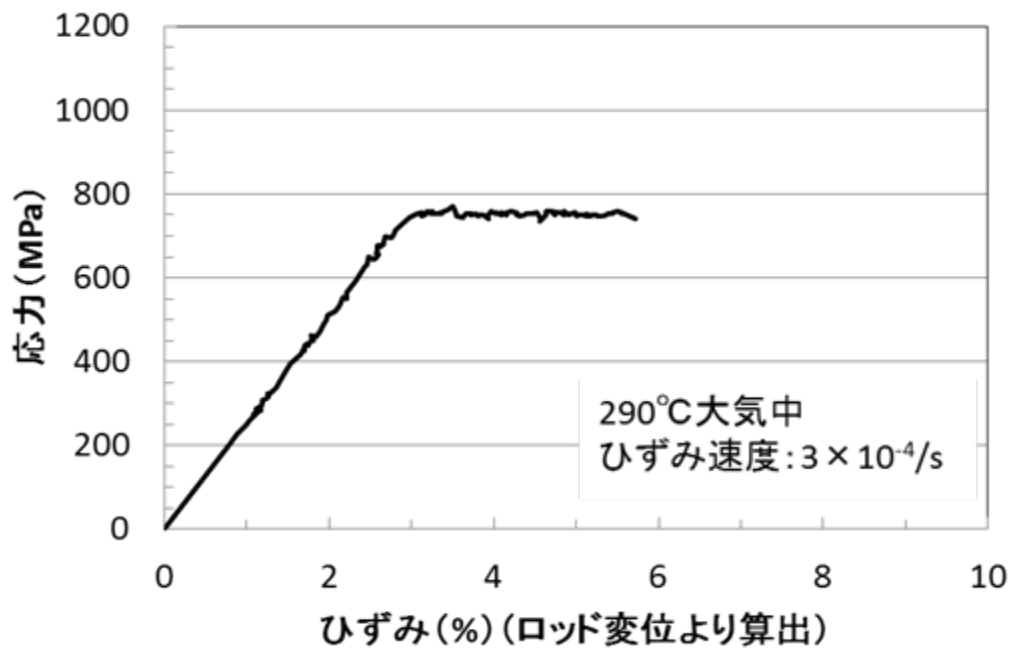


単位：mm

図 5.2.4-23 引張試験片形状図

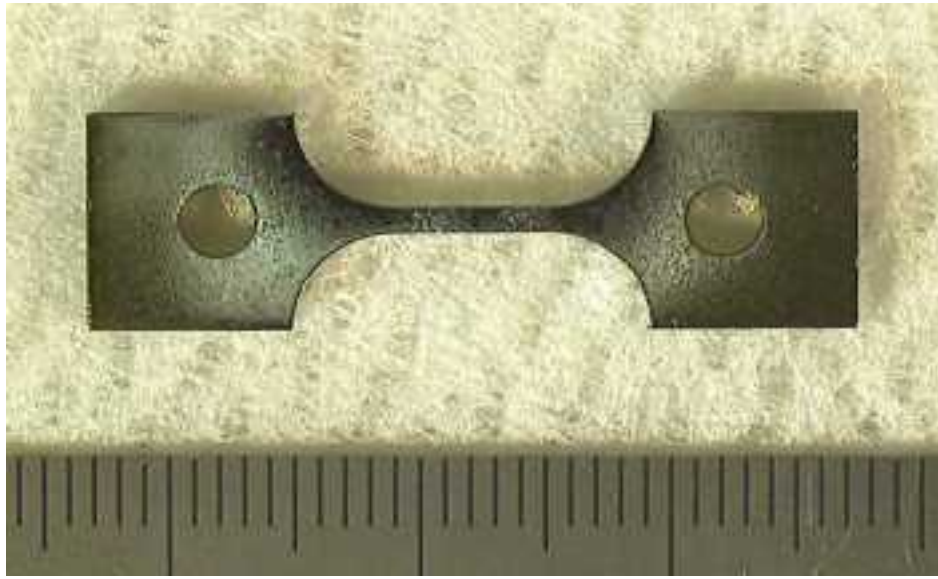


(1)室温で 2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)



(2)290°Cで 2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT02)

図 5.2.4-24 ひずみ付与時の荷重とひずみの関係



室温で 2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)



290°Cで 2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT02)

図 5.2.4-25 ひずみ付与後の引張試験片外観

b.SEM/EBSD観察

(i)実験方法

前項で目標値 2%までひずみ付与した引張試験片 2 個(TT01、TT02)の平行部の表面を 200 倍及び 500 倍で SEM 観察した。ここでは平行部のつなぎ観察写真を作成すると共に、平行部に現出したすべり線につき、特徴的な領域について詳細に観察した。観察されたすべり線は、SEM 写真よりステップ幅に着目して整理した。

その後試験片つかみ部を切断して引張試験片の平行部のみをホットセル外に搬出し、EBSD 分析を実施した。なお EBSD 分析箇所は、SEM 観察結果に基づき、すべり線の高さ、密度、ステップ幅などを参考に決定した。

(ii)結果

(ア)試験片ID. TT01(試験温度：室温)

室温で約 2.1%ひずみ付与した TT01 の SEM 写真を図 5.2.4-26(1)～(12)に示す。ひずみ付与により試験片表面にはステップが形成されていた。ステップは平行部にほぼ均一に発生した。

ステップ幅は、500 倍で撮影した SEM 写真から測定した。なおステップ幅の定義は以下の通りである。

$$D_{\text{step}} = (\text{平行なステップ群の両端間の距離}) / (\text{ステップ数})$$

ステップ幅の頻度分布を図 5.2.4-27 に示す。ステップ幅は 1～7 μm に分布し、平均ステップ幅は 3.1 μm であった。

SEM 観察によりステップが密に分布している 2 箇所を選択して EBSD 測定を実施した。EBSD 測定箇所はいずれも圧痕に近い箇所であった。EBSD 測定により得られた IQ 像、IPF 像および KAM 像を図 5.2.4-28(1)及び(2)に示す。図 5.2.4-28(1)に示した視野では、IQ が低下している箇所、粒界三重点およびステップと粒界の交差点で KAM(ひずみに相当)が高くなる傾向であった。また、ステップに沿って KAM は高くなっていた。一方図 5.2.4-28(2)に示した視野では、ステップと粒界が交差し IQ が低下している箇所で KAM が高くなっていた。図 5.2.4-28(1)に示した視野において KAM の高い箇所に着目し、試料を 70 度傾斜して観察した結果を図 5.2.4-29 に示す。KAM の高い箇所では粒界ステップが生じていた。KAM が高い箇所の粒界ステップは周辺の粒界ステップと比較して低いが、粒界ステップ周辺に塑性変形が生じているように見える。

(イ)TT02(試験温度：290℃)

290℃で約 2.2%ひずみ付与した TT02 の SEM 写真を図 5.2.4-30(1)～(8)に示す。ひずみ付与により試験片表面にはステップが形成されていた。ステップは平行部のおおよそ 1/3 の領域に局在していた。500 倍の SEM 写真から測定したステップ幅の頻度分布を図 5.2.4-31 に示す。ステップは 1～8 μm の範囲に分布し、平均ステップ幅は 3.3 μm であつ

た。TT01 の結果と比較してステップ幅の範囲と平均ステップ幅には明瞭な差は無いが、ステップ幅の頻度が、TT01 は 3 μm に強いピークを持つものに対して、TT02 は 2~6 μm に幅を持って分布する特徴があった。

SEM 観察によりステップが密に分布している 2 箇所を選択して EBSD 測定を実施した。EBSD 測定により得られた IQ 像、IPF 像および KAM 像を図 5.2.4-32 に示す。いずれの EBSD 測定箇所においても、ほとんどの粒界の IQ は低下し、KAM は高くなっていた。図 5.2.4-32 で KAM の高い 2 か所について試料を 70 度傾斜して観察した結果を図 5.2.4-33 に示す。KAM が高い箇所は粒界ステップが高くなっていた。

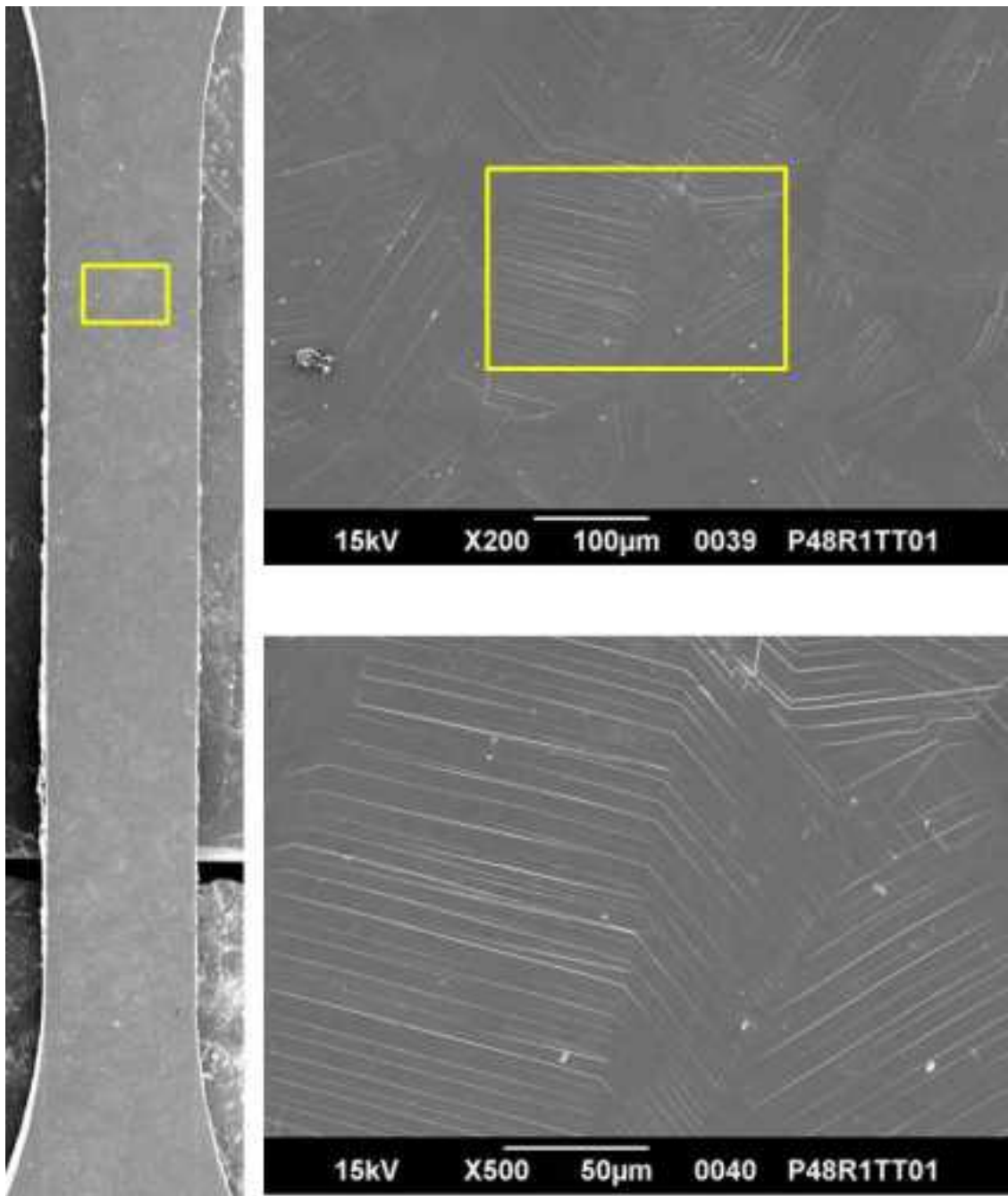


図 5.2.4-26(1) 室温で2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)のSEM写真(1/12)

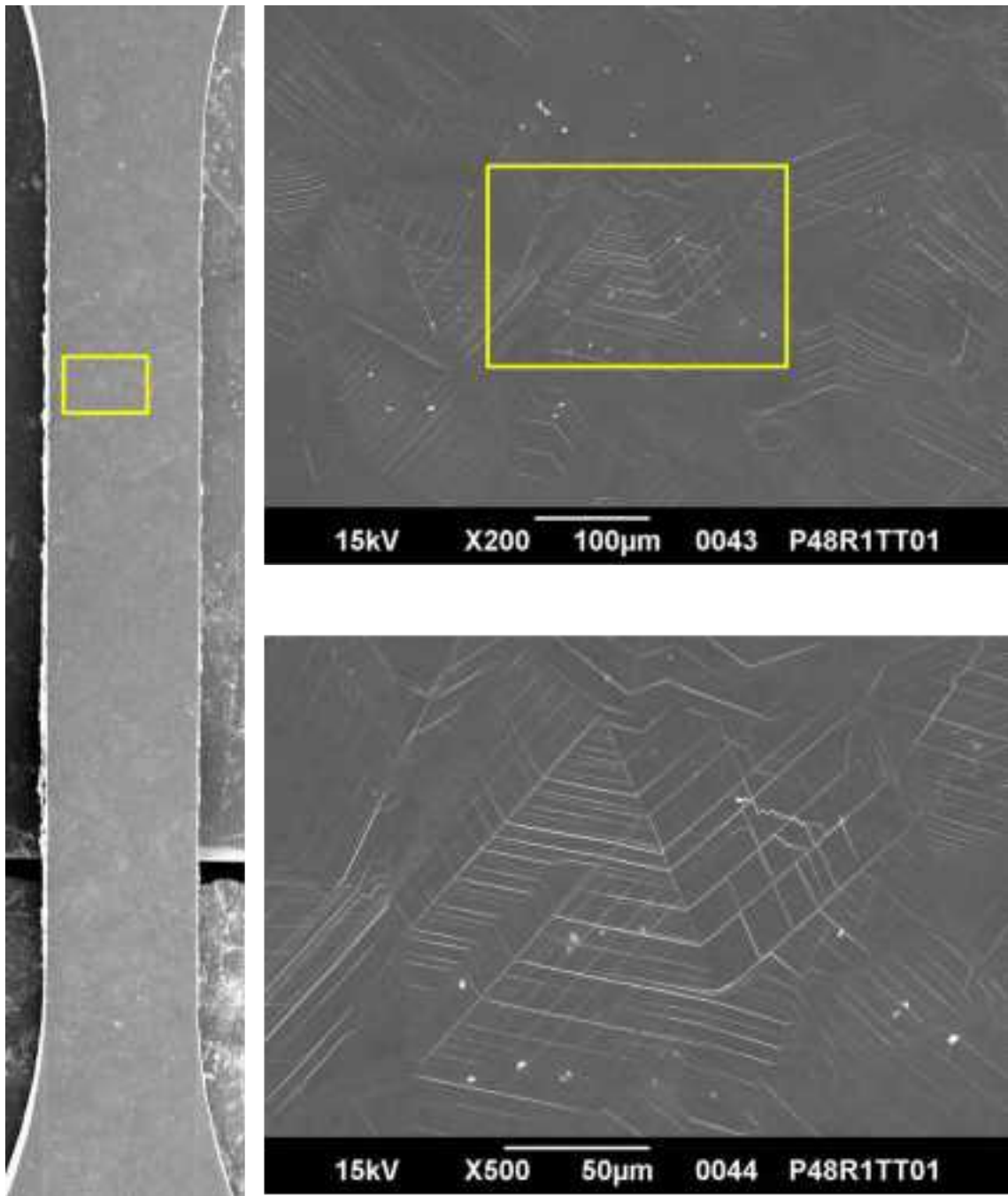


図 5.2.4-26(2) 室温で2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)のSEM写真(2/12)

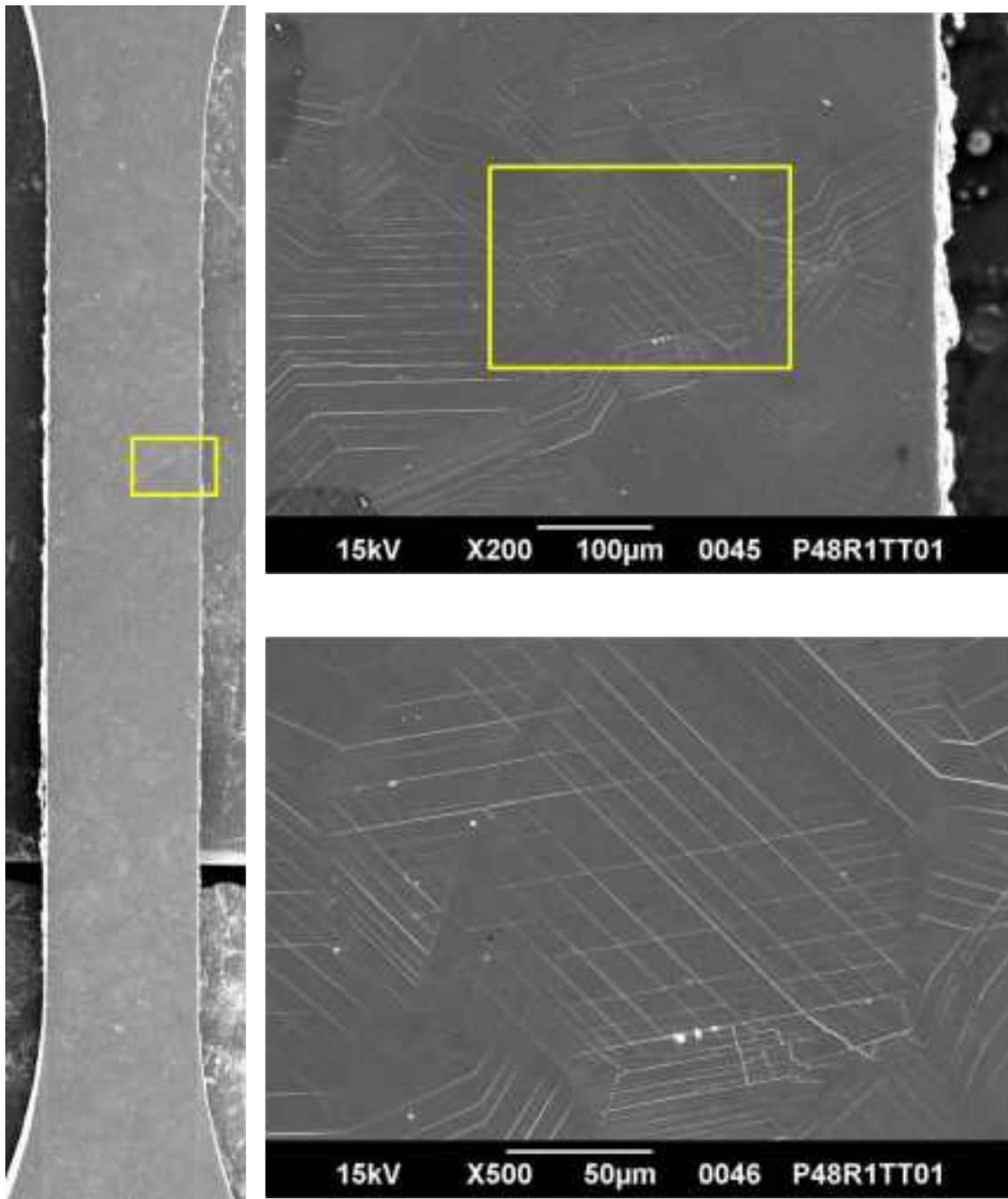


図 5.2.4-26(3) 室温で2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)のSEM写真(3/12)

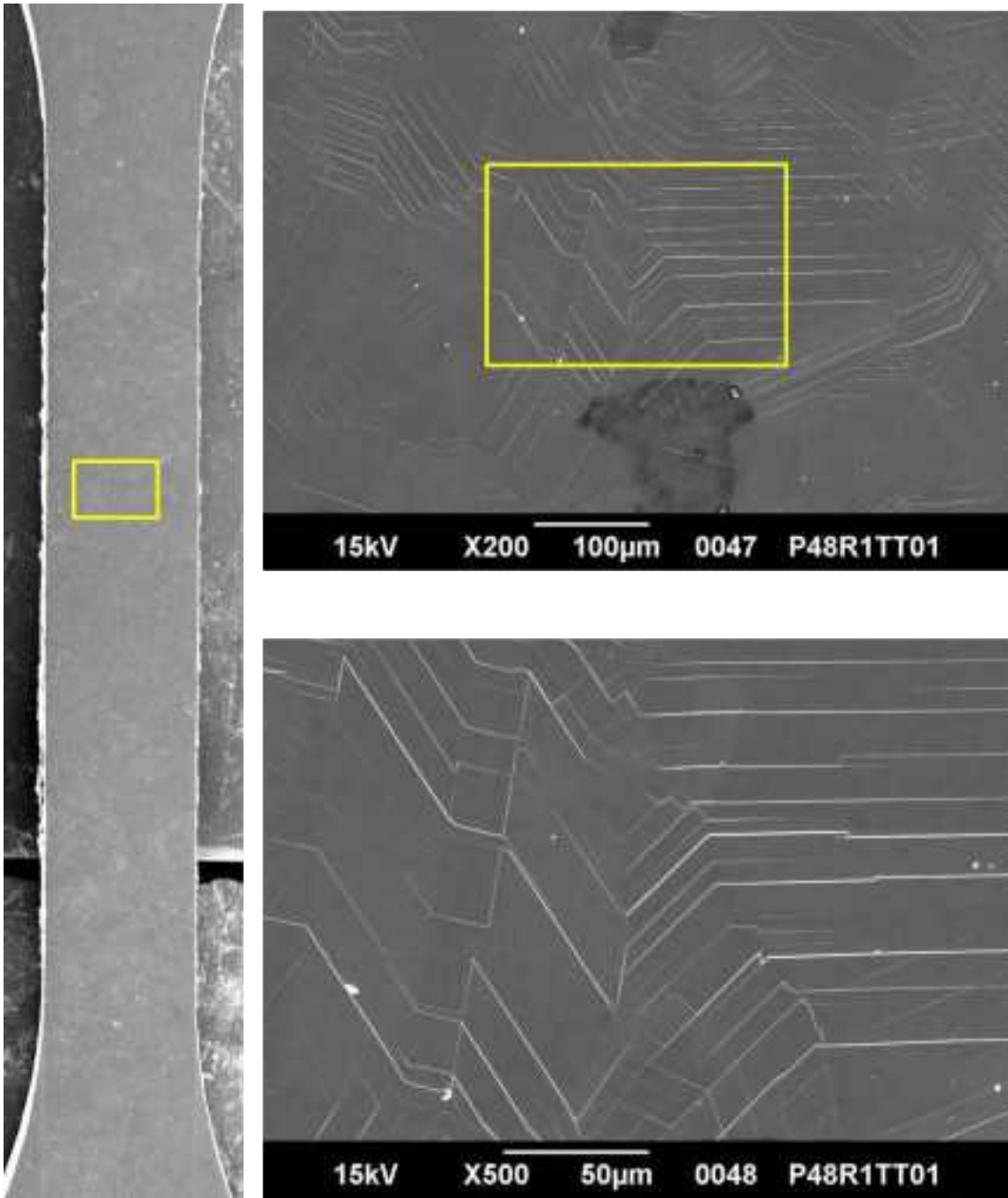


図 5.2.4-26(4) 室温で2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)のSEM写真(4/12)

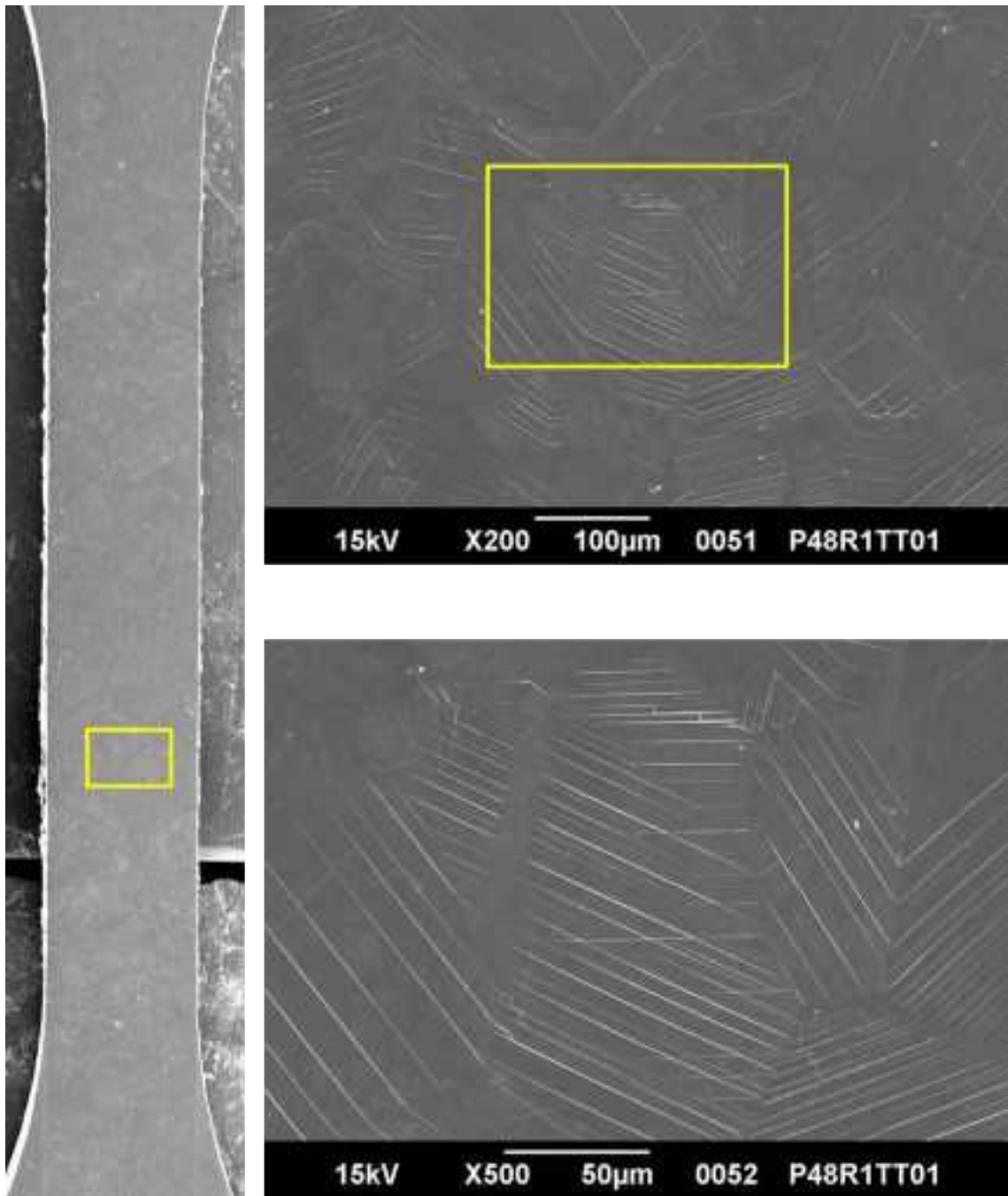


図 5.2.4-26(5) 室温で2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)のSEM写真(5/12)

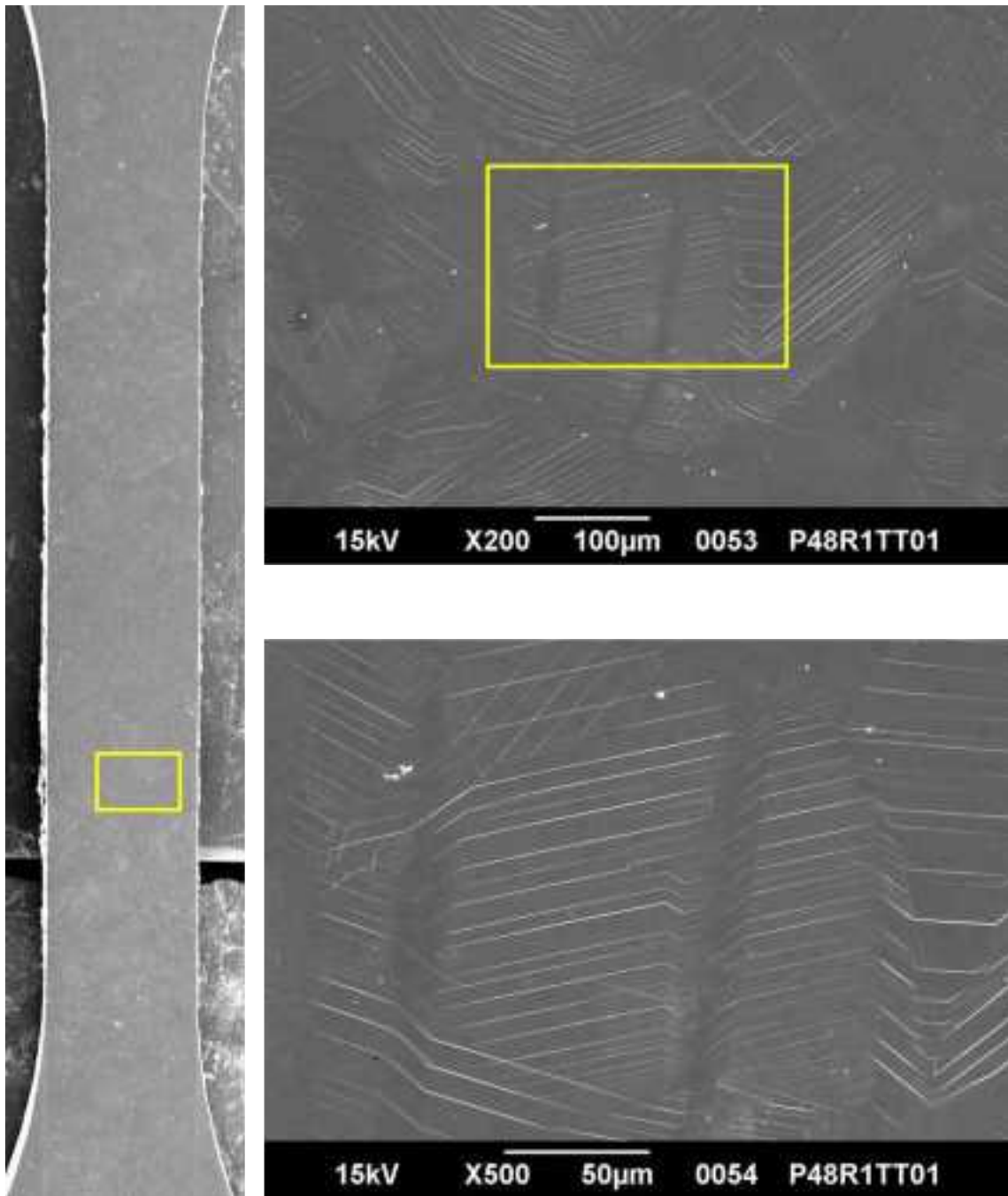


図 5.2.4-26(6) 室温で2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)のSEM写真(6/12)

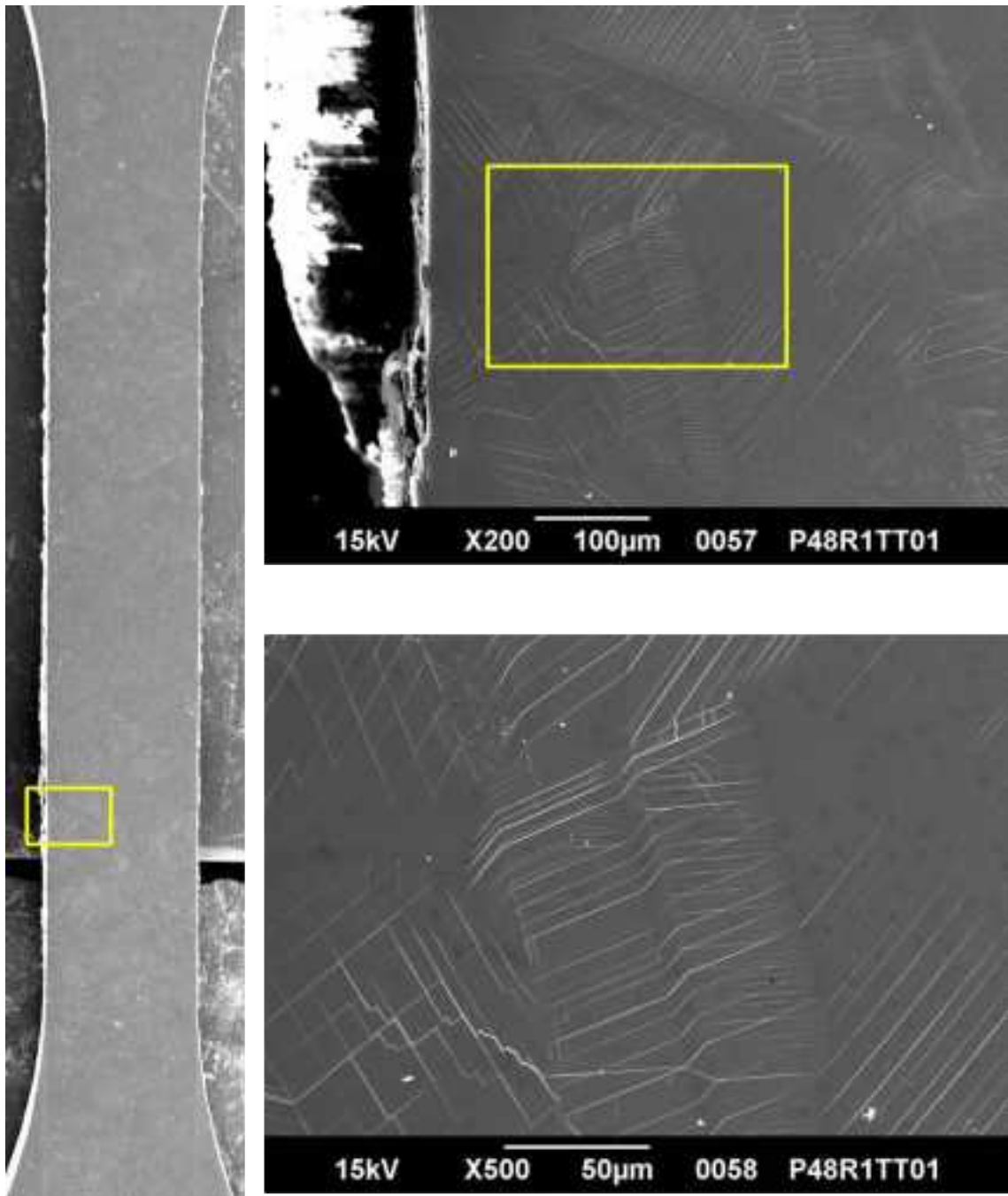


図 5.2.4-26(7) 室温で2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)のSEM写真(7/12)

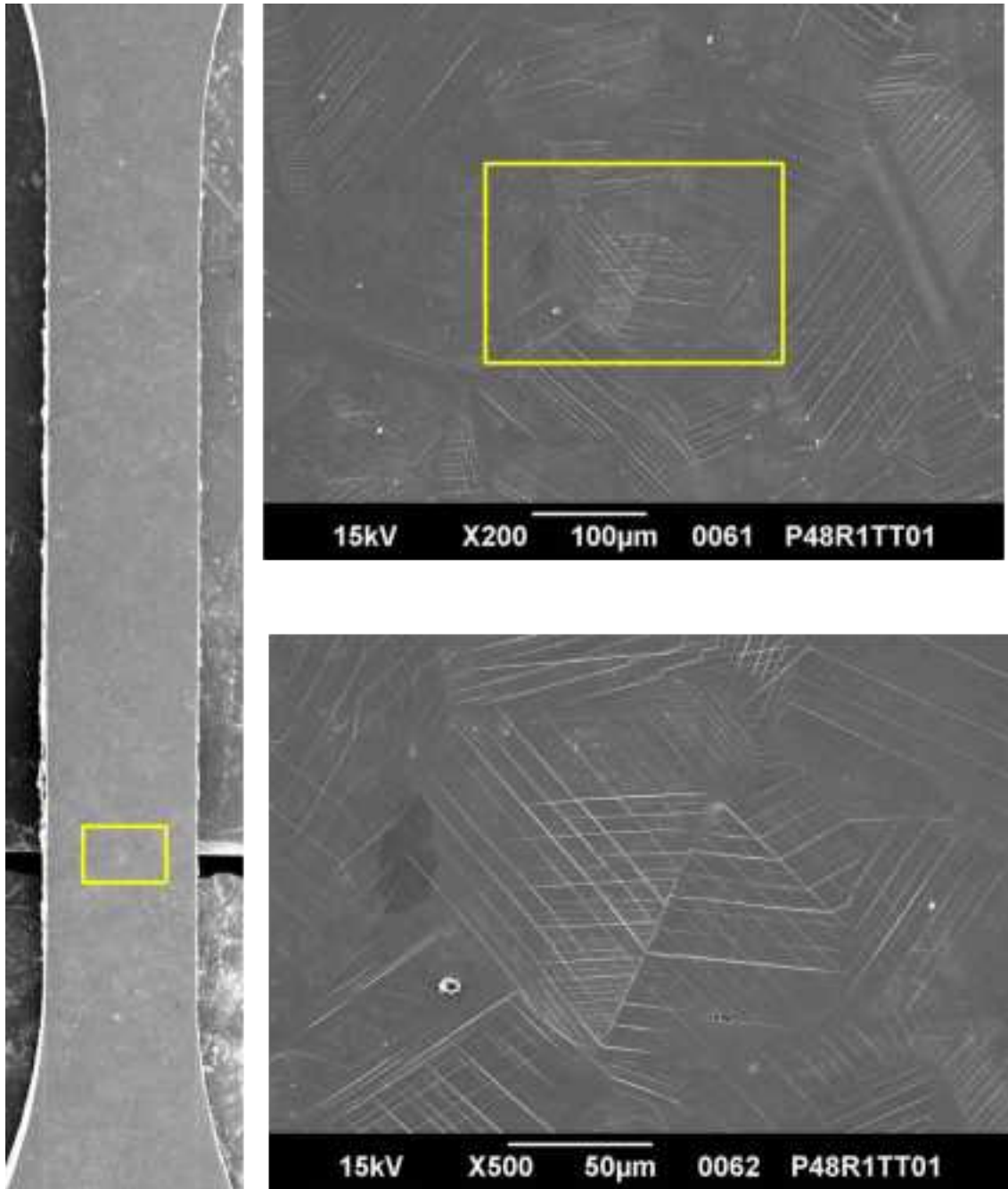


図 5.2.4-26(8) 室温で2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)のSEM写真(8/12)

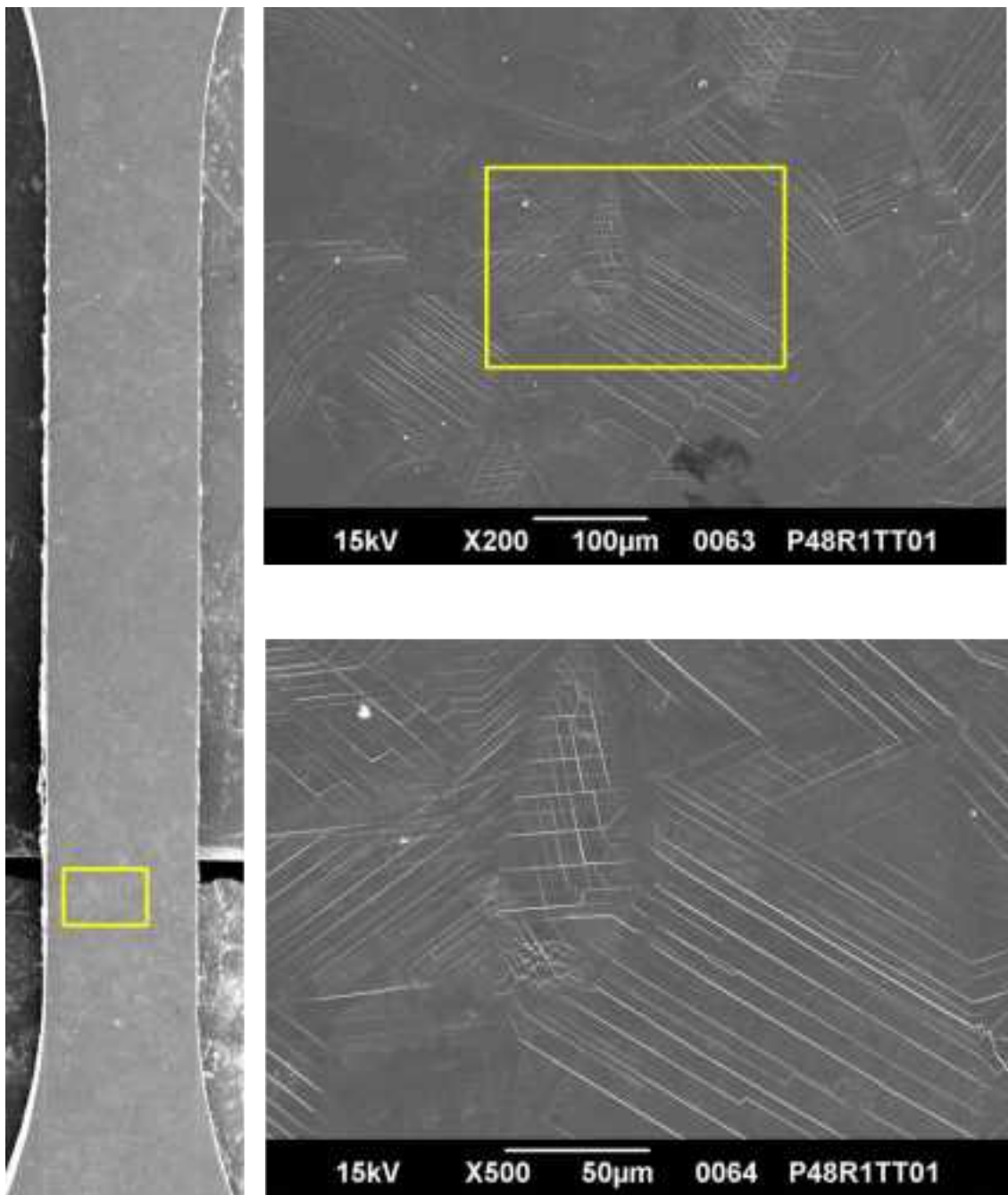


図 5.2.4-26(9) 室温で2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)のSEM写真(9/12)

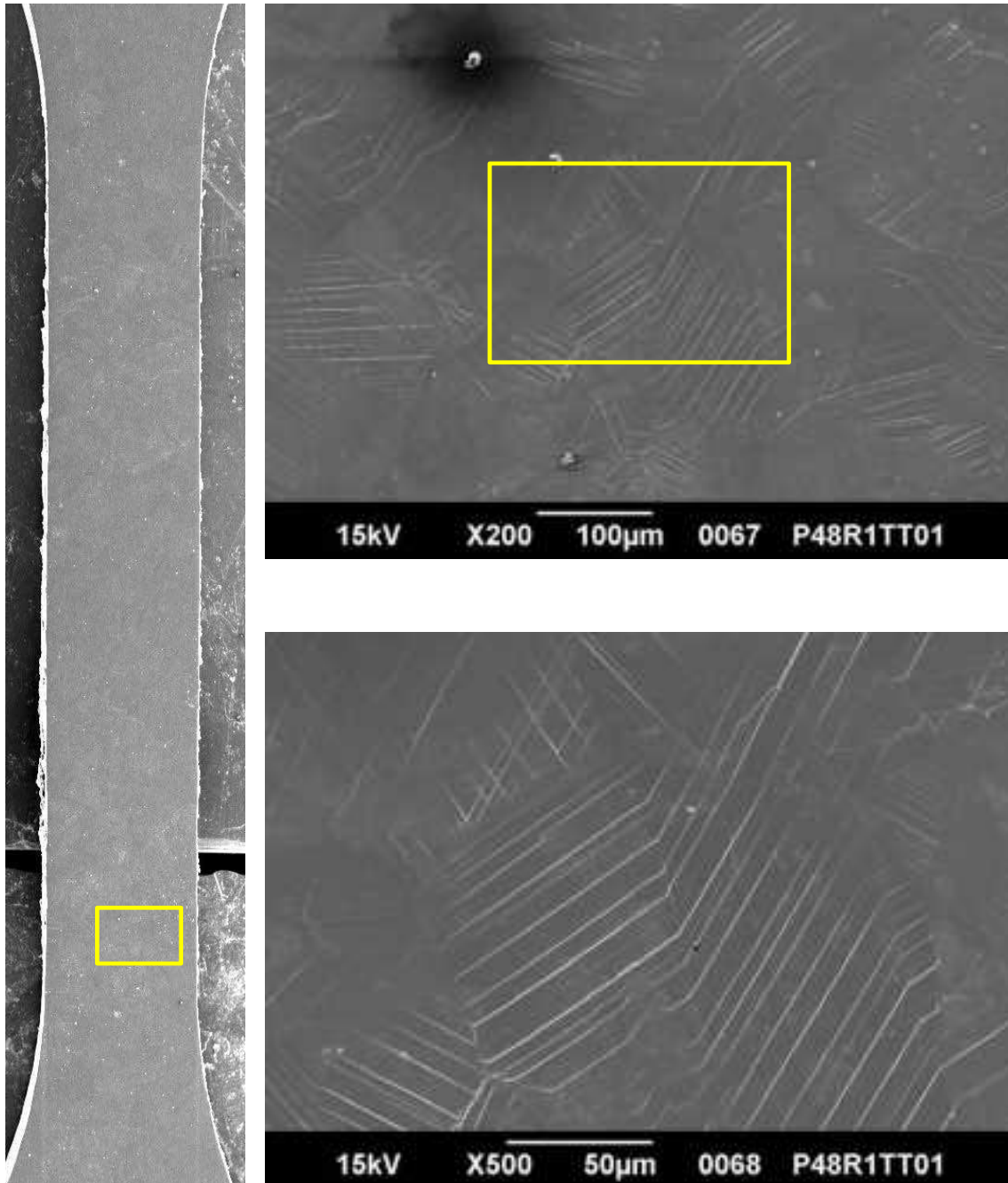


図 5.2.4-26(10) 室温で 2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)の SEM 写真
(10/12)

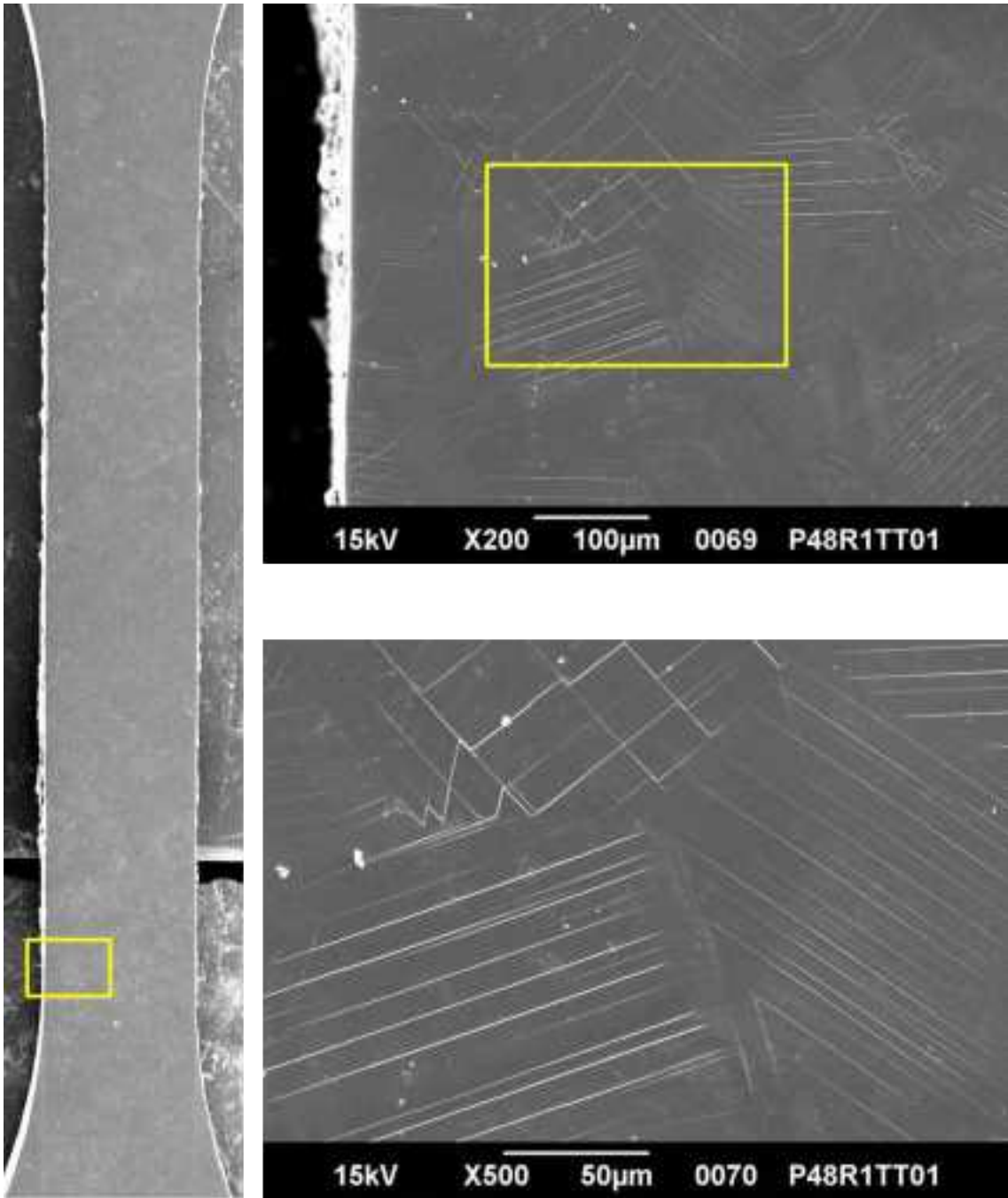


図 5.2.4-26(11) 室温で 2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)の SEM 写真
(11/12)

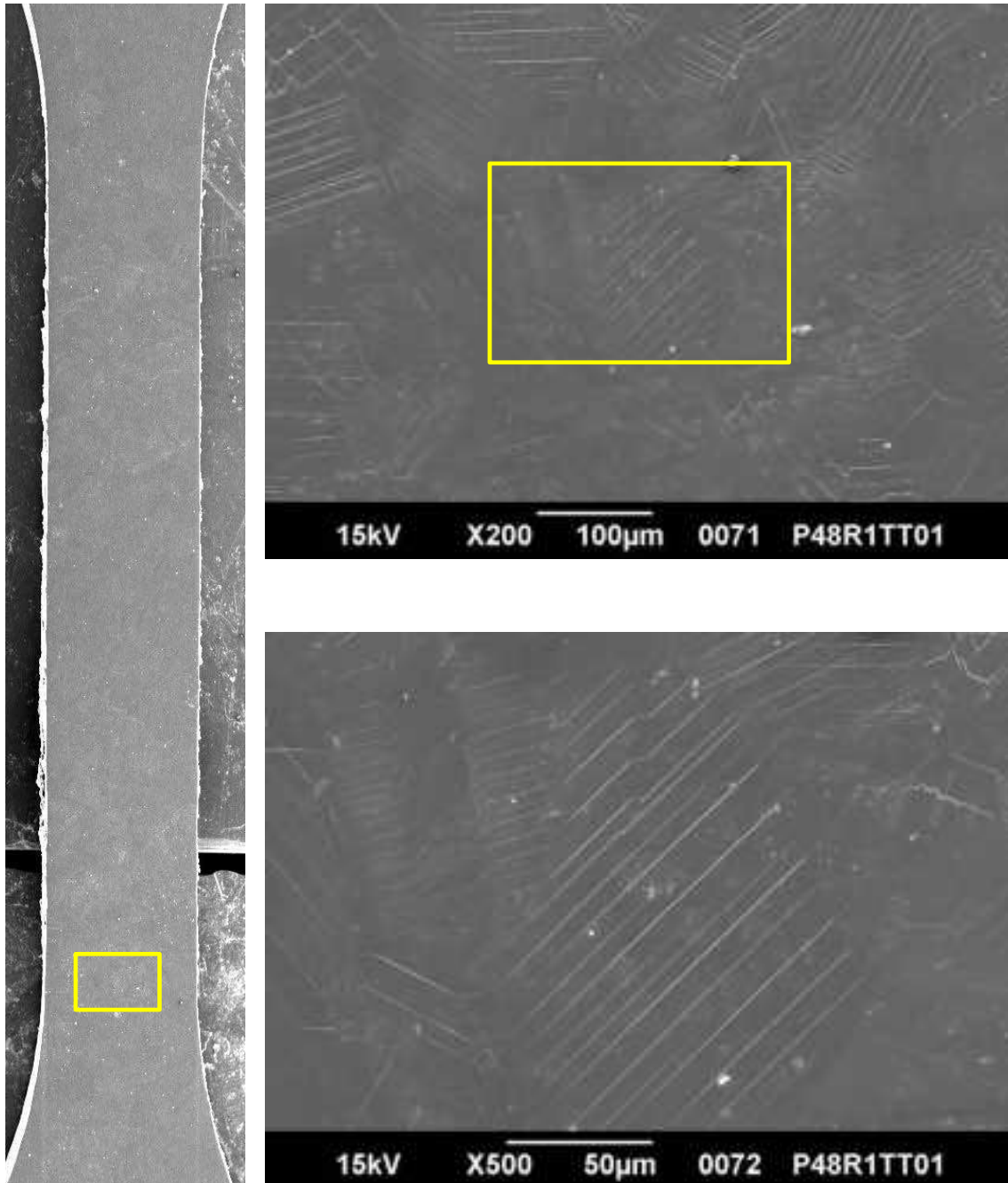


図 5.2.4-26(12) 室温で 2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)の SEM 写真
(12/12)

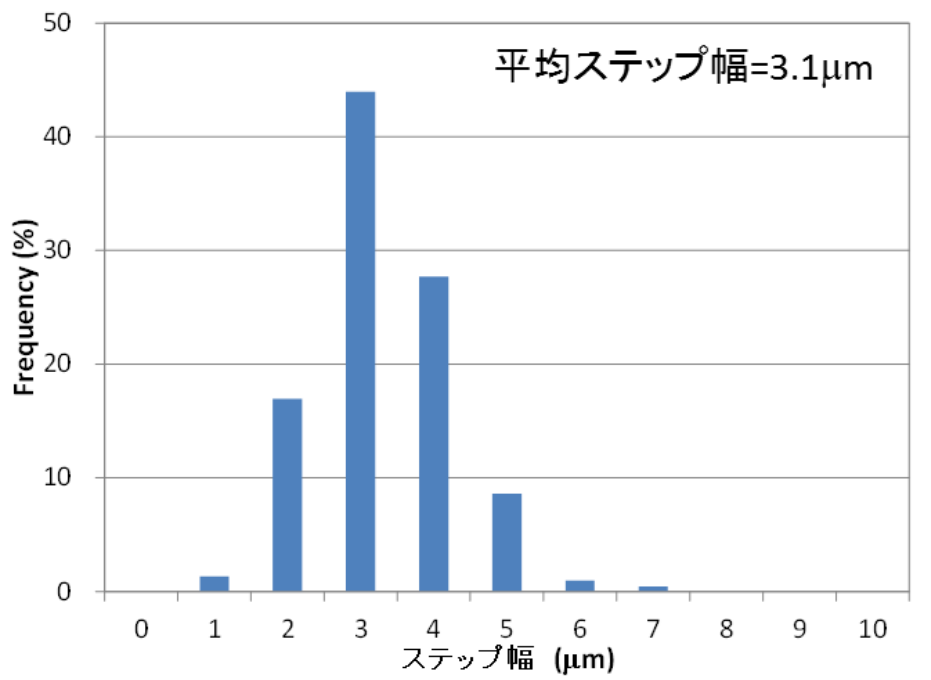


図 5.2.4-27 室温で 2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)のステップ幅頻度分布

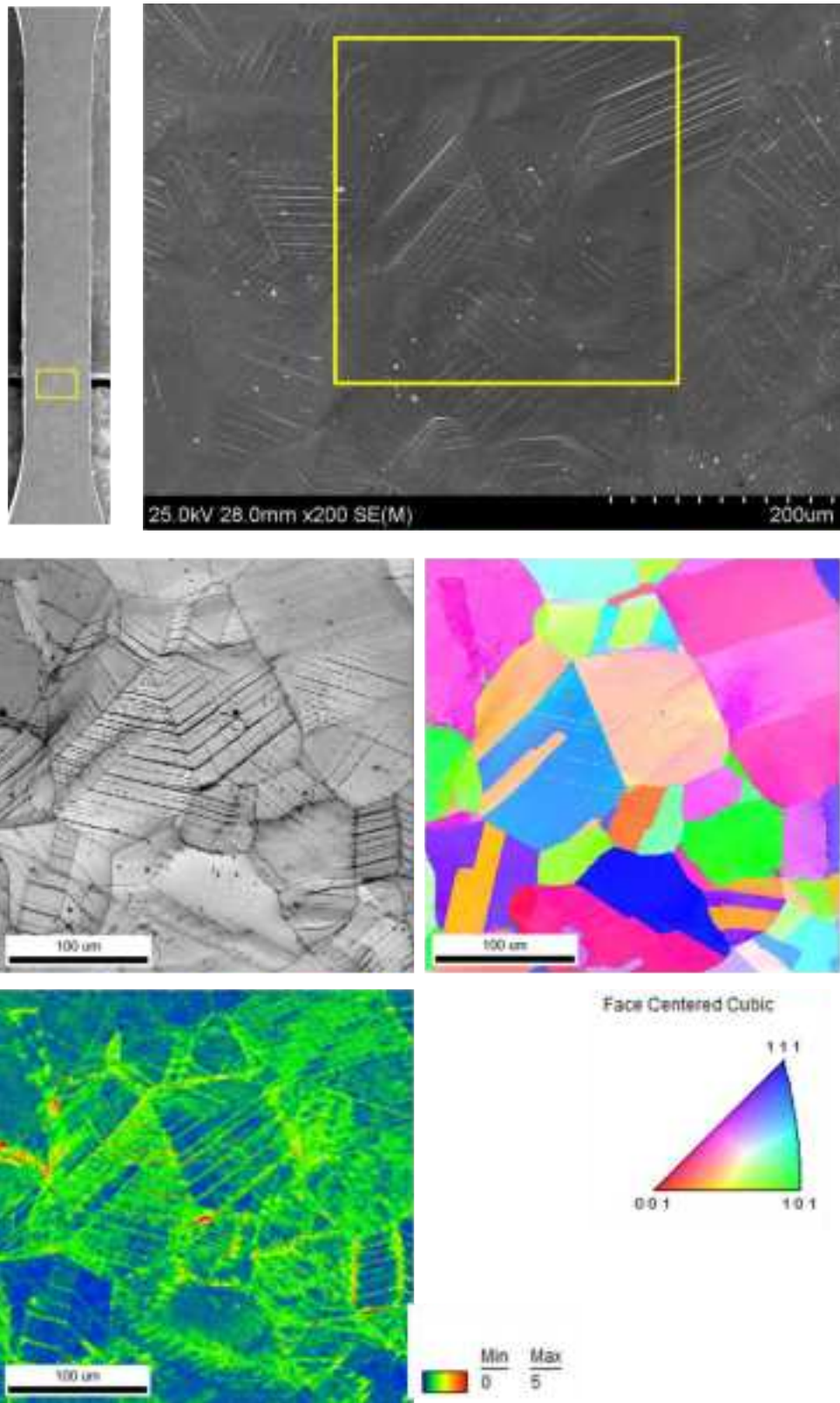


図 5.2.4-28 (1) 室温で 2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)の EBSD 測定結果

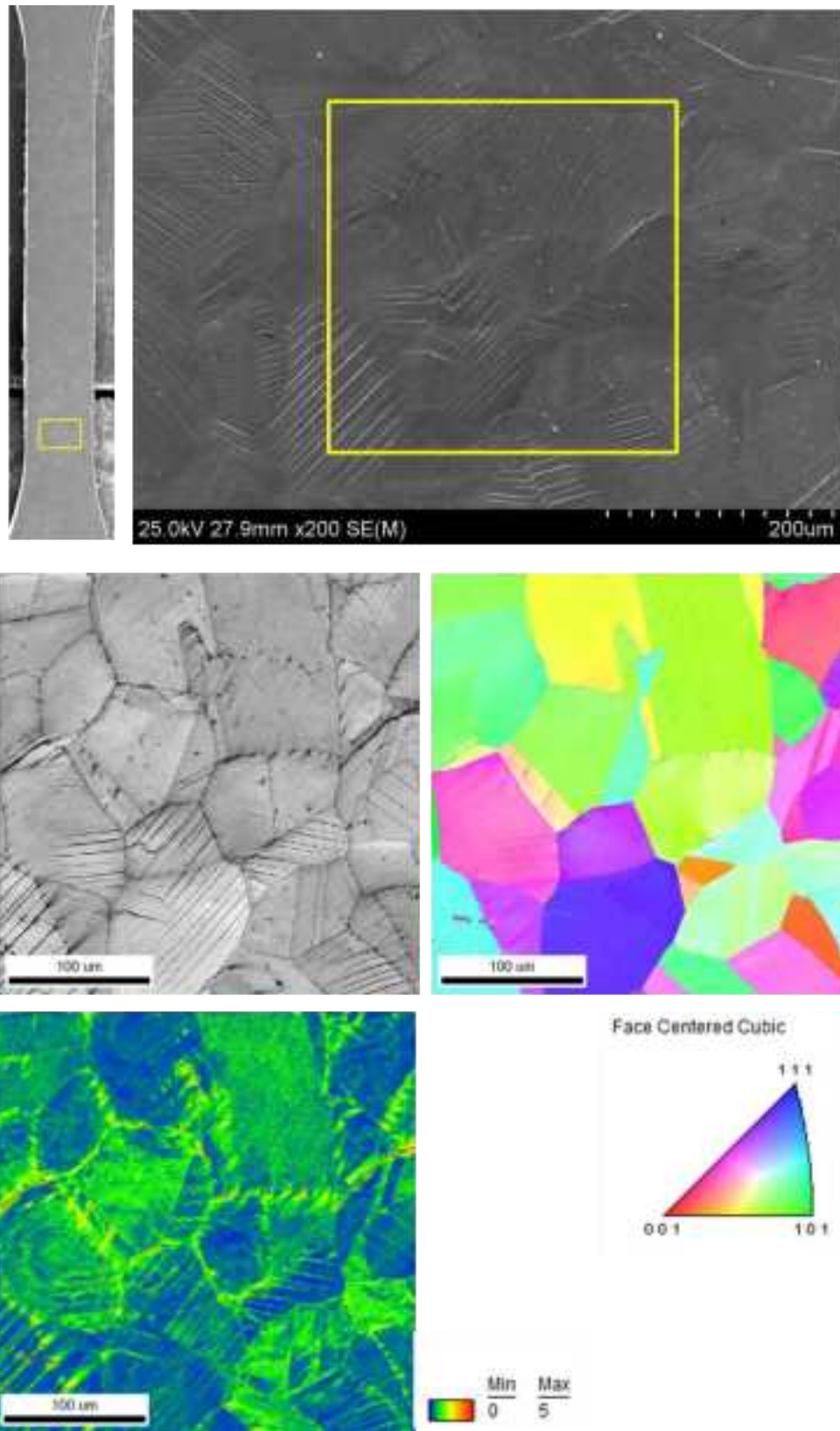
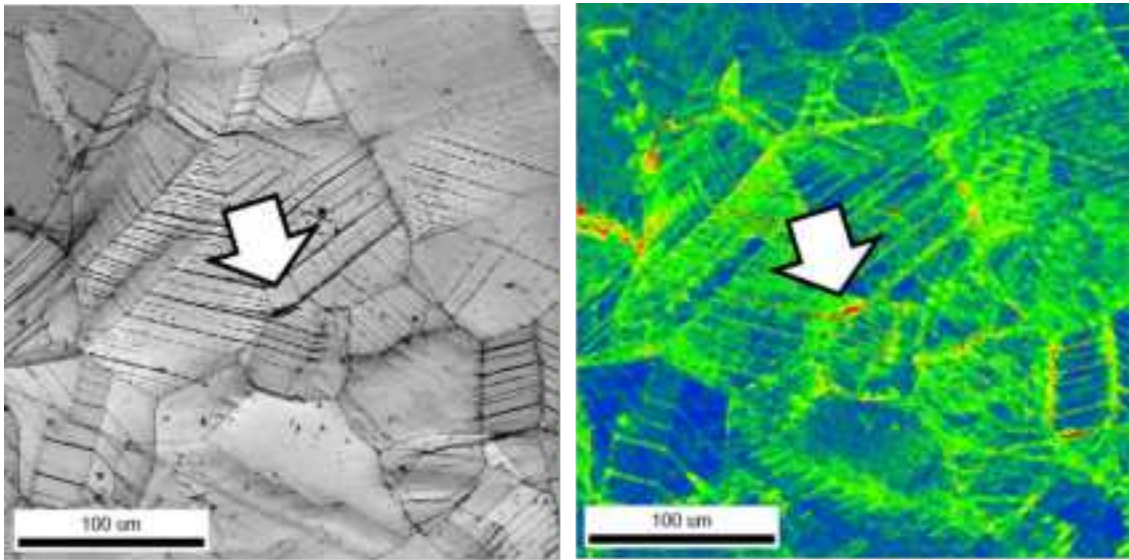


図 5.2.4-28(2) 室温で2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)のEBSD測定結果



矢印方向から試料を70度傾斜して観察

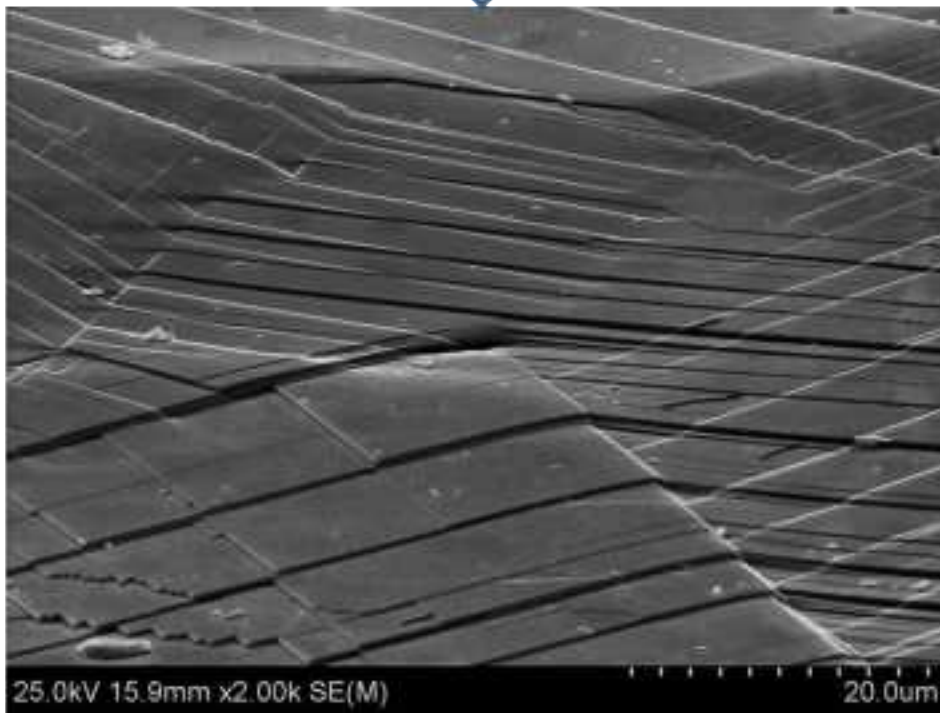


図 5.2.4-29 室温で 2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT01)の SEM 写真

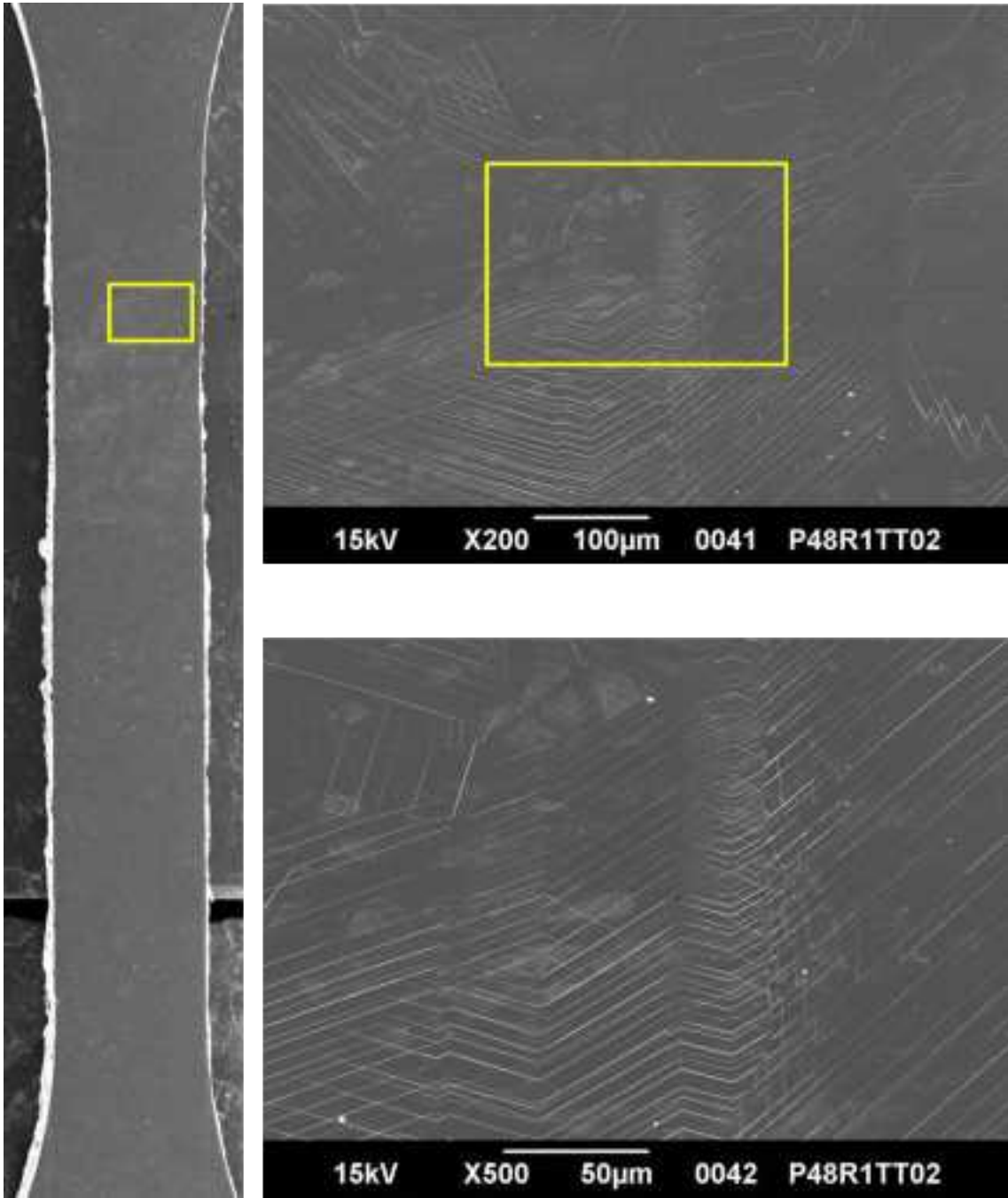


図 5.2.4-30(1) 290°Cで2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT02)のSEM写真
(1/8)

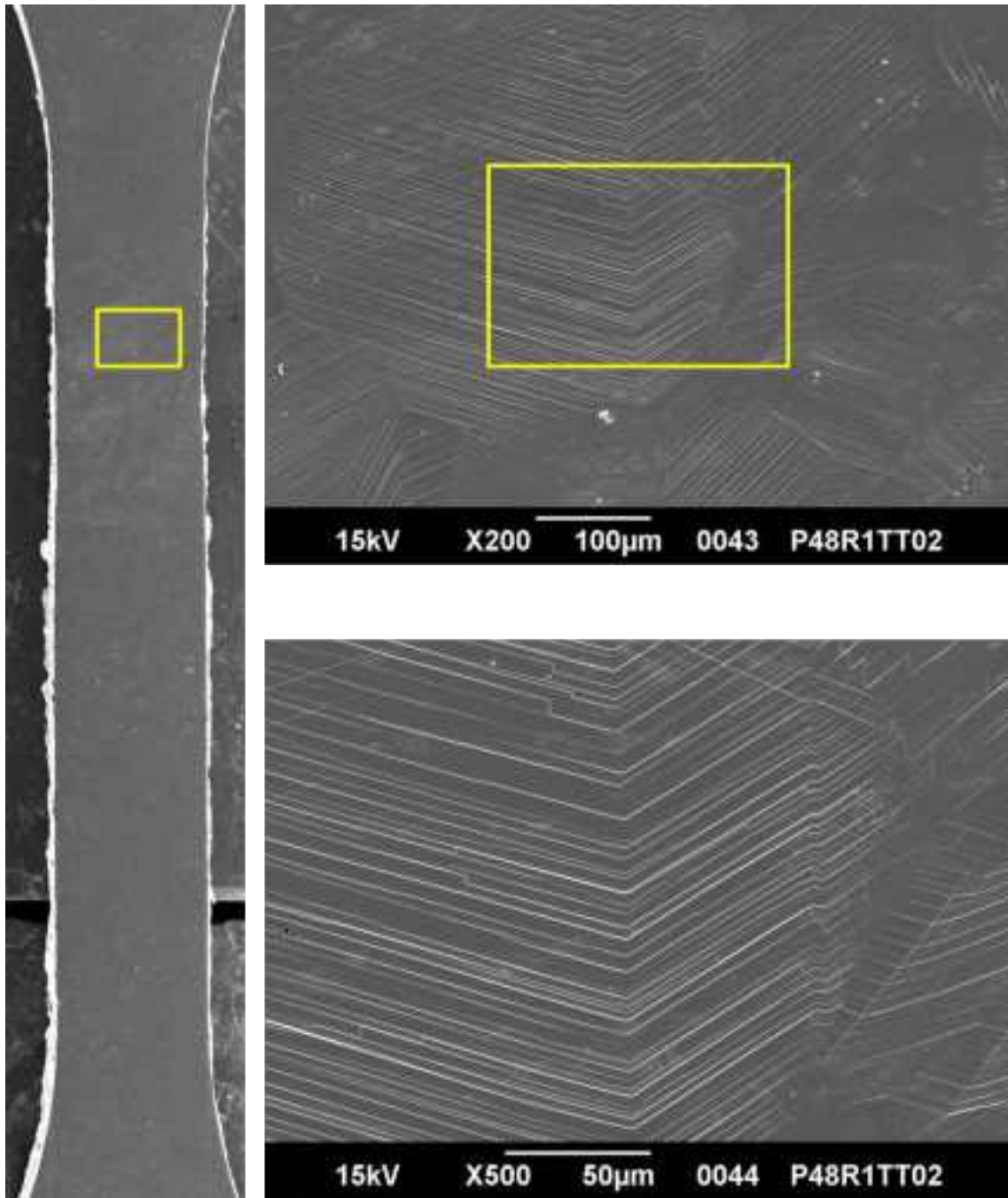


図 5.2.4-30(2) 290°Cで2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT02)のSEM写真
(2/8)

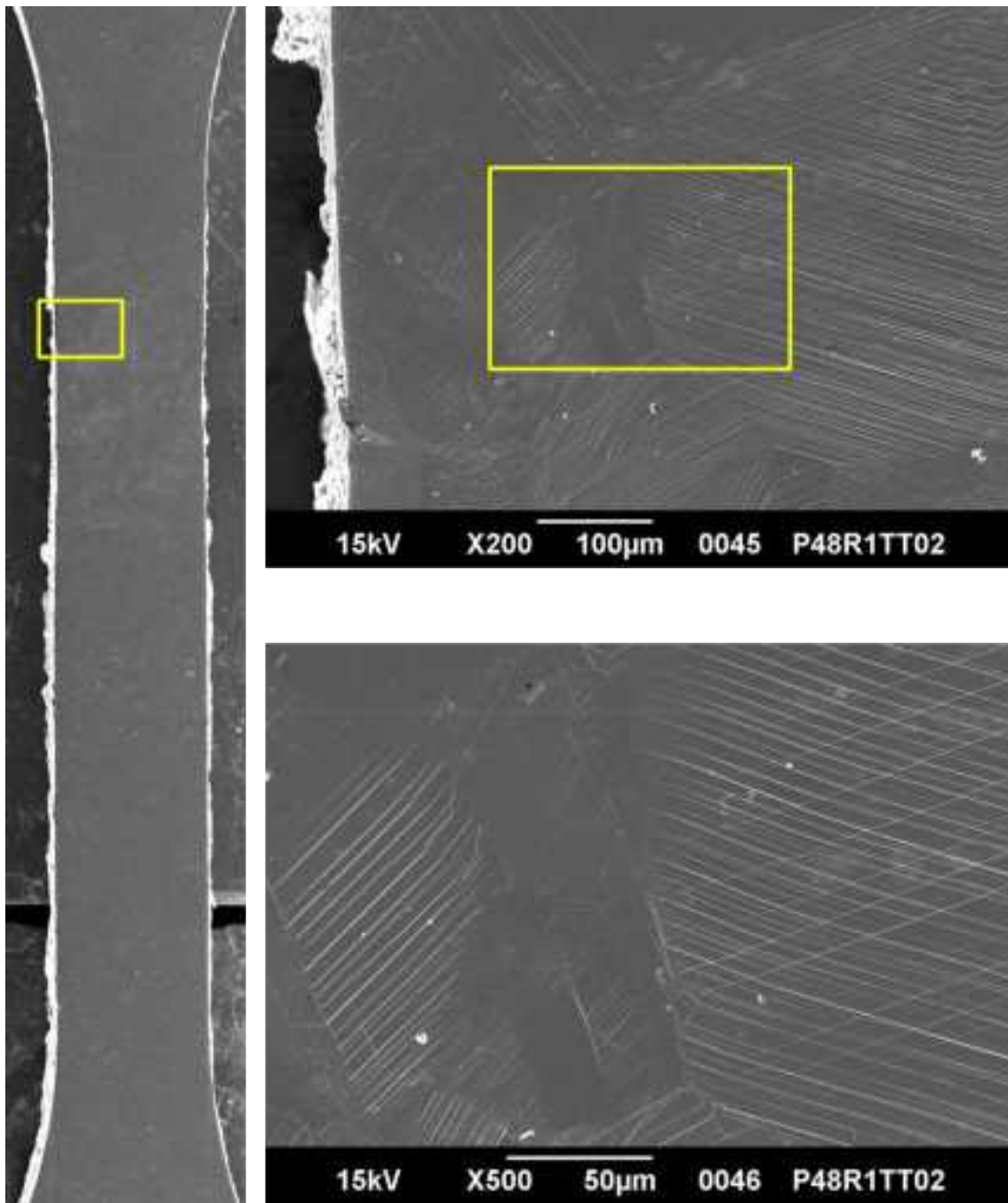


図 5.2.4-30(3) 290°Cで2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT02)のSEM写真
(3/8)

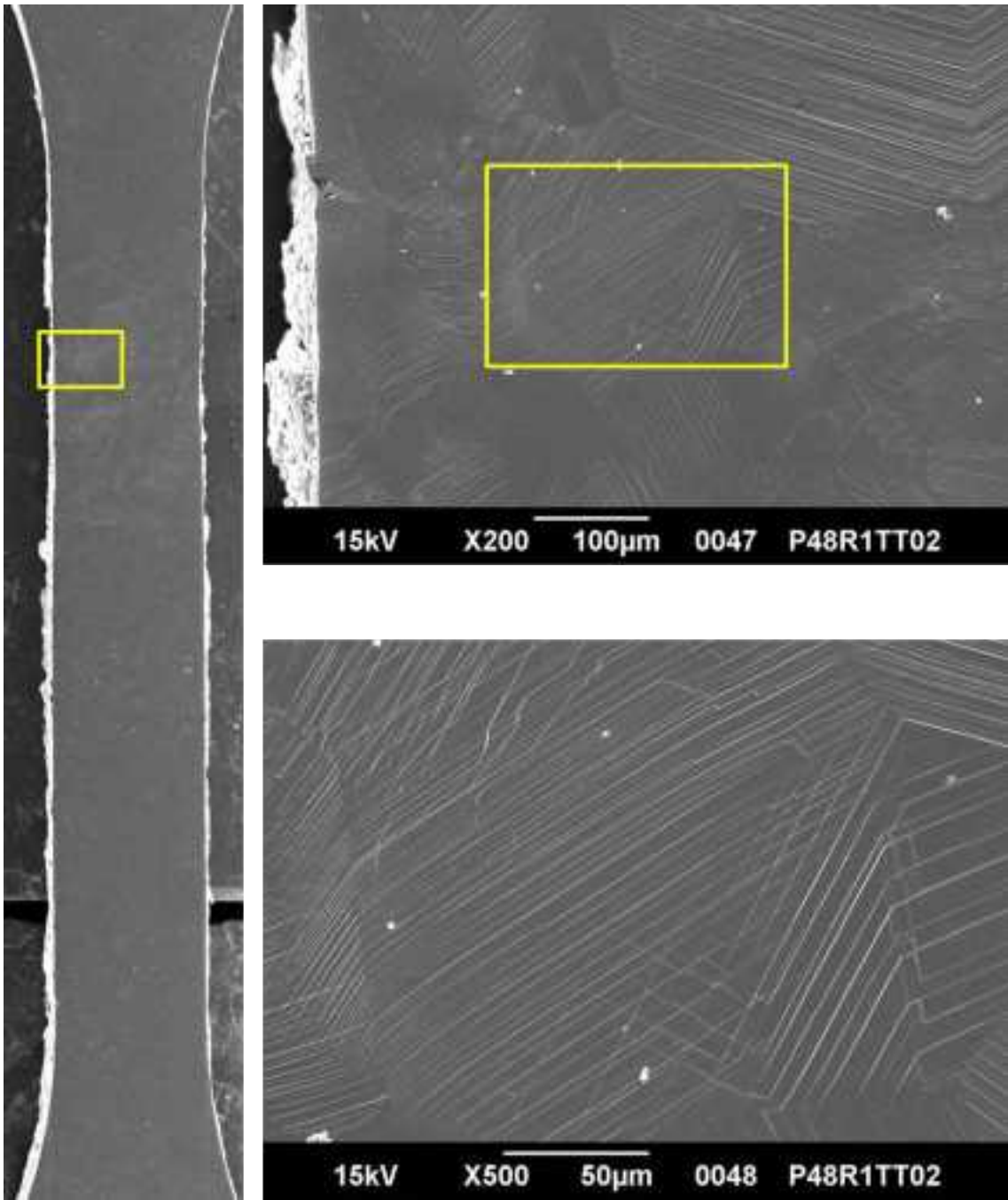


図 5.2.4-30(4) 290°Cで2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT02)のSEM写真
(4/8)

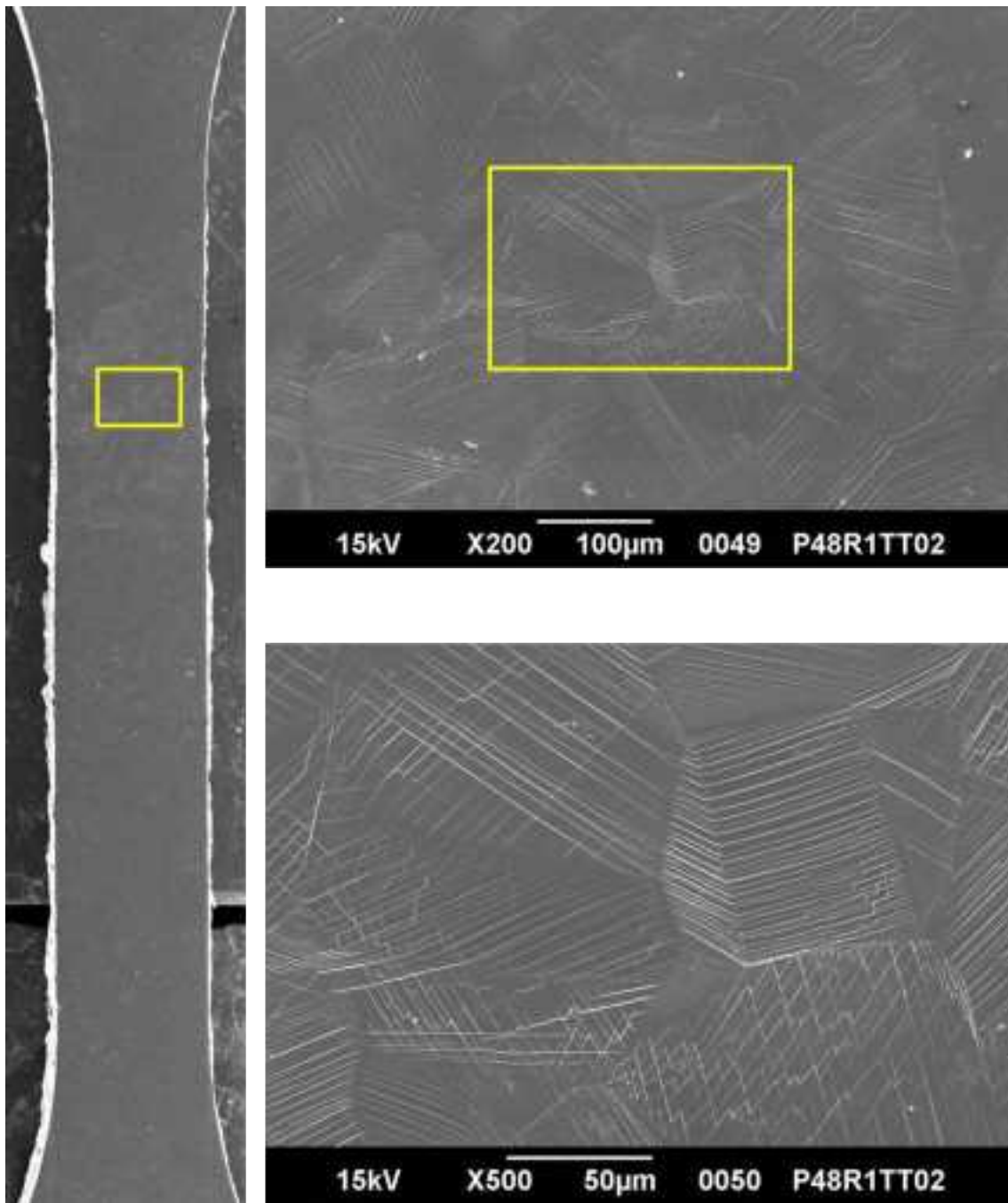


図 5.2.4-30(5) 290°Cで2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT02)のSEM写真
(5/8)

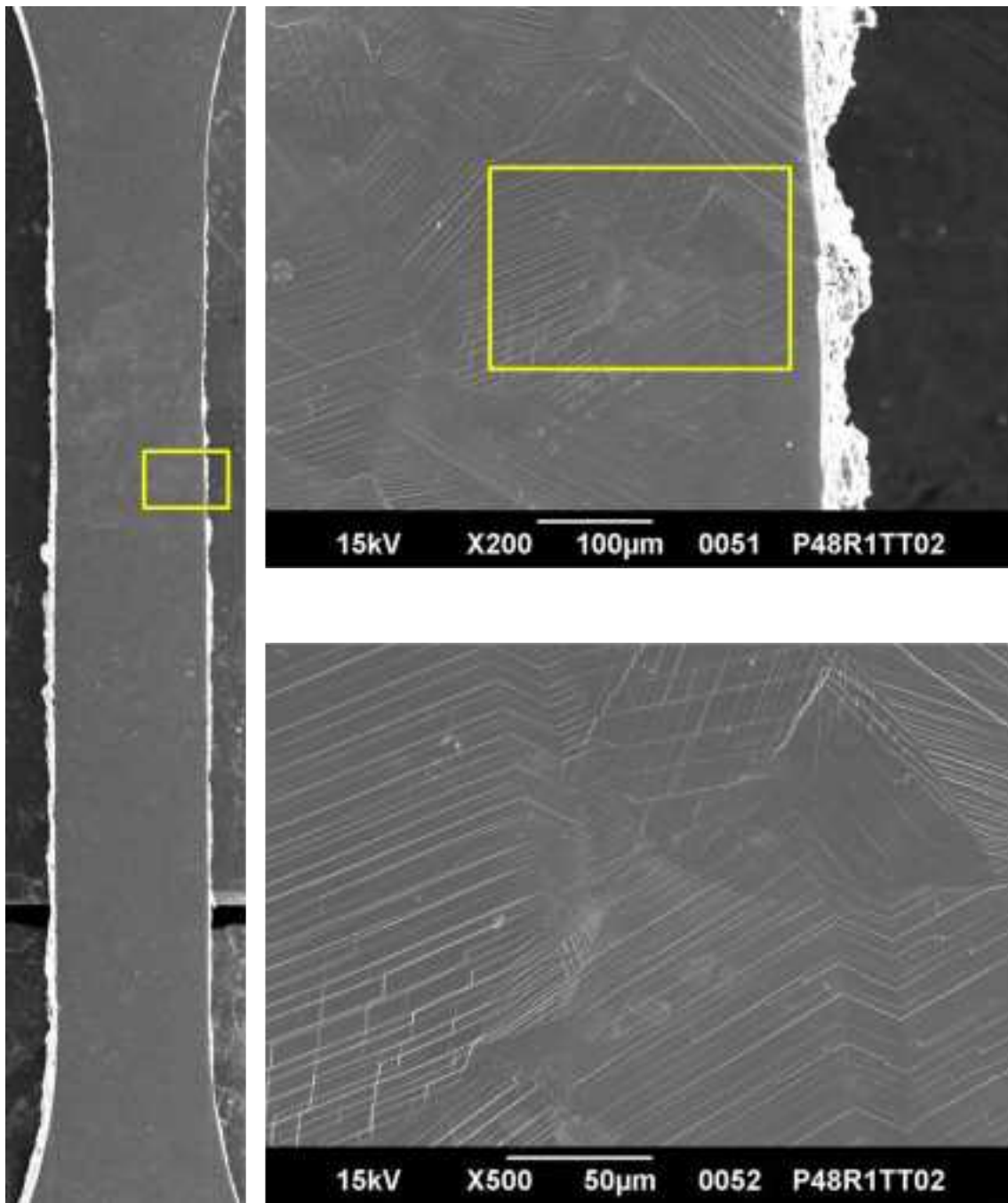


図 5.2.4-30(6) 290°Cで2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT02)のSEM写真
(6/8)

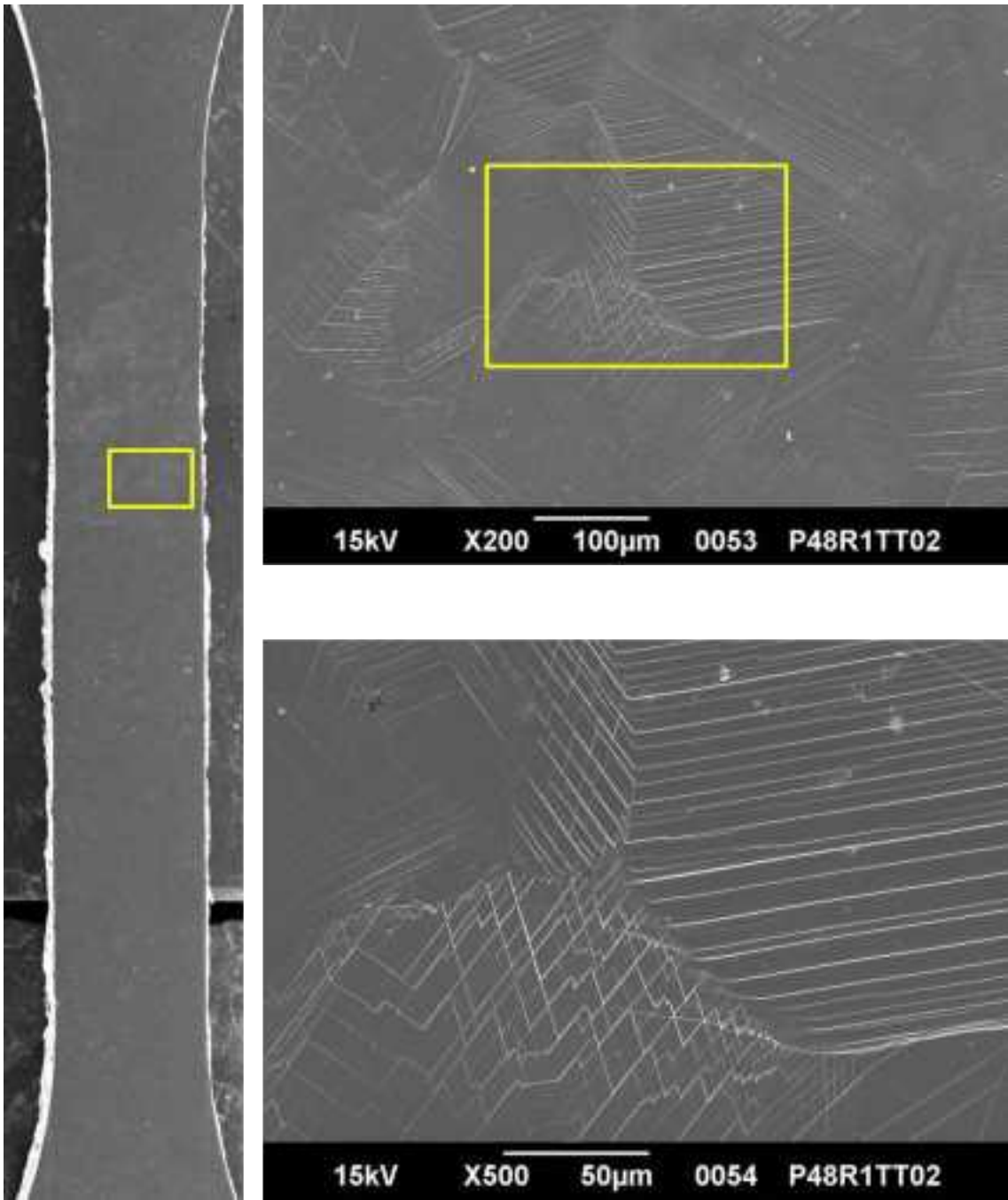


図 5.2.4-30(7) 290°Cで2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT02)のSEM写真
(7/8)

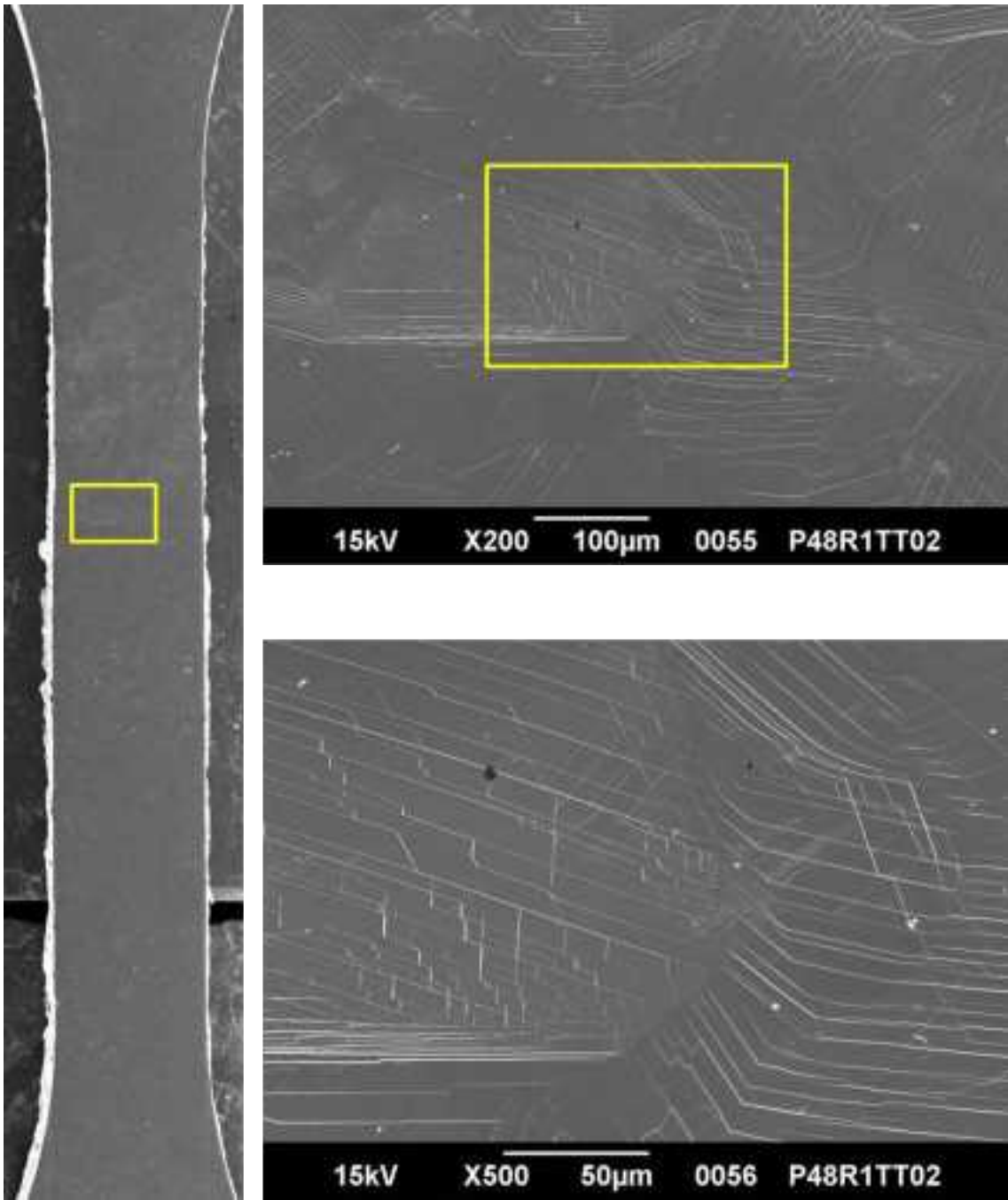


図 5.2.4-30(8) 290°Cで2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT02)のSEM写真
(8/8)

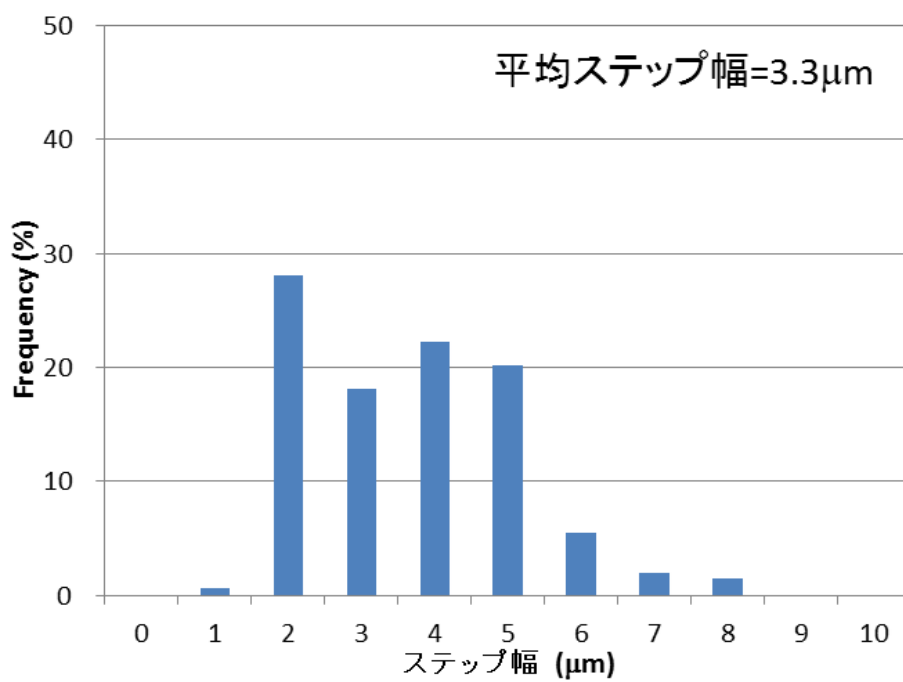


図 5.2.4-31 290°Cで2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT02)のステップ幅頻度分布

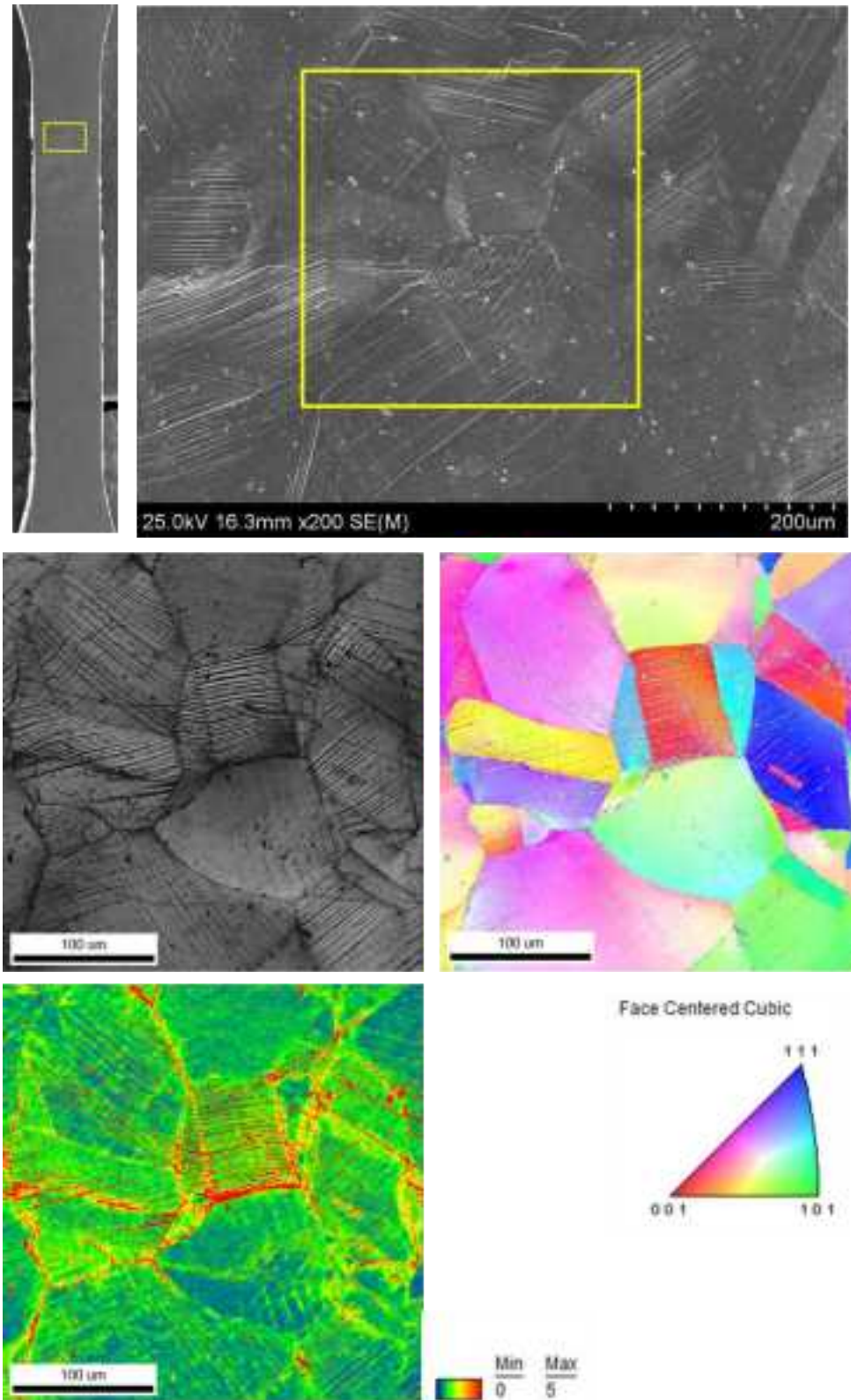


図 5.2.4-32(1) 290°Cで2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT02)のEBSD測定結果

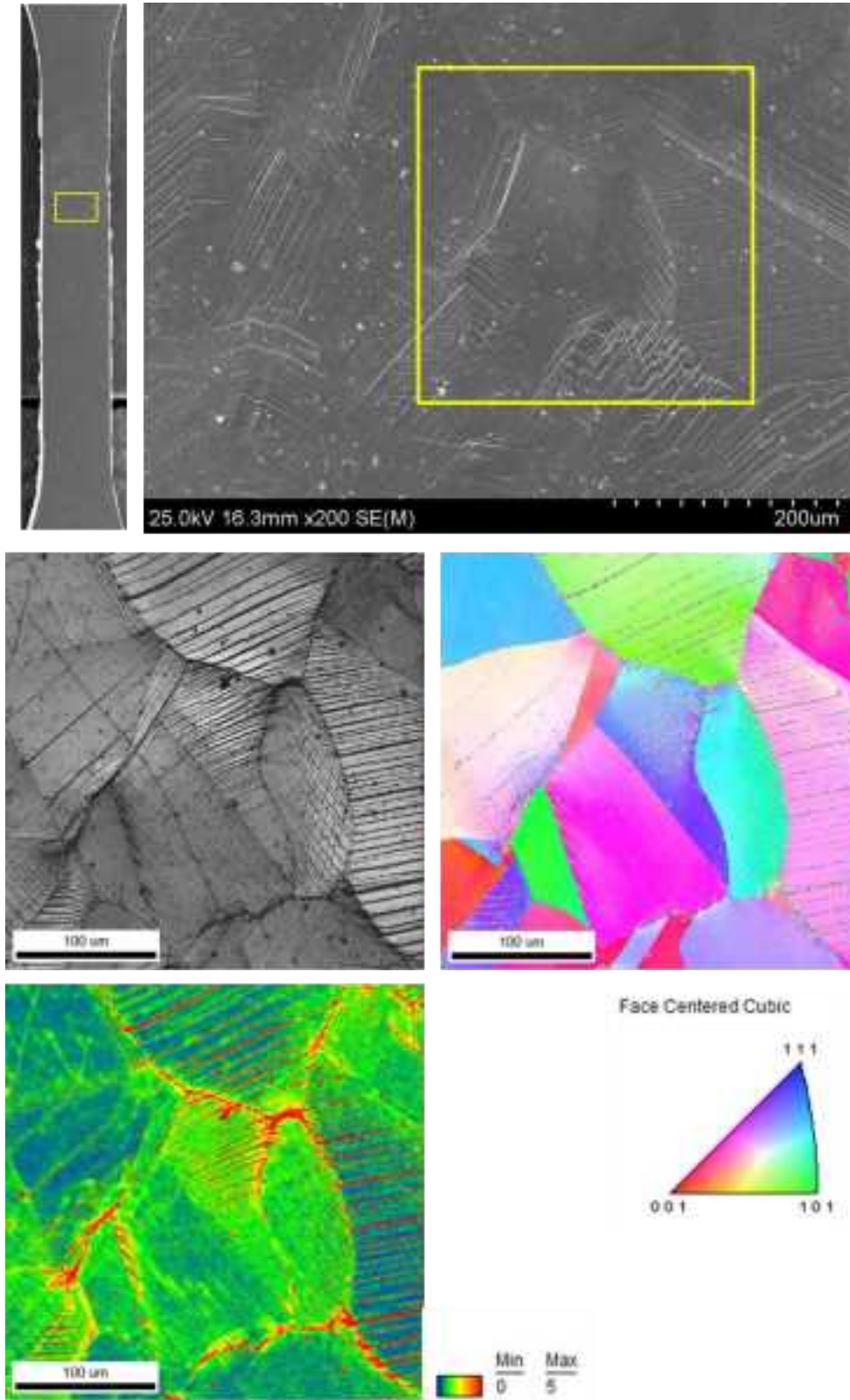
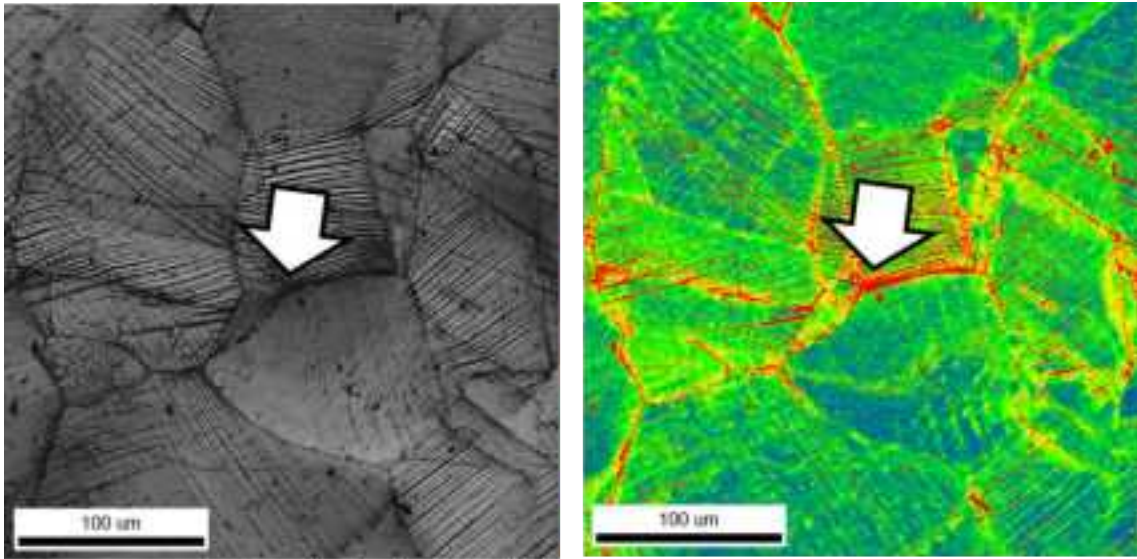


図 5.2.4-32(2) 290°Cで2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT02)の EBSD 測定結果



矢印方向から試料を70度傾斜して観察

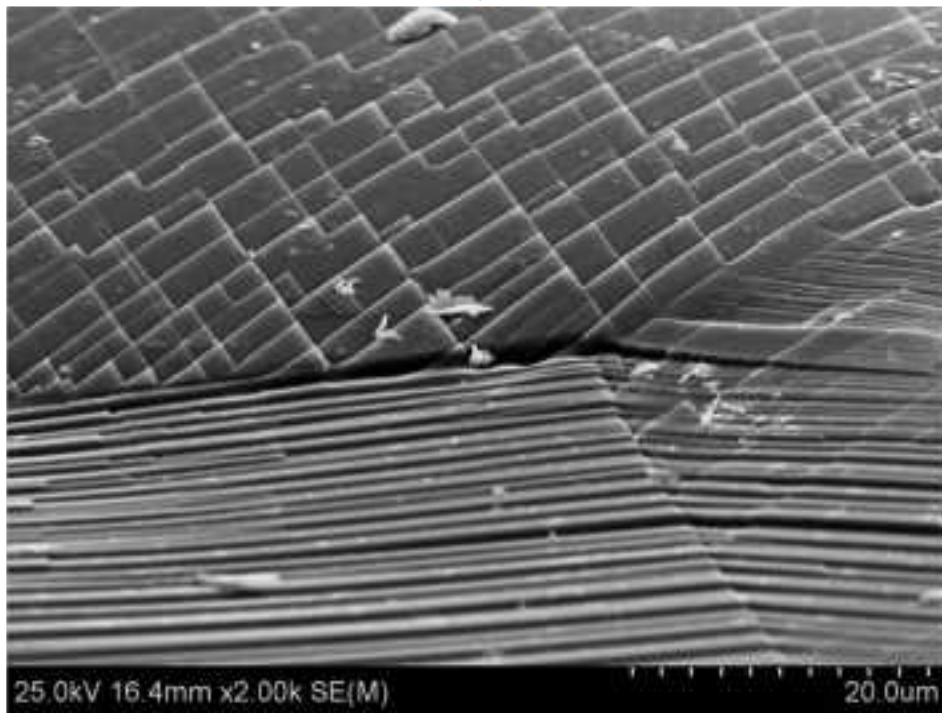
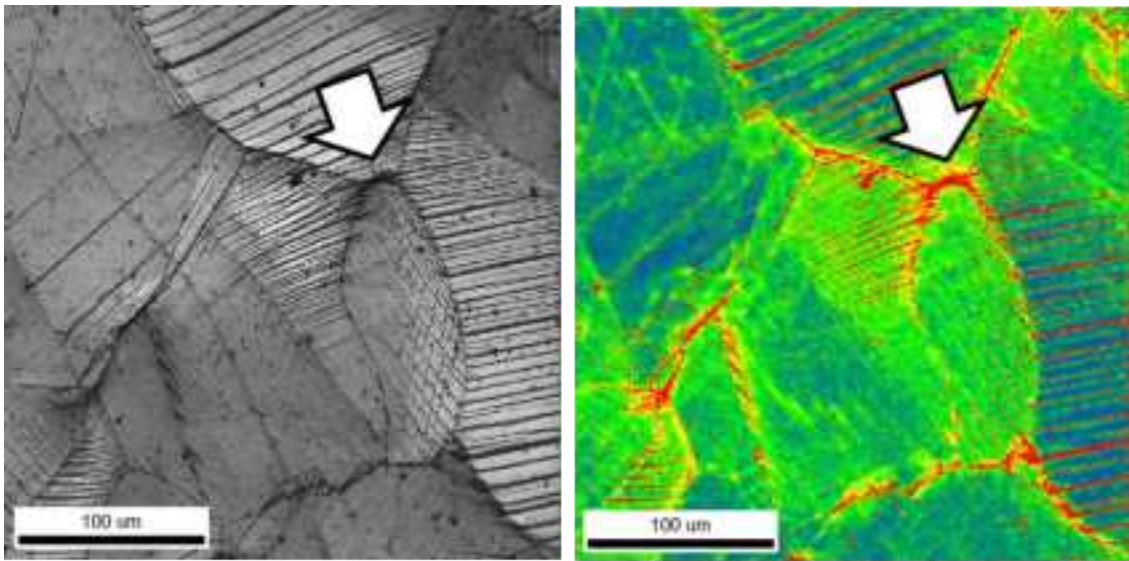


図 5.2.4-33(1) 290°Cで2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT02)の SEM 写真



矢印方向から試料を70度傾斜して観察

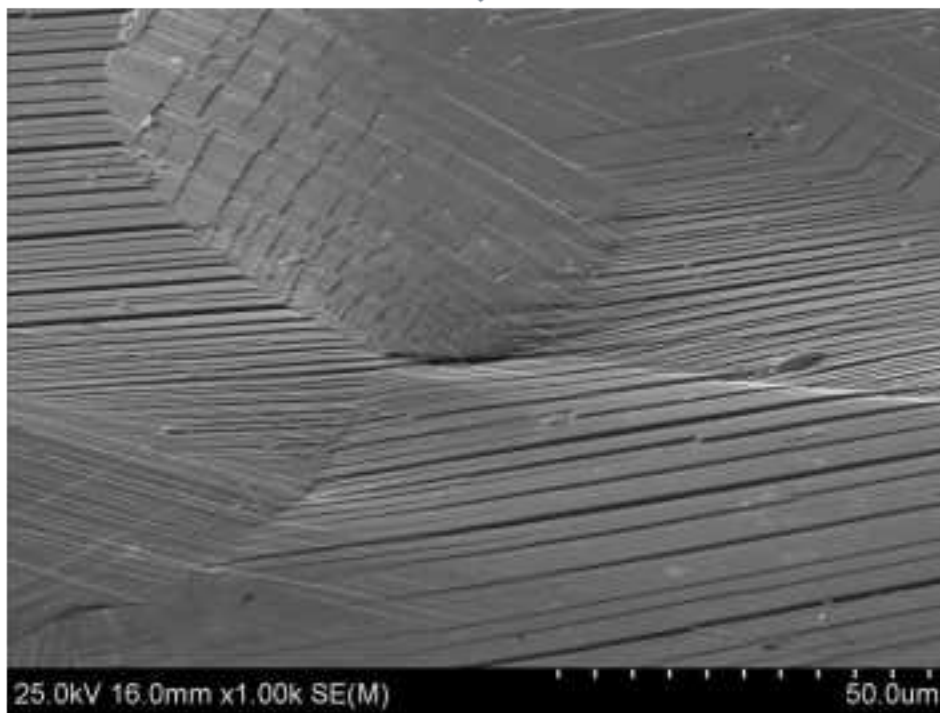


図 5.2.4-33(2) 290°Cで2%(目標値)までひずみ付与した引張試験片(TT02)の SEM 写真

c. ミクロ組織観察

(i) 実験方法

ミクロ組織観察の試験マトリクスを表 5.2.4-11 に示す。ミクロ組織観察により評価する項目は、①変形によるステップ高さ、②変形組織、③酸化皮膜性状、④粒界腐食の有無とした。

試験片 TT01 と TT02 では、ひずみ付与により表面に生じたステップ高さの変形組織を評価した。それぞれの EBSD 測定結果から、高ひずみ粒界でかつステップが高い粒界とステップが低い粒界を選択してミクロ組織を観察した。昨年度、室温でひずみ付与後浸漬試験に供した A135 および A440 の 0.1%ひずみ付与材と 2.0%ひずみ付与材については、酸化皮膜の性状と粒界腐食の有無について評価した。また、2.0%ひずみ付与材については、浸漬試験後ではあるがひずみ付与によるステップ高さを測定し、変形組織を評価した。なおミクロ組織観察用試験片の採取箇所は EBSD 測定結果を基に決定した。

表 5.2.4-11 ミクロ組織観察マトリクス

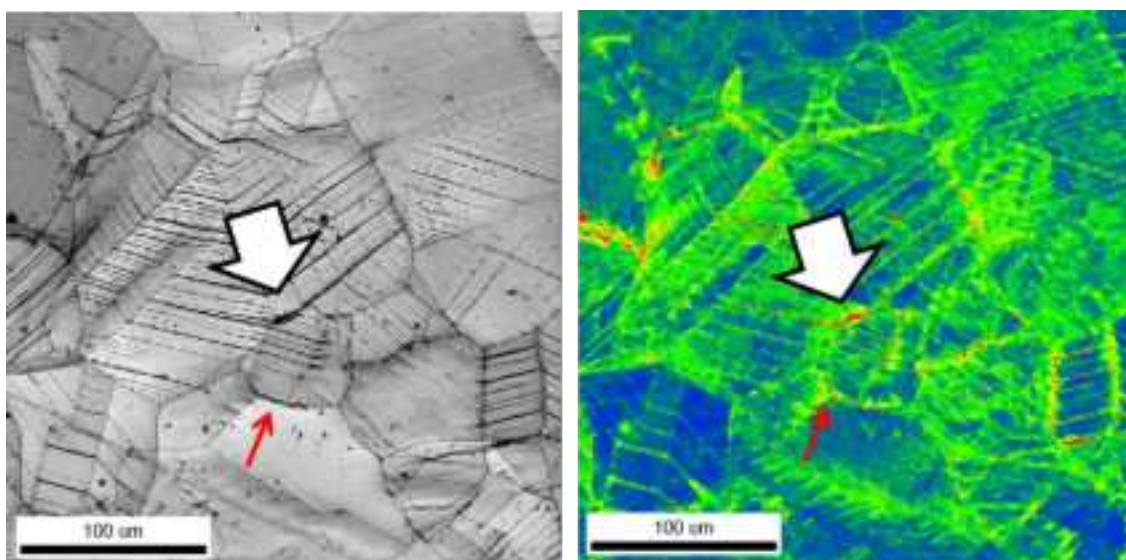
		浸漬試験片				引張試験片	
試験片名		A135		A440		TT01	TT02
照射量		5X10 ²⁴ n/m ²		7X10 ²⁵ n/m ²		7X10 ²⁵ n/m ²	
ひずみ付与温度		RT				RT	290°C
ひずみ量		0.1%	2.0%	0.1%	2.0%	2.0%	
TEM	ステップ高さ		3 (マトリックス) (ひずみ小GB) (ひずみ大GB)		3 (マトリックス) (ひずみ小GB) (ひずみ大GB)	2 (ひずみ大ステップ大GB) (ひずみ大ステップ小GB)	2 (ひずみ大ステップ大GB) (ひずみ大ステップ小GB)
	変形組織	1 (ひずみ小GB)		1 (ひずみ小GB)			
	皮膜性状						
	粒界腐食						

(ii)結果

(ア)TT01(試験温度：室温、ひずみ大、粒界ステップ小)

マイクロ組織採取箇所を図 5.2.4-34 に示す。マイクロ組織採取箇所は、EBSD 測定により KAM によるひずみが大きく、ステップが小さい粒界である、黄棒と赤矢印で示した箇所である。当該箇所は異なる方位のすべりステップが交差した粒界である。マイクロ組織を図 5.2.4-35 に示す。マイクロ組織の右側が図 5.2.4-34 の手前側である。作製した試料には粒界が 1 つ、ステップが 3 つ観察された。粒界には明瞭なステップは形成されていなかった。ステップの高さは 170 μm 、75 μm 、30 μm であった。粒界の左側には縦方向と横方向に双晶が多数生じていた(図 5.2.4-35(3))。左側の結晶粒に生じた双晶は高密度であり、わずかに歪んであり、ひずみ発生の原因になっていると考えられる。図 5.2.4-35(2)に示すようにステップは双晶と平行に形成されているが、ステップが形成されていない双晶もある。図のようなステップが双晶によって形成されるとは考えにくく、ステップは転位チャンネルにより形成したと推察される。図 5.2.4-35(5)では粒界近傍に転位が集中すると共に、粒界右側が隆起しており、変形によりひずみが蓄積していることを示唆している。

以上のように、本研究による変形組織観察の結果、試験片表面に生じたステップは転位チャンネルによるものと考えられる。また、ステップは粒界面にも形成されていた。そこで、本研究では、転位チャンネルによって生じたステップを「すべりステップ」、粒界面で生じたステップを「粒界ステップ」と呼ぶこととする。



矢印方向から試料を70度傾斜して観察

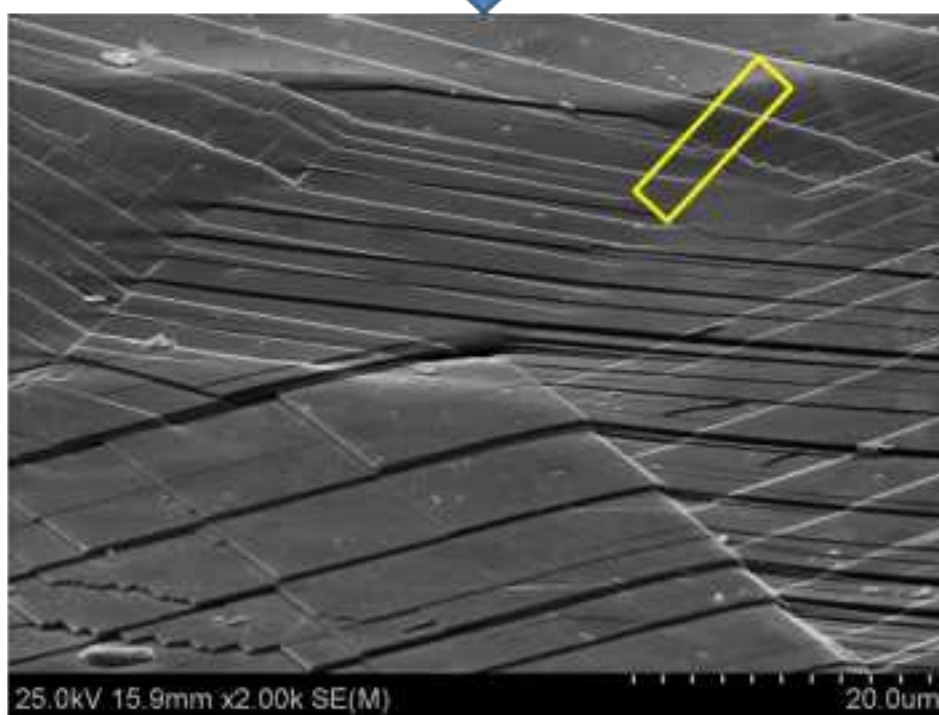
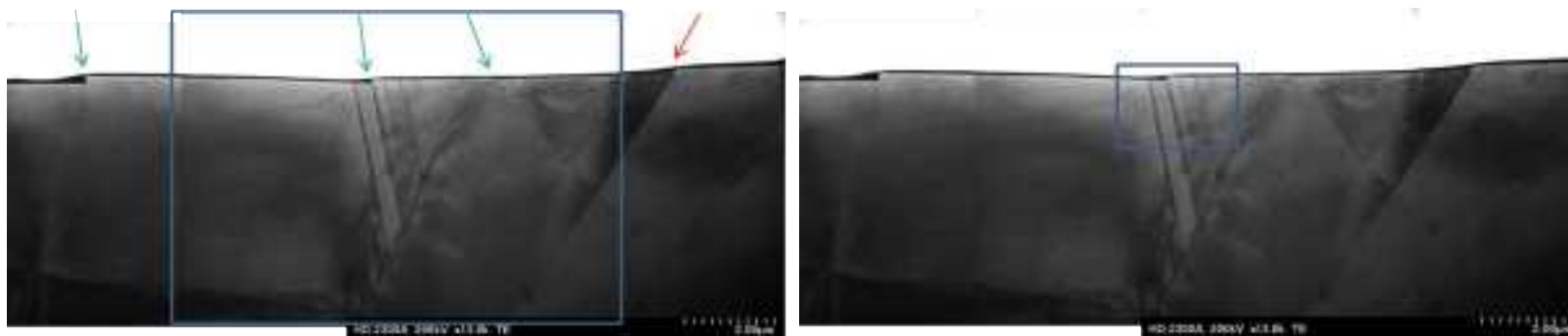


図 5.2.4-34 TT01(試験温度：室温)からのマイクロ組織試験片採取箇所
(ひずみ大、粒界ステップ小)



← 粒界
← すべりステップ

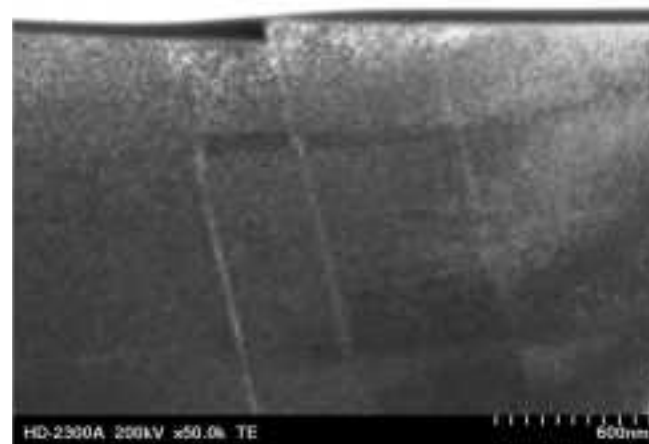


図 5.2.4-35(1) TT01(試験温度：室温、ひずみ大、粒界ステップ小)のマイクロ組織

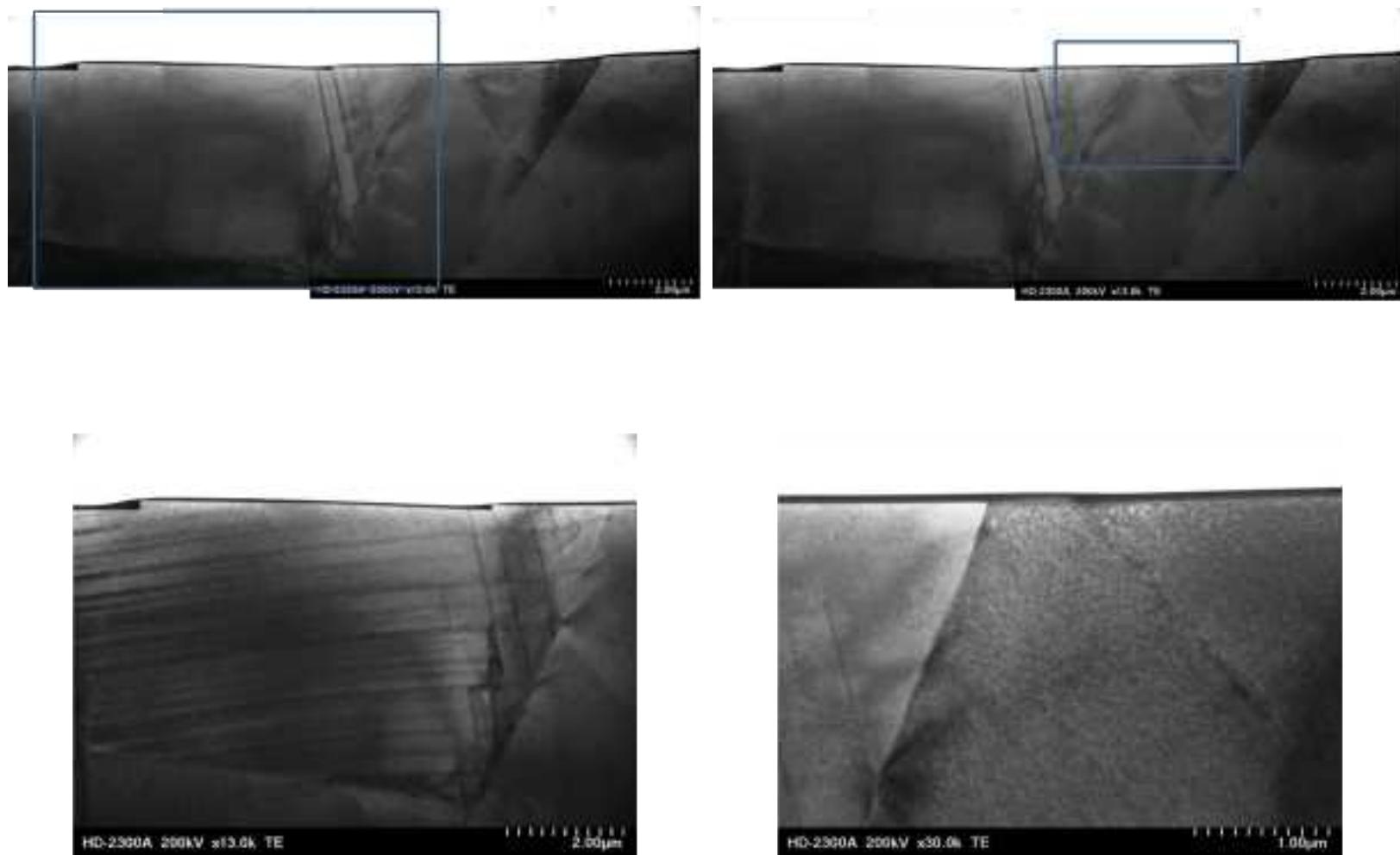


図 5.2.4-35(2) TT01(試験温度：室温、ひずみ大、粒界ステップ小)のマイクロ組織

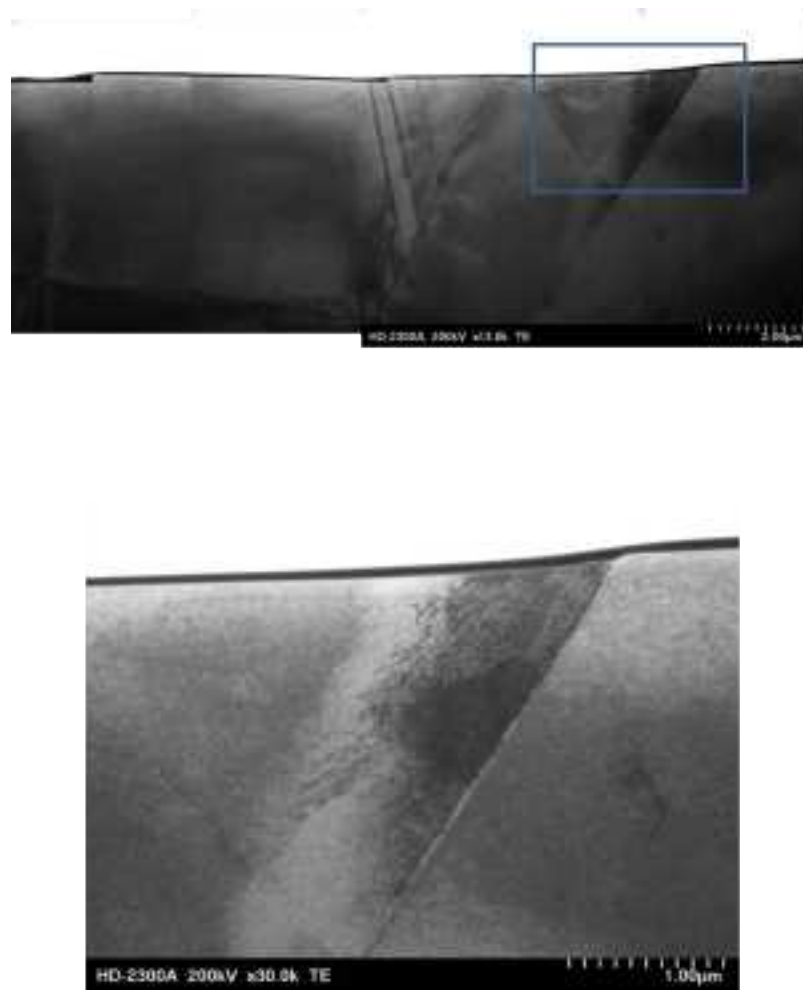
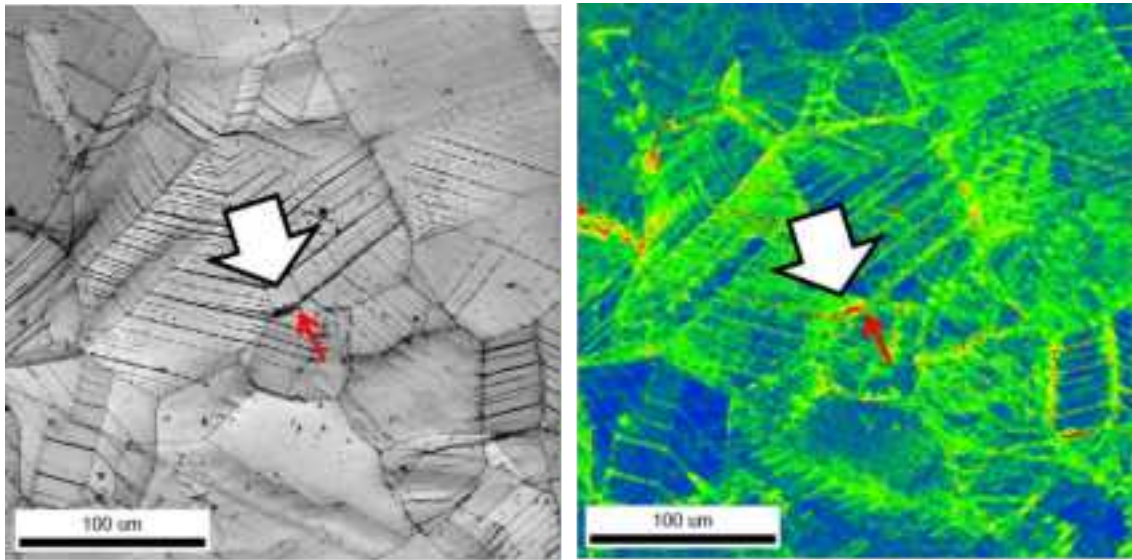


図 5.2.4-35(3) TT01(試験温度：室温、ひずみ大、粒界ステップ小)のマイクロ組織

(イ)TT01(試験温度：室温、ひずみ大、粒界ステップ大)

マイクロ組織採取箇所を図 5.2.4-36 に示す。マイクロ組織採取箇所は、EBSD 測定により KAM によるひずみが大きく、ステップが大きい粒界であり、黄枠と赤矢印で示した箇所である。マイクロ組織を図 5.2.4-37 に示す。作製した試料には、粒界が 1 つとすべりステップが 3 つ観察された。図 5.2.4-37(1)において青矢印で示す粒界ステップの高さは 630 μm であり、すべりステップの高さは 300 μm 、84 μm 、60 μm であった。粒界ステップ付近は顕著なひずみコントラストが発生しており、粒界ステップに対して低くなっている右側の結晶粒には高密度の双晶が生成していた(図 5.2.4-37(1))。これらの高密度な双晶は表面において変形しており、高ひずみの原因になっていると考えられる。粒界左側には転位チャネルによるすべりステップが形成し、そのすべりステップに直交するコントラストも見られる。図 5.2.4-37(1)の赤矢印で示すように、試料表面で微小なステップが見られるため、このコントラストは転位チャネルによると推察される。



矢印方向から試料を70度傾斜して観察

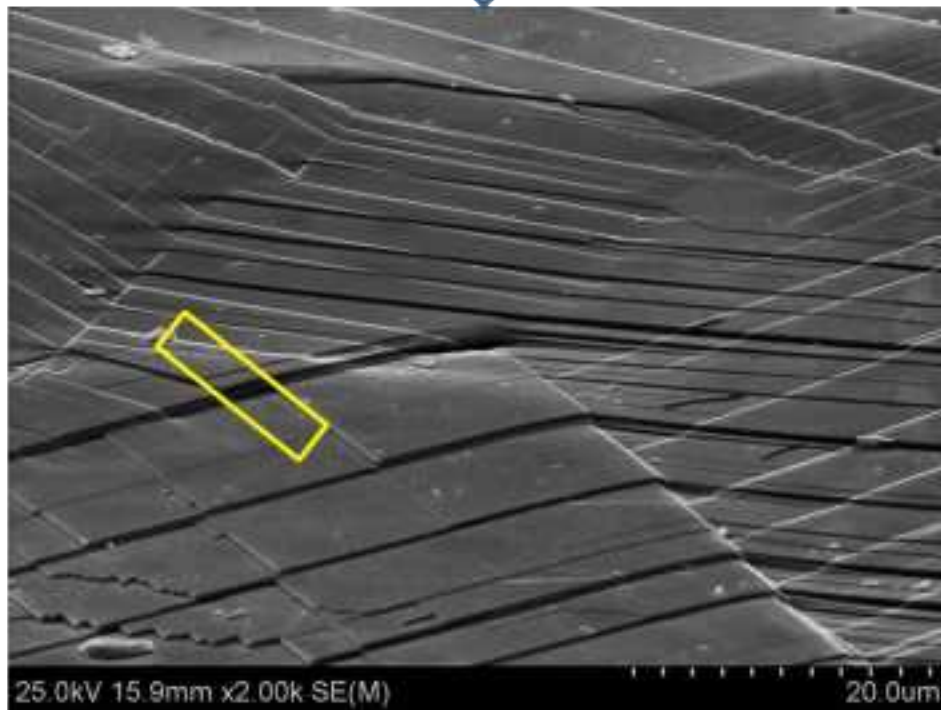


図 5.2.4-36 TT01(試験温度：室温)のマイクロ組織試験片採取箇所
(ひずみ大、粒界ステップ大)

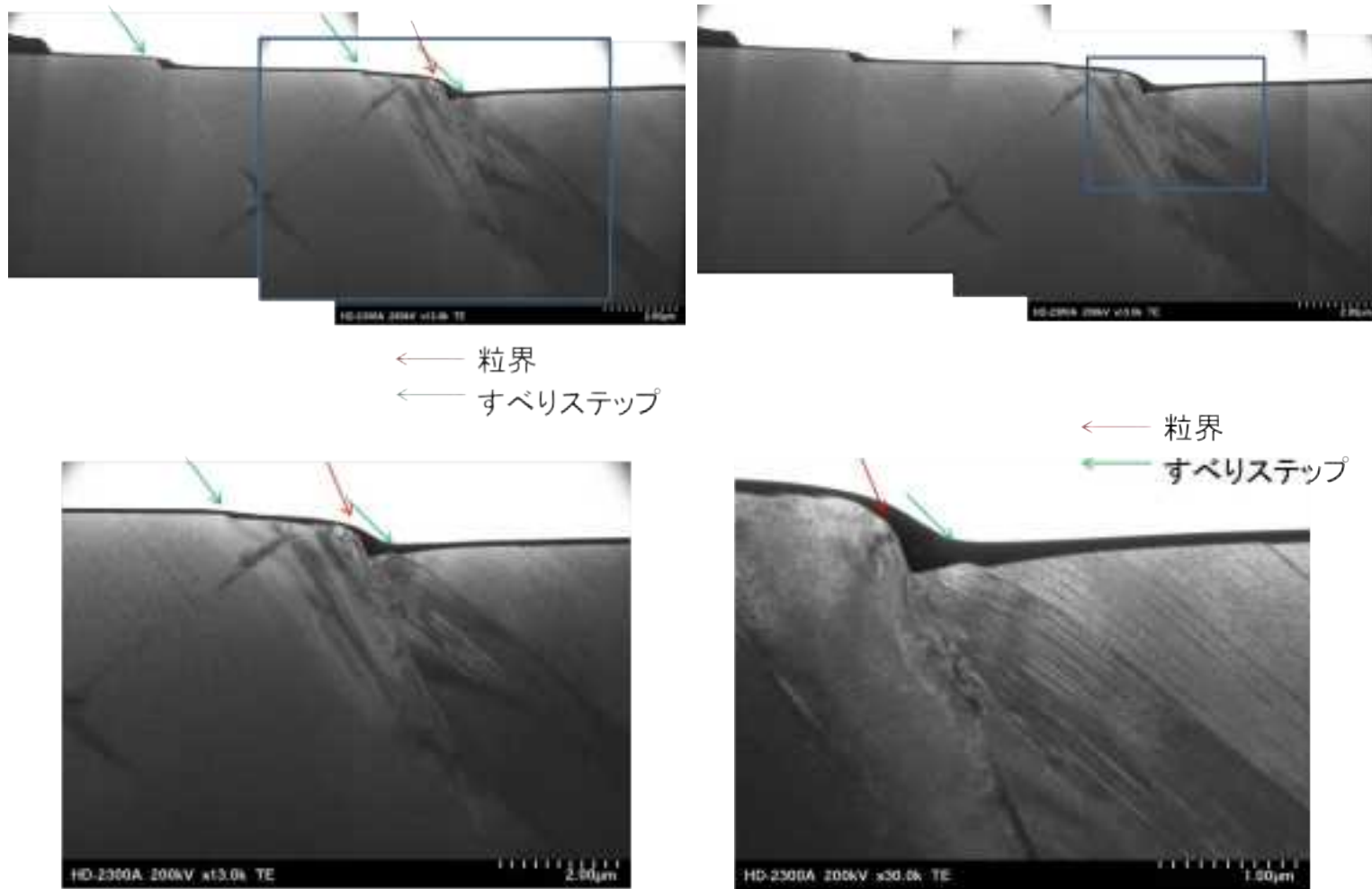


図 5.2.4-37(1) TT01(試験温度：室温、ひずみ大、粒界ステップ大)のマイクロ組織

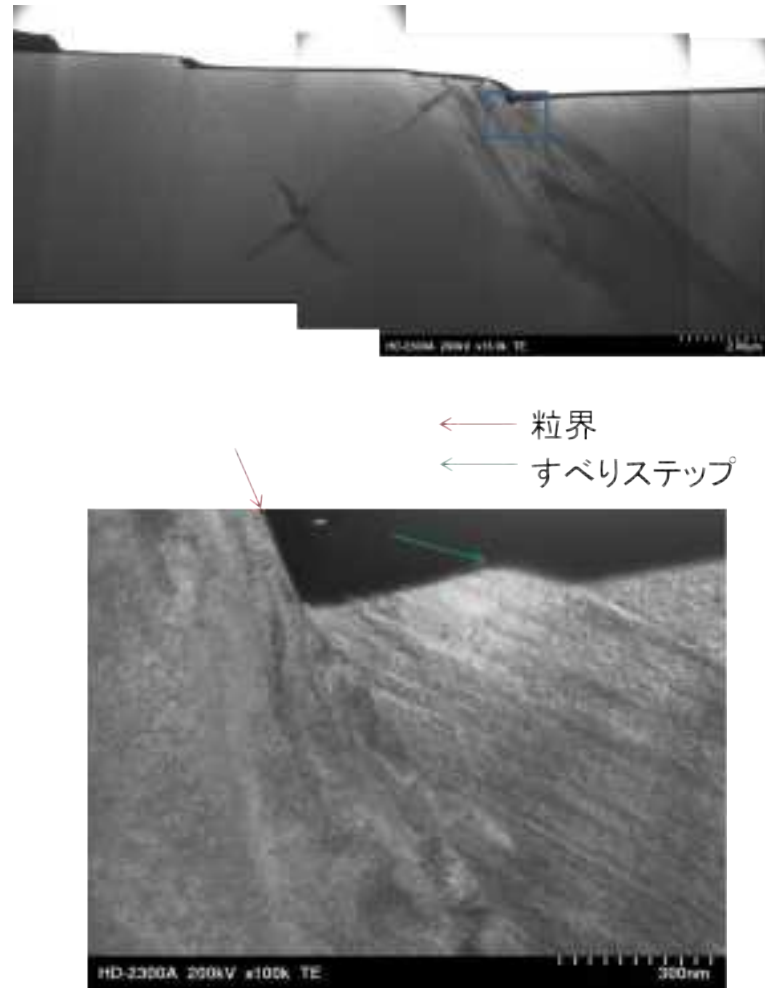
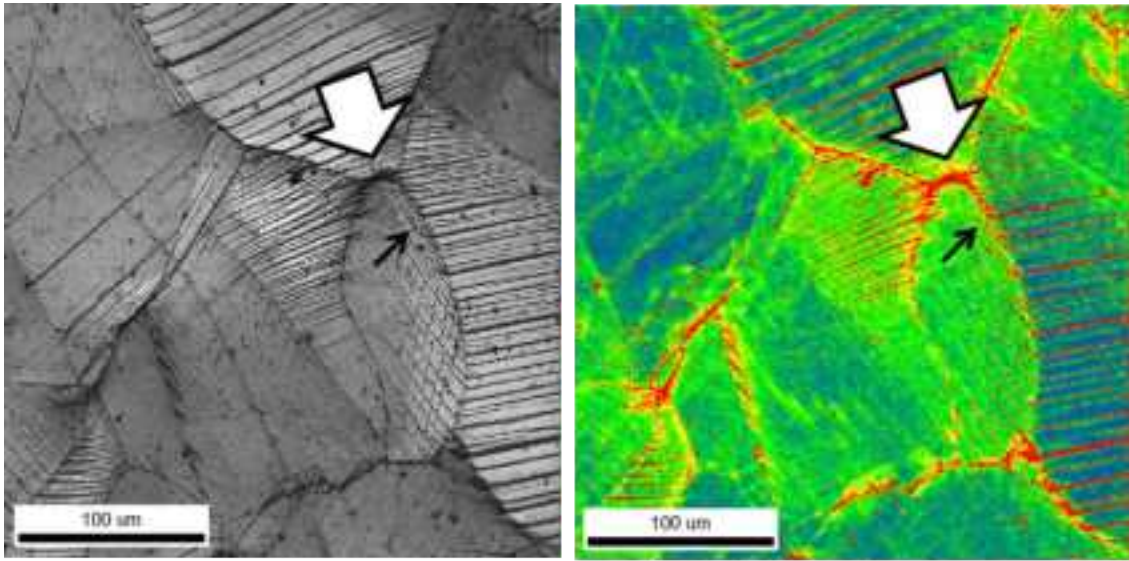


図 5.2.4-37(2)(1) TT01(試験温度：室温、ひずみ大、粒界ステップ大)のマイクロ組織

(ウ)TT02(試験温度：290℃、ひずみ大、粒界ステップ小)

マイクロ組織採取箇所を図 5.2.4-38 に示す。マイクロ組織採取箇所は、EBSD 測定により KAM によるひずみが大きく、ステップの小さい粒界である黄枠と黒矢印で示した箇所である。採取箇所は一方向のすべりステップにより変形した結晶粒と交差したすべりステップにより変形した結晶粒の粒界を含んでいる。マイクロ組織を図 5.2.4-39 に示す。粒界に対して左側が図 5.2.4-38 において交差したすべりステップが生じていた結晶粒である。作製した試料には、粒界が 1 つとすべりステップが 9 つ観察された。すべりステップの高さは、試料左から、119 μm 、86 μm 、291 μm 、53 μm 、212 μm 、165 μm 、357 μm 、176 μm 、139 μm であった。粒界はその周辺より 70 μm 程度凹んでいた。図 5.2.4-39(1)、-6(2)に示すように左側の結晶粒では転位チャンネルが交差して試料表面にぬけているため図 5.2.4-39(3)に示すように表面で凹凸が生じていた。図 5.2.4-39(4)に示すように粒界右側では転位チャンネルにより試験片表面にわずかにステップが生じており、転位チャンネルと粒界の交差点では粒界のずれが認められた。



矢印方向から試料を70度傾斜して観察

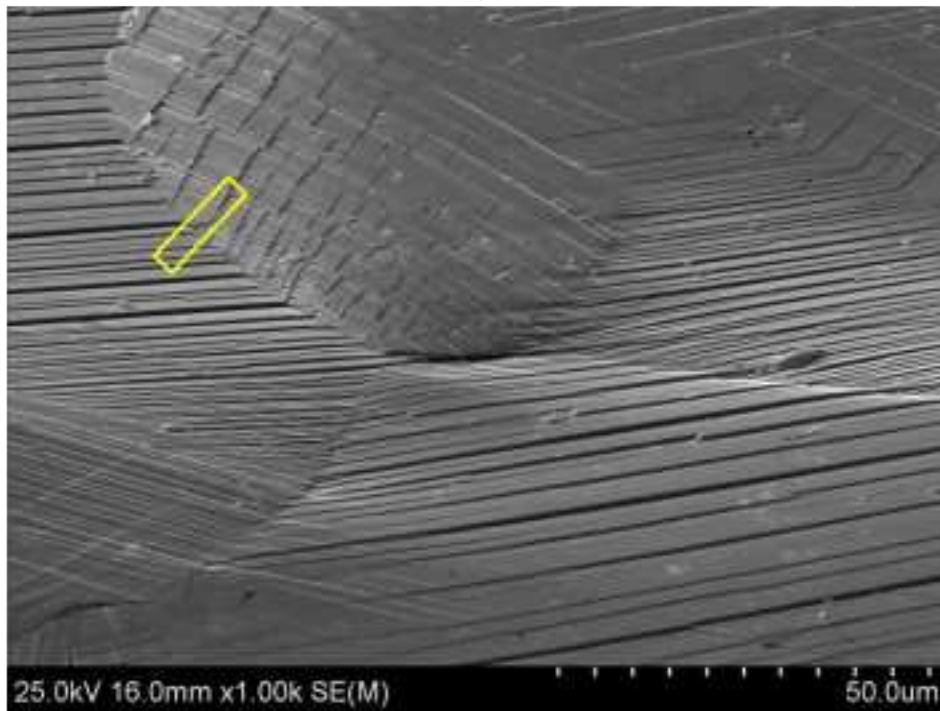


図 5.2.4-38 TT02 のマイクロ組織試験片採取箇所
(ひずみ大、粒界ステップ小)

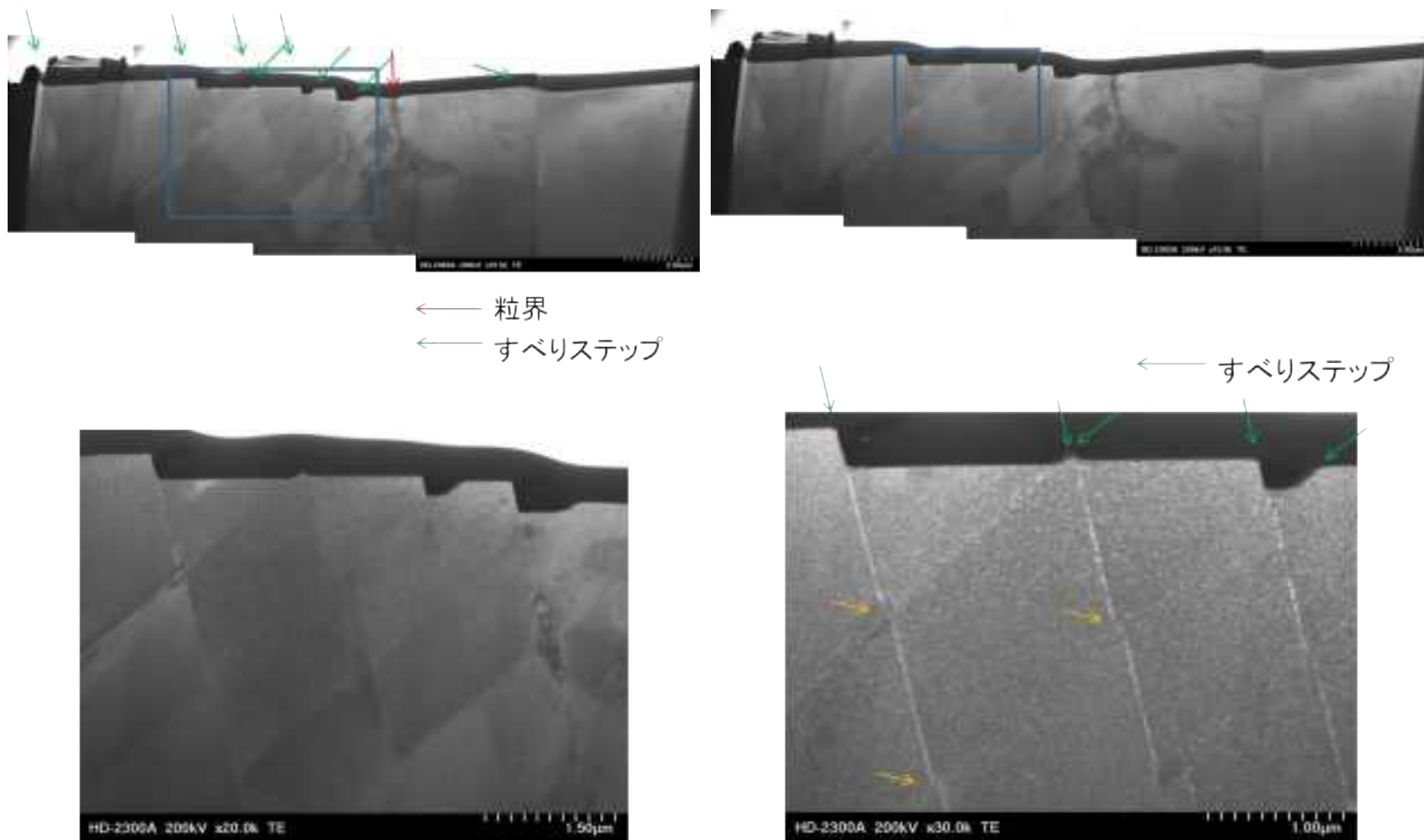


図 5.2.4-39(1) TT02(試験温度：290℃、ひずみ大、粒界ステップ大)のマイクロ組織

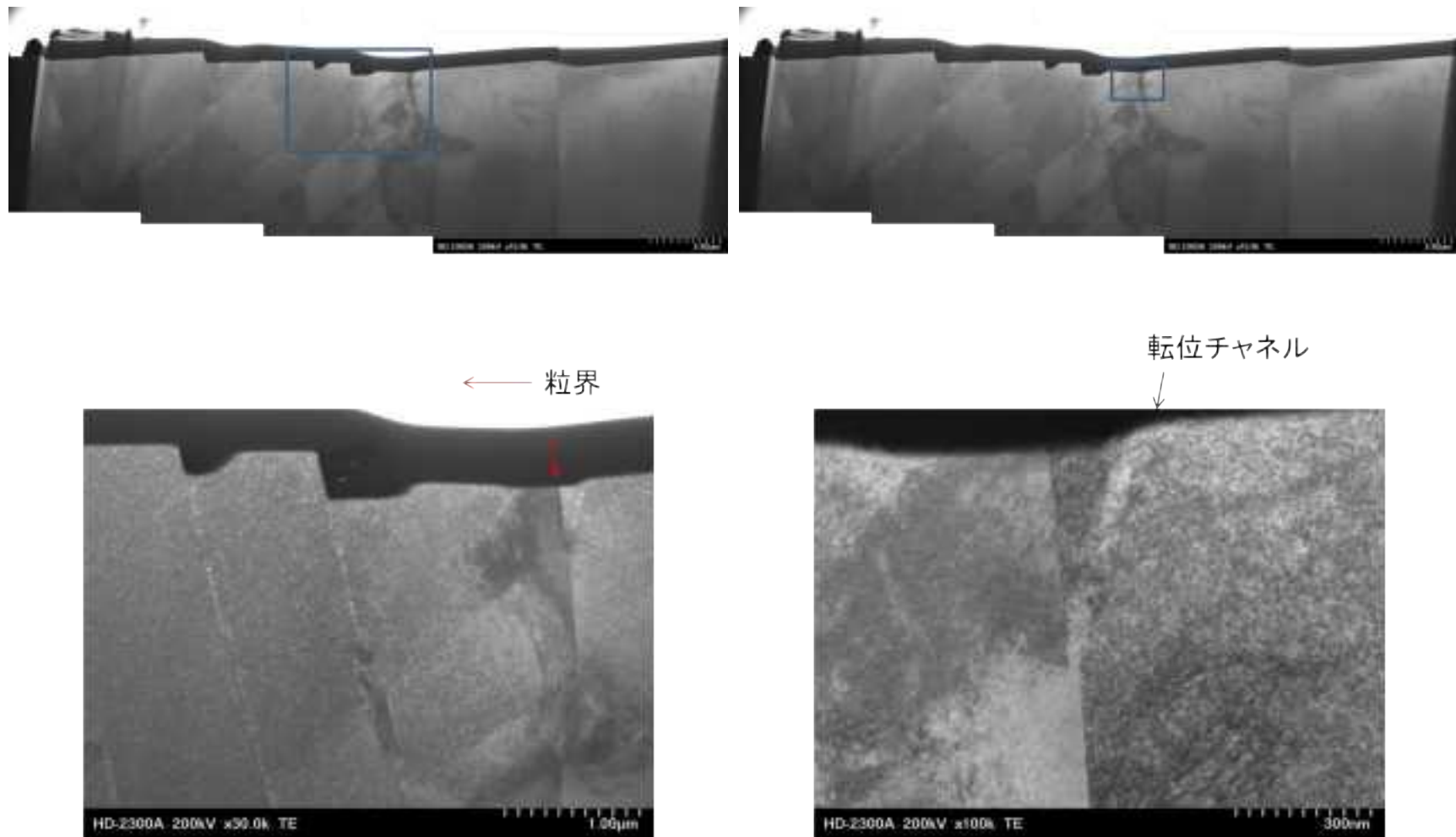
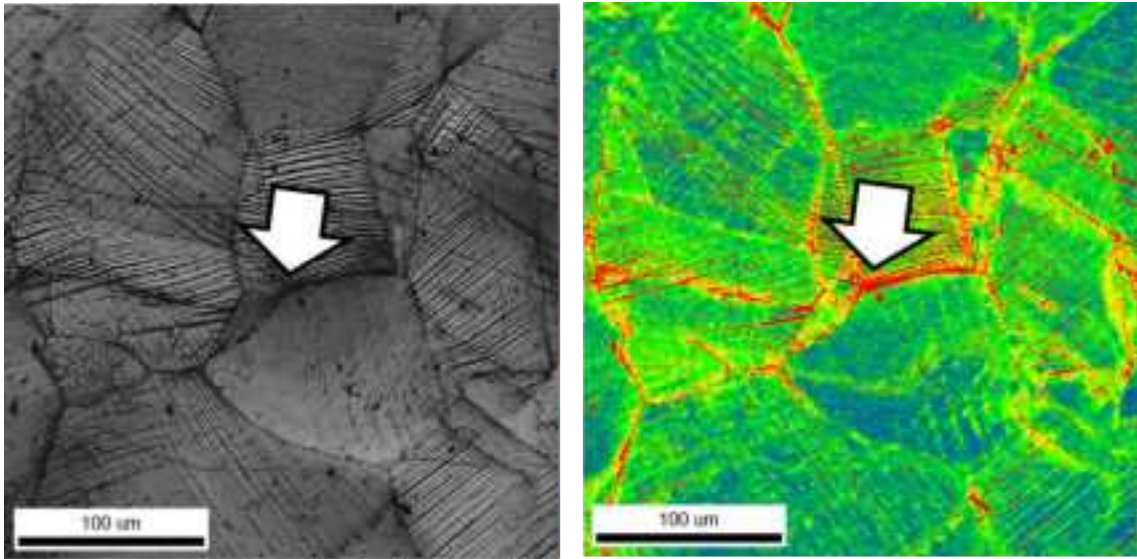


図 5.2.4-39(2) TT02(試験温度：290℃、ひずみ大、粒界ステップ大)のマイクロ組織

(エ) TT02(試験温度：290℃、ひずみ大、粒界ステップ大)

マイクロ組織採取箇所を図 5.2.4-40 に示す。マイクロ組織採取箇所は、EBSD 測定により KAM によるひずみが大きく、ステップの大きい粒界である黄枠で示した箇所であり、一方向のすべりステップにより変形した結晶粒と交差したすべりステップにより変形した結晶粒の界面を含んでいる。マイクロ組織を図 5.2.4-41 に示す。図 2.4.(3)-8 の右側が図 5.2.4-40 の下側となる。作製した試料には、粒界が 1 つとすべりステップが 7 つ観察された。すべりステップの高さは左から 200 μm 、357 μm 、61 μm 、152 μm 、99 μm 、258 μm 、238 μm であった。粒界は周辺よりも 440 μm 程度凹んでいた。粒界ステップに対して低くなっている右側の結晶粒には高密度の双晶が生じていた。双晶は直線上ではなく変形しており高ひずみ要因の一つになっていると考えられる。右側の結晶粒に見られるステップは転位チャンネルに因るものと考えられるが、図 5.2.4-41(4)に示すように、すべりステップと平行に双晶も形成している。



矢印方向から試料を70度傾斜して観察

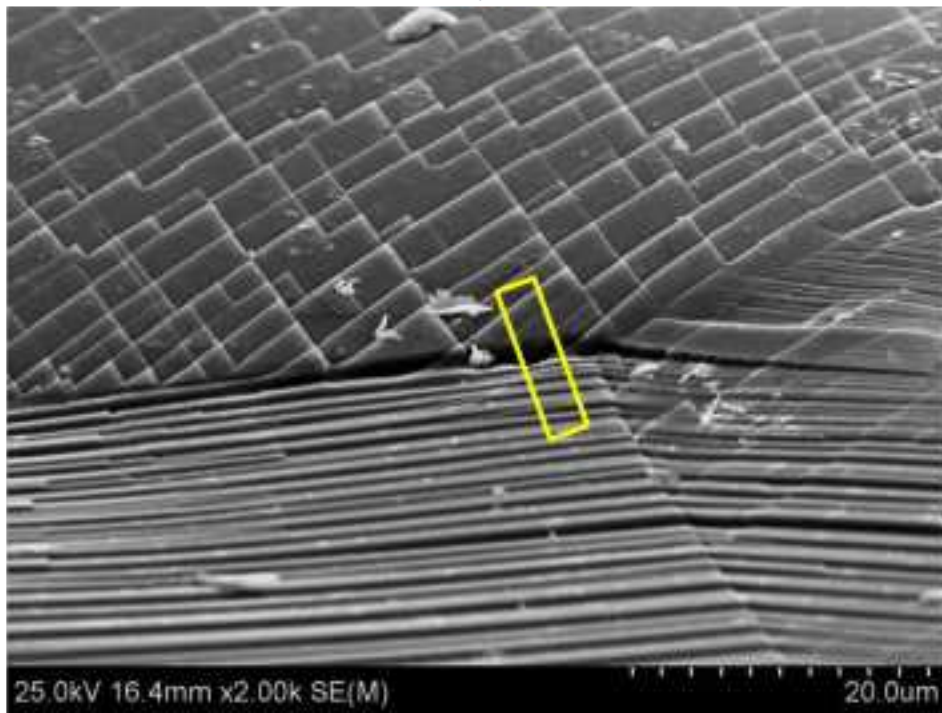


図 5.2.4-40 TT02 からのマイクロ組織試験片採取箇所
(ひずみ大、粒界ステップ大)

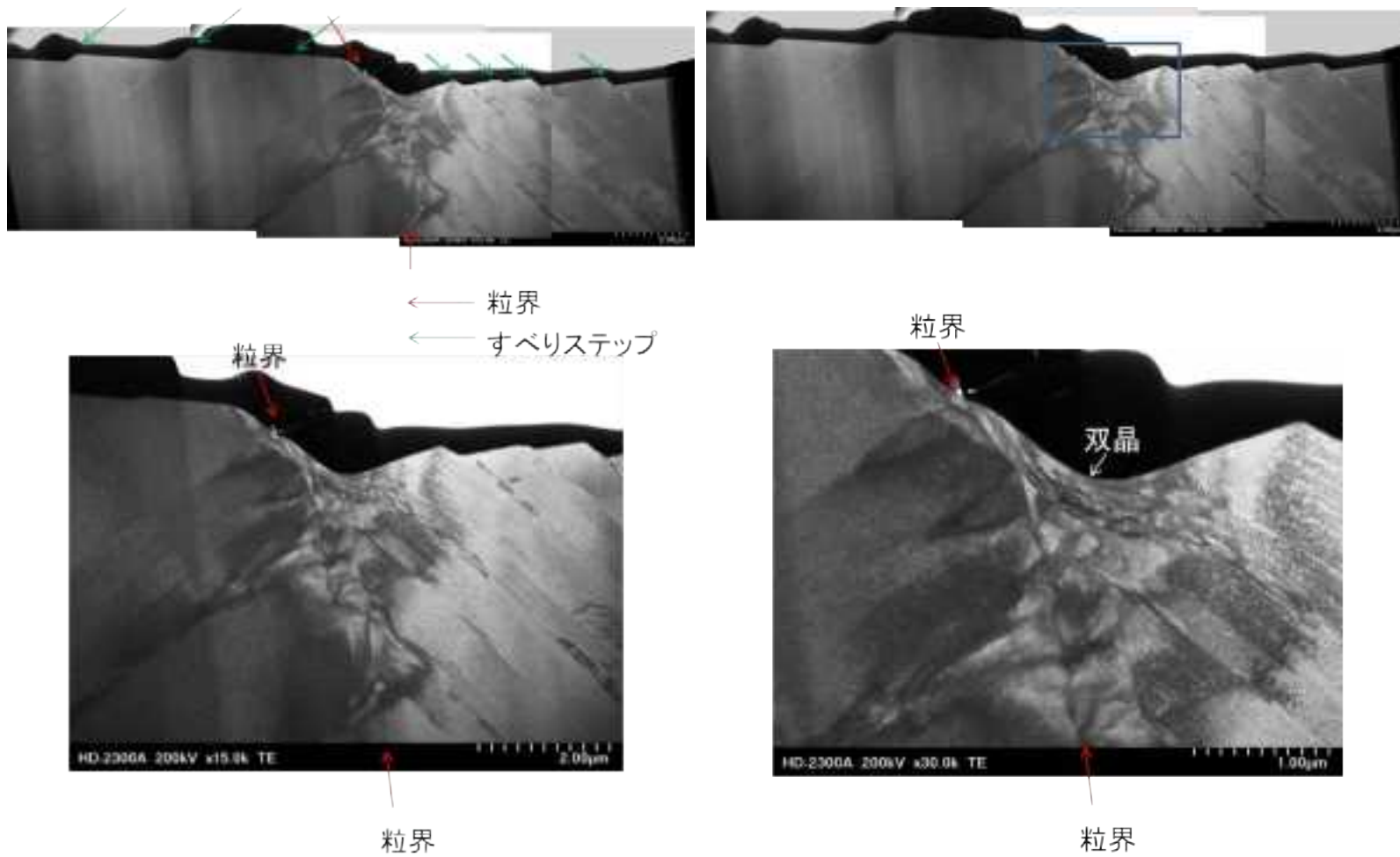


図 5.2.4-41(1) TT02(試験温度：290℃、ひずみ大、粒界ステップ大)のマイクロ組織



粒界



双晶

粒界

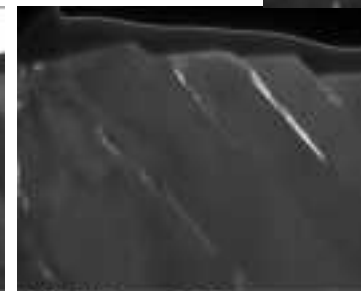
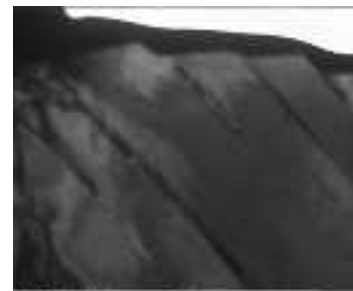
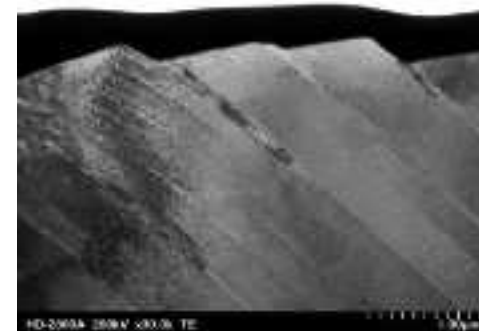


図 5.2.4-41(2) TT02(試験温度：290°C、ひずみ大、粒界ステップ大)のマイクロ組織

(オ)A135(0.1%ひずみ付与材)

マイクロ組織採取箇所を図 5.2.4-42 に示す。マイクロ組織採取箇所は、EBSD 測定により KAM によるひずみが小さい粒界である。マイクロ組織を図 5.2.4-43 に示す。マイクロ組織は原子番号に依存した像が得られる Z コントラスト像(以下 ZC 像と略す)と透過像(以下 TE 像と略す)を示す。ZC 像は原子番号が小さい箇所が暗いコントラストに、原子番号が大きい箇所が明るいコントラストとなるため、酸化物の判別が容易である。作製した試料には粒界が 1 つ観察された。試料表面側には酸化被膜が生成していた。また、酸化被膜上には外来由来の付着物が見られるが、これらは付着物の酸化物の評価から除外した。また、マイクロ組織観察の結果、変形組織は観察されなかった。

図 5.2.4-43 の ZC 像の 100 点につき酸化被膜厚さを測定した結果を図 5.2.4-44 に示す。酸化被膜の最大厚さは 141 nm、最小厚さは 24 nm であり、平均厚さは 75 nm であった。酸化被膜の回折像を図 5.2.4-45 に、EDX による組成マップを図 5.2.4-46 に、を原子数に半定量した組成マップ(at%)を図 5.2.4-46 に示す。組成マップから、金属/酸化被膜界面において Cr が濃化して内層酸化被膜となり、Fe と Ni を主とする外層酸化被膜が生成していることが示唆された。回折図形から外層酸化被膜は Fe-Ni スピネルと考えられる。

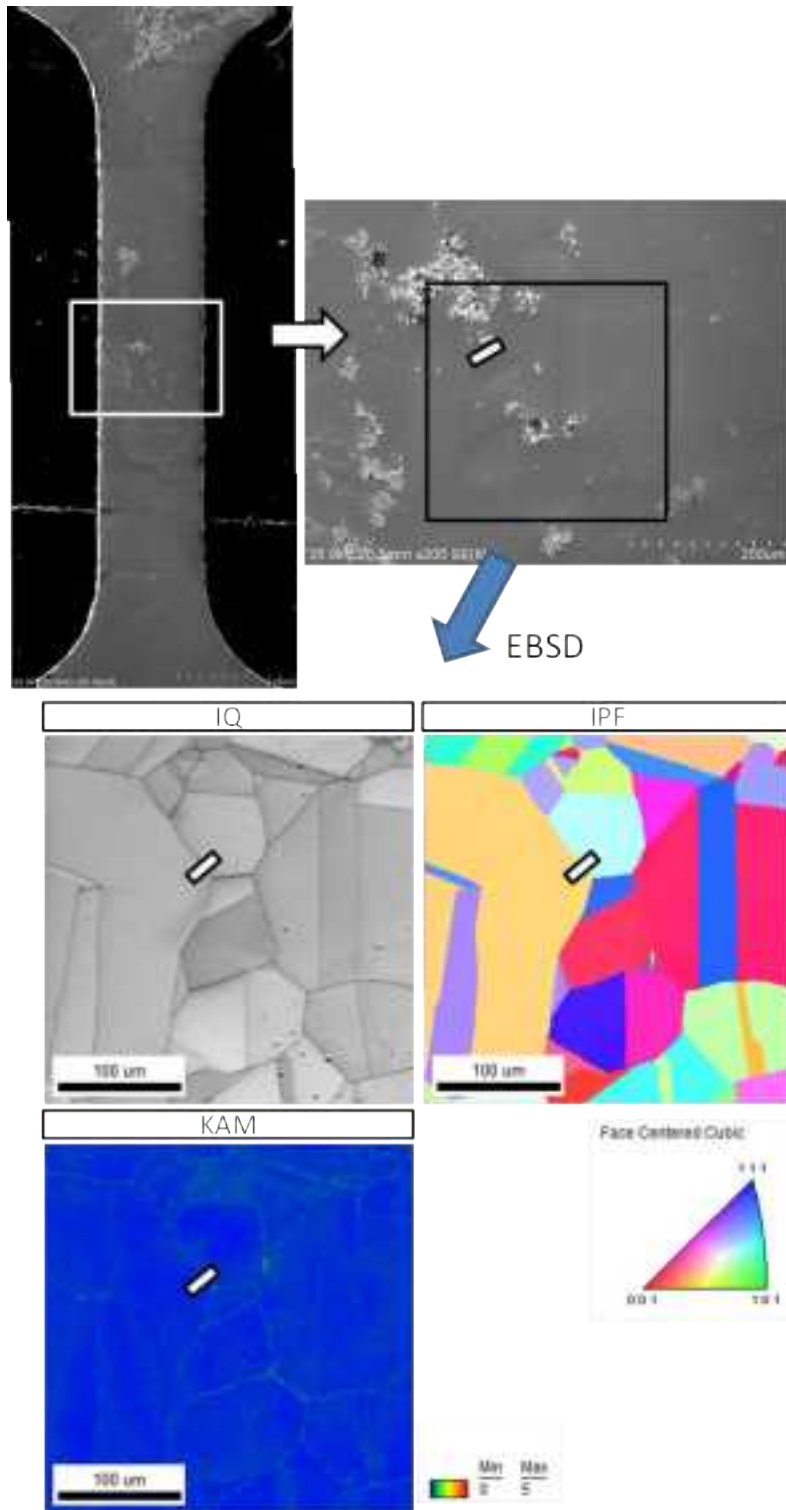


図 5.2.4-42 A135(0.1%ひずみ付与材)からのマイクロ組織試験片採取箇所

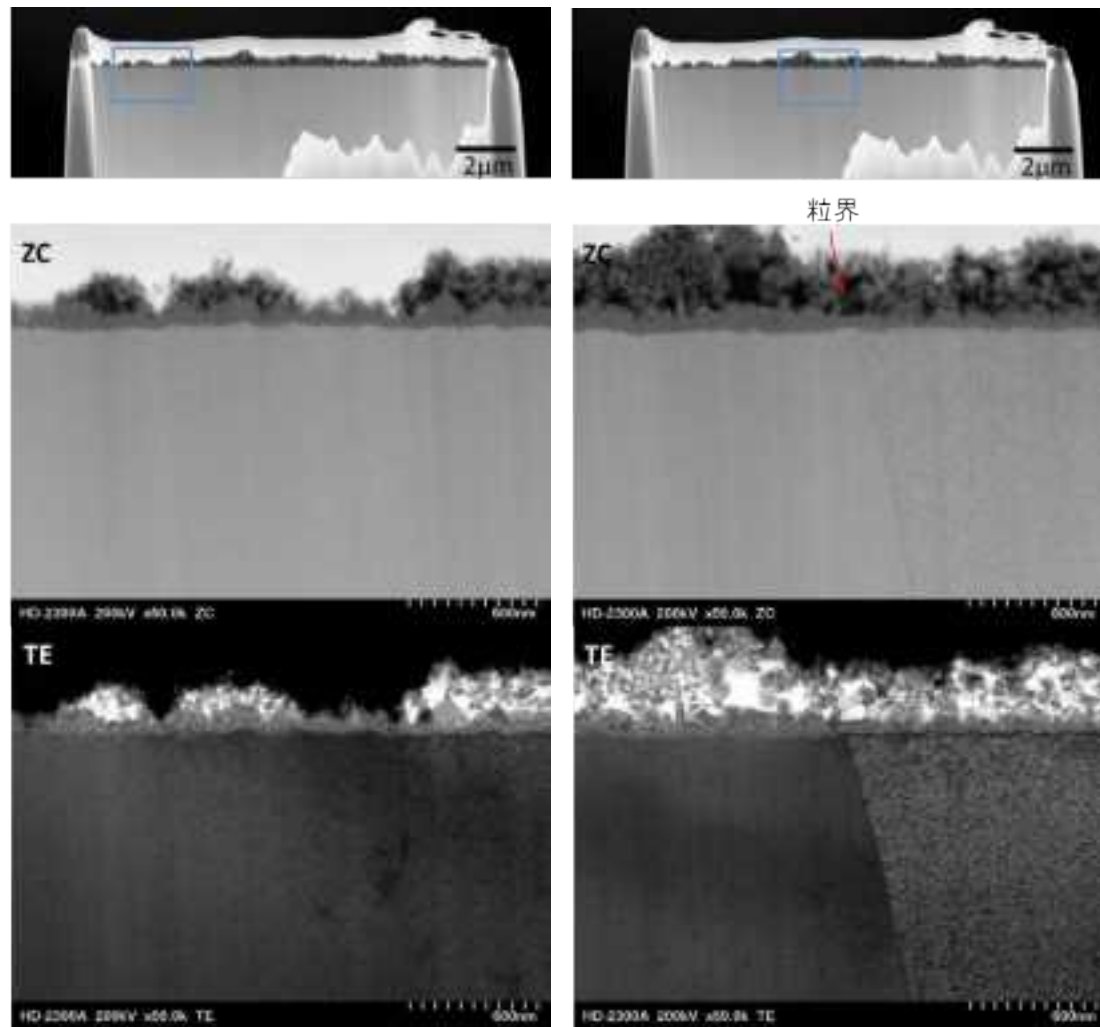


図 5.2.4-43(1) A135(0.1%ひずみ付与材)のマイクロ組織

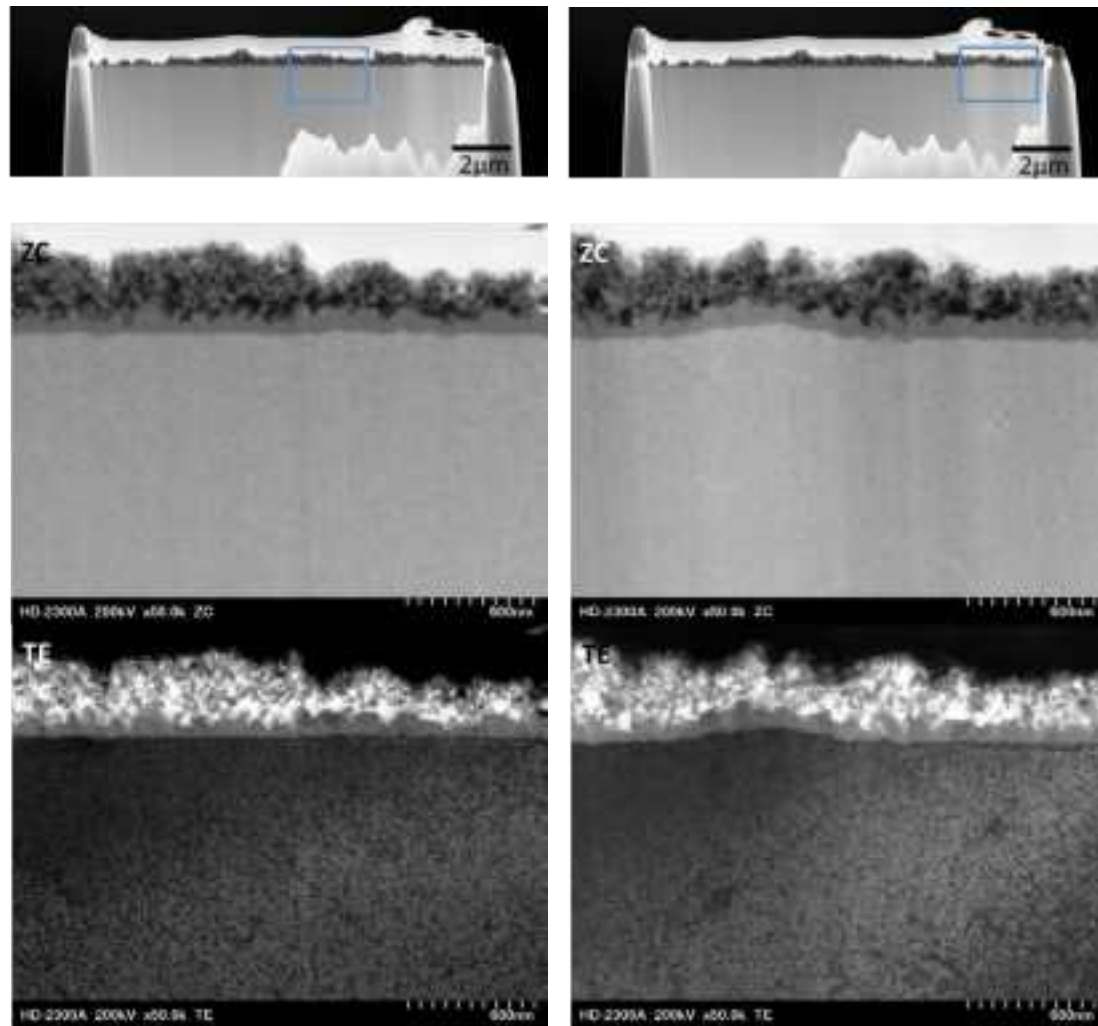


図 5.2.4-43(2) A135(0.1%ひずみ付与材)のマイクロ組織

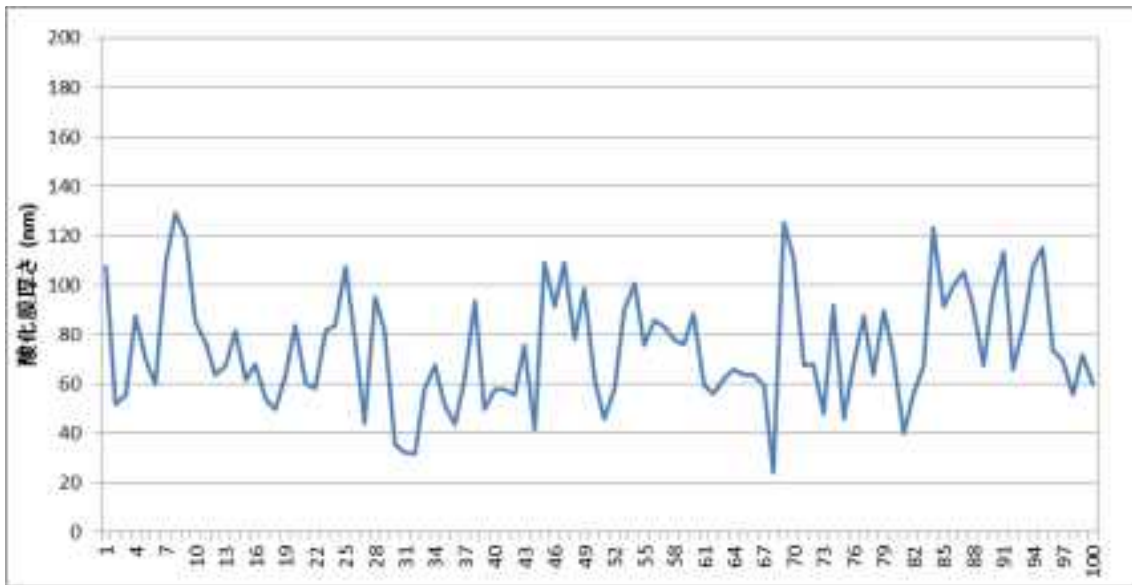


図 5.2.4-44 A135(0.1%ひずみ付与材)の酸化皮膜厚さ

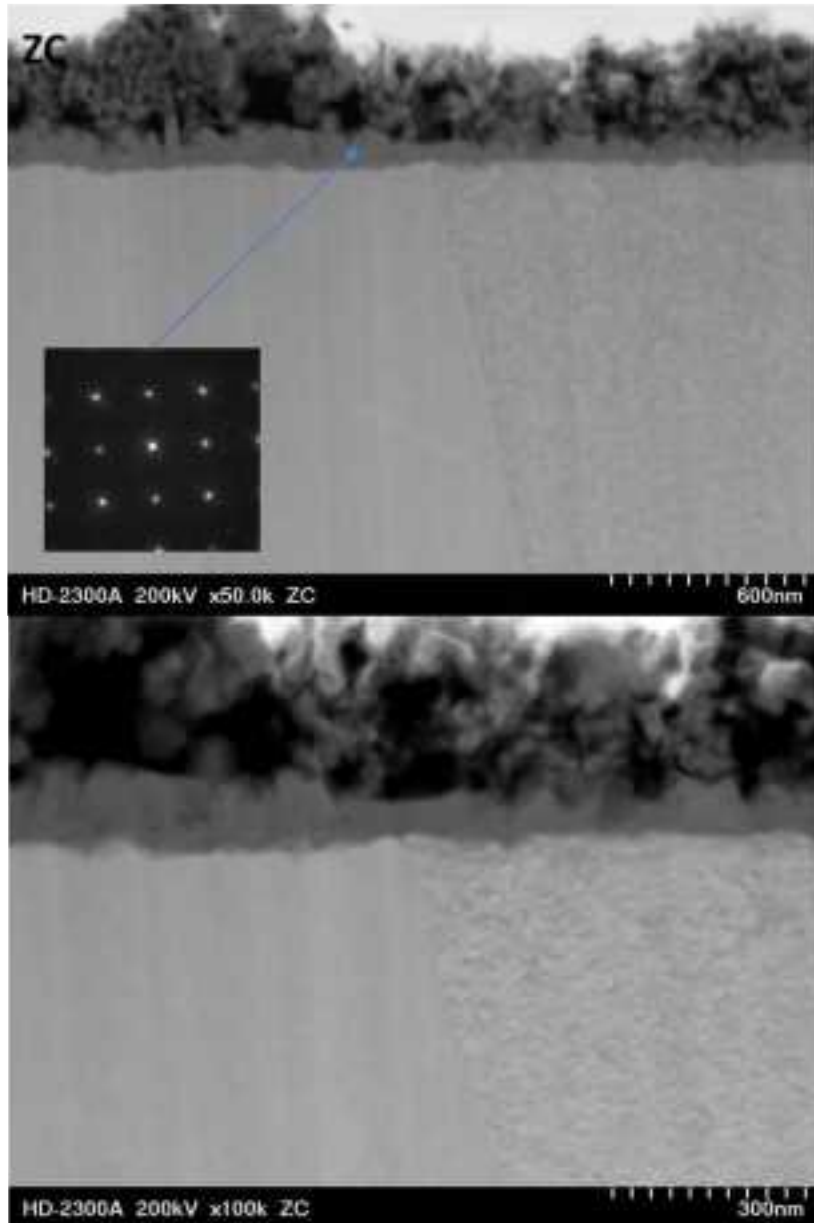
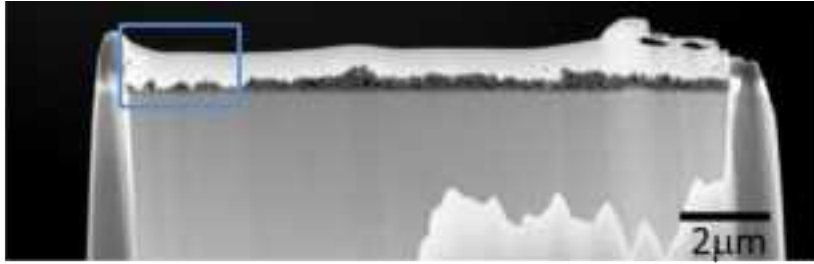


図 5.2.4-45 A135(0.1%ひずみ付与材)の EDX 分析箇所

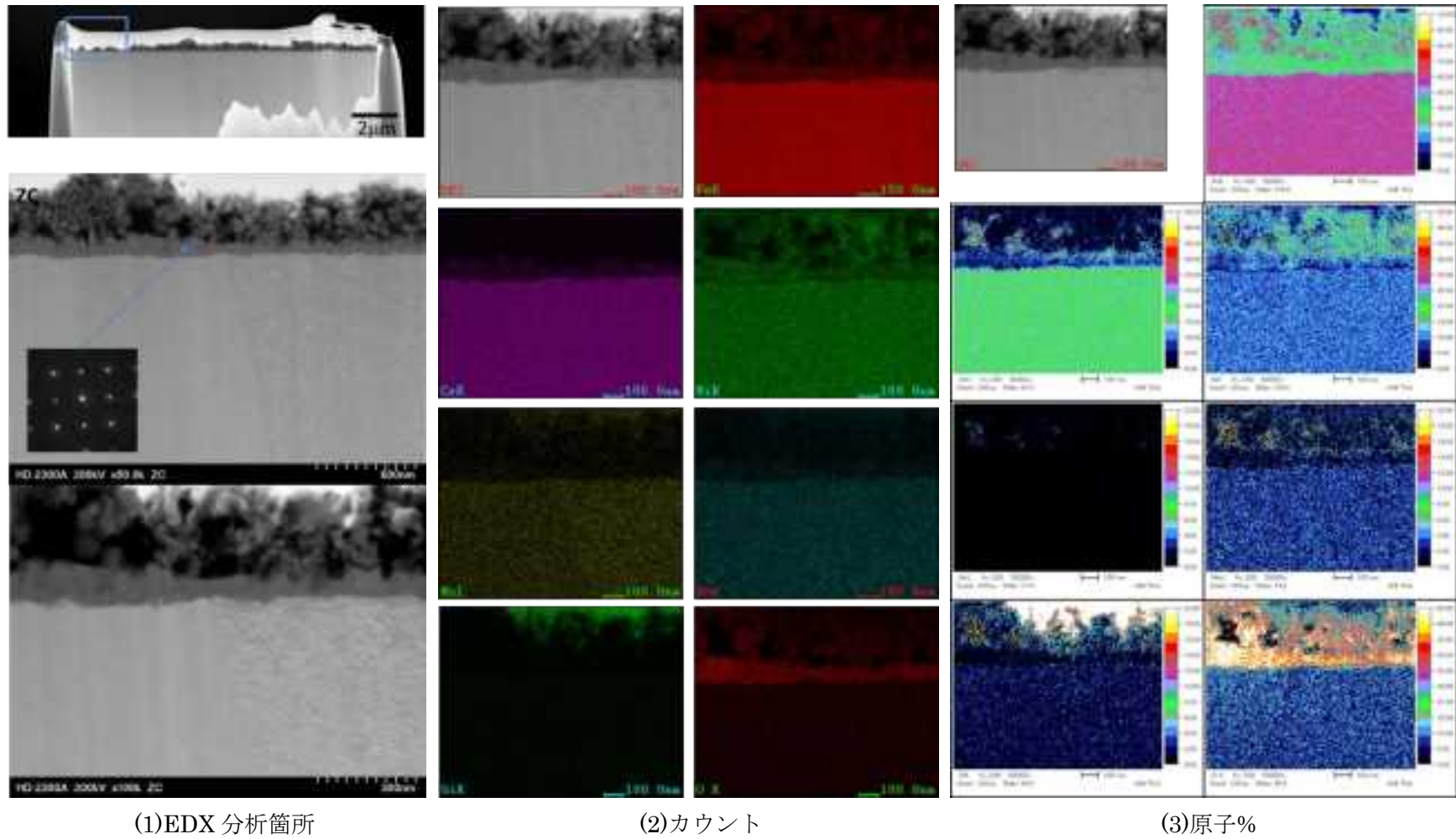


図 5.2.4-46 A135(0.1%ひずみ付与材)の EDX 分析結果

(カ)A135(2.0%ひずみ付与材、母相)

マイクロ組織採取箇所を図 5.2.4-47 に示す。マイクロ組織採取箇所は、EBSD 測定により KAM によるひずみが小さいすべりステップが生じている粒内である。マイクロ組織を図 5.2.4-48 に示す。作製した試料には、すべりステップが 3 つ観察された。金属部で評価したすべりステップの高さは、108 μm 、106 μm 、158 μm であった。図 5.2.4-48 において、すべりステップ周辺に見られるコントラストは試料調整に用いた FIB 加工によりものであり、ひずみ付与の影響ではない。このため、母相部には明瞭な変形組織は生成していないと考えられる。図 5.2.4-48 の ZC 像の 100 点につき酸化被膜厚さを測定した結果を図 5.2.4-49 示す。酸化被膜の最大厚さは 110 nm、最小厚さは 23 nm であり、平均厚さは 73 nm であった。酸化被膜の回折像を、EDX による組成マップを図 5.2.4-50 に、半定量組成マップ(at%)を図 5.2.4-50 に示す。酸化被膜はスピネル構造であり、内層酸化被膜は Cr を主とし、外層酸化被膜は Fe-Ni を主とするスピネル酸化物であると推察された。

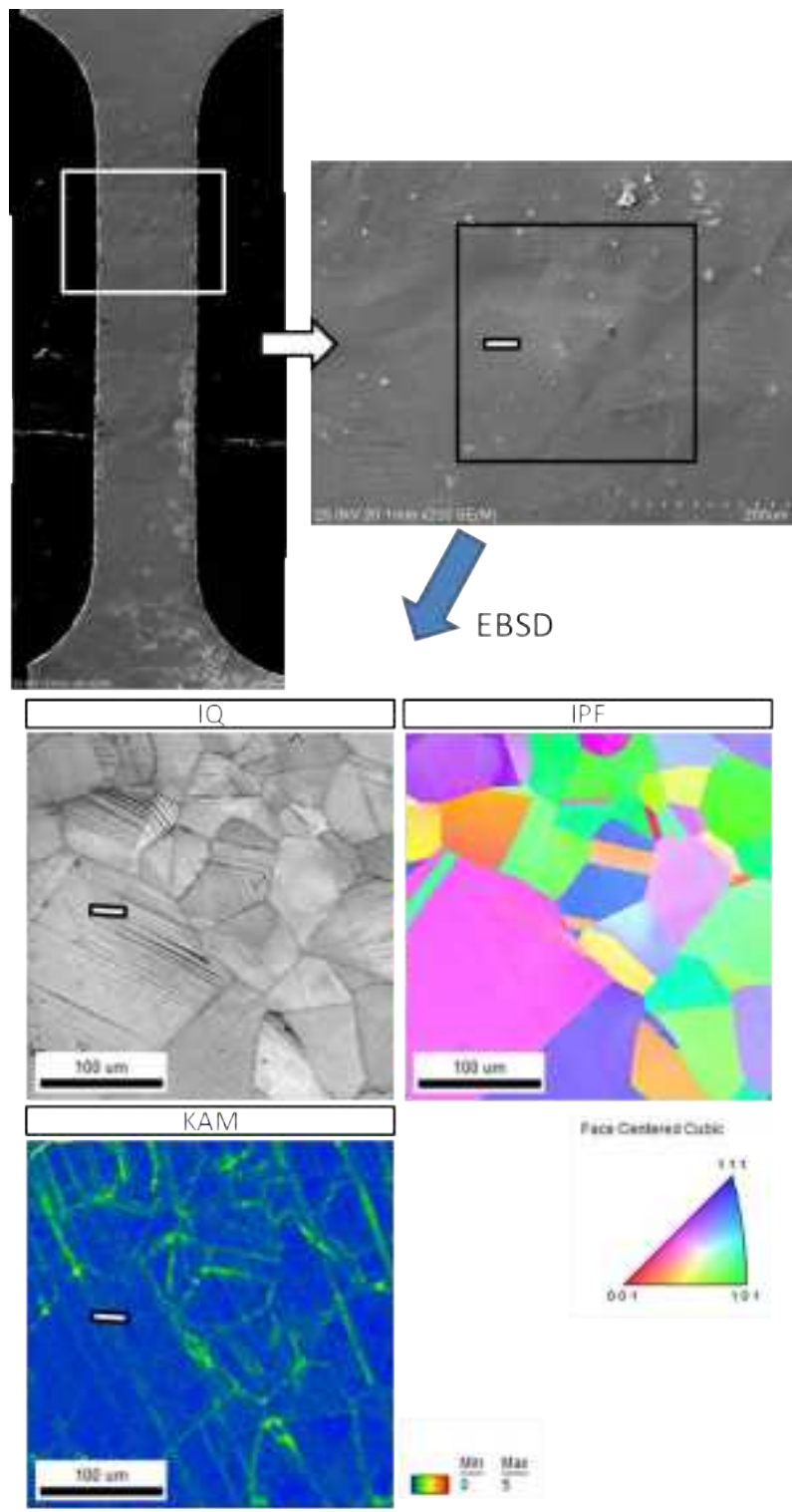


図 5.2.4-47 A135(2.0%ひずみ付与材、母相)からのマイクロ組織試験片採取箇所

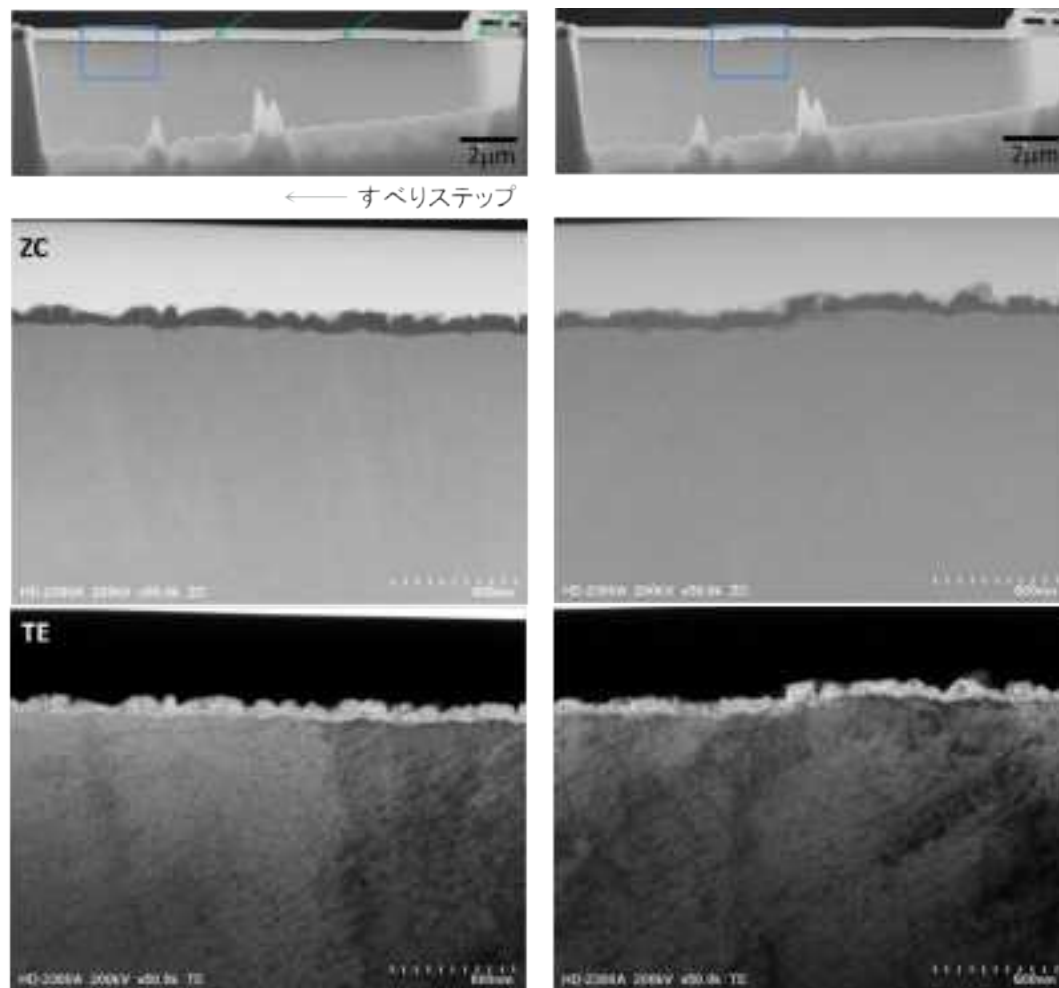


図 5.2.4-48(1) A135(2.0%ひずみ付与材、母相)のマイクロ組織

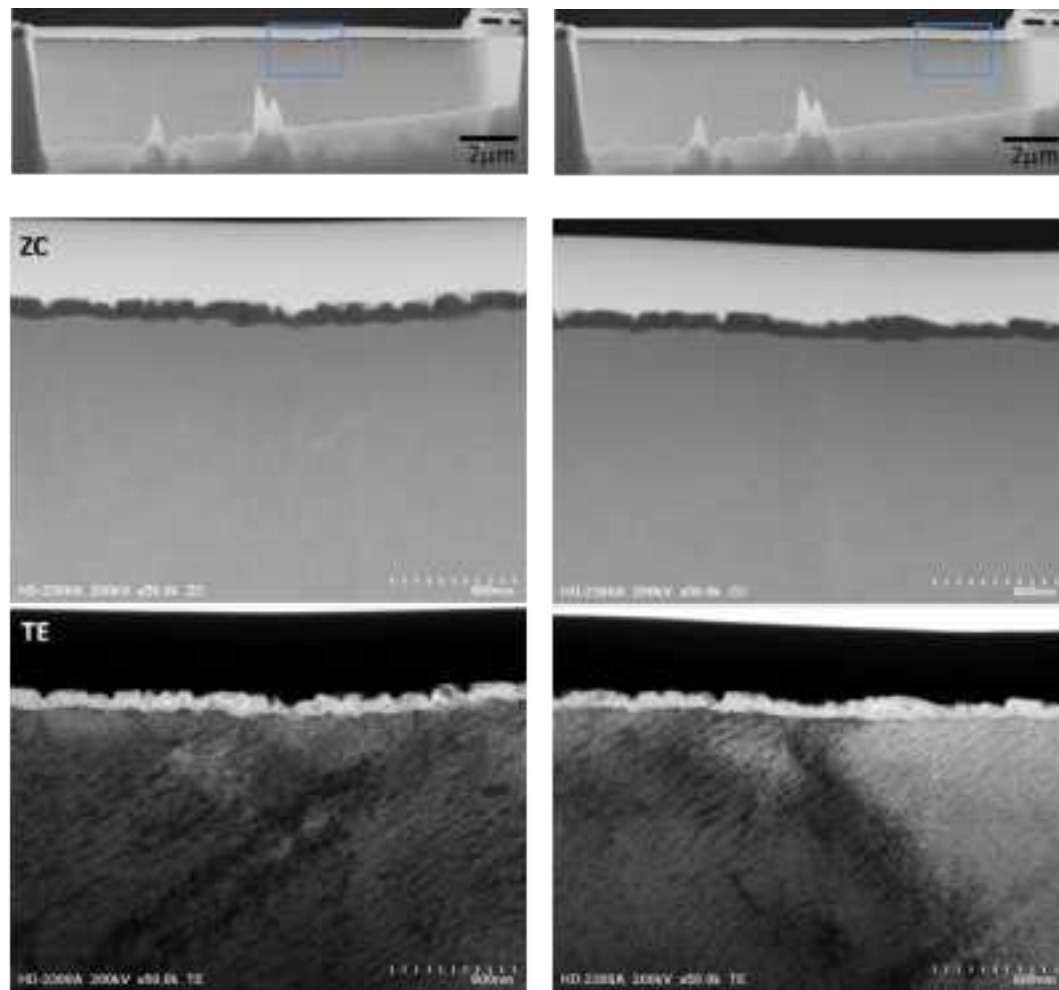


図 5.2.4-48(2) A135(2.0%ひずみ付与材、母相)のマイクロ組織

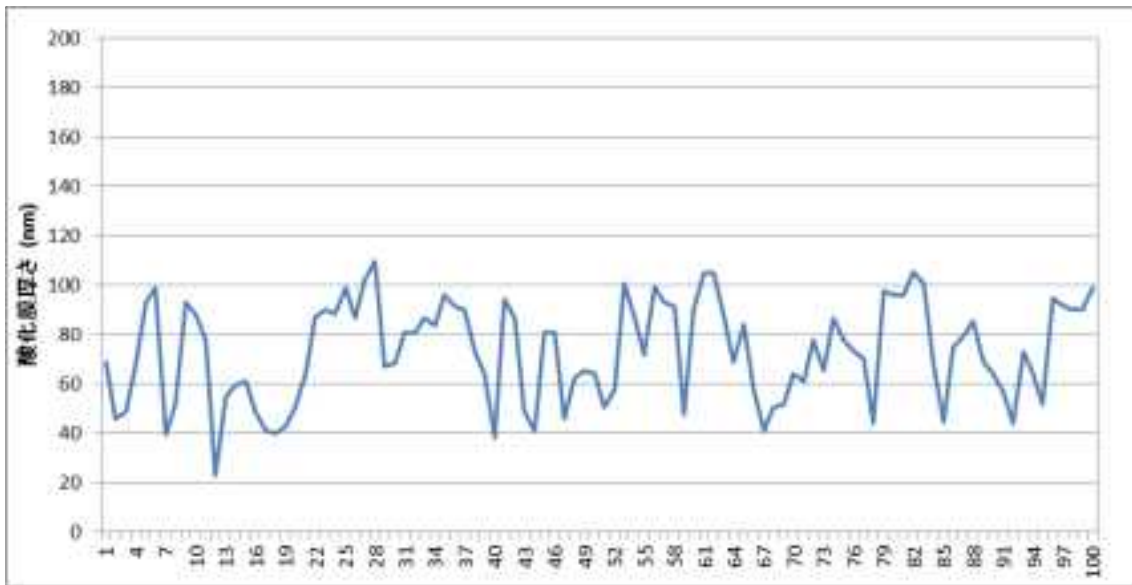


図 5.2.4-49 A135(2.0%ひずみ付与材、母相)の酸化皮膜厚さ

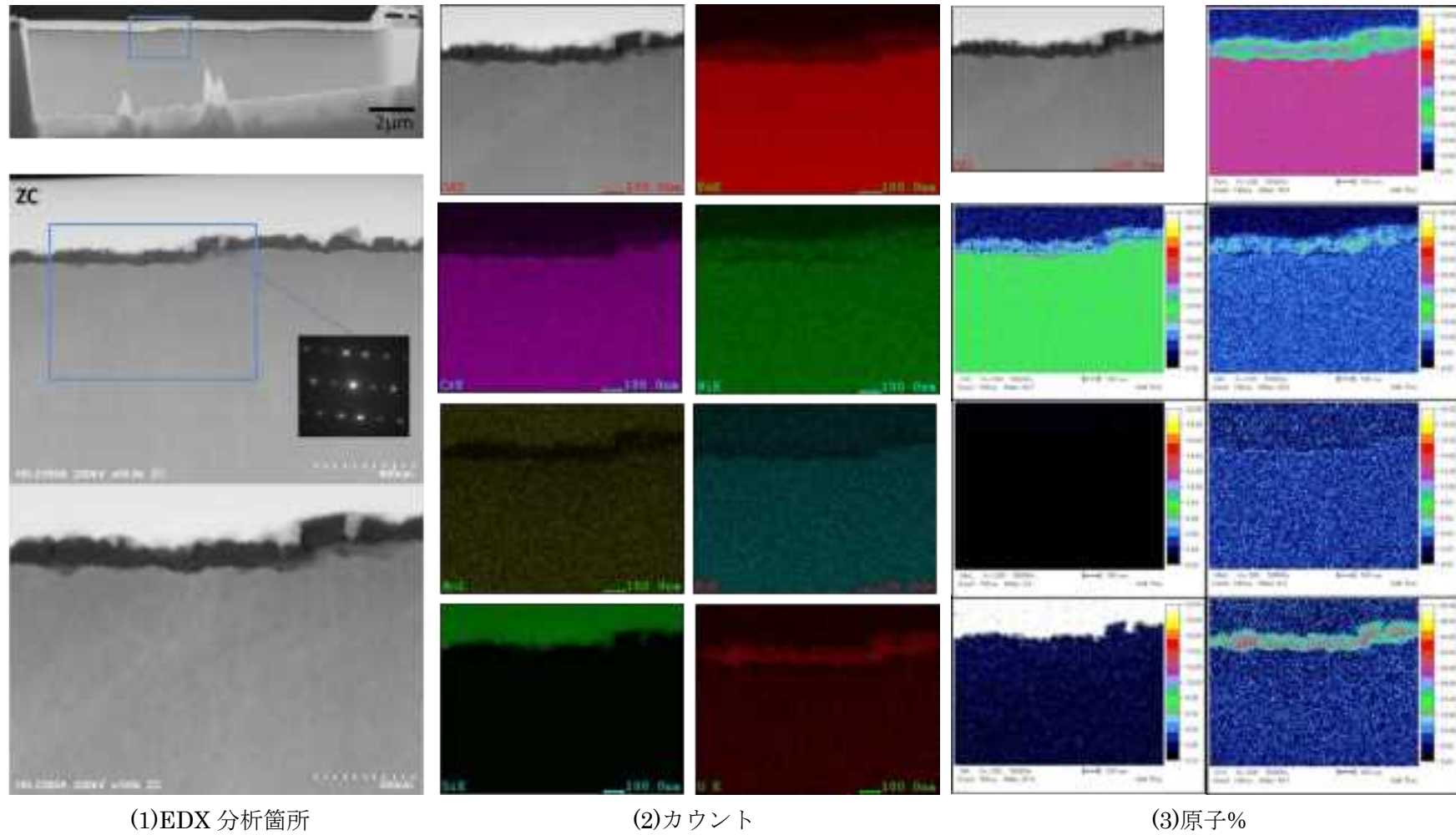


図 5.2.4-50 A135(2.0%ひずみ付与材、母相)の EDX 分析結果

(キ)A135(2.0%ひずみ付与材、粒界ひずみ小)

マイクロ組織採取箇所を図 5.2.4-51 に示す。マイクロ組織採取箇所は、EBSD 測定により KAM によるひずみが小さい粒界である。マイクロ組織を図 5.2.4-52 に示す。作製した試料には、粒界が 1 つと微小なすべりステップが 1 つ観察された。ステップの高さは 66 μm であった。の ZC 像の 100 点につき酸化被膜厚さを測定した結果を図 5.2.4-53 に示す。酸化被膜の最大厚さは 145 nm、最小厚さは 35 nm であり、平均厚さは 80 nm であった。図 5.2.4-54(1)に粒界部を拡大して示す。浸漬試験により粒界部はその周辺よりわずかに腐食が多いように見える。図 5.2.4-54 の EDX 分析結果を見ると粒界近傍とその周辺の酸化被膜生成に優位な差は認められなかった。酸化被膜は Cr を主とする内層酸化被膜と Fe-Ni を主とする外層酸化被膜からなり、図 5.2.4-54(1)の回折図形からスピネル酸化物とであると推察された。

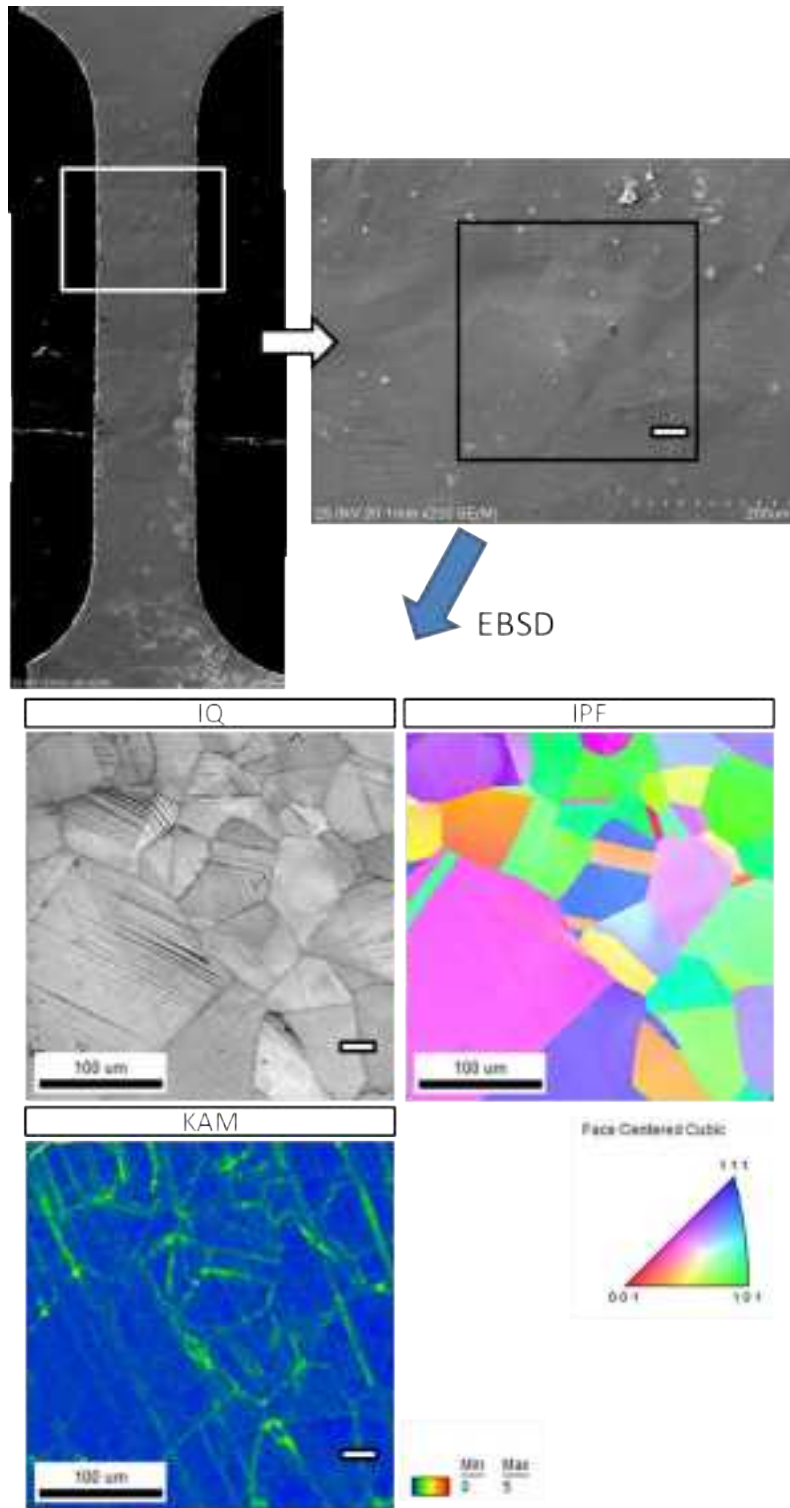


図 5.2.4-51 A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ小)からのマイクロ組織試験片採取箇所

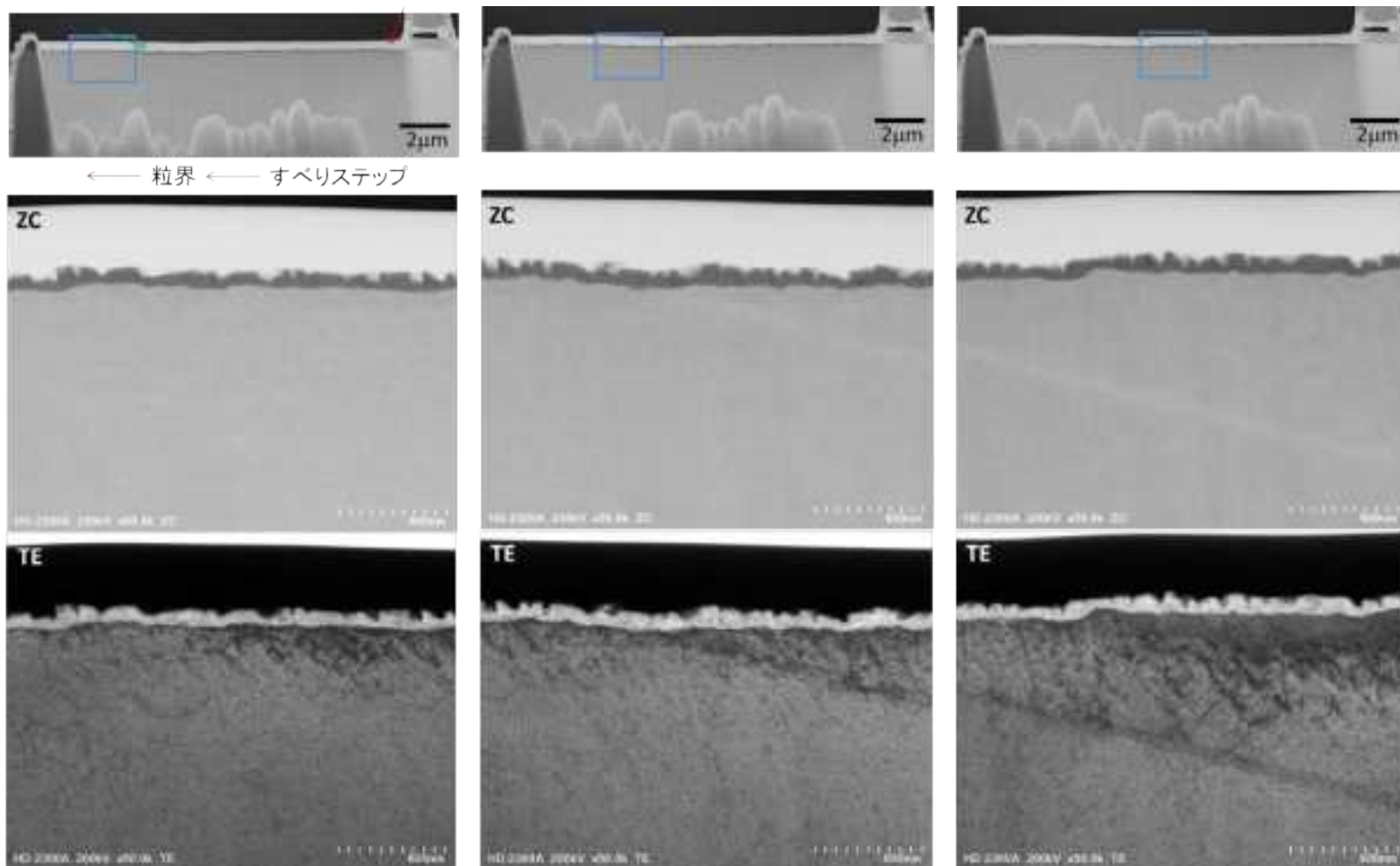


図 5.2.4-52 A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ小)のマイクロ組織観察結果

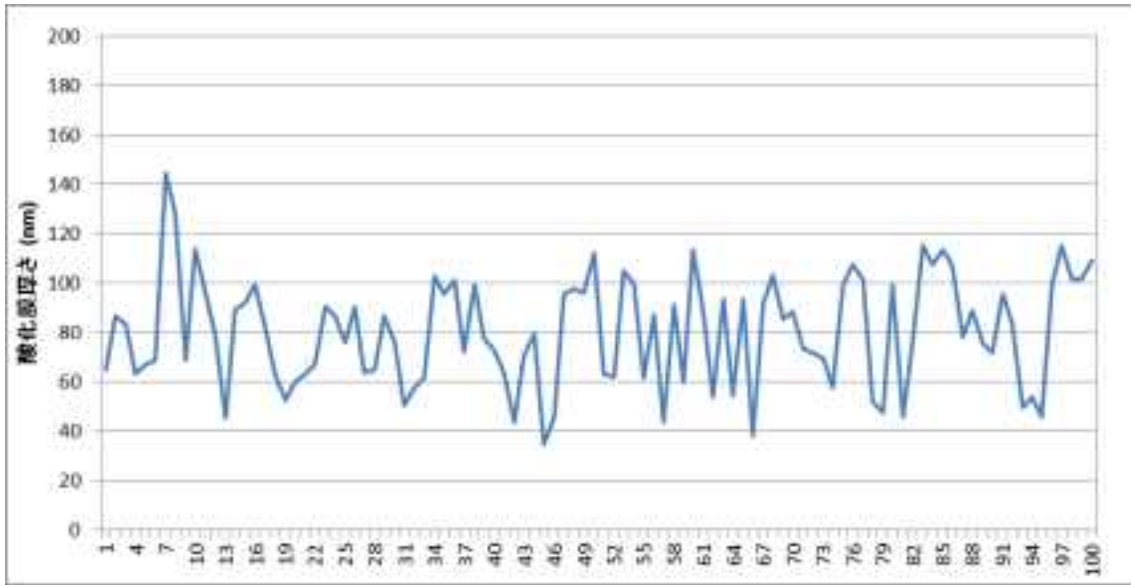
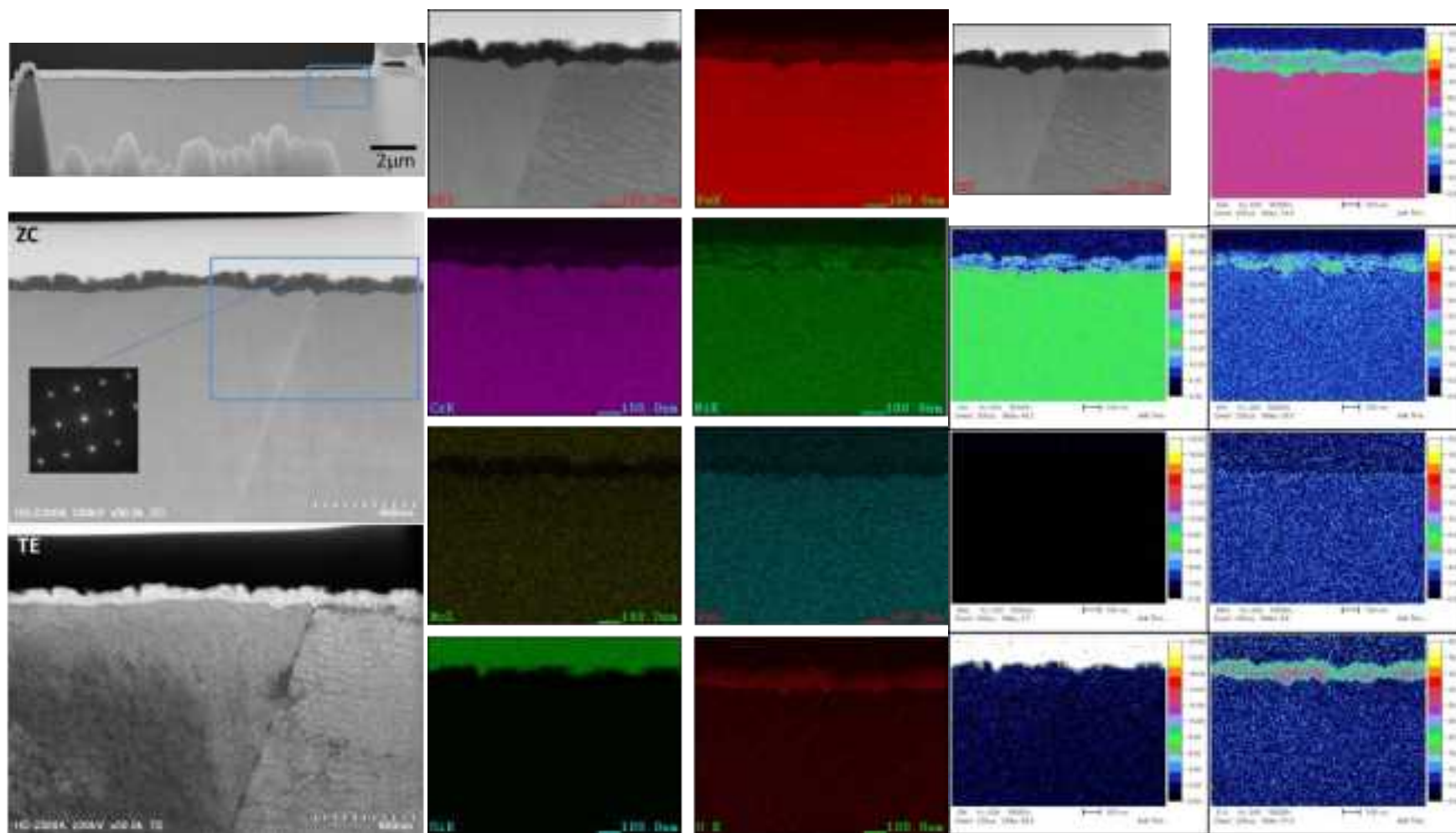


図 5.2.4-53 A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ小)の酸化皮膜厚さ



(1)EDX 分析箇所

(2)カウント

(3)原子%

図 5.2.4-54 A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ小)の EDX 分析結果

(ク)A135(2.0%ひずみ付与材、粒界ひずみ大)

マイクロ組織採取箇所を図 5.2.4-55 に示す。マイクロ組織採取箇所は、EBSD 測定により KAM によるひずみが比較的大きい粒界である。マイクロ組織を図 5.2.4-56 に示す。作製した試料には、双晶($\Sigma 3$ 粒界)が 2 つとすべりステップが 1 つ観察された。すべりステップの高さは 167 nm であった。図 5.2.4-56(2)に示すように、すべりステップには転位はタングリングしてひずみコントラスト発生していた。転位チャネルは認められなかった。このため、この試料で観察されたすべりステップは先に定義した転位チャネルによるすべりステップとは異なり、未照射材と同様の通常の転位の上昇運動により生じたステップと考えられる。図 5.2.4-56 の ZC 像の 100 点につき酸化被膜厚さを測定した結果を図 5.2.4-57 に示す。図 5.2.4-57 において、酸化被膜厚さが 130 nm を超える箇所があり、そこは図 5.2.4-56(2)に示すステップ上の酸化物に対応する。酸化被膜酸化被膜の最大厚さは 188 nm、最小厚さは 42 nm であり、平均厚さは 84 nm であった。図 5.2.4-58(1)に示すように双晶は周辺よりも腐食が多いように見える。図 5.2.4-58(2)及び(3)に双晶近傍の EDX 分析結果を示す。EDX 分析結果から双晶に沿った腐食は認められなかった。また、酸化被膜は Cr を主とする内層酸化被膜と Fe-Ni を主とする外層酸化被膜からなり、回折図形(図 5.2.4-58(1))からスピネル酸化物と推察された。

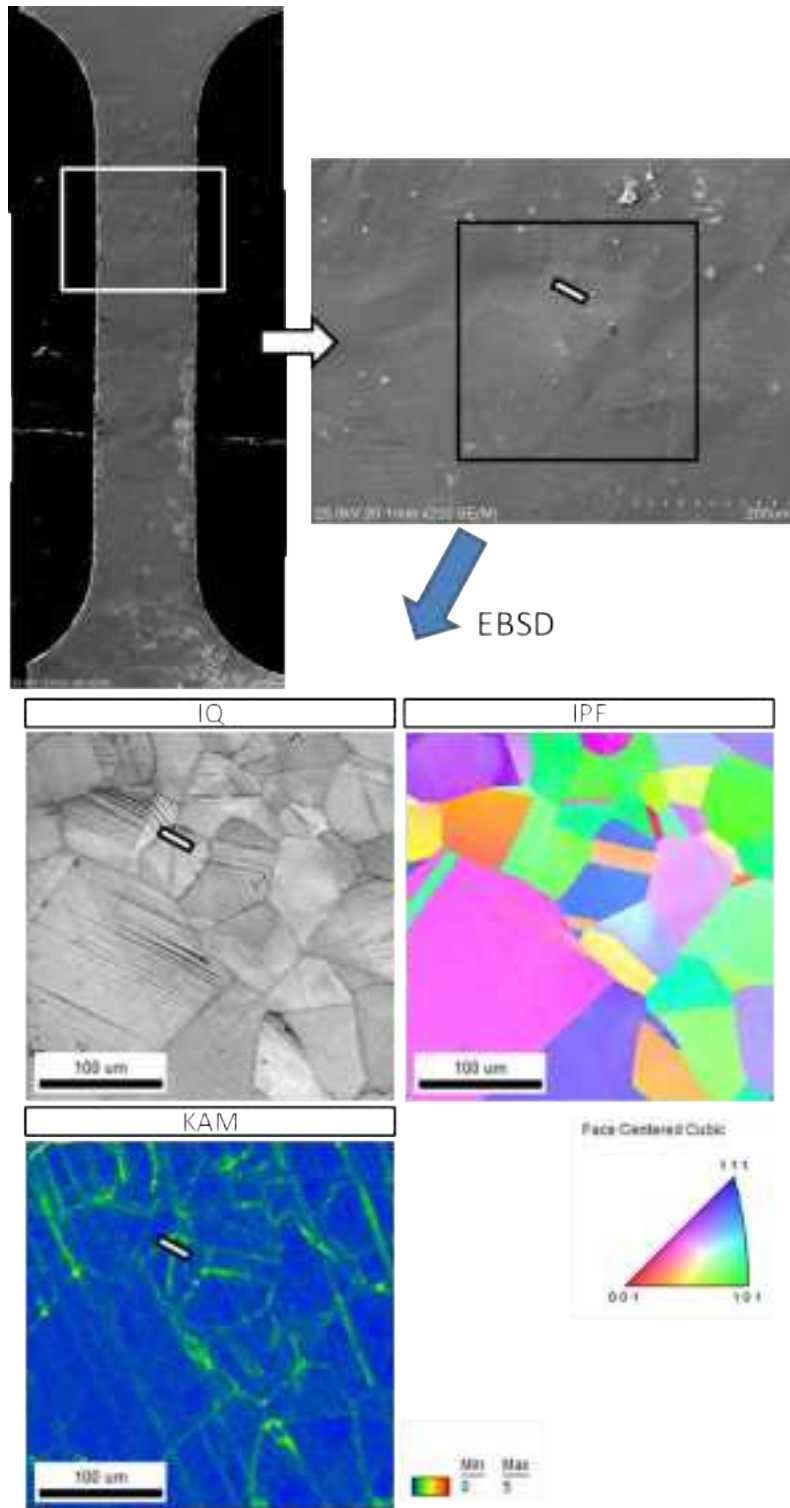


図 5.2.4-55 A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ大)からのマイクロ組織試験片採取箇所

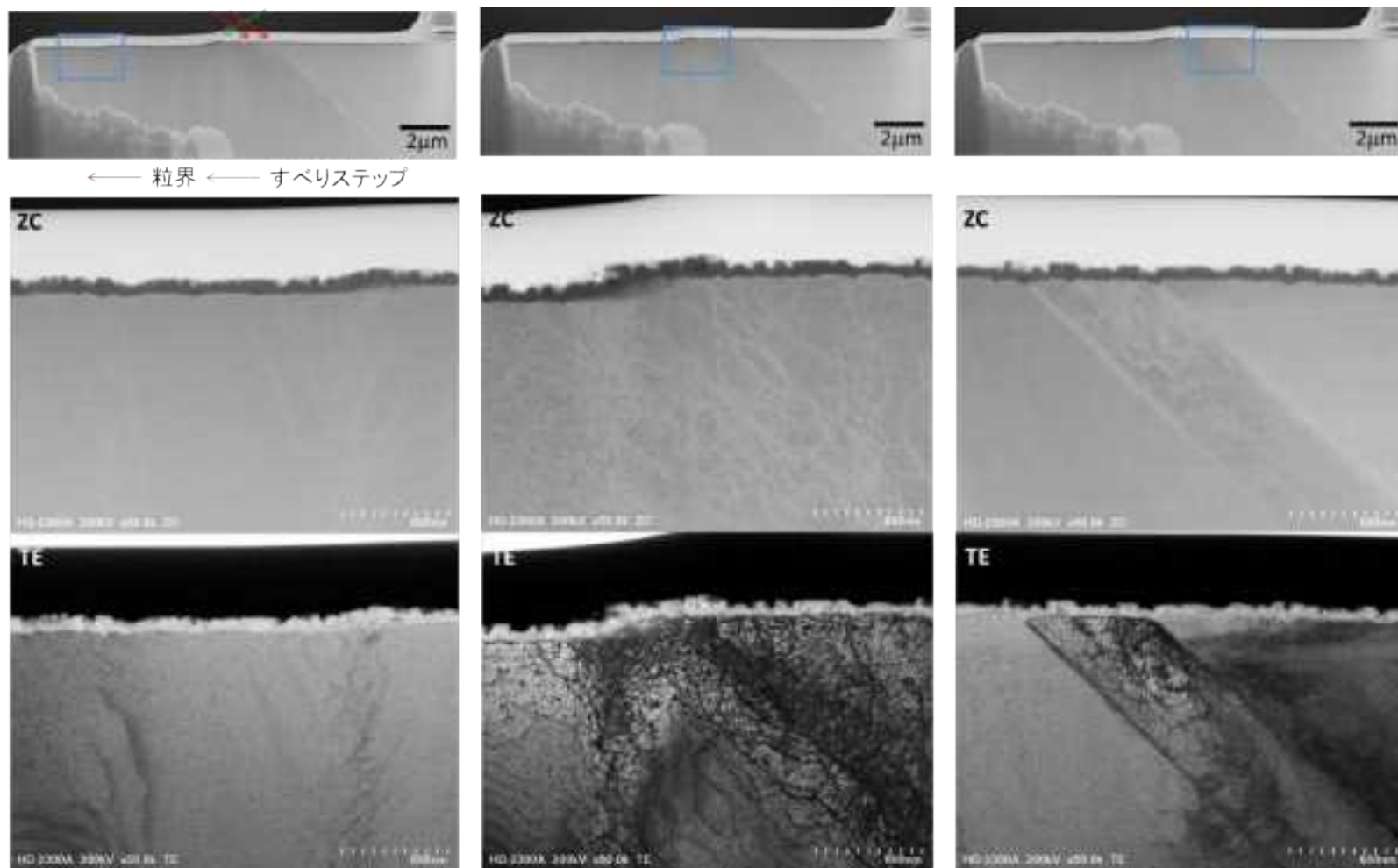


図 5.2.4-56(1) A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ大)のマイクロ組織

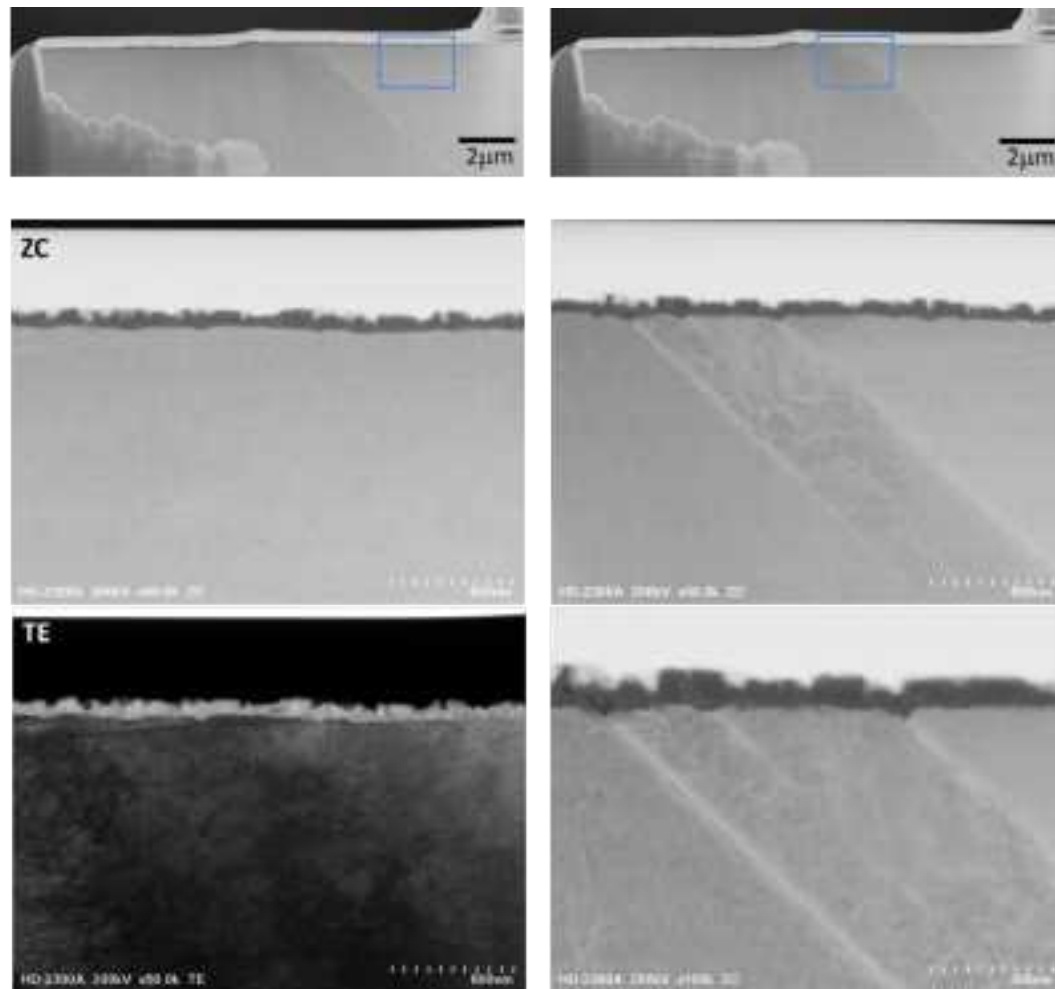


図 5.2.4-56(2) A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ大)のマイクロ組織

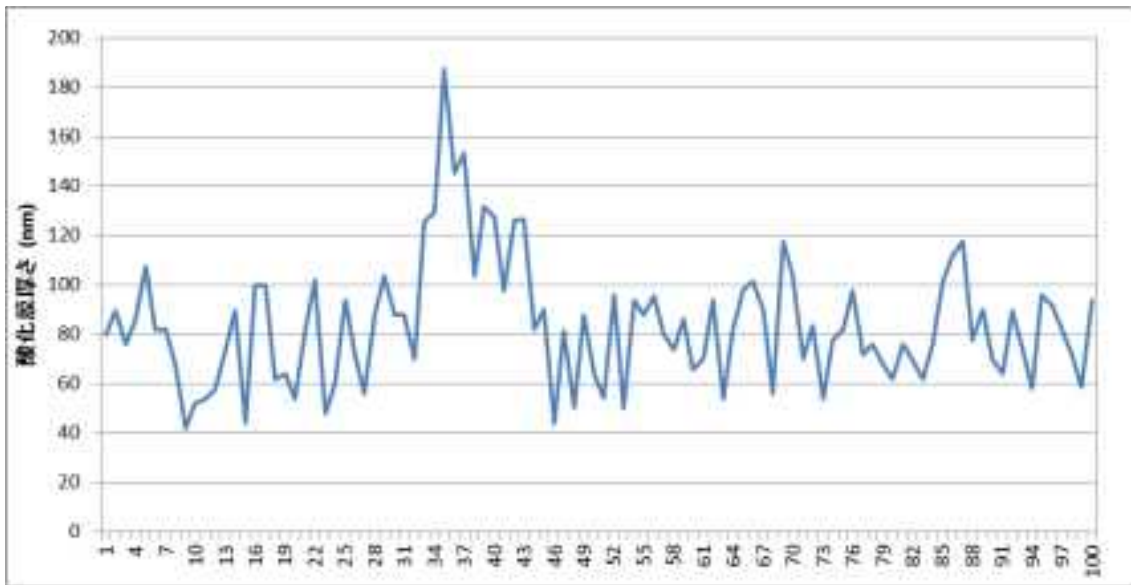


図 5.2.4-57 A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ大)の酸化皮膜厚さ

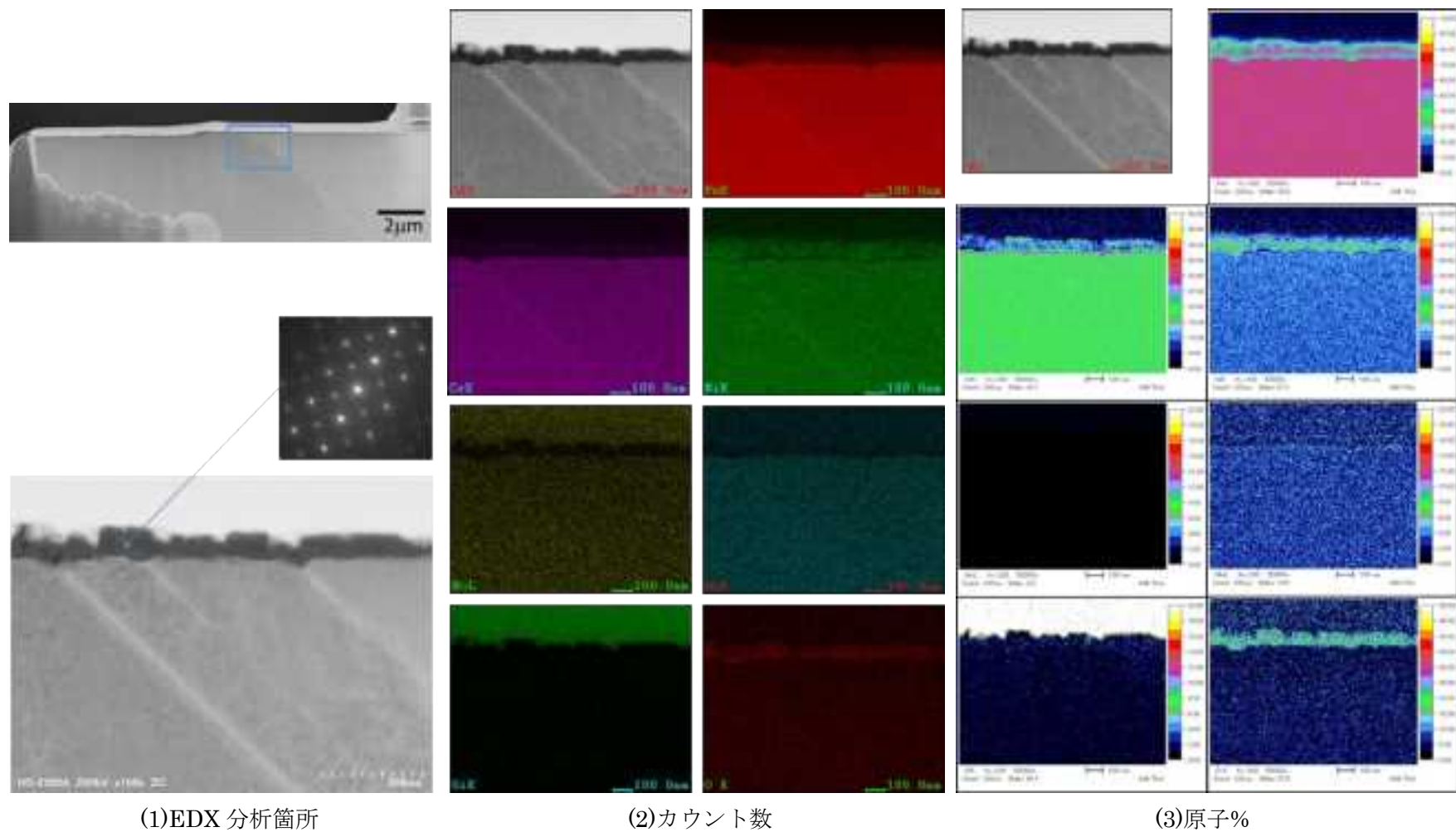


図 5.2.4-58 A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ大)の EDX 分析結果

(ケ)A440(0.1%ひずみ付与材)

マイクロ組織採取箇所を図 5.2.4-59 に示す。マイクロ組織採取箇所は、先行研究で断面観察を行った箇所である。マイクロ組織を図 5.2.4-60 に示す。作製した試料には粒界は含まれていなかった。また、変形組織も生じていなかった。図 5.2.4-60 の ZC 像の 100 点につき酸化被膜厚さを測定した結果を図 5.2.4-61 に示す。酸化被膜の最大厚さは 140 nm、最小厚さは 36 nm であり、平均厚さは 90 nm であった。**xxx** は酸化被膜の回折図形であり酸化被膜はスピネル構造であった。図 5.2.4-62 の EDX 分析結果により酸化被膜は Cr を主とする内層酸化被膜と Fe-Ni を主とする外層酸化被膜からなり、回折図形の結果と併せて、スピネル酸化物が生成していると考えられる。

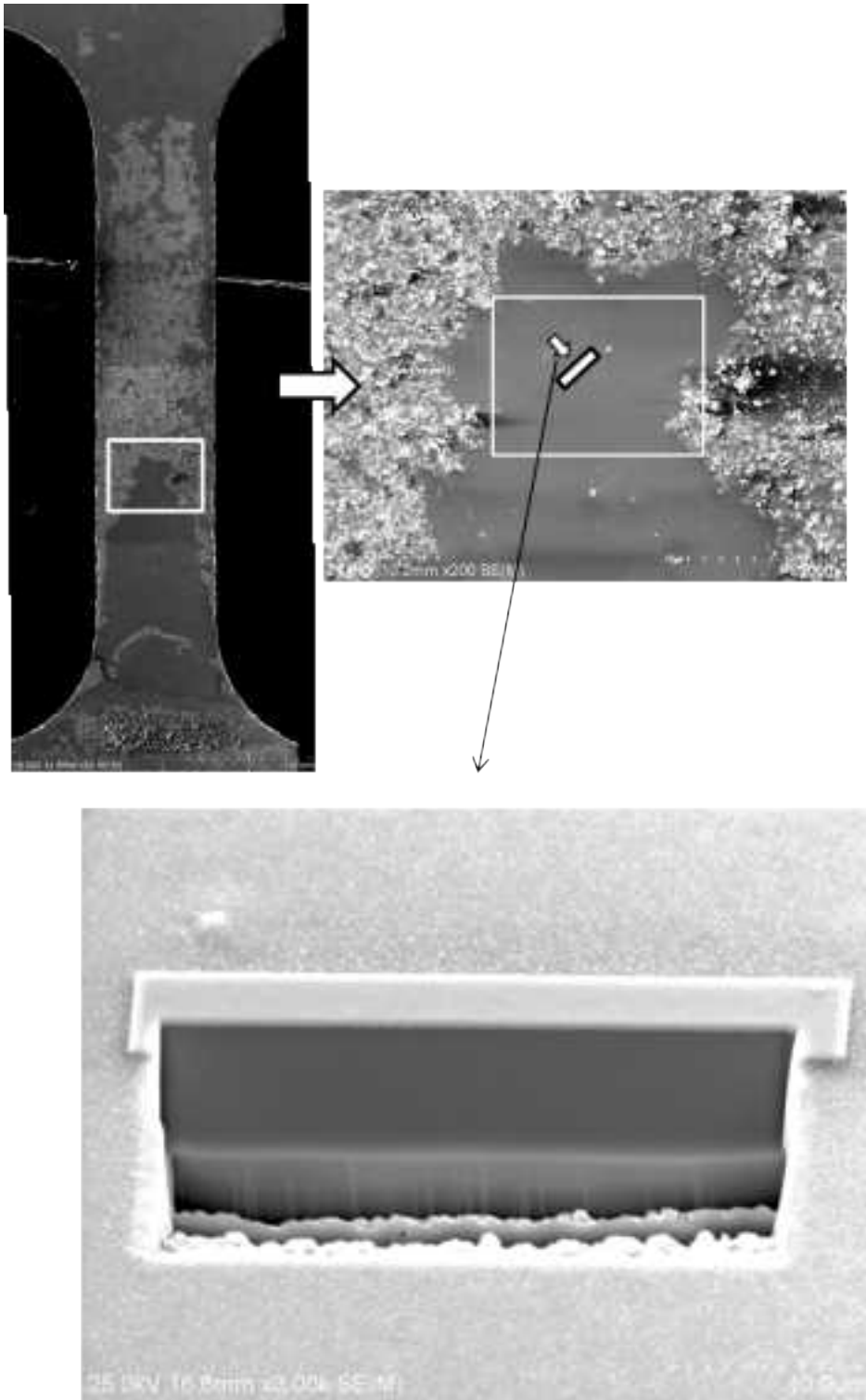


図 5.2.4-59 A440(0.1%ひずみ付与材)からのマイクロ組織試験片採取箇所

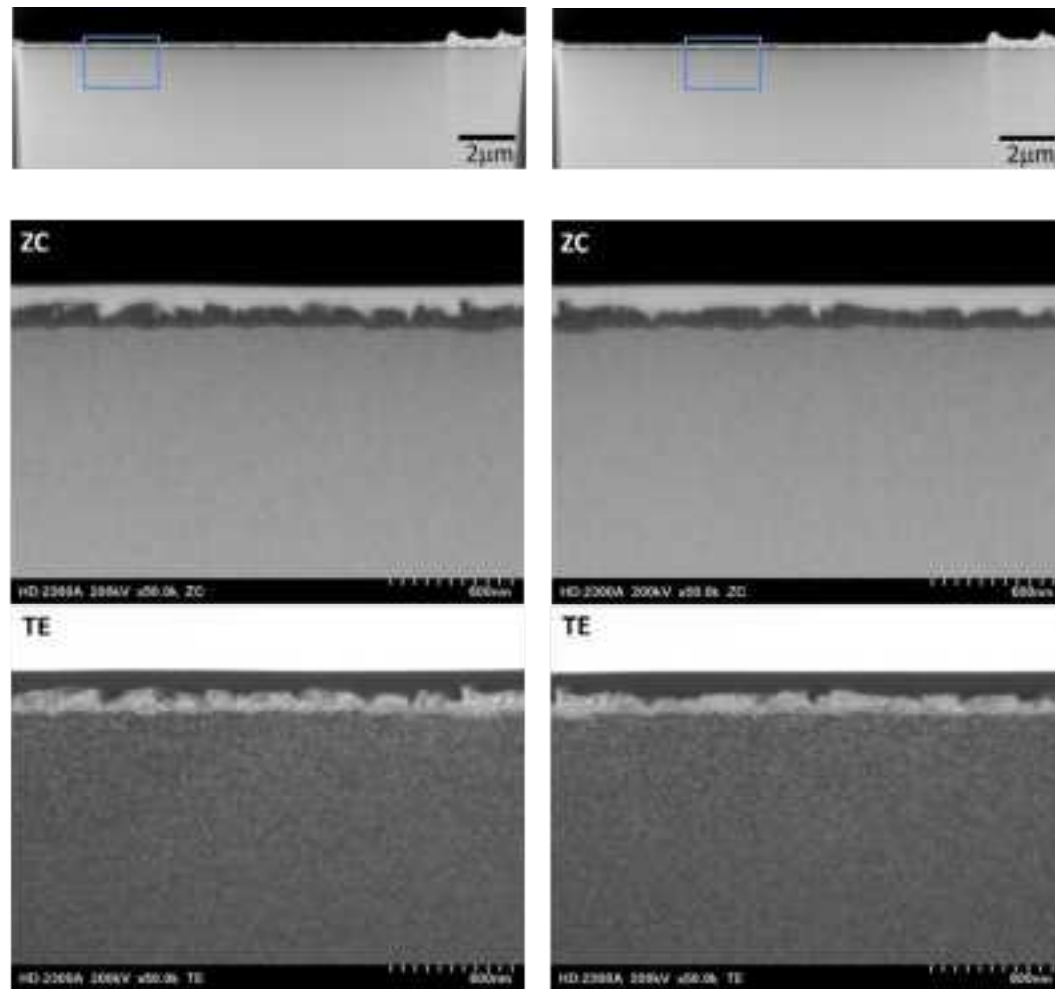


図 5.2.4-60(1) A440(0.1%ひずみ付与材)のマイクロ組織観察結果

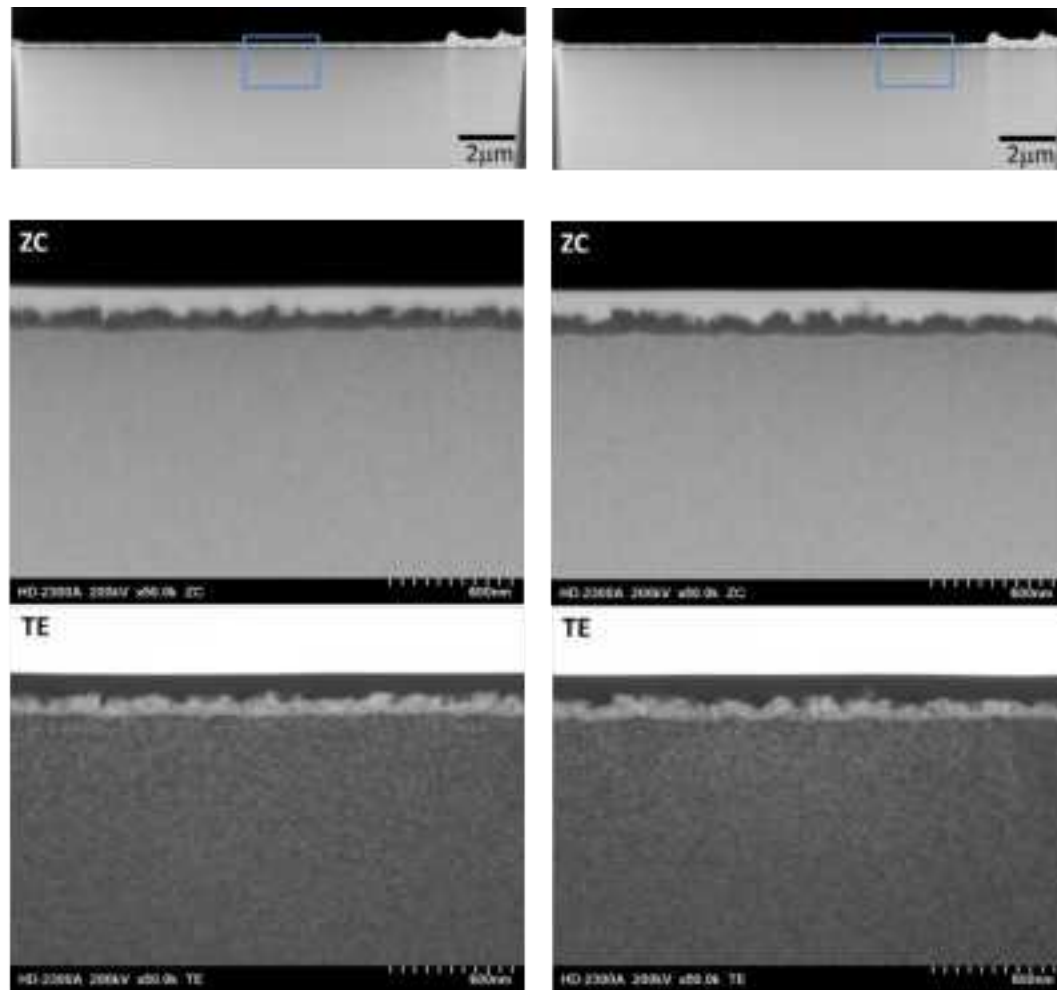


図 5.2.4-60(2) A440(0.1%ひずみ付与材)のマイクロ組織観察結果



図 5.2.4-61 A440(0.1%ひずみ付与材)の酸化皮膜厚さ

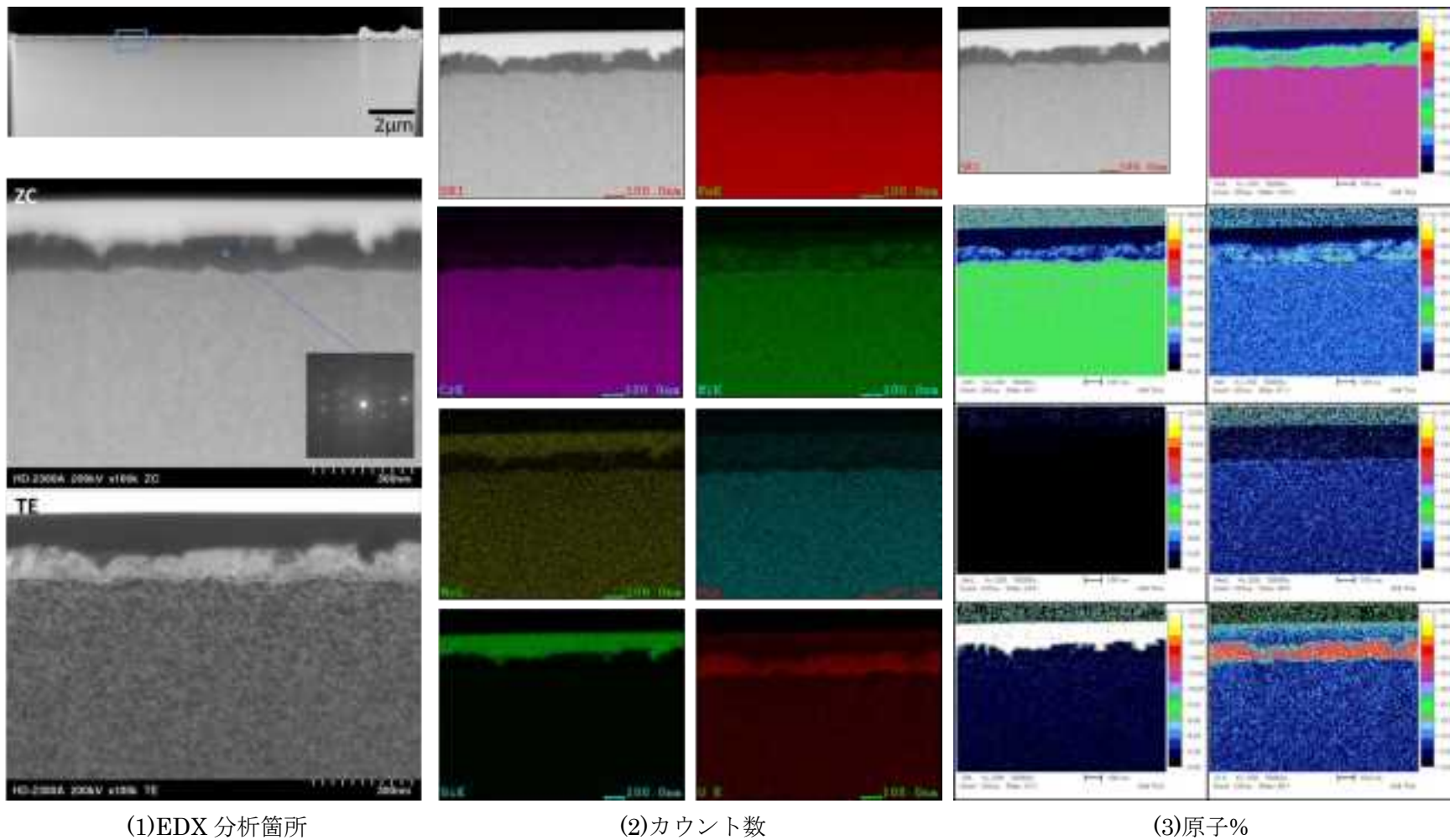


図 5.2.4-62 A440(0.1%ひずみ付与材)の EDX マップ

(コ)A440(2.0%ひずみ付与材、母相)

マイクロ組織採取箇所を図 5.2.4-63 に示す。マイクロ組織採取箇所は、KAM によるひずみが小さく、すべりステップが見られる粒内である。マイクロ組織を図 5.2.4-64 に示す。作製した試料にはすべりステップが 4 つ観察された。すべりステップの高さは 214 μm 、119 μm 、205 μm 、214 μm であった。ステップ周辺には転位等は観察されず、変形に伴うひずみコントラストも確認できなかった。図 5.2.4-64 の ZC 像の 100 点につき酸化被膜厚さを測定した結果を図 5.2.4-65 に示す。酸化被膜の最大厚さは 121 nm、最小厚さは 40 nm であり、平均厚さは 74 nm であった。xxx に示すすべりステップの EDX 分析結果を図 5.2.4-66 に示す。酸化被膜は Cr を主とする内層酸化被膜と Fe-Ni を主とする外層酸化被膜からなり、回折図形(図 5.2.4-66)からスピネル酸化物と推察された。図 5.2.4-67 はすべりステップの詳細観察結果である。図 5.2.4-67(1)から、すべりステップと平行に双晶が生成している。すべりステップが生じている箇所に生成した双晶はいずれも幅が広い傾向がある。また、図 5.2.4-67(2)、-45(3)から分かるようにすべりステップは双晶の端面と一致しており、転位チャンネルは双晶面に沿って発生することが示唆された。

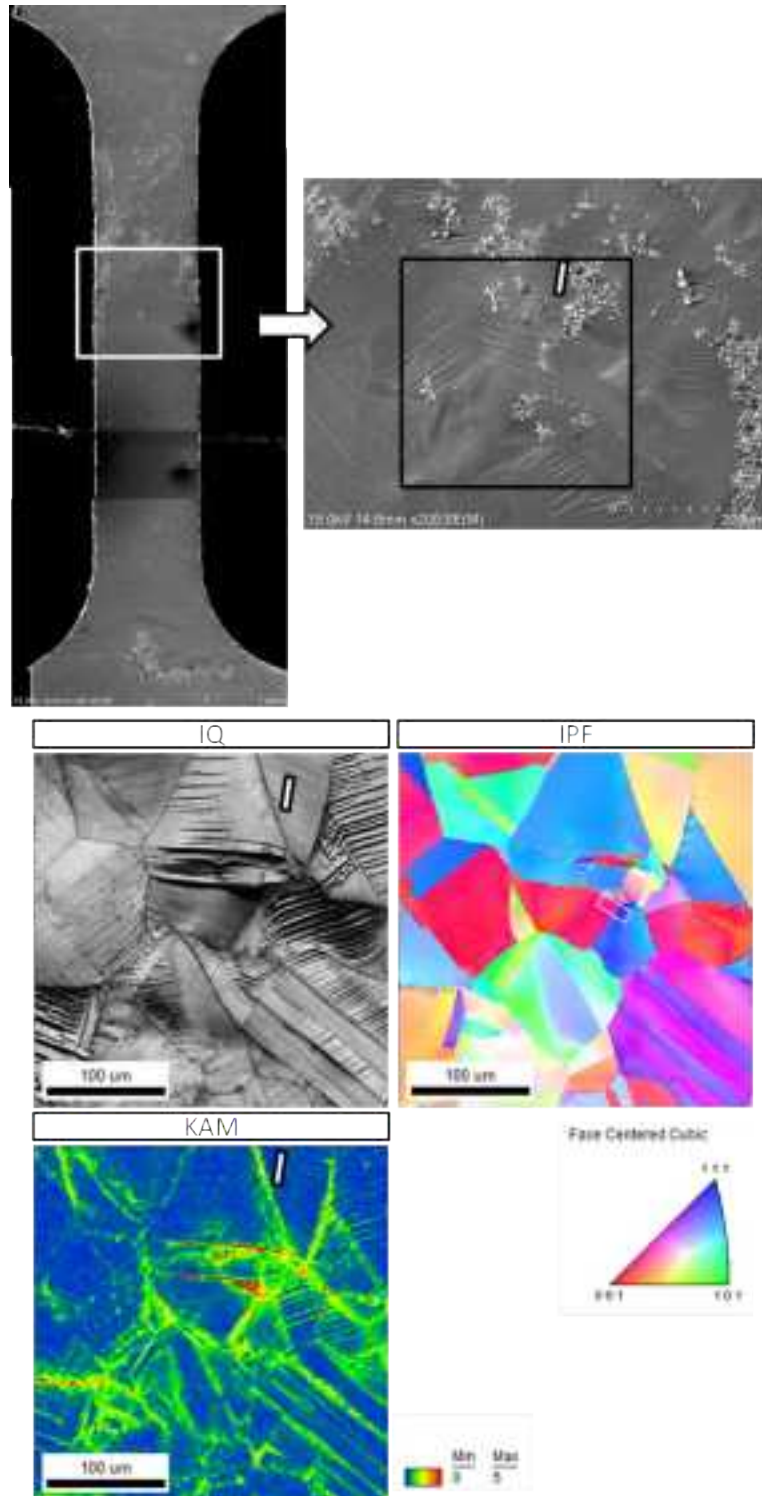


図 5.2.4-63 A440(2.0%ひずみ付与材、母相)からのマイクロ組織試験片採取箇所

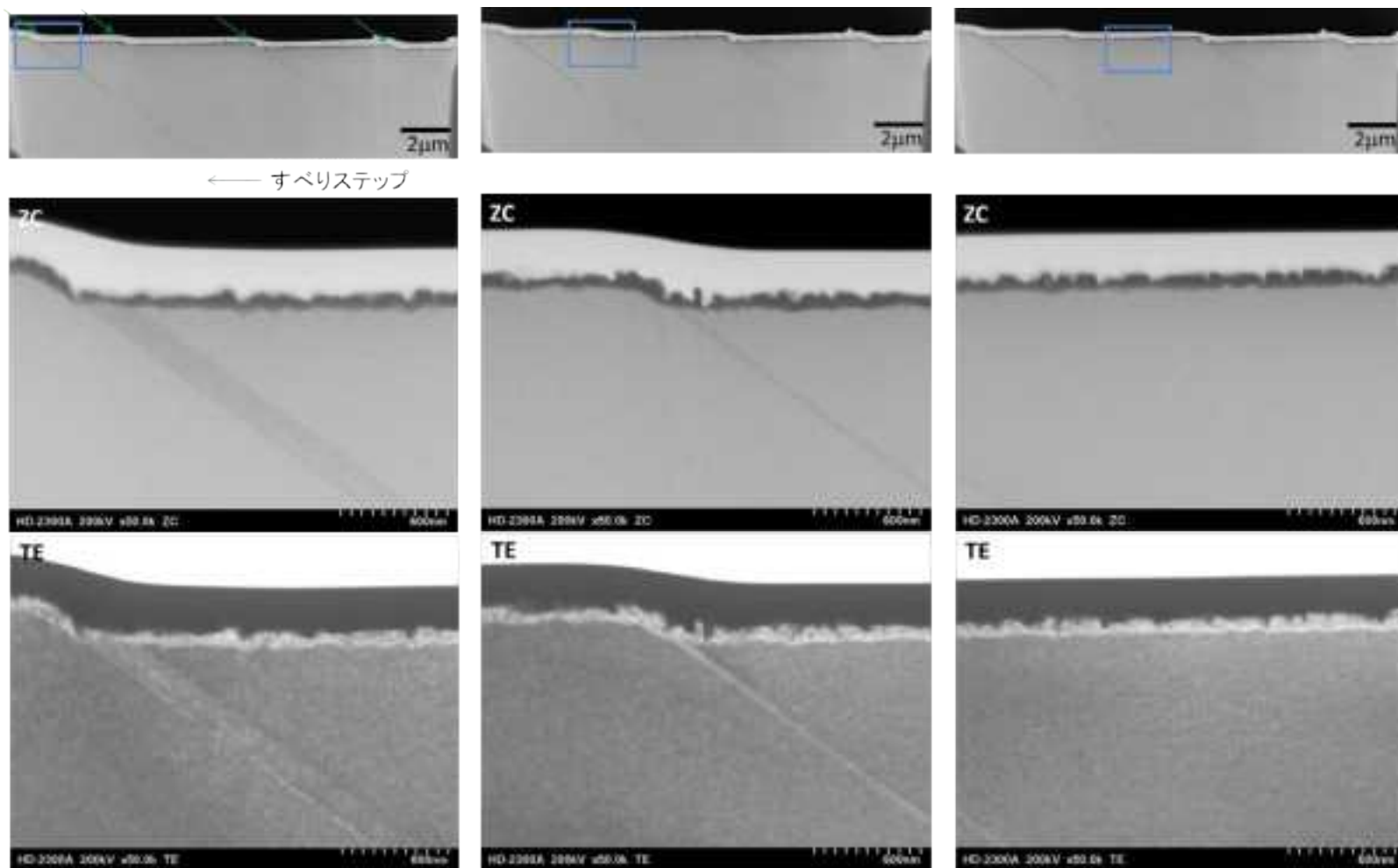


図 5.2.4-64(1) A440(2.0%ひずみ付与材、母相)のマイクロ組織

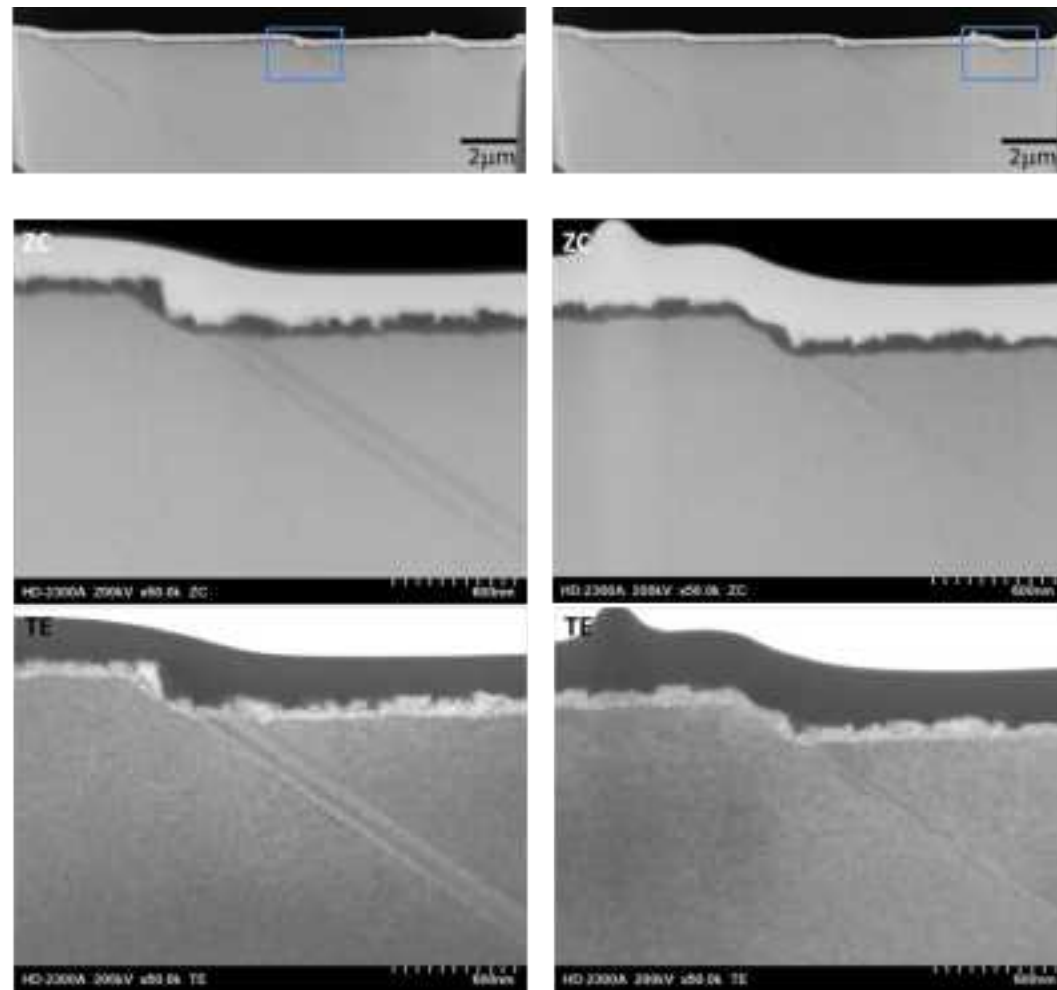


図 5.2.4-64(2) A440(2.0%ひずみ付与材、母相)のマイクロ組織

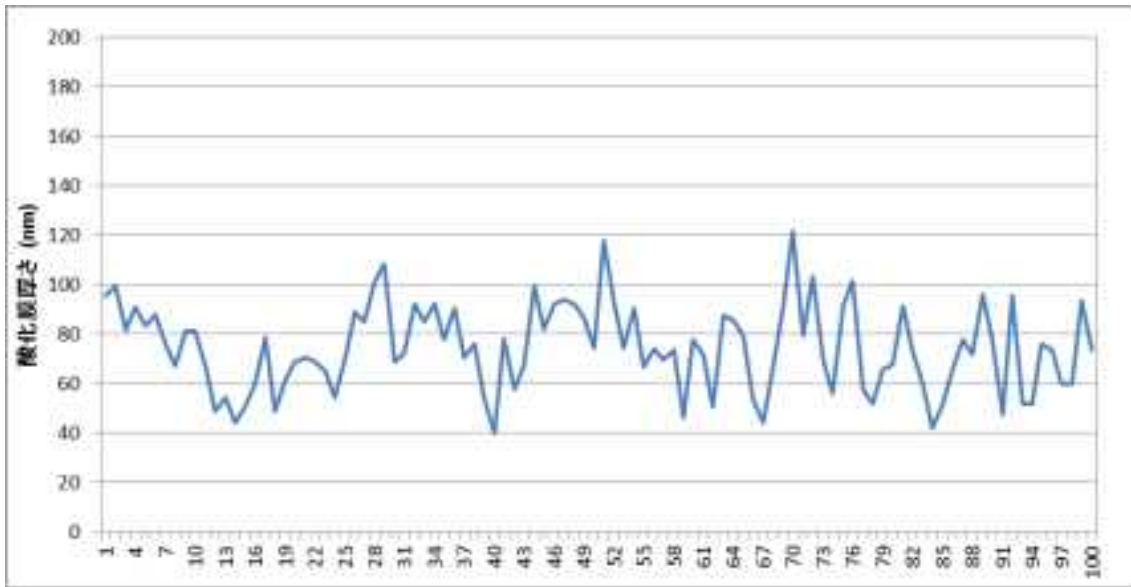
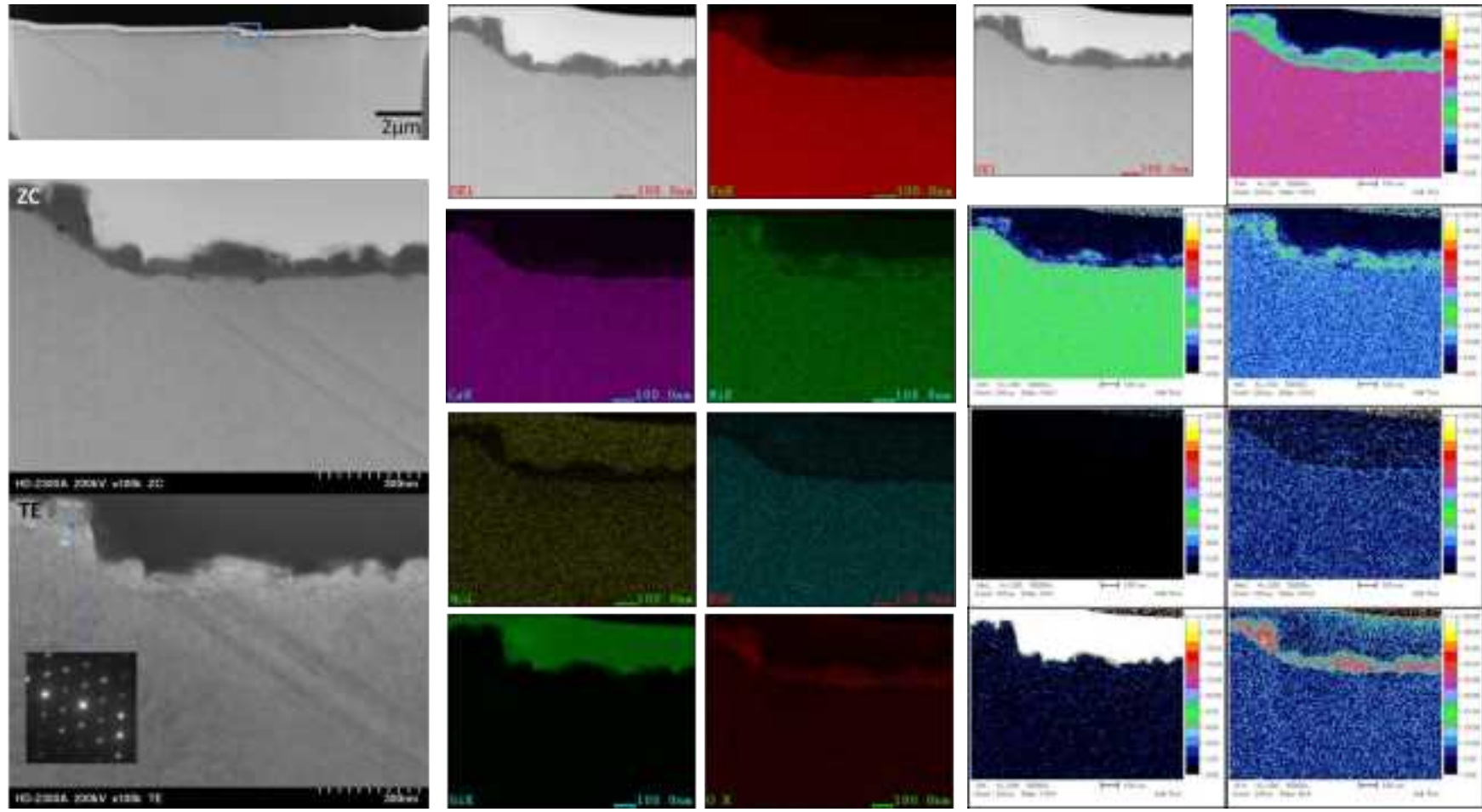


図 5.2.4-65 A440(2.0%ひずみ付与材、母相)の酸化皮膜厚さ



(1)EDX 分析箇所

(2)カウント数

(3)原子%

図 5.2.4-66 A440(2.0%ひずみ付与材、母相)の EDX 分析結果

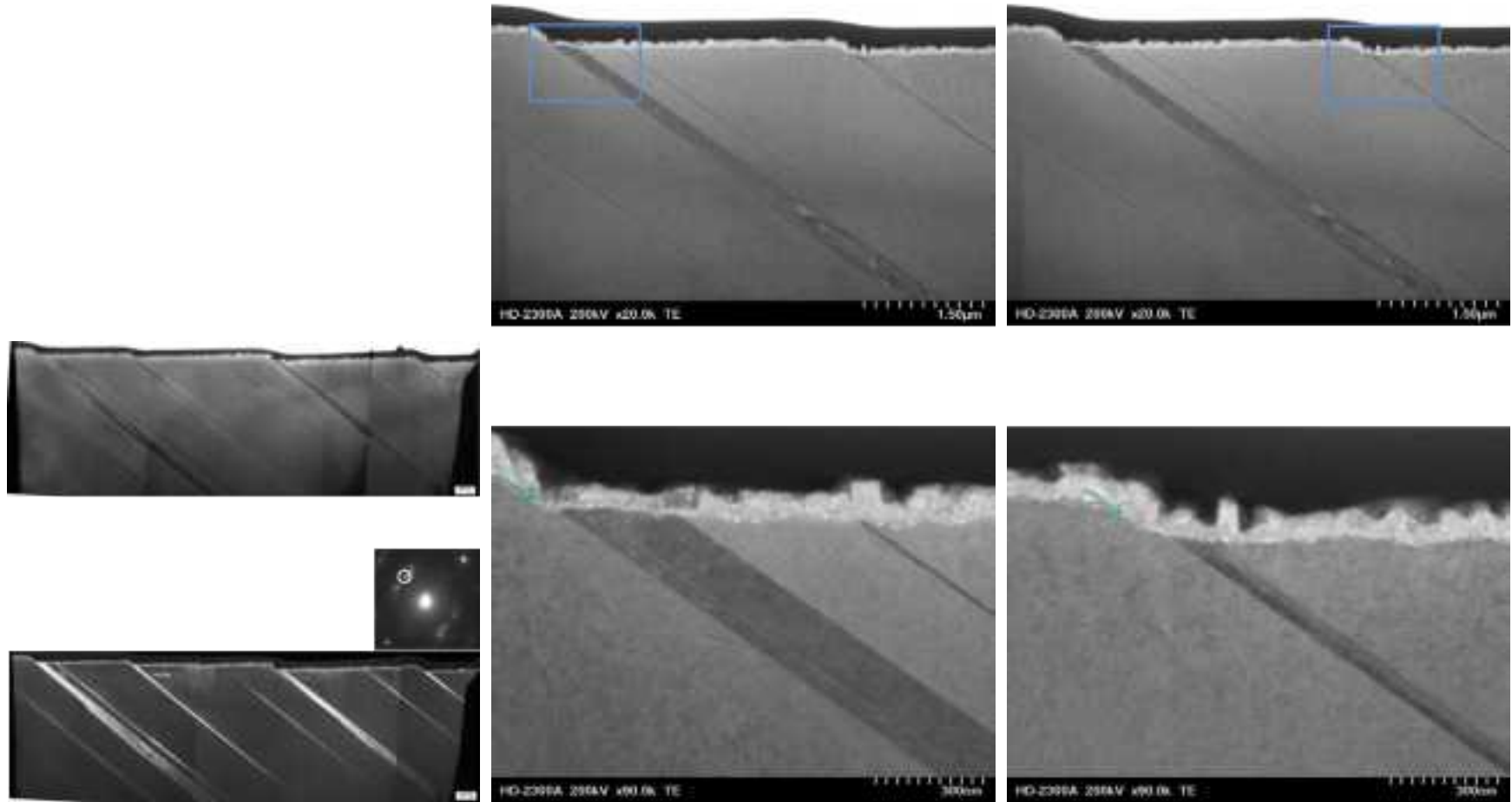


図 5.2.4-67(1) A440(2.0%ひずみ付与材、母相)のマイクロ組織

(㊦)A440(2.0%ひずみ付与材、粒界ひずみ小)

マイクロ組織採取箇所を図 5.2.4-68 に示す。マイクロ組織採取箇所は、KAM によるひずみが小さく、先行研究で断面観察を実施した粒界である。マイクロ組織を図 5.2.4-69 に示す。作製した試料には粒界が 1 つとすべりステップが 3 つ観察された。すべりステップの高さは 114 μm 、241 μm 、100 μm であった。図 5.2.4-69 の ZC 像の 100 点につき酸化被膜厚さを測定した結果を図 5.2.4-70 に示す。酸化被膜の最大厚さは 161 nm、最小厚さは 40 nm であり、平均厚さは 85 nm であった。xxx に粒界の詳細観察結果を示す。粒界は周辺よりもわずかに腐食が顕著であった。酸化被膜から取得した回折像はスピネル構造と考えられる。図 5.2.4-71 に粒界の EDX 分析結果を示す。EDX マップでは粒界周辺での濃縮や欠乏は検出されなかった。酸化被膜は Cr を主とする内層酸化被膜と Fe-Ni を主とする外層酸化被膜からなり、回折図形(xxx)からスピネル酸化物と推察された。

図 5.2.4-72 はすべりステップの詳細観察結果である。図 5.2.4-72(1)において、すべりステップが交差しているのが確認される。すべりステップの交差によりひずみコントラストが発生している。図 5.2.4-72(2)は双晶を示す明視野像と暗視野像であり、双晶はすべりステップと平行に生じている。また、右上から左斜め下方向にすべりが発生したことにより中央の双晶がずれたことが確認できる。これにより、図 5.2.4-72(1)のひずみコントラストが発生したものと推察される。本試料においても、双晶に隣接して転位チャネルが発生していることが観察された。

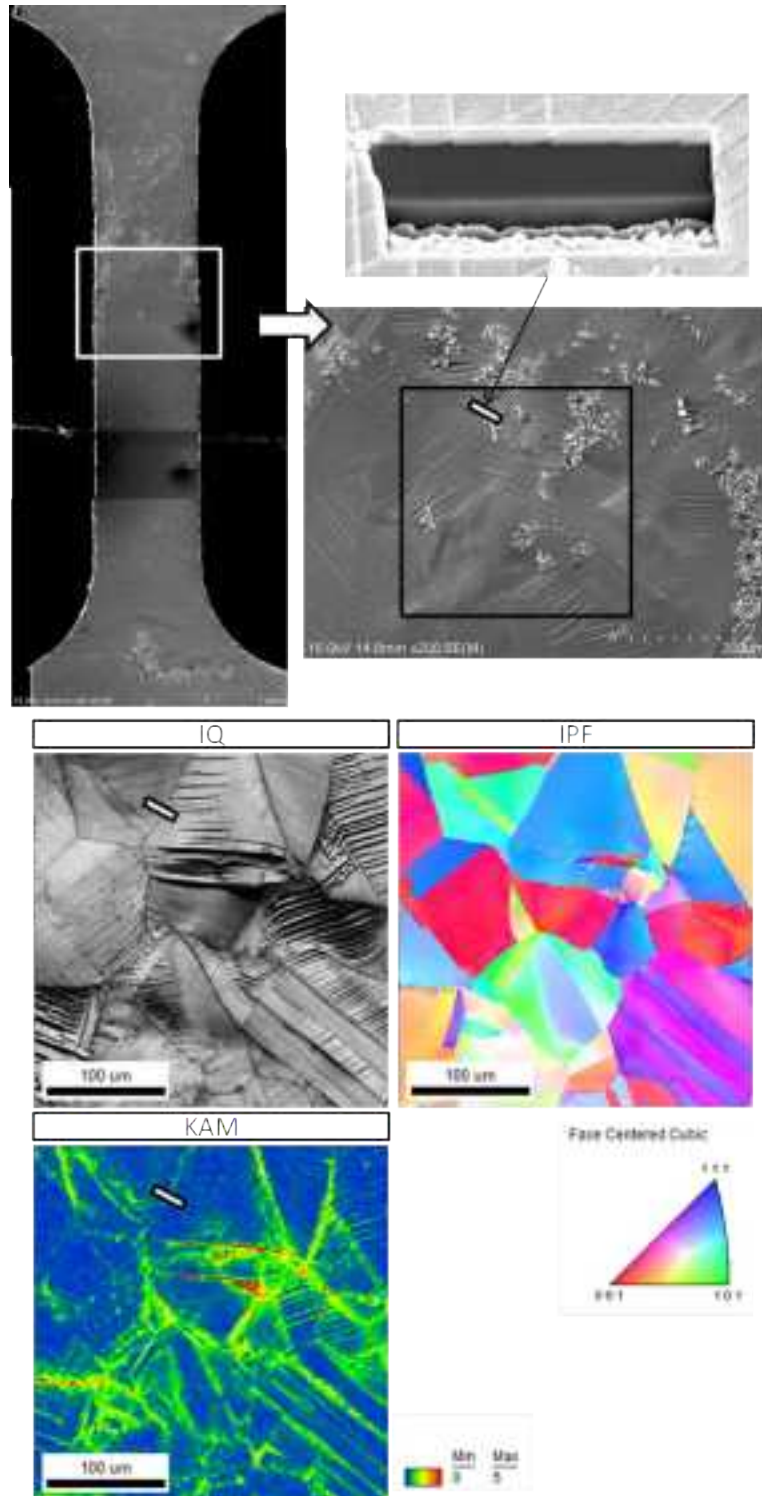


図 5.2.4-68 A440(2.0%ひずみ付与材、ひずみ小)からのマイクロ組織試験片採取箇所

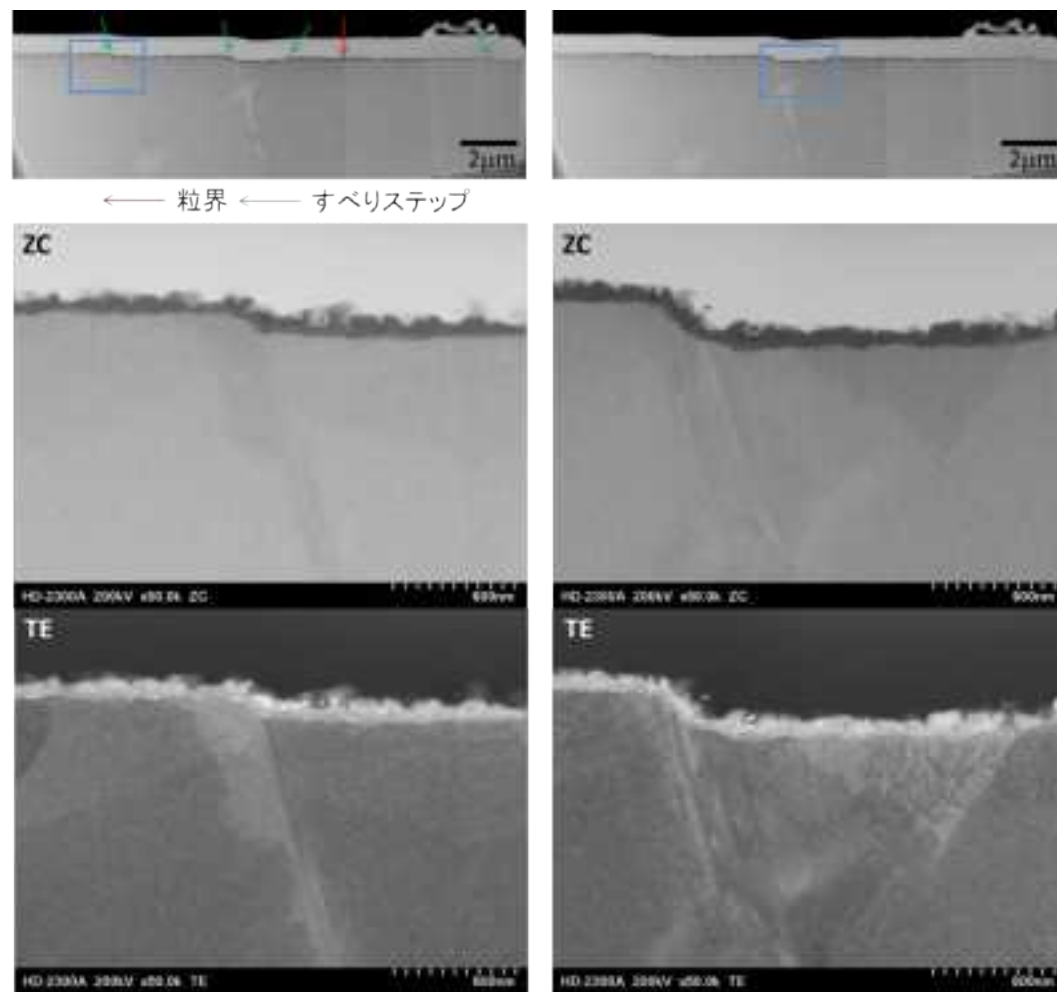


図 5.2.4-69(1) A440(2.0%ひずみ付与材、ひずみ小)のマイクロ組織

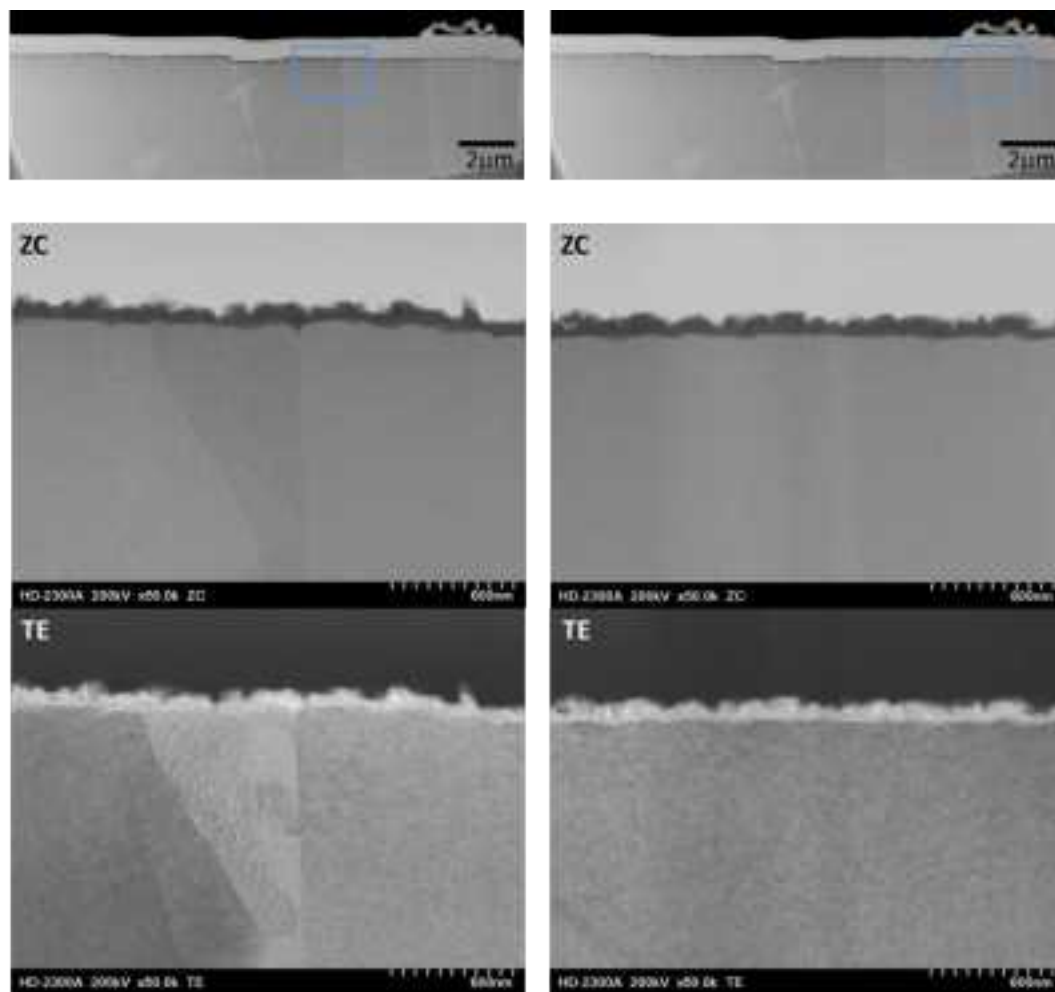


図 5.2.4-69(3) A440(2.0%ひずみ付与材、ひずみ小)のマイクロ組織

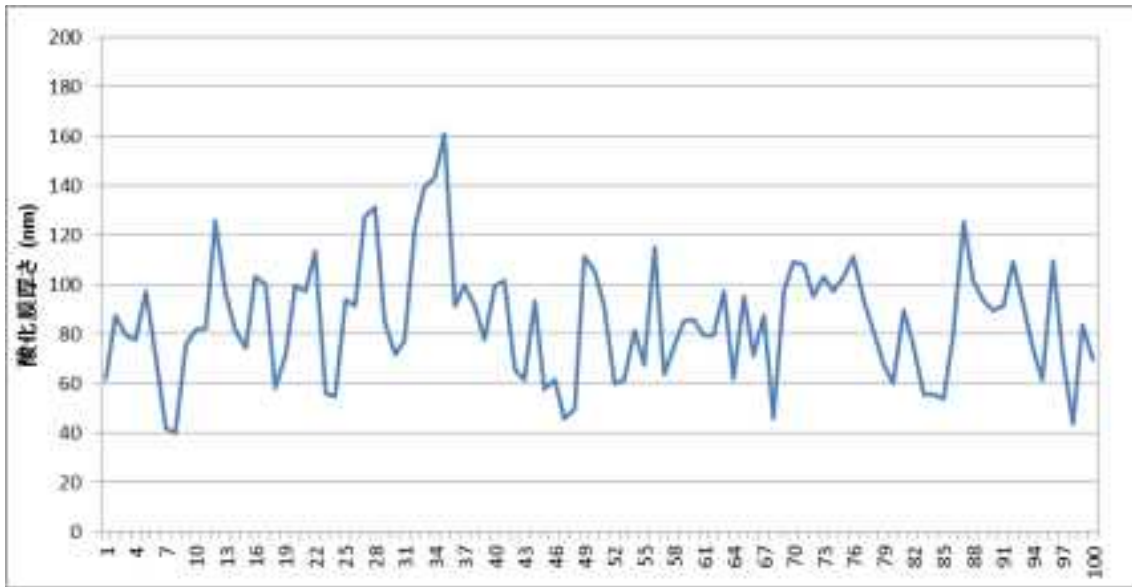


図 5.2.4-70 A440(2.0%ひずみ付与材、ひずみ小)の酸化皮膜厚さ

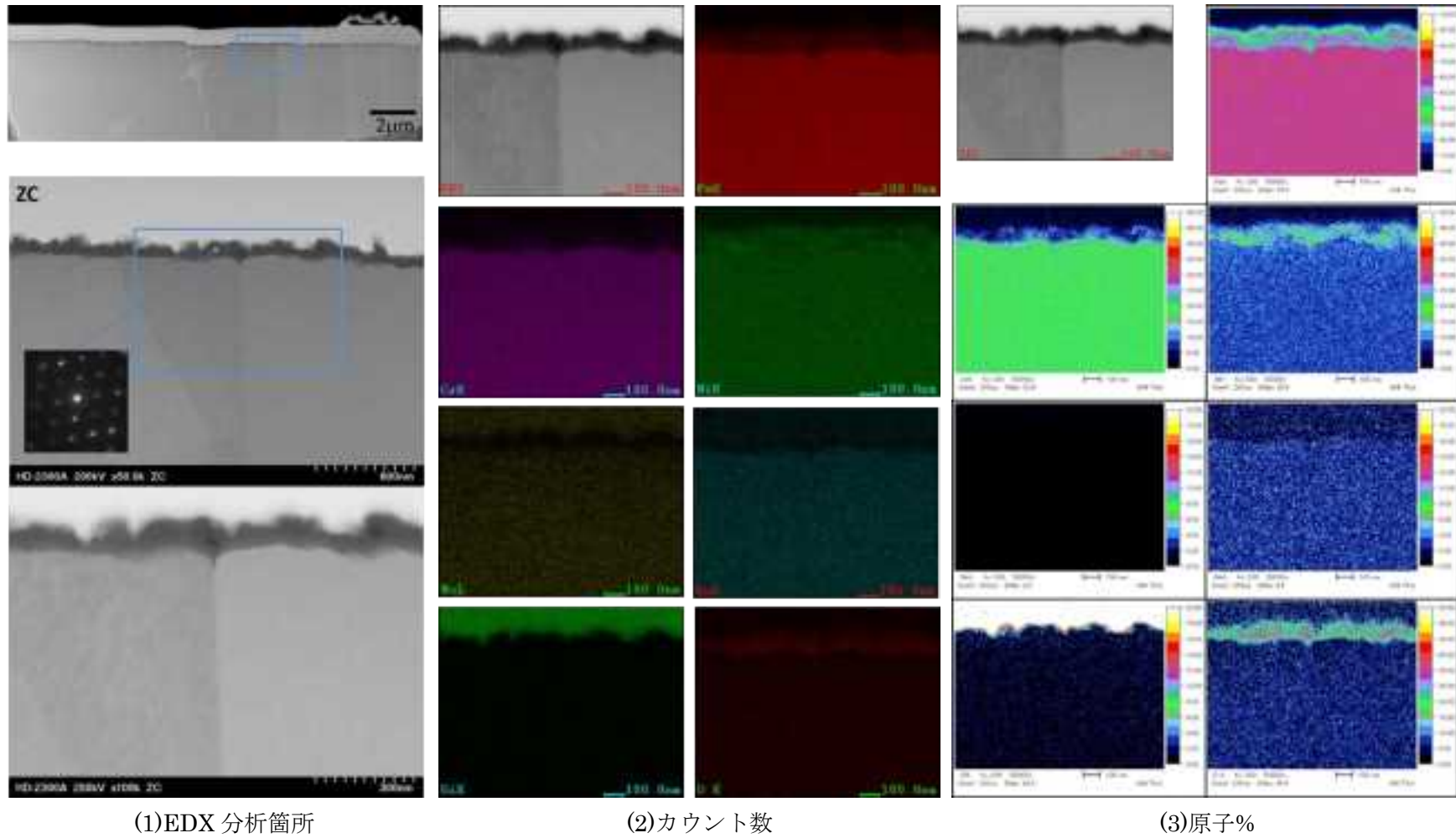


図 5.2.4-71 A440(2.0%ひずみ付与材、ひずみ小)の EDX 分析結果

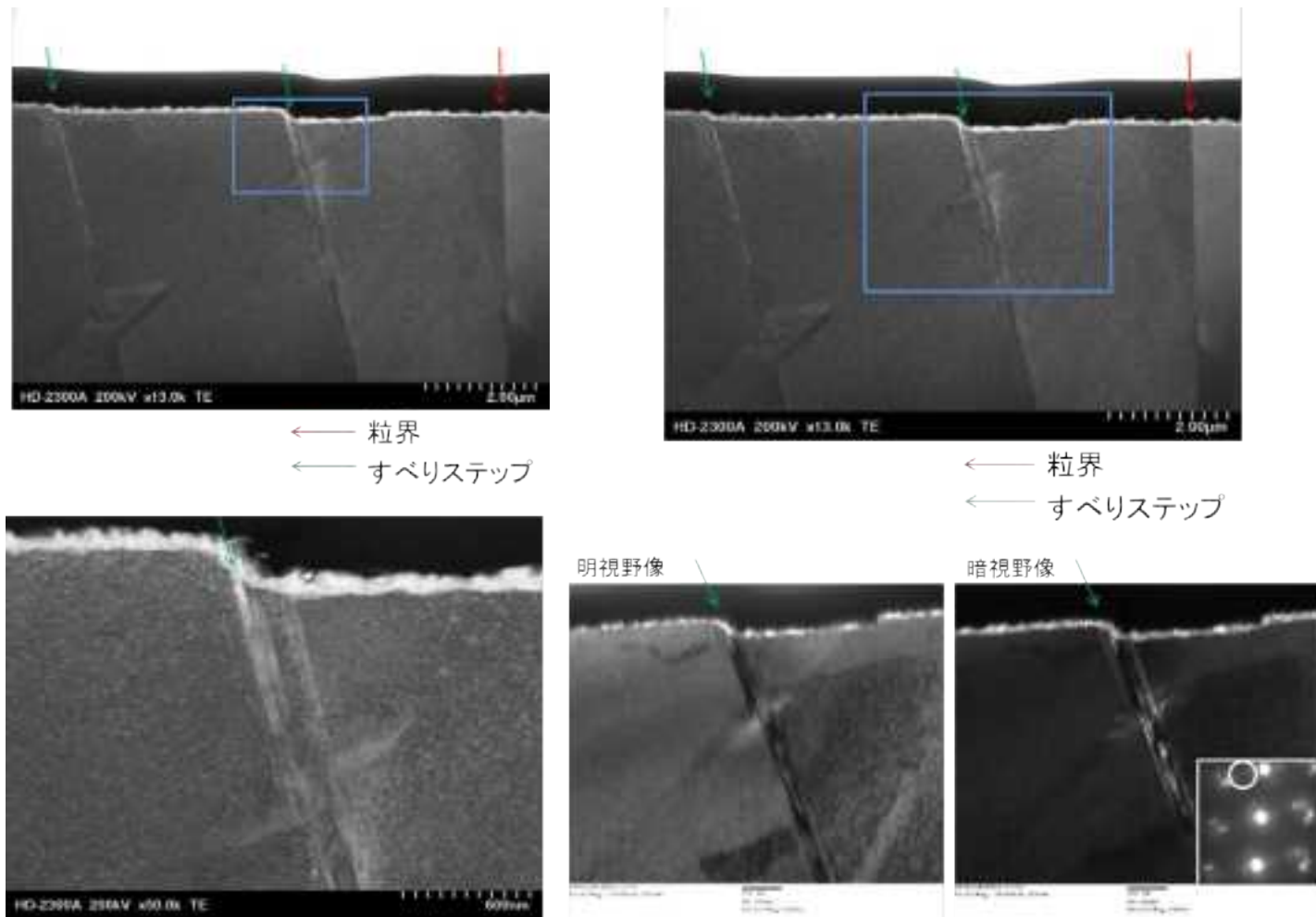


図 5.2.4-72 A440(2.0%ひずみ付与材、ひずみ小)のマイクロ組織

(シ)A440(2.0%ひずみ付与材、粒界ひずみ大)

マイクロ組織採取箇所を図 5.2.4-73 に示す。マイクロ組織採取箇所は、KAM によるひずみが大きく、先行研究で断面観察を実施した粒界である。マイクロ組織を図 5.2.4-74 に示す。作製した試料には粒界が 1 つとすべりステップが 1 つ観察された。すべりステップの高さは 108 μm であった。図 5.2.4-74 の ZC 像の 100 点につき酸化被膜厚さを測定した結果を図 5.2.4-75 に示す。酸化被膜の最大厚さは 183 nm、最小厚さは 54 nm であり、平均厚さは 95 nm であった。粒界の詳細な観察結果を xxx に示す。粒界上の酸化被膜には空隙が見られた。回折図形から酸化被膜はスピネル構造であると考えられる。EDX 分析箇所及び分析結果を図 5.2.4-76 に示す。の空隙の下部である金属側に Ni が濃縮しているように見える。き裂先端では Ni が濃縮する傾向があり、Ni の濃縮は酸化フロントを示唆するものと考えられる。酸化被膜は Cr を主とする内層酸化被膜と Fe-Ni を主とする外層酸化被膜からなるスピネル酸化物と考えられる。図 5.2.4-77 に変形組織の詳細観察結果を示す。粒界を挟み、極めて高密度の双晶が生成していた。図 5.2.4-77(1)中に青矢印で示すように粒界を等間隔にひずみコントラストが発生している。拡大すると粒界がずれたことによりひずみコントラストが発生したと推測される。図 5.2.4-77(2)に左側の結晶粒の双晶を示す。双晶は試料表面にほぼ直交して生成している。また、試料表面にはわずかながらステップが形成しているように見える。前述したように双晶端面には転位チャンネルが生成しやすい傾向がある。このため、左側の結晶粒においても転位チャンネルが生成している可能性がある。図 5.2.4-77(3)、-58(4)は粒界と左側の結晶粒に生じた双晶との相互作用を観察した結果である。左側の結晶粒に生じた双晶と粒界が交差して試料面に近い箇所にひずみコントラストが発生している。高倍で観察(図 5.2.4-77(4)すると、双晶と粒界が交差して粒界にステップが形成されている。

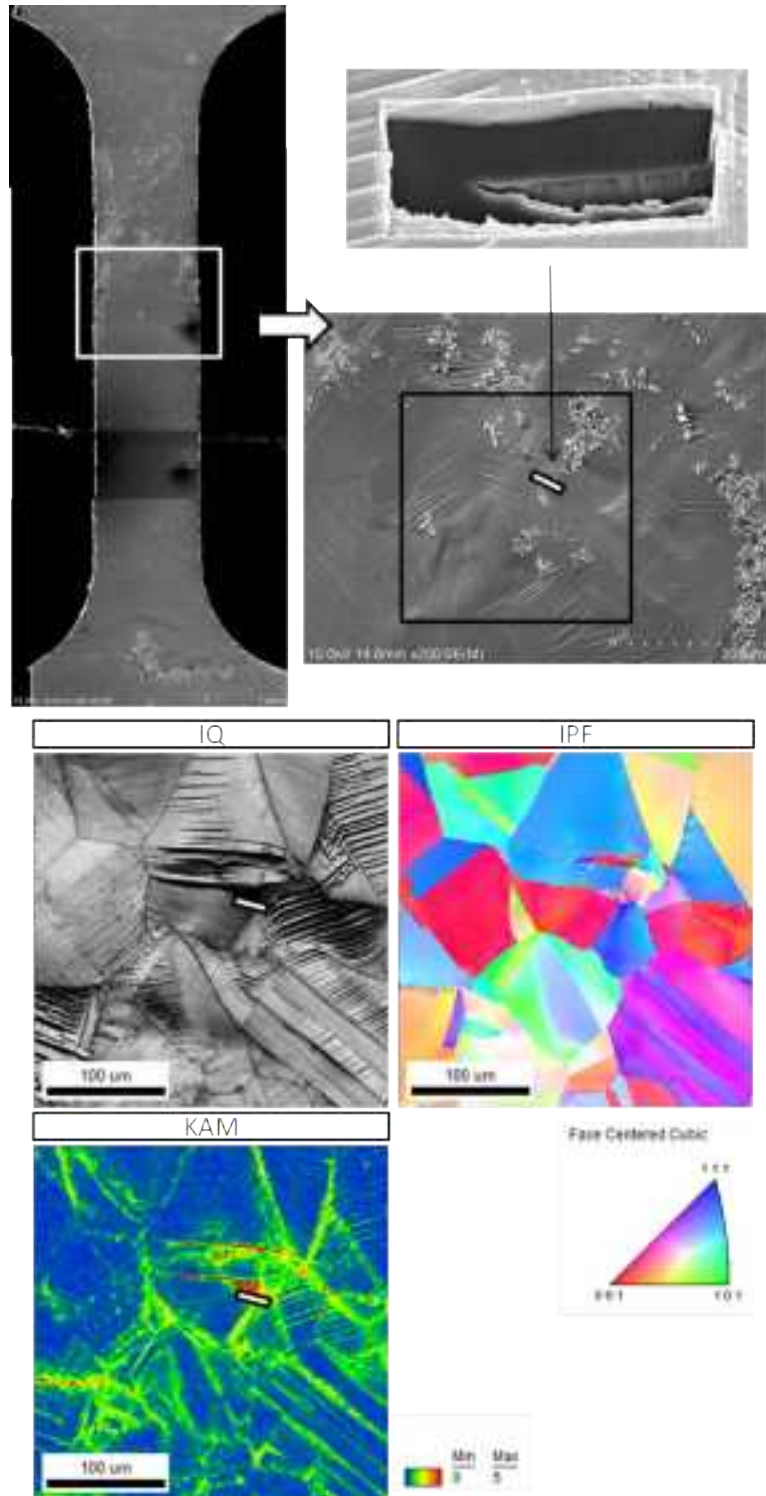


図 5.2.4-73 A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ大)からのマイクロ組織試験片採取箇所

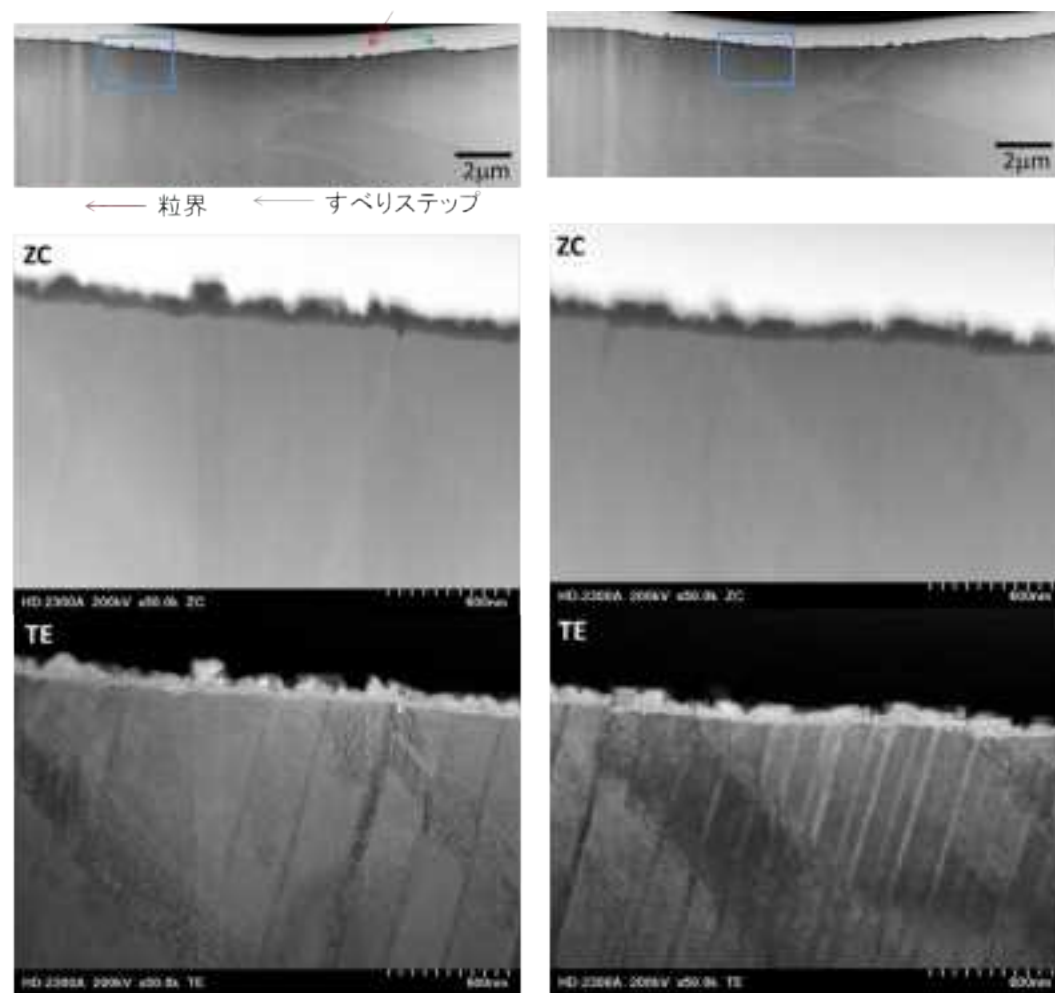


図 5.2.4-74(1) A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ大)のマイクロ組織

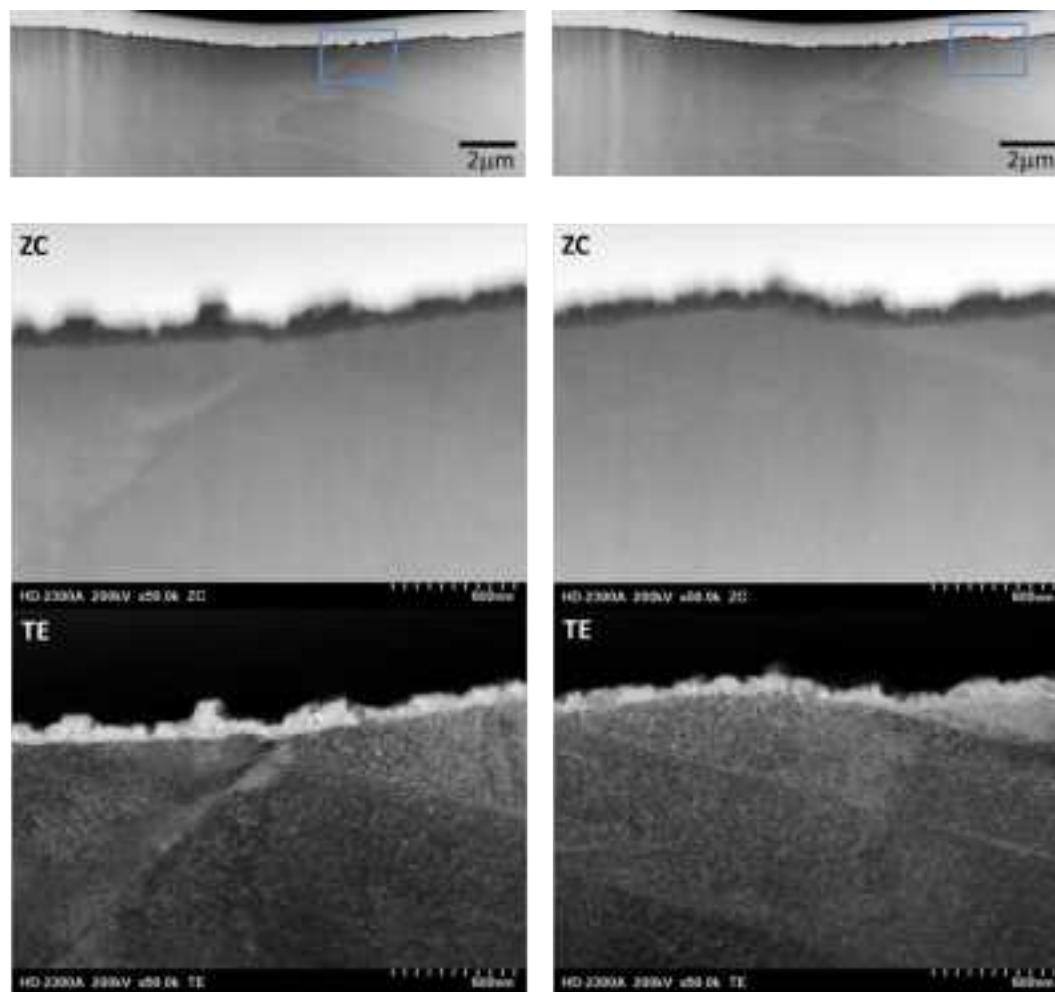


図 5.2.4-74(3) A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ大)のマイクロ組織



図 5.2.4-75 A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ大)の酸化皮膜厚さ

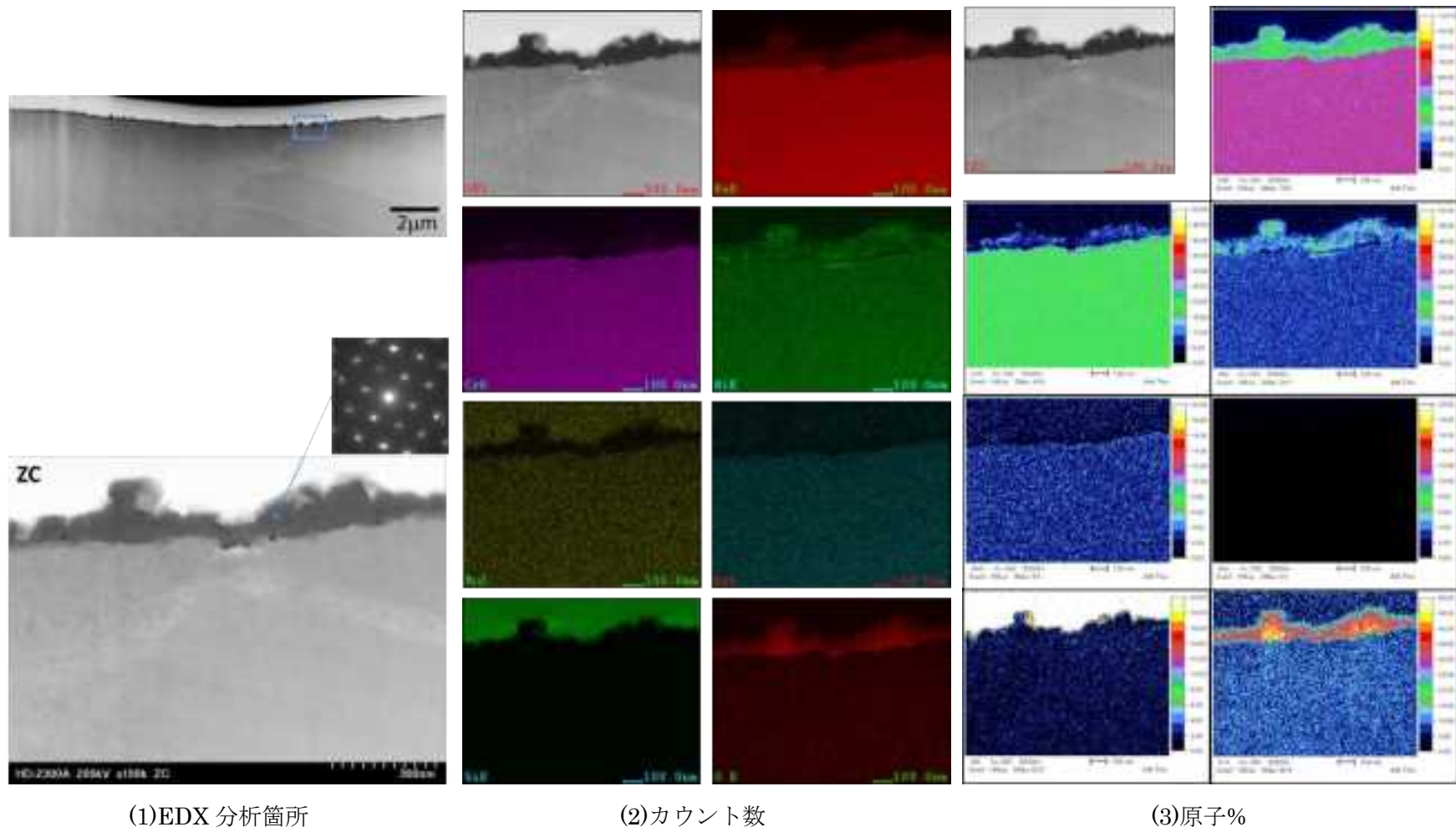


図 5.2.4-76 A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ大)の EDX 分析結果

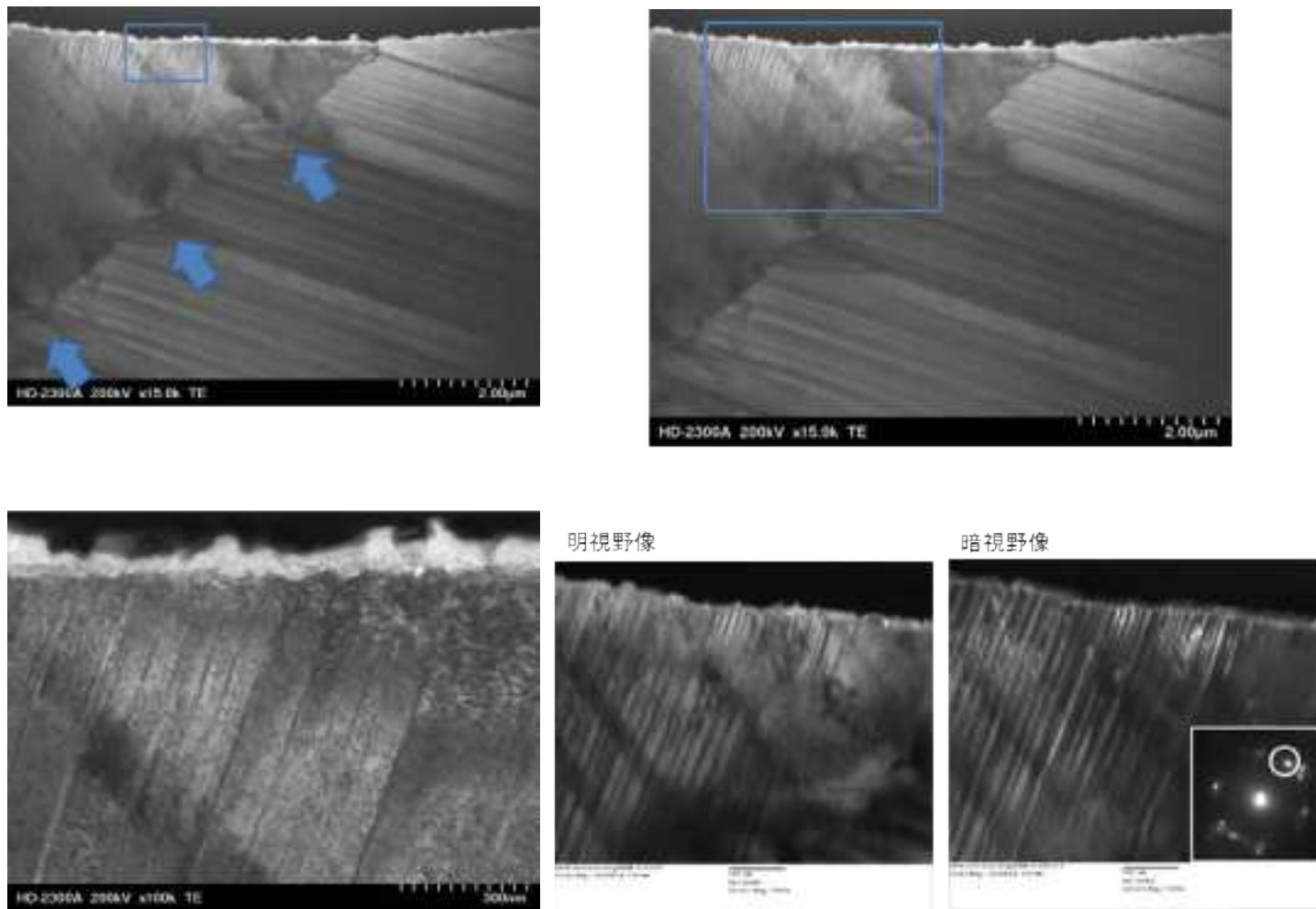


図 5.2.4-77 A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ大)のマイクロ組織

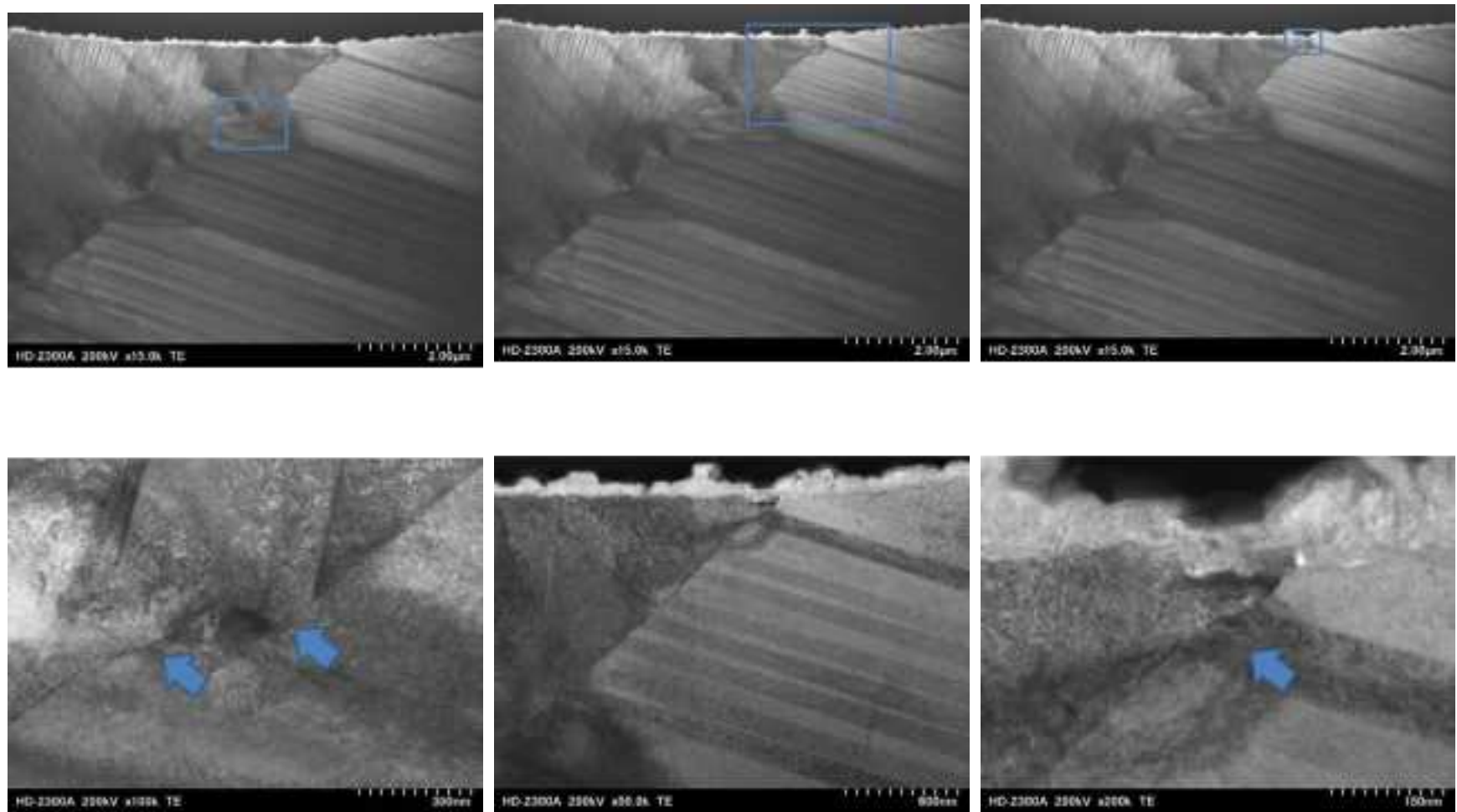


図 5.2.4-77(2) A135(2.0%ひずみ付与材、ひずみ大)のマイクロ組織

(iii)まとめ

(f)酸化皮膜性状および粒界腐食

昨年度実施した先行研究において BWR 環境で浸漬試験したひずみ付与試験片について表 5.2.4-11 の母相でマイクロ組織観察を行った。測定した酸化皮膜厚さの比較を図 5.2.4-78 に示す。ここでは、A135 および A440 の 0.1%ひずみ付与材には変形組織が観察されなかったため、ひずみ無しと記載した。また、図には酸化皮膜の最大厚さと最小厚さも示した。この図から、粒界ひずみと照射量が大きくなると酸化皮膜が厚くなる傾向が見て取れる。この傾向は最小皮膜により顕著に現れている。

EDX 分析の結果、酸化皮膜は内層酸化皮膜と外層酸化皮膜の 2 層構造になっており、内層酸化皮膜は Cr を主成分とするスピネルであり、外層酸化皮膜は Fe-Ni を主成分とするスピネルと推察された。また、酸化皮膜の性状はひずみ量や照射量に依存していなかった。

浸漬試験により粒界腐食の兆候が見られたのは、に示す A135(2.0%ひずみ付与材、粒界ひずみ小)、に示す A135(2.0%ひずみ付与材、粒界ひずみ大)、に示す A440(2.0%ひずみ付与材、粒界ひずみ小)、に示す A440(2.0%ひずみ付与材、粒界ひずみ大)であった。いずれも周辺部より粒界部の方がわずかに腐食しているように見えたが、照射量やひずみ量の影響は明瞭では無いと考えられる。EDX 分析の結果、A440(2.0%ひずみ付与材、粒界ひずみ大)を除いて、粒界腐食部における差は認められず、粒界周辺の酸化皮膜と組成等に変化はなかった。A440(2.0%ひずみ付与材、粒界ひずみ大)については粒界腐食部に Ni が濃縮する特徴があった。

(i)ステップ高さ評価

全てのすべりステップ測定結果を表 5.2.4-12 に示す。この結果を棒グラフで表し図 5.2.4-79 に示す。TT01 と TT02 を比較して試験温度影響をみると試験温度 RT よりも 290°Cのほうステップが高い傾向にある。次に TT01 と TT02 において、同じ温度でのひずみ条件でのステップ高さを比較すると、RT、290°C共に粒界ひずみが大きい方がステップが高くなる傾向であった。2.4(2)章に示したように、TT01 は引張試験片平行部にすべりステップが生じたのに対して、TT02 は平行部の 1/3 の領域にすべりステップは局在し、すべりステップの幅は両者に顕著な差は見られなかった。このため、TT01 と TT02 において引張試験により付与された 2%ひずみ量を確保するためには、TT01 よりも TT02 のほうがすべり高さが高くなる必要があり、すべりステップ高さ測定結果はそれを示している。

一方、昨年度室温でひずみ付与試験を行った A135 と A440 では、その傾向は明瞭ではない。A135 で最も平均ステップが高いのは 2.0%ひずみ付与_粒界ひずみ大であるが、A440 で最も平均ステップが高いのは 2.0%ひずみ付与_母相であった。この結果は測定対象としたステップ数が不足することに起因すると考えられ、評価は困難である。

(ウ)変形組織

変形組織が確認できなかった室温で 0.1%(目標値)までひずみ付与した引張試験片 (A135)と A440(0.1%ひずみ付与)を除いた 10 試料につき、観察された変形組織を表 5.2.4-13 にまとめた。観察された変形組織は双晶や転位チャンネルが主であり、A135(2.0%ひずみ付与_粒界ひずみ大)では転位のタングリングが観察された。また、試験温度によって変形組織に明瞭な差は認められなかった。

TT01 と TT02 の粒界ひずみ大においては、(1)と(2)に示すように粗大な粒界ステップが生じており、粒界ステップの低い側の結晶粒に高密度な双晶が変形して形成していた。これらの粒界近傍にはひずみコントラストが発生しており、EBSD 測定結果に一致した。このような高ひずみが発生した主因は高密度な双晶が変形したことによると考えられる。その他の高ひずみ要因は、変形組織(双晶や転位チャンネル)と粒界の交差である。双晶と粒界の交差によるひずみ発生は(1)に見られる。転位チャンネルと粒界の交差によるひずみ発生は(4)に見られる。双晶と転位チャンネルの交差により発生するひずみコントラストも(1)に見られる。以下に高ひずみが発生すると考えられる変形組織をまとめる。

- ①高密度な双晶が変形した場合
- ②双晶と粒界が交差した場合
- ③転位チャンネルと粒界が交差した場合
- ④双晶と転位チャンネルが交差した場合

一方、引張試験片表面に生じたすべりステップにはほとんどひずみコントラストは発生していなかった。この結果は EBSD 測定による KAM の評価結果と異なる。例えばにおいてマイクロ組織観察用試験片を採取した試料には粒界を挟む粒界にはすべりステップにそった高ひずみコントラストが観察されるはずである。しかし、すべりが交差した左側の結晶粒ではほとんどひずみコントラストは発生していない。このことは、すべりステップによってひずみは上昇しないことを示している。したがって、KAM によりひずみ評価を行う場合は、注意が必要である。

変形組織観察の結果、すべりステップのほとんどに双晶と転位チャンネルが観察され、双晶の端面に沿ってすべりステップが生じていた。これらは(2)、-45(3)や(1)に見られる。転位チャンネルが生じてすべりステップを形成するよりは寧ろ、何らかの理由で双晶と転位チャンネルが隣接することによってすべりステップは形成されやすくなると推測される。

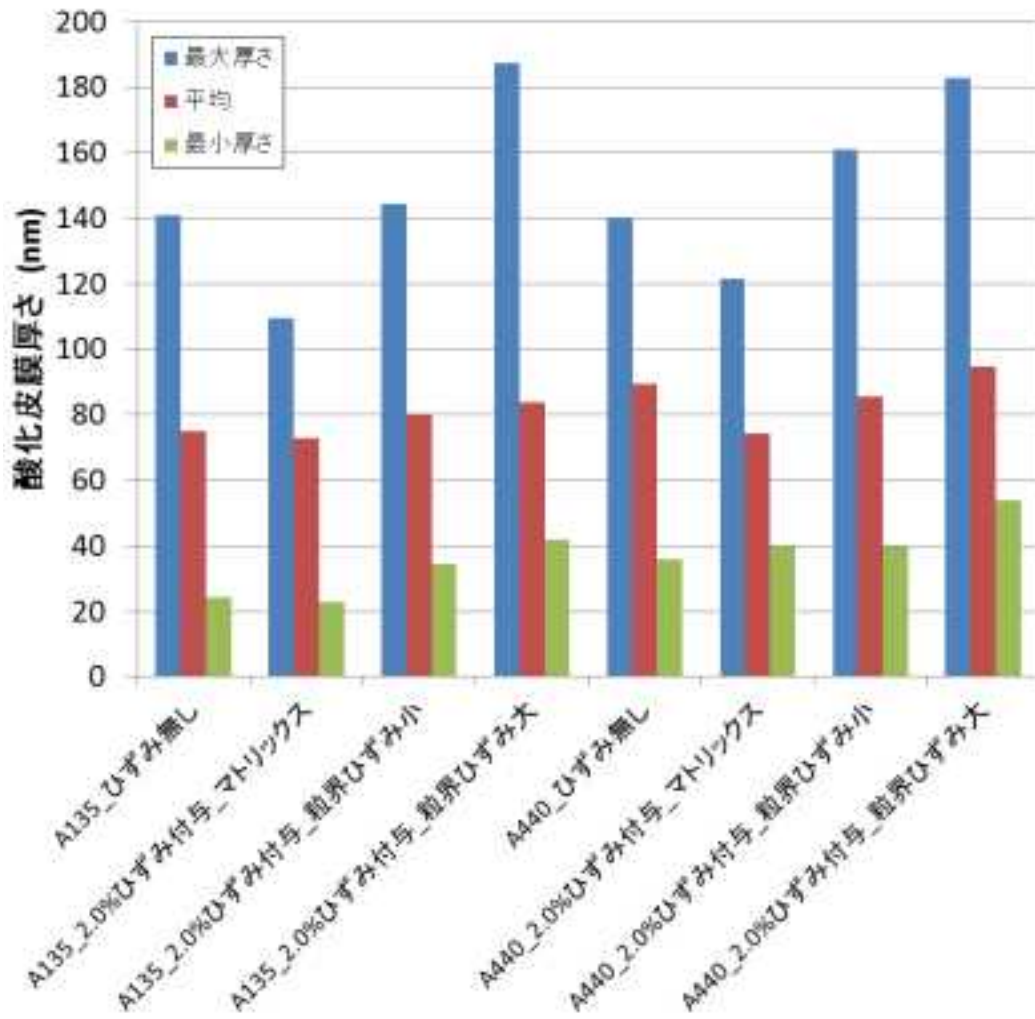


図 5.2.4-78 酸化皮膜厚さの比較

表 5.2.4-12 ステップ高さの測定結果

試験片名	試験温度	ひずみ条件	ステップ高さ(nm)					平均
TT01	RT	粒界ひずみ小	170	75	30			92
		粒界ひずみ大	300	84	60			148
TT02	290°C	粒界ひずみ小	119	86	291	53	212	165
			357	176	139			178
		粒界ひずみ大	200	357	61	152	99	258
								188
A135	RT	2.0%ひずみ付与_マトリックス	108	106	158			124
		2.0%ひずみ付与_粒界ひずみ小	66					66
		2.0%ひずみ付与_粒界ひずみ大	167					167
A440	RT	2.0%ひずみ付与_マトリックス	214	119	205	214		188
		2.0%ひずみ付与_粒界ひずみ小	114	241	100			152
		2.0%ひずみ付与_粒界ひずみ大	108					108

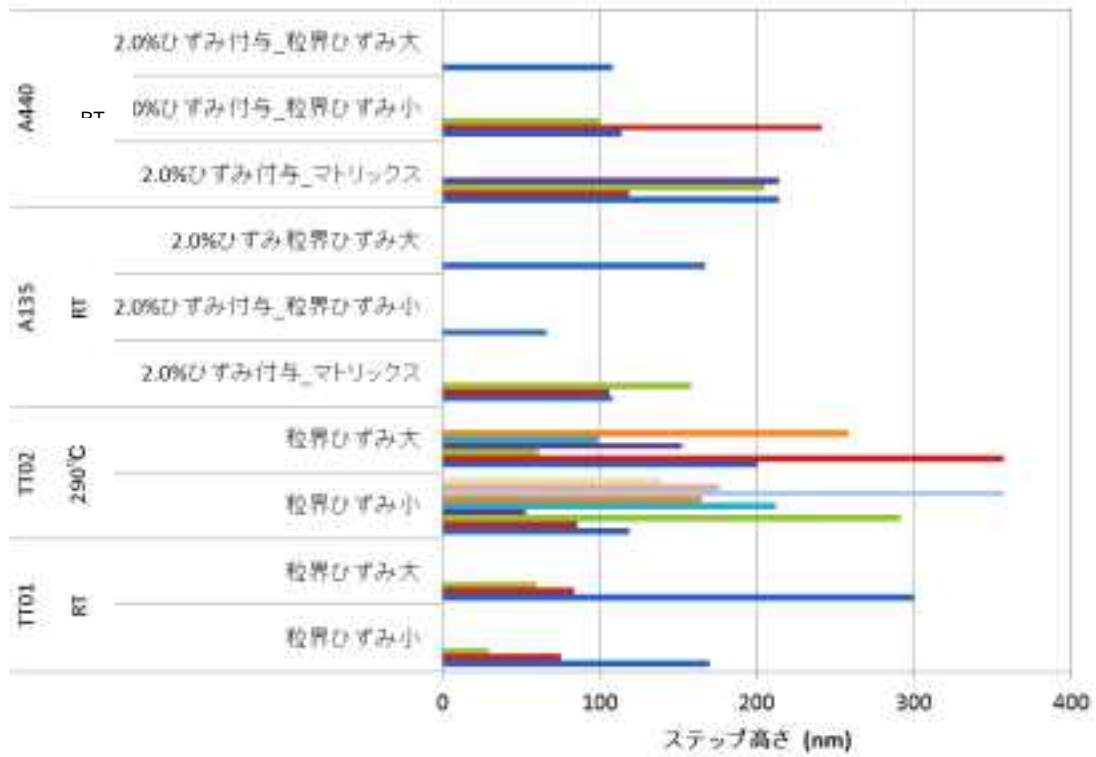


図 5.2.4-79 ステップ高さの比較

表 5.2.4-13 変形組織の整理

試験片名	試験温度	ひずみ条件	変形組織			
TT01	RT	粒界ひずみ小	双晶	転位チャネル		
		粒界ひずみ大	高密度な双晶	転位チャネルの交差	粒界ステップ	双晶の変形
TT02	290°C	粒界ひずみ小	転位チャネルの交差	双晶	転位チャネルと粒界の交差	
		粒界ひずみ大	高密度な双晶	転位チャネル	双晶の変形	
A135	RT	2.0%ひずみ付与_マトリックス	—			
		2.0%ひずみ付与_粒界ひずみ小	転位チャネル	ひずみコントラスト無し		
		2.0%ひずみ付与_粒界ひずみ大	転位のタンゲリング			
A440	RT	2.0%ひずみ付与_マトリックス	双晶	転位チャネル	ひずみコントラスト無し	
		2.0%ひずみ付与_粒界ひずみ小	双晶	転位チャネル	双晶と転位チャネルの交差	
		2.0%ひずみ付与_粒界ひずみ大	高密度な双晶	双晶と粒界の交差		

(5)水のラジオリシスがき裂進展に及ぼす影響評価試験

a. 目的と試験マトリクス

本事業では、照射ステンレス鋼の高温水中き裂進展挙動に及ぼす水のラジオリシス影響評価を目的として、中性子照射ステンレス鋼の照射下き裂進展試験を計画中である。ここでは、JMTR 炉心の放射線照射場において高温水中き裂進展速度データと ECP データを取得し、合わせてラジオリシスコードを用いた水の放射線分解生成物の濃度を計算して水質条件を評価することとしている。一方その比較データを取得するには、例えば ^{60}Co 線源による γ 線照射下での高温水試験が選択肢として挙げられるが、試験装置の設置やマシンタイムの確保などに多くの制約があって、その実施は容易ではない。

そこで本項目では、中性子照射したステンレス鋼自身が放出する γ 線によって 0.5T-CT 試験片のき裂内の放射線照射水質環境を詳細に評価し、き裂内でのラジオリシスがき裂進展挙動に及ぼす影響を評価するための試験を実施する。

水のラジオリシスがき裂進展に及ぼす影響評価試験マトリクスを表 5.2.4-14 に示す。ここでは、入手可能な中性子照射材で比較的放射化量が大きいものとして、旧原子力安全基盤機構(JNES)IASCC 事業で約 $7.5 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ まで中性子照射した 0.5T-CT 試験片(照射量レベル F4)の中から、試験片 ID. A410(SUS316L、HT 材、 $7.14 \times 10^{25} \text{ n/m}^2(E>1\text{MeV})$)、A412(SUS316L、HT 材、 $7.38 \times 10^{25} \text{ n/m}^2(E>1\text{MeV})$)、A413(SUS316L、HT 材、 $7.32 \times 10^{25} \text{ n/m}^2(E>1\text{MeV})$)を選定した。そのうち試験片 ID. A413 については、 γ 線照射のき裂内水質への効果そのものを確認するため、機械的性質と照射誘起粒界偏析に着目して、溶体化材と同等な条件となるように熱処理を施した。また熱処理条件確認試験として、IASCC 事業の引張試験片 A435(SUS316L、HT 材、 $7.26 \times 10^{25} \text{ n/m}^2(E>1\text{MeV})$)に対して $700^\circ\text{C} \times 1$ 時間の熱処理を実施し、引張試験、硬さ試験、粒界分析を実施した。

b. き裂進展試験片の選定と放射化量評価

各種の試験の実施に先立ち、前項で選定した IASCC 事業の照射量レベル F4 の現時点での放射化量に基づき、0.5T-CT 試験片き裂内の放射線水質の評価を行った。

図 5.2.4-81 は、当該 0.5T-CT 試験片の放射化量の減衰挙動を示す。この結果より、現在は ^{60}Co からの γ 線放出が主であり、IASCC 事業で試験を実施した平成 19 年度当時に比べて線量は約半分に減衰していることが判る。

図 5.2.4-81 は、0.5T-CT 試験片のき裂先端位置における γ 線の線量率を評価するための 2 次元のメッシュを示す。この表において、1 は水で構成されたメッシュ、2 はステンレス鋼で構成されたメッシュを示し、0.5T-CT 試験片の自己遮へい効果も考慮したき裂先端位置での γ 線の線量率を求めた。

計算には 2 次元輸送計算コード DOT3.5 を用い、0.5T-CT 試験片の予き裂幅は $0.5 \mu\text{m}$ とした。また線源は ^{60}Co (1 Bq 当たり 1.17 MeV 及び 1.33 MeV の γ 線を放出)のみとし、

図 5.2.4-81 を参考として吸収線量換算係数 $1.817 \times 10^{-2} \mu\text{Sv/時間/Bq/cm}^2$ を用いた。また ^{60}Co 線源の強度は $1.0 \times 10^{10} \text{ Bq}$ (10 GBq) として、試験片全体に分布させた。水の吸収線量率 (Gy/秒) への換算には γ 線に対する係数 1 を用いた。図 5.2.4-82 に計算結果を示す。0.5T-CT 試験片の放射エネルギーが 10 GBq の ^{60}Co であった場合、き裂先端位置での水の吸収線量率は 0.224 Gy/秒 (806.4 Gy/時間) と求められた。

この水の吸収線量率に基づいて、き裂先端位置におけるラジオリシス評価を行った結果を図 5.2.4-83(1)~(2) に示す。照射量レベル F4 のき裂進展試験実施時期については、JNES IASCC 事業報告書を参考に平成 19 年 12 月と仮定し、本年度の試験実施時期は平成 26 年 12 月として比較した。溶存酸素 32ppm の場合は酸素濃度が支配的であるが、脱気により溶存酸素を 10ppb とした場合や、そこに 40ppb の水素を添加した場合では、水のラジオリシスによる溶存水素、溶存過酸化水素の濃度に変化が認められることが判る。

以上の結果は、高温水中き裂進展試験の環境条件決定の際に参考とする。

表 5.2.4-14 水のラジオリシスが SUS316L 照射材のき裂進展に及ぼす

影響評価試験マトリクス

ID	照射量 (n/m ²) (E>1MeV)	熱処理	引張 試験	硬さ 試験	粒界 分析	き裂 進展 試験	破面 開放
A435	7.26×10 ²⁵	700℃× 1h	1	1	3		
A410	7.14×10 ²⁵	なし	—	—	—	1	1
A412	7.38×10 ²⁵	なし	—	—	—	1	△
A413	7.32×10 ²⁵	700℃× 1h	—	—	—	1	△

凡例 1、3：試験繰返し数

△：き裂進展状況により実施を判断

—：実施せず(または既往データ参照)

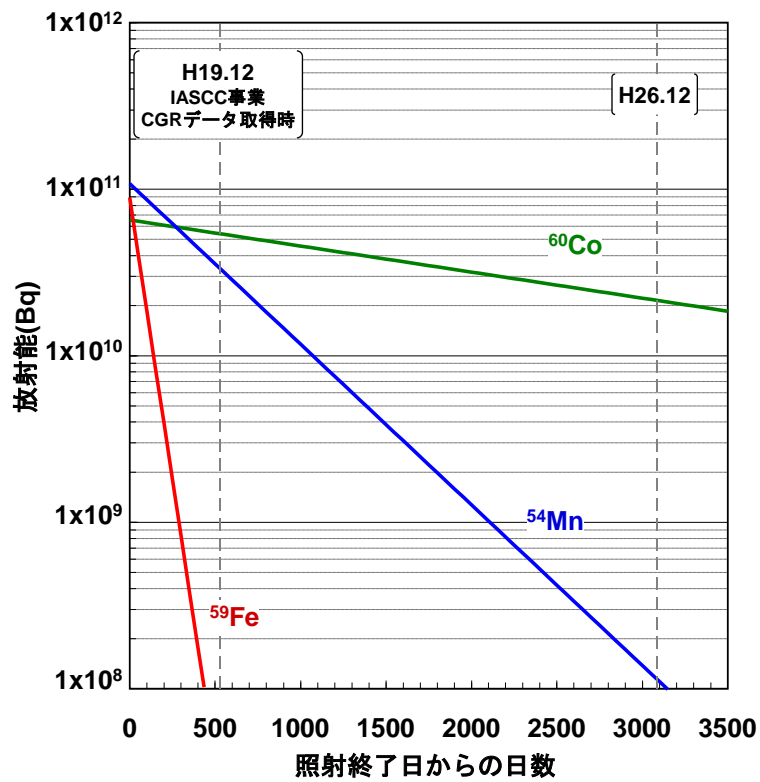


図 5.2.4-80 IASCC 事業照射量レベル F4 の 0.5T-CT 試験片の放射化量

表 5.2.4-15 水中における 0.5T-CT 試験片(き裂開口幅 0.5 μm)の計算モデル

		No.														
		メッシュ位置														
		メッシュ数														
		領域幅														
		メッシュ幅														
Xメッシュ数	212	9.0000	10.0000	10.2900	10.9225	10.6400	10.9575	11.4600	11.6600	11.7800	13.1800	14.1800	23.1800			
Yメッシュ数	229	40	20	8	4	8	8	4	12	4	44	20	40			
	48548	9.00000	1.00000	0.29000	0.03250	0.31750	0.31750	0.50250	0.20000	0.12000	1.40000	1.00000	9.00000			
No.	メッシュ位置	メッシュ数	領域幅	メッシュ幅	0.22500	0.05000	0.03625	0.00813	0.03969	0.03969	0.12563	0.01667	0.03000	0.03182	0.05000	0.22500
1	9.000000	40	9.0000	0.225	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	10.000000	20	1.0000	0.050	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	10.507500	8	0.5075	0.063	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
4	11.142500	16	0.6350	0.040	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1
5	11.245000	4	0.1025	0.026	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
6	11.345000	8	0.1000	0.013	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
7	11.445000	8	0.1000	0.013	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
8	11.515000	4	0.0700	0.018	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1
9	11.524975	4	0.009975	0.002	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1
10	11.525025	5	5.0E-05	1.0E-05	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1
11	11.535000	4	0.009975	0.002	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	1
12	11.605000	4	0.0700	0.018	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1
13	11.705000	8	0.1000	0.013	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
14	11.805000	8	0.1000	0.013	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
15	11.907500	4	0.1025	0.026	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
16	12.542500	16	0.6350	0.040	1	1	2	2	1	1	2	2	2	2	2	1
17	13.050000	8	0.5075	0.063	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1
18	14.050000	20	1.0000	0.050	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	23.050000	40	9.0000	0.225	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

領域組成 単位: 10²⁴N/cc

核種	1	2
	水	SUS
H	6.66440E-02	
O	3.33220E-02	
Cr		1.72076E-02
Mn		1.50008E-03
Fe		5.90264E-02
Ni		7.41727E-03

メッシュ構成 1: 水、2: SUS

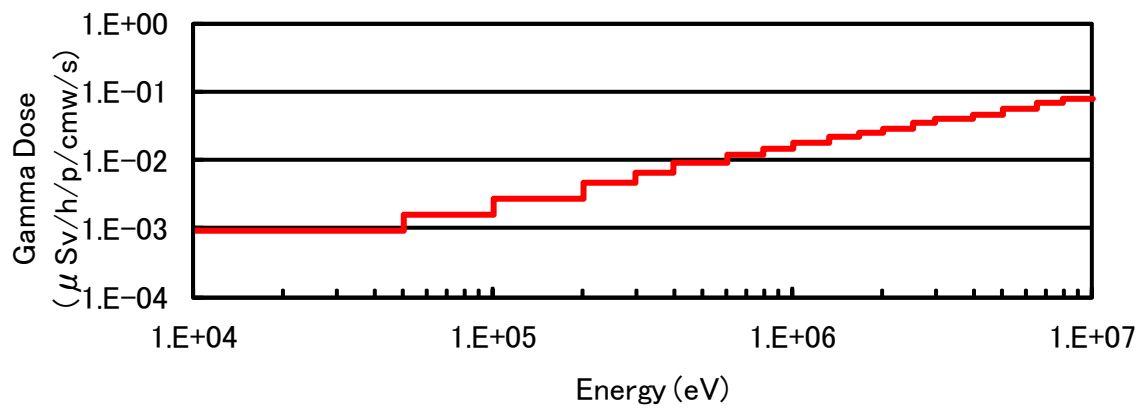


図 5.2.4-81 計算に用いた水の吸収線量換算係数

参考文献: 坂本幸夫: 実効線量評価のための光子・中性子・ベータ線制動輻射に対する遮へい計算定数 JAERI Data-Code 2000-044 (2001)

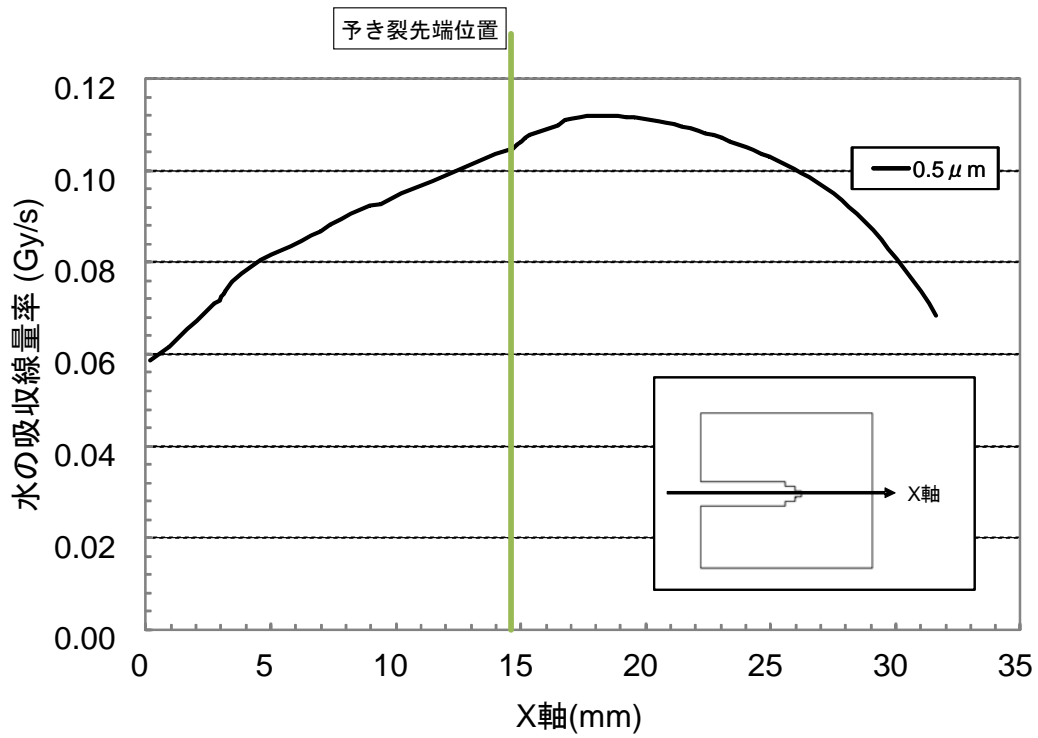
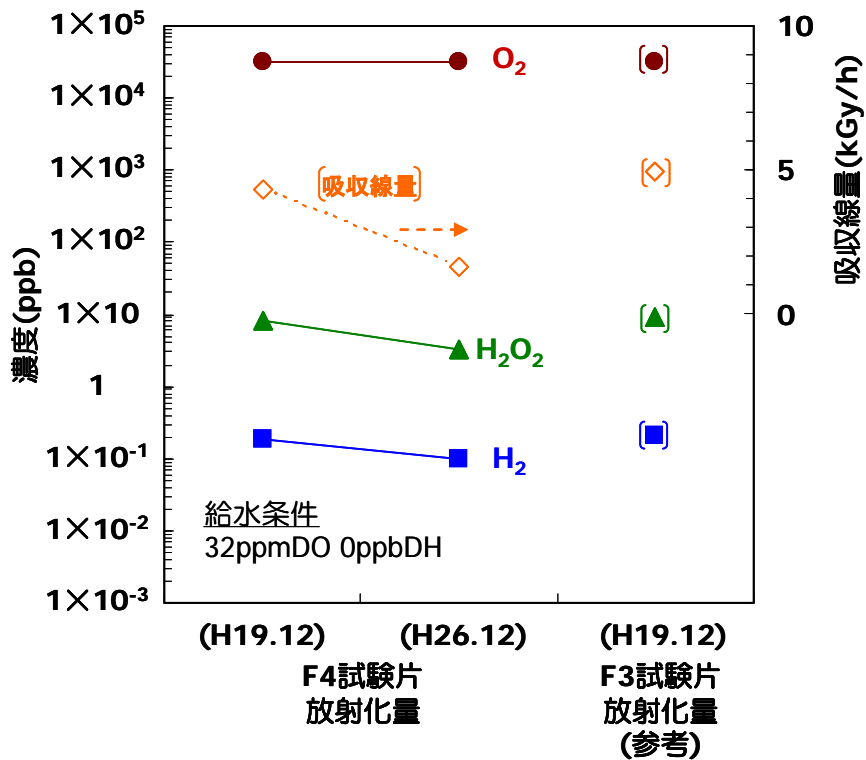
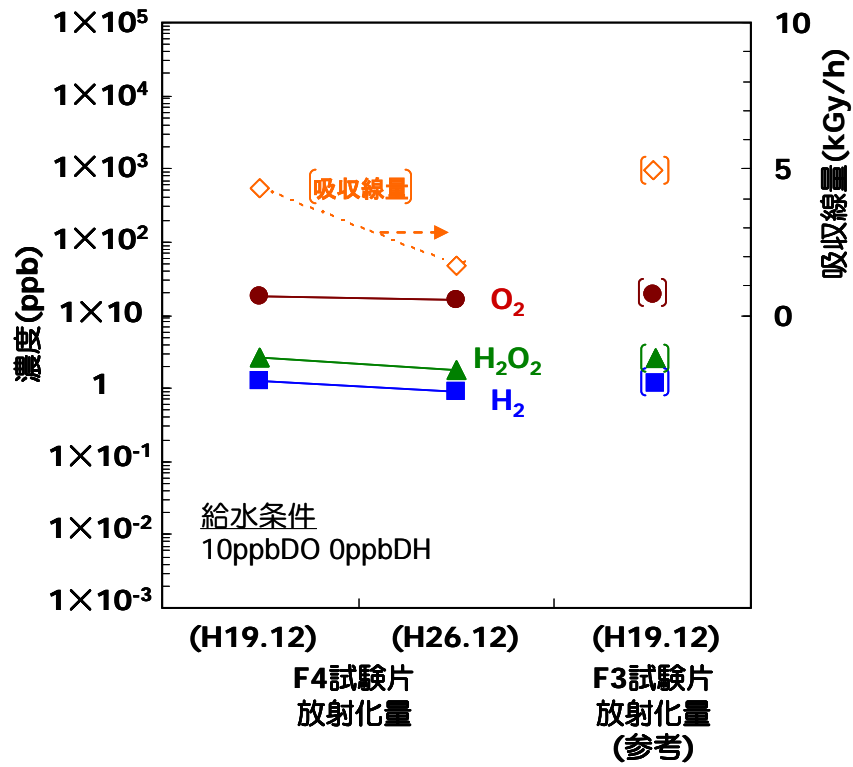


図 5.2.4-82 0.5T-CT 試験片の荷重中立線上における水の吸収線量率

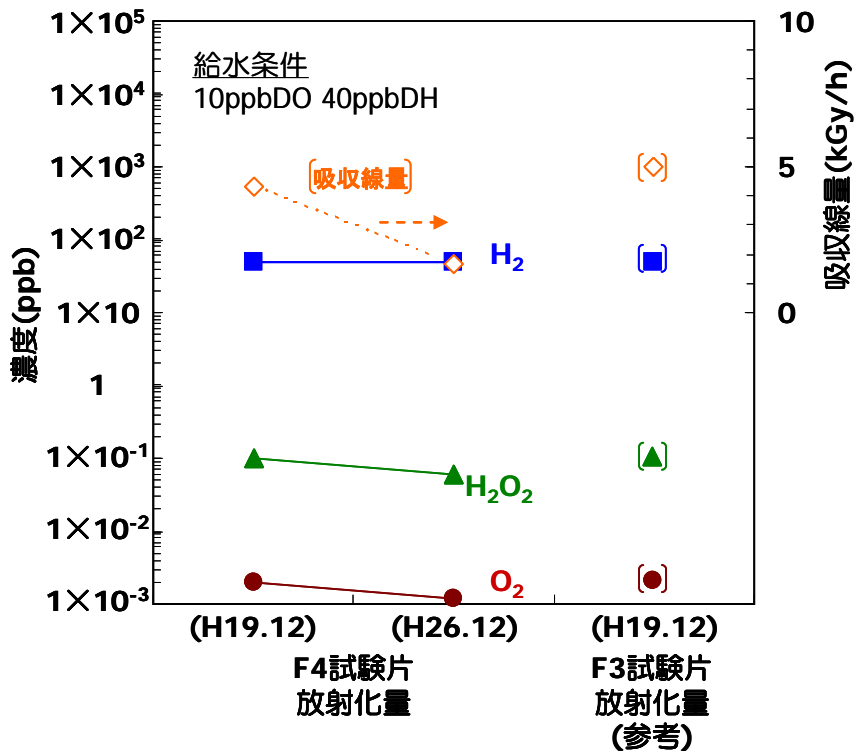


(1)給水条件 溶存酸素 32ppm 溶存水素 0ppb(酸素飽和)

図 5.2.4-83(1) 中性子照射した 0.5T-CT 試験片き裂先端における水の吸収線量、溶存酸素、溶存水素、溶存過酸化水素濃度



(2)給水条件 溶存酸素 10ppb 溶存水素 0ppb(脱気 水素注入なし)



(3)給水条件 溶存酸素 10ppb 溶存水素 40ppb(脱気 水素注入あり)

図 5.2.4-83(2) 放射化量 GBq(⁶⁰Co)の 0.5T-CT 試験片き裂先端における水の吸収線量、溶存酸素、溶存水素、溶存過酸化水素濃度(続き)

c.熱処理条件確認試験

(i)実験方法

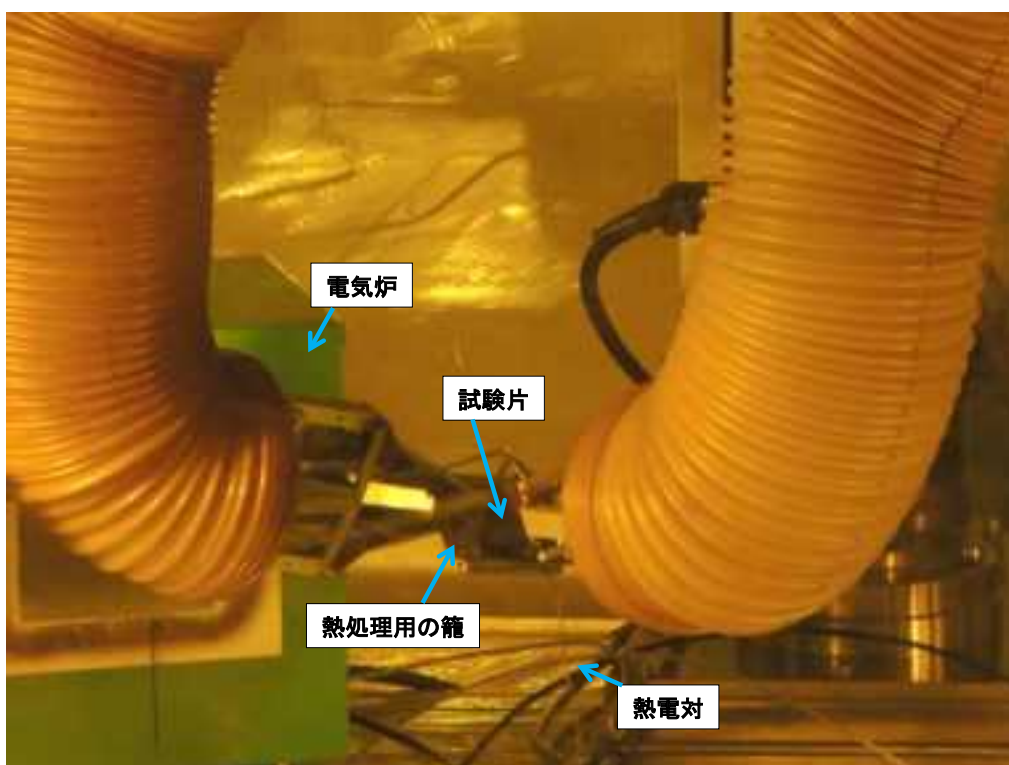
材料への照射影響を除去するための焼鈍熱処理を実施するき裂進展用試験片として、IASCC 事業において照射量レベル F4 まで中性子照射した SUS316L(HT)の 0.5T-CT 試験片 A413(照射量 $7.32 \times 10^{25} \text{ n/m}^2(E>1\text{MeV})$)を用いた。また焼鈍熱処理による照射効果の回復挙動確認のための引張試験、硬さ試験等に供する引張試験片として、試験片 ID. A435(照射量 $7.26 \times 10^{25} \text{ n/m}^2(E>1\text{MeV})$)を選定した。

焼鈍熱処理条件は、これまでの知見 (5.2.4-5)を参考に大気中 $700^{\circ}\text{C} \times 1$ 時間とした。

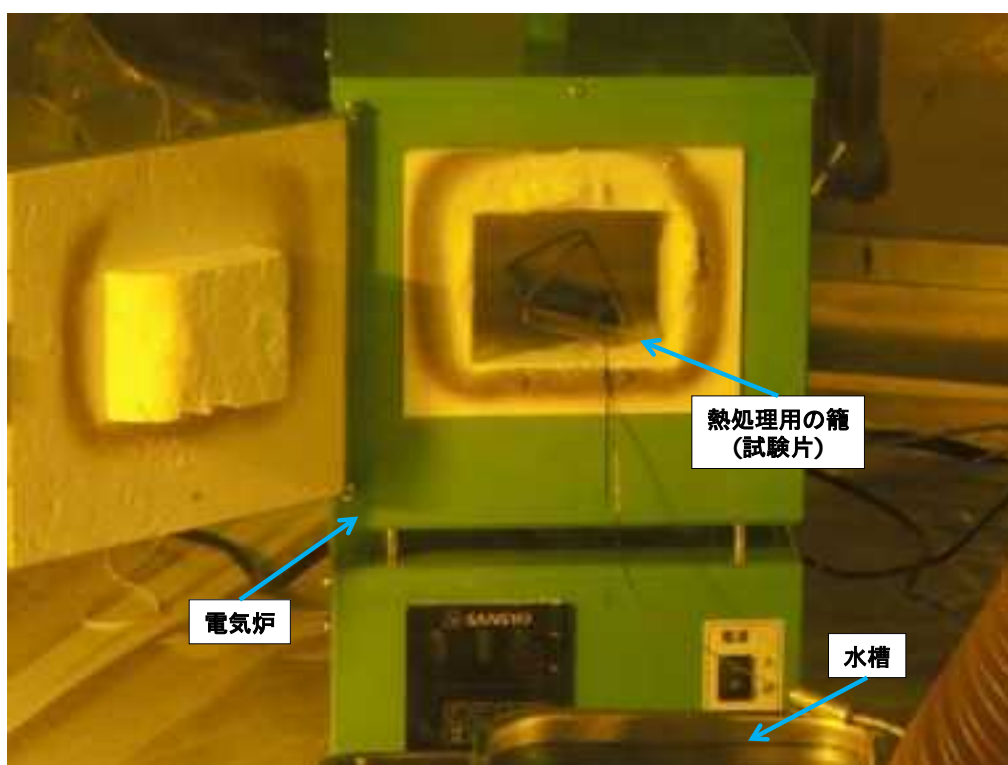
(ii)結果

0.5T-CT 試験片及び引張試験片を熱処理用の籠にのせ、遠隔操作で電気炉内にセットして熱処理を実施した。熱処理時の外観を図 5.2.4-84 に、温度履歴を図 5.2.4-85 に示す。

ダミー試験片(非照射材)に取り付けた熱電対の温度に基づいて電気炉を制御し、 700°C 大気中に 1 時間保持した後、試験片を水冷した。熱処理中、籠に取り付けた熱電対で温度測定し、この値を試験片の温度とした。試験片近傍の温度実績は、引張試験片 A435 が約 $700 \sim 705^{\circ}\text{C}$ 、0.5T-CT 試験片 A413 が約 $700 \sim 703^{\circ}\text{C}$ であった。

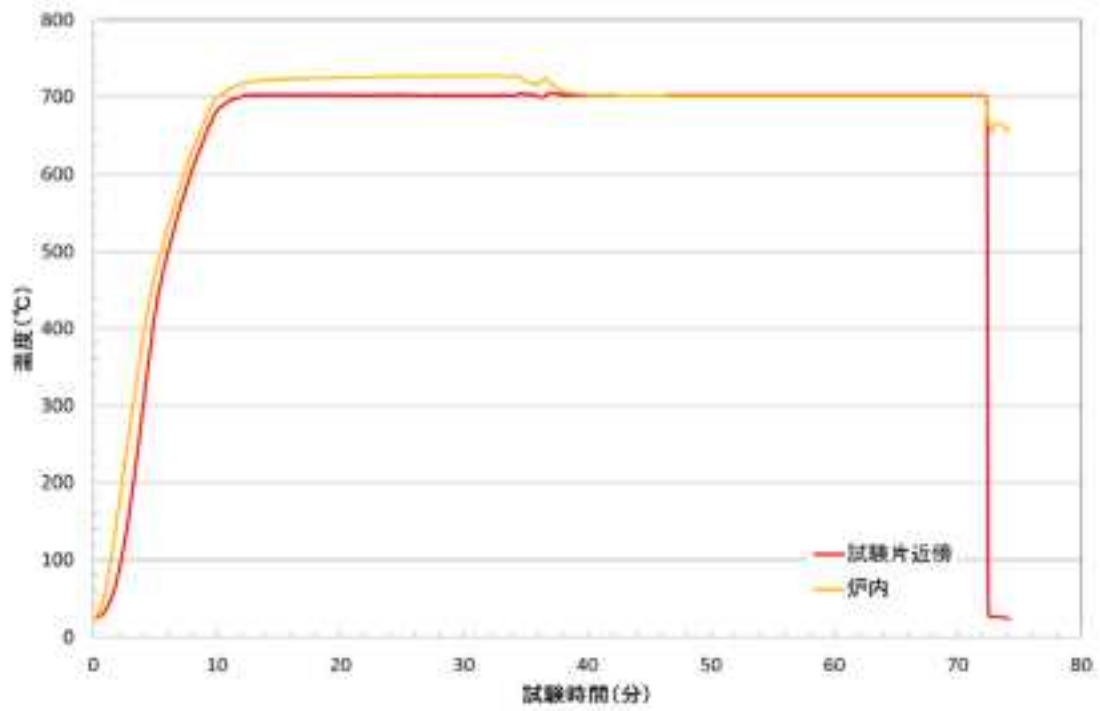


(1)試験片の熱処理用籠への設置状況

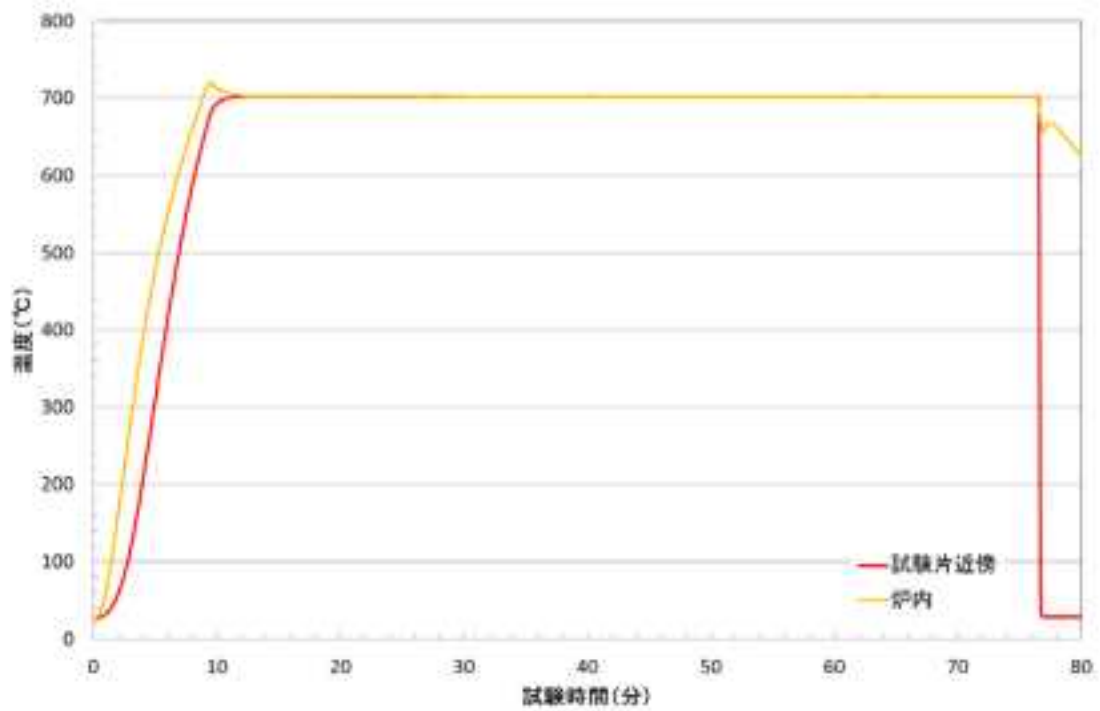


(2)試験片の電気炉内への装荷状況

図 5.2.4-84 ホットセル内での熱処理時の外観



(1)A435(0.5T-CT 試験片)



(2)A413(引張試験片)

図 5.2.4-85 熱処理温度履歴(700°C×1 時間)

d.引張試験

(i)実験方法

耐久において、温度 700°C で 1h 照射後焼鈍材した引張試験片 A435(SUS316L、HT 材、 $7.26 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)を用いて引張試験を実施した。引張試験片形状を図 5.2.4-86 に示す。

引張試験は JIS Z2241 および JIS G 0567 に準拠し、大気中、試験温度 290°C、ひずみ速度 $3 \times 10^{-4} / \text{s}$ で実施した。

(ii)結果

図 5.2.4-87 に引張試験前後の試験片の外観を示す。試験片は試験片平行部内で破断していた。表 5.2.4-16 に引張結果を、図 5.2.4-88 に応力ひずみ曲線をそれぞれ示す。また試験後の破面 SEM 観察結果を図 5.2.4-89(1)~(4)に示す。試験片破断部には、ディンプル模様を呈する延性破面が観察された。

非照射材(試験片 ID:A035)データとの比較を図 5.2.4-90 に示す。照射材 A435 を 700°C で 1h 熱処理することにより、非照射材と同等なレベルまで強度、伸び共に回復したことを確認した。

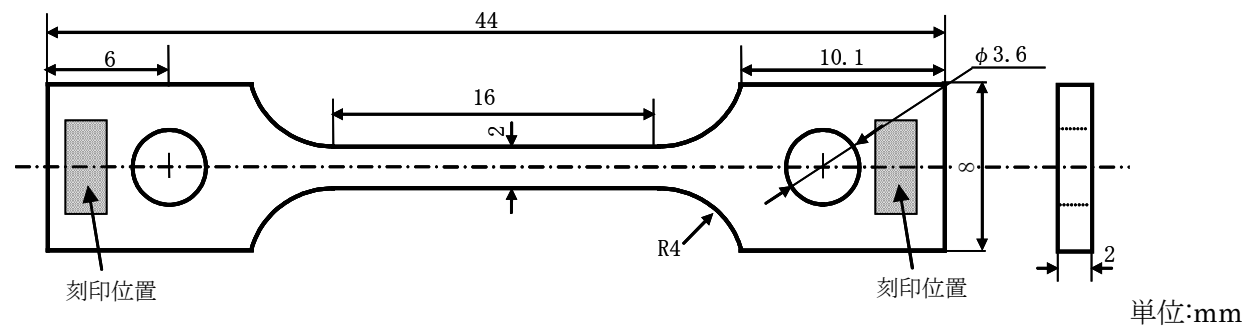


図 5.2.4-86 引張試験片形状図

表 5.2.4-16 700°C×1h 熱処理した SUS316L の引張試験結果(290°C大気中、約 3×10^{-4} /s)

試験片 ID	中性子照射量(E>1MeV)	損傷量	0.2%耐力	引張強さ	一様伸び	破断伸び	絞り
A435	7.26×10^{25} n/m ²	12.1dpa	168 MPa	404 MPa	24.7%	31.7%	67%

照射後焼鈍材

伸びは伸び計変位より算出



試験前



試験後

図 5.2.4-87 290℃引張試験前後の試験片外観
(A435、SUS316L、12.1dpa、照射後焼鈍材 700℃×1h)

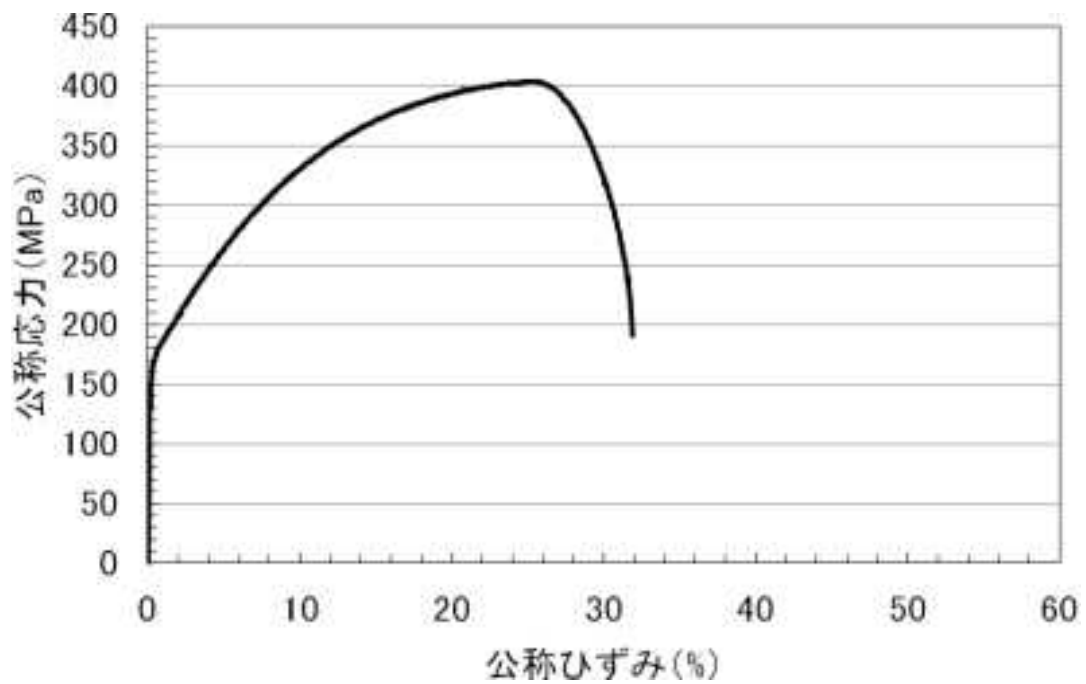


図 5.2.4-88 290℃引張試験の応力ひずみ曲線
(A435、SUS316L、12.1dpa、照射後焼鈍材 700℃×1h、290℃大気中、 3×10^{-4} /s)

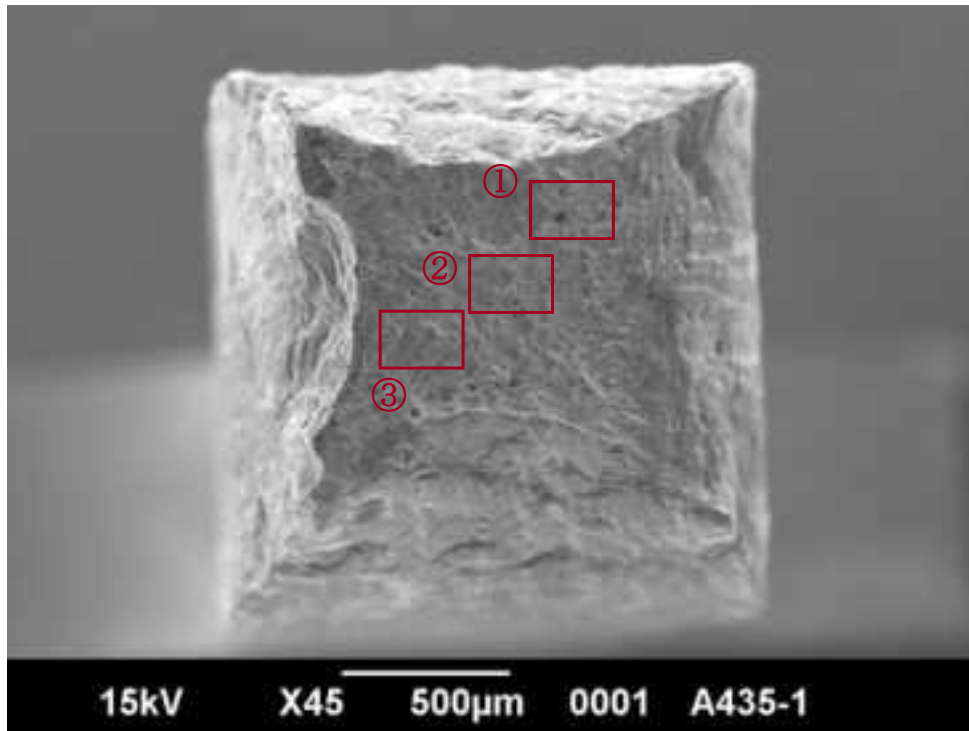


図 5.2.4-89 (1) 290°C引張試験後の試験片破面 SEM 観察結果(全体)
(A435、SUS316L、12.1dpa、照射後焼鈍材 700°C×1h)

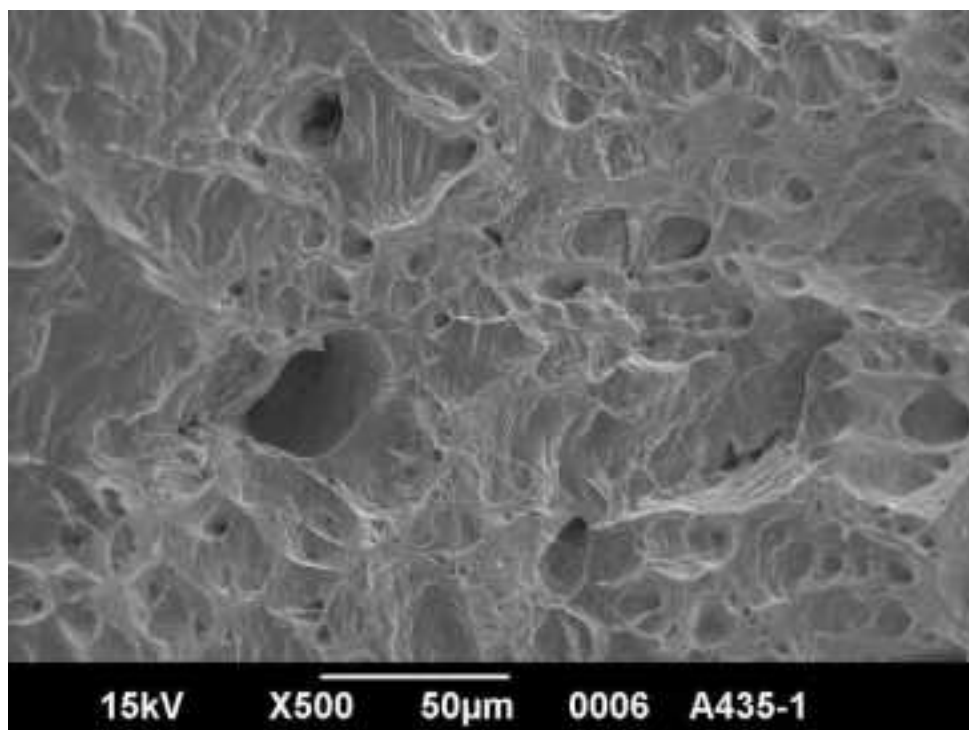


図 5.2.4-89 (2) 290°C引張試験後の試験片破面 SEM 観察結果(①部)
(A435、SUS316L、12.1dpa、照射後焼鈍材 700°C×1h)

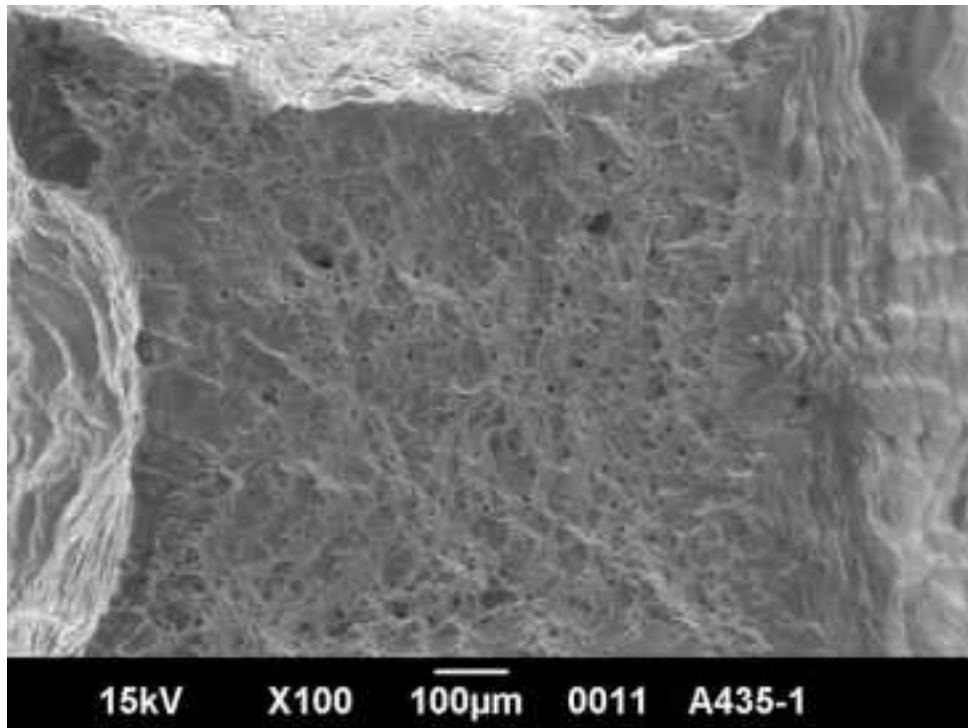


図 5.2.4-89 (3) 290°C引張試験後の試験片破面 SEM 観察結果(②部)
(A435、SUS316L、12.1dpa、照射後焼鈍材 700°C×1h)

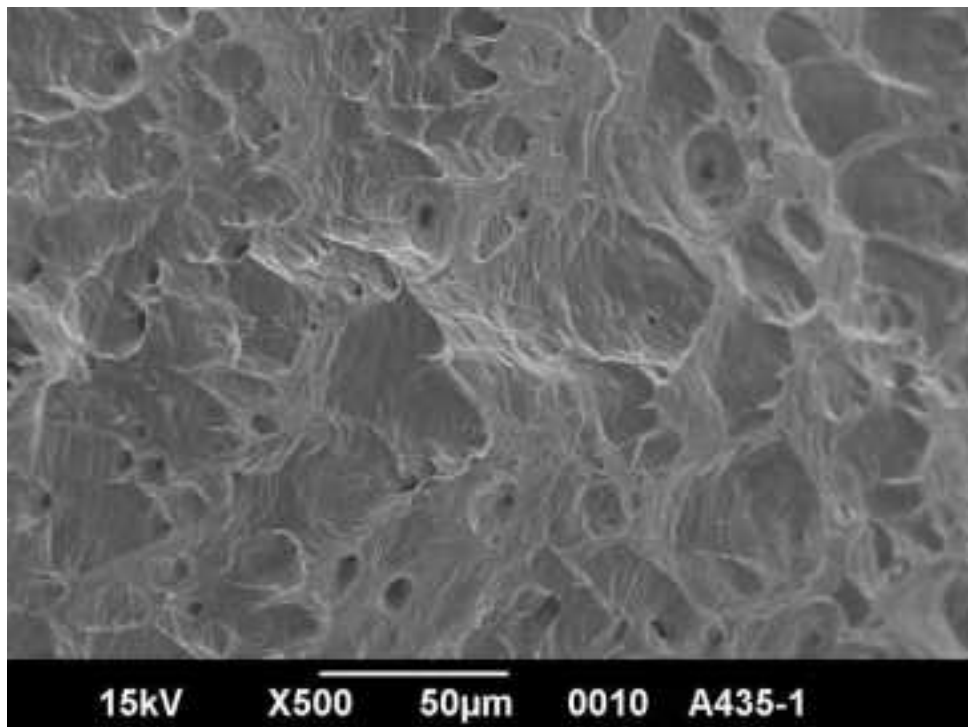


図 5.2.4-89 (4) 290°C引張試験後の試験片破面 SEM 観察結果(③部)
(A435、SUS316L、12.1dpa、照射後焼鈍材 700°C×1h)

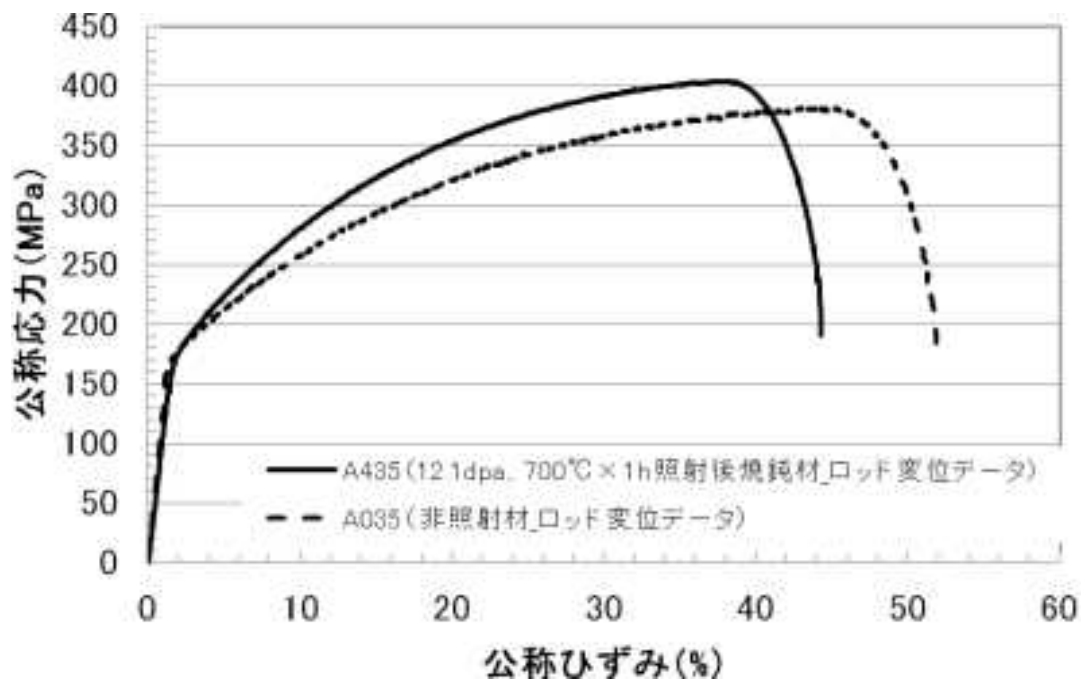


図 5.2.4-90 SUS316L 非照射材の応力-ひずみの関係との比較

e. ビッカース硬さ試験

(i) 実験方法

引張試験に供した後の A435(SUS316L、HT 材、 7.26×10^{25} n/m²(E>1MeV)、700°C×1h 照射後焼鈍材)より硬さ試験片を製作し、ビッカース硬さ試験を実施した。試験片は前出(2)章に記した硬さ試験片を用いた。

試験は JIS Z 2244 に準拠し、室温大気中において試験力 4.9 N(0.5 kgf)、保持時間 10s で実施し、測定点は 10 点とした。

(ii) 結果

硬さ測定結果を表 5.2.4-17 に示す。

また文献値との比較を図 5.2.4-91 に示す。当該試験片は、700°C×1h 熱処理により、非照射材と同等の硬さまで回復したことを確認した。

表 5.2.4-17 硬さ測定結果(4.9N)

試験片 ID		A435(700°C × 1h 照射後焼鈍材)
損傷量(dpa)		12.1
測定No	1	142
	2	144
	3	142
	4	148
	5	149
	6	148
	7	140
	8	140
	9	139
	10	140
	平均	

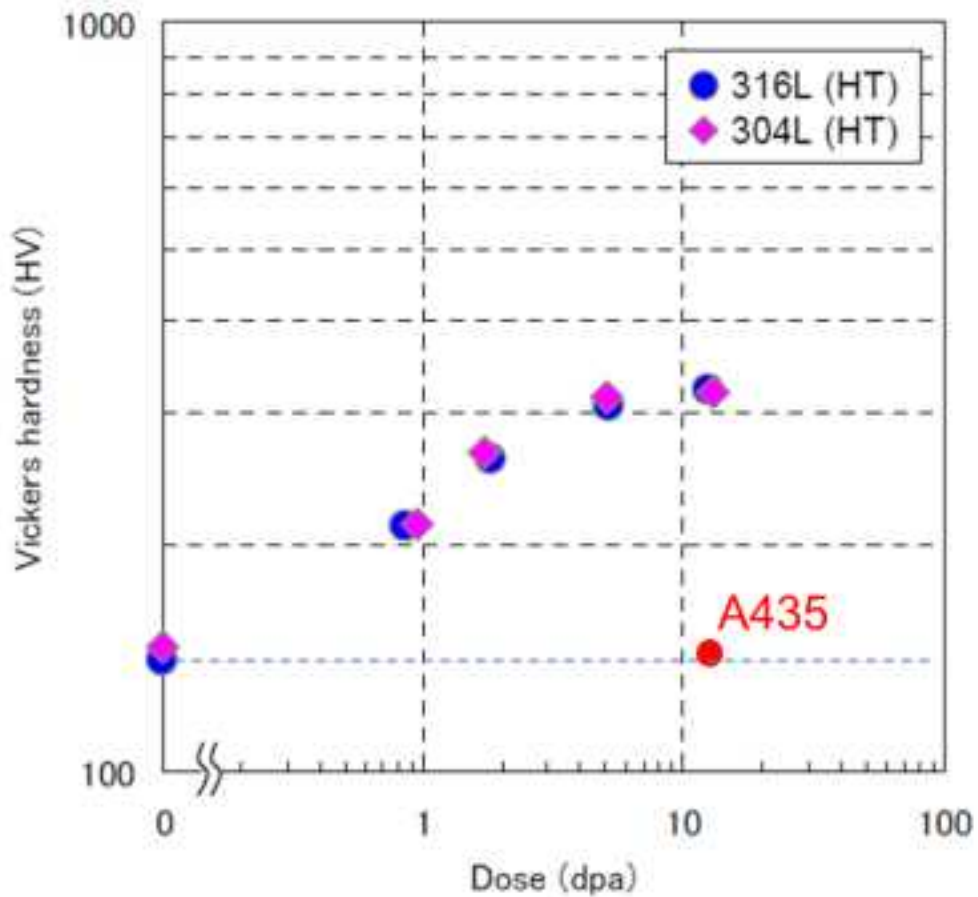


図 5.2.4-91 照射ステンレス鋼の硬さに関する既往データとの比較 (5.2.4-1)

f. 粒界分析

(i) 実験方法

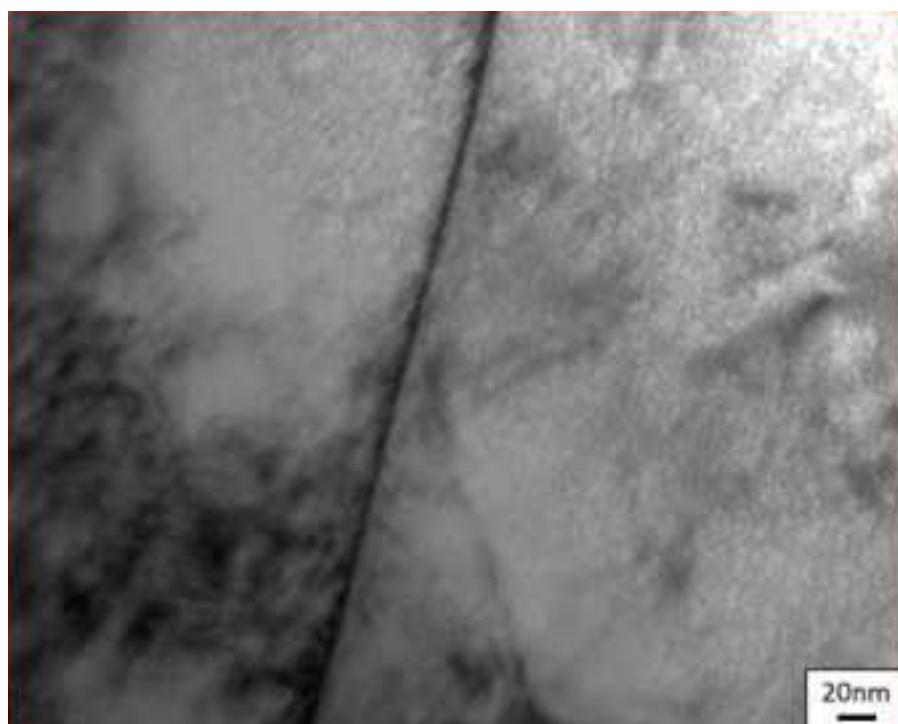
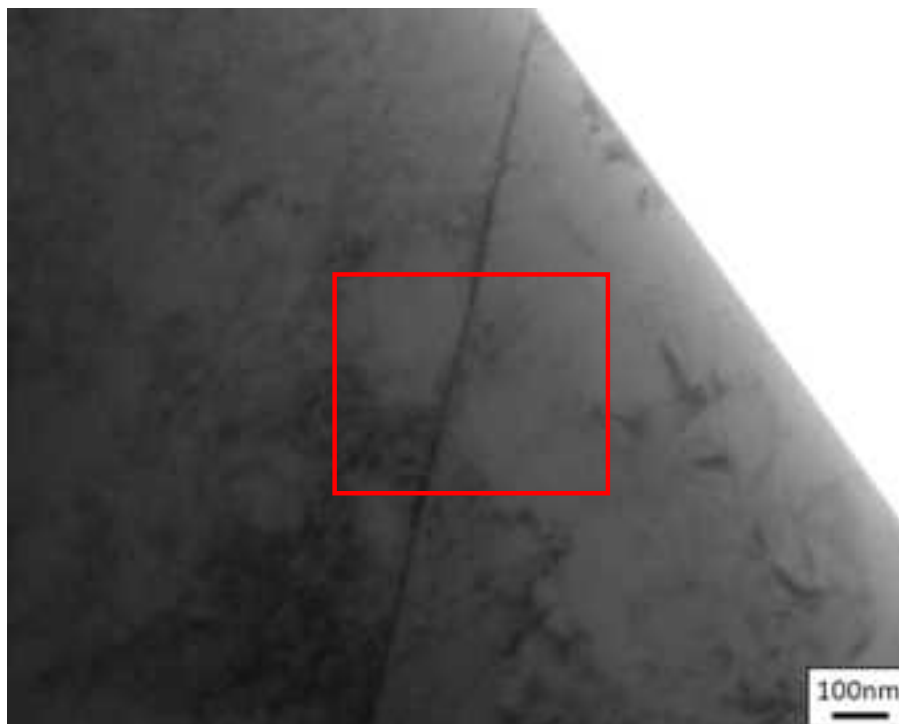
照射量 F4 レベルまで中性子照射した SUS316L(HT)(試験片 ID. A435 7.26×10^{25} n/m² (E>1MeV))を 700°C×1h 照射後焼鈍した供試材を用いて、FE-TEM(電界放出型透過電子顕微鏡)および付属の EDS(エネルギー分散型 X 線分析装置)を用いて粒界近傍の元素濃度を分析した。

分析対象元素は、Fe、Cr、Ni、Si、P、Mo の 6 元素とし、測定位置は、粒界上で 3 点、粒界から±1、±2、±3、±4、±5、±10、±15、±20、±50nm の位置で各 1 点とした。上記の測定位置において試験片ごとに 3 粒界 の分析を実施した。粒界偏析はランダム粒界で顕著であることが知られているので、電子線回折により両側の結晶粒の方位を確認し、双晶粒界等、粒界エネルギーの小さい粒界を避けて分析した。

(ii) 結果

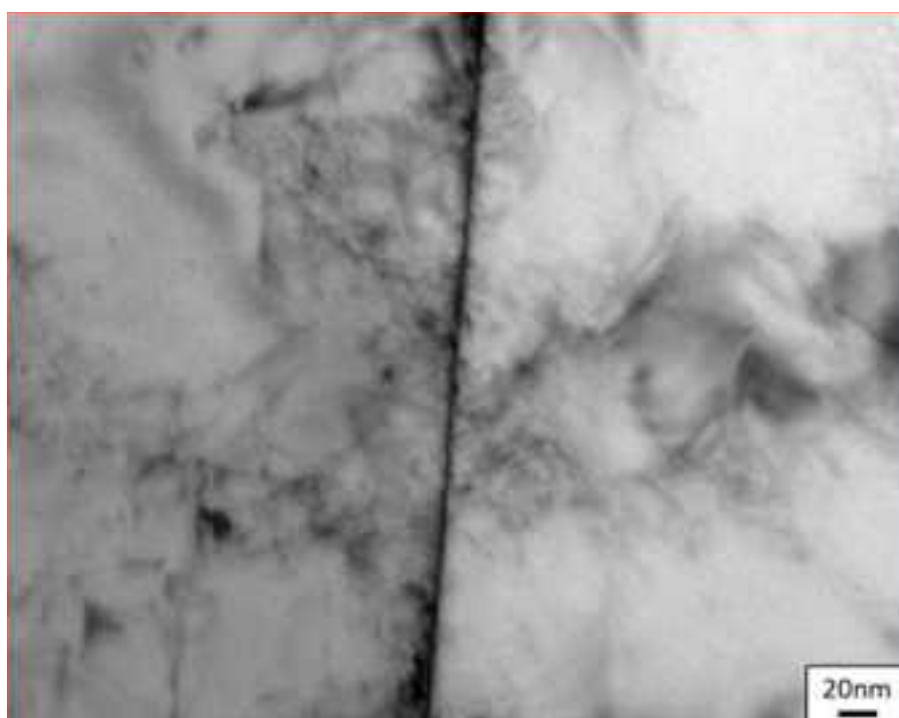
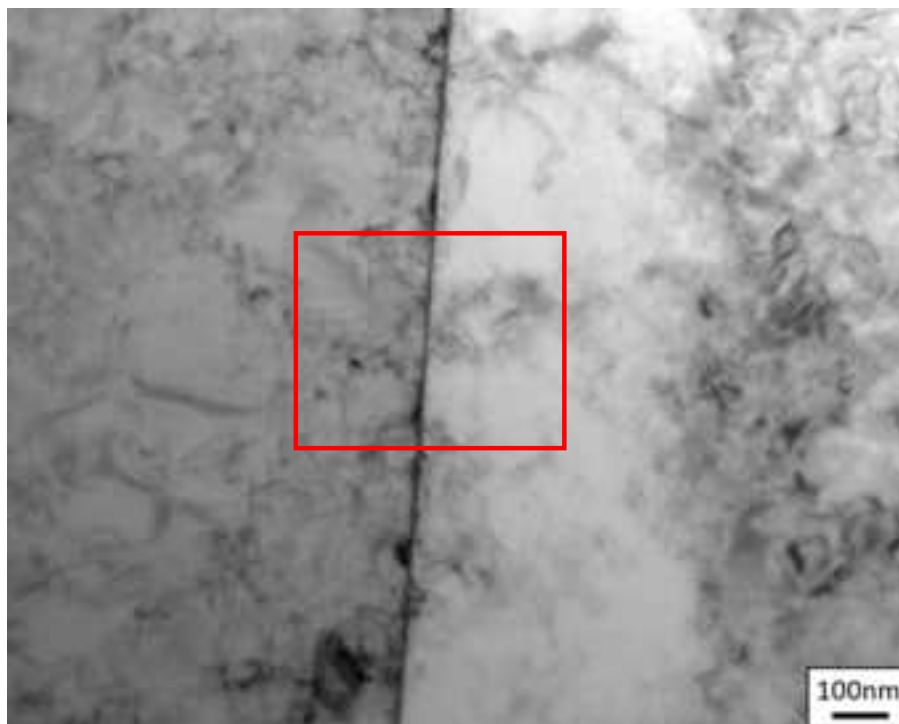
分析を行った粒界の明視野像を図 5.2.4-92 (1)~(3)に示す。いずれの粒界においても、粒界上に析出物は観察されなかった。分析結果を図 5.2.4-93 (1)~(3)に示す。ここでは、分析対象元素のうち Cr、Ni、Si、P、Mo のプロファイルを示した。粒界 1 および粒界 2 で Mo の濃縮が認められ、粒界 3 でもわずかに認められた。また、粒界 1 および粒界 2 で Cr の濃縮がわずかに認められた。

表 5.2.4-18 にそれぞれの試験片について、各分析粒界における粒界偏析量を示す。本研究では、粒界分析により得られたプロファイルより、粒界上 3 点の平均値を粒界濃度とし、粒界から±20nm と±50nm 離れた 4 点の平均値を母相濃度として、その差(粒界濃度－母相濃度)を粒界偏析量とした。



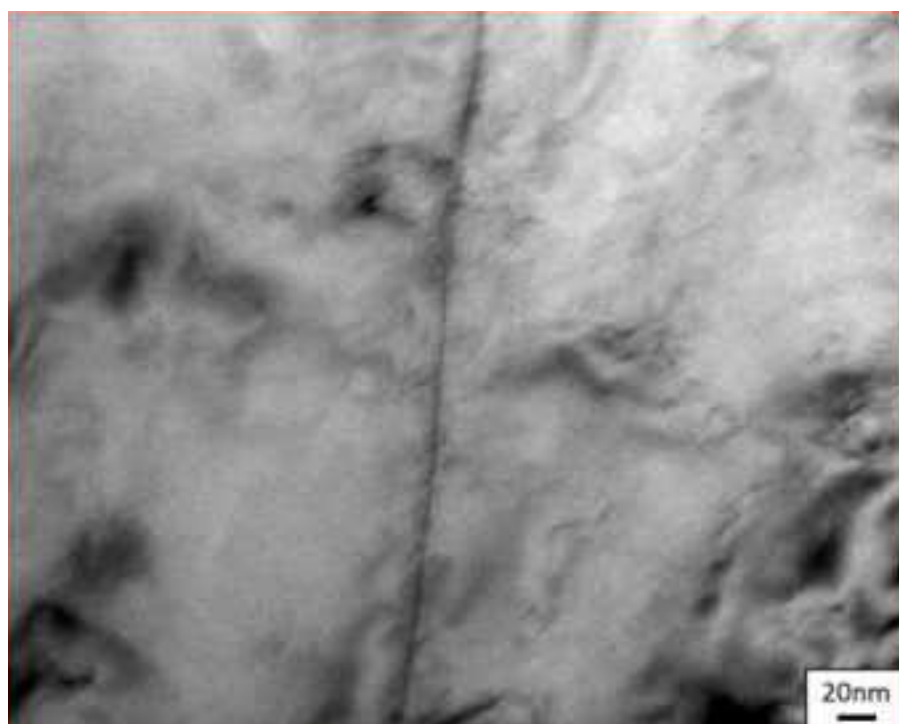
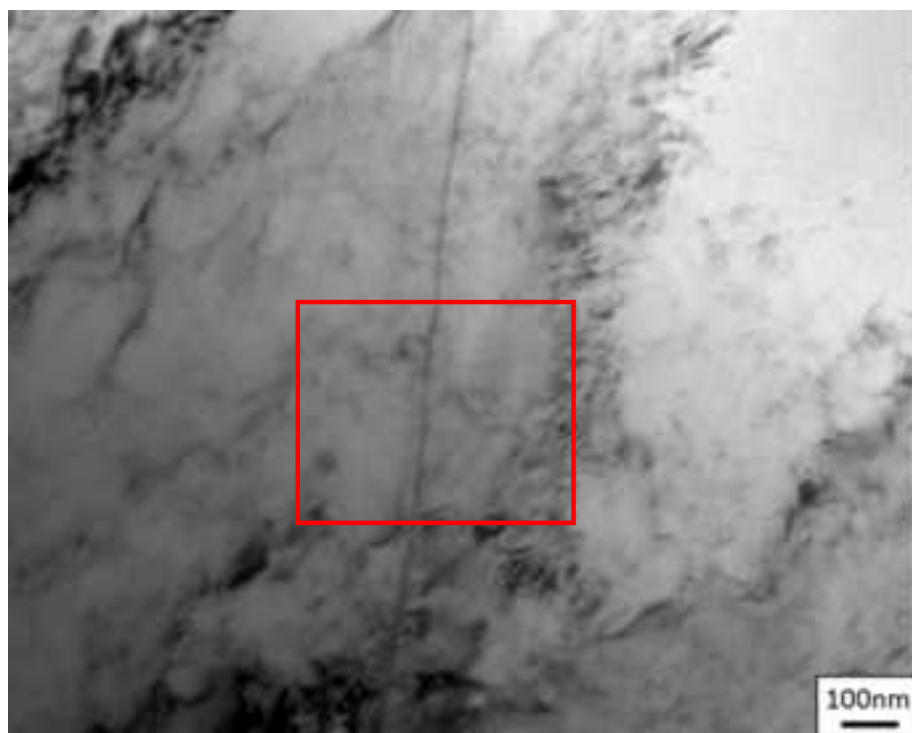
(1) 粒界 1

図 5.2.4-92(1) 分析した粒界の明視野像(A435)(1/3)



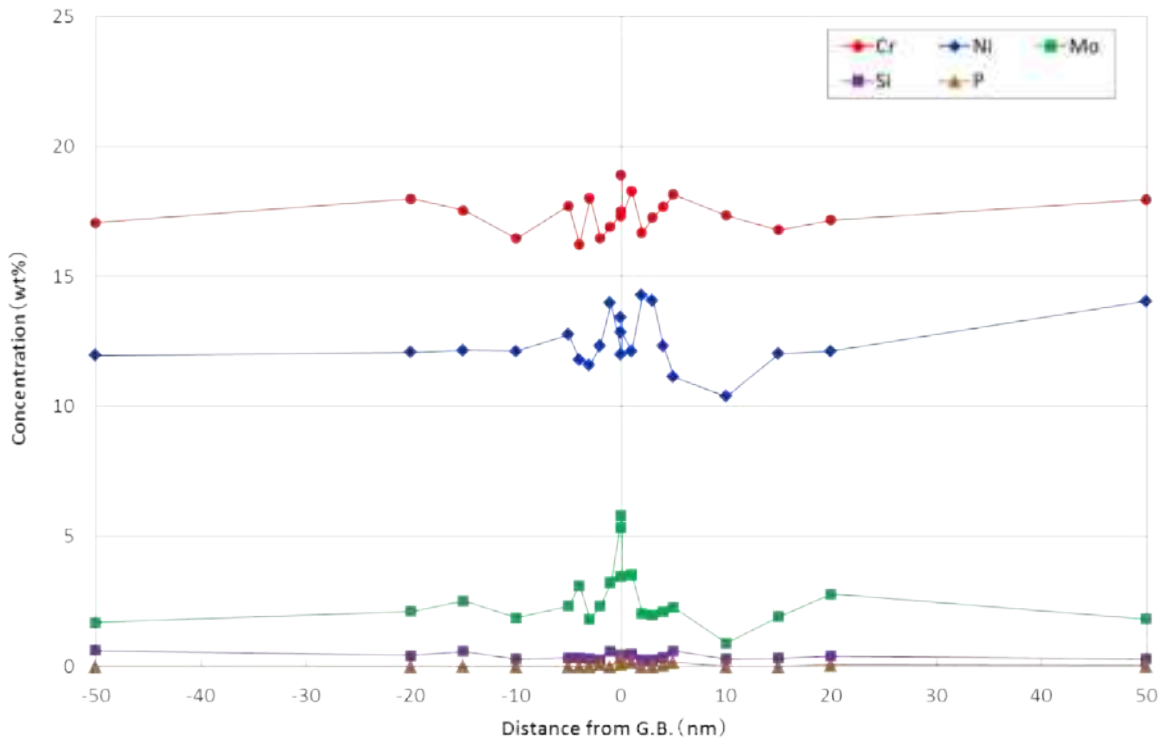
(2) 粒界 2

図 5.2.4-92(2) 分析した粒界の明視野像(A435)(2/3)

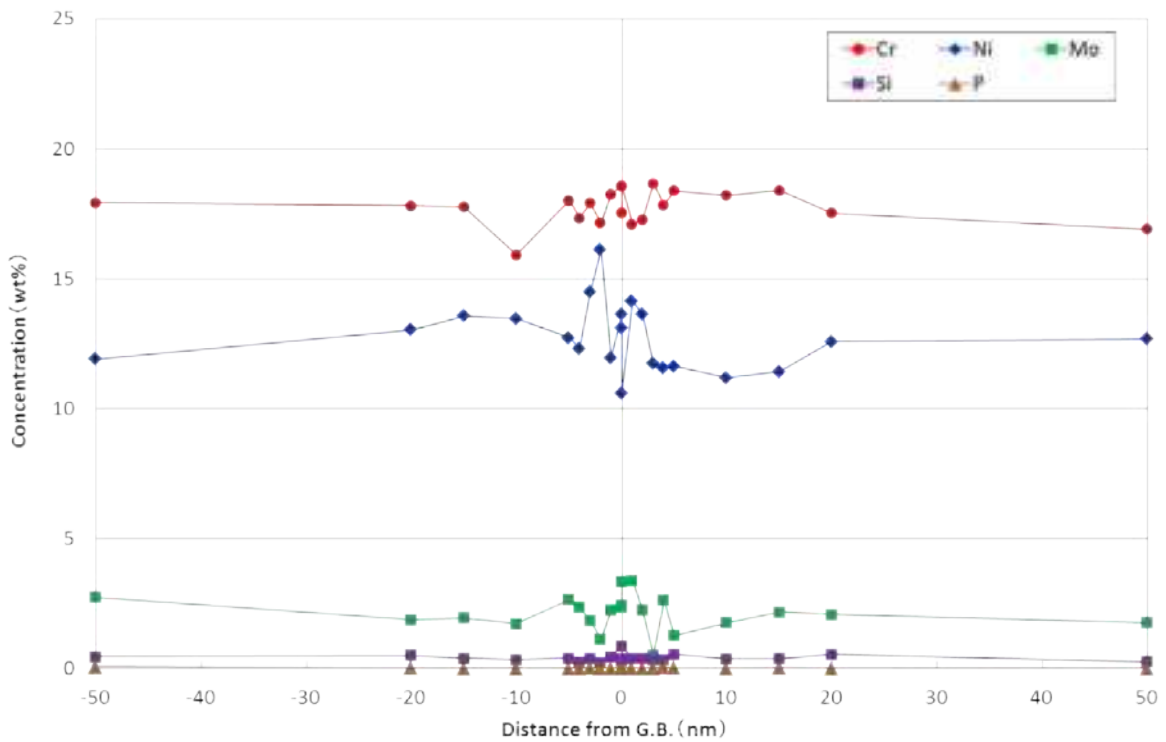


(3) 粒界 3

図 5.2.4-92(3) 分析した粒界の明視野像(A435)(3/3)

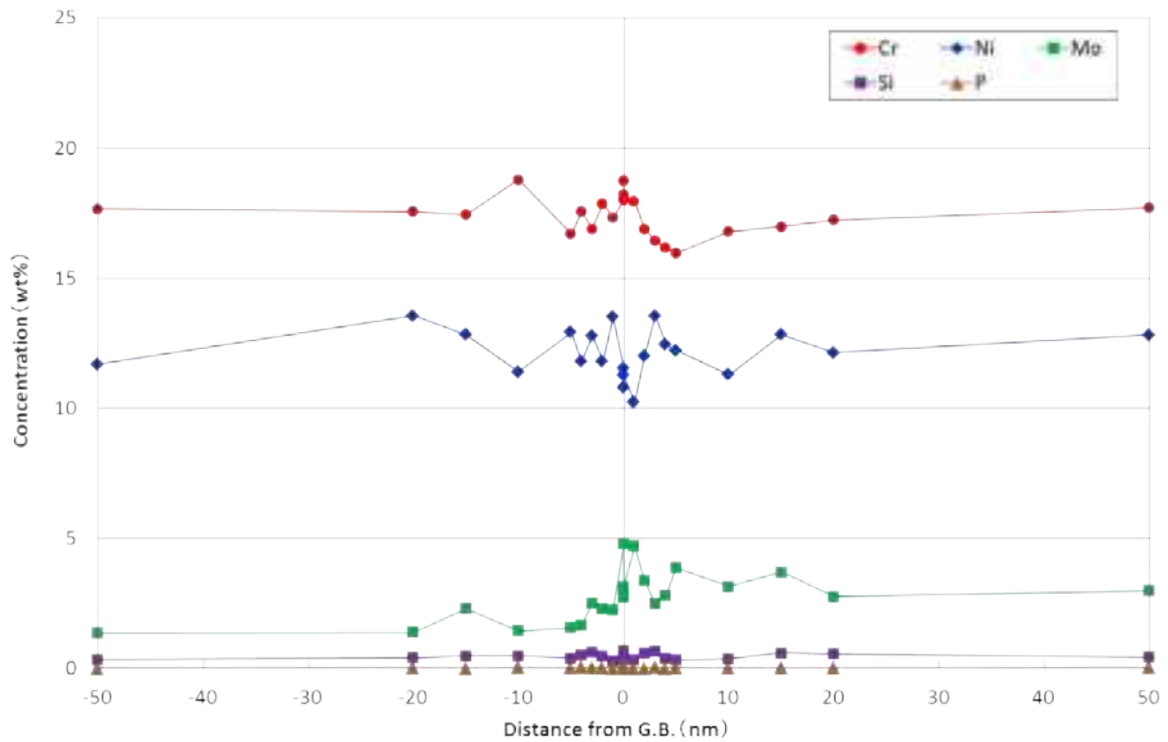


(1) 粒界 1



(2) 粒界 2

図 5.2.4-93(1) 粒界から±50nm の範囲における各元素の濃度プロファイル(A435)(1/2)



(c) 粒界 3

図 5.2.4-93 粒界から±50nm の範囲における各元素の濃度プロファイル(A435)(2/2)

表 5.2.4-18 各分析位置における粒界偏析量

(粒界偏析量=粒界濃度-母相濃度(粒界から±20nm、50nm 位置での平均))

鋼種	試験片 ID	照射量(n/m ²) (E>1MeV)	熱処理	分析位置	粒界偏析量(wt%)					
					Fe	Cr	Ni	Si	P	Mo
SUS 316L	A435	7.26×10 ²⁵	700°C ×1h	粒界 1	-3.89	0.54	0.66	-0.08	0.25	2.52
				粒界 2	-0.89	0.36	-0.21	0.06	0.00	0.69
				粒界 3	-0.39	1.02	-1.65	-0.04	0.04	1.01
				平均	-1.72	0.64	-0.40	-0.02	0.10	1.41

g. き裂進展試験

(i) 実験方法

中性子照射済 0.5T-CT 試験片の形状を図 5.2.4-94 に示す。試験片 ID.A410、A412、A413 について、約 290°C 高温水中(BWR 模擬水質環境中)において腐食電位(ECP)を 2～3 条件に変化させてき裂進展試験を実施した。照射済 0.5T-CT 試験片試験マトリックスを表 5.2.4-19 に示す。またき裂進展試験の試験水の条件を表 5.2.4-20 に示す。

き裂進展試験装置の構造図(例)を図 5.2.4-95 に示す。荷重機構は、一定荷重モードのほか、三角波等の変動荷重モードに対応可能である。また、試験水のリフレッシュレートは 3 回以上/h とする。

次に、き裂進展試験における個々の操作について示す。

(f) 環境中予き裂導入

試験片について、アセトン等による超音波洗浄を実施後、き裂長さモニタ用の交番直流電位差法(以下 PDM 法)測定用端子を試験片の所定位置(開口部側 4 箇所、背面側 2 箇所)に点溶接した後に、試験装置へ装荷する。

図 5.2.4-96 は PDM 計測装置の構成例を示す。試験片の電気抵抗は、き裂進展に伴い断面積の減少に起因して変化する。したがって、試験片に一定の電流を流し、き裂をはさんで電位差を測定すればき裂長さの増分を電位差の増分と対応させて検出できる。本方法では較正曲線の使用により、き裂長さを間接的ではあるが連続的に測定可能である。装荷後、環境中で試験片に繰返し負荷を付与し、大気中疲労予き裂の前縁に粒界型のき裂を下記の条件で導入する。なお、明確な指示値の増分(PDM の検出限界値(3 σ 値))が観察されない場合(熱処理なし材は 48h、熱処理材は 100h が目安)は、導入条件を再検討する。

- ・ 応力比：約 0.7(試験開始時の初期 K 値が K_{max})
- ・ 周波数：0.01Hz(導入開始時)→0.001Hz→0.0001Hz
- ・ 水質：高 ECP レベル(32 ppmDO)
- ・ 環境中予き裂の長さ：PDM 指示値で約 0.4 mm 以上

(照射前疲労予き裂導入時の塑性域寸法)

(i) 定荷重き裂進展試験

目標長さ以上の環境中予き裂を導入した後、定荷重き裂進展試験の目標荷重条件に移行すると同時にき裂長さの時間変化を PDM 法にて計測、記録し、SCC 進展速度データの評価に資する。

① 荷重条件

試験開始時の目標 K 値は、高 K 値条件では 25 MPa \sqrt{m} 、低 K 値条件では 15 MPa \sqrt{m} とする。尚、本研究での試験 K 値は、熱処理なし材の場合は IASCC 事業と同様に ASTM E399 に記載の K の有効範囲(<約 31 MPa \sqrt{m})を満足している。一方、

熱処理材は強度が非照射材と同等まで回復するものと仮定すると、E399 の K validity は 0.2%耐力で評価すると、<約 7 MPa√m となり、比較可能な非照射材の文献値(き裂進展データ)はない。そこで、SCC 試験法の JIS 化案^(5.2.4-6)の validity 評価(<約 16 MPa√m)を考慮し、試験開始時の K 値を 15 MPa√m とし、き裂進展データを取得し、非照射材文献値^(5.2.4-5)と比較する。

②腐食電位条件

表 5.2.4-19 に記載の通り、高腐食電位(ECP)条件は入口溶存酸素(DO)濃度を 32ppm 程度に調整する。低 ECP 条件その 1 は入口 DO 濃度を脱気し 10ppb 程度に調整する。低 ECP 条件その 2 は入口 DO 濃度を 10ppb 程度に調整した上で、爆発限界以下の濃度のアルゴン+水素の混合ガスを注入し調整する。

③試験水質管理方法

き裂進展試験の水質条件を表 5.2.4-20 に示す。試験水に含まれる不純物イオンの濃度は、入口および出口側のサンプリング点より定期的にサンプル水を採取し分析する。実機の水質を考慮して硫酸、塩素及び硝酸イオンは十分低い濃度に保持する。なお、目標とする硫酸、塩素、硝酸イオン濃度は 5ppb 以下とする。サンプリングの頻度は、定荷重試験開始前、終了後、試験期間中は導電率の安定性を監視しながら約 1 ヶ月程度の頻度で実施する。また試験水の導電率が管理目標値を逸脱した場合にも分析を実施する。

④ECP測定方法

腐食電位の測定には内部参照式の参照電極(Ag/AgCl)を使用し、試験片の腐食電位を連続測定する。作用極はき裂進展試験片とする。腐食電位の設定は、ガスの濃度調整により行う。

⑤試験中のき裂長さモニタ方法

試験中のき裂長さ変化は PDM 法によりモニタ(連続的に計測、記録)する。PDM 法をき裂のモニタリング手法として用いるに当たっては、試験片に対する PDM 出力のばらつき(1σ値)を求め、その 3 倍(3σ値)を PDM 法によって得られるき裂長さの検出限界値と定義する。なお、PDM 指示値が十分な増分を示さない場合についての要領は別途⑦項に定めることとする。

⑥試験期間内の試験状況に関する記録

試験期間中は以下の項目について計測、記録し、試験条件の安定性をモニタリングするとともに、PDM 指示値に異常が見られた場合の参考データとする。

- ・ 出口の導電率、入口の溶存酸素・溶存水素濃度、温度、腐食電位、荷重
(自動記録)

⑦ き裂先端活性化操作

SCC 進展試験期間中に PDM 指示値が十分な増分を示さない場合に、き裂先端活性化操作を実施する。き裂先端活性化の条件を表 5.2.4-21 に示す。また、図 5.2.4-97 にき裂先端活性化操作(短期繰返し除荷)の応力付与モードを示す。試験時における目標 K 値の 70%まで繰返し荷重の除負荷を行う。PDM の検出限界値(3σ 値)以上のき裂進展が確認された後、活性化操作から定荷重条件に移行し一定時間以上保持して、PDM 指示値の挙動をモニタする。その際 PDM の指示値がばらつき(1σ)を超えない場合は、再度活性化操作を実施する。

⑧ 試験水条件の異常時の措置

オートクレーブ入口及び出口における試験水の導電率が管理目標値を超える事象が発生した場合は試験水の分析を行うとともにその原因を特定し、管理目標値以下となるような対策措置(イオン交換樹脂の取替、等)を講ずる。その際約 1 週間を限度に試験水の導電率をモニタし、対策に効果が見られない場合は試験を中止して改めてその原因特定の調査を実施する。また試験水条件が管理目標値を満足することが確認された後は、一定時間以上継続して試験を実施する。なお、試験水条件が管理値を超えた期間(1 週間以内)における PDM データについては、試験期間全体における PDM 指示値の傾向を総合的に評価した上で、SCC 進展速度評価区間から除外する等、別途取扱いを検討する。

⑨ 装置の計画外停止時の措置

落雷などによる停電や、その他試験装置の異常によって装置が停止した場合は、直ちに荷重付与を中止し、装置を復帰させる。試験水環境が試験設定条件に戻り、かつ十分安定したことを確認した後、所定の荷重を付与して試験を再開する。なお試験再開後は PDM 指示値をモニタする。

⑩ SCC進展速度評価方法

試験中は⑤に示した要領に則って PDM 指示値を常にモニタし、その値が SCC 進展速度評価上十分な増分($>3\sigma$)を示したと判断された後もしくは定荷重以降後にき裂進展速度が評価可能な試験時間が経過したことを確認した後に試験を終了する。

試験終了後の 0.5T-CT 試験片を大気中にて疲労により強制的に破断し、疲労予き裂および環境中において進展した破面部を光学的に観察するとともに、環境中のき裂進展領域の典型的な破面を 100 倍、400 倍を中心とした SEM 観察にて評価する

ことにより、進展領域の面積・最大進展長さ等を評価する。

き裂長さは、平均き裂長さ($\text{SCC 面積} \div \text{試験片板厚}$ 或いは $\text{SCC 面積} \div \text{IGSCC 発生幅}$)を求め、必要に応じて最大き裂長さも求める。その結果に基づいて PDM 指示値を補正の上、進展速度の算出に資する。その際、試験片破面より特定したき裂進展量と試験期間中における荷重条件を総合的に評価し、SCC 進展評価に用いた領域が試験片の有効 K 値範囲にあることを確認する。

SCC 進展速度を求めるために評価区間を設定する。評価区間は、破面補正後の PDM データ及び破面観察でき裂進展が認められた場合、以下の条件に満たす範囲で設定する。

- ・定荷重試験期間中の水質が試験条件を満たし大きな変動がない期間

破面補正後の PDM データにおいて評価区間における PDM 指示値の傾きを最小自乗法により求めることで SCC 進展速度を決定する。なお、評価区間はき裂長さの増分が、少なくとも PDM 信号のばらつきの 3 倍 (3σ : 検出限界) 以上確保される領域とし、それに満たない場合は、ばらつきの 3 倍を試験時間で除した速度以下の“検出限界以下”の速度として取り扱う。

表 5.2.4-19 中性子照射した SUS316L のき裂進展試験マトリックス

試験 番号	試験 片 ID	照射量 (n/m ²) (E>1MeV)	熱処理	初期 K 値 (MPa√m)	ECP レベル			破面 開放
					高 ※1	低 その 1 ※2	低 その 2 ※3	
①	A410	7.14×10 ²⁵	なし	25	1	1	1	1
②	A412	7.38×10 ²⁵	なし	15	1	1	1	
③	A413	7.32×10 ²⁵	700℃ ×1h	15	1			

凡例 1:試験員数

※1 : +130mV_{SHE}以上(目標値)、32ppmDO(目標値)

※2 : -200mV_{SHE}(目標値)、10ppbDO(目標値)

※3 : 10ppbDO(目標値) + Ar+3 ~ 4%H₂ ガス注入(30 ~ 60ppbDH 程度)

表 5.2.4-20 試験水質条件

項目	条件	備考
温度	290±1℃	常時モニタリング
電位	表 5.2.4-19 に記載の条件	常時モニタリング
溶存酸素濃度	表 5.2.4-19 に記載の条件	入口のみ 常時モニタリング
溶存水素濃度	表 5.2.4-19 に記載の条件	入口のみ 常時モニタリング
導電率	入口 : 0.1 μS/cm 以下 出口 : 0.2 μS/cm 以下	出口のみ 常時モニタリング
イオン濃度	硫酸イオン : 5ppb 以下 塩素イオン : 5ppb 以下 硝酸イオン : 5ppb 以下	試験前後および試験中 1 ヶ月程度 おきに循環水をサンプリングし、左 記イオンの濃度を分析する。

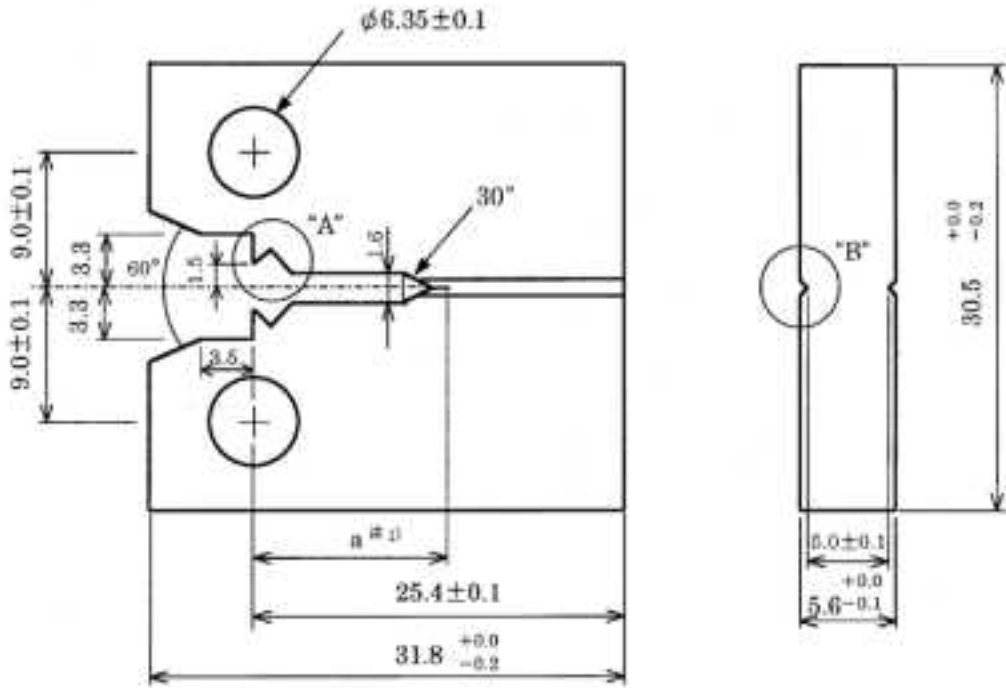


図 5.2.4-94 き裂進展試験片形状図

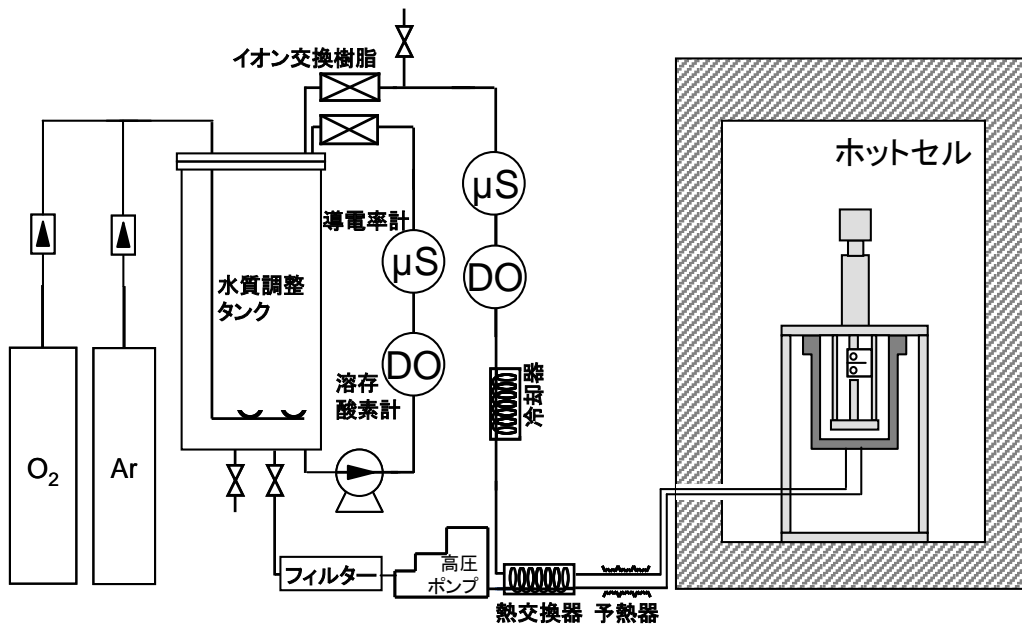


図 5.2.4-95 き裂進展試験装置の構造図(例)

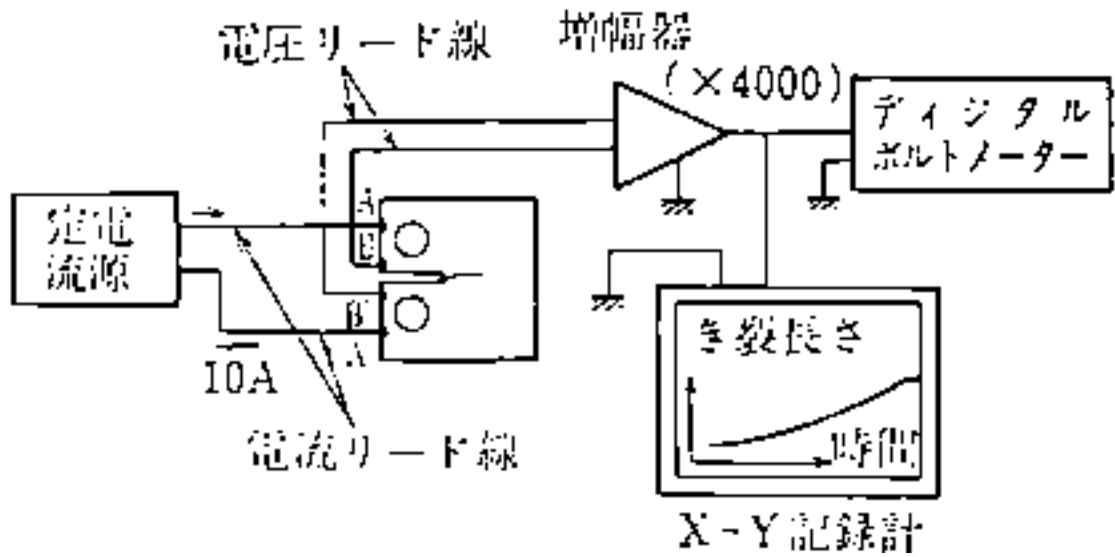


図 5.2.4-96 き裂進展量計測装置の構成(例)

表 5.2.4-21 き裂先端活性化条件例

項目	条件
最大荷重	設定荷重
応力比	R=0.7
周波数	0.001Hz (Tr = 500s)
保持時間	9,000s
波形	台形波

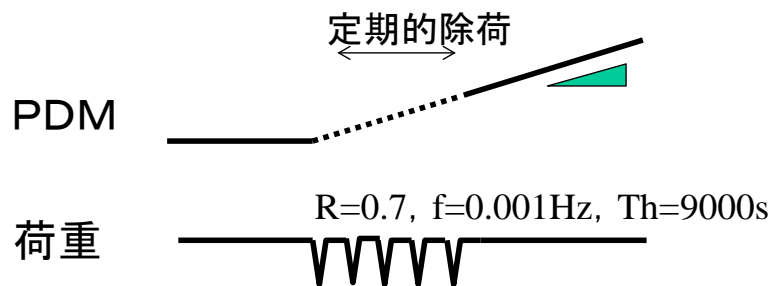


図 5.2.4-97 き裂先端活性化操作における負荷応力モード例

(ii)試験結果

(ア)試験番号①(A410(SUS316L、HT材、 7.14×10^{25} n/m²(E>1MeV))

試験開始から繰り返し荷重負荷による環境中予き裂を導入した。環境中予き裂の導入条件を表 5.2.4-22 に示す。環境中予き裂導入後、定荷重制御に移行し NWC および HWC 模擬水質環境下での SCC 進展挙動を確認した。試験中の導電率は、入口で 0.1 μS/cm 以下、出口で 0.2 μS/cm 以下であった。不純物イオンの分析結果を表 5.2.4-23 に示す。SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻ともに目標値である 5ppb 未満であった。

SCC 進展試験終了後 0.5T-CT 試験片を破面開放し、デジタルマイクロスコープおよび SEM を用いて破面を観察した。試験片の外観観察結果を図 5.2.4-98 に示す。分岐したき裂がサイドグループから逸脱した形跡が観察された。

破面観察結果を図 5.2.4-99 に示す。SEM 観察の結果とデジタルマイクロスコープ観察の結果を用いて環境中き裂進展領域を特定し、その面積からき裂進展量を求めた。

また図 5.2.4-100～図 5.2.4-102 に、環境中き裂進展領域を SEM により詳細に観察した結果を示す。いずれの試験片においても、環境中き裂進展領域で粒界割れが観察された。

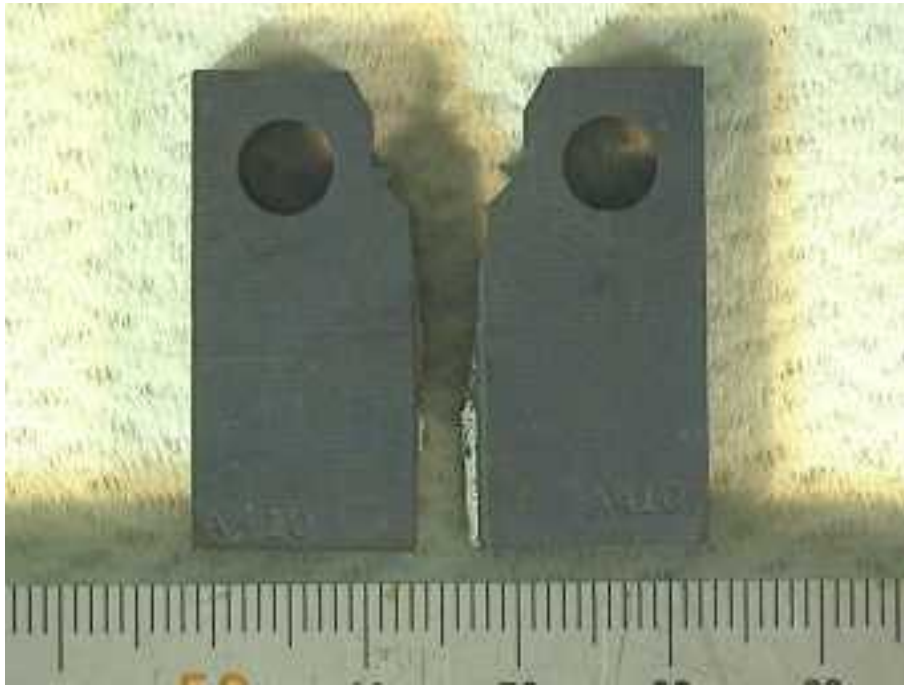
破面観察より得られたき裂進展量に基づき試験中に取得した PDM 指示値の補正を行い、補正後の PDM チャートより各 ECP 条件で定荷重制御された全領域を選定し、その区間のデータを最小二乗法で直線近似して得た傾きに基づいて、き裂進展速度を求めた。板幅平均のき裂長さで補正後の PDM チャートを図 5.2.4-103(1)～(3)に、き裂進展速度を表 5.2.4-24 に示す。

表 5.2.4-22 環境中予き裂導入条件(試験片番号 A410)

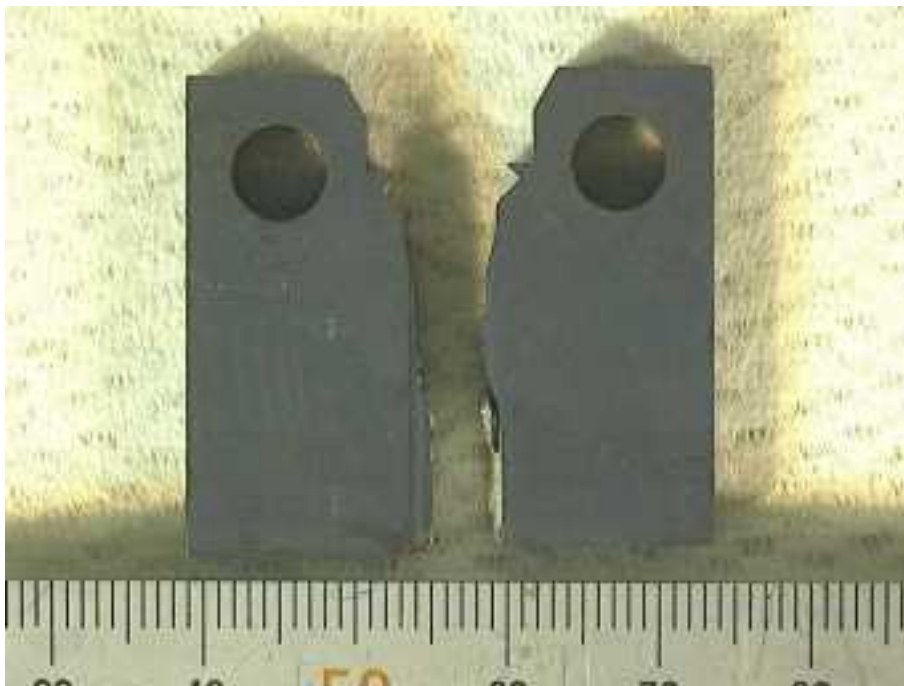
STEP1	STEP2
R=0.7 f=0.001(Hz) 波形：三角波	R=0.7 f=0.0001(Hz) 波形：三角波

表 5.2.4-23 試験水分析結果(試験片番号 A410)

イオン種	試験開始時		試験終了時	
	入口	出口	入口	出口
SO ₄ ²⁻ (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2
Cl ⁻ (ppb)	< 2	< 2	< 2	3.7
NO ₃ ⁻ (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2



(1)刻印面



(2)刻印と反対面

図 5.2.4-98 き裂進展試験及び破面開放後の 0.5T-CT 試験片の外観観察結果
(A410(SUS316L、HT 材、 $7.14 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)))



破面詳細観察

図 5.2.4-99 き裂進展試験終了後の破面観察(デジタルマイクロスコープ)
 (A410(SUS316L、HT 材、 $7.14 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)))

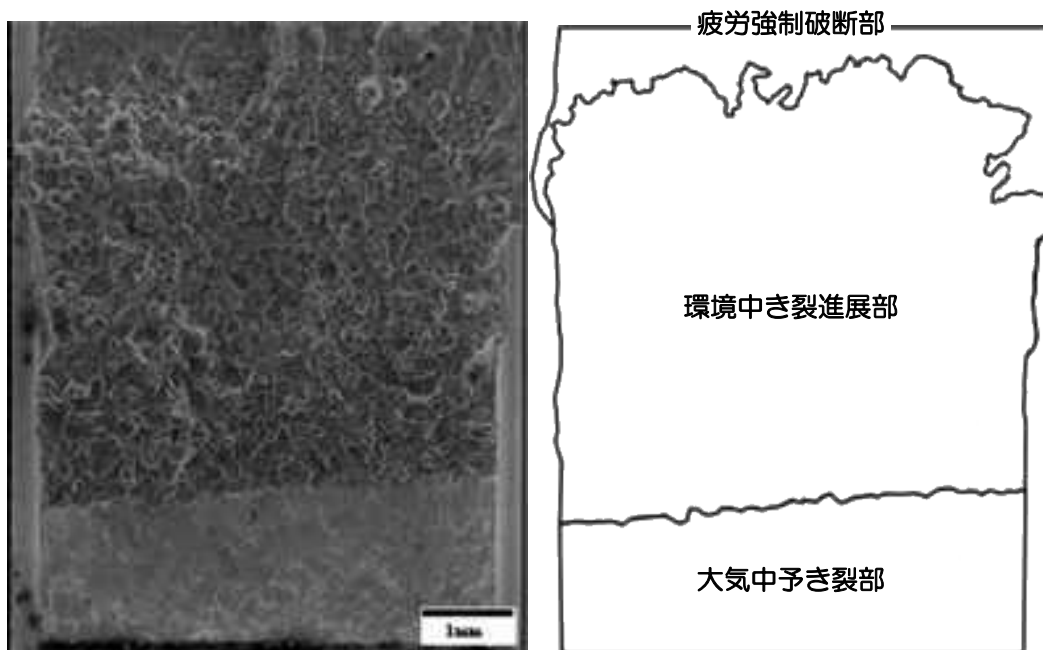


図 5.2.4-100 き裂進展試験後の破面の SEM 観察(破面全体)
 (A410(SUS316L、HT 材、 $7.14 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)))

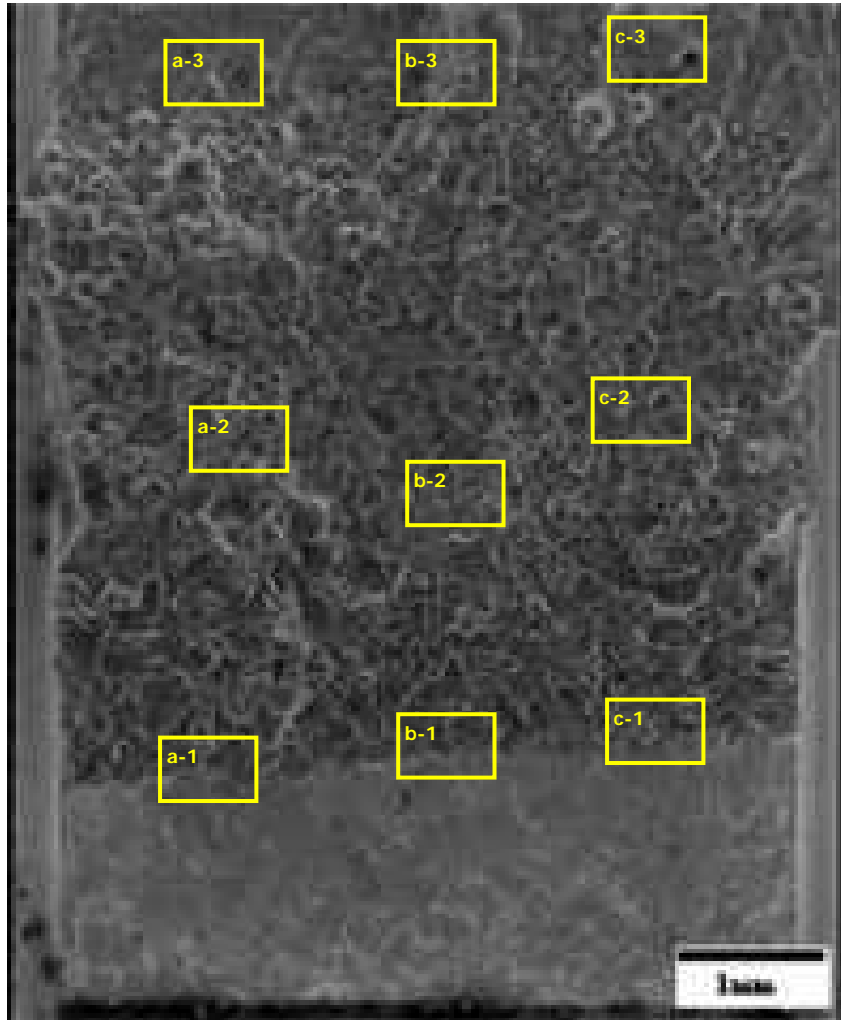


図 5.2.4-101 き裂進展試験後破面の SEM 詳細観察位置
(A410(SUS316L、HT 材、 7.14×10^{25} n/m²(E>1MeV)))

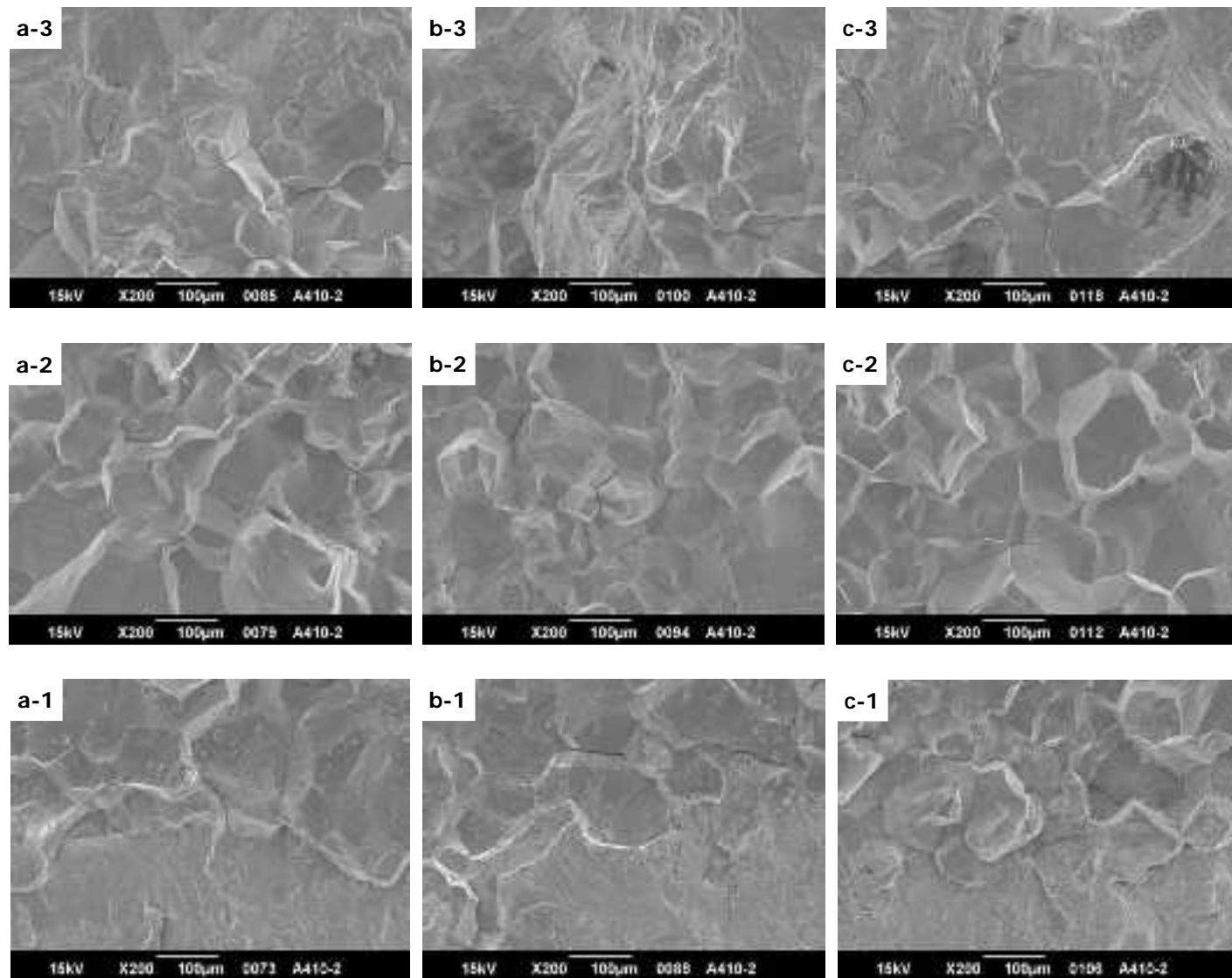


図 5.2.4-102 き裂進展試験後破面の SEM 観察結果(3/5)
(A410(SUS316L、HT 材、 $7.14 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$))

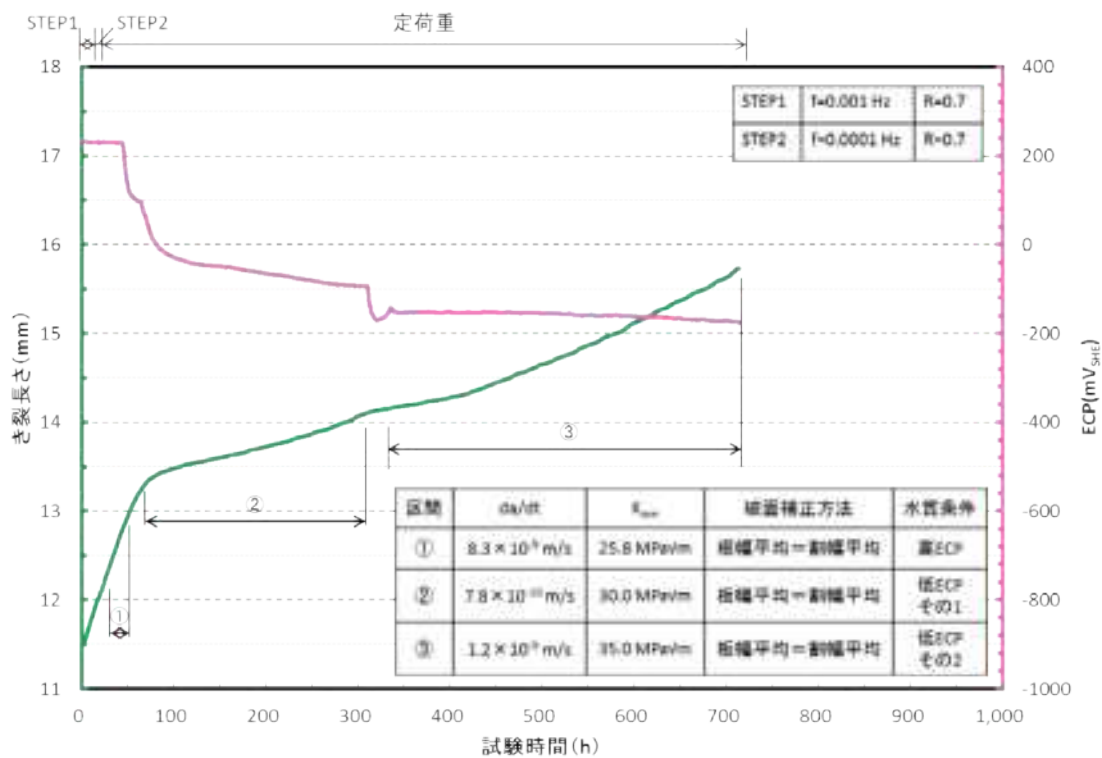


図 5.2.4-103(1) き裂長さの時間変化(破面補正後)(1/3)(き裂長さ と ECP)
(A410(SUS316L、HT 材、 7.14×10^{25} n/m²(E>1MeV))

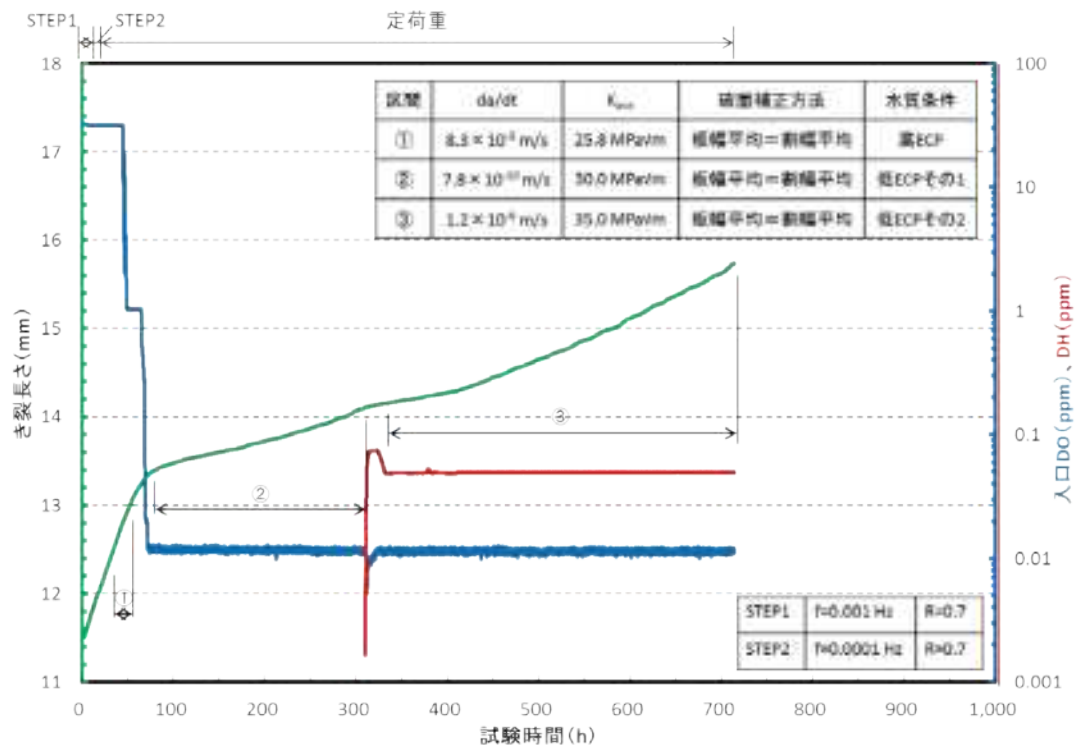


図 5.2.4-103(2) き裂長さの時間変化(破面補正後)(2/3)(き裂長さ と DO・DH)
(A410(SUS316L、HT 材、 7.14×10^{25} n/m²(E>1MeV))

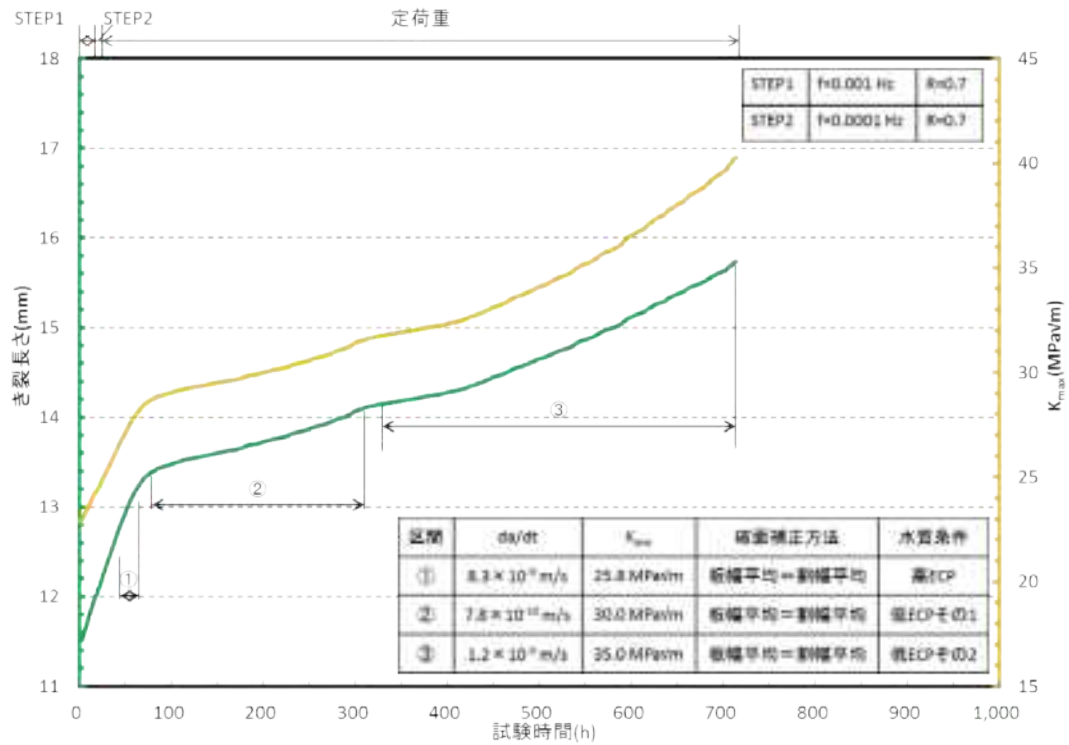


図 5.2.4-103(3) き裂長さの時間変化(破面補正後)(3/3)(き裂長さ と K 値)
(A410(SUS316L、HT 材、 7.14×10^{25} n/m²(E>1MeV))

表 5.2.4-24 き裂進展試験結果まとめ(A410、破面補正後)

鋼種	ID	損傷量 (dpa)	ECP 平均値 (mV _{SHE})	K 平均値 (MPa√m)	da/dt (m/s)	備考
SUS 316L	A410	11.9	230	26.6	8.3×10 ⁻⁹	高 ECP
			-60	32.6	7.8×10 ⁻¹⁰	低 ECP その 1
			-170	40.3	1.2×10 ⁻⁹	低 ECP その 2

(イ)試験番号②(A412(SUS316L、HT材、 $7.38 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$))

試験開始から繰り返し荷重負荷による環境中予き裂を導入した。環境中予き裂の導入条件を表 5.2.4-25 に示す。環境中予き裂導入後、定荷重制御に移行し NWC および HWC 模擬水質環境下での SCC 進展挙動を確認した。試験中の導電率は、入口で $0.1 \mu\text{S/cm}$ 以下、出口で $0.2 \mu\text{S/cm}$ 以下であった。不純物イオンの分析結果を表 5.2.4-26 に示す。 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- ともに目標値である 5ppb 未満であった。所定の時間が経過後に、試験荷重を除荷し試験を終了した。

破面観察前の PDM チャートより、各 ECP 条件で定荷重制御された全領域を選定し、その区間のデータを最小二乗法で直線近似して得た傾きに基づいて、き裂進展速度の暫定値を求めた。PDM チャートを図 5.2.4-104 に、き裂進展速度の暫定値を表 5.2.4-27 に示す。

表 5.2.4-25 環境中予き裂導入条件(試験片番号 A412)

STEP1	STEP2
R=0.7 f=0.001(Hz) 波形：三角波	R=0.7 f=0.0001(Hz) 波形：三角波

表 5.2.4-26 試験水分析結果(試験片番号 A412)

イオン種	試験開始時		試験終了時	
	入口	出口	入口	出口
SO_4^{2-} (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2
Cl^- (ppb)	< 2	3.0	< 2	3.7
NO_3^- (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2

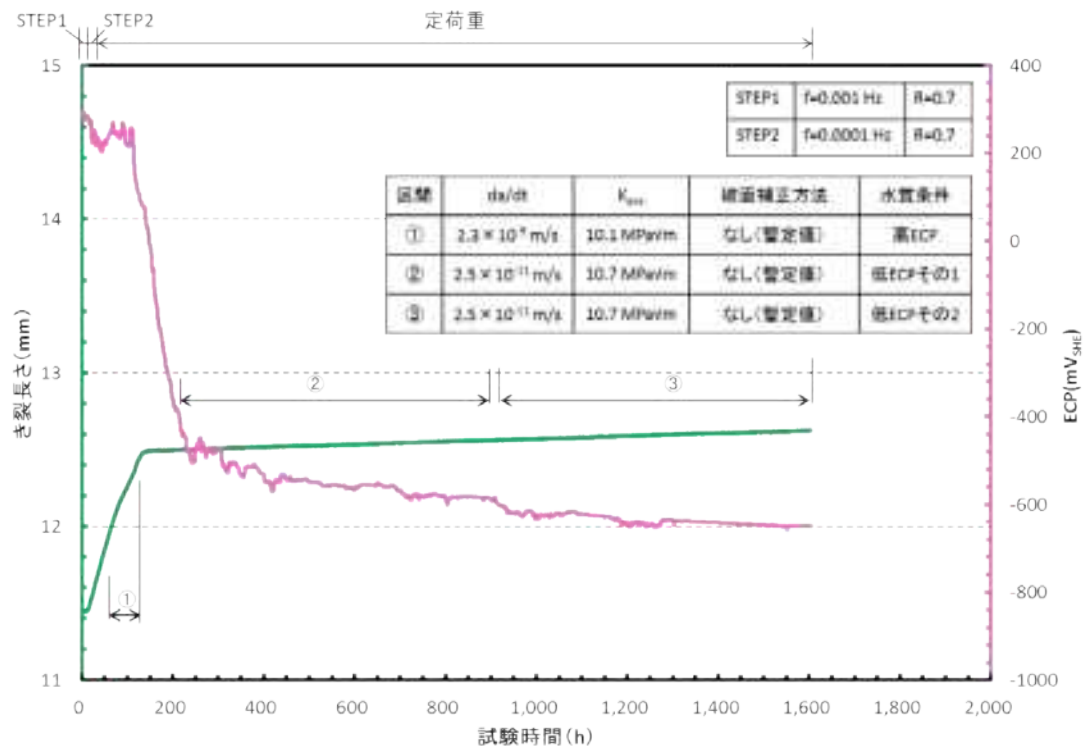


図 5.2.4-104(1) き裂長さの時間変化(破面補正前)(1/3)(ECP と併記)
(A412(SUS316L、HT 材、 7.38×10^{25} n/m²(E>1MeV))

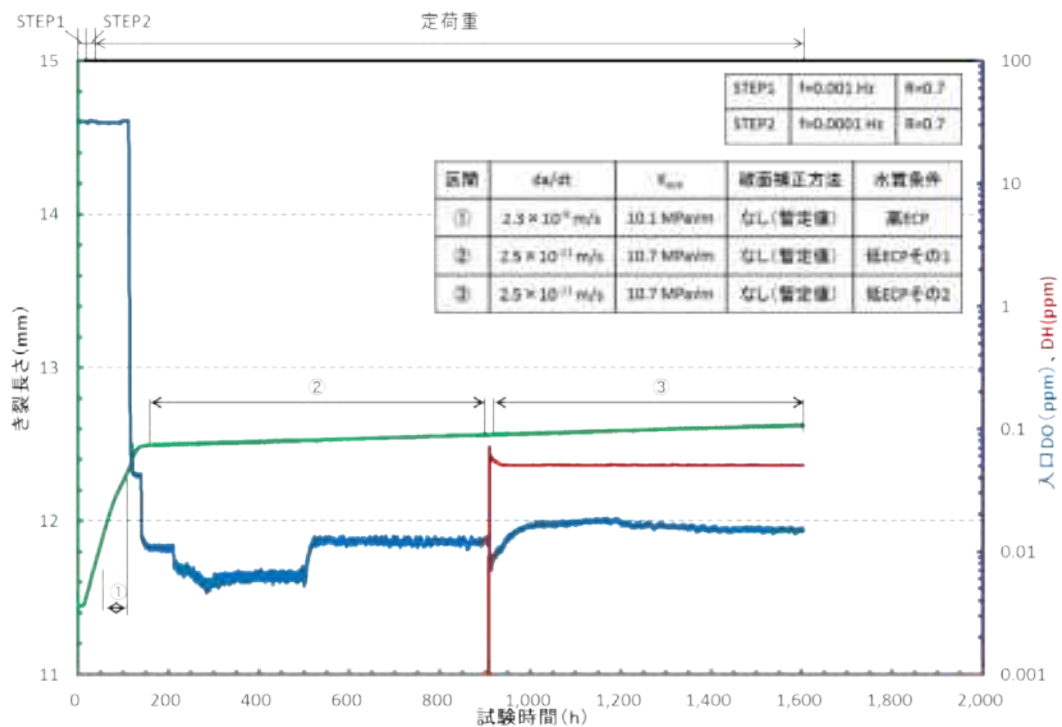


図 5.2.4-104(2) き裂長さの時間変化(破面補正前)(2/3)(DO、DH と併記)
(A412(SUS316L、HT 材、 7.38×10^{25} n/m²(E>1MeV))

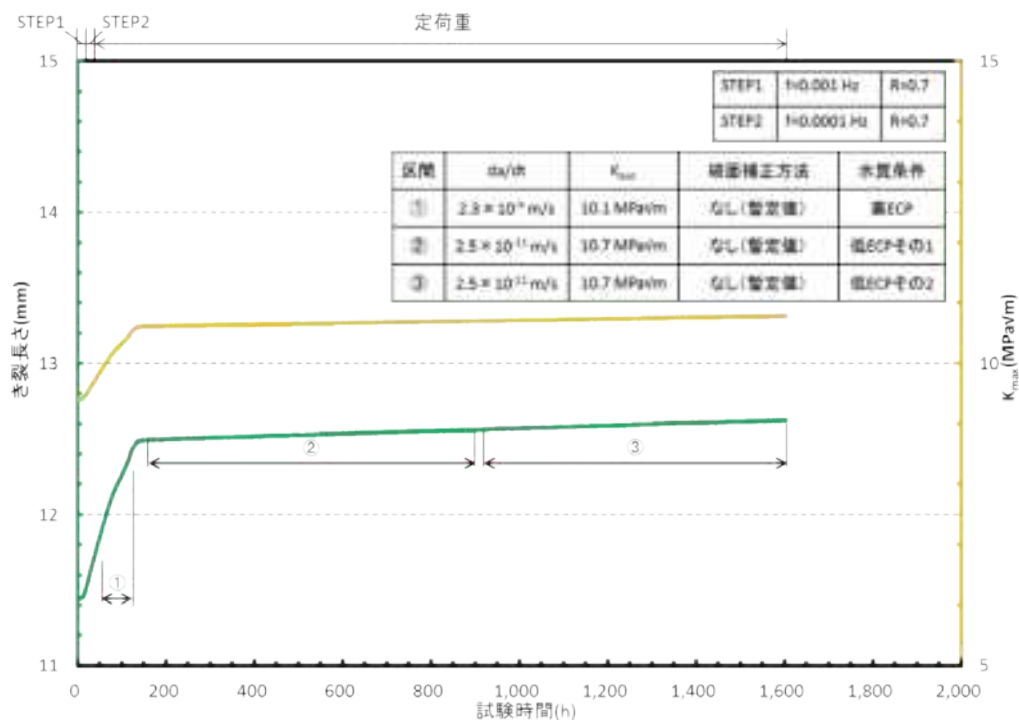


図 5.2.4-104(3) き裂長さの時間変化(破面補正前)(3/3)(K 値と併記)
(A412(SUS316L、HT 材、7.38×10²⁵ n/m²(E>1MeV))

表 5.2.4-27 き裂進展試験結果まとめ(破面補正前)

鋼種	ID	損傷量 (dpa)	ECP (mV _{SHE})	K (MPa√m)	da/dt (m/s)	備考
SUS 316L	A412	12.2	240	10.1	2.3×10 ⁻⁹	高 ECP
			-510	10.7	2.5×10 ⁻¹¹	低 ECP その 1
			-630	10.7	2.5×10 ⁻¹¹	低 ECP その 2

(ウ)試験番号③(A413(SUS316L、HT材、 7.32×10^{25} n/m²(E>1MeV)、700°C×1h、照射後焼鈍材))

試験開始から繰り返し荷重負荷による環境中予き裂を導入した。環境中予き裂の導入条件を表 5.2.4-28 に示す。環境中予き裂導入後、定荷重制御に移行し NWC 模擬水質環境下での SCC 進展挙動を確認した。試験中の導電率は、入口で 0.1 μS/cm 以下、出口で 0.2 μS/cm 以下であった。不純物イオンの分析結果を表 5.2.4-29 に示す。SO₄²⁻、NO₃⁻、Cl⁻ともに目標値である 5ppb 未満であった。所定の時間が経過後に、試験荷重を除荷し試験を終了した。

破面観察前の PDM チャートより、各 ECP 条件で定荷重制御された全領域を選定し、その区間のデータを最小二乗法で直線近似して得た傾きに基づいて、き裂進展速度の暫定値を求めた。PDM チャートを図 5.2.4-105 に、き裂進展速度の暫定値を表 5.2.4-30 に示す。

表 5.2.4-28 環境中予き裂導入条件(試験片番号 A413)

STEP1	STEP2	STEP3	STEP4
R=0.7 f=0.01(Hz) 波形：三角波	R=0.7 f=0.005(Hz) 波形：三角波	R=0.7 f=0.001(Hz) 波形：三角波	R=0.7 f=0.0005(Hz) 波形：三角波

表 5.2.4-29 試験水分析結果(試験片番号 A413)

イオン種	試験開始時		試験開始 1 ヶ月後		試験開始 2 ヶ月後		試験終了時	
	入口	出口	入口	出口	入口	出口	入口	出口
SO ₄ ²⁻ (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Cl ⁻ (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	2.4	< 2	2.3
NO ₃ ⁻ (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2

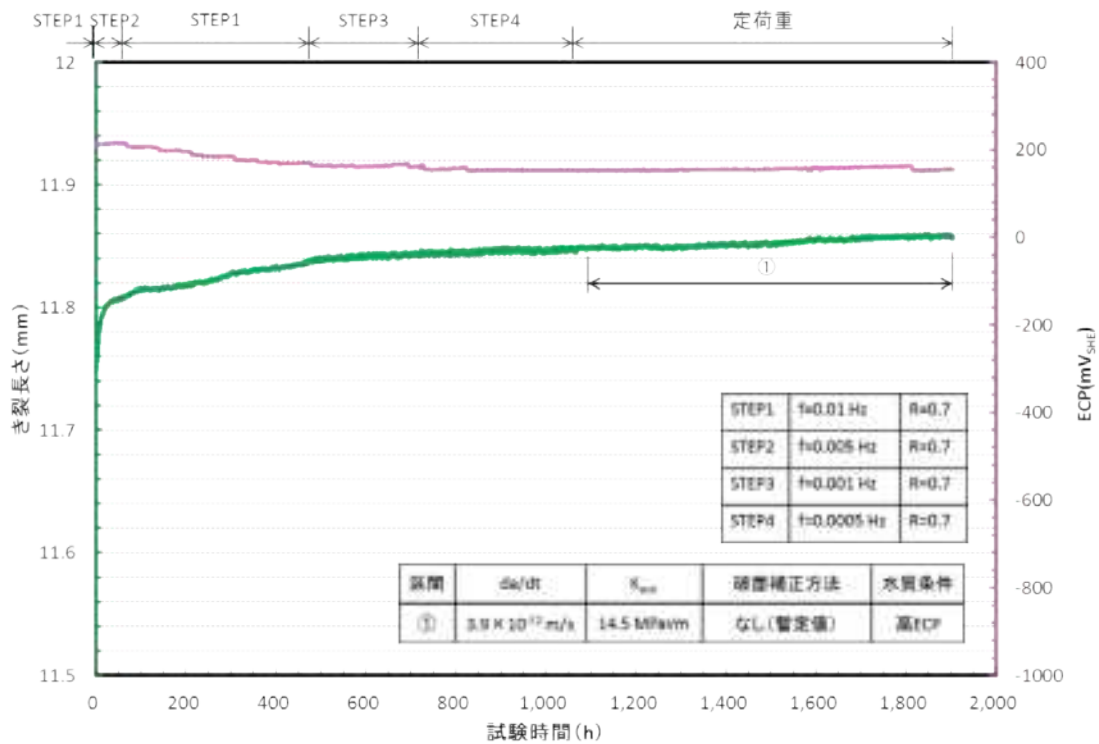


図 5.2.4-105(1) き裂長さの時間変化(破面補正前)(1/3)(ECP と併記)
(A413(SUS316L、HT 材、 7.32×10^{25} n/m²(E>1MeV)、700°C×1h 照射後焼鈍材))

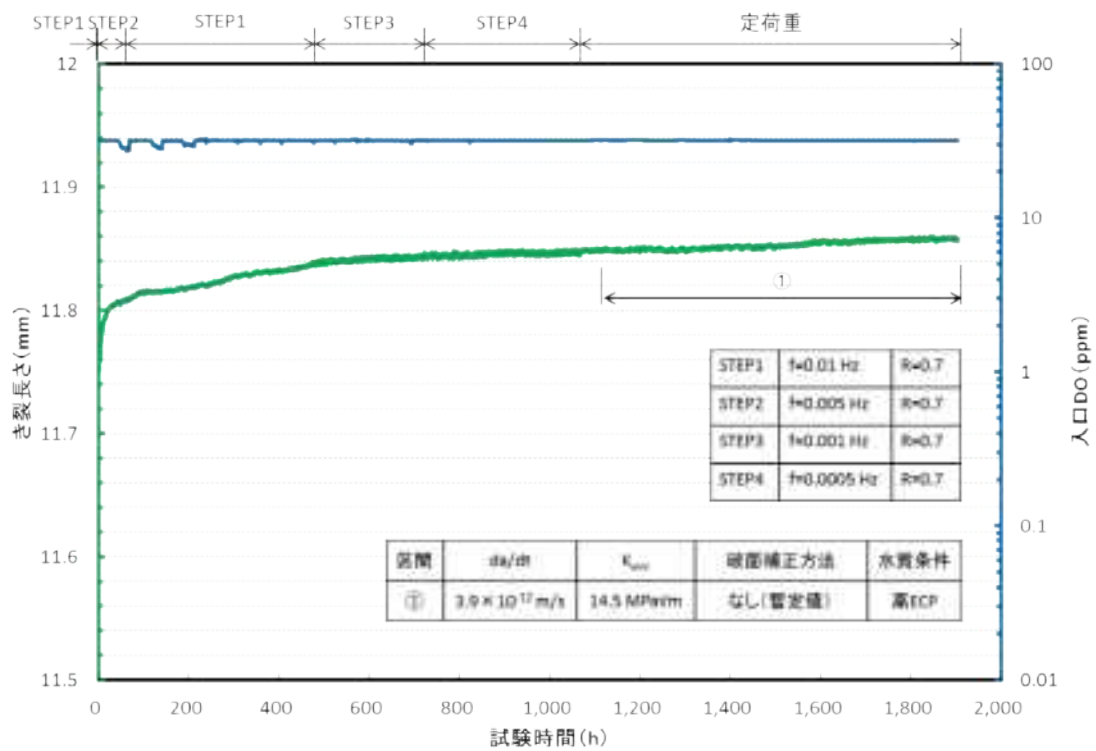


図 5.2.4-105(2) き裂長さの時間変化(破面補正前)(2/3)(DO と併記)
(A413(SUS316L、HT 材、 7.32×10^{25} n/m²(E>1MeV)、700°C×1h 照射後焼鈍材))

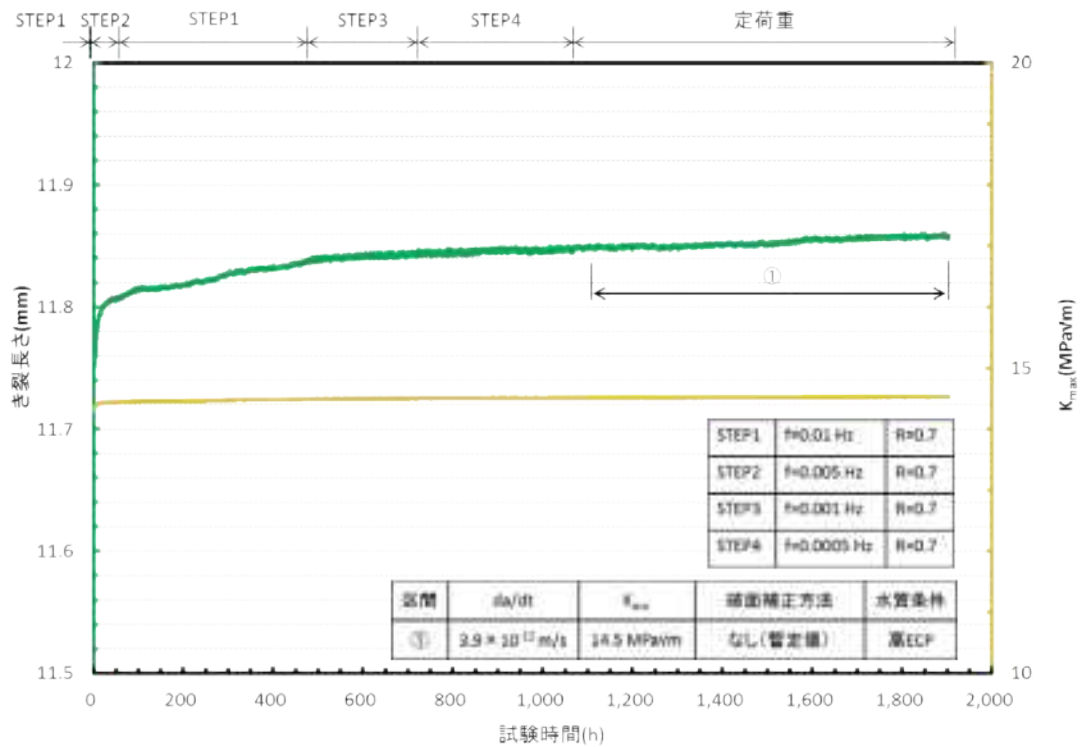


図 5.2.4-105(3) き裂長さの時間変化(破面補正前)(3/3)(K 値と併記)
(A413(SUS316L、HT 材、 7.32×10^{25} n/m²(E>1MeV)、700°C×1h 照射後焼鈍材))

表 5.2.4-30 き裂進展試験結果まとめ(破面補正前)

鋼種	ID	損傷量 (dpa)	ECP (mV _{SHE})	K (MPa√m)	da/dt (m/s)	備考
SUS316L (700°C×1h 照射後焼鈍材)	A413	11.9	160	14.5	3.9×10 ⁻¹²	高 ECP

(iii) 水のラジオリシスがき裂進展に及ぼす影響評価試験まとめ

今年度は、照射量レベル F4(中性子照射量: 6.5×10^{25} n/m² 損傷量:約 12 dpa)のステンレス鋼を用いて高 K 値レベルのき裂進展試験を実施した。図 5.2.4-106 は、既往の照射ステンレス鋼の文献値との比較を示す。溶存酸素の高い試験条件(図中 DO1 と表記)では、損傷量の増加に伴ってき裂進展速度も大きくなる傾向が認められた。図 5.2.4-83 に示したように、給水における溶存酸素量を 32ppm とした場合、水のラジオリシスに起因する過酸化水素の濃度は 4 桁小さいことから、この条件において水のラジオリシスの効果は小さく、試験片が放出するγ線の顕著な影響は認められないと評価された。

一方低い溶存酸素濃度(図中 DO3 と表記)若しくは水素注入した条件においては、き裂進展速度が約 1 桁抑制される傾向が認められた。図 5.2.4-106 に示した照射量レベル F3(2.5×10^{25} n/m² 損傷量:約 4 dpa)の結果の通り、これまでの知見では高照射レベルのステンレス鋼に対し、溶存酸素濃度を低減してもき裂進展速度抑制効果はあまりない、と考えられてきた。今回取得したデータはこれまでの知見と異なる結果となっており、引き続き同じ照射量レベルの試験片を用いた低 K 値条件でのき裂進展試験結果も踏まえ、詳細に検討していく必要がある。

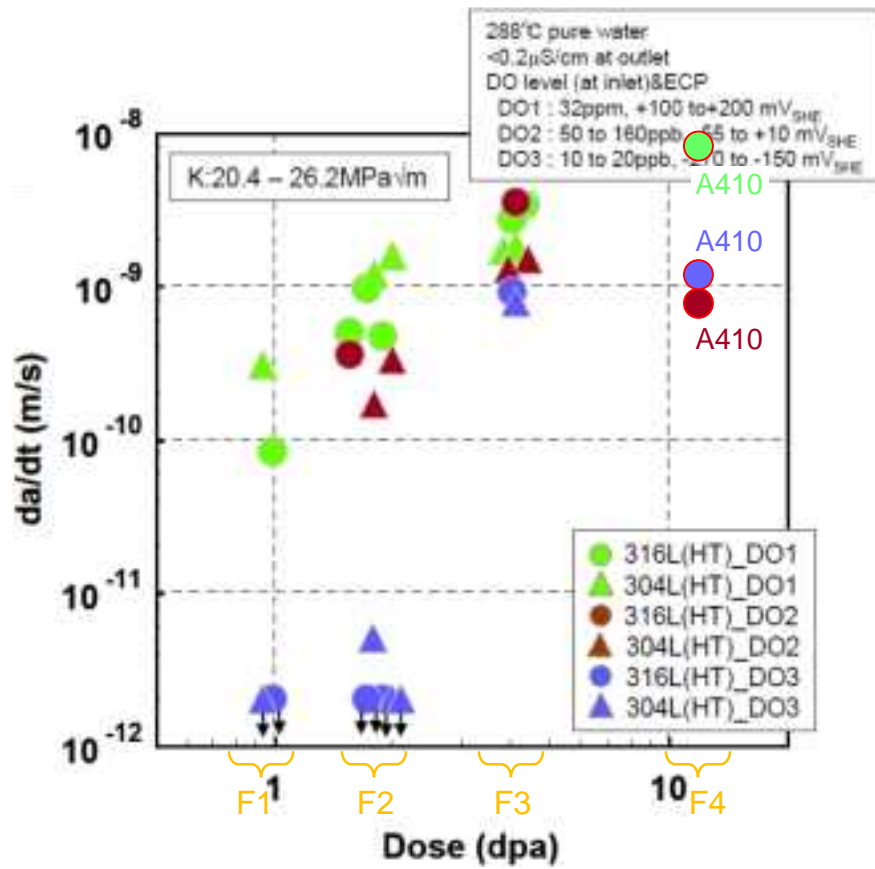


図 5.2.4-106 既往の中性子照射ステンレス鋼き裂進展速度データ (5.2.4-1) との比較

(iv)5.2.4章参考文献

- (5.2.4-1) K. Takakura, S. Tanaka, T. Nakamura, K. Chatani, Y. Kaji, “ CRACK GROWTH BEHAVIOR OF NEUTRON IRRADIATED L-GRADE AUSTENITIC STAINLESS STEELS IN SIMULATED BWR CONDITIONS”, Proceedings of fourteenth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System-Water Reactors, August 2009
- (5.2.4-2) 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成 15 年度 照射誘起応力腐食割れ (IASCC)評価技術調査研究に関する報告書, 2004 年 6 月
- (5.2.4-3) 独立行政法人 原子力安全基盤機構, 平成 16 年度 照射誘起応力腐食割れ (IASCC)評価技術調査研究に関する報告書, 2005 年 7 月
- (5.2.4-4) M. Kodama, S. Suzuki, K. Nakata, S. Nishimura, K. Fukuya, T. Kato, Y. Tanaka, S. Shima, “MECHANICAL PROPERTIES OF VARIOUS KINDS OF IRRADIATED AUSTENITIC STAINLESS STEELS”, Proceedings of Eighth International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System-Water Reactors, August 1991
- (5.2.4-5) Y. Ishiyama et. al., “Influence of annealing on grain boundary segregation of neutron irradiated Type 316L stainless steel” , ICAPP ’ 09, May 2009
- (5.2.4-6) 腐食防食協会フォーラム「軽水炉水環境下における応力腐食き裂進展試験方法」 配付資料
- (5.2.4-5) M. Itoh et. al., “SCC GROWTH RATES AND REFERENCE CURVES FOR LOW CARBON STAINLESS STEELS IN BWR ENVIRONMENT” , PVP-Vol. 479, Residual Stress, Fracture, and Stress Corrosion Cracking, July 25-29, 2004, San Diego, California USA

5.3 材料照射キャプセル及び照射後試験装置等の整備

5.3.1 照射脆化評価用大型試験片照射キャプセル部品の製作

JMTR では、「照射脆化評価用大型試験片キャプセル」を用い、低照射速度（約 $4.3 \times 10^{16} \text{n/m}^2/\text{s}$ ($>1\text{MeV}$)) の条件で、原子炉圧力容器鋼から加工、製作した 1 インチ厚さコンパクトテンション型 (1T-CT) 試験片の照射試験を行う予定である。本年度は、第 177～179 サイクルに照射予定の照射脆化評価用大型試験片キャプセル 1 体 (14M-03AG) について、部品製作を実施した。

本キャプセルは、一重管構造で、外径 110mm であり、外筒管(外径 110mm×厚さ 3.5mm)の内側には、1T-CT 試験片、0.4T-CT 試験片、ダミー試験片等の照射試料、並びに試料ホルダ等のキャプセル構成部品が配置される。キャプセル内部は、真空度調節による温度制御方法(真空温度制御)と電気ヒータによる温度制御方法(ヒータ温度制御)を併用して温度制御が行われる。

図 5.3.1-1 にキャプセル内での照射試料の配置を、図 5.3.1-2 にキャプセルの概略構造図を示す。

5.3.2 照射脆化評価用照射キャプセル部品の製作

JMTR では、「照射脆化評価用キャプセル」を用い、低照射速度並びに高照射速度(高速中性子束: 約 $1.3 \times 10^{17} \text{n/m}^2/\text{s}$ ($>1\text{MeV}$)) の条件で、監視試験片サイズの試験片及び小型破壊靱性試験片の照射試験を行う予定である。本年度は、照射試験に供するキャプセル 2 体分の部品製作を行うとともに、昨年度に製作した部品を用いてキャプセル 2 体分の組立を実施した。

(1) 照射脆化評価用照射キャプセル部品の製作

第 182～187 サイクルに照射予定の高照射速度の条件で使用するキャプセル 2 体 (14M-04AG 及び 14M-05AG) について、設計及び部品製作を実施した。

これらのキャプセルは、一重管構造で、外径 60mm であり、外筒管(外径 60mm×厚さ 2mm)の内側に 0.4T-CT 試験片、0.16T-CT 試験片、SS3 型引張試験片、シャルピー型衝撃試験片、シャルピー型破壊靱性試験片、硬さ試験片及びキャプセル構成部品が配置される。キャプセル内部は、真空度調節による温度制御方法(真空温度制御)と電気ヒータによる温度制御方法(ヒータ温度制御)を併用して温度制御が行われる。

図 5.3.1-1 にキャプセル内での照射試料の配置を、図 5.3.2-1 にキャプセルの概略構造図(1/2)(2/2)を示す。

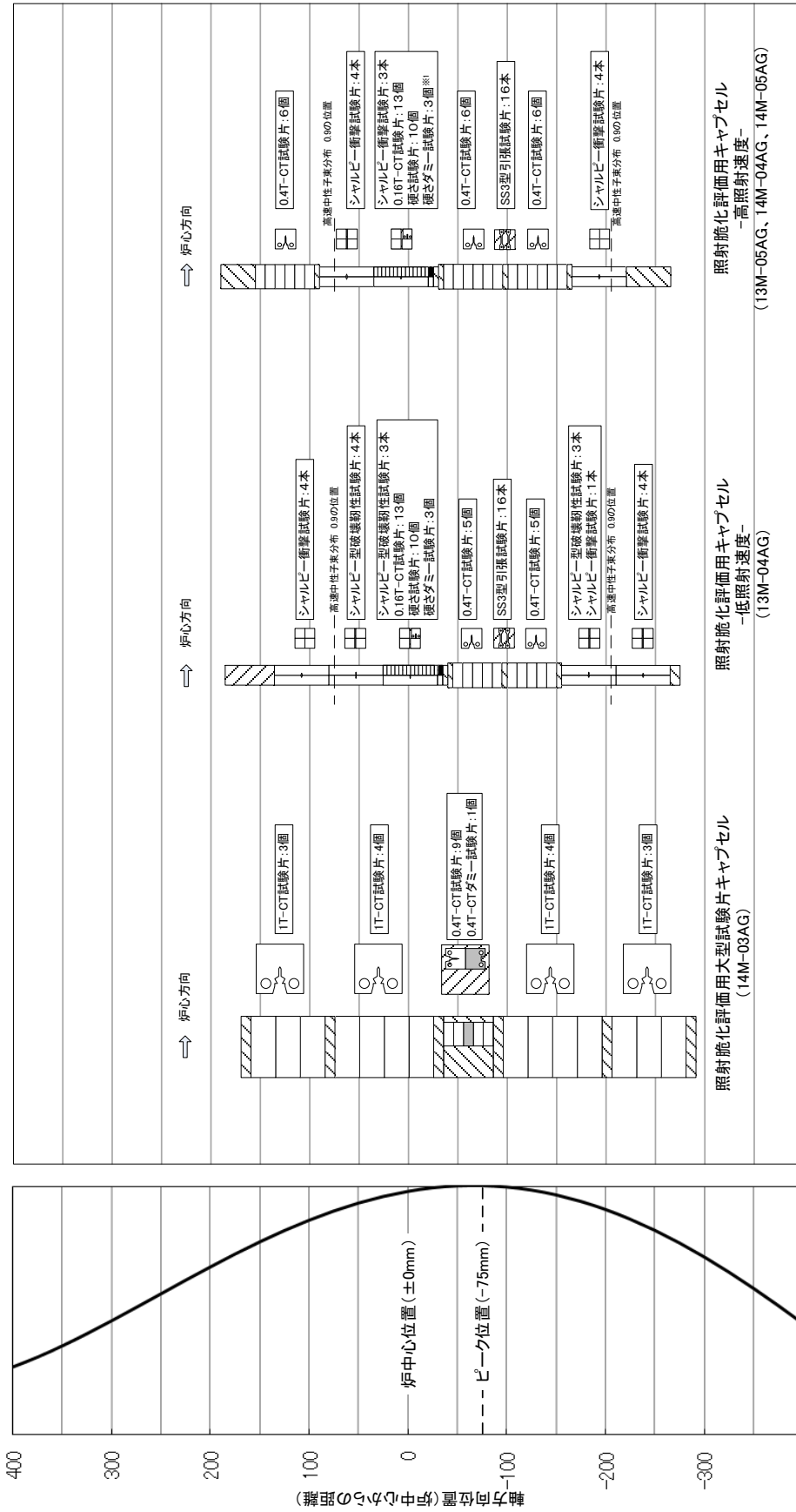
(2) 照射脆化評価用照射キャプセルの組立

第 175～184 サイクルに照射予定の低照射速度の条件で使用するキャプセル 1 体 (13M-04AG)、及び第 179～181 サイクルに照射予定の高照射速度の条件で使用するキャプセル

ル 1 体 (13M-05AG) の合計 2 体のキャプセルについて、昨年度に製作した部品を用いて組立を実施した。組立にあたっては、JAEA の製作工場で保管できる大きさにとどめることとし、キャプセル本体部 (下部端栓から上部端栓までの範囲) まで組立を進めた。

本キャプセルは、一重管構造で、外径 60mm であり、外筒管 (外径 60mm×厚さ 2mm) の内側に 0.4T-CT 試験片、0.16T-CT 試験片、SS3 型引張試験片、シャルピー型衝撃試験片、シャルピー型破壊靱性試験片、硬さ試験片、硬さダミー試験片及びキャプセル構成部品が配置される。キャプセル内部は、真空度調節による温度制御方法 (真空温度制御) と電気ヒータによる温度制御方法 (ヒータ温度制御) を併用して温度制御が行われる。

図 5.3.1-1 にキャプセル内での照射試料の配置を、図 5.3.2-2 に各々のキャプセルの外観写真を示す。



※1 14M-04AG、14M-05AGでは、硬さダミー試験片を装着しないため同形状のスペーサを配置した。

図 5.3.1-1 照射試料の配置

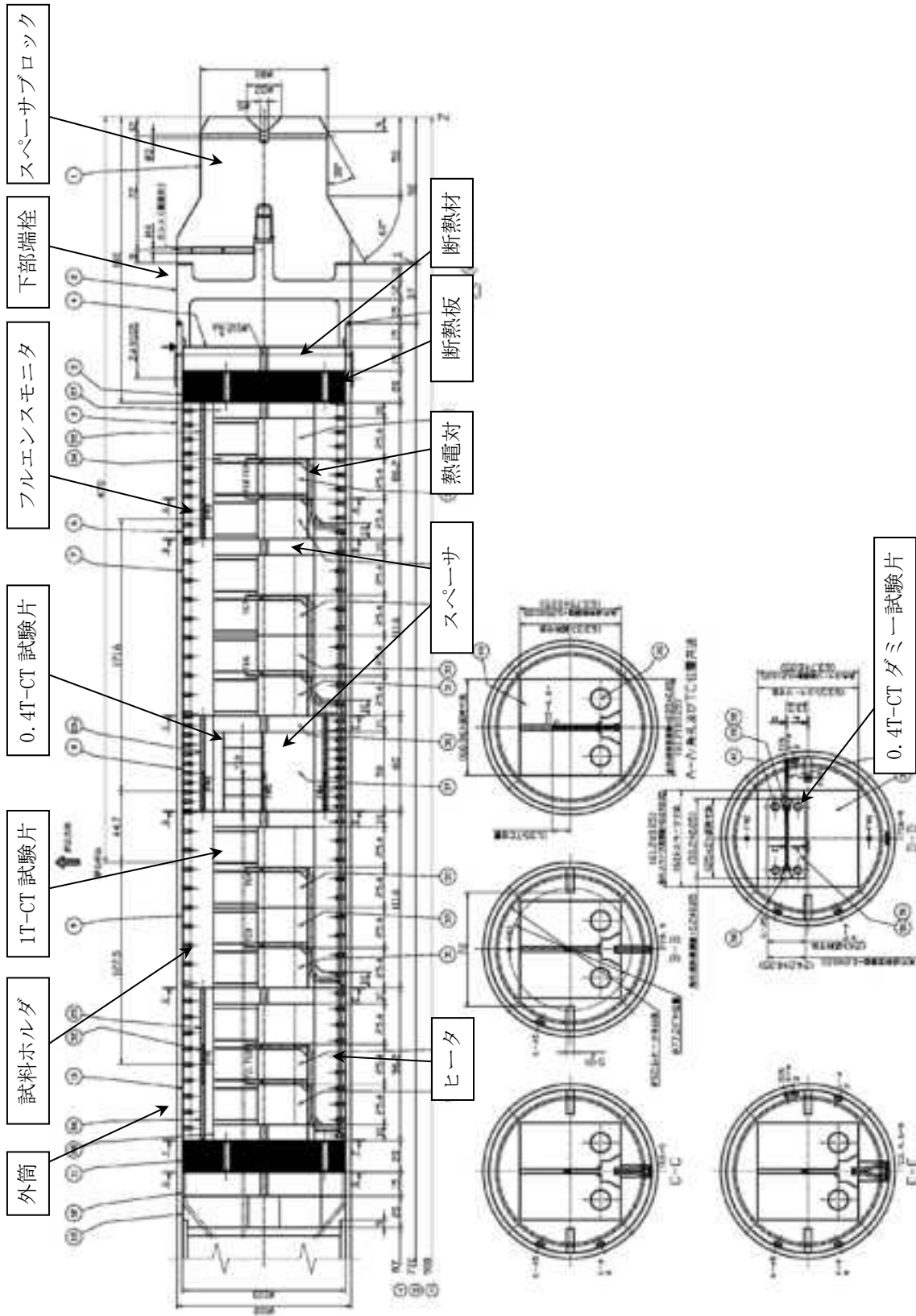


図 5.3.1-2 照射脆化評価用大型試験片キャプセル (14M-03AG) の概略構造図(1/2)
 【第 177～179 サイクル照射予定】

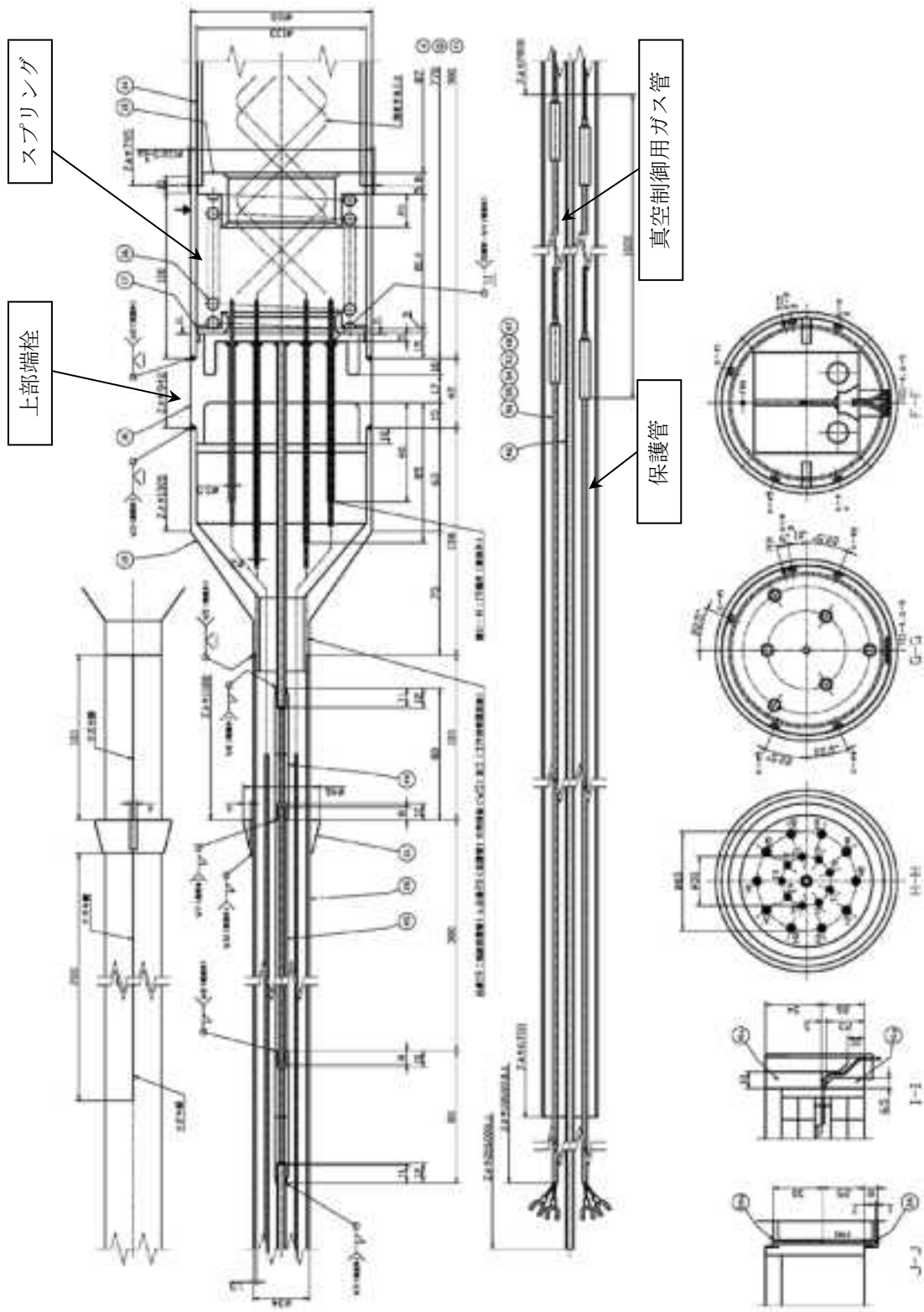


図 5.3.1-2 照射脆化評価用大型試験片キャプセル (14M-03AG) の概略構造図(2/2)

【第 177～179 サイクル照射予定】

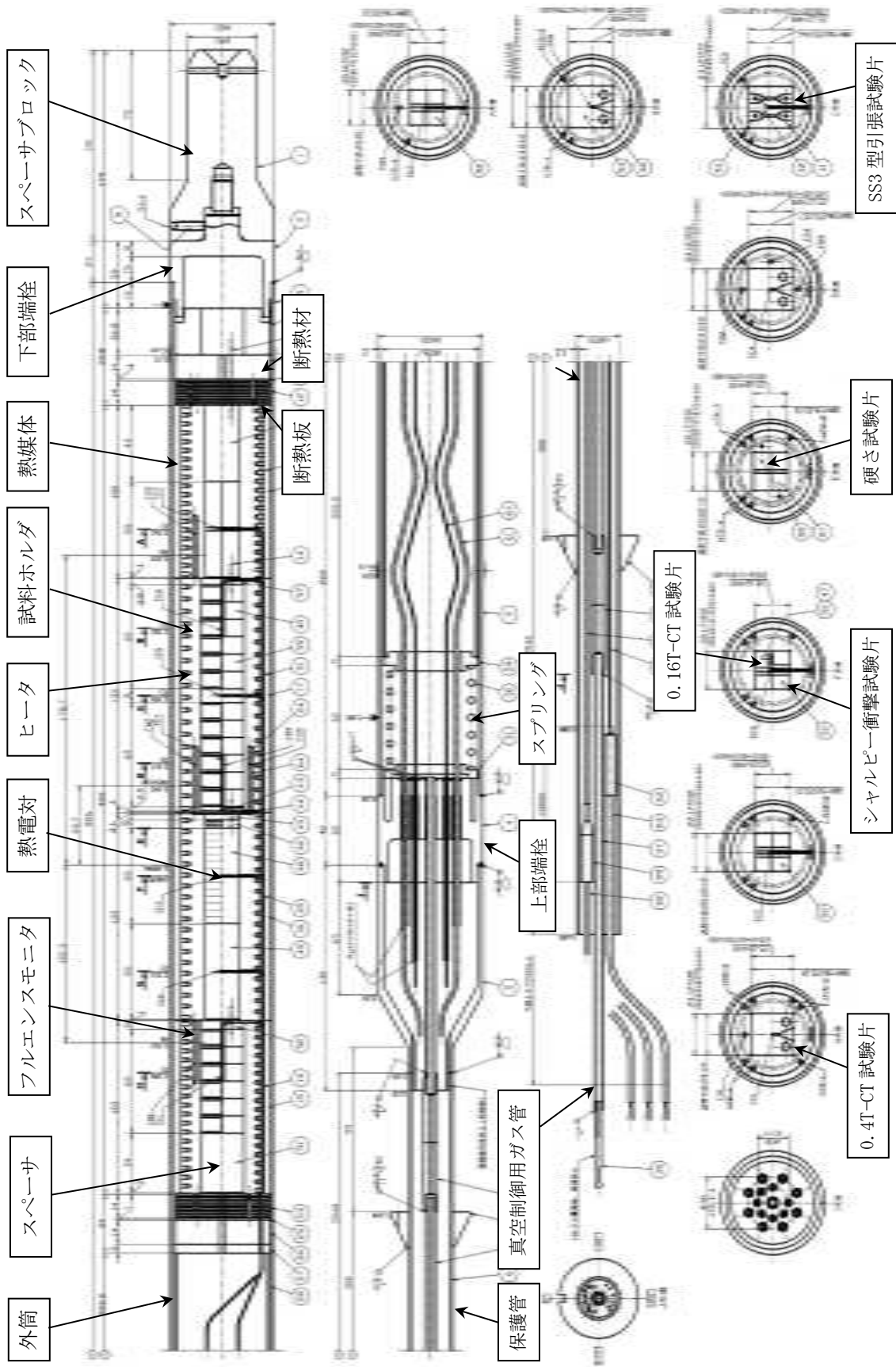


図 5.3.2-1 高照射速度の照射脆化評価用キャプセル (14M-04AG、14M-05AG) の概略構造図

【第 182~187 サイクル照射予定】



(a)13M-04AG (低照射速度条件)
 〔第 175~184 サイクル〕
 照射予定

(b)13M-05AG (高照射速度条件)
 〔第 179~181 サイクル〕
 照射予定

図 5.3.2-2 照射脆化評価用キャプセルの外観写真

5.3.3 照射下き裂進展試験用照射キャプセルの製作

JMTRにおいて、照射誘起応力腐食割れ(IASCC: Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking) 研究の一環として、軽水炉水環境を模擬した照射条件下で原子炉構造材等のIASCCき裂進展挙動を調査するため、高温高压水中でCT試験片に荷重を加えながらCT試験片のき裂長さの変化を測定するき裂進展試験を実施する。

この照射試験は、ウイング溶接型0.5T-CT試験片を組み込んだき裂進展試験用テコ式荷重負荷ユニットを照射下き裂進展試験用照射キャプセルに装荷して行うものである。

5.3.3.1 照射下き裂進展試験用照射キャプセル部品の製作

本キャプセル2体(14M-01AG、14M-02AG)は、キャプセル本体部と保護管下部の部品製作を実施した。それらの部品リストを表5.3.3.2に示す。また、このうち主要な部品の外観を図5.3.3-3に示す。平成27年度以降は、本キャプセルに用いる保護管上部の部品を製作した後、本年度に製作した部品と合わせて、製作メーカー工場にて組立を行った後、ホットラボ及びカナルにおいて、順次組立を行っていく予定である。

表 5.3.3.2 照射下き裂進展試験用照射キャプセル(14M-01AG、14M-02AG)の部品リスト

品番	部品名	材質	員数	品番	部品名	材質	員数
1	スペーサブロック	A1070	1	33	ナット	SUS316L	4
2	外筒部組	-	-	34	仕切管(2)	SUS316L	1
1	外筒	SUS316LTP	1	35	仕切管固定ねじ	SUS316L	2
2	外筒下部端栓	SUS316L	1	36	角度決めピン	SUS316L	2
3	パッド	SUS316	8	38	仕切管(3)	SUS316L	1
3	内筒部組	-	-	39	仕切管(4)	SUS316L	1
1	内筒	SUS316LTP	1	40	接地電極	-	-
2	内筒下部端栓	SUS316L	1	1	コンタクト	Fe-Ni-Co合金他	1
3	中間内筒	SUS316L	1	2	MIケーブル	シース:SUS316	1
4	支持金具(1)	SUS304	4	3	ワイヤ	SUS304	1
5	支持金具(2)	YS316L相当	4	41	溶接スリーブ	SUS316L	7
4	上部内筒	SUS316L	1	44	レデュースングユニオン(1)	316ステンレス鋼	1
5	上部端栓部組	-	-	45	レデュースングユニオン(2)	316ステンレス鋼	1
1	上部端栓	SUS316L	1	46	FMホルダ部組	-	-
2	MI取り出しスリーブ(1)	SUS316LTP	19	1	FM容器	SUS304	1
3	MI取り出しスリーブ(2)	SUS316LTP	1	2	スペーサ	YS316L相当	1
4	導水管	SUS316LTP	1	3	端栓	SUS304	2
5	給水管	SUS316LTP	1	4	ワイヤ	YS316L相当	2
6	排水管	SUS316LTP	2	47	バンド	SUS304	1
7	真空制御管	SUS304, 他	1式	48	金属Oリング	Ni, インコネルX-750	6
8	メタルフィルタ	SUS316, 他	1式	49	スウェージロック継手	316ステンレス鋼	2
9	排水ジョイント胴	SUS316L	1	50	VCRコネクタ	-	-
10	排水ジョイント蓋(1)	SUS316L	1	1	VCRコネクタ	SUS316	3式
11	排水ジョイント蓋(2)	SUS316L	1	2	変換スリーブ	SUS316	1
12	排水管延長管	SUS316LTP	1	51	MI継手	-	-
13	プラグ	SUS304	1	1	コンタクト	Fe-Ni-Co合金他	5
6	保護管(1)	SUS316L	1	2	固定ねじ	SUS304	4
7	レジュース(1)	SUS316L	1	52	計装用コネクタ(プラグ)	-	-
8	保護管(2)	SUS316LTP	1	1	ガラス	ガラス	1
9	ツバ	SUS304	1	2	ピン	Fe-Ni	19
10	六角管	SUS316L	1	3	ソケットコンタクト	銅合金	19
11	保護管(3)	SUS316LTP	1	4	シェル	SUS304	1
12	接続管部	-	-	5	カバー	SUS304	1
1	接続管(下側)	SUS304	1	6	フランジ	SUS304	1
2	ロックナット	SUS304	1	7	パイプ(1)	SUS304TP	14
3	袋ナット	SUS630	1	8	ガス置換パイプ	SUS304TP	1
4	シム	SUS304	2	9	スリーブ	SUS304	1
13	保護管スペーサ	SUS304	2	10	パイプ(2)	SUS304TP	1
14	SUSワイヤ	SUS304	1式	53	保護キャップ部組	-	-
15	止めねじ	SUS304	1	1	接続管(保護キャップ用)	SUS304	1
16	熱電対	シース:SUS316	4	2	延長管	SUS304TP	1
19	仕切管(1)	SUS316LTP	1	3	端栓	SUS304	1
21	流路調整金具	SUS316L	4	4	ノズル(1)	SUS304TP	2
22	熱電対取付スリーブ	SUS304TP	2	5	クイックコネクタ	316ステンレス鋼	2
25	接続金具(1)	SUS316L	1	6	スウェージロックA	316ステンレス鋼	1式
26	接続金具(2)	SUS316L	4	7	シリコンチューブ	シリコン	1
27	ECP保持金具(1)	SUS316L	1	8	ノズル(2)	SUS304	1
30	ECP保持金具(2)	SUS316L	1	9	スウェージロックB	316ステンレス鋼	1
31	アース線	YS316L相当	2	10	SUSワイヤ	SUS	1式
32	接続金具(3)	SUS316L	1	61	接続管(上側)	SUS316	1

※：員数はキャプセル1体分を表す。



(1) 外筒



(2) 上部端栓



(3) 保護管(1)



(4) 外筒下部端栓



(5) メタルフィルタ



(6) 熱電対



(7) スペーサブロック



(8) 接続管(下側)

図 5.3.3-3 照射下き裂進展試験用照射キャプセル(14M-01AG、14M-02AG)の主要な部品の外観

5.3.4 照射下試験技術の総合動作確認試験用キャプセルの製作

本キャプセル（14M-08AG）は、H27年度実施予定の照射下試験技術の総合動作確認試験に用いるためのものであり、本年度はキャプセルの部品製作及び組立を実施した。本キャプセルの概略図を図 5.3.4-1 に示す。

照射下試験技術の総合動作確認試験では、材料照射試験装置（JMTR 炉室内に設置されている水環境調整設備及び荷重制御装置）を用いて、高温高圧水中での荷重測定、PDM 測定、ECP 測定等の各種確認試験（照射下き裂進展模擬試験）を実施し、目標とする試験・測定ができることをあらかじめ確認する。

本キャプセル（14M-08AG）は、き裂進展試験ユニット照射下動作確認試験用キャプセルと同等の構造であり、キャプセル本体部は、外筒（外径 65mm×厚さ 2mm）と内筒（外径 58mm×厚さ 4mm）の間に、真空温度制御を行うためのギャップ層を設けた二重管気密構造である。内筒の内側には、仕切管を配置し、その内側にテコ式き裂進展試験ユニット、ウイング溶接型 0.5T-CT 試験片（PDM 測定用 MI ケーブルを取り付けたウイングを点付け溶接済み）、高温型ロードセル、ECP センサー（隔膜型及び白金型）及びキャプセル構成部品が配置される。

水環境調整設備からキャプセル内部に送られる供給水は、炉外に設置する当該設備内で水質（溶存酸素濃度及び溶存水素濃度）を調整した高温高圧水であり、給水管から仕切管外側を下降しキャプセル下端で折り返した後、上昇に変わり試料の表層を通過して、排水管を通過して水環境調整設備に戻る。

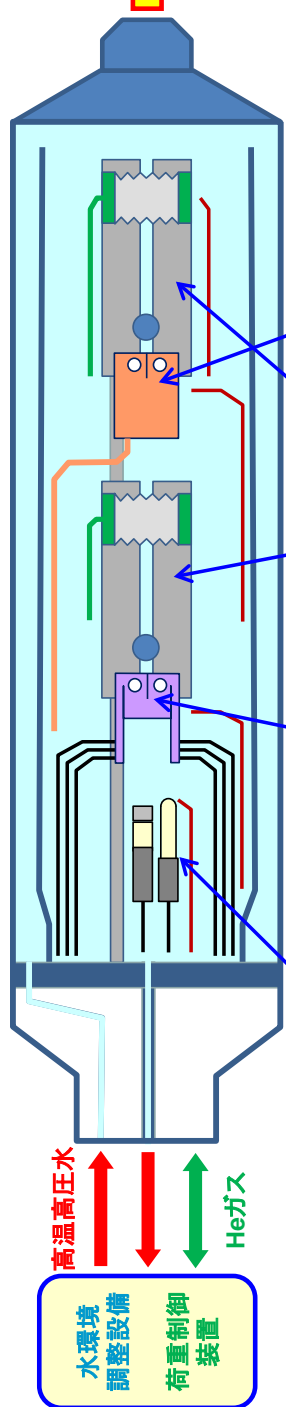
保護管部には、キャプセル本体部から引き回される給排水管や、熱電対、MI ケーブル等の信号線が収納されている。本キャプセルの構造図を図5.3.4-2に、キャプセル組立時の高温型ロードセル等の配置状況の写真を図5.3.4-3に、製作後のキャプセル外観写真を図

5.3.4-4に示す。

また、炉プール水による水の冷却状況を評価するために、接続ユニット内の排水管から分岐して閉止板に接続する熱電対付きサンプリング配管の製作を行った。サンプリング配管内に間隔をおいて熱電対を取り付け、データ収集装置に水の温度データを取り込んで計測し評価する。サンプリング配管の概略図を図 5.3.4-5 に、外観写真を図 5.3.4-6 に示す。



燃料装荷前のJMTR炉内に装荷



ECPセンサー

- 白金型ECPセンサー(Studsvik製)
- 隔膜型ECPセンサー(JAEA製)

き裂進展試験ユニット

ウイング溶接型0.5T-CT試験片

- SUS304鋭敏化材
- ウイング・MIケーブル部を溶接
- 荷重負荷、電位差測定を実施

高温型ロードセル

- き裂進展試験ユニットの荷重ピン間に負荷される引張荷重を測定

図 5.3.4-1 照射下試験技術の総合動作確認試験用キャプセルの概略図

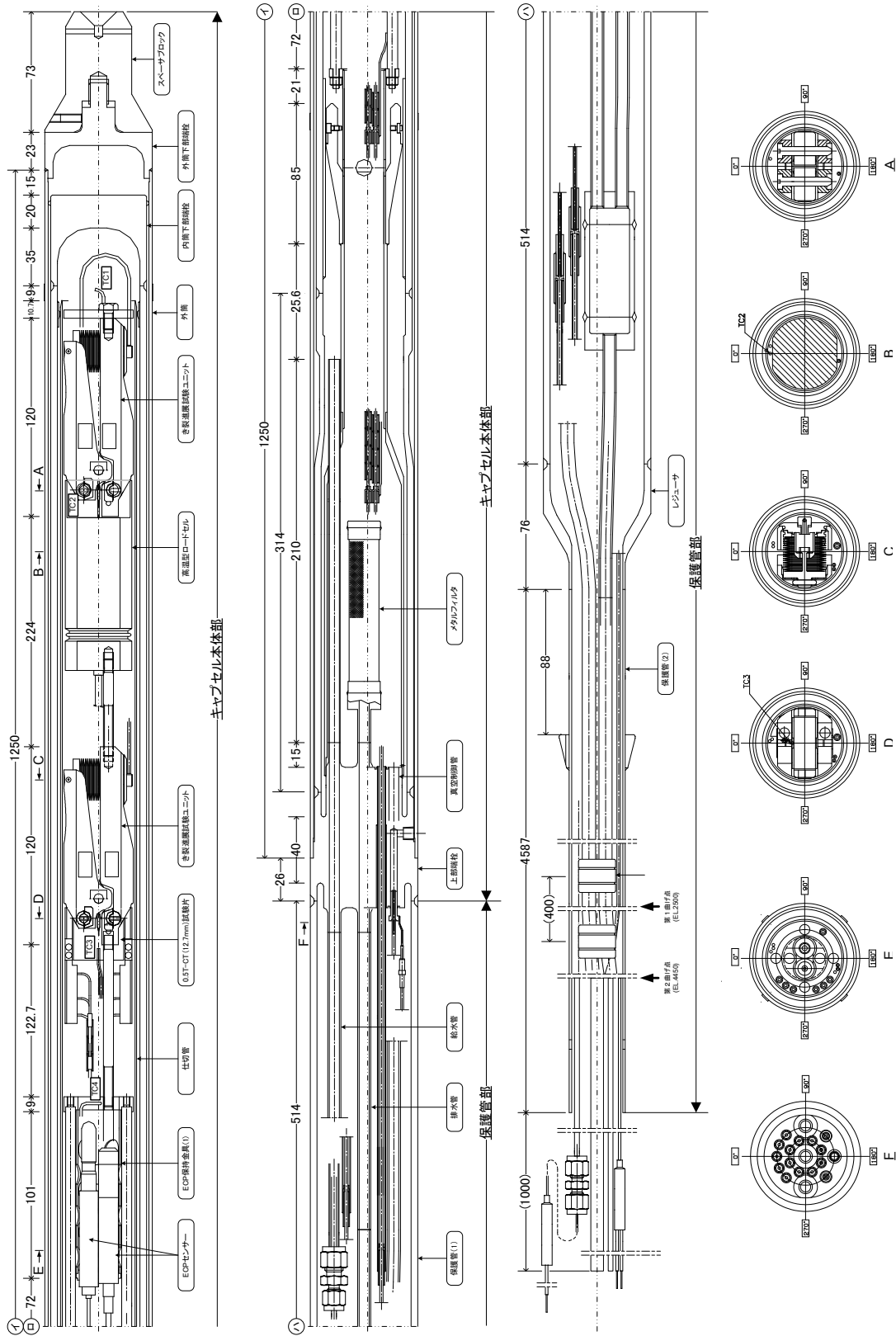
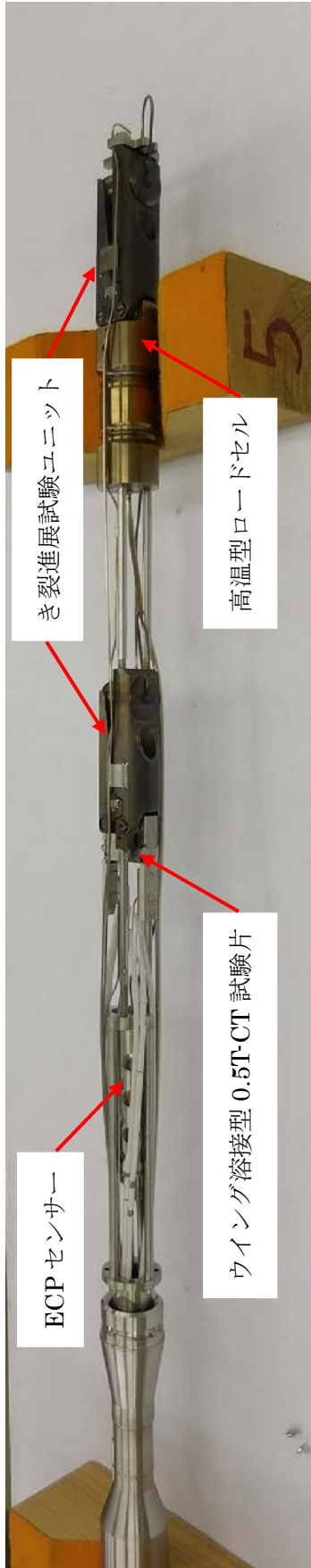


図 5.3.4-2 照射下試験技術の総合動作確認試験用キャセルの構造図



ウイング溶接型 0.5T-CT 試験片

PDM 測定用
MI ケーブル
(6 本)



き裂進展試験ユニット

ウイング溶接型 0.5T-CT 試験片部の拡大

図 5.3.4-3 照射下試験技術の総合動作確認試験用キャプセル組立時の高温型ロードセル等の配置状況

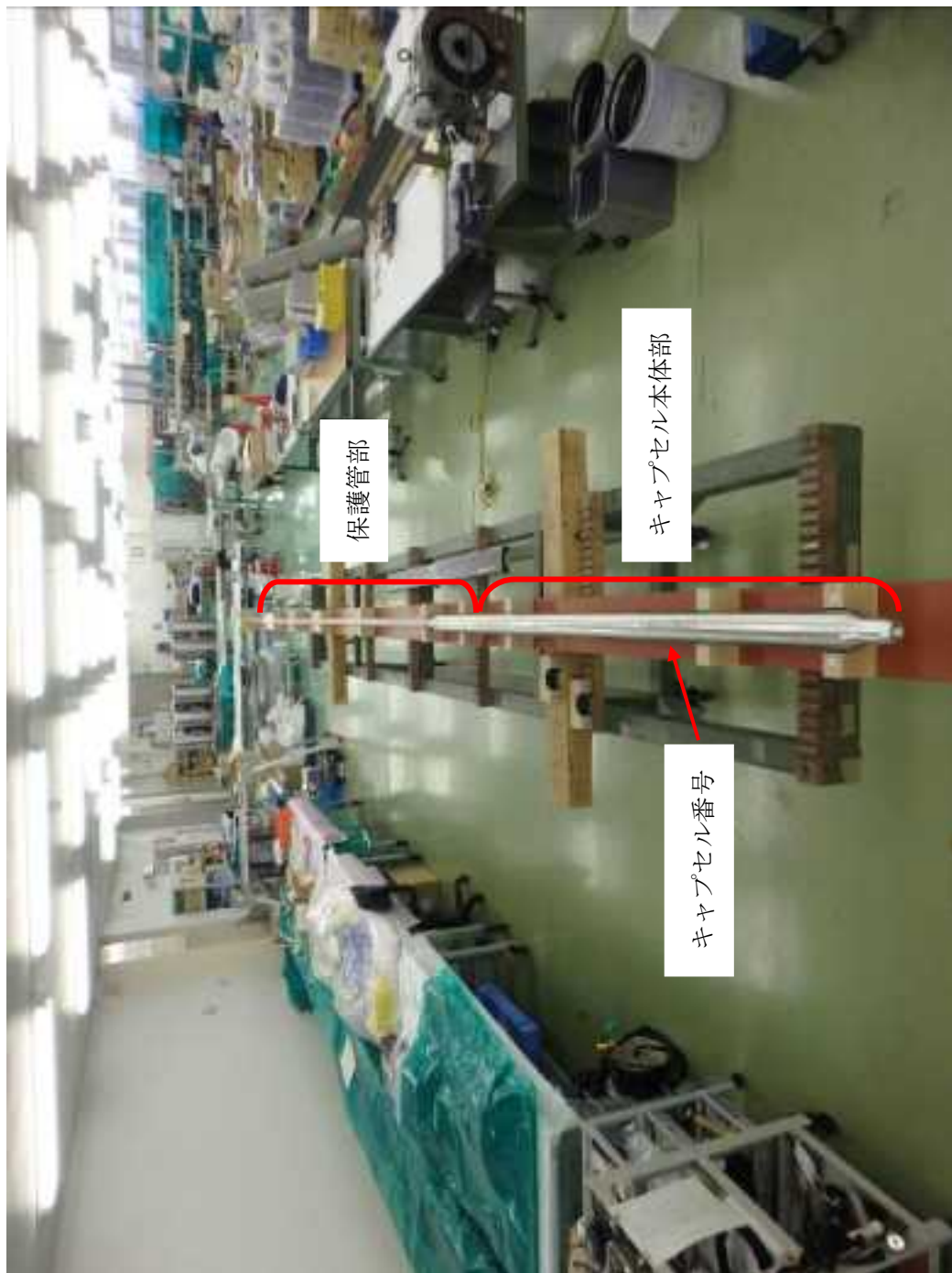


図 5.3.4-4 照射下試験技術の総合動作確認試験用キャプセルの外観写真

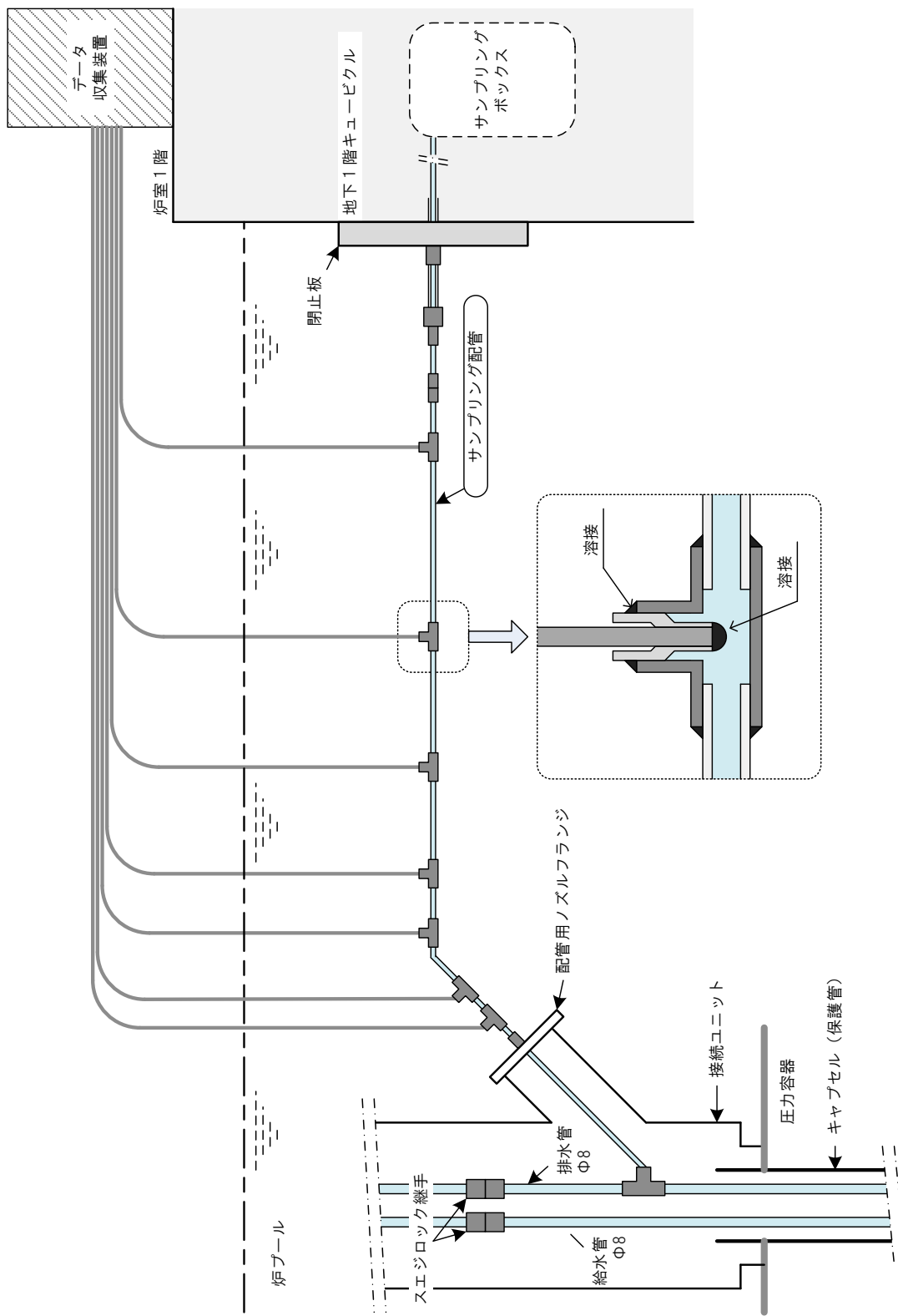


図 5.3.4-5 サンプリング配管の概要図

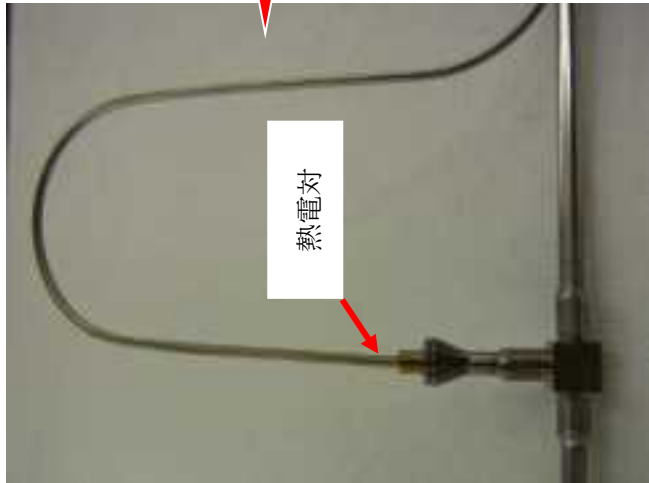
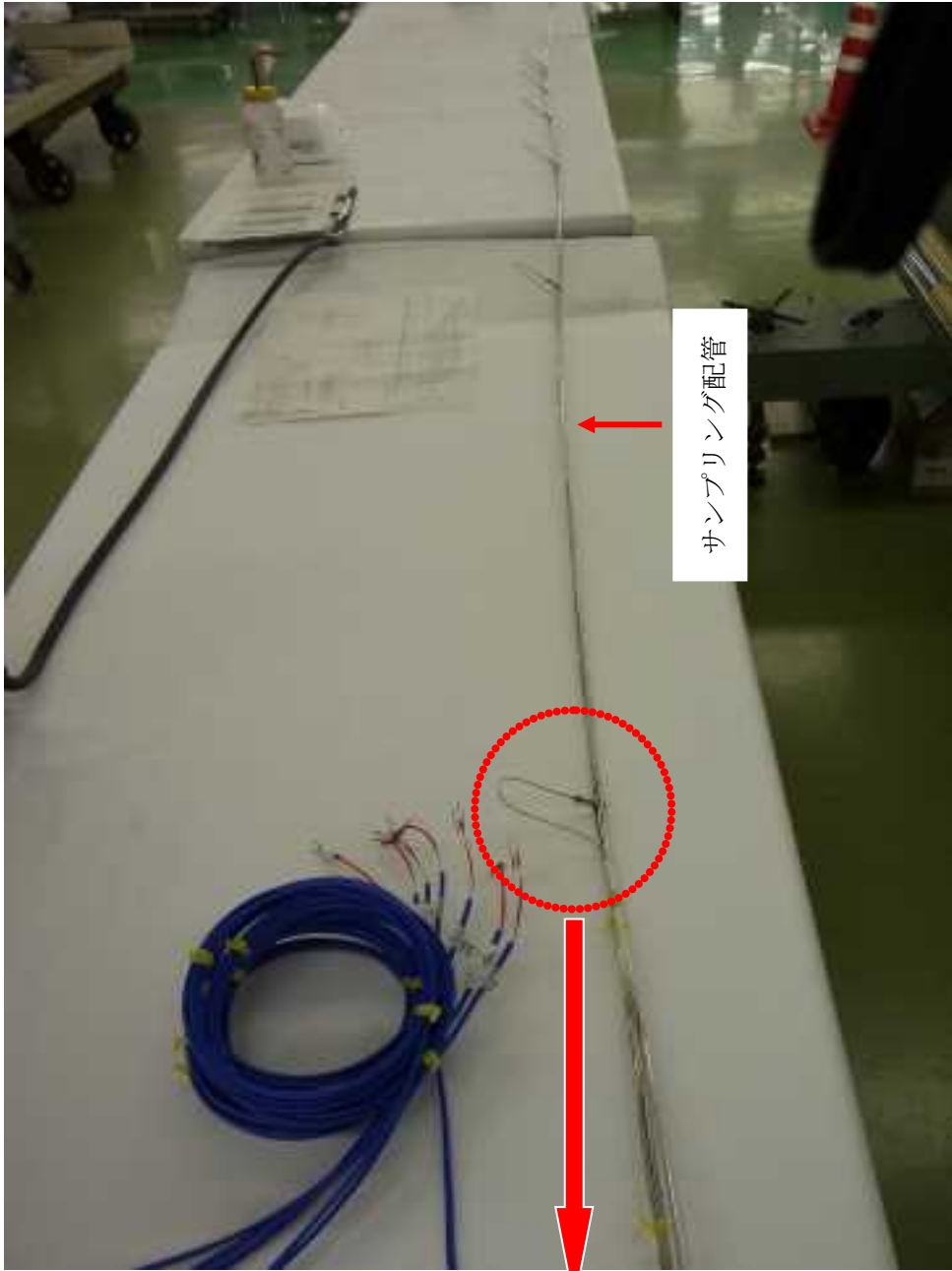


図 5.3.4-6 サンプリング配管の外観写真

5.3.5 キャプセルヒータの購入

照射キャプセル専用の電気ヒータ（キャプセルヒータ）は、照射試料の周辺に配置し、ヒータの出力を調整し、目標照射温度に制御するためのものである。

平成 26 年度は、次年度以降に組立が予定されている照射脆化試験用キャプセル（3 体分）の部品（予備品も含む）として、下記のキャプセルヒータを整備した。

(1) キャプセルヒータの仕様

キャプセルヒータは、サーモコアックス社製のシースヒータであり、JMTR で行われてきた照射試験で多くの使用実績があるものである。以下にその仕様を示す。整備したキャプセルヒータの写真を図 5.3.5 に示す。

- ・型式：TUT I2.0/350-200-350 計 22 本
- ・シース径： $\phi 2.0$
- ・シース材質：インコネル 600
- ・発熱部長さ：2m
- ・非発熱部長さ：3.5m（片側）
- ・抵抗値：7 Ω /m
- ・使用電圧：200V
- ・絶縁材：MgO

(2) キャプセルヒータ仕様の確認

本ヒータの整備にあたり、材料検査、外観検査、寸法検査、導通検査、絶縁抵抗検査、耐電圧検査、浸透探傷検査及び X 線検査を実施し、仕様通りに製作されていることを確認した。



図 5.4.5 キャプセルヒータの外観写真

5.3.6 原子炉圧力容器鋼照射用試験片の製作

照射脆化試験に必要な試験片数を考慮し、平成20年度に購入した原子炉圧力容器鋼比較標準材S1、平成22年度に購入したCu含有率等を変化させた3種類の圧延材(A533B鋼)のうちJRM、平成23年度に製作した溶接継手JRWから、7種類の試験片を採取・加工した。製作した試験片の形状を図5.3.6-1～図5.3.6-7に、数量を表5.3.6-1に示す。

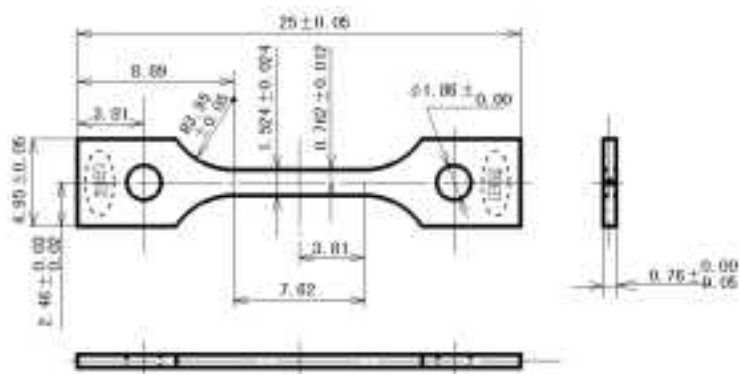


図5.3.6-1 SS3型引張試験片

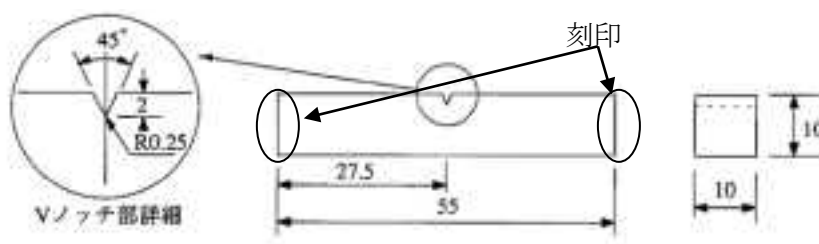


図5.3.6-2 シャルピー衝撃試験片（公差は別途指示）

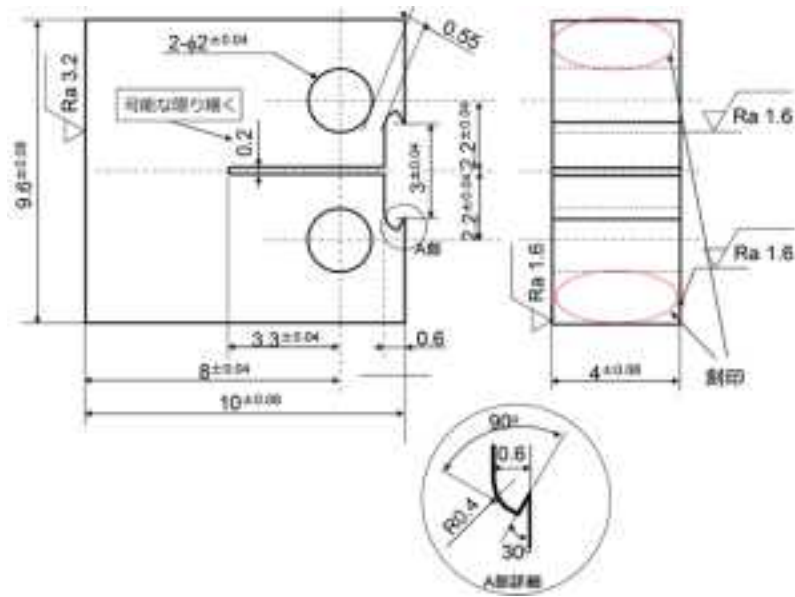


図5.3.6-3 0.16T-CT試験片の形状及び寸法

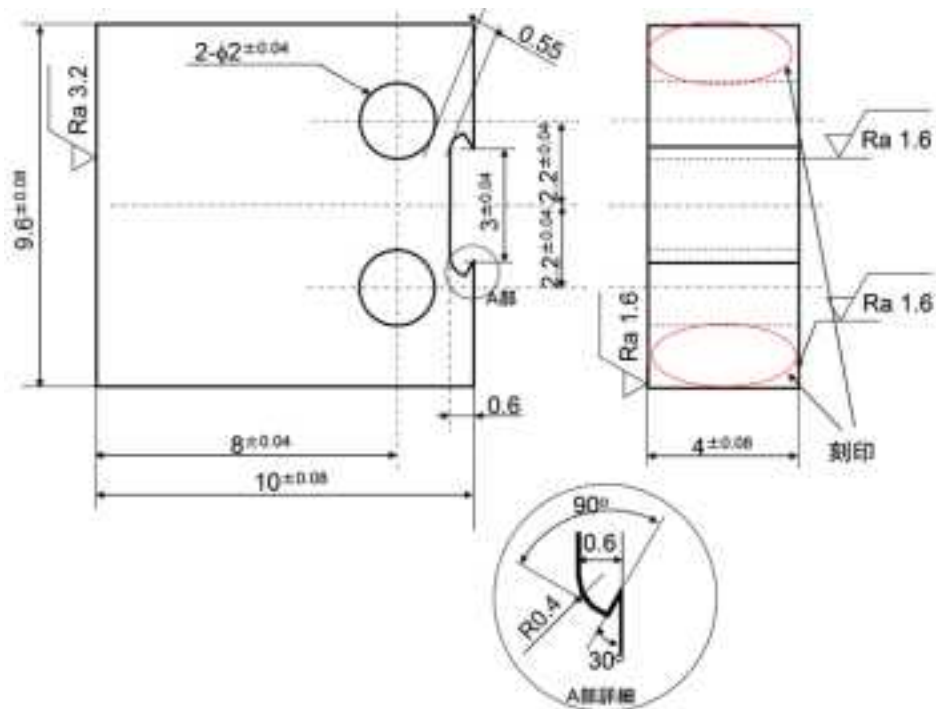


図5.3.6-4 0.16T-CT型ダミー試験片

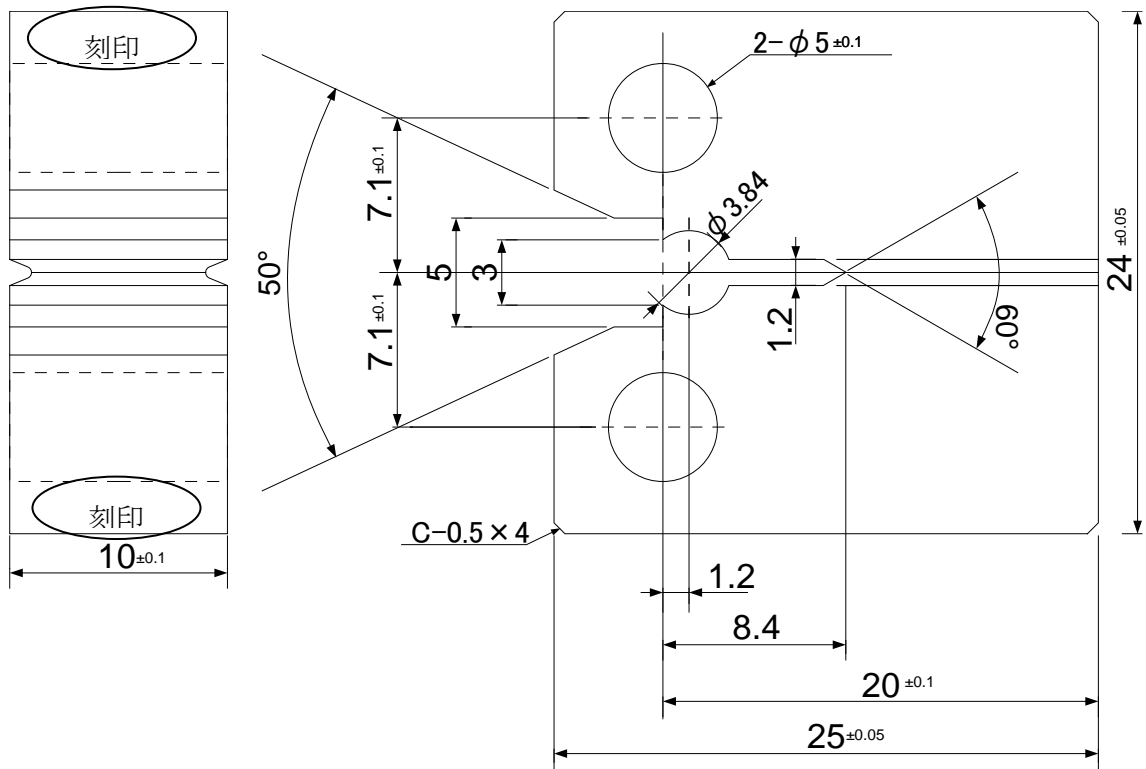


图5.3.6-5 0.4T-CT試驗片

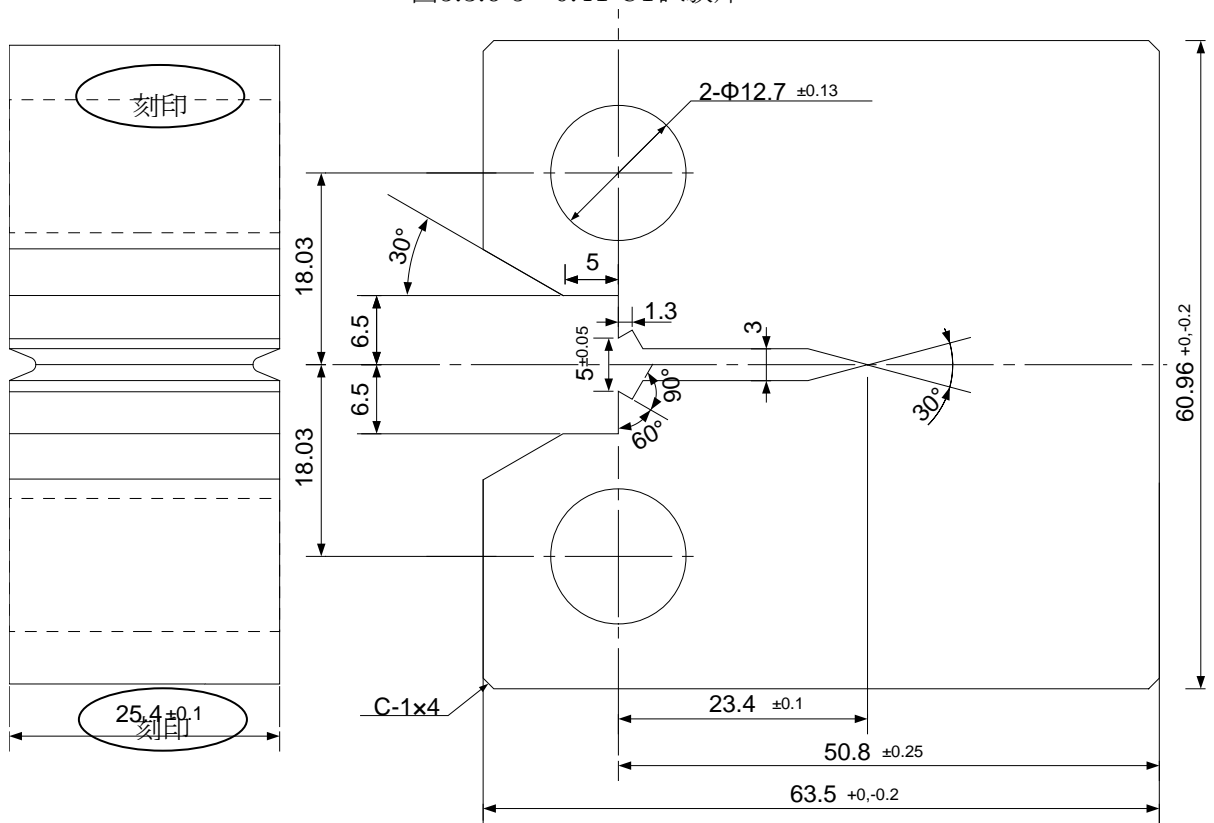


图5.3.6-6 1T-CT試驗片

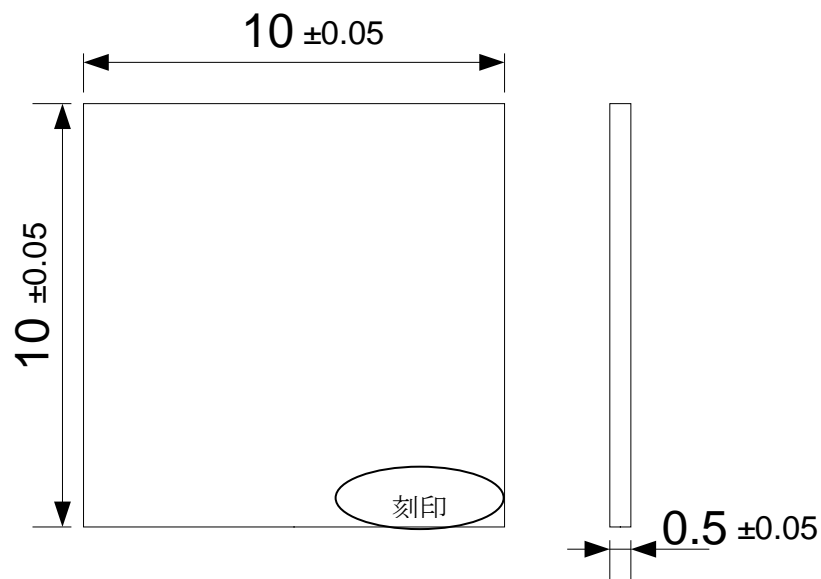


図5.3.6-7 硬さ試験片

表 5.3.6-1 本年度に製作した照射用試験片の数量

試験片種類	材質	数量(予備含む)
SS3型引張試験片	S1	20
	JRW	20
シャルピー衝撃試験片	S1	14
	JRW	14
0.16T-CT試験片	S1	16
	JRM	16
	JRW	16
0.16T-CT型ダミー試験片	JRM	4
0.4T-CT試験片	S1	30
	JRW	30
1T-CT試験片	JRW	16
硬さ試験片	S1	10
	JRW	10

5.3.7 照射キャプセル用き裂進展試験ユニットの製作

(1)はじめに

これまでに実施した照射下き裂進展試験に関連した技術開発の検討結果等を踏まえ、今年度は、材料試験炉(以下、JMTR)炉内における中性子照射下き裂進展試験用荷重負荷ユニット(以下、荷重負荷ユニット)2体の製作を実施した。

(2)荷重負荷ユニットの概要

図 5.3.7-1 は荷重負荷ユニットにき裂進展試験片(①:図 5.3.7-1 の丸数字に一致、以下同)を組み込んだ参考組立図を示す。また、荷重負荷ユニットに装荷するき裂進展試験用 CT 試験片の形状を図 5.3.7-2 に示す。荷重負荷ユニットの構成と概略動作原理を以下に示す。但しベローズ④の詳細については次項に詳述する。

- (a)ベースプレート②とアッパーアーム③に試験片ピン⑦で試験片を固定
- (b)ベースプレートとアッパーアームの間にベローズピン⑤を介してベローズ④を固定
- (c)ベローズの内外圧の差圧で生じさせた(収縮側)推力をアッパーアームに伝達
- (d)ベースプレートとアッパーアームは支点ピン⑥で固定されているので、この原理によりベローズ推力を増幅して 0.5T-CT 試験片に引張荷重を負荷
- (e)その他、絶縁材⑧、ピンカバー⑨、廻り止めピン⑩、ロッド⑪で構成

なお荷重負荷ユニットは、JMTR の照射キャプセル内で以下の条件にて供用することを念頭に詳細な設計検討を行った。

(ア)使用環境の条件

- ・ 雰囲気: 中性子照射下高温高圧水(軽水)
- ・ 最高使用圧力(水圧): 10 MPa
- ・ 最高使用温度(水温): 325°C
- ・ 通常使用温度(水温): 288°C
- ・ 最大流量: 400 kg/h
- ・ 最大高速中性子束(>1 MeV): 3×10^{16} n/m²/s

(イ)照射キャプセル(内径 44 mm^φ)に装荷する際、荷重負荷ユニットと照射キャプセル内壁との間に、MI ケーブル(1.6 mm^φ)12 本、ガス管(2 mm^φ)2 本、熱電対(1.6 mm^φ)5 本の計測線等が通せ、かつ出来るだけ干渉しないようスペース確保する。

(ロ)照射キャプセル内での使用に当たっては、試験片等の変形に伴う変位相当分も含め、内径 44 mm^φ以内に収める。

(ハ)構成部品の熱膨張や変形によって試験片へ試験負荷以外の力が加わらない。

(ニ)荷重負荷ユニットへのき裂進展試験片の取り付け及び取り外しは、すべてホットセル内においてマニピュレータを使った遠隔操作で行うことができる。

(ホ)荷重負荷ユニットのアッパーアーム、ベースプレートのたわみ低減(剛性確保)を図り、かつ照射キャプセル内に挿入可能な範囲で厚くする。

- (*)荷重負荷ユニット2体をロッドにより結合し、1つの照射キャプセル内に装荷する。
- (ク)試験片と荷重負荷ユニットを電氣的に絶縁するために、ジルコニウム合金を使った試験片ピンをカバーするリング(絶縁カラー)を用いる。

(3)ベローズの概要

荷重負荷ユニットのベローズは、照射下き裂進展試験用キャプセル内の高温高压水環境下(温度 288℃ 圧力 8~10 MPa)において試験片に荷重を負荷するための推力を発生する機能を有する。すなわちベローズ内部のガス圧を制御して高温高压水による圧力との差圧によってベローズを収縮させて推力としてアップパーアームとベースプレートによってテコ原理で増幅し、0.5T-CT 試験片を開口させる方向に荷重を負荷することが出来る。ベローズの構成(図 5.3.7-3)と概略動作原理を以下に示す。

- (a)ベローズ④はベースプレート②に保持され、ベローズピン⑤を介してアップパーアーム③に取付け
- (b)試験開始前は、試験片に荷重が負荷しないように、ベローズの自然長を保つよう雰囲気の圧力(昇圧)に合わせてベローズ内部のガス圧を制御
- (c)試験開始後は雰囲気の圧力は一定となるので、内部のガス圧を制御してベローズを収縮させ、き裂進展試験片に所望の引張荷重を付与
- (d)定荷重負荷モードでのき裂進展試験実施時はベローズ内部のガス圧を一定に保持し、変動荷重負荷モードではき裂進展試験片に負荷する引張荷重が周期的に変動するようにガス圧を制御

なおベローズの設計・製作の詳細検討に当たっては、以下の条件を考慮した。

(7)使用環境の条件(荷重負荷ユニット本体と同)

- ・雰囲気: 高温高压水(軽水)
- ・最高使用圧力(水圧): 10 MPa
- ・最高使用温度(水温): 325℃
- ・通常使用温度(水温): 288℃
- ・最大流量: 400 kg/h
- ・最大高速中性子束(>1 MeV): 3×10^{16} n/m²/s
- ・ベローズ内圧制御ガス: He ガス(非照射下では N₂または Ar ガスも可)
- ・き裂進展試験片への引張荷重:最大 7.6 kN

- (イ)ユニットの変位やベローズのストローク及び反力等を考慮の上、水圧(最大 10 MPa)との差圧で生じさせた(収縮側)ベローズ推力によって試験片部に最大荷重 7.6 kN が負荷できる。
- (ロ)ベローズが最も収縮するケースと伸張する場合を想定し、ベローズ機能喪失防止の安全対策(維持機能)を備える。
- (ハ)ベローズ内圧制御ガス導入管(外径 2 mm^φ以下 長さ 10 m 以上)を備える。

(4)荷重負荷ユニット及びベローズの製作

荷重負荷ユニットを合計 2 組製作すると共に、一部の部品については予備品を製作した。荷重負荷ユニット各部品の材質、員数を表 5.3.7-1 に示す。またテコ比 1:6(タイプ A)の荷重負荷ユニットの製作図面を図 5.3.7-4 に示す。個々の荷重負荷ユニットの識別のため、ベースプレート及びアッパーアーム外表面に刻印を施した。刻印は、AC1、AC2、とした。ここで、刻印の最初のアルファベットは、当該の荷重負荷ユニットが「タイプ A」であること、次のアルファベットの C は平成 26 年度製作品であることを示し、通し番号を付与した。なお中性子照射下で使用することを考慮し、照射中のクラッド発生の原因となる放電加工時のワイヤー屑を酸洗浄、電解研磨で除去した。今年度製作した荷重負荷ユニットの外観を図 5.3.7-5 に示す。

またベローズは、以下の仕様にて 3 体製作した。

- ・構造: ヘリウムガス加圧管付き溶接型ベローズ
- ・寸法: 外径 25 mm^φ
- ・ストローク: 約 5 mm

個々のベローズの識別のため、ベローズ外表面に刻印を施した。刻印は、平成 26 年度製作品を示す「C」に通し番号を付けて C1~C3 とした。今年度製作した荷重負荷ユニットの外観を図 5.3.7-6 に示す。

(5)照射下き裂進展ユニット用ベローズの購入

非照射条件下において照射下き裂進展用の荷重負荷ユニットと同等のものを使った高温水中き裂進展試験に用いるため、今年度製作したベローズ 2 体の他にベローズ C4 を購入した。また大気中におけるベローズ本体の力学特性評価試験用として、ベローズ内圧制御ガス導入管(加圧管)を付随していないベローズ C5 を購入した。なおベローズ C4 は製作した他のベローズと共に員数管理し、ベローズ C5 は員数管理の外数とする。購入したベローズの外観を図 5.3.7-7 に示す。

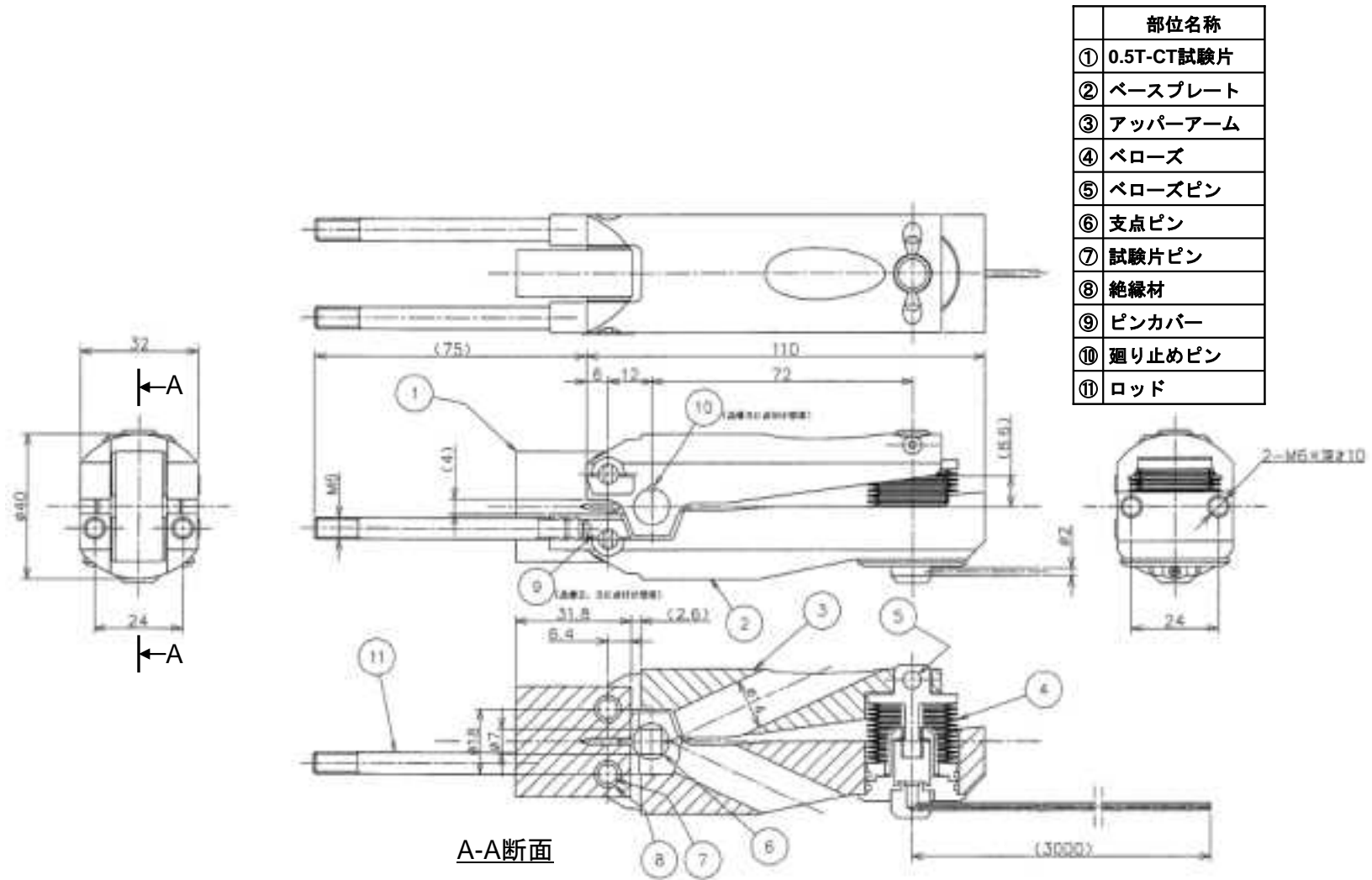
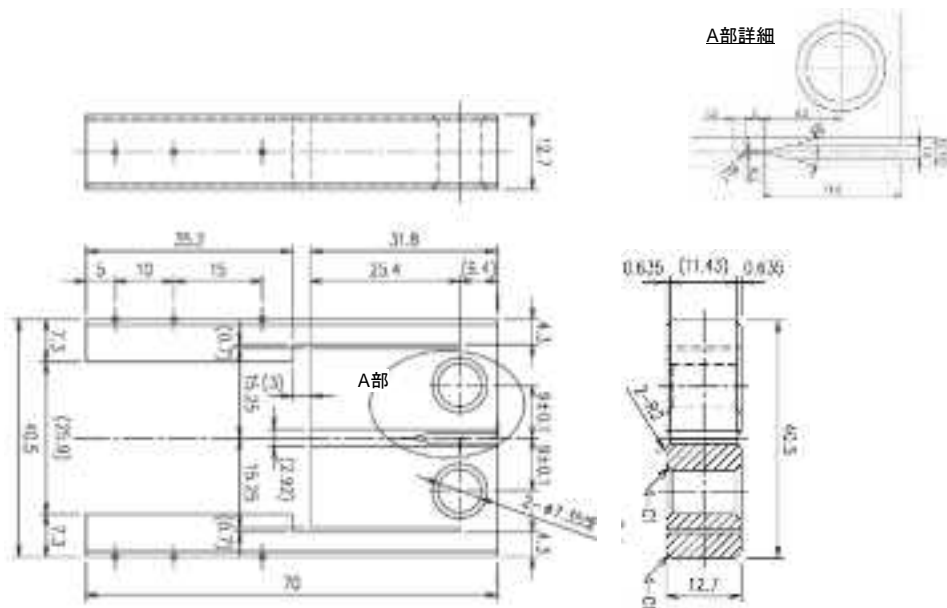
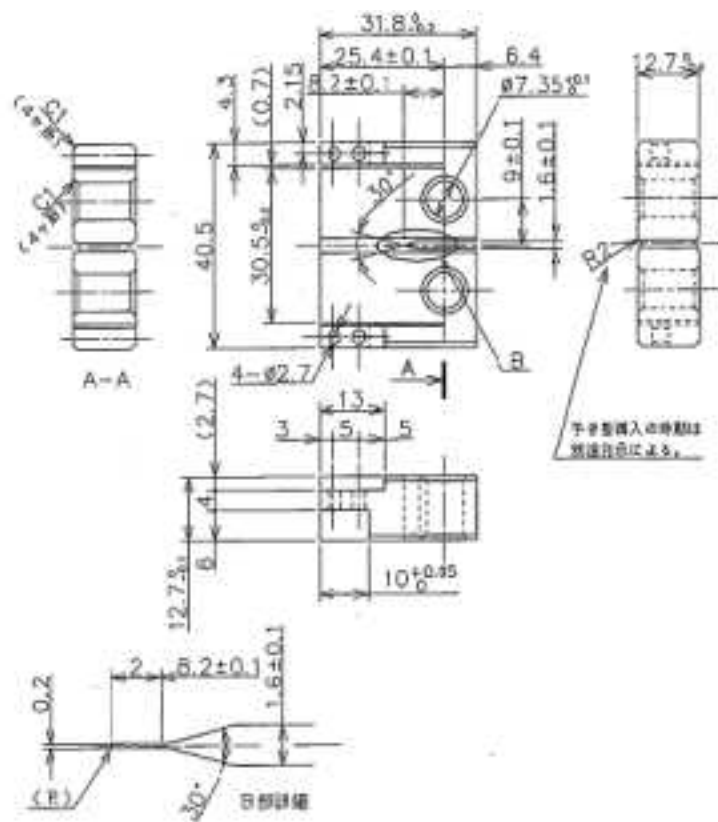


図 5.3.7-1 き裂進展試験用 0.5T-CT 試験片と照射下き裂進展試験機構(荷重負荷ユニットテコ比 1:6 を含む)の参考組立図(単位: mm)



(1) ウィンガー体型 0.5T-CT 試験片



(2) ウィング溶接型 0.5T-CT 試験片

図 5.3.7-2 き裂進展試験片の例(単位: mm)

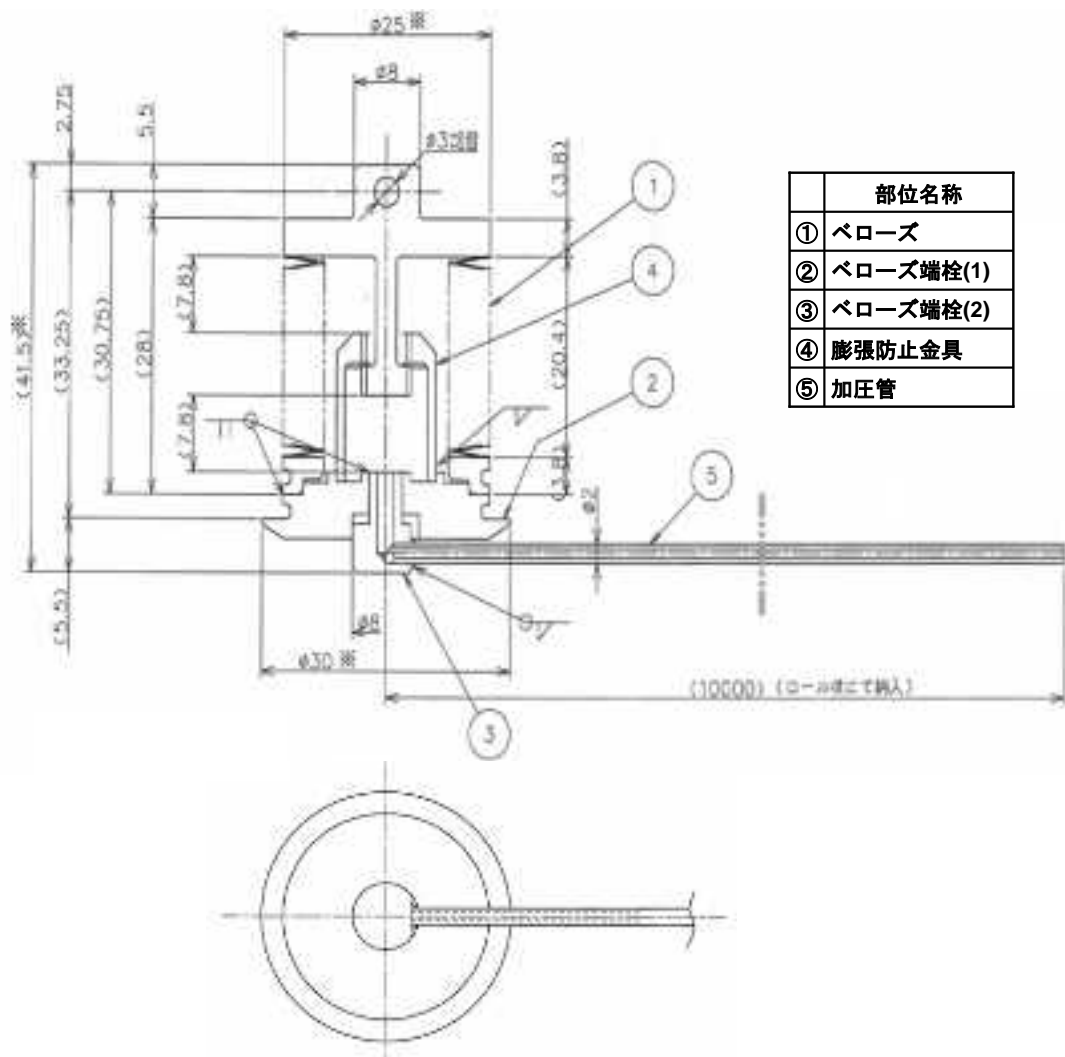


図 5.3.7-3 ベローズ参考図(単位: mm)

表 5.3.7-1 荷重負荷ユニットの部品内訳と製作員数

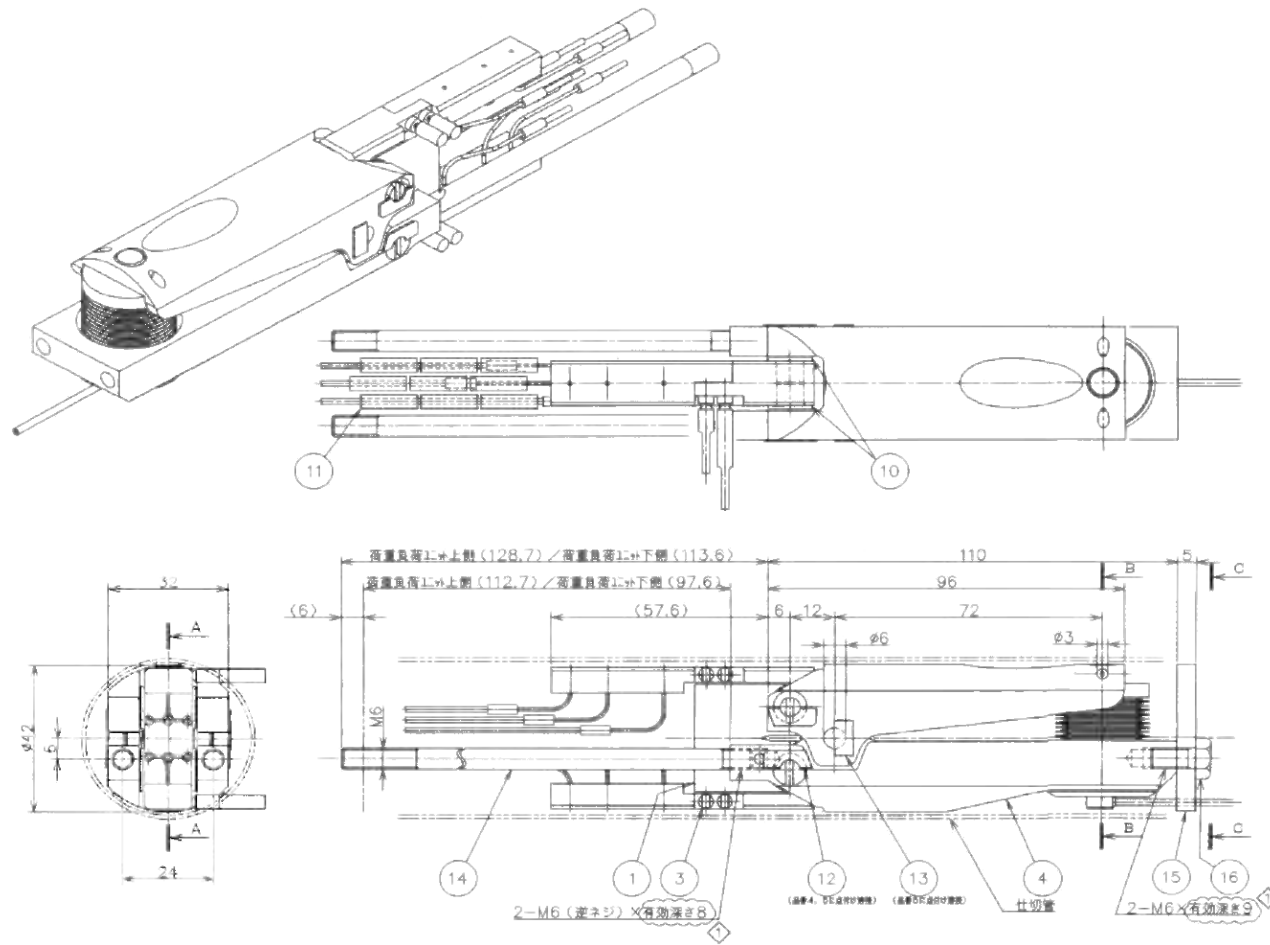
部品名 ※1)	材質	製作員数	予備品	合計
②MI ケーブル部組	SUS 等	12 組	なし	12 組
③ウィング固定ネジ	SUS304	8 個	なし	8 個
④ベースプレート	SUS630※2)	3 個	なし	3 個
⑤アッパーアーム	SUS630※2)	3 個	なし	3 個
⑥ベローズ部組	Inconel718 等	3 組	1 組 ※3)	4 組
⑦ベローズピン	SUS630※2)	3 本	1 本	4 本
⑧支点ピン	SUS630※2)	2 本	2 本	4 本
⑨試験片ピン	SUS630※2)	4 本	4 本	8 本
⑫試験片ピンカバー	SUS304	8 個	0 個	8 個
⑬支点ピンカバー	SUS304	4 個	4 個	8 個
⑭荷重負荷ユニット固定金具	SUS304	4 本 ※4)	なし	4 本
⑮MI ケーブル・熱電対固定金具	SUS304	1 個	なし	1 個
⑯固定ネジ	SUS304	2 個	なし	2 個

※1)番号は図 5.3.7-4 に準拠。なお①の 0.5T-CT 試験片と⑩の絶縁材は対象外。

※2)SUS630 を使用した各部品は、加工した後析出硬化熱処理(H900)を行った。

※3)ベローズの予備品は非照射試験専用として 1 組購入した。また大気中においてベローズの力学特性評価に用いるため、加圧管を伴わないベローズを購入し、外数で管理する。

※4)1 組は、ユニットをキャプセル下側に配置するための寸法のものを作成した。



(1)タイプ A(テコ比 1:6)

図 5.3.7-4 平成 26 年度に製作した荷重負荷ユニット

①	0.5T-CT試験片(ウイング付)	SUS
②	MIケーブル部組	SUS等
③	ウイング固定ネジ	SUS304
④	ベースプレート(タイプA)	SUS630
⑤	アッパーアーム(タイプA)	SUS630
⑥	ベローズ部組	Inconel 718等
⑦	ベローズピン	SUS630
⑧	支点ピン	SUS630
⑨	試験片ピン	SUS630
⑩	絶縁材	Zircaloy等
⑪	MIケーブル絶縁リング	PSZ
⑫	ピンカバー	SUS304
⑬	支点ピンカバー	SUS304
⑭	荷重負荷ユニット固定金具	SUS304
⑮	MIケーブル・熱電対固定金具	SUS304
⑯	固定ネジ	SUS304



(1)AC1



(2)AC2

図 5.3.7-5 平成 26 年度に製作した荷重負荷ユニットの外観
タイプ A(テコ比 1:6)



(1)C1



(2)C2



(3)C3

図 5.3.7-6 平成 26 年度に製作したベローズの外観



(1)C4

(2)C5(大気中評価用ベローズ)
(管理上 C5 は外数)

図 5.3.7-7 平成 26 年度に購入したベローズの外観

5.3.8 ガス圧制御装置の整備

5.3.8.1 概要

JMTR での照射下き裂進展試験では、照射キャプセル内の試験片に荷重を負荷するため、専用の荷重負荷機構（き裂進展試験ユニット（図 5.3.8-1））を使用する。このき裂進展試験ユニットは、高温高圧水中で荷重を負荷するために小型ベローズを有し、その内外差圧により発生する推力をテコの原理で増幅して試験片に負荷する。ほぼ一定に保たれる外部の水圧に対して、荷重を直接決定するのはベローズ内部に送り込むガス（窒素またはヘリウム）の圧力であり、これを制御するのが本装置の目的である。本装置の使用概念を図 5.3.8-2 に示す。

これまでに、炉外のオートクレーブで実施するき裂進展試験ユニットを用いた荷重測定及びき裂進展試験に使用するため、及び照射後試験において JMTR ホットラボセル内のオートクレーブでの試験に使用するために各 1 台のガス圧制御装置を整備してきた。本年度は、照射キャプセルを模擬した長尺のオートクレーブ（H23 年度に整備）を用いて、JMTR での照射下き裂進展試験と同様にき裂進展試験ユニットを 2 個連結して同時に試験ができるように、ガス圧制御装置を 1 台追加整備した。

5.3.8.2 ガス圧制御装置の設計・製作

照射下き裂進展試験では、試験荷重を精度良く負荷するとともに、試験目的に応じた様々な変動荷重を与えることが要求される。したがって、ガス圧制御装置には圧力の設定精度と変動荷重を与える制御性が同時に求められる。また、制御すべき対象は水圧とガス圧の差圧であることから、定常時においても変動し得る水圧への追従性が重要となる。き裂進展試験における、本装置でのガス圧制御パターン例を図 5.3.8-3 に示す。次の 3 種類の運転モードを有する必要がある。

- ① 水圧追従モード： オートクレーブ水圧に対して、指定した差圧（ $-0.2 \sim +0.2$ MPa）を保持しながらガス圧を制御する。常時投入可能。
- ② 定常荷重モード： 指定した差圧（ $-0.2 \sim +6.0$ MPa）に移行、保持する（移行後に保持時間カウント）。オートクレーブ昇圧時に投入可能とするが、変動荷重モード動作時は投入不可とする。
- ③ 変動荷重モード： 指定した最小差圧と最大差圧（＝定常荷重モード差圧）の間を、指定した昇降圧速度、保持時間で移行し、これを指定回数繰り返す。指定回数終了後、開始前の定常荷重モードに自動移行し、保持時間を零から再カウントする。定常荷重モード時にのみ投入可能。指定繰り返し数前にサイクルを停止（最大差圧保持終了を区切りとする）できる強制終了機能を持たせる。

ガス圧制御装置の基本設計仕様を以下に示す。

(1) 循環水の条件

- ・ 流体： 純水
- ・ 運転温度： 室温～300℃
- ・ 運転圧力： 昇降圧時： 0～10 MPa（オートクレーブ水圧）
定常時： 6～10 MPa（オートクレーブ水圧）
- ・ 昇降圧速度： 0.02 MPa/s 以下
- ・ 定常時脈動： ±0.01 MPa、2 Hz

(2) ガスの条件

- ・ 流体： 窒素
- ・ 運転温度： 10～40℃
- ・ 運転圧力： 0～10 MPa

(3) ガスの制御

1) 水圧追従時（水圧追従モード）

- ・ 設定圧力 循環水圧±0.2 MPa
- ・ 追従速度 昇降圧速度への追従を前提とし、脈動は無視して良い

2) 荷重負荷時（定常荷重、変動荷重モード）

- ・ 設定圧力 2～10 MPa の任意（循環水との最大差圧 6 MPa）
- ・ 圧力精度 設定値±0.4%を目標とし、圧力変動時のオーバーシュートを可能な限り低減すること
- ・ 圧力変動パターン 変動荷重の圧力変動幅、周波数、昇降圧速度は表 5.3.8-1 の条件を網羅（目標値）しながら、差圧、昇降圧速度、保持時間、繰返し数をすべて任意に設定できること。また、循環水の圧力変動（6～10 MPa）も考慮した設計、機器選定を行うこと。
- ・ 圧力変動繰返し数 20000 サイクルを目安としながら、これを超える場合でも運転操作に支障のないシステムとすること。ガスボンベは 2 本装備でき、運転を停止することなく交換できること。

3) 制御方法

- ・ ガスの消費量を極力抑えるため、昇圧時はガス流入側（入口弁）のみ、降圧時はガス排出側（出口弁）のみで制御を行い、入口弁・出口弁がいずれも開状態とならないようにすること。

4) 制御プログラム

- ・ 上記の運転モードに応じたプログラム操作及びマニュアル操作ができること。
- ・ 荷重負荷時において、定荷重を与えるため、次の値を設定できること。
 - 目標差圧の値、昇圧（降圧）速度

- ・ 荷重負荷時において、変動荷重を与えるため、次の値を設定できること。
 - 最大（最小）差圧の値、保持時間
 - 昇圧（降圧）速度、昇降圧繰返し数
- ・ 各設定値は、任意の値が設定できること。なお、差圧には正負の値を設定できること。

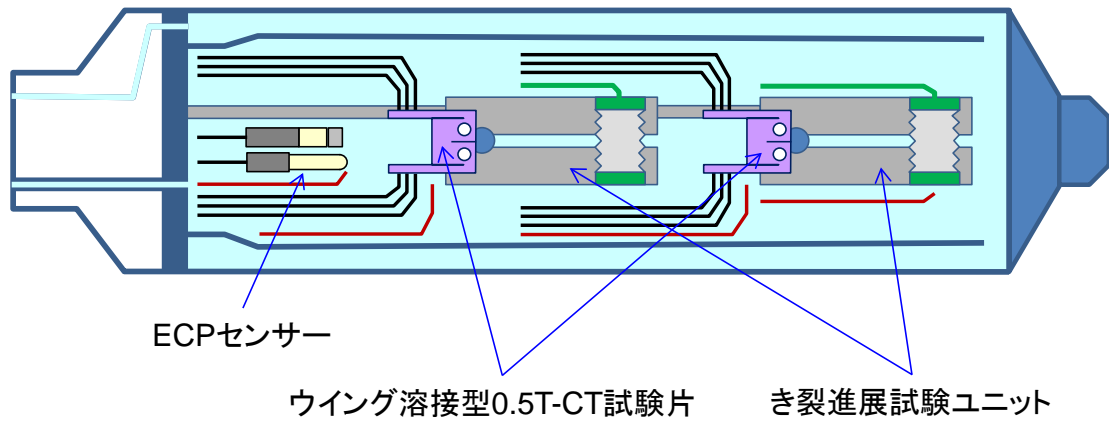
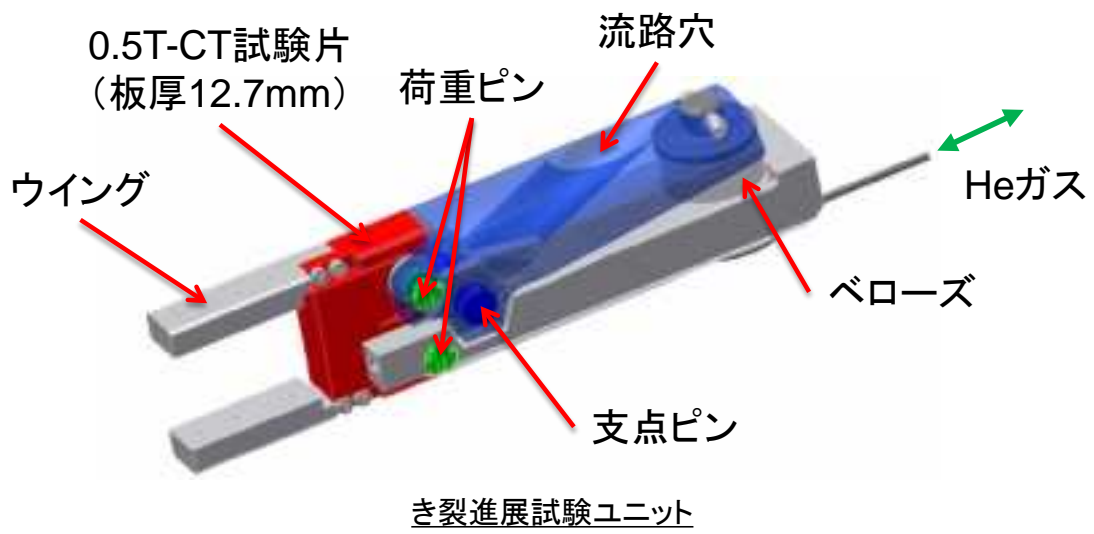
(4) 取り合い、その他

- ・ ベローズガス配管末端を取り合い点とし、取り合い点から接続配管、ガス制御ユニット（ポンベは含まない）、制御盤までを製作範囲とする。
- ・ ベローズのガス容積は、配管部分を含め 20 cc として計算すること。
- ・ 本装置は任意の試験場所に持ち込んで使用するため、移動設備（高圧ガス設備）として設計・製作を行うこと。
- ・ 可搬性を考慮して、ガスユニット、制御盤を含めできる限り小型化すること。

図 5.3.8-4 に製作したガス圧制御装置のフロー図、図 5.3.8-5 に製作図、図 5.3.8-6 に装置の外観写真を示す。また、動作確認試験においては、JMTR での照射下き裂進展試験で用いるガス配管及びベローズとの接続を模擬した状態で装置の運転を行い、ベローズ相当部分のガス圧をモニターしながら、き裂進展試験で想定しているガス圧制御パターン（表 5.3.8-1、図 5.3.8-3 参照）が実現できることを確認した。図 5.3.8-7 に動作確認試験結果の例を示す。

表 5.3.8-1 目標荷重負荷条件と圧力変動幅及び昇降圧速度（循環水圧力を 9 MPa 一定とした場合）

ケース	目標K値	荷重			差圧		水圧	ガス圧力			周波数	昇降圧速度
		最大	応力比	最小	最小	最大		最大	最小	変動幅		
	MPa・m ^{1/2}	N	—	N	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	Hz	kPa/s
1	10	2300	0.7	1610	0.86	1.23	9	8.14	7.77	0.37	0.0005	0.370
2											0.005	3.697
3											0.05	36.974
4			0.5	1150	0.62	8.38		0.62	0.0005	0.616		
5									0.005	6.162		
6									0.05	61.624		
7	30	7000	0.7	4900	2.63	3.75	9	6.37	5.25	1.13	0.0005	1.125
8											0.005	11.253
9											0.05	112.531
10			0.5	3500	1.88	7.12		1.88	0.0005	1.876		
11									0.005	18.755		
12									0.05	187.552		



照射下き裂進展試験キャプセル内配置図

図 5.3.8-1 き裂進展試験ユニットの構造概念

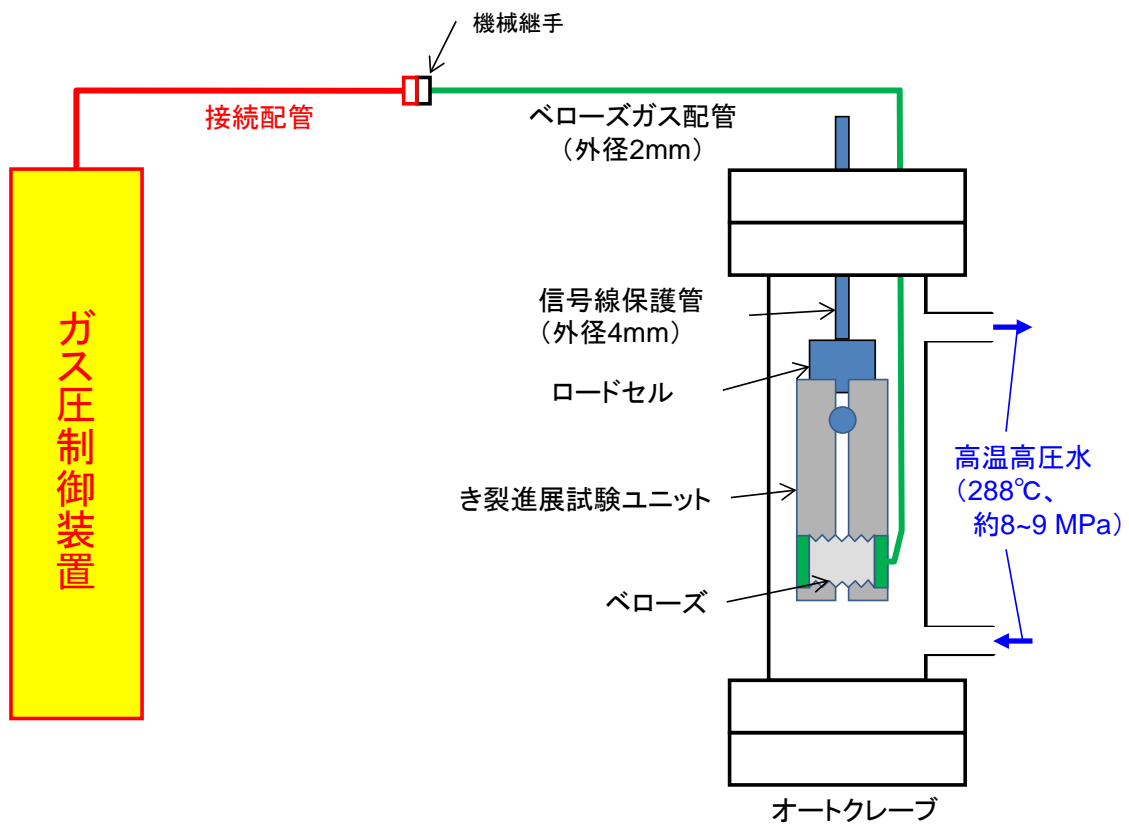


図 5.3.8-2 ガス圧制御装置の使用概念図

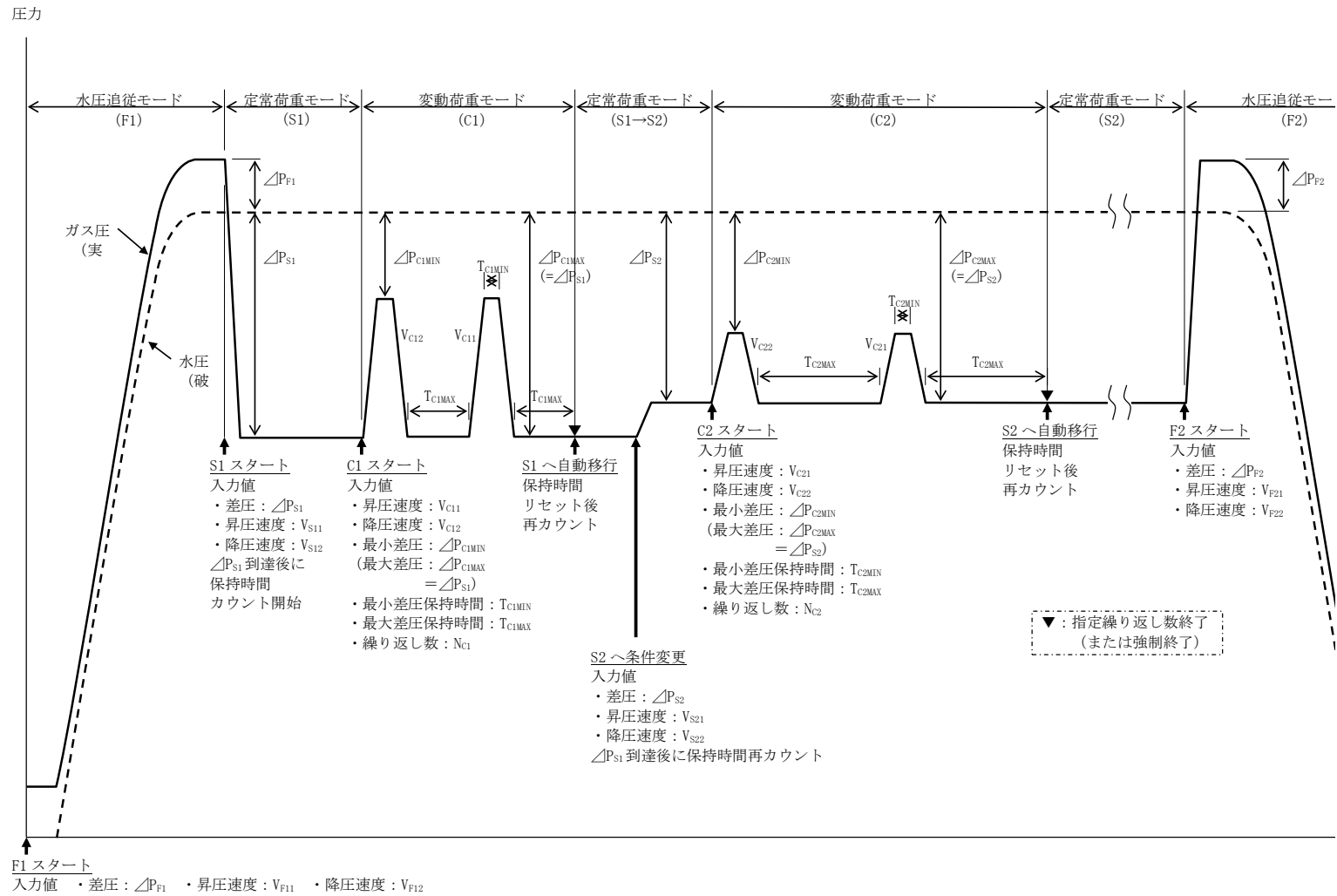


図 5.3.8-3 ガス圧制御装置の運転パターン例

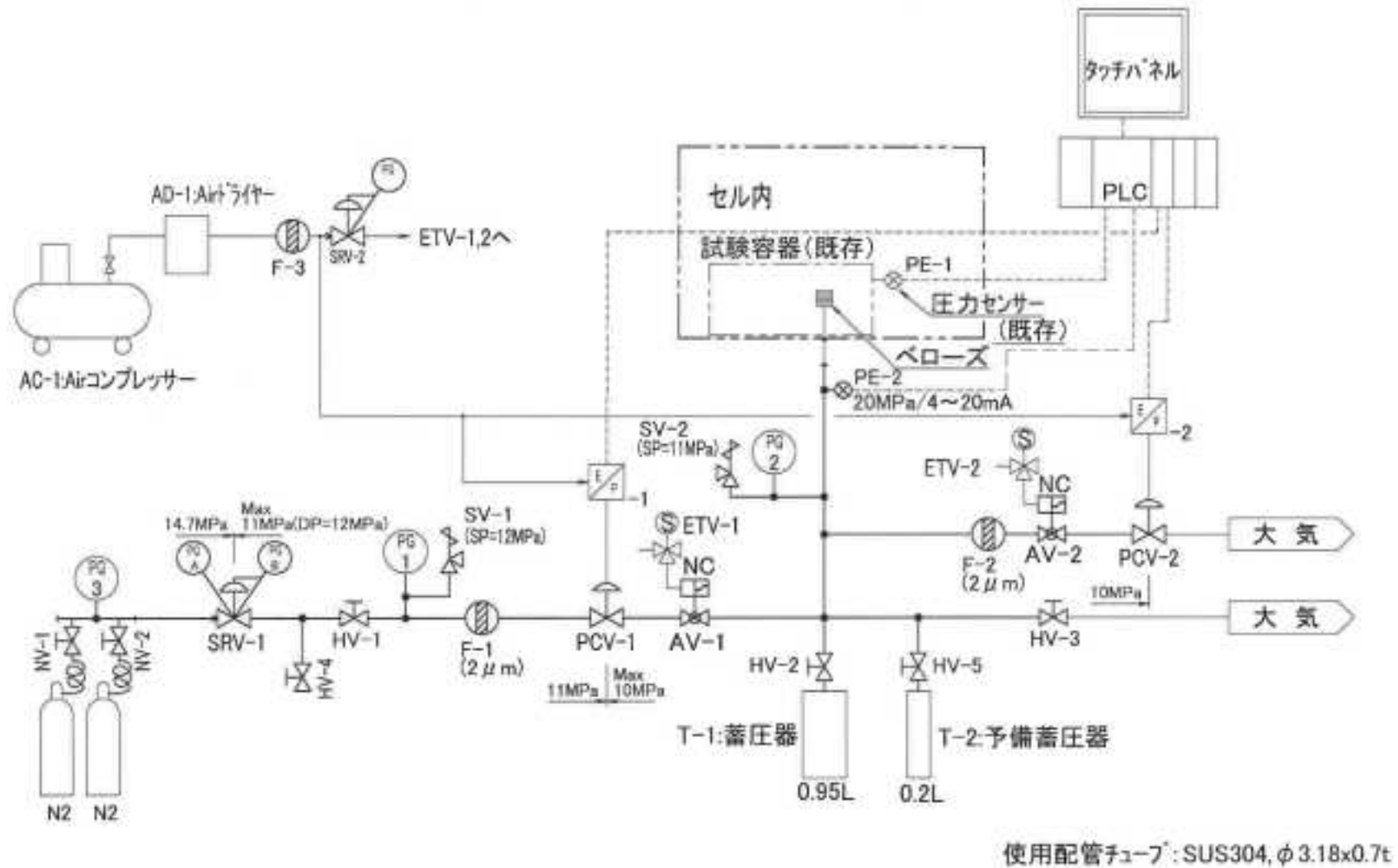


図 5.3.8-4 ガス圧制御装置のフロー図

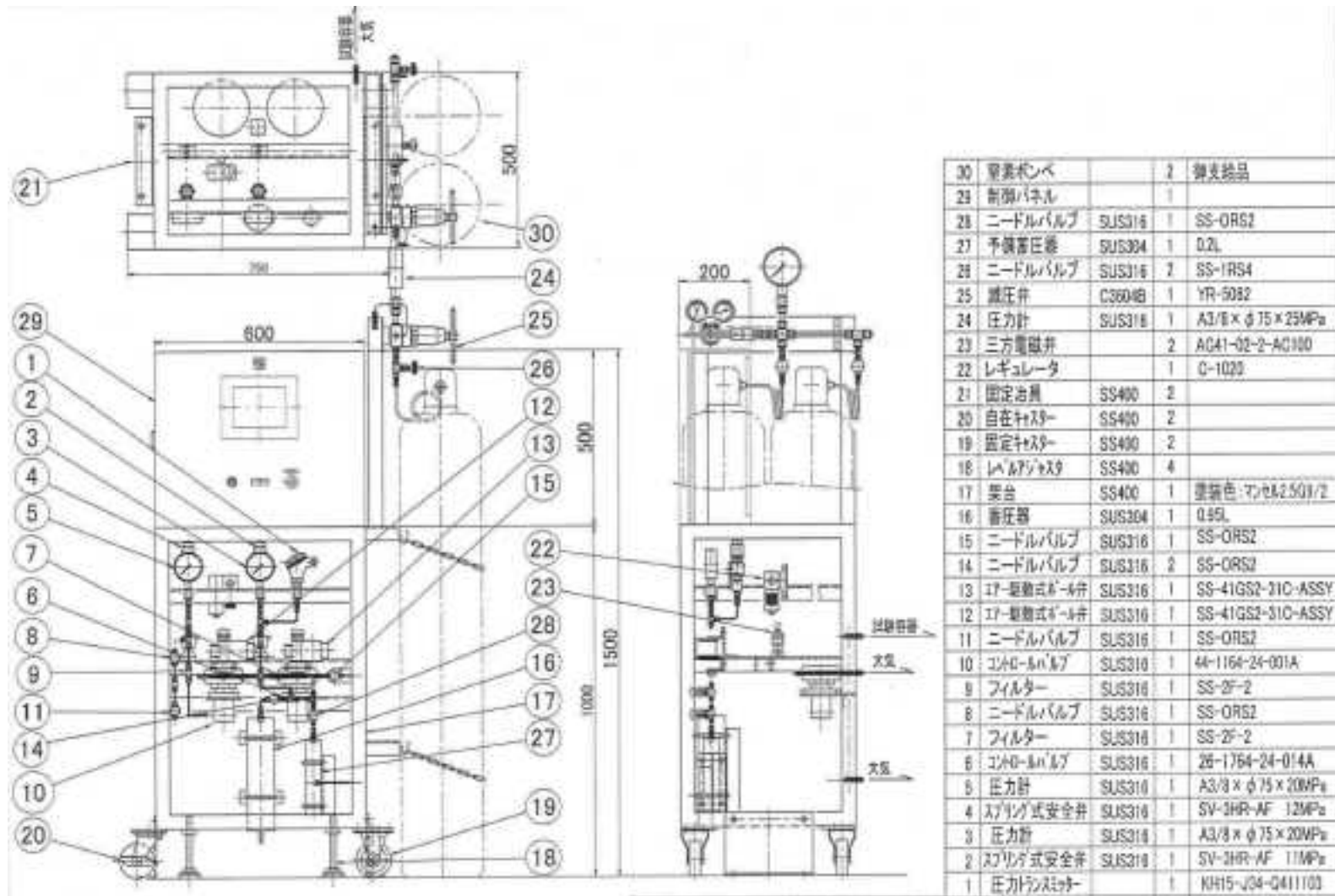
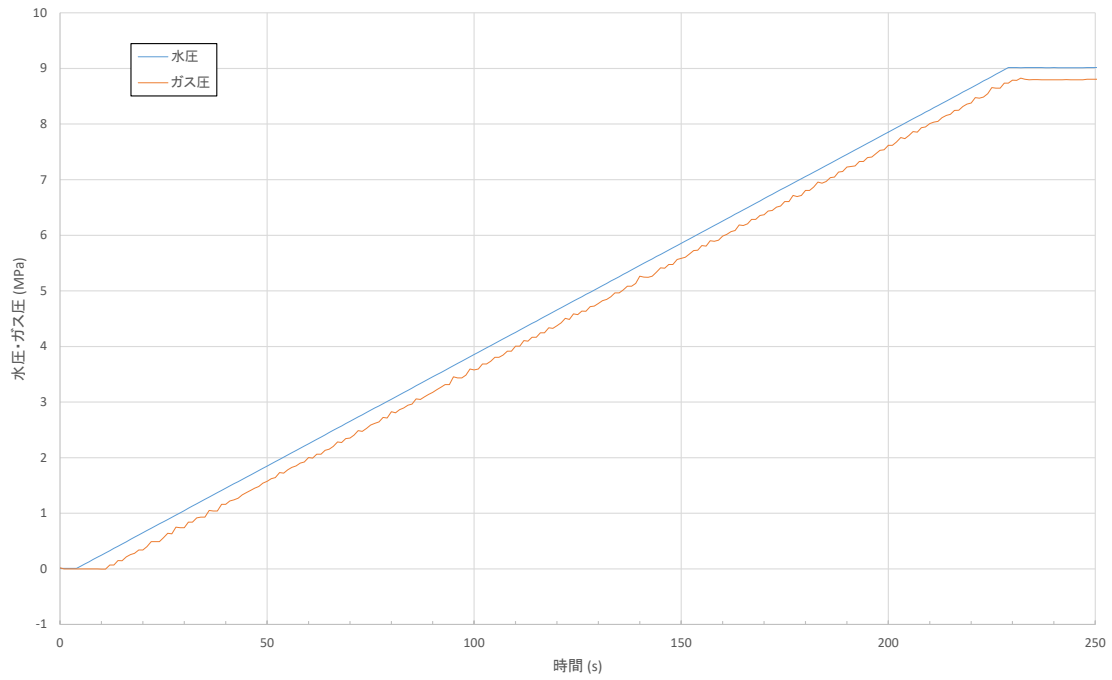


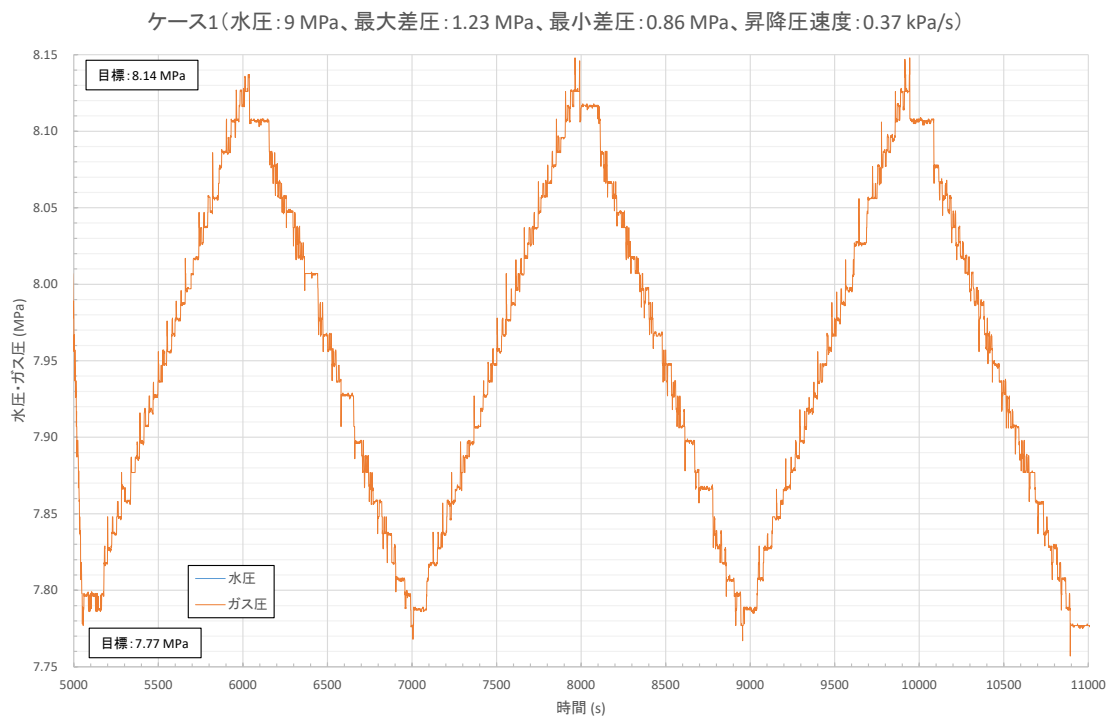
図 5.3.8-5 ガス圧制御装置の製作図



図 5.3.8-6 ガス圧制御装置の外観写真



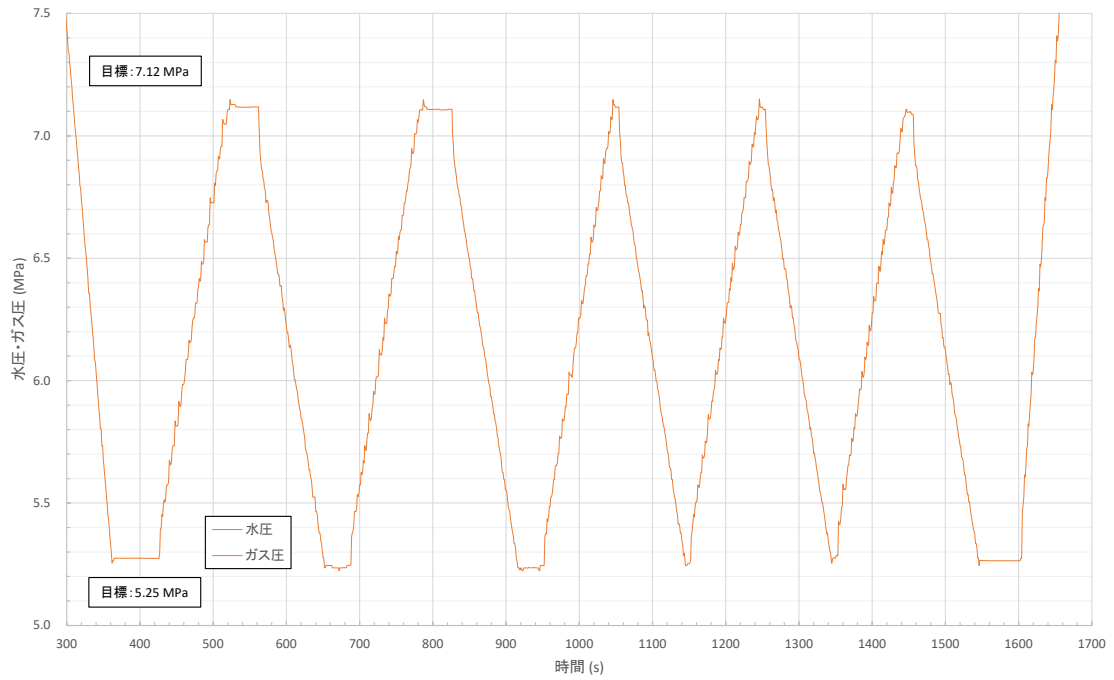
(1) 水圧追従モード (水圧昇圧時、差圧 : +0.2 MPa)



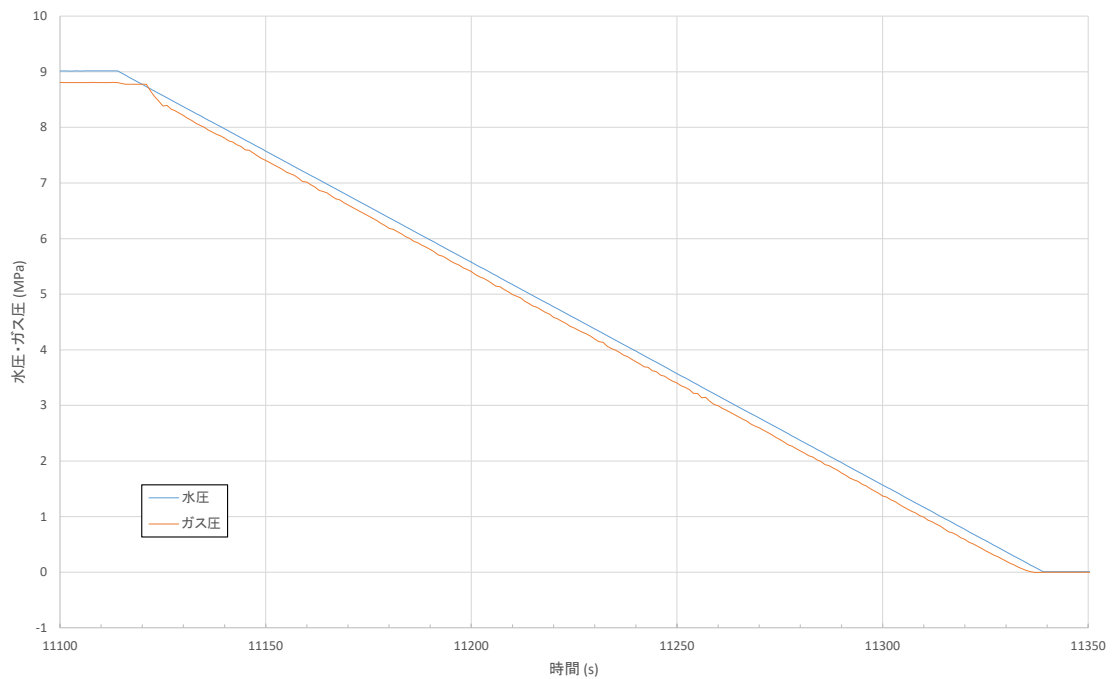
(2) 変動荷重モード (表 5.4.8-1 のケース 1)

図 5.3.8-7 動作確認試験結果の例 (1/2)

ケース11(水圧:9 MPa、最大差圧:3.75 MPa、最小差圧:1.88 MPa、昇降圧速度:18.7 kPa/s)



(3) 変動荷重モード (表 5.4.8-1 のケース 11)



(4) 水圧追従モード (水圧降圧時、差圧: +0.2 MPa)

図 5.3.8-7 動作確認試験結果の例 (2/2)

5.3.9 材料照射試験装置を用いた荷重制御性の改良

5.3.9.1 荷重制御装置の概要

荷重制御装置は、水環境調整設備を用いて炉内で実施される照射環境下における IASCC 試験のうち、CT 試験片に荷重負荷を与え、き裂進展試験を行うための装置である。材料照射試験装置全体の概略図を図 5.3.9-1 に示す。

本装置は、キャプセル内の高圧水中に装荷されるき裂進展試験ユニットの荷重発生機構（ベローズ）に対し、ヘリウムボンベから供給する荷重制御ガスを給気または排気することにより、ベローズ内の圧力を調整し、キャプセル内の供給水圧力との差を利用して、試験片へ荷重を負荷させるための装置である。

本装置は、①「ガス供給部」、②「圧力制御装置部」、③「圧力制御部」、④「漏えい検出ユニット」から構成される。①ガス供給部は、ヘリウムガスボンベ、減圧弁、配管等から構成され、「圧力制御装置部」の給気側に接続されている。②圧力制御装置部は、荷重制御ガス圧の時間応答を調整するためのキャピラリチューブ（以下、「遅延配管」という）、荷重制御ガスの供給・排気を自動的に行うための電磁弁、ガス圧力制御用の圧力伝送器等から構成される。キャプセル内のき裂進展試験ユニットのベローズ内の圧力制御を精度良く行うために、内径及び長さの異なる遅延配管を組み合わせることで、給気速度・排気速度の微調整を行う。③圧力制御部は、水環境調整設備からの供給水の圧力信号、主ポンプの起動・停止などの運転状態、装置故障等の異常信号等を取り込み、水環境調整設備と連動して、「圧力制御装置部」の電磁弁の開閉操作を自動的に行い、キャプセル内のき裂進展試験ユニットのベローズ内の圧力制御を行う。④漏えい検出ユニットは、キャプセル内部のベローズ加圧管の破断等が発生すると、高温高圧水が浸入する。この漏えいした水または圧力上昇を検知し、キャプセルと荷重制御装置を遮断し漏えい水を隔離する。装置の詳細図を図 5.3.9-2 に示す。

5.3.9.2 改良の目的

き裂進展試験の実施においては、正確な荷重負荷を試験片に与えることが信頼性の高い試験データを取得することとなるため、安定した精度の良い荷重制御が不可欠であるとともに、当該試験で予定している荷重変動速度（圧力移行速度）を実現する必要がある。

本改良は、平成 25 年度に実施した試験運転時の結果を踏まえて、目標としている精度・安定性・圧力移行速度を実現するために実施した。

5.3.9.3 主な改良点

圧力移行速度を任意に設定できるようにするための改良点を次に示す。

5.3.9.3-1 遅延配管の改良

遅延配管の改良は、要求される圧力移行速度を達成するために、給気、排気それぞれの遅延配管を 1 本増設するとともに、既設遅延配管の長さ調整、新規に遅延配管を製作する等の対応を図り、圧力移行速度を再設定した。改良前後のフローシートを図 5.3.9-3 に、改良前後の遅延配管のサイズ等の仕様と圧力移行速度測定結果を表 5.3.9-1 に示す。

5.3.9.3-2 圧力伝送器の更新

圧力伝送器の更新は、制御ガス圧力に使用している圧力伝送器をより精度の高いものに更新するとともに、制御ガス圧力指示回路を見直し、実験データをより詳細にするとともに、圧力移行速度制御の高度化を図った。制御ガス圧力用伝送器の取付け箇所を図 5.3.9-3 に、更新前後の比較データを図 5.3.9-4 に示す。

5.3.9.3-3 微小流量調節用弁（手動弁）の追加

微小流量調節用弁は、遅延配管等の構造で決定する移行速度を微調整するために使用するもので、遅延配管の一次側に追加した。図 5.3.9-3 に本調節用弁の取付け位置を示す。

5.3.9.3-4 電磁弁の移設

荷重制御装置の排気ラインは、JMTR の排気系に接続されている。排気ラインに使用する電磁弁の移設前は、遅延配管を含む電磁弁の手前まで負圧状態となっていた。このため、電磁弁が開になると遅延配管が貯留タンクの役割を果たし、圧力が急降下していた。荷重負荷試験においては、この急降下が問題となるため、排気側の全ての電磁弁を遅延配管の前に移設して、この問題に対処した。移設前後の電磁弁位置を図 5.3.9-3 に、移設前後の比較データを図 5.3.9-5 に示す。

5.3.9.3-5 電動微小流量調整弁の追加

電動微小流量調整弁は、専用のコントローラ（0-100%、分解能 0.1%）にて動作し、PID 制御を用いて段差のない理想的な圧力移行速度制御を実現するものである。今回の改良作業では、1 系統について（給気用・排気用 1 台ずつ）追加した。

標記弁の制御方法は、減圧時、給気用の弁開度を強制的に閉とし、排気用の弁で PID 制御を行う。また、加圧時は排気用の弁開度を強制的に閉とし、給気用の弁で PID 制御を行う。この弁は、荷重印加モードにおいて使用する。追加位置を図 5.3.9-3 に、この弁を使用した荷重印加（サイクル）試験データを図 5.3.9-6 に示す。

5.3.9.3-6 漏えい検出ユニット警報発報回路の追加

漏えい検出ユニットは、キャプセル内部のベローズ加圧管の破断等が発生すると、

高温高压水が浸入する。この漏えいした水または圧力上昇を検知し、キャプセルと荷重制御装置を遮断し漏えい水を隔離するための装置である。異常が発生した際、漏えい検出ユニット現場盤に警報の表示・ブザー発報するとともに、荷重制御装置の警報表示灯が点灯する。しかし、現場盤からのブザーが聞き取りにくいとため、荷重制御装置のブザーを使用し、警報表示と連動して、ブザーを発報するように改良した。

5.3.9.3-7 圧力制御部シーケンサ制御プログラムの改修

標記制御プログラムは主に、①「昇降圧」モード、②「水圧一定」モード、③「変動荷重」モード、④「荷重印加」モード等から構成されている。従来の動作は、次のとおりである。①「昇降圧」モードは、水環境調整設備の過渡時（起動・停止時の昇降圧等）に使用するもので、設定値（昇降時差圧）を維持するため、全ての給気弁（SV-11,12,13）と全ての排気弁（SV-15,16,17）を使用して瞬時に、正確に制御する。②「水圧一定」モードは、試験開始前後に選択するモードで、水環境調整設備の脈動（緩やかな圧力変動）に合わせてSV-11（給気弁）とSV-15（排気弁）のみを使用して制御ガスの消費を抑えた制御を行う。③「変動荷重」モードは、荷重印加試験を実施する前に選択するモードで、SV-15（排気弁）のみを使用し緩やかに設定値（最大負荷時差圧）に向かって移行し制御する。④「荷重印加」モードは、最大負荷時差圧と最小負荷時差圧の繰り返し試験を実施するモードで、全ての給気弁（SV-11,12,13）と全ての排気弁（SV-15,16,17）を使用して変動制御を行う。

平成 25 年度に実施した試験運転を踏まえ、動作精度の更なる向上を図るため、②「水圧一定」モードと③「変動荷重」モード及び④「荷重印加」モードにおいては、圧力移行速度（変化率）の任意設定機能を導入し、全ての制御プログラムの改修を実施した。改修内容の詳細を次に示す。また、操作画面を図 5.3.9-7 に示す。

(1) 圧力移行速度選択機能の追加

「水圧一定」モードと「変動荷重」モード及び「荷重印加」モードにおいて、成り行き（遅延配管の太さ・長さ）で制御していた圧力移行速度制御に加え、制御プログラムを構築して変化率をリアルタイムで求めて電磁弁の開閉動作を制御し、階段状ではあるが、任意の圧力移行速度で制御できる機能を追加した。

また、動作弁を明確にするため圧力移行速度は、①「12MPa/min」制御（給気側：SV12+SV13、排気側：SV16+SV17の組合せ）、②「8MPa/min」制御（給気側：SV13、排気側：SV17）、③「4MPa/min」制御（給気側：SV12、排気側：SV16）、④「2⇔0.1MPa/min(三方弁にて切換え)」制御（給気側：SV11、排気側：SV15）の4段階とし、圧力移行速度（使用する遅延配管＝電磁弁）が選択できるようになった。

(2) 昇降圧モードの改良

改良前の昇降圧モードでは、昇降時差圧設定制御幅は、0.15～0.3MPa と限られていた。荷重を印加した状態で水圧の昇降圧が実施できるように制御幅を見直し-0.5MPa～0.5MPa へ拡大した。

(3) 水圧一定モードの改良

改良前の水圧一定モードは、変動荷重モードの前段階の状態、定常後（昇圧後）昇降圧モードから切り替えて使用していた。これを改め、どのモードからでも水圧一定モードに移行できるように改良した。

また、キャプセル圧力の過渡時（昇降圧時）及び異常時にも偏差によって開閉する電磁弁を制御し、試験片に急激な差圧を生じさせないように改良した。

(4) 変動荷重モードの改良

改良前の変動荷重モードは、水圧一定モードから切り替えて使用していた。これを改め、どのモードからでも変動荷重モードに移行できるように改良した。

また、改良前の変動荷重モードは、最大負荷時差圧まで制御ガス圧力を排気（減圧）するだけの機能であった。これを改め、現在値と設定値を比較し、給気・減圧動作どちらにも対応できるように改良した。

(5) 荷重印加モードの改良

改良前の荷重印加モード（荷重印加サイクル試験）は、最大・最小負荷時差圧到達時の保持時間のカウント開始のタイミングに問題があり、設定した保持時間を超過することが頻発していた。このため、制御偏差等を見直し、到達後速やかに保持時間のカウントを開始し設定した保持時間を順守するように改良した。

また、本改良では、荷重印加サイクルを制御するため、サイクル数を 9999 回まで設定できるように、機能を追加した。

(6) 荷重保持モードの改良

改良前の荷重保持モードは、荷重印加モード時に限られていた。これを改め、昇降圧モード以外のどのモードからでも荷重保持モードに移行できるように改良した。

圧力移行中においては、全ての電磁弁を閉とし、その圧力を保持（成り行き）するように改良した。また、荷重保持モード時は、条件により最大・最小負荷時差圧、保持時間及び圧力の移行速度が変更でき、保持前モードの続きから再開（復帰）できるように改良した（＝一時停止モード）。

(7) エラーチェック機能の追加

エラーチェック機能は、入力操作を実施する全てのモードについて、試験条件を逸脱した入力・操作時にはエラーメッセージを表示し注意喚起を促し誤入力・誤操作を防止する機能を追加した。また、各モードに移行する場合は、釦押下後、タッチパネルに、選択されたモードに移行する旨を表示しオペレータに確認を促したのち、「OK」押下後、ランプを点灯し選択されたモードを開始するように改良した。なお、「キャンセル」が押下された場合は、動作を中止するようにした。

5.3.9.4 性能試験

上記改良を実施した後、試験チャートに沿って性能試験 1 から性能試験 14 を実施した。試験チャートを図 5.3.9-8 に示す。

5.3.9.4-1 性能試験 1

性能試験 1 は、キャプセル水圧の上昇とともに「昇降圧モード」で昇圧（昇降時差圧：0.2MPa）し、昇圧終了後「水圧一定モード」に切り替えて水圧一定とした。一連の動作に問題のないことを確認した。性能試験結果を図 5.3.9-9 に示す。

5.3.9.4-2 性能試験 2 から性能試験 11

性能試験 2 から性能試験 11 は、荷重印加試験で、「変動荷重モード」（最大負荷時差圧：2.0MPa）から、「荷重印加モード」を選択し、次の条件で最小負荷（差圧：0.5MPa）⇔最大負荷（差圧：2.0MPa）のサイクル試験を実施した。一連の動作に問題のないことを確認した。性能試験結果をそれぞれ図 5.3.9-10 から図 5.3.9-19 に示す。

(1) 性能試験 2

- ・電磁弁制御（圧力移行速度 12MPa/min 選択、自動制御 8.0MPa/min 設定）
- ・最小/最大負荷保持時間：30 秒、荷重印加サイクル数：4 回

(2) 性能試験 3

- ・電磁弁制御（圧力移行速度 8MPa/min 選択、自動制御 4.0MPa/min 設定）
- ・最小/最大負荷保持時間：30 秒、荷重印加サイクル数：4 回

(3) 性能試験 4

- ・電磁弁制御（圧力移行速度 4MPa/min 選択、自動制御 2.0MPa/min 設定）
- ・最小/最大負荷保持時間：30 秒、荷重印加サイクル数：4 回

(4) 性能試験 5

- ・電磁弁制御（圧力移行速度 2MPa/min 選択、自動制御 1.0MPa/min 設定）
- ・最小/最大負荷保持時間：30 秒、荷重印加サイクル数：4 回

(5) 性能試験 6

- ・電磁弁制御（圧力移行速度 0.1MPa/min 選択、自動制御 0.1MPa/min 設定）
- ・最小/最大負荷保持時間：10 秒、荷重印加サイクル数：2 回

(6) 性能試験 7

- ・電磁弁制御（圧力移行速度 12MPa/min 選択、手動制御）
- ・最小/最大負荷保持時間：30 秒、荷重印加サイクル数：4 回

(7) 性能試験 8

- ・電磁弁制御（圧力移行速度 8MPa/min 選択、手動制御）
- ・最小/最大負荷保持時間：30 秒、荷重印加サイクル数：4 回

(8) 性能試験 9

- ・電磁弁制御（圧力移行速度 4MPa/min 選択、手動制御）
- ・最小/最大負荷保持時間：30 秒、荷重印加サイクル数：4 回

(9) 性能試験 10

- ・電磁弁制御（圧力移行速度 2MPa/min 選択、手動制御）
- ・最小/最大負荷保持時間：30 秒、荷重印加サイクル数：4 回

(10) 性能試験 11

- ・電磁弁制御（圧力移行速度 0.1MPa/min 選択、手動制御）
- ・最小/最大負荷保持時間：10 秒、荷重印加サイクル数：2 回

5.3.9.4-3 性能試験 12、13

性能試験 12、13 は、「変動荷重モード」を使用して、最大負荷時差圧を変更し（初期値：2MPa）階段試験を次の条件で実施した。一連の動作に問題のないことを確認した。性能試験結果をそれぞれ図 5.3.9-20、図 5.3.9-21 に示す。

(1) 性能試験 12（自動制御）

① 最大負荷時差圧：3.0MPa

電磁弁制御（圧力移行速度 4MPa/min 選択、自動制御 2.0MPa/min 設定）

② 最大負荷時差圧：3.5MPa

電磁弁制御（圧力移行速度 4MPa/min 選択、自動制御 2.0MPa/min 設定）

③ 最大負荷時差圧：4.0MPa

電磁弁制御（圧力移行速度 4MPa/min 選択、自動制御 2.0MPa/min 設定）

④ 最大負荷時差圧：3.5MPa

電磁弁制御（圧力移行速度 4MPa/min 選択、自動制御 2.0MPa/min 設定）

⑤ 最大負荷時差圧：2.0MPa

電磁弁制御（圧力移行速度 12MPa/min 選択、自動制御 8.0MPa/min 設定）

⑥ 最大負荷時差圧：1.0MPa

電磁弁制御（圧力移行速度 8MPa/min 選択、自動制御 4.0MPa/min 設定）

⑦ 最大負荷時差圧：0.0MPa

電磁弁制御（圧力移行速度 8MPa/min 選択、自動制御 4.0MPa/min 設定）

(2) 性能試験 13（手動制御）

① 最大負荷時差圧：3.0MPa

電磁弁制御（圧力移行速度 4MPa/min 選択、手動制御）

② 最大負荷時差圧：3.5MPa

電磁弁制御（圧力移行速度 4MPa/min 選択、手動制御）

③ 最大負荷時差圧：4.0MPa

電磁弁制御（圧力移行速度 4MPa/min 選択、手動制御）

④ 最大負荷時差圧：3.5MPa

電磁弁制御（圧力移行速度 4MPa/min 選択、手動制御）

⑤ 最大負荷時差圧：2.0MPa

電磁弁制御（圧力移行速度 12MPa/min 選択、手動制御）

⑥ 最大負荷時差圧：1.0MPa

電磁弁制御（圧力移行速度 8MPa/min 選択、手動制御）

⑦ 最大負荷時差圧：0.1MPa

電磁弁制御（圧力移行速度 8MPa/min 選択、手動制御）

5.3.9.4-3 性能試験 14

性能試験 14 は、「水圧一定モード」を使用して、キャプセル水圧の下降とともに、制御ガス圧力を制御した。一連の動作に問題のないことを確認した。性能試験結果を図 5.3.9-22 に示す。

5.3.9.5 まとめ

制御ガス圧力に使用している圧力伝送器を更新したことで、 $\pm 0.16\text{MPa}$ (F・S) の誤差が $\pm 0.05\text{MPa}$ (F・S) 程度に向上した。また、制御ガス圧力指示回路を見直したことで、 0.03MPa の分解能が 0.002MPa に、図 5.3.9-4 のとおり制御精度が大幅に向上した。

微小流量調節弁（手動弁）を追加したことで、バルブが抵抗となり、表 5.3.9-1 のとおり、SV-17 の圧力移行速度が大幅に改善した。このバルブの設置により、他の系統の圧力移行速度の微調整も可能となり、目標とする圧力移行速度が実現可能となった。

電磁弁を移設したことで、図 5.3.9-5 のとおり急激な圧力降下が無くなった。

電動微小流量調整弁を用いた PID 制御は、今回の試験結果（図 5.3.9-6）において、動作に異常のないことが確認できた。ただし、パラメータのチューニング不足により目的の圧力移行速度が実現できなかった。今後、パラメータのチューニングを実施し目的の移行速度実現に向けて調整する。

従来の昇降圧モードでは、+側の差圧 ($0.15\text{MPa}\sim 0.3\text{MPa}$: 荷重を除荷した状態) のみを任意に設定して制御していた。圧力制御部シーケンサ制御プログラムを改修し、性能試験 1 のとおり、-側の差圧 (荷重を印加した状態) を含めた差圧範囲 ($0.5\text{MPa}\sim -0.5\text{MPa}$) でも制御が可能となった。

従来の水圧一定モード、変動荷重モード、荷重印加モードでは、遅延配管の特性で圧力移行速度が決定していた。これに加え今回の改良では、圧力制御部シーケンサ制御プログラムを改修し、性能試験 2~6 のとおり、電磁弁の開閉動作を制御し任意の圧力移行速度 (約 $12\text{MPa}/\text{min}\sim 0.1\text{MPa}/\text{min}$ 程度) で圧力制御が可能となった。

従来の荷重印加モードでは、給気用と排気用の遅延配管の特性が異なっていたため、昇圧時及び降圧時において同程度の圧力移行速度で制御することが出来なかった。遅延配管の改良を実施した結果、性能試験 7~11 のとおり、同程度の圧力移行速度での制御が可能となった。

新規キャプセルの荷重印加試験前の特性測定を実施することを想定し、圧力制御部シーケンサ制御プログラムを改修し、性能試験 12~13 のとおり、手動で荷重印加 (階段試験) が可能となった。

従来の水圧一定モードは、キャプセル圧力の急激な変動に対処することが出来なかった。圧力制御部シーケンサ制御プログラムを改修し、性能試験 14 のとおり、キャプセル水圧の降圧時においても圧力移行速度の選択条件によっては、キャプセル圧力付近で制御することができるようになった。

これらの結果より、目標としている精度・安定性・圧力移行速度を実現することが可能となった。今後は、中性子照射試験に向けて制御偏差パラメータの詳細設定を行い、確実に荷重制御試験を実施するための調整を継続する予定である。

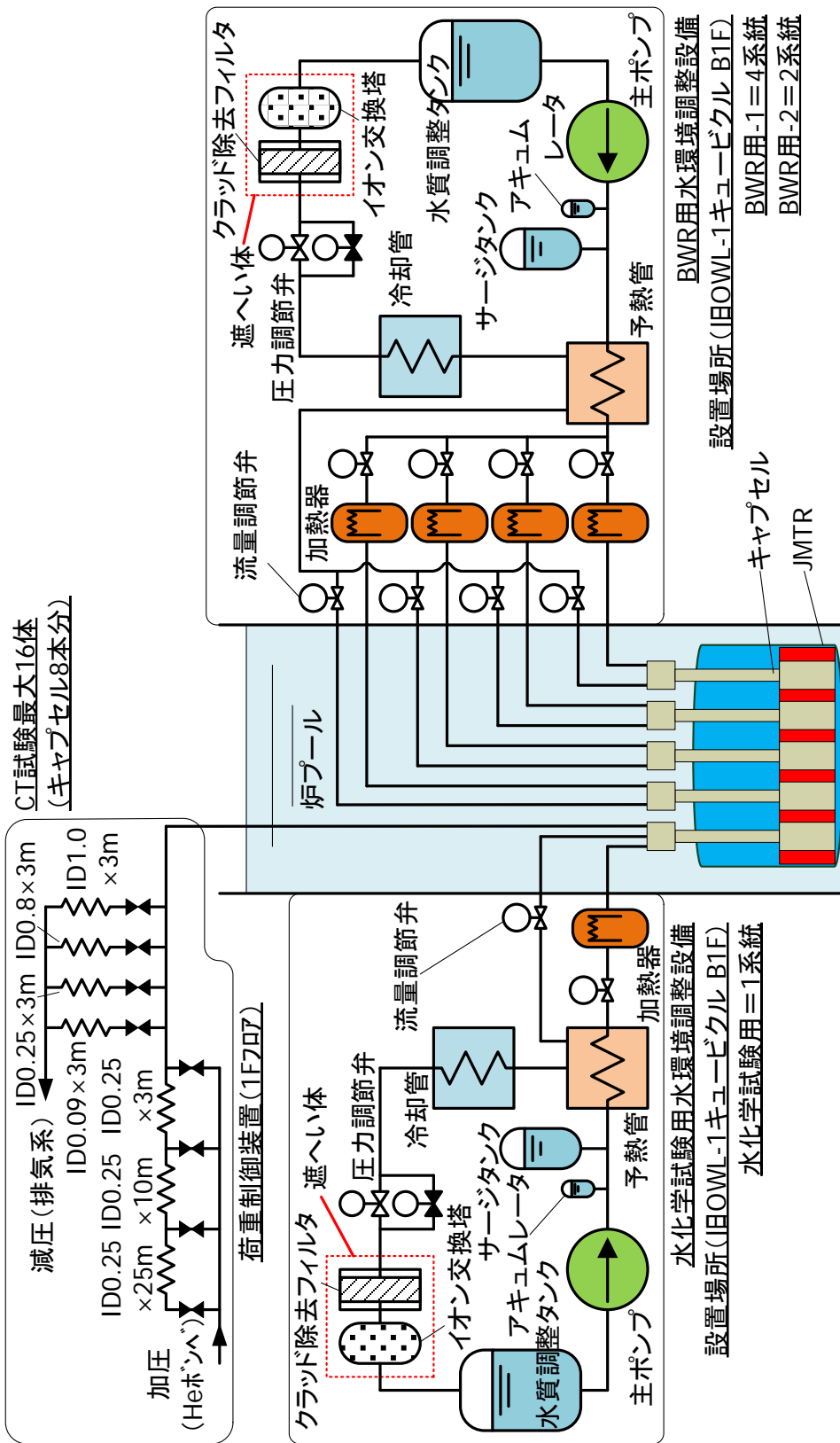
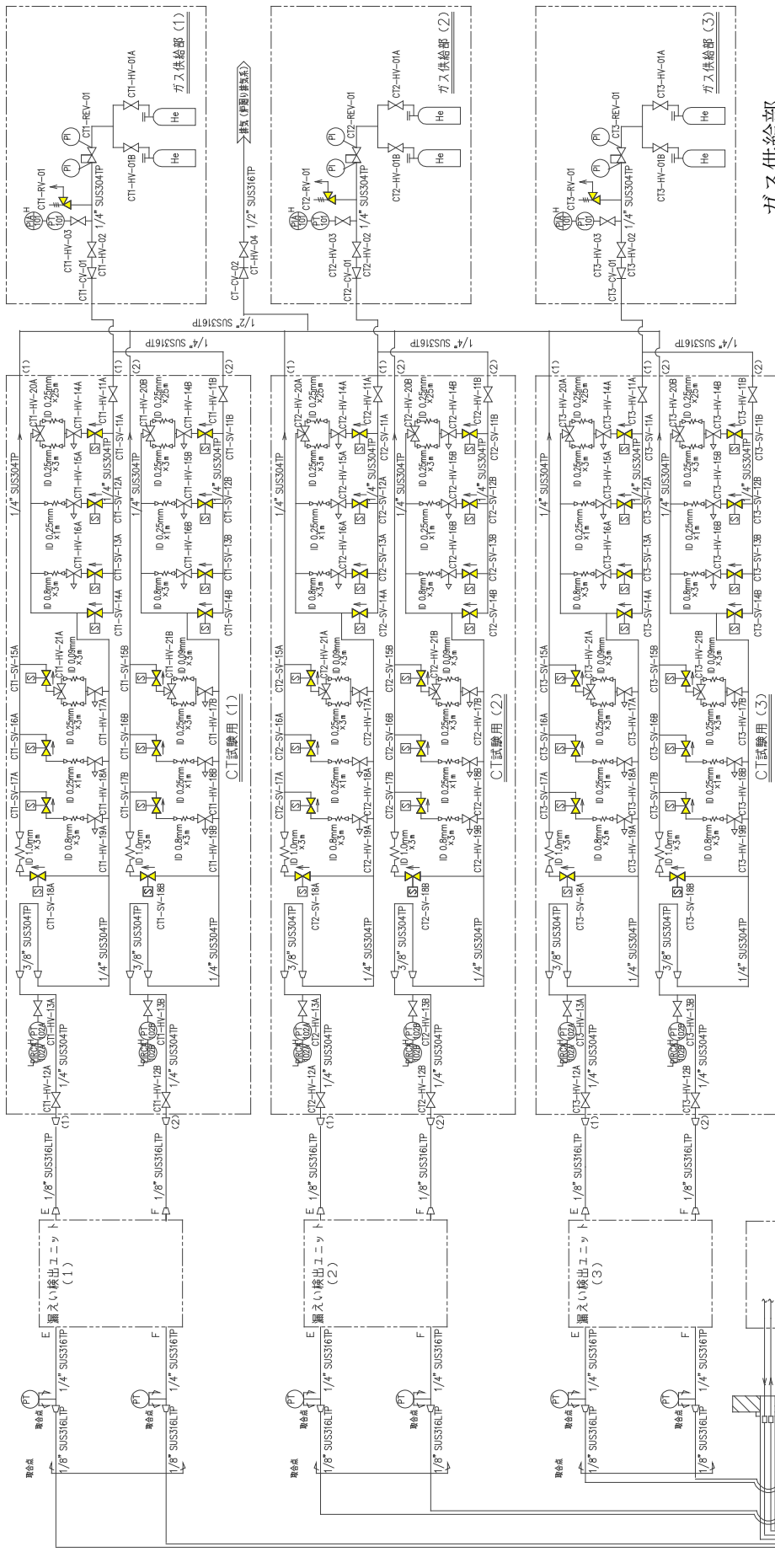


図 5.3.9-1 材料照射試験装置の概略図



圧力制御装置部

ガス供給部

漏えい検出ユニット

図 5.3.9-2(1/2) 荷重制御装置詳細図：改良後



ガス供給部



圧力制御装置部(1)



圧力制御装置部(2)



制御盤



漏えい検出ユニット

図 5.3.9-2 (2/2) 荷重制御装置詳細図

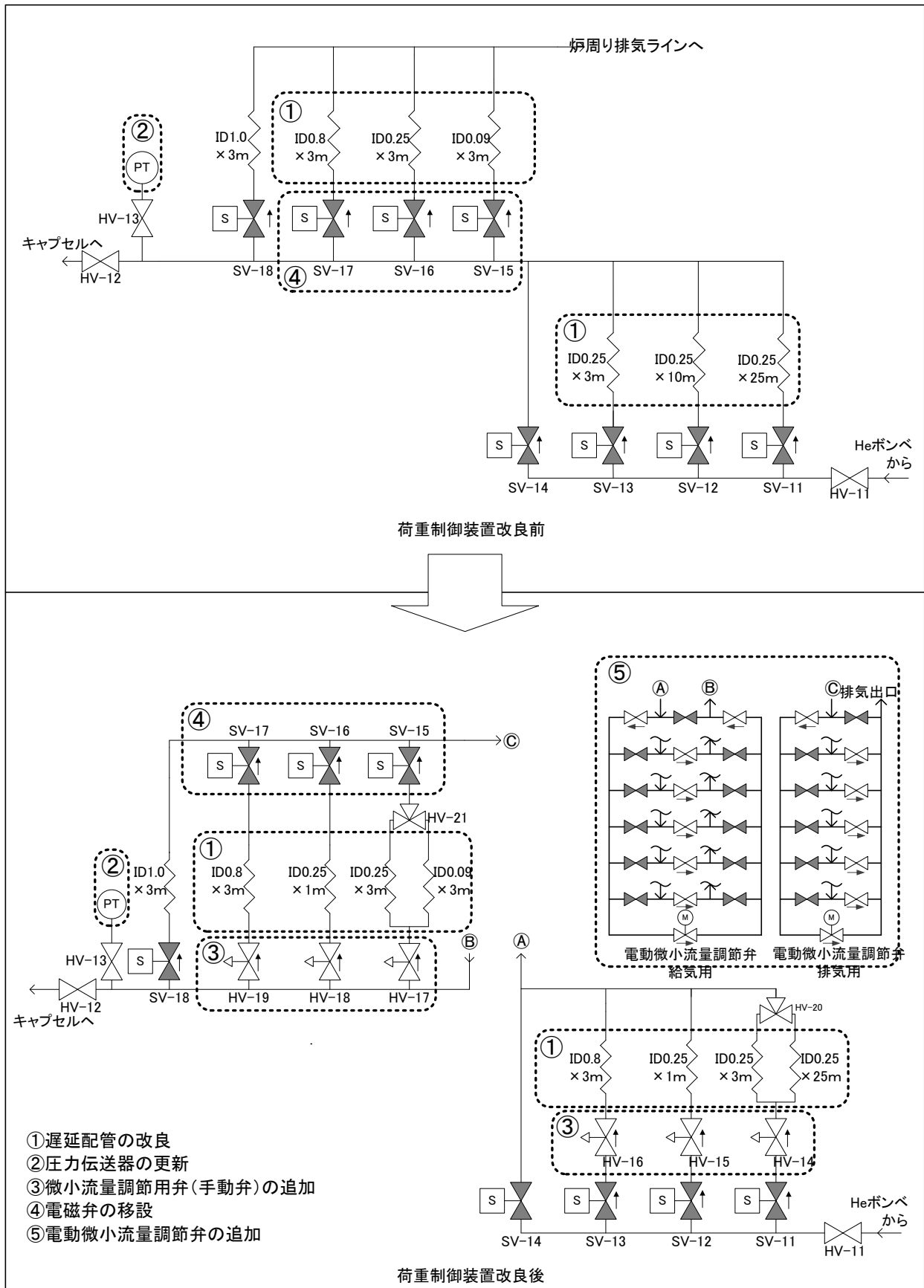


図 5.3.9-3 圧力制御装置部改良前後のフローシート

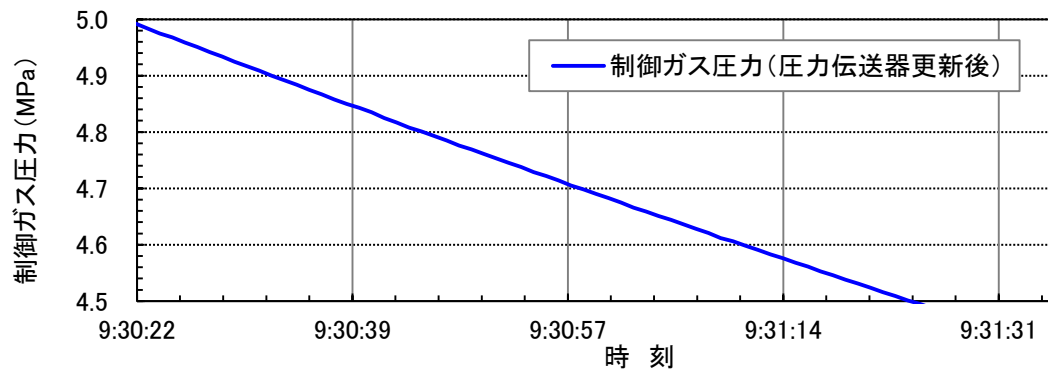
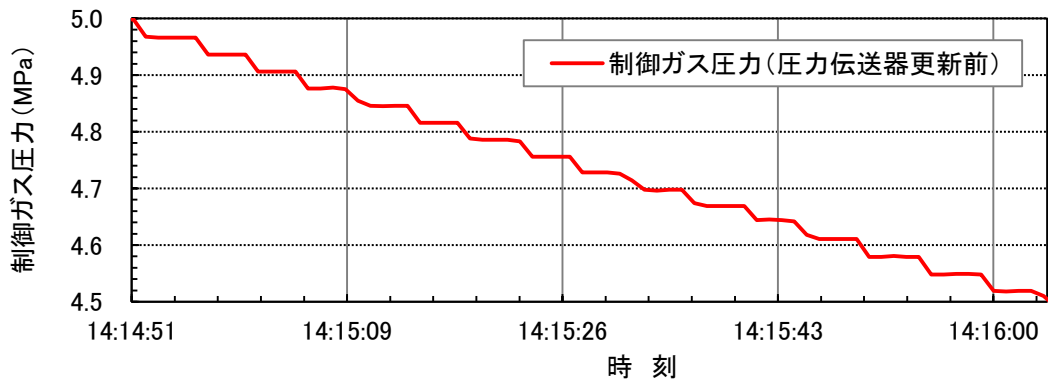


図 5.3.9-4 圧力伝送器更新前後の比較データ

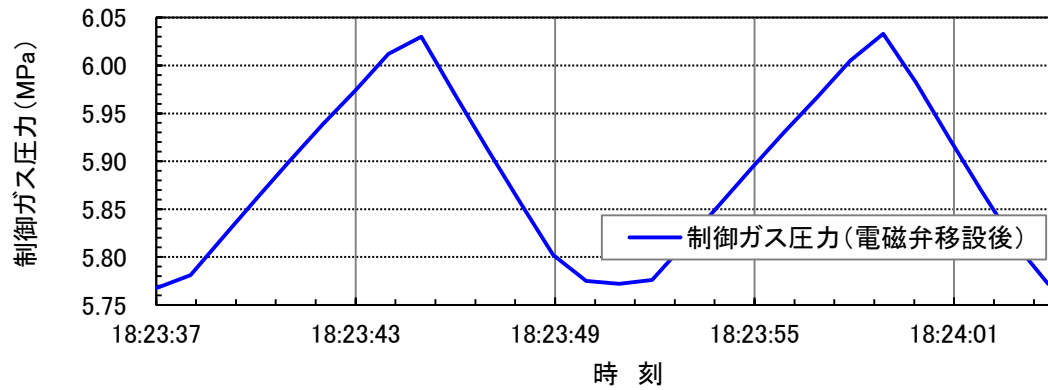
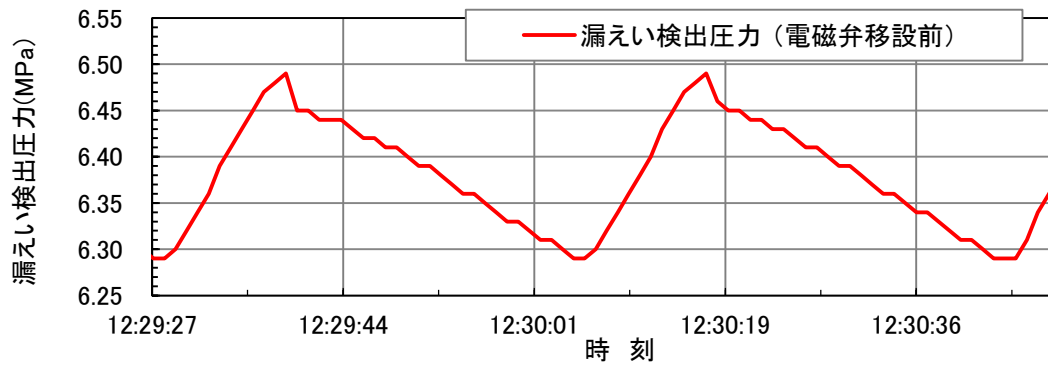


図 5.3.9-5 電磁弁移設前後の比較データ

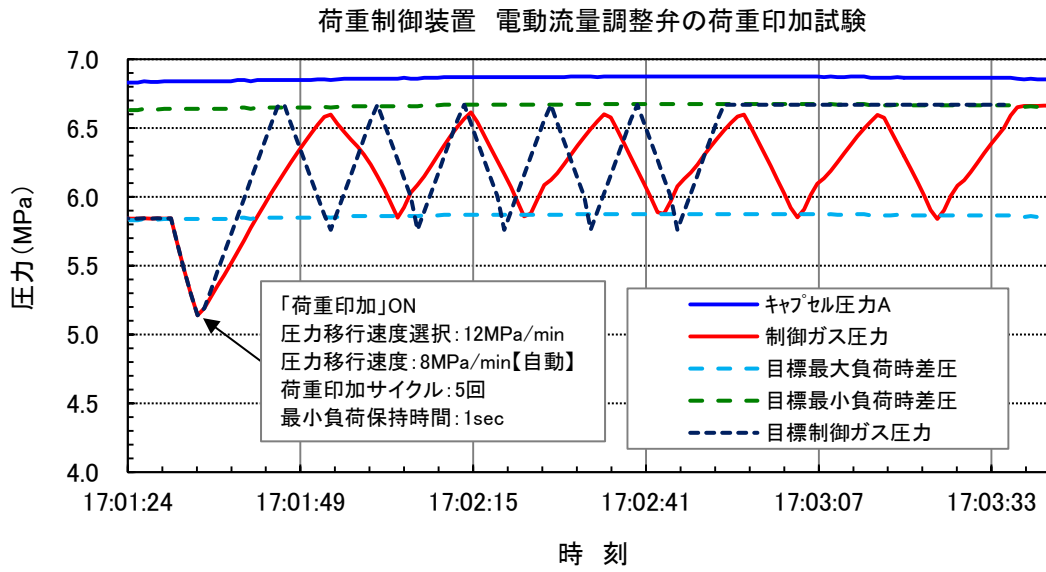


図 5.3.9-6 電動微小流量調整弁の荷重印加試験データ

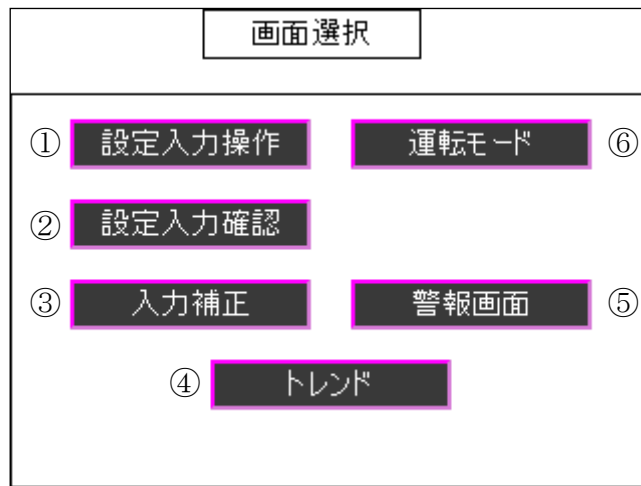


図 5.3.9-7 (1/13) 操作画面 (画面選択: メニュー画面)

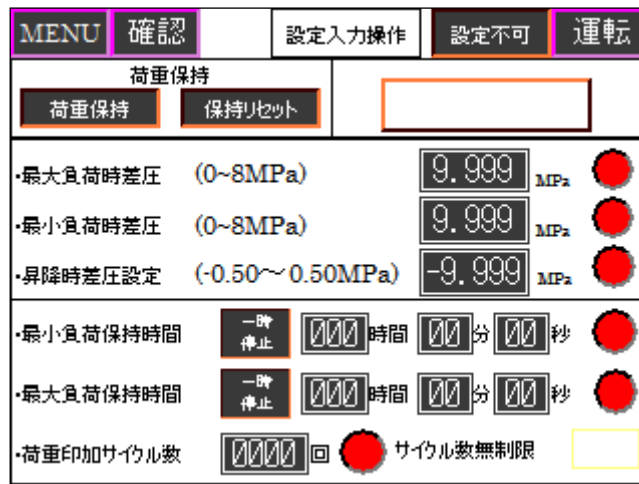


図 5.3.9-7 (2/13) 操作画面 (①設定入力操作画面)

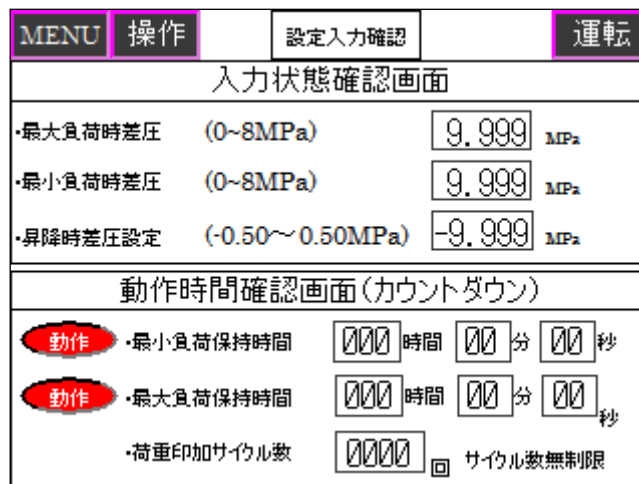


図 5.3.9-7 (3/13) 操作画面 (②設定入力確認画面)

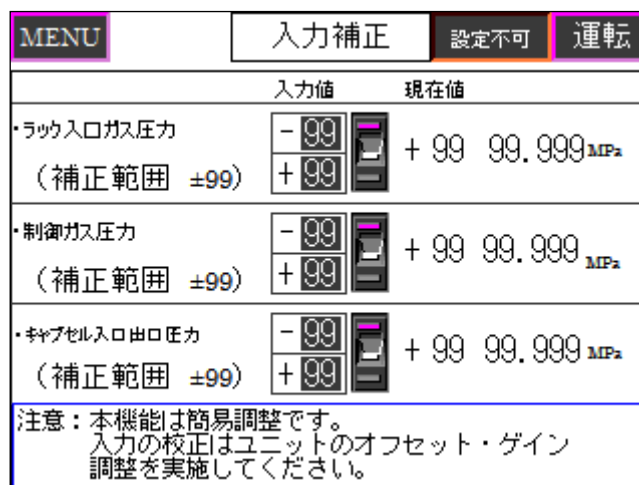


図 5.3.9-7 (4/13) 操作画面 (③入力補正画面)

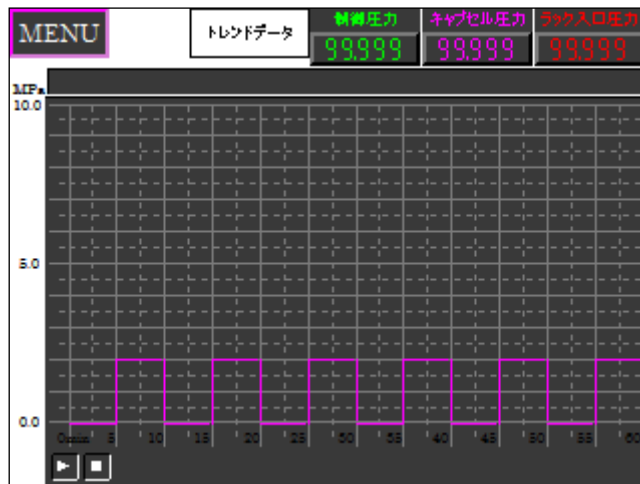


図 5.3.9-7 (5/13) 操作画面 (④トレンド画面)

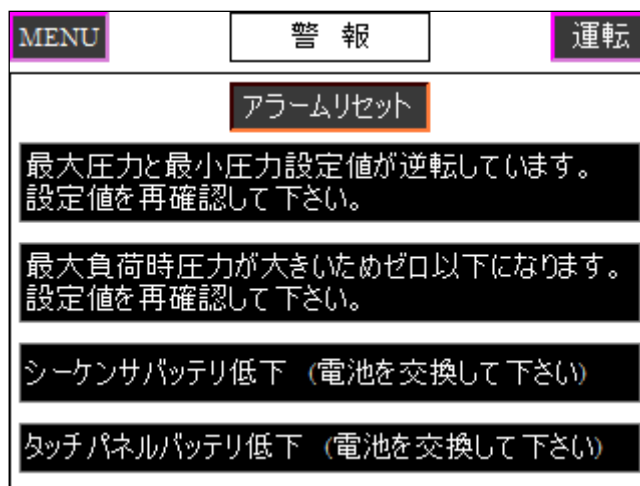


図 5.3.9-7 (6/13) 操作画面 (⑤警報画面)



図 5.3.9-7 (7/13) 操作画面 (⑥運転モード画面)

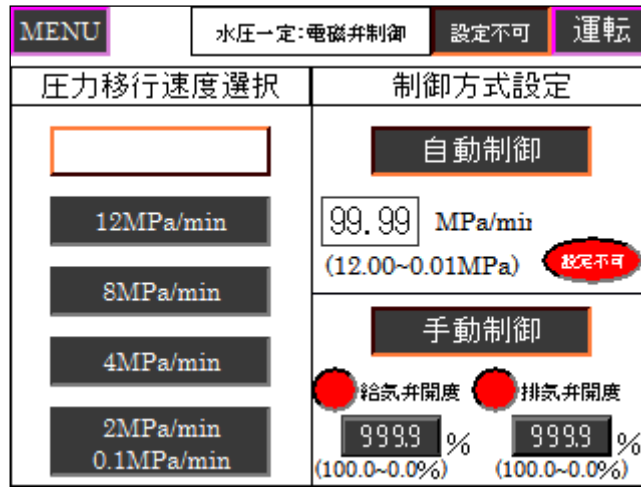


図 5.3.9-7 (8/13) 操作画面 (⑥運転モード画面→水圧一定:電磁弁制御)

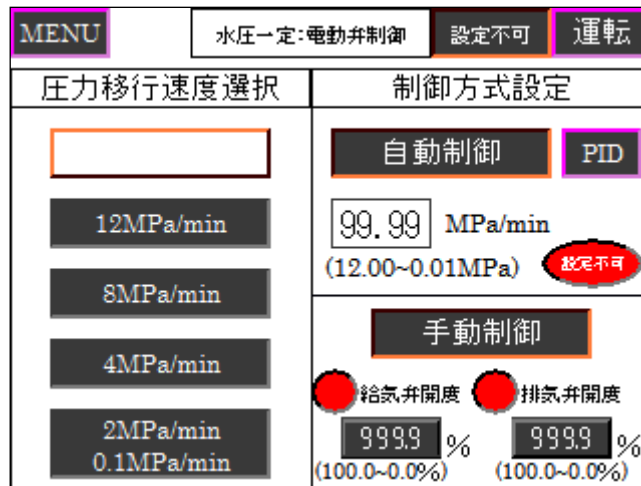


図 5.3.9-7 (9/13) 操作画面 (⑥運転モード画面→水圧一定:電動弁制御)

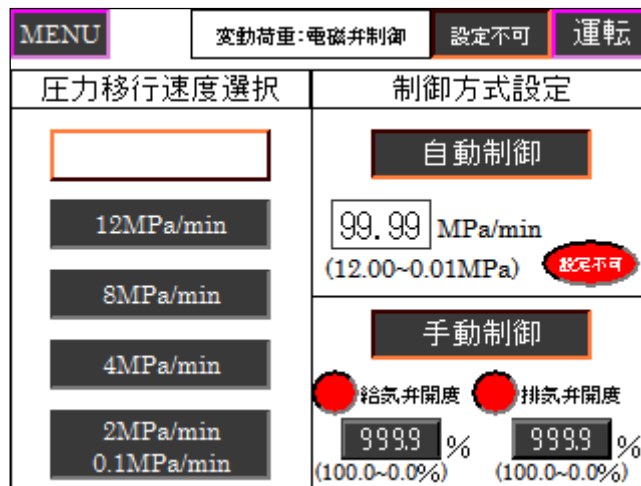


図 5.3.9-7 (10/13) 操作画面 (⑥運転モード画面→変動荷重:電磁弁制御)

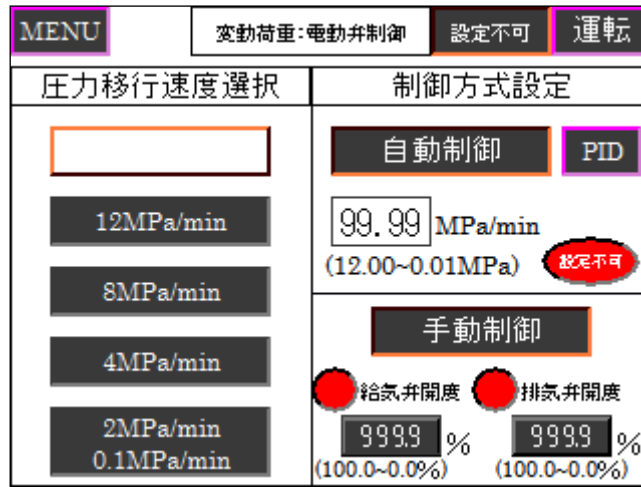


図 5.3.9-7 (11/13) 操作画面 (⑥運転モード画面→変動荷重:電動弁制御)

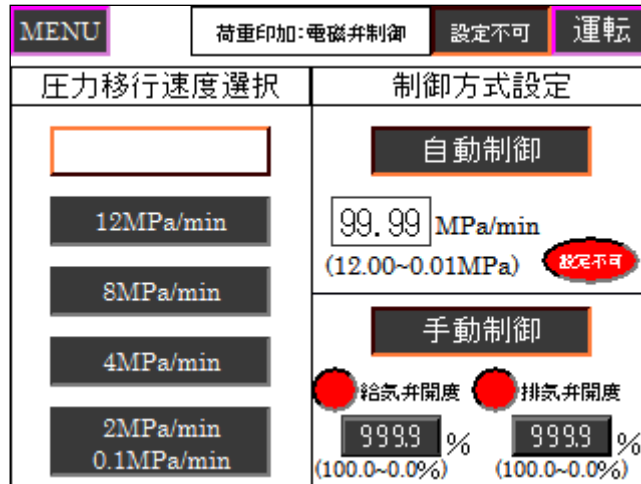


図 5.3.9-7 (12/13) 操作画面 (⑥運転モード画面→荷重印加:電磁弁制御)

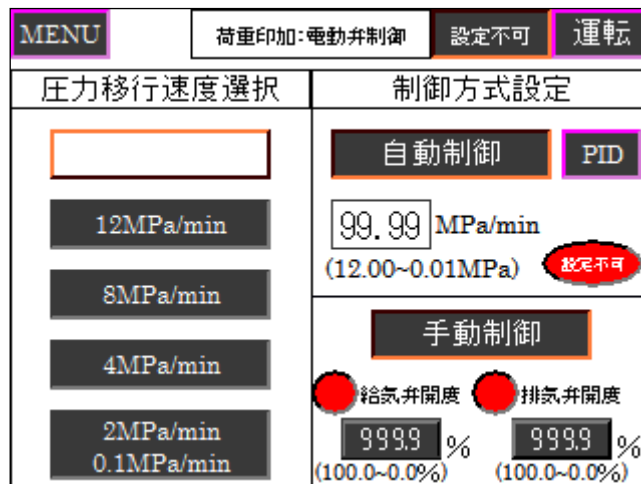


図 5.3.9-7 (13/13) 操作画面 (⑥運転モード画面→荷重印加:電動弁制御)

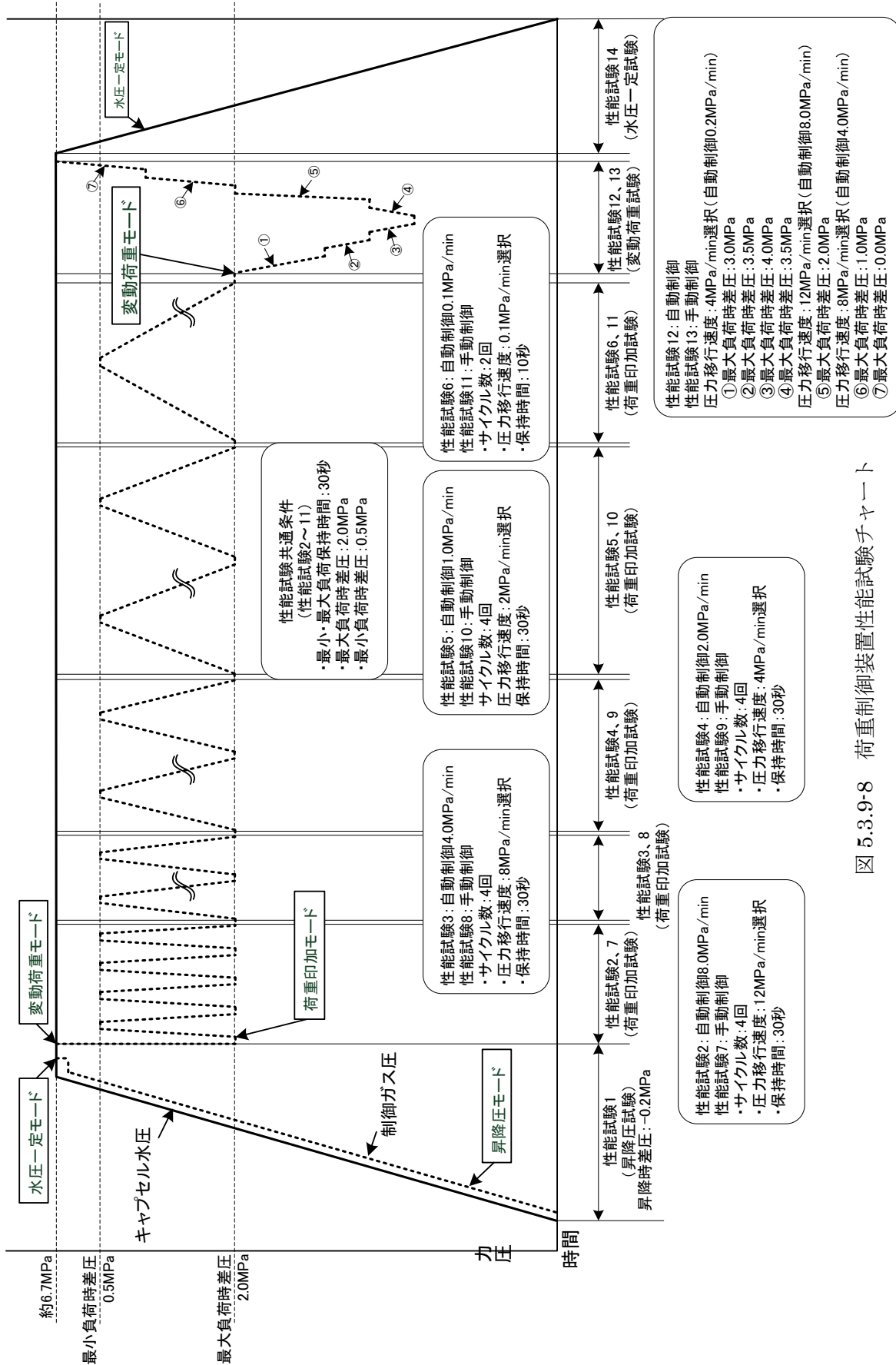


図 5.3.9-8 荷重制御装置性能試験チャート

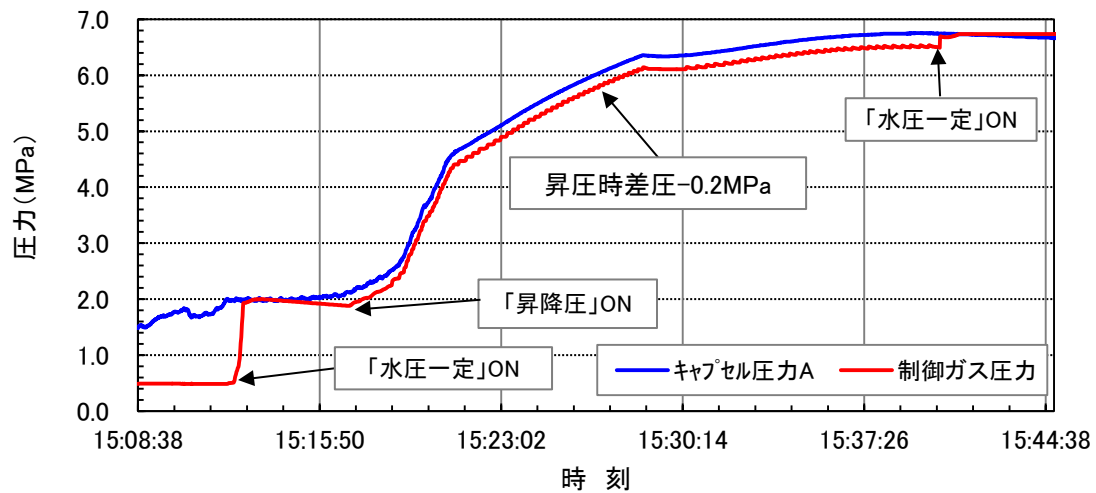


図 5.3.9-9 性能試験 1 結果 (昇降圧モード)

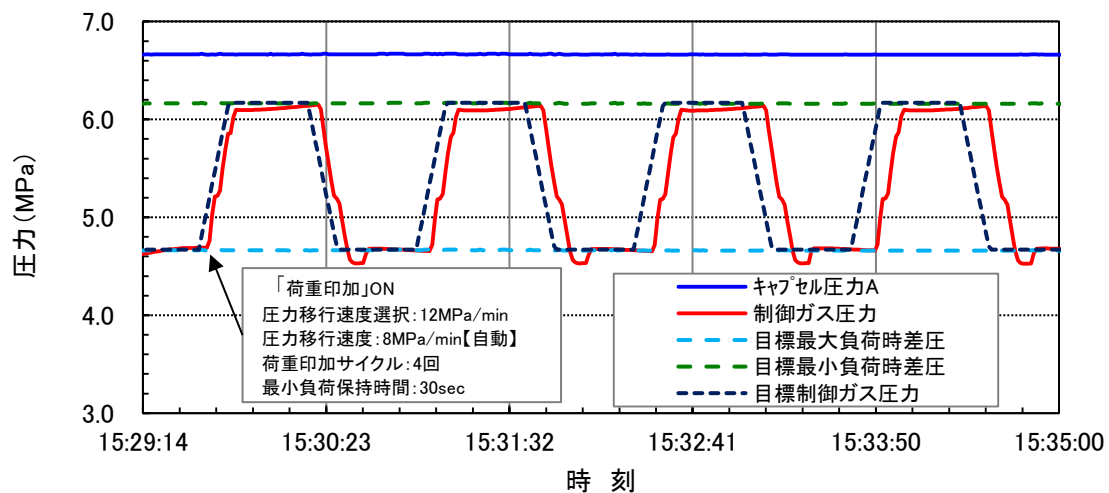


図 5.3.9-10 性能試験 2 結果 (圧力移行速度 12MPa/min 選択、自動制御 8.0MPa/min 設定)

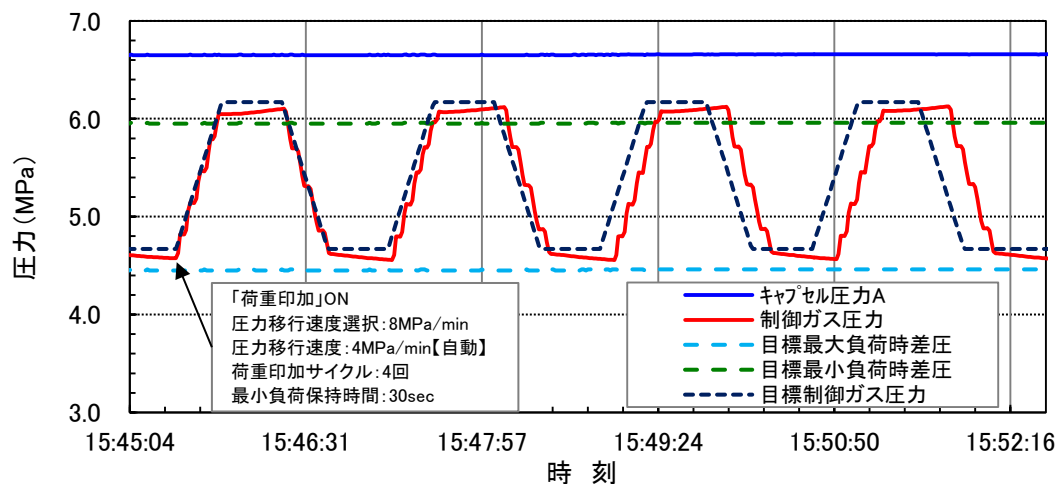


図 5.3.9-11 性能試験 3 結果 (圧力移行速度 8MPa/min 選択、自動制御 4.0MPa/min 設定)

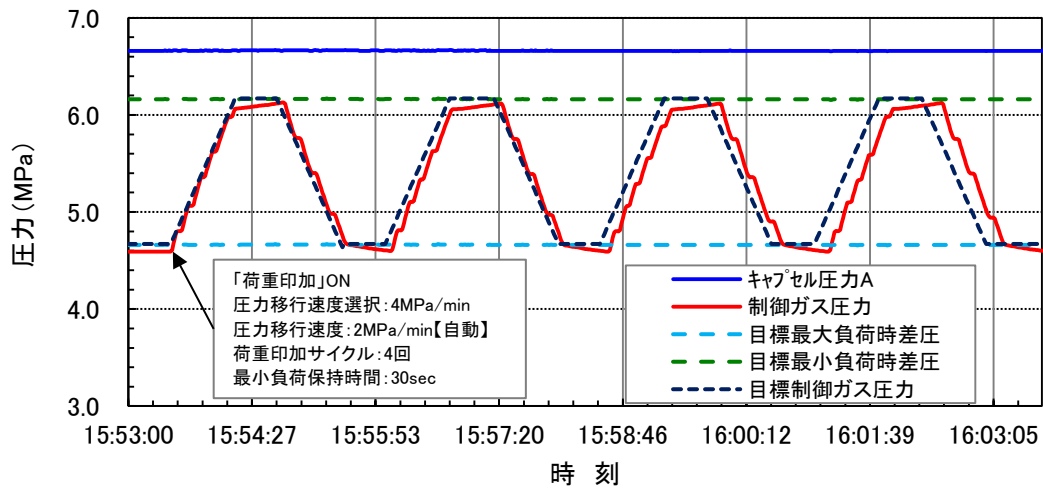


図 5.3.9-12 性能試験 4 結果 (圧力移行速度 4MPa/min 選択、自動制御 2.0MPa/min 設定)

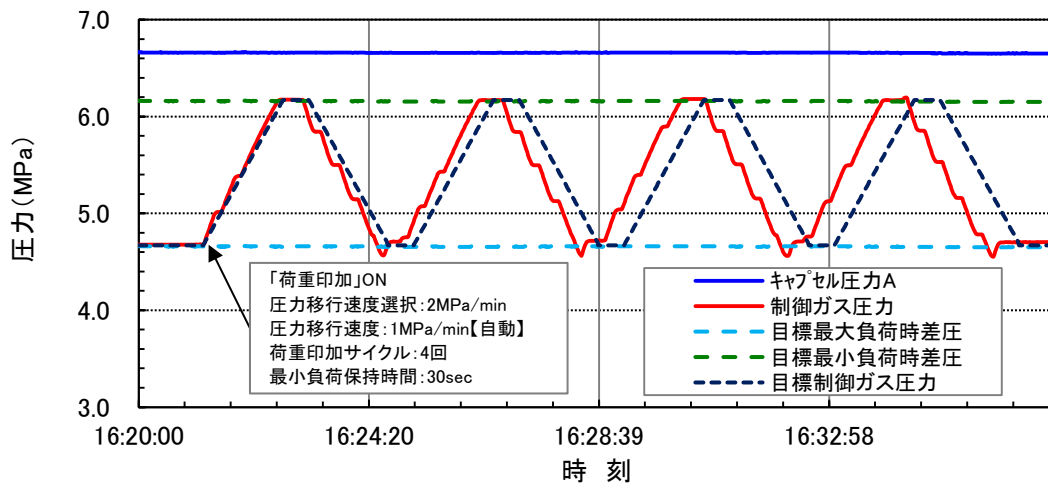


図 5.3.9-13 性能試験 5 結果 (圧力移行速度 2MPa/min 選択、自動制御 1.0MPa/min 設定)

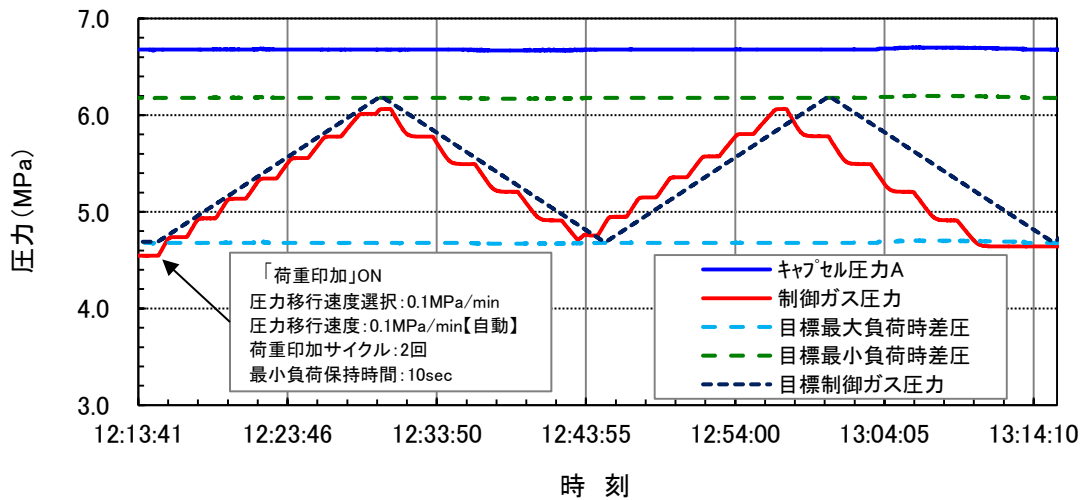


図 5.3.9-14 性能試験 6 結果 (圧力移行速度 0.1MPa/min 選択、自動制御 0.1MPa/min 設定)

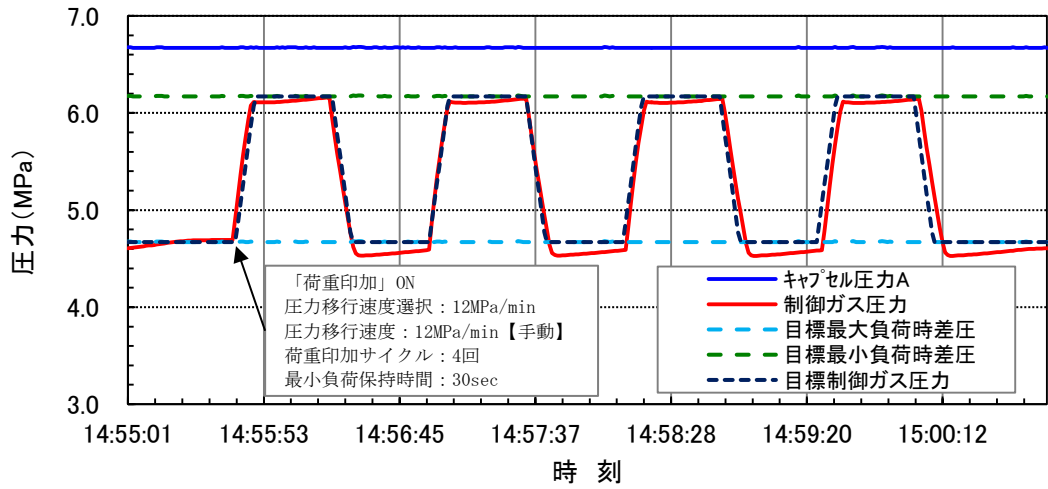


図 5.3.9-15 性能試験 7 結果 (圧力移行速度 12MPa/min 選択、手動制御)

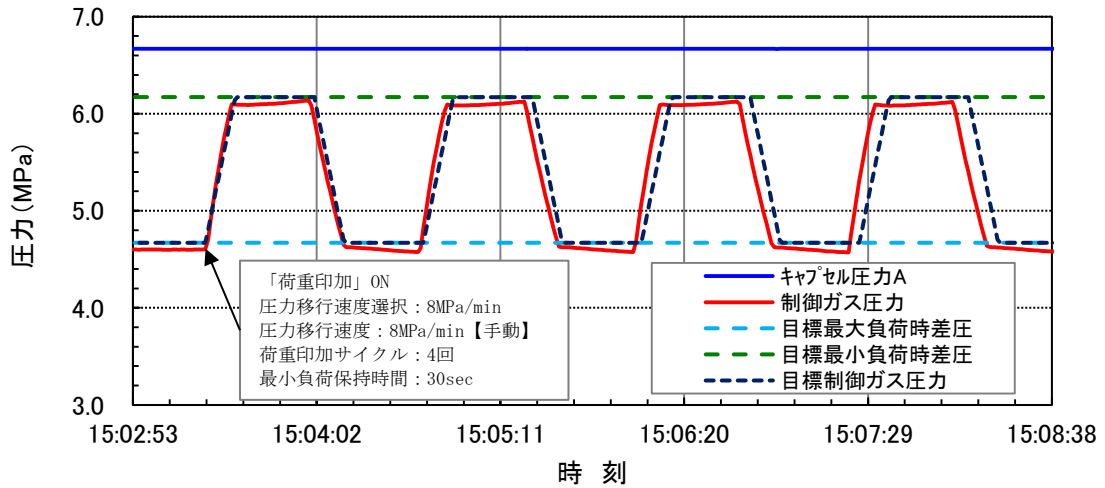


図 5.3.9-16 性能試験 8 結果 (圧力移行速度 8MPa/min 選択、手動制御)

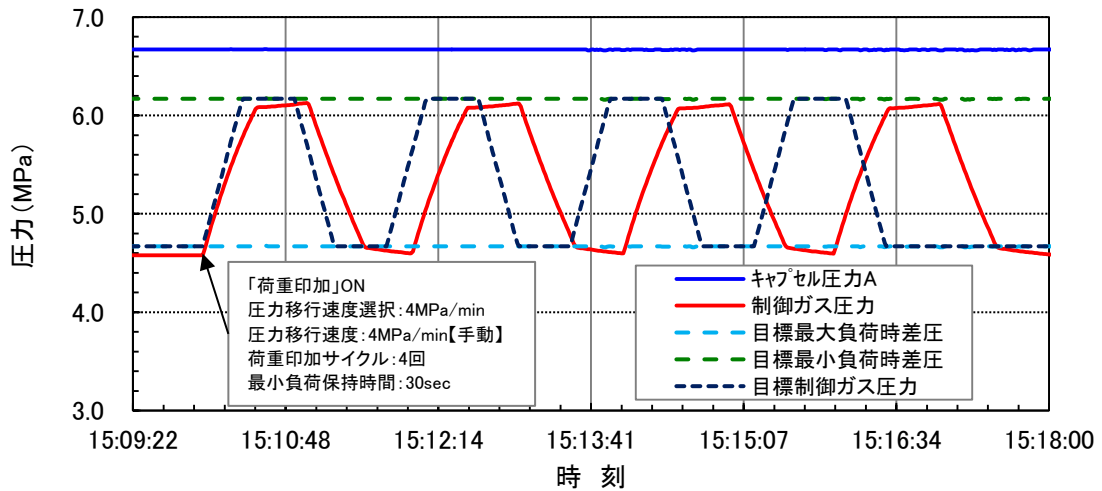


図 5.3.9-17 性能試験 9 結果 (圧力移行速度 4MPa/min 選択、手動制御)

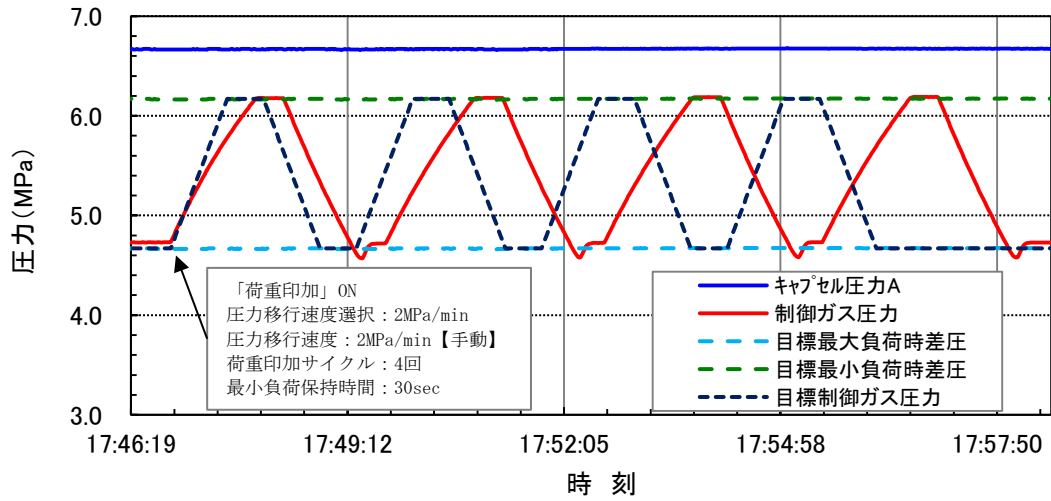


図 5.3.9-18 性能試験 10 結果 (圧力移行速度 2MPa/min 選択、手動制御)

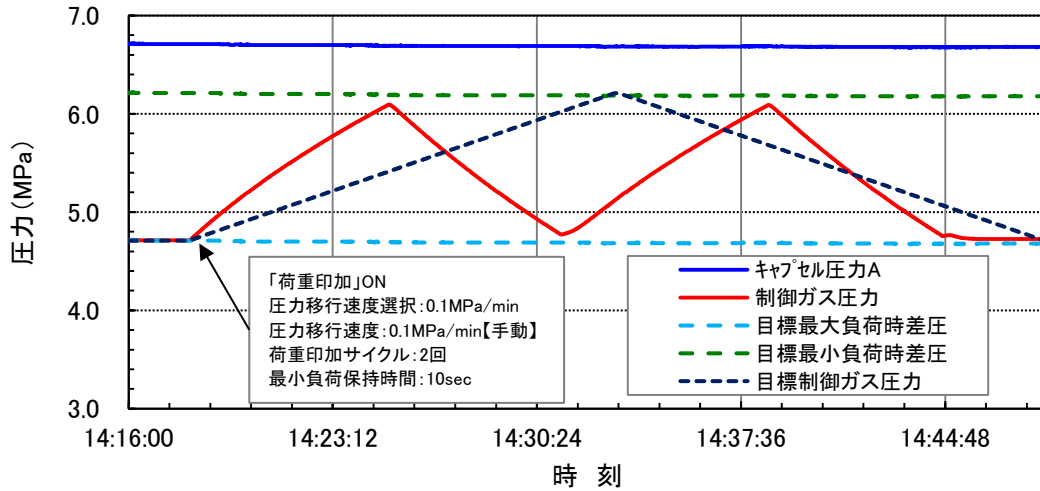


図 5.3.9-19 性能試験 11 結果 (圧力移行速度 0.1MPa/min 選択、手動制御)

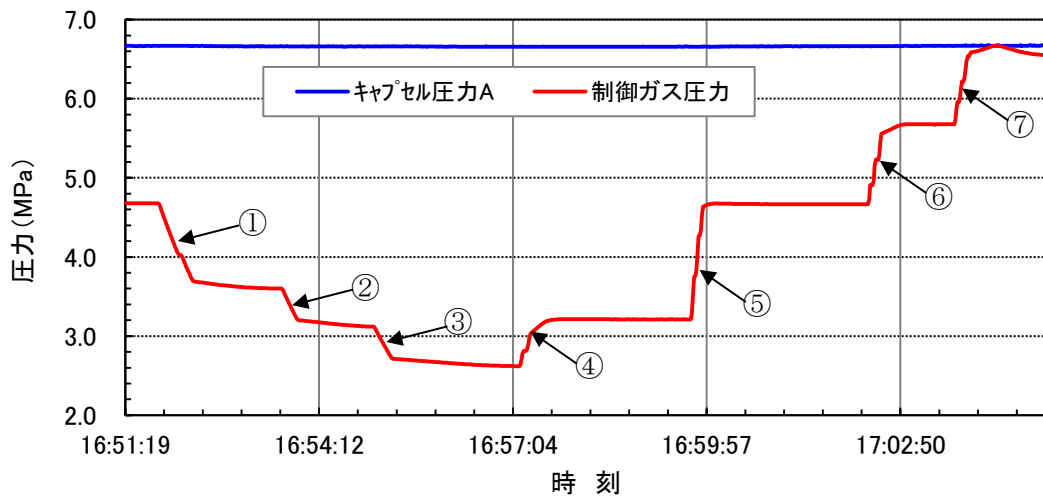


図 5.3.9-20 性能試験 12 結果 (変動荷重モード自動)

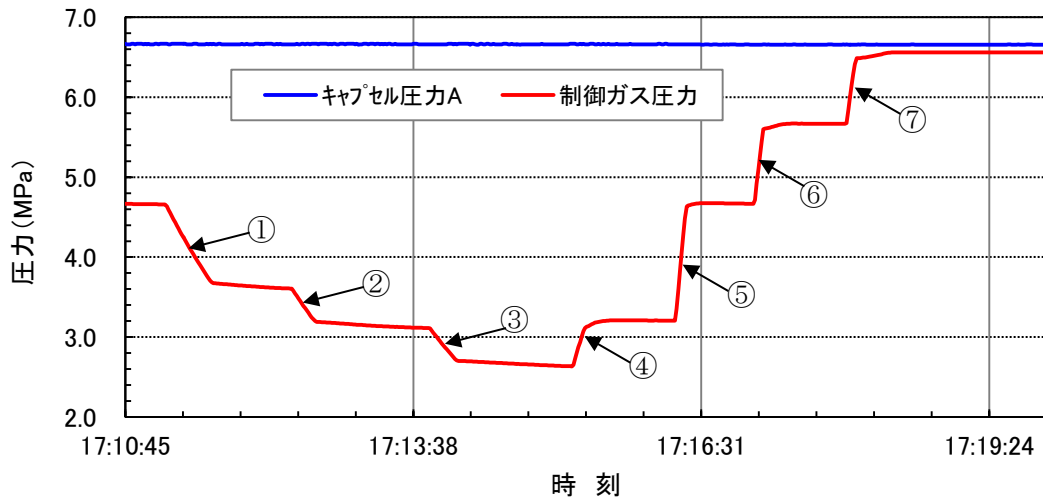


図 5.3.9-21 性能試験 13 結果 (変動荷重モード手動)

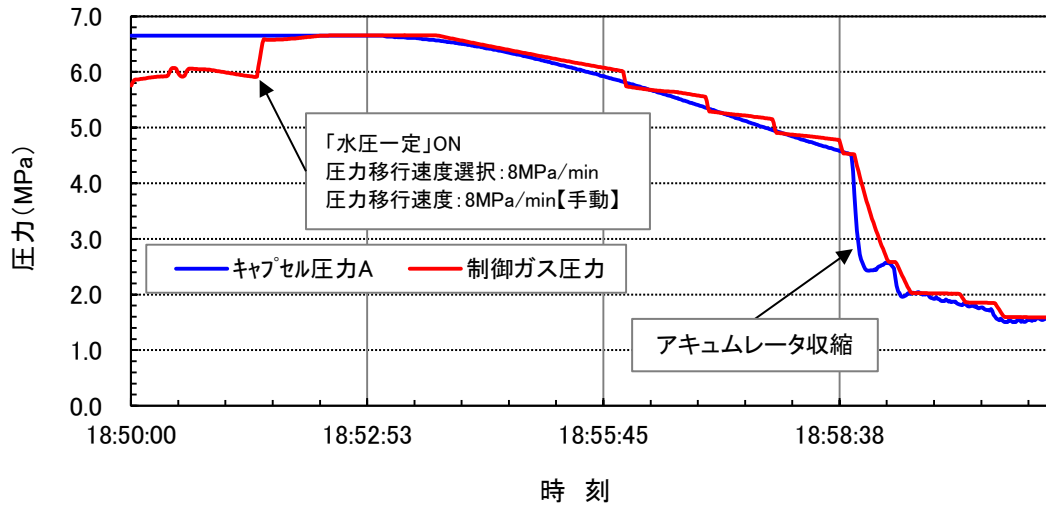


図 5.3.9-22 性能試験 14 結果 (水圧一定モード)

表 5.3.9-1(1/2) 遅延配管のサイズ等の仕様と圧力移行速度測定結果：変更前

荷重制御装置 圧力移行速度測定記録						
設備系統名	荷重制御装置(18系統)			測定条件	・キャプセル側負荷: 接続なし ・Heガス2次側圧力: 6.0~7.0MPa	
測定年月日	平成26年6月9日~平成26年6月13日					
遅延配管	SV-11 (φ0.25×25m)	SV-12 (φ0.25×10m)	SV-13 (φ0.25×3m)	SV-15 (φ0.09×3m)	SV-16 (φ0.25×3m)	SV-17 (φ0.8×3m)
	装置系統名	圧力移行速度 (MPa/min)	圧力移行速度 (MPa/min)	圧力移行速度 (MPa/min)	圧力移行速度 (MPa/min)	圧力移行速度 (MPa/min)
1-A	0.41	1.00	2.53	0.47	2.56	28.2
1-B	0.43	0.85	1.15	0.42	2.59	31.0
1-C	0.38	0.85	2.01	0.42	2.46	29.5
1-D	0.47	1.08	1.70	0.36	2.49	27.8
2-A	0.52	1.21	2.84	0.40	2.42	31.6
2-B	0.65	1.47	3.47	0.35	2.57	31.8
2-C	0.43	1.13	2.63	0.42	2.64	30.8
2-D	0.52	1.19	2.85	0.39	2.51	35.7
3-A	0.38	1.22	2.81	0.24	2.73	36.7
3-B	0.48	0.98	2.57	0.44	2.69	29.8
3-C	0.41	0.99	2.39	0.42	2.54	35.0
3-D	0.40	1.11	2.52	0.13	2.72	30.5
4-A	0.42	1.05	2.58	0.38	2.49	30.9
4-B	0.43	1.03	2.65	0.38	2.47	31.0
5-A	0.40	0.80	1.83	0.10	2.46	34.9
5-B	0.21	0.76	1.61	0.18	2.63	30.9
6-A	0.42	0.94	2.13	0.22	2.33	30.5
6-B	0.44	0.91	2.30	0.42	2.41	31.5

表 5.3.9-1(2/2) 遅延配管のサイズ等の仕様と圧力移行速度測定結果：変更後

荷重制御装置 圧力移行速度測定記録								
設備系統名	荷重制御装置(18系統)			測定条件	・キャプセル側負荷: 接続なし ・Heガス2次側圧力: 6.0~7.0MPa			
測定年月日	平成27年2月26日							
遅延配管	SV-11-1 (φ0.25×25m)	SV-11-2 (φ0.25×3m)	SV-12 (φ0.25×1m)	SV-13 (φ0.8×3m)	SV-15-1 (φ0.09×3m)	SV-15-2 (φ0.25×3m)	SV-16 (φ0.25×1m)	SV-17 (φ0.8×3m)
	装置系統名	圧力移行速度 (MPa/min)	圧力移行速度 (MPa/min)	圧力移行速度 (MPa/min)	圧力移行速度 (MPa/min)	圧力移行速度 (MPa/min)	圧力移行速度 (MPa/min)	圧力移行速度 (MPa/min)
1-A	0.30	3.19	5.11	11.26	0.33	2.54	4.13	10.24
1-B	0.98	2.96	6.49	8.86	0.34	2.50	4.78	6.08
1-C	0.73	2.71	4.87	15.47	0.39	2.16	4.03	9.12
1-D	0.39	3.97	6.20	15.08	0.35	3.00	4.82	12.22
2-A	0.95	2.71	4.55	13.98	0.30	1.93	3.48	7.92
2-B	0.87	3.79	5.97	11.74	0.35	2.67	4.58	13.17
2-C	0.96	2.99	5.31	12.22	0.33	2.02	3.77	7.62
2-D	0.78	3.47	5.61	15.69	0.58	3.06	5.82	12.35
3-A	0.54	2.41	4.41	13.56	0.21	1.91	3.44	7.73
3-B	0.79	3.83	5.52	12.89	0.36	1.26	4.71	11.35
3-C	0.64	2.39	4.50	11.83	0.26	1.82	3.24	7.04
3-D	0.92	3.68	5.57	12.46	0.22	3.23	5.13	11.95
4-A	0.46	3.81	5.97	14.72	0.28	2.13	6.22	7.35
4-B	0.35	3.21	5.78	8.13	0.29	2.29	5.50	8.25
5-A	0.35	2.88	5.98	11.67	0.22	2.04	3.89	7.49
5-B	0.25	3.75	5.20	12.74	0.31	3.07	4.30	10.21
6-A	0.27	2.53	3.09	9.54	0.27	2.31	3.95	10.88
6-B	0.40	3.58	5.87	7.92	0.34	2.82	4.73	10.16
目標値	0.2~1.0	1.0~4.0	2.0~7.0	7.0~16.0	0.2~1.0	1.0~4.0	2.0~7.0	7.0~16.0

5.3.10 放電加工装置及びNCフライス盤のセル内設置

5.3.10.1 概要

原子炉圧力容器鋼の破壊靱性試験及び WPS 効果確認試験で使用する放電加工装置及び NC フライス盤を設置するホットセル(コンクリート No.2 セル)内の立入除染及び上記装置のセル内への設置を実施した。

5.3.10.2 作業内容

コンクリート NO.2 セルは、照射済燃料及び材料の照射後試験としてキャプセルの解体等を行ってきたセルであり、作業員の被ばく低減のためセル内除染を適宜行い表面汚染密度を低下させながら、当該装置の中継端子箱のセル内設置及び配線接続、遮蔽プラグの交換等を行った。セル内作業の様子を図 5.3.10.2-1 に示す。

5.3.10.3 まとめ

除染作業で、架台上の表面汚染密度を $3.1\text{Bq}/\text{cm}^2$ 以下にすることが出来た。また、当該装置の制御ケーブルをセル内へ敷設するための専用遮蔽プラグの交換及びセル内の不要な配管及びコネクタ類の撤去を行い、当該装置の設置準備及び作業場所の確保をすることが出来た。



放電加工装置の中継端子箱の設置



専用遮蔽プラグ交換作業



NCフライス盤設置予定場所



放電加工装置設置予定場所

図 5.3.10.2-1 セル内作業の様子

5.3.11 スポット溶接治具の製作

(1) スポット溶接治具の製作

a. スポット溶接治具の概要

スポット溶接治具(以下、本治具)は、本事業でJMTRホットラボ施設に整備したものであり、き裂長さをモニターするための直流交番電位差法(PDM)に用いる信号線を照射後応力腐食割れ試験に供する試験片に、容易にスポット溶接するためのものである。

図5.3.11-1にスポット溶接治具を示す。

b. スポット溶接治具の技術仕様

本治具は、遠隔操作でCT試験片(試験試料)を試験片治具に取り付けた状態でPDM信号線(リード線：SUS316L製)をCT試験片(SUS316L製)上の指定された位置に容易に溶接できる構造とし、溶接後は試験機の荷重軸へのセットが容易に行える構造とした。

スポット溶接については、リード線一本につき板厚方向に3カ所以上の溶接が可能な範囲とし、溶接個所についてはリード線をCT試験片のノッチ側の両端の位置に2本、0.6 mmリード線をノッチ側の内側に2本、リガメント側に2本溶接を可能とした。

対象となるCT試験片は、標準型0.5T-CT(厚さ12.7 mm、6.35 mm、5.6 mm)とした。また本治具はマニピュレータによる遠隔操作にてセル架台上を容易に移動でき、溶接機を固定するためのストッパーを設けてロックと解除が可能な構造とした。

(2) き裂進展試験片PDM信号線用スポット溶接機の改造

a. スポット溶接機の改造の目的

スポット溶接機は、JMTRホットラボのコンクリート5セル内に設置し、マニピュレータを使った遠隔操作にて中性子照射済0.5T-CT試験片にPDM信号線を溶接するためのものである。

今年度は、コンクリートセル内における遠隔操作性の向上を目的とし、以下の内容について改造を行った。

b. スポット溶接機の改造内容

スポット溶接機の改造内容のイメージを図5.3.11-2に示す。作業内容を以下に示す。

(i) 溶接用ハンドセットの増設

溶接用のプッシュ型ハンドセットを1台増設し、既存のハンドセットと合わせて2台のハンドセットをスポット溶接治具に固定設置して0.5T-CT試験片の両側からスポット溶接できるようにした。合わせてそれぞれのハンドセットに電源供給できるように回路を改造し、端子を増設した。

(ii) 遠隔操作盤の増設

コンクリートセル内の作業位置から約10 m離れた操作室(セル外)で電源の操作が可能なように操作盤を増設した。また遠隔操作盤と電源本体の操作盤を切り替えるためのスイッチを増設した。

(iii) 電源筐体へのキャスターの付設

ホットセル内のマニピュレータを用い、電源筐体を容易に移動させるため、電源筐体にキャスターを付設した。合わせて溶接を行う時等、移動を要しない時には、電源筐体は固定できるようにした。

c. 改造後のスポット溶接機

改造後のスポット溶接機の外観を図5.3.11-3に示す。

(3)スポット溶接治具部品の購入

本治具に装着して用いる部品を購入した。当該部品の外観を図5.3.11-4に示す。

(4)まとめ

本治具及びスポット溶接機の改造について、工場検査及び納入時に行う現地検査を行い、所定の仕様を満足していることを確認した。

また購入したスポット溶接治具部品を本治具に装着し、予定通りの機能を満足することを確認した。



図 5.3.11-1 スポット溶接治具の外観

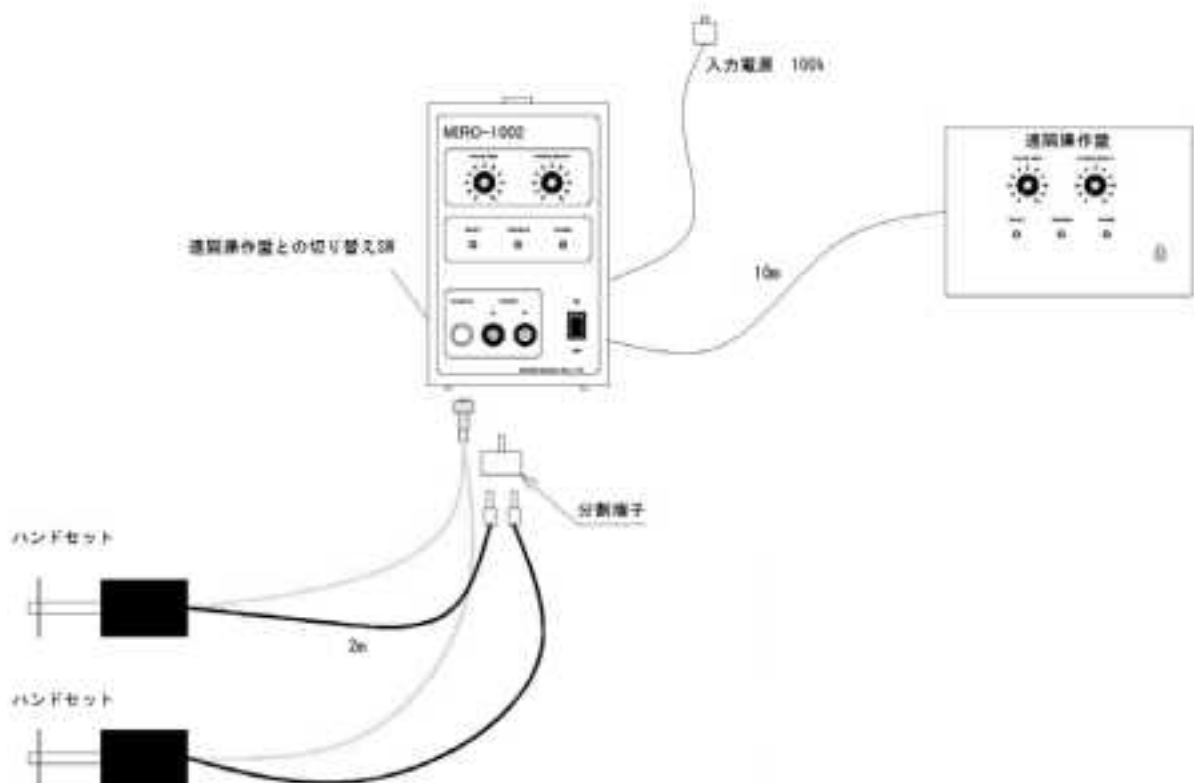
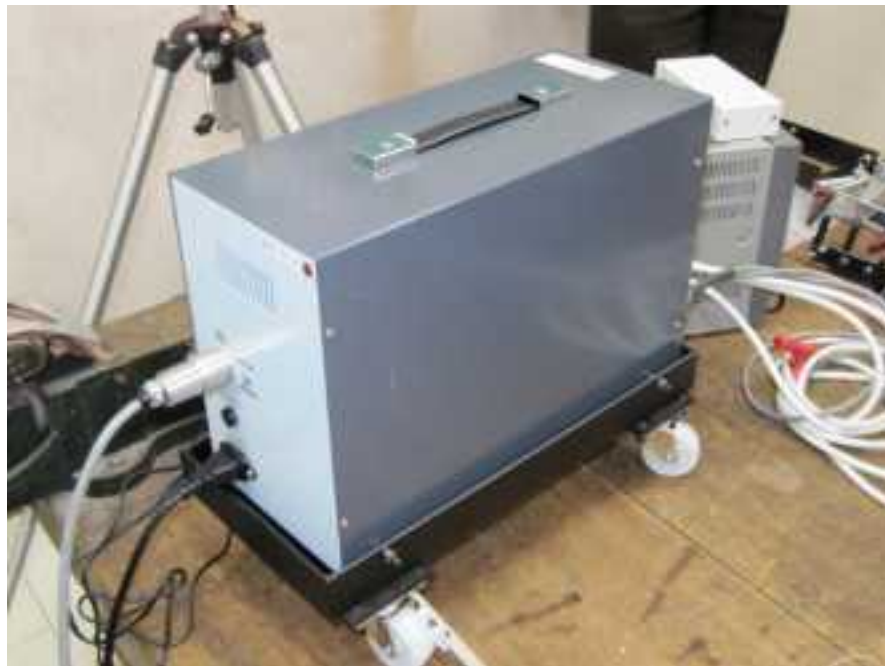


図 5.3.11-2 き裂進展試験片 PDM 信号線用スポット溶接機の改造内容(イメージ)



(1)前景



(2)後景

図 5.3.11-3 改造後のスポット溶接機の外観



図 5.3.11-4 購入したスポット溶接治具部品の外観

5.3.12 照射後応力腐食割れ試験装置用ナットランナー保持装置の製作

(1)概要

本治具は、JMTRホットラボ内に設置してある照射後応力腐食割れ試験装置のオートクレーブのナットを締める際に、遠隔操作にてナットを一定のトルクで締め付けるナットランナーを支えるためのものである。本年度は本治具の設計・製作を行った。

(2) 技術仕様

照射後応力腐食割れ試験装置は、オートクレーブ内に試験片を設置し、一定の圧力をかけてき裂進展試験を行う。オートクレーブは12本のナットを締め付けて圧力を保持するが、この締め付けにはナットランナーを用い一定のトルクをかけなければならない。

ナットランナー用治具は、オートクレーブを密閉する為12本のナットを締めるナットランナーを保持するものであり、ホットセル内で遠隔操作により締め付け作業を補助する機能を有するものとする。

(設計・製作条件)

- 1)オートクレーブ密封する時、ナットランナーを所定の位置及び姿勢に保持し、遠隔操作にてナットの締め付けを可能とすること。また、ボルト位置にナットランナーが到達できること。
- 2)遠隔操作にて、セル架台上を移動できるものとする。また固定可能なストッパーを付けること。
- 3)施設作業環境を十分把握し、十分留意した上で着手すること。

(3) まとめ

設計・製作に関して施設作業環境を十分調査し、協議・調整を行った。本設計・製作に取り掛かり、工場検査にて外観検査・寸法検査・動作確認をし、再度調整を行いナットランナー保持装置について技術仕様を十分満足していることを確認した。

製作したナットランナー保持装置を図5.3.12-1に示す。



図 5.3.12-1 ナットランナー保持装置

6. おわりに

平成26年度「軽水炉燃材料詳細健全性調査」事業では、平成25年度までに実施した技術課題の整理結果、試験装置の詳細設計・整備などの成果を踏まえて、照射環境下での燃料及び材料の健全性に関する次の試験等を実施した。

①燃料異常過渡試験

②中性子照射脆化試験

③照射誘起応力腐食割れ (IASCC: Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking) 試験

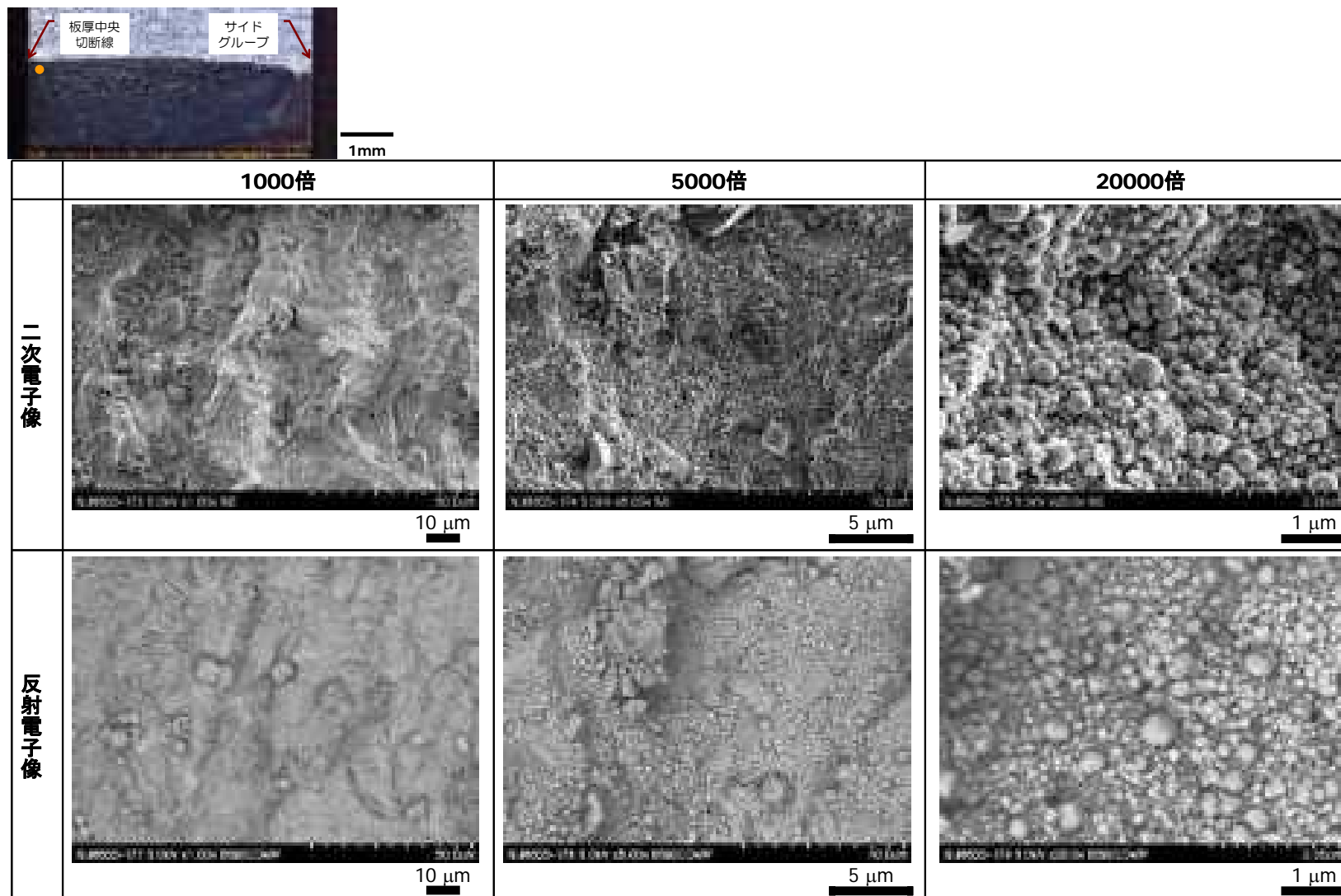
上記①～③を実施するため、必要な設備（照射試験装置及び照射後試験装置等）の整備を進めるとともに、昨年度までに整備した設備を適切に維持・管理するための点検等を行った。また、②及び③の照射に必要な材料照射キャプセル及び部品の製作を行った。②及び③の実施に先立ち、非照射材の特性を調べるための試験を継続し、照射挙動を評価するために必要な基礎的な非照射データを拡充するとともに、既往研究等での照射済み材を活用した試験を継続した。

これらの結果、JMTRの再稼働に合わせて照射試験を開始するための準備が順調に進捗した。

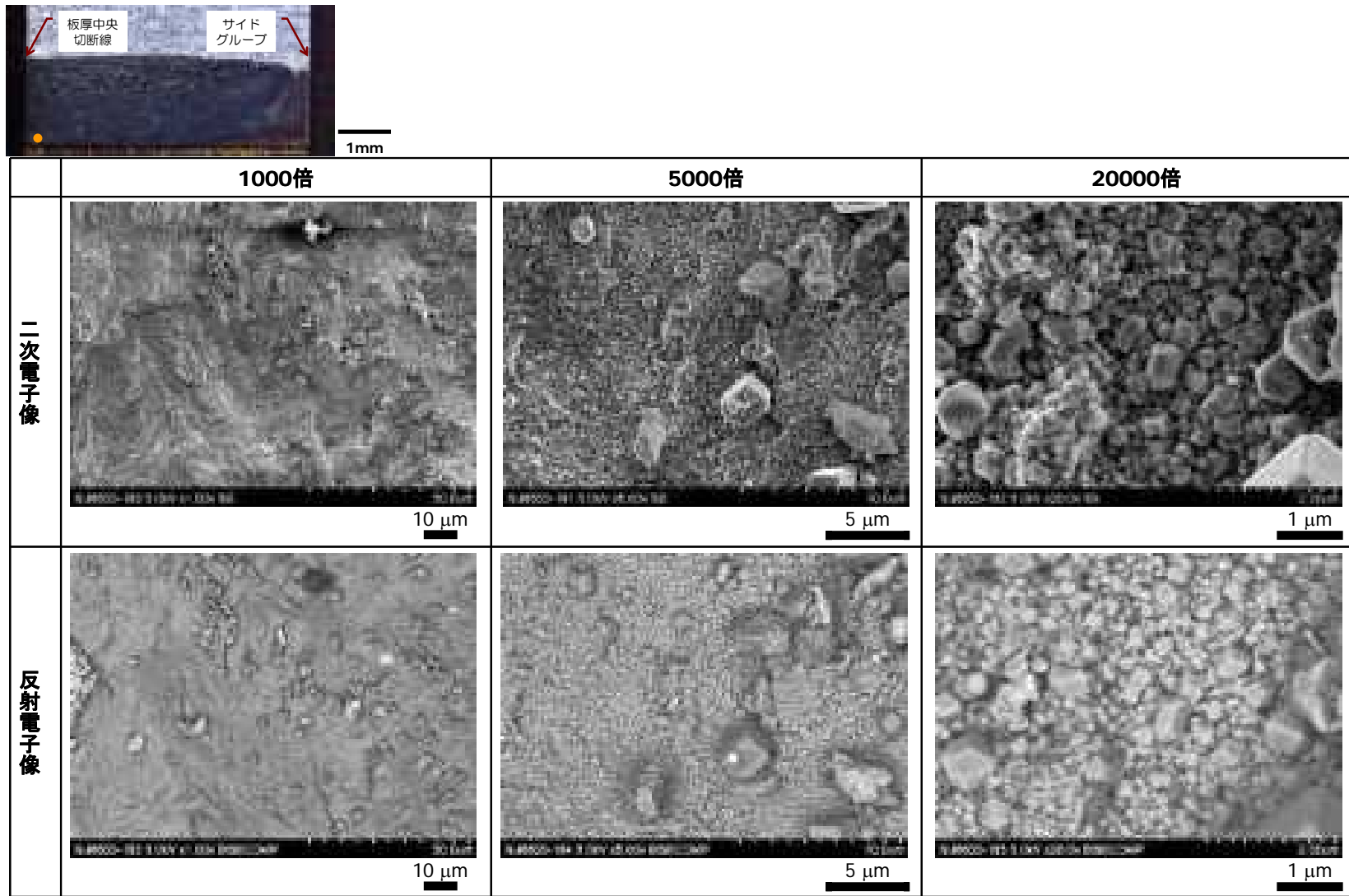
付録

5.2.1 CT 試験片のき裂内皮膜分析

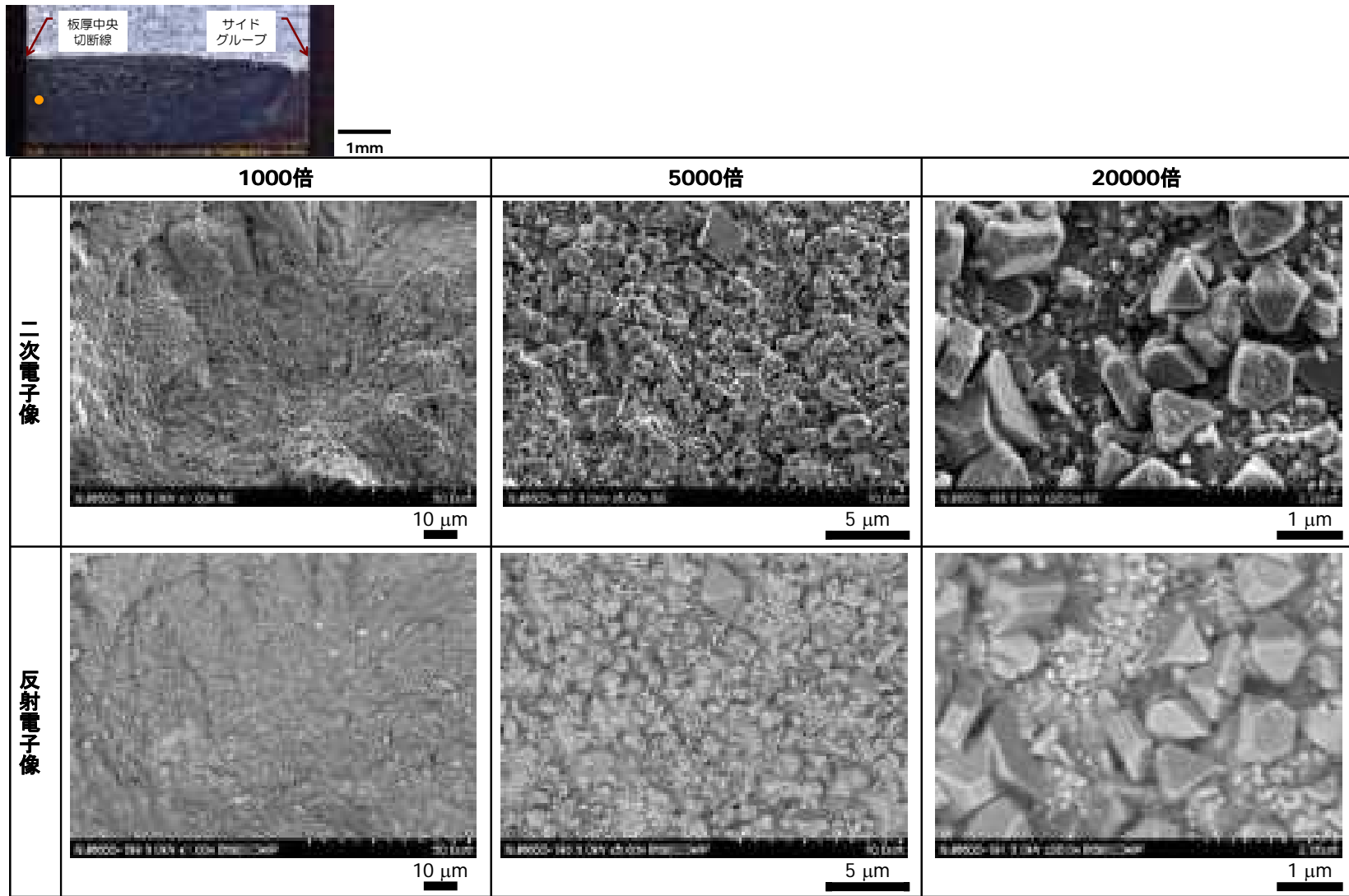
①CT 試験片の疲労き裂表面(破面)の SEM 観察



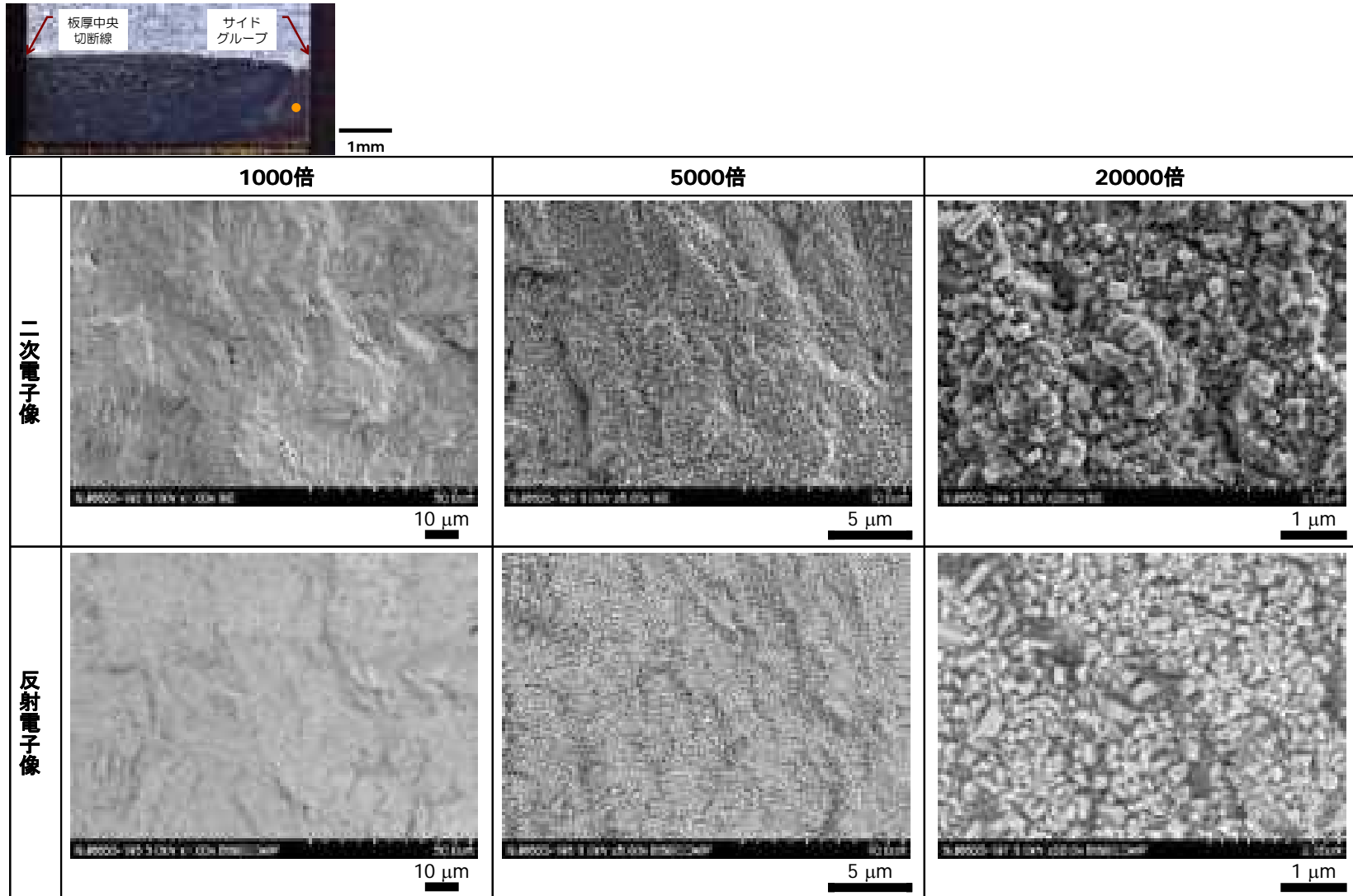
付録図 1(1) CT試験片(V6L5)のき裂表面(破面)に形成した酸化皮膜のSEM観察結果:観察位置(1)(き裂先端近傍)



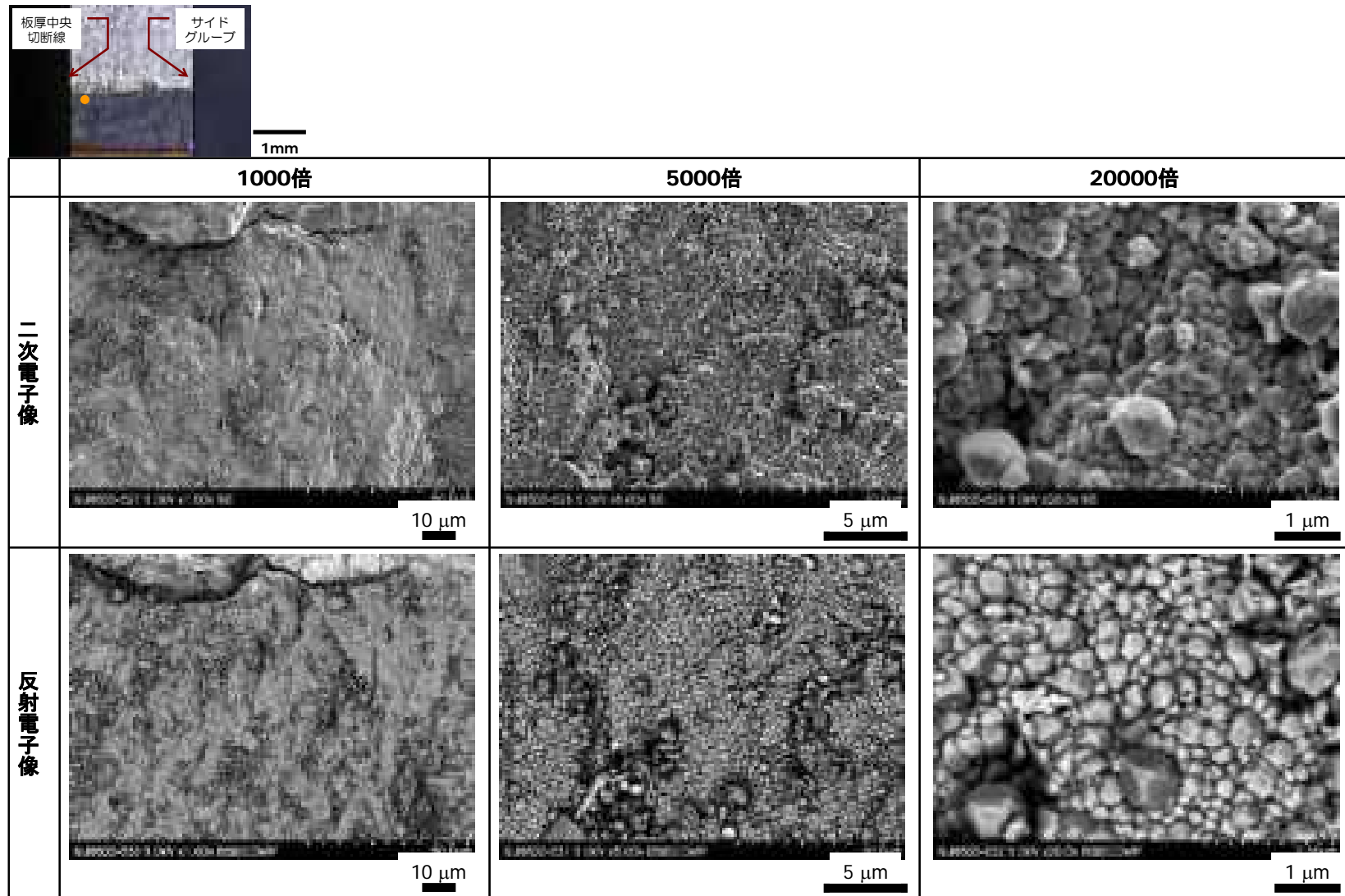
付録図 1(2) CT 試験片(V6L5)のき裂表面(破面)に形成した酸化皮膜の SEM 観察結果:観察位置(2)(機械加工部先端近傍)



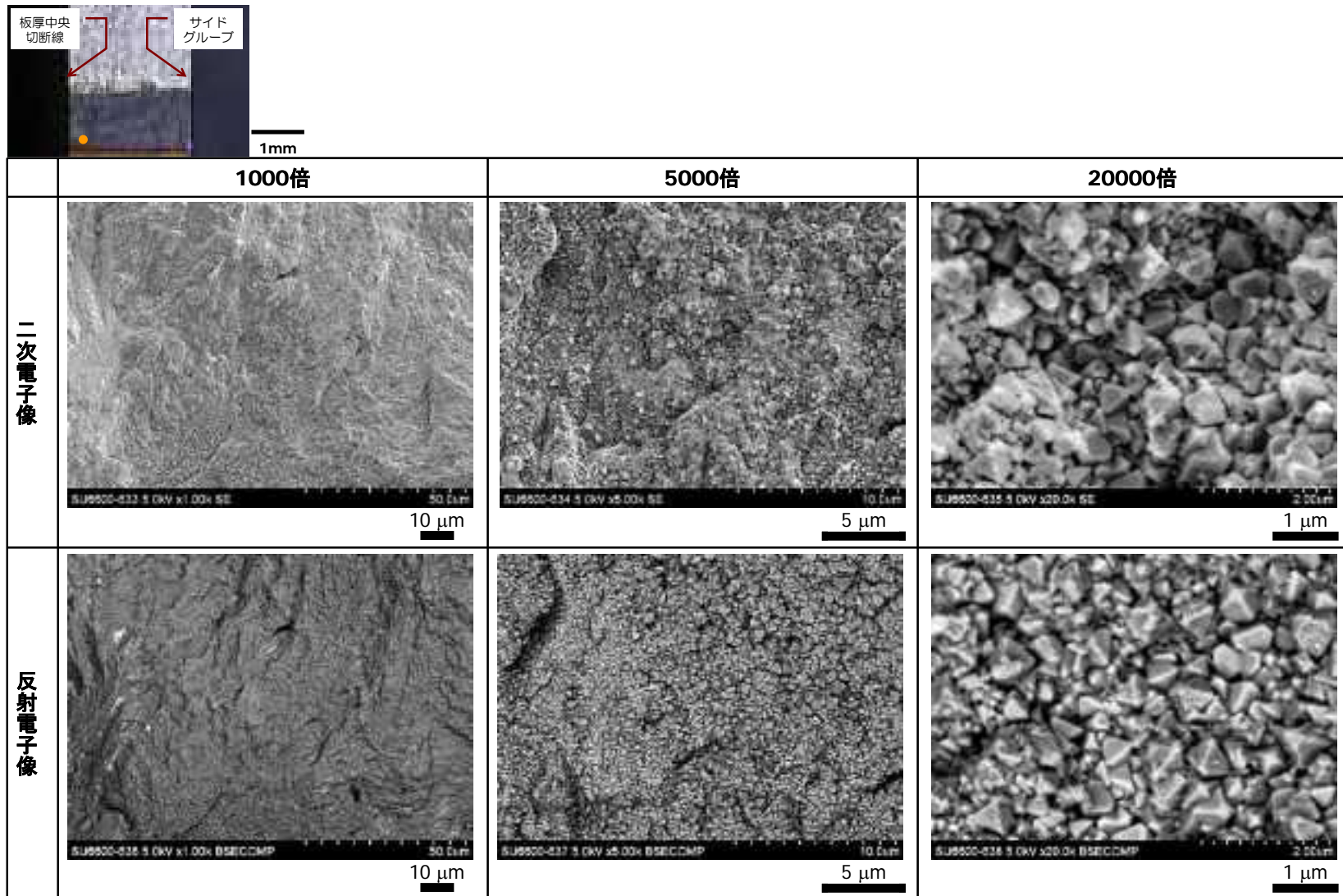
付録図 1 (3) CT 試験片(V6L5)のき裂表面(破面)に形成した酸化皮膜の SEM 観察結果;観察位置(3)(き裂長さ中間位置近傍)



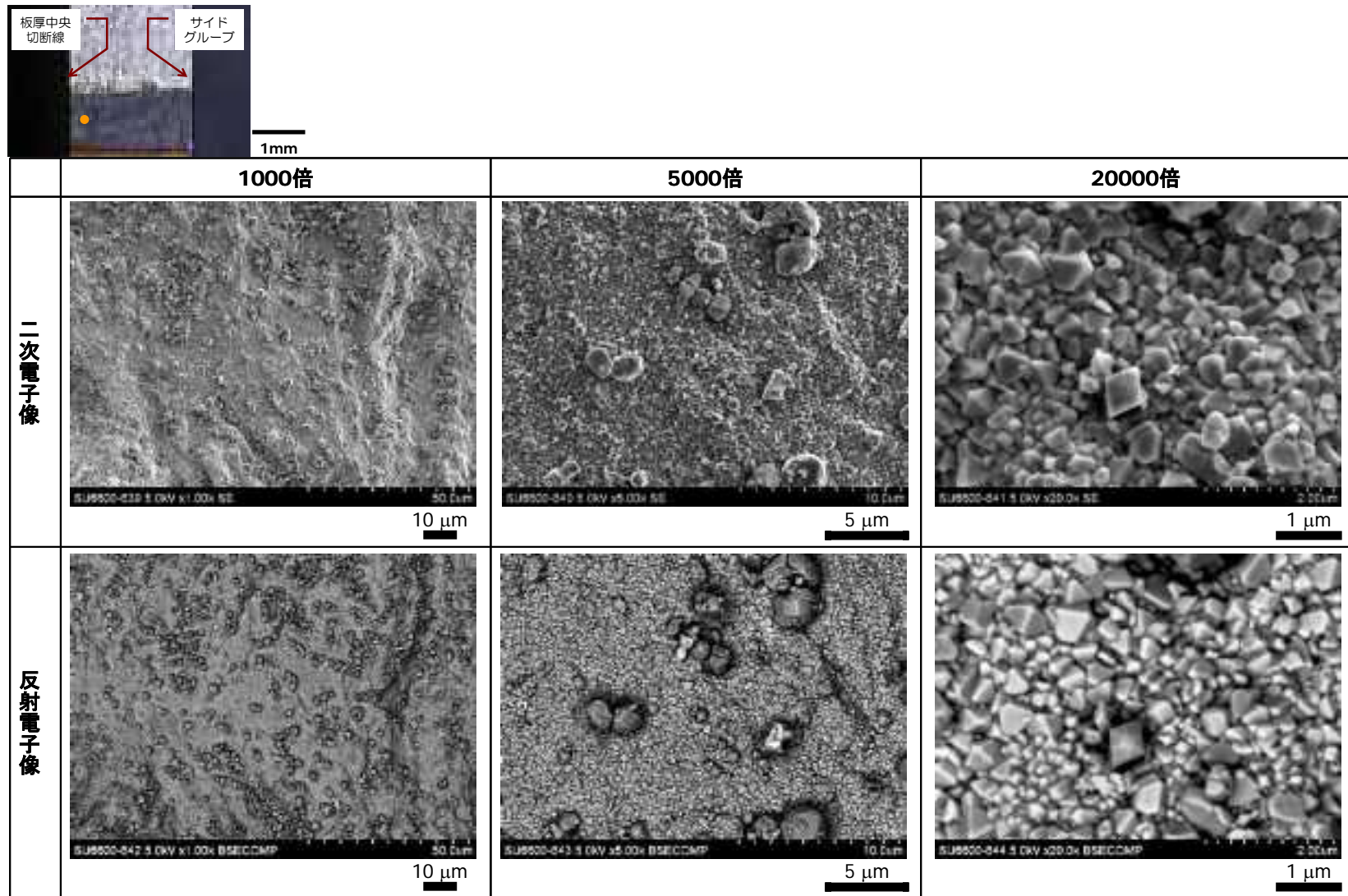
付録図 1 (4) CT 試験片(V6L5)のき裂表面(破面)に形成した酸化皮膜の SEM 観察結果:観察位置(3)(サイドグループ脇)



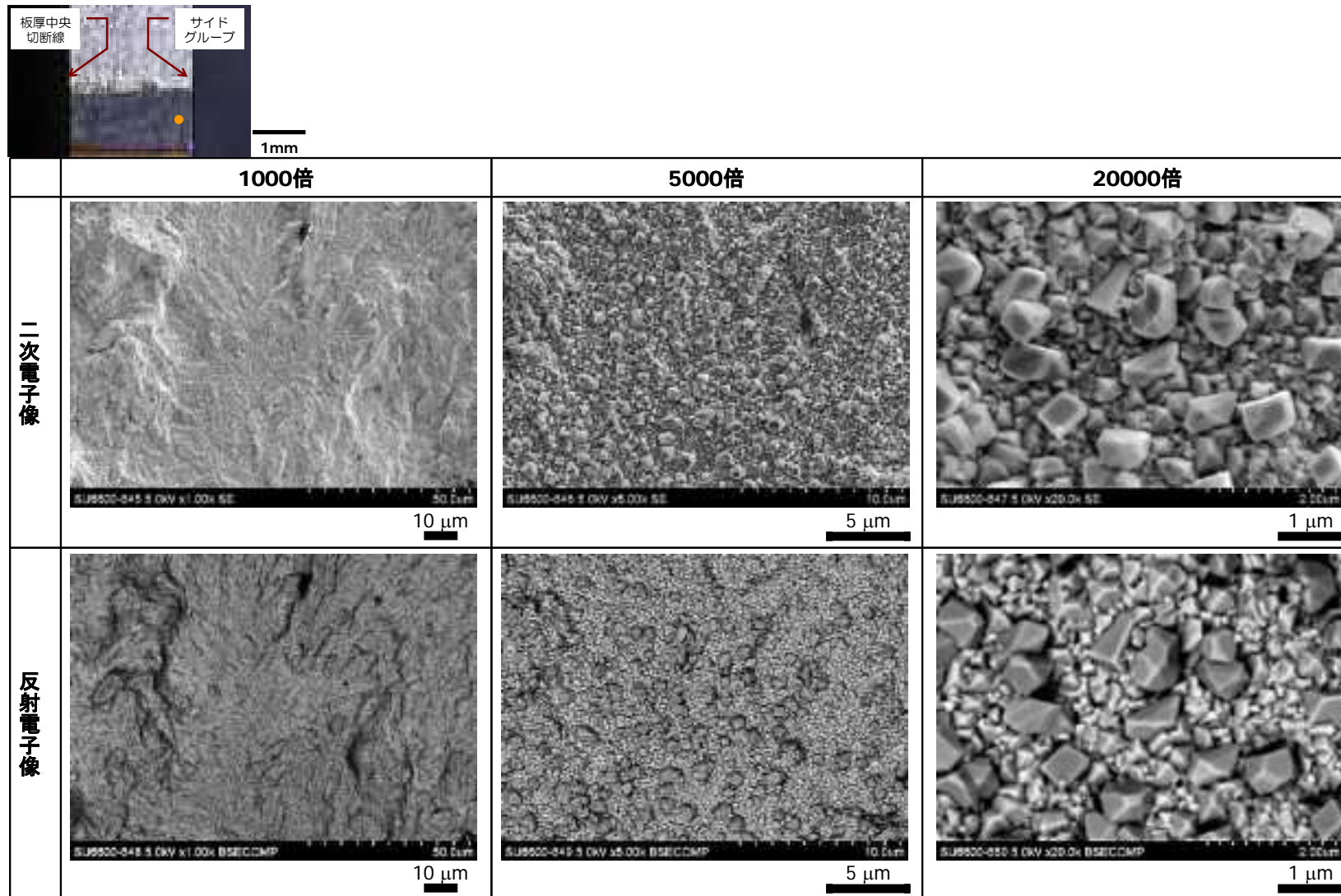
付録図 2(1) CT 試験片(FTLA)のき裂表面(破面)に形成した酸化皮膜の SEM 観察結果:観察位置(1)(き裂先端近傍)



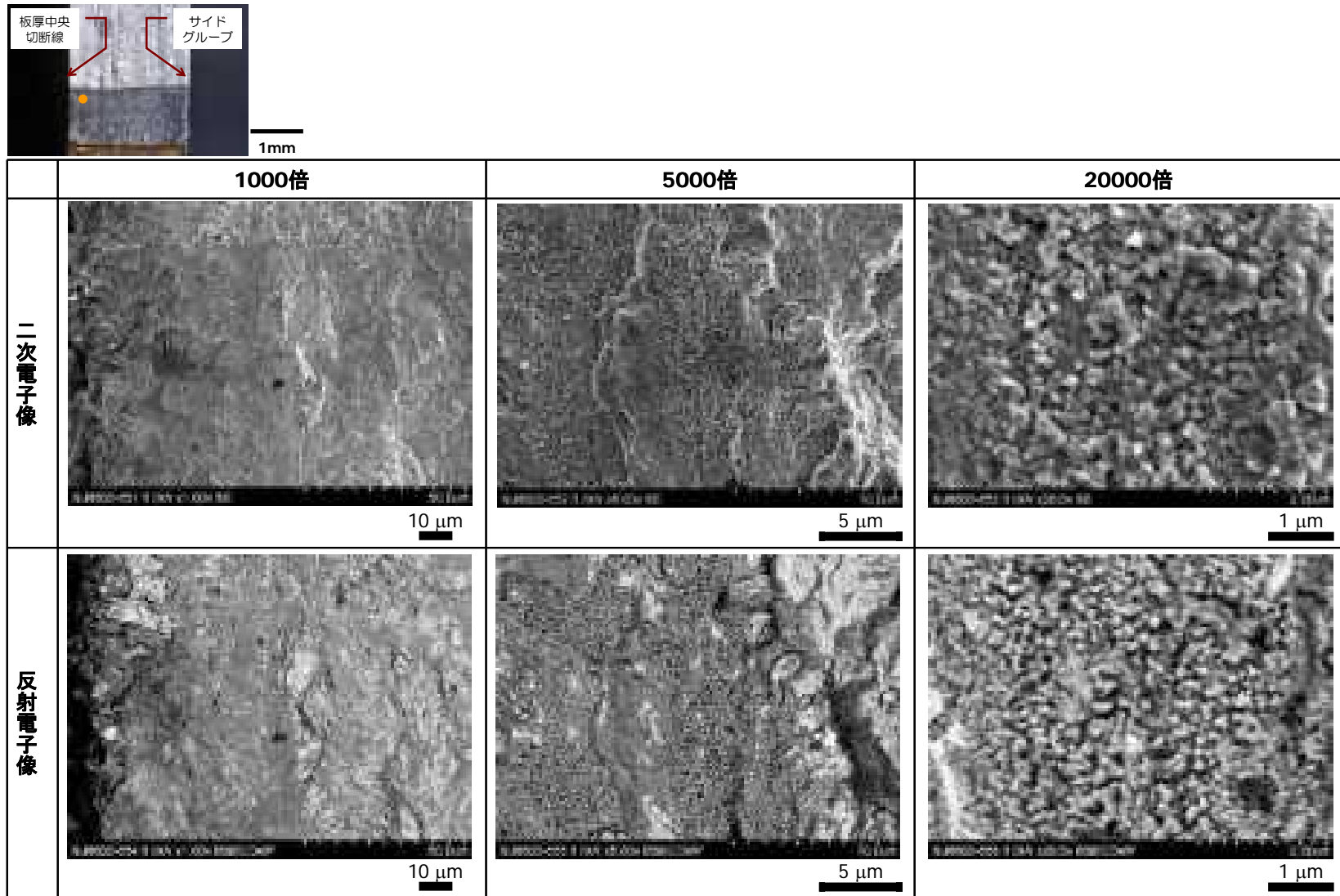
付録図 2 (2) CT 試験片(FTLA)のき裂表面(破面)に形成した酸化皮膜の SEM 観察結果:観察位置(2)(機械加工部先端近傍)



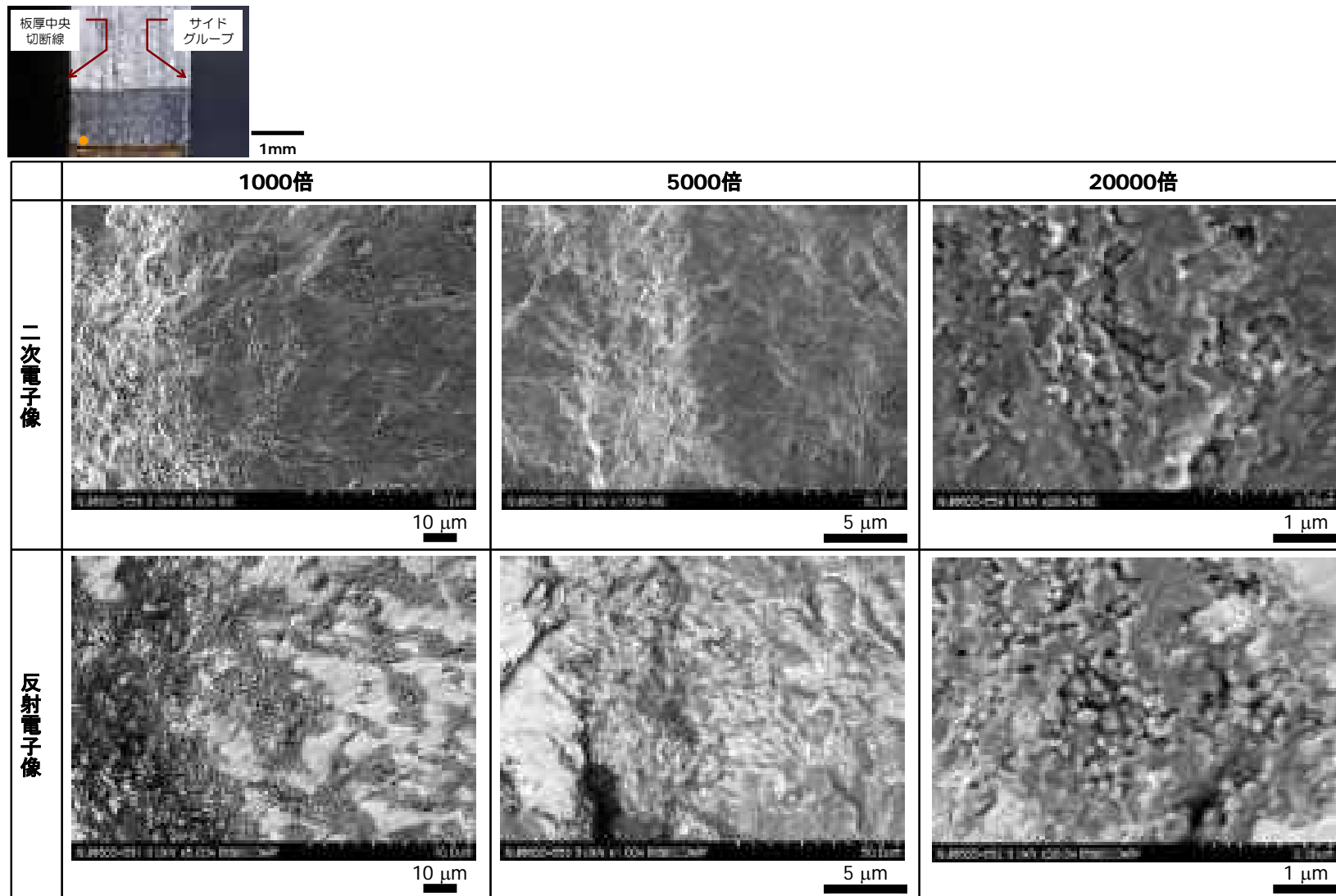
付録図 2 (3) CT 試験片(FTLA)のき裂表面(破面)に形成した酸化皮膜の SEM 観察結果:観察位置(3)(き裂長さ中間位置近傍)



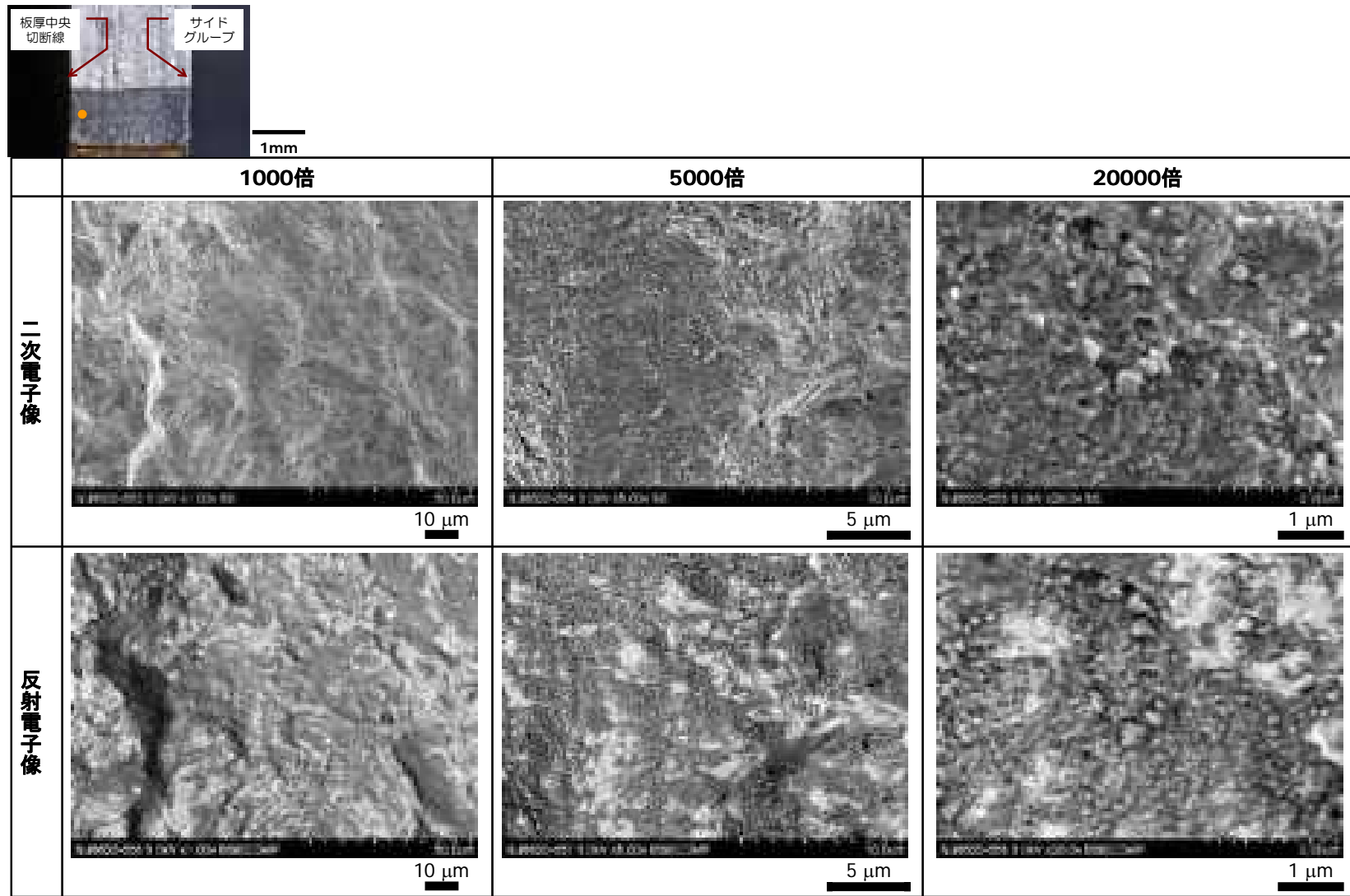
付録図 2 (4) CT 試験片(FTLA)のき裂表面(破面)に形成した酸化皮膜の SEM 観察結果:観察位置(4)(サイドグループ脇)



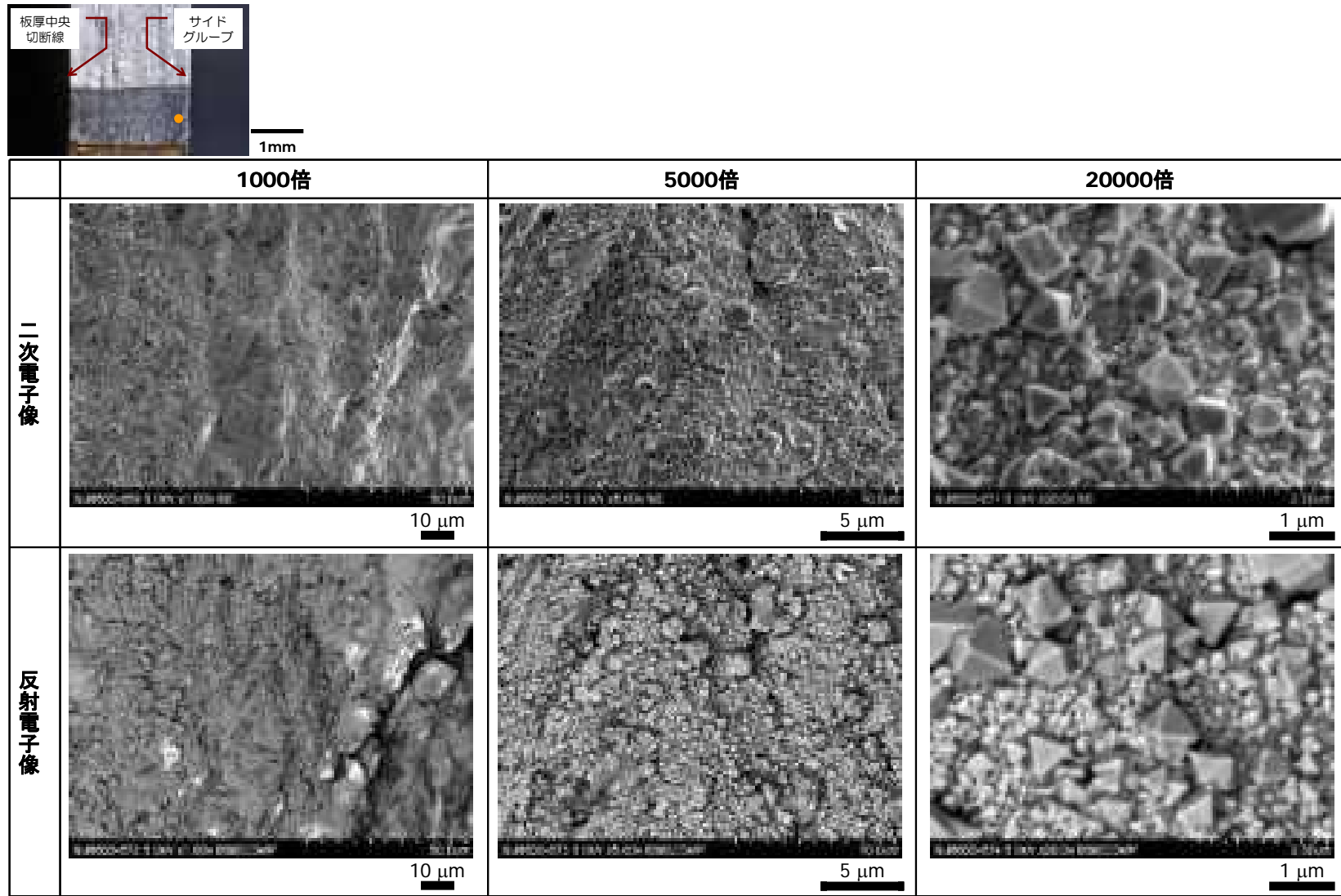
付録図 3(1) CT 試験片(FTLA)のき裂表面(破面)に形成した酸化皮膜の SEM 観察結果:観察位置(1)(き裂先端近傍)



付録図 3(2) CT 試験片(FTLA)のき裂表面(破面)に形成した酸化皮膜の SEM 観察結果:観察位置(2)(機械加工部先端近傍)

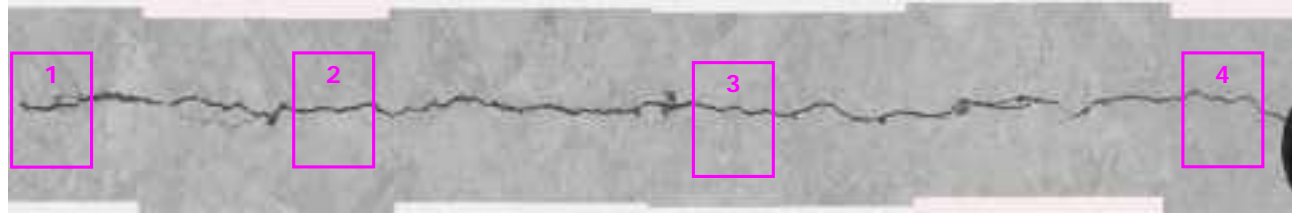


付録図 3(3) CT 試験片(FTLA)のき裂表面(破面)に形成した酸化皮膜の SEM 観察結果;観察位置(3)(き裂長さ中間位置近傍)



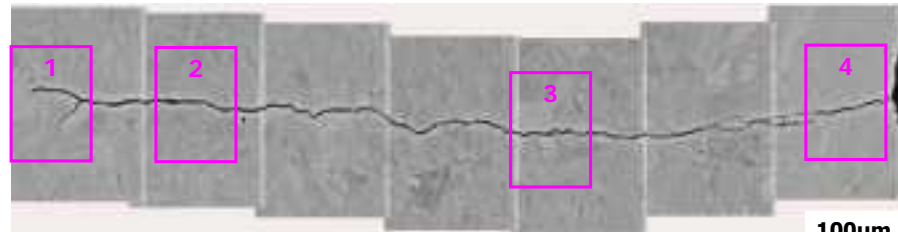
付録図 3(4) CT 試験片(FTLA)のき裂表面(破面)に形成した酸化皮膜の SEM 観察結果:観察位置(4)(サイドグループ脇)

②0.5T-CT 試験片疲労き裂断面の SEM 観察



100μm

(1)板厚中央



100μm

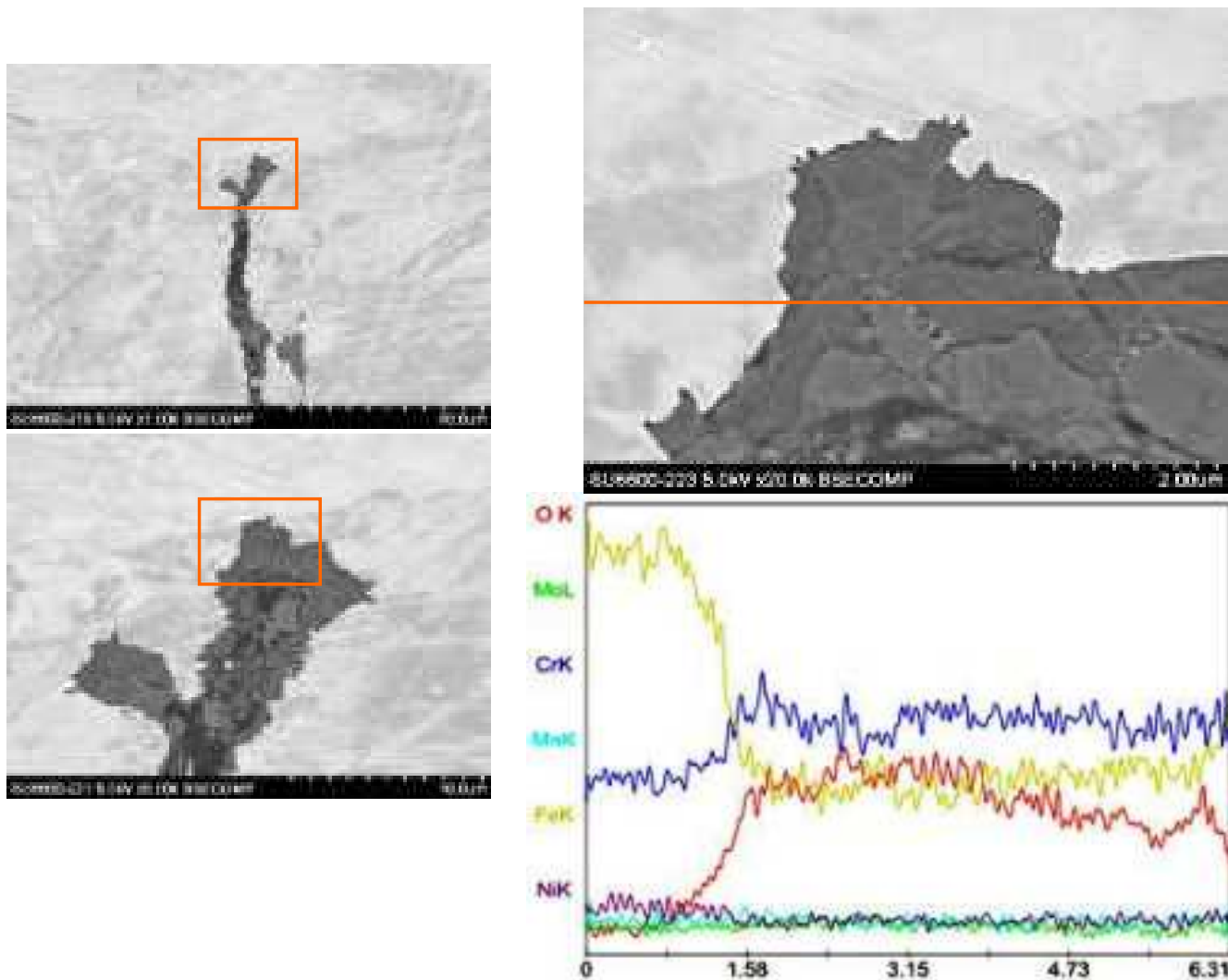
(2)サイドグループ脇

付録図 4 CT 試験片(V6L5)のき裂断面 SEM 観察結果及び拡大観察位置(視野 1~4)



	1000倍	5000倍	20000倍
二次電子像			
反射電子像			

付録図 5(1) CT 試験片(V6L5) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端

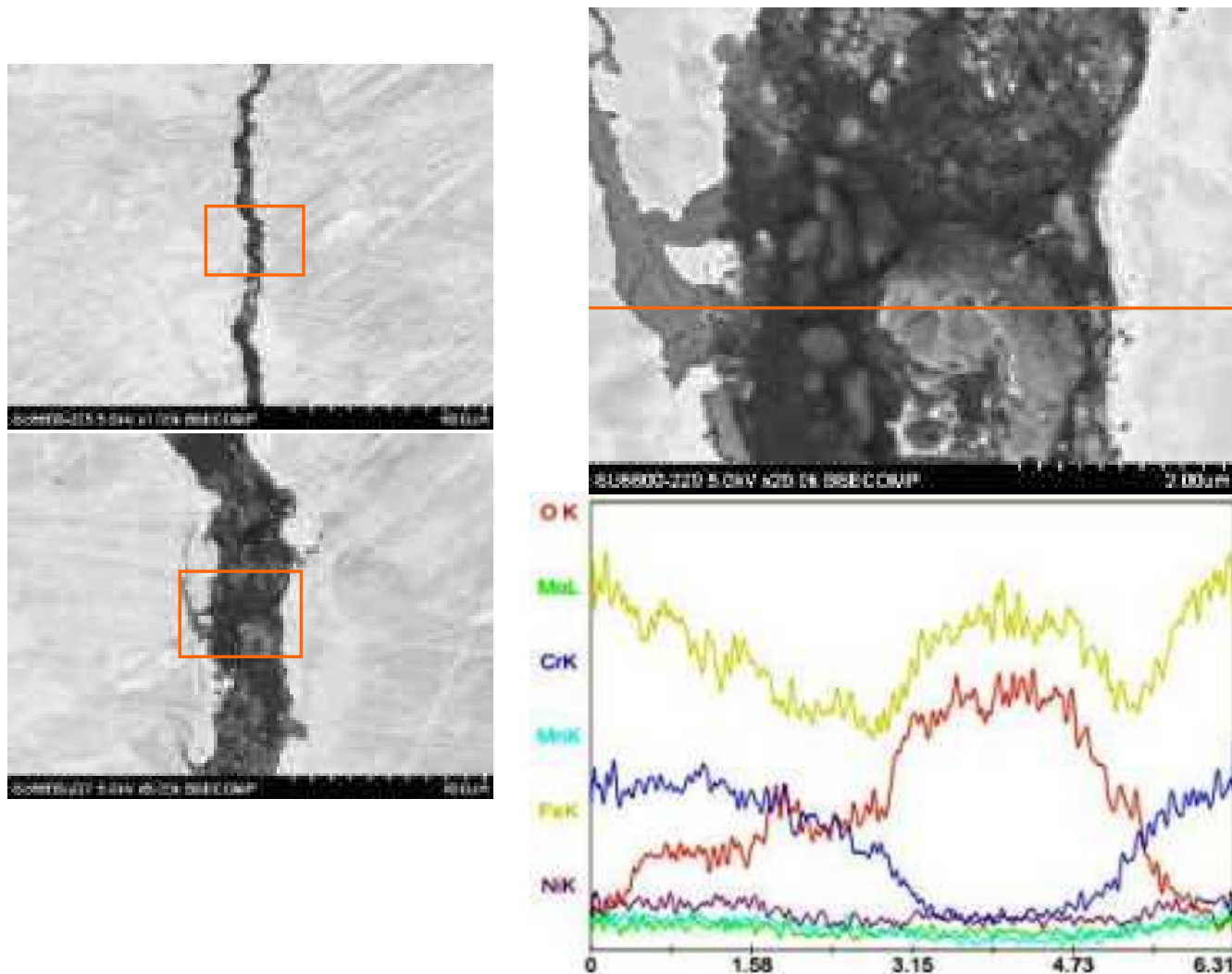


付録図 6(2) CT 試験片(V6L5) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端 EDX 線分析
 (観察箇所：左付録付録図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

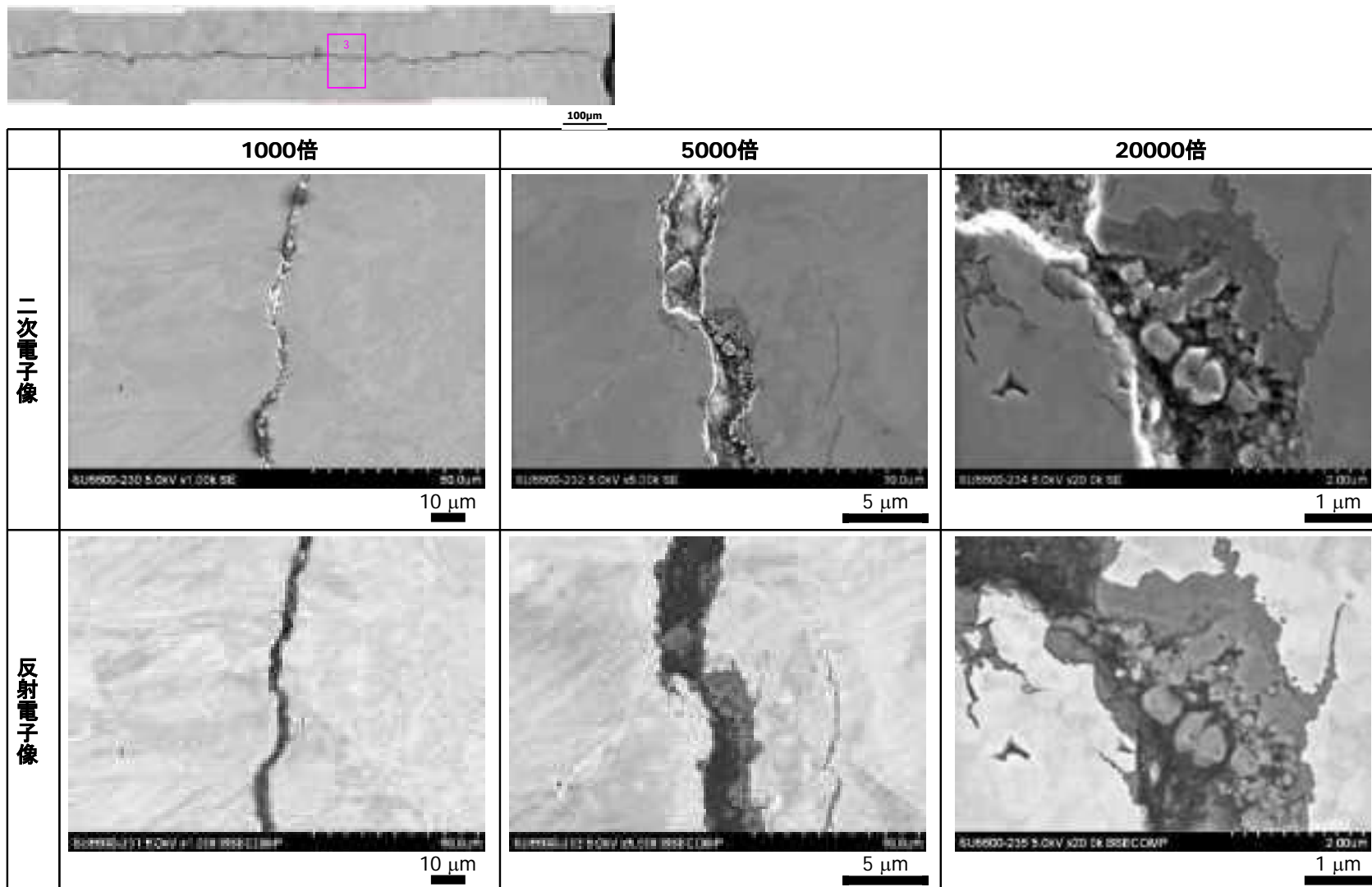


	1000倍	5000倍	20000倍
二次電子像			
反射電子像			

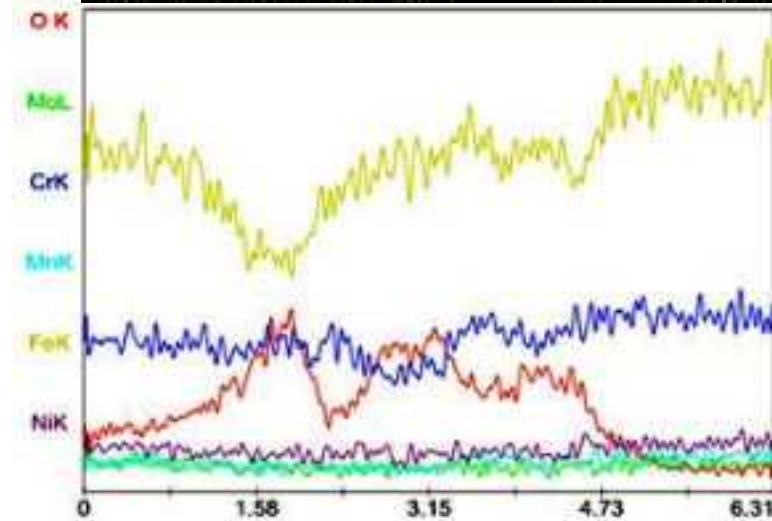
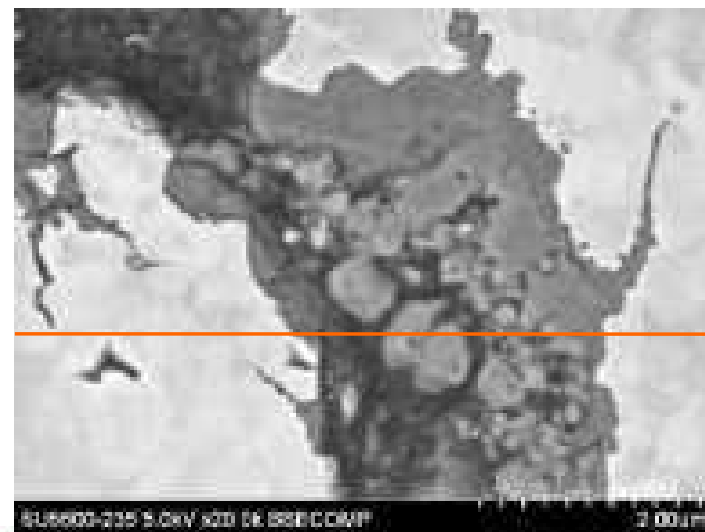
付録図 5 (3) CT 試験片(V6L5)板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 2 き裂先端近傍



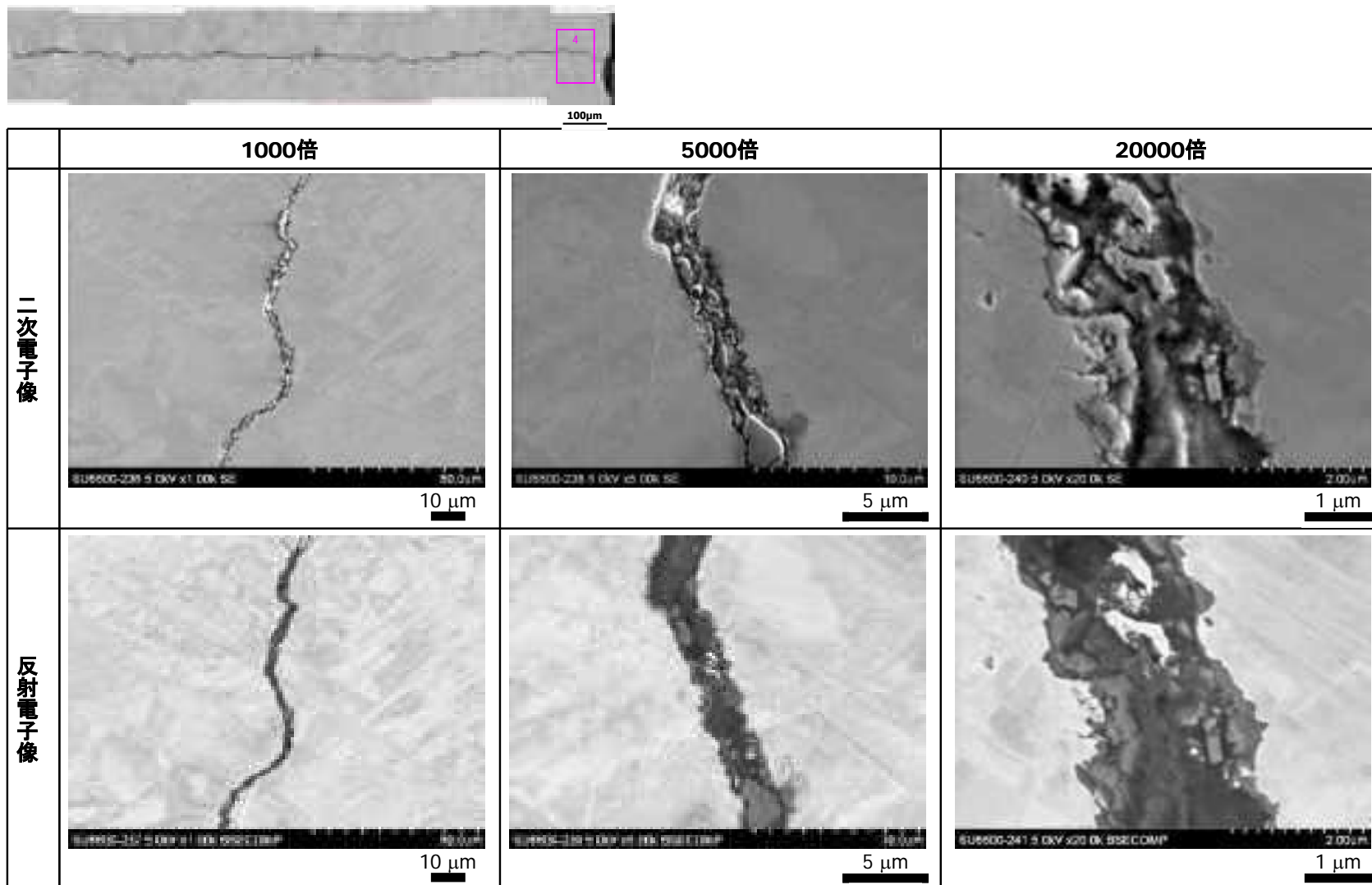
付録図 5 (4) CT 試験片(V6L5)板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 2 き裂先端近傍 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)



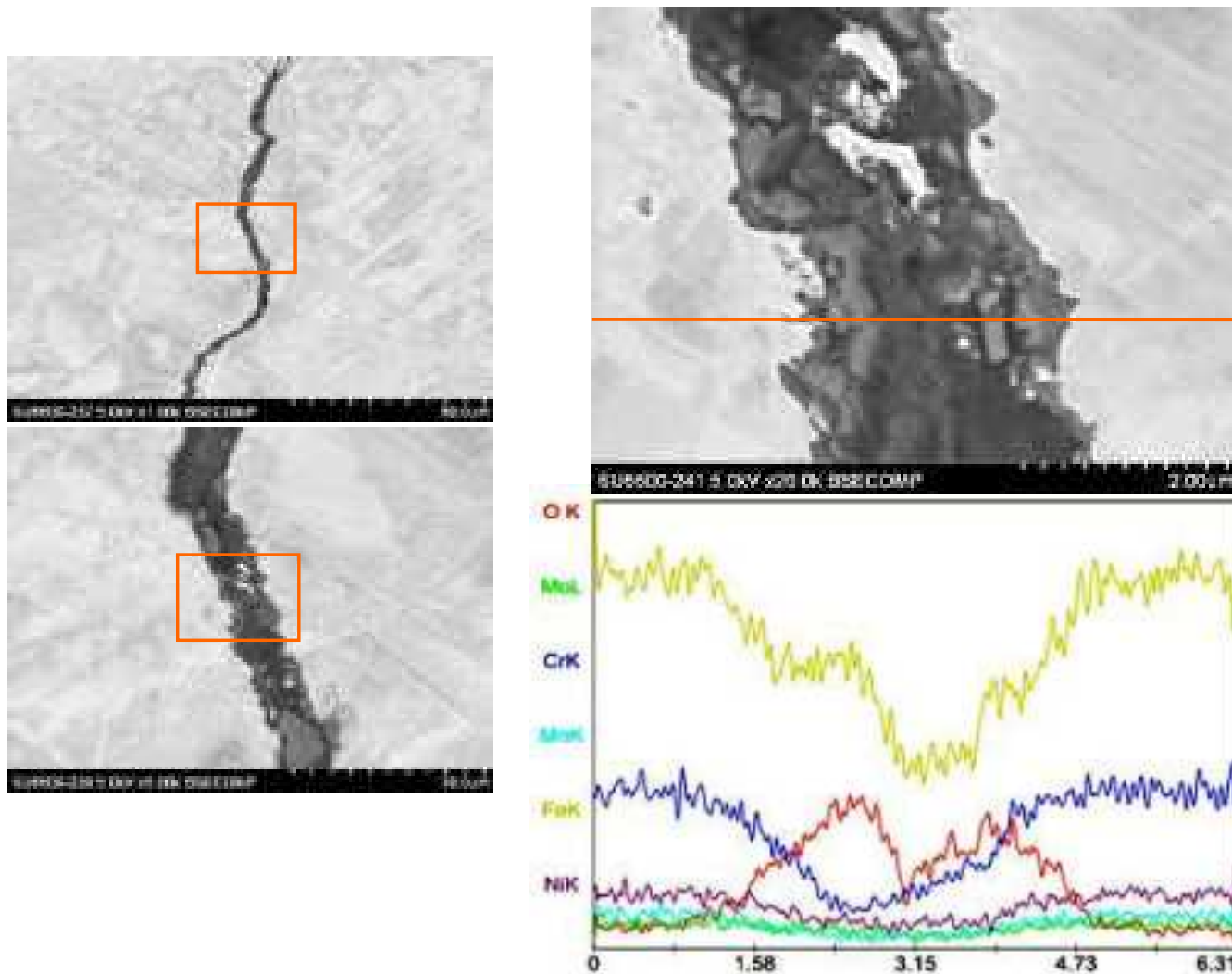
付録図 5(5) CT 試験片(V6L5) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 3 き裂長さ中間位置



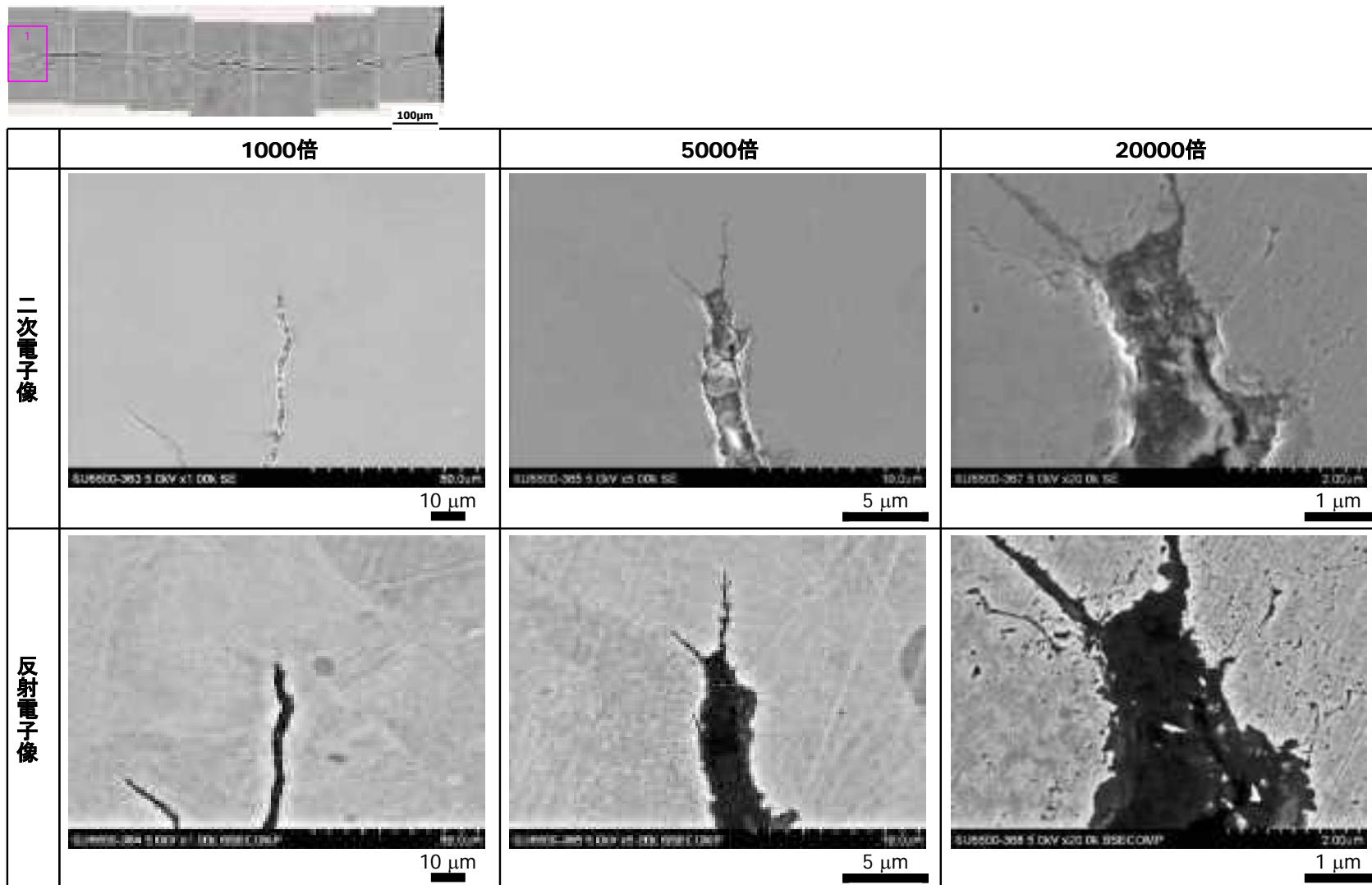
付録図 5(6) CT 試験片(V6L5) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 3 き裂長さ中間位置 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)



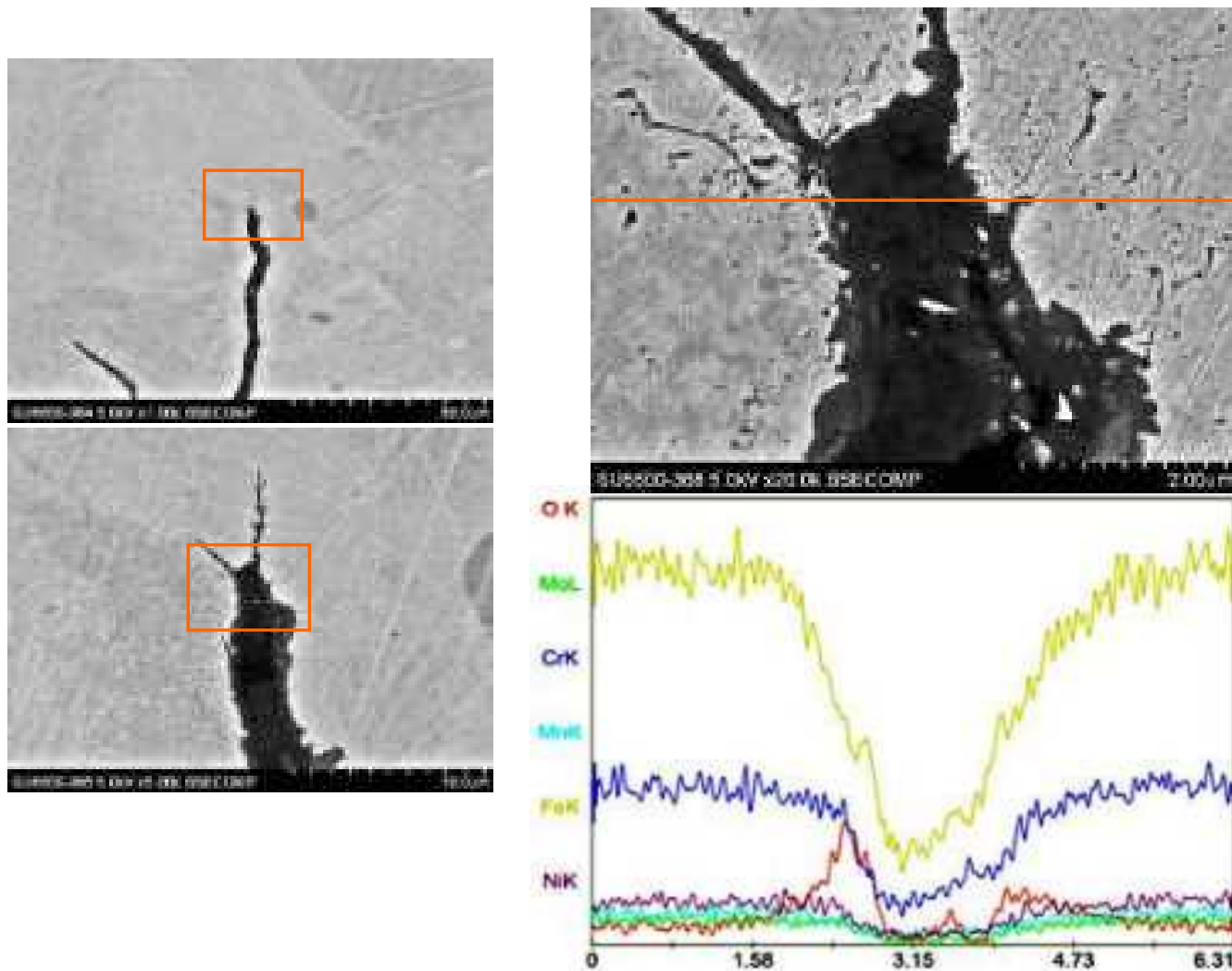
付録図 5(7) CT 試験片(V6L5) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍



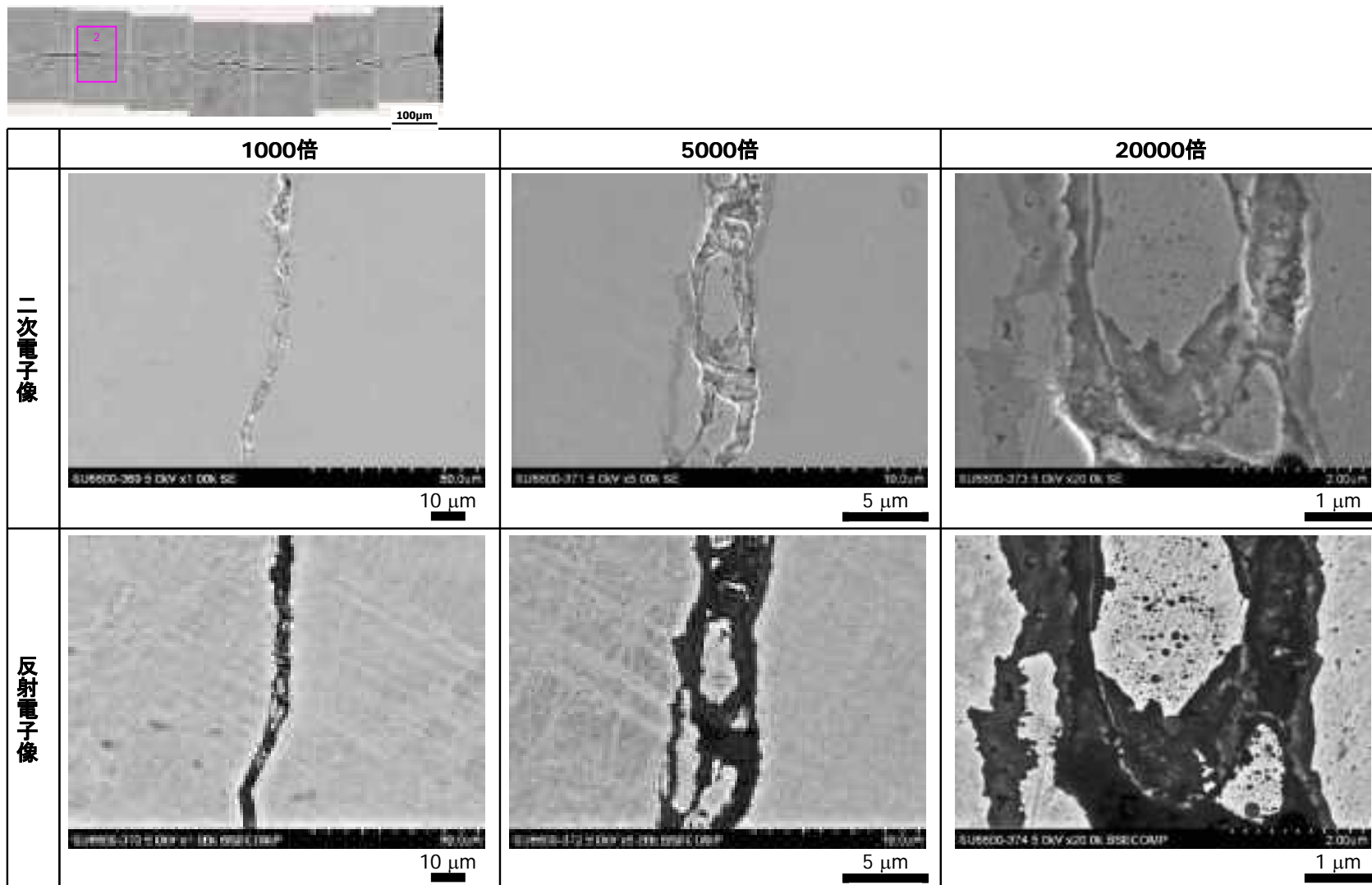
付録図 5(8) CT 試験片(V6L5) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)



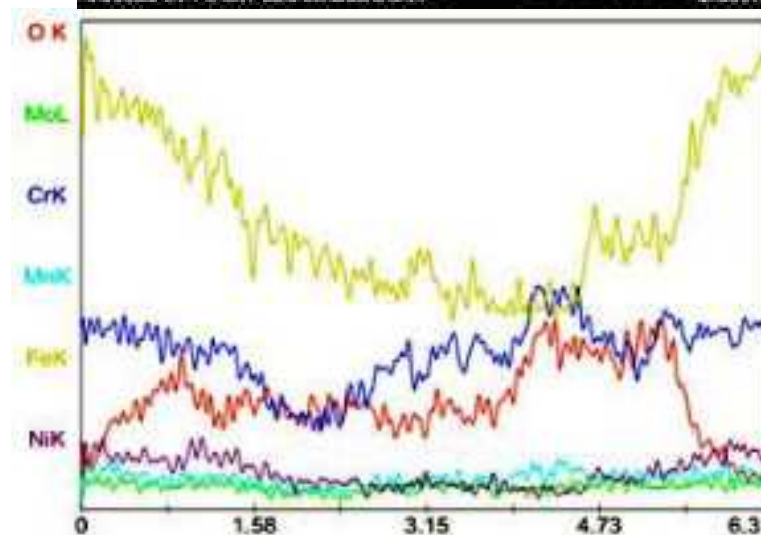
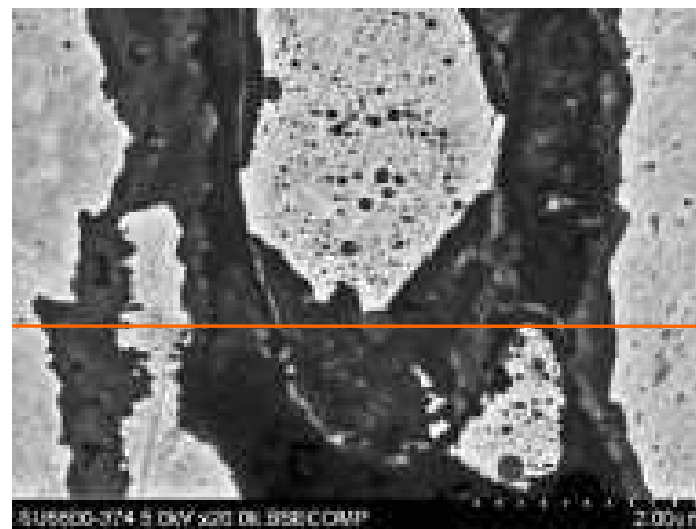
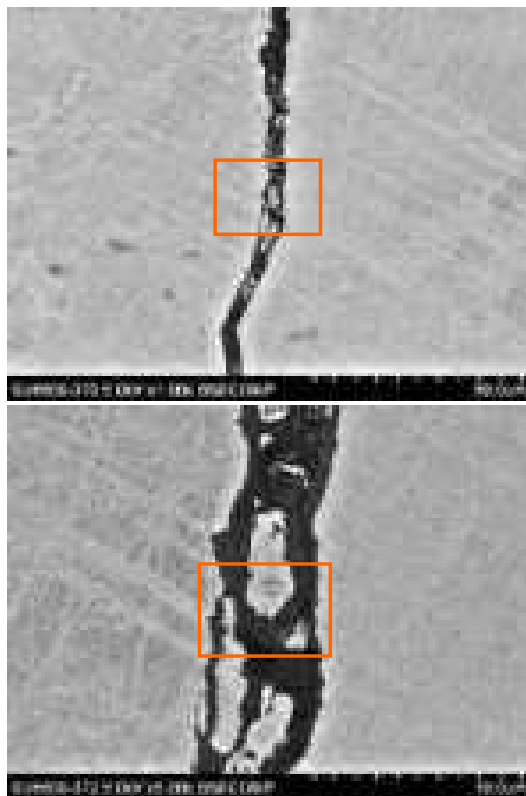
付録図 7(1) CT 試験片(V6L5)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端



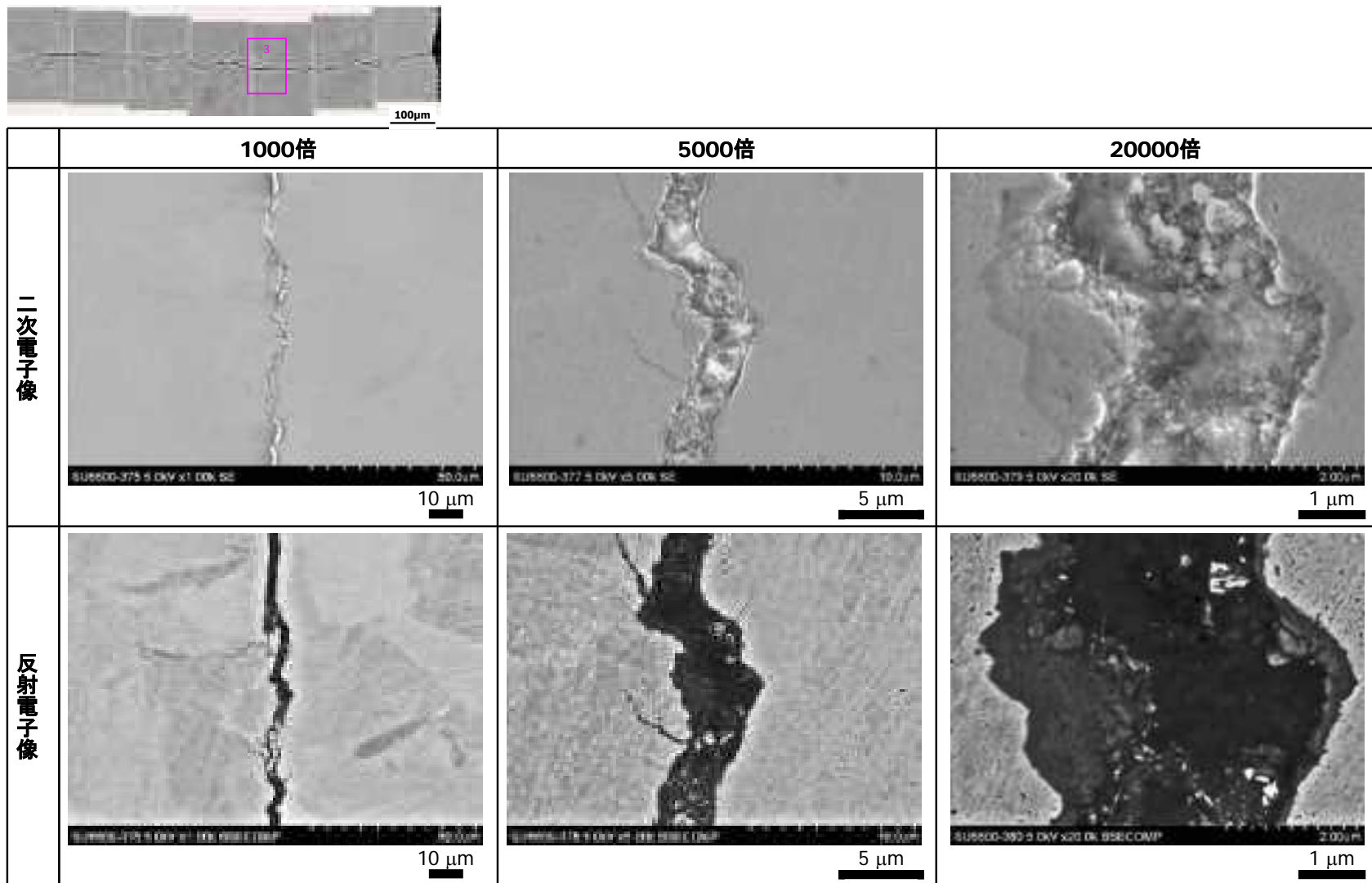
付録図 7(2) CT 試験片(V6L5)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)



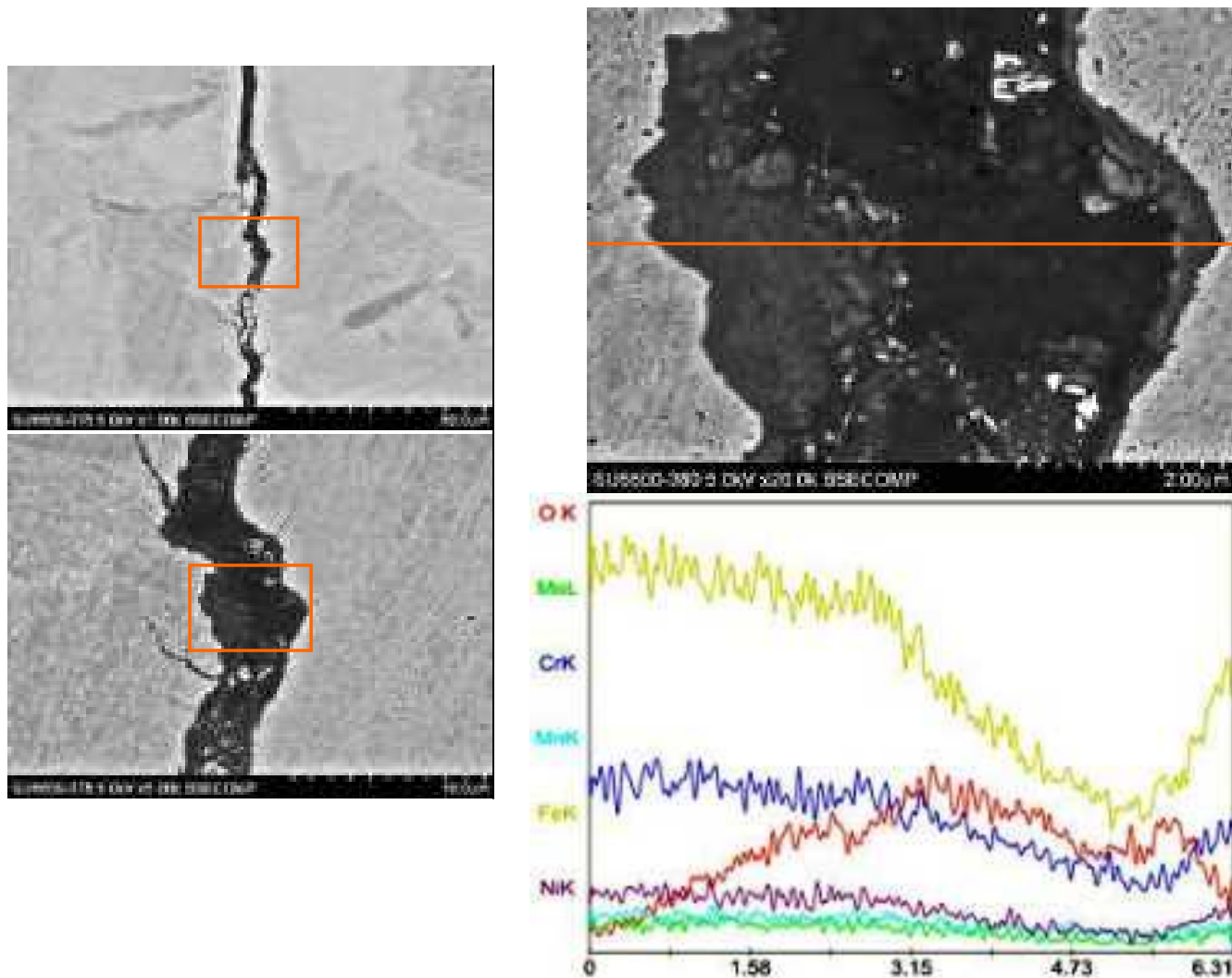
付録図 7(3) CT試験片(V6L5)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 2 き裂先端近傍



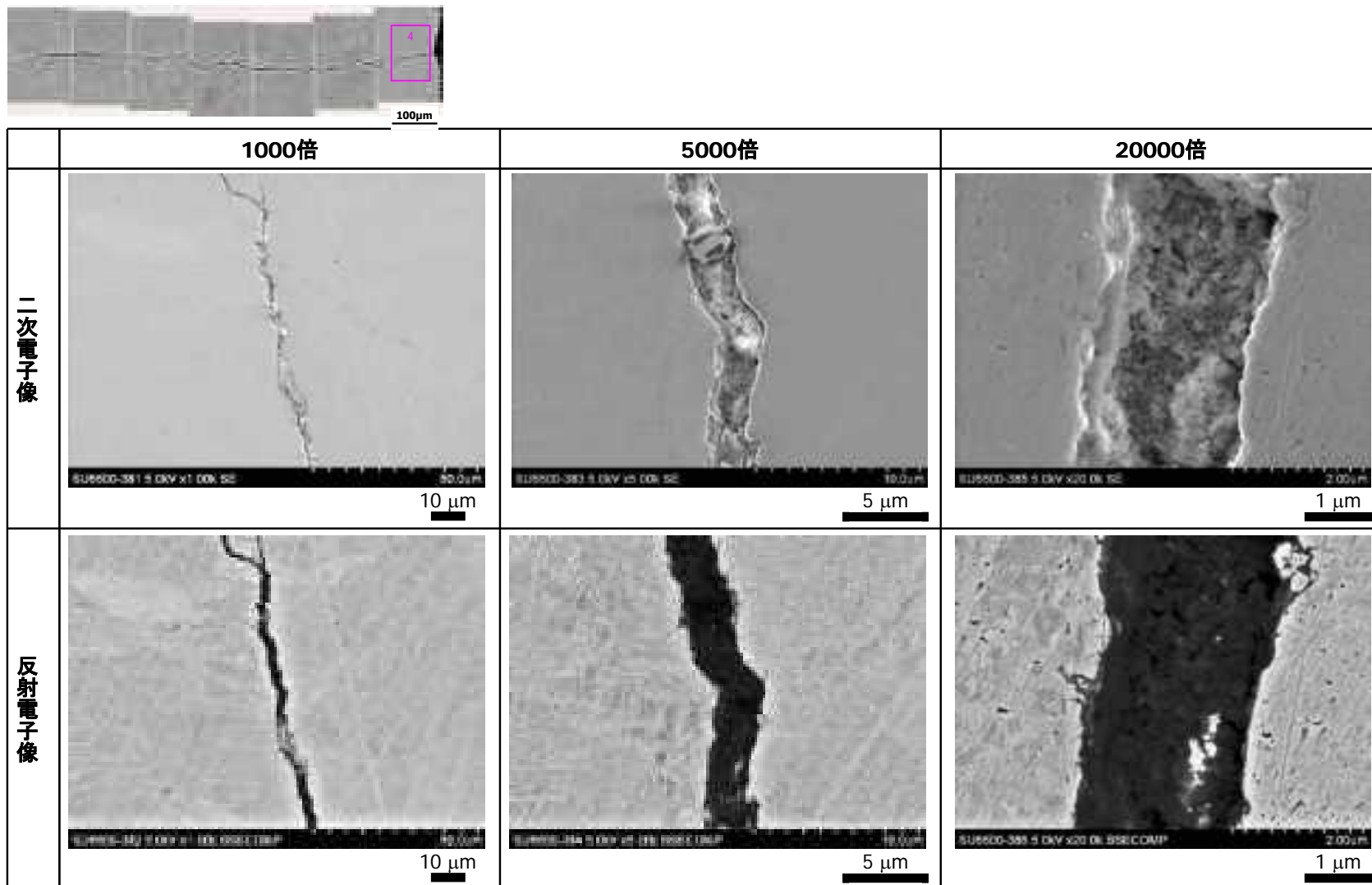
付録図 7(4) CT 試験片(V6L5)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 2 き裂先端近傍 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)



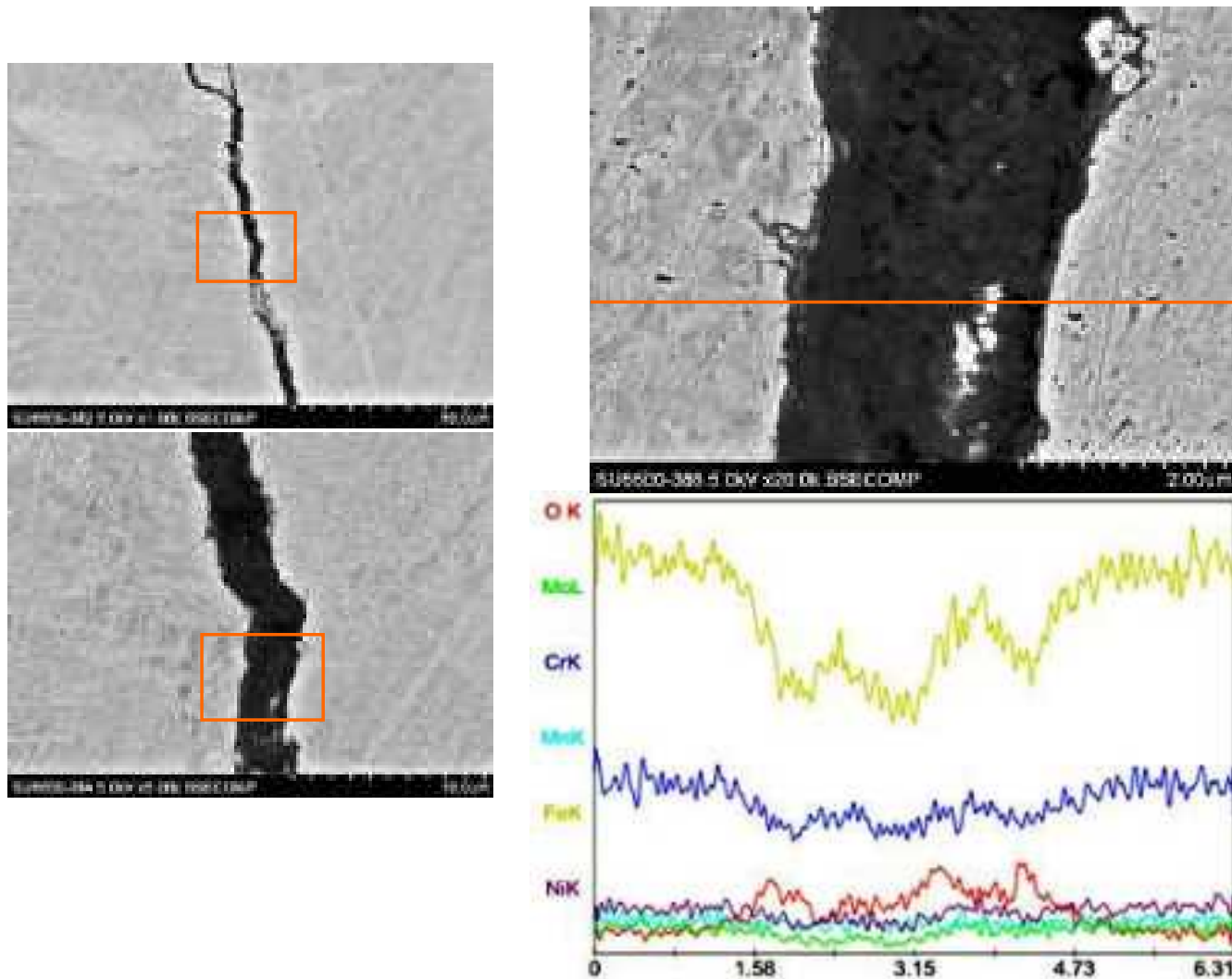
付録図 7 (5) CT 試験片(V6L5)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 3 き裂長さ中間位置



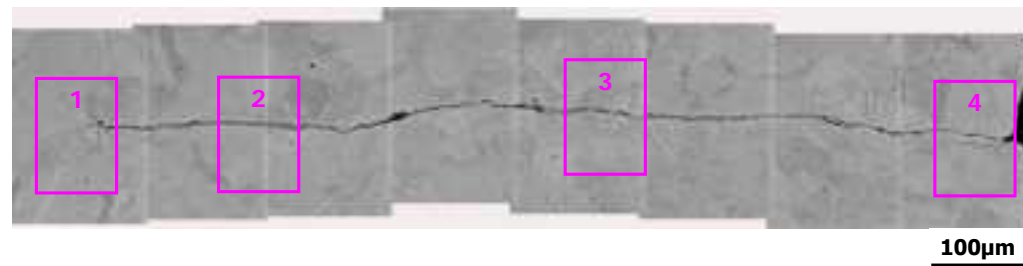
付録図 7(6) CT 試験片(V6L5)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 3 き裂長さ中間位置 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)



付録図 7(7) CT試験片(V6L5)サイドグループ脇のき裂断面 SEM観察結果 観察位置：視野4 機械加工部近傍



付録図 7(8) CT 試験片(V6L5)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

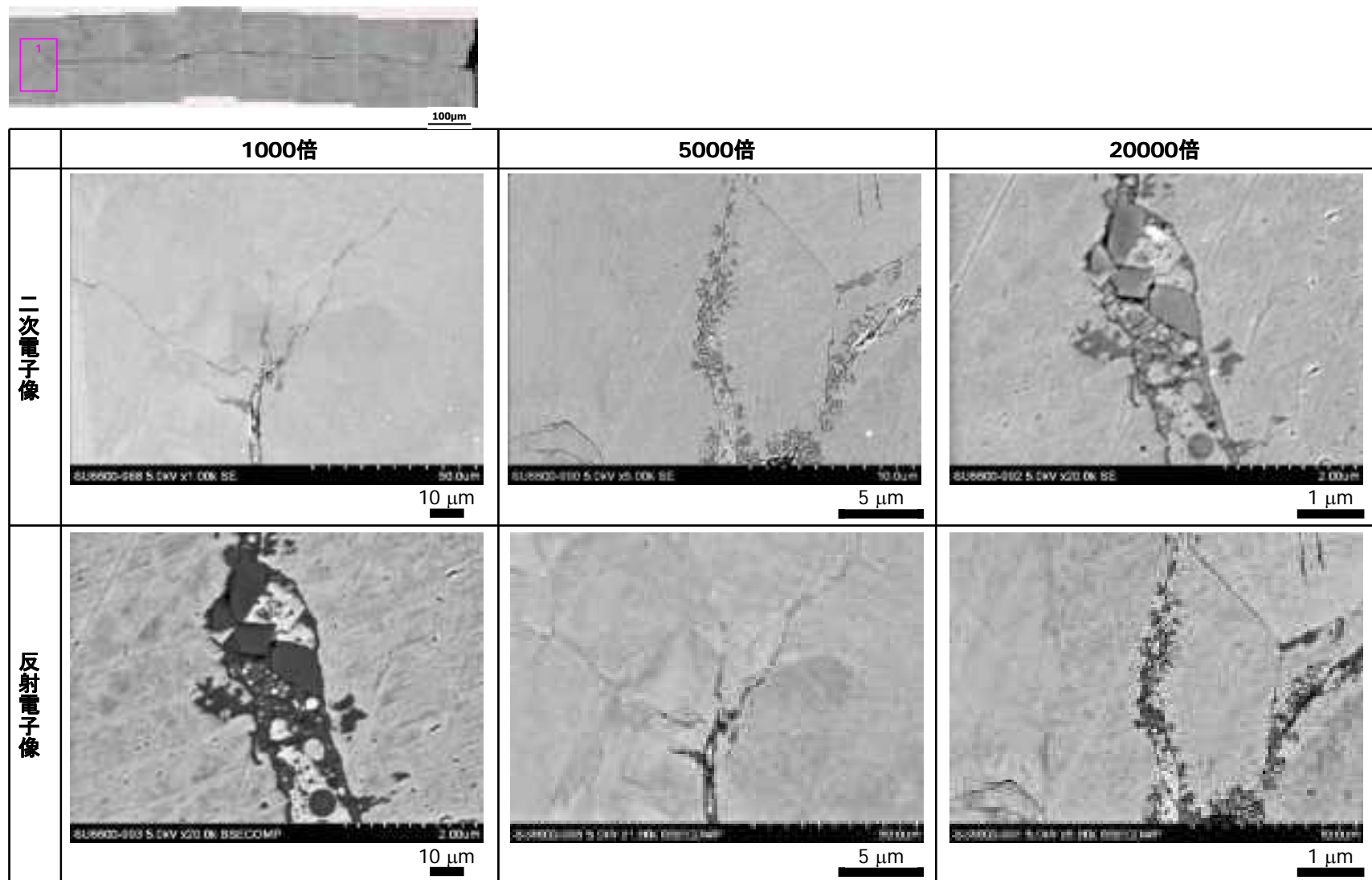


(1)板厚中央

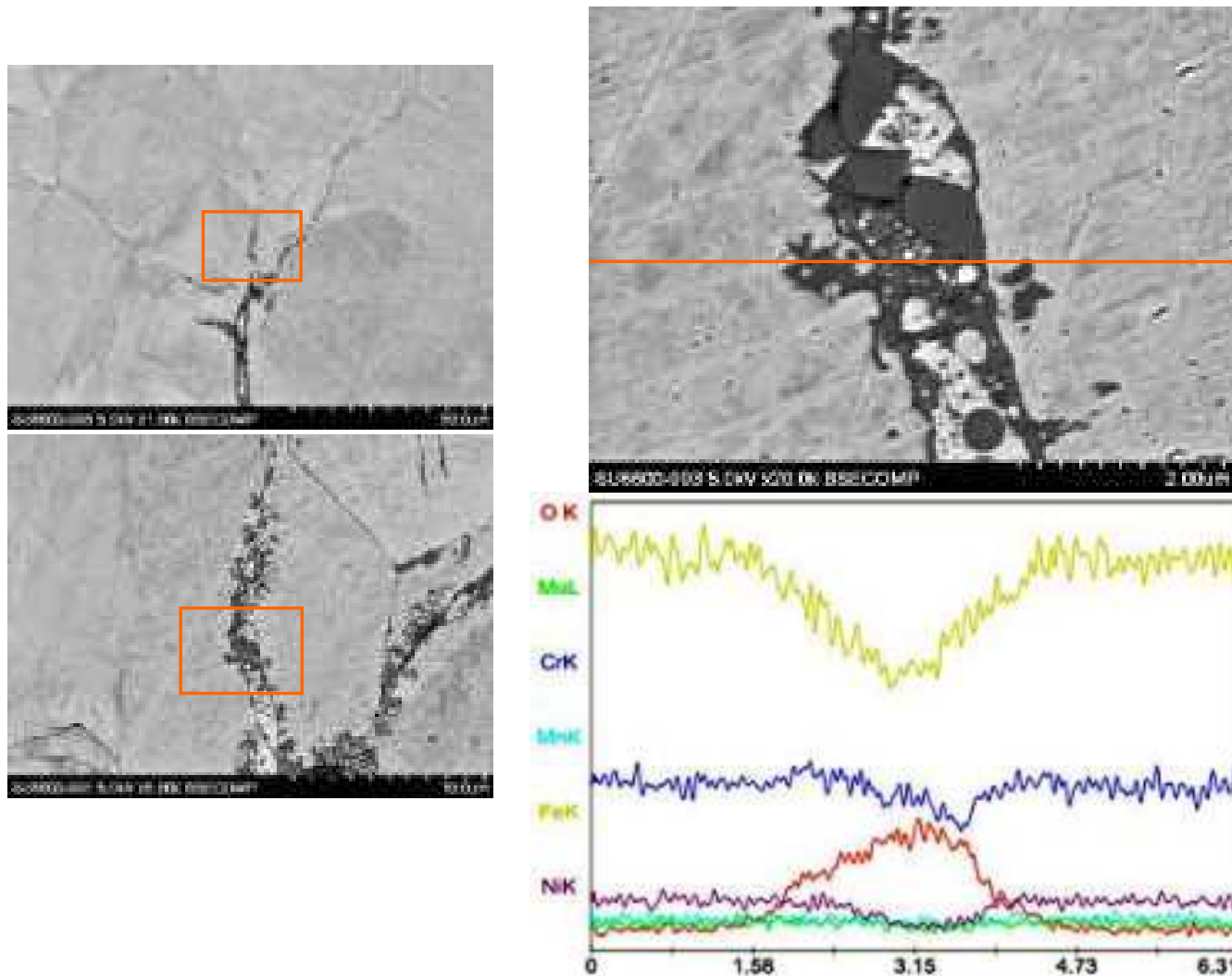


(2)サイドグループ脇

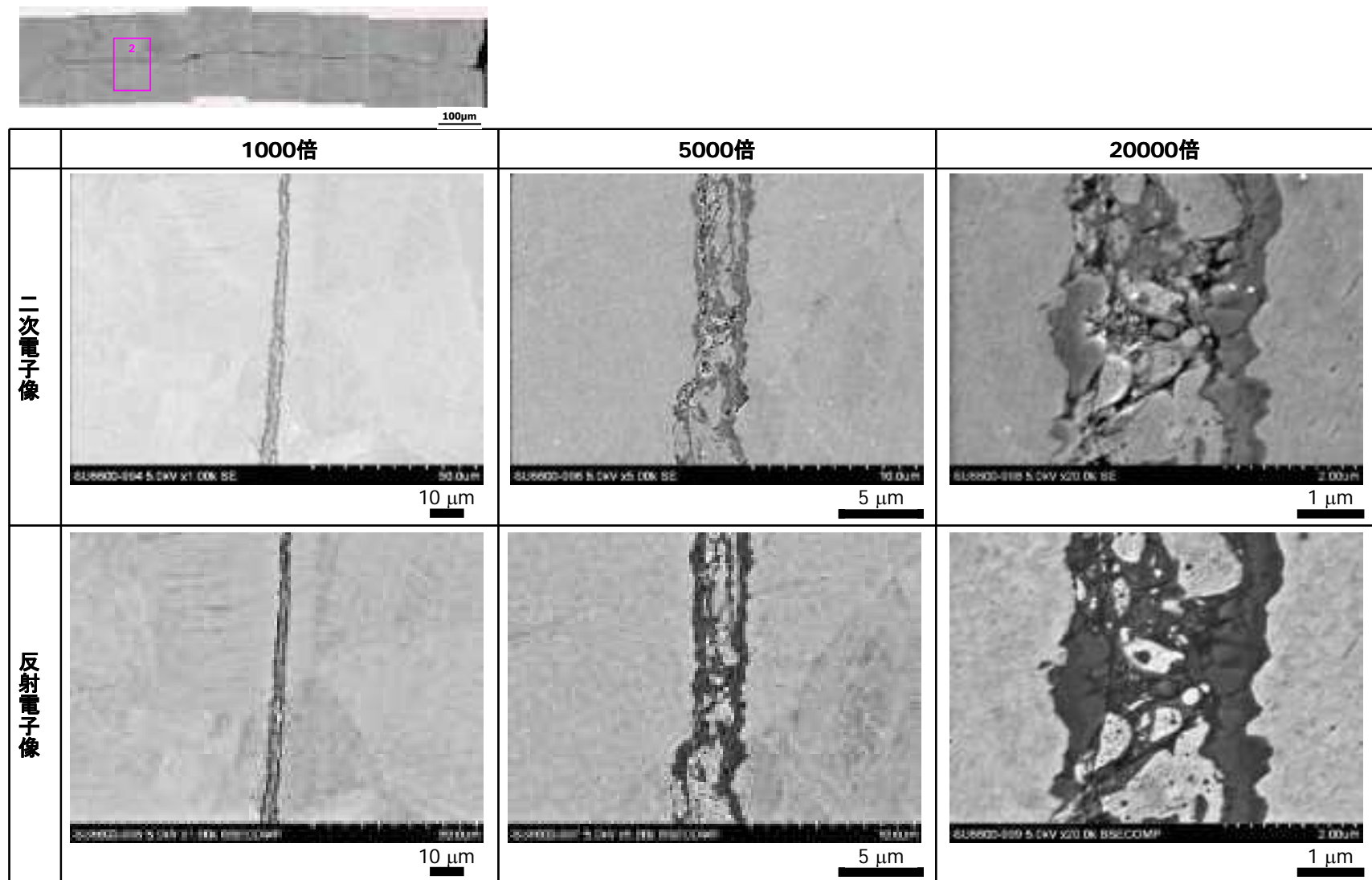
付録図 8 CT 試験片(FTLA)のき裂断面 SEM 観察結果及び拡大観察位置(視野 1~4)



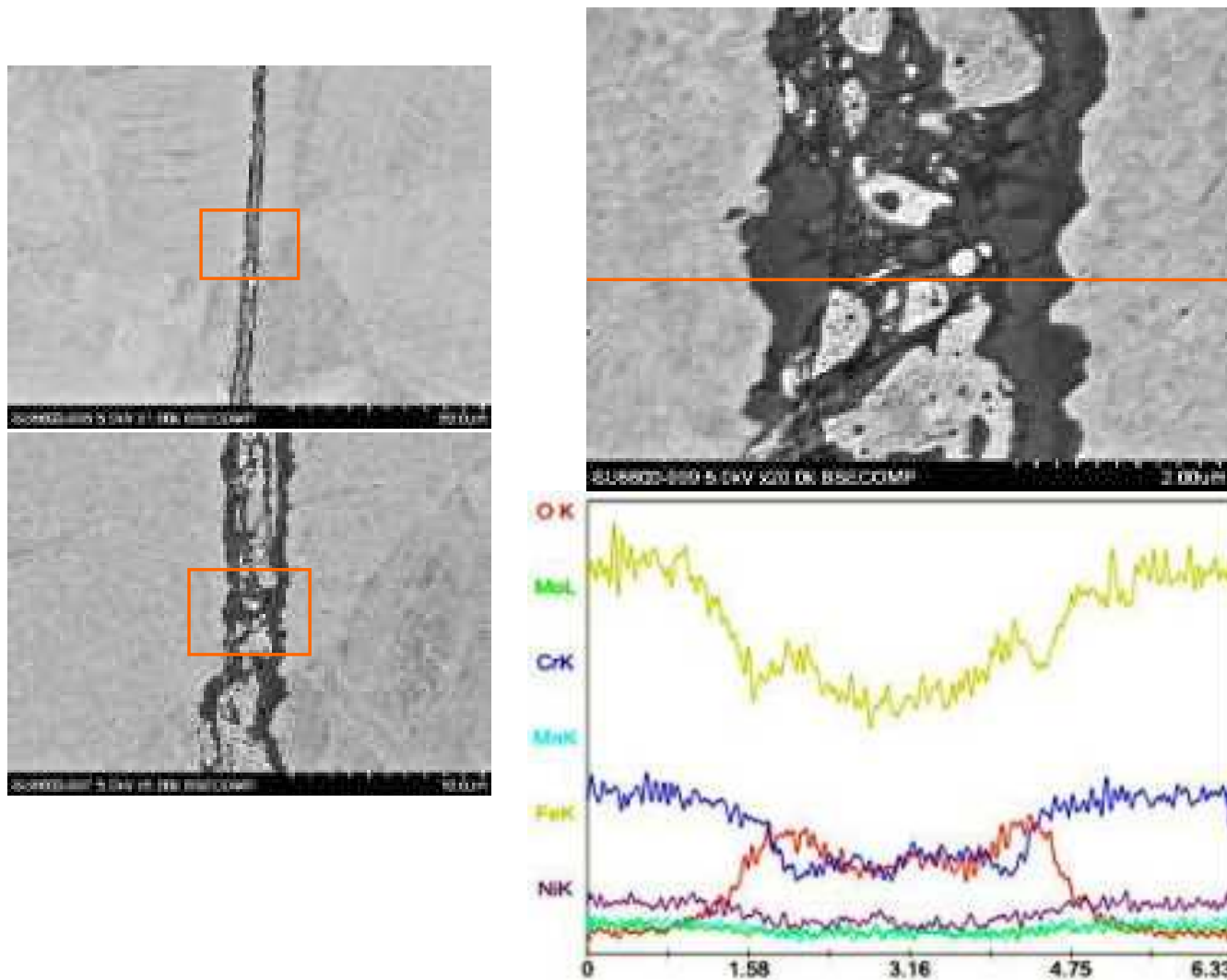
付録図 9 (1) CT 試験片(FTLA)板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端



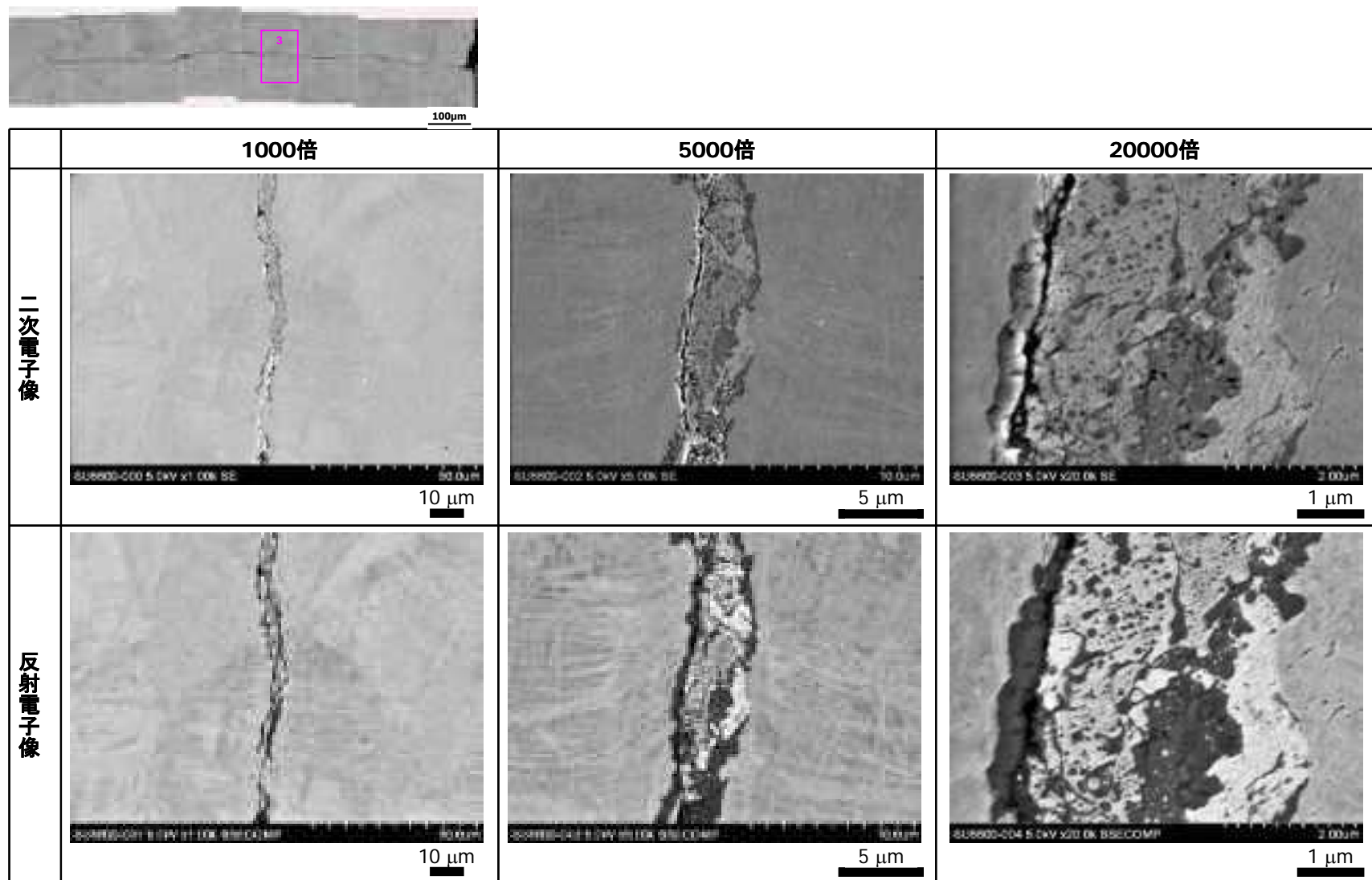
付録図 9(2) CT 試験片(FTLA) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 2 き裂先端 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)



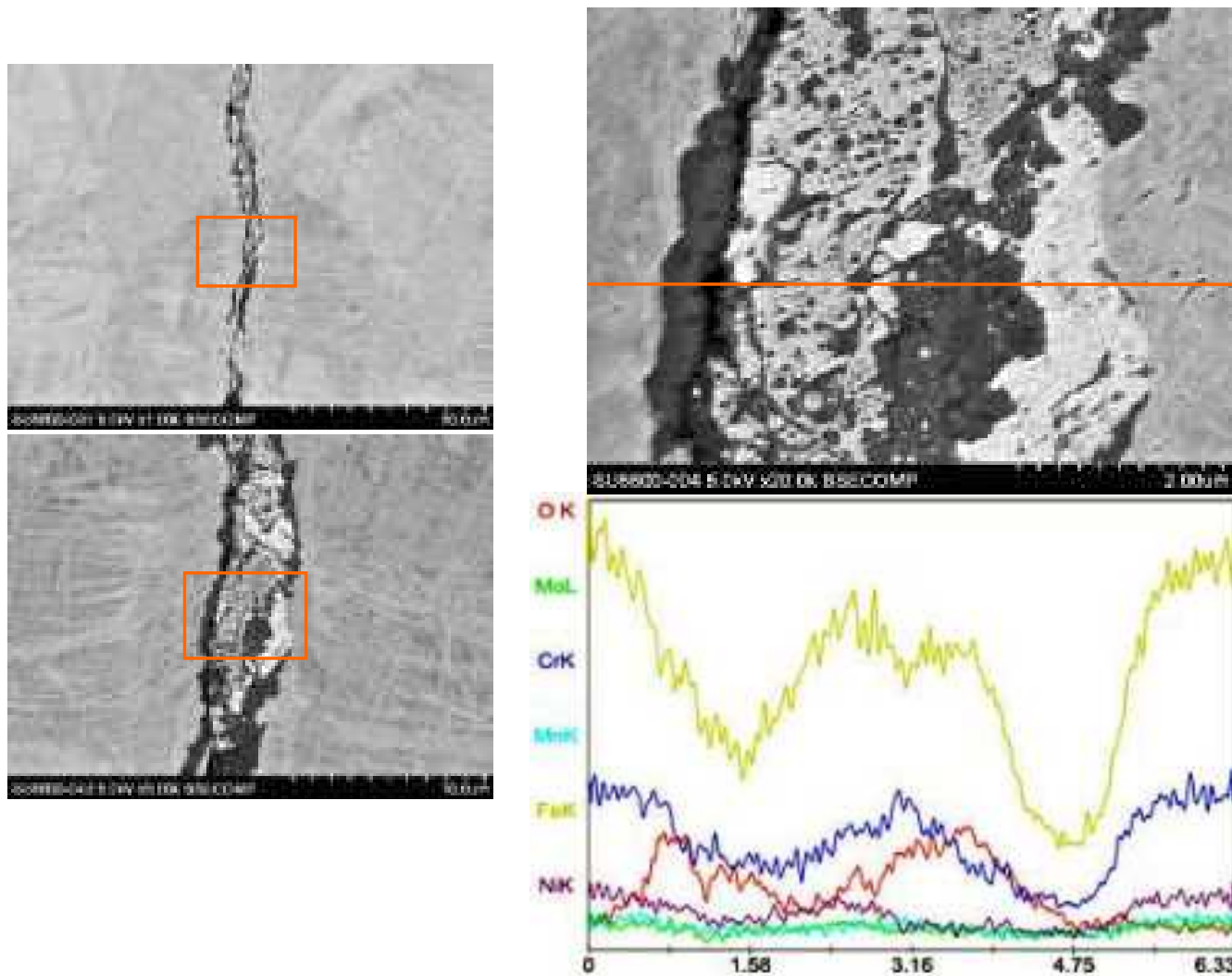
付録図 9(3) CT 試験片(FTLA) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 2 き裂先端近傍



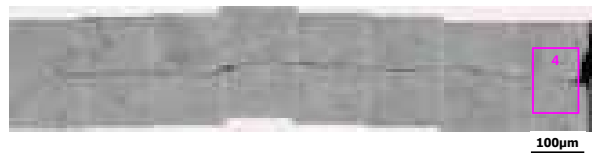
付録図 9(4) CT試験片(FTLA) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 2 き裂先端近傍 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)



付録図 9 (5) CT 試験片(FTLA) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 3 き裂長さ中間位置

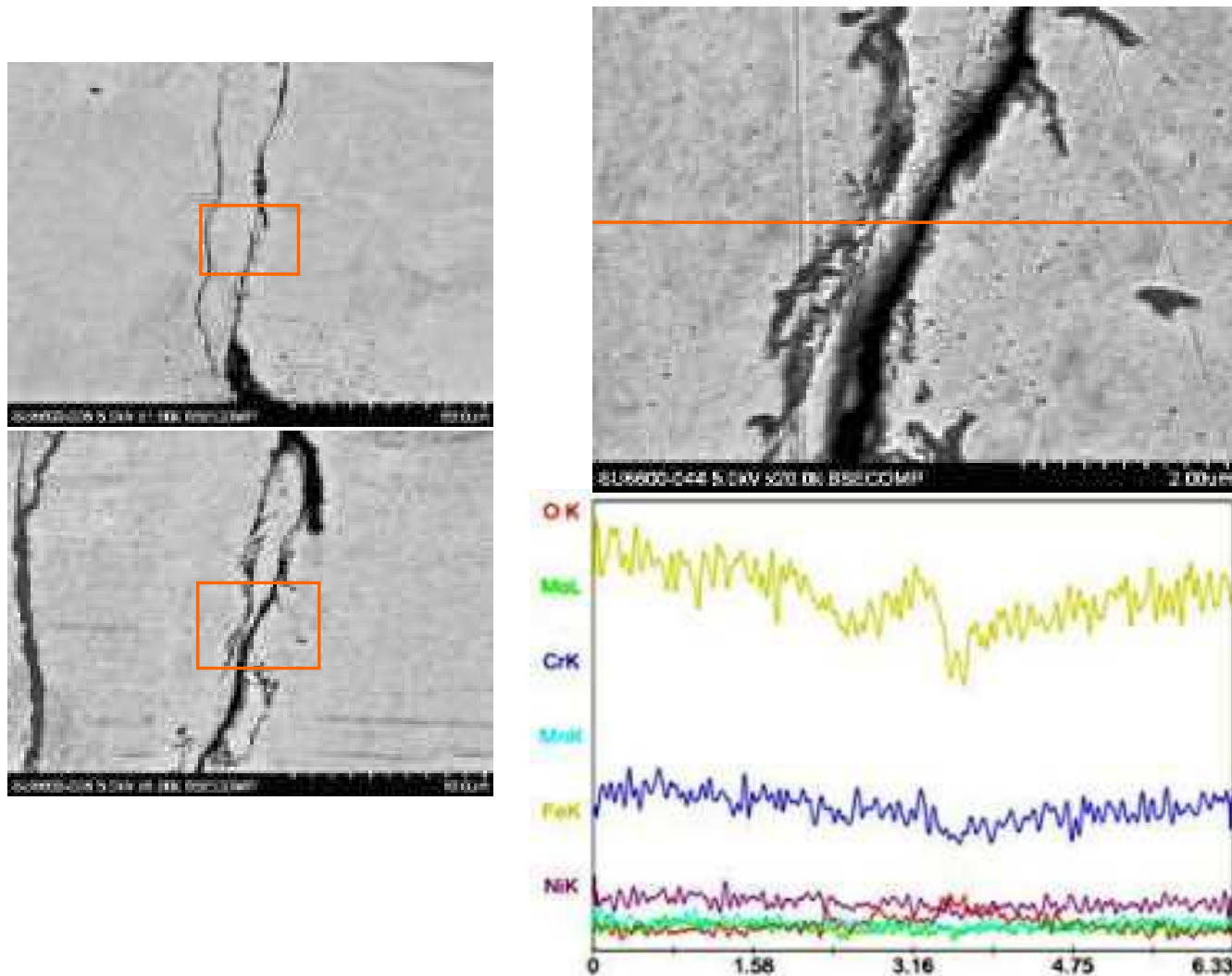


付録図 9(6) CT 試験片(FTLA) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 3 き裂長さ中間位置 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

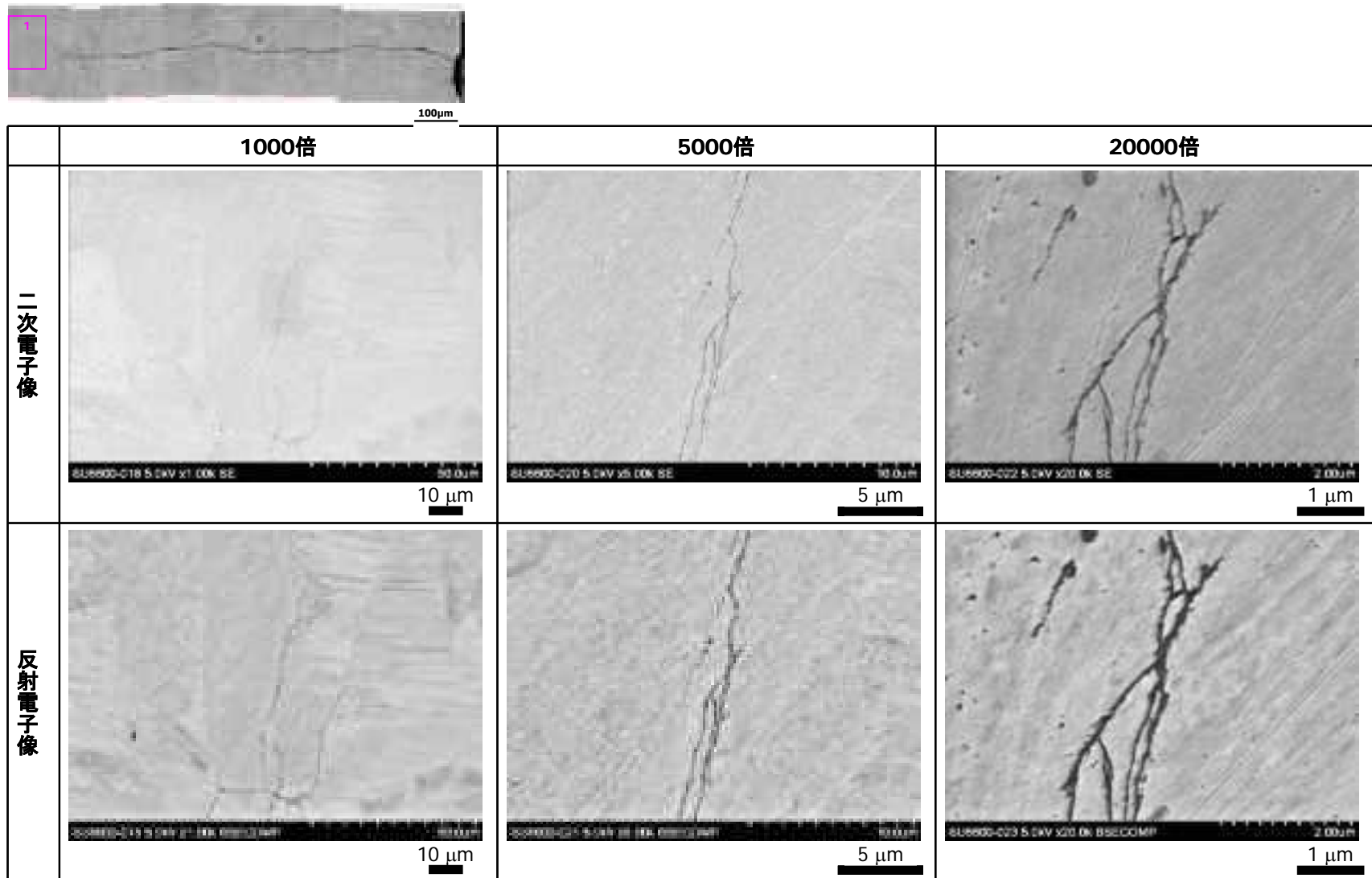


	1000倍	5000倍	20000倍
二次電子像			
反射電子像			

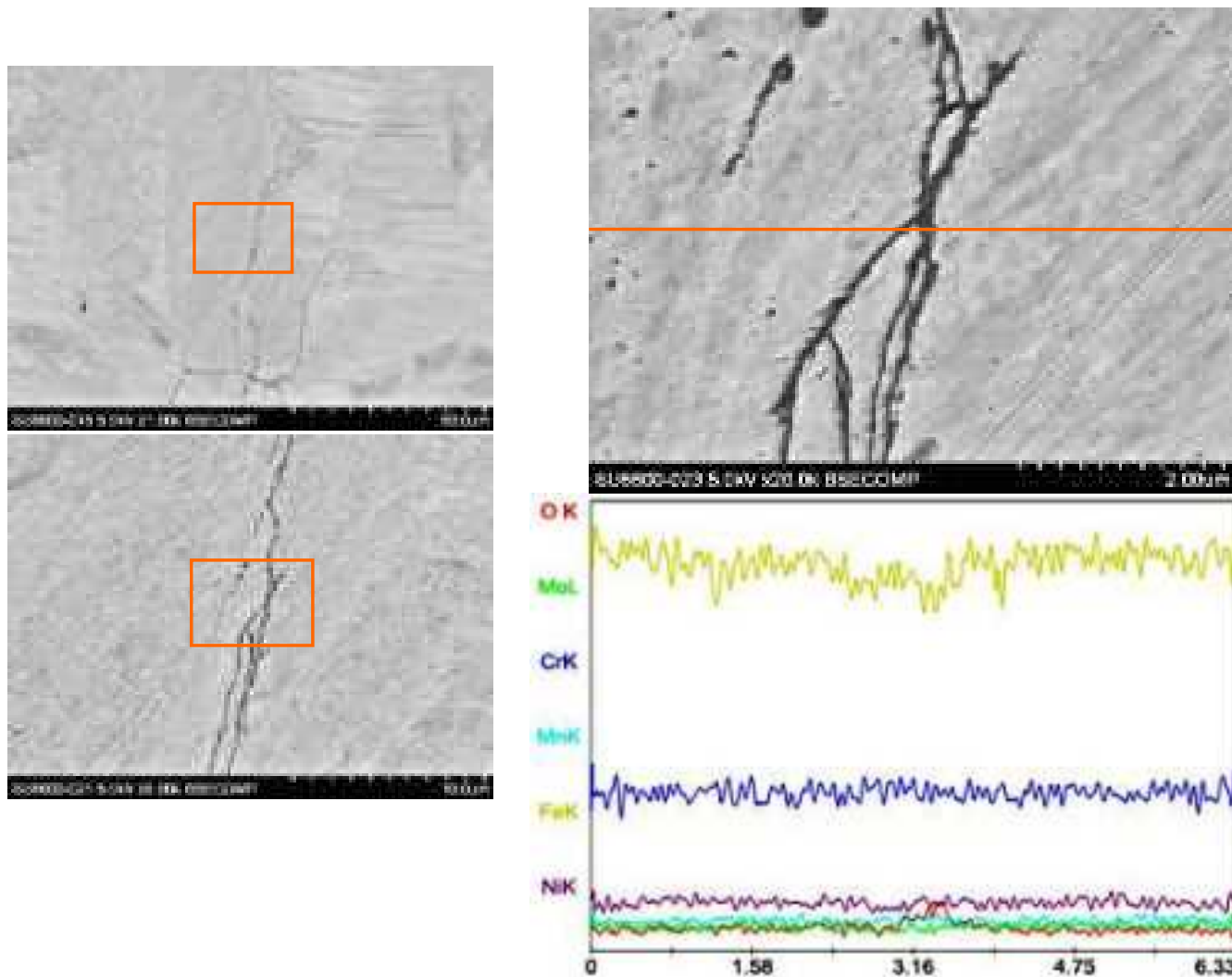
付録図 9 (7) CT 試験片(FTLA) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍



付録図 9 (8) CT 試験片(FTLA) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)



付録図 10 (1) CT 試験片(FTLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端

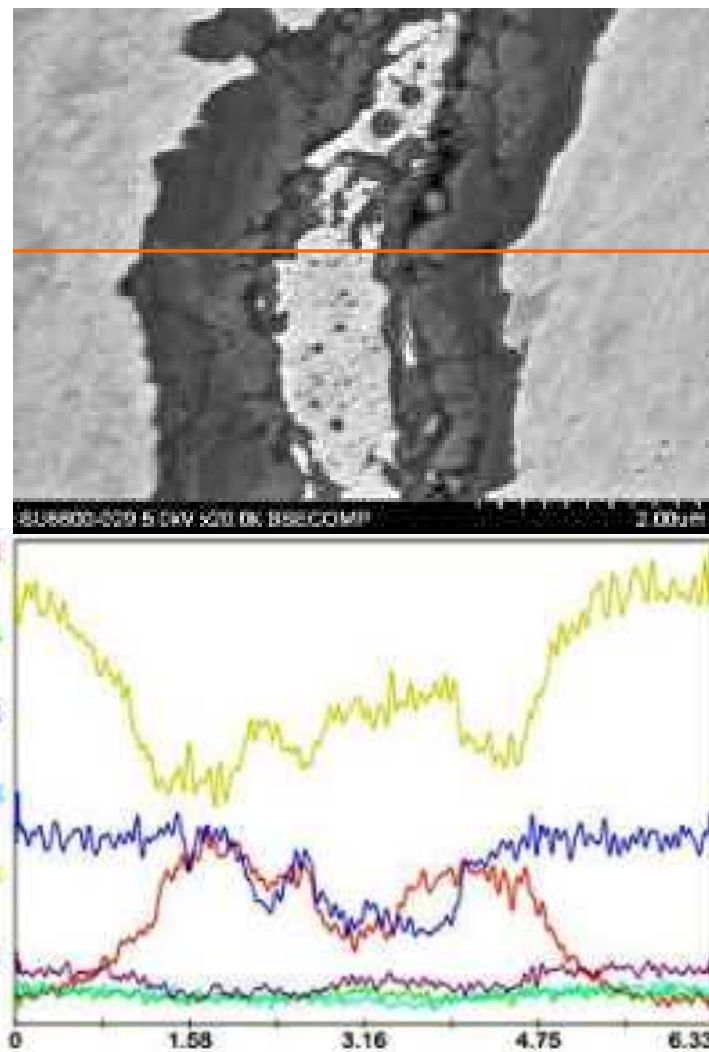
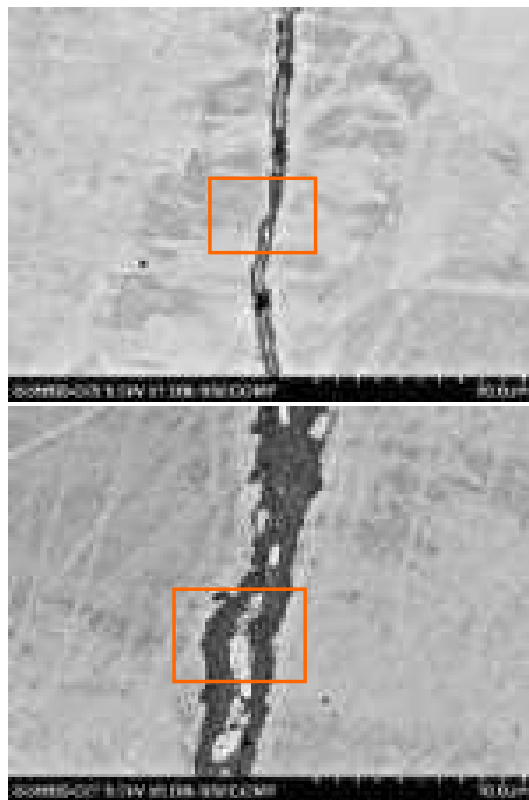


付録図 10(2) CT 試験片(FTLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

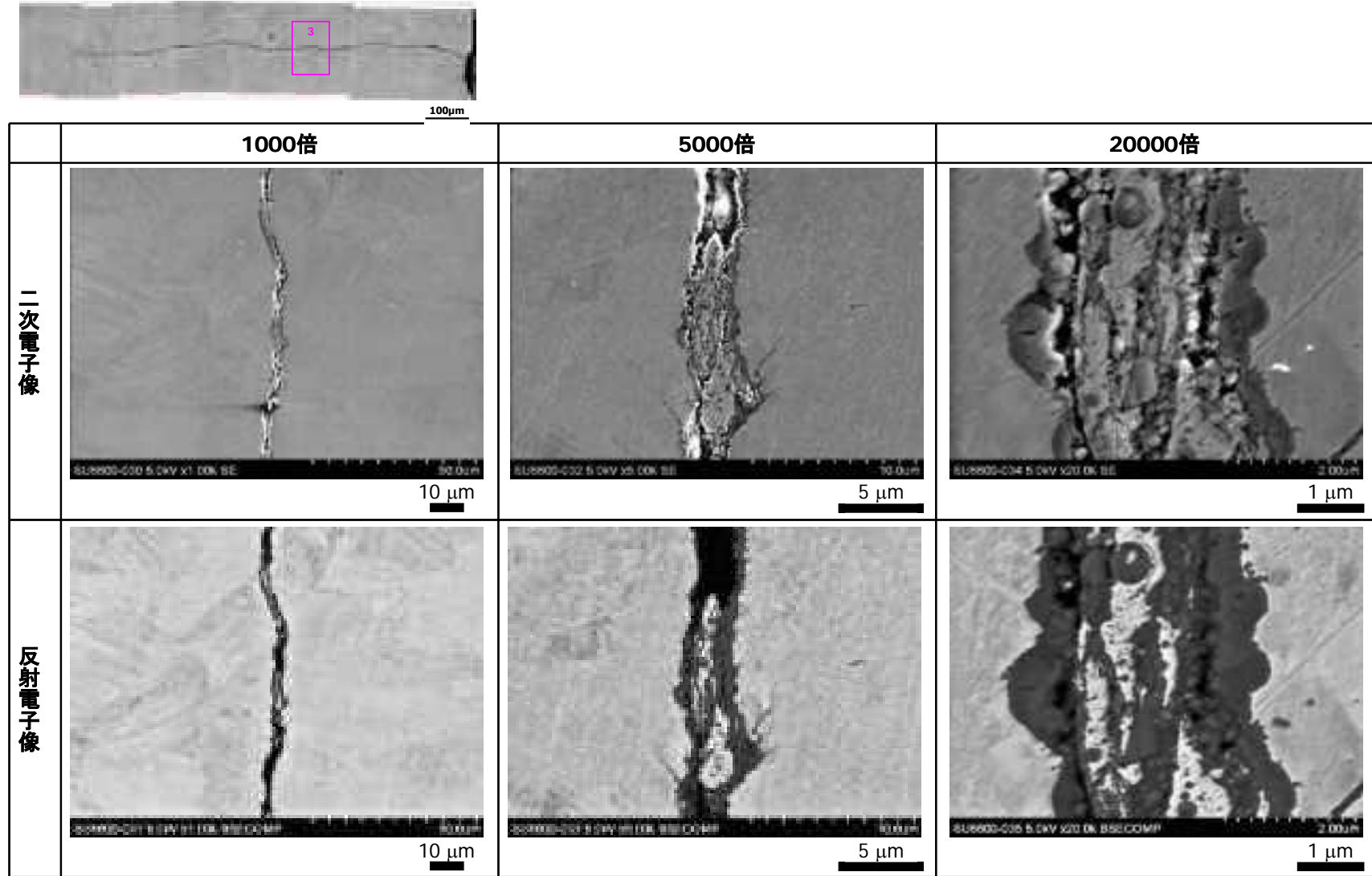


	1000倍	5000倍	20000倍
二次電子像			
反射電子像			

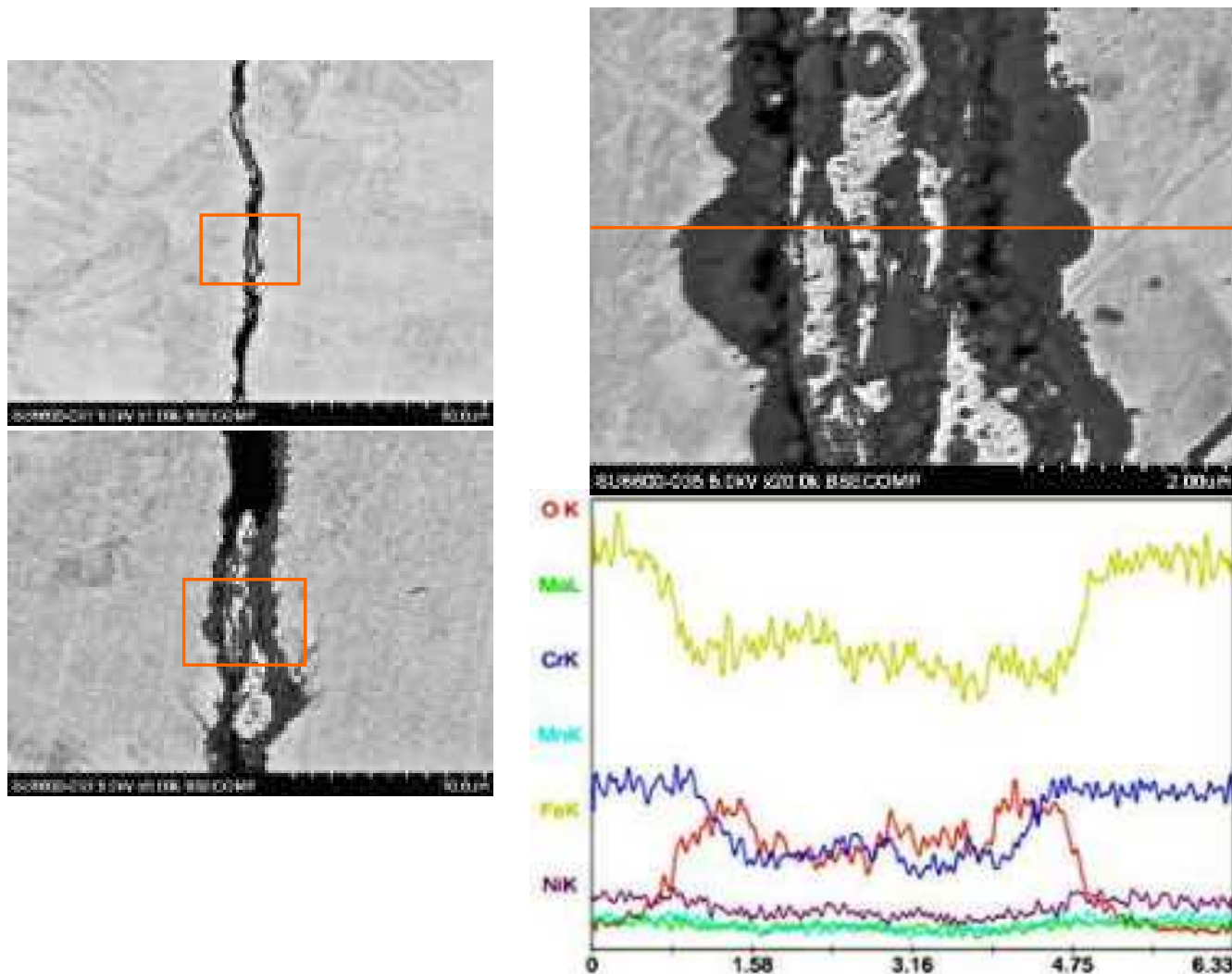
付録図 10(3) CT試験片(FTLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 2 き裂先端近傍



付録図 10(4) CT 試験片(FTLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 2 き裂先端近傍 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)



付録図 10 (5) CT 試験片(FTLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 3 き裂長さ中間位置

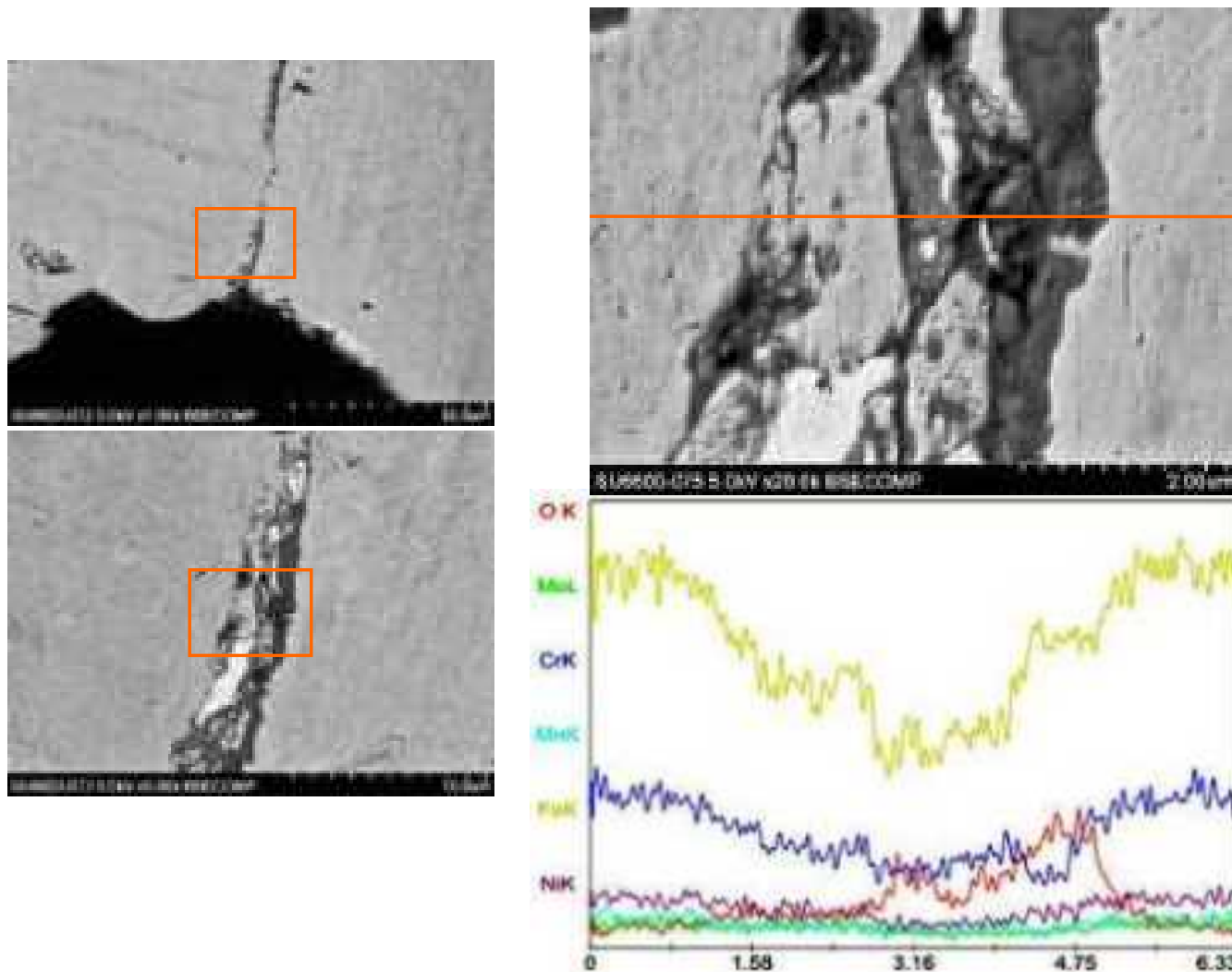


付録図 10(6) CT 試験片(FTLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 3 き裂長さ中間位置 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

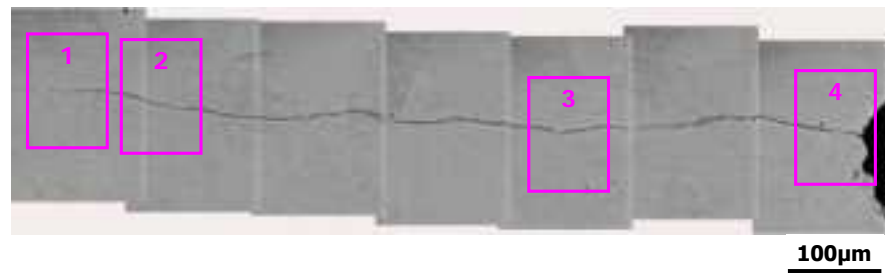


	1000倍	5000倍	20000倍
二次電子像			
反射電子像			

付録図 10 (7) CT 試験片(FTLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍



付録図 10 (8) CT 試験片(FTLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

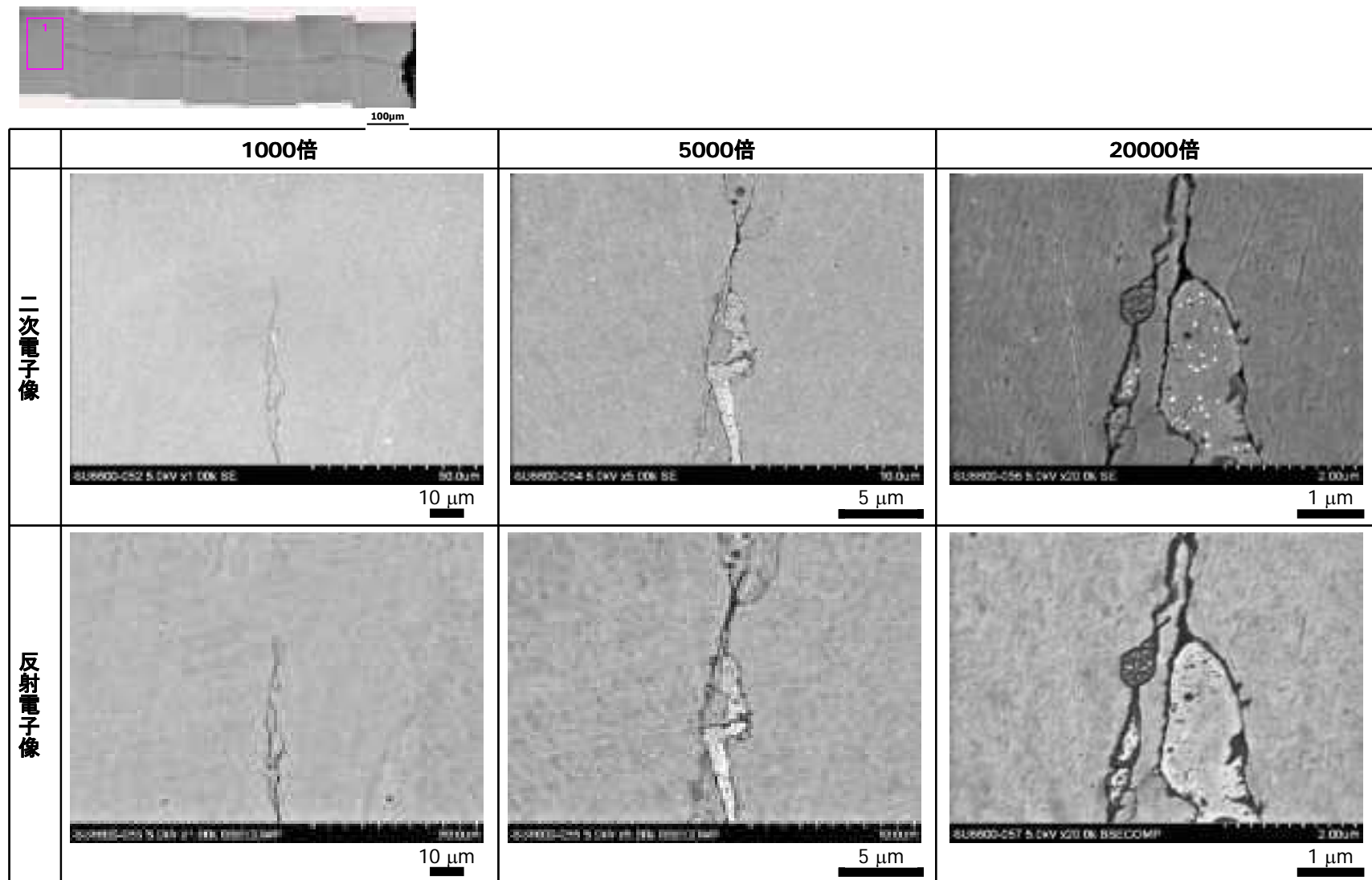


(1)板厚中央

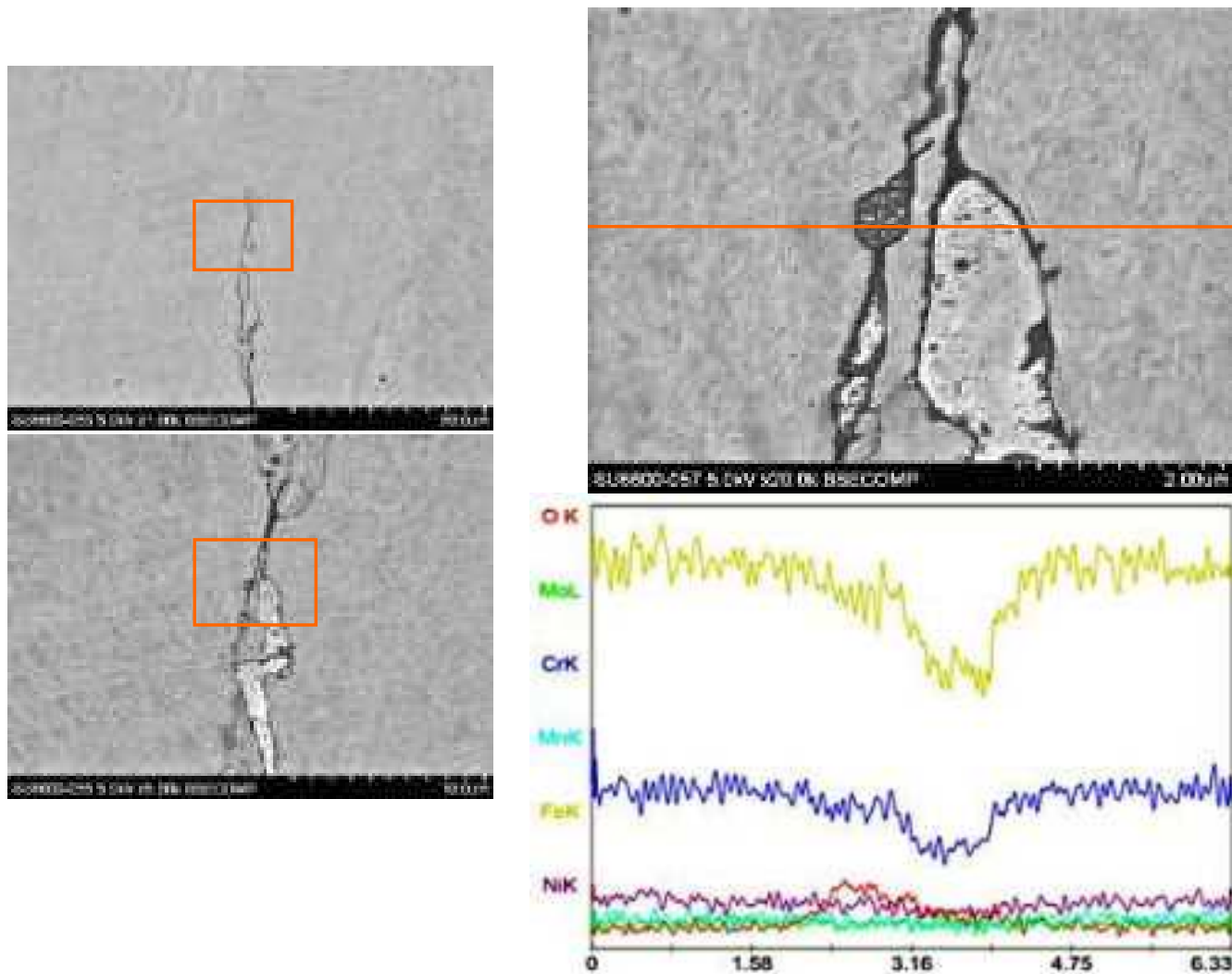


(2)サイドグループ脇

付録図 11 CT 試験片(FTLB)のき裂断面 SEM 観察結果及び拡大観察位置(視野 1~4)



付録図 12 (1) CT 試験片(FTLB)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端

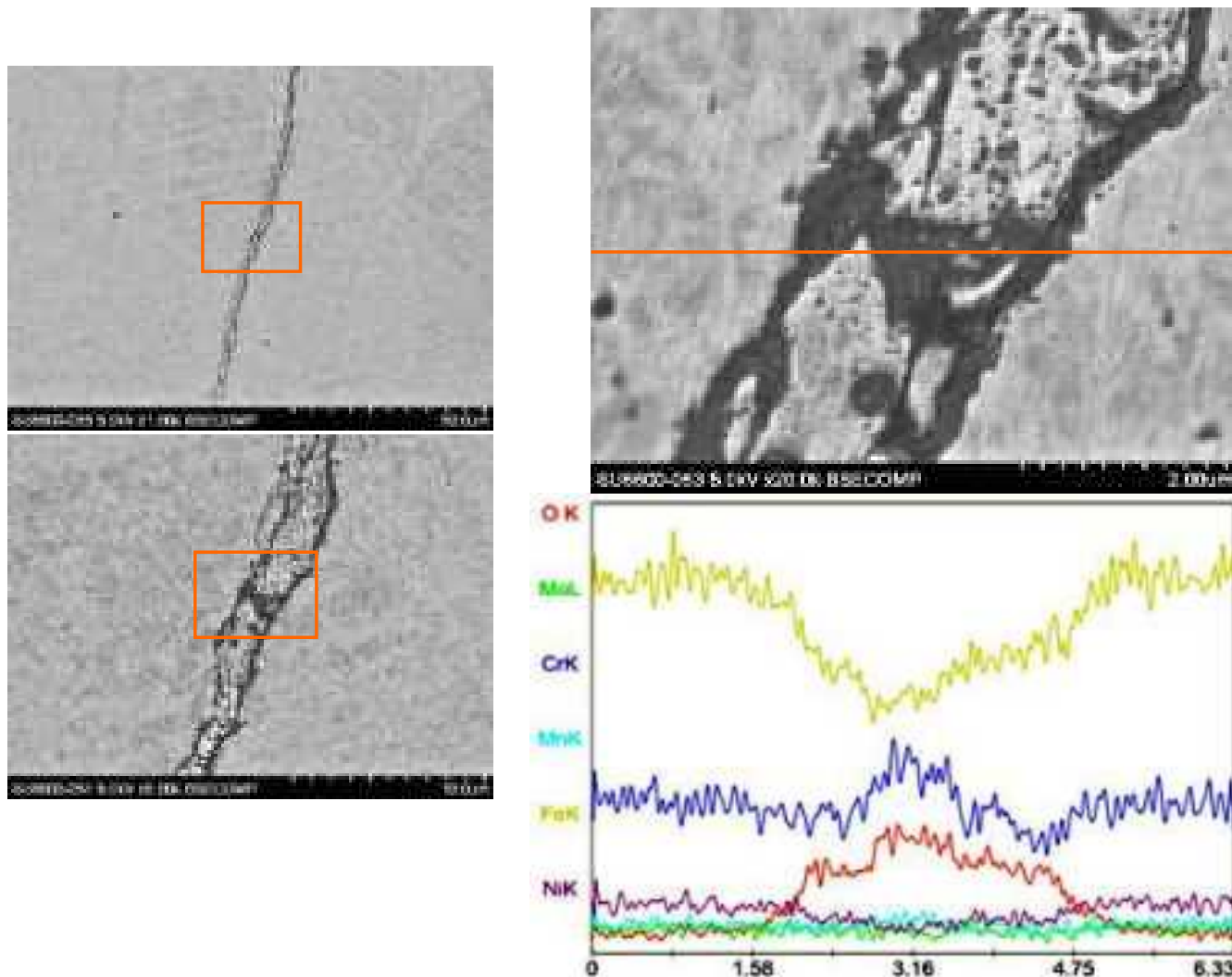


付録図 12 (2) CT 試験片(FTLB)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端 EDX 線分析 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

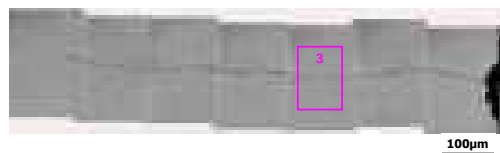


	1000倍	5000倍	20000倍
二次電子像	<p>SEM image at 1000x magnification showing a crack. Scale bar: 10 μm. Metadata: SU8600-058 5.0kV x1.00k SE</p>	<p>SEM image at 5000x magnification showing a crack. Scale bar: 5 μm. Metadata: SU8600-060 5.0kV x5.00k SE</p>	<p>SEM image at 20000x magnification showing a crack. Scale bar: 1 μm. Metadata: SU8600-062 5.0kV x20.0k SE</p>
反射電子像	<p>SEM image at 1000x magnification showing a crack. Scale bar: 10 μm. Metadata: SU8600-058 5.0kV x1.00k BE</p>	<p>SEM image at 5000x magnification showing a crack. Scale bar: 5 μm. Metadata: SU8600-060 5.0kV x5.00k BE</p>	<p>SEM image at 20000x magnification showing a crack. Scale bar: 1 μm. Metadata: SU8600-063 5.0kV x20.0k BSECOMP</p>

付録図 12 (3) CT 試験片(FTLB)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 2 き裂先端近傍

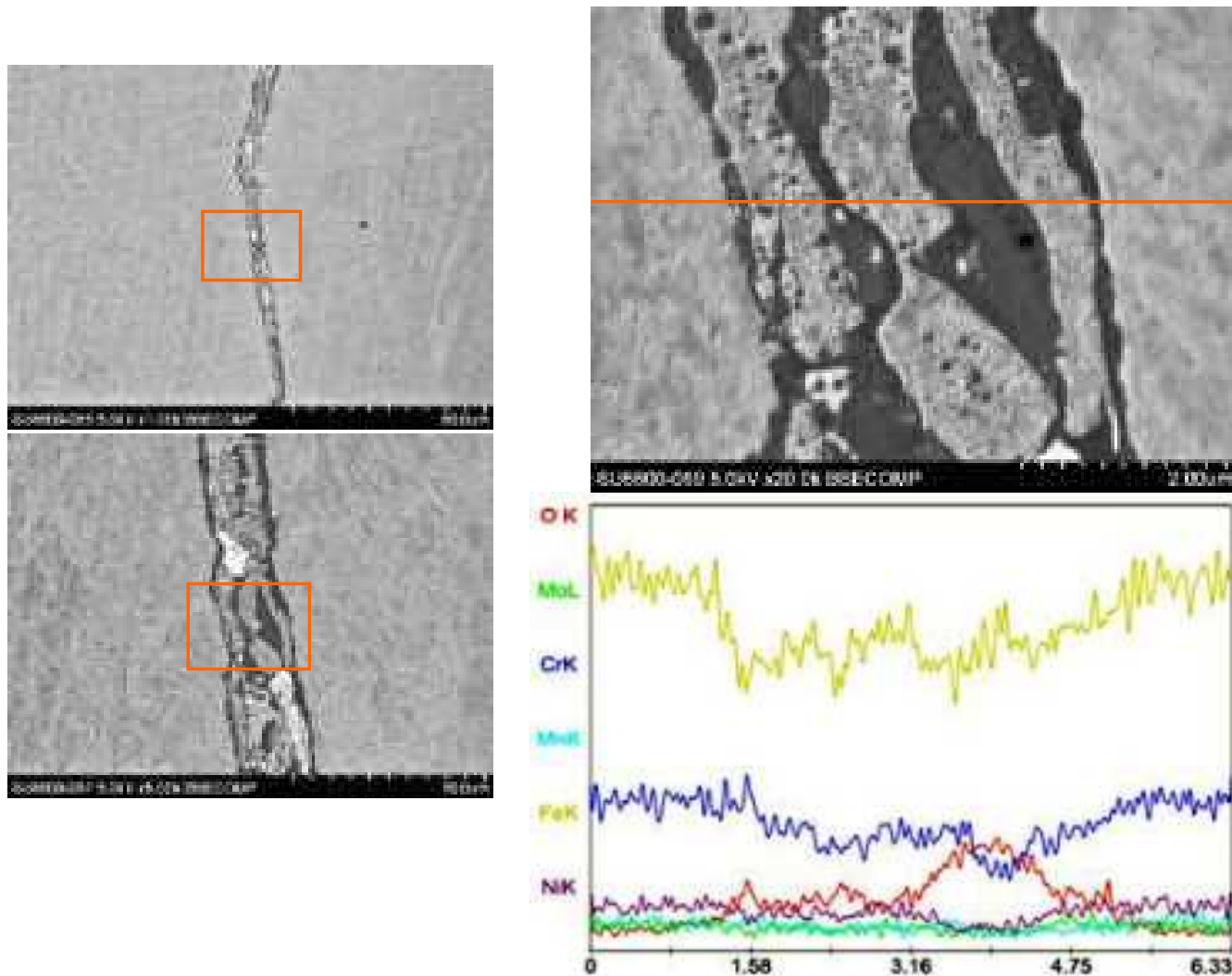


付録図 12 (4) CT 試験片(FTLB)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 2 き裂先端近傍 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)



	1000倍	5000倍	20000倍
二次電子像	<p>10 µm</p>	<p>5 µm</p>	<p>1 µm</p>
反射電子像	<p>10 µm</p>	<p>5 µm</p>	<p>1 µm</p>

付録図 12 (5) CT 試験片(FTLB)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野3 き裂長さ中間位置

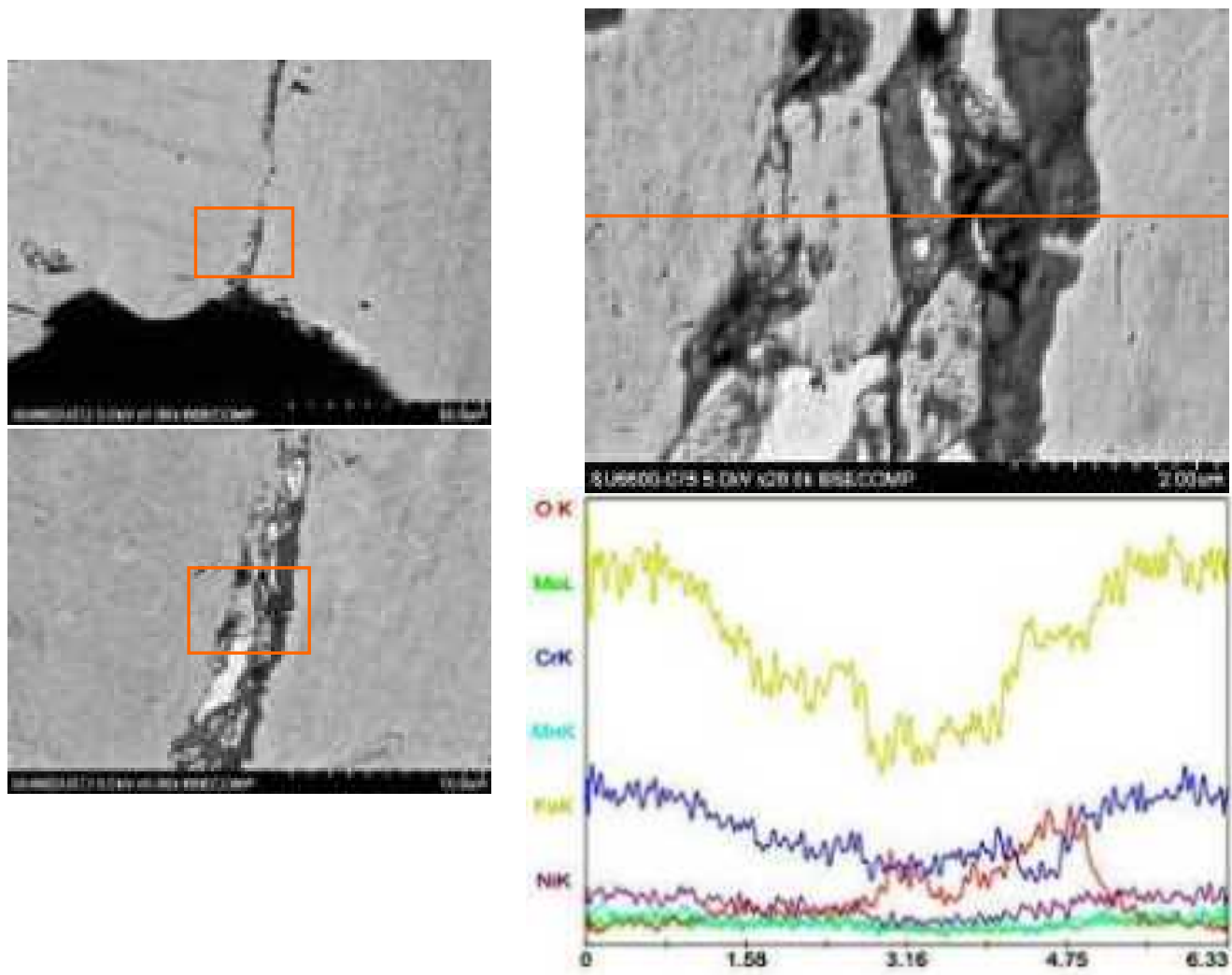


付録図 12 (6) CT 試験片(FTLB)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 3 き裂長さ中間位置 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)



	1000倍	5000倍	20000倍
二次電子像			
反射電子像			

付録図 12 (7) CT 試験片(FTLB)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍

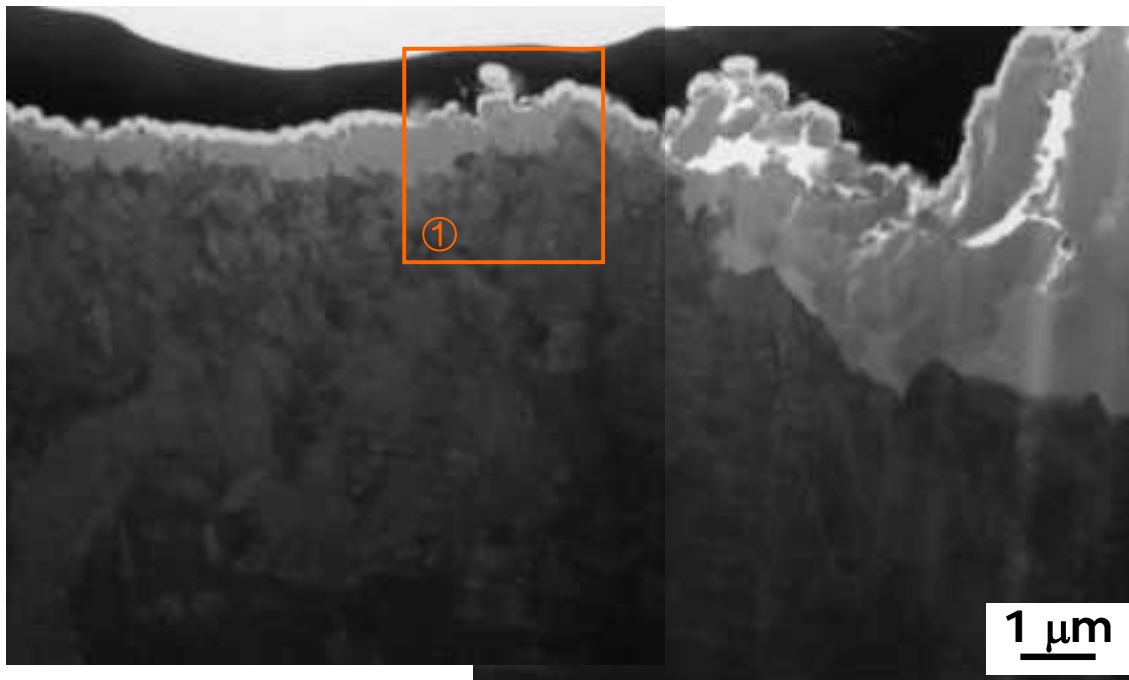


付録図 12 (8) CT 試験片(FTLB)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

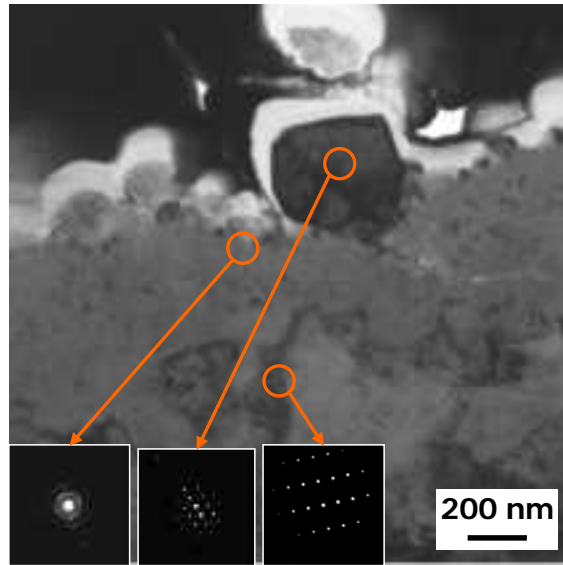
③CT試験片のき裂表面に形成した酸化皮膜の TEM 観察



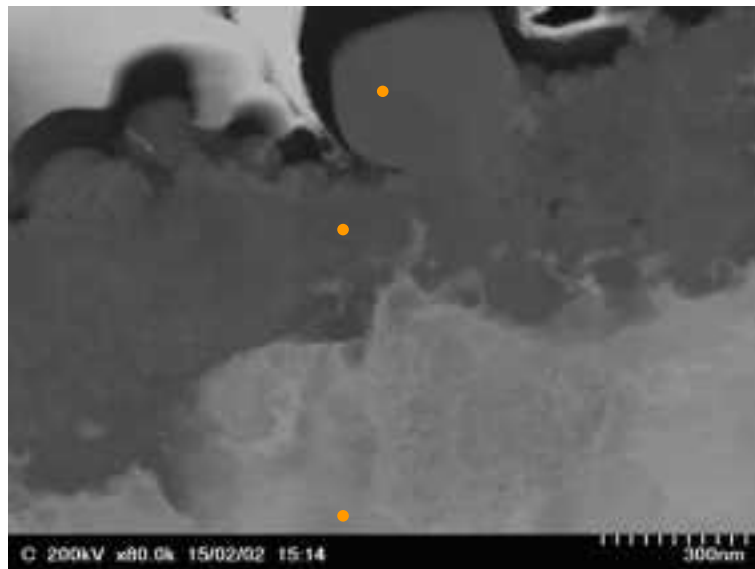
付録図 13 CT 試験片(V6L5)の TEM 観察用試験片採取位置
 (a)板厚中央き裂先端 (b)サイドグループ脇



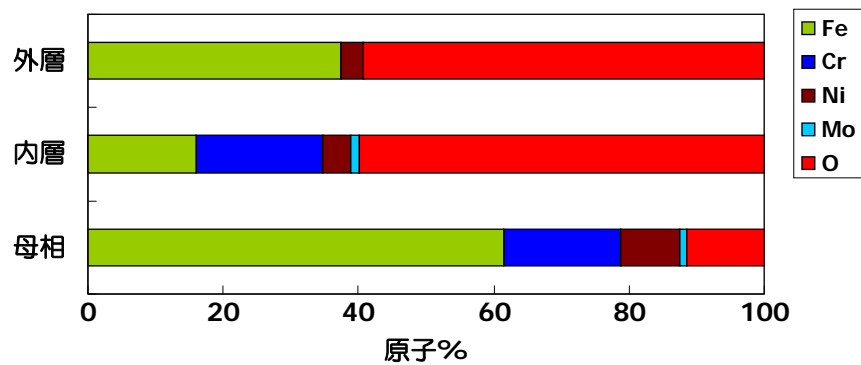
付録図 14 CT 試験片(V6L5)板厚中央き裂先端近傍(付録図 13 (a)部)の
 酸化皮膜の断面 TEM 観察結果(明視野像)
 橙色枠：高倍率での詳細観察箇所



(1)領域①の拡大(明視野像)

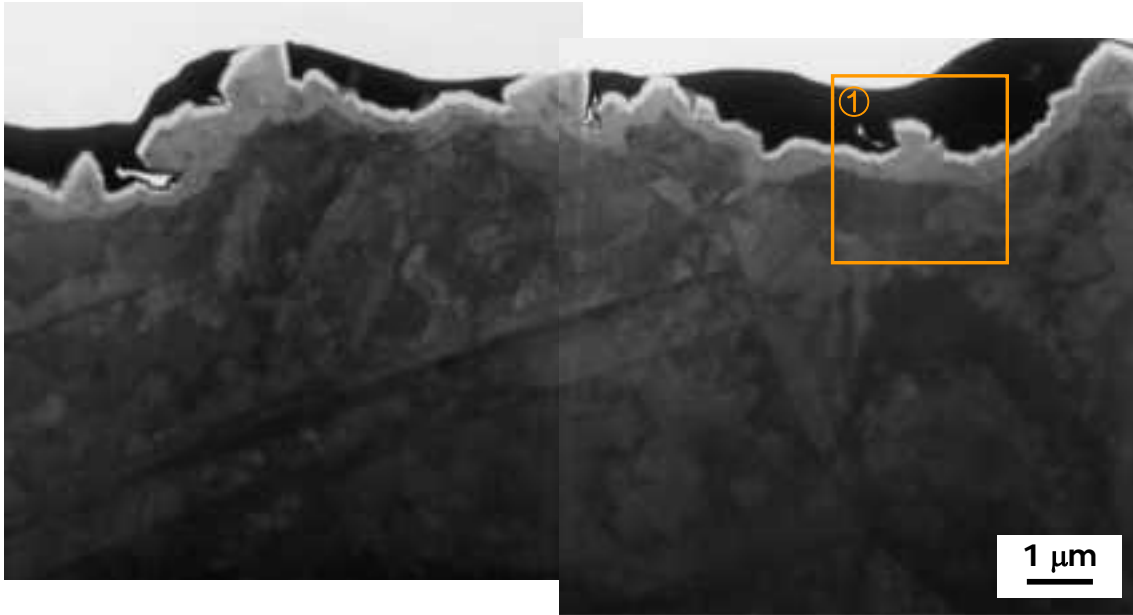


(2)領域①の STEM モードでの Z コントラスト像(橙色点:EDX 分析点)

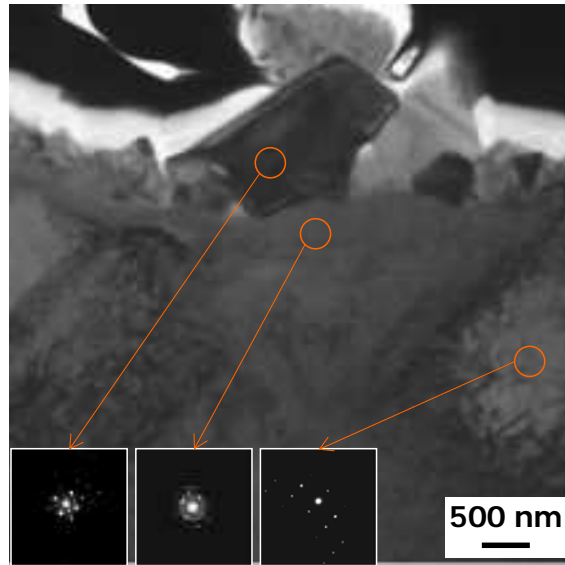


(3)EDX 分析結果

付録図 15 CT 試験片(V6L5)板厚中央き裂先端近傍の酸化皮膜構造の詳細観察結果



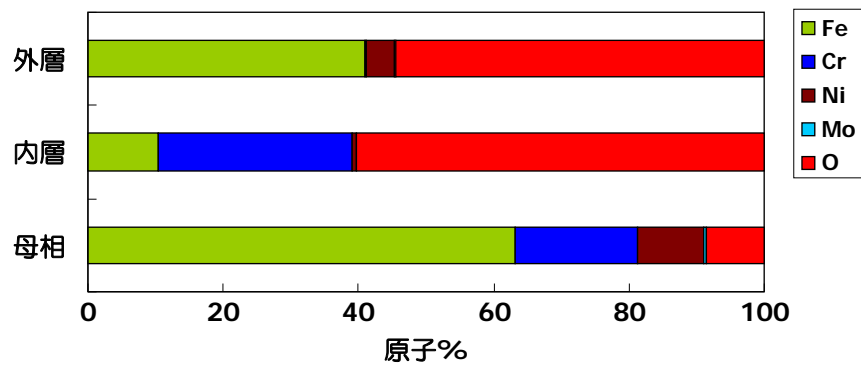
付録図 16 CT 試験片(V6L5)サイドグループ脇の(付録図 13(b)部)の
酸化皮膜の断面 TEM 観察結果(明視野像)
橙色枠：高倍率での詳細観察箇所



(1)領域①の拡大(明視野像)

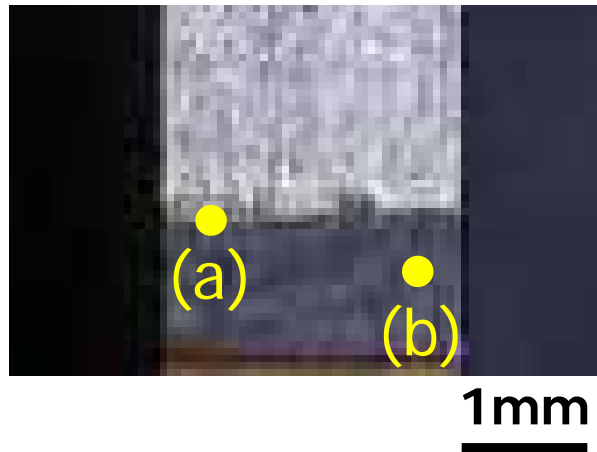


(2)領域①の STEM モードでの Z コントラスト像(橙色点:EDX 分析点)

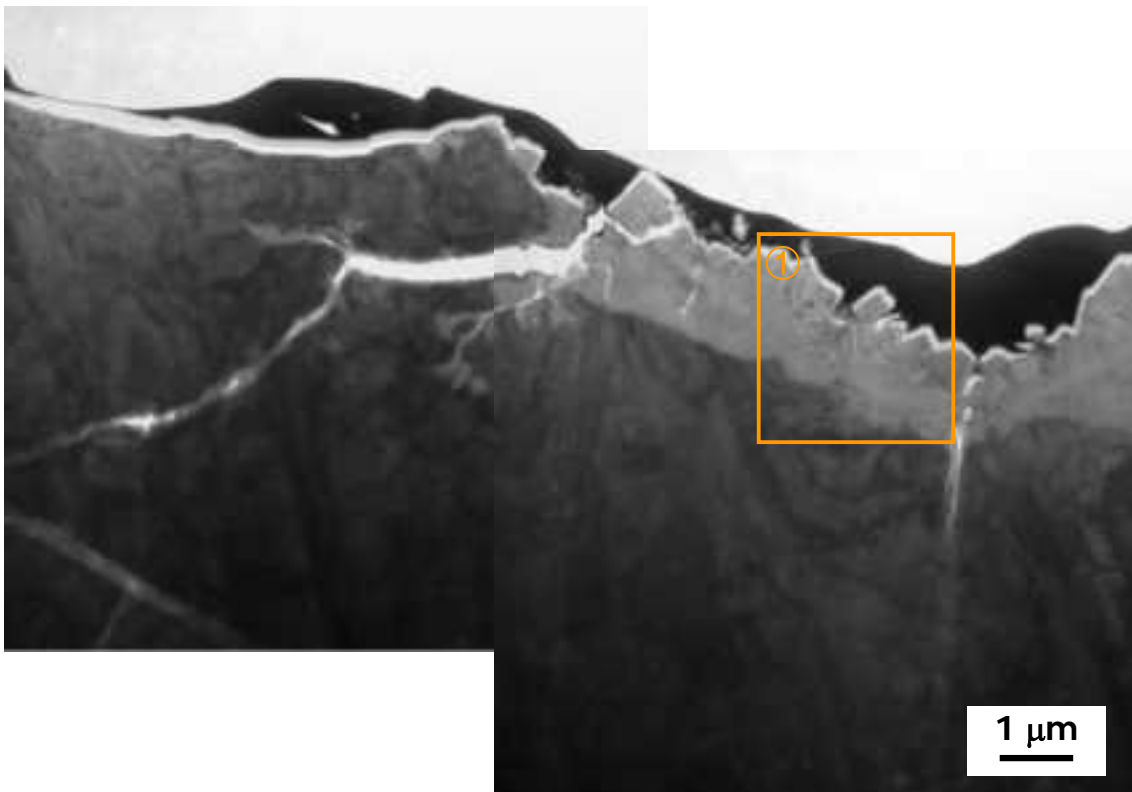


(3)EDX 分析結果

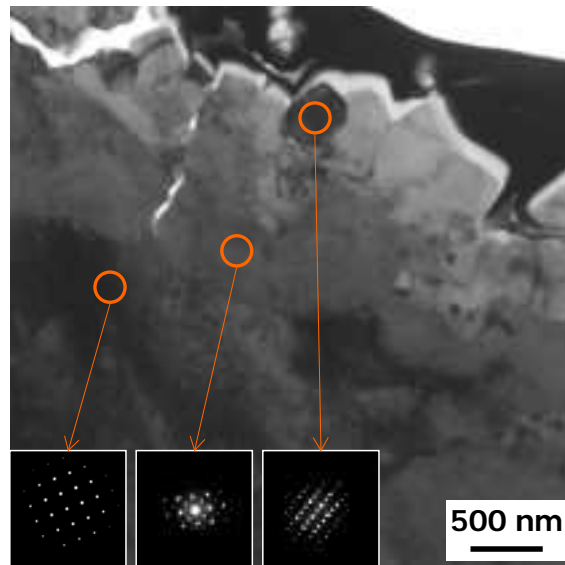
付録図 17 CT 試験片(V6L5)サイドグループ脇の酸化皮膜構造の詳細観察結果



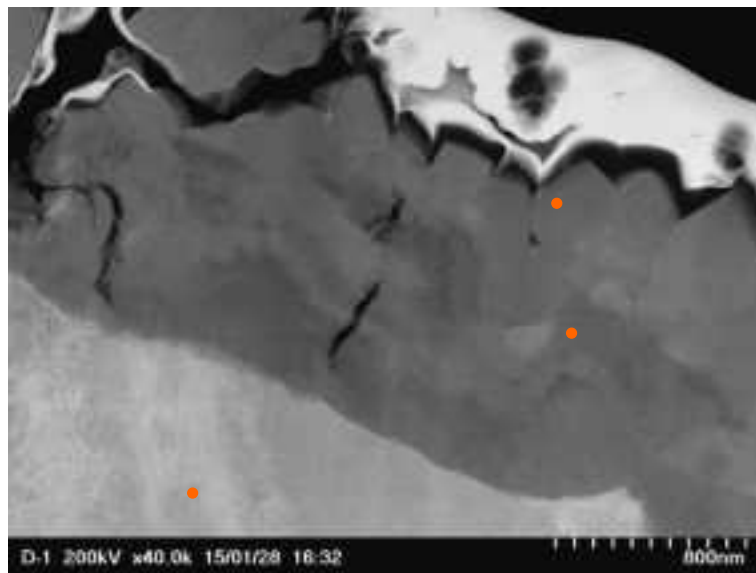
付録図 18 CT 試験片(FTLA)の TEM 観察用試験片採取位置
 (a)板厚中央き裂先端 (b)サイドグループ脇



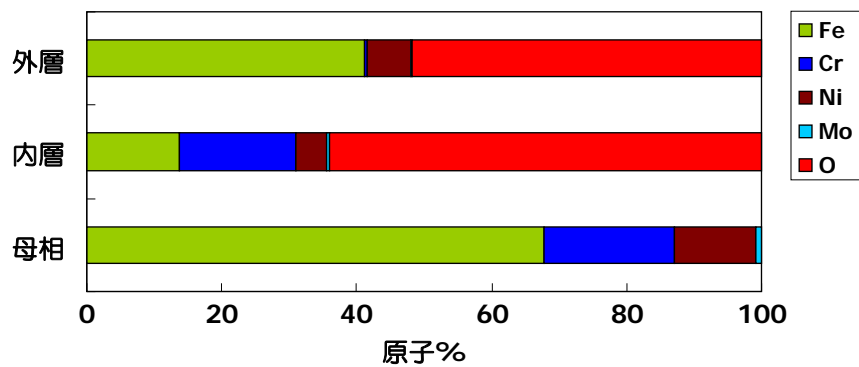
付録図 19 CT 試験片(FTLA)板厚中央き裂先端近傍(付録図 13(a)部)の
 酸化皮膜の断面 TEM 観察結果(明視野像)
 橙色枠：高倍率での詳細観察箇所



(1)領域①の拡大(明視野像)

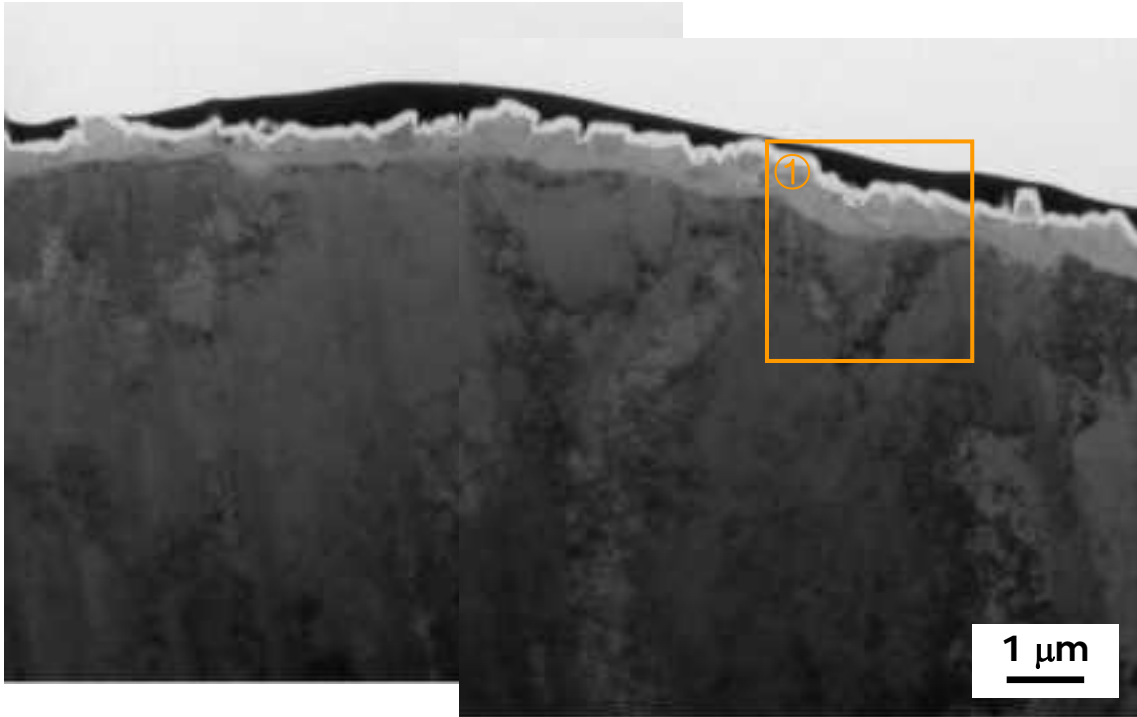


(2)領域①の STEM モードでの Z コントラスト像(橙色点:EDX 分析点)

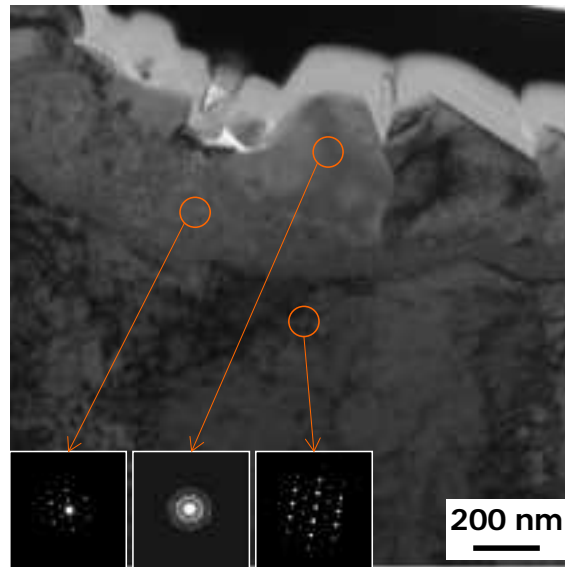


(3)EDX 分析結果

付録図 20 CT 試験片(FTLA)板厚中央き裂先端近傍の酸化皮膜構造の詳細観察結果



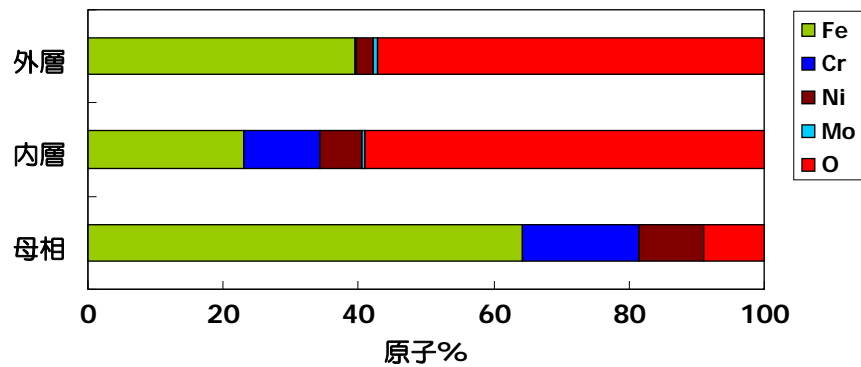
付録図 21 CT 試験片(FTLA)サイドグループ脇の(付録図 13(b)部)の
酸化皮膜の断面 TEM 観察結果(明視野像)
橙色枠：高倍率での詳細観察箇所



(1)領域①の拡大(明視野像)

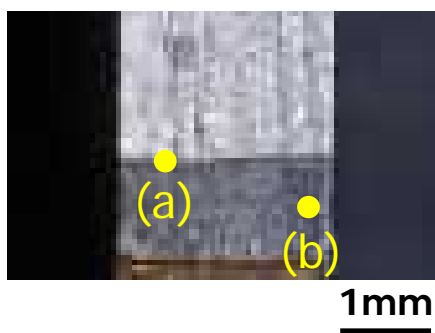


(2)領域①の STEM モードでの Z コントラスト像(橙色点:EDX 分析点)

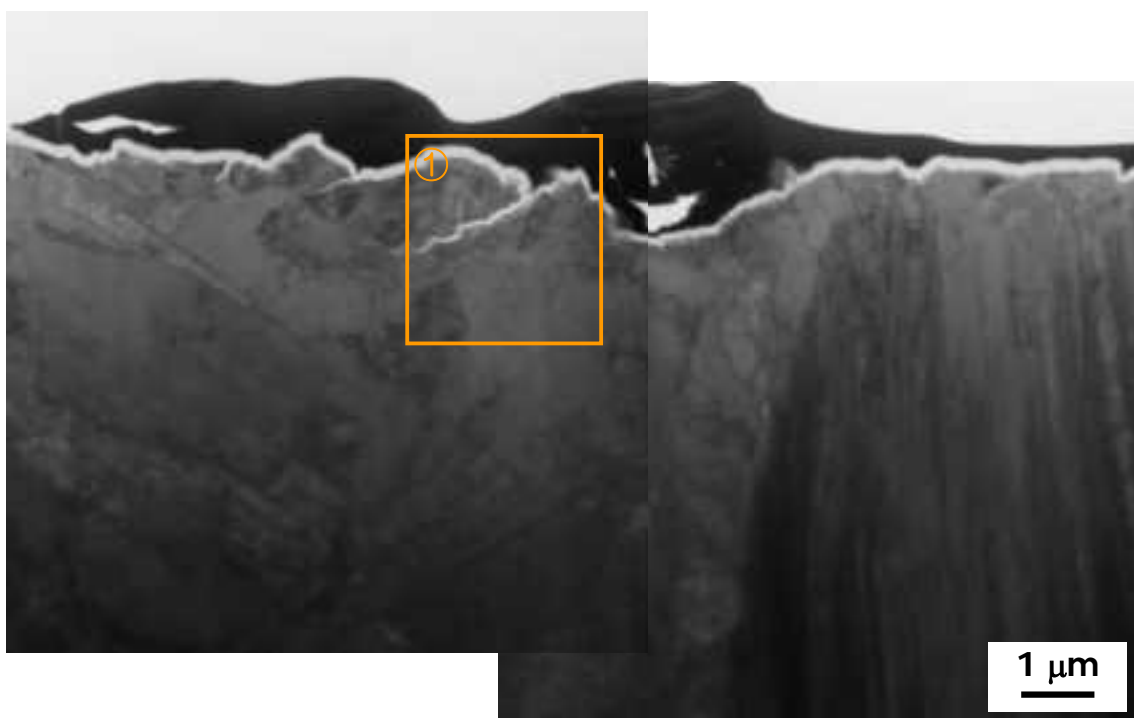


(3)EDX 分析結果

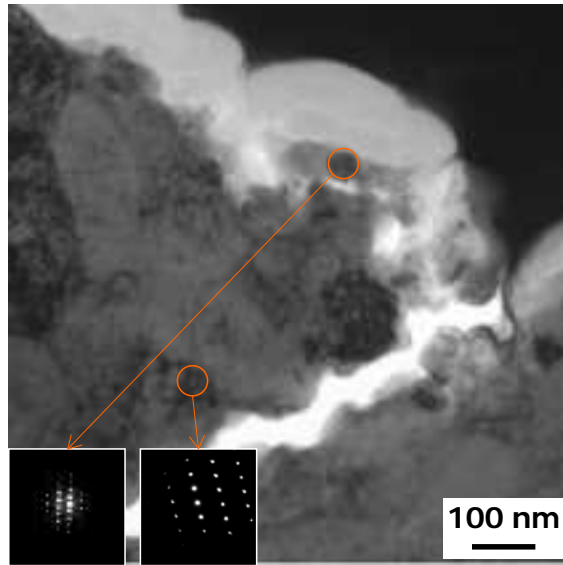
付録図 22 CT 試験片(FTLA)サイドグループ脇の酸化皮膜構造の詳細観察結果



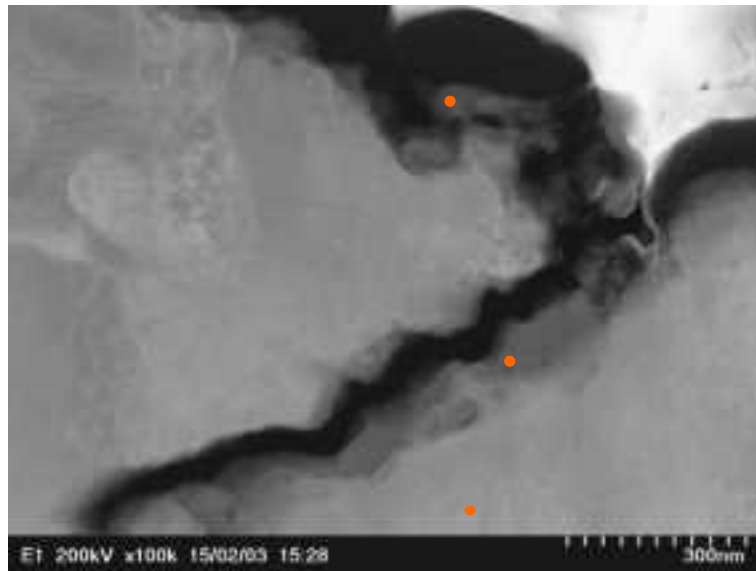
付録図 23 CT 試験片(FTLB)の TEM 観察用試験片採取位置
 (a)板厚中央き裂先端 (b)サイドグループ脇



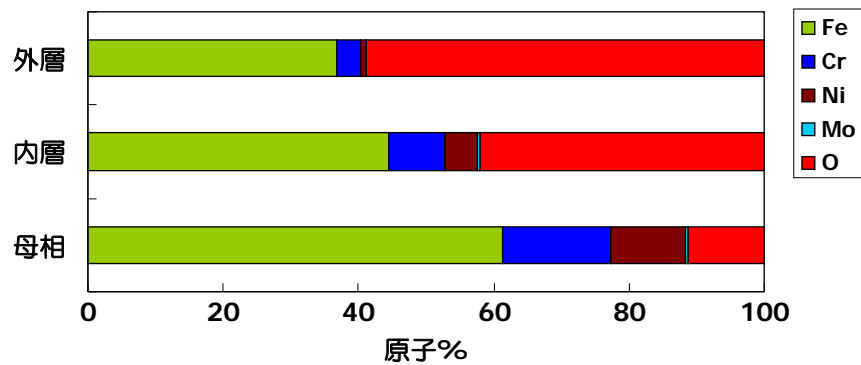
付録図 24 CT 試験片(FTLB)板厚中央き裂先端近傍(付録図 13(a)部)の
 酸化皮膜の断面 TEM 観察結果(明視野像)
 橙色枠：高倍率での詳細観察箇所



(1)領域①の拡大(明視野像)

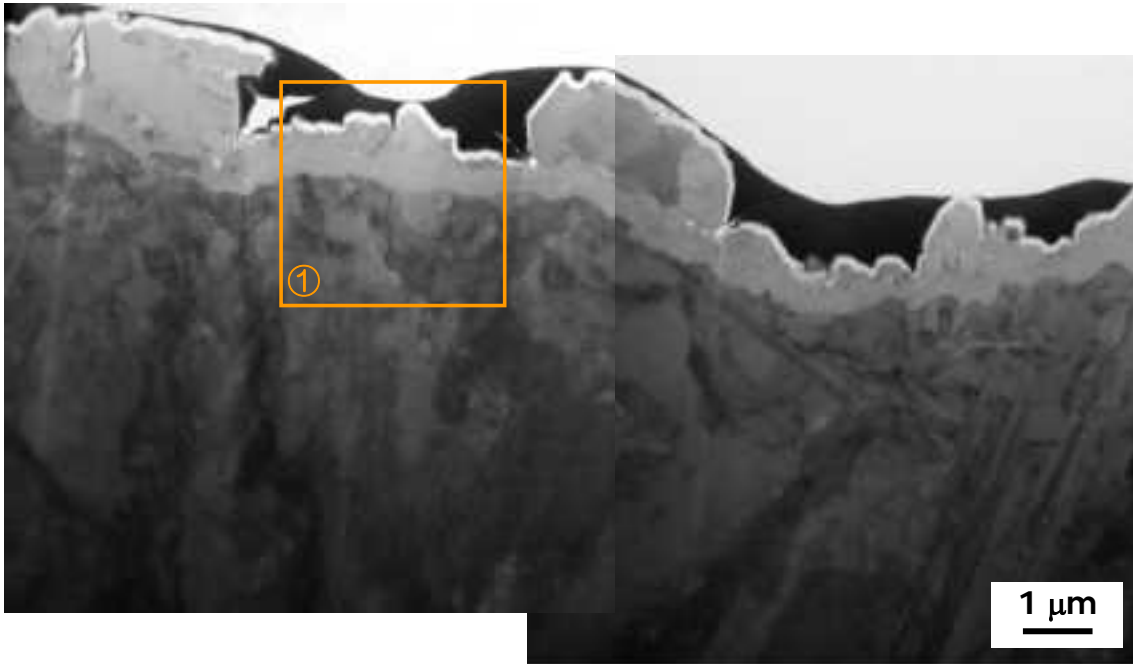


(2)領域①の STEM モードでの Z コントラスト像(橙色点:EDX 分析点)

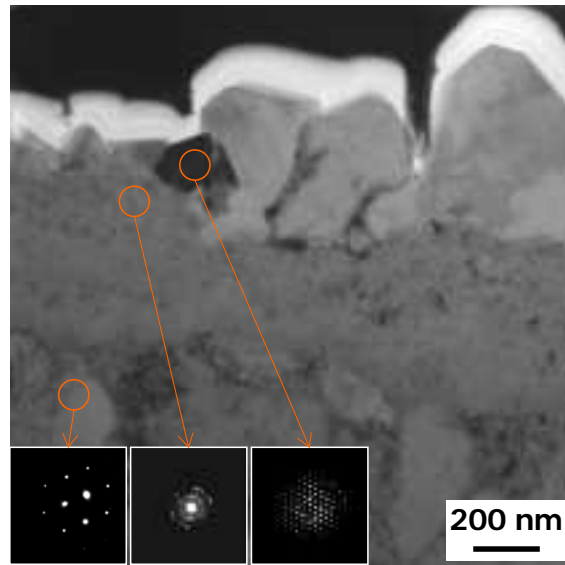


(3)EDX 分析結果

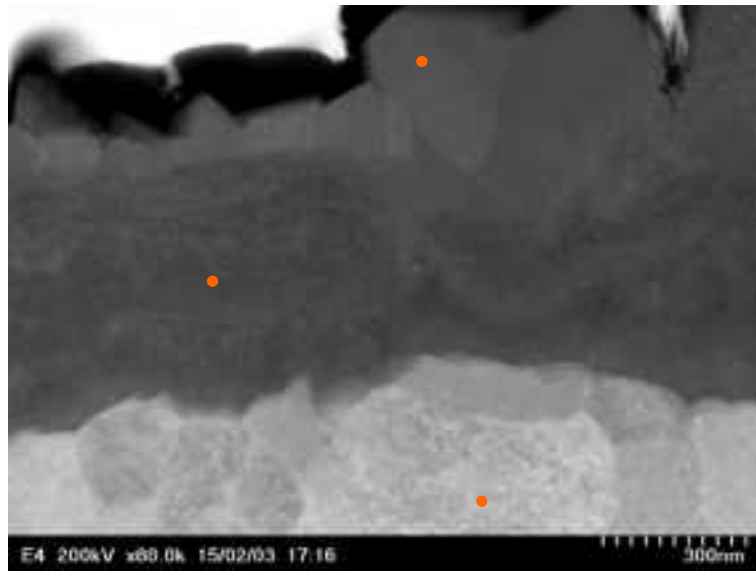
付録図 25 CT 試験片(FTLB)板厚中央き裂先端近傍の酸化皮膜構造の詳細観察結果



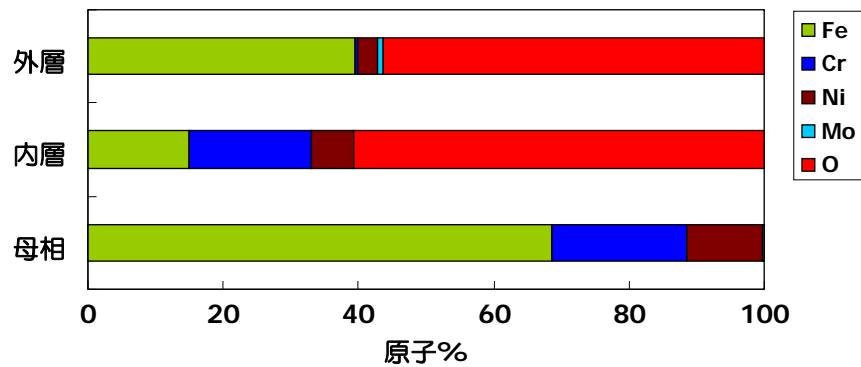
付録図 26 CT 試験片(FTLB)サイドグループ脇の(付録図 13(b)部)の
酸化皮膜の断面 TEM 観察結果(明視野像)
橙色枠：高倍率での詳細観察箇所



(1)領域①の拡大(明視野像)



(2)領域①の STEM モードでの Z コントラスト像(橙色点:EDX 分析点)



(3)EDX 分析結果

付録図 27 CT 試験片(FTLB)サイドグループ脇の酸化皮膜構造の詳細観察結果