

(3) 加熱・冷却設備

図 3.1.4.3-33 に冷却設備構成を示す。冷却水は、冷凍機と冷水貯留タンクを循環させ、所定の温度まで冷却する。試験前は、冷却水スプレー用ポンプの吐出ラインを冷水貯留タンクに循環させ、試験開始時にバルブ切替えによりスプレーノズルへ送水する。試験完了後は、試験ピットに排水した冷却水を水中ポンプで回収し、フィルターにて濾過した後、送水ポンプで冷水貯留タンクに戻す装置構成とした。試験開始前に試験体の温度を昇温するために、試験体を加熱する。

構成は、加熱ヒータ、ヒータ制御盤、試験体保温材である。加熱ヒータは、マイクロヒータを板に貼りつけたプレートヒータとする。ヒータは、試験体中央部の温度分布を均一に保つため、試験体中央及びアーム部への熱逃げを補償するための中央支点近傍の合計 5 か所に配置する(図 3.1.4.3-34)。概略仕様を表 3.1.4.3-3 及び図 3.1.4.3-35 から図 3.1.4.3-45 に示す。

表 3.1.4.3-3 概略仕様

	名称	仕様	寸法 (mm)	形状 (図)	数量
①	冷却水 スプレー用 ポンプ	NPSH : 7.2m, ポンプ効率: 80%, 駆動機出力: 250kW, 吐出量: 20m ³ /min, 全揚程: 50m	幅 750 長さ 1850 高さ 1020	図 3.1.4.3-35 図 3.1.4.3-41	1 台
②	スプレー ノズル	材質: SUS304 ノズル径: $\phi 20$, ノズル孔数: 48	直径 836.6 高さ 320	図 3.1.4.3-36 図 3.1.4.3-42	1 台
③	冷凍機	冷却能力: 196.9kW 冷水量: 24.2m ³ /h	幅 860 長さ 3400 高さ 2350	図 3.1.4.3-37 図 3.1.4.3-43	3 台
④	冷水循環 ポンプ	NPSH: 3.2m, ポンプ効率: 77.5%, 駆動機出力 22: kW, 吐出量: 3m ³ /min, 全揚程: 30m	幅 460 長さ 1265 高さ 600	図 3.1.4.3-38 図 3.1.4.3-44	1 台
⑤	冷水貯留 タンク	複合板構造 貯水量: 112m ³ (4.0 × 7.0 × 4.0) タンク質量: 5630 kg 底, 側壁平均保温厚さ: 25 mm	幅 4570 長さ 7136 高さ 4062	図 3.1.4.3-39 図 3.1.4.3-45	1 台
⑥	供試体 加熱ヒータ	メインヒータ: 定格 2.5kW 補助ヒータ: 定格 2.5kW	幅 600 長さ 600 厚み 10	図 3.1.4.3-40	1 式

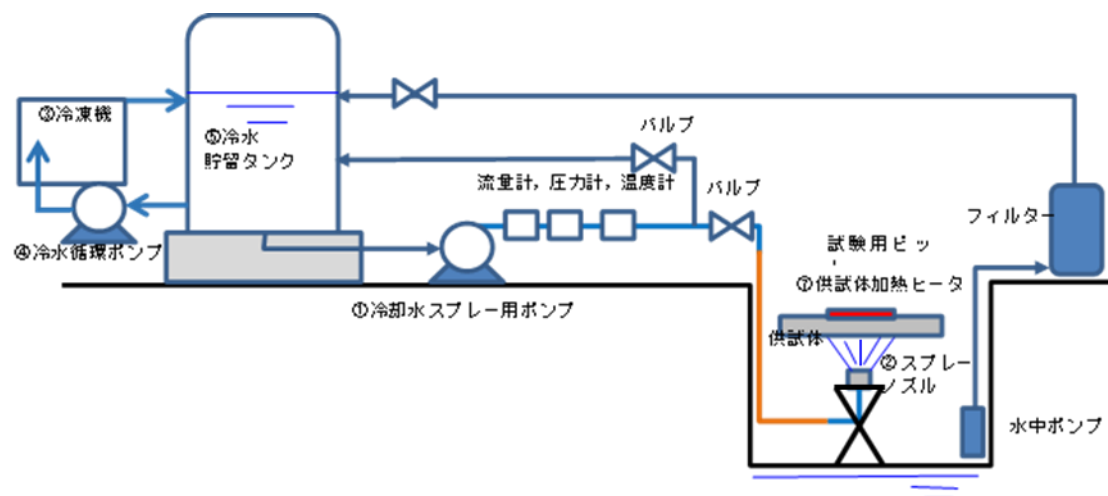


図 3.1.4.3-33 冷却設備

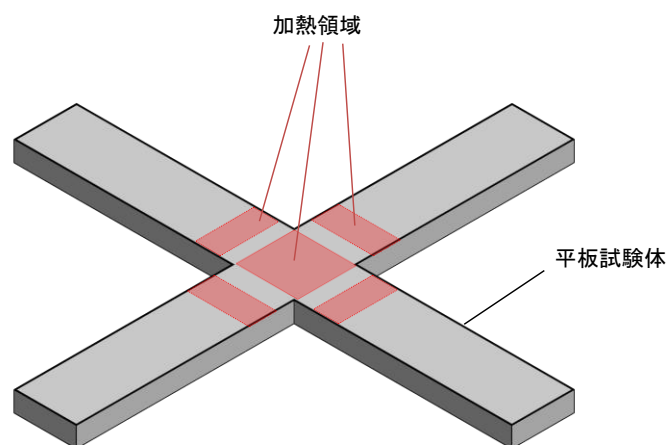


図 3.1.4.3-34 加熱設備

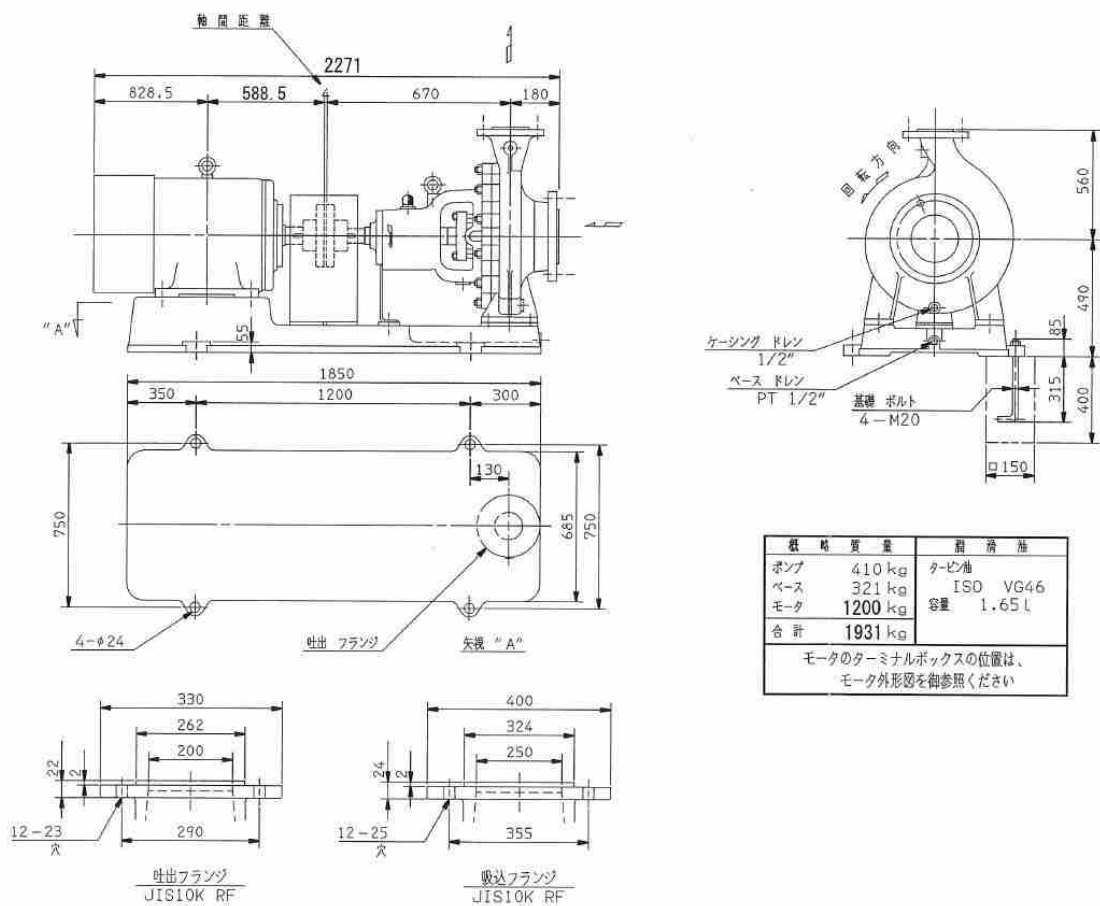


図 3.1.4.3-35 冷却スプレイ用ポンプ

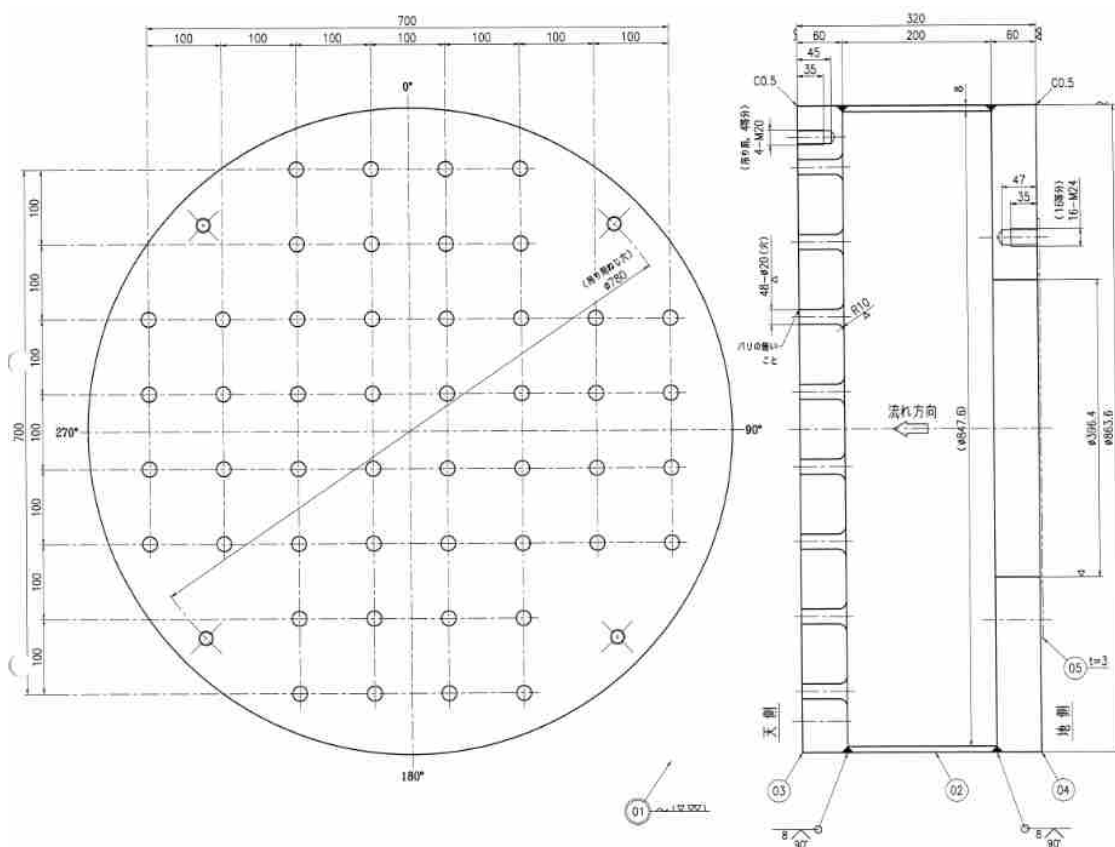


図 3.1.4.3-36 スプレイノズル

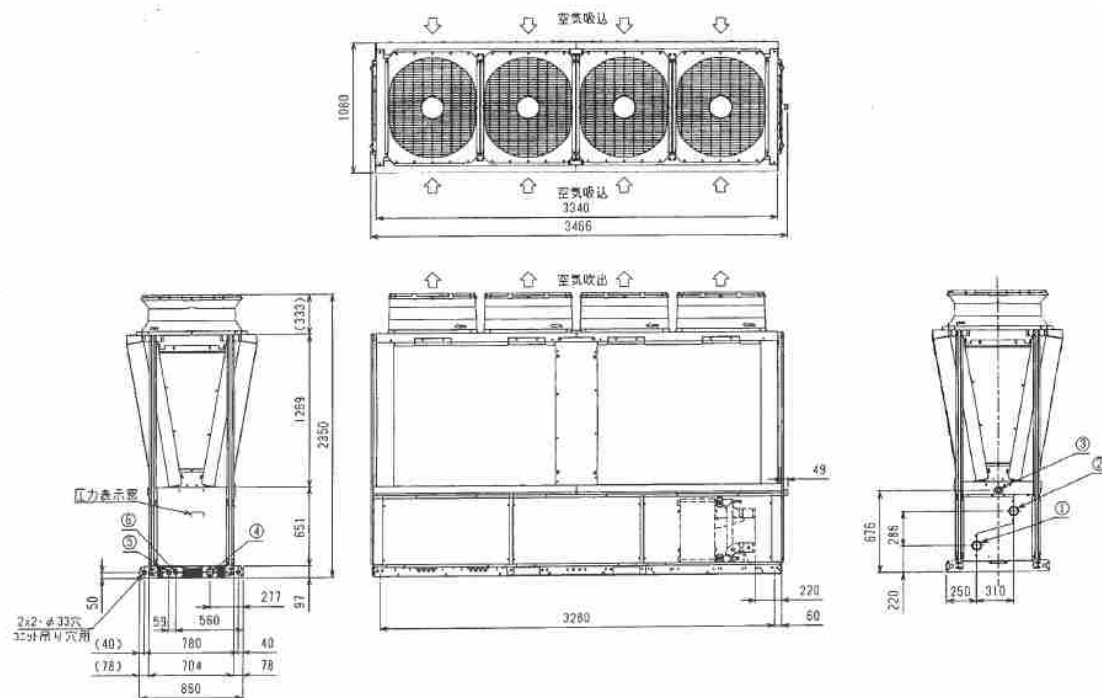


図 3.1.4.3-37 冷凍機本体

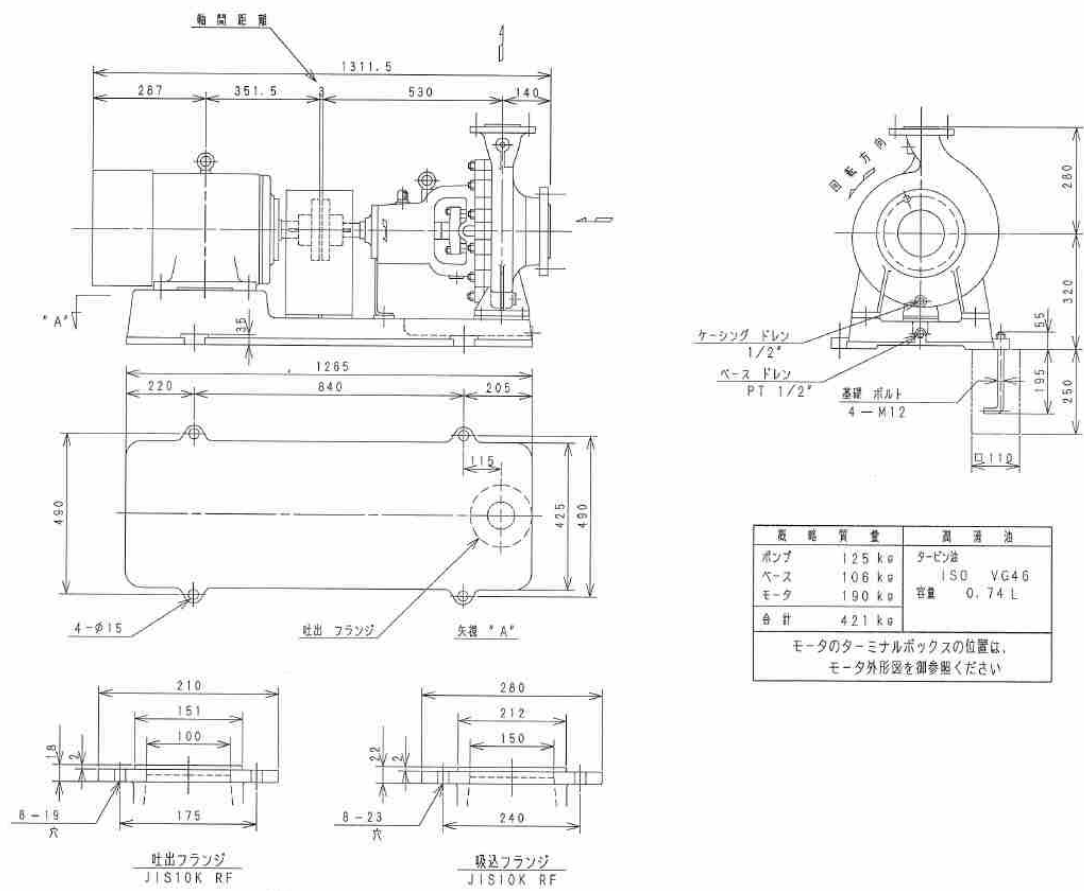


図 3.1.4.3-38 冷水循環ポンプ

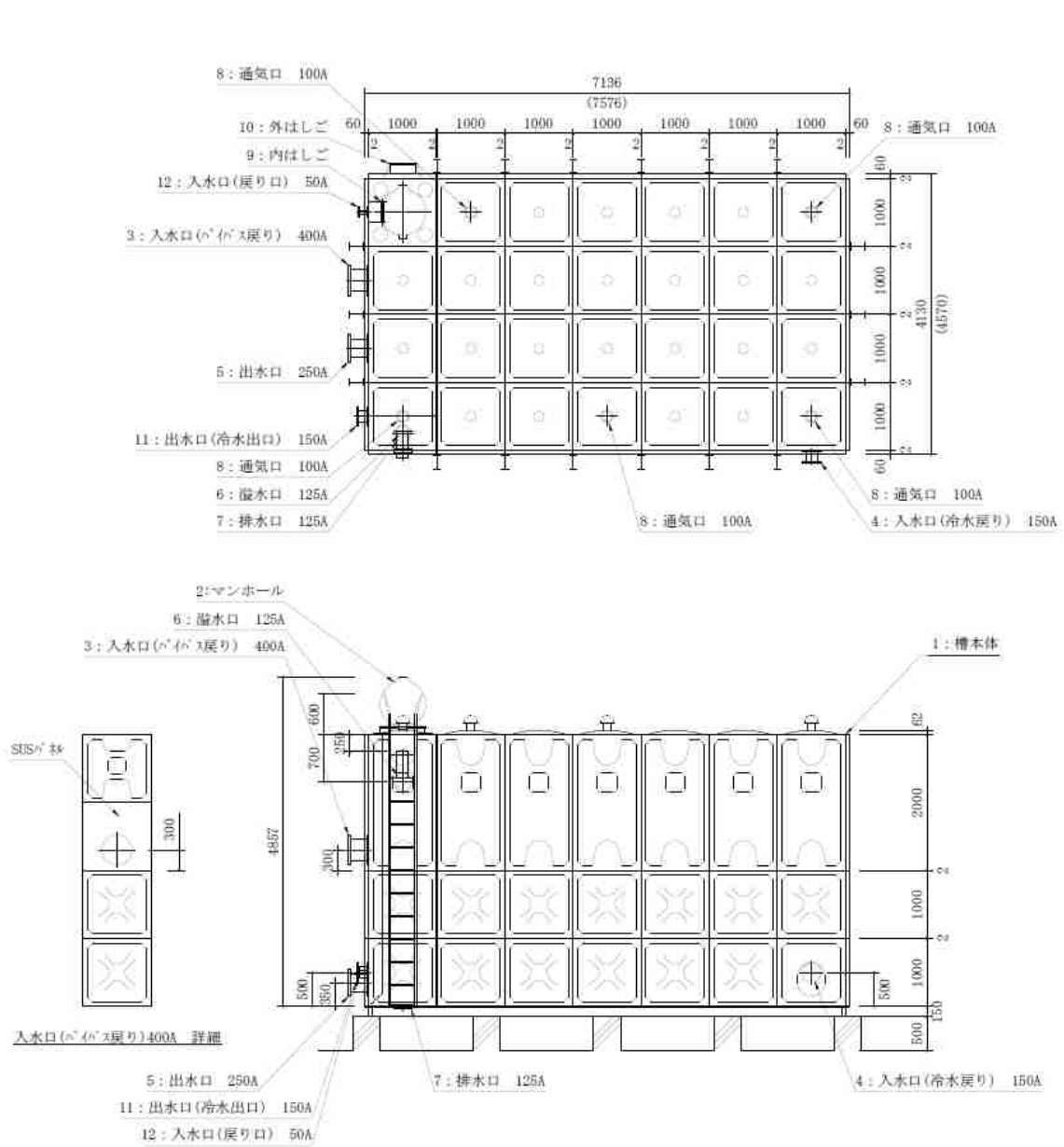


図 3.1.4.3-39 冷水貯留タンク

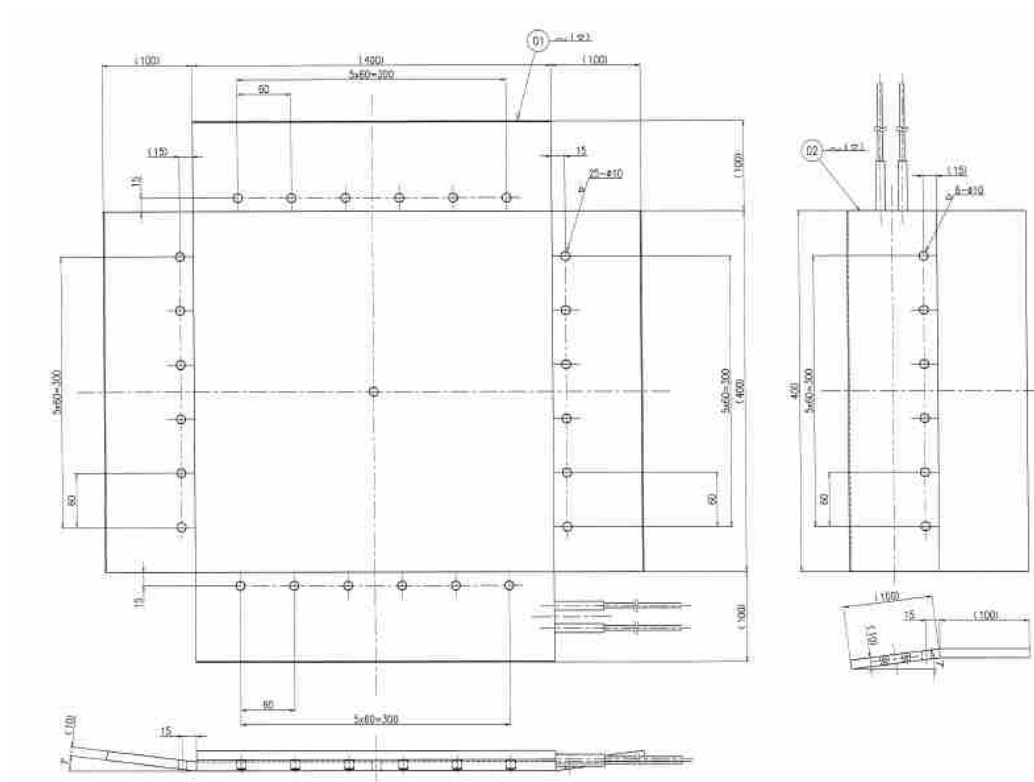


図 3.1.4.3-40 供試体ヒータ

3.3.2.3.2 設備写真



図 3.1.4.3-41 冷却スプレイ用ポンプ



図 3.1.4.3-42 スプレイノズル



図 3.1.4.3-43 冷凍機本体



図 3.1.4.3-44 冷水循環ポンプ



図 3.1.4.3-45 冷水貯留タンク

(4) ピット蓋

平板モデル試験設備は、図 3.1.4.3-46 に示すように、既存の地下ピットに以下の設備を配置される。まず、平板試験体を保持し、2 軸の曲げ荷重を与える反力フレームと载荷設備を、ピット内支持構造に設置する。加熱設備は、設置した試験体上面に配置する。冷却水は、屋外に設置した冷却設備に接続した冷却水配管によりピット内の試験体下面に噴射する。

ピット内支持構造は、反力フレームの支持、冷却水配管の支持、計測線接続のための作業ステージとして機能するもので、既存の設備を整備して使用する。なお、ピットの空間の下半分は、冷却水の排水を試験後に貯留するために使用する。また、ピット内には、水蒸気が充満するため、ピットには鋼製の蓋を設置する。このピット蓋も、既存の設備を整備して使用する。ただし、冷却水配管が干渉する部分のピット蓋は、新たに製作する。

表 3.1.4.3-4 に、ピット蓋の明細を示す。設備概略仕様は以下の通りである。

(a)ピット蓋

形 式 : 鋼鈑溶接組立品
主要材料 : SS400
外形寸法 : 幅 1200×長さ 7400×高さ 800mm
重 量 : 5.1ton

(b)ピット蓋 追加梁

形 式 : 鋼鈑溶接組立品
主要材料 : SS400
外形寸法 : 幅 280×長さ 900×高さ 430mm
重 量 : 160kgf

表 3.1.4.3-4 ピット蓋明細表

番号	設備名	数量	備考
1	ピット蓋	1 台	図 3.1.4.3-47
2	ピット蓋 追加梁	1 台	図 3.1.4.3-48

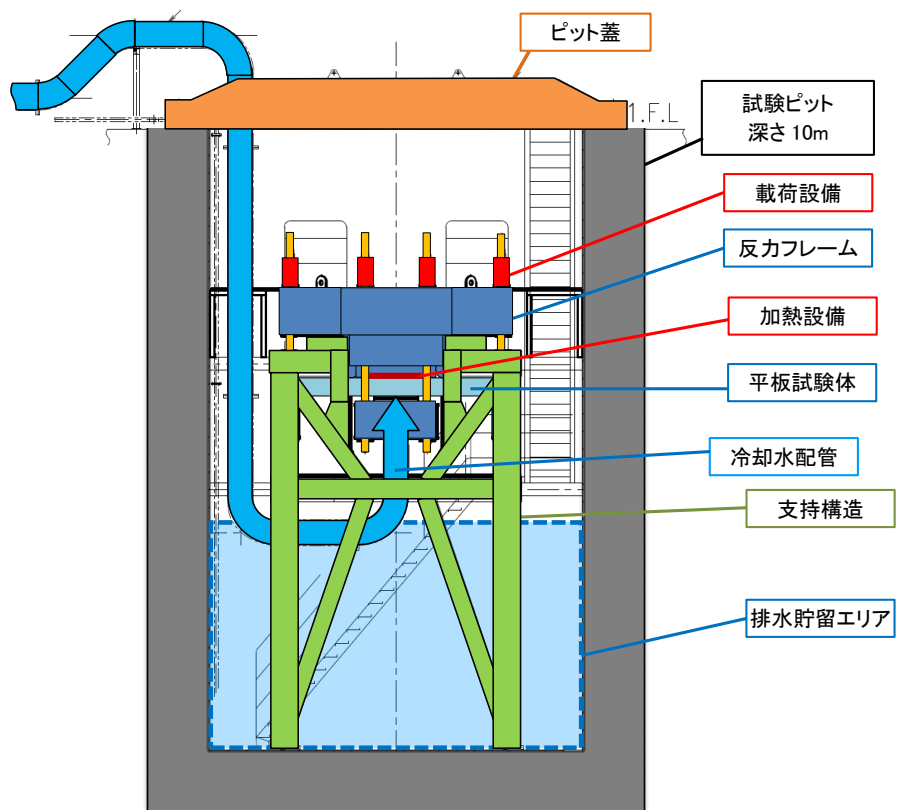


図 4. 1. 4-46 ピット内の試験設備の配置

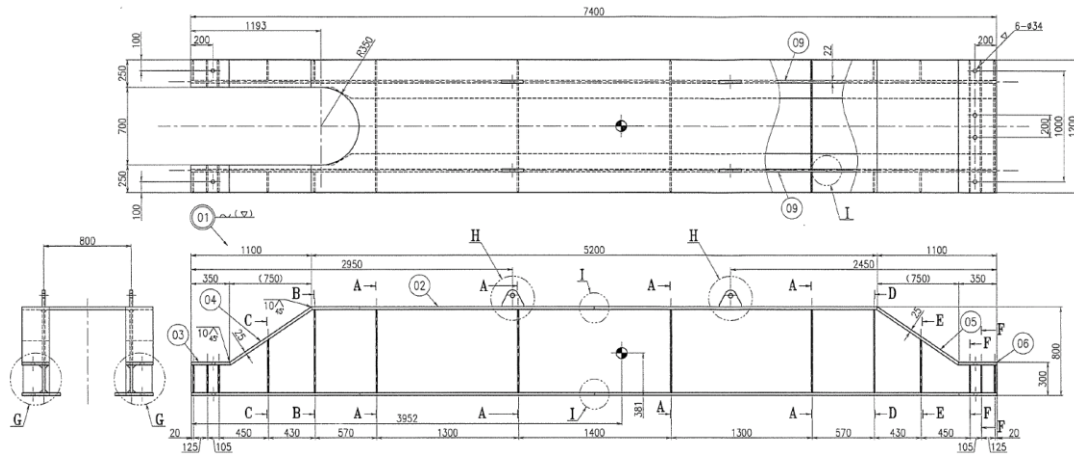


図 3.1.4.3-47 ピット蓋

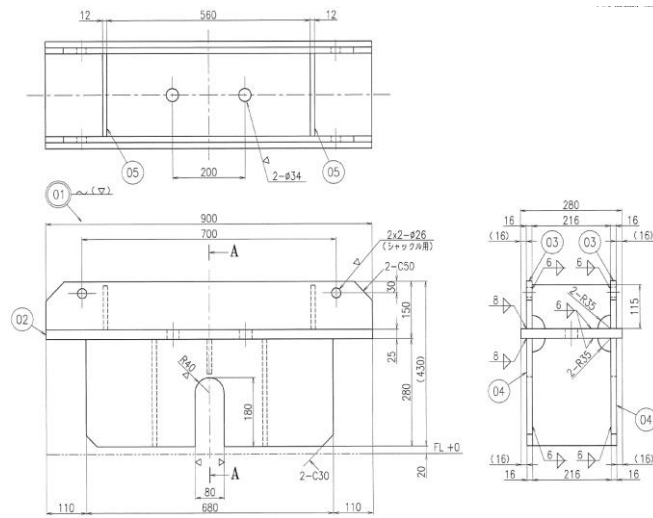


図 3.1.4.3-48 ピット蓋 追加梁

(5) 試験体の組立用架台

平板モデル試験設備は、試験体の上面に反力フレーム、下面に載荷治具を設置して組立てた状態でピット内へ設置される。組立の手順を、図 3.1.4.3-49 に示す。組立用架台は、(a) に示す試験体受け、載荷治具受け、反力フレーム受けより構成される。作業は、まず、(b) に示すように中央の試験体受けに試験体を搭載し、試験体上下面にセンサを取付ける等の準備を行う。次に、(c)に示す載荷治具を、載荷治具受けに搭載して試験体の下面に設置する。最後に、(d)に示すように、上方から反力フレームを設置して、テンションロッドで一体に結合する。その後、全体を楊重してピット内に設置する。

表 3.1.4.3-5 及び図 3.1.4.3-50 から図 3.1.4.3-53 に組立用架台の明細を示す。設備概略仕様は以下の通りである。

(a)試験体受け

形 式 : 鋼鈑溶接組立品
主要材料 : SS400
外形寸法 : 幅 1200×長さ 7400×高さ 800mm
重 量 : 5.1ton (合計)

(b)載荷治具受け

形 式 : 鋼鈑溶接組立品
主要材料 : SS400
外形寸法 : 幅 1200×長さ 7400×高さ 800mm
重 量 : 5.1ton (合計)

(c)反力フレーム受け

形 式 : 鋼鈑溶接組立品
主要材料 : SS400
外形寸法 : 幅 1200×長さ 7400×高さ 800mm
重 量 : 5.1ton (合計)

表 3.1.4.3-5 組立用架台明細表

番号	設備名	数量	備考
1	試験体受け	4 台	図 3.1.4.3-51
2	載荷治具受け	4 台	図 3.1.4.3-52
3	反力フレーム受け	4 台	図 3.1.4.3-53

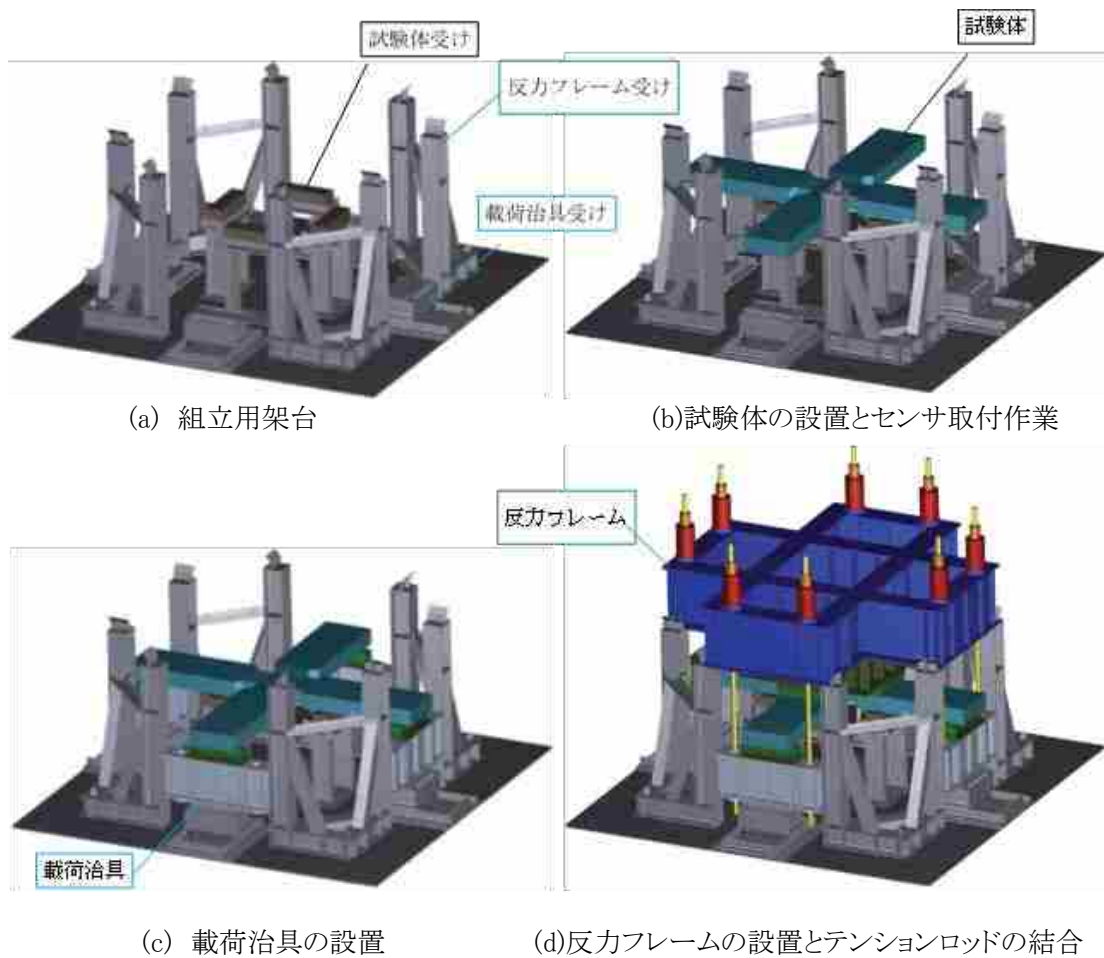


図 3.1.4.3-49 試験体及び試験設備の組立手順

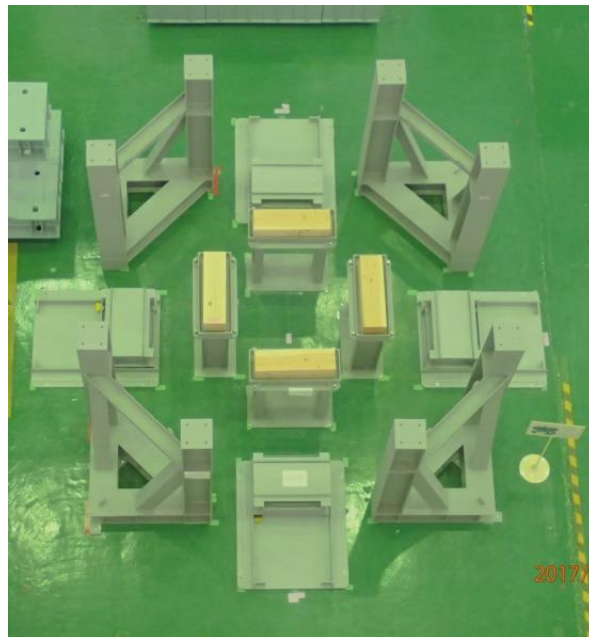
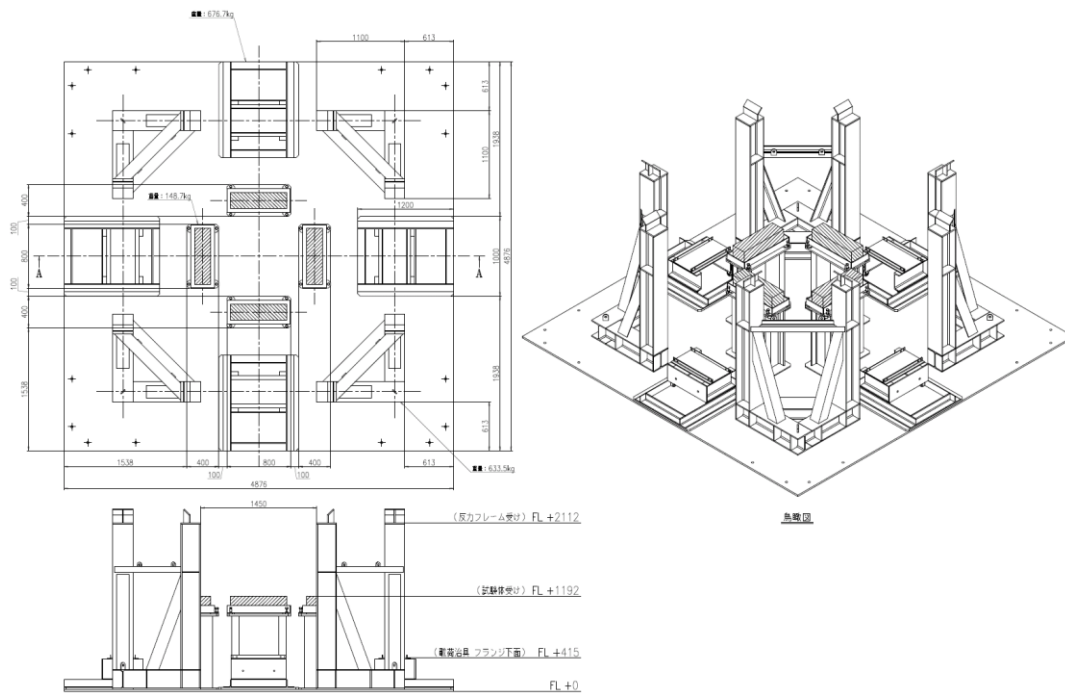


図 3.1.4.3-50 組立架台配置図

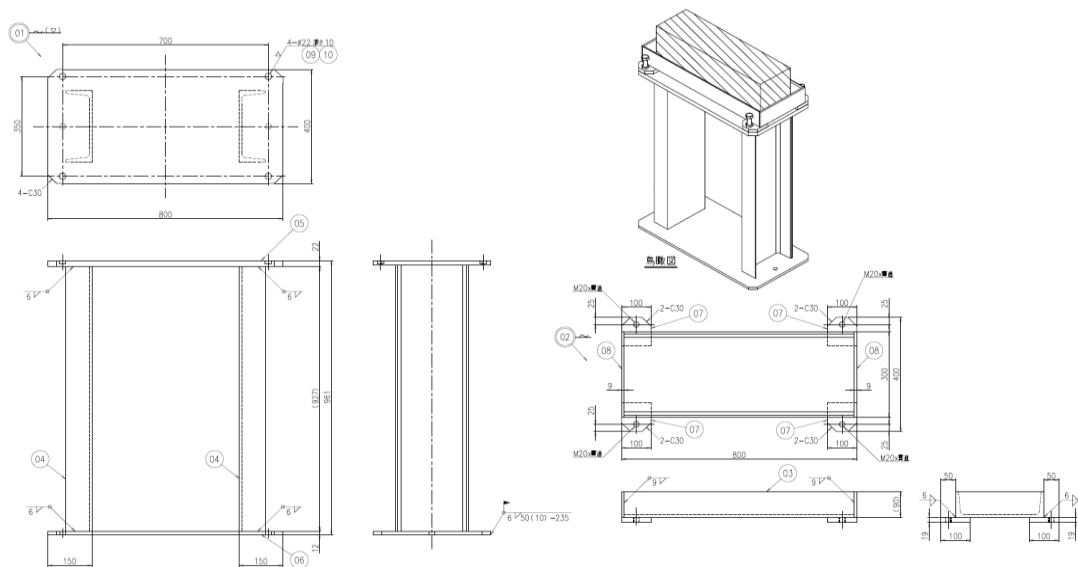


図 3.1.4.3-51 試験体受け

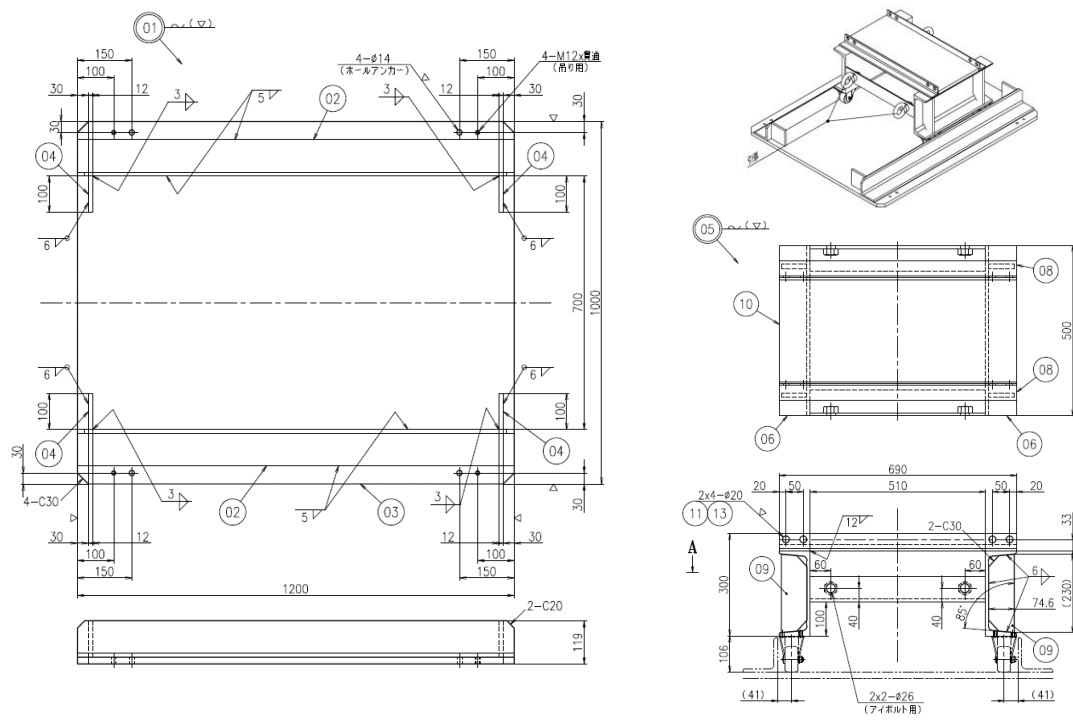


図 3.1.4.3-52 载荷治具受け

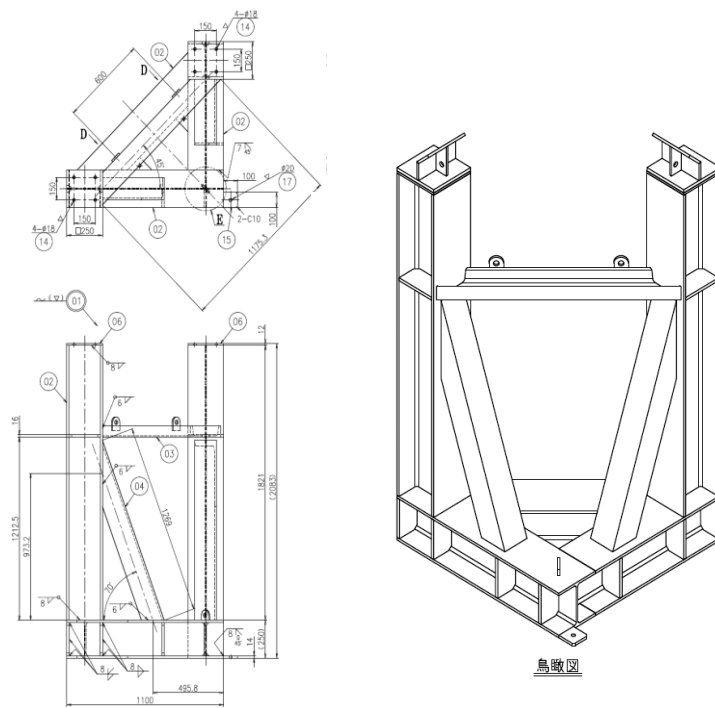


図 3.1.4.3-53 反力フレーム受け

(6) 疲労き裂導入設備

放電加工(EDM)にて導入したスリットに対し繰返し負荷を与え、疲労き裂をわずかに進展させることにより疲労き裂を導入する。平板試験体では、疲労き裂を進展させるために、き裂面直交方向に曲げ負荷を付与できる疲労き裂導入設備を整備する。試験体を支持する反力フレーム上に、載荷治具、支持治具、アクチュエータ（疲労試験機）を配置して疲労試験を実施する。疲労き裂の進展状況は、き裂進展量を計測して把握する。（アクチュエータとその油圧源は、既存の設備を整備して使用する。）

図 3.1.4.3-54 に疲労予き裂導入試験機のイメージを示す。表 3.1.4.3-6 及び図 3.1.4.3-55 から図 3.1.4.3-57 に組立用架台の明細を示す。設備概略仕様は以下の通りである。

(a)アクチュエータ（整備工事のみ）

荷 重 : 1MN
ストローク : ±150mm
外形寸法 : 直径 φ470mm×ℓ2110mm

(b)反力フレーム及び治具

形 式 : 鋼鈑溶接組立品
主要材料 : SS400
外形寸法 : 幅 2400×長さ 4200×高さ 4235mm
重 量 : 15.2ton（アクチュエータ込）

(c)油圧源（整備工事のみ）

最高使用圧力 : 20.6MPa
吐出流量 : 262L/min
容 量 : 55kW×2 台

表 3.1.4.3-6 疲労き裂導入設備明細表

番号	設備名	数量	備考
1	アクチュエータ(整備工事のみ)	1 台	図 3.1.4.3-55
2	反力フレーム及び治具	一式	図 3.1.4.3-56
3	油圧源(整備工事のみ)	一式	

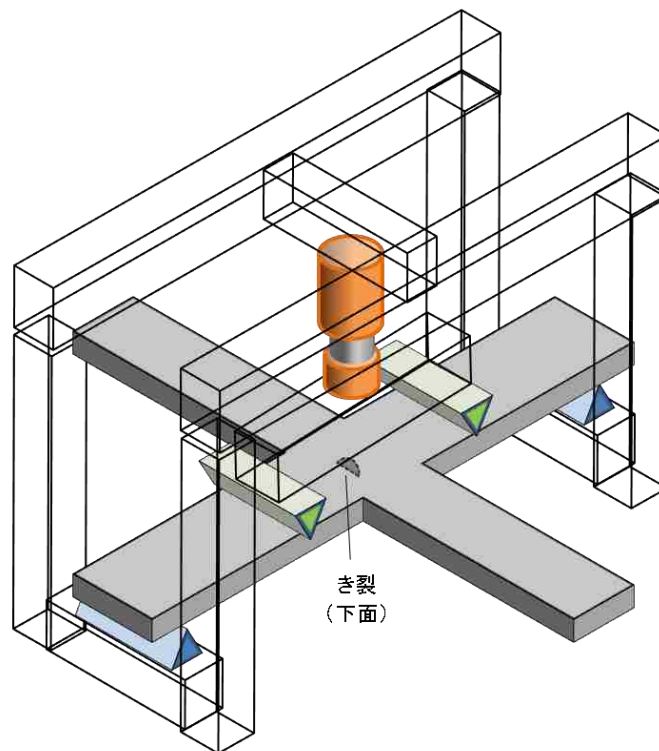
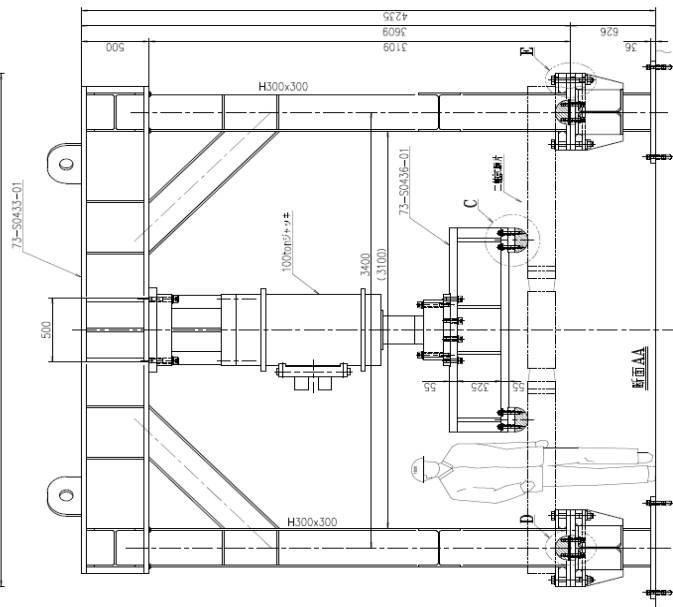
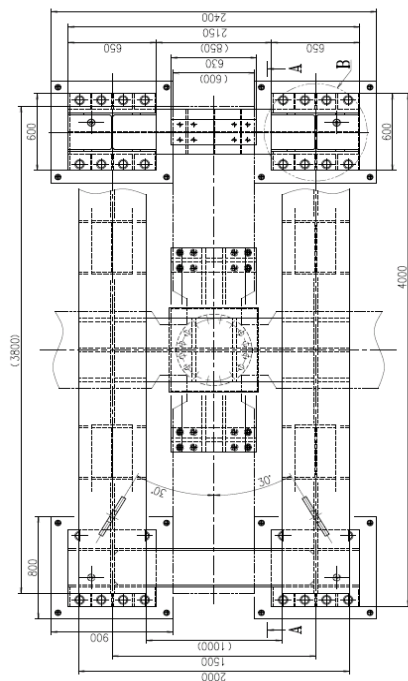


図 3.1.4.3-54 疲労予き裂導入試験機（き裂直交方向の 4 点曲げ試験）



306



図 3.1.4.3-56 アクチュエータ、反力フレーム及び治具

3.1.4.4 クラッド下亀裂導入に係る検討

クラッド下半楕円亀裂を付与した試験体を製作するためには、疲労予亀裂導入後にクラッドを溶接する必要がある。クラッド溶接による入熱等により、試験体に既に導入した疲労予亀裂の形状や亀裂計測の精度、破壊靱性値等への影響が生じる可能性がある。そのため、クラッド溶接の影響を確認するための予備検討を行った。

(1) PDM による亀裂計測方法の有効性確認、及び亀裂内へのクラッド溶け込み等の影響に関する確認

試験マトリクスを表 3.1.4.4-1 に示す。供試体として、板厚約 140mm の原子炉压力容器鋼 (SQV2A 鋼) から、330mm×200mm×t50mm の寸法の試験体を製作し、330mm×200mm の面の片側の 4 箇所、放電加工により以下の 2 種類の半楕円形状のスリットを導入した。

- ・スリット① : 表面長 $\cdots l=52\text{mm}$ 、深さ $\cdots a=6\text{mm}$
- ・スリット② : 表面長 $\cdots l=60\text{mm}$ 、深さ $\cdots a=10\text{mm}$

スリット導入後に、以下の条件でクラッド溶接を行った。

- ・クラッド材料 : 神戸製鋼所製 USB-309L
- ・フラックス : 神戸製鋼所製 PF-B1
- ・クラッド溶接幅 : 約 50mm (1 パスあたり)

予備検討用試験体の形状及び寸法を図 3.1.4.4-1 に示す。予備検討用試験体へのクラッド溶接は、幅 200mm 方向に対して 4 回に分けて行い、B→C→D→A の順序で溶接した。

(a) PDM による亀裂計測方法の有効性確認

PDM は亀裂長さの変化を計測する方法として一般的に用いられるが、クラッド下亀裂の場合、クラッド部を電流が流れるため、有効な計測ができない可能性がある。そこで、クラッド溶接前後でスリットを挟む両側位置での電位計測を行った。なお、スリットがない場合についても参考までに電位計測を行った。また、クラッド溶接後については、PDM 電極部のクラッド部分を一部座ぐりにより除去し、端子を直接 SQV2A 母材に取り付けた場合の検討も行った。図 3.1.4.4-2 に、クラッド溶接前後での PDM 端子取付け状況を示す。

PDM 計測条件の概要を以下に示す。

- ・電流 : 5A
- ・電流方向 : 2 方向切換え
- ・端子位置 : 電流端子 $\cdots$ スリットから 25 mm 離れた位置
電圧端子 $\cdots$ スリットから 3 mm 離れた位置、スリットを中心として表面長さ方向に 13 mm ピッチの合計 5 箇所

スリット中央部で測定した PDM の結果(スリットなしの場合にはスリットありと同じ電極位置で測定)を図 3.1.4.4-3 に示す。同図はスリットなしの電位で無次元化した値を示しているが、クラッドなしの状態では、スリット寸法が大きくなるほど、無次元化した電位は顕著に増

加する傾向が認められる。これに対して、クラッドあり(座ぐり穴加工なし)の状態では、スリット有無及びスリット寸法の違いによって無次元化電位はほとんど変化しない。しかしながら、クラッドあり(座ぐり穴加工あり)で SQV2A 母材に直接 PDM 端子を取り付けた場合には、クラッドなしの場合ほど大きくはないが、スリット寸法が大きくなるほど無次元化電位も増加する傾向を示している。

図 3.1.4.4-4 に、今回の計測結果と電場解析による解析結果との比較を示すが、スリットなしの状態で基準化した電位は、電場解析による結果と概ね一致しており、PDM 測定に関して電場解析による検討が有効であることがわかる。

(b)クラッド溶接時における亀裂内へのクラッド溶け込み等の影響に関する確認

スリットは、表面長さ $l=60\text{mm}$ 、深さ $a=10\text{mm}$ の1種類であり、図3.1.4.4-5に示すようにクラッドとの位置関係を変えた2種類のスリットについて断面観察を行った。観察位置は、スリット中央部とスリット端から約5mm位置のそれぞれ2箇所とした。クラッド溶接後にスリットに対して直交する断面を観察した結果を図3.1.4.4-6及び図3.1.4.4-7に示す。この断面観察結果より、観察を行った4断面のうち、1断面において若干スリット内へのクラッドの入り込みが認められたものの、残りの3断面についてはクラッドの入り込みはほとんど認められなかった。

なお、クラッドとSQV2A母材との境界は若干波打っており、スリット近傍の母材が一部溶融しているため、スリットが約1mm程度短くなっている。また、クラッド下の熱影響部(HAZ)が、最も大きい断面で10mm以上あり、クラッド溶接時の条件の検討が必要である。

表 3.1.4.4-1 試験マトリクス

クラッド溶接* ¹ 有無	スリット 有無	スリット* ² 種類	クラッドと* ³ の 位置関係	PDM 計測	断面観察
なし (クラッド溶接前)	なし	—	—	○	—
	あり	スリット①	A	○	—
		スリット②	A	○	—
あり (クラッド溶接後)	なし	—	A	○	—
	あり	スリット①	A	○	—
		スリット②	A	○	○
		スリット②	B	—	○
あり (PDM 端子取付け部 座ぐり穴加工後)	なし	—	A	○	—
	あり	スリット①	A	○	—
		スリット②	A	○	—

*1：クラッド溶接前後での PDM 端子取付け状況の関係は図 3.3.1.4-10 参照。

*2：スリット種類については図 3.3.1.4-9 参照。

*3：クラッドとの位置関係については図 3.3.1.4-11 参照。

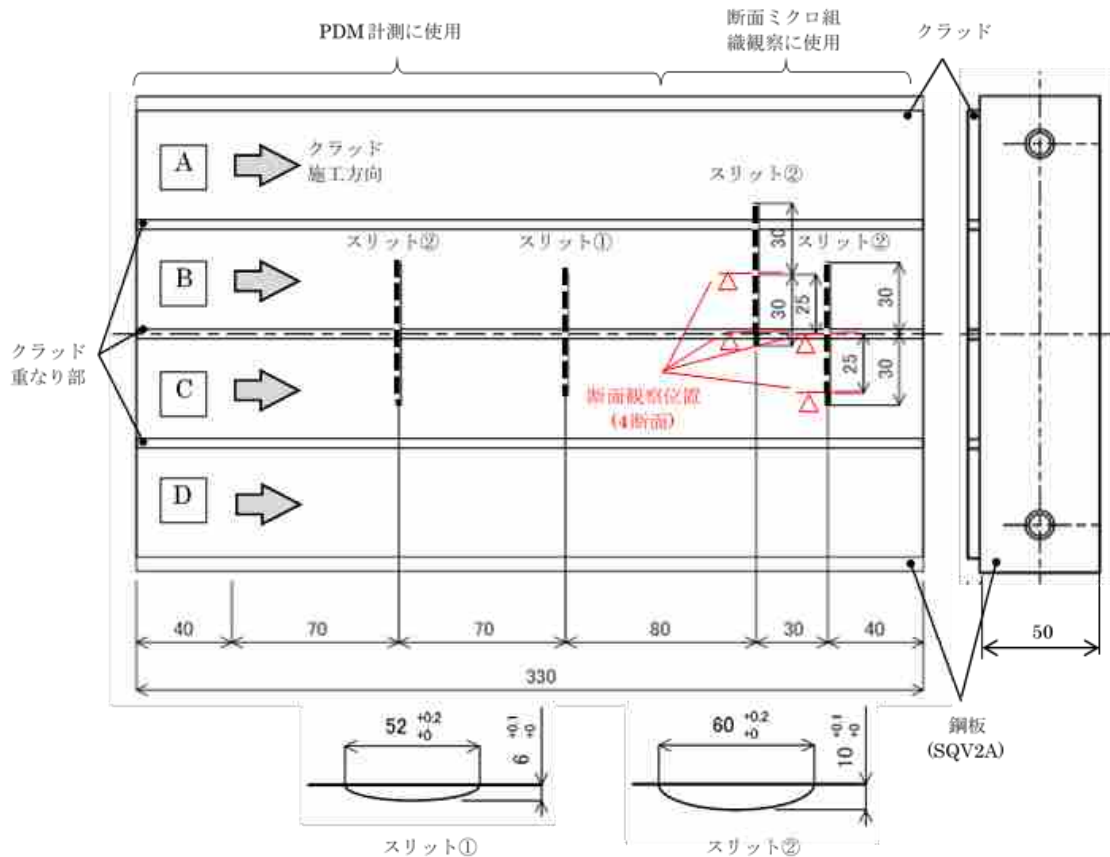


図 3.1.4.4-1 予備検討用試験体の形状及び寸法

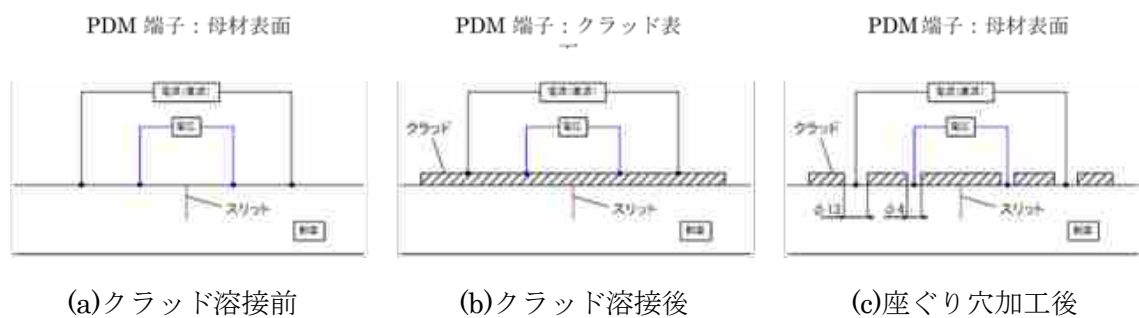


図 3.1.4.4-2 クラッド溶接前後での PDM 端子取付け状況(端子取付け部断面のイメージ)

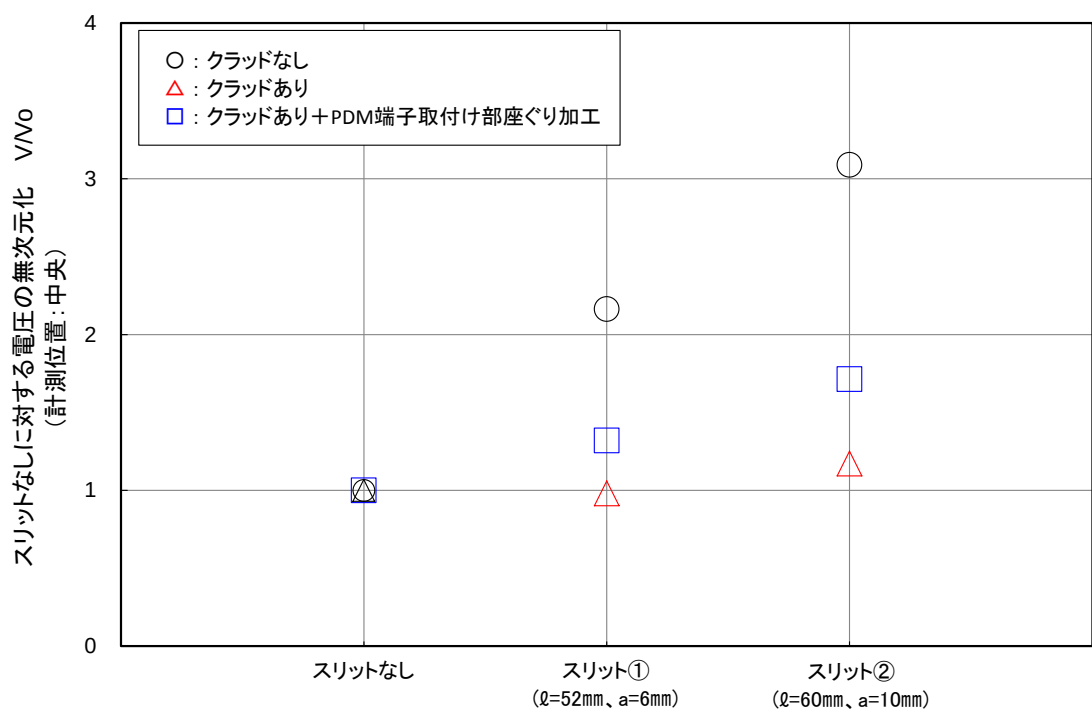


図 3.1.4.4-3 PDM 計測結果

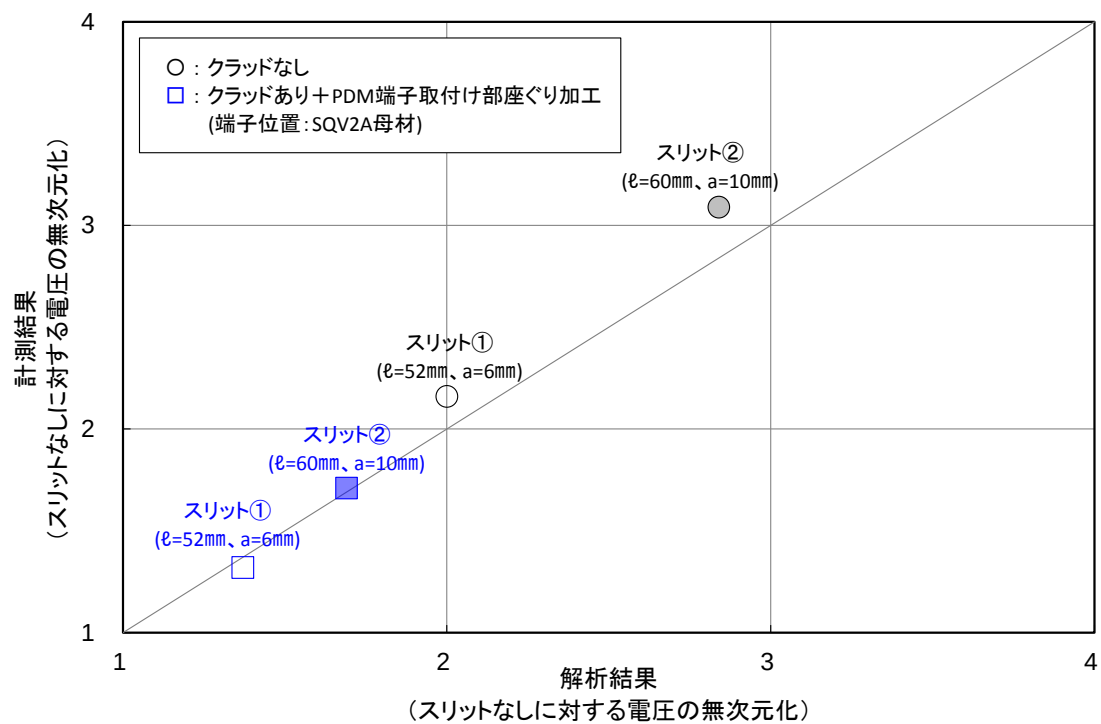


図 3.1.4.4-4 PDM 計測結果と解析結果の比較

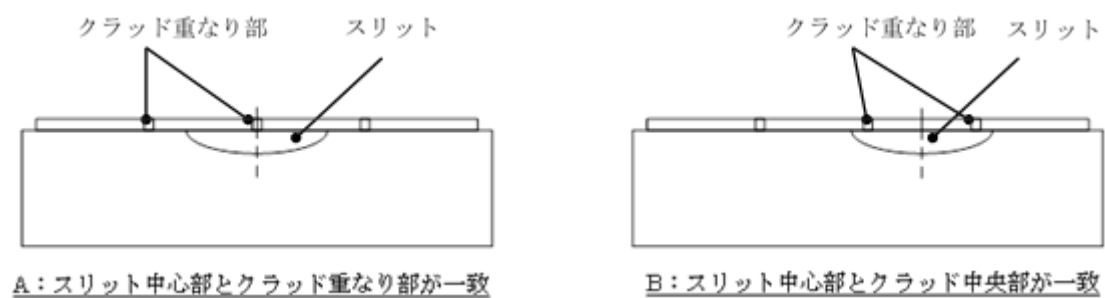


図 3.1.4.4-5 スリットとクラッドの位置関係(断面のイメージ)

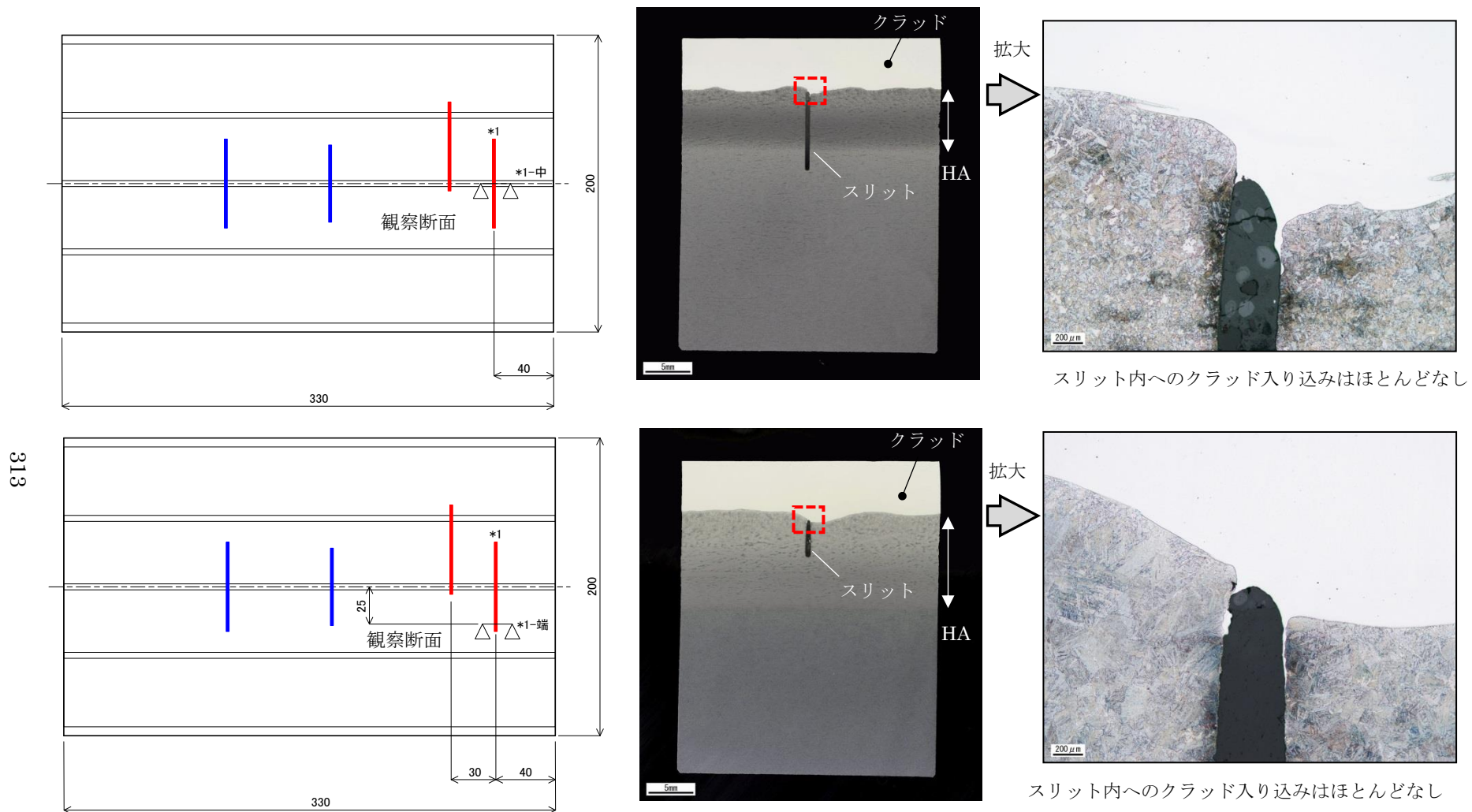


図 3.1.4.4-6 断面マイクロ組織観察結果(スリット②, クラッドとの位置関係 : A)

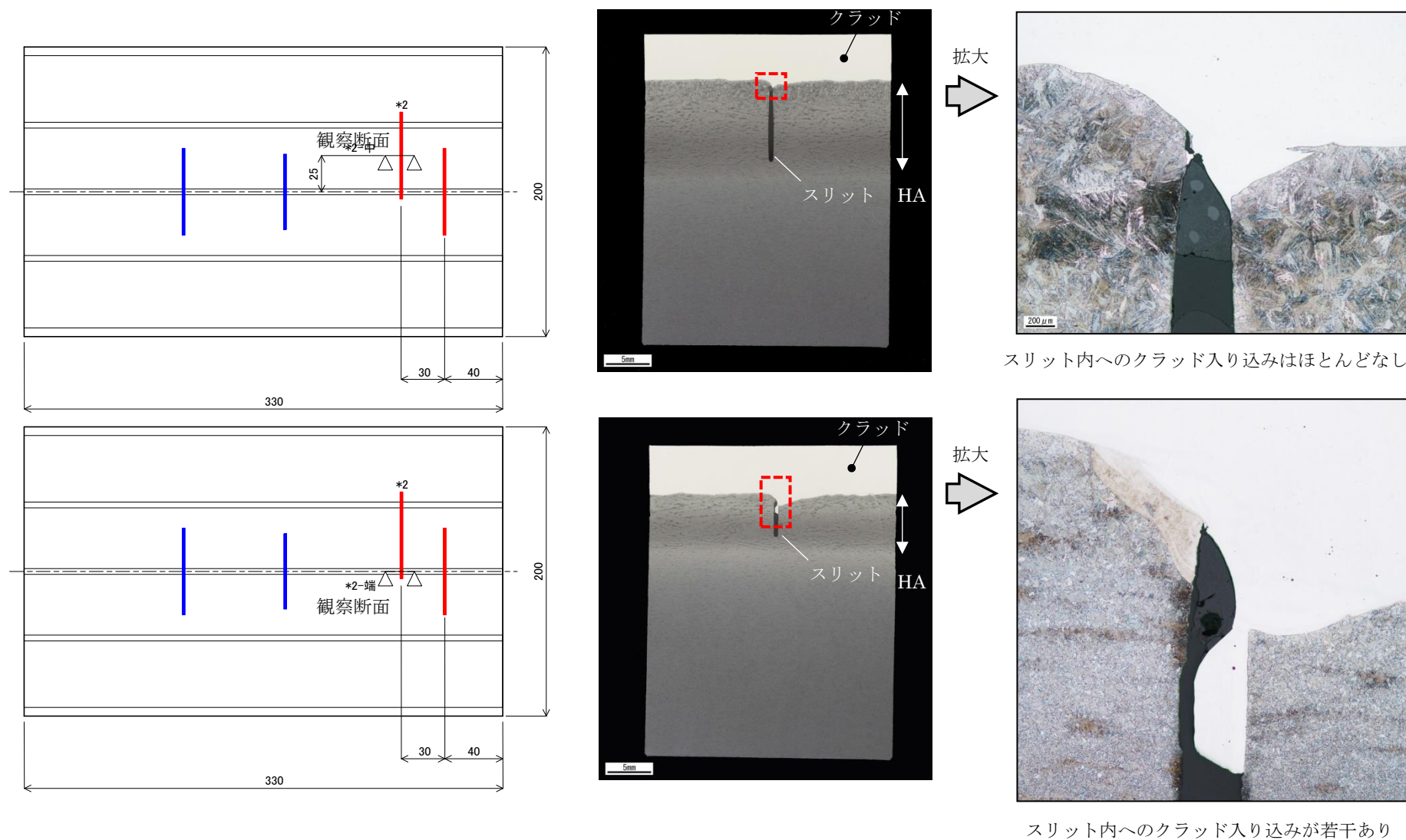


図 3.1.4.4-7 断面マイクロ組織観察結果(スリット②, クラッドとの位置関係 : B)

(2)クラッド溶接による疲労予亀裂への入熱等の影響

クラッド下半楕円亀裂を付与した試験体を製作するためには、疲労予亀裂導入後にクラッドを溶接する必要がある。疲労予亀裂導入後にクラッドを溶接すると、溶接入熱による亀裂先端の温度上昇や熱膨張による予亀裂の開口などが生じると考えられる。そのため、予亀裂先端の鈍化や残留応力の発生などが生じ、高温予荷重(WPS)効果により破壊靱性に影響を及ぼす懸念がある。破壊靱性に及ぼすクラッド溶接の影響を確認するために、クラッドを溶接後に亀裂を導入した試験片と、亀裂導入後にクラッドを溶接した試験片を用いた試験を行い、破壊発生時の応力拡大係数を比較した。供試材として、板厚 200mm の原子炉圧力容器鋼(SQV2A 鋼)の表面近傍の材料を用い、健全性評価において想定される欠陥と同じ深さであるクラッド下 10mm の亀裂を導入した曲げ試験片を用いた。

(a) クラッド溶接後予亀裂導入(CWF)試験片

図 3.1.4.4-7 に、CWF 試験片製作手順の概要を示す。なおクラッド溶接条件等は後述の(c) 項に示す。クラッドを溶接したブロックから、T-S 方向に試験片を切り出し、母材部分に $\phi 2$ の孔を空け、EDM によりスリットを加工した後に疲労予亀裂を導入した。疲労予亀裂は、周波数 10Hz、応力比 0.1 の正弦波、荷重条件 3 ステップにて導入した。疲労予亀裂導入最終段階の K 値は $15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ とした。疲労予亀裂の導入後に、再度 EDM により母材とクラッドの境界までスリットを延長した。クラッド溶接後予亀裂導入(CWF)試験片の形状を図 3.1.4.4-8 に示す。スリットの両側には、開口変位測定用クリップゲージを取り付けるためのネジ穴を加工した。試験片寸法を表 3.1.4.4-2 に示す。

表 3.1.4.4-2 クラッド溶接後予亀裂導入試験片寸法

試験片	厚さ (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)	スリット長さ (mm)	疲労亀裂長さ (mm)
CWF-1	14.89	35.00	150	8.25	1.6
CWF-2	14.88	35.01	150	8.23	1.6
CWF-3	14.85	35.01	150	8.24	1.6
CWF-4	14.87	35.01	150	8.25	1.6
CWF-5	14.89	35.01	150	8.26	1.6
CWF-6	14.88	35.01	150	8.26	1.7
CWF-7	14.89	35.01	150	8.27	1.7

スリット長さと疲労亀裂長さは試験片表面にて測定した値

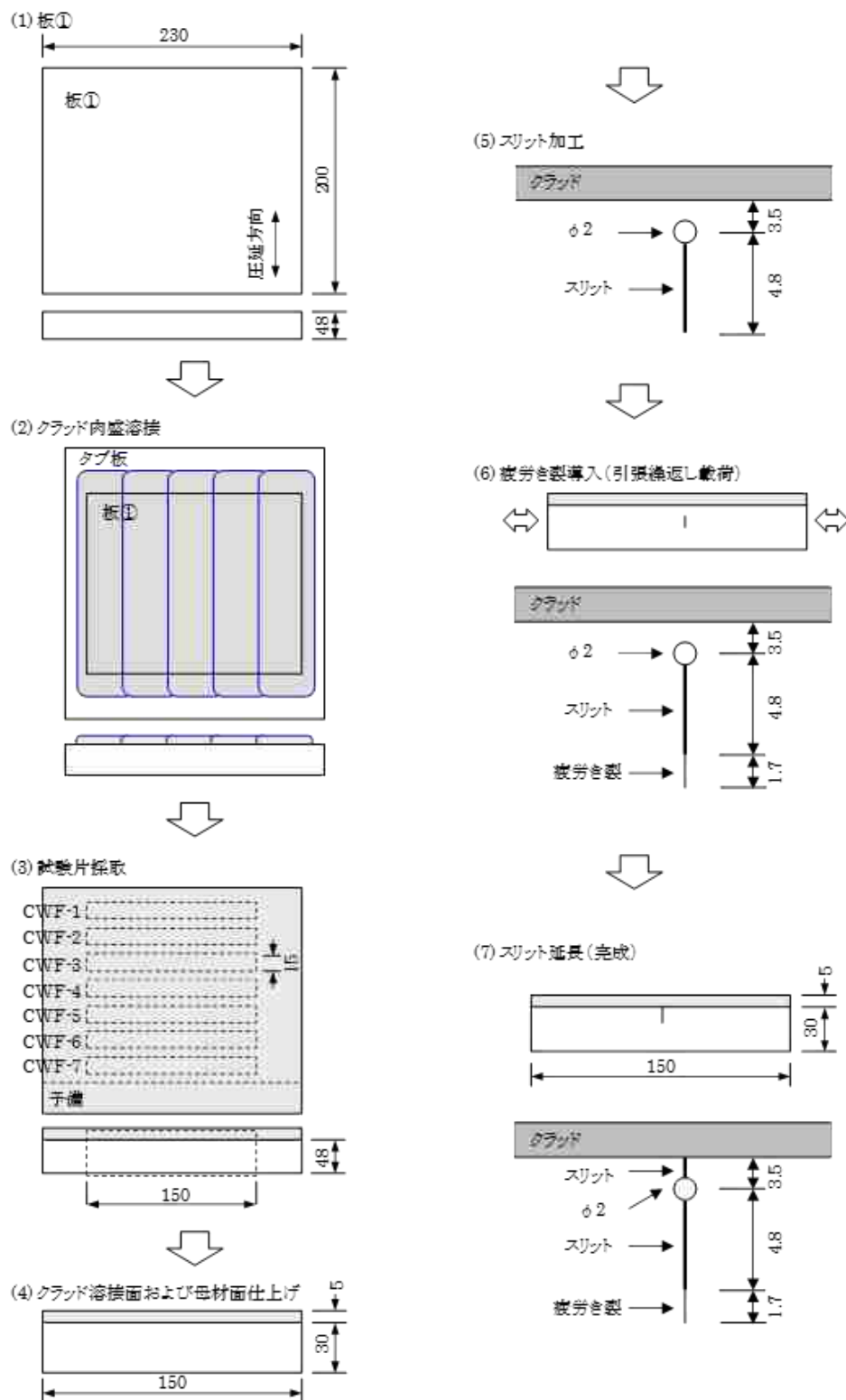


図 3.1.4.4-7 クラッド溶接後予亀裂導入試験片(CWF)製作手順の概要

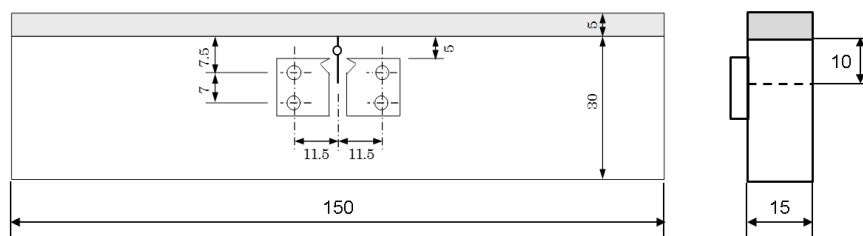


図 3.1.4.4-8 クラッド溶接後亀裂導入(CWF)試験片の形状

(b) 予亀裂導入後クラッド溶接(FCW)試験片

図 3.1.4.4-9 に、予亀裂導入後クラッド溶接(FCW)試験片製作手順を示す。100×230mm のブロックの黒皮を切削した表面側に深さ 9.5mm のスリットを加工した後、T-S 方向に疲労予亀裂を導入した。疲労予亀裂は、周波数 10Hz、応力比 0.1 の正弦波、荷重条件 3 ステップにて導入した。疲労予亀裂導入最終段階の K 値は $15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ とした。後述の(c) 項に示すように疲労予亀裂を導入後のブロック 2 つをまとめてクラッドを溶接し、その後に T-S 方向に試験片を切り出した。予亀裂導入後クラッド溶接試験片の形状を図 3.1.4.4-10 に示す。試験片寸法を表 3.1.4.4-3 に示す。

表 3.1.4.4-3 予亀裂導入後クラッド溶接試験片寸法

試験片	厚さ (mm)	幅 (mm)	長さ (mm)	スリット長さ (mm)	疲労亀裂長さ (mm)
FCW-1	15.01	34.99	150	8.93	2.14
FCW-2	15.01	35.00	150	8.97	1.87
FCW-3	15.02	35.00	150	9.02	1.93
FCW-4	15.02	35.00	150	8.92	2.15
FCW-5	15.02	35.00	150	8.91	2.01
FCW-6	15.02	35.00	150	8.88	1.96
FCW-7	15.02	35.00	150	8.86	1.79

スリット長さと疲労亀裂長さは試験片表面で測定した値

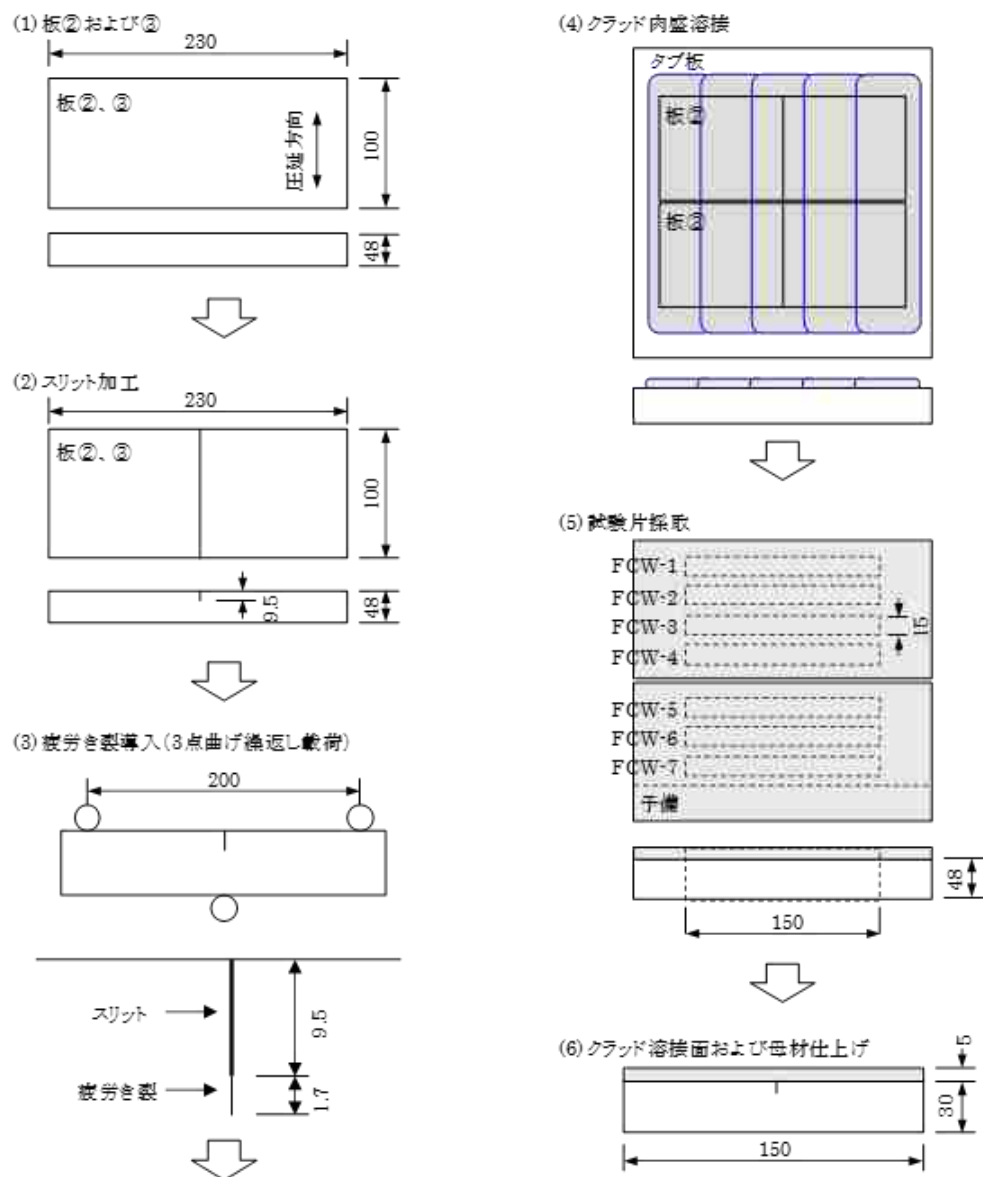


図 3.1.4.4-9 予亀裂導入後クラッド溶接(FCW)試験片製作手順

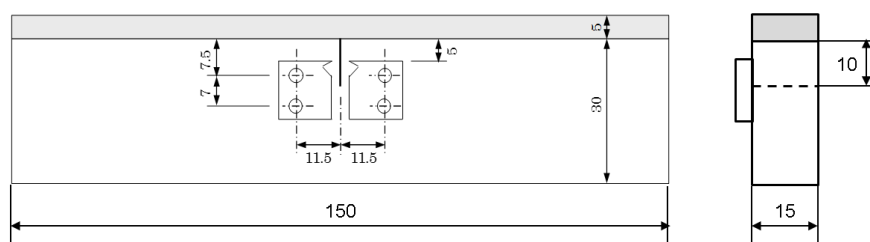


図 3.1.4.4-10 予亀裂導入後クラッド溶接(FCW)試験片の形状

(c) クラッド溶接及び溶接後熱処理条件

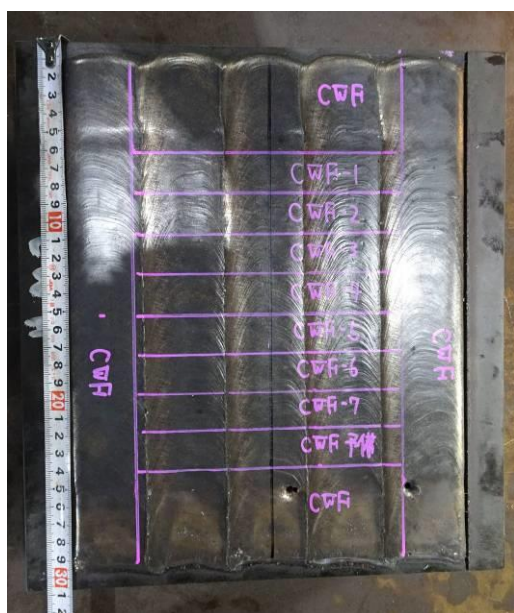
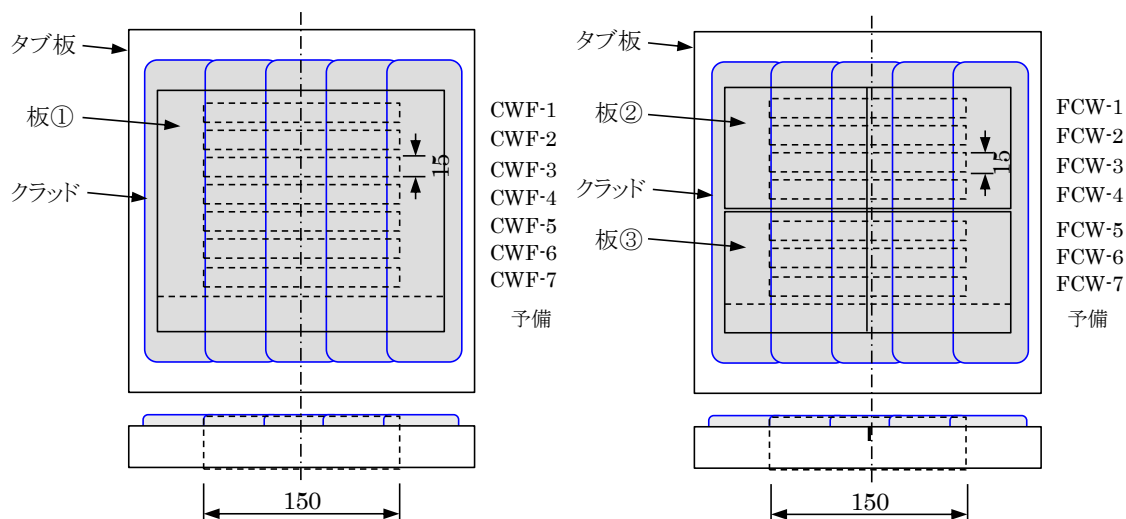
試験片採取領域を十分に確保するため、溶接スタート側およびエンド側の両側にタブ板を取り付けて溶接を行った。溶接後の様子を図 3.1.4.4-11 に示す。クラッド溶接に用いる帯状電極として、WEL ESS 309L（サイズ：0.4mm×50mmw）を用いた。溶接条件を表 3.1.4.4-4、化学成分を表 3.1.4.4-5 に示す。フラックスは、WEL BND F-8CR3（Cr:3.5%添加フラックス）粒度（12x200mesh）であり、溶接前に 250～300℃にて 1 時間の再乾燥を行った。溶接後に溶接後熱処理を実施した。熱処理条件を図 3.1.4.4-12 に示す。

表 3.1.4.4-4 クラッド溶接条件

電源	溶接電流 (A)	電圧 (V)	溶接速度 (cm/min)	エクステンション (mm)	フラックス散布 高さ(mm)	重ね代 (mm)	予熱、パス 間温度(℃)
DC-EP	850～900	27～28	180	約 35	約 25	6～8	100～150

表 3.1.4.4-5 供試帯状電極の化学成分 (%)

帯状電極	Heat No.	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	N
WEL ESS 309L	7V121	0.007	0.34	1.82	0.003	0.003	12.72	22.28	0.01	0.02	0.033
規格 (WEL)	上限	0.0020	0.60	2.00	0.025	0.010	13.00	23.50	0.75	0.75	0.040
	下限	－	0.20	1.50	－	－	11.25	22.00	－	－	0.020



(a) クラッド溶接後予亀裂導入



(b) 予亀裂導入後クラッド溶接

図 3.1.4.4-11 クラッド溶接の様子

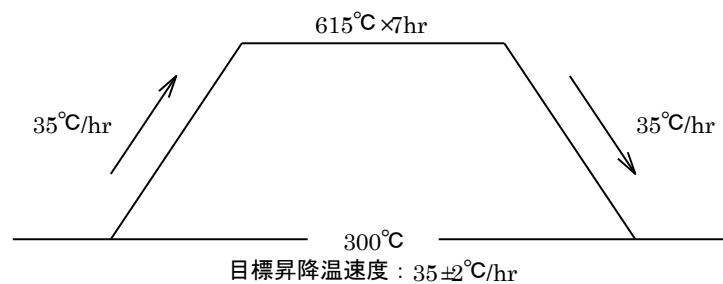


図 3.1.4.4-12 溶接後熱処理(PWHT)条件

(d) 破壊靱性試験

破壊靱性試験は以下の条件で実施した。試験の様子を図 3.1.4.4-12 に示す。

- ・ 試験規格 : ASTM E 1921 準拠 (試験片形状を除く)
- ・ 試験方法 : 3 点曲げ試験 (スパン 120mm)
- ・ 試験温度 : $-130^{\circ}\text{C}\pm 1^{\circ}\text{C}$ 、15 分以上保持
- ・ 試験速度 : 0.5 mm/min ($dK/dt=1.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m/s}}$ に相当)
- ・ 計測 : 荷重、荷重線変位、開口変位、温度 (試験片両表面ノッチ先端近傍)

破面写真を図 3.1.4.4-13 及び図 3.1.4.4-14 に示す。試験片はクラッドも含め全て破断しており、母材の破面は脆性破面であった。また、延性亀裂進展はほとんど見られなかった。荷重－荷重線変位曲線及び荷重－開口変位曲線を図 3.1.4.4-15、図 3.1.4.4-16 及び図 3.1.4.4-17、図 3.1.4.4-18 に示す。変位の増加と共に荷重はピークを示し、その後に低下してから破壊が生じた。前述したように母材の破面は脆性破面であり延性亀裂が見られなかったことから、最大荷重点近傍で母材が破壊し、その後にクラッド部に亀裂が進展して破断に至ったものと考えられる。

試験結果のまとめを表 3.1.4.4-6 及び表 3.1.4.4-7 に示す。亀裂長さの測定結果を表 3.1.4.4-8 及び表 3.1.4.4-9 に示す。WPS 効果の懸念があった予亀裂導入後クラッド溶接(FCW)試験片の方が全体的に低い最大荷重を示しているが、疲労予亀裂長さがクラッド溶接後予亀裂導入(CWF)試験片より長い傾向にあるため、両者の違いは明確ではない。

クラッドの厚さは全試験片でほぼ一定であることから、まずはクラッドを考慮せずに母材の形状と亀裂長さのみから最大荷重時の応力拡大係数を算出し、FCW 試験片と CWF 試験片の比較を行った。図 3.1.4.4-19 に、各試験片の最大荷重時の応力拡大係数を示す。FCW 試験片及び CWF 試験片とも平均値にはほとんど差はなく、FCW 試験片に溶接入熱による WPS 効果は認められない。このことから、疲労予亀裂導入後にクラッドを溶接した場合にも、破壊靱性に及ぼすクラッド溶接の影響は大きくないと考えられる。次年度は、有限要素解析により弾塑性破壊靱性値を評価して詳細な比較検討を行う予定である。



(a) 試験機外観



(b) 冷却槽内



(c) 試験片セット状況 1



(d) 試験片セット状況

図 3.1.4.4-12 破壊靱性試験の様子

表 6.1 破壊靱性試験結果（クラッド溶接後予亀裂導入試験片 CWF）

試験片 記号	温度 (°C)	B (mm)	W (mm)	a_s (mm)	a_f (mm)	a_c (mm)	S (mm)	Δa_p (mm)	P_{max} (kN)	P_{frac} (kN)	$V_{LL(Pmax)}$ (mm)	$V_{LL(Pfrac)}$ (mm)	$V_{OP(Pmax)}$ (mm)	$V_{OP(Pfrac)}$ (mm)
CWF-1	-130	14.89	35.00	8.25	1.48	5.04	120	0.07	74.37	61.61	1.30	1.68	0.31	0.52
CWF-2	-130	14.88	35.01	8.23	1.48	5.07	120	0.08	75.07	66.15	1.32	1.57	0.31	0.43
CWF-3	-130	14.85	35.01	8.24	1.54	5.05	120	0.00	74.51	74.49	1.27	1.29	0.30	0.31
CWF-4	-130	14.87	35.01	8.25	1.47	5.05	120	0.09	77.63	61.14	1.51	1.86	0.33	0.57
CWF-5	-130	14.89	35.01	8.26	1.53	5.04	120	0.03	73.07	70.88	1.20	1.35	0.27	0.34
CWF-6	-130	14.88	35.01	8.26	1.57	5.04	120	0.00	73.22	73.22	1.20	1.20	0.28	0.28
CWF-7	-130	14.89	35.01	8.27	1.42	5.03	120	0.00	72.57	72.57	1.14	1.14	0.26	0.26

 a_s : スリット長さ a_f : 疲労き裂長さ a_c : クラッド厚さ(クラッド側リガメント) Δa_p : 最大安定き裂長さ(ストレッチゾーン幅含む) P_{max} : 最大荷重 P_{frac} : 破壊発生荷重 $V_{LL(Pmax)}$: 荷重線変位(最大荷重到達時) $V_{LL(Pfrac)}$: 荷重線変位(破壊発生時) $V_{OP(Pmax)}$: 開口変位(最大荷重到達時) $V_{OP(Pfrac)}$: 開口変位(破壊発生時)

表 6.2 破壊靱性試験結果（予亀裂導入後クラッド溶接試験片 FCW）

試験片 記号	温度 (°C)	B (mm)	W (mm)	a_s (mm)	a_f (mm)	a_c (mm)	S (mm)	Δa_p (mm)	P_{max} (kN)	P_{frac} (kN)	$V_{LL(Pmax)}$ (mm)	$V_{LL(Pfrac)}$ (mm)	$V_{OP(Pmax)}$ (mm)	$V_{OP(Pfrac)}$ (mm)
FCW-1	-130	15.01	34.99	8.93	2.19	5.08	120	0.06	67.61	66.35	1.06	1.21	0.25	0.32
FCW-2	-130	15.01	35.00	8.97	1.91	5.05	120	0.14	68.54	42.76	1.10	1.84	0.26	0.70
FCW-3	-130	15.02	35.00	9.02	1.95	5.03	120	0.07	68.50	55.42	1.12	1.56	0.27	0.51
FCW-4	-130	15.02	35.00	8.92	2.25	5.07	120	0.08	68.33	51.55	1.16	1.60	0.29	0.54
FCW-5	-130	15.02	35.00	8.91	2.17	5.08	120	0.09	67.82	53.21	1.09	1.51	0.26	0.49
FCW-6	-130	15.02	35.00	8.88	2.04	5.16	120	0.10	68.73	51.34	1.06	1.56	0.25	0.53
FCW-7	-130	15.02	35.00	8.86	2.03	5.08	120	0.08	67.20	57.93	1.03	1.34	0.23	0.42

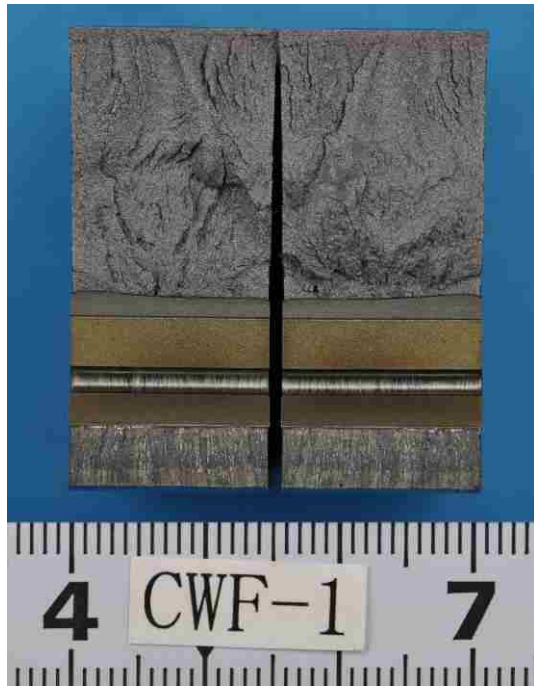
- a_s : スリット長さ
 a_f : 疲労き裂長さ
 a_c : クラッド厚さ(クラッド側リガメント)
 Δa_p : 最大安定き裂長さ(ストレッチゾーン幅含む)
 P_{max} : 最大荷重
 P_{frac} : 破壊発生荷重
 $V_{LL(Pmax)}$: 荷重線変位(最大荷重到達時)
 $V_{LL(Pfrac)}$: 荷重線変位(破壊発生時)
 $V_{OP(Pmax)}$: 開口変位(最大荷重到達時)
 $V_{OP(Pfrac)}$: 開口変位(破壊発生時)

表 6.3 亀裂長さ測定結果（クラッド溶接後予亀裂導入試験片）

試験片	項目	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	平均値	平均との 最大差	疲労き裂長さ	W
CWF-1	機械ノッチ	8.247	8.247	8.247	8.247	8.247	8.247	8.247	8.247	8.247	8.25	－	1.48	35.00
	機械+疲労き裂	9.912	10.019	9.872	9.705	9.623	9.549	9.605	9.678	9.585	9.72	0.29		
	延性き裂	0.019	0.019	0.034	0.070	0.012	0.034	0.008	0.000	0.000	延性き裂長さ最大値＝		0.07	
CWF-2	機械ノッチ	8.229	8.229	8.229	8.229	8.229	8.229	8.229	8.229	8.229	8.23	－	1.48	35.01
	機械+疲労き裂	9.649	9.748	9.649	9.567	9.565	9.654	9.794	9.895	9.878	9.70	0.19		
	延性き裂	0.000	0.045	0.079	0.028	0.007	0.032	0.027	0.000	0.000	延性き裂長さ最大値＝		0.08	
CWF-3	機械ノッチ	8.242	8.242	8.242	8.242	8.242	8.242	8.242	8.242	8.242	8.24	－	1.54	35.01
	機械+疲労き裂	9.714	9.870	9.766	9.662	9.688	9.714	9.818	9.974	9.870	9.79	0.19		
	延性き裂	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	延性き裂長さ最大値＝		0.00	
CWF-4	機械ノッチ	8.250	8.250	8.250	8.250	8.250	8.250	8.250	8.250	8.250	8.25	－	1.47	35.01
	機械+疲労き裂	9.221	9.429	9.403	9.403	9.636	9.844	10.104	10.286	10.052	9.72	0.57		
	延性き裂	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	延性き裂長さ最大値＝		0.09	
CWF-5	機械ノッチ	8.257	8.257	8.257	8.257	8.257	8.257	8.257	8.257	8.257	8.26	－	1.53	35.01
	機械+疲労き裂	9.377	9.584	9.558	9.636	9.662	9.896	10.000	10.260	10.052	9.79	0.47		
	延性き裂	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	0.030	延性き裂長さ最大値＝		0.03	
CWF-6	機械ノッチ	8.260	8.260	8.260	8.260	8.260	8.260	8.260	8.260	8.260	8.26	－	1.57	35.01
	機械+疲労き裂	9.688	9.870	9.740	9.714	9.688	9.792	9.922	10.130	9.922	9.83	0.30		
	延性き裂	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	延性き裂長さ最大値＝		0.00	
CWF-7	機械ノッチ	8.271	8.271	8.271	8.271	8.271	8.271	8.271	8.271	8.271	8.27	－	1.42	35.01
	機械+疲労き裂	9.610	9.636	9.636	9.584	9.610	9.662	9.818	9.896	9.714	9.69	0.21		
	延性き裂	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	延性き裂長さ最大値＝		0.00	

表 6.4 亀裂長さ測定結果（予亀裂導入後クラッド溶接試験片）

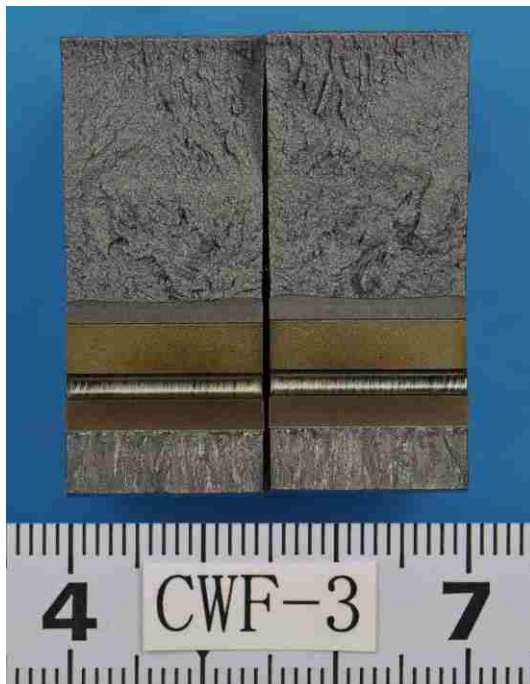
試験片	項目	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	平均値	平均との 最大差	疲労き裂長さ	W
FCW-1	機械ノッチ	8.928	8.928	8.928	8.928	8.928	8.928	8.928	8.928	8.928	8.93	－	2.19	34.99
	機械+疲労き裂	11.099	11.136	11.129	11.178	11.148	11.129	11.119	11.030	11.028	11.12	0.09		
	延性き裂	0.000	0.000	0.000	0.026	0.015	0.033	0.006	0.059	0.035	延性き裂長さ最大値＝		0.06	
FCW-2	機械ノッチ	8.966	8.966	8.966	8.966	8.966	8.966	8.966	8.966	8.966	8.97	－	1.91	35.00
	機械+疲労き裂	10.889	10.895	10.904	10.906	10.876	10.870	10.848	10.835	10.783	10.87	0.09		
	延性き裂	0.044	0.072	0.090	0.125	0.137	0.055	0.084	0.056	0.023	延性き裂長さ最大値＝		0.14	
FCW-3	機械ノッチ	9.020	9.020	9.020	9.020	9.020	9.020	9.020	9.020	9.020	9.02	－	1.95	35.00
	機械+疲労き裂	10.897	10.934	10.932	10.945	10.945	11.017	11.025	11.030	10.998	10.97	0.07		
	延性き裂	0.002	0.026	0.029	0.048	0.066	0.025	0.031	0.013	0.030	延性き裂長さ最大値＝		0.07	
FCW-4	機械ノッチ	8.917	8.917	8.917	8.917	8.917	8.917	8.917	8.917	8.917	8.92	－	2.25	35.00
	機械+疲労き裂	10.961	11.143	11.169	11.169	11.221	11.169	11.195	11.221	11.169	11.17	0.21		
	延性き裂	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	延性き裂長さ最大値＝		0.08	
FCW-5	機械ノッチ	8.912	8.912	8.912	8.912	8.912	8.912	8.912	8.912	8.912	8.91	－	2.17	35.00
	機械+疲労き裂	11.091	11.169	11.143	11.117	11.091	11.117	11.039	10.987	10.935	11.08	0.15		
	延性き裂	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	0.090	延性き裂長さ最大値＝		0.09	
FCW-6	機械ノッチ	8.876	8.876	8.876	8.876	8.876	8.876	8.876	8.876	8.876	8.88	－	2.04	35.00
	機械+疲労き裂	10.909	10.961	11.013	10.935	10.883	10.883	10.935	10.883	10.753	10.92	0.16		
	延性き裂	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	0.100	延性き裂長さ最大値＝		0.10	
FCW-7	機械ノッチ	8.858	8.858	8.858	8.858	8.858	8.858	8.858	8.858	8.858	8.86	－	2.03	35.00
	機械+疲労き裂	10.883	10.935	10.922	10.909	10.909	10.922	10.909	10.935	10.403	10.89	0.48		
	延性き裂	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	0.080	延性き裂長さ最大値＝		0.08	



CWF-1)



CWF-2



CWF-3



CWF-4

図 3.1.4.4-13 試験片の破面（クラッド溶接後予亀裂導入試験片、CWF）



CWF-5

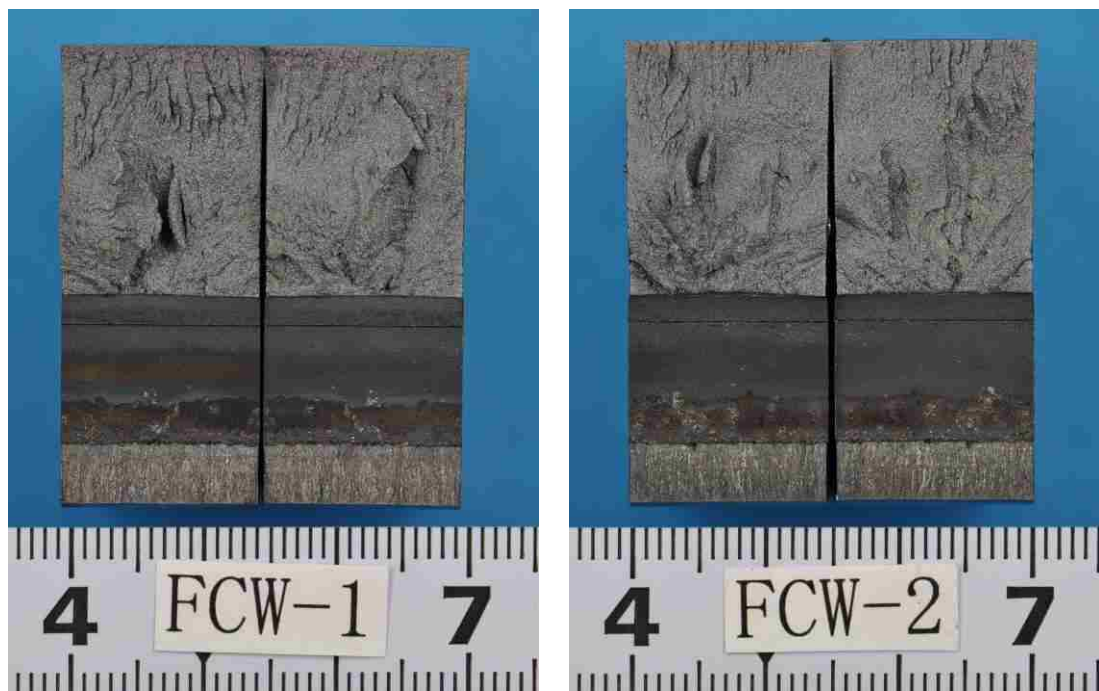


CWF-6



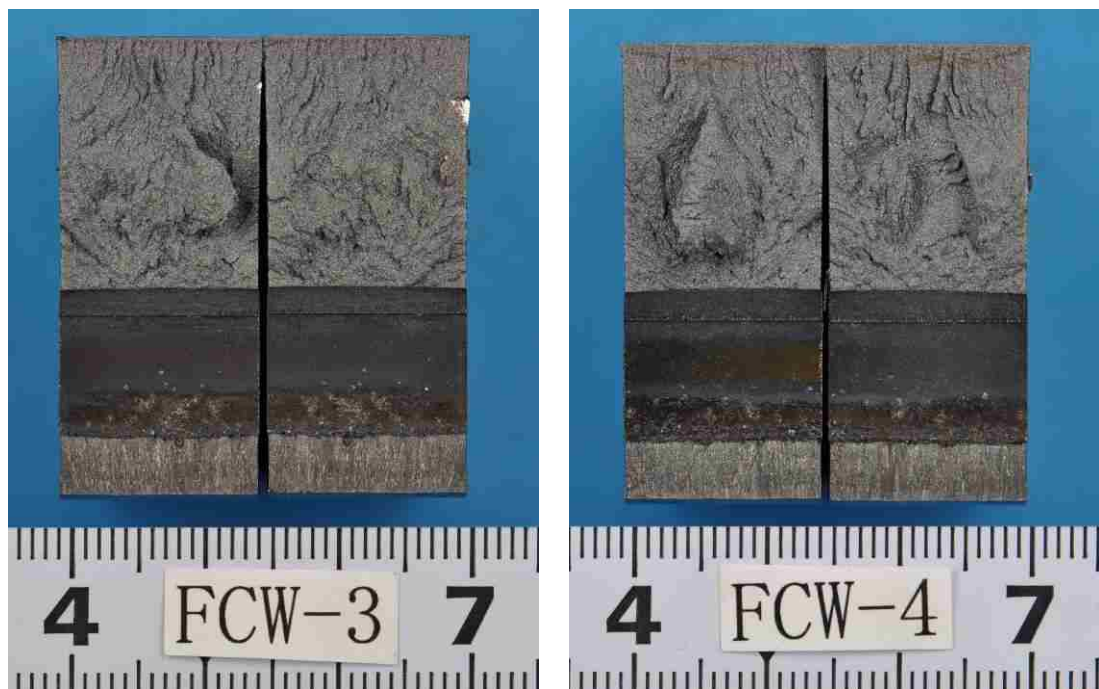
CWF-7

図 3.1.4.4-13 試験片の破面（クラッド溶接後予亀裂導入試験片、CWF） つづき



FCW-1

FCW-2



FCW-3

FCW-4

図 3.1.4.4-14 試験片の破面（予亀裂導入後クラッド溶接試験片、FCW）



FCW-5



FCW-6



FCW-7

図 3.1.4.4-14 試験片の破面（予亀裂導入後クラッド溶接試験片、FCW）つづき

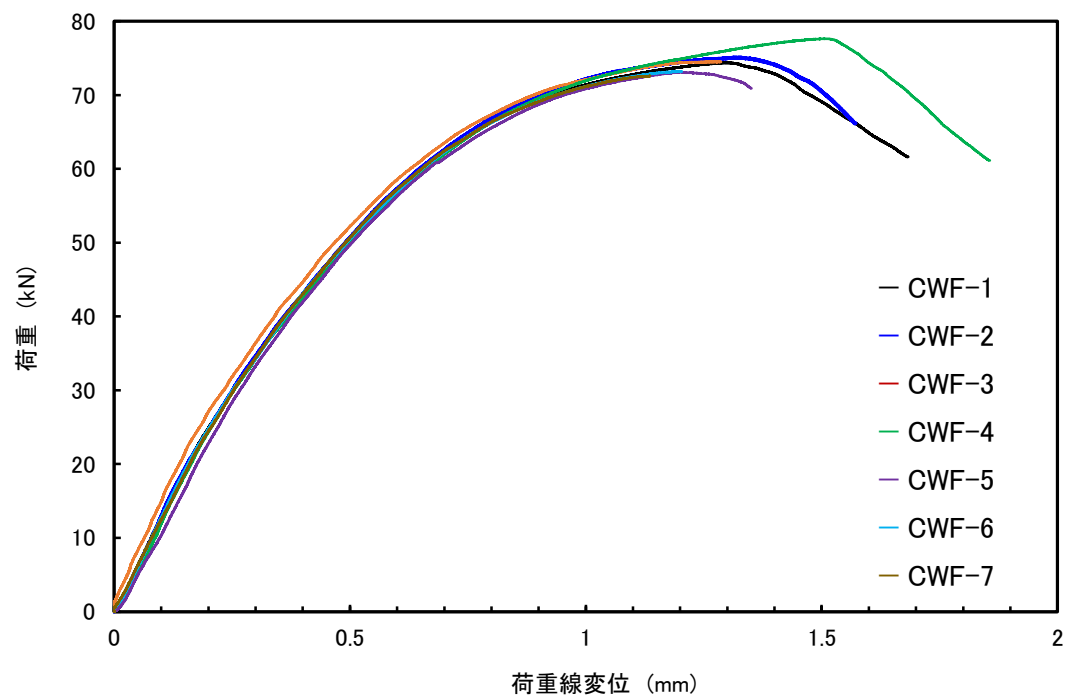


図 3.1.4.4-15 荷重－荷重線変位曲線（クラッド溶接後予亀裂導入試験片、CWF）

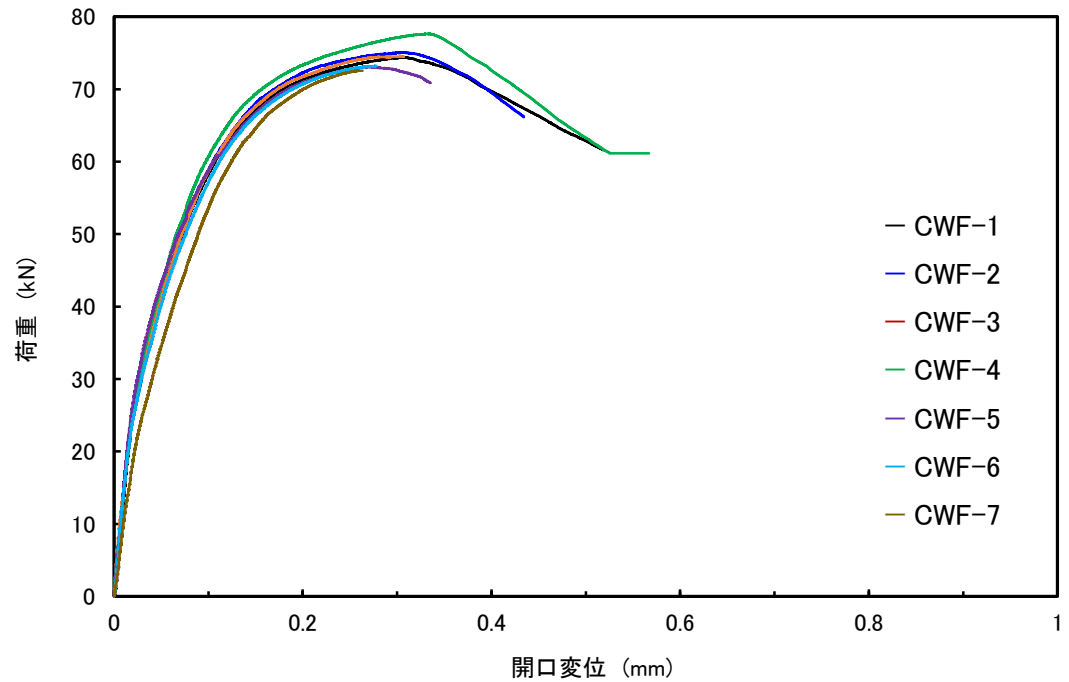


図 3.1.4.4-16 荷重－開口変位曲線（クラッド溶接後予亀裂導入試験片、CWF）

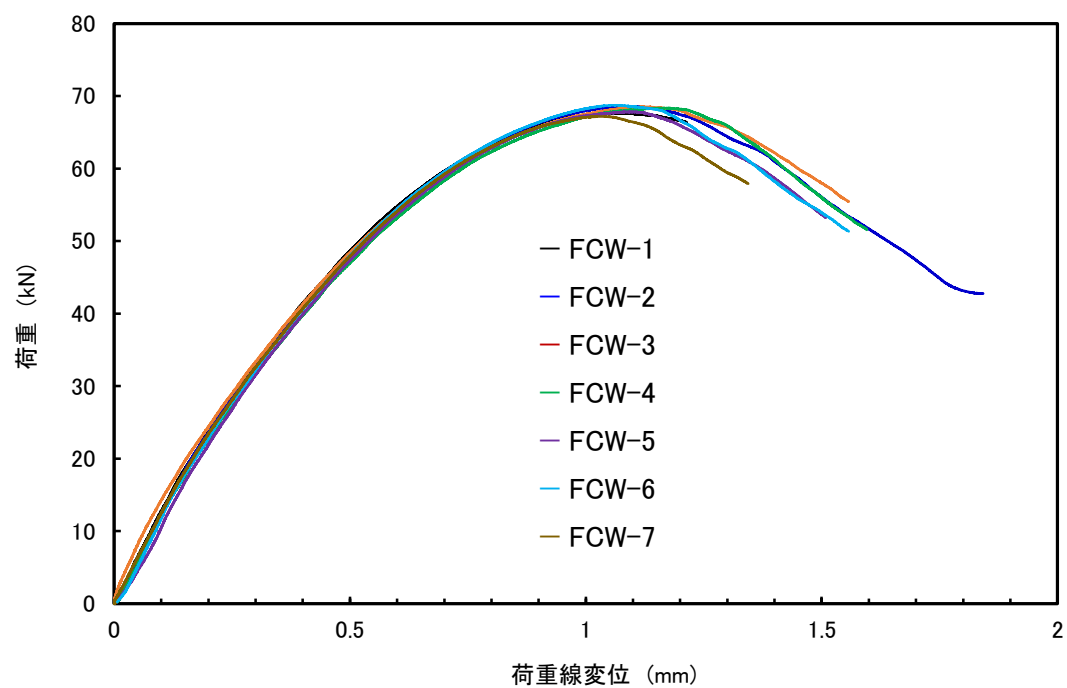


図 3.1.4.4-17 荷重－荷重線変位曲線（予亀裂導入後クラッド溶接試験片、FCW）

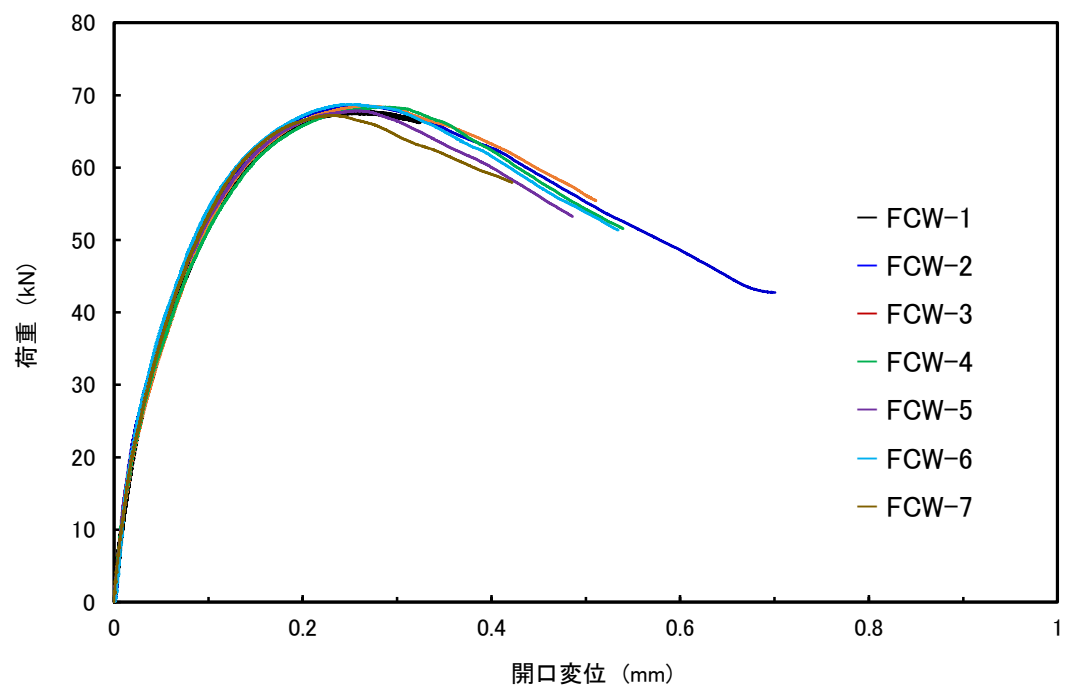


図 3.1.4.4-18 荷重－荷重線変位曲線（予亀裂導入後クラッド溶接試験片、FCW）

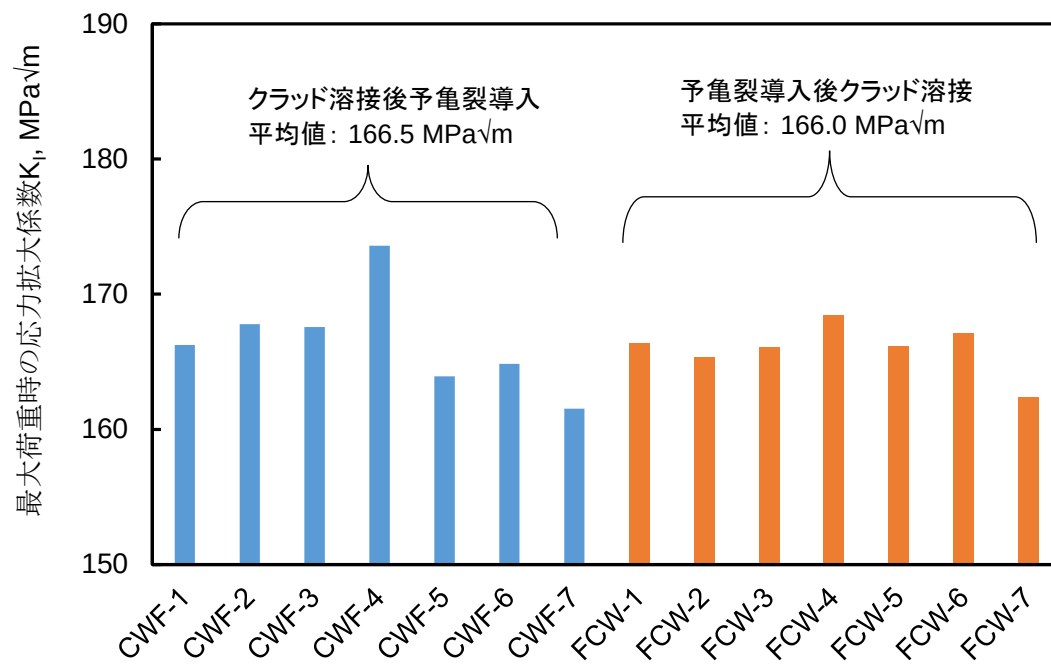


図 3.1.4.4-19 最大荷重時の応力拡大係数の比較(K の算出においてクラッドは考慮せず)

3.1.4.5 まとめ

クラッド下 HAZ を含む板厚内の破壊靱性分布に係るデータを取得するための国内初期プラント相当の原子炉圧力容器鋼を製作し、溶接継手、クラッド肉盛溶接及び溶接後熱処理を行った。

PTS 模擬試験等に用いる低靱性材に関して、シャルピー延性脆性遷移温度が高温側になるような化学成分、熱処理条件等を検討し、材料仕様を決定した。決定した仕様に基づき材料手配を行い、低靱性材の製作に着手した。

PTS 模擬試験を実施するための試験設備の部品製作を完了すると共にピット内への組み立てに着手した。

クラッド下亀裂の導入に係る検討として、亀裂を導入した材料へクラッドを溶接する際の入熱等の影響を把握するための試験を実施した。クラッドの亀裂への入り込みに問題が無いこと、及び電位差法による亀裂計測方法に関し電場解析を用いる方法が有効であることを確認した。また、溶接入熱が破壊靱性へ及ぼす影響は大きくないことを確認した。

参考文献

- (3.1.4-1) 一般社団法人日本電気協会 原子力規格委員会 JEAC 4206-2016“原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法”, (2016)
- (3.1.4-2) 一般社団法人日本電気協会 原子力規格委員会 JEAC4201-2007(2013 年追補版) “原子炉構造材の監視試験方法”, (2013)
- (3.1.4-3) 一般社団法人日本規格協会 JIS Z 2242:2005 ”金属材料のシャルピー衝撃試験方法”, (2005)
- (3.1.4-4) 一般社団法人日本規格協会 JIS Z 2241:(2011 ” 金属材料引張試験方法”, (2011)
- (3.1.4-5) 一般社団法人日本電気協会 原子力規格委員会 JEAC 4202-2004 “フェライト鋼の落重試験方法”, (2004)
- (3.1.4-6) 一般社団法人日本電気協会 原子力規格委員会 JEAC 4216-2015“フェライト鋼の破壊靱性参照温度 T_0 決定のための試験方法”, (2015).

3.2 照射誘起応力腐食割れ(IASCC)試験

BWR 炉内構造物等の IASCC 亀裂進展評価においては、検査により検出された亀裂をモデル化し、中性子照射量が $5 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ を超える場合には、日本機械学会 維持規格^(3.2-1)で規定されている「オーステナイト系ステンレス鋼の BWR 通常炉内水質環境中の SCC き裂進展速度線図」の鋭敏化 SUS304 鋼の上限値 ($9.2 \times 10^{-7} \text{ mm/s}$) を用いて保守的に亀裂進展速度を評価することとされている^(3.2-2)。また、想定亀裂に対しては、維持規格に規定されている「オーステナイト系ステンレス鋼の BWR 炉内水質環境中の SCC き裂進展速度」の表に記載の亀裂進展速度式 (PLEDGE モデル。中性子照射量や応力拡大係数、導電率、腐食電位等に依存) を用いて亀裂進展速度を評価することとされている。しかし、現在までにこれらの上限値や PLEDGE モデルの値を超える中性子照射材の亀裂進展速度が取得されてきていること^(3.2-3)、また実機炉内環境では炉心からの中性子及びγ線照射による水の放射線分解で発生した過酸化水素等の酸化種の影響で亀裂進展が加速される可能性が指摘されていること^(3.2-4)、一方で中性子照射下での酸化皮膜抵抗の低下により腐食電位の低下の可能性が指摘されていること^(3.2-5)、等を考慮すると、上述の亀裂進展速度評価は必ずしも保守的になっていない可能性がある (図 3.2-1)。このため、より実機に近い環境で亀裂進展挙動に対する材料及び水環境への照射の影響を適切に評価する必要がある。

本事業では、炉内照射下での材料及び水環境に及ぼす照射影響 (その場効果) に着目した照射下 IASCC 亀裂進展試験を実施し、照射後試験(PIE)と照射下試験で得られた亀裂進展挙動を比較することにより、照射下その場効果の影響を明確化し、IASCC 亀裂進展速度評価の保守性を確認する計画である。

平成 22 年度までに、本試験計画を具体化するため他研究等において得られた既往の知見を調査して総合的に評価し、それを踏まえて試験マトリクスと試験パラメータ範囲を検討した。その上で実際の照射孔、照射試験期間を考慮して実施内容の重点化を図り、照射スケジュールの具体化を検討すると共に、ベース照射キャプセル内の試験片配置の概略検討を行った。

平成 23 年度には、震災の影響による試験規模の縮小等のために照射試験計画の見直しが必要となったため、ベース照射及び照射下亀裂進展試験マトリクスを再検討した。また、PIE 計画について、この再検討を踏まえて具体化を行った。

平成 24～26 年度は、それまでに検討した照射試験及び PIE 計画の具体化内容を踏まえ、照射下亀裂進展試験に必要な荷重負荷ユニット(亀裂進展試験ユニット)の詳細な特性評価を進め、実際に高温水中での亀裂進展試験を実施して荷重制御方法を確認した。また、非照射材及び既存の照射材等を用いた材料基礎特性評価試験、亀裂進展試験及び材料表面のミクロ組織観察等を実施し、IASCC 進展挙動の機構論的検討に活用するための知見を取得した。更に照射下及び照射後亀裂進展試験の実施に必要な照射キャプセル等の製作、及び試験装置の整備・改良・保守を行った。

平成 27 年度は、本事業における照射脆化試験への重点化に伴う IASCC 試験計画の縮小

方針を受け、平成 23 年度までに検討した照射試験計画について、平成 26 年度までに取得した既存照射材を用いた試験結果等の最新の知見を踏まえて、ベース照射での中性子照射量の再検討を行った。また、非照射材及び既存照射材を用いた亀裂進展試験及び試験片亀裂先端近傍等の変形組織・酸化皮膜等のミクロ組織観察・分析を継続した。ステンレス鋼照射材の亀裂進展速度を含む材料特性データに関して、従来の知見を整理するための文献調査及びデータ収集・整理を行った。

平成 28 年度は、照射下試験条件の検討、照射下試験データの評価等に活用するため、既存照射材等を用いた亀裂進展試験及び試験片亀裂先端近傍等の変形組織・酸化皮膜のミクロ組織観察・分析を継続するとともに、既往研究での照射材データの調査・整理を継続した。これまでに取得した照射材試験結果等の知見を含めて総合的に勘案し、より効果的な試験を効率的に実施できるよう、照射下試験マトリクスの見直しを行った。また、海外炉を用いた照射試験に関する検討を進め、ノルウェーハルデン炉において本事業で整備した照射下試験技術を使用して照射下亀裂進展試験を実施するための技術検討及び照射リグの概念設計を実施した。

参考文献

- (3.2-1) 日本機械学会「発電用原子力設備規格 維持規格（2008 年版）」JSME S NA1-2008（2008 年 10 月）.
- (3.2-2) 原子力規制委員会「実用発電用原子炉及びその附属施設における破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥の解釈」（平成 26 年 8 月）.
- (3.2-3) K. Takakura, K. Nakata, S. Tanaka, T. Nakamura, K. Chatani, Y. Kaji, Crack growth behavior of neutron irradiated L-grade austenitic stainless steels in simulated BWR conditions, Proc. 14th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, ANS, 2009, pp.1192–1203.
- (3.2-4) G.S. Was, P.L. Andresen, Stress Corrosion Cracking Behavior of Alloys in Aggressive Nuclear Reactor Core Environments, Corrosion 63 (1) (2007) 19–45.
- (3.2-5) S. Hanawa, T. Nakamura, S. Uchida, P. Kus, R. Vsolak, J. Kysela, M. Sakai, Determination of electrochemical corrosion potential along the JMTR in-pile loop – II: Validation of ECP electrodes and the extrapolation of measured ECP data, Nuclear Technology 183 (2013) 136–148.

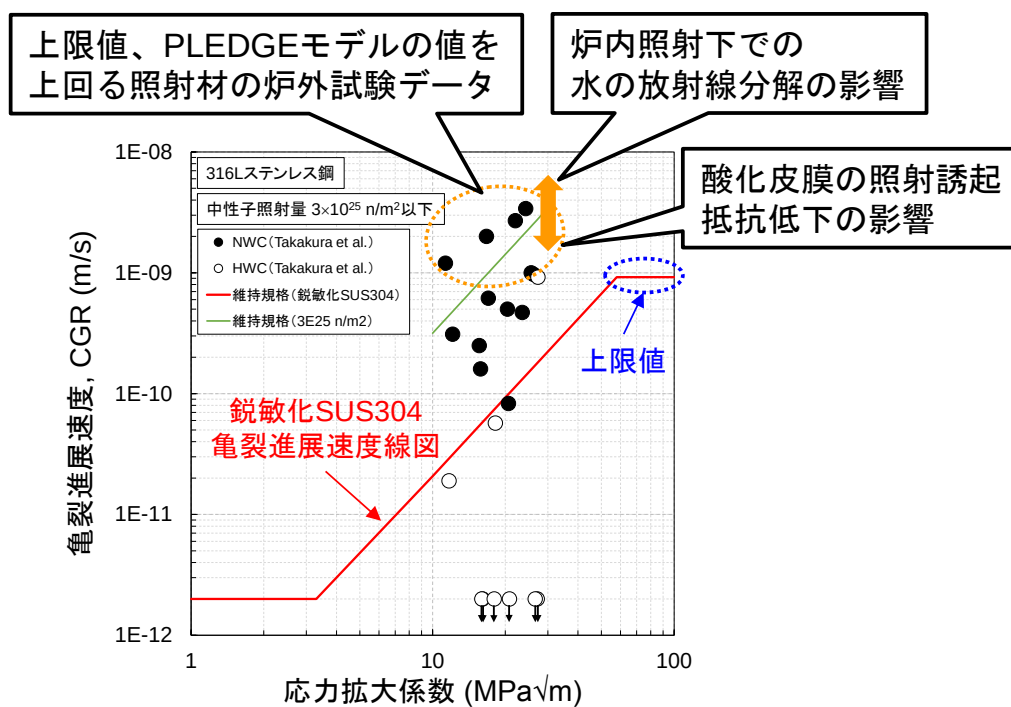


図 3.2-1 維持規格での亀裂進展速度線図と照射材データの比較(3.2-1),(3.2-3)

3.2.1 既往事業の照射材等を用いた試験

本事業で実施する照射下亀裂進展試験の比較データ先行取得と亀裂進展への水の放射線分解の影響評価に適した中性子照射量と試験条件を選定し照射下亀裂進展試験マトリクスへ反映することを目的として、照射下亀裂進展速度試験に先立ち、既存の中性子照射済 CT 試験片の中から、照射下亀裂進展試験マトリクスで計画中の中性子照射量範囲に合致するもの入手し、照射後亀裂進展試験を実施した。また亀裂先端での酸化反応の理解に資するため、照射材特有の変形組織と酸化機構の検証(粒界近傍の局所ひずみ集積と酸化促進)に着目した照射材の変形組織と酸化皮膜観察を実施した。

また、亀裂進展試験に供した CT 試験片の亀裂内水質評価に資することを目的として、「亀裂進展速度に及ぼす添加物影響評価試験」(平成 27 年度実施)で亀裂進展速度評価に用いた CT 試験片の亀裂内に形成した酸化皮膜を詳細に分析し、試験水の添加物(イオン)の酸化皮膜への取り込み等を評価した上で、亀裂内でのイオンの拡散について検討した。

3.2.1.1 既存照射材を用いた亀裂進展試験

(1) 試験方法

① 既存の照射済CT試験片と試験マトリクス

既存照射材より、(独)原子力安全基盤機構(JNES) IASCC 事業で中性子照射した SUS316L のミルアニール受入れまま(AR)材の CT 試験片(試験片 ID. E304 中性子照射量 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)を選定し、照射後亀裂進展試験に供した。0.5T-CT 試験片の形状を図 3.2.1-1 に示す。

今年度実施した照射後亀裂進展試験マトリクスを表 3.2.1-1 に示す。また亀裂進展試験条件を図 3.2.1-2 に、亀裂進展試験の試験水の条件を表 3.2.1-2 に示す。

亀裂進展試験装置の構造図(例)を図 3.2.1-3 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/時間とする。

次に、亀裂進展試験における個々の操作について示す。

② 環境中亀裂進展試験方法

a. 環境中予亀裂導入

試験片について、アセトン等による超音波洗浄を実施後、亀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 3.2.1-4 は PDM 計測装置の構成例を示す。試験片の電気抵抗は、亀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、亀裂をはさんで電位差を測定すれば亀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、亀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、大気中疲労予亀裂の前縁に粒界型の亀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(3σ 値))が観察されない場合(熱処理なし材は 48 時間、熱処理材は 100 時間が目安)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)
- ・ 環境中予亀裂の長さ：PDM 指示値で約 0.4 mm 以上
(照射前疲労予亀裂導入時の塑性域寸法)

b. 定荷重亀裂進展試験

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

c. 荷重条件

JNES IASCC 事業で照射レベル F3 まで中性子照射した CT 試験片については、ASTM E399 に記載の応力拡大係数(K 値)の有効範囲(約 31 MPa $\sqrt{m}$ 以下)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 値有効範囲は 0.2%耐力で評価すると、約 7 MPa $\sqrt{m}$ 以下となり、比較可能な非照射材の文献値(亀裂進展データ)はない。そこで、SCC 試験法の JIS 化案の有効範囲評価(<約 16 MPa $\sqrt{m}$)を考慮し、試験開始時の K 値を 15 MPa $\sqrt{m}$ として亀裂進展データを取得し、非照射材文献値と比較する。

d. 環境条件

i) 溶存酸素及び溶存水素濃度

高腐食電位(ECP1)条件は試験水の入口での溶存酸素(DO)濃度を 32ppm 程度に調整する。また低 ECP 条件のうち脱気条件では、試験水を脱気し、入口での DO 濃度を 10ppb 程度に、さらに低 ECP 条件のうち脱気+水素注入条件では、試験水を脱気して入口での 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、溶存水素濃度で 50ppb 程度に調整する。

ii) 試験水質管理

実機の水質を考慮して、亀裂進展試験の水質条件は硫酸、塩素及び硝酸イオンは十分低い濃度に保持することとし、入口および出口側のサンプリング点より試験水を定期的にサンプルし、水を採取し含まれる不純物イオンの濃度を分析する。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。

iii) ECP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。作用極は亀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った。

e. 試験中の亀裂長さモニタ方法

試験中の亀裂長さ変化は PDM 法によりモニタ(連続的に計測、記録)する。PDM 法を亀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(1 σ 値)を求め、その 3 倍(3 σ 値)を PDM 法によって得られる亀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 g 項の定めに従うこととする。

f. 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)

g. 亀裂先端活性化操作

亀裂進展試験期間中に PDM 指示値が十分な増分を示さない場合に、亀裂先端活性化操作を実施する。亀裂先端活性化の条件を表 3.2.1-3 に示す。また、図 3.2.1-5 に亀裂先端活性化操作(短期繰返し除荷)の応力付与モードを示す。操作の手順は以下の通りとする。

- ・ 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(3 σ 値)以上の亀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する。
- ・ 以降の PDM 指示値の挙動をモニタし、PDM の指示値がばらつき(1 σ)を超えない場合は、再度活性化操作を実施する。

h. 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)を講ずることとする。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を確認した後は、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、亀裂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。

i. 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、装置を復帰させることとする。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。

j. 亀裂進展速度評価方法

試験中は PDM 指示値を常にモニタし、その値が亀裂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亀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、疲労予亀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、環境中の亀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。

亀裂長さは、平均亀裂長さ($\text{SCC 面積} \div \text{試験片板厚}$ 或いは $\text{SCC 面積} \div \text{IGSCC 割れ幅}$)を求め、必要に応じて最大亀裂長さも求めた。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(破面補正)に用いた。その際、試験片破面より特定した亀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、亀裂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。

亀裂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亀裂進展が認められた場合、「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」の条件を満たす範囲で設定する。

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亀裂進展速度を決定する。なお、評価区間は亀裂長さの増分が、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。

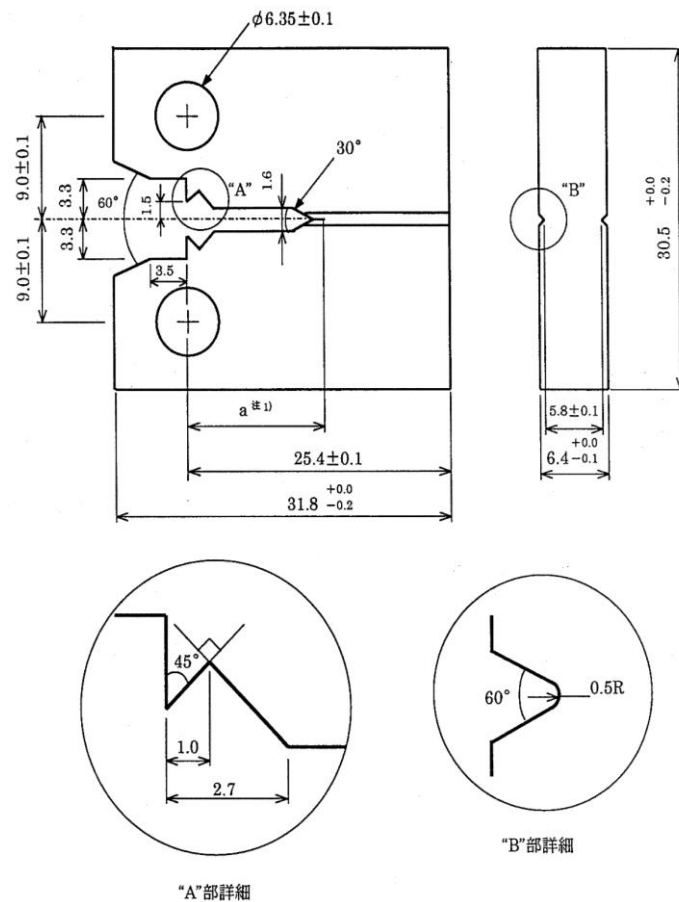


図 3.2.1-1 中性子照射した亀裂進展試験片形状図
(JNES IASCC 事業で照射した CT 試験片(照射量レベル F3))

表 3.2.1-1 亀裂進展試験マトリクス

試験片 ID	鋼種	試験片 形状	照射量	水質条件※)		破面 開放	破面 観察
				高 ECP	低 ECP		
E304	SUS316L (AR)	0.5T-CT	2.88 dpa $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)	○	○	○	○

凡例 ○：実施

※) 高 ECP：酸素飽和(DO32ppm)

低 ECP：脱気(DO10ppb 程度)から脱気+水素注
入(DH50ppb 程度)に移行。

高 ECP で試験開始し、亀裂進展の経過を見なが
ら低 ECP(脱気または脱気+水素注入) 3 条件に移
行し、亀裂進展速度データを取得する。

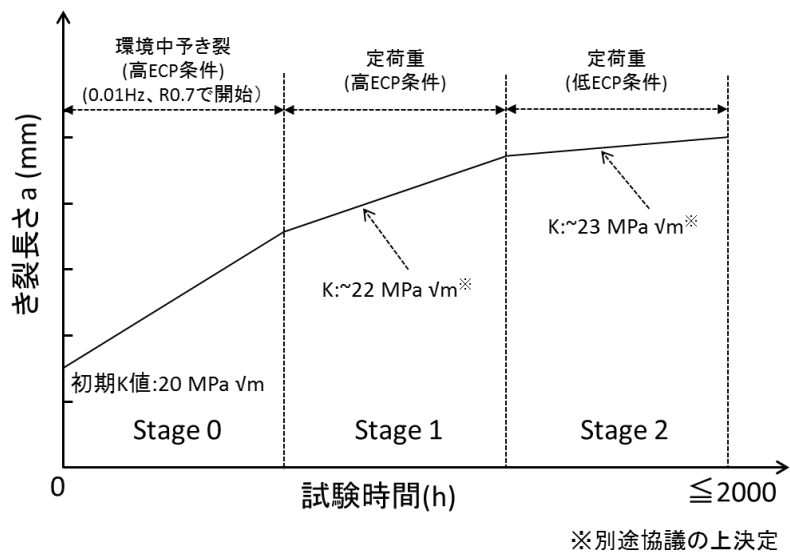


図 3.2.1-2 亀裂進展試験条件

表 3.2.1-2 試験水質条件

項目	条件	備考
温度	$290\pm 1^{\circ}\text{C}$	常時モニタリング
電位	(試験中に測定)	常時モニタリング
溶存酸素濃度	表 3.2.1-1 に記載の条件	常時モニタリング(入口のみ)
溶存水素濃度	表 3.2.1-1 に記載の条件	常時モニタリング(入口のみ)
導電率	入口 : $0.1\text{ }\mu\text{S/cm}$ 以下 出口 : $0.2\text{ }\mu\text{S/cm}$ 以下	常時モニタリング(出口のみ)
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。

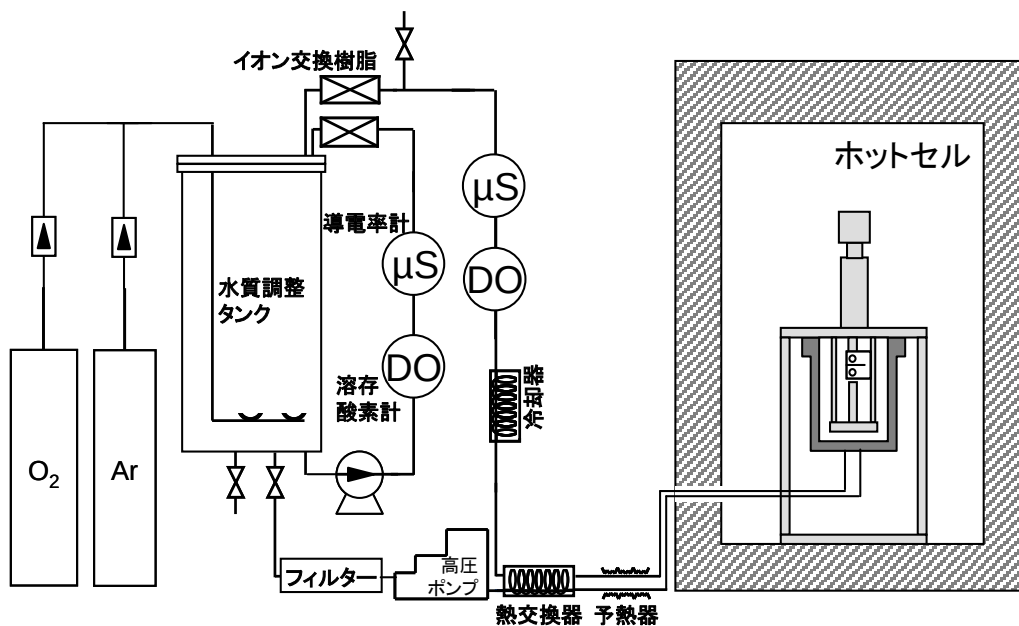


図 3.2.1-3 亀裂進展試験装置の構造図(例)

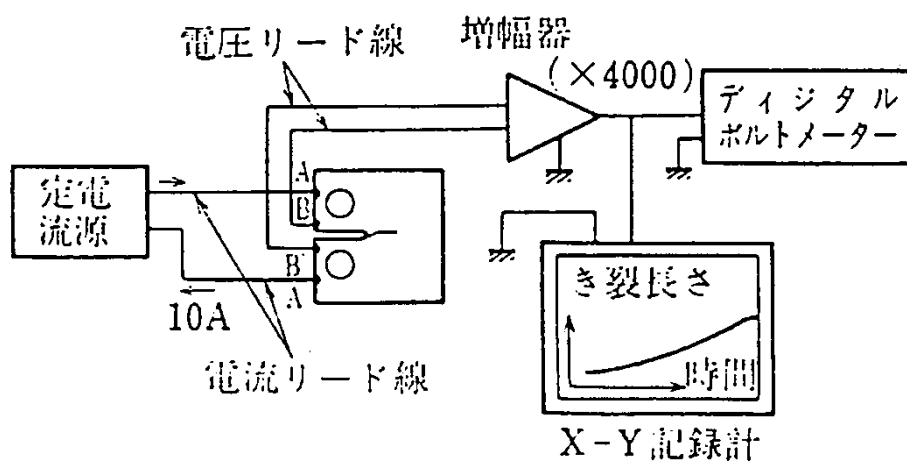


図 3.2.1-4 亀裂進展量計測装置の構成(例)

表 3.2.1-3 亀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

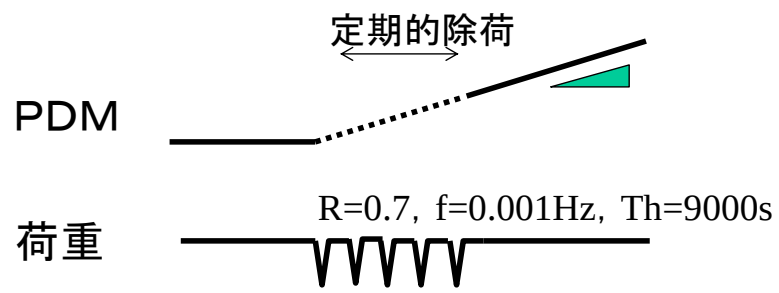


図 3.2.1-5 亀裂先端活性化操作における負荷応力モード例

(2) 試験結果

試験開始から繰り返し荷重負荷による環境中予亀裂を導入した。環境中予亀裂の導入条件を表 3.2.1-4 に示す。環境中予亀裂導入後、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 $0.1 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下、出口で $0.2 \mu\text{S}/\text{cm}$ 以下であった。不純物イオンの分析結果を表 3.2.1-5 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。

SCC 進展試験終了後の試験片について、破面開放した後にデジタルマイクロスコープおよび SEM による観察を実施した。試験片の外観観察結果を図 3.2.1-6 に示す。試験中の亀裂はサイドグループを逸脱せず進展したことが確認された。

破面観察結果を図 3.2.1-7 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亀裂進展領域を特定し、その面積から亀裂進展量を求めた。また、図 3.2.1-8 に環境中亀裂進展領域を SEM により高倍で観察した結果を示す。環境中亀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亀裂進展量に基づき、試験中に取得した PDM 指示値の補正を行った。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、亀裂進展速度を求めた。板幅平均の亀裂長さで補正後の PDM チャートを図 3.2.1-9 に、亀裂進展速度を表 3.2.1-6 に示す。表 3.2.1-6 には、板幅平均に加え、最大亀裂長さより算出した亀裂進展速度および平均 K 値も参考までに記載した。

JNES IASCC 事業成果[3.2.1-1]との比較を図 3.2.1-10 に示す。本年度の試験で得られた亀裂進展速度は、文献値と同じく板幅平均で算出した値とした。同等の照射量のデータはないものの、ECP 高での亀裂進展速度は、文献値と同程度であった。一方、ECP 低での亀裂進展速度は、2 dpa 程度の文献値と比較すると高い値であったが、4 dpa 程度の文献値よりは低く、文献値の傾向にほぼ合致した。また、今年度の試験と同程度の照射量の文献値[3.2.1-2]との比較を図 3.2.1-11 に示す。今年度の試験で取得された ECP 低での亀裂進展速度は、同等の K 値のデータがないものの、文献値の傾向にほぼ合致した。

参考文献

- [3.2.1-1] 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
- [3.2.1-2] O. K. Chopra, E. E. Gruber, W. J. Shack, “Crack Growth Behavior of Irradiated Austenitic Stainless Steels in High-Purity Water at 289”, Proceedings of 11th

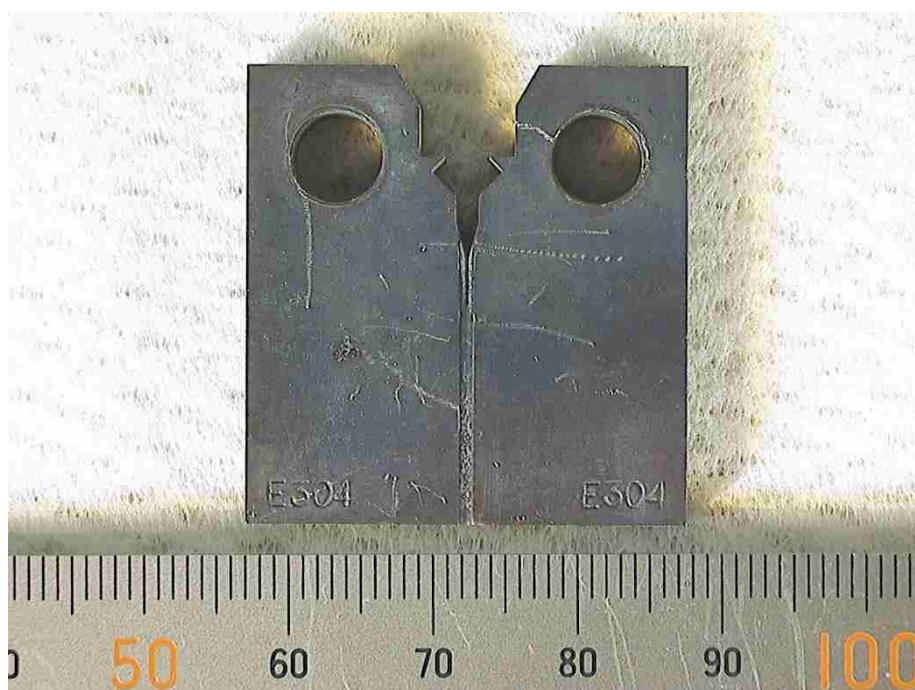
International Symposium on Environmental Degradation of Materials in
Nuclear Power System-Water Reactors, August 2003

表 3.2.1-4 環境中予亀裂導入条件(試験片番号 E304)

STEP1	STEP2	STEP3
R=0.7 f=0.01(Hz) 波形：三角波	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 3.2.1-5 試験水分析結果(試験片番号 E304)

イオン種	試験開始時		1 ヶ月経過時		試験終了時	
	入口	出口	入口	出口	入口	出口
SO ₄ ²⁻ (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Cl ⁻ (ppb)	< 2	< 2	< 2	2.9	< 2	2.8
NO ₃ ⁻ (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2



刻印面



刻印面の裏面

図 3.2.1-6 亀裂進展試験終了後の外観観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$))

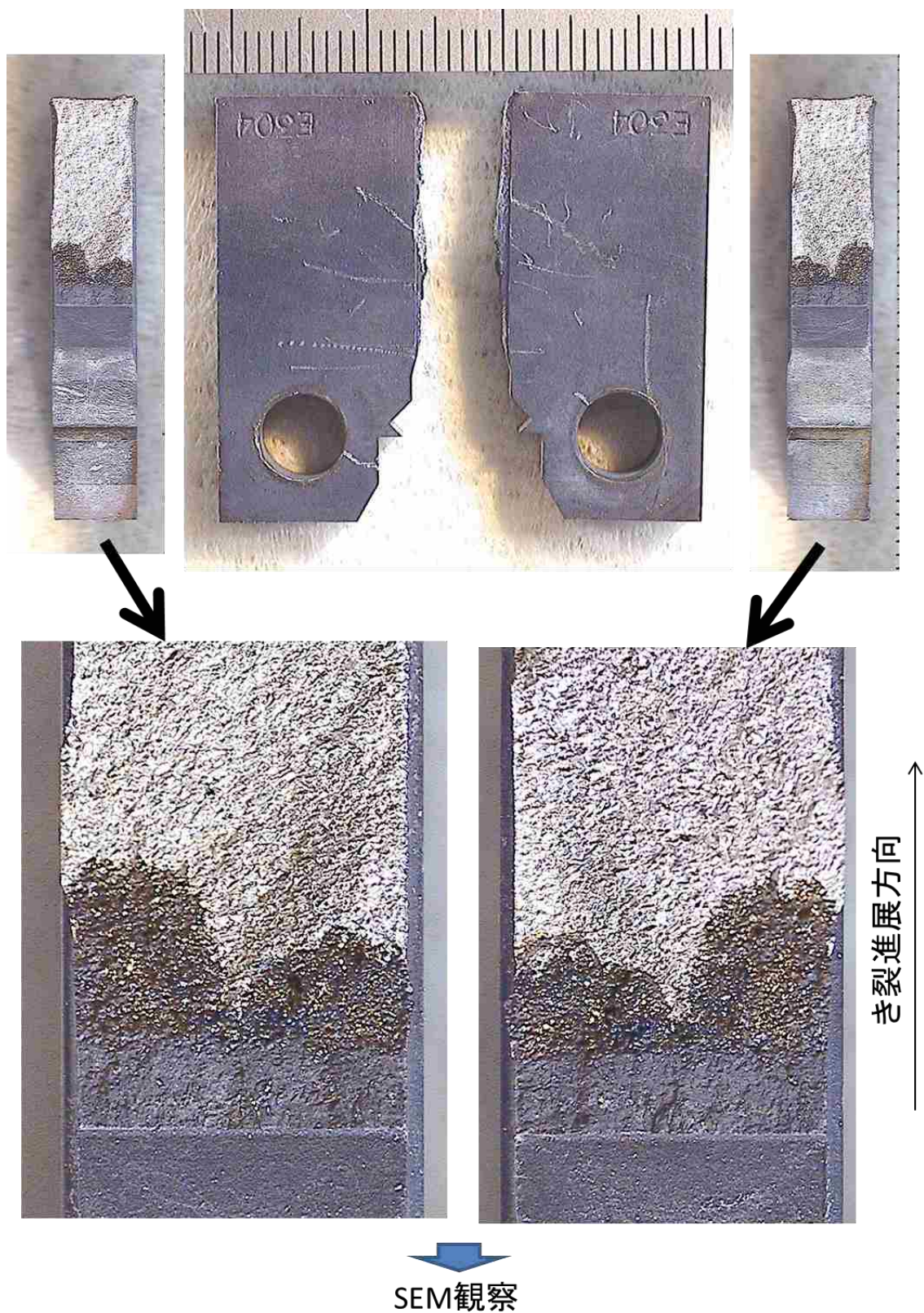


図 3.2.1-7 亀裂進展試験終了後の破面観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$))

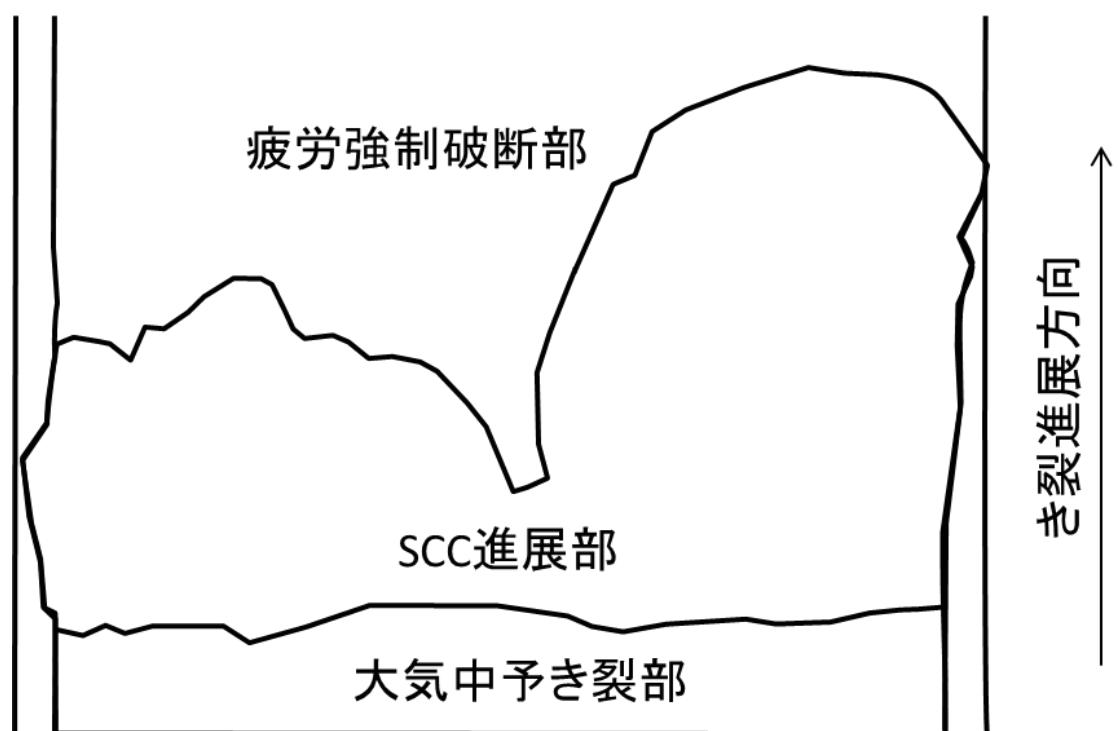
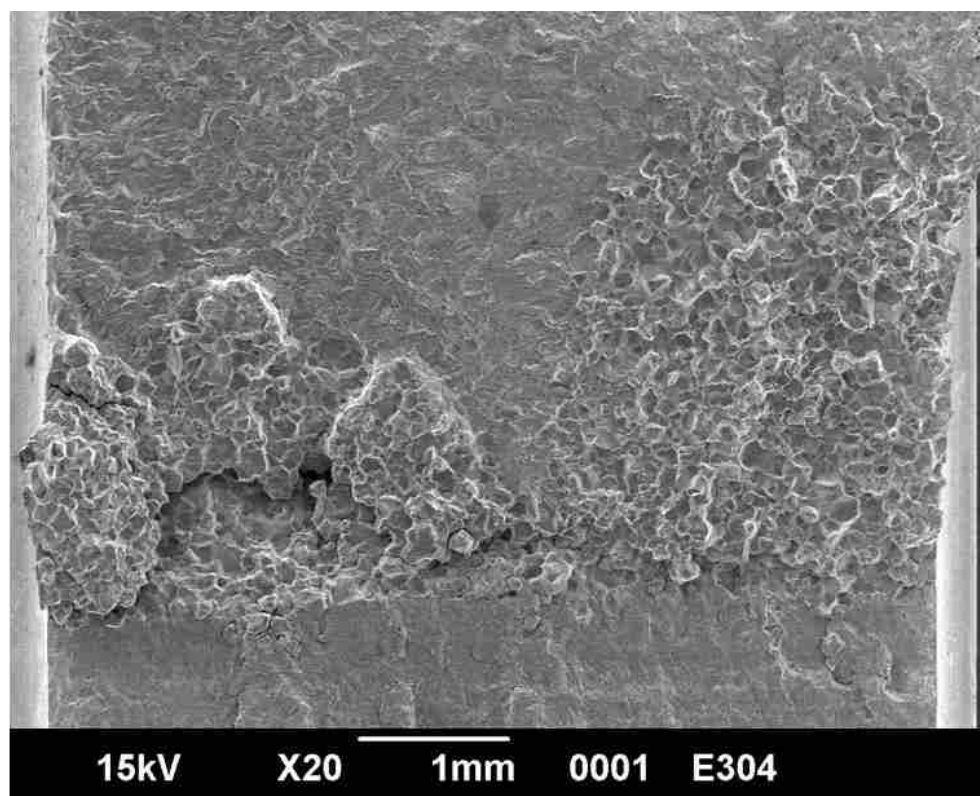
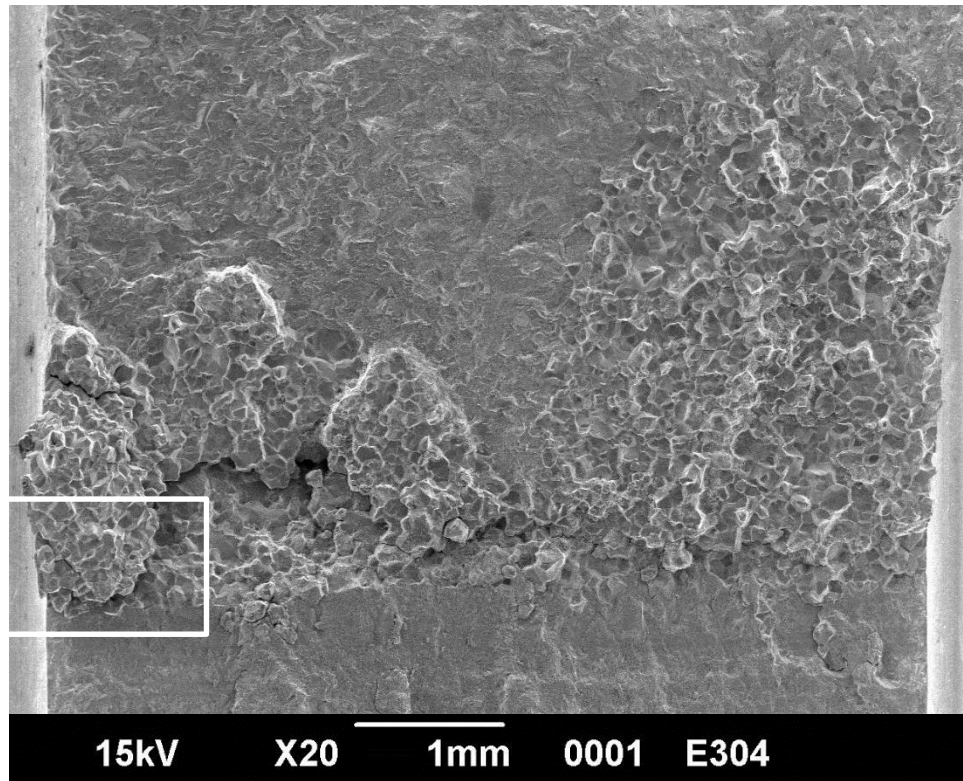
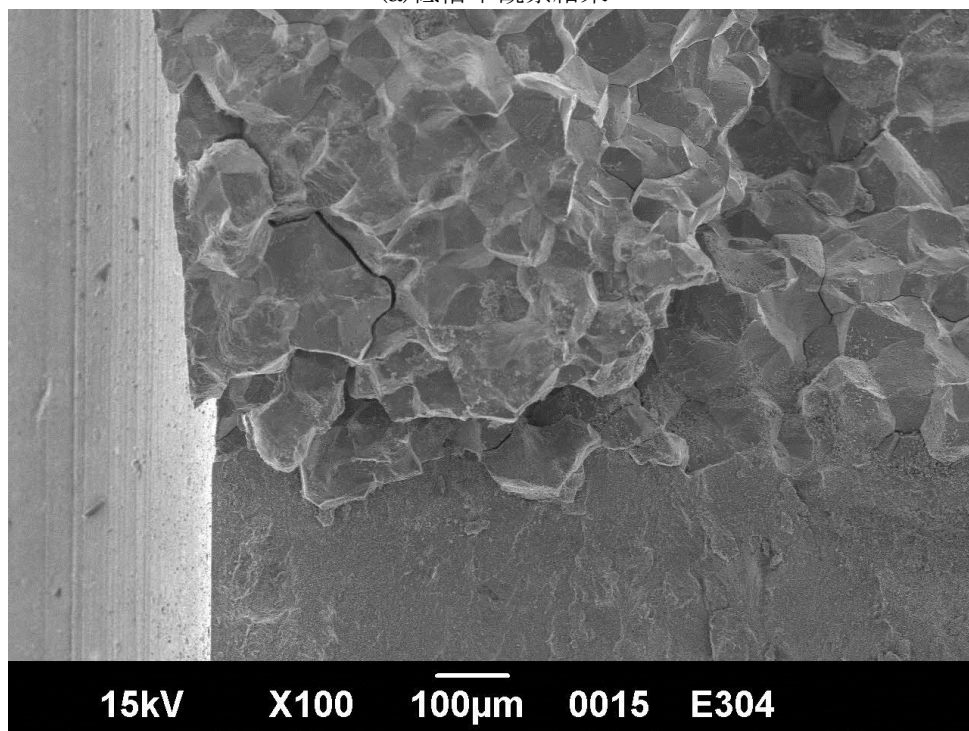


図 3.2.1-8(1) 亀裂進展試験後の破面 SEM 観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$))

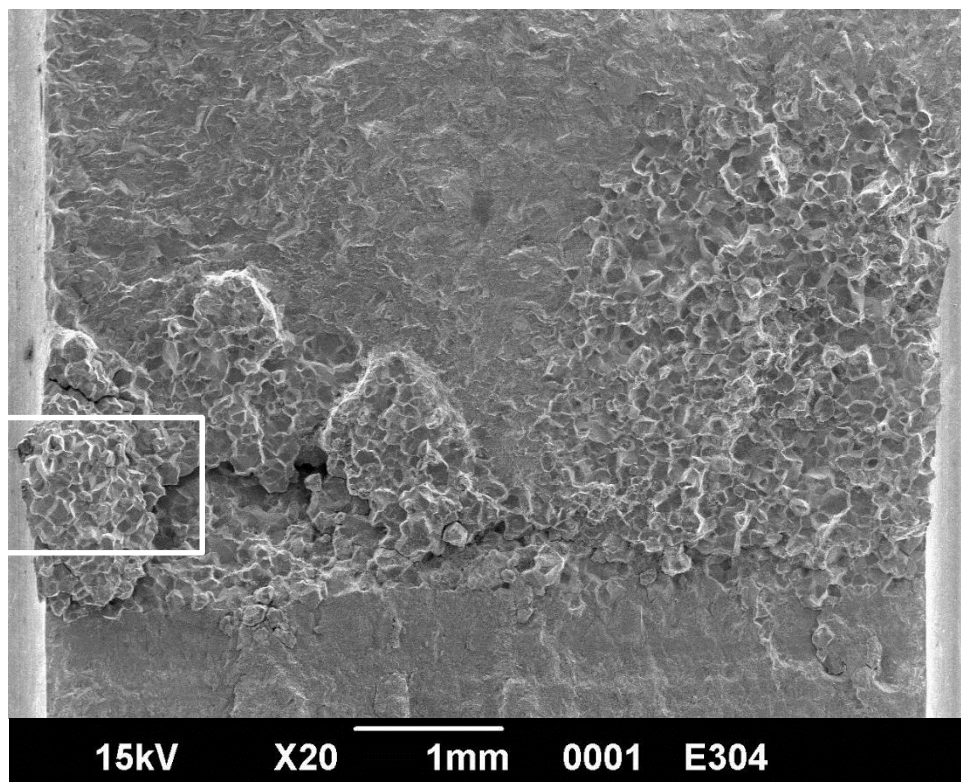


(a)低倍率観察結果

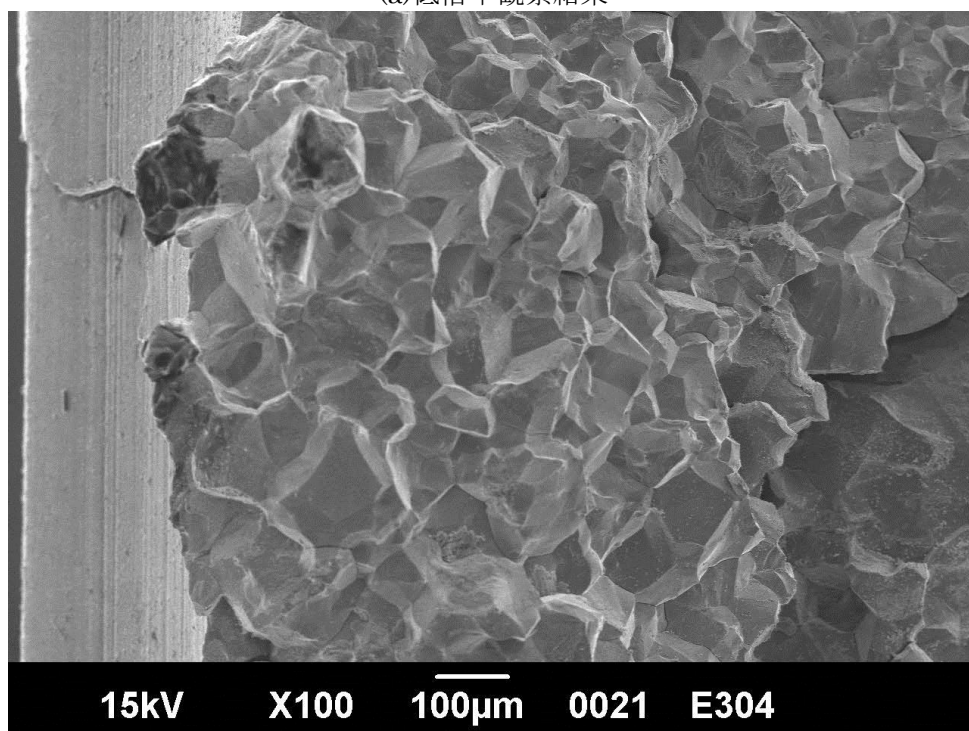


(b)上図(1)の四角部分の高倍率観察結果

図 3.2.1-8(2) 亀裂進展試験後の破面 SEM 観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)))

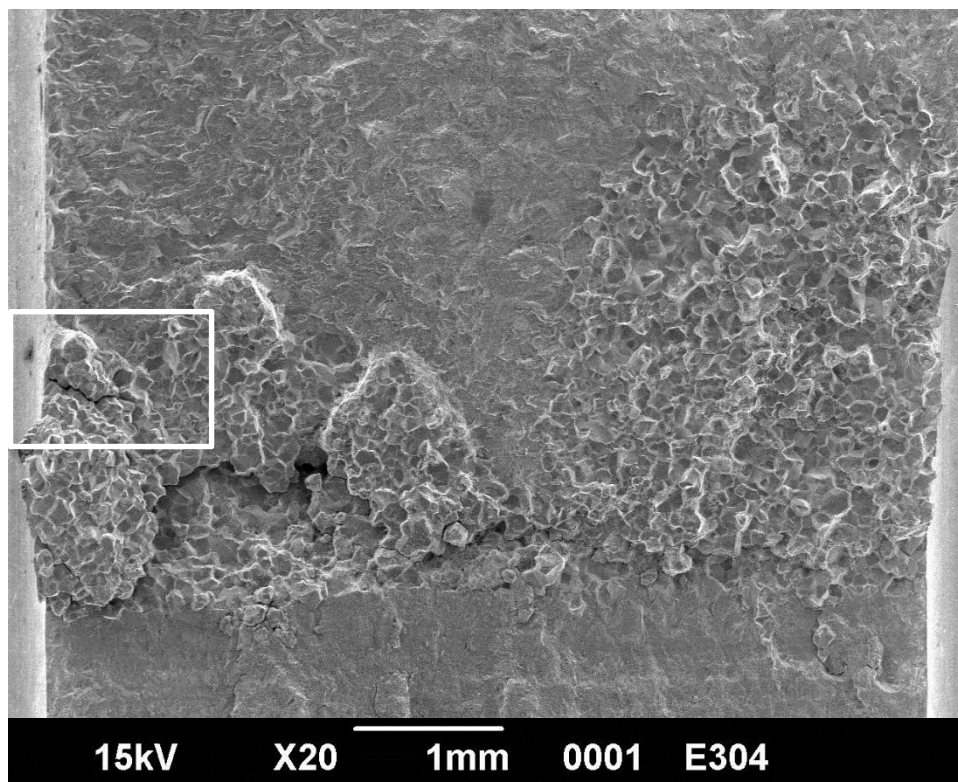


(a)低倍率観察結果

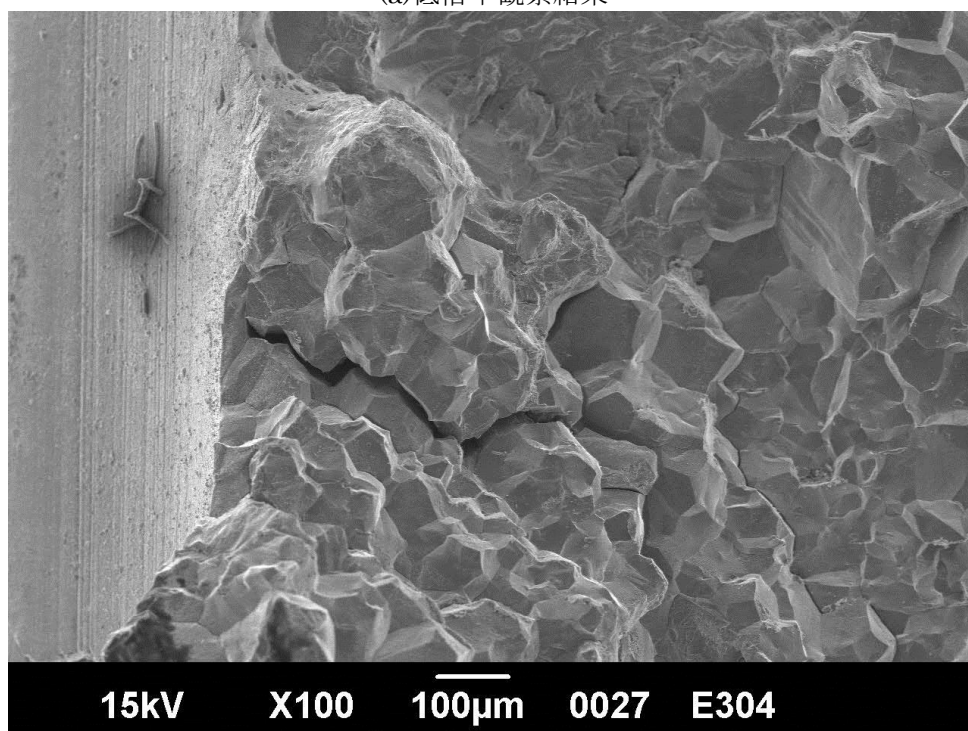


(b)上図(1)の四角部分の高倍率観察結果

図 3.2.1-8(3) 亀裂進展試験後の破面 SEM 観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)))

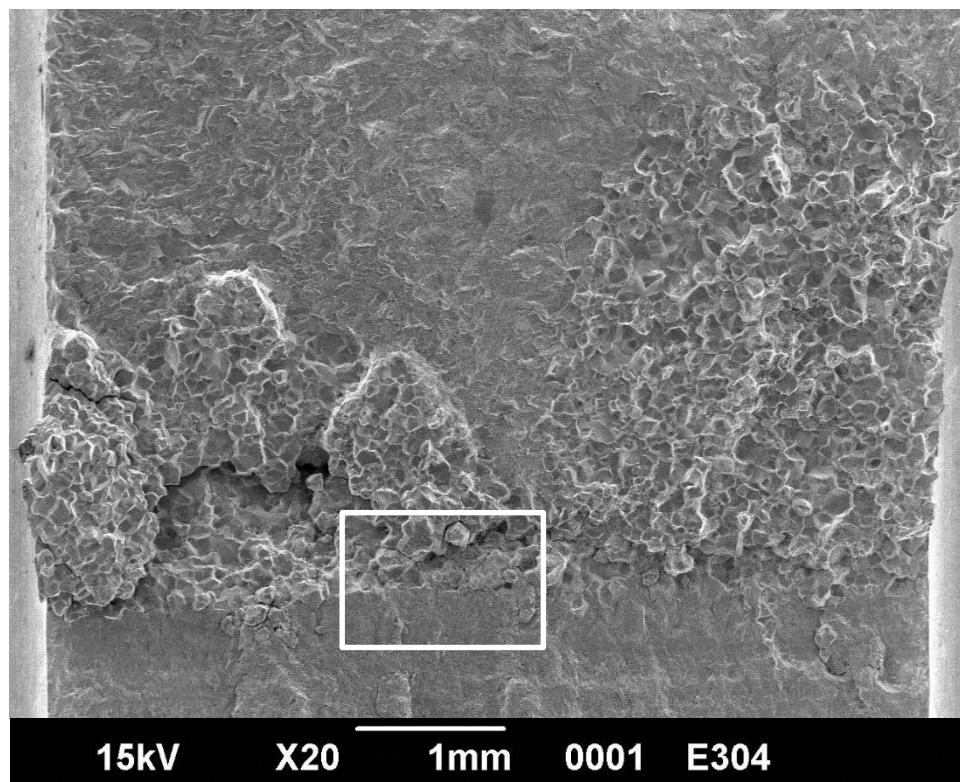


(a)低倍率観察結果

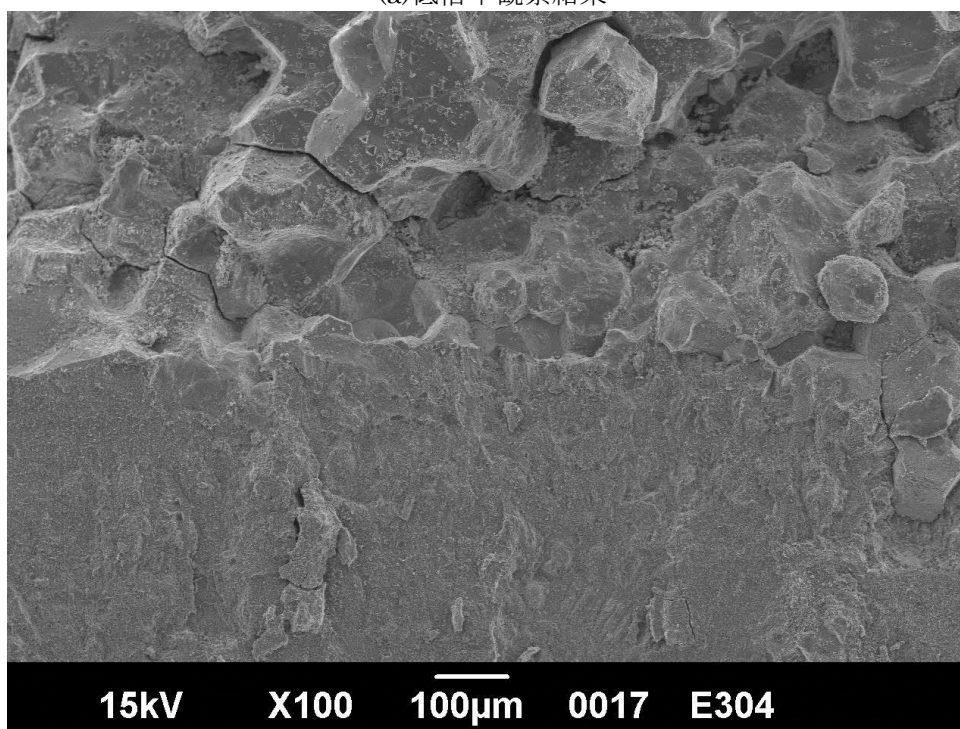


(b)上図(1)の四角部分の高倍率観察結果

図 3.2.1-8(4) 亀裂進展試験後の破面 SEM 観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)))

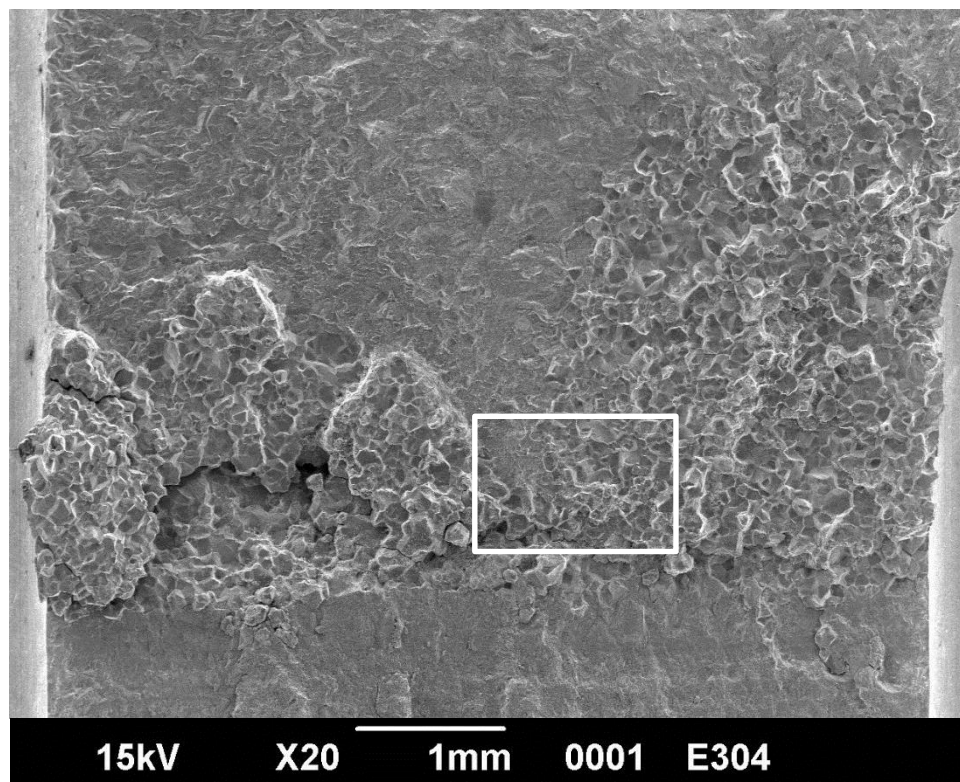


(a)低倍率観察結果

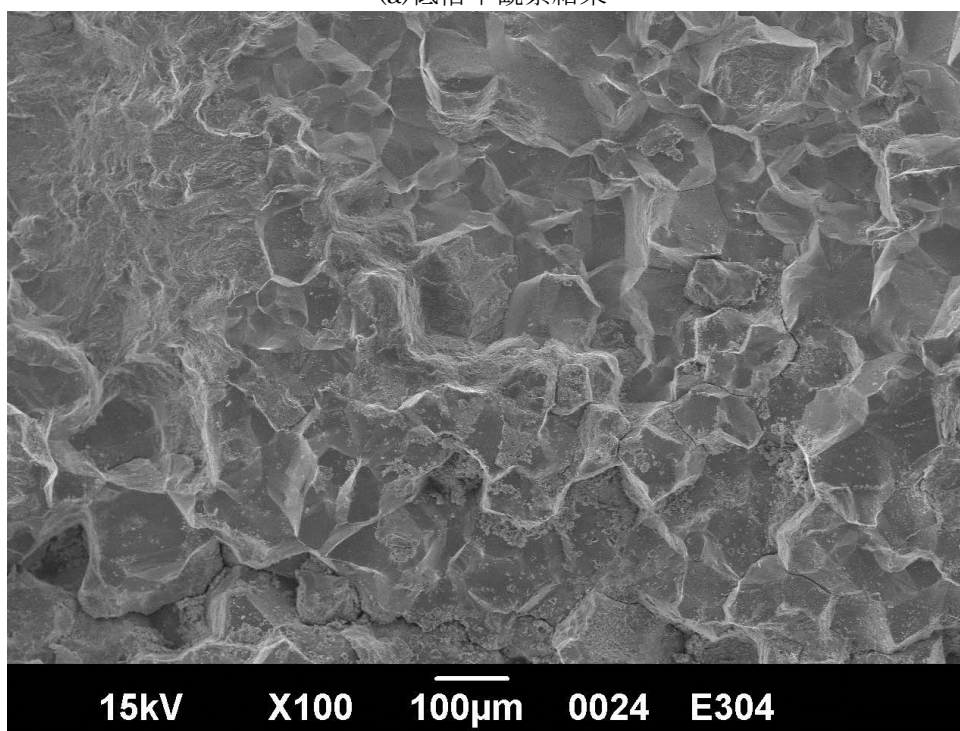


(b)上図(1)の四角部分の高倍率観察結果

図 3.2.1-8(5) 亀裂進展試験後の破面 SEM 観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)))

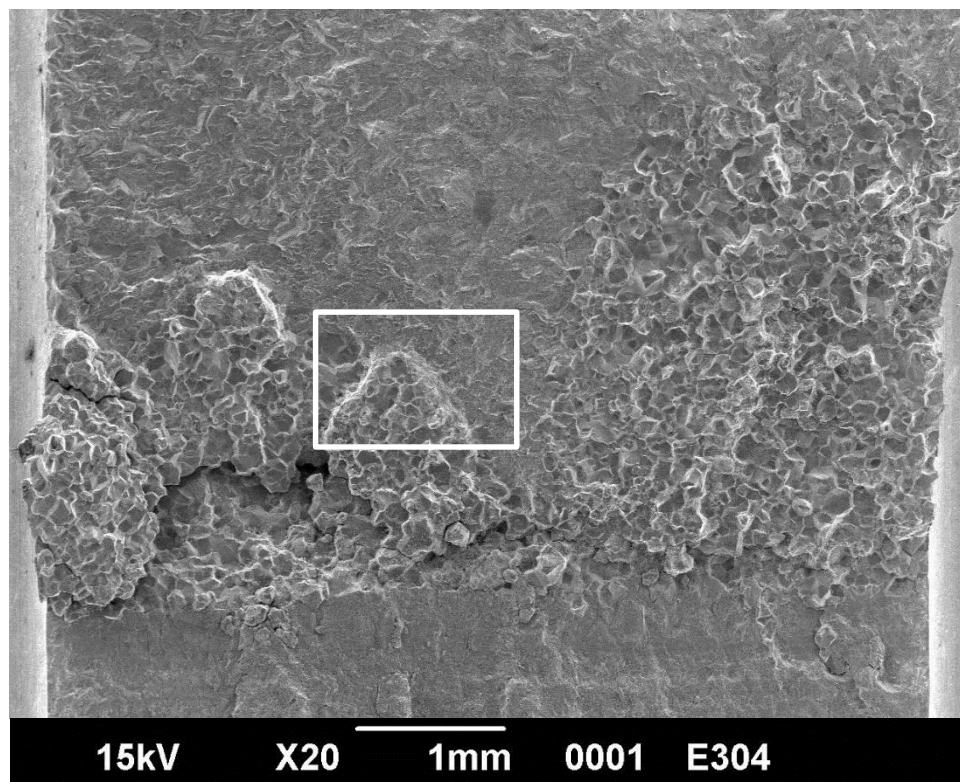


(a)低倍率観察結果

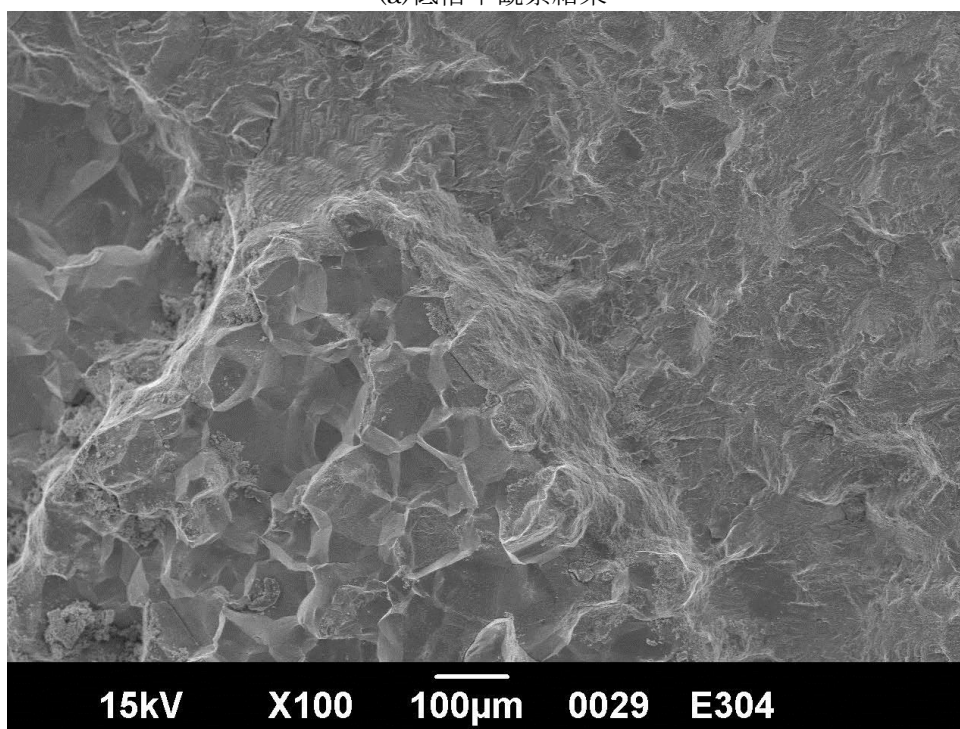


(b)上図(1)の四角部分の高倍率観察結果

図 3.2.1-8(6) 亀裂進展試験後の破面 SEM 観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)))

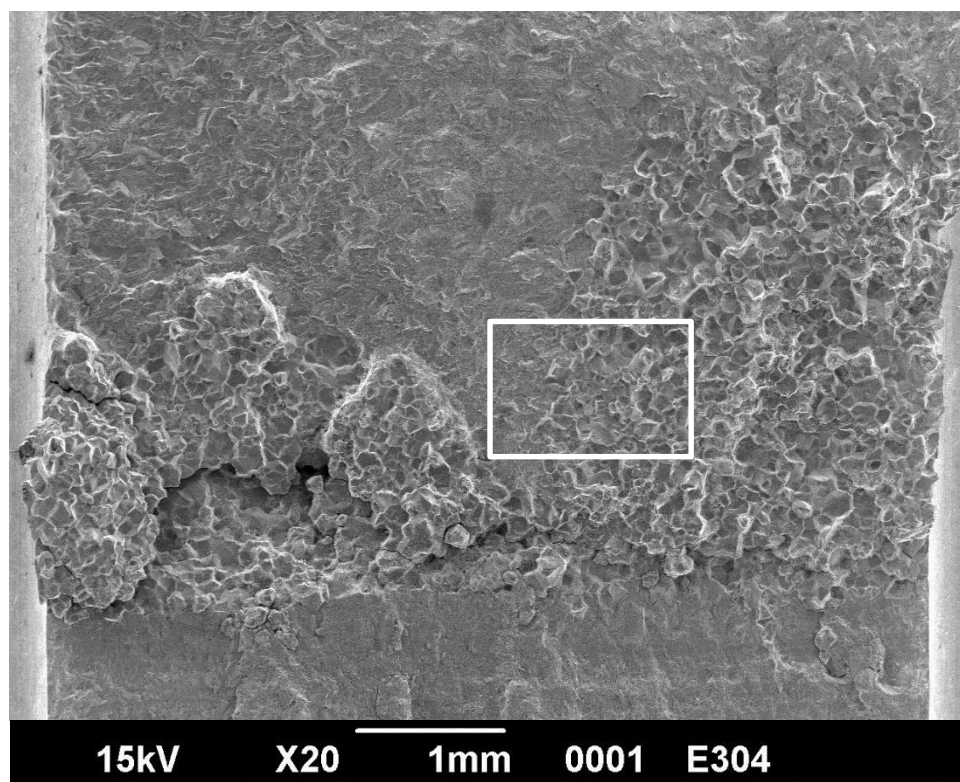


(a)低倍率観察結果

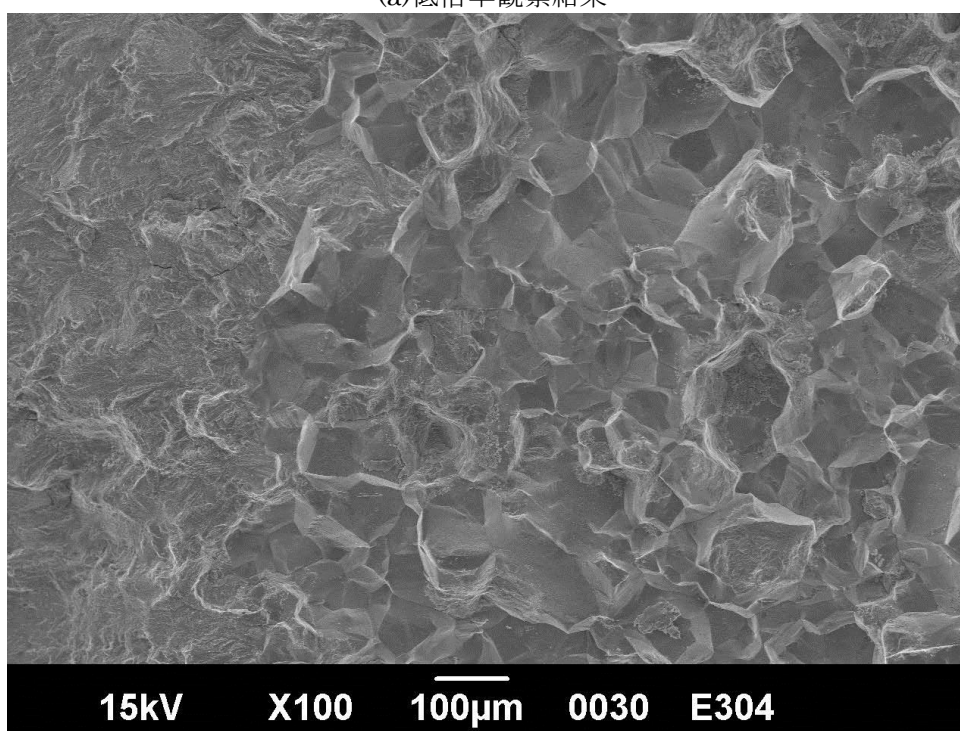


(b)上図(1)の四角部分の高倍率観察結果

図 3.2.1-8(7) 亀裂進展試験後の破面 SEM 観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$))

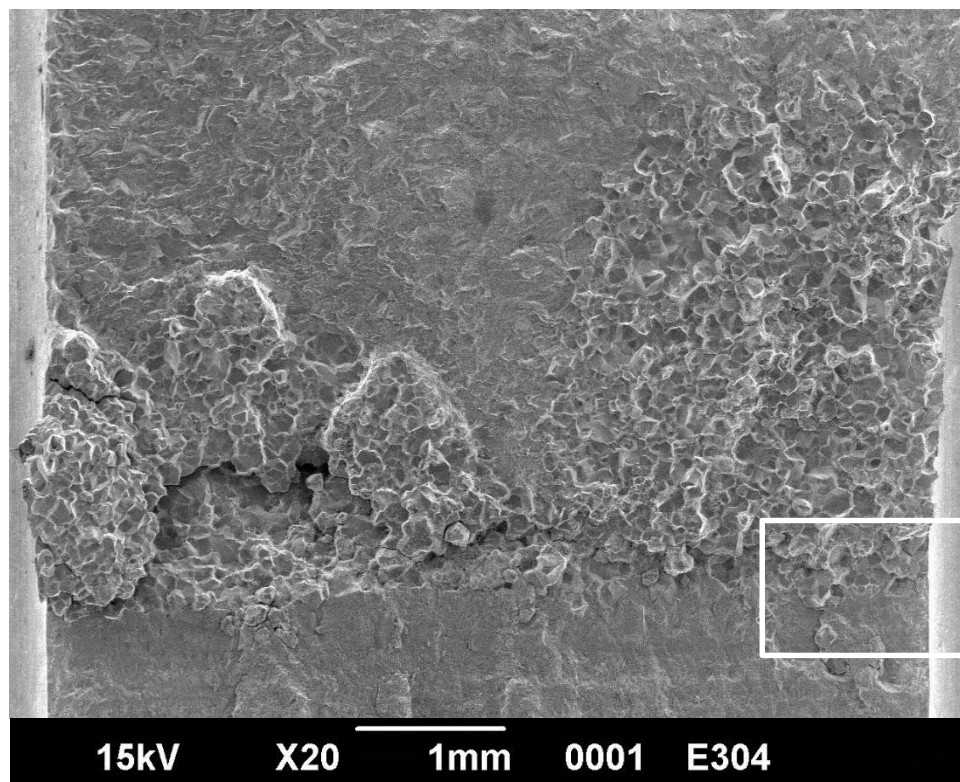


(a)低倍率観察結果

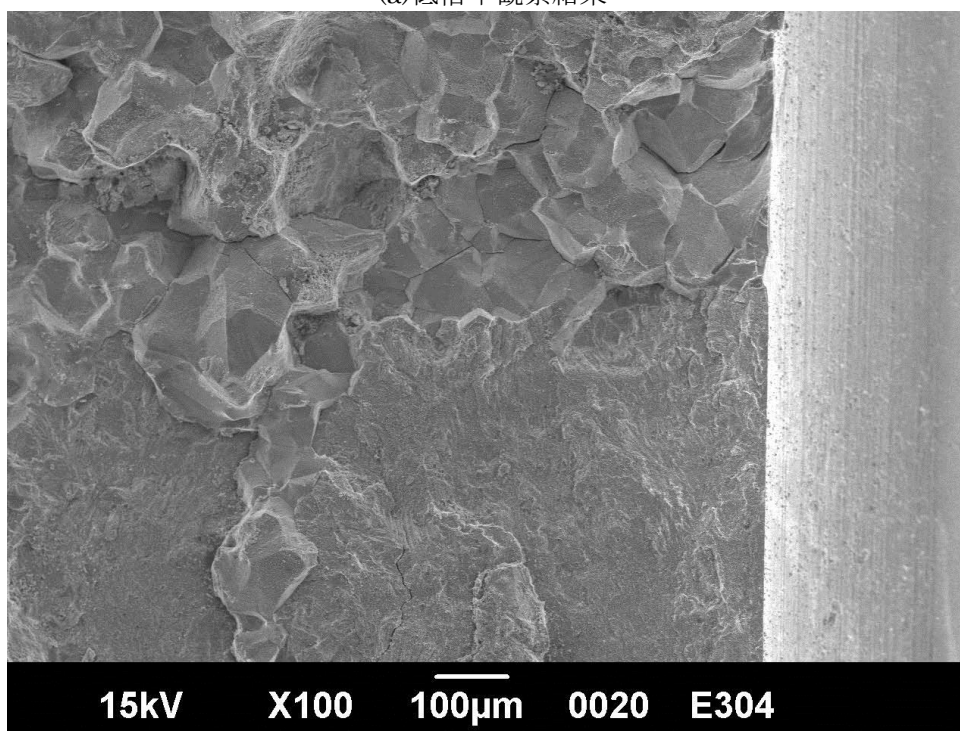


(b)上図(1)の四角部分の高倍率観察結果

図 3.2.1-8(8) 亀裂進展試験後の破面 SEM 観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)))

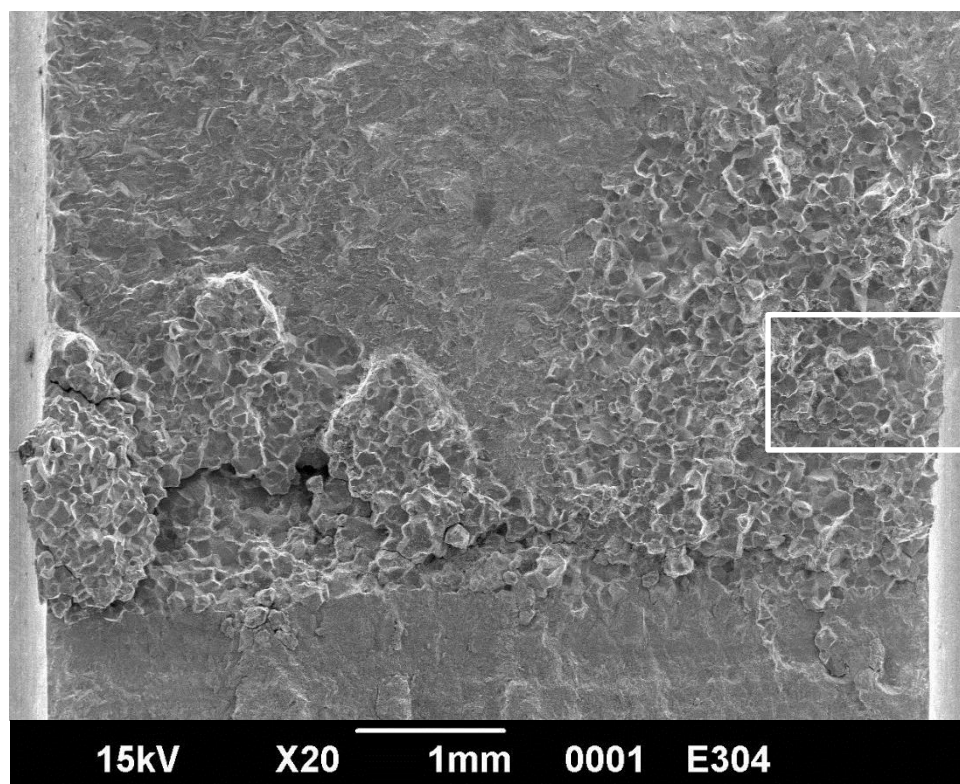


(a)低倍率観察結果

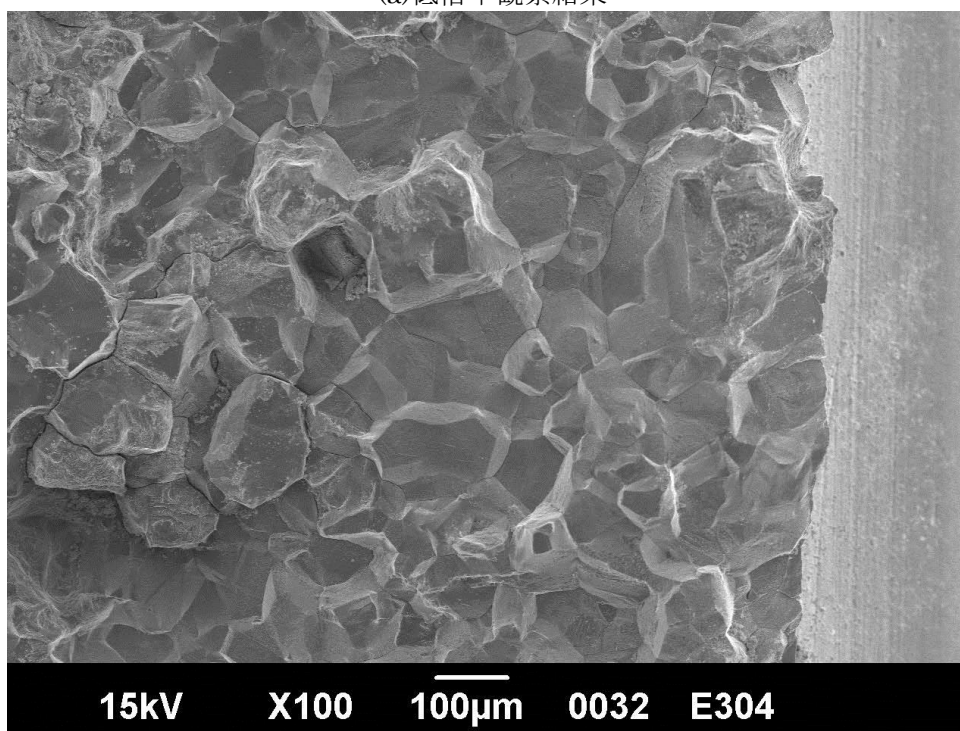


(b)上図(1)の四角部分の高倍率観察結果

図 3.2.1-8(9) 亀裂進展試験後の破面 SEM 観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)))

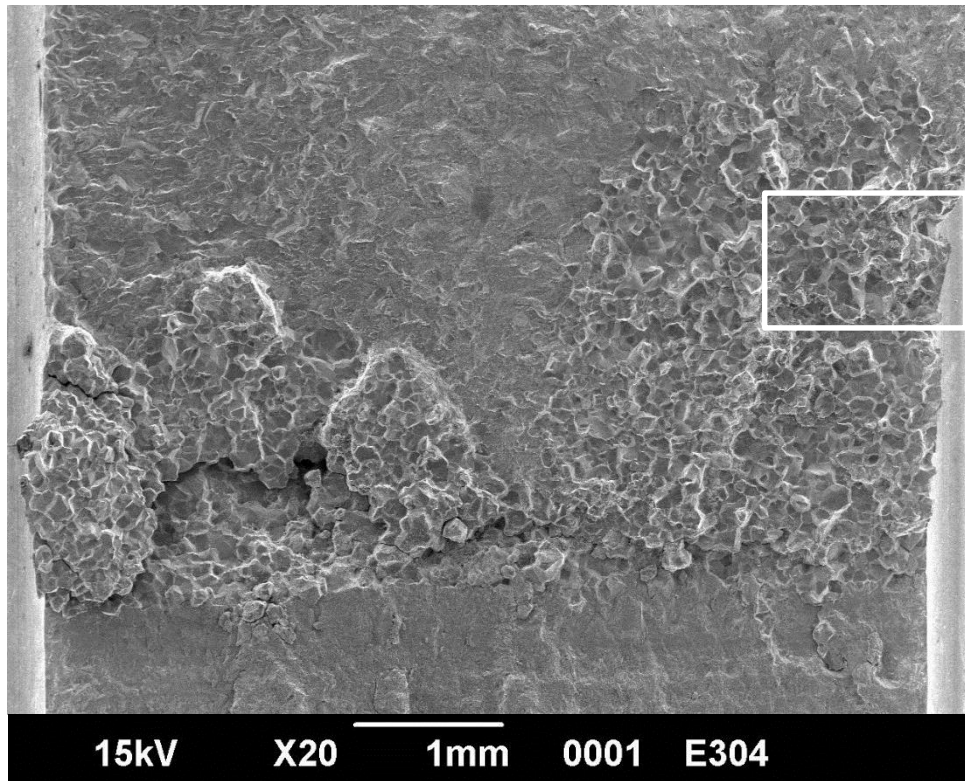


(a)低倍率観察結果

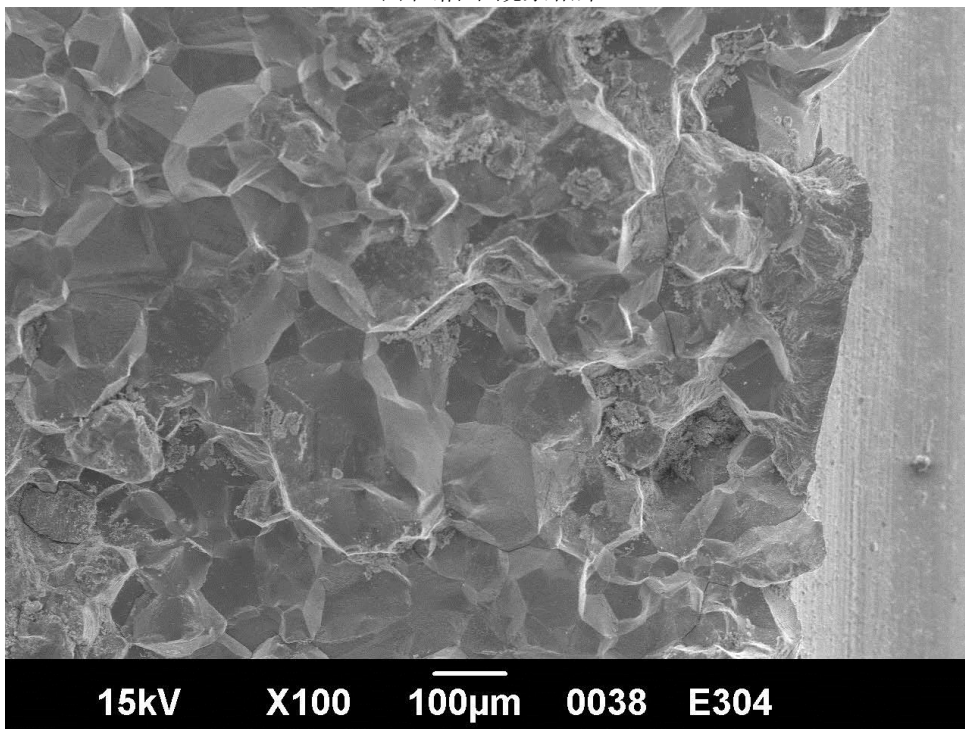


(b)上図(1)の四角部分の高倍率観察結果

図 3.2.1-8(10) 亀裂進展試験後の破面 SEM 観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$))

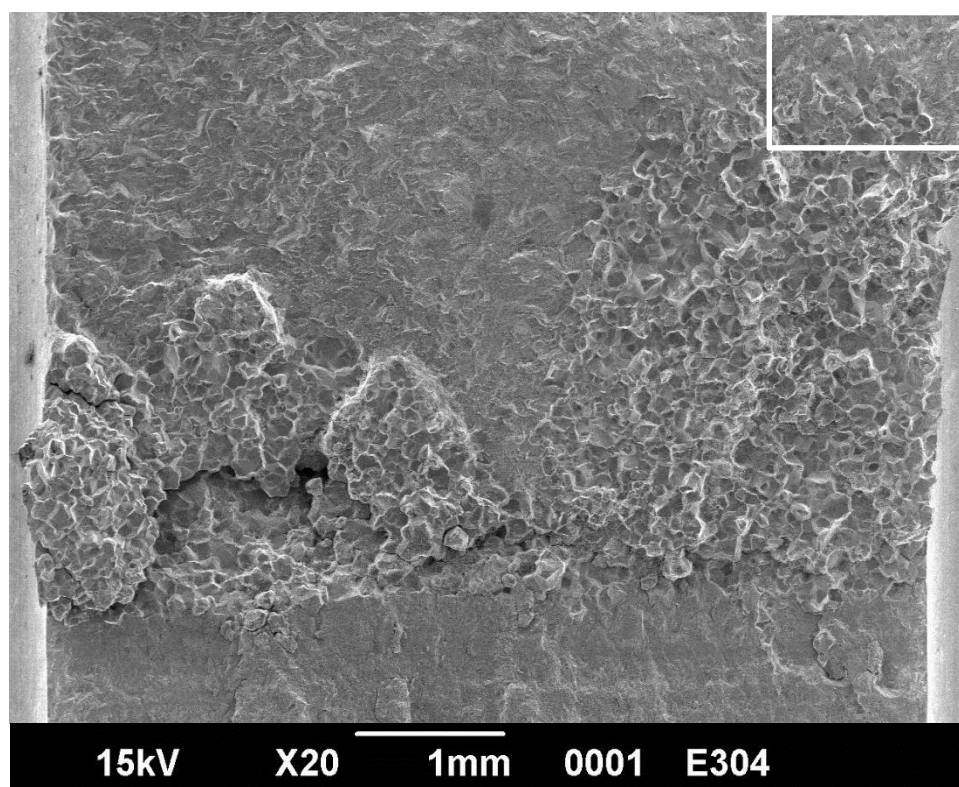


(a)低倍率観察結果

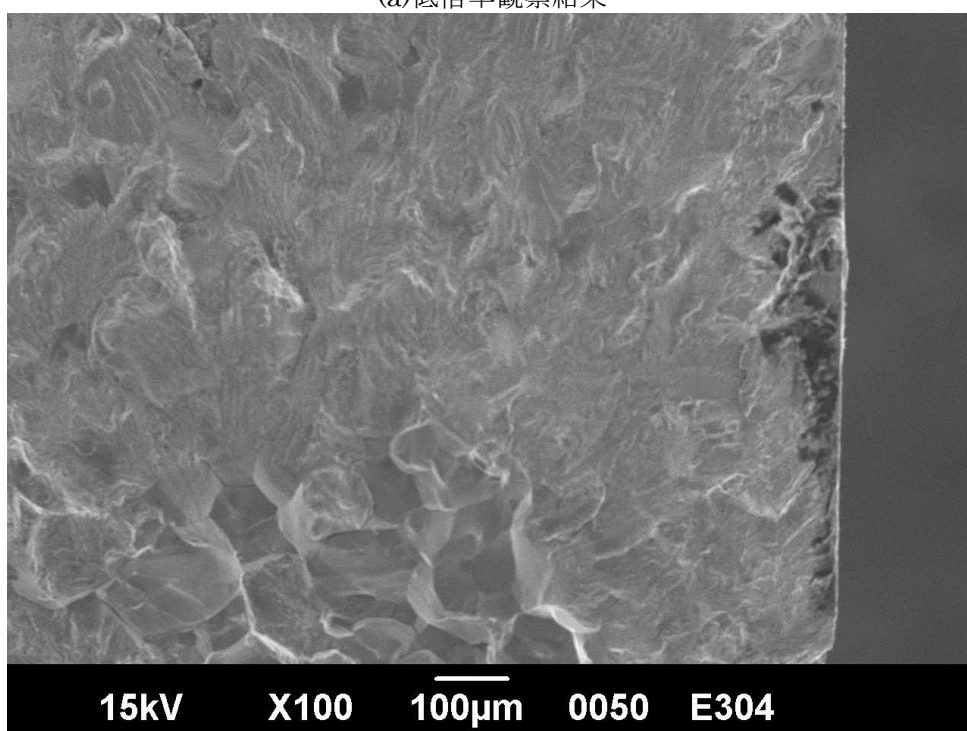


(b)上図(1)の四角部分の高倍率観察結果

図 3.2.1-8(11) 亀裂進展試験後の破面 SEM 観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)))

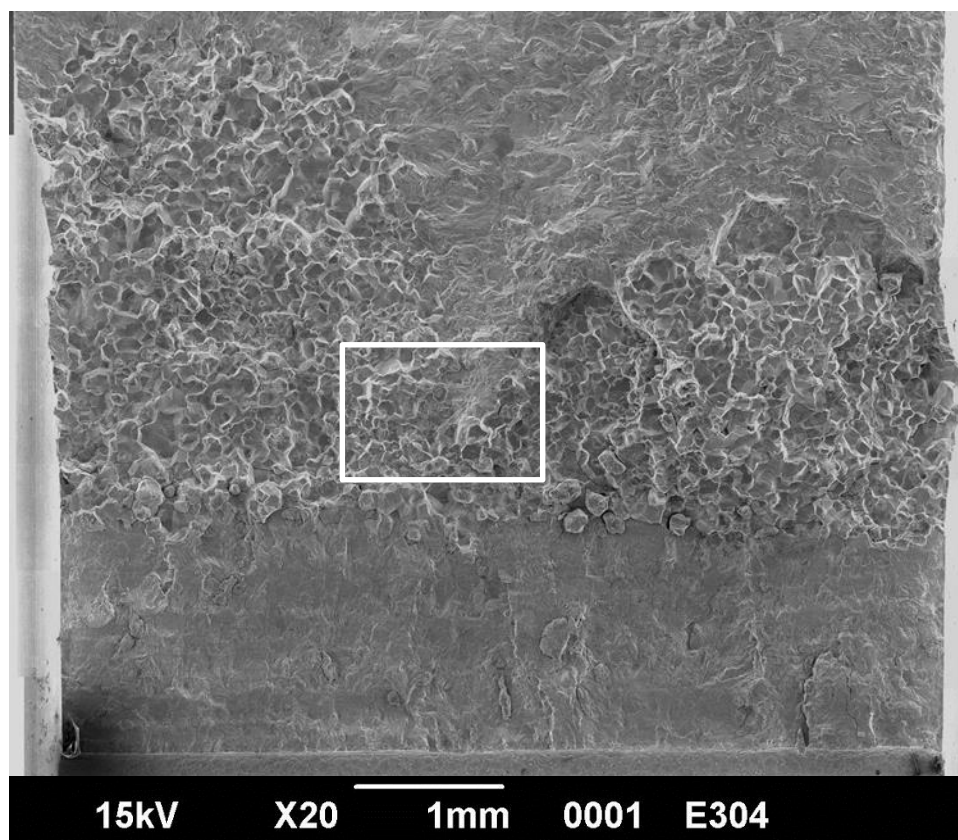


(a)低倍率観察結果

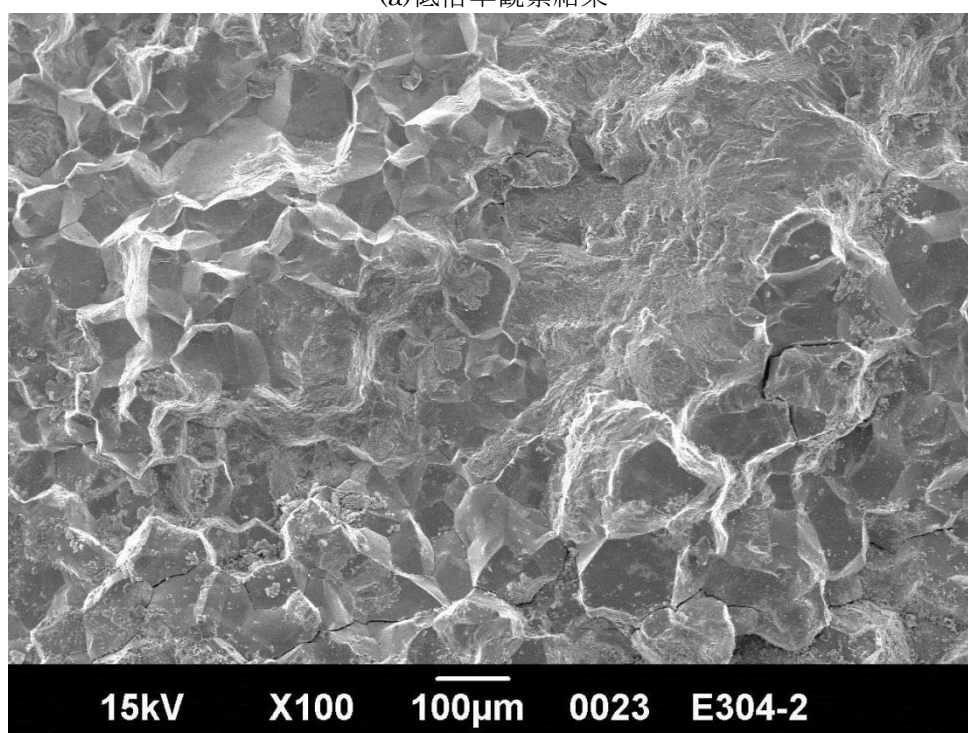


(b)上図(1)の四角部分の高倍率観察結果

図 3.2.1-8(12) 亀裂進展試験後の破面 SEM 観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)))

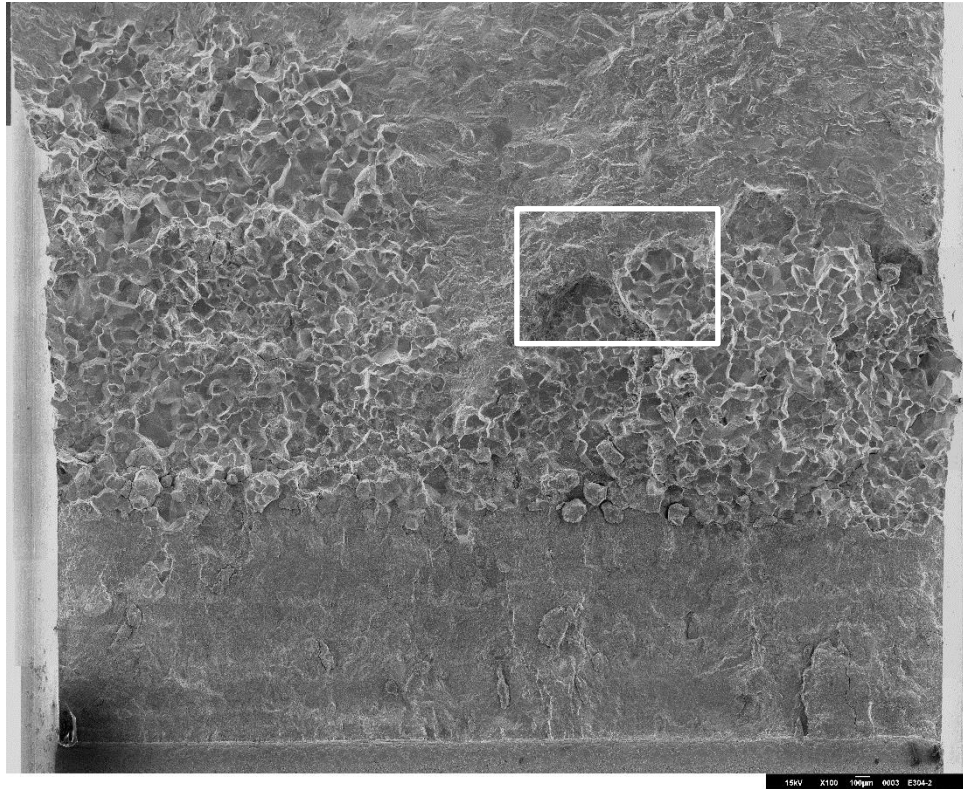


(a)低倍率観察結果

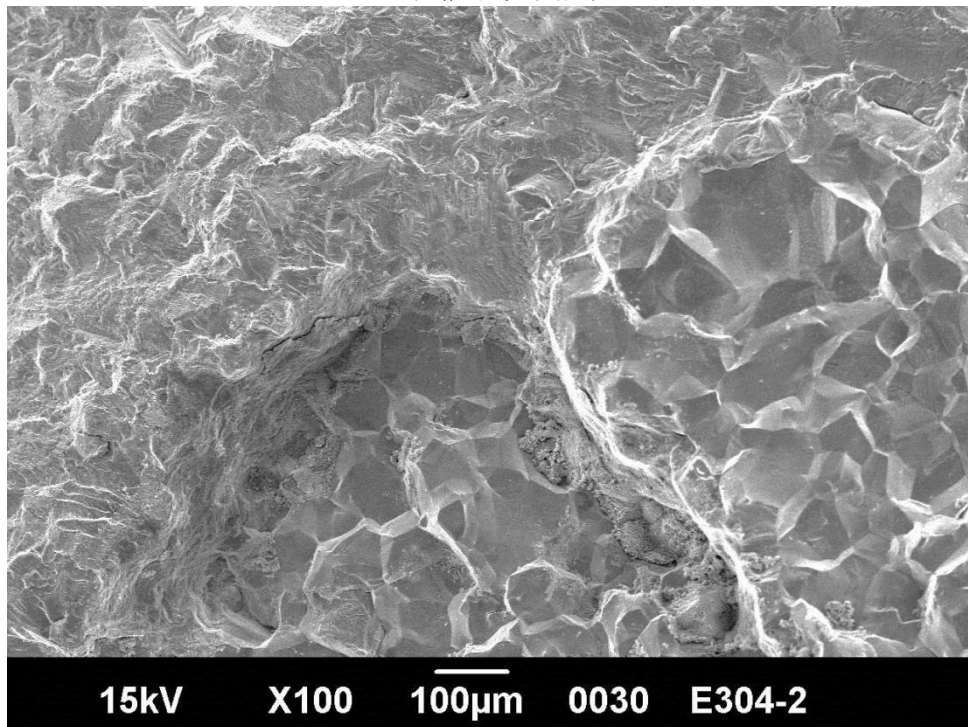


(b)上図(1)の四角部分の高倍率観察結果

図 3.2.1-8(13) 亀裂進展試験後の破面 SEM 観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$))



(a)低倍率観察結果



(b)上図(1)の四角部分の高倍率観察結果

図 3.2.1-8(14) 亀裂進展試験後の破面 SEM 観察結果
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)))

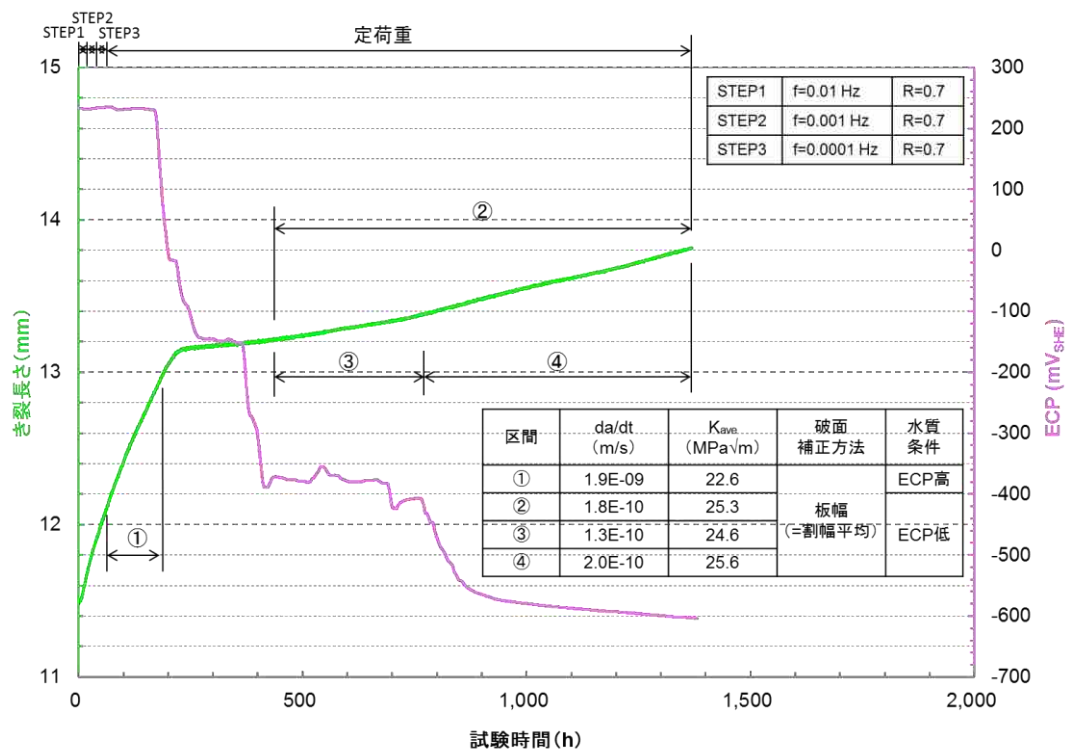


図 3.2.1-9 亀裂長さの時間変化(破面補正後)(1/3)(亀裂長さ と ECP)
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)))

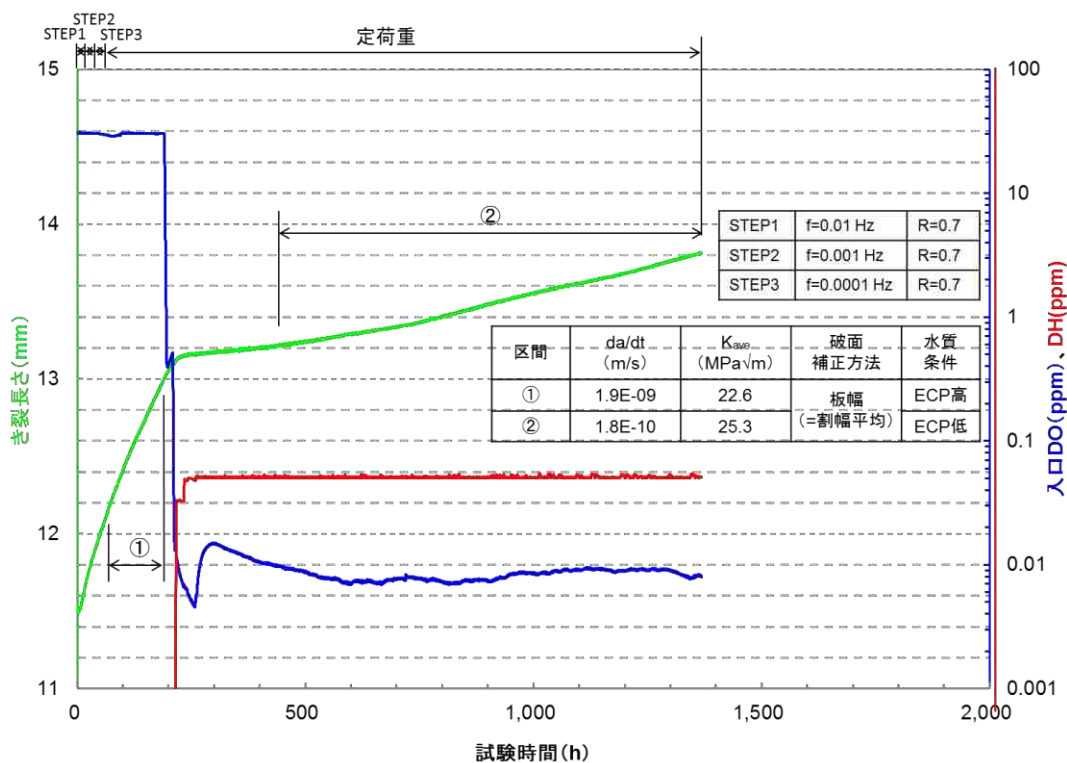


図 3.2.1-9 亀裂長さの時間変化(破面補正後)(2/3)(亀裂長さ と DO・DH)
(E304(SUS316L、AR 材、 $1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$)))

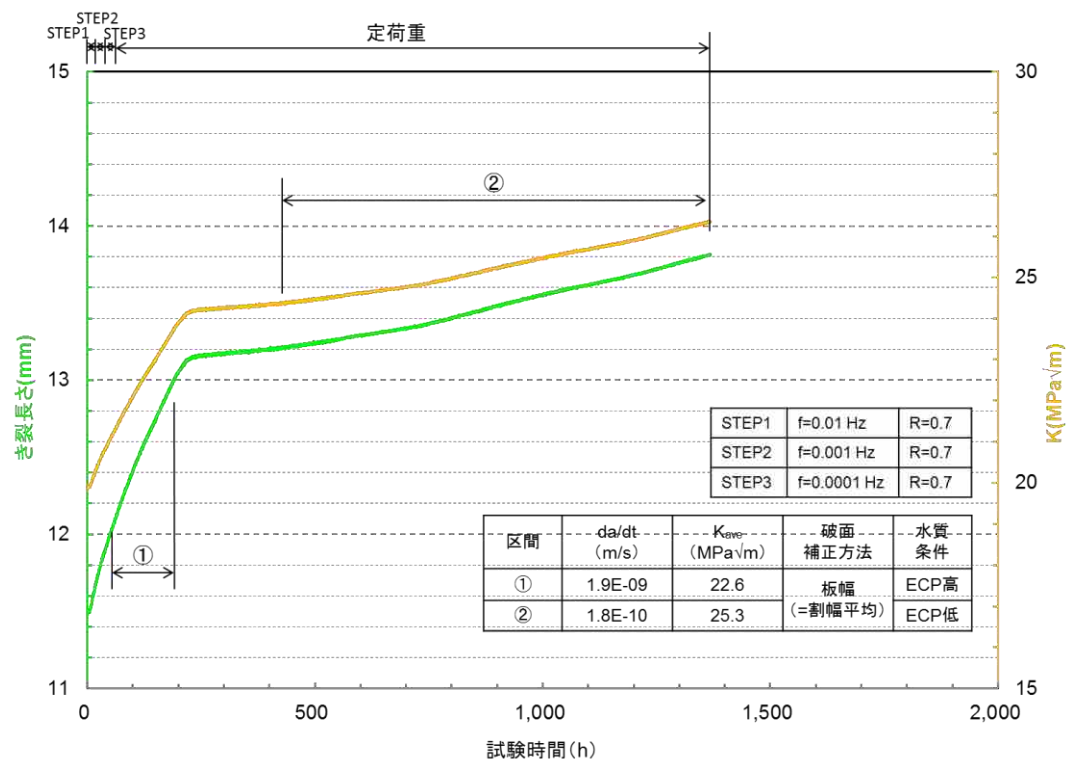


図 3.2.1-9 亀裂長さの時間変化(破面補正後)(3/3)(亀裂長さと K 値)
(E304(SUS316L、AR 材、 1.73×10^{25} n/m²(E>1 MeV)))

表 3.2.1-6 亀裂進展試験結果まとめ(E304、破面補正後)

鋼種	ID	照射量	ECP 平均値 (mV _{SHE})	K 平均値 (MPa√m)	da/dt (m/s)	備考
				上段：板幅(=割幅)平均 下段：最大長さ		
SUS 316L (AR)	E304	2.88 dpa 1.73×10 ²⁵ n/m ² (E>1 MeV)	214	22.6	1.9×10 ⁻⁹	ECP 高
				24.4	2.8×10 ⁻⁹	
			-506	25.3	1.8×10 ⁻¹⁰	ECP 低
				28.8	2.7×10 ⁻¹⁰	

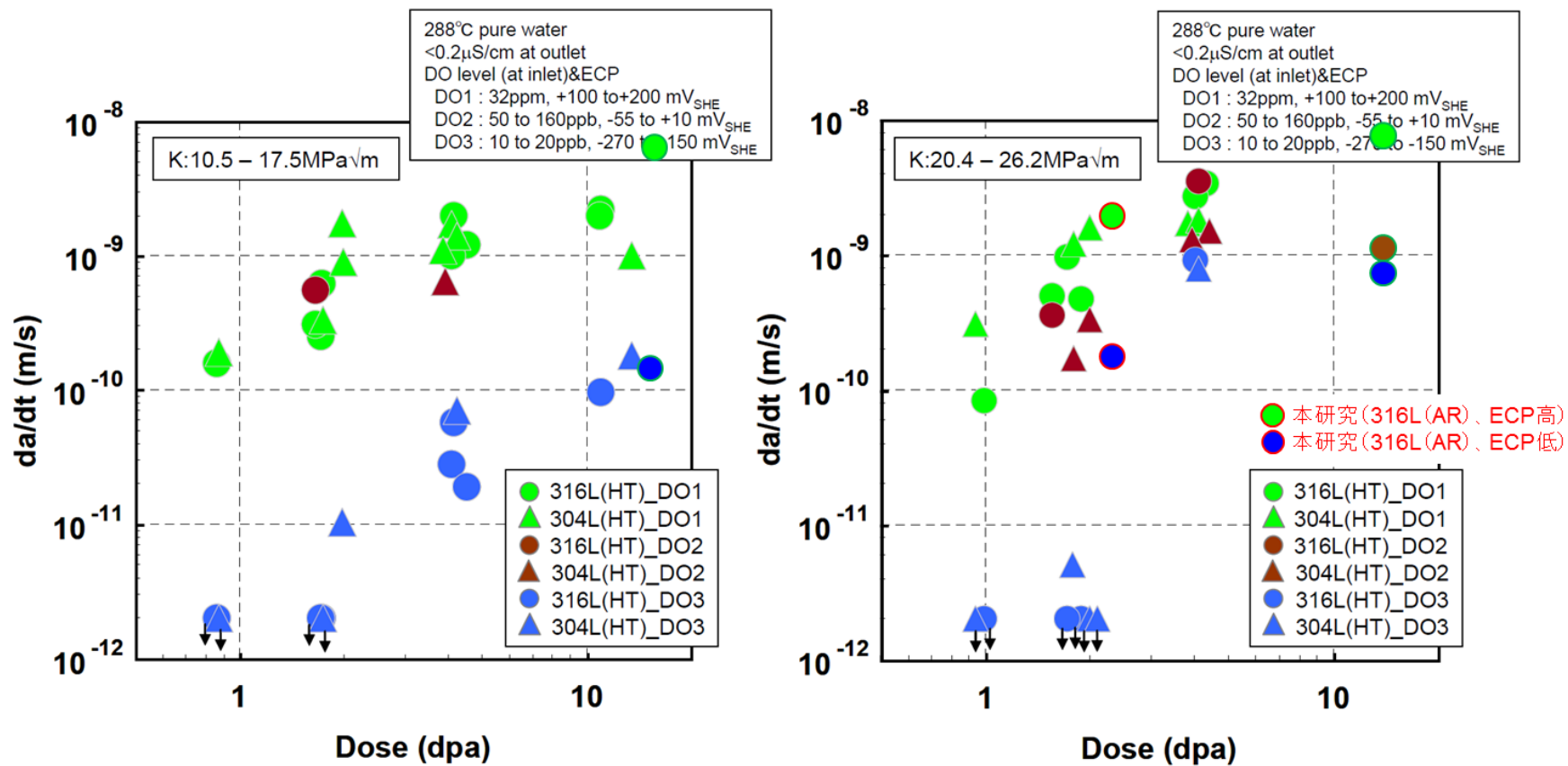


図 3.2.1-10 文献値[3.2.1-1]との比較

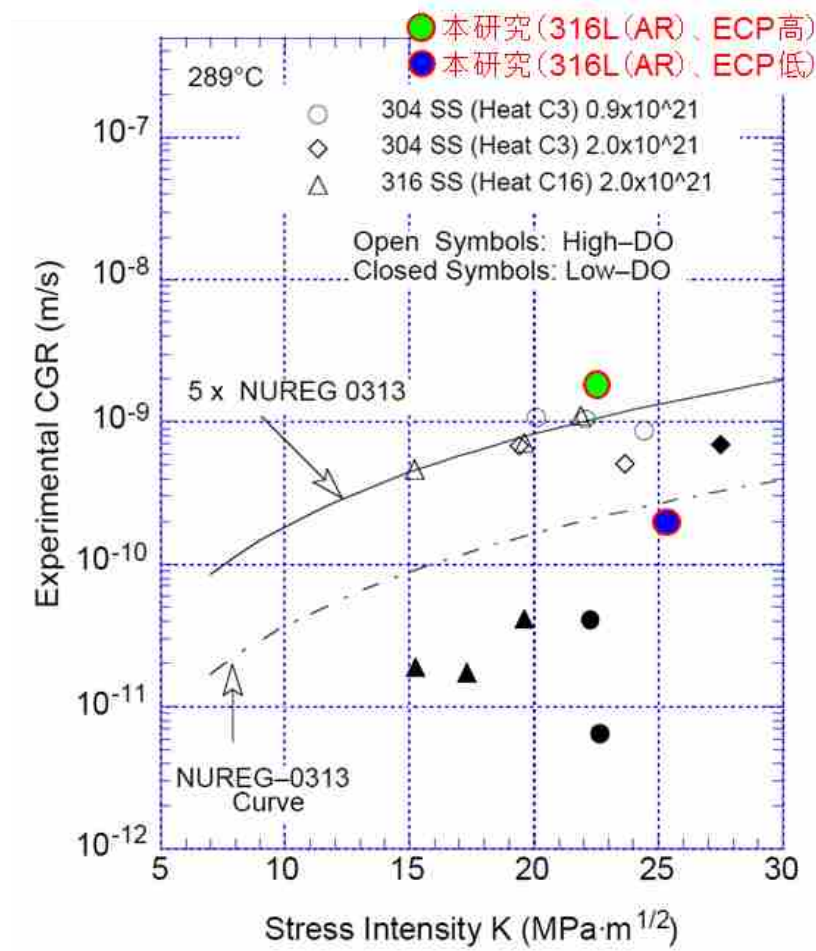


図 3.2.1-11 文献値[3.2.1-2]との比較

3.2.1.2 既存照射材を用いた引張試験

(1) 試験方法

既存照射材より、JNES IASCC 事業で中性子照射したミルアニール受入れまま(AR)材の引張試験片(試験片 ID. E332 中性子照射量 $1.49 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)を選定し、引張試験に供した。引張試験片の形状を図 3.2.1-12 に示す。また試験マトリクスを表 3.2.1-7 に示す。

引張試験は、ひずみ速度約 $3 \times 10^{-4} \text{ s}$ 、 288°C 大気中で実施した。試験機器構成の概要を図 3.2.1-13 に示す。試験中の応力は引張試験機のロードセルで取得し、伸びは試験機の伸び計ならびにホットセル内に設置した CCD カメラで試験中の試験片平行部の画像を取得し、画像相関法(DIC)を用いて評価した。試験中に取得したデータを用いて、応力-ひずみ曲線を取得し、0.2%耐力、引張強さ、均一ひずみ、破断ひずみ、及びひずみ硬化指数を求めた。また、試験前後での試験片の外観写真の撮影、及び破面の SEM 観察を実施した。

表 3.2.1-7 引張試験マトリクス

試験片 ID	鋼種	照射量	引張試験(288℃)
E332	SUS316L (AR)	2.48 dpa $1.49 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$	○

凡例 ○: 実施

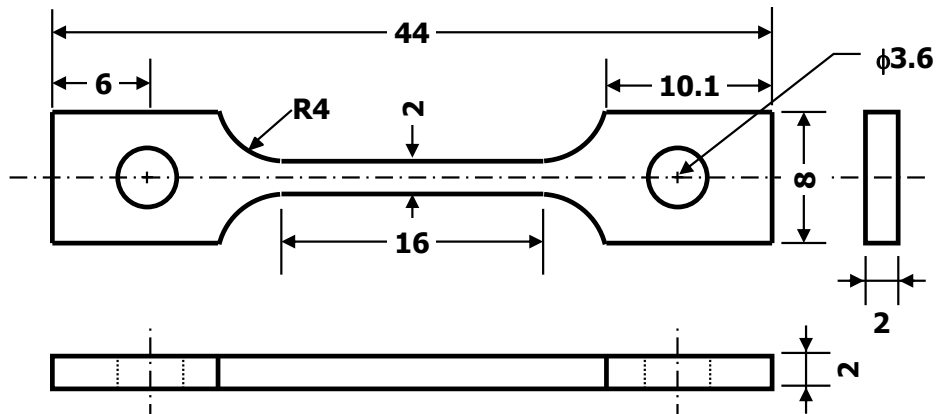


図 3.2.1-12 引張試験片の形状(JNES IASCC 事業)

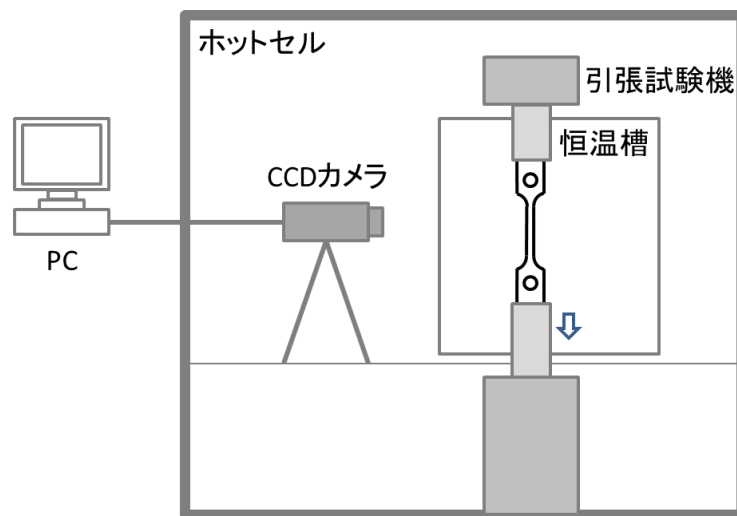


図 3.2.1-13 試験機器構成概要

(2) 試験結果

引張試験前の試験片外観写真を図 3.2.1-14 に示す。得られた応力-ひずみ関係を図 3.2.1-15 に示す。引張試験により得られた結果を表 3.2.1-8 にまとめた。本試験片の 0.2% 耐力は 538MPa、破断ひずみは 28.7% であった。引張試験後の外観写真を図 3.2.1-16 に示す。試験片は平行部で破断していた。破面の SEM 写真を図 3.2.1-17 に示す。破面は延性破面であった。

CCD カメラを用いて引張試験中の試験片の画像を約 1 秒ごとに取得した。取得した画像をもとにひずみ挙動の解析を行った。解析には Lavison 社 Strain Master 付属のソフトウェア Davis 8.3 を用い、以下の手順で実施した。

- ①試験開始時(無負荷時)から破断直前まで試験片表面のひずみを計算
- ②破断直前で荷重軸方向のひずみが最大となる点を通ると予想される軸方向のラインを指定し、ライン上のひずみ分布を抽出
- ③指定したライン上のひずみ分布から、破断直前で荷重軸方向のひずみが最大となる点を抽出(位置を特定)
- ④ひずみが最大となる点(位置)のひずみ履歴を抽出

例として、図 3.2.1-18 に示す応力-ひずみ関係の各位置(フレーム数を表示)における、DIC 解析結果を図 3.2.1-19~20 に示す。引張軸方向のひずみ分布を調べるために、図 3.2.1-18 に示す各位置において、図 3.2.1-21 のライン上のひずみ分布を抽出した。引張軸方向のひずみ分布を図 3.2.1-22 に示す。X 座標：760~820 の区間では、フレーム数の増加に従って負荷方向ひずみは概ね上昇するが、x 座標：795 付近は 511 フレームまではひずみの上昇は少なく、応力-ひずみ関係で最大応力に到達した 911 フレーム付近からひずみは上昇した。1111 フレームでは、負荷応力ひずみが最大に達した x 座標：789 で試験片は破断したことが分かる。X 座標：840~950 の区間では、フレーム数の増加にしたがって負荷方向ひずみは上昇した。一方、x 座標：830 付近ではひずみの変化がほとんど見られなかった。以上のように、引張試験におけるひずみ分布は極めて不均一であることが示唆された。

破断位置(x 座標：789)における負荷方向ひずみ変化を図 3.2.1-23 に示す。約 500 フレームまではほぼ均一にひずみが増加するが、一旦約 700 フレームまではひずみは一定となった。700 フレームを超えると緩やかにひずみは上昇し、最大応力に達した 900 フレームから急激にひずみは上昇し、1000 フレーム付近で最大ひずみとなり、破断した。

図 3.2.1-24 に引張軸方向の Mises 相当ひずみ分布を示す。フレーム数の増加に従って Mises 相当ひずみが増加する傾向があるが、ひずみ分布は不均一であった。また、図 3.2.1-22 と比較すると、最大 Mises 相当ひずみと最大負荷方向ひずみとなる x 座標は一致した。一方、負荷方向ひずみの変化がほとんど見られなかった x 座標：830 付近では、Mises 相当ひずみはフレーム数に従って上昇していた。このことは、破断箇所におけるくびれの発生に伴い、その周辺には y 方向のひずみが生じて、x 座標：830 付近においても

Mises 相当ひずみが発生したことを示唆すると考えられる。

DIC 解析によって得られたひずみ分布から評価した応力-ひずみ関係と、引張試験機のプルロッド変位から評価した応力-ひずみ関係を図 3.2.1-25 に示す。DIC 解析で評価した破断ひずみは、プルロッド変位による破断ひずみの約 58%であった。

ここで得られた結果は、前項で得られた亀裂進展試験結果の検討に資する共に、これまでに得られた成果も含めて後述 3.2.1.5 項において総合的に評価した。



図 3.2.1-14 引張試験前の試験片外観写真
E332(SUS316L、AR 材、 $1.49 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

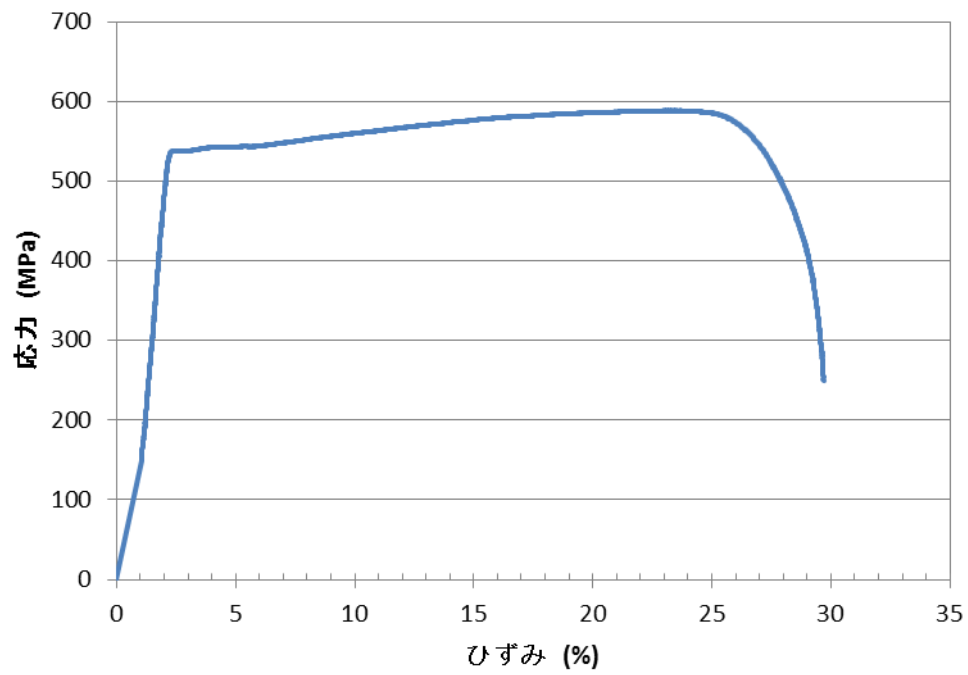


図 3.2.1-15 応力-ひずみ関係
E332(SUS316L、AR 材、 $1.49 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

表 3.2.1-8 引張試験結果

試験片名	E332
試験温度	288 °C
雰囲気	大気中
ひずみ速度	$3 \times 10^{-4} / \text{s}$
0.2%耐力	538 MPa
引張応力	589 MPa
均一ひずみ	15.1 %
破断ひずみ	28.7 %
ひずみ硬化指数	0.04



図 3.2.1-16 引張試験後の試験片外観写真
E332(SUS316L、AR 材、 $1.49 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

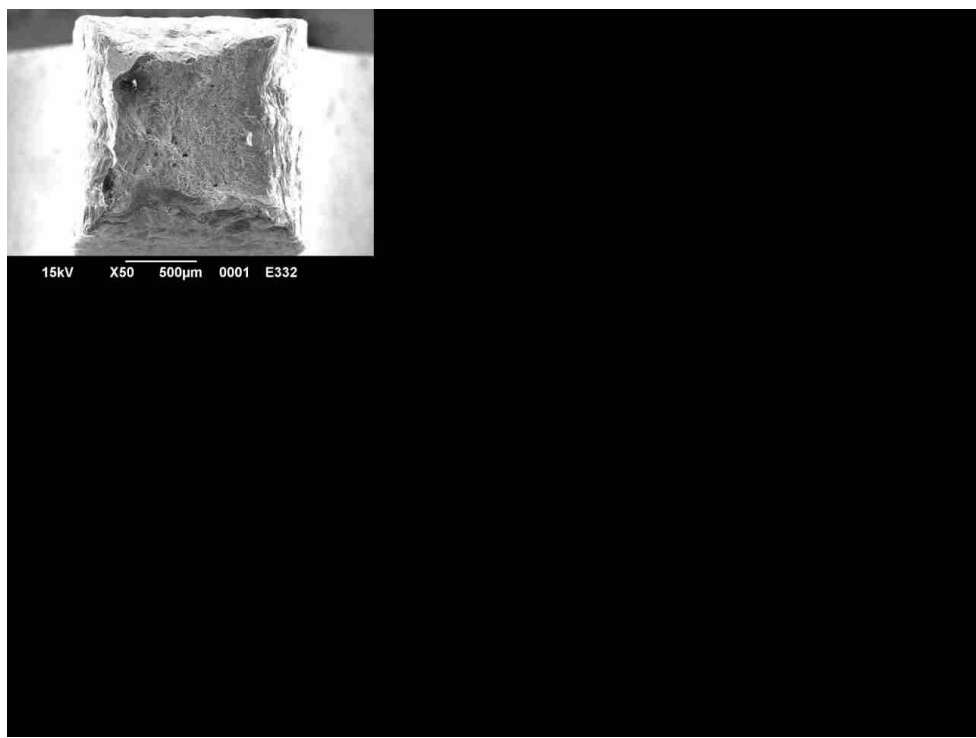


図 3.2.1-17 引張試験後の破面 SEM 写真
E332(SUS316L、AR 材、 $1.49 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

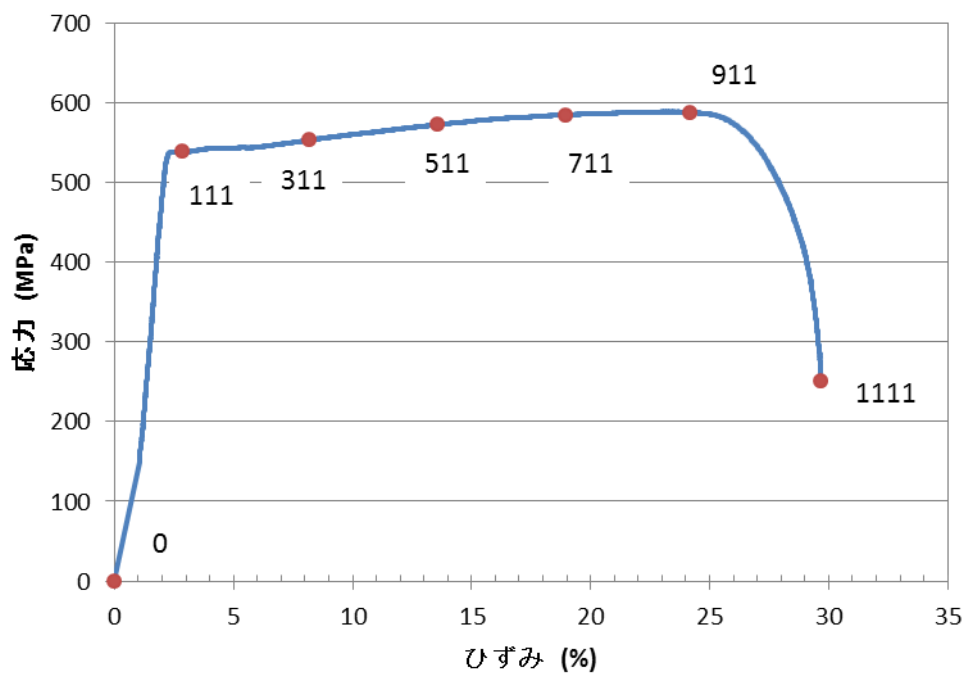


図 3.2.1-18 応力-ひずみ関係における DIC の画像抽出箇所
E332(SUS316L、AR 材、 $1.49 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

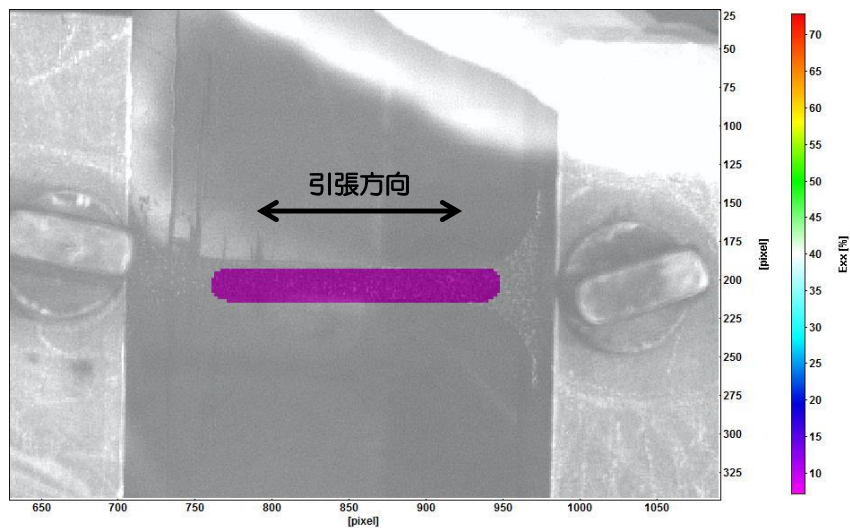


図 3.2.1-19(1) DIC 解析結果 (1frame)
E332(SUS316L、AR 材、 $1.49 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

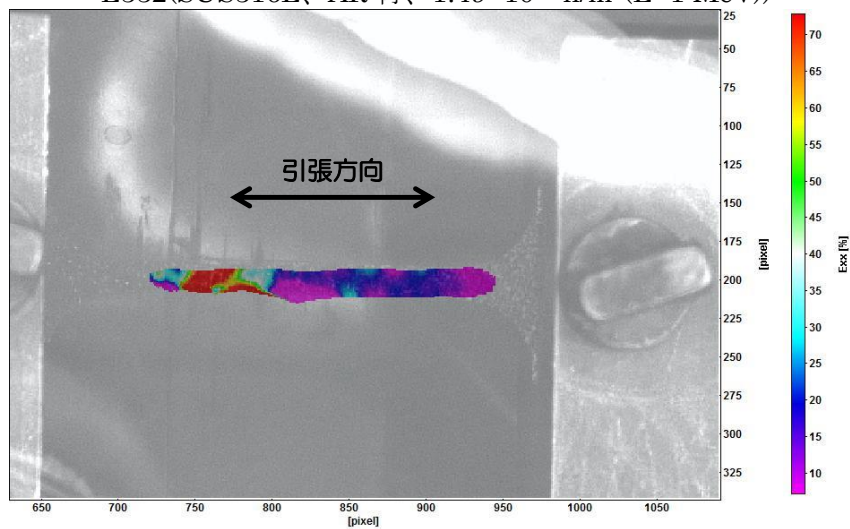


図 3.2.1-20(2) DIC 解析結果(1111frame)
E332(SUS316L、AR 材、 $1.49 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

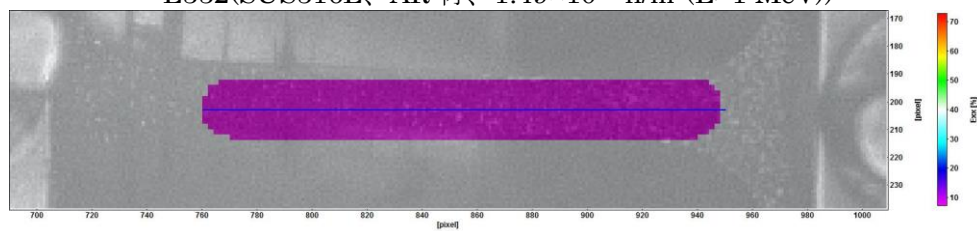


図 3.2.1-21 ひずみ抽出ライン
E332(SUS316L、AR 材、 $1.49 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

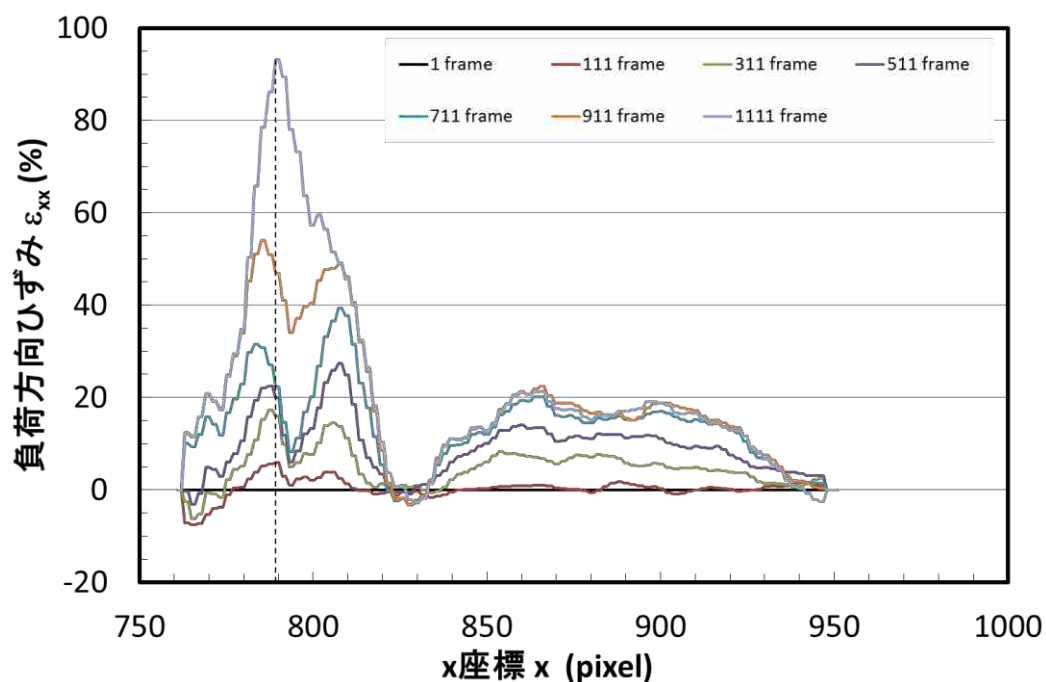


図 3.2.1-22 X 座標における応力負荷方向ひずみ分布
E332(SUS316L、AR 材、 $1.49 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

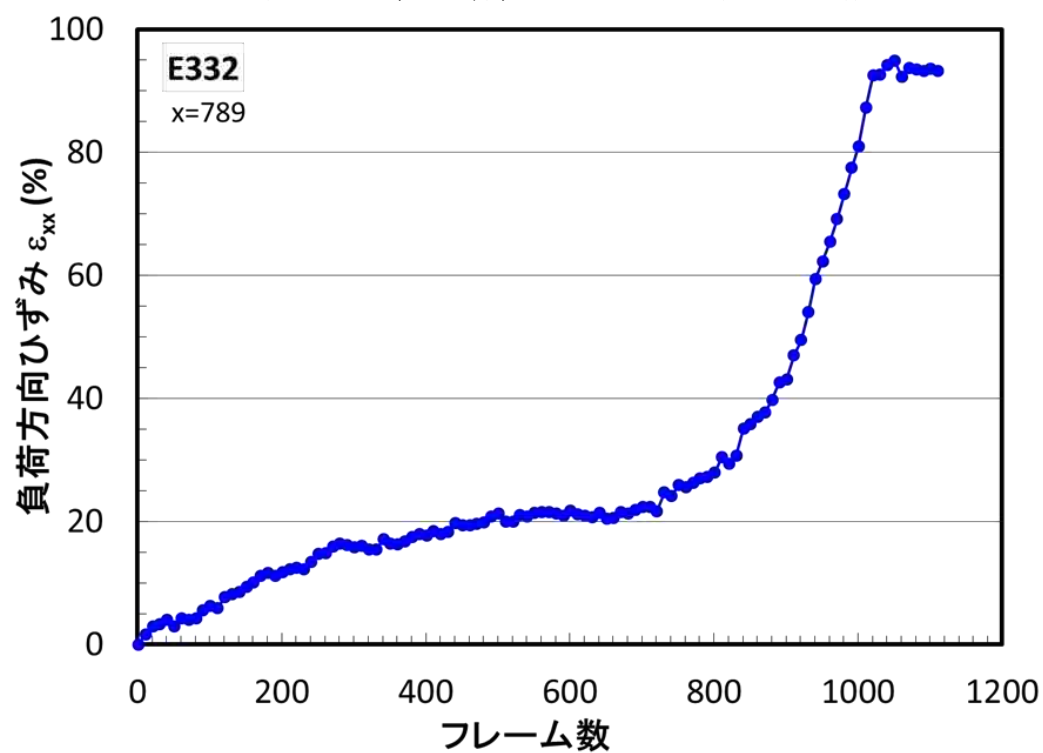


図 3.2.1-23 破断箇所($x=789$)における応力負荷方向ひずみ変化
E332(SUS316L、AR 材、 $1.49 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

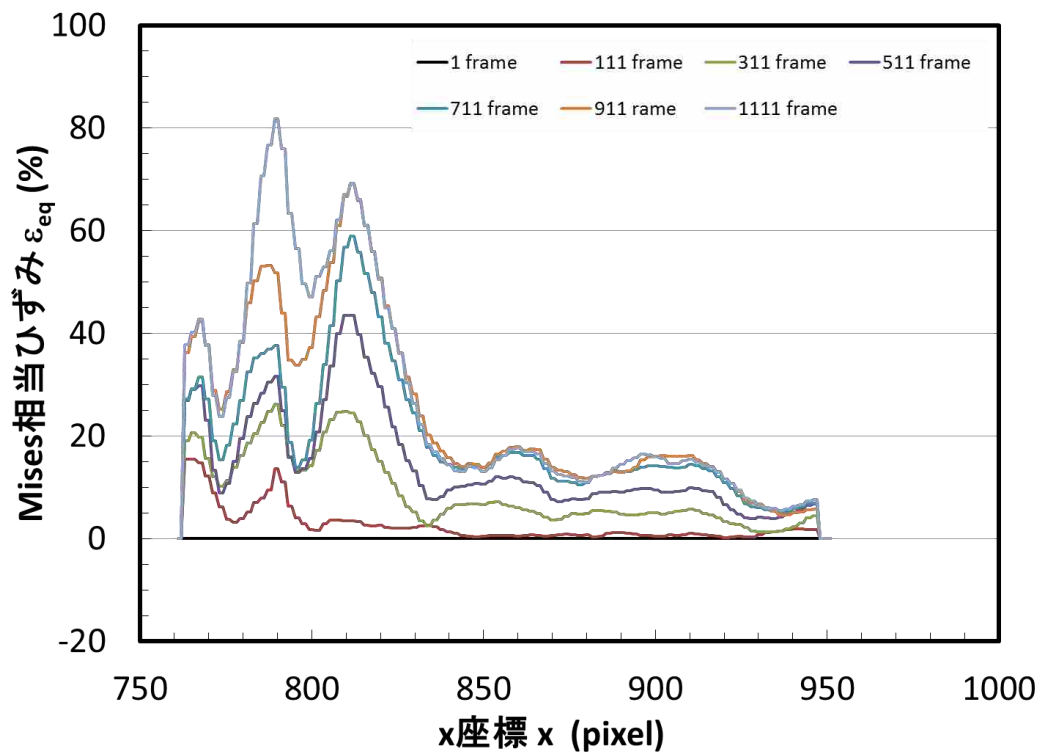


図 3.2.1-24 X 座標における Mises 相当ひずみ分布
E332(SUS316L、AR 材、 $1.49 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

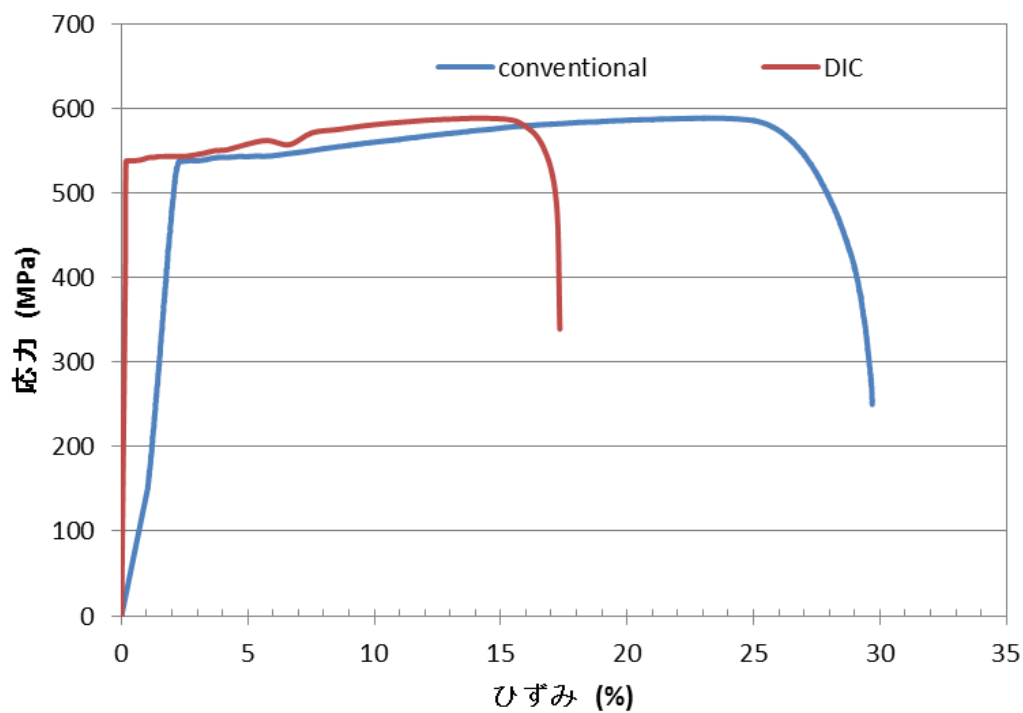


図 3.2.1-25 プルロッド変位と DIC による応力-ひずみ関係比較
E332(SUS316L、AR 材、 $1.49 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

3.2.1.3 塑性ひずみ付与後の変形組織のマイクロ組織観察

(1) 試験方法

既存照射材より、JNES IASCC 事業の残材である SUS316L の溶体化熱処理材(HT)より ID. A237、ミルアニール受入れまま(AR)材より ID. E331 を選択し、塑性ひずみ付与後の変形組織のマイクロ組織観察に供した。試験マトリクスを表 3.2.1-9 に示す。これらの試験片は、いずれも既に引張試験に用いた後の残材である。また平成 26 年度に試験を実施した試験片 ID. A337 に対し、未実施であった変形組織と酸化皮膜のマイクロ観察を実施した。

引張試験後の試験片 E331 及び A237 のつかみ部から微小引張試験片 1 個を加工した。微小引張試験片の形状図を図 3.2.1-26 に、引張試験片からの採取イメージを図 3.2.1-27 に示す。加工した微小引張試験片に室温で約 2%までの塑性ひずみを付与し、そのときの変形挙動について DIC を用いて評価するとともに、ひずみ付与後の表面の変形組織の SEM 観察、EBSD 分析を行った。ひずみ速度は約 2.5×10^{-4} s (0.001 mm/s)とした。その後表面ステップ下のマイクロ組織について、TEM 観察を行った。

また、試験片 A337 は室温で約 2%までの塑性ひずみが付与されたのちに腐食試験に供した微小引張試験片であり、これについても表面ステップ下マイクロ組織の TEM 観察を行った。この試験片形状も図 3.2.1-26 に示す通りである。

表 3.2.1-9 試験マトリクス

試験片 ID	鋼種	試験片 形状	照射量	微小引張 試験片 加工	塑性 ひずみ 付与	SEM EBSD 観察	TEM 観察
							変形 組織
E331	SUS316L (AR)	引張	2.74 dpa 1.65×10 ²⁵ n/m ²	○	○	○	○
A337	SUS316L (HT)		5.20 dpa 3.12×10 ²⁵ n/m ²	—	—	—	○
A237			1.68 dpa 1.01×10 ²⁵ n/m ²	○	○	○	○

凡例 ○：実施、—：実施なし

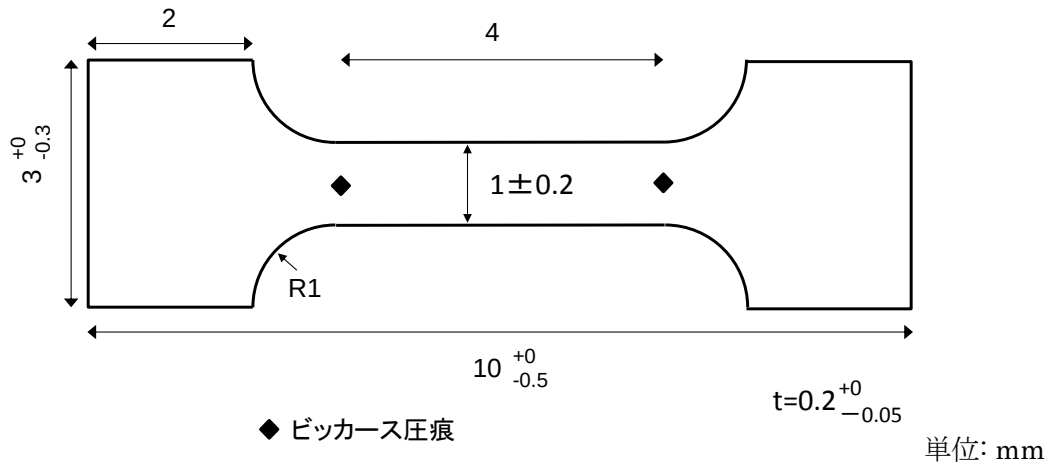


図 3.2.1-26 微小引張試験片形状図

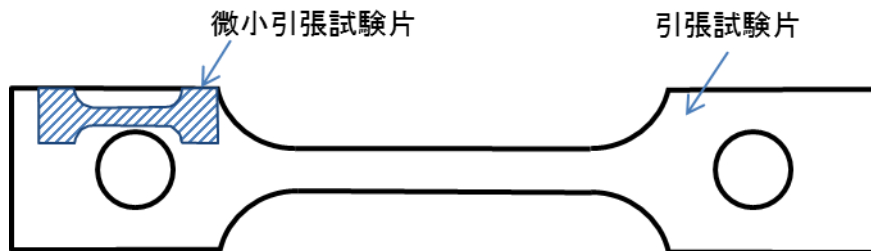


図 3.2.1-27 引張試験片からの微小引張試験片の採取イメージ

(2) 試験結果

① E331

作製した微小試験片外観写真を図 3.2.1-28 に示す。引張試験により得られた応力-ひずみ関係を図 3.2.1-29 に示す。引張試験は、降伏後に約 2%のひずみを付与し試験を停止した。降伏応力は 525 MPa であった。

引張試験後の外観 SEM 写真を図 3.2.1-30 に示す。試験片表面には変形による表面ステップが観察され、試験片のほぼ中央に変形が多く観察された。また、圧痕間の距離から求めたひずみ量は 2.7%であった。

CCD カメラを用いて引張試験中の試験片の画像を約 1 秒ごとに取得した。取得した画像をもとにひずみ挙動の解析を行った。例として、図 3.2.1-31 に示す応力-ひずみ関係の各位置(フレーム数を表示)における、DIC 解析結果を図 3.2.1-32 に示す。引張軸方向のひずみ分布を調べるために、図 3.2.1-31 に示す各位置において、図 3.2.1-33 のライン上のひずみ分布を抽出した。引張軸方向のひずみ分布を図 3.2.1-34 に示す。Y 座標 : 395 付近で最大負荷方向ひずみとなった。最大負荷方向ひずみとなった箇所は、図 3.2.1-33 下の SEM 写真における変形箇所とほぼ一致した。また、図 3.2.1-34 において、負荷方向ひずみ分布は不均一であることがわかった。図 3.2.1-35 に Mises 相当ひずみ分布を示す。引張軸方向に対して Mises 相当ひずみは不均一に分布していた。また、Y 座標 : 375 ~385 の区間では、70 フレームで急激にひずみが上昇するものの、71 フレームから 371 フレームにかけて、Mises 相当ひずみは低下した。これは、試験片と試験片押さえ治具の接触の影響によるものと考えられるが、試験片の平行部以外には変形組織は確認されなかったため、試験への影響は無視できると思われる。

DIC 解析によって得られたひずみ分布から評価した応力-ひずみ関係と、引張試験機のプルロッド変位から評価した応力-ひずみ関係を図 3.2.1-36 に示す。

変形が観察された図 3.2.1-30(3)下の箇所について EBSD 測定を行った。EBSD 測定結果を図 3.2.1-37 に示す。粒界に沿って KAM 値が上昇していることが確認された。さらに、変形が集中した試験片中央部を中心とした広範囲の EBSD 測定を実施した。EBSD 測定結果を図 3.2.1-38 に示す。図 3.2.1-38 には 30 μm $\times$ 30 μm の領域毎の KAM 値の平均値も併せて示した。IQ 像では、変形は試験片中央に集中しているように見えるが、KAM 値の平均では試験片全体にひずみが不均一に分布していた。この結果は、図 3.2.1-35 に示した Mises 相当ひずみの分布と同様の結果と考えられる。

変形におけるミクロ組織を観察するために、図 3.2.1-39 に示すように、粒界を含み同程度の高い KAM 値の箇所である TP1 と TP2 から薄膜試料を作製した。TP1 のミクロ組織を図 3.2.1-40 に示す。TP1 には転位チャネルによって形成された表面ステップが多数観察された。また、図 3.2.1-40(2)に示すように、双晶による変形も観察された。表面ステップを詳細に観察すると、図 3.2.1-40(3)に示すように複数の転位チャネルが発動して高さ 100 nm 程度の表面ステップを形成していることがわかる。図 3.2.1-40(4)に示すよ

うに、左側の結晶粒に形成された表面ステップにより粒界近傍は隆起しており、右側の結晶粒にひずみコントラストを形成したと考えられる。これにより、図 3.2.1-40(5)に示すように右側の結晶粒には双晶が形成されたと思われる。

TP2 のマイクロ組織を図 3.2.1-41 に示す。TP2 にも転位チャネルにより形成された表面ステップが観察された。左側の結晶粒に転位チャネルが多く観察されるものの、明瞭な表面ステップは 2 つのみである。粒界付近には高さ 200 nm 程度の表面ステップが形成されており図 3.2.1-41(4)から分かるように、右側の結晶粒にひずみコントラストを形成していた。TP2 では表面ステップは観察されたものの、TP1 と比較してその頻度は極めて低い。図 3.2.1-39 に示したように、TP1 は小さな表面ステップを多数含む箇所であるのに対して、TP2 は粗大な表面ステップが 1 つ含むのみであった。

TP1、TP2 とともに、変形は左側の結晶粒に多く、また、右側の結晶粒の粒界近傍にひずみコントラストが観察された。これは、左側の結晶粒の変形を右側の結晶粒がひずむことで変形を緩和したためと考えられる。



図 3.2.1-28 微小引張試験片外観写真
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

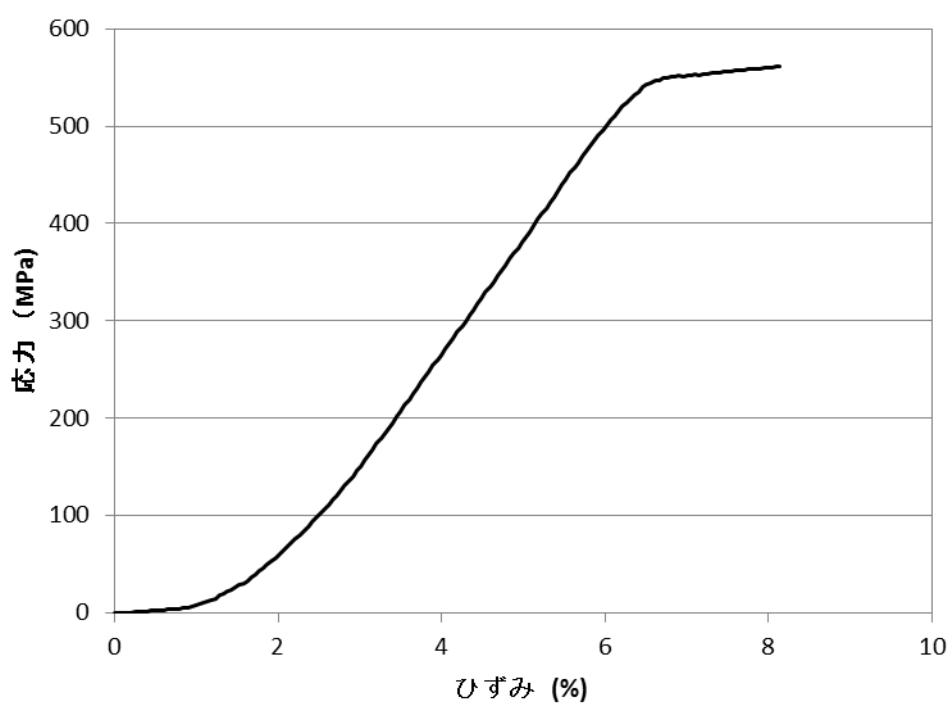


図 3.2.1-29 応力ひずみ関係
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

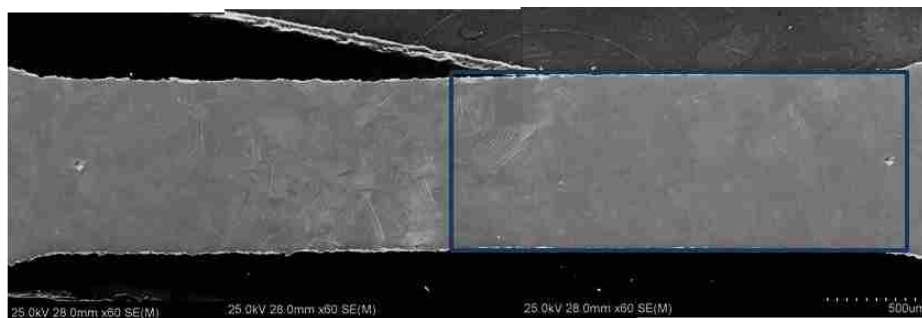


図 3.2.1-30(1) 引張試験後の SEM 写真
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

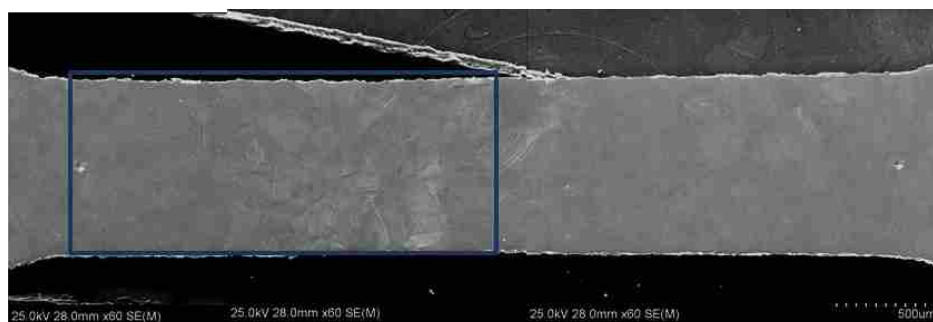


図 3.2.1-30(2) 引張試験後の SEM 写真
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

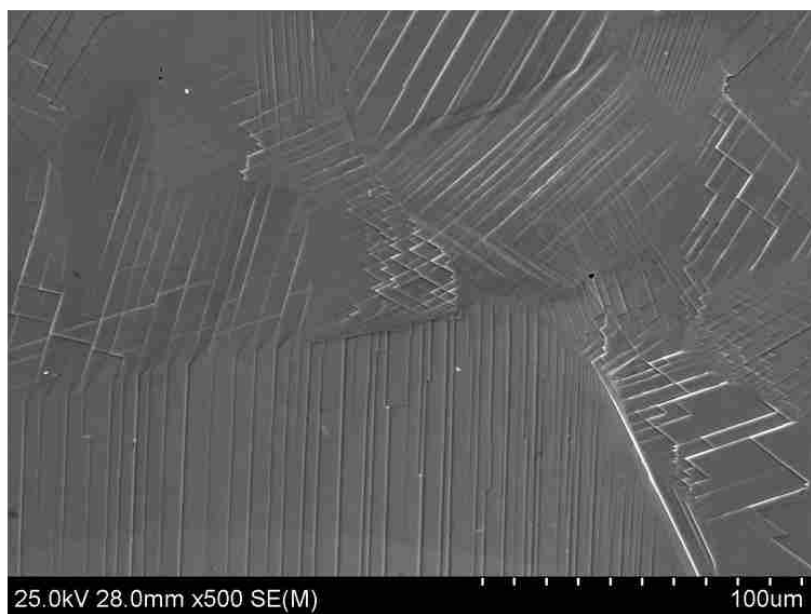
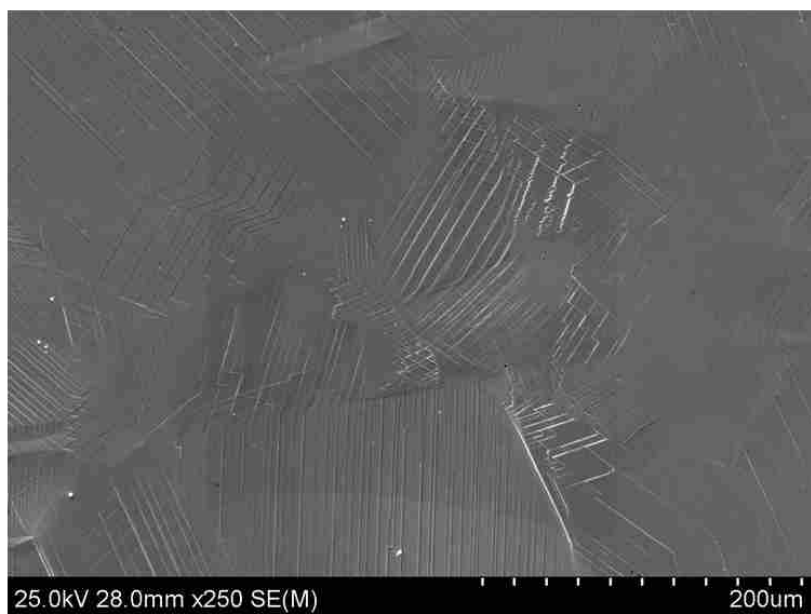
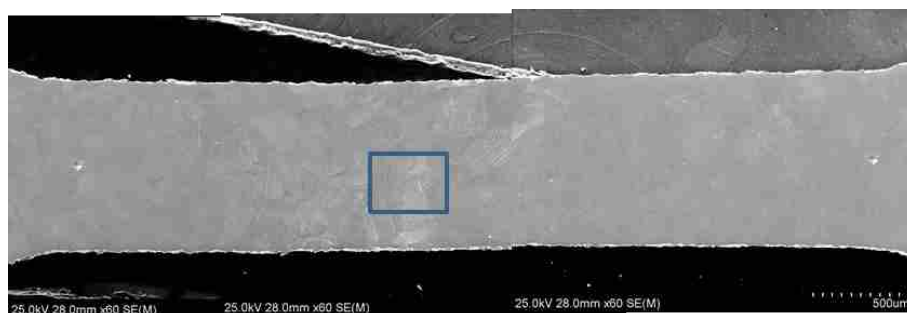


図 3.2.1-30(3) 引張試験後の SEM 写真
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

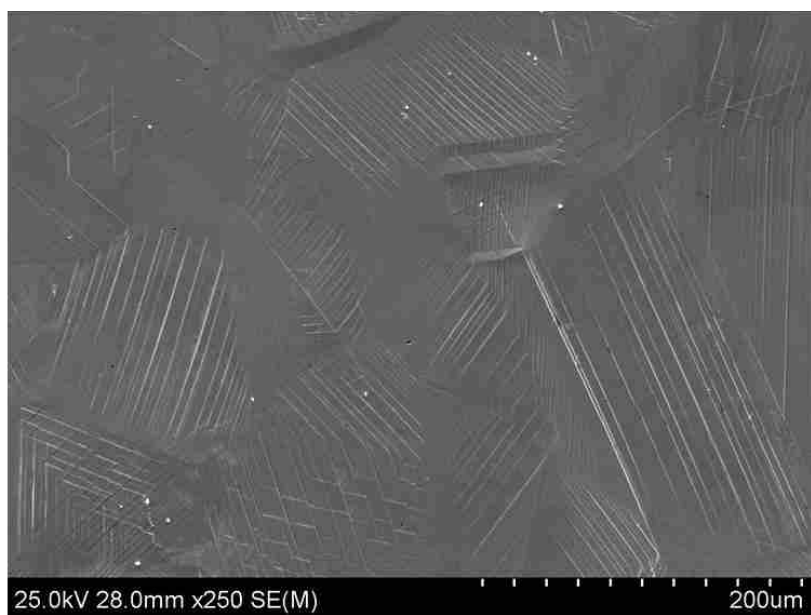
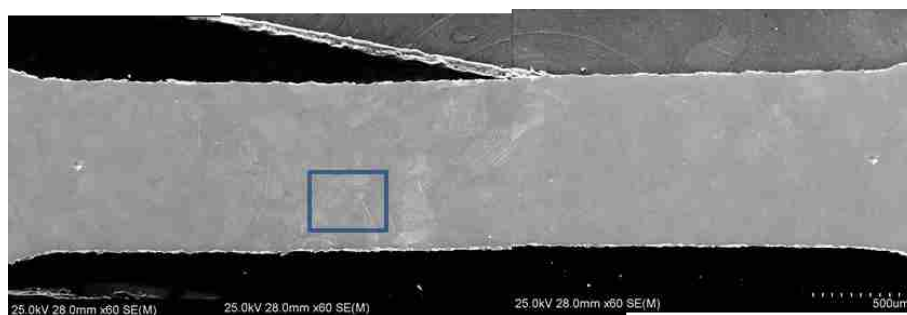


図 3.2.1-30(4) 引張試験後の SEM 写真
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

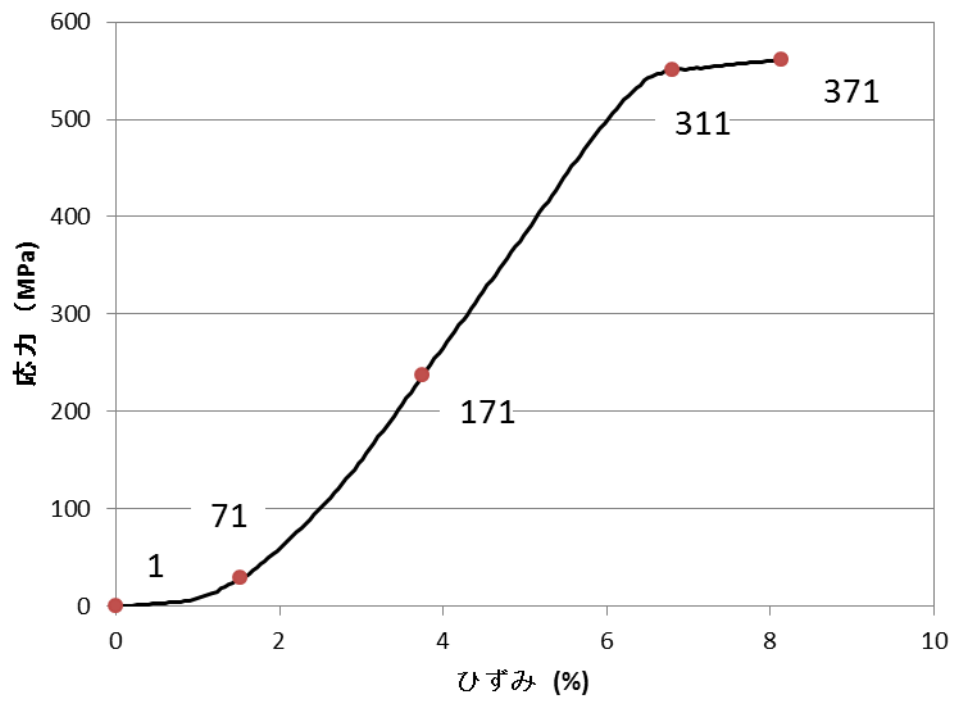


図 3.2.1-31 応力-ひずみ関係における DIC の画像抽出箇所
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

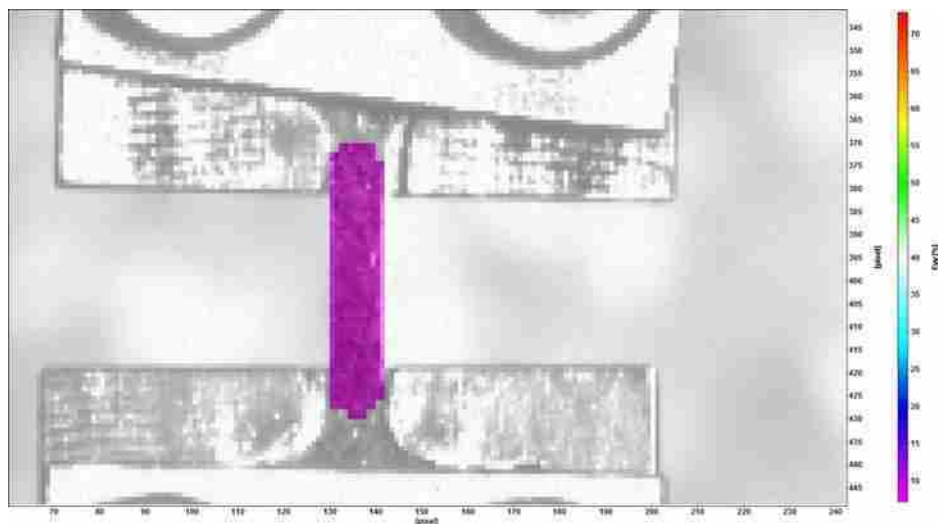


図 3.2.1-32(1) DIC 解析結果 (1frame)
E331(SUS316L、AR 材、 1.65×10^{25} n/m²(E>1 MeV))

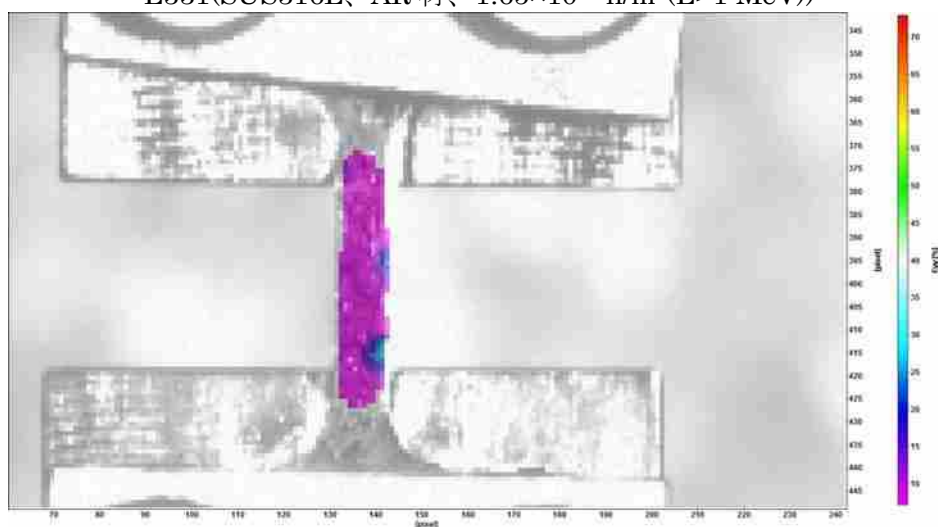
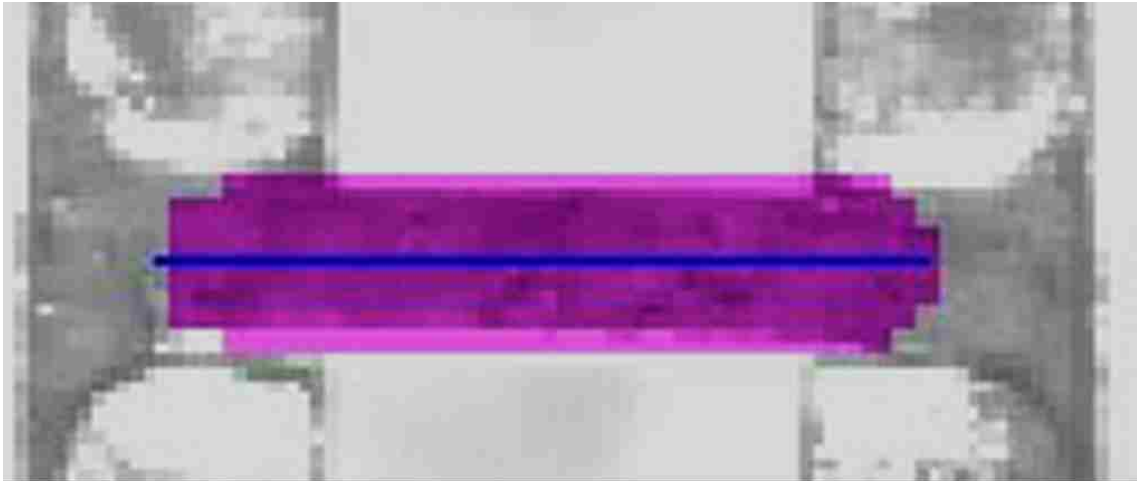
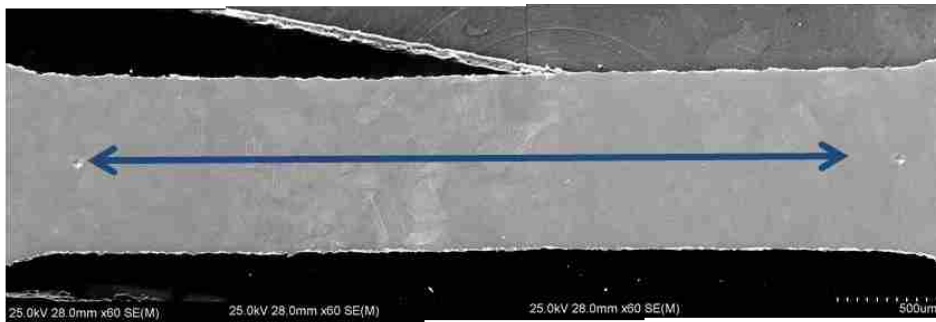


図 3.2.1-32(2) DIC 解析結果 (371frame)
E331(SUS316L、AR 材、 1.65×10^{25} n/m²(E>1 MeV))



ひずみ分布抽出ライン (CCDカメラ)



ひずみ分布抽出ライン (SEM写真)

図 3.2.1-33 ひずみ抽出ライン
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

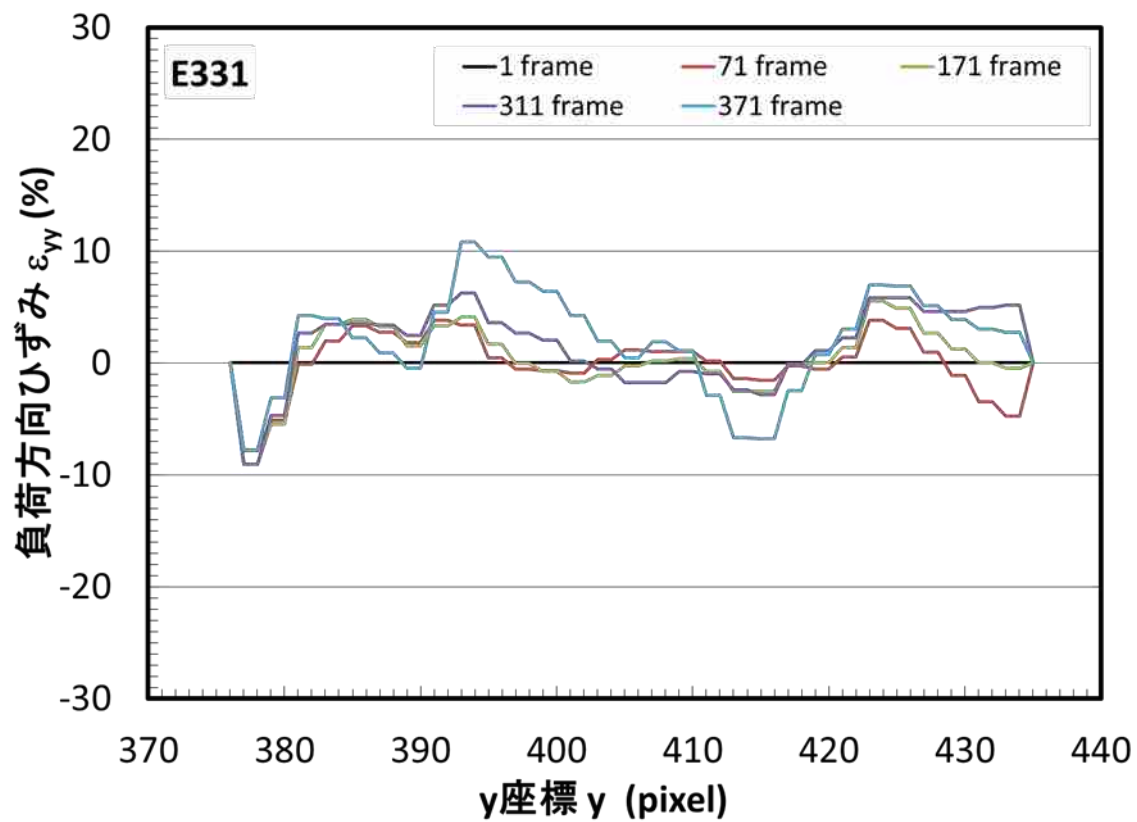


図 3.2.1-34 Y座標における負荷方向ひずみ分布
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

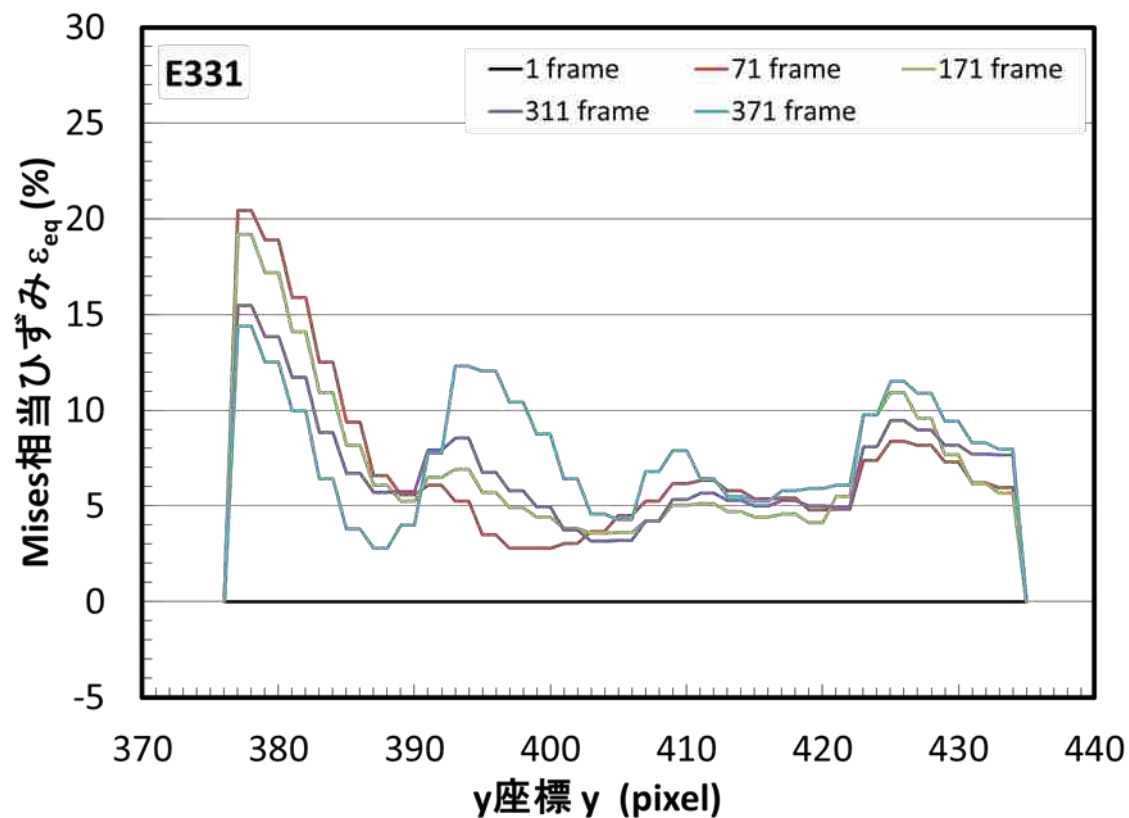


図 3.2.1-35 Y座標における Mises 相当ひずみ分布
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

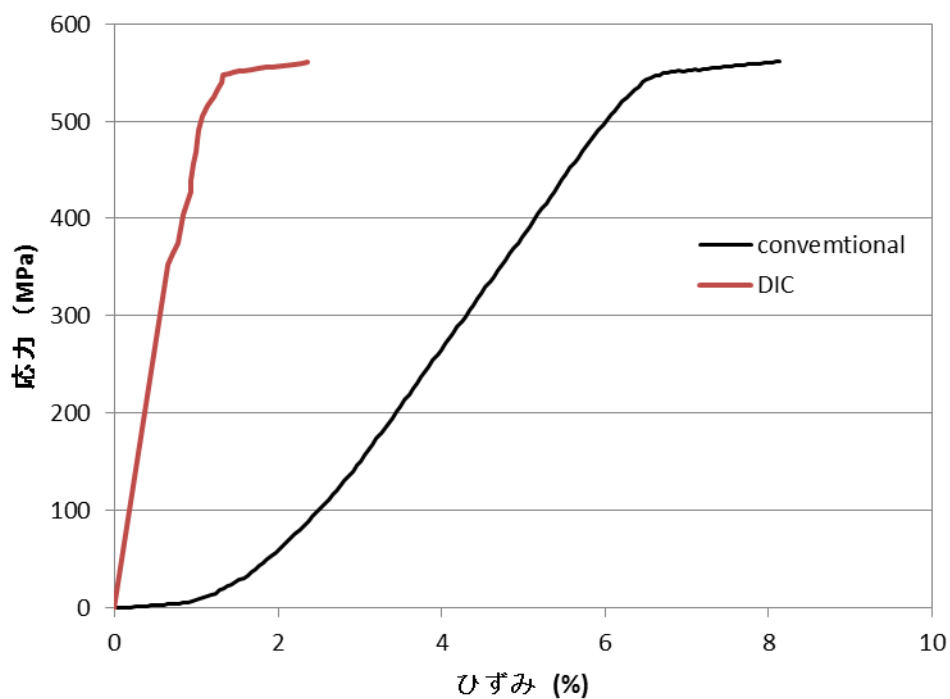


図 3.2.1-36 プルロッド変位と DIC による応力-ひずみ関係比較
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

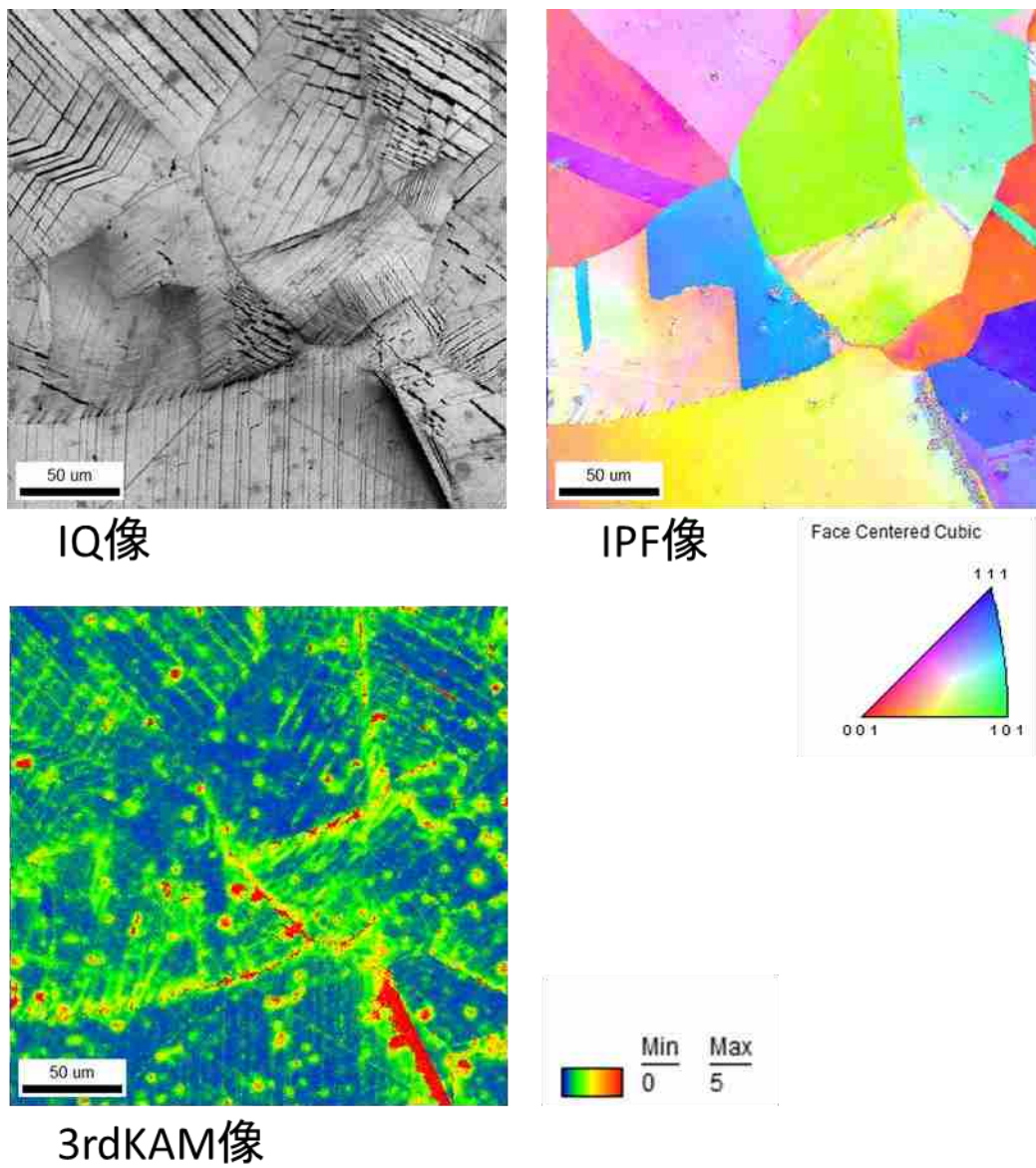
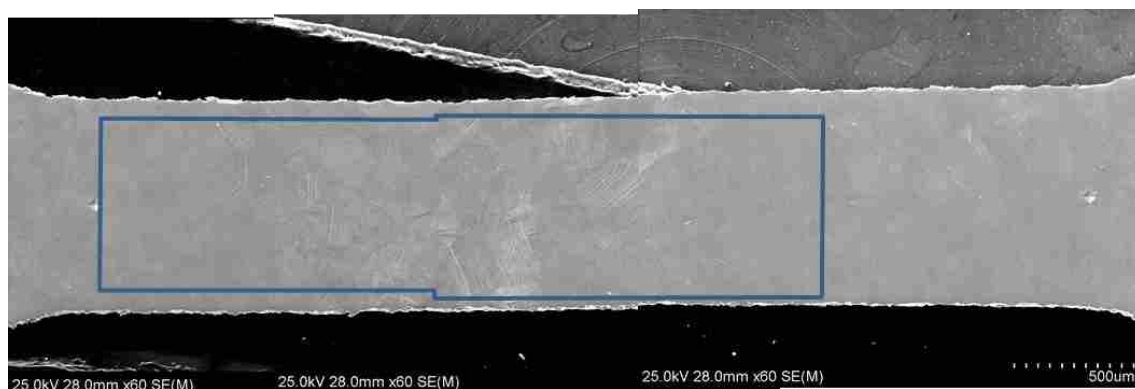


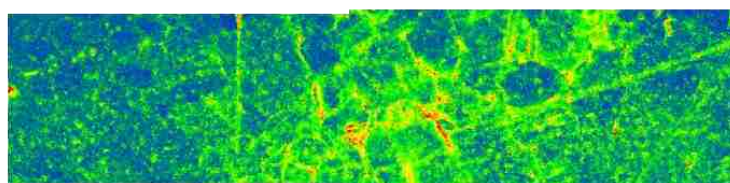
図 3.2.1-37 引張試験後の EBSD 測定結果
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)



IQ像



IPF像



1stKAM像



KAM	
0	
1	
2	
3	
4	
5	

KAM平均 (30μm X 30μm 平均)

図 3.2.1-38 引張試験後における変形部の EBSD 測定結果
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

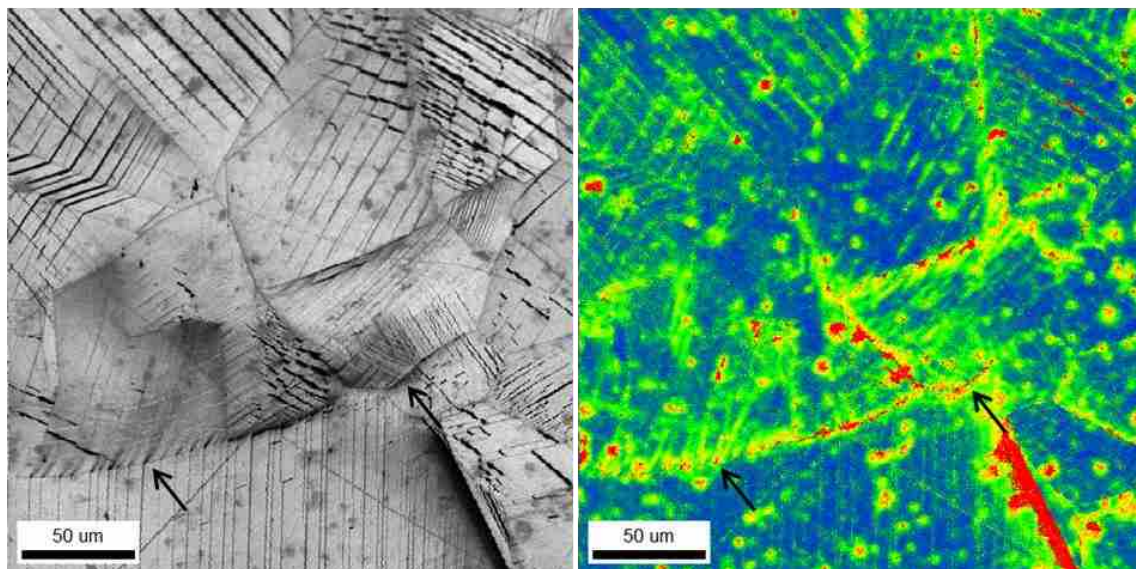
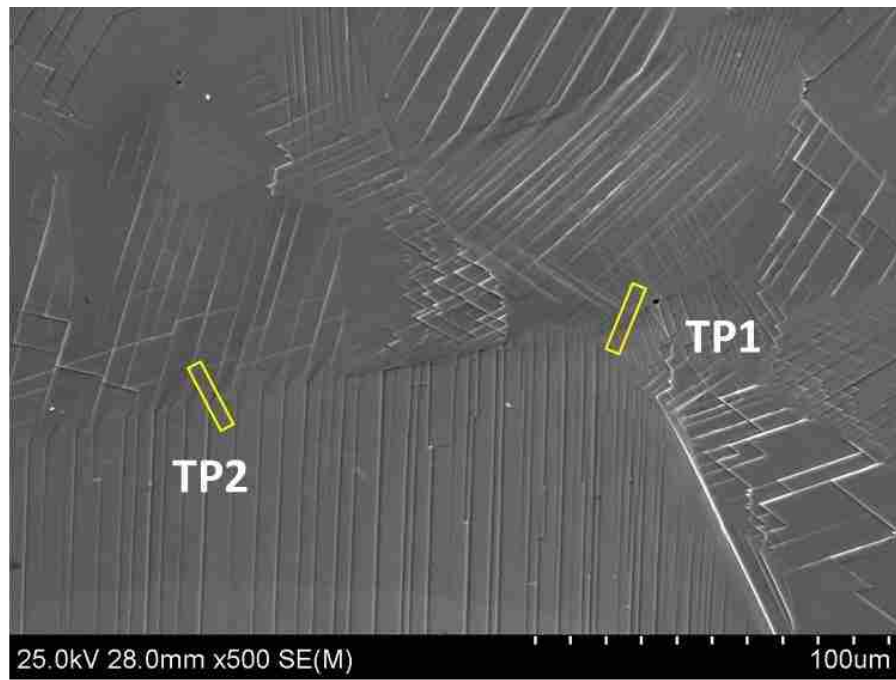


図 3.2.1-39 変形組織観察箇所
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

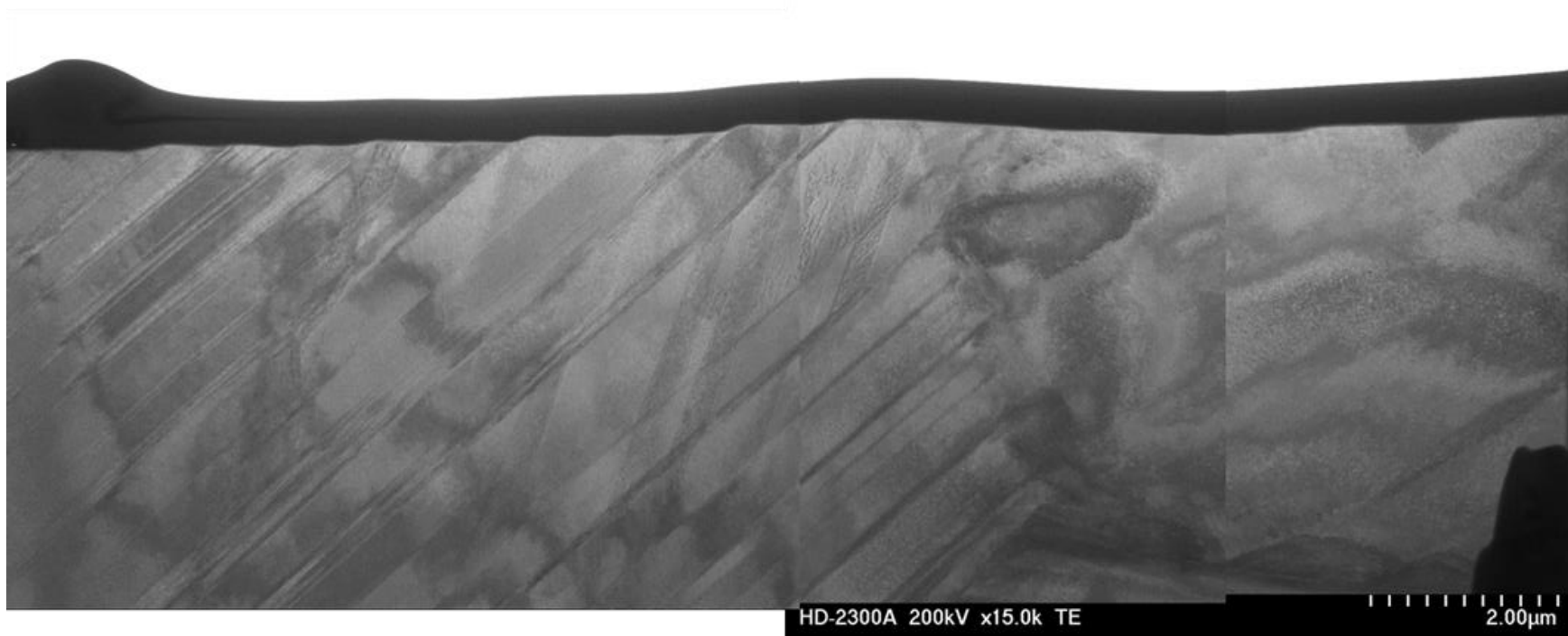


図 3.2.1-40(1) 引張試験後の変形組織(TP1)
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$))

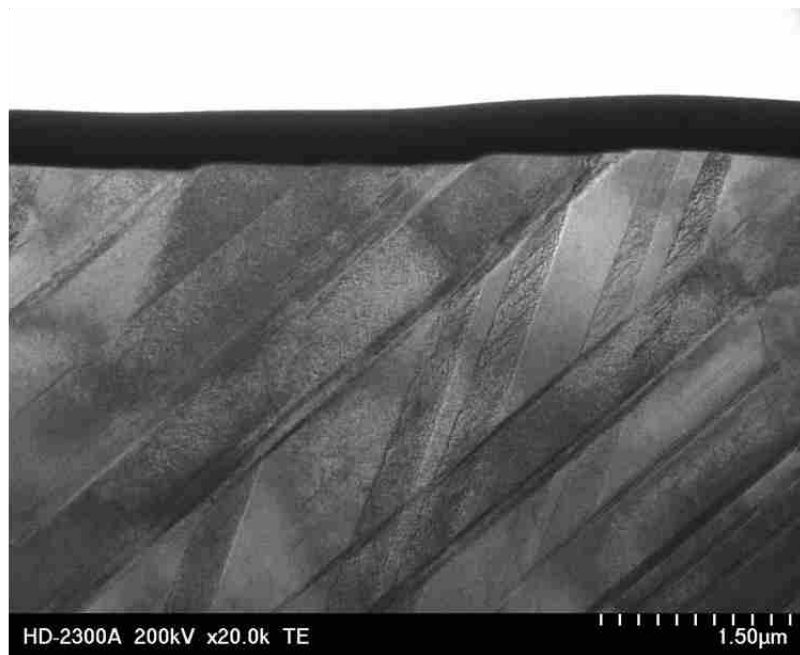


図 3.2.1-40(2) 引張試験後の変形組織(TP1)
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$))

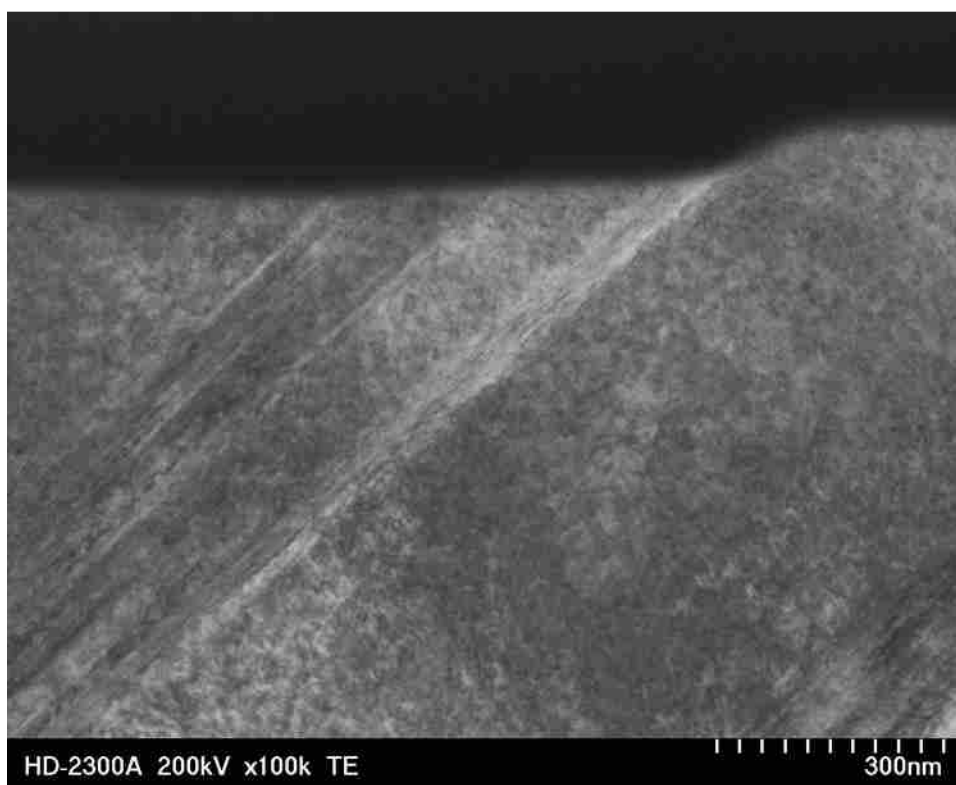
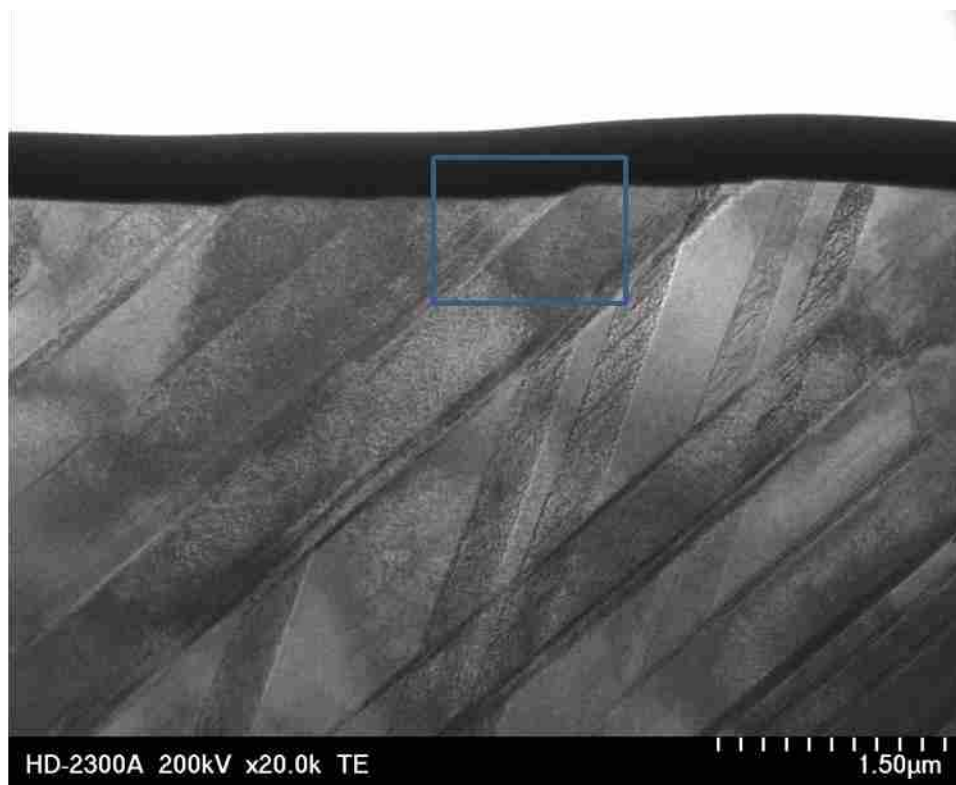


図 3.2.1-40(3) 引張試験後の変形組織(TP1)
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$))



図 3.2.1-40(4) 引張試験後の変形組織(TP1)
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$))

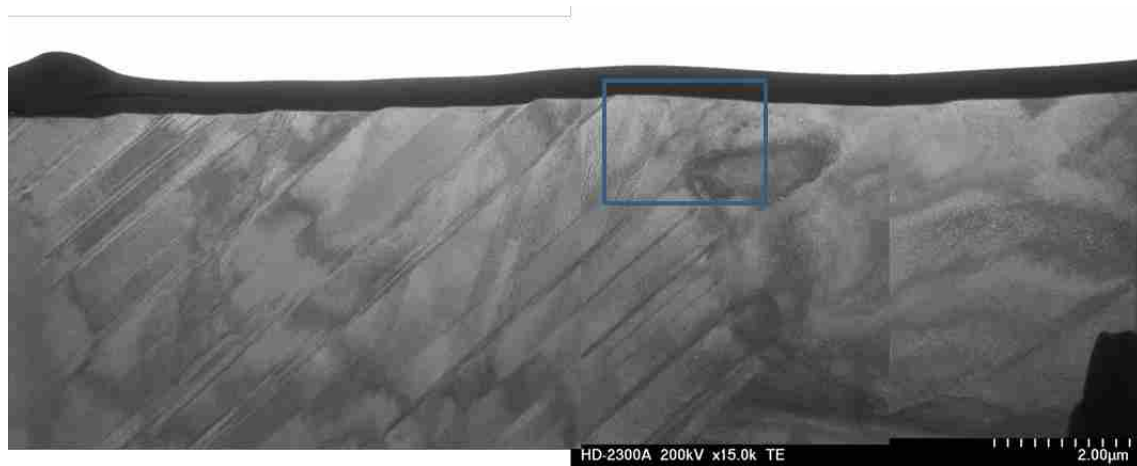


図 3.2.1-40(5) 引張試験後の変形組織(TP1)
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$))

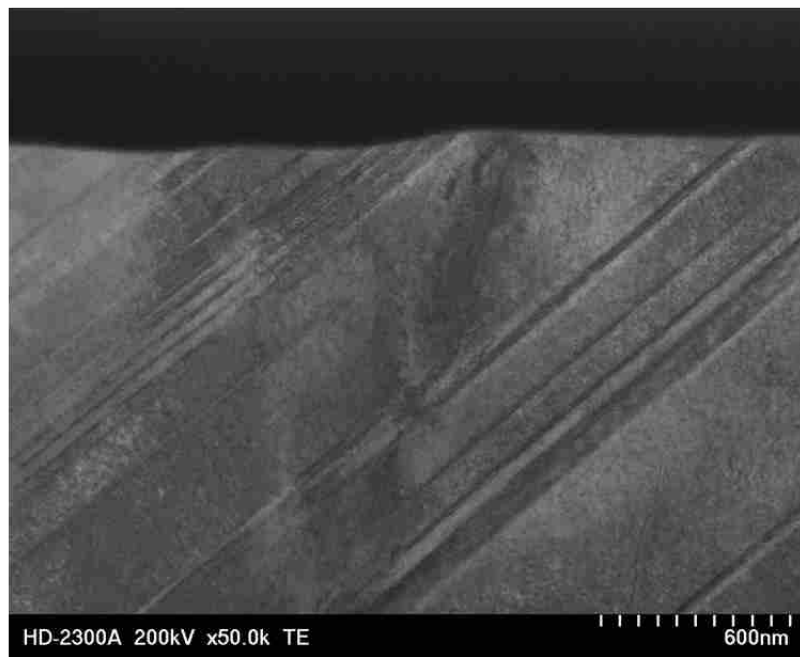


図 3.2.1-40(6) 引張試験後の変形組織(TP1)
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

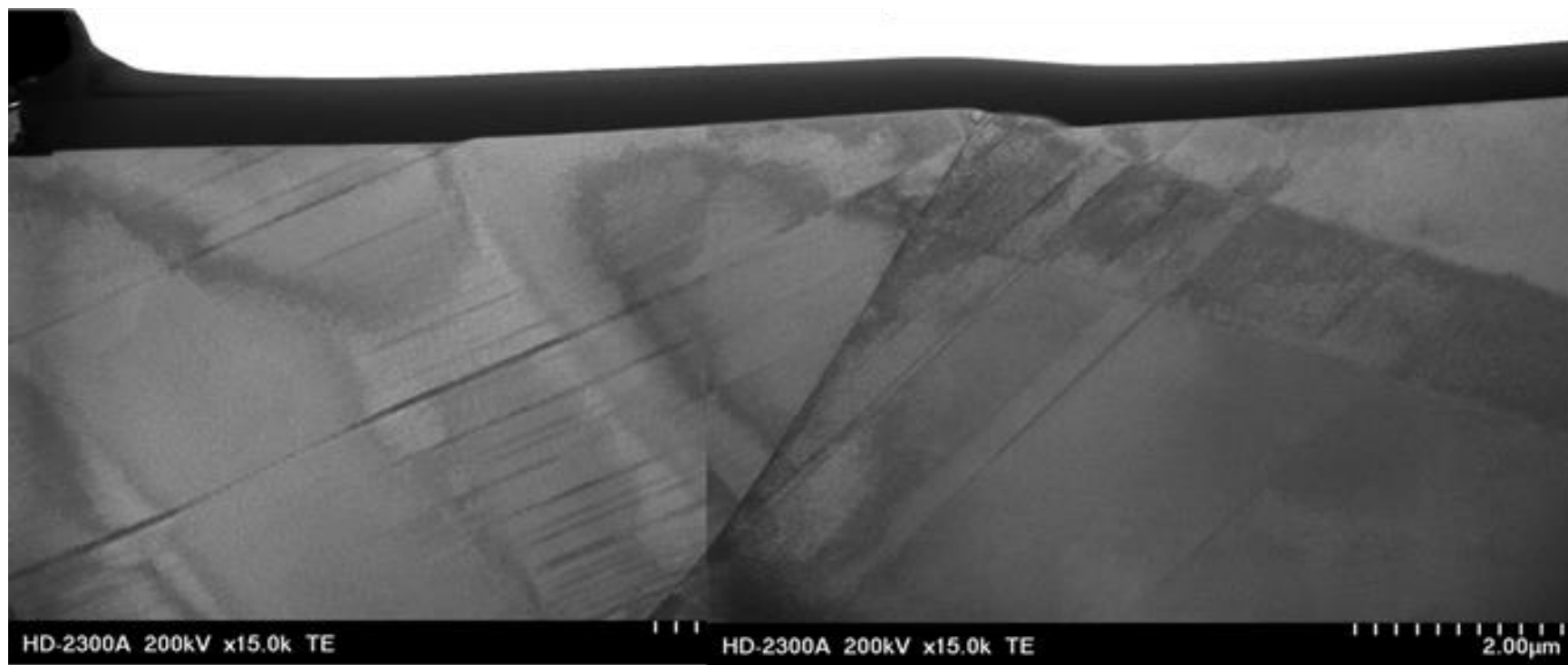


図 3.2.1-41(1) 引張試験後の変形組織(TP2)
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)



図 3.2.1-40(2) 引張試験後の変形組織(TP2)
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$))

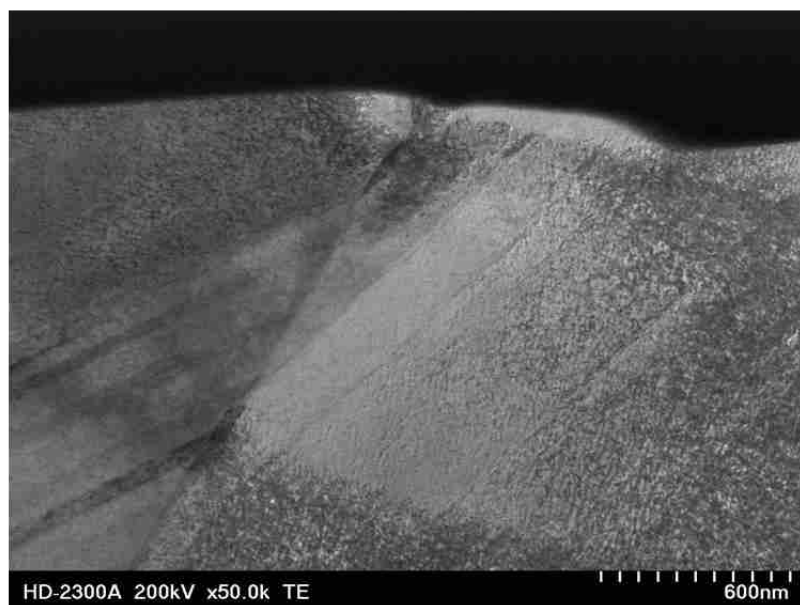


図 3.2.1-40(3) 引張試験後の変形組織(TP2)
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$))

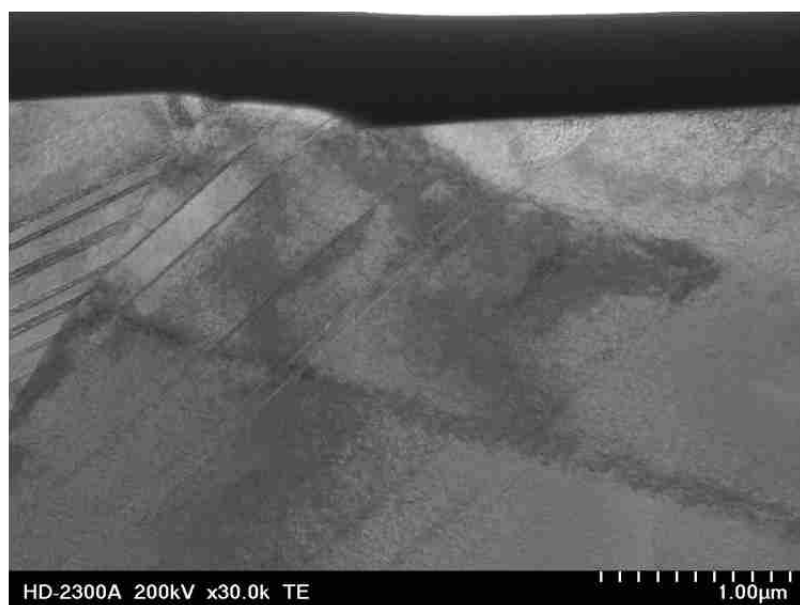
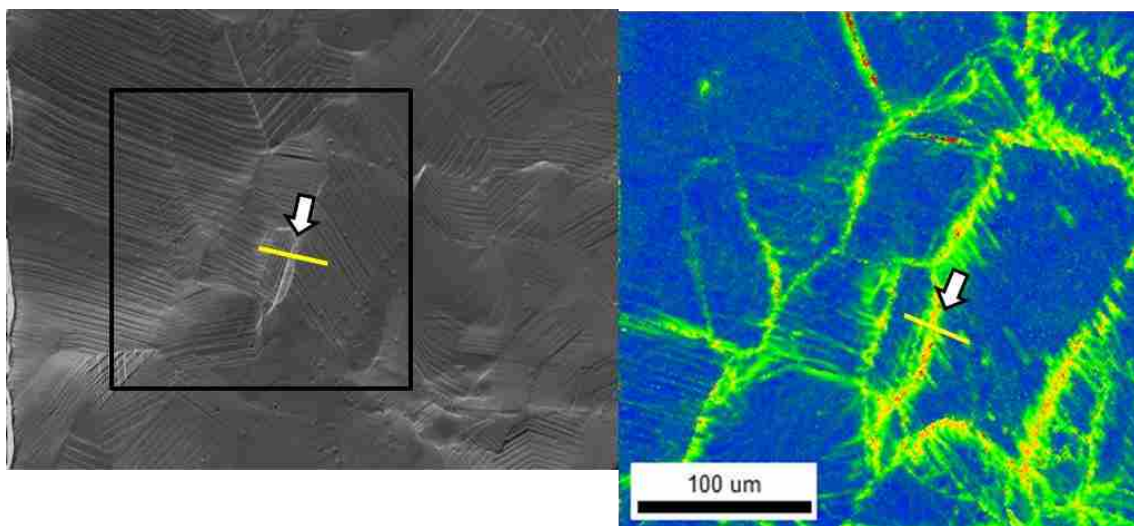


図 3.2.1-40(4) 引張試験後の変形組織(TP2)
E331(SUS316L、AR 材、 $1.65 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$))

② A337

室温で2%付与した後に、高温腐食試験を実施した A337 の微小引張試験片から薄膜試料を採取し、ミクロ組織観察を行った。図 3.2.1-42 に薄膜試料の採取箇所および観察箇所を示す。薄膜採取箇所は、SEM を用いて酸化皮膜を断面から観察した箇所の近傍とした。ミクロ組織観察面は赤破線で示す断面であり、観察方向は断面奥方向からである。

ミクロ組織を図 3.2.1-43 に示す。粒界を含む変形部について、TE 像と ZC 像を併せて示した。図 3.2.1-44 に酸化皮膜厚さ測定結果を示す。酸化皮膜測定範囲を上にした。酸化皮膜は 30~150 nm の範囲の厚さであり、平均厚さは 82 nm であった。図 3.2.1-45 に詳細な変形組織観察結果を示す。図 3.2.1-45(1)は粒界近傍の左側の結晶粒に生じた双晶であり、表面には表面ステップを形成していない。図 3.2.1-45(2)は左側の結晶粒に、転位チャネルによって形成された 2 つの表面ステップが、表面に 500 nm 程度の凸部を発生させていた。図 3.2.1-45(3)は粗大な表面ステップとなった粒界近傍であり、転位チャネルと双晶が多数生じることで 1.5 μm 程度の粗大表面ステップを形成していた。この視野の EDS による組成マップを図 3.2.1-46 に示す。図 3.2.1-46(1)はカウント数であり、図 3.2.1-46(2)は原子%によるマップである。酸化皮膜には Fe、Cr、Ni が含まれていると考えられる。粒界表面ステップのミクロ組織をさらに拡大して図 3.2.1-47 に示す。図 3.2.1-47(2)に示すように、内層酸化皮膜はポーラスであるように見える。図 3.2.1-47(2)の視野から EDS による組成マップを取得し図 3.2.1-48 に示す。図 3.2.1-48(1)はカウント数であり、図 3.2.1-48(2)は原子%によるマップである。図 3.2.1-48(2)を見ると、粒界表面ステップ上には Ni 濃縮層が見られ、Cr 量は少なくなっているように見える。一方、粒界表面ステップでない箇所では内装部に Cr が濃縮していて、内層には Cr 酸化物、外層には Fe-Ni 酸化物が生成している。一般的に、BWR 環境中で腐食されたオーステナイトステンレス鋼表面の酸化皮膜は、内層が Cr 系酸化物、外層が Fe-Ni 系酸化物の 2 層構造となる。しかし、図 3.2.1-48(2)に示すように、粒界表面ステップ部では、従来知見と異なる酸化皮膜が形成していた。



ミクロ組織観察方向

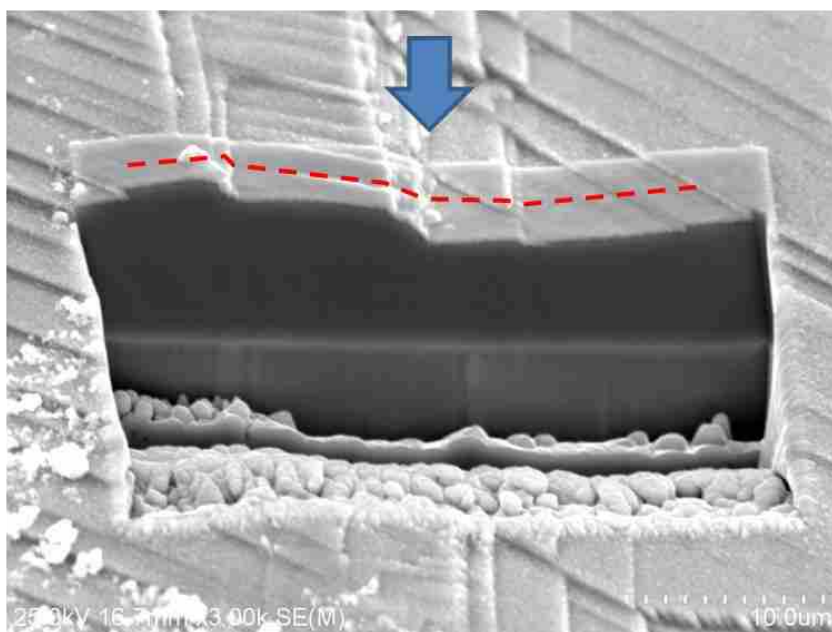


図 3.2.1-42 腐食試験後のミクロ組織観察結果観察箇所
A337(SUS316L、HT 材、 $3.12 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

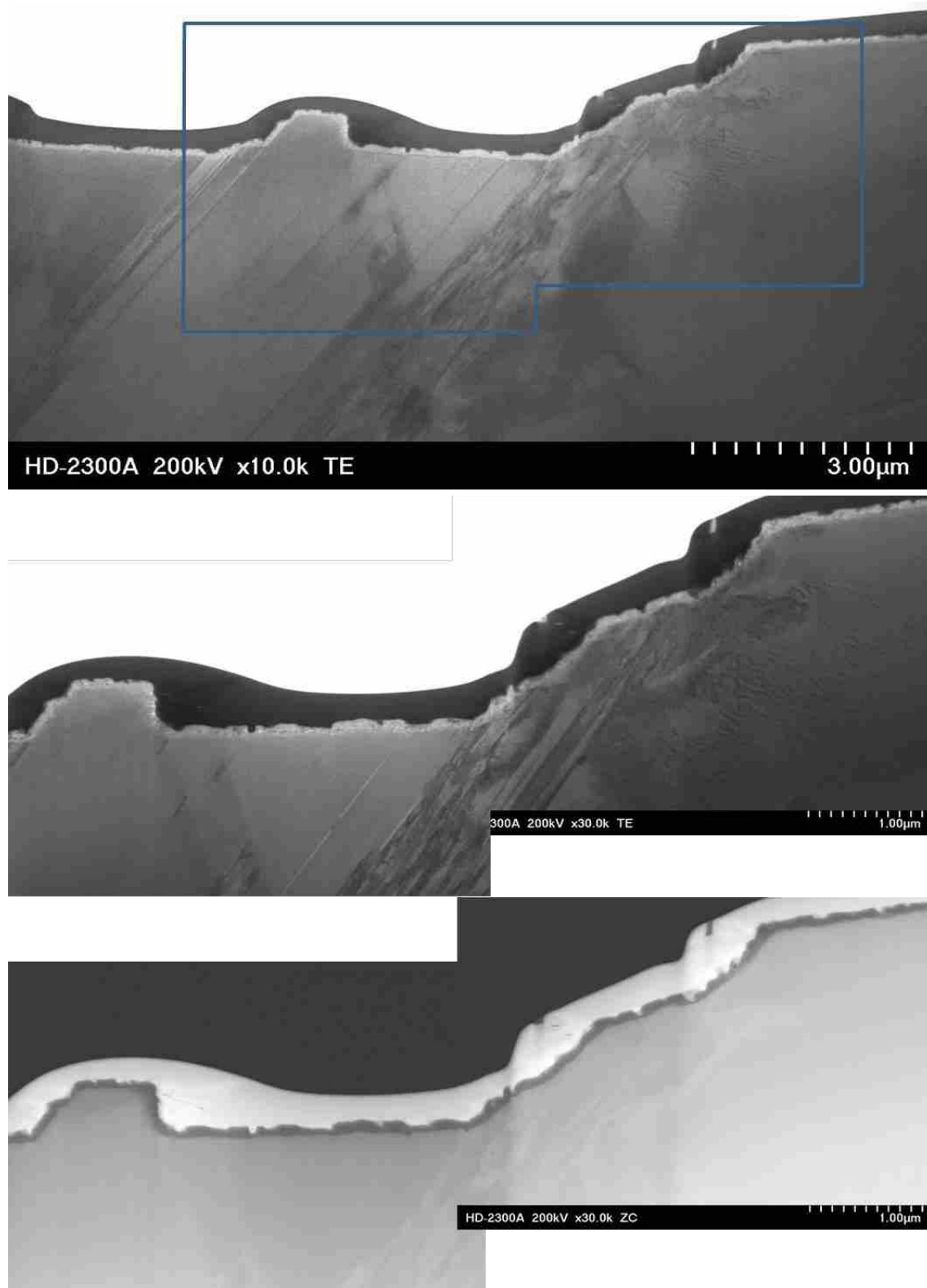


図 3.2.1-43 腐食試験後のマイクロ組織観察結果
A337(SUS316L、HT 材、 $3.12 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

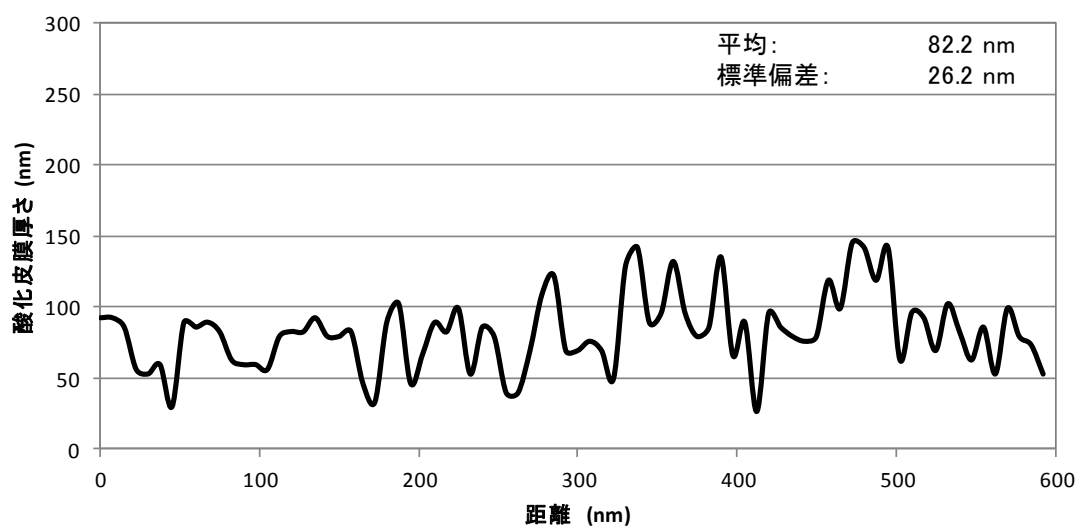
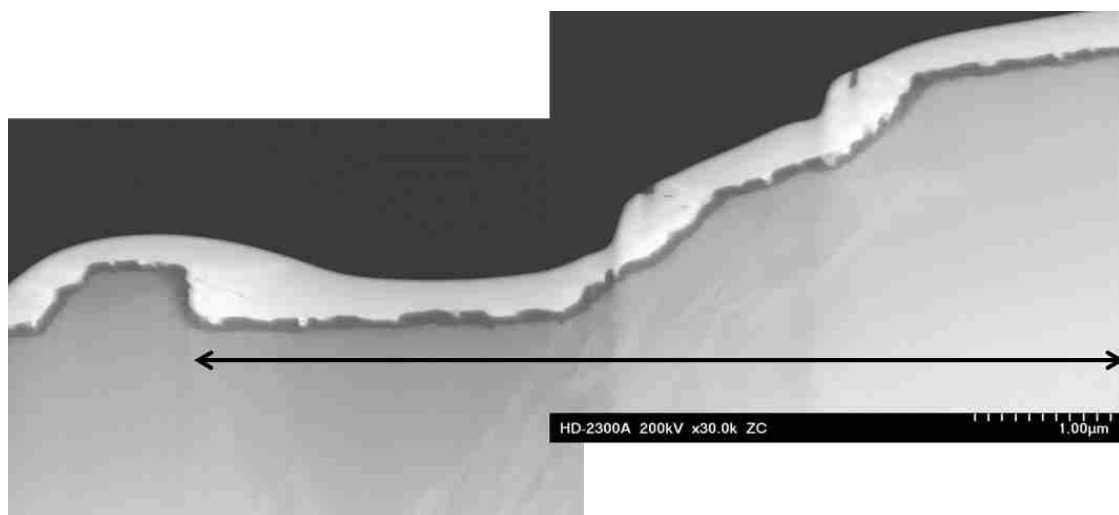


図 3.2.1-44 腐食試験後の酸化皮膜厚さ
A337(SUS316L、HT 材、 $3.12 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

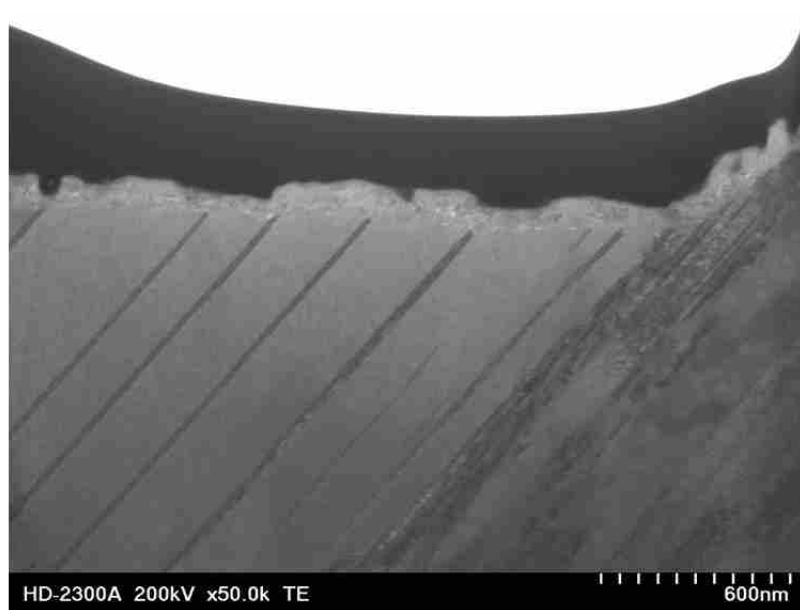
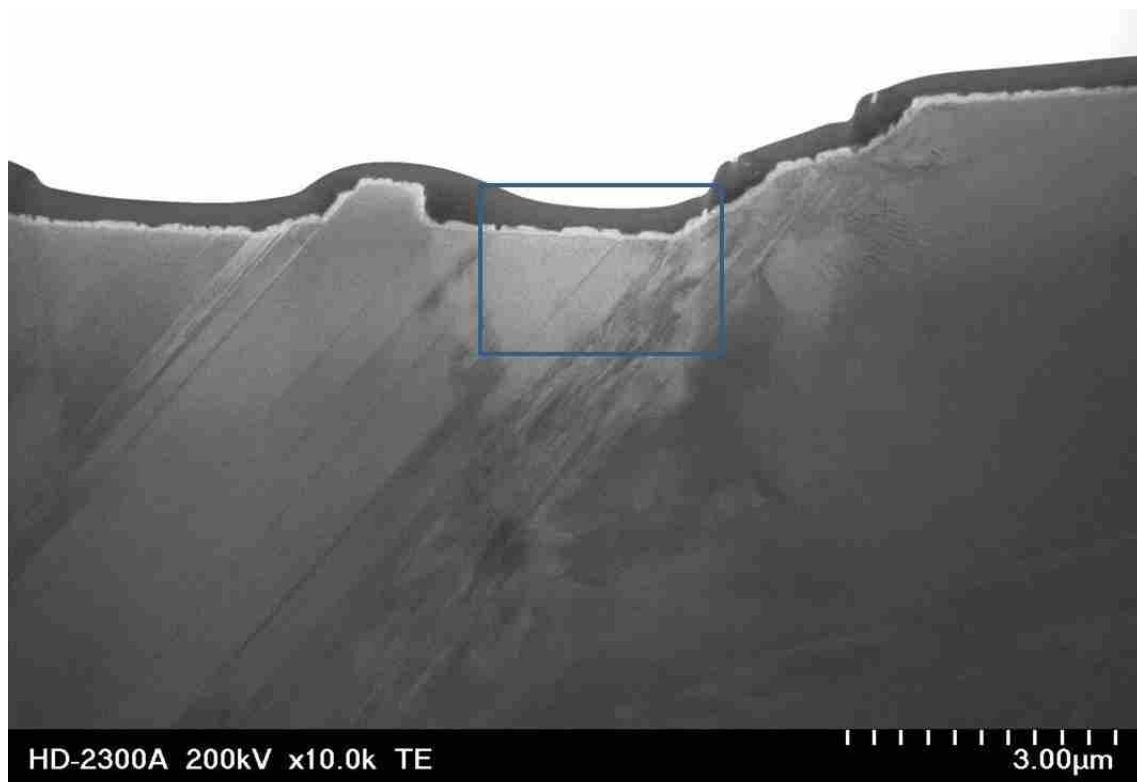


図 3.2.1-45(1) 腐食試験後の詳細マイクロ組織
A337(SUS316L、HT 材、 $3.12 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

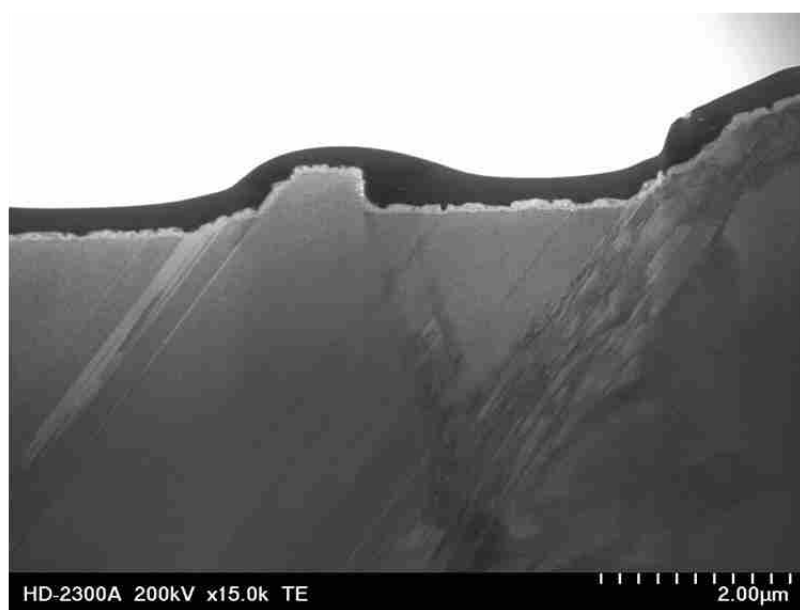
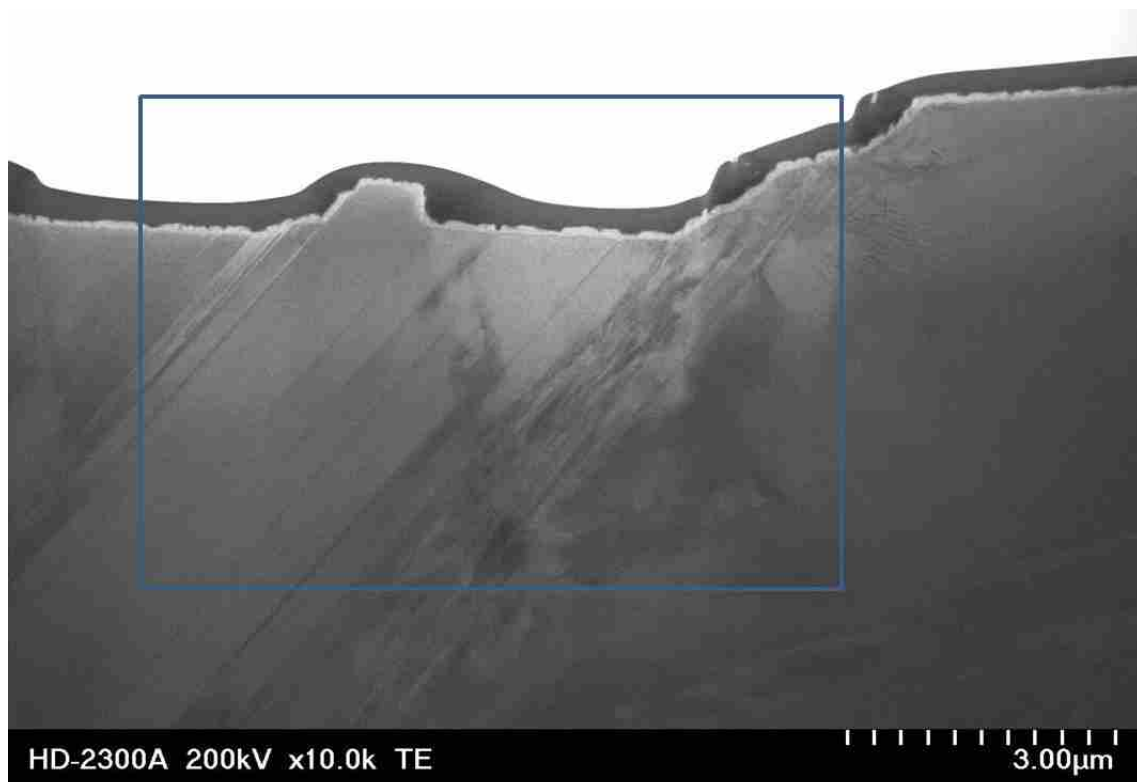


図 3.2.1-45(2) 腐食試験後の詳細マイクロ組織
A337(SUS316L、HT 材、 $3.12 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

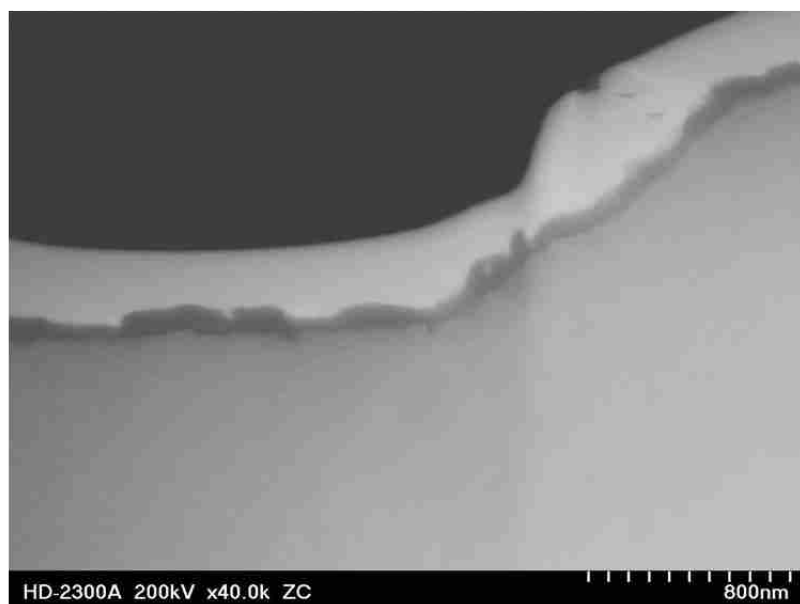
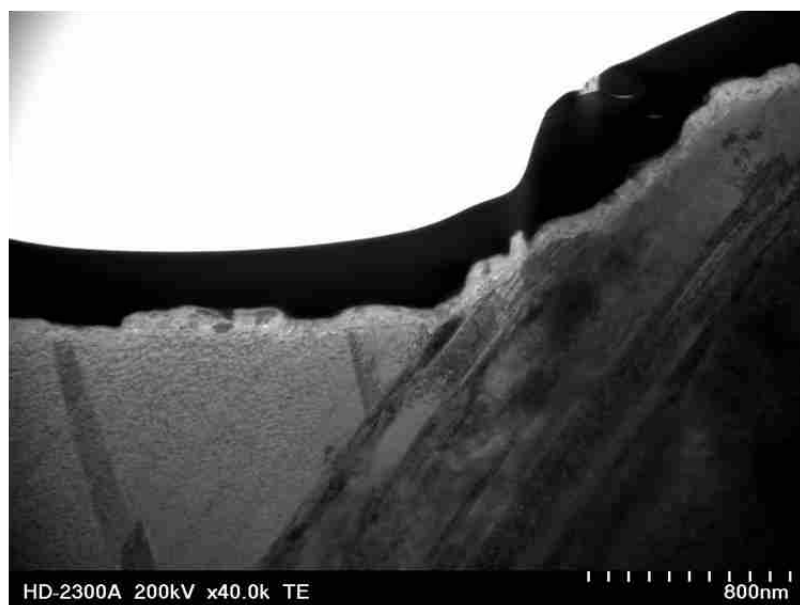


図 3.2.1-45(3) 腐食試験後の詳細マイクロ組織
A337(SUS316L、HT 材、 $3.12 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

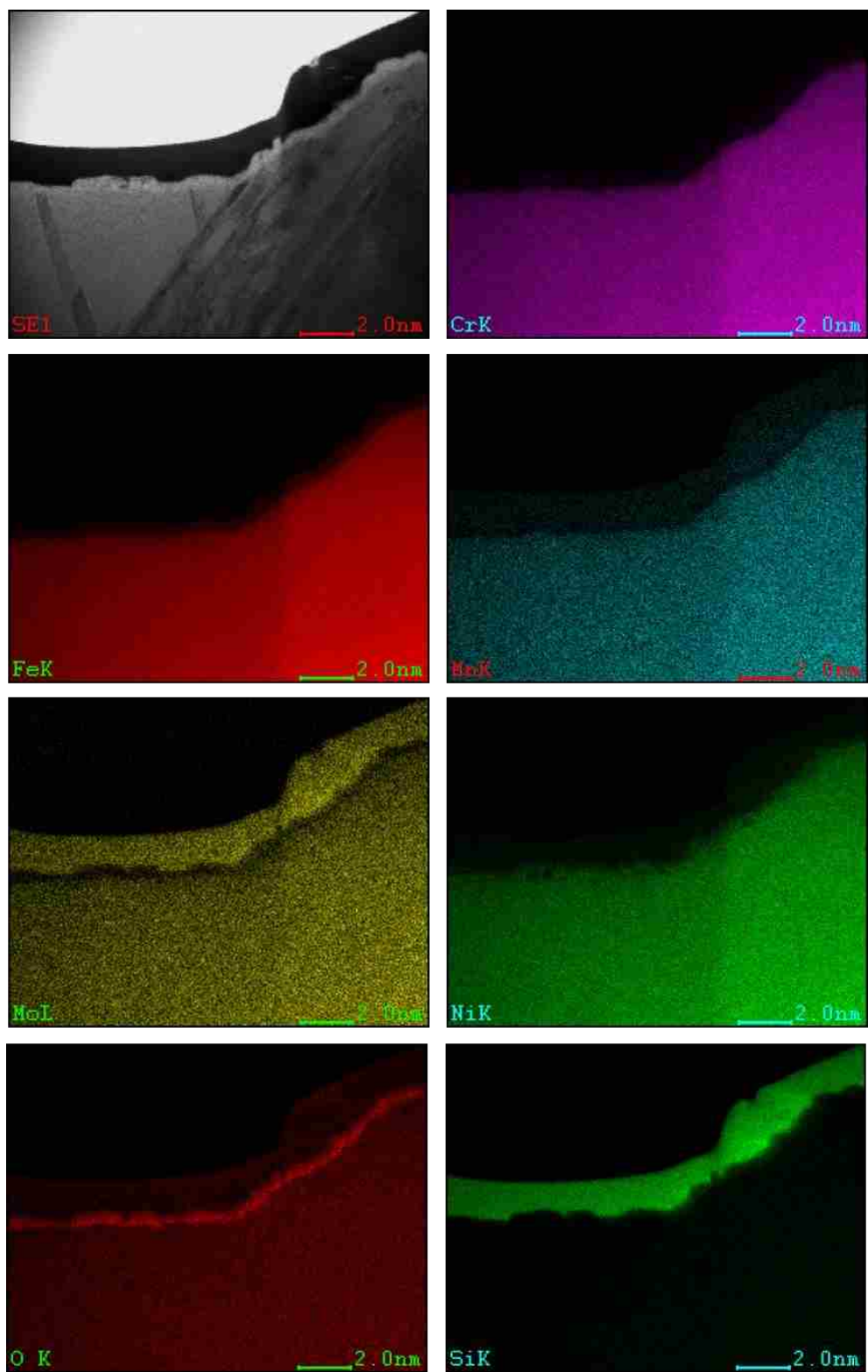


図 3.2.1-46(1) 腐食試験後における皮膜部組成マップ(カウント数)
A337(SUS316L、HT 材、 $3.12 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

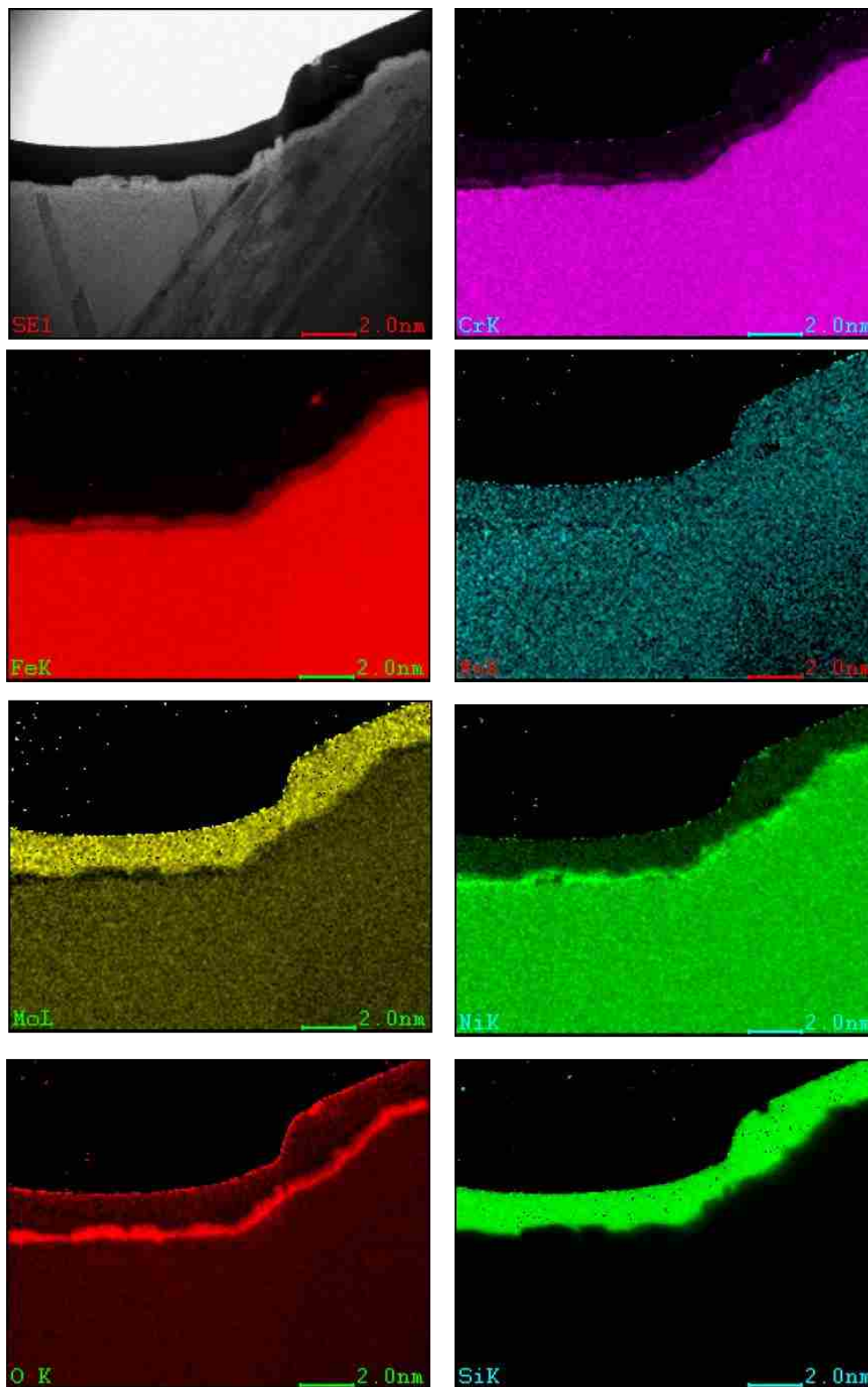


図 3.2.1-46(2) 腐食試験後における皮膜部組成マップ(原子%)
A337(SUS316L、HT 材、 $3.12 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

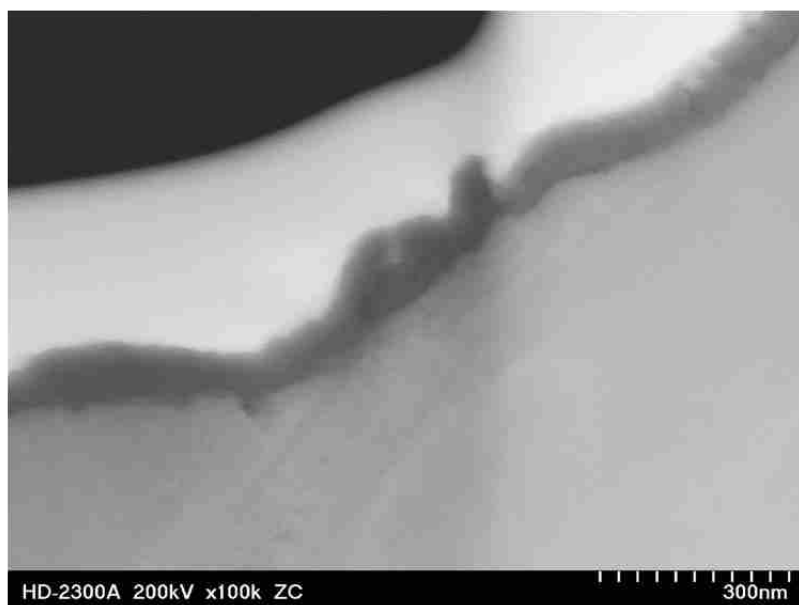
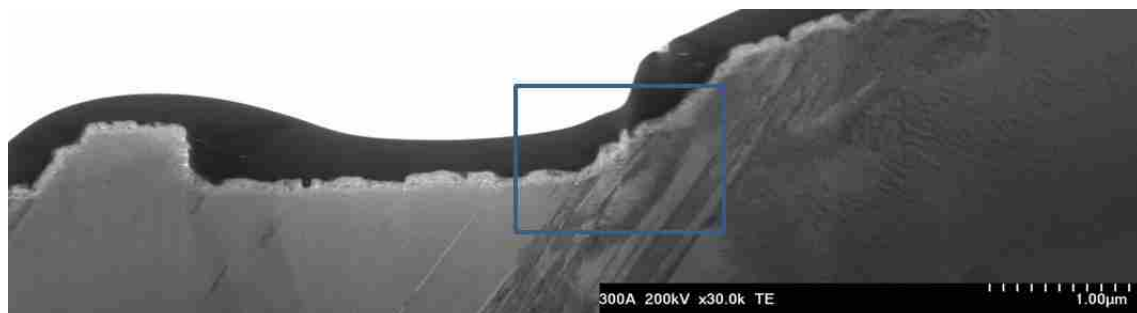


図 3.2.1-47(1) 腐食試験後の詳細マイクロ組織
A337(SUS316L、HT 材、 $3.12 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

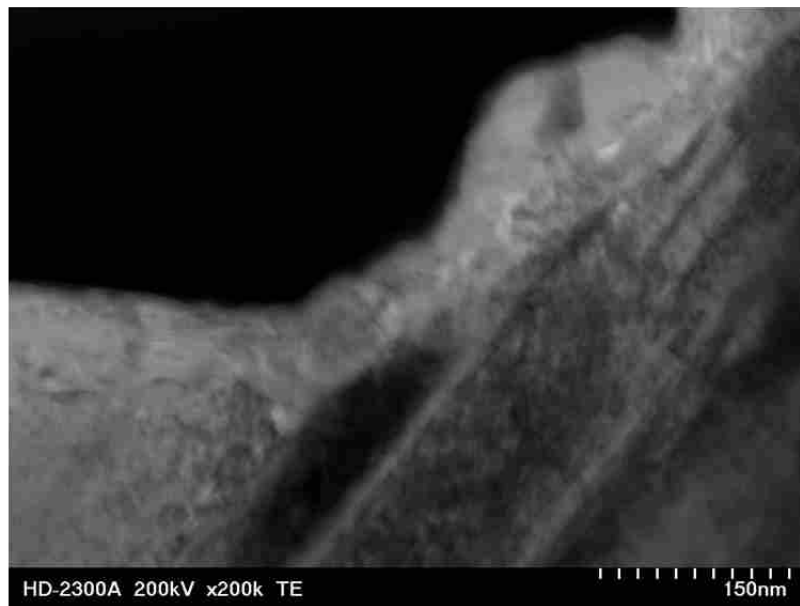
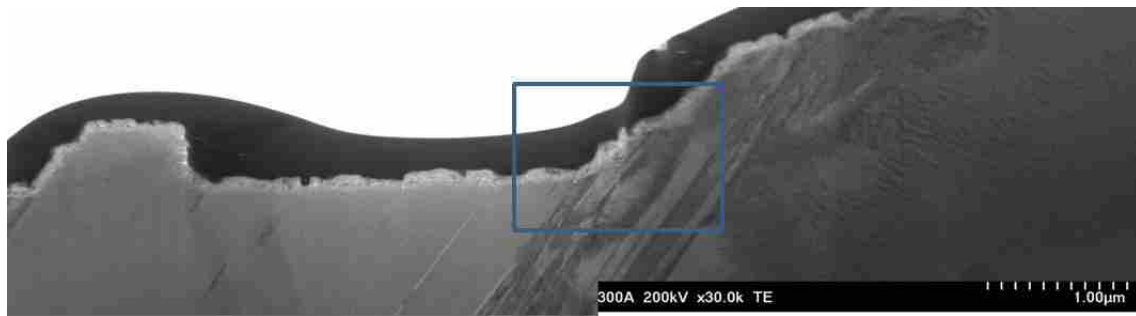


図 3.2.1-47(2) 腐食試験後の詳細マイクロ組織
A337(SUS316L、HT 材、 $3.12 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

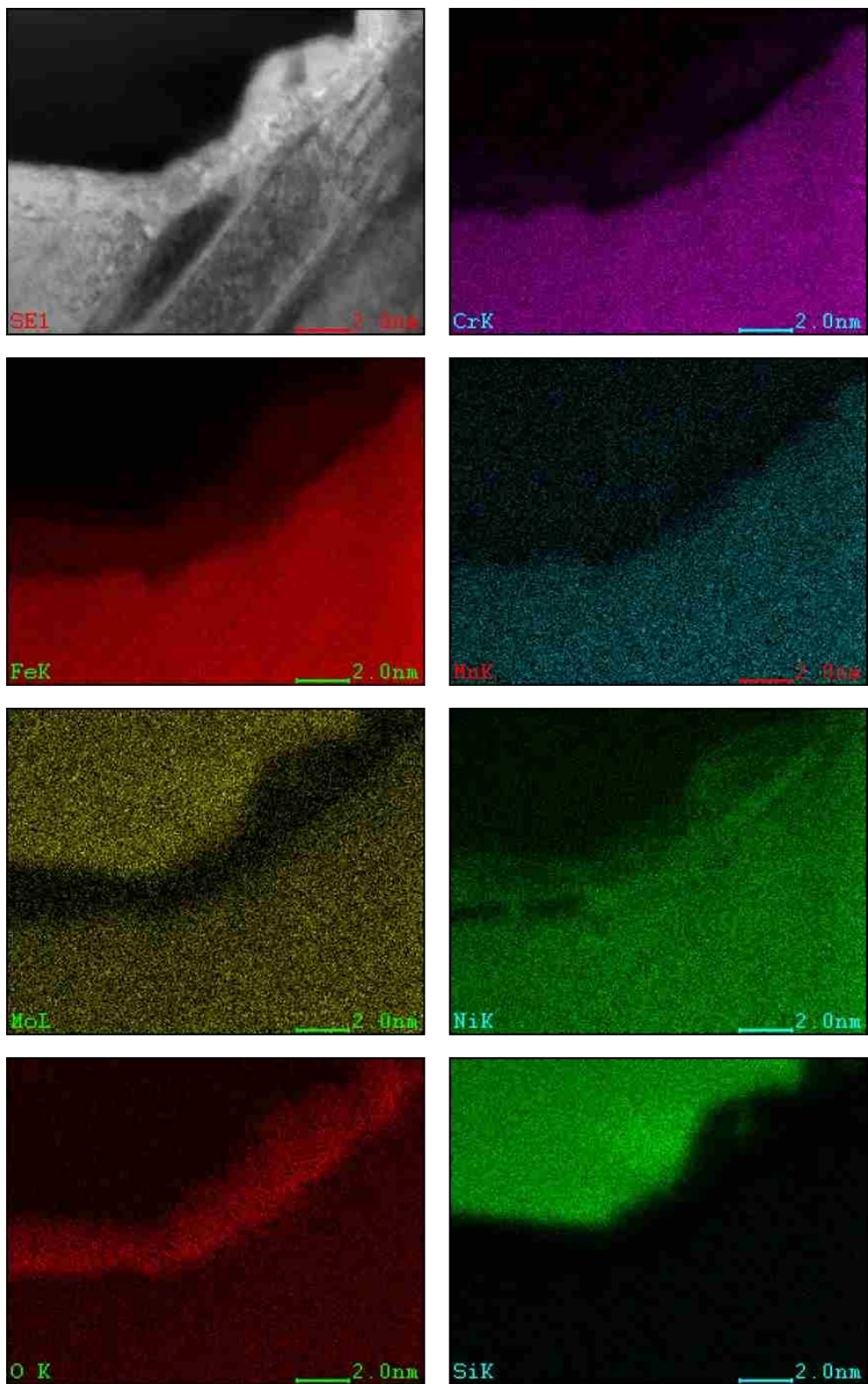


図 3.2.1-48(1) 腐食試験後における酸化皮膜組成マップ(カウント数)
A337(SUS316L、HT 材、 $3.12 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

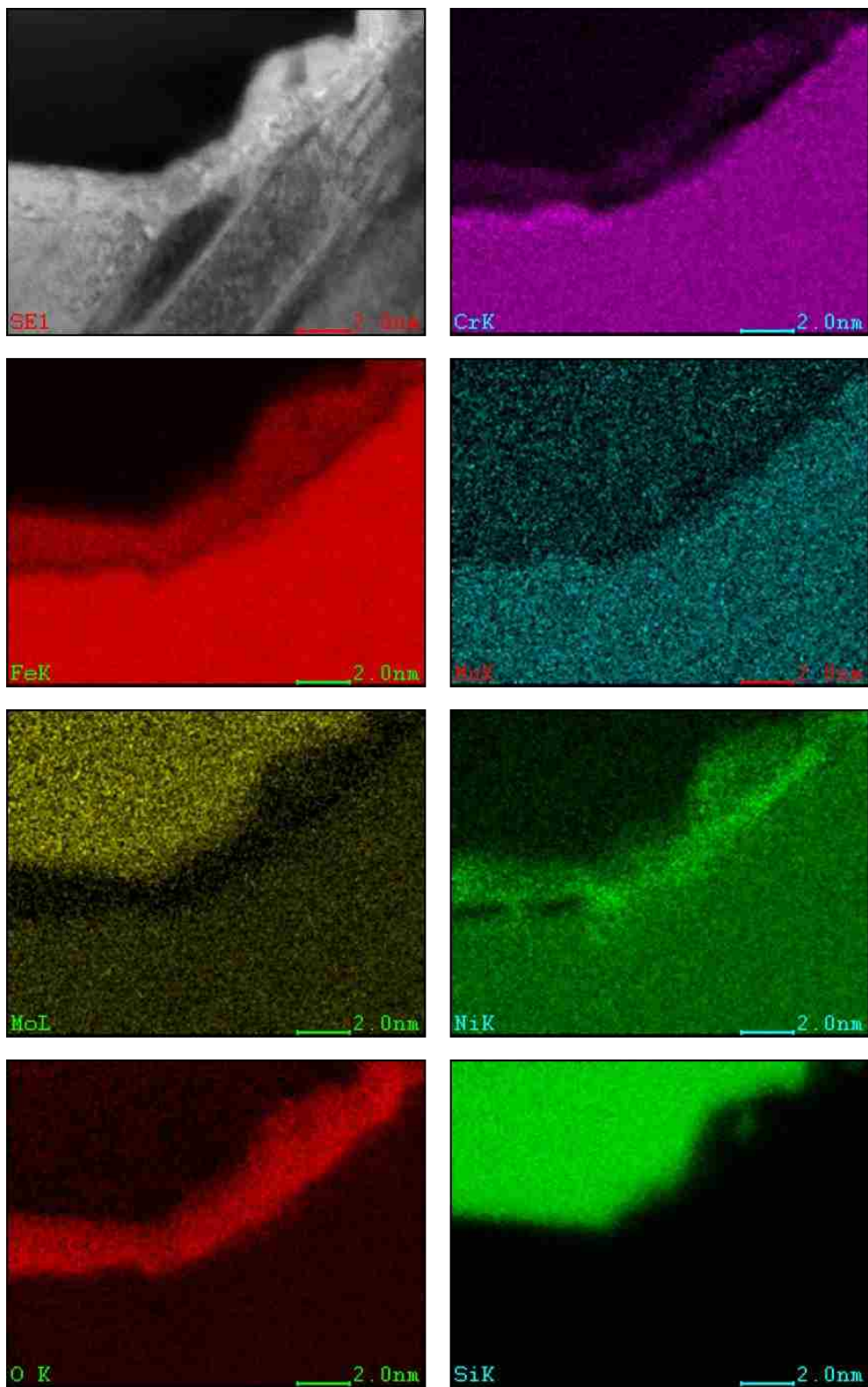


図 3.2.1-48 (2) 腐食試験後における酸化皮膜組成マップ(原子%)
A337(SUS316L、HT 材、 $3.12 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

③ A237

作製した微小試験片外観写真を図 3.2.1-49 に示す。引張試験により得られた応力-ひずみ関係を図 3.2.1-50 に示す。引張試験は、降伏後に約 2%のひずみを付与し試験を停止した。降伏応力は 417 MPa であった。

引張試験後の外観 SEM 写真を図 3.2.1-51 に示す。試験片表面には変形による表面ステップが観察され、試験片の右側に変形が観察された。また、圧痕間の距離から求めたひずみ量は 2.1%であった。

CCD カメラを用いて引張試験中の試験片の画像を約 1 秒ごとに取得した。取得した画像をもとにひずみ挙動の解析を行った。例として、図 3.2.1-52 に示す応力-ひずみ関係の各位置(フレーム数を表示)における、DIC 解析結果を図 3.2.1-53 に示す。引張軸方向のひずみ分布を調べるために、図 3.2.1-53 の DIC 解析結果をもとに、図 3.2.1-54 のライン上のひずみ分布を抽出した。引張軸方向のひずみ分布を図 3.2.1-55 に示す。Y 座標：415 付近で最大負荷方向ひずみとなった。また、図 3.2.1-55 から分かるように、負荷方向ひずみ分布は不均一であった。図 3.2.1-56 に Mises 相当ひずみ分布を示す。引張軸方向に対して Mises 相当ひずみは不均一に分布していた。図 3.2.1-56において、両端部は、試験片と試験治具の影響を受けて Mises 相当ひずみが高くなっていると考えられる。両端を除くと Y 座標：392 付近が最大 Mises 負荷方向ひずみとなった。この箇所は、図 3.2.1-51(3)に示した変形箇所に対応すると思われる。すなわち、変形組織は Mises 相当ひずみの高い箇所に多く発生していると考えられる。

DIC 解析によって得られたひずみ分布から評価した応力-ひずみ関係と、引張試験機のプルロッド変位から評価した応力-ひずみ関係を図 3.2.1-57 に示す。

変形が観察された図 3.2.1-51(3)下の箇所について EBSD 測定を行った。EBSD 測定結果を図 3.2.1-58 に示す。粒界に沿って、すべりによる表面ステップの箇所で KAM 値が上昇していることが確認された。さらに、変形が集中した試験片中央部を中心とした広範囲の EBSD 測定を実施した。EBSD 測定結果を図 3.2.1-59 に示す。図 3.2.1-59 には 30 μm $\times$ 30 μm の領域毎の KAM 値の平均値も併せて示した。IQ 像では、変形は試験片の右側に集中しているように見えるが、KAM 値の平均では試験片全体にひずみが不均一に分布していた。この結果は、図 3.2.1-56 に示した Mises 相当ひずみの分布と同様の結果と考えられる。

変形におけるミクロ組織を観察するために、図 3.2.1-60 に示す箇所から FIB により薄膜試料を作製した。図 3.2.1-60 に示すように、粒界を含み同程度の高い KAM 値の箇所である TP1 と TP2 から薄膜試料を作製した。TP1 のミクロ組織を図 3.2.1-61 に示す。図 3.2.1-61(2)に示すように、左側の結晶粒には転位チャネルによって形成された表面ステップが観察された。この表面ステップは図 3.2.1-60 の SEM 写真にみられる表面ステップに対応している。また、右側の結晶粒には図 3.2.1-61(3)に示すように双晶によるものと、図 3.2.1-61(4)に示すように転位チャネルによるものが観察された。TP2 のミクロ

組織を図 3.2.1-62 に示す。図 3.2.1-62(2)に示すように、左側の結晶粒には双晶による表面ステップが形成されていた。また、図 3.2.1-62(3)に示すように、右側の結晶粒にはわずかにすべり組織が見られた。

以上の①～③項で得られた結果は、後述 3.2.1.5 項において、これまでに得られた成果も含めて総合的に評価し、照射ステンレス鋼の亀裂進展メカニズムにおける寄与について検討した。



図 3.2.1-49 微小試験片外観写真
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

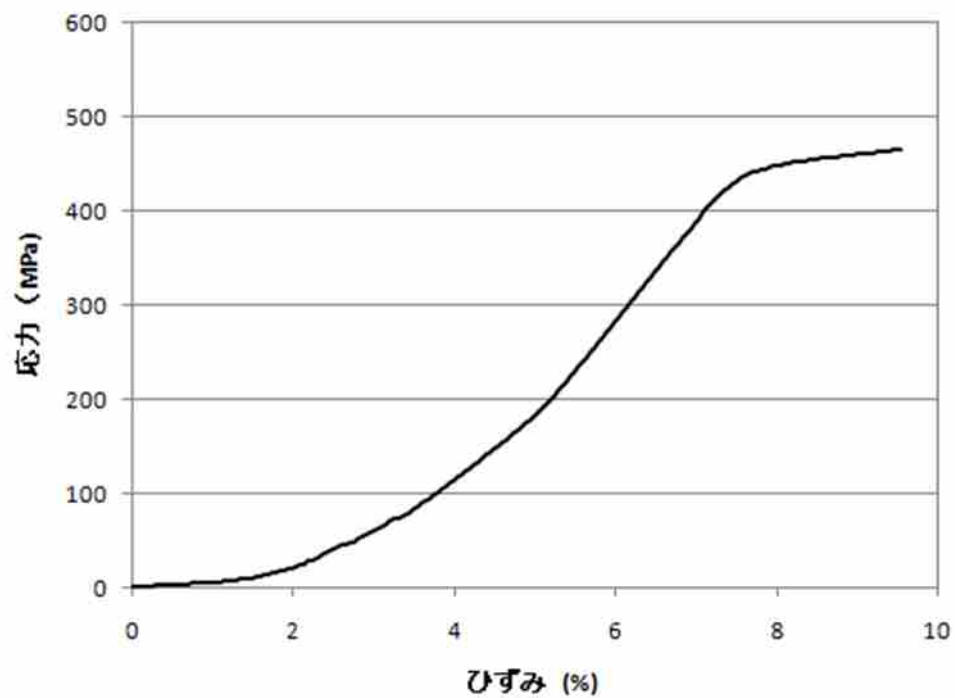


図 3.2.1-50 応力-ひずみ関係
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

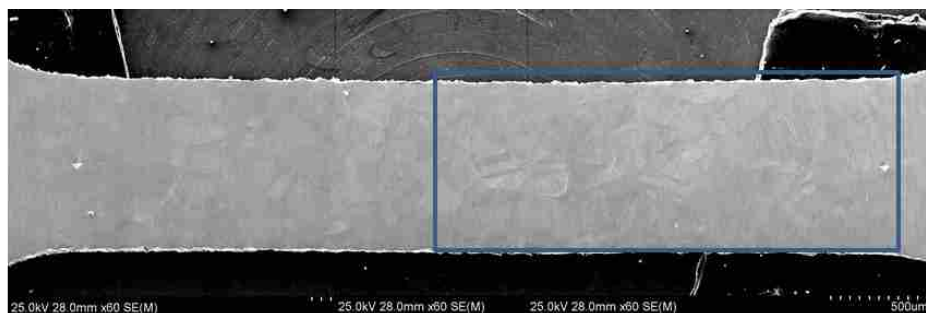


図 3.2.1-51(1) 引張試験後の SEM 写真
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

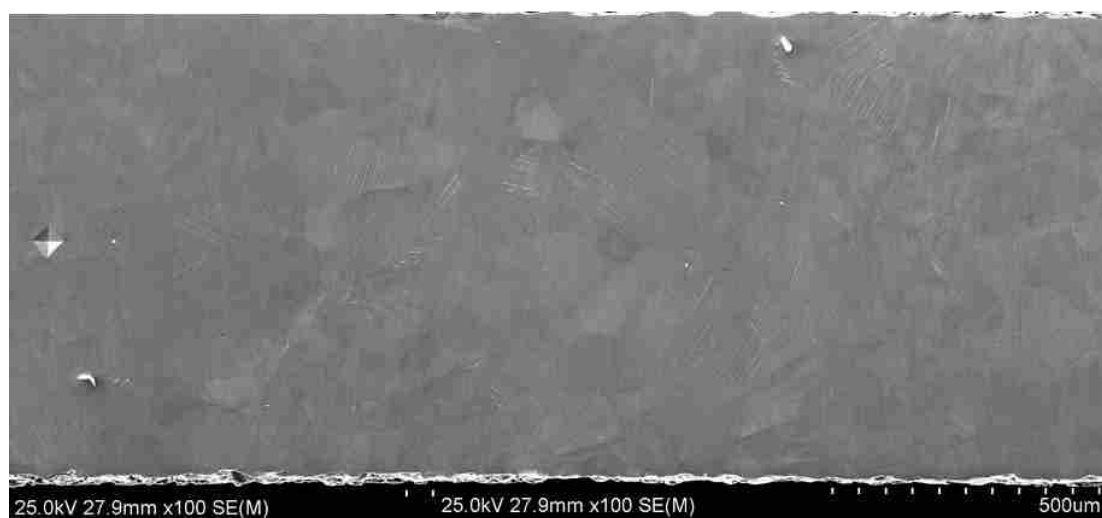
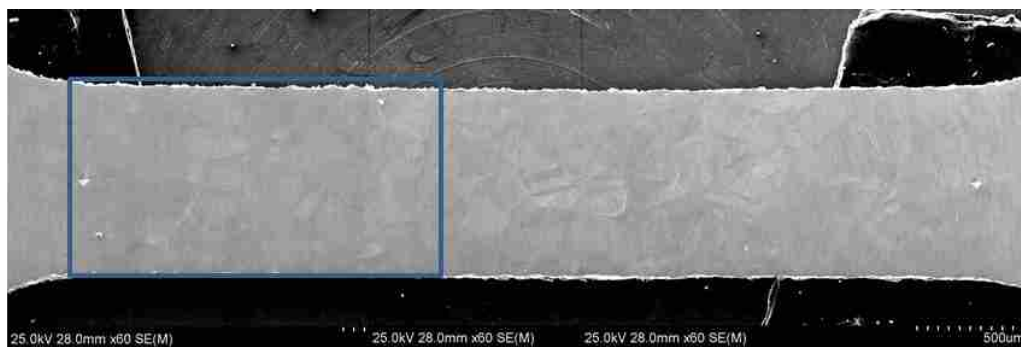


図 3.2.1-51(2) 引張試験後の SEM 写真
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

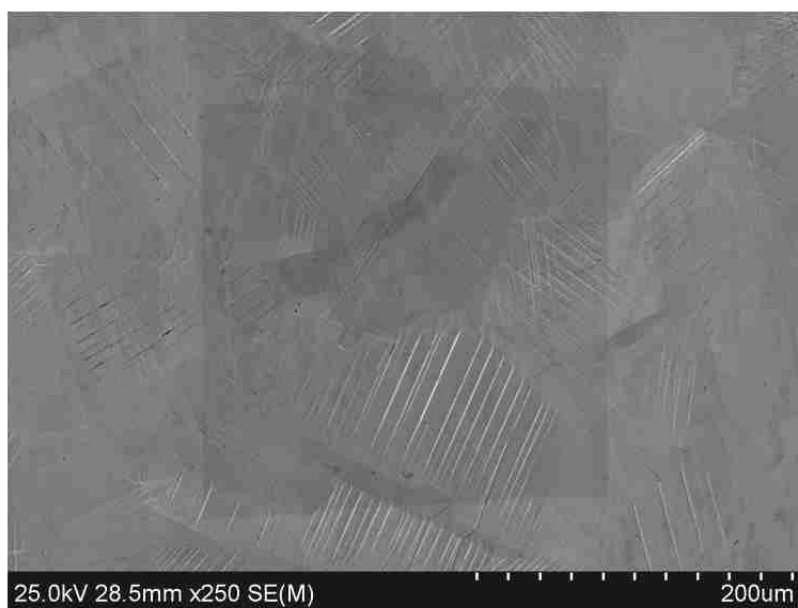
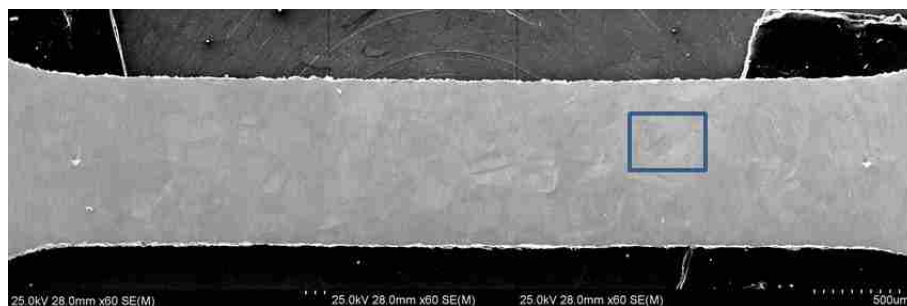


図 3.2.1-51(3) 引張試験後の SEM 写真
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

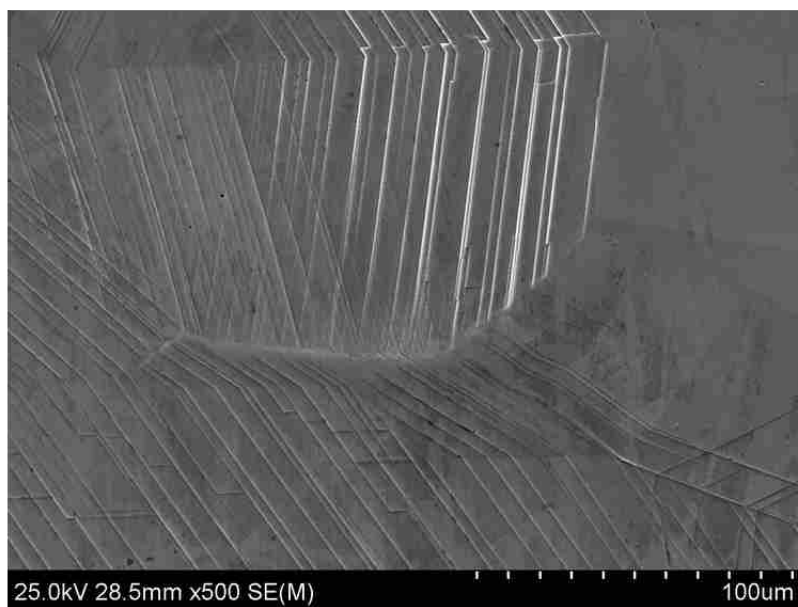
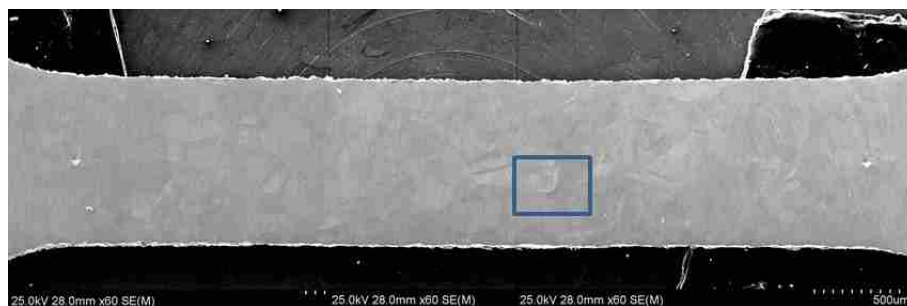


図 3.2.1-51(4) 引張試験後の SEM 写真
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

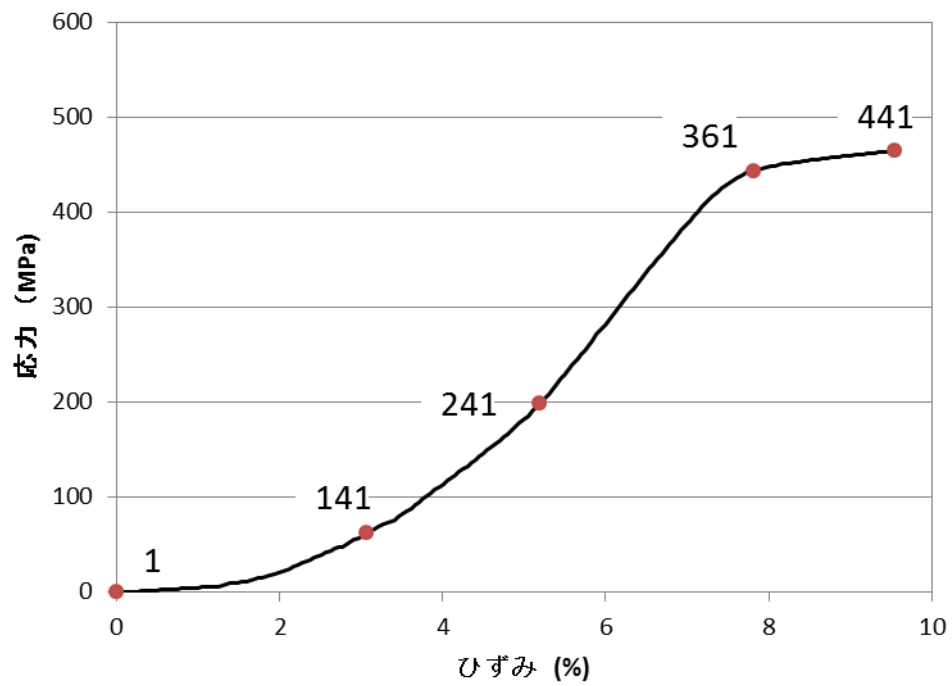


図 3.2.1-52 応力-ひずみ関係における DIC の画像抽出箇所
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

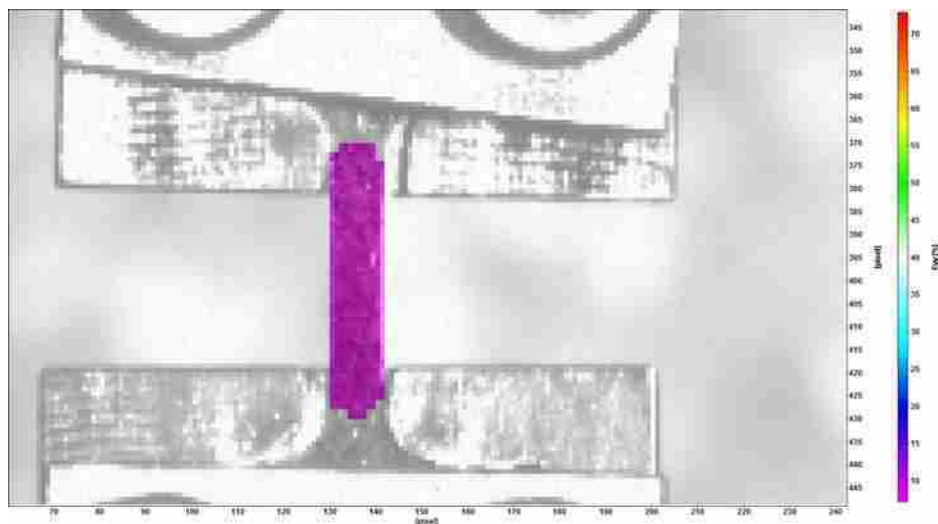


図 3.2.1-53(1) DIC 解析結果 (1frame)
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

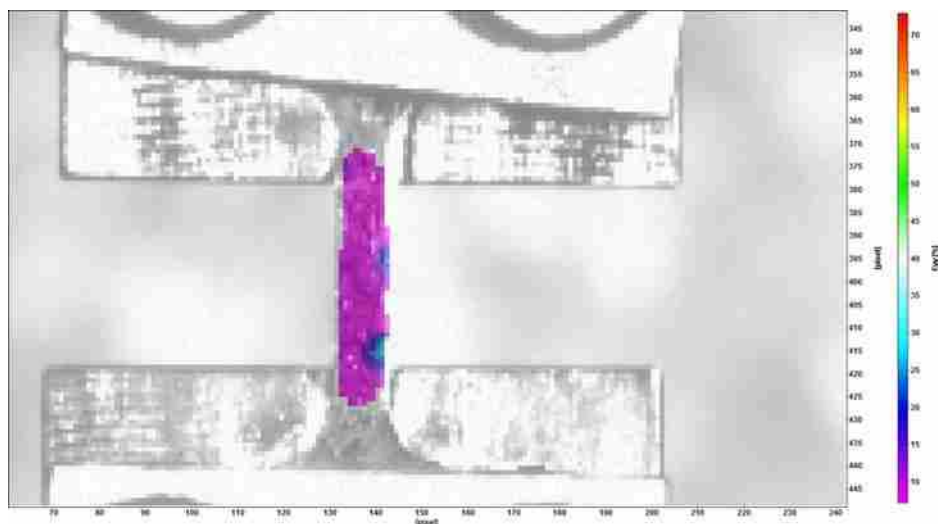
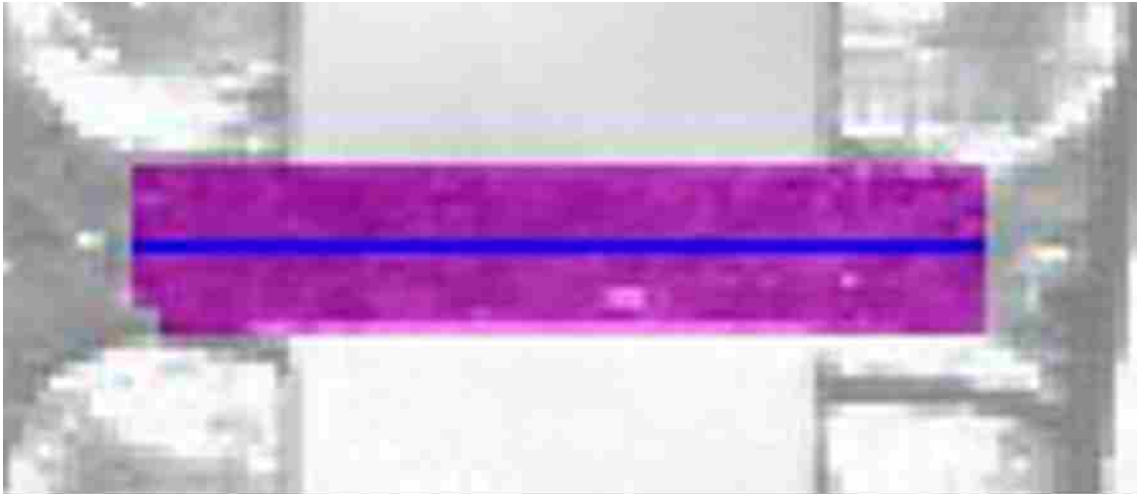
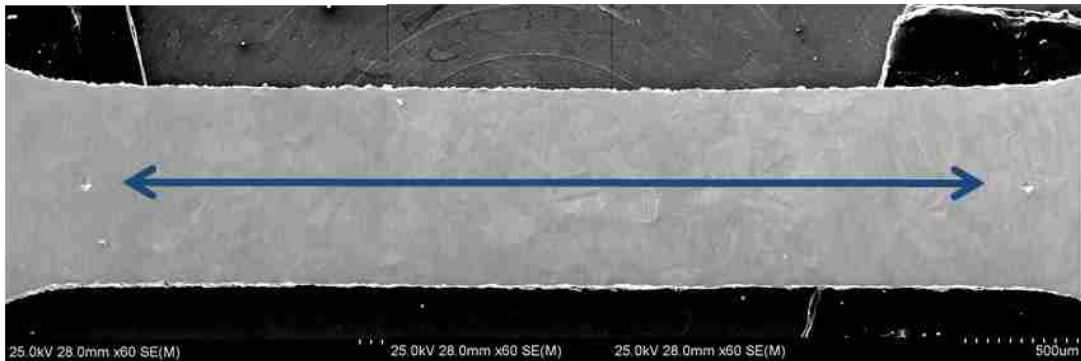


図 3.2.1-53(2) DIC 解析結果 (441frame)
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)



ひずみ分布抽出ライン(CCDカメラ)



ひずみ分布抽出ライン(SEM写真)

図 3.2.1-54 ひずみ抽出ライン
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

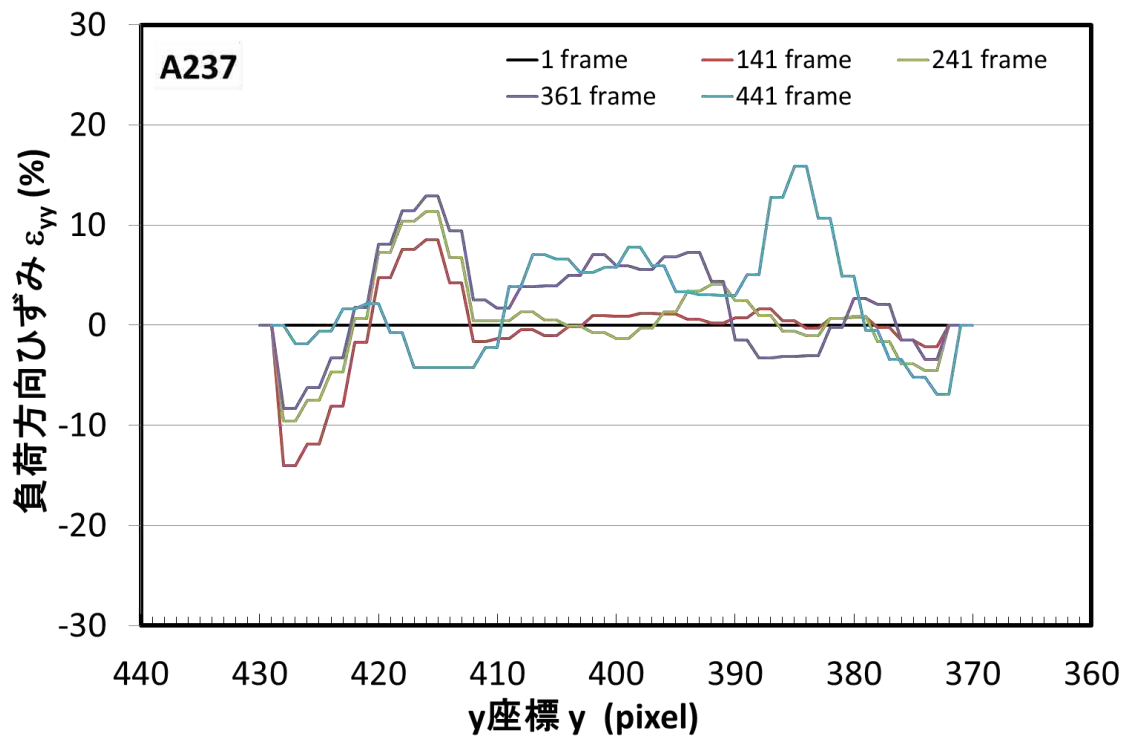


図 3.2.1-55 Y 座標における負荷方向ひずみ分布
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

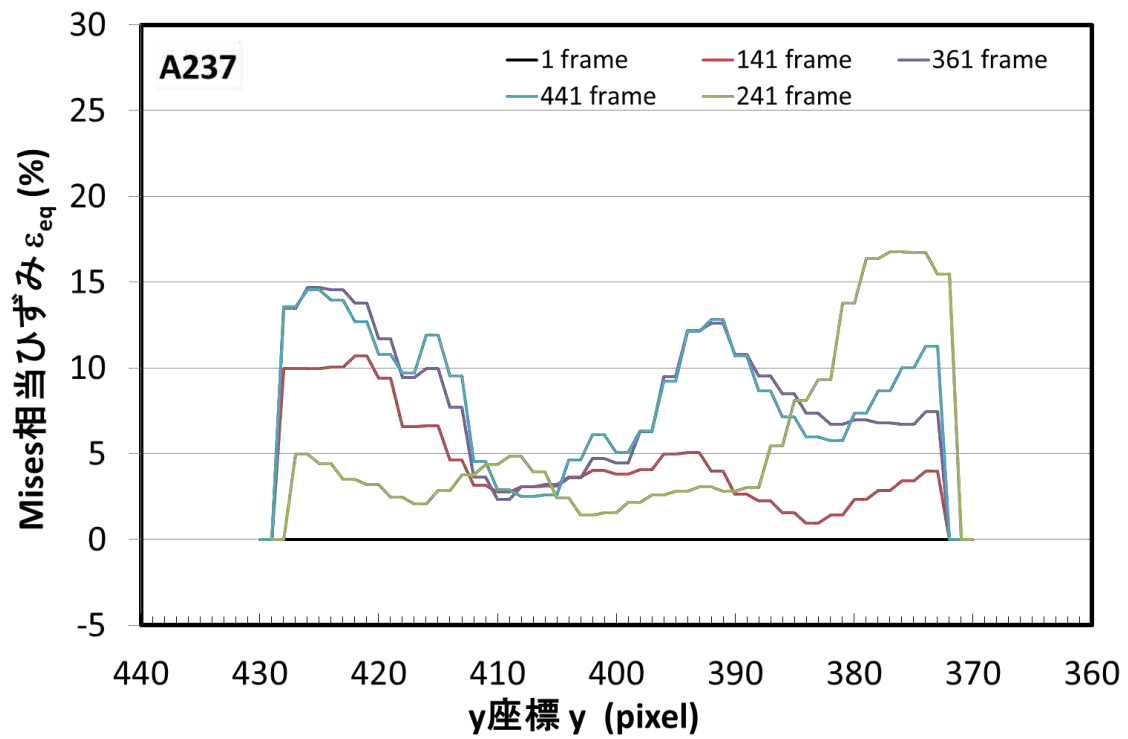


図 3.2.1-56 Y 座標における Mises 相当ひずみ分布
A237(SUS316L、HT 材、 1.01×10^{25} n/m²(E>1 MeV))

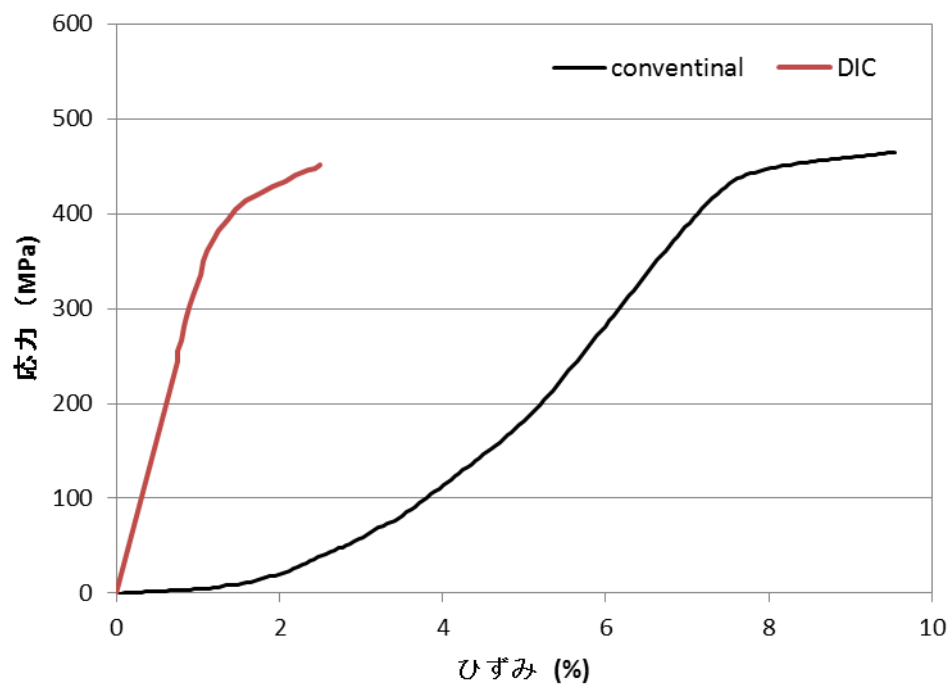


図 3.2.1-57 プルロッド変位と DIC による応力-ひずみ関係比較
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

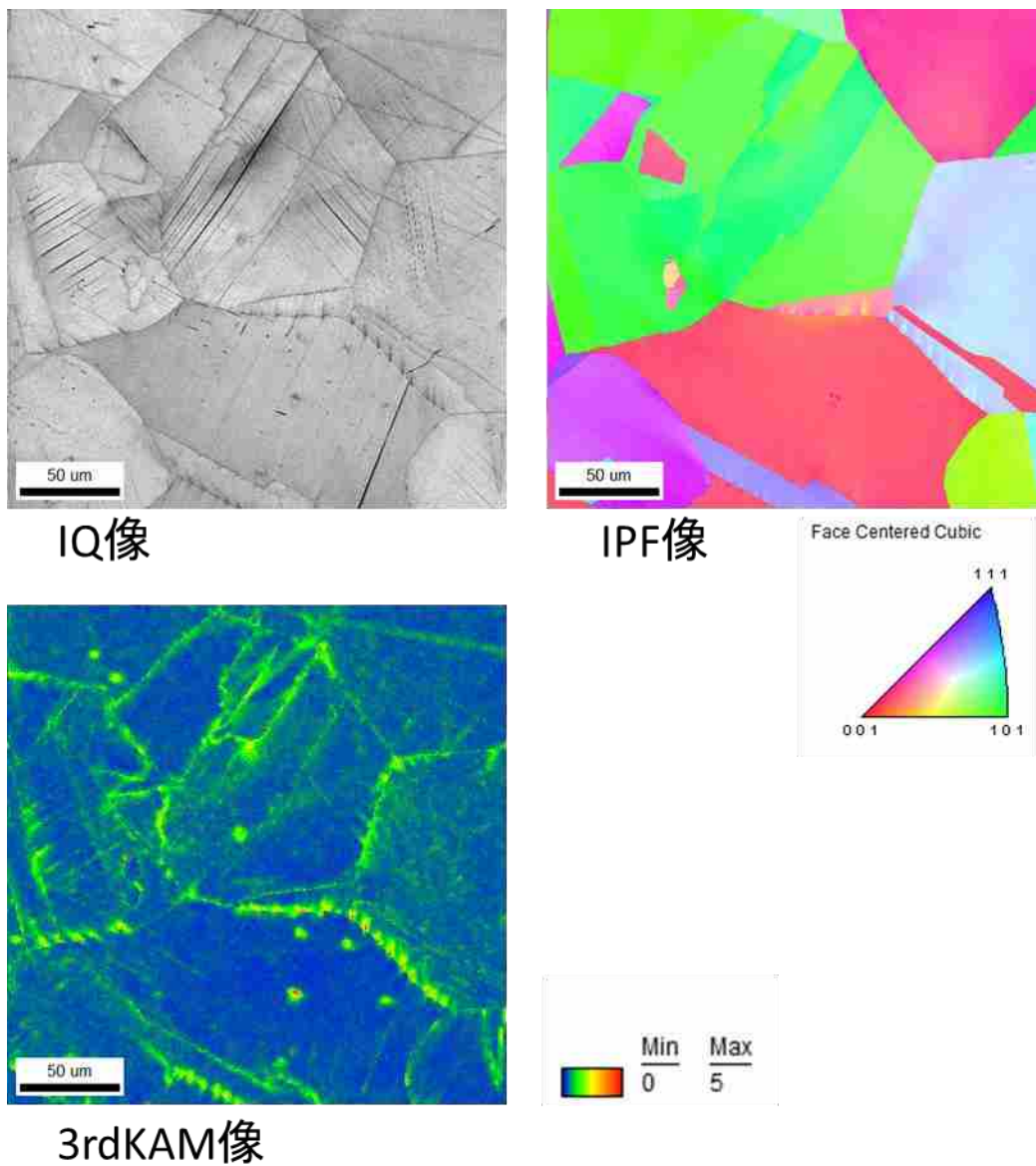
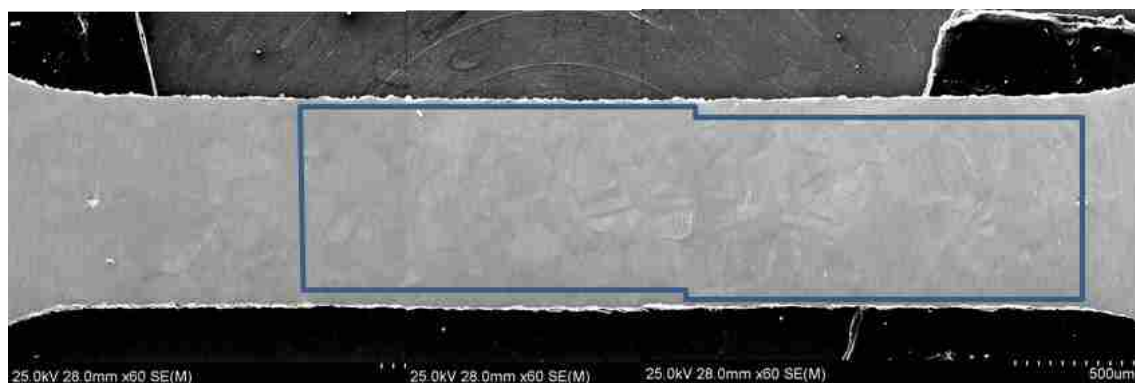


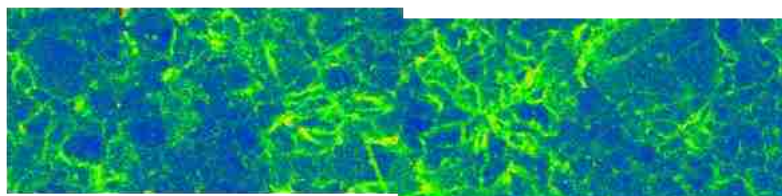
図 3.2.1-58 引張試験後の EBSD 測定結果
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)



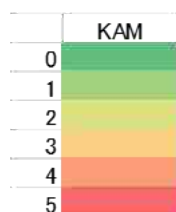
IQ



KAM



IPF



KAM平均 (30μm X 30μm 平均)

図 3.2.1-59 引張試験後における変形部の EBSD 測定結果
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

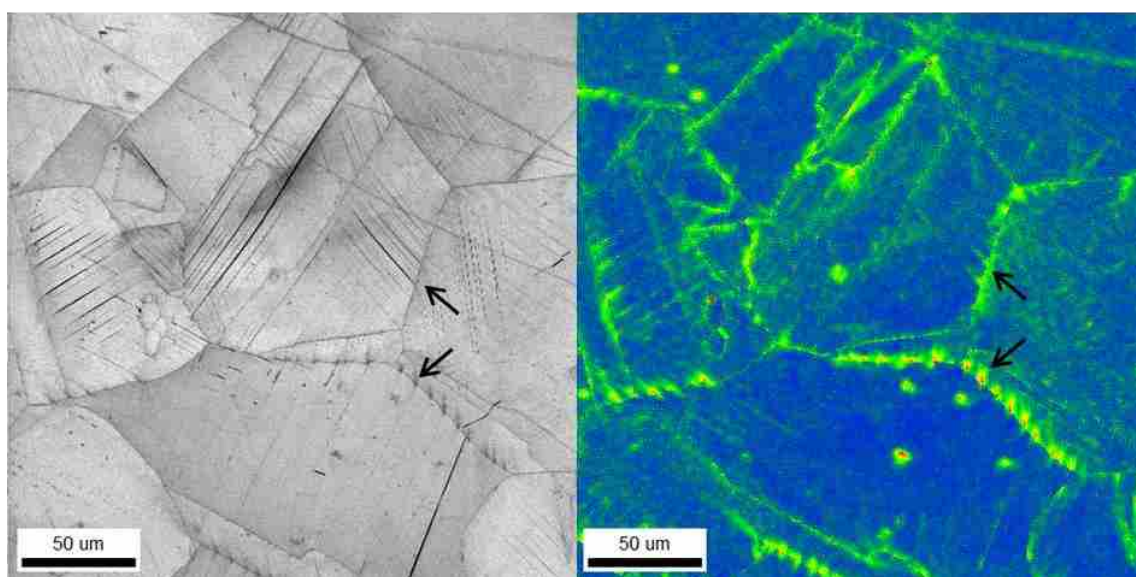
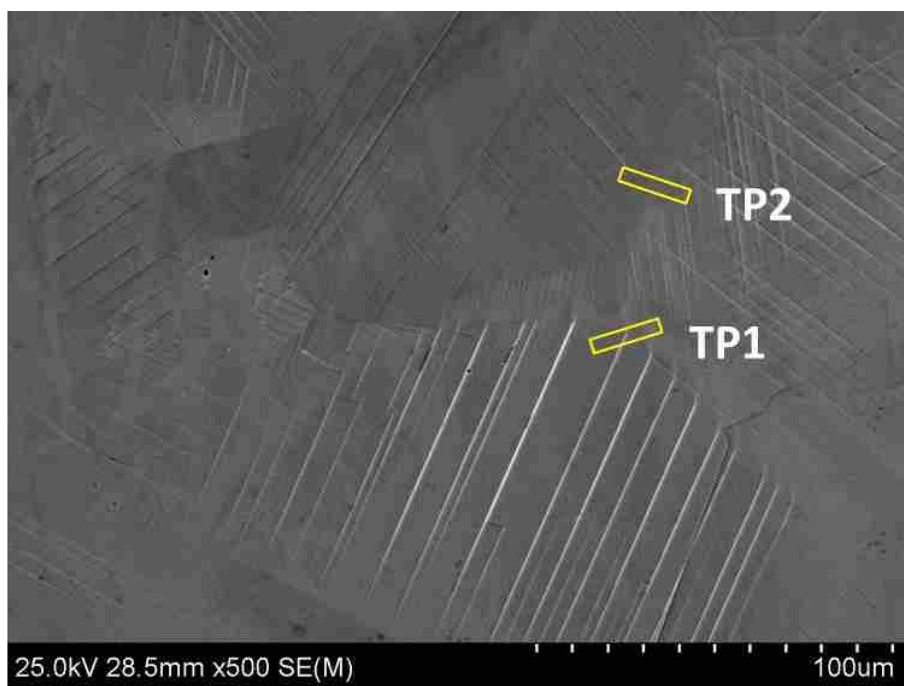


図 3.2.1-60 変形組織観察箇所
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

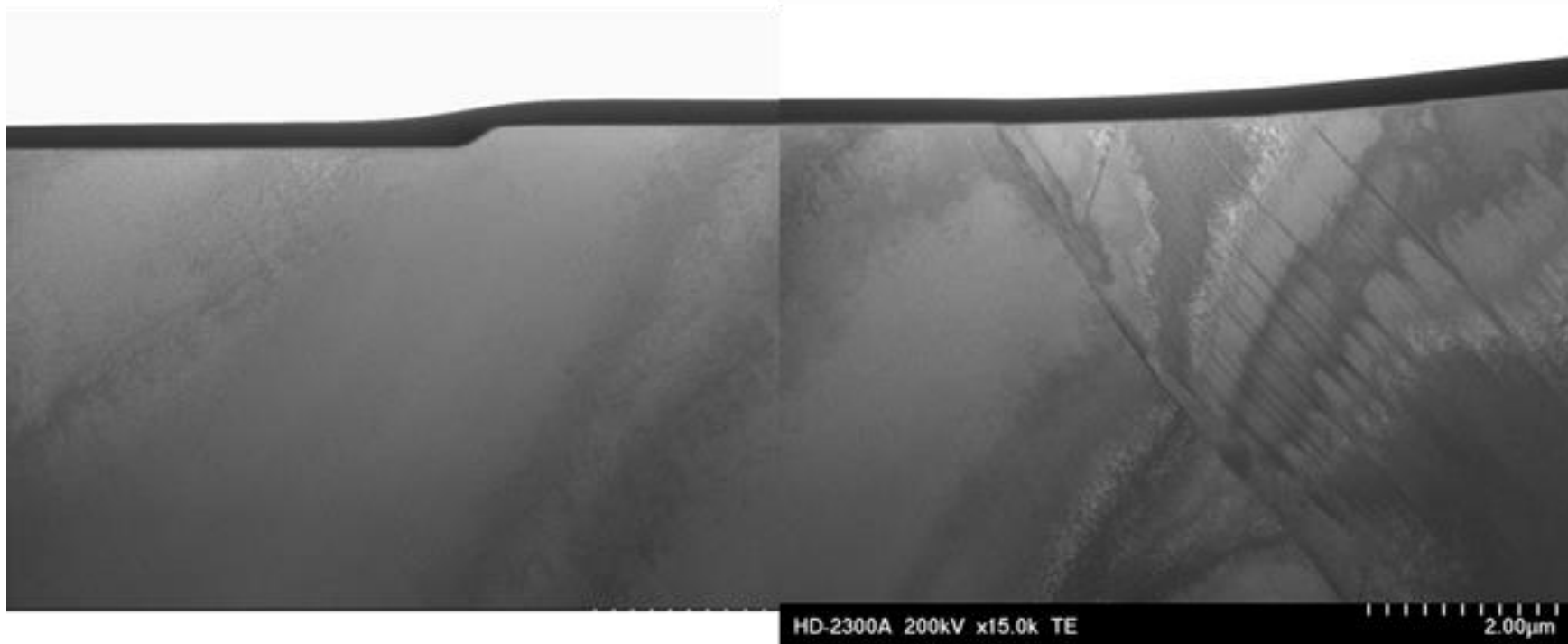


図 3.2.1-61(1) 引張試験後の変形組織(TP1)
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$))

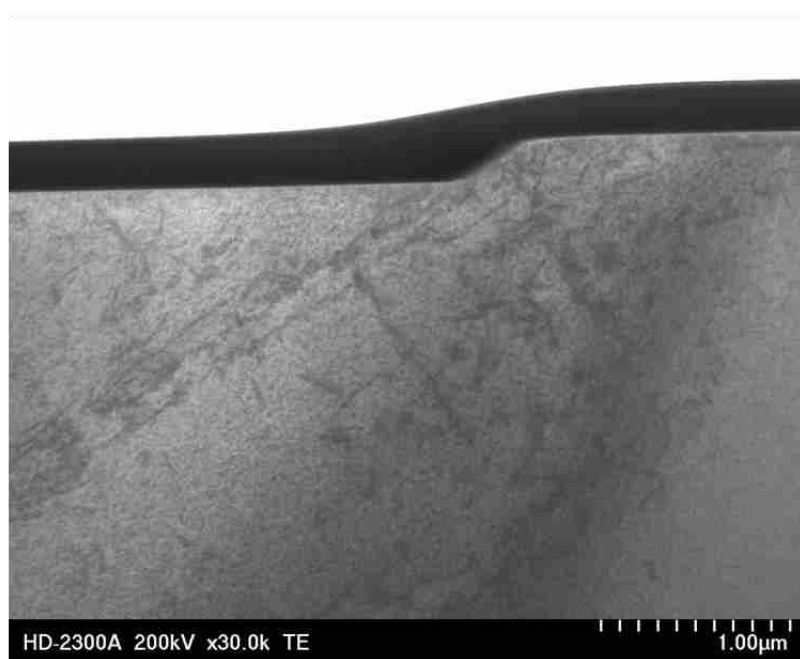
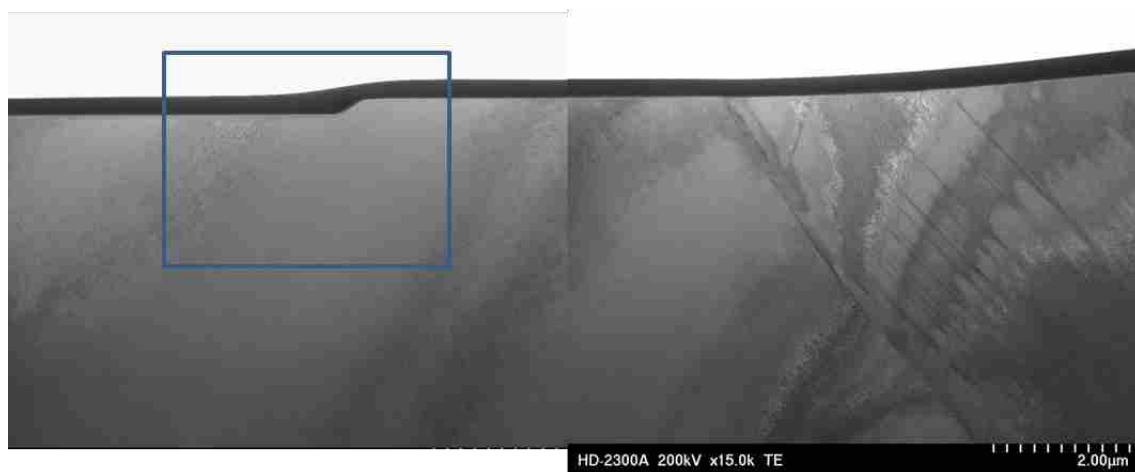


図 3.2.1-61(2) 引張試験後の変形組織(TP1)
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

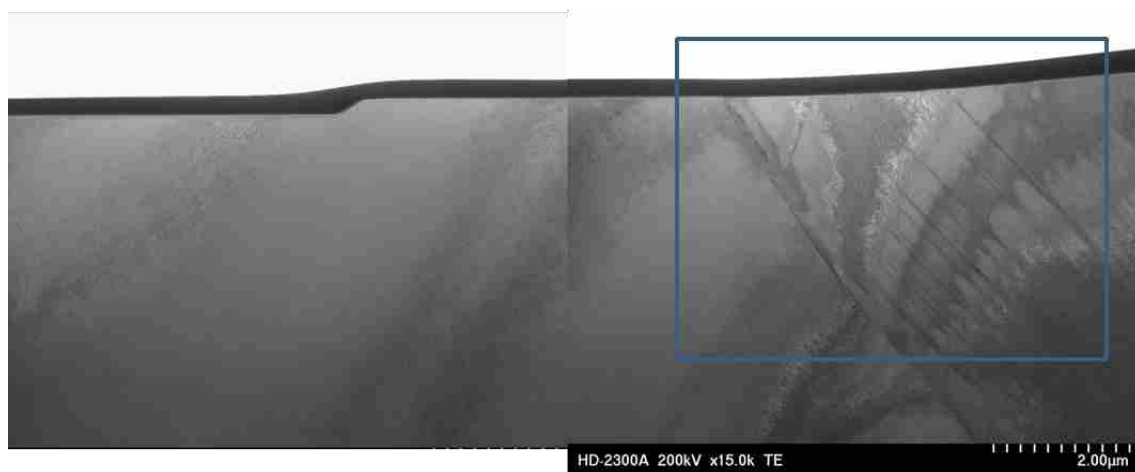


図 3.2.1-61(3) 引張試験後の変形組織(TP1)
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$))

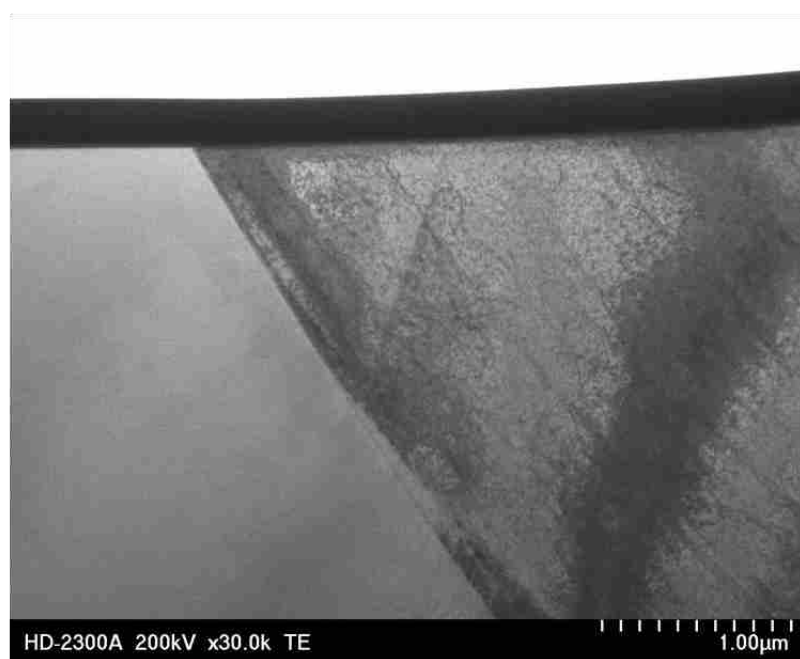
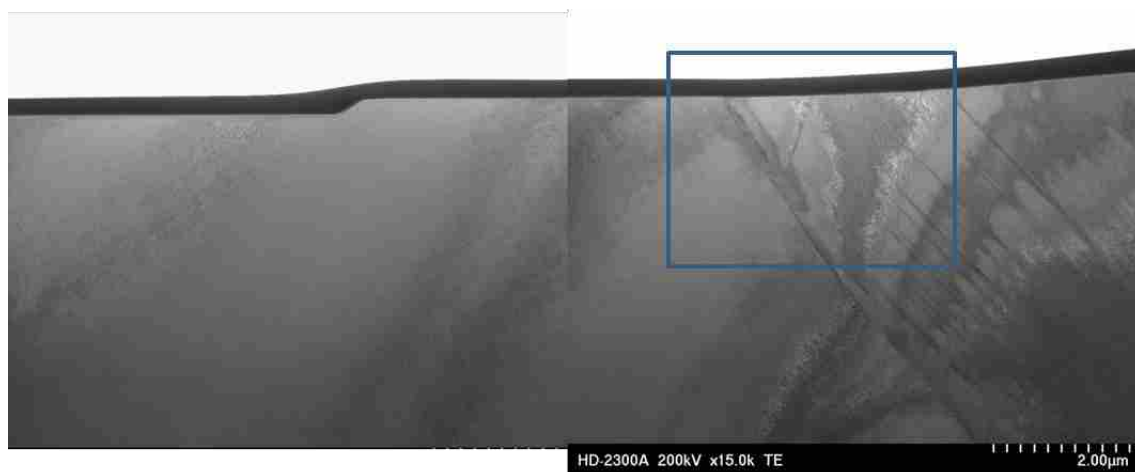


図 3.2.1-61(4) 引張試験後の変形組織(TP1)
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$))



図 3.2.1-62(1) 引張試験後の変形組織(TP2)
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$))

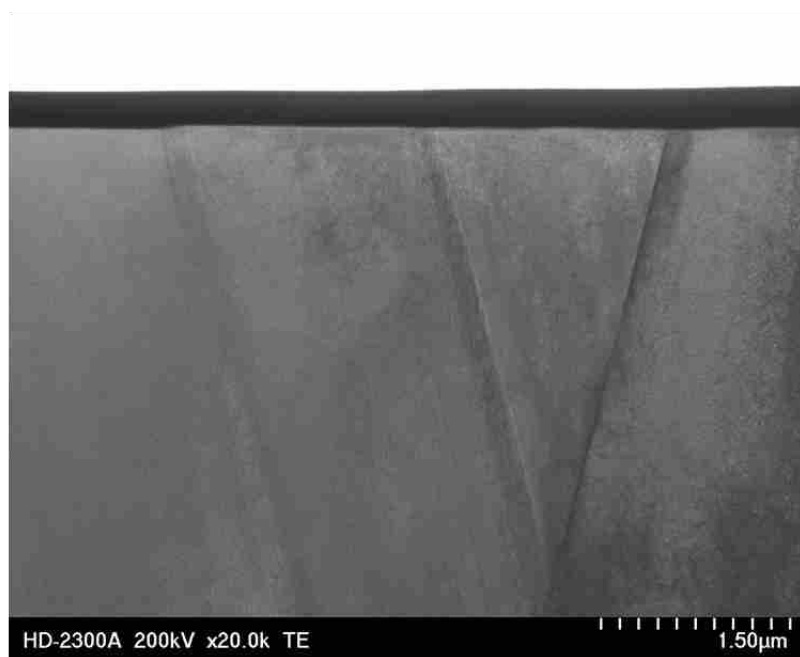
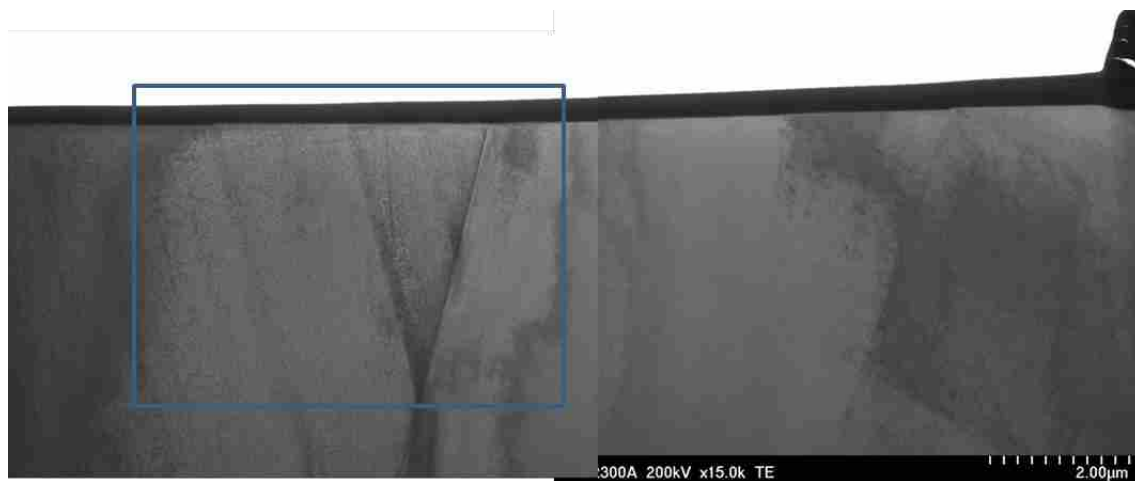


図 3.2.1-62(2) 引張試験後の変形組織(TP2)
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)



図 3.2.1-62(3) 引張試験後の変形組織(TP2)
A237(SUS316L、HT 材、 $1.01 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

3.2.1.4 CT試験片亀裂先端近傍のマイクロ組織観察

(1) 試験方法

試験マトリクスを表 3.2.1-10 に示す。亀裂進展試験を実施した SUS316L の HAZ を対象とした CT 試験片(ID. 64HC405)を用い、亀裂先端近傍での変形組織及び酸化皮膜の FE-TEM によるマイクロ組織観察を行った。CT 試験片(ID. 64HC405)の外観を図 3.2.1-63 に示す。マイクロ組織観察用試験片は FIB により採取した。採取イメージを図 3.2.1-64 に示す。マイクロ組織観察は変形組織及び酸化皮膜について各 2 箇所実施した。

表 3.2.1-10 亀裂先端近傍のマイクロ組織観察マトリクス

試験片 ID	鋼種	試験片形状	照射量	TEM 観察	
				変形組織	酸化皮膜
64HC405	SUS316L (HAZ)	0.5TCT (亀裂進展試験済)	0.793 dpa $5.16 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$	○	○



図 3.2.1-63 試験片外観(ID : 64HC405)

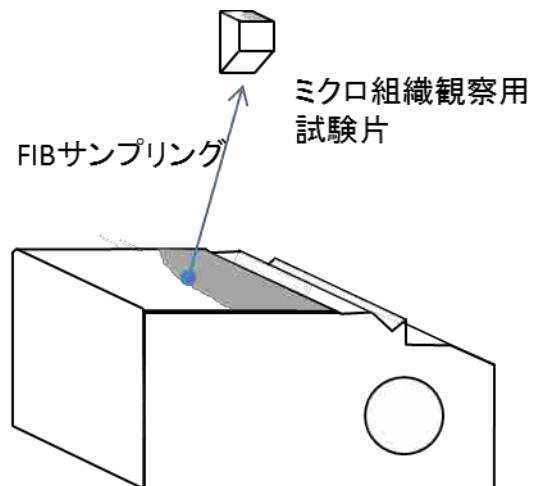


図 3.2.1-64 TEM 試料の採取イメージ

(2) 試験結果

亀裂進展試験後の破面および破面の SEM 写真を図 3.2.1-65 に示す。破面におけるミクロ組織観察箇所を図 3.2.1-66 に示す。TP2 は HWC 環境でのマクロな亀裂先端部であり、TP1 は TP2 よりも先行した亀裂先端部である。図 3.2.1-67 に FIB による TP1 採取箇所の SIM 像を示す。TP1 のミクロ組織観察結果を図 3.2.1-68 に示す。図 3.2.1-68(1) は TE 像と ZC 像を示す。TE 像から分かるように、粒内には高密度の転位組織が観察されるが、転位チャネルや双晶は観察されなかった。表面には粒状の酸化物が観察された。詳細な組織を図 3.2.1-68(2) に示す。図 3.2.1-69 に EDS による組成マップを示す。図 3.2.1-69(1) はカウント数、図 3.2.1-69(2) は原子%のマップである。図 3.2.1-69(2) の Cr マップを見ると金属部と酸化皮膜の境界に極めて薄い Cr 濃縮層が認められ、内層酸化皮膜に相当すると考えられる。外層酸化物は Fe が主たる成分であった。

図 3.2.1-70 に FIB による TP2 採取箇所の SIM 像を示す。TP2 のミクロ組織観察結果を図 3.2.1-71 に示す。(1) は TE 像と ZC 像を示す。TE 像から分かるように、粒内には高密度の転位組織が観察されるが、転位チャネルや双晶は観察されなかった。表面には粒状の酸化物が観察された。詳細な組織を図 3.2.1-71(2) に示す。図 3.2.1-72 に EDS による組成マップを示す。図 3.2.1-72(1) はカウント数、図 3.2.1-72(2) は原子%のマップである。図 3.2.1-72(2) を見ると金属側表面に明瞭な Cr 濃縮層が認められた。外層酸化物は Fe が主たる成分であった。TP2 においても TP1 と同様の結果が得られ、明瞭な相違は認められなかった。

以上に示した試験結果については、後述 3.2.1.5 項において、これまでに得られた成果も含めて総合的に評価し、照射ステンレス鋼の亀裂進展メカニズムにおける寄与について検討した。

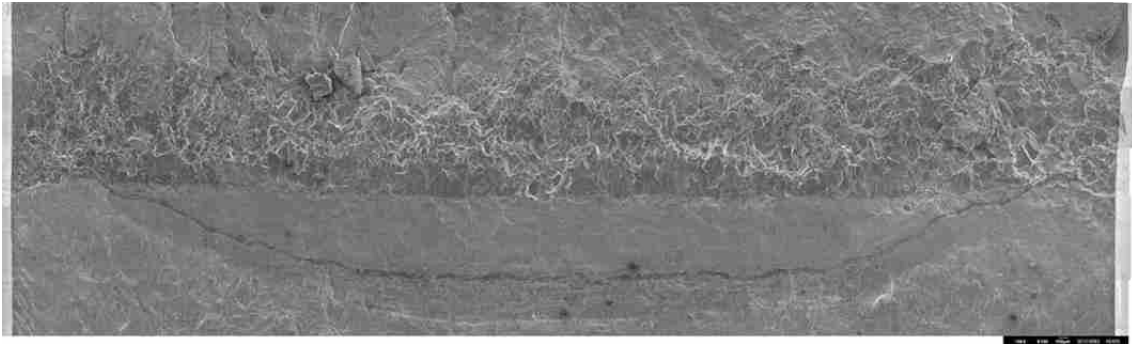
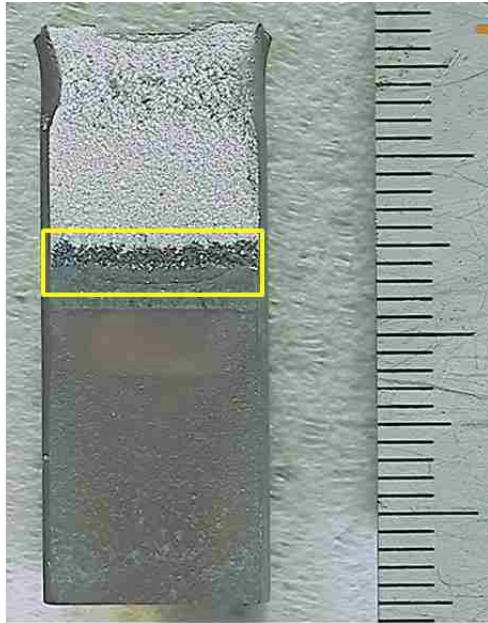


図 3.2.1-65 亀裂進展部 SEM 写真
64HC405(SUS316L(HAZ)、 $5.16 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ ($E > 1 \text{ MeV}$))

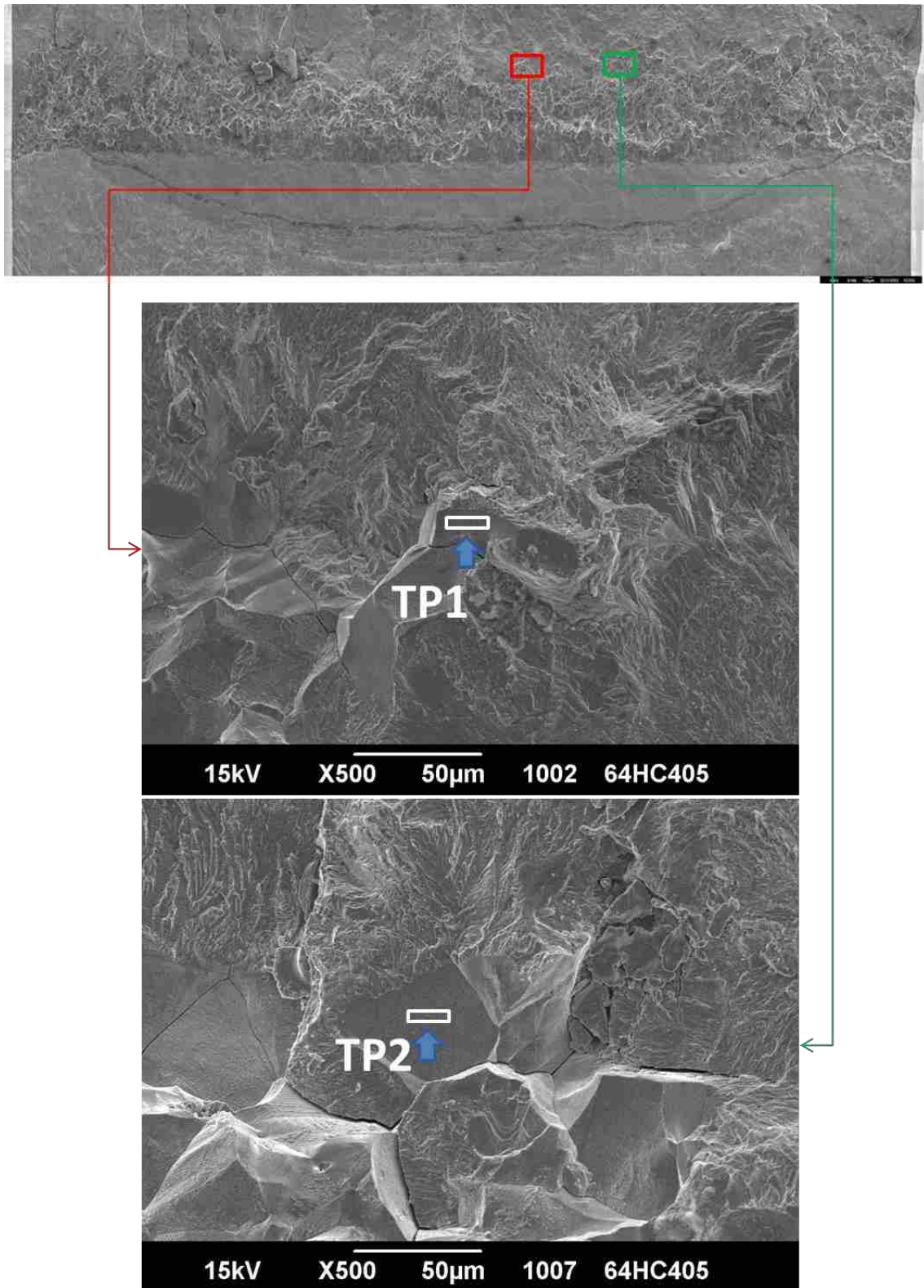


図 3.2.1-66 ミクロ組織観察箇所
64HC405(SUS316L(HAZ)、 $5.16 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

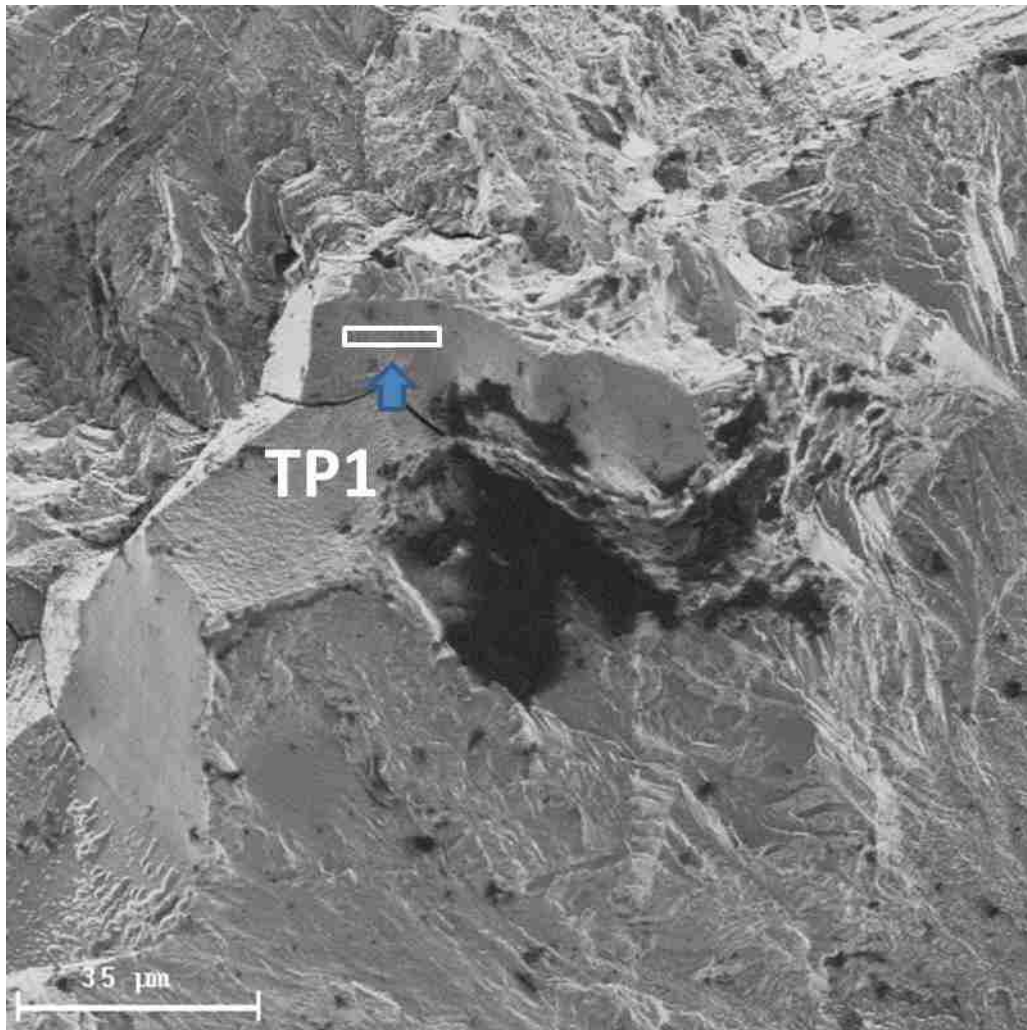


図 3.2.1-67 TP1 ミクロ組織観察試料採取箇所(SIM 像)
64HC405(SUS316L(HAZ)、 $5.16 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

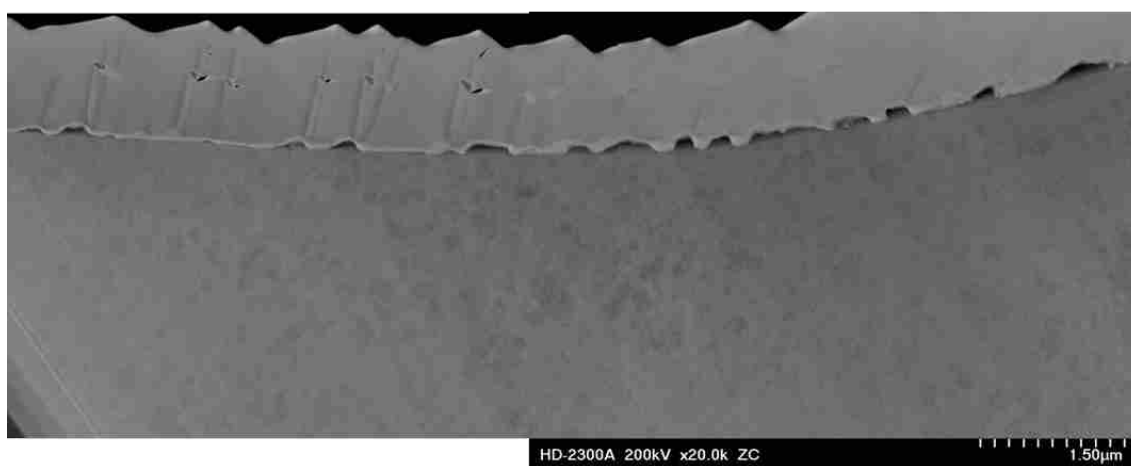
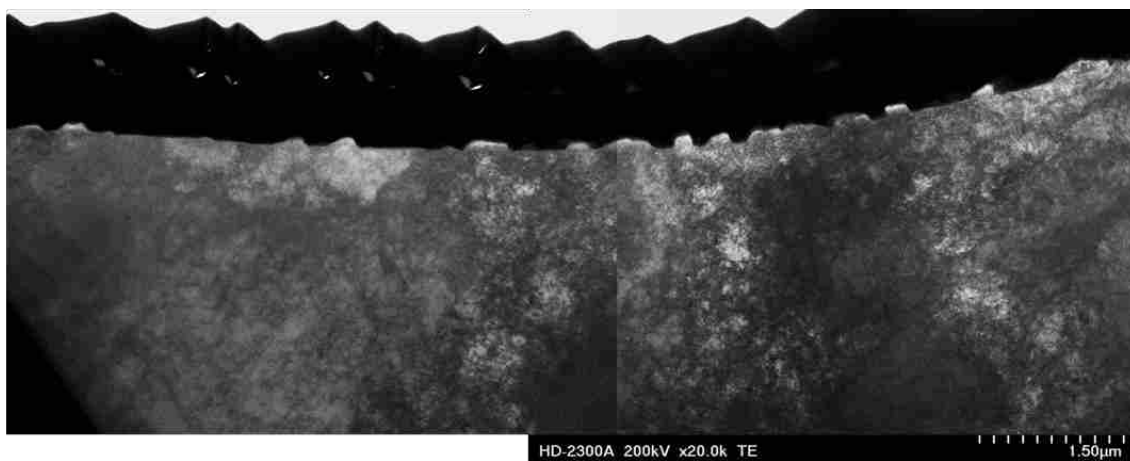


図 3.2.1-68(1) TP1 におけるマイクロ組織
64HC405(SUS316L(HAZ)、 $5.16 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

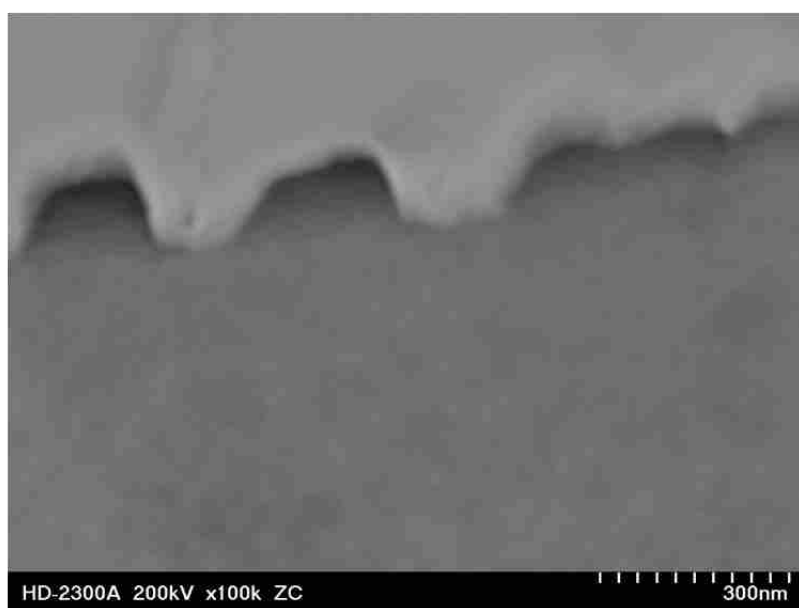
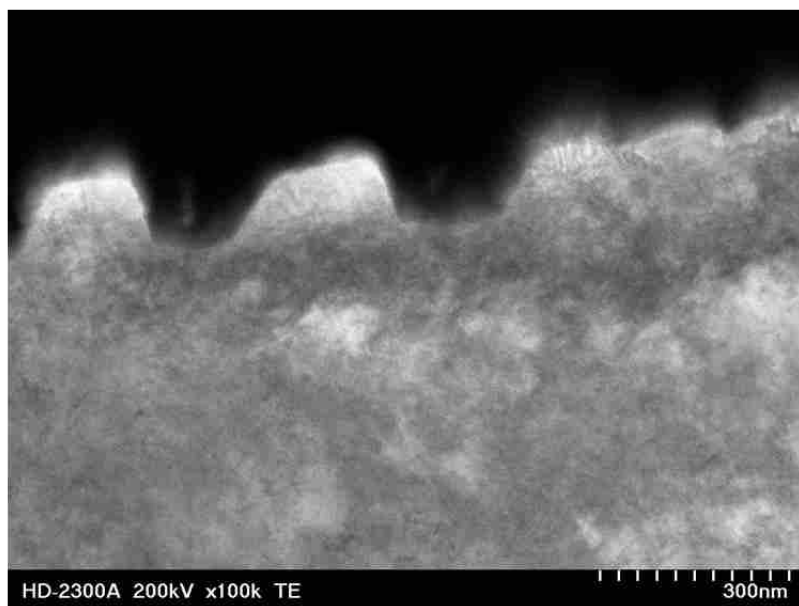
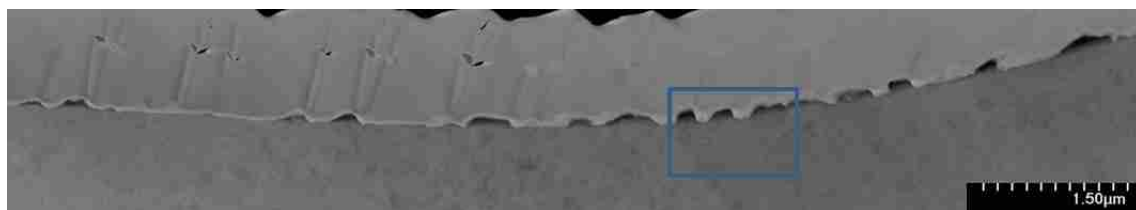


図 3.2.1-68(2) TP1 におけるミクロ組織
64HC405(SUS316L(HAZ)、 $5.16 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

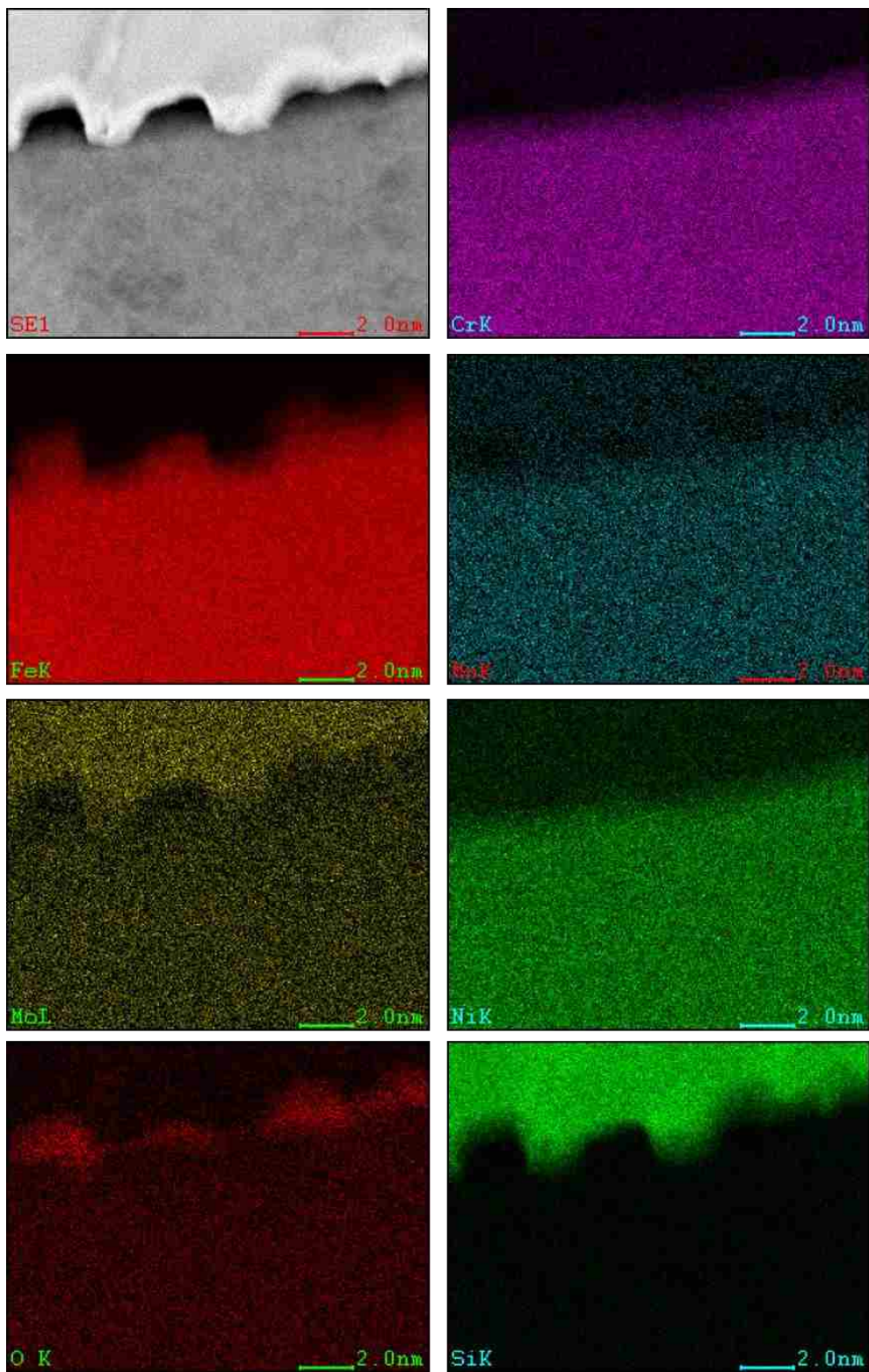


図 3.2.1-69(1) TP1 における酸化皮膜組成マップ(カウント数)
64HC405(SUS316L(HAZ)、 $5.16 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

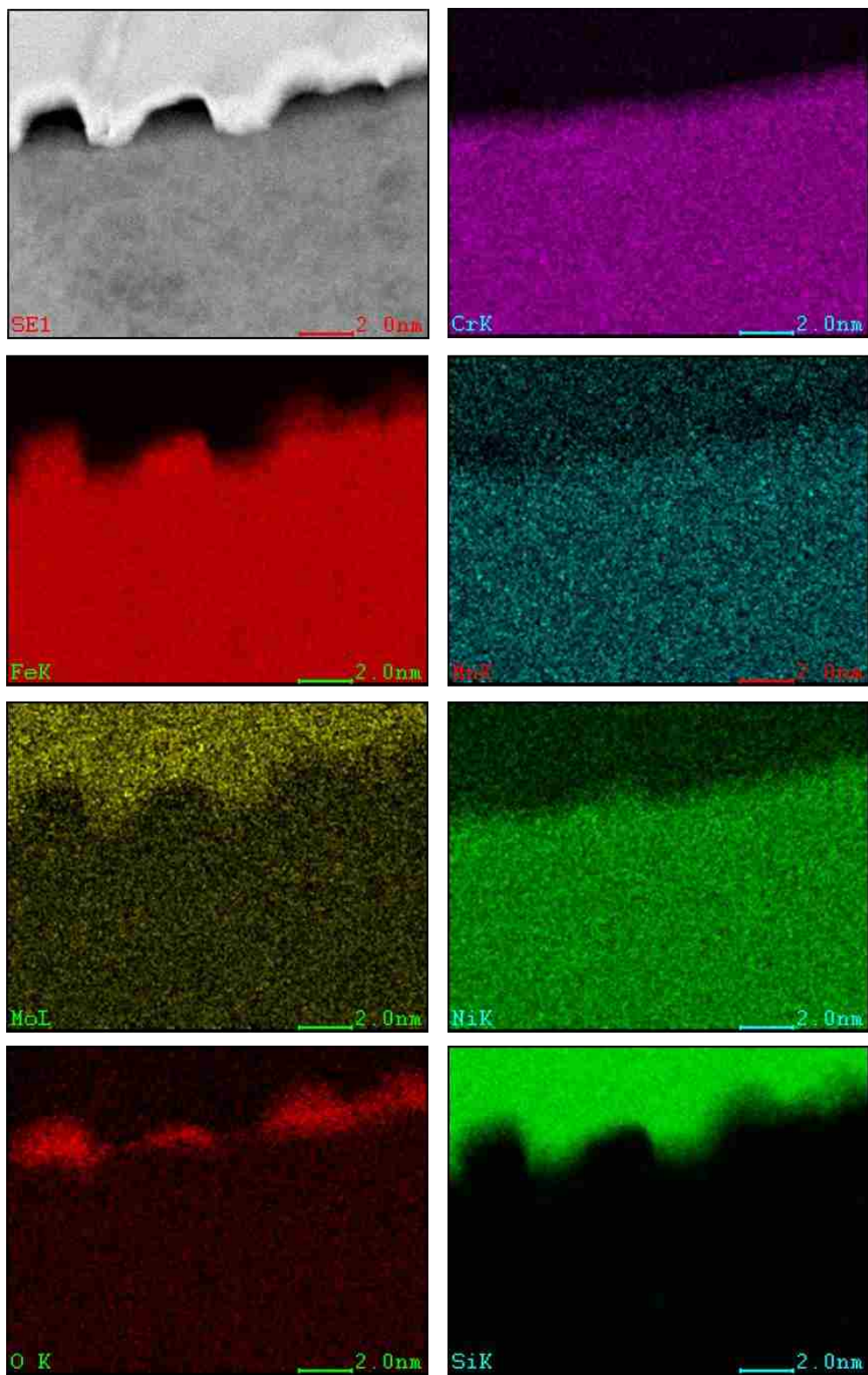


図 3.2.1-69(2) TP1 における酸化皮膜組成マップ(原子%)
 64HC405(SUS316L(HAZ)、 $5.16 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

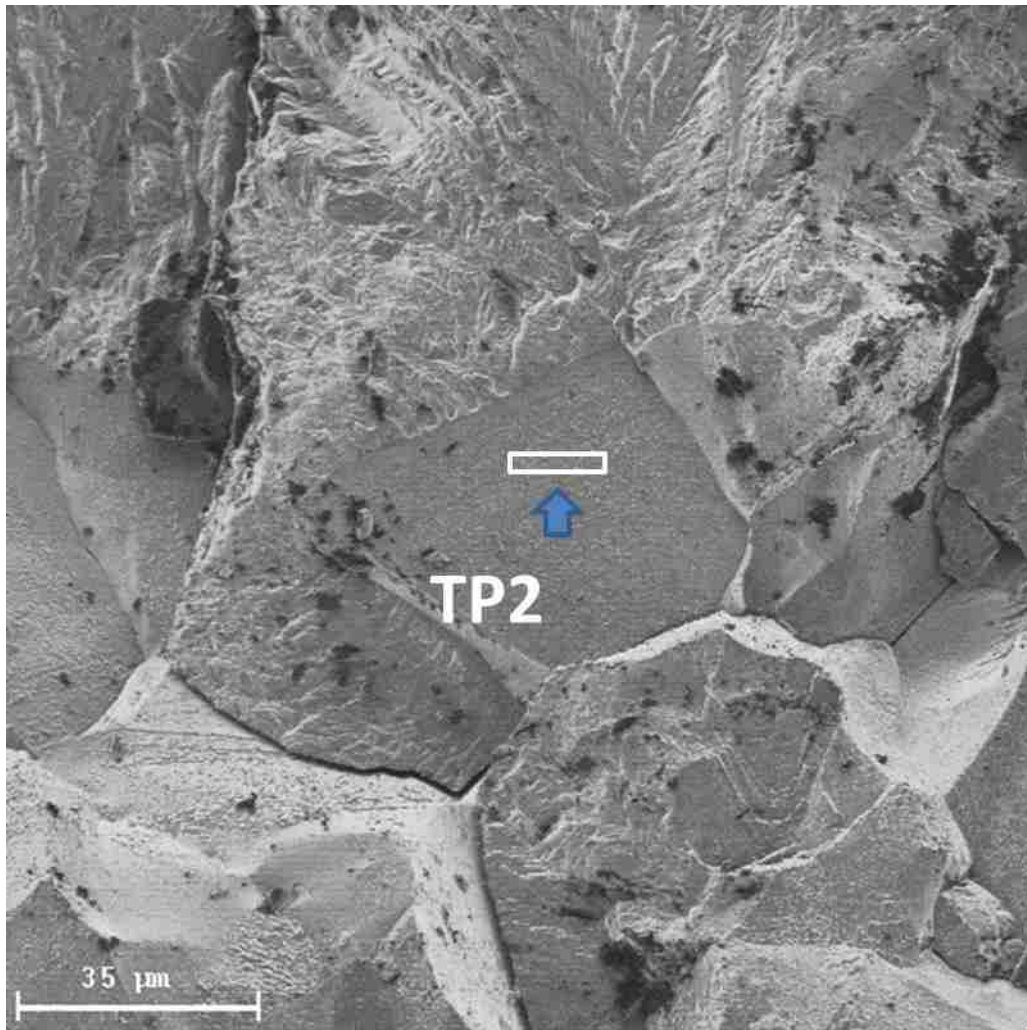


図 3.2.1-70 TP2 ミクロ組織観察試料採取箇所(SIM 像)
 64HC405(SUS316L(HAZ)、 $5.16 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

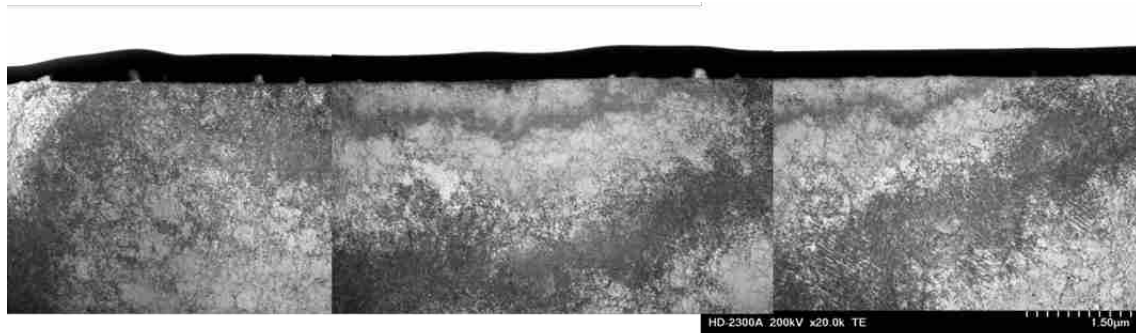


図 3.2.1-71(1) TP2 におけるマイクロ組織
64HC405(SUS316L(HAZ)、 $5.16 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

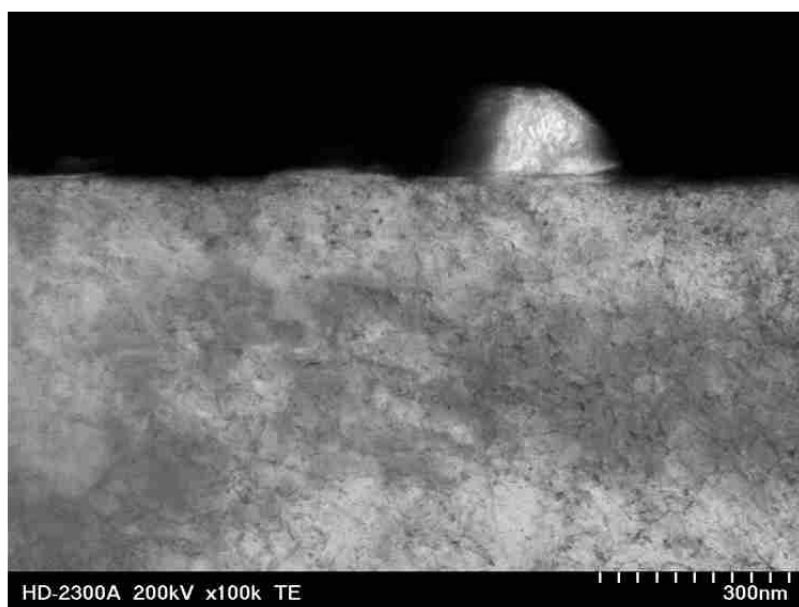
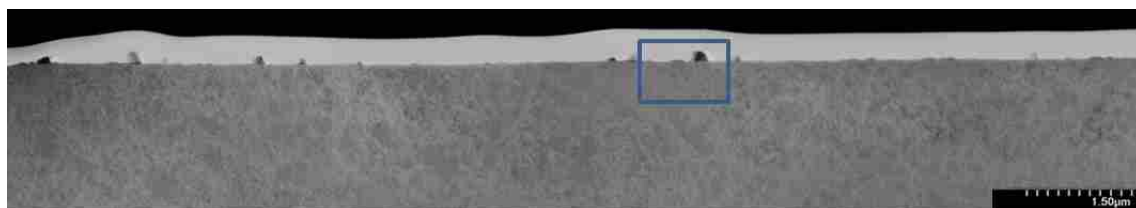


図 3.2.1-71(2) TP2 におけるマイクロ組織
64HC405(SUS316L(HAZ)、 $5.16 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

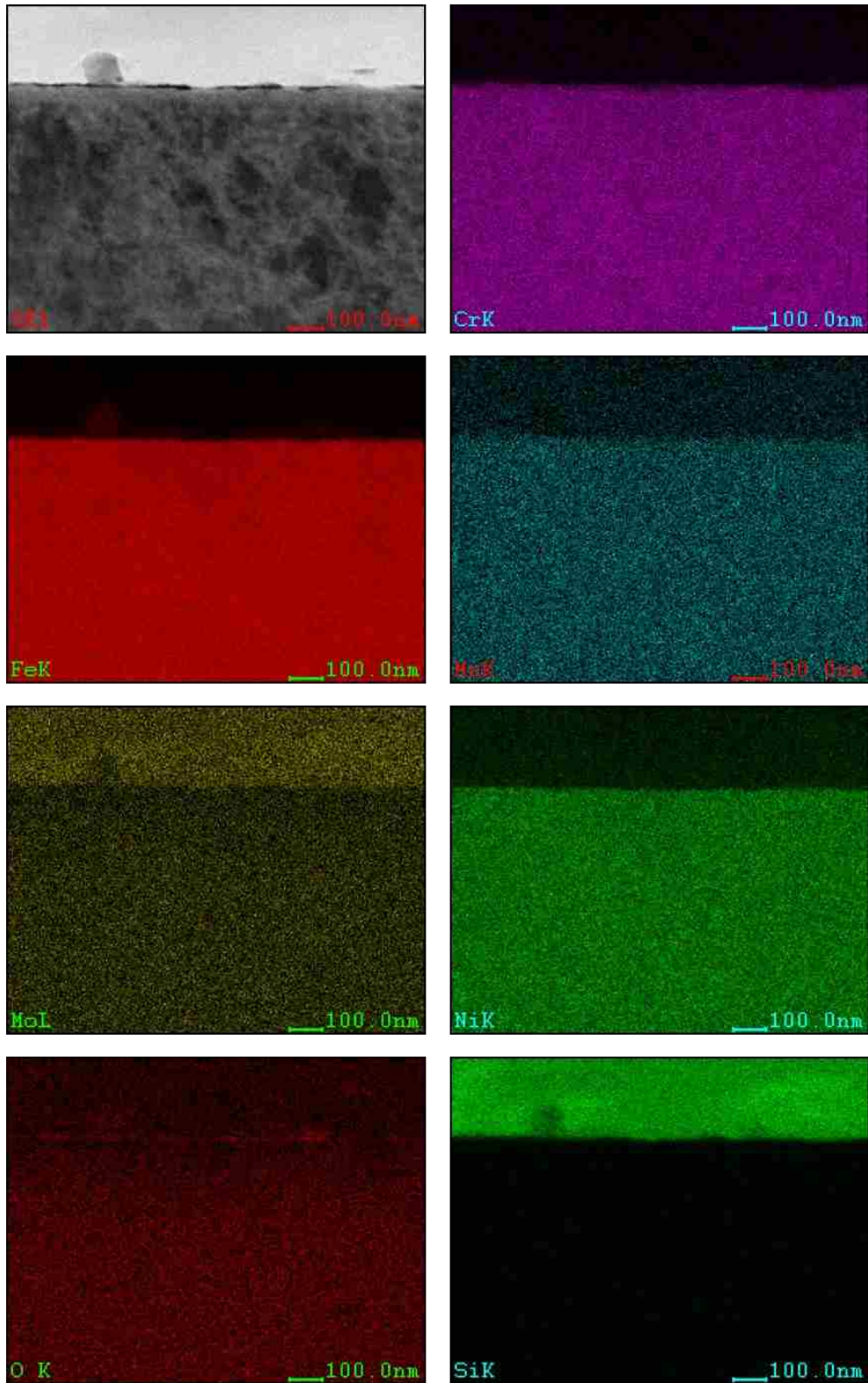


図 3.2.1-72(1) TP2 における酸化皮膜組成マップ(カウント数)
64HC405(SUS316L(HAZ)、 $5.16 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

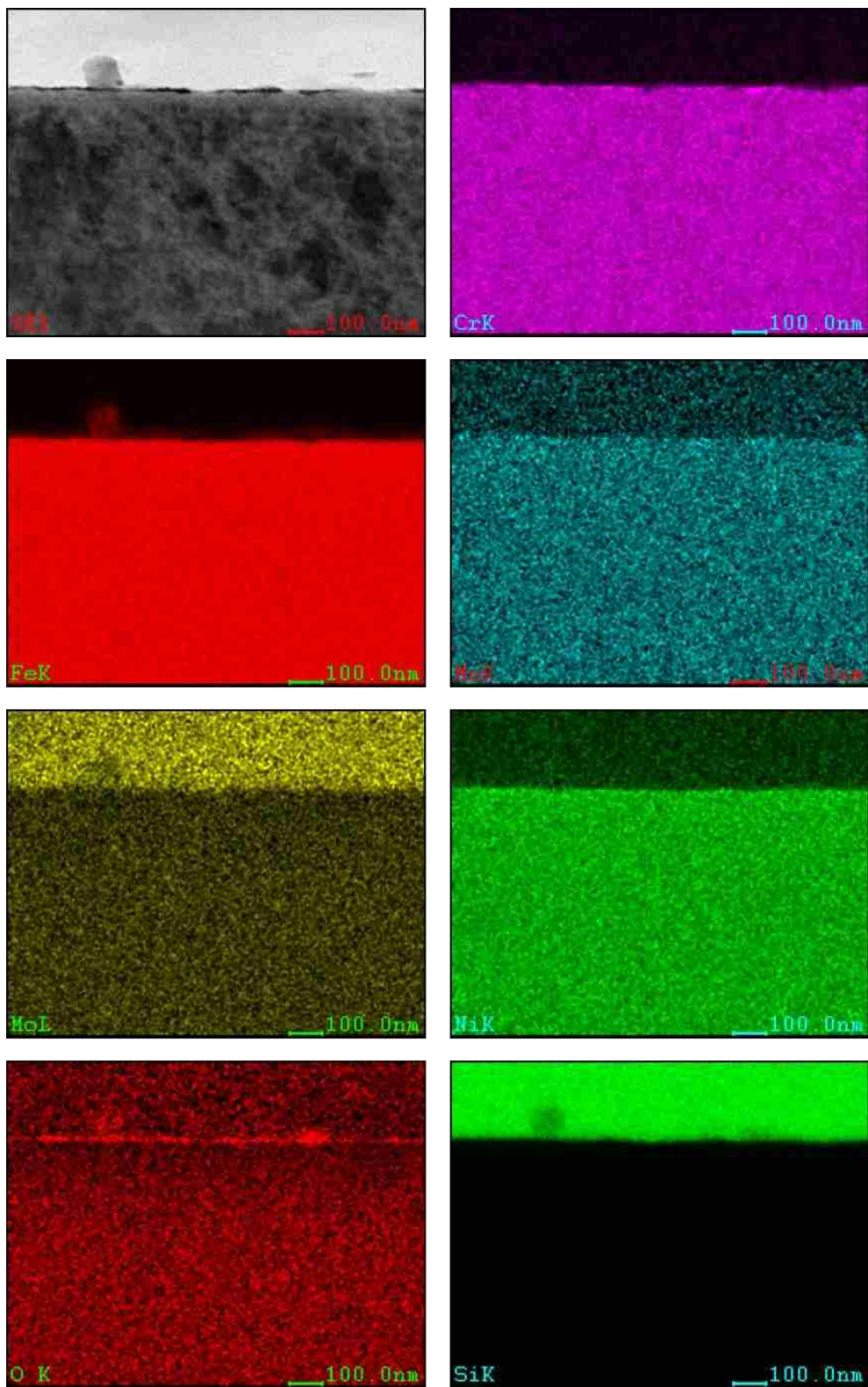


図 3.2.1-72(2) TP2 における酸化皮膜組成マップ(原子%)
64HC405(SUS316L(HAZ)、 $5.16 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$)

3.2.1.5 既往事業の照射材を用いた試験結果の評価

軽水炉発電プラントの運転期間延長認可申請や高経年化技術評価の審査に当たっては、最大 60 年にわたって規制基準に適合することを確認するための知見の収集が必要である。「実用発電用原子炉及びその附属施設における破壊を引き起こす亀裂その他の欠陥の解釈」(“亀裂解釈”平成 26 年 8 月：原子力規制委員会)等では、中性子照射量が $5 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (\text{E} > 1 \text{ MeV})$ を超える場合の BWR 炉内構造物の健全性評価において、日本機械学会発電用原子力設備規格維持規格の亀裂進展速度(添付 E-2)を用いることが規定されている。これに対し、“亀裂解釈”で用いることされる亀裂進展速度(線図)の保守性確認が必要である。

BWR 炉内構造物の供用環境にあつては、ステンレス鋼への中性子照射効果に関する知見の収集と評価が不可欠である。また照射ステンレス鋼の照射誘起応力腐食割れ(IASCC)に関わるこれまでの研究では、ステンレス鋼の亀裂進展速度(線図)の保守性確認に当たっては、ステンレス鋼の亀裂進展促進と照射効果の関連性に着目する必要があると考えられている。具体的には、

- ・ 材料特性変化(照射硬化, 偏析, etc.)
- ・ 亀裂内の水の放射線分解による酸化種湧き出し影響
- ・ 照射誘起酸化皮膜抵抗低下

等が挙げられる。このうち 2 番目及び 3 番目の項目は水の放射線分解や酸化皮膜の放射線による電気伝導に係る事象であるため、中性子や γ 線照射下での評価が必須である。

そこで本事業では、亀裂進展速度(線図)の保守性確認に資することを目的とし、より実機に近い試験条件下でステンレス鋼の亀裂進展速度データを取得すると共に、機構論的視点から亀裂進展促進と材料と環境の照射効果の関係について検討するため、照射下亀裂進展試験を計画中である。照射下亀裂進展試験データの評価には、比較のための照射後(PIE)亀裂進展試験による亀裂進展速度データが不可欠であることから、本項「既往事業の照射材を用いた試験」では、平成 25 年度より今年度にかけて、比較データの先行取得を目的として、既存の中性子照射済 CT 試験片の中から照射下亀裂進展試験マトリクスで計画中の中性子照射量範囲に合致するものを入手し、照射後亀裂進展試験を実施してきた。またメカニズム面から照射下亀裂進展試験結果を評価するため、亀裂先端における酸化反応の検討の一環として照射材特有の変形組織と酸化機構の検証(粒界近傍の局所ひずみ集積と酸化促進)に着目した照射材の変形組織と酸化皮膜観察を実施してきた。本年度は、以下に示す通りこれまでの成果をまとめて総合評価を行い、今後の課題を抽出すると共に照射下亀裂進展試験の計画等への反映を検討することとした。

図 3.2.1-73 は、本事業における照射材を用いた亀裂進展試験の全体フローを示す。このフロー図において、実線で囲んだ項目は既往事業等で照射した試験片用いた試験の実績であり一点鎖線で囲んだ項目は今後実施予定の項目を示す。ここでは、既往事業の照射材を用いた試験でこれまでに取得したデータについて評価を行い、今後の照射下亀裂

進展試験の計画等への反映について検討した。

表 3.2.1-11 は、本事業で実施した既存照射材を用いた照射後亀裂進展試験マトリクスを示す。既存の照射材亀裂進展速度データを、中性子照射量、K 値、ECP の観点で再整理した上で、データ未取得条件の照射後亀裂進展試験を実施した。特に、低 K 値かつ低 ECP(ECP2 及び 3)条件での亀裂進展速度データ(試験片 ID. A425)は、PDM の測定限界を超える有意な評価となることが重要であると考え、長時間試験を実施した。

図 3.2.1-74 は、高 ECP、低 ECP それぞれの条件における SUS316L 母材の亀裂進展速度と中性子照射量の関係を示す。ここでは高 K 値($K \geq 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)条件のデータを図(a)に、また低 K 値($K < 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)条件のデータを図(b)に区分し、本事業で取得したデータを赤色のプロットで示した。この図より、本事業で実施した照射後亀裂進展試験は既存データの無い中性子照射量領域を補完するデータとなっていることが判る。また亀裂進展抑制に及ぼす ECP 低減(=環境緩和)効果は、高照射材($\geq 1.7 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$)に比べて低照射材($< 1 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$)において顕著であることや、その傾向は高 K 値条件よりも低 K 値条件においてより明確であることを明らかにした。更に図 3.2.1-75 に示すように、本事業で取得したデータ(赤色のプロット: 低 K 値 $K < 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 条件)によれば、SUS316L 照射材の HAZ(溶接熱影響硬化部)においても ECP 低減による亀裂進展抑制効果は認められるものの、母材の方が明確であることが判った。

以上のような亀裂進展速度と ECP の関係について、メカニズム面からの評価の一環として引張試験で得られた応力-ひずみの関係、ひずみの付与による変形組織の観点から検討を行った。その概要を図 3.2.1-76 に示す。なお中性子照射量と亀裂進展速度の関係図には、図 3.2.1-74 と図 3.2.1-75 のデータを全て記載した。この図に示した 290°C における照射ステンレス鋼の応力-ひずみの関係を見ると、低照射量($1.09 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$: 1.68 dpa 以下)では加工硬化能が認められるのに対して高照射量($3.04 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$: 2.74 dpa 以上)では加工硬化能が認められないことが判る。またこれらと同様の中性子照射量の変形組織の例として室温引張で約 2%ひずみを付与した時のマイクロ組織観察結果によれば、低照射量条件の供試材では結晶粒の変形に伴って加工転位や双晶が形成して表面には緩やかなすべり表面ステップが形成したのに対し、高照射量条件の供試材では転位チャネルを伴う照射材特有の変形組織が表面の段差の大きいすべり表面ステップ組織や粒界近傍の大きなずれの形成に関与していることが考えられる。以上の事柄を総合的に評価すると、中性子照射量と亀裂進展速度の関係図において赤色の破線で囲った高照射量条件では、結晶粒の変形によって転位チャネルが抜けた粒界に局所ひずみ(変形)が蓄積し、その結果青色の破線で囲った低照射量領域に比べて粒界割れにおける力学因子の寄与が大きくなったものと思われる。このことは、照射ステンレス鋼の亀裂先端における材料、応力、環境因子の関わりが高照射量領域と低照射領域で異なることを示唆するものと思われ、今回の結果からそのしきい照射量は約 $1.1 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ 程度と見積もった。

以上のことを踏まえ、亀裂進展への水の放射線分解の影響評価に適した中性子照射量

と試験条件を選定し、照射下亀裂進展試験マトリクスへ反映を検討した。その結果を、当初計画と比較して表 3.2.1-12 に示す。表 3.2.1-12 (1)に示した当初計画での照射試験内容は以下の通りとしていた。

- ・BWR 炉心シュラウド模擬ステンレス鋼溶接継手より母材及び HAZ の亀裂進展速度を評価するための CT 試験片を採取し、JMTR で中性子照射する。
- ・CT 試験片は、亀裂進展評価に広く用いられている標準的なサイズの 0.5T-CT 試験片を採用する。
- ・運転期間 60 年超を見据えて、中性子照射量は $3 \times 10^{24} \sim 3 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ より 3~4 レベル選定する(ベース照射)。
- ・ベース照射した CT 試験片を JMTR に再装荷し、照射下亀裂進展試験を実施する。同時に照射下亀裂進展試験キャプセル内に ECP センサーを装荷して環境パラメータとの関係性を評価する。

これに対し、照射試験内容(案)の内容を以下の通りに見直した。

- ・BWR 炉心シュラウド模擬ステンレス鋼溶接継手から採取、中性子照射した母材及び HAZ の CT 試験片を利用し、JMTR の再稼動遅延と試験効率向上に対応する。
- ・亀裂進展への環境影響が顕著な低照射量を中心とし、HAZ の硬化と環境影響の重畳による亀裂進展促進への影響評価に着目した試験計画に見直す。
- ・炉内照射下亀裂進展試験に海外炉を用いることを基本とし、本事業で準備した荷重負荷ユニットと ECP センサーを装荷して当初計画と同等な照射下亀裂進展試験を実施する。

表 3.2.1-13 に、本事業で計画中の照射下亀裂進展試験の検討項目と必要性を挙げると共に、試験を効率的かつ合理的に進めるために行ってきた既存の知見の再評価とこれまでに得られた成果を整理した。

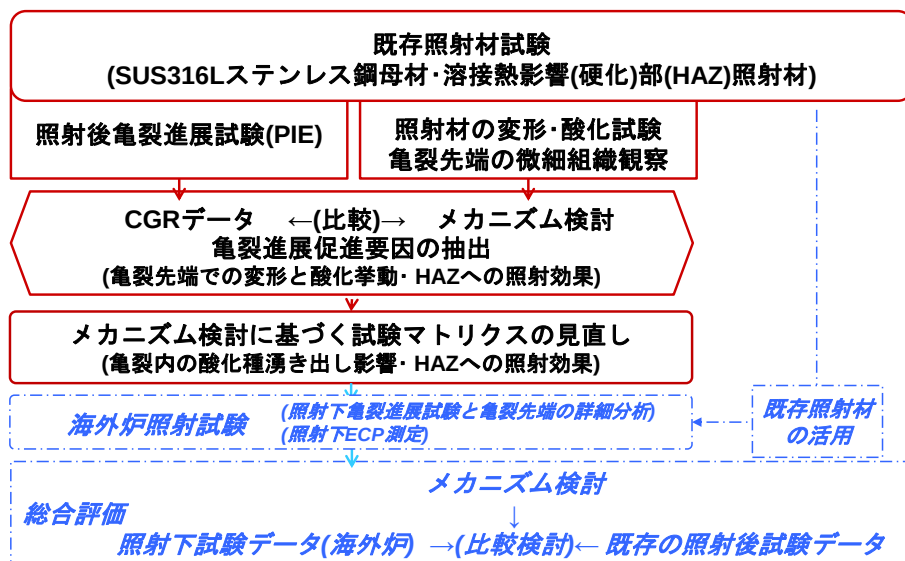


図 3.2.1-73 照射材を用いた亀裂進展試験の全体フローと
既往事業の照射材を用いた試験の位置づけ
(実線で囲んだ項目：実施実績 一点鎖線で囲んだ項目：今後実施予定項目)

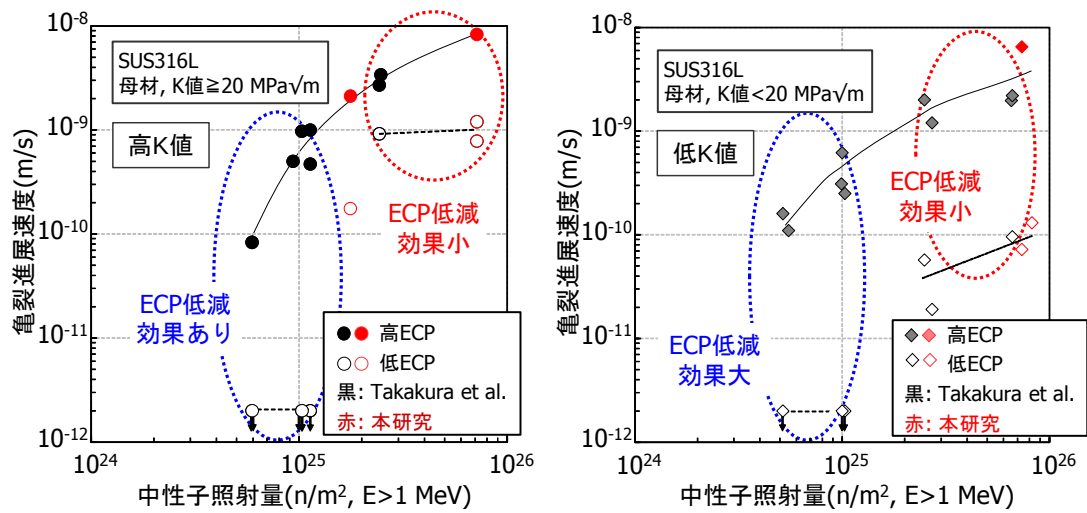
表 3.2.1-11 既存照射材を用いた亀裂進展試験 試験マトリクス

試験片 ID	鋼種	照射量($E > 1 \text{ MeV}$) (損傷量)	亀裂進展試験環境条件※)			K 値 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)
			ECP1	ECP2	ECP3	
E304	SUS316L (母材)	$1.73 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ (2.88 dpa)	○	○	○	高(≥ 20)
A410		$7.14 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ (11.9 dpa)	○	○	○	高(≥ 20)
A412		$7.38 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ (12.3 dpa)	○	○	○	低(< 20)
A425		$8.23 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$ (13.7 dpa)	—	○	○	低(< 20)
64HC 405	SUS316L (H4 HAZ)	$5.16 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ (0.793 dpa)	○	—		低(< 20)

凡例 ○：実施 —：実施なし

※) ECP1：酸素飽和(DO32ppm) ECP2：脱気(DO10ppb 程度)

ECP3：脱気＋水素注入(DH50ppb 程度)。ECP2 で試験開始し、亀裂進展の経過を見ながら ECP2 または ECP3 条件での亀裂進展速度データを取得する。



(a)高 K 値($K \geq 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) (a)低 K 値($K < 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)
 図 3.2.1-74 SUS316L 照射材の亀裂進展速度と中性子照射量の関係

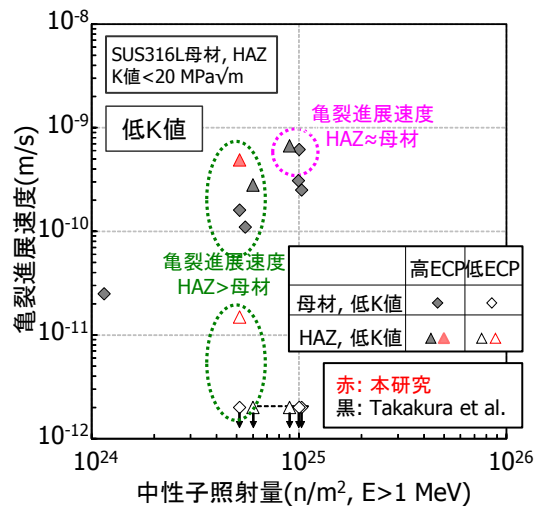


図 3.2.1-75 SUS316L 照射材の母材と HAZ の亀裂進展速度と中性子照射量の関係
 (低 K 値: $K < 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 条件)

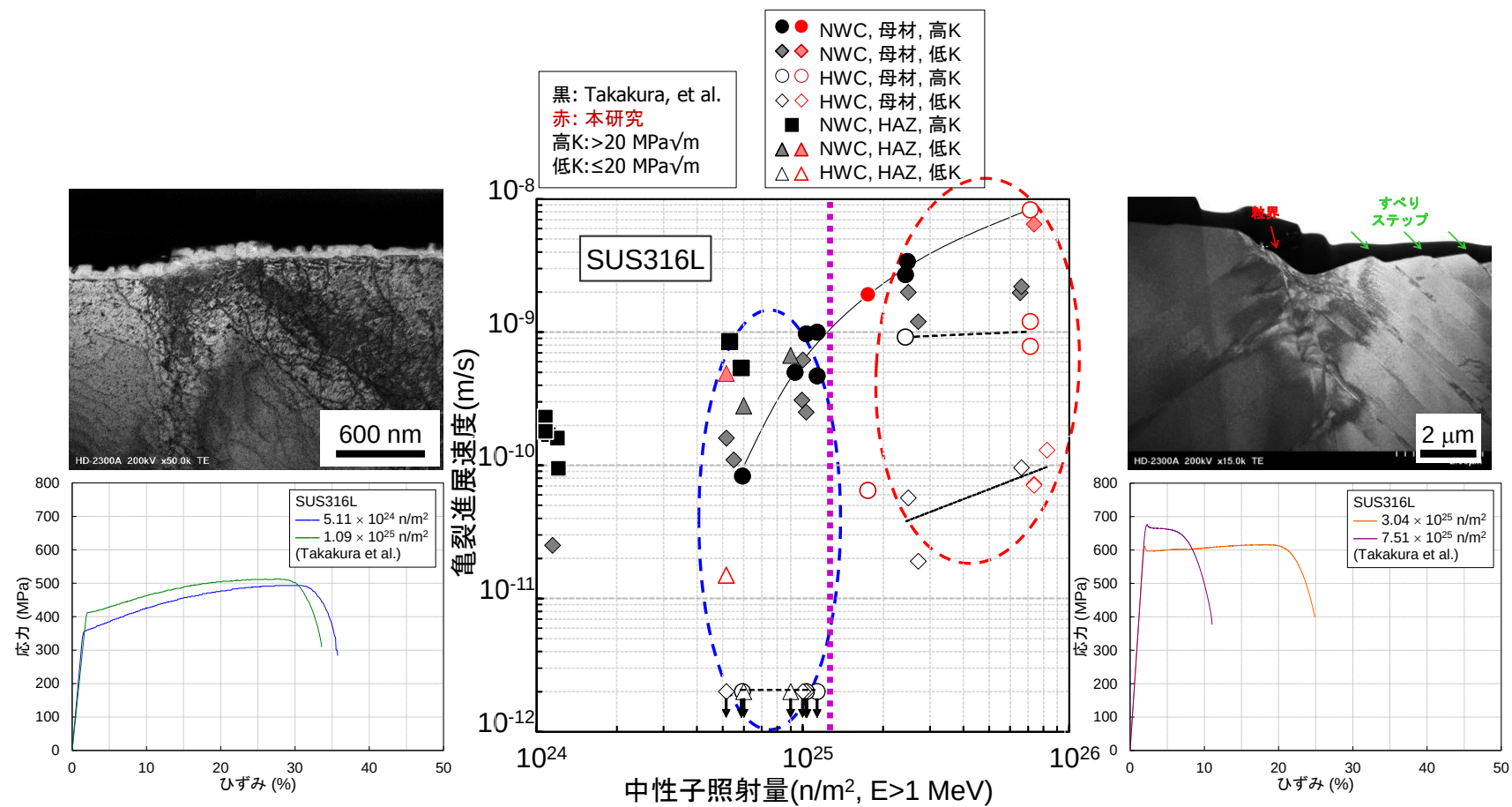


図 3.2.1-76 変形挙動の相違する SUS316L 照射材の亀裂進展速度と中性子照射量の関係

表 3.2.1-12 照射下亀裂進展試験マトリクスの見直し(案)

(1)当初計画

	照射量(n/m ² (E>1MeV))		
	3×10 ²⁴	5×10 ²⁴ ~ 2×10 ²⁵	>2×10 ²⁵
試験数	4	4	4

(2)見直し後

	照射量(n/m ² (E>1MeV))		
	3×10 ²⁴	5×10 ²⁴ ~ 2×10 ²⁵	>2×10 ²⁵
試験数	6(HAZ中心)	6(HAZ中心)	0

表 3.2.1-13 照射下亀裂進展評価における検討項目と必要性に対するこれまでの成果と今後の課題

検討項目	必要性	既存知見における技術的課題	本事業で得られた成果	今後の課題
① 照射ステンレス鋼の亀裂進展に及ぼす亀裂内の水の放射線分解の影響	照射下高温水中亀裂進展試験により、材料と環境への照射効果の重量を考慮した総合評価	• Halden炉での実績・知見 → 数多くの照射下亀裂進展試験実績 → 同条件の照射材を使ったPIEと照射下試験の直接比較が極めて少ない • JMTRでの実績・知見 → 中性子照射SUS304母材を用いた照射下試験実績	• 既存照射材のPIEデータに基づき、亀裂進展促進に及ぼす放射線分解水質の影響評価に適した試験条件の検討 ➢ 照射下亀裂進展試験マトリクスを中性子照射量1×10²⁵ n/m²以下の試験片を用いた条件に重点化	• 照射下CGRデータの総合評価に基づく亀裂進展速度の保守性確認 • 比較のための低ECP条件CGRデータ(PIE)の拡充
② 亀裂進展促進と材料(特にHAZ)照射効果の関係評価	炉内構造物HAZの亀裂進展評価における母材のCGRデータ(または線図)適用の保守性確認	• IASCC事業、ENI事業で得られた知見 → 中性子照射量1×10²⁵ n/m²では母材とHAZのCGRはほぼ同等(IASCC事業) ※開先形状が実機と相違、機械的性質等の照射データが十分でない等の制約あり → 中性子照射量5×10²⁴ n/m²以下の照射によってHAZの亀裂進展促進(ENI事業) • その他の既往データ・亀裂進展速度線図からの知見 → HAZを対象とした検討は限定的	• SUS316L HAZ(H4溶接線模擬: 中性子照射量5×10²⁴ n/m²)の低K値、低ECP条件での長時間亀裂進展試験 ➢ HAZへのECP低減による亀裂進展抑制効果は母材への効果に比べて小さい • SUS316L母材(中性子照射量7×10²⁵ n/m²)の低ECP環境長時間亀裂進展試験 ➢ 高照射量領域でのECP低減による亀裂進展抑制効果は低照射量領域に比べて小さい • 照射材特有の変形組織と酸化挙動に関する基礎検討 ➢ 結晶粒の変形に起因する粒界へのひずみ蓄積(局所変形)が顕著となるしきい照射量(1×10²⁵ n/m²以上)の確認 ➢ 引張特性における加工硬化能と結晶粒内の変形組織の関連付け • 照射材データに基づく傾向式の提案 ➢ IASCC特性と他の照射データの関係に係る系統的・網羅的検討に着手 • 亀裂進展試験後のCT試験片亀裂先端の酸化皮膜性状の詳細分析 ➢ 間接的な亀裂先端の環境評価に着手	• HAZの亀裂進展評価に対する母材の亀裂進展速度線図適用性確認 • 照射材の物性値に対して設定した傾向式を用い、亀裂進展促進に係る材料照射効果の系統的な検討 • 照射下亀裂進展試験片の亀裂先端の詳細分析に基づくバルク水と亀裂内環境の差異の評価 • 亀裂内環境下での水のラジオリシスが亀裂進展促進に及ぼす影響検討
③ 亀裂内環境とバルク水の関係及び亀裂進展促進への影響評価	亀裂進展促進要因の検討(メカニズム解明)	• 材料照射効果の寄与 → 照射硬化、照射誘起偏析等の材料照射データとIASCCの関連を系統的に検討した例は極めて少ない • 環境照射効果の寄与 → 低ECP条件でのCGR評価事例拡充要件に亀裂内環境とバルク水の差異評価と亀裂促進への影響についての定説なし		

3.2.1.6 CT試験片の亀裂内に形成した酸化物の分析

(1) 試験方法

① 供試材

酸化物の分析には、「亀裂進展速度に及ぼす添加物影響評価試験」(平成 27 年度実施)の破面解放後の 0.7T-CT 試験片(図 3.2.1-77)を用いた。以下に平成 27 年度の実績に基づき、供試材及び亀裂進展試験条件を示す。

供試材とした 600 合金(MA600)の化学成分と機械特性を表 3.2.1-14 及び表 3.2.1-15 に示す。この供試材に 10%の一軸引張冷間加工を付与した後、安定伸びが確認された部位から T-L 方向に 0.7T-CT 試験片を切り出した(図 3.2.1-78 及び図 3.2.1-79 参照)。亀裂進展試験は、PWR 一次系模擬水質(1800ppm as B、3.5ppm as Li)で溶存水素(DH)濃度を 5、30、50cc/kg H₂O STP の 3 水準の条件で実施した。また添加物影響評価において着目した亜鉛(Zn)の注入条件は、国内原子力プラント実績相当となる 5~10ppb を管理目標に設定した。試験温度は、実機温度条件を考慮して 320℃とし、応力拡大係数(K 値)が 24 MPa√m となるように荷重条件を決定した。

亀裂進展試験終了後の試験片外観を図 3.2.1-80 に示す。この図より、試験条件の DH ごとに CT 試験片の表面と環境中で進展した亀裂(破面)の色調が異なることが判り、DH 濃度によって形成した酸化物の性状が異なっていることが示唆された。

② 試験マトリクスと試験方法

PWR 一次系模擬環境下で進展した環境中で進展した亀裂開口部近傍(疲労予亀裂先端部から概ね 200 μm 以内)と、亀裂先端部(環境下で進展した亀裂と強制破面の境界から概ね 100 μm 以内)を対象として、走査型電子顕微鏡(Scanning Electron Microscope: SEM)を用いて酸化物の表面状態を観察した後、収束イオンビーム(FIB)法によりそれぞれの位置からマイクロ組織観察用試験片を採取した。また亀裂内のすき間条件下と自由表面での酸化皮膜の性状等を比較するため、CT 試験片サイドグループの近傍を対象に表面の酸化物を分析した。

酸化物分析マトリクスを表 3.2.1-16 に示す。分析として、主に FIB で採取したマイクロ組織観察用試験片を用いて電界放出型電子銃付(走査)透過型電子顕微鏡((Scanning) Transmission Electron Microscope equipped Field Emission gun and Energy dispersed X-ray spectroscopy: FE-(S)TEM/EDX)を用いた酸化物の性状と厚さの評価と酸化物の半定量分析と元素マッピングを行った。電子線のスポット径は約 0.1 nm であった。またホウ素等の軽元素の分析には、電子エネルギー損失分光装置(EELS; Electron Energy-Loss Spectroscopy)を用いた。さらに CT 試験片サイドグループの近傍のオージェ電子分光分析(AES; Auger Electron Spectroscopy)を実施し、マイクロ組織観察用試験片よりも広い範囲の酸化物を対象に、酸化物厚さと深さ方向に対する構成元素の分布を評価した。なお酸化物の厚さは酸素の深さ方向分布の半値幅を以って酸化皮膜厚さとした。

表 3.2.1-14 供試材の化学成分分析結果(wt%)

	C	Mn	Fe	S	Si	Cu	Ni	Cr	P
ミルシート	0.08	0.28	9.29	0.001	0.30	0.07	74.17	15.80	0.007
規格値	0.15 以下	1.0 以下	6.00~10.00	0.015 以下	0.50 以下	0.50 以下	72.0 以上	14.0~17.0	-

表 3.2.1-15 機械的特性評価

	0.2%耐力(MPa)	引張強さ(MPa)	伸び(%)	絞り(%)	ロックウェル硬さ
ミルシート	411	732	35.2	60.8	92.1 注)
規格値	235~628	579~833	50~30	-	75~95

注)ビッカース換算で約 Hv200

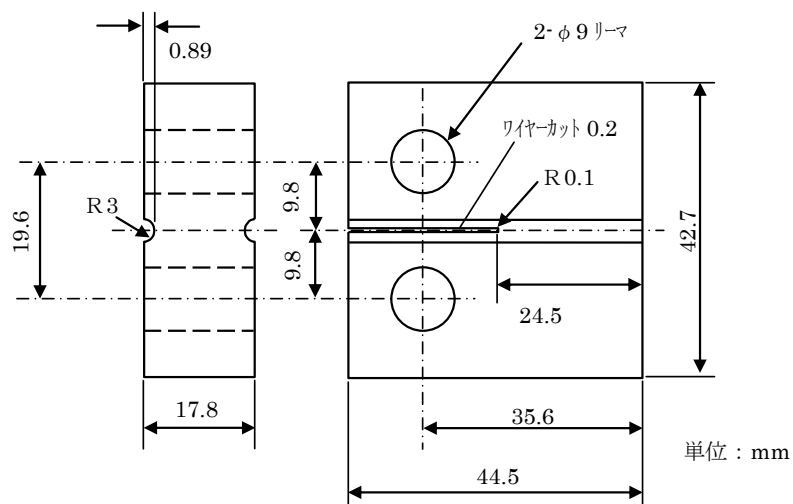


図 3.2.1-77 0.7T-CT 試験片の構造及び寸法

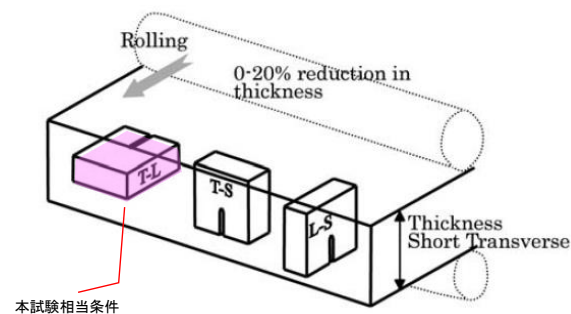


図 3.2.1-78 試験片の冷間圧延(加工)方向

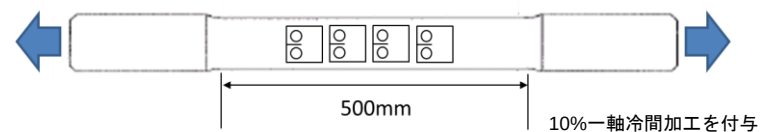


図 3.2.1-79 冷間加工付与用素材とCT試験片切り出しイメージ

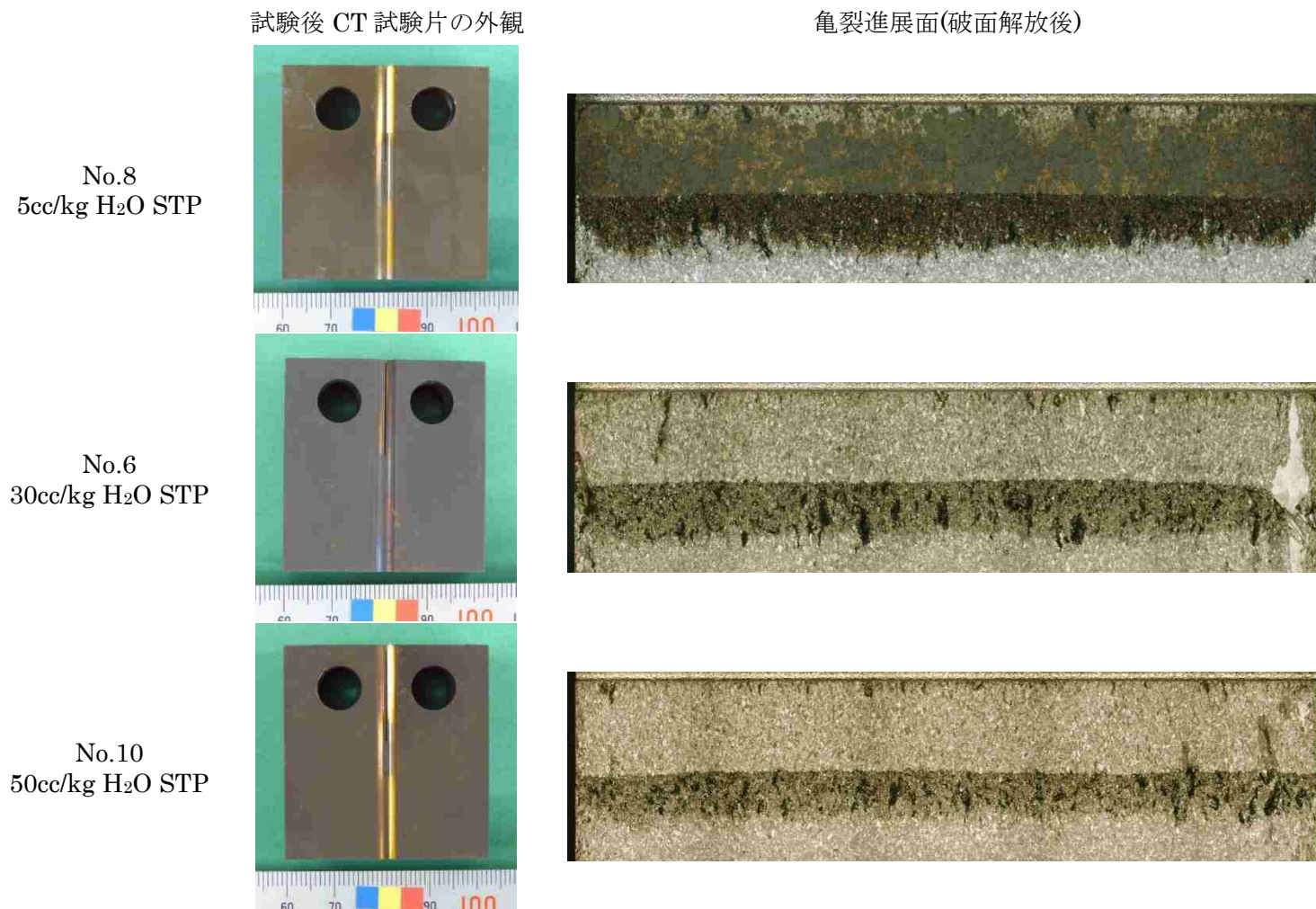


図 3.2.1-80 亀裂進展試験後の試験片外観(CT 試験片表面および破面)確認結果

表 3.2.1-16 酸化物分析マトリクス

	試験片 ID	No.8	No.6	No.10
	供試材	10%冷間加工 MA(ミルアニール)600 合金		
	試験温度	320℃		
	K 値条件	約 24 MPa√m		
	DH(H ₂ O STP)	5 cc/kg	30 cc/kg	50 cc/kg
	亀裂進展試験時間	2040 時間	2210 時間	2040 時間
分析位置と分析方法	環境中で進展した亀裂開口部近傍※1)	FE-STEM/EDX	FE-STEM/EDX	FE-STEM/EDX
	亀裂先端部※2)	FE-STEM/EDX	FE-STEM/EDX	FE-STEM/EDX
	CT 試験片 サイドグループ表面	AES	AES FE-STEM/EDX	AES

DH: 溶存水素濃度

FE-STEM/EDX: 電界放出型電子銃とエネルギー分散型 X 線分光装置を有する走査透過型電子顕微鏡

AES: オージェ電子分光分析装置

※1) 疲労予亀裂先端部から概ね 200 μm 以内

※2) 環境下で進展した亀裂と/強制破面境界から概ね 100 μm 以内

(2) 試験結果

① CT試験片(No.8)の分析結果(試験条件5cc/kg H₂O STP)

a. 環境中で進展した亀裂開口部近傍

図 3.2.1-81 に、環境中で進展した亀裂開口部近傍の酸化物の FIB サンプリング位置を示す。サンプリング位置の表面には、粒状酸化物の上部に針状酸化物が形成している様子が観察された。図 3.2.1-82 の図(a)は FIB でサンプリングした試験片の FEG-STEM による Z コントラスト像の低倍率観察結果、また図(b)及び(c)は高倍率での視野①と②の観察結果と酸化物の回折図形を示す。視野①と②のいずれにおいても、下側に明るい組織が観察され、その上側に不定形のやや暗い組織、粒状と針状の組織が認められた。

図 3.2.1-83(1)及び(2)は、視野①と②の EDX マッピングと点分析結果を示す。ここで、図中の 8M-1~16 は点分析実施位置を示し、分析結果は原子%で示した。これらを総合的に検討した結果、観察領域下側の明るい部分(8M-6、15)はニッケル基合金母相であり、その表面上(亀裂が伝播した粒界)には厚さ約 100 nm の Fe と Cr を含む NiO の内層酸化物(8M-3~5、13~14)が形成し、その上部の粒状酸化物(8M-1~2、11~12)は Fe をわずかに含む NiO であることが判った。さらに、針状の外層酸化物(8M-7~10)は、ホウ素を含む酸化物に近い結晶構造の Fe および Ni 主体の酸化物であると推定された。一方この視野において粒界に析出した Cr 炭化物の形成は認められず、また EDX 分析の結果において Zn は検出されなかった。

b. 亀裂先端部

図 3.2.1-84 に、亀裂先端部に形成した酸化物の FIB サンプリング位置を示す。サンプリング位置の表面には、粒状酸化物の上部に針状酸化物の形成が認められた。図 3.2.1-85 の図(a)は FIB でサンプリングした試験片の FEG-STEM による Z コントラスト像の低倍率観察結果、また図(b)及び(c)は高倍率での視野①と②の観察結果と酸化物の回折図形を示す。視野①と②のいずれにおいても、下側に明るい組織が観察され、その上側に不定形のやや暗い組織が認められ、さらにその上部には針状の組織が形成していた。

図 3.2.1-86 に、視野②の EDX マッピングと点分析結果を示す。ここで、図中の 8S-1~6 は点分析実施位置を示し、分析結果は原子%で示した。これらを総合的に検討した結果、観察領域下側の明るい部分(8S-7)はニッケル基合金母相であり、その直上(亀裂が伝播した粒界)に観察された不定形の組織(8S-4~5)は、粒界に析出した Cr 炭化物であった。また Cr 炭化物の近傍には厚さ約 20 nm の Cr リッチな NiO の内層酸化物(8S-3)の形成が認められた。さらに、Cr 炭化物周辺から針状の外層酸化物(8S-1~2、6)が成長しており、ホウ素を含む酸化物に近い結晶構造の Fe および Ni 主体の酸化物であると確認された。一方この視野において、粒状の外層酸化物の形成は認められなかった。なお EDX 分析の結果において Zn は検出されなかった。

c. CT試験片サイドグループ表面

図 3.2.1-87 は、CT 試験片サイドグループの表面を SEM と AES で分析した結果を示す。CT 試験片の表面には一様に針状の外層酸化物が形成していた。また AES 分析の結果より、酸化物中に Zn が存在することが確認された。AES 分析より見積もった酸化物の厚さは SiO₂ 換算で約 100 nm であった。

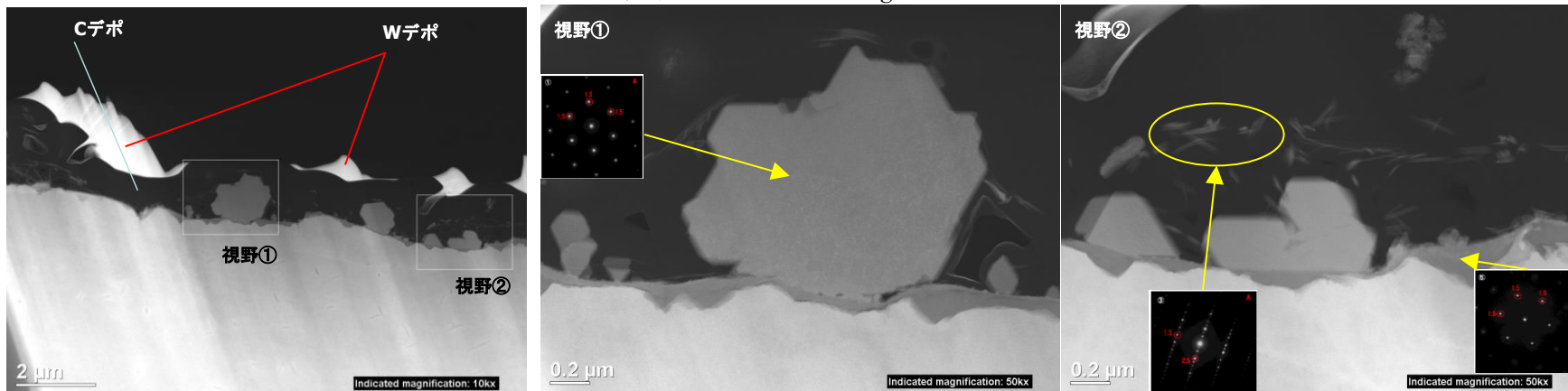


(a)低倍率

(b)高倍率

(c)FIB サンプリング位置詳細(破線)

図 3.2.1-81 環境中で進展した亀裂開口部近傍の破面 SEM 観察結果と FIB サンプリング位置
(試験片 No.8 DH : 5cc/kg H₂O STP)



(a)低倍率

(b)高倍率(視野①)

(c)高倍率(視野②)

図 3.2.1-82 環境中で進展した亀裂開口部近傍の微細組織観察結果(FE-STEM/EDX Z コントラスト像)
(試験片 No.8 DH : 5cc/kg H₂O STP)

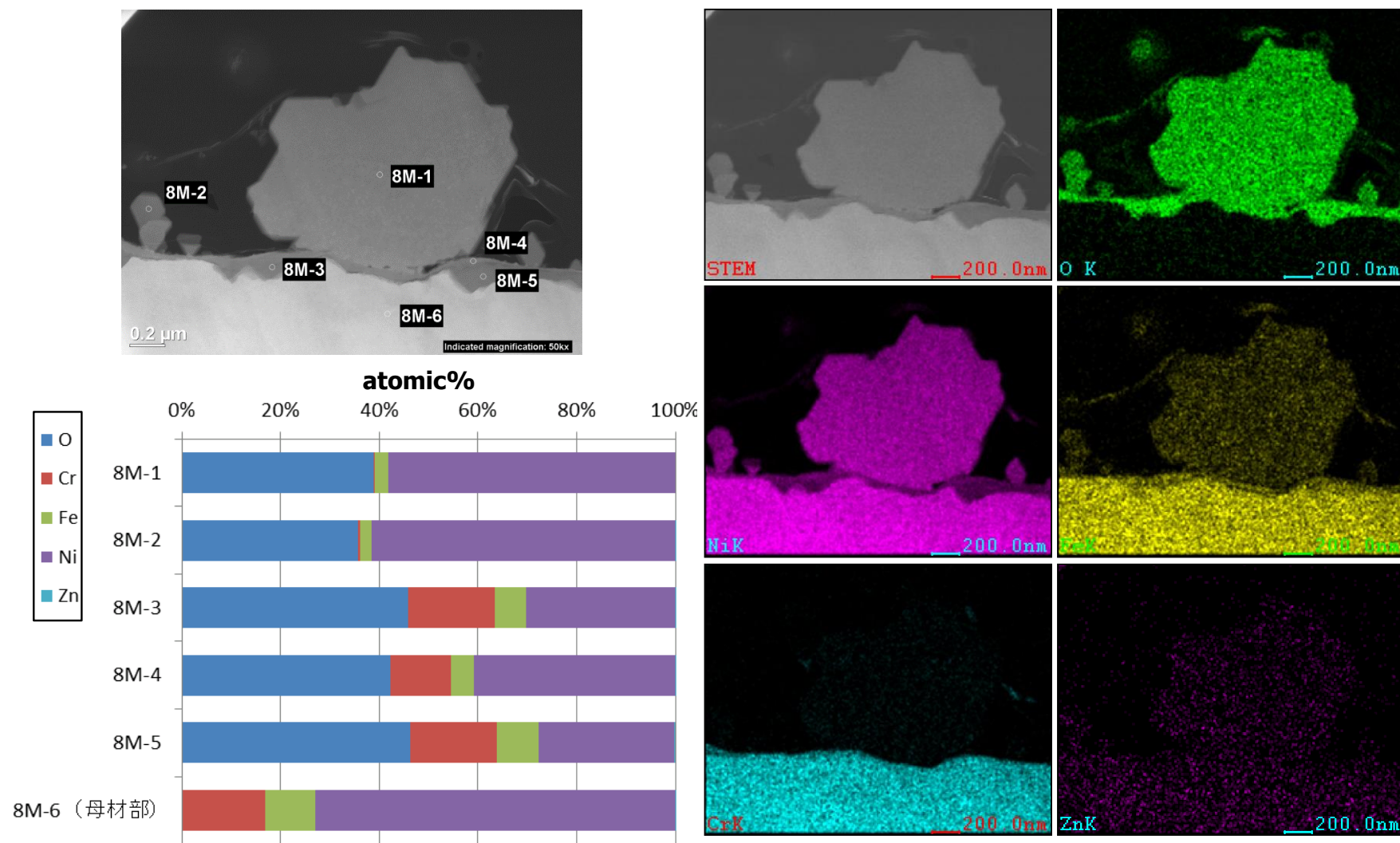


図 3.2.1-83 環境中で進展した亀裂開口部近傍の酸化物の EDX 分析結果(視野①)
(試験片 No.8 DH : 5cc/kg H₂O STP)

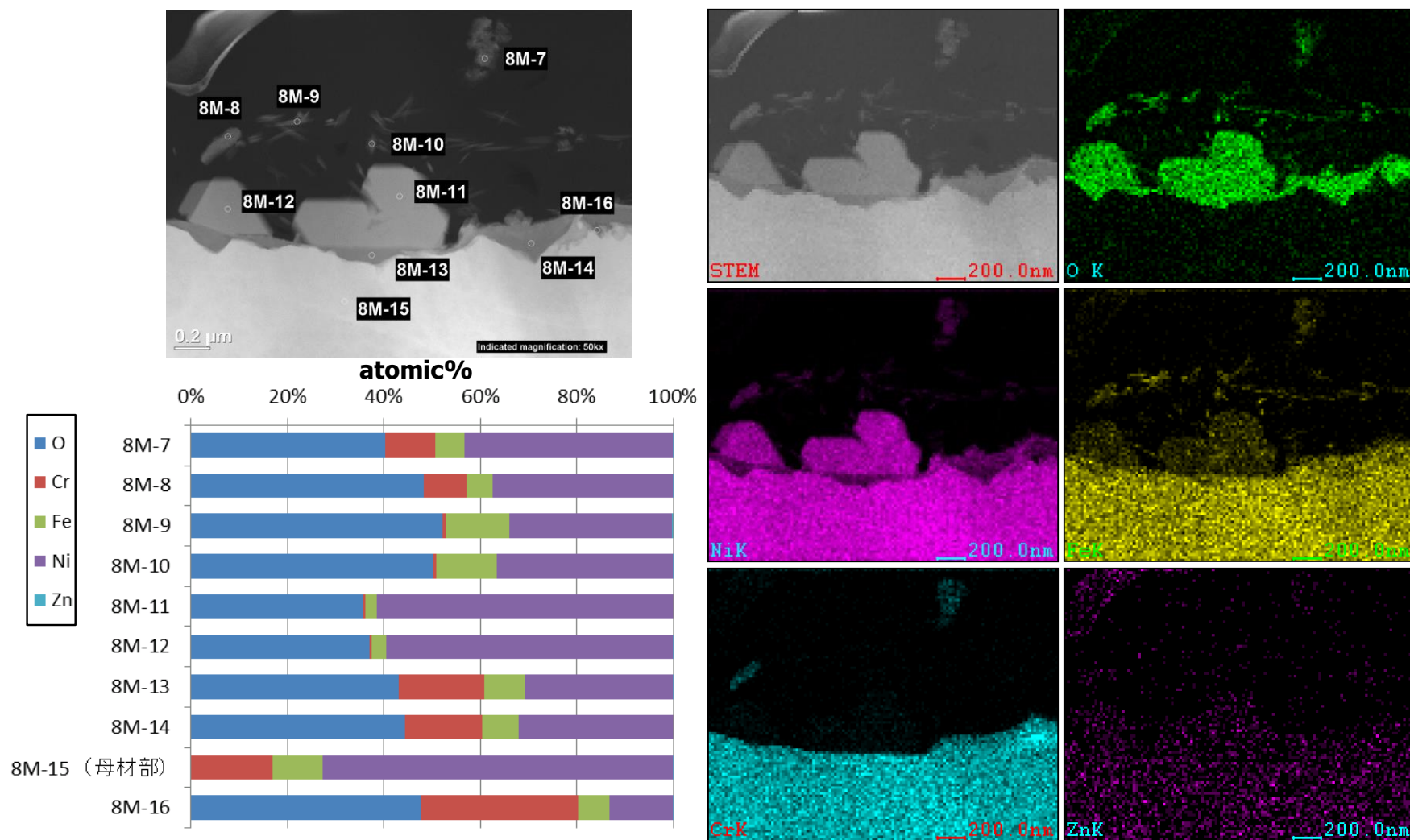
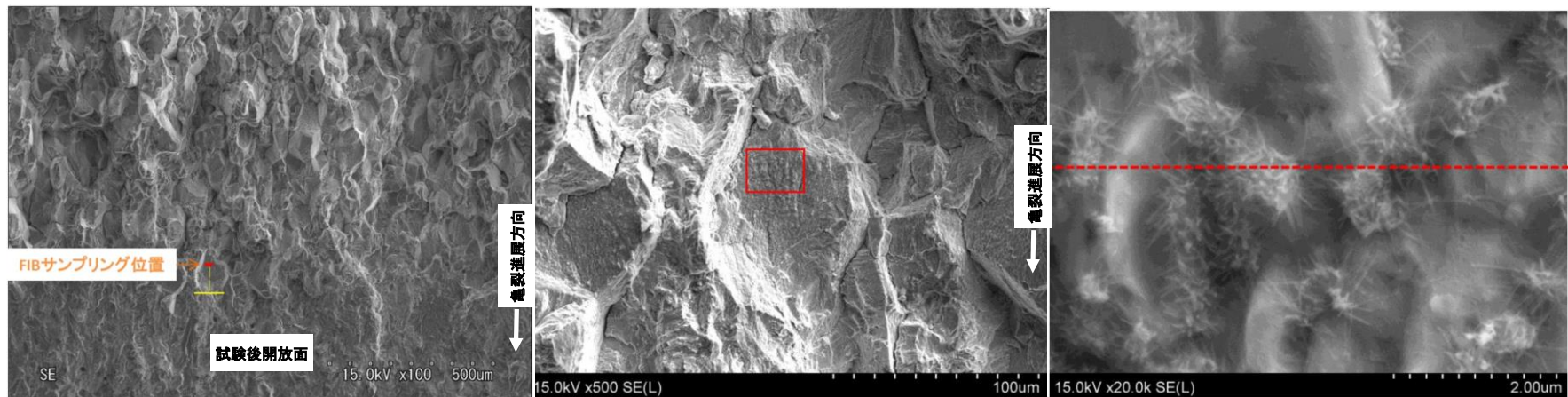


図 3.2.1-83(2) 環境中で進展した亀裂開口部近傍の酸化物の EDX 分析結果(視野②)
(試験片 No.8 DH : 5cc/kg H₂O STP)

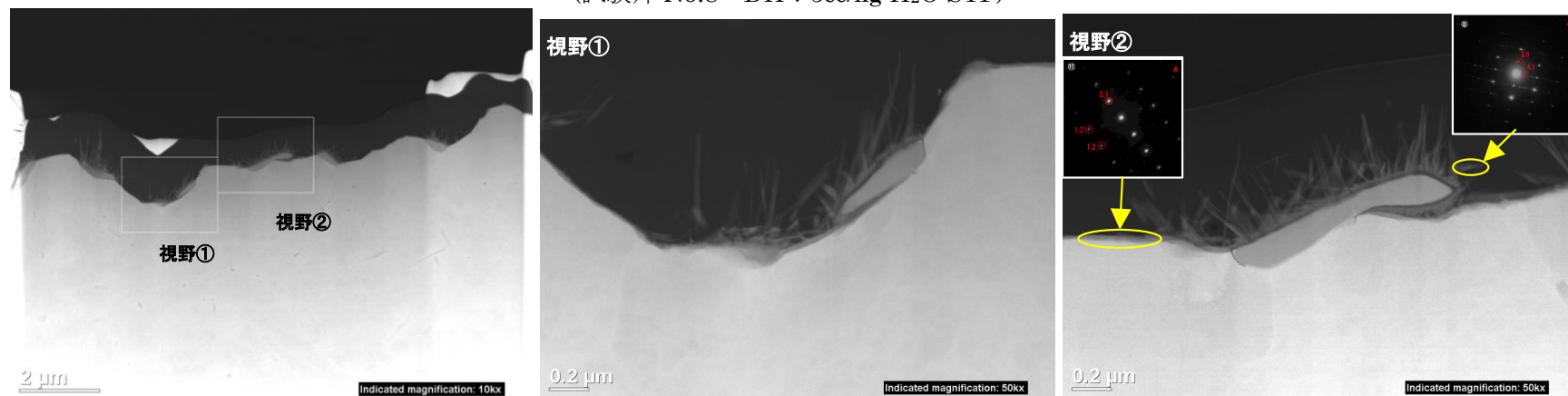


(a)低倍率

(b)高倍率

(c)FIB サンプリング位置詳細(破線)

図 3.2.1-84 亀裂先端部の破面 SEM 観察結果と FIB サンプリング位置
(試験片 No.8 DH : 5cc/kg H₂O STP)



(a)低倍率

(b)高倍率(視野①)

(c)高倍率(視野②)

図 3.2.1-85 亀裂先端部の微細組織観察結果(FE-STEM/EDX Z コントラスト像)
(試験片 No.8 DH : 5cc/kg H₂O STP)

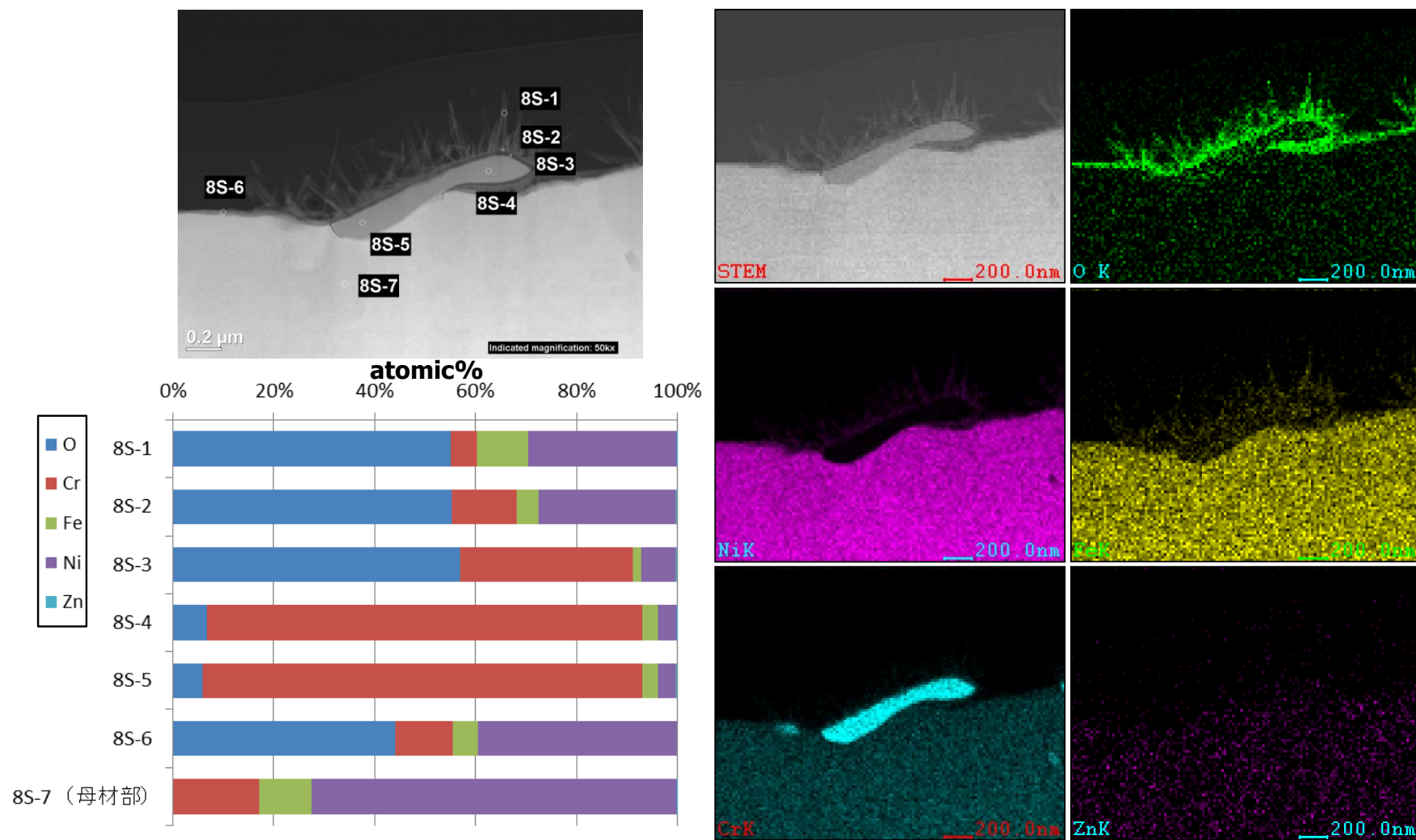


図 3.2.1-86 亀裂先端部の酸化物の EDX 分析結果(試験片 No.8 DH : 5cc/kg H₂O STP 視野②)

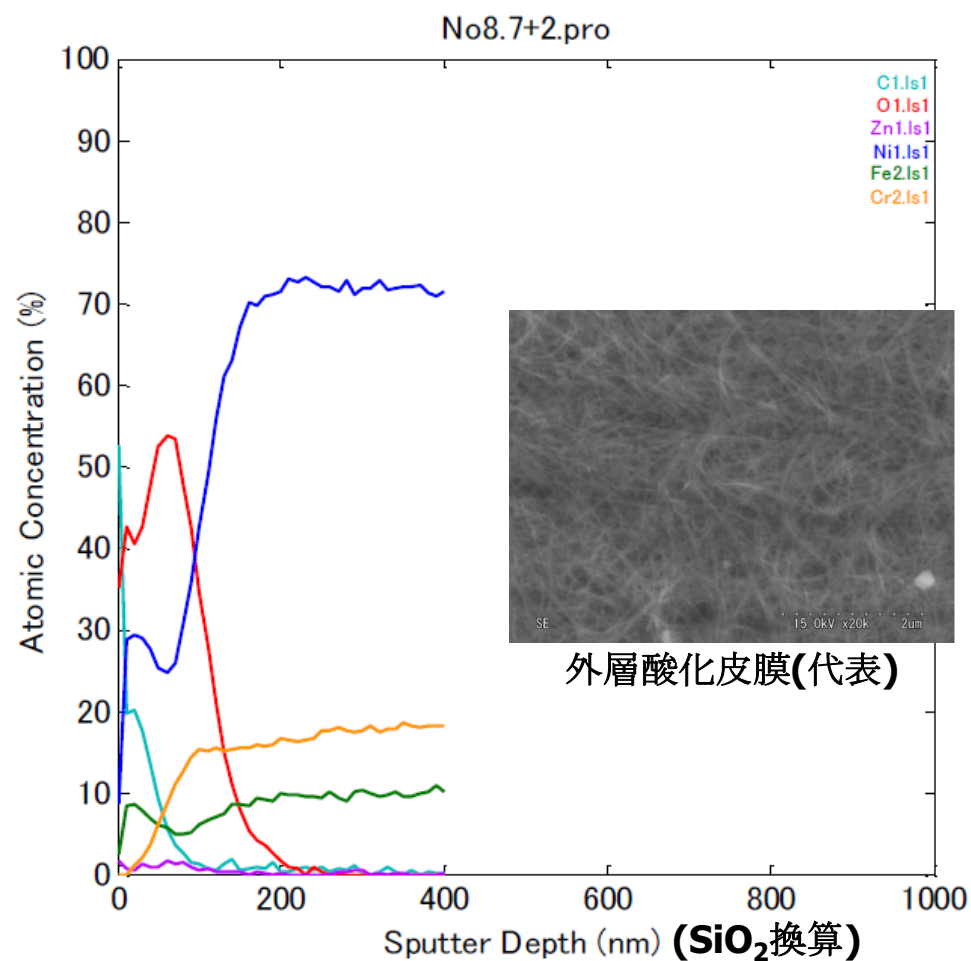
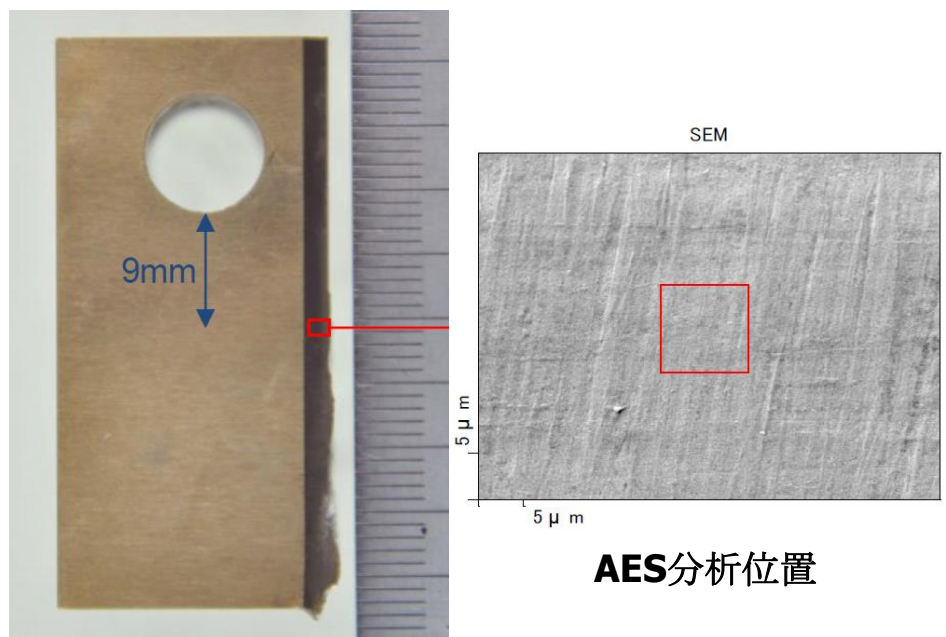


図 3.2.1-87 CT 試験片サイドグループの表面観察結果(SEM 及び AES)
(試験片 No.8 DH : 5cc/kg H₂O STP)

② CT試験片(No.6)の分析結果(試験条件30cc/kg H₂O STP)

a. 環境中で進展した亀裂開口部近傍

図 3.2.1-88 に、環境中で進展した亀裂開口部近傍の酸化物の FIB サンプリング位置を示す。サンプリング位置の表面には、粒状酸化物の上部に針状酸化物が高密度に形成している様子が観察された。図 3.2.1-89 の図(a)は FIB でサンプリングした試験片の FEG-STEM による Z コントラスト像の低倍率観察結果、また図(b)及び(c)は高倍率での視野①と②の観察結果と酸化物の回折図形を示す。視野①と②のいずれにおいても、下側に明るい組織が観察され、その上側に不定形の組織、針状と角張った粒状の組織が認められた。

図 3.2.1-90 (1)に視野①、図 3.2.1-90(2)~(3)に視野②の EDX マッピングと点分析結果を示す。ここで、図中の 6M-1~16 は点分析実施位置を示し、分析結果は原子%で示した。これらを総合的に検討した結果、観察領域下側の明るい部分(6M-7、13)はニッケル基合金母相であり、その直上(亀裂が伝播した粒界)に観察された不定形の組織(6M-4、12、14)は粒界に析出した Cr 炭化物であった。また Cr 炭化物の無い箇所の母相上(6M-5)に、厚さ約 10 nm の $\text{Ni}_x\text{Cr}_y\text{O}_{4(x+y=3)}$ スピネル構造の内層酸化物の形成を確認した。さらに、角張った形状の粒状酸化物(6M-6)は Fe、Cr、Ni の酸化物、Cr 炭化物上に成長した針状の外層酸化物(6M-1~3、8~10、14~15)は、Cr リッチな Ni 酸化物であり、Cr 炭化物に近い側ほど Cr の含有量が大きい傾向を示した。なお図 3.2.1-90(2)及び(3)に示すように、Cr 炭化物直上の酸化物領域(6M-10、15)に Zn のピークが検出されたが、その量は非常に小さかった。

b. 亀裂先端部

図 3.2.1-91 に、亀裂先端部に形成した酸化物の FIB サンプリング位置を示す。サンプリング位置の表面には針状酸化物の形成が認められたが、粒状酸化物の形成は認められなかった。図 3.2.1-92 の図(a)は FIB でサンプリングした試験片の FEG-STEM による Z コントラスト像の低倍率観察結果、また図(b)及び(c)は高倍率での視野①と②の観察結果を示す。視野①と②のいずれにおいても、下側に明るい組織が観察され、その上側に不定形のやや暗い組織が認められ、さらにその上部には針状の組織が形成していた。

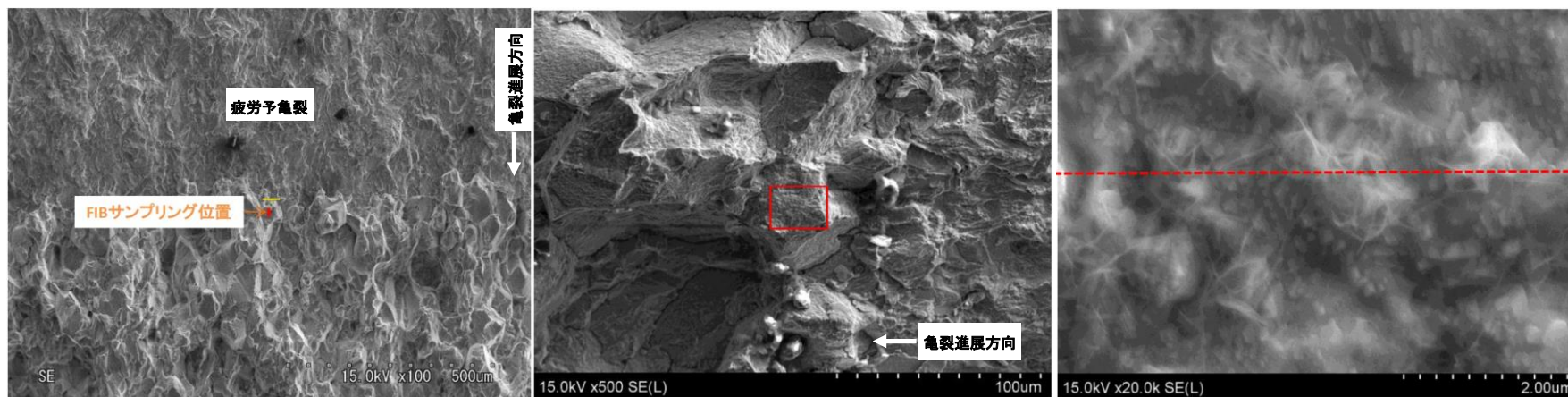
図 3.2.1-93 は、視野②の EDX マッピングと点分析結果を示す。ここで、図中の 6S-1~6 は点分析実施位置を示し、分析結果は原子%で示した。これらを総合的に検討した結果、観察領域下側の明るい部分(6S-6)はニッケル基合金母相であり、この視野で観察された不定形の組織は(6S-4~5)は粒界に析出した Cr 炭化物であった。Cr 炭化物上に成長した針状の外層酸化物(6S-1~3)は Cr および Ni 主体の酸化物であることが確認された。一方この視野において、粒状の外層酸化物及び内層酸化物の形成は認められなかった。なお EDX 分析の結果において Zn は検出されなかった。

c. CT試験片サイドグループ表面

図 3.2.1-94 は、CT 試験片サイドグループの表面を SEM と AES で分析した結果を示す。CT 試験片の表面には結晶状の外層酸化物が形成していたが、針状の外層酸化物の形成は認められなかった。また粒状酸化物の無い領域に対して AES を用いた深さ方向分析の結果より、酸化物中に Zn が存在することを確認し、その厚さは SiO_2 換算で約 100 nm であった。

図 3.2.1-95 に、CT 試験片サイドグループの表面酸化物の FIB サンプルング位置を示す。サンプルング位置の表面には、粒状酸化物が形成している様子が観察されたが、針状酸化物の形成は認められなかった。図 3.2.1-96 の図(a)は FIB でサンプルングした試験片の FEG-STEM による Z コントラスト像の低倍率観察結果、また図(b)及び(c)は赤枠で囲った位置の高倍率観察結果と酸化物の回折図形を示す。これらの図において、下側に明るい組織が観察され、その上側に不定形の組織と粒状の組織が認められた。

図 3.2.1-97 に EDX マッピングと点分析結果を示す。ここで、図中の 6G-1~6 は点分析実施位置を示し、分析結果は原子%で示した。これらを総合的に検討した結果、観察領域下側の明るい部分(6G-5)はニッケル基合金母相であり、その直上に形成した不定形の組織(6G-2~3)は、 Cr_2O_3 の結晶構造を有する Cr リッチな Ni、Cr、Fe のスピネル構造の内層酸化物であり、Zn の取り込みが認められた。また角張った形状の粒状酸化物(6G-1)は NiFe_2O_4 である事が判った。

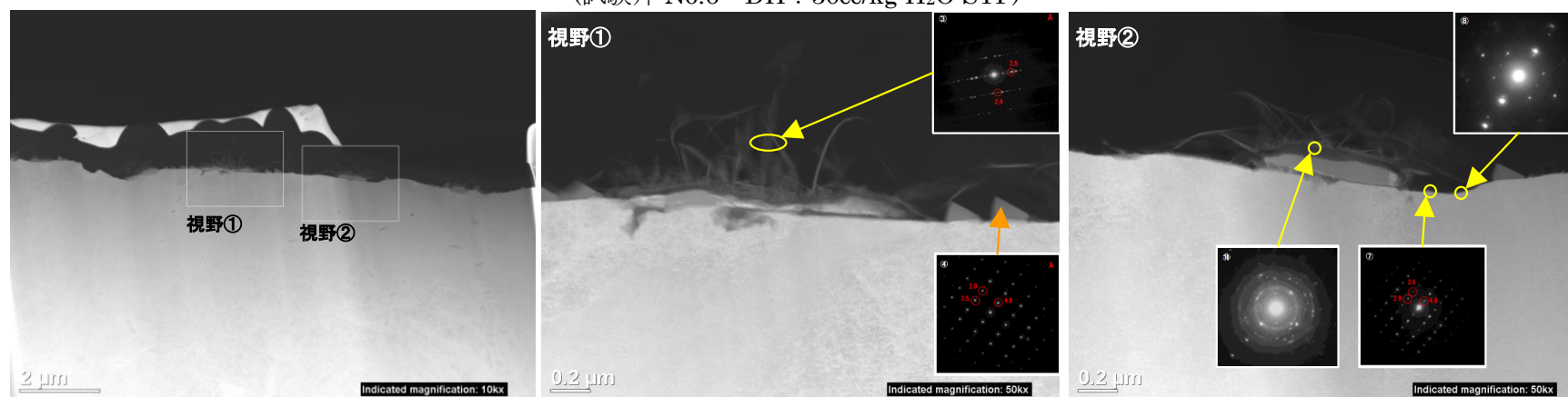


(a)低倍率

(b)高倍率

(c)FIB サンプリング位置詳細(破線)

図 3.2.1-88 環境中で進展した亀裂開口部近傍の破面 SEM 観察結果と FIB サンプリング位置
(試験片 No.6 DH : 30cc/kg H₂O STP)



(a)低倍率

(b)高倍率(視野①)

(c)高倍率(視野②)

図 3.2.1-89 環境中で進展した亀裂開口部近傍の微細組織観察結果(FE-STEM/EDX Z コントラスト像)
(試験片 No.6 DH : 30cc/kg H₂O STP)

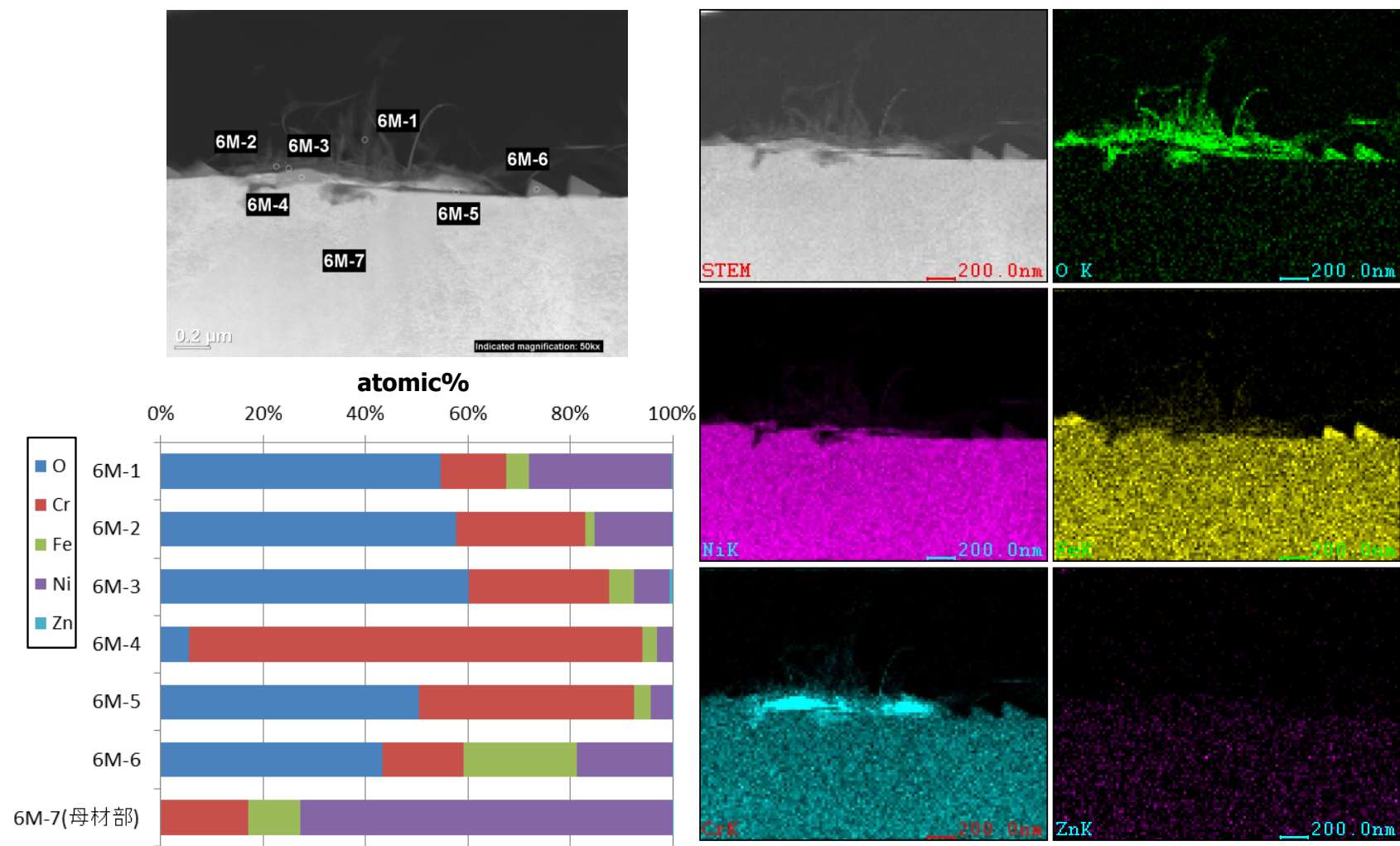


図 3.2.1-90(1) 環境中で進展した亀裂開口部近傍の酸化物の EDX 分析結果(視野①)
(試験片 No.6 DH : 30cc/kg H₂O STP)

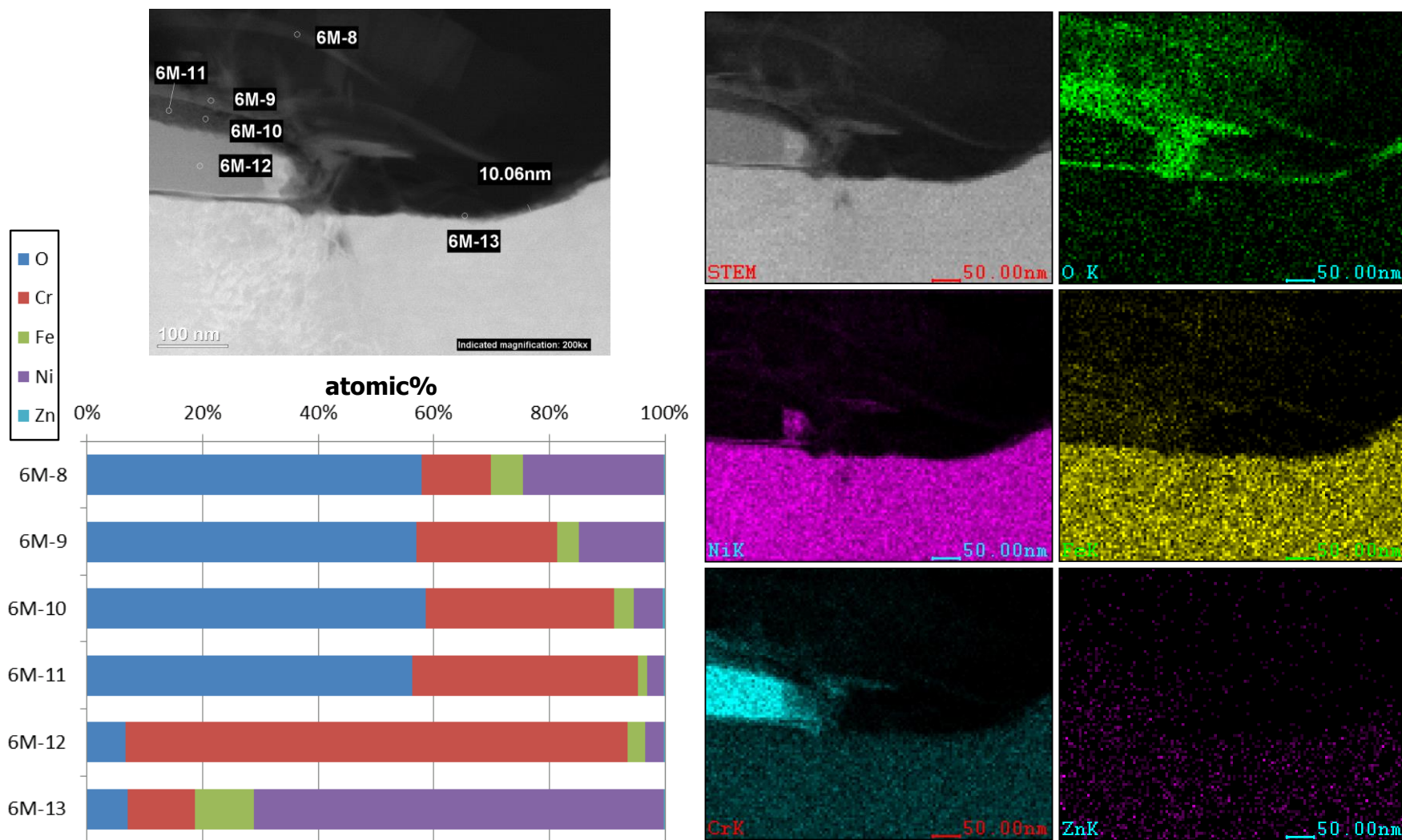


図 3.2.1-90(2) 環境中で進展した亀裂開口部近傍の酸化物の EDX 分析結果(視野②-1)
(試験片 No.6 DH : 30cc/kg H₂O STP)

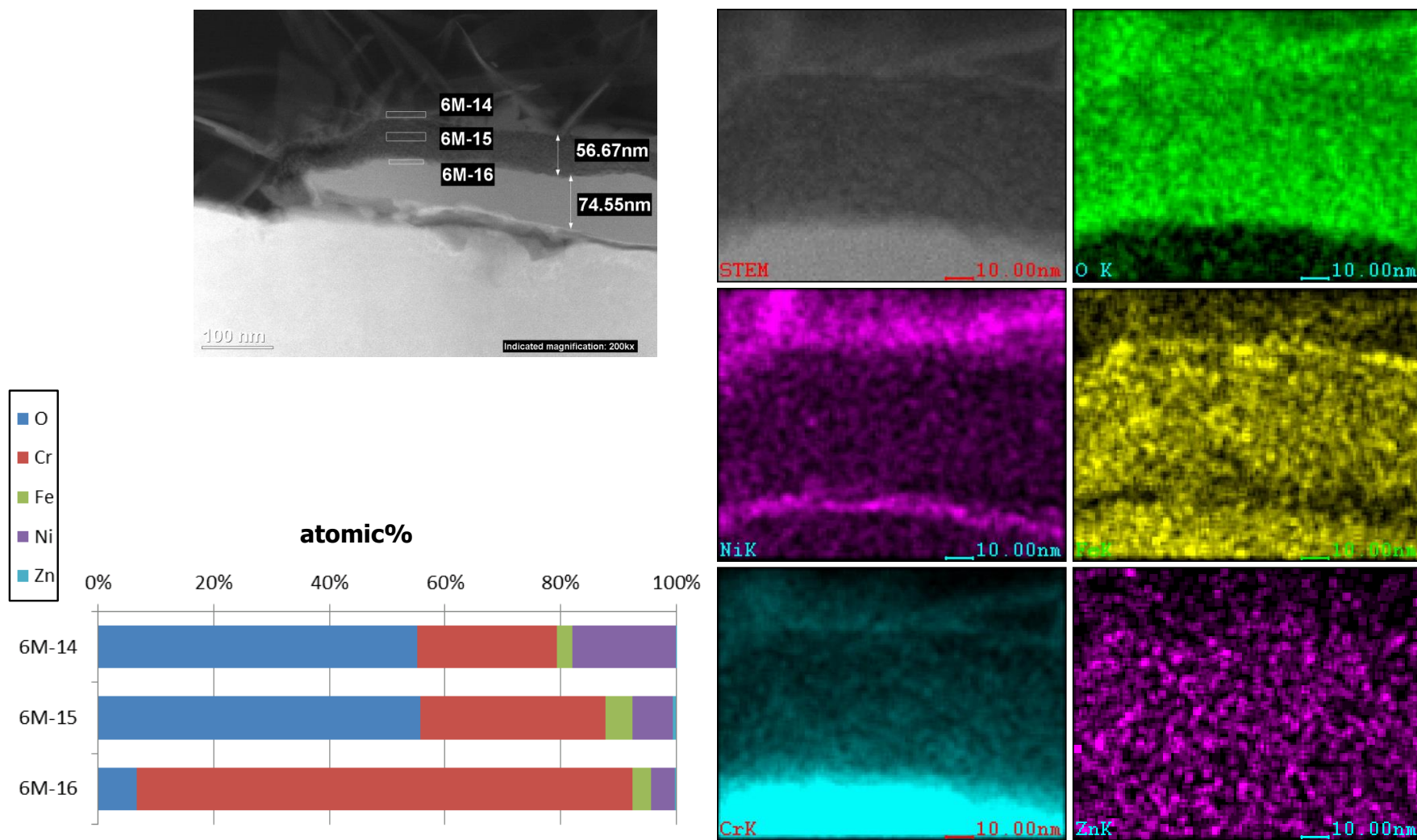
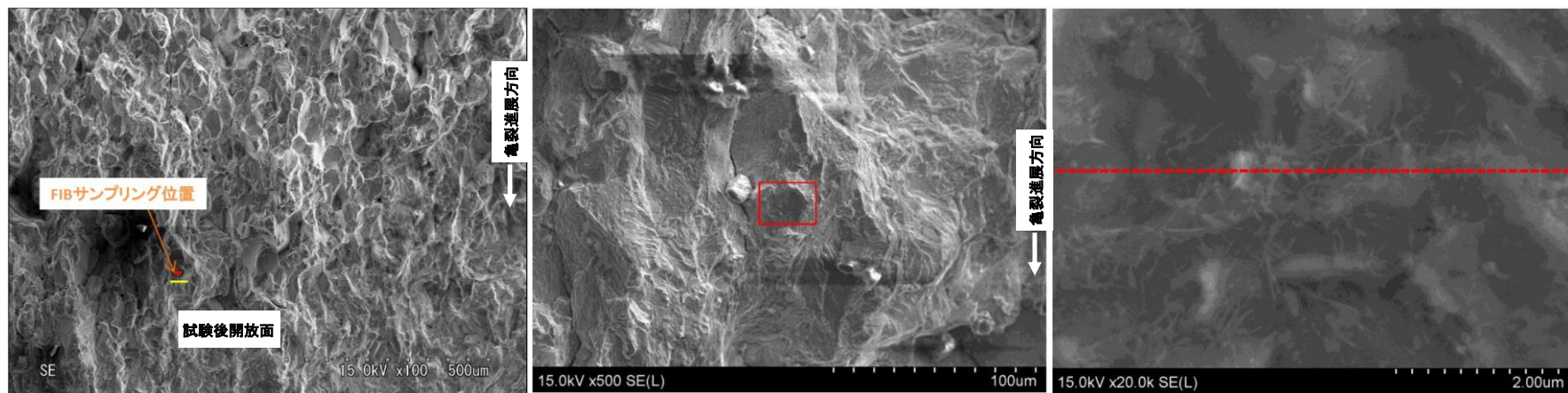


図 3.2.1-90(3) 環境中で進展した亀裂開口部近傍の酸化物の EDX 分析結果(視野②-2)
(試験片 No.6 DH : 30cc/kg H₂O STP)



(a)低倍率

(b)高倍率

(c)FIB サンプリング位置詳細(破線)

図 3.2.1-91 亀裂先端部の破面 SEM 観察結果と FIB サンプリング位置
(試験片 No.6 DH : 30cc/kg H₂O STP)



(a)低倍率

(b)高倍率(視野①)

(c)高倍率(視野②)

図 3.2.1-92 亀裂先端部の微細組織観察結果(FE-STEM/EDX Z コントラスト像)
(試験片 No.6 DH : 30cc/kg H₂O STP)

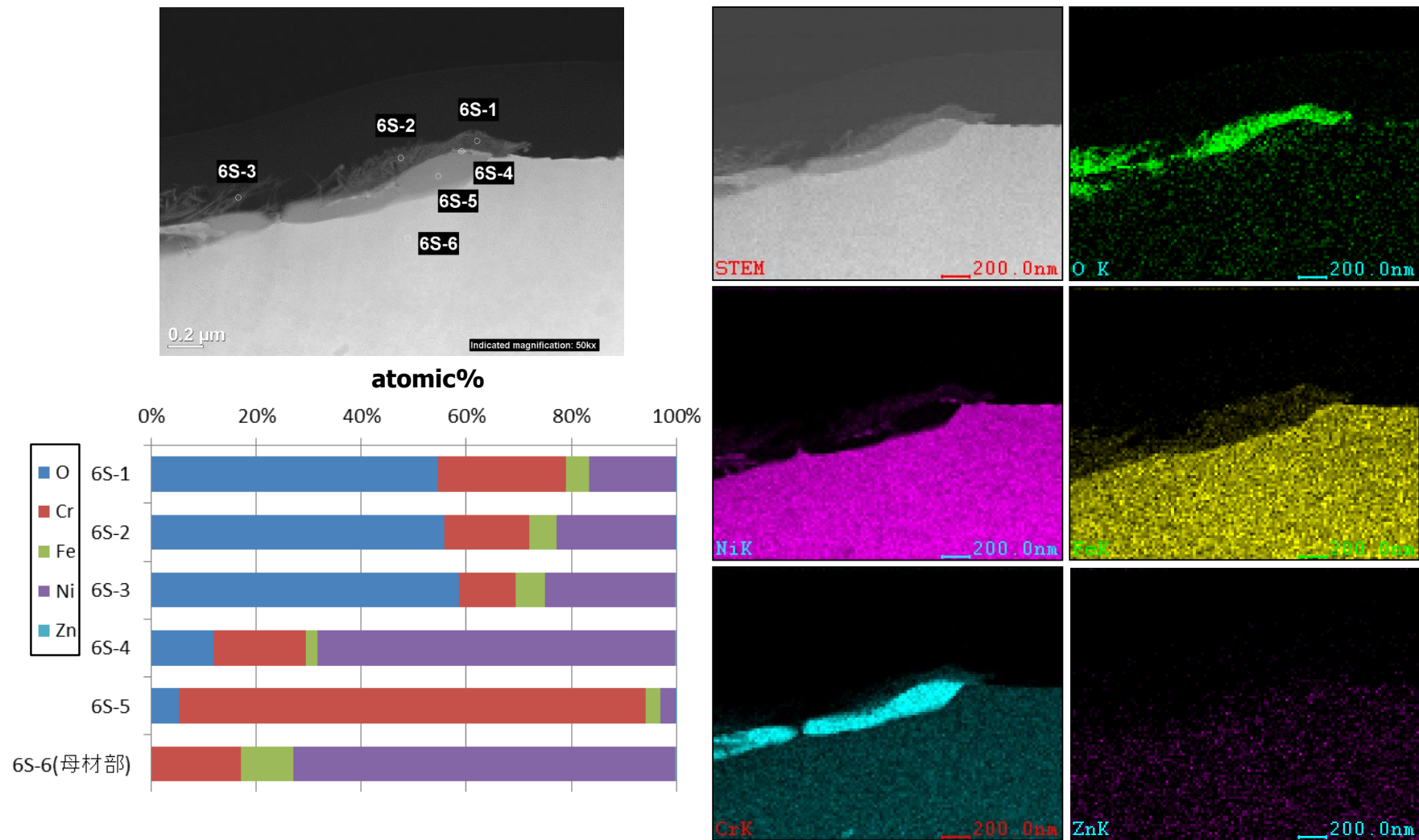
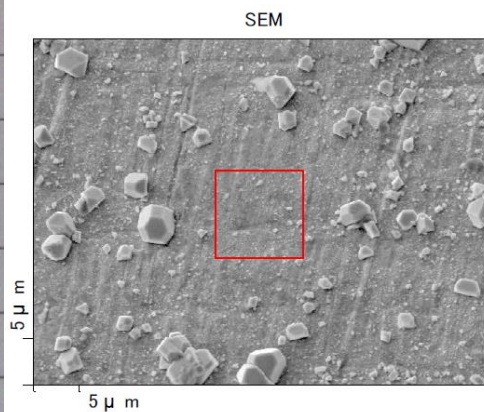
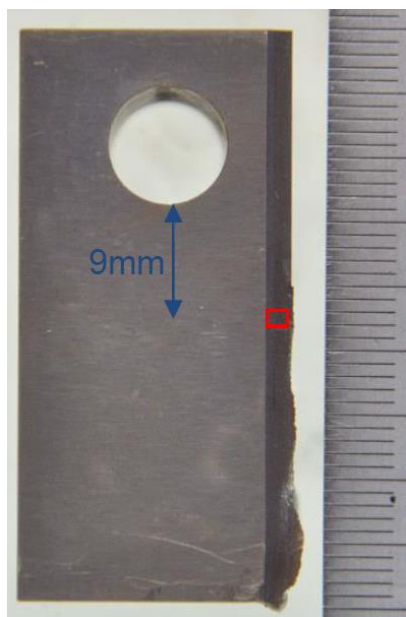


図 3.2.1-93 亀裂先端部の酸化物の EDX 分析結果(試験片 No.6 DH : 30cc/kg H₂O STP)(視野②)



AES分析位置

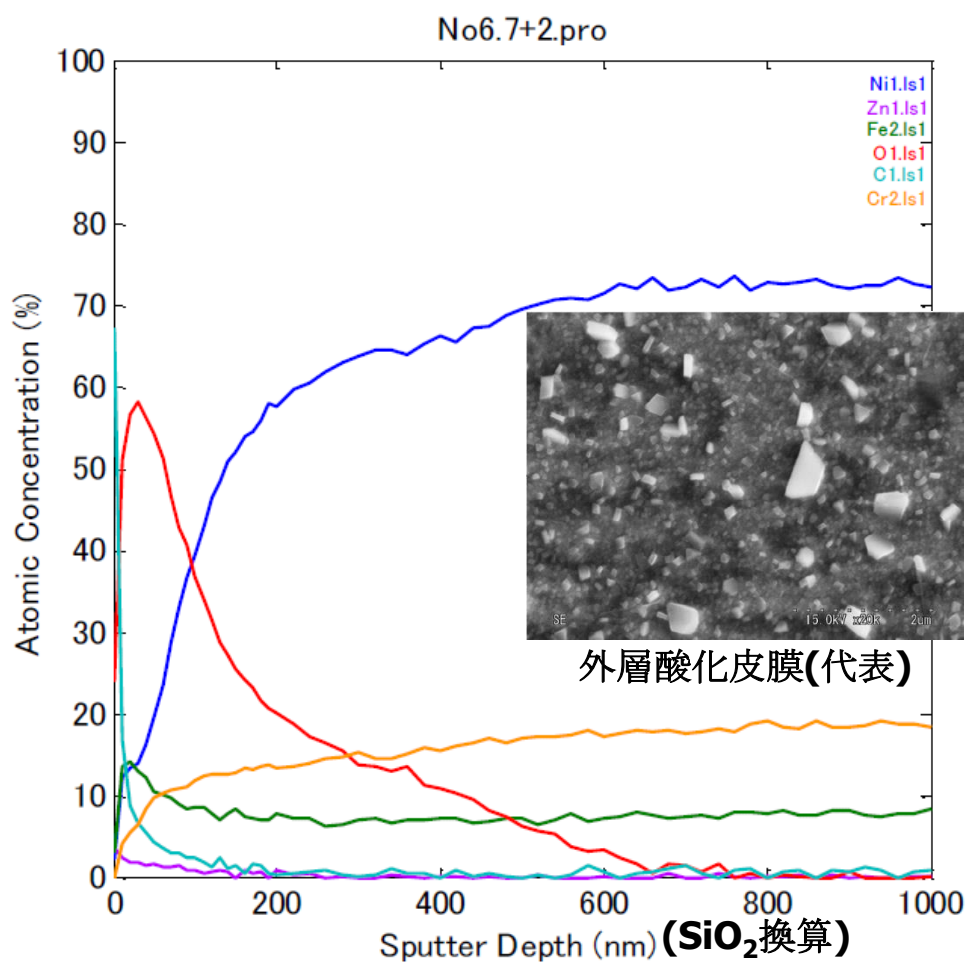


図 3.2.1-94 CT 試験片サイドグループの表面観察結果(SEM 及び AES)
(試験片 No.6 DH : 30cc/kg H₂O STP)

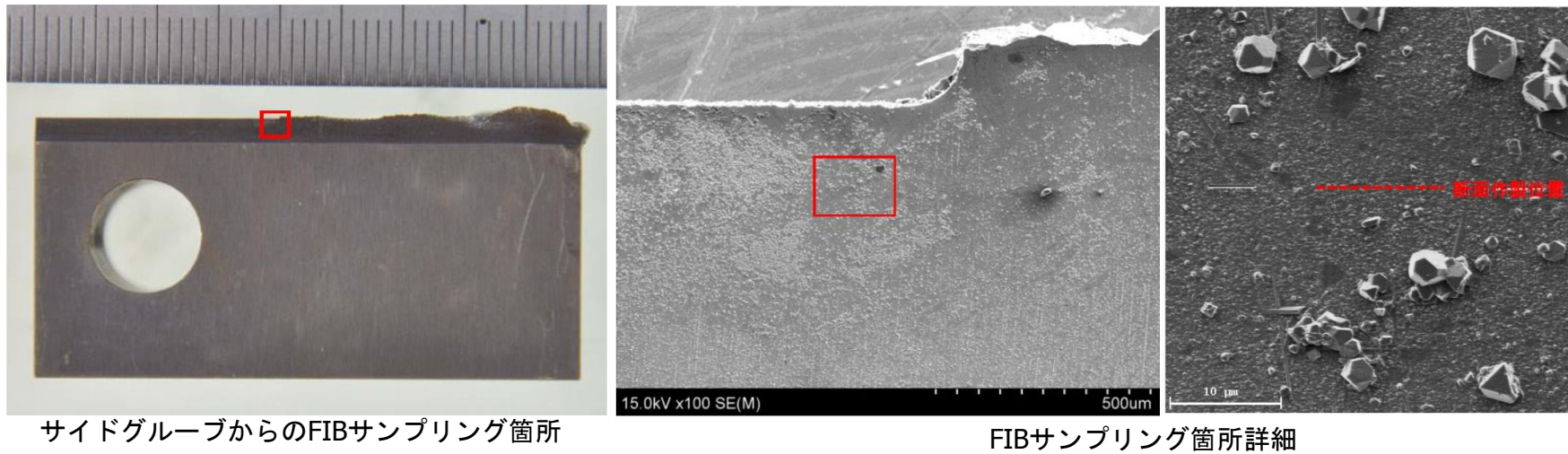


図 3.2.1-95 CT 試験片サイドグループの SEM 観察結果と FIB サンプリング位置
(試験片 No.6、DH : 30cc/kg H₂O STP)

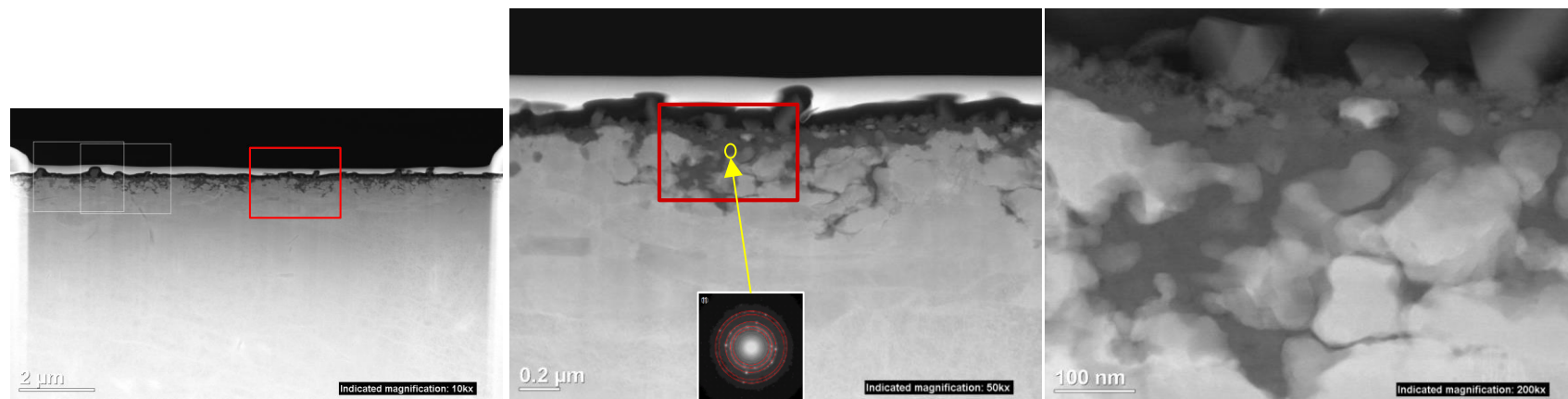


図 3.2.1-96 CT 試験片サイドグループの微細組織観察結果(FE-STEM/EDX Z コントラスト像)
(試験片 No.6、DH : 30cc/kg H₂O STP)

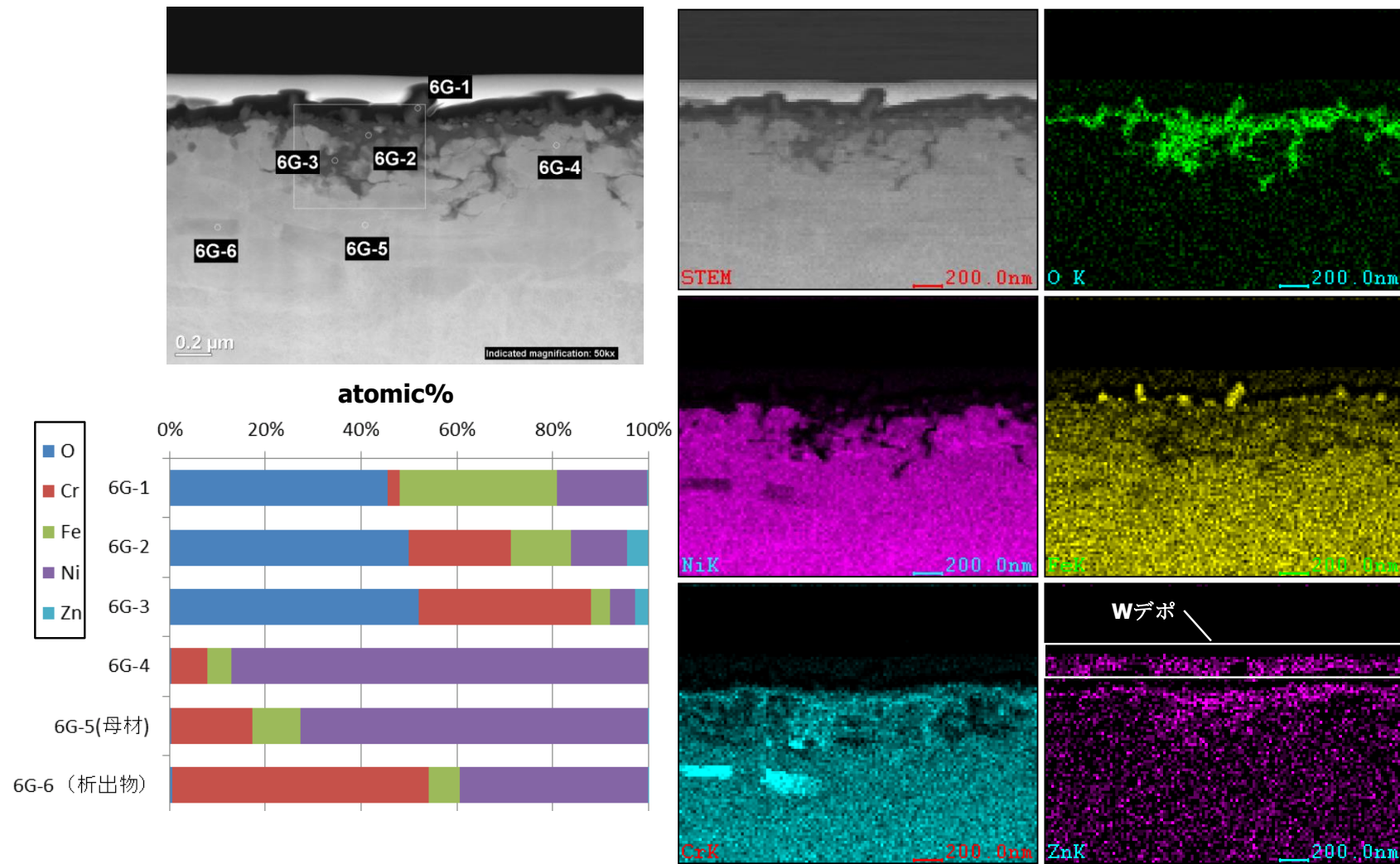


図 3.2.1-97 亀裂進展試験後の CT 試験片サイドグループに認められた酸化物の EDX 分析結果
(試験片 No.6、DH : 30cc/kg H₂O STP)

③ CT試験片(No.10)の分析結果(試験条件50cc/kg H₂O STP)

a. 環境中で進展した亀裂開口部近傍

図 3.2.1-98 に、環境中で進展した亀裂開口部近傍の酸化物の FIB サンプリング位置を示す。サンプリング位置の表面には、針状酸化物が形成している様子が観察されたが、粒状酸化物の形成は認められなかった。図 3.2.1-99 の図(a)は FIB でサンプリングした試験片の FEG-STEM による Z コントラスト像の低倍率観察結果、また図(b)及び(c)は高倍率での視野①と②の観察結果と酸化物の回折図形を示す。視野①と②のいずれにおいても、下側に明るい組織が観察され、その上側に形成した不定形の組織、針状の組織が認められた。

図 3.2.1-100(1)、(2)に視野①と視野②の EDX マッピングと点分析結果を示す。ここで、図中の 10M-1~12 は点分析実施位置を示し、分析結果は原子%で示した。これらを総合的に検討した結果、観察領域下側の明るい部分(10M-5、12)はニッケル基合金母相であり、その直上(亀裂が伝播した粒界)に観察された不定形の組織(10M-4)は粒界に析出した Cr 炭化物であった。Cr 炭化物の上部には Ni を含む Cr 酸化物の針状外層酸化物(10M-1~3、6~8)が形成していた。一方視野②の母相表面(10M-9)に NiO の回折パターンが認められ、内層酸化物であると推察された。またこの視野で分析した酸化物中に Zn の取り込みは認められなかった。

b. 亀裂先端部

図 3.2.1-101 に、亀裂先端部に形成した酸化物の FIB サンプリング位置を示す。サンプリング位置の表面には若干の針状酸化物の形成が認められたが、他の条件に比べてその密度は低かった。図 3.2.1-102 の図(a)は FIB でサンプリングした試験片の FEG-STEM による Z コントラスト像の低倍率観察結果、また図(b)は高倍率での観察結果を示す。この視野においては、下側に明るい組織が観察され、その上側に不定形のやや暗い組織が認められ、その上部に若干の針状の組織が形成していた。

図 3.2.1-103(1)は高倍率観察した視野全体、図 3.2.1-103(2)はさらに拡大観察した箇所
の EDX マッピングと点分析結果を示す。ここで、図中の 10S-1~7 は点分析実施位置を示し、分析結果は原子%で示した。これらを総合的に検討した結果、観察領域下側の明るい部分(10S-3)はニッケル基合金母相であり、その直上(亀裂が伝播した粒界)の不定形の組織(10S-2、7)は粒界に析出した Cr 炭化物であった。さらに、針状の外層酸化物(10S-1、4、5)は Cr 炭化物周辺から成長しており、Ni を含む Cr 酸化物であった。なおこの視野において明確な内層酸化物の形成は観察されず、分析した酸化物中に Zn の取り込みは認められなかった。

c. CT試験片サイドグループ表面

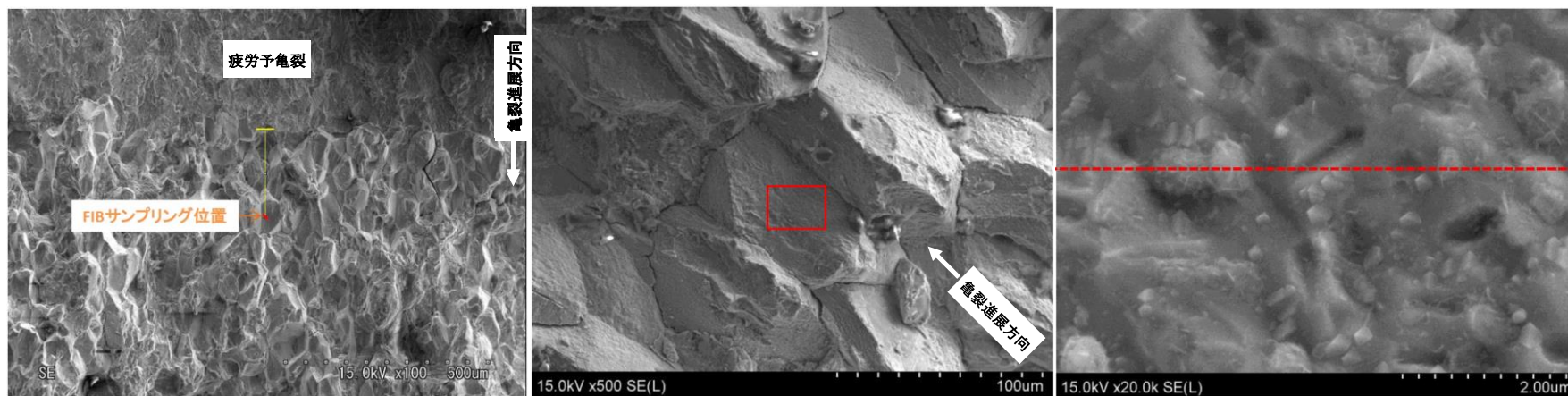
図 3.2.1-104 は、CT 試験片サイドグループの表面を SEM と AES で分析した結果を示

す。CT 試験片の表面には結晶状の外層酸化物が形成していたが、針状の外層酸化物の形成は認められなかった。また粒状酸化物の無い領域に対して AES を用いた深さ方向分析の結果より、酸化物中に Zn が存在することを確認し、その厚さは SiO₂ 換算で約 50 nm であった。

(3) CT試験片の亀裂内に形成した酸化物の分析のまとめ

亀裂進展試験に供した CT 試験片の亀裂内水質評価に資することを目的として、「亀裂進展速度に及ぼす添加物影響評価試験」(平成 27 年度実施)で亀裂進展速度評価に用いた CT 試験片の亀裂内に形成した酸化皮膜を詳細に分析し、試験水に添加した亜鉛イオンの酸化皮膜への取り込み等を詳細に観察した。

主な結果を表 3.2.1-17 にまとめる。3.2.1.5 項「既往事業の照射材を用いた試験結果の評価」では、照射ステンレス鋼を対象とした BWR 一次系環境下での照射下亀裂進展評価に係る検討項目と必要性に対する今後の課題を挙げたが、照射下亀裂進展試験データより亀裂進展を促進する因子を網羅的に評価することは難しい。そのため、本項で示したような材料と環境の異なる亀裂進展評価に係るデータを積極的に活用して材料及び環境因子の相違点、類似点を整理することによって、高温水中における亀裂進展メカニズムの側面からの検討を深めるとが期待され、結果として照射下亀裂進展試験結果の総合評価に資するものと思われる。

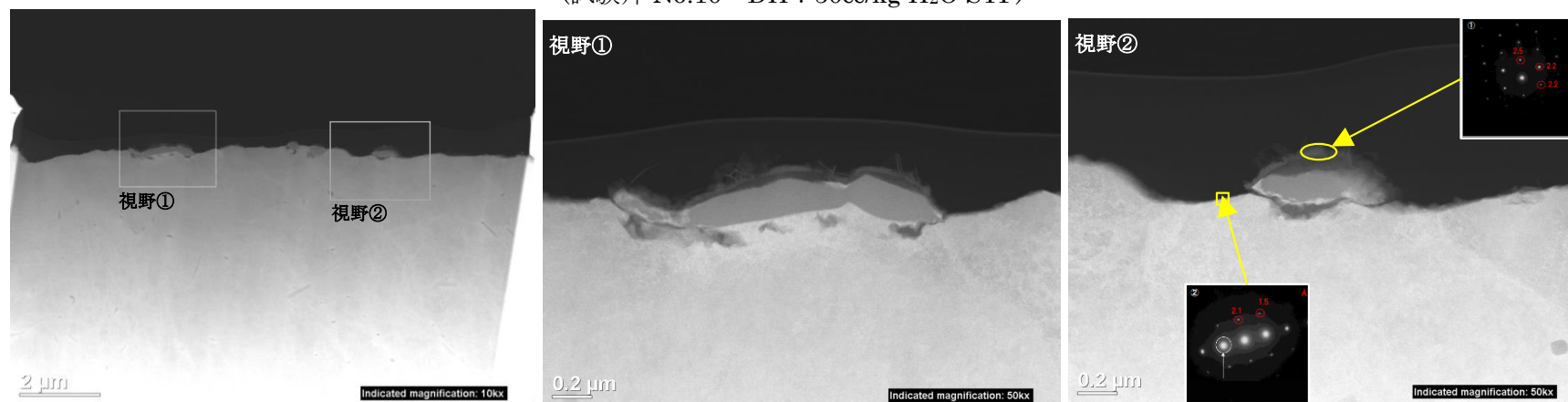


(a)低倍率

(b)高倍率

(c)FIB サンプリング位置詳細(破線)

図 3.2.1-98 環境中で進展した亀裂開口部近傍の破面 SEM 観察結果と FIB サンプリング位置
(試験片 No.10 DH : 50cc/kg H₂O STP)



(a)低倍率

(b)高倍率(視野①)

(c)高倍率(視野②)

図 3.2.1-99 環境中で進展した亀裂開口部近傍の微細組織観察結果(FE-STEM/EDX Z コントラスト像)
(試験片 No.10 DH : 50cc/kg H₂O STP)

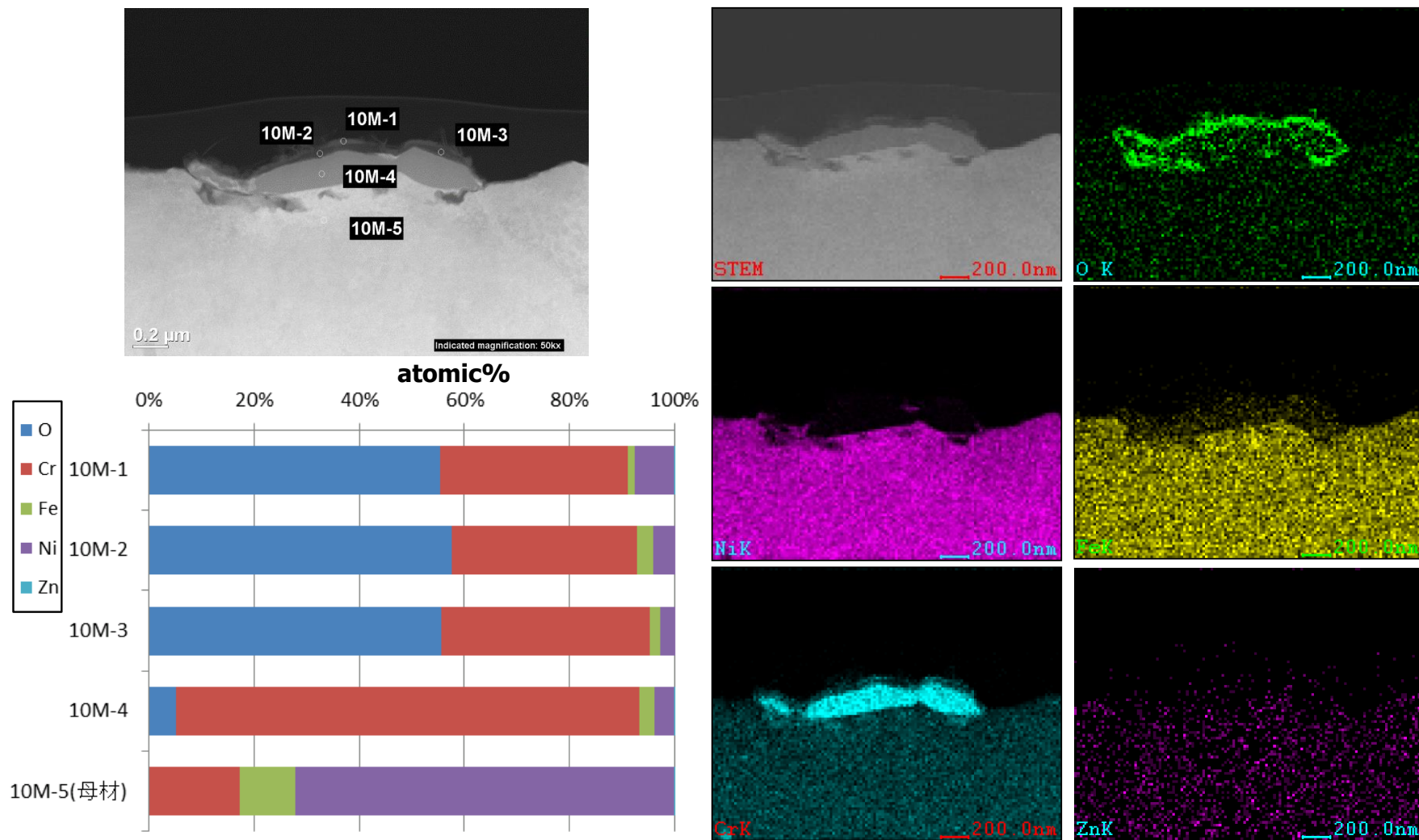


図 3.2.1-100(1) 環境中で進展した亀裂開口部近傍の酸化物の EDX 分析結果(視野①)
(試験片 No.10 DH : 50cc/kg H₂O STP)

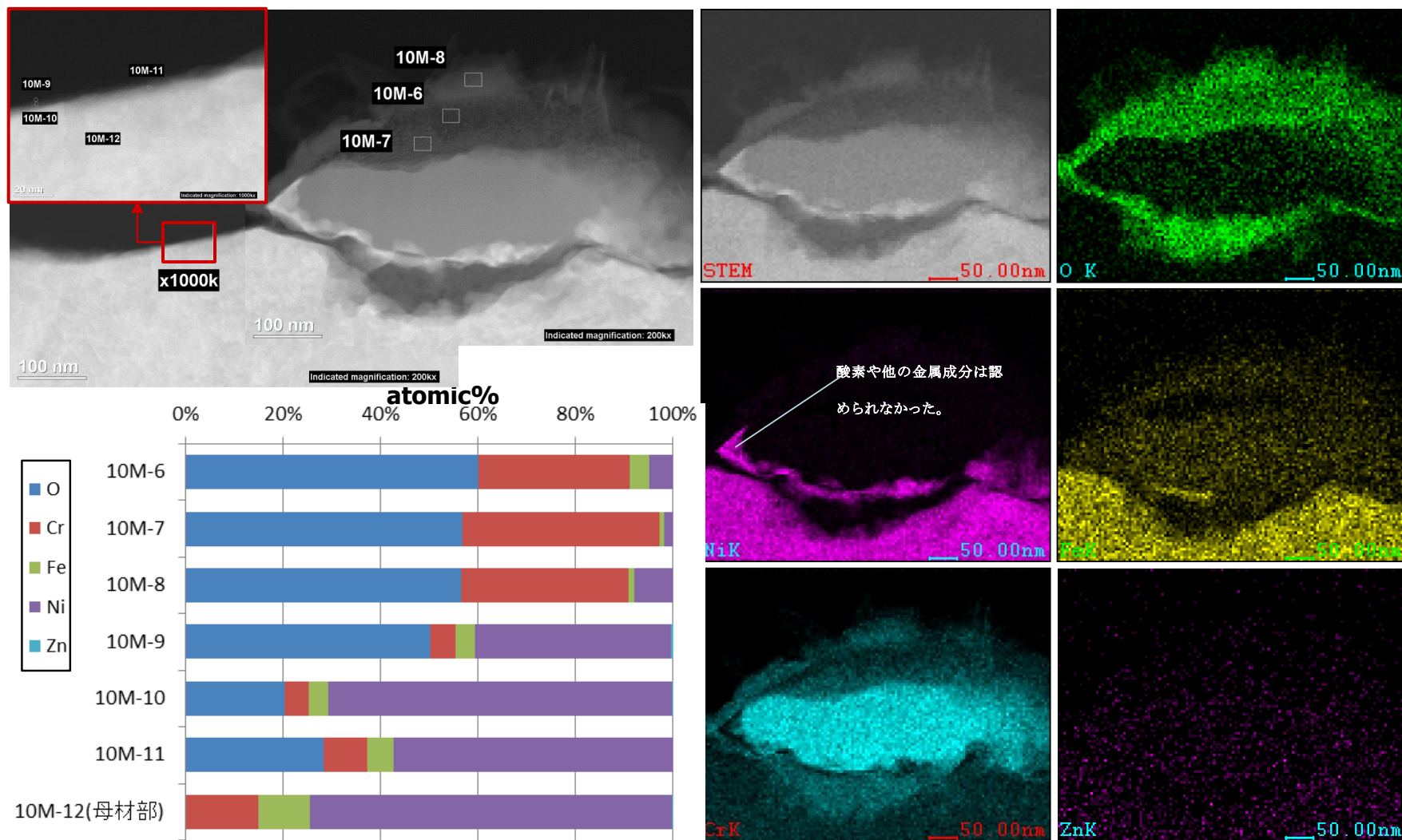
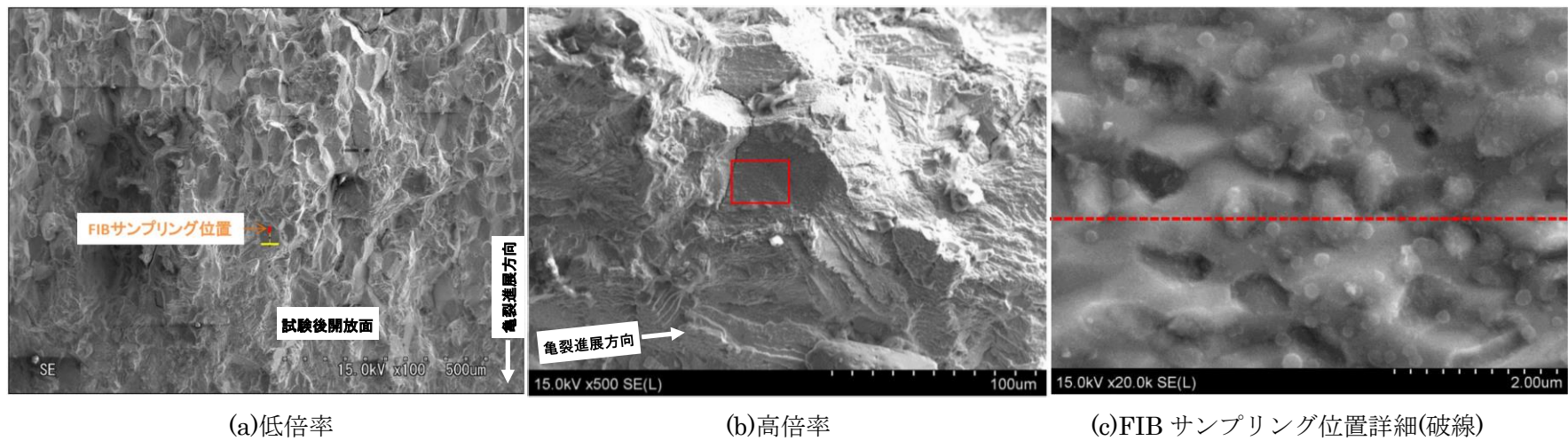


図 3.2.1-100(2) 環境中で進展した亀裂開口部近傍の酸化物の EDX 分析結果(視野②)
(試験片 No.10 DH : 50cc/kg H₂O STP)

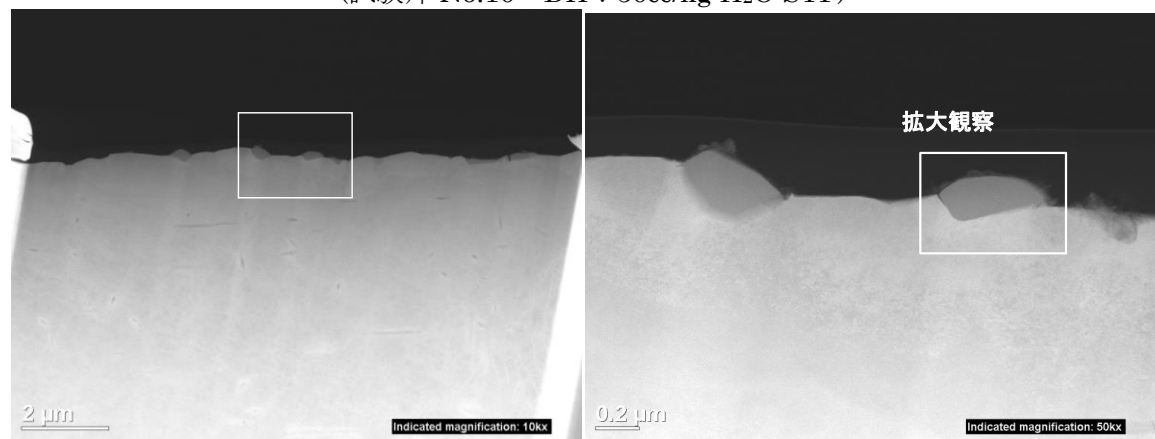


(a)低倍率

(b)高倍率

(c)FIB サンプリング位置詳細(破線)

図 3.2.1-101 亀裂先端部の破面 SEM 観察結果と FIB サンプリング位置
(試験片 No.10 DH : 50cc/kg H₂O STP)



(a)低倍率

(b)高倍率

図 3.2.1-102 亀裂先端部の微細組織観察結果(FE-STEM/EDX Z コントラスト像)
(試験片 No.10 DH : 50cc/kg H₂O STP)

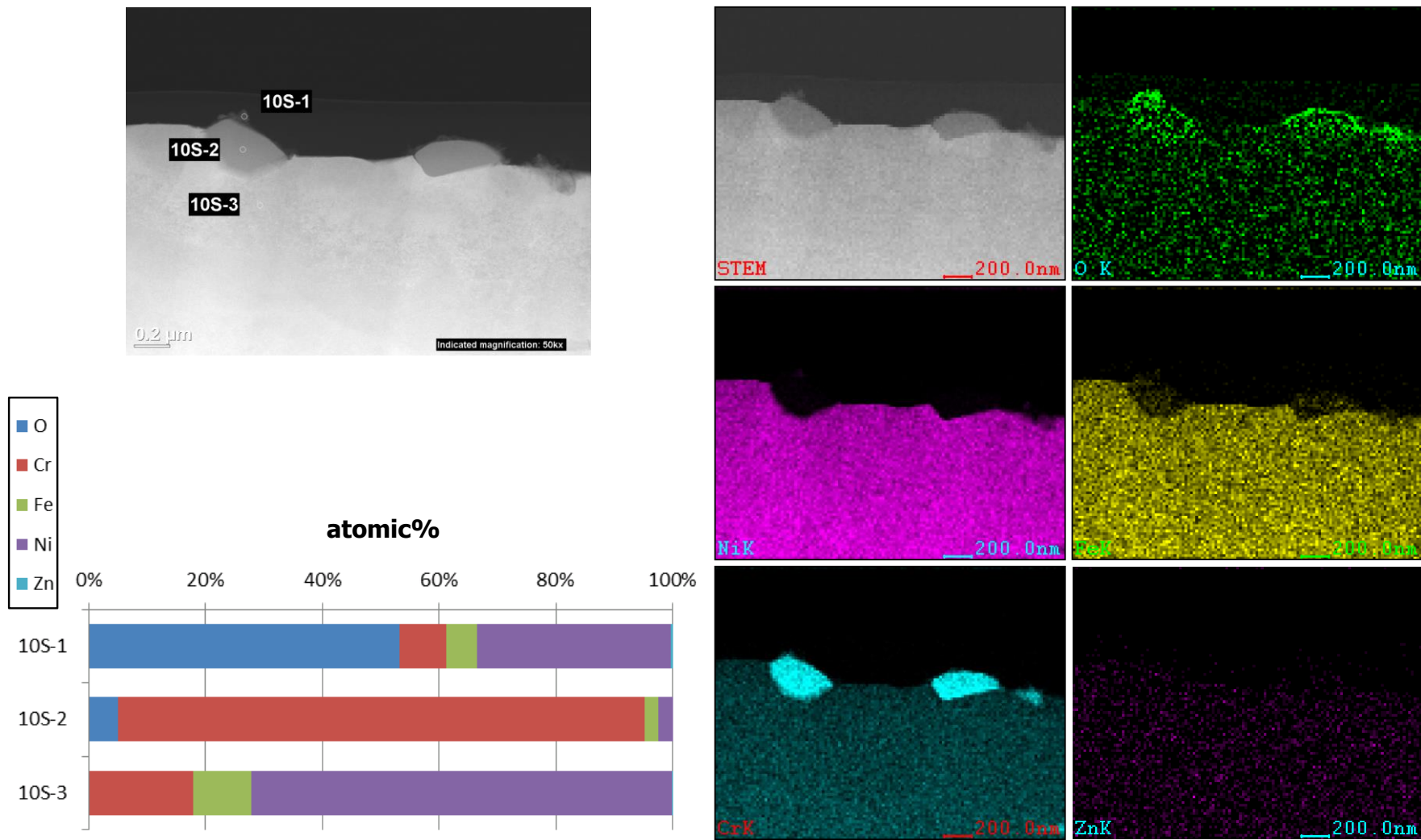


図 3.2.1-103 亀裂先端部の酸化物の EDX 分析結果
(試験片 No.10 DH : 50cc/kg H₂O STP)

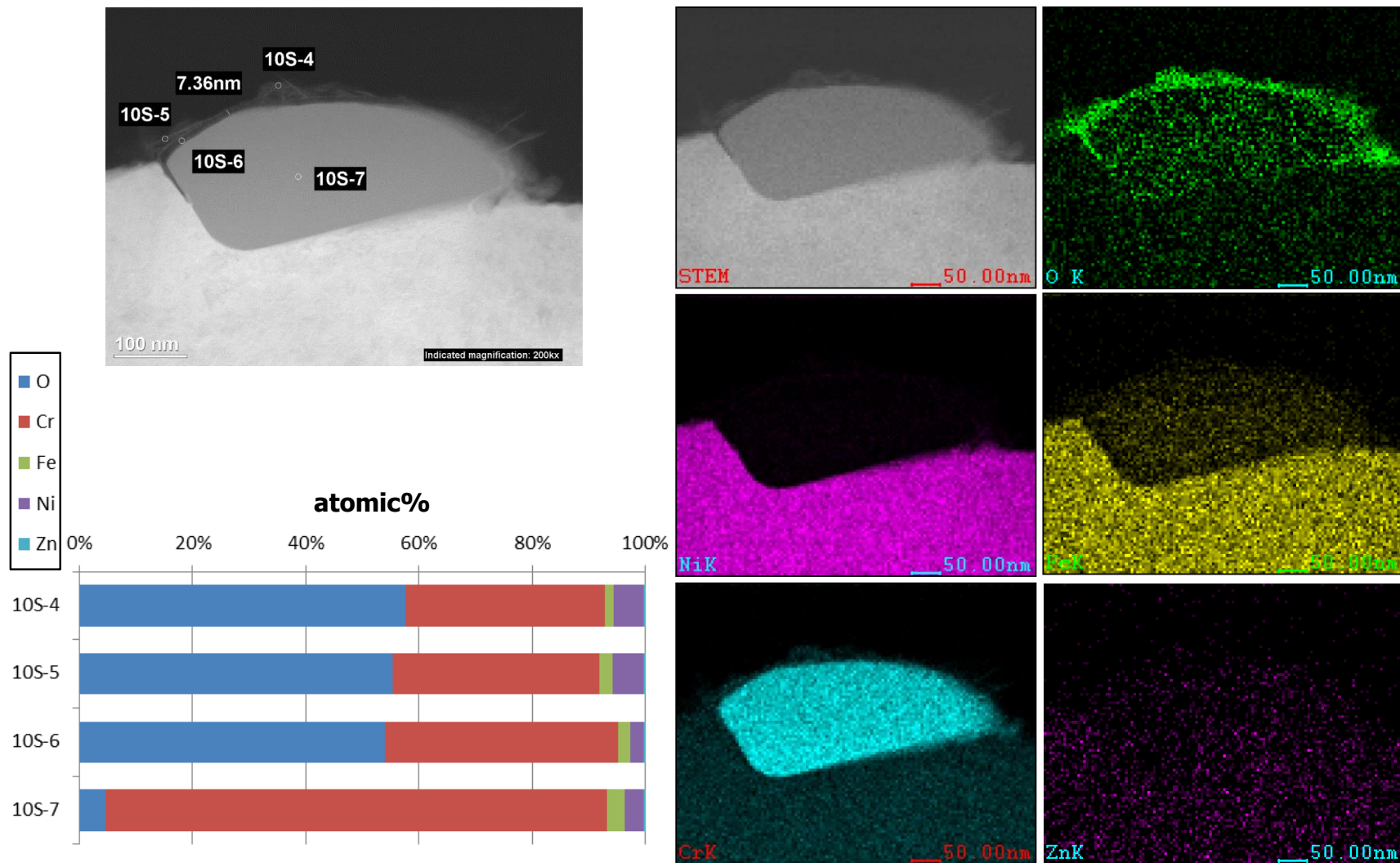
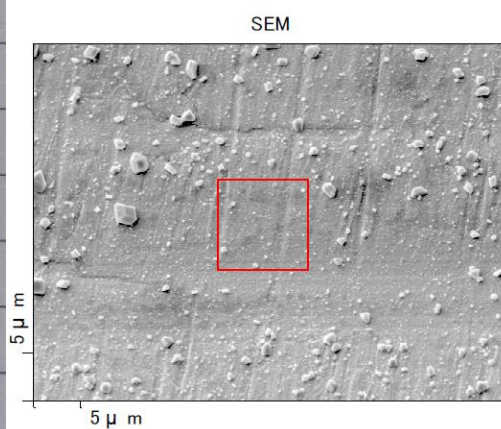
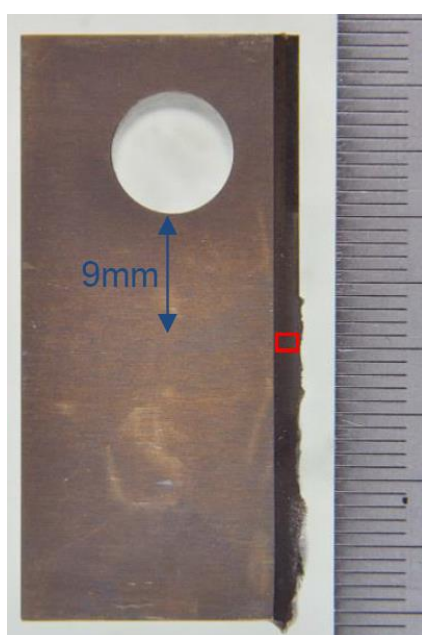


図 3.2.1-103(2) 亀裂先端部の酸化物の EDX 分析結果(拡大観察領域)
(試験片 No.10 DH : 50cc/kg H₂O STP)



AES分析位置

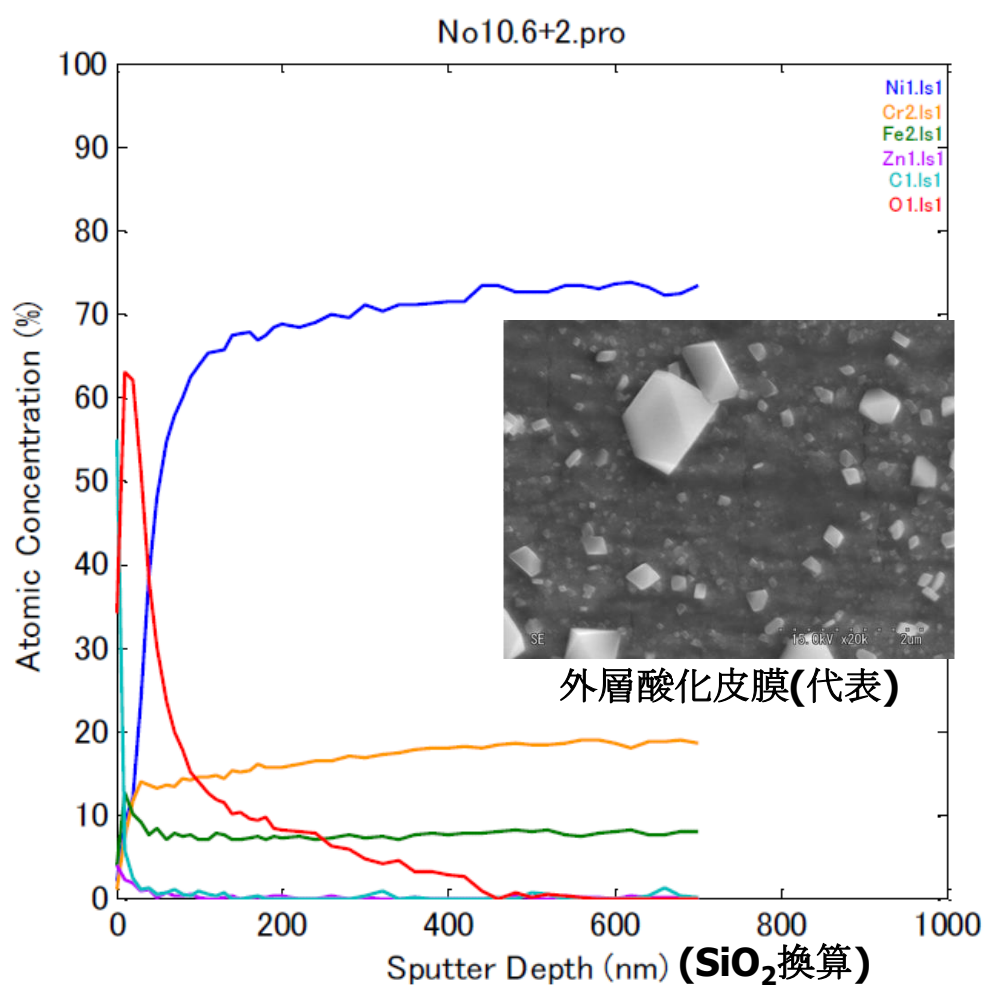


図 3.2.1-104 CT 試験片サイドグループの表面観察結果(SEM 及び AES)
(試験片 No.10 DH : 50cc/kg H_2O STP)

表 3.2.1-17 CT 試験片の亀裂内に形成した酸化物の分析結果まとめ

	5cc/kg (No.8)	30cc/kg (No.6)	50cc/kg (No.10)
亀裂開口部 近傍	【全般的な傾向】 ・ Zn 検出されず ・ Cr 炭化物上に針状酸化物形成 【外層酸化物】 ・ 針状酸化物：ホウ素を含む酸化物に近い結晶構造で Fe および Ni 主体の酸化物 ・ 粒状酸化物：NiO 【内層酸化物】 100nm 程度	【全般的な傾向】 ・ Cr 炭化物上の酸化物中に微量 Zn ・ Cr 炭化物上に針状酸化物形成 【外層酸化物】 ・ 針状酸化物：ホウ素を含む酸化物に近い結晶構造で Cr リッチな Ni 酸化物 ・ 粒状酸化物：Fe、Cr、Ni の酸化物 【内層酸化物】 ・ $\text{Ni}_x\text{Cr}_y\text{O}_{4(x+y=3)}$ スピネル構造 ・ 内層酸化物の厚さは 10nm 程度	【全般的な傾向】 ・ Zn 検出されず ・ Cr 炭化物上に針状酸化物形成 【外層酸化物】 ・ 針状酸化物：Cr_2O_3 ・ 粒状酸化物は認められず 【内層酸化物】 ・ NiO の回折パターン ・ 内層酸化物の厚さは 5nm 程度
亀裂先端部	【全般的な傾向】 ・ Zn 検出されず ・ Cr 炭化物上に針状酸化物形成 【外層酸化物】 ・ 針状酸化物：ホウ素を含む酸化物に近い結晶構造で Fe および Ni 主体の酸化物 ・ 粒状酸化物なし 【内層酸化物】 ・ Fe および Cr を含む NiO ・ 内層酸化物の厚さは 20nm 程度	【全般的な傾向】 ・ Zn 検出されず ・ Cr 炭化物上に針状酸化物形成 【外層酸化物】 ・ Ni/Fe/Cr 酸化物で Cr 炭化物に近いほど Cr 濃度が高い傾向 ・ 粒状酸化物なし 【内層酸化物】 ・ 内層酸化物の厚さは 5nm 程度	【全般的な傾向】 ・ Zn 検出されず ・ Cr 炭化物上に針状酸化物形成 【外層酸化物】 ・ 針状酸化物：Fe を含む Ni 主体の酸化物 ・ 粒状酸化物なし 【内層酸化物】 ・ 内層酸化物はほとんど認められず
サイドグループ近傍	・ 表面は針状酸化物 ・ 酸化物厚さ 100 nm 程度(SiO_2 換算) ・ Zn 取り込みあり	・ 表面は粒状酸化物 ・ 酸化物厚さ 100 nm 程度(SiO_2 換算) ・ Zn 取り込みあり	・ 表面は粒状酸化物 ・ 酸化物厚さ 50 nm 程度(SiO_2 換算) ・ Zn 取り込みあり

3.2.2 照射材データの調査・整理

3.2.2.1 はじめに

本事業で取得するデータの解釈等に用いるため、オーステナイト系ステンレス鋼(以下 SS と記載)等を中心に照射データを調査・整理してスプレッドシート(MS EXCEL ファイル形式)に纏めると共に、収集した材料データに基づいて代表値や最確値を与える式に基づいて中性子照射量等の材料パラメータとの関連性を検討する。

3.2.2.2 材料照射データの調査

(1) 調査方法

① 材料特性

原子炉構造物の健全性評価では、構造物に使用されている材料の応力ひずみ関係、ヤング率、強度、伸び、靱性などの基本的な機械的性質がまず必要である。また、応力腐食割れなど亀裂の発生が想定され、亀裂の存在を前提とした健全性評価を行う場合には、亀裂の発生条件として応力やひずみ、時間などとともに、亀裂の進展速度が必要な情報である。さらに、亀裂の発生や進展は構造物に負荷される応力やひずみ量に依存するので、その応力ひずみに影響するクリープや応力緩和、体積や寸法の変化も必要な情報となる。これらの材料特性に関わる情報の必要性と重要性は、対象とする構造物の機能、形状、使用条件、材料の種類、評価方法などにより変わりうる。炉内に使用されているオーステナイト系ステンレス鋼は、圧力容器の内面クラッド、炉内構造物のほとんど全て、制御棒と関連機器であるが、PWR と BWR では構造(ボルトと溶接)や温度条件(288°C と最高約 350°C)などが異なる。軽水炉の炉内構造物の健全性の評価は、日本機械学会の発電用原子力設備規格の維持規格[3.2.2-1]や原子力安全推進協会の炉内構造物等点検評価ガイドライン[3.2.2-2]に沿って実施されており、特に重要な材料特性は以下のとおりである。

PWR では中性子照射量の高いバッフルフォーマボルトの IASCC 発生が健全性評価で重要とされており、IASCC 発生条件(応力、照射量、時間)と、ボルトの負荷応力に影響する引張特性、応力緩和、スエリングが重要な材料特性となる。炉心そうは厚板の溶接構造物であり照射量は低いものの IASCC 発生を想定した破壊力学評価では、IASCC 進展速度、破壊靱性が重要となる場合がある。BWR では炉心シュラウドや上部格子板の IASCC 亀裂が健全性評価上重要とされており、IASCC 発生、IASCC 進展速度、進展の駆動力である応力拡大係数に影響する引張特性と応力緩和、破壊力学的評価での破壊靱性が重要な材料特性となる。また、照射による材料特性の変化の原因となるミクロ組織や粒界偏析に関しても、特性変化の機構と関連する基本データとして重要である。したがって、PWR 分野および BWR 分野について、引張特性、硬さ、破壊靱性、IASCC 感受性、IASCC 発生、IASCC 進展、応力緩和、ミクロ組織変化、粒界偏析を調査の対象とし、PWR 分野ではスエリングも含めることとした。

② 材料条件と照射条件

材料照射データは多様な材料条件と照射条件を含むが、本事業でのデータ調査は軽水炉の炉内の構造物のステンレス鋼を対象としており、軽水炉に近い材料と照射の条件に絞って調査を実施した。バルクの材料特性を把握できる中性子照射材のデータを対象とし、中性子以外の粒子の影響を含むイオン照射や核破砕中性子源を用いたデータは除外した。中性子照射では軽水炉の照射された部材のデータの場合と、研究炉による材料照射のデータの場合がある。研究炉については熱中性子炉のデータはすべて対象とし、高速中性子炉については、照射は 370°C 以上の温度で行われ場合がほとんどであるが、370°C 以下のデータについては参考データとして調査に含めた。

データの照射温度は軽水炉の照射温度である 300°C 付近を中心とし、おおよそ 250~370°C の範囲のデータを対象とした。データの得られた試験温度については健全性評価が冷態時(室温)でも必要であることから、室温までの低温から 370°C の範囲のデータを対象とした。

データの対象材料は、軽水炉で使用されている 300 系のオーステナイト系ステンレス鋼とし、鋳鋼や溶接金属も含むものとした。具体的には、304、304L、316、316L、原子力用 316SS 等である。なお、Nb を含む 347 系ステンレス鋼や Ti を含む 321 系ステンレス鋼は、海外では広く使用されているが国内の軽水炉ではほとんど使用されていないことから、それらだけを対象とした論文のデータは除外した。

③ 対象とする文献

比較的系統的な照射材データは大規模なプロジェクトで実施された試験から得られており、それらに該当する発電技術検査協会や原子力安全基盤機構などの国プロジェクトのデータ、電力共研のデータはすべて対象とした。また、米国の EPRI、NRC やフランスの EDF などが実施し公開されているデータはすべて対象とした。特に、実際の軽水炉で照射を受けた部材の材料データは貴重であり注意して収集した。

国際会議プロシーディングについては照射材データが含まれる可能性のあるものとして以下を調査した。

- ・ International Symposium on Effects of Radiation on Materials

ASTM(American Society of Testing and Materials)の E10 委員会(Nuclear Technology and its Application)が主催し、2 年毎に米国で開催。論文集が ASTM の STP(Special Technical Publication)として発行されている。

- ・ International Symposium on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Systems – Water Reactors (略して EDM とされる)

軽水炉材料の照射も含めた環境劣化に関する国際会議で、2 年毎に北米で ANS(American Nuclear Society)、NACE(National Association of Corrosion Engineer)、TMS(The Minerals, Metals & Materials Society)、CNS(Canadian

Nuclear Society)が主催して開催される。

- International Symposium on Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud)

フランス原子力学会(SFEN)が主催する材料研究の国際会議で4年毎に開催される。第8回の会議タイトルは若干変更となっている。

- ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference(ASME PVP)

原子炉構成機器の健全性に関する ASME(American Society of Mechanical Engineering)主催の国際会議であり毎年開催されている。

- International Conference on Nuclear Engineering(ICONE)

原子力に全般に関する国際会議で毎年主催国を変えて開催されている。

- International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology(SMiRT)

原子炉機器に関する機械系の国際会議であり、2年毎にもち回りで開催されている。

- Microstructural Processes in Irradiated Materials

米国 Material Research Society(MRS)の年会中に照射材の研究に関する専門分野のセッションとして開催されている。

- International Congress on Advances in Nuclear Power Plants(ICAPP)

原子力全般の国際会議で各国の原子力学会が持ち回りで毎年開催されている。

学術論文誌については、照射材データが含まれる可能性のあるものと以下を調査した。

- Journal of Nuclear Materials
- Journal of ASTM International
- Nuclear Engineering and Design
- Acta Materialia
- Metallurgical Transactions
- Philosophical Magazine
- Nuclear Instruments and Methods
- 日本原子力学会論文誌(和文と英文 Journal of Nuclear Science and Technology)
- 日本金属学会誌(和文と英文 Materials Transaction)

今年度は、引張特性、硬さ、破壊靱性、IASCC 発生、IASCC 進展、応力緩和、スエリングを対象として、新規のデータがある場合は追加するとともに、IASCC 感受性、ミクロ組織、粒界偏析について文献を調査した。

(2) 調査結果

近年公開された文献および国プロ報告書等(以下文献等)を調査し、オーステナイト系ステンレス鋼に関する照射データを抽出した。この調査では、文献データをデータベースとして整理するとともに代表値・最確値の導出方法の検討を行うことが目的であるため、測定値がデジタル値として記載されている文献を対象とした。測定結果が図だけで記載

されている文献は、何らかの形でデジタル値が提供される場合にはそれらも対象とした。

3.1 節に述べた条件に基づいて調査した結果、抽出された文献についてその概要を表 3.2.2-1~表 3.2.2-10 および表 3.2.2-11~表 3.2.2-19 にまとめた。これらの表は、軽水炉での材料特性を念頭に置いた研究では PWR か BWR のどちらかを念頭に置いて試験条件が選ばれている場合がほとんどであることから、PWR 分野と BWR 分野に分けて材料特性ごとに文献データの概要をまとめたものである。研究炉のデータについては、照射温度が 300°C 以下で 290°C 付近の温度の文献は BWR で、300°C 以上の温度の文献は PWR として扱うこととした。概要として、照射炉、材料、照射温度、照射量、試験方法、データ数を示した。各表の文献データは、国プロジェクトの文献、国内国外の軽水炉の材料試験データの文献、研究炉を用いた材料試験データの文献の順となっている。なお、調査結果の整理では、分野別に特性ごとに個別に参照できるように、特定の記号を用いてデータと文献を整理することとした。

① PWR分野

a. 引張特性(表 3.2.2-1、データおよび文献記号PT)

今年度の継続調査ではこれまでの調査結果に追加すべきデータは無かった。

PWR 実機から取り出された使用済みの部材による試験データの文献があり [3.2.2-3]~[3.2.2-15]、国プロジェクトとして発電設備技術検査協会と原子力安全基盤機構で多くのデータが得られている。特に、使用済みのシンプルチューブとバップルボルト等の冷間加工 316SS 製部材のデータが多く報告されており、照射量は最大 76 dpa まで達している。実機材では 304SS 製部材としてシンプルプラグ、遮蔽体ノズル、バップル板のデータが報告されているがデータは多くない。実機部材のデータでは部材の照射温度や中性子束は解析計算で推定する必要がある、そのような評価は原子力安全基盤機構(JNES)のプロジェクト等で行われてきたが、やや古い文献では実施されず温度と中性子束は記載されていないデータがほとんどである。

研究炉や高速炉による照射試験では 300°C 付近の照射温度の文献は少ないが、ORR(Oak Ridge Reactor)、HFIR(High Flux Isotope Reactor)、HFR(High Flux Reactor)、OSIRIS、BOR-60 によるデータが報告されている[3.2.2-16]~[3.2.2-20]。EBR-II を使用した文献は古くから多くあり最近の 2 例をリストに示したが、照射温度は Na 入口温度である 370°C 以上に限られるため、軽水炉の評価には使用されないことが多い[3.2.2-21], [3.2.2-22]。

b. 硬さ(表 3.2.2-2、データおよび文献記号PH)

今年度の継続調査ではこれまでの調査結果に追加すべきデータは無かった。

PWR 実機から取り出された使用済みの部材による試験データが報告されており [3.2.2-23], [3.2.2-24]、使用済みのシンプルチューブとバップルボルト等の冷間加工

316SS 製部材のデータが報告されている[3.2.2-25]。硬さは標準的に機械的性質として測定されるものではないためデータは多くない。局所的な組織変化の調査の一環として測定される場合があるが断片的である。

c. 破壊靱性(表 3.2.2-3、データおよび文献記号PF)

今年度の継続調査ではこれまでの調査結果に追加すべきデータは無かった。

PWR 実機から取り出された使用済みの部材を用いた発電設備技術検査協会による国プロジェクトの試験データの文献がある[3.2.2-26]。その他には、バッフルボルトを用いた試験結果[3.2.2-27], [3.2.2-28]と高照射のシンプルチューブを用いた試験結果[3.2.2-29]が報告されている。照射量は最大 65 dpa まで達している。いずれも 10 mm 程度の径のチューブや棒状の試験片による試験であり、試験片サイズの観点では破壊靱性試験としての有効性は保たれていない。

一方、廃炉からの 304 製バッフル板やフォーマ板から採取した 0.5T-CT や 1T-CT 試験片を用いた試験が報告されている[3.2.2-30]。

d. IASCC感受性(表 3.2.2-4、データおよび文献記号PIS)

今年度に調査を実施した。

PWR 実機から取り出された使用済みのシンプルチューブやバッフルボルトを用いた発電設備技術検査協会と原子力安全基盤機構による国プロジェクトの試験データの文献がある[3.2.2-31]~[3.2.2-33]。その他にも、シンプルチューブを用いた試験結果[3.2.2-34]~[3.2.2-37]とバッフルボルトを用いた試験結果[3.2.2-39], [3.2.2-40]が報告されている。また希ガス中の試験試験も報告されている[3.2.2-36], [3.2.2-37]。照射量は最大 73 dpa まで達している。いずれも 10 mm 程度の径のチューブやボルトからの切り出した引張試験片による試験である。

試験炉照射材では BOR-60 での照射材の試験が報告されている[3.2.2-41]。

e. IASCC発生(表 3.2.2-5、データおよび文献記号PII)

今年度の継続調査ではこれまでの調査結果に追加すべきデータは無かった。

PWR 実機から取り出されたシンプルチューブとバッフルボルトを用いた原子力安全基盤機構による国プロジェクトの試験データの文献がある[3.2.2-42], [3.2.2-43]。シンプルチューブを用いた試験は他にも多く実施され、米国の EPRI による一連の試験、INSS の試験、ベルギーの Tihange-2 を用いた SCK/CEN の試験が報告されている[3.2.2-44]~[3.2.2-48], [3.2.2-51]。照射量は最大 80 dpa に達している。多くの試験は O リングまたは C リング試験片で行われており、負荷荷重は計算で評価されている。INSS の試験では引張試験片による単軸定荷重の試験を行っている。EDF では廃炉となった Chooz A の 304SS 製バッフル板の引張試験による定荷重試験が行われている[3.2.2-49],

[3.2.2-50]。

f. IASCC進展(表 3.2.2-6、データおよび文献記号PIG)

今年度に新規に調査を実施した。

亀裂進展試験にはある程度の大きさが必要であるため PWR 実機から取り出された材料の試験は少ない。バッフルボルトを用いた試験データが EPRI から報告されているのみである[3.2.2-52], [3.2.2-53]。亀裂進展試験に適した形状の試験片(小型 CT 試験片等)を研究炉で照射した研究が行われており、高速炉の BOR-60 で照射後、PWR 環境で試験したデータが多く報告されている[3.2.2-53]~[3.2.2-56]。照射量は最大 35 dpa に達している。また、PWR と BWR の部材から作成した CT 試験片を用いた Halden 炉での炉内亀裂進展試験が報告されている[3.2.2-57]。

g. 応力緩和・クリープ(表 3.2.2-7、データおよび文献記号PC)

今年度の継続調査ではこれまでの調査結果に追加すべきデータは無かった。

PWR の温度領域でのクリープ試験としては、原子力安全基盤機構のプロジェクトで Halden 炉を用いて冷間加工 316SS の比較的高応力の試験が報告されている[3.2.2-59]。内圧チューブや引張試験片によるクリープ試験は様々な炉で実施されているが、300°C 付近のデータは多くない。古い文献では、Grossbeck らが ORR での 60、330、400°C のクリープ試験を報告している[3.2.2-60]。

最近の 300°C 付近の試験が 2 例報告されており、Garnier らが OSIRIS や BOR-60 による 320~325°C でのチューブ内圧クリープ試験[3.2.2-61]、Foster らが Halden 炉による 290~330°C での単軸引張クリープ試験を報告している[3.2.2-62]。

EBR-II を用いた 370°C 以上のクリープや応力緩和の試験は多く行われており、一例として Kenfield らがベントビーム試験による応力緩和試験を報告している[3.2.2-63]。

応力緩和試験の報告では、データはある照射温度で照射された場合のある照射量での応力比(初期応力に対する比)としてあらわされる場合が多い。クリープ試験の報告では、ある照射温度とある負荷応力のもとでの、照射量とひずみの関係または定常クリープ速度(照射量当たりのひずみ量)として表され、データはフィッティングにより決定した係数が報告されている場合が多い。

h. スエリング(表 3.2.2-8、データおよび文献記号PSW)

今年度の継続調査では、FBR 部材のデータのうち、EBR-II の反射体の比較的低温のデータ[3.2.2-74] はスエリングの中性子束と温度の依存性の検討に使用されているため、これらのデータを収集データに加えた。

スエリングは温度と中性子束の照射条件に極めて敏感であることから、実機部材のデータが重要でありそれらを抽出した[3.2.2-64]~[3.2.2-73]。CW316SS 製のシンブルチュ

ーブとボルトの部材のデータが多く、304SS 製部材のデータは非常に少ない。

スエリングの値は、すべて TEM 観察によるマイクロ組織で得られたキャビティの密度と平均サイズから計算した値で報告されている。

i. ミクロ組織(表 3.2.2-9、データおよび文献記号PM)

今年度に新規に調査を実施した。

PWR 実機から取り出された冷間加工 316SS 製シンプルチューブとバッフルボルトについて原子力安全基盤機構による国プロジェクトで得られたデータが報告されている[3.2.2-75]。シンプルチューブやバッフルボルトのデータは他にも多く報告されている[3.2.2-76]~[3.2.2-85]。PWR の温度範囲内の研究炉データは多くはないが、PWR 部材との比較を意識したデータも報告されている[3.2.2-79]。

j. 粒界偏析(表 3.2.2-10、データおよび文献記号PG)

今年度に新規に調査を実施した。

PWR 実機から取り出されたシンプルチューブなどについて発電設備技術検査協会と原子力安全基盤機構による国プロジェクトで得られたデータが報告されている[3.2.2-86]~[3.2.2-88]。シンプルチューブやバッフルボルトのデータは他にも報告されている[3.2.2-89]~[3.2.2-91]。PWR の温度範囲内の研究炉データは多くはないが、PWR 部材との比較を意識したデータも報告されている[3.2.2-92]。

表 3.2.2-1 PWR 分野の引張特性の文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
PT-R1	発電設備技術検査協会報告書 プラント長寿命化技術開発 「ステンレス鋼照射SCC試験(PWR)」 平成9年3月	海外PWR	CW316 (シムプルチューブ)	記載なし	5, 25dpa	引張試験 RT, 325°C	6
			304 (シムプルプラグ)	記載なし	3.25dpa	引張試験 RT, 325°C	4
PT-R1	発電設備技術検査協会報告書 プラント長寿命化技術開発 「ステンレス鋼照射SCC試験(PWR)」 平成9年3月	米国PWR	CW316 (シムプルチューブ)	記載なし	0.005～51dpa	引張試験 RT, 300, 350°C	32
			CW316 (熱遮蔽体ボルト)	記載なし	0.4dpa	引張試験 RT, 300, 350°C	12
			304 (燃料ノズル他)	記載なし	0.12, 1.5dpa	引張試験 RT, 300, 350°C	19
PT-R2	原子力安全基盤機構 平成20年度照射誘起応力腐食割れに 関する報告書(09基材報-0012)」 平成21年9月等	海外PWR	CW316 (バップルボルト)	310～340°C	4～12dpa	引張試験 290, 320, 340°C	19
		国内PWR	CW316 (シムプルチューブ)	290～310°C	4～72dpa	引張試験 290, 320, 340°C	20
PT-R3	福谷ら INSS MONOGRAPH No.4	国内PWR	CW316 (シムプルチューブ)	304～313°C	6, 35, 53dpa	引張試験 320°C	12
PT-R4	Fukuya et al., J.Nucl.Sci.Tech. 41(2004)673	国内PWR					
PT-R5	Fukuya et al., J.Nucl.Mater. 378(2008)211	国内PWR	CW316 (シムプルチューブ)	305°C	73dpa	引張試験 RT, 320°C	5
PT-R6	Fukuya et al., J.Nucl.Sci.Tech. 45(2008)452	国内PWR	CW316 (シムプルチューブ)	313°C	35dpa	引張試験 320°C	4
PT-R7	Shogan et al. 10th EDM, 2001	海外PWR	CW316 (シムプルチューブ)	記載なし	20, 46dpa	引張試験 RT, 360°C	6
PT-R8	Connerman et al. 10th EDM, 2001	海外PWR	CW316, 347 (バップルボルト) 304(ロックバー)	記載なし	4～21dpa	引張試験 RT, 320°C	9
PT-R9	Connerman et al. 12th EDM, 2005	海外PWR (Ringhals 2)	CW316 (シムプルチューブ)	290, 320°C	28, 35, 65dpa	引張試験 RT, 320, 340°C	16
PT-R10	EPRI Report 1015332 Sept. 2007	米国PWR	CW316 (シムプルチューブ)	記載なし	6～76dpa	引張試験 290～340°C	18
PT-R11	Toivonen et al. Fontevraud 6, 2006	仏PWR (Chooz A)	304 (バップル板)	300°C	30dpa	引張試験 RT, 300, 340°C	3
PT-R12	Jenssen et al. Fontevraud 6, 2006	海外PWR (Ringhals 2)	CW316 (シムプルチューブ)	記載なし	24, 29, 65dpa	引張試験 RT, 320°C	12
PT-R13	Jenssen et al. Fontevraud 7, 2010	海外PWR (Ringhals 2)	CW316 (シムプルチューブ)	290～321°C	76dpa	引張試験 RT, 320°C	4
PT-R14	Robertson et al. ASTM STP1325, 1999	ORR, HFIR	316	60, 200, 330, 400°C	7, 18dpa	引張試験 60～400°C	24
PT-R15	Horsten et al. J.Nucl.Mater. 212-215(1994)514	HFR Petten	316L(N)	223, 323, 423°C	10dpa	引張試験 RT～577°C	39
PT-R16	Pokor et al. J.Nucl.Mater. 326(2004)30	OSIRIS BOR60	304, CW316	330°C	5dpa 100dpa	引張試験 330°C	16
PT-R17	Fujimoto et al. 12th EDM, 2005	BOR60	CW316	330°C	18, 42dpa	引張試験 330°C	6
PT-R18	Jenssen et al. 15th EDM, 2011	BOR60	CW316, 316, 304L	320°C	5～48dpa	引張試験 330°C	14
PT-R19	Yoshitake et al. ASTM STP1405, 2001	EBR-II	CW316	371～444°C	0.9～40dpa	引張試験 RT, 377～432°C	17
PT-R20	Allen et al. ASTM STP1447, 2003	EBR-II	CW316	371～386°C	10～47dpa	引張試験 370°C	8

表 3.2.2-2 PWR 分野の硬さの文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
PH-R1	原子力安全基盤機構 平成20年度照射誘起応力腐食割れに 関する報告書(09基材報-0012)」 平成21年9月等	海外PWR	CW316 (バップルボルト)	310～340°C	4～12dpa	ビッカース硬さ 500g	10
		国内PWR	CW316 (シンプルチューブ)	290～310°C	4～72dpa	ビッカース硬さ 500g	16
PH-R2	福谷ら INSS MONOGRAPH No.4	国内PWR	CW316 (シンプルチューブ)	292～323°C	0.7～73dpa	ビッカース硬さ 500g	16
PH-R3	Edwards et al. J.Nucl.Mater.317(2003)32	海外PWR (Tihange 2)	CW316 (バップルボルト)	320～343°C	8～20dpa	ビッカース硬さ 500g	3

表 3.2.2-3 PWR 分野の破壊靱性の文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
PF-R1	発電設備技術検査協会報告書 プラント長寿命化技術開発 「ステンレス鋼照射SCC試験(PWR)」 平成9年3月	米国PWR	CW316 (シンプルチューブ)	記載なし	0.005～33dpa	破壊靱性試験 円筒試験片 RT, 300, 350°C	28
			CW316 (熱遮蔽体ボルト)	記載なし	0.1～1dpa	破壊靱性試験 R-CT試験片 RT, 300, 350°C	3
			304 (熱遮蔽体取付ピン)	記載なし	0.08dpa	破壊靱性試験 R-CT試験片 RT, 300, 350°C	3
			304 (燃料ノズル他)	記載なし	1.5dpa	破壊靱性試験 棒状試験片 RT, 300, 350°C	6
PF-R2	EPRI Report 1003069 Nov. 2001	米国PWR	CW316 (バップルボルト)	記載なし	6～18dpa	破壊靱性試験 円筒試験片 RT, 320°C	7
PF-R3	EPRI Report 1008204 Sep. 2004						
PF-R4	Jenssen et al. Fontevraud 6, 2006	海外PWR (Ringhals-2)	CW316 (シンプルチューブ)	記載なし	39, 65dpa	破壊靱性試験 円筒PLT試験片 RT, 320°C	6
PF-R5	EPRI Report 1012079 Sep. 2005	PWR	304 (バップル板、 フォーマ板)	記載なし	0.1～13dpa	破壊靱性試験 0.5, 1TCT試験片 320°C	5

表 3.2.2-4 PWR 分野の IASCC 感受性の文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
PIS-R1	発電設備技術検査協会報告書 プラント長寿命化技術開発 「ステンレス鋼照射SCC試験(PWR)」 平成9年3月	国内PWR	CW316 (シムプルチューブ)	290～300°C	0.3～19.5dpa	SSRT	12
PIS-R2		海外PWR (Kewaunee)	304 (シムプルプラグ)	325°C	1.3, 3.3dpa	SSRT	2
PIS-R3	JNES 平成20年度IASCCに関する 報告書(09基材報-0012)」 平成21年9月等	海外PWR	CW316 (ハッフルボルト)	310, 317°C	0～4.7dpa	SSRT	9
PIS-R4	福谷ら INSS MONOGRAPH No.4	国内PWR	CW316 (シムプルチューブ)	305～323°C	0～73dpa	SSRT	30
PIS-R5	Nishioka et al., 13th EDM, 2007	国内PWR	CW316 (シムプルチューブ)	320°C	35～73dpa	SSRT (希ガス中)	6
PIS-R6	Fukuya et al., J. Nucl.Sci.Tech.45, 2008	国内PWR	CW316 (シムプルチューブ)	313°C	35dpa	SSRT (希ガス中)	2
PIS-R7	Conermann et al., 12th EDM 2005 (EPRI Report 1003525 (MRP-73) 2002)	海外PWR (Ringhals 2)	CW316 (シムプルチューブ)	295～325°C	0～65dpa	SSRT	7
PIS-R8		海外PWR (Ringhals 2)	CW316 (シムプルチューブ)	320°C	65dpa	SSRT (希ガス中)	2
PIS-R9	Conermann et al., 10th EDM, 2001	海外PWR	347, CW316 (ハッフルボルト) 304(ロックバー)	—	9.75～20.72dpa	SSRT	5
PIS-R10	EPRI Report 1003069 (MRP-51) 2001	海外PWR	347, CW316 (ハッフルボルト) 304(ロックバー)	—	3～21dpa	SSRT	9
PIS-R11	Was et al., 16th EDM, 2013	BOR60	304L 他	320°C	4.4～47.5dpa	SSRT	13

表 3.2.2-5 PWR 分野の IASCC 発生の文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
PII-R1 PII-R2	原子力安全基盤機構 平成20年度照射誘起応力腐食割れに 関する報告書(09基材報-0012)J 平成21年9月等	海外PWR	CW316 (バップルボルト)	310～340°C	5～20dpa	定荷重SCC試験 Cリング試験片 一次系模擬水 340°C	27
			CW316 (シンプルチューブ)	290～310°C	6～74dpa	定荷重SCC試験 Cリング試験片 一次系模擬水 320, 340°C	54
PII-R3	Nishioka et al. J.Nucl.Sci.Tech. 45(2008)1072	国内PWR	CW316 (シンプルチューブ)	299～322°C	20, 38, 72dpa	定荷重SCC試験 引張試験片 一次系模擬水 320°C	10
PII-R4	Fujii et al. Fontevraud 7, 2010	国内PWR	CW316 (シンプルチューブ)	298°C	38dpa	定荷重SCC試験 引張試験片 一次系模擬水 320°C, DH変化	8
PII-R5	Connerman et al. 12th EDM, 2005	海外PWR (Ringhals 2)	CW316 (シンプルチューブ)	記載なし	17～65dpa	定荷重SCC試験 Cリング試験片 一次系模擬水 340°C	28
PII-R6	Shogan et al. 10th EDM, 2001	海外PWR	CW316 (シンプルチューブ)	記載なし	1～32dpa	定荷重SCC試験 Cリング試験片 一次系模擬水 330°C	30
PII-R7	Freyer et al. 13th EDM, 2007	米国PWR	CW316 (シンプルチューブ)	記載なし	12～76dpa	定荷重SCC試験 Cリング試験片 一次系模擬水 340°C	76
PII-R8	Pokor et al. Fontevraud 7, 2010	仏PWR (Chooz A)	304 (バップル板)	300°C	30dpa	定荷重SCC試験 引張試験片 一次系模擬水 340°C	11
PII-R9	Toivonen et al. Fontevraud 6, 2006						
PII-R10	Bosch et al. J.Nucl.Mater. 461(2015)112	海外PWR (Tihange 2)	CW316 (シンプルチューブ)	300°C	45～80dpa	定荷重SCC試験 Cリング試験片 一次系模擬水 320°C	38

表 3.2.2-6 PWR 分野の IASCC 進展の文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
PIG-R1	EPRI Report 1003069 MRP-51, 2001	海外PWR (Point Beach)	347 (バップルボルト)	—	12～18dpa	炉外CGR	10
		海外PWR (Farley)	CW316 (バップルボルト)	—	12～18dpa	炉外CGR	8
PIG-R2	Jenssen, 15th EDM 2011	BOR60	CW316他	320°C	11.3, 35dpa	炉外CGR	16
PIG-R3	Jenssen, 14th EDM 2009	BOR60	CW316他	320°C	25dpa	炉外CGR	32
PIG-R4	Chen et al., 16th EDM 2013	BOR60	304L	320°C	7dpa	炉外CGR	24
PIG-R5	Was et al., 16th EDM 2013	BOR60	CW316他	320°C	7.8～35dpa	炉外CGR	35
PIG-R6	Karlsen et al., 12th EDM 2005	海外BWR	304L	335°C	5.9～16.3dpa	炉内CGR (Halden)	28
PIG-R7	Karlsen et al., 17th EDM 2015	海外BWR 海外PWR	304L	302/307°C 324/334°C	3, 5.9, 7.7dpa	炉内CGR (Halden)	24

表 3.2.2-7 PWR 分野の応力緩和・クリープの文献

文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
PC-R1 原子力安全基盤機構 平成20年度照射誘起応力腐食割れに 関する報告書(09基材報-0012)J 平成21年9月等	Halden炉	CW316	290, 340°C	1dpa	単軸クリープ試験	11
PC-R2 Grossbeck et al. J.Nucl.Mater. 179-181(1991)130	ORR	316, CW316	60~330°C	8dpa	チューブ内圧試験 (クリープ)	34
PC-R3 Garnier et al. Fontevraud 7, 2010	BOR60, OSIRIS, EBR-II	304L, CW316	320°C 325°C 370°C	120dpa 10dpa 10dpa	チューブ内圧試験 (クリープ)	5
PC-R4 J.P Foster et al. 15th EDM, 2011	Halden炉	304L	290°C	~1dpa	単軸引張試験 (クリープ)	2
		CW316	330°C	~1dpa	単軸引張試験 (応力緩和)	11
PC-R5 Kenfield et al. J.Nucl.Mater. 66(1977)238	EBR-II	CW316	370°C	~1dpa	ベントビーム試験 (応力緩和)	70

表 3.2.2-8 PWR 分野のスエリングの文献

文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
PSW-R1 原子力安全基盤機構 平成17年度照射誘起応力腐食割れに 関する報告書 平成21年9月等	国内PWR	CW316 (シンプルチューブ)	302~311°C	10~71dpa	TEM	4
	海外PWR	CW316 (バップルボルト)	298, 340°C	10, 20dpa	TEM	2
PSW-R2 福谷ら INSS MONOGRAPH No.4	国内PWR	CW316 (シンプルチューブ)	299~323°C	0.7~73dpa	TEM	13
PSW-R3 Fukuya et al. J.Nucl.Sci.Tech.43(2006)159						
PSW-R4 Fujimoto et al., 12th EDM, 2005	海外PWR (Tihange 2)	CW316 (シンプルチューブ)	290~325°C	17, 35, 65dpa	TEM	6
PSW-R5 Chung et al. NUREG/CR-6897	海外PWR (Tihange 2)	CW316 (シンプルチューブ)	295, 325°C	17, 35, 65dpa	TEM	3
	海外PWR	CW316 (バップルボルト)	290, 329°C	9, 18dpa	TEM	2
	海外PWR	347(バップルボルト) 304(ロックバー)	290, 329°C	9~25dpa	TEM	8
PSW-R6 Edwards et al. J.Nucl.Mater.317(2003)32	海外PWR (Tihange 2)	CW316 (バップルボルト)	320~343°C	8~20dpa	TEM	3
PSW-R7 Edwards et al. J.Nucl.Mater.384(2009)249	海外PWR	CW316 (シンプルチューブ)	290, 315°C	33, 70dpa	TEM	2
PSW-R8 Foster et al. J.Nucl.Mater. 224(1995)207	海外PWR	CW316 (シンプルチューブ)	305~315°C	35dpa	TEM	1
PSW-R9 Pokor et al. Fontevraud 6, 2006	海外PWR 他	CW316, 304L	310~365°C	10~25dpa	TEM	25
PSW-R10 Panait et al. Fontevraud 8, 2014	海外PWR	CW316 (バップルボルト 他)	312, 325°C	7,9 dpa	TEM	6
PSW-R11 EPRI report 1000970 (MRP-50), 2001	海外FBR (EBR-II)	304 (反射体)	373~399°C	3.7~31.6dpa	TEM	133

表 3.2.2-9 PWR 分野のミクロ組織の文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
PM-R1	JNES 平成20年度IASCC研究 (09基材報-0012)」平成21年9月等	海外PWR	CW316 (バップルボルト)	298, 340°C	10.8, 19.8dpa	TEM	2
		国内PWR	CW316 (シンプルチューブ)	302～311°C	10.5～71dpa	TEM	4
PM-R2	福谷ら, INSS MONOGRAPH No.4 2009	国内PWR	CW316 (シンプルチューブ)	292～323°C	0.7～73dpa	TEM	13
PM-R3	Edwards et al., J. Nucl. Mater. 317 (2003) 32	海外PWR (Tihange 1)	CW316 (バップルボルト)	320～343°C	7.5～19.5dpa	TEM	3
PM-R4	Edwards et al., J. Nucl. Mater. 384 (2009) 249	海外PWR	CW316 (シンプルチューブ)	290, 315°C	33, 70dpa	TEM	2
PM-R5	Pokor et al., Fontevraud 6, 2006	海外PWR	304L (バップル板)	310°C	28dpa	TEM	1
		海外PWR	CW316 (バップルボルト)	345～365°C 310°C	13, 25dpa	TEM	2
		Osiris, SM, BOR60	304, CW316	320°C	0.8～40dpa	TEM	15
PM-R6	Monnet et al., Fontevraud 5, 2002	海外PWR (Chooz A)	CW304	300～320°C	2.5～21.6dpa	TEM	4
PM-R7	Goltran et al., Fontevraud IV, 1998	海外PWR (Chooz A)	304L	310°C	35dpa	TEM	1
PM-R8	Cauvin et al., Fontevraud III, 1994	海外PWR	CW316 (バップルボルト)	320°C	10dpa	TEM	1
PM-R9	Pironet et al., Fontevraud IV, 1998	海外PWR	CW316 (バップルボルト)	300°C	24.4dpa	TEM	1
PM-R10	Panait et al., Fontevraud 8, 2014	海外PWR (CP0)	CW316 (バップルボルト)	312, 325°C	7, 9dpa	TEM	2
PM-R11	Fujimoto et al., 12th EDM, 2005, 299	海外PWR (Ringhals 2)	CW316 (シンプルチューブ)	290～325°C	0～65dpa	TEM	8

表 3.2.2-10 PWR 分野の粒界偏析の文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
PG-R1 PG-R2	Suzuki et al., ICONE-4, Vol.5, 1996, 205	海外PWR	CW316 (シンプルチューブ)	—	0～19.5dpa	TEM/EDS	6
PG-R3	JNES 平成20年度IASCCに関する 報告書(09基材報-0012)」 平成21年9月等	海外PWR	CW316 (バップルボルト)	298, 340°C	0～19.8dpa	TEM/EDS	9
		国内PWR	CW316 (シンプルチューブ)	302～311°C	0～71dpa	TEM/EDS	18
PG-R4	福谷ら INSS MONOGRAPH No.4 2009 他	国内PWR	CW316 (シンプルチューブ)	293～323°C	0～73dpa	TEM/EDS	36
PG-R5	Fujimoto et al., 12th EDM, 2005, 299 (EPRI Report 1003525, MRP-73, 2002)	海外PWR (Ringhals 2)	CW316 (シンプルチューブ)	—	0～65dpa	TEM/EDS	4
PG-R6	Edwards et al., J.Nucl.Mater. 317 (2003) 32	海外PWR (Tihange 1)	CW316 (バップルボルト)	333, 343°C	7.5, 12.2dpa	TEM/EDS	4
PG-R7	Edwards, 13th EDM, 2007	BOR60	304L他	320°C	0～25dpa	TEM/EDS	15

② BWR分野

a. 引張特性(表 3.2.2-11、データおよび文献記号BT)

今年度の継続調査ではこれまでの調査結果に追加すべきデータは無かった。

国プロジェクトとして原子力安全基盤機構が実施した JMTR による照射データが報告されている[3.2.2-1], [3.2.2-94]。照射量は最大 13 dpa 程度である。国内の BWR 実機から取り出された使用済みの部材や BWR 炉内で照射された試験片による試験データが多く報告されている[3.2.2-95]~[3.2.2-102]。実機部材は炉内計装管、シュラウド、上部格子板、制御棒ハンドルなど多様である。炉心で照射された部材では最大照射量は約 20 dpa に達している。海外の BWR の部材についても試験データが多く報告されている[3.2.2-102]~[3.2.2-104]。海外 BWR のガイドチューブ部材で 50 dpa のデータが報告されている[3.2.2-103]。

研究炉の照射データでは、JMTR、ATR(Advanced Test Reactor)、BR2 での照射データが報告されている[3.2.2-106]~[3.2.2-108]。

照射温度は BWR 運転温度と同じ 288°C 付近であり、実機部材では中性子束が記載されていない文献がほとんどである。材料は大部分のデータが溶体化材のもので、冷間加工材のデータは少ない。鋼種は過去に組成の調整に基づく耐 IASCC 材の開発が盛んに行われたこともあり、通常の 304、304L、316、316L、316NGSS とともに、JIS 等の基準範囲内で Si、P、S を低減した高純度材、N を調整した材料、Nb や Ti 等を添加した材料のデータが報告されている。

b. 硬さ(表 3.2.2-12、データおよび文献記号BH)

今年度の継続調査ではこれまでの調査結果に追加すべきデータは無かった。

国プロジェクトとして原子力安全基盤機構が実施した JMTR による照射データが報告されている[3.2.2-110], [3.2.2-111]。照射量は最大 13 dpa 程度である。国内の BWR 実機から取り出された使用済みの部材や BWR 炉内で照射された試験片による測定データが報告されている[3.2.2-112]~[3.2.2-116]。実機部材は炉内計装管、シュラウド、上部格子板、制御棒ハンドルなど多様である。炉心で照射された部材では最大照射量は約 20 dpa に達している。引張試験に対応してデータがとられている例が多い。

c. 破壊靱性(表 3.2.2-13、データおよび文献記号BF)

今年度の継続調査ではこれまでの調査結果に追加すべきデータは無かった。

国プロジェクトとして原子力安全基盤機構が実施した 0.5T-CT 試験片の JMTR 照射のデータが報告されている[3.2.2-117]。また、発電技研によるプラント長寿命化研究では、海外 BWR の取出材について、3 点曲げ、CT 試験片、ショートロッド(SR)試験片を用いたデータが報告されており[3.2.2-118]、このデータは維持基準で示されている評価用破壊靱性値の根拠となっている。

BWR 実機から取出した比較的厚い部材による試験データが報告されており、0.24T-CT から最大で 1.5T-CT までの試験片のデータが報告されている[3.2.2-119]~[3.2.2-121]。研究炉のデータは、JMTR のほかに Halden 炉で照射した 1/4T-CT のデータが ANL から報告されている[3.2.2-122]~[3.2.2-124]。また、圧力容器のステンレスクラッド材について、模擬して作製した溶金を JMTR で照射したデータが報告されている[3.2.2-125]。

材料は 304、304L、316、316LSS であり、他に鋳造材 CF8M のデータが報告されている[3.2.2-122]、[3.2.2-123]。照射量は最大 12 dpa である。破壊靱性試験の方法としては CT 試験片による J_{IC} 試験が用いられている。試験温度はほとんどが 288°C であるが、室温、150°C での試験も見られた[3.2.2-121]。

d. IASCC感受性(表 3.2.2-14、データおよび文献記号BIS)

今年度に新規に調査を実施した。

国プロジェクトとして原子力安全基盤機構が実施した JMTR 照射のデータが報告されている[3.2.2-126]。BWR 実機から取出した材料、あるいは実機で照射された試験片を対象とした試験データは IASCC 対策の初期から多数報告されている[3.2.2-127]~[3.2.2-134]。国内 BWR の部材や国内 BWR で照射された材料のデータは、IASCC 感受性の発現する照射量を設定するデータとして使用されている。研究炉のデータは上記の国プロジェクトの他に JMTR 照射材等があるが、系統的なものとしては ATR 照射材のデータがある[3.2.2-135]、[3.2.2-136]。

e. IASCC発生(表 3.2.2-15、データおよび文献記号BII)

今年度の継続調査ではこれまでの調査結果に追加すべきデータは無かった。

定荷重ないし低ひずみで SCC 発生を調べた報告は少なく、国内 BWR の実機部材による単軸定荷重試験[3.2.2-137]と海外 BWR の実機部材による 3 点曲げ試験[3.2.2-138]が報告されている。前者は最大照射量が 18 dpa で、水質環境を変えたデータ(32ppmDO と 0.02ppmDO)も報告されている。

f. IASCC進展(表 3.2.2-16、データおよび文献記号BIG)

今年度の継続調査ではこれまでの調査の文献をさらに精査し追加した。

国プロジェクトとして原子力安全基盤機構が実施した 0.5T-CT 試験片の JMTR 照射のデータが報告されており、最大 13 dpa までの幅広い照射量まで照射された商用ステンレス鋼について、BWR の通常水質(NWC)と水素注入水質(HWC)における進展データが系統的にとられている[3.2.2-139]~[3.2.2-142]。

BWR 実機から取出したシュラウド、上部格子板、制御棒等の比較的厚い部材による試験データが報告されており、0.5T-CT までの試験片のデータが報告されている[3.2.2-143]~[3.2.2-147]。照射量は最大 13 dpa 程度までのデータがある。

研究炉照射材のデータは、JMTR[3.2.2-151]のほかに Halden 炉[3.2.2-149], [3.2.2-150] と BOR-60[3.2.2-147], [3.2.2-148]での照射材が報告されており、1/4-CT または 8 mm 厚 R-CT 試験片が照射されている。BOR-60 照射は PWR 照射条件を考慮した条件でありで 320°C で最大 47.5 dpa まで照射されている。

IASCC 進展試験では、研究炉内で進展試験を行う炉内 SCC 試験を実施した結果が JMTR[3.2.2-152]と Halden 炉[3.2.2-153], [3.2.2-154]から報告されている。JMTR での炉内試験では JMTR で約 1 dpa 照射した 304SS 試験片の進展測定が NWC と HWC で行われ、炉外試験の結果とも比較されている。Halden 炉での炉内試験は、BWR 実機の照射材を用いた試験であり、BWR 環境だけでなく PWR 一次系模擬環境でも試験が行われている。

g. 応力緩和・クリープ(表 3.2.2-17、データおよび文献記号BC)

今年度の継続調査ではこれまでの調査結果に追加すべきデータは無かった。

BWR 条件を対象とした研究炉を用いた応力緩和試験が数件報告されている[3.2.2-156]~[3.2.2-161]。試験方法として、C リング法、ベントビーム法、単軸引張法、中性子回折法が用いられており、前 3 つの方法では一定のひずみ負荷で照射し照射後の負荷解放後のひずみとの差で緩和量を測定し、後者では溶接残留応力の照射前後の変化を中性子回折法で測定する。

国プロジェクトとして原子力安全基盤機構が実施した C リング試験片の JMTR 照射のデータが報告されており、最大 13 dpa まで照射された商用ステンレス鋼について応力比が測定されている[3.2.2-156]。JMTR では他にも 3 dpa 以内でのベントビーム法[3.2.2-157] や単軸引張法[3.2.2-160] での測定結果も報告されている。やや古い文献では Causey らにより、Chalk River 炉でのベントビーム法による測定結果が報告されている[3.2.2-161]。

照射前後の溶接部の残留応力の変化を中性子回折法で測定した報告が 2 件あり、304L と 316LSS のビードオン溶接の近傍の 3 方向の応力成分の変化が測定されている[3.2.2-158], [3.2.2-159]。

h. ミクロ組織(表 3.2.2-18、データおよび文献記号BM)

今年度に新規に調査を実施した。

国プロジェクトとして原子力安全基盤機構が実施した JMTR 照射のデータが報告されている[3.2.2-162]。国内 BWR 実機から取出した材料、あるいは実機で照射された試験片を対象とした試験データはいくつかの文献で報告されている[3.2.2-163]~[3.2.2-165]。海外 BWR の部材のデータも何件か報告されている[3.2.2-164], [3.2.2-166]~[3.2.2-167]。研究炉のデータは上記の国プロジェクトの他に JRR3 や ATR 照射材で報告されている[3.2.2-168], [3.2.2-169]。

i. 粒界偏析(表 3.2.2-19、データおよび文献記号BG)

今年度に新規に調査を実施した。

国プロジェクトとして原子力安全基盤機構が実施した JMTR 照射のデータが報告されている[3.2.2-170]。国内 BWR 実機から取出した材料、あるいは実機で照射された試験片を対象とした比較的系統的なデータがいくつかの文献で報告されている[3.2.2-171]~[3.2.2-175]。海外 BWR の部材のデータも何件か報告されている[3.2.2-175], [3.2.2-176]。研究炉のデータは上記の国プロジェクトの他にもあるが BWR 照射温度のデータはあまりない。

表 3.2.2-11 BWR 分野の引張特性の文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
BT-R1 BT-R2	原子力安全基盤機構 平成20年度照射誘起応力腐食割れに 関する報告書(09基材報-0012)J 平成21年3月	JMTR	304, 304L, 316L, 316NG	286~288°C	1~1.5dpa	引張試験 288°C	38
			溶接金属 308L, 316, 316L	286~288°C	1~1.5dpa	引張試験 288°C	14
	Takakura et al. 14th EDM, 2009	JMTR	316L, 304L	284~288°C	1~12.7dpa	引張試験 288°C	20
BT-R3	児玉光弘 博士論文	国内BWR	304, 316 (炉内計装管等)	288°C	0.4~20dpa	引張試験 288°C	27
BT-R4	K. Fukuya, et al. 6th EDM, 1993	国内BWR	304, 304L, 316L, 316NG, 347, 347L	288°C	1~3dpa	引張試験 288°C	48
BT-R5	M. Kodama, et al. 8th EDM, 1997	国内BWR	304, 304L, 316L, 316NG, 347, 347L	288°C	1~3dpa	引張試験 288°C	54
BT-R6	Ooki et al. 12th EDM, 2005	国内BWR	304(シュラウド) 316(上部格子板)	288°C	0.5~2dpa	引張試験 288°C	8
BT-R7	Torimaru et al. Fontevraud 7, 2010	国内BWR	304(シュラウド) 316(上部格子板)	288°C	0.2~2dpa	引張試験 288°C	8
BT-R8	2007NISA公募研究	国内BWR	304(シュラウド) 316(上部格子板)	288°C	0.5~1.5dpa	引張試験 288°C	8
BT-R9	2008NISA公募研究	国内BWR	304(シュラウド) 316(上部格子板)	288°C	0.5dpa	引張試験 288°C	4
		JMTR	316L	288°C	1.2dpa	引張試験 288°C	4
BT-R10	Demma et al. 13th EDM, 2007	海外BWR	304L(制御棒) 304(上部格子板)	288°C	5, 12dpa	引張試験 288°C	18
		国内BWR	304(制御棒)	288°C	7.4, 8.4dpa	引張試験 288°C	4
BT-R11	Jenssen et al. 15th EDM, 2011	海外BWR	304L(制御棒)	270~288°C	7.7dpa	引張試験 288°C	1
BT-R12	Jenssen et al. Fontevraud 7, 2010	海外BWR	304 (ガイドチューブ)	288°C	50dpa	引張試験 288°C	5
BT-R13	Nakamura et al. 13th EDM, 2007	BWR	304L	288°C	3.5dpa	引張試験 288°C	2
BT-R14	仲田清智ら、 日本金属学会誌 52 (1988)1023	ATR	304, 304L, 316L, 316NG	287°C	1~3dpa	引張試験 288°C	30
BT-R15	Jacobs et al. 3rd EDM, 1987	ATR	304, 304L, 316L, 316NG	287°C	1~3dpa	引張試験 288°C	29
BT-R16	Kaji et al. 13th EDM, 2007	JMTR	304	273°C	1.2dpa	引張試験 273°C	10
BT-R17	Karlsen et al. 14th EDM, 2009	BR2	CW304	300°C	2dpa	引張試験 300°C	6

表 3.2.2-12 BWR 分野の硬さの文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
BH-R1	原子力安全基盤機構 平成20年度照射誘起応力腐食割れに 関する報告書(09基材報-0012)」 平成21年3月	JMTR	304, 304L, 316L, 316NG	286~288°C	1~1.5dpa	ビッカース硬さ 500g	14
BH-R2	Takakura et al. 14th EDM, 2009	JMTR	316L, 304L	284~288°C	1~12.7dpa	ビッカース硬さ 500g	10
BH-R3	K. Fukuya, et al. 6th EDM, 1993	国内BWR	304, 304L, 316L, 316NG, 347, 347L	288°C	1~3dpa	ビッカース硬さ 1kg	32
BH-R4	M. Kodama, et al. 8th EDM, 1997	国内BWR	304, 304L, 316L, 316NG, 347, 347L	288°C	1~3dpa	ビッカース硬さ 500g	53
BH-R5	2007NISA公募研究	国内BWR	304(シュラウド) 316(上部格子板)	288°C	0.5~1.5dpa	ビッカース硬さ 500g	6
BH-R6	2008NISA公募研究	国内BWR	304(シュラウド) 316(上部格子板)	288°C	0.5dpa	ビッカース硬さ 500g	4
BH-R7	Torimaru et al. J. ASTM Int. 2(2005)JA112843	国内BWR	304	288°C	0.5~2dpa	ビッカース硬さ 500g	13

表 3.2.2-13 BWR 分野の破壊靱性の文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
BF-R1	原子力安全基盤機構 平成20年度照射誘起応力腐食割れに 関する報告書(09基材報-0012)」 平成21年3月	JMTR	304L, 316L	275~298°C	0.9~1.9dpa	破壊靱性試験 0.5TCT 288°C	7
BF-R2	発電設備技術検査協会 平成3年度原子カプラント長寿命化技術 開発に関する調査報告書 平成4年3月	海外BWR	304, 316	288°C	3~10dpa	破壊靱性試験 CT, 3点曲げ, SR 288°C	29
BF-R3	Torimaru et al. Fontevraud 7, 2010	国内BWR	304(シュラウド) 316(上部格子板)	288°C	0.2~2dpa	破壊靱性試験 0.5~1.5TCT 288°C	15
BF-R4	Demma et al. 13th EDM, 2007	海外BWR	304L(制御棒) 304(上部格子板)	288°C	5, 12dpa	破壊靱性試験 0.5TCT 288°C	12
		国内BWR	304(制御棒)	288°C	7.4, 8.4dpa	破壊靱性試験 0.5TCT 288°C	4
BF-R5	Ehrnsten et al. Fontevraud 6, 2006	海外BWR	304L, 316L (制御棒)	288°C	2.7~8.7dpa	破壊靱性試験 SE(B) RT, 150, 288°C	15
BF-R6	Chopra, et al. 13th EDM, 2007	Halden炉	304, 304HAZ, CF8M	296~305°C	2.3dpa	破壊靱性試験 1/4TCT 288°C	6
BF-R7	Chopra, et al. NUREG/CR-6826, 2003	Halden炉	304, 316, CF8M	288°C	1.2dpa	破壊靱性試験 0.24TCT 288°C	13
BF-R8	Chen et al. 14th EDM, 2009	Halden炉	304, 316	293°C	2dpa	破壊靱性試験 0.24TCT 288°C	4
BF-R9	Tobita et al. J Nucl. Mater., 452(2011)61.	JMTR	308L溶接金属 圧力容器クラッド模擬	290°C	0.1~0.2dpa	破壊靱性試験 0.24TCT 288°C	28

表 3.2.2-14 BWR 分野の IASCC 感受性の文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
BIS-R1	原子力安全基盤機構 平成20年度照射誘起応力腐食割れに 関する報告書(09基材報-0012)」 平成21年3月	JMTR	304L, 316L	275~298°C	1.9dpa	SSRT 32ppmDO 288°C	29
BIS-R2	Kodama et al EDM5, 1991	国内BWR	304, 316 (炉内計装管等)	288°C	~18dpa	SSRT 0.02~32ppmDO 288°C	39
BIS-R3	Kodama et al EDM6, 1993	国内BWR	304 (炉内計装管等)	288°C	~20dpa	SSRT 32ppmDO 288°C	6
BIS-R4	Kodama et al EDM7, 1995	国内BWR	304 (炉内計装管等)	288°C	~20dpa	SSRT 0.02, 32ppmDO 290°C	9
BIS-R5	Tanaka et al EDM8, 1997	国内BWR	304, 304L, 316L (照射試験片)	288°C	2dpa	SSRT 32ppmDO 288°C	12
BIS-R6	Kodama et al EDM9, 1999	国内BWR	304, 316 (照射試験片)	288°C	2~3dpa	SSRT 32ppmDO 288°C	6
BIS-R7	Chatani et al. EDM12, 2005	国内BWR	304(シュラウド) 316(上部格子板)	288°C	~2dpa	SSRT 32ppmDO 288°C	6
BIS-R8	Clarke & Jacobs EDM1, 1983	海外BWR	304	288°C	~2dpa	SSRT 32ppmDO 288°C	13
BIS-R9	Fukuya et al EDM6, 1993	海外BWR	304, 304L, 316, 316L, 347	288°C	2dpa	SSRT 32ppmDO 288°C	17
BIS-R10	仲田ら 日本金属学会誌 52(1988)1167	ATR	304,304L 316L,316NG	288°C	~3dpa	SSRT 0.2, 32ppmDO 290°C	16
BIS-R11	Jacobs et al. EDM3, 1988						

表 3.2.2-15 BWR 分野の IASCC 発生の文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
BII-R1	Katsura et al. 6th EDM, 1993	国内BWR	304, 316 (炉内計装管等)	288°C	0.7~18dpa	定荷重SCC試験 引張試験片 0.02, 32ppmDO 288°C	34
BII-R2	Jacobs et al. Corrosion, 49(1993)650	海外BWR	304	288°C	0.1~5dpa	定荷重SCC試験 曲げ板試験 32ppmDO 288°C	29

表 3.2.2-16 BWR 分野の IASCC 進展の文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
BIG-R1	原子力安全基盤機構 平成20年度照射誘起応力腐食割れに 関する報告書(09基材報-0012)」 平成21年3月	JMTR	304, 304L 316L, 316NG 溶接金属	286~288°C	1~13.5dpa	照射後SCC試験 0.5TCT 288°C純水	91
BIG-R2	Takakura et al. 14th EDM, 2009						
BIG-R3	Kaji et al. 14th EDM, 2009						
BIG-R4	Chatani et al. 13th EDM, 2007						
BIG-R5	Ooki et al. 12th EDM, 2005	国内BWR	304(シュラウド) 316(上部格子板)	288°C	0.5~2dpa	照射後SCC試験 0.5TCT 288°C純水	23
BIG-R6	Horn et al. 16th EDM, 2013	海外BWR	304, 316L (制御棒)	288°C	2~5dpa	照射後SCC試験 CT 288°C純水	16
BIG-R7	Jenssen et al. Fontevraud 8, 2012	海外BWR	304, 304L, 316L (制御棒、シュラウド 等)	288°C	1~13dpa	照射後SCC試験 CT 288°C純水	33
BIG-R8	Jenssen et al. 11th EDM, 2003	海外BWR	304L (制御棒)	270~288°C	13dpa	照射後SCC試験 0.3TCT 288°C純水	3
BIG-R9	Jenssen et al. 15th EDM, 2011 11th EDM, 2003	BWR	304L (制御棒)	288°C	7.7pa	照射後SCC試験 RCT 288°C純水	3
		BOR60	304L	320°C	11~47.5dpa	照射後SCC試験 RCT 288°C純水	17
BIG-R10	Jenssen et al. 14th EDM, 2009	BOR60	304L	320°C	5,10dpa	照射後SCC試験 RCT 288°C純水	12
BIG-R11	Chopra et al. 11th EDM, 2003	Halden炉	304, 316 溶金、HAZ	288°C	1,3dpa	照射後SCC試験 1/4TCT 288°C純水	16
BIG-R12	Chopra et al. 12th EDM, 2005						
BIG-R13	Kaji et al. 15th EDM, 2011	JMTR	304	288°C	1dpa	照射後SCC試験 1/4TCT 288°C純水	9
BIG-R14	Kaji et al. J.Nucl.Sci.Tech. 45(2008)725	JMTR照射 JMTR 炉内試験	304	288°C	~1dpa	炉内SCC試験 0.4TCT 288°C	17
BIG-R15	Karlsen et al. 12th EDM, 2005	BWR照射 Halden 炉内試験	304L, 304	335°C	~2dpa	炉内SCC試験 0.4TCT 335°C1次系模擬	7
BIG-R16	Karlsen et al. 17th EDM, 2015	BWR照射 Halden 炉内試験	304L 316L	280°C	3~13dpa	炉内SCC試験 0.4TCT 280°C純水	43

表 3.2.2-17 BWR 分野の応力緩和・クリープの文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
BC-R1	原子力安全基盤機構 平成20年度照射誘起応力腐食割れに 関する報告書(09基材報-0012)」 平成21年3月	JMTR	304L, 316L	275~298°C	1.9dpa	Cリング試験	60
BC-R2	Ishiyama et al. 11th EDM, 2005	JMTR	304, 316L, XM-19	288°C	3dpa	Cリング試験 ペントビーム試験	45
BC-R3	Obata et al. J.ASTM Int. 3(2006)JAI12348	JMTR	304溶接部	288°C	1, 3.5dpa	中性子回折 残留応力測定	9
BC-R4	Ishiyama et al. J.Nucl.Mater. 408(2011)153	JMTR	316L溶接部	288°C	0.9, 1.9, 4.1dpa	中性子回折 残留応力測定	12
BC-R5	Kaji et al. J.Nucl.Mater. 307-311(2002)331	JMTR	316L	288°C	2.5dpa	単軸引張試験片	10
BC-R6	Causey et al. J.Nucl.Mater. 90(1980)216	Chalk River炉	304, X-750他	67, 287°C	~1dpa	ペントビーム試験	25

表 3.2.2-18 BWR 分野のマイクロ組織の文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
BM-R1	原子力安全基盤機構 平成20年度照射誘起応力腐食割れに 関する報告書(09基材報-0012)」 平成21年3月	JMTR	304L, 316L	275~298°C	1.9dpa	TEM	17
BM-R2	Torimaru J.ASTM Int. 2(2005)JAI12843	国内BWR	304	288°C	0.1~20dpa	TEM	23
BM-R3	Demma et al 13th EDM	国内BWR 海外BWR	304	288°C	4~8dpa	TEM	8
BM-R4	Kasahara et al JNM480(2016)386	JMTR 国内BWR	316L	288°C	0.8~3.3dpa	TEM	4
BM-R5	Edward et al. JNM317(2003)13	海外BWR	304, 316	275°C	0.7~13dpa	TEM	19
BM-R6	Bailat et al JNM283-287(2000)446	海外BWR (Barseback)	304,316	288°C	1.5,7.5dpa	TEM	5
BM-R7	Miwa et al JNM271&272(1999)316	JRR3	316系	~240°C	~1dpa	TEM	8
BM-R8	仲田清智ら、 日本金属学会誌 52 (1988)1023	ATR	304, 304L, 316L, 316NG	287°C	1~3dpa	TEM	12

表 3.2.2-19 BWR 分野の粒界偏析の文献

文献		照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
BG-R1	原子力安全基盤機構 平成20年度照射誘起応力腐食割れに 関する報告書(09基材報-0012)」 平成21年3月	JMTR	304L, 316L	275~298°C	0~10dpa	FETEM	18
BG-R2	Asano et al 5th EDM	国内BWR	304,316	288°C	0.1~14dpa	FETEM	12
BG-R3	Kodama et al 6th EDM	国内BWR	304	288°C	18dpa	FETEM	2
BG-R4	Kodama et al 9th EDM	国内BWR	304, 316, 316L	288°C	3dpa	FETEM	12
BG-R5	Chatani et al 12th EDM	国内BWR	304, 316	288°C	2dpa	FETEM	15
BG-R6	Demma et al 13th EDM	国内BWR 海外BWR	304	288°C	4~8dpa	FETEM	8
BG-R7	Brueimmer et al 10th EDM	海外BWR	304,316	275°C	0.1~12dpa	FETEM	29

3.2.2.3 調査した照射材データの整理

個々の文献等につき記載内容の質と量を比較、検討し、それぞれに必要十分であるものを抽出して、文献等に記載されたデータをスプレッドシートへ入力し整理した。

なお文献データの整理と検討に当たっては、データのばらつきとその要因について検討を行った。特に調査対象の文献データは、放射化した試験片を用い、遠隔操作による試験で取得されているため、試験方法等に起因すると思われるばらつき要因について検討した。

(1) 照射材データの整理方法

前章で抽出した文献から各データのデジタル値をデータシートの形で整理した。試験データの整理ではそのデータが得られた条件が重要であり、材料条件、照射条件、試験条件が必要である。収集する材料特性は引張特性、破壊靱性、IASCC 特性、応力緩和・クリープ、スエリング、マイクロ組織、粒界組成と多岐にわたるが、材料条件と照射条件の内容は基本的に同一であると判断される。一方、試験条件は試験片を含めて試験方法が大きく異なるため、材料特性ごとに必要な内容を決める必要がある。このため、データシートの共通の項目として材料条件と照射条件を整理し、材料特性ごとの項目として試験条件と試験データを整理した。

① 共通項目

材料条件については、鋼種、組成、加工熱処理の有無と条件は必須であり、実機の部材の場合は部材名や形状も重要な情報であり項目に加えた。照射条件については、照射炉、照射温度、中性子束、中性子照射量が必須であり、照射中の雰囲気の情報も参考となる情報として項目に加えた。照射量の単位は、BWR、PWR、研究炉で慣例的に使用されている単位が異なるため、3種類の単位で記載できるようにした。また、文献とデータシートのデータ確認を容易にするため、文献内で区別のため使用されている試験片、材料、鋼種の記号や番号もデータシートに記載することとした。

またデータシートには、行政文書「平成 24-25 年度 照射された低炭素ステンレス鋼の SCC 進展試験に関する報告書」[3.2.2-177]の開示に基づいて ENI 事業で取得した引張特性データとき裂進展速度データを含めた。

データシートの共通項目は順に以下のとおりとした。

- ・ DB No.

データの固有番号を特性ごとの記号を用いて記載、例: PT-1-2, BIS-10-5

- ・ 試験片番号

文献内で示された試験片の番号や記号を記載、例: A3-10, JPU2

- ・ 材料番号

文献内で示された材料やヒートの番号や記号を記載、例: D23

- ・ 照射炉

照射された炉を記載、例: 国内 PWR, 海外 BWR, JMTR

- ・ 照射環境

照射材の照射中の雰囲気に記載、例: 水中, He 中, Na 中

- ・ 採取部位

実機部材の場合に部品名を記載、例: BFB, シュラウド

- ・ 照射時形状

実機部材の場合に部品形状を記載、例: ボルト、チューブ、棒

- ・ 詳細鋼種

文献内で使われた鋼種名を記載、例: 316L-PL, 304L(HAZ)

- ・ 鋼種

JIS 等の規格上の鋼種名を記載、例: 304, 347

- ・ 材料組成(wt%)

材料組成として C, Si, Mn, P, S, Ni, Cr, Mo, Nb, Ti, B, Cu, N, Co, Fe の濃度を記載

- ・ 熱処理等

加工熱処理等を記載、例: 溶体化、980-1050°C、冷間加工、溶接熱影響部

- ・ 冷間加工率(%)

冷間加工材の場合の加工率を記載

- ・ 照射量

中性子照射量を記載、単位は n/m^2 ($E>0.1 \text{ MeV}$)、 n/m^2 ($E>1 \text{ MeV}$)、dpa の 3 種類

dpa には換算した値も記載、軽水炉の場合の換算は次式による

$$1 \text{ dpa} = 7 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (E>1 \text{ MeV}) = 1.5 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E>0.1 \text{ MeV})$$

- ・ 中性子束(dpa/s)

損傷速度に換算して記載

- ・ 照射温度(°C)

照射温度を記載、BWR で特に記載のない場合は公称値 288°C と記載

② 材料特性ごとの項目

a. 引張特性

試験条件に関する項目として、試験環境と温度、試験片形状と寸法、採取方向(部材に対する引張方向)、引張速度を項目とした。試験データについては、引張試験データとして報告される 0.2%耐力、引張強さ、一様伸び、全伸び(破断伸び)とともに、絞り、加工硬化指数をデータ項目とした。また、応力ひずみ線図の有無も情報として項目に加えた。

引張特性のデータシートの項目は順に以下のとおりとした。

- ・ 試験環境

試験の雰囲気に記載、例: 大気中、Ar ガス中

- ・ 試験温度(°C)
試験温度を記載
- ・ 試験片形状
試験片の形状を簡単に記載、例: 中実丸棒型、平板型、
- ・ 平行部面積(mm²)
ゲージ部の断面積を記載、例: 2 × 6
- ・ 平行部長さ(mm)
ゲージ部の長さを記載
- ・ 採取方向
試験片長手方向と素材形状との関係を記載、例: 軸方向、圧延方向
- ・ 引張ひずみ速度(/s)
引張試験のひずみ速度を記載
- ・ 0.2%耐力(MPa)
0.2%耐力のデータを記載
- ・ 引張強さ(MPa)
引張強さのデータを記載
- ・ 一様伸び(%)
一様伸びのデータを記載
- ・ 全伸び(%)
全伸びまたは破断伸びのデータを記載
- ・ 絞り(%)
絞りのデータを記載
- ・ 加工硬化指数
加工硬化指数のデータを記載
- ・ 応力ひずみ線図
文献に応力ひずみ線図が文献にあるかどうかを有無で記載
- ・ 備考、関連図、文献リスト、出典
注記事項、データシートに示す図表、文献リスト No、出典を記載

b. 硬さ

試験条件に関する項目として、測定方法や測定環境、測定した組織、測定の方法(荷重、保持時間、測定数)を項目とした。試験データについては、硬さとそのばらつき、硬さ増加量(未照射からの変化)、対応する引張試験データ(温度、0.2%耐力、引張強さ、一様伸び、全伸び)をデータ項目とした。

引張特性のデータシートの項目は順に以下のとおりとした。

- ・ 測定方法

- 硬さ測定の方法を記載、例: ビッカース、ヌープ、ブリネル
- ・測定環境
 - 試験の雰囲気に記載、例: 大気中、Ar ガス中
- ・測定温度(°C)
 - 試験温度を記載、例: 室温
- ・測定組織
 - 母材、溶接金属、HAZ 等の区別を記載
- ・試験荷重
 - 負荷力を記載、例: 500g, 1kg
- ・保持時間(sec)
 - 圧子の押込みを保持した時間を記載
- ・測定数
 - 硬さの値を決定に用いた測定数を記載
- ・硬さ
 - 測定値された硬さ値(平均値等)を記載
- ・ばらつき
 - 標準偏差や範囲などが示されている場合それを記載
- ・硬さ増加量
 - 未照射の値からの増加量を記載
- ・単位
 - 測定データの単位を記載、例 HV0.5, HV1, kg/mm²
- ・引張データ
 - 同一材の引張試験データがある場合は、試験温度、0.2%耐力、引張強さ、一様伸び(%)、全伸びを記載(%)
- ・備考、関連図、文献リスト、出典
 - 注記事項、データシートに示す図表、文献リスト No、出典を記載

c. 破壊靱性

試験条件に関する項目として、試験環境と温度、試験片形状と寸法を項目とした。破壊靱性試験では十分に体積の試験片が準備できる場合は、標準的な CT 試験片が使用される。CT 試験片の寸法記号を図 3.2.2-1 に示す。試験片寸法が得られた破壊靱性値の有効性に大きく影響するめ、試験片厚さ、正味厚さ(サイドグループを除いた)、試験片幅、亀裂長さなど多くの寸法情報を項目とした。

ステンレス鋼のような延性材料では破壊靱性を求める試験方法として、図 3.2.2-2 に示すような除荷コンプライアンス法ないし類似した方法が用いられることが多い。この試験方法で得られる試験データは、J_Q、J_{1mm}、J_{1C}、Tearing Modulus、換算 K など多様で

あるのでそれらを項目とした。 J_Q は除荷コンプライアンス法ではJ-R曲線と0.2 mmオフセットラインの交点のJ値、 $J_{1\text{ mm}}$ は亀裂進展量1 mmにおけるJ値、 J_{IC} は平面ひずみ状態におけるJQであり、材料の耐力と試験片の板厚に対して判定基準を満たすことが必要である。ASTM E813では、試験片板厚が $B \geq 25(J_Q/\sigma_y)$ を満たす必要がある。Tearing Modulus(引裂き係数)は、 $T = dJ/da \cdot E/\sigma_y^2$ で与えられる。換算したKはJ積分値から $K = \sqrt{E \cdot J/(1-\nu^2)}$ で換算される靱性値である。また、データとしてJ-R曲線、開口幅荷重曲線の有無も情報として項目に加えた。

破壊靱性のデータシートの項目は順に以下のとおりとした。

- ・試験環境
試験の雰囲気に記載、例: 大気中、Ar ガス中
- ・試験温度(°C)
試験温度を記載
- ・試験片形状
試験片の形状を記載、例: 0.5T-CT, 円筒
- ・試験片厚さ(mm)
試験片の公称厚さ(図 3.2.2-1 の B)を記載
- ・有効試験片厚さ(mm)
サイドグループを除いた正味の厚さ(図 3.2.2-1 の B_n)を記載
- ・試験片幅(mm)
試験片の幅(図 3.2.2-1 の H)を記載
- ・機械亀裂長さ(mm)
機械加工時の亀裂先端と荷重点の距離(図 3.2.2-1 の a_n)を記載
- ・初期亀裂長さ(mm)
疲労予亀裂導入後の亀裂先端と荷重点の距離(図 3.2.2-1 の a_0)を記載
- ・初期リガメント(mm)
疲労予亀裂導入後の亀裂先端と試験片単の距離(図 3.2.2-1 の L)を記載
- ・疲労予亀裂長さ(mm)
導入した疲労予亀裂の長さを記載
- ・亀裂方向
亀裂の進展方向と圧延方向等の関係を記載、例: LT, TS
- ・ $J_Q(\text{kJ/m}^2)$
測定した破壊靱性値 J_Q を記載
- ・ $J_{1\text{ mm}}(\text{kJ/m}^2)$
亀裂進展量 1 mm の時の破壊靱性値を記載
- ・ $J_{IC}(\text{kJ/m}^2)$
論文に記載された破壊靱性値を記載

所定の試験片厚さに関する判定条件を満たす場合の J_Q 値

- $K_{Ic}(MPa\sqrt{m})$

論文に記載された平面ひずみ破壊靱性値を記載

- Tearing Modulus (dJ/da)

測定された Tearing Modulus を記載

- K 換算値

測定された J 積分値から換算した K を記載

- 引張特性

破壊靱性値の換算や判定に必要な基礎特性としても 0.2%耐力、引張強さ、一様伸び、全伸び、絞りのデータを記載

- J-R 曲線

破壊靱性試験による J-R 曲線を示す図が文献にあるかどうかを有無で記載

- 開口幅荷重曲線

破壊靱性試験による開口幅荷重曲線を示す図が文献にあるかどうかを有無で記載

- 準拠試験法

準拠した規格が明記されている場合はそれを記載、例: ASTM E1820-08

- 備考、関連図、文献リスト、出典

注記事項、データシートに示す図表、文献リスト No、出典を記載

d. IASCC感受性

IASCC 感受性は、軽水炉冷却水を模擬した水質の高温水中で、低ひずみ速度引張試験で調べられる場合がほとんどである。低ひずみ速度引張試験は、SSRT(Slow strain rate test ないし Slow strain rate tensile test)または CERT(Constant extension rate test)と略されるが、ここでは SSRT 試験とする。最近では定量データとして扱われることはあまりないが、感受性が発現する照射量の目安のデータとして用いられている。また、高温水だけでなく Ar ガス中で実施された例もある。

試験条件に関する項目として、試験温度、試験環境、試験片形状と寸法、応力負荷に関する情報を項目とした。試験環境として、高温水か Ar 中かを区別する環境を項目とし、高温水での溶存酸素(DO)、溶存水素(DH)、B 濃度、Li 濃度、導電率、腐食電位(ECP)を項目とした。なお、導電率はある値以下というようなデータが多いため、符号(>または<)を示すこととした。試験片については形状を示し、引張試験片の場合は平行部面積と平行部長さを項目とした。応力やひずみの負荷に関しては、ひずみ速度を項目とした。

試験データは、破断までの応力伸び曲線から得られる、みかけの耐力、最大応力、最大応力時ひずみ、IASCC 発生ひずみ、破断ひずみ、破断時間とした。また、破断後の破面内の観察から得られる粒界割れ(IG 割れ)破面率、粒内割れ(TG 割れ)破面率も感受性指標として用いられる。みかけの耐力は、応力ひずみ曲線の耐力に相当する応力であり、

ひずみ速度が遅いこと、弾性範囲で割れる場合があることから、引張試験による耐力と区別するため「みかけの耐力」としている。IASCC 発生ひずみは、同一材料の照射材の照射材と未照射材の応力ひずみ曲線を比較して、照射材の曲線が未照射材の曲線から離れて応力が低下し始めるひずみとして定義されている。

IASCC 発生のデータシートの項目は順に以下のとおりとした。

- ・ 試験温度(°C)
試験温度を記載
- ・ 試験環境
環境(高温水または Ar ガス)、溶存酸素(DO, ppm 単位)、溶存水素(DH, cc/kg および ppm 単位)、B 濃度(ppm 単位)、Li 濃度(ppm 単位)、導電率の符号と値($\mu\text{S}/\text{cm}$)、ECP(mV_{SHE})を記載
- ・ 試験片形状
試験片の形状を簡単に記載、例: 引張試験片
- ・ 平行部面積(mm^2)
引張試験片の場合のゲージ部の断面積を記載
- ・ 平行部長さ(mm)
同ゲージ部の長さを記載
- ・ 採取方向
試験片長手方向と素材形状との関係を記載、例: 圧延方向、TL
- ・ ひずみ速度(/s)
引張試験におけるひずみ速度を記載、例 $2 \times 10^{-7} / \text{s}$
- ・ みかけの耐力(MPa)
応力ひずみ曲線上で引張試験における耐力に相当する位置での応力を記載
- ・ 最大応力(MPa)
応力ひずみ曲線の最大の応力を記載
- ・ 最大応力時ひずみ(%)
応力ひずみ曲線で最大応力の時のひずみ量を記載
- ・ IASCC 発生ひずみ(%)
IASCC 発生ひずみが示されている場合にそのデータを記載
- ・ 破断ひずみ(%)
破断ひずみのデータを記載
- ・ IG 割れ破面率(%)
粒界(IG)割れ破面率のデータを記載
- ・ TG 割れ破面率(%)
粒内(TG)割れ破面率のデータを記載
- ・ 応力ひずみ線図

SSRT 試験による応力ひずみ曲線を示す図が文献にあるかどうかを有無で記載

- ・備考、関連図、文献リスト、出典

注記事項、データシートに示す図表、文献リスト No、出典を記載

e. IASCC発生

IASCC 発生試験は、軽水炉冷却水を模擬した水質の高温水中で、定荷重ないし低ひずみを負荷して所定の時間または破断が発生するまで保持する試験が一般的であり、そのような試験データを対象とした。

試験条件に関する項目として、試験温度、試験環境、試験片形状と寸法、応力負荷に関する情報を項目とした。試験環境として、溶存酸素(DO)、溶存水素(DH)、B 濃度、Li 濃度、導電率、腐食電位(ECP)を項目とした。なお、導電率はある値以下というようなデータが多いため、符号(>または<)を示すこととした。試験片については形状を示し、引張試験片の場合は平行部面積と平行部長さを項目とした。応力やひずみの負荷に関しては、負荷方向、負荷方式、負荷応力、0.2%耐力、応力比(0.2%耐力に対する負荷応力の比)を項目とした。

試験データは、破断時間と破断の有無であり、試験時間内に破断がない場合の破断時間は試験時間以上であり、破断が起こった場合は破断が確認された時間である。文献によっては一定の試験時間ごとに試験片を取出して破断を確認している試験もある。

IASCC 発生のデータシートの項目は順に以下のとおりとした。

- ・試験温度(°C)

試験温度を記載

- ・試験環境

水環境として溶存酸素(DO, ppm 単位)、溶存水素(DH, cc/kg および ppm 単位)、B 濃度(ppm 単位)、Li 濃度(ppm 単位)、導電率の符号と値($\mu\text{S}/\text{cm}$)、ECP(mV_{SHE})を記載

- ・試験片形状

試験片の形状を簡単に記載、例: C リング、引張試験片

- ・平行部面積(mm²)

引張試験片の場合のゲージ部の断面積を記載

- ・平行部長さ(mm)

同ゲージ部の長さを記載

- ・採取方向

試験片の方向と素材形状との関係を記載、例: 圧延方向、軸方向

- ・負荷方向

応力ないしひずみの負荷方向と試験片形状との関係を記載、例: 周方向

- ・負荷方式

負荷方法を記載、例: 定荷重、定ひずみ

- ・ 負荷応力(MPa)
試験片への負荷応力を記載
- ・ 0.2%耐力(MPa)
応力比算出のために使用した 0.2%耐力値を記載
- ・ 応力比
負荷応力と 0.2%耐力の比を記載
- ・ 破断時間(hr)と破断時間符号
試験片の破断時間ないし破断が確認された時間を記載
破断し無かった場合の破断時間は試験時間以上となるので符号として>を記載
- ・ 割れ有無
試験片の破断面や側面の割れによる割れ有無を記載
- ・ 備考、関連図、文献リスト、出典
注記事項、データシートに示す図表、文献リスト No、出典を記載

f. IASCC進展

IASCC 進展試験は、軽水炉冷却水を模擬した水質の高温水中で、CT 試験片や CDCB 試験片に定荷重を負荷して実施され、ポテンシャルドロップ法等によりオンラインで亀裂長さを測定し、試験後に破面観察結果から校正する方法が最も信頼性が高いとされている。ここではそのような方法で得られたデータを対象とした。

試験条件に関する項目として、今年度から追加等を行い、炉内・炉外試験の区別、試験温度、試験環境、試験片形状、応力負荷に関する情報を項目とした。試験環境として、IASCC 発生と同じく、溶存酸素(DO)、溶存水素(DH)、導電率、腐食電位(ECP)を項目とした。

試験片については、試験片寸法が得られたデータの有効性に影響するため、試験片厚さ、有効試験片厚さ(サイドグループを除いた)を項目とした。荷重負荷には静的な場合や繰返し除荷を行う場合があるのでその方法、亀裂進展速度を測定した試験時間の長さもデータの質にかかわる情報であり、それらも項目とした。さらに、平面ひずみ状態の有効性に関して、その判定の元となるデータである未照射と照射後の耐力、論文における有効性の判定結果(Validity)を追加することとした。試験データは進展速度であり、進展が見られない場合は測定限界以下の値として扱われる場合がある。

IASCC 進展のデータシートの項目は順に以下のとおりとした。

- ・ 炉内・炉外試験
原子炉内での進展試験(炉内)とホットラボでの照射後試験(炉外)の区別を記載
- ・ 試験温度(°C)
試験温度を記載
- ・ 試験環境

水環境として溶存酸素(DO, ppm 単位)、溶存水素(DH, cc/kg および ppm 単位)、B 濃度(ppm 単位)、Li 濃度(ppm 単位)、導電率の符号と値(mS/cm)、不純物濃度の符号と値(ppm)、ECP(mV_{SHE})を記載

- ・試験片形状

試験片の形状を記載、例: 0.5T-CT, CDCB

- ・試験片厚さ(mm)

試験片の公称厚さ(図 3.2.2-1 の B)を記載

- ・試験片厚さ(mm)

CT 試験片の幅を記載

- ・有効試験片厚さ(mm)

サイドグループを除いた正味の厚さ(図 3.2.2-1 の B_n)を記載

- ・負荷制御方法

静荷重ではなく定期的除荷等を行った場合はそれを記載 例: 定期部分除荷

- ・試験時間(hr)

亀裂進展速度のデータを定義した範囲に相当する試験時間を記載

- ・応力拡大係数(MPa√m)

亀裂進展速度データに対応する応力拡大係数を記載

- ・亀裂進展速度(mm/s)と進展速度符号

進展速度を記載

亀裂進展がみられ無かった場合は測定限界以下となるので符号として<を記載

- ・破面 SEM 写真の有無

破面形態のわかる SEM 写真の有無を記載

- ・未照射耐力(MPa)

validity 評価に使用されている未照射の耐力値を記載

- ・照射後耐力(MPa)

validity 評価に使用されている照射後の耐力値を記載

- ・Validity

文献に示された validity 判定結果(valid, invalid)を記載

判定方法(Jessen の方法、Andresen の方法など)は備考に記載する

- ・備考、関連図、文献リスト、出典

注記事項、データシートに示す図表、文献リスト No、出典を記載

g. 応力緩和・クリープ

応力緩和とクリープのデータは、一定の応力ないしひずみを負荷した試験片を原子炉で照射し、応力ないしひずみの変化を測定する試験方法で得られている。試験片の形状、応力やひずみを負荷する方法、応力やひずみを測定する方法は多様である。応力緩和は

一定ひずみでの C リング試験、ベントビーム試験が主として用いられ、クリープ試験では内圧チューブや単軸引張試験が用いられる。応力やひずみの変化は、C リングの開口量、ベントビームの変形もどり量、単軸引張試験片では伸び量、内圧チューブでは直径変化量で測定される。応力緩和では溶接ビード近傍の残留応力の変化を中性子回折で測定する方法も利用されている。

試験条件に関する項目としては、試験方法(応力緩和かクリープか)、試験片形状と寸法、応力やひずみの負荷に関する情報を項目とした。応力やひずみの負荷に関しては、負荷方向、負荷方式、負荷応力ないしひずみ、応力比(0.2%耐力に対する負荷応力の比)を項目とした。

試験データは、応力緩和の場合はある照射量での応力比、クリープの場合はある照射量でのクリープひずみが得られる。個々の測定値ではなく、クリープ式や応力緩和式が結果として報告される場合が多く、それらも項目に含めた。

応力緩和・クリープのデータシートはデータの性格が異なるため別々のシートにまとめることとし、項目は以下のとおりとした。

◆応力緩和

・試験方法

応力緩和の試験方法を記載、例: 曲げ、C リング、溶接ビードなど

・試験片形状

試験片の概略寸法を記載、例: 内径 20 厚さ 2 mm、3x5x10 mm

・測定方法

試験方法に応じた測定方法を記載、例: 曲率測定、2 点間距離測定、中性子回折

・測定環境

測定環境を記載、例: 炉内測定、大気中

・測定温度

測定時の温度を記載、例: 室温、20°C など

・照射前応力、照射後応力(MPa)

応力の測定データを記載

・照射前曲率、照射後曲率

曲げ試験での曲率測定データを記載

・照射前距離、照射後距離(mm)

C リング試験での開口幅等の距離測定データを記載

・照射前後の応力比

測定または計算された照射前と照射後の応力比を記載

・代表式と係数

文献に示された緩和式とその係数等を記載

・備考、関連図、文献リスト、出典

注記事項、データシートに示す図表、文献リスト No、出典を記載

◆クリープ

・試験方法

クリープ試験の試験方法を記載、例：単軸引張、チューブ内圧

・試験片形状

試験片の概略寸法を記載、例：5φ x100 mm

・測定方法

ひずみの測定方法を記載、例：炉内測定、炉外測定、

・照射前応力(MPa)

照射前の負荷応力を記載

・照射後応力(MPa)

照射後の応力を記載

・負荷時間

負荷していた時間や炉内照射時間などを記載

・ひずみ量

測定されたクリープひずみの量を記載

・定常クリープ速度

定常域のクリープ速度が示されている場合はそれを記載

・代表式と係数

文献に示されたクリープ式とその係数等を記載

・備考、関連図、文献リスト、出典

注記事項、データシートに示す図表、文献リスト No、出典を記載

h. スエリング

スエリングのデータは、密度測定または TEM 観察で行われるのが一般的であるが、軽水炉照射環境ではスエリング自体が小さいため TEM 観察がほとんどである。観察されたキャビティの平均直径と数密度のデータから計算されているが、文献にスエリング量が示されていない場合には、平均直径 d と数密度 N を用いて次式で計算した。

$$S = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2} \right)^3 N$$

スエリングのデータシートの項目は順に以下のとおりとした。

・測定方法

測定方法を記載、例：TEM 観察、密度測定

・キャビティの有無

- キャビティやボイドの有無を記載
- 平均直径(nm)
 - キャビティの平均直径を記載
- 数密度(/m³)
 - キャビティの数密度を記載
- スエリング(%)
 - 報告されたスエリング値を記載
- スエリング計算値(%)
 - 文献に数値がないが、密度と直径から計算できる場合は計算値を記載
- 備考、関連図、文献リスト、出典
 - 注記事項、データシートに示す図表、文献リスト No、出典を記載

i. ミクロ組織

ミクロ組織のデータは、TEM 観察で行われており、軽水炉照射環境ではフランクグループ、ブラックドット、キャビティ、析出物が報告されている。なお、最近はアトムプローブ分析の結果が報告されるようになってきているが、溶質クラスタの定義に関して統一された見解がないことからこのデータシートには含めないこととする。

フランクグループは格子間原子型の積層欠陥転位ループを対象としている。ブラックドットはフランクグループ以外の欠陥クラスタを広く指すが、中には完全転位とループを区別している場合もあり、その場合は完全転位として別に記載することとする。キャビティはボイドと He バブルの総称であり区別せずにキャビティとして扱う。観察されない場合も多く報告されており、その有無も項目とした。析出物として報告されているものについては、そのタイプ、平均サイズ(直径)、密度を項目とした。キャビティについては、スエリング量も項目とした。さらに、He と H の濃度はミクロ組織等の発達に重要な因子であり、それらの分析値が示されている場合があるのでそれらも項目とした。

ミクロ組織のデータシートの項目は順に以下のとおりとした。

- フランクグループ
 - 平均サイズ(直径、nm)と密度(/m³)を記載
- ブラックドット等
 - タイプ等(完全転位、BD)、平均サイズ(直径、nm)、密度(/m³)を記載
- キャビティ
 - 有無、平均サイズ(直径、nm)、密度(/m³)、スエリング値(%)を記載
- 析出物
 - タイプ等(γ、M₆C など)、平均サイズ(直径、nm)、密度(/m³)を記載
- He 濃度(appm)
 - 報告された He 濃度値を記載

- ・ H 濃度(appm)

報告された H 濃度値を記載

- ・ 備考、関連図、文献リスト、出典

注記事項、データシートに示す図表、文献リスト No、出典を記載

j. 粒界偏析

粒界組成の分析は、フィールドエミッション銃(FEG: Field emission gun)を備えた TEM ないし STEM とエネルギー分散型 X 線分析(EDS)を用いてプローブビーム径が 1 nm 程度で行われており、比較的多くのデータが報告されているのでそれらをデータ収集の対象とする。ビーム径が大きい従来型の熱電子放射型電子銃による分析データや、最近のアトムプローブによるデータは含めないこととする。

試験方法の関しては分析装置やビーム径が重要な情報であり、TEM/STEM と EDS のその型式、ビーム径を項目とした。

データとして、粒界性状(大傾角粒界、対応粒界、あるいは Σ 値等)は重要情報であり項目とする。数値データは粒界濃度と粒界偏析でありそれらを項目とした。粒界濃度は粒界上で測定された濃度値であり、粒界偏析は粒界濃度と粒内濃度の差である。対象元素は、ステンレス鋼対象に多く報告されている元素として、Fe、Cr、Ni、Si、P、Mo とし、その他に報告されている場合は元素と値を項目とした。また、分析データとして粒界に垂直方向の組成分布が示されていることが多いが、これらは少数が例示されている場合が多く系統的なデータにならないことから文献での分布データの有無を項目とすることとした。

粒界組成のデータシートの項目は順に以下のとおりとした。

- ・ 分析方法

TEM/STEM の区別と使用された機種を記載

- ・ EDS

使用された機種を記載

- ・ ビーム径(nm)

分析のプローブビームの直径を記載

- ・ 粒界性状

分析された粒界の性状を記載、例: 大傾角、対応粒界、 $\Sigma 3$ 等

- ・ 粒界濃度(wt%)

Fe, Cr, Ni, Si, P, Mo, その他の粒界濃度値を記載、その他については元素名を記載

- ・ 粒界偏析(wt%)

Fe, Cr, Ni, Si, P, Mo, その他の粒界偏析値(粒界と粒内の濃度差)を記載、その他については元素名を記載

- ・ 分布データ

粒界に垂直方向の分布データの有無を記載

- ・備考、関連図、文献リスト、出典

注記事項、データシートに示す図表、文献リスト No、出典を記載

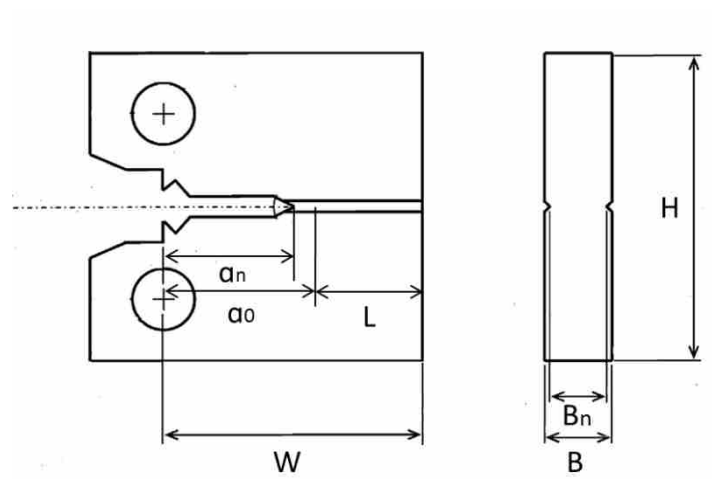


図 3.2.2-1 CT 試験片の寸法記号

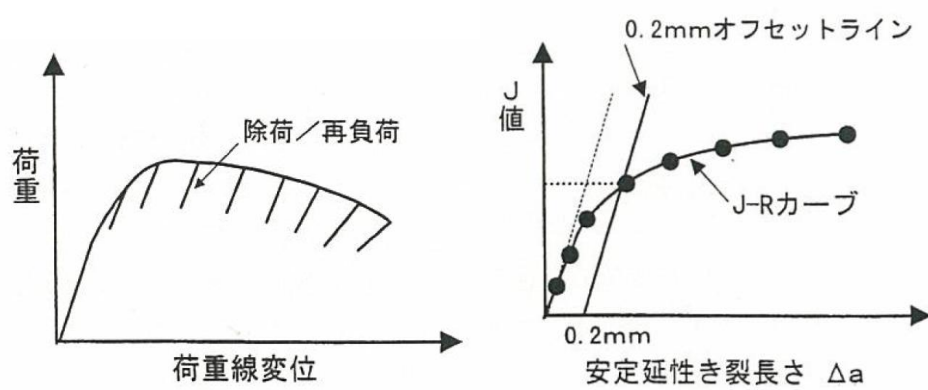


図 3.2.2-2 除荷コンプライアンス法

③ 図表データおよびデータプロット

a. 図表データ

データシートにデータを収録した文献の図表は、デジタル値以外の重要情報やそのデータの範囲や照射量依存性を示す情報であり、主要な図表はデータシートと関連付けて別シートにまとめることとした。特に、引張特性における応力ひずみ線図、破壊靱性における J-R 曲線は、それ自体がデータとして重要である。また、文献ごとに示される材料特性の照射量依存性などは、そのデータ特有の傾向を把握する上でも重要である。

具体的には、データシートに図の有無や番号を示し、別シートに転載した図表に対応する番号を示す方法により、データに対応した図表を確認することができるようにした。

b. データプロット

データシートに収録したデータ全体の傾向を把握するため、照射量等の主要なパラメータに対してデータをプロットした図を別シートに示すこととした。このプロットはデータのある照射量などの範囲やデータ自体の範囲の概略を把握するためのものであり、詳細なパラメータによる分類などは行わず、データソースによる分類を主として行うこととした。

(2) 照射材データ整理の結果

① データシートの概要

データシートはデータ値を整理したシートであり、文献の図表を転載した図表シート、および、収集したデータをプロットした図を記載したまとめ図シートが付随した構成とした。データシートの印刷出力は A3 サイズとなるように設定した。図表シートとまとめ図シートは内容に応じて A3 ないし A4 サイズとした。図表シートとまとめ図を付録に掲載した。

入力したデータは何らかの形でデジタル値が入手できたものだけでなく、一部は図からの読み取ったデータも入力している。3.2.2 章(2)項の文献調査の結果で示した文献の一部やデータの一部は、条件を考慮してデータシートに入力した。データシートは添付資料としてまとめた。各特性のデータシートの詳細は以下のとおりである。

今年度の調査で追加すべきデータがない場合でも、データおよび文献記号を新たに設定しておりデータシートには変更が加えられている。

② PWR分野データシート

a. 引張特性(データおよび文献記号PT)

今年度に新たに追加すべき文献データは無かったが、これまでに作成したデータシートに文献記号等の必要な変更を実施した。表 3.2.2-1 に示した文献のデータがデータシートに入力されている。PWR 実機部材のデータはすべてのデータ(DB No.

PT-R10[3.2.2-12]~PT-R 14[3.2.2-16])を、研究炉のデータは PWR 実機相当の温度である 290~350°C の範囲の照射温度のデータを含む文献のデータが入力されている。DB No. PT-R15[3.2.2-17]の ORR や DB No. PT-R16[3.2.2-18]の HFR のデータには、より高温での照射や試験のデータもひとつの文献のデータセットとして入力されており、400~500°C のデータも含まれている。高速炉の BOR-60 のデータは PWR 条件を念頭に置いて 320°C での照射試験が行われておりそれらはすべて入力した。DB No. PT-R20[3.2.2-22]と PT-R21(?)の EBR-II の反射体のデータは最低温度が 370°C であり、この温度を PWR の最高温度として想定する論文もあるので参考としてデータを入力した。文献に示された応力ひずみ曲線はすべて図表シートに示した。

まとめ図では、データシートに入力したデータについて、耐力、引張強さ、一様伸び、全伸びを照射量に対してプロットした。まとめ図 1~4 はすべてのデータを、まとめ図 5~8 は研究炉データを除いたデータをプロットしている。また、図中の線は、参考のため、EPRI MRP-135 Rev.1 に示された式による傾向線を示したものであり、赤線は CW316SS の 320°C の線、青線は SA304SS の 320°C の線である。

b. 硬さ(データおよび文献記号PH)

今年度に新たに追加すべき文献データは無かったが、これまでに作成したデータシートに文献記号等の必要な変更を実施した。

硬さでは表 3.2.2-2 に示した 4 文献のデータがデータシートに入力されている。データはバルクの平均値としてのビッカース硬さのみを入力しており、表面近傍などの局所分布や微小硬さのデータは入力していない。DB No. PH-R1[3.2.2-23]と No. PH-R2[3.2.2-24]のデータでは、硬さ測定用試料の採取位置が引張試験片とは異なるため、照射量と温度が一对一对応しないデータのみとなっている。DB No. PH-R3[3.2.2-25]のデータでは一部対応している。

まとめ図では、全データについて照射量と硬さの関係をプロットした。

c. 破壊靱性(データおよび文献記号PF)

今年度の調査では新たに追加すべき文献データは無かったが、これまでに作成したデータシートに文献記号等の必要な変更を実施した。

破壊靱性では表 3.2.2-3 に示した 4 文献のデータがデータシートに入力されている。いずれも PWR 実機の部材のデータである。DB No. PF-R1[3.2.2-26]~No. PF-R3[3.2.2-28]はシンプルチューブ、ボルト、ピンなどの小型の取出部品が素材であり、素材に依存した形状の小型試験片で J-R 試験が行われている。DB No. PF-R4[3.2.2-29]は Chooz A 廃炉材の 304 製バップル板が素材であり、0.5T-CT や 1T-CT の試験片が用いられている。文献中の J-R 曲線や J 値データは図表シートに集めている。個別の J-R 曲線や J- Δa 関係のデータも報告されている。

まとめ図では、データシートに入力したデータについて、 J_{IC} と Tearing modulus(引裂き係数)を照射量に対してプロットした。まとめ図 1 と 2 は室温試験によるデータを、まとめ図 3 と 4 は高温試験(300~350°C)のデータをプロットした。

d. IASCC感受性(データおよび文献記号PIS)

今年度新規に実施した調査結果に基づき、表 3.2.2-4 に示した文献のデータをデータシートに入力した。

DB No. PIS-R1[3.2.2-31]~PIS-R10[3.2.2-40]までは PWR 実機部材のデータであり、部材としてバッフルフォーマボルトとシンプルチューブが使用されている。研究炉では BOR-60 照射材のデータを DB No. PIS-R10[3.2.2-40]に入力した。PWR 一次系模擬環境の試験では標準水質がほとんどであるが、DB No. PIS-R3[3.2.2-33]では溶存水素濃度を変化させたデータが報告されている。図表シートには粒界破面率の照射量依存性等を集めている。

まとめ図では、全データについて照射量と粒界破面率の関係をプロットし、まとめ図 1 に 80 dpa まで、まとめ図 2 に 10 dpa までの範囲で示した。

e. IASCC発生(データおよび文献記号PII)

今年度の調査では新たに追加すべき文献データは無かったが、これまでに作成したデータシートに文献記号等の必要な変更を実施した。

IASCC 発生では表 3.2.2-5 に示した文献のデータをデータシートに入力されている。すべて PWR 実機の部材のデータであり、試験材として最も多用されているのはシンプルチューブである。それ以外では DB No. PII-R1[3.2.2-42]の原子力安全基盤機構のバッフルフォーマボルトと DB No. PII-R8[3.2.2-49]のフランスの 304SS 製バッフル板のデータが報告されている。試験はほとんどが C リング、O リング、単軸引張試験片による定荷重試験であり、DB No. PII-R7[3.2.2-48]の Westing House 社から O リングの定変位試験のデータが報告されている。試験データは、負荷応力に対して破断の有無と破断時間、破断しない場合は試験時間で示され、照射量と負荷応力、破断時間と負荷応力のマップとして整理されておりそれらを図表シートに示した。

まとめ図では、負荷応力と照射量、負荷応力と破断時間(試験時間)のマップを作成した。まとめ図 1 と 3 には WH の定変位データを含めた全データをプロットし、まとめ図 2 と 4 には WH の定変位データを除いてプロットした。また、まとめ図 5 と 6 には文献に書かれた発生応力下限の傾向線を参考として示した。

f. IASCC進展(データおよび文献記号PIG)

今年度新規に実施した調査結果に基づき、表 3.2.2-6 に示した文献のデータをデータシートに入力した。

採取可能な PWR 実機部材は大きさが限られるため亀裂進展試験を実施した文献は少なく、DB No. PIG-R1[3.2.2-52]でバッフルフォーマボルトが使用されている。研究炉では高照射が可能な BOR-60 の照射材のデータを多く報告されている。

PWR 一次系模擬水を対象とした炉内試験は Halden 炉で行われており、試験材として PWR 実機取出のバッフル板とともに BWR 実機の制御棒ハンドルも使用されている。

試験データである亀裂進展速度は応力拡大係数 K との関係などに整理されておりそれらを図表シートに示した。また、PWR 一次系模擬水も含めた低ポテンシャル環境の亀裂進展データをレビューした論文の図表も参考に図表シートに示した。

まとめ図では、全データについて進展速度と K 値および照射量との関係をプロットした。まとめ図 1 には K 値との関係、まとめ図 2 には照射量との関係を示した。

g. 応力緩和・クリープ(データおよび文献記号PC)

今年度の調査では新たに追加すべき文献データは無かったが、これまでに作成したデータシートに文献記号等の必要な変更を実施した。

応力緩和・クリープでは表 3.2.2-7 に示したクリープ試験の 4 文献と応力緩和の試験の 2 文献のデータを別々のデータシートに入力されている。クリープデータではクリープひずみのデータは図で示され、クリープ式とその係数として整理されている例が多いので、文献の式とその係数をデータとしている。応力緩和のシートには原子力安全基盤機構の IASCC プロジェクトからの照射前後の応力比のデータも入力していた。図表シートには文献に示されたクリープ曲線、クリープひずみの応力依存性などを示した。

クリープでは多様なデータを同一のプロットにまとめるのは困難であるため、原子力安全基盤機構の IASCC プロジェクトで得られた定常クリープ速度のみをまとめ図にプロットした。

h. スエリング(データおよび文献記号PSW)

今年度には、中性子束影響の検討に用いられた高速炉照射データを追加するとともに、文献記号等の必要な変更を実施した。

スエリングで表 3.2.2-8 に示した文献のデータをデータシートに入力されており、DB No. PSW-13(?)が追加データである。それ以外は実機のシンブルチューブやバッフルボルトの TEM 観察によるデータである。断片的なデータが多くキャビティの観察されていないデータも多い。図表データには少なく、DB No. PSW-R13(?)の図表データを追加した。

まとめ図には、スエリング量の示されたデータについて照射量、照射温度で整理した図を作成した。照射量で整理したまとめ図 1 には、国内で使用されているスエリング式で温度を 320°C とし、損傷速度を 10^{-10} ~ 10^{-6} dpa/s を変えた場合の計算値をプロットした。まとめ図 3 はデータの照射温度と照射量をマップ示した図であり、データのある照射条件を示している。

i. ミクロ組織(データおよび文献記号PM)

今年度新規に実施した調査結果に基づき、表 3.2.2-9 に示した文献のデータをデータシートに入力した。

ほとんどは PWR 実機部材のデータであり、シンブルチューブ、バッフルボルト、バッフル板の TEM 観察によるデータである。ミクロ組織の比較を目的とする文献 PM-R5[3.2.2-79]の研究炉のデータも入力した。フランクグループ、キャビティ、He 濃度がそろったデータは DB No. PM-2[3.2.2-76]だけであり、多くはフランクグループのみかキャビティを含めたデータである。

ミクロ組織のサイズと密度の照射量による変化を示す図を図表シートに示した。

まとめ図では、フランクグループ等の平均直径と数密度と照射量の関係をプロットした。まとめ図 1 はフランクグループ、まとめ図 2 はブラックドット、まとめ図 3 はキャビティ、まとめ図 4 は析出物のプロットである。

j. 粒界偏析(データおよび文献記号PG)

今年度新規に実施した調査結果に基づき、表 3.2.2-10 に示した文献のデータをデータシートに入力した。

ほとんどは PWR 実機部材のデータであり、シンブルチューブとバッフルボルトの FEG-TEM 分析によるデータである。照射誘起偏析の比較を目的とする DB No. PG-R7[3.2.2-92]の高速炉 BOR-60 のデータも入力した。図表シートには粒界近傍の組成分布や偏析量の照射量依存性を示す図を示した。

まとめ図では、Cr、Ni、Si について粒界濃度および偏析量と照射量の関係をプロットした。まとめ図 1 は Cr、まとめ図 2 は Ni、まとめ図 3 は Si のプロットである。

③ BWR分野データシート

a. 引張特性(データおよび文献記号BT)

今年度の調査では新たに追加すべき文献データは無かったが、これまでに作成したデータシートに文献記号等の必要な変更を実施した。

引張特性では表 3.2.2-11 に示した文献のデータをデータシートに入力している。BWR 実機部材や実機照射のデータはすべて収録した。研究炉では、DB No. BT-R1[3.2.2-1]、BT-R2[3.2.2-94]、BT-R16[3.2.2-108] の JMTR、DB No. BT-R14[3.2.2-106]、BT-R15[3.2.2-107]の ATR、DB No. BT-R17[3.2.2-109]の BR2 のデータを入力した。試験温度は 290°C 近辺であり、室温と 300°C が見られるが、それ以外のデータは文献にはない。図表シートには、応力ひずみ曲線と耐力等のデータ表をすべて集めた。またデータシートには、旧原子力安全基盤機構で実施した「低炭素ステンレス鋼の SCC 進展への中性子照射影響実証」(通称 ENI)事業で取得した引張特性データも含めた。これらのデー

タの一部は公開済であるが、未公開のデータも網羅することを目的に、本事業の委託元(原子力規制委員会原子力規制庁)が所管する行政文書「平成 24-25 年度 照射された低炭素ステンレス鋼の SCC 進展試験に関する報告書」^{引用文献注)}の開示に基づいて収録した。

まとめ図では、0.2%耐力、引張強さ、一様伸び、全伸びを照射量に対してプロットした。

b. 硬さ(データおよび文献記号BH)

今年度の調査では新たに追加すべき文献データは無かったが、これまでに作成したデータシートに文献記号等の必要な変更を実施した。

硬さでは表 3.2.2-12 に示した文献のデータをデータシートに入力している。入力したデータはすべて国内 BWR と JMTR のデータであり、組成の異なる鋼種のデータが多い。DB No. BH-R7[3.2.2-116]は硬さ増加量のデータが報告され硬さ値は無かった。DB No. BH-R7[3.2.2-116]を除いて、全ての硬さデータで対応する 288°C の引張試験データが報告されていた。

まとめ図では、硬さを照射量に対してプロットした。また、硬さと 0.2%耐力の対応をプロットした。非常に良い相関が認められる。

c. 破壊靱性(データおよび文献記号BF)

今年度の調査では新たに追加すべき文献データは無かったが、これまでに作成したデータシートに文献記号等の必要な変更を実施した。

破壊靱性では表 3.2.2-13 に示した文献のデータをデータシートに入力している。BWR 実機部材のデータは DB. No.2~5 である。DB No. BF-R2[3.2.2-118]は CT タイプではない小型試験片のデータであるが、No.3~5 は 7 mm 厚以上の構造材からの CT 試験片で試験されており、特に DB No. BF-R3[3.2.2-119]では照射量は低いがシュラウド厚さ(38 mm)の CT 試験片が使用されている。研究炉では Halden 炉と JMTR での照射データがあり、0.5T-CT や 1T-CT の試験片が用いられている。試験温度は 288°C か室温である。DB No. BF-R9[3.2.2-125]は圧力容器クラッド材のデータである。文献中の J-R 曲線はすべて図表シートに集めている。

まとめ図では、ステンレス鋼母材のデータについて、J_Qまたは J_{IC}を照射量に対してプロットした。また、報告されている下限線(EPRI、NRC、日本機械学会維持規格)もあわせて示した。

d. IASCC感受性(データおよび文献記号BIS)

今年度新規に実施した調査結果に基づき、表 3.2.2-14 に示した文献のデータをデータシートに入力した。

DB No. BIS-R1[3.2.2-126]の国プロデータは JMTR 照射材のデータであるが、DB No.

BIS-R2[3.2.2-127]~BIS-R9[3.2.2-134]まではBWR実機部材またはBWR実機照射試験片のデータである。実機部材としては炉内計装管、シュラウド、上部格子板等が使用されている。研究炉ではATR照射材のデータをDB No. BIS-R10[3.2.2-135]に入力した。BWR模擬環境の試験では溶存酸素 DO32ppm が標準的な水質となっているが、0.02ppm 等の低 DO のデータも見られる。図表シートには SSRT 試験の応力伸び曲線、破面写真、粒界破面率と照射量の関係等を集めている。

まとめ図では、全データについて照射量と粒界破面率の関係をプロットし、まとめ図 1 に 20 dpa まで、まとめ図 2 に 5 dpa までの範囲で示した。

e. IASCC発生(データおよび文献記号BII)

今年度の調査では新たに追加すべき文献データは無かったが、これまでに作成したデータシートに文献記号等の必要な変更を実施した。

IASCC 発生では表 3.2.2-15 に示した 2 文献のデータをデータシートに入力している。BWR 実機の部材のデータであり、DB No. BII-R1[3.2.2-137]は単軸定荷重試験で 20 dpa までの試験材、DB No. BII-R2[3.2.2-138]は 3 点曲げ試験で 5 dpa 以下の試験材のデータである。応力比ないし応力と照射量の図に破断の有無を示したデータを図表シートに示した。

まとめ図では、応力比と照射量のマップに破断の有無をプロットした。

f. IASCC進展(データおよび文献記号BIG)

今年度に新たに追加すべき文献データは無かったが、文献の公開性等を整理してデータの追加や削除を行った。また、データシートの文献記号等の必要な変更を実施した。

IASCC の亀裂進展では表 3.2.2-16 に示した文献のデータのうち、BWR の温度条件に対応するデータがデータシートに入力されている。BOR-60 で 320°C の温度で照射された材料のデータや、亀裂進展試験の水環境温度が 300°C 以上の高温のデータは除外した。

BWR 実機部材の照射後試験のデータは DB No. BIG-R5[3.2.2-143]~BIG-R7[3.2.2-145]である。DB No. BIG-R5[3.2.2-143]では照射量は低いシュラウド厚さ(38 mm)の CT 試験片が使用されている。DB No. BIG-R6[3.2.2-144]、BIG-R7[3.2.2-145]は制御棒ハンドルから加工した CT 試験片で試験されている。研究炉照射材の照射後試験では、DB No. BIG-R1[3.2.2-139]~BIG-R4[3.2.2-142]の JMTR 照射材試験データと、DB No. BIG-R8[3.2.2-146]の Halden 炉照射材の試験データを入力している。DB No. BIG-R1[3.2.2-139]は原子力安全基盤機構の IASCC プロジェクトのデータであり最も系統的な照射データとなっている。DB No. BIG-R9[3.2.2-147]~BIG-R11[3.2.2-149]は照射材の炉内 SCC 試験であり、DB No. BIG-R14[3.2.2-152]は JMTR で、DB No. BIG-R15[3.2.2-153]、BIG-R16[3.2.2-154]は Halden 炉で得られたデータである。文献中の進展速度データを示す表等を図表シートに

収録した。またデータシートには、引張特性と同様、行政文書「平成 24－25 年度 照射された低炭素ステンレス鋼の SCC 進展試験に関する報告書」[3.2.2-177]の開示に基づいて ENI 事業で取得したき裂進展速度データを引張特性データも含めた。

まとめ図では、通常水質(NWC)と水素注入水質(HWC)に分けて国内データを照射量に対してプロットした。

g. 応力緩和(データおよび文献記号BC)

今年度の調査では新たに追加すべき文献データは無かったが、これまでに作成したデータシートに文献記号等の必要な変更を実施した。

応力緩和では表 3.2.2-17 に示した応力緩和の 6 文献のデータがデータシートに入力されている。DB No. BC-R1[3.2.2-156]～BC-R5[3.2.2-160]はいずれも JMTR 照射による国内データであり、DB No. BC-R6[3.2.2-161]はカナダの研究炉データである。試験方法は、C リング試験(DB No. BC-R1[3.2.2-156]、BC-R2[3.2.2-157])、曲げ試験(DB No. BC-R2[3.2.2-157]、BC-R6[3.2.2-161])、単軸引張試験(DB No. BC-R5[3.2.2-160])、ビードオン溶接近傍の中性子回折による残留応力測定(DB No. BC-R3[3.2.2-158]、BC-R4[3.2.2-159])など多様である。図表シートには文献に示された応力比の変化などを示した。

まとめ図では、応力比を照射量に対してプロットした。

h. ミクロ組織(データおよび文献記号BM)

今年度新規に実施した調査結果に基づき、表 3.2.2-18 に示した文献のデータをデータシートに入力した。

DB No. BM-R1[3.2.2-162]及びBM-R4[3.2.2-165]のデータは JMTR 照射材のデータである。DB No. BM-R2[3.2.2-163]、BM-R3[3.2.2-164]、BM-R5[3.2.2-166]は BWR 実機部材または BWR 実機照射試験片のデータであり、BM-R4[3.2.2-165]にも 1 点含まれている。研究炉では DB No. BM-R7[3.2.2-168]が JRR-3、DB No. BM-R8[3.2.2-169]が ATR の照射データである。JRR-3 のデータは照射温度が 240℃ と低いデータである。図表シートには転位ループ等のサイズ・密度の照射量による変化やサイズ分布等の図表データを示した。

まとめ図では、温度の低い JRR-3 のデータを除いて、フランクループについて平均直径と照射量の関係(まとめ図 1)、密度と照射量の関係(まとめ図 2)をプロットした。

i. 粒界組成(データおよび文献記号BG)

今年度新規に実施した調査結果に基づき、表 3.2.2-19 に示した文献のデータをデータシートに入力した。

DB No. BG-1[3.2.2-170]の国プロデータは JMTR 照射材のデータである。DB No.

BG-2[3.2.2-171]~BG-7[3.2.2-176]は BWR 実機部材または BWR 実機照射試験片のデータである。数値表のデータは少なく、DB No. BG-2[3.2.2-171]~BG7[3.2.2-176]では図から読み取った数値を入力しており、必ずしも主要元素がすべてそろっていない。データはいずれも大傾角粒界を 1~2 nm のプローブビームで測定して得られたものである。

図表シートには、粒界近傍の組成分布や主要元素の偏析量と照射量ら関係を表す図表データを示した。

まとめ図では、Cr、Ni、Si について粒界濃度および粒界偏析量と照射量の関係をプロットした。

(3) 照射材データの検討

① 引張特性

オーステナイトステンレス鋼の引張特性の照射による変化については多くの研究があり、変化の傾向は比較的よく知られている。図 3.2.2-3 に示すように、照射とともに強度増加と延性低下が進行し 10 dpa 付近から飽和し、300°C 付近は強度増加と延性低下が大きくなることが知られている[3.2.2-1]。冷間加工の影響については、図 3.2.2-4 に示すように、300°C 付近の照射温度では冷間加工の方が溶体化材よりも耐力は高くなるが[3.2.2-179]、照射による増分は図 3.2.2-5 のデータのように冷間加工材の方が溶体化材よりも小さい[3.2.2-180]。これは、未照射の耐力は冷間加工材の方が高く、冷間加工の効果(転位による点欠陥の吸収)で硬化の原因となる転位ループの形成が抑制されるためと考えられる。

整理したデータシート内の引張特性データについて、これまでは上記の知見に従い照射温度や冷間加工の有無で分類して検討した。今年度は材料組成について通常炭素と低炭素の違いについても検討した。なお、検討結果はこれまでの調査分も含めて記載する。

a. PWR分野

i) 冷間加工材と溶体化材の比較

PWR 分野のデータでは溶体化材のデータは少ないが 320°C 付近の冷間加工 316SS のデータが豊富である。耐力(YS)、引張強さ(UTS)、一様伸び(UE)、全伸び(TE)の照射量依存性を、冷間加工材について図 3.2.2-6 に、溶体化材について図 3.2.2-7 に示す。強度と伸びはいずれも 10~20 dpa で飽和し、耐力の飽和レベルは冷間加工材で 900~1000 MPa、溶体化材は 800~900 MPa である。溶体化材はデータが少なくほとんどが 304SS のデータである。引張強さもほぼ同じレベルに達しており、引張応力と耐力の比である降伏比はほぼ 1 となり、一様伸びが非常に小さくなることと対応している。

ii) 試験温度の影響(冷間加工材)

PWR 実機の部材による冷間加工 316SS のデータでは試験温度を 290~350°C の範囲で変えたデータが報告されている。図 3.2.2-8 に耐力について試験温度を 290°C、320~325°C、340~350°C に分けてプロットした図を示す。ばらつきが大きいこともあり、試験温度による耐力の飽和レベルに明確な差は見られない。照射温度は記載のないデータが多く、照射温度と試験温度は必ずしも対応していないことも差が明確でない理由の一つと考えられる。

iii) 室温試験データ

試験温度が室温のデータが比較的多くあり、図 3.2.2-9 にそれらをプロットした図を示す。耐力で 1000 MPa を超えるデータが多く、また引張強さは 1100~1200 MPa の範囲

にあり、300°C 付近の試験データよりも強度が高くなっている。また、一様伸びも破断伸びも 300°C 付近のデータに比較して高くなっている。室温引張試験では 300°C 付近よりも強度と延性がともに高くなることが確認できる。

b. BWR分野

BWR 分野のデータでは冷間加工データは少なく溶体化材のデータが豊富である。溶体化材では 304 系と 316 系ともに多くのデータがある。また、熱中性子型の研究炉のデータも比較的多い。ほとんどすべてのデータは照射温度、試験温度ともに約 288°C である。

i) 304系と316系の比較溶体化材)

耐力、引張強さ、一様伸び、全伸びの照射量依存性を、304 系溶体化材(304/304L)について図 3.2.2-10 に、316 系(316/316L)について図 3.2.2-11 に示す。なお、これらの図では、347 系や 321 系、Nb や Ti を添加した 304 系や 316 系の材料のデータは除いてある。材料は強度と伸びはいずれも 5~10 dpa で飽和し、耐力の飽和レベルは 304 系も 316 系もほぼ同じ 800~900 MPa である。引張強さもほぼ同じレベルに達しており、引張応力と耐力の比である降伏比はほぼ 1 となり、一様伸びが非常に小さいことと対応している。データのばらつきが大きく、飽和レベルと飽和に達する照射量にみかけの差は顕著ではない。

ii) 炭素量の影響溶体化材)

耐力、引張強さ、一様伸び、全伸びの照射量依存性を、通常炭素材(304/316)について図 3.2.2-12 に、低炭素材(304L/316L)について図 3.2.2-13 に示す。なお、316NG も低炭素材 L に含めている。低炭素材の高照射量のデータが少なく、ばらつきが大きい、飽和レベルと低照射量での耐力増加は高炭素材の方がやや大きいように見える。

iii) 溶体化材と冷間加工材の比較

冷間加工材のデータは少ないが、図 3.2.2-14 に耐力と一様伸びを溶体化材と比較して示す。冷間加工材のデータは照射量 5 dpa 以下のものしかないが、耐力は 1000 MPa 近いデータがあり溶体化材よりも硬化が大きく、一様伸びも低くなっている。しかし、照射前からの耐力増加は冷間加工材の方が小さい傾向であり、PWR 分野のデータでも見られた傾向と同じである。

iv) BWR照射材と研究炉照射材の比較

図 3.2.2-15 に、耐力と一様伸びを BWR 照射と研究炉照射で比較して示す。研究炉は JMTR と ATR いずれも熱中性子炉である。5 dpa までの傾向では研究炉照射材の方が、耐力がやや小さく伸びが大きいデータが多くなっている。12 dpa 付近の研究炉のデータ

は耐力が BWR 照射材よりもかなり小さくなっている。

c. PWRとBWRの比較

図 3.2.2-16 に、溶体化材の BWR 分野と PWR 分野のデータについて、耐力と一様伸びを比較して示す。試験温度と照射温度は BWR 分野が 288°C、PWR 分野が 300~350°C であり温度が異なるが、耐力増加と伸び低下の低照射量領域の変化と飽和挙動に顕著な違いが見られない。文献から収集した多様なデータからの傾向では、300°C 付近 (290~350°C の範囲)では照射温度や試験温度の影響は大きく表れていないことを示していると考えられる。

② 硬さ

硬さは構造評価で必要となるデータではないが、降伏応力等と比例関係にあり、引張試験より簡便に小さい試料でデータが取れ、引張特性の推定も可能なデータである。

図 3.2.2-17 に BWR 分野と PWR 分野の硬さデータの照射量依存性を示す。硬さは初期に増加して数 dpa から 10 dpa の範囲で飽和する。BWR 分野のデータは飽和前に大きくばらついている。これは、引張データと同様に材料条件(組成等)や照射条件(温度等)により増加の傾向が異なることが原因と考えられる。

照射材では硬さ増加と耐力の増加がほぼ比例することが知られており [3.2.2-181]、最近の検討では軽水炉温度付近で照射されたステンレス鋼では、次のような耐力の変化量 ($\Delta\sigma_y$)と硬さの変化量(ΔHV)の関係が報告されている [3.2.2-182]。

$$\Delta\sigma_y \sim 3.03\Delta HV$$

図 3.2.2-18 は BWR 分野と PWR 分野のデータを合わせて、硬さ増加量と耐力増加量の関係を上記の関係(図中の点線)とともに示す。収集したデータはこの関係に従っていると判断される。

図 3.2.2-19 に硬さと耐力の関係を示す。データはすべて 304 系と 316 系のオーステナイト系ステンレス鋼のデータであり明瞭な比例関係が見られ、硬さ増加量と耐力増加量の関係よりもばらつきが小さくなっている。

③ 破壊靱性

オーステナイト系ステンレス鋼の照射材の破壊靱性試験データはいくつか報告されているが、破壊靱性値の有効性は試験片の形状とサイズに依存するのでデータ評価にはそれを考慮する必要がある。研究炉照射では CT 試験片の照射が行われているが、実機部材の場合には部材の形状により試験片形状とサイズに制約が生ずる場合がある。整理したデータシート内の破壊靱性データについて、PWR 分野と BWR 分野でその特徴を検討した。

a. PWR分野

PWR 分野のデータは、実機から取出されたシンプルチューブとボルトのデータが報告されており、冷間加工 316SS のデータがほとんどである。図 3.2.2-20 に PWR 分野の 300~350°C での破壊靱性データを示す。試験片は肉厚 1 mm 以下のチューブ、直径約 9 mm の R-CT、直径約 4 mm の棒状試験片であり、平面ひずみ状態としての有効性は確保されていない。照射材の破壊靱性値は 200 kJ/m² 以下であり、高照射では 50 kJ/m² 以下となっている。

b. BWR分野

BWR 分野のデータでは CT 試験片を用いた破壊靱性試験が多く報告されており、溶体化 304 系と 316 系のデータがある。図 3.2.2-21 に BWR 分野の 288°C での破壊靱性データを示す。BWR の場合は実機から比較的厚い材料が取出されて試験されており、シュラウドでは実厚の 1.5T-CT 相当のデータも報告されている[3.2.2-183]。破壊靱性データは非常にばらつきが大きく、文献による値の差が大きい。各文献のデータの傾向から、照射量の増加とともに破壊靱性値は低下する傾向にあるが、ばらつきが大きく、10 dpa 付近では Demma らの 10 kJ/m² 以下の低い値を示すデータ[3.2.2-184] と Ehrnsten らの 500 kJ/m² 近い高い破壊靱性値を示すデータ[3.2.2-185] が存在している。

304 系と 316 系に系統的な違いは見られないが、Demma らのデータでは亀裂方向により系統的な破壊靱性値の差が見られている[3.2.2-184]。T-L 方向の靱性値は L-T 方向の靱性値よりも低くなっている。T-L 方向は圧延面を亀裂が進展する方向であり、圧延面上にある介在物などが影響していると考えられている。介在物の量などは鋼材の清浄度に依存しており、製鋼法の変化や製造時期などにも関係していると考えられる。

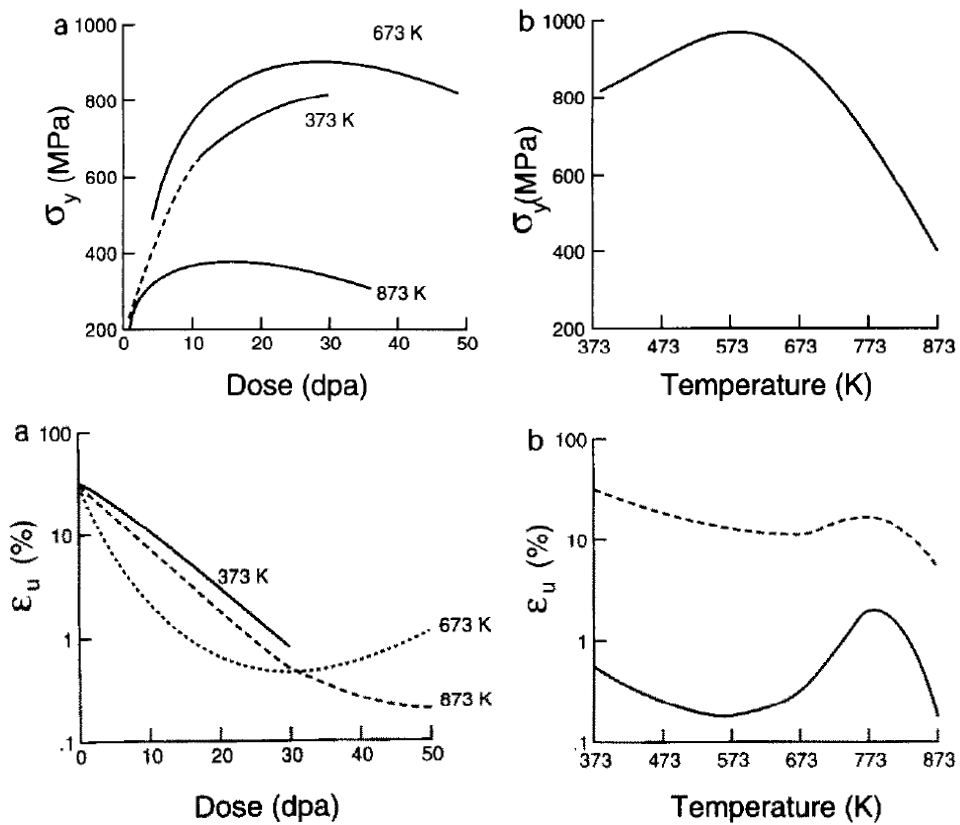


図 3.2.2-3 溶体化ステンレス鋼の耐力と一様伸びの照射量と照射温度による変化 [3.2.2-1]

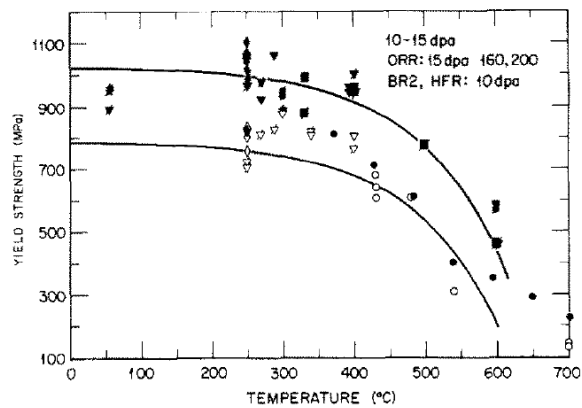


図 3.2.2-4 照射ステンレス鋼(10-15 dpa)の耐力の温度依存性[3.2.2-179]
上の線は冷間加工材、下の線は溶体化材の傾向を示す。

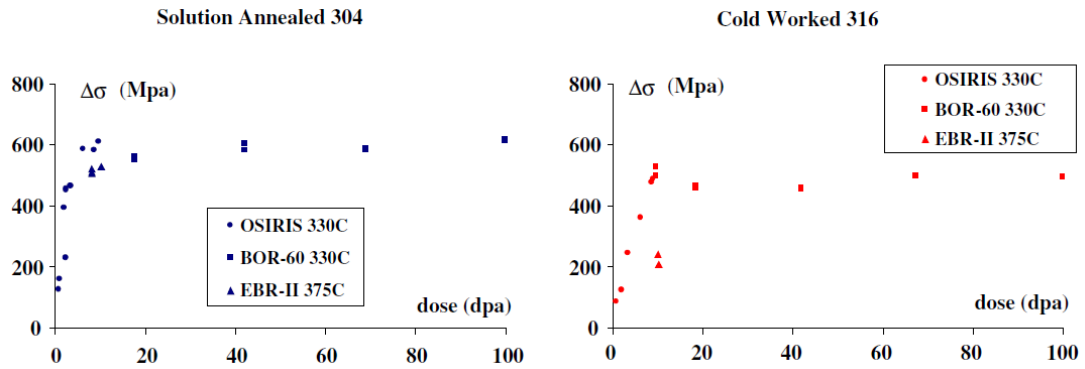


図 3.2.2-5 照射による耐力増加の比較(溶体化 304SS と冷間加工 316SS)[3.2.2-180]

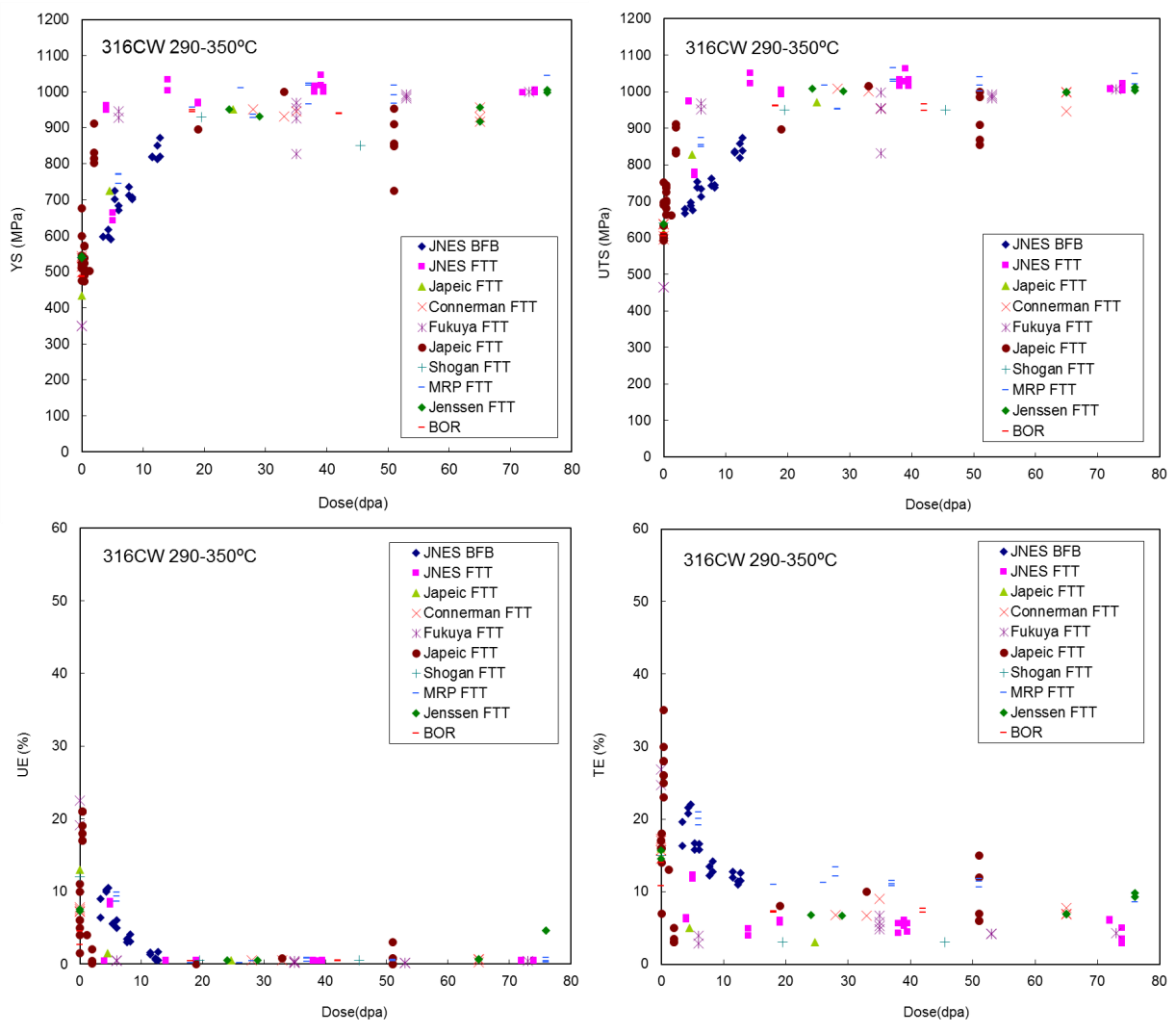


図 3.2.2-6 冷間加工 316SS の引張特性データ(PWR 分野)

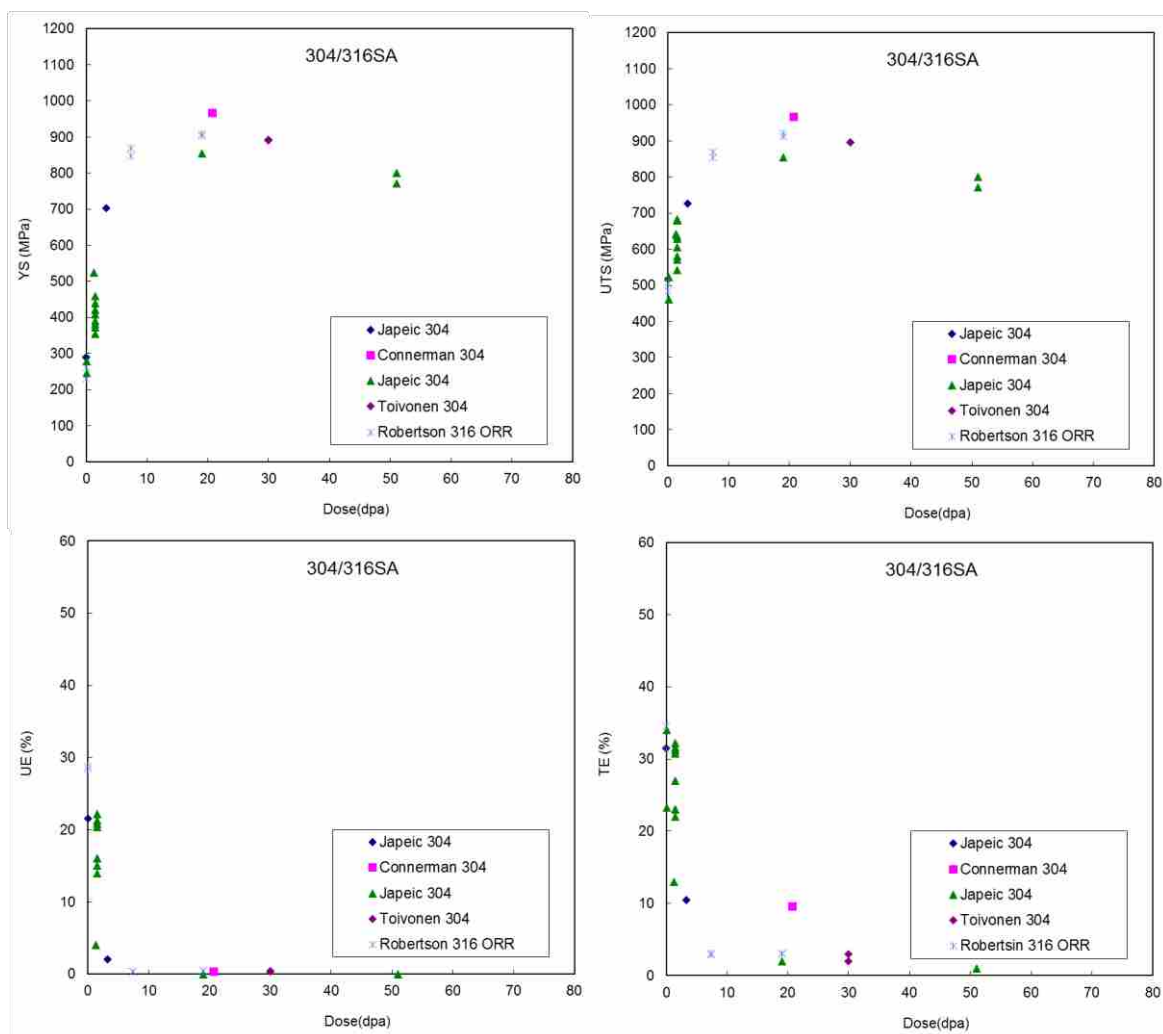


図 3.2.2-7 溶体化材 304/316SS の引張特性データ(PWR 分野)

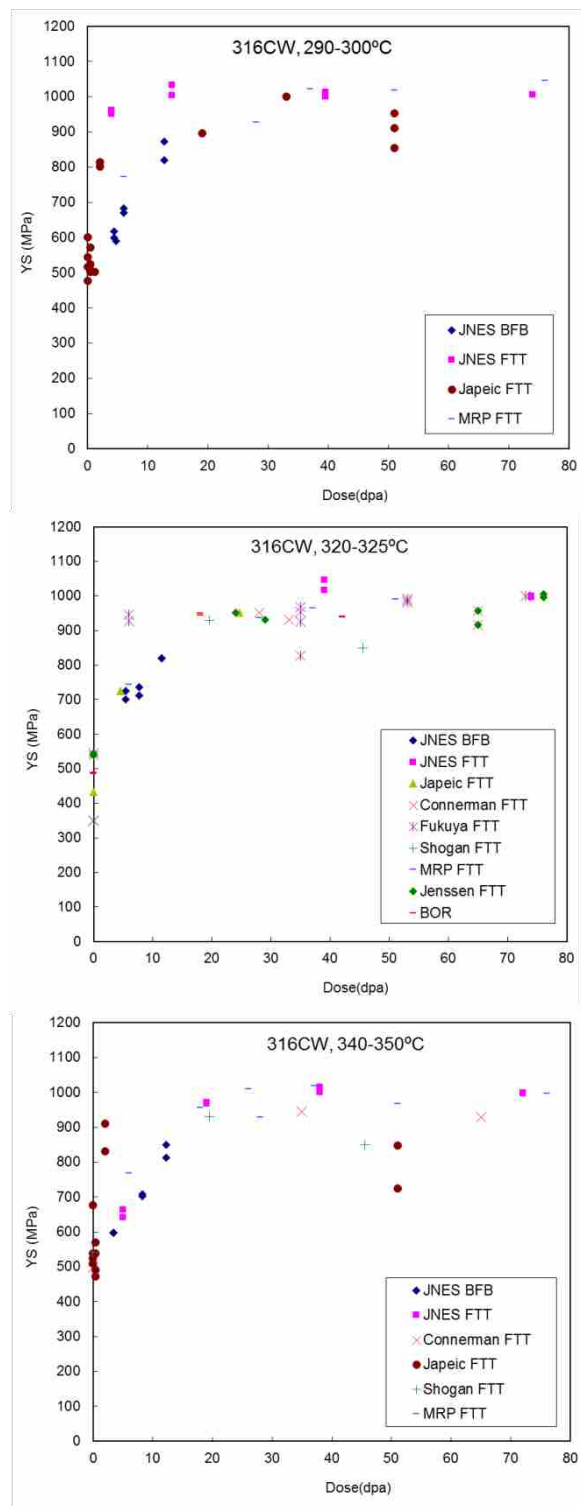


図 3.2.2-8 冷間加工 316SS の耐力の試験温度による違い(PWR 分野)

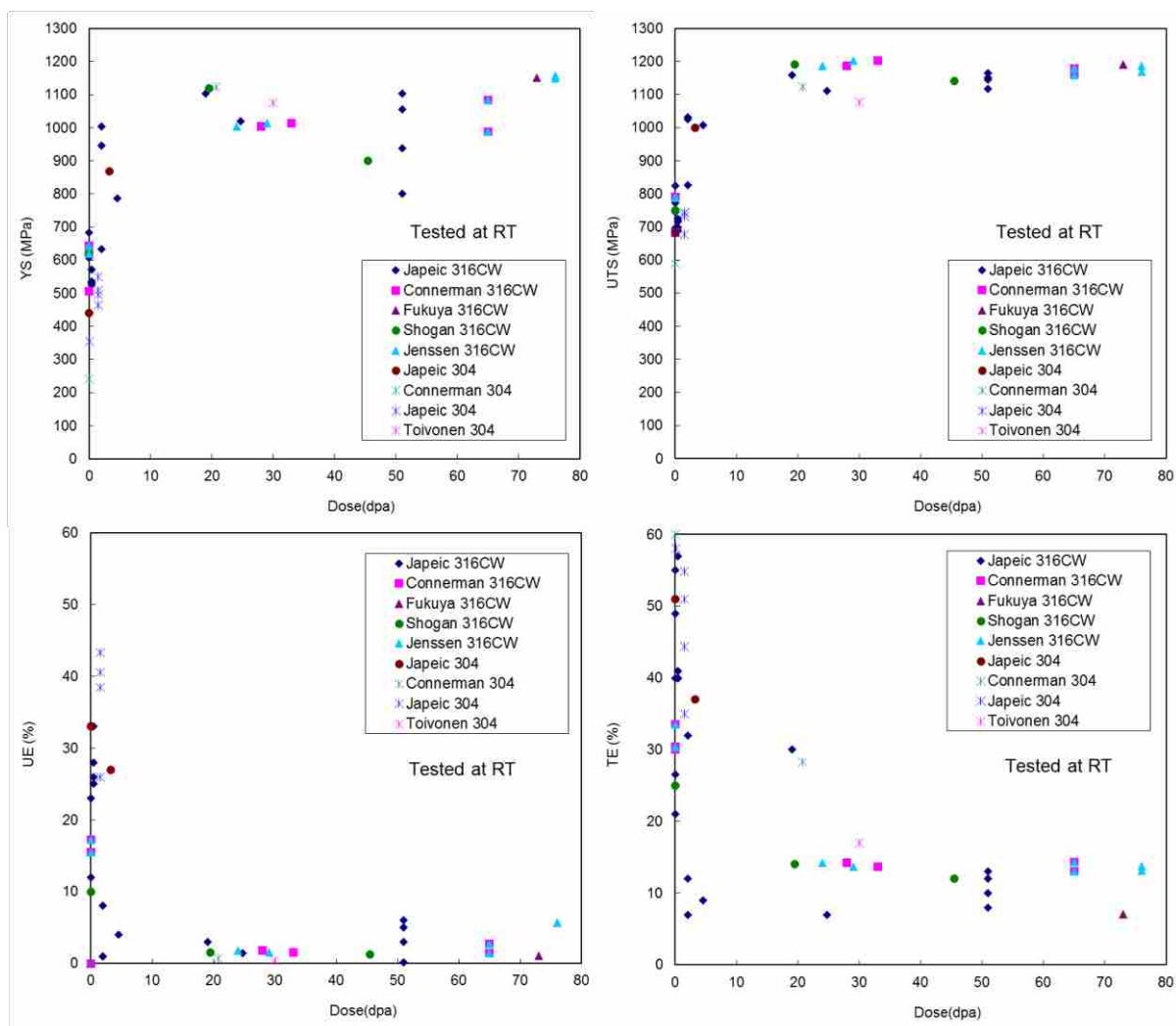


図 3.2.2-9 照射後の室温引張データ(PWR 分野)

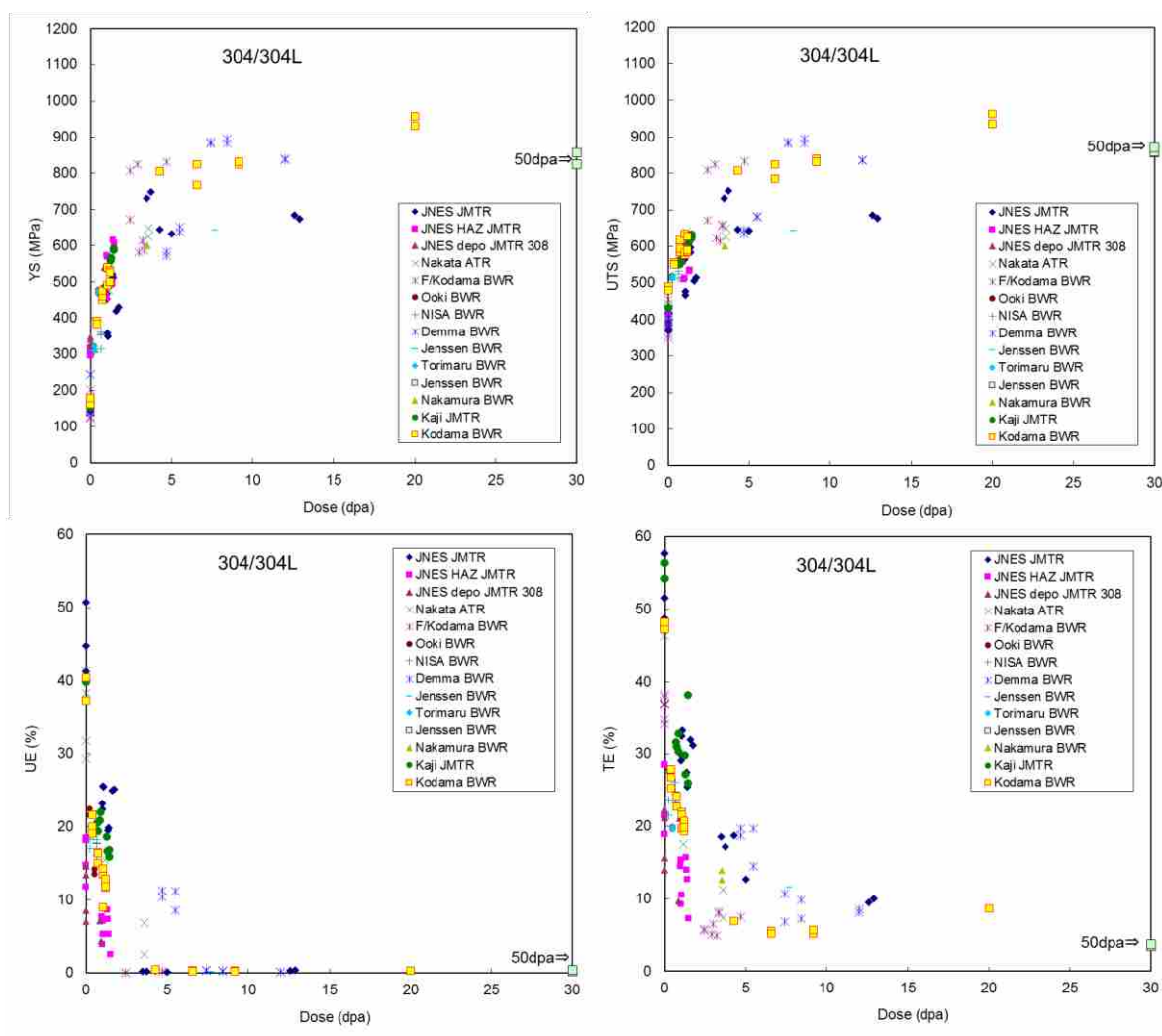


図 3.2.2-10 溶体化 304/304LSS の引張特性データ(BWR 分野)

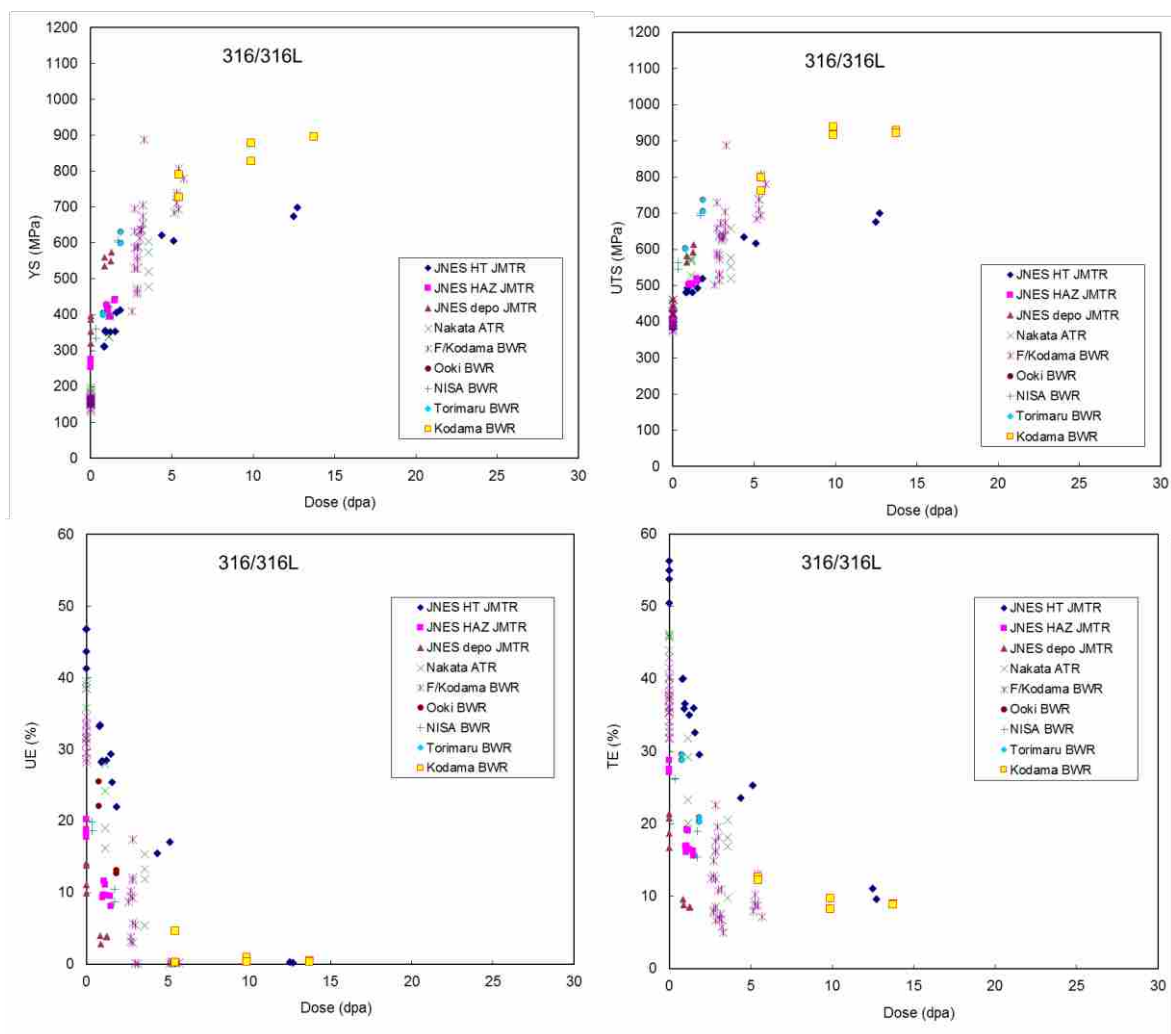


図 3.2.2-11 溶体化 316/316LSS の引張特性データ(BWR 分野)

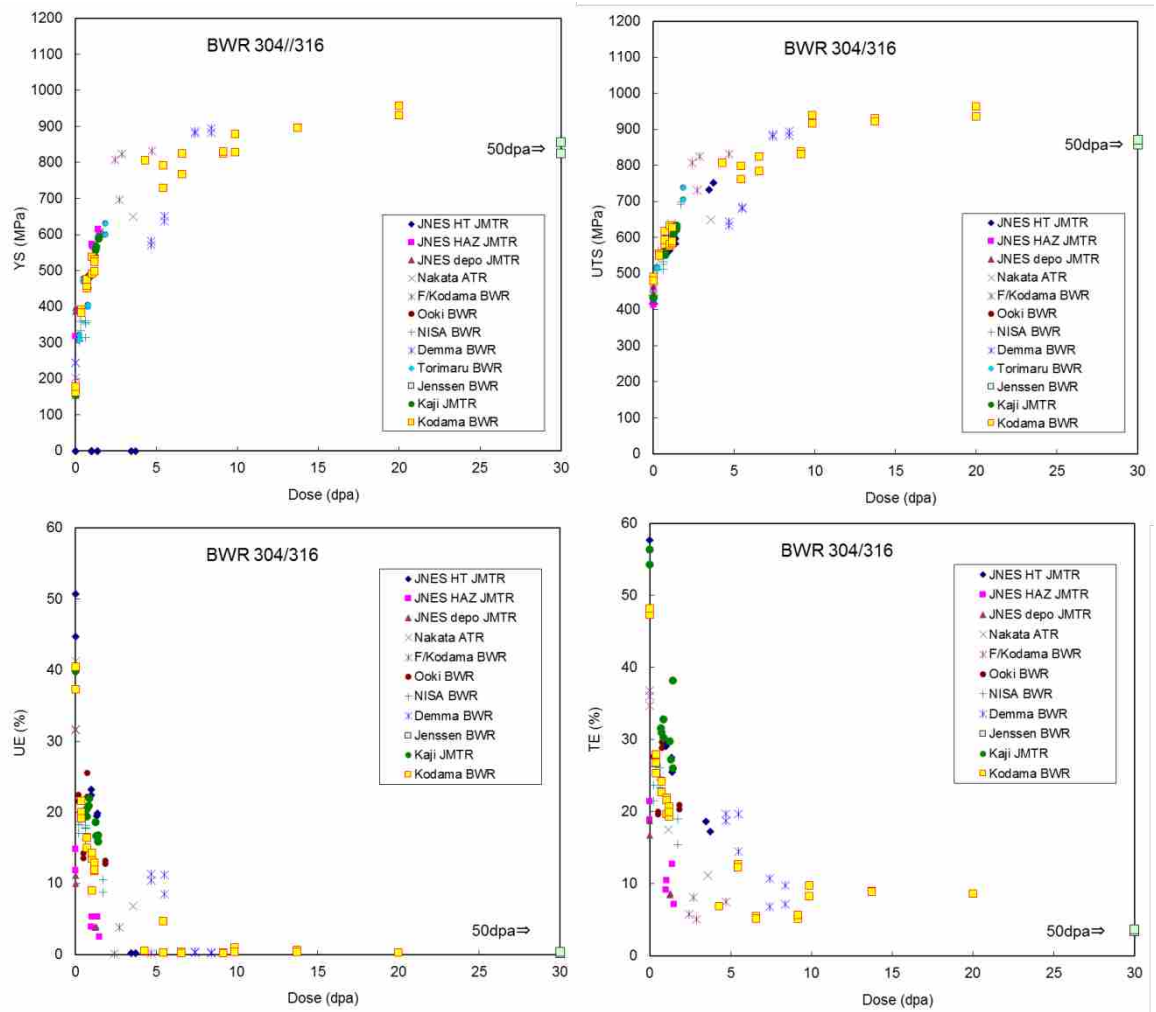


図 3.2.2-12 通常炭素材 304/316SS の引張特性データ(BWR 分野)

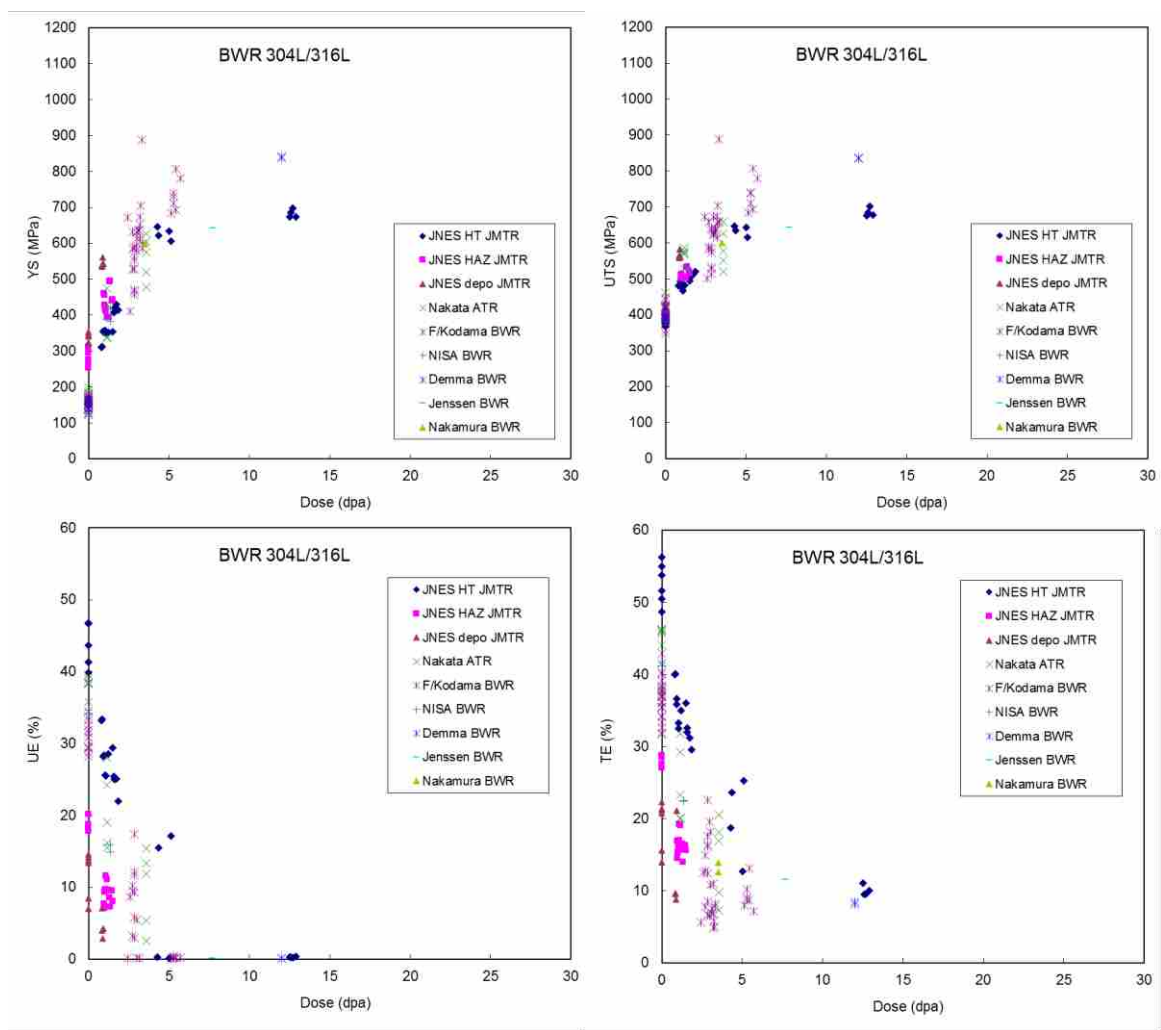


図 3.2.2-13 低炭素材 304L/316LSS の引張特性データ(BWR 分野)

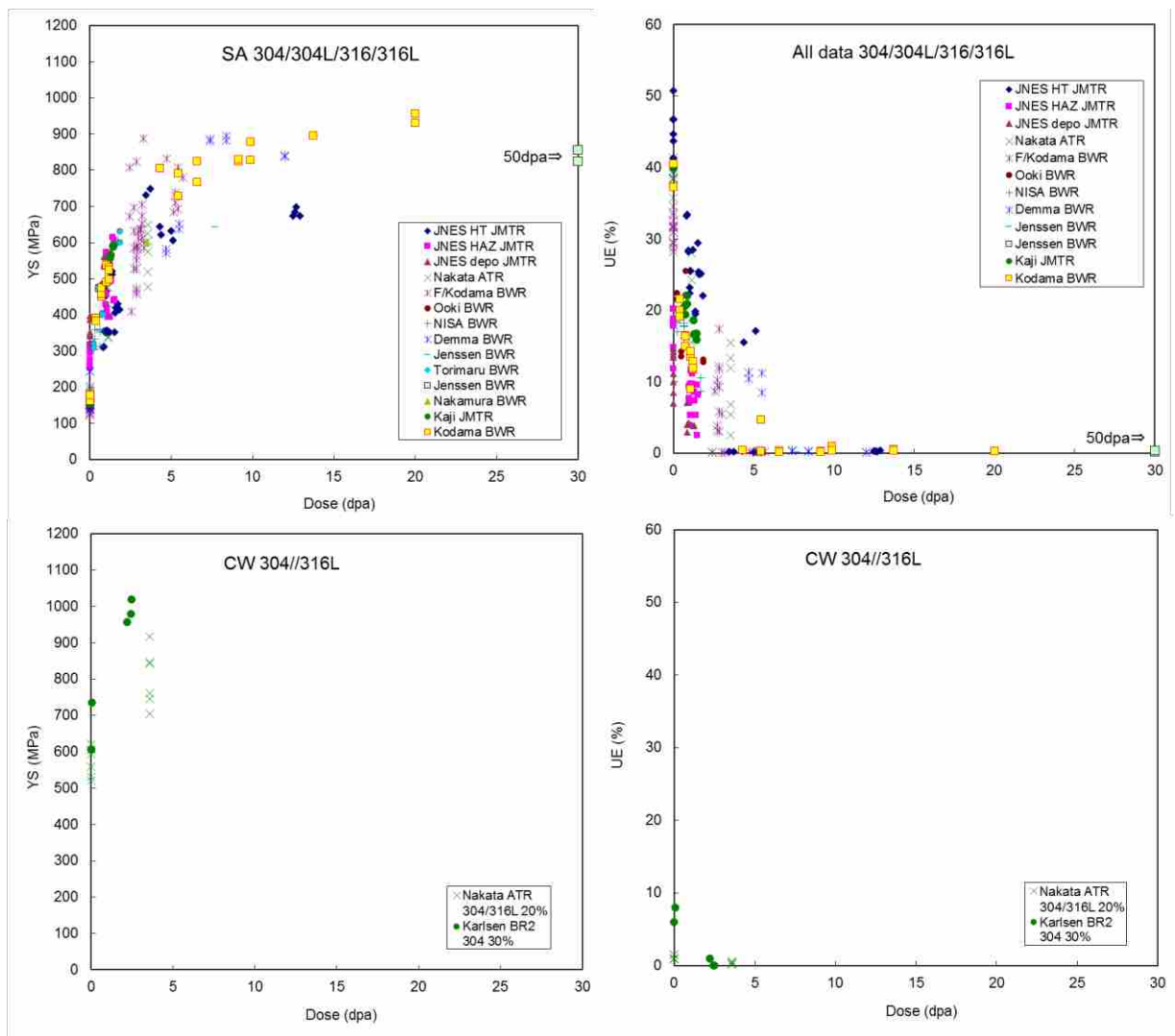


図 3.2.2-14 冷間加工材と溶体化材の耐力と一様伸びの比較(BWR 分野)

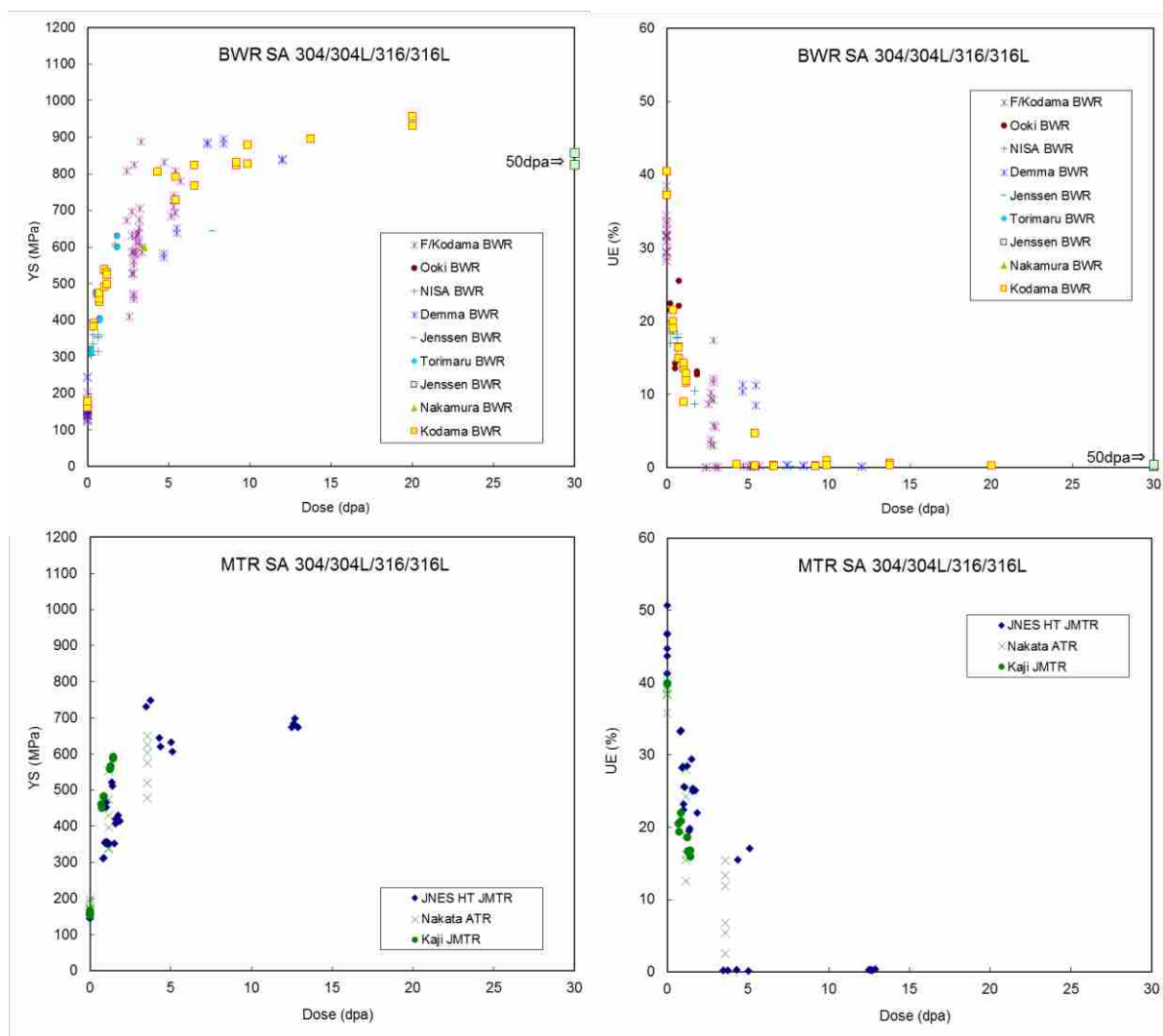


図 3.2.2-15 BWR 照射材と研究炉照射材の耐力と一様伸びの比較(BWR 分野)

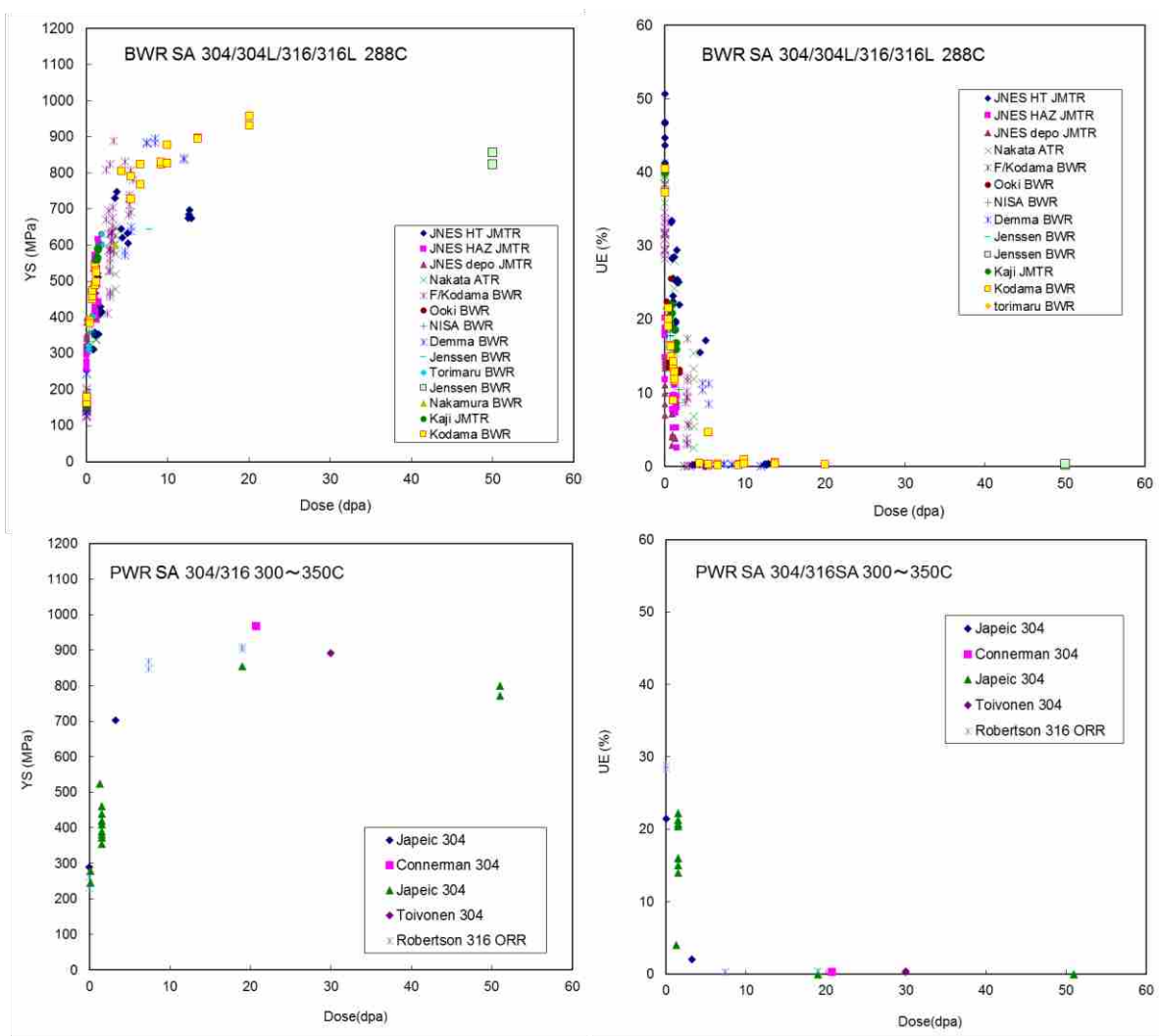


図 3.2.2-16 BWR 分野(288°C)と PWR 分野(300~350°C)の溶体化材の耐力和一様伸びの比較

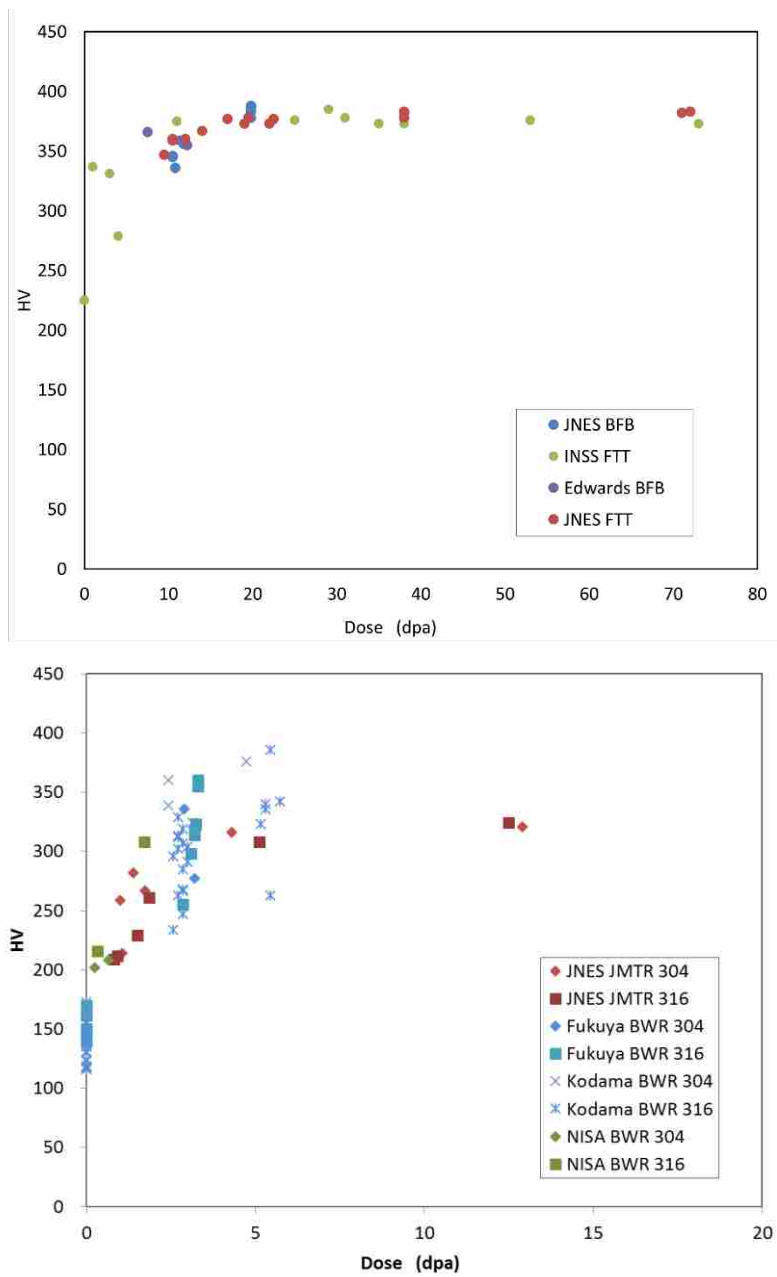


図 3.2.2-17 PWR 分野(上)と BWR 分野(下)の硬さの照射量依存性

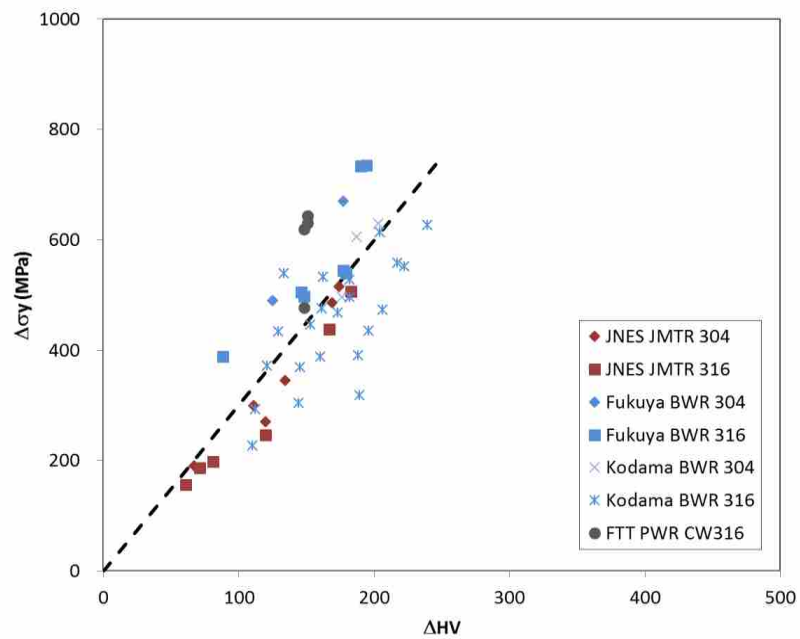


図 3.2.2-18 硬さ増加量と耐力増加量の関係

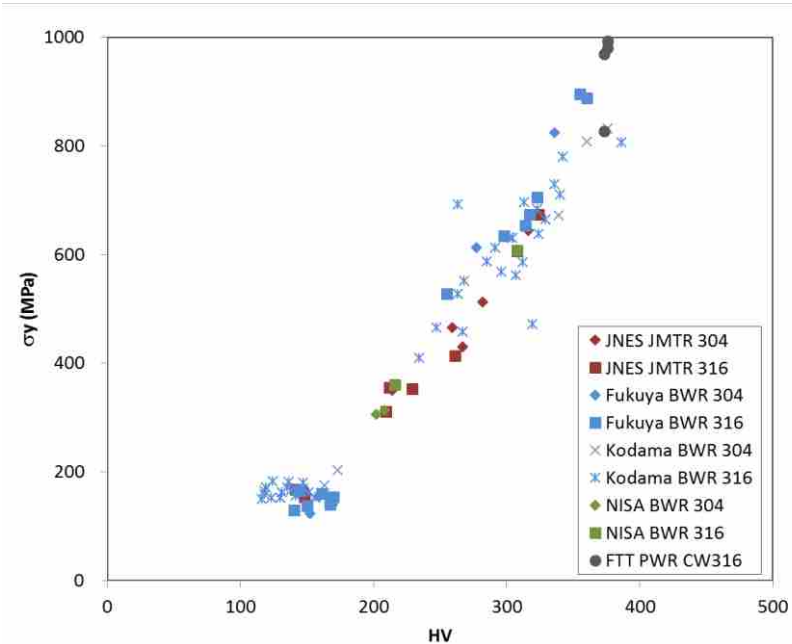


図 3.2.2-19 硬さと耐力の関係

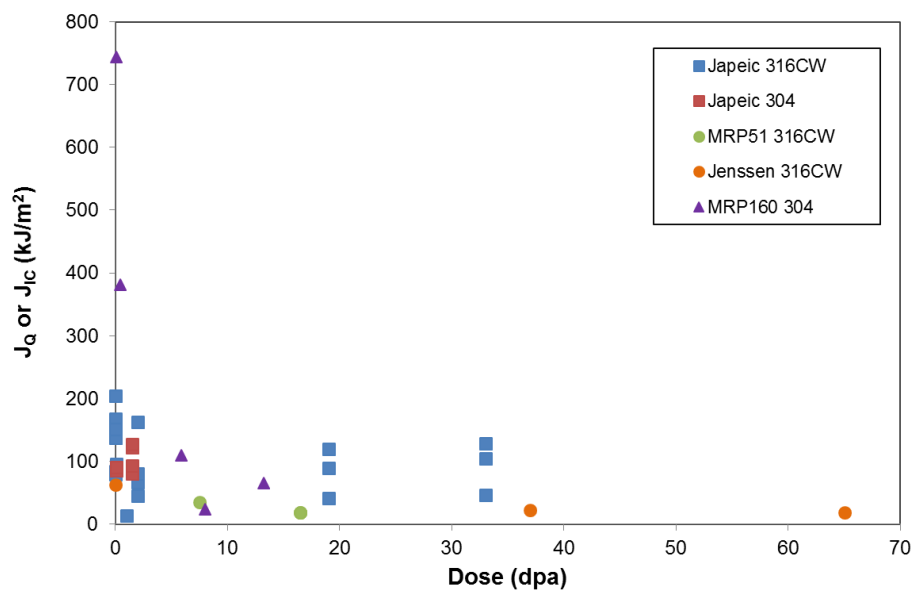


図 3.2.2-20 PWR 分野の破壊靱性データ

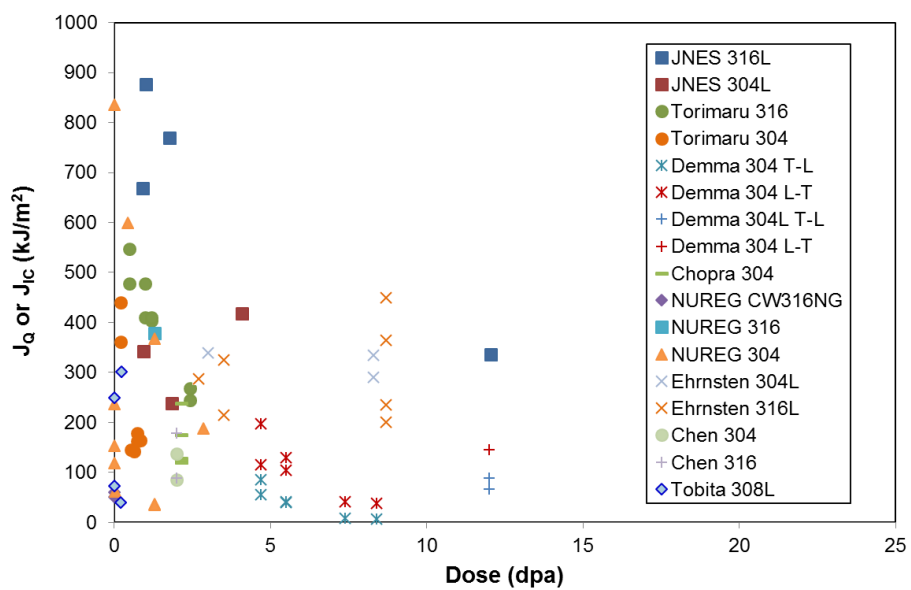


図 3.2.2-21 BWR 分野の破壊靱性データ

④ IASCC感受性

今年度に新たに収集された IASCC 感受性のデータについて全体的な傾向を整理した。IASCC 感受性は、炉内構造物の健全性評価において照射による IASCC を考慮すべきかどうかを判断する時期や照射量の評価と関連する。PWR では照射量が高く高応力の部位である炉内構造物のボルトの損傷に関して「感受性発生までの時間」と関係しており、BWR ではシュラウド等の亀裂に関して「IASCC 発生のしきい照射量」と関係している [3.2.2-186] [3.2.2-187]。IASCC 感受性は、冷却水模擬環境での低ひずみ引張試験(SSRT)で調べられており、粒界割れの有無と破面率等がデータとなる。整理したデータシート内の試験データについて、PWR 分野と BWR 分野でその特徴を検討した。

a. PWR分野

PWR 分野のデータは、実機から取出された冷間加工 316SS 製のシンプルチューブとボルトのデータが多く報告されている。図 3.2.2-22 は PWR の標準的な一次冷却水模擬環境での冷間加工 316SS の IASCC 感受性試験のデータを粒界割れ破面率(IG fraction)と照射量の関係で示したものである。照射量の範囲を 80 dpa までと 10 dpa までに変えている。試験水質は、標準的な PWR 一次系環境を模擬したもので、溶存水素 30cc/kg、温度 290~340°C、B 濃度 500~1200ppm、Li 濃度 2~2.2ppm の範囲である。SSRT 試験のひずみ速度は $6.7 \times 10^{-8} \sim 1 \times 10^{-7}$ /s である。粒界破面率は照射量の増加とともに増加しており、20 dpa を超えると破面率は極めて高くなる。低照射量のデータは少ないが、粒界破面が現れるデータは 2 dpa 以上となっている。

試験環境の影響は個別の文献で調べられている。試験温度が高いほど感受性が高くなること [3.2.2-188]、溶存水素濃度が高いほど感受性が高くなること [3.2.2-189] が報告されている。材料の違いを示すデータは極めて少なく、347SS と 304SS の断片的なデータがあるのみである。

b. BWR分野

BWR 分野のデータは、溶体化ステンレス鋼の実機部材や実機照射材が多く報告されている。図 3.2.2-23 は BWR の 1 次冷却水模擬環境としてよく用いられる 288°C 純水で溶存酸素濃度 8~32ppm の試験環境での、溶体化ステンレス鋼の IASCC 感受性試験のデータを粒界割れ破面率と照射量の関係で示したものである。照射量の範囲を 20 dpa までと 5 dpa までに変えている。ひずみ速度は $6 \times 10^{-8} \sim 3 \times 10^{-7}$ /s である。粒界破面率は照射量の増加とともに増加し、3 dpa を超えると破面率は極めて高くなる。低照射量のデータは比較的多く、粒界破面が現れるデータは約 0.7 dpa である。

図 3.2.2-24 は図 3.2.2-23 示した溶体化材のデータを、304 系と 316 系の材料に分けてプロットしたものである。304 系では 1 dpa 以下で粒界割れを示すデータがあり、316 系では粒界割れを示すデータは 1 dpa を超えている。

環境や材料の違いの影響は個別の文献で調べられており、溶存酸素濃度が高いほど感受性が高くなること[3.2.2-190] [3.2.2-191] が報告されている。材料組成については規格内で P、Si、N 等を変化させた材料の試験が多く行われているが[3.2.2-192]、SSRT 試験による感受性の比較では影響は顕著なものではないと考えられる。

⑤ IASCC発生

今年度に新たに追加すべき文献データは無かった。IASCC 発生は PWR では照射量が高く高応力の部位である炉内構造物のボルトの損傷に関して必須のデータとなるため、多くの試験データが報告されている。一方、BWR では厚板のシュラウド等の亀裂の進展挙動が重要であり、IASCC 発生に関する試験データは少ない。IASCC 発生は、冷却水模擬環境での定荷重ないし定ひずみの SCC 試験で調べられ、負荷応力(ひずみ)、破断時間がデータとなる。整理したデータシート内の試験データについて、PWR 分野と BWR 分野でその特徴を検討した。

a. PWR分野

PWR 分野のデータは、実機から取出された冷間加工 316SS 製のシンプルチューブとボルトのデータが多く報告されており、304SS 製炉内構造物のデータが 1 例報告されている。図 3.2.2-25 の上は PWR の標準的な一次冷却水模擬環境での IASCC 発生試験のデータを照射量と負荷応力のマップに破断の有無で示したものである。図 3.2.2-25 の下は負荷応力を応力比(耐力に対する比)に変えたものである。標準的な模擬環境として、溶存水素 30cc/kg、温度 290~350°C、B 濃度 500~1200ppm、Li 濃度 2~2.2ppm の範囲とした。試験時間は未破断の場合で最長約 4000 時間である。なお、定ひずみ条件の Shogan ら[3.2.2-193] のデータ以外はすべて定荷重条件のデータある。定荷重試験では Nishioka ら[3.2.2-194] と Toivonen ら[3.2.2-195] の試験は単軸定荷重条件であり、その他は C リングか O リングを用いた試験で負荷応力は解析計算で求められている。

照射量の増加とともに割れの発生する下限の応力は低下する傾向にある。Shogan らの定ひずみ試験では低い応力で割れが見られている。定荷重のデータ、特に単軸定荷重のデータで見ると、20 dpa 以上での割れ発生下限応力比は 0.5 となっている。

図 3.2.2-26 は照射量を区別せずに破断の有無を発生時間と応力比のマップにプロットした図である。最も短い発生時間は、応力が高いほど短い傾向となる。

IASCC には水質条件も強い影響をもつことが知られており、温度、溶存水素、Li 濃度の影響が調べられている。温度では 290~340°C の範囲で調べられ、同一照射量では高温の方がより低い荷重で割れが発生している[3.2.2-196]。溶存水素では 5~45cc/kg の範囲で調べられ、同じ照射量では高溶存水素の方が低い負荷応力で割れが発生している[3.2.2-197]。Li 濃度では標準の約 2ppm より高い 3.5ppm での試験で、短時間で割れが発生したと報告されている。

b. BWR分野

BWR 分野のデータとして Jacobs らの定ひずみの 4 点曲げ試験[3.2.2-198] と Katsura らの単軸定荷重試験のデータ[3.2.2-199] が報告されている。Katsura らのデータは照射量が 18 dpa までで、溶存酸素 32ppm で最長 5000 時間まで実施されている。図 3.2.2-27 に定荷重の IASCC 発生データを示す。データは少ないが応力比で 0.4 付近に割れ発生の下限があると考えられる。Katsura らは溶存酸素 0.02ppm の試験も実施しており、32ppm で発生した条件では割れ発生がないことを報告している。

⑥ IASCC進展

今年度には PWR 分野について新たに文献を調査しデータシートを作成するとともに、BWR 分野についても文献の追加調査を行いデータシートを更新した。IASCC 進展は炉内の比較的厚い構造物に亀裂が発生するような場合に亀裂進展速度に基づく評価が必要な場合があり、試験データが報告されている。PWR では炉心その溶接部が該当する場合は考えられ、BWR ではシュラウド等の溶接部が該当する。IASCC 進展は、冷却水模擬環境で CT 試験片を用いた荷重負荷条件等での SCC 進展試験で調べられ、亀裂進展速度がデータとなる。データシート内の試験データについて、PWR 分野と BWR 分野でその特徴を検討した。

a. PWR分野

PWR の場合亀裂進展試験に適した CT 試験片サイズの実機材や照射が簡単ではため、小型の試験片を用いた試験データが報告されているが断片的である。PWR 実機材を用いたデータとしては 347SS および CW316SS の BFB のデータのみである[3.2.2-200]。他の照射後試験のデータは BOR-60 照射の R-CT 試験片のデータである[3.2.2-201]~[3.2.2-204]。Halden 炉による炉内進展試験のデータが報告されており[3.2.2-205] [3.2.2-206]、試験材として PWR 実機部材だけでなく BWR 実機の制御棒ハンドルが使用された例がある。これらの試験では繰返荷重や定期除荷荷重なども用いられ、相互の比較がほとんど困難である。

図 3.2.2-28 には報告されている亀裂進展速度について応力拡大係数と照射量との関係を示した。亀裂進展速度は 10^{-12} m/s から 10^{-6} m/s のオーダーで非常に大きくばらついており、複数のデータから統一的な傾向を見出すのは困難である。

b. BWR分野

亀裂進展試験により比較的多くの進展速度のデータが報告されている。国内では原子力安全基盤機構によるプロジェクトで JMTR 照射材の照射後試験により多くのデータが得られている[3.2.2-207]~[3.2.2-210] [4.3.4-25]。また、国内 BWR から採取したシュラウド、上部格子板等を用いた大型 CT 試験片の照射後試験によるデータ[3.2.2-211]、JMTR

照射材の JMTR 炉内 SCC 試験によるデータ[3.2.2-212] が報告されている。海外では BWR 照射材の照射後試験や Halden 炉での炉内試験のデータ、Halden 炉や BOR-60 で照射した照射材の炉外試験のデータが報告されている。BOR-60 では照射温度が 320°C と高いが、最大 47.5 dpa の高照射量のデータが報告されている[3.2.2-213]。

試験環境は 288°C での NWC または HWC での試験が標準的であるが、Halden 炉では 330°C で炉内試験したデータが報告されている。

図 3.2.2-29 は NWC 条件の主要なデータの亀裂進展速度と照射量および応力拡大係数 K との関係を示す。図 3.2.2-30 は HWC 条件の対応する図である。これらの図においては、文献に示された試験方法や結果に基づくデータの有効性により有効なデータのみを選び、さらに材料は HAZ や溶接金属を除く溶体化ステンレス鋼の母材で、試験条件は 288°C で定荷重のデータのみをプロットしている。NWC は溶存酸素濃度から判断して明らかなデータと ECP が +140mV 以上データであり、HWC は溶存酸素濃度が低いと溶存水素濃度が高く、ECP は -200mV 以下のデータである。

NWC ではデータのほとんどは 10^{-10} ~ 10^{-8} /s の範囲にあるが、照射量とともに増加し 10^{-9} m/s 付近で飽和する傾向がみられる。 K に対する全体的な傾向は明瞭ではないが、各データ群では K の増加とともに進展速度は増加する傾向がある。データ群による明瞭な違いは見られないが、BOR-60 の 320°C 照射材と Halden での 330°C の炉内試験のデータに速度が高いデータが見られ、照射温度や試験温度が高いことによる影響の可能性がある。

HWC ではデータのばらつきが NWC よりも大きい、 10^{-10} m/s 以下のデータが多い。全体として NWC よりも進展速度は小さくなる傾向であるが、Jenssen らの BWR 照射材のデータに NWC 以上に高い進展速度が見られる。

図 3.2.2-31 と図 3.2.2-32 は、図 3.2.2-29 と図 3.2.2-30 に示したデータから 288°C の照射後試験データに限定してプロットした図である。NWC で進展速度が照射量とともに増加し飽和する傾向は非常に明瞭であるが、HWC ではデータを限定してもばらつきは大きい。

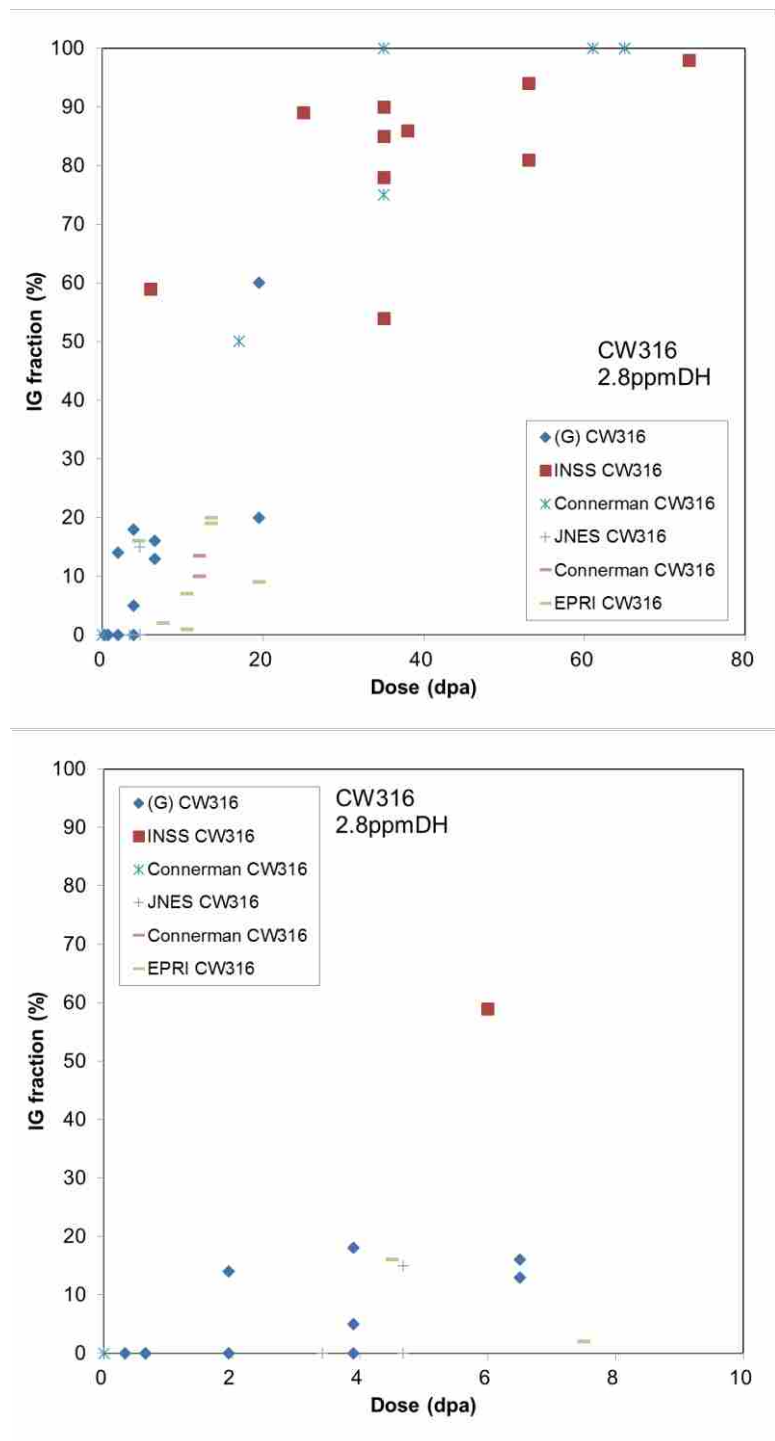


図 3.2.2-22 PWR 分野の CW316 の IASCC 感受性データ
上は照射量 80 dpa まで、下は照射量 10 dpa まで

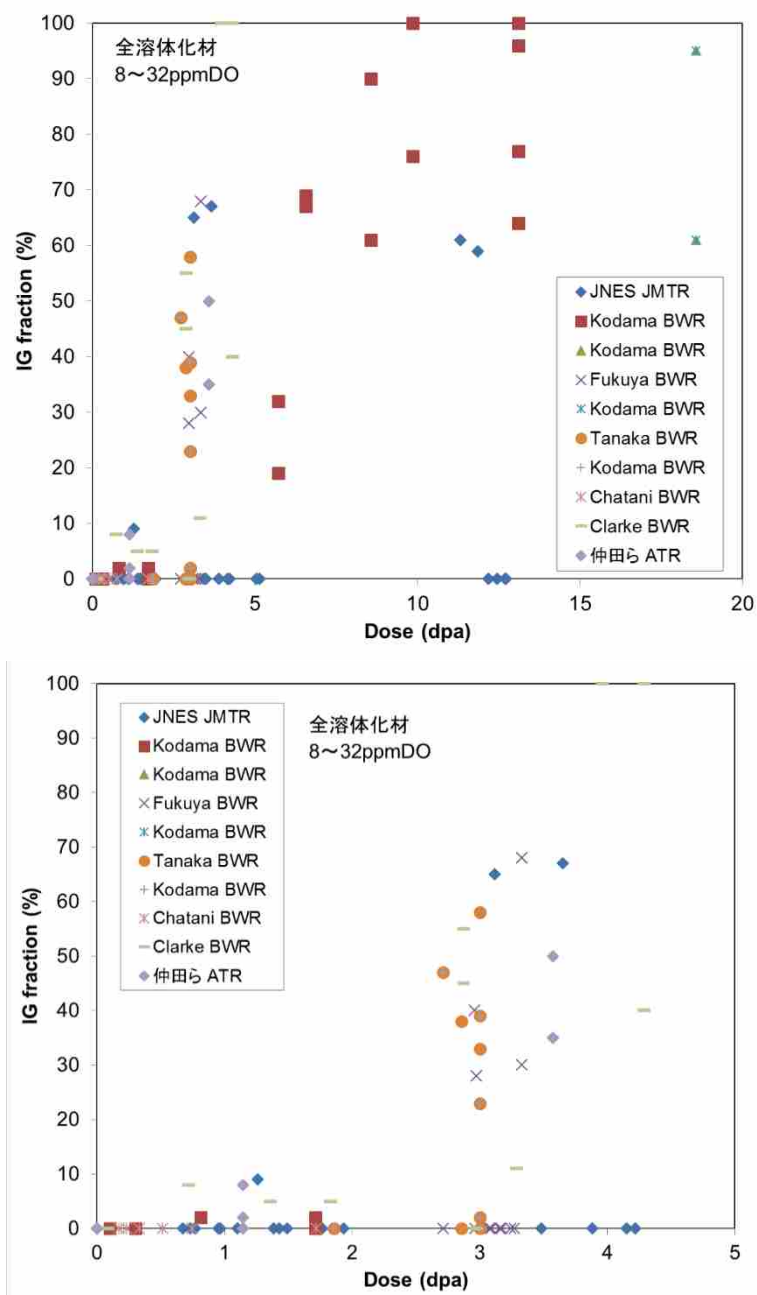


図 3.2.2-23 BWR 分野の溶体化ステンレス鋼の IASCC 感受性データ
上は照射量 20 dpa まで、下は照射量 5 dpa まで

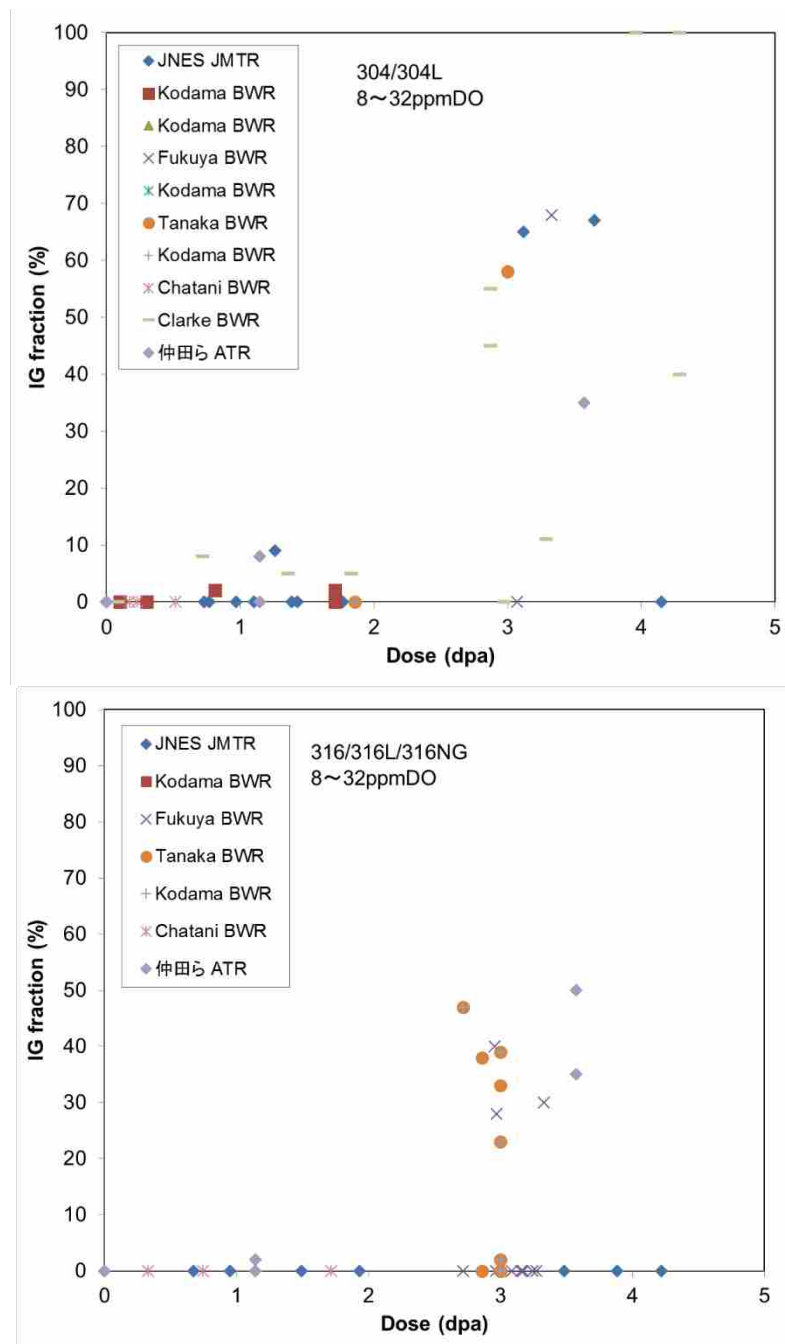


図 3.2.2-24 BWR 分野の溶体化ステンレス鋼の IASCC 感受性データ
上は 304 系 SS、下は 316 系 SS