

平成 27 年度  
軽水炉照射材料健全性評価研究  
報 告 書

平成 28 年 3 月

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

本調査は、原子力規制庁からの受託事業「平成27年度軽水炉照射材料健全性評価研究」として、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構が実施したものである。

## 目 次

1. はじめに	1
2. 事業計画	2
2.1 目的	2
2.2 事業内容	2
2.2.1 平成 26 年度まで	2
2.2.2 平成 27 年度	3
2.3 専門部会	5
3. 平成 27 年度の事業概要	6
3.1 材料照射試験	6
3.2 燃料照射試験	7
4. 材料照射試験に関する実施内容	9
4.1 照射脆化試験	9
4.1.1 既存照射材を用いた試験	10
4.1.2 高温予荷重(WPS)効果に関する試験	31
4.1.3 き裂伝播停止破壊靱性(K <sub>Ia</sub> )に関する試験	95
4.1.4 原子炉圧力容器の照射脆化に関する微細組織分析	113
4.1.5 破壊力学評価に関する試験	130
4.2 照射誘起応力腐食割れ (IASCC) 試験	166
4.2.1 既往事業の照射材を用いた試験	172
4.2.2 き裂進展速度に及ぼす添加物影響評価試験	447
4.2.3 照射材データの調査・整理	510
4.3 材料照射キャプセル及び照射後試験装置等の整備	682
4.3.1 照射脆化キャプセルの点検維持	682
4.3.2 疲労試験機の整備	684
4.3.3 画像寸法測定機の整備	685
4.3.4 放電加工装置の整備	687
4.3.5 NC フライス盤の整備	688
4.3.6 照射済ステンレス鋼試験片の保管管理	689
4.3.7 サンプリングラインの敷設作業	752
5. おわりに	756

### 付録

#### 4.2.3 章 照射材データの調査・整理

照射ステンレス鋼に関するデータシート

#### 4.3.6 章 照射済ステンレス鋼試験片の保管管理

保管中の照射済ステンレス鋼試験片リスト (平成 28 年 3 月現在)

## 1. はじめに

軽水炉の炉心付近で使用される機器は厳しい使用環境に長期間さらされるため、① 材料そのものの劣化、② 高温、高圧、高放射線及び化学的に厳しい環境、及び③ 機器の寸法変化や相互作用等による応力の発生、が複雑に相互に作用してひび割れの発生等の安全上問題となる現象が起きる可能性がある。電気事業者はこうした劣化(き裂発生の有無)を検査するとともに、維持規格<sup>(1-1)</sup>及び電気技術規程<sup>(1-2),(1-3)</sup>に基づき健全性評価等を行っている。さらに、原子力発電所の運転開始後30年を目途に高経年化技術評価を行い、長期保全計画を策定・実施している。高経年化した原子力発電所の安全性及び信頼性の確保は、このような適切な保全計画の実施と継続的な改善が不可欠である。こうした構造材料の照射環境下における経年劣化事象は照射量の増大に伴って複雑化するため、実機を模擬した照射等の環境における材料の複雑な劣化挙動を把握する必要がある。

こうした課題に適切に対応するために、原子力規制委員会は、「原子力規制委員会における安全研究について－平成27年度版－」（平成27年4月22日、原子力規制委員会）<sup>(1-4)</sup>において原子炉施設の「運転期間延長及び高経年化対策」等に係る技術的知見の整備を安全研究が必要な研究分野として位置づけた。

「軽水炉照射材料健全性評価研究（平成18～31年度(予定)、旧事業名：軽水炉燃材料詳細健全性調査）」は、国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構が原子力規制委員会 原子力規制庁から受託し、材料試験炉(JMTR: Japan Materials Testing Reactor)に照射試験装置を整備し、上記の安全研究が必要な分野に対応した軽水炉の構造機器の健全性評価に係る基準等の整備に資するための照射試験を実施するものである。本報告書は、平成27年度事業の実施結果についてまとめたものである。

## 参考文献

- (1-1) 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 NA 1-2008)  
(平成 20 年 11 月)
- (1-2) 日本電気協会 電気技術規程「原子炉構造材の監視試験方法」(JEAC 4201-2007)  
(平成 19 年 12 月)
- (1-3) 日本電気協会 電気技術規程「原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法」(JEAC 4206-2007) (平成 19 年 12 月)
- (1-4) 原子力規制委員会「原子力規制委員会における安全研究について－平成 27 年度版－」(平成 27 年 4 月 22 日)

## 2. 事業計画

### 2.1 目的

原子力発電をエネルギー源として今後も利用するためには、原子力安全を継続的に改善していくことが不可欠である。軽水炉材料では、高経年化及び運転期間の延長により脆化やひび割れ等の劣化が生じる可能性が高まる。本事業では、「原子力規制委員会における安全研究について－平成27年度版－」（平成27年4月22日、原子力規制委員会）<sup>(2-1)</sup>において安全研究が必要な研究分野として位置づけられた、原子炉施設の「運転期間延長及び高経年化対策」に係る技術的知見の整備を目的とする。具体的には、審査対象の機器及び構造物に想定される経年劣化事象のうち、中性子照射に関連する原子炉压力容器の照射脆化及び炉内構造物等の照射誘起応力腐食割れに関して、材料試験炉(JMTR)を活用して照射の影響を確認するための試験装置等の整備・維持管理を行うとともに、照射下試験及び照射後試験を体系的に実施してデータ分析等を行い、国の規制判断に必要な技術的知見を収集・整備する。

### 2.2 事業内容

#### 2.2.1 平成26年度まで

本事業を開始した平成18年度には、照射環境下での燃料及び材料の健全性に関する研究課題を整理し、本事業で実施すべき試験項目と必要な技術要素について検討した。平成19年度は、実施すべき試験項目に対応した照射試験装置を実現するために必要な試験技術の検討と試験装置の詳細設計を実施した。これを受けて、平成20年度からは燃料異常過渡試験、中性子照射脆化試験及び照射誘起応力腐食割れ試験を実施するために必要な設備の製作設計、設置準備及び材料入手等を行い、設備整備を進めるとともに、照射キャプセル及び付随する炉外装置等の製作を進めた。また、照射後試験実施に必要な装置の製作、整備を行った。並行して、試験実施に必要な技術を確立するための研究開発を行うとともに、試験燃料を入手するための欧州から日本への輸送を平成22年度に実施した。また、材料照射試験に先立ち、非照射材の特性を調べる試験を実施し、照射挙動を評価するために必要な基礎的な非照射データの整備を進めた。

本事業では平成24年4月からの本格的な照射試験の開始を予定していた。しかし、平成23年3月に発生した震災後の状況を踏まえ委託元と協議を行い、軽水炉利用の高度化に関連した燃料照射試験及びハフニウム照射試験は凍結し、既設炉の高経年化対策に関連する材料照射試験については規模を縮小して実施することとなった。また、整備を進めていた燃料及び材料照射試験装置は予定通り整備を完了させ、燃料照射試験装置については、試験の再開に向けて技術と合わせてその維持を行うこととなった。

さらに、試験研究用等原子炉施設の新規制基準が平成25年12月に施行され、JMTRの適合性確認が必要なことからJMTRの再稼働時期が見通せなくなった。

このような状況を踏まえて、燃料照射試験では、平成23年度に燃料異常過渡試験を実施するための設備の整備を完了するとともに、装置性能確認のための試験燃料棒の準備及び

JMTRホットラボへの輸送を行い、平成24~26年度は装置性能維持のための保守点検を実施した。材料照射試験では、平成24年度までに照射キャプセルに高温高压水を供給するための材料照射試験装置の整備を完了し性能確認試験を実施した。平成25年度は、照射前、照射下及び照射後に照射脆化、応力腐食割れ等を評価するために必要な試験装置の整備及び照射キャプセルの製作を行うとともに、材料照射キャプセル内で試験片に荷重を負荷するための機構、き裂長さの測定、試験片の水環境の測定に関する技術等を炉外で確認するための動作確認試験を実施した。また、照射脆化及び応力腐食割れ特性等を評価するための非照射材の試験を継続し、非照射データの整備を進めるとともに、既存のJMTR照射材等を用いた材料基礎特性評価試験を実施した。さらに、加圧熱衝撃時の健全性評価手法の高度化を目的に、き裂伝播停止及び高温予荷重効果の評価に関する試験に着手した。平成26年度は、材料照射キャプセルの製作及び照射後試験等に必要な装置の整備等を継続するとともに、整備した装置等の性能維持のための保守点検を実施した。また、未照射材や既往研究等での照射済み材を用いて、照射脆化及び応力腐食割れ等を評価するために必要なデータ取得を継続した。

## 2.2.2 平成27年度

平成27年度においては、次の実施を計画した。

### a) 材料照射試験

#### ① 照射脆化試験

原子炉圧力容器の照射脆化に関して、既往の事業における照射材等を使用し、マスターカーブ法による破壊靱性データを取得するとともに解析的検討を行う。原子炉圧力容器を模擬した試験体を用いた破壊試験に関する既往研究等の調査と試験計画の検討を行うとともに、試験に必要な鋼材等の準備を開始する。製作済みの照射キャプセル、照射後に照射脆化試験を実施するために必要な装置の点検等を行う。

具体的には以下に掲げる事項を実施する。

#### (1) 非照射材を用いた試験等

高温予荷重(WPS)効果等に関する解析、試験を行う。また、原子炉圧力容器内面ステンレスオーバーレイクラッド材の熱時効脆化に関する微細組織観察を行う。

#### (2) 既往事業の照射材を用いた試験

既往事業の照射材から試験片を加工するとともに、引張試験、破壊靱性試験等を行い、破壊靱性参照温度とシャルピー延性脆性遷移温度の中性子照射による移行量を比較する。また、照射材の亀裂伝播停止破壊靱性を評価するために計装化シャルピー衝撃試験を行う。

#### (3) 破壊試験等に関する調査

原子炉圧力容器を模擬した試験体等により、クラッドの影響等も考慮できる破壊試験を目指し、既往の研究成果、課題を取りまとめ、試験計画を検討する。また、照射を受ける原子炉圧力容器等破壊評価に必要な既往研究でのデータを調査・整理する。

(4) 原子炉圧力容器鋼・クラッド材の製作

上記(3)の破壊試験を行うために必要な鋼材、溶接継手・クラッド用材料の仕様を決定する。

(5) 照射後試験装置の整備

照射材試験片加工装置及び破壊靱性試験後に亀裂進展量を測定するための装置を整備する。

(6) 照射キャプセル・試験装置の維持管理

製作済みの照射キャプセル、照射後に照射脆化試験を実施するために必要な装置の点検等を行って、キャプセル装荷済みの試験片や計測器の劣化防止や安全の確保を図る。

② 照射誘起応力腐食割れ(IASCC)試験

炉内構造物等の照射誘起応力腐食割れに関して、既往の事業における照射材等を使用し、高温水中き裂進展速度データを取得するとともに、試験片の詳細観察・分析を行い、照射材等のき裂進展挙動に関する知見を整備する。照射下で応力腐食割れに関する試験を実施するために必要な機器・装置等について、ボイラー及び圧力容器安全規則等に基づいて必要な点検・整備等を行う。

具体的には以下に掲げる事項を実施する。

(1) 既往事業の照射材を用いた試験

照射後試験(PIE)データを先行取得するため、既往事業の照射済み材を活用して高温水中き裂進展試験及び試験片き裂先端近傍の変形組織・酸化皮膜等の詳細観察・分析を行う。また本事業で活用する照射済み材の保管・管理を行う。

(2) き裂進展に及ぼす添加物影響評価試験

既存軽水炉の圧力バウンダリであるニッケル(Ni)基合金異材溶接部において発生しているSCC(PWSCC)を対象に、民間規格のき裂進展速度線図の妥当性を確認するため、亜鉛(Zn)注入環境中でのき裂進展速度データを取得する。

(3) 試験装置の整備・維持管理

照射キャプセル内で水の放射線分解により生成された過酸化水素濃度を評価する

ために、照射キャプセルから水をサンプリングして素早く冷却するための配管類を整備する。また、本事業で整備した照射試験装置、照射後試験装置等について、ボイラー及び圧力容器安全規則等に基づいて必要な点検等を行い、安全の維持を図る。

## b) 燃料照射試験

### ① 試験装置の維持管理

「燃料の規制基準に係る技術的知見の整備」で示された課題である、異常な過渡変化時における燃料の健全性に関する技術的知見を取得するために必要となる試験装置等の維持管理を行う。具体的には、これまでに本事業で整備した燃料照射試験装置について、原子炉施設保安規定、核燃料物質使用施設等保安規定、高圧ガス保安法等に基づいて必要な点検等を行い、安全の維持を図る。

平成27年度の実施内容の概要を3章に、詳細は4章にまとめた。

## 2.3 専門部会

本事業は、学識経験者等による専門部会を開催し、調査・試験の詳細計画、実施方法、成果等に関する検討を行うとともに、海外の照射試験及び機器試験のための調査等を行い、これらを踏まえて事業を実施した。

### 参考文献

- (2-1) 原子力規制委員会「原子力規制委員会における安全研究について－平成 27 年度版－」（平成 27 年 4 月 22 日）。



### 3. 平成27年度の事業概要

本事業では、平成26年度までに実施した研究課題の整理結果、材料基礎特性評価試験結果などの成果を踏まえて、照射環境下での材料及び燃料の健全性に関する次の試験等を実施した。

#### (1) 試験装置等の整備・維持管理：

①照射脆化試験、②照射誘起応力腐食割れ(IASCC: Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking)試験、及び③燃料照射試験を実施するために必要な設備(照射試験装置及び照射後試験装置等)の整備を進めるとともに、昨年度までに整備した設備を適切に維持・管理するための点検等を行った。また、①の照射に必要な材料照射キャプセルの維持管理を行った。

#### (2) 試験：

①及び②の材料照射試験に先立ち、非照射材の特性を調べるための試験を継続し、照射挙動を評価するために必要な基礎的な非照射データを拡充するとともに、既往研究等での照射済み材を活用した試験を継続した。また、①に関連して、実機に即した評価を行うための破壊試験に着手した。

### 3.1 材料照射試験

本事業では、原子炉圧力容器鋼の照射脆化及び炉内構造物の照射誘起応力腐食割れ(IASCC)の評価手法について、JMTRに照射試験装置等の整備を行い、破壊靱性の低下、照射下き裂進展速度に関するデータを取得し、運転期間延長認可制度及び高経年化技術評価の審査、並びに民間規格の妥当性確認に必要な技術的知見を収集・整備する。

#### ① 照射脆化試験

原子炉圧力容器の破壊靱性値は、非照射材で落重試験により求めた関連温度の照射によるシフトが、監視試験のシャルピー衝撃試験で求められる延性脆性遷移温度のシフトと等価であるとして間接的に予測評価されている。そのため、高照射量材(高脆化材)でそれぞれのシフトが等価であるかを確認する必要がある。また、直接的に破壊靱性値を評価する手法が合理的であるため、今後は破壊靱性マスターカーブ法の監視試験への導入が見込まれている。この方法では、試験によって求める参照温度 $T_0$ というパラメータにより破壊靱性値の温度依存性を評価する。参照温度 $T_0$ には試験片形状・板厚依存性が存在することが非照射材の試験から示唆されており、照射材でもこれらを確認する必要がある。本事業では、監視試験片サイズの小型試験片、マスターカーブ法での標準サイズである1インチ厚さコンパクトテンション型(1T-CT)試験片を装荷した照射キャプセルを、JMTRによって約 $1 \times 10^{24} \text{n/m}^2$ まで中性子照射を行う。照射による破壊靱性の低下、すなわち参照温度 $T_0$ の高温側へのシフトとシャルピー延性脆性遷移温度(DBTT)のシフトを求め、それらを比較することにより、現行のシャルピー衝撃試験に基づく間接的な破壊靱性評価手法の妥当性を高脆化材で確認する。照射材で破壊靱性値に及ぼす試験片形状・板厚の効果を調べ、監視試験片サイズの小型

の破壊靱性試験片から参照温度 $T_0$ を評価することの妥当性を確認するとともに、高脆化材でのマスターカーブの形状、すなわち破壊靱性値の温度依存性を確認する。さらに、これらの高照射量領域まで中性子照射された材料の組織分析を行い、高照射量領域でも脆化因子が変化しないことを確認する。本年度は、既往研究等での照射済み材を活用して破壊靱性試験を実施し、照射材の破壊靱性値を取得した。ホットラボにおいて照射材試験片加工装置の整備を進めるとともに試験片加工手順・方法を確立した。また、加圧熱衝撃時の健全性評価手法を高度化することを目的に、高温予荷重効果及びき裂伝播停止破壊靱性に関する試験を実施した。クラッドの影響等も考慮できる破壊試験を実施するための鋼材、溶接継手・クラッド用材料の仕様決定及び試験装置の設計を完了し、製作に着手した。

## ② 照射誘起応力腐食割れ(IASCC)試験

実機炉内構造物のIASCCは、炉心からの中性子やガンマ線が照射されている環境中で進展するため、炉内での照射下で起こる現象(材料の劣化や水の放射線分解等)のIASCC進展挙動に及ぼす影響を確認する必要がある。本事業では、0.5インチ厚さコンパクトテンション型試験片(0.5T-CT試験片)を用いて、高中性子照射量( $1\sim 3\times 10^{25}\text{n/m}^2$ )までの予備(ベース)照射試験をJMTRにて実施する。ベース照射した試験片について、原子炉の炉内の水質条件や応力状態などをパラメータとして、照射下及び照射後に応力腐食割れ進展試験を実施する。き裂進展速度の測定及び試験後の試験片の各種分析において、照射下試験と照射後試験データの比較を行い、照射下で起こる現象がIASCC進展挙動に及ぼす影響を明らかにすることにより、照射後試験データに基づくIASCC健全性評価手法の妥当性を確認する。本年度は、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、より効率的な照射試験を実施するために、これまでに取得した照射材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、照射後試験データの先行取得及びSCCき裂進展挙動の機構論的な検討に資するため、非照射材及び既存のJMTR照射材等を用いたき裂進展試験及び試験片き裂先端近傍の変形組織・酸化皮膜等のマイクロ組織観察・分析を実施した。照射キャプセル内の水質評価に必要なサンプリング配管類を整備するとともに、これまでに整備した装置の性能を維持するために必要な点検を行った。

これら照射脆化試験及びIASCC試験に関する事業成果については、試験及び試験装置に大きく分類して、4.1～4.3章にまとめた。

## 3.2 燃料照射試験

本事業で整備した燃料異常過渡試験装置は、制御棒の誤引き抜きなどによる原子炉出力の異常な上昇事象などを模擬するため、JMTRの出力と独立に試験燃料の出力を制御するための出力制御設備、軽水炉を模擬した冷却条件で試験燃料を照射するための水環境調整設備、キャプセルを原子炉と独立に冷却するためのキャプセル冷却設備などから構成され、原子炉及び隣接するキュービクルなどに機器が設置される。燃料照射試験は平成23年度より

凍結されているが、凍結解除後に速やかに照射試験が開始できるよう試験装置等の維持管理は継続する。平成27年度事業では、整備した装置の性能を維持するために必要な点検を行った。

#### 4. 材料照射試験に関する実施内容

##### 4.1 照射脆化試験

本試験では、監視試験片から採取可能な破壊靱性試験片(4mm厚さコンパクトテンション型試験片(Mini-C(T)試験片))とマスターカーブ法での標準サイズの破壊靱性試験片(1インチ厚さコンパクトテンション型試験片(1T-C(T)試験片))等の中性子照射を実施し、破壊靱性値の試験片形状・寸法効果を明らかにする。また、高照射量領域での1T-C(T)試験片による破壊靱性シフトとシャルピー衝撃試験片による延性脆性遷移温度(DBTT)から現行の間接的な破壊靱性評価手法の妥当性を確認する。さらに、これらの高照射量領域まで中性子照射された材料でナノスケールの組織分析を行うことで、脆化因子を確認する。

平成20年度は、本試験で使用するために製作する鋼材の仕様及び試験マトリクスについて検討を行った。

平成21年度は、Cu含有率等を変化させた3種類の圧延材(A533B鋼)を製作し、溶接継手を製作するために必要な溶接材料を購入した。また、平成20年度に購入したPWR標準材(S1材)のマスターカーブ法による破壊靱性試験を行った。

平成22年度は、圧延材について、引張試験、シャルピー衝撃試験、破壊靱性試験を実施した。平成23年度は、溶接継手を製作するとともに、照射キャプセルの準備を行った。また、平成22年度までに製作・入手した圧延材について、3次元アトムプローブ等によって微細組織分析を行った。また、破壊靱性試験を行ってデータを追加するとともに、破壊靱性値への試験片寸法効果に関する力学的要因を調べるため破壊靱性試験片の有限要素解析を行った。平成24年度は、平成23年度に製作した溶接継手について、破壊靱性試験及び微細組織分析を行った。また、照射キャプセル、照射後試験に必要な機器等の準備を行った。平成25年度は、機械的特性の板厚内分布の調査等非照射材の試験を継続し、非照射データの整備を進めるとともに、既往研究等での照射済み材を活用した試験計画について検討を行った。さらに、加圧熱衝撃時の健全性評価手法の高度化を目的に、き裂伝播停止及び高温予荷重効果の評価に関する試験に着手した。平成26年度は、照射試験準備として照射キャプセルの製作を進めるとともに、既往研究等での照射済み材及びその未照射保管材を活用して破壊靱性試験片等を製作した。未照射保管材について破壊靱性試験を実施し参照温度 $T_0$ を評価した。照射材についても破壊靱性試験に着手した。また、加圧熱衝撃時の健全性評価手法を高度化することを目的に、高温予荷重効果及びき裂伝播停止破壊靱性に関する試験を開始した。

本年度は、既往研究等での照射済み材を活用して破壊靱性試験を実施し、照射材の破壊靱性値を取得した。また、加圧熱衝撃時の健全性評価手法を高度化することを目的に、高温予荷重効果及びき裂伝播停止破壊靱性に関する試験を実施し、試験データを拡充した。クラッドの影響等も考慮できる破壊試験を実施するための鋼材、溶接継手・クラッド用材料の仕様決定及び試験装置の設計を完了し、製作に着手した。

#### 4.1.1 既存照射材を用いた試験

JMTR での照射試験に先立ち、既存の照射材を利用して 0.16 インチ厚 CT (Mini-C(T)) 試験片を用いたマスターカーブ法による破壊靱性評価が可能であることを確認するとともに参照温度  $T_0$  とシャルピー遷移温度  $T_{41J}$  の相関を確認する。本年度は、昨年度に引き続き JNES 事業等の照射材試験片から Mini-C(T)試験片及び引張試験片を製作するとともに、製作済みの試験片を用いた破壊靱性試験を実施した。

##### 4.1.1.1 既存照射材からの試験片製作

JNES 事業等(4.1.1-1)(4.1.1-2)で使用された照射材(試験済みシャルピー試験片)の中から選定した、Mini-C(T)試験片を採取して破壊靱性試験を行うための材料を表 4.1.1-1 に示す。ここでは、照射材のシャルピー試験結果があり、十分な数の Mini-C(T)試験片と引張試験片を製作可能なシャルピー破断片があり、未照射材が保管されていることを条件に選定している。これらの材料のうち、さらに優先順位をつけて再度選定した材料を表 4.1.1-2 に示す。

昨年度及び本年度に製作した試験片及び後述する破壊靱性試験に使用した試験片の一覧を表 4.1.1-3 に示す。照射材については新規に 5B-B 材及び 5B-A 材を製作し、Steel B 材を追加製作した。事業者 A による 5B-B 材及び 5B-A 材からの試験片採取方法の模式図と試験片の外観を図 4.1.1-1 に、事業者 B による Steel B 材からの同図を図 4.1.1-2 に示す。照射材 Mini-C(T)の寸法測定結果を表 4.1.1-4 に、照射材引張試験片の寸法測定結果を表 4.1.1-5 に示す。ASTM E1921 規格に従うと許容公差は試験片サイズが小さくなるほど厳しくなるが、放電加工及びフライス加工ともスリット幅(N)を除いて規格を満足した。スリット幅(N)に関しては、放電加工の 0.2mm に対しフライス加工では 0.45mm と幅が広がったが、先端 R は 0.125mm 以下である。

##### 4.1.1.2 未照射保管材の破壊靱性試験

昨年度の 1T-C(T)に引き続き、未照射保管材から製作した Mini-C(T)を用いた破壊靱性試験と有効な  $K_{Jc}$  値上限を求めるための引張試験を実施した。引張試験結果を表 4.1.1-6 に、破壊靱性試験結果を表 4.1.1-7 及び図 4.1.1-4 に、参照温度  $T_0$  の評価結果を表 4.1.1-8 に示す。全ての材料について十分な数の有効な破壊靱性値が得られ、参照温度  $T_0$  を評価することができた。なお 5B 材については、疲労予き裂長さの進展が規格で要求される 0.6mm に至らなかった試験片が生じたため、H26 年度試験済みの 1T-C(T)試験片を用いて Mini-C(T)を追加製作した。

##### 4.1.1.3 照射材の破壊靱性試験

昨年度に製作した照射材 3B 材 10 本の Mini-C(T)を用いた破壊靱性試験と、有効な  $K_{Jc}$  値上限を求めるための引張試験を実施した。Steel B 材については照射済みシャルピー破

断片から Mini-C(T)を 10 本製作し破壊靱性試験を実施した。照射材の引張試験結果を表 4.1.1-9 に、照射材破壊靱性試験結果を表 4.1.1-10 及び図 4.1.1-5 に、参照温度  $T_0$  の評価結果を表 4.1.1-11 に示す。Steel B 材については、疲労予き裂長さの進展が規格で要求される 4.4mm を超えてしまったもの 2 本が棄却となったが、昨年度の試験結果と合わせることで有効な参照温度  $T_0$  を評価することができた。なお、B01 に関しては棄却データとなった(含めて評価すると参照温度  $T_0$  の有効範囲  $T_0 \pm 50^\circ\text{C}$  を逸脱するため)。3B 材に関しては 10 本中 4 本が有効範囲  $T_0 \pm 50^\circ\text{C}$  を逸脱し棄却となり、有効な参照温度  $T_0$  を得られなかった。

#### 4.1.1.4 考察

図 4.1.1-6 に、過年度に取得済みのデータ(4.1.1-5)と合わせた全ての材料の参照温度  $T_0$  の比較を示す。照射材を含め全ての材料について、1T-C(T)やシャルピー型 3 点曲げ破壊靱性試験片(PCCv)と Mini-C(T)の参照温度  $T_0$  は評価誤差( $\sigma$ )の範囲内で一致している。図 4.1.1-7 に、1T-C(T)に対する小型試験片の参照温度の比較を示す。PCCv は 1T-C(T)に比してやや低めの  $T_0$  を示す傾向にあるが、Mini-C(T)に関しては  $0.4T-C(T)$  と同様に差は小さく、明確な寸法依存性は見られない。

図 4.1.1-8 に、シャルピー遷移温度と参照温度の相関を示す。全ての試験片寸法、未照射材及び照射材ともに既往研究(4.1.1-6)のデータのばらつきの範囲内に分布しており、明確な逸脱は見られない。図 4.1.1-9 に、破壊靱性のばらつきの指標であるワイブル係数を示す。全ての試験片寸法、未照射材及び照射材ともにワイブル係数 4 を中心に既往研究(4.1.1-7)の範囲内に分布しており、こちらにも明確な逸脱は見られない。

#### 4.1.1.5 ホットラボにおける試験片加工方法の検討

JMTR ホットラボにおいて、照射材から Mini-C(T)試験片を加工する手法を確立し、フライス盤及び放電加工機等の装置をホットセル内に整備するため、試験片加工方法の検討を行った。

平成 25 年度に整備した NC フライス盤及び放電加工装置を用いて、昨年度改訂した試験片外形加工手順(図 4.1.1-10)に基づき Mini-C(T)試験片を製作した。その結果、NC フライス盤で加工した際に発生するバリ等の影響を抑え、規格で要求される寸法公差を満足することができた(図 4.1.1-11)。ただし、治具への試験片素材のチャッキング等の状況により、寸法公差を満足する試験片の歩留まりは約 50%程度に止まるため、次年度以降更なる改善が必要である。

ホットセル内では顕微鏡による目視確認が困難であるため、昨年度に引き続き除荷コンプライアンス法による疲労予き裂長さ導入の条件を検討した。除荷コンプライアンス法による疲労予き裂長さ推定は、試験片の外形寸法とヤング率を用いて、試験片の開口変位量からき裂長さを計算する方法である。ここで、初期のスリット長さを指定して材料別にヤ

ング率を推定して使用方法と、初期のスリット長さを無視し材料のヤング率を指定する方法がある。本年度は以下の式を用いて評価したヤング率を指定することで、き裂長さを規格の範囲(4±0.4mm)に導入できることを確認した。なお、本年度試験を実施した未照射保管材 Mini-C(T)試験片は、本方法で疲労予き裂を導入したものである。

$$E=(1000*207-(T-20)*87)/1000$$

ここで、E はヤング率 GPa、T は温度 °C である。

#### 4.1.1.6 まとめ

本年度は、未照射保管材 3B、5B、B4 及び 5W 材、照射材 3B 及び Steel B の Mini-C(T)試験を実施し、照射材 3B を除いて有効な参照温度  $T_0$  を評価した。本年度の結果からは、参照温度  $T_0$  や破壊靱性のばらつきに明確な寸法依存性は認められず、照射材についても Mini-C(T)試験片が有効であることが示された。また、照射材についても参照温度  $T_0$  とシャルピー遷移温度  $T_{41J}$  の相関が既往研究の範囲内にあることを確認した。

JMTR ホットラボにおける照射材からの試験片加工については、規格で要求される寸法公差を満足する加工方法を確立した。また、除荷コンプライアンス法による疲労予き裂の導入方法を確立した。

#### 参考文献

- (4.1.1-1) 発電技研「原子力発電施設信頼性実証試験の現状」昭和 62 年報告書
- (4.1.1-2) 原子力安全基盤機構「原子力プラント機器高度化技術開発」平成 12 年度 及び「原子力プラント機器高度安全化対策技術」平成 13 年度報告書
- (4.1.1-3) K.Onizawa and M. Suzuki, “Correlation between cleavage fracture toughness and charpy impact properties in the transition temperature range of reactor pressure vessel steels,” JSME International Journal Series A, 47(3), pp.479-485(2004).
- (4.1.1-4) 平成 22 年度 経済産業省原子力安全・保安院 高経年化対策強化基盤整備事業 (健全性評価の妥当性確認手法の確立等) 成果報告書
- (4.1.1-5) T. Tobita, Y. Nishiyama, T. Ohtsu, M. Udagawa, J. Katsuyama, K. Onizawa, “Fracture Toughness Evaluation of Reactor Pressure Vessel Steels by Master Curve Method Using Mini-CT Specimens,” J. Pressure Vessel Technol. 137(5), pp. 051405-1 – 051405-8 (2015) .
- (4.1.1-6) Sokolov, M. A., and Nanstad, R. K., Oak Ridge National Laboratory, Report No. NUREG/CR-6609 (2000).

(4.1.1-7) Wallin, K., "The Scatter in KIc Results," Eng. Fract. Mech., 19(6), pp.1085-1093 (1984)



表 4.1.1-1 試験に使用できる照射材の一覧

履歴	材料ID	化学組成 (wt%)			照射量 x10 <sup>19</sup> n/cm <sup>2</sup>	初期RT <sub>NDT</sub> , °C	シャルピー遷移温度T <sub>41J</sub> , °C			上部棚吸収エネルギーUSE, J		
		Cu	Ni	P			未照射	照射後	シフト	未照射	照射後	低下率, %
PTS事業 母材 [4.1.1-1]	2B	0.25	0.59	0.007	7.0	-30	-55	85	140	147	109	26
	3B	0.06	0.57	0.018	5.4	-20	-42	14	56	157	145	8
	4B	0.06	1.78	0.009	7.1	-65	-75	105	180	163	106	35
	5B-A	0.23	0.61	0.018	5.6	-25	-30	114	144	140	100	29
	5B-B				10.0			143	173		90	36
PTS事業 溶金 [4.1.1-1]	1W-A	0.06	0.98	0.007	5.8	-60	-66	0	66	209	191	8
	1W-B				12.0			39	105	172	154	10
	5W-A	0.25	1.06	0.019	4.6	-50	-42	117	159	207	116	44
	5W-B				9.8			140	182	191	100	48
	B1(L) ※				0.21			0.63	0.009	3.1	-25	-33
PLIM事業 母材 [4.1.1-2]	B4(L) ※	0.17	0.62	0.009	3.2	-8	-25	64	89	82	68	17
	B4(H) ※				12.9			135	160		51	38
	Steel A				0.16			0.67	0.015		13.0	-35
JAEA ホットラボ 保管材	Steel B	0.04	0.65	0.005	11.0	-45	-61	10	71	207	166	20

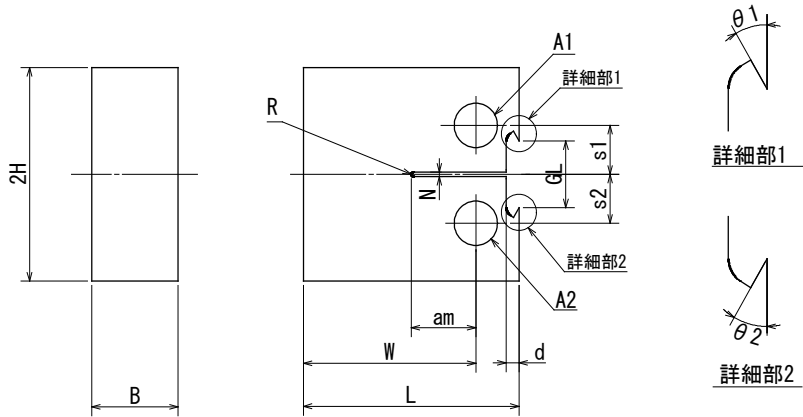
表 4.1.1-2 選定した照射材および優先順位

優先順位	①		②	③	④	⑤	⑥
材料ID	3B	Steel B	5B-B	B4(L)	B4(H)	5B-A	5W-B
特徴等	脆化が少なく未照射材に近い		T <sub>41J</sub> シフトが大きい	初期USEが低い	初期USEが低く脆化が大きい	②と同じ材料で脆化が少ない	溶接金属で脆化が大きい

表 4.1.1-3 今年度までに製作及び試験を実施した材料一覧

材料		試験片	H26	H27	
照射材	原子炉圧力容器 鋼母材	3B	Mini-C(T)	製作 10	試験 10
			引張試験片	製作 6	試験 6
		5B-B	Mini-C(T)		製作 10
			引張試験片		製作 6
		B4(L)	Mini-C(T)		
			引張試験片		
		5B-A	Mini-C(T)		製作 10
			引張試験片		製作 6
		B4(H)	Mini-C(T)		
			引張試験片		
		Steel B	Mini-C(T)	製作 2 試験 2	製作 10 試験 10
			引張試験片	既往データ有り	
	溶接金属	5W-B	Mini-C(T)		
			引張試験片		
未照射材	原子炉圧力容器 鋼母材	3B	1T-C(T)	製作 14 試験 7	
			Mini-C(T)	製作 12	試験 12
			引張試験片	製作 6	試験 6
		5B	1T-C(T)	製作 14 試験 7	
			Mini-C(T)	製作 12	試験 12
			引張試験片	製作 6	試験 6
		B4	1T-C(T)	採取可能な残材無し	
			Mini-C(T)	製作 12	試験 12
			引張試験片	製作 6	試験 6
		Steel B	1T-C(T)	既往データ有り(4.1.1-5)	
			Mini-C(T)		
			引張試験片		
	溶接金属	5W	1T-C(T)	製作 14 試験 7	
Mini-C(T)			製作 12	試験 12	
引張試験片			製作 6	試験 6	

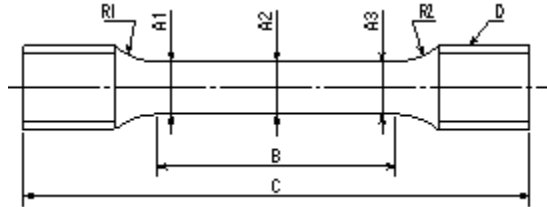
表 4.1.1-4 照射材 Mini-C(T)試験片の寸法



材料 (照射材)	ID	B 4±0.08	2H 9.6±0.08	L 10±0.08	W 8±0.04	am 3±0.04	N 0.2	d 0.6	A1 2±0.04	A2 2±0.04	GL 3±0.04	s1 2.2±0.04	s2 2.2±0.04
5B-A	5B-1-A-1	4.05	9.61	10.01	8.02	3.01	0.20	0.6	2.01	2.01	3.00	2.20	2.20
	5B-1-A-2	4.05	9.61	10.01	8.02	3.01	0.20	0.6	2.01	2.01	3.00	2.20	2.20
	5B-2-A-1	4.04	9.61	10.01	8.03	3.00	0.20	0.6	2.01	2.01	3.00	2.20	2.20
	5B-2-A-2	4.04	9.61	10.00	8.02	3.00	0.20	0.6	2.01	2.01	3.00	2.20	2.20
	5B-2-B-1	4.04	9.61	10.00	8.02	3.00	0.20	0.6	2.01	2.01	3.00	2.20	2.20
	5B-2-B-2	4.04	9.61	10.00	8.02	3.00	0.20	0.6	2.01	2.01	3.00	2.20	2.20
	5B-9-A-1	4.04	9.61	10.00	8.02	3.00	0.20	0.6	2.01	2.01	3.00	2.20	2.20
	5B-9-A-2	4.04	9.61	10.00	8.02	3.00	0.20	0.6	2.01	2.01	3.00	2.20	2.20
5B-B	5B-12-A-1	4.04	9.61	10.00	8.02	3.00	0.20	0.6	2.01	2.01	3.00	2.20	2.20
	5B-12-A-2	4.04	9.61	10.01	8.02	3.00	0.20	0.6	2.01	2.01	3.01	2.20	2.20
	5B-25-A-1	4.04	9.61	10.01	8.01	3.00	0.20	0.6	2.00	2.00	3.03	2.21	2.21
	5B-25-A-2	4.04	9.61	10.01	8.01	3.00	0.20	0.6	2.00	2.00	3.03	2.21	2.20
	5B-25-B-1	4.03	9.61	10.01	8.01	3.00	0.20	0.6	2.00	2.00	3.02	2.21	2.21
	5B-25-B-2	4.04	9.61	10.01	8.01	3.00	0.20	0.6	2.00	2.00	3.03	2.20	2.21
	5B-26-A-1	4.03	9.61	10.01	8.03	3.01	0.20	0.6	2.00	2.00	3.03	2.20	2.20
	5B-26-A-2	4.03	9.61	10.00	8.02	3.00	0.20	0.6	2.00	2.00	3.02	2.20	2.20
Steel B	5B-27-A-1	4.04	9.61	10.01	8.02	3.00	0.20	0.6	2.00	2.00	3.02	2.20	2.21
	5B-27-A-2	4.03	9.61	10.00	8.02	3.00	0.20	0.6	2.00	2.00	3.02	2.20	2.20
	5B-28-A-1	4.03	9.61	10.00	8.02	3.00	0.20	0.6	2.00	2.00	3.02	2.20	2.20
	5B-28-A-2	4.03	9.61	10.00	8.01	3.00	0.20	0.6	2.00	2.00	3.02	2.20	2.20
	B01 ※	3.97	9.57	9.98	8.00	3.01	0.40	0.70	1.99	1.99	3.01	2.21	2.19
	B02 ※	4.00	9.60	10.00	8.02	2.97	0.45	0.70	2.00	1.99	2.97	2.22	2.18
	B03	4.00	9.58	10.00	7.97	3.27	0.41	0.65	1.98	1.97	2.98	2.20	2.20
	B04	3.99	9.59	9.99	8.01	3.31	0.41	0.66	2.03	2.00	2.95	2.19	2.22
	B05	4.01	9.60	9.99	8.02	3.32	0.40	0.64	2.01	2.01	2.98	2.21	2.19
	B06	4.00	9.59	9.99	8.00	3.30	0.40	0.66	2.01	2.01	2.99	2.21	2.19
	B07	4.00	9.60	9.98	8.03	3.32	0.41	0.64	2.02	2.00	3.03	2.20	2.19
	B08	4.00	9.61	9.99	8.01	3.29	0.41	0.62	2.00	2.01	2.95	2.21	2.18
B09	4.00	9.59	9.98	7.99	3.29	0.41	0.63	2.03	2.00	2.96	2.24	2.17	
B10	4.00	9.60	9.98	8.01	3.30	0.41	0.67	2.00	2.03	2.96	2.20	2.19	
B11	4.00	9.59	10.00	8.04	3.30	0.41	0.64	1.98	1.97	2.96	2.20	2.20	
B12	4.00	9.60	9.99	8.05	3.31	0.41	0.65	2.01	2.00	3.00	2.19	2.21	

※H26 製作及び試験済み

表 4.1.1-5 照射材引張試験片の寸法



材料 (照射材)	符号	平行部	A			B	C	D	R	
		測定方位	$(\phi 2.5 \pm 0.02)$			$(11.3 \pm 0.2)$	$(24 \pm 0.2)$	$(M4 \times 0.7)$	$(3.1 \text{以上})$	
			A1	A2	A3				R1	R2
5B-A	5B-4-A-①	0°方位	2.51	2.52	2.52	11.4	24	良	3.1	3.1
		90°方位	2.51	2.52	2.52					
	5B-4-A-②	0°方位	2.5	2.5	2.5	11.4	24	良	3.1	3.1
		90°方位	2.5	2.5	2.5					
	5B-4-A-③	0°方位	2.5	2.5	2.5	11.4	24	良	3.1	3.1
		90°方位	2.5	2.5	2.5					
	5B-4-A-④	0°方位	2.51	2.51	2.51	11.4	24	良	3.1	3.1
		90°方位	2.51	2.51	2.51					
	5B-4-B-①	0°方位	2.51	2.51	2.51	11.4	24	良	3.1	3.1
		90°方位	2.51	2.51	2.51					
5B-4-B-②	0°方位	2.5	2.5	2.5	11.4	24	良	3.1	3.1	
	90°方位	2.5	2.5	2.5						
5B-B	5B-17-B-①	0°方位	2.5	2.5	2.5	11.3	24.1	良	3.1	3.1
		90°方位	2.5	2.5	2.5					
	5B-17-B-②	0°方位	2.51	2.51	2.51	11.4	24.1	良	3.1	3.1
		90°方位	2.51	2.51	2.51					
	5B-17-B-③	0°方位	2.5	2.5	2.5	11.4	24.1	良	3.1	3.1
		90°方位	2.49	2.5	2.5					
	5B-17-B-④	0°方位	2.52	2.52	2.51	11.4	24.1	良	3.1	3.1
		90°方位	2.52	2.52	2.52					
	5B-18-A-①	0°方位	2.51	2.51	2.51	11.4	24.1	良	3.1	3.1
		90°方位	2.5	2.51	2.51					
5B-18-A-②	0°方位	2.51	2.52	2.51	11.4	24.1	良	3.1	3.1	
	90°方位	2.52	2.51	2.52						

表 4.1.1-6 未照射保管材の引張試験結果

	試験片 ID	平行部断面, mm		温度, °C	$\sigma_y$ , MPa	$\sigma_u$ , MPa	$\sigma_y$ 温度依存性
3B	3BT-1	1.539	0.75	14	429	590	$\sigma_y =$ $299.84 \cdot \text{EXP}(104.560 / (B6 + 273.15))$
	3BT-2	1.539	0.75	15	438	587	
	3BT-3	1.542	0.75	-70	498	672	
	3BT-4	1.542	0.75	-70	498	678	
	3BT-5	1.535	0.76	-111	574	724	
	3BT-6	1.537	0.75	-111	570	731	
5B	5BT-1	1.540	0.73	15	461	609	$\sigma_y =$ $348.79 \cdot \text{EXP}(79.799 / (B6 + 273.15))$
	5BT-2	1.546	0.73	16	453	608	
	5BT-3	1.540	0.73	-60	514	682	
	5BT-4	1.540	0.73	-60	511	687	
	5BT-5	1.539	0.74	-111	592	753	
	5BT-6	1.534	0.73	-111	544	764	
B4	B4T-1	1.531	0.74	19	472	621	$\sigma_y =$ $334.28 \cdot \text{EXP}(99.166 / (B6 + 273.15))$
	B4T-2	1.530	0.73	20	474	623	
	B4T-3	1.531	0.73	-101	590	757	
	B4T-4	1.527	0.72	-100	598	766	
	B4T-5	1.526	0.73	-60	527	699	
	B4T-6	1.524	0.74	-60	525	697	
	B4T-7	1.528	0.73	-120	649	794	
	B4T-8	1.530	0.73	-120	633	796	
5W	5WT-1	1.530	0.75	19	515	626	$\sigma_y =$ $379.82 \cdot \text{EXP}(90.022 / (B6 + 273.15))$
	5WT-2	1.536	0.74	19	518	622	
	5WT-3	1.526	0.76	-60	575	704	
	5WT-4	1.536	0.75	-60	585	707	
	5WT-5	1.535	0.75	-90	624	744	
	5WT-6	1.532	0.75	-91	618	738	

表 4.1.1-7 未照射保管材の破壊靱性試験結果

材料 (未照射 保管材)	試験片 ID	試験温 度, °C	B, mm	BN, mm	W, mm	a0, mm	KJc, MPa√ m	KJc (limit)	Validity
3B	3B-1	-105	4.04	4.04	8.00	4.05	50	133	valid
	3B-2	-85	4.04	4.04	8.00	4.01	83	129	valid
	3B-3	-85	4.04	4.04	8.01	4.14	222	126	Invalid
	3B-4	-95	4.04	4.04	8.02	4.02	106	131	valid
	3B-5	-95	4.04	4.04	8.01	4.09	121	130	valid
	3B-6	-95	4.04	4.04	8.00	4.06	112	130	valid
	3B-7	-95	4.04	4.04	8.00	4.02	96	131	valid
	3B-8	-95	4.04	4.04	8.00	4.14	119	129	valid
	3B-9	-95	4.04	4.04	8.01	4.12	93	129	valid
	3B-10	-95	4.04	4.04	8.01	3.93	155	132	Invalid
	3B-11	-105	4.04	4.04	8.01	4.03	127	133	valid
	3B-12	-105	4.04	4.04	8.01	3.87	102	136	valid
5B	5B-1	-110	4.04	4.04	8.01	4.12	154	133	Invalid
	5B-2	-120	4.04	4.04	8.02	4.11	118	136	valid
	5B-3	-120	4.04	4.04	8.01	4.04	73	137	valid
	5B-4	-120	4.04	4.04	8.02	3.91	83	139	valid
	5B-7	-120	4.04	4.04	8.00	3.99	42	137	valid
	5B-8	-120	4.04	4.04	8.01	4.24	176	133	Invalid
	5B-9	-130	4.04	4.04	8.01	4.08	49	139	valid
	5B-11	-130	4.04	4.04	8.01	3.87	58	143	valid
	1T_5B7- m2 ※	-130	4.08	4.08	8.02	4.18	88	137	valid
	1T_5B7- m9 ※	-130	3.98	3.98	8.00	4.04	85	140	valid
1T_5B7- m10 ※	-130	3.92	3.92	7.98	4.08	110	138	valid	

※H26 年度試験済みの 1T-C(T)試験片を用いて Mini-C(T)を追加製作

表 4.1.1-7 未照射保管材の破壊靱性試験結果(つづき)

B4	B4-1	-80	4.04	4.04	8.00	4.16	253	130	Invalid
	B4-2	-100	4.04	4.04	8.00	4.15	138	135	Invalid
	B4-3	-120	4.03	4.03	8.00	4.19	107	139	valid
	B4-4	-120	4.04	4.04	8.00	4.11	108	141	valid
	B4-5	-120	4.04	4.04	8.00	4.07	72	141	valid
	B4-6	-120	4.04	4.04	8.02	4.08	55	142	valid
	B4-7	-120	4.04	4.04	8.00	4.01	99	143	valid
	B4-8	-120	4.04	4.04	8.00	4.03	105	142	valid
	B4-9	-120	4.04	4.04	8.00	3.98	79	143	valid
	B4-10	-120	4.04	4.04	8.01	4.12	81	141	valid
	B4-11	-120	4.04	4.04	8.00	4.10	80	141	valid
	B4-12	-120	4.04	4.04	7.99	4.08	100	141	valid
5W	5WB-1	-90	4.04	4.04	8.01	4.10	111	136	valid
	5WB-2	-90	4.04	4.04	8.03	4.12	123	140	valid
	5WB-3	-90	4.04	4.04	8.01	4.11	109	140	valid
	5WB-4	-90	4.04	4.04	8.01	4.08	94	139	valid
	5WB-5	-90	4.04	4.04	8.01	4.09	99	139	valid
	5WB-6	-90	4.04	4.04	8.02	4.03	98	139	valid
	5WB-7	-90	4.04	4.04	8.02	4.29	89	139	valid
	5WB-8	-90	4.04	4.04	8.02	4.05	89	139	valid
	5WB-9	-90	4.04	4.04	8.01	4.04	93	140	valid
	5WB-10	-90	4.04	4.04	8.02	4.12	85	139	valid
	5WB-11	-90	4.04	4.04	8.01	4.05	135	140	valid
	5WB-12	-90	4.04	4.04	8.01	4.10	88	139	valid

表 4.1.1-8 未照射保管材の参照温度

材料	試験片 形状	温度, °C	dK/dt, MPa√ m/s	全デ ータ 数	有効デ ータ数	参照温 度 T <sub>0</sub> , ° C	Validity of T <sub>0</sub>	σ, °C	ワイブ ル係数 m
3B	1T-C(T)	-70~-60	0.8	7	7	-72	Valid	7.9	5.0
	Mini-C(T)	-105~-85	0.5	12	10	-74	Valid	7.0	3.0
5B	1T-C(T)	-60~-50	0.8	7	7	-79	Valid	7.9	1.8
	Mini-C(T)	-130~-110	0.5	11	9	-92	Valid	7.2	2.2
B4	Mini-C(T)	-120~-80	0.5	12	10	-83	Valid	7.0	3.7
5W	1T-C(T)	-60	0.8	7	7	-57	Valid	7.9	9.5
	Mini-C(T)	-90	0.5	12	12	-58	Valid	6.7	8.0
Steel	1T-C(T)	-110~-60	0.8	32	32	-97	Valid	5.1	4.3
B※	PCCv	-110~-130	1.0	32	29	-99	Valid	5.2	3.6
	Mini-C(T)	-120	0.1~ 1.8	30	29	-91	Valid	5.3	3.7

※Steel B の数値は文献(4.1.1-5)



表 4.1.1-9 照射材の引張試験結果

	試験片 ID	平行部 φ, mm		温度, °C	σ <sub>y</sub> , MPa	σ <sub>u</sub> , MPa	σ <sub>y</sub> 温度依存性
3B	3B-3-B-①	2.50	2.49	15	560	690	σ <sub>y</sub> = 471.05*EXP(54.826/(B6+273.15))
	3B-3-B-②	2.51	2.51	16	571	701	
	3B-3-B-③	2.51	2.51	-30	590	733	
	3B-3-B-④	2.50	2.51	-30	607	747	
	3B-8-A-①	2.51	2.50	-60	606	752	
	3B-8-A-②	2.49	2.50	-60	604	745	
Steel B ※	B16	4.02		27	562	667	σ <sub>y</sub> = 412.17*EXP(90.032/(B6+273.15))
	B12	4.02		27	565	666	
	B13	4.03		150	500	630	
	B15	4.03		290	484	620	
	B14	4.02		-50	613	732	
	B17	4.03		-20	585	703	
	B18	4.03		-50	612	733	
	B19	4.02		-20	596	707	

※Steel B の数値は JAEA 既存データ

表 4.1.1-10 照射材の破壊靱性試験結果

材料	試験片 ID	温度, °C	B, mm	B <sub>N</sub> , mm	W, mm	a <sub>0</sub> , mm	K <sub>Jc</sub> , MPa√m	K <sub>Jc</sub> limit MPa√m	Validity
3B irr.	3B-4-A-1	-40	4.01	4.01	7.99	4.24	79	129	Rejection
	3B-4-A-2	-40	4.01	4.01	7.98	4.07	81	132	Rejection
	3B-9-A-1	-30	4.01	4.01	7.99	4.05	89	132	Rejection
	3B-9-A-2	-30	4.00	4.00	7.99	4.10	59	131	Rejection
	3B-13-A-2	-10	4.01	4.01	8.00	4.21	53	128	valid
	3B-10-B-1	-15	4.01	4.01	7.99	4.09	59	130	valid
	3B-9-B-1	-15	4.00	4.00	7.99	4.11	68	130	valid
	3B-10-B-2	-10	4.01	4.01	7.99	4.13	75	129	valid
	3B-13-A-1	-5	4.01	4.01	7.99	4.10	104	129	valid
	3B-9-B-2	-5	4.01	4.01	7.99	4.09	125	129	valid
Steel B irr.	B01	-60	3.97	3.97	8.00	3.85	55	143	Rejection
	B02	-50	4.00	4.00	8.02	3.93	41	140	valid
	B03	-40	4.00	4.00	8.00	4.37	138	131	Invalid
	B05	-50	4.00	4.00	8.00	4.31	98	134	valid
	B06	-50	4.00	4.00	8.00	4.38	75	132	valid
	B07	-50	4.00	4.00	8.00	4.13	64	137	valid
	B08	-50	4.00	4.00	8.00	4.32	87	134	valid
	B09	-50	4.00	4.00	8.00	4.32	108	134	valid
	B10	-45	4.00	4.00	8.00	4.39	73	132	valid
	B11	-45	4.00	4.00	8.00	4.36	102	132	valid

表 4.1.1-11 照射材の参照温度

材料	試験片形状	温度, °C	dK/dt, MPa√m/s	全データ数	有効データ数	参照温度 T <sub>0</sub> , °C	Validity of T <sub>0</sub>	σ, °C	ワイブル係数 m
3B	Mini-C(T)	-15~-5	0.5	10	6	34	Invalid	9.1	2.8
Steel B	PCCv※	-50	1.0	7	7	-24	Valid	8.2	2.0
	Mini-C(T)	-15~-40	0.5	10	8	-11	Valid	7.8	2.3

※Steel B の PCCv の数値は文献(4.1.1-3)

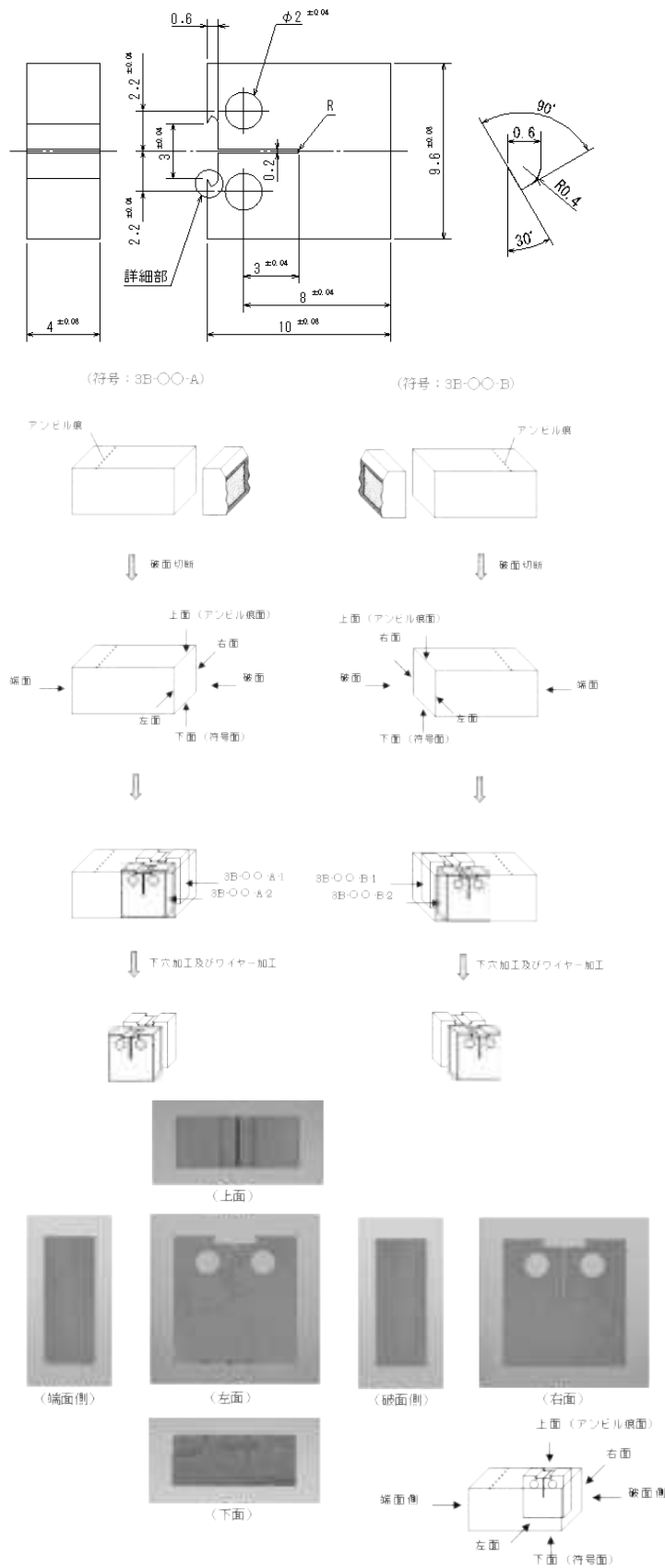


図 4.1.1-1 5B-A 及び 5B-B 材からの放電加工による Mini-C(T)試験片採取方法の模式図

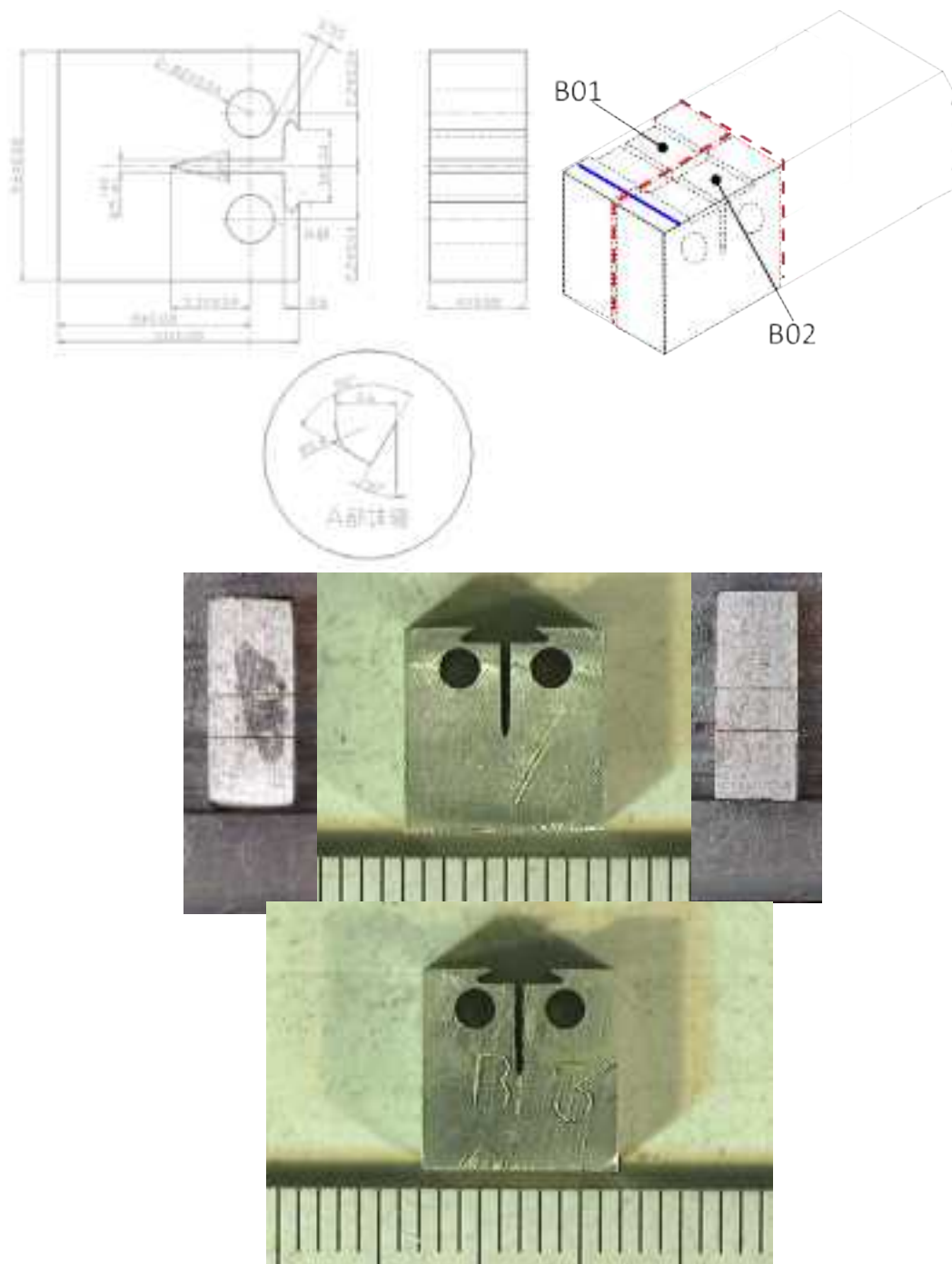
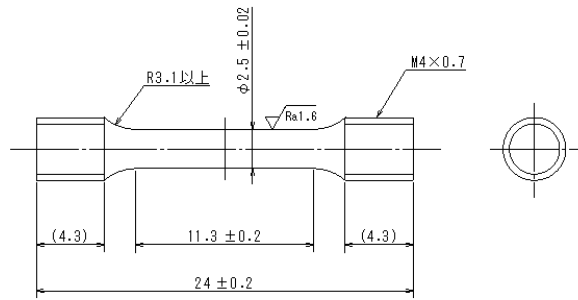
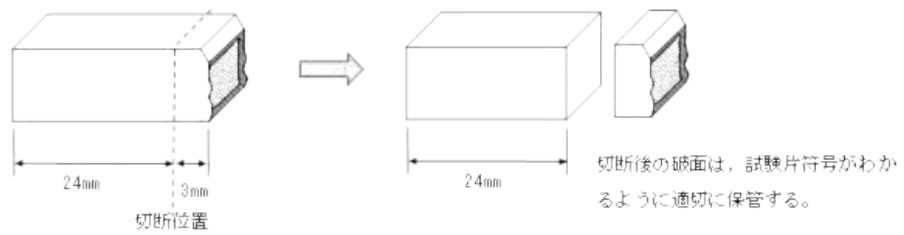


図 4.1.1-2 Steel B 材からのフライス盤による Mini-C(T)試験片採取方法の模式図

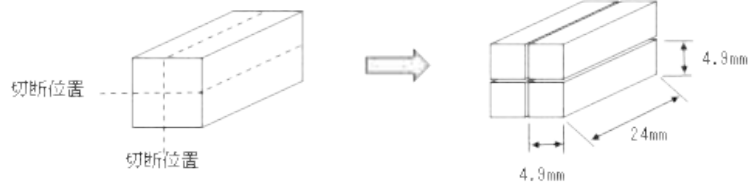


① 破面切断



② 4分割加工

ワイヤー放電加工装置にて4.9mm角に4分割



③ 引張試験片加工

速隔操作型旋盤を使用してセンター穴加工、外周加工、ネジ加工、平行部加工を行い、引張試験片を製作する。

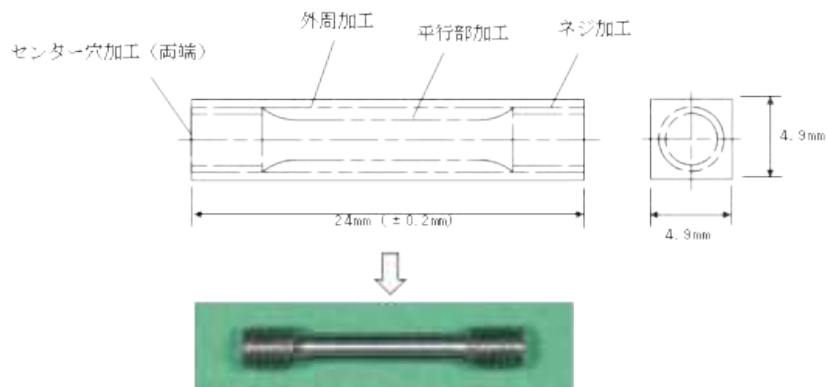


図 4.1.1-3 5B-A 及び 5B-B 材からの引張試験片採取方法の模式図

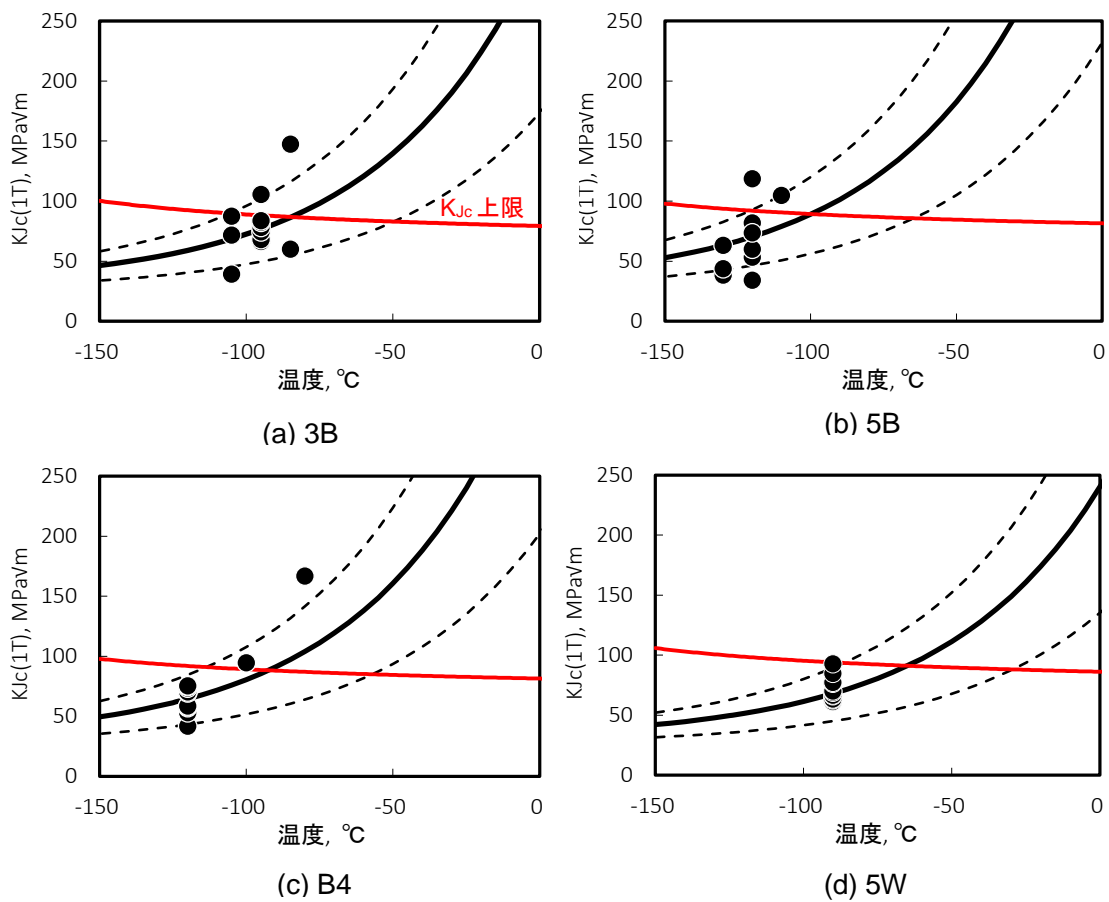


図 4.1.1-4 未照射保管材の破壊靱性試験結果

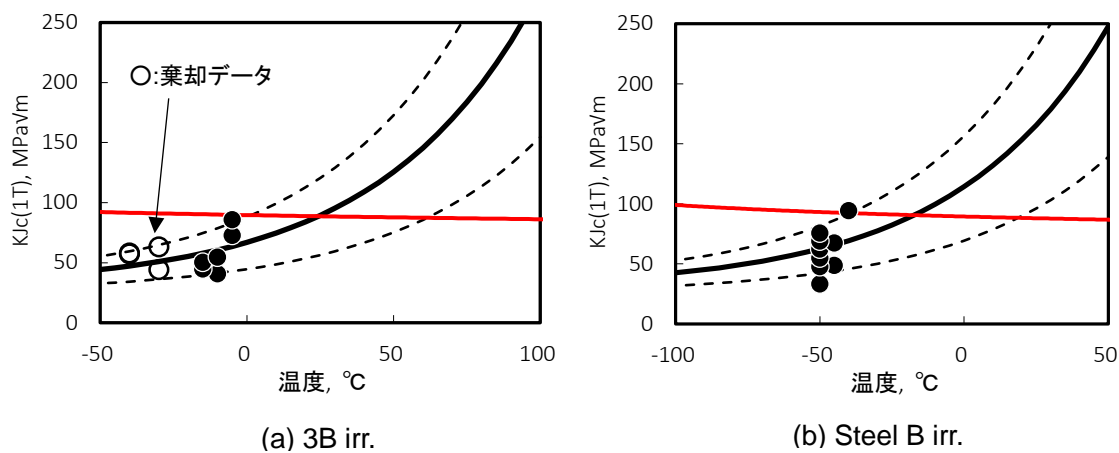


図 4.1.1-5 照射材の破壊靱性試験結果

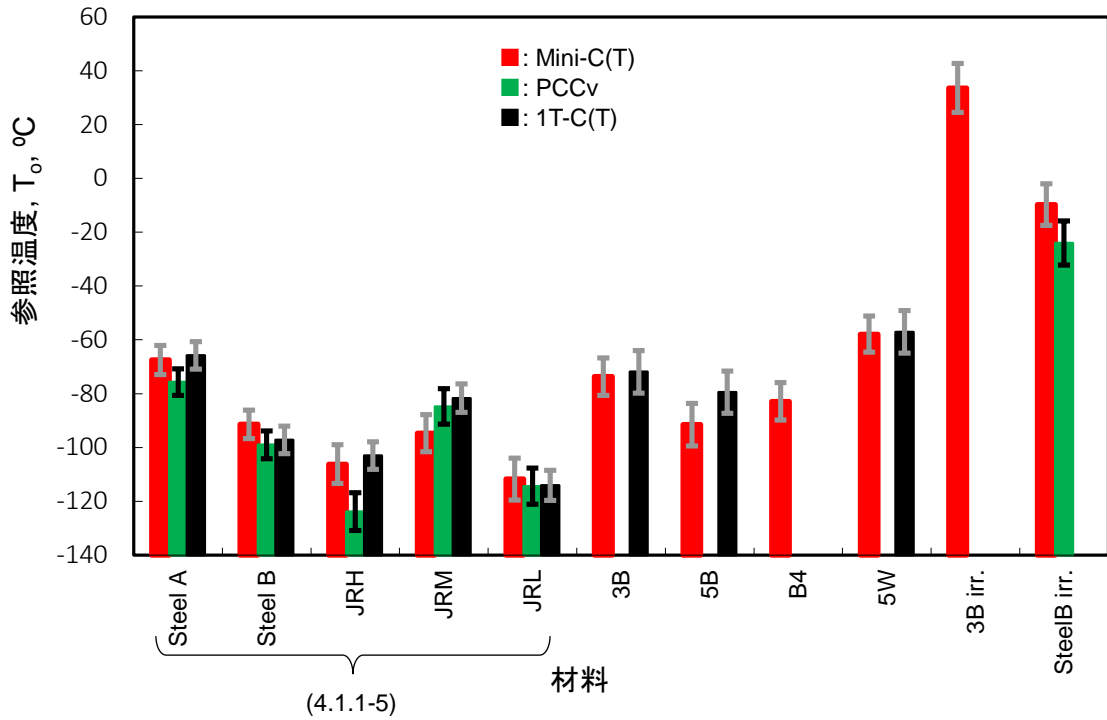


図 4.1.1-6 参照温度の比較

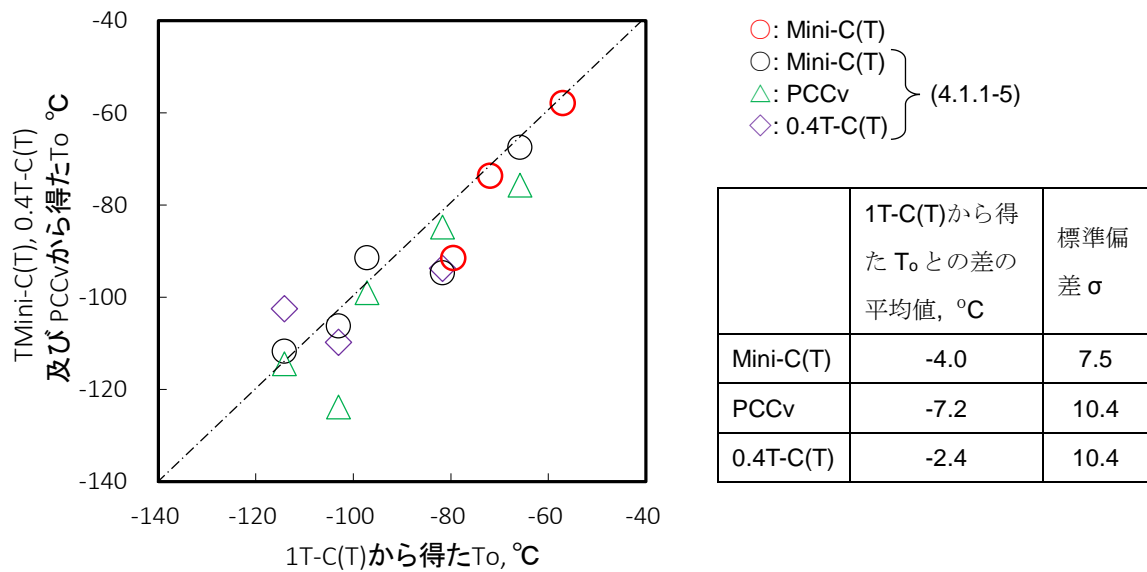


図 4.1.1-7 1T-C(T)に対する小型試験片の参照温度の比較

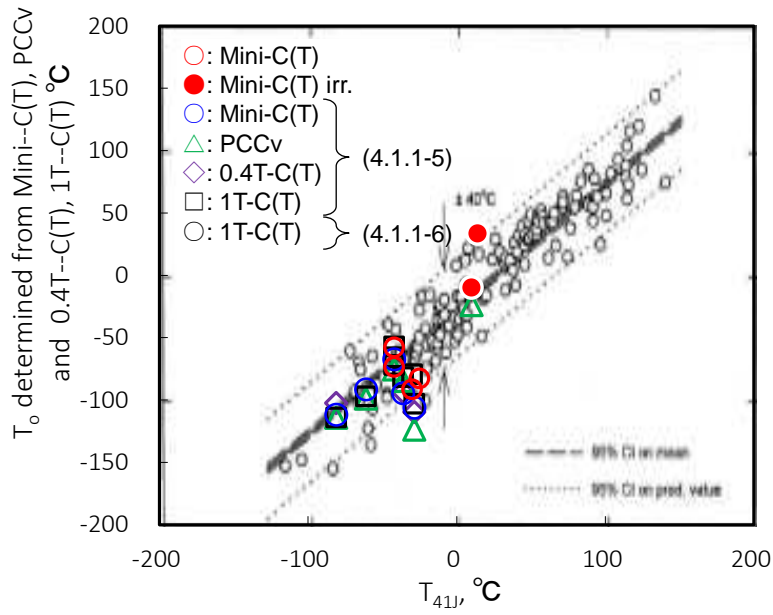


図 4.1.1-8 シャルピー遷移温度と参照温度の相関

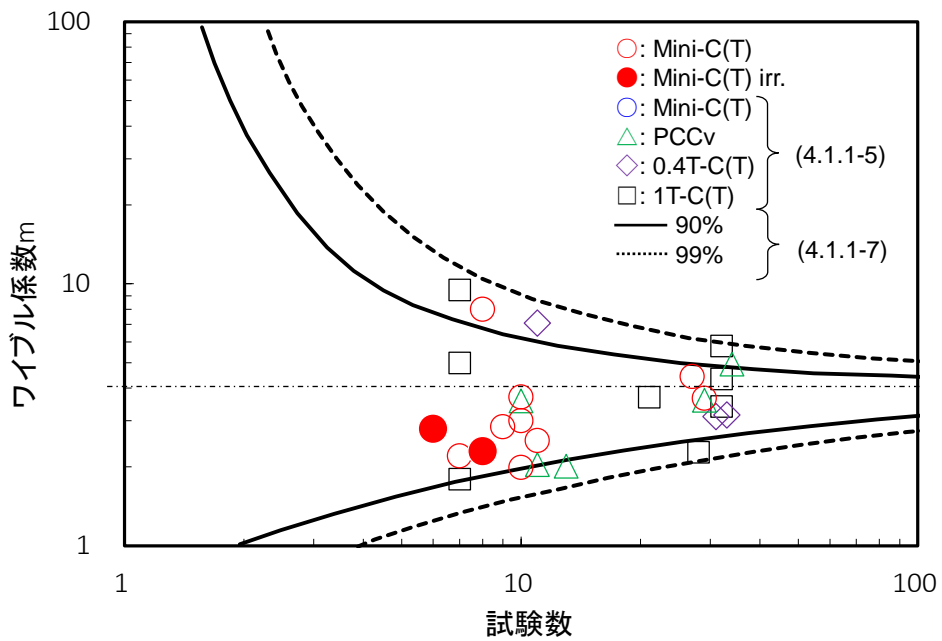


図 4.1.1-9 破壊靱性のばらつき(試験数とワイブル係数の関係)



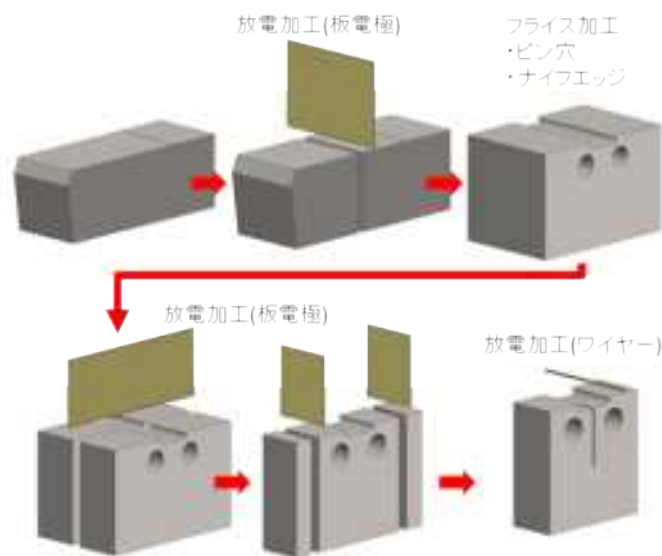


図 4.1.1-10 Mini-C(T)試験片外形加工手順

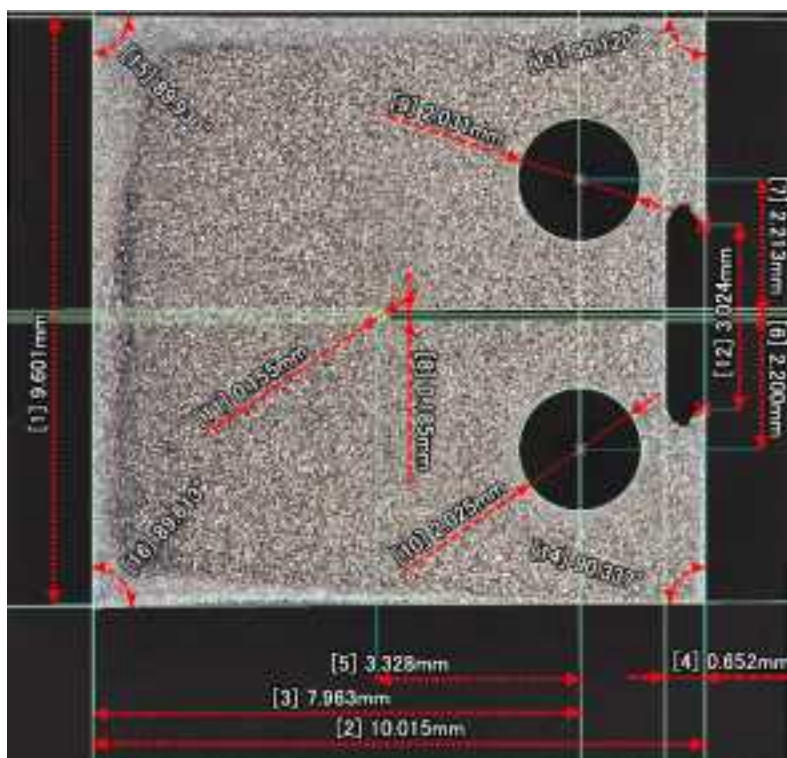


図 4.1.1-11 Mini-C(T)試験片寸法検査例

#### 4.1.2 高温予荷重(WPS)効果に関する試験

原子炉圧力容器の加圧熱衝撃(PTS)時における健全性評価において、今後導入される健全性判定基準の一つに高温予荷重(WPS)効果がある。これは、応力拡大係数が時間とともに減少する過程では、応力拡大係数が破壊靱性を上回っても脆性破壊が起こらないというものである。また再負荷時の WPS 効果についても研究報告がある[4.1.2.1-1~4]。未照射材については多くの研究報告があるが照射材の報告は少ない。

昨年度は、試験片寸法を変えて試験を実施し、WPS 効果の寸法依存性について調査した。本年度は、昨年度の試験で WPS 効果が明確に確認できなかった Mini-C(T)試験片と同程度の塑性域を 0.4 インチ厚 CT 試験片に与えて確認する。また、サイドグループ(SG)の有無が WPS 効果に与える影響、予荷重後の除荷の有無による影響を確認する。さらに 0.4T-C(T)試験片と Mini-C(T)試験片を用いて、除荷をしない波形である LCF (Load→Cooling→Fracture)が WPS 効果に与える影響を確認する。

また、実機の想定き裂(10 mm 深さ×60 mm 幅)における評価のためには、解析モデルを整備し、実験データをもとに解析により WPS 効果を評価する手法の整備が必要になる。本年度は、試験試験片寸法に依存しない WPS 効果の評価法の検討を目的として、有限要素解析(FEM)に基づいたワイブル応力を用いた評価法の検討するために、ローカルアプローチ(LA)法を用いた解析を行った。

##### 4.1.2.1 未照射材を用いた WPS 試験

###### (1) 供試材及び試験片

平成 25 年度、平成 26 年度に用いた PWR 比較標準材から、0.4 インチ厚及び 0.16 インチ厚 CT 試験片(0.4T-C(T)、Mini-C(T))を製作した。試験片採取方向は、き裂伝播方向が主圧延方向と一致するようにした。板厚方向の採取位置は、1/4T 近傍である(T: 供試材板厚)。

試験片の形状及び寸法を図 4.1.2.1-1 と図 4.1.2.1-2 に示す。試験実施前には以下の条件で疲労予き裂を導入した。

###### 疲労予き裂導入条件

- ・ 応力比 :  $R \leq 0.1$  (正弦波)
- ・ 導入初期の最大 K 値 :  $K_{\max} \leq 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$
- ・ 最終段階の最大 K 値 :  $K_{\max} \leq 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$   
(最終の疲労予き裂長さ 0.2 mm 以上)
- ・ 予き裂長さ : (0.4T-C(T)) 約 10 mm (目標)  
(Mini-C(T)) 約 4mm (目標)
- ・ 周波数 : 10~30 Hz

なお、本事業では表 4.1.2.1-1 に示す 4 ケースの WPS 効果確認試験を実施しているが、このうち、0.4T-C(T)試験片を用いるケース 2 及びケース 3 の試験片は SG 有りとし、ケース 1 の試験片は平成 26 年度の Mini-C(T)試験片と同様に SG 無しとした。SG の加工は、疲労予き裂導入後に実施した。

製作した試験片の寸法は、すべて JEAC 4216-2011<sup>[4.1.2.1-5]</sup>の規格寸法を満足していることを確認した。合計 32 体の試験片を製作し、各試験条件に 8 体ずつ供した。

## (2) WPS 試験条件

本年度の WPS 効果確認試験では、平成 26 年度の試験結果をもとに、試験片形状及び荷重-温度履歴が WPS 効果に与える影響を確認するために、表 4.1.2.1-1 に示す 4 ケースの条件で試験を実施した。各ケースの条件設定理由を以下に示す。

### ① ケース 1

試験片寸法が WPS 効果に及ぼす影響の確認を目的とした平成 26 年度の WPS 効果確認試験では、1T-C(T)試験片及び 0.4T-C(T)試験片の試験では WPS 効果が明確に認められたが、Mini-C(T)試験片の試験では WPS 効果が明確には認められなかった<sup>[4.1.2.1-6]</sup>。

この要因を検討するために、各試験片に対して予荷重後の除荷の状態を FEM で解析した。解析結果の相当塑性ひずみコンター図を図 4.1.2.1-3 に示す。なお、同図で着色した領域は、材料が降伏するレベルである 0.1%以上の相当塑性ひずみが発生している部分を示す。この解析結果より、Mini-C(T)試験片では、他の試験片と比較して、リガメントの大部分が降伏していることがわかった。この塑性域の広がり Mini-C(T)試験片を用いた試験において WPS 効果が明確に認められなかった一因として考えられる。また、試験片中央断面に沿った相当塑性ひずみ分布及び残留応力分布を図 4.1.2.1-4 に示す。Mini-C(T)試験片のき裂先端近傍では、比較的大きな相当塑性ひずみと圧縮の残留応力が生じているが、圧縮場となっている領域は他の寸法の試験片の場合と比べて小さい。き裂開口を抑制する圧縮場が小さいことも一因として考えられる。

以上の検討より、Mini-C(T)試験片を用いた試験において WPS 効果が明確でなくなる要因として、き裂先端近傍の「塑性域寸法」と「残留応力分布」の二つの違いが考えられる。

本年度は塑性域寸法に着目し、0.4T-C(T)試験片で Mini-C(T)試験片と同様の状況を再現できるか(WPS 効果が明確に認められなくなることが Mini-C(T)試験片に特有の事象であるか)確認するために、予荷重条件の  $K_{JWPS}$  を平成 26 年度の Mini-C(T)試験片と同様に  $K_{Jc(limit)}$  に近いレベル( $K_{JWPS}/K_{Jc(limit)} \doteq 0.86$ )に設定した。なお、試験片は平成 26 年度の Mini-C(T)試験片を模擬するために、SG 無しとした。

設定した予荷重レベル  $K_{JWPS}$  が適切かどうか判断するため、Mini-C(T)試験片(SG 有り)及び 0.4T-C(T)試験片(SG 有り及び SG 無し)を対象に、予荷重付与後の塑性ひずみと残留応

力の分布を確認するための FEM 弾塑性解析を実施した。予荷重を付与し除荷した後の相当塑性ひずみコンター図を図 4.1.2.1-5 に示す。この図より、表 4.1.2.1-1 に示す条件で予荷重を付与すれば、試験片寸法に対する相対的な塑性域の広がり平成 26 年度の Mini-C(T)試験片と同程度となることが確認できた。

ケース 1 の WPS 波形は図 4.1.2.1-6 に示す Load→Unload→Cooling→Fracture (LUCF) とした。

## ② ケース 2

SG 有無が WPS 効果へ及ぼす影響が無いことを確認するため、ケース 1 と同様の WPS 波形で、SG 有りの 0.4T-C(T)試験片を用いて試験を実施した。本ケースは後述するローカルアプローチ解析における検証を主目的として実施したものである。

なお、WPS 波形はケース 1 と同様に LUCF とした。

## ③ ケース 3、4

平成 26 年度に 0.4T-C(T)及び Mini-C(T)試験片を用いて実施した LUCF の WPS 効果確認試験に対して、本年度は Load→Cooling→Fracture(LCF)の試験を実施した。なお、試験片については平成 26 年度と同様に SG 有りの 0.4T-C(T)試験片及び SG 無しの Mini-C(T)試験片を用いた。

ケース 3、4 の WPS 波形を図 4.1.2.1-7 に示す。

ケース 1～ケース 4 のいずれの試験についても、油圧サーボ試験機に恒温槽を取り付け、槽内に液体窒素を噴霧することで冷却し、試験片に取り付けた熱電対で温度を管理した。冷却速度は 3°C/min とした。試験温度に到達後、30 分の温度保持を経て予荷重及び再負荷を開始した。なお、予荷重及び再負荷は変位制御による負荷とした。また、ケース 3 及び 4 では、予荷重を付与した後に荷重制御に切り替え、予荷重時の最大荷重を保持したまま冷却を実施した。再負荷の際には、再び変位制御に切り替え、試験を実施した。

表 4.1.2.1-1 平成 27 年度の WPS 効果確認試験マトリクス

ケース	負荷 パターン	試験片寸法	サイト グループ 有無	予荷重			再負荷	試験数	備考(目的)
				温度 (°C)	K <sub>JWPS</sub> (MPa√m)	目標 開口変位 (mm)	温度 (°C)		
ケース 1	LUCF	0.4T-C(T)	無	0	160* <sup>1</sup>	0.59	-120* <sup>2</sup>	8	K <sub>Jc(limit)</sub> に対する K <sub>JWPS</sub> の比を平成 26 年度の Mini-C(T)試験片と同等のレベルとする。(WPS 効果が明確に認められなくなることの確認)
ケース 2	LUCF	0.4T-C(T)	有	0	160* <sup>1</sup>	0.52	-120* <sup>2</sup>	8	ケース①との比較(SG の影響確認)
ケース 3	LCF	0.4T-C(T)	有	-50	110	0.29	-160	8	平成 26 年度の 0.4T-C(T)、 Mini-C(T)試験片の結果 (LUCF)との比較(負荷パターンの影響)
ケース 4	LCF	Mini-C(T)	無	-50	110		-160	8	

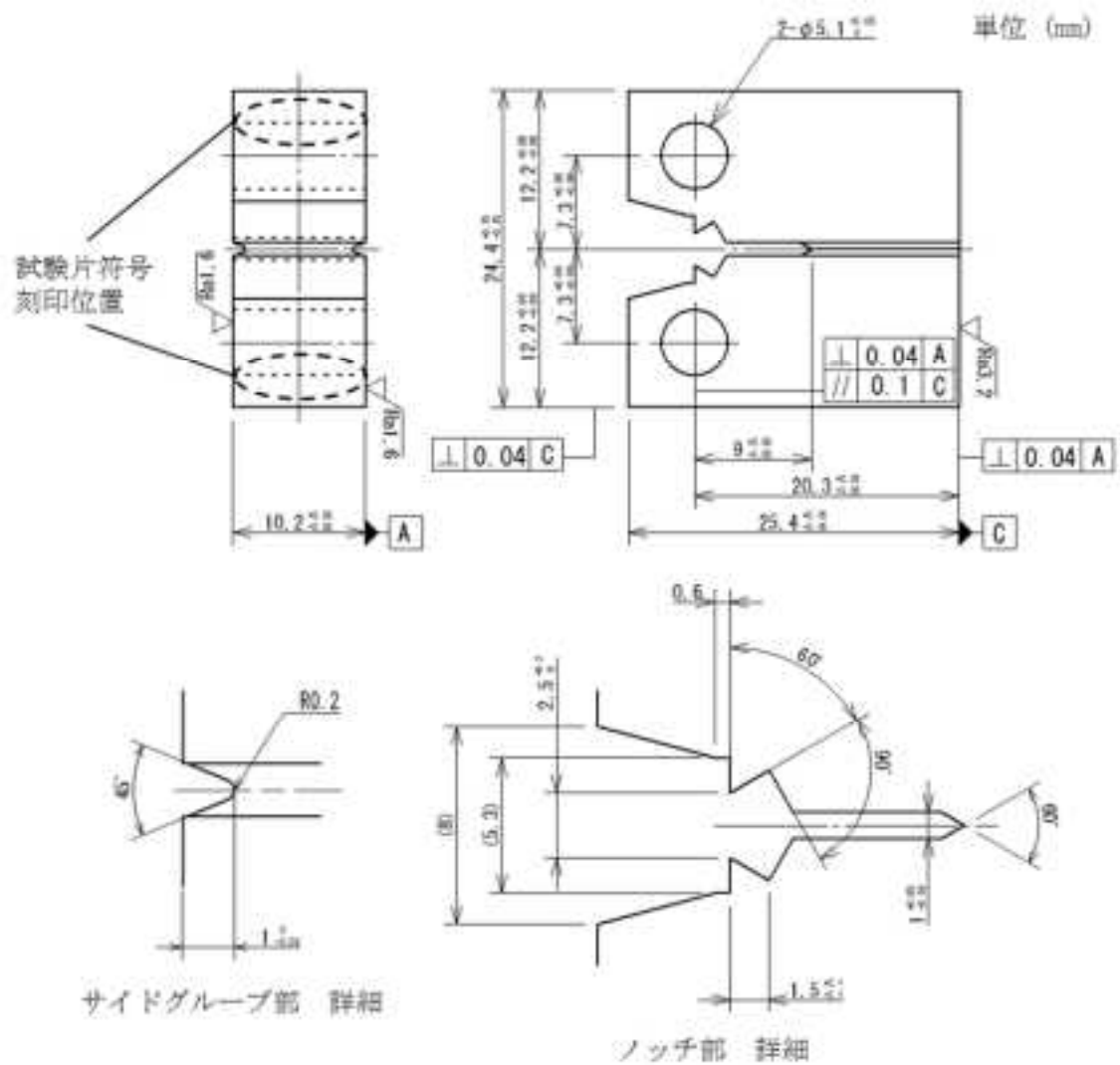


図 4.1.2.1-1 0.4T-C(T)試験片の形状及び寸法  
(ケース 1 で使用するものには SG は加工しない)

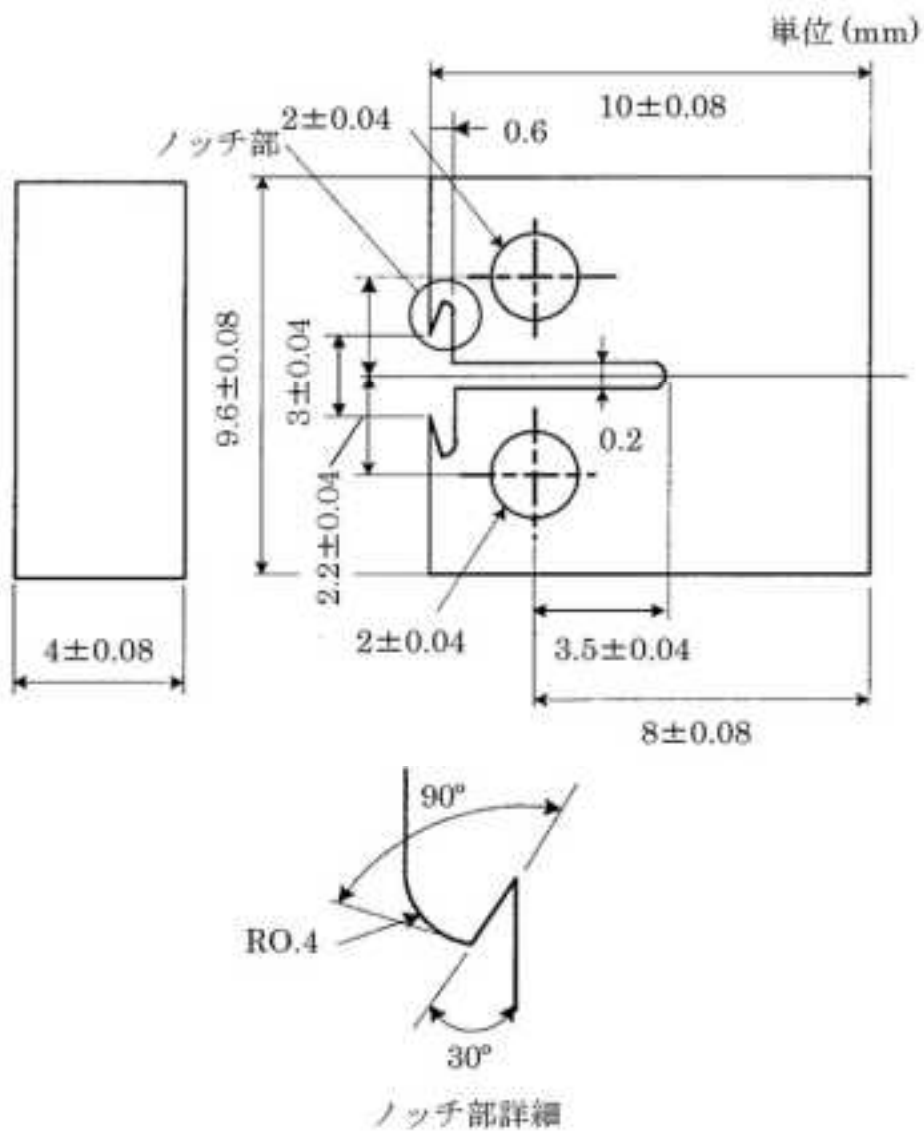


図 4.1.2.1-2 Mini-C(T)試験片の形状及び寸法

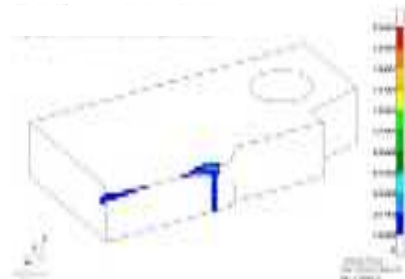
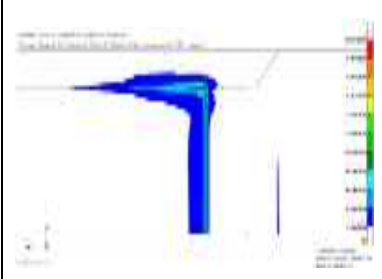
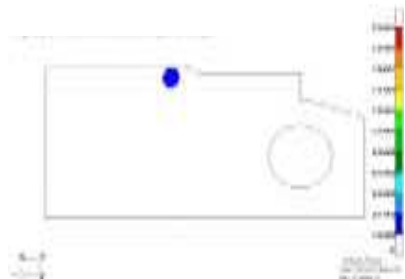
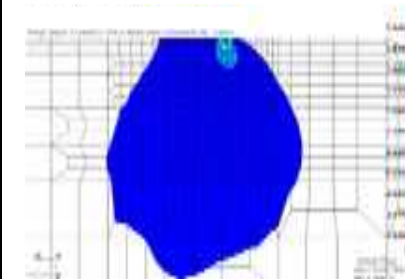
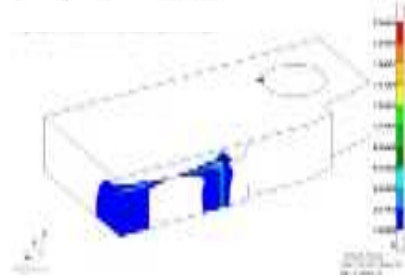
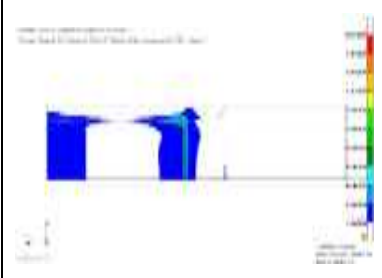
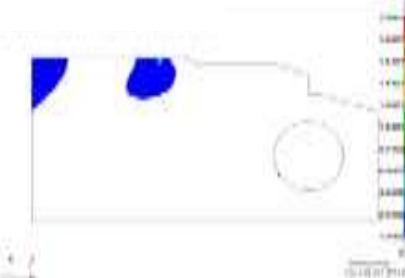
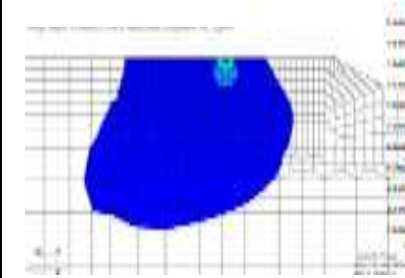
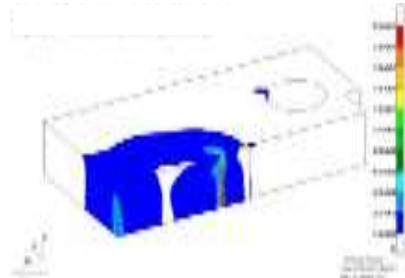
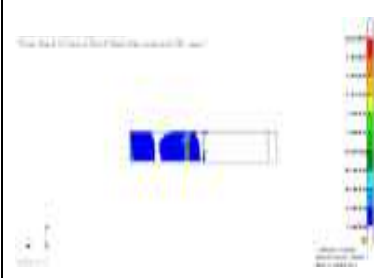
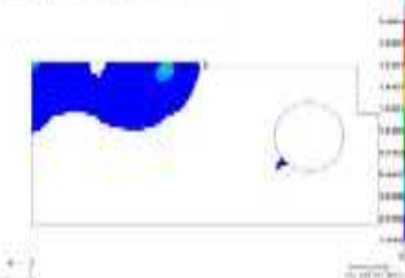
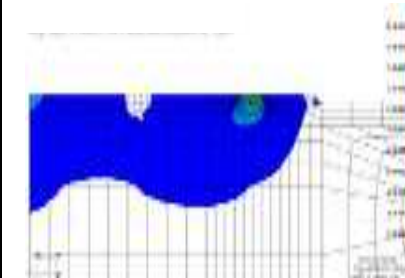
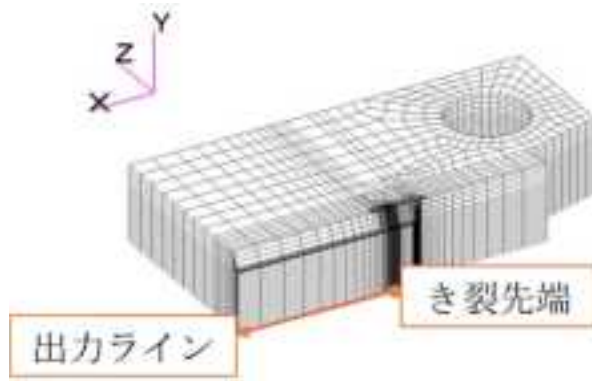
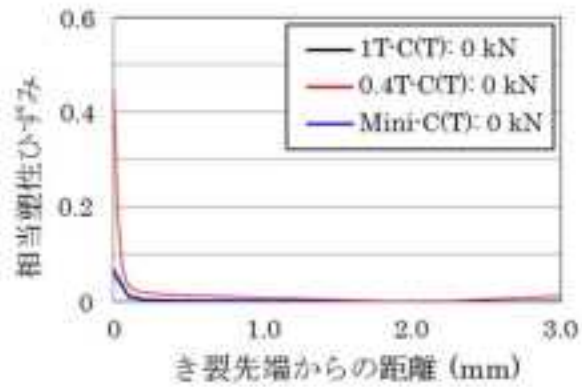
試験片種類	予荷重温度 (°C)	$K_{JWPS}$ (MPa√m)	試験片全体	き裂面	板厚中央断面 (試験片全体)	板厚中央断面 (拡大、き裂先端部同一領域)
1T-C(T) 試験片 (SG 有)	-50	110				
0.4T-C(T) 試験片 (SG 有)	-50	110				
Mini-C(T) 試験片 (SG 無)	-50	110				

図 4.1.2.1-3 平成 26 年度の WPS 効果確認試験における予荷重後の相当塑性ひずみ分布状況の比較

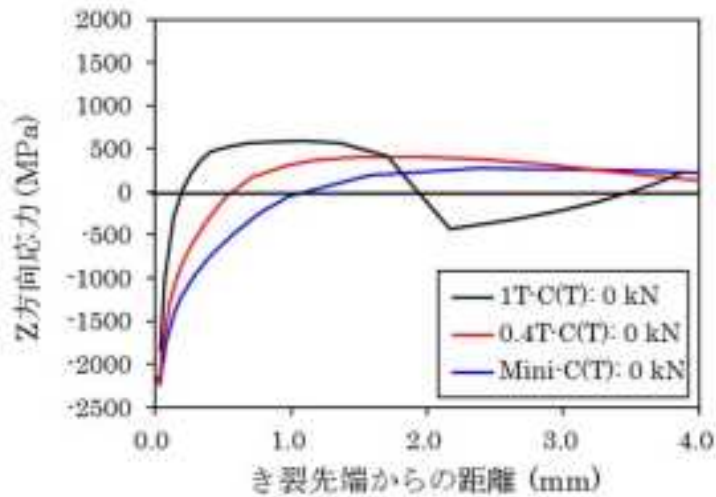




a) 出力位置 (1T-C(T)試験片モデルの場合)



b) 相当塑性ひずみ分布



c) き裂開口方向残留応力分布

図 4.1.2.1-4 平成 26 年度の WPS 効果確認試験における予荷重後の  
き裂先端部の相当塑性ひずみ分布及び残留応力分布

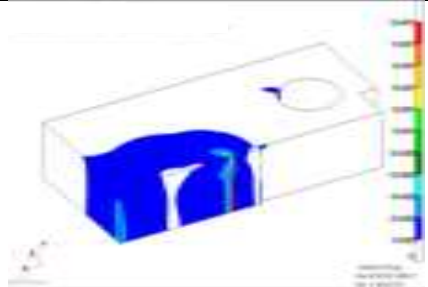
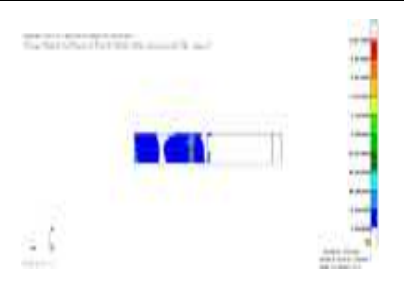
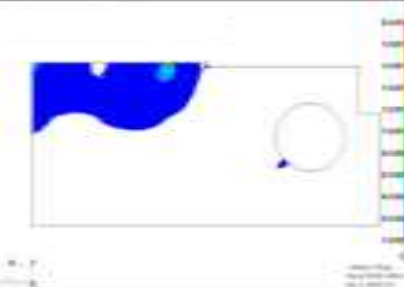
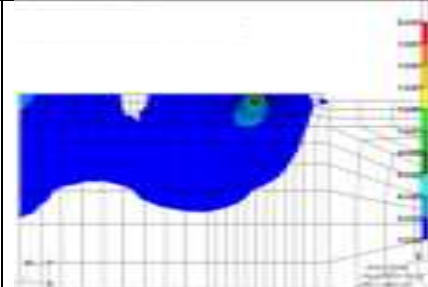
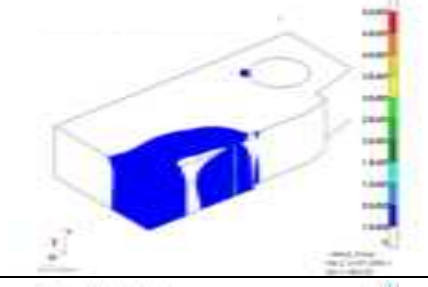
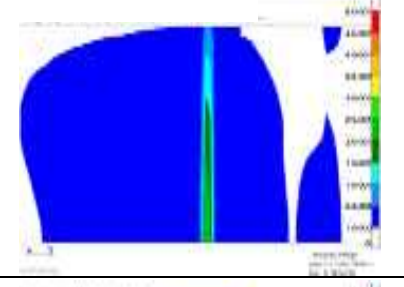
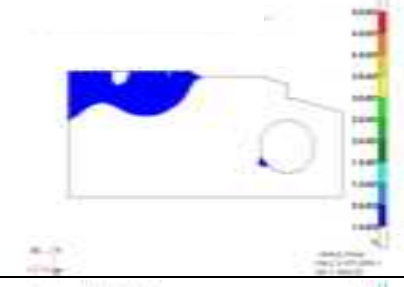
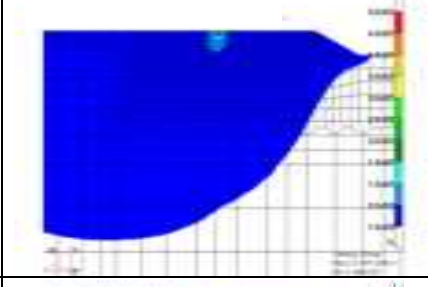
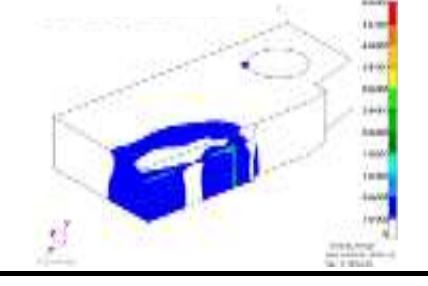
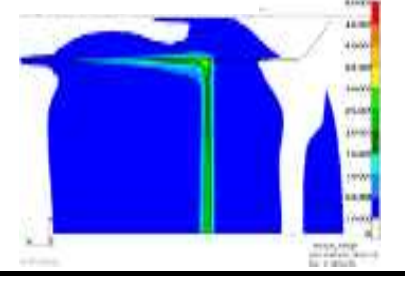
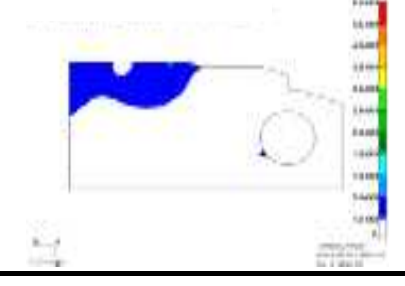
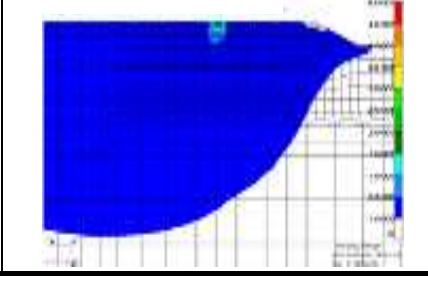
試験片種類	予荷重温度 (°C)	$K_{JWPS}$ (MPa√m)	試験片全体	き裂面	板厚中央断面 (試験片全体)	板厚中央断面 (拡大、き裂先端部同一領域)
Mini-C(T) 試験片 (SG 無)	-50	110				
0.4T-C(T) 試験片 (SG 無)	0	160				
0.4T-C(T) 試験片 (SG 有)	0	160				

図 4.1.2.1-5 ケース 1 及びケース 2 の WPS 効果確認試験における予荷重後の相当塑性ひずみ分布状況の比較

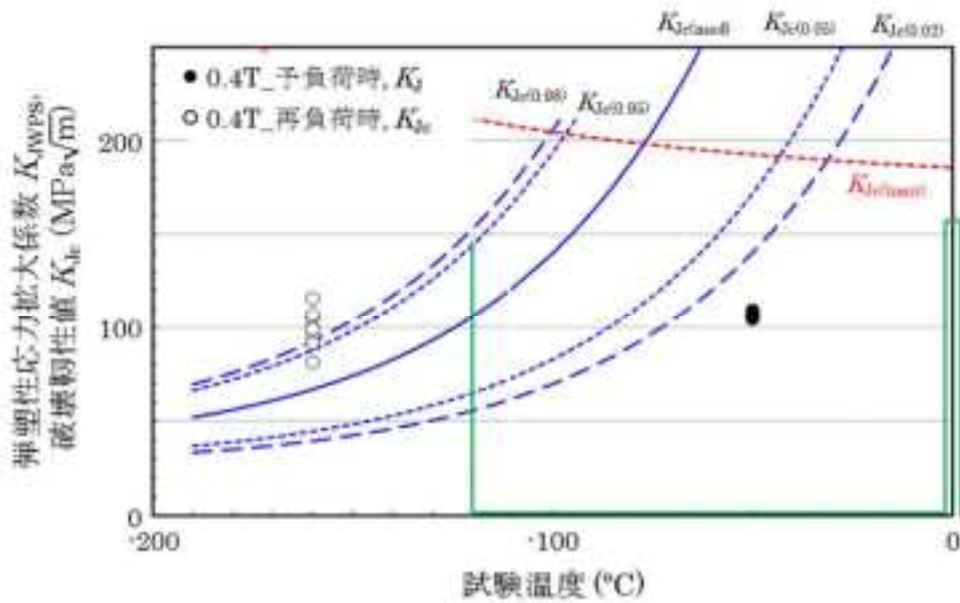


図 4.1.2.1-6 0.4T-C(T)試験片を用いた平成 26 年度の WPS 効果確認試験結果(LUCF)と平成 27 年度試験条件(LUCF)(ケース 1 及びケース 2)

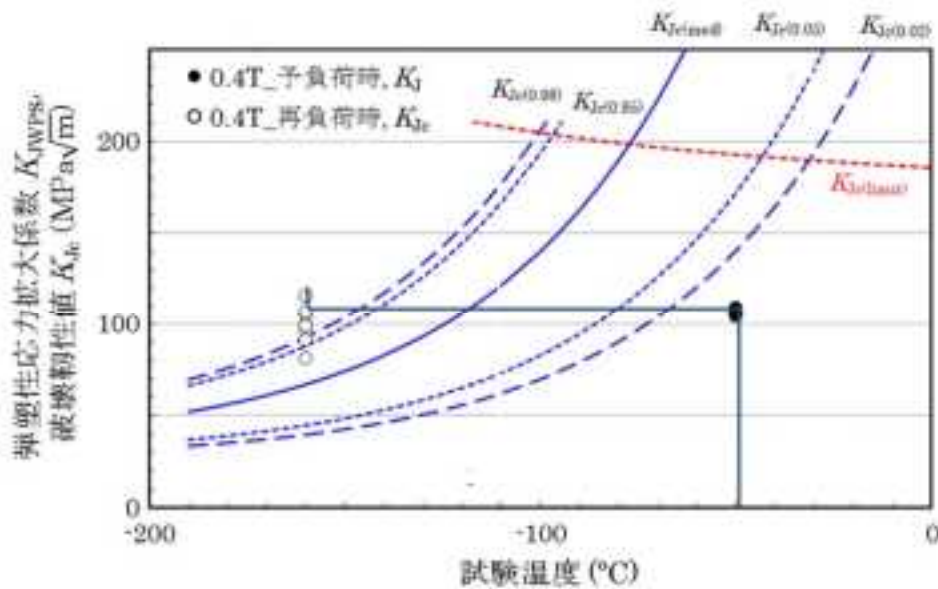


図 4.1.2.1-7 0.4T-C(T)試験片を用いた平成 26 年度 WPS 効果確認試験結果(LUCF)と平成 27 年度試験条件(LCF)(ケース 3 及びケース 4)

### (3) WPS 試験結果

ケース 1～ケース 4 の荷重-開口変位の関係を図 4.1.2.1-8 に示す。ここで、図 4.1.2.1-8 (3/4)、(4/4)に示したケース 3、ケース 4 の荷重-開口変位の関係においては荷重保持冷却中の試験片の収縮による開口変位の変化分を除いた。開口変位は、予め取得した温度と開口変位の関係を用いて低温時のクリップゲージの出力を補正し、予荷重及び再負荷開始時の開口変位が 0 mm となるようオフセットして負荷を開始した。

図 4.1.2.1-8 に示すように、各ケースの荷重-開口変位関係は試験片によらず、同様の挙動を示した。全ての試験において再負荷時の荷重は予荷重時の最大荷重を上回っていた。

試験片の破面外観を図 4.1.2.1-9 に、き裂長さの測定結果を表 4.1.2.1-10 に示す。き裂長さ  $a_0$  は、JEAC 4216-2011<sup>[4.1.2.1-5]</sup>に基づき破面開放後に測定した疲労予き裂長さ  $a_f$  の平均値にノッチ長さ  $a_n$  を加算して算出した。Mini-C(T)試験片を用いたケース 4 では破面開放後に図 4.1.2.1-10 に示した測定長平均値  $g_0$  と、図 4.1.2.1-11 に示した長さ C、D、G (mm)を用いて式(4.1.2.1-1)により  $a_0$  を求めた。

$$a_0 = g_0 - (C - G - D) \quad (4.1.2.1-1)$$

疲労予き裂の形状は、SG を加工しなかったケース 1 の試験片 2 体を除いて、規格に記載された要求条件を満足していた。破面は、全ての試験片で脆性破壊の様相を呈しており、疲労予き裂の先端部に顕著な延性き裂成長は認められなかった。

予荷重時の  $K_{JWPS}$  及び破壊時の破壊靱性値  $K_{Jc}$  は、それぞれの最大荷重及び荷重-開口変位関係を用いて、以下に示す式(4.1.2.1-2)～式(4.1.2.1-5)より求めた。

$$K_{Jc} = \sqrt{J_c \frac{E}{1-\nu^2}} \quad (4.1.2.1-2)$$

$$J_c = J_e + J_p \quad (4.1.2.1-3)$$

$$\text{J 積分の弾性成分: } J_e = \frac{(1-\nu^2)K_e^2}{E} \quad (4.1.2.1-4)$$

$$\text{J 積分の塑性成分: } J_p = \frac{\eta \cdot A_p}{B_N \cdot b_0} \quad (4.1.2.1-5)$$

$$K_e = \left[ \frac{1000P}{(BB_N W^2)^{1/2}} \right] f\left(\frac{a_0}{W}\right) \quad (4.1.2.1-6)$$

$$f\left(\frac{a_0}{W}\right) = \frac{\left(2 + \frac{a_0}{W}\right)}{\left(1 - \frac{a_0}{W}\right)^{3/2}} \left[ 0.886 + 4.64 \left(\frac{a_0}{W}\right) - 13.32 \left(\frac{a_0}{W}\right)^2 + 14.72 \left(\frac{a_0}{W}\right)^3 - 5.6 \left(\frac{a_0}{W}\right)^4 \right]$$

ここで、

- E : ヤング率(MPa)
- $\nu$  : ポアソン比(0.3 を使用)

- $\eta$  :  $\eta=2+0.522(b_0/W)$
- P : 荷重(kN)
- W : 試験片幅(m)
- B : 試験片板厚(m)
- $B_N$  : サイドグループ底での試験片板厚(m)
- $b_0$  : 初期のリガメント(=W· $a_0$ )
- $a_0$  : 初期のき裂長さ(m)
- $A_e$  :  $1/2C_0P^2$
- $C_0$  : 荷重・変位の弾性域の傾きの逆数
- $A_p$  :  $A_p=A \cdot A_e$
- A : 荷重－変位線図下の面積

試験結果を表 4.1.2.1-3 に示す。なお、ヤング率は JEAC 4216-2011<sup>[4.1.2.1-5]</sup>の解説 MCT-1300 に示される材料グループ A に対する温度依存性の式  $E(\text{MPa})=202100-62.6T(^{\circ}\text{C})$  より算出した。試験結果とマスターカーブの関係をケース毎に図 4.1.2.1-12 に示す。図 4.1.2.1-12(1/3)には SG の有無の違いによる WPS 効果の差を確認するためケース 1 とケース 2 の結果を記載した。両ケースとも WPS 効果は認められず、SG の有無による違いも認められなかった。これは予荷重条件の  $K_{WPS}$  を昨年度の試験より高く設定したことで塑性域が拡大し、WPS 効果が得られなかったと考えられる。

ケース 3、ケース 4 の試験結果を図 4.1.2.1-12 (2/3)及び図 4.1.2.1-12 (3/3)に示す。なお、比較のために LUCF の結果として平成 26 年度に実施した 0.4T-C(T)試験片の結果を同時に示している<sup>[4.1.2.1-6]</sup>。なお、再負荷時の  $K_{Jc}$  を 2 種類のプロットで表示しているが、これらは評価の方法が異なる。図 4.1.2.1-13 にその評価方法の違いを示す。ASTM 法では、破壊靱性  $K_{Jc}$  を評価する際に、荷重・開口変位関係より求める面積  $A_{pl}$  を算出するが、この  $A_{pl}$  とする範囲が異なる。図 4.1.2.1-13 (1/2)では予荷重時と再負荷時の面積を合わせて評価しており、図 4.1.2.1-13 (2/2)では再負荷時のみの面積を ASTM E1820 のコンプライアンスを計算する式(4.1.2.1-7)を用いて弾性域を仮定することで評価している。

$$C = \frac{1}{EB_e} \left( \frac{W+a_0}{W-a_0} \right)^2 \left[ 2.1630 + 12.219 \left( \frac{a_0}{W} \right) - 20.065 \left( \frac{a_0}{W} \right)^2 - 0.9925 \left( \frac{a_0}{W} \right)^3 + 20.609 \left( \frac{a_0}{W} \right)^4 - 9.9314 \left( \frac{a_0}{W} \right)^5 \right] \quad (4.1.2.1-7)$$

ここで、

$$B_e = B \cdot \frac{(B-B_N)^2}{B}$$

なお、再負荷時のみの面積を評価する目的は、LUCF による  $K_{Jc}$  と整合を取るためである。また、文献で報告されている LCF に対する  $K_{Jc}$ <sup>[4.1.2.1-1]</sup>は、多くの場合、予荷重と再負

荷の面積を合算しているものと推測される。

ケース 3 及びケース 4 の再負荷時の  $K_{Jc}$  は、予荷重と再負荷の面積を合わせた評価ではマスターカーブの上限を上回っており、再負荷時のみの面積での評価の場合においてもマスターカーブの上限近傍に位置しており、いずれの評価においても WPS 効果が明確に認められた。ケース 4 では 26 年度に実施した LUCF で WPS 効果がみられなかったものの LCF では WPS 効果が認められる結果となった。

また、ケース 3 の再負荷時の  $K_{Jc}$  のばらつきは平成 26 年度の LUCF の  $K_{Jc}$  と比較して小さい傾向にあった。

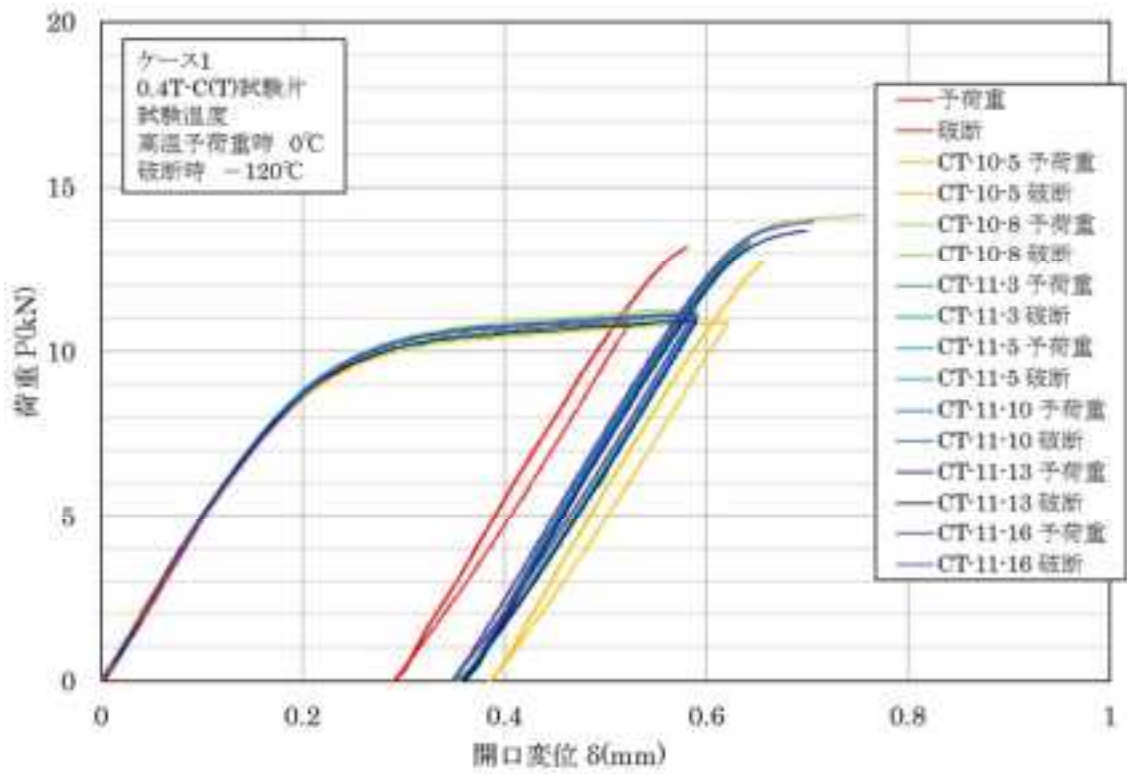


図 4.1.2.1-8 (1/4) 荷重-開口変位の関係 (ケース 1)

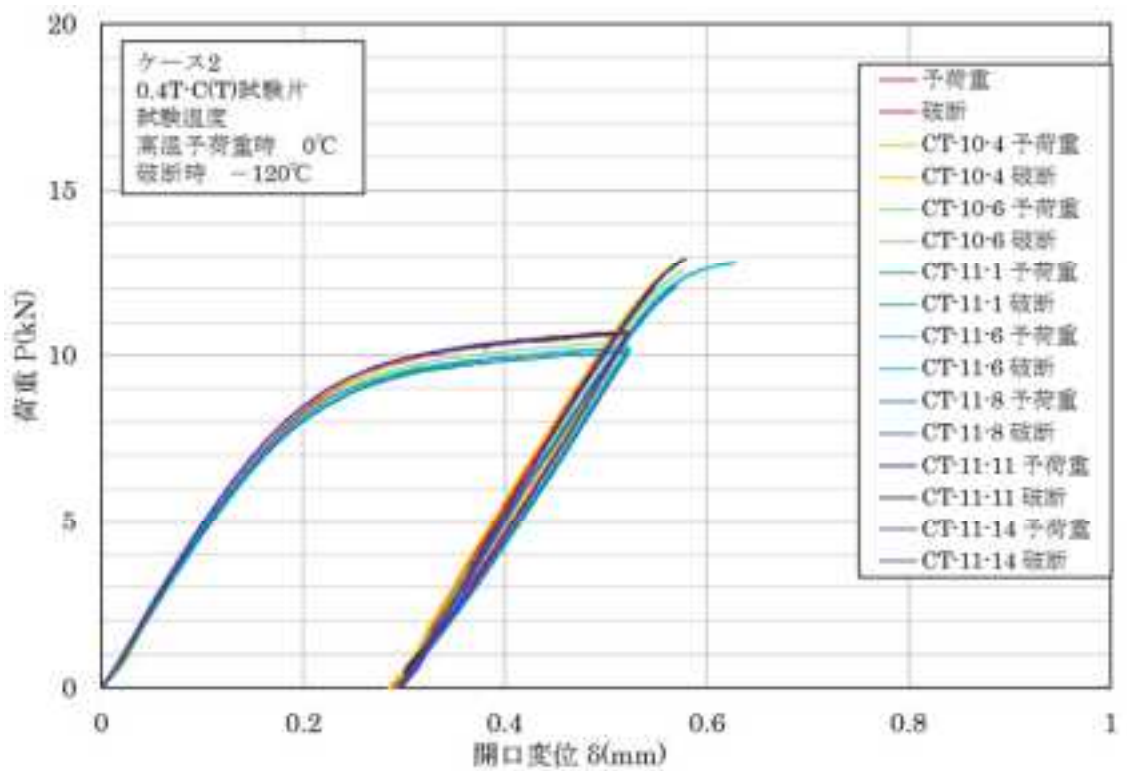


図 4.1.2.1-8 (2/4) 荷重-開口変位の関係 (ケース 2)

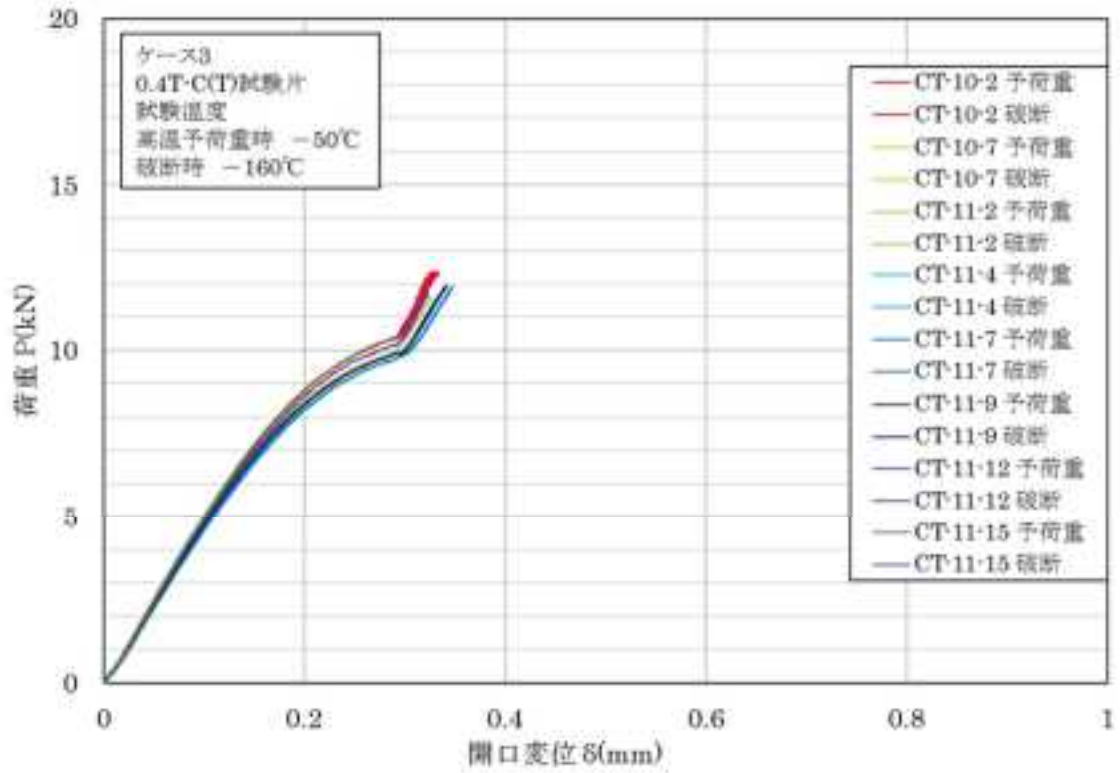


図 4.1.2.1-8 (3/4) 荷重-開口変位の関係 (ケース 3)

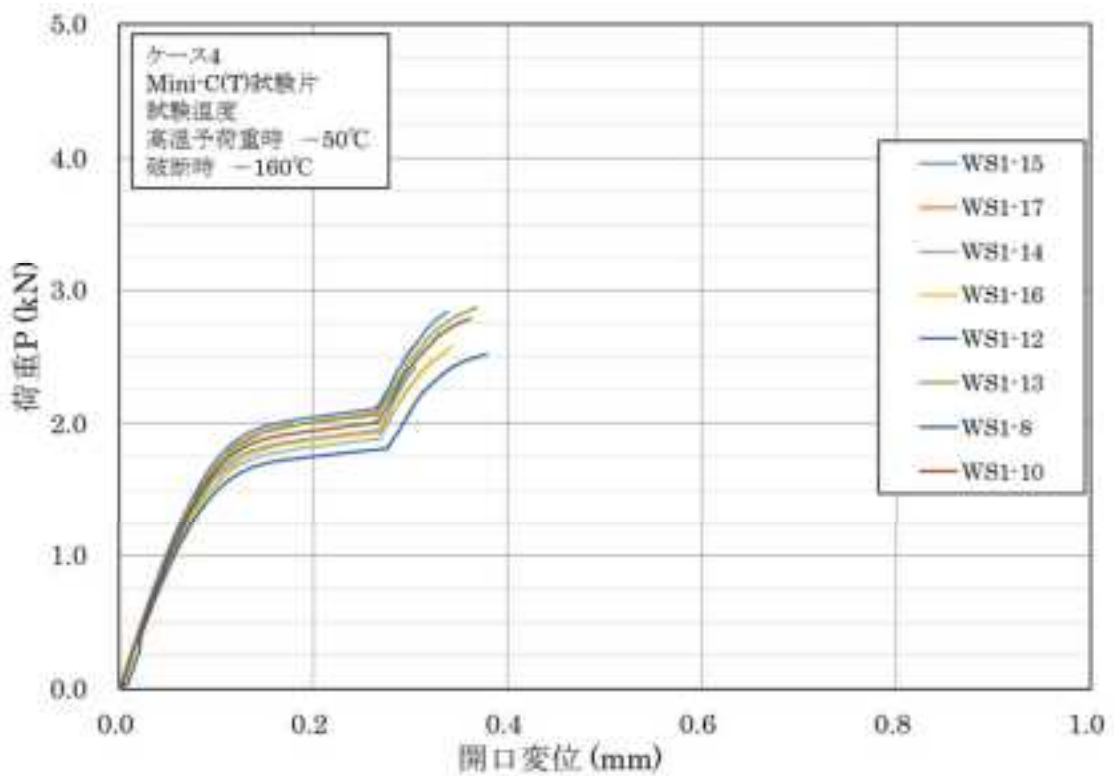


図 4.1.2.1-8 (4/4) 荷重-開口変位の関係 (ケース 4)



破面				
試験片 符号	CT-10-1	CT-10-4	CT-10-6	CT-11-1
破面				
試験片 符号	CT-11-6	CT-11-8	CT-11-11	CT-11-14

図 4.1.2.1-9 (1/4) 破面外観写真 (ケース 1)

破面				
試験片 符号	CT-10-1	CT-10-4	CT-10-6	CT-11-1
破面				
試験片 符号	CT-11-6	CT-11-8	CT-11-11	CT-11-14

図 4.1.2.1-9 (2/4) 破面外観写真 (ケース 2)

破面				
試験片 符号	CT-10-2	CT-10-7	CT-11-2	CT-11-4
破面				
試験片 符号	CT-11-7	CT-11-9	CT-11-12	CT-11-15

図 4.1.2.1-9 (3/4) 破面外観写真 (ケース 3)

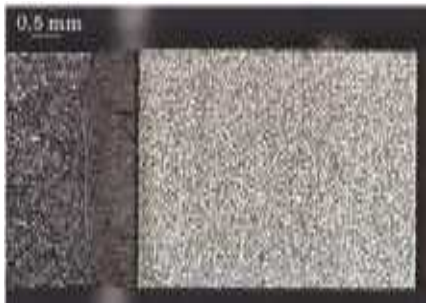
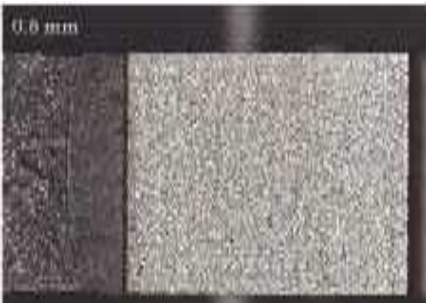
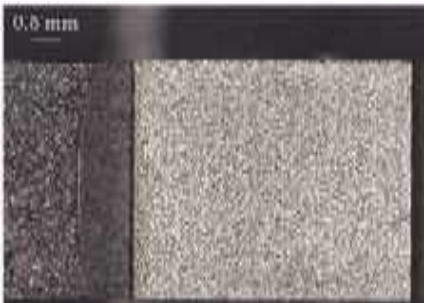
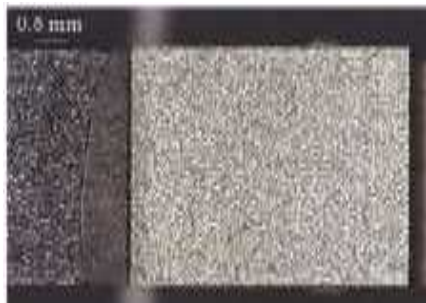

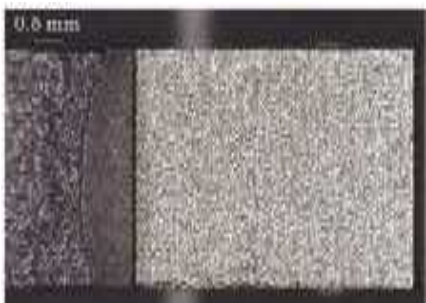
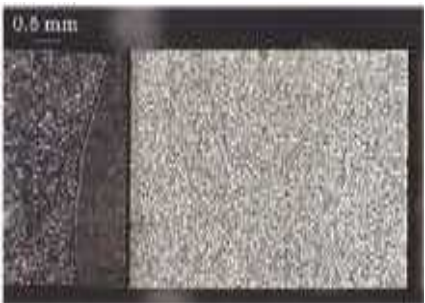
破面				
試験片 符号	WS1-15	WS1-17	WS1-14	WS1-16
破面				
試験片 符号	WS1-12	WS1-8	WS1-10	WS1-13

図 4.1.2.1-9 (4/4) 破面外観写真 (ケース 4)

き裂先端

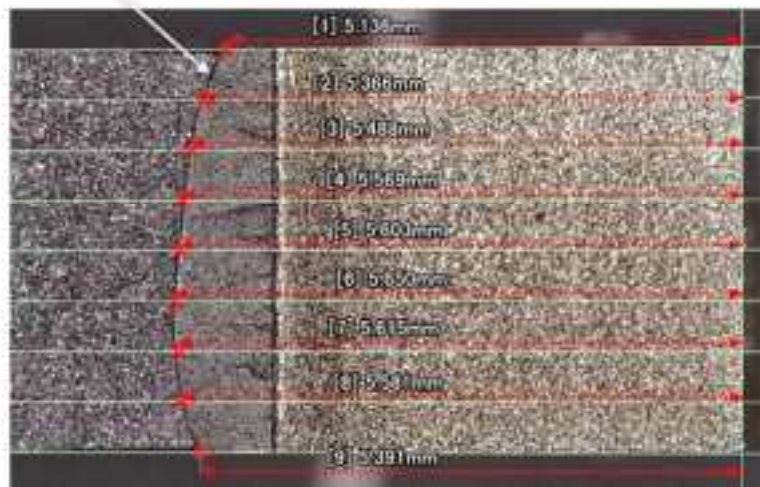


図 4.1.2.1-10 破面開放後のき裂長さ測定

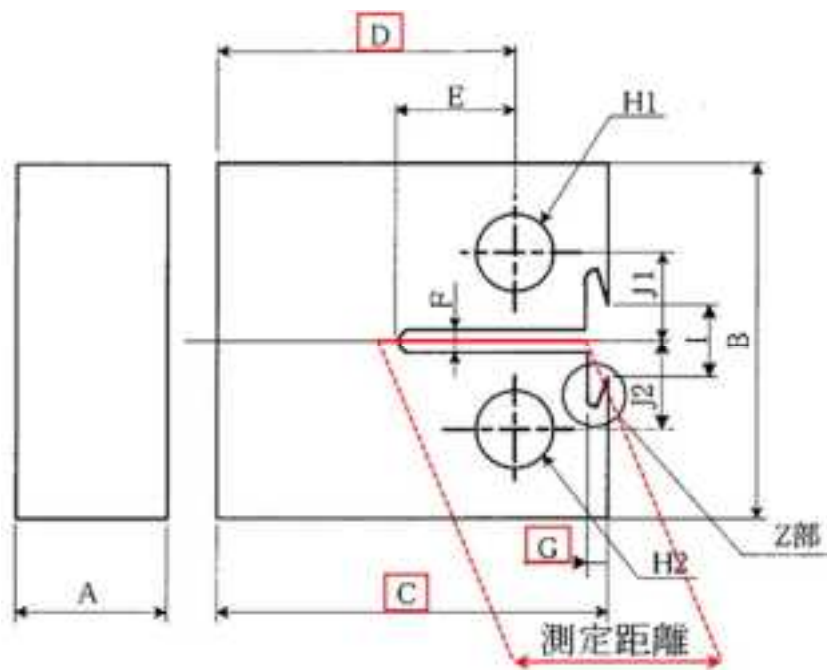


図 4.1.2.1-11 ケース 4 のき裂長さ算出法



表 4.1.2.1-3 (1/4) WPS 効果確認試験結果 (ケース 1)

(a) 予荷重時

試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状				最大荷重 P (kN)	弾性J J <sub>e</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	塑性J J <sub>p</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	J <sub>c</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	弾性分 K <sub>e</sub> (MPa√m)	破壊靱性 K <sub>Jc</sub> (MPa√m)	1T相当破壊靱性 K <sub>Jc(1T)</sub> (MPa√m)
		幅 W	厚さ B	正味厚さ B <sub>N</sub>	き裂長さ a <sub>0</sub>							
CT-10-3	0	20.31	10.22	10.22	10.81	10.92	29.0	70.7	99.7	80.3	<b>148.8</b>	122.6
CT-10-5	0	20.32	10.23	10.23	10.82	10.91	28.9	94.5	123.4	80.1	<b>165.6</b>	136.0
CT-10-8	0	20.31	10.23	10.23	10.67	11.32	29.7	85.7	115.4	81.2	<b>160.1</b>	131.6
CT-11-3	0	20.32	10.22	10.22	10.74	11.01	28.8	83.2	112.0	80.0	<b>157.7</b>	129.7
CT-11-5	0	20.36	10.22	10.22	10.69	11.18	29.0	87.2	116.2	80.3	<b>160.7</b>	132.0
CT-11-10	0	20.34	10.22	10.22	10.75	11.12	29.3	89.4	118.7	80.7	<b>162.4</b>	133.4
CT-11-13	0	20.31	10.22	10.22	10.78	10.96	28.9	89.4	118.4	80.2	<b>162.1</b>	133.2
CT-11-16	0	20.33	10.23	10.23	10.70	11.18	29.2	85.9	115.1	80.5	<b>159.9</b>	131.4

(b) 再負荷時

試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状				最大荷重 P (kN)	弾性J J <sub>e</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	塑性J J <sub>p</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	J <sub>c</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	弾性分 K <sub>e</sub> (MPa√m)	破壊靱性 K <sub>Jc</sub> (MPa√m)	1T相当破壊靱性 K <sub>Jc(1T)</sub> (MPa√m)
		幅 W	厚さ B	正味厚さ B <sub>N</sub>	き裂長さ a <sub>0</sub>							
CT-10-3	-120	20.31	10.22	10.22	10.81	13.20	40.9	7.2	48.1	97.1	<b>105.3</b>	87.9
CT-10-5	-120	20.32	10.23	10.23	10.82	12.76	38.2	6.1	44.3	93.8	<b>101.0</b>	84.5
CT-10-8	-120	20.31	10.23	10.23	10.67	14.16	44.8	42.6	87.4	101.6	<b>141.9</b>	117.1
CT-11-3	-120	20.32	10.22	10.22	10.74	13.26	40.2	9.6	49.9	96.3	<b>107.2</b>	89.4
CT-11-5	-120	20.36	10.22	10.22	10.69	13.84	42.8	15.8	58.6	99.3	<b>116.2</b>	96.6
CT-11-10	-120	20.34	10.22	10.22	10.75	13.38	41.0	9.4	50.3	97.1	<b>107.7</b>	89.8
CT-11-13	-120	20.31	10.22	10.22	10.78	13.71	43.7	23.7	67.3	100.3	<b>124.5</b>	103.3
CT-11-16	-120	20.33	10.23	10.23	10.70	13.99	44.1	24.7	68.8	100.7	<b>125.8</b>	104.3

表 4.1.2.1-3 (2/4) WPS 効果確認試験結果 (ケース 2)

(a) 予荷重時

試験片符号	温度	試験片形状				最大荷重	弾性J	塑性J		弾性分	破壊靱性	1T相当破壊靱性
	T	幅	厚さ	正味厚さ	き裂長さ	P	J <sub>e</sub>	J <sub>p</sub>	J <sub>c</sub>	K <sub>e</sub>	K <sub>Jc</sub>	K <sub>Jc(1T)</sub>
	(°C)	W	B	B <sub>N</sub>	a <sub>0</sub>	(kN)	(kJ/m <sup>2</sup> )	(kJ/m <sup>2</sup> )	(kJ/m <sup>2</sup> )	(MPa√m)	(MPa√m)	(MPa√m)
CT-10-1	0	20.35	10.22	8.33	10.76	10.70	33.3	83.7	117.0	86.0	<b>161.2</b>	132.5
CT-10-4	0	20.33	10.22	8.32	10.72	10.76	33.5	83.0	116.5	86.3	<b>160.8</b>	132.2
CT-10-6	0	20.35	10.23	8.33	10.76	10.44	31.7	82.0	113.7	83.9	<b>158.9</b>	130.7
CT-11-1	0	20.33	10.22	8.32	10.82	10.26	31.4	82.7	114.1	83.6	<b>159.2</b>	130.8
CT-11-6	0	20.34	10.23	8.33	10.83	10.26	31.4	81.5	112.9	83.5	<b>158.4</b>	130.2
CT-11-8	0	20.34	10.23	8.33	10.85	10.13	30.8	80.0	110.8	82.7	<b>156.9</b>	129.1
CT-11-11	0	20.34	10.23	8.34	10.66	10.73	32.5	85.6	118.1	85.0	<b>162.0</b>	133.1
CT-11-14	0	20.31	10.23	8.33	10.65	10.67	32.2	85.3	117.6	84.6	<b>161.6</b>	132.8

(b) 再負荷時

試験片符号	温度	試験片形状				最大荷重	弾性J	塑性J		弾性分	破壊靱性	1T相当破壊靱性
	T	幅	厚さ	正味厚さ	き裂長さ	P	J <sub>e</sub>	J <sub>p</sub>	J <sub>c</sub>	K <sub>e</sub>	K <sub>Jc</sub>	K <sub>Jc(1T)</sub>
	(°C)	W	B	B <sub>N</sub>	a <sub>0</sub>	(kN)	(kJ/m <sup>2</sup> )	(kJ/m <sup>2</sup> )	(kJ/m <sup>2</sup> )	(MPa√m)	(MPa√m)	(MPa√m)
CT-10-1	-120	20.35	10.22	8.33	10.76	12.11	41.1	6.2	47.4	97.3	<b>104.4</b>	87.2
CT-10-4	-120	20.33	10.22	8.32	10.72	13.02	47.3	13.3	60.6	104.4	<b>118.1</b>	98.1
CT-10-6	-120	20.35	10.23	8.33	10.76	12.57	44.4	11.3	55.7	101.1	<b>113.3</b>	94.3
CT-11-1	-120	20.33	10.22	8.32	10.82	12.81	47.3	25.2	72.5	104.4	<b>129.2</b>	107.0
CT-11-6	-120	20.34	10.23	8.33	10.83	12.83	47.3	24.6	71.9	104.4	<b>128.7</b>	106.6
CT-11-8	-120	20.34	10.23	8.33	10.85	12.11	42.4	5.7	48.2	98.8	<b>105.3</b>	88.0
CT-11-11	-120	20.34	10.23	8.34	10.66	12.93	45.5	10.5	56.0	102.4	<b>113.6</b>	94.6
CT-11-14	-120	20.31	10.23	8.33	10.65	11.99	39.2	4.4	43.6	95.0	<b>100.2</b>	83.9



表 4.1.2.1-3 (3/4) WPS 効果確認試験結果 (ケース 3)

(a) 予荷重時

試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状				最大荷重 P (kN)	弾性J J <sub>e</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	塑性J J <sub>p</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	J <sub>c</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	弾性分 K <sub>e</sub> (MPa√m)	破壊靱性 K <sub>Jc</sub> (MPa√m)	1T相当破壊靱性 K <sub>Jc(1T)</sub> (MPa√m)
		幅 W	厚さ B	正味厚さ B <sub>N</sub>	き裂長さ a <sub>0</sub>							
CT-10-2	-50	20.34	10.23	8.34	10.64	10.41	29.9	22.7	52.6	82.1	<b>108.9</b>	90.8
CT-10-7	-50	20.32	10.22	8.32	10.79	10.00	29.1	22.3	51.4	81.1	<b>107.7</b>	89.8
CT-11-2	-50	20.31	10.22	8.32	10.75	9.75	27.4	21.3	48.7	78.7	<b>104.8</b>	87.5
CT-11-4	-50	20.32	10.22	8.34	10.75	9.97	28.5	21.9	50.4	80.2	<b>106.6</b>	88.9
CT-11-7	-50	20.33	10.22	8.34	10.81	9.89	28.5	23.3	51.8	80.2	<b>108.1</b>	90.2
CT-11-9	-50	20.31	10.23	8.35	10.74	9.95	28.4	23.5	51.9	80.0	<b>108.2</b>	90.3
CT-11-12	-50	20.31	10.23	8.33	10.63	10.19	28.8	22.7	51.4	80.6	<b>107.7</b>	89.9
CT-11-15	-50	20.29	10.23	8.36	10.55	10.38	29.1	22.9	52.1	81.1	<b>108.4</b>	90.4

(b) 再負荷時 (予荷重の A<sub>p1</sub> + 再負荷の A<sub>p1</sub> より K<sub>Jc</sub> を算出)

試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状				最大荷重 P (kN)	弾性J J <sub>e</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	塑性J J <sub>p</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	J <sub>c</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	弾性分 K <sub>e</sub> (MPa√m)	破壊靱性 K <sub>Jc</sub> (MPa√m)	1T相当破壊靱性 K <sub>Jc(1T)</sub> (MPa√m)
		幅 W	厚さ B	正味厚さ B <sub>N</sub>	き裂長さ a <sub>0</sub>							
CT-10-2	-160	20.34	10.23	8.34	10.64	12.36	40.7	22.7	63.5	97.4	<b>121.6</b>	101.0
CT-10-7	-160	20.32	10.22	8.32	10.79	11.61	38.0	22.6	60.6	94.1	<b>118.8</b>	98.7
CT-11-2	-160	20.31	10.22	8.32	10.75	10.89	33.1	22.5	55.6	87.8	<b>113.8</b>	94.7
CT-11-4	-160	20.32	10.22	8.34	10.75	11.56	37.1	23.1	60.2	93.0	<b>118.5</b>	98.4
CT-11-7	-160	20.33	10.22	8.34	10.81	11.91	40.1	24.5	64.5	96.7	<b>122.7</b>	101.8
CT-11-9	-160	20.31	10.23	8.35	10.74	11.95	39.6	24.9	64.5	96.1	<b>122.6</b>	101.7
CT-11-12	-160	20.31	10.23	8.33	10.63	11.72	36.9	23.0	59.9	92.7	<b>118.1</b>	98.2
CT-11-15	-160	20.29	10.23	8.36	10.55	12.19	38.9	24.0	62.9	95.2	<b>121.1</b>	100.5

(c) 再負荷時 (再負荷の A<sub>p1</sub> より K<sub>Jc</sub> を算出)

試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状				最大荷重 P (kN)	弾性J J <sub>e</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	塑性J J <sub>p</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	J <sub>c</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	弾性分 K <sub>e</sub> (MPa√m)	破壊靱性 K <sub>Jc</sub> (MPa√m)	1T相当破壊靱性 K <sub>Jc(1T)</sub> (MPa√m)
		幅 W	厚さ B	正味厚さ B <sub>N</sub>	き裂長さ a <sub>0</sub>							
CT-10-2	-160	20.34	10.23	8.34	10.64	12.36	40.7	0.0	40.8	97.4	<b>97.5</b>	81.7
CT-10-7	-160	20.32	10.22	8.32	10.79	11.61	38.0	0.3	38.3	94.1	<b>94.5</b>	79.3
CT-11-2	-160	20.31	10.22	8.32	10.75	10.89	33.1	1.2	34.3	87.8	<b>89.4</b>	75.3
CT-11-4	-160	20.32	10.22	8.34	10.75	11.56	37.1	1.3	38.4	93.0	<b>94.5</b>	79.4
CT-11-7	-160	20.33	10.22	8.34	10.81	11.91	40.1	1.2	41.2	96.7	<b>98.0</b>	82.2
CT-11-9	-160	20.31	10.23	8.35	10.74	11.95	39.6	1.3	41.0	96.1	<b>97.7</b>	81.9
CT-11-12	-160	20.31	10.23	8.33	10.63	11.72	36.9	0.3	37.2	92.7	<b>93.1</b>	78.3
CT-11-15	-160	20.29	10.23	8.36	10.55	12.19	38.9	1.1	40.0	95.2	<b>96.5</b>	81.0

表 4.1.2.1-3 (4/4) WPS 効果確認試験結果 (ケース 4)

(a) 予荷重時

試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状				最大荷重 P (kN)	弾性J J <sub>e</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	塑性J J <sub>p</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	J <sub>c</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	弾性分 K <sub>e</sub> (MPa√m)	破壊靱性 K <sub>Jc</sub> (MPa√m)	1T相当破壊靱性 K <sub>Jc(1T)</sub> (MPa√m)
		幅	厚さ	正味厚さ	き裂長さ							
		W	B	B <sub>N</sub>	a <sub>0</sub>							
WS1-15	-50	8.01	4.02	4.02	4.10	1.95	12.6	43.3	56.0	54.4	<b>114.5</b>	79.6
WS1-17	-50	8.01	4.02	4.02	4.01	2.08	13.4	44.0	57.4	56.0	<b>116.0</b>	80.5
WS1-14	-50	8.00	4.02	4.02	4.15	1.89	12.4	42.0	54.4	53.8	<b>112.9</b>	78.6
WS1-16	-50	8.00	4.02	4.02	4.08	1.94	12.3	41.7	54.0	53.7	<b>112.5</b>	78.3
WS1-12	-50	8.01	4.02	4.02	3.95	2.12	13.2	44.9	58.1	55.6	<b>116.6</b>	80.9
WS1-8	-50	8.01	4.02	4.02	4.21	1.82	11.9	43.8	55.7	52.8	<b>114.2</b>	79.4
WS1-10	-50	8.01	4.02	4.02	4.03	2.01	12.7	44.1	56.8	54.5	<b>115.3</b>	80.1
WS1-13	-50	8.01	4.02	4.02	3.98	2.07	13.0	43.3	56.3	55.1	<b>114.8</b>	79.8

(b) 再負荷時 (予荷重の A<sub>p1</sub> + 再負荷の A<sub>p1</sub> より K<sub>Jc</sub> を算出)

試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状				最大荷重 P (kN)	弾性J J <sub>e</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	塑性J J <sub>p</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	J <sub>c</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	弾性分 K <sub>e</sub> (MPa√m)	破壊靱性 K <sub>Jc</sub> (MPa√m)	1T相当破壊靱性 K <sub>Jc(1T)</sub> (MPa√m)
		幅	厚さ	正味厚さ	き裂長さ							
		W	B	B <sub>N</sub>	a <sub>0</sub>							
WS1-15	-160	8.01	4.02	4.02	4.10	2.43	18.7	1.3	20.0	67.6	<b>74.4</b>	54.3
WS1-17	-160	8.01	4.02	4.02	4.01	2.60	19.9	0.7	20.6	69.7	<b>78.7</b>	57.0
WS1-14	-160	8.00	4.02	4.02	4.15	2.53	21.2	4.1	25.3	72.1	<b>89.4</b>	63.8
WS1-16	-160	8.00	4.02	4.02	4.08	2.58	21.0	4.2	25.2	71.6	<b>90.7</b>	64.6
WS1-12	-160	8.01	4.02	4.02	3.95	2.84	22.7	3.9	26.6	74.6	<b>94.7</b>	67.1
WS1-8	-160	8.01	4.02	4.02	4.21	2.52	21.9	11.5	33.4	73.1	<b>103.3</b>	72.6
WS1-10	-160	8.01	4.02	4.02	4.03	2.79	23.4	9.9	33.2	75.6	<b>103.8</b>	72.9
WS1-13	-160	8.01	4.02	4.02	3.98	2.87	23.9	9.4	33.4	76.5	<b>107.0</b>	74.9

(c) 再負荷時 (再負荷の A<sub>p1</sub> より K<sub>Jc</sub> を算出)

試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状				最大荷重 P (kN)	弾性J J <sub>e</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	塑性J J <sub>p</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	J <sub>c</sub> (kJ/m <sup>2</sup> )	弾性分 K <sub>e</sub> (MPa√m)	破壊靱性 K <sub>Jc</sub> (MPa√m)	1T相当破壊靱性 K <sub>Jc(1T)</sub> (MPa√m)
		幅	厚さ	正味厚さ	き裂長さ							
		W	B	B <sub>N</sub>	a <sub>0</sub>							
WS1-15	-160	8.01	4.02	4.02	4.10	2.43	19.5	47.5	67.0	<b>125.3</b>	86.4	
WS1-17	-160	8.01	4.02	4.02	4.01	2.60	20.8	49.7	70.5	69.7	<b>128.5</b>	88.4
WS1-14	-160	8.00	4.02	4.02	4.15	2.53	21.2	53.5	74.7	72.1	<b>133.1</b>	91.3
WS1-16	-160	8.00	4.02	4.02	4.08	2.58	21.9	54.9	76.9	71.6	<b>134.2</b>	92.0
WS1-12	-160	8.01	4.02	4.02	3.95	2.84	22.7	58.8	81.5	74.6	<b>141.2</b>	96.4
WS1-8	-160	8.01	4.02	4.02	4.21	2.87	21.9	65.6	87.4	73.1	<b>146.1</b>	99.5
WS1-10	-160	8.01	4.02	4.02	4.03	2.52	23.4	64.8	88.1	75.6	<b>146.3</b>	99.6
WS1-13	-160	8.01	4.02	4.02	3.98	2.79	23.9	66.2	90.1	76.5	<b>146.8</b>	100.0

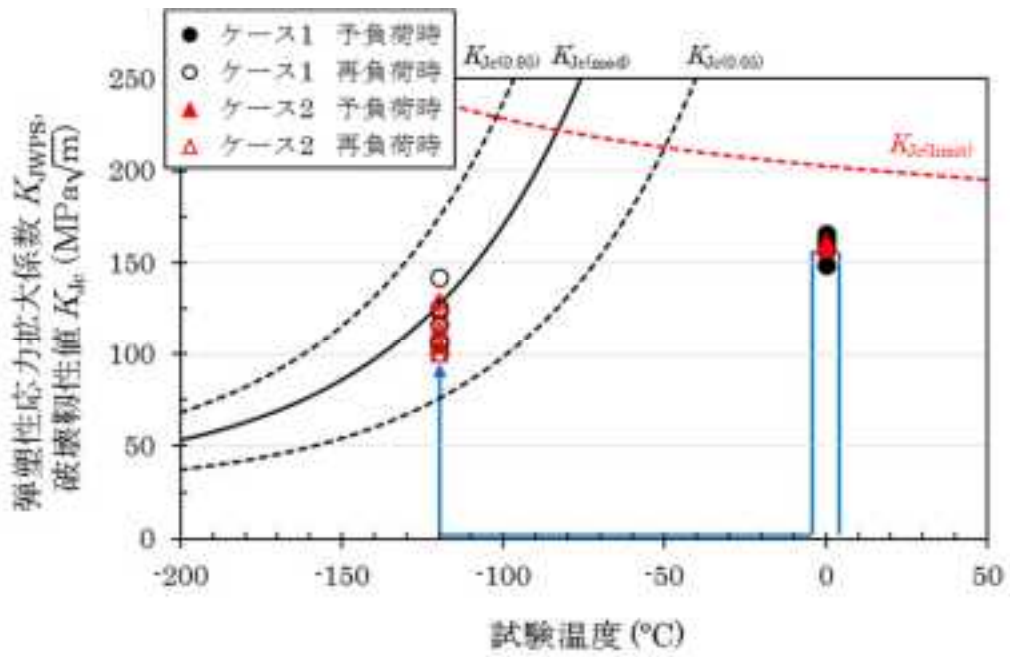


図 4.1.2.1-12 (1/3) 試験結果とマスターカーブの関係 (ケース 1、 2)

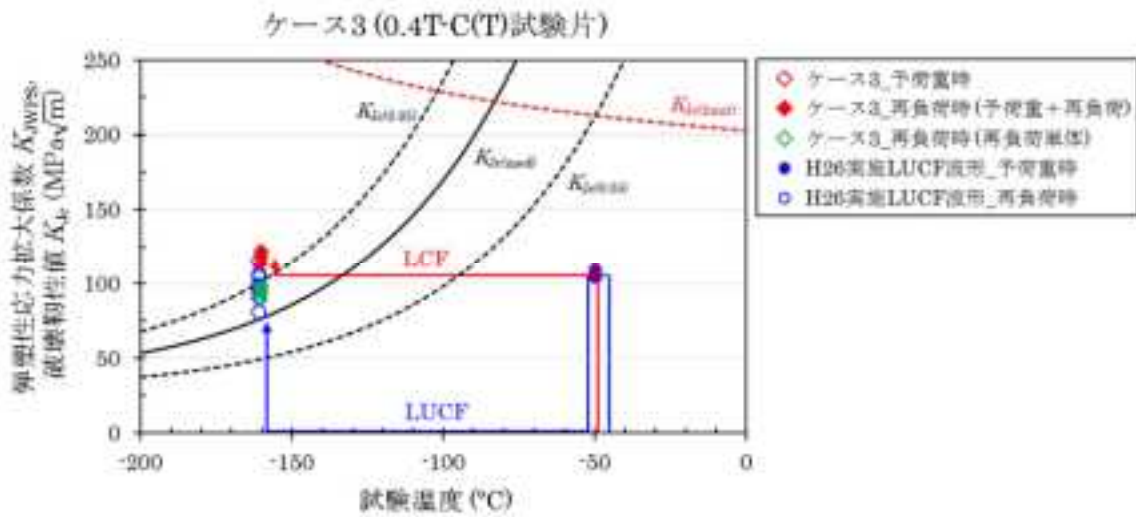


図 4.1.2.1-12 (2/3) 試験結果とマスターカーブの関係 (ケース 3)

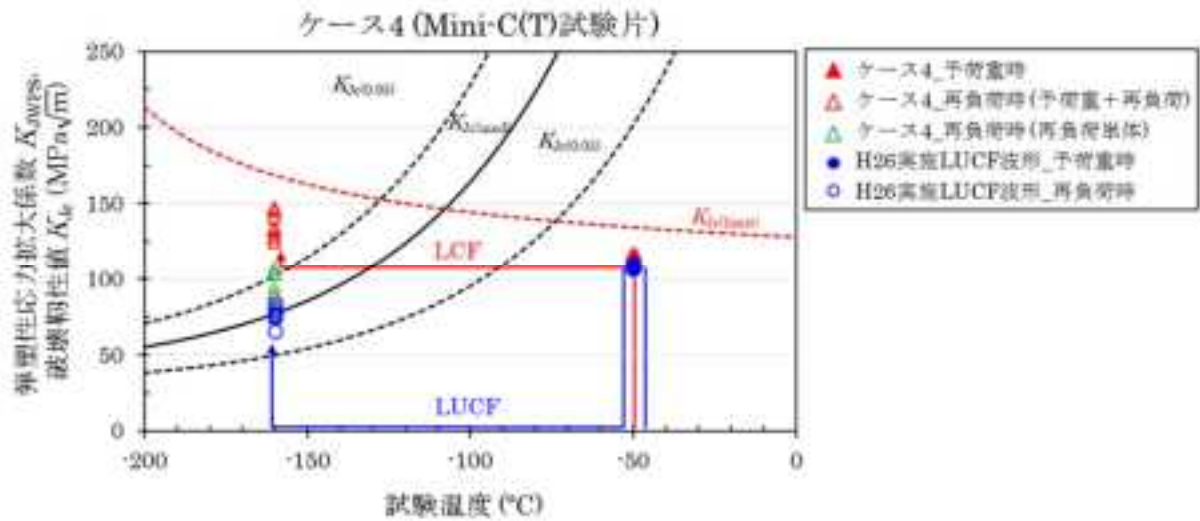
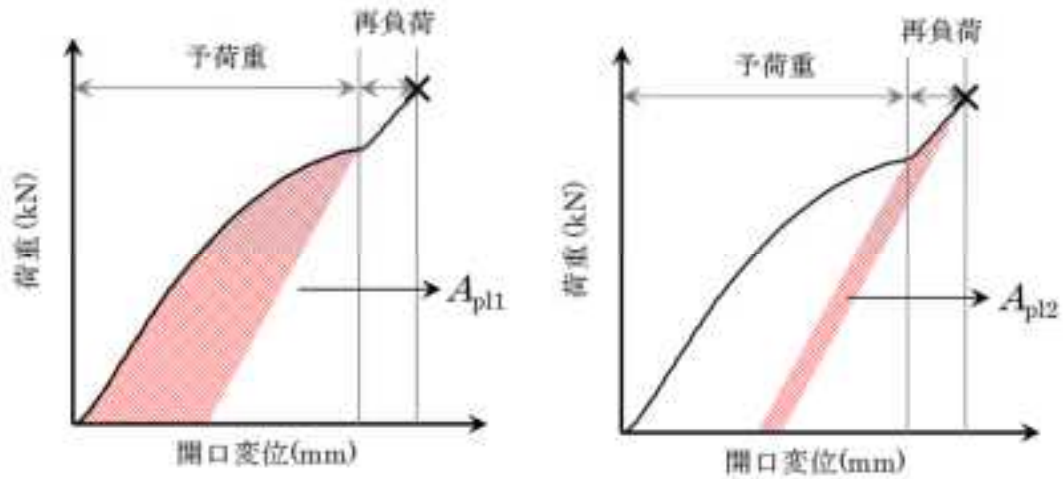
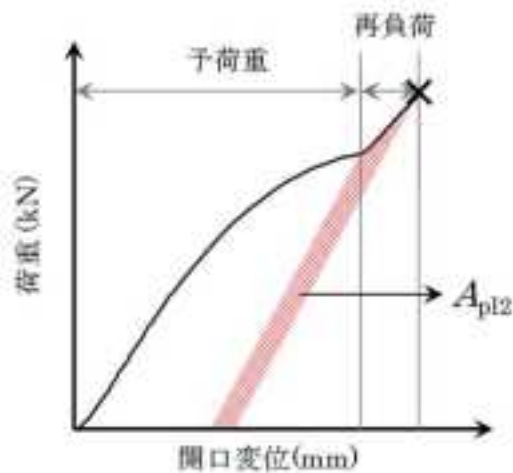


図 4.1.2.1-12 (3/3) 試験結果とマスターカーブの関係 (ケース 4)



(1) 評価対象とする面積  $A_{pl} = \text{予荷重時の } A_{pl1} + \text{再荷重時の } A_{pl2}$



(2) 評価対象とする面積  $A_{pl} = \text{再荷重時の } A_{pl2}$

図 4.1.2.1-13 再荷重時の破壊靱性評価に用いた面積  $A_{pl}$  の算出法

#### (4) WPS 効果確認試験結果の考察

本年度の WPS 試験で得られた再負荷時の破壊靱性  $K_{Jc}$  に関して、WPS 効果を予測する工学モデルによる評価結果との比較を行い、予測値とどの程度の差があるか確認を行った。式(4.1.2.1-8)～式(4.1.2.1-11)に各モデルに対する予測式を示す。

・ Chell & Haigh モデル<sup>[4.1.2.1-2]</sup>

$$K_{FRACT} = K_2 + 0.20(K_{WPS} - K_2) + 0.87K_{1c} \quad (4.1.2.1-8)$$

・ Wallin モデル<sup>[4.1.2.1-3]</sup>

$$K_{FRACT} = \max\left[K_{1c}; 0.15 \cdot K_{1c} + \min\left\{K_{WPS}; \sqrt{K_{1c} \cdot (K_{WPS} - K_2)}\right\} + K_2\right] \quad (4.1.2.1-9)$$

・ NRI-Wallin モデル<sup>[4.1.2.1-4]</sup>

$$K_{FRACT} = \max\left[K_{1c}; \min\left\{K_{WPS}; \sqrt{K_{1c} \cdot (K_{WPS} - K_2)}\right\} + K_2\right] \quad (4.1.2.1-10)$$

・ ACE モデル<sup>[4.1.2.1-4]</sup>

$$K_{FRACT} = \max\left[K_{1c}; \min\left\{K_{WPS}; K_2 + \frac{K_{WPS}}{2}\right\}\right] \quad (4.1.2.1-11)$$

図 4.1.2.1-14 にケース毎の各モデルにおける予測値をそれぞれの実験値に対してプロットした。ケース 2 のプロットには平成 26 年度に実施した 0.4T-C(T)試験片の LUCF 条件下で予荷重が今年度より低い試験の結果を比較のため掲載した。ケース 1 とケース 2 では予荷重が低い場合の結果と比較して予測値は非保守側に位置した。またケース 3 とケース 4 では Chell & Haigh モデル<sup>[4.1.2.1-2]</sup>が他のモデルと比較して非保守側に位置した。その他のモデルは実測値に近い値を示した。また、すべてのケースを通して ACE モデル<sup>[4.1.2.1-4]</sup>が最も保守的な予測値を示した。

図 4.1.2.1-15 では ACE モデルの下限線と本試験の結果を比較した。ここで、横軸は予荷重過程の相対除荷  $U_{nl}$  (式 4.1.2.1-12)、縦軸は再負荷能力  $R_{cap}$  (式 4.1.2.1-13)である。

・ 予荷重過程の相対除荷：

$$U_{nl} = \frac{K_{JWPS} - K_2}{K_{JWPS}} \quad (4.1.2.1-12)$$

・ 再負荷能力：

$$R_{cap} = \frac{K_{Jc} - K_2}{K_{JWPS}} \quad (4.1.2.1-13)$$

## $K_2$ : 再負荷直前の $K$ 値

また、 $K_{Jc}$  は 1T-C(T)試験片相当に換算して評価を行った。図中の赤線は式(4.1.2.1-11)の ACE モデルの下限線を示している。本試験の結果はすべて下限線を上回っており、ACE モデルの保守性が示された。また WPS 効果の見られなかったケース 1、ケース 2、及び昨年度の Mini-C(T)試験片を用いた LUCF 条件下で得られた試験結果についても ACE モデルの下限線を上回る位置にプロットされた。

図 4.1.2.1-16 では Wallin モデル<sup>[4.1.2.1-3]</sup>の予測値と文献値を LCF と LUCF に分けて比較した。図 4.1.2.1-16 (1/2)では LUCF 波形で試験を行ったケース 1 とケース 2 及び前年度に試験した 0.4T-C(T)と Mini-C(T)試験片を用いた LUCF 条件下の試験結果をプロットした。横軸と縦軸は  $K_{JWPS}$  または  $K_{Jc}$  を再負荷時の温度におけるマスターカーブのメディアン  $K_{Jc(med)}$  で除したものである。前年度に実施した 0.4T-C(T)試験片を用いた結果は Wallin モデルとよく一致しているが、 $K_{Jc(limit)}$ の約 86%まで予荷重を付与したケース(ケース 1、ケース 2 及び平成 26 年度の Mini-C(T)試験片による結果)では、試験結果は Wallin モデルによる予測を下回る傾向であった。図 4.1.2.1-16 (2/2)では LCF 波形で試験を行ったケース 3 とケース 4 の結果をプロットした。両者のケースとも Wallin モデルによる予測と良い一致を示した。

LUCF 波形で行ったケース 1、ケース 2 の結果及び平成 26 年度の Mini-C(T)の結果は、4 つのいずれのモデルに対しても、予測値を下回るデータがあり、工学モデルによる予測から外れる傾向であった。これらの 3 つの試験ケースについては、 $K_{Jc(limit)}$ の約 86%という比較的大きな予荷重を付与していることから、 $K_{Jc(limit)}$ に対する予荷重レベルを考慮した評価を実施した。その結果を図 4.1.2.1-17 に示す。同図は、横軸に予荷重温度での  $K_{Jc(limit)}$ 値に対する  $K_{JWPS}$  の比を、縦軸に再負荷温度における  $K_{Jc(med)}$ に対する再負荷時の破壊靱性  $K_{Jc}$  の比をとり、両者の関係を整理したものである。 $K_{JWPS}/K_{Jc(limit)}=0.54\sim 0.57$  の範囲にある平成 26 年度の 0.4T-C(T)試験片の結果では、 $K_{Jc}$  が  $K_{Jc(med)}$ を全て上回っているのに対し、 $K_{JWPS}/K_{Jc(limit)}=0.80\sim 0.89$  範囲にある他の試験結果は  $K_{Jc(med)}$ 近傍に分布している。このことから、WPS 効果が明確に認められる  $K_{JWPS}$  の条件には制限がある可能性があることを示唆しており、その範囲は  $K_{Jc(limit)}$ によって影響を受ける可能性がある。従って、工学モデルによる予測はその範囲により適用が制限される可能性が考えられる。しかしながら、比較対象とした試験ケースの再負荷温度は、ケース 1 及びケース 2 が $-120^{\circ}\text{C}$ であるのに対し、平成 26 年度の 0.4T-C(T)試験片を用いた LUCF 試験における再負荷温度が $-160^{\circ}\text{C}$ であり、両者で異なっている。WPS 効果のメカニズムには、き裂先端近傍の塑性域や圧縮残留応力、降伏応力等の影響が大きいと考えられることから、WPS 効果が明確に認められる  $K_{JWPS}$  の条件の範囲については、再負荷温度も考慮した検討が必要と思われる。

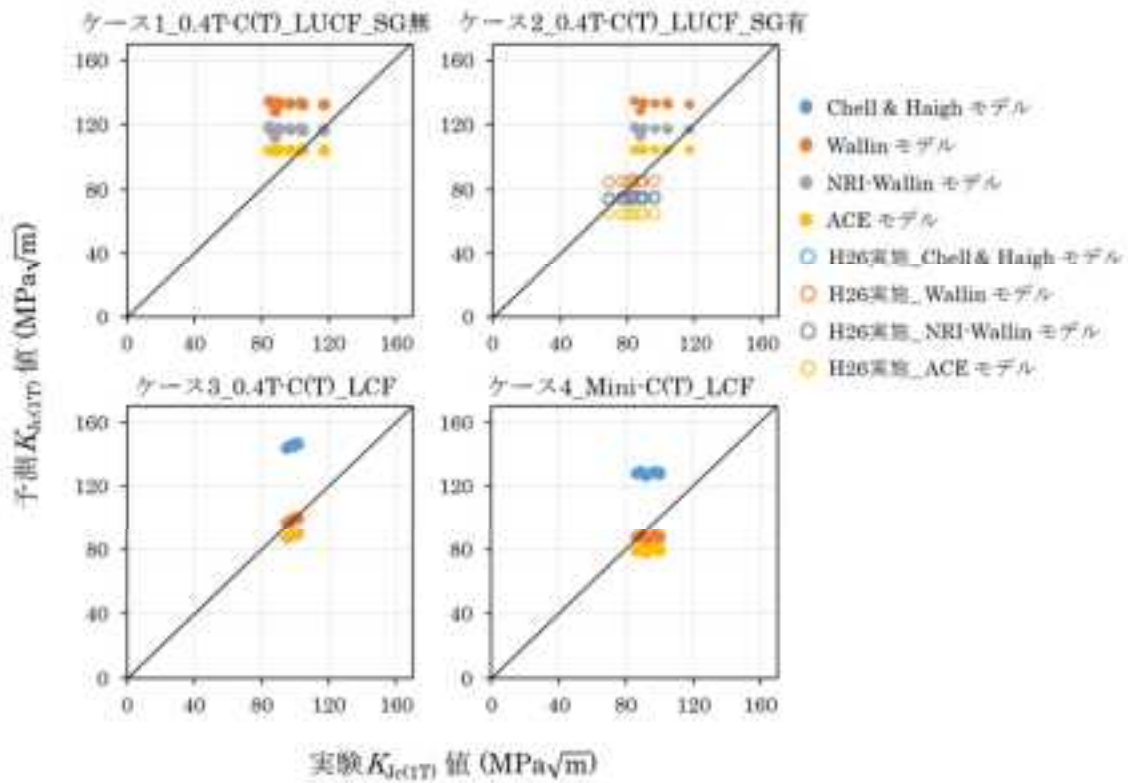


図 4.1.2.1-14 工学モデルによる予測値と試験結果の比較

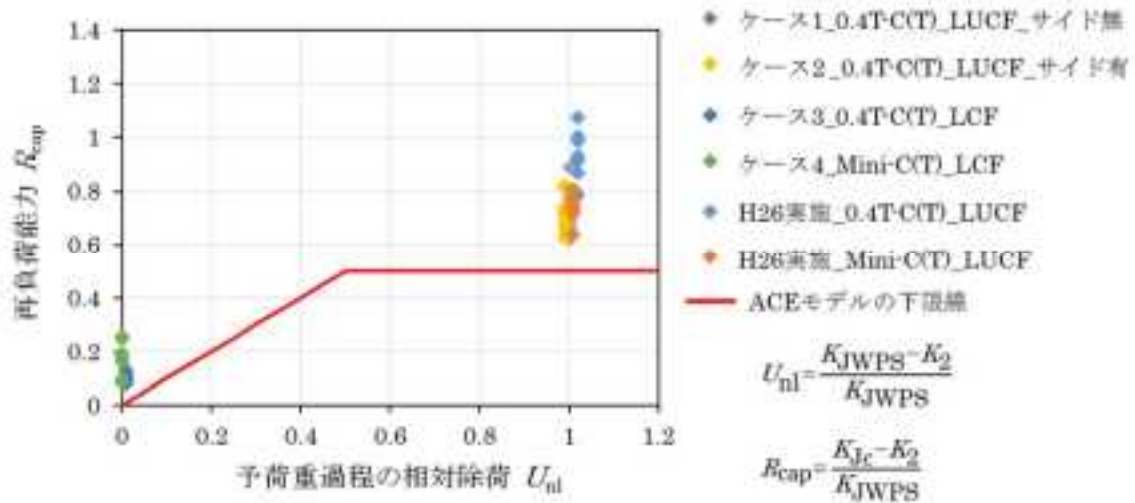


図 4.1.2.1-15 ACE モデルの下限と試験データの比較

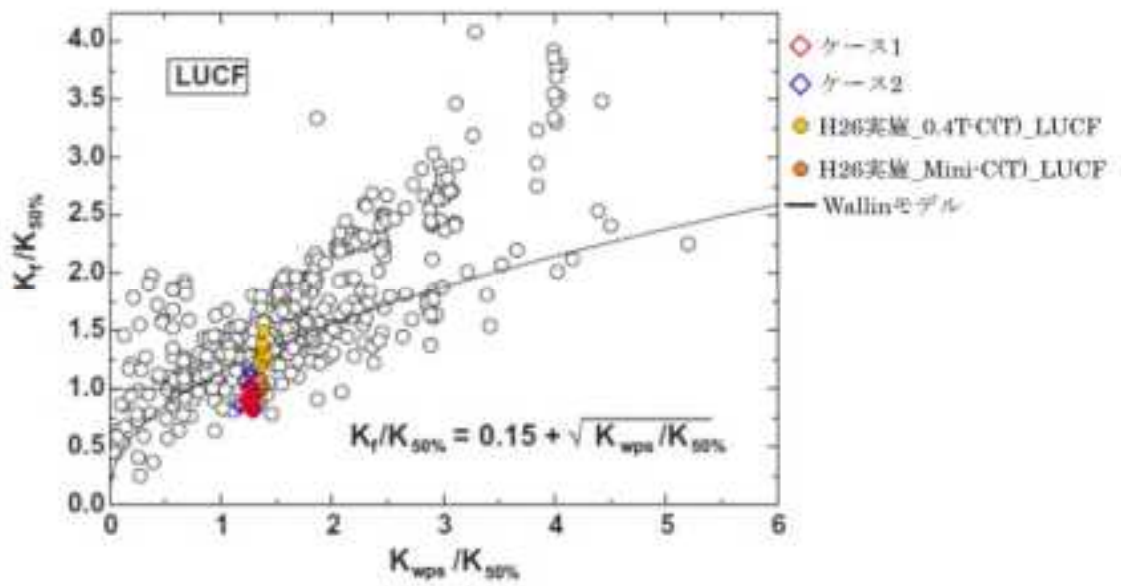


図 4.1.2.1-16 (1/2) Wallin モデル<sup>[4.1.2.1-3]</sup>と試験結果の比較 (LUCF 波形)

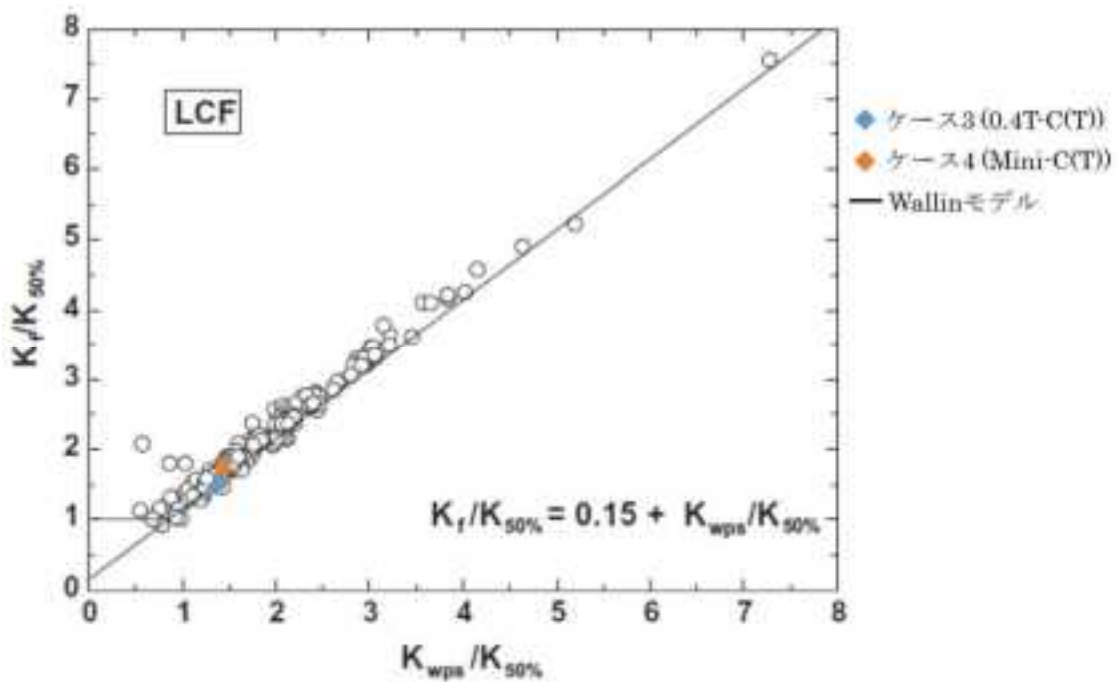


図 4.1.2.1-16 (2/2) Wallin モデル<sup>[4.1.2.1-3]</sup>と試験結果の比較 (LCF 波形)



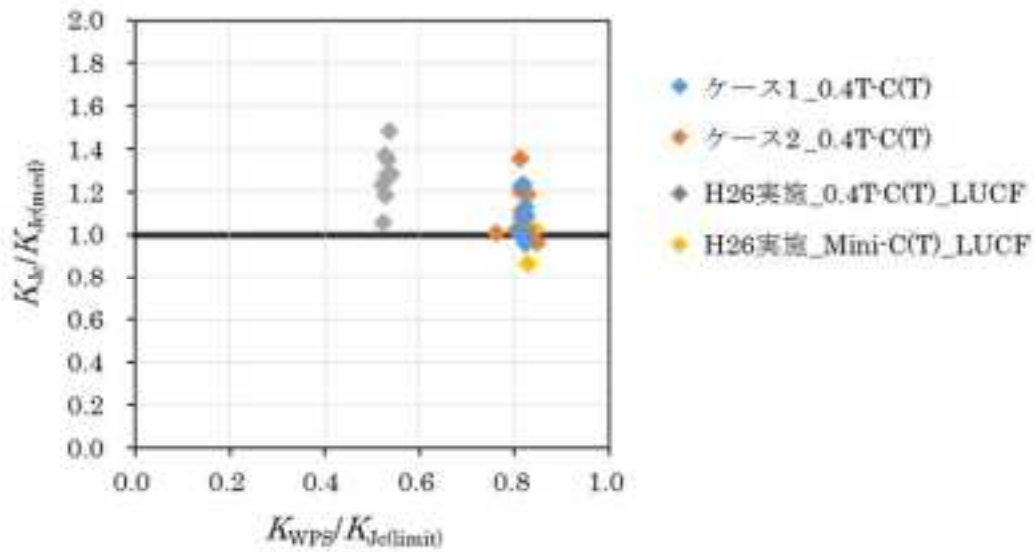


図 4.1.2.1-17  $K_{WPS}/K_{Jc(limit)}$ と再負荷時の  $K_{Jc}$  の関係

#### 参考文献

- [4.1.2.1-1] D. Lidbury et al., “Effects of pre-stressing on the transition toughness behavior of an A533 Grade Class 1 pressure vessel steel” , ASME PVP 250, pp.264-285, (1993)
- [4.1.2.1-2] G.G.Chell et al., “A theory of warm prestressing: experimental validation and the implications for elastic failure criteria” , International Journal of Fracture, pp.61-81, (1981).
- [4.1.2.1-3] K.Wallin, “Master Curve implementation of the warm pre-stress effect” , Engineering Fracture Mechanics, 70, pp.2587-2602, (2003).
- [4.1.2.1-4] S.Chapuliot et al., “WPS Criterion proposition based on experimental data base interpretation” , Fontevraud 7, (2010).
- [4.1.2.1-5] 一般社団法人日本電気協会 原子力規格委員会 JEAC 4216-2004 “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” , (2011)
- [4.1.2.1-6] 平成 26 年度軽水炉燃材料詳細健全性調査 報告書, 独立行政法人日本原子力研究開発機構, (2015)

#### 4.1.2.2 WPS 効果に関する解析的アプローチ

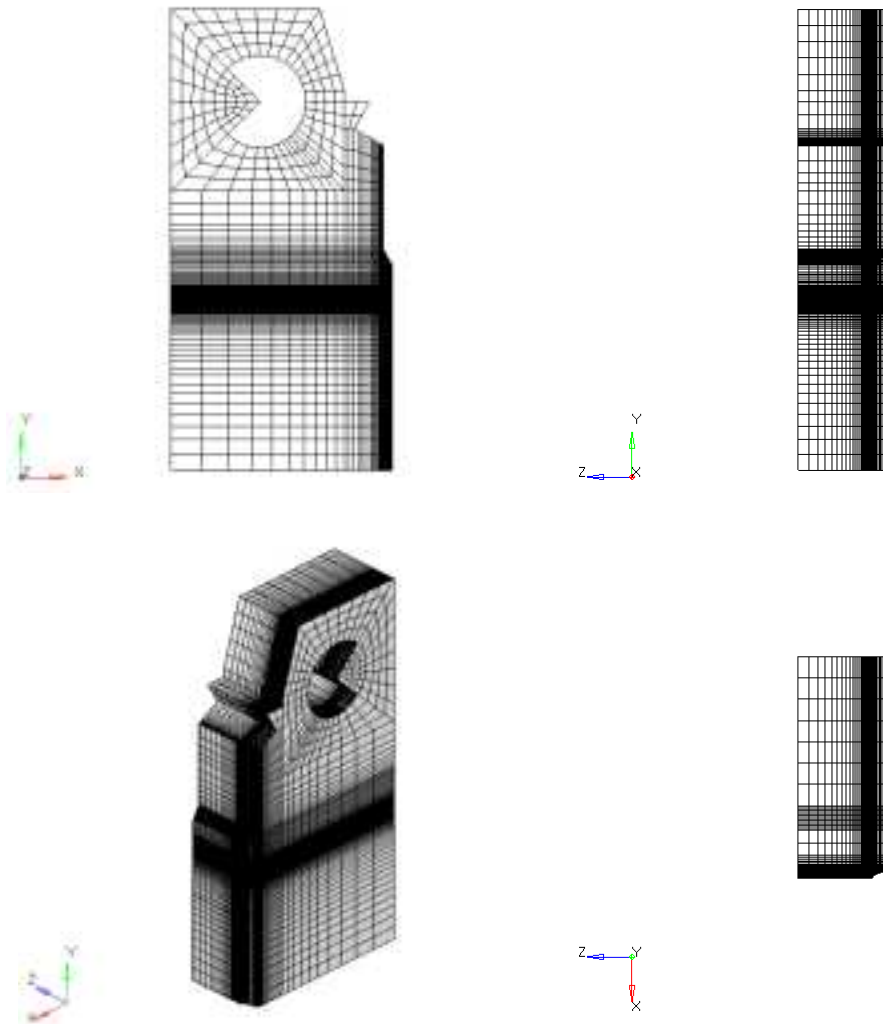
平成 25 年度に WPS 効果に対する解析的アプローチの適用に関して国内外の文献を調査し、ワイブル応力を用いたローカルアプローチ(LA)法においては WPS 予荷重負荷後の低温域への遷移領域で塑性ひずみの変化を考慮する必要があることが確認された<sup>[4.1.2.2-1]</sup>。LA 法として適用されているオリジナルの Beremin モデルは単調荷重条件における評価であり、WPS サイクルのような除荷を含む荷重条件での適用には課題があるとされる。これに対して、W. Lefevre らにより修正 Beremin モデルが提案されている<sup>[4.1.2.2-2]</sup>。修正 Beremin モデルでは、き裂先端領域の塑性ひずみが増加しているときのみで破壊が進行するという考え方を導入し、へき開破壊に対する抵抗値の温度依存性を考慮したモデルを提案している。本項では WPS 効果の予測への LA 法適用に関して修正 Beremin モデルを取り入れて有限要素法(FEM)で試解析を行い、平成 26 年度に実施した Mini-C(T)、0.4T-C(T)試験片の LUCF 条件<sup>[4.1.2.2-3]</sup>および 4.1.2.1 項で実施した 0.4T-C(T)試験片の WPS 効果確認試験データとの比較検証を行った。

##### (1) 解析モデル

解析に用いた試験片モデルでは、Mini-C(T)試験片及び 0.4T-C(T)試験片の SG 無しに対してはトンネリング形状(円弧状き裂)でき裂を付与し、0.4T-C(T)の SG 有りに対しては、板厚内予き裂の平均値の深さに直線状き裂を付与した。

解析モデルを図 4.1.2.2-1 に示す。FEM モデルは 1/4 対象モデルとし、要素タイプは C3D8(8 節点 6 面体ソリッド要素)を使用した。メッシュ分割にあたり SG 部のき裂先端近傍は、図 4.1.2.2-2 に示すように 3 軸方向の 10 要素分について、一つの要素が 0.03 mm × 0.03 mm × 0.03 mm サイズとなるように分割した。荷重負荷点となるピン部には仮想的に要素を作成した。また、WPS サイクルにおいて塑性ひずみの残留に伴って、き裂面上の要素が対称面を超えて変形する現象を抑えるため図 4.1.2.2-3 に示すように、き裂面上に板状の剛体壁を作成した。

総節点数 : 184338  
総要素数 : 173569

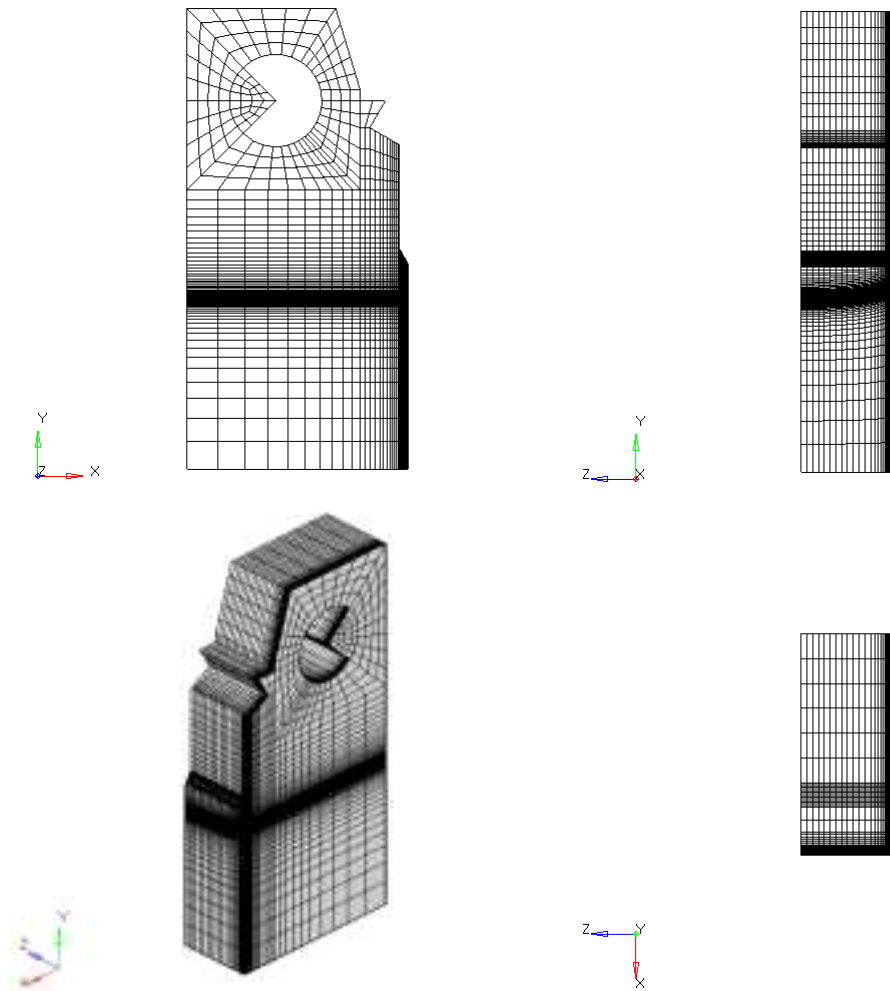


(a) 0.4T-C(T)試験片(SG 有り、予き裂形状：直線)

図 4.1.2.2-1 (1/3) 解析モデル

総節点数：88945

総要素数：82081

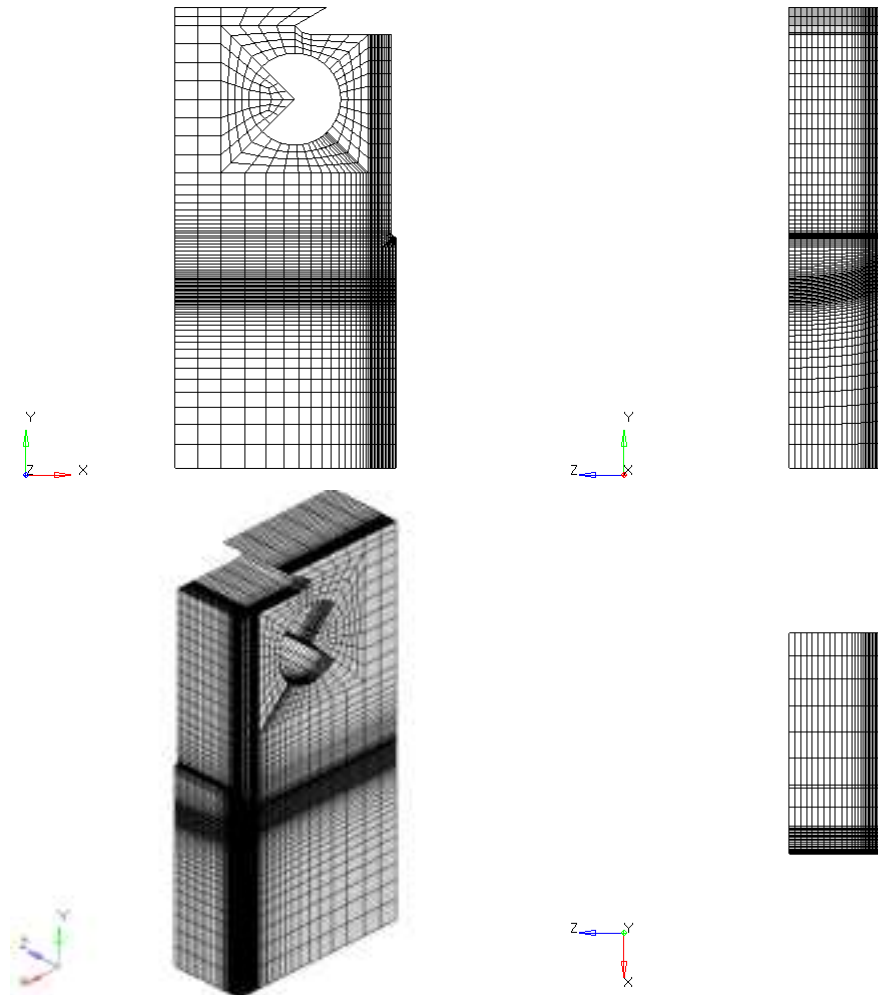


(b) 0.4T-C(T)試験片(SG 無し、予き裂形状：円弧状)

図 4.1.2.2-1 (2/3) 解析モデル

総節点数：83700

総要素数：77001



(c) Mini-C(T)試験片(SG無し、予き裂形状：円弧状)

図 4.1.2.2-1 (3/3) 解析モデル

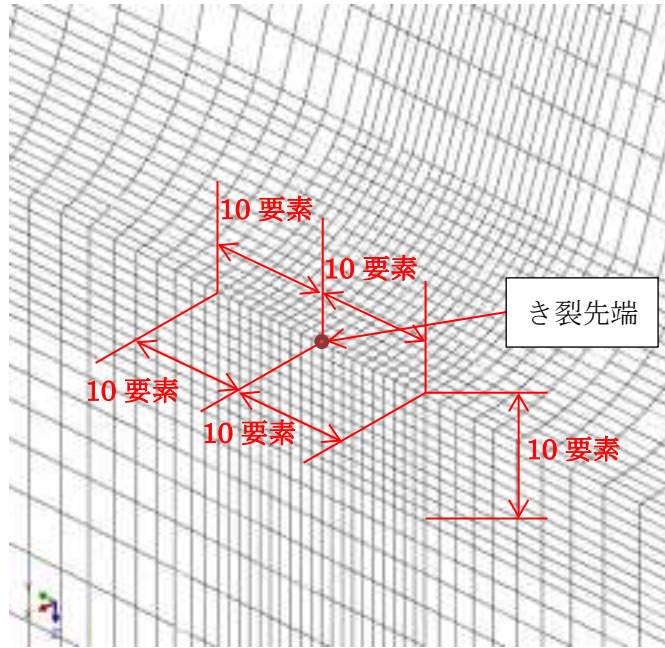


図 4.1.2.2-2 き裂先端の要素分割

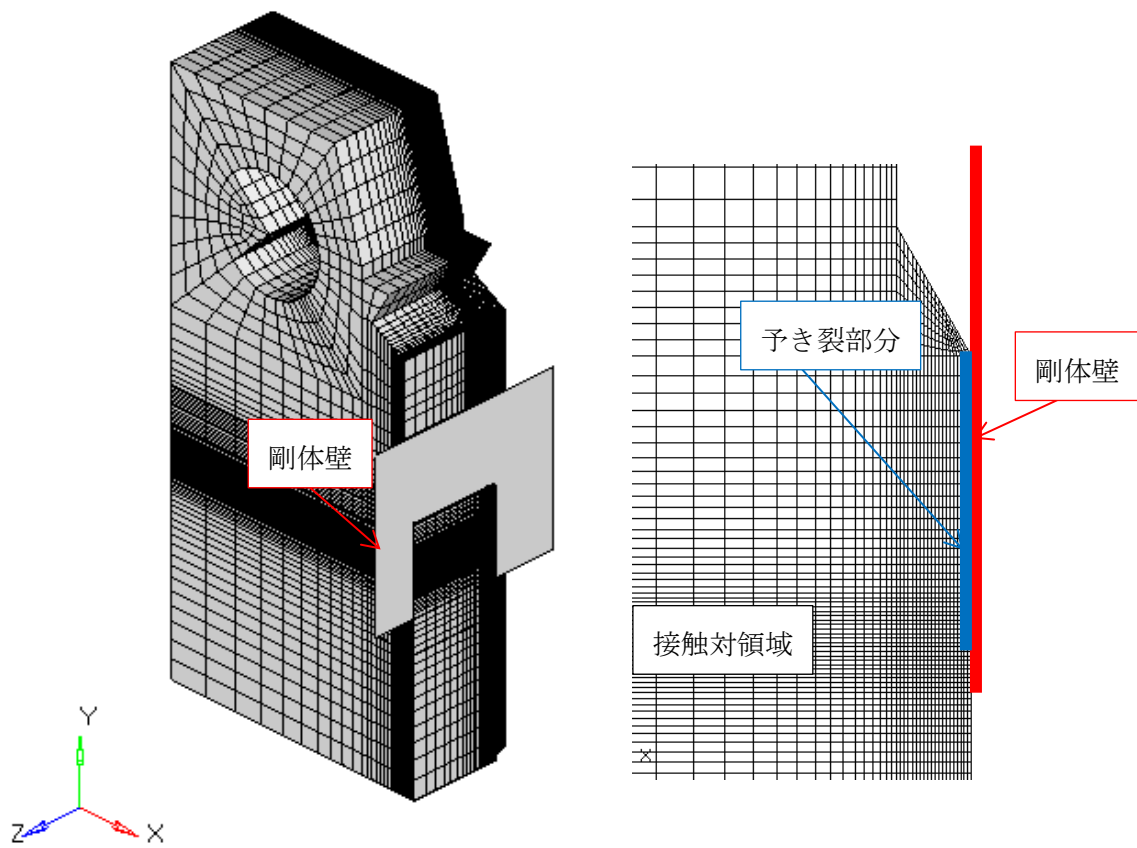


図 4.1.2.2-3 き裂面上の接触条件

## (2) 材料物性

解析に用いた材料物性値を表 4.1.2.2-1、各温度における真応力-真歪みの関係を図 4.1.2.2-4 に示す。降伏応力は材料試験結果の上降伏点以降の最小値とした。また、20℃、-50℃においては、真ひずみ 0.07~0.08 間を外挿して 0.08 以降の真応力、-100℃、-150℃においては、真歪み 0.09~0.1 間を外挿して 0.1 以降の真応力を入力した。ヤング率は JEAC4216-2011(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)<sup>[4.1.2.2-4]</sup>の解説 MCT-1300 記載の次式を用いて設定した。

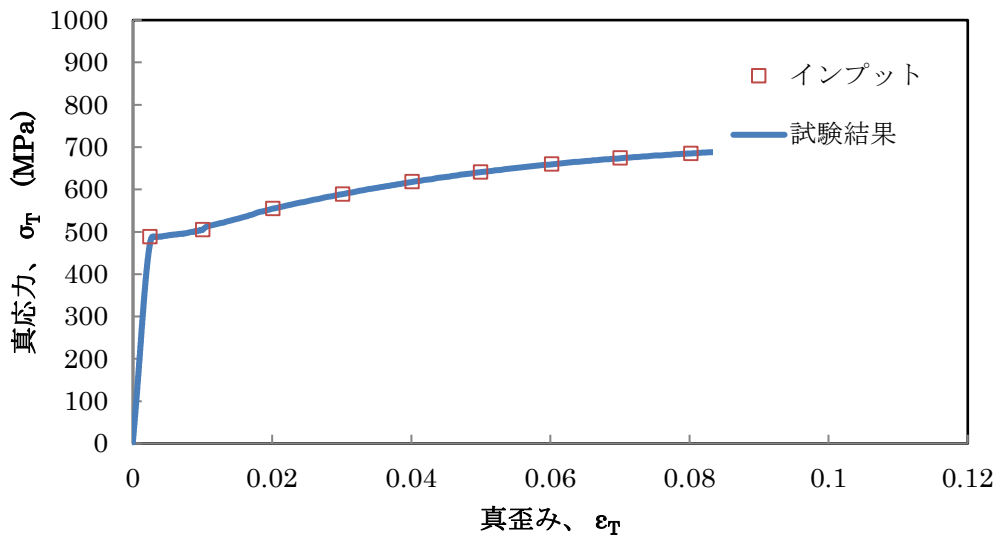
$$E = 202100 - 62.6 \times T \quad (4.1.2.2-1)$$

ここで、E：ヤング率 (MPa)、T：温度 (℃)。  
なお、材料物性で対応する温度が存在しない条件の場合、本評価で用いた解析コード Abaqus では以下の条件で材料物性が適用される。

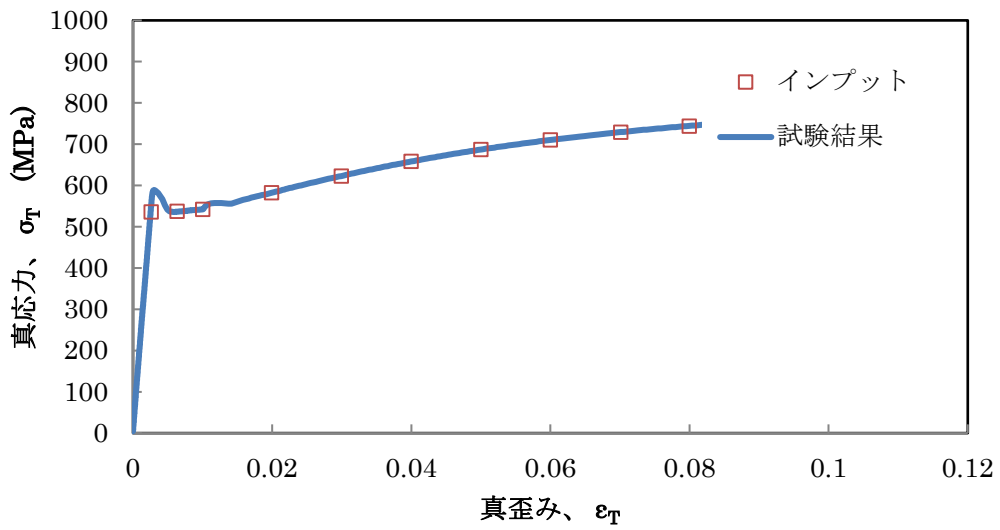
- ・ 20℃より高い温度：20℃の物性
- ・ 20℃~-50℃：20℃~-50℃の間で線形補間
- ・ -50℃~-100℃：-50℃~-100℃の間で線形補間
- ・ -100℃~-150℃：-100℃~-150℃の間で線形補間
- ・ -150℃より低い温度：-150℃の物性

表 4.1.2.2-1 物性値

温度 T (℃)	ヤング率 E (MPa)	ポアソン比 $\nu$	降伏点 $\sigma_y$ (MPa)	線膨張係数 $\alpha$ ( $\times 10^{-6}$ mm/mm℃)
20	200848	0.3	488	12.62
-50	205230		536	
-100	208360		611	
-150	211490		751	



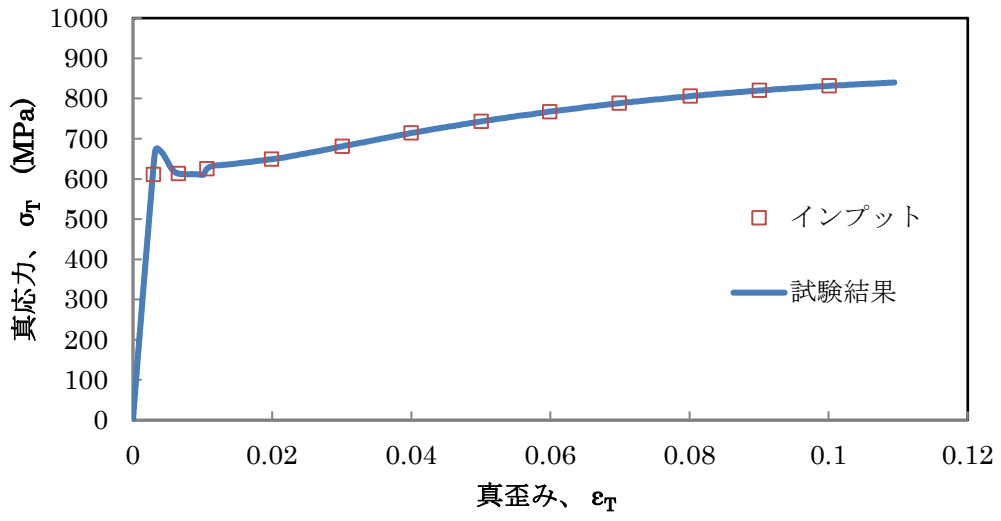
(a) 20°C



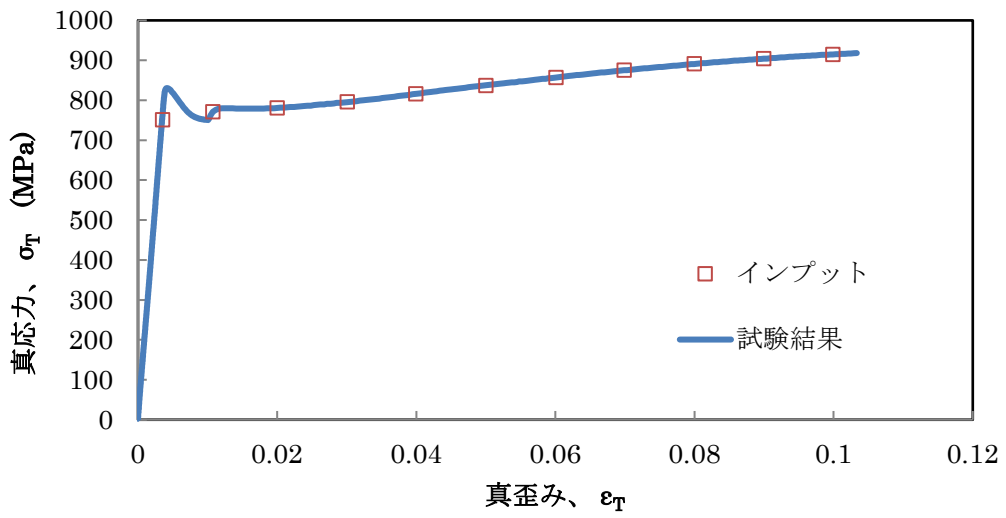
(b) -50°C

図 4.1.2.2-4 (1/2) 真応力-真歪み線図





(c) -100°C



(d) -150°C

図 4.1.2.2-4 (2/2) 真応力-真歪み線図

### (3) 荷重・境界条件

荷重負荷条件を図 4.1.2.2-5 に示す。荷重はピン穴中心位置において試験片板厚方向(Z 軸)に存在するダミー節点に対して Equation 拘束を指定して負荷し、荷重負荷方向(X 軸)並進自由度が一定の変位となるように定義した。

解析モデルにおける境界条件を図 4.1.2.2-6 に示す。本解析では 1/4 対象モデルを用いているため、き裂面、試験片中央面に面对称条件を設定した。また、ピンの稼働方向を固定するため、ピン穴中心の節点の Y 軸並進方向を拘束した。温度は FEM モデルの節点全てに一律で負荷した。

ここで、WPS サイクルは除荷過程を含むことから、経路積分を用いた J 値の評価を単純に適用することが出来ないため、以下の手順で J 値評価を行った。

- ① WPS 予荷重までの J 値を弾塑性解析で評価
- ② WPS 予荷重時における塑性分の J 値を弾塑性解析と弾性解析の結果から次式にて評価

$$J_{PLASTIC}(F_{WPS}) = J_{ELASTIC-PLASTIC}(F_{WPS}) - J_{ELASTIC}(F_{WPS}) \quad (4.1.2.2-2)$$

ここで、

- $J_{PLASTIC}(F_{WPS})$  : WPS予荷重時における塑性分のJ値  
 $J_{ELASTIC-PLASTIC}(F_{WPS})$  : WPS予荷重時の弾塑性解析結果のJ値  
 $J_{ELASTIC}(F_{WPS})$  : WPS予荷重時の弾性解析結果のJ値

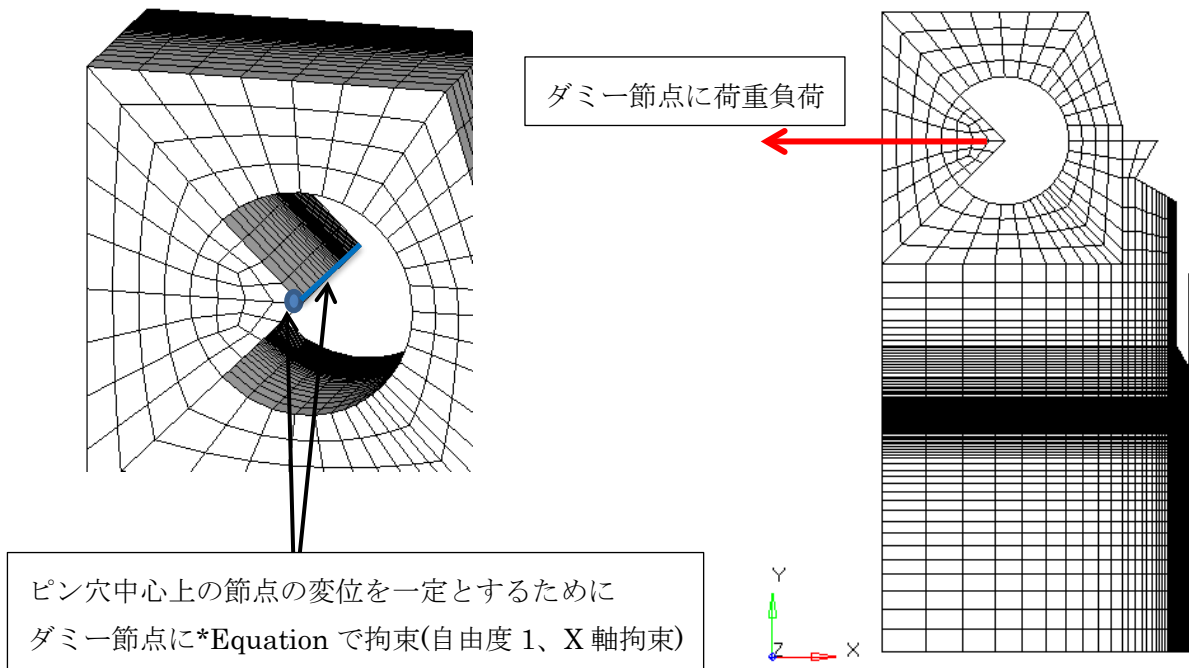
- ③ WPS 予荷重以降の J 値は②で評価した WPS 予荷重時における塑性分の J 値と弾性解析結果の J 値から次式にて評価

$$J(F_{after-WPS}) = J_{ELASTIC}(F_{after-WPS}) + J_{PLASTIC}(F_{WPS}) \quad (4.1.2.2-3)$$

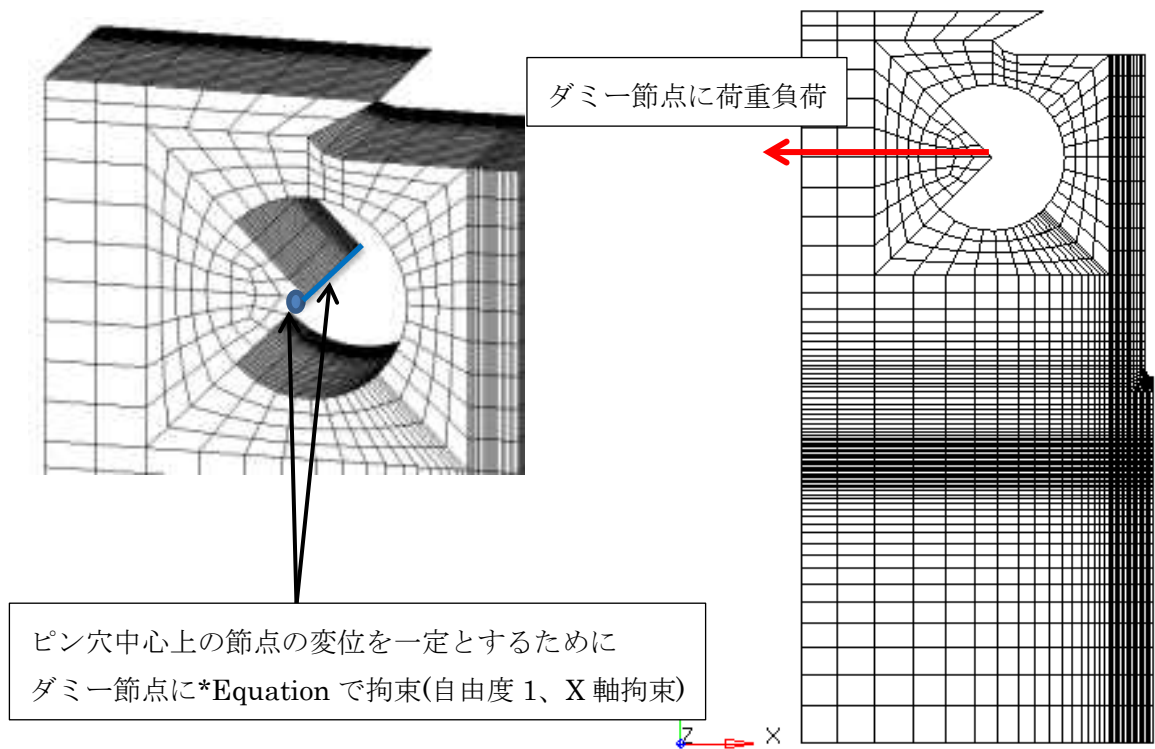
ここで、

- $J(F_{after-WPS})$  : WPS予荷重以降のJ値  
 $J_{ELASTIC}(F_{after-WPS})$  : WPS予荷重以降の弾性解析結果のJ値  
 $J_{PLASTIC}(F_{WPS})$  : WPS予荷重時における塑性分のJ値

なお、比較評価として、上記のように有限要素解析から得られる J 値( $K_J$  値)だけでなく、WPS 予荷重、再負荷時それぞれにおいて、荷重-開口変位を用いて ASTM1921 の式<sup>[4.1.2.2-5]</sup>から求められる J 値の評価を行った。

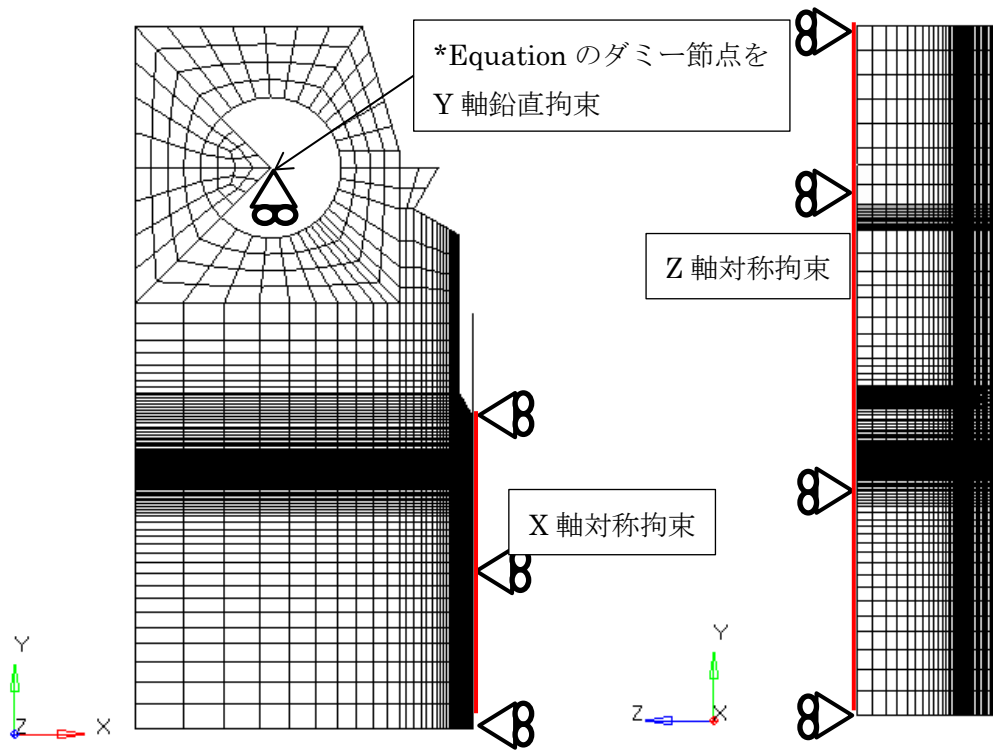


(a) 0.4T-C(T)試験片

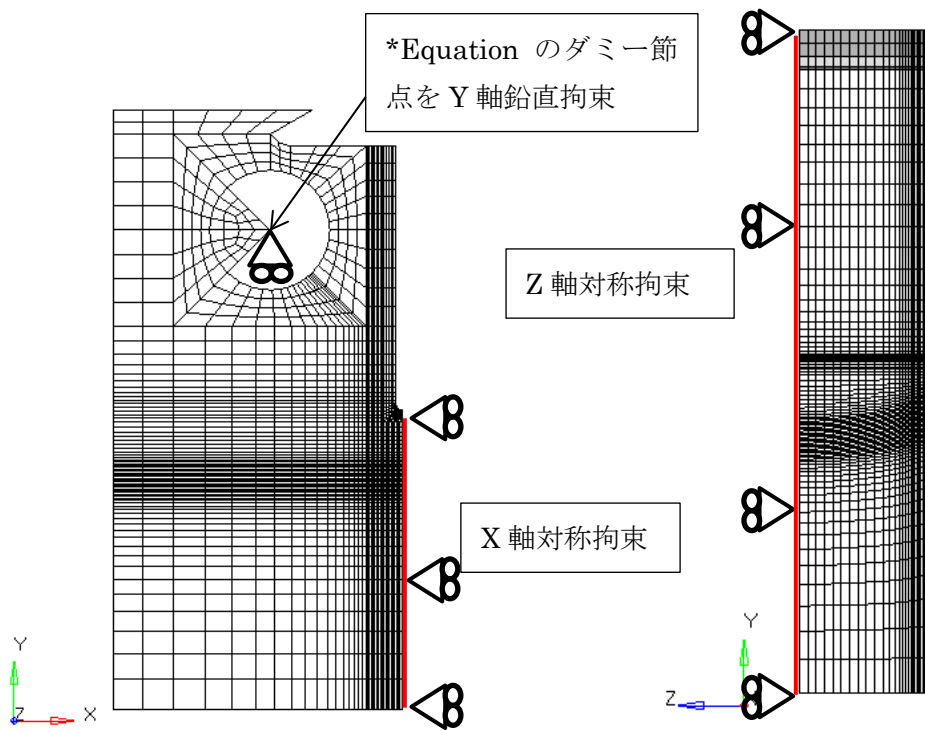


(b) Mini-C(T)試験片

図 4.1.2.2-5 荷重負荷条件図



(a) 0.4T-C(T)試験片



(b) Mini-C(T)試験片

図 4.1.2.2-6 境界条件

(4) 解析条件(解析ケース)

表 4.1.2.2-2 に解析した WPS サイクルの条件を示す。解析は 4 ケースを実施し、ケース A と B、及び平成 26 年度実施の 1T-C(T)試験片での評価結果より、WPS 効果における試験片寸法の依存性を確認した。また、ケース A、B と C の比較により全断面塑性に近い状態まで予荷重を負荷したときの、WPS 効果が明瞭でなくなる傾向の確認を行った。さらにケース C と D の比較により、SG の有無及び疲労予き裂の形状の違い(直線もしくは円弧状)によるワイブル応力への影響を確認するとともに、4.1.2.1 項で実施した WPS 試験において、再負荷時の  $K_{Jc}$  値に違いが無いことに対する検討を行った。

表 4.1.2.2-2 解析条件

解析 ケース	試験片 寸法	サイド グループ	き裂 形状	WPS 波形	予荷重条件		再負荷 温度 (°C)	LA 法による 解析の目的
					温度 (°C)	$K_J$ (MPa√m)		
A	0.4T- C(T)	有り	直線	LUCF	-50	110	-160	A と B の比較、及び平成 26 年度実施の 1T-C(T)試験片での評価結果より、WPS 効果の試験片寸法依存性をワイブル応力で説明可能か確認。
B	Mini- C(T)	無し	円弧状	LUCF	-50	110	-160	
C	0.4T- C(T)	無し	円弧状	LUCF	0	160	-120	A、B と C の比較により、全断面塑性に近い状態まで予荷重を負荷した場合に、WPS 効果が明瞭でなくなることをワイブル応力で説明可能か確認。
D	0.4T- C(T)	有り	直線	LUCF	0	160	-120	SG 有無及び疲労予き裂の形状がワイブル応力に及ぼす影響を確認するとともに、C と D で再負荷時の $K_{Jc}$ にほとんど差がない結果を説明可能か確認。

(5) ワイブル応力評価方法

ワイブル応力(Weibull stress)  $\sigma_w$  は、有限要素法による構造解析コード Abaqus の解析結果と材料固有のパラメータから次式で定義される。

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_u} = \left[ \frac{1}{V_0} \int_V \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_u} \right)^m dV \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4.1.2.2-4)$$

ここで、 $\sigma_1$  は最大主応力、 $\sigma_u$  は限界ワイブル応力、 $m$  は形状パラメータ、 $V_0$  はある一定の体積、積分範囲  $V$  は  $\sigma_1$  が降伏応力を超えるか、もしくは塑性ひずみが発生した領域である。文献などでは一般に  $\sigma_u$  を消去した形式がワイブル応力の式として以下のように表される。

$$\sigma_w = \left[ \frac{1}{V_0} \int_V \sigma_1^m dV \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4.1.2.2-5)$$

ワイブル応力評価では、(4.1.2.2-4)の右辺  $(\sigma_1/\sigma_u)^m$  の最大値を用いることが一般的であり、次式でワイブル応力を計算した。

$$\sigma_w = \sigma_u \times \left[ \frac{1}{V_0} \int_V \max \left\{ \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_u} \right)^m \Big|_{t=n}, \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_u} \right)^m \Big|_{t=n-1} \right\} dV \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4.1.2.2-6)$$

脆性破壊確率を  $P_f$  とすると  $\sigma_w$  はワイブル分布に従い、 $\ln(1/1-P_f)$  と  $\sigma_w$  が傾き  $m$  の直線関係となることから、 $\sigma_w$  が求めれば破壊確率を求めることができる。

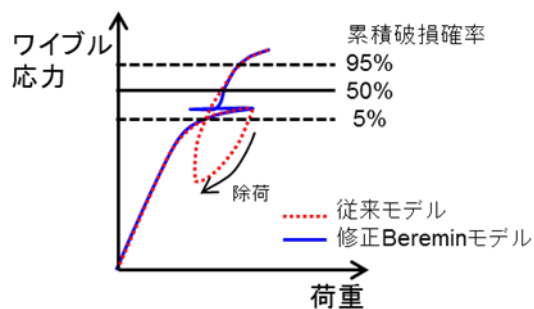
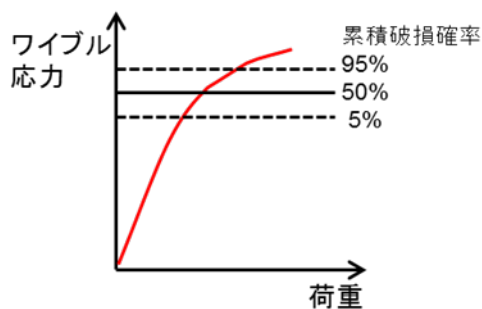
また、WPS 試験のような荷重除荷を伴う評価に対応できるように、ワイブル応力評価方法を変更した。具体的には、荷重除荷が発生する場合、図 4.1.2.2-7 に示すように荷重と共にワイブル応力の数値が減少する現象を防ぐために次式のような修正 Beremin モデル<sup>[4.1.2.2-2],[4.1.2.2-6]</sup>が提唱されている。

$$\sigma_w = \sigma_u(T(t)) \times \left[ \frac{1}{V_0} \int_V \max_{(u \leq t, \dot{p}(u) > 0)} \left\{ \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_u(T(u))} \right)^m \right\} dV \right]^{\frac{1}{m}} \quad (4.1.2.2-7)$$

(4.1.2.2-7)では累積塑性変形  $\dot{p}$  が増加した場合のみ、ワイブル応力を更新するものであり、更新の際も数値の最大を取り続けるため、予荷重時に与えられたワイブル応力は減少しないものとなっている。本解析では上記の修正 Beremin モデルに基づく評価を行った。

単調増加荷重の場合は、従来モデルと修正 Beremin モデルで得られるワイブル応力は等しい

修正 Beremin モデルを用いることで、荷重除荷時の累積破損確率の低下事象を避けることができる。



(a) 単調増加荷重の場合

(b) 除荷が含まれる荷重負荷の場合

図 4.1.2.2-7 従来モデルと修正 Beremin モデルの違い

(6) ワイブルパラメータ

ワイブルパラメータは、平成 26 年度<sup>[4.1.2.2-3]</sup>のワイブル応力評価時に 1T-C(T)試験片に対して算出した値と同じとした。なお、本解析における評価範囲は 0~-160°Cであり、0~-50°Cの範囲については平成 26 年度に実施した-110~-50°Cの  $\sigma_u$  を外挿することで設定し、表 4.1.2.2-3 に示す値を適用した。また、各温度の間の値は線形補間とした。

表 4.1.2.2-3 ワイブルパラメータ温度依存性

温度 (°C)	m 値	$\sigma_u$ (MPa)
0	14.2	2491
-50		2335
-110		2148
-160		2148



#### (7) WPS 試験条件を用いたワイブル応力評価

図 4.1.2.2-8 に表 4.1.2.2-2 に示した条件における荷重－開口変位について、解析結果と実験結果を重ね書きしたものを示す。解析結果は試験の荷重－開口変位と概ね一致しているが、除荷以降においてずれが発生している。この原因として、解析ではヤング率に対して規格値を入力としているが、実際の試験材料のヤング率が高かった可能性が考えられる。予荷重時に目標となる  $K_J$  値まで荷重を負荷した段階で解析と実験で開口変位量に差が生じることから、除荷時、再負荷時にその変位量の差が残ったままの荷重-開口変位挙動となったと考えられる。

図 4.1.2.2-9～図 4.1.2.2-12 にワイブル応力－荷重関係、ワイブル応力－ $K_J$  関係を示す。グラフには WPS サイクルに対する修正 Beremin モデルでの評価結果に加えて、各ケースの再負荷温度である-160°C(ケース A、B)もしくは-120°C(ケース C、D)での単調引張におけるワイブル応力を重ねて表示している。 $\ln(1/1-P_f)$  と  $\sigma_w$  の関係から求めた累積破損確率 5%、50%、95%に相当するワイブル応力をグラフに実線(50%)、点線(5%、95%)で示した。図中のシンボルは試験結果であり、破壊時の  $K_J$  に対応する位置にプロットしている。ワイブル応力－ $K_J$  関係に関して、 $K_J$  については 4.1.2.1 項で示したように WPS 予荷重時の J 積分値の塑性分を除荷以降に足し合わせる方法と、WPS 予荷重、再負荷それぞれ単独で荷重－開口変位から ASTM1921<sup>[4.1.2.2-5]</sup>の式を用いて求める方法の 2 種類で評価した。

図 4.1.2.2-9～図 4.1.2.2-12 に示したワイブル応力－荷重関係、ワイブル応力－ $K_J$  関係のグラフから縦軸をワイブル応力に対応する累積破損確率としたグラフを図 4.1.2.2-13～図 4.1.2.2-16 に示す。累積破損確率－ $K_J$  関係のグラフには、マスターカーブに従った累積破損確率－ $K_J$  関係も黒実線で示している。 $K_J$  については、先述と同様に 2 種類の方法で評価を行った。

図 4.1.2.2-17、図 4.1.2.2-18 に平成 26 年度に実施した 1T-C(T)試験片の LUCF 試験に対するワイブル応力－荷重関係、ワイブル応力－ $K_J$  関係と、それぞれの縦軸を累積破損確率に表現し直したグラフを比較のために示した<sup>[4.1.2.2-3]</sup>。

各条件におけるワイブル応力結果より、試験片寸法依存性、WPS 効果、SG の有無に対する影響評価について以下にまとめる。

##### ・試験片寸法依存性（ケース A、B と平成 26 年度の 1T-C(T)試験片結果）

修正 Beremin モデルで評価した LUCF 負荷と単調引張と比較した結果、1T-C(T)、0.4T-C(T)試験片においては、LUCF 負荷のワイブル応力は単調引張で等しい荷重を負荷したときに比べて低く、同じワイブル応力を得るためには高い荷重・破壊靱性値が必要となる。このことから、WPS 効果による破壊靱性値の上昇が認められた。一方で、Mini-C(T)試験片では単調引張と LUCF 負荷でワイブル応力と荷重の関係に明確な差が見られず、 $K_J$  に対しても LUCF 負荷で低い値でワイブル応力が高くなること

から、WPS 効果は認められなかった。この解析結果は試験結果の傾向と一致しており、WPS 効果における試験片寸法依存性をワイブル応力で説明可能であることが示唆された。

・ WPS 効果に対する予荷重の影響（ケース A、B 及び C）

0.4T-C(T)試験片について、試験片のき裂面の塑性域の大きさがケースBの相似形となるように予荷重を負荷した条件(ケース C)とケース A を比較した結果、高い予荷重を負荷することにより、低い  $K_J$  でワイブル応力が高くなる傾向を示すことから WPS 効果が明確に認められなくなることを確認できた。また、ワイブル応力と  $K_J$  の関係はケース B と似た傾向を示している。

・ SG 有無の影響（ケース C 及び D）

0.4T-C(T)試験片を用いて、SG の有無及び疲労予き裂の形状の違い（直線、円弧状）により、ワイブル応力と荷重、ワイブル応力と  $K_J$  の関係に違いが無いことから、形状の違いがワイブル応力評価に影響を及ぼさないことを確認できた。

本年度は、0.4T-C(T)、Mini-C(T)試験片に対するワイブル応力評価を実施したが、平成 26 年度に実施した 1T-C(T) 試験片のワイブル応力評価結果も踏まえて、以下に課題事項をまとめる。

(1)除荷以降の  $K_J$  値の設定方法

除荷以降の  $K_J$  値の算出方法として 2 種類採用したが、WPS 予荷重時の  $K_J$  値の塑性分を除荷以降に足し合わせる方法では、塑性分の  $K_J$  値が大きいため、ワイブル応力- $K_J$  関係において、 $K_J$  値の増加に対するワイブル応力の増加量が大きくなり、図 4.1.2.2-9～図 4.1.2.2-12 の(b-1)に示すように、ごく小さいばらつき範囲内で破壊する結果となっており、実態に即しているとは言い難い。一方、再負荷時の荷重-開口変位から J 値( $K_J$  値)を算出した方法では、同じワイブル応力値で比較すると、図 4.1.2.2-9～図 4.1.2.2-12 の(b-2)に示すように、WPS 負荷(修正 Beremin モデル)が単調増加負荷よりも  $K_J$  値が小さくなる結果となっており、WPS 予荷重時の J 値の塑性分を無視していることで、 $K_J$  値が低めに評価されていると考えられる。

そのため、WPS 負荷のような除荷過程を含む  $K_J$  値の評価方法については、適切な評価方法の検討が今後も必要と考えられる。

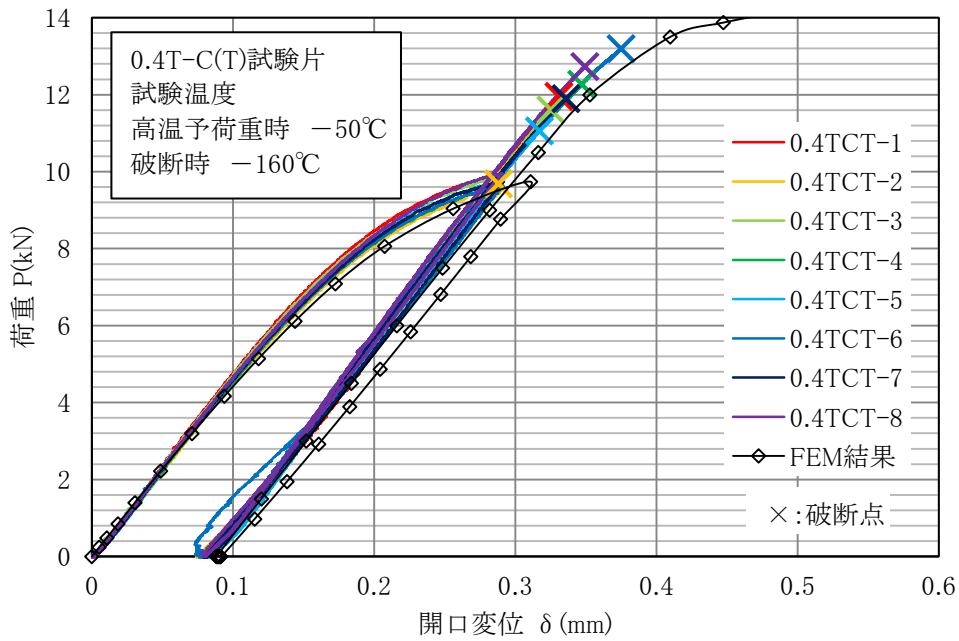
(2)ワイブルパラメータの温度依存性

今回のワイブル応力評価では、平成 26 年度の 1T-C(T)試験片にて算出したワイ

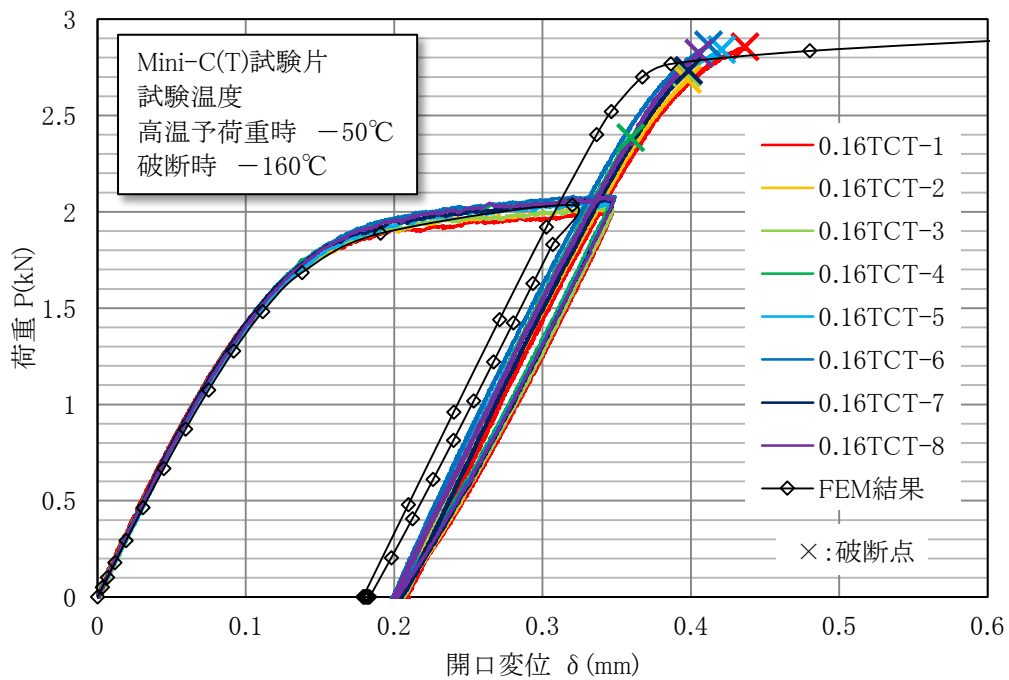
ブルパラメータから温度依存性を考慮して設定したものをそのまま適用しているが、例えば、図 4.1.2.2-14～図 4.1.2.2-16 の(b-1)及び(b-2)に示すように、累積破損確率- $K_J$  関係においてマスターカーブ法のカーブと比べて単調引張のカーブとズレが発生していることと、ワイブル応力による予測と比べて、試験結果のばらつきが非常に小さいこと等を勘案すると、特に 0.4T-C(T)や Mini-C(T)試験片に対して、ワイブルパラメータ(m 値、 $\sigma_u$  両方)が適切な値に設定できていないと推定される。特に-160°Cのパラメータは温度依存性がないとして、-110°Cの結果と同様としているが、その妥当性についても検討の余地があると考えられる。

### (3)Mini-C(T)試験片に対するワイブル応力評価

図 4.1.2.2-14(b-1)、(b-2)において、 $K_J$ の増加に対して累積破損確率の上昇が低く、図 4.1.2.2-14 (a)の荷重の関係と比べても、整合性が取れていない。これは、図 4.1.2.2-8(b)に示した荷重-開口変位からも分かるように、試験での破断点は荷重の増加に対し、変位が大きく増え始める領域になる。そのため、ワイブル応力評価に用いるき裂先端近傍の最大主応力の増加は軽微であるものの、ひずみ量増加による  $K_J$  値の増加が顕著になる。その影響が Mini-C(T)試験片では大きく生じていると考えられ、試験片が小さく、荷重負荷レベルが高くなる場合には適用に限界がある可能性がある。



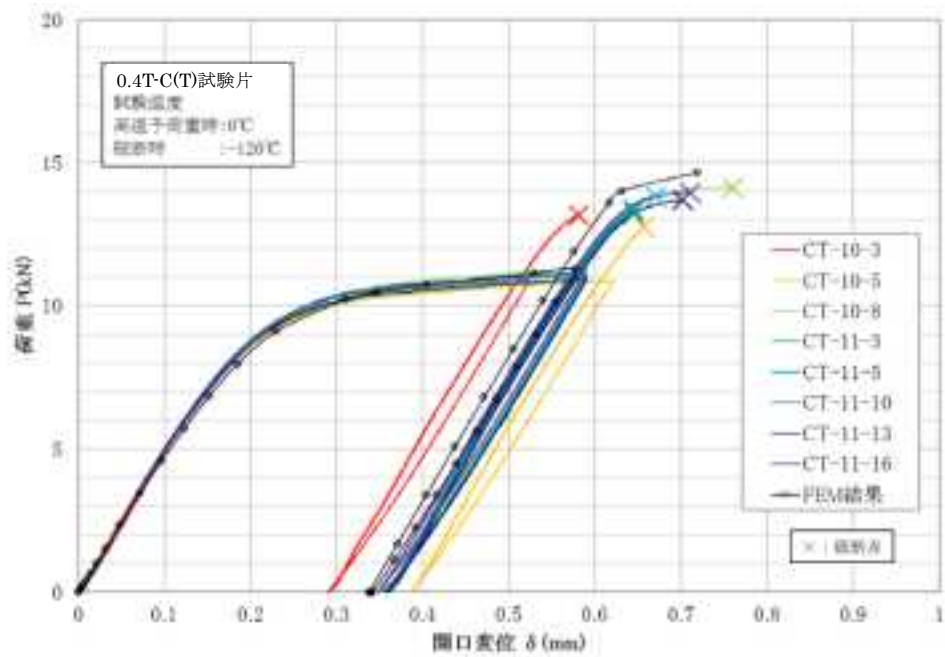
(a) ケース A (0.4T-C(T)試験片、SG 有、予荷重時 : -50°C、110MPa $\sqrt{m}$ 、再負荷時 : -160°C)



(b) ケース B

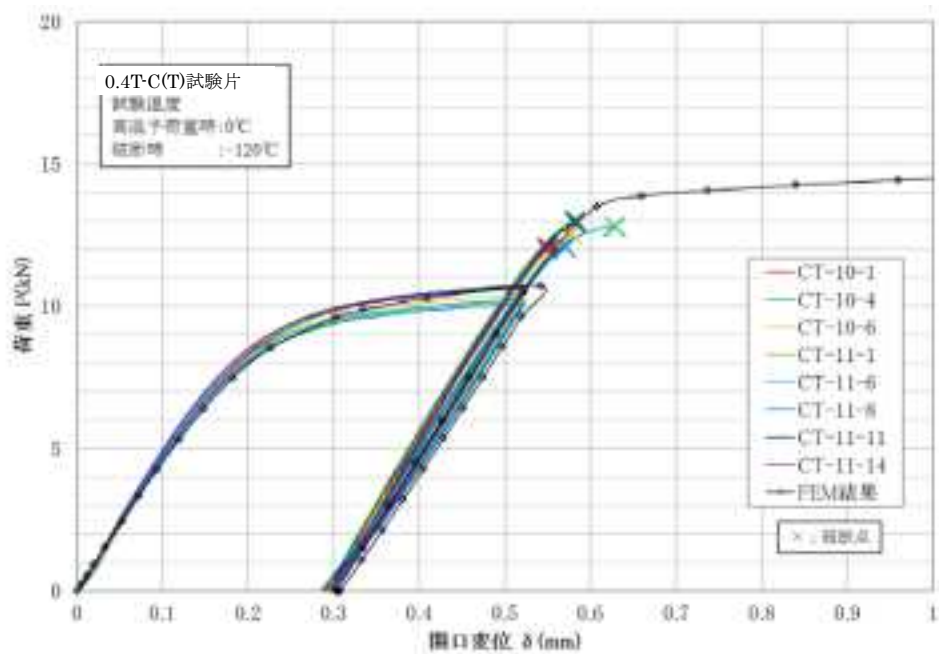
(Mini-C(T)試験片、SG 無(円弧状き裂)、予荷重時 : -50°C、110MPa $\sqrt{m}$ 、再負荷時 : -160°C)

図 4.1.2.2-8(1/2) 荷重-開口変位関係



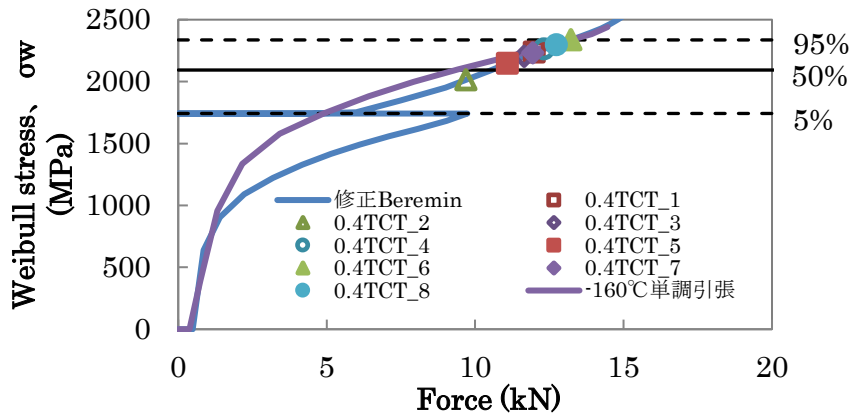
(c) ケース C

(0.4T-C(T)試験片、SG 無(円弧状き裂)、予荷重時：0°C、160MPa√m、再負荷時：-120°C)

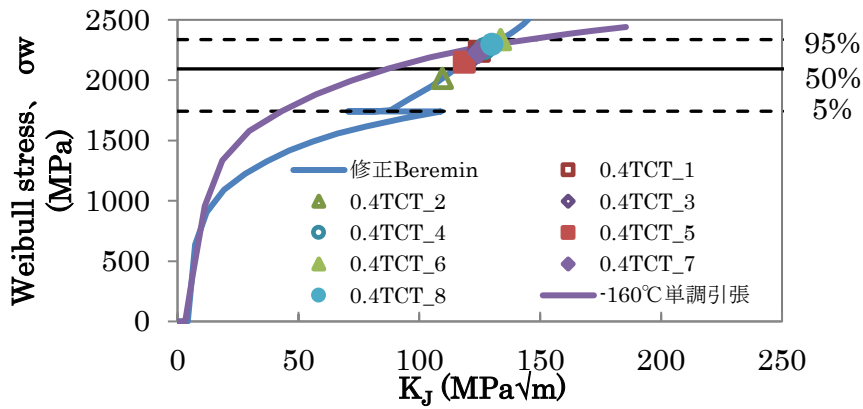


(d) ケース D (0.4T-C(T)試験片、SG 有、予荷重時：0°C、160MPa√m、再負荷時：-120°C)

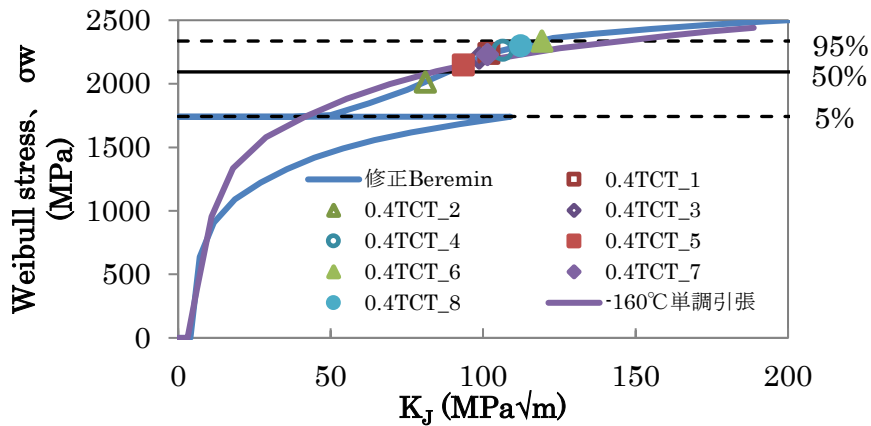
図 4.1.2.2-8(2/2) 荷重－開口変位関係



(a) ワイブル応力-荷重関係



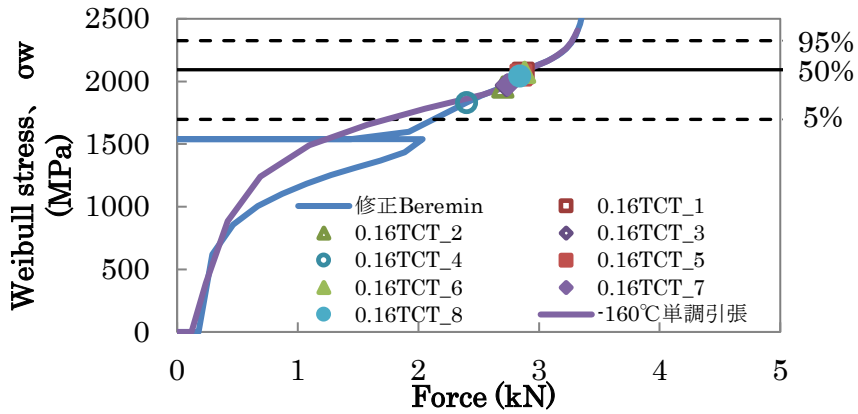
(b-1) ワイブル応力- $K_J$  関係 (WPS 予荷重時の  $K_J$  値塑性分を除荷以降の  $K_J$  値に加算)



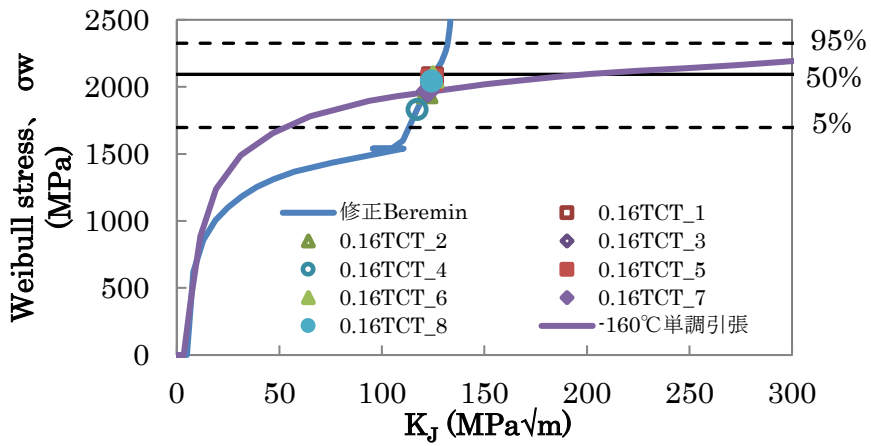
(b-2) ワイブル応力- $K_J$  関係 ( $K_J$  値を予荷重、再負荷過程それぞれで計算(ASTM))

図 4.1.2.2-9 ワイブル評価結果 ケース A

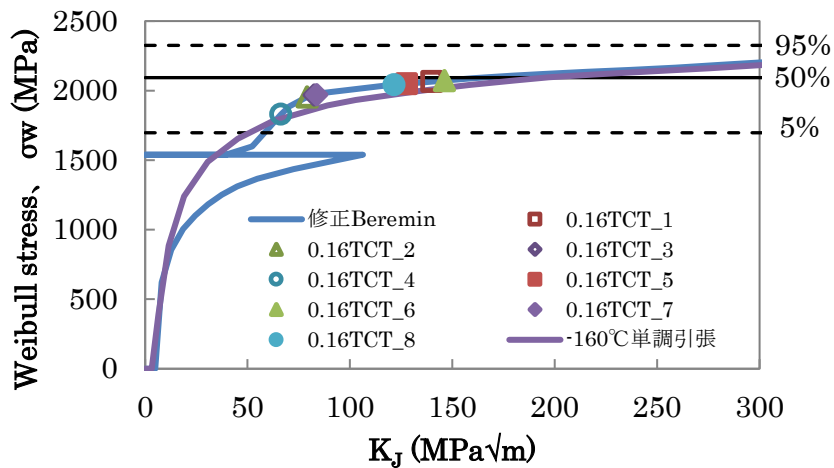
(0.4T-C(T)試験片、SG 有、予荷重時：-50°C、110MPa√m、再負荷時：-160°C)



(a) ワイブル応力-荷重関係



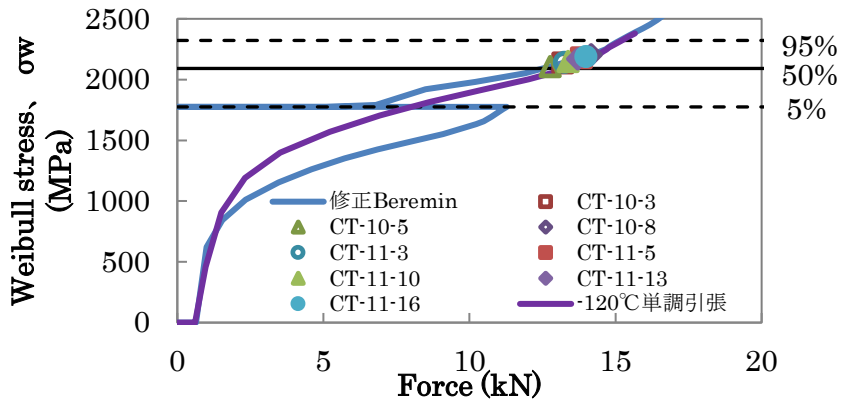
(b-1) ワイブル応力- $K_J$  関係 (WPS 予荷重時の  $K_J$  値塑性分を除荷以降の  $K_J$  値に加算)



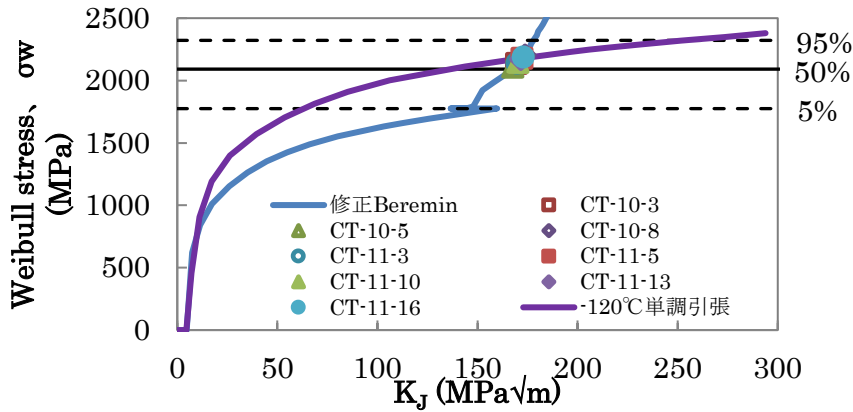
(b-2) ワイブル応力- $K_J$  関係 ( $K_J$  値を予荷重、再負荷過程それぞれで計算(ASTM))

図 4.1.2.2-10 ワイブル評価結果 ケース B

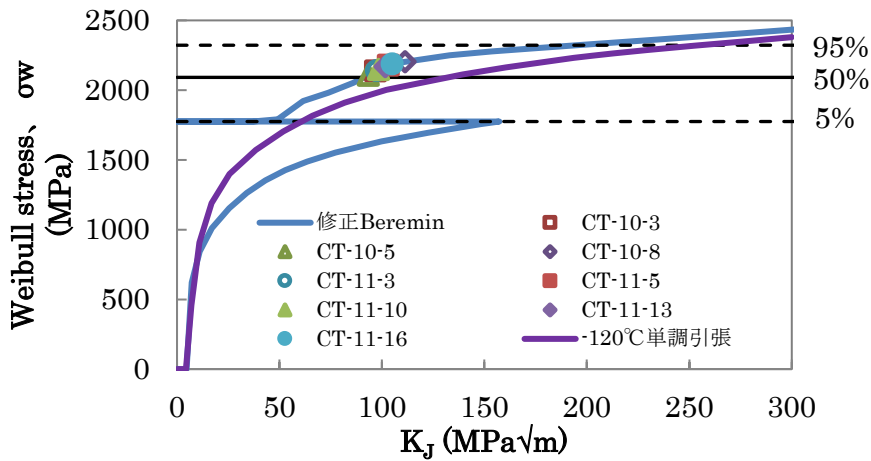
(Mini-C(T)試験片、SG 無(円弧状き裂)、予荷重時：-50°C、110MPa√m、再負荷時：-160°C)



(a) ワイブル応力-荷重関係



(b-1)ワイブル応力- $K_J$  関係 (WPS 予荷重時の  $K_J$  値塑性分を除荷以降の  $K_J$  値に加算)

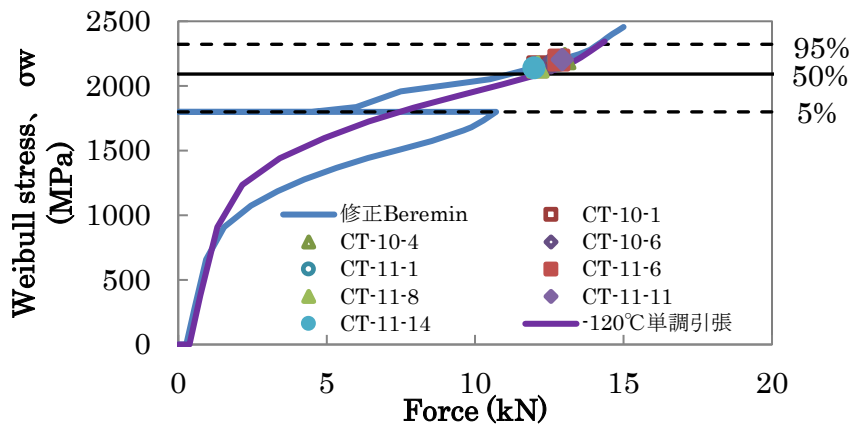


(b-2)ワイブル応力- $K_J$  関係 ( $K_J$  値を予荷重、再負荷過程それぞれで計算(ASTM))

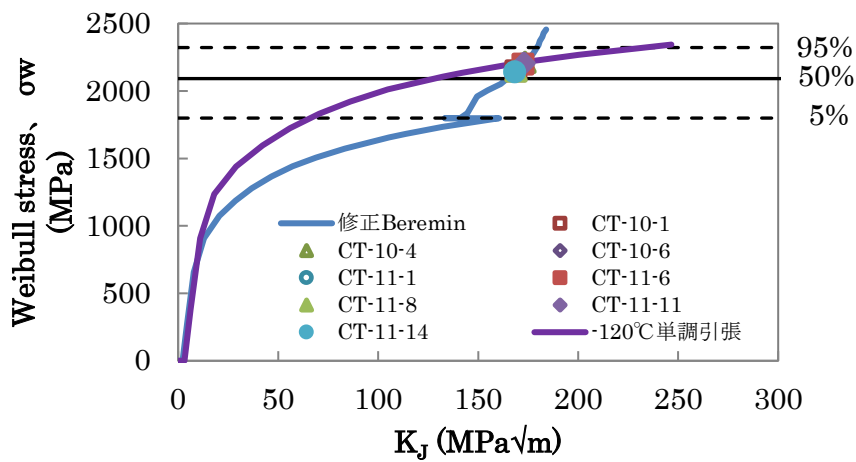
図 4.1.2.2-11 ワイブル評価結果 ケース C

(0.4T-C(T)試験片、SG 無(円弧状き裂)、予荷重時：0°C、160MPa√m、再負荷時：-120°C)

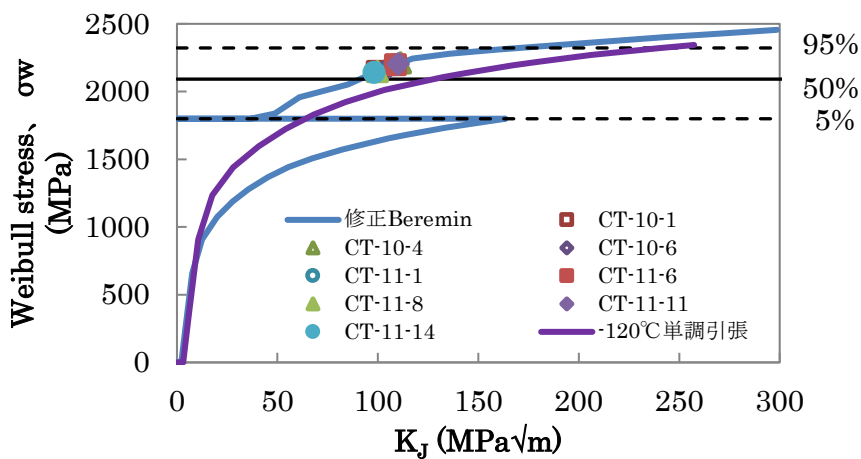




(a) ワイブル応力-荷重関係



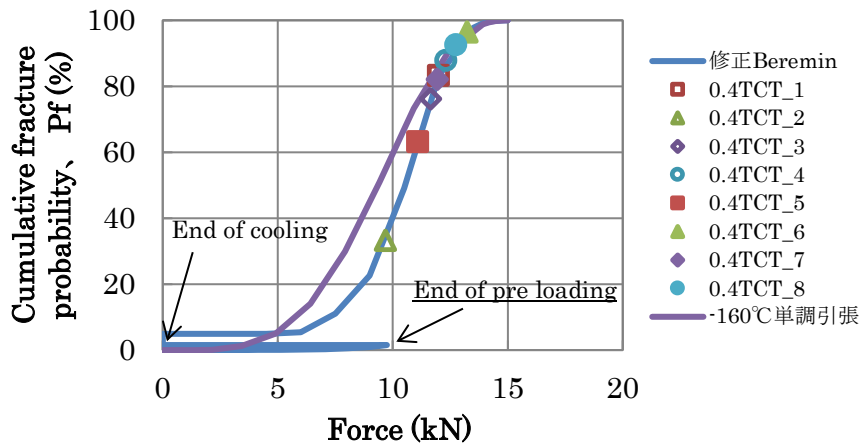
(b-1) ワイブル応力- $K_J$ 関係 (WPS予荷重時の $K_J$ 値塑性分を除荷以降の $K_J$ 値に加算)



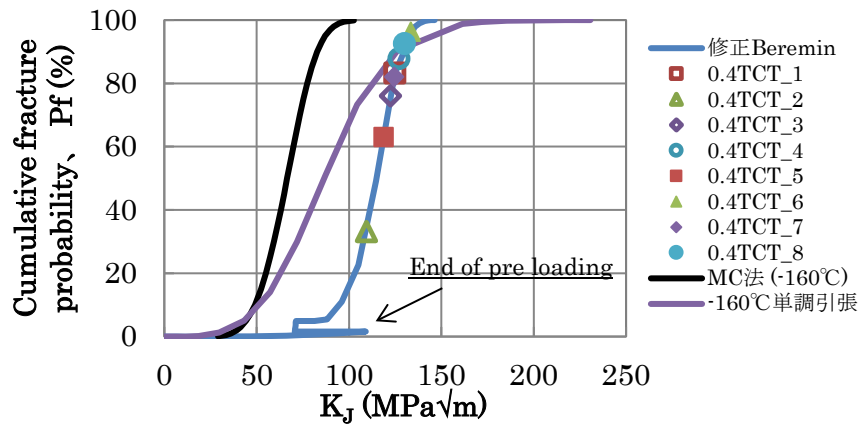
(b-2) ワイブル応力- $K_J$ 関係 ( $K_J$ 値を予荷重、再荷重過程それぞれで計算(ASTM))

図 4.1.2.2-12 ワイブル評価結果 ケース D

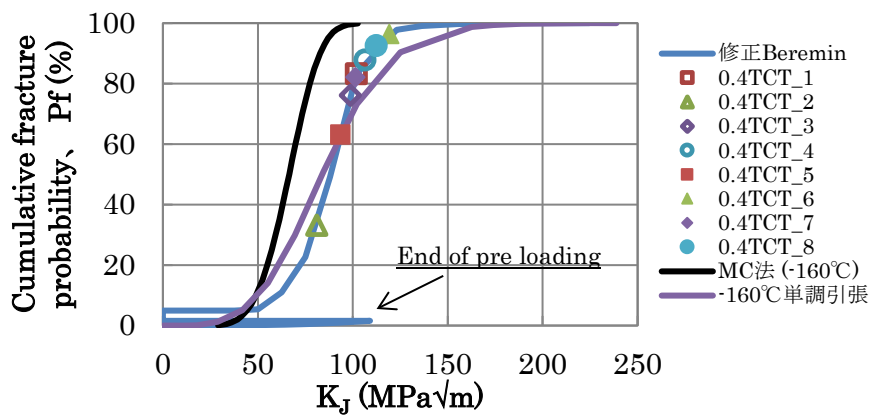
(0.4T-C(T)試験片、SG 有、予荷重時：0℃、160MPa√m、再荷重時：-120℃)



(a) 累積破損確率－荷重関係



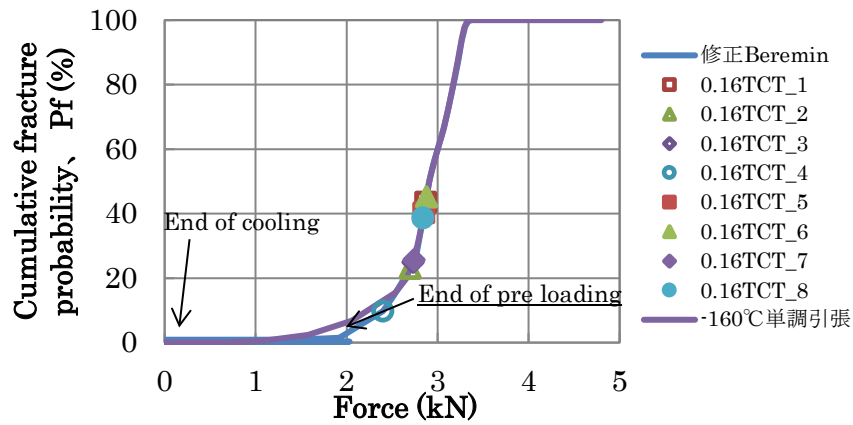
(b-1) 累積破損確率－ $K_J$  関係 (WPS 予荷重時の  $K_J$  値塑性分を除荷以降の  $K_J$  値に加算)



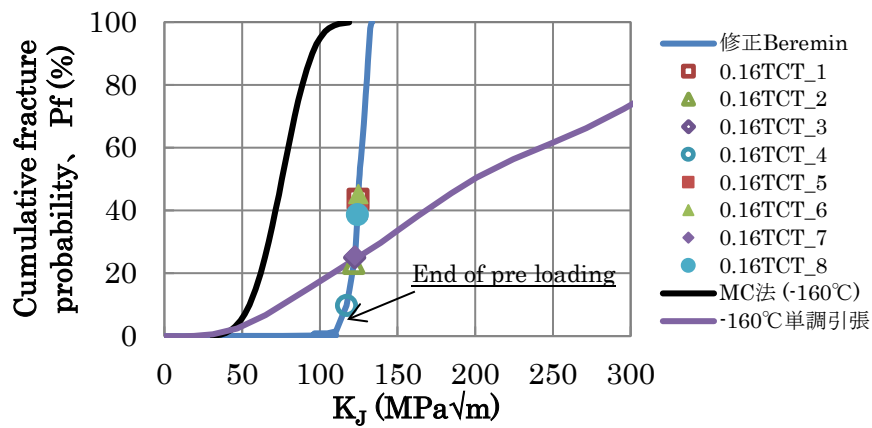
(b-2) 累積破損確率－ $K_J$  関係 ( $K_J$  値を予荷重、再負荷過程それぞれで計算(ASTM))

図 4.1.2.2-13 累積破損確率評価結果 ケース A

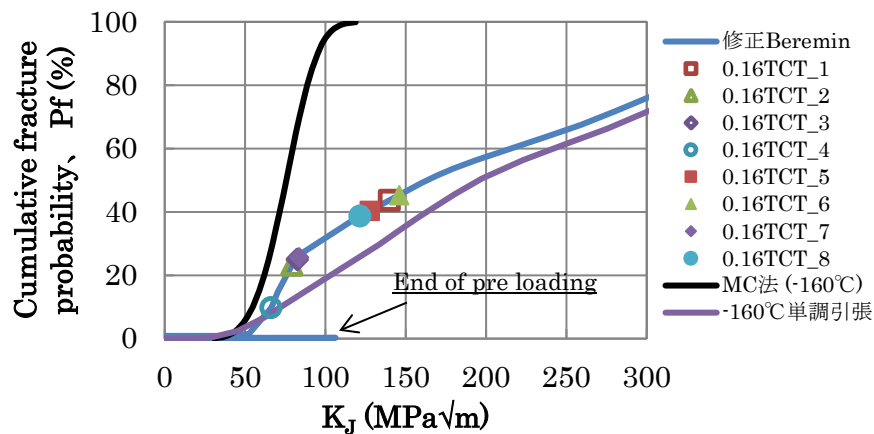
(0.4T-C(T)試験片、SG 有、予荷重時：-50°C、110MPa√m、再負荷時：-160°C)



(a) 累積破損確率－荷重関係



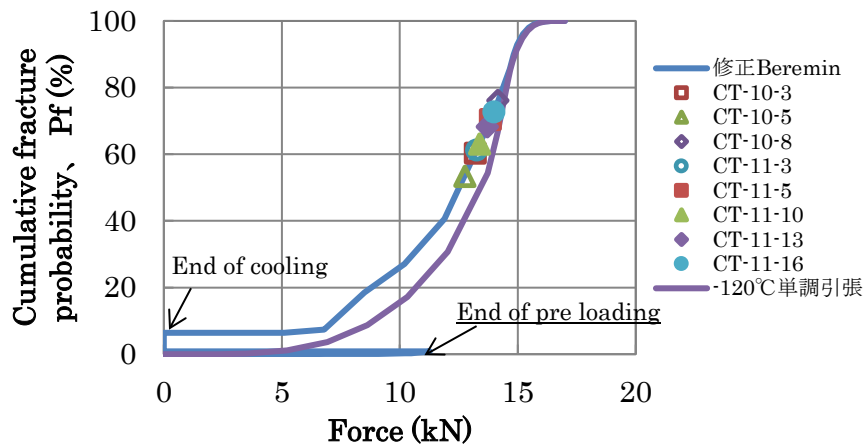
(b-1) 累積破損確率－ $K_J$  関係 (WPS 予荷重時の  $K_J$  値塑性分を除荷以降の  $K_J$  値に加算)



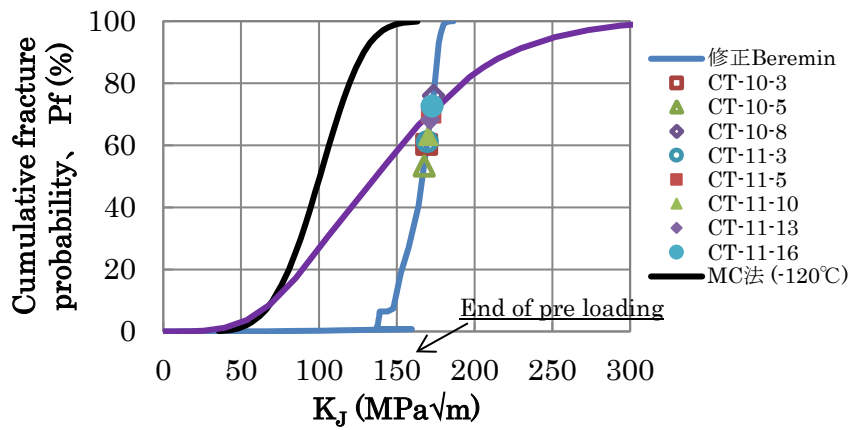
(b-2) 累積破損確率－ $K_J$  関係 ( $K_J$  値を予荷重、再負荷過程それぞれで計算(ASTM))

図 4.1.2.2-14 累積破損確率評価結果 ケース B

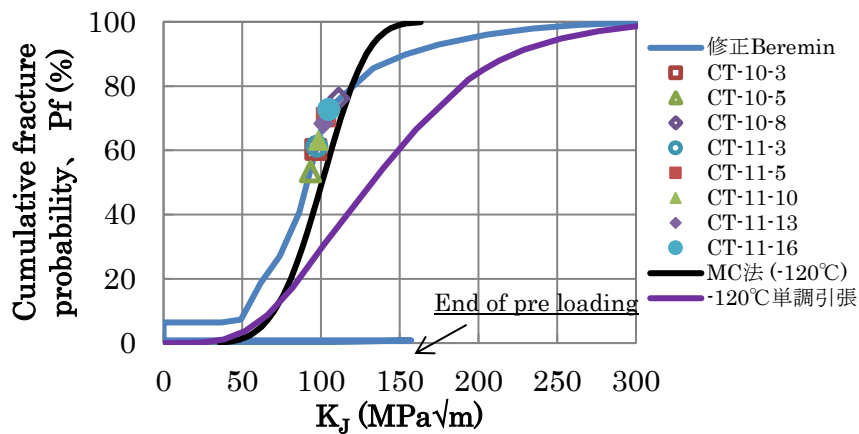
(Mini-C(T)試験片、SG 無(円弧状き裂)、予荷重時：-50°C、110MPa√m、再負荷時：-160°C)



(a) 累積破損確率－荷重関係

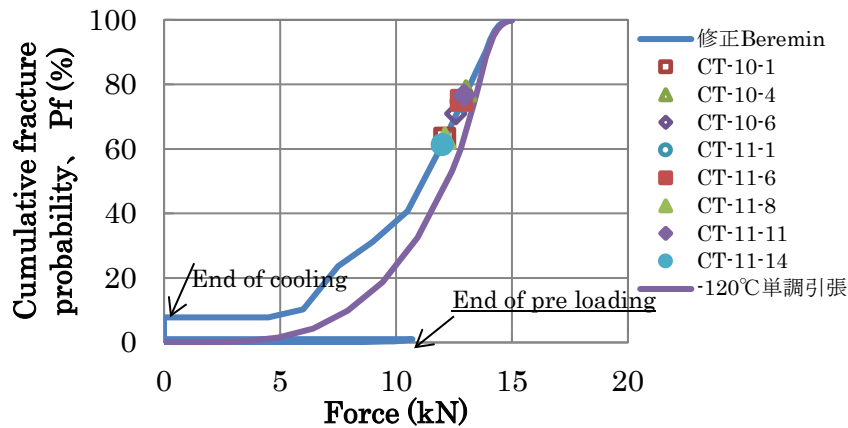


(b-1) 累積破損確率－ $K_J$  関係 (WPS 予荷重時の  $K_J$  値塑性分を除荷以降の  $K_J$  値に加算)

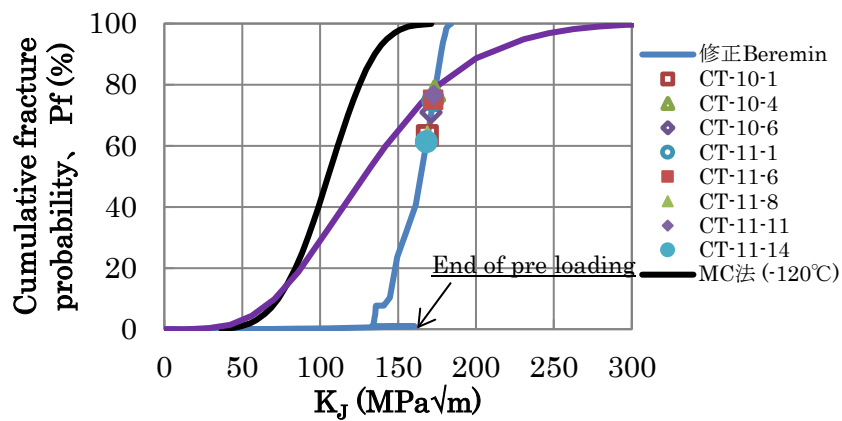


(b-2) 累積破損確率－ $K_J$  関係 ( $K_J$  値を予荷重、再負荷過程それぞれで計算(ASTM))

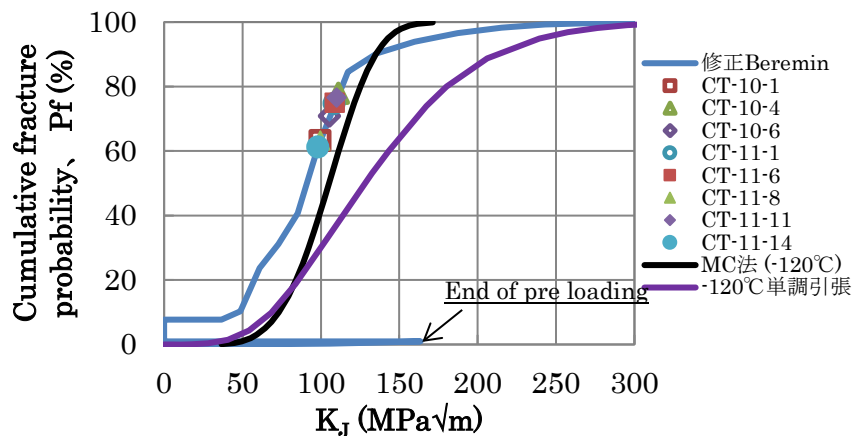
図 4.1.2.2-15 累積破損確率評価結果 ケース C  
(0.4T-C(T)試験片、SG 無(円弧状き裂)、予荷重時： $0^{\circ}\text{C}$ 、 $160\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、再負荷時： $-120^{\circ}\text{C}$ )



(a) 累積破損確率－荷重関係

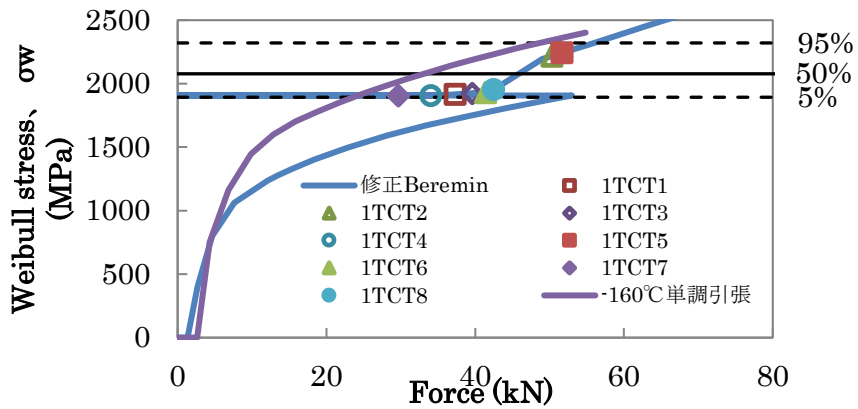


(b-1) 累積破損確率－ $K_J$  関係 (WPS 予荷重時の  $K_J$  値塑性分を除荷以降の  $K_J$  値に加算)

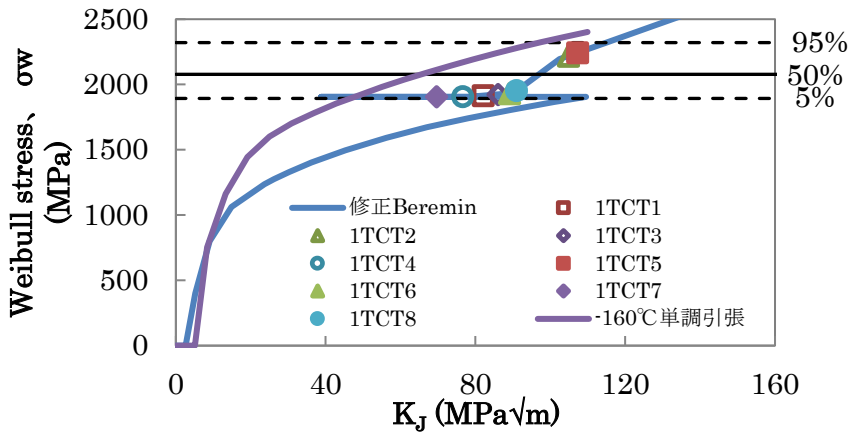


(b-2) 累積破損確率－ $K_J$  関係 ( $K_J$  値を予荷重、再負荷過程それぞれで計算(ASTM))

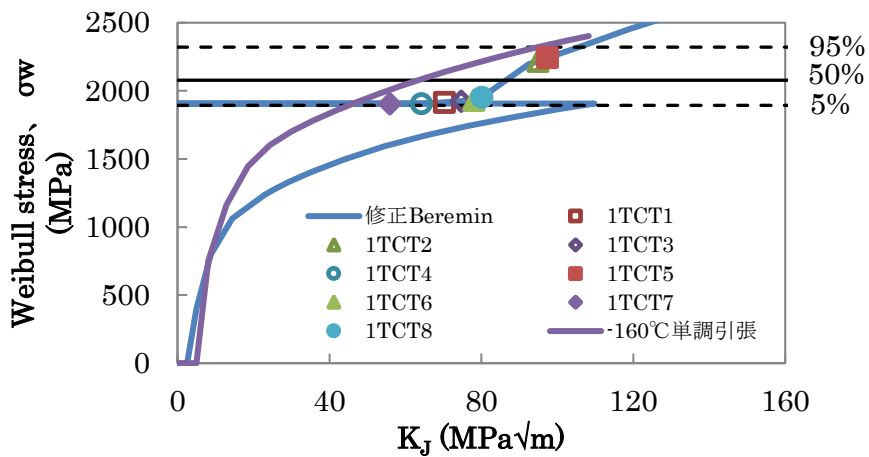
図 4.1.2.2-16 累積破損確率評価結果 ケース D  
(0.4T-C(T)試験片、SG 有、予荷重時：0°C、160MPa√m、再負荷時：-120°C)



(a) ワイブル応力-荷重関係

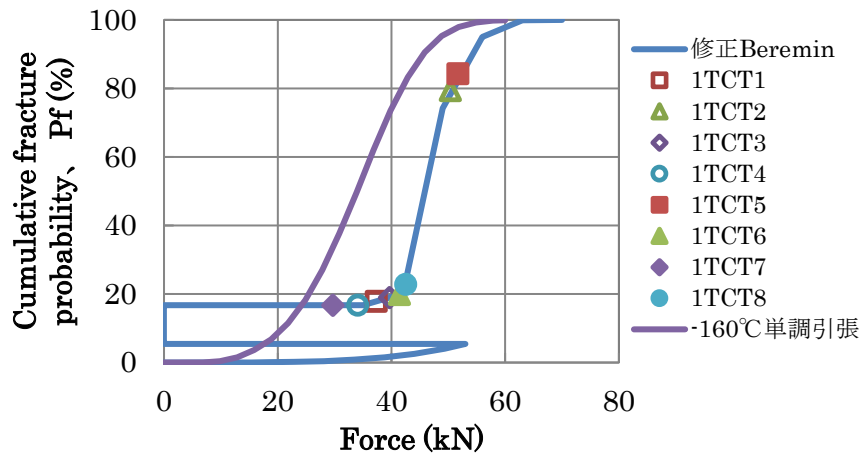


(b-1) ワイブル応力- $K_J$  関係 (WPS 予荷重時の  $K_J$  値塑性分を除荷以降の  $K_J$  値に加算)

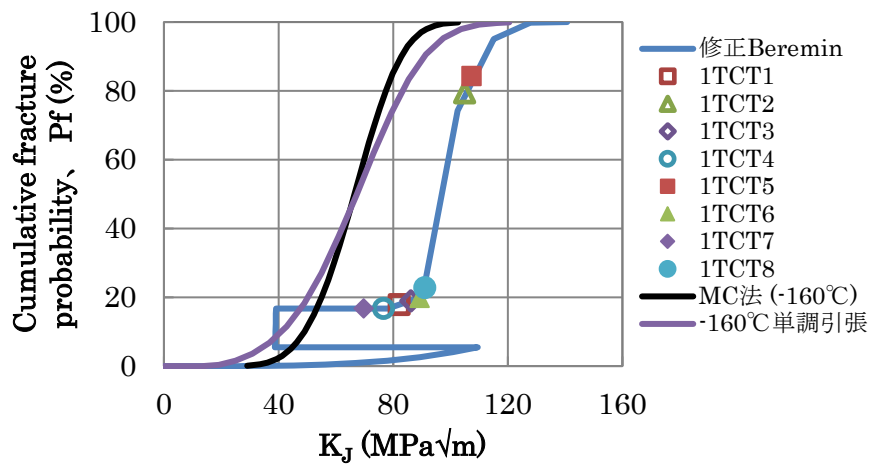


(b-2) ワイブル応力- $K_J$  関係 ( $K_J$  値を予荷重、再負荷過程それぞれで計算 (ASTM))

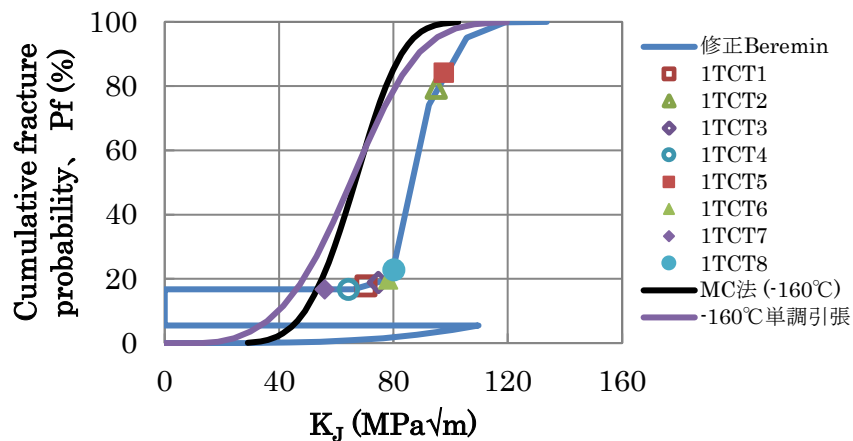
図 4.1.2.2-17 ワイブル応力評価結果 (平成 26 年度の結果) [4.1.2.2-3]  
(1T-C(T)試験片、SG 有、予荷重時: 0°C、160MPa√m、再負荷時: -120°C)



(a) 累積破損確率－荷重関係



(b-1) 累積破損確率－ $K_J$  関係 (WPS 予荷重時の  $K_J$  値塑性分を除荷以降の  $K_J$  値に加算)



(b-2) 累積破損確率－ $K_J$  関係 ( $K_J$  値を予荷重、再負荷過程それぞれで計算(ASTM))

図 4.1.2.2-18 累積破損確率評価結果 (平成 26 年度の結果) [4.1.2.2-3]  
(1T-C(T)試験片、SG 有、予荷重時：0°C、160 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、再負荷時：-120°C)

・参考文献

- [4.1.2.2-1] 平成 25 年度 軽水炉燃材料詳細健全性調査 報告書
- [4.1.2.2-2] W.Lefevre, et al., “A modified Beremin model to simulate the warm pre-stress effect”, Nuclear Engineering and Design 216, pp.27-42, 2002.
- [4.1.2.2-3] 平成 26 年度 軽水炉燃材料詳細健全性調査 報告書
- [4.1.2.2-4] 一般社団法人日本電気協会 原子力規格委員会 JEAC 4216-2011 “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”, (2011).
- [4.1.2.2-5] ASTM E1921-10e1, “Standard Test Method for Determination of Reference Temperature,  $T_0$ , for Ferritic Steels in the Transition Range”
- [4.1.2.2-6] T.Yuritzinn et al., “Illustration of the WPS benefit through BATMAN test series:Test on large specimens under WPS loading configurations”, Engineering Fracture Mechanics 75, pp.2191-2207, 2008.



#### 4.1.2.3 高温予荷重(WPS)効果に関する試験のまとめ

原子炉圧力容器の加圧熱衝撃(PTS)時の構造健全性評価における高温予荷重(WPS)効果に関して、予荷重レベル(予荷重によって生じるき裂先端塑性域の大きさ)の影響の確認、荷重-温度履歴の影響の確認を目的として、本年度は代表的な WPS 条件 4 ケースについて、昨年度までと同じ PWR 比較標準材に対して、0.4T-C(T)試験片および Mini-C(T)試験片を用いて WPS 効果確認試験を行った。また、解析的検討として、平成 26 年度及び本年度に実施した WPS 効果確認試験の中から 4 ケースを対象としてローカルアプローチ(LA)法を用いた解析を行った。

実験的アプローチとして、国内 PWR 比較標準材から採取した 0.4T-C(T)試験片を用いて、予荷重時の塑性域の広がりや平成 26 年度に実施した Mini-C(T)試験片の LUCF 試験と同等となるような LUCF 条件で試験を実施した結果、Mini-C(T)試験片による WPS 試験結果と同様、WPS 効果が明確には認められなかった。また、サイドグループ有無は WPS 効果に影響しないことを確認した。WPS 効果への荷重-温度履歴の影響に関し、平成 26 年度の WPS 効果確認試験(LUCF 条件)と同一の予荷重温度、再負荷温度で 0.4T-C(T)試験片を用いて LCF 条件で試験を行った結果、LUCF 条件と比較して再負荷時の破壊靱性  $K_{Jc}$  に顕著な違いは認められなかった。また、LUCF 条件と比較して再負荷時の破壊靱性  $K_{Jc}$  のばらつきが小さくなることが明らかとなった。Mini-C(T)試験片に対する WPS 効果への荷重-温度履歴の影響に関し、平成 26 年度に実施した LUCF 条件と同一の予荷重、温度で LCF 条件にて試験を行った。LUCF 条件とは異なり、LCF 条件では WPS 効果が確認できた。

WPS 試験で得られた再負荷時の破壊靱性  $K_{Jc}$  に関して、WPS 効果を予測する 4 つの工学モデルによる評価結果にとの比較を行い、すべてのケースにおいて ACE モデルが最も保守的な予測値を与えることを明らかにした。また、本年度実施した WPS 試験結果のすべてが ACE モデルの下限線を上回ることから ACE モデルの保守性を確認した。

解析的アプローチとして、修正 Beremin モデル(ワイブル応力)を取り入れた LA 法に基づいた解析を実施した結果、平成 26 年度及び本年度に実施した試験結果について、WPS 効果の有無を定性的に説明可能であることを明らかにした。

#### 4.1.3 き裂伝播停止破壊靱性(K<sub>Ia</sub>)に関する試験

原子炉圧力容器の健全性評価を行う上で、脆性き裂発生から耐圧機能の喪失に直接結びつくき裂の板厚貫通までにはある程度の裕度があると考えられる。健全性評価における裕度の定量化を図るためには、き裂が板厚を貫通する状態に至るまでのき裂進展挙動を破壊力学的に評価すること、すなわちき裂伝播停止破壊靱性(K<sub>Ia</sub>)の温度依存性を評価する必要がある。しかし、後述するようにき裂伝播停止試験には大型の試験片が必要であり、中性子照射試験を行うことは困難である。照射材の K<sub>Ia</sub> 評価を行うためには、他の破壊靱性パラメータとの相関を利用して間接的に評価する手法を整備する必要がある。既往研究において、破壊靱性参照温度 T<sub>0</sub> と K<sub>Ia</sub>、<sup>[4.1.3-1],[4.1.3-2]</sup>及び計装シャルピーで得られるき裂伝播停止荷重 F<sub>a</sub> と K<sub>Ia</sub><sup>[4.1.3-3]-[4.1.3-6]</sup>に良い相関あることが報告されている。本年度は、昨年度の PWR 比較標準材(SA533B Cl.1 鋼)に引き続き、靱性レベルの異なる JRH 及び JRM 材を用いて計装シャルピー試験を実施し、K<sub>Ia</sub> との相関を調査した。

##### 4.1.3.1 計装シャルピー試験

###### (1) シャルピー衝撃試験片の製作

供試材には、平成 26 年度「き裂伝播停止試験並びに WPS 効果実証試験」にて K<sub>Ia</sub> 試験で使用済みの JRH 及び JRM 材の残材を用いた。供試材の熱処理条件、化学成分、機械的特性及びシャルピー衝撃特性を表 4.1.3-1 に示す。供試材からのシャルピー試験片採取方法を図 4.1.3-1 に、試験片の形状及び寸法を表 4.1.3-2 に示す。試験片は JIS Z2242-2005「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」<sup>[4.1.3-7]</sup>に規定されている 2mmV ノッチ試験片とした。試験片は、供試材の 1/4T 位置(T：供試材板厚)近傍から採取し、採取方向が C 方向(試験片長手方向が圧延方向と直角)となるように、各材料あたり 20 体、合計 40 本の試験片を製作した。

###### (2) 未照射材の計装シャルピー試験試験結果

300J 計装シャルピー試験機を用いて、-100°C～室温の範囲で試験を行った。試験に使用したシャルピー衝撃試験機の諸元を表 4.1.3-3 に示す。図 4.1.3-2 に示すように、計測した荷重の時刻歴からき裂伝播停止の荷重(F<sub>a</sub>)を評価した。既往研究ではき裂伝播停止点の決定法に関する詳細な記述はないため目測で停止点を決定した。き裂伝播停止点の決定法に関する詳細な検討は次年度に実施する。表 4.1.3-4 に、シャルピー衝撃試験結果と F<sub>a</sub> の評価結果を示す。

既往研究<sup>[4.1.3-3]-[4.1.3-6]</sup>では、試験温度と F<sub>a</sub> の関係を、次の式でフィッティングすることにより T<sub>Fa4kN</sub> の温度を評価している。

$$F_a = 4 * \exp((T - T_{Fa4kN}) / A) \quad (4.1.3-1)$$

ここで、F<sub>a</sub> はき裂伝播停止点の荷重、T は試験温度、T<sub>Fa4kN</sub> と A は最小二乗法によるフィッティングで決まる係数である。表 4.1.3-4 及び図 4.1.3-3 に T<sub>Fa4kN</sub> の評価結果を示す。図

4.1.3-4 にき裂伝播停止破壊靱性参照温度( $T_{KIa}$ )と  $T_{Fa4kN}$  の相関を、既往研究<sup>[4.1.3-3]-[4.1.3-6]</sup>のデータと併せて示す。本研究で用いた S1 材、JRH 材及び JRM 材とも既往データの範囲内に分布しており、 $T_{KIa}$  との相関は良好であることが確認できた。 $T_{KIa}$  と  $T_{Fa4kN}$  との相関は以下の式で表される。

$$T_{KIa} = T_{Fa4kN} + 10 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \sigma = 12.5^\circ\text{C} \quad (4.1.3-2)$$

#### 4.1.3.2 JAEA 既存材料の計装シャルピーデータ分析

JAEA の既存材料のなかで照射材の計装データが取得されている材料について、 $T_{Fa4kN}$  の評価を行った。表 4.1.3-5 に、これら JAEA 既存材料の化学成分を示す。表 4.1.3-6 に JAEA 既存材料の  $F_a$ 、 $T_{Fa4kN}$ 、 $T_{41J}$  及び関連温度  $RT_{NDT}$  を示す。照射材については照射量も示す。図 4.1.3-5 に、JAEA 既存材料の  $T_{Fa4kN}$  の評価結果を示す。

#### 4.1.3.3 考察

図 4.1.3-6 に、関連温度シフト( $\Delta RT_{NDT}$ )とき裂伝播停止破壊靱性参照温度シフト( $\Delta T_{Fa4kN}$ )の相関を示す。 $\Delta RT_{NDT}$  は照射によるシャルピーシフト  $\Delta T_{41J}$  に等しい。 $T_{KIa}$  と良好な相関を示す  $T_{Fa4kN}$  のシフトは関連温度シフトよりも明らかに小さく、き裂伝播停止破壊靱性の照射脆化感受性はシャルピーや破壊靱性よりも低いことが示された。JEAC4206 の改定で導入が予定されている  $K_{Ia}$  遷移曲線は  $RT_{NDT}$  を元に設定されるため、照射材については保守側の評価になると考えられる。JEAC4206 の改定で導入が予定されている  $K_{Ia}$  遷移曲線は以下の式で与えられる。

$$K_{Ia} = 29.46 + 15.16 * \exp(0.0274 * (T - RT_{NDT}(\text{調整値})))$$

$$RT_{NDT}(\text{調整値}) = \text{初期 } RT_{NDT} + \Delta RT_{NDT} \quad (4.1.3-2)$$

図 4.1.3-7 に、JEAC4206 の  $K_{Ia}$  遷移曲線と過年度に測定した材料の  $K_{Ia}$  値及び照射材の  $T_{Fa4kN}$  から評価した  $K_{Ia}$  マスターカーブ 5%下限曲線の比較を示す。既往研究のデータ<sup>[4.1.3-8]-[4.1.3-15]</sup>、 $K_{Ia}$  実測値、及び  $T_{Fa4kN}$  を用いて評価した照射材の  $K_{Ia}$  5%下限曲線すべて、JEAC4206 の改定版で導入が予定されている  $K_{Ia}$  遷移曲線ではほぼ包絡できることが確認できた。

#### 4.1.3.4 まとめ

監視試験にも適用できる  $K_{Ia}$  評価手法を整備することを目的に、計装シャルピー試験におけるき裂伝播停止荷重  $F_a$  と  $K_{Ia}$  の相関について未照射材を用いた検討を行った。計装シャルピー試験におけるき裂伝播停止荷重  $F_a=4kN$  となる温度  $T_{Fa4kN}$  と  $T_{KIa}$  との間に良好な相関が確認できた。また、JAEA の既存材料のなかで照射材の計装データが取得されている材

料について、 $T_{Fa4kN}$  の評価を行った。き裂伝播停止破壊靱性の照射脆化感受性はシャルピーや破壊靱性よりも低く、JEAC4206 の改定で導入が予定されている  $K_{Ia}$  遷移曲線は保守側の評価を与えることを間接的に確認した。

今後廃炉材など大型試験片が採取可能な材料が入手でき次第、照射材を用いて  $T_o$  及び  $T_{Fa4kN}$  と  $T_{KIa}$  との相関の確認を行うことが望ましいと考えられる。

#### 参考文献

- [4.1.3-1] K.Wallin、 et al.、“Master Curve based Correlation between Static Initiation Toughness  $K_{Ic}$  and Crack Arrest Toughness  $K_{Ia}$ ”、24th MPA-Seminar、(1998).
- [4.1.3-2] M. EricksonKirk、 et al.、“THE INTERRELATIONSHIPS OF  $K_{Ia}$ 、  $K_{Ic}$ 、 AND  $J_{Ic}$ 、 AND THE IMPLICATIONS OF THESE RELATIONSHIPS ON USE OF FRACTURE MODELS OVER THE RANGES OF HARDENING OBSERVED IN FERRITIC STEELS”、PVP2006-ICPVT-11-93651、(2006).
- [4.1.3-3] K. Wallin, ESIS20, pp.165-176 (1996).
- [4.1.3-4] Planman T, SMiRT-14, G11/1 (1997).
- [4.1.3-5] Elisabeth Keim, PVP2007-26506 (2007).
- [4.1.3-6] K. Müller, G. Pusch, Elsevier Science LTd. And ESIS, pp.263-270, (2002).
- [4.1.3-7] JIS Z2242-2005、“金属材料のシャルピー衝撃試験方法”、(2005).
- [4.1.3-8] 日本溶接協会 原子力研究委員会 7HST 小委員会、“原子力圧力容器用超厚鋼材の安全性に関する試験研究”、(昭和 53 年 10 月).
- [4.1.3-9] 日本溶接協会 原子力研究委員会 8HST 小委員会、“原子力圧力容器用超厚鋼材の安全性に関する試験研究”、(昭和 54 年 11 月).
- [4.1.3-10] 日本溶接協会 原子力研究委員会 9HST 小委員会、“原子力圧力容器用超厚鋼材の安全性に関する試験研究(Ⅲ) 成果報告書”、(昭和 56 年 1 月).
- [4.1.3-11] 発電設備技術検査協会、溶接部等熱影響部信頼性実証試験に関する調査報告書 [原子炉圧力容器加圧熱衝撃試験][総まとめ版]、(平成 4 年 3 月).
- [4.1.3-12] 火力原子力発電技術協会、“構造基準委員会 KIR 検討会活動報告書(最終年度)[第一種容器の破壊靱性規定策定]”、(平成 8 年 3 月).
- [4.1.3-13] 日本溶接協会 原子力研究委員会 0TS 小委員会、“軽水炉圧力容器ノズル部の熱衝撃に関する研究 成果報告書”(JWES-AE-8202)、(昭和 57 年 3 月).
- [4.1.3-14] 日本溶接協会 原子力研究委員会 1TS 小委員会、“軽水炉圧力容器ノズル部の熱衝撃に関する研究(Ⅱ) 成果報告書”(JWES-AE-8301)、(昭和 58 年 1 月).
- [4.1.3-15] 日本溶接協会 原子力研究委員会 2TS 小委員会、“軽水炉圧力容器ノズル部の熱衝撃に関する研究(Ⅲ) 成果報告書”(JWES-AE-8319)、(昭和 58 年 12 月).

表 4.1.3-1 供試材 JRM 材及び JRH 材の材料特性

(a) 熱処理条件

鋼板	JRH 及び JRM 200mm 厚
焼入れ	880℃・水冷
焼戻し	650℃・4h、空冷
PWHT	615℃・15h、炉冷

(b) 化学成分 (wt.%)

Material ID	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
JRH	0.17	0.23	1.47	0.014	0.017	0.15	0.57	0.10	0.51
JRM	0.17	0.24	1.46	0.010	0.009	0.09	0.59	0.10	0.51

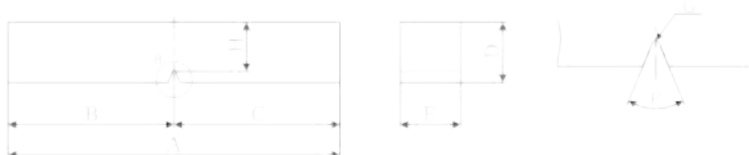
(c) 機械的特性 (引張試験)

JRH				JRM			
温度, °C	$\sigma_y$ , MPa	$\sigma_u$ , MPa	突合伸, %	温度, °C	$\sigma_y$ , MPa	$\sigma_u$ , MPa	突合伸, %
-150	716	823	25	-150	680	810	29
-150	708	827	28	-150	687	814	28
-100	582	726	23	-100	562	721	31
-100	579	708	20	-100	551	718	31
-50	522	687	22	-50	507	688	28
-50	518	668	25	-50	504	668	29
24	478	607	24	24	458	597	26
23	508	612	23	24	458	595	23
150	438	568	18	150	418	556	21
150	435	568	17	150	414	556	24
290	426	607	21	290	417	593	28
290	424	604	17				

(d) シャルピー衝撃特性(ASTM 法)

供試材	シャルピー衝撃特性		
	T <sub>r30</sub> (°C)	RT <sub>NDT</sub> (°C)	USE (J)
JRH	-33	-12	86
JRM	-43	-30	160

表 4.1.3-2 シャルピーVノッチ衝撃試験片の寸法測定結果



単位, mm

(a) JRH 材

符号	基準値	A	B	C	D	E	F	G	H
		55±0.60	27.5±0.40	27.5±0.40	10±0.05	10±0.05	45° ±2°	R0.25±0.025	8±0.05
HCV1		55.18	27.61	27.56	10.02	10.03	45° 00'	0.250	8.03
HCV2		55.24	27.61	27.63	10.02	10.03	44° 54'	0.249	8.03
HCV3		55.25	27.61	27.64	10.02	10.03	44° 52'	0.247	8.03
HCV4		55.24	27.60	27.64	10.02	10.03	44° 44'	0.250	8.03
HCV5		55.25	27.63	27.62	10.02	10.02	45° 02'	0.249	8.04
HCV6		55.16	27.56	27.60	10.02	10.02	44° 45'	0.244	8.03
HCV7		55.23	27.62	27.61	10.02	10.03	45° 04'	0.243	8.03
HCV8		55.24	27.63	27.61	10.02	10.03	44° 55'	0.247	8.03
HCV9		55.23	27.62	27.62	10.02	10.03	44° 59'	0.248	8.03
HCV10		55.22	27.62	27.60	10.02	10.03	44° 56'	0.246	8.02
HCV11		55.24	27.64	27.60	10.02	10.03	45° 02'	0.254	8.02
HCV12		55.25	27.62	27.63	10.02	10.03	44° 52'	0.249	8.01
HCV13		55.23	27.62	27.62	10.02	10.03	44° 54'	0.246	8.02
HCV14		55.25	27.62	27.63	10.02	10.03	45° 01'	0.246	8.01
HCV15		55.24	27.64	27.60	10.02	10.03	44° 56'	0.250	8.01
HCV16		55.24	27.62	27.62	10.02	10.03	44° 54'	0.255	8.01
HCV17		55.23	27.62	27.62	10.02	10.03	44° 53'	0.250	8.01
HCV18		55.24	27.62	27.62	10.02	10.03	44° 54'	0.248	8.01
HCV19		55.25	27.62	27.64	10.02	10.03	44° 56'	0.249	8.00
HCV20		55.26	27.62	27.64	10.02	10.03	44° 52'	0.248	8.00

表 4.1.3-2 シャルピーV ノッチ衝撃試験片の寸法測定結果(つづき)



単位, mm

(b) JRM 材

符号	基準値							
	A	B	C	D	E	F	G	H
	55±0.60	27.5±0.40	27.5±0.40	10±0.05	10±0.05	45° ±2°	R0.25±0.025	8±0.05
MCV1	55.24	27.61	27.63	10.02	10.03	45° 02'	0.249	8.02
MCV2	55.26	27.63	27.63	10.02	10.03	45° 01'	0.240	8.02
MCV3	55.24	27.64	27.60	10.02	10.03	45° 12'	0.240	8.03
MCV4	55.22	27.63	27.59	10.02	10.03	44° 55'	0.250	8.02
MCV5	55.22	27.63	27.59	10.02	10.03	44° 55'	0.250	8.02
MCV6	55.24	27.62	27.62	10.01	10.03	44° 49'	0.251	8.01
MCV7	55.27	27.63	27.64	10.02	10.03	44° 47'	0.250	8.01
MCV8	55.21	27.64	27.57	10.02	10.02	44° 54'	0.249	8.01
MCV9	55.21	27.63	27.58	10.02	10.03	44° 53'	0.251	8.01
MCV10	55.20	27.61	27.58	10.02	10.03	44° 50'	0.249	8.02
MCV11	55.25	27.64	27.60	10.02	10.02	44° 47'	0.248	8.04
MCV12	55.25	27.63	27.62	10.02	10.03	44° 53'	0.251	8.02
MCV13	55.23	27.61	27.62	10.02	10.03	44° 59'	0.246	8.03
MCV14	55.21	27.62	27.58	10.02	10.03	44° 51'	0.248	8.02
MCV15	55.22	27.61	27.60	10.02	10.03	44° 34'	0.261	8.03
MCV16	55.23	27.61	27.62	10.02	10.02	44° 39'	0.242	8.02
MCV17	55.21	27.60	27.62	10.02	10.03	44° 58'	0.244	8.02
MCV18	55.21	27.63	27.58	10.02	10.02	44° 57'	0.249	8.01
MCV19	55.24	27.63	27.61	10.02	10.03	44° 42'	0.253	8.02
MCV20	55.23	27.62	27.62	10.02	10.02	44° 37'	0.242	8.01

表 4.1.3-3 計装シャルピー衝撃試験機諸元

ハンマー質量(kg)	26.64
刃先形状	ISO タップ
重心距離(m)	0.634
重力加速度(m/s <sup>2</sup> )	9.800
振り上げ角(deg)	144.5
振り上がり角(deg)	144.5
打撃中心距離(m)	0.750
容量(J)	300.3
打撃速度(m/s)	5.165
荷重分解能	12bit
サンプリング周波数	1MHz



表 4.1.3-4 シャルピー衝撃試験結果

材料	ID	温度, °C	吸収エネルギー, J	F <sub>a</sub> , kN	T <sub>Fa4kN</sub> , °C
JRH	HCV-1	11.8	75.2	脆性き裂発生無	-18.5
	HCV-2	-10	46.3	6	
	HCV-3	-10	54.5	7	
	HCV-4	-20	38.4	4	
	HCV-5	-20	37.7	5	
	HCV-6	-25	37.0	3	
	HCV-7	-25	33.8	2	
	HCV-8	-40	32.4	1	
	HCV-9	0	64.0	7	
	HCV-10	0	66.1	8	
	HCV-11	-5	55.5	7	
	HCV-12	-5	66.1	5	
	HCV-13	-15	43.6	5	
	HCV-14	-15	45.8	4	
	HCV-15	-20	42.4	3	
	HCV-16	-25	45.6	4	
	HCV-17	-30	32.6	2	
	HCV-18	5	62.2	8	
JRM	MCV-1	12.2	96.1	6	-0.4
	MCV-2	12.4	89.1	7	
	MCV-3	0	82.2	5	
	MCV-4	-10	50.7	3	
	MCV-5	-10	64.8	2	
	MCV-6	-5	65.3	3.5	
	MCV-7	-5	72.2	3	
	MCV-8	0	101.2	4	
	MCV-9	0	82.2	4.2	
	MCV-10	-25	45.8	1	
	MCV-11	5	93.0	6	
	MCV-12	5	89.9	5	
	MCV-13	-5	82.8	3.8	
	MCV-14	-15	71.1	2	
MCV-18	9	103.4	6.5		

表 4.1.3-5 JAEA 既存材料の化学成分, wt%

材料 ID	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SteelA	0.18	0.29	1.31	0.015	0.009	0.16	0.67	0.17	0.52
SteelB	0.19	0.17	1.42	0.005	0.001	0.04	0.65	0.13	0.5
JRQ	0.18	0.24	1.42	0.017	0.004	0.14	0.84	0.12	0.51
SteelL	0.17	0.24	1.36	0.003	0.003	0.02	0.61	0.07	0.47

表 4.1.3-6 JAEA 既存材料の計装シャルピーデータと関連温度

(a)未照射材

材料	温度, ° 度	F <sub>a</sub> , kN	T <sub>Fa4kN</sub> , °C	T <sub>41J</sub> , °C	RT <sub>NDT</sub> , °C
Steel A	-40	0.0	-4.0	-42	-35
	-40	0.6			
	-30	1.4			
	-20	3.9			
	-20	1.9			
	-20	3.5			
	-10	3.9			
	20	8.5			
	20	8.0			
	20	7.4			
Steel B	-50	0.0	-22.4	-61	-45
	-50	0.1			
	-40	1.4			
	-40	3.4			
	-20	4.5			
	-20	4.5			
JRQ	-20	0.0	32.6	-28	-15
	-20	0.3			
	-10	1.2			
	-5	3.7			
	-5	1.3			
	20	3.2			
	20	2.7			
	40	7.6			
	40	4.3			
	60	5.6			
Steel L	-50	0.0	9.1	-68	
	-40	0.8			
	-20	3.6			
	20	4.9			

表 4.1.3-6 JAEA 既存材料の計装シャルピーデータと関連温度(つづき)

(b)照射材

材料及び照射量	温度, ° 度	F <sub>a</sub> , kN	T <sub>Fa4kN</sub> , °C	T <sub>41J</sub> , °C	RT <sub>NDT</sub> , °C
Steel A irr. 13.0*10 <sup>19</sup> n/cm <sup>2</sup>	70	0.0	91.4	113	120
	90	3.0			
	110	2.0			
	120	7.8			
	125	9.9			
	130	12.4			
	150	5.6			
Steel B irr. 11.0*10 <sup>19</sup> n/cm <sup>2</sup>	10	0.0	24.0	10	26
	15	2.7			
	28	6.9			
	50	8.5			
	70	6.1			
JRQ irr. 2.4*10 <sup>19</sup> n/cm <sup>2</sup>	-20	0.2	86.4	60	73
	19	0.0			
	50	0.0			
	50	0.2			
	60	0.7			
	80	5.4			
	100	6.1			
Steel L irr. 2.9*10 <sup>19</sup> n/cm <sup>2</sup>	-40	0.0	22.8	12	
	-20	0.1			
	0	1.3			
	15	3.5			
	28	5.7			
	50	9.4			



(a) JRH 材



(b) JRM 材

図 4.1.3-1 試験片採取方法

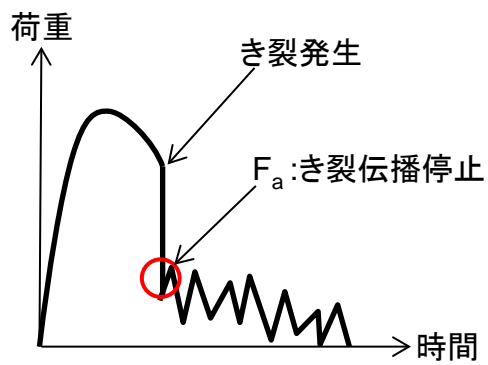
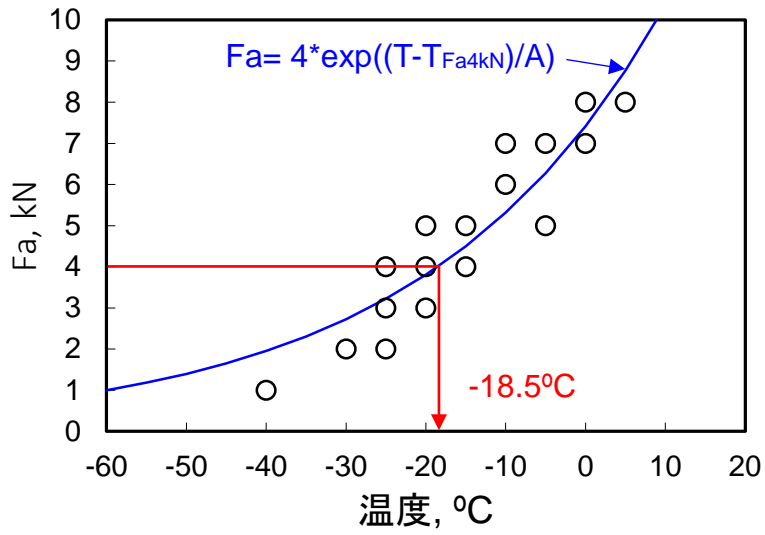
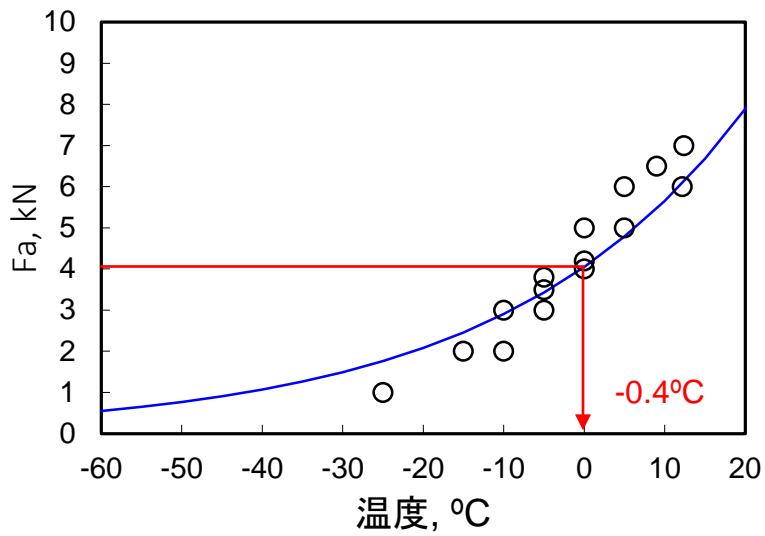


図 4.1.3-2 シャルピー試験におけるき裂伝播停止荷重( $F_a$ )の定義



(a) JRH 材



(b) JRM 材

図 4.1.3-3 JRH 及び JRM 材の  $T_{Fa4kN}$  の評価結果

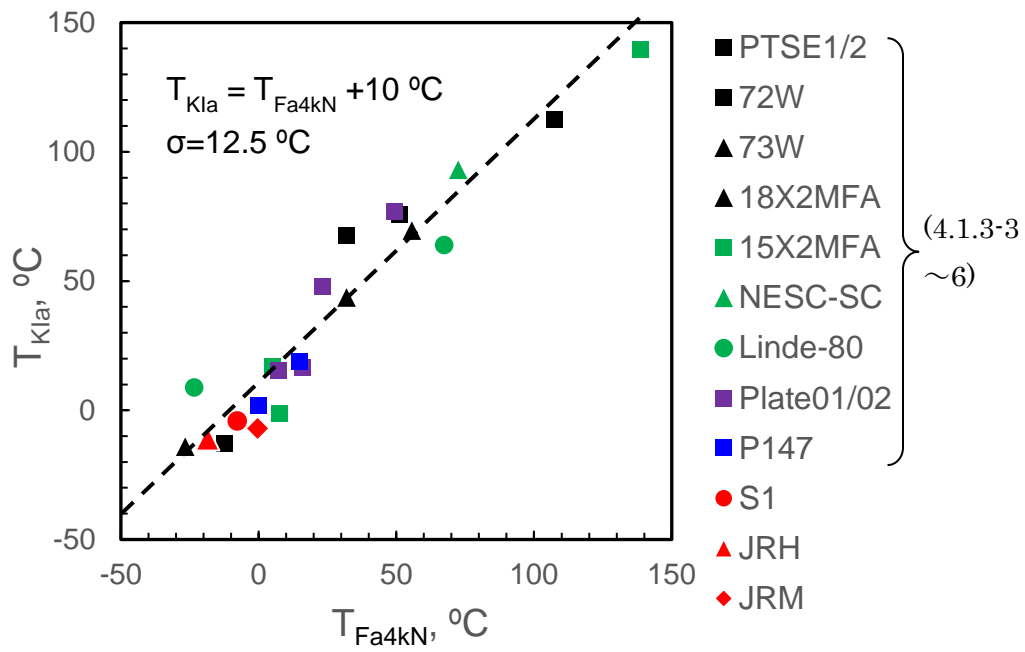
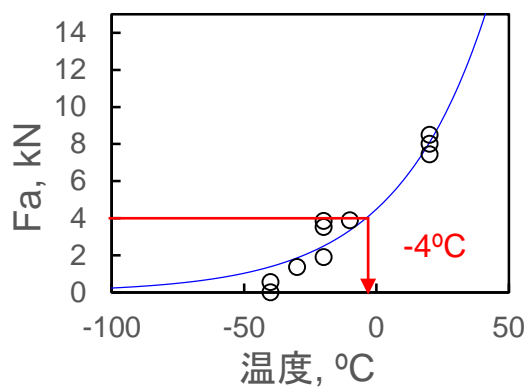
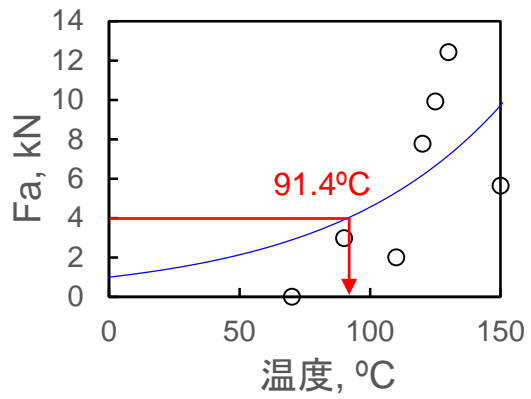


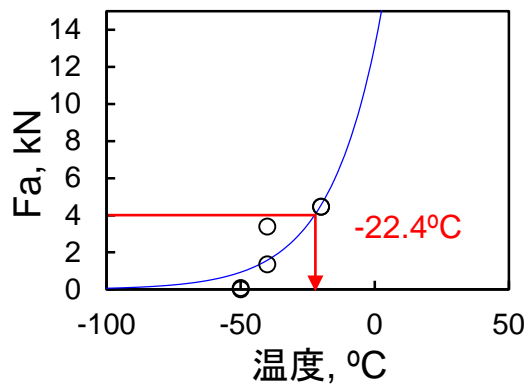
図 4.1.3-4  $T_{KIa}$  と  $T_{Fa4kN}$  の相関



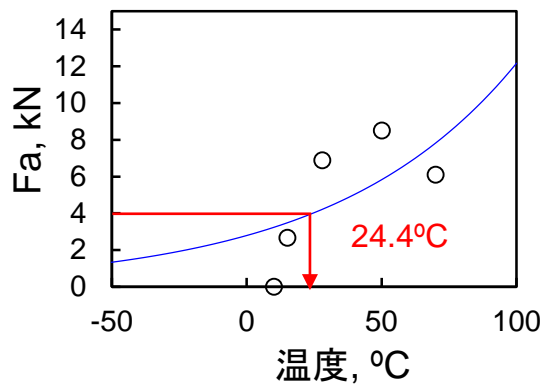
(a) Steel A 未照射材



(b) Steel A 照射材



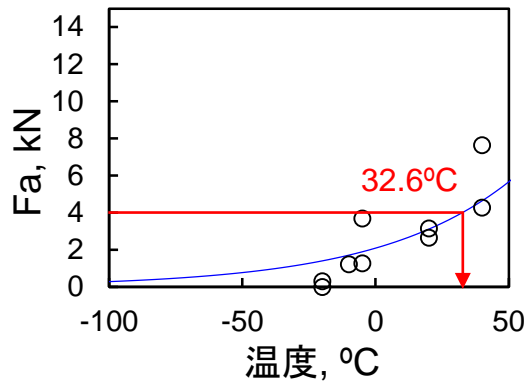
(c) Steel B 未照射材



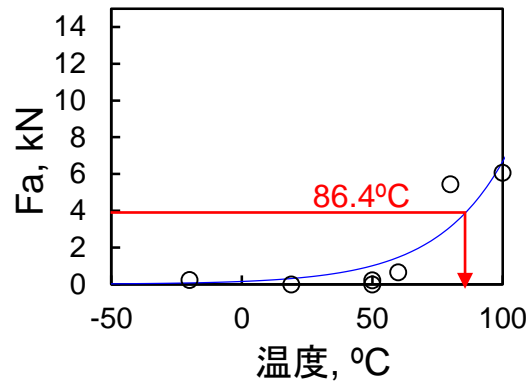
(d) Steel B 照射材

図 4.1.3-5 JAEA 既存材料の  $T_{Fa4KN}$  の評価結果

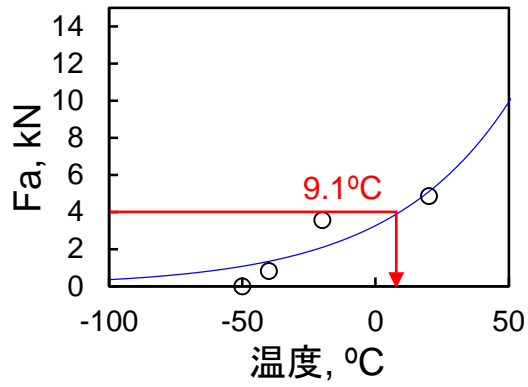




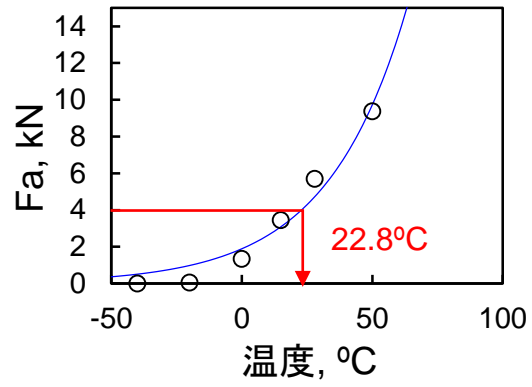
(e) JRQ 未照射材



(f) JRQ 照射材



(g) Steel L 未照射材



(h) Steel L 照射材

図 4.1.3-5 JAEA 既存材料の  $T_{Fa4KN}$  の評価結果(つづき)

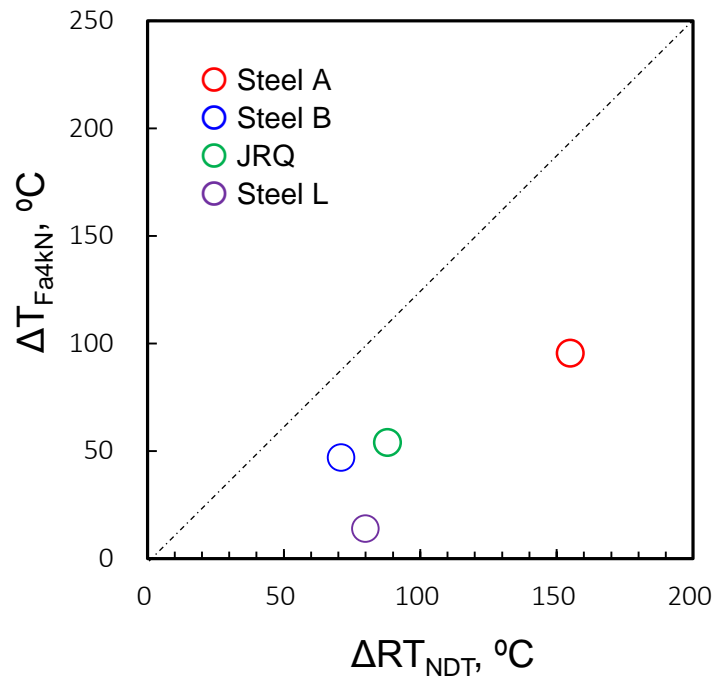


図 4.1.3-6 関連温度シフトと  $T_{Fa4kN}$  シフトの相関

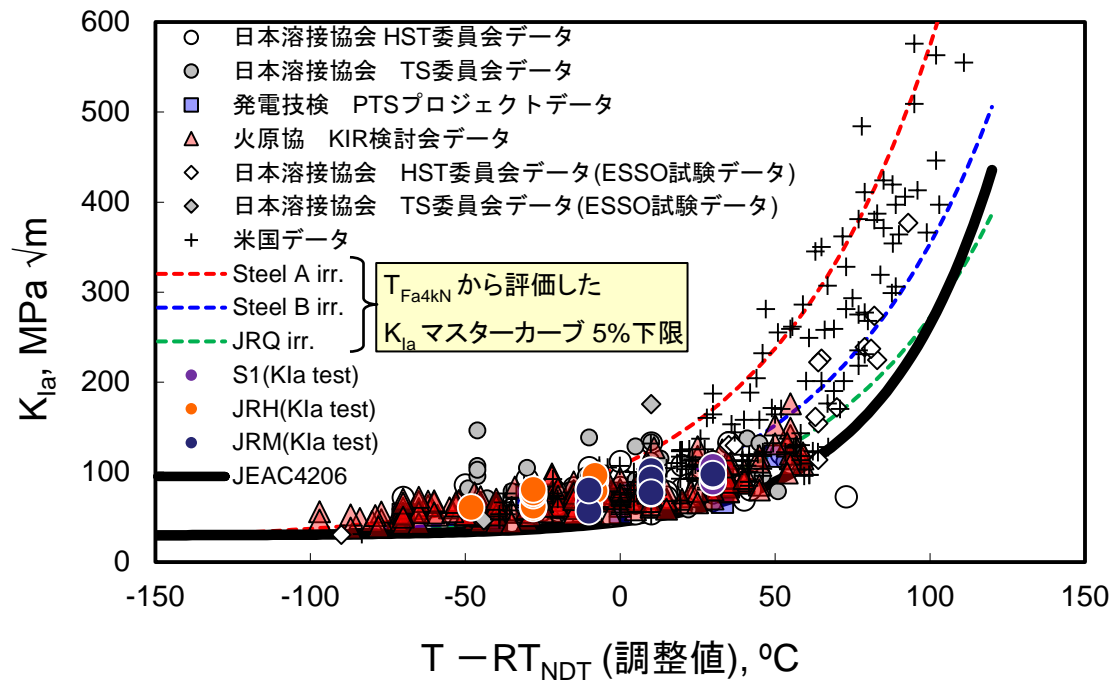


図 4.1.3-7 JEAC4206  $K_{Ia}$  遷移曲線と  $K_{Ia}$  値及び  $K_{Ia}$  マスターカーブ 5%下限曲線の比較

#### 4.1.4 原子炉圧力容器の照射脆化に関する微細組織分析

原子炉圧力容器内表面に肉盛溶接されている 2 相ステンレスオーバーレイクラッドは原子炉運転環境中の熱時効や中性子照射によって降伏応力が変化し、クラッド下に想定される亀裂の応力拡大係数の評価に影響することが知られている<sup>[4.1.4-1]</sup>。このため、クラッドにおける降伏応力変化のメカニズムを理解することが重要である。クラッドは肉盛溶接時の熱間加工割れを防ぐため、10%程度の  $\delta$  フェライト相が含まれた 2 相ステンレス鋼である。中性子照射や熱時効によって、 $\delta$  フェライト相中に Cr 濃度揺らぎ(スピノーダル分解)や Mn-Ni-Si(G 相: FCC 構造)の析出が生じることが明らかとなっており、それらと脆化への関連性を明らかにすることが求められる。特に、スピノーダル分解は結晶構造が変化せずに Cr 濃度が変調する現象であり、材料物性の変化の関連性を評価することが重要である。そこで、本年度はスピノーダル分解の進行度合いと材料特性の変化の関係性について詳細に評価するため、フェライト単相の Fe-Cr の 2 元系合金について熱時効処理を実施し、3 次元アトムプローブ(APT)による微細組織観察と硬さ評価を行った。

##### (1) スピノーダル分解

金属材料中の相分離は、核生成・成長とスピノーダル分解に分けられる。スピノーダル分解は、溶質原子が低濃度側から高濃度側へとエネルギー障壁を伴わず拡散する特徴を持ち、核生成・成長とは異なり相分離の過程で構造の変化などの明瞭な界面が形成されない。基本理論は、図 4.1.4-1 に示す 2 元系置換型固溶体の状態図と自由エネルギー曲線で説明できる。まず、高温の  $T_1$  で均一な固溶体と仮定し、低温  $T_2$  に急冷した場合を考える。溶質濃度が 50% に近い  $X_2$  のような高濃度合金では、その組成近傍での自由エネルギー-溶質濃度曲線が上に凸となる。この場合、わずかの濃度変調が生じても物体の自由エネルギーが低下するので濃度変調が安定に存在できる。相分離は小さな濃度変調から始まり、連続的に変動が大きくなり、最終的に平衡組成である  $X_a$  と  $X_b$  に達する。これをスピノーダル分解と呼ぶ。スピノーダル分解では溶質原子が低濃度側から高濃度側へと移動する。また、スピノーダル分解が生じる組成範囲は、自由エネルギー曲線における二つの変曲点の間 ( $\partial^2 G / \partial X^2 < 0$ ) の領域である。各温度における自由エネルギーの変曲点を結ぶと図 4.1.4-1 の破線ようになる。この波線をスピノーダル線と呼び、実線を相分離の限界線(バイノーダル線)と呼ぶ<sup>[4.1.4-2]-[4.1.4-5]</sup>。

Fe-Cr 系の状態図を図 4.1.4-2 に示す。この状態図から 300°C (573 K) で、Cr が約 5% から 95% 含まれる Fe-Cr 合金であればスピノーダル線の内側に位置し、スピノーダル分解が生じる組成域であることがわかる。原子炉圧力容器のクラッド材の  $\delta$  フェライト相においても、長時間の熱時効によって、Cr がスピノーダル分解することが報告されており、 $\delta$  フェライト相の硬化に寄与していることが示唆されている。

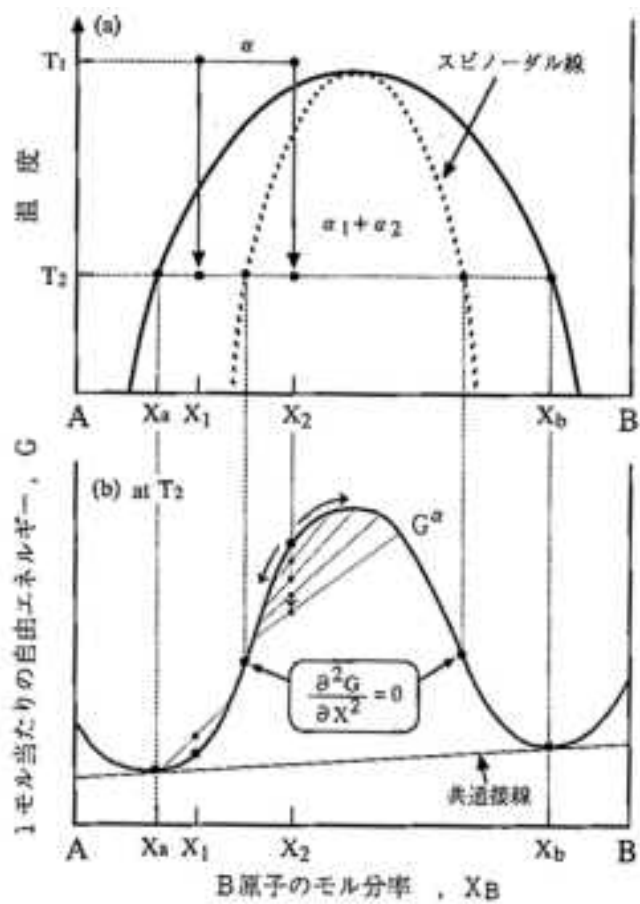


図 4.1.4-1 スピノーダル分解過程における自由エネルギー変化  
 (文献[4.1.4-6]より転載)

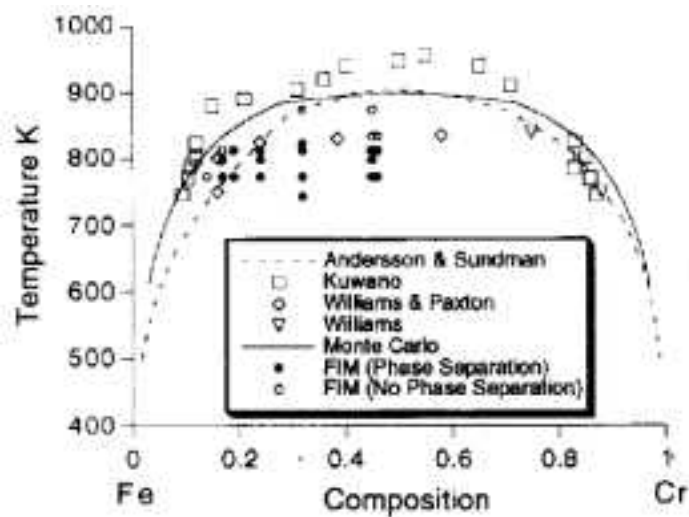


図 4.1.4-2 Fe-Cr 系の状態図(破線：スピノーダル線、文献[4.1.4-6]より転載)

## (2) 試験

### (2-1) 試料

フェライト単相の Fe-Cr 合金、Cr 濃度 25 wt.%の鋼材を 1230°C×2hr にて鍛造加工後、Ar 雰囲気中で 1080°C×8hr 水冷の条件にて溶体化処理を施した試料(溶体化処理材)を用いた。500°Cにて 10h、50h、100h、200h、500h の 5 種類の熱時効(500°C熱時効試料)を実施し、APT による微細組織分析と硬さ評価を行った。

化学組成を表 4.1.4-1 に示す。熱時効後の各試料は、機械研磨した後、エタノール：過塩素酸 = 4 : 1 の研磨液中で DC 電圧 15V を印加して電解研磨を実施した。

表 4.1.4-1 化学組成 (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
0.07	<0.01	<0.01	<0.005	0.0008	<0.01	<0.01
Cr	Mo	Al	O	B	N	
24.60	<0.01	<0.01	0.0076	<0.0003	0.0012	

### (2-2) 微細組織評価方法

#### 3次元アトムプローブ(Atom Probe Tomography : APT)

APT は、電界イオン顕微鏡(Field Ion Microscope : FIM)と位置敏感型検出器とを組み合わせることで、試料表面の直径数 10 nm 程度の領域における 2次元の原子分布を測定し、これを深さ方向に表面一層ずつ拡張していくことで試料中における原子の 3次元分布を測定する実験手法である<sup>[4.1.4-7]-[4.1.4-9]</sup>。

図 4.1.4-3にAPTの模式図を示す。APTでは試料表面に高電場を発生させるために針状の試料を用いる。先端半径 $r$ の試料に電圧 $V$ を印加したとき、試料表面の電場 $F$ は、 $V/kr$ で表わされる( $k$ は試料の形状・材質に依存する定数であり通常2~5程度)。実際の測定では先端半径が数10~100 nmの針状試料にkVオーダーの電圧を印加することで、試料表面に10~100 V/nmという非常に高い電場が発生し、針先端の原子がイオン化して電界蒸発を起こす。イオン化した原子を位置敏感検出器で収集し、針状試料の長手方向に対して垂直方向(X-Y方向)の情報を取得する。電界蒸発は針先端の最表層から順に起こることから、そのイオンを連続的に収集することで針の長手方向(Z方向)のデータを蓄積し、3次元の情報を収集する。実際の測定では試料表面での原子の拡散を抑制するため、20~70 K程度に冷却して行い、Z方向に約0.2 nm、X-Y方向に約0.5 nm程度の位置分解能を実現可能である。イオン種は電界蒸発後に加速されて位置敏感検出器に到達するまでの飛行時間による質量分析を用いて特定する。飛行時間型の質量分析のため、イオン検出効率が元素の種類にほとんど依存しない点もAPTの大きな特徴の一つである。

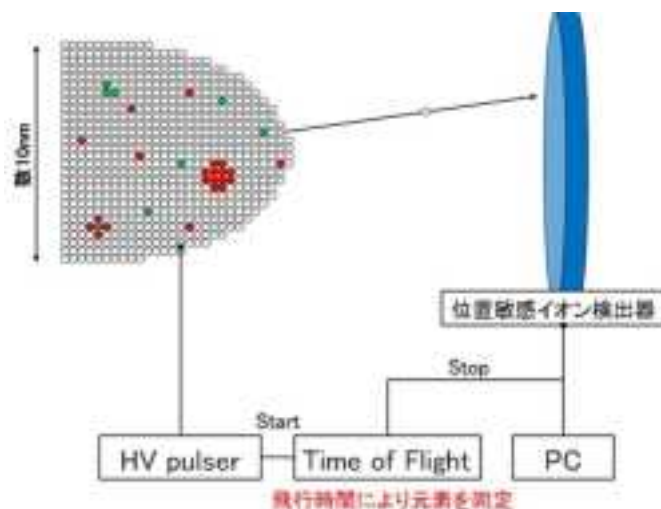


図 4.1.4-3 APT の模式図

本評価では、エネルギー補償型レーザー局所電極アトムプローブ(Cameca 社製、LEAP 3000X-HR)を用いた。この装置では APT にレーザーパルス、局所電極、リフレクトロンを備え付けることにより、従来方式より観察中の試料の破壊頻度を低減し、短時間に広範囲の原子分布を高い質量分解能で測定可能である。

### (2.3) APT 測定用試料作製

APT 分析用針状試料を作成するために、走査型電子顕微鏡/集束イオンビームを具備したデュアルビームシステム(FEI 社製、Quanta 3D 200)を用いた。本装置の特徴は、集束イオンビームによるエッチング加工と走査型電子顕微鏡を用いた観察を交互に行うことで詳細な観察を行いながら微小な体積の試料を加工できることである(図 4.1.4-4)。また、集束イオンビームの加速電圧は 5-30 kV で可変であり、最終加工を低加速電圧で行うことで加工時に導入されるダメージ層を低減させることができる。

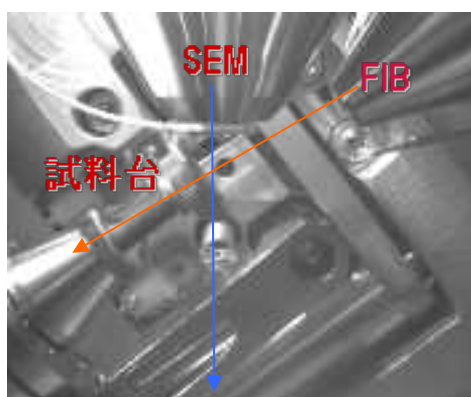


図 4.1.4-4 走査型電子顕微鏡/集束イオンビームを具備したデュアルビームシステム (FEI 社製、Quanta 3D 200)の加工チャンバー内 CCD カメラ像

## (2.4) 解析方法

### (2.4.1) 濃度解析

APT分析では、検出した個々のイオンの位置情報と質量の情報を取得しているため、3次元に再構築したデータから任意の領域の情報を取りだし、3次元の濃度分析することが可能である。図 4.1.4-5に例としてFe-Cr2元系合金の熱時効材から取得したFeとCr元素のマップを示す。このようなAPT観察結果に対して、以下に記述する解析を実施した。

### (2.4.2) 1次元濃度プロファイル

APT分析で得られた3次元の位置情報から1方向を任意のステップ毎に区切り元素の濃度をプロットすることで1次元の濃度プロファイルを得ることができる。図 4.1.4-5中のハッチングされた  $3 \times 3 \times 100 \text{ nm}^3$ の解析領域を用いた場合、 $3 \times 3 \text{ nm}$ のX-Y方向の面内濃度を任意の幅(Z方向)で区切り1次元濃度プロファイルとして分析可能である。また、3次元マップから任意の位置を選んで評価可能であり、任意の方位の1次元濃度プロファイルを取得できる。

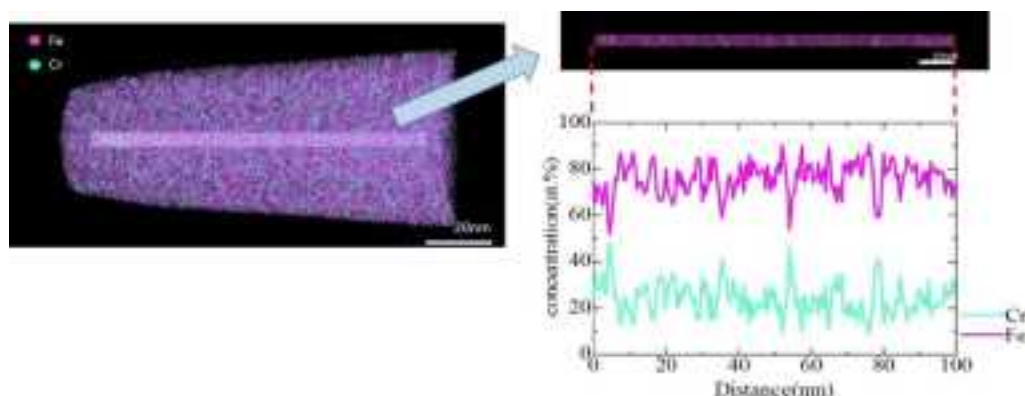


図 4.1.4-5 Fe-Cr 合金の3次元アトムマップ(左)と  $3 \times 3 \times 100 \text{ nm}^3$ の解析領域のFeとCrの1次元濃度ファイル(右)

### (2.4.3) Frequency Distribution 解析

APT分析で得られた3次元元素マップを任意の原子数が含まれた領域に分割し、各領域に含まれる溶質原子数の頻度分布から溶質原子のランダム性の検定を行う。図 4.1.4-6は、クラッドにおける $\delta$ 相のスピノーダル分解を分析した例である。具体的には、原子100個中に含まれるCr原子数の頻度分布を丸点で示し、Cr原子がランダムに分布していると仮定したときに得られる二項分布を黒斜線部で示し、実測したCr分布と二項分布の差を赤斜線で示している。このようにAPT分析で得られた結果と二項分布とのずれを調べることで、分析対象の元素がランダム分布に従っているかを明らかにすることができる。



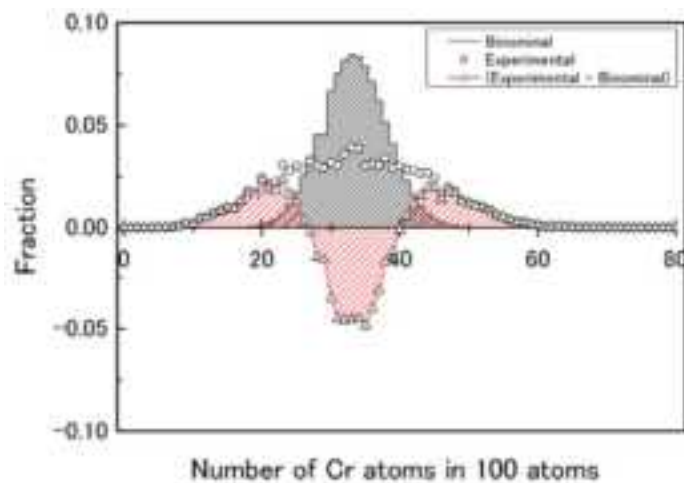


図 4.1.4-6 クラッドの $\delta$ 相における100原子中のCr原子数の頻度分布  
(文献[4.1.4-10]より転載)

#### (2.4.4) 動径分布関数(Radial Distribution Function)

図 4.1.4-7で示すように任意の溶質原子から放射線状に半径 $r+dr$ 間に含まれる各原子の数から、溶質原子からの濃度分布を分析する。距離の短い領域において溶質原子の濃度が高くなるほど溶質原子が凝集化していることを示唆し、濃度が距離に依存して変化しなければ溶質原子がランダム分布に従うことを示唆する。図 4.1.4-7で示すAl-1.7Cu-0.01Sn合金の解析結果では、Sn(赤点に相当)の周りに存在するCu(緑点に相当)の濃度が200°Cの時効によって増加することを示している。このように、異種元素同士の濃度分布分析にも応用が可能な手法である。

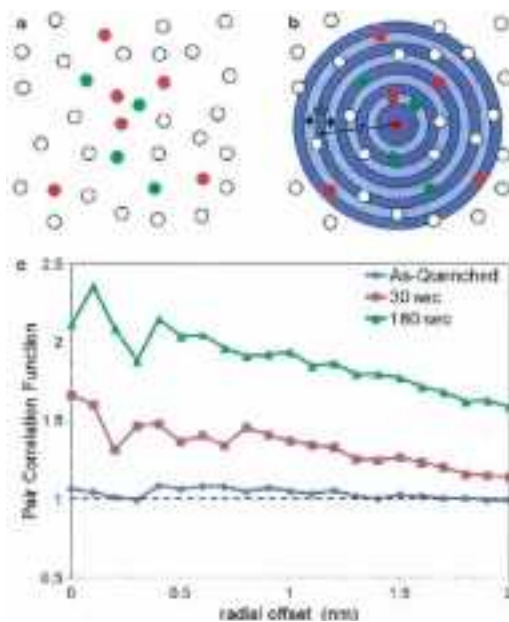


図 4.1.4-7 Radial Distribution Function の概念図(Al-1.7Cu-0.01Sn 合金の例、文献 [4.1.4-11]より転載)

## (2.5) 試験条件・解析条件

APT法の試験条件を表 4.1.4-2 に示す。解析には IVAS ver.3.6.6 (Cameca 社製)を用い、3次元アトムマップの再構成には、走査型電子顕微鏡で観察した針の形状を参考とした。

表 4.1.4-2 APT 分析における試験条件

測定方法	試験温度(K)	Pulse Fraction (%)
電圧パルス	50	20

APTで得られた各試料の質量スペクトルは、主要ピークである27のピークでCrとFeが混在している。そのため元素マップから組成を見積もる際には、それぞれのピーク内の元素を同位体の存在比から換算し見積もることが必要である。CrとFeの元素濃度分析においては、IVAS ver.3.6.6に実装されているピーク分離解析(Peak decomposition)を用いて解析を実施した。

## (2.6) 試験結果

### APT 法による Fe-Cr 合金の微細観察組織の結果

Fe-Cr2 元系合金の 500°C 熱時効材 (0h、10h、50h、100h、200h、500h) について APT 分析を行った。下記に詳細な解析結果について述べる。

APT 分析で得られた各試料における Cr 濃度を表 4.1.4-3 に示す。Cr 濃度 24.6 wt.% の鋼材から切り出し、局所領域の APT 分析を実施したが、いずれの試料でも Cr 濃度は 24.6 ±1 wt.% の範囲内であり、採取場所による Cr 濃度の違いがほとんど無いことを確認している。

表 4.1.4-3 APT 分析で得られた各試料における Cr 濃度(wt.%)

熱時効時間	Cr	Fe
0 h	25.6	Bal.
10 h	24.8	Bal.
20 h	24.9	Bal.
100 h	24.7	Bal.
200 h	23.9	Bal.
500 h	24.2	Bal.

### (2.6.1) 元素マップ

得られた 3 次元アトムマップから、 $20 \times 20 \times 50 \text{ nm}^3$  の微小領域を取り出し、Cr のアトムマップを示した結果を図 4.1.4-8 に示す。未照射材と 10h、50h、100h、200h、500h 熱時効材の Cr 元素マップを比較すると熱時効時間が増加するに従って Cr の濃淡が明瞭になることがわかる。

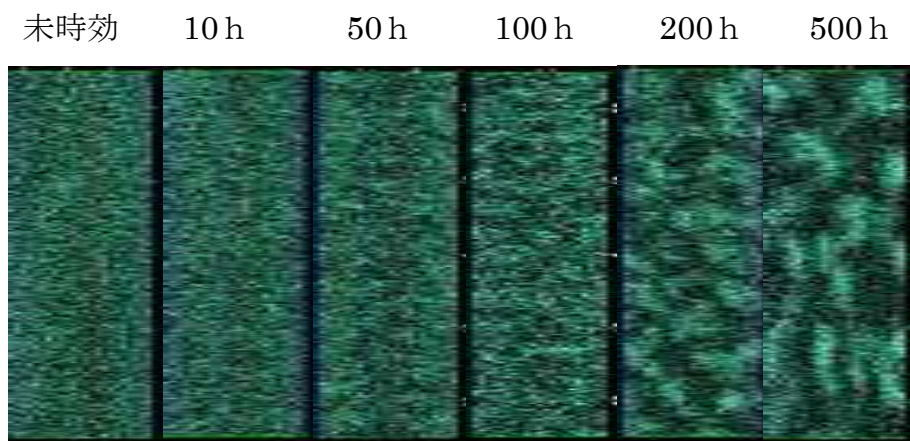


図 4.1.4-8 各熱時効時間における Cr の元素マップ 20nm

### (2.6.2) 1次元濃度プロファイル

3次元再構成したデータの中央部、 $3 \times 3 \times 75 \text{ nm}^3$ の領域について1次元濃度プロファイルを作成した結果を図 4.1.4-9に示す。CrとFeのピークがオーバーラップする質量/電荷 = 27のピークについてはCrとFeの同位体比から存在比を見積もり、長手方向の区切りを0.5 nmとして解析を実施した。熱時効時間が大きくなるにしたがって、Crの濃度揺らぎが大きくなる傾向であることがわかる。Crの濃度揺らぎを定量的に示すため、濃度プロファイルにおけるCr濃度の最大値と最小値の差(振幅)と熱時効時間の関係を図 4.1.4-10に、濃度揺らぎの平均頂点間距離と熱時効時間の関係を図 4.1.4-11に示す。これらの結果から、Crのスピノーダル分解の振幅と波長が熱時効時間の経過とともに大きくなっていることが明らかである。

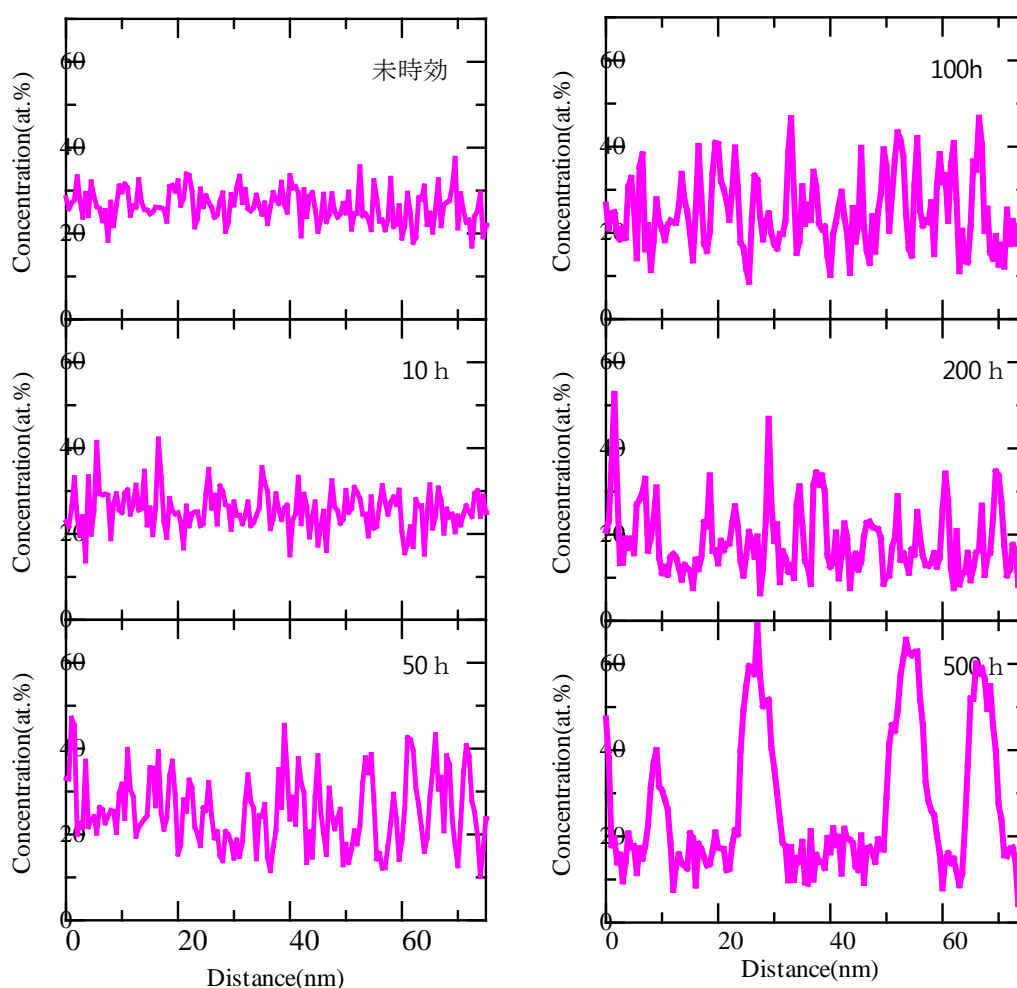


図 4.1.4-9 各熱時効条件試料における Cr の 1次元濃度プロファイル

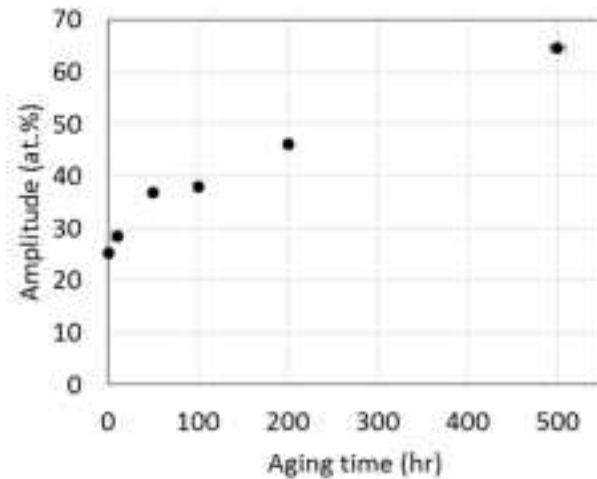


図 4.1.4-10 Cr の濃度揺らぎの振幅と熱時効時間の関係

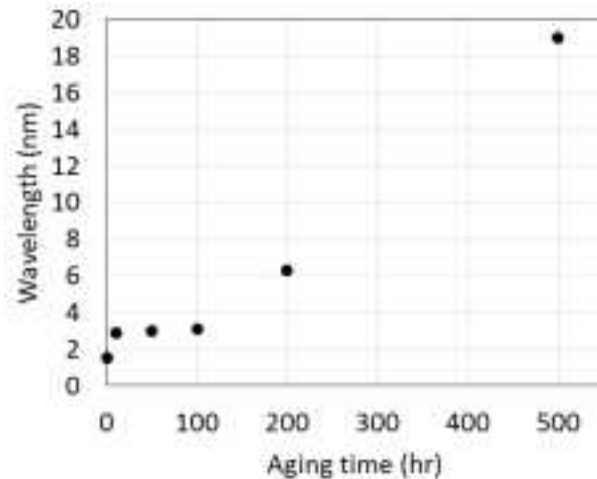


図 4.1.4-11 Cr の濃度揺らぎの波長と熱時効時間の関係

### (2.6.3) Frequency distribution 解析 (V 値)

元素マップや1次元濃度プロファイルから Cr の濃度揺らぎが熱時効時間の経過とともに変化することが観察できた。Cr のスピノーダル分解の進行を評価するための指標の一つとして、Danoix や Pareige らのグループの報告[4.1.4-12]、[4.1.4-13]にある V 値を用いた評価を行った。V 値は、(4.1.4-1)に示すように Cr がランダムに分布したと仮定したときの二項分布と実測の Cr 濃度頻度分布の差の絶対値の和で示される。

$$V = \sum_{i=0}^{100} |O(i) - B(i)| \quad (4.1.4-1)$$

ここで、iは原子100個中に含まれるCr原子の数、O(i)は実測した頻度、B(i)は二項分布である。V値の算出は、 $20 \times 20 \times 50 \text{ nm}^3$ の解析領域で行った。

図 4.1.4-12 に各試料から得られた Cr の頻度分布と二項分布及びその差を示す。V 値は、赤く塗りつぶした面積の総和に相当する。APT で実測した Cr の頻度分布は熱時効時

間の経過とともに広がり、500hの熱時効材ではCr濃度が10数%の領域にピークを持つことが分かる。図4.1.4-13に各試料のV値(図中では $V_{Cr}$ と表記)と熱時効時間の関係を示す。エラーバーは標準誤差を示している。V値は未時効から200hまでにおよそ0.16から1.09(およそ0.93増加)まで急速に増加し、200hから500hまでは1.09から1.33(およそ0.25増加)に緩やかに増加している。このことから、V値を用いた評価ではCrのスピノーダル分解は200hまで急速に進行し、その後も緩やかに進行を続けることを示唆している。

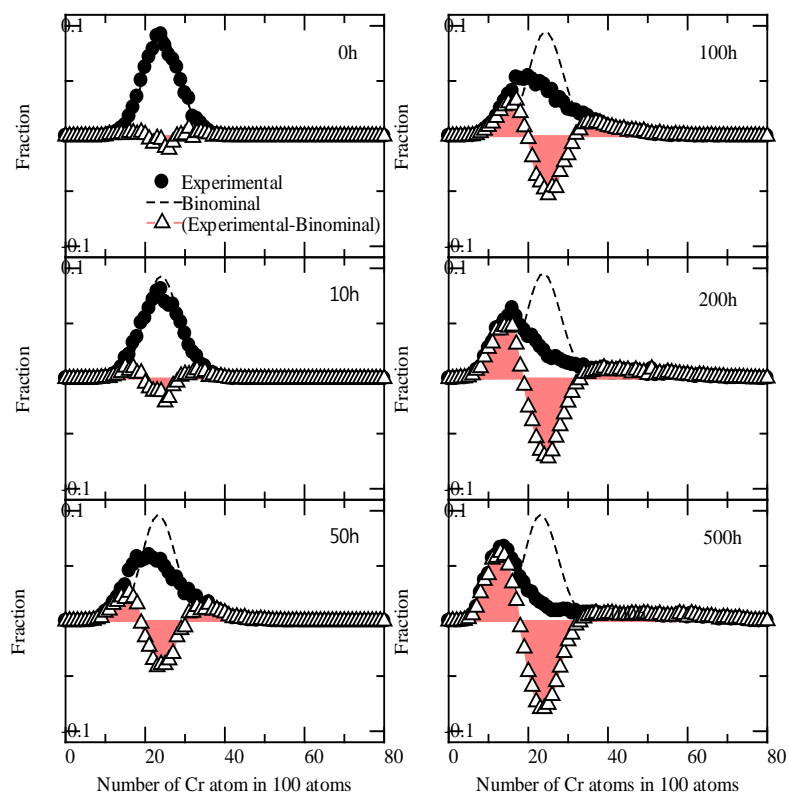


図 4.1.4-12 各熱時効時間におけるCrの頻度分布と二項分布及びその差分

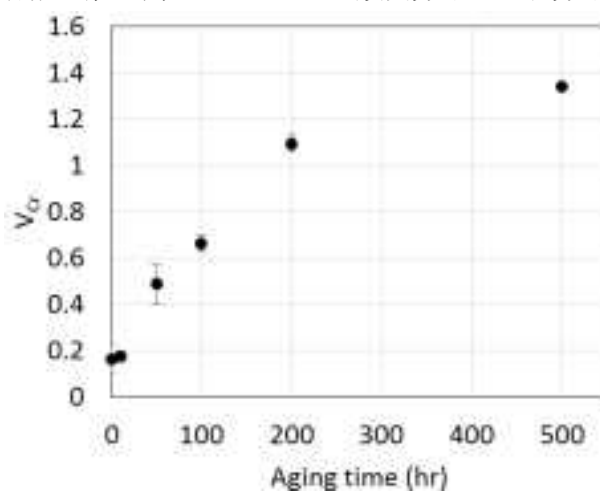


図 4.1.4-13 V値と熱時効時間の関係

#### (2.6.4) 動径分布関数(Radial Distribution Function)

図 4.1.4-14 に各試料の Cr 原子を中心とした動径方向の濃度プロファイルを示す。Radial Fraction の値は各元素からの距離  $r+dr$  の範囲内の元素濃度/分析領域全体の平均濃度を示している。熱時効時間が長くなるほど Cr 原子から近い領域で Radial fraction が大きくなることから、Cr 原子が凝集化していることを示唆する。

図 4.1.4-14 中の各曲線が Radial fraction = 1 と交差する Cr 原子からの距離 ( $D_{Rf}$ )と熱時効時間の関係を図 4.1.4-15 に示す。 $D_{Rf}$ が大きいほど、Cr 濃度揺らぎの波長が大きくなることに対応し、図 4.1.4-11 の Cr 濃度揺らぎの波長と熱時効時間の関係と同じ傾向を示していることがわかる。

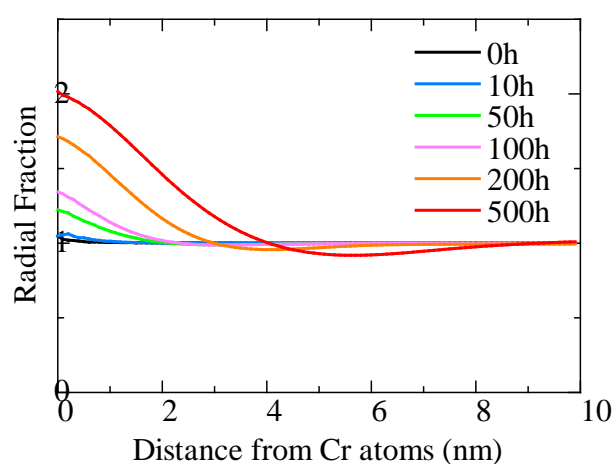


図 4.1.4-14 各試料における Cr の動径分布関数

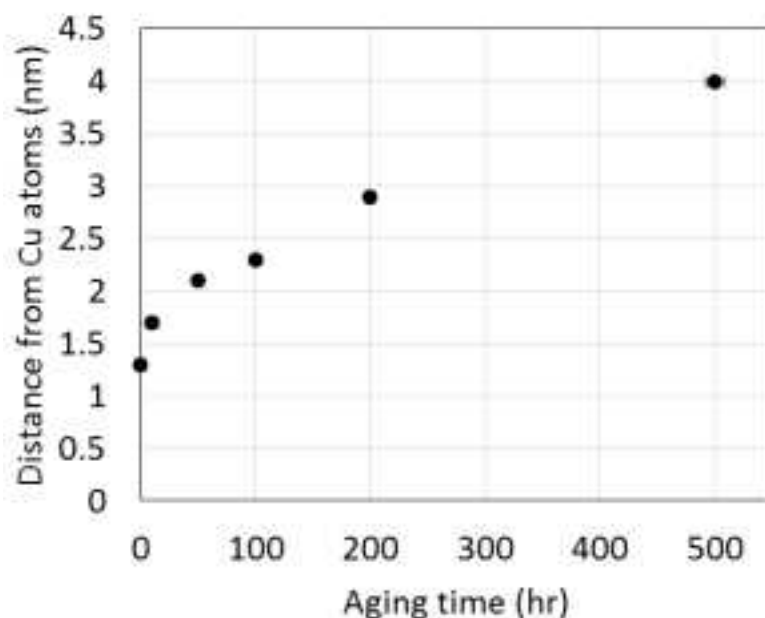


図 4.1.4-15  $D_{Rf}$ と熱時効時間の関係

・ビッカース硬さとスピノーダル分解の進行を表す各指標の相関

図 4.1.4-16 にビッカース硬さ試験結果と熱時効時間の関係を示す。熱時効時間の増加に伴って硬さも増加しており、未時効材から 200h 時効材までの硬さの変化に比べ 200h から 500h 熱時効材では変化が緩やかであることがわかる。図 4.1.4-17 は V 値と硬さの関係を示したものであり、硬さの変化と V 値の変化には強い正の相関があると言える。

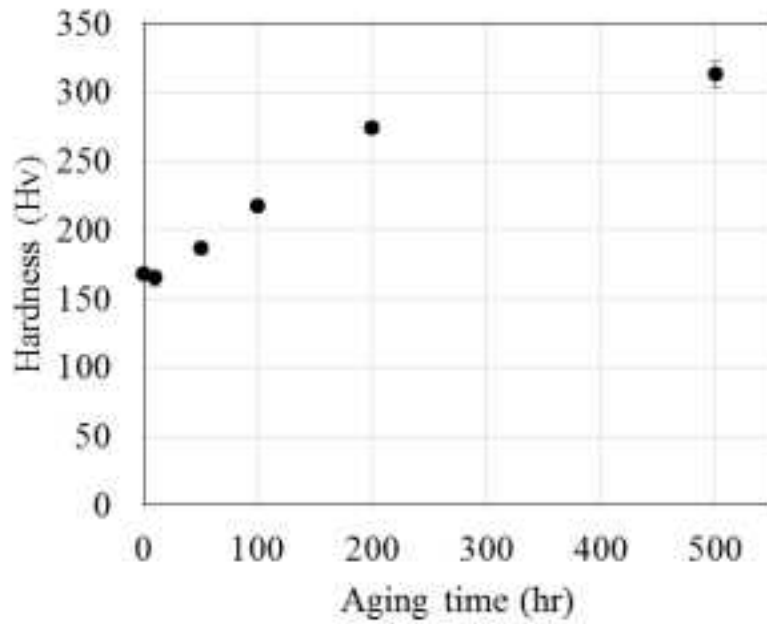


図 4.1.4-16 ビッカース硬さと熱時効時間の関係

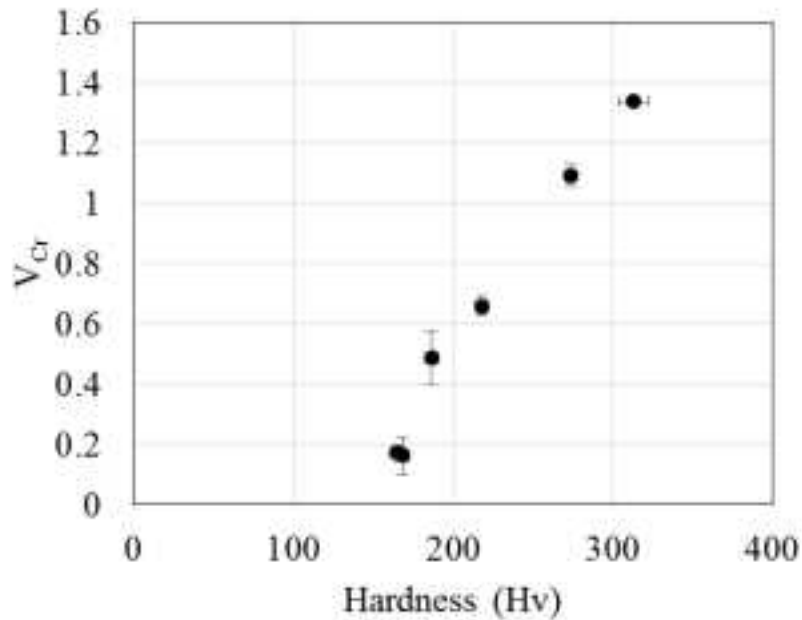


図 4.1.4-17 V 値とビッカース硬さの関係



図 4.1.4-18 に Cr 濃度揺らぎの振幅と V 値の関係、図 4.1.4-19 に Cr 濃度揺らぎの波長と硬さの関係を示す。振幅については多少のばらつきがあるものの、線形関係で変化している。一方、波長と硬さの関係においては、硬さが 220 以下では波長の変化は小さいが、硬さが 220 よりも大きい領域で波長が大きく増大している。

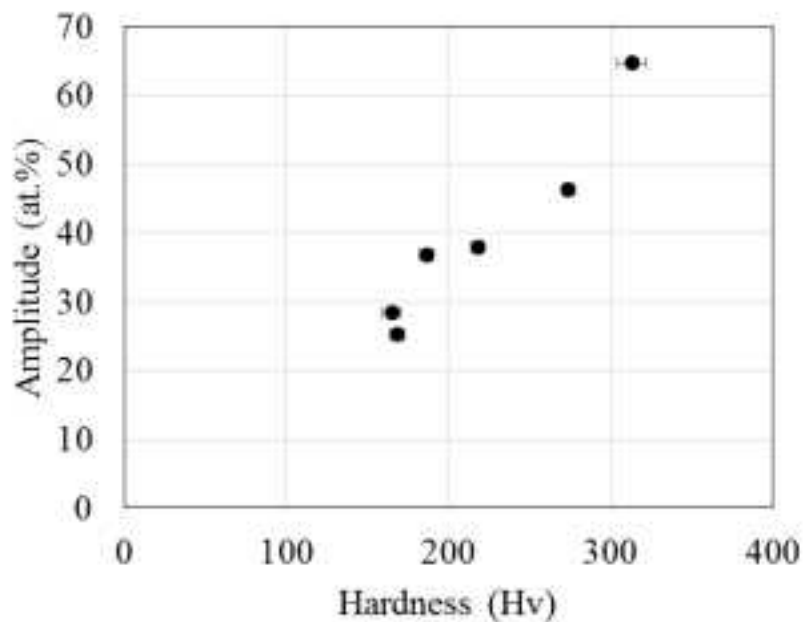


図 4.1.4-18 Cr 濃度揺らぎの振幅とビッカース硬さの関係

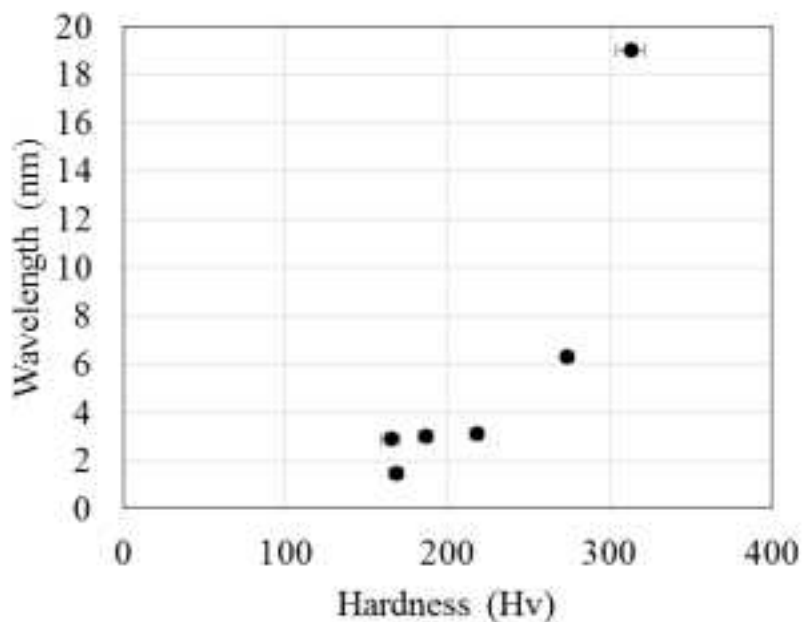


図 4.1.4-19 Cr 濃度揺らぎの波長とビッカース硬さの関係

図 4.1.4-20 に Radial fraction とビッカース硬さの関係、図 4.1.4-21 に  $D_{Rf}$  とビッカース硬さの関係を示す。Radial fraction と硬さの関係は非常に良い正の線形関係を示している。一方で  $D_{Rf}$  とビッカース硬さの関係では、硬さ 220 以上の領域で  $D_{Rf}$  の値の増分が大きくなっており、図 4.1.4-19 に示した Cr 濃度揺らぎの波長とビッカース硬さの関係と同様の傾向を示している。

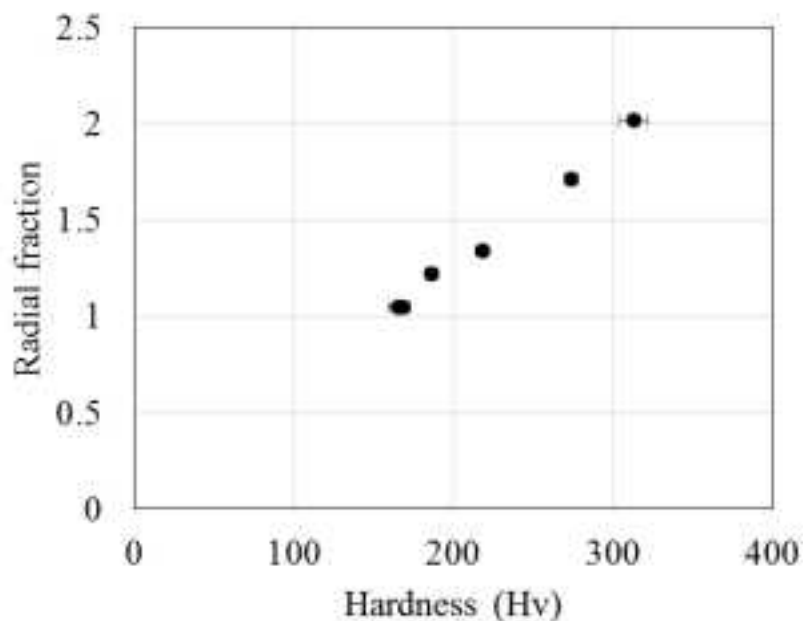


図 4.1.4-20 Radial fraction とビッカース硬さの関係

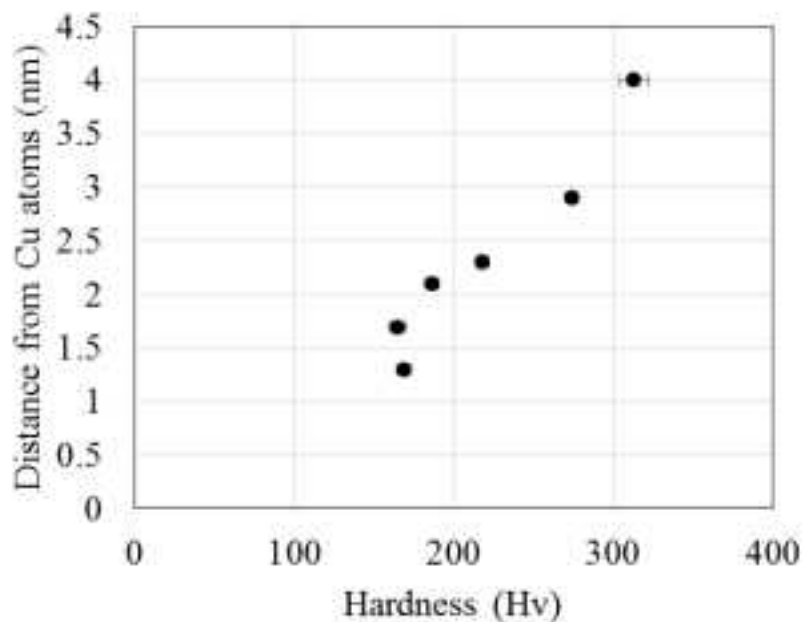


図 4.1.4-21  $D_{Rf}$  とビッカース硬さの関係

これらの各指標の変化と、時効時間および硬さとの関係について相関係数を評価した結果を表 4.1.4-4 に示す。熱時効時間との関係では Cr スピノーダル分解の波長と振幅が最も 1 に近い値を示しており、時効時間と強い線形関係にあることが伺える。一方でビッカース硬さとの関係では、Radial fraction や V 値が強く関係していることが分かる。

このことから、今回用いた指標の中ではスピノーダル分解の硬さ変化に関して Radial fraction や V 値を用いた評価は有用である。

表 4.1.4-4 各指標と熱時効時間・ビッカース硬さとの相関係数

	時効時間	ビッカース硬さ
硬さ	0.944	-
V 値	0.918	0.991
振幅	0.978	0.959
波長	0.982	0.870
Radial fraction	0.959	0.997
D <sub>Rf</sub>	0.971	0.967

まとめ

APT 法により、Fe-Cr 合金 溶体化処理材の 500°C 熱時効試料(時効時間 0h、10h、50h、100h、200h、500h)の分析を行った。

1 次元濃度プロファイルにおいて、熱時効時間の経過と共に Cr 濃度の振幅と波長が大きくなることや、動径濃度プロファイルの Radial fraction、D<sub>Rf</sub>が増加などから、熱時効に伴う Cr の濃度揺らぎ(スピノーダル分解)の進行について評価を行った。スピノーダル分解の進行を表す指標とビッカース硬さとの関係から、熱時効による硬さの上昇が Cr のスピノーダル分解の進行によるものであることが示唆された。また、ビッカース硬さと V 値や Radial fraction との関係はほぼ直線であることから、硬さの変化量の評価に、これらの指標が有用であることが示唆された。

今回用いた指標は原子間の距離や濃度などの比較的単純なものであり、硬化メカニズムを考慮しこれらの指標から硬化量を導くモデルの構築を検討する必要がある。

・参考文献

- [4.1.4-1] French Association for Design, 2010, RSE-M Appendix 5.4, pp21-23.
- [4.1.4-2] J. W. Cahn, *Chemical Physics*, **42** (1965) 93.
- [4.1.4-3] J. W. Cahn and J. E. Hilliard, *Acta Metallurgica*, **19** (1971) 151.
- [4.1.4-3] J. S. Langer, *Annals of Physics*, **65** (1971) 53.
- [4.1.4-4] 高木節雄,津崎兼彰,材料組織学,朝倉書店(2009)
- [4.1.4-1] M. K. Miller, J. M. Hyde, M. G. Hetherington, A. Cerezo, G. D. W. Smith and C. M. Elliott, *Acta. Metall. Mater.*, **43** (1995) 3385.
- [4.1.4-2] M. K. Miller, A. Cerezo, M. G. Hetherington, G. D. W. Smith : “Atom Probe Micro Ion Microscopy“ Oxford Univ. Press (1996).
- [4.1.4-3] M. K. Miller : “Atom Probe Tomography” Kluwer Academic Press, (1999).
- [4.1.4-4] K. Hono : *Mater. Sci.*, **47** (2002) 621.
- [4.1.4-5] 鹿窪勇太, 東北大学金属材料研究所材料照射工学部門, 修士論文(2013)
- [4.1.4-6] B.Gault, M.P.Moody, J.M.Gairney and S.P.Ringer, *Atom Probe Microscopy*, Springer, (2012)
- [4.1.4-7] F. Danoix, P. Auger and D. Blavette, *Microsc. Microanal.*, **10** (2004) 349.
- [4.1.4-8] C. Pareige, S. Novy, S. SAILLET and P. Pareige, *Nuclear Materials*, **411** (2011) 90.

#### 4.1.5 破壊力学評価に関する試験

ここまで述べてきた原子炉圧力容器鋼の照射脆化、破壊靱性評価、WPS 効果及びき裂伝播停止破壊靱性等の材料特性は、板厚 1/4 位置から採取する試験片を用いて評価されている。しかし、健全性評価における想定欠陥である RPV 内面の表面欠陥においては、試験片と負荷条件が異なる。すなわち、試験片に比して浅い半楕円欠陥や 2 軸荷重負荷など、保守側と非保守側に働く作用が混在する。さらに、改定が予定されている JEAC4206 ではクラッドも考慮されるため、想定欠陥位置の材料特性、すなわちクラッド溶接に伴う溶接熱影響部(HAZ)の照射脆化感受性を調査する必要がある。また、クラッド下欠陥に対する応力拡大係数評価式の妥当性や、欠陥の拘束効果及び WPS 効果の評価等に及ぼすクラッドの影響評価に加え、PTS 模擬試験により健全性評価手法の保守性を総合的に確認する必要がある。

本年度は、クラッド付き試験体の形状の検討、クラッド下 HAZ の照射脆化感受性調査に用いる初期プラント模擬材及びクラッド付き試験体の製作に用いる脆化模擬材の製作及び PTS 模擬試験を実施するための試験設備の整備に着手するとともに、クラッド溶接の残留応力を算出する解析ツールを整備した。

#### 4.1.5.1 クラッド付き試験体の形状の検討

表 4.1.5.1-1 に、類似の既往研究(4.1.5.1-1~12)で用いられた試験体の種類を示す。試験体の形状は大きく分けて平板曲げ試験体(以降、平板試験体)、十字型 2 軸曲げ試験体(以降、十字型試験体)及び円筒試験体に分けられるが、本事業で対象とするクラッド下半楕円欠陥に対する研究例は無い。円筒試験体は最も RPV に近い条件での試験が可能であるが、試験設備も含めてコストは非常に高く現実的ではないため、本事業では平板試験体と十字型試験体を組み合わせて試験を実施する。また、十字型試験体においては 2 軸荷重に加え熱衝撃を加えることにより PTS 模擬試験を実施することとした。

十字型試験体の大きさは板厚によって決定される。材料の破壊靱性が低いほど破壊に必要な K 値が低くなり、有効な破壊試験を行うための板厚を薄くすることができる。しかし、供試材となる脆化模擬材の破壊靱性を極端に低く製作することは困難である。また、熱衝撃(板厚内温度勾配)を模擬するためにはある程度の板厚が必要であることから、十字型試験体の板厚を 150mm とした。PTS 模擬試験(破壊試験)が可能となる脆化模擬材の仕様(破壊靱性)検討については次節に述べる。

#### 参考文献

- (4.1.5.1-1) 発電技研「原子力発電施設信頼性実証試験の現状」昭和 62 年報告書
- (4.1.5.1-2) McCabe, Donald E., et al., ASTM STP1046, pp. 348-360, 1990
- (4.1.5.1-3) NESC-VI PROJECT Final Report, 2009
- (4.1.5.1-4) Vladislav Pistora, et al., PVP2008-61474
- (4.1.5.1-5) Dana Lauerova, et al., PVP2008-61476
- (4.1.5.1-6) Milan Brumovsky, et al., Fontevraud 8, 2014
- (4.1.5.1-7) NESC-IV PROJECT Final Report, 2005
- (4.1.5.1-8) NESC-VII, C. Jacquemoud, et al., PVP2012-78044
- (4.1.5.1-9) VOCALIST, David Lidbury, et al., PVP2002-1176
- (4.1.5.1-10) NESC-1 Project. Final Overview Report, 2000
- (4.1.5.1-11) NESC-II PROJECT Final Report, 2003
- (4.1.5.1-12) SMILE, G. Bezdikian, et al., 30th MPA-Seminar in conjunction with the 9th German-Japanese Seminar Stuttgart, October 6 and 7 2004

表 4.1.5.1-1 既往研究で用いられた試験体の種類

試験体形状	プロジェクト名	2軸荷重	クラッド下欠陥	半楕円欠陥	熱衝撃	コスト
平板曲げ試験体	PTS 事業	×	×	○	○	中
	McCabe et al.	×	×	○	×	
	NESC-VI	×	○	×	×	
	EU PHASE	×	○	×	×	
	NESC-IV	×	○	×	×	
十字型 2軸曲げ試験体	NESC-IV	○	×	○	×	高
	NESC-VII	○	×	○	×	
	VOCALIST	○	×	○	×	
円筒試験体	NESC-I(延性亀裂)	△(内圧無し)	○	○	○	非常に高
	NESC-II(破壊せず)	○	全周欠陥	貫通欠陥	○	
	SMILE	○	×	×	○	

#### 4.1.5.2 原子炉圧力容器鋼の製作

##### (1) 初期プラント模擬材

原子炉圧力容器鋼の初期プラント模擬材として製造する材料のうち、母材は国内 PWR プラントの比較的初期のプラントの平均的な特性となることを基本方針として、材料仕様を決定した。

初期のプラントの材料製造を行っていた時代から材料メーカーの設備が更新されていることから、材料仕様の決定に先立ち、現有設備で目標とする材料特性が得られることを確認した。確認方法としては、小型の試験鋼塊を用いて、目標とする材料の化学成分のうち、P 量と S 量を変化させその傾向を分析するための事前試験を行った。事前試験では 6 種類の成分系の鋼種を製造し、室温引張試験及びシャルピー衝撃試験を実施した。化学成分及び機械試験結果を要求値とともにそれぞれ表 4.1.5.2-1 及び表 4.1.5.2-2 に示す。事前試験の結果、試験鋼塊と実機鋼塊のサイズの相違による影響を考慮すると鋼種 C が最適と判断し、これをベースとして材料仕様を設定した。本年度に製作した事前試験材料（試験後に確認した余材の状態）を図 4.1.5.2-1 に示す。

なお、溶接継手製作用の溶接材料仕様の検討（継手、オーバーレイクラッド用の溶接材料）、及び溶接継手の製作は次年度に実施予定である。

表 4.1.5.2-1 初期プラント模擬材の事前試験材料の化学成分

鋼種 No.	化学成分 (wt.%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo
要求値	0.18	0.20	1.20	0.010	0.010	0.50	—	0.10	0.40
	～ 0.25	～ 0.30	～ 1.55	～ 0.020	～ 0.020	～ 0.65		～ 0.16	～ 0.60
A	0.19	0.26	1.51	0.010	0.014	0.60	0.09	0.13	0.52
B	0.19	0.26	1.50	0.019	0.007	0.60	0.09	0.14	0.53
C	0.19	0.26	1.50	0.018	0.014	0.60	0.09	0.13	0.53
D	0.19	0.26	1.50	0.019	0.019	0.60	0.10	0.14	0.53
E	0.19	0.26	1.48	0.027	0.014	0.59	0.09	0.13	0.52
F	0.23	0.26	1.49	0.018	0.020	0.59	0.09	0.14	0.53



表 4.1.5.2-2 初期プラント模擬材の事前試験材料の機械試験結果

鋼種 No.	引張特性 (室温)			シャルピー衝撃特性	
	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	上部棚吸収 エネルギー (J)	$vT_{r30}$ (°C)
要求値	420~510	580~640	18 以上	135±45	-20±20
A	435~467	577~605	23.8~26.6	76~91	-16~-14
B	443~469	583~611	25.4~26.4	114~134	-32~-26
C	446~469	586~611	23.4~26.2	80~90	-17~-13
D	443~470	582~611	23.8~26.6	62~68	-6~-4
E	451~470	584~607	24.2~26.8	77~87	-16~-6
F	474~504	615~643	22.0~25.2	59~65	-3~4



図 4.2.5.2-1 初期プラント模擬材の事前試験材料

## (2) 脆化模擬材

大型平板試験（十字型試験体）の成立性を鑑みて、本材料に要求する機械的特性の目標値を  $T_0 \geq 150^\circ\text{C}$ 、 $0.2\%$ 耐力  $\geq 700 \text{ MPa}$  に仮設定した。 $T_0$ の目標値を  $\geq 150^\circ\text{C}$  と仮設定した根拠について、初期の検討結果を以下に示す。また、 $0.2\%$ 耐力の目標値は、大型平板試験時の負荷荷重を考慮して過大な変形を生じさせない値とした。なお、今後の検討により、仮設定条件が変更になる可能性がある。

### (a) 解析モデル

解析モデルは、図 4.1.5.2-2 に示すように対称性を考慮して、十字型試験体を 1/4 対称で簡易モデル化した。板厚は母材 150 mm、クラッド 5.5 mm とし、クラッドは十字型試験体の中心部 400 mm×400 mm のみ模擬した。

十字型試験体中心部の板厚内応力分布を均一化させるために、スリットを導入した。また、亀裂は中心部にクラッド下内部欠陥として、半楕円亀裂（亀裂深さ 10 mm×亀裂長さ 60 mm）を設定した。

なお、材料物性値は弾塑性挙動で定義した。

### (b) 解析条件

荷重は図 4.1.5.2-3 に示す通り、中心位置から 500 mm の位置に荷重点、1500 mm の位置に支持点を設け、初期状態は 0 ton として、温度変化に追従するよう、10 kN/sec（解析では対称のため 5 kN/sec）で 2 軸状態（1：1）で荷重を線形増加させた。

クラッドには室温状態で降伏応力相当の残留応力が発生するように設定した。

また、板厚内温度分布は、図 4.1.5.2-4 に示すような水冷時の温度履歴を適用した。

### (c) 評価結果

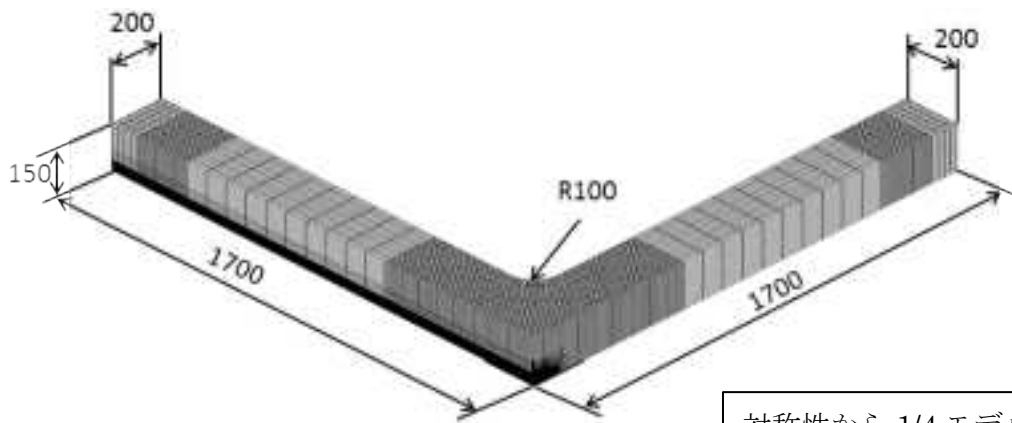
#### • 応力分布

冷却開始 50 秒後 ( $K_J=80 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ )、100 秒後 ( $K_J=120 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ) の応力分布を図 4.1.5.2-5 に示す。曲げ+熱の応力は 700 MPa 程度で、降伏点を少し超えた領域ではあるが、板厚中心付近の応力は十分低く、塑性崩壊には至らないと考えられ、試験は成立すると考えられる。

#### • K 値評価結果

K 値と温度の関係と破壊靱性曲線との関係を図 4.1.5.2-6 に示す。破壊靱性曲線との交差を考えると、 $T_0=100^\circ\text{C}$  条件であれば、破壊に至る試験を実現できると考えられる。

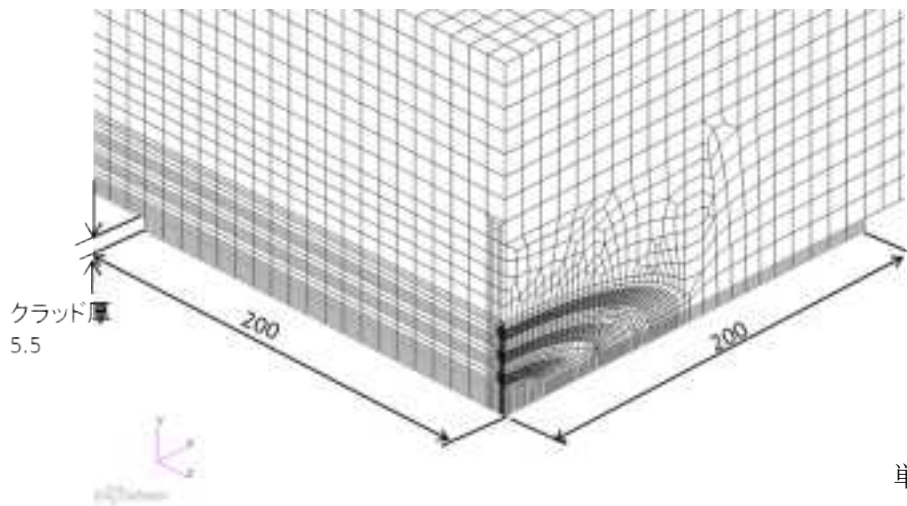
ただし、破壊靱性試験片との拘束状態の相違、クラッド溶接入熱による靱性回復程度や試験条件の誤差等で  $T_0 = \Delta 50^\circ\text{C}$  分の裕度を想定し、材料要求仕様値を  $T_0=100+50=150^\circ\text{C}$  と仮設定した。



(a) 全体図

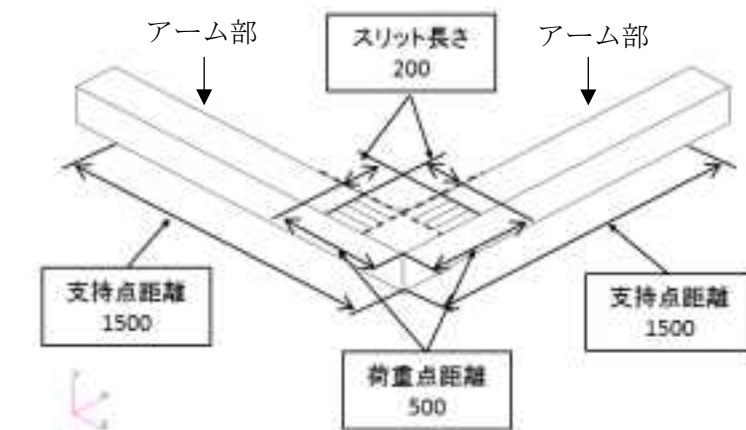
対称性から 1/4 モデルで構築

単位 : mm



(b) 拡大図 (その1)

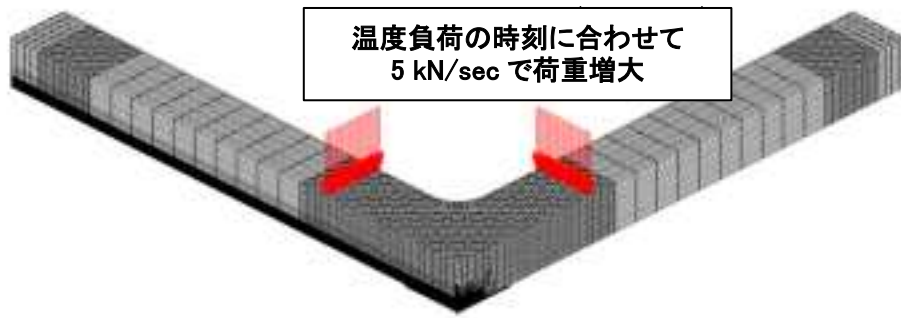
単位 : mm



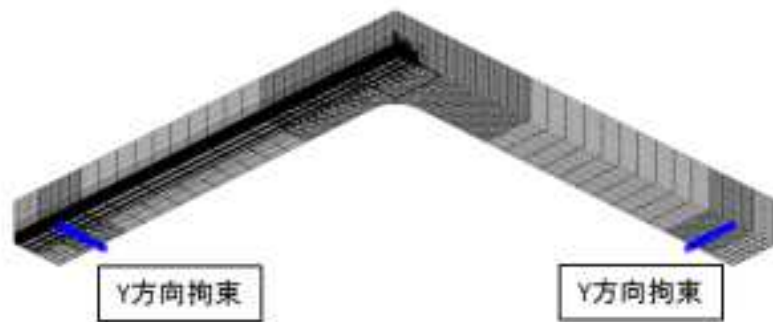
(c) 全体図 (その2)

単位 : mm

図 4.1.5.2-2 解析モデル



(a) 荷重条件



(b) 拘束条件

図 4.1.5.2-3 荷重・拘束条件

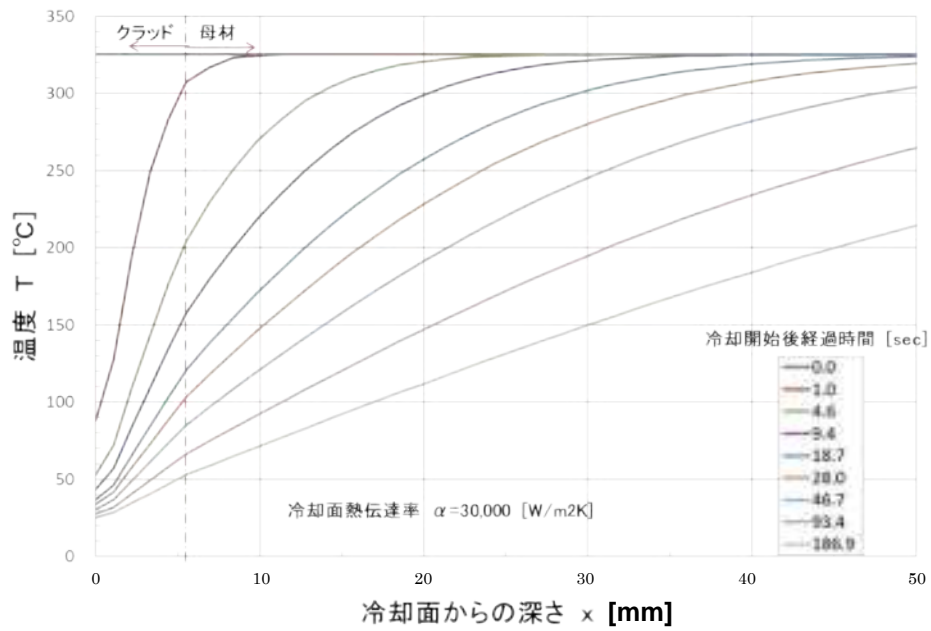


図 4.1.5.2-4 板厚内温度分布（1次元解析結果）

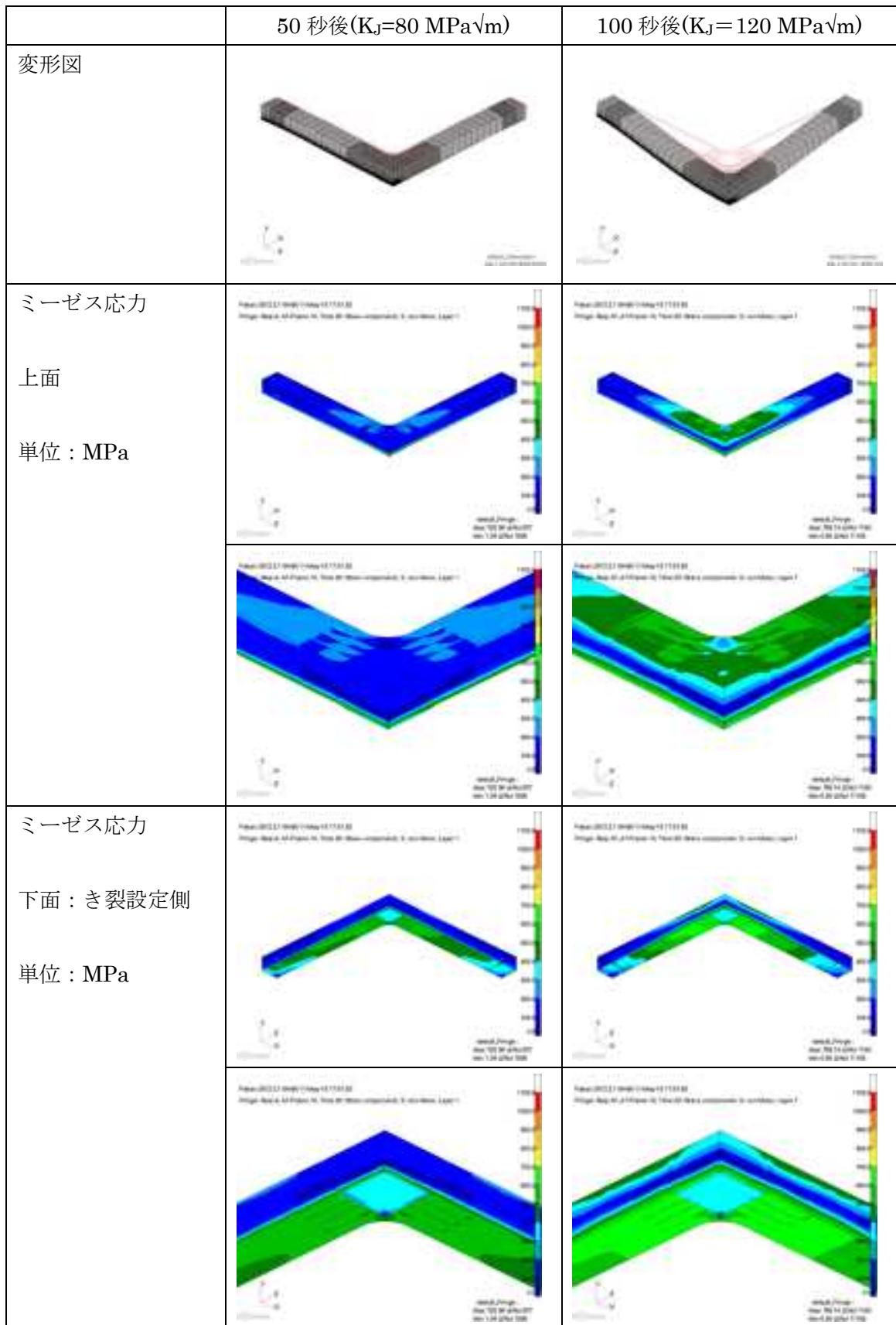


図 4.1.5.2-5 応力分布

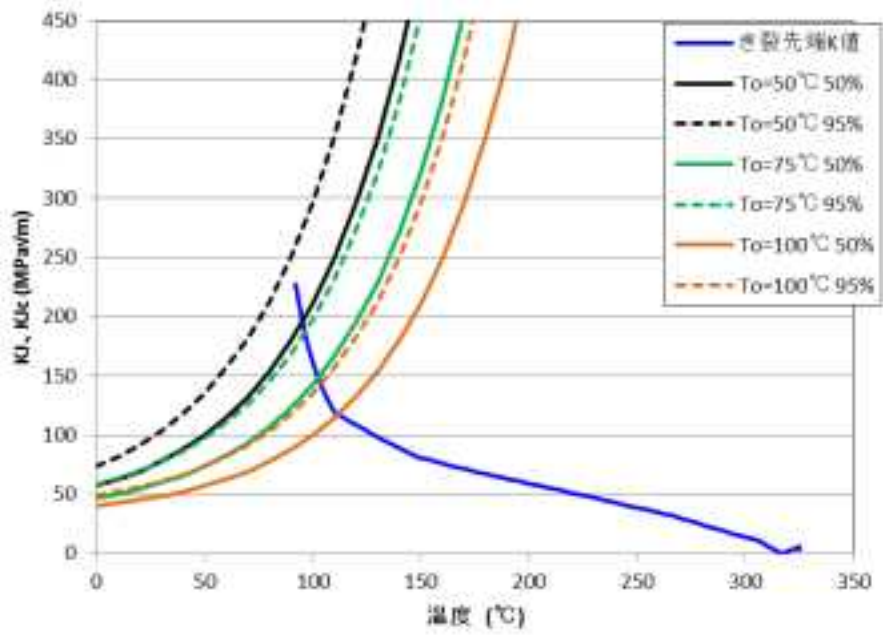


図 4.1.5.2-6 き裂先端の K 値と破壊靱性曲線との関係

本年度は、仮設定した機械的特性の目標値  $T_0 \geq 150^\circ\text{C}$ 、 $0.2\%$ 耐力  $\geq 700 \text{ MPa}$  の達成可否を検討するための事前試験を実施した。事前試験では、材料メーカーの過去の製造実績において目標値に近い結果が得られている成分系をベースとして、C量、S量等の化学成分を変化させた6鋼種の材料を製作し、機械的特性を確認した。化学成分及び機械試験結果をそれぞれ表4.2.5.2-3及び表4.2.5.2-4に示す。次年度も引き続き熱処理条件等をパラメータとした試験を継続する予定である。本年度に製作した事前試験材料（試験後に確認した余材の状態）を図4.1.5.2-7に示す。

なお、次年度は、事前試験の結果から、材料仕様を決定し、材料を製造するとともに、オーバーレイクラッド材料を手配する予定である。

表 4.1.5.2-3 脆化模擬材の事前試験材料の化学成分

鋼種 No.	化学成分 (wt.%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo
A1	0.25	0.40	1.40	0.029	0.002	0.50	0.14	0.20	0.60
B1	0.30	0.40	1.40	0.028	0.002	0.49	0.14	0.20	0.60
B3	0.30	0.40	1.42	0.029	0.010	0.49	0.14	0.20	0.60
B4	0.30	0.41	1.46	0.030	0.020	0.51	0.14	0.20	0.63
C1	0.35	0.40	1.44	0.030	0.003	0.51	0.14	0.20	0.61
C2	0.35	0.40	1.46	0.029	0.010	0.50	0.14	0.20	0.62

表 4.1.5.2-4 脆化模擬材の事前試験材料の機械試験結果

鋼種 No.	引張特性 (室温)	シャルピー衝撃特性
	0.2%耐力 (MPa)	vT <sub>r30</sub> (°C)
目標値	700 以上	150 以上
A1	675~676	77
B1	686~693	84
B3	689~698	101
B4	668~674	124
C1	747~761	76
C2	718~728	121



図 4.1.5.2-7 脆化模擬材の事前試験材料



#### 4.1.5.3 十字型試験体を用いた PTS 模擬試験を実施するための試験設備の整備

##### (1) 全体試験計画

###### • 試験概要

原子炉圧力容器の運転条件を模擬した荷重状態として、2軸荷重負荷及び熱過渡を与えた条件において、クラッド下の亀裂に対する破壊評価手法の妥当性を確認する。

想定亀裂としては、JEAC4206 改定案で規定する深さ 10 mm、長さ 60 mm 程度のクラッド下の半楕円欠陥を付与した平板モデル試験体(十字型)を準備する。試験は、高温に加熱した状態で 2 軸荷重負荷を行い、冷却水を噴射し非延性破壊を発生させる。

破壊試験結果と基礎試験で取得したマスターカーブ及び JEAC4206 改定案の  $T_{r30}$  に基づく破壊靱性カーブを比較し、保守性を確認する。また、JEAC4206 改定案で取り込んだ RSE-M のクラッドを考慮した応力拡大係数計算式による K 値、ならびに、亀裂を付与した弾塑性 FEM 解析による J 値( $K_J$ )とも比較することで、保守性を評価する。

###### • 試験装置概要

図 4.1.5.3-1 に示すような十字型試験体を用いて、図 4.1.5.3-2 に示すような 2 軸荷重負荷が可能な試験装置の設計検討を行い、破壊評価に必要な仕様を決定する。本試験では熱過渡を考慮するため、荷重負荷装置だけでなく、冷却設備の設計も並行して実施する。

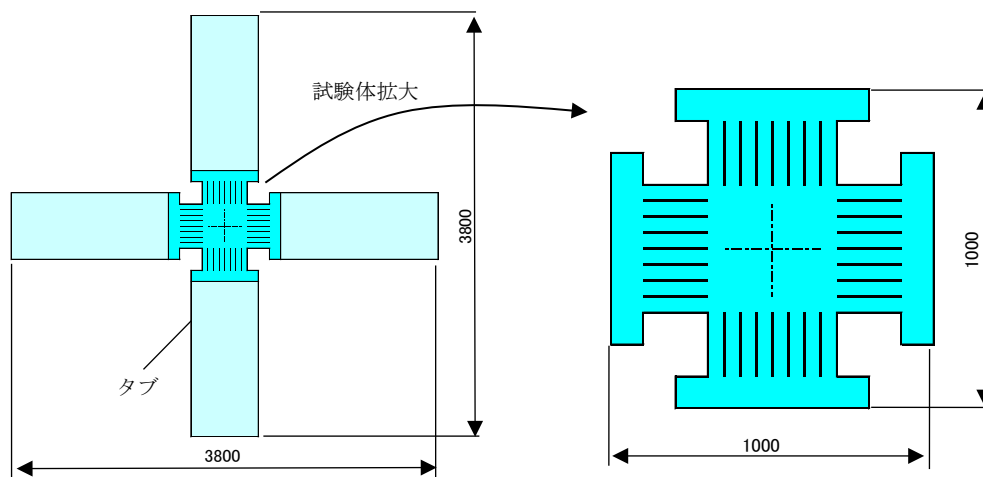


図 4.1.5.3-1 十字型試験体 (イメージ)

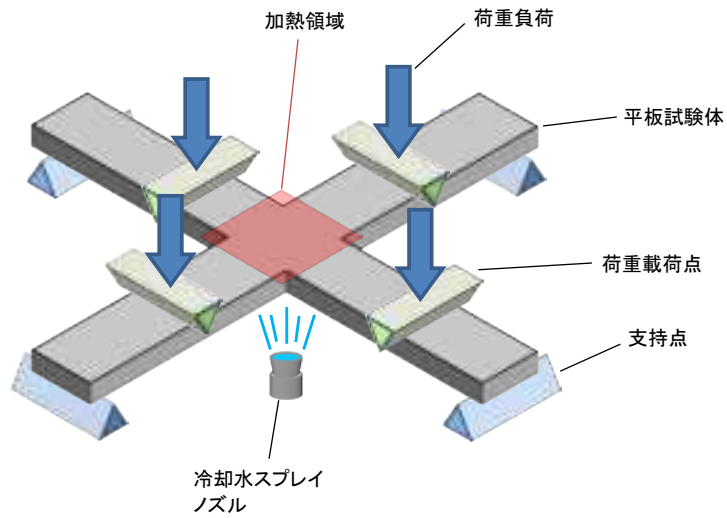


図 4.1.5.3-2 十字型試験体を用いた PTS 模擬試験における試験装置 (イメージ)

- 試験条件検討

本試験では、図 4.1.5.3-3 に示す通り、破壊靱性カーブに対して応力拡大係数 ( $K_I$ ) が交差するように試験温度及び荷重を変化させることで、破壊挙動や WPS 効果( $K_I$ が減少する過程で破壊しないこと)が確認できるように、FEM 解析を用いた条件設定検討を行う。

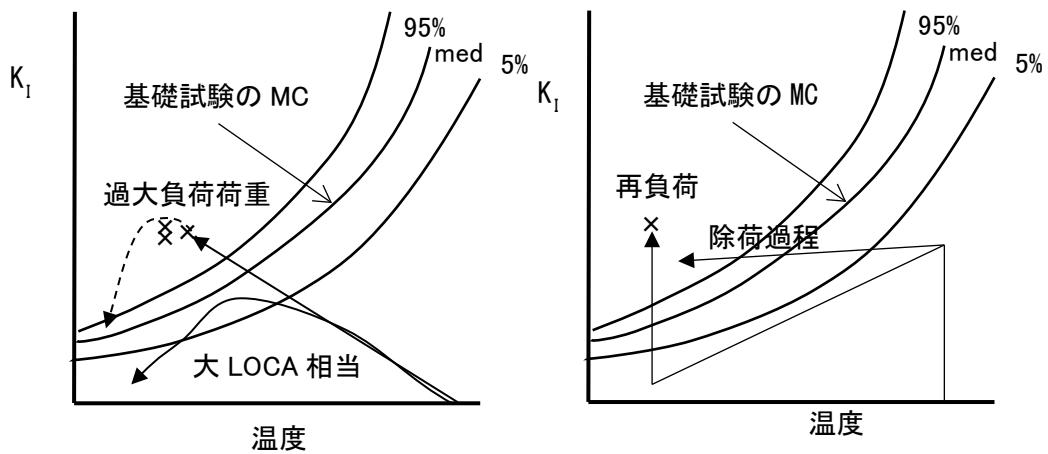


図 4.1.5.3-3 熱過渡条件 (イメージ)

- 試験体

- (a) 試験体断面

図 4.1.5.3-4 に試験体のき裂面に平行方向の断面の模式図を示す。

- 実機プラントより模擬した寸法  
板厚： $t=150$  mm（暫定）、  
クラッド厚： $t_c=5.5$  mm
- き裂サイズ（仮定：3 ケース）  
き裂深さ： $a=10\sim 30$  mm、 $a/2c=1/6$  とすると、  
き裂長さ： $2c=60\sim 180$  mm 程度を想定\*
- 板厚とき裂サイズより、試験体幅： $b=400$  mm とした。2 軸载荷エリアは、400 mm 角である。

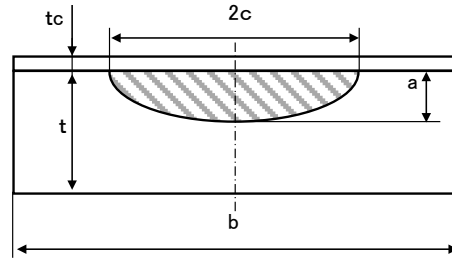


図 4.1.5.3-4 試験体断面の模式図

\* 試験体断面形状は、想定き裂が大きくなった場合の余裕を考慮した寸法で設定

- (b) スリット

図 4.1.5.3-5 に試験体中央部分、図 4.1.5.3-6 に試験体全体形状の概要を示す。

十字型試験体ではき裂設定部の応力分布を整流化するためにスリットを設定する。スリット幅については、海外プロジェクト事例（NESC-IV<sup>[4.1.5.3-1]</sup>、VII<sup>[4.1.5.3-2]</sup>）を参考に板幅の半分を目安に設定した。今後、詳細形状、位置は解析検討にて決定する。

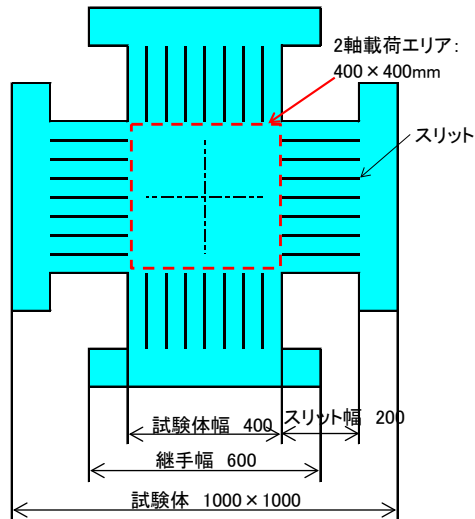


図 4.1.5.3-5 試験体中央部分

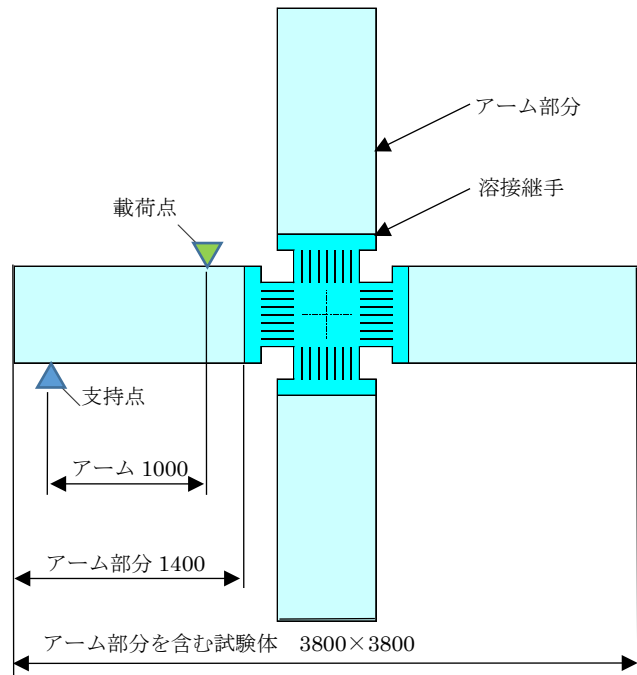


図 4.1.5.3-6 試験体全体形状

(c) 溶接継手

材料の有効活用のため、中央部分の寸法は 1000×1000 mm とし、荷重付与のアーム部分は、溶接にて継ぎ足す構造とする。溶接継手部は継手部の応力低減のために拡幅 (400→600 mm) する。

(2) 設備検討

試験では、図 4.1.5.3-7 に示すように、十字型試験体に 2 軸の曲げ荷重を負荷し、高温に加熱して保持した状態で、冷却水による急冷で熱応力を与えて、非延性破壊を発生させる。

冷却水の排水を貯留するために、地下ピットに試験装置を設置する。

主要な設備は、図 4.1.5.3-8 に示す荷重を与える载荷設備、反力フレーム、冷却設備、加熱設備、計測設備であり、ピット内で試験装置を支持する架台、試験体の組立用架台、疲労き裂導入設備も必要である。

各設備における検討・製作状況を以下に示す。

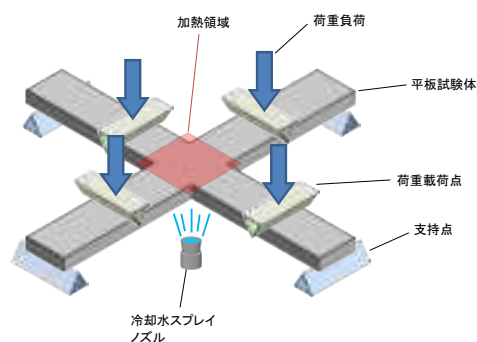


図 4.1.5.3-7 試験イメージ

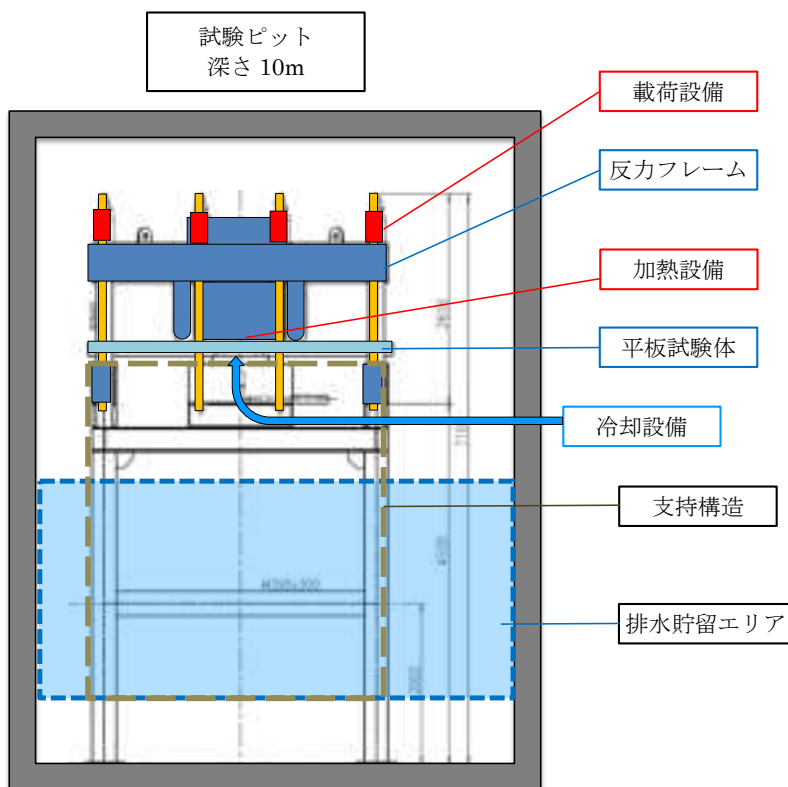


図 4.1.5.3-8 ピット内試験設備配置

- ジャッキシステム (荷重設備)

試験体に荷重を負荷する荷重設備は、油圧ジャッキとその制御装置から構成されるジャッキシステムとする。性能は試験の過渡条件により規定される。

図 4.1.5.3-9 に示すイメージでは、反力フレーム上に油圧センターホールジャッキ(1MN)を 8 台設置し、テンションロッドで試験体に曲げを与える構造である。ジャッキは試験条件に応じて、2 方向の曲げ荷重を別々に制御する。

本年度は、ジャッキシステムの一部部材を入手した。入手した部材を図 4.1.5.3-10 に示す。

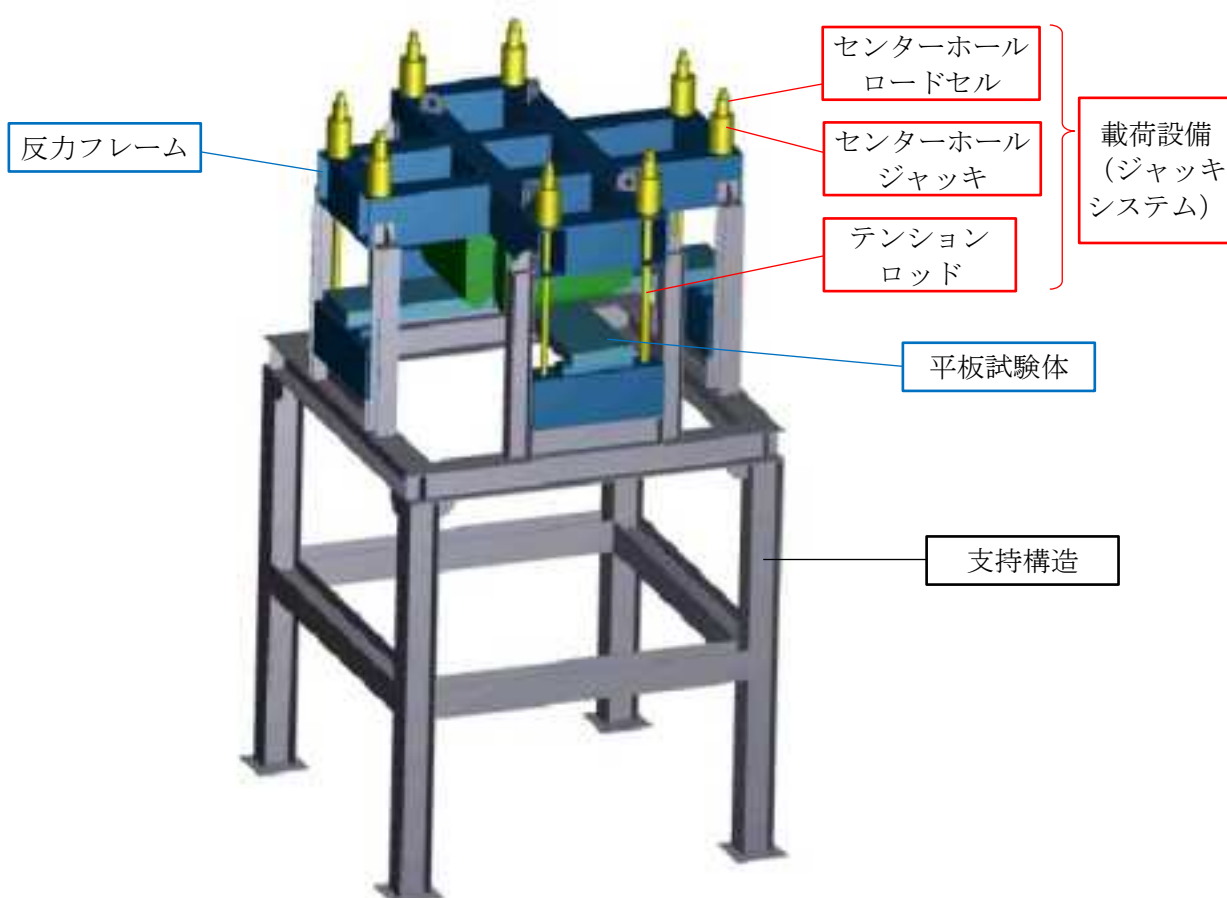


図 4.1.5.3-9 主要設備イメージ



図 4.1.5.3-10 本年度に入手したジャッキシステムの一部部材

- 反力フレーム（载荷設備）

試験反力を支持する反力フレームは、十字型試験体の負荷モーメントの反力で壊れないこと、変形が試験に影響を及ぼさないことが要求される。十分な剛性を有する鋼板溶接構造とする。さらに、試験の運用において、次の機能が要求される。

- ▶ 試験ピット内に設置し、試験体をセットしたまま吊り上げ可能なこと。
- ▶ 試験体を保持して設置、試験体の破壊後も試験体を保持してピットから取り出せること。
- ▶ 試験体中央部の支持点は、ヒータの熱を遮断する断熱材及び水冷装置を有すること。

図 4.1.5.3-11 に反力フレームのイメージを示す。

本年度は、反力フレームの一部部材を入手した。入手した部材を図 4.1.5.3-12 に示す。

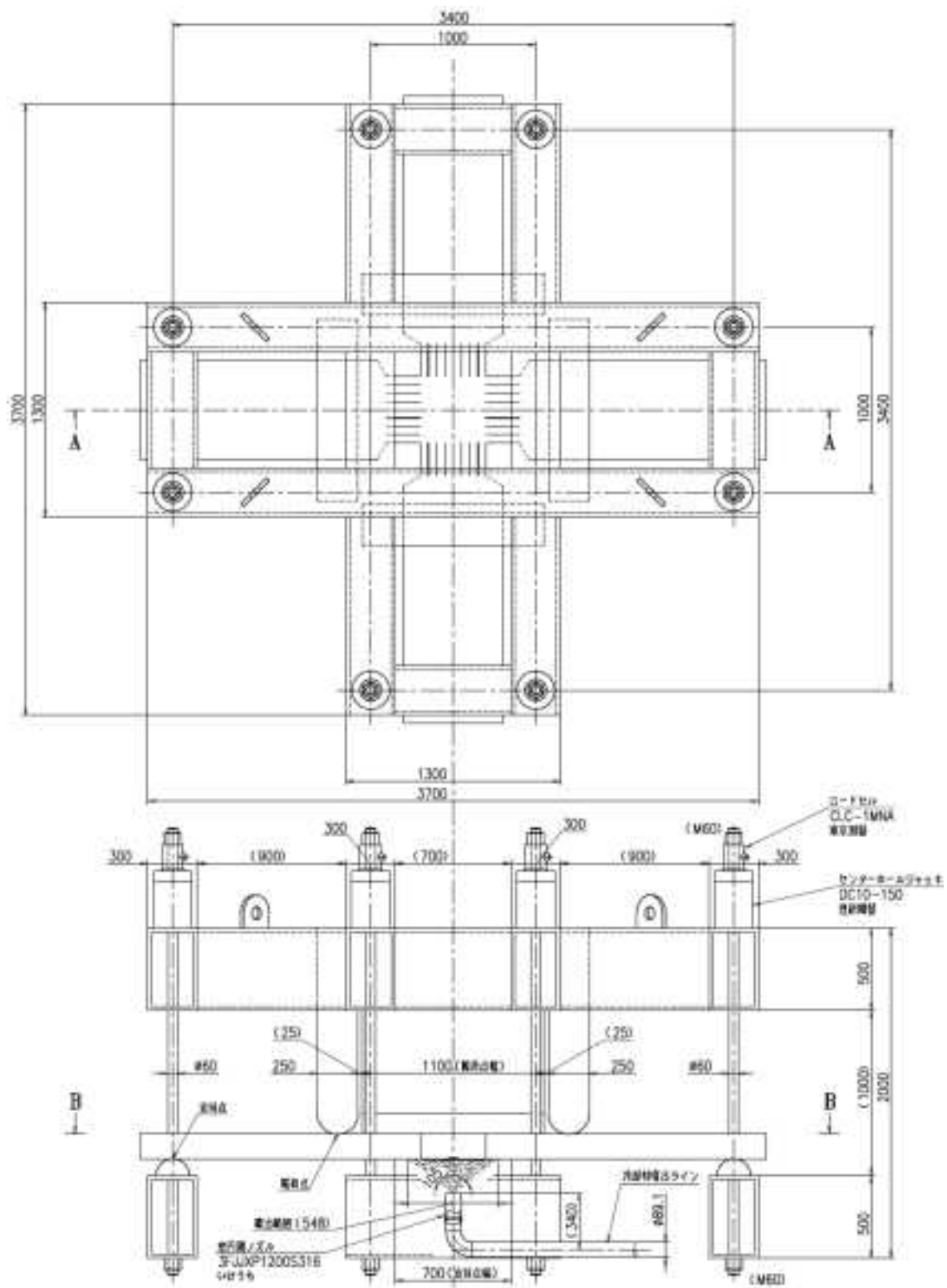


図 4.1.5.3-11 反力フレームのイメージ



図 4.1.5.3-12 本年度に入手した反力フレームの一部部材

- 加熱・冷却設備

図 4.1.5.3-13 に示す系統で冷却設備を構成する。

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。試験前には、冷却水スプレー用ポンプを三方弁により冷水貯留タンクに循環させる。試験開始時に三方弁を切替え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。

本設備については、次年度、詳細仕様を検討後、製作予定である。

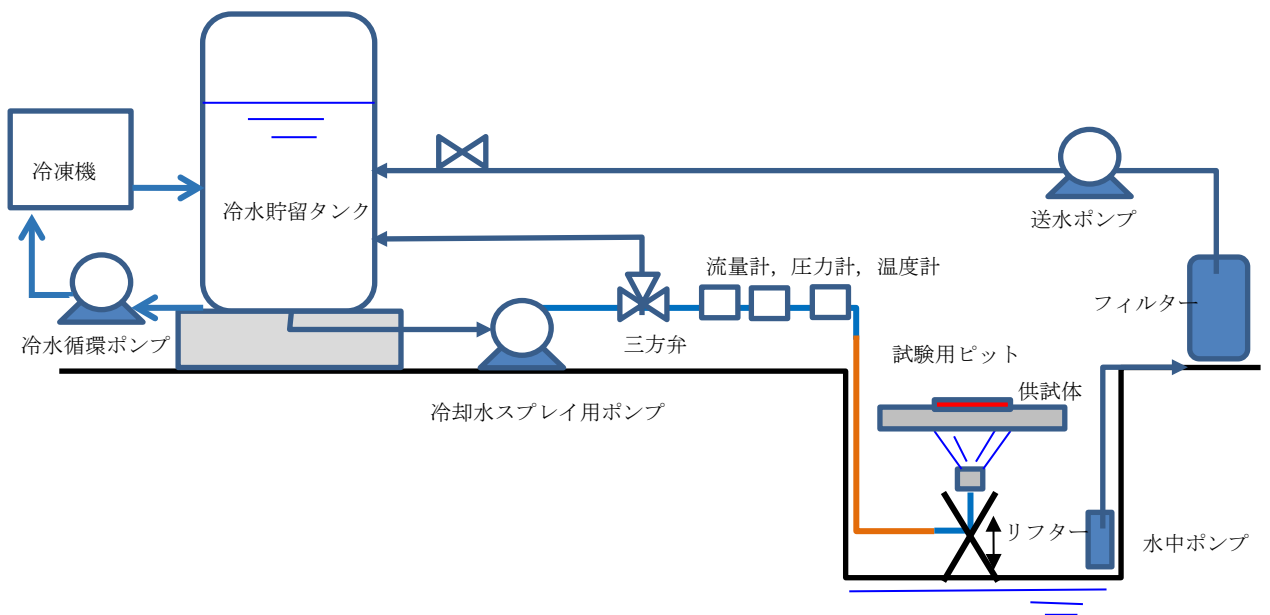


図 4.1.5.3-13 冷却設備 (案)



- その他の設備

計測設備、ピット内での試験装置支持架台、試験体の組立用架台、及び疲労き裂導入設備については、次年度、詳細仕様を検討後、製作予定である。

#### 参考文献

- [4.1.5.3-1] N. Taylor et al., NESC-IV PROJECT, An investigation of the transferability of Master Curve technology to shallow flaws in reactor pressure vessel applications, Final Report, 2005.
- [4.1.5.3-2] S. Yin et al., NESC-VII: FRACTURE MECHANICS ANALYSES OF WPS EXPERIMENTS ON LARGE-SCALE CRUCIFORM SPECIMEN, Proceedings of 2009 ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2011-57112, July, 2011.

#### 4.1.5.4 原子炉圧力容器における残留応力・ひずみ評価法の整備

次年度以降に制作・試験を予定する大型平板試験体や十字試験体に対して、クラッド部に生じる肉盛溶接による残留応力及び残留ひずみ分布を考慮した破壊靱性試験評価手法を検討するため、比較的小さい形状の平板モデル（以下、局所平板モデルと称する）を用いて熱弾塑性解析により求めた残留ひずみを固有ひずみとして取り扱い、弾性解析から実規模のモデルで残留応力を算出する解析ツールを整備した。また、円筒モデルを用いて応力分布の確認を行った。

##### (1) 固有ひずみによる残留応力の算出

溶接時の熱履歴や材料の相変態を考慮した熱弾塑性解析により求められる残留歪を固有歪として取り扱うことを前提に、以下に記す解析ツールを整備した。有限要素解析において、固有ひずみは初期ひずみ $\varepsilon_{eigen}$ (4.1.5.4-1)を初期条件として適用するのが一般的であるが、PTS 解析等で実績を有する汎用有限要素解析コード **Abaqus** では、初期ひずみの設定が困難であるため、代わりに初期応力(4.1.5.4-2)を利用することとした。

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_{eigen}) \quad (4.1.5.4-1)$$

$$\sigma = D\varepsilon + \sigma_0 \quad (4.1.5.4-2)$$

ここで、 $\varepsilon$ は変位から計算される全ひずみである。(4.1.5.4-1)と(4.1.5.4-2)から、固有ひずみに相当する初期応力 $\sigma_0$ は(4.1.5.4-3)で表される。

$$\sigma_0 = -D\varepsilon_{eigen} \quad (4.1.5.4-3)$$

$D$ は応力-ひずみの弾性材料剛性マトリクスである。構造全体の連立方程式は(4.1.5.4-4)で表される。

$$Ku = F_{ext} - F_i \quad (4.1.5.4-4)$$

ここで、 $K$ は構造の剛性マトリクス、 $u$ は節点の変位(求めたいベクトル)、 $F_{ext}$ は外力ベクトル、 $F_i$ は内力ベクトルであり、変位が与えられていない初期状態の時、 $F_i$ は(4.1.5.4-5)に従い、要素毎に積分和で求められる。 $B^T$ はひずみ-変位の微分変換転置マトリクス、 $ne$ は要素数、 $V$ は体積である。

$$F_i = \sum_{i=1}^{ne} \int B^T \sigma_0 dV = - \sum_{i=1}^{ne} \int B^T D \varepsilon_{eigen} dV \quad (4.1.5.4-5)$$

拘束境界以外に外力がない場合( $F_{ext} = 0$ )、連立方程式(4.1.5.4-4)は式 4.1.5.4-6)となる。

$$Ku = -F_i = -\sum_{i=1}^{ne} \int B^T \sigma_0 dV = \sum_{i=1}^{ne} \int B^T D \varepsilon_{eigen} dV \quad (4.1.5.4-6)$$

## (2) 残留ひずみのマッピング

熱弾塑性解析により求めた局所平板モデルにおける残留ひずみを適切にマッピングする方法を整備するため、局所平板モデルにおけるひずみ分布を把握する必要がある。図 4.1.5.4-1 に局所平板モデルを用いた試計算により得られた肉盛溶接方向に対して垂直方向のひずみ成分 $\varepsilon_{xx}$ の分布を示す。局所モデルではZ方向に9パスの溶接線(1パス/4格子)が並んでいる。溶接定常部における残留ひずみを固有ひずみとして用いるため、まず中心四角形(黒線)の領域内の赤点線の断面上(図 4.1.5.4-2)のひずみを抽出し、板厚方向のひずみ分布を分析した。

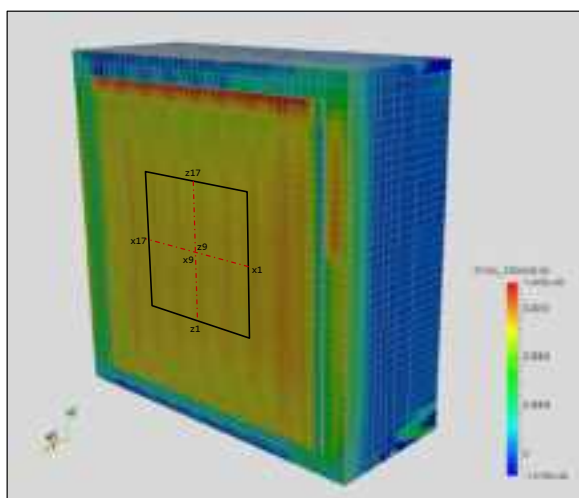


図 4.1.5.4-1 局所平板モデルひずみ成分 $\varepsilon_{xx}$ の分布

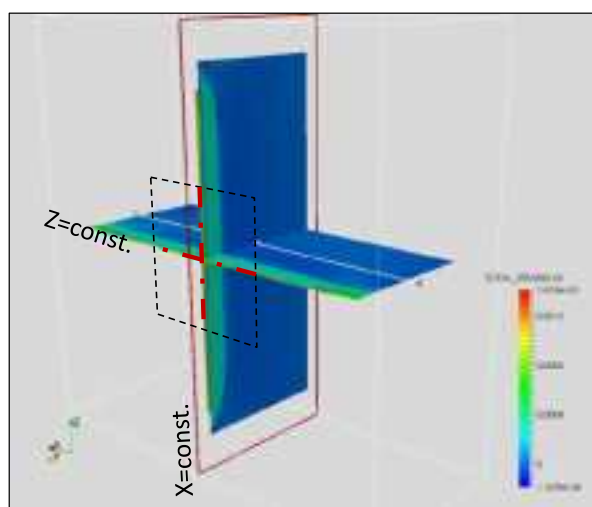


図 4.1.5.4-2 抽出領域断面上のひずみ成分 $\varepsilon_{xx}$ の分布

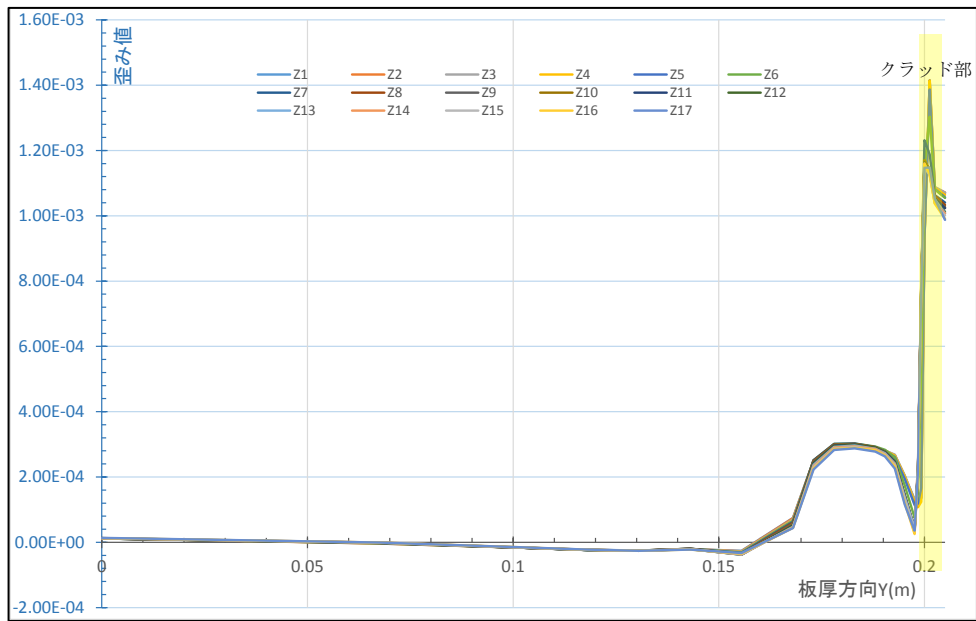


図 4.1.5.4-3(a) X 方向中心位置における板厚方向の $\epsilon_{xx}$ の分布

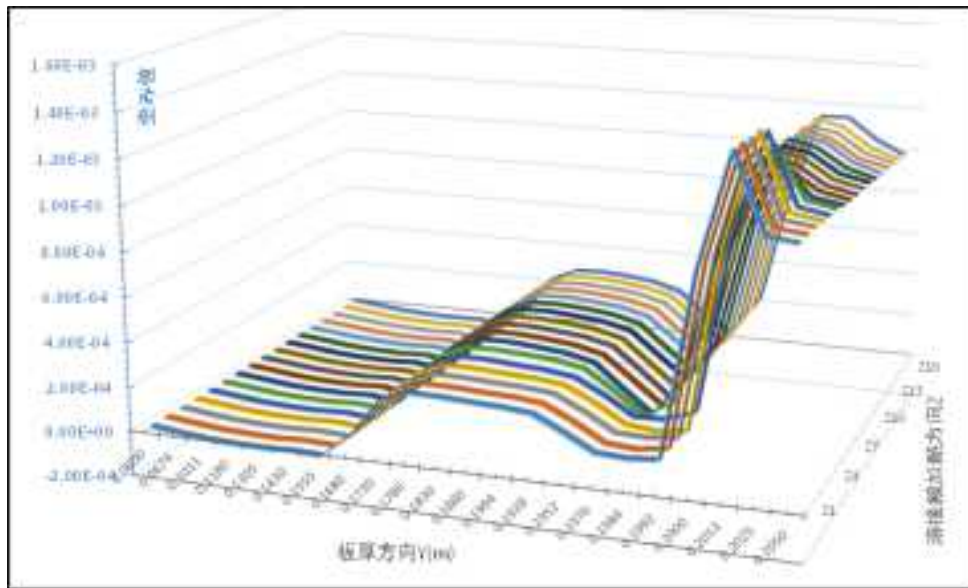


図 4.1.5.4-3 (b) X 方向中心位置における板厚方向の $\epsilon_{xx}$ 分布の 3D グラフ

図 4.1.5.4-3 は、図 4.1.5.4-2 の縦方向の各 Z 座標における板厚方向のひずみ成分 $\epsilon_{xx}$ の分布図である。クラッド部（厚み 5mm）と母材部（200 mm）の境界面付近のいわゆる熱影響部（HAZ）で、ひずみ $\epsilon_{xx}$ の勾配が大きい（図 4.1.5.4-3(a)）。また、Z 方向に下から上までの溶接順で 3D グラフの分布図を比較すると、クラッド部のひずみのピーク値は上の 12 格子よりも下の 5 格子で大きい。したがって、溶接パスの先頭部を除いて中央部以上の領域を選んだ方が、溶接始端部における非均質な入熱の影響を除くことができ、より均一なひずみ分布となる。図 4.1.5.4-2 に示した X 方向の各 X 座標における板厚方向のひ

ずみ成分 $\epsilon_{xx}$ の分布を図 4.1.5.4-4～図 4.1.5.4-8 に抽出した。図 4.1.5.4-4 は 5 溶接パス（中央 3 パスと、近接する 1 パスずつの計 2 パス）の領域に存在する格子におけるひずみ分布全てを示しているため、異なる分布パターンが見られる。実際には、1 溶接パス当たり 4 格子で構成されているため、その 4 格子ごとにグループ化すると、それぞれの分布はほぼ一致することが分かった（図 4.1.5.4-5 ～図 4.1.5.4-8）。この結果から、溶接ビード中央と重なり部とでひずみ分布は異なるが、図 4.1.5.4-1 の黒線で囲んだ領域の分布はビードごとにほぼ一致しており、固有ひずみ法を適用するうえで重要な溶接定常部に当たると考えられる。

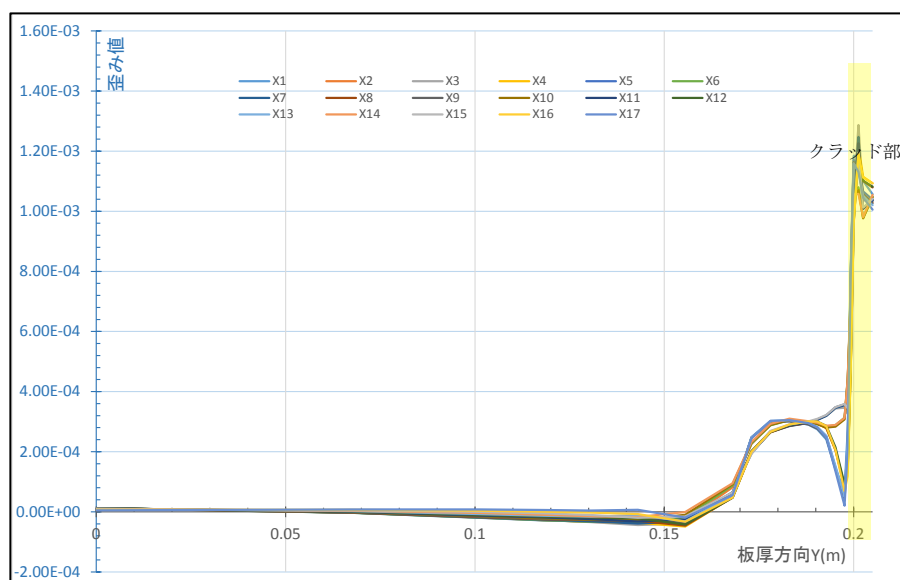


図 4.1.5.4-4(a) Z 方向中心位置における板厚方向の $\epsilon_{xx}$ の分布

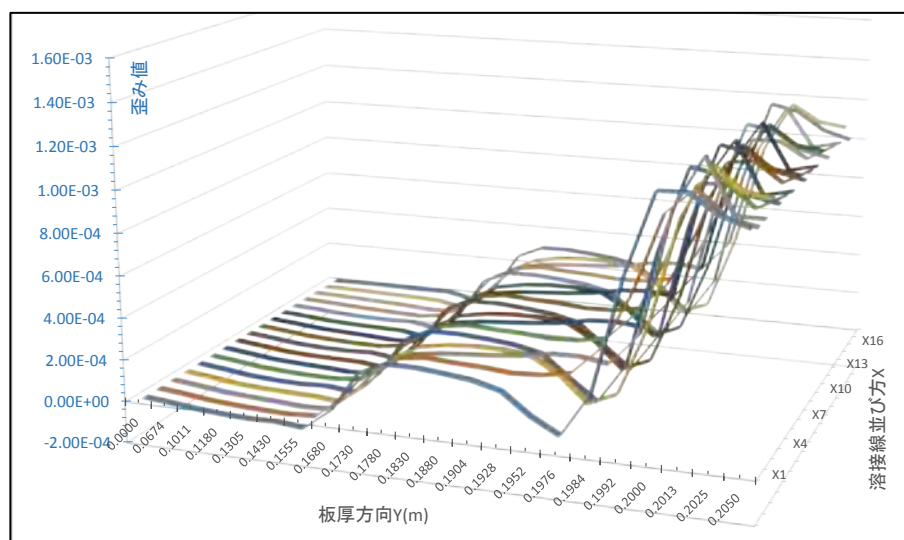


図 4.1.5.4-4(b) Z 方向中心位置における板厚方向の $\epsilon_{xx}$ 分布の 3D グラフ

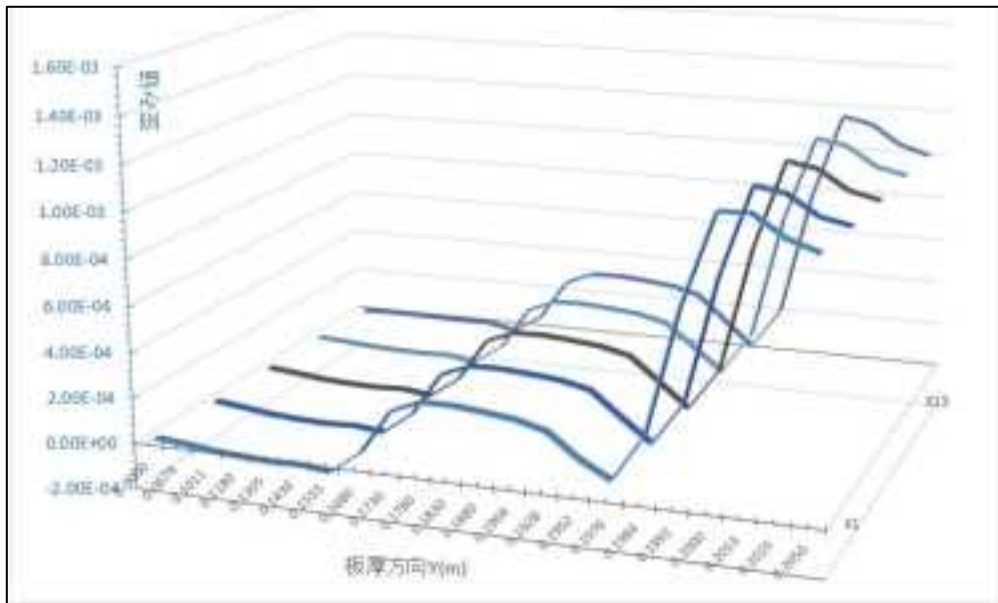


図 4.1.5.4-5 Z 方向中心位置における板厚方向の $\epsilon_{xx}$ の分布 (格子 1,5,9,13,17)

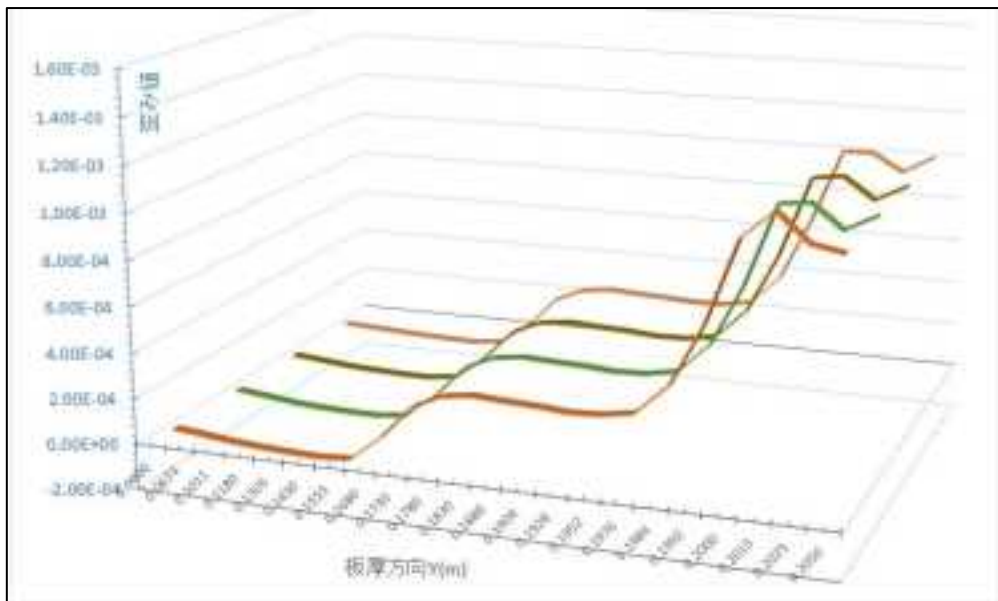


図 4.1.5.4-6 Z 方向中心位置における板厚方向の $\epsilon_{xx}$ の分布 (格子 2,6,10,14)

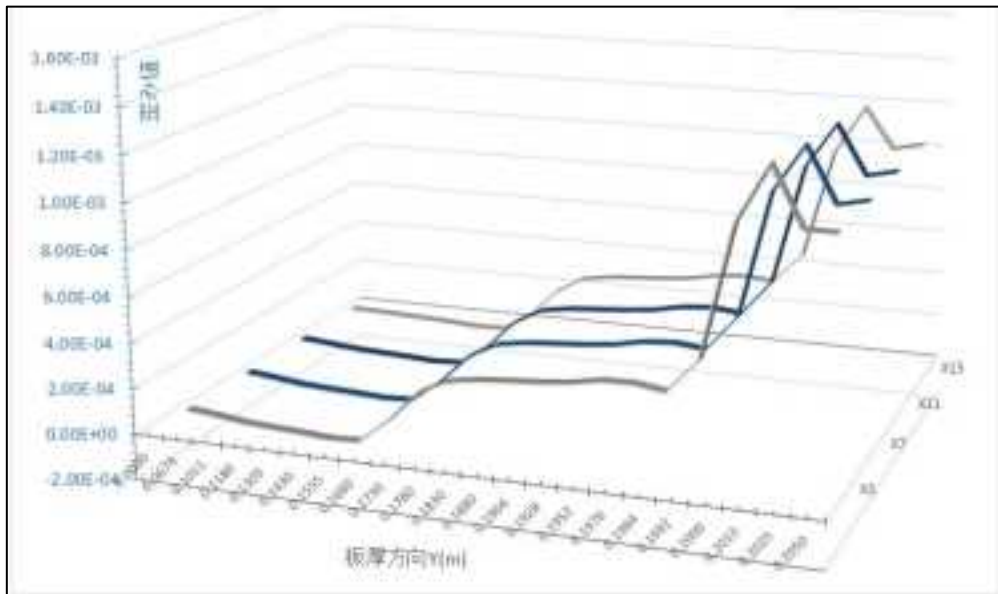


図 4.1.5.4-7 Z 方向中心位置における板厚方向の $\epsilon_{xx}$ の分布 (格子 3,7,11,15)

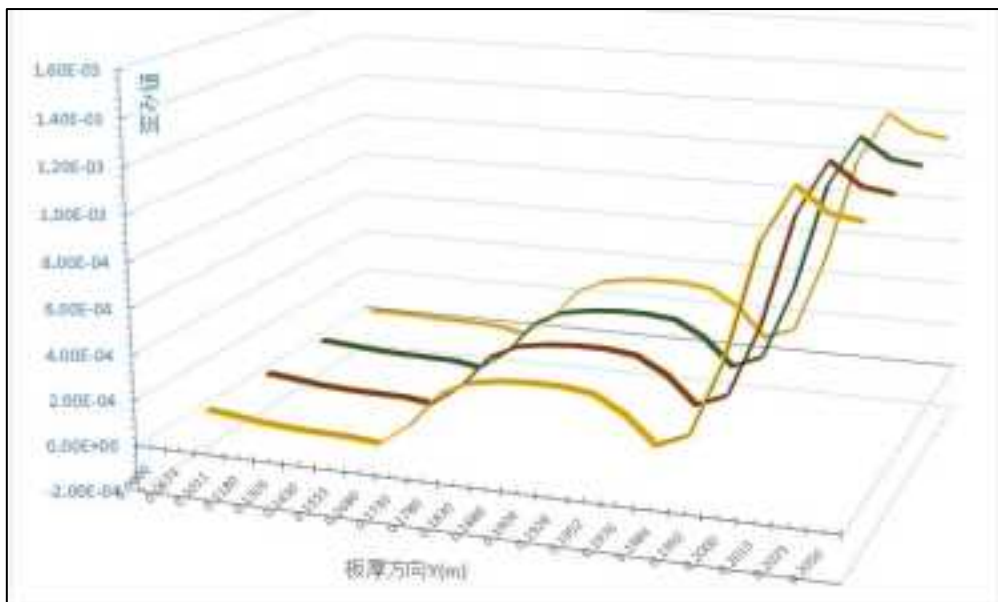


図 4.1.5.4-8 Z 方向中心位置における板厚方向の $\epsilon_{xx}$ の分布 (格子 4,8,12,16)

### (3) 固有ひずみのマッピング方法

図 4.1.5.4-9 に原子炉圧力容器のクラッド肉盛溶接方向を示す。同じ条件で肉盛溶接されると想定すれば、円柱座標系を用いて、ある角度の断面における溶接パスの分布は周期的であると考えられる。局所平板モデルを用いたクラッド肉盛溶接の代表的な 1 溶接パス、または溶接定常部における複数の溶接パスの断面上のひずみ分布を抽出し、原子炉圧力容器へのマッピングを行えるよう解析ツールを整備した。図 4.1.5.4-10 に平板モデルの 1 溶接パスの断面メッシュと原子炉圧力容器モデルの要素積分点のマッピング位置関係を示す。円筒座標系を用いて、3 次元モデルへのマッピングは 2 次元軸対称として扱うことができる。

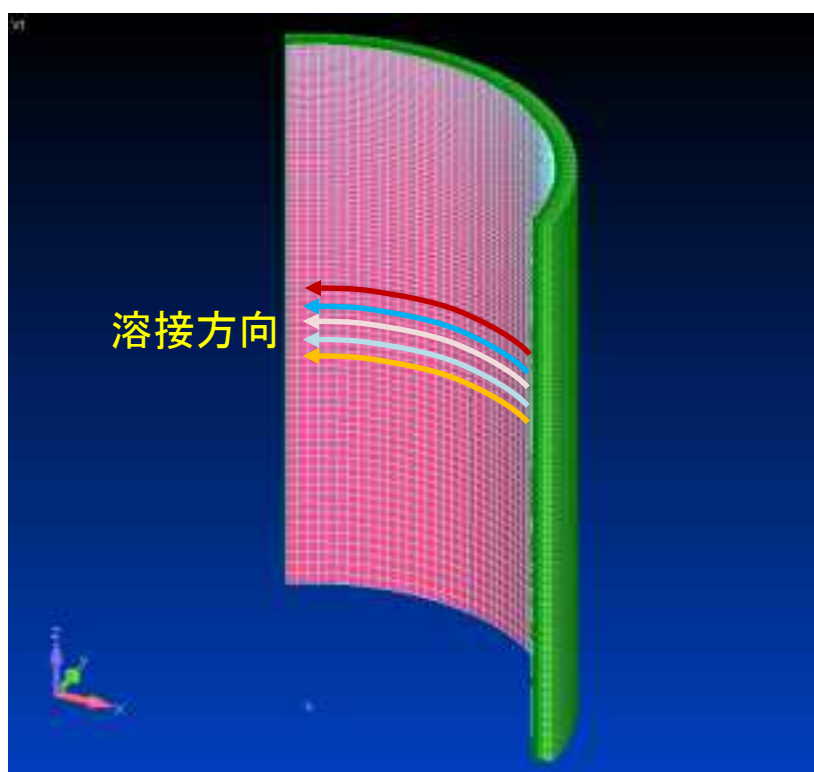


図 4.1.5.4-9 原子炉圧力容器円筒モデルの溶接方向



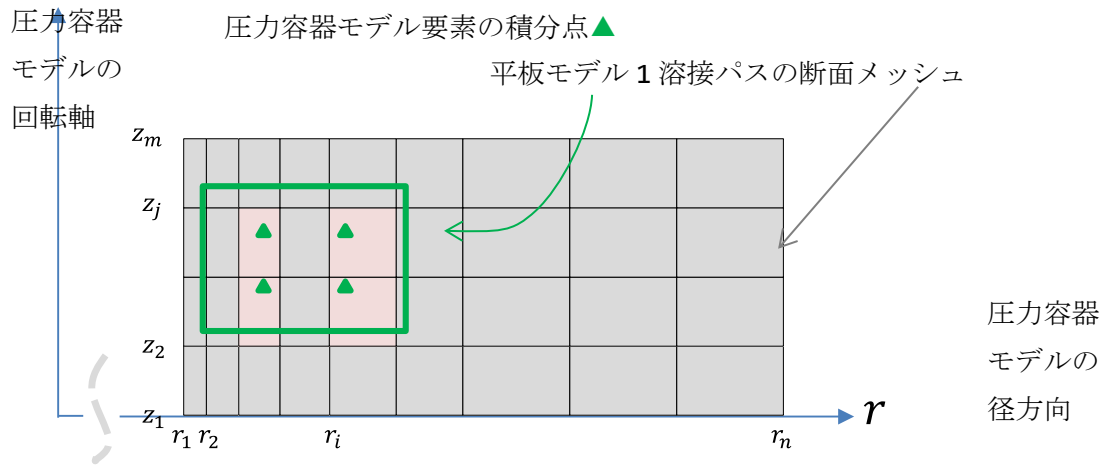


図 4.1.5.4-10 压力容器モデルの要素積分点とマッピング元の局所平板モデルの断面メッシュ

原子炉压力容器モデルの要素積分点の全体座標を $(x, y, z)$ としたとき、対応する円柱座標系の座標値は(4.1.5.4-7)で計算される。

$$(r, \theta, z) = \begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta = \arccos(x/r) \\ z = z \end{cases} \quad (4.1.5.4-7)$$

円柱座標で $\theta = 0$ の断面のひずみテンソルを $\varepsilon_0$ とし、任意の $\theta$ 上の断面のひずみテンソル $\varepsilon_\theta$ は(4.1.5.4-8)で表わされる。

$$\varepsilon_\theta = R\varepsilon_0R^T \quad (4.1.5.4-8)$$

ここで、 $R$ は回転マトリクス(4.1.5.4-9)である。

$$R = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1.5.4-9)$$

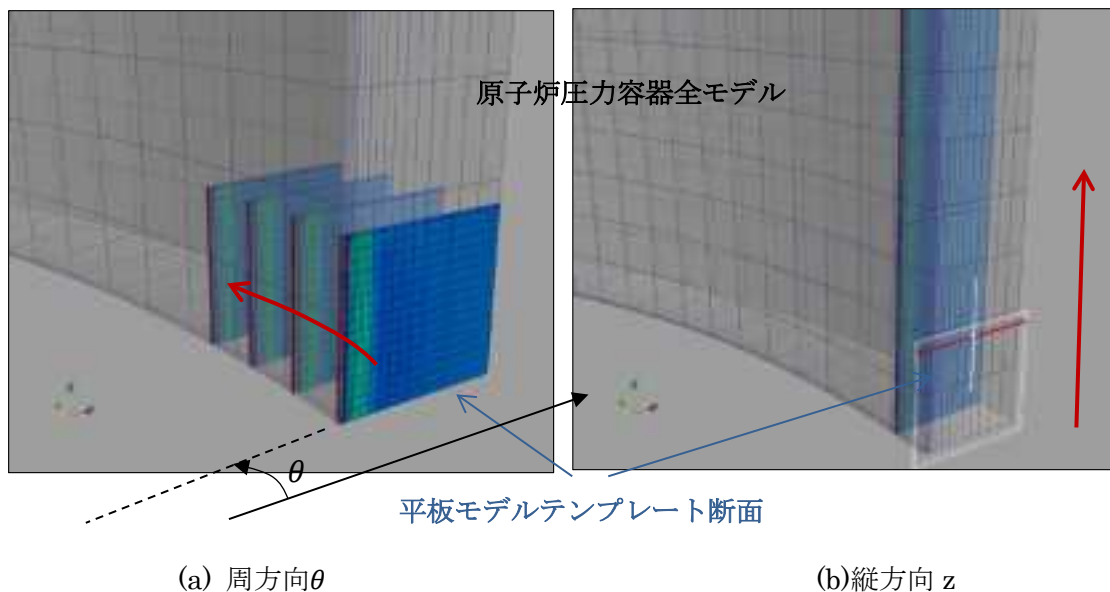


図 4.1.5.4-11 局所平板モデルの断面から原子炉压力容器モデルの全積分点へのマッピング

局所平板モデルの節点におけるひずみは、周囲の要素の積分点からの外挿値を平均することで与えられる。今回の肉盛溶接ではクラッドと母材の境界面のひずみ勾配が大きいので、クラッド側の高いひずみと母材側の低いひずみの平均を取ると、マッピングされるひずみの精度が落ちてしまう。対策として、界面上の節点のひずみはクラッドと母材それぞれの材料要素を区別して外挿された2つのひずみテンソルを持つこととした（図4.1.5.4-12）。

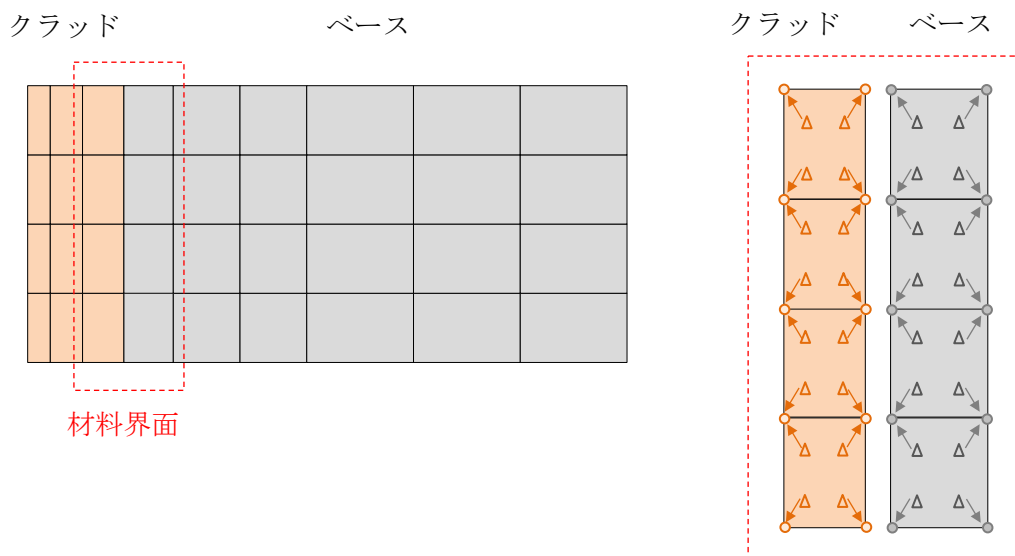


図 4.1.5.4-12 局所平板モデルにおける、クラッドと母材の境界面上節点のひずみの求め方

(4) 局所平板モデルと原子炉压力容器円筒モデルの方向合わせ

局所平板モデルと原子炉压力容器円筒モデルのそれぞれの溶接座標系を合わせて、局所平板モデルのひずみ分布を円筒压力容器モデルにマッピングするために、座標変換が必要となる。

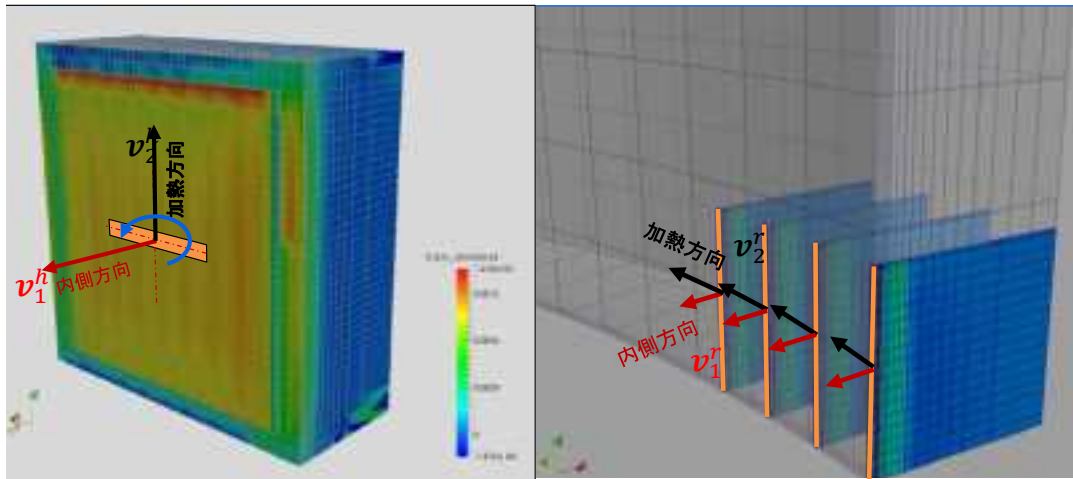


図 4.1.5.4-13 各モデルにおける溶接方向 (a)局所平板モデル (b)原子炉压力容器円筒モデル

図 4.1.5.4-13 に示すように、全体座標系で局所平板モデルと原子炉压力容器円筒モデルの溶接局所座標系が定義されれば、座標変換マトリクスを確定できる。溶接局所座標系は、クラッド内側方向 $v_1$ と溶接パスの加熱方向 $v_2$ で決められる。

平板モデルの座標系は $\{v_1^h \ v_2^h \ v_3^h\}$ 、ここで、 $v_3^h = \frac{v_1^h \times v_2^h}{|v_1^h \times v_2^h|}$ ；原子炉压力容器円筒モデルの板厚断面の溶接局所座標系は $\{v_1^r \ v_2^r \ v_3^r\}$ として、局所平板モデルから原子炉压力容器円筒モデルへの座標変換マトリクスは(4.1.5.4-10)で表される。

$$R = \begin{bmatrix} v_1^r \cdot v_1^h & v_2^r \cdot v_1^h & v_3^r \cdot v_1^h \\ v_1^r \cdot v_2^h & v_2^r \cdot v_2^h & v_3^r \cdot v_2^h \\ v_1^r \cdot v_3^h & v_2^r \cdot v_3^h & v_3^r \cdot v_3^h \end{bmatrix} \quad (4.1.5.4-10)$$

固有ひずみマッピングの処理フローチャートは図 4.1.5.4-14 に示すように「データ入力」「モデル形状認識」「固有ひずみのマッピング」「初期応力の出力」4つの部分で構成される。

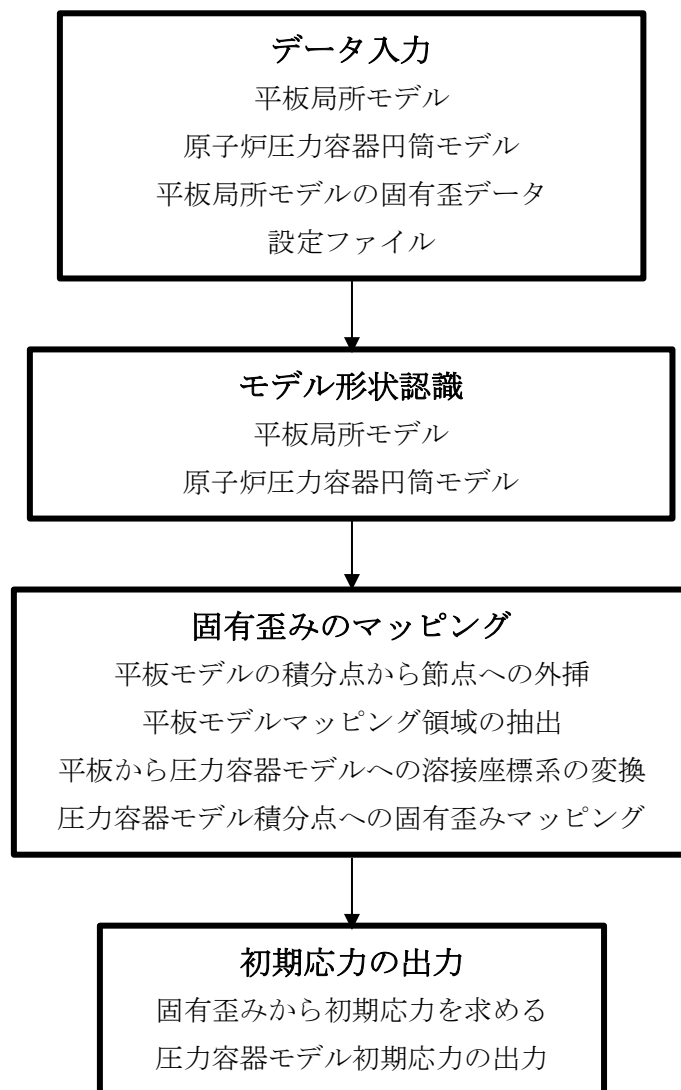
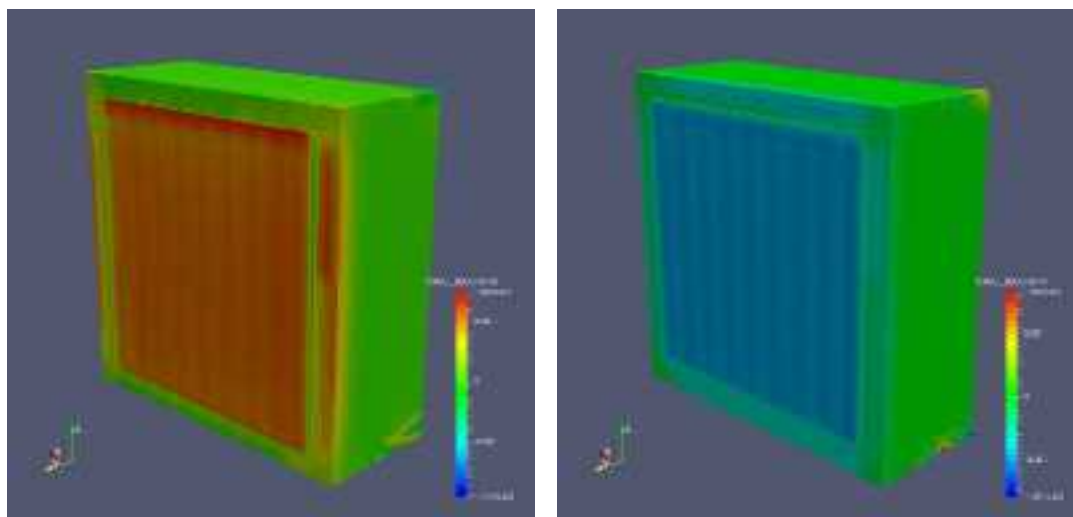


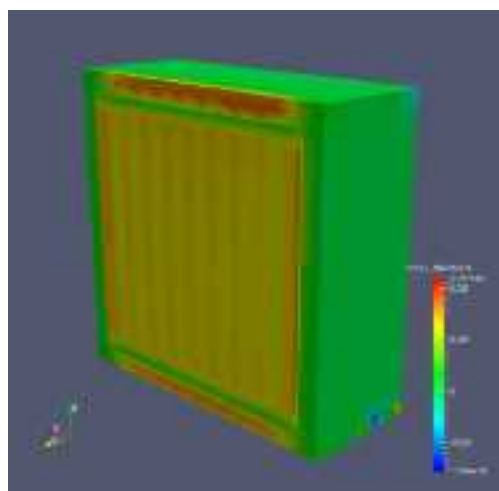
図 4.1.5.4-14 マッピング処理フローチャート

図 4.1.5.4-15 は平板モデルの残留ひずみ成分 $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ,  $\epsilon_{zz}$ の分布図を示している。図 4.1.5.4-16 に平板モデルの溶接座標を压力容器のモデルに合わせて回転させたときの残留ひずみ分布を示す。



(a)ひずみ成分 $\epsilon_{xx}$

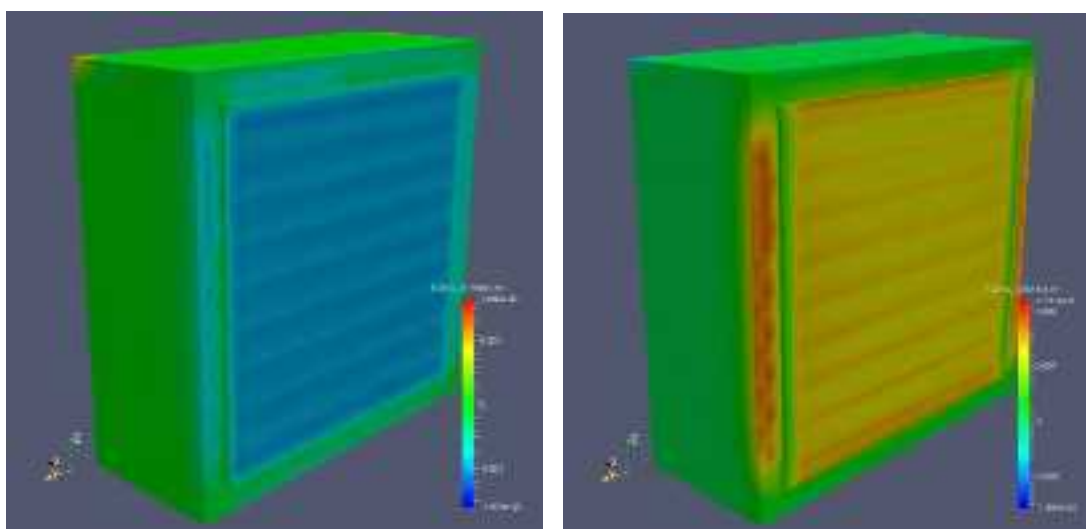
(b)ひずみ成分 $\epsilon_{yy}$



(c)ひずみ成分 $\epsilon_{zz}$

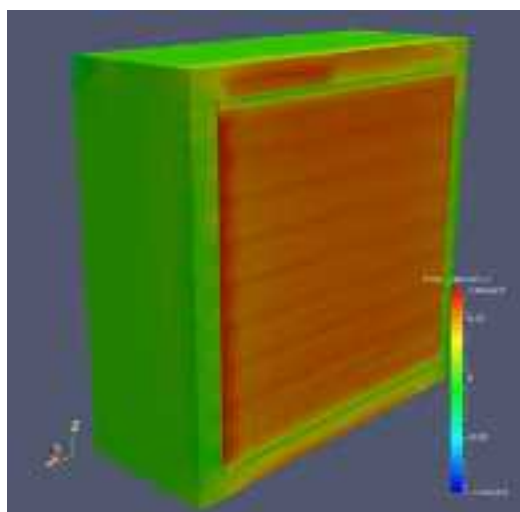
図 4.1.5.4-15 平板モデルの残留ひずみ分布図

図 4.1.5.4-16 に圧力容器モデルの溶接座標系 $\theta = 0$ に回転した平板モデル残留ひずみの分布図を示す。図 4.1.5.4-15 と図 4.1.5.4-16 の回転前後のひずみ成分分布を比較すると、回転前のひずみ成分 $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$ がそれぞれ回転後のひずみ成分 $\varepsilon_{zz}, \varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}$ に一致することから、ひずみ成分の座標変換が正しく行われていることを確認した。



(a)ひずみ成分 $\varepsilon_{xx}$

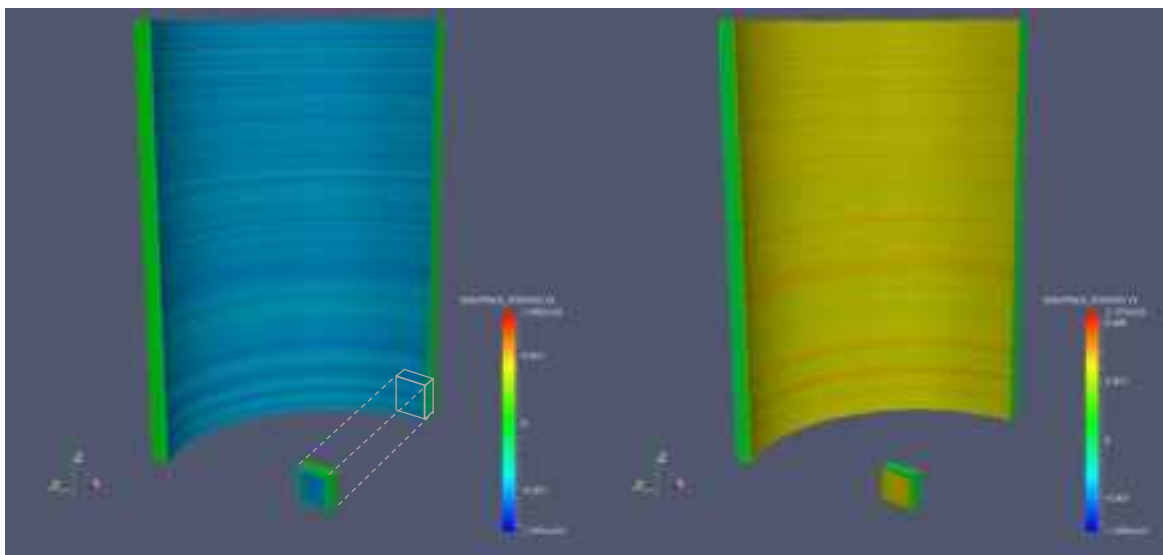
(b)ひずみ成分 $\varepsilon_{yy}$



(c)ひずみ成分 $\varepsilon_{zz}$

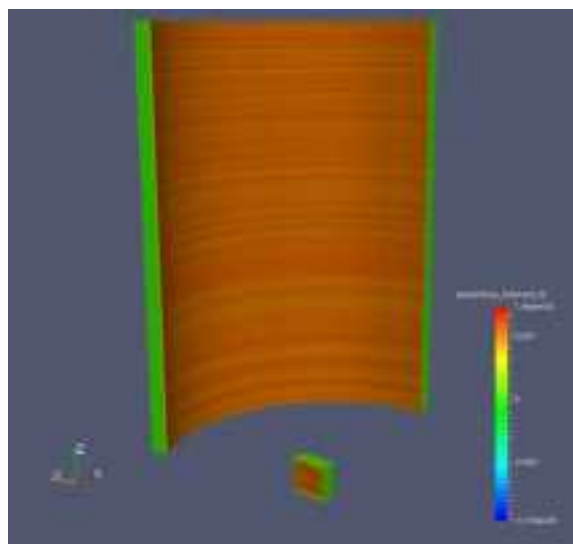
図 4.1.5.4-16 圧力容器モデルの溶接座標系 $\theta = 0$ に回転した平板モデルの残留ひずみ分布

図 4.1.5.4-17 には円柱座標系で圧力容器モデルのマッピングされたひずみ分布を示す。周方向においてそれぞれのひずみ成分の分布が等しくなることを確認した。Z 軸方向に不均一な分布を示すのは、溶接ビードによるものと平板モデルのメッシュサイズに対して円筒容器モデルのメッシュサイズが大きいためと考えられる。



(a)ひずみ成分 $\varepsilon_{xx}$

(b)ひずみ成分 $\varepsilon_{yy}$



(c)ひずみ成分 $\varepsilon_{zz}$

図 4.1.5.4-17 圧力容器モデルにマッピングされたひずみ分布（円柱座標系）

図 4.1.5.4-18 に、汎用有限要素解析コード **Abaqus** にひずみ分布を与えて変形させたときの応力分布を示す。ひずみ分布と同様に周方向において応力分布が等しくなることを確認した。また、円筒容器モデルのメッシュサイズに依存して応力分布に変化が見られるため、高い精度で円筒容器の残留応力を考慮した解析を実施するためにはメッシュの細分化が重要となる。

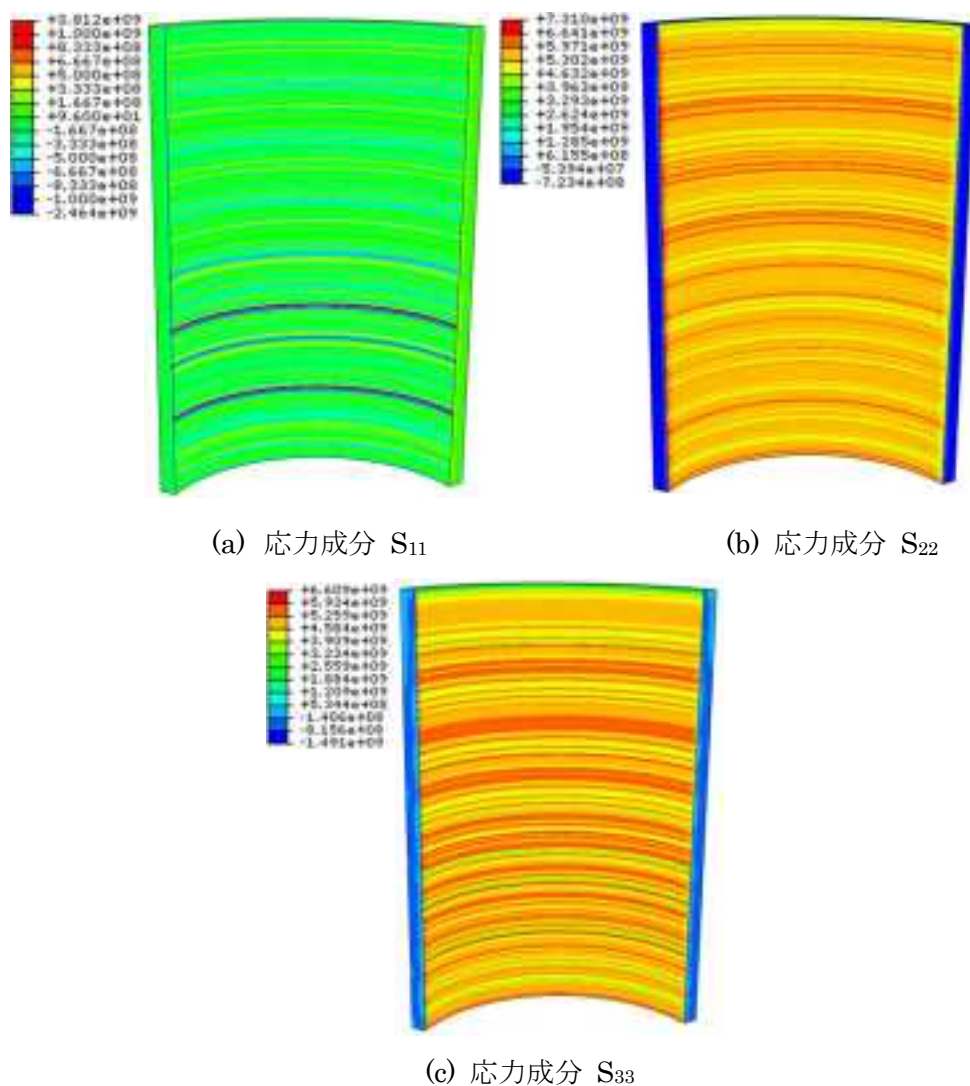


図 4.1.5.4-18 汎用有限要素解析コード **Abaqus** にひずみ分布を与えることで求めた初期応力分布(円柱座標系)



## 4.2 照射誘起応力腐食割れ(IASCC)試験

### (1) 概要

BWR 炉内構造物等の IASCC き裂進展評価においては、検査により検出されたき裂をモデル化し、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<sup>(4.2-1)</sup>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 ( $9.2 \times 10^{-7} \text{ mm/s}$ ) を用いて保守的にき裂進展速度を評価することとされている<sup>(4.2-2)</sup>。また、想定き裂に対しては、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」の表に記載のき裂進展速度式 (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) を用いてき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き裂進展速度が取得されてきていること<sup>(4.2-3)</sup>、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き裂進展が加速される可能性が指摘されていること<sup>(4.2-4)</sup>、を考慮すると、上述のき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 4.2-1)。このため、き裂進展速度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 き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き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、PIE データに基づいた IASCC き裂進展評価の妥当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及び JMTR 再稼働時期の延期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き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、照射下き裂進展試験に必要な荷重負荷ユニット(き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き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 JMTR 照射材等を用いた材料基礎特性評価試験、き裂進展試験及び材料表面のマイ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き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、より効率的な照射試験を実施するために、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。なお、既存照射材を用いた試験結果については、軽水炉環境における材料劣化研究に関する国際会議である「第 17 回原子力発電システムにおける材料の環境劣化に関する国際会議（17th International conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System – Water Reactors）」において公開<sup>(4.2-5)</sup>するとともに、当該分野の最新知見の入手を図った。また平成 26 年度に引き続き、非照射材及び既存照射材を用いたき裂進展試験及び試験片き裂先端近傍等の変形組織・酸化皮膜等のマイクロ組織観察・分析を実施した。ステンレス鋼照射材のき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を行い、データベースを作成した。

## (2) ベース照射での中性子照射量の再検討

平成 23 年度までに検討した照射試験マトリクスを表 4.2-1 に示す。ベース照射での中性子照射量レベルは、60 年供用相当までの評価対象となる照射量範囲を内挿で評価できるよう  $3 \times 10^{24} \sim 3 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$  ( $E > 1 \text{ MeV}$ ) と設定し、照射量依存性を評価できるように中間に 1 レベル設定したものである。しかし、より効率的な照射試験を実施する必要性から、照射期間及び照射費用等に最もインパクトが大きいベース照射量の削減を検討することとした。

既往研究<sup>(4.2-3)</sup>において、中性子照射量に対するき裂進展速度の変化のデータが得られており、また本事業<sup>(4.2-6)</sup>でも高照射量領域でのき裂進展速度データを拡充した。316L ステンレス鋼のき裂進展速度の照射量依存性を図 4.2-2 に示す。ここで、NWC は給水中の溶存酸素濃度 (DO) 32 ppm、HWC は DO 10 ppb 以下の脱気もしくは脱気+水素注入 (溶存水素濃度 (DH) 50 ppb) の水質条件を示している。応力拡大係数 (K 値) の高低の違いはあるが、中性子照射量の増加に伴ってき裂進展速度は上昇しており、また、HWC 条件では NWC 条件と比較してき裂進展速度が低下している。しかし、中性子照射量によって HWC 条件でのき裂進展速度の低下の程度が異なり、約  $1 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$  以下の低照射量では HWC 条件での低下の程度が大きいが、約  $2.5 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$  以上の高照射量では HWC 条件にしてもあまり低下しなくなっている。このことは他の研究<sup>(4.2-7)</sup>でも示されており、高照射量では環境の影響が小さくなる傾向があることが知られている。

一方、本事業では昨年度までにステンレス鋼照射材の変形組織と酸化挙動の相関について、中性子照射量と付与ひずみ量を変化させて系統的なデータを取得した。その結果、約  $6 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$  の低照射量では変形組織として転位が集積して絡み合った組織が導入されるのに対し、約  $3 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$  以上の高照射量では変形組織として転位チャンネルが導入されやすくなり局在化し、間隔の広い粗大な表面ステップが発生すること、またそれに伴い局所的なひずみが粒界に蓄積し、その近傍での酸化が進行することを明らかにした<sup>(4.2-5),(4.2-8)</sup>。また、転位チャンネルが導入されるような高照射量では、変形が局所化するため、引張試験での応

カーヒズミ曲線に加工硬化による一様伸びを示す部分がほとんど見られなくなることが知られている。

以上のき裂進展速度と変形組織の中性子照射量依存性を比較すると、図 4.2-3 に示すように、変形組織とき裂進展速度への環境影響が変化する場合、中性子照射量がほぼ対応しており、約  $1\sim 3\times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup> の中性子照射量でき裂進展メカニズムが変化し、水の放射線分解の影響も変化する可能性がある。従って、このような変形組織と環境影響の異なる中性子照射量 2 レベルに絞って照射下試験を実施することで、水の放射線分解の影響を見極めることができると考えられる。

現状では、中性子照射量が約  $1\sim 3\times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup> の範囲のき裂進展速度及び変形組織のデータが不足しており、今後、既存照射材を活用したデータ拡充により変形組織や環境影響が変化する場合の中性子照射量の確認を進める予定である。

#### 参考文献

- (4.2-1) 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) .
- (4.2-2) 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) .
- (4.2-3) 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.
- (4.2-4) G.S. Was, P.L. Andresen, Stress Corrosion Cracking Behavior of Alloys in Aggressive Nuclear Reactor Core Environments, Corrosion 63 (1) (2007) 19–45.
- (4.2-5) Y. Chimi, Y. Kitsunai, S. Kasahara, K. Chatani, M. Koshiishi, Y. Nishiyama, Effects of locally deformed structure on oxide film properties in neutron-irradiated austenitic stainless steel, Proc. 17th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, CNS, 2015.
- (4.2-6) (独)日本原子力研究開発機構「平成 26 年度 軽水炉燃材料詳細健全性調査 報告書」(平成 27 年 3 月) .
- (4.2-7) A. Jenssen, P. Efsing, K. Gott, P-O. Andersson, Crack growth behavior of irradiated type 304L stainless steel in simulated BWR environment, Proc. 11th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, ANS, 2003, pp. 1015–1026.

(4.2-8) Y. Chimi, Y. Kitsunai, S. Kasahara, K. Chatani, M. Koshiishi, Y. Nishiyama, Correlation between locally deformed structure and oxide film properties in austenitic stainless steel irradiated with neutrons, J. Nucl. Mater. (2016), in press.

表 4.2-1 平成 23 年度までに検討した照射試験マトリクス

中性子照射量 (n/m <sup>2</sup> )(>1 MeV)		3×10 <sup>24</sup>				5×10 <sup>24</sup> ~ 1×10 <sup>25</sup> の範囲で1レベル				3×10 <sup>25</sup>			
K値レベル (MPa√m)		低 (10~15)		高 (25~30)		低 (10~15)		高 (25~30)		低 (10~15)		高 (25~30)	
ECレベル		低	高	低	高	低	高	低	高	低	高	低	高
照射下 き裂進展試験	母材	○	○	※				○○		○○			
	HAZ	○☆	○	※				※					
照射後 き裂進展試験	母材	○	○	※				○		○			
	HAZ	○	○	※				※					

- ：実施（繰り返し数1）
- ※：先行取得データ（PIE及び他プロジェクト等）の評価を参考に、試験片照射量、試験条件、優先順位等を検討
- ☆：先行取得データ（PIE及び他プロジェクト等）の評価を参考に、繰り返し数2の要否を検討
- 高ECP（≥100 mV<sub>SHE</sub>）に引き続き、水素注入により低ECP（≤100 mV<sub>SHE</sub>）に環境条件を移行して試験を実施

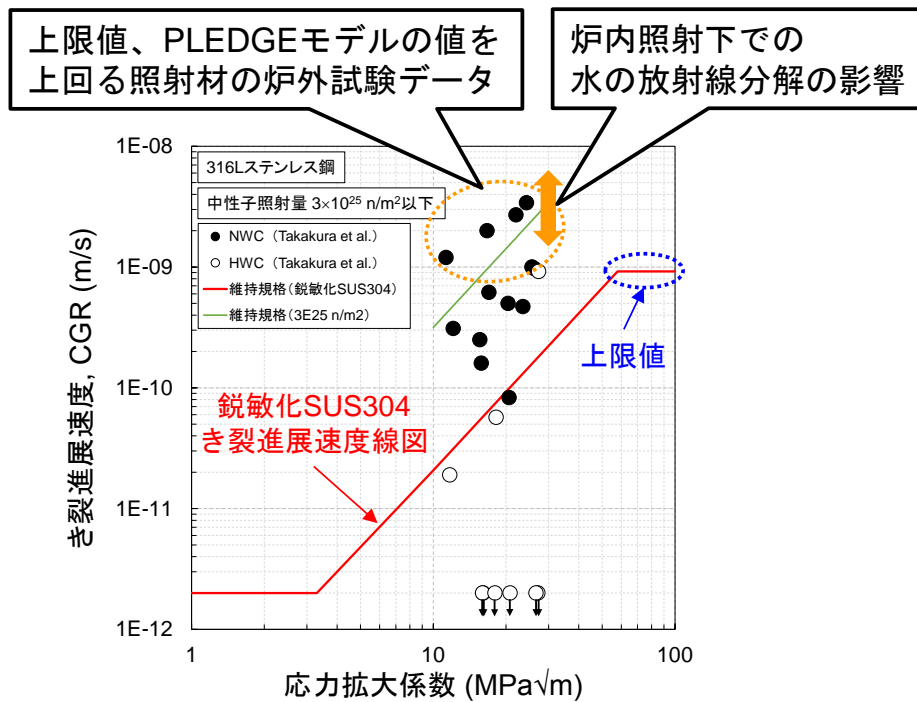
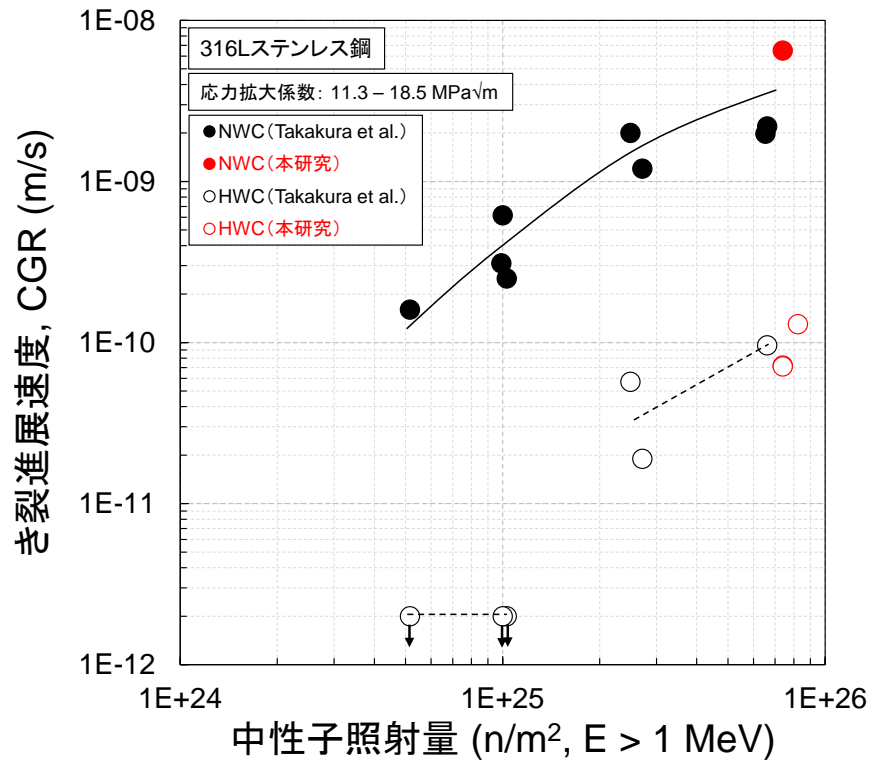
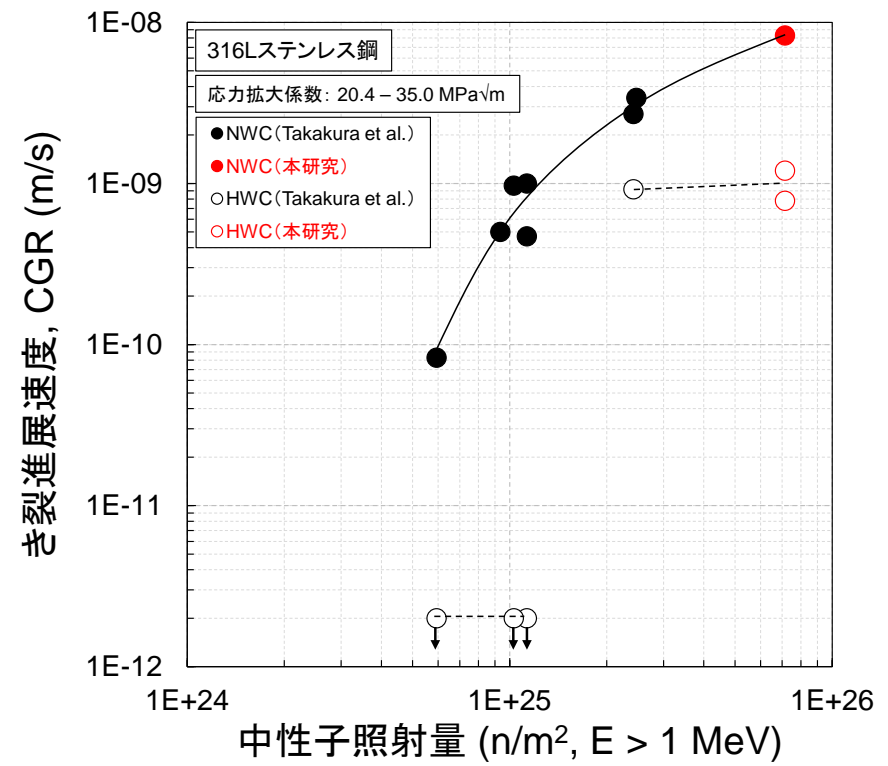


図 4.2-1 維持規格でのき裂進展速度線図と照射材データの比較(4.2-1),(4.2-3)



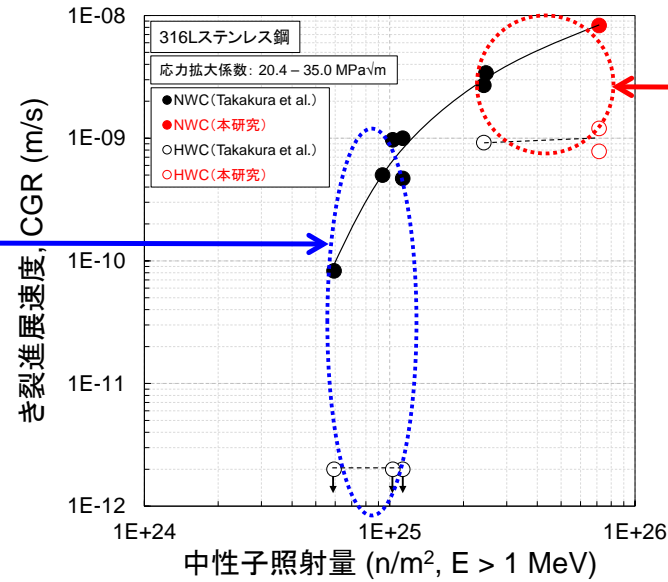
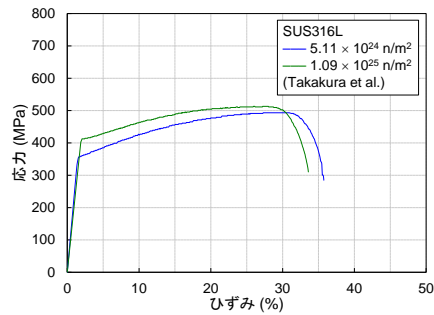
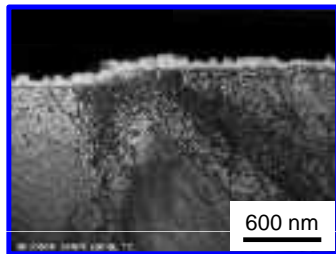
(a) 低 K 値(11.3~18.5 MPa√m)



(b) 高 K 値(20.4~35.0 MPa√m)

図 4.2-2 316L ステンレス鋼のき裂進展速度の中性子照射量依存性(4.2-3),(4.2-6)

低照射量(約 $1 \times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup>以下)  
 転位が集積し、絡み合った組織  
 → 環境影響 大



高照射量(約 $3 \times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup>以上)  
 転位チャンネルの導入(局所変形)  
 → 環境影響 小

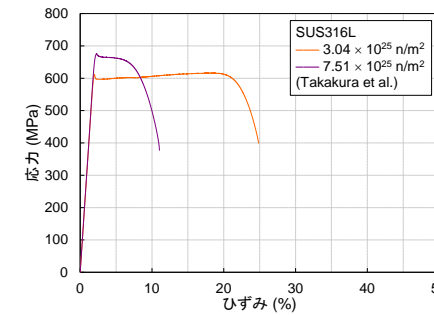
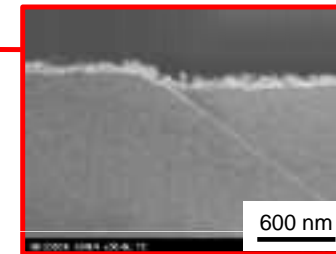


図 4.2-3 き裂進展速度と変形組織の中性子照射量による変化(4.2-3),(4.2-5),(4.2-6),(4.2-8)

## 4.2.1 既往事業の照射材を用いた試験

### 4.2.1.1 CT試験片のき裂内皮膜分析

#### (1)はじめに

軽水炉炉心環境下においては、放射線による水のラジオリシスによって過酸化水素等の酸化剤が形成する(湧き出す)ことが知られている。照射下き裂進展試験の主な目的は、中性子照射したステンレス鋼のき裂進展速度に及ぼす水のラジオリシス(過酸化水素等の発生)の影響評価を行うことにある。

き裂進展を加速させる要因の一つとして照射環境下での水のラジオリシスが考えられているが、バルク水中の放射線分解水質は、主に水のラジオリシスと高温水中の電気化学反応に基づく腐食電位(ECP)を求めるための計算コードによる評価と、ECP センサーを使った腐食電位測定による検証が広く進められている。一方き裂内のような局所的な部位(すき間)における放射線分解水質については計算コードによる評価が一部行われているが、ECP センサーを使った検証は技術的に容易でない。そこでき裂内に形成した酸化皮膜の性状や形成挙動の観察を通して、間接的にき裂内の水質を検証することが有効であると考えられる。

そこで本項では、照射下き裂進展実施中の 0.5T-CT 試験片のき裂内水質評価に資することを目的として、疲労き裂を導入した0.5T-CT試験片を非照射高温水環境中に浸漬し、疲労き裂内に形成した酸化皮膜を種々の分析技術を用いて分析し、照射下き裂進展試験中のき裂内放射線分解水質を評価するための基礎データ収集を行った。また、平成 24 年度より順次実施してきた試験結果の総合評価を行った。

#### (2)試験マトリクスと試験方法

##### a. 試験片と試験マトリクス

図 4.2.1.1-1 は浸漬試験に用いた標準型 0.5T-CT 試験片及びウィング付 0.5T-CT 試験の形状と概略寸法を示す。この試験片をループ式オートクレーブ内に静置または荷重軸にセットして荷重負荷し、290℃の高温純水環境中で 224 時間まで浸漬した。試験条件を示した試験マトリクスと試験片 ID を表 4.2.1.1-1 に示す。なおオートクレーブ入口における試験水の導電率は0.2 μS/cm 以下、試験 No.1~4については溶存酸素濃度(DO)2ppm、試験 No. 5~7については溶存水素濃度(DH)100ppb となるように調整した。

今年度の試験に用いた CT 試験片の外観を図 4.2.1.1-2 に示す。

##### b. 酸化皮膜観察用試験片の加工

###### ①CT試験片の切断

高温水に浸漬した 0.5T-CT 試験片は、水中ワイヤー放電加工にて、下記に示すように図 4.2.1.1-1 の赤色破線で示す位置で 2 個に切断した。なお図 4.2.1.1-1(2)に示すウィング付 0.5T-CT 試験片は、ウィングを切断した後、以下の作業を実施した。

- ・切断片(a) : (a)側の板厚端部(サイドグループ側)から約 7 mm の板厚の試験片
- ・切断片(b) : 残部

## ②破面開放

試験片 ID. 6TS2、6TS3 及び 6TLW1 の切断片(a)は、以下に示す条件により大気中での疲労き裂を進展させて強制破断し、破面開放した。

- ・高温水中浸漬試験時(=破面開放開始時)のき裂長さ : 11.4 mm
- ・ $K_{max}$ =約 10~11 MPa $\sqrt{m}$  相当の最大荷重、応力比  $R=0.7$  で疲労き裂進展
- ・その後  $K_{max}=11$  MPa $\sqrt{m}$  以上の最大荷重、 $R=0.2$  とし、破断まで疲労き裂進展  
破面開放後、後述の酸化皮膜観察のための前処理に供した。
- ・高温水浸漬試験前のき裂長さ : 表 1 参照
- ・破面開放開始時の  $P_{max}$  : 切断後の板厚形状を考慮し、ASTM E399 の評価式より求めた  $K$  値換算でおよそ 12 MPa $\sqrt{m}$  以下とした。
- ・ $K_{max}=12$  MPa $\sqrt{m}$  以下、 $R=0.7\sim 0.9$ 、周波数 20~30Hz 程度でき裂を進展させた。
- ・1 mm 程度進展させた後、破面開放条件を  $K_{max}=12$ MPa $\sqrt{m}$  以上、 $R$  は 0.5 以下に変更し、試験片が破断するまでき裂を進展させた。
- ・破面開放後の試験片一対(2 個)を並べて外観の写真撮影を行った。このうちの 1 個を疲労き裂に形成した酸化皮膜の破面観察に用いた。

## ③断面観察用試験片の研磨

試験片 ID. 6TS2、6TS3 及び 6TLW1 の切断片(b)をき裂内酸化皮膜の断面観察用試験片とするため、以下の方法で観察面を研磨した。

- ・耐水研磨紙(#2400 まで)
- ・バフ研磨
- ・研磨剤研磨(最終仕上げ荒さ: 1  $\mu\text{m}$ )

## c. 疲労き裂表面に形成した酸化皮膜の観察

### ①破面観察

図 4.2.1.1-3 に示すように、破面解放後の試験片 ID. 6TS2、6TS3 及び 6TLW1 の切断片(a)の破面を対象としてビデオマイクロスコープ等を用いて破面の拡大観察を実施し写真撮影した。

その後、破面上に形成した酸化皮膜を、加速電圧 15 kV で FE-SEM にて詳細に観察した。SEM 観察は、1 個の試験片に対して 2 次電子像と反射電子像それぞれ、倍率 4 水準(200、1000、5000、20000 倍)とした。図 4.2.1.1-3 の(1)、(2)は SEM による破面観察位置を示す。観察位置(1)は板厚中央(切断線)のき裂先端近傍、観察位置(2)はサイドグループ脇のき裂先端近傍より選択した。



## ②疲労き裂内に形成した酸化皮膜の断面観察

図 4.2.1.1-4 に模式的に示す通り、試験片 ID. 6TS2、6TS3 及び 6TLW1 の観察面研磨後の切断片(b)を用い、FE-SEM を用いてき裂内に形成した酸化皮膜を断面より観察した。観察条件は以下の通りとした。

加速電圧： 5 kV

観察倍率： つなぎ観察 300 倍(反射電子像)

詳細観察 5000 倍、20000 倍(反射電子像および二次電子像)

観察箇所： 試験片 ID. 6TLW1(静置) CT 試験片板厚中央のき裂先端近傍

試験片 ID. 6TS2、6TS3(荷重付与) CT 試験片板厚中央のき裂先端近傍  
及びき裂長さ方向に 2~3 箇所

また、20000 倍で観察した領域について、EDX を用いた線分析を行った。

## ③CT試験片き裂内酸化皮膜のTEM観察

表 4.2.1.1-1 の試験マトリクスに示す通り、CT 試験片 No. 1~7 毎に酸化皮膜の観察位置を選定し、表面に形成した酸化皮膜層を断面方向に TEM 観察を実施した。

破面観察に供した切断片(b)に表面保護のためのカーボン蒸着を施し、集束イオンビーム(FIB)装置のマイクロサンプリングユニットにて目的箇所を含む微小切片を摘出した。図 4.2.1.1-5 に疲労き裂先端部の酸化皮膜観察用試験片の採取位置を模式的に示す。FIB 加工位置は長手方向がき裂進展方向に平行となるよう、また、き裂前縁を跨ぐように設定した。その後 Cu 製メッシュに固定して、薄膜化を行った。

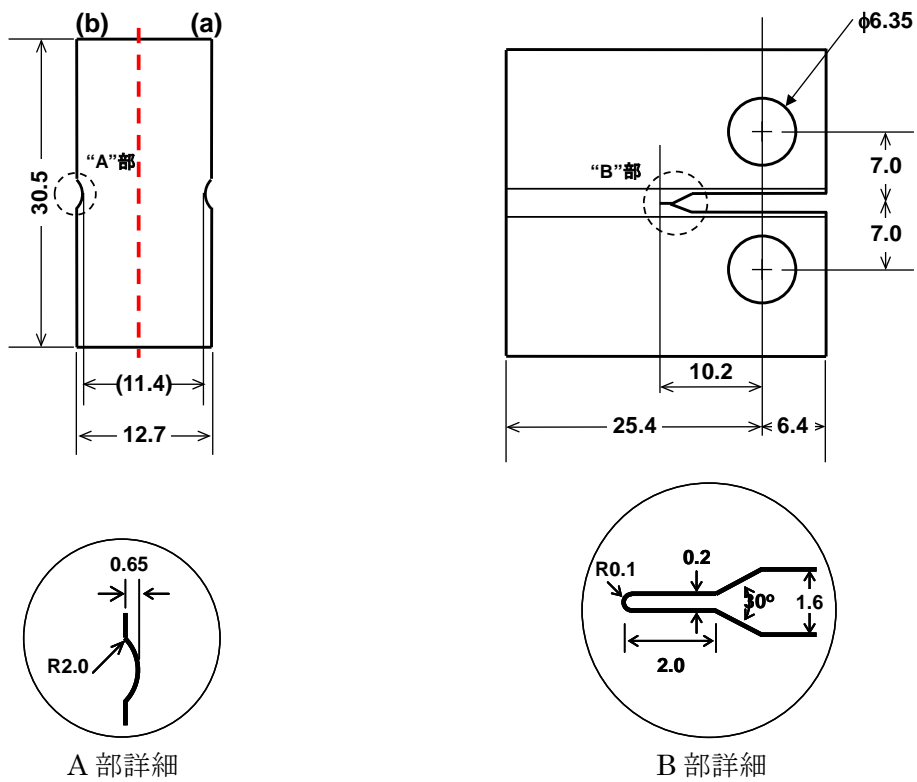
FIB 法にて採取した TEM 観察用試験片を対象として、図 4.2.1.1-6 にイメージを示すような像を撮影した。またこの結果を参考に皮膜性状評価に相当と思われる視野を選定し、詳細に観察を行った。さらにこの視野に形成した酸化皮膜第 1 層、第 2 層、母相を対象として EDX 分析を実施し、皮膜の性状を同定した。

表 4.2.1.1-1 0.5T-CT 試験片の疲労き裂内に生成した酸化皮膜分析試験マトリクス

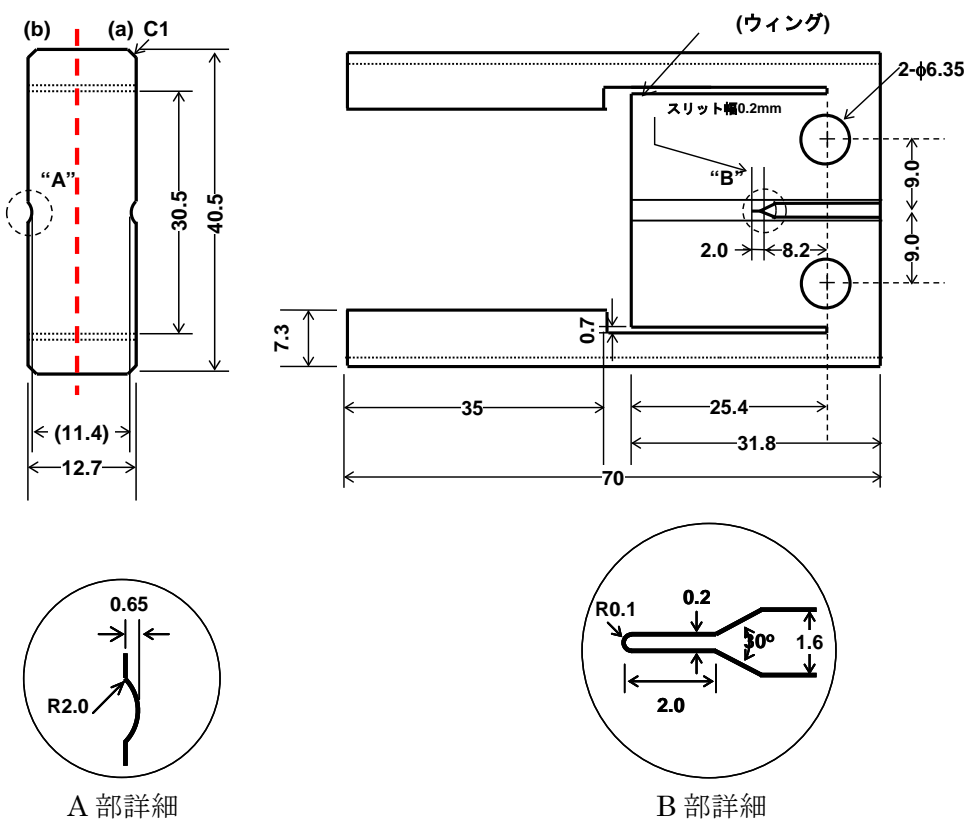
No	供試材	形状	板厚 (mm)	図面	ID	浸漬条件	SEM 観察		TEM 観察
							破面	断面	
1	20%冷間加工 SUS316L	標準型 0.5T-CT	12.7	☒ 4.2.1.1- 1(1)	6TS2	2ppmDO 224 時間浸漬 荷重負荷(20 MPa√m 相当)	○	○	・き裂先端 1 箇所 ・サイドグループ脇 1 箇所
2	20%冷間加工 SUS316L	ウイング付 0.5T-CT	12.7	☒ 4.2.1.1- 1(2)	6LWA	2ppmDO 224 時間浸漬 負荷荷重なし	—	—	・き裂先端 1 箇所
3	20%冷間加工 SUS316L	標準型 0.5T-CT	12.7	☒ 4.2.1.1- 1(1)	V6L5	2ppmDO 224 時間浸漬 荷重負荷(30 MPa√m 相当)	—	—	・サイドグループ脇 1 箇所
4	20%冷間加工 SUS316L	標準型 0.5T-CT	12.7	☒ 4.2.1.1- 1(1)	V6L4	破面解放した CT 試験片を 2ppmDO 224 時間浸漬	○	—	・解放後の疲労破面 (自由表面)1 箇所
5	20%冷間加工 SUS316L	標準型 0.5T-CT	12.7	☒ 4.2.1.1- 1(1)	6TS3	100ppbDH 224 時間浸漬 荷重負荷(30 MPa√m 相当)	○	○	・き裂先端 1 箇所 ・サイドグループ脇 1 箇所
6	20%冷間加工 SUS316L	ウイング付 0.5T-CT	12.7	☒ 4.2.1.1- 1(2)	6TLW1	100ppbDH 224 時間浸漬 負荷荷重なし	○	○	・き裂先端 1 箇所
7	20%冷間加工 SUS316L	標準型 0.5T-CT	12.7	☒ 4.2.1.1- 1(2)	6TLW6	破面解放した CT 試験片を 100ppbDH 224 時間浸漬	○	—	・解放後の疲労破面 (自由表面)1 箇所

凡例 ○: 実施 —: 実施せず

備考 No. 1 負荷荷重 5.0 kN  
 No. 2、3 既分析試験片の追加確認データ取得用(H26 年度に破面・断面観察実施済)  
 No. 4、7 疲労き裂表面上の酸化皮膜観察(オートクレーブ内に静置)  
 No. 5 負荷荷重 7.2 kN  
 No. 6 無負荷(オートクレーブ内に静置)



(1)0.5T-CT 試験片



(2)ウイング付 0.5T-CT 試験片

図 4.2.1.1-1 0.5T-CT 試験片の概略寸法と切断位置(破線)(単位 mm)



(1)6TS2



(2)6LWA  
(強制破断により破面開放済)



(3)V6L5  
(強制破断により破面開放済)

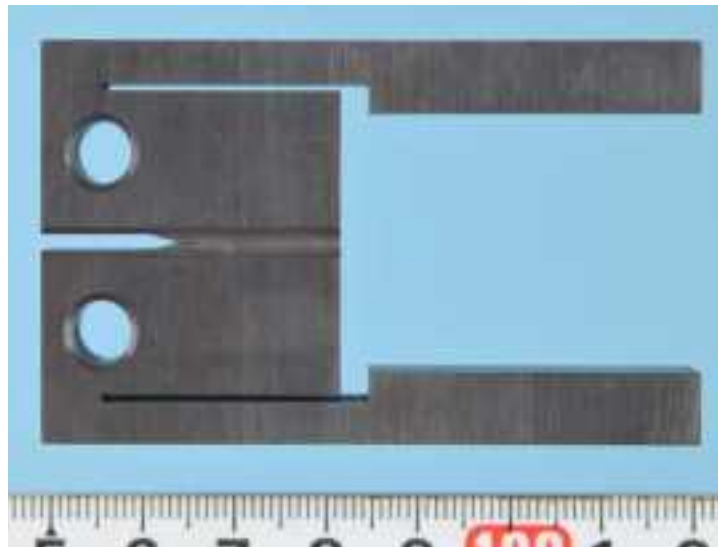


(4)V6L4  
(強制破断により破面開放後浸漬)

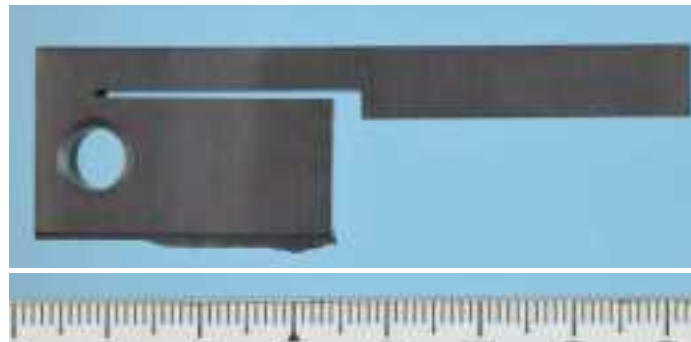


(5)6TS3

図 4.2.1.1-2(1) CT 試験片の外観



(6)6TLW1



(7)6TLW6 (強制破断により破面開放後に浸漬試験)

図 4.2.1.1-2(2) CT 試験片の外観(つづき)

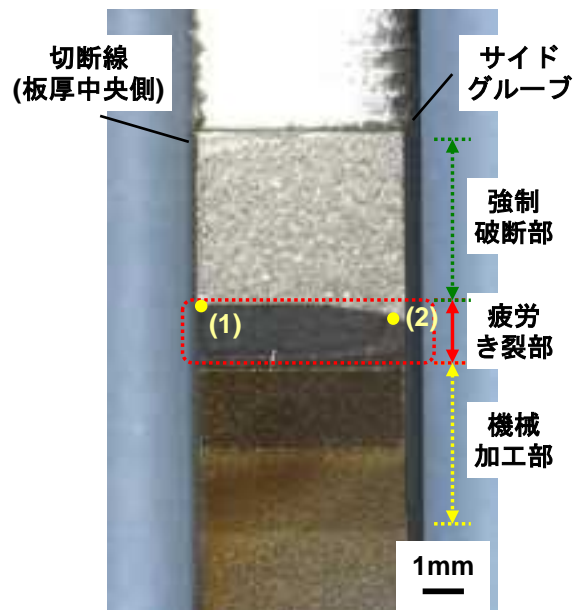


図 4.2.1.1-3 破面解放後の CT 試験片(切断片(a))の各部呼称と SEM 観察位置(黄色丸位置)(例)

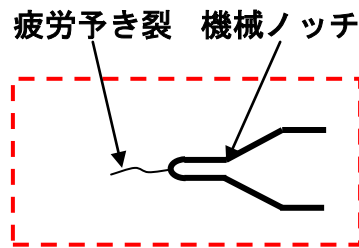


図 4.2.1.1-4 き裂内酸化皮膜の断面観察方法(イメージ)

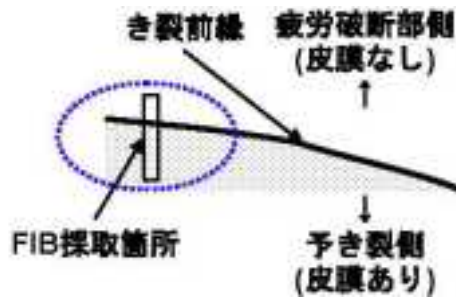


図 4.2.1.1-5 疲労き裂先端部に形成した酸化皮膜 TEM 観察試験片採取位置(イメージ)

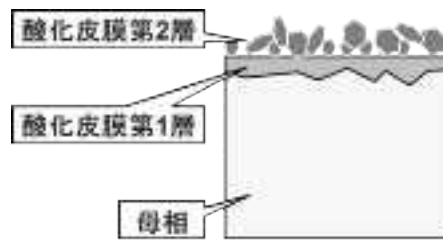


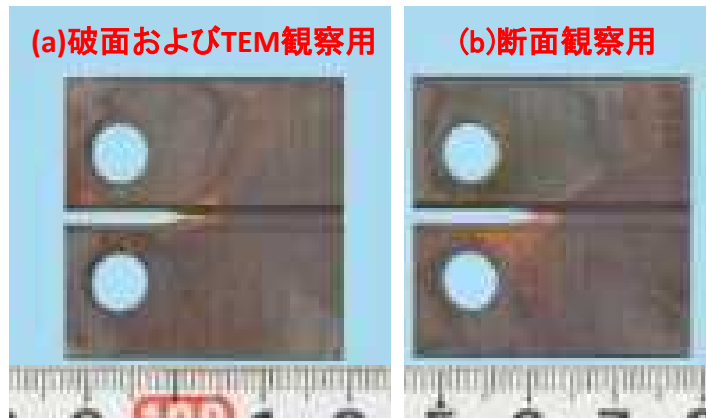
図 4.2.1.1-6 FIB で採取した酸化皮膜 TEM 観察用試験片(イメージ)

### (3)試験結果

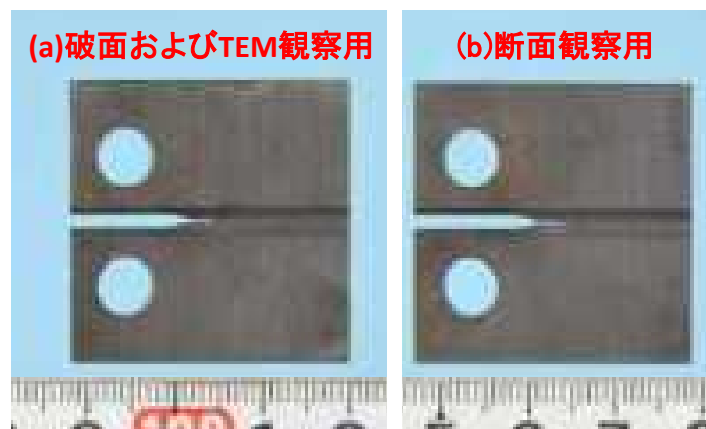
#### a.ワイヤー放電加工後のCT試験片の及び破面開放

試験片 No. 1(6TS2)、No. 5(6TS3)及び No. 6(6TLW1)を水中ワイヤー放電加工で切断し、疲労き裂の断面観察用切断片(a)と疲労き裂の破面観察及び TEM 観察用切断片(b)とした。切断後の CT 試験片外観を図 4.2.1.1-7 に示す。各試験片とも、ワイヤー切断により、概ね計画通りの厚さの切断片①～③に分割した。

これらの切断片(a)に対して、疲労き裂先端の状態を維持し、破面に油脂等の汚れが付着しないように大気中で疲労き裂を進展させて強制破断し、破面開放を行った。破面開放結果を表 4.2.1.1-2(1)～(3)に、また破面解放後の CT 試験片外観を図 4.2.1.1-8 に示す。



(1)6TS2



(2)6TS3



(3)6TLW1(ウイング切断後)

図 4.2.1.1-7 ワイヤ放電加工後の CT 試験片の外観



表 4.2.1.1-2(1)表 3-2 No.1(ID : 6TS2)の破面開放結果

最大荷重 (kN)	最小荷重 (kN)	R 比	き裂進展長さ(mm)		K <sub>max</sub> (MPa√m)		サイクル数(cycle)
			開始時	終了時	開始時	終了時	
1.54	1.08	0.7	0.0	0.3	11.6	12.0	20,000
1.50	1.05	0.7	0.3	0.6	11.6	12.0	158,000
1.44	1.01	0.7	0.6	0.9	11.6	12.0	
1.38	0.97	0.7	0.9	1.2	11.5	11.9	
1.45	0.29	0.2	1.2	4.8	12.5	20.5	274,000
1.35	0.27	0.2	4.8	5.8	19.1	22.7	34,000

表 4.2.1.1-2(2)表 3-1 No.5(ID : 6TS3)の破面開放結果

最大荷重 (kN)	最小荷重 (kN)	R 比	き裂進展長さ(mm)		K <sub>max</sub> (MPa√m)		サイクル数(cycle)
			開始時	終了時	開始時	終了時	
1.55	1.09	0.7	0.0	0.3	11.6	12.0	382,000
1.50	1.05	0.7	0.3	0.6	11.6	12.0	
1.45	1.02	0.7	0.6	0.9	11.6	12.0	
1.40	0.98	0.7	0.9	1.2	11.6	12.0	
1.45	0.29	0.2	1.2	1.6	12.5	13.1	80,000
1.50	0.30	0.2	1.6	2.0	13.5	14.2	93,000
1.60	0.32	0.2	2.0	3.0	15.1	17.3	70,000
1.65	0.33	0.2	3.0	4.0	17.8	20.5	600,000
1.70	0.34	0.2	4.0	5.0	21.2	24.9	
1.65	0.33	0.2	5.0	6.0	24.1	28.9	

表 4.2.1.1-2(3)表 3-3 No.6(ID : 6TLW1)の破面開放結果

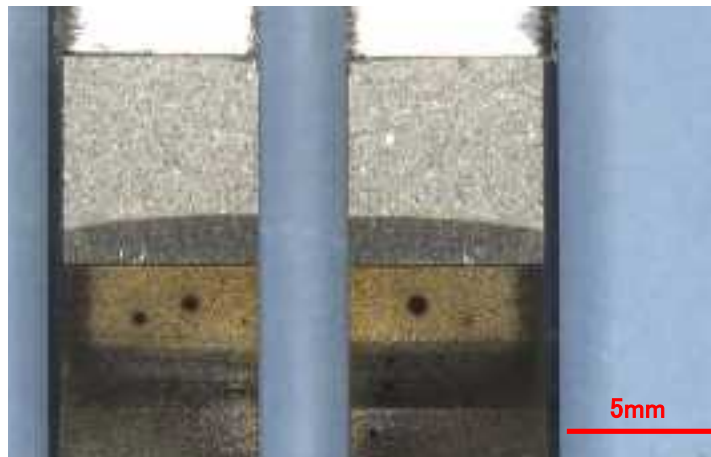
最大荷重 (kN)	最小荷重 (kN)	R 比	き裂進展長さ(mm)		K <sub>max</sub> (MPa√m)		サイクル数(cycle)
			開始時	終了時	開始時	終了時	
1.64	1.15	0.7	0.0	0.4	11.3	11.8	42,730
1.54	1.08	0.7	0.4	0.9	11.1	11.8	
1.44	1.01	0.7	0.9	1.3	11.0	11.5	
1.44	0.29	0.2	1.3	4.9	11.5	19.1	237,000
1.35	0.27	0.2	4.9	5.9	17.9	21.4	747,000



(1)6TS2



(2)6TS3



(3)6TLW1

図 4.2.1.1-8 破面解放後の CT 試験片の外観

## b.疲労き裂に形成した酸化皮膜の断面SEM観察結果

### ①試験片No. 1(ID. 6TS2) 溶存酸素2ppm 荷重負荷あり

図 4.2.1.1-9 は、5.0 kN の荷重を負荷し、温度 290℃、溶存酸素 2ppm の高温水に 224 時間浸漬した ID. 6TS2 の断面 SEM 観察結果(二次電子像及び反射電子像)を示す。なお負荷した荷重はき裂長さ 11.4 mm に対してき裂先端での応力拡大係数  $K=約 20 MPa\sqrt{m}$  に相当する。図 4.2.1.1-9(a)の 1~3 は、疲労き裂先端、疲労き裂先端近傍、疲労き裂中間部を高倍率で SEM 観察した位置を示し、その結果を図 4.2.1.1-9(b)~(d)に示す。疲労き裂全体は僅かに開口し、疲労き裂表面(ステンレス鋼と高温水の界面)には酸化皮膜の形成が認められた。二次電子及び反射電子像の観察結果より、酸化皮膜は、ステンレス鋼に近い側の内層と高温水側の外層の二層構造となっていることが判った。また SEM/EDX 線分析結果より、疲労き裂の開口部から金属相に向かって酸素が分布し、合わせて酸化皮膜の内部には Fe と Cr の濃度分布が認められた。この濃度分布の傾向は、外層では Fe と O の強度が高く、Cr、Ni、Mn、Mo は金属表面部の強度よりも低くなった。また、内層へ行くに従い Fe と O の強度が低下し、Cr の強度が大きく上昇し、Ni、Mn、Mo は僅かに上昇し金属表面と同程度になった。このような酸化皮膜の構造は、観察位置 1~3 ではほぼ同等であったが、酸化皮膜の厚さは、疲労き裂先端及びその近傍に比べ、開口部により近い観察位置 3 の方が厚い傾向が認められた。

### ②試験片No. 6(ID. 6TS3) 溶存水素100ppb 荷重負荷あり

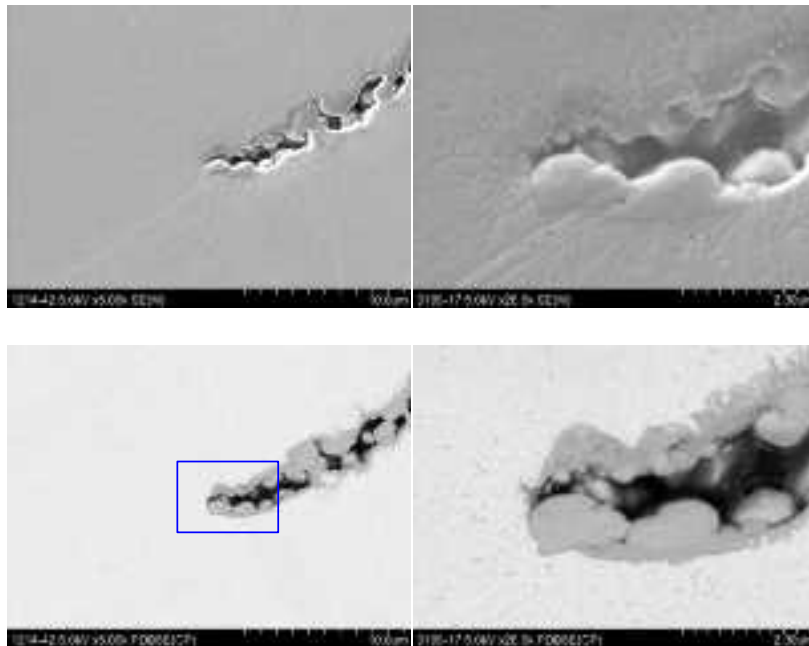
図 4.2.1.1-10 は、7.2 kN の荷重を負荷し、温度 290℃、溶存水素 100ppb の高温水に 224 時間浸漬した ID. 6TS3 の断面 SEM 観察結果(二次電子像及び反射電子像)を示す。なお負荷した荷重はき裂長さ 11.4 mm に対してき裂先端での応力拡大係数  $K=約 30 MPa\sqrt{m}$  に相当する。図 4.2.1.1-10(a)の 1~4 は、疲労き裂先端、疲労き裂先端近傍、疲労き裂中間部を高倍率で SEM 観察した位置を示し、その結果を図 4.2.1.1-10(b)~(e)に示す。疲労き裂全体は僅かに開口し、疲労き裂表面(ステンレス鋼と高温水の界面)には酸化皮膜の形成が認められた。二次電子及び反射電子像の観察結果より、酸化皮膜は、ステンレス鋼に近い側の内層と高温水側の外層の二層構造となっていることが判った。また SEM/EDX 線分析結果より、疲労き裂の開口部から金属相に向かって酸素が分布し、合わせて酸化皮膜の内部には Fe と Cr の濃度分布が認められた。この濃度分布の傾向は、外層では Fe と O の強度が高く、Cr、Ni、Mn、Mo は金属表面部の強度よりも低くなった。また、内層へ行くに従い Fe と O の強度が低下し、Cr の強度が大きく上昇し、Ni、Mn、Mo は僅かに上昇し金属表面と同程度になった。このような酸化皮膜の構造は、観察位置 2~4 ではほぼ同等であったが、酸化皮膜の厚さは、疲労き裂先端及びその近傍に比べ、開口部により近い観察位置 3 や 4 の方が厚い傾向が認められた。なお疲労き裂先端の観察位置 1 では、酸化皮膜の厚さは十分でなかったため、SEM/EDX 線分析は実施しなかった。

③試験片No. 7(ID. 6TLW1) 溶存水素100ppb 荷重負荷無

図 4.2.1.1-11 は、オートクレーブ内に静置し(荷重負荷なし)、温度 290℃、溶存水素 100ppb の高温水に 224 時間浸漬した ID. 6TLW1 の断面 SEM 観察結果(二次電子像及び反射電子像)を示す。試験片の疲労き裂に殆ど開口はみられず、また高倍率で観察した反射電子像(図 4.2.1.1-11(b)、(c))においてき裂に沿って若干の濃淡の差が認められたものの、荷重を負荷した ID. 6TS3(前項②)に示したような明瞭な酸化皮膜の形成はみられなかった。



(a)疲労き裂全体の低倍観察(反射電子像)及び高倍観察箇所



(b)高倍観察箇所 1(上段: 二次電子像 中段: 反射電子像 下段: EDX 線分析結果)

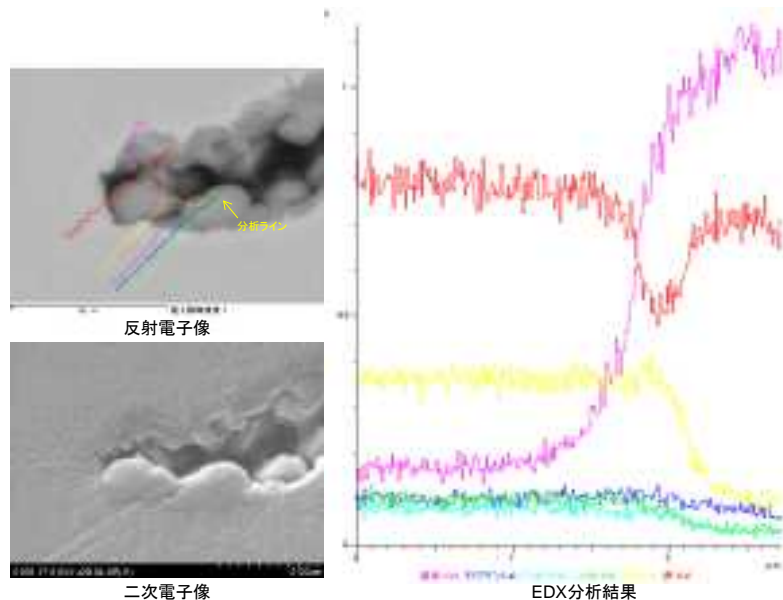
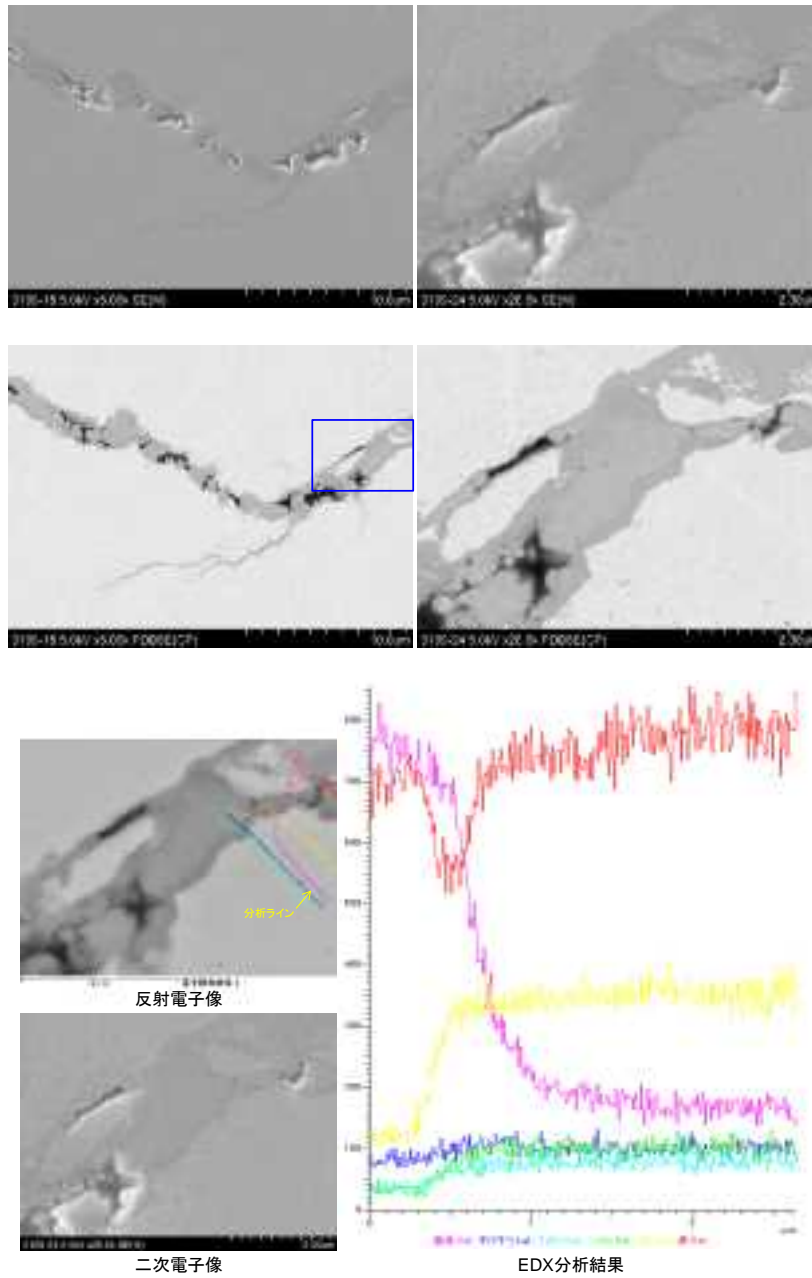
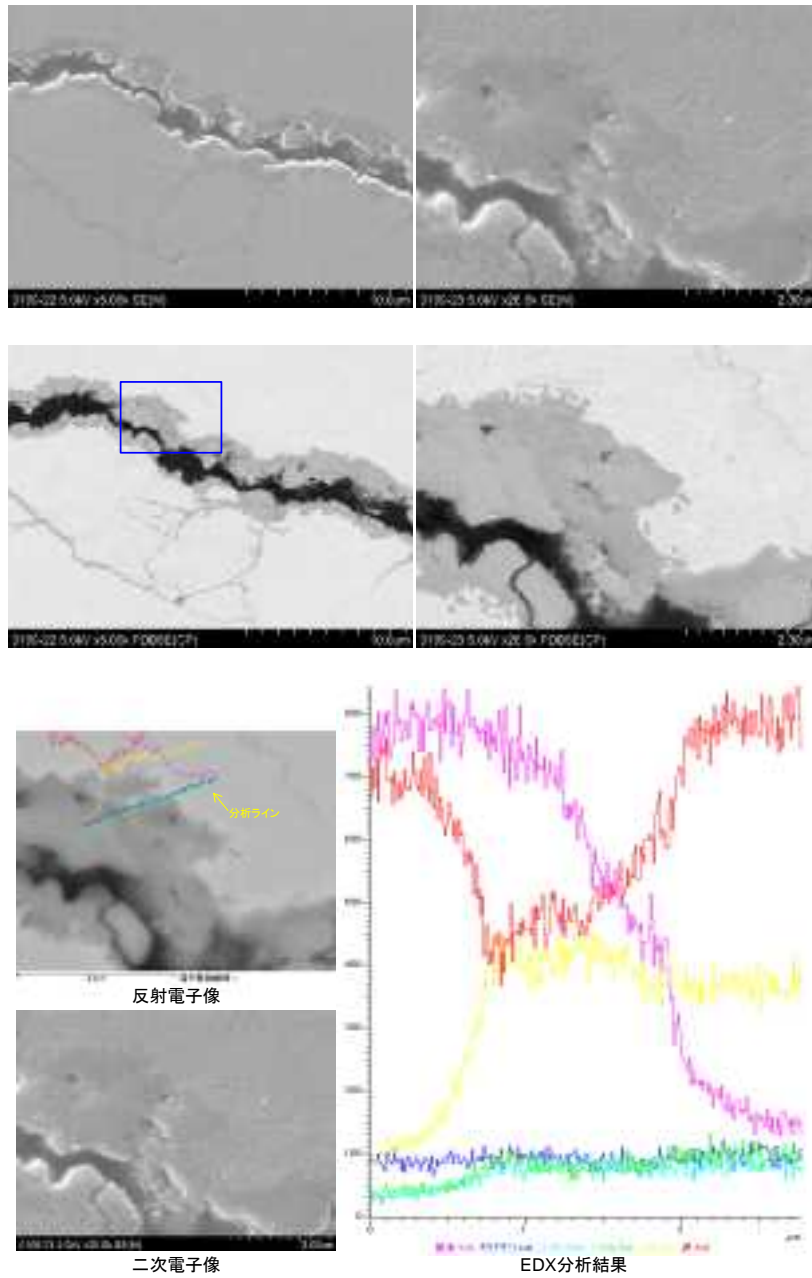


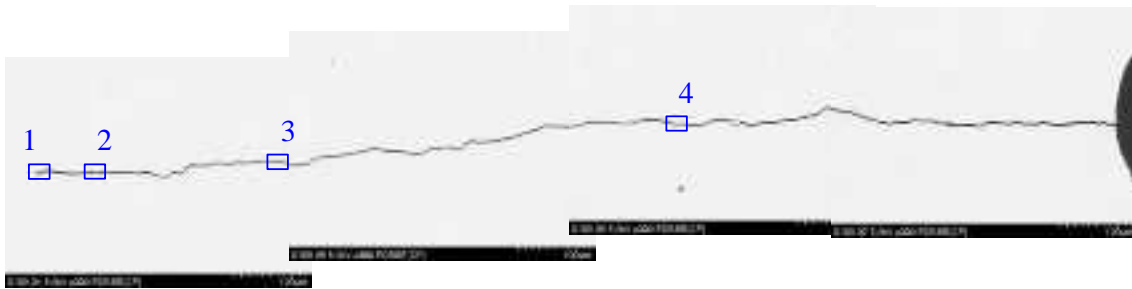
図 4.2.1.1-9 高温水に浸漬した CT 試験片の疲労き裂断面 SEM 観察結果  
(試験片 No. 1 ID. 6TS2 荷重負荷あり(K 値  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存酸素 2ppm)



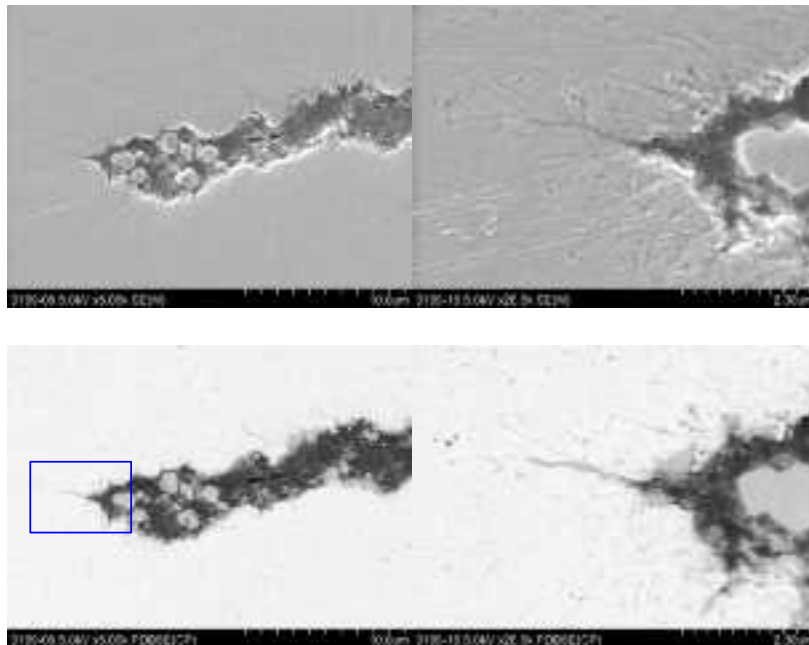
(c)高倍観察箇所 2(上段: 二次電子像 中段: 反射電子像 下段: EDX 線分析結果)  
 図 4.2.1.1-9 高温水に浸漬した CT 試験片の疲労き裂断面 SEM 観察結果(つづき)  
 (試験片 No. 1 ID. 6TS2 荷重負荷あり(K 値  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存酸素 2ppm)



(d)高倍観察箇所 3(上段: 二次電子像 中段: 反射電子像 下段: EDX 線分析結果)  
 図 4.2.1.1-9 高温水に浸漬した CT 試験片の疲労き裂断面 SEM 観察結果(つづき)  
 (試験片 No. 1 ID. 6TS2 荷重負荷あり(K 値  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存酸素 2ppm)



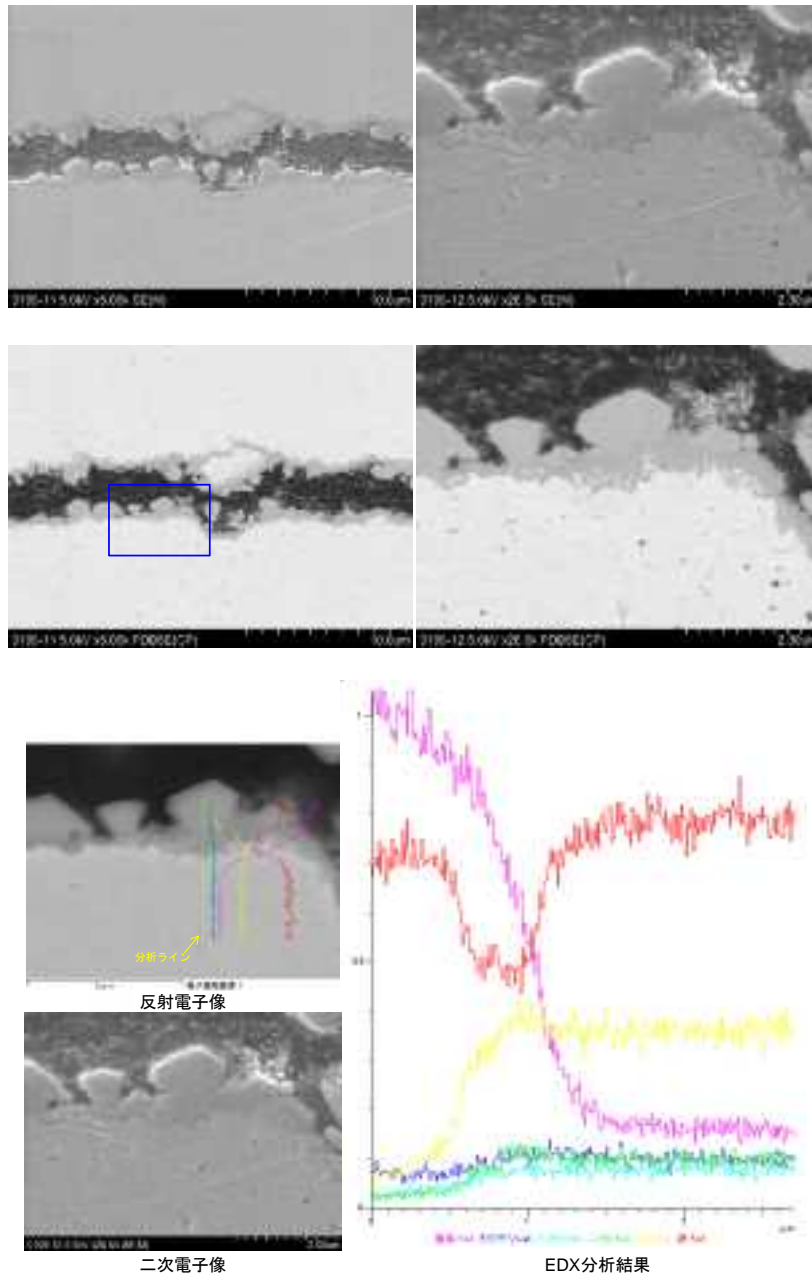
(a)疲労き裂全体の低倍観察(反射電子像)及び高倍観察箇所



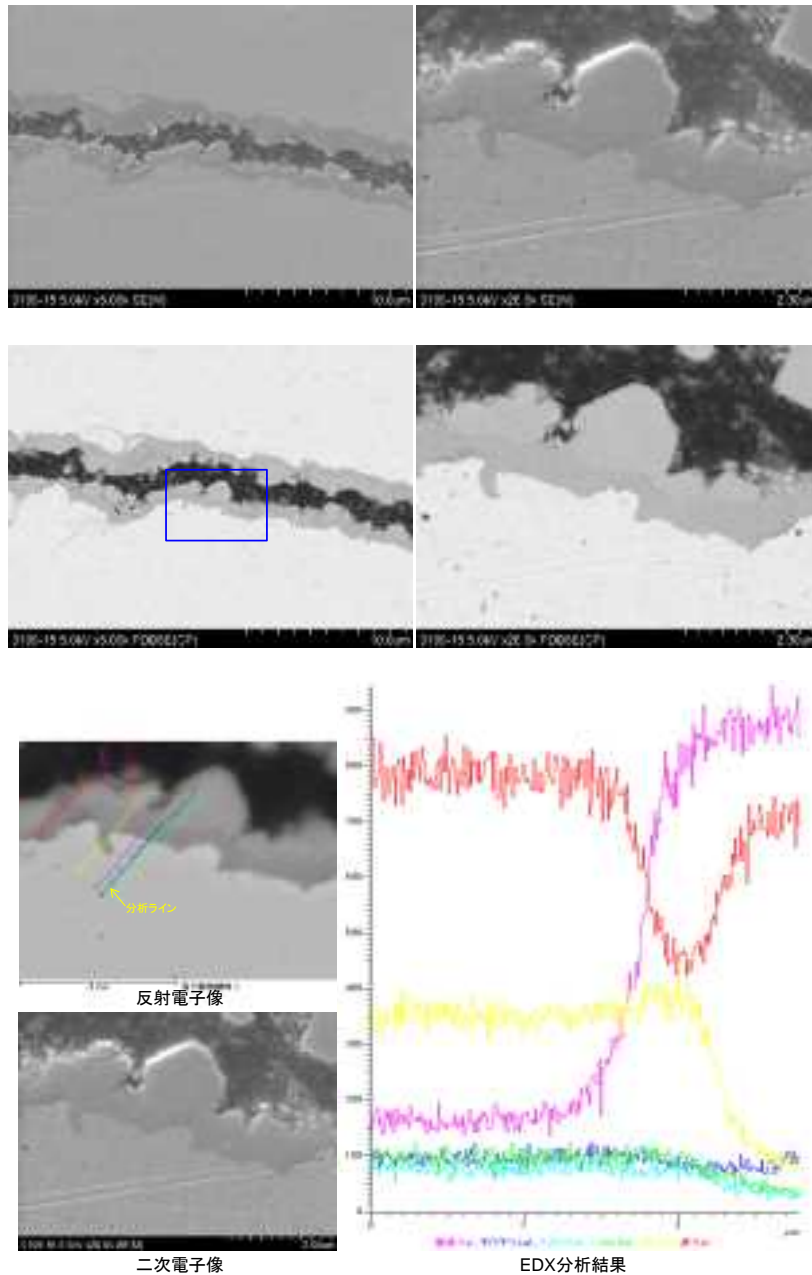
(b)高倍観察箇所 1(上段: 二次電子像 下段: 反射電子像)

図 4.2.1.1-10 高温水に浸漬した CT 試験片の疲労き裂断面 SEM 観察結果  
(試験片 No. 5 ID. 6TS3 荷重負荷あり(K 値  $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存水素 100ppb)

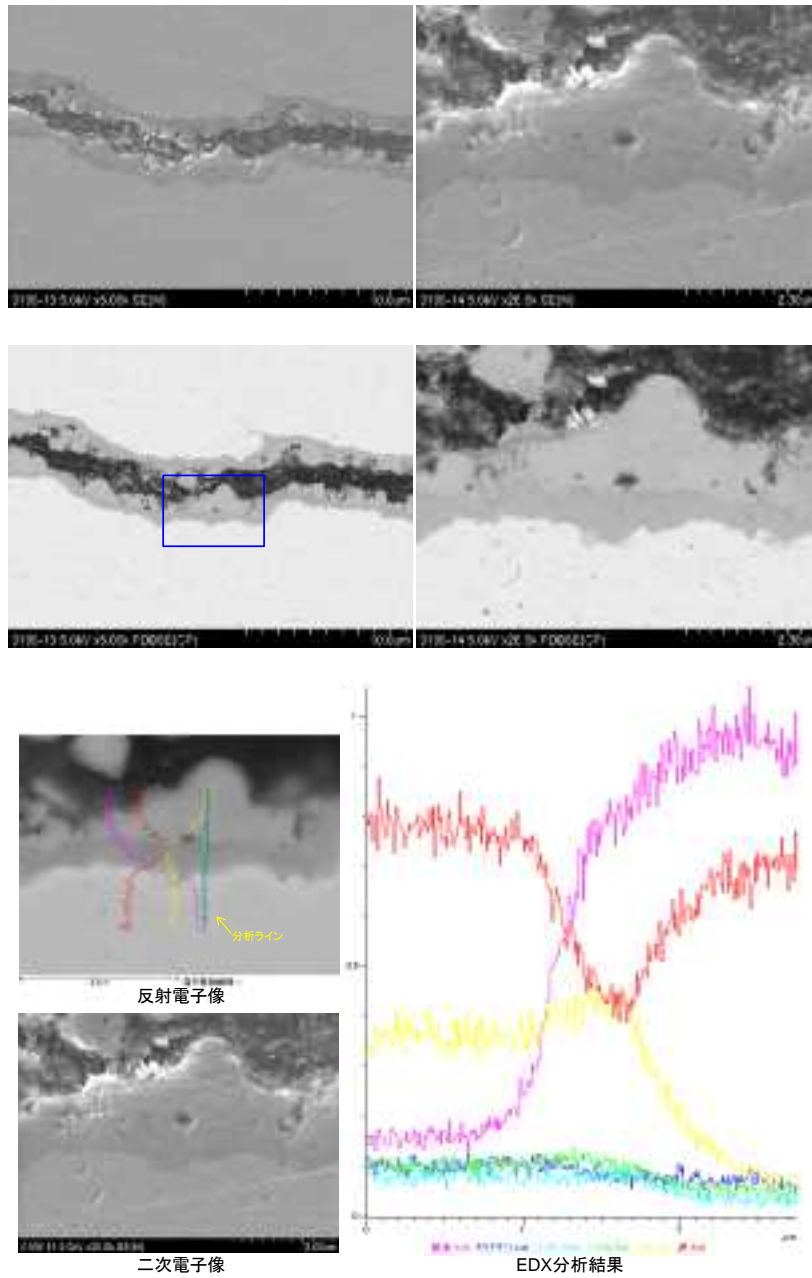




(c)高倍観察箇所 2(上段: 二次電子像 中段: 反射電子像 下段: EDX 線分析結果)  
 図 4.2.1.1-10 高温水に浸漬した CT 試験片の疲労き裂断面 SEM 観察結果(続き)  
 (試験片 No. 5 ID. 6TS3 荷重負荷あり(K 値  $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存水素 100ppb)



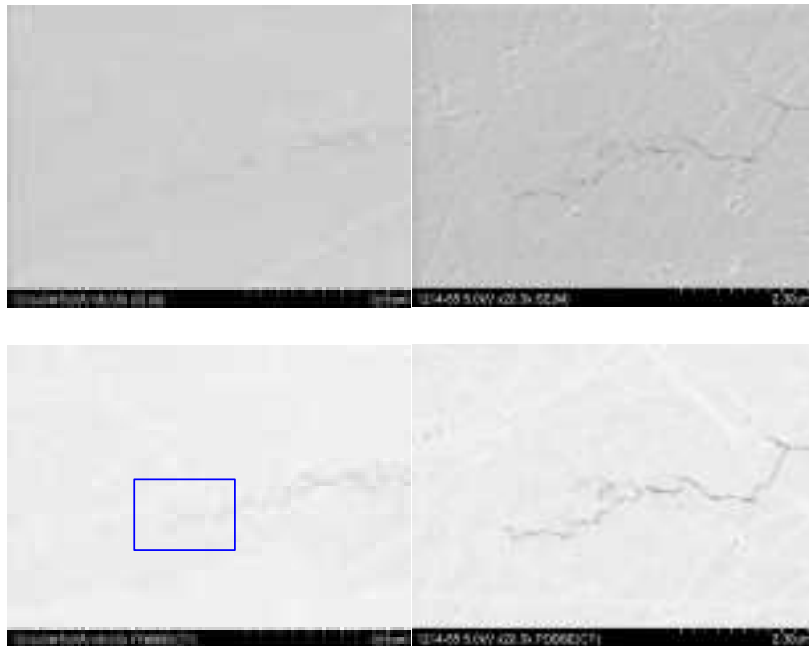
(d)高倍観察箇所 3(上段: 二次電子像 中段: 反射電子像 下段: EDX 線分析結果)  
 図 4.2.1.1-10 高温水に浸漬した CT 試験片の疲労き裂断面 SEM 観察結果(続き)  
 (試験片 No. 5 ID. 6TS3 荷重負荷あり(K 値  $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存水素 100ppb)



(e)高倍観察箇所 4(上段: 二次電子像 中段: 反射電子像 下段: EDX 線分析結果)  
 図 4.2.1.1-10 高温水に浸漬した CT 試験片の疲労き裂断面 SEM 観察結果(続き)  
 (試験片 No. 5 ID. 6TS3 荷重負荷あり(K 値  $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存水素 100ppb)

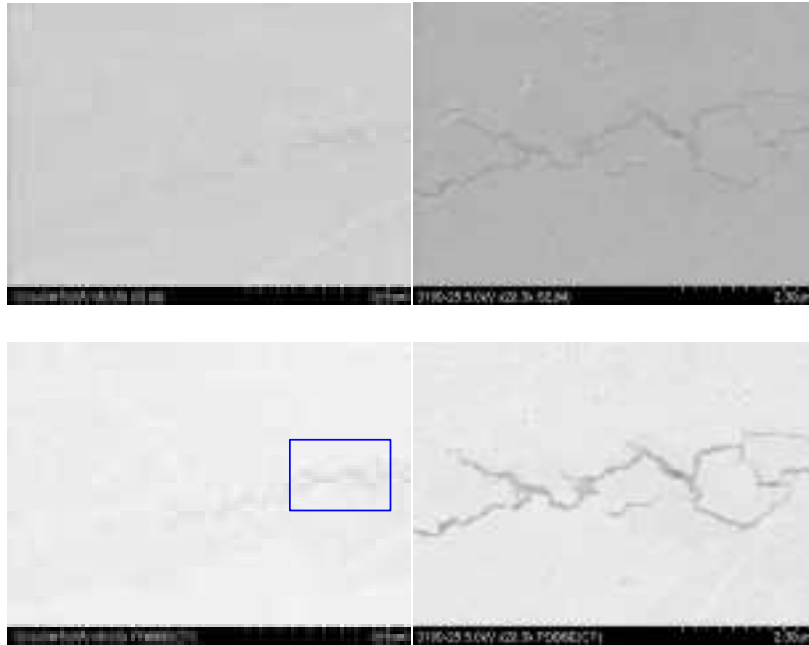


(a)疲労き裂全体の低倍観察(反射電子像)及び高倍観察箇所



(b)高倍観察箇所 1-1(上段: 二次電子像 下段: 反射電子像)

図 4.2.1.1-11 高温水に浸漬した CT 試験片の疲労き裂断面 SEM 観察結果  
(試験片 No. 6 ID. 6TLW1 荷重負荷なし(オートクレーブ静置) 溶存水素 100ppb)



(c)高倍観察箇所 1-2(上段: 二次電子像 下段: 反射電子像)

図 4.2.1.1-11 高温水に浸漬した CT 試験片の疲労き裂断面 SEM 観察結果(続き)  
(試験片 No. 6 ID. 6TLW1 荷重負荷なし(オートクレーブ静置) 溶存水素 100ppb)

### c.疲労き裂に形成した酸化皮膜の破面観察結果

#### ①試験片No. 1(ID. 6TS2) 溶存酸素2ppm 荷重負荷あり

図 4.2.1.1-12 は、5.0 kN の荷重を負荷し、温度 290℃、溶存酸素 2ppm の高温水に 224 時間浸漬した ID. 6TS2 の疲労き裂破面のビデオマイクロスコープ観察結果を示す。なお負荷した荷重はき裂長さ 11.4 mm に対してき裂先端での応力拡大係数  $K=約 20 MPa\sqrt{m}$  に相当する。高温水に浸漬した疲労き裂部の色調は濃い灰色であった。

図 4.2.1.1-13 は疲労き裂の破面を低倍率で SEM 観察した結果(二次電子像及び反射電子像)を示す。観察位置は図 4.2.1.1-12 のビデオマイクロスコープ観察の赤破線位置より選択した。図 4.2.1.1-13 中の 1~3 は、CT 試験片板厚中央部の疲労き裂先端、サイドグループ側の疲労き裂先端近傍を高倍率で SEM 観察した位置を示す。その結果を図 4.2.1.1-14(1)~(3)に示す。図 4.2.1.1-14(1)に示す通り、試験片板厚中央近傍のき裂先端の破面は角の無い丸い粒状の酸化物が多く認められた。また、き裂先端から若干離れた位置の破面は先端に比べ、粒が大きく数量も多く認められた。一方図 4.2.1.1-14(2)~(3)に示す通り、サイドグループ近傍のき裂先端の破面においても粒状の酸化物が多数認められ、試験片板厚中央近傍に比べて粒は大きくエッジの鋭い形状で、数密度も大きかった。

#### ②試験片No. 6(ID. 6TS3) 溶存水素100ppb 荷重負荷あり

図 4.2.1.1-15 は、7.2 kN の荷重を負荷し、温度 290℃、溶存水素 100ppb の高温水に 224 時間浸漬した ID. 6TS3 の疲労き裂破面のビデオマイクロスコープ観察結果を示す。なお負荷した荷重はき裂長さ 11.4 mm に対してき裂先端での応力拡大係数  $K=約 30 MPa\sqrt{m}$  に相当する。高温水に浸漬した疲労き裂部の色調は灰色であり、前項図 4.2.1.1-12 で示した溶存酸素 2ppm 浸漬の結果に比べてやや薄い色調であった。

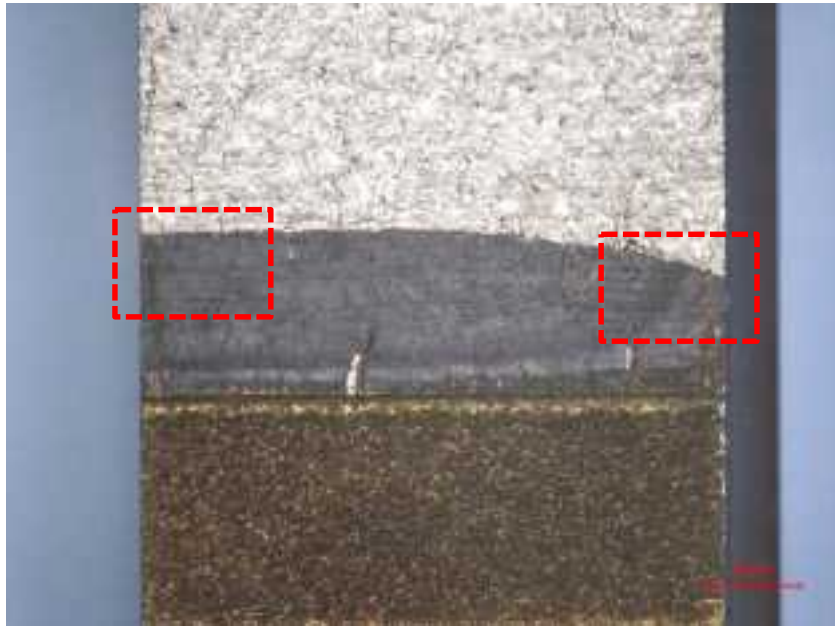
図 4.2.1.1-16 は疲労き裂の破面を低倍率で SEM 観察した結果(二次電子像及び反射電子像)を示す。観察位置は図 4.2.1.1-15 のビデオマイクロスコープ観察の赤破線位置より選択した。図 4.2.1.1-2 中の 1~3 は CT 試験片板厚中央部の疲労き裂先端、4~5 はサイドグループ側の疲労き裂先端近傍を高倍率で SEM 観察した位置を示す。その結果を図 4.2.1.1-17(1)~(5)に示す。図 4.2.1.1-17(1)~(3)に示すように、試験片板厚中央近傍の疲労き裂先端の破面は粒状の酸化物が密集して認められ、粒形状はエッジの鋭いものが多く認められ、疲労き裂先端から若干離れた位置の破面は先端に比べ粒が大きいうようにみえた。一方図 4.2.1.1-17(4)~(5)に示す通り、サイドグループ近傍の疲労き裂先端の破面は板厚中央近傍と同じように粒状の酸化物が密集していたが、粒の形状は角の無い、丸みをもったものが多く認められた。

#### ③試験片No. 7(ID. 6TLW1) 溶存水素100ppb 荷重負荷なし

図 4.2.1.1-18 はオートクレーブ内に静置し(荷重負荷なし)、温度 290℃、溶存水素 100ppb の高温水に 224 時間浸漬した ID. 6TLW1 の疲労き裂破面のビデオマイクロスコー

ープ観察結果を示す。高温水に浸漬した疲労き裂部の色調は灰白色であり、前項図 4.2.1.1-15 で示した溶存水素 100ppb 環境下、荷重負荷ありの条件に比べて薄い色調であった。

図 4.2.1.1-19 は疲労き裂の破面を低倍率で SEM 観察した結果(二次電子像及び反射電子像)を示す。観察位置は図 4.2.1.1-18 のビデオマイクロスコープ観察の赤破線位置より選択した。図 4.2.1.1-19 中の 1~2 は CT 試験片板厚中央部の疲労き裂先端、3~4 はサイドグループ側の疲労き裂先端近傍を高倍率で SEM 観察した位置を示す。その結果を図 4.2.1.1-20 (1)~(4)に示す。図 4.2.1.1-20 (1)~(2)に示すように、試験片板厚中央近傍の疲労き裂先端の破面には所々僅かに小さな粒状の凹凸が認められた。また疲労き裂先端から離れた位置の破面には、粒の形状は小さく、丸みを帯びた酸化物の粒が局所的に認められた。サイドグループ近傍の疲労き裂先端の破面も板厚中央近傍と同等であった。



(1)低倍率(全体: 赤枠は高倍率観察位置)



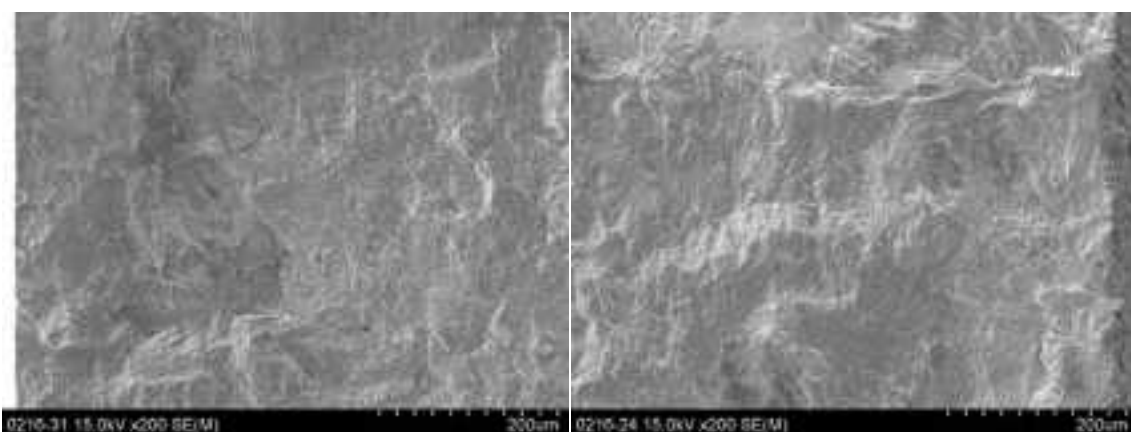
(2)高倍率(板厚中央切断線近傍)

(3)高倍率(サイドグループ近傍)

図 4.2.1.1-12 ビデオマイクロスコープ観察結果(試験片 No. 1 ID. 6TS2)

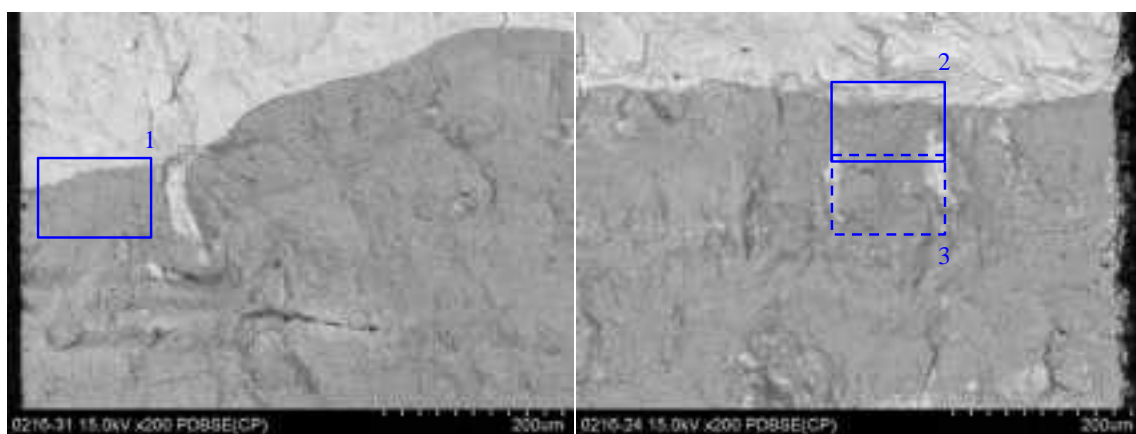
(荷重負荷あり(K 値 20 MPa√m 相当) 溶存酸素 2ppm)





(1)板厚中央切断線近傍

(2)サイドグループ近傍



(1)板厚中央切断線近傍

(2)サイドグループ近傍

図 4.2.1.1-13 疲労き裂破面の SEM 観察結果(低倍率)(試験片 No. 1 ID. 6TS2)

(荷重負荷あり(K 値  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存酸素 2ppm)

(上段: 二次電子像 下段: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)

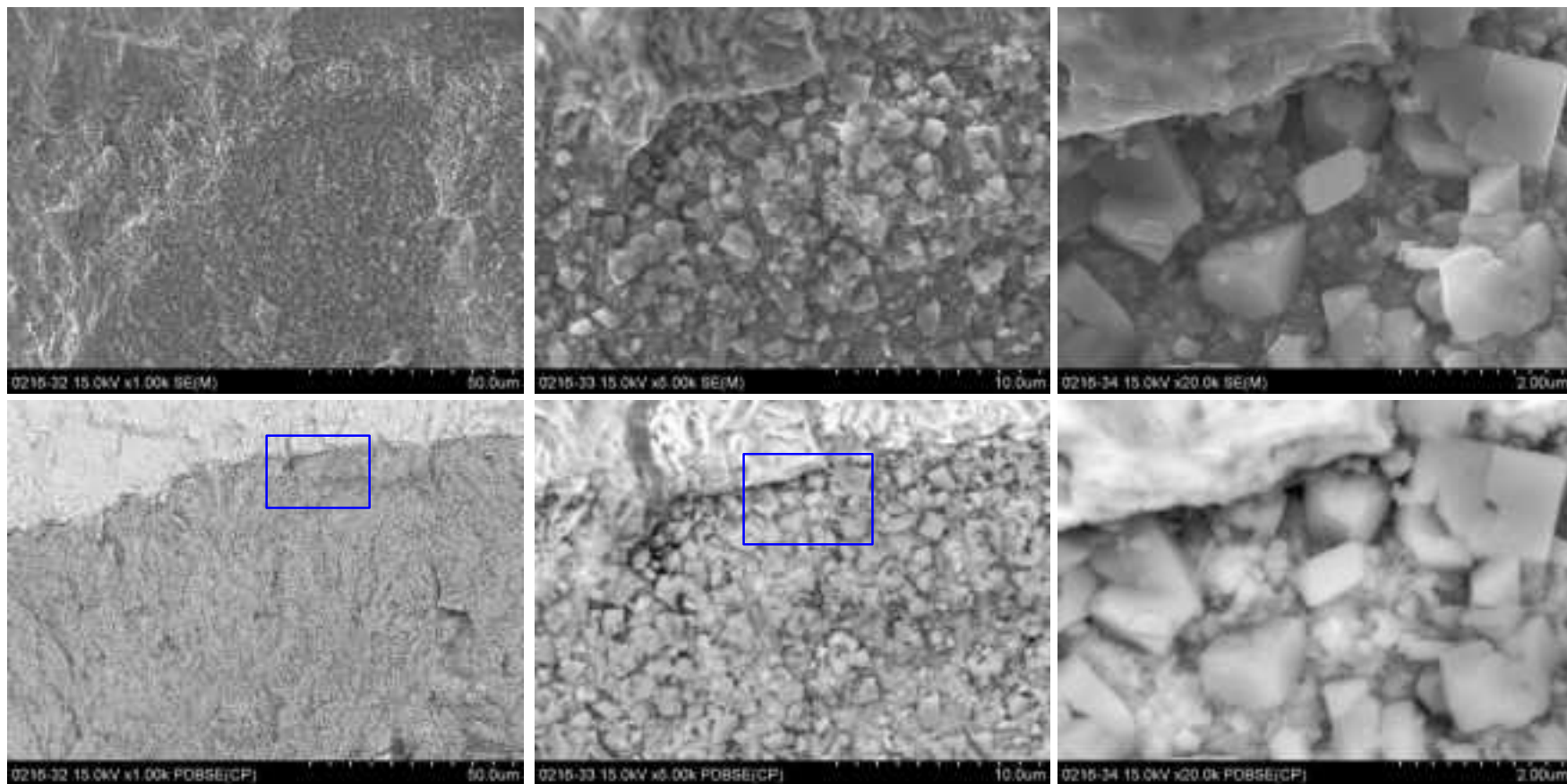


図 4.2.1.1-14(1) 疲労き裂破面の SEM 観察結果(図 4.2.1.1-13 視野 1 高倍率)(試験片 No. 1 ID. 6TS2)  
 (荷重負荷あり(K 値 20 MPa√m 相当) 溶存酸素 2ppm)  
 (上段: 二次電子像 下段: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)

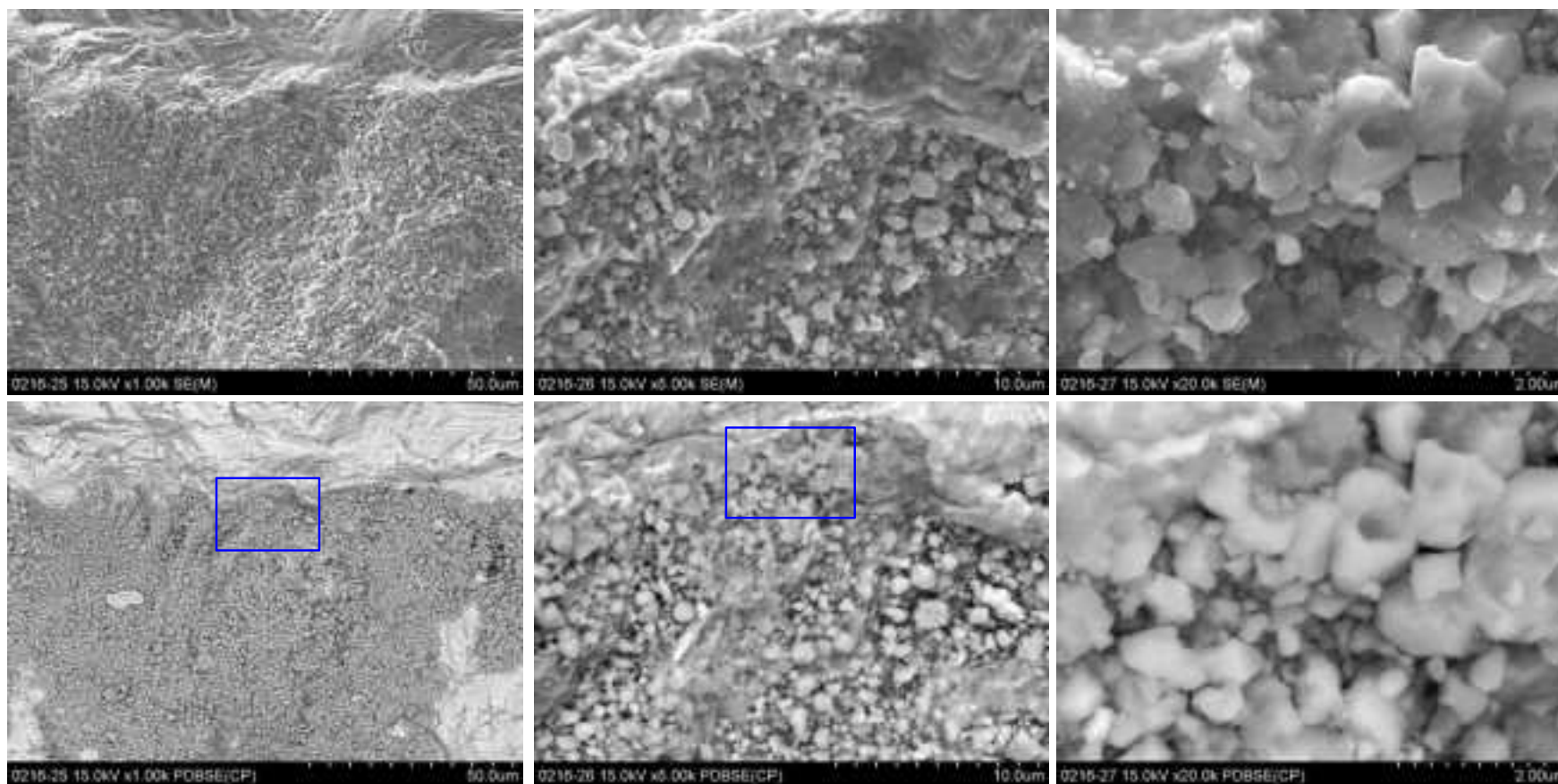


図 4.2.1.1-14(2) 疲労き裂破面の SEM 観察結果(図 4.2.1.1-13 視野 2 高倍率)(試験片 No. 1 ID. 6TS2)  
 (荷重負荷あり(K 値  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存酸素 2ppm)  
 (上段: 二次電子像 下段: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)

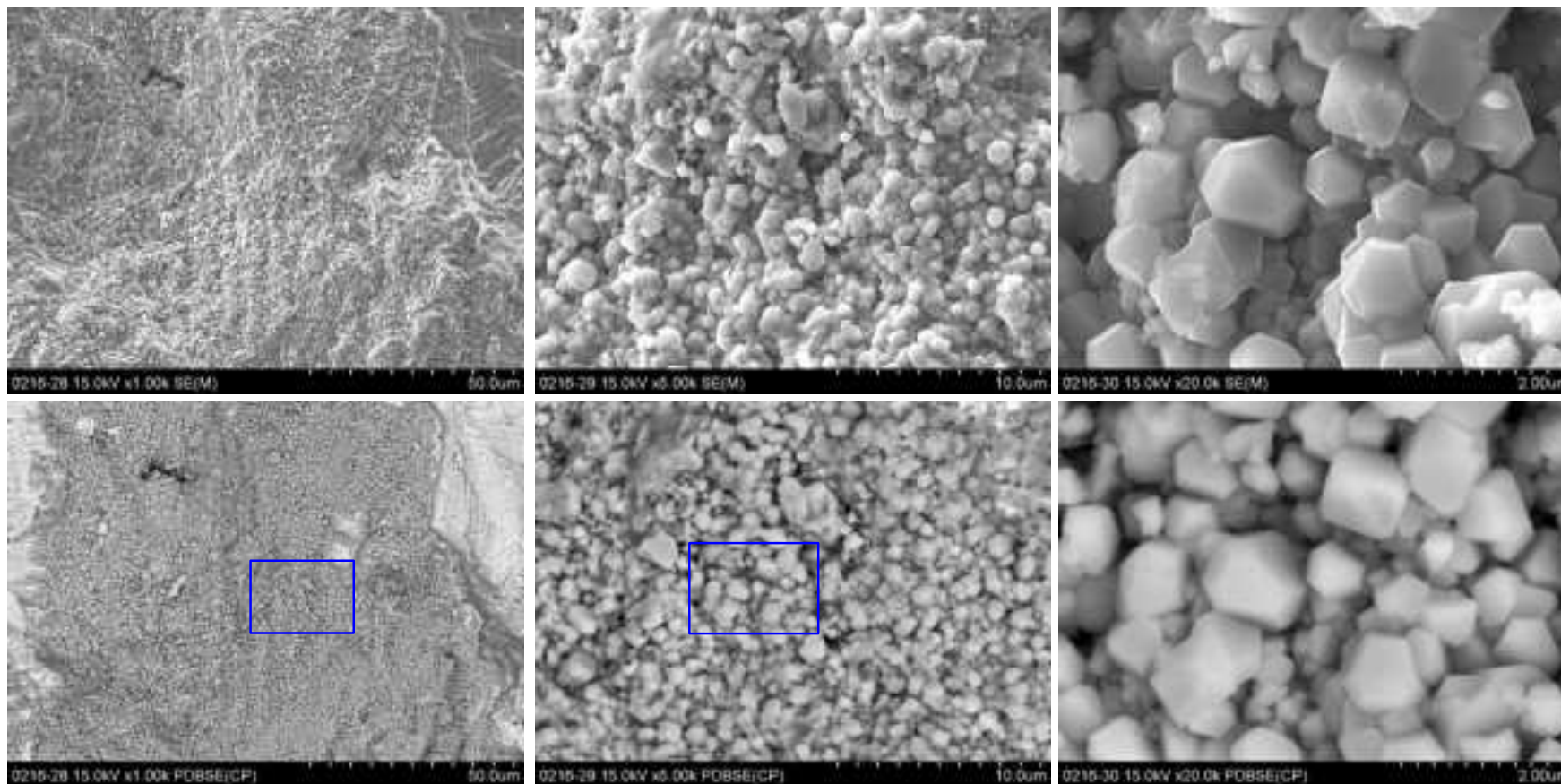
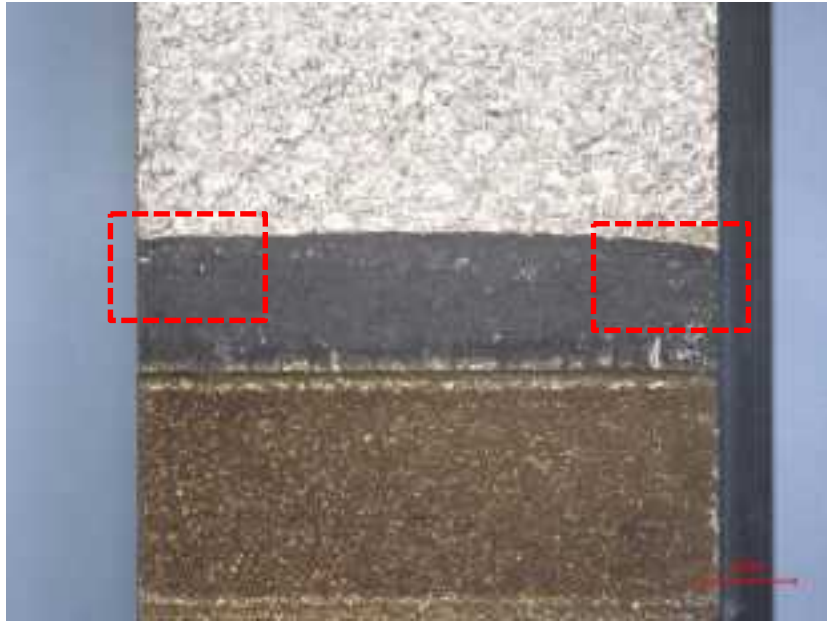


図 4.2.1.1-14(3) 疲労き裂破面の SEM 観察結果(図 4.2.1.1-13 視野 3 高倍率)(試験片 No. 1 ID. 6TS2)  
 (荷重負荷あり(K 値 20 MPa√m 相当) 溶存酸素 2ppm)  
 (上段: 二次電子像 下段: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)



(1)低倍率(全体: 赤枠は高倍率観察位置)

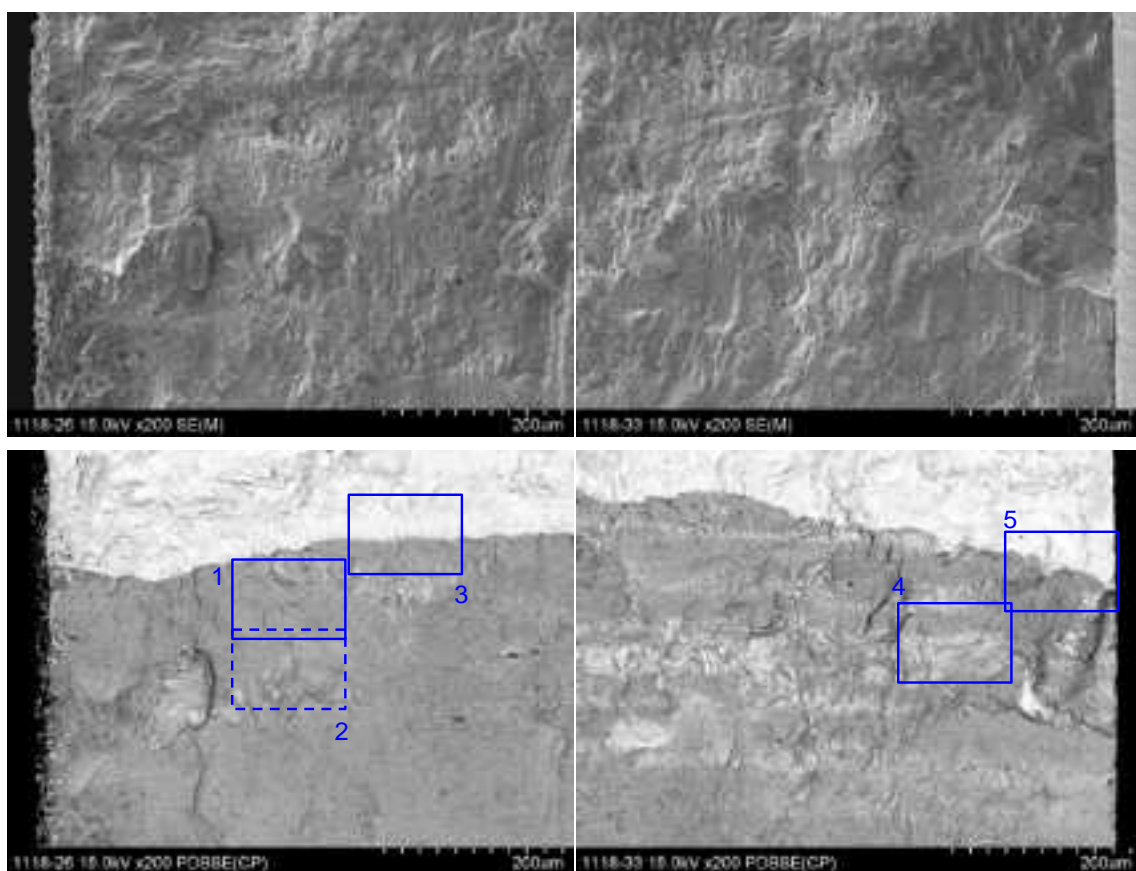


(2)高倍率(板厚中央切断線近傍)

(3)高倍率(サイドグループ近傍)

図 4.2.1.1-15 ビデオマイクロスコープ観察結果(試験片 No. 5 ID. 6TS3)

(荷重負荷あり(K 値  $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存水素 100ppb)



(1)板厚中央切断線近傍

(2)サイドグループ近傍

図 4.2.1.1-16 疲労き裂破面の SEM 観察結果(低倍率)(試験片 No. 5 ID. 6TS3)

(荷重負荷あり(K 値  $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存水素 100ppb)

(上段: 二次電子像 下段: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)

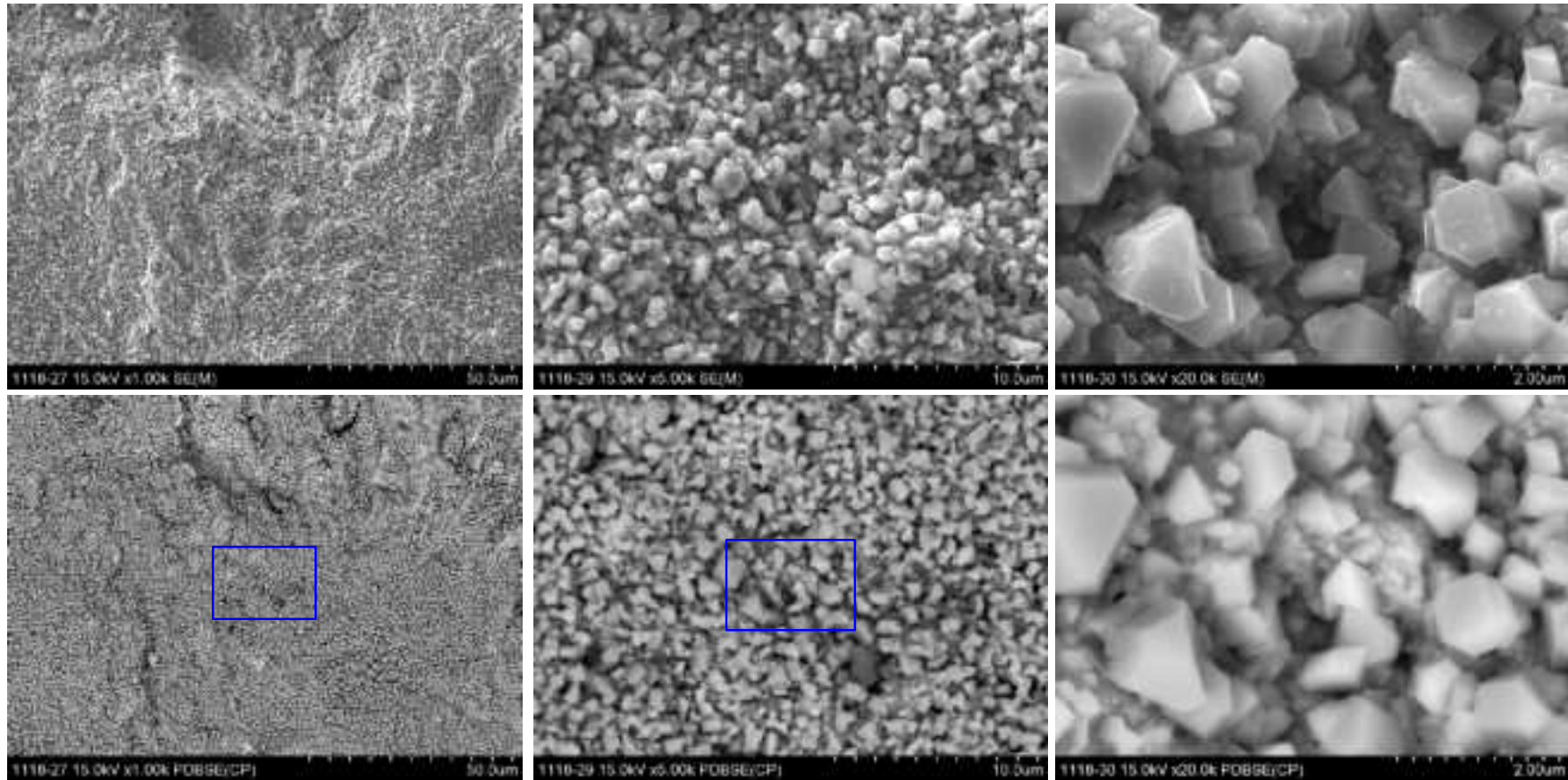


図 4.2.1.1-17(1) 疲労き裂破面の SEM 観察結果(図 4.2.1.1-16 視野 1 高倍率)(試験片 No. 5 ID. 6TS3)  
 (荷重負荷あり(K 値 30 MPa√m 相当) 溶存水素 100ppb)  
 (上段: 二次電子像 下段: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)

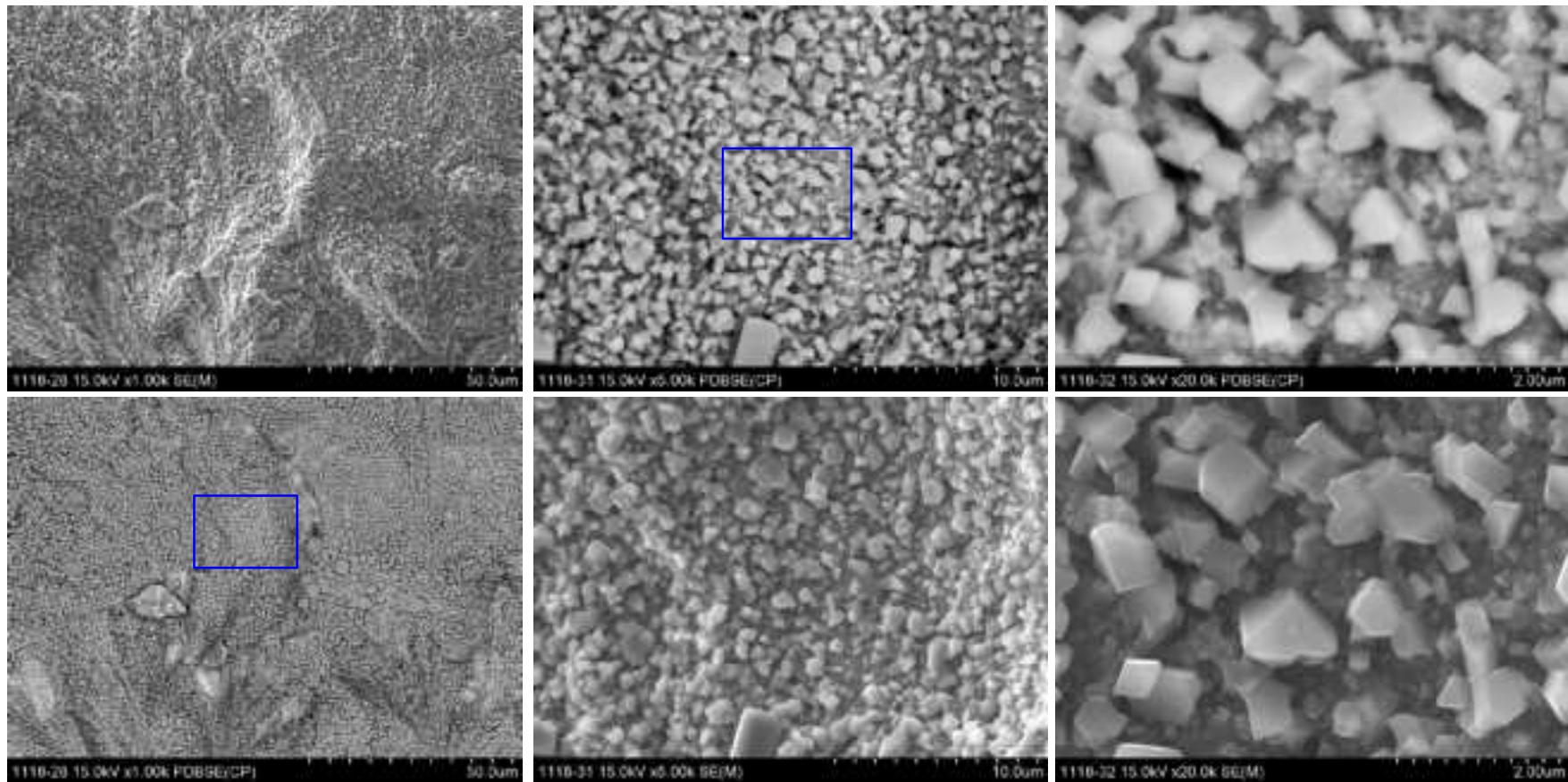


図 4.2.1.1-17(2) 疲労き裂破面の SEM 観察結果(図 4.2.1.1-16 視野 2 高倍率)(試験片 No. 5 ID. 6TS3)

(荷重負荷あり(K 値 30 MPa√m 相当) 溶存水素 100ppb)

(上段: 二次電子像 下段: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)



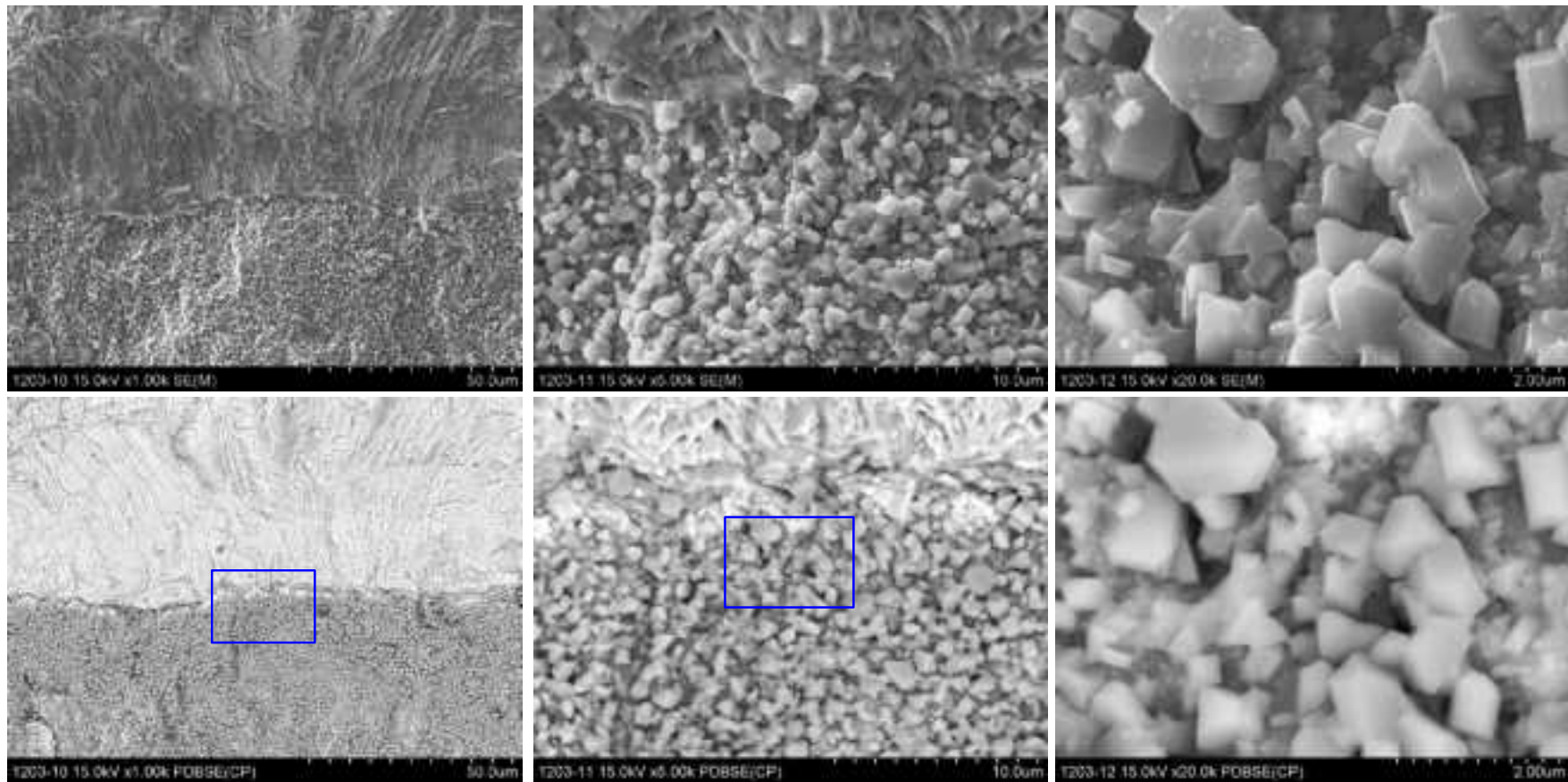


図 4.2.1.1-17(3) 疲労き裂破面の SEM 観察結果(図 4.2.1.1-16 視野 3 高倍率)(試験片 No. 5 ID. 6TS3)

(荷重負荷あり(K 値 30 MPa√m 相当) 溶存水素 100ppb)

(上段: 二次電子像 下段: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)

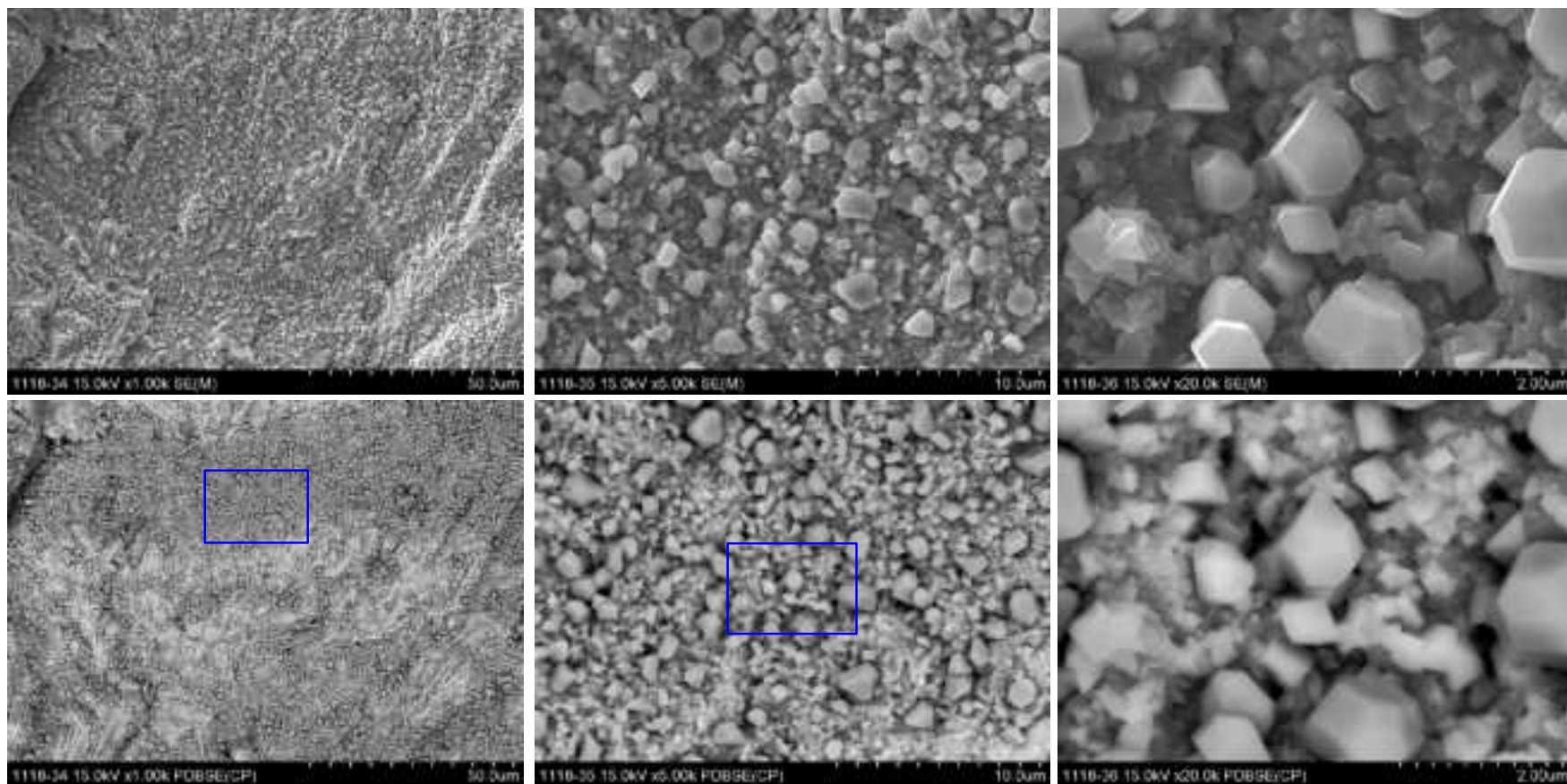


図 4.2.1.1-17(4) 疲労き裂破面の SEM 観察結果(図 4.2.1.1-16 視野 4 高倍率)(試験片 No. 5 ID. 6TS3)

(荷重負荷あり(K 値 30 MPa√m 相当) 溶存水素 100ppb)

(上段: 二次電子像 下段: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)

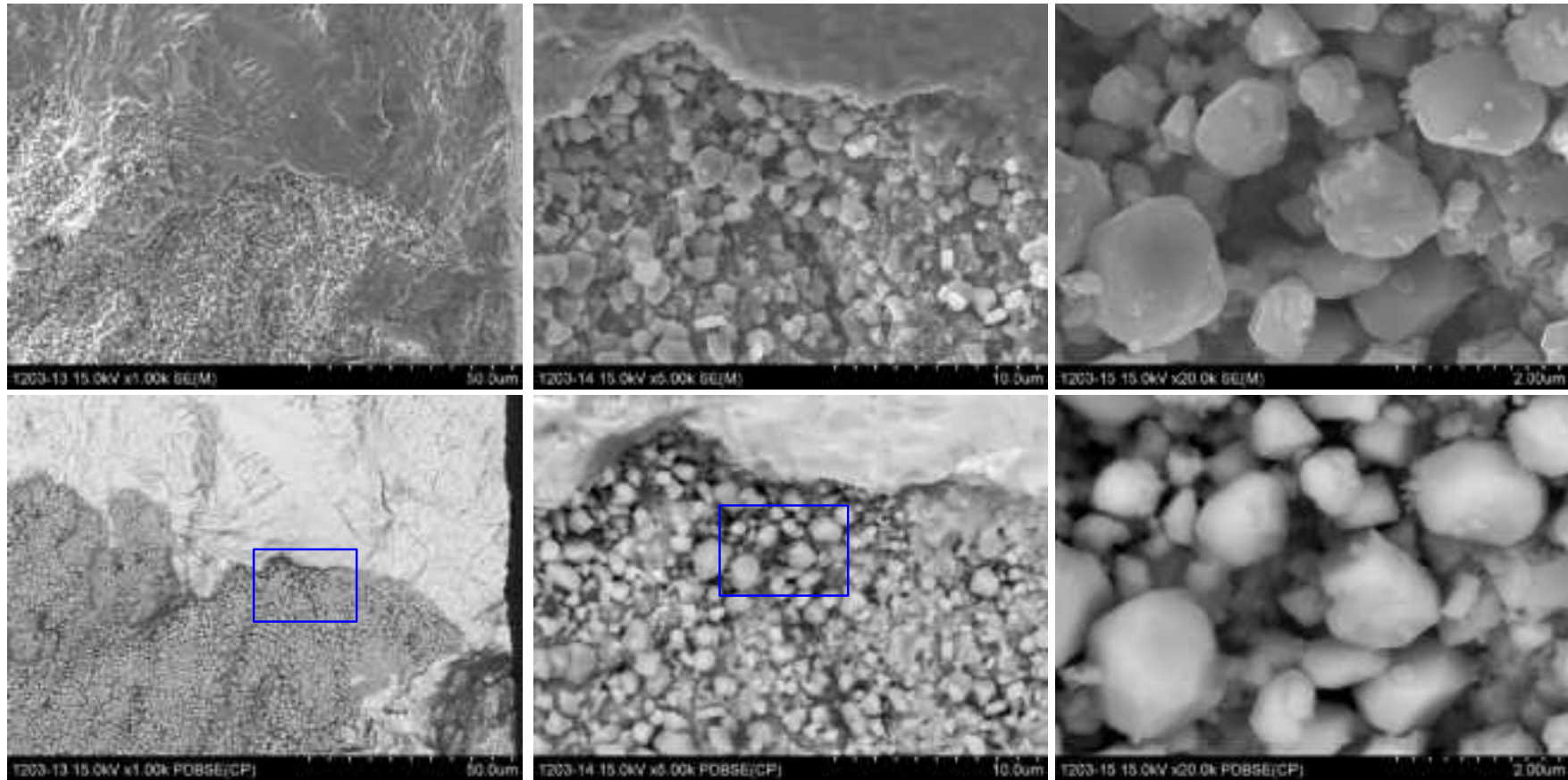
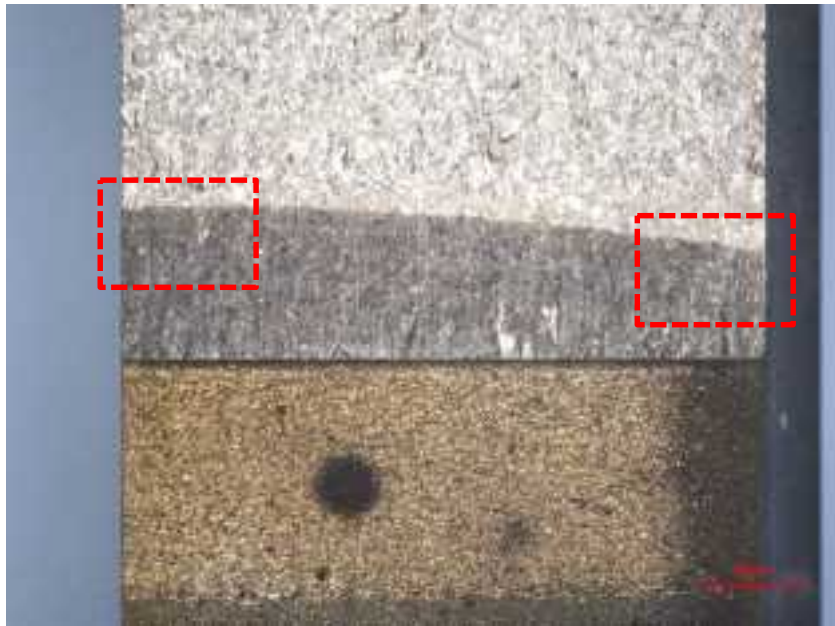


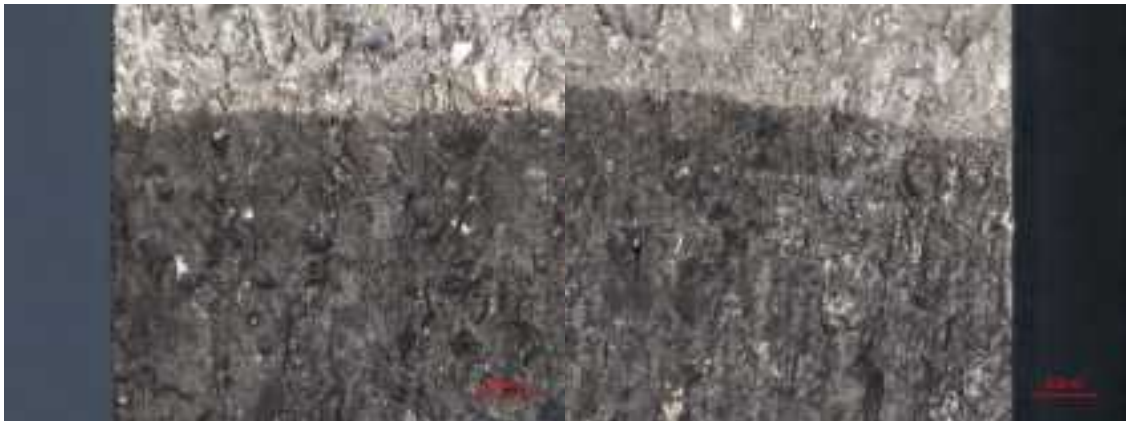
図 4.2.1.1-17(5) 疲労き裂破面の SEM 観察結果(図 4.2.1.1-16 視野 5 高倍率)(試験片 No. 5 ID. 6TS3)

(荷重負荷あり(K 値 30 MPa√m 相当) 溶存水素 100ppb)

(上段: 二次電子像 下段: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)



(1)低倍率(全体: 赤枠は高倍率観察位置)

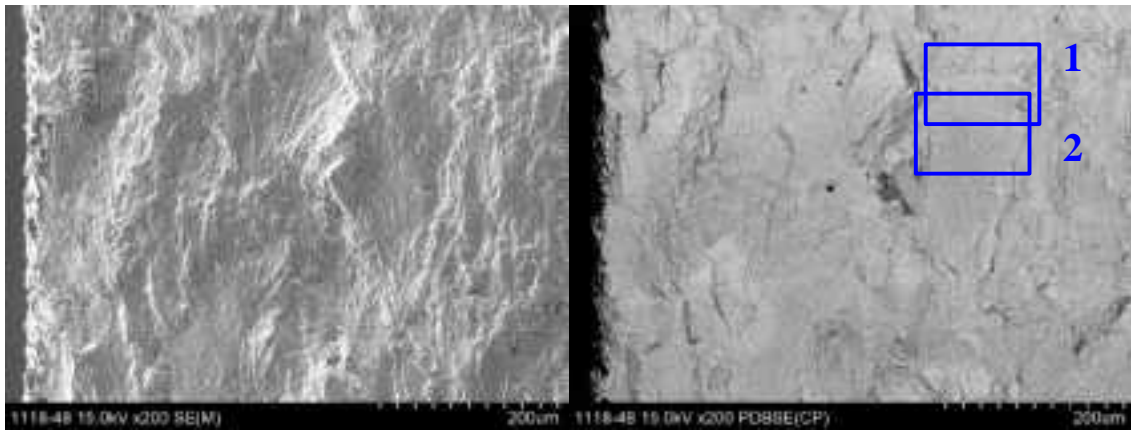


(1)高倍率(板厚中央切断線近傍)

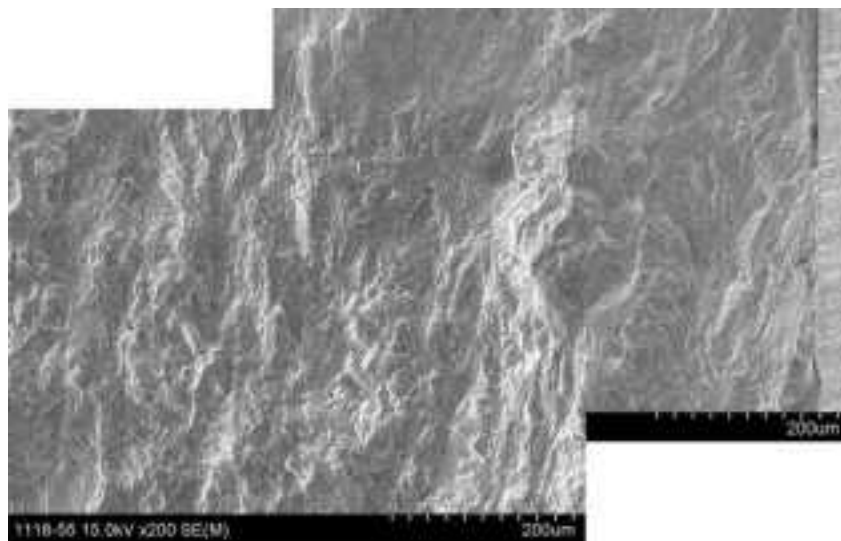
(2)高倍率(サイドグループ近傍)

図 4.2.1.1-18 ビデオマイクロスコープ観察結果(試験片 No. 6 ID. 6TLW1)

(荷重負荷なし(オートクレーブ内静置) 溶存水素 100ppb)



(1)板厚中央切断線近傍(左: 二次電子像 右: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)



(2)サイドグループ近傍(上: 二次電子像 下: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)

図 4.2.1.1-19 疲労き裂破面の SEM 観察結果(低倍率)(試験片 No. 6 ID. 6TLW1)  
(荷重負荷なし(オートクレーブ内静置) 溶存水素 100ppb)

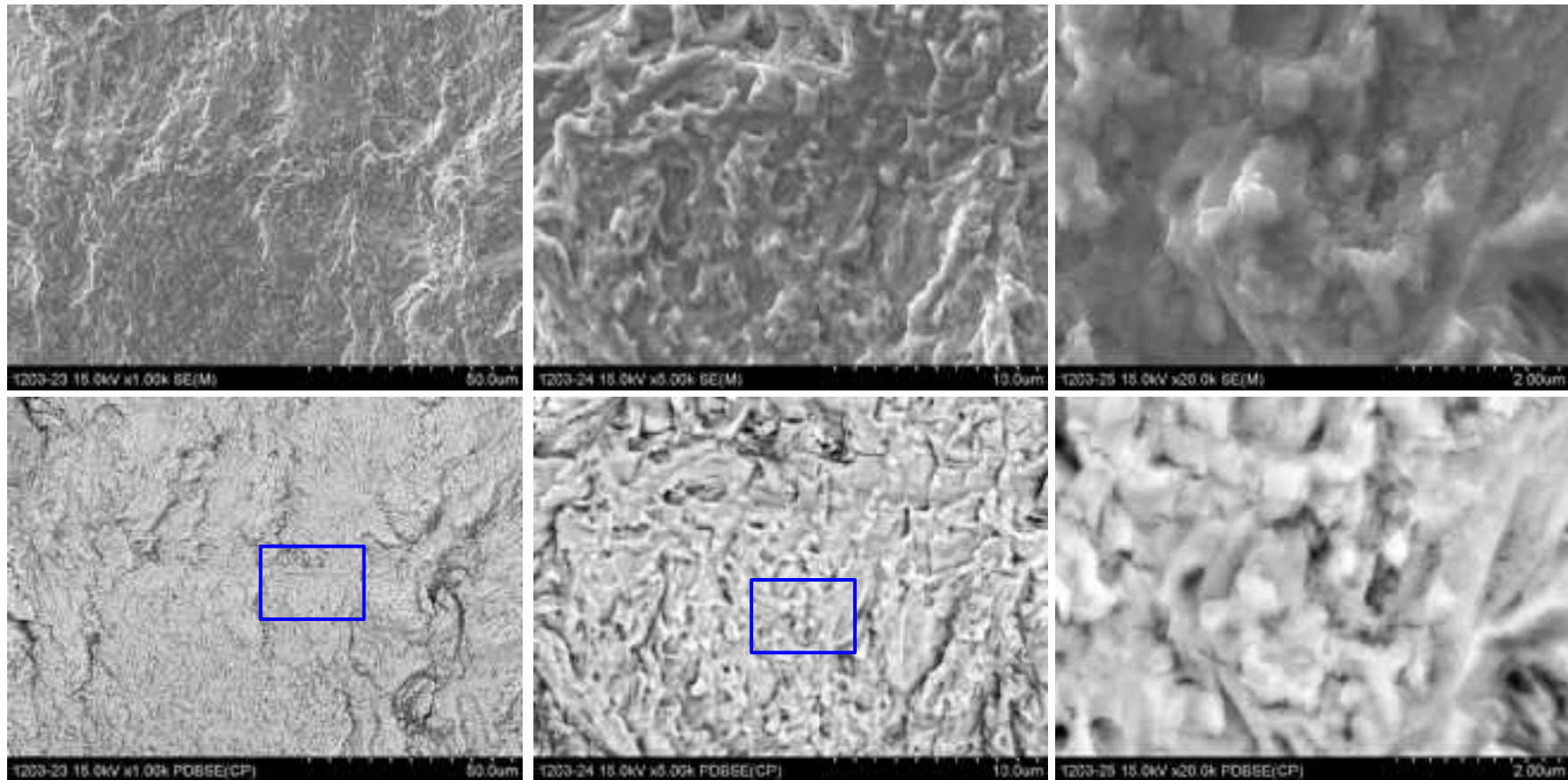


図 4.2.1.1-20 (1) 疲労き裂破面の SEM 観察結果(図 4.2.1.1-19 視野 1 高倍率)(試験片 No. 5 ID. 6TLW1)  
(荷重負荷なし(オートクレーブ内静置) 溶存水素 100ppb)  
(上段: 二次電子像 下段: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)

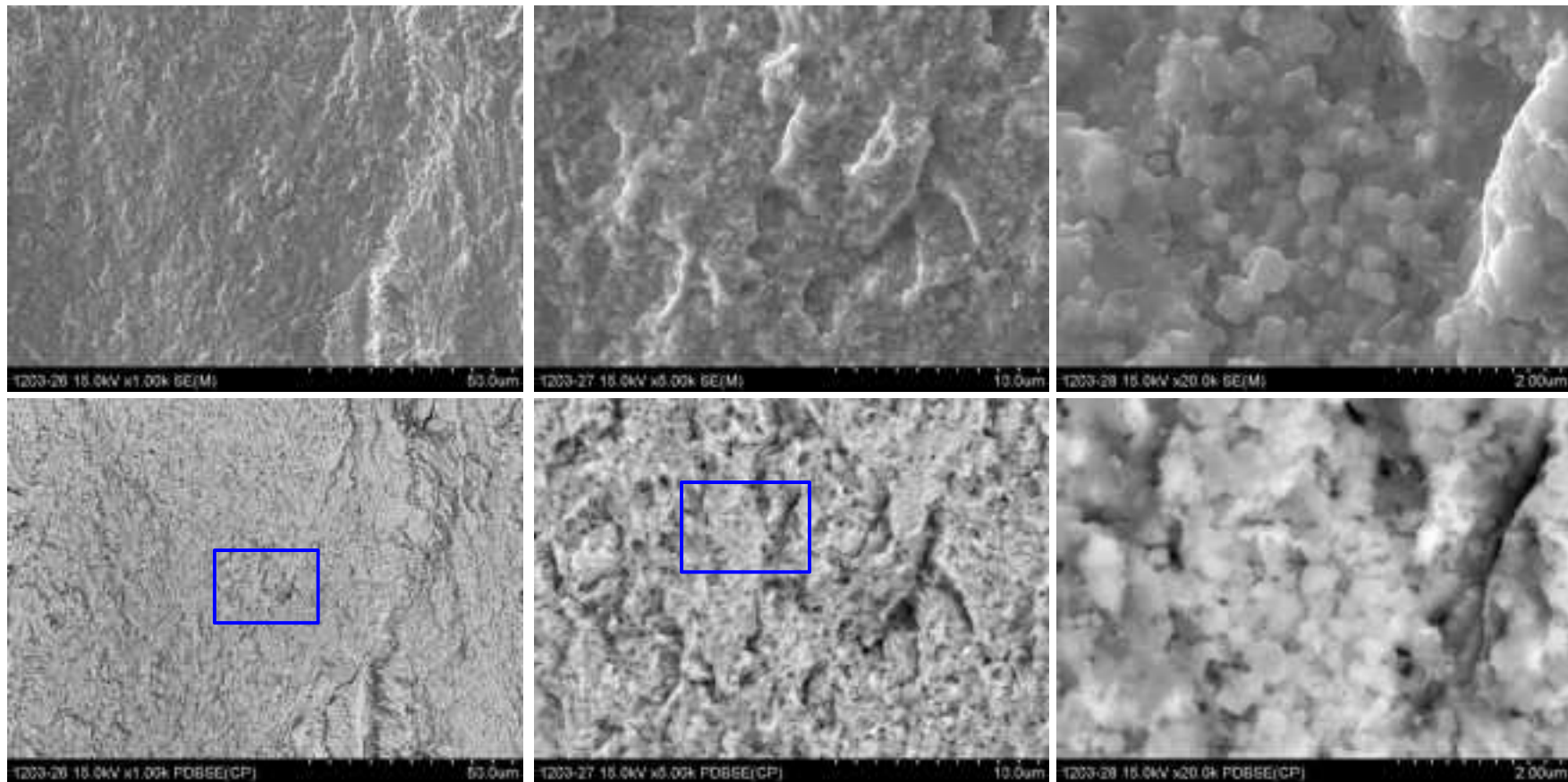


図 4.2.1.1-20(2) 疲労き裂破面の SEM 観察結果(図 4.2.1.1-19 視野 2 高倍率)(試験片 No. 5 ID. 6TLW1)  
 (荷重負荷なし(オートクレーブ内静置) 溶存水素 100ppb)  
 (上段: 二次電子像 下段: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)

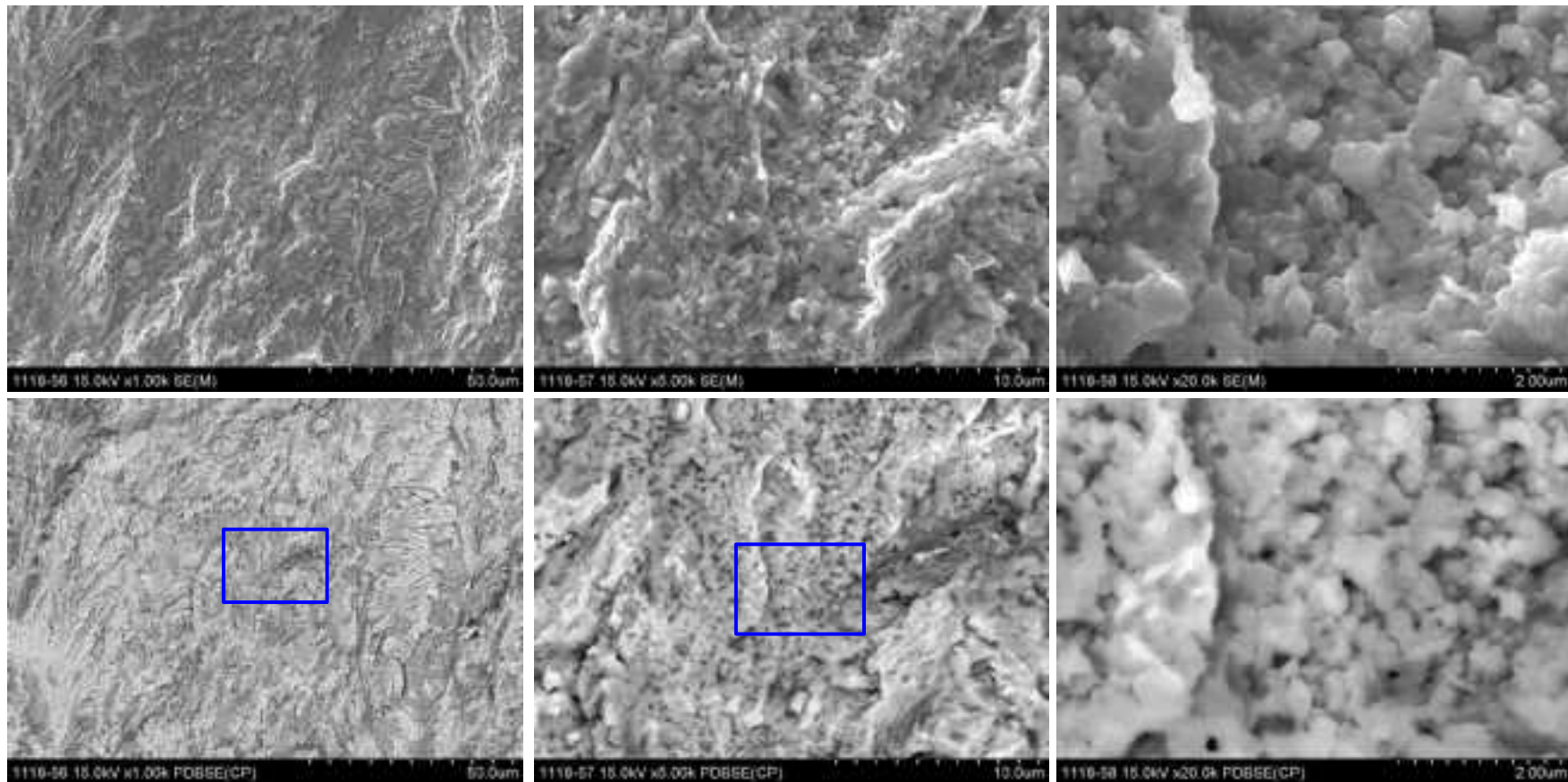


図 4.2.1.1-20(3) 疲労き裂破面の SEM 観察結果(図 4.2.1.1-19 視野 3 高倍率)(試験片 No. 5 ID. 6TLW1)  
 (荷重負荷なし(オートクレーブ内静置) 溶存水素 100ppb)  
 (上段: 二次電子像 下段: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)



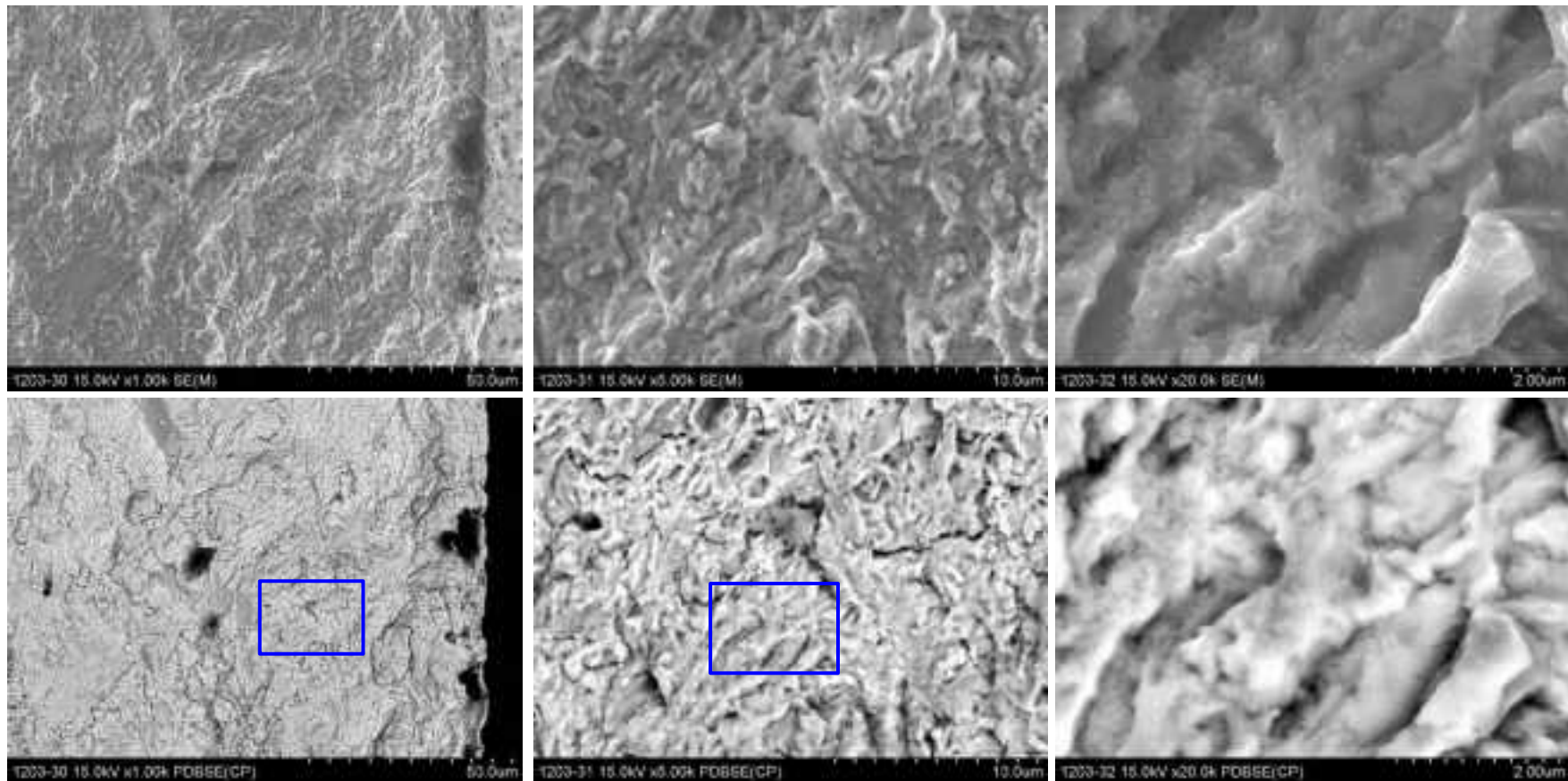


図 4.2.1.1-20(4) 疲労き裂破面の SEM 観察結果(図 4.2.1.1-19 視野 4 高倍率)(試験片 No. 5 ID. 6TLW1)

(荷重負荷なし(オートクレーブ内静置) 溶存水素 100ppb)

(上段: 二次電子像 下段: 反射電子像 青枠: 高倍率観察箇所)

#### d.疲労き裂に形成した酸化皮膜の疲労き裂破面のTEM観察結果

##### ①試験片No. 1(ID. 6TS2) き裂先端板厚中央

図 4.2.1.1-21 は、荷重を 5.0 kN 負荷し、温度 290°C、溶存酸素 2ppm の高温水に 224 時間浸漬した ID. 6TS2 の切断片(a)を破面開放した後、き裂先端板厚中央近傍(図 2 の位置(1))から FIB でサンプリングした TEM 試験片の酸化皮膜観察結果を示す。なお負荷した荷重はき裂長さ 11.4 mm に対してき裂先端での応力拡大係数  $K=約 20 MPa\sqrt{m}$  に相当する。

図 4.2.1.1-21(a)及び(b)の明視野及び STEM モードの Z コントラストによる観察結果より、最下層のステンレス鋼(金属相)の上に 2 層に分かれた酸化膜層が形成していることが判った。また酸化膜層は、金属相に近く帯状に形成した内層と高温水に接しブロック状組織の外層で構成し、Z コントラスト像の濃淡が僅かに異なっていた。Z コントラスト像は、SEM の反射電子像と同様に組織を形成する原子量の平均値や分子量の相違を反映して濃淡が相違することが知られており、酸化膜層の内層と外層を形成する元素及びその比率が異なることが示唆される。図 4.2.1.1-21(c)は、図 4.2.1.1-21(a)中に黄色枠で囲った箇所の明視野像と制限視野回折像を示し、また図 4.2.1.1-21(d)は制限視野回折を撮影した Point 1~3 の EDX 分析結果を示す。この結果より、内層はやや Cr リッチな Fe、Cr、Ni スピネル構造の酸化皮膜( $Fe_xCr_yNi_zO_4$ )、外層は Fe を主とし、微量の Ni を含んだ結晶性の良い酸化皮膜( $Fe_3O_4$ )であることが判った。

##### ②試験片No. 1(ID. 6TS2) き裂先端サイドグループ近傍

図 4.2.1.1-22 は、前項①で用いた ID. 6TS2 の切断片(a)のき裂先端サイドグループ近傍(図 2 の位置(2))から FIB でサンプリングした TEM 試験片の酸化皮膜観察結果を示す。

図 4.2.1.1-22 (1)の明視野及び STEM モードの Z コントラスト、図 4.2.1.1-22 (2)の詳細観察と EDX 分析結果より、ここで観察された酸化皮膜内層は Fe、Cr、Ni を含む  $Fe_3O_4$  及び  $Fe_2O_3$  に近いスピネル構造を有する箇所が混在しており、き裂先端板厚中央近傍で認められたものと定性的に異なる箇所があることが判った。一方、き裂先端サイドグループ近傍に形成した酸化皮膜の内層、外層は、板厚中央に比べて厚さが小さい傾向が認められた。これは、板厚中央近傍におけるすき間環境が酸化皮膜の成長を加速したことを示唆するものと考えられる。

##### ③試験片No. 2(ID. 6LWA) き裂先端板厚中央

図 4.2.1.1-23 は、オートクレーブに静置し(荷重負荷なし)、温度 290°C、溶存酸素 2ppm の高温水に 224 時間浸漬した ID. 6LWA の切断片(a)を破面開放した後、き裂先端板厚中央近傍から FIB でサンプリングした TEM 試験片の酸化皮膜観察結果を示す。この条件の TEM 観察は平成 25 年度にも実施したが、結果の確認のため再度観察を行った。

図 4.2.1.1-23(1)の明視野及び STEM モードの Z コントラストより、最下層の金属相以

外に FIB サンプリングに用いた 2 層のカーボンの保護蒸着層が認められるだけで、明瞭な酸化皮膜層の形成は認められなかった。また図 4.2.1.1-23(2)の(c)の詳細観察箇所には局所的な酸化皮膜の形成が認められた。EDX 分析の結果、この組織は酸化物となる前の、金属相と同等の元素比率を有する酸素を多く含んだ相であると推察された。今年度の結果より、荷重負荷した場合に比べて荷重負荷がない場合の方が酸化皮膜形成は抑制され、形成しても局所的となることが判った。この結果は平成 25 年度の結果と同様の傾向であることを確認した。

#### ④試験片No. 3(ID. V6L5) き裂先端サイドグループ近傍

図 4.2.1.1-24 は、7.2 kN の荷重を負荷し、温度 290°C、溶存酸素 2ppm の高温水に 224 時間浸漬した ID. V6L5 の切断片(a)を破面開放した後、き裂先端サイドグループ近傍(図 2 の位置(2))から FIB でサンプリングした TEM 試験片の酸化皮膜観察結果を示す。同様の位置からサンプリングした試験片の TEM 観察は平成 26 年度にも実施したが、結果の確認のため再度観察を行った。

図 4.2.1.1-24(1)の明視野及び STEM モードの Z コントラスト、図 4.2.1.1-24(2)の詳細観察と EDX 分析結果より、平成 26 年度に実施した ID. V6L5 のき裂先端板厚中央近傍で認められた酸化皮膜と定性的に一致していることが判った。一方、ID. V6L5 のき裂先端板厚中央近傍においては、き裂先端の前縁において顕著な酸化皮膜の形成が認められたが(平成 26 年度成果)、今回のサイドグループ近傍に形成した酸化皮膜ではそのような傾向は認められなかった。これは、板厚中央近傍におけるすき間環境が酸化皮膜の成長を加速したことを示唆するものと考えられる。

#### ⑤試験片No. 5(ID. V6L4) 疲労き裂自由表面

図 4.2.1.1-25 は、疲労き裂を進展させて破面開放した CT 試験片をオートクレーブに静置し、温度 290°C、溶存酸素 2ppm の高温水に 224 時間浸漬した ID. V6L4 の疲労き裂表面(自由表面)から FIB でサンプリングした TEM 試験片の酸化皮膜観察結果を示す。この試験片のデータは、疲労破面上に形成する酸化皮膜の構造及び成長に関する基本データとして活用するために取得した。

図 4.2.1.1-25(1)の明視野及び STEM モードの Z コントラスト、図 4.2.1.1-25(2)の詳細観察と EDX 分析結果より、内層はやや Cr リッチな $(\text{Fe,Cr,Ni})_3\text{O}_4$ または $(\text{Fe,Cr,Ni})_2\text{O}_3$ のスピネル構造が混在する組織、外層は Fe を主とし、微量の Cr を含んだ結晶性の良い $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 構造の酸化皮膜であることが判った。

各層の酸化皮膜は、試験片全体に渡って均一な厚さで形成していた。ここで得られた酸化皮膜厚さと、疲労き裂内で形成した酸化皮膜厚さを比較することによって、き裂内のすき間影響やき裂先端近傍における応力集中の影響を評価することが可能である。

⑥試験片No. 5(ID. 6TS3) き裂先端板厚中央

図 4.2.1.1-26 は、7.2 kN の荷重を負荷し、温度 290℃、溶存水素 100ppb の高温水に 224 時間浸漬した ID. 6TS3 の切断片(a)を破面開放した後、き裂先端板厚中央近傍(図 2 の位置(1))から FIB でサンプリングした TEM 試験片の酸化皮膜観察結果を示す。なお負荷した荷重はき裂長さ 11.4 mm に対してき裂先端での応力拡大係数  $K=約 30 MPa\sqrt{m}$  に相当する。

図 4.2.1.1-26 (1)の明視野及び STEM モードの Z コントラスト、図 4.2.1.1-26 (2)の詳細観察と EDX 分析結果より、ここで観察された酸化皮膜内層は Cr リッチなスピネル構造の酸化皮膜( $Fe_xCr_yNi_zO_4$ )、酸化皮膜外層は、微量の Ni を含む結晶性の良い  $Fe_3O_4$  であることが判った。溶存酸素 2ppm で浸漬した試験片 ID. 6TS2 や V6L5(平成 26 年度報告済)で観察された酸化皮膜内層も( $Fe_xCr_yNi_zO_4$ )のスピネル構造を有していたが、酸素濃度が低いため、皮膜の成長は抑制されていた。加えて酸化皮膜内層が薄い部分の上方では酸化皮膜外層が成長していた箇所も認められ、溶存酸素 2ppm のケースと異なっていた。

⑦試験片No. 5(ID. 6TS3) き裂先端サイドグループ近傍

図 4.2.1.1-27 は、前項⑥で用いた ID. 6TS3 の切断片(a)のき裂先端サイドグループ近傍(図 2 の位置(2))から FIB でサンプリングした TEM 試験片の酸化皮膜観察結果を示す。

図 4.2.1.1-27 (1)の明視野及び STEM モードの Z コントラスト、図 4.2.1.1-27 (2)の詳細観察と EDX 分析結果より、ここで観察された酸化皮膜内層は Cr リッチなスピネル構造の酸化皮膜( $Fe_xCr_yNi_zO_4$ )、酸化皮膜外層は結晶性の良い  $Fe_3O_4$  であることが判った。前項⑥の結果と比較すると、酸化皮膜内層の性状及び厚さもは概ね同等であった。一方、酸化皮膜内層の薄い箇所やポーラスな構造の箇所では酸化皮膜外層の成長が促進される傾向が認められた。

⑧試験片No. 7(ID. 6TLW1) き裂先端板厚中央

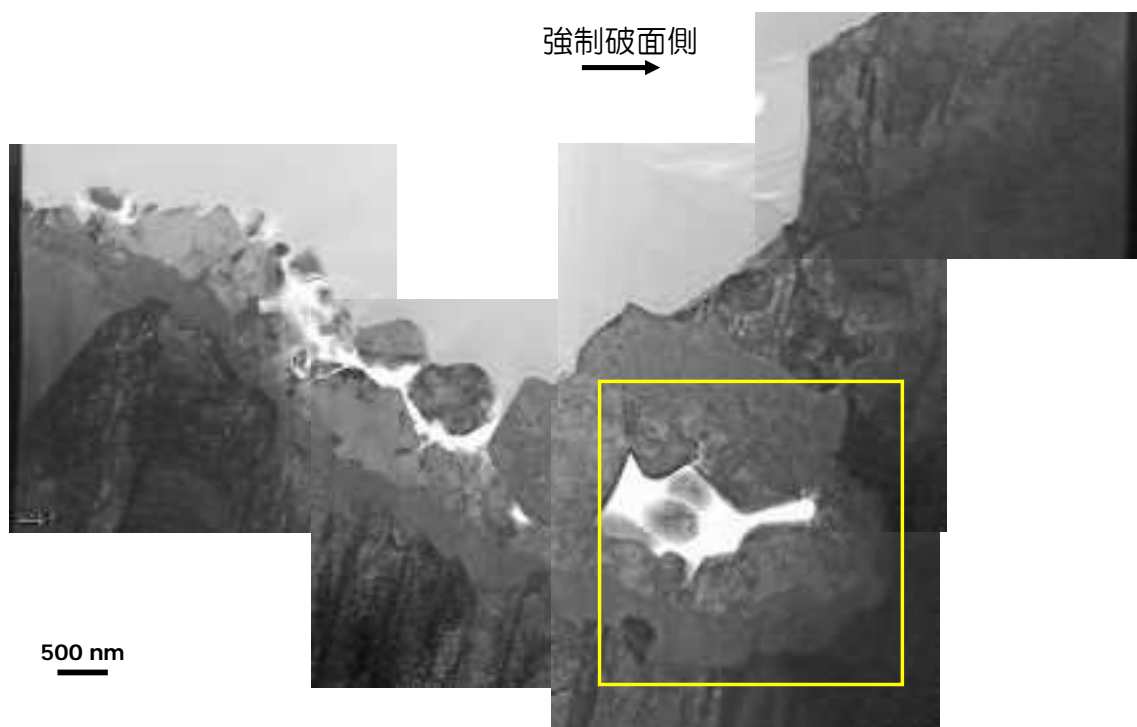
図 4.2.1.1-28 は、オートクレーブ内に静置し(荷重負荷なし)、温度 290℃、溶存水素 100ppb の高温水に 224 時間浸漬した ID. 6TLW1 の切断片(a)を破面開放した後、き裂先端板厚中央近傍(図 2 の位置(1))から FIB でサンプリングした TEM 試験片の酸化皮膜観察結果を示す。

図 4.2.1.1-28(1)の明視野及び STEM モードの Z コントラストより、酸化皮膜層は離散的に形成していることがわかる。また図 4.2.1.1-28 (2)の(c)は酸化皮膜の形成が認められた箇所を詳細観察した結果であるが、制限視野回折と EDX 分析の結果よりこの酸化皮膜内層は Cr リッチなスピネル構造の酸化皮膜( $Fe_xCr_yNi_zO_4$ )、酸化皮膜外層は結晶性の良い  $Fe_3O_4$  であり、荷重付与のケースと概ね同等であった。この結果より、荷重負荷した場合に比べて荷重負荷がない場合の方が酸化皮膜形成は抑制され、形成しても局所的となることが判った。この結果は溶存酸素 2ppm の結果(前項⑧)と同様の傾向であった。

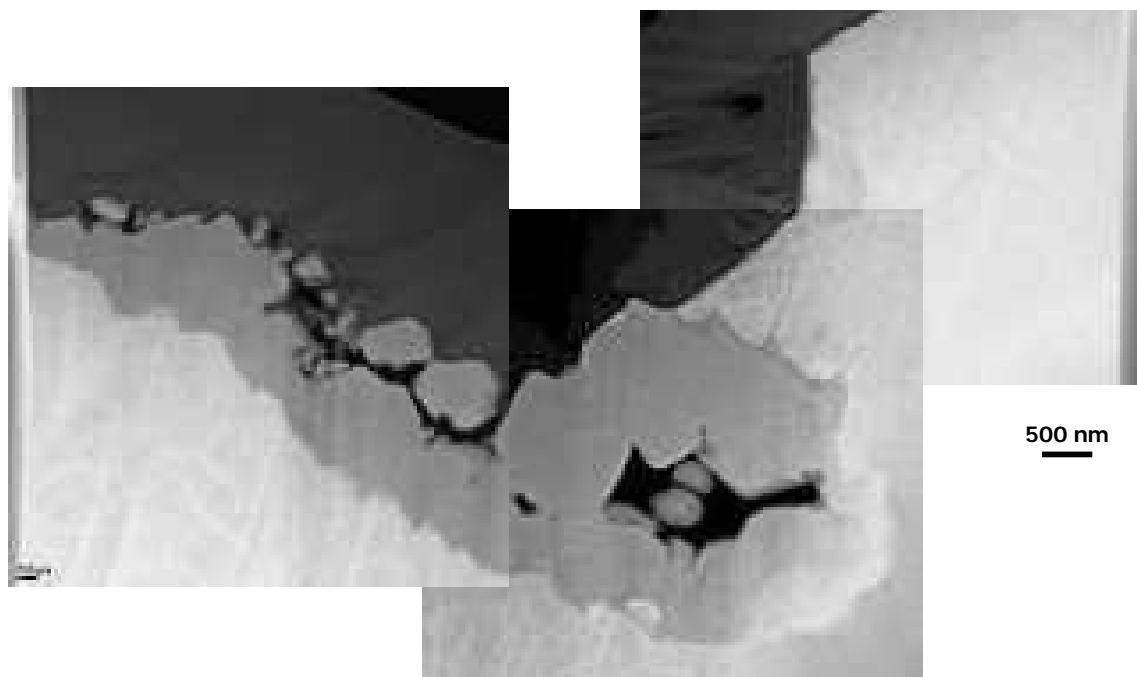
⑨試験片No. 7(ID. 6TLW6) 疲労き裂自由表面

図 4.2.1.1-29 は、疲労き裂を進展させて破面開放した CT 試験片をオートクレーブに静置し、温度 290℃、溶存水素 100ppb の高温水に 224 時間浸漬した ID. 6TLW6 の疲労き裂表面(自由表面)から FIB でサンプリングした TEM 試験片の酸化皮膜観察結果を示す。この試験片のデータは、疲労破面上に形成する酸化皮膜の構造及び成長に関する基本データとして活用するために取得した。

図 4.2.1.1-29(1)の明視野及び STEM モードの Z コントラスト、図 4.2.1.1-29 (2)の詳細観察と EDX 分析結果より、内層は Cr リッチな(Fe,Cr,Ni)<sub>3</sub>O<sub>4</sub> スピネル構造、外層は Fe を主とし、微量の Ni を含んだ結晶性の良い Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 構造の酸化皮膜であることが判った。酸化皮膜内層は、酸素濃度 2ppm の場合(前項⑤)と比較して、厚い箇所と薄い箇所が混在して形成していた。この結果は、酸化種が少ないために酸化皮膜の形成、成長が抑制されていたことを示唆するものと考えられる。



(a) 明視野像



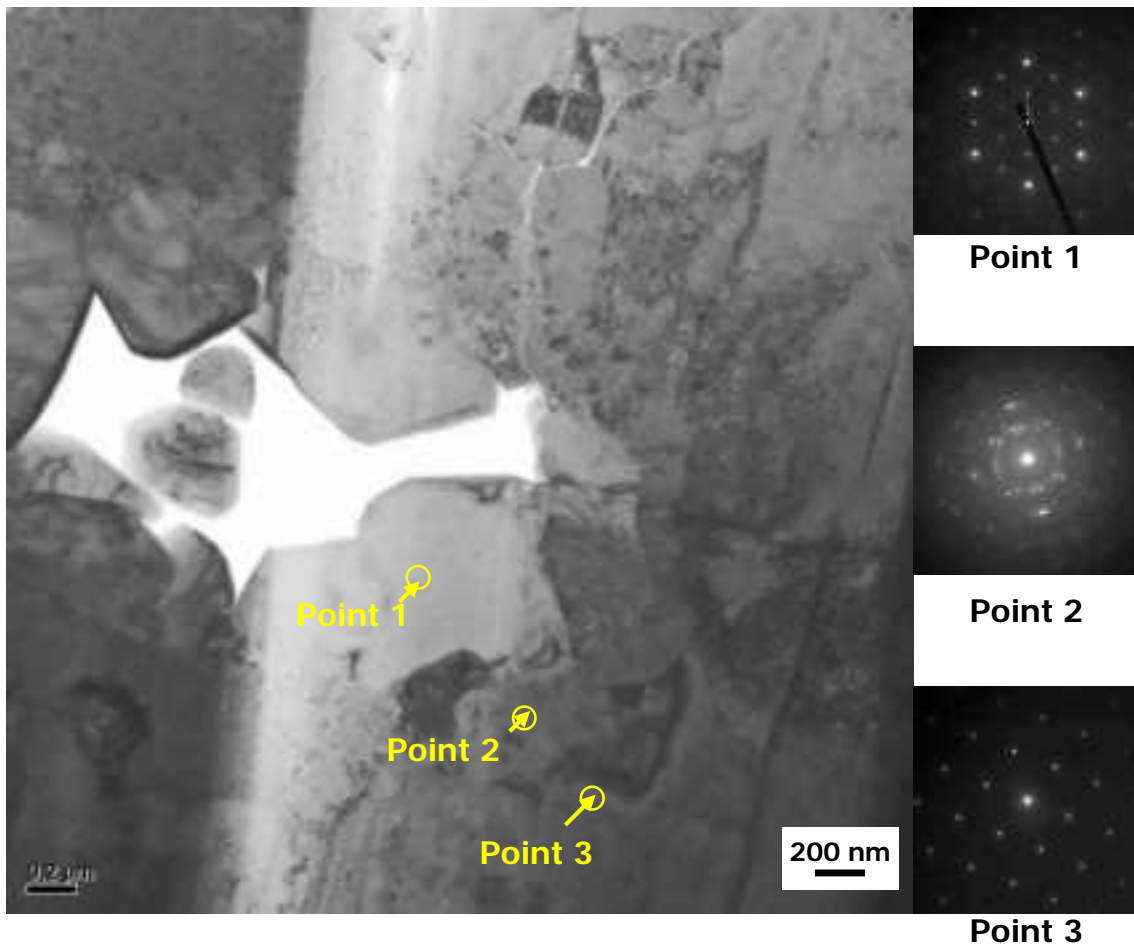
(b) STEM モードでの Z コントラスト像

図 4.2.1.1-21(1) CT 試験片板厚中央き裂先端近傍の酸化皮膜の TEM 観察結果

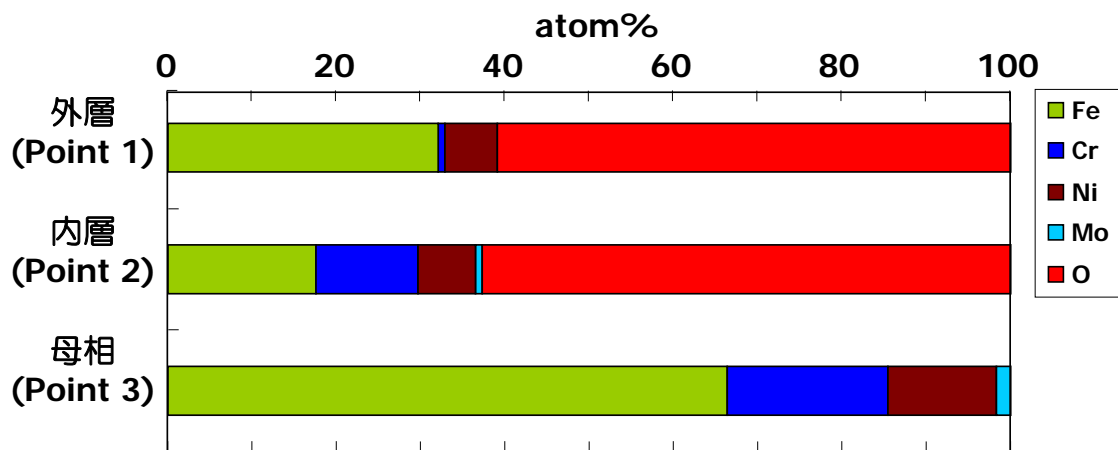
試験片 No. 1 ID. 6TS2

荷重負荷あり(K 値  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存酸素 2ppm)

黄色枠：高倍率での詳細観察箇所

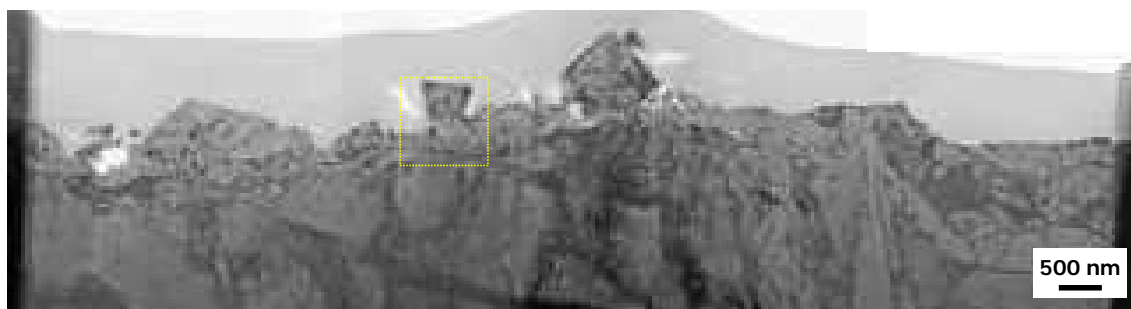


(c) 図(a)黄色枠部詳細観察(明視野像)

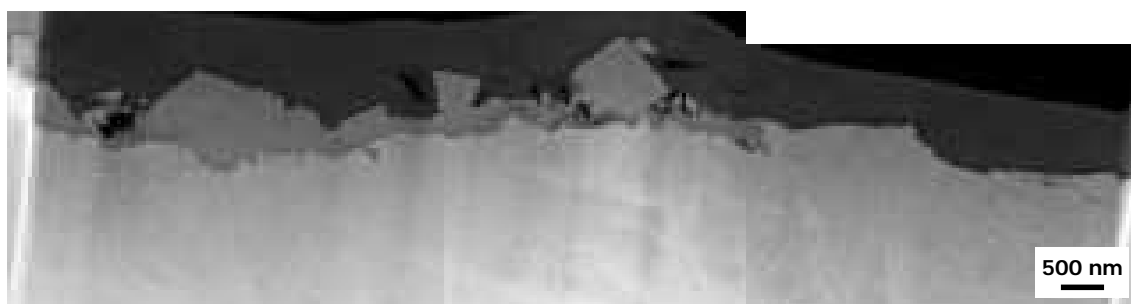


(d)EDX 分析結果(原子%)

図 4.2.1.1-21(2) CT 試験片板厚中央き裂先端近傍の酸化皮膜の TEM 観察結果(つづき)  
(試験片 No. 1 ID. 6TS2)



(a) 明視野像



(b) STEM モードでの Z コントラスト像

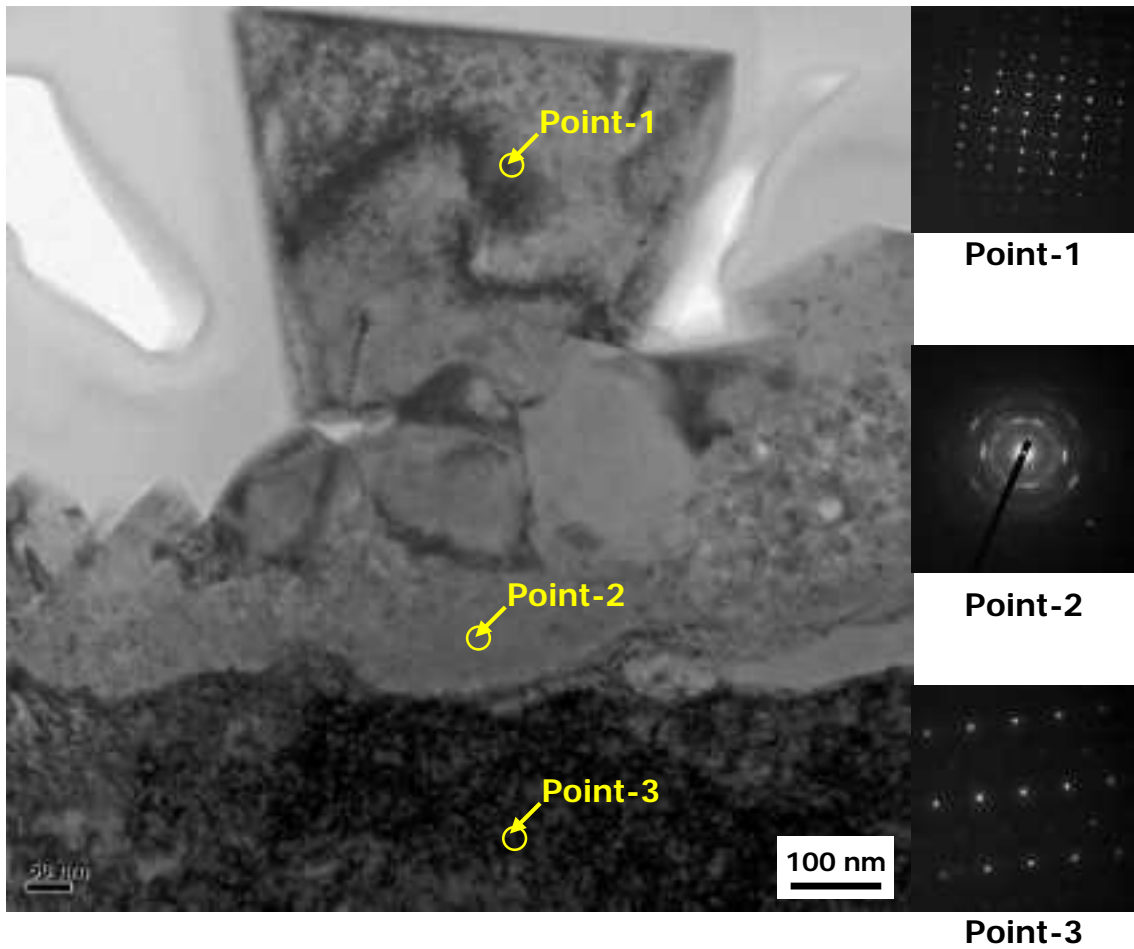
図 4.2.1.1-22(1) CT 試験片サイドグループ近傍き裂先端近傍の酸化皮膜の TEM 観察結果

試験片 No. 1 ID. 6TS2

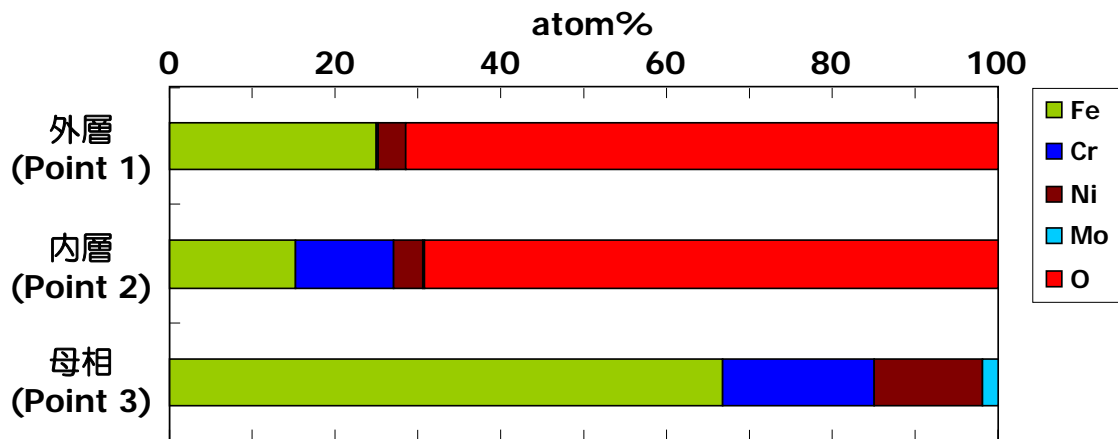
荷重負荷あり(K 値  $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存酸素 2ppm 浸漬時間 224h

黄色枠：高倍率での詳細観察箇所





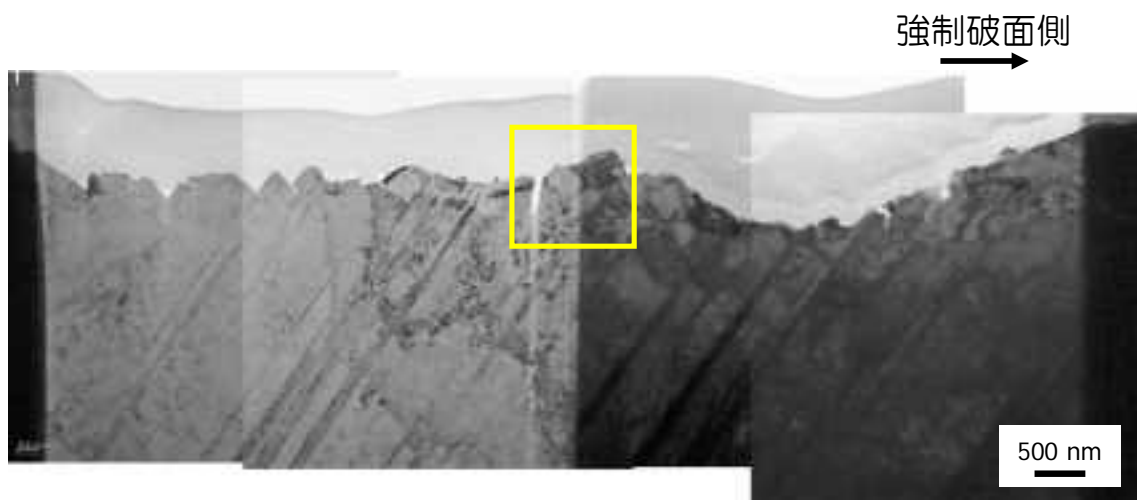
(c) 図(a)黄色枠部詳細観察(明視野像)



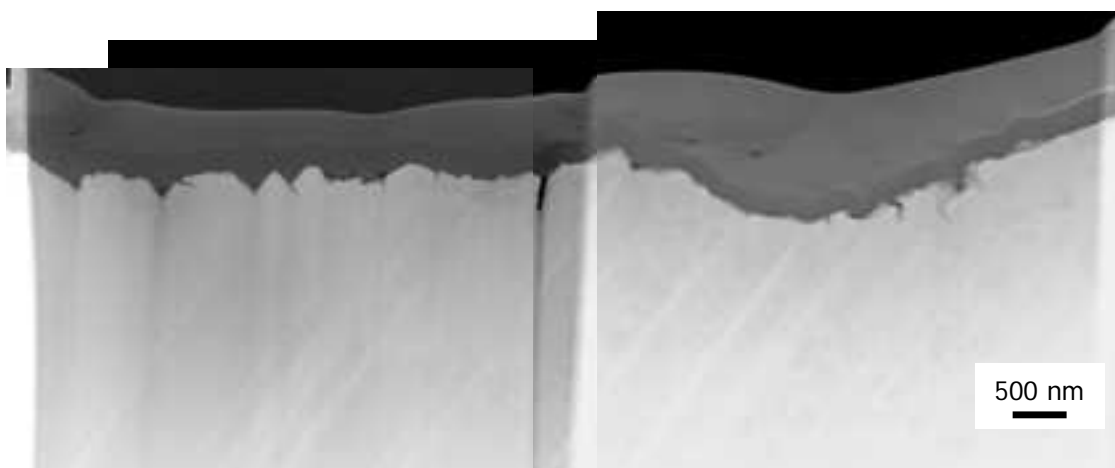
(d)EDX 分析結果(原子%)

図 4.2.1.1-22(2) CT 試験片サイドグループ近傍き裂先端近傍の酸化皮膜の TEM 観察結果 (つづき)

(試験片 No. 1 ID. 6TS2)



(a) 明視野像



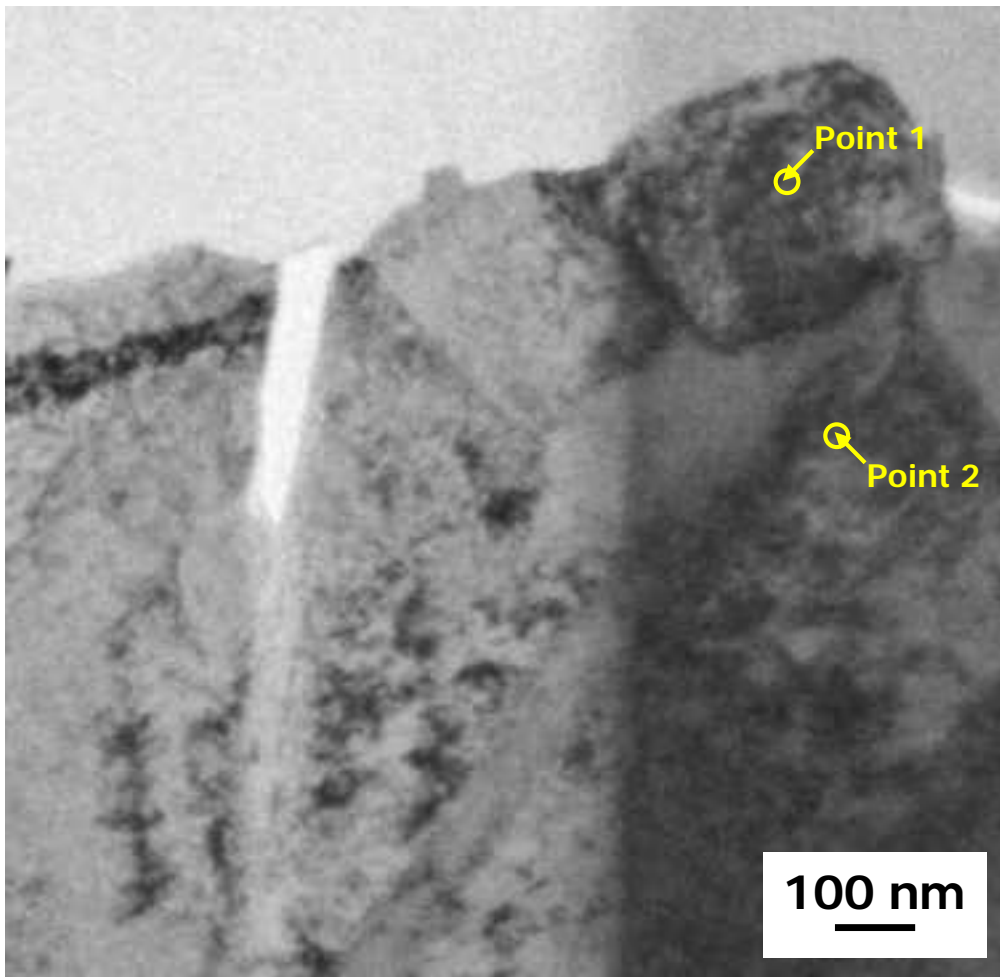
(b) STEM モードでの Z コントラスト像

図 4.2.1.1-23(1) CT 試験片板厚中央き裂先端近傍の酸化皮膜の TEM 観察結果

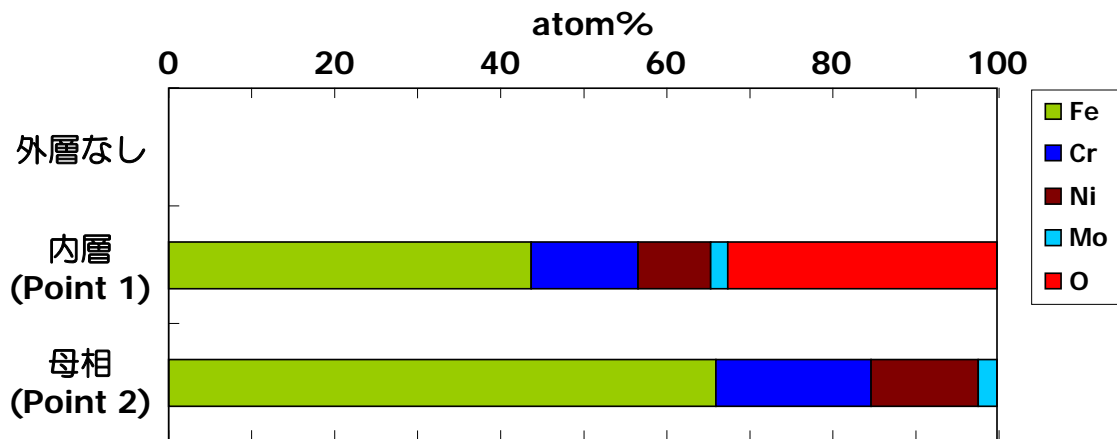
試験片 No. 2 ID. 6LWA

荷重負荷なし(オートクレーブ静置) 溶存酸素 2ppm 浸漬時間 224h

黄色枠：高倍率での詳細観察箇所



(c) 図(a)黄色枠部詳細観察(明視野像)

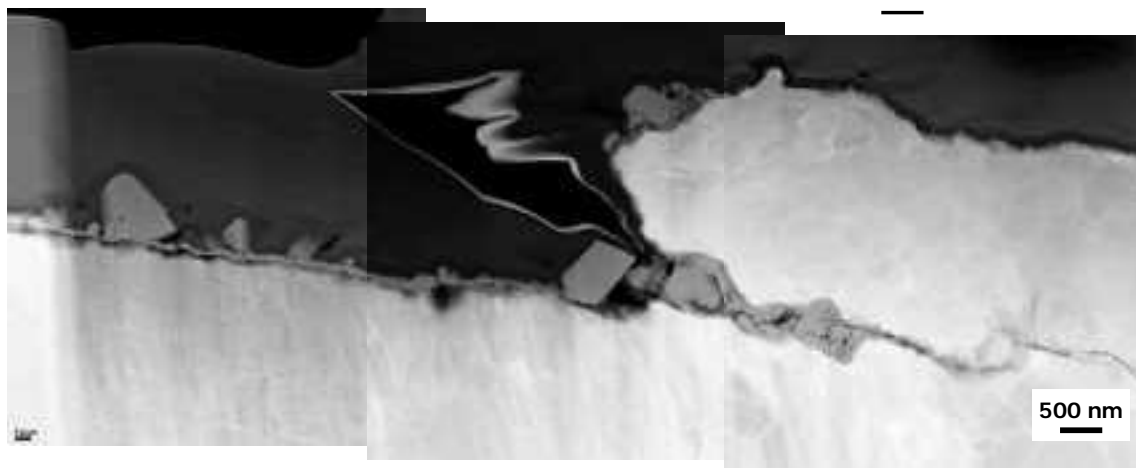


(d)EDX 分析結果(原子%)

図 4.2.1.1-23(2) CT 試験片板厚中央き裂先端近傍の酸化皮膜の TEM 観察結果(つづき)  
(試験片 No. 2 ID. 6LWA)



(a) 明視野像



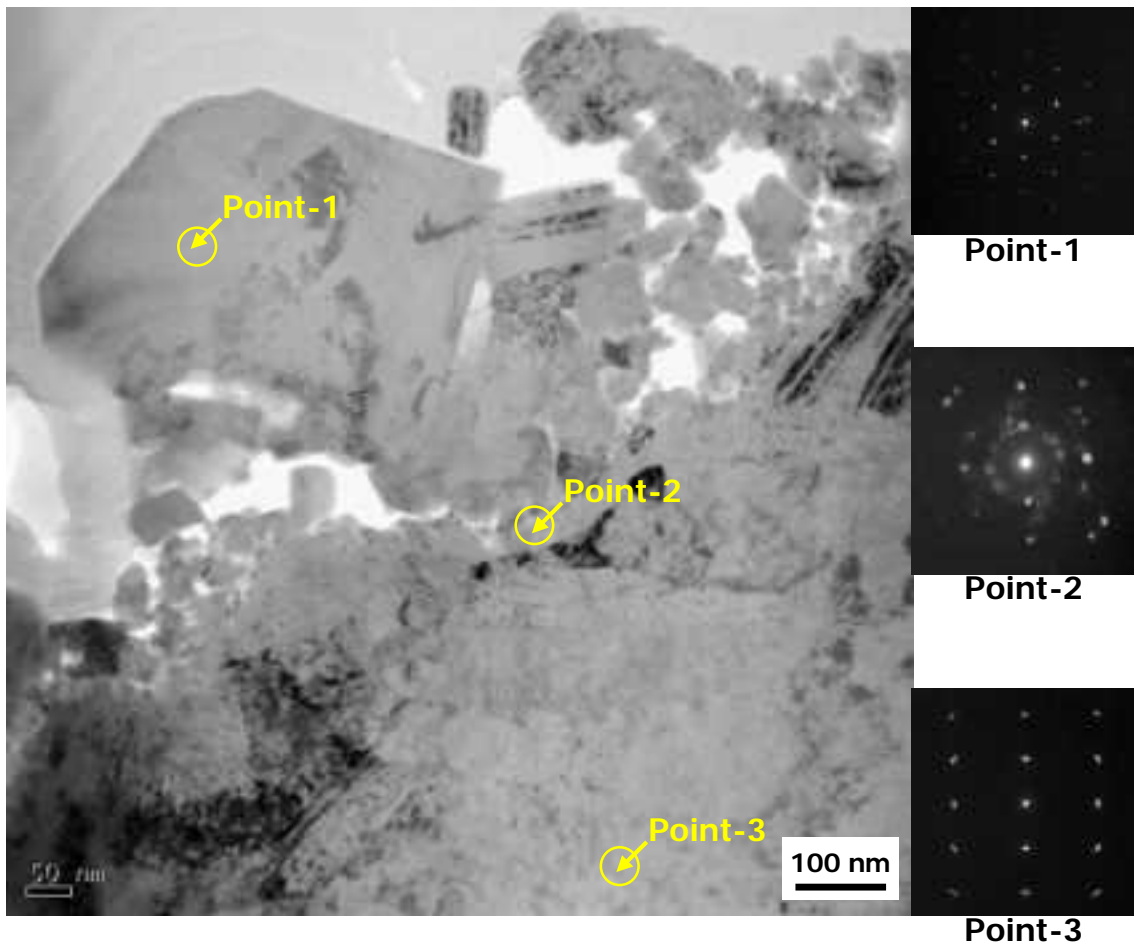
(b) STEM モードでの Z コントラスト像

図 4.2.1.1-24(1) CT 試験片サイドグループ近傍き裂先端近傍の酸化皮膜の TEM 観察結果

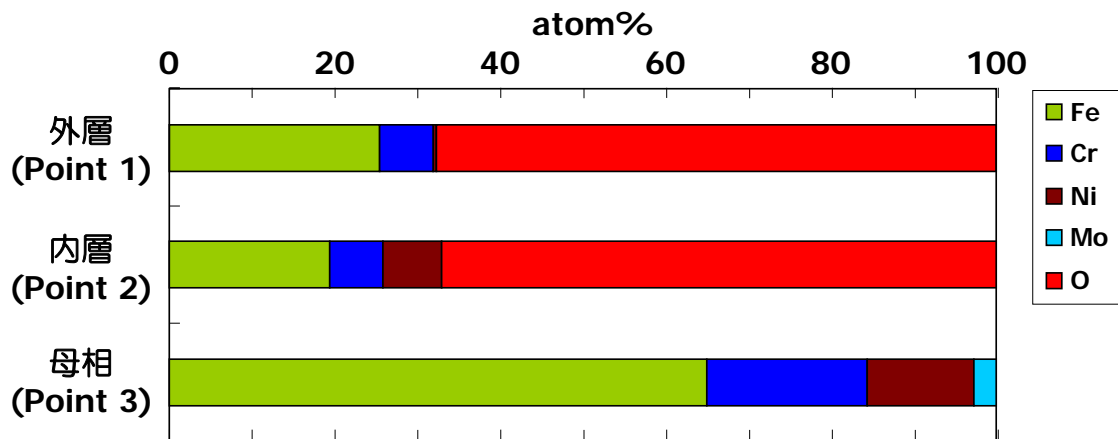
試験片 No. 3 ID. V6L5

荷重負荷あり(K 値  $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存酸素 2ppm 浸漬時間 224h

黄色枠：高倍率での詳細観察箇所



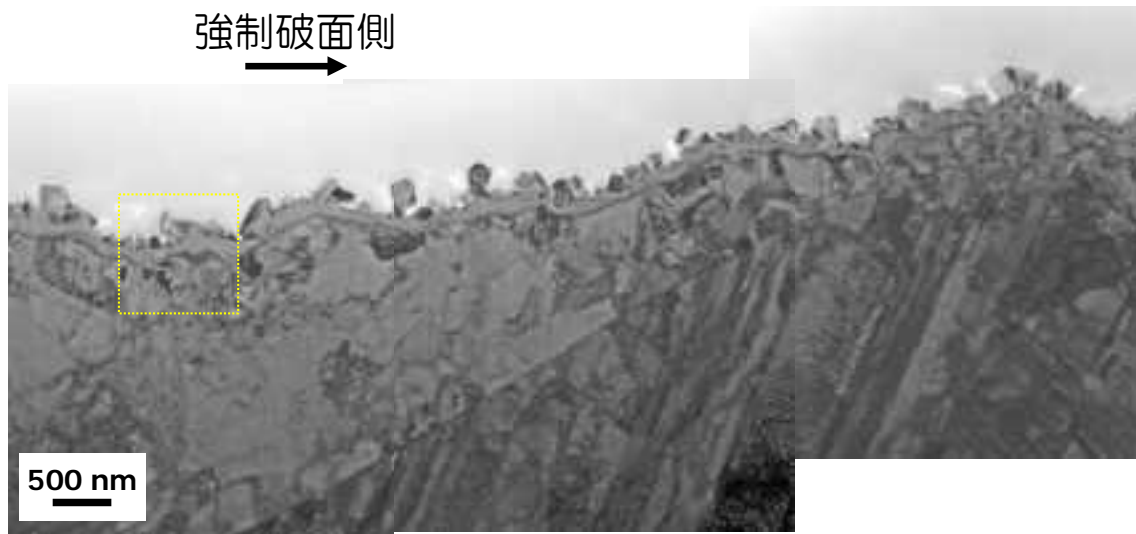
(c) 図(a)黄色枠部詳細観察(明視野像)



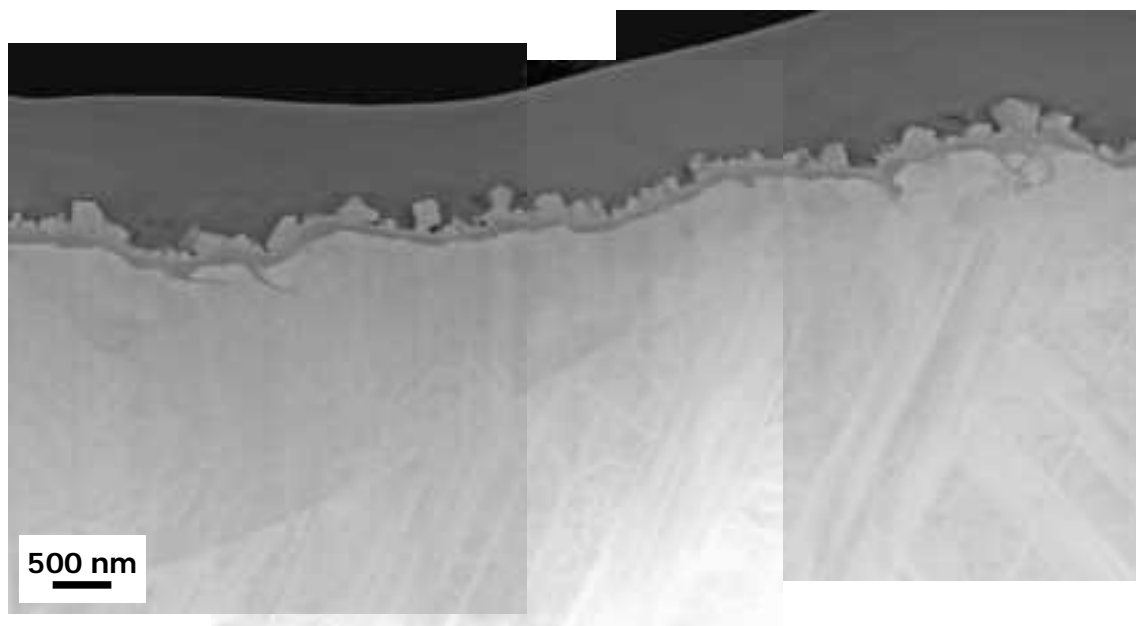
(d)EDX 分析結果(原子%)

図 4.2.1.1-24(2) CT 試験片サイドグループ近傍き裂先端近傍の酸化皮膜の TEM 観察結果 (つづき)

(試験片 No. 3 ID. V6L5)



(a) 明視野像



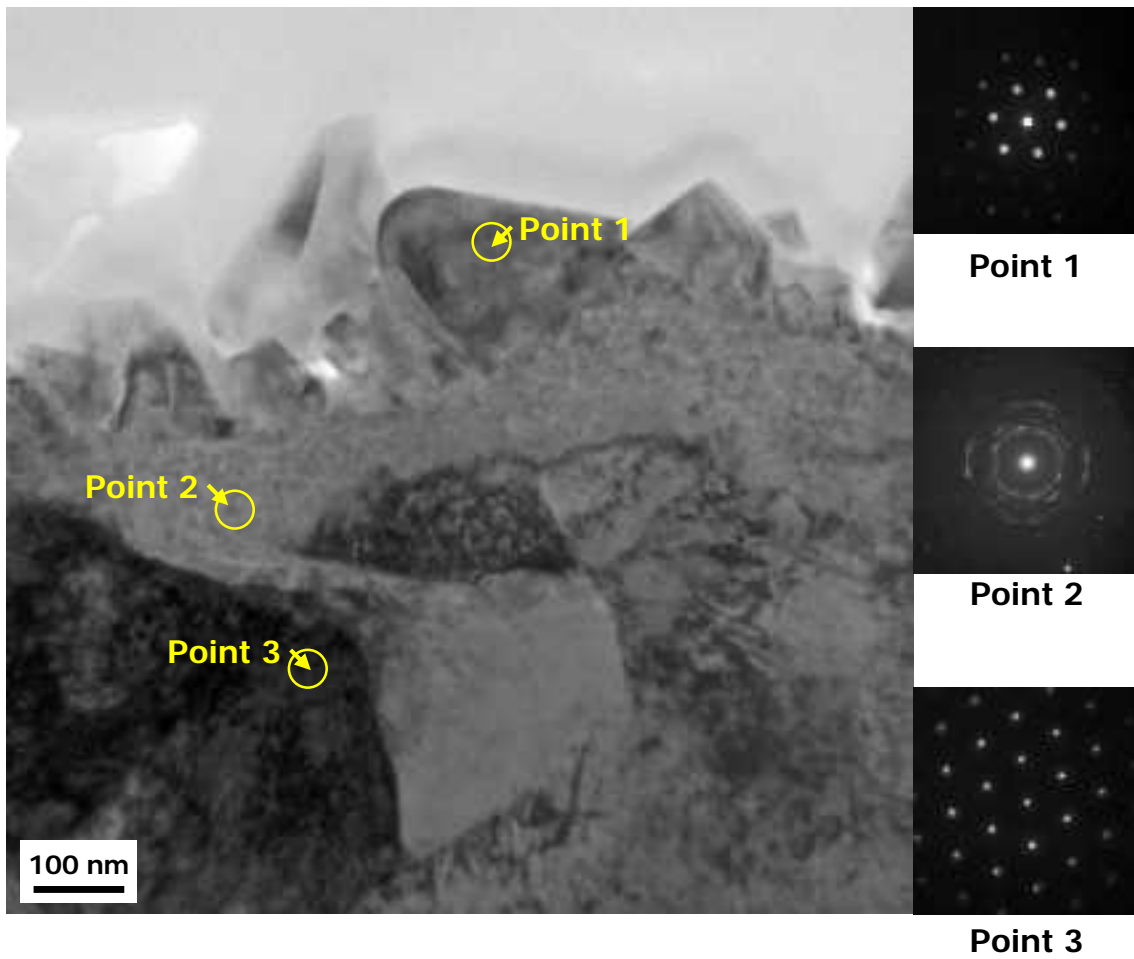
(b) STEM モードでの Z コントラスト像

図 4.2.1.1-25(1) 破面解放した CT 試験片疲労き裂表面(自由表面)に形成した酸化皮膜の TEM 観察結果

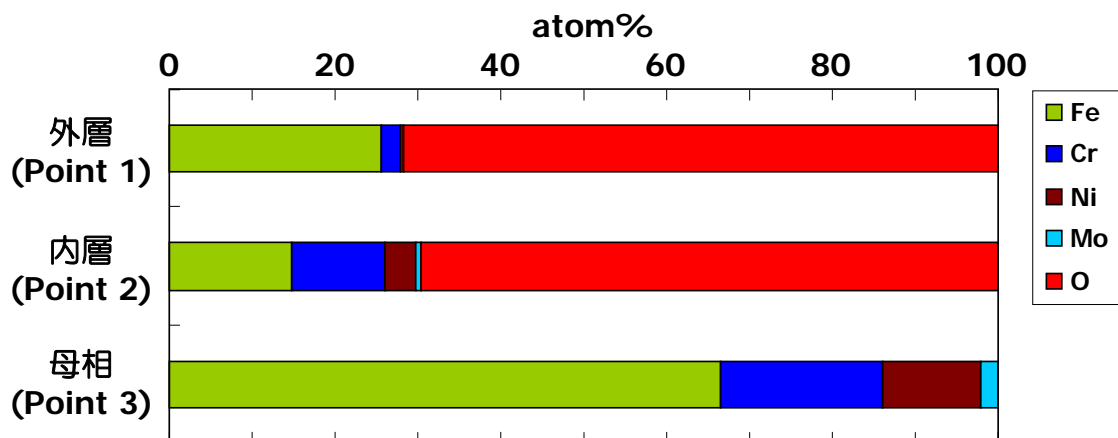
試験片 No. 4 ID. V6L4

オートクレーブ内静置 溶存酸素 2ppm 浸漬時間 224h

黄色枠：高倍率での詳細観察箇所

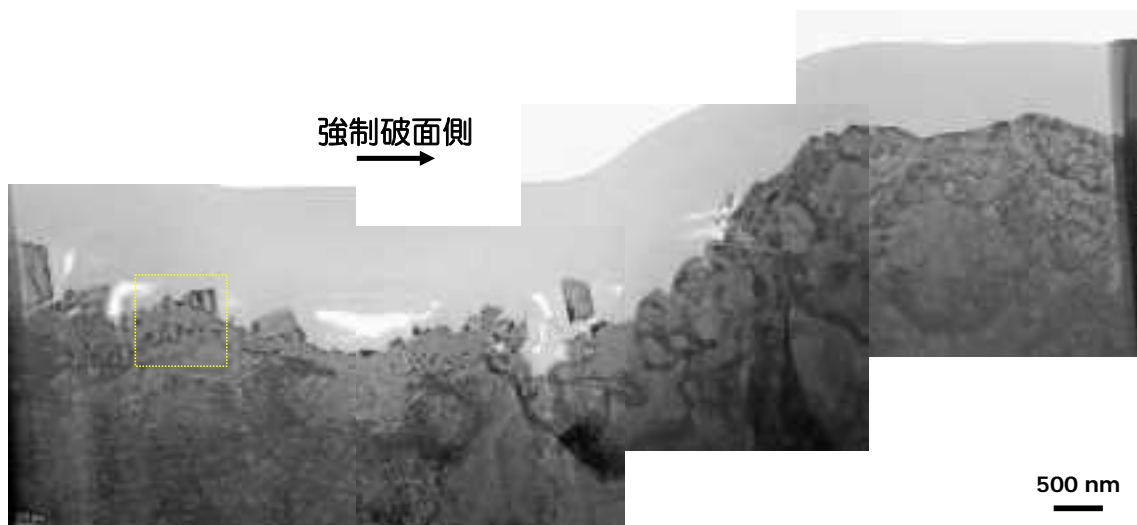


(c) 図(a)黄色枠部詳細観察(明視野像)

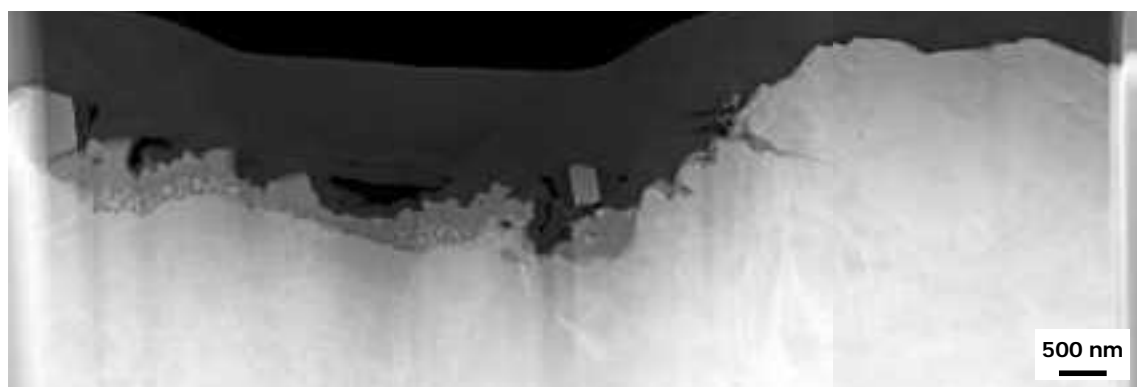


(d)EDX 分析結果(原子%)

図 4.2.1.1-25(2) 破面解放した CT 試験片疲労き裂表面(自由表面)に形成した酸化皮膜の TEM 観察結果(つづき)  
(試験片 No. 4 ID. V6L4)



(a) 明視野像



(b) STEM モードでの Z コントラスト像

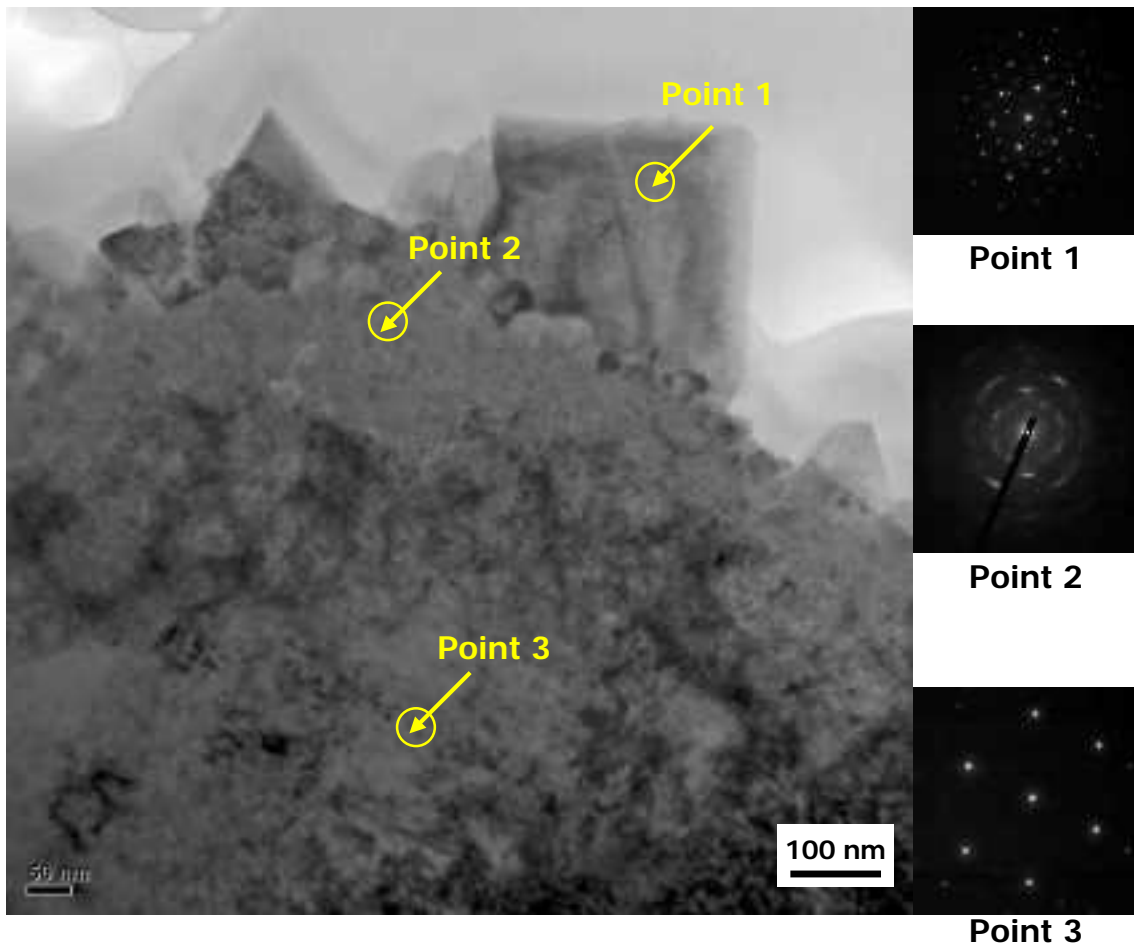
図 4.2.1.1-26(1) CT 試験片板厚中央き裂先端近傍の酸化皮膜の TEM 観察結果

試験片 No. 5 ID. 6TS3

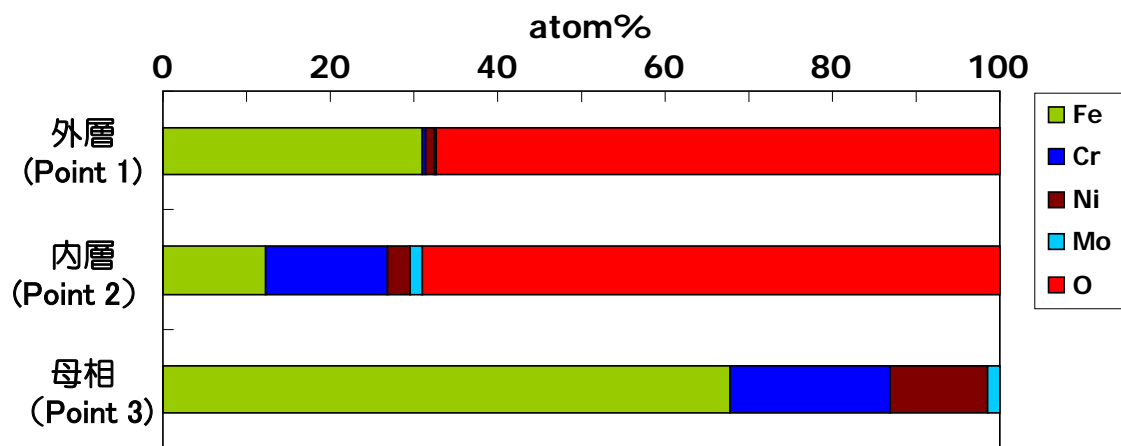
荷重負荷あり (K 値  $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存水素 100ppb)

黄色枠：高倍率での詳細観察箇所



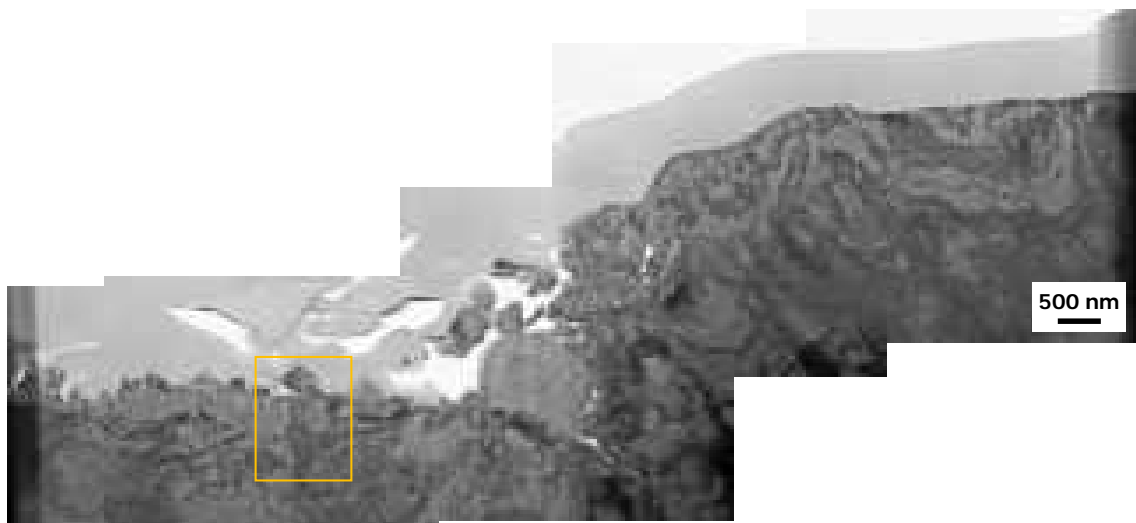


(c) 図(a)黄色枠部詳細観察(明視野像)



(d)EDX 分析結果(原子%)

図 4.2.1.1-26 (2) CT 試験片板厚中央き裂先端近傍の酸化皮膜の TEM 観察結果(つづき)  
(試験片 No. 5 ID. 6TS3)



(a) 明視野像



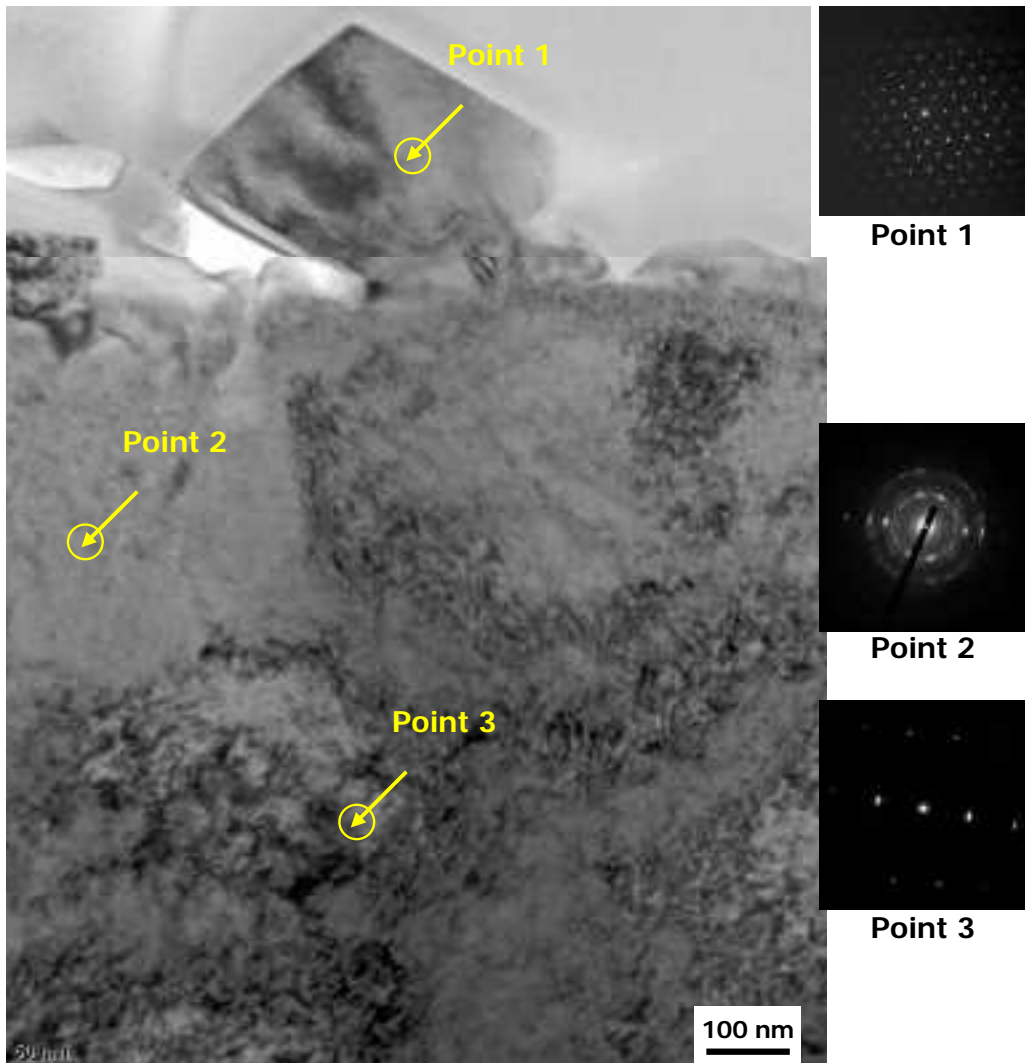
(b) STEM モードでの Z コントラスト像

図 4.2.1.1-27(1) CT 試験片サイドグループ近傍き裂先端近傍の酸化皮膜の TEM 観察結果

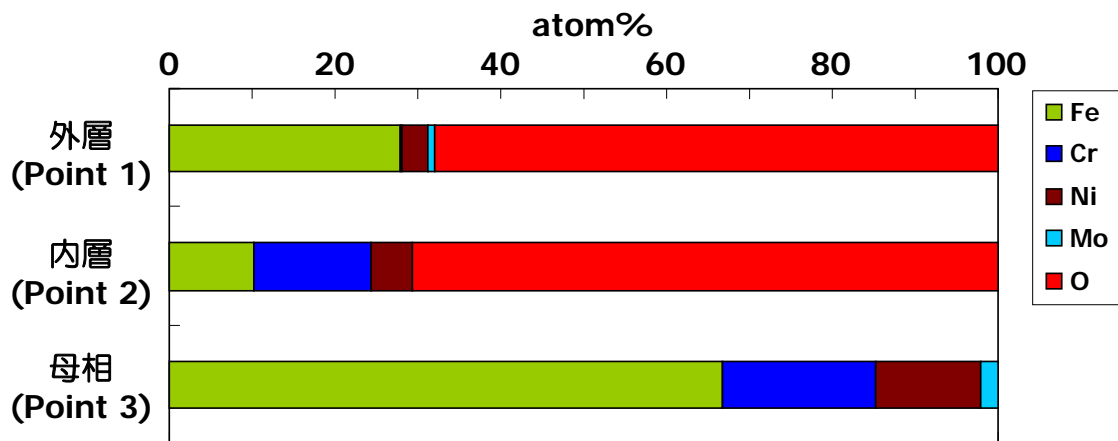
試験片 No. 5 ID. 6TS3

荷重負荷あり(K 値  $30 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当) 溶存水素 100ppb 浸漬時間 224h

黄色枠：高倍率での詳細観察箇所



(c) 図(a)黄色枠部詳細観察(明視野像)



(d)EDX 分析結果(原子%)

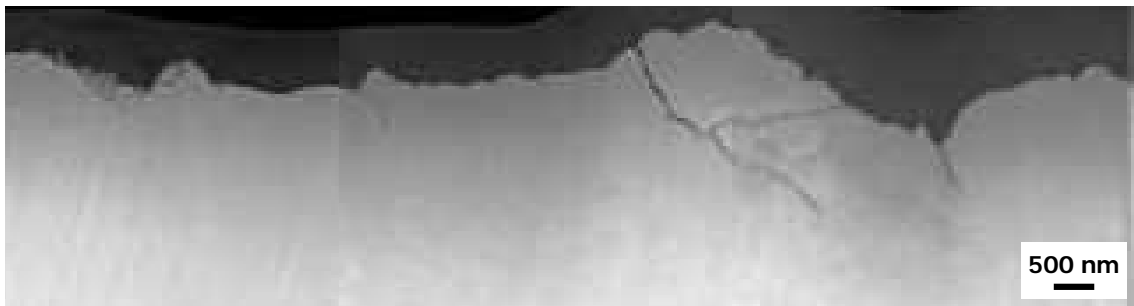
図 4.2.1.1-27 (2) CT 試験片サイドグループ近傍き裂先端近傍の酸化皮膜の TEM 観察結果(つづき)

(試験片 No. 5 ID. 6TS3)

強制破面側  
→



(a) 明視野像



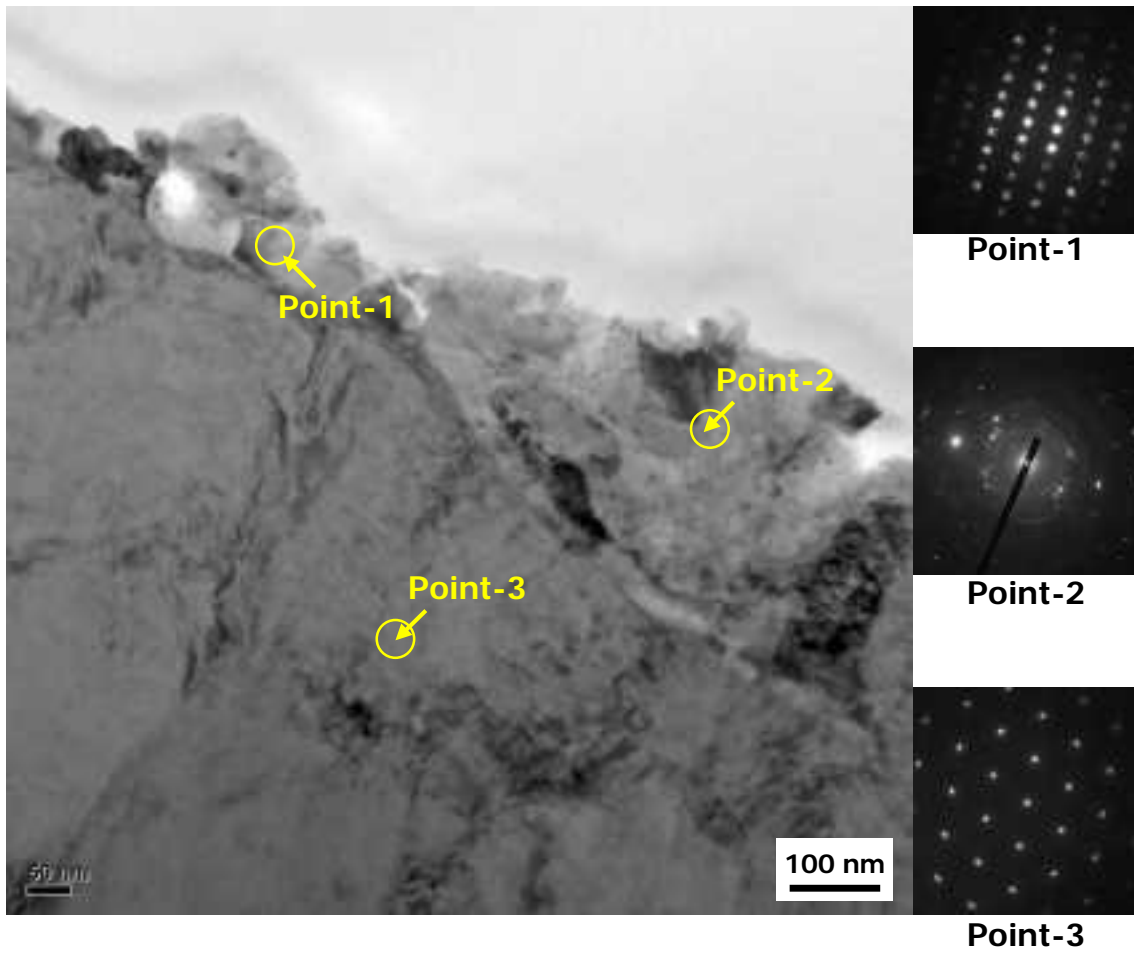
(b) STEM モードでの Z コントラスト像

図 4.2.1.1-28(1) CT 試験片板厚中央き裂先端近傍の酸化皮膜の TEM 観察結果

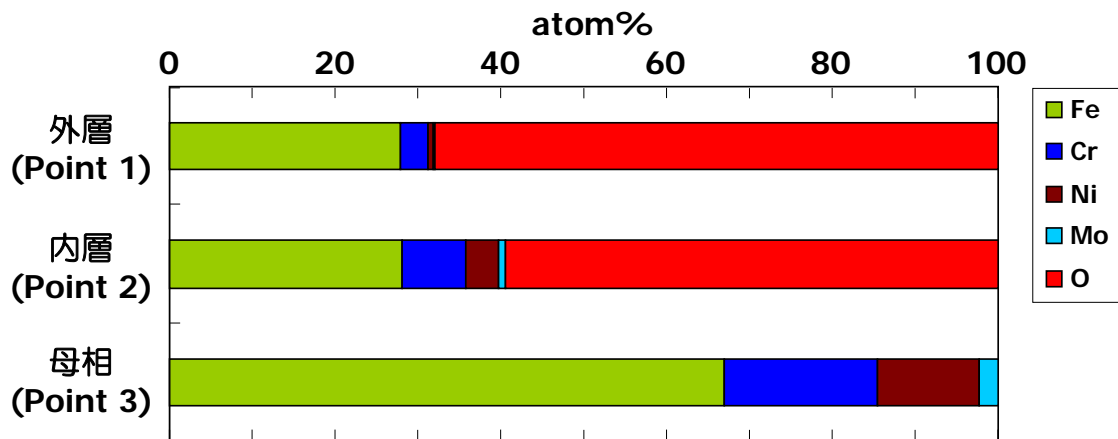
試験片 No. 6 ID. 6TLW1

荷重負荷なし(オートクレーブ内静置) 溶存水素 100ppb)

黄色枠：高倍率での詳細観察箇所

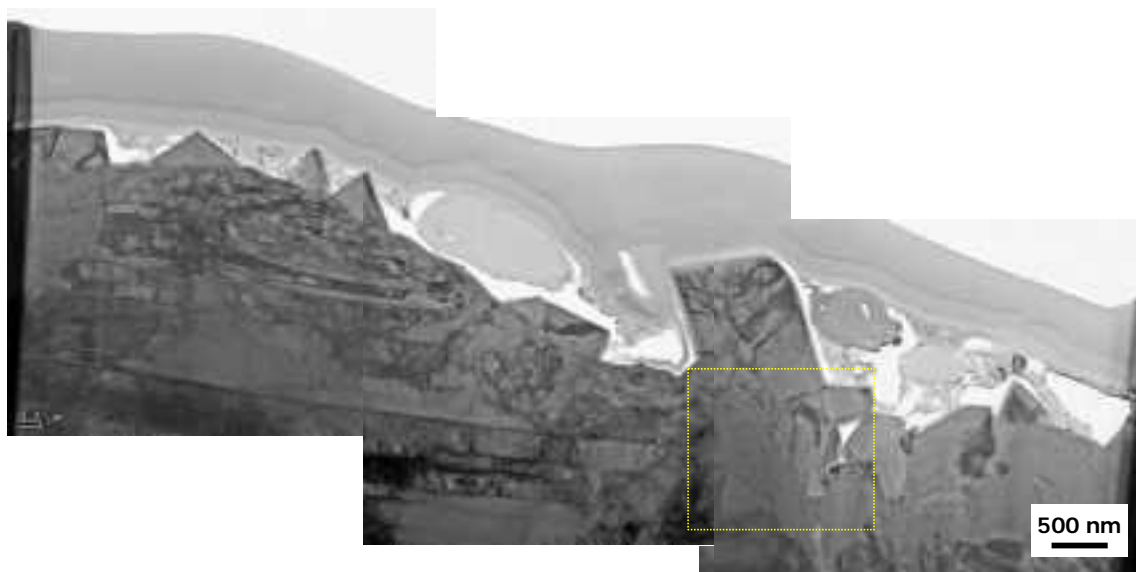


(c) 図(a)黄色枠部詳細観察(明視野像)



(d)EDX 分析結果(原子%)

図 4.2.1.1-28(2) CT 試験片板厚中央き裂先端近傍の酸化皮膜の TEM 観察結果(つづき)  
(試験片 No. 6 ID. 6TLW1)

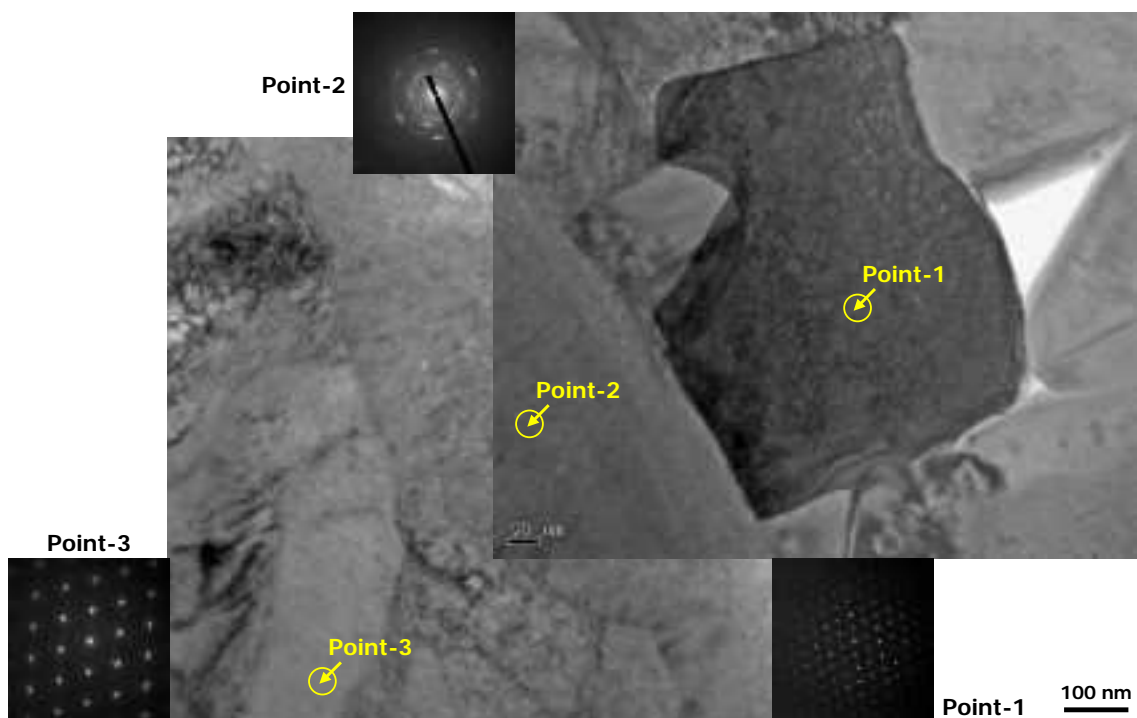


(a) 明視野像

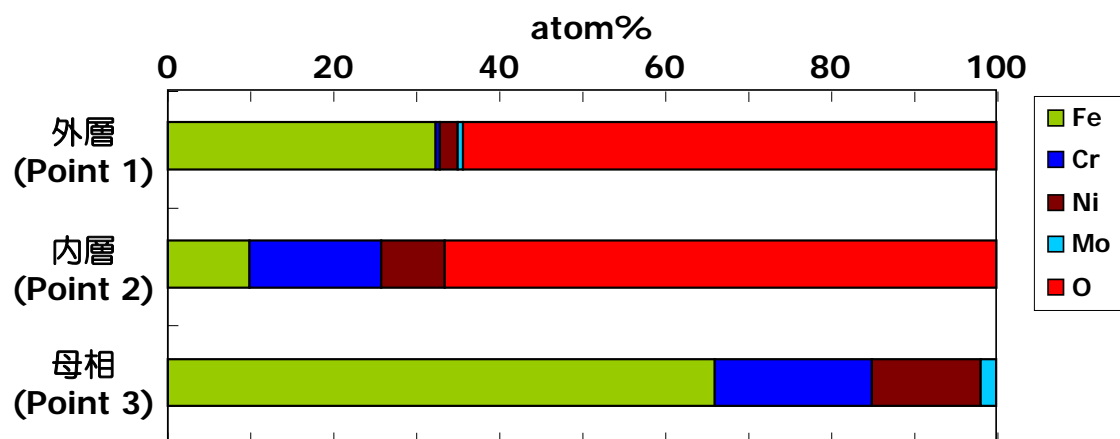


(b) STEM モードでの Z コントラスト像

図 4.2.1.1-29(1) 破面解放した CT 試験片疲労き裂表面(自由表面)に形成した  
酸化皮膜の TEM 観察結果  
試験片 No. 7 ID. 6TLW6  
オートクレーブ内静置 溶存水素 100ppb 浸漬時間 224h  
黄色枠：高倍率での詳細観察箇所



(c) 図(a)黄色枠部詳細観察(明視野像)



(d)EDX 分析結果(原子%)

図 4.2.1.1-29(2) 破面解放した CT 試験片疲労き裂表面(自由表面)に形成した酸化皮膜の TEM 観察結果(つづき)  
(試験片 No. 7 ID. 6TLW6)

e. 今年度成果のまとめ

・断面 SEM 観察

荷重負荷した CT 試験片の疲労き裂に形成した酸化皮膜は、溶存酸素 2ppm と溶存水素 100ppb とともに、疲労き裂の先端まで 2 層の酸化皮膜層が形成し、EDX のライン分析の結果に大きな差異はみられなかった。一方荷重負荷なしのケースでは疲労き裂内部の酸化皮膜形成は離散的であった。

・破面 SEM 観察

荷重負荷した CT 試験片の疲労き裂表面の酸化物は、疲労き裂先端よりも開口側の方の粒が大きく、且つ、数量が多くなっていたが、環境の違いによる明瞭な差異はみられなかった。また荷重負荷なしのケースでは、酸化皮膜形成は離散的かつ粒の成長が抑制されていた。

・TEM 観察

荷重負荷した CT 試験片の疲労き裂表面に形成した酸化皮膜は、高温水の溶存酸素、溶存水素の相違に関わらず、いずれも  $(\text{Fe}_x\text{Cr}_y\text{Ni}_z)_3\text{O}_4$  のスピネル構造を有する酸化皮膜内層と、結晶性の良い  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  で構成する酸化皮膜外層で構成されていた。また溶存酸素、溶存水素濃度の相違が酸化皮膜内層に含まれる Fe、Cr、Ni の比率に影響することが示唆された。さらに溶存酸素 2ppm の条件下では酸化皮膜内層は比較的厚く形成するのに対し、溶存水素 100ppb 条件では酸化皮膜内層の形成、成長が抑制され、その上部に酸化皮膜外層が成長することが判った。

f. これまでの結果のまとめと評価

①経緯と全体試験マトリクス

照射下き裂進展試験の実施とその結果の評価においては、CT 試験片のき裂内(すき間)環境における放射線分解水質を考慮する必要があると思われる。一方で、すき間環境の評価は電気化学的な手法(計算コード)による検討が主であり、ECP センサー使った検証は技術的に容易でない。

そこで、「CT 試験片のき裂内皮膜分析」では、き裂内に形成した酸化皮膜の性状や形成挙動の観察を通して間接的にき裂内の水質の検証やき裂先端の応力集中と酸化の関係評価に資することを目的として、平成 25 年度より、非照射高温水環境における基礎データ収集を順次実施してきた。これまでに実施してきた試験項目を年度別に表 4.2.1.1-3 に示す。また試験マトリクスと個々の条件に対する着眼点を表 4.2.1.1-4 に示す。

試験マトリクスは、20%冷間圧延加工した SUS316L の 0.5T-CT 試験片を用いた浸漬試験を軸に構成した。その理由として、以下が挙げられる。

- ・0.2%耐力(硬さ)の上昇によるき裂先端酸化挙動の検証とき裂進展促進への影響評価に資するデータ取得すること
- ・き裂先端の平面ひずみ、小規模降伏条件を維持できる(K 値有効範囲)を広く設定でき



ること

また一部の試験条件では溶体化 SUS316L の 0.5T-CT 試験片も用いた。

## ②荷重負荷した疲労き裂内の皮膜形成

図 4.2.1.1-30 は、荷重負荷した CT 試験片板厚中央近傍の疲労き裂先端における酸化皮膜内層厚さの分布を示す。なお皮膜厚さデータは、TEM 写真の測定により求めた。この図より、CT 試験片の疲労き裂に形成する酸化皮膜内層は、

(a) 荷重荷重が大きくなると酸化皮膜内層の厚さは厚くなる

(b) き裂先端から約 3  $\mu\text{m}$  程度離れると応力集中の影響は見られなくなり、ほぼ同程度の厚さとなる

ことが判る。この結果より、き裂先端の応力集中によって酸化が促進されることが示唆され、一方荷重荷重の大小によって開口量(すき間のギャップ)が変化することが考えられるが、き裂先端以外での酸化皮膜形成には大きく影響しないと考えられる。

図 4.2.1.1-31 は、板厚の異なる CT 試験片に荷重負荷した時の板厚中央近傍の疲労き裂先端における酸化皮膜内層厚さの分布を示す。板厚半分の CT 試験片は、JNES IASCC 事業において高照射量用の試験片として活用された実績があり、これら既往データの検証に資するため、本事業でも板厚半分の CT 試験片の照射を計画中である。どちらの CT 試験片にも  $K$  値=30  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  相当の荷重を負荷した。この図においても、板厚半分の CT 試験片においても応力集中によるき裂先端の酸化促進が認められた。またこの結果より、応力集中のない領域での酸化皮膜内層の平均厚さは、板厚半分の CT 試験片の方が大きいことが示唆された。この相違の原因については今後も詳細に検討する必要があるが、板厚の相違がバルク水の流通に影響し、酸化挙動が変化したことが考えられる。

ここで CT 試験片の板厚中央とサイドグループ近傍における酸化皮膜内層の平均厚さに着目し、比較検討を行った。まず図 4.2.1.1-32(a)に、荷重負荷あり、なしの影響を自由表面での酸化皮膜内層厚さと比較して示す。なおここでは、上で示した皮膜厚さ分布より、き裂先端から 3  $\mu\text{m}$  以上離れた領域における皮膜厚さの平均値を用いた。この結果より、酸化皮膜内層厚さは、荷重負荷によってき裂内部がすき間となったために自由表面よりも大きくなったことが判る。加えてすき間による酸化促進は、サイドグループ近傍よりも板厚中央の方が顕著であった。一方荷重負荷なしの場合は、酸化皮膜の形成、成長はほとんど認められず、き裂内の酸化促進には荷重負荷による開口が必要であることが判った。

次に図 4.2.1.1-32(b)に、冷間加工材とミルアニール材の比較を行った結果を示す。この結果より、サイドグループ近傍では概ね同等であるのに対し、板厚中央での酸化皮膜はミルアニール材の方がやや大きく酸化が促進されていたことが判る。

続いて図 4.2.1.1-32(c)に板厚の異なる CT 試験片どうしの比較結果を示す。板厚の薄い CT 試験片のサイドグループ近傍の酸化皮膜厚さはいずれも同等であったが、板厚中央の皮膜厚さにおいて CT 試験片板厚の相違の影響が認められた。

最後に図 4.2.1.1-32(d)にバルク水の溶存酸素、溶存水素濃度の影響について比較した結果を示す。この結果においても、サイドグループ近傍の酸化皮膜はほぼ同等であったが、板厚中央における酸化皮膜成長は抑制される傾向が認められた。

以上の結果については、それぞれの条件で取得されたき裂進展速度に及ぼす影響との関連において今後も引き続き考察し、き裂進展の機構論的な検討に役立てて行く予定である。

表 4.2.1.1-3 「CT 試験片のき裂内皮膜分析」で実施してきた試験項目(年度展開)

	目的	環境	H25	H26	H27
20%冷間加工 (CW) SUS316L	き裂先端酸化皮膜形成に 及ぼす荷重影響評価	高ECP (2ppmDO)			
		低ECP (100ppbDH)			
	0.5T-CT試験片板厚中央と サイドグループ近傍の 酸化皮膜比較	高ECP (2ppmDO)			
		低ECP (100ppbDH)			
ミルアニール SUS316L	冷間加工の影響評価 (20%冷間加工材との比較)	高ECP (2ppmDO)			

表 4.2.1.1-4 「CT 試験片のき裂内皮膜分析」試験マトリクスと着眼点

供試材 (SUS316L)	CT 試験片	位置づけ	溶存酸素 2ppm	溶存水素 100ppb
冷間加工材	破面解放後 (自由表面)	・浸漬試験基礎データ	●	●
	荷重負荷あり	・き裂先端応力集中効果 ・き裂開口(すき間)効果 ・酸化皮膜形成に及ぼす CT 試験片 板厚影響	●	●
	荷重負荷なし	・き裂開口(すき間)効果	●	—
ミルアニー ル材	荷重負荷あり	・冷間加工による転位組織の酸化皮 膜形成促進の確認 (※荷重負荷条件の着眼点は、冷間加 工材と同じ)	●	—
	荷重負荷なし		●	—

凡例 ●：実施済 —：実施なし

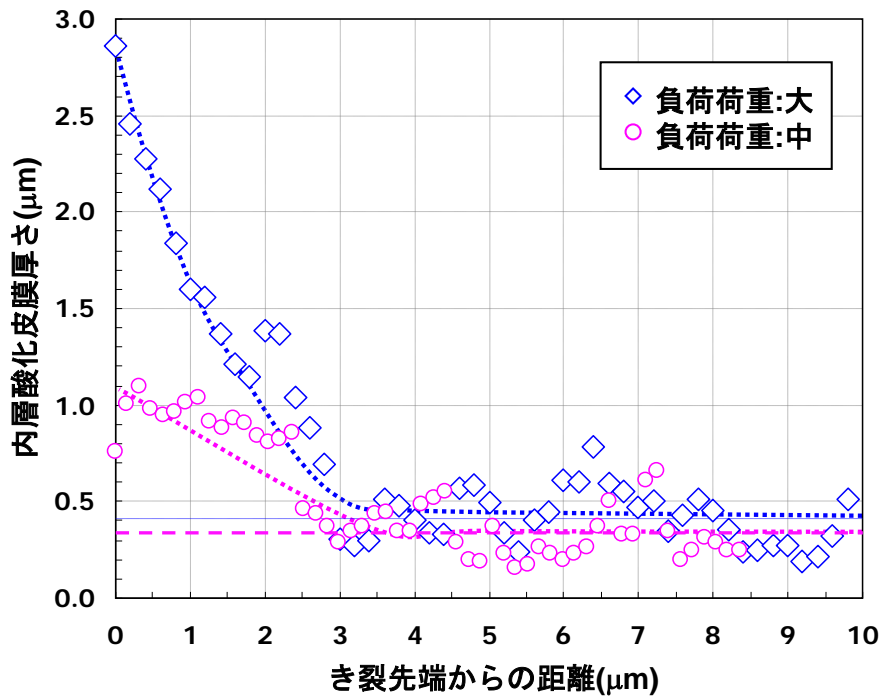


図 4.2.1.1-30 CT 試験片板厚中央近傍の疲労き裂先端近傍の酸化皮膜内層厚さ分布(1)  
 (290°C高温水浸漬 溶存酸素 2ppm 浸漬時間 224 時間)  
 (荷重負荷大: 7.2kN/K 値=30 MPa√m 相当 荷重負荷中: 5.0 kN/K 値=20 MPa√m 相当)

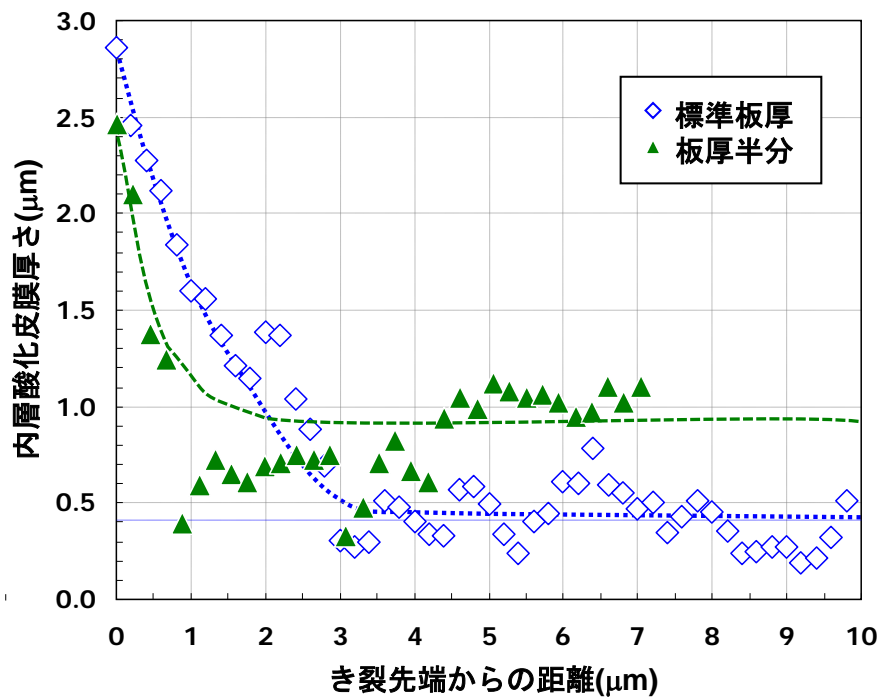


図 4.2.1.1-31 CT 試験片板厚中央近傍の疲労き裂先端近傍の酸化皮膜内層厚さ分布(2)  
 (290°C高温水浸漬 溶存酸素 2ppm 浸漬時間 224 時間)  
 (標準板厚 12.7mm とその半分の板厚の 0.5T-CT 試験片 K 値=30 MPa√m 相当)

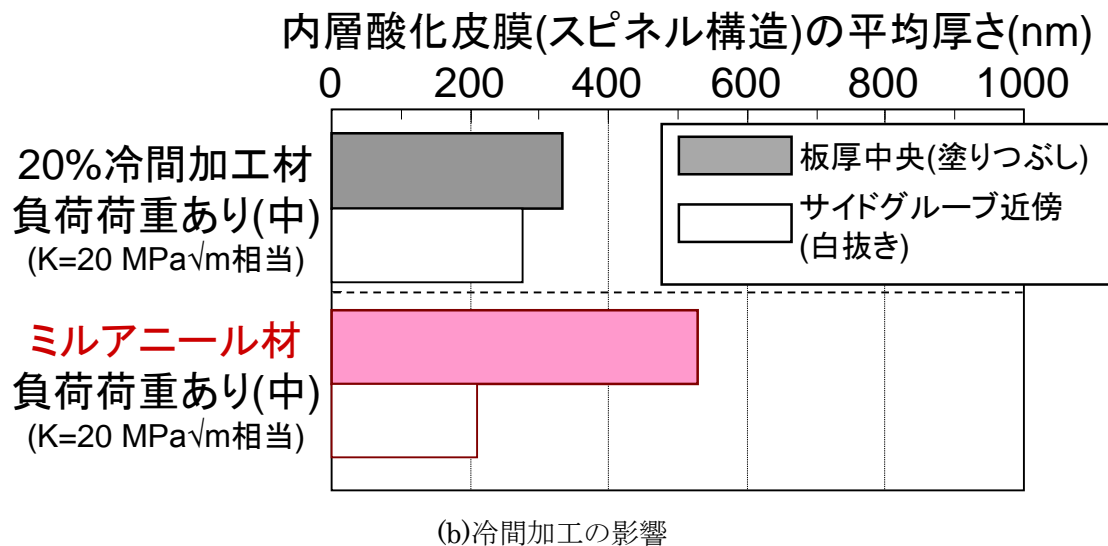
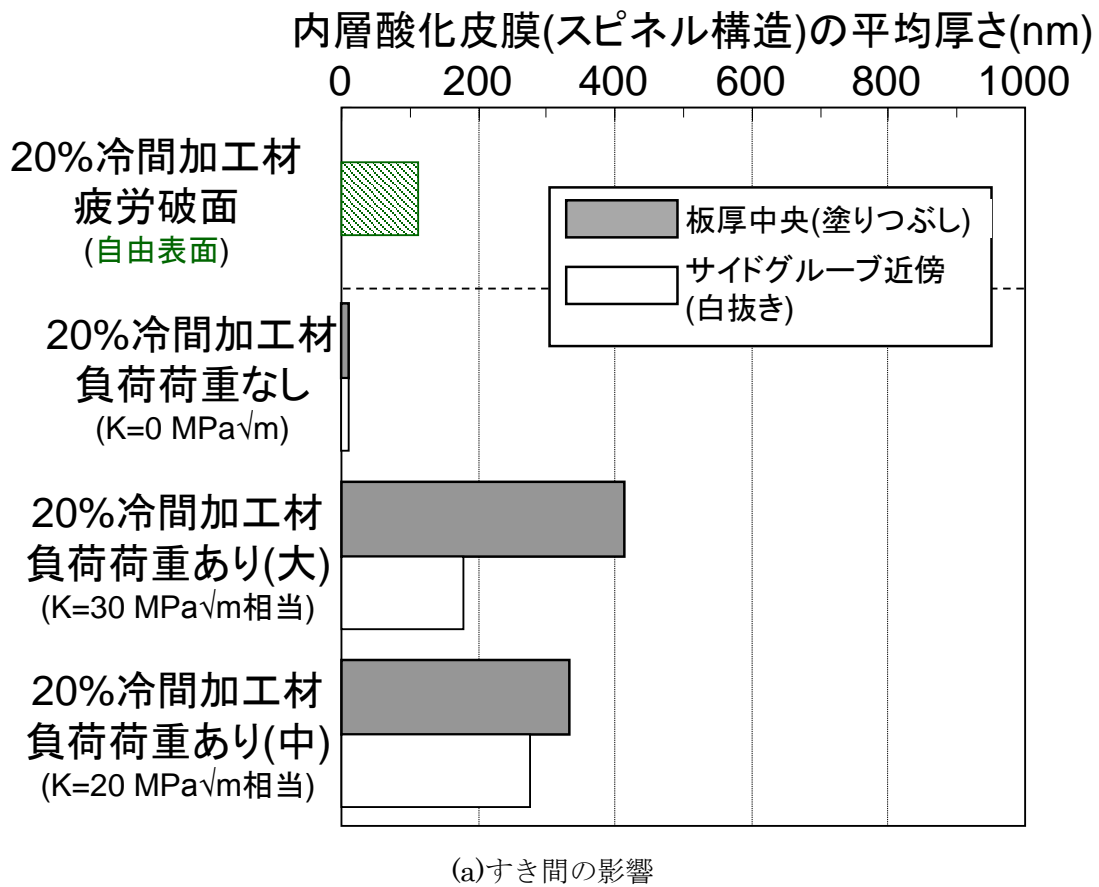


図 4.2.1.1-32(1) CT 試験片疲労き裂内の板厚中央とサイドグループ近傍に形成した酸化皮膜内層(スピネル層)厚さ比較

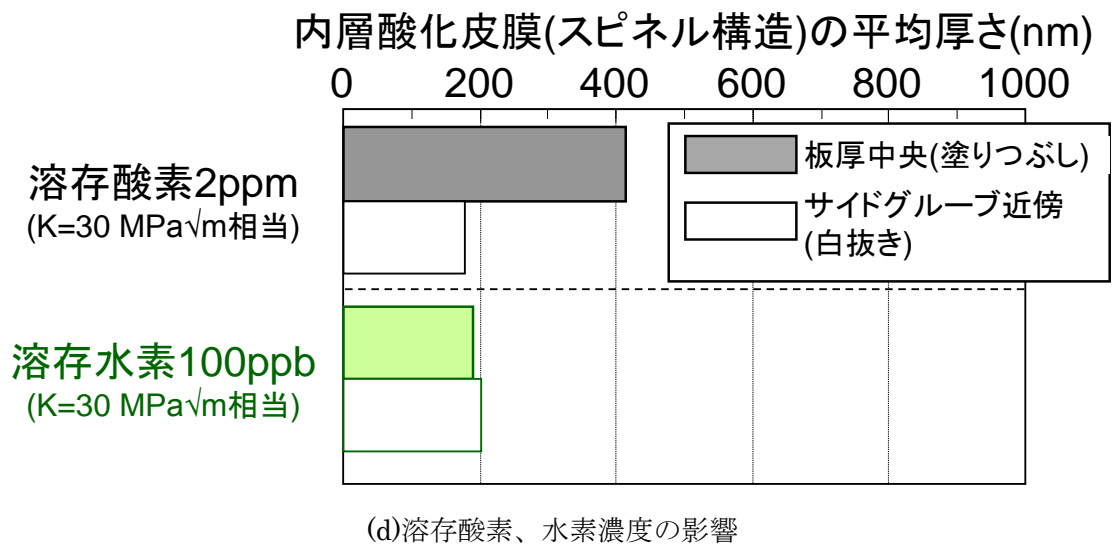
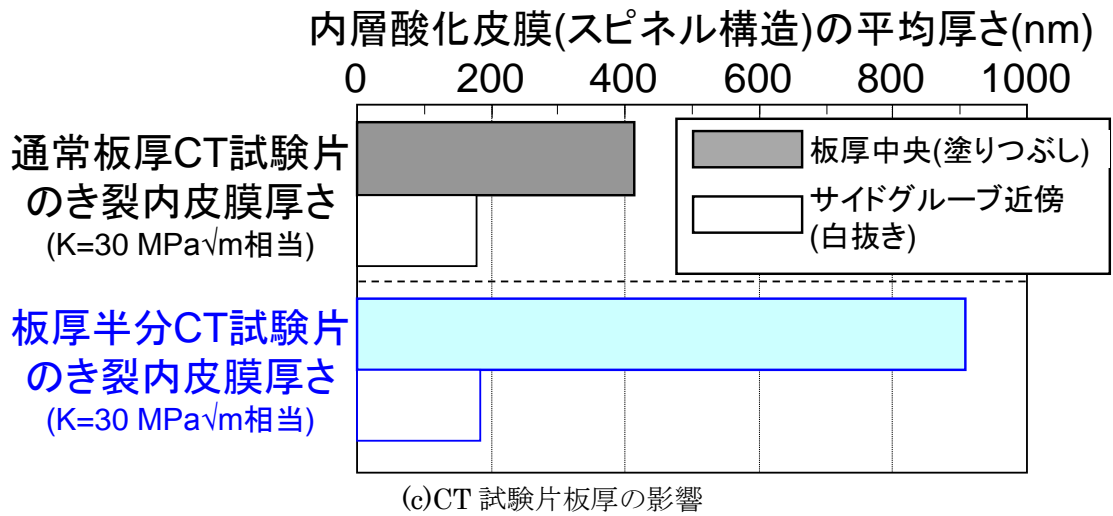


図 4.2.1.1-32(2) CT 試験片疲労き裂内の板厚中央とサイドグループ近傍に形成した酸化皮膜内層(スピネル層)厚さ比較

#### 4.2.1.2 照射材のき裂進展試験と酸化皮膜等の分析

##### (1) 既存照射材を使ったき裂進展試験

###### a. 目的

###### ①水のラジオリシスがき裂進展に及ぼす影響評価試験

本事業では、照射ステンレス鋼の高温水中き裂進展挙動に及ぼす水のラジオリシス影響評価を目的として、中性子照射ステンレス鋼の照射下き裂進展試験を計画中的である。ここでは、JMTR 炉心の放射線照射場において高温水中き裂進展速度データと ECP データを取得し、合わせてラジオリシスコードを用いた水の放射線分解生成物の濃度を計算して水質条件を評価することとしている。

一方その比較データを取得するには、例えば  $^{60}\text{Co}$  線源による $\gamma$ 線照射下での高温水試験が選択肢として挙げられるが、試験装置の設置やマシンタイムの確保などに多くの制約を考慮すると、その実施は容易ではない。

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

###### ②照射下き裂進展試験に先行した照射材のき裂進展データ取得

本事業では、JMTR を用いて中性子照射ステンレス鋼 0.5T-CT 試験片を準備し(ベース照射の実施)、照射下き裂進展試験に供する計画としている。

本項目では、既存の中性子照射 CT 試験片の中から、照射下き裂進展試験マトリクスで計画中的の中性子照射量範囲に合致するものを入手し、先行的にき裂進展速度データを取得するものである。

###### b. 既存照射材を使ったき裂進展試験マトリクス

既存照射材を用いたき裂進展試験マトリクスを表 4.2.1.2-1 に示す。

試験 No. 1~3 は、水のラジオリシスがき裂進展に及ぼす影響評価試験に対応したき裂進展試験を示す。この試験の目的に鑑み、入手可能な既存の中性子照射材のうち比較的放射化量が大きいものとして、旧原子力安全基盤機構(JNES)IASCC 事業で約  $7.5 \times 10^{25} \text{ n/m}^2$  まで中性子照射した 0.5T-CT 試験片(照射量レベル F4)の中から、試験片 ID. A410(SUS316L, HT 材,  $7.14 \times 10^{25} \text{ n/m}^2(\text{E}>1\text{MeV})$ )、A412(SUS316L, HT 材,  $7.38 \times 10^{25} \text{ n/m}^2(\text{E}>1\text{MeV})$ )、A413(SUS316L, HT 材,  $7.33 \times 10^{25} \text{ n/m}^2(\text{E}>1\text{MeV})$ )を選定した。そのうち試験片 ID. A413 については、 $\gamma$ 線照射のき裂内水質への効果そのものを確認するため、平成 26 年度に実施した熱処理条件確認試験結果を参考に、機械的性質と照射誘起粒界偏析が溶体化材と同等な条件となるような熱処理( $700^\circ\text{C} \times 1$  時間)を施した。

また試験 No. 4 は照射下き裂進展試験に先行した照射材のき裂進展データ取得に対応した試験であり、旧 JNES ENI 事業にて Halden 炉照射した 0.5T-CT 試験片の中から、

炉心シュラウド H4 溶接線を模擬した溶接継手の熱影響部(HAZ)から採取したものを選  
択し、き裂進展試験に供した。



表 4.2.1.2-1 既存照射材を用いたき裂進展試験 試験マトリックス

試験 No	試験片 ID	鋼種	照射量(n/m <sup>2</sup> ) (損傷量)	照射後 熱処理	き裂進展試験環境条件 <sup>※1)</sup>			断面 観察 <sup>※2)</sup>	破面 観察 <sup>※3)</sup>	TEM 観察	備考
					ECP1	ECP2	ECP3				
1	A412	SUS316L (母材)	7.39×10 <sup>25</sup>	—	—	—	—	○	○	※4)	JNES IASCC 事業残材 (き裂進展試験済)
2	A413		7.33×10 <sup>25</sup>	700℃ ×1h	—	—	—	—	○	※4)	JNES IASCC 事業残材 (き裂進展試験済)
3	A425		8.23×10 <sup>25</sup>	—	—	○	○	○	○	※4)	JNES IASCC 事業残材
4	64HC 405	SUS316L (H4 HAZ)	5.16×10 <sup>24</sup> (0.793dpa)	—	○	—	—	—	○	—	JNES ENI 事業残材

凡例 ○：実施 —：実施予定なし

※1) 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、き裂進展の経過を見ながら ECP2 または ECP3 条件でのき裂進展速度データを取得する。

※2) き裂の断面観察用として、破面開放前の 0.5TCT 試験片を板厚方向約半分の位置で切断し、一方の切断片を観察する。

※3) ※2)で2分割された試験片のいずれについても、破面開放し破面観察する。

### c. き裂進展試験方法

中性子照射済 0.5T-CT 試験片の形状を図 4.2.1.2-1 に示す。またき裂進展試験の試験水の条件を表 4.2.1.2-2 に示す。

き裂進展試験装置の構造図(例)を図 4.2.1.2-2 に示す。荷重機構は、一定荷重モードのほか、三角波等の変動荷重モードに対応可能である。また、試験水のリフレッシュレートは 3 回以上/h とする。

次に、き裂進展試験における個々の操作について示す。

#### ①環境中予き裂導入

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

図 4.2.1.2-3 は PDM 計測装置の構成例を示す。試験片の電気抵抗は、き裂進展に伴い断面積の減少に起因して変化する。したがって、試験片に一定の電流を流し、き裂をはさんで電位差を測定すればき裂長さの増分を電位差の増分と対応させて検出できる。本方法では較正曲線の使用により、き裂長さを間接的ではあるが連続的に測定可能である。装荷後、環境中で試験片に繰返し負荷を付与し、大気中疲労予き裂の前縁に粒界型のき裂を下記の条件で導入する。なお、明確な指示値の増分(PDM の検出限界値( $3\sigma$ 値))が観察されない場合(熱処理なし材は 48h、熱処理材は 100h が目安)は、導入条件を再検討する。

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

#### ②定荷重き裂進展試験

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

#### ③荷重条件

IASCC 事業で照射レベル F4 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  $31 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ )を満足している。一方、熱処理材は強度が非照射材と同等まで回復するものと仮定すると、E399 の K 値有効範囲は 0.2% 耐力で評価すると、<約  $7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  となり、比較可能な非照射材の文献値(き裂進展データ)はない。そこで、SCC 試験法の JIS 化案の有効範囲評価(<約  $16 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ )を考慮し、

試験開始時の K 値を  $15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  としてき裂進展データを取得し、非照射材文献値と比較することとした。

#### ④環境条件

##### i)溶存酸素及び溶存水素濃度

表 4.2.1.2-1 及び表 4.2.1.2-2 に記載の通り、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 程度に調整することとした。また低 ECP 条件のうち ECP2 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 ECP3 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 程度に調整することとした。

##### ii)試験水質管理

表 4.2.1.2-2 に示す通り、実機の水質を考慮して、き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こととした。なお、目標とする硫酸、塩素、硝酸イオン濃度は 5ppb 以下とした。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した。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した。

##### 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した。作用極はき裂進展試験片とした。腐食電位の設定は、ガスの濃度調整により行った。

#### ⑤試験中のき裂長さモニタ方法

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

#### ⑥試験期間内の試験状況に関する記録

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

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

#### ⑦ き裂先端活性化操作

き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、き裂先端活性化操作を実施することとした。き裂先端活性化の条件を表 4.2.1.2-3 に示す。また、図 4.2.1.2-4 にき裂先端活性化操作(短期繰返し除荷)の応力付与モードを示す。操作の手順は以下の通りとした。

- ・ 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( $3\sigma$ 値)以上のき裂進展が確認された後、活性化操作から定荷重条件に移行し一定時間以上保持する。
- ・ 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( $1\sigma$ )を超えない場合は、再度活性化操作を実施する。

#### ⑧ 試験水条件の異常時の措置

オートクレーブ入口及び出口における試験水の導電率が管理目標値を超える事象が発生した場合は試験水の分析を行うとともにその原因を特定し、管理目標値以下となるような対策措置(イオン交換樹脂の取替、等)を講ずることとした。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こととした。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こととした。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、き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こととした。

#### ⑨ 装置の計画外停止時の措置

落雷などによる停電や、その他試験装置の異常によって装置が停止した場合は、直ちに荷重付与を中止し、装置を復帰させることとした。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こととした。なお試験再開後は PDM 指示値をモニタすることとした。

#### ⑩ き裂進展速度評価方法

試験中は PDM 指示値を常にモニタし、その値がき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き裂進展速度が評価可能な試験時間が経過したことを確認した後に試験を終了することとした。

試験終了後の 0.5T-CT 試験片を大気中にて疲労により強制的に破断し、疲労予き裂お

よび環境中において進展した破面部を光学的に観察するとともに、環境中のき裂進展領域の典型的な破面を 100 倍、400 倍を中心とした SEM 観察にて評価することにより、進展領域の面積・最大進展長さ等を評価した。

き裂長さは、平均き裂長さ( $\text{SCC 面積} \div \text{試験片板厚}$  或いは  $\text{SCC 面積} \div \text{IGSCC 割れ幅}$ ) を求め、必要に応じて最大き裂長さも求めた。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き裂進展量と試験期間中における荷重条件を総合的に評価し、き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した。

き裂進展速度を求めるために評価区間を設定することとした。評価区間は、破面補正後の PDM データ及び破面観察でき裂進展が認められた場合、「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こととした。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き裂進展速度を決定する。なお、評価区間はき裂長さの増分が、少なくとも PDM 信号のばらつきの 3 倍( $3\sigma$ : 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。

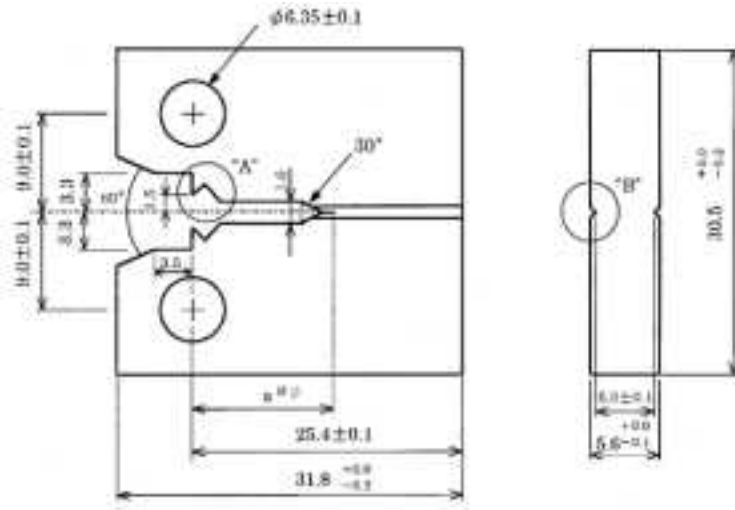
#### d. き裂進展終了後の試験片の分析

き裂進展試験を実施した CT 試験片 A412 及び A425 について、断面観察、破面観察および TEM 観察を実施した。試験フローを図 4.2.1.2-5 に示す。断面観察については、CT 試験片を板厚中央部で切断し二等分にした片側(A412-1 及び A425-1)を供試材とし、切断面を鏡面研磨した後、光学顕微鏡ならびに SEM を用いて実施した。

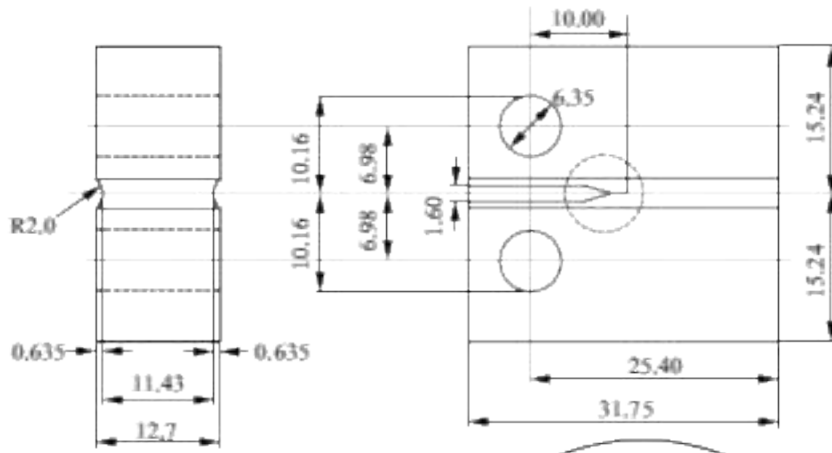
また CT 試験片 A413 については破面観察及び TEM 観察、64HC405 については破面観察を実施した。

表 4.2.1.2-2 試験水質条件

項目	条件	備考
温度	290±1℃	常時モニタリング
電位	表 4.2.1.2-1 に記載の条件	常時モニタリング
溶存酸素濃度	表 4.2.1.2-1 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 4.2.1.2-1 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 μS/cm 以下 出口 : 0.2 μS/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。



(1) IASCC 事業で照射した CT 試験片(照射量レベル F4)



(2) ENI 事業で照射した CT 試験片(照射量レベル L1~L4)

図 4.2.1.2-1 中性子照射したき裂進展試験片形状図

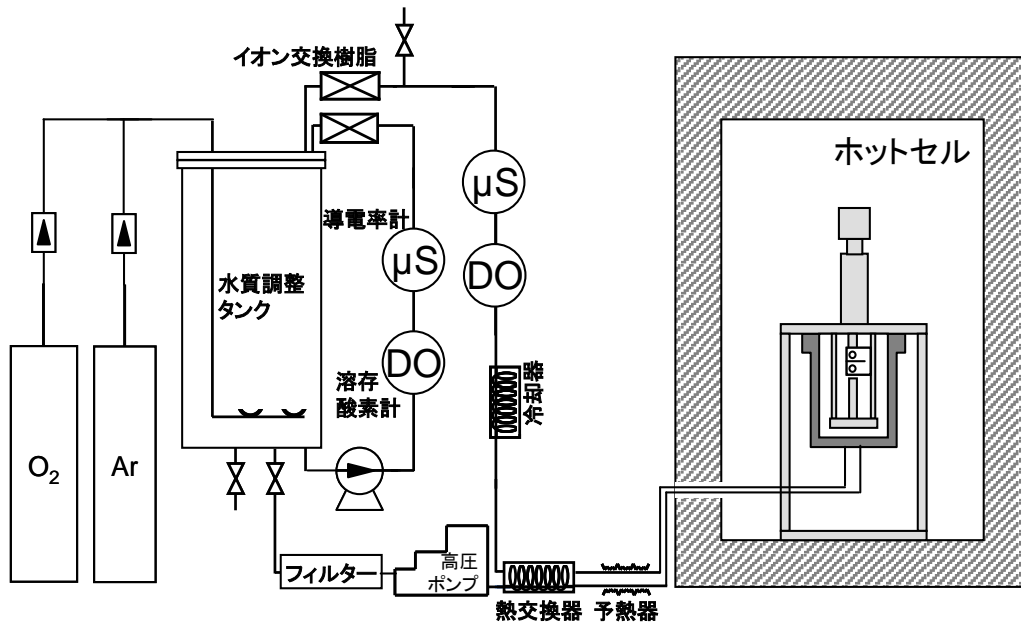


図 4.2.1.2-2 き裂進展試験装置の構造図(例)

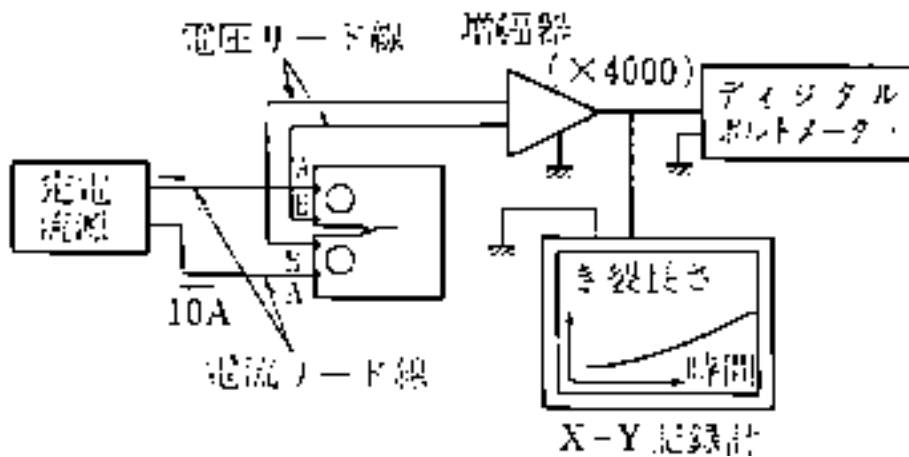


図 4.2.1.2-3 き裂進展量計測装置の構成(例)

表 4.2.1.2-3 き裂先端活性化条件例

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

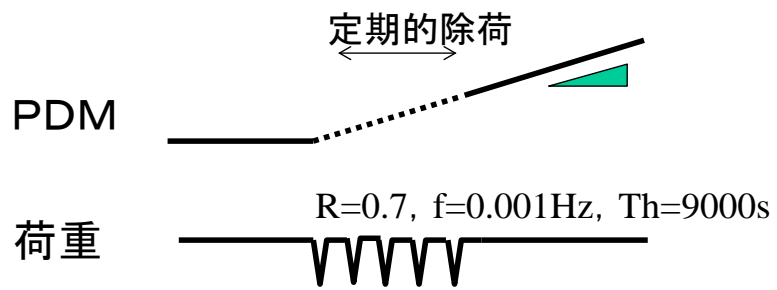


図 4.2.1.2-4 き裂先端活性化操作における負荷応力モード例



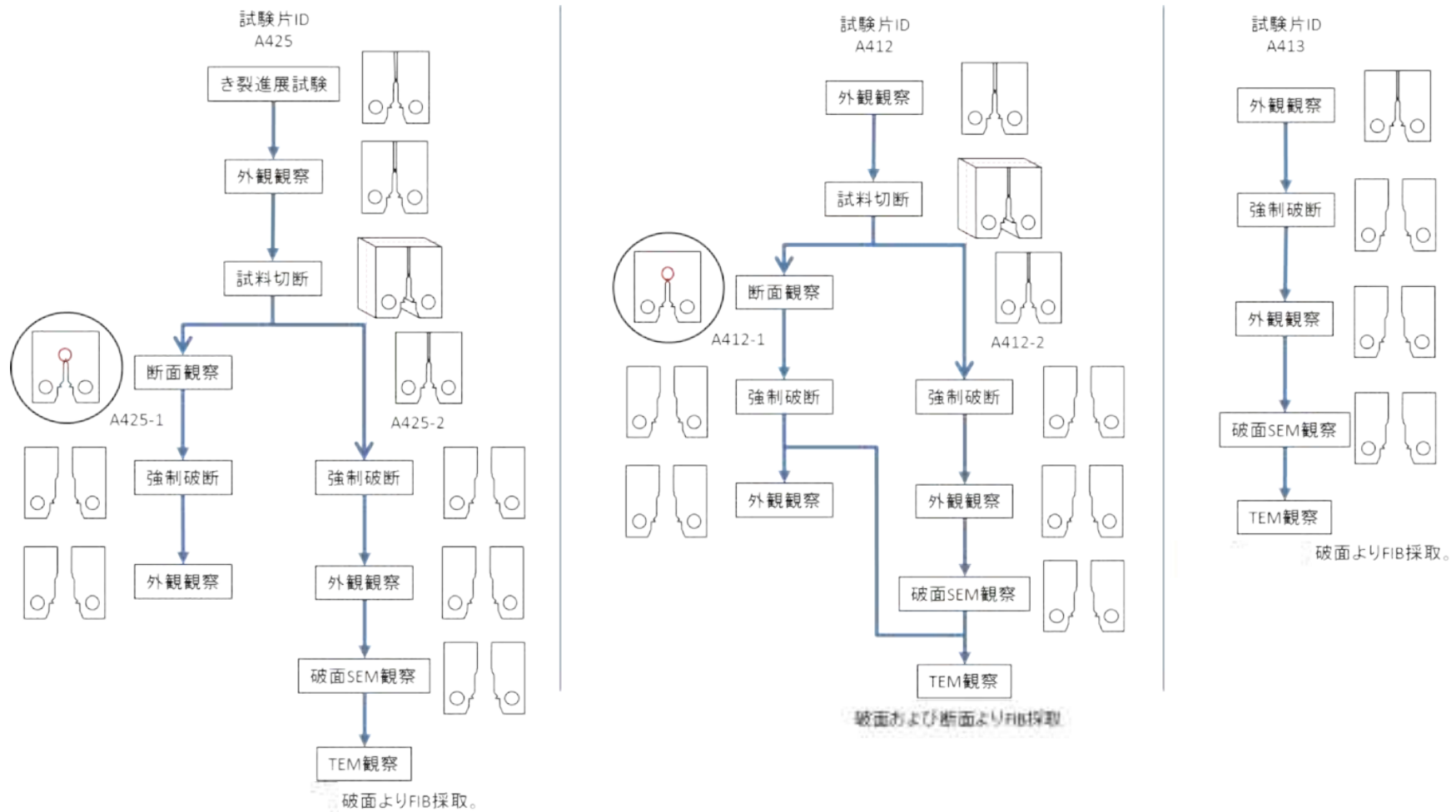


図 4.2.1.2-5 き裂進展試験後の CT 試験片の詳細分析試験フロー

e. 試験結果

①試験No. 1(A412(SUS316L、HT材、 $7.38 \times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup>(E>1MeV))

試験開始から繰り返し荷重負荷による環境中予き裂を導入した。環境中予き裂の導入条件を表 4.2.1.2-4 に示す。環境中予き裂導入後、定荷重制御に移行し NWC および HWC 模擬水質環境下でのき裂進展挙動を確認した。試験中の導電率は、入口で 0.1  $\mu$ S/cm 以下、出口で 0.2  $\mu$ S/cm 以下であった。不純物イオンの分析結果を表 4.2.1.2-5 に示す。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>ともに目標値である 5ppb 未満であった。所定の時間が経過後に、試験荷重を除荷し試験を終了した。以上、平成 26 年度に実施したき裂進展試験の実績を再録した。

今年度は、き裂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。図 4.2.1.2-1 にデジタルマイクロスコープを用いた外観観察結果を示すが、試験中のき裂はサイドグループを逸脱せず進展したことを確認した。SEM 観察の結果とデジタルマイクロスコープ観察の結果を用いて環境中き裂進展領域を特定し、その面積からき裂進展量を求めた。破面観察結果の詳細は次章に記載した。

破面観察より得られたき裂進展量に基づき試験中に取得した PDM 指示値の補正を行い、補正後の PDM チャートより各 ECP 条件で定荷重制御された全領域を選定し、その区間のデータを最小二乗法で直線近似して得た傾きに基づいて、き裂進展速度を求めた。板幅平均および割幅平均のき裂長さで補正後の PDM チャートを図 4.2.1.2-7 に、き裂進展速度を表 4.2.1.2-6 に示す。

表 4.2.1.2-4 環境中予き裂導入条件(試験片番号 A412)

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

表 4.2.1.2-5 試験水分析結果(試験片番号 A412)

イオン種	試験開始時		試験終了時	
	入口	出口	入口	出口
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2
Cl <sup>-</sup> (ppb)	< 2	3.0	< 2	3.7
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2



図 4.2.1.2-6 き裂進展試験後のデジタルマイクロスコープによる試験片外観観察結果  
(A412(SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ ( $E > 1 \text{MeV}$ )))

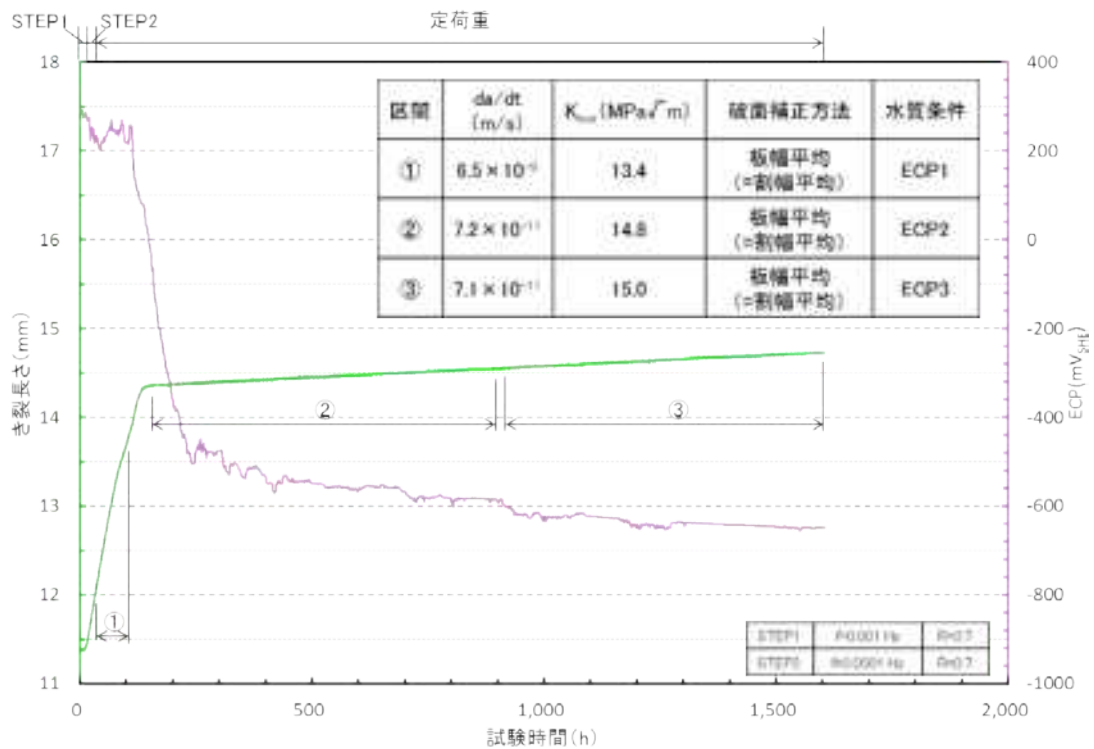


図 4.2.1.2-7(1) き裂長さの時間変化(破面補正後)(1/3)(き裂長さ と ECP)  
(A412(SUS316L、HT 材、 $7.38 \times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup>(E>1MeV))

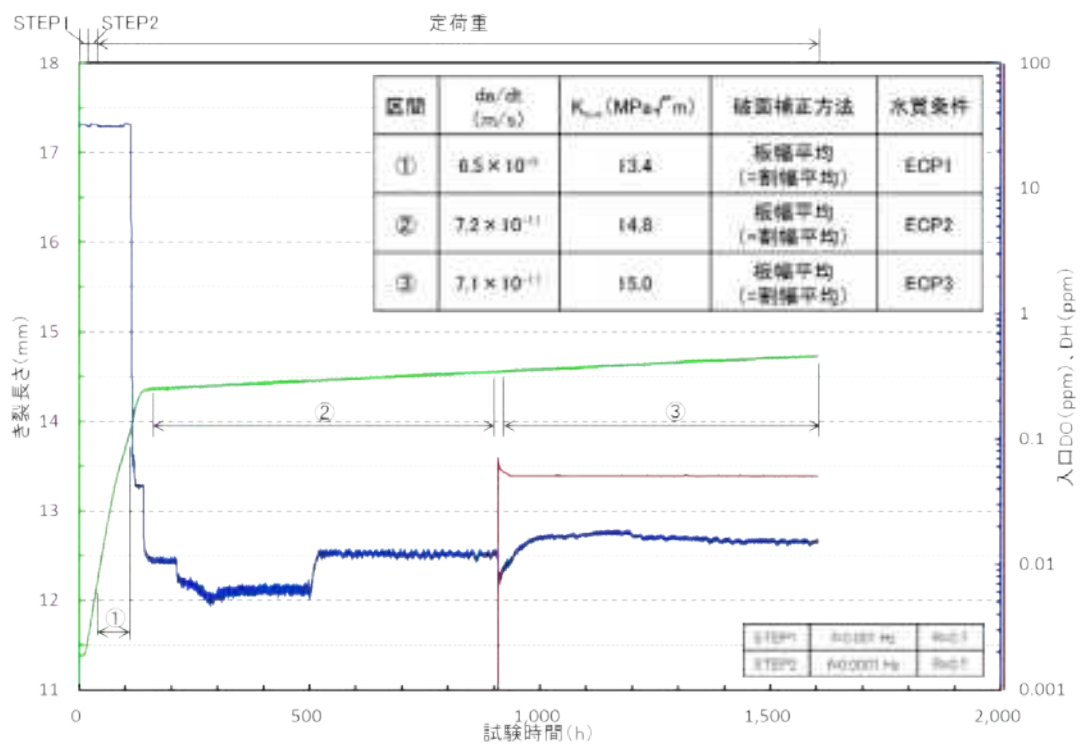


図 4.2.1.2-7(2) き裂長さの時間変化(破面補正後)(2/3)(き裂長さ と DO、DH)  
(A412(SUS316L、HT 材、 $7.38 \times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup>(E>1MeV))

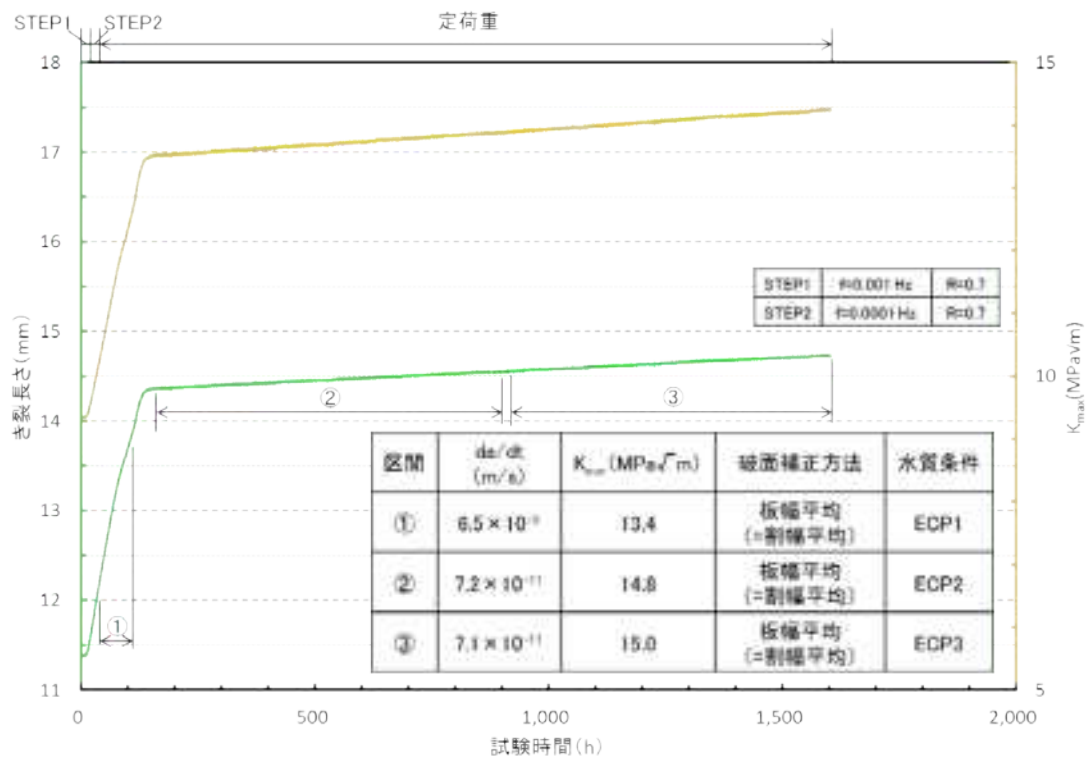


図 4.2.1.2-7(3) き裂長さの時間変化(破面補正後)(3/3)(き裂長さ と K 値)  
(A412(SUS316L、HT 材、 $7.38 \times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup>(E>1MeV)))

表 4.2.1.2-6 き裂進展試験結果まとめ(A412、破面補正後)

鋼種	ID	損傷量 (dpa)	環境条件	ECP 平均値 (mV <sub>SHE</sub> )	K 値 平均値 (MPa√m)	da/dt (m/s)	備考
SUS 316L	A412	12.3	ECP1	230	13.4	6.5×10 <sup>-9</sup>	板幅平均 (=割幅平均)
			ECP2	-530	14.8	7.2×10 <sup>-11</sup>	
			ECP3	-630	15.0	7.1×10 <sup>-11</sup>	

②試験No. 2(A413(SUS316L、HT材、 $7.33 \times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup>(E>1MeV)、700°C×1h、照射後焼鈍材))

試験開始から繰り返し荷重負荷による環境中予き裂を導入した。環境中予き裂の導入条件を表 4.2.1.2-7 に示す。環境中予き裂導入後、定荷重制御に移行し NWC 模擬水質環境下でのき裂進展挙動を確認した。試験中の導電率は、入口で 0.1 μS/cm 以下、出口で 0.2 μS/cm 以下であった。不純物イオンの分析結果を表 4.2.1.2-8 に示す。SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、Cl<sup>-</sup>ともに目標値である 5ppb 未満であった。所定の時間が経過後に、試験荷重を除荷し試験を終了した。以上、平成 26 年度に実施したき裂進展試験の実績を再録した。

今年度は、き裂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。図 4.2.1.2-8 にデジタルマイクロスコープを用いた外観観察結果を示すが、試験中のき裂はサイドグループを逸脱せず進展したことを確認した。破面観察結果の詳細は次章に記載した。

SEM 観察の結果とデジタルマイクロスコープ観察の結果を用いて環境中き裂進展領域を特定し、その面積からき裂進展量を求めた。破面観察より得られたき裂進展量に基づき試験中に取得した PDM 指示値の補正を行い、補正後の PDM チャートより各 ECP 条件で定荷重制御された全領域を選定し、その区間のデータを最小二乗法で直線近似して得た傾きに基づいて、き裂進展速度を求めた。板幅平均および割幅平均のき裂長さで補正後の PDM チャートを図 4.2.1.2-9 に、き裂進展速度を表 4.2.1.2-9 に示す。

表 4.2.1.2-7 環境中予き裂導入条件(試験片番号 A413)

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

表 4.2.1.2-8 試験水分析結果(試験片番号 A413)

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

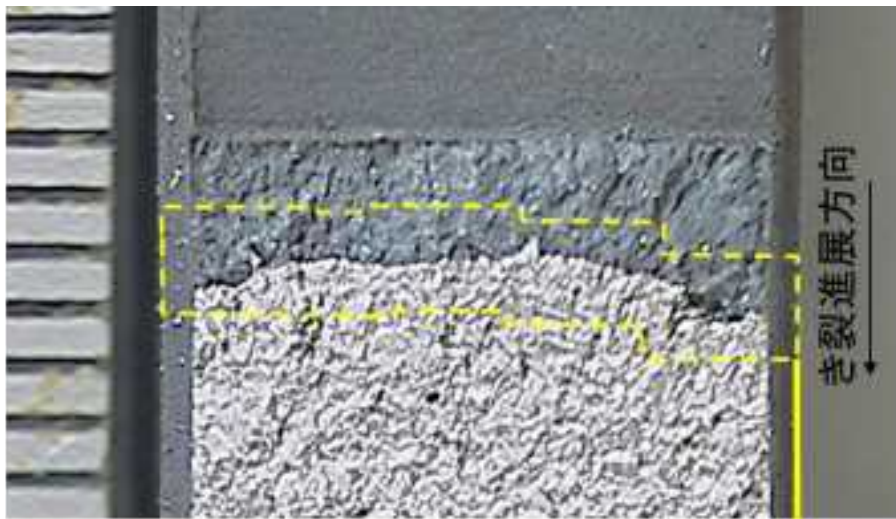


図 4.2.1.2-8 き裂進展試験後のデジタルマイクロスコープによる試験片外観観察結果  
(A413(SUS316L 母材、 $7.33 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ ( $E > 1 \text{MeV}$ )、 $700^\circ\text{C} \times 1 \text{h}$  照射後焼鈍材))

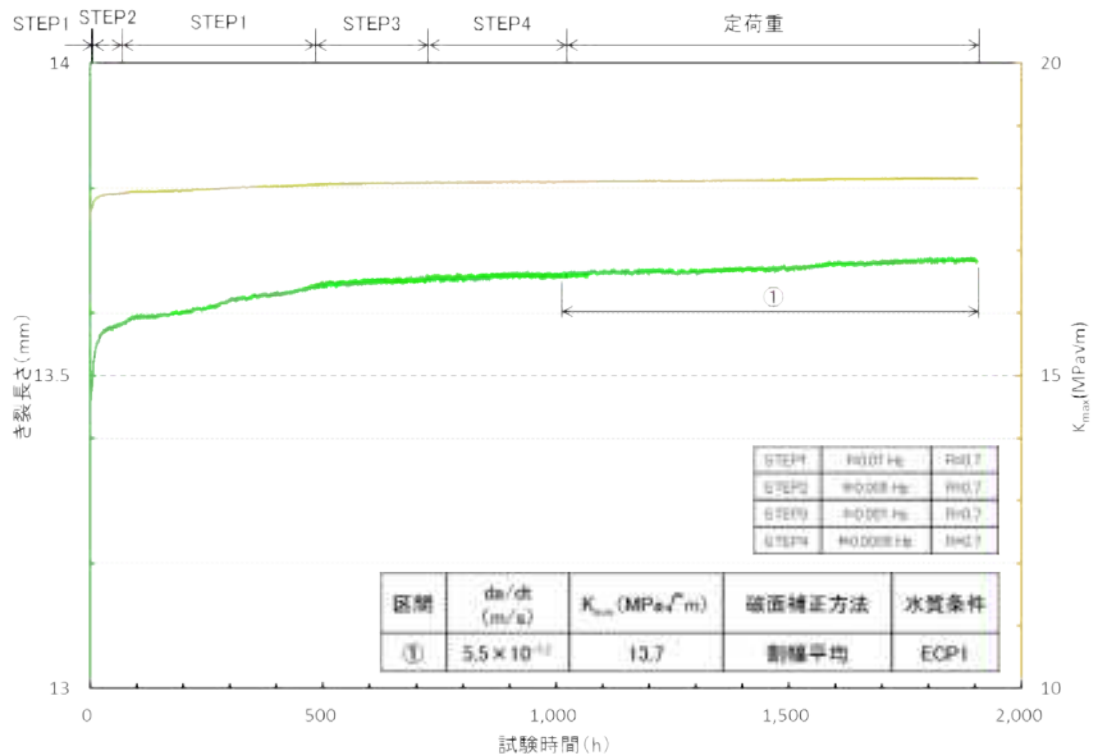
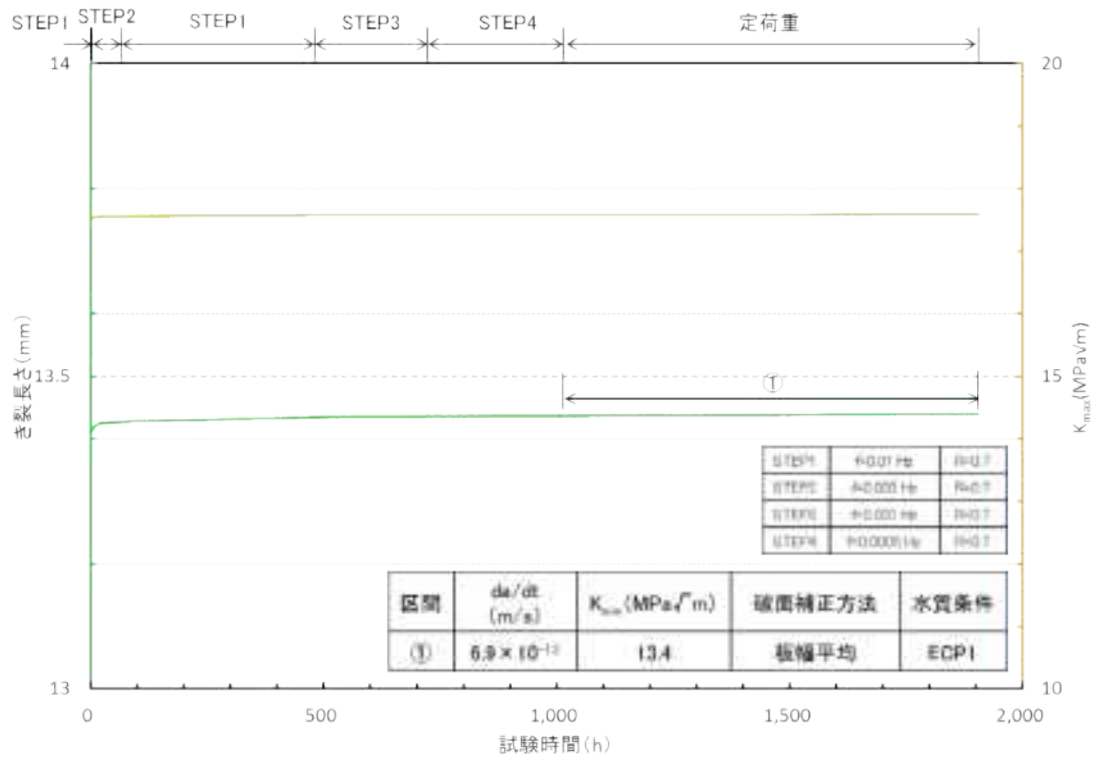


図 4.2.1.2-9(1) き裂長さの時間変化(破面補正後)(1/3)き裂長さ と ECP  
 (A413(SUS316L、HT 材、 $7.33 \times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup>(E>1MeV)、700°C×1h 照射後焼鈍材))  
 (上段: 板幅平均のき裂長さで補正 下段: 割幅平均のき裂長さで補正)



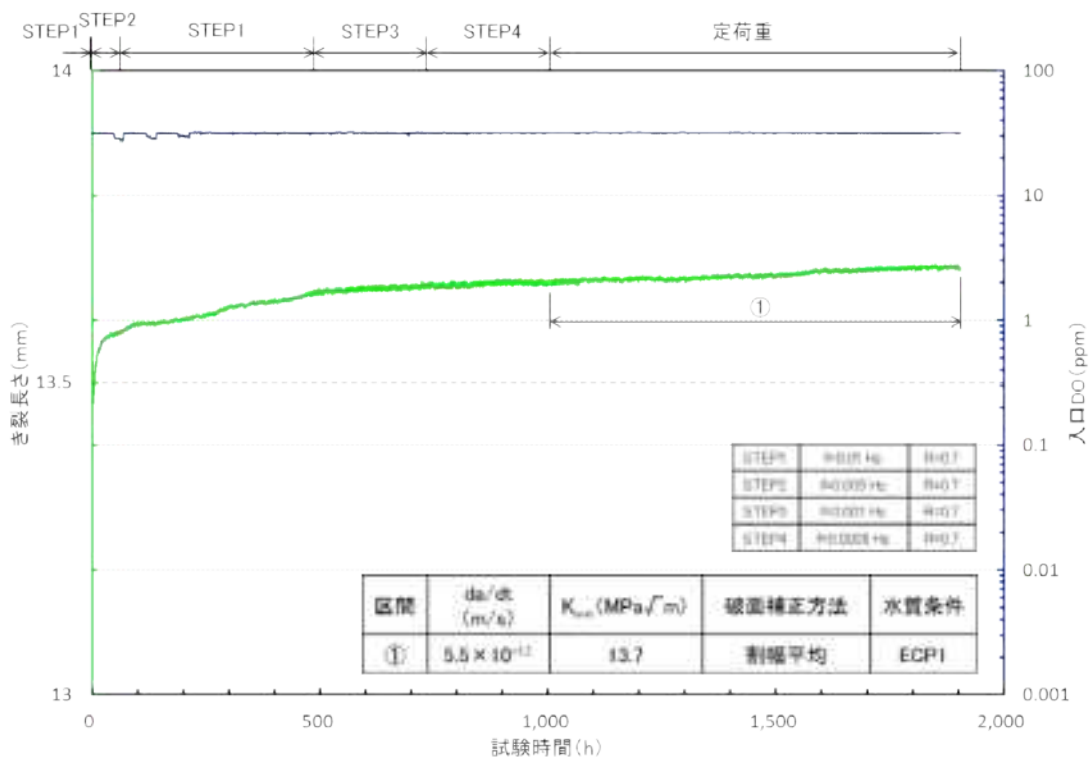
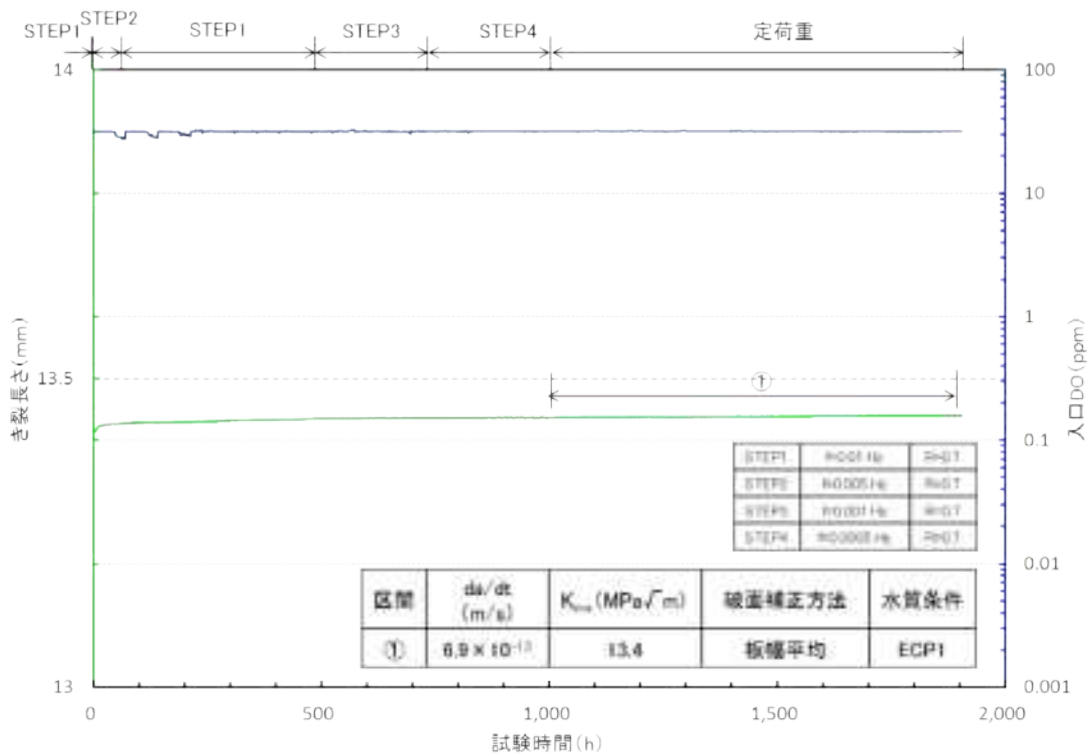


図 4.2.1.2-9(2) き裂長さの時間変化(破面補正後)(2/3)(き裂長さ と DO)  
 (A413(SUS316L、HT 材、 $7.33 \times 10^{25}$  n/m $^2$ (E>1MeV)、700°C×1h 照射後焼鈍材))  
 (上段: 板幅平均のき裂長さで補正 下段: 割幅平均のき裂長さで補正)

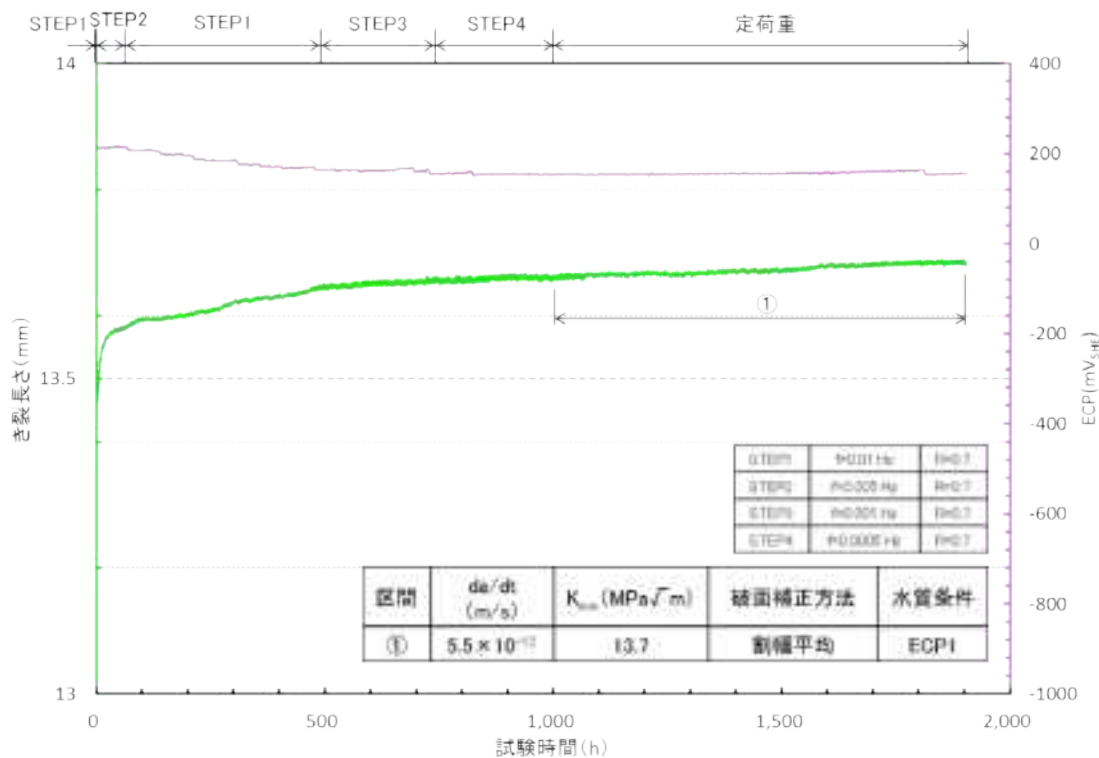
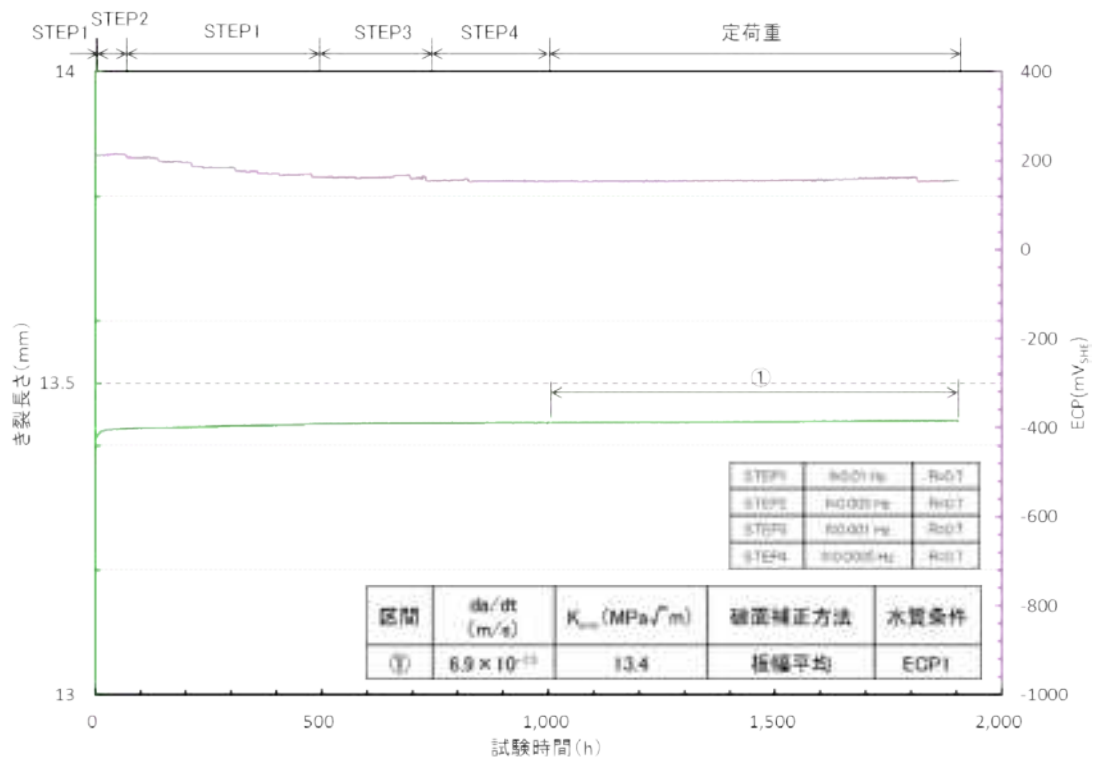


図 4.2.1.2-9(3) き裂長さの時間変化(破面補正後)(3/3)(き裂長さと K 値)  
 (A413(SUS316L、HT 材、 $7.33 \times 10^{25}$  n/m<sup>2</sup>(E>1MeV)、700°C×1h 照射後焼鈍材))  
 (上段: 板幅平均のき裂長さで補正 下段: 割幅平均のき裂長さで補正)

表 4.2.1.2-9 き裂進展試験結果まとめ(A413、破面補正後)

鋼種	ID	損傷量 (dpa)	環境 条件	ECP 平均値 (mV <sub>SHE</sub> )	K 値 平均値 (MPa√m)	da/dt (m/s)	備考
SUS 316L 母材	A413	(11.9※)	ECP1	160	13.4	$6.9 \times 10^{-12}$	板幅平均
					13.7	$5.5 \times 10^{-12}$	割幅平均

※)700°C×1h 照射後焼鈍材

③試験No. 3(A425(SUS316L、HT材、 $8.23 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$ ))

本試験では、試験片をセットし試験容器を閉止した時点から試験終了まで、DO が 10ppb 未満(水素注入なし)の試験水を調整し試験容器に通水した。試験開始から繰り返し荷重負荷による環境中予き裂を導入した。環境中予き裂の導入条件を表 4.2.1.2-10 表 2.2.1-2 に示す。環境中予き裂導入後、定荷重制御に移行し ECP2 環境でのき裂進展挙動を確認した。試験中の導電率は、入口で  $0.1 \mu\text{S/cm}$  以下、出口で  $0.2 \mu\text{S/cm}$  以下であった。不純物イオンの分析結果を表 4.2.1.2-11 表 2.2.1-3 に示す。 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ ともに目標値である 5ppb 以下であった。

き裂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。図 4.2.1.2-10 にデジタルマイクロスコープを用いた外観観察結果を示すが、試験中のき裂はサイドグループを逸脱せず進展したことを確認した。破面観察結果の詳細は次章に記載した。

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

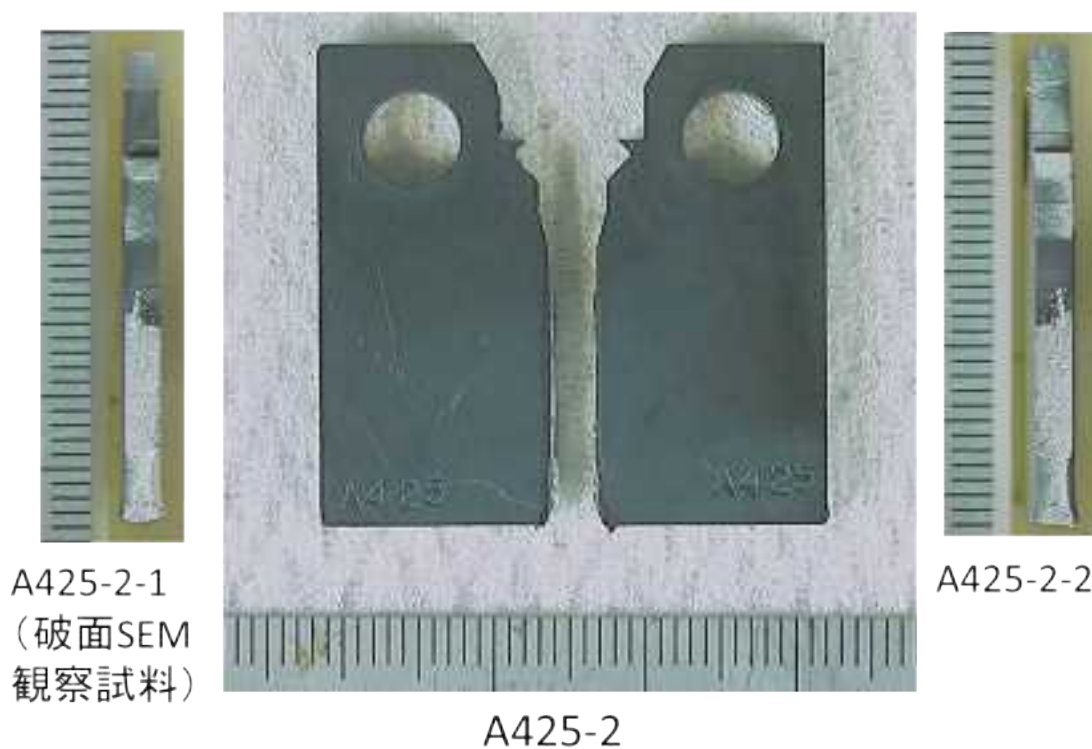
破面観察より得られたき裂進展量に基づき試験中に取得した PDM 指示値の補正を行い、補正後の PDM チャートより各 ECP 条件で定荷重制御された全領域を選定し、その区間のデータを最小二乗法で直線近似して得た傾きに基づいて、き裂進展速度を求めた。板幅平均および割幅平均のき裂長さで補正後の PDM チャートを図 4.2.1.2-11 に、き裂進展速度を表 4.2.1.2-12 に示す。

表 4.2.1.2-10 表 2.2.1-2 環境中予き裂導入条件(試験片番号 A425)

STEP1	STEP2	STEP3
R=0.7	R=0.7	R=0.7
f=0.01(Hz)	f=0.001(Hz)	f=0.0001(Hz)
波形：三角波	波形：三角波	波形：三角波

表 4.2.1.2-11 表 2.2.1-3 試験水分析結果(試験片番号 A425)

イオン種	試験開始時		1ヶ月経過時		2ヶ月経過時		試験終了時	
	入口	出口	入口	出口	入口	出口	入口	出口
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Cl <sup>-</sup> (ppb)	< 2	4.4	< 2	4.9	< 2	5.0	< 2	4.7
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2



A425-2-1  
(破面SEM  
観察試料)

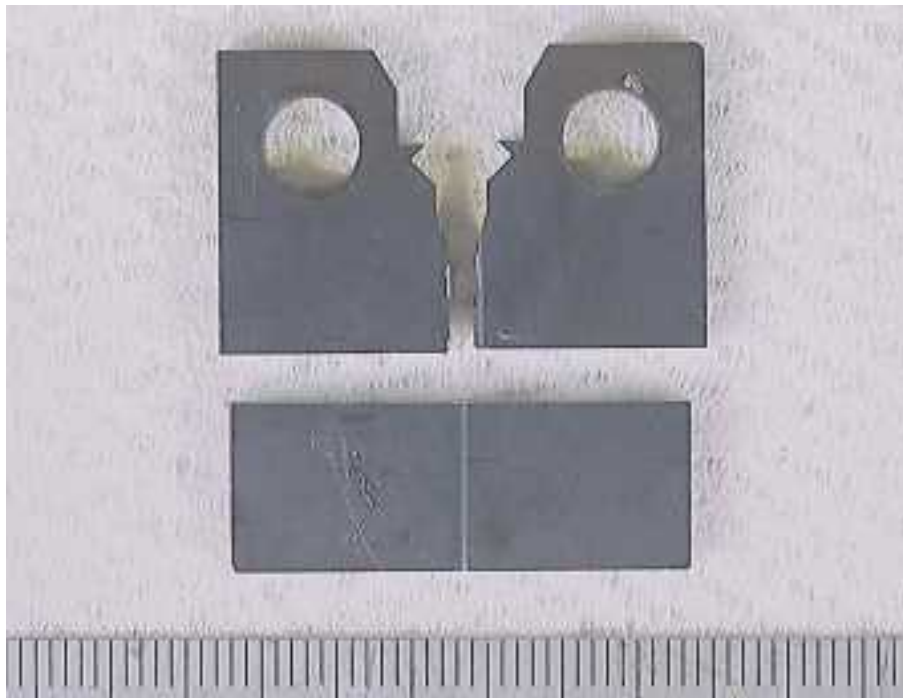
A425-2-2

A425-2

図 4.2.1.2-10(1) き裂進展試験終了後の外観観察結果  
(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))



刻印面



刻印面の裏面

図 4.2.1.2-10(1) き裂進展試験終了後の外観観察結果  
(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

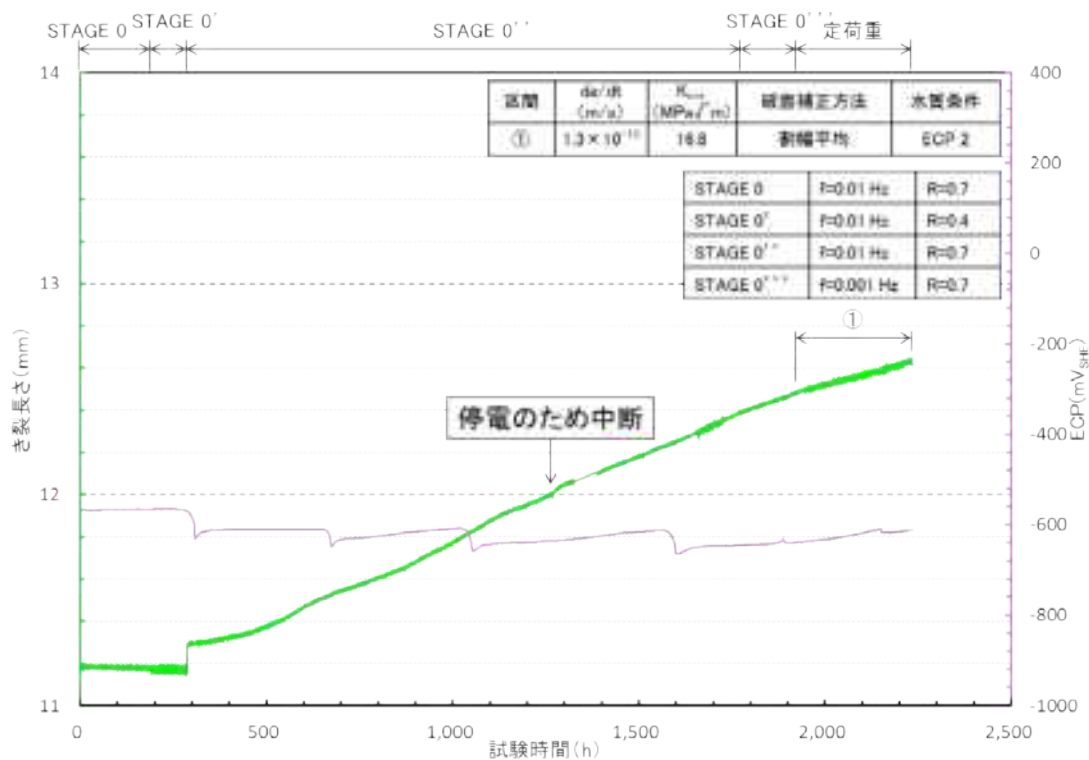
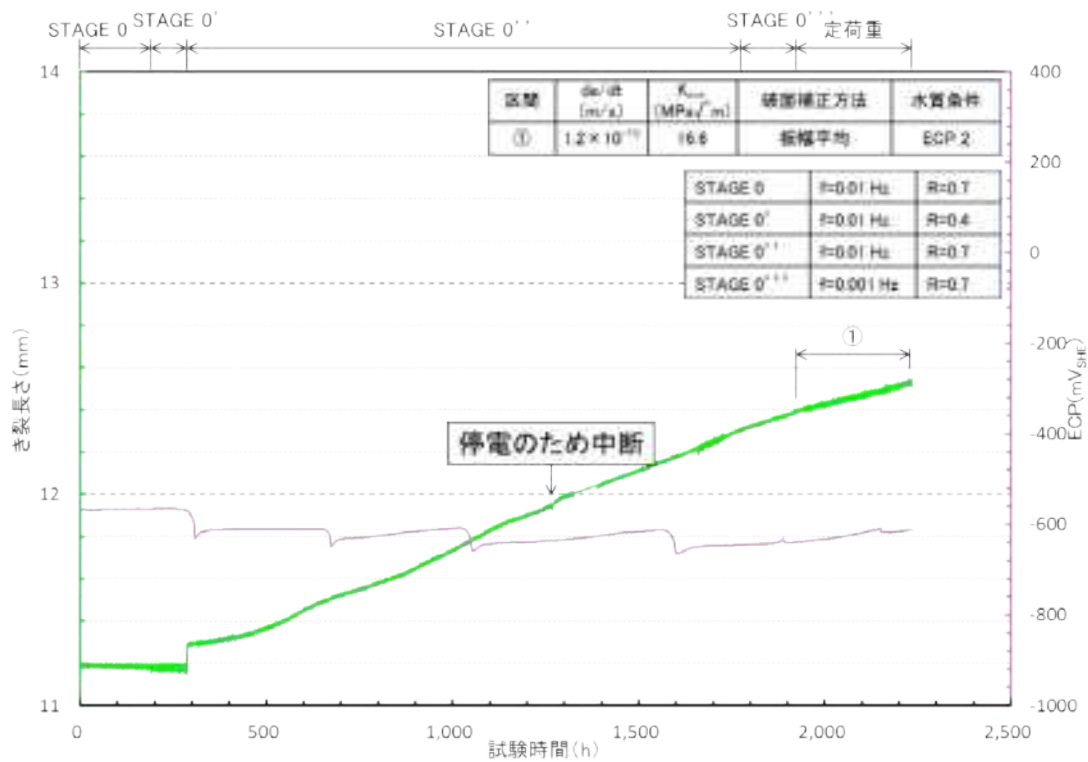


図 4.2.1.2-11(1) き裂長さの時間変化(破面補正後)(1/3)(き裂長さ と ECP)  
 (A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} n/m^2 (E > 1 MeV)$ ))  
 (上段: 板幅平均のき裂長さで補正 下段: 割幅平均のき裂長さで補正)

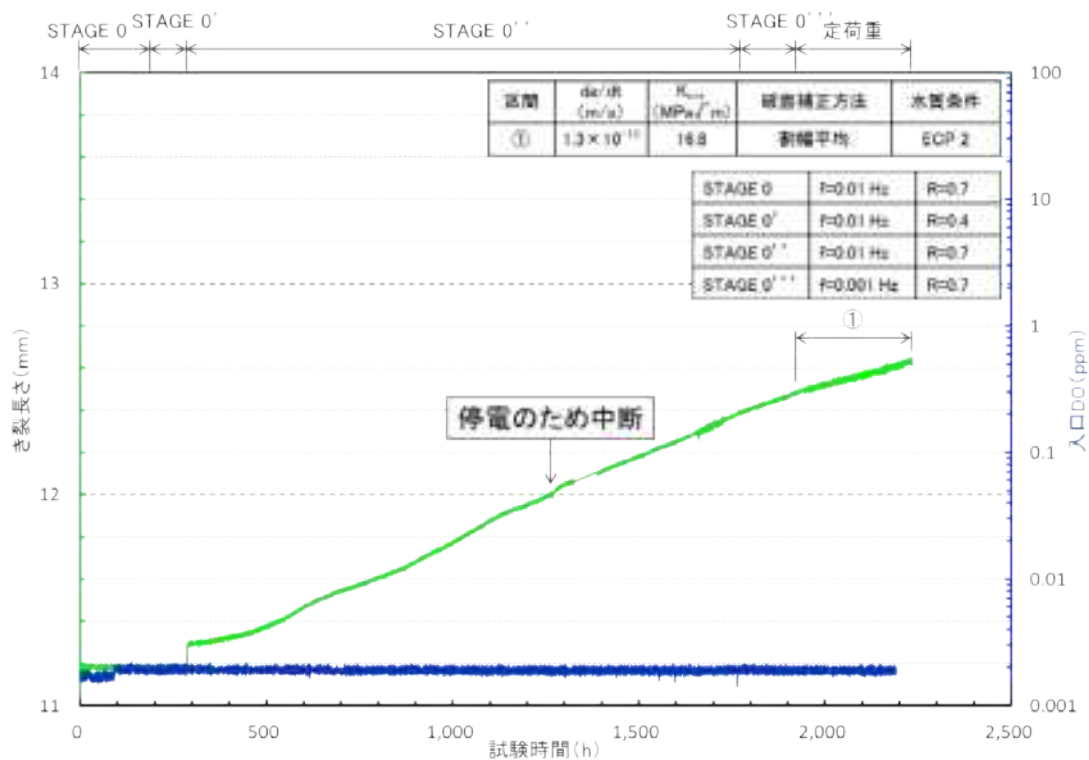
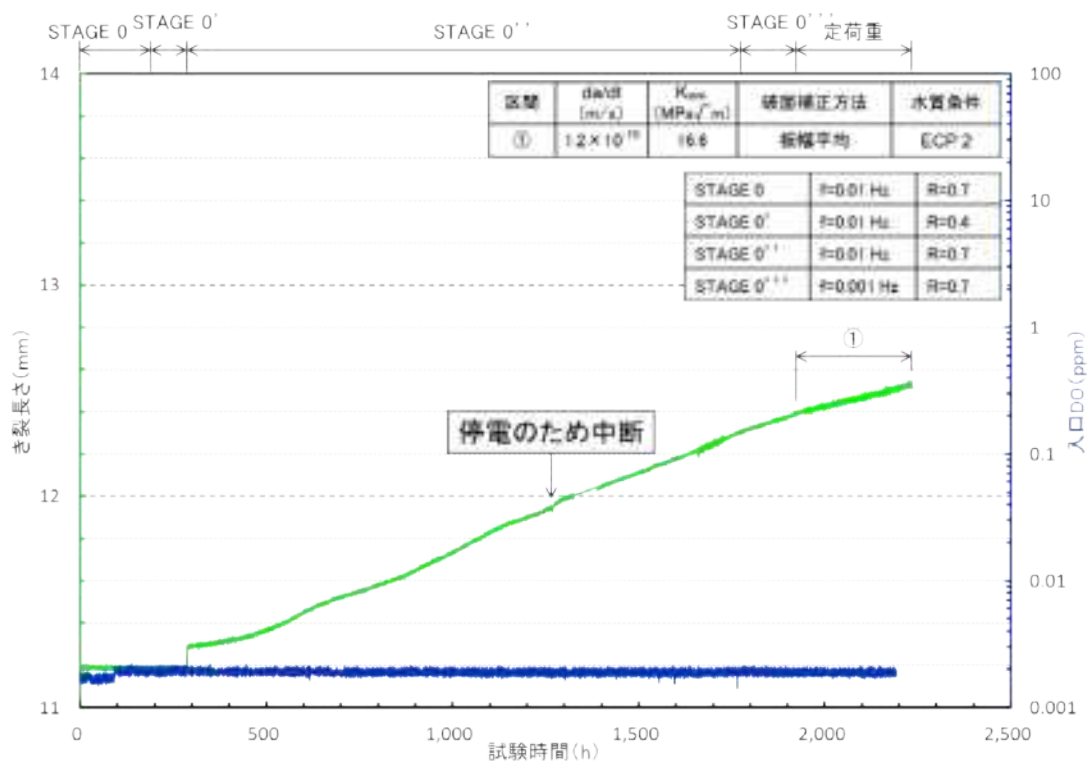


図 4.2.1.2-11 (2) き裂長さの時間変化(破面補正後)(2/3)(き裂長さど DO)  
 (A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} n/m^2 (E > 1 MeV)$ ))  
 (上段: 板幅平均のき裂長さで補正 下段: 割幅平均のき裂長さで補正)



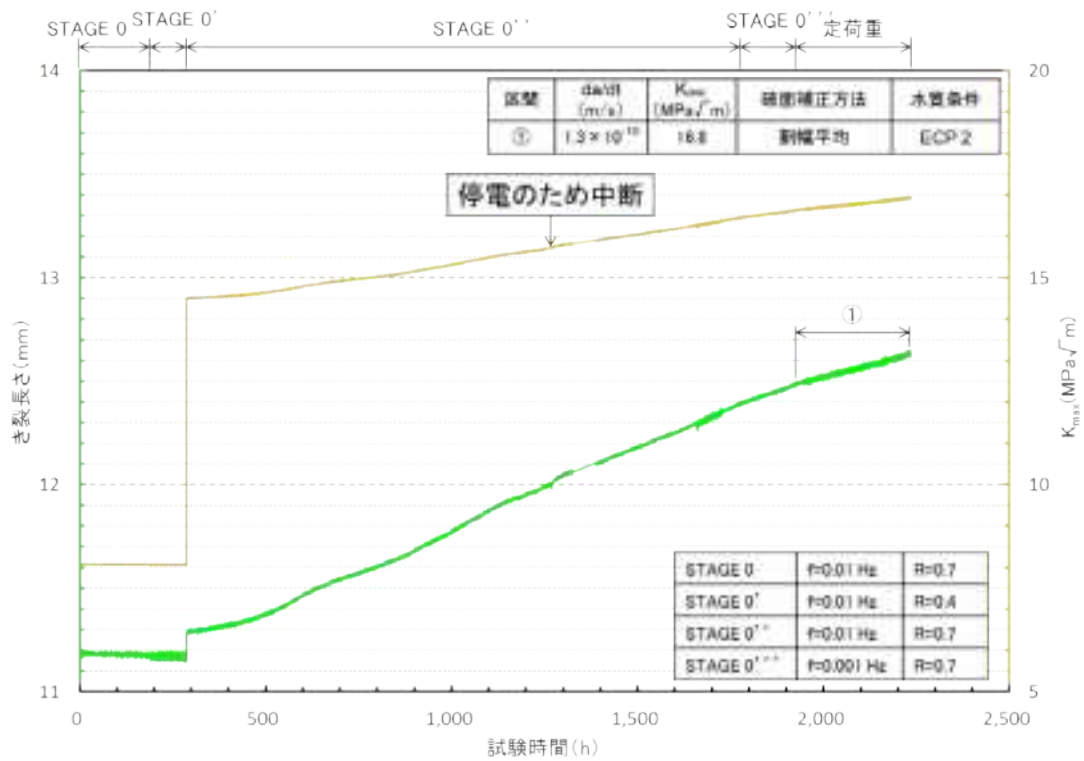
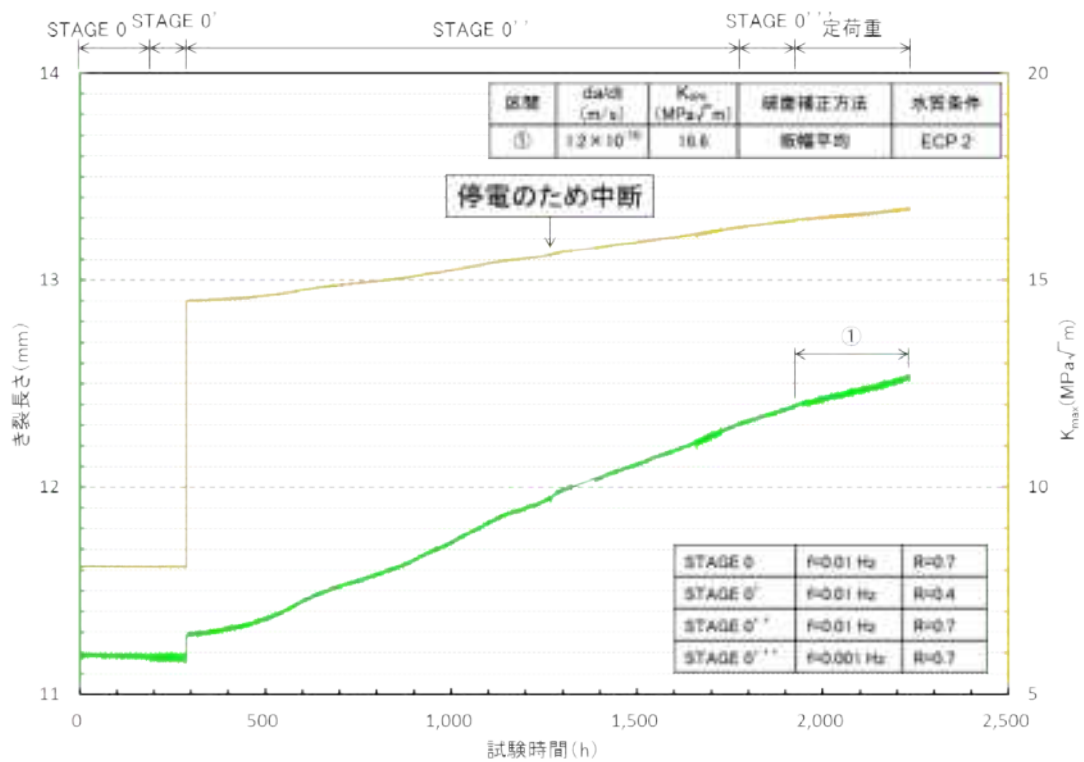


図 4.2.1.2-11 (3) き裂長さの時間変化(破面補正後)(3/3)(き裂長さ と K 値)  
 (A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))  
 (上段: 板幅平均のき裂長さで補正 下段: 割幅平均のき裂長さで補正)

表 4.2.1.2-12 き裂進展試験結果まとめ(A425、破面補正後)

鋼種	ID	損傷量 (dpa)	ECP 平均値 (mV <sub>SHE</sub> )	K 平均値 (MPa√m)	da/dt (m/s)	備考
SUS 316L 母材	A425	13.7	-620	16.6	1.2×10 <sup>-10</sup>	板幅平均
				16.8	1.3×10 <sup>-10</sup>	割幅平均

④試験No. 4(64HC405(SUS316L、HAZ材、 $5.16 \times 10^{24}$  n/m<sup>2</sup>(E>1MeV)))

試験開始から繰り返し荷重負荷による環境中予き裂を導入した。環境中予き裂の導入条件を表 4.2.1.2-13 に示す。環境中予き裂導入後、定荷重制御に移行し NWC および HWC 模擬水質環境下でのき裂進展挙動を確認した。試験中の導電率は、入口で  $0.1 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  以下、出口で  $0.2 \mu\text{S}/\text{cm}^2$  以下であった。不純物イオンの分析結果を表 4.2.1.2-14 に示す。 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{Cl}^-$ ともに目標値である 5ppb 未満であった。

き裂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。図 4.2.1.2-12 にデジタルマイクロスコープを用いた外観観察結果を示すが、試験中のき裂はサイドグループを逸脱せず進展したことを確認した。SEM 観察の結果とデジタルマイクロスコープ観察の結果を用いて環境中き裂進展領域を特定し、その面積からき裂進展量を求めた。破面観察結果の詳細は次章に記載した。

破面観察より得られたき裂進展量に基づき試験中に取得した PDM 指示値の補正を行い、補正後の PDM チャートより各 ECP 条件で定荷重制御された全領域を選定し、その区間のデータを最小二乗法で直線近似して得た傾きに基づいて、き裂進展速度を求めた。板幅平均のき裂長さで補正後の PDM チャートを図 4.2.1.2-13 に、き裂進展速度を表 4.2.1.2-15 に示す。

表 4.2.1.2-13 環境中予き裂導入条件(試験片番号 64HC405)

STEP1	STEP2	STEP3
R=0.7	R=0.7	R=0.7
f=0.01(Hz)	f=0.001(Hz)	f=0.0001(Hz)
波形：三角波	波形：三角波	波形：三角波

表 4.2.1.2-14 試験水分析結果(試験片番号 64HC405)

イオン種	試験開始時		1ヶ月経過時		2ヶ月経過時		試験終了時	
	入口	出口	入口	出口	入口	出口	入口	出口
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2
Cl <sup>-</sup> (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	3.0	< 2	4.6
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppb)	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2	< 2



刻印面



刻印面の裏面

図 4.2.1.2-12(1) き裂進展試験終了後の外観観察結果  
(64HC405(SUS316L、HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

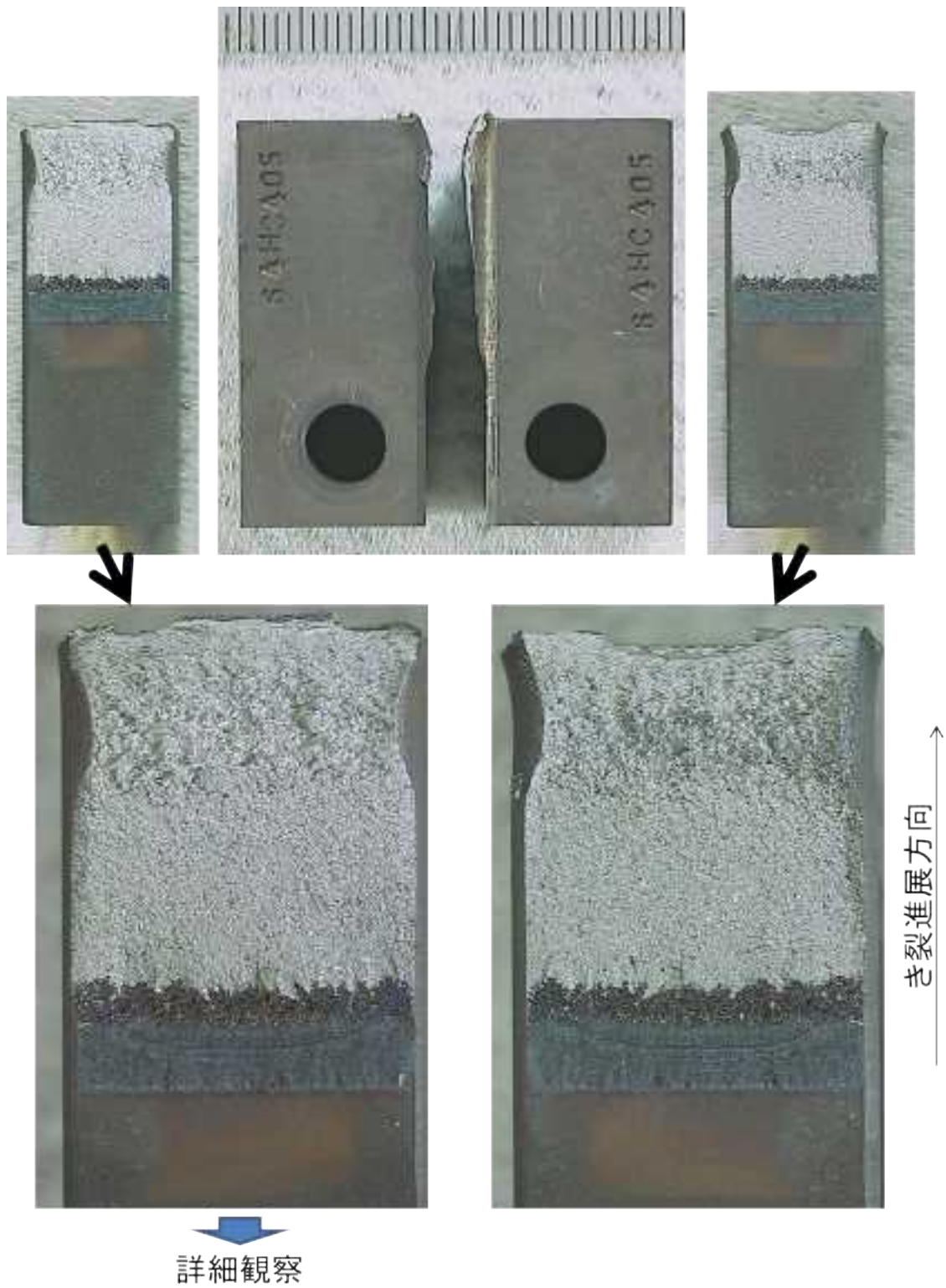


図 4.2.1.2-12(2) き裂進展試験終了後の破面観察結果  
 (64HC405(SUS316L、HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

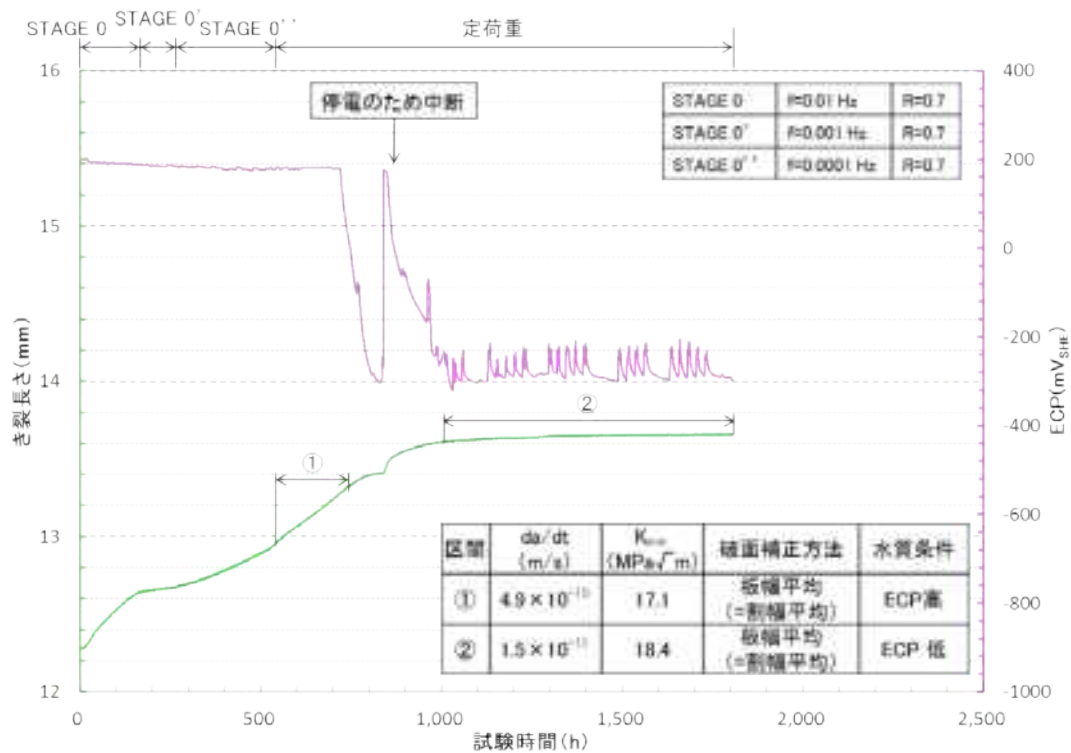


図 4.2.1.2-13(1) き裂長さの時間変化(破面補正後)(1/3)(き裂長さ と ECP)  
(64HC405(SUS316L, HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ )

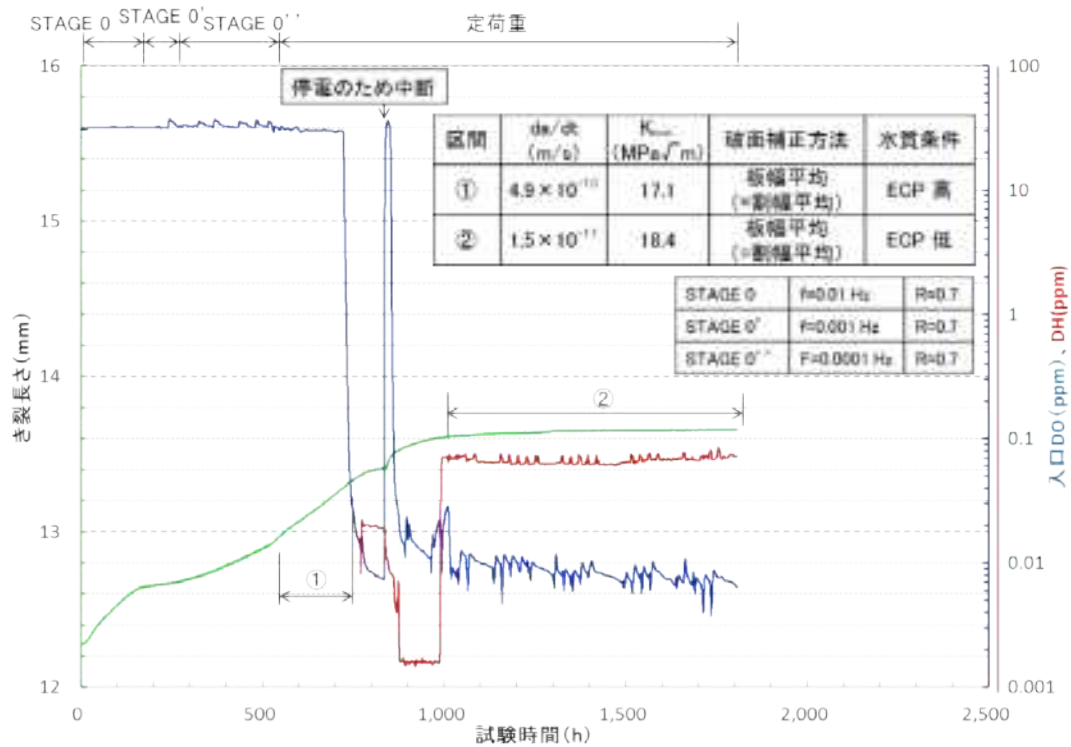


図 4.2.1.2-13(2) き裂長さの時間変化(破面補正後)(2/3)(き裂長さ と DO・DH)  
(64HC405(SUS316L, HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ )

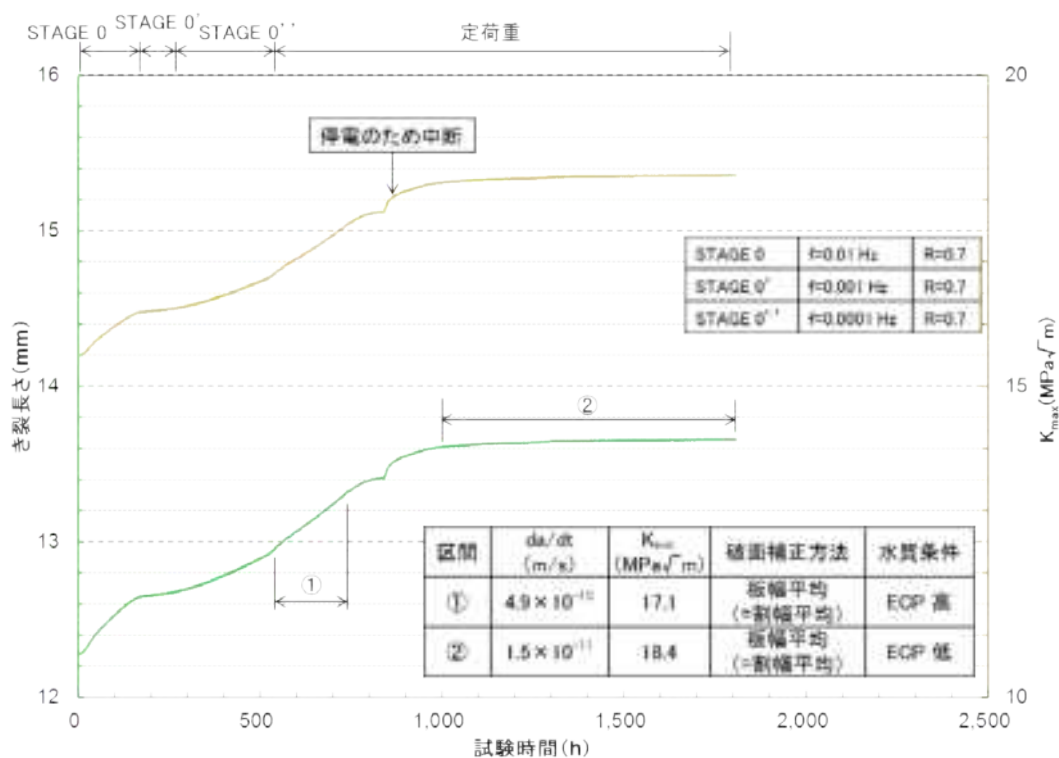


図 4.2.1.2-13(3) き裂長さの時間変化(破面補正後)(3/3)(き裂長さ と K 値)  
(64HC405(SUS316L、HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

表 4.2.1.2-15 き裂進展試験結果まとめ(64HC405、破面補正後)

鋼種	ID	損傷量 (dpa)	ECP 平均値 (mV <sub>SHE</sub> )	K 平均値 (MPa√m)	da/dt (m/s)	備考
SUS 316L	64HC405	0.793	180	17.1	$4.9 \times 10^{-10}$	ECP 高
			-280	18.4	$1.5 \times 10^{-11}$	ECP 低



f. 既存照射材を使ったき裂進展試験のまとめ

①水のラジオリシスがき裂進展に及ぼす影響評価試験

破面補正によりき裂進展速度を評価した試験片 ID A412、A413 及び A425 の結果と文献値との比較を図 4.2.1.2-14 に示す。本研究で用いた試験片は、文献<sup>[4.2.1.2-1]</sup>のデータを取得した JMTR で照射された試験片の一部である。

A412 については、高 ECP(ECP1)では文献<sup>[4.2.1.2-1]</sup>と同等のき裂進展速度が得られた。低 ECP(ECP2)では文献値よりも ECP が低いものの、DO や DH 条件は同等であり、き裂進展速度も文献<sup>[4.2.1.2-1]</sup>と同程度であった。

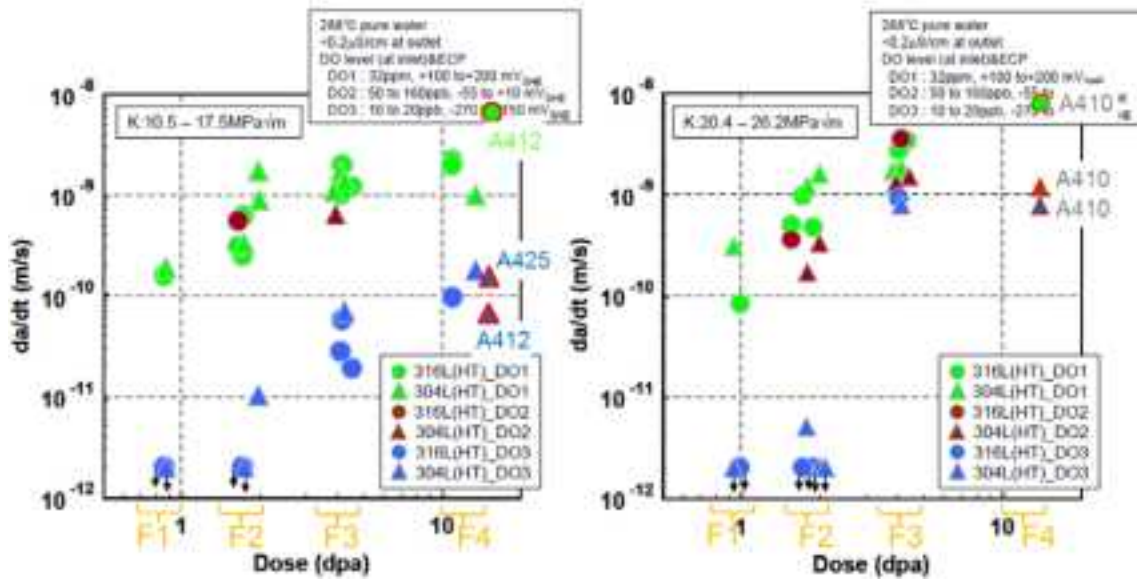
A413 については、板幅に対する SCC 割れ幅が 60%以下で、文献<sup>[4.2.1.2-1]</sup>のスクリーニング条件では参考値扱いとなる結果であるが、板幅平均で求めたき裂進展速度は文献<sup>[4.2.1.2-2]</sup>の非照射材と同程度であり、0.5T-CT 試験片の放射するγ線によって、き裂の進展が助長する傾向は認められなかった。

A425 については、文献<sup>[4.2.1.2-1]</sup>のデータは、ECP 値が文献値より低いものの、DO が <10ppb、水素注入なしの環境は同等である。大気中予き裂が板厚方向に均一に進んでいない点で特異であるが、得られたき裂進展速度は文献<sup>[4.2.1.2-1]</sup>と同程度であった。

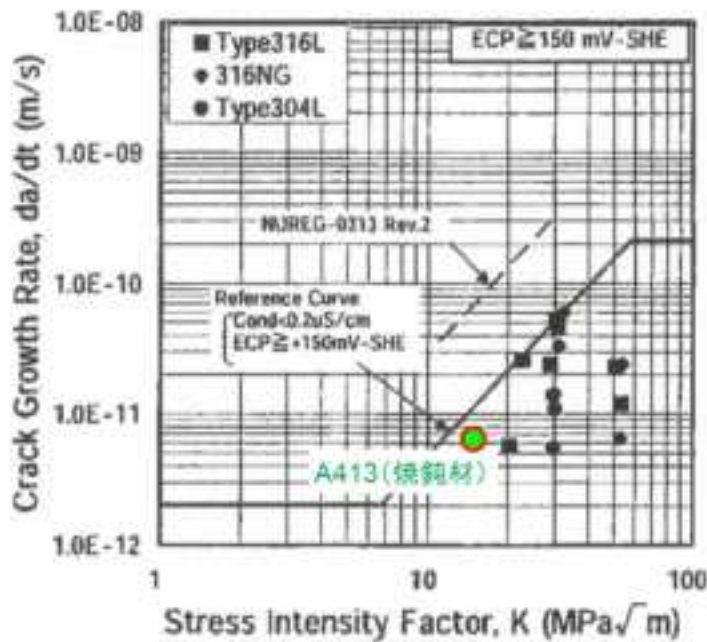
②.照射下き裂進展試験に先行した照射材のき裂進展データ取得

文献値との比較を図 4.2.1.2-15 に示す。図(a)に ECP 高でのき裂進展速度について照射材文献値との比較を示す。本研究で用いた試験片は、文献<sup>[4.2.1.2-1]</sup>のデータを取得したノルウェーのハルデン炉で照射された試験片の一部である。文献<sup>[4.2.1.2-1]</sup>のデータは NWC 条件、K 値が 10-30MPa√m の範囲で取得されており、本研究の試験条件と同様で比較可能である。本研究で得られた ECP 高でのき裂進展速度は、文献<sup>[4.2.1.2-1]</sup>のデータと同程度の値であった。

また図(b)に ECP 低でのき裂進展速度について照射材文献値との比較を示す。文献<sup>[4.2.1.2-1]</sup>のき裂進展データは JMTR 照射材から取得された値で、本研究と材料のヒートや溶接方法も異なっている。また、文献<sup>[4.2.1.2-1]</sup>の HWC 環境でのき裂進展速度は PDM の検出限界以下であった。このため正確な比較とはならないが、本研究での水素注入によるき裂進展速度の低下率は、文献値と同程度であった。

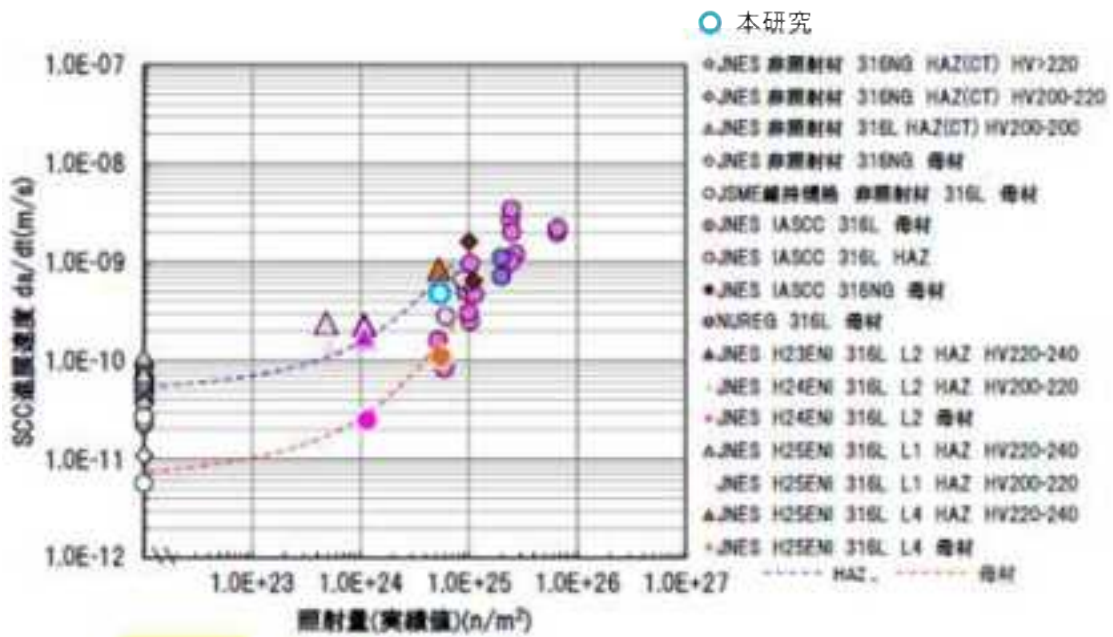


(a) A412、A425 と文献値の比較<sup>[4.2.1.2-1]</sup>

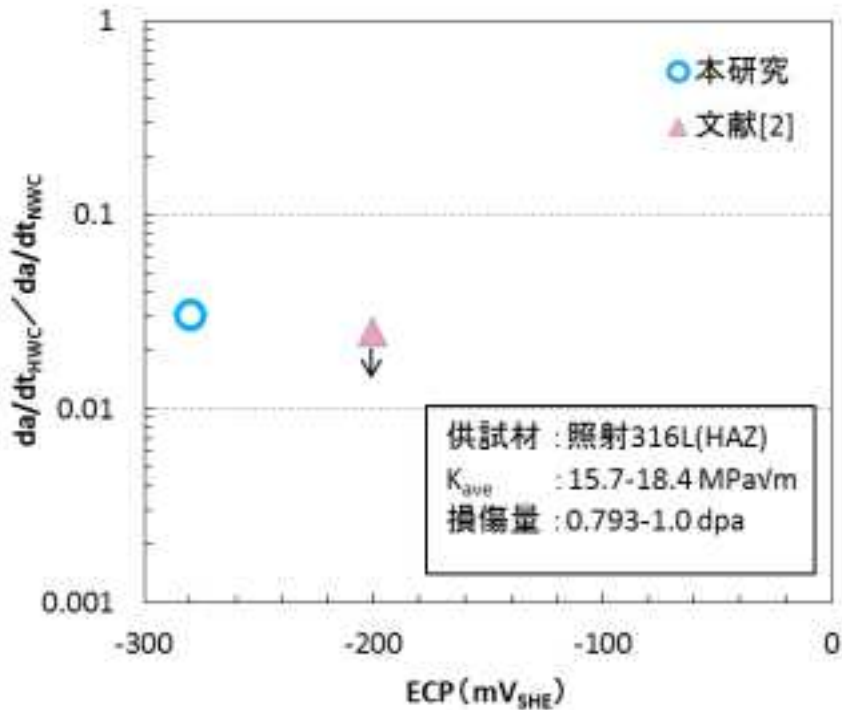


(b) A413 と文献値の比較<sup>[4.2.1.2-2]</sup>

図 4.2.1.2-14 文献値との比較(1/2)



(a) ECP 高<sup>[4.2.1.2-1]</sup>



(b) ECP 低<sup>[4.2.1.2-1]</sup>

図 4.2.1.2-15 文献値との比較

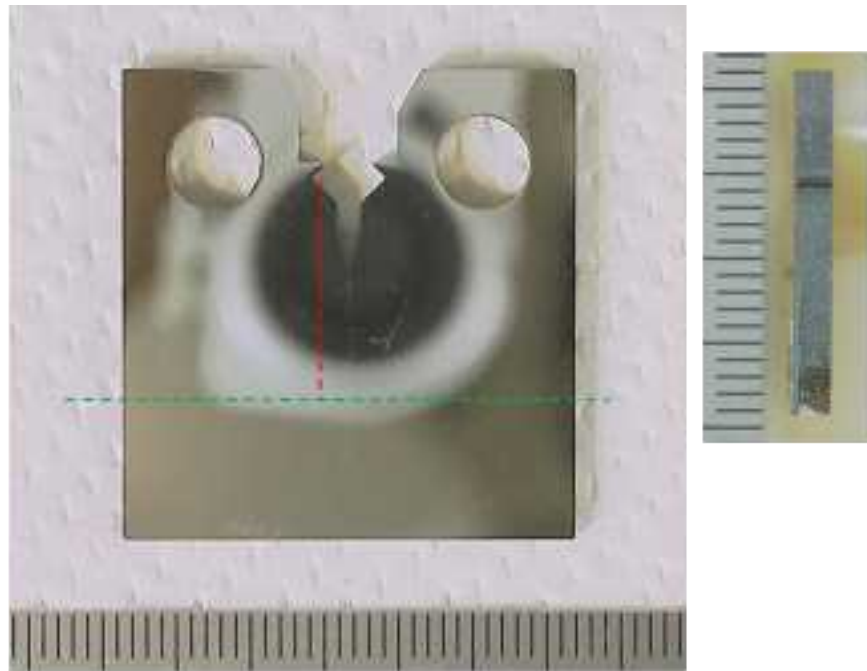
g. CT試験片の破面観察

き裂進展試験後の CT 試験片 A412、A413 および A425 について、デジタルマイクロスコープおよび SEM による破面観察を実施した。これらの試験片は JNES の IASCC 事業において、JMTR で F4 照射(高速中性子照射量の目標値：約  $8 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ )されたものである。

①試験No. 1(A412(SUS316L母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ ( $E > 1 \text{MeV}$ ))

デジタルマイクロスコープによる外観写真を図 4.2.1.2-16 に示す。A412-1 は断面観察実施後にリガメント部を切断し強制破断により破面開放したため、SCC 部先端の一部が切除されている。そのため、き裂進展速度は、A412-2 の破面のみで PDM データを補正した。

破面の SEM 観察結果を図 4.2.1.2-17(1)～(12)に示す。試験片 A412 のき裂進展試験は、開始時が NWC 環境、その後 HWC 環境に移行して実施されたが、酸化物は NWC 環境で進展した SCC 始端部の方が、HWC 環境で進展した SCC 終端部(先端部)より多い傾向であった。



----- 疲労破断前に切断  
 ----- 疲労破断後に切断

A412-1 (断面金相観察後)



A412-2-1  
 (破面SEM  
 観察試料)



A412-2



A412-2-2

図 4.2.1.2-16 き裂進展試験後のデジタルマイクロスコープによる試験片外観観察結果  
 (A412(SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ ( $E > 1 \text{MeV}$ )))

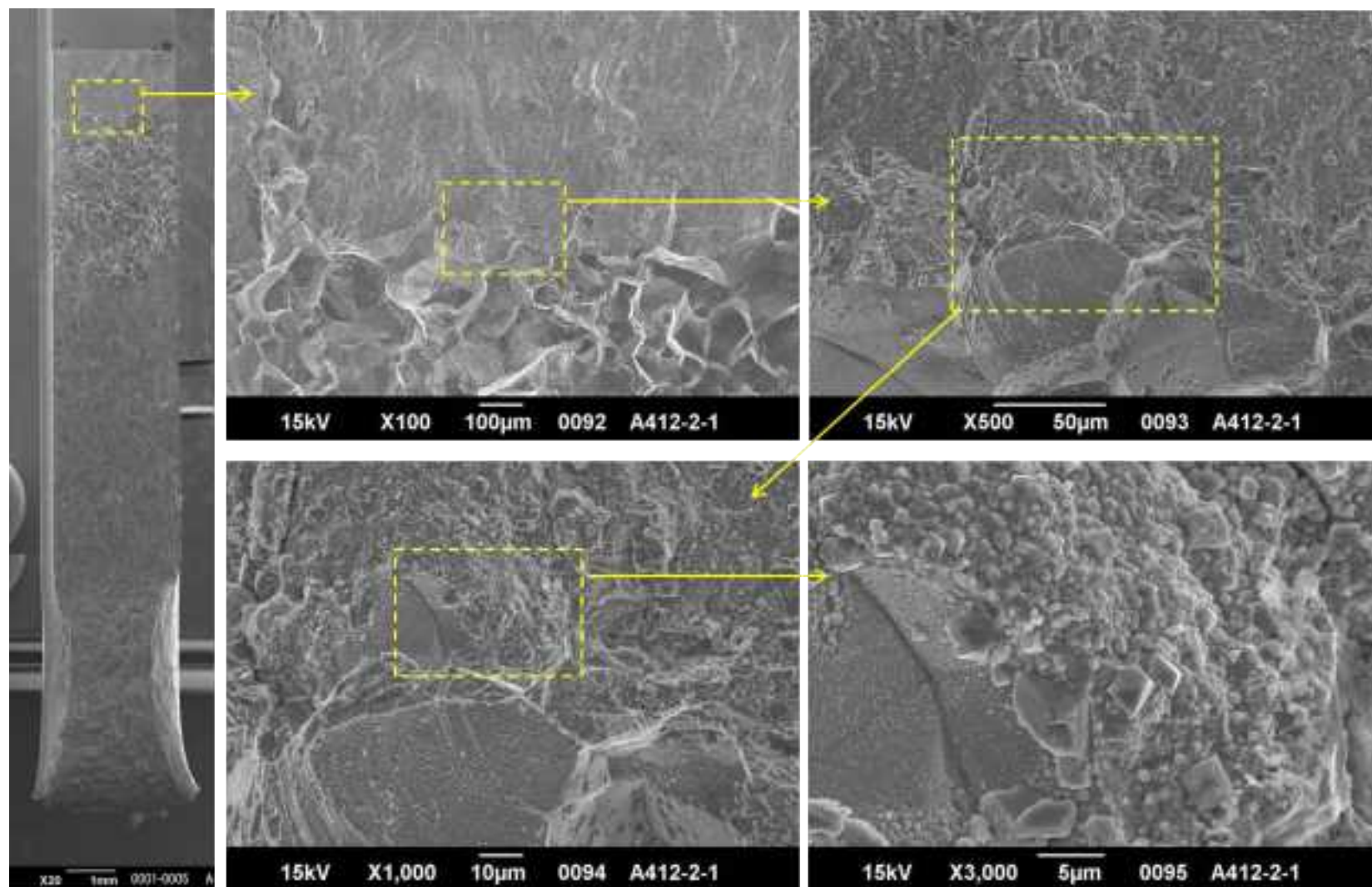


図 4.2.1.2-17(1) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A412(SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

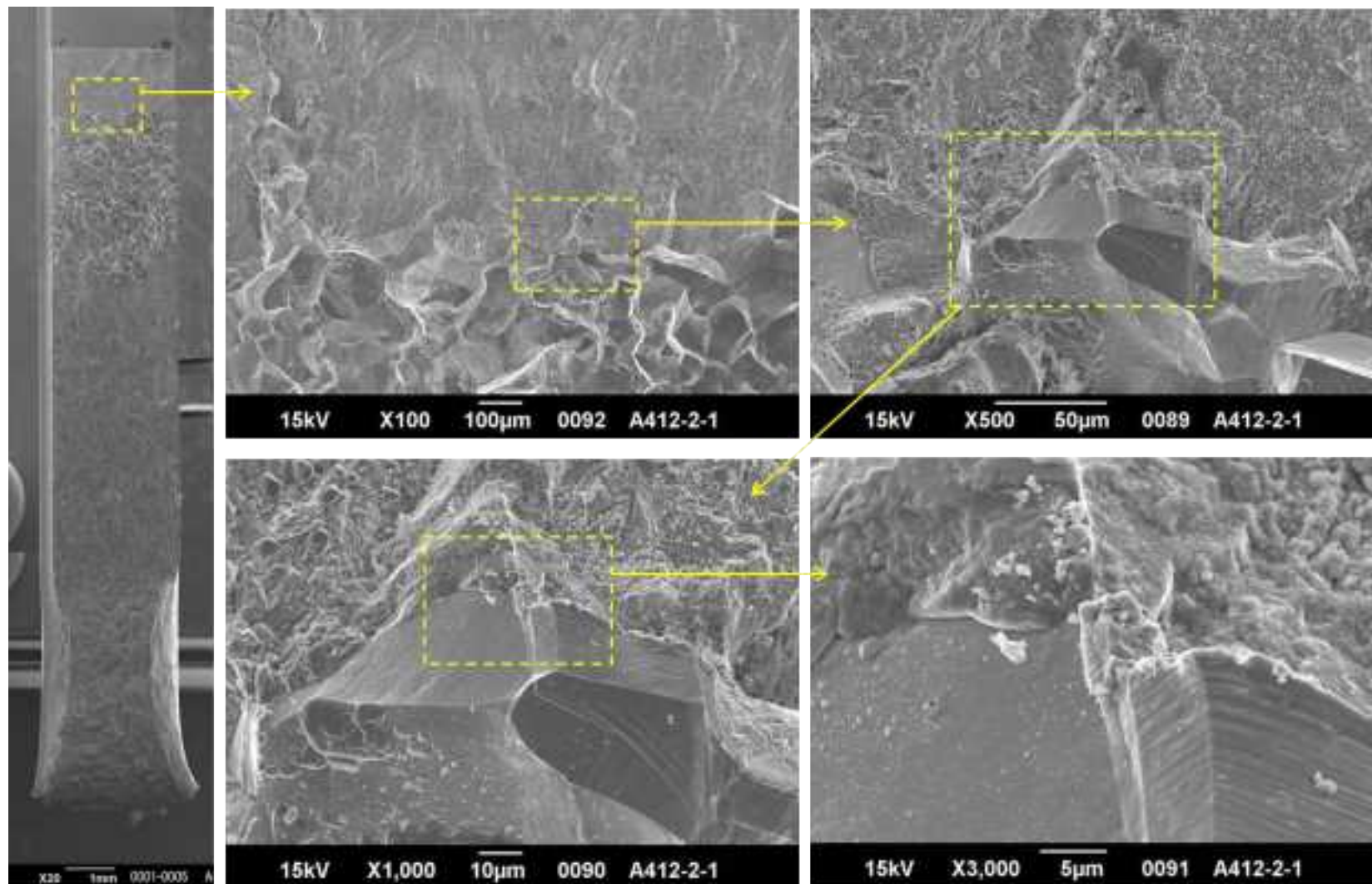


図 4.2.1.2-17(2) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A412(SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

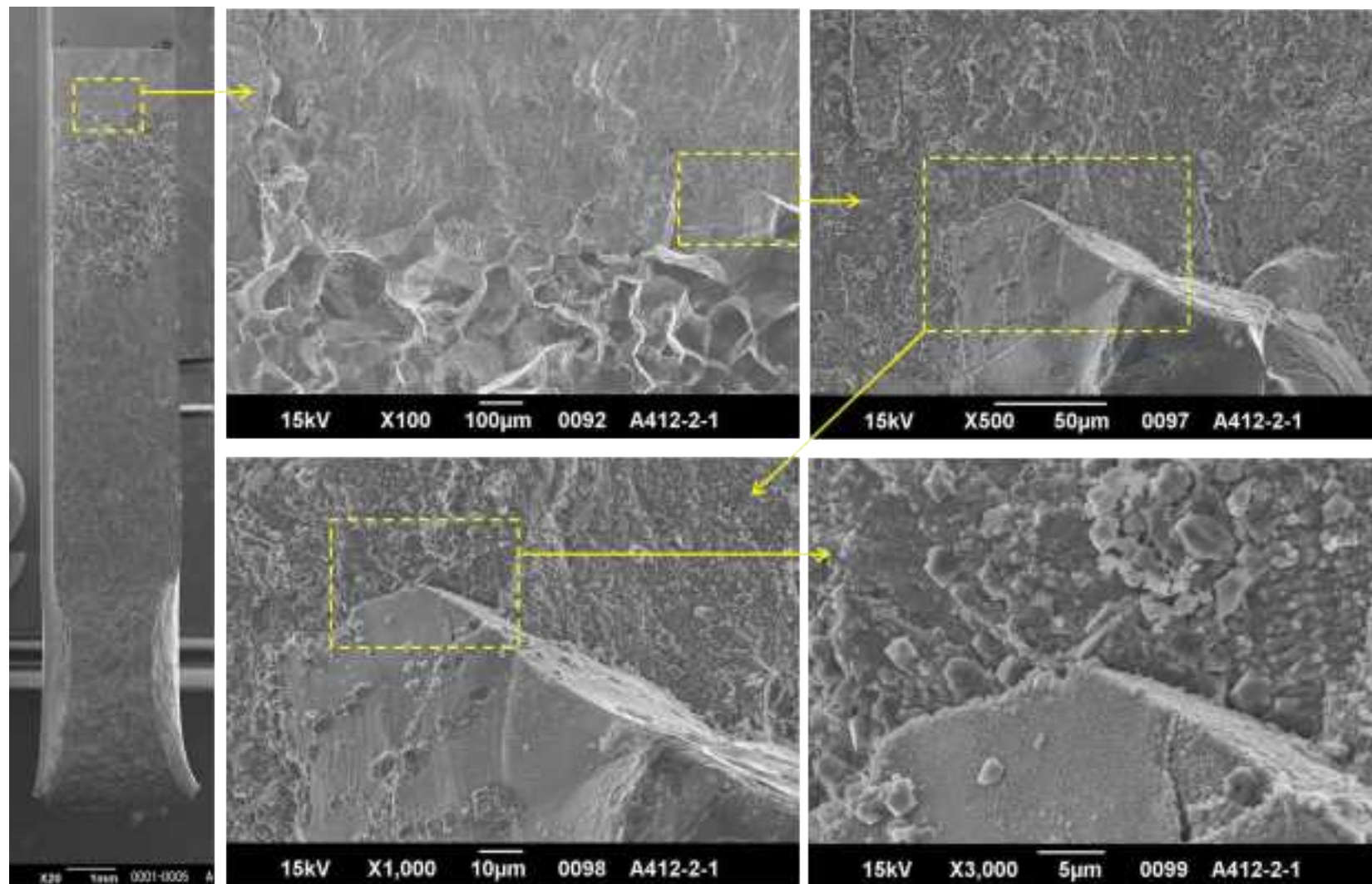


図 4.2.1.2-17(3) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A412(SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))



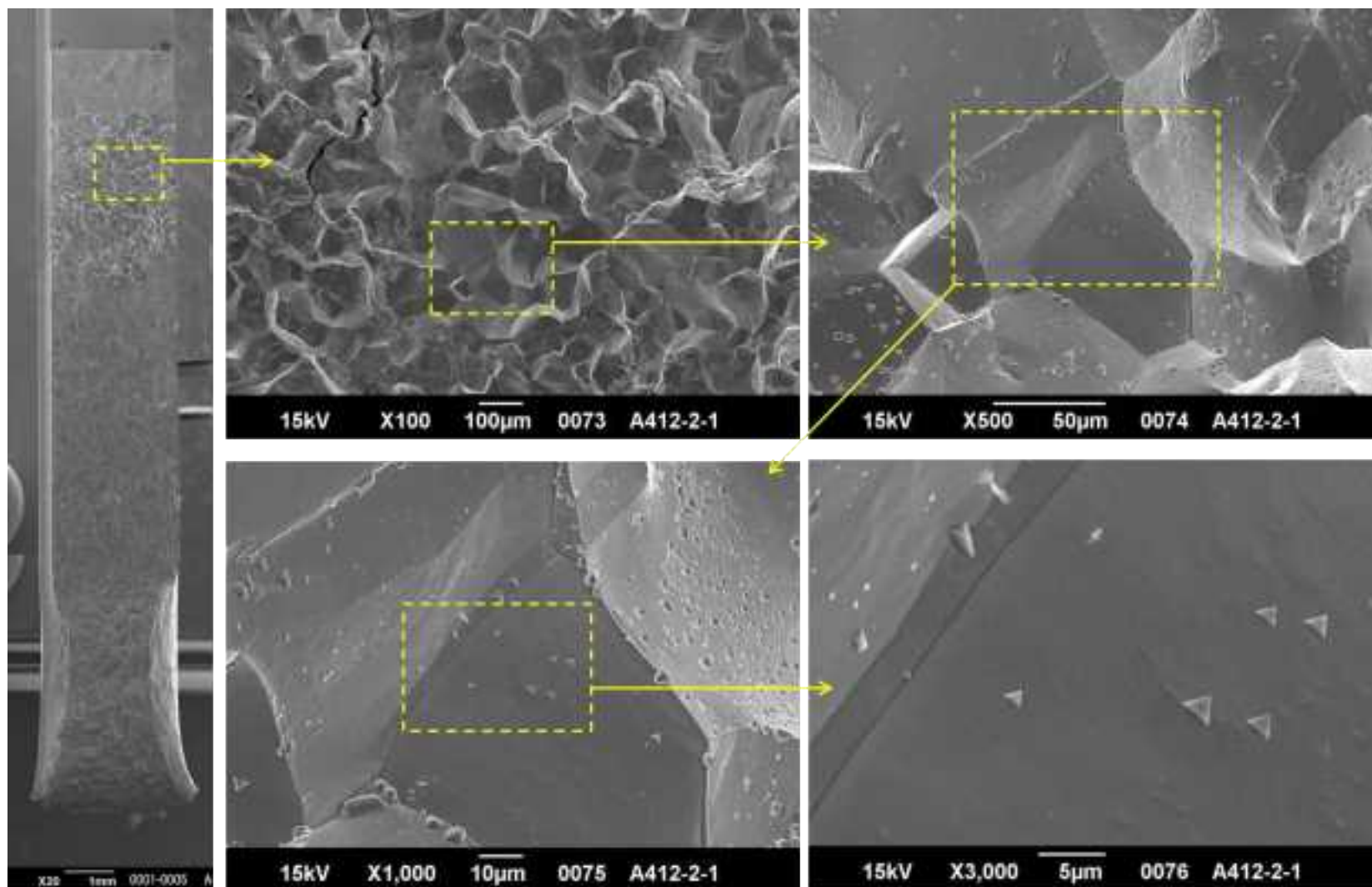


図 4.2.1.2-17(4) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A412(SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

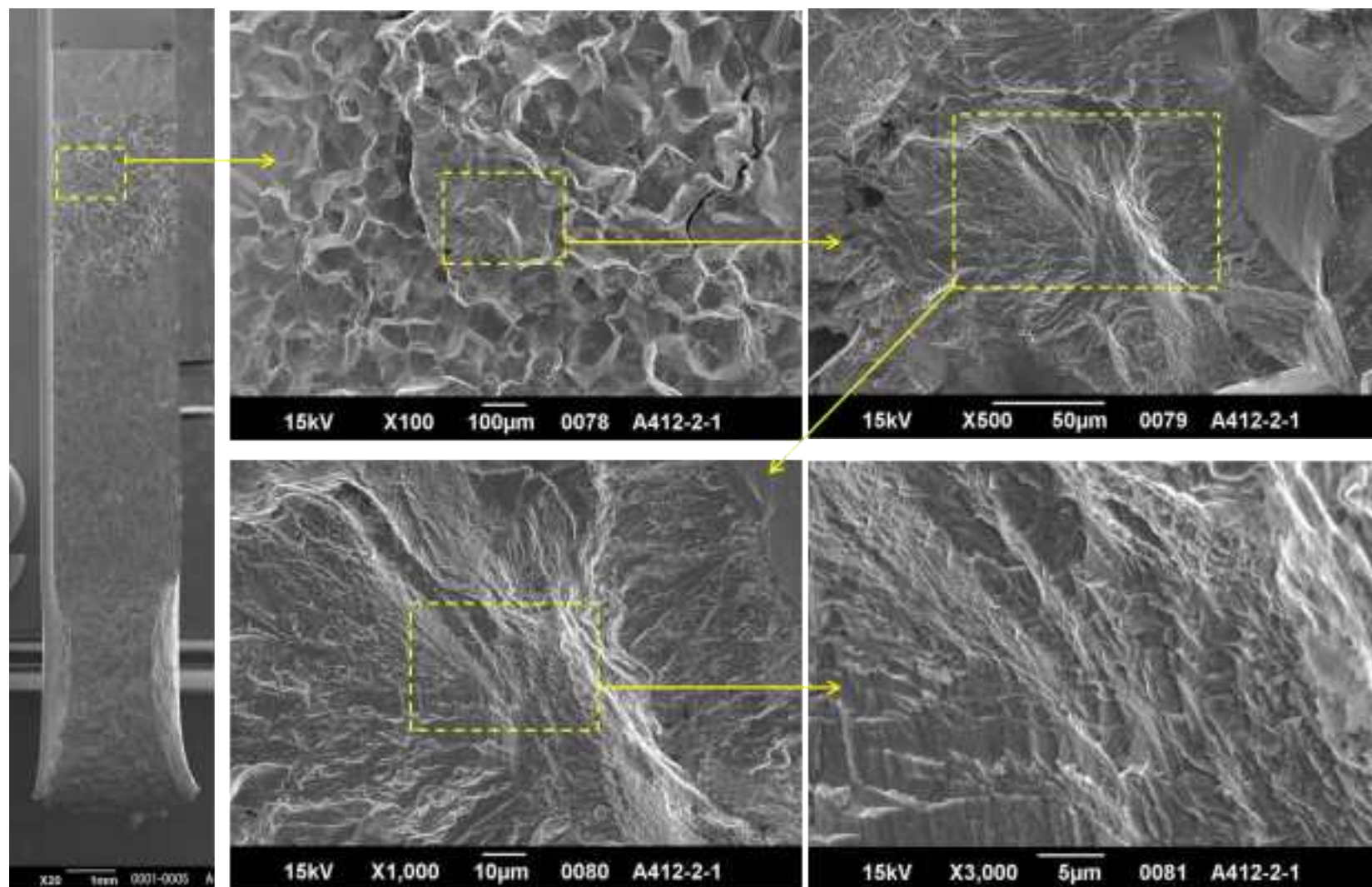


図 4.2.1.2-17(5) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A412(SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$ ))

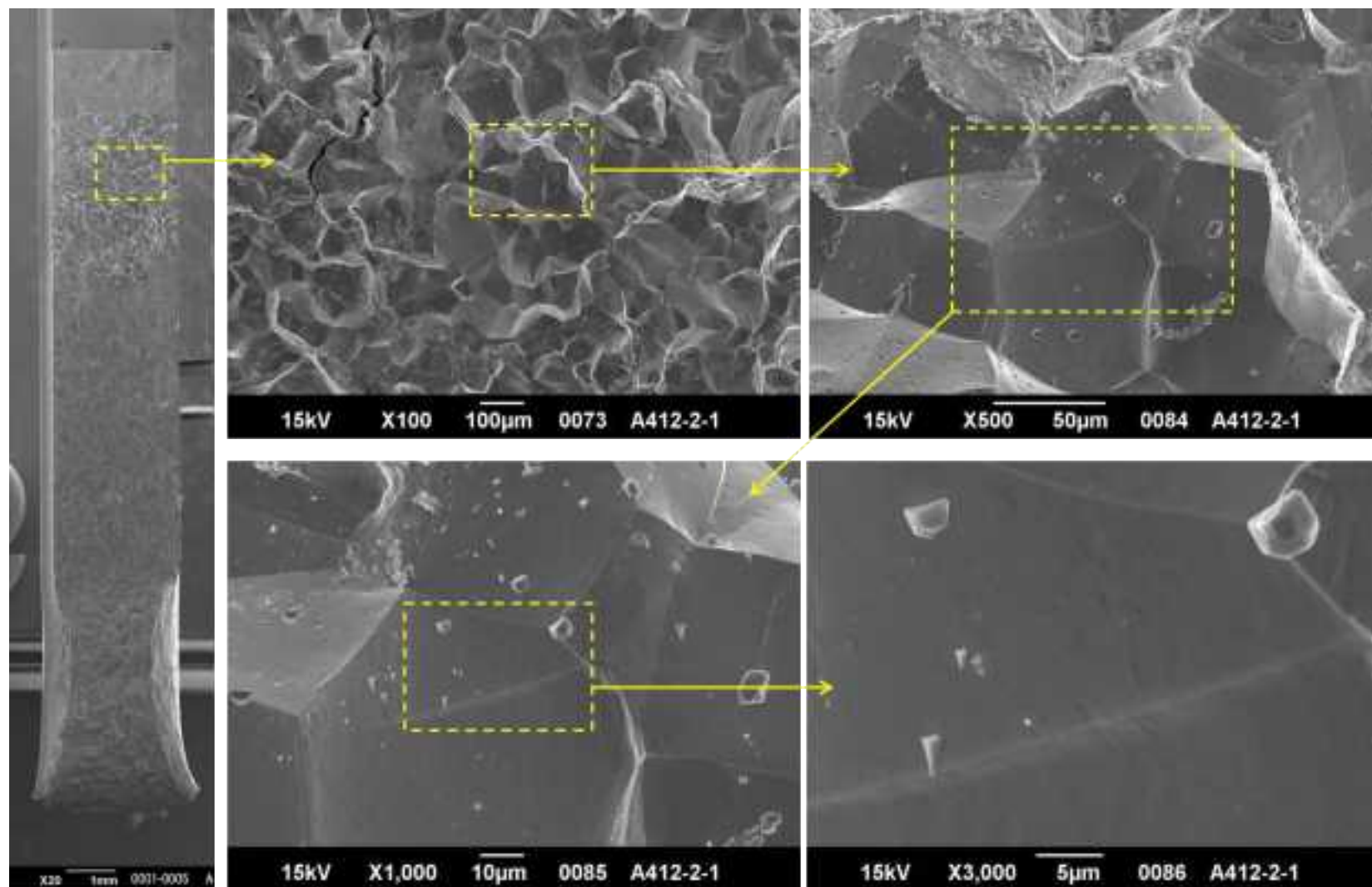


図 4.2.1.2-17(6) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A412(SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

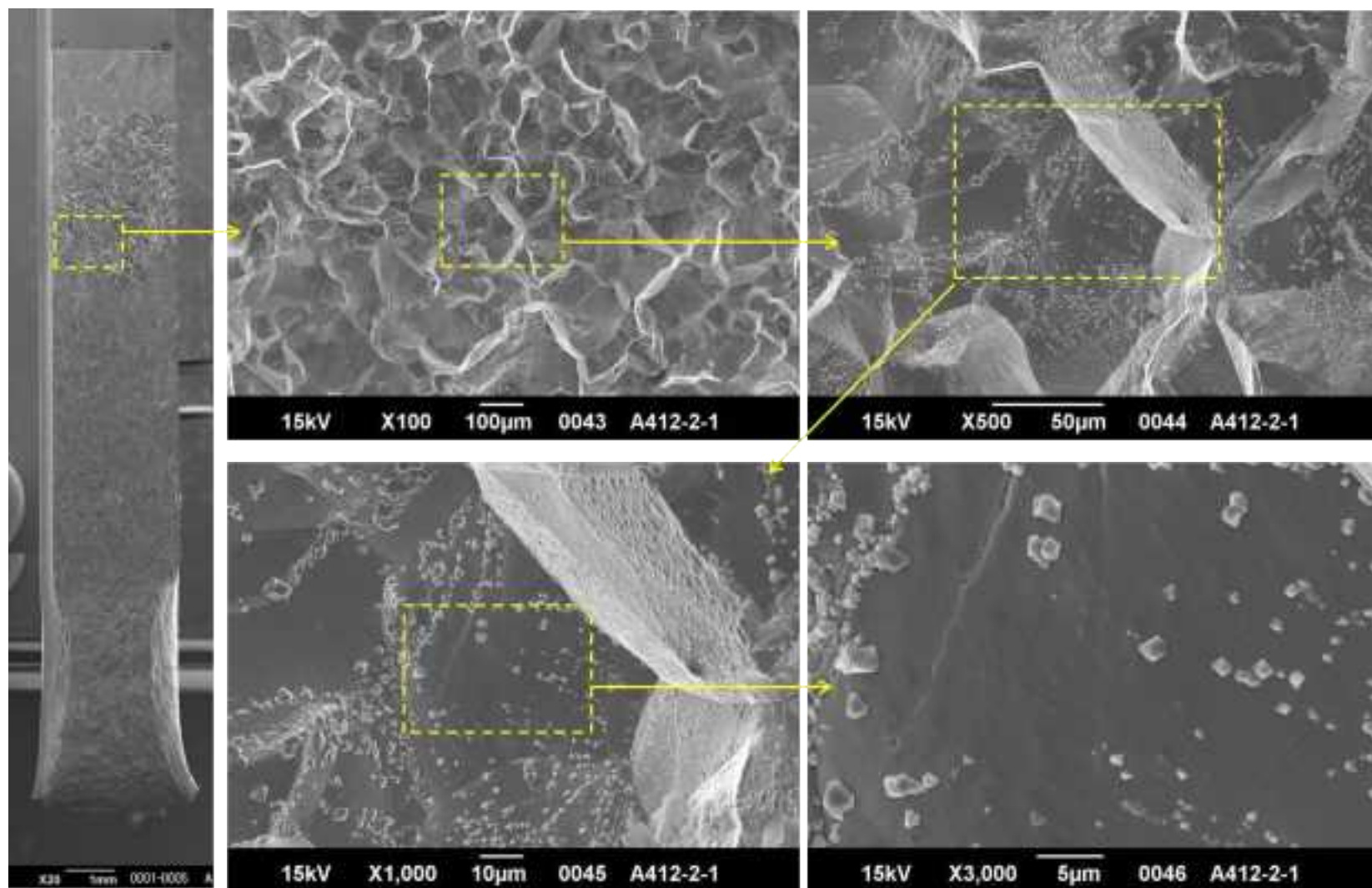


図 4.2.1.2-17(7) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A412(SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

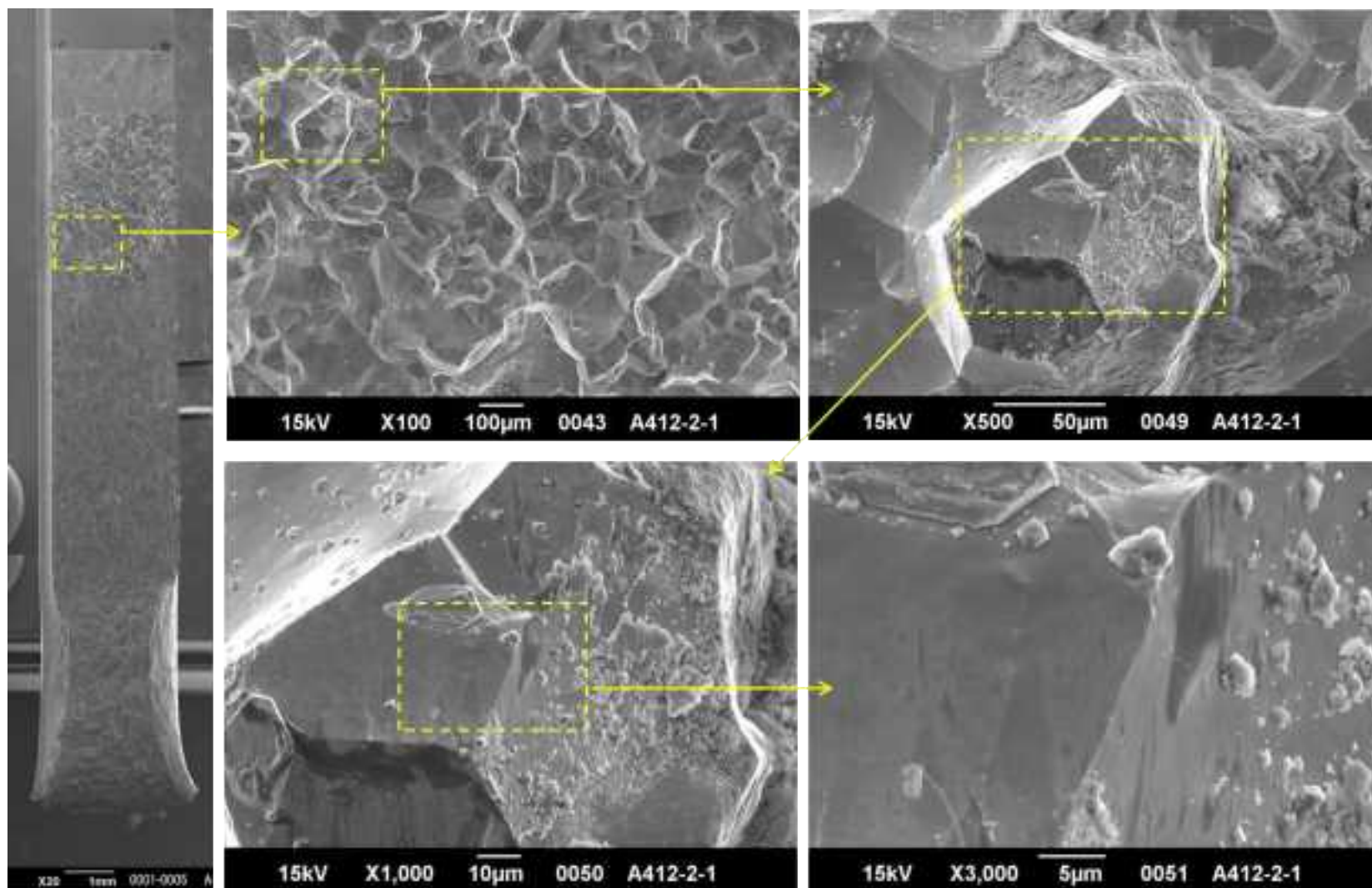


図 4.2.1.2-17(8) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A412(SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

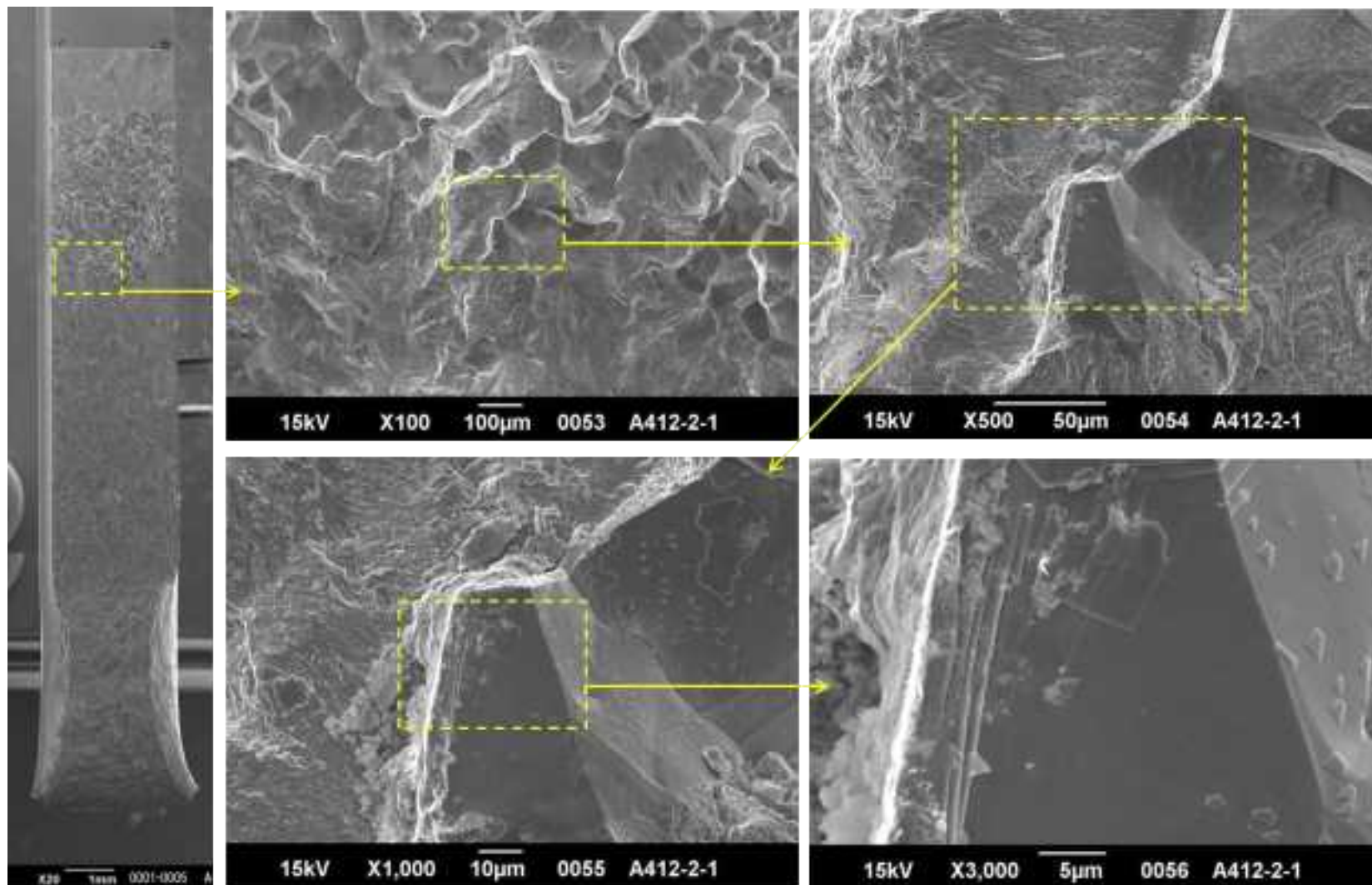


図 4.2.1.2-17(9) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A412(SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

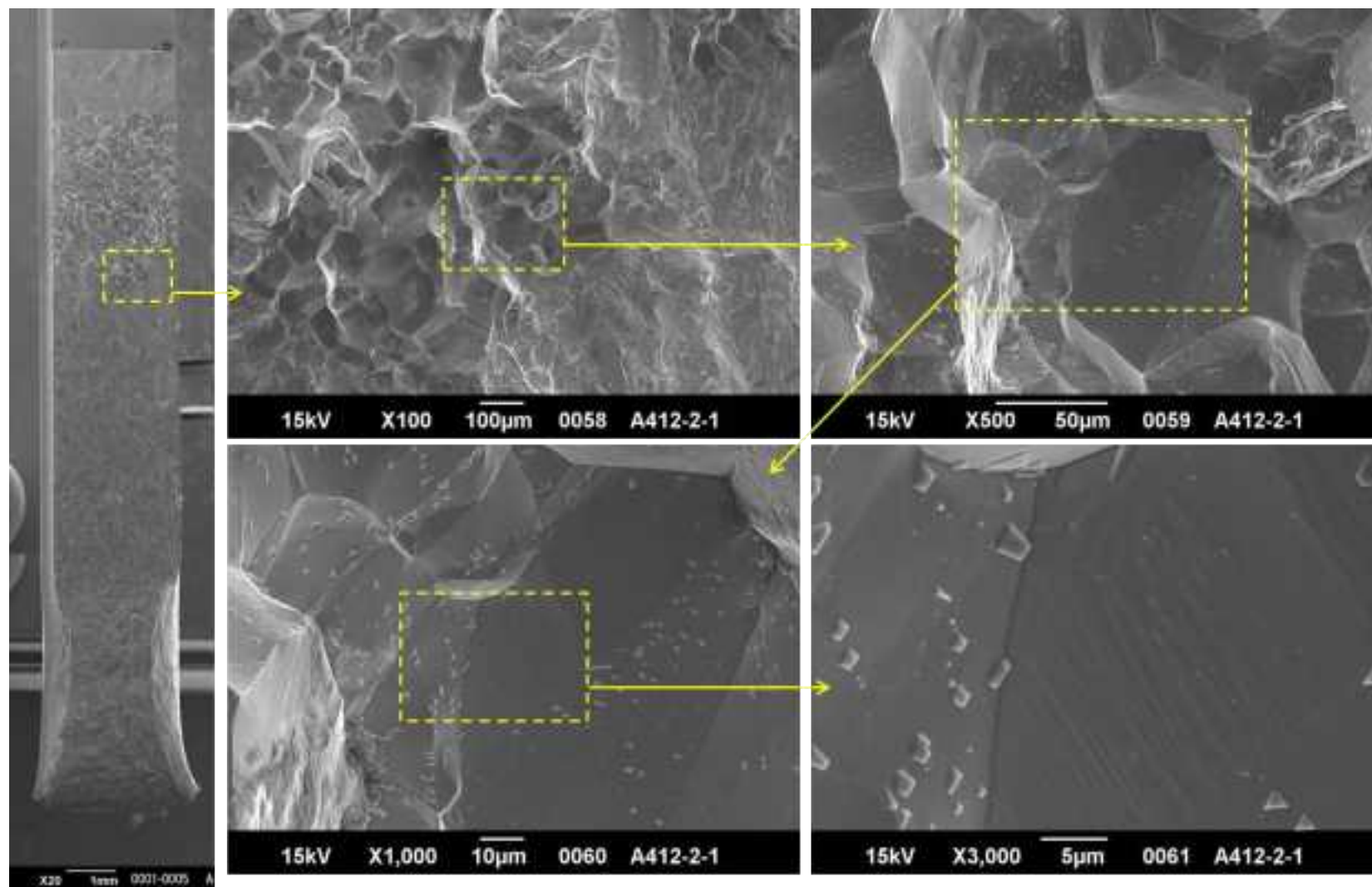


図 4.2.1.2-17(10) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A412(SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

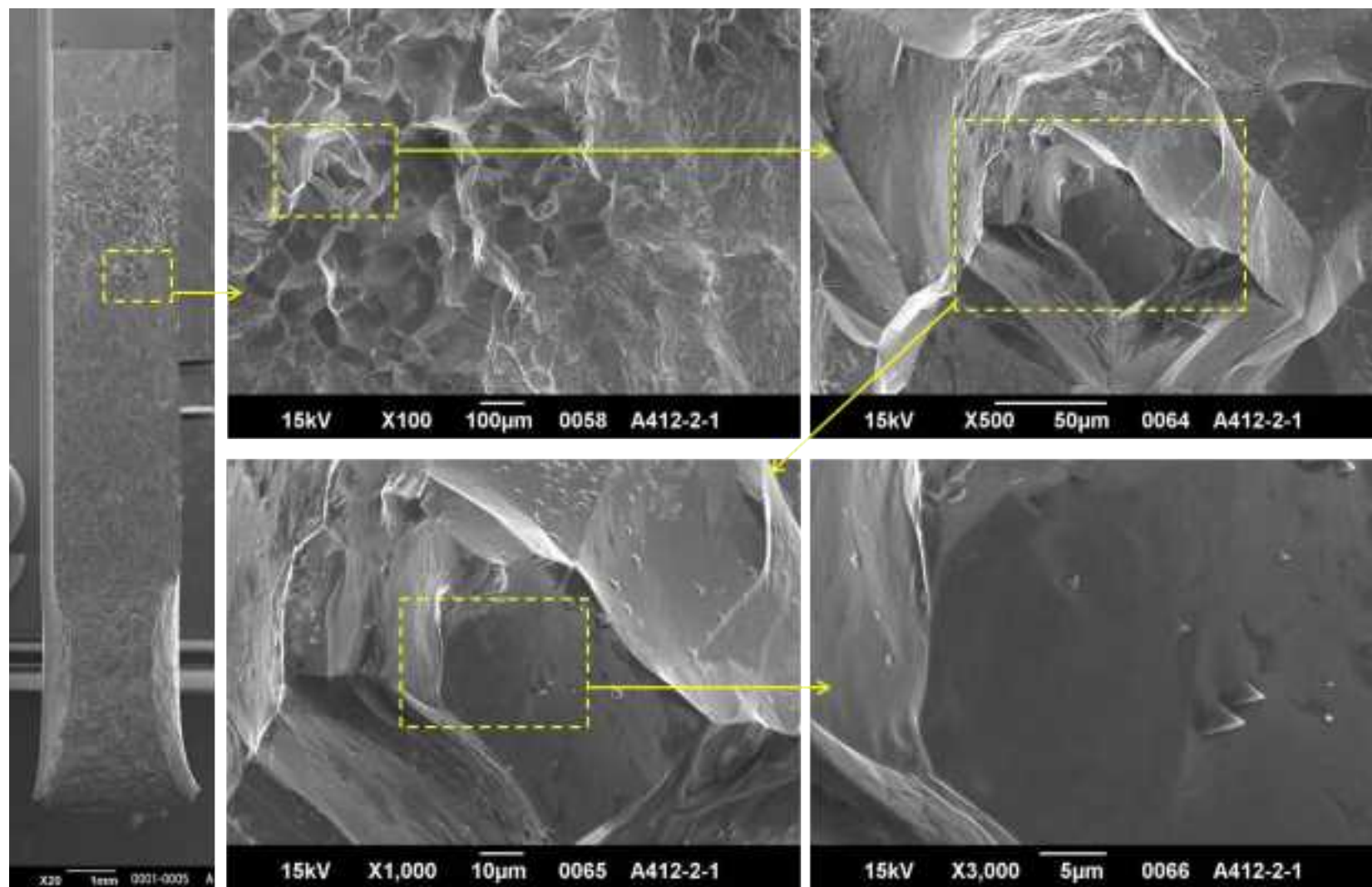


図 4.2.1.2-17(11) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A412(SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))



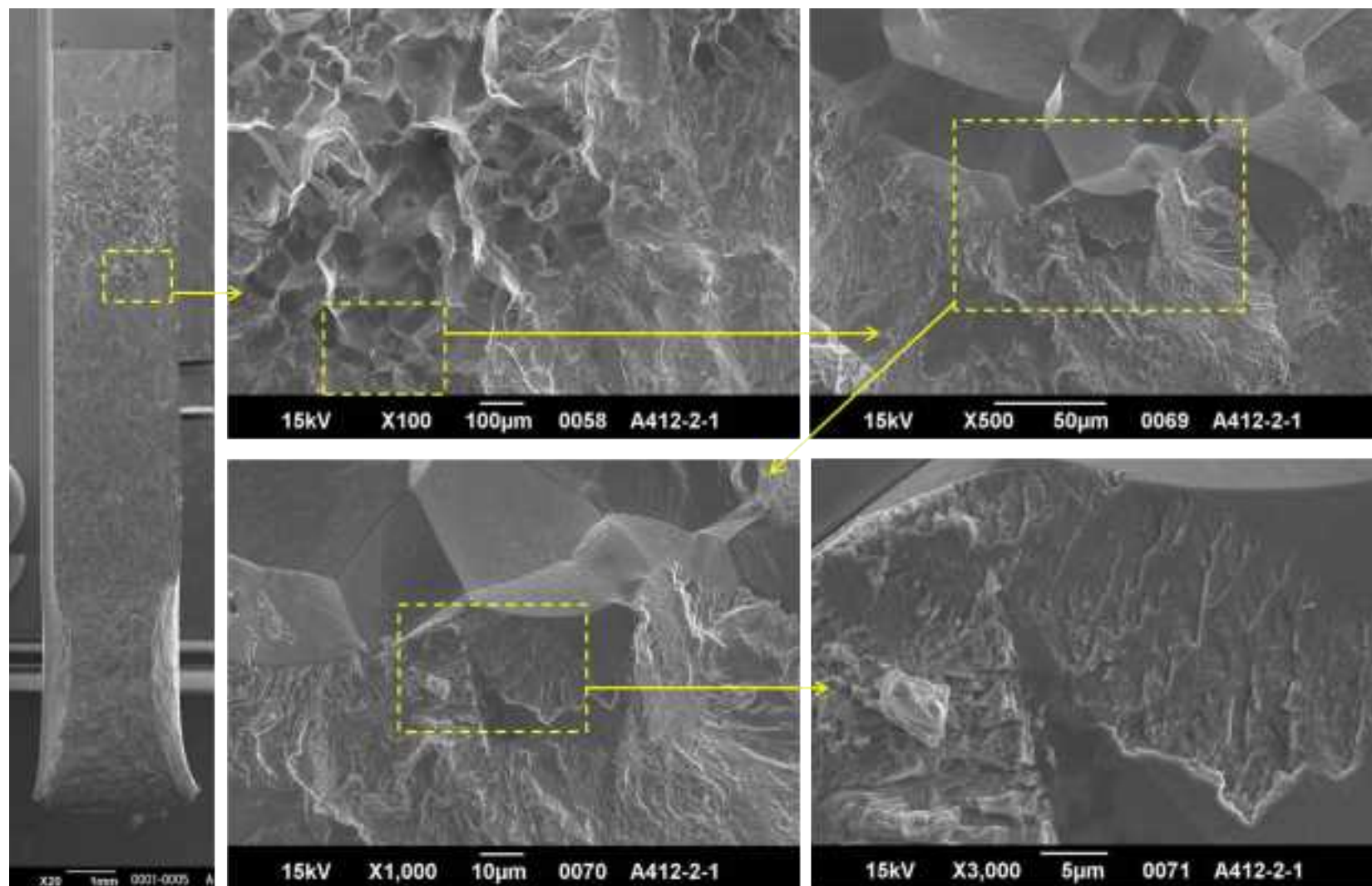


図 4.2.1.2-17(12) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A412(SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

②試験No. 2(A413(SUS316L母材、 $7.33 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ ( $E > 1 \text{MeV}$ )、 $700^\circ\text{C} \times 1 \text{h}$ 照射後焼鈍材)

デジタルマイクロスコープによる外観写真を図 4.2.1.2-18 に示す。A413 破面には SCC き裂と思われる割れが観察されたが、非常に狭い範囲であった。

破面の SEM 観察結果を図 4.2.1.2-19(1)～(6)に示す。試験片 A413 のき裂進展試験環境は NWC であったが、前述の A412 の SCC き裂の始端部と同様に多数の酸化物が観察された。

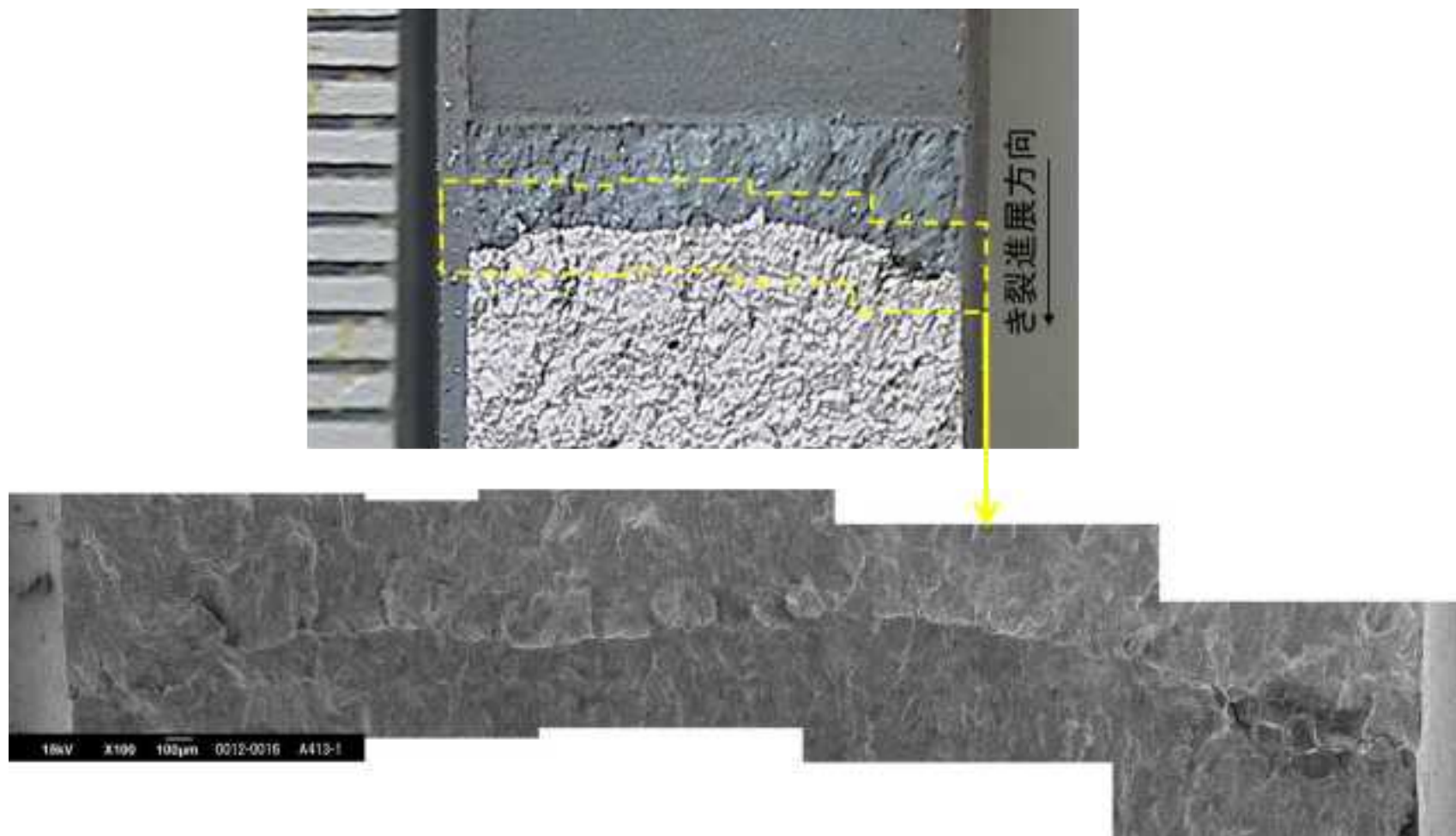


図 4.2.1.2-18 き裂進展試験後のデジタルマイクロスコープによる試験片外観観察結果  
(A413(SUS316L 母材、 $7.33 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ ( $E > 1 \text{MeV}$ )、 $700^\circ\text{C} \times 1\text{h}$  照射後焼鈍材))

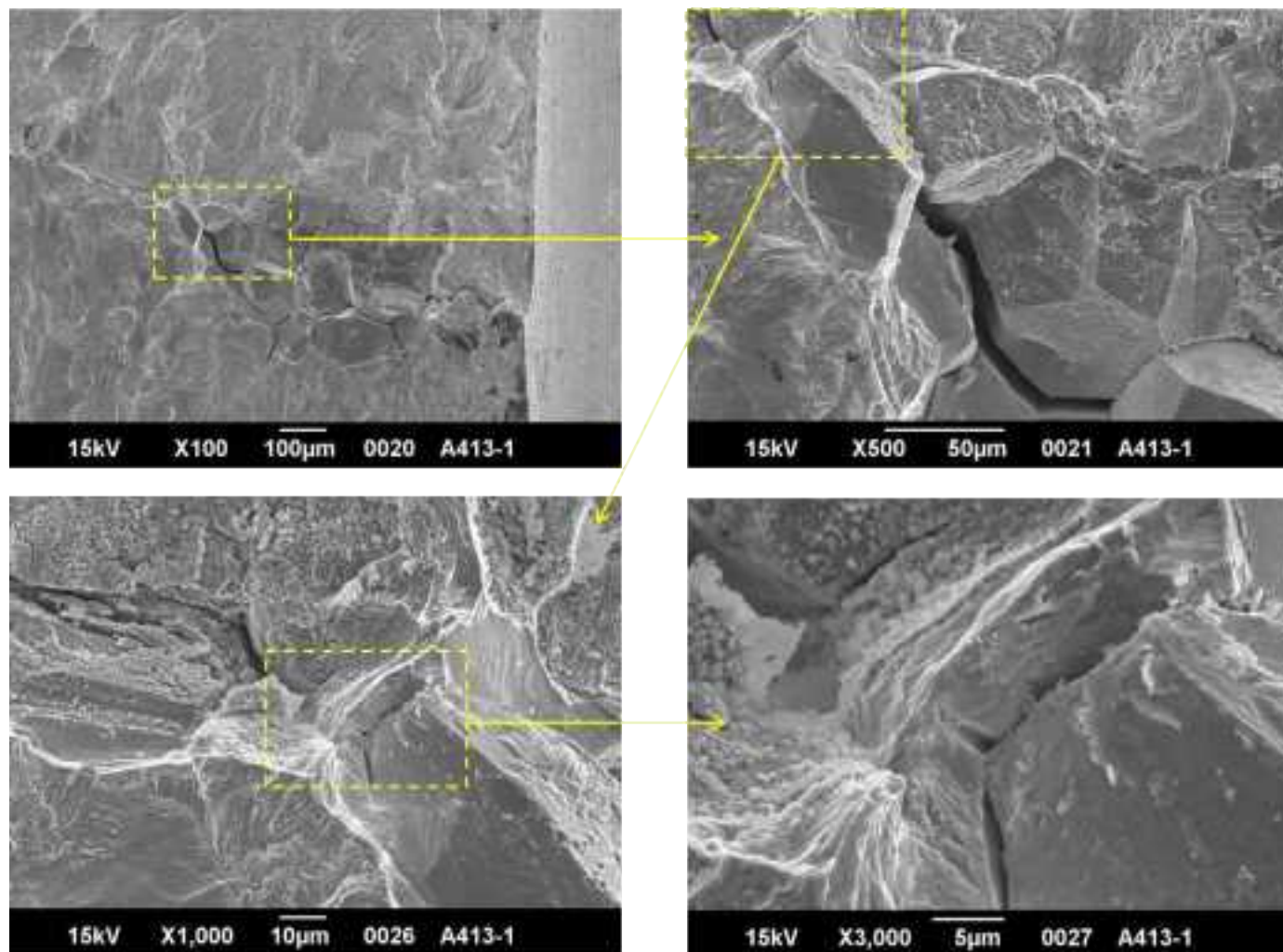


図 4.2.1.2-19(1) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果  
(A413(SUS316L 母材、 $7.33 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ ( $E > 1 \text{MeV}$ )、 $700^\circ\text{C} \times 1\text{h}$  照射後焼鈍材))

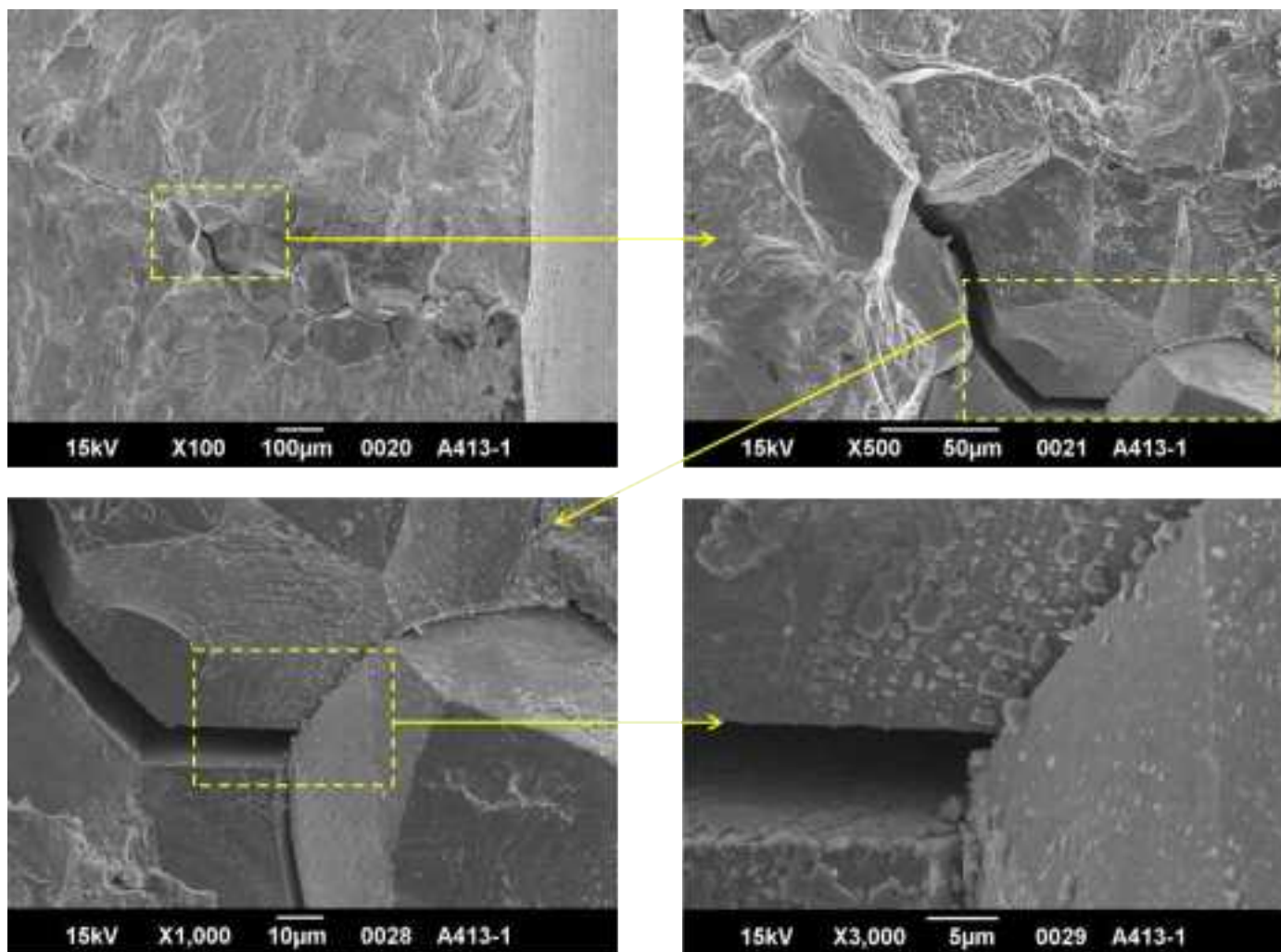


図 4.2.1.2-19(2) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果  
(A413(SUS316L 母材、 $7.33 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ 、 $700^\circ\text{C} \times 1 \text{h}$  照射後焼鈍材))

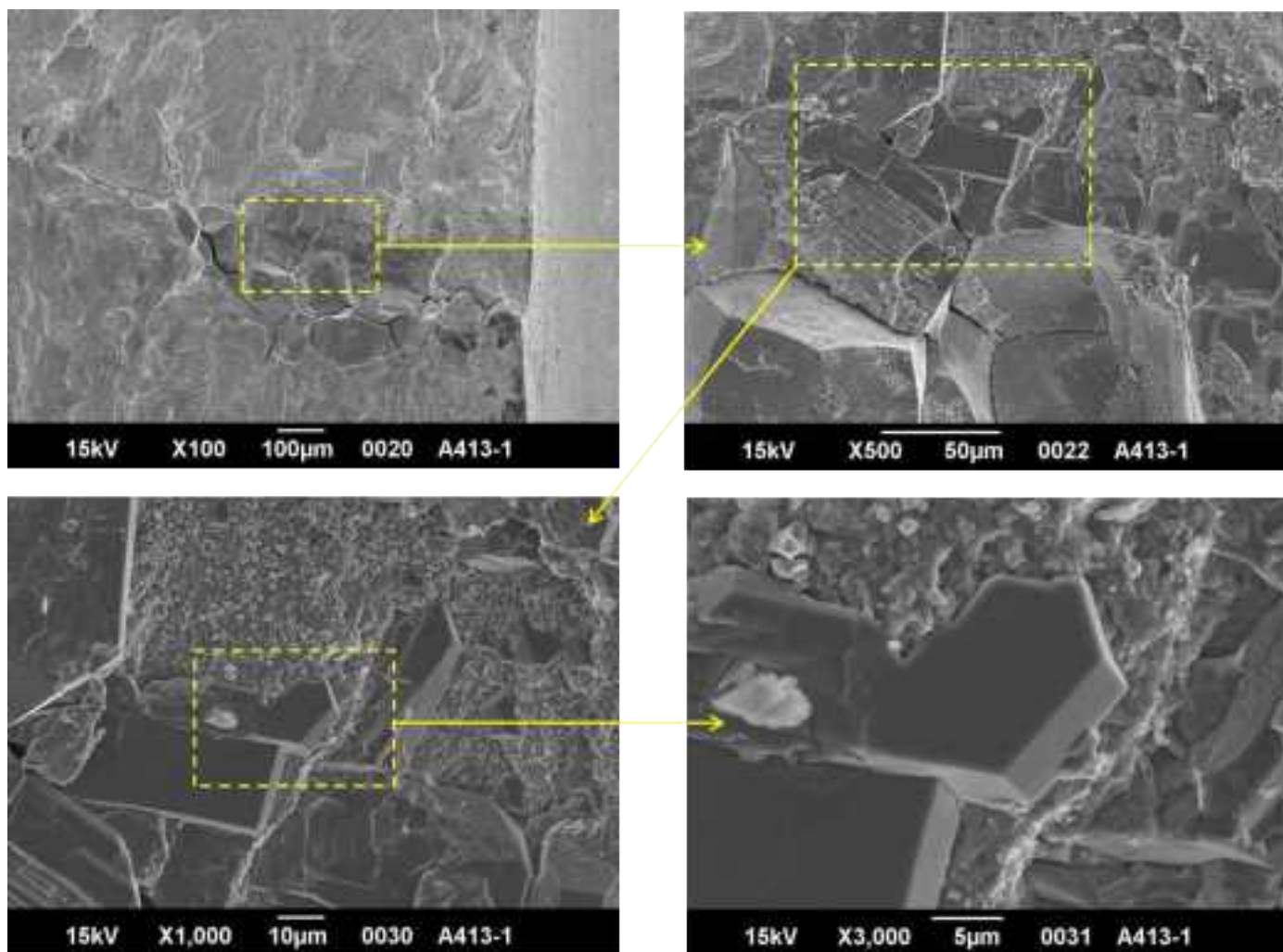


図 4.2.1.2-19(3) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果  
(A413(SUS316L 母材、 $7.33 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ 、 $700^\circ\text{C} \times 1 \text{h}$  照射後焼鈍材))

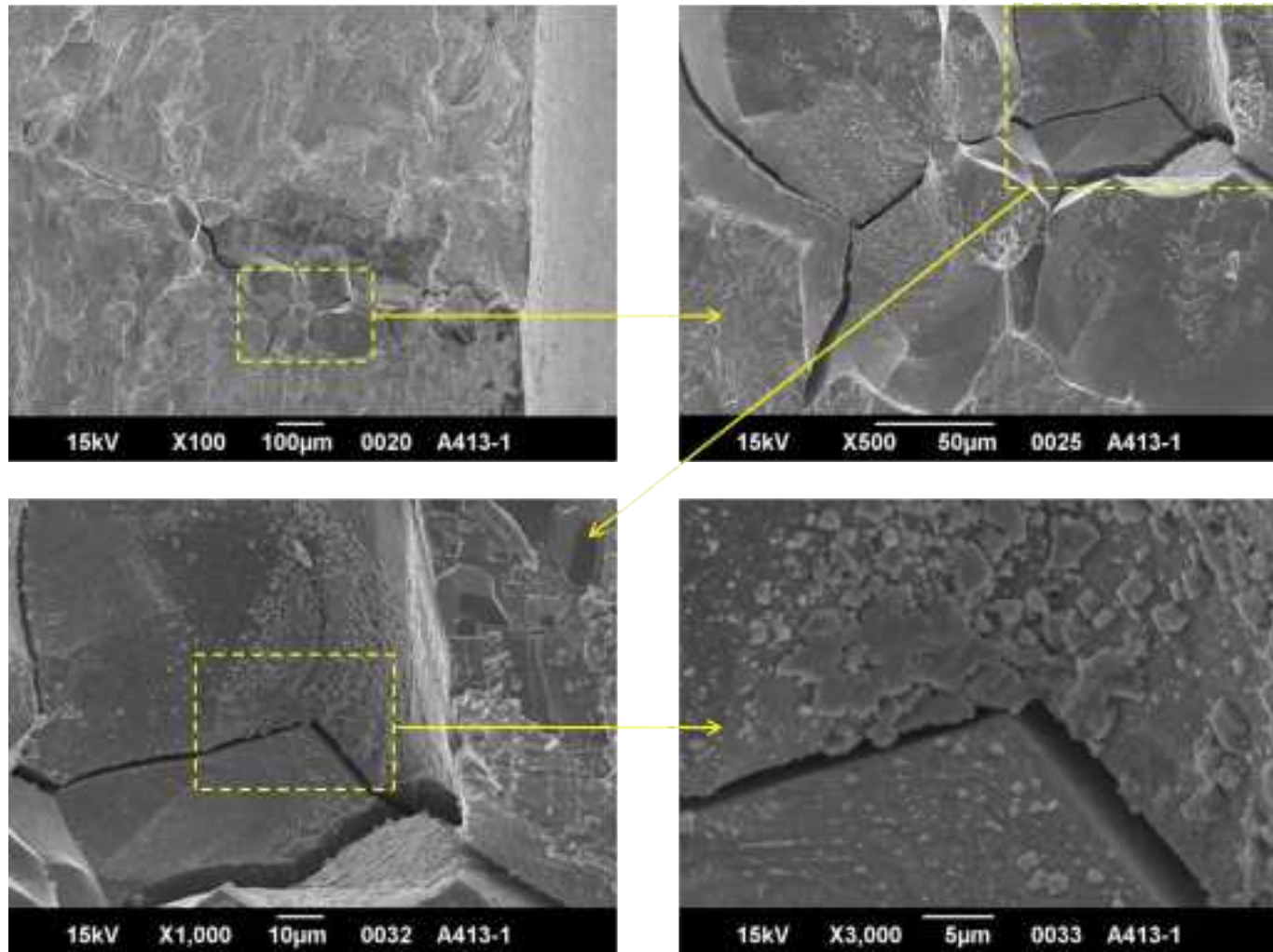


図 4.2.1.2-19(4) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果  
(A413(SUS316L 母材、 $7.33 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ ( $E > 1 \text{MeV}$ )、 $700^\circ\text{C} \times 1 \text{h}$  照射後焼鈍材))

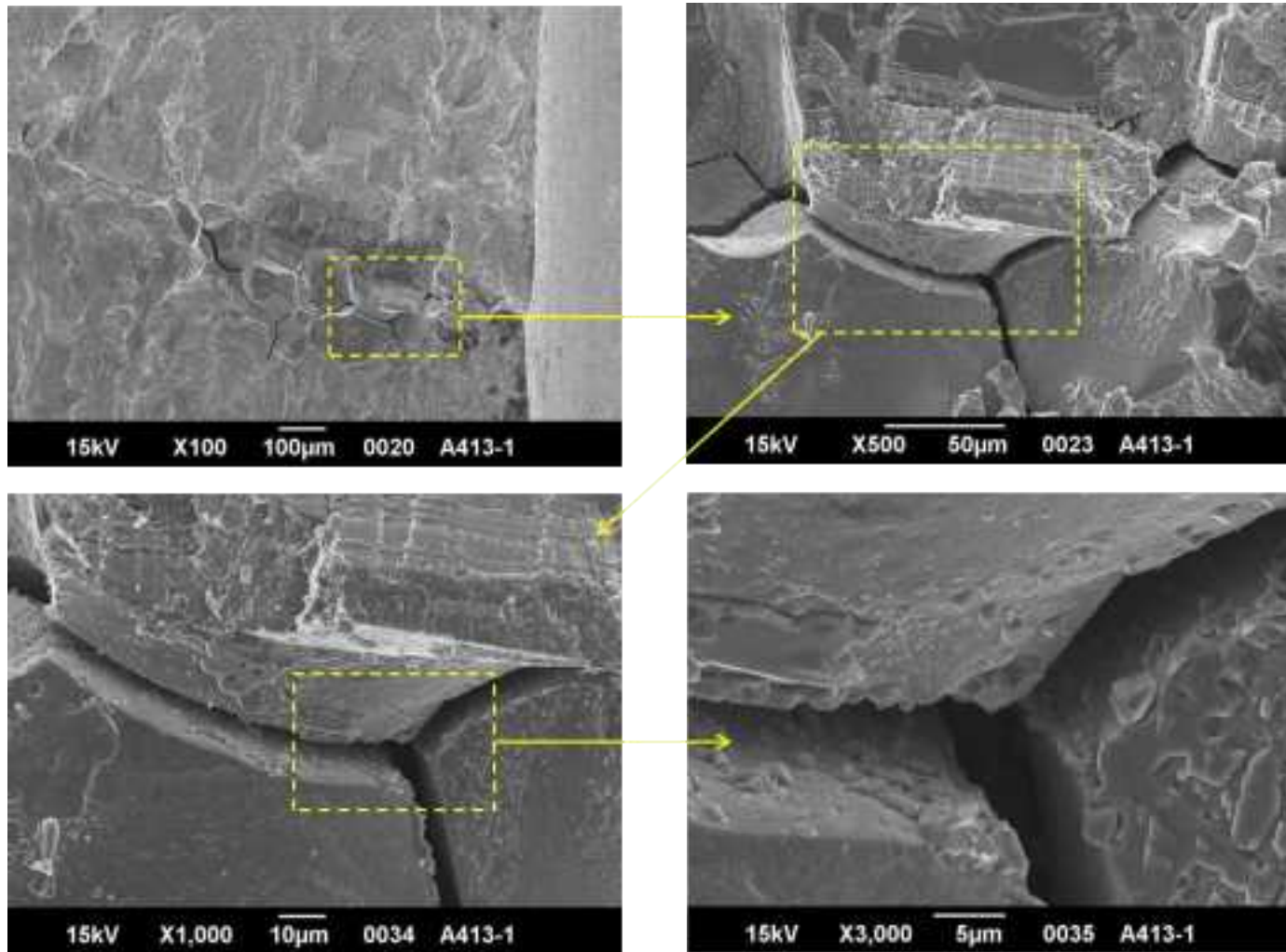


図 4.2.1.2-19(5) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果  
(A413(SUS316L 母材、 $7.33 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ 、 $700^\circ\text{C} \times 1 \text{h}$  照射後焼鈍材))



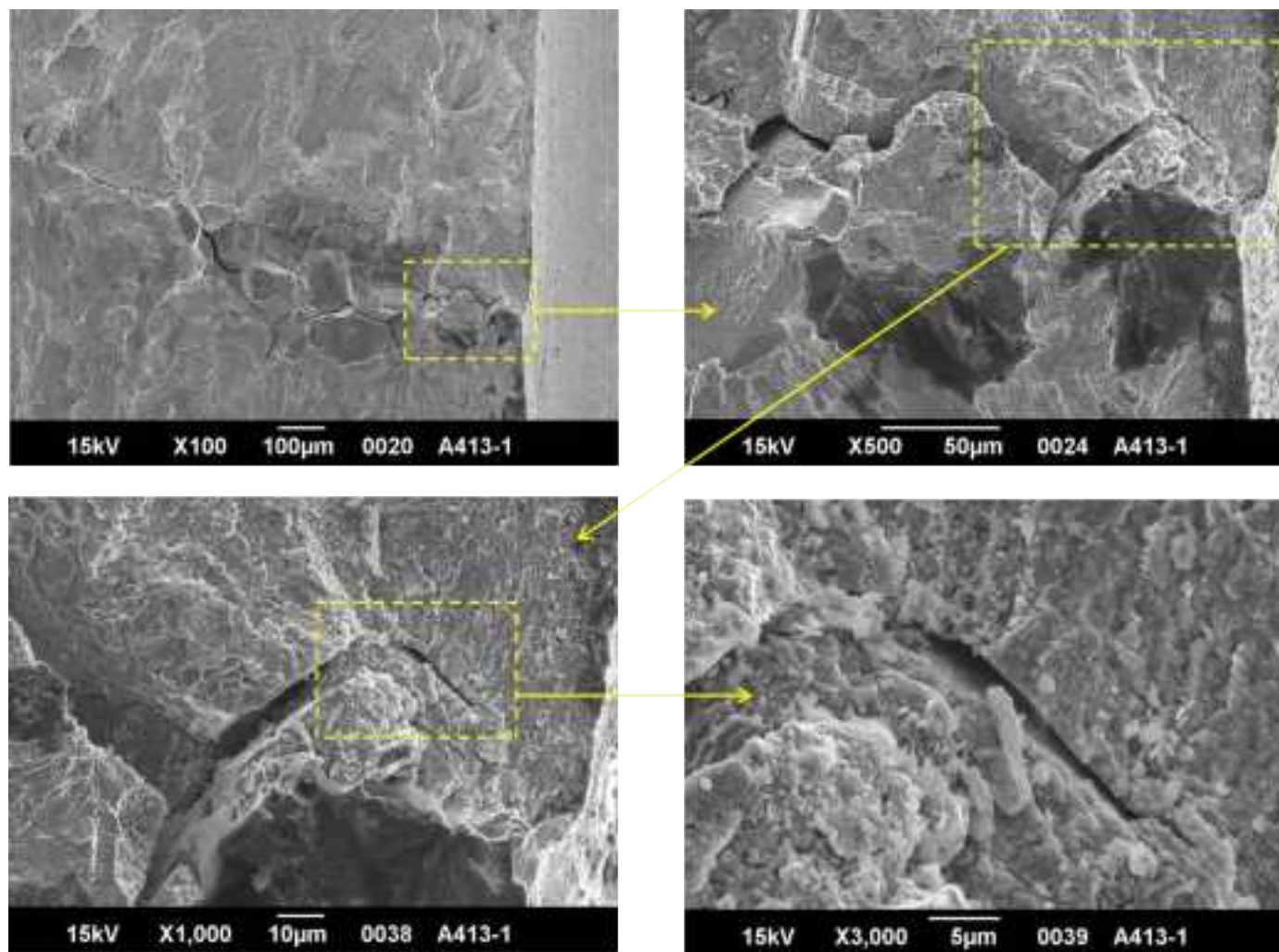
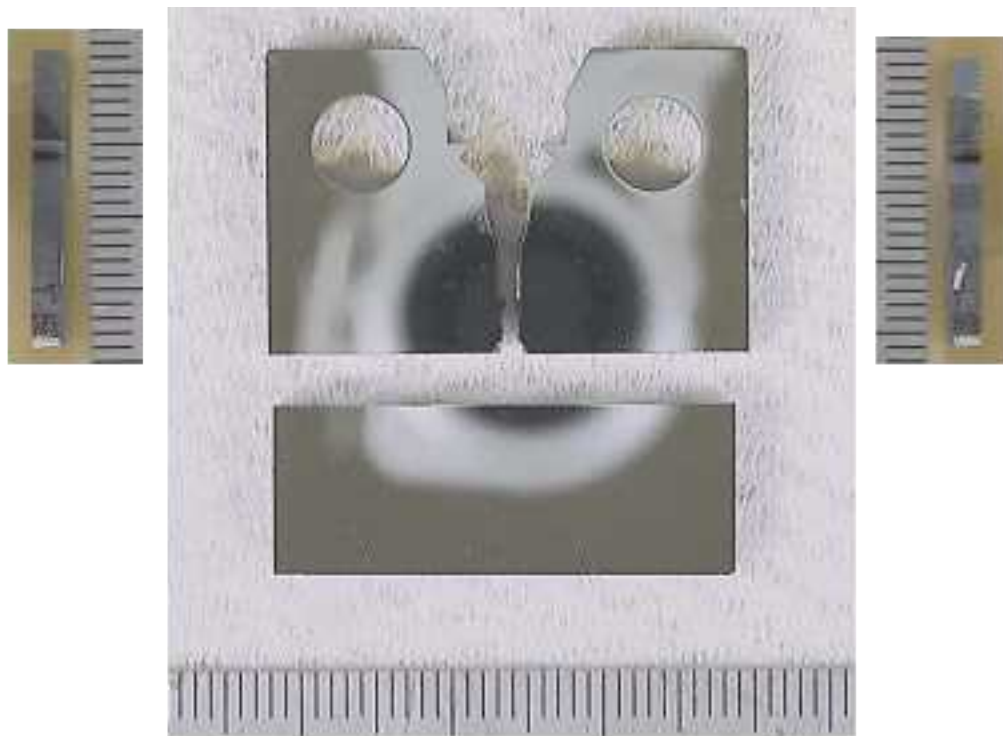


図 4.2.1.2-19(6) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果  
(A413(SUS316L 母材、 $7.33 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ 、 $700^\circ\text{C} \times 1 \text{h}$  照射後焼鈍材))

③試験No. 3(A425(SUS316L母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ )

デジタルマイクロスコープによる外観写真を図 4.2.1.2-20 に示す。A425-1 は断面観察実施後にリガメント部を切断し強制破断により破面開放した。A425-2 の破面では、一部大気中予き裂が導入できていない箇所が観察され、機械ノッチ先端から SCC 割れが発生していた。き裂進展速度は、A425-1 および A425-2 の両方の破面で PDM データを補正した。

破面の SEM 観察結果を図 4.2.1.2-21(1)～(13)に示す。試験片 A425 のき裂進展試験環境は、低 DO(入口<10ppb、水素注入なし)であったが、酸化物は NWC を経験した SCC 始端部の方が、HWC で進展した SCC 終端部(先端部)より多い傾向であった。



A425-1 (断面金相観察、リガメント切断後)



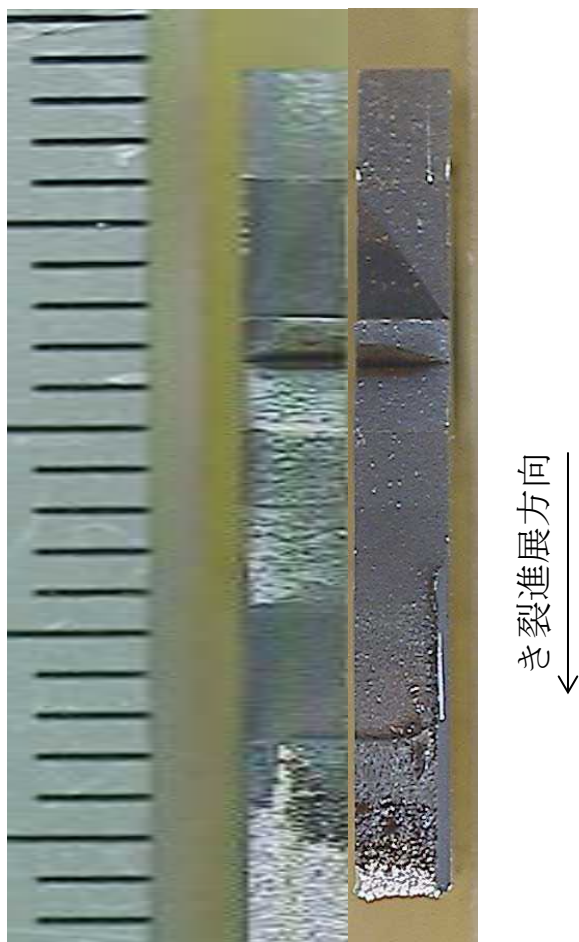
A425-2-1  
(破面SEM  
観察試料)

A425-2-2

A425-2

図 4.2.1.2-20(1) き裂進展試験後のデジタルマイクロ스코プによる試験片外観観察結果 (1/2)

(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ )



元の破面のイメージ

図 4.2.1.2-20(2) き裂進展試験後のデジタルマイクロスコープによる試験片外観観察結果

(2/2)

(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

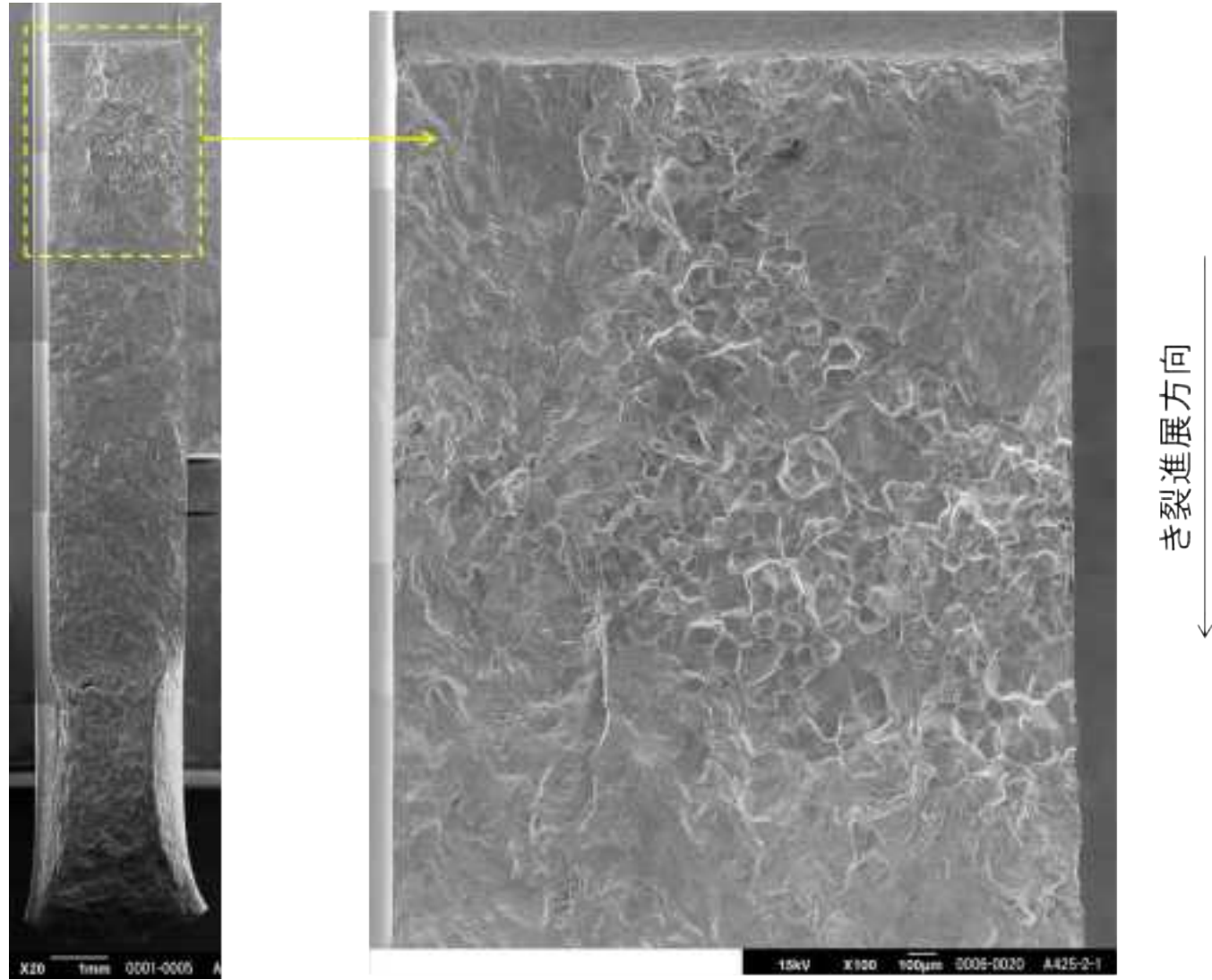


図 4.2.1.2-21(1) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

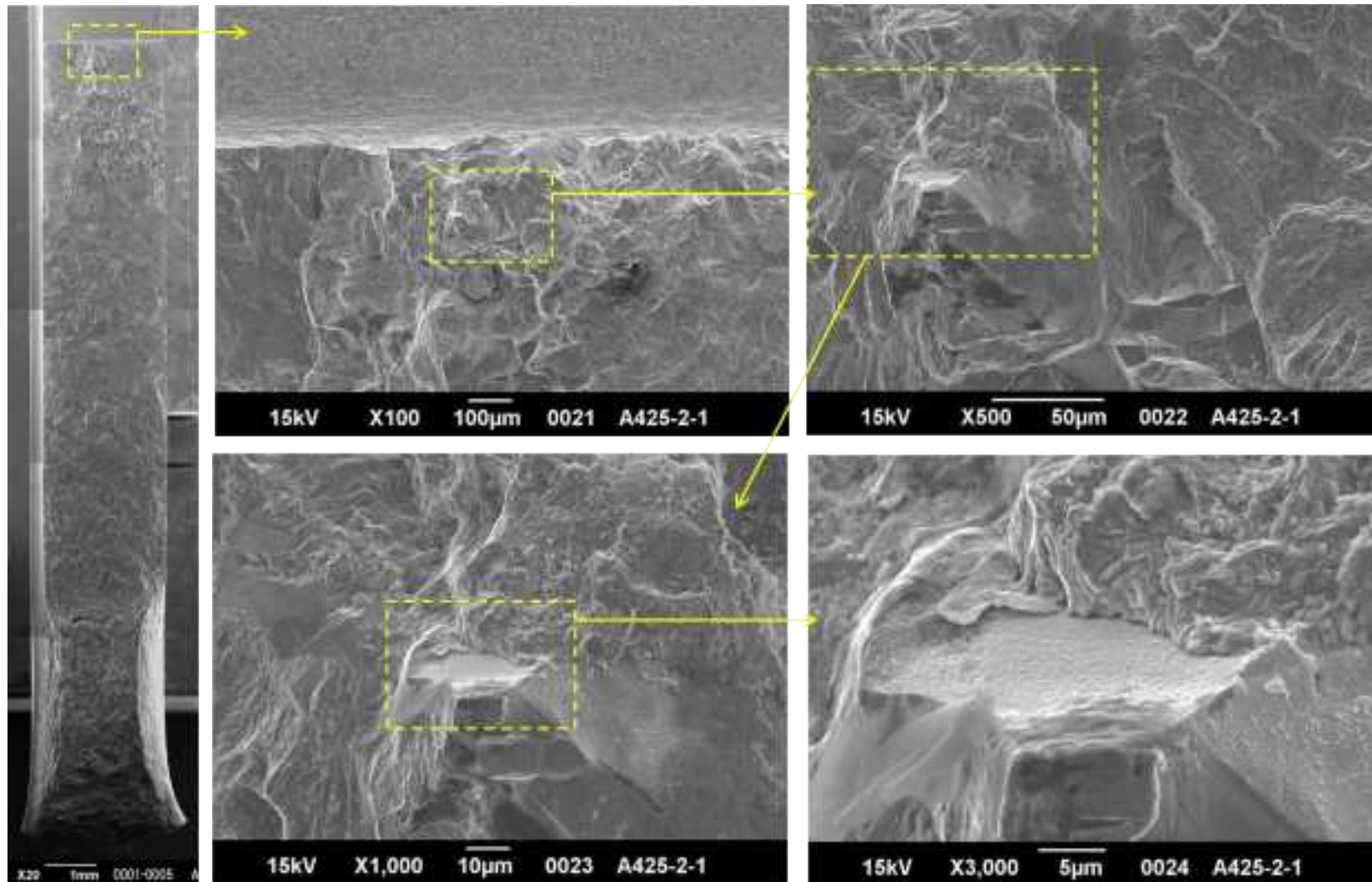


図 4.2.1.2-21(2) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

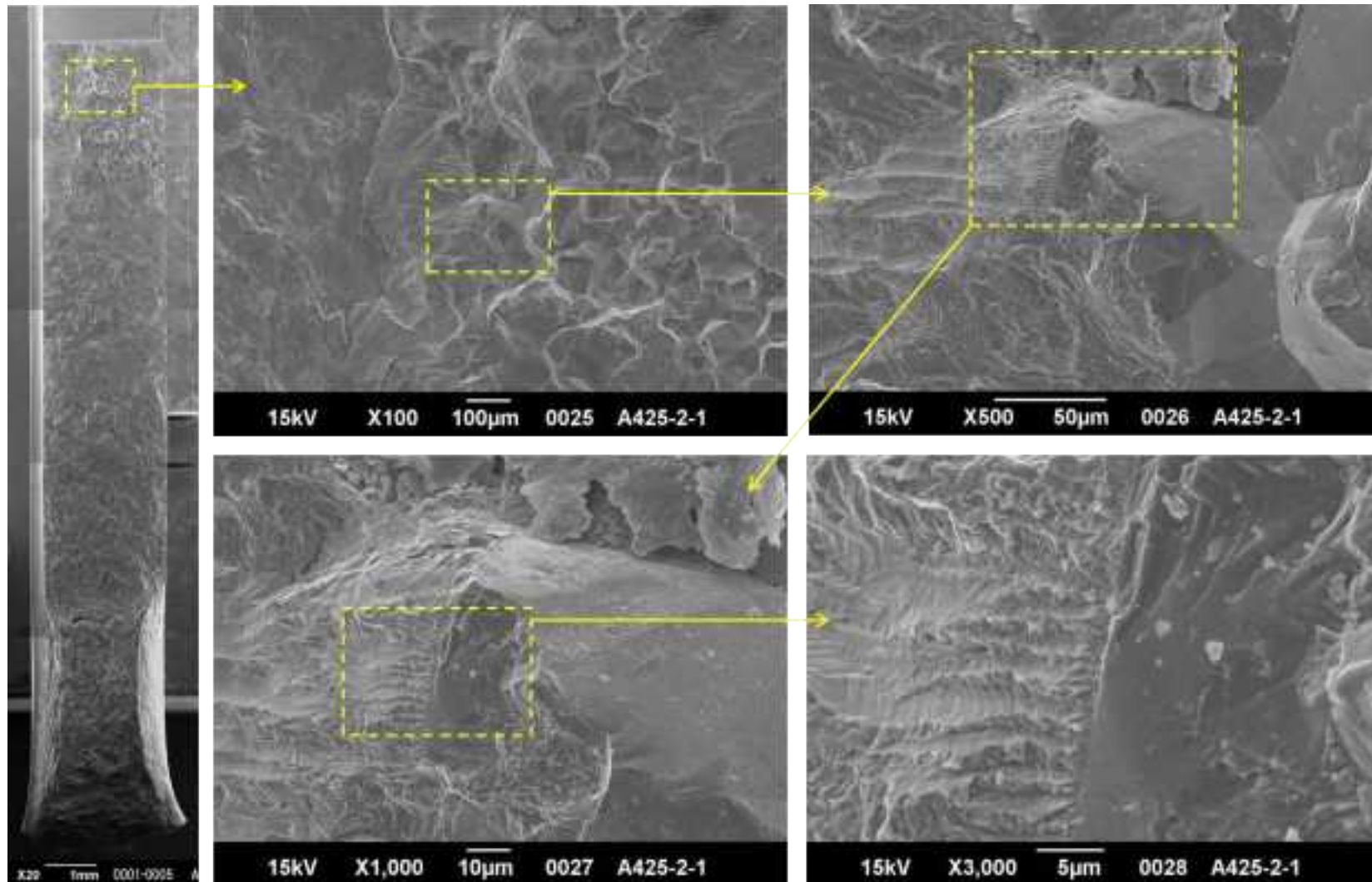


図 4.2.1.2-21(3) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 (E > 1 \text{ MeV})$ ))

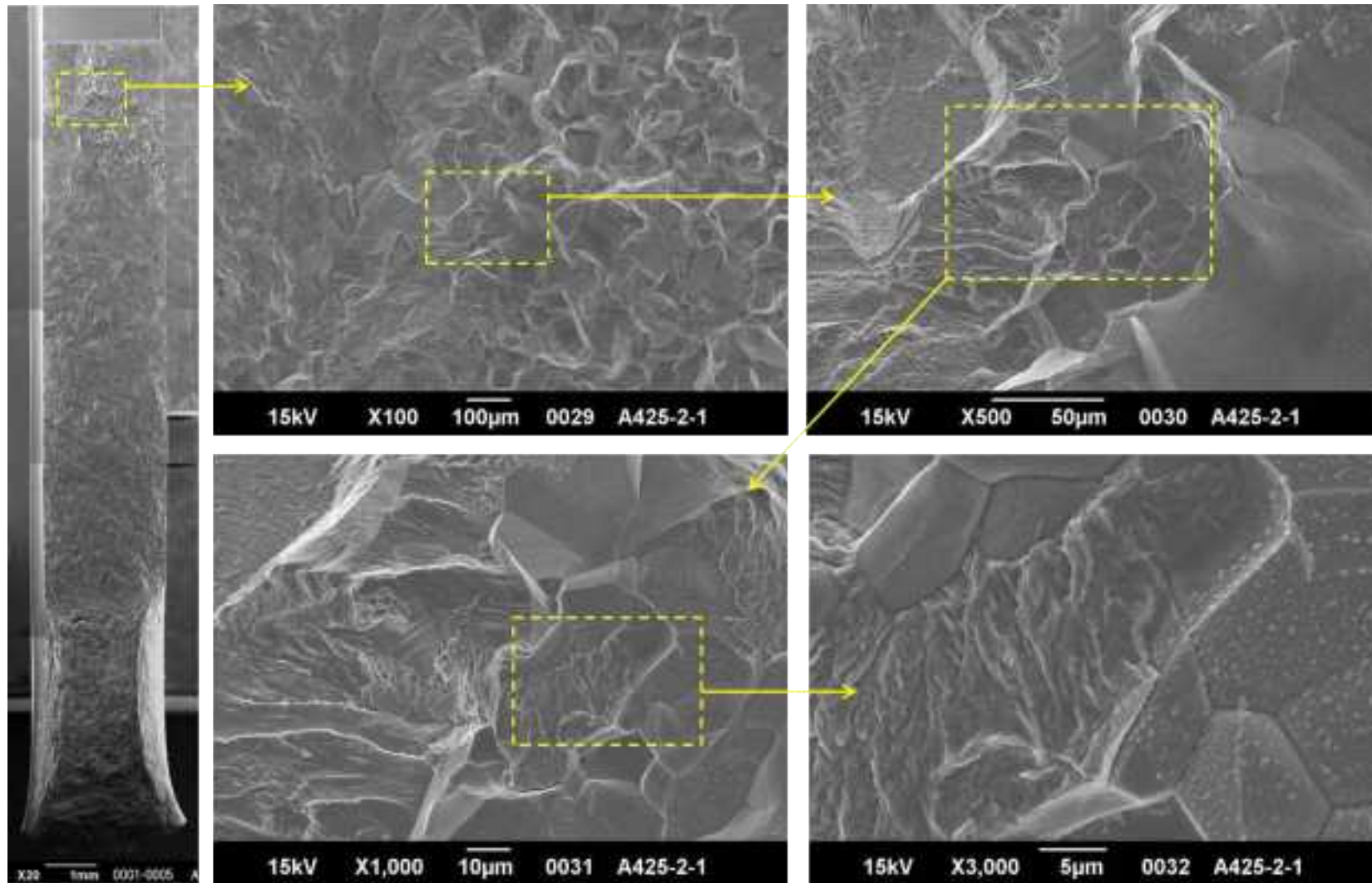


図 4.2.1.2-21(4) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))



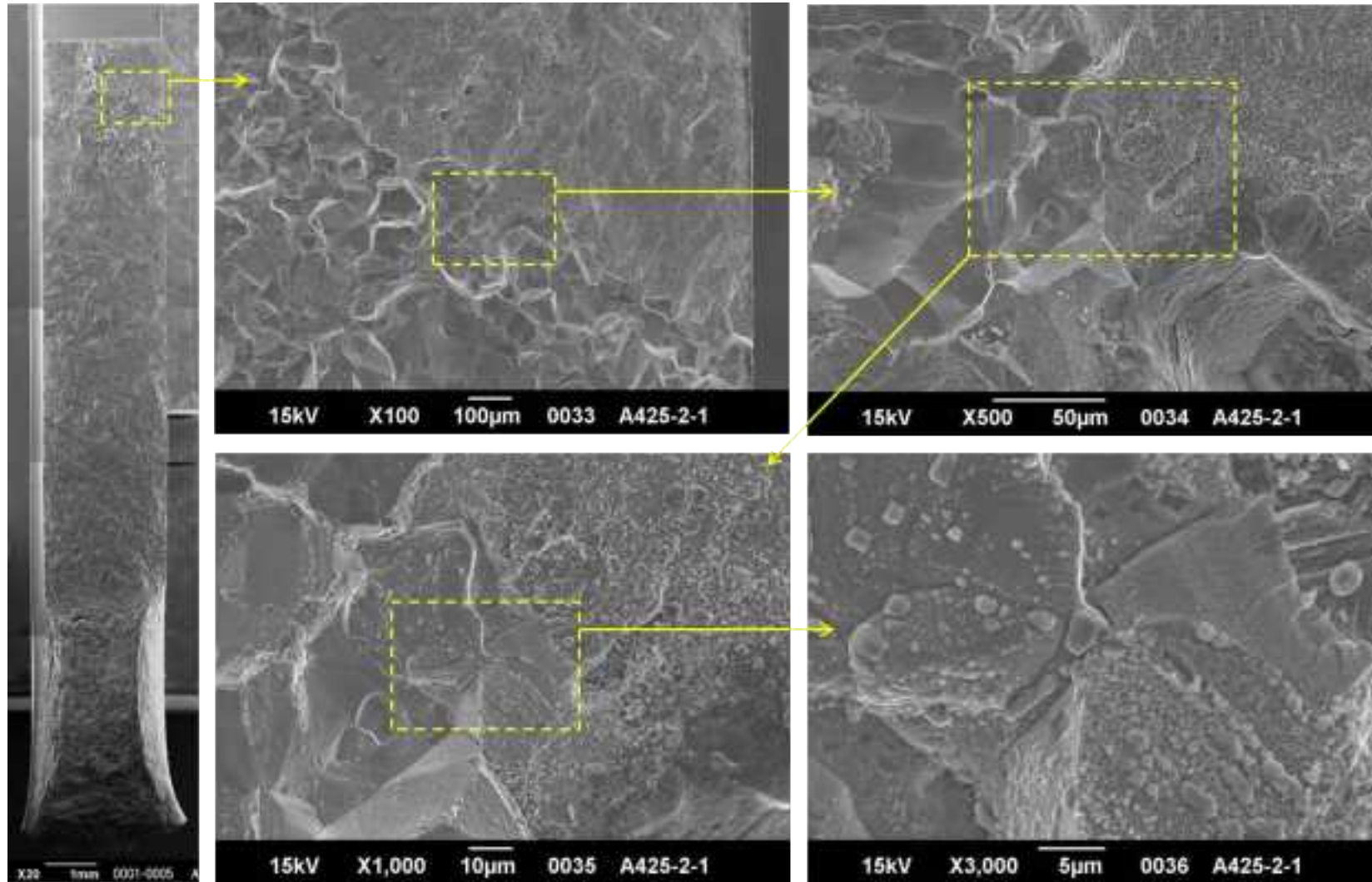


図 4.2.1.2-21(5) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

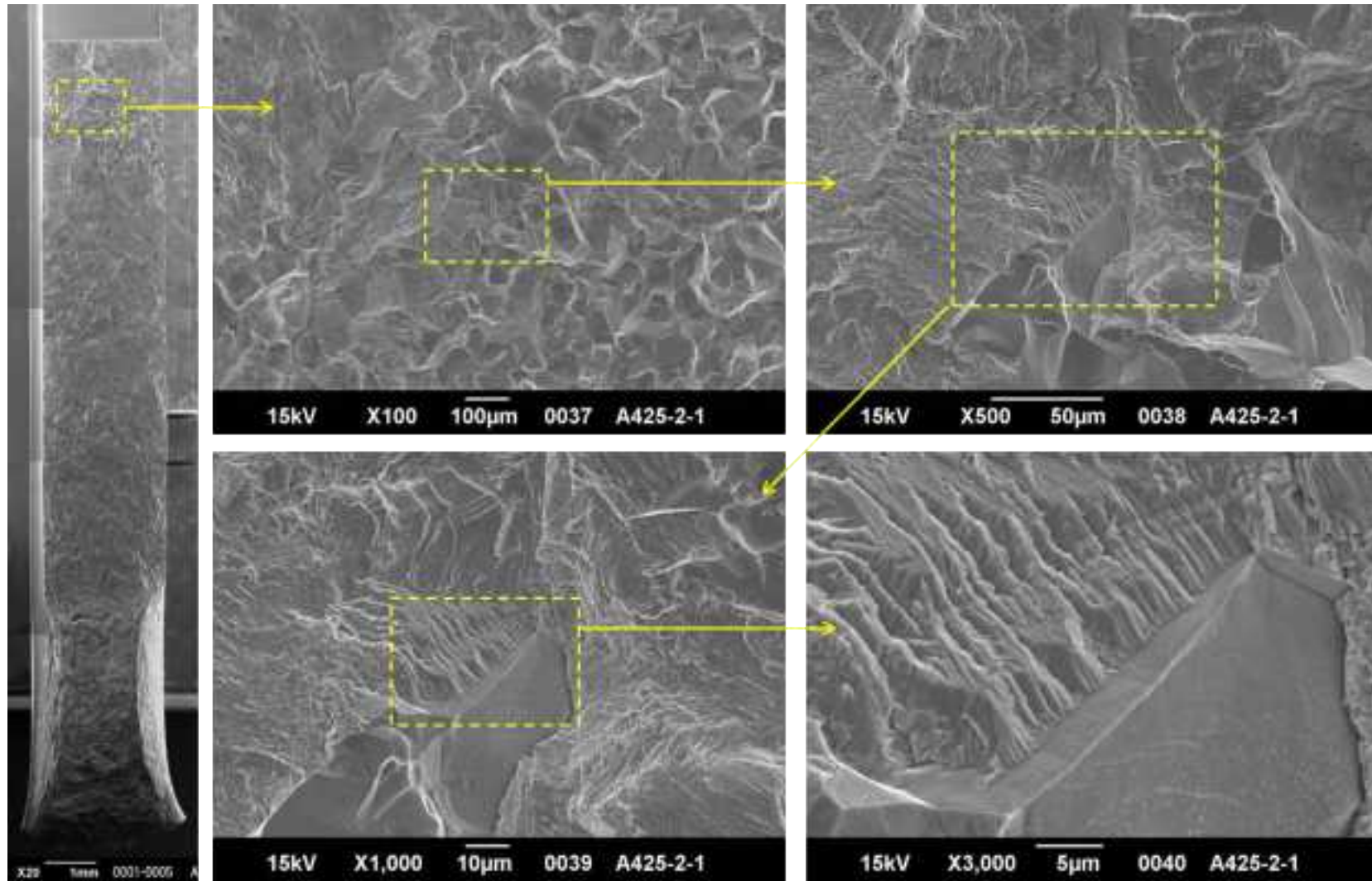


図 4.2.1.2-21(6) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

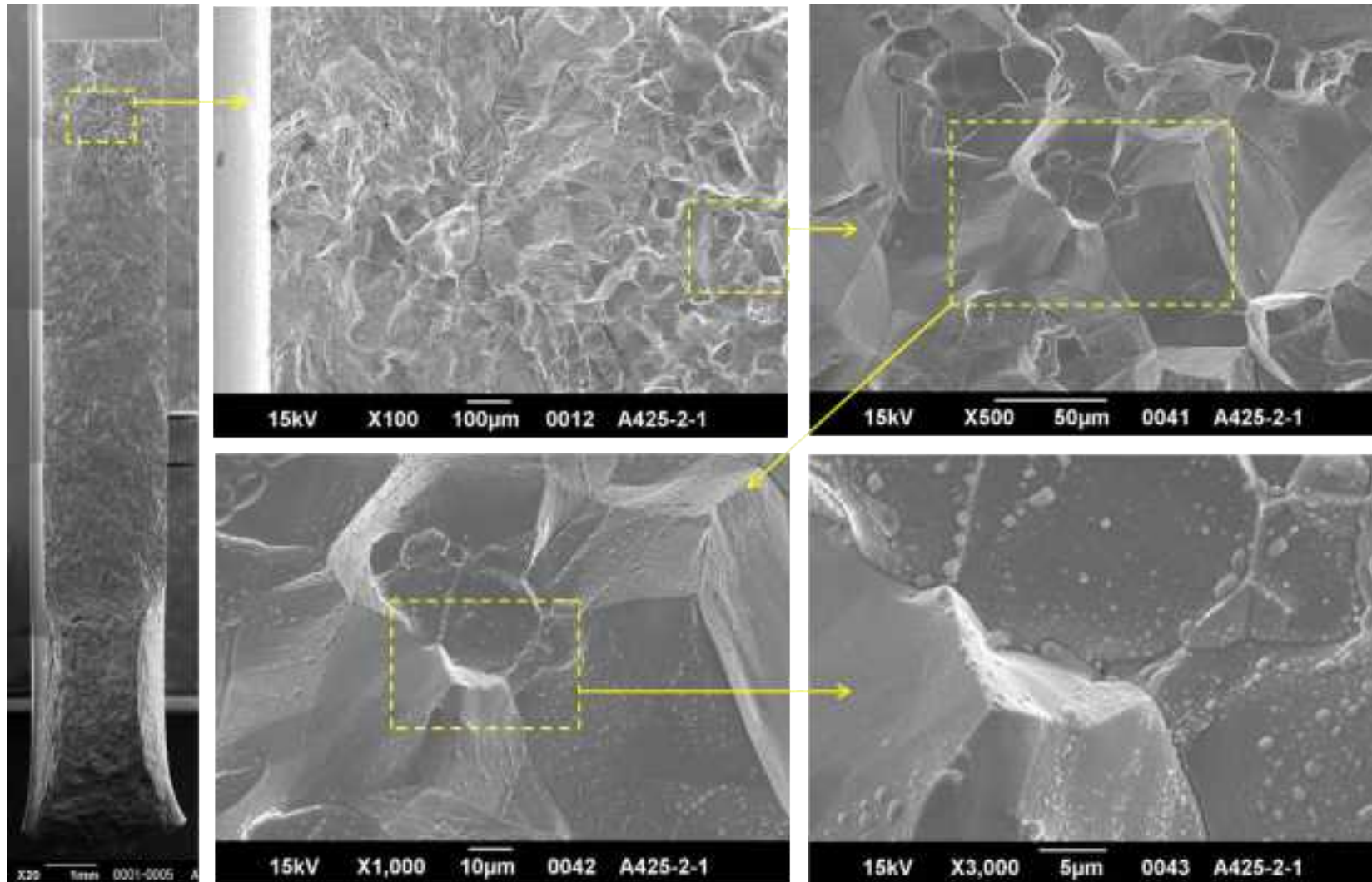


図 4.2.1.2-21(7) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

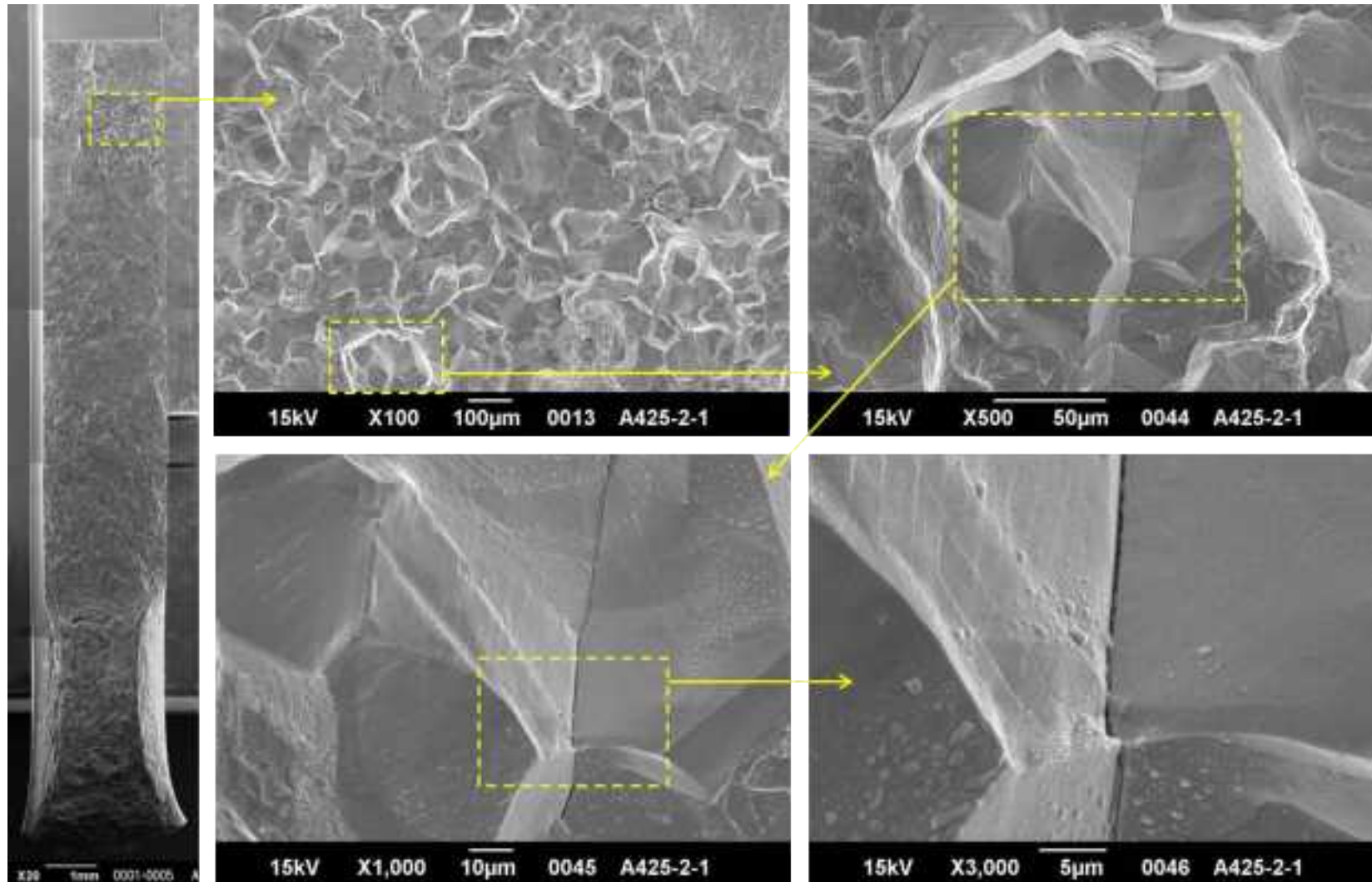


図 4.2.1.2-21(8) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

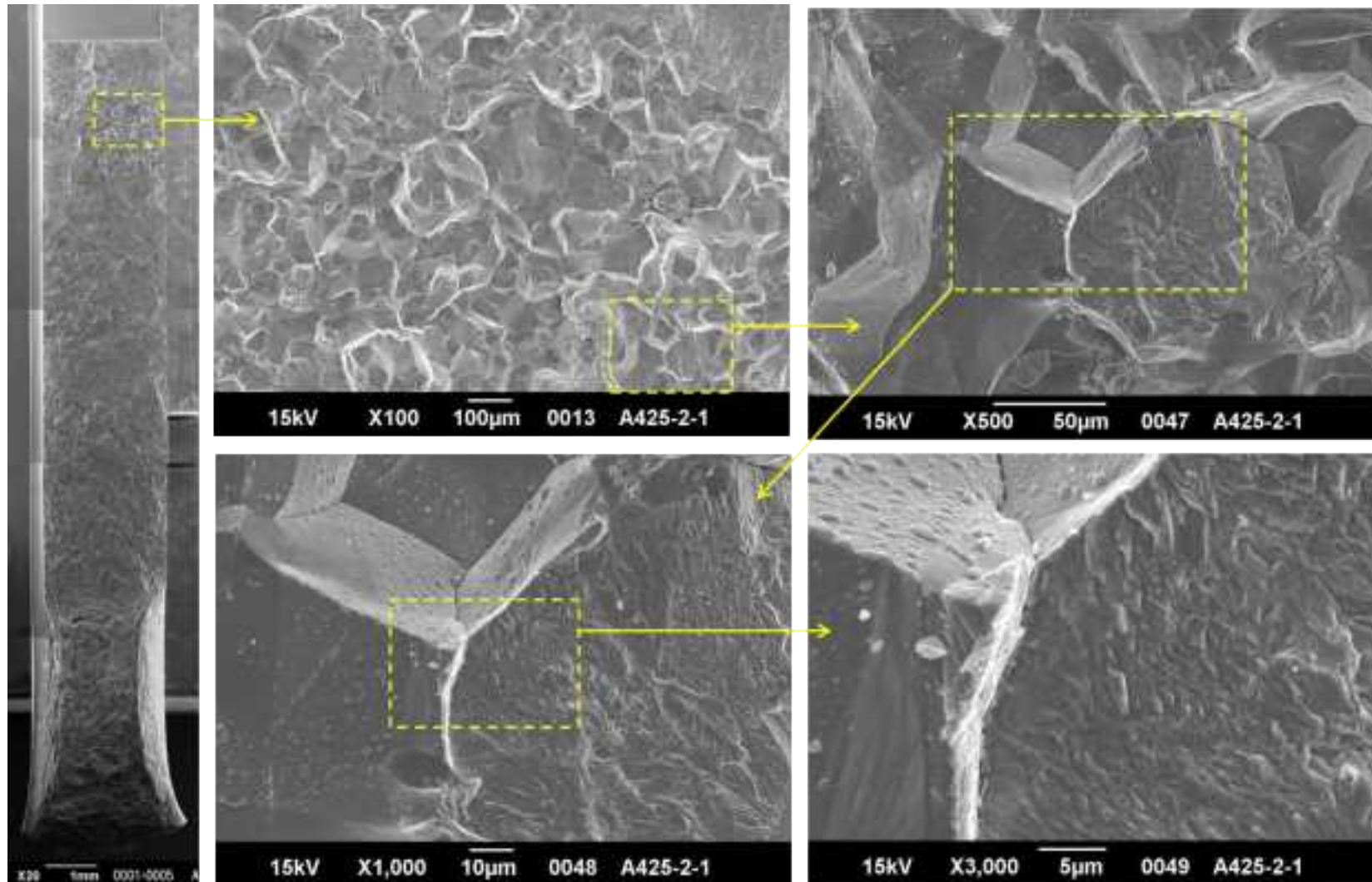


図 4.2.1.2-21(9) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

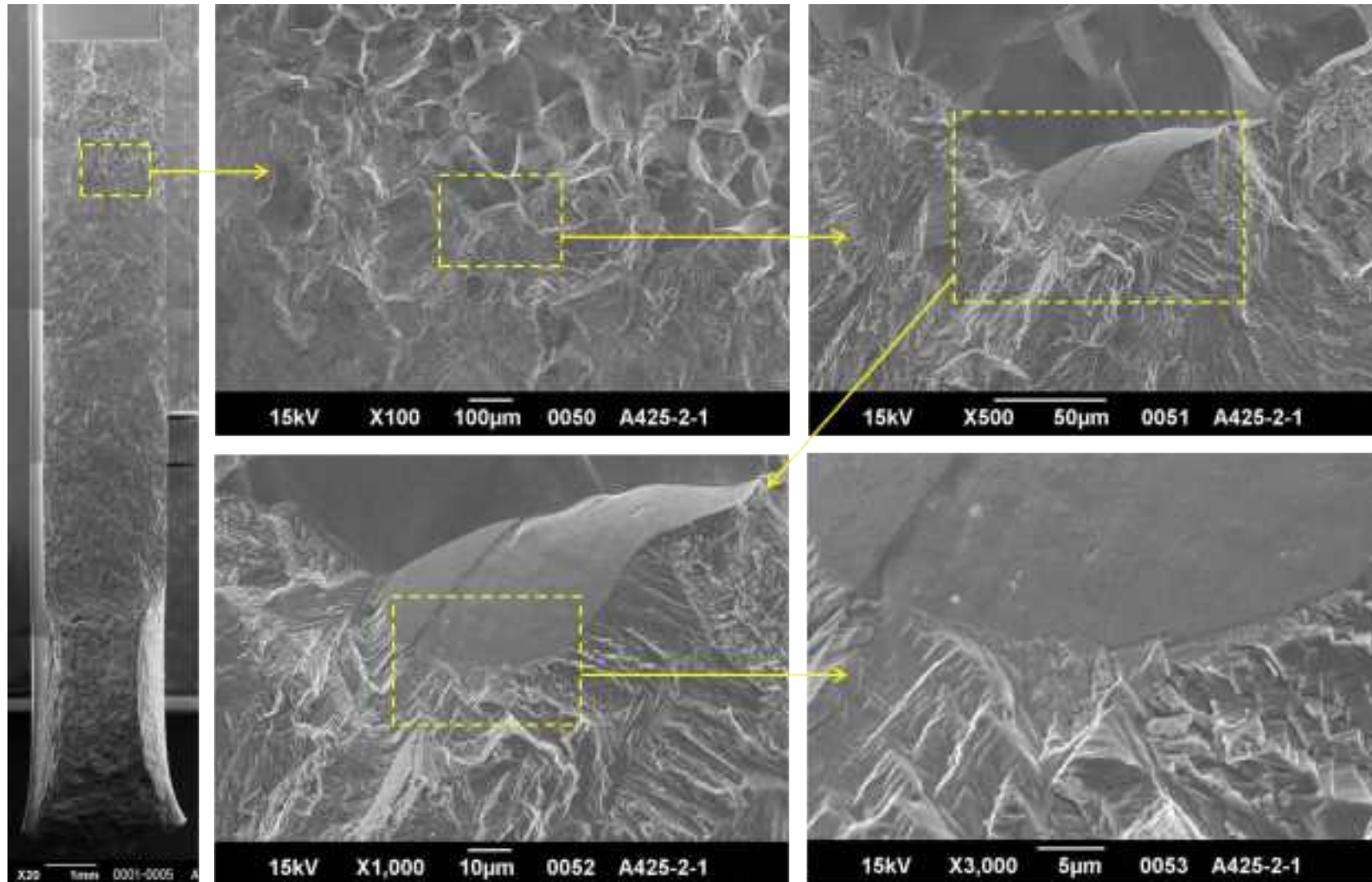


図 4.2.1.2-21(10) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

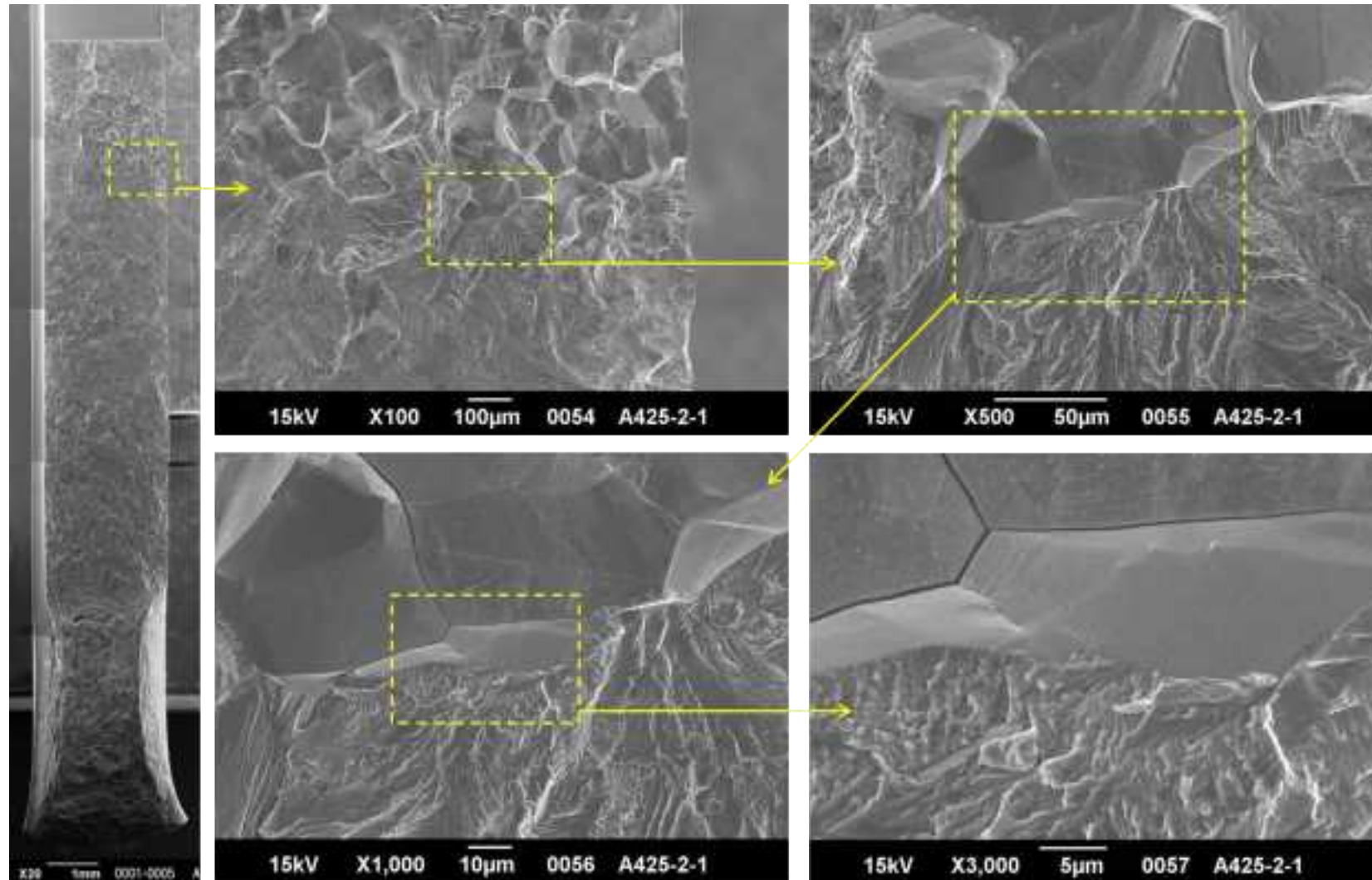


図 4.2.1.2-21(11) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

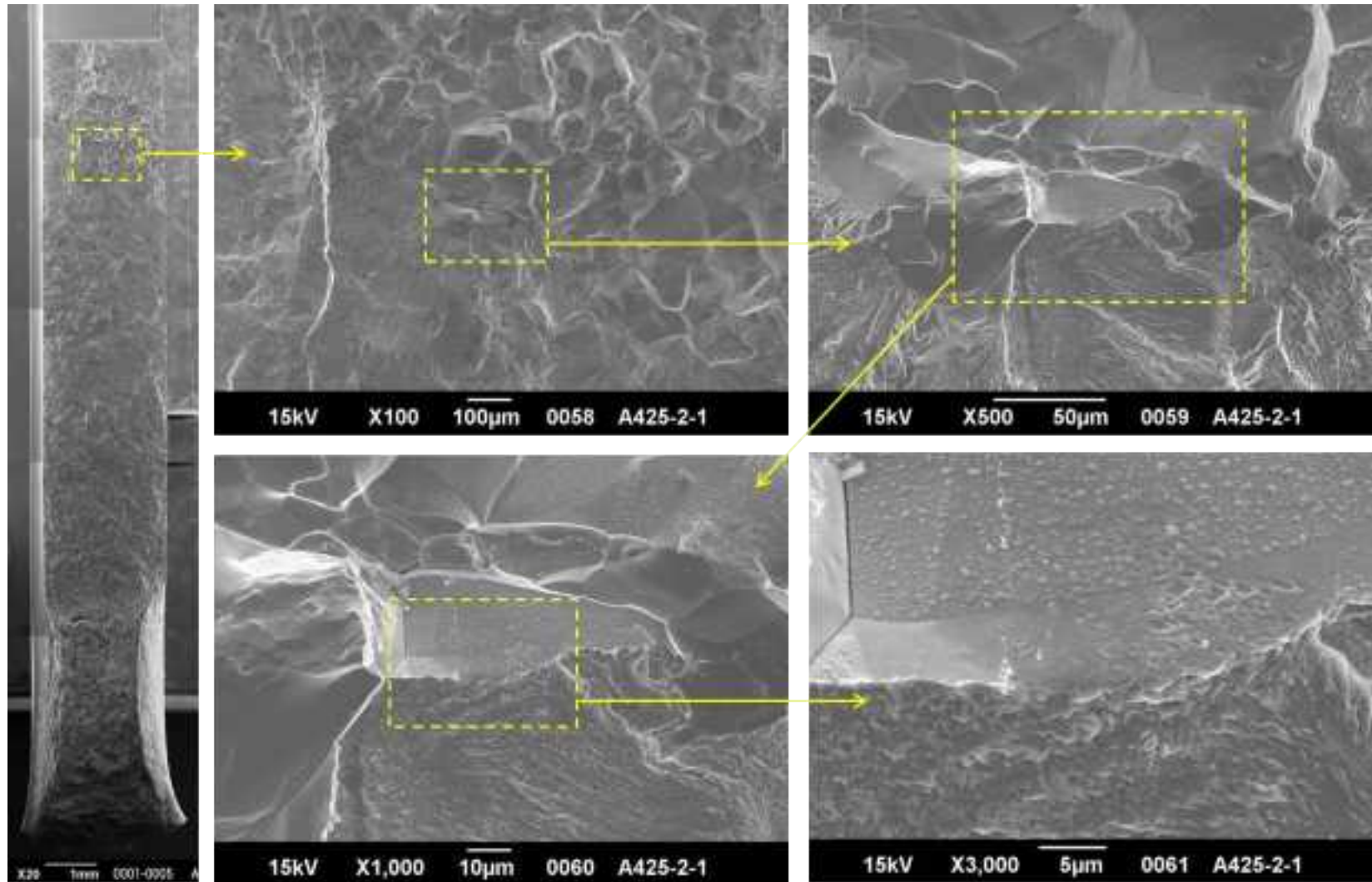


図 4.2.1.2-21(12) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))



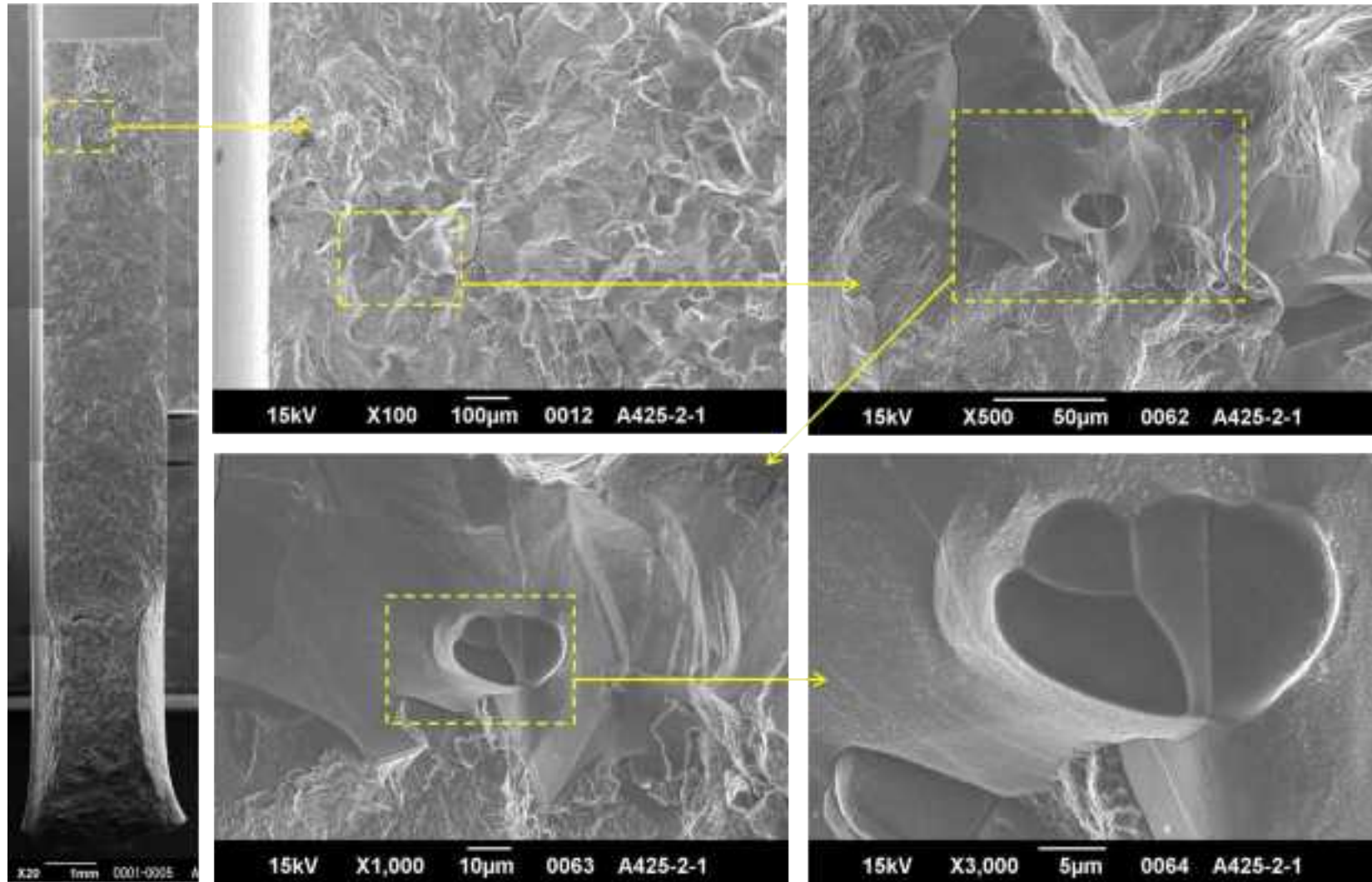


図 4.2.1.2-21(13) き裂進展試験後の SEM による試験片破面観察結果(A425(SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

④試験No. 4(64HC405(SUS316L、HAZ材、 $5.16 \times 10^{24}$  n/m<sup>2</sup>(E>1MeV)))

き裂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4.2.1.2-22に示す。試験中のき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4.2.1.2-23に示す。SEM観察の結果とデジタルマイクロスコープ観察の結果を用いて環境中き裂進展領域を特定し、その面積からき裂進展量を求めた。

また、図4.2.1.2-24に、各試験片における環境中き裂進展領域をSEMにより詳細に観察した結果を示す。いずれの試験片においても、環境中き裂進展領域で粒界割れが観察された。

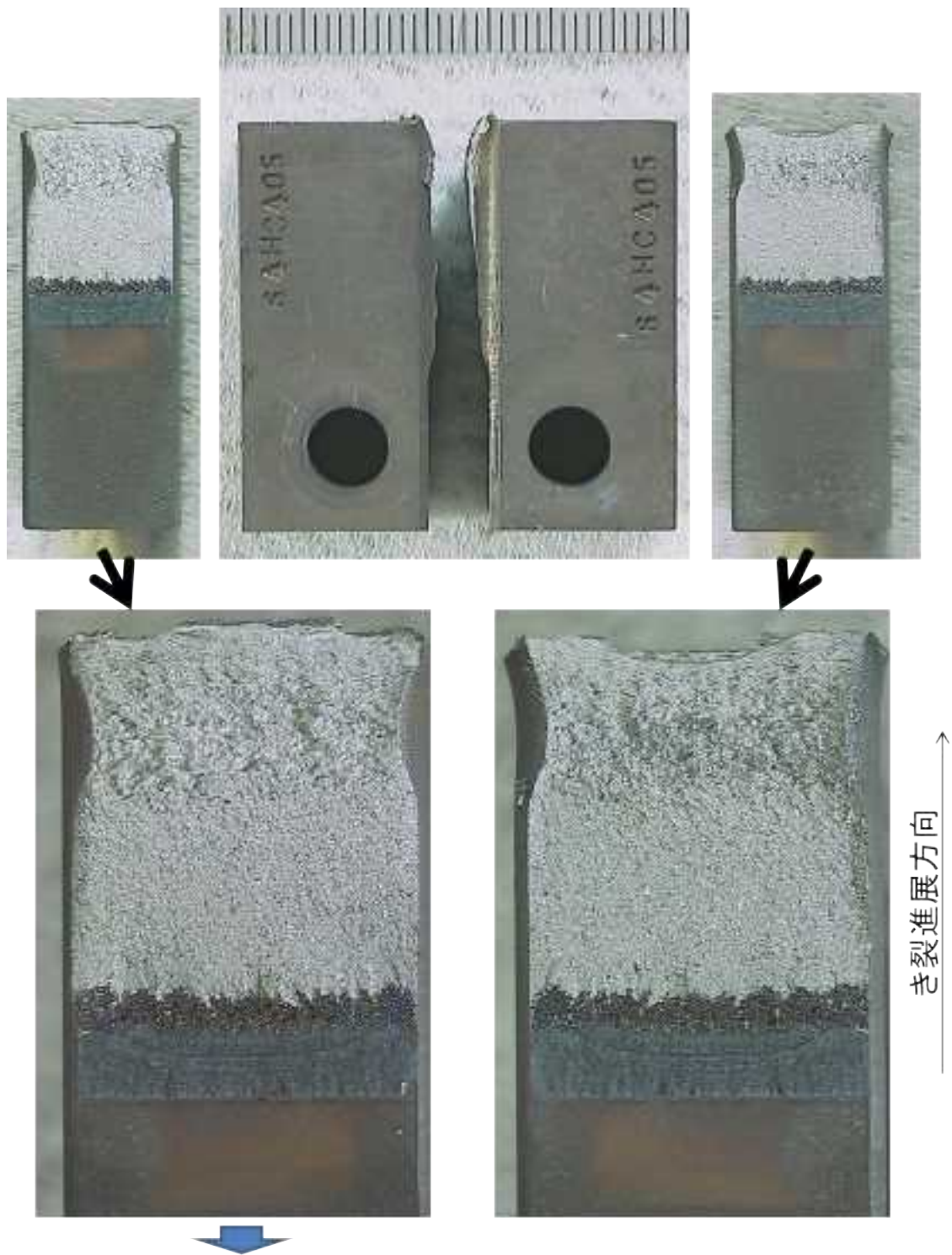


刻印面



刻印面の裏面

図 4.2.1.2-22 き裂進展試験終了後の外観観察結果  
(64HC405(SUS316L、HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))



詳細観察

図 4.2.1.2-23 き裂進展試験終了後の破面観察結果  
 (64HC405(SUS316L、HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

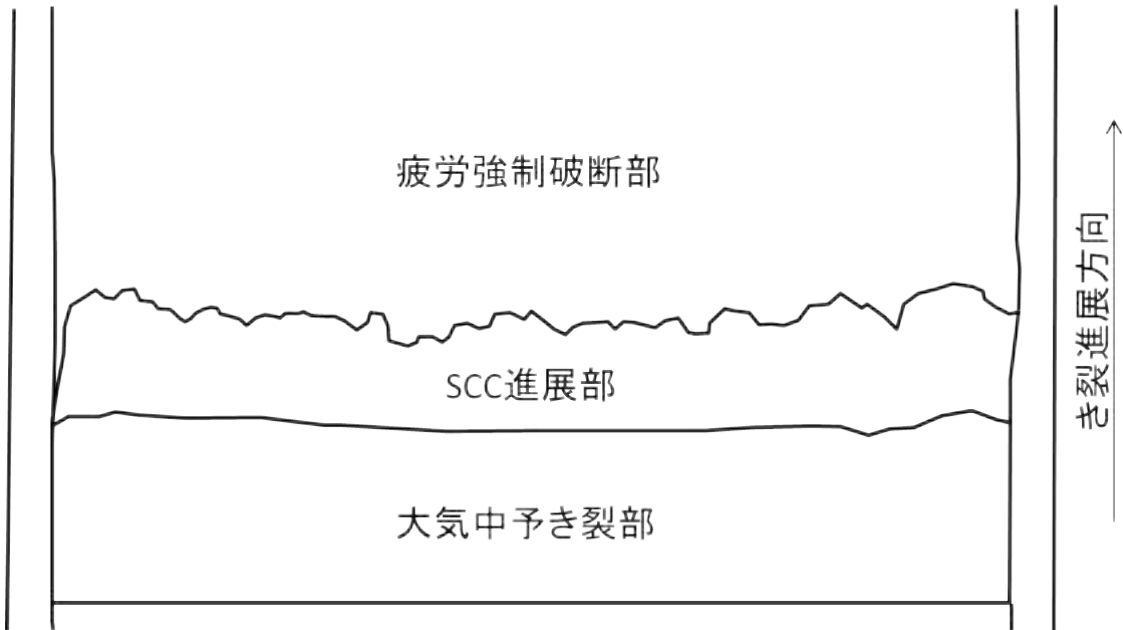
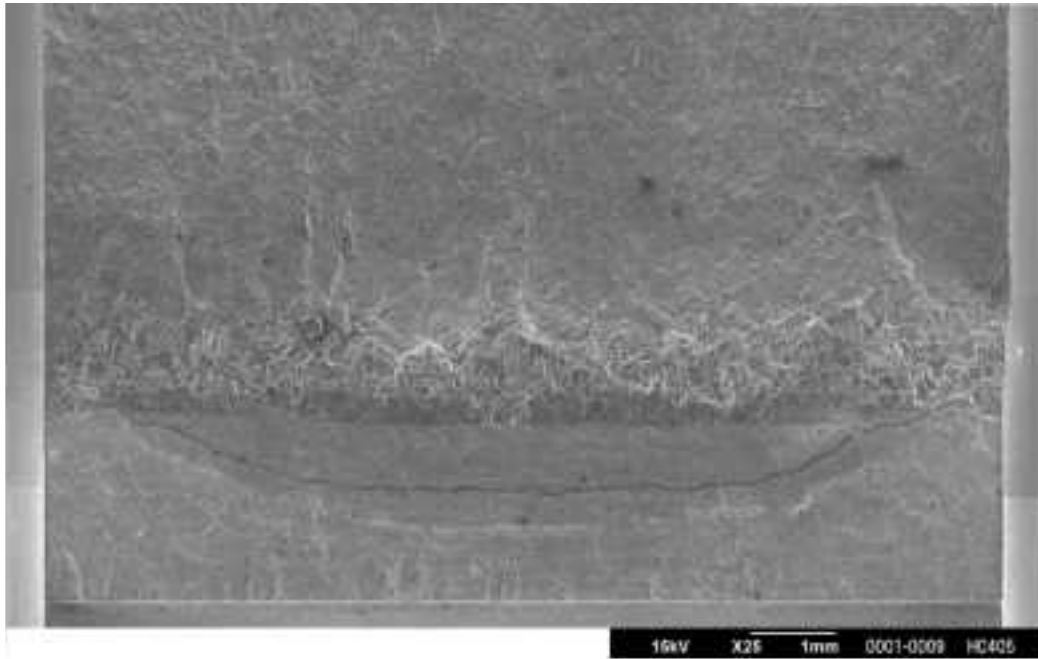


図 4.2.1.2-24(1) き裂進展試験後の破面詳細観察結果(1/9)  
(64HC405(SUS316L、HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

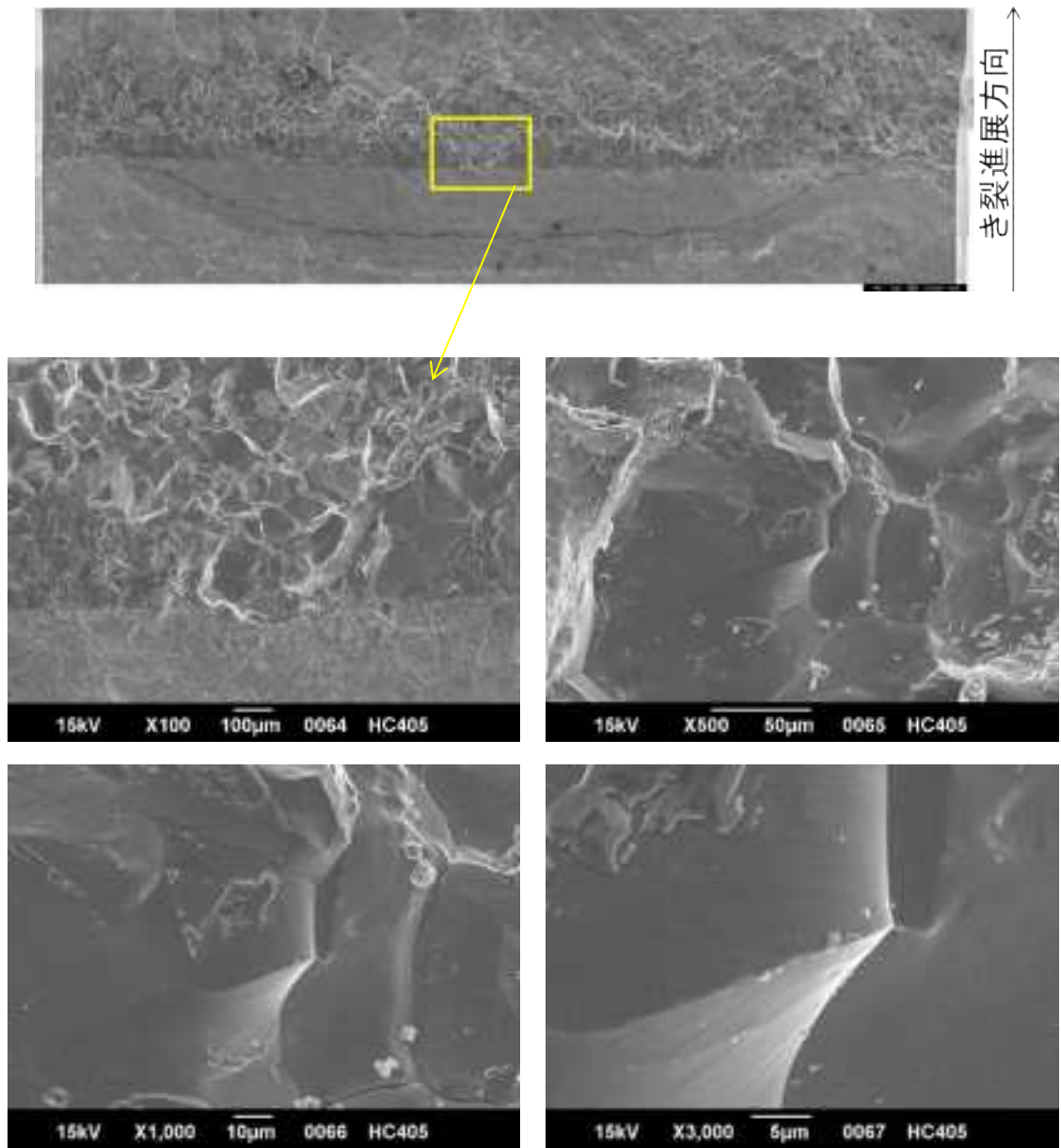


図 4.2.1.2-24(2) き裂進展試験後の破面詳細観察結果(2/9)(続き)  
 (64HC405(SUS316L、HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

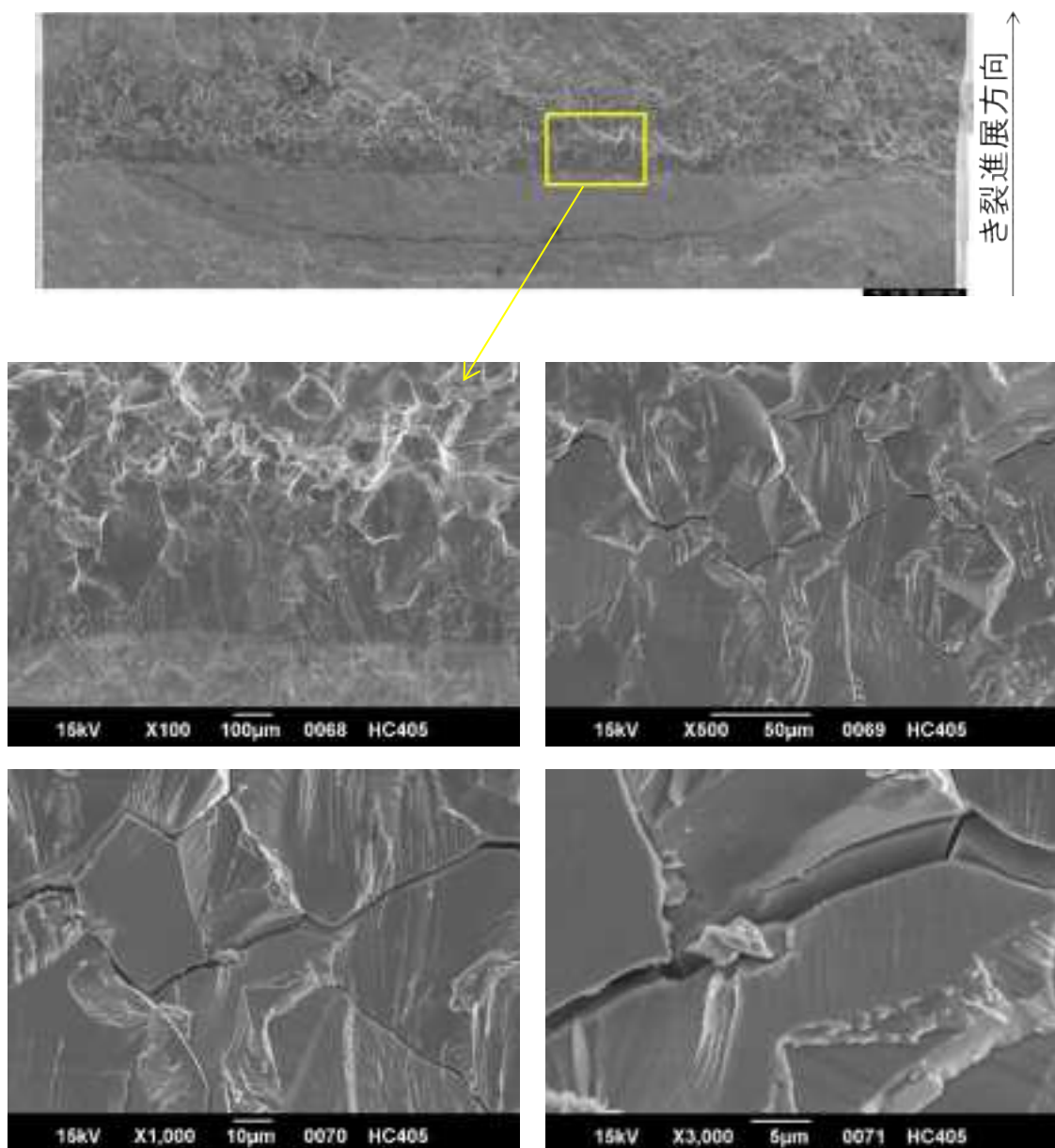


図 4.2.1.2-24(3) き裂進展試験後の破面詳細観察結果(3/9)(続き)  
 (64HC405(SUS316L、HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

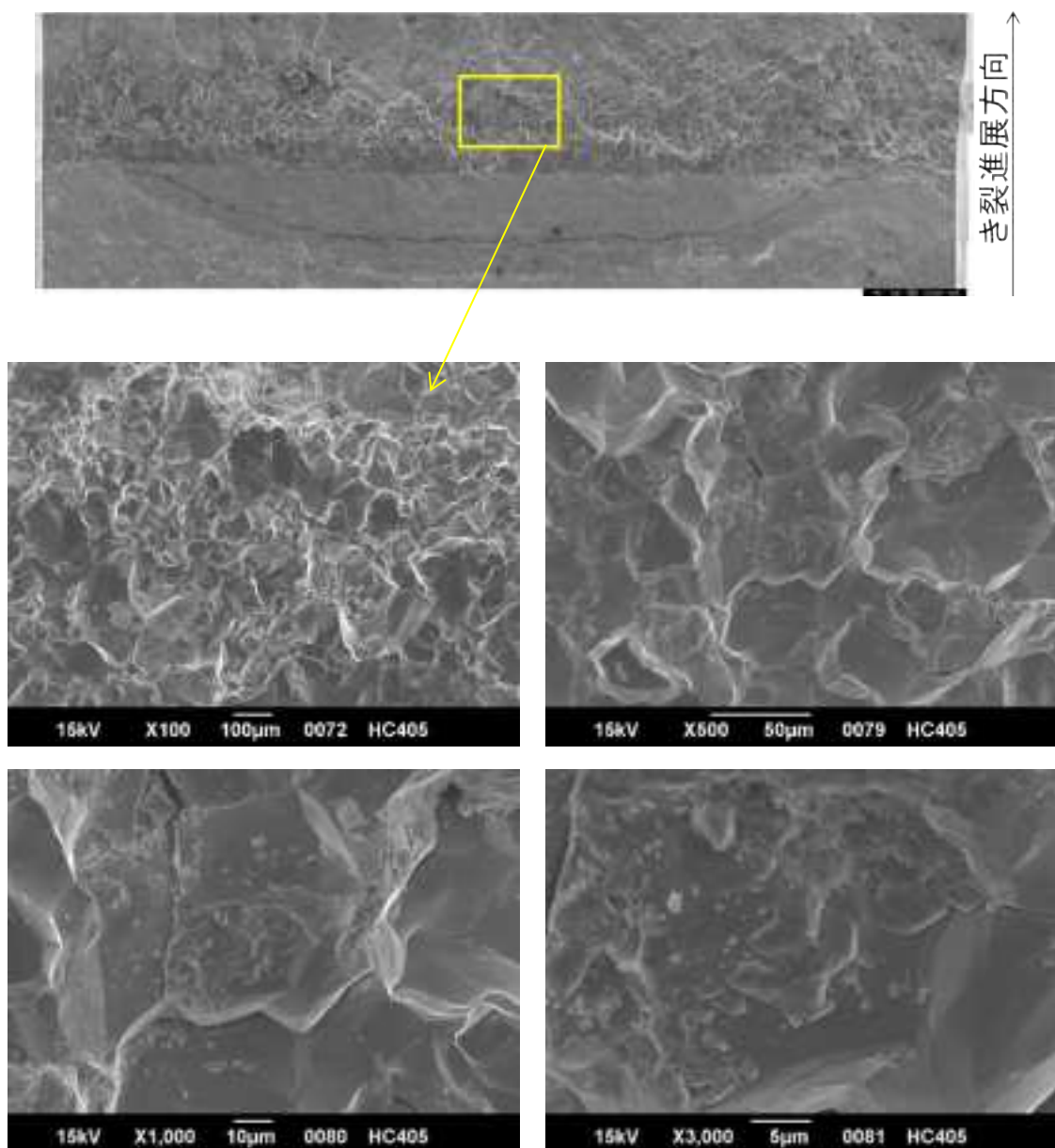


図 4.2.1.2-24(4) き裂進展試験後の破面詳細観察結果(4/9)(続き)  
 (64HC405(SUS316L、HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))



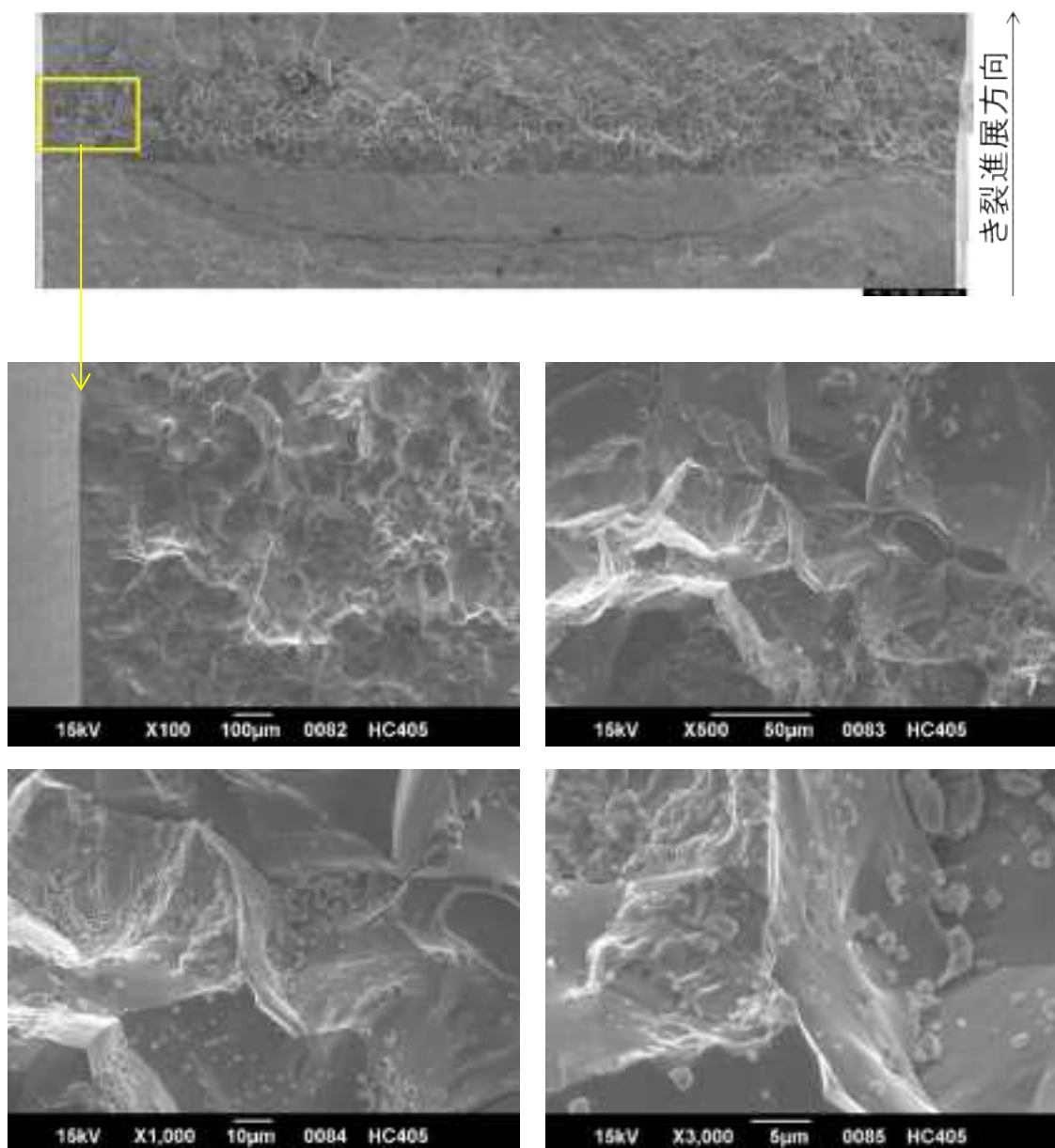


図 4.2.1.2-24(5) き裂進展試験後の破面詳細観察結果(5/9)(続き)  
 (64HC405(SUS316L、HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

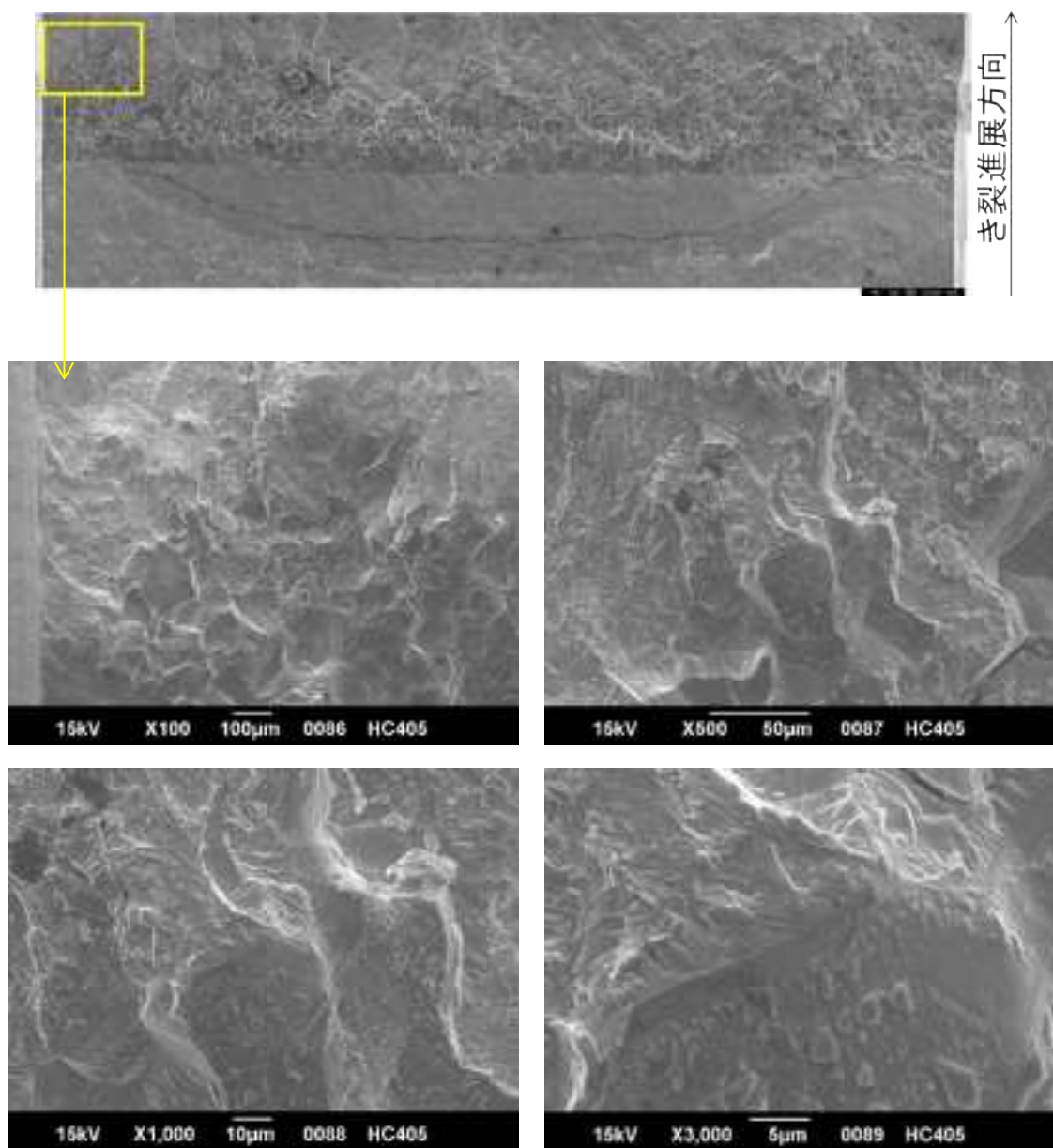


図 4.2.1.2-24(6) き裂進展試験後の破面詳細観察結果(6/9)(続き)  
 (64HC405(SUS316L、HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2$ ( $E > 1 \text{MeV}$ )))

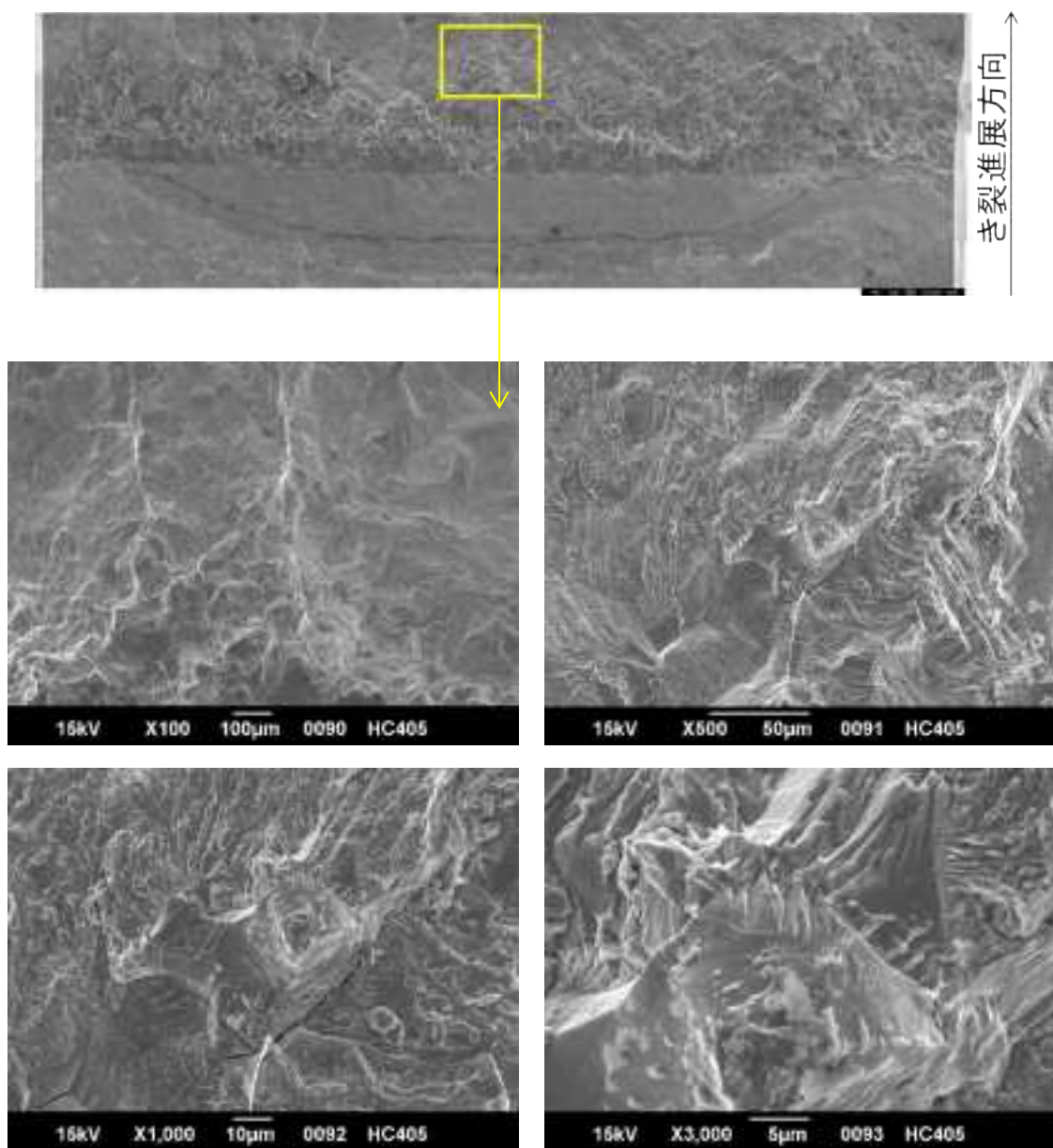


図 4.2.1.2-24(7) き裂進展試験後の破面詳細観察結果(7/9)(続き)  
 (64HC405(SUS316L、HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

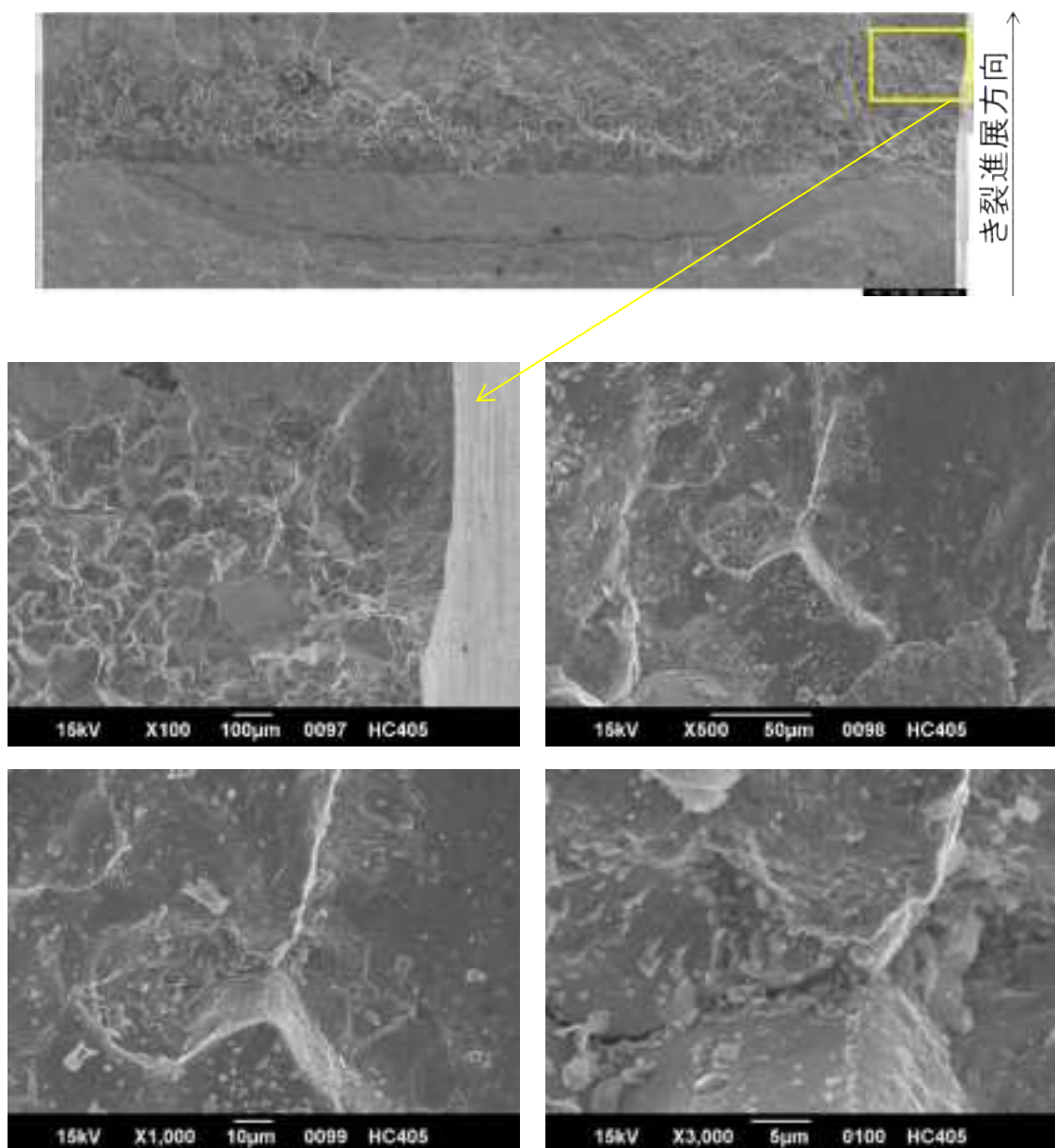


図 4.2.1.2-24(8) き裂進展試験後の破面詳細観察結果(8/9)(続き)  
 (64HC405(SUS316L、HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ ))

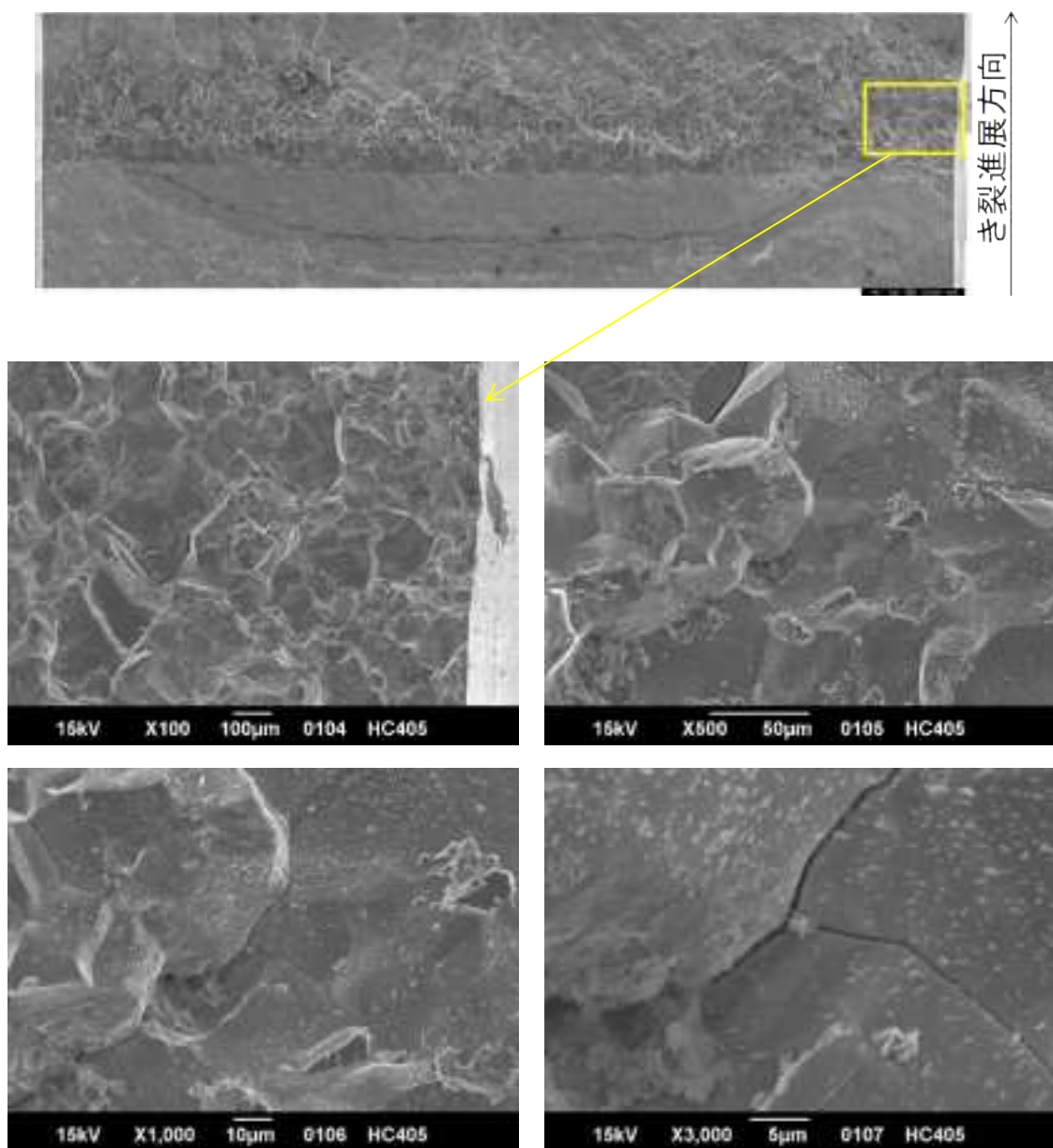


図 4.2.1.2-24(9) き裂進展試験後の破面詳細観察結果(9/9)(続き)  
 (64HC405(SUS316L、HAZ 材、 $5.16 \times 10^{24} \text{n/m}^2$ ( $E > 1 \text{MeV}$ )))

#### h. CT試験片の断面観察

##### ①試験No. 2(A412(SUS316L母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ ( $E > 1 \text{MeV}$ ))

光学顕微鏡による観察結果を図 4.2.1.2-25 に、SEM による観察結果を図 4.2.1.2-26 に示す。数カ所の分岐き裂が観察された。試験片 A412 のき裂進展試験環境は NWC および HWC であったが、き裂の分岐に及ぼす環境の影響は不明であった。

##### ②試験No. 3(A425(SUS316L母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ ( $E > 1 \text{MeV}$ ))

光学顕微鏡による観察結果を図 4.2.1.2-27 に、SEM による観察結果を図 4.2.1.2-28 に示す。数カ所の分岐き裂が観察された。試験片 A425 のき裂進展試験環境は低 DO(<10ppb、水素注入なし)であったが、き裂の分岐に及ぼす環境の影響は不明であった。

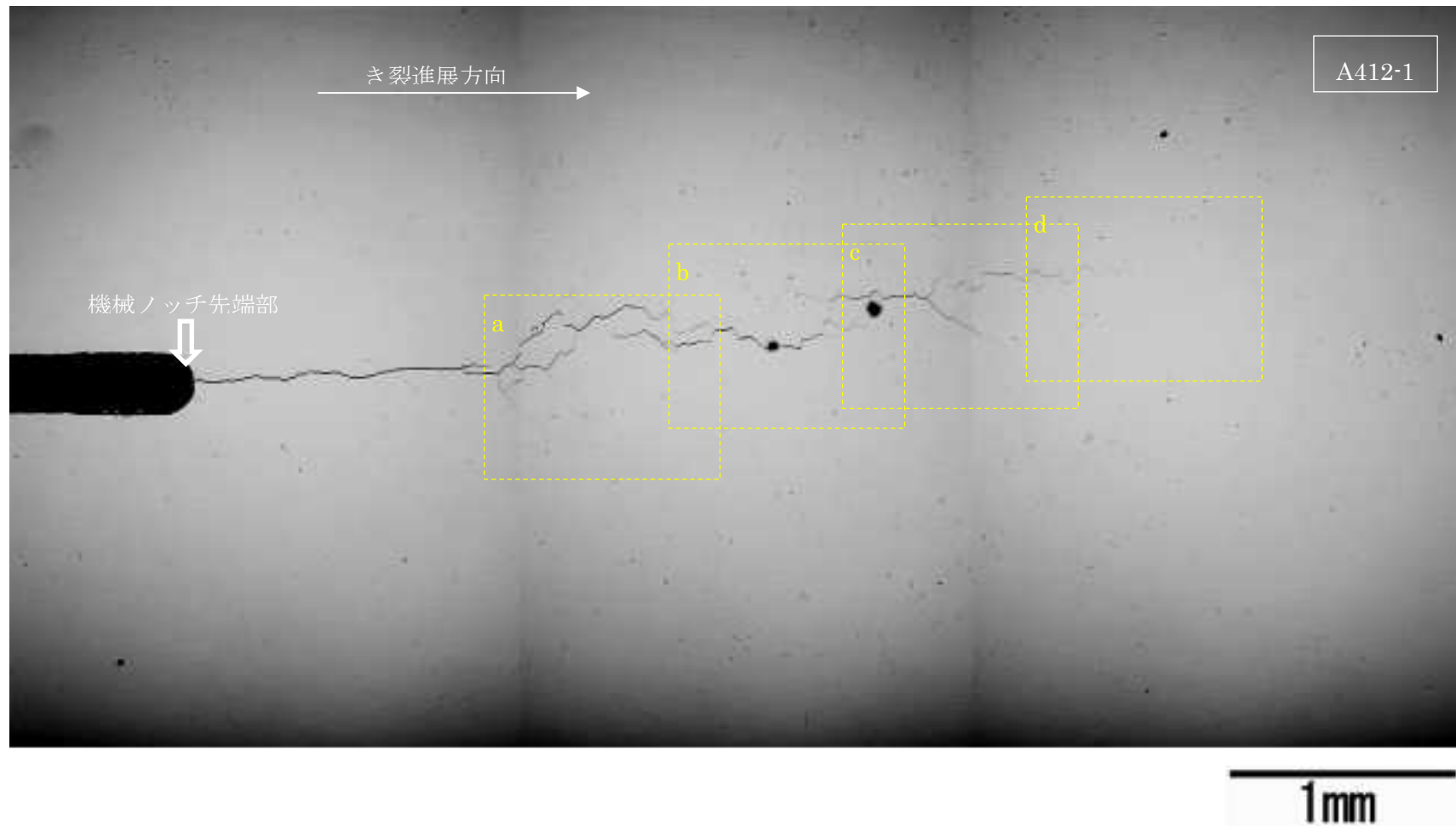


図 4.2.1.2-25(1) き裂断面の光学顕微鏡観察結果(1/2)(A412、SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ )

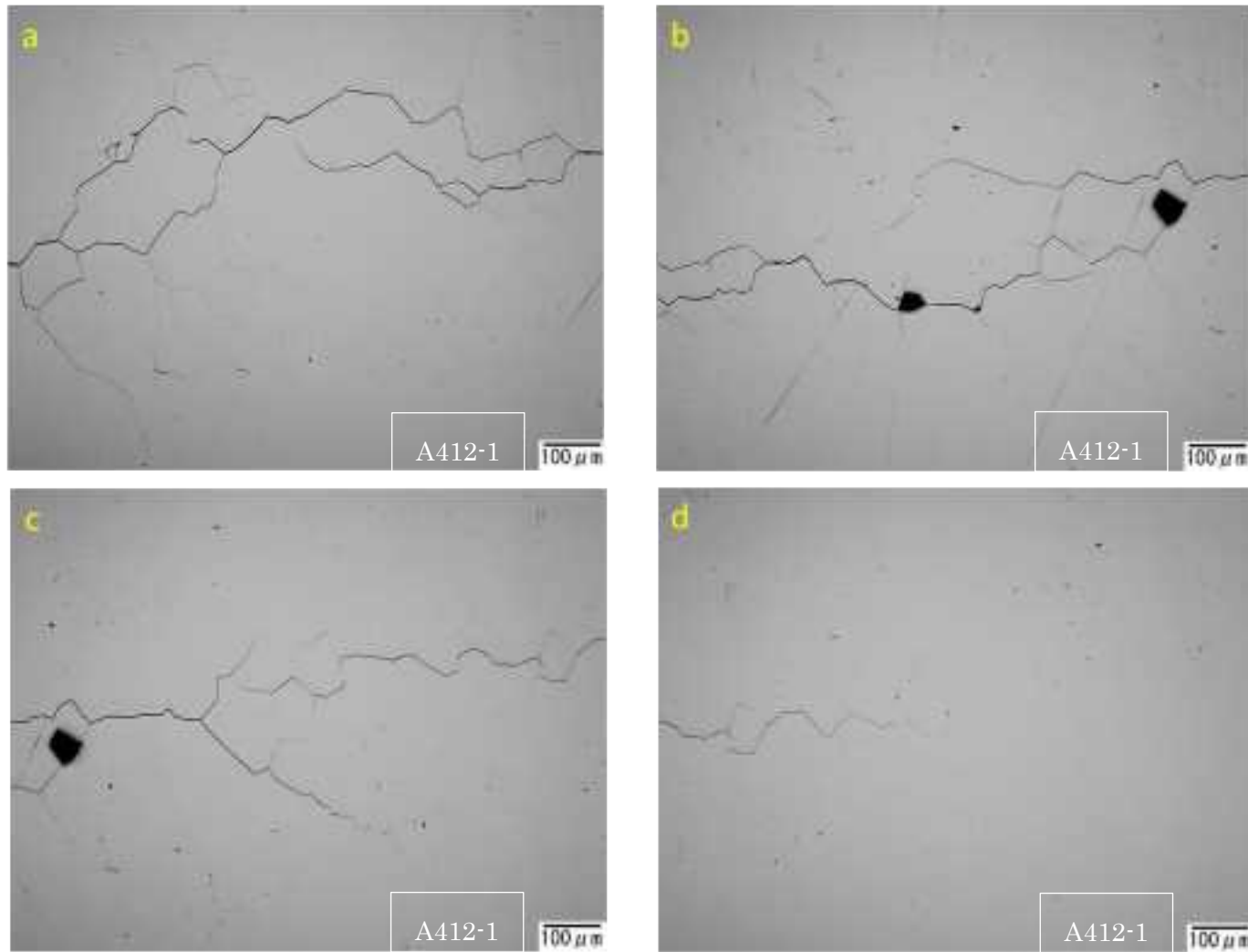


図 4.2.1.2-25(2) き裂断面の光学顕微鏡観察結果(2/2)(A412、SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ )



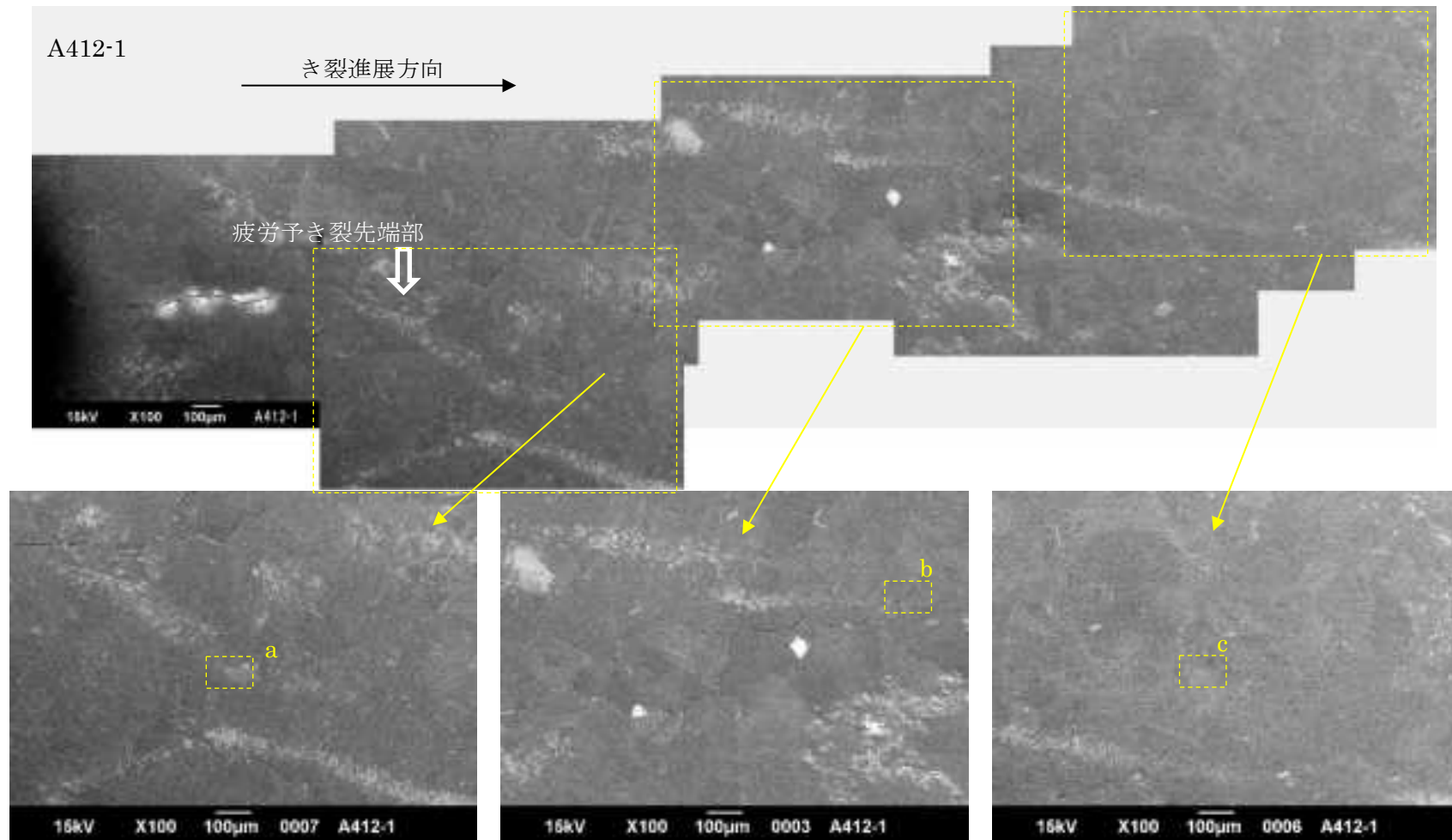


図 4.2.1.2-26(1) き裂断面の SEM 観察結果(1/2)(A412、SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ )

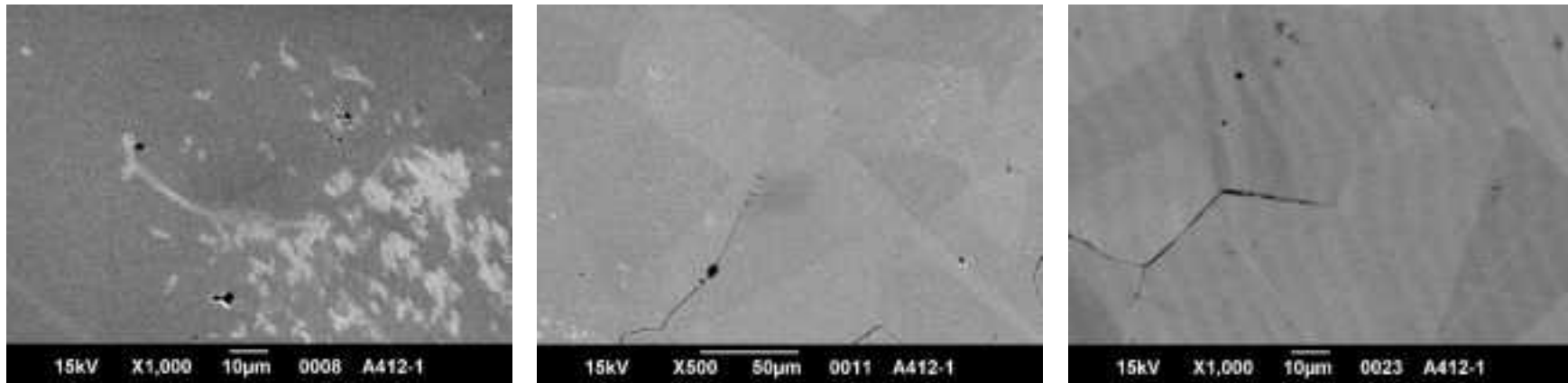


図 4.2.1.2-26(2) き裂断面の SEM 観察結果(2/2)(A412、SUS316L 母材、 $7.39 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ ( $E > 1 \text{MeV}$ ))

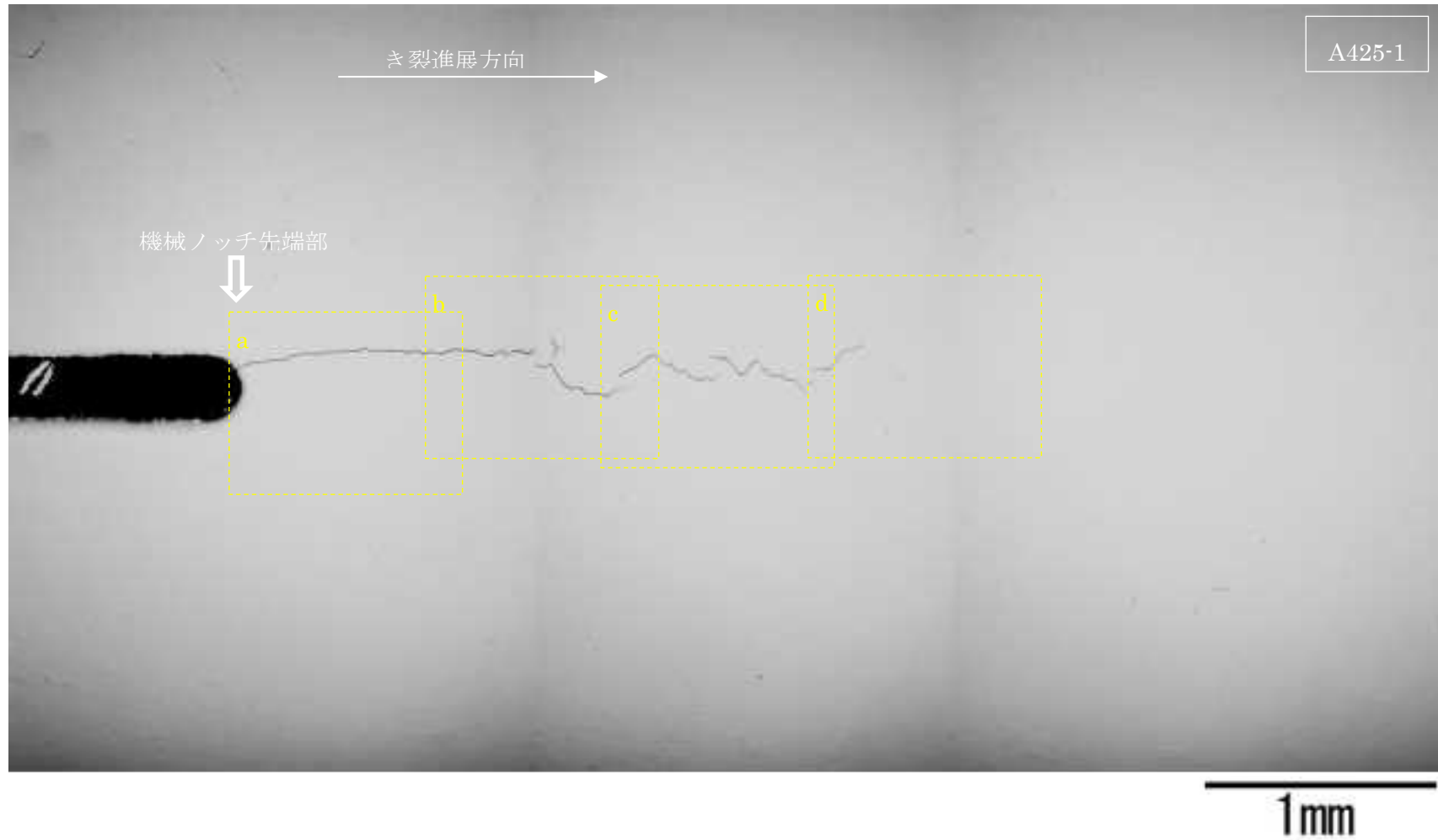


図 4.2.1.2-27(1) き裂断面の光学顕微鏡観察結果(1/2)(A425、SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2$  ( $E > 1 \text{MeV}$ ))

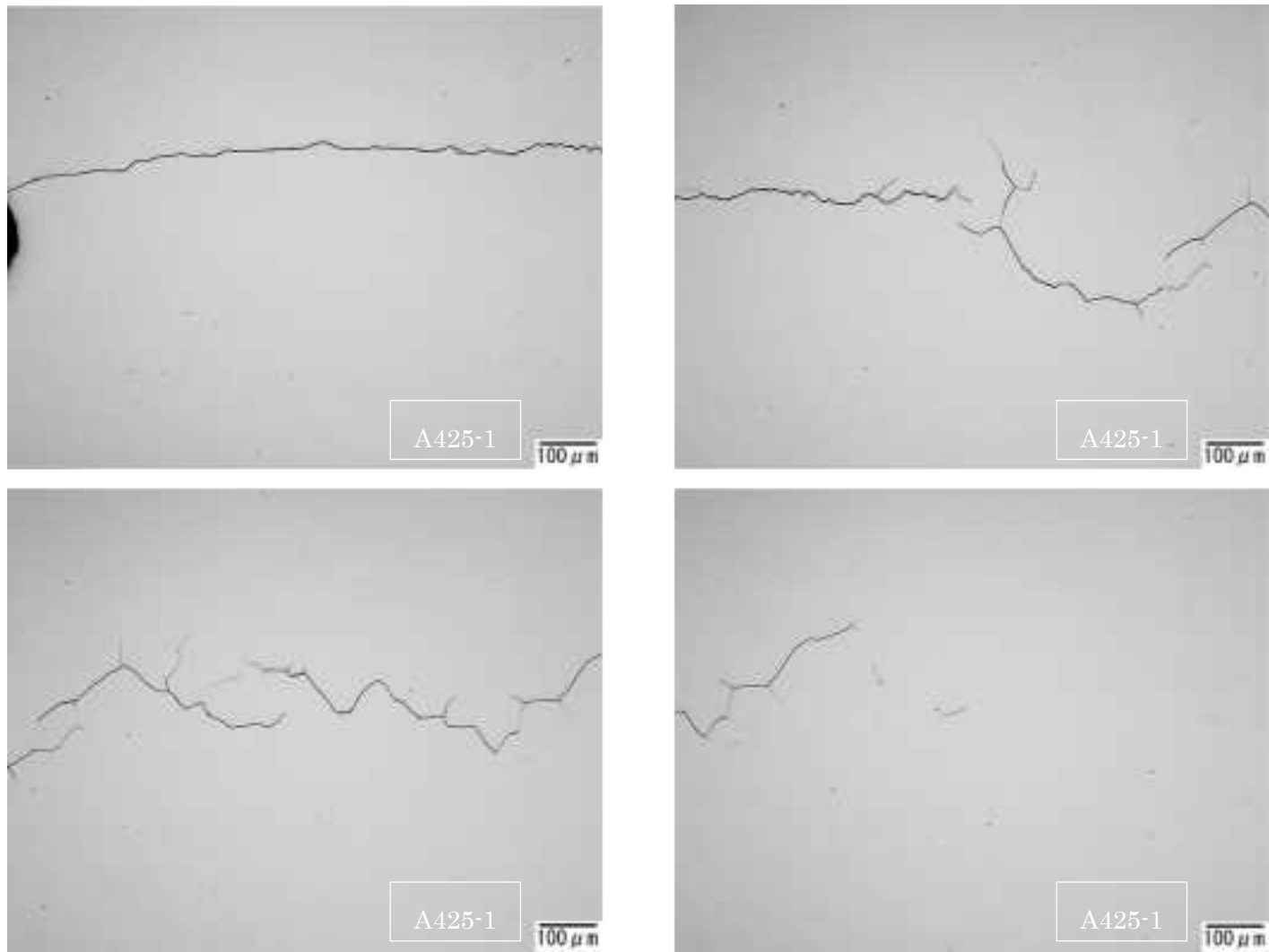


図 4.2.1.2-27(2) き裂断面の光学顕微鏡観察結果(2/2)(A425、SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ )

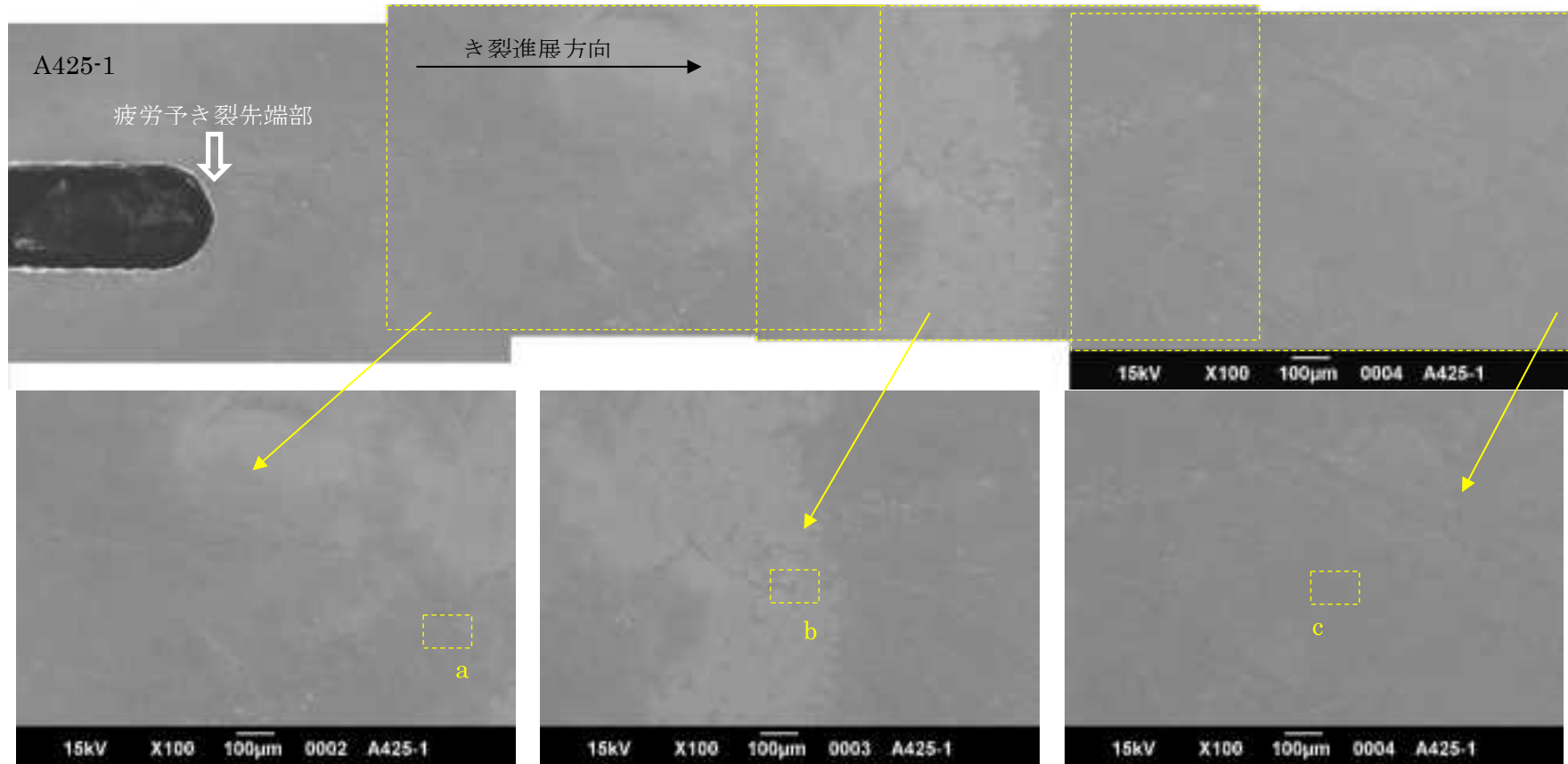


図 4.2.1.2-28(1) き裂断面の SEM 観察結果(1/2)(A425、SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ )

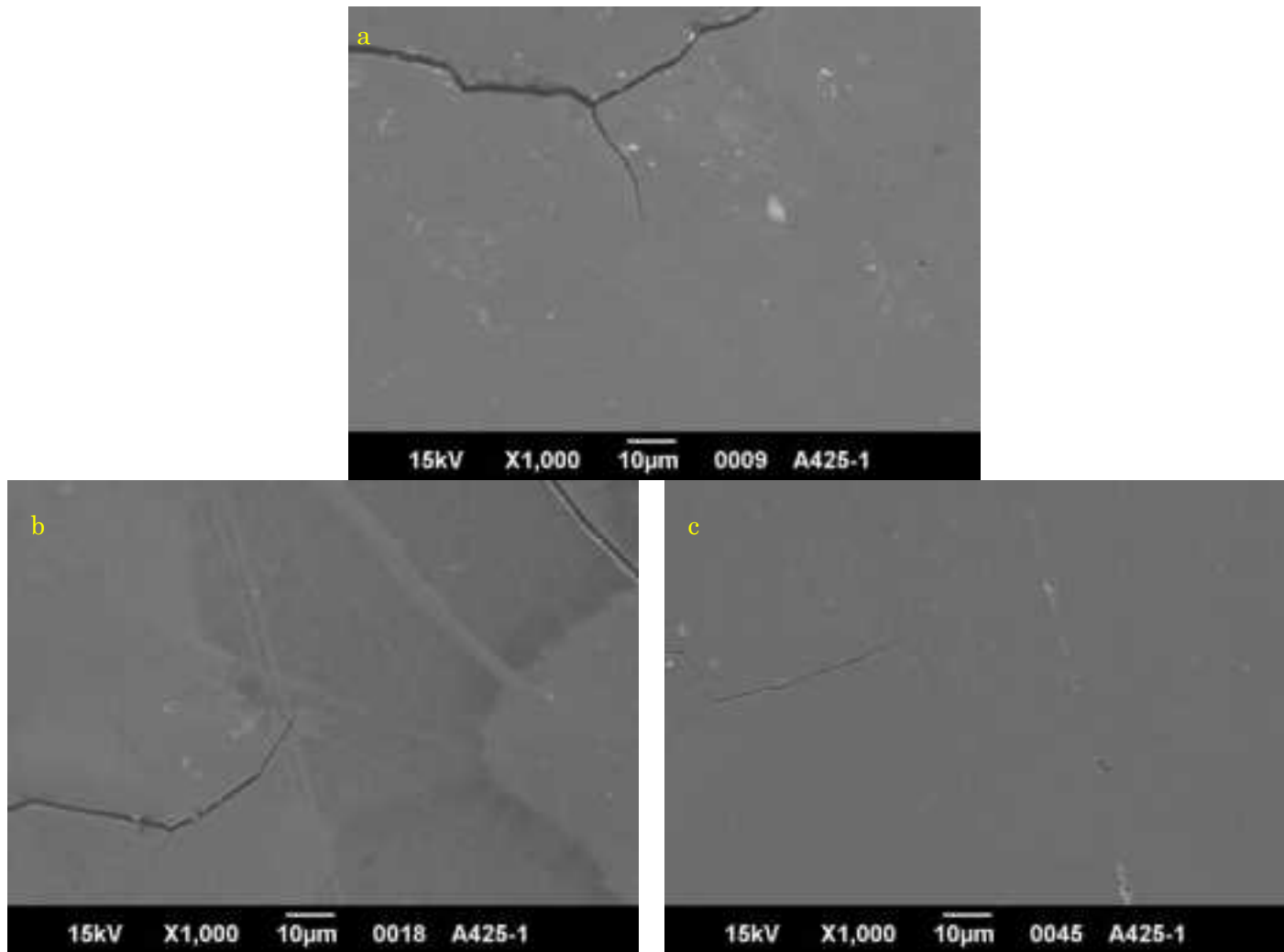


図 4.2.1.2-28(2) き裂断面の SEM 観察結果(2/2)(A425、SUS316L 母材、 $8.23 \times 10^{25} \text{n/m}^2$ ( $E > 1 \text{MeV}$ ))

i. CT試験片き裂表面近傍のマイクロ組織観察

①A425

マイクロ組織観察用薄膜試料採取箇所を図 4.2.1.2-29 に示す。図 4.2.1.2-29(1)は SEM 写真であり、図 4.2.1.2-29(2)は FIB による SIM 写真である。マイクロ組織観察箇所はき裂先端部である。

先端部のマイクロ組織写真を図 4.2.1.2-30 に示す。図は上が透過像であり、下が Z コントラスト像である。マイクロ組織は左から右にかけてき裂が進展した。矢印から左側は粒界面であり、矢印から右側には粒界および強制破断時に粒内で破断した破面の反対側の結晶が付いていることから、矢印がき裂進展試験終了時のき裂先端部と考えられる。矢印から左側の粒界面には酸化皮膜層はほとんど認められなかった。き裂先端部の EDS マップを図 4.2.1.2-31 に示す。EDS マップにおいても酸素はほとんど検出されなかった。き裂先端部から粒界に沿った線分析結果を図 4.2.1.2-32 に示す。線分析においても粒界に沿った Ni の濃縮等は認められなかった。

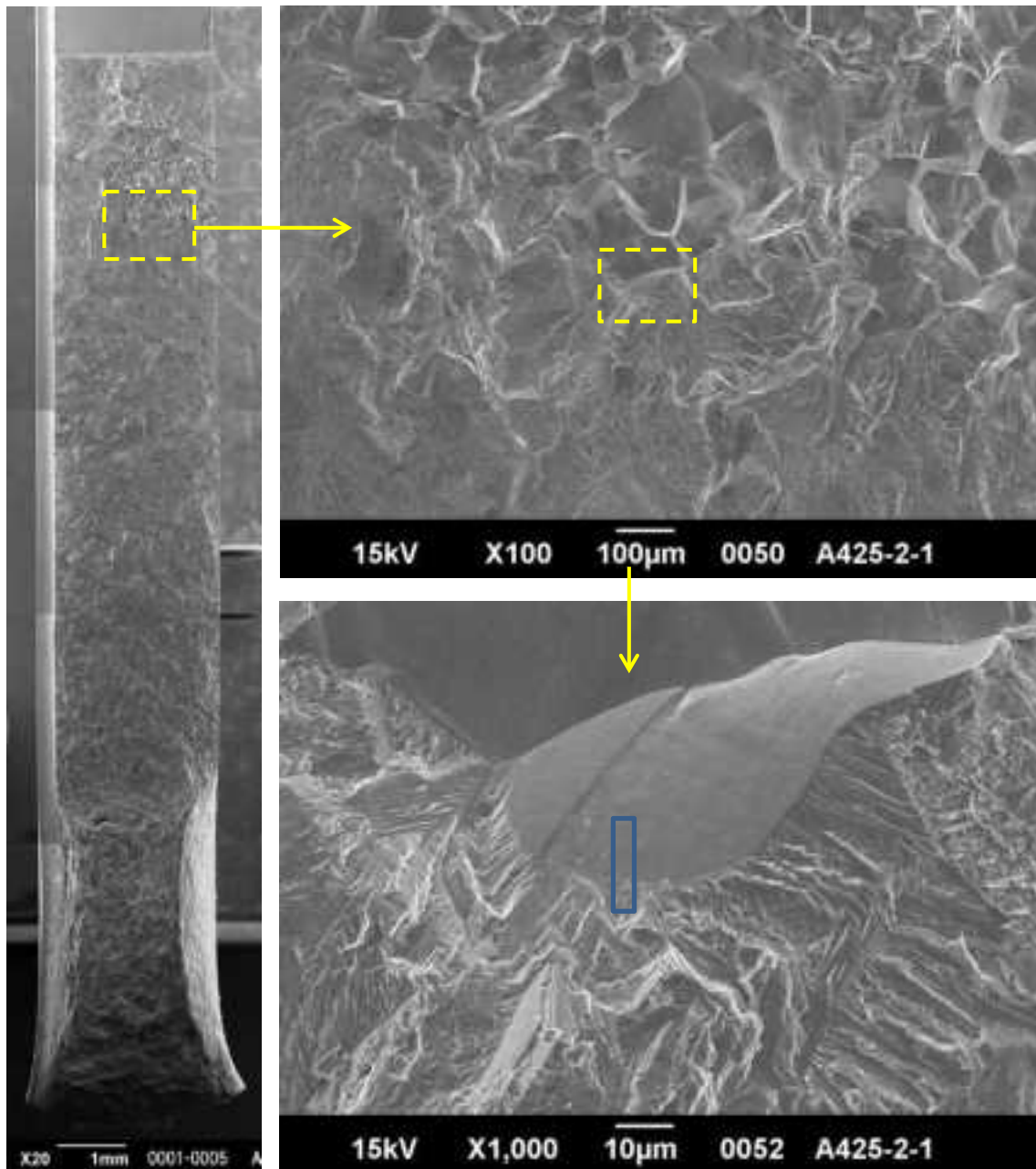
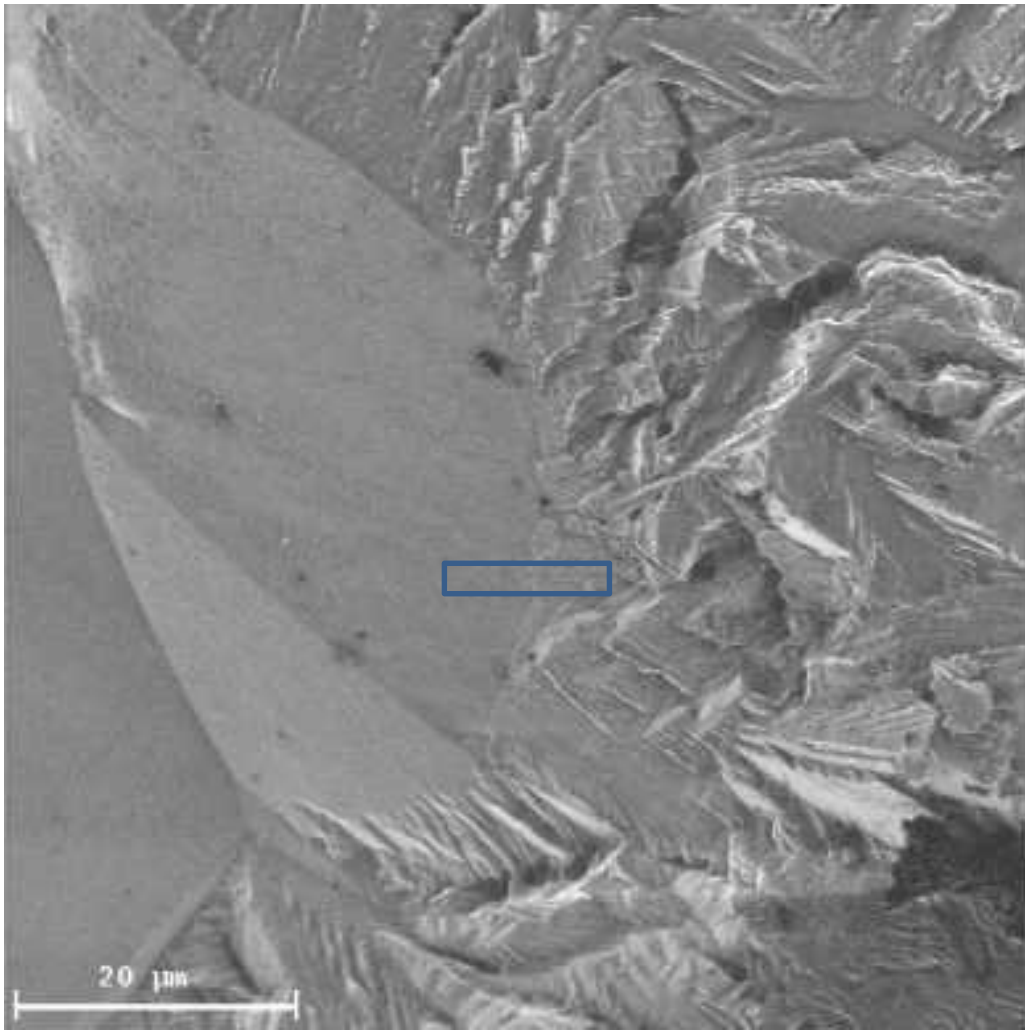


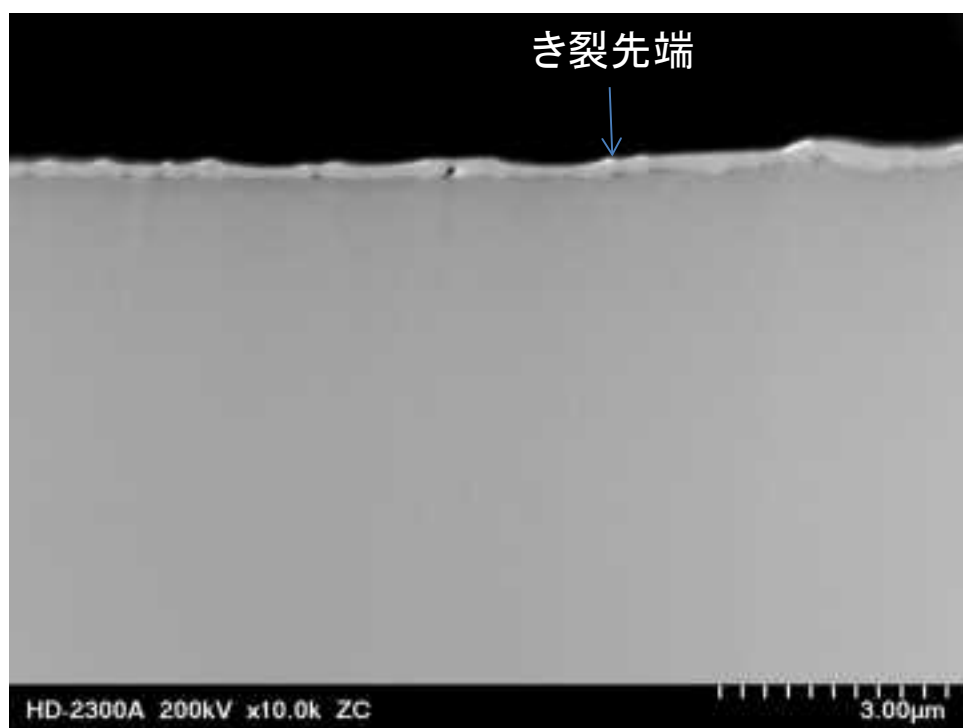
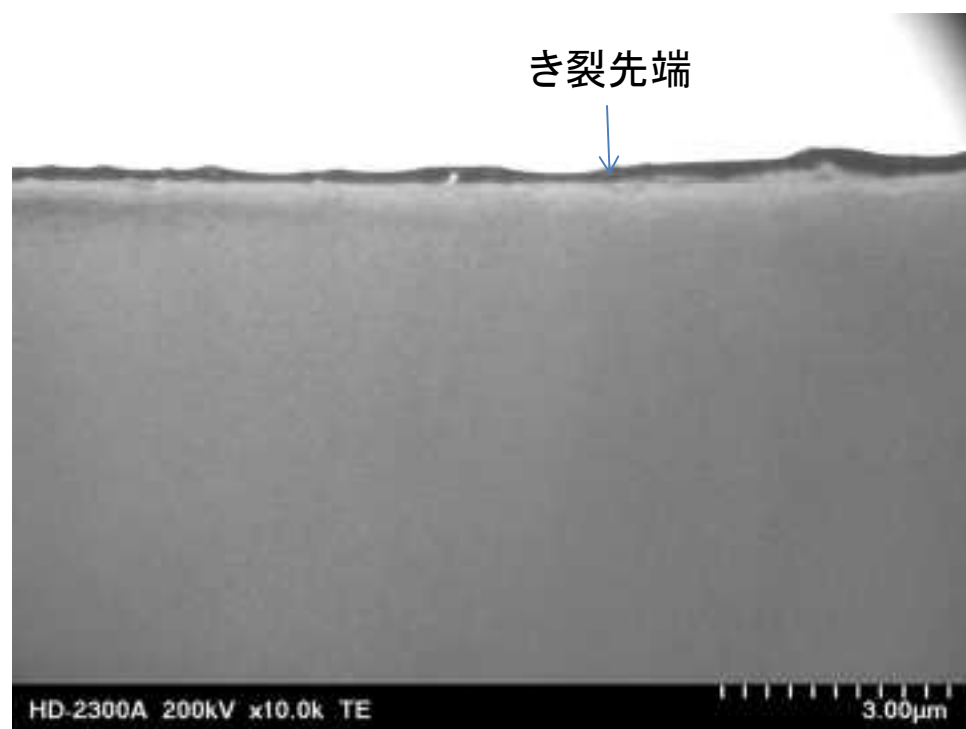
図 4.2.1.2-29(1) き裂進展試験した A425 からの薄膜試料採取箇所





—————→  
き裂進展方向

図 4.2.1.2-29(2) き裂進展試験した A425 からの薄膜試料採取箇所



き裂進展方向 →

図 4.2.1.2-30(1) き裂進展試験した A425 のマイクロ組織

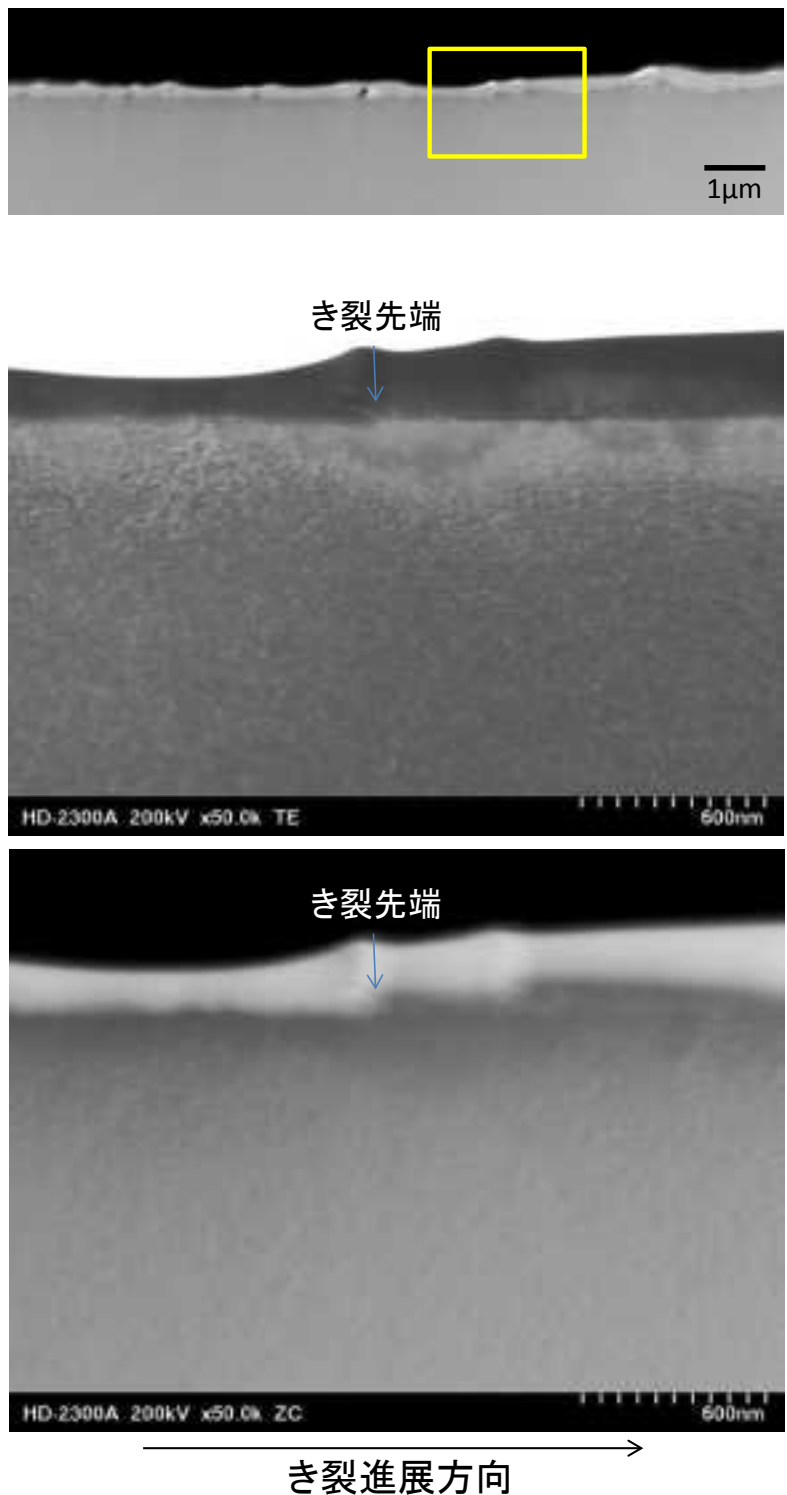


図 4.2.1.2-30(2) き裂進展試験した A425 のマイクロ組織

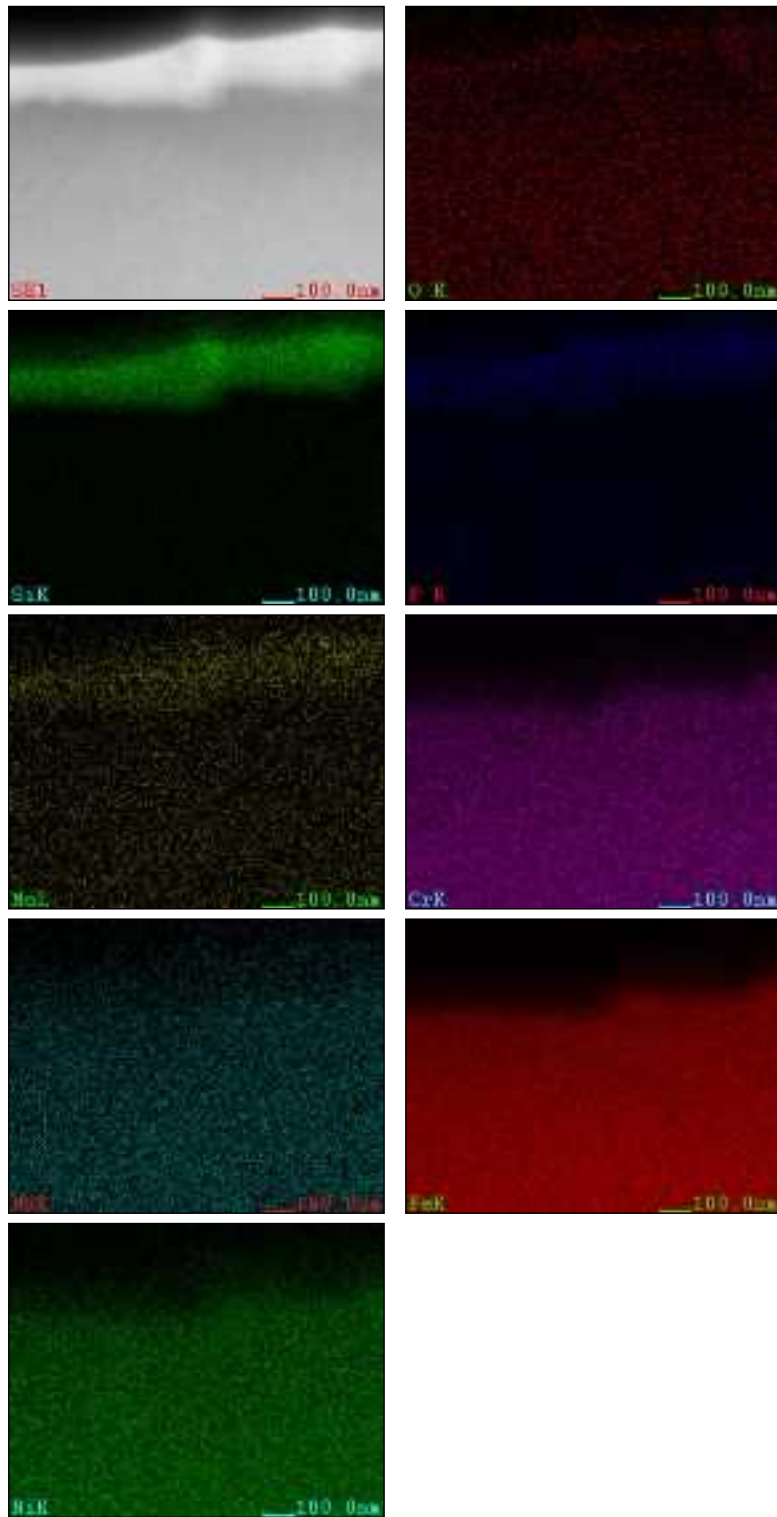


図 4.2.1.2-31 き裂進展試験した A425 のき裂先端における EDS マップ

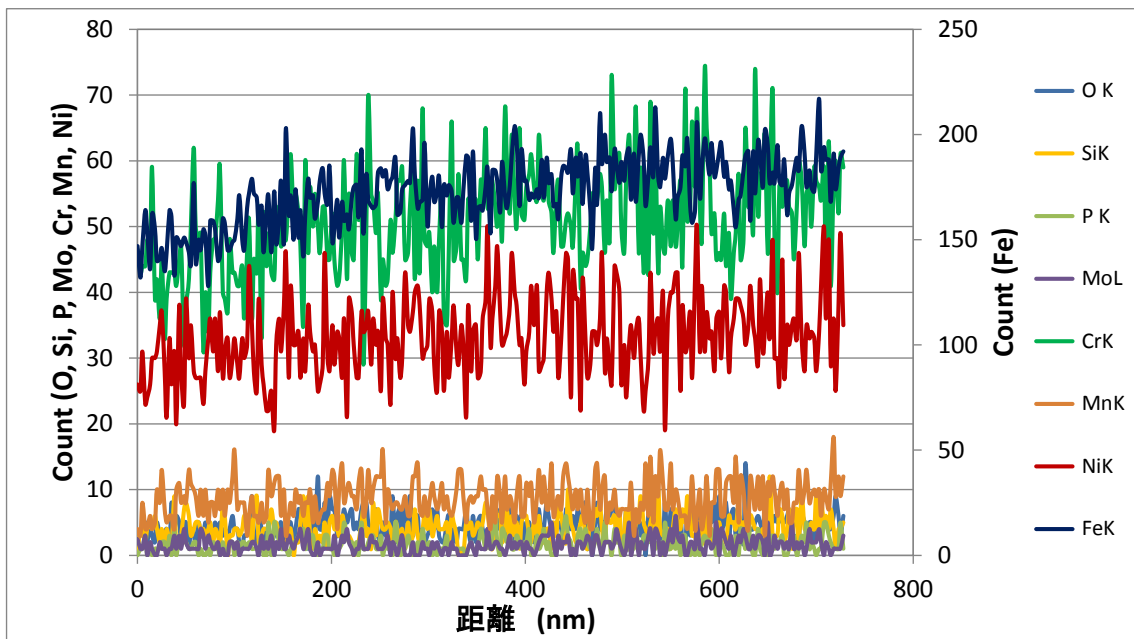
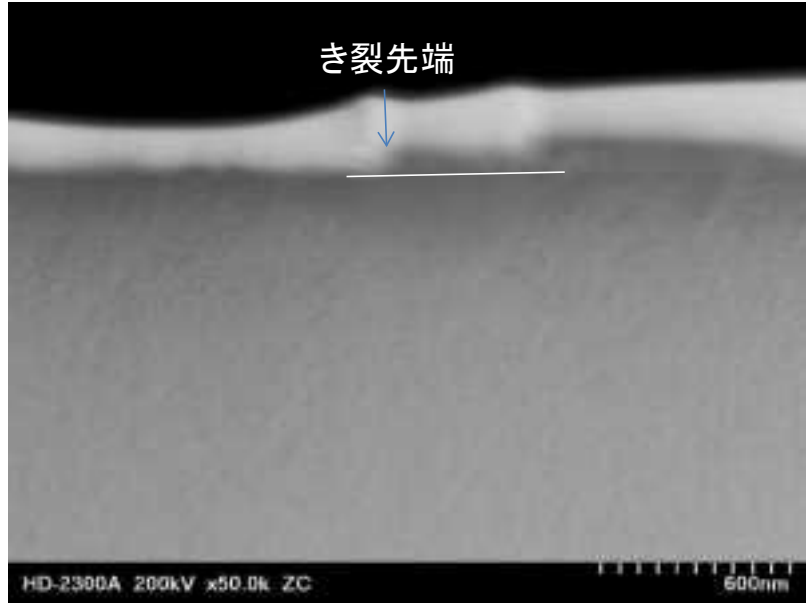


図 4.2.1.2-32 き裂進展試験した A425 のき裂先端における粒界に沿った EDS マップ

## ②A412

A412における開放破面からの薄膜試料採取箇所を図4.2.1.2-33に示す。薄膜採取箇所  
の考え方を表4.2.1.2-16に示す。

また断面金相試料からき裂先端試料2個採取した。表4.2.1.2-17に採取箇所の考え方を示す。

解放後の破面から採取したTEM試験片

### ・A412-(a)

A412-(a)のマイクロ組織を図4.2.1.2-34に示す。A412-(a)には変形に伴う顕著な転位組織は観察されなかった。EDSマップの結果を図4.2.1.2-35および図4.2.1.2-36に、点分析の結果を図4.2.1.2-37に示す。結晶粒表面に生成した酸化皮膜は薄く最も厚い箇所で50nm程度であった。また、図4.2.1.2-36でEDSマップからわかるように、酸化物外層はFe、内層はCrが主たる元素であり、このことは図4.2.1.2-37に示す点分析の結果からもわかる。

### ・A412-(b)

A412-(b)のマイクロ組織を図4.2.1.2-38に示す。試料表面と内部では明らかに組織が異なっていた。表面のEDSマップを図4.2.1.2-39に示す。EDSマップの結果から、表面の酸化皮膜は極めて薄いこと、マトリックス内部は酸化していないことがわかる。したがって、図4.2.1.2-38に示す組織は転位組織等の違いを反映した組織である。右から左下に斜めに入る組織は双晶であり、表面から深さ3 $\mu$ m以内の範囲にのみ生じていた。また、最表面に見られるのは転位コントラストと考えられる。

### ・A412-(c)

A412-(c)のマイクロ組織を図4.2.1.2-40に示す。EDSマップ取得箇所およびEDSマップの結果を図4.2.1.2-41、図4.2.1.2-42に示す。図4.2.1.2-40では結晶粒表面に赤矢印で示す粒が見られた。図4.2.1.2-41のEDSマップの結果から赤矢印で示す粒は酸化していないこと、A412-(c)はき裂先端近傍であり強制破断箇所に近いことから、赤矢印で示した粒は強制破断した対となる破面の結晶粒の一部と考えられる。また、図4.2.1.2-42のEDSマップからもわかるように、明瞭な酸化は確認されなかった。

### ・A412-(d)

A412-(d)のマイクロ組織を図4.2.1.2-43に示す。EDSマップの結果を図4.2.1.2-44に示す。EDSマップの結果から表面の酸化皮膜が極めて薄いこと、試料内部は酸化していないことがわかる。したがって、図4.2.1.2-43に見られる格子状の組織は双晶であり、最表面に見られるのは転位コントラストと考えられる。

・ A412-(e)

A412-(e)は NWC 環境でき裂進展した後 HWC 環境に保持された箇所と考えられる。A412-(e)のマイクロ組織を図 4.2.1.2-45 に示す。粒界を含む試料であり、粒界割れが生じていた。また、結晶粒表面にはいくつか酸化物と思われるコントラストが見られた。粒界割れ箇所の EDS マップを図 4.2.1.2-46 に示す。すき間環境で保持されたためか、結晶粒表面には厚さ 80nm 程度の皮膜が生成していた。粒状の酸化物は Fe が主たる元素である。結晶粒表面の酸化物の EDS マップを図 4.2.1.2-47 および図 4.2.1.2-48 に示す。図 4.2.1.2-47 に示す結晶粒表面に生成した酸化物は Fe が主たる元素であった。図 4.2.1.2-48 に示す結晶粒内側に生成した酸化物は Cr が主たる元素であった。

断面観察用試験片から採取したTEM試験片

・ A412-先端(a)

A412-先端(a)の採取箇所を図 4.2.1.2-49 に示す。き裂は赤破線に沿って、矢印の箇所まで進展していた。マイクロ組織を図 4.2.1.2-50 に示す。A412-先端(a)は薄膜試料に対してき裂が傾斜していたため、エッジオンでの観察および分析は出来なかったため、図 4.2.1.2-50 はき裂を傾斜した条件で観察している。図 4.2.1.2-50 から明らかなように、き裂先端にはすべり線や双晶などの変形組織は観察されなかった。EDS マップを図 4.2.1.2-51 に示す。先端部での Ni 濃縮などは検出されなかったが、エッジオン条件で分析できていないことが原因と考えられる。

A412-先端(b)

A412-先端(b)の採取箇所を図 4.2.1.2-52 に示す。き裂は赤破線に沿って、矢印の箇所まで進展していた。マイクロ組織を図 4.2.1.2-53 に示す。き裂は粒界に沿って進展し、粒界三重点の手前約 1  $\mu$  m 付近で停止していた。き裂前方の粒界三重点付近には双晶が 2 個観察された。き裂先端部の EDS マップを図 4.2.1.2-54 に示す。き裂部には、O が検出され、Fe と Ni のカウント数は低下していた。粒界及びき裂に沿った線分析の結果を図 4.2.1.2-55 に示す。EDS マップの結果と同様に、O のカウントが上昇すると Fe のカウントが低下した。また、先端部前方の Ni カウントの上昇に合わせて Cr のカウントが低下していた。図 4.2.1.2-56 にナノ回折像を示す。き裂内部の酸化物はいずれもスピネル構造であった。

表 4.2.1.2-16 A412 破面からの薄膜試料採取箇所

試料番号	採取箇所
A412-(a)	き裂先端近傍の粒界を含む
A412-(b)	板厚中央に近く最も進展していたき裂先端
A412-(c)	サイドグループ側にあるき裂先端近傍の結晶粒
A412-(d)	板厚中央のき裂先端
A412-(e)	定荷重下で NWC→HWC を経験したと思われる粒界

表 4.2.1.2-17 断面金相試料からのき裂先端試料採取箇所

試料番号	採取箇所
A412-先端(a)	HWC 環境下でのき裂先端
A412-先端(b)	NWC→HWC を経験したき裂先端



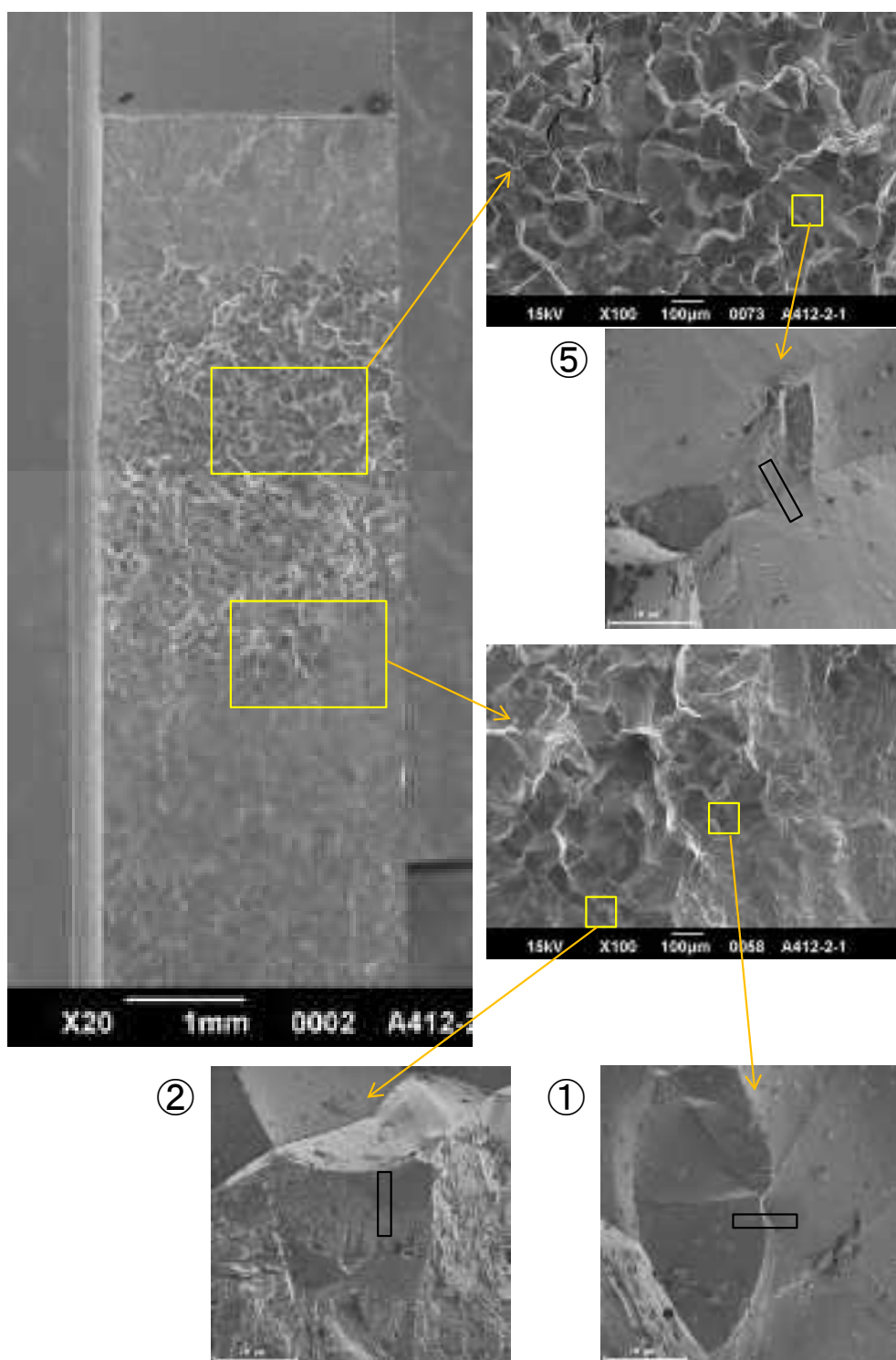


図 4.2.1.2-33(1) A412 からの薄膜試料採取箇所

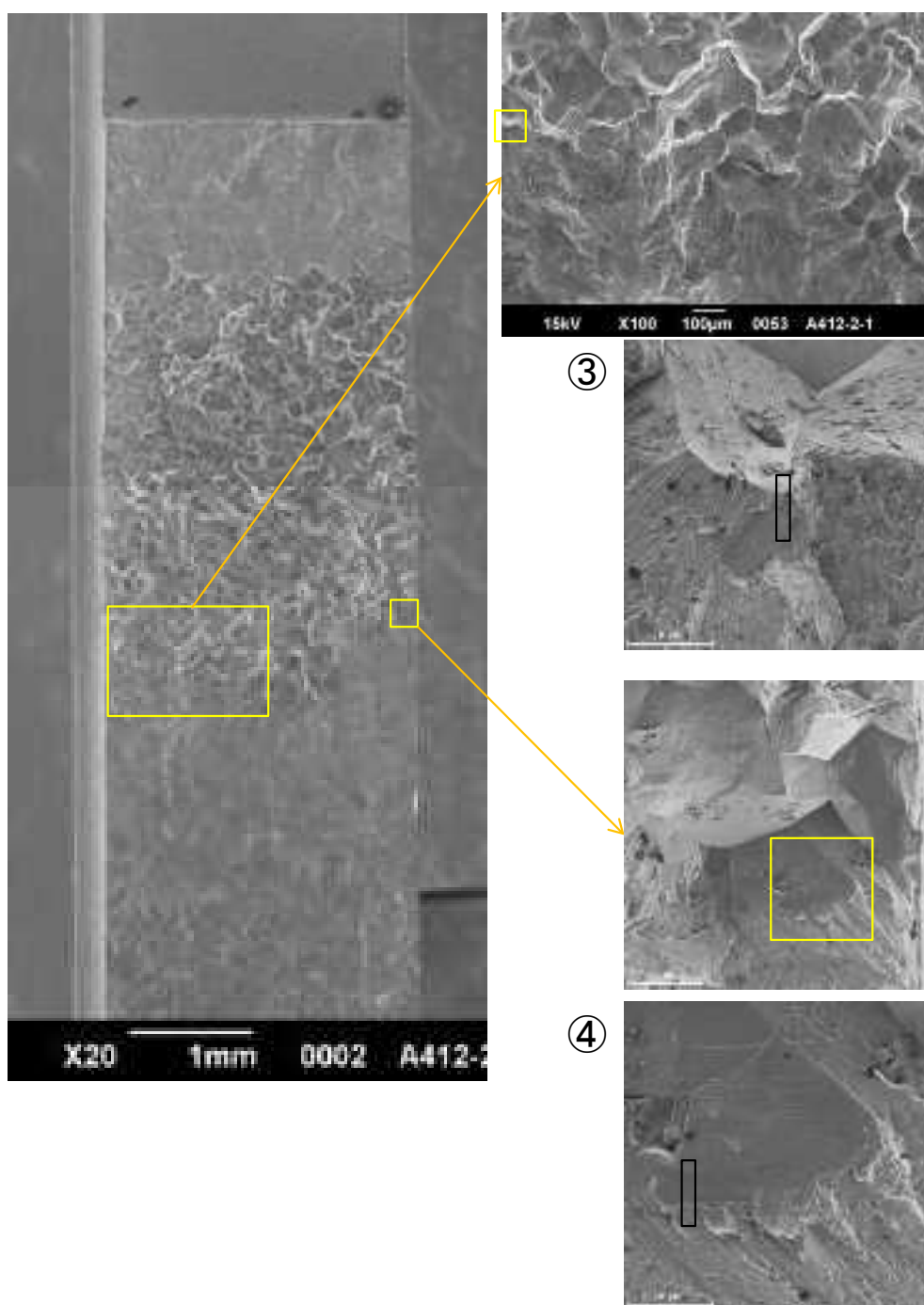


図 4.2.1.2-33(2) A412 からの薄膜試料採取箇所

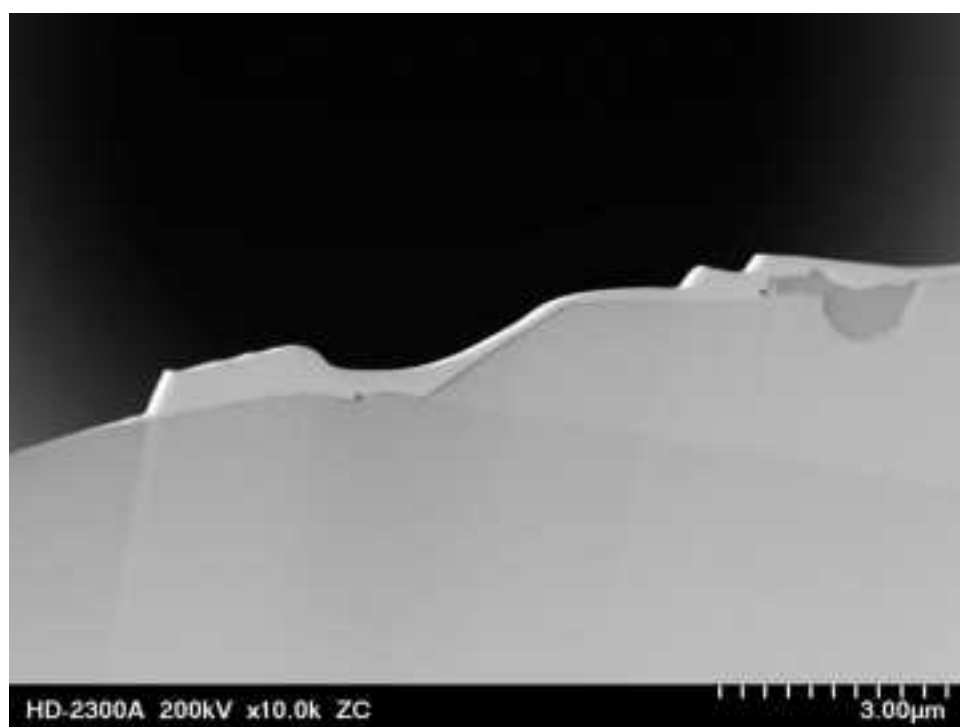
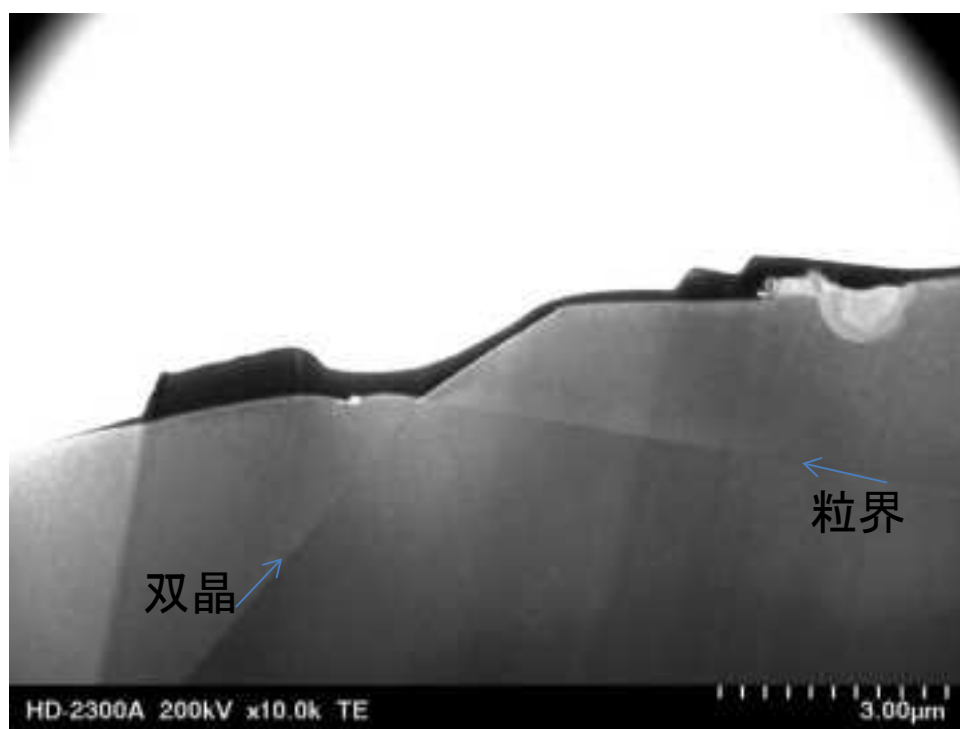


図 4.2.1.2-34 A412-(a)のマイクロ組織

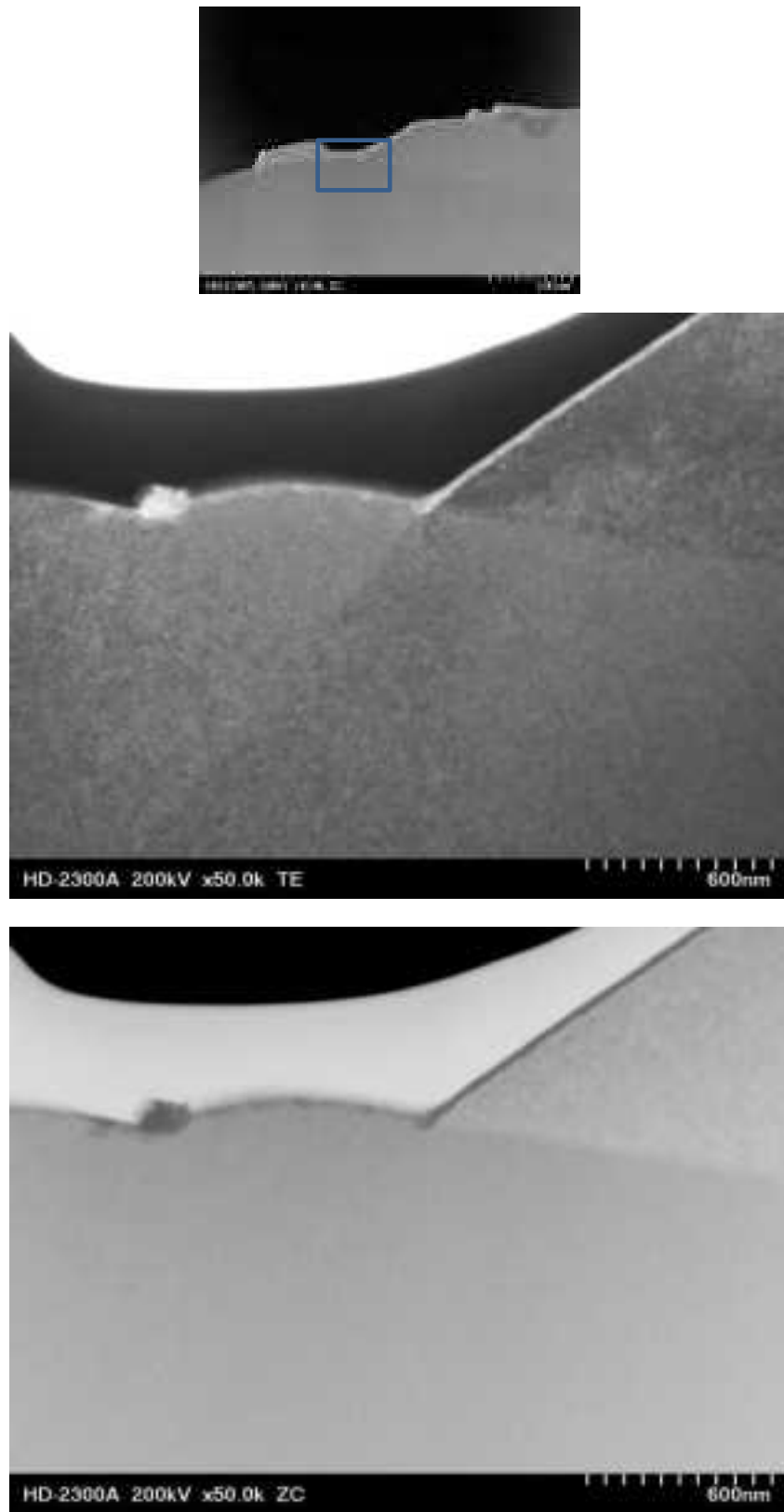


図 4.2.1.2-35(1) A412-(a)の EDS マップ箇所マイクロ組織

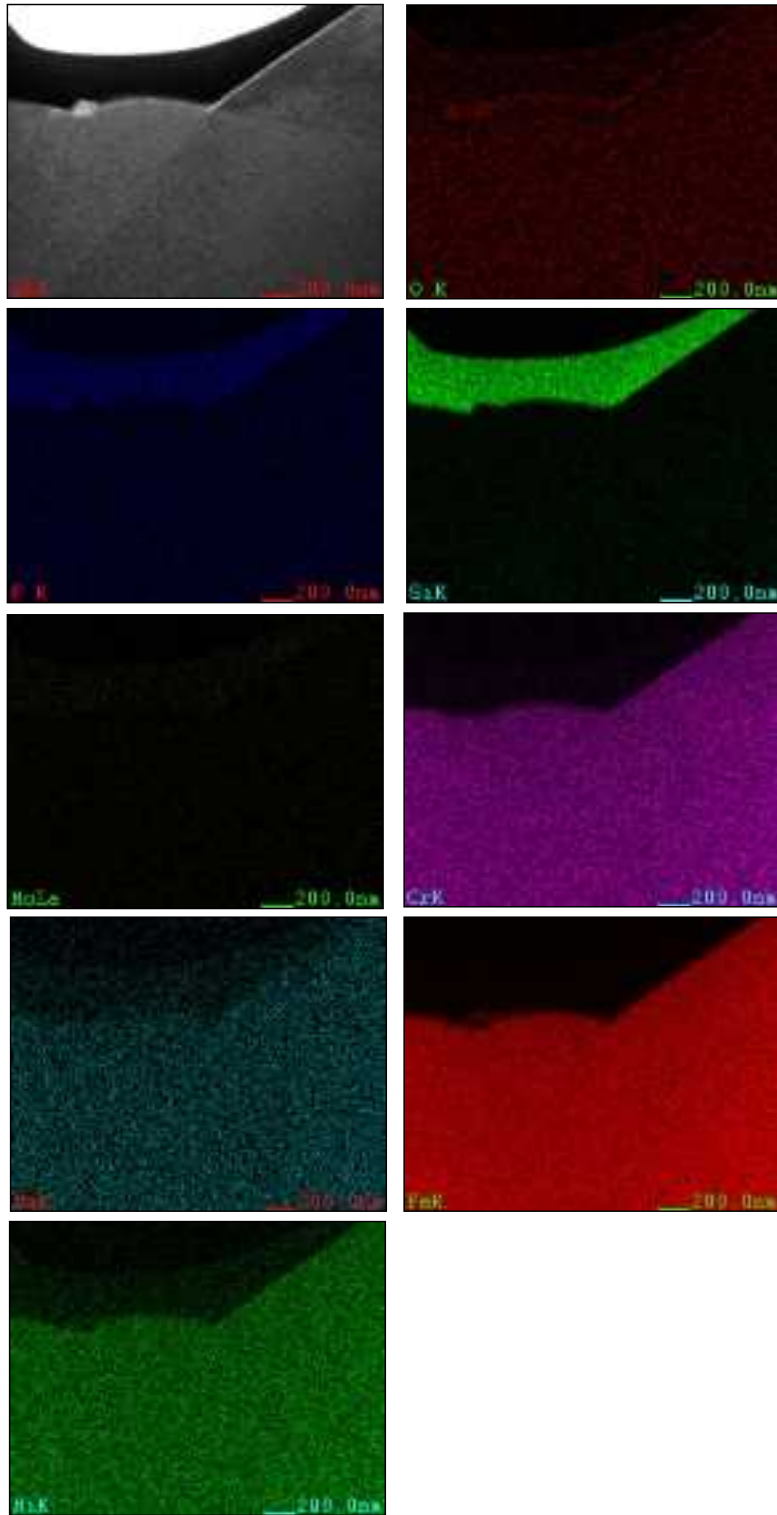


図 4.2.1.2-35(2) A412-(a)の EDS マップ

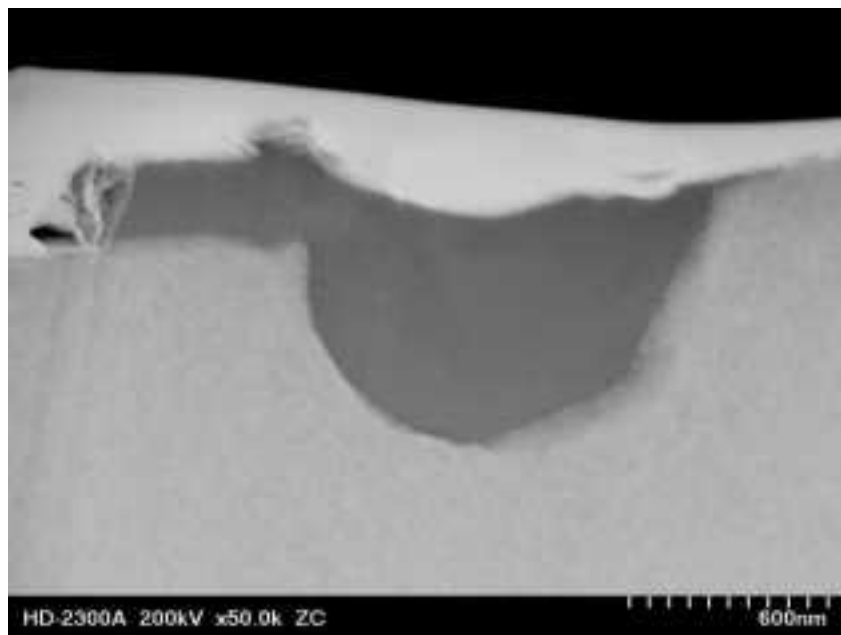
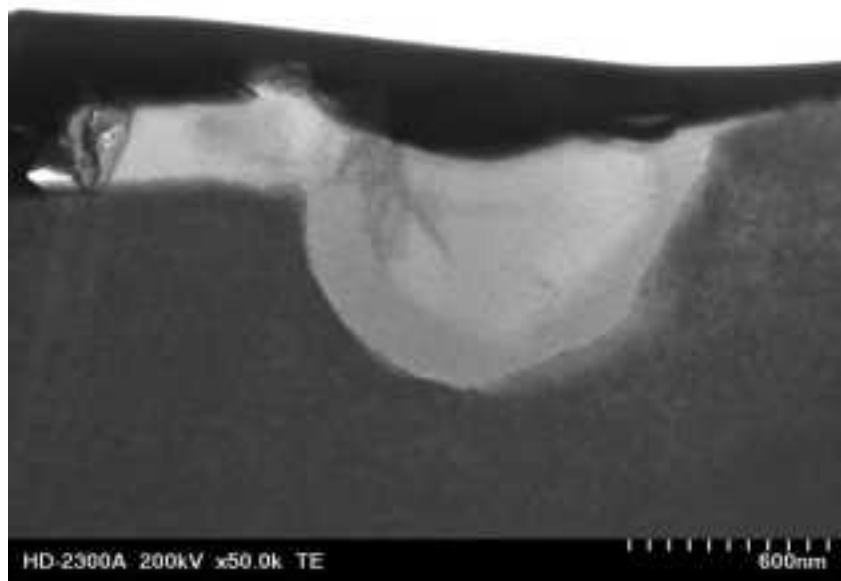
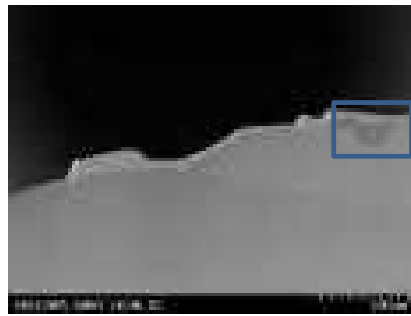


図 4.2.1.2-36(1) A412-(a)の EDS マップ箇所マイクロ組織

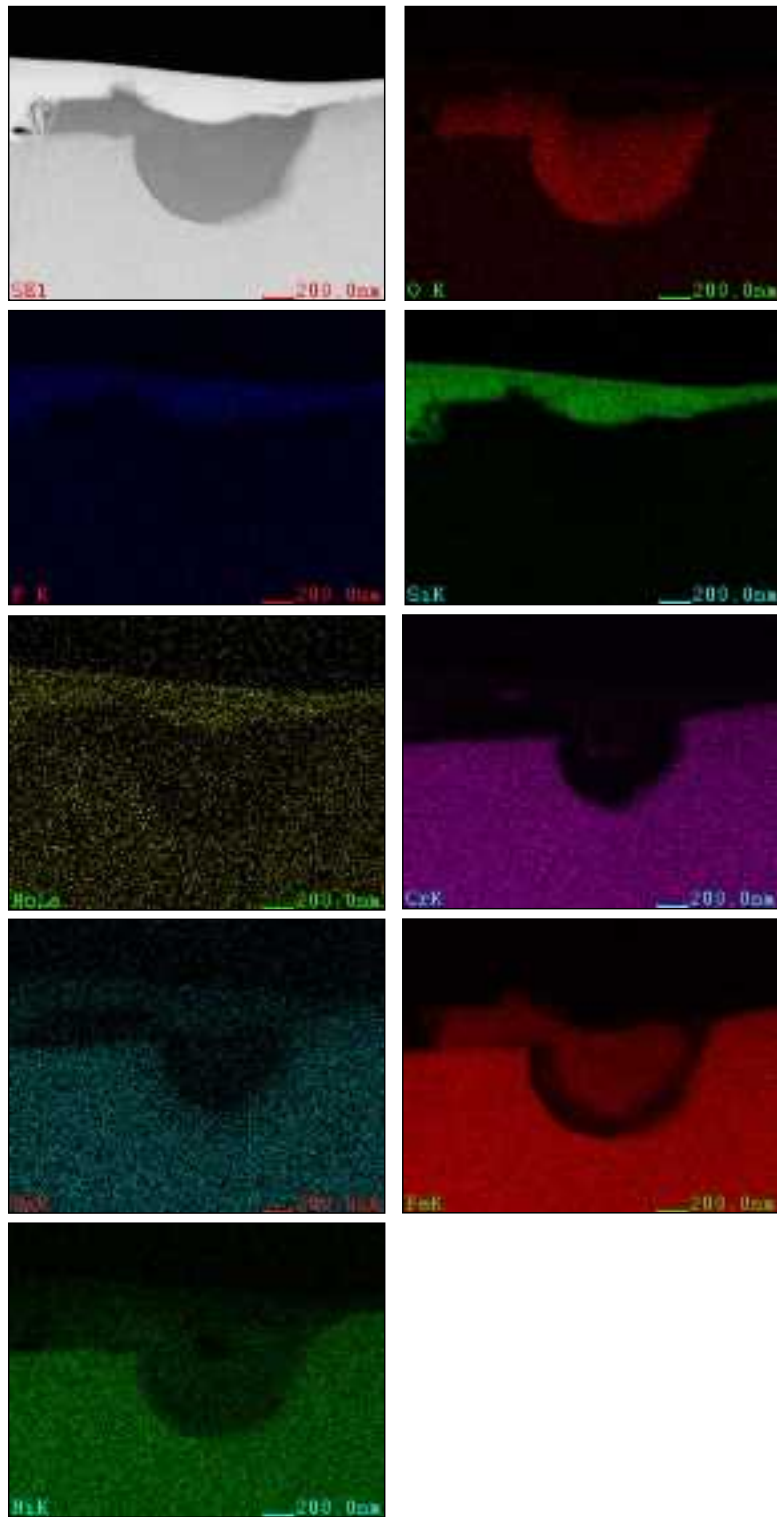
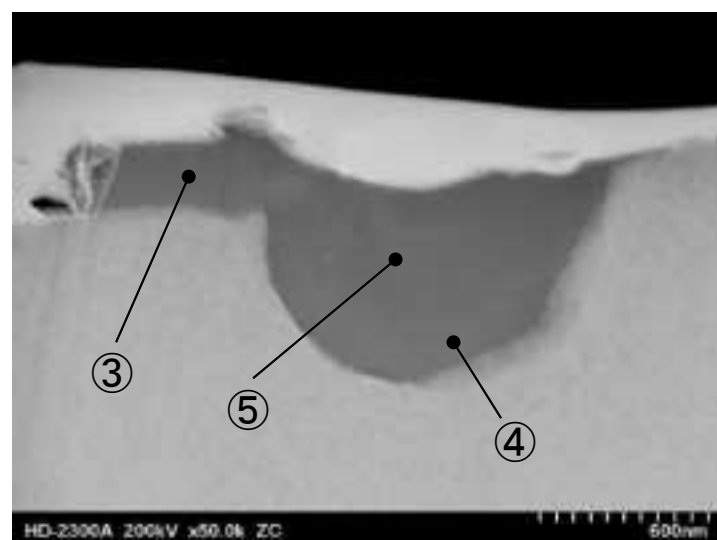
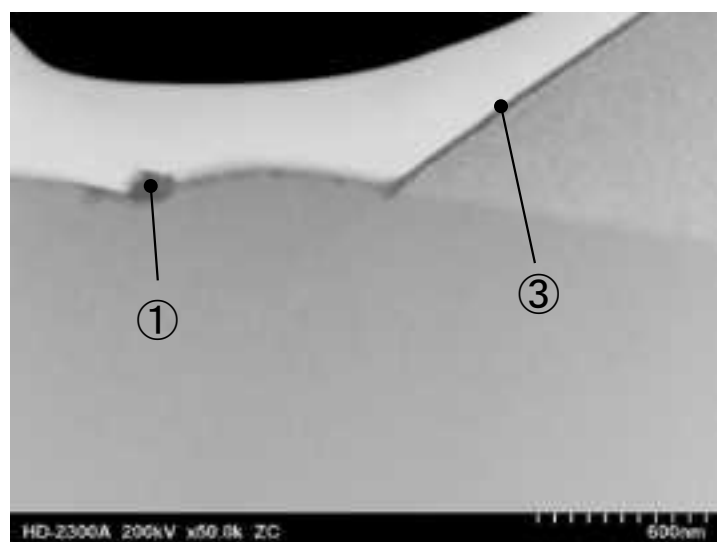


図 4.2.1.2-36(2) A412-(a)の EDS マップ



wt%								
	O K	SiK	P K	MoL	CrK	MnK	FeK	NiK
1	3.0	0.7	0.3	0.5	20.3	1.0	62.1	12.1
2	19.9	0.4	0.3	0.4	0.5	0.3	71.2	6.9
3	11.9	5.7	0.4	0.6	40.4	0.3	32.1	8.6
4	26.7	0.5	0.1	0.4	32.8	0.1	32.4	6.9
5	21.9	0.3	0.1	0.7	1.7	0.3	68.0	7.1
at%								
	O K	SiK	P K	MoL	CrK	MnK	FeK	NiK
1	9.6	1.3	0.5	0.2	19.9	0.9	56.9	10.5
2	46.3	0.6	0.3	0.2	0.4	0.2	47.6	4.4
3	30.1	8.2	0.5	0.3	31.5	0.2	23.3	6
4	55.1	0.5	0.1	0.1	20.9	0.1	19.2	3.9
5	49.5	0.4	0.1	0.3	1.2	0.2	44	4.4

図 4.2.1.2-37 A412-(a)の EDS による点分析



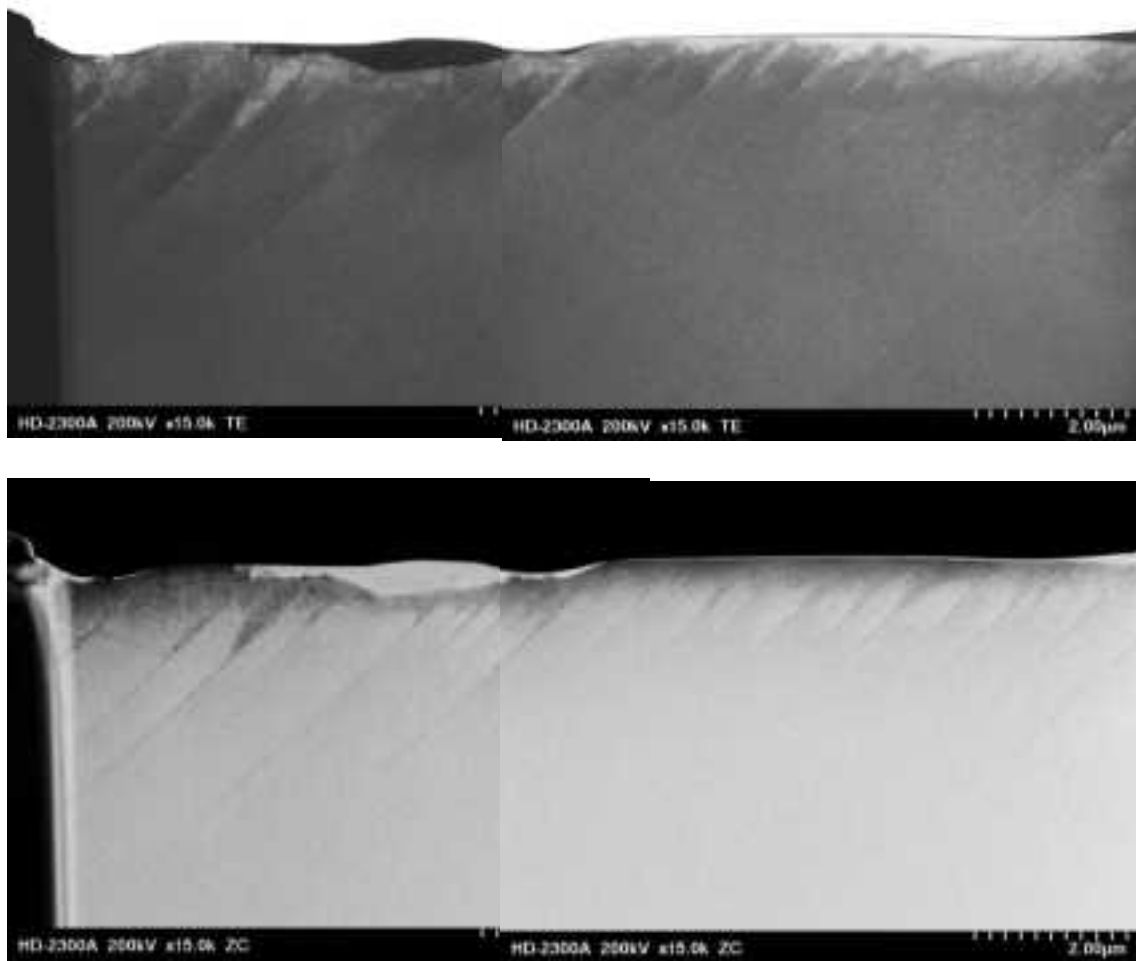


図 4.2.1.2-38(1) A412-(b)のマイクロ組織

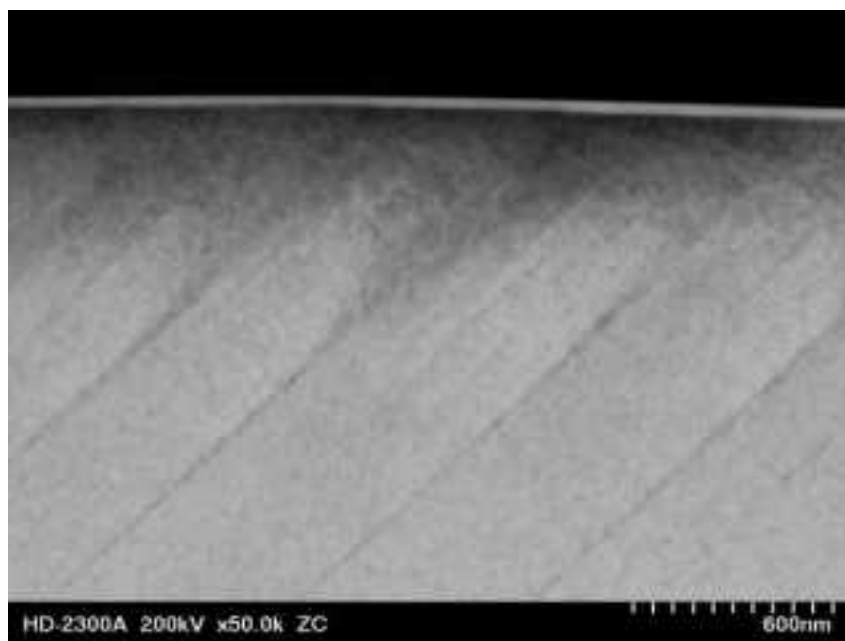
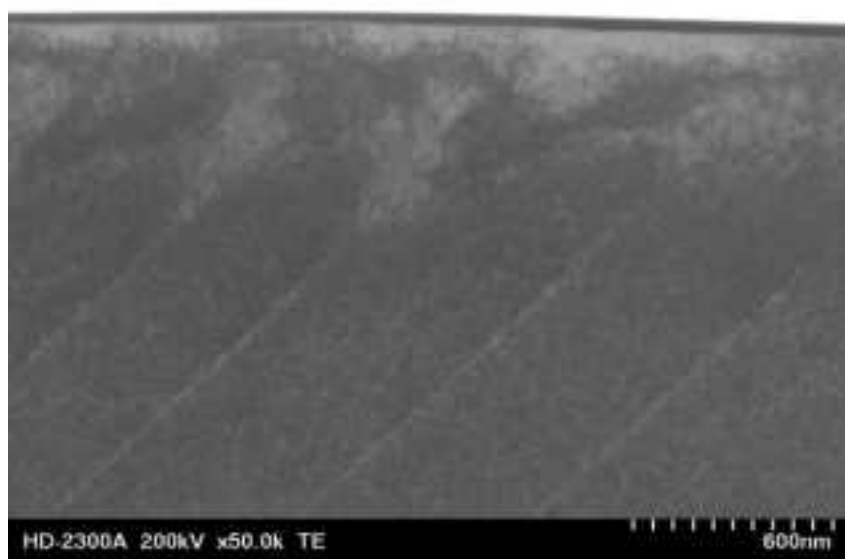


図 4.2.1.2-38(2) A412-(b)のマイクロ組織

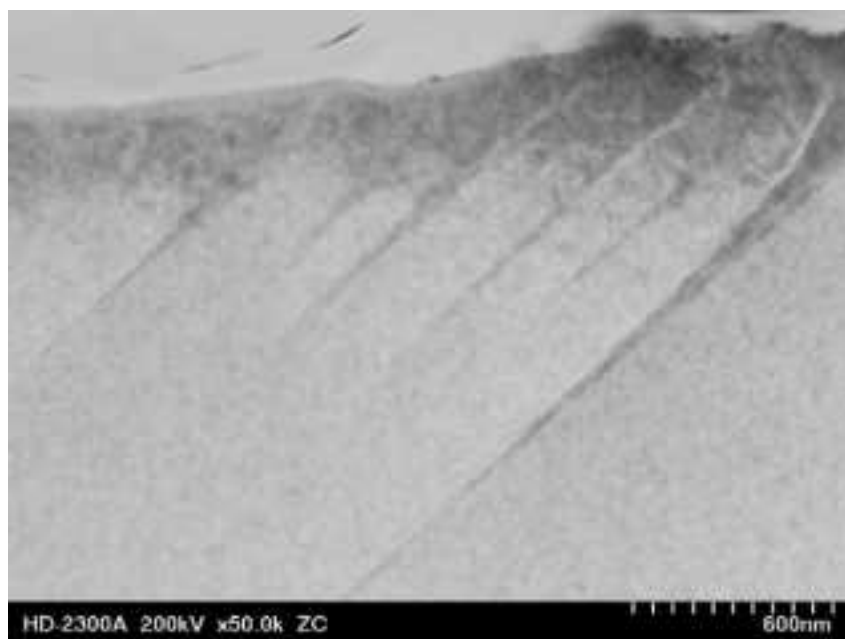
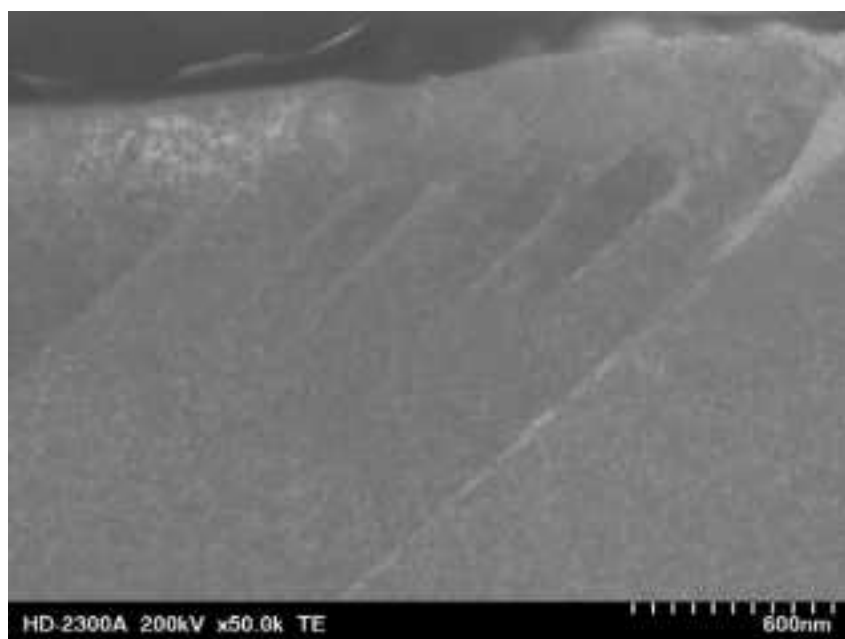
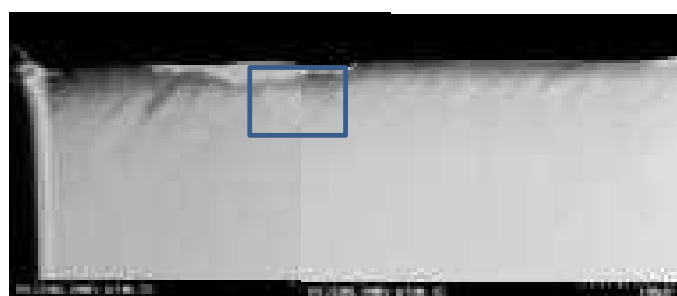


図 4.2.1.2-39(1) A412-(b)の EDS マップ箇所のみクロ組織

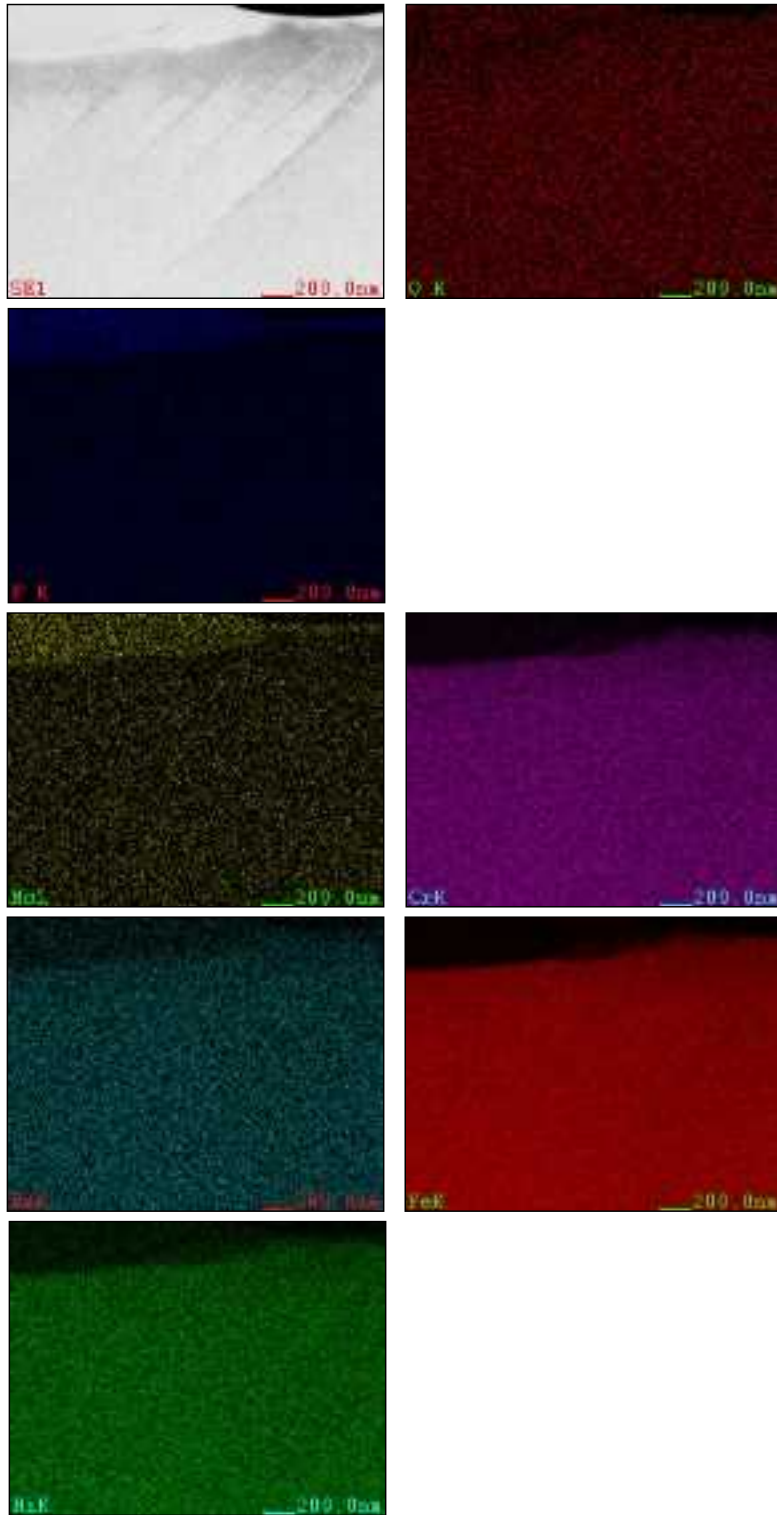


図 4.2.1.2-39(2) A412-(b)の EDS マップ

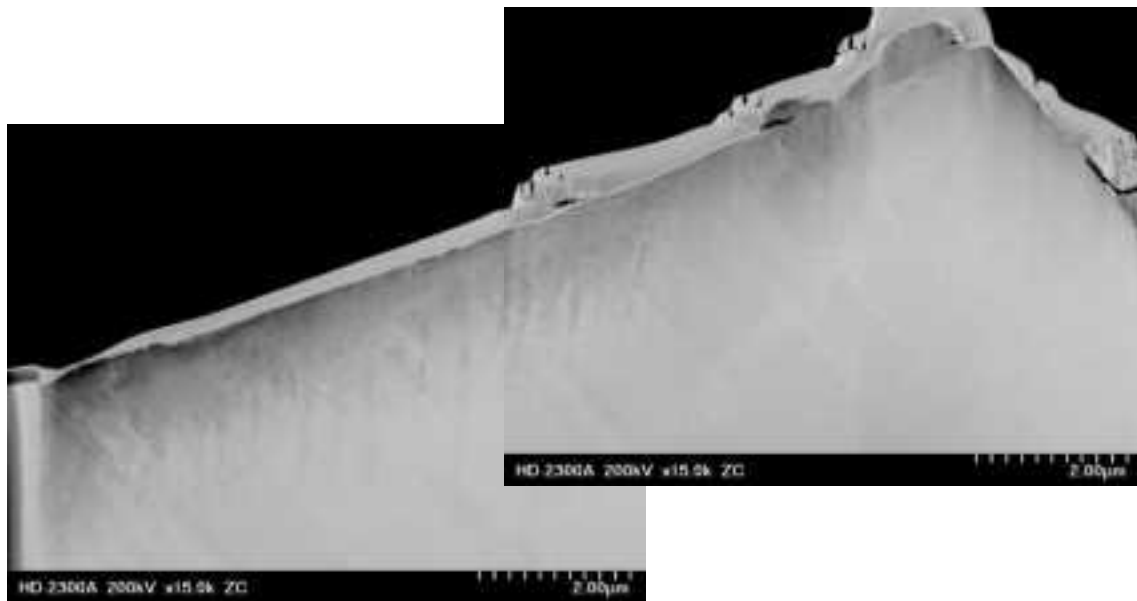


図 4.2.1.2-40 A412-(c)のマイクロ組織

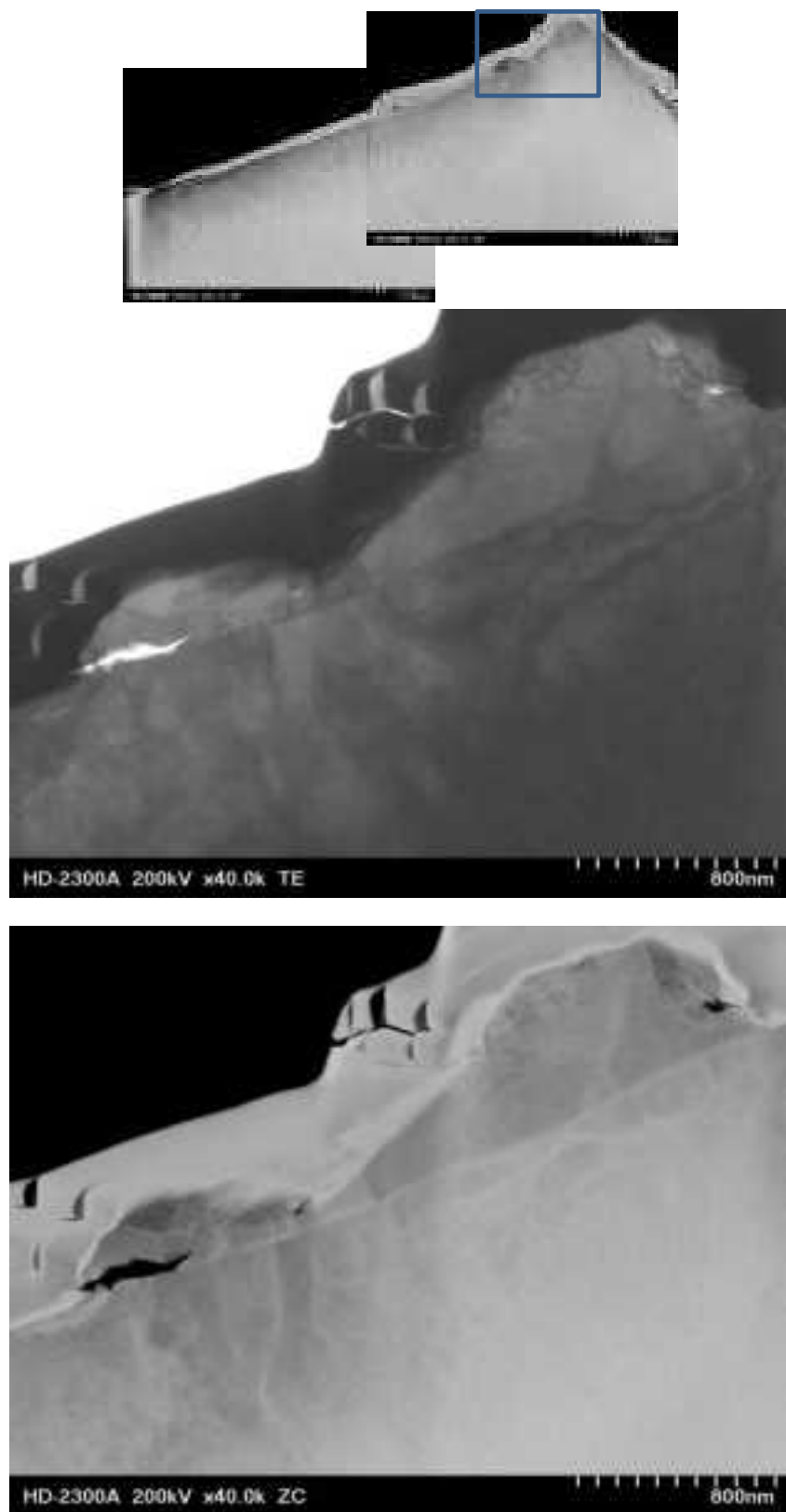


図 4.2.1.2-41(1) A412-(c)の EDS マップ箇所のマイクロ組織

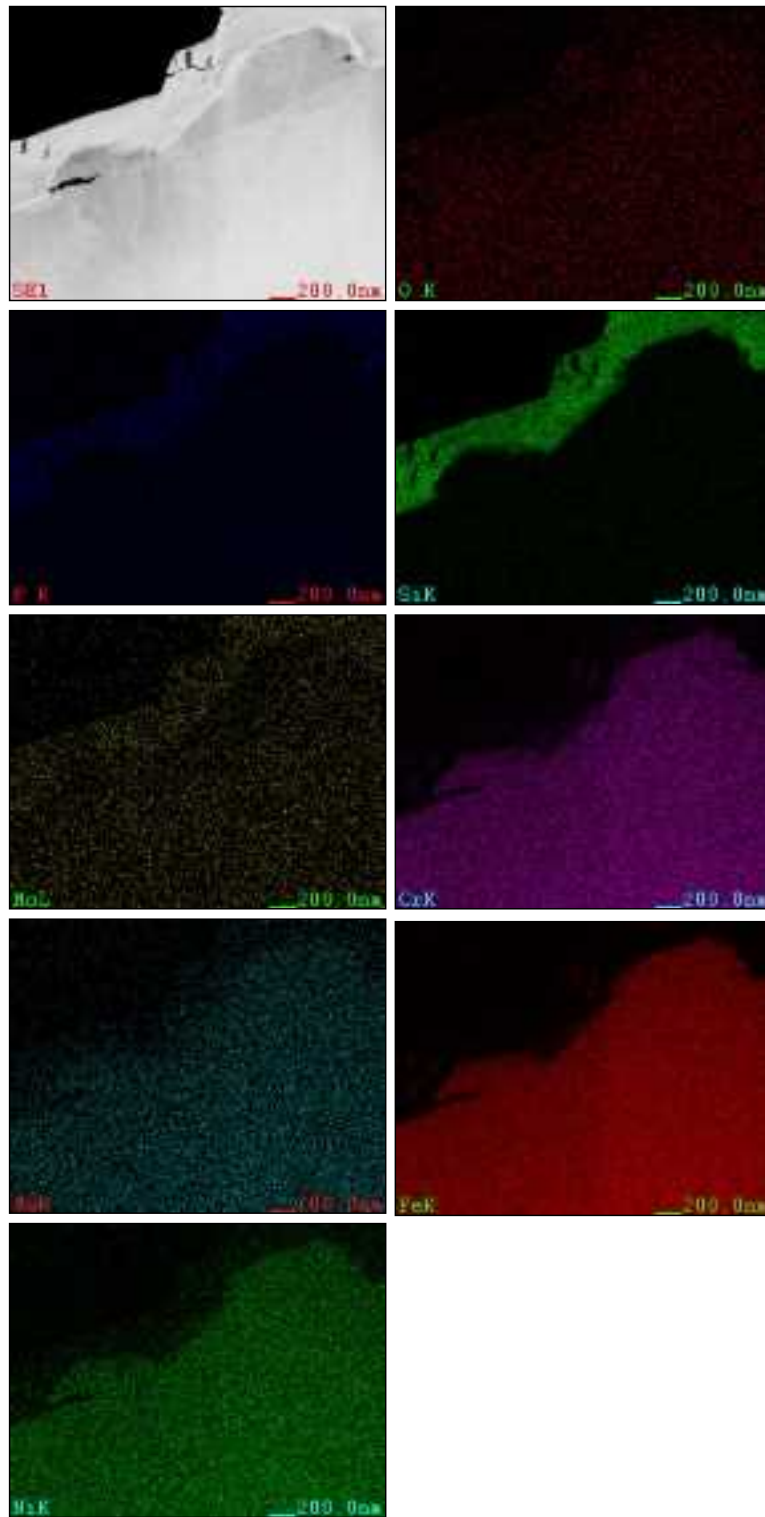


図 4.2.1.2-41(2) A412-(c)の EDS マップ

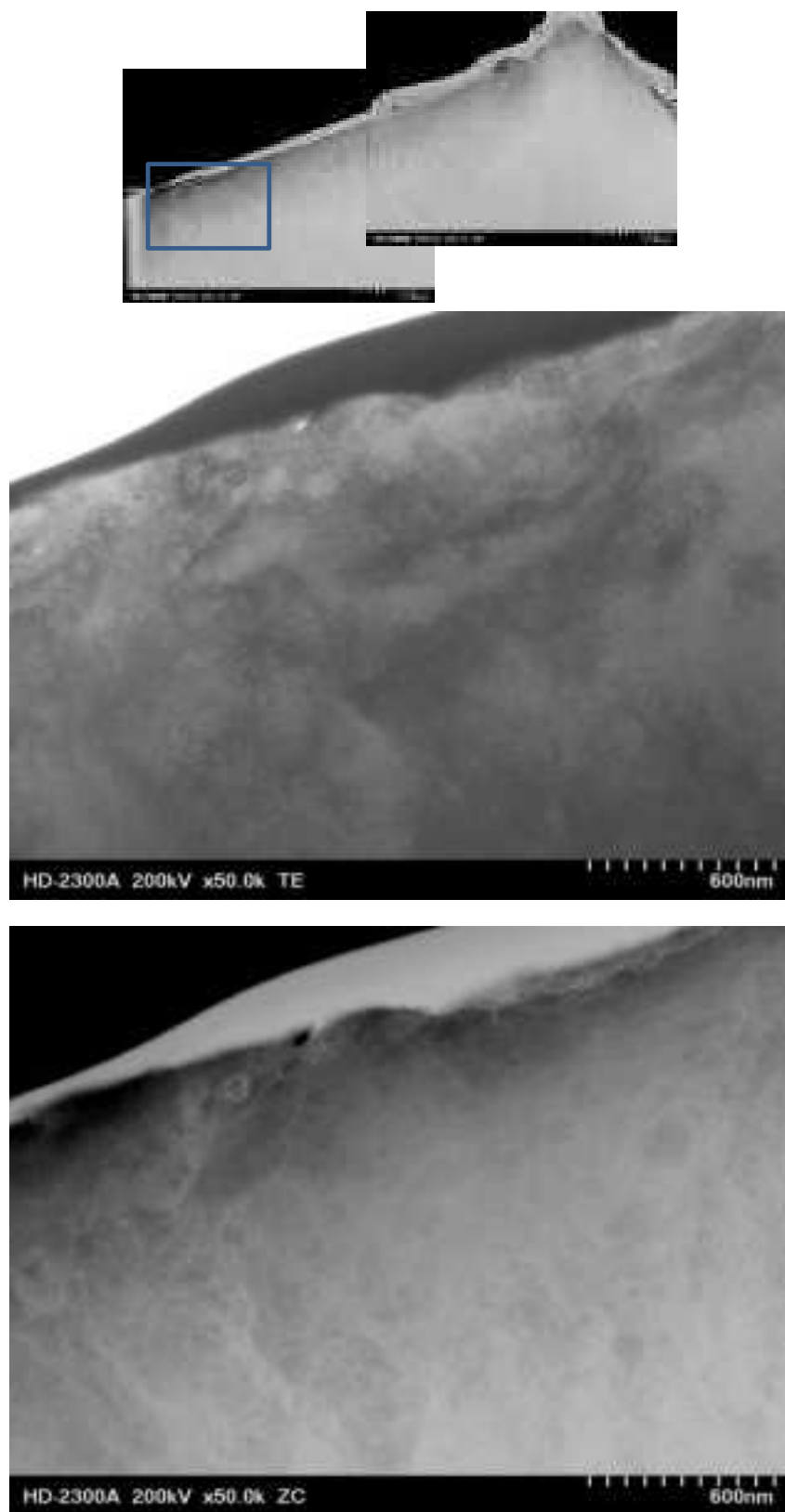


図 4.2.1.2-42(1) A412-(c)の EDS マップ箇所のマイクロ組織



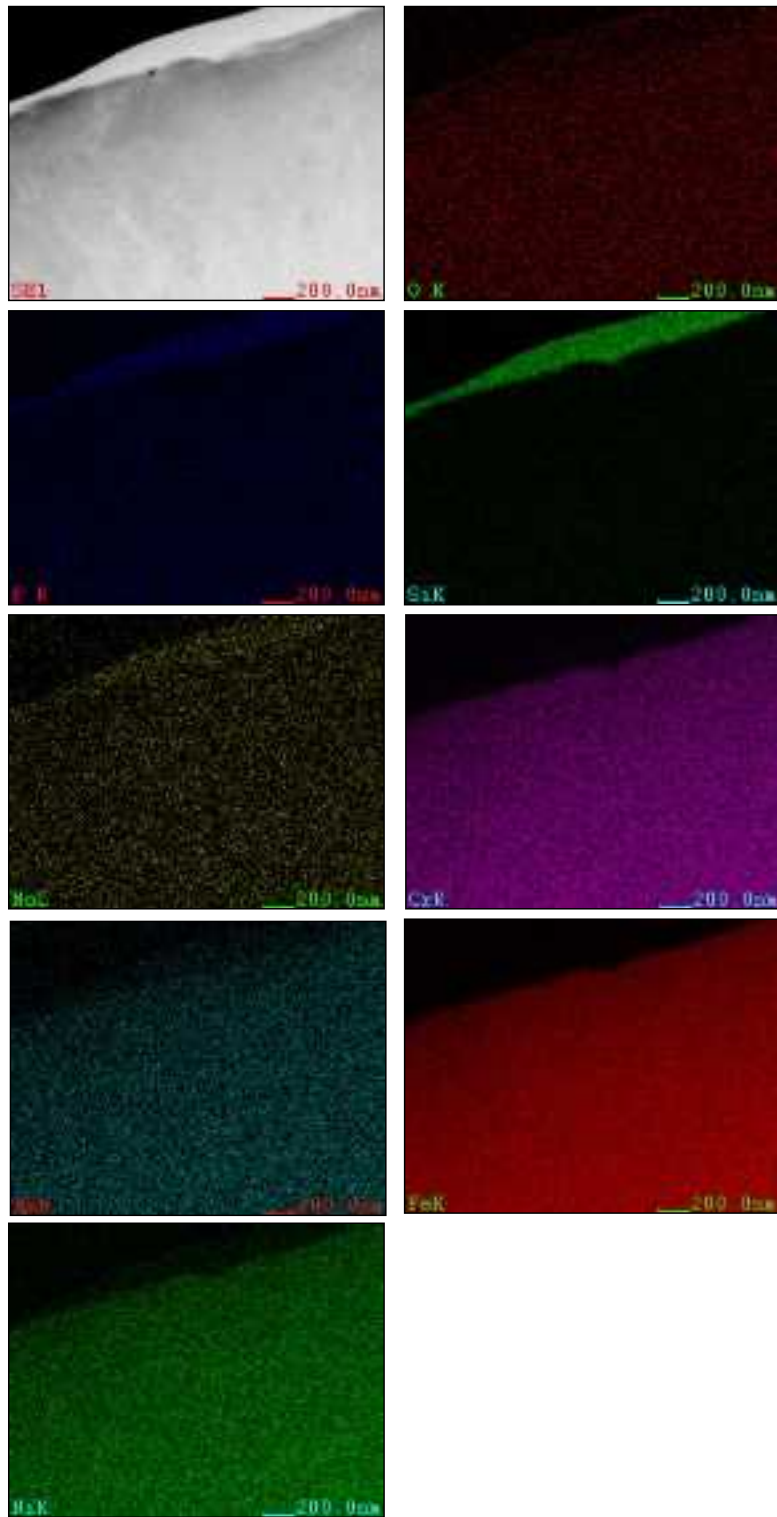


図 4.2.1.2-42(2) A412-(c)の EDS マップ

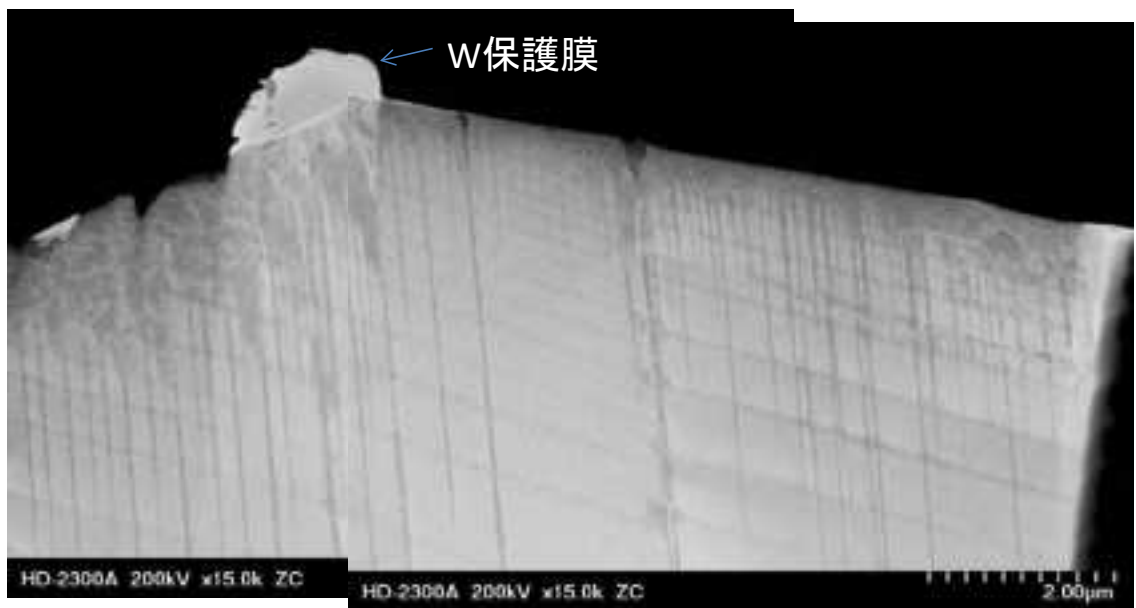


図 4.2.1.2-43 A412-(d)のマイクロ組織

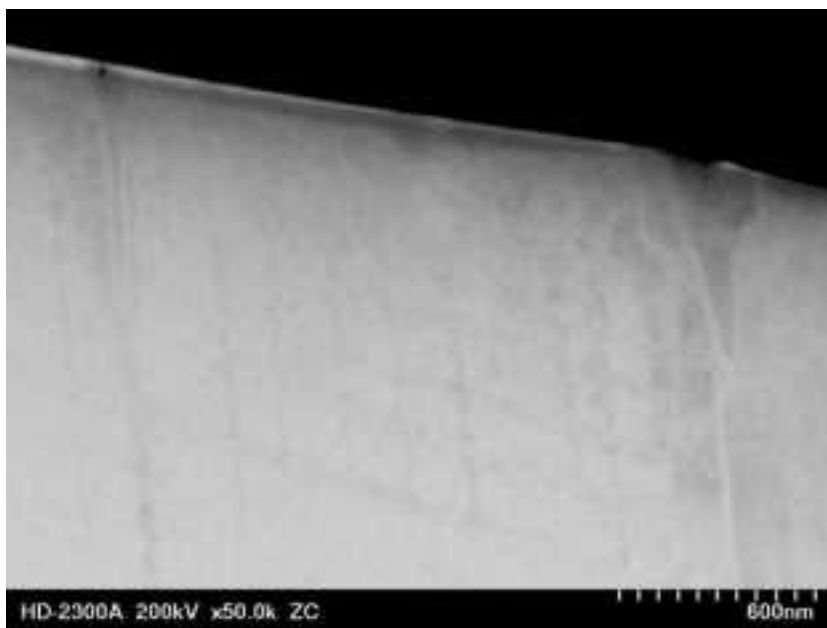
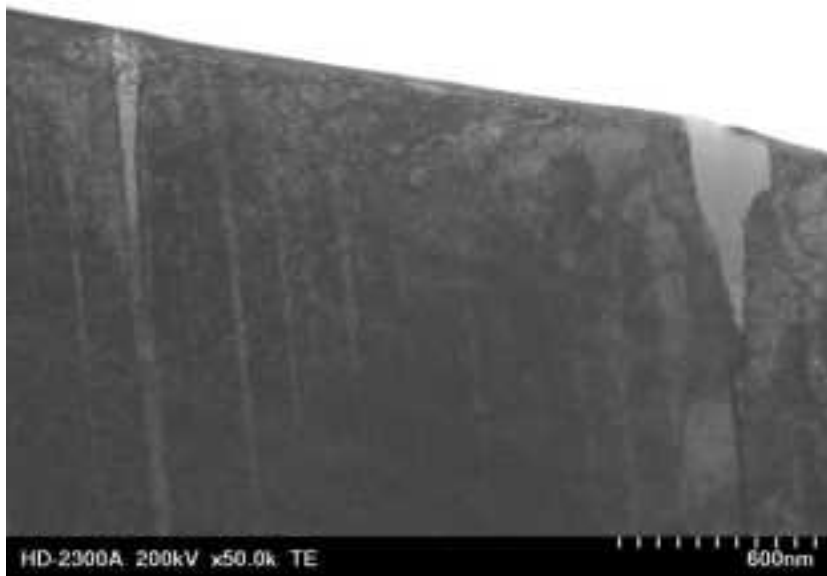
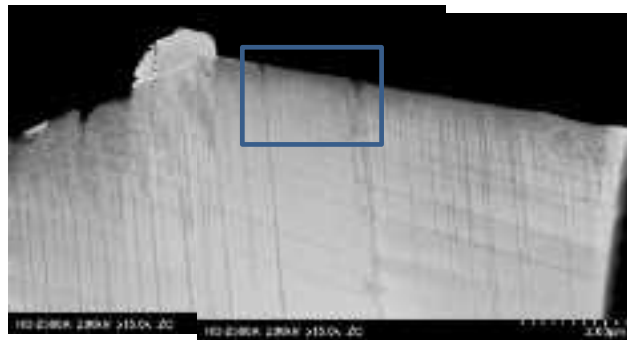


図 4.2.1.2-44(1) A412-(d)の EDS マップ箇所マイクロ組織

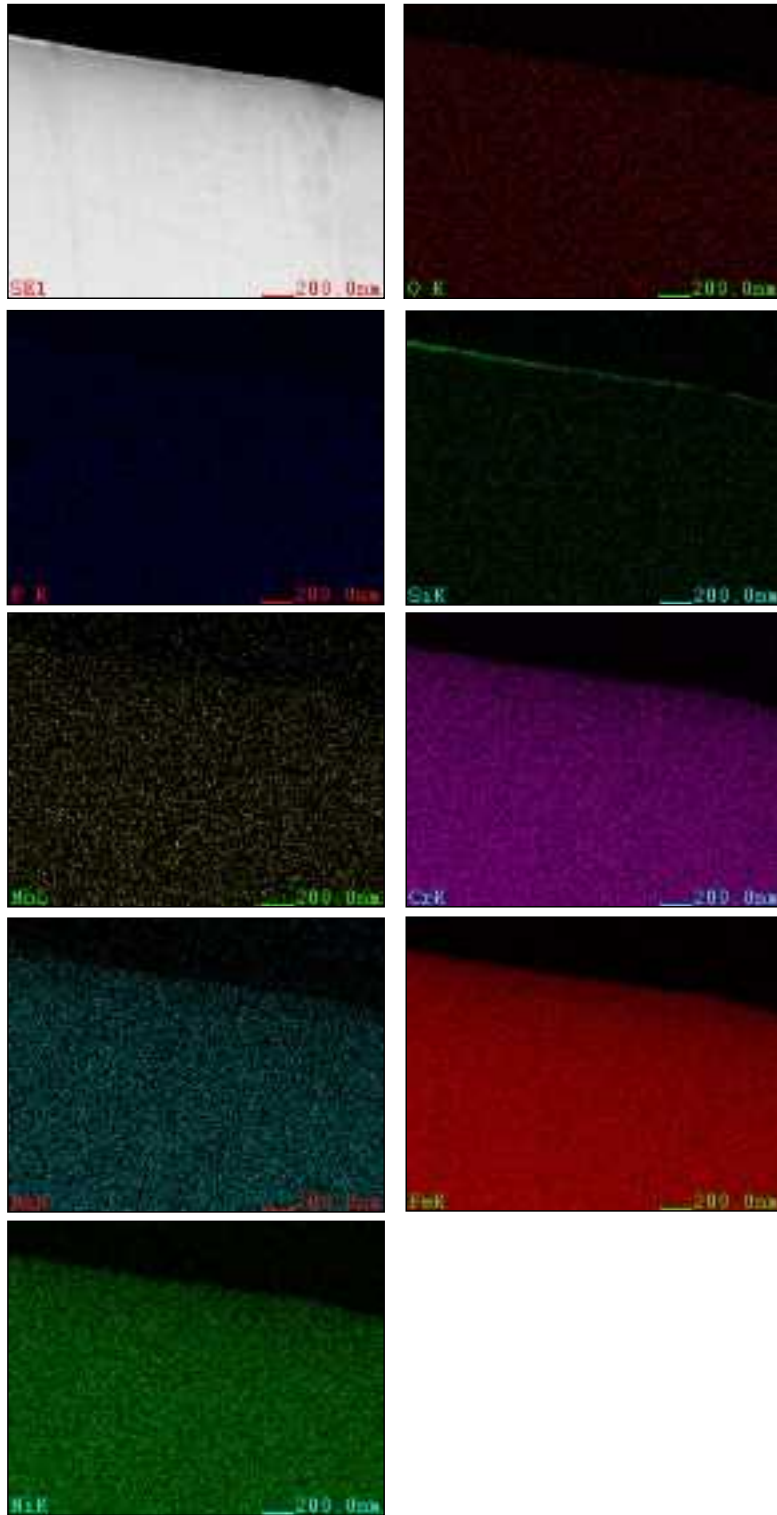


図 4.2.1.2-44(2) A412-(d)の EDS マップ

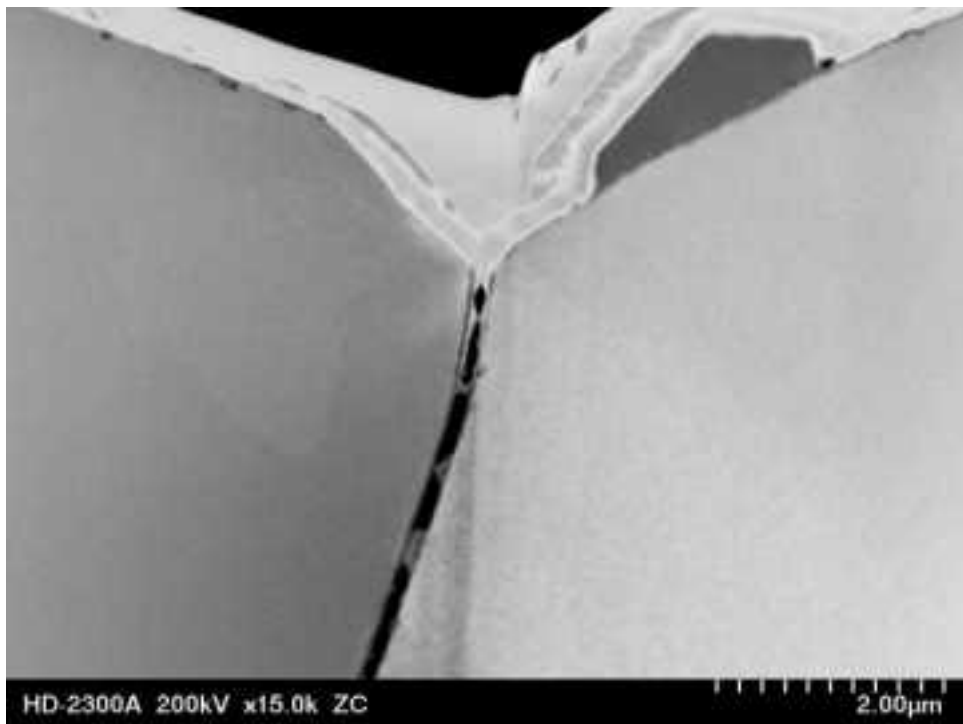
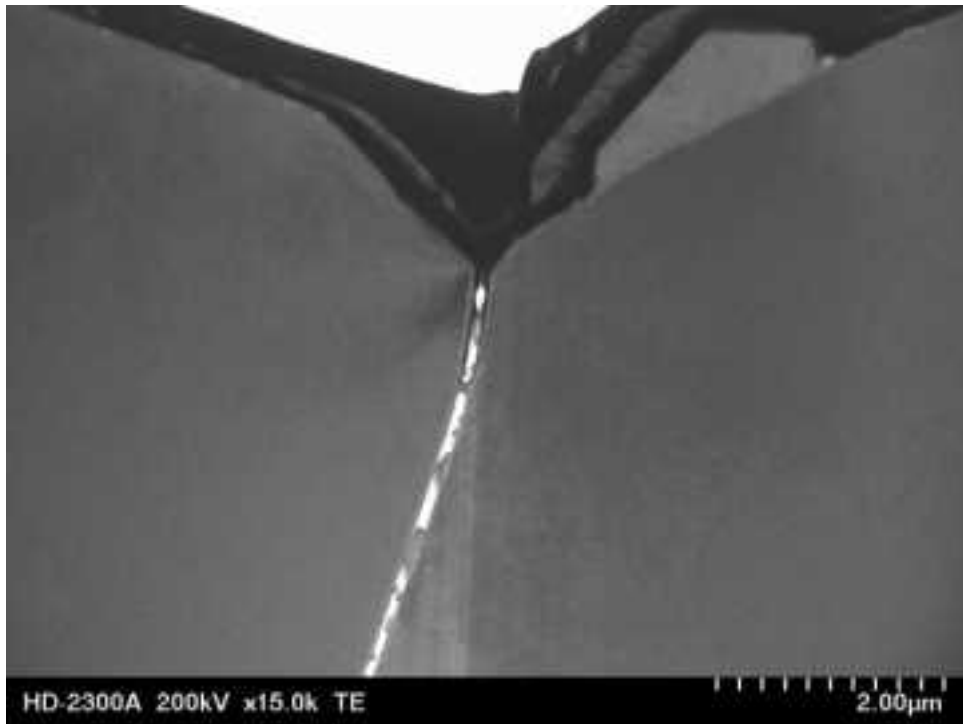


図 4.2.1.2-45 A412-(e)のマイクロ組織

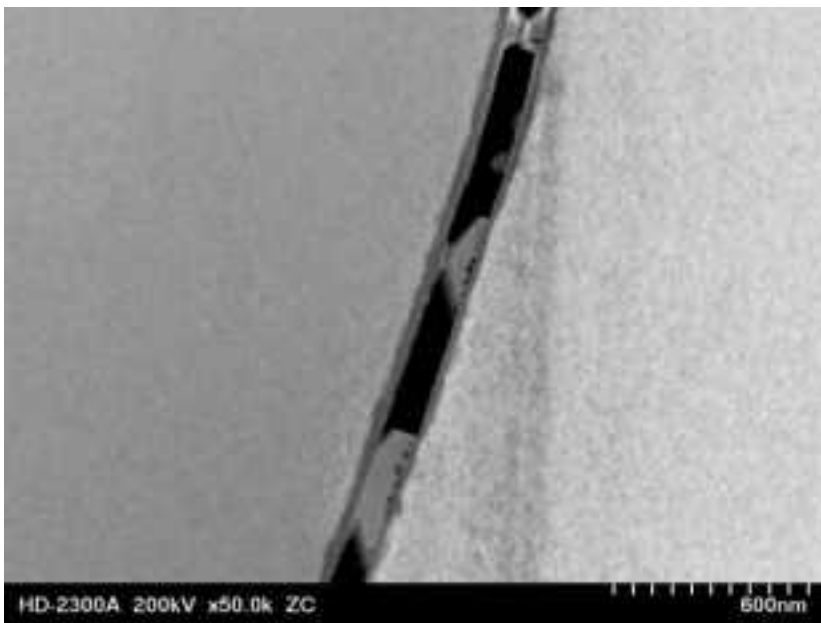
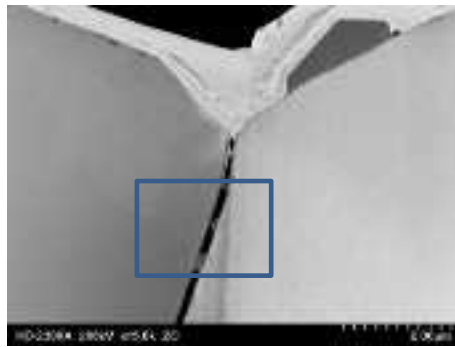


図 4.2.1.2-46(1) A412-(e)の EDS マップ箇所マイクロ組織

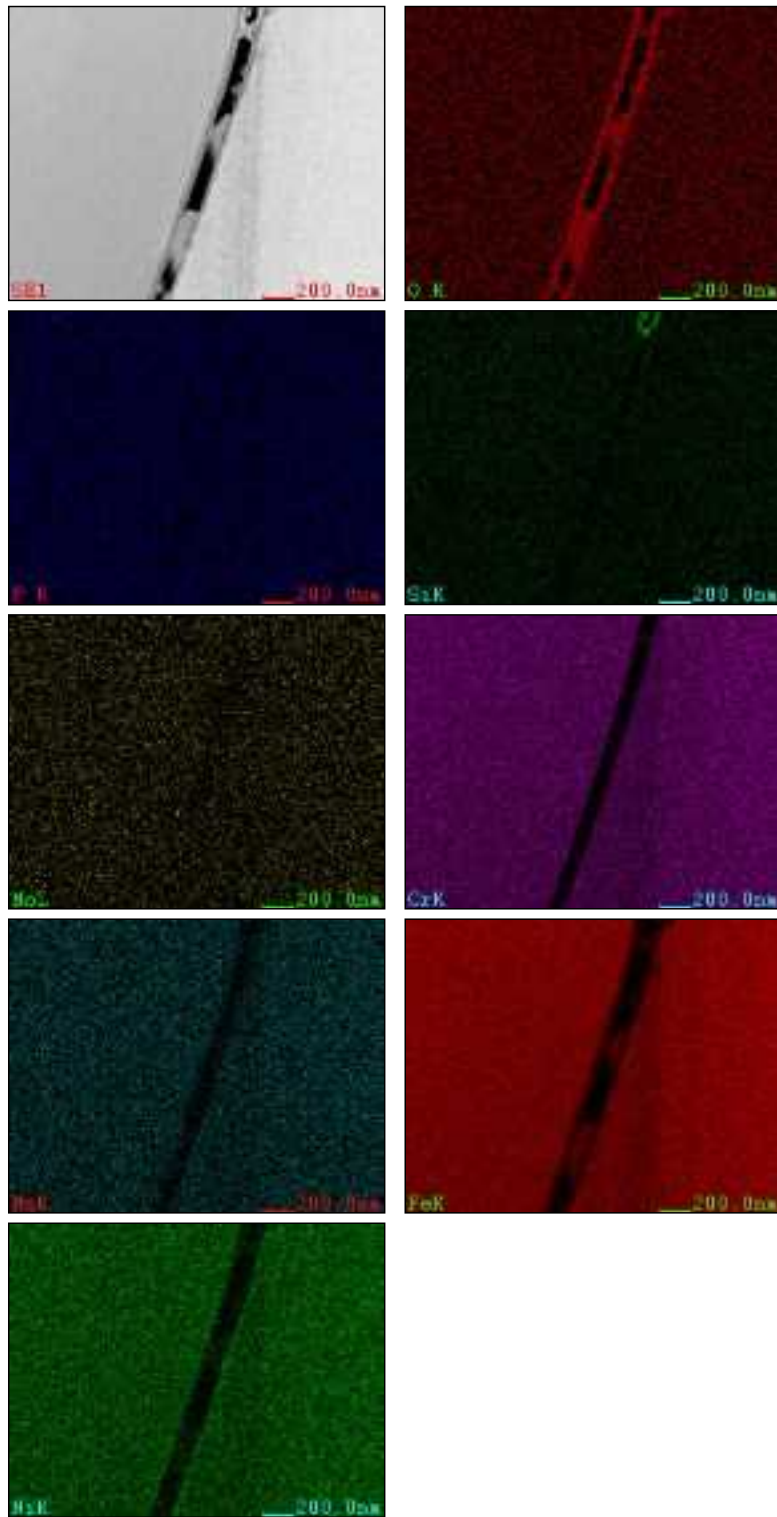


図 4.2.1.2-46(2) A412-(e)の EDS マップ(カウント)

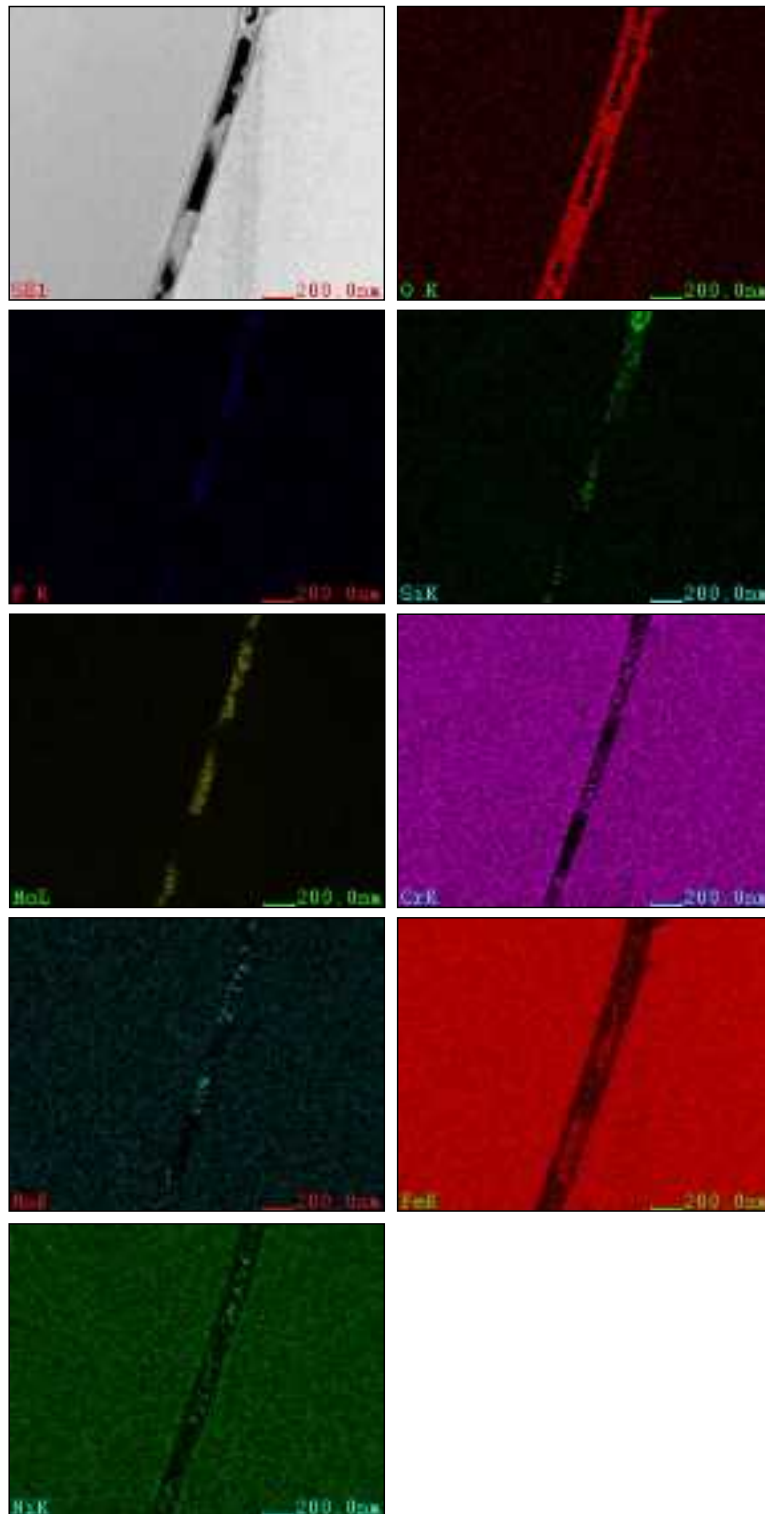


図 4.2.1.2-46(3) A412-(e)の EDS マップ (wt%)



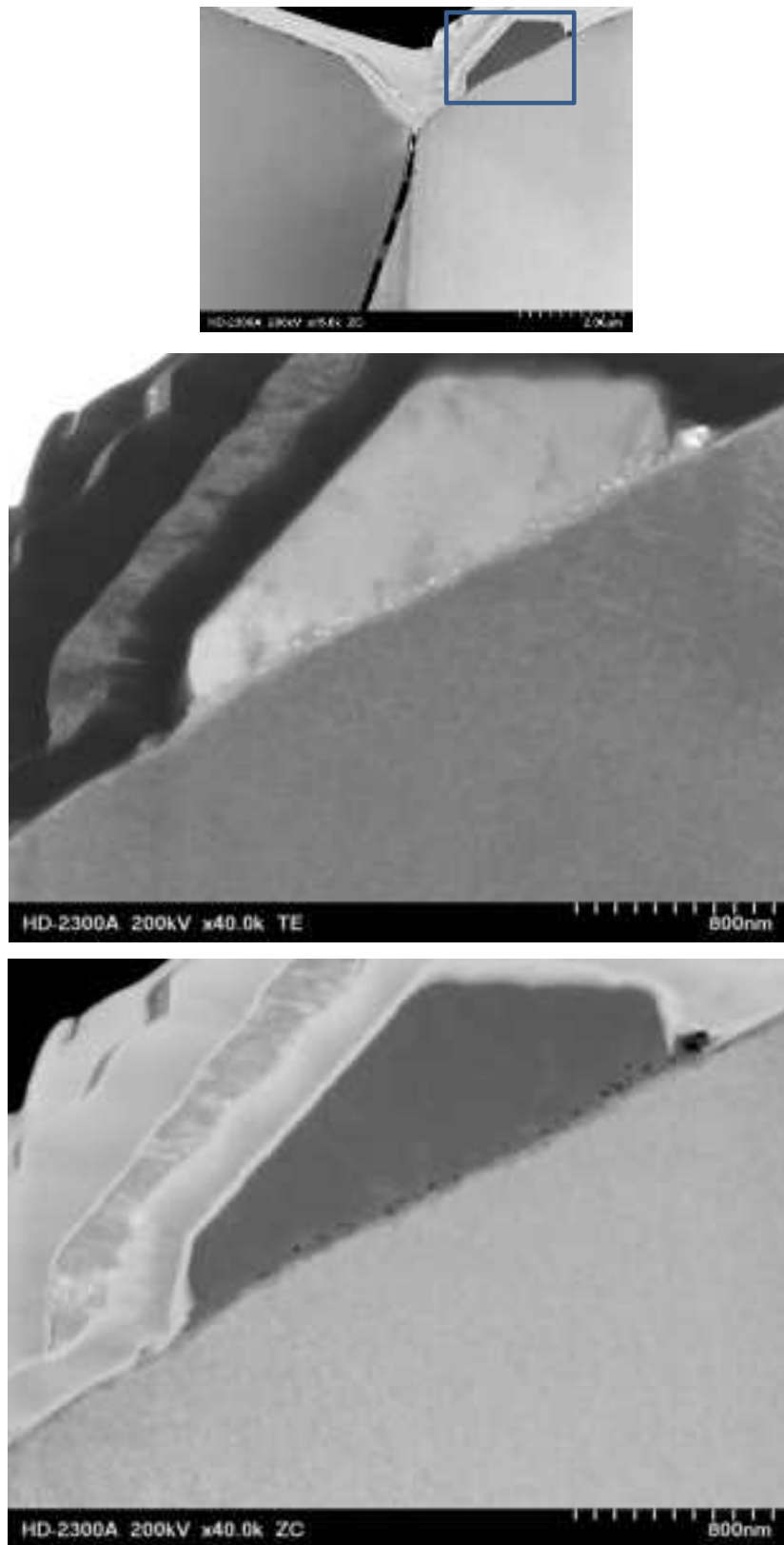


図 4.2.1.2-47(1) A412-(e)の EDS マップ箇所のマイクロ組織

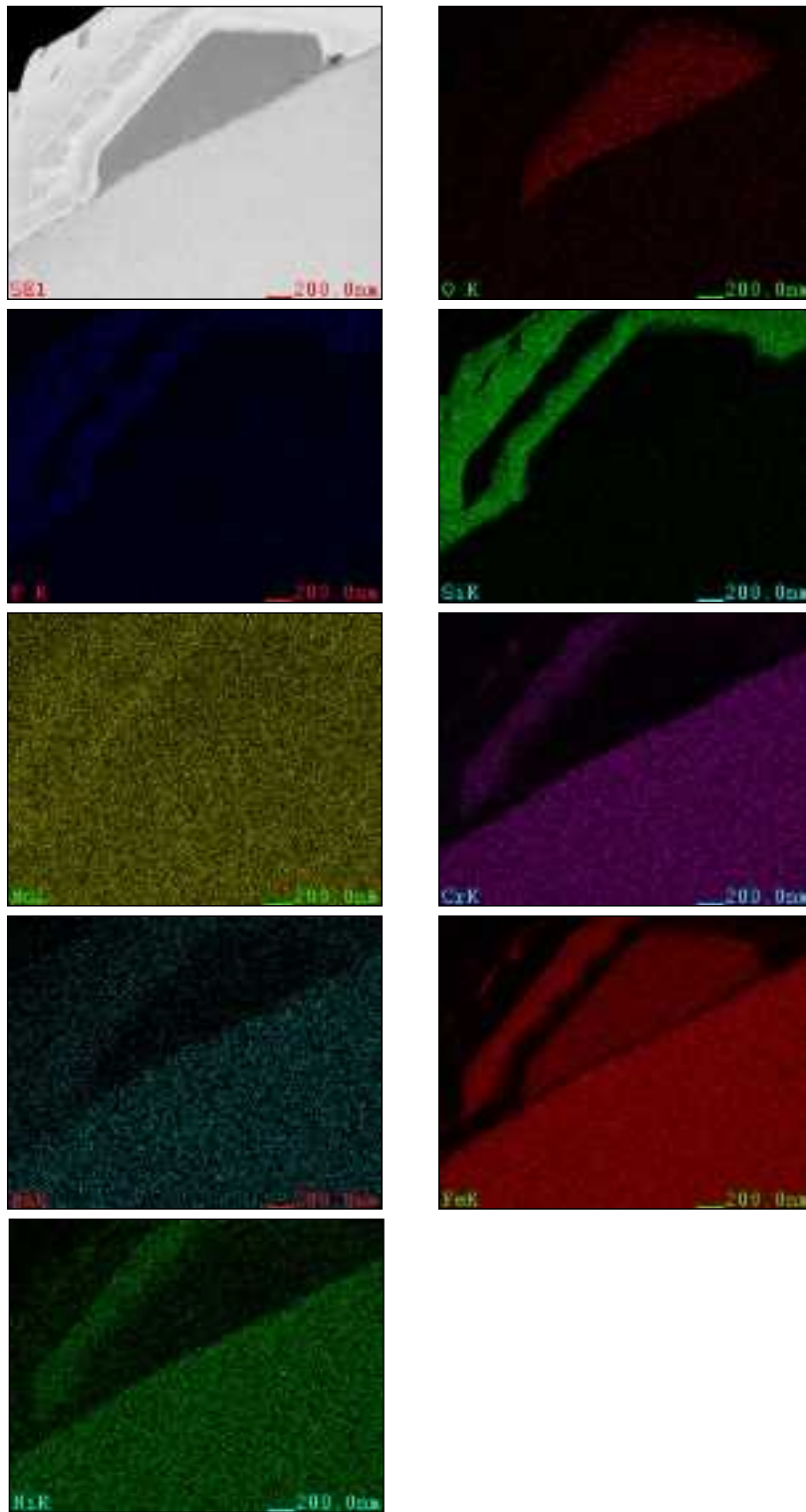


図 4.2.1.2-47(1) A412-(e)の EDS マップ箇所のマイクロ組織

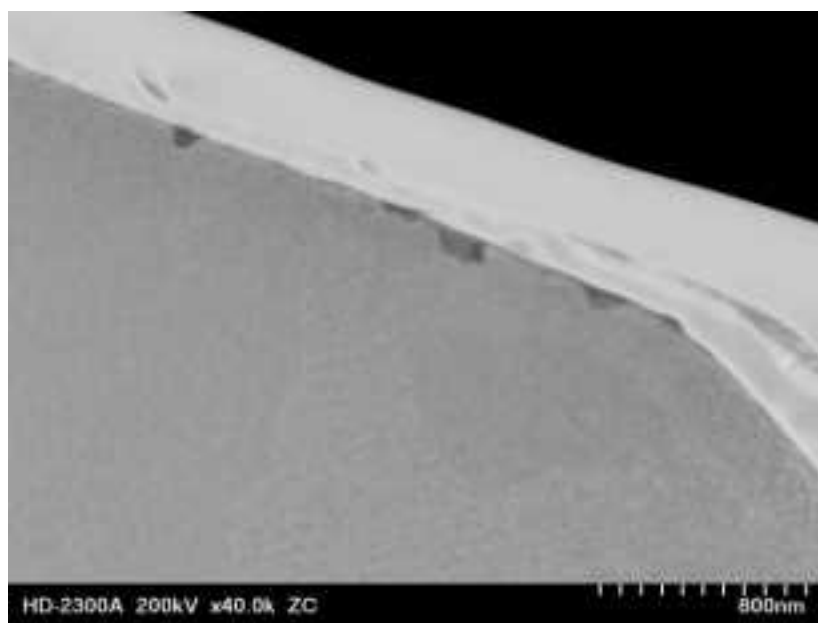
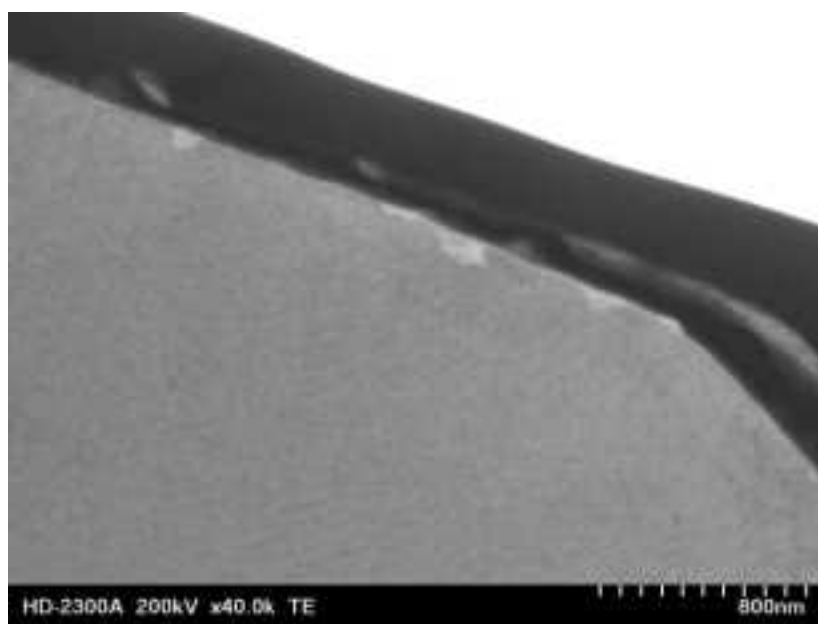
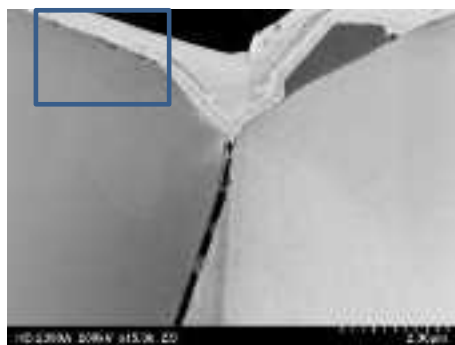


図 4.2.1.2-48(1) A412-(e)の EDS マップ箇所のマイクロ組織

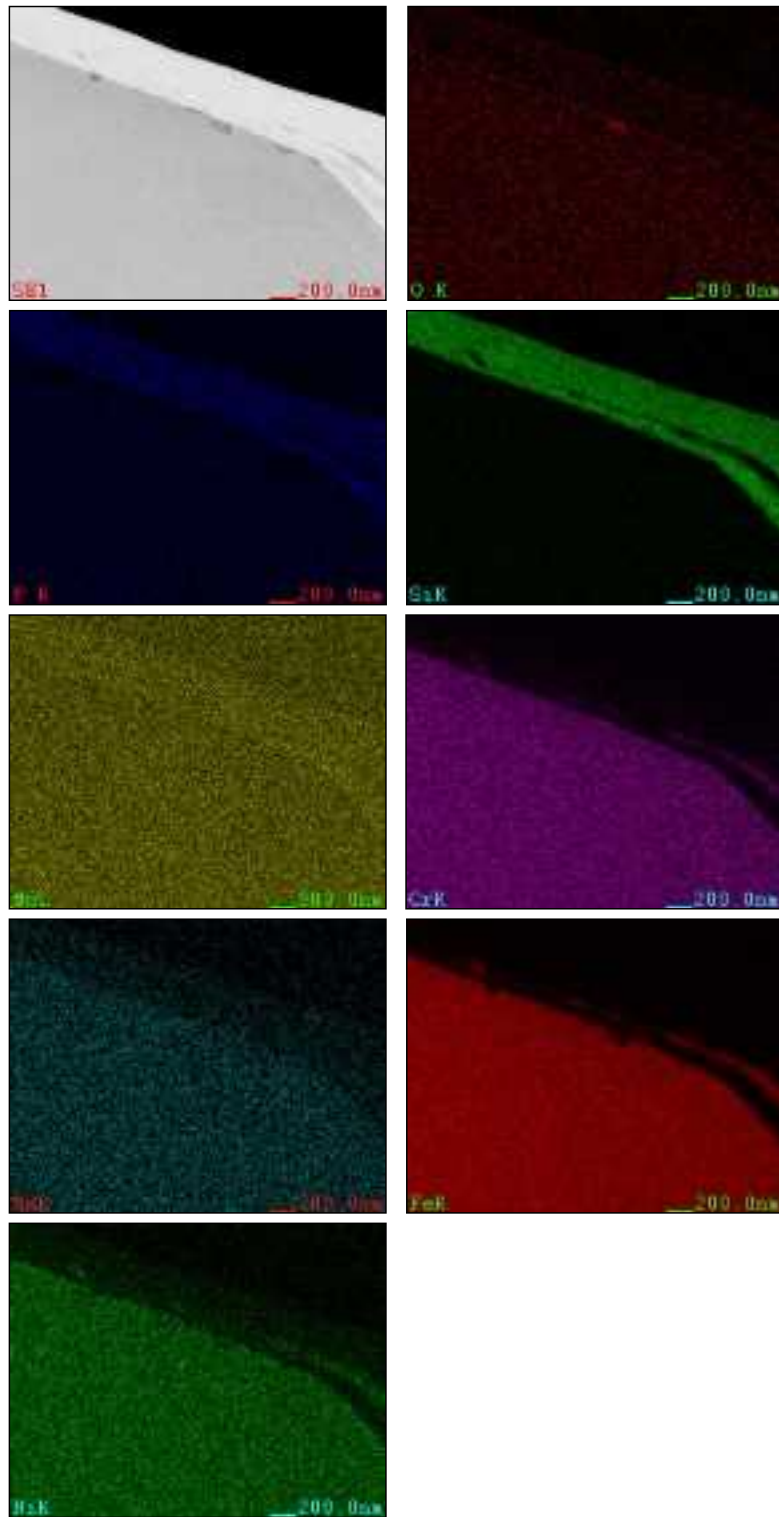


図 4.2.1.2-48(2) A412-(e)の EDS マップ

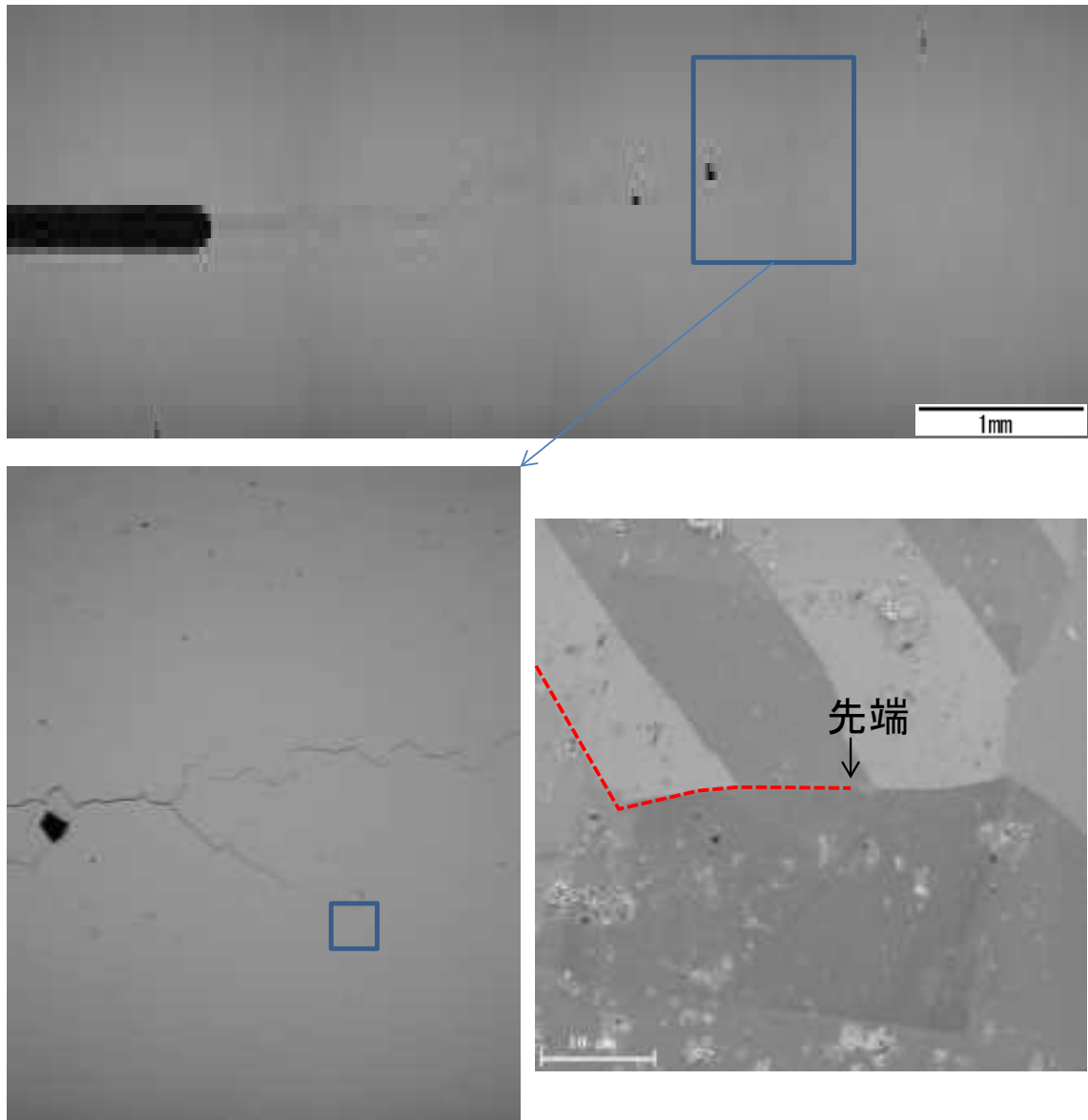


図 4.2.1.2-49 A412-先端(a)の採取箇所

き裂進展方向 →

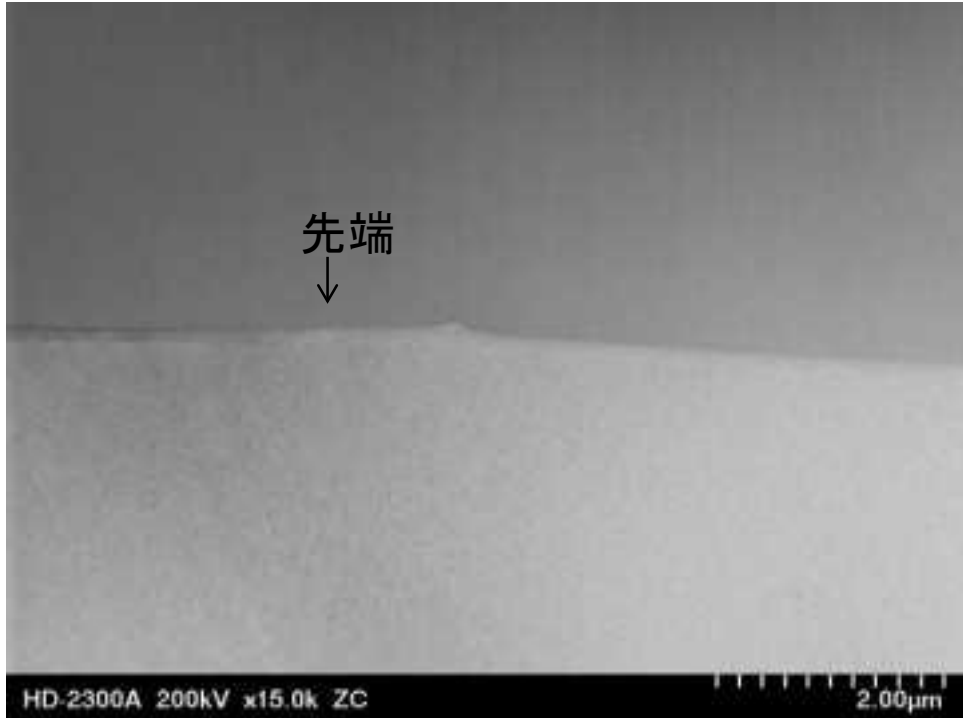
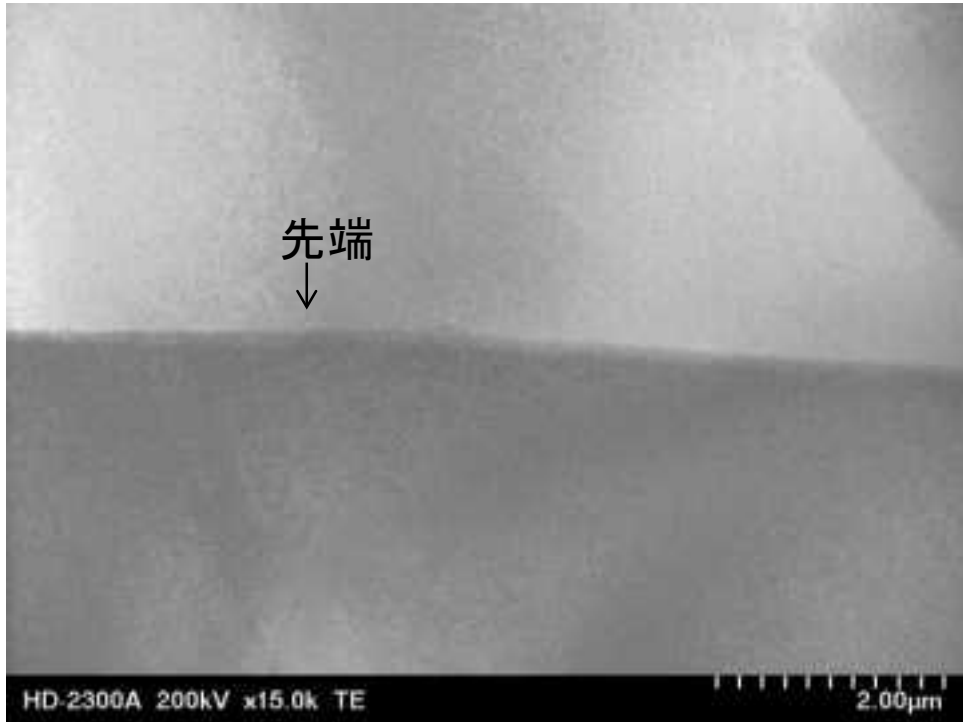


図 4.2.1.2-50(1) A412-先端(a)のマイクロ組織

き裂進展方向 →

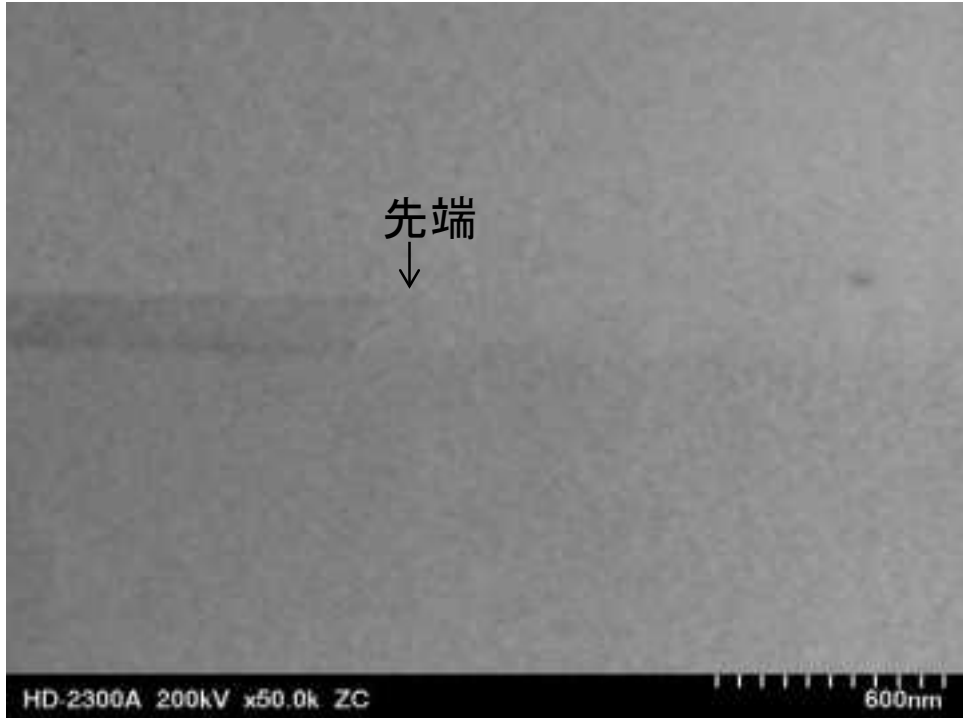
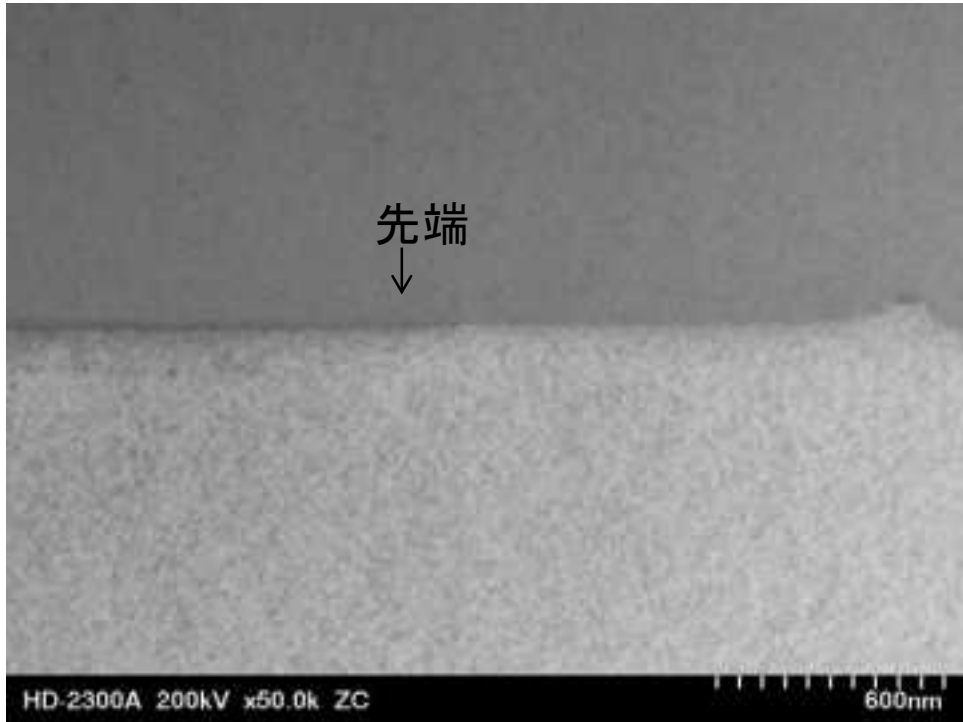


図 4.2.1.2-50(2) A412-先端(a)のマイクロ組織



図 4.2.1.2-51 A412-先端(a)の EDS マップ



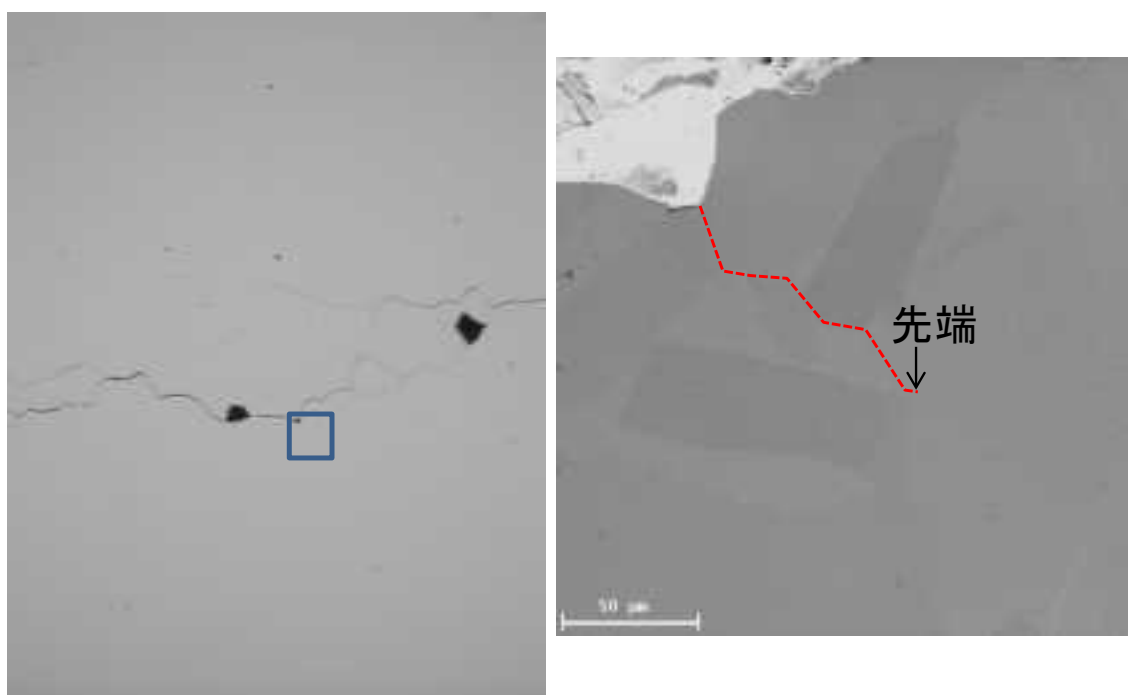
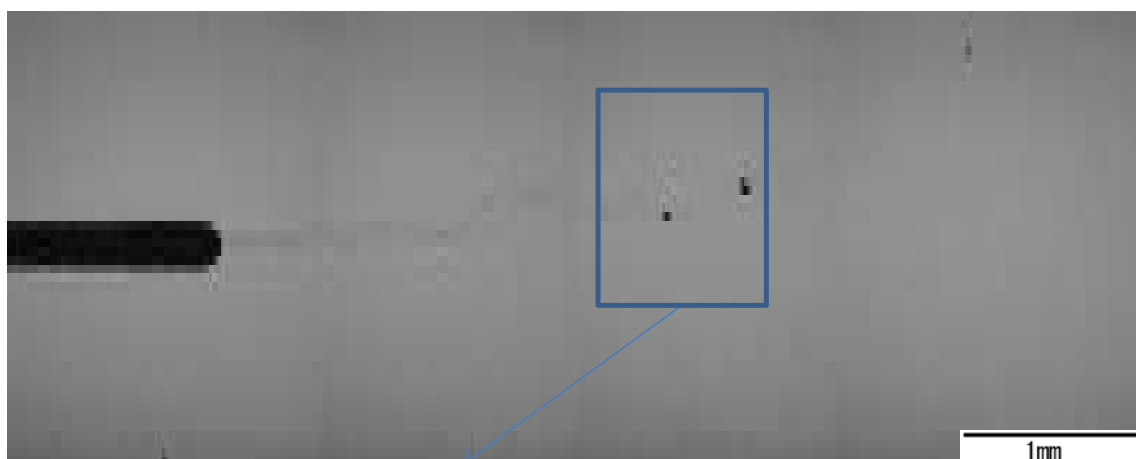


図 4.2.1.2-52 A412-先端(b)の採取箇所

き裂進展方向

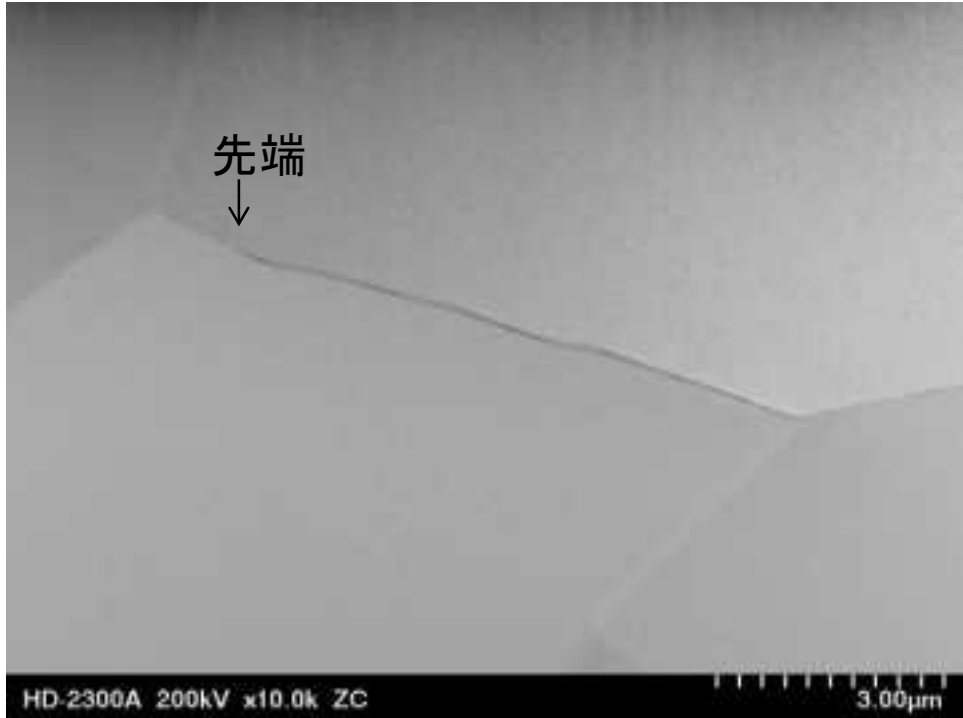


図 4.2.1.2-53(1) A412-先端(b)のマイクロ組織

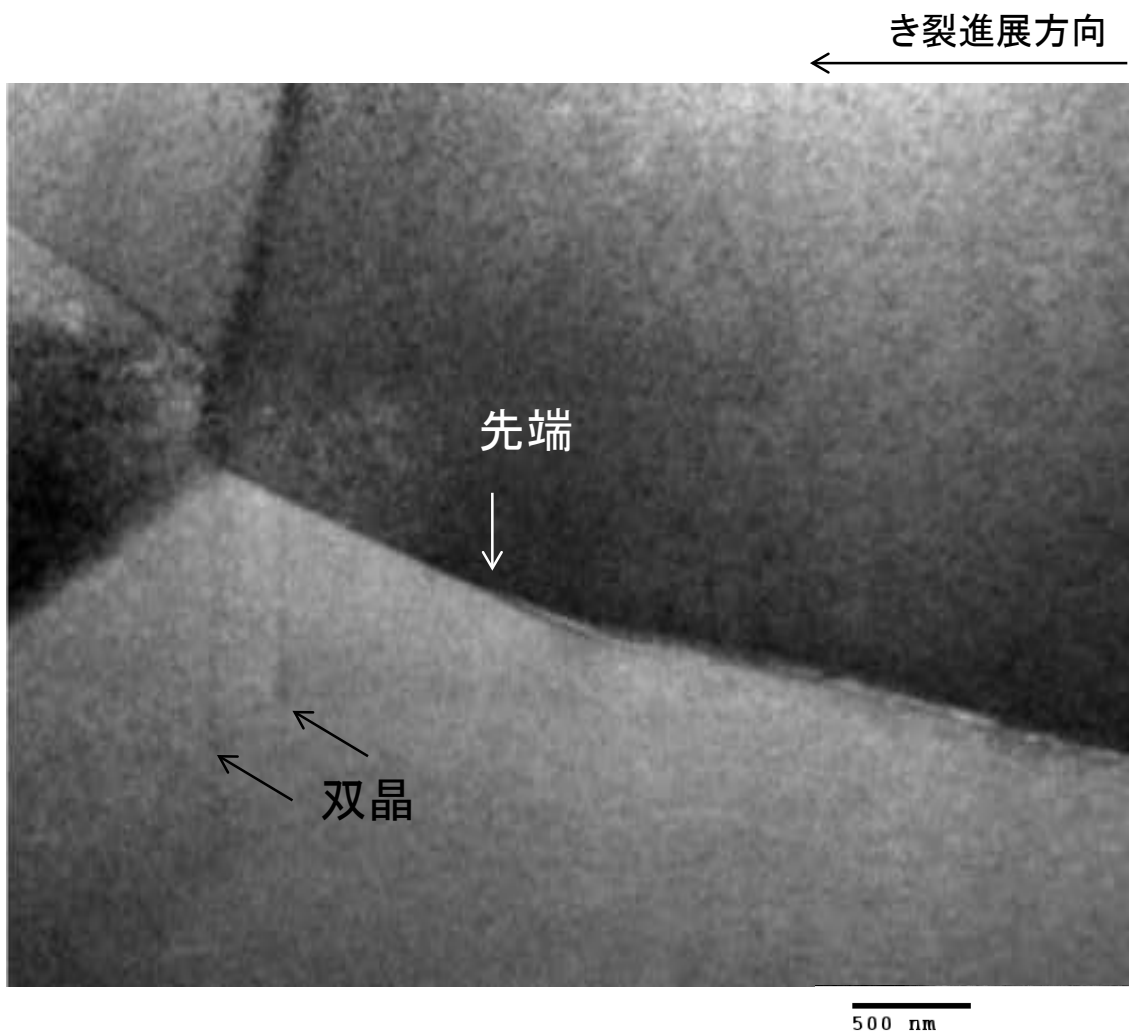


図 4.2.1.2-53(2) A412-先端(b)のマイクロ組織

← き裂進展方向

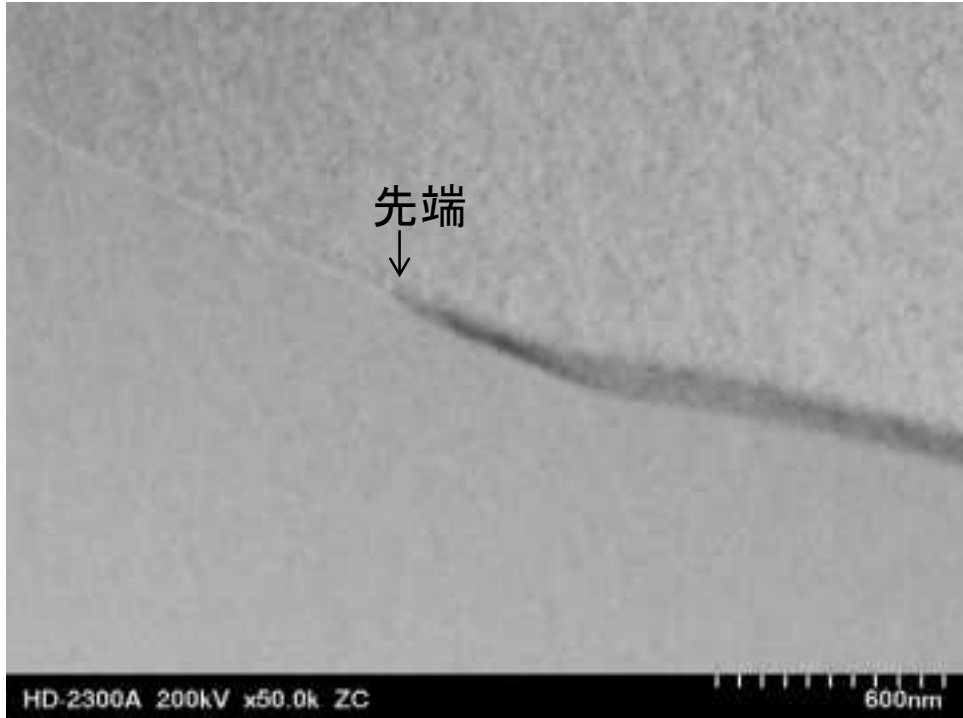
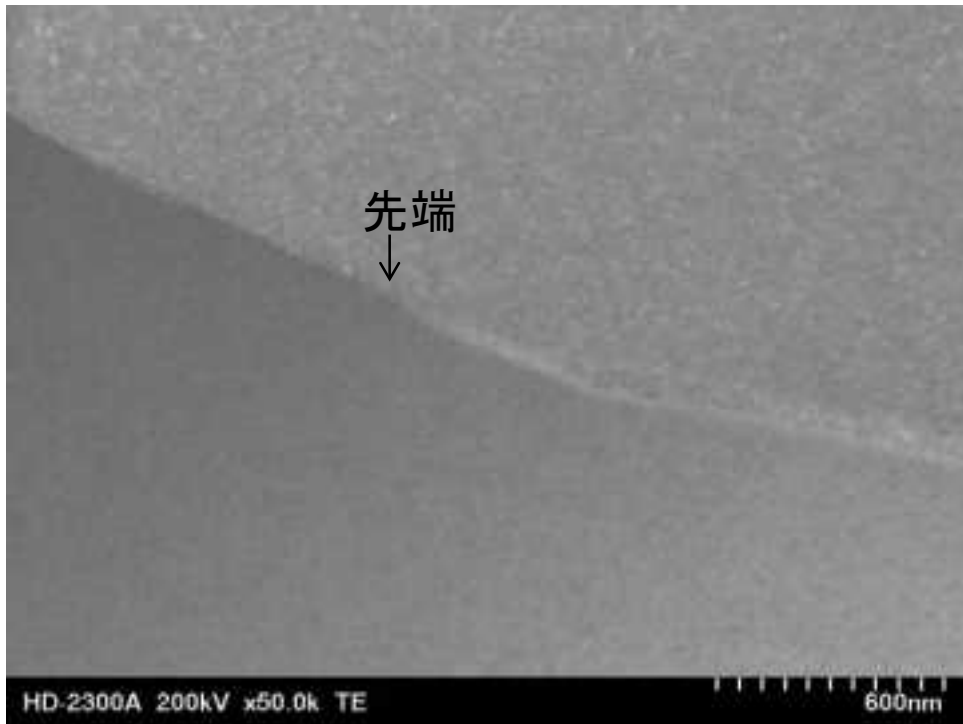


図 4.2.1.2-53(3) A412-先端(b)のマイクロ組織

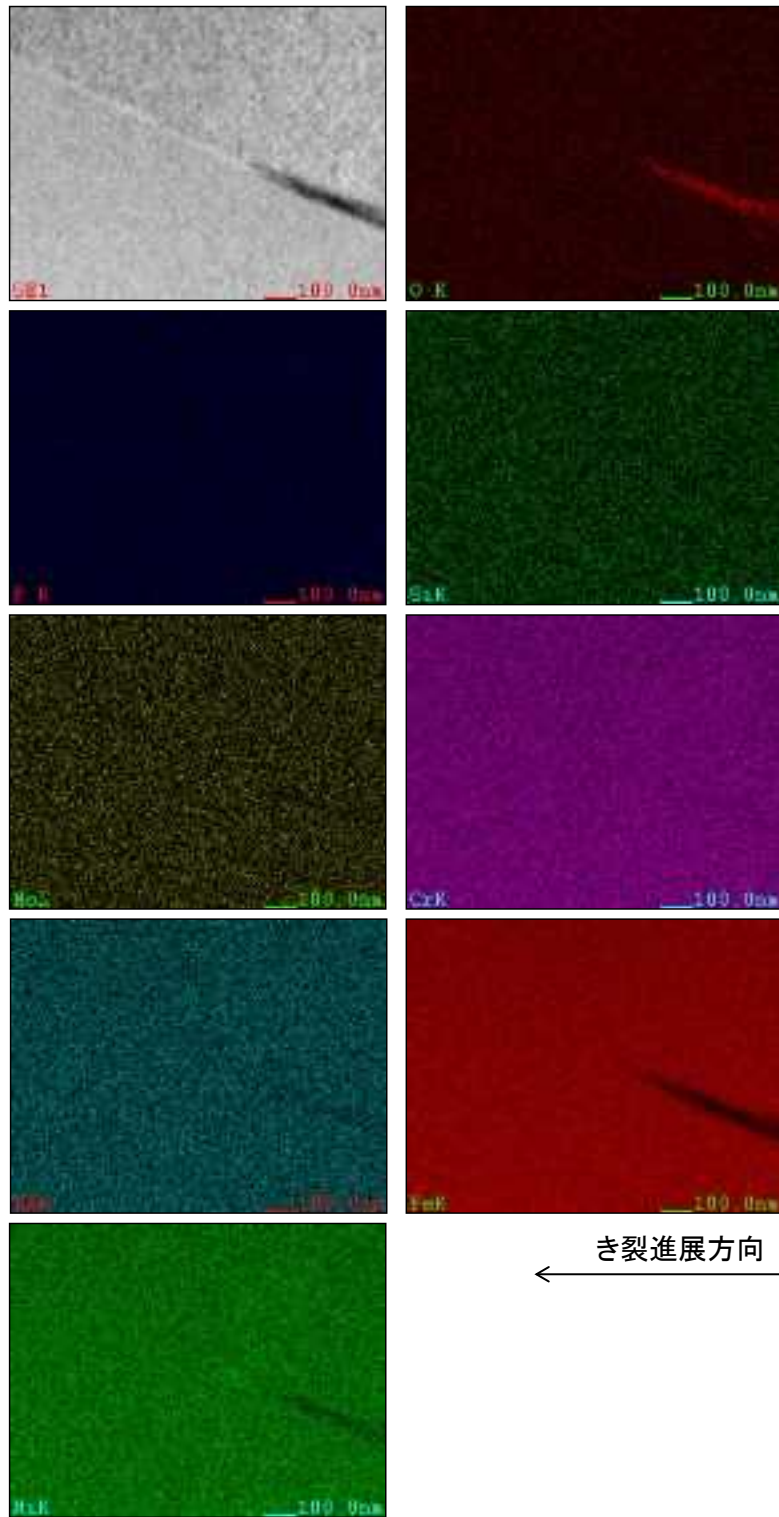


図 4.2.1.2-54 A412-先端(b)の EDS マップ

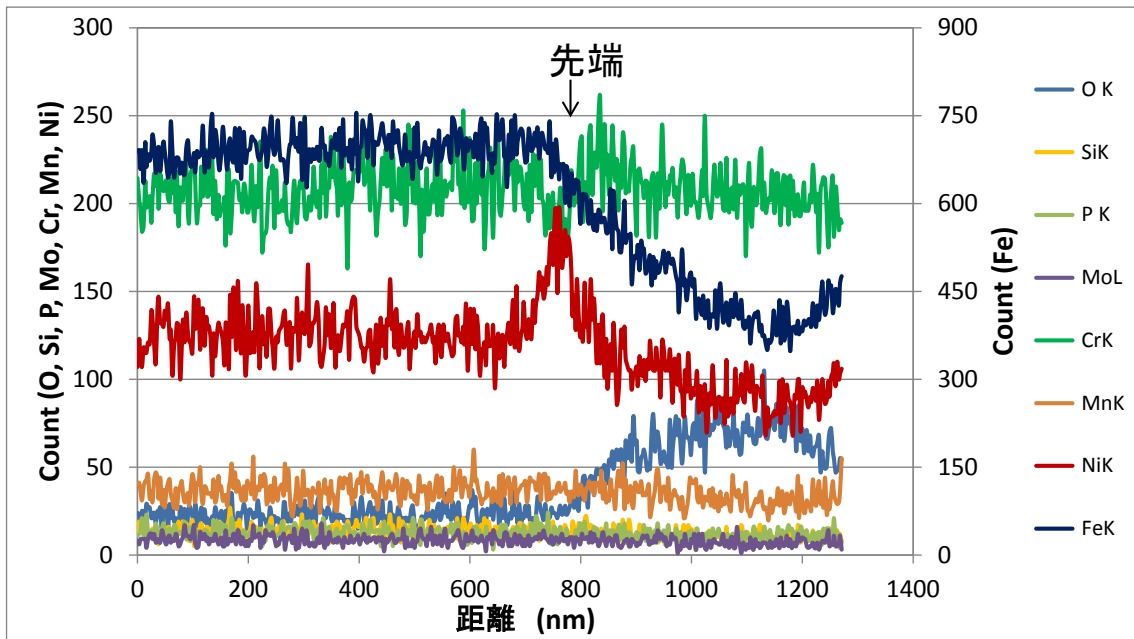
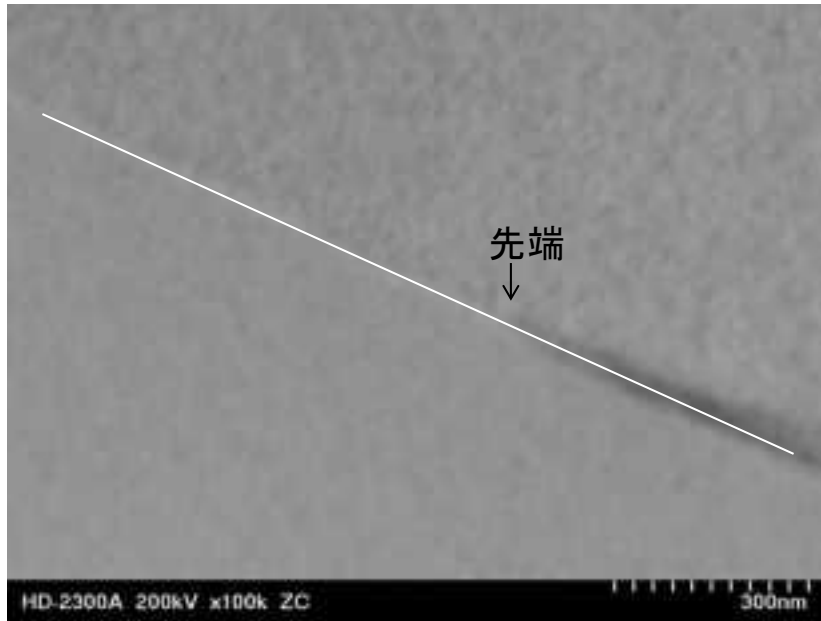


図 4.2.1.2-55 A412-先端(b)のき裂先端線分析

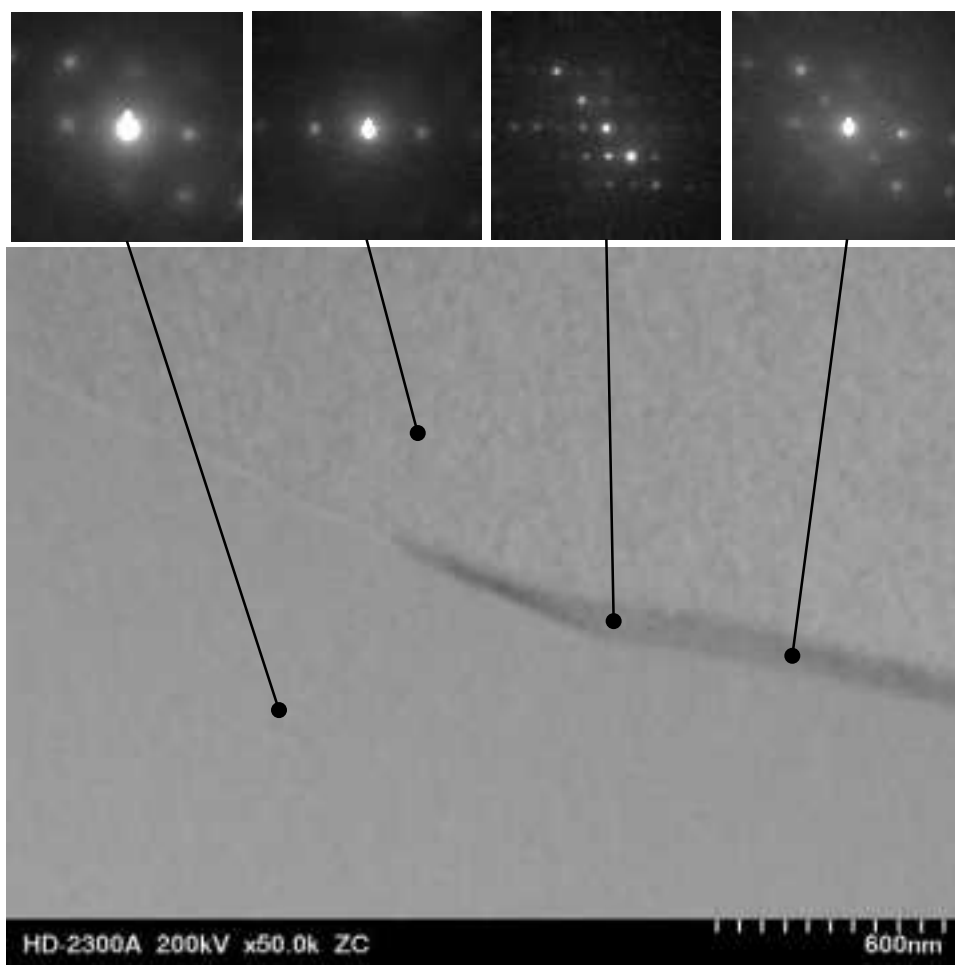


図 4.2.1.2-56 A412-先端(b)のナノ回折像

### ③A413

A413 からの薄膜試料採取箇所を図 4.2.1.2-57 に示す。採取した薄膜試料は先端箇所と先端から約 100nm 後方の結晶粒表面である。

#### ・ A413\_先端

図 4.2.1.2-58 に A413\_先端のマイクロ組織を示す。図の左から右方向がき裂進展方向であり、図の左側がき裂進展面、右側が強制は断面である。図から明らかなように強制破断面には双晶組織が観察された。図 4.2.1.2-59 にき裂進展面のマイクロ組織を示す。TE 像にはき裂進展面に転位組織が見られ、Z コントラスト像には試料表面側に粒内への酸化と考えられるコントラストが確認された。粒内への酸化と思われる部位について、EDS マップ分析箇所および EDS マップを図 4.2.1.2-60 に示す。EDS マップはカウント数および wt% で示した。Z コントラスト像で黒く明瞭に酸化している箇所周辺に酸素が分布していることが確認された。カウントマップを見ると、酸素が検出された箇所では Fe と Ni が減少し、Cr は変化していなかった。したがって wt% マップでは Cr 濃度が上昇していた。

図 4.2.1.2-61 にき裂進展面と強制は断面の境界のマイクロ組織を示す。矢印で示した箇所から右側には粒界が観察されたため、矢印箇所をき裂先端と推測した。先述したように先端から右側の領域にのみ強制破断で生じたと思われる双晶組織が観察された。先端周辺には変形に伴う変形組織は観察されなかった。先端から粒界に沿った線分析の結果を図 4.2.1.2-62 に示す。線分析には明瞭な特徴は観察されなかった。

#### ・ A413\_結晶粒表面

A413\_結晶粒表面のマイクロ組織を図 4.2.1.2-63 に示す。図から明らかなように、結晶粒表面には酸化皮膜が観察されると共に、結晶粒内部に酸化によるコントラストが観察された。酸化が生じていない箇所には転位線が観察された。EDS マップの結果を図 4.2.1.2-64 に示す。図 4.2.1.2-64(2) はカウントマップ、図 4.2.1.2-64(3) および(4) は wt% マップである。図 4.2.1.2-64(2) のカウントマップでは、粒内酸化部では Cr のカウント数は変化せず、Fe と Ni のカウント数が減少した。wt% に変換すると酸化部は Cr-Fe-Ni が主たる元素であり、酸化部とマトリックス境界は Ni 濃度が高くなる傾向であった。点分析の結果を図 4.2.1.2-65 に示す。点分析結果も酸化物は Cr-Fe-Ni が主たる元素であり、概ね図 4.2.1.2-64(3) および(4) と同様の結果が得られた。図 4.2.1.2-66 にナノ回折像の結果を示す。ナノ回折像を取得した箇所は図 4.2.1.2-65 に示す点分析箇所 1、2、4、6 である。1、2、4 はいずれもほぼ同じ回折図形が得られ、スピネル構造であった。酸化物からの回折波を用いて結像した暗視野像を図 4.2.1.2-67 に示す。酸化物は粒径 50nm 以下の微細な結晶の集合体であると考えられる。



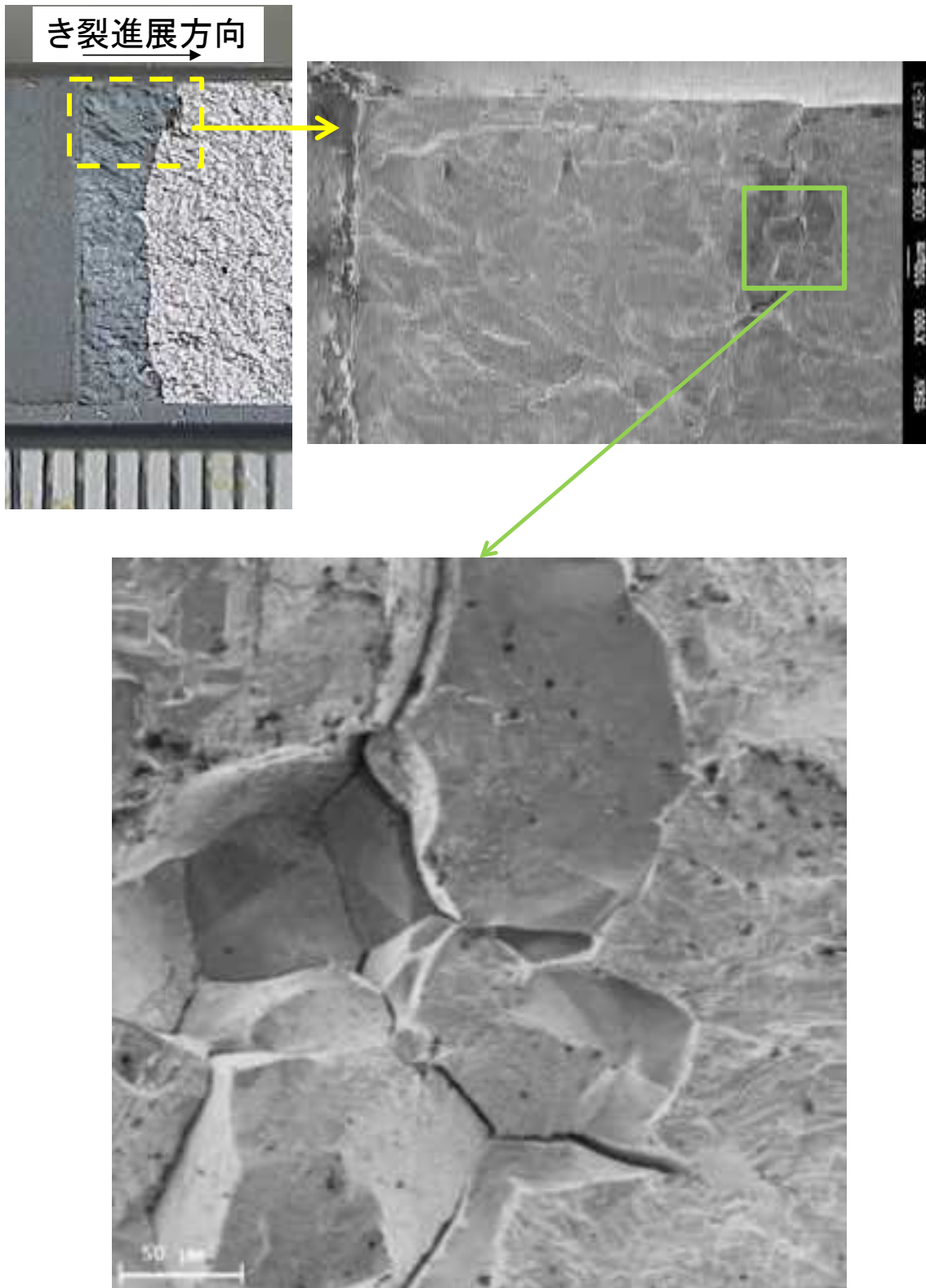
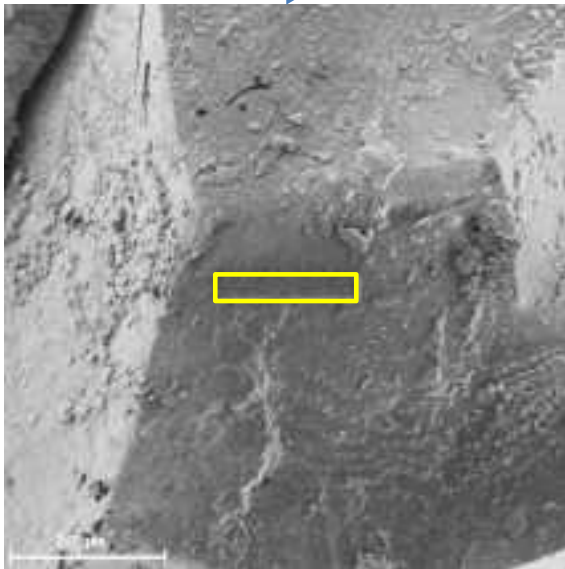
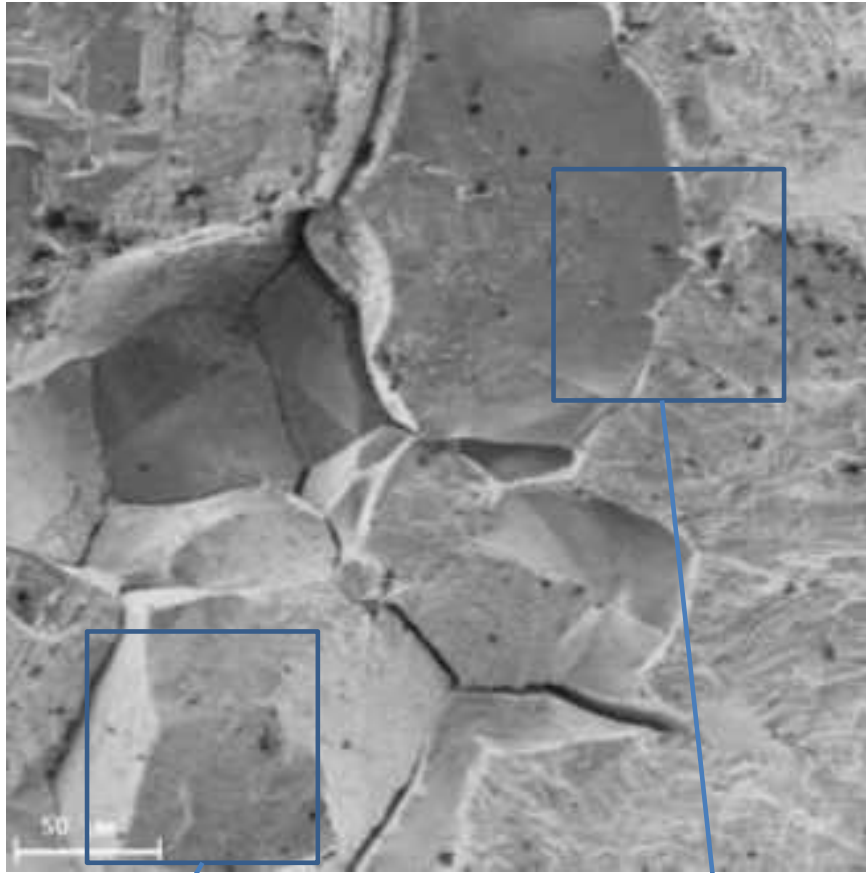
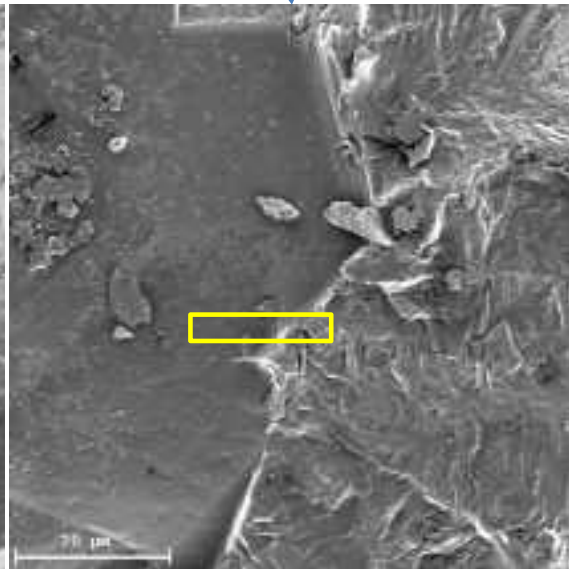


図 4.2.1.2-57(1) A413 からの薄膜試料採取箇所



A413\_結晶粒表面



A413\_先端

図 4.2.1.2-57(2) A413 からの薄膜試料採取箇所

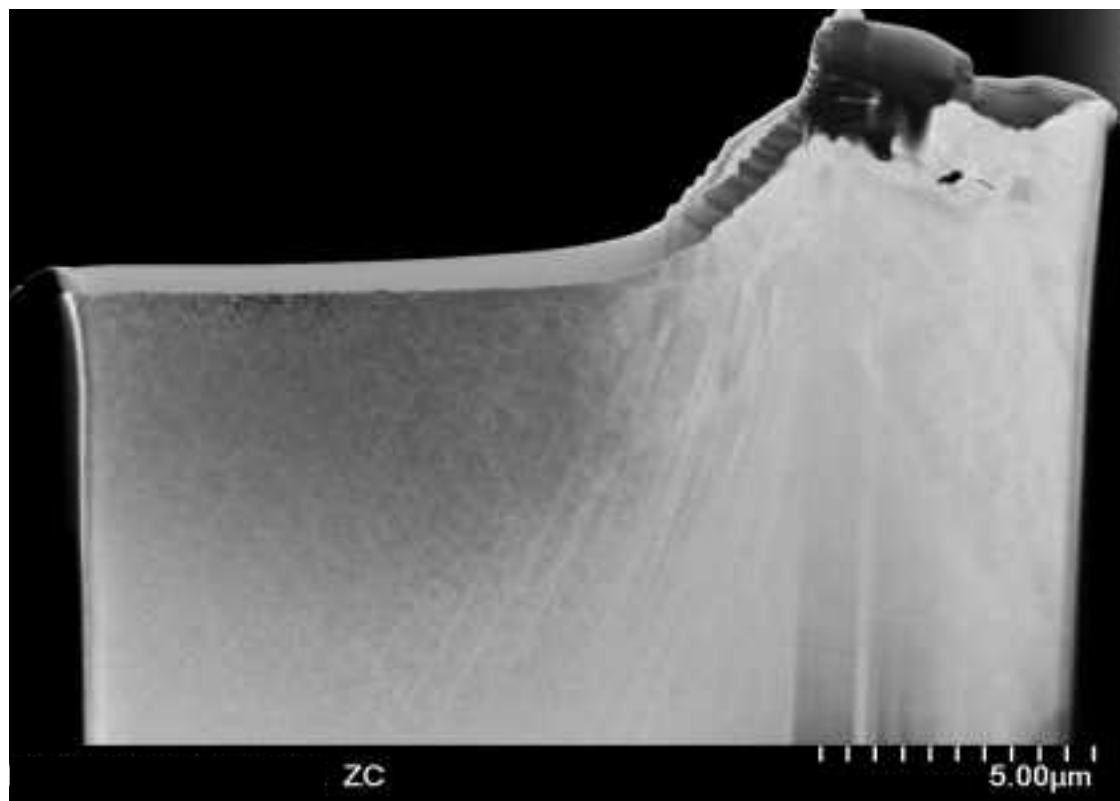


図 4.2.1.2-58 A413\_先端のマイクロ組織

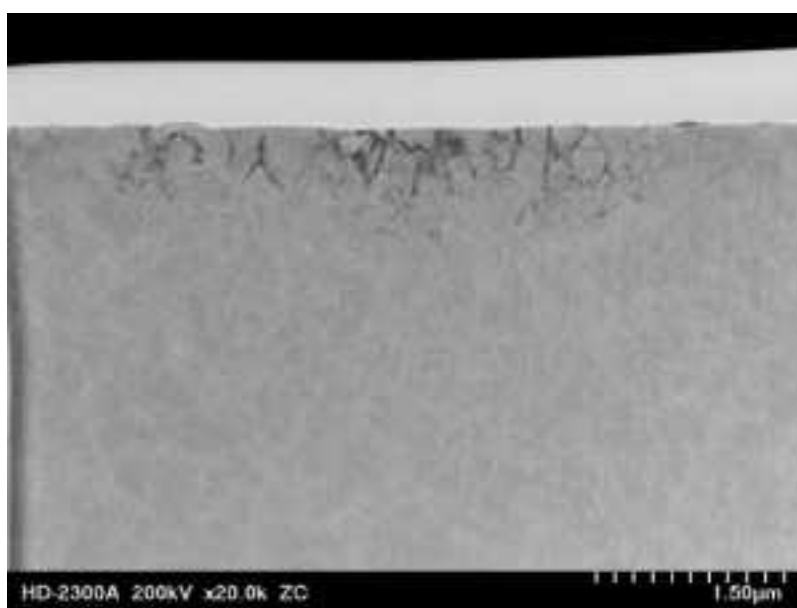
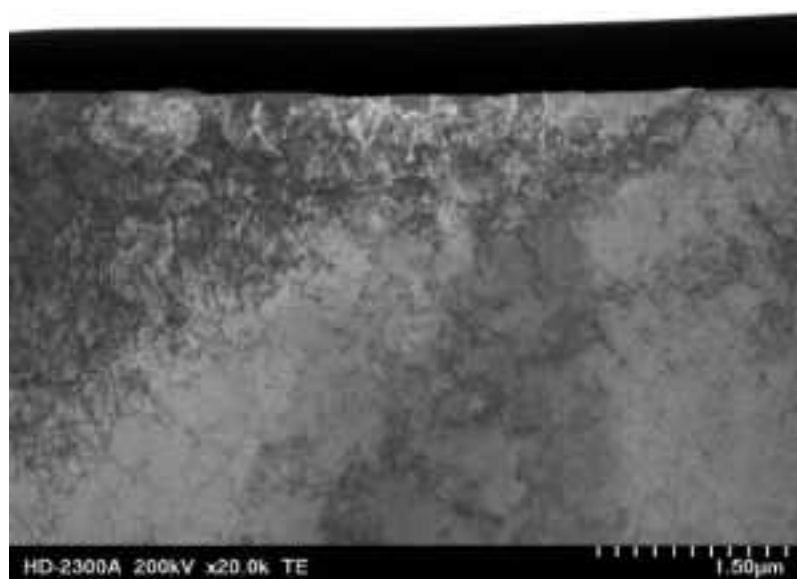
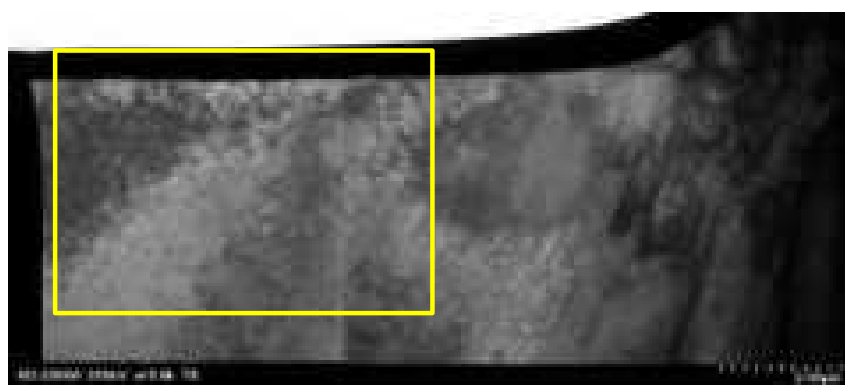


図 4.2.1.2-59 A413\_先端のマイクロ組織

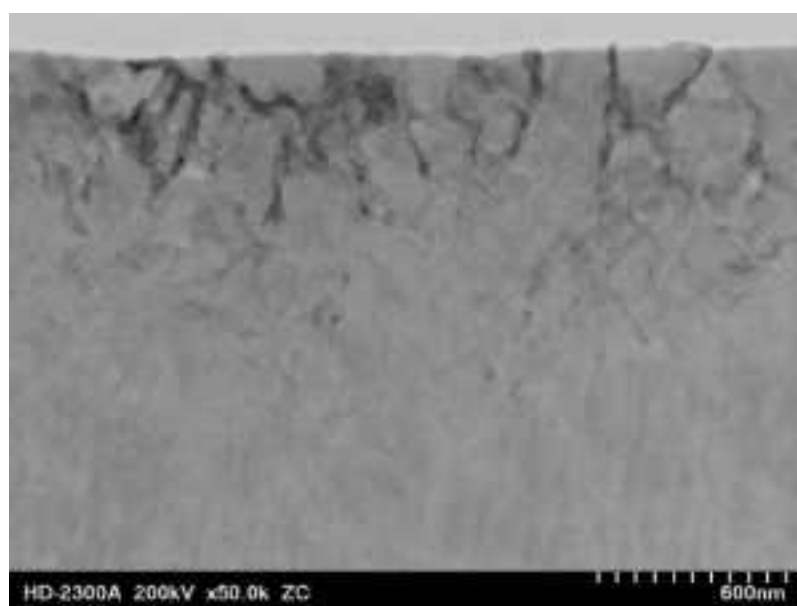
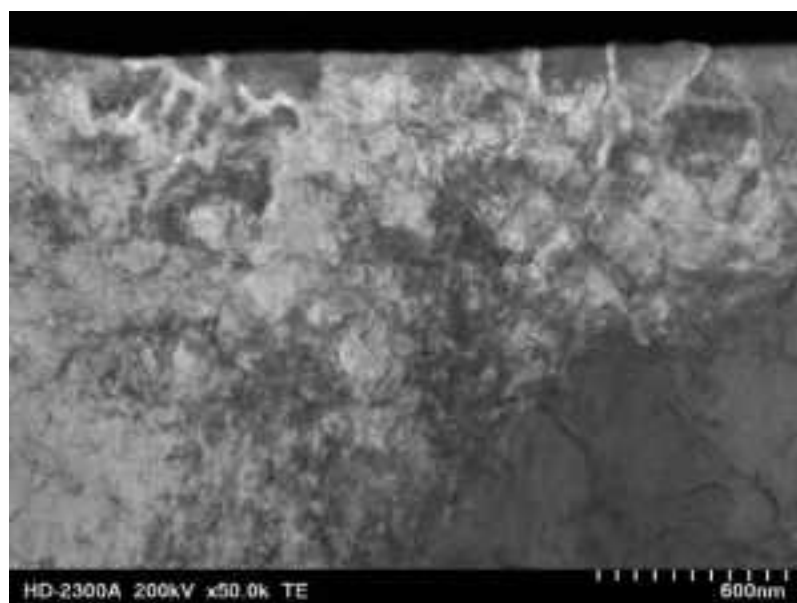
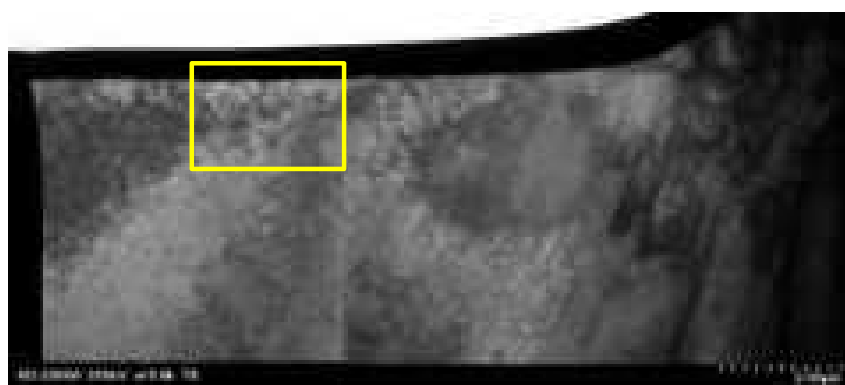


図 4.2.1.2-60(1) A413\_先端の EDS マップ分析箇所

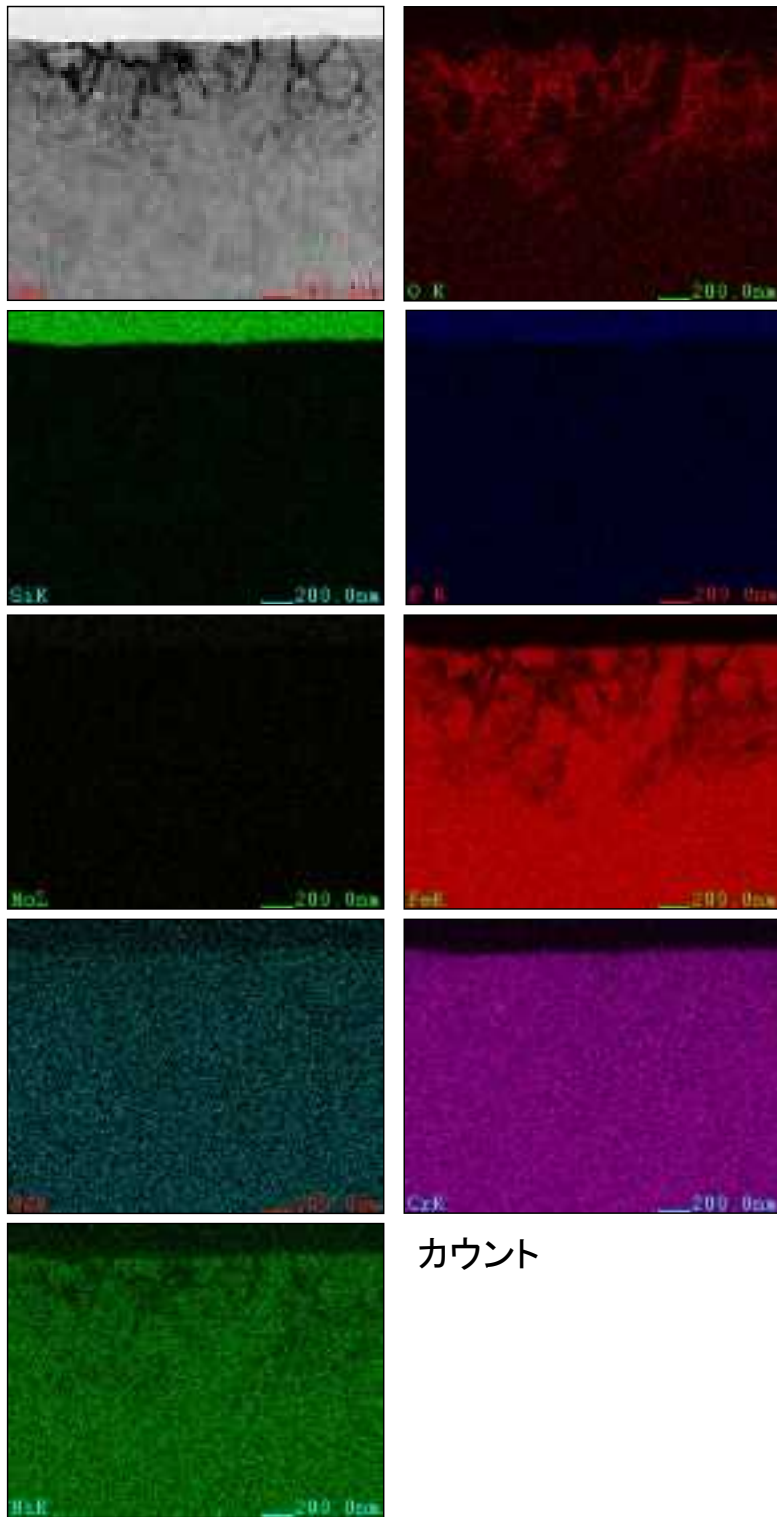


図 4.2.1.2-60(2) A413\_先端の EDS マップ(カウント)

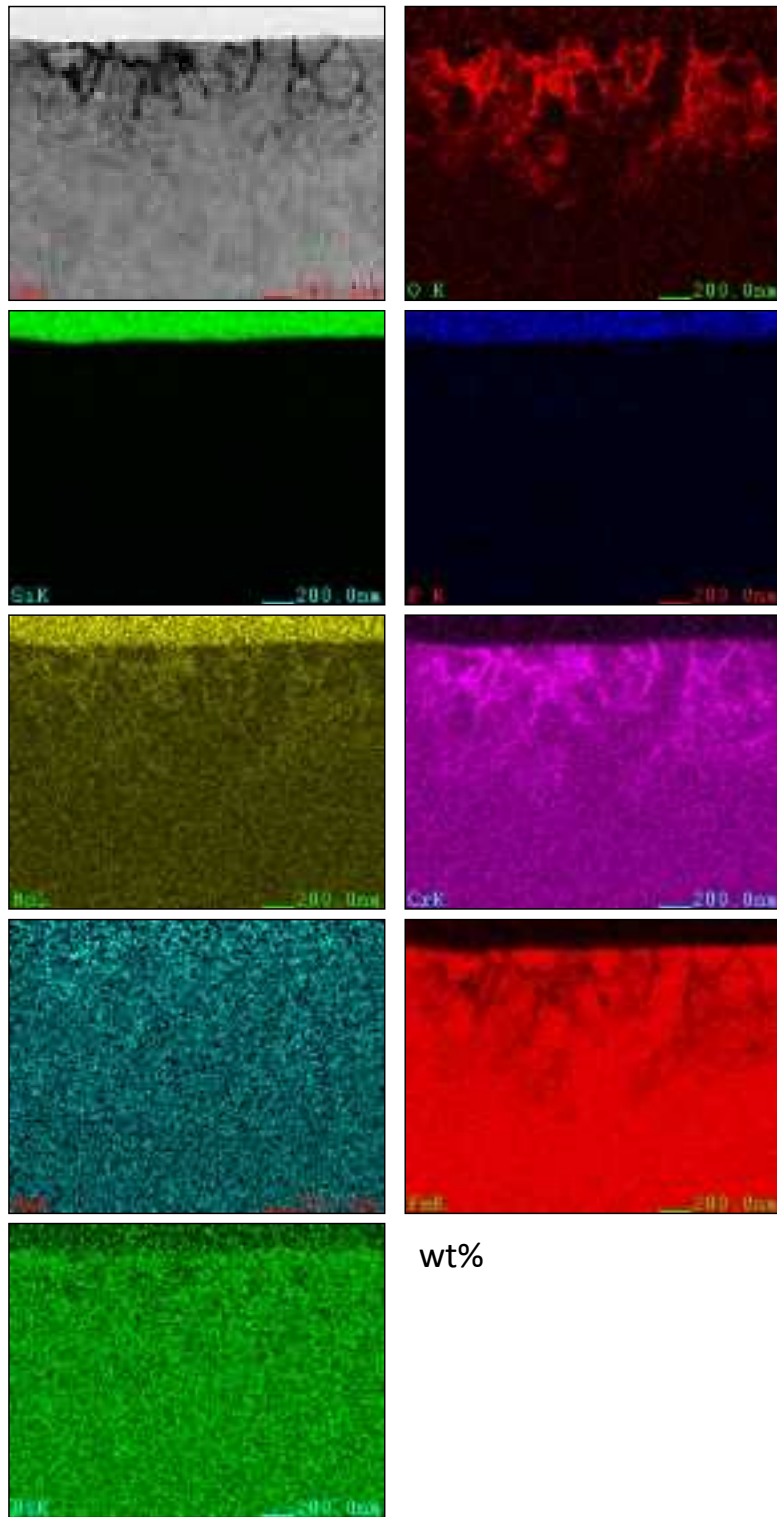


図 4.2.1.2-60(3) A413\_先端の EDS マップ(wt%)

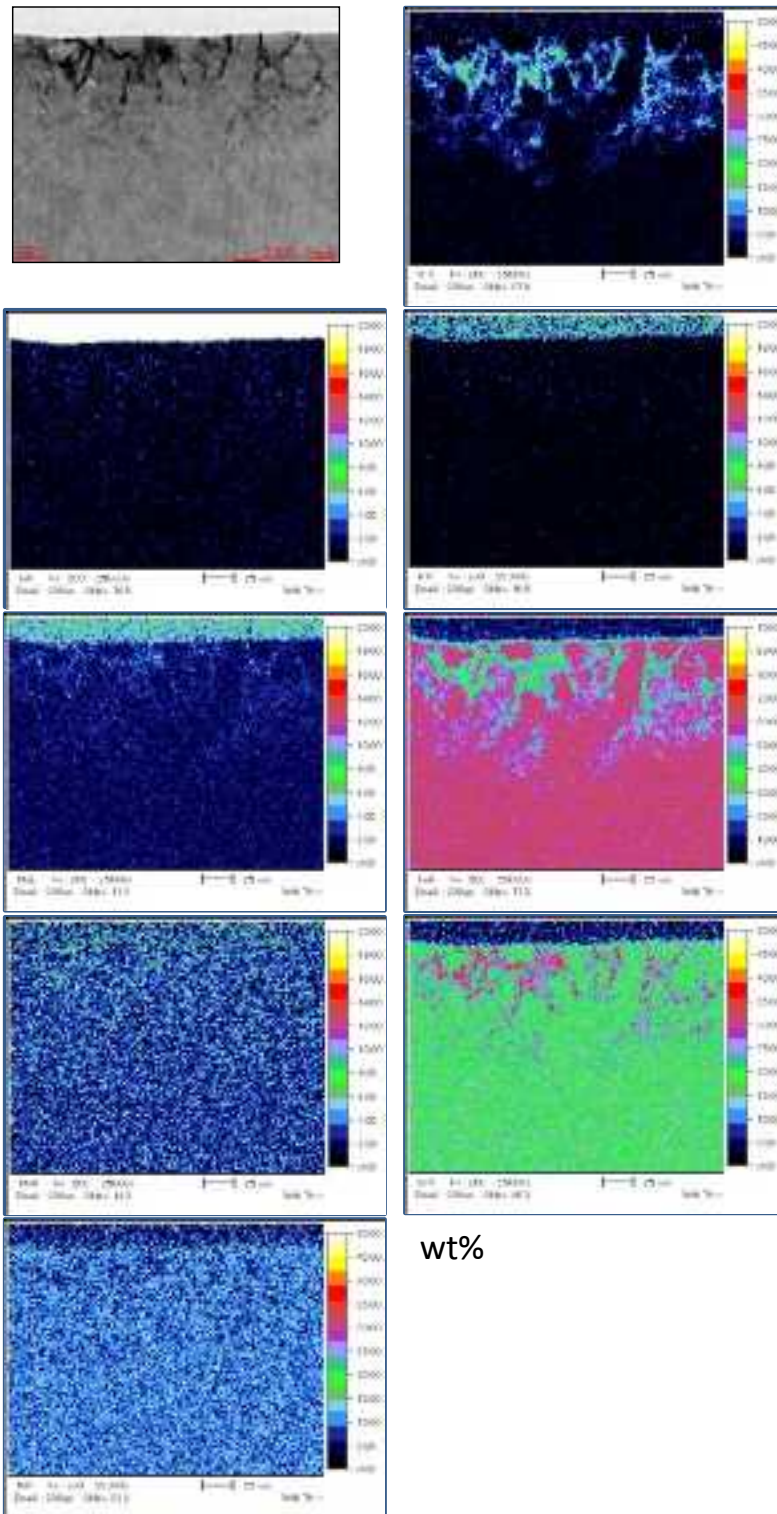


図 4.2.1.2-60(4) A413\_先端の EDS マップ(wt%)



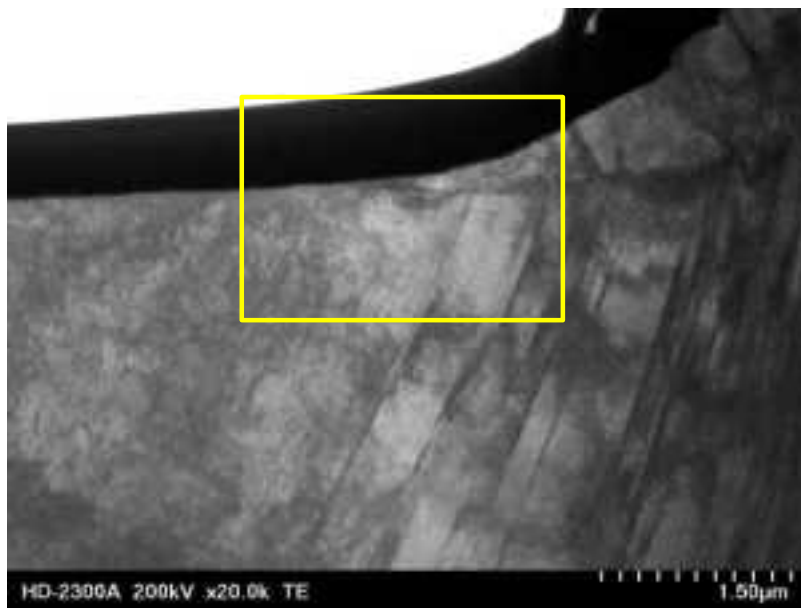
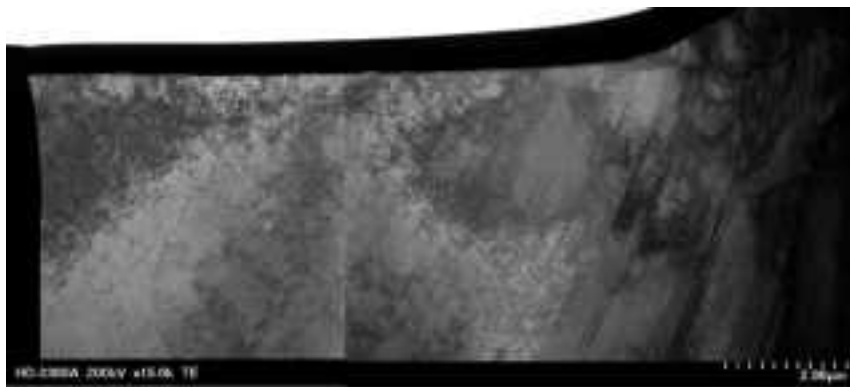


図 4.2.1.2-61 A413\_先端のき裂先端マイクロ組織

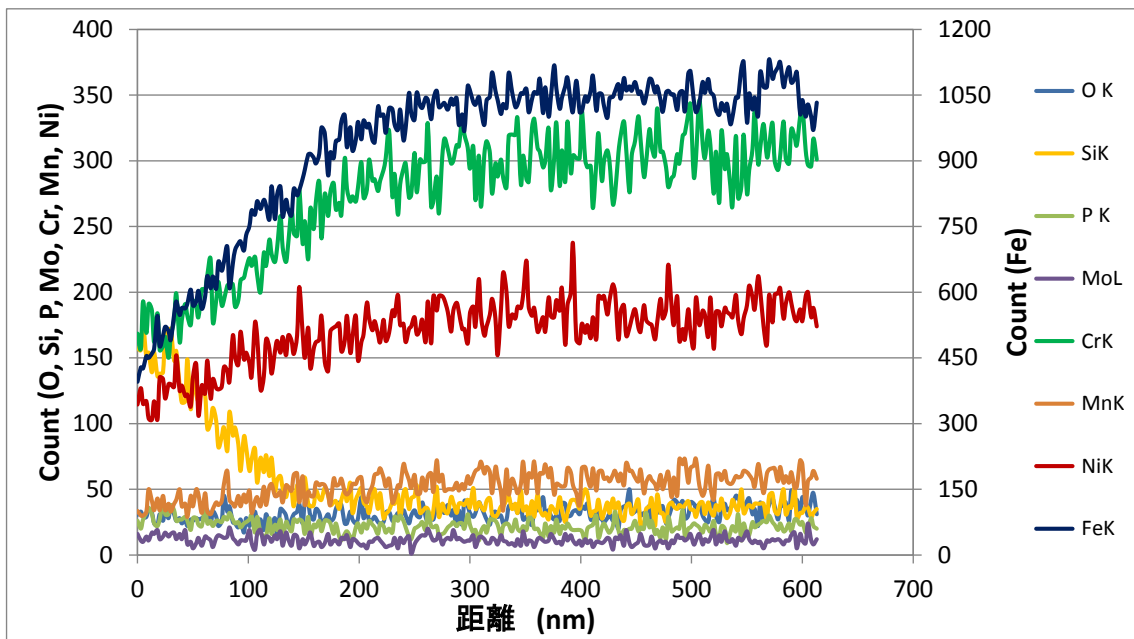
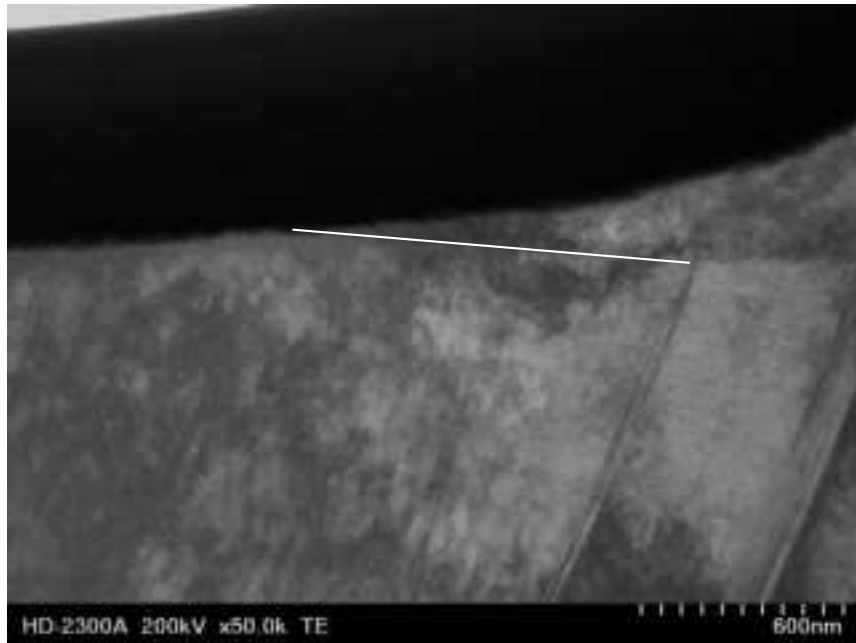


図 4.2.1.2-62 A413\_先端のき裂先端線分析結果

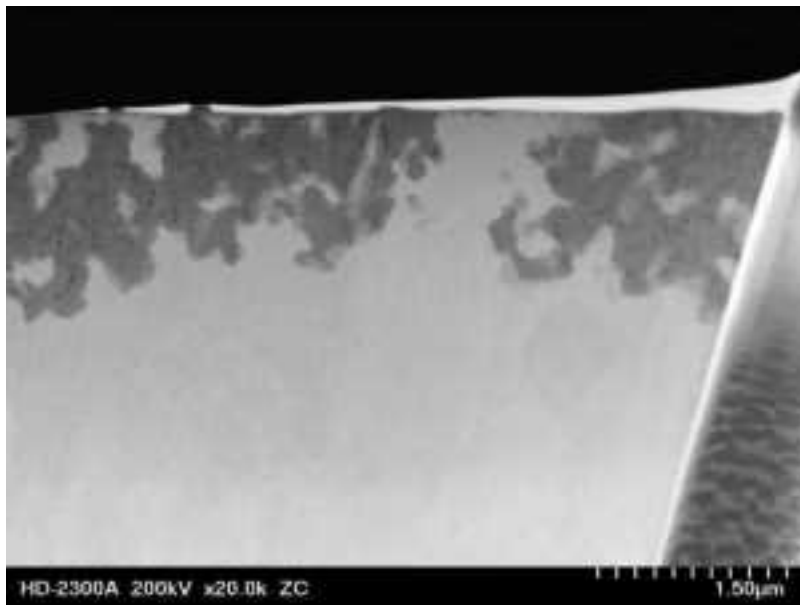
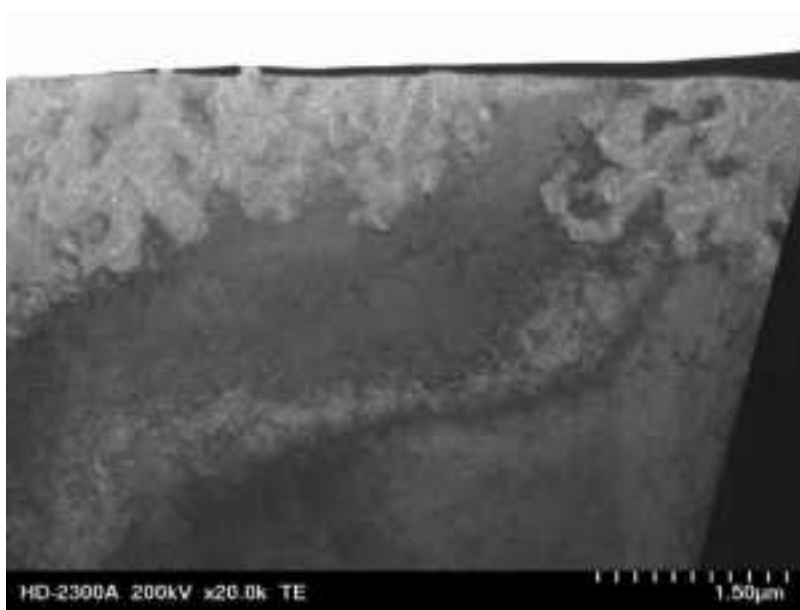
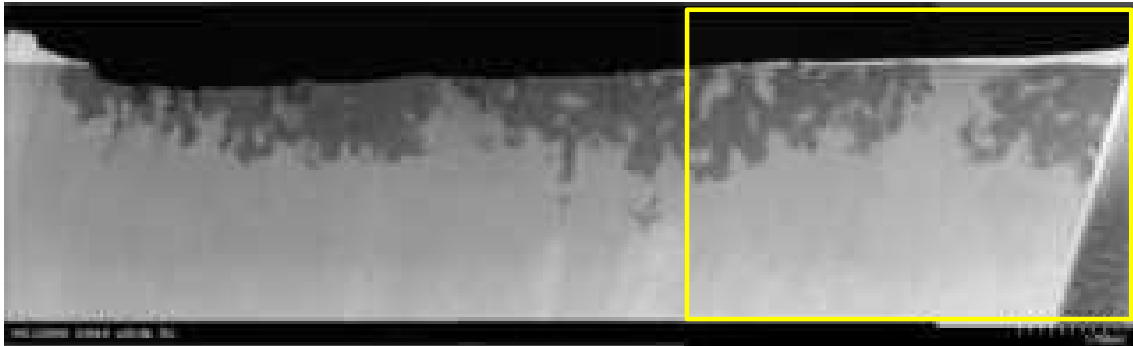


図 4.2.1.2-63(1) A413\_結晶粒表面のマイクロ組織

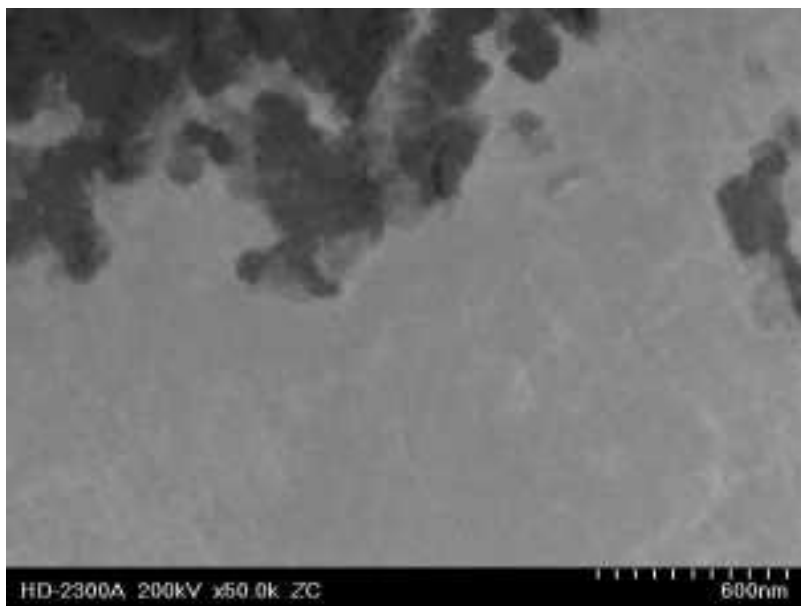
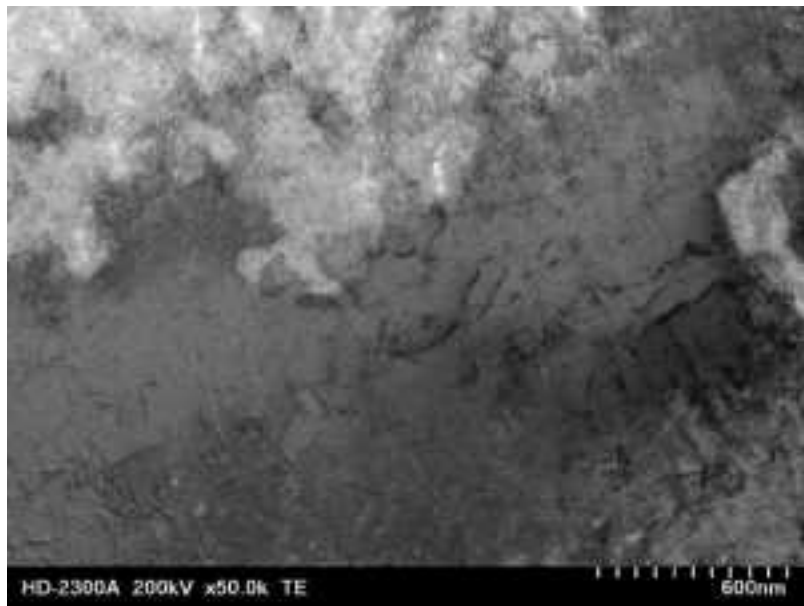


図 4.2.1.2-63(2) A413\_結晶粒表面のマイクロ組織

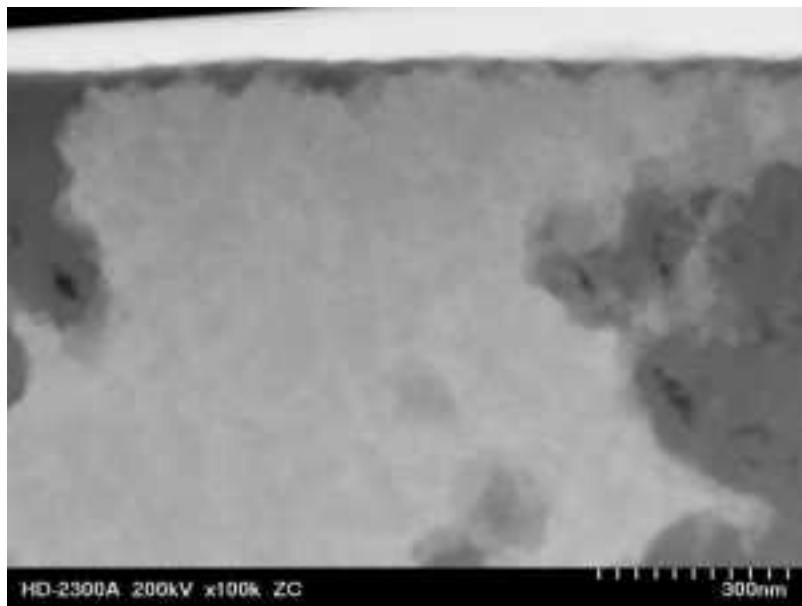
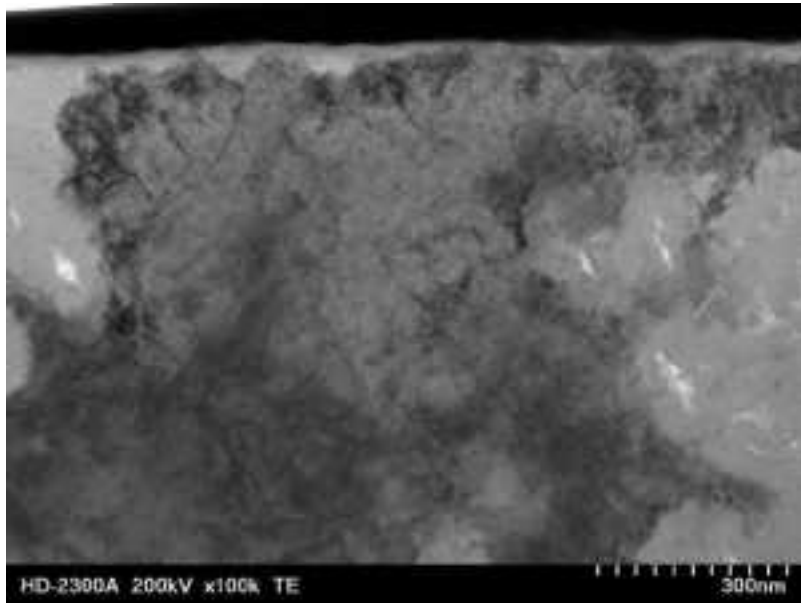


図 4.2.1.2-63(3) A413\_結晶粒表面のマイクロ組織

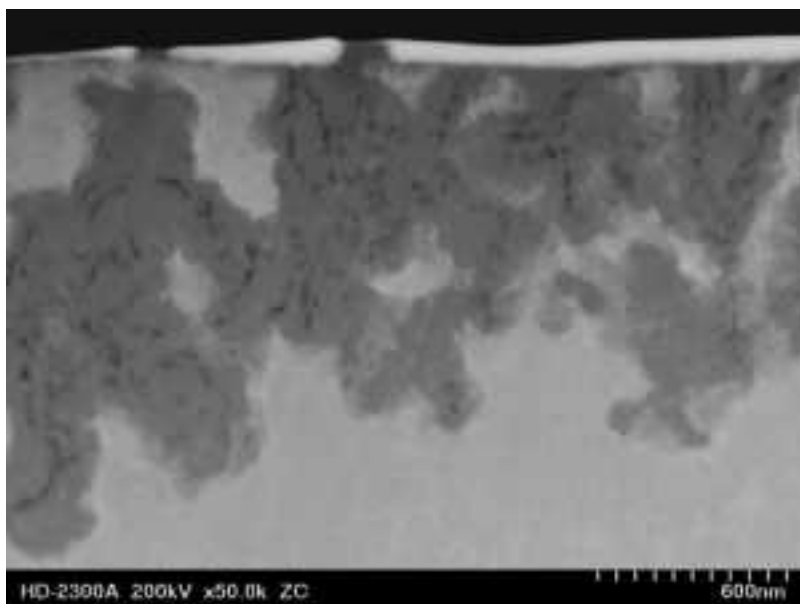
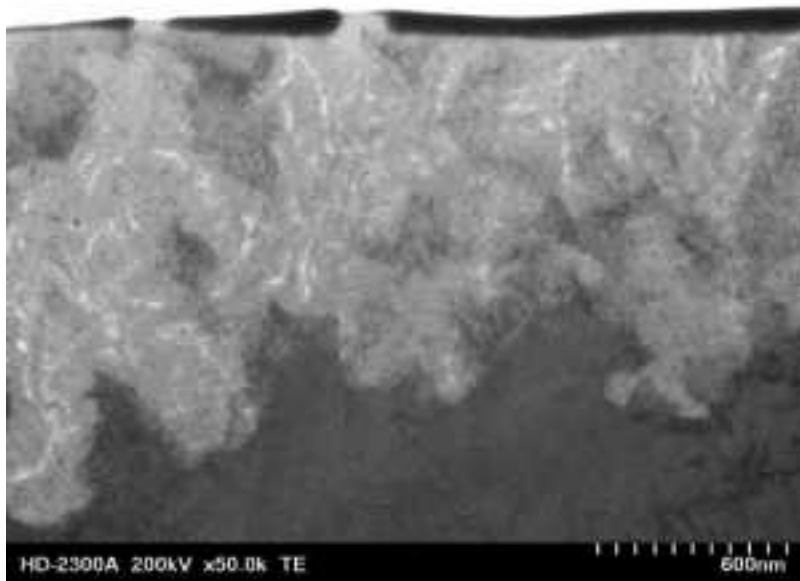
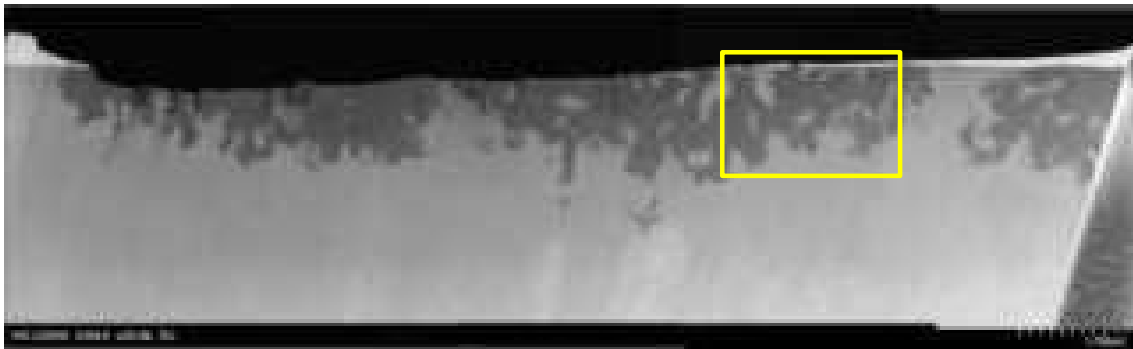


図 4.2.1.2-64(1) A413\_結晶粒表面の EDS マップ分析箇所

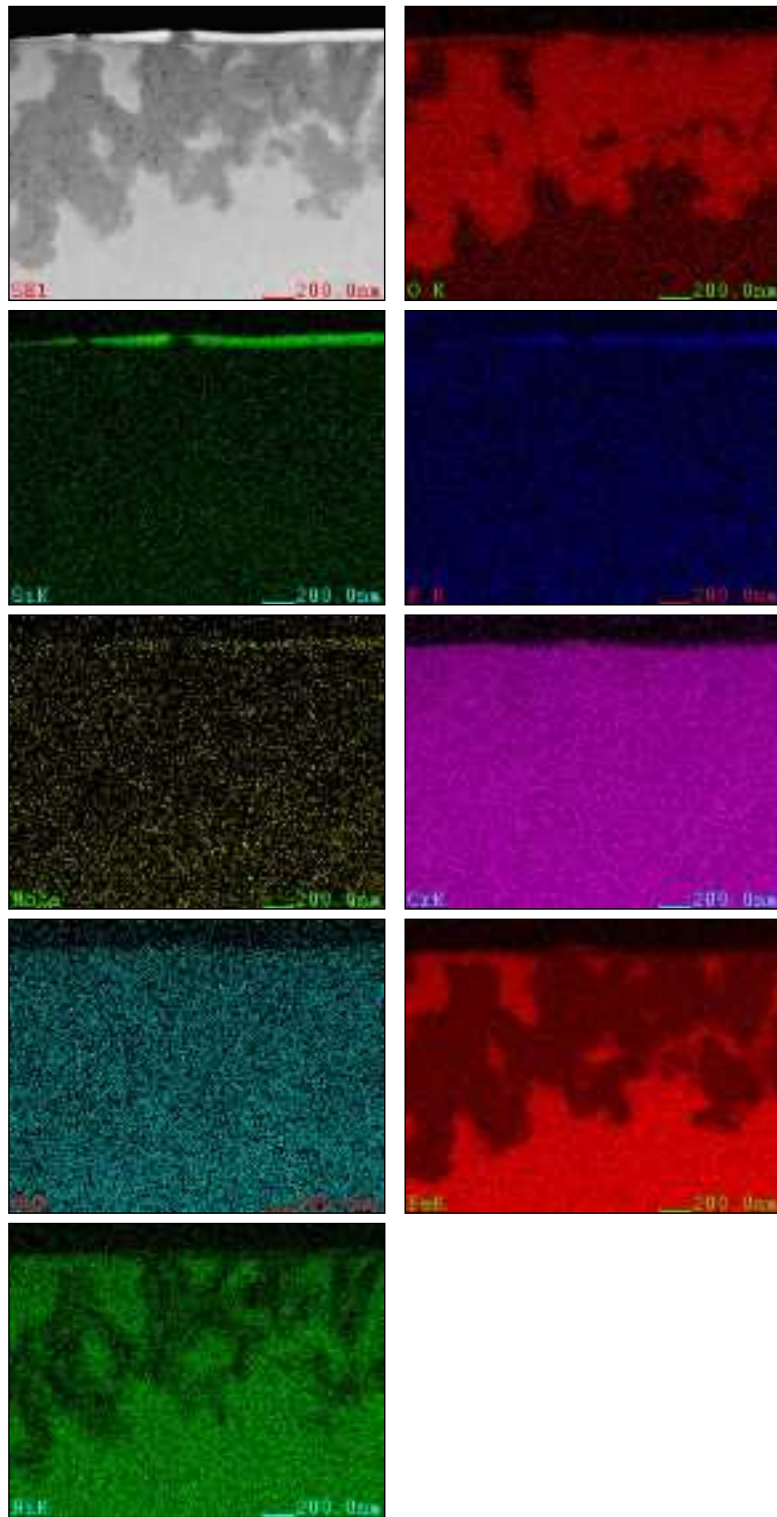


図 4.2.1.2-64(2) A413\_結晶粒表面の EDS マップ(カウント)

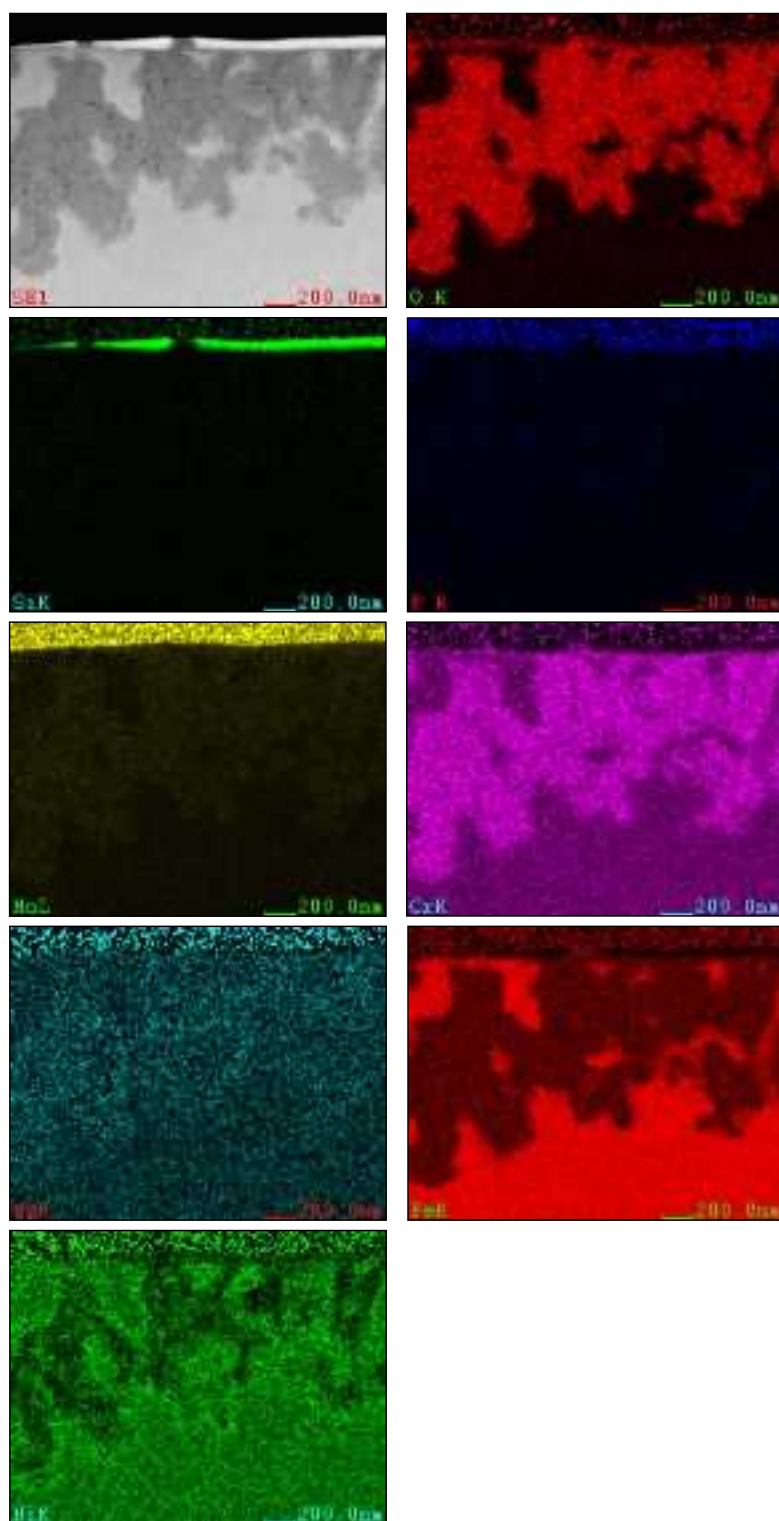


図 4.2.1.2-64(3) A413\_結晶粒表面の EDS マップ(wt%)



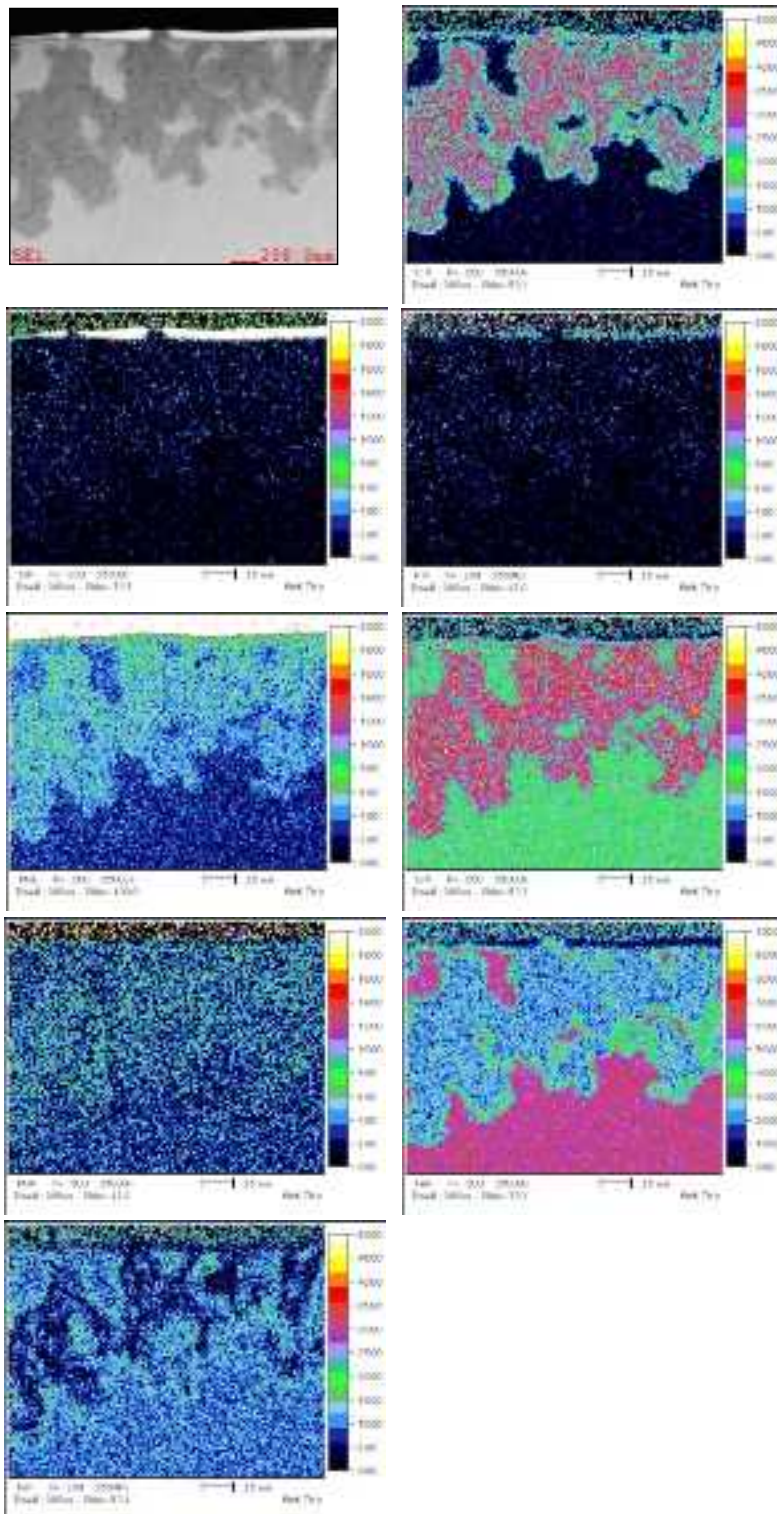
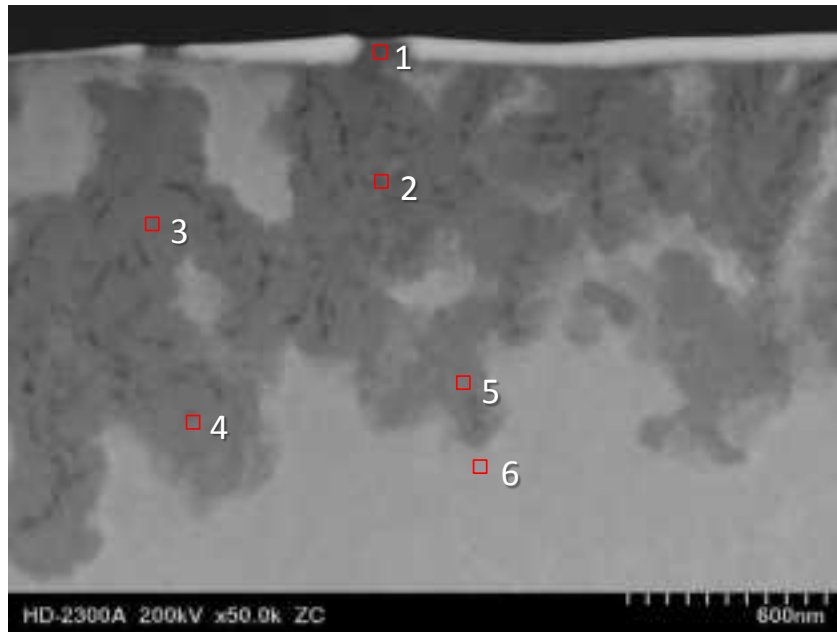


図 4.2.1.2-64(4) A413\_結晶粒表面の EDS マップ(wt%)



wt%								
	O K	SiK	P K	MoL	CrK	MnK	FeK	NiK
1	27.5	0.7	0.1	0.3	24.7	1.1	39.3	6.3
2	29.8	0.8	0.0	0.5	37.1	0.7	24.7	6.4
3	29.0	0.9	0.1	0.6	32.8	0.4	26.8	9.3
4	28.9	0.9	0.1	0.5	33.9	0.4	27.0	8.3
5	27.7	0.8	0.2	0.5	35.8	0.3	22.8	11.8
6	2.6	0.5	0.2	0.3	19.2	0.7	66.4	10.0

at%								
	O K	SiK	P K	MoL	CrK	MnK	FeK	NiK
1	56.2	0.8	0.1	0.1	15.5	0.7	23.0	3.5
2	58.7	0.9	0.0	0.2	22.5	0.4	13.9	3.4
3	57.9	1.1	0.1	0.2	20.1	0.2	15.3	5.0
4	57.7	1.0	0.1	0.2	20.8	0.2	15.5	4.5
5	56.3	0.9	0.2	0.2	22.4	0.2	13.3	6.5
6	8.3	1.0	0.3	0.2	19.1	0.7	61.6	8.8

図 4.2.1.2-65 A413\_結晶粒表面の点分析結果

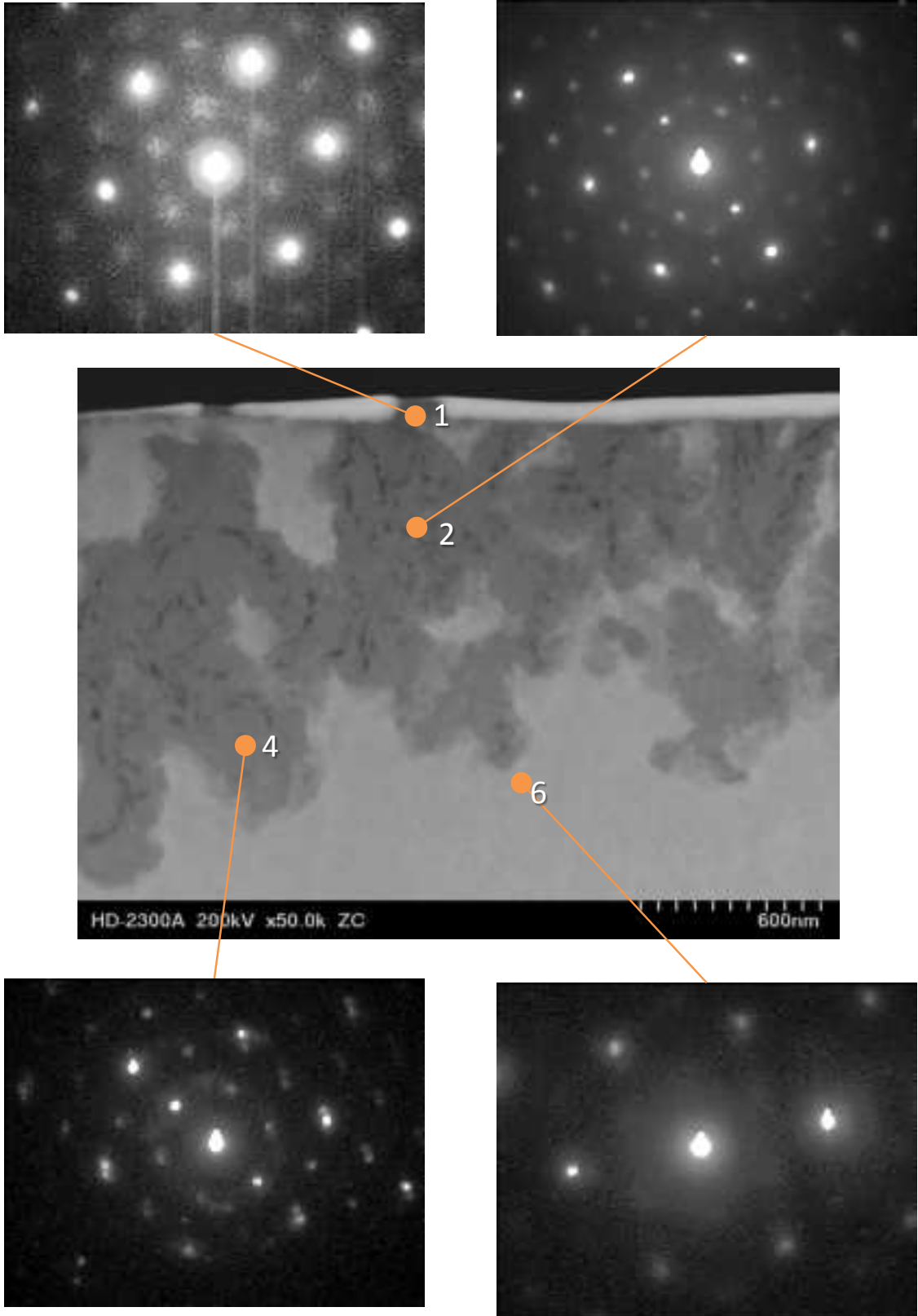


図 4.2.1.2-66 A413\_結晶粒表面におけるナノ回折像

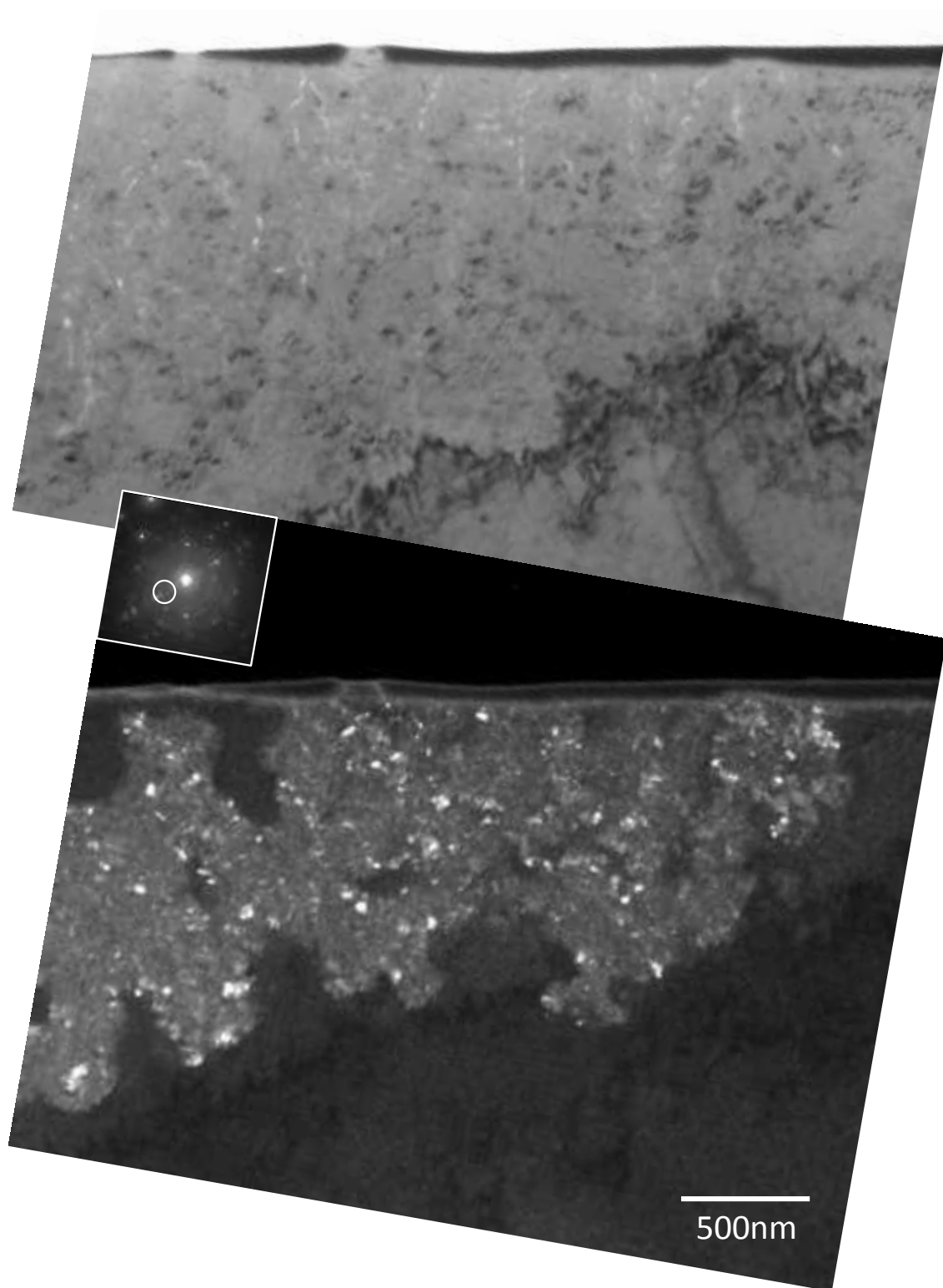


図 4.2.1.2-67 A413\_結晶粒表面の明視野像(上)および  
酸化物の回折波から結像した暗視野像(下)

## (2)照射開始時の温度履歴が照射材特性に及ぼす影響評価試験

### a. 試験の狙い

試験炉で中性子照射を行う際、原子炉の起動に伴う温度履歴を経験することとなるが、一般に軽水炉の起動時における温度履歴と異なることが知られている。

本項目では、原子炉の起動に伴う照射温度履歴の相違が材料特性に及ぼす影響を評価するため、中性子照射ステンレス鋼の IASCC 感受性に着目し、低ひずみ速度引張試験 (SSRT 試験)を実施する。

### b. 供試材、試験方法及び結果

試験マトリックスを表 4.2.1.2-18 に示す。図 4.2.1.2-68 に示す照射材について、SSRT 試験を実施した。この試験片は、JMTR において BWR の起動時と同様、炉の出力に伴う  $\gamma$ 加熱で昇温したものである。

水質条件は表 4.2.1.2-19 の通り、ひずみ速度は約  $2.5 \times 10^{-7}/s$  とした。

試験結果を表 4.2.1.2-20 に、試験前後の試験片外観写真を図 4.2.1.2-69 に示す。試験片は平行部で破断した。SSRT 試験中の応力-ひずみ線図を図 4.2.1.2-70 に、破面 SEM 観察結果を図 4.2.1.2-71 に示す。破面には粒界割れが観察された。また、粒内割れも観察され、粒界割れと混在した箇所も観察された。

表 4.2.1.2-18 照射開始時の温度履歴が照射材特性に及ぼす影響評価試験

試験マトリックス

試験片 ID	鋼種	試験片 管理番号	中性子 照射量 (n/m <sup>2</sup> )	照射後 熱処理	SSRT 試験	外観 破面 SEM	備考
B6	SUS 316L	B10R5 TT02	2×10 <sup>25</sup>	—	○	○	NFD 準備材

凡例 ○：実施、—：実施なし

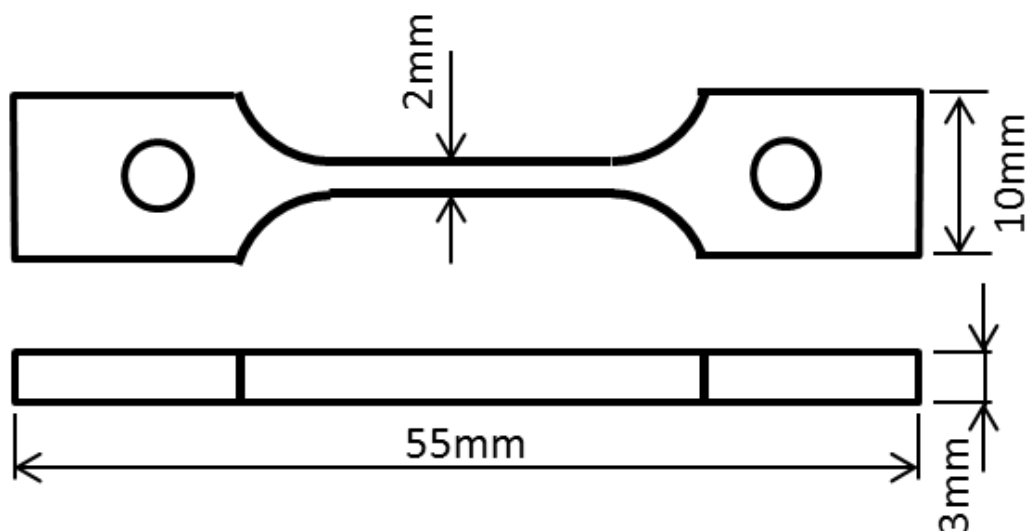


図 4.2.1.2-68 SSRT 試験片形状図

表 4.2.1.2-19 SSRT 試験水質条件

項目	条件	備考
温度	290±1℃	常時モニタリング
圧力	9MPa 程度	常時モニタリング
溶存酸素濃度	32ppm(入口)	入口のみ常時モニタリング
導電率	入口 : 0.2 μS/cm 以下 出口 : 0.2 μS/cm 以下	出口のみ常時モニタリング

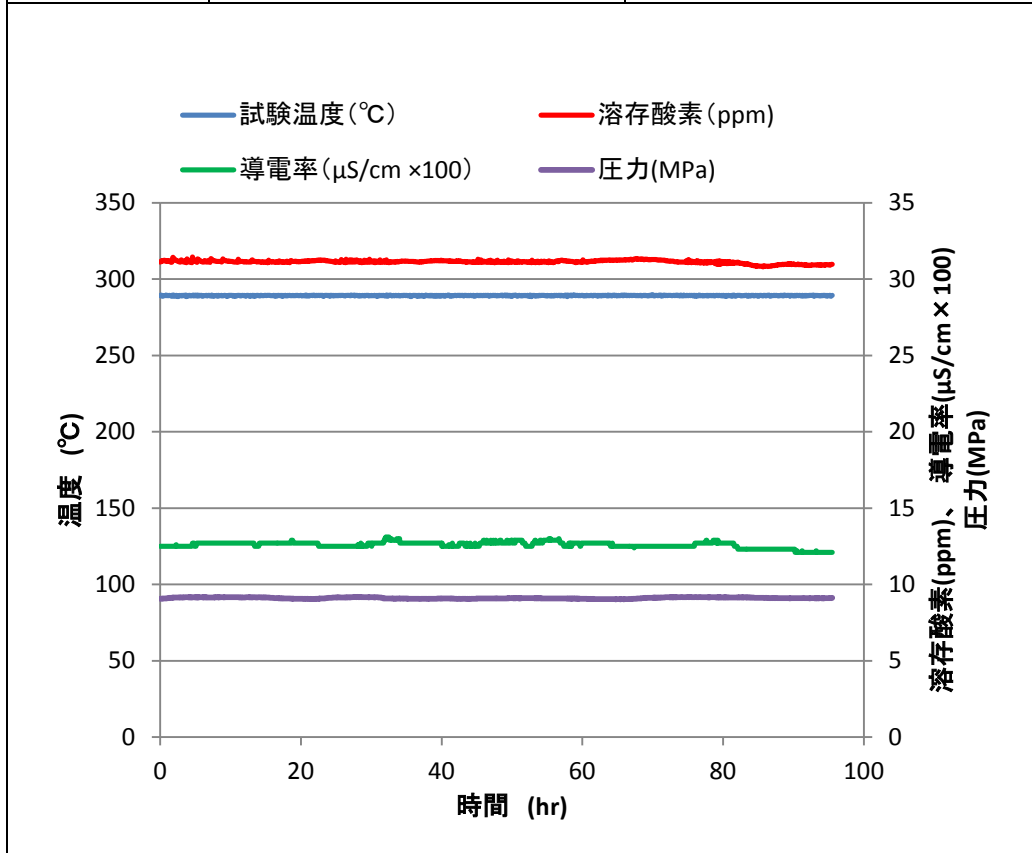
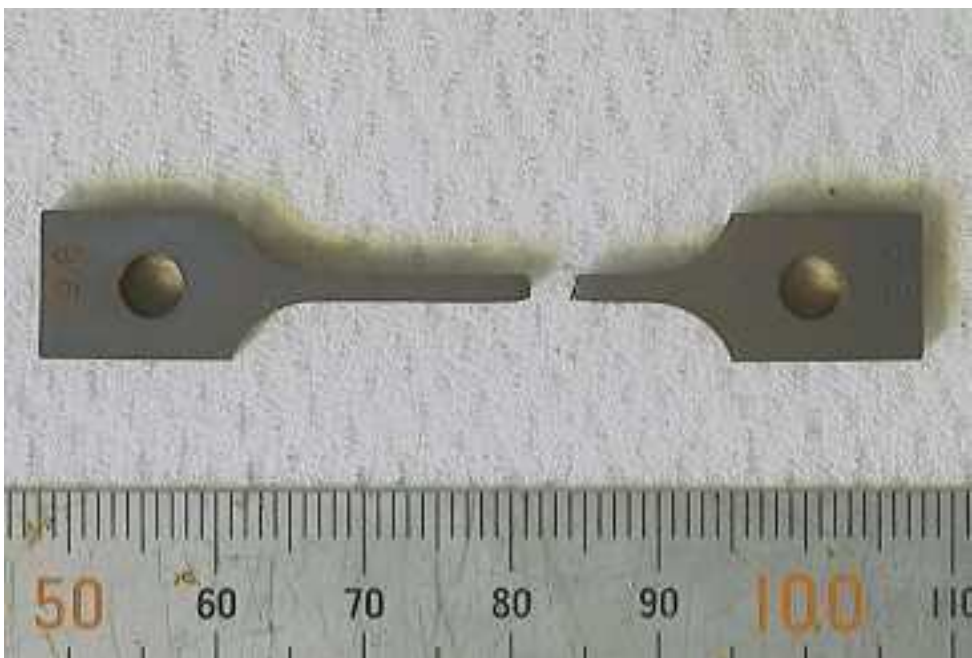


表 4.2.1.2-20 SSRT 試験結果

試験片 ID	鋼種	照射量 (n/m <sup>2</sup> ) (E>1MeV)	入口 DO	最大応力時 歪(%)	粒界割れ 破面率 (%)	備考
B6	SUS 316L	2×10 <sup>25</sup>	32ppm	0.2	67	粒内割れ あり



試験前



試験後

図 4.2.1.2-69 SSRT 試験前後の試験片外観



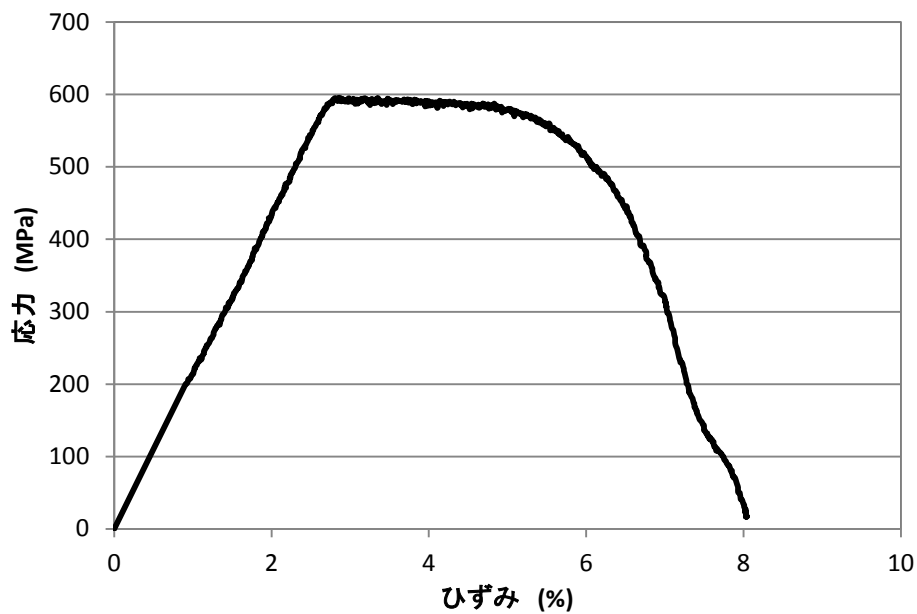
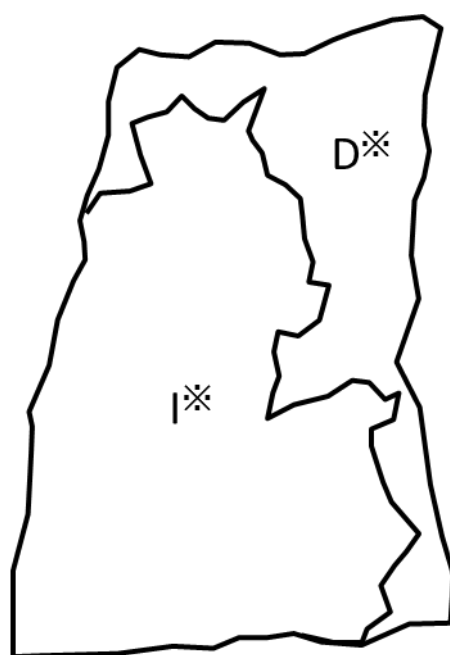
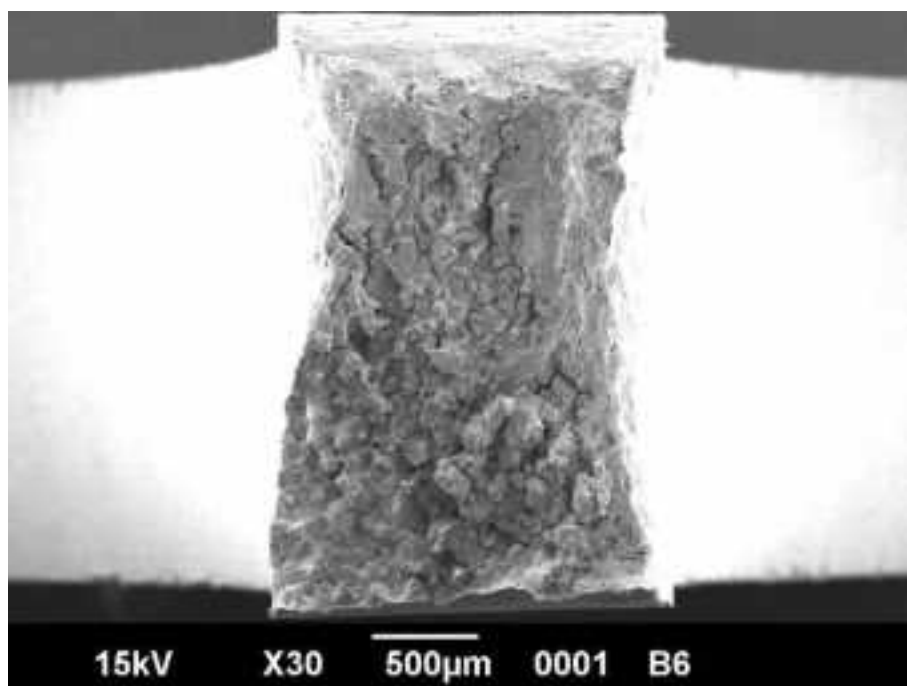


図 4.2.1.2-70 SSRT 試験時の応力—ひずみ曲線



I : 粒界割れ  
D : 延性割れ  
※ 粒内割れが一部混在

図 4.2.1.2-71(1) 破面 SEM 観察結果(B6、SUS316L、 $2 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ )(1/6)

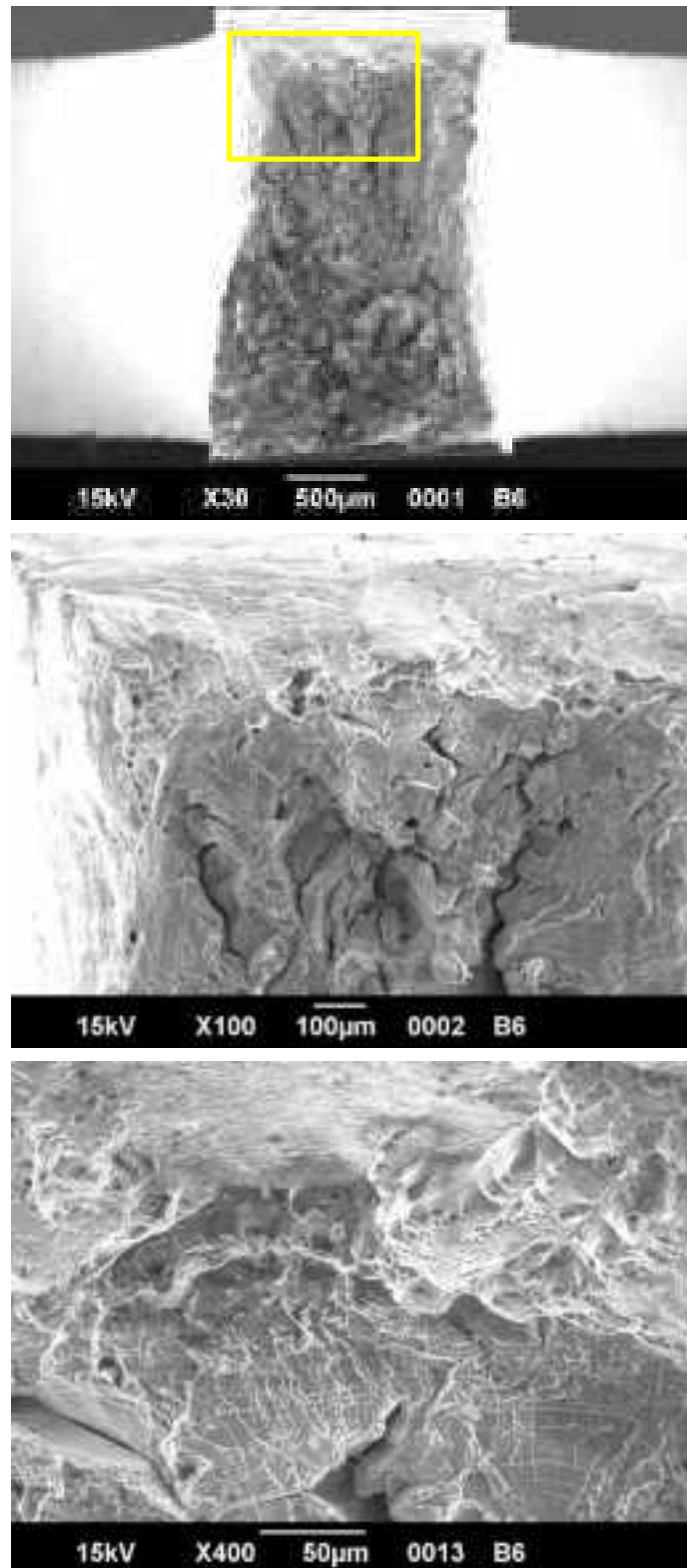


圖 4.2.1.2-71(2) 破面 SEM 觀察結果(B6、SUS316L、 $2 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ )(2/6)

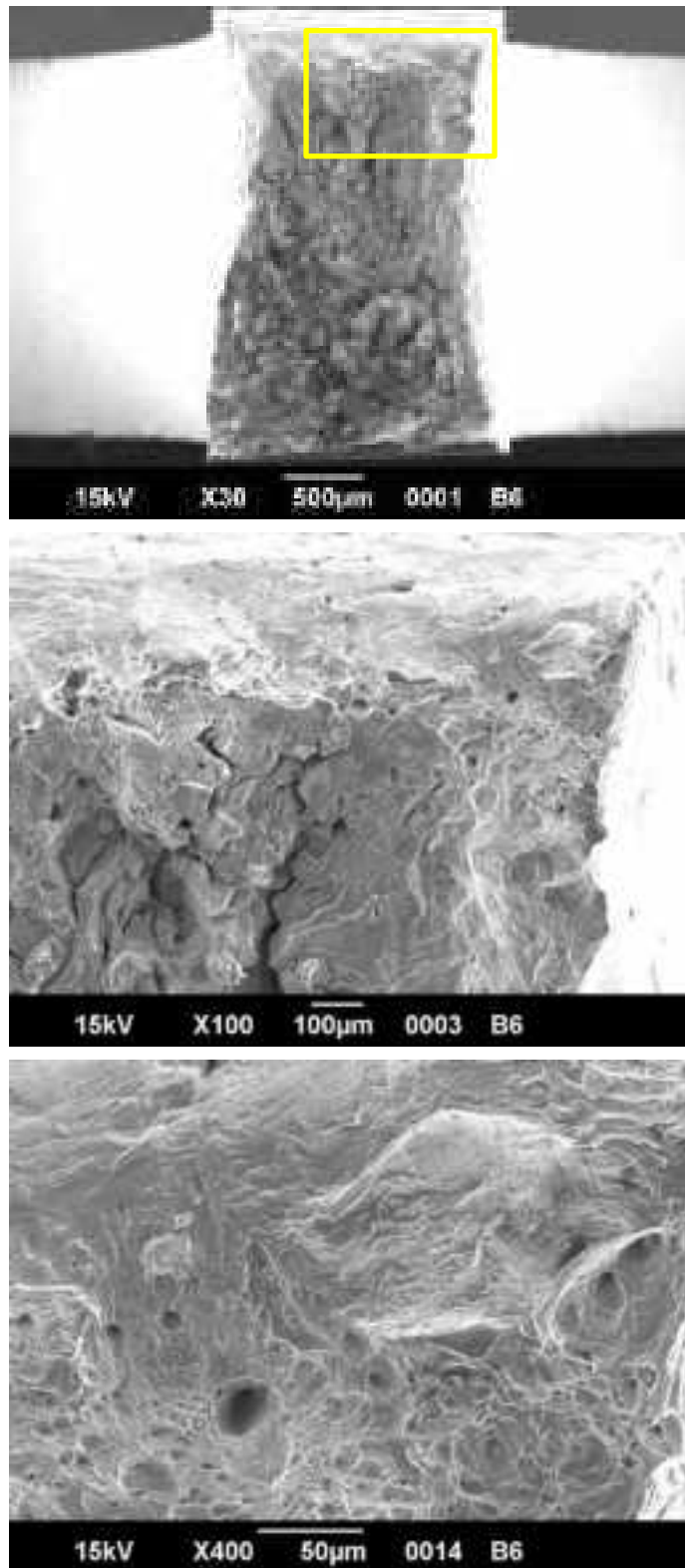


圖 4.2.1.2-71(3) 破面 SEM 觀察結果(B6、SUS316L、 $2 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ )(3/6)

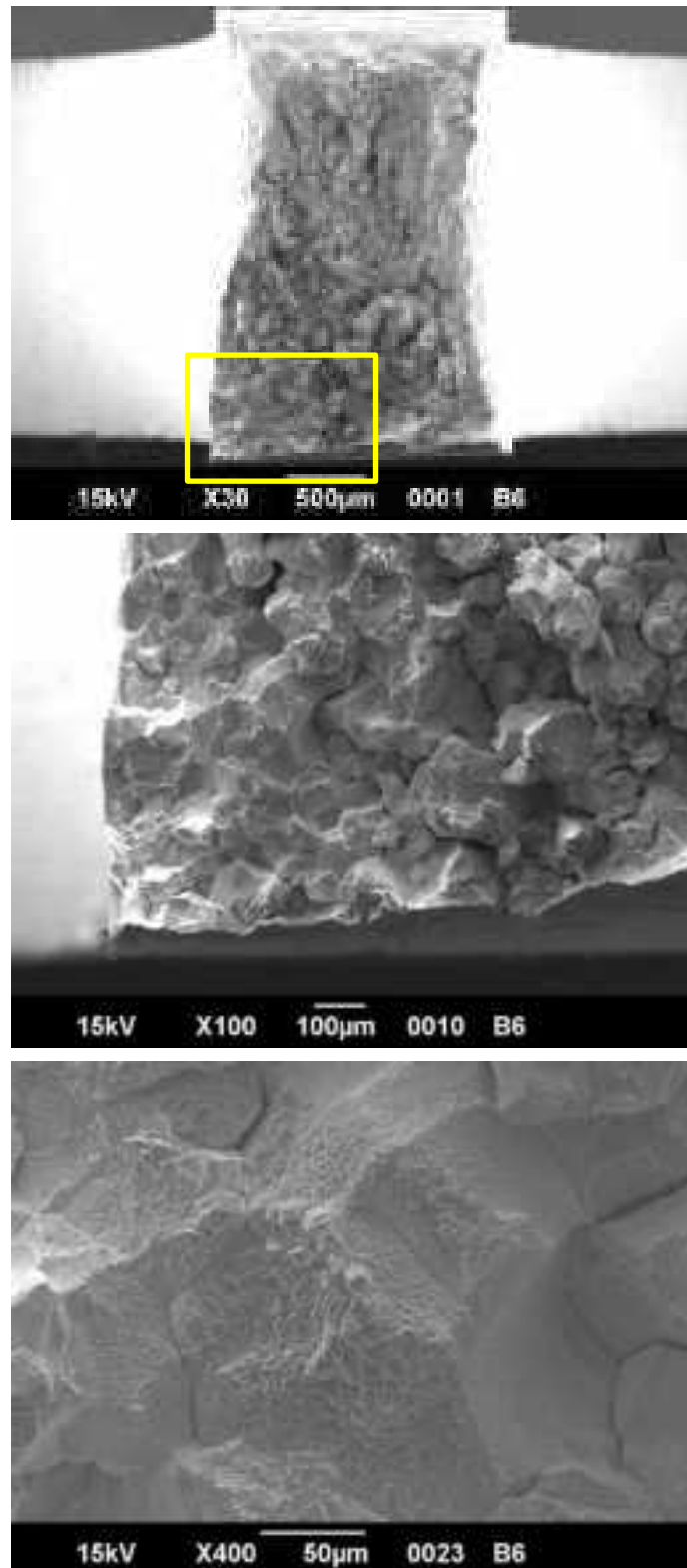


図 4.2.1.2-71(4) 破面 SEM 観察結果(B6、SUS316L、 $2 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ )(4/6)

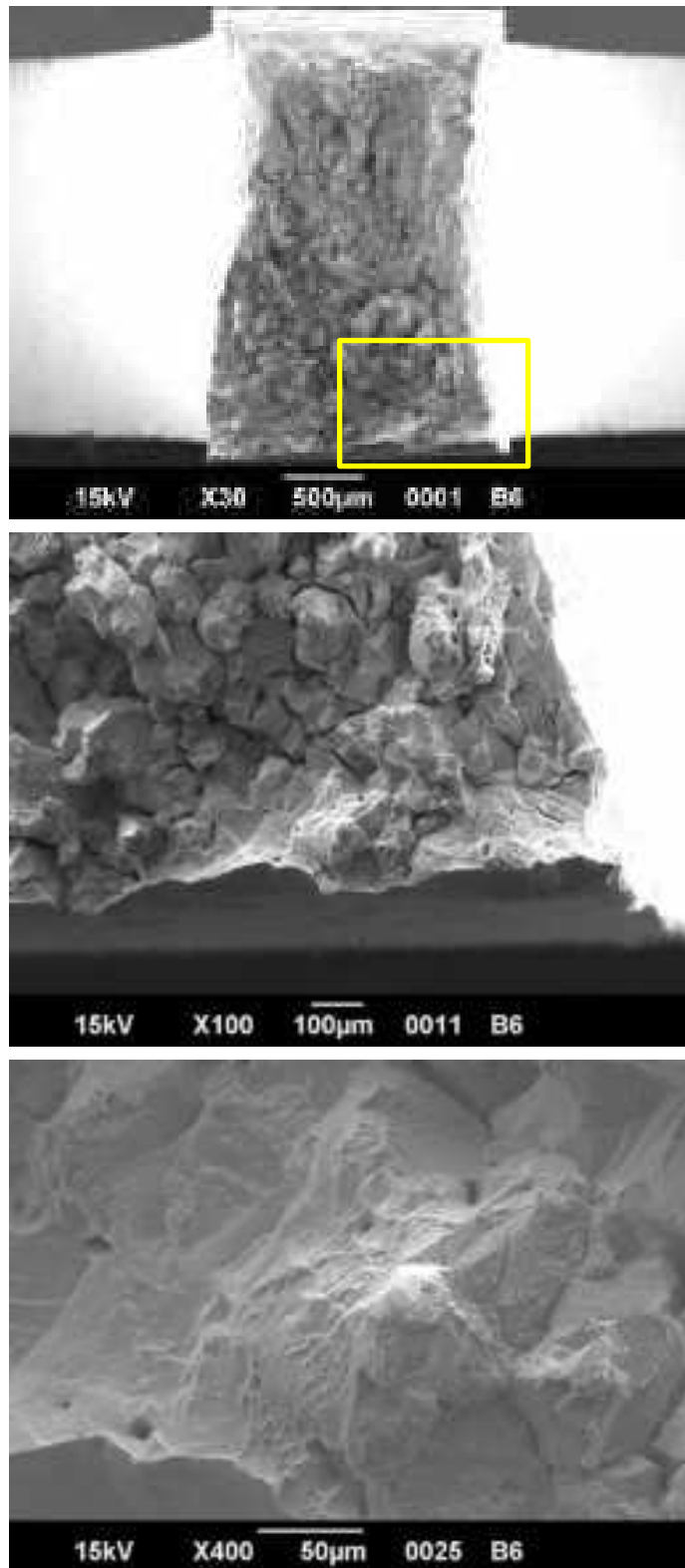


圖 4.2.1.2-71(5) 破面 SEM 觀察結果(B6、SUS316L、 $2 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ )(5/6)

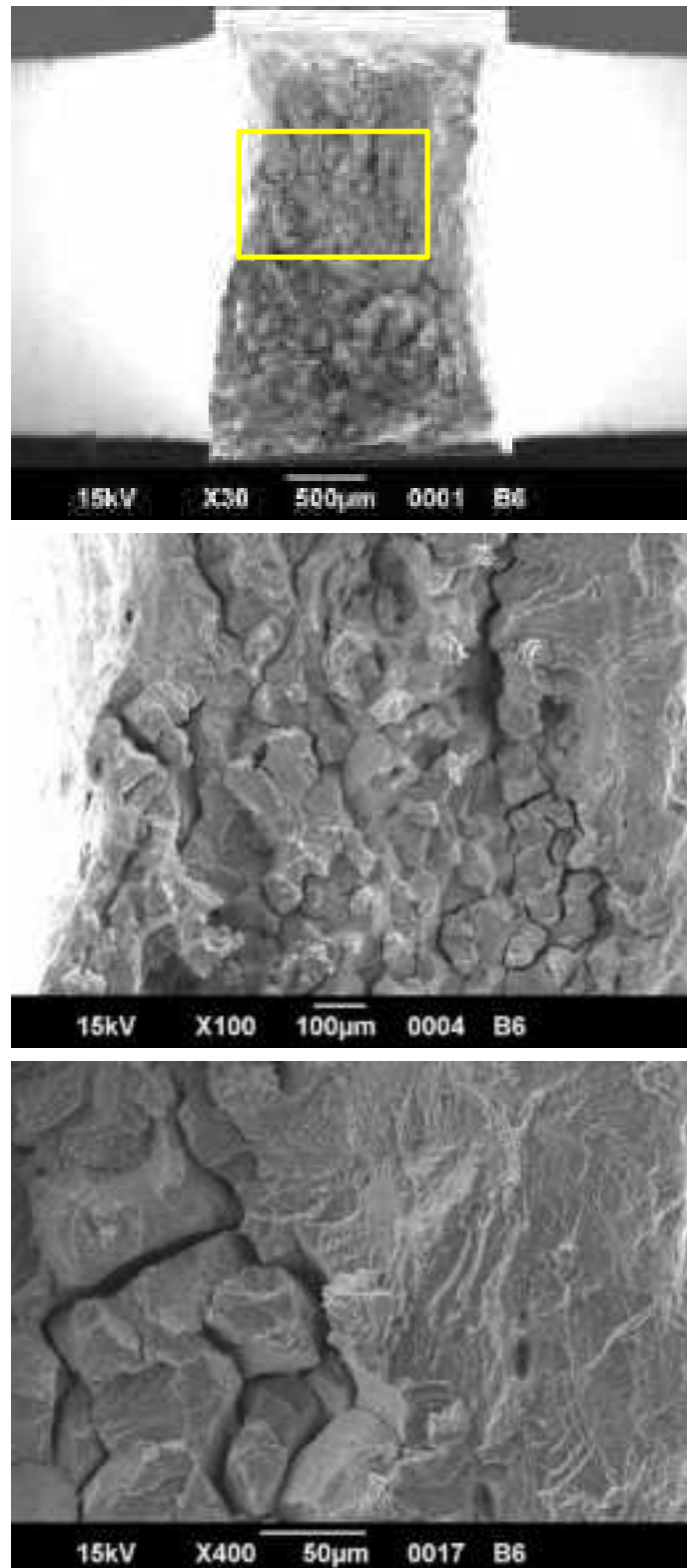


圖 4.2.1.2-71(6) 破面 SEM 觀察結果(B6、SUS316L、 $2 \times 10^{25} \text{n/m}^2 (E > 1 \text{MeV})$ )(6/6)

### (3)高温水浸漬した照射試験片の酸化皮膜分析

#### a. 試験の狙い

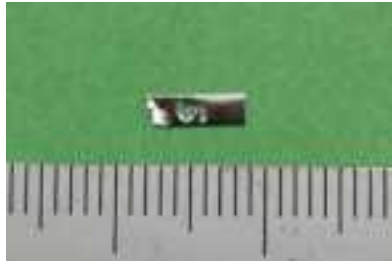
試験片表面近傍の水のラジオリシスと照射による材料のマイクロ組織変化が表面の酸化皮膜形成に及ぼす影響を評価するため、照射量レベル F4 試験片及びそれを焼鈍した試験片を高 ECP 条件の高温水に浸漬し、試験片表面に形成した酸化皮膜の性状を分析する。

#### b. 供試材、試験方法及び結果

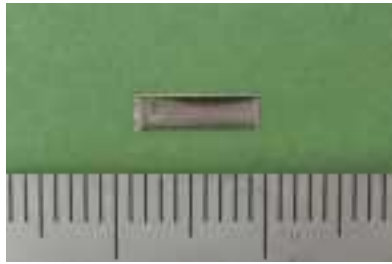
浸漬試験に供した試験片外観写真を図 4.2.1.2-72 に示す。試験片寸法から試験片の識別を行うため、A435(700°C×1h 熱処理材)、A409 および未照射材の寸法を変えて浸漬試験に供した。図 4.2.1.2-73 に浸漬用治具に試験片を取り付けた写真を示す。電氣的絶縁を施すため、試験片はテフロン被覆した Ni ワイヤで浸漬用治具にぶら下げた。

浸漬試験中における温度および溶存酸素の推移を図 4.2.1.2-74 に示す。瞬停の影響により溶存酸素および温度が逸脱する箇所があるものの温度および溶存酸素は設定値の範囲であり、浸漬時間は 1016 時間とした。

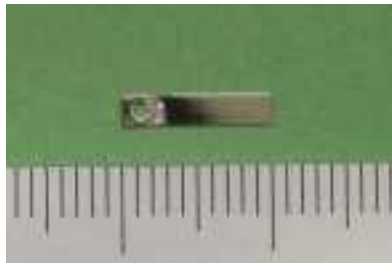




A435(700°C × 1h)



A409



未照射

図 4.2.1.2-72 腐食試験片外観写真



図 4.2.1.2-73 試験治具に取り付けた腐食試験片

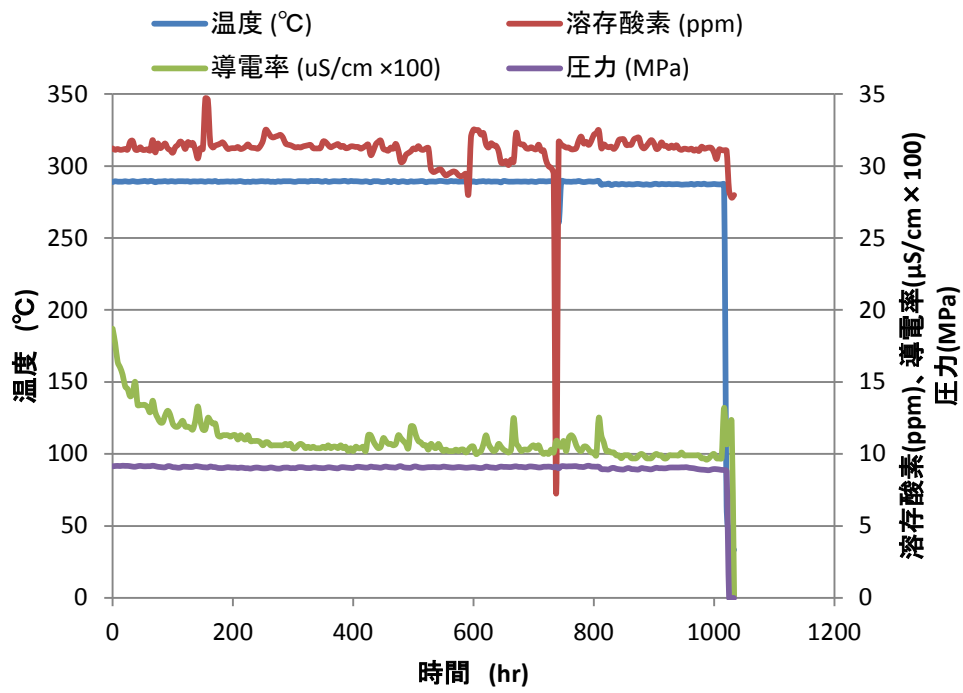


図 4.2.1.2-74 高温水浸漬試験等の推移

### c. ミクロ組織観察

#### ① 外観観察

腐食試験後の外観写真を図 4.2.1.2-75 に示す。いずれの試験片もほぼ同色であり黄褐色に変色していた。

#### ② ミクロ組織観察

##### i) A435(700°C×1h)

A435(700°C×1h)の表面 SEM 観察結果を図 4.2.1.2-76 に示す。表面には主に低倍で観察される白いコントラストの外来由来と思われる付着物が観察された。また、20k 倍で観察すると寸法 200~400nm の酸化物が緻密に試験片表面を覆っていた。図 4.2.1.2-76 右上の SEM 写真で青口部分から薄膜試験片を採取しミクロ組織観察を行った。白破線は粒界である。

Z コントラストで観察したミクロ組織観察結果を図 4.2.1.2-77 に示す。図から明らかなように、母材表面には酸化皮膜が生成していた。腐食試験前に鏡面仕上げし平滑面となっていた母材表面は腐食試験により平滑ではなくなっていた。図 4.2.1.2-77(2)には酸化皮膜および母材の回折図形を示した。回折図形は酸化皮膜がスピネル構造を有していることを示している。EDS マップを図 4.2.1.2-78 に示す。酸化皮膜は主に Fe と Ni を含んでいた。酸化皮膜から母材にかけての線分析結果を図 4.2.1.2-79 に示す。酸化皮膜部分では Fe と Ni のカウント数が高いことがわかる。また、line2 では酸化皮膜と母材の境界で Fe よりも Cr の立ち上がりが早くなっており、酸化皮膜と母材の境界に Cr 濃度>Fe 濃度となる箇所があることを示している。

##### ii) A409

A409 の表面 SEM 観察結果を図 4.2.1.2-80 に示す。表面には主に低倍で観察される白いコントラストの外来由来と思われる付着物が観察された。また、20k 倍で観察すると寸法 200~400nm の酸化物が緻密に試験片表面を覆っていた。図 4.2.1.2-80 右上の SEM 写真で青口部分から薄膜試験片を採取しミクロ組織観察を行った。白破線は粒界である。

Z コントラストで観察したミクロ組織観察結果をに示す。図から明らかなように、母材表面には酸化皮膜が生成していた。腐食試験前に鏡面仕上げし平滑面となっていた母材表面は腐食試験により平滑ではなくなっていた。図 4.2.1.2-81(2)には酸化皮膜および母材の回折図形を示した。回折図形は酸化皮膜がスピネル構造を有していることを示している。EDS マップを図 4.2.1.2-82 に示す。酸化皮膜は主に Fe と Ni を含んでいた。酸化皮膜から母材にかけての線分析結果を図 4.2.1.2-83 に示す。酸化皮膜部分では Fe と Ni のカウント数が高いことがわかる。また、line1、line2 共に酸化皮膜と母材の境界で Fe よりも Cr の立ち上がりが早くなっており、酸化皮膜と母材の境界に Cr 濃度>Fe 濃度となる箇所があることを示している。

### iii)未照射材

未照射材の表面 SEM 観察結果を図 4.2.1.2-84 に示す。表面には主に低倍で観察される白いコントラストの外来由来と思われる付着物が観察された。また、20k 倍で観察すると寸法 200~400nm の酸化物が緻密に試験片表面を覆っていた。図 4.2.1.2-84 右上の SEM 写真で青口部分から薄膜試験片を採取しマイクロ組織観察を行った。白破線は粒界である。

Z コントラストで観察したマイクロ組織観察結果を図 4.2.1.2-85 に示す。図から明らかのように、母材表面には酸化皮膜が生成していた。腐食試験前に鏡面仕上げし平滑面となっていた母材表面は腐食試験により平滑ではなくなっていた。図 4.2.1.2-85(2)には酸化皮膜および母材の回折図形を示した。回折図形は酸化皮膜がスピネル構造を有していることを示している。EDS マップを図 4.2.1.2-86 に示す。酸化皮膜は主に Fe と Ni を含んでいた。酸化皮膜から母材にかけての線分析結果を図 4.2.1.2-87 に示す。酸化皮膜部分では Fe と Ni のカウント数が高いことがわかる。また、line1、line2 共に酸化皮膜と母材の境界で Fe よりも Cr の立ち上がりは早くなっており、酸化皮膜と母材の境界に Cr 濃度>Fe 濃度となる箇所があることを示している。



図 4.2.1.2-75 腐食試験片外観写真

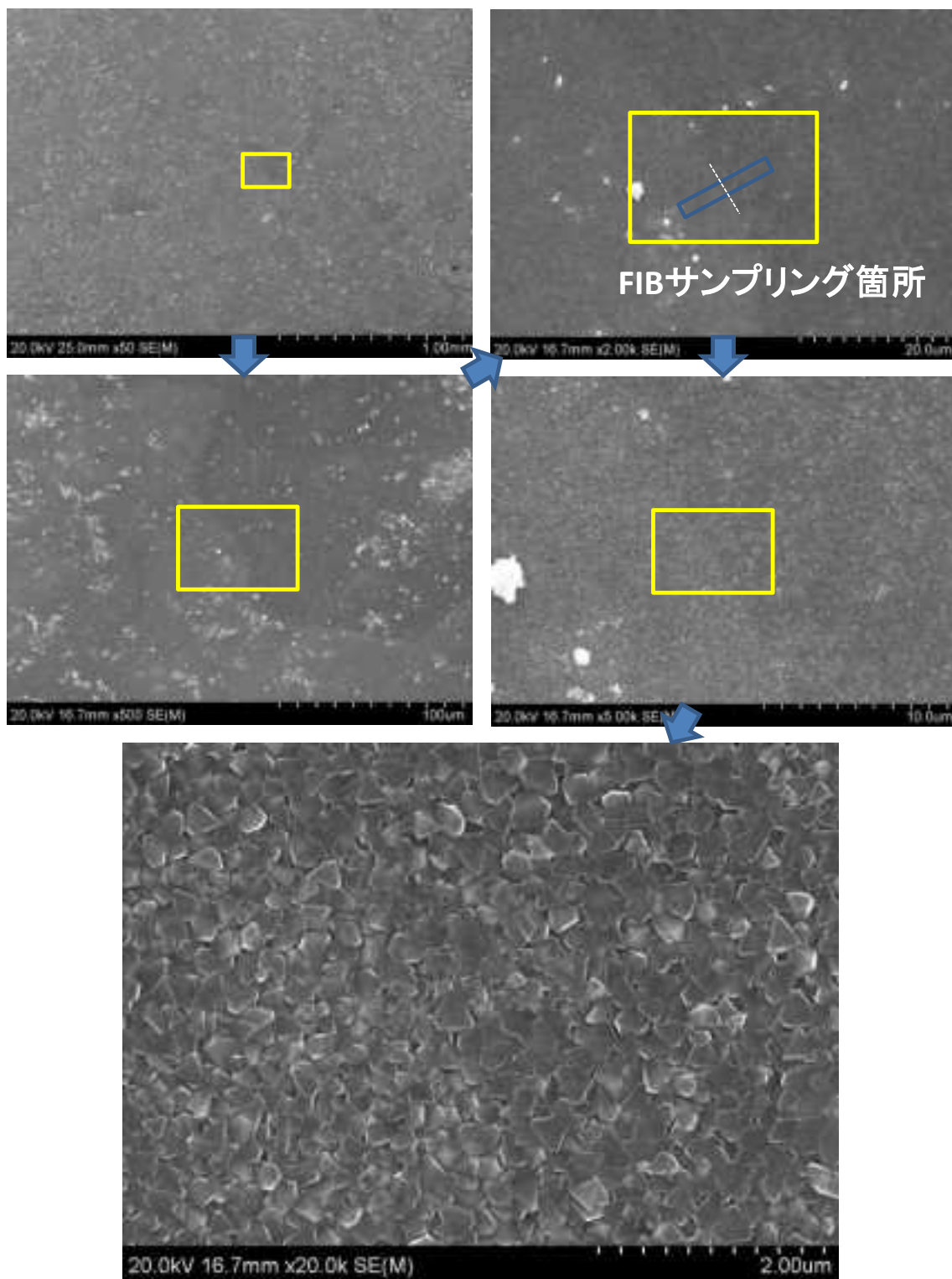


図 4.2.1.2-76 A435(700°C×1h)の腐食試験後 SEM 写真

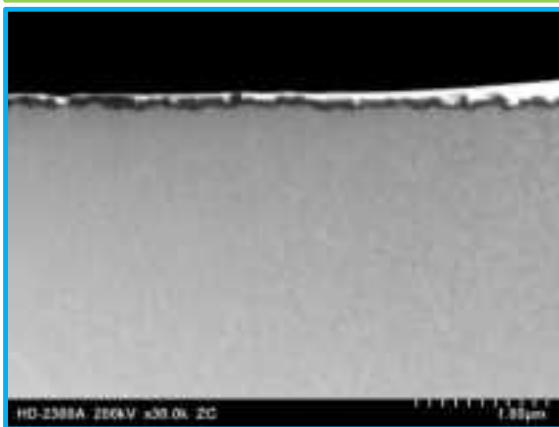
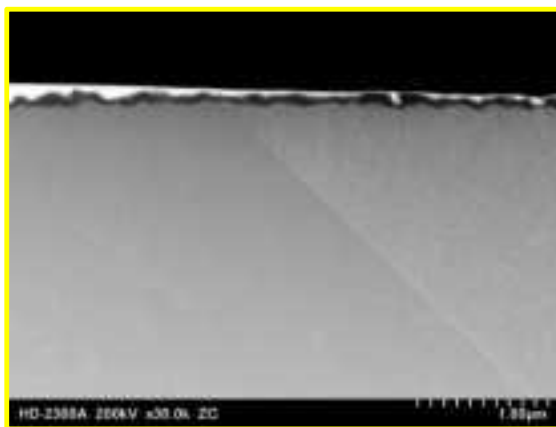
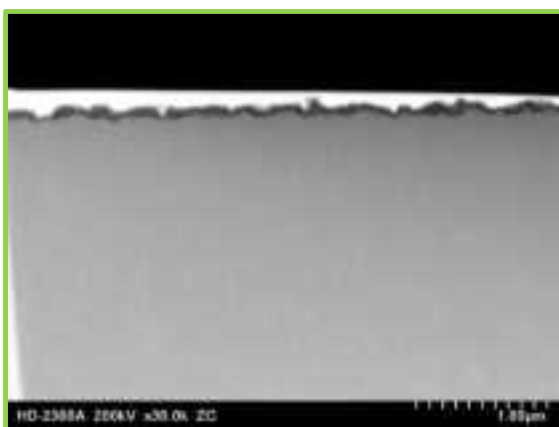
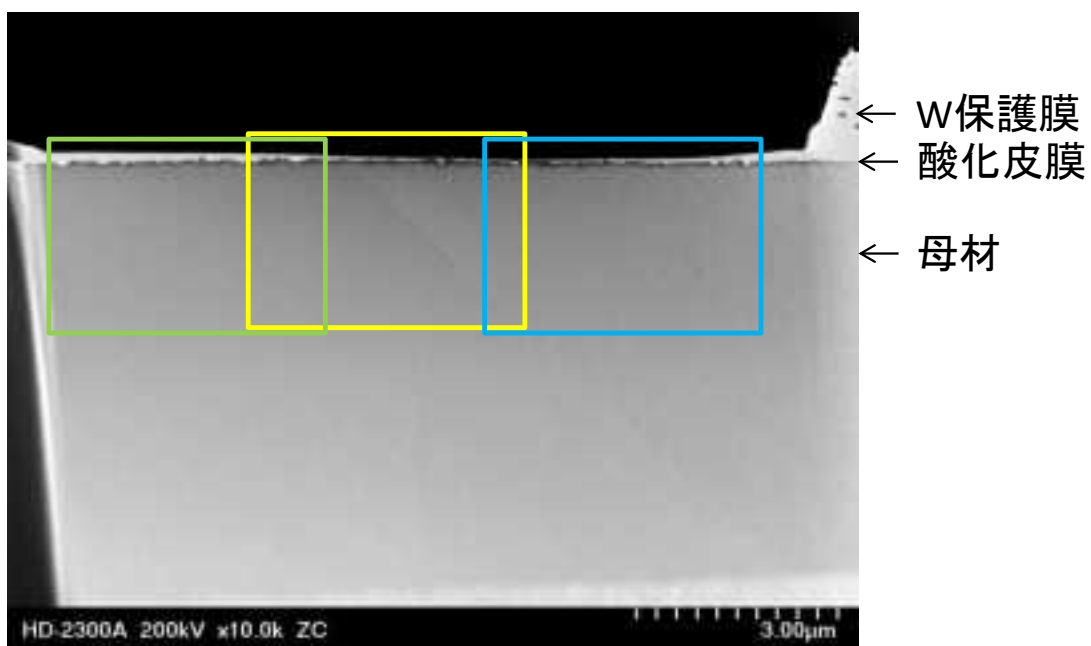


図 4.2.1.2-77(1) A435(700°C×1h)のマイクロ組織写真



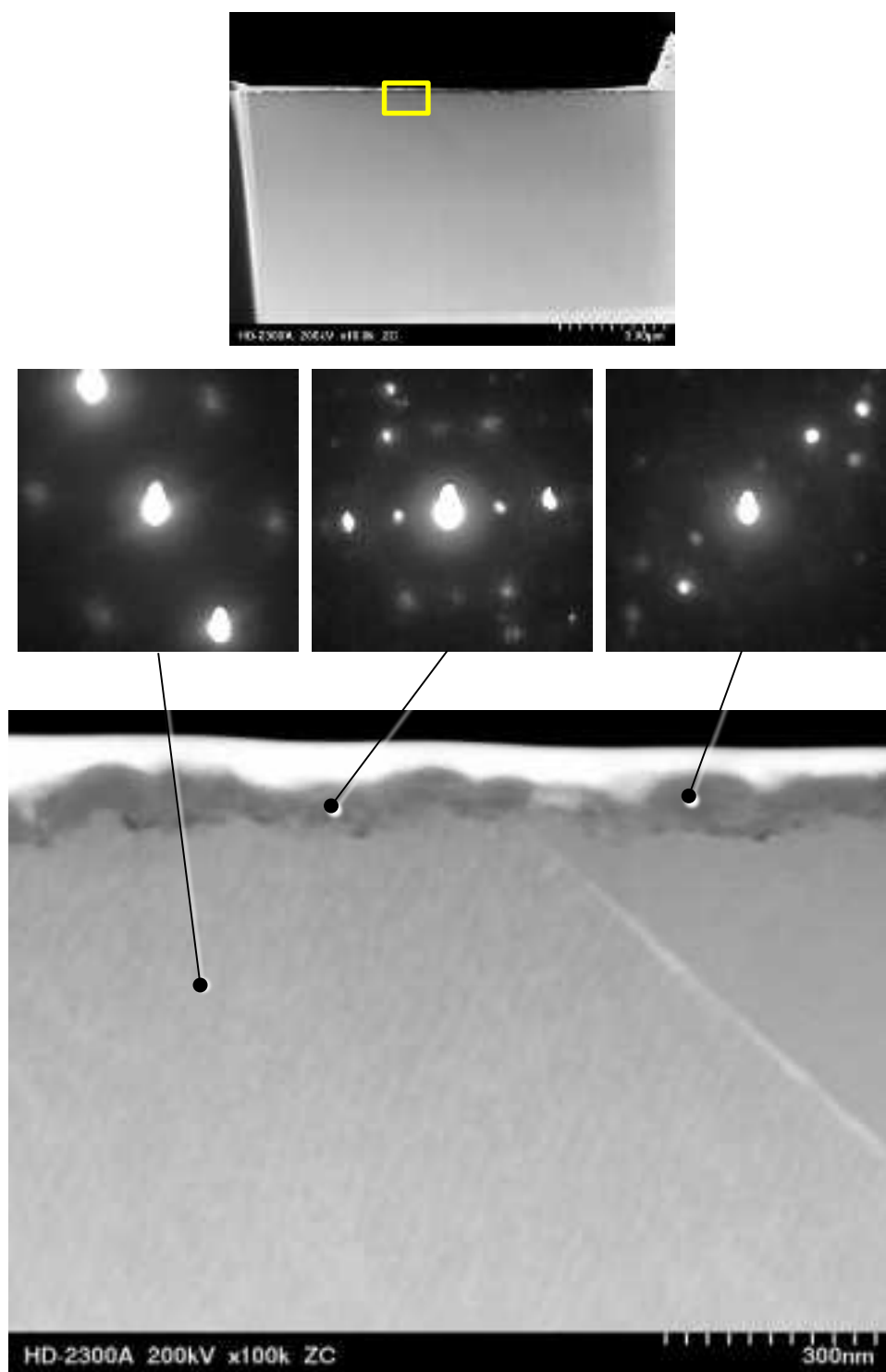


図 4.2.1.2-77(2) A435(700°C×1h)のマイクロ組織写真

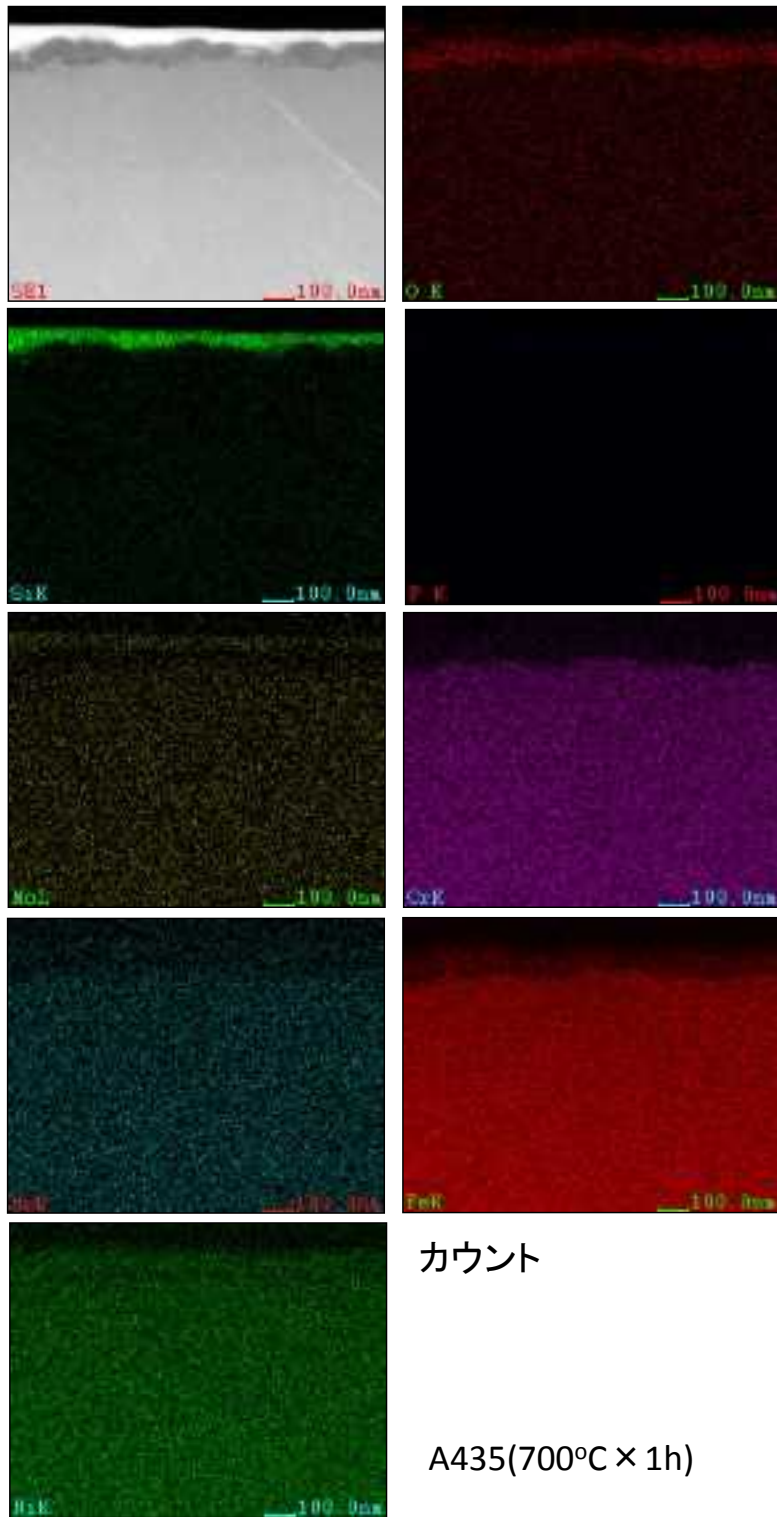


図 4.2.1.2-78 A435(700°C × 1h)の EDS マップ(カウント)

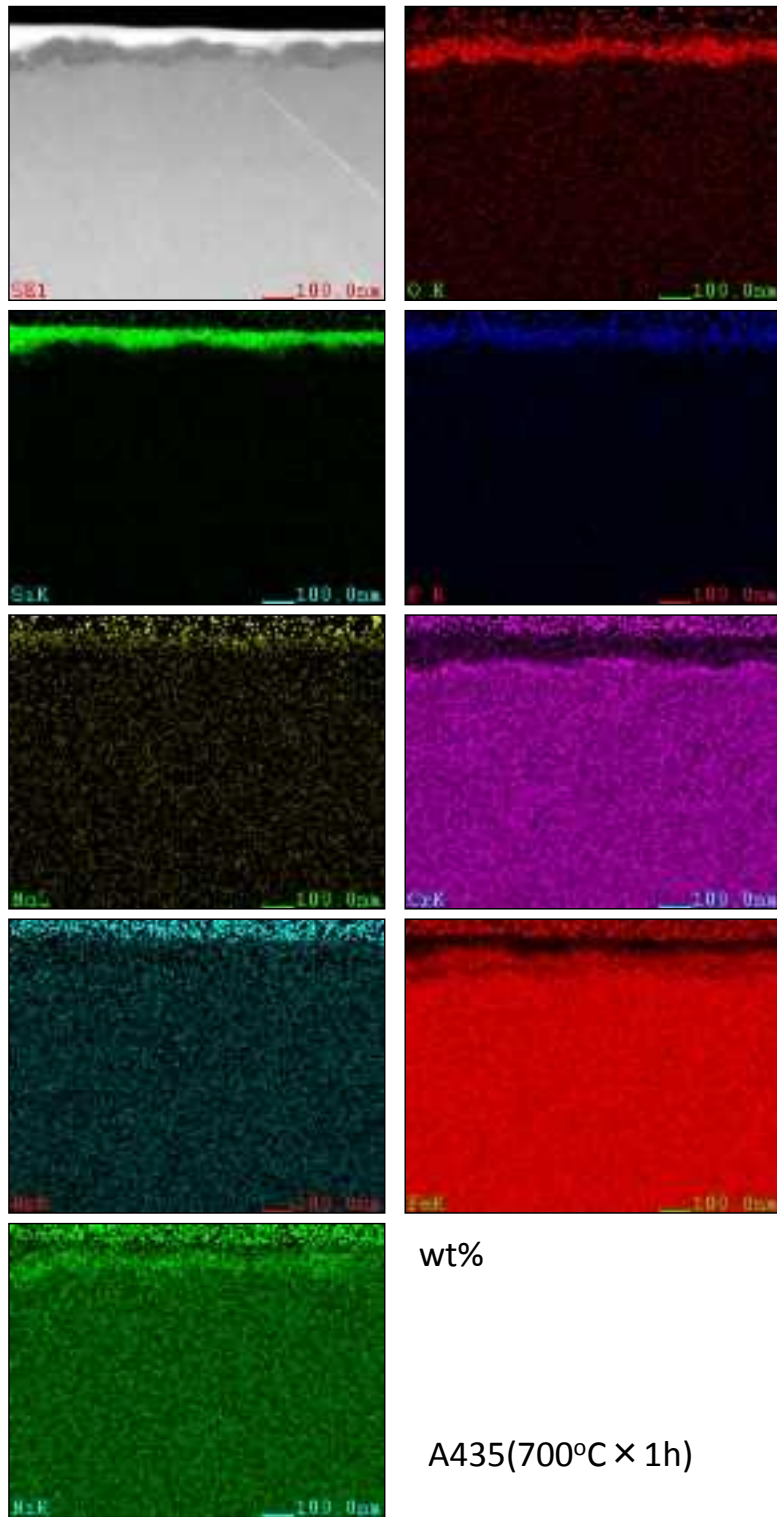


図 4.2.1.2-78(2) A435(700°C × 1h)の EDS マップ(wt%)

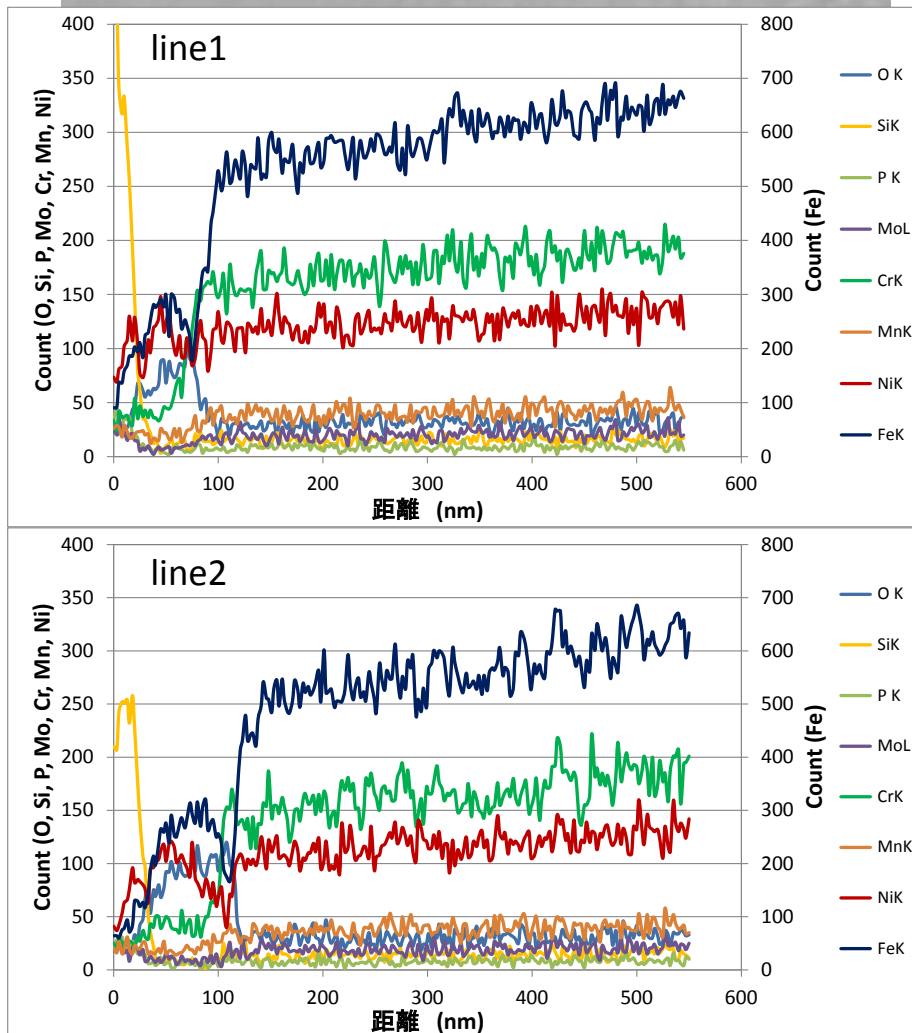
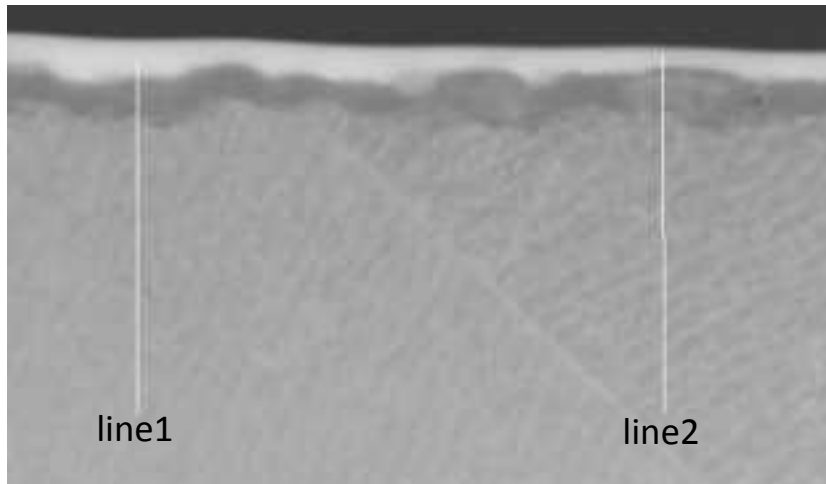


図 4.2.1.2-79 A435(700°C×1h)の線分析

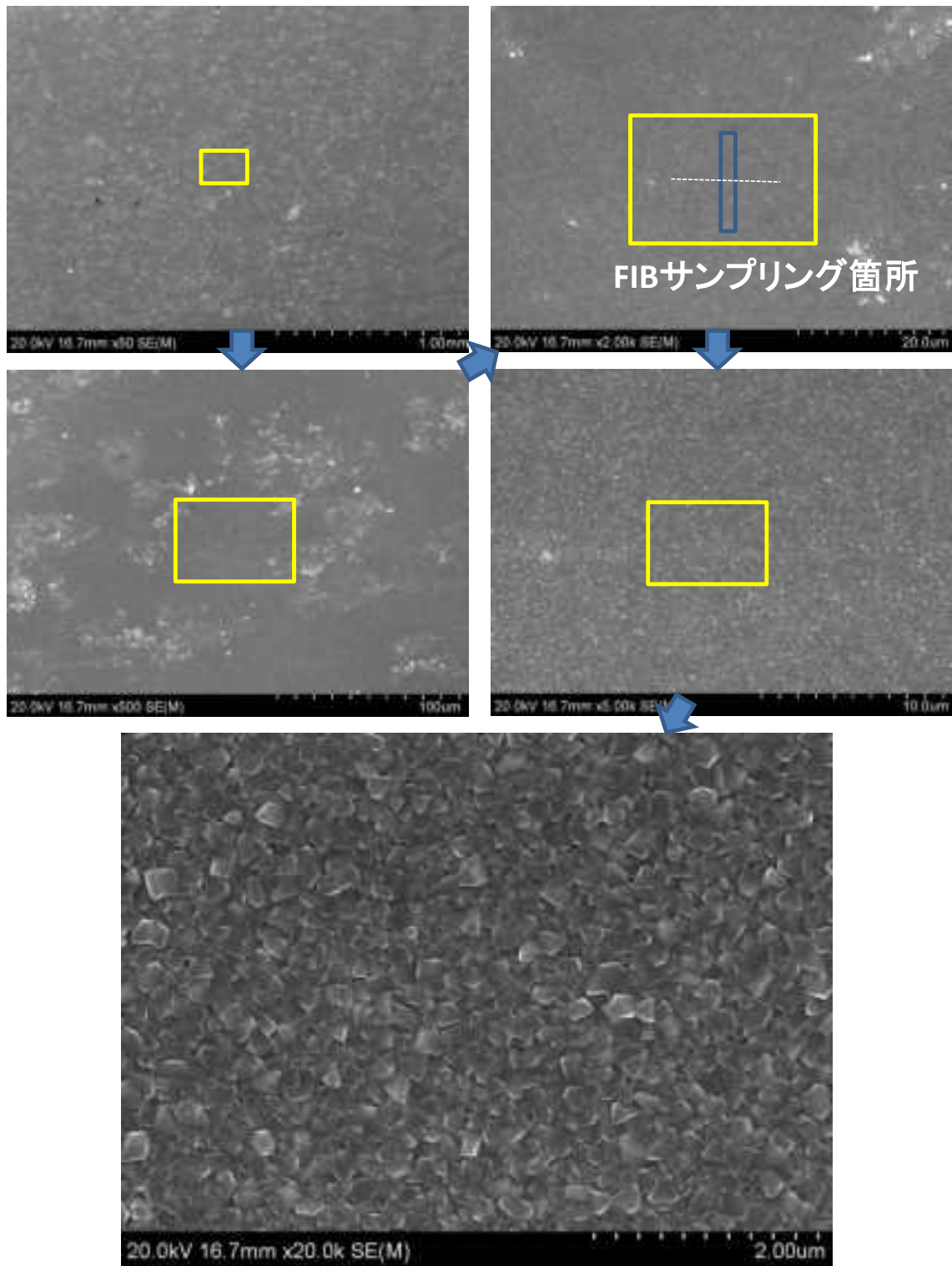


図 4.2.1.2-80 A409 の腐食試験後 SEM 写真

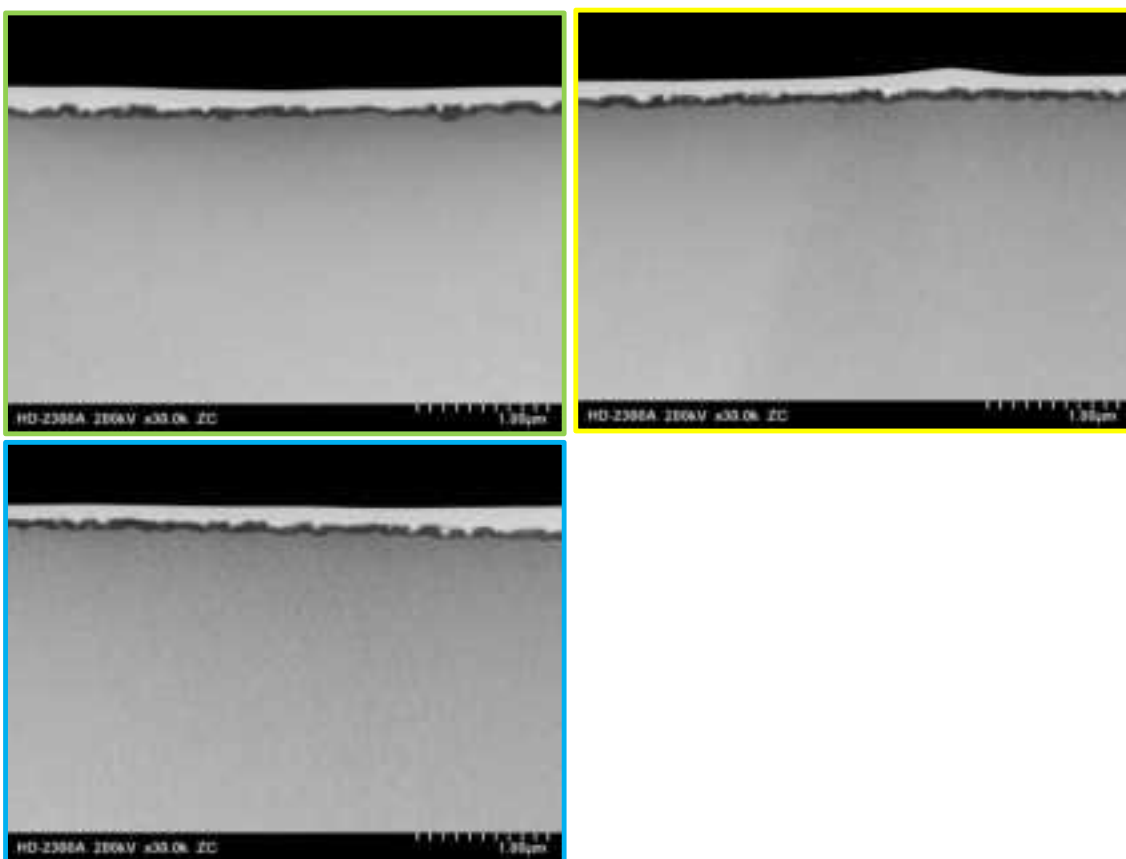
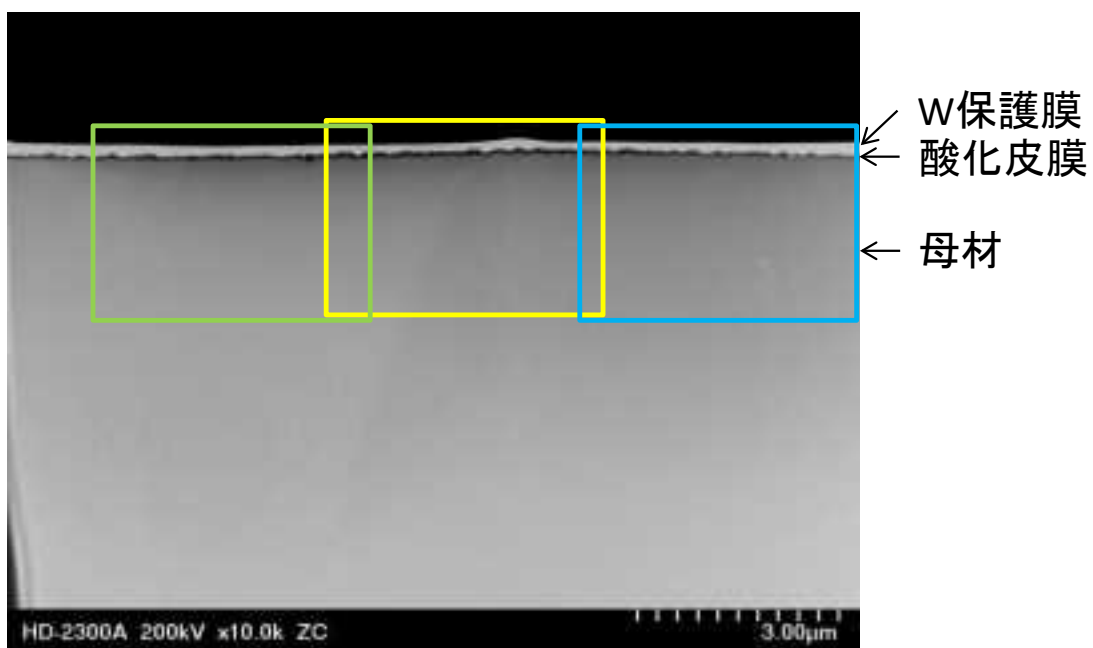


図 4.2.1.2-81(1) A409 のマイクロ組織写真

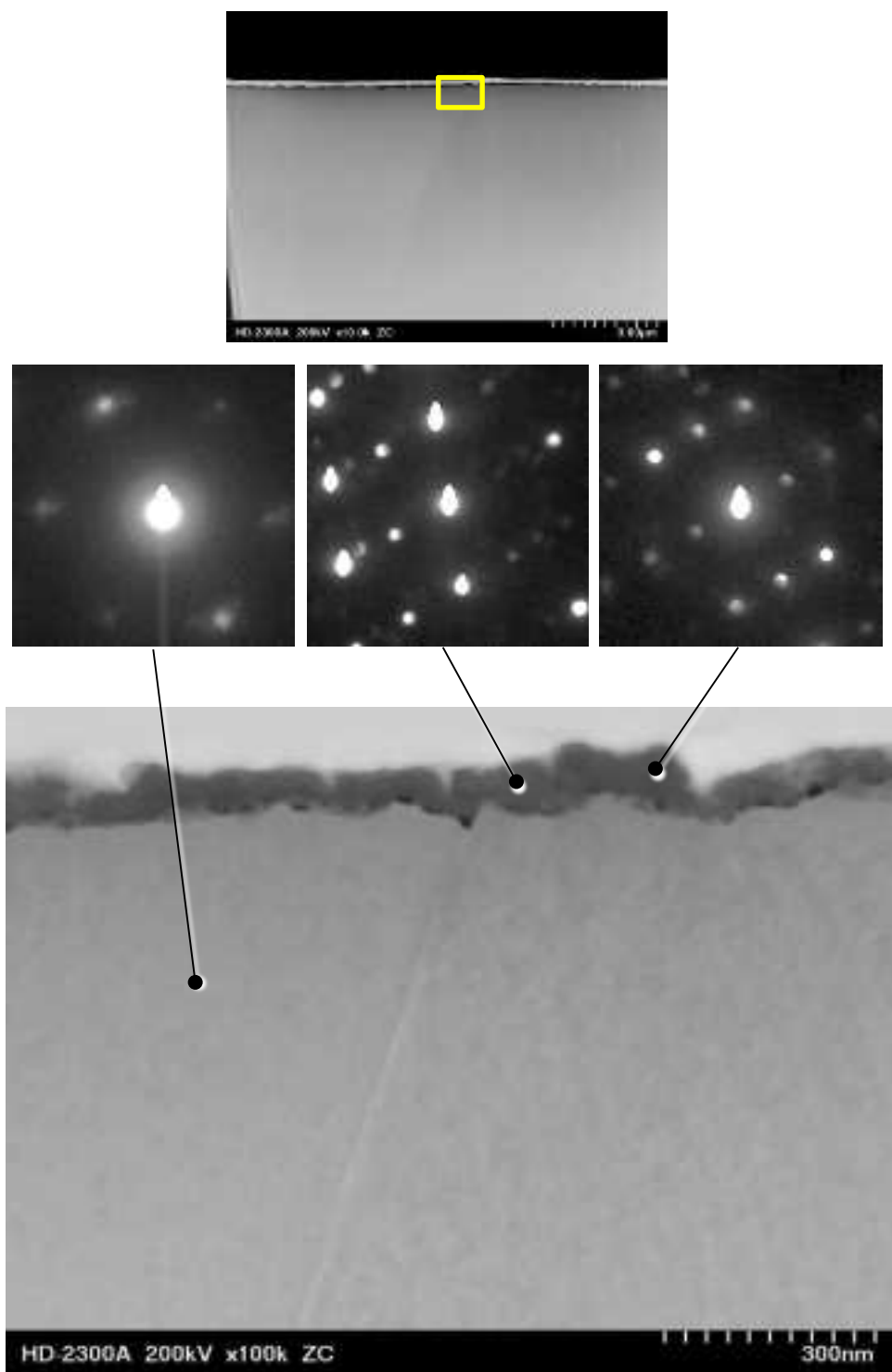


図 4.2.1.2-81(2) A409 のマイクロ組織写真

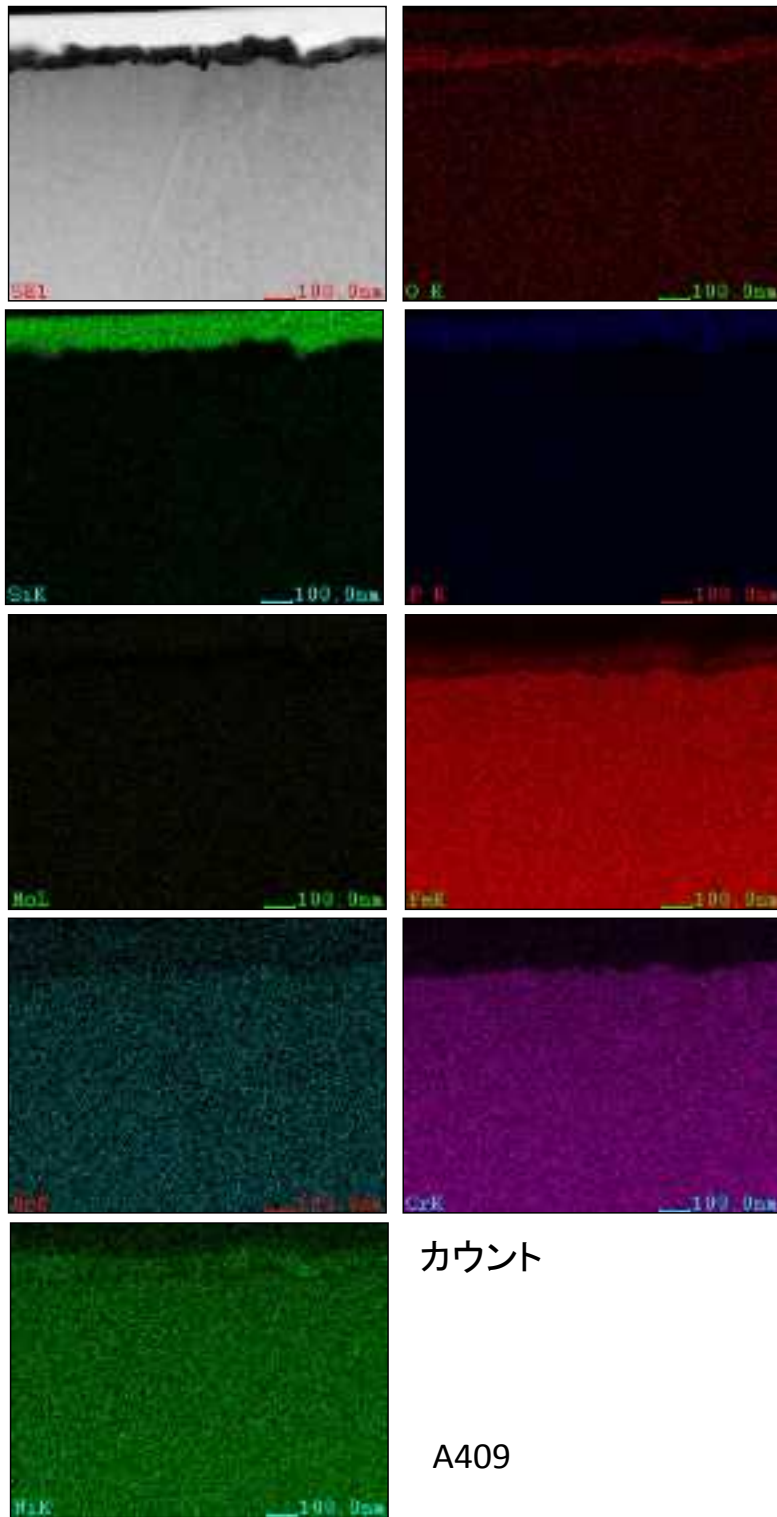


図 4.2.1.2-82(1) A409 の EDS マップ(カウント)



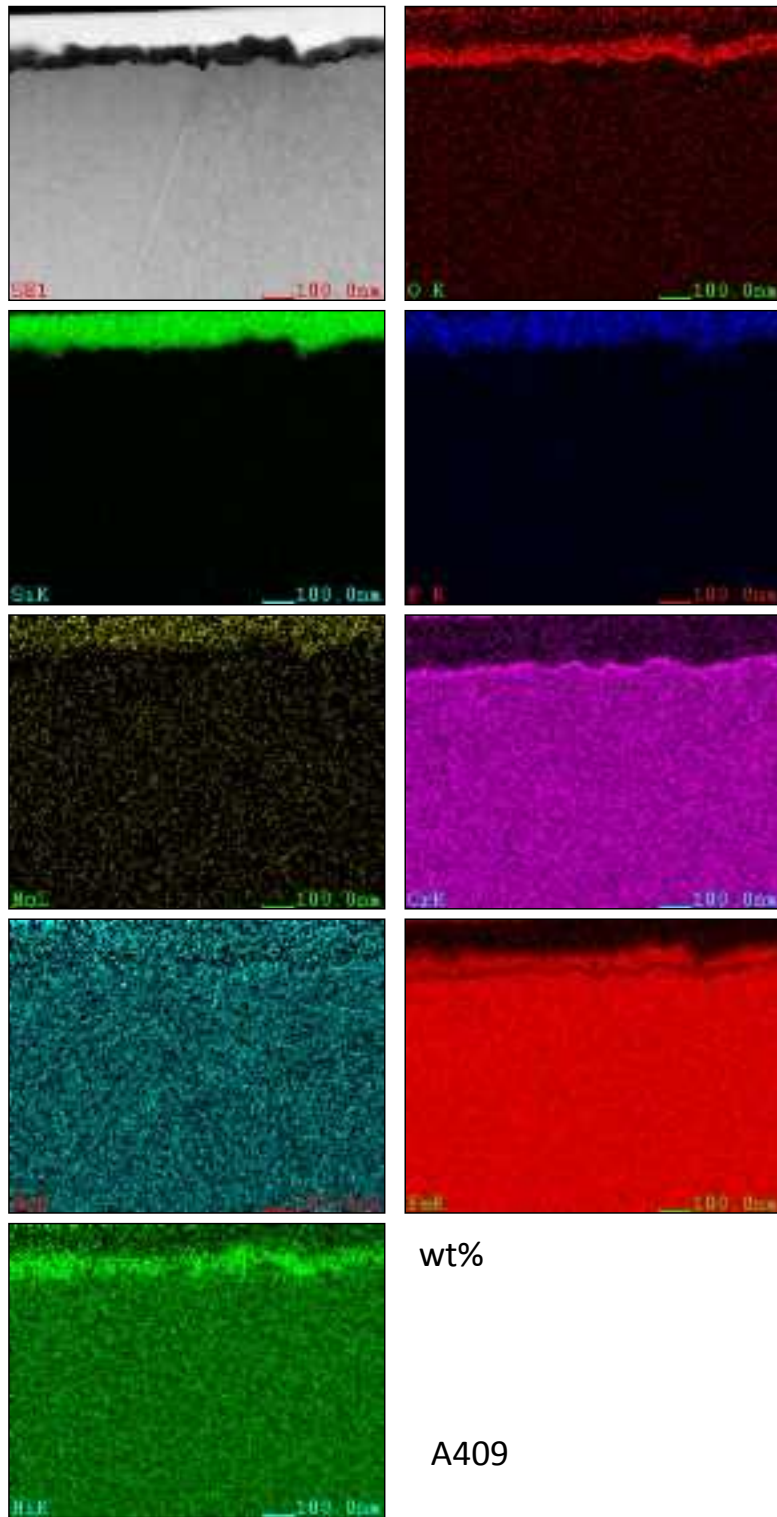


図 4.2.1.2-82(2) A409 の EDS マップ(wt%)

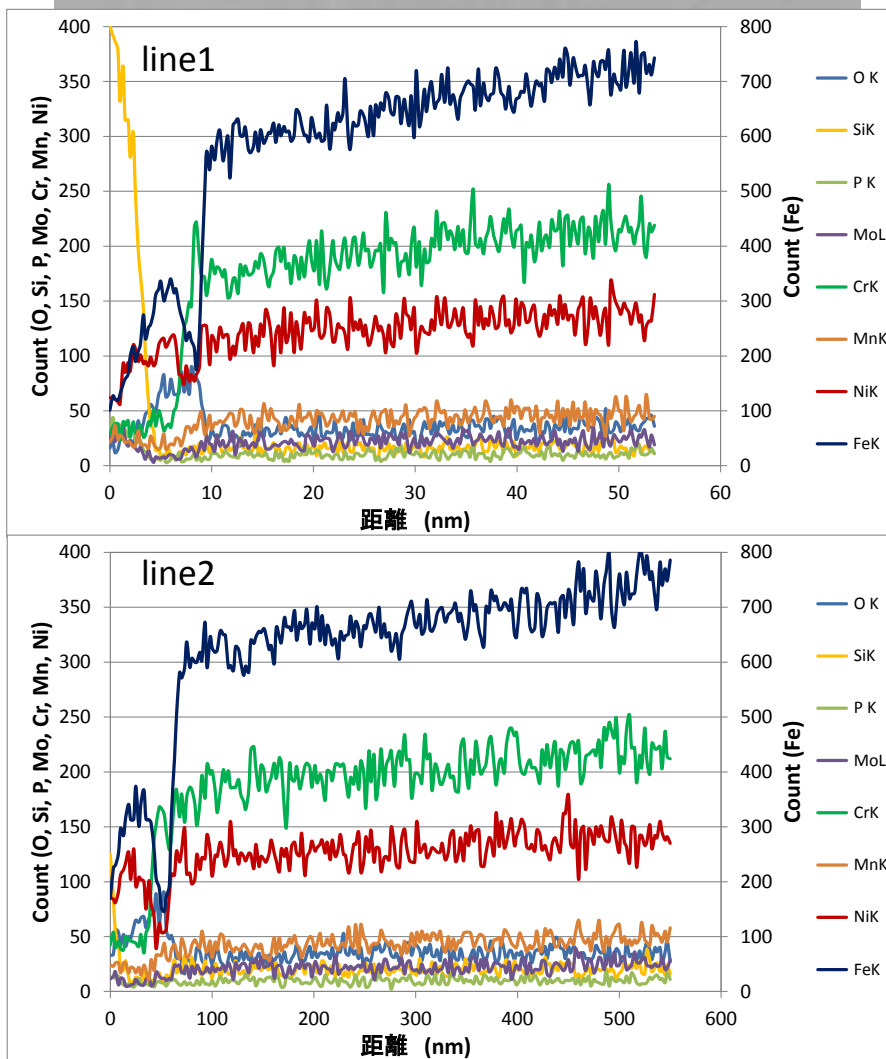
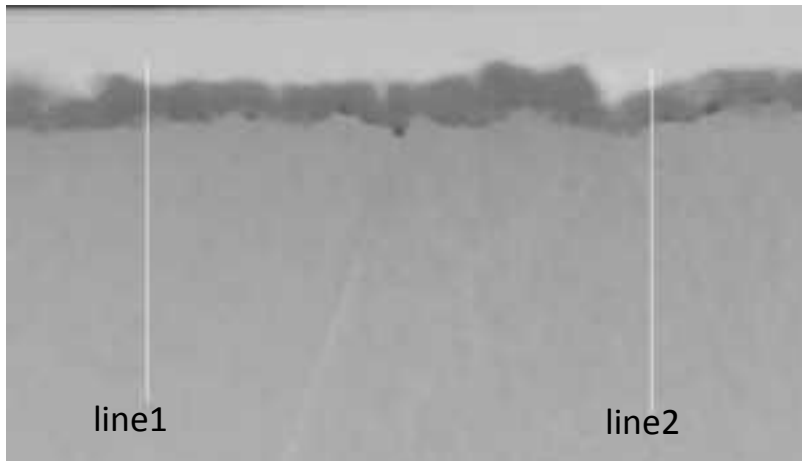


図 4.2.1.2-83 A409 の線分析

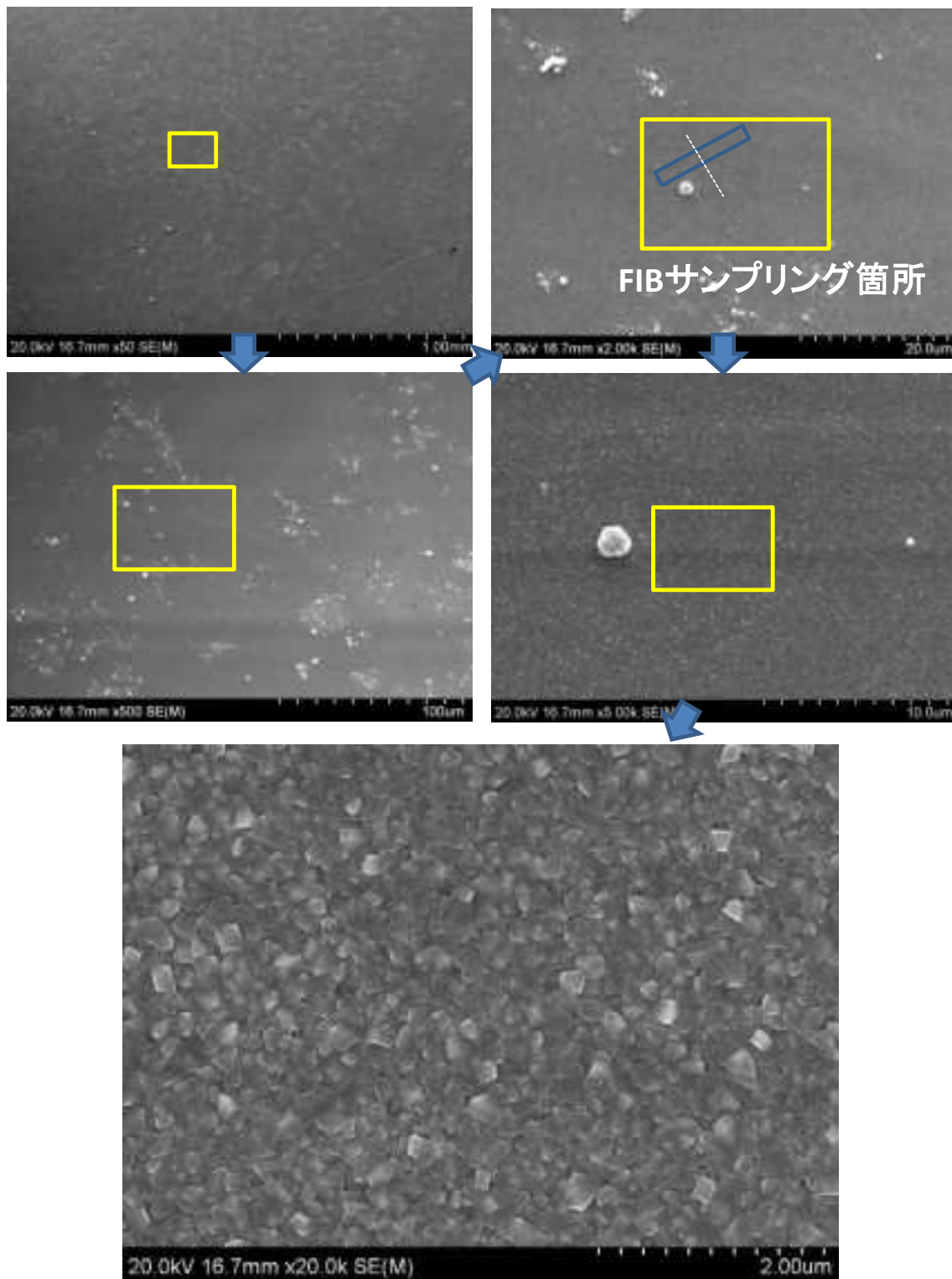


図 4.2.1.2-84 未照射材の腐食試験後 SEM 写真

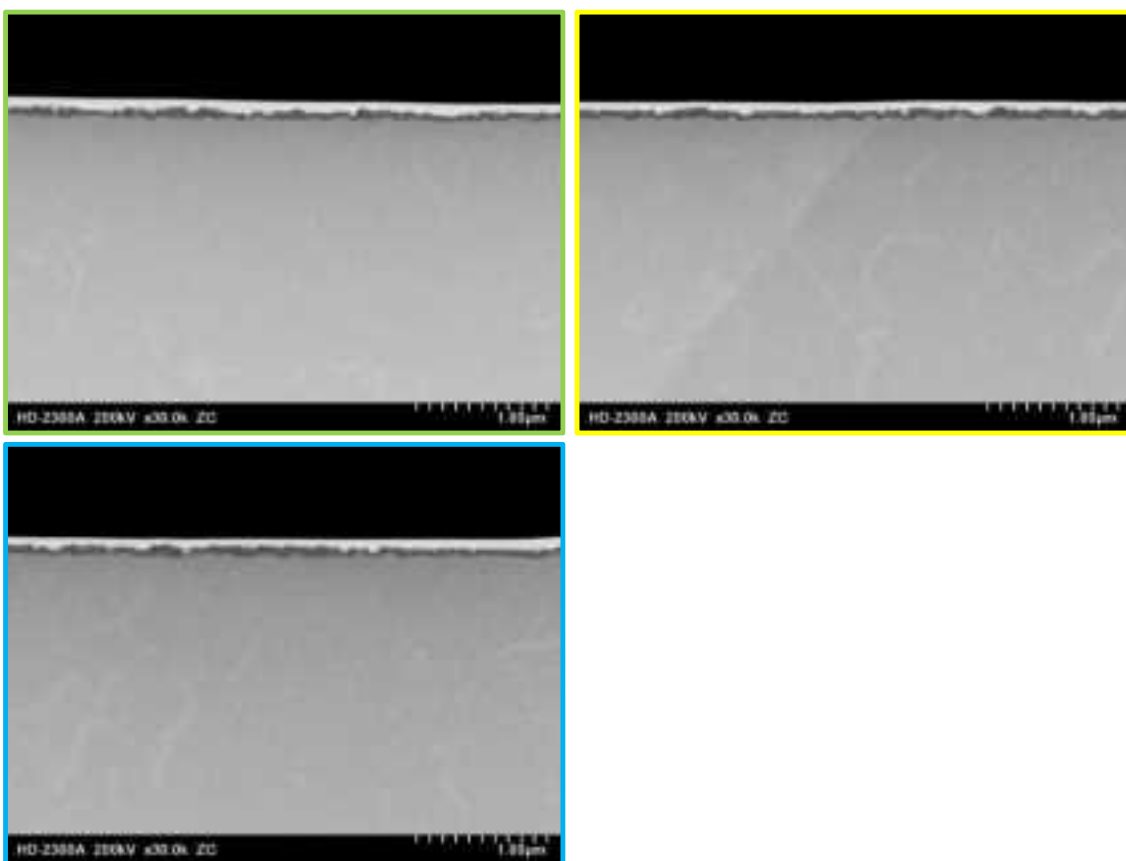
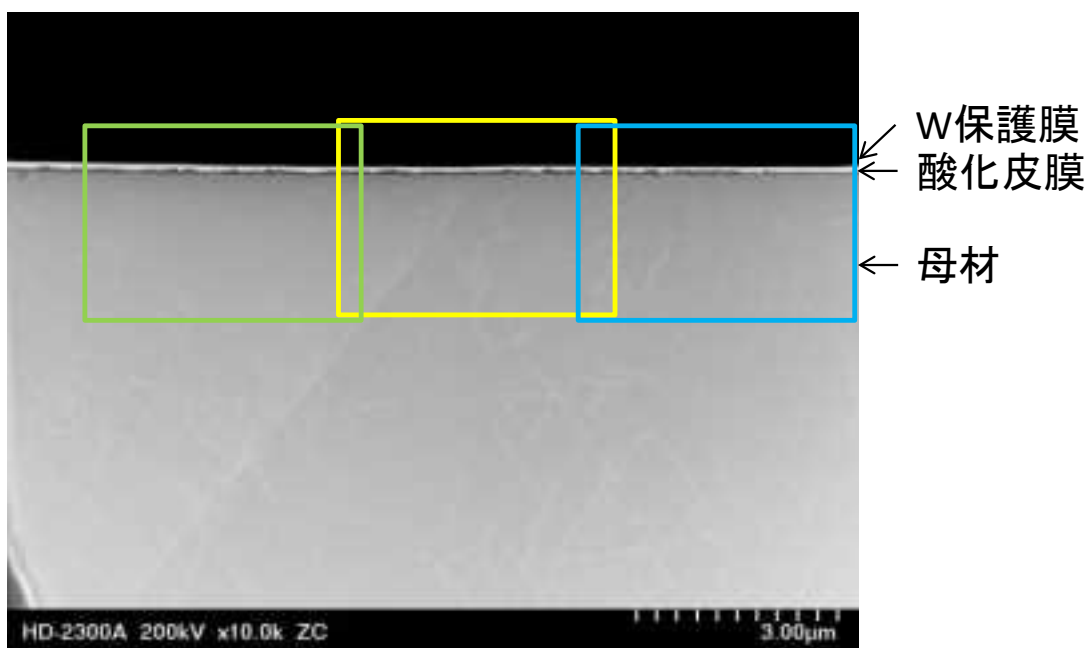


図 4.2.1.2-85(1) 未照射材のマイクロ組織写真

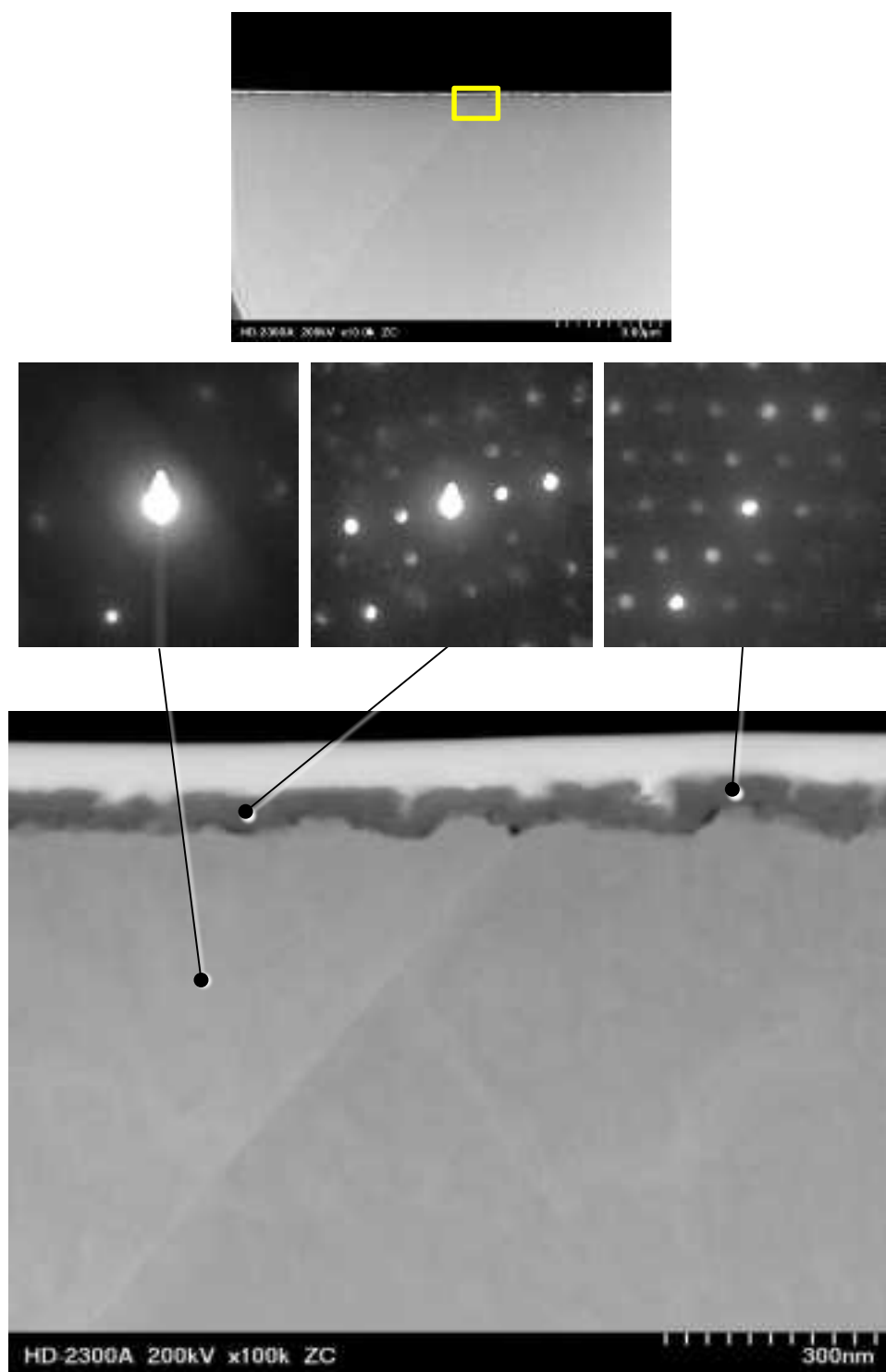


図 4.2.1.2-85(2) 未照射材のマイクロ組織写真

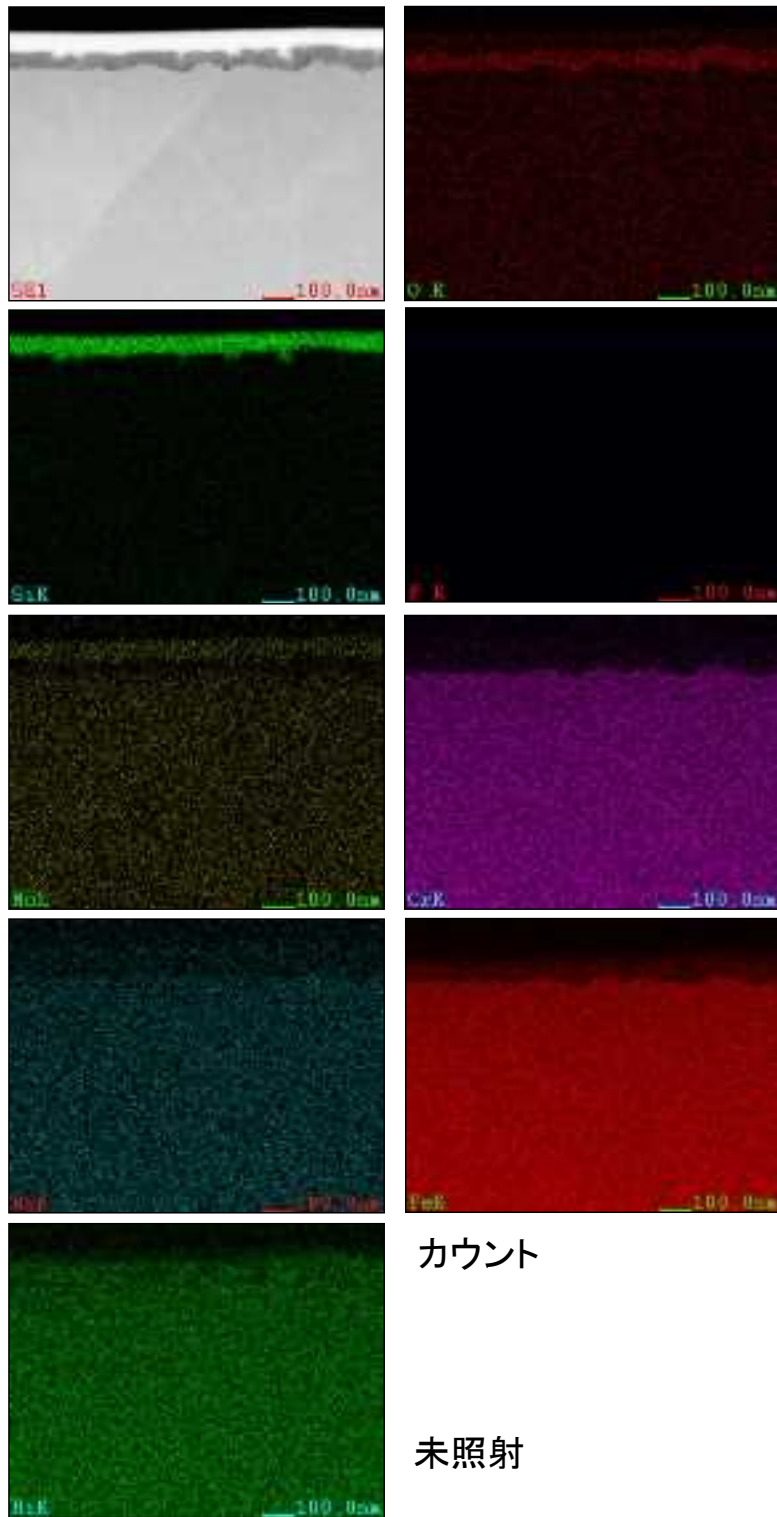


図 4.2.1.2-86(1) 未照射材の EDS マップ(カウント)

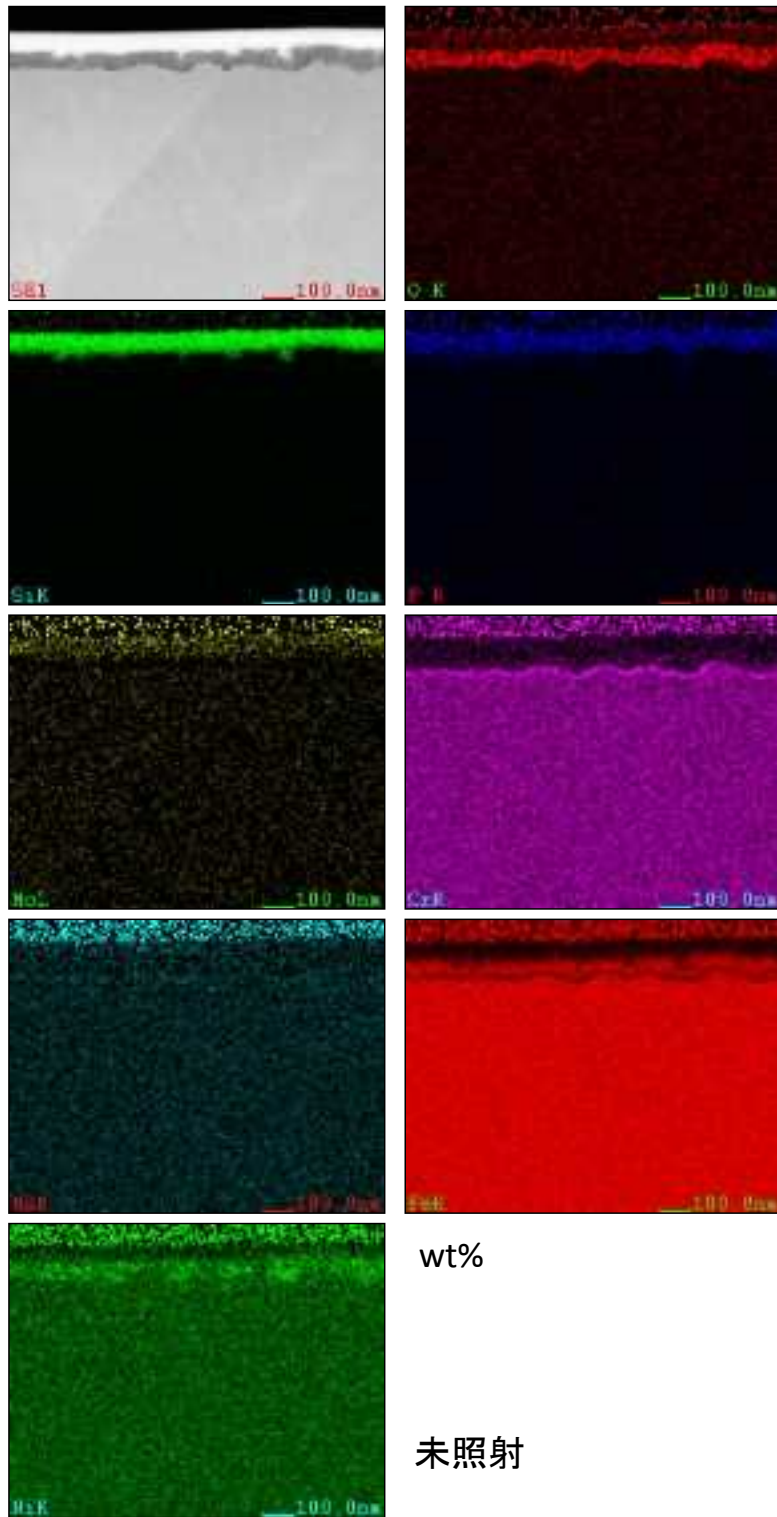


図 4.2.1.2-86(2) 未照射材の EDS マップ(wt%)

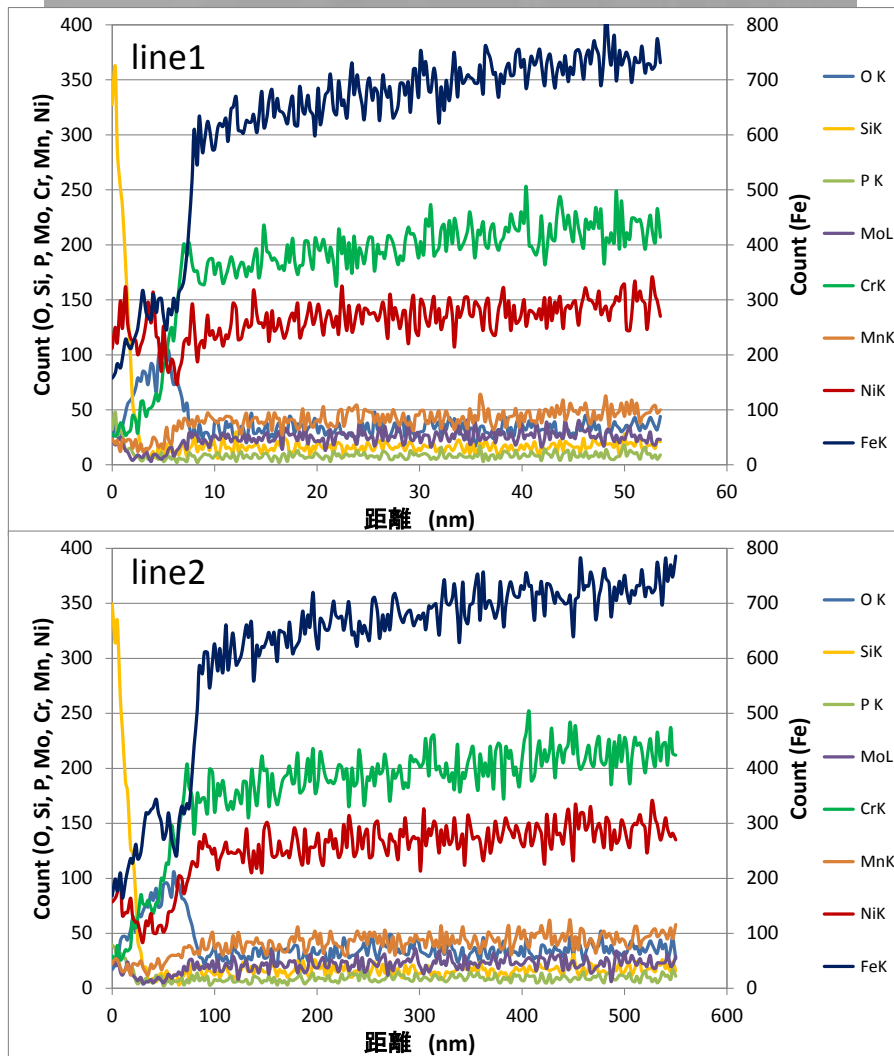
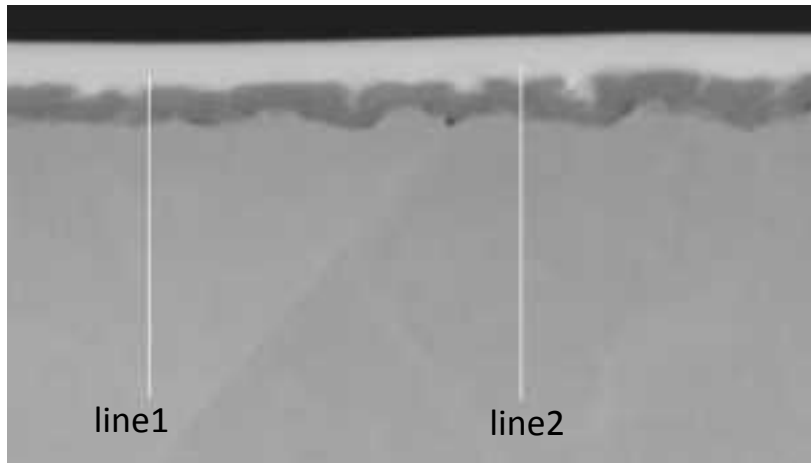


図 4.2.1.2-87 未照射材の線分析



(4) 4.2.1.2章の参考文献

- [4.2.1.2-1] 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
- [4.2.1.2-2] M. Itow et. al., “SCC GROWTH RATES AND REFERENCE CURVES FOR LOW CARBON STAINLESS STEELS IN BWR ENVIRONMENT”, PVP-Vol. 479, Residual Stress, Fracture, and Stress Corrosion Cracking, July 25-29, 2004, San Diego, California USA

#### 4.2.2 き裂進展速度に及ぼす添加物影響評価試験

##### (1)ニッケル基合金のPWSCCき裂進展速度に及ぼす亜鉛(Zn)及び水素添加量の影響評価

###### a. 背景と目的

加圧水型軽水炉(PWR)の一次系配管、機器、圧力バウンダリを構成する構造物に用いられるニッケル基合金(Alloy 600)は PWR 一次系冷却(RCS)水環境下で PWSCC(Primary Water Stress Corrosion Cracking)感受性を有することが知られており、近年、PWSCC 対策の一環として、RCS 水への水素注入量の最適化に関する検討が進められている。加えて、PWR 一次系に係る被ばく線量低減対策の一環として、実機において RCS 水への微量添加元素(亜鉛: Zn)注入が適用されており、ニッケル基合金の PWSCC 感受性への影響確認に資するデータの収集が必要となってきた。

本項では、PWR 一次系 RCS 水環境における DH(または腐食電位: ECP)、Zn 注入の有無がニッケル基合金の PWSCC き裂進展挙動に及ぼす影響に着目し、PWR 一次系模擬環境においてニッケル基合金の SCC(PWSCC)試験を実施し、SCC と添加元素(Zn)と ECP の関連について検討を行った。

###### b. 試験方法

###### ①供試材及び試験片

PWSCC 試験に供した 600 合金の化学成分表及び機械特性を表 4.2.2-1 及び表 4.2.2-2 に示す。手配材料が規格を満足していることを確認し、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 TL 方向に 0.7T-CT 試験片を切り出した。

なお、試験片には試験期間中に有意なき裂が進展するように 10%の一軸引張り冷間加工を付与し、SCC 感受性が高くなる加工付与方向にき裂が進行する方向(T-L、図 4.2.2-2 及び図 4.2.2-3 参照)に切り出しを行った。

PWSCC き裂進展評価として従来から適用されている CT 試験片を採用し試験容器寸法を考慮し 0.7T-CT 試験片により試験を実施した(図 4.2.2-1)。なお、CT 試験片に対しては約 2mm の疲労予き裂を付与し、SCC 試験に供した。

###### ②試験水質条件

PWSCC 試験水質としては PWSCC 感受性が高く、過去に独立行政法人 原子力安全基盤機構(JNES)で取得されている PWSCC 進展評価の水質(1800ppm as B、3.5ppm as Li)を採用した。なお、試験温度は実機温度条件となる 320℃、亜鉛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。

###### ③き裂進展モニタリング手法

試験中のき裂進展挙動は PDM 計測にて行う。なお計測及び評価手法は JNES から発行されている「H17 年度 Ni 基合金応力腐食割れ(SCC)進展評価技術調査(定荷重試験)に

関する報告書」記載の内容に準拠した。当該ページの抜粋を図 4.2.2-5 及び図 4.2.2-6 に示す。

#### ④循環式試験装置

本試験に供した循環式試験装置(循環式オートクレーブ)の外観及び代表系統図を図 4.2.2-7～図 4.2.2-11 に示す。

本試験においては各 DH 濃度条件に対して個別に試験装置を調整した(PL-3B (5 cc/kg 条件)、PL-3A (30 cc/kg 条件)、PL-6(50 cc/kg 条件))。

なお、注入した Zn は試験装置構成部材(配管、試験容器等)の内面酸化皮膜中に取り込まれるため、試験開始前に予備運転を実施し、試験容器及び配管系統の内面酸化物に Zn を事前に取り込ませることで、SCC 試験中に安定した Zn 濃度管理ができるように調整を行った。

表 4.2.2-1 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 4.2.2-2 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

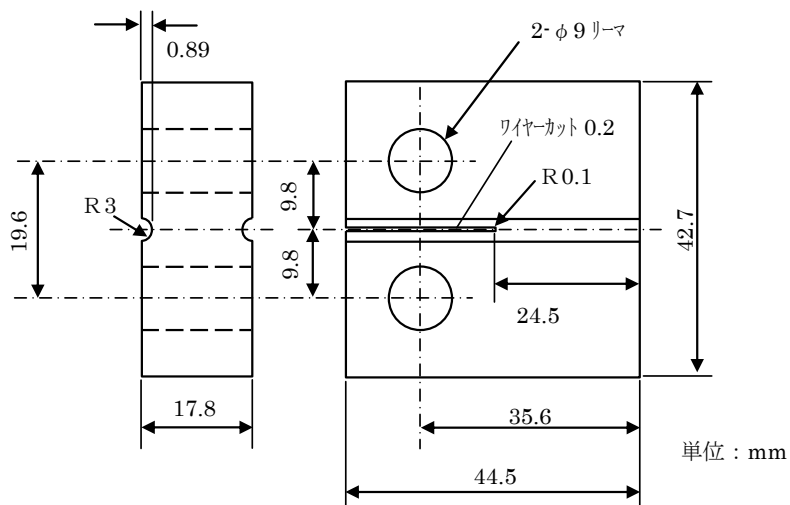


図 4.2.2-1 0.7T-CT 試験片の構造及び寸法[4.2.2-2]

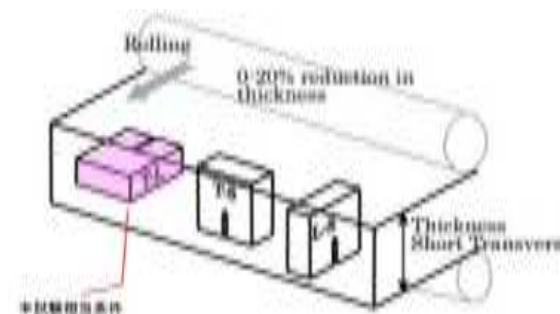


図 4.2.2-2 試験片の冷間圧延(加工)方向[4.2.2-2]

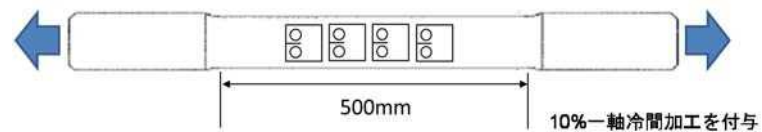


図 4.2.2-3 冷間加工付与用素材と CT 試験片切り出しイメージ

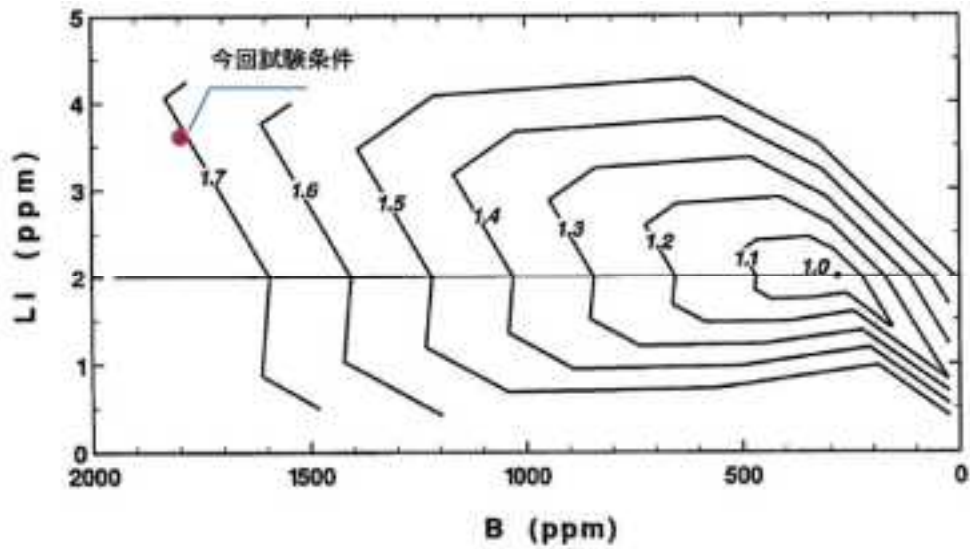


図 4.2.2-4 PWSCC 感受性に対する B,Li 濃度の関係  
(280ppm as B, 2ppm as Li に対する SCC 破面率比データ)<sup>[4.2.2-3]</sup>

## 測定原理

・ 交番定電流による電位差（電圧）の計測

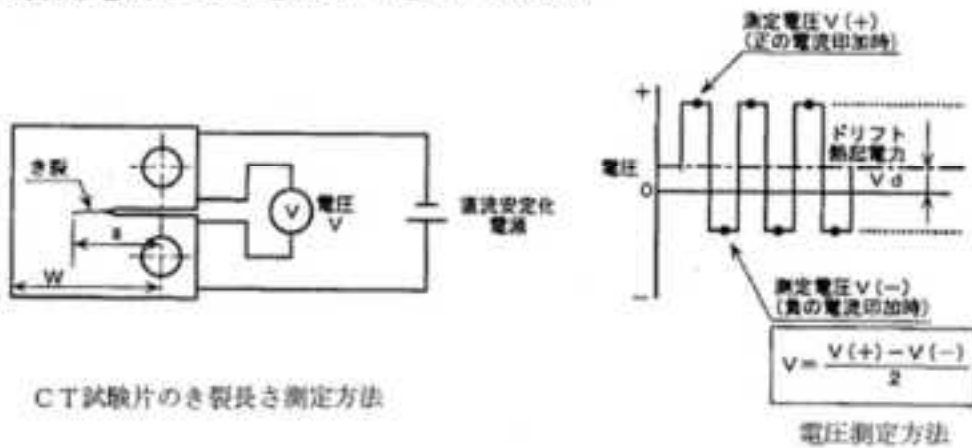


図 3.2.1-10 電位差法によるき裂長さ測定方法

図 4.2.2-5 電位差法によるき裂長さ測定方法<sup>[4.2.2-1]</sup>

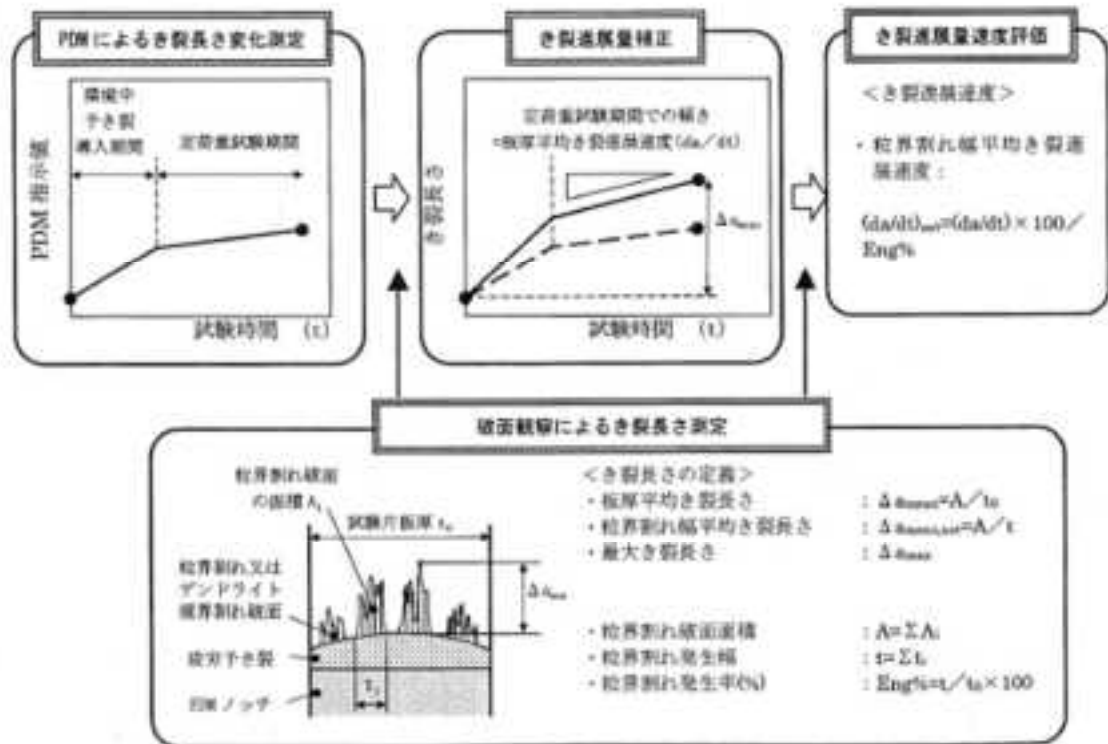


図 3.2.1-11 電位差法により測定されたき裂長さとき裂進展速度の評価方法

図 4.2.2-6 電位差法により測定されたき裂長さとき裂進展速度の評価方法[4.2.2-1]



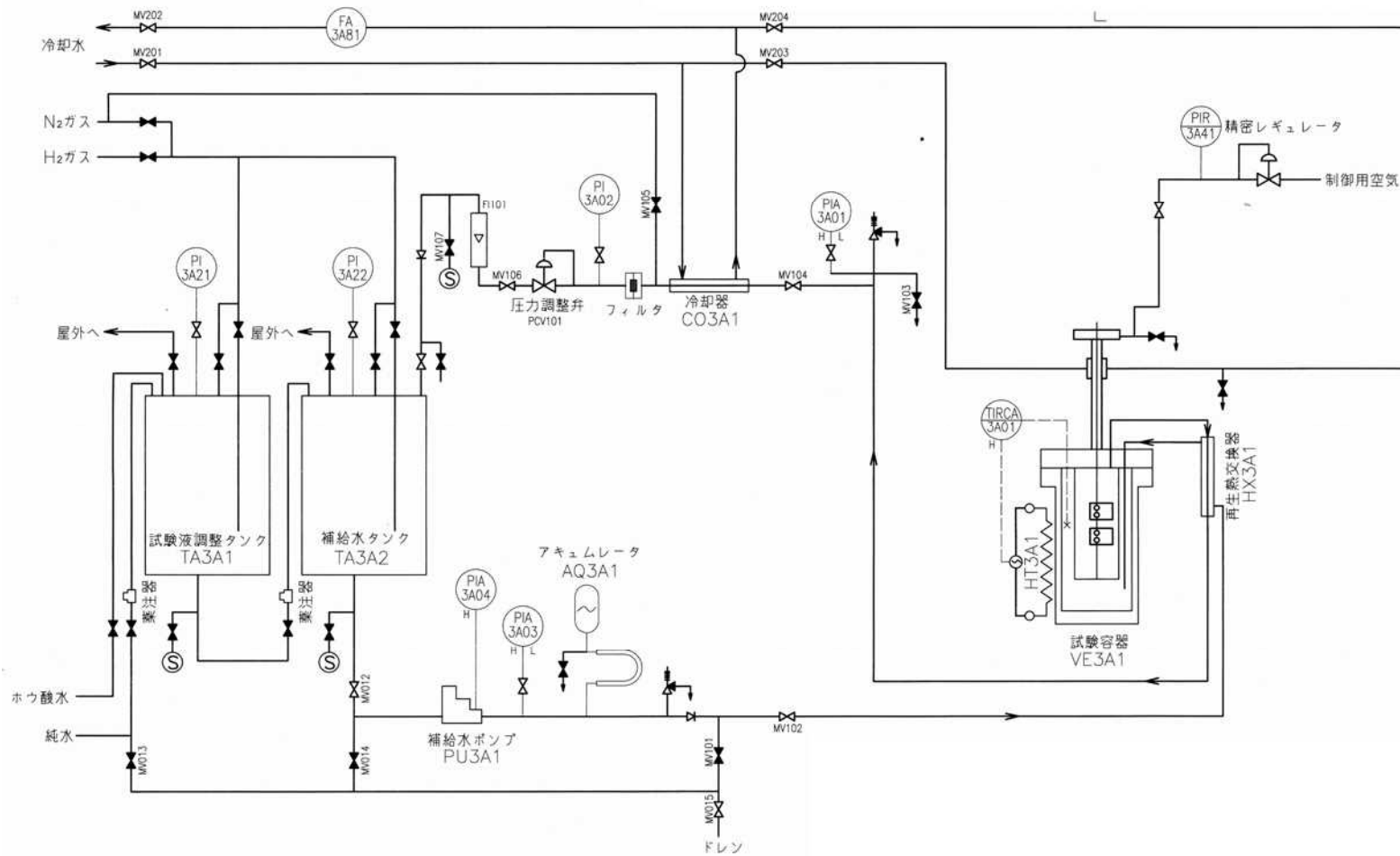
図 4.2.2-7 循環装置及びタンク外観(PL-3A 及び PL-3B)



図 4.2.2-8 試験容器外観(PL-3A 及び PL-3B)



図 4.2.2-9 循環装置、タンク及び試験容器外観(PL-6)



補給水タンクの前段に Zn 濃度調整のための調整タンクを設置  
 図 4.2.2-10 Zn 注入用循環試験装置 代表系統図(PL-3B)



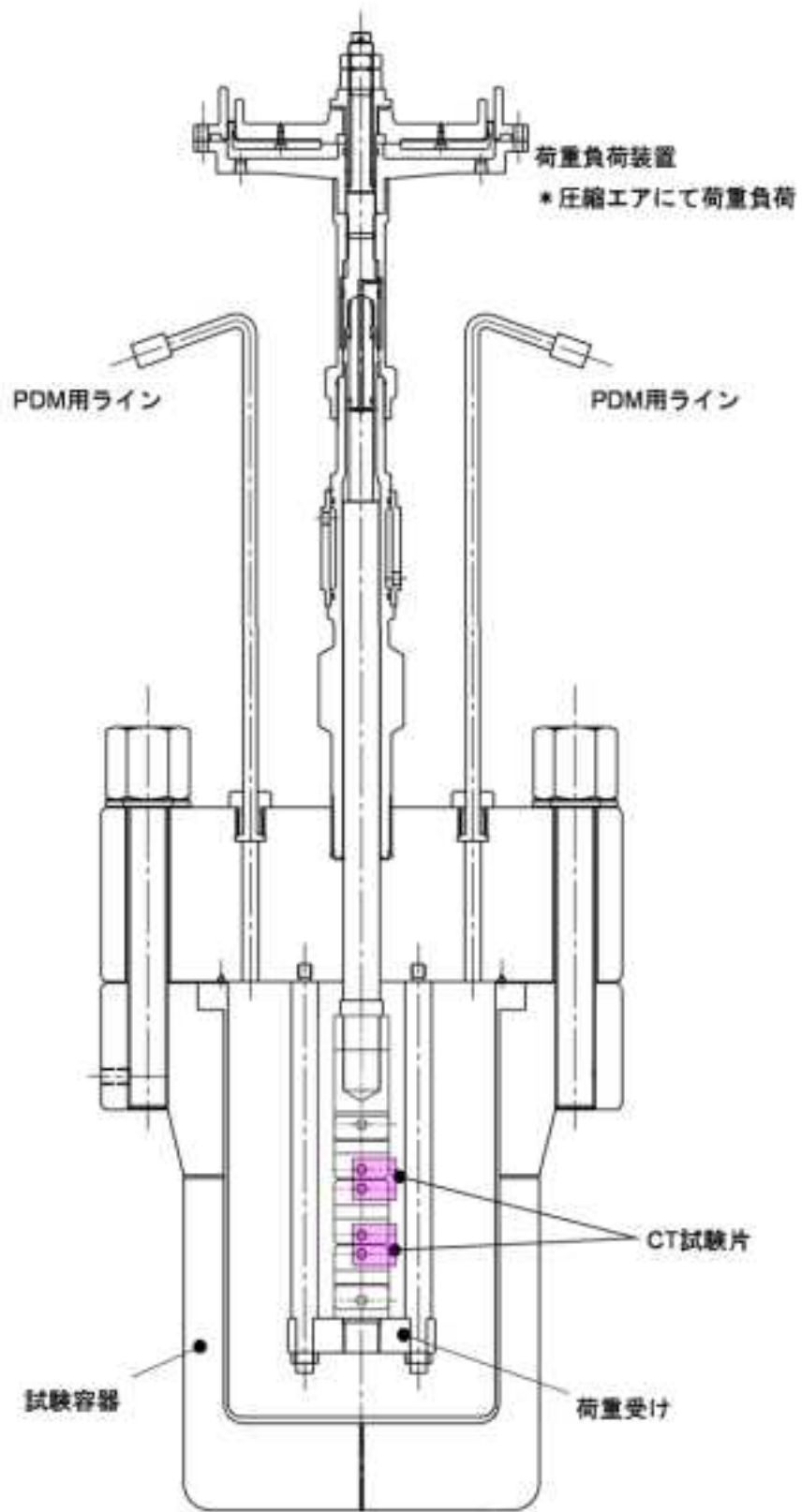


図 4.2.2-11 試験用圧力容器及び荷重負荷装置構造図

### c. 試験結果

#### ①Zn注入予備試験(Zn皮膜付与試験)時の運転管理データ

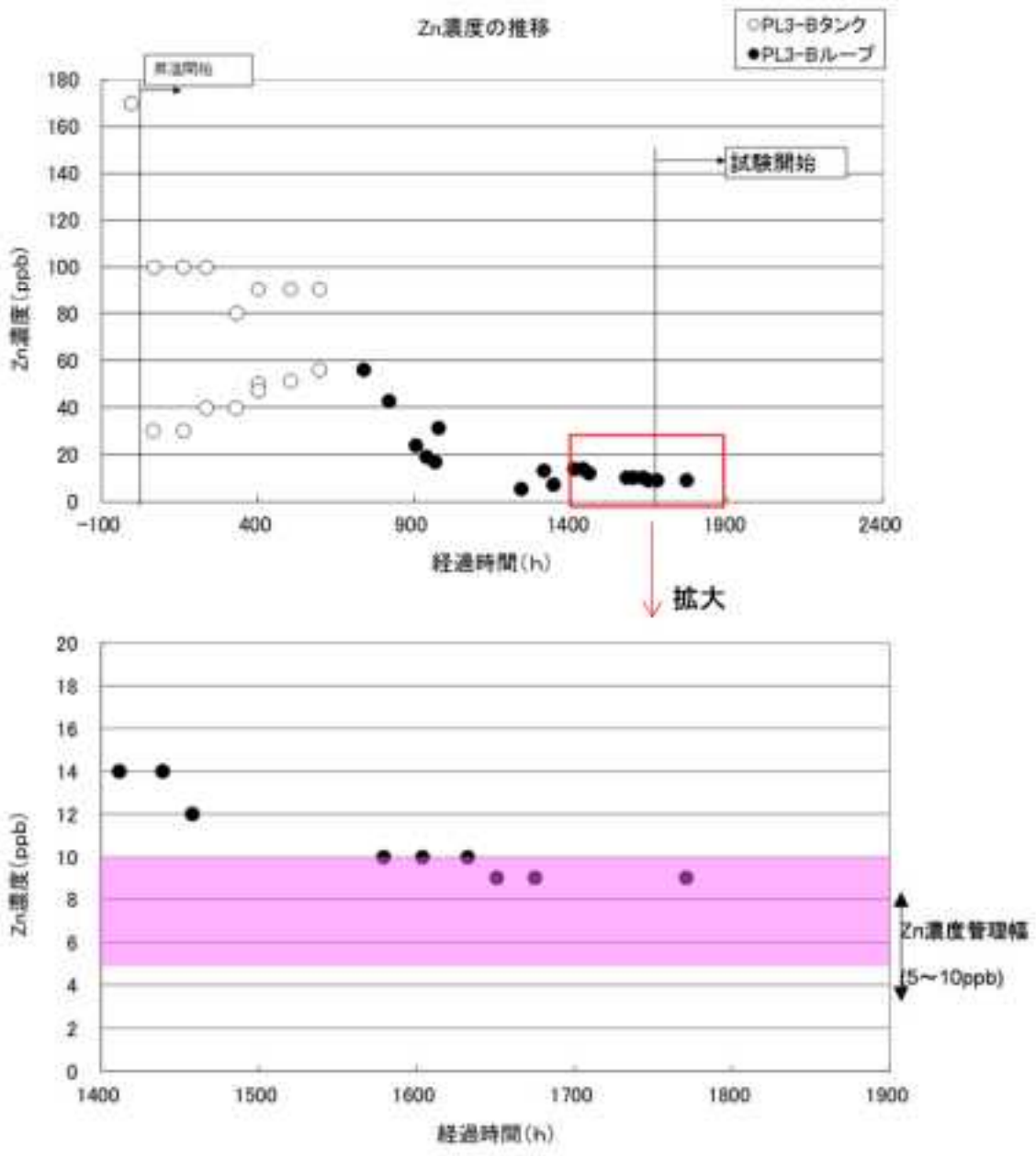
Zn 注入条件下での PWSCC 試験においては、試験に先んじて試験系統(配管、タンク等)の内面酸化皮膜に Zn を取り込ませ、試験中の Zn 消費を抑制するための予備試験を実施した。Zn 注入時にはホウ酸亜鉛( $2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$ 、水酸化 Li に溶解して注入)及び酸化亜鉛( $\text{ZnO}$ 、ホウ酸水に溶解して注入)を注入用試薬として用いており、狙い値である Zn 濃度 5~10ppb に調整するため、初期の Zn 濃度を 100ppb 以上に設定し、徐々に調整タンク中の Zn 濃度を低くする事で系統内濃度を調整した。

図 4.2.2-12~図 4.2.2-14 に予備試験時の Zn 濃度計測結果を示す。約 1 ヶ月半から 2 ヶ月の予備試験により 5~10ppb で濃度管理できる目途が得られた。

#### ②PWSCC試験時の運転管理データ

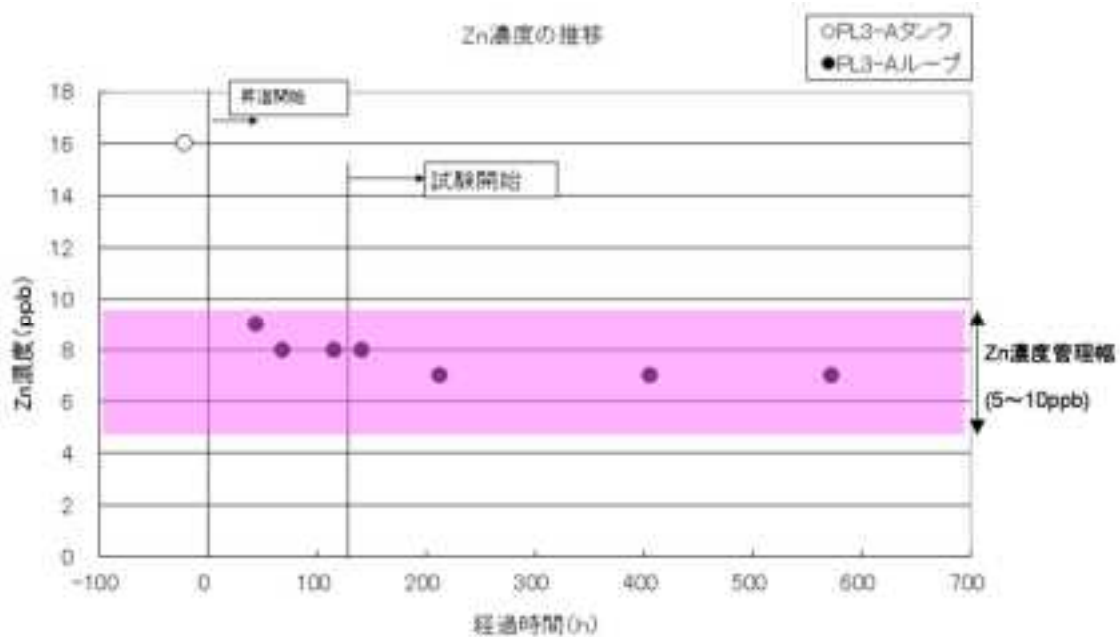
表 4.2.2-3~表 4.2.2-5 及び図 4.2.2-15~図 4.2.2-18 に試験中の運転管理データ(水質、温度、系統圧力)示す。

Zn 濃度は各水質条件で 5~10ppb に管理されており、その他の水質管理項目も目標値からの逸脱なく、安定した温度、水質管理を達成した事を確認した。



<備考>昇温開始時間をゼロ時間と規定

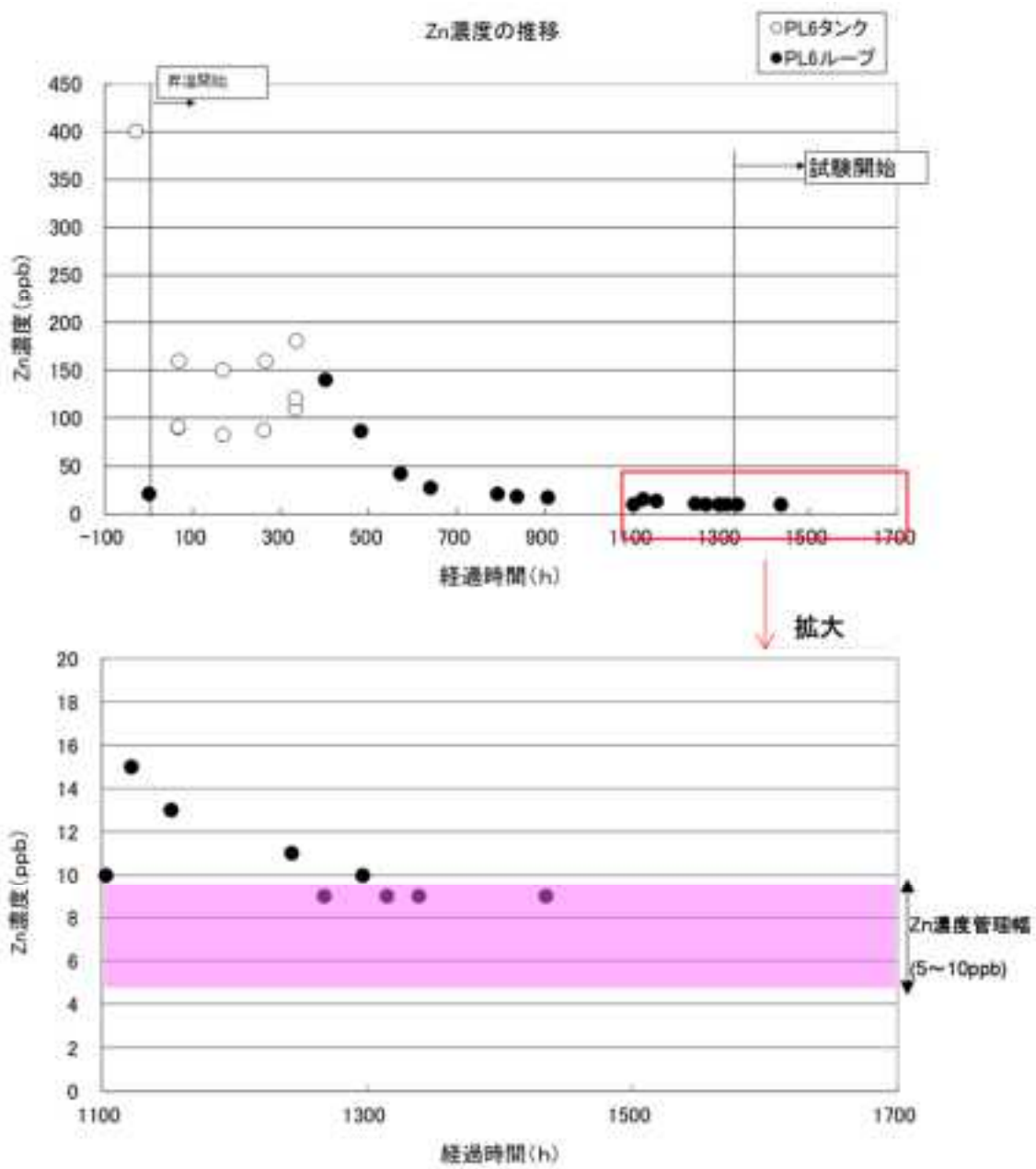
図 4.2.2-12 Zn 注入予備試験における Zn 濃度の推移(PL-3B、5cc/kg 用試験装置)



<備考>

- ・昇温開始時間をゼロ時間と規定。
- ・本試験装置は H26 年度の委託研究で装置系統に Zn 皮膜付与を適用しており、比較的短時間で予備試験を終了した。

図 4.2.2-13 Zn 注入予備試験における Zn 濃度の推移(PL-3A、30cc/kg 用試験装置)



<備考>昇温開始時間をゼロ時間と規定

図 4.2.2-14 Zn 注入予備試験における Zn 濃度の推移(PL-6、50cc/kg 用試験装置)

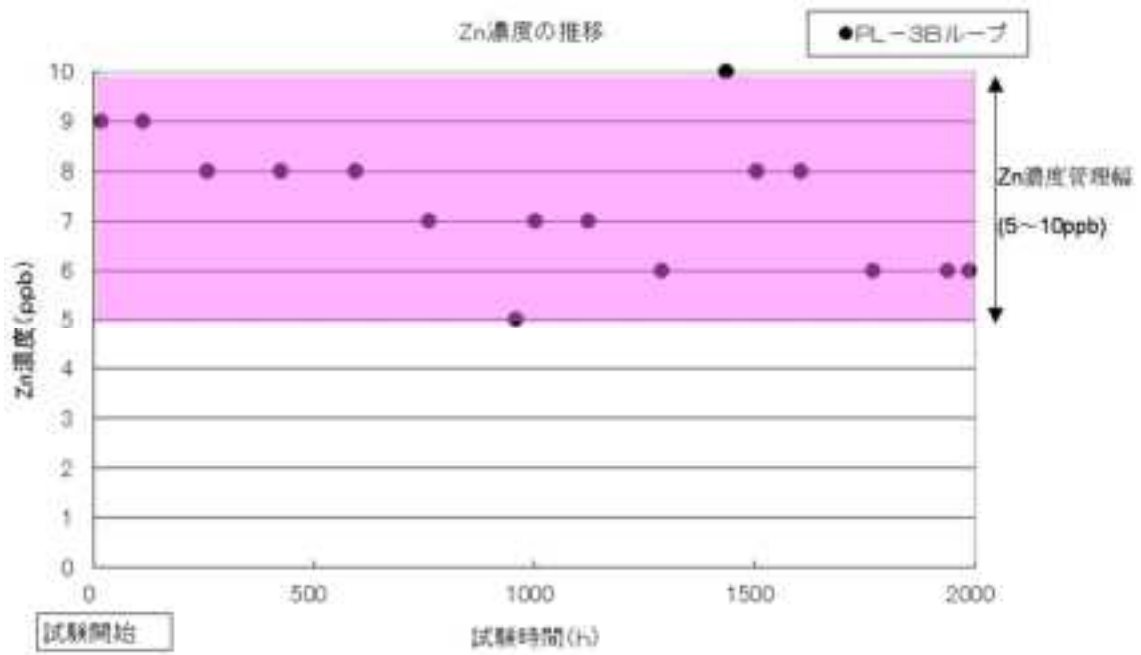


図 4.2.2-15 試験中の Zn 濃度トレンド(5cc/kg 条件)

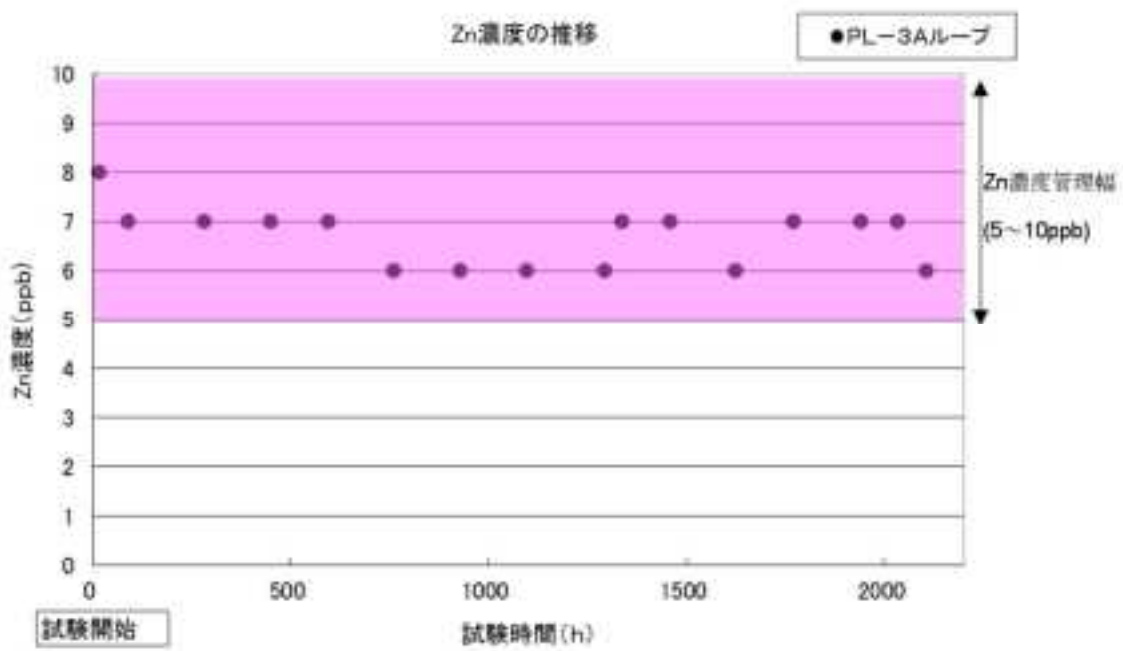


図 4.2.2-16 試験中の Zn 濃度トレンド(30cc/kg 条件)

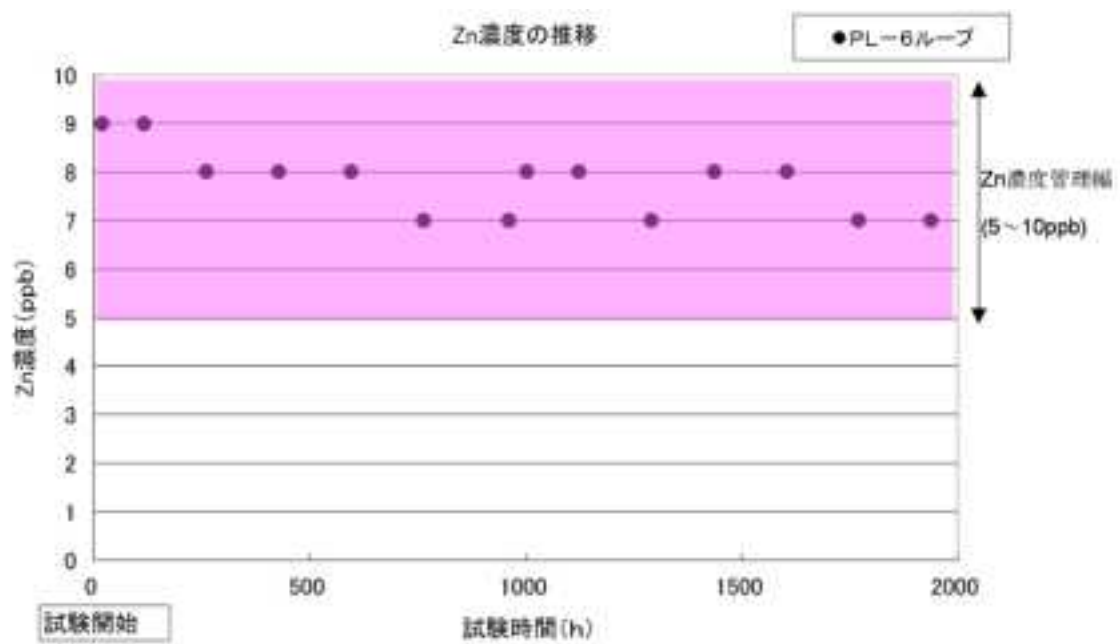


図 4.2.2-17 試験中の Zn 濃度トレンド(50cc/kg 条件)

表 4.2.2-3 水質管理結果(DH 5 cc/kg 条件)

年月日時刻	pH	Fe	Li	Zn	DH	備考
	at25℃	mg/l	mg/l	mg/l	cc/kg	
2015/10/19 09:50				50		
2015/10/22 10:20				42		
2015/10/26 10:15				24		
2015/10/27 18:30				18		
2015/10/28 19:45				17		
2015/10/28 09:00				21		
2015/11/04 10:10				8		
2015/11/12 09:30				13		
2015/11/13 15:30				7		
2015/11/18 10:30		1750	3.75	14		
2015/11/18 16:40					6	
2015/11/17 14:00				14		
2015/11/18 09:00			3.85	12		
2015/11/21 10:00				10		
2015/11/24 10:30		1770	3.80	10		
2015/11/24 17:25					6	
2015/11/25 15:30				10		
2015/11/26 10:00				6		
2015/11/26 15:30						試験開始
2015/11/27 10:00	8.20	1810	3.80	6		
2015/11/27 17:45					6	
2015/11/27 20:40						
2015/12/01 10:30		1810	3.85	6		
2015/12/04 16:50					6	
2015/12/07 19:50	8.20	1820	3.90	6		
2015/12/09 11:50					6	
2015/12/09 11:50					6	
2015/12/14 10:15				6		
2015/12/14 16:40					6	
2015/12/21 10:00	8.20	1820	3.80	6		
2015/12/23 16:06					6	
2015/12/28 09:50				7		
2015/12/28 14:15					6	
2016/01/04 15:30	8.20	1870	3.80	6		
2016/01/06 17:20					6	
2016/01/07 09:15				7		
2016/01/11 10:10				7		
2016/01/14 17:40					4	
2016/01/19 09:40	8.25	1850	3.80	6		
2016/01/19 17:20					4	
2016/01/25 11:15				10		
2016/01/25 17:45					4	
2016/01/28 09:30				6		
2016/01/28 17:20					6	
2016/02/01 11:45		1880	3.80	6		
2016/02/03 16:50					4	
2016/02/05 08:20					6	
2016/02/08 09:25				6		
2016/02/10 17:10					6	
2016/02/11 09:20						
2016/02/13 09:25	8.20	1860	3.80	6		
2016/02/17 14:20					6	
2016/02/17 16:50						
2016/02/17 09:30						
最小値	8.20	1810	3.80	6	4	試験開始後の水質を対象
最大値	8.31	1890	3.85	10	6	同上
平均値	8.21	1840	3.81	7	6	同上
管理目標値*	8.20以上	1800±100	3.8±0.05	6~10	6±1	

\*水質管理目標値は平成 21 年度 Ni 基合金応力腐食割れ進展評価技術実証に関する報告書を参考に設定した。なお、Zn 注入濃度及び DH 管理濃度は自主管理目標値として設定



表 4.2.2-4 水質管理結果(DH 30 cc/kg 条件)

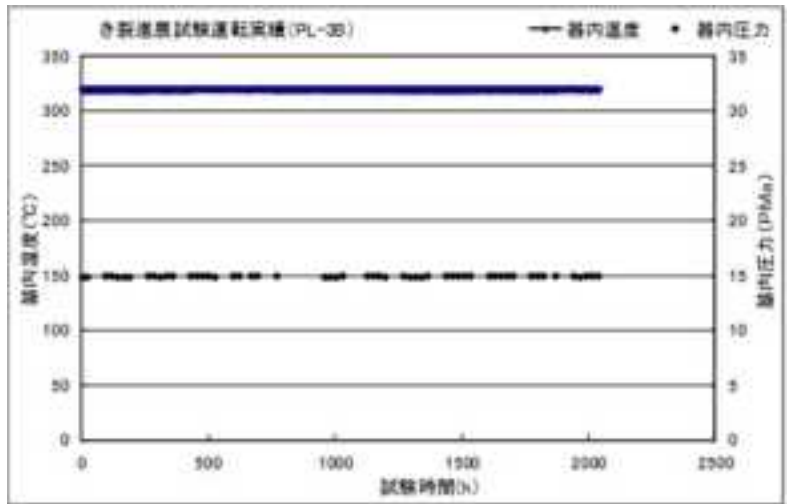
測定日時		pH at 25°C	B mg/l	Li mg/l	Zn μg/l	DH2 cm <sup>3</sup> /kg	備考
2015/11/08	16:10				18		
2015/11/09	10:15				9		
2015/11/10	10:20	8.30	1800	3.80	8		
2015/11/10	11:50					30	
2015/11/12	09:35				8		
2015/11/12	18:30						試験開始
2015/11/13	09:35	8.30	1780	3.80	8		
2015/11/13	14:30					29	
2015/11/13	18:40						
2015/11/18	10:30				7		
2015/11/18	15:30					32	
2015/11/24	10:30		1800	3.70	7		
2015/11/24	17:10					30	
2015/12/01	10:00		1800	3.70	7		
2015/12/04	14:00					30	
2015/12/07	10:50	8.35	1810	3.70	7		
2015/12/09	11:30					30	
2015/12/14	10:15				8		
2015/12/14	17:50					30	
2015/12/21	10:00	8.30	1870	3.80	8		
2015/12/22	17:30					28	
2015/12/29	09:50				8		
2015/12/28	13:45					31	
2018/01/05	14:30	8.30	1830	3.85	8		
2018/01/08	14:30					31	
2018/01/07	09:15				7		
2018/01/12	10:05				7		
2018/01/14	17:20					32	
2018/01/19	09:35	8.30	1880	3.85	8		
2018/01/19	18:45					31	
2018/01/25	11:10				7		
2018/01/25	18:45					22	
2018/02/01	11:35		1870	3.85	7		
2018/02/03	18:25					29	
2018/02/05	09:10				7		
2018/02/08	09:20				8		
2018/02/10	18:40					29	
2018/02/12	09:25						
2018/02/12	15:00						
最小値		8.30	1780	3.80	8	28	試験開始後の水質を対象
最大値		8.35	1890	3.80	8	32	同上
平均値		8.31	1830	3.88	7	30	同上
管理目標値*		6.25±0.15	1800±190	3.5±0.35	5~10	30±5	

\*水質管理目標値は平成 21 年度 Ni 基合金応力腐食割れ進展評価技術実証に関する報告書を参考に設定した。なお、Zn 注入濃度は自主管理目標値として設定

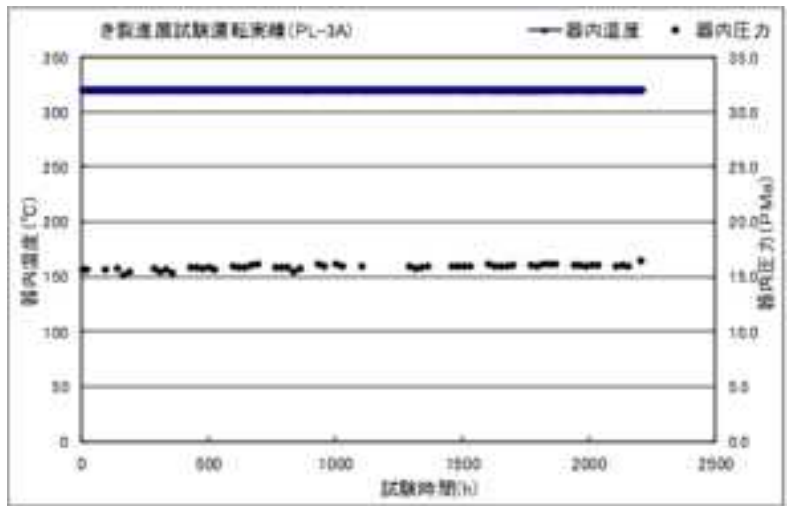
表 4.2.2-5 水質管理結果(DH 50 cc/kg 条件)

年月日時	pH	Cr	Li	Zn	DH	備 考
	4.0以上	㎍/L	㎍/L	μg/L	㎍/kg	
2018/10/09 11:10		1790	3.00			
2018/10/09 13:00						定検・新調付分濃縮試験
2018/10/09 13:30		1790	3.11			
2018/10/09 16:00				31		
2018/10/09 11:00						
2018/10/09 17:10				30		
2018/10/09 17:40						
2018/10/23 14:10				40		
2018/10/23 14:40						
2018/10/28 14:00				130		
2018/10/28 14:30						
2018/10/28 16:50				140		
2018/10/28 18:30				40		
2018/10/28 19:18				40		
2018/10/28 19:50				38		
2018/11/04 18:18				30		
2018/11/06 13:18				18		
2018/11/07 20:00						停止
2018/11/08 10:18				17		
2018/11/17 18:00						定検・新調付分濃縮試験
2018/11/17 14:50				10		
2018/11/18 19:00		1890	3.00	10		
2018/11/28 19:00				48		
2018/11/28 19:00				13		
2018/11/28 19:00				11		
2018/11/24 19:00		1890	3.00	9		
2018/11/24 17:40				40		
2018/11/28 13:30				10		
2018/11/28 10:00				9		
2018/11/28 13:00						試験開始
2018/11/27 10:00	8.30	1870	3.00	9		
2018/11/27 17:40				10		
2018/11/27 19:10						
2018/12/03 19:00		1890	3.11	9		
2018/12/04 14:00				10		
2018/12/07 19:50	8.20	1890	3.11	8		
2018/12/08 11:00				48		
2018/12/14 19:10				9		
2018/12/14 19:18				49		
2018/12/21 19:00	8.20	1880	3.11	8		
2018/12/22 17:30				10		
2018/12/28 19:30				7		
2018/12/28 14:30				10		
2019/01/08 14:30	8.20	1890	3.11	7		
2019/01/08 17:00				31		
2019/01/07 19:18				8		
2019/01/13 19:00				8		
2019/01/14 17:00				31		
2019/01/14 16:30	8.20	1880	3.11	7		
2019/01/14 17:00				50		
2019/01/15 11:00				9		
2019/01/15 17:00				40		
2019/02/01 11:30		1880	3.00	9		
2019/02/03 18:18				47		
2019/02/06 17:00				31		
2019/02/19 19:30				7		
2019/02/19 19:24				48		
2019/02/13 19:30						
2019/02/15 19:18	8.20	1880	3.00	7		
2019/02/17 14:18				48		
2019/02/17 18:30						新調付分濃縮試験
最大値	8.30	1940	3.11	7		47試験開始後の水質を対象
最小値	8.20	1880	3.00	9		50以上
平均値	8.20	1878	3.11	9		50以上
管理目標値	8.20以上	1890以上	3.00以上	5-10		50以上

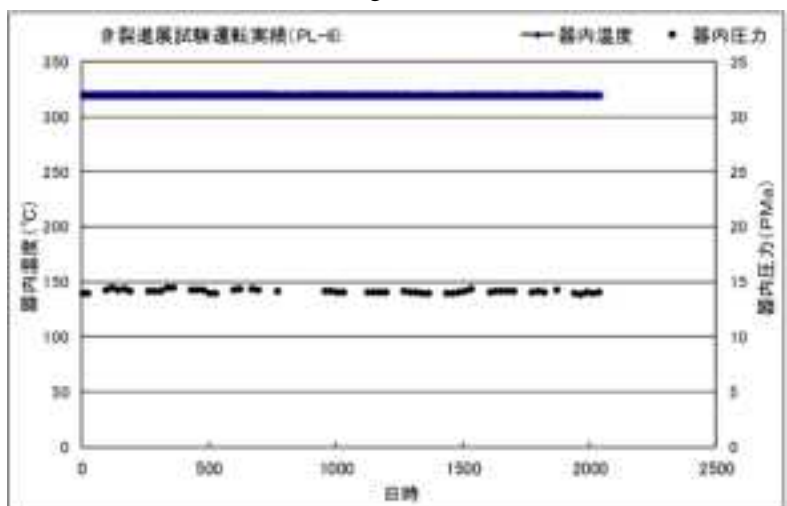
\*水質管理目標値は平成 21 年度 Ni 基合金応力腐食割れ進展評価技術実証に関する報告書を参考に設定した。なお、Zn 注入濃度及び DH 管理濃度は自主管理目標値として設定



5cc/kg 試験条件



30cc/kg 試験条件



50cc/kg 試験条件

図 4.2.2-18 PWSCC 試験時の温度・圧力データ

### ③き裂進展速度評価結果

各水質条件で試験開始初期から PDM の漸増傾向が確認されたことから、約 2000 時間で試験を終了し、破面 SEM 観察によるき裂進展評価を実施した。

取出し後の試験片外観状況を図 4.2.2-19 に示す。

試験片一般部は 30cc/kg 条件が最も黒色を呈しており、5cc/kg 及び 50cc/kg は外観上、薄い酸化皮膜を形成している様相であった。

一方、疲労予き裂部及び SCC 進展部は 5cc/kg 条件が最も黒色を呈している事から、酸化皮膜の形成状況が各水質及びき裂内外で異なる事が確認された。

破面 SEM 観察結果及び PDM 計測結果を図 4.2.2-20～図 4.2.2-25 に示すが、疲労予き裂先端から、PWSCC の特徴である粒界型 SCC(IGSCC)が認められた。

SCC 進展速度評価は PDM 計測上安定したき裂進展が認められている領域として、試験終了時から遡って 4 区間に分割して K 値とき裂進展速度の関係を纏めた(各評価区間の試験時間は約 400 時間としている)。

なお、本試験では各水質において繰り返し 2 の試験を実施したが、いずれの水質条件においても、サンプル間の差異は認められず、同様のき裂進展傾向を確認している。

DH	5cc/kg		30cc/kg		50cc/kg	
試験片 No.	No.7	No.8	No.5	No.6	No.9	No.10
試験時間(Hr)	2040	2040	2210	2210	2040	2040
試験後 外観状況 (一般部)						
試験後 外観状況 (き裂進展部)						
	No.7	No.8	No.5	No.6	No.9	No.10

図 4.2.2-19 き裂進展試験後の試験片外観(一般部及び破面)確認結果

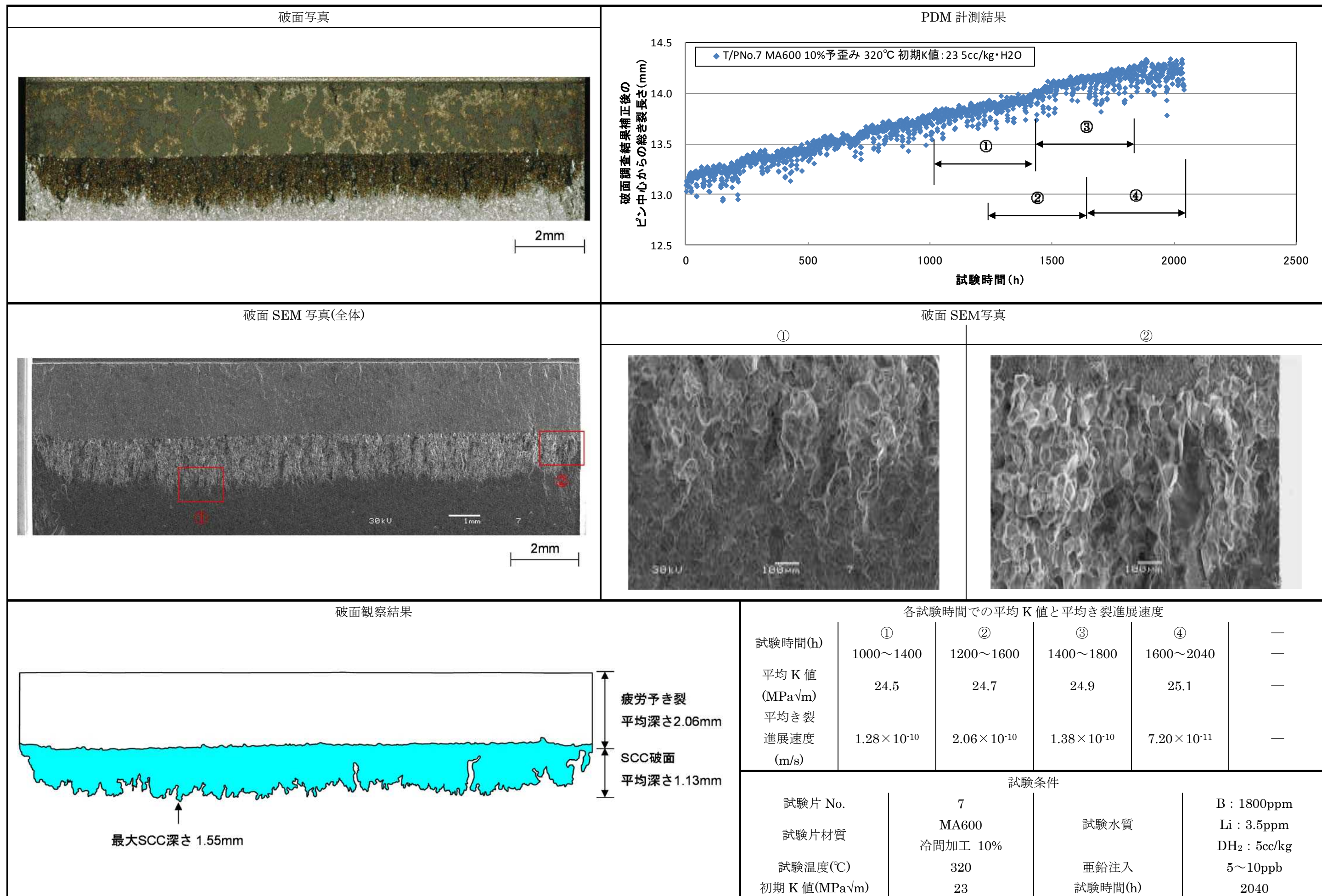


図 4.2.2-20 破面調査結果(試験片 No.7、DH 5cc/kg 条件)

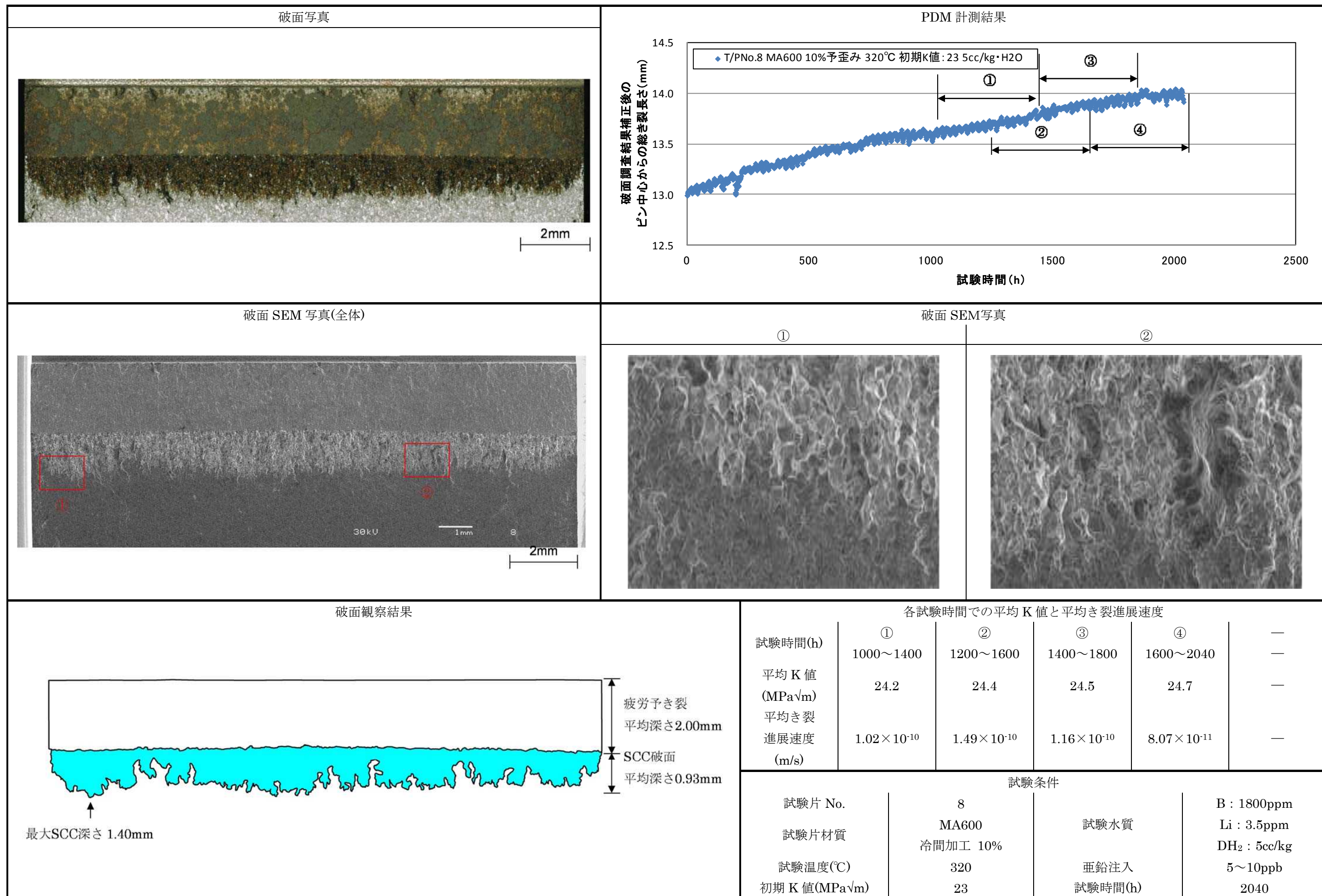


図 4.2.2-21 破面調査結果(試験片 No.8、DH 5cc/kg 条件)

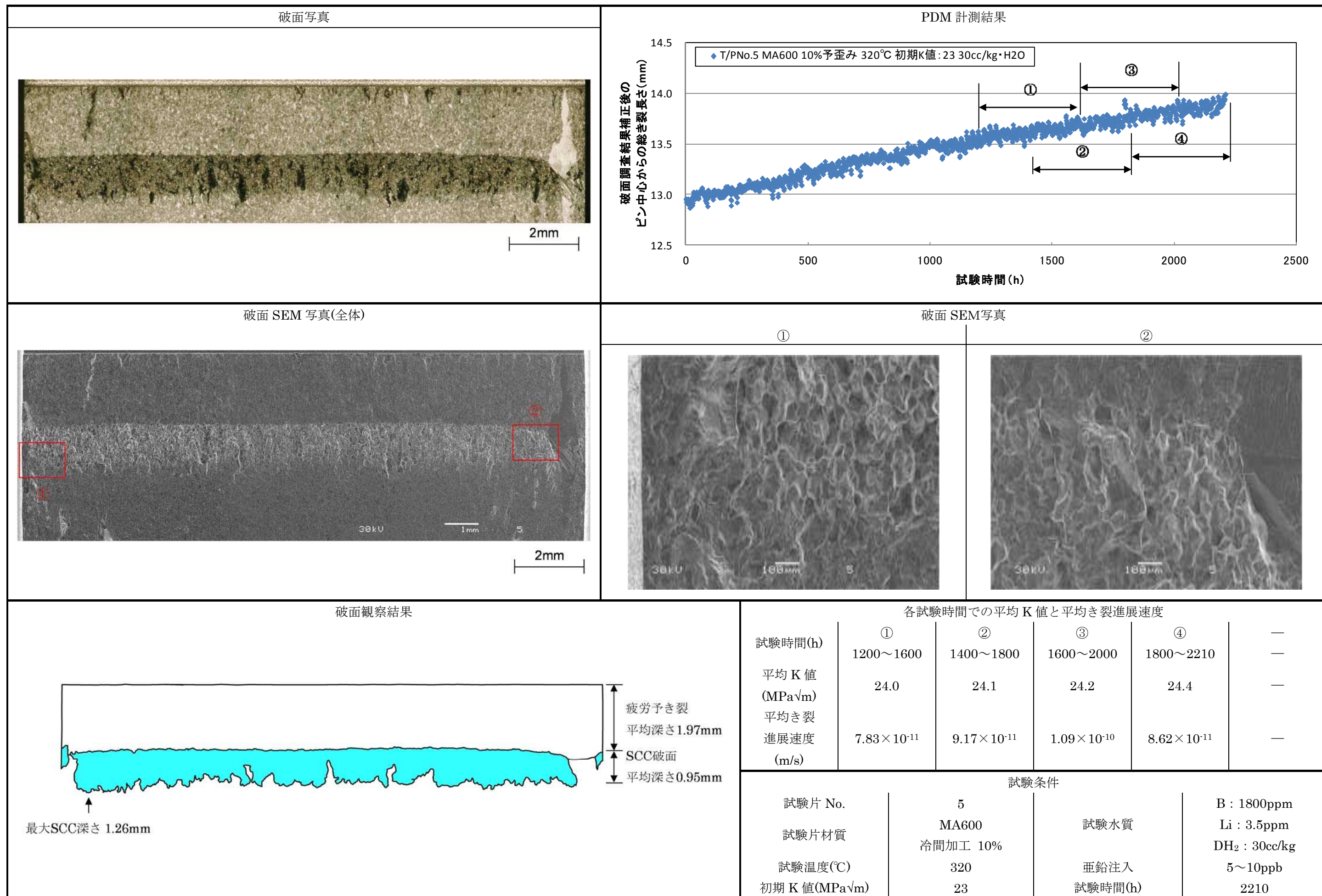


図 4.2.2-22 破面調査結果(試験片 No.5、DH 30cc/kg 条件)



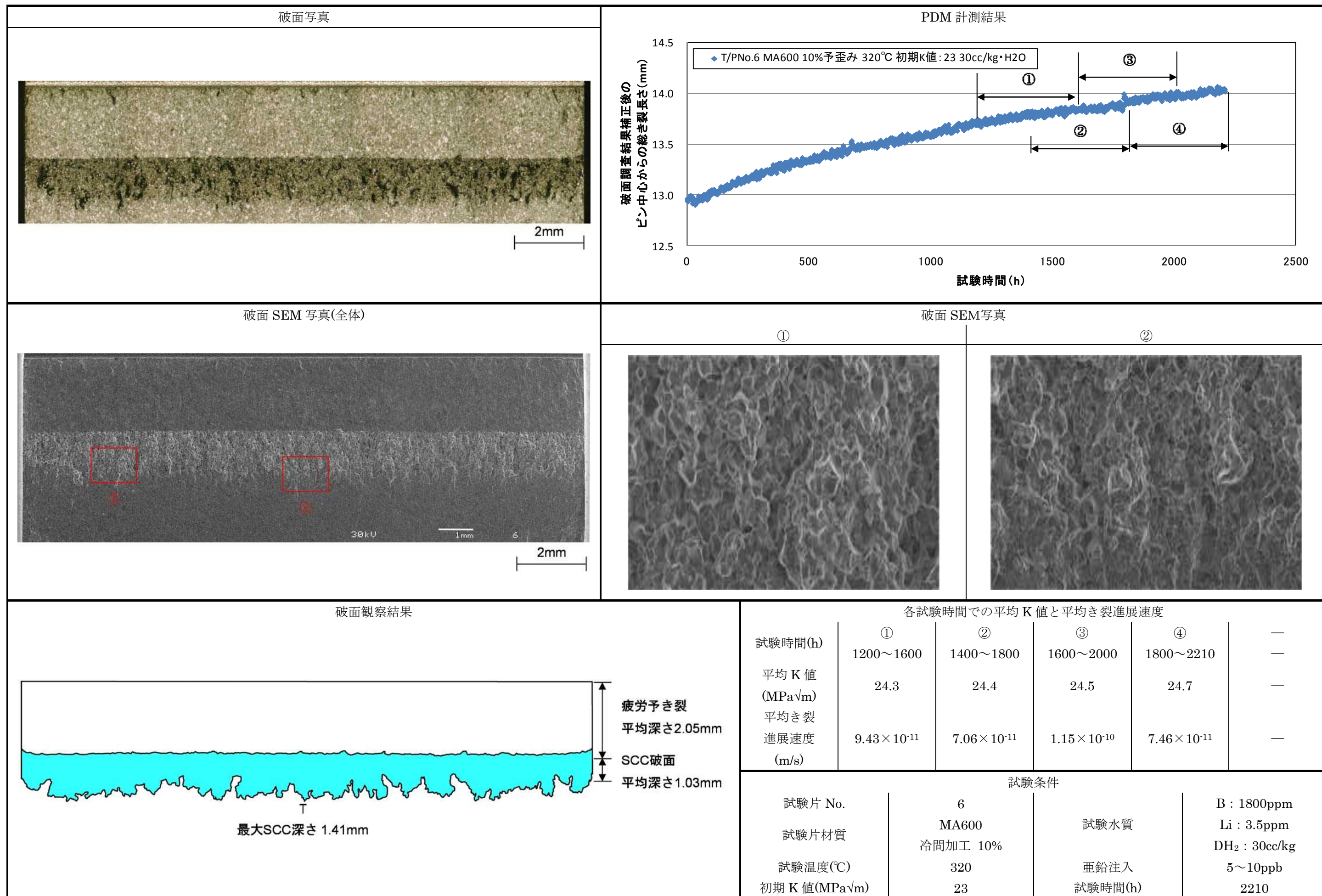


図 4.2.2-23 破面調査結果(試験片 No.6、DH 30cc/kg 条件)

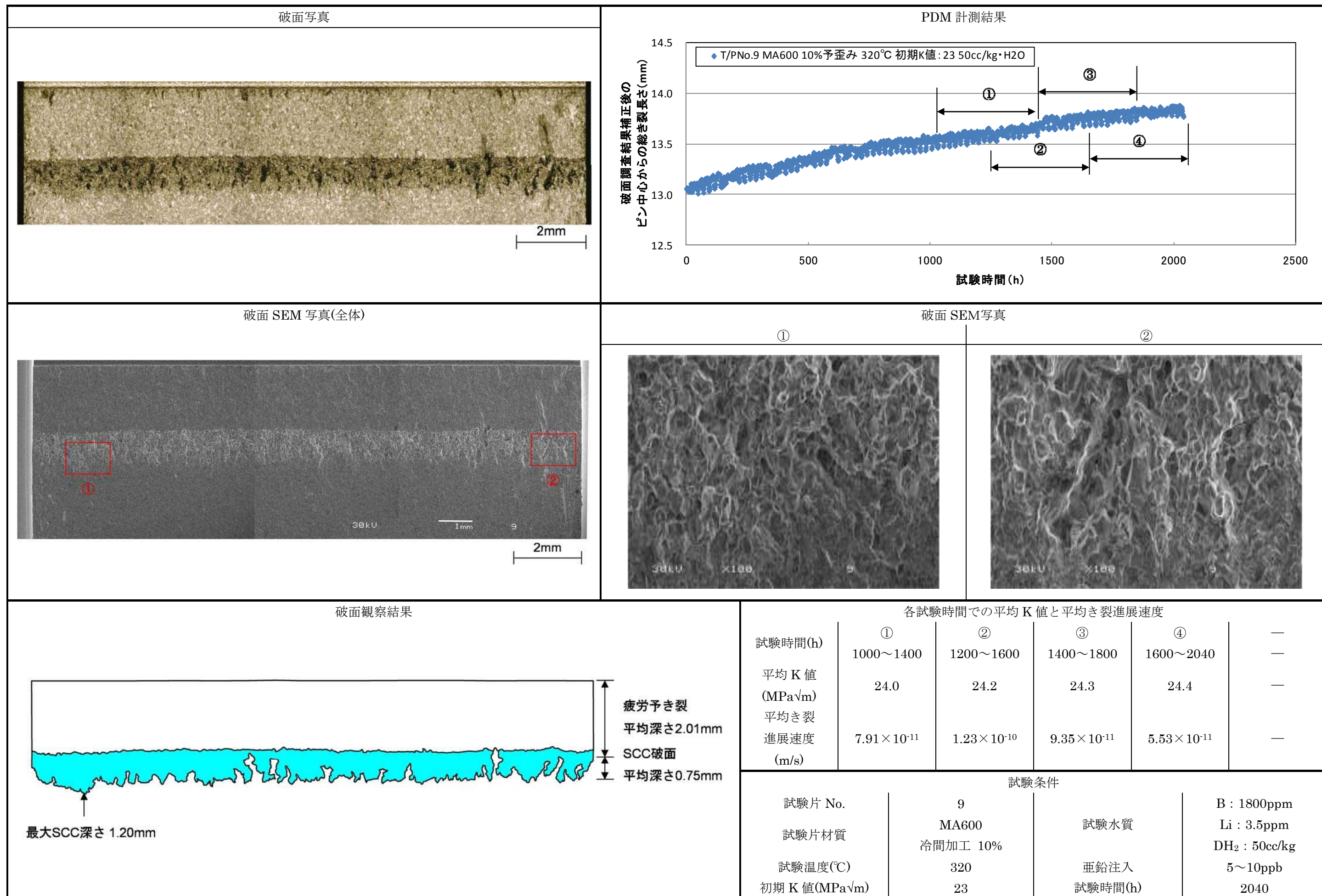


図 4.2.2-24 破面調査結果(試験片 No.9、DH 50cc/kg 条件)

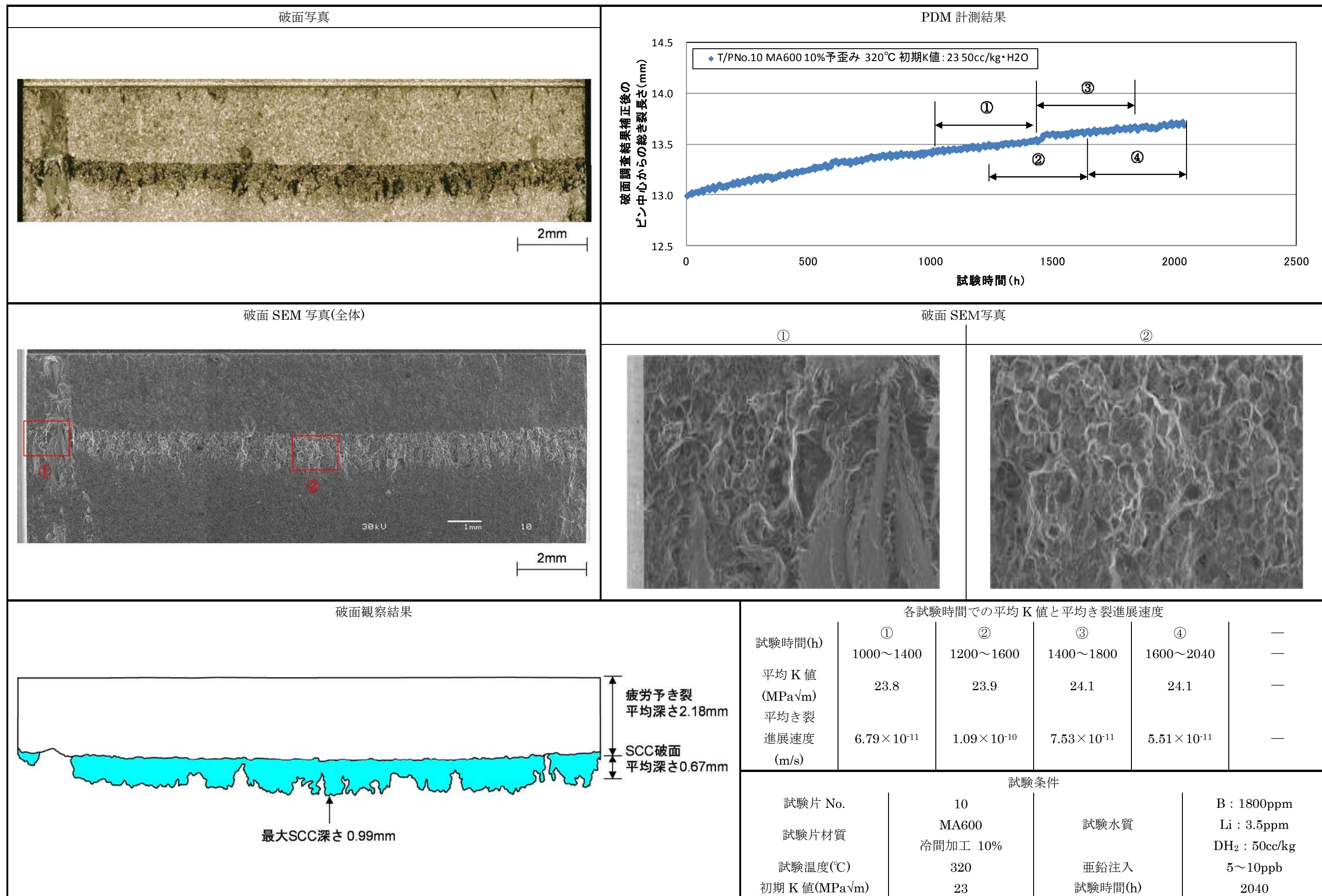


図 4.2.2-25 破面調査結果(試験片 No.10、DH 50cc/kg 条件)

#### ④結果の検討

##### i) き裂進展速度のまとめと既往データとの比較

表 4.2.2-6 に各 DH 濃度における平均 K 値とき裂進展速度の比較、図 4.2.2-26 に過去に取得した CT 試験片によるき裂進展速度データ<sup>[4.2.2-1]</sup>との比較を示す。

今回の試験で確認されたき裂進展速度はいずれも過去の試験で得られたデータ(冷間加工無し)に対して高いき裂進展速度を示している。き裂進展速度への加工度の影響について図 4.2.2-27 に示すが、10%冷間加工により冷間加工無の材料と比較して十倍以上のき裂進展速度が得られており、今回の結果と概ね一致することから、き裂進展速度に対する加工度の影響は Zn 注入に因らず概ね同様の感受性を示すものと考えられる。

各評価区間における平均 K 値とき裂進展速度の関係を図 4.2.2-28 に示す。

4 評価区間の平均プロットに対して Scott 式によるフィッティングを行い、き裂進展速度に対する DH 濃度依存性(K 値=24MPa $\sqrt{m}$ )を確認した(図 4.2.2-29 及び図 4.2.2-30)。

結果として、き裂進展速度に対する DH 濃度の顕著な影響は認められなかった。

Zn 注入条件下における PWSCC 進展速度の DH 濃度依存性は、5、30、50cc/kg 条件で顕著な差異は認められなかった。

既往報告によるき裂進展速度に対する DH 濃度依存性データ(図 4.2.2-31)を用いて 30cc/kg 条件に対するき裂進展速度比を比較すると、Zn 注入を適用した本試験では DH 濃度依存性が小さくなっている可能性が確認された(表 4.2.2-7)。

##### ii) 皮膜性状

各試験条件における試験後の外観観察結果を表 4.2.2-8 に纏める。

Ni/NiO 平衡水素濃度については報告者によるバラつきが大きいものの、図 4.2.2-32 に示すように概ね 5cc/kg では NiO 安定領域、50cc/kg は Ni 安定領域になるという報告が一般的である。

DH 濃度条件から評価すると 5cc/kg 条件は相対的に電位が高く、厚い酸化皮膜を形成するものと考えられるが、一般部の皮膜は外観上金属光沢を呈しており、30cc/kg 条件と比較して薄い酸化皮膜を形成している可能性が示唆されることから、皮膜中に Zn が取り込まれ、緻密な酸化皮膜を形成している可能性が考えられる。

一方、5cc/kg 条件における予き裂部及び SCC 進展部は一般部と異なり、黒色の厚い酸化皮膜が認められた事から、皮膜形成状況がき裂内外で異なる事が確認されている。

ここで、PWSCC 進展速度に対する Zn 注入の影響に関する既往知見として、Zn 注入によるき裂進展抑制効果は K 値(き裂進展速度)に依存し、低 K 値条件では進展抑制効果が認められるが、K 値が高い条件では抑制効果が確認できないという報告がある(図 4.2.2-33 及び図 4.2.2-34)。

つまり、5cc/kg 条件は NiO 安定であり、一般部の酸化皮膜中への Zn 取り込みは有効に作用したものの、き裂先端部は進展速度が速く、十分な効果が認められなかった可能性

が考えられる。

ちなみに、低 K 値条件が支配的となる実機環境における SG の損傷確率評価では、Zn 注入により損傷確率が下がる傾向が認められており(図 4.2.2-35)、5cc/kg 条件でも低 K 値条件ではき裂部への Zn 取り込みが促進され、き裂進展速度が低下する可能性が考えられる。

表 4.2.2-9 に各水質条件におけるき裂進展速度に対する考察を纏めるが、PWSCC 進展速度に対する DH 濃度依存性への Zn 注入の影響としては、以下の様に整理できる。

#### d. 4.2.2章(1)項のまとめ

- ・ PWSCC 試験後の酸化皮膜の色調は各水質で異なり、5cc/kg 条件は相対的に電位が高いにも関わらず、外観上薄い酸化皮膜を形成している事から、Zn 注入により試験片表面に形成する酸化皮膜性状が変化している可能性がある。
- ・ 図 4.2.2-36 に示されているように、PWSCC 進展速度に対する DH 濃度の影響は皮膜形成に依存していると解釈されており、Zn 注入が PWSCC 進展速度の DH 濃度依存性に影響している可能性がある。
- ・ 5cc/kg 条件では一般部と予き裂部以降の皮膜形成状況が異なっている事から、皮膜中への Zn の取り込みはあったものの、き裂進展速度が比較的早く、き裂先端部まで Zn 注入の効果が発揮されなかった可能性が考えられる。

今後の取り組むべき課題としては、今回作成した試験片のき裂先端近傍及び一般部の酸化皮膜分析により、皮膜厚み、成分分析を行い、上記推定に関する評価を実施する事が必要である。さらに、実機環境はより低い K 値条件であると推定されるため、5cc/kg 条件でもき裂進展抑制効果が期待できる可能性があり、低 K 値条件におけるき裂進展速度評価の実施が望まれる。

表 4.2.2-6 各 DH 濃度における平均 K 値とき裂進展速度比較

DH	5cc/kg				30cc/kg				50cc/kg			
試験片符号	No.7		No.8		No.5		No.6		No.9		No.10	
	K(MPa√m)	da/dt(m/s)	K(MPa√m)	da/dt(m/s)	K(MPa√m)	da/dt(m/s)	K(MPa√m)	da/dt(m/s)	K(MPa√m)	da/dt(m/s)	K(MPa√m)	da/dt(m/s)
K 値及び き裂進展 速度	24.5	$1.28 \times 10^{-10}$	24.2	$1.02 \times 10^{-10}$	24.0	$7.83 \times 10^{-11}$	24.3	$9.43 \times 10^{-11}$	24.0	$7.91 \times 10^{-11}$	23.8	$6.79 \times 10^{-11}$
	24.7	$2.06 \times 10^{-10}$	24.4	$1.49 \times 10^{-10}$	24.1	$9.17 \times 10^{-11}$	24.4	$7.06 \times 10^{-11}$	24.2	$1.23 \times 10^{-10}$	23.9	$1.09 \times 10^{-10}$
	24.9	$1.38 \times 10^{-10}$	24.5	$1.16 \times 10^{-10}$	24.2	$1.09 \times 10^{-10}$	24.5	$1.15 \times 10^{-10}$	24.3	$9.35 \times 10^{-11}$	24.1	$7.53 \times 10^{-11}$
	25.1	$7.20 \times 10^{-11}$	24.7	$8.07 \times 10^{-11}$	24.4	$8.62 \times 10^{-11}$	24.7	$7.46 \times 10^{-11}$	24.4	$5.53 \times 10^{-11}$	24.1	$5.51 \times 10^{-11}$
平均値	24.8	$1.36 \times 10^{-10}$	24.4	$1.12 \times 10^{-10}$	24.2	$9.12 \times 10^{-11}$	24.5	$8.88 \times 10^{-11}$	24.2	$8.77 \times 10^{-11}$	24.0	$7.69 \times 10^{-11}$

備考：平均 K 値とは評価区間における初期 K 値と最終 K 値の平均値である。

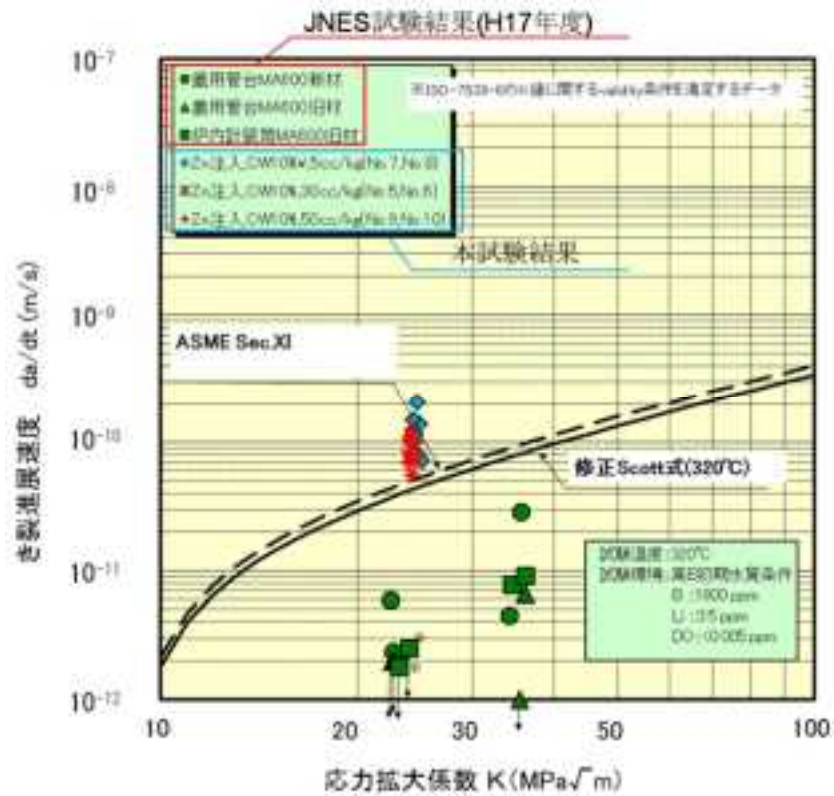


図 4.2.2-26 き裂進展速度に対する K 値依存性(JNES データに追加プロット)

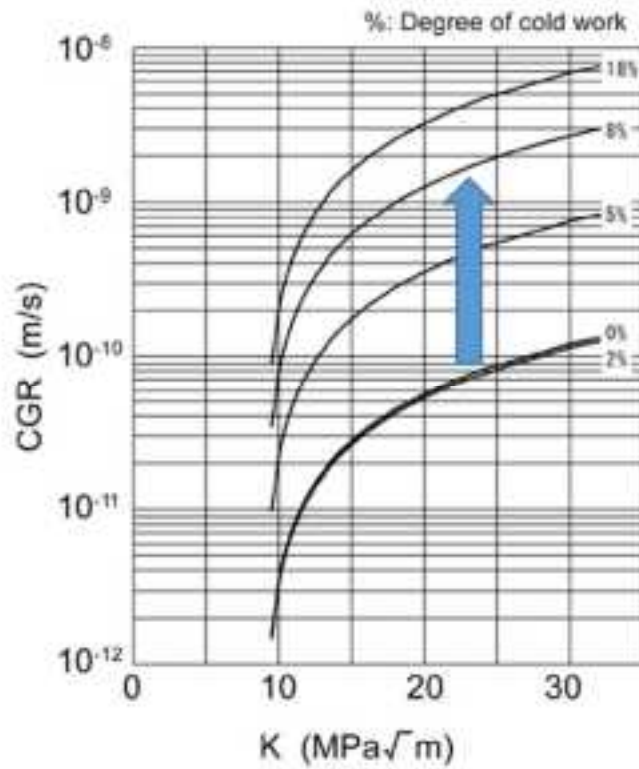


図 4.2.2-27 TT600 合金の 360°C RCS 水中のき裂進展速度への加工度の影響[4.2.2-4]

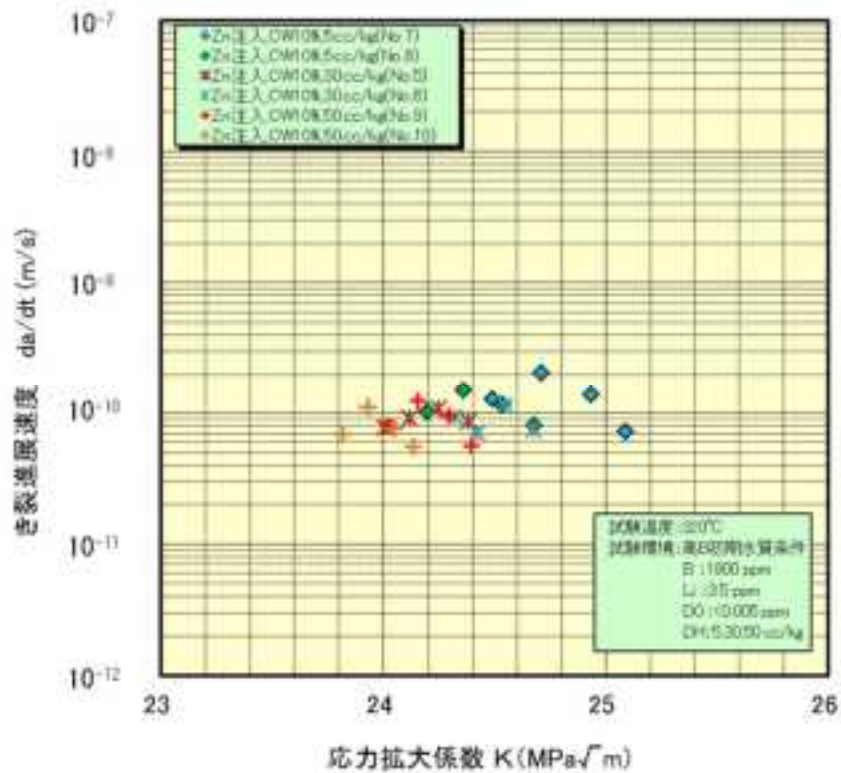


図 4.2.2-28 各評価区間におけるき裂進展速度と K 値の関係(横軸：リニア表示)

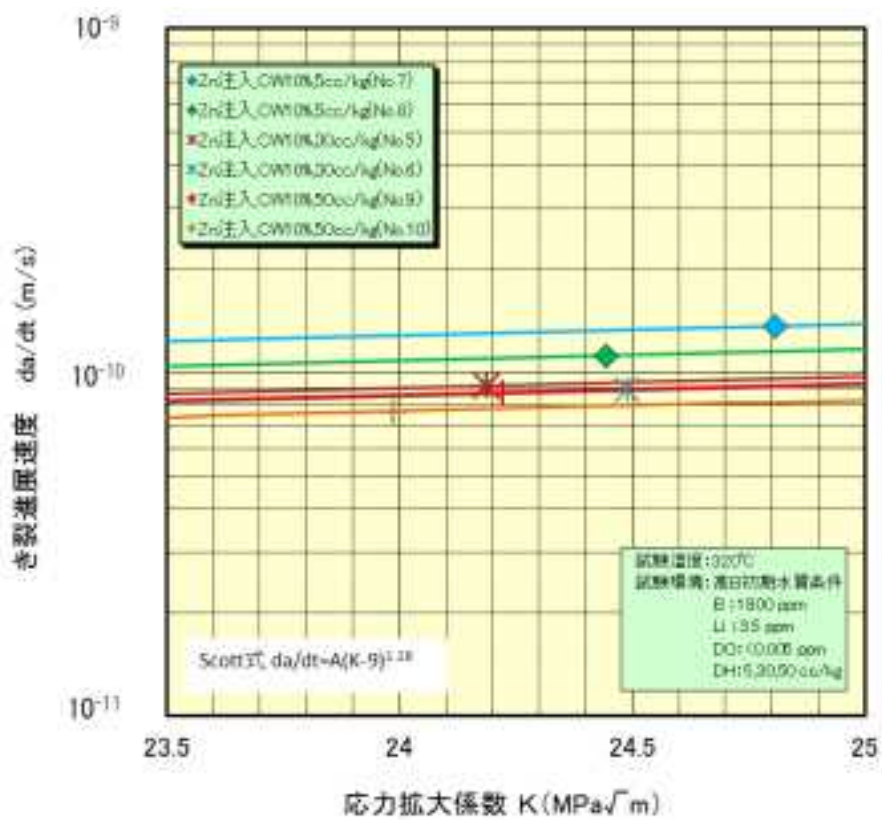


図 4.2.2-29 評価区間平均 K 値とき裂進展速度の関係(Scott 式でフィッティング)



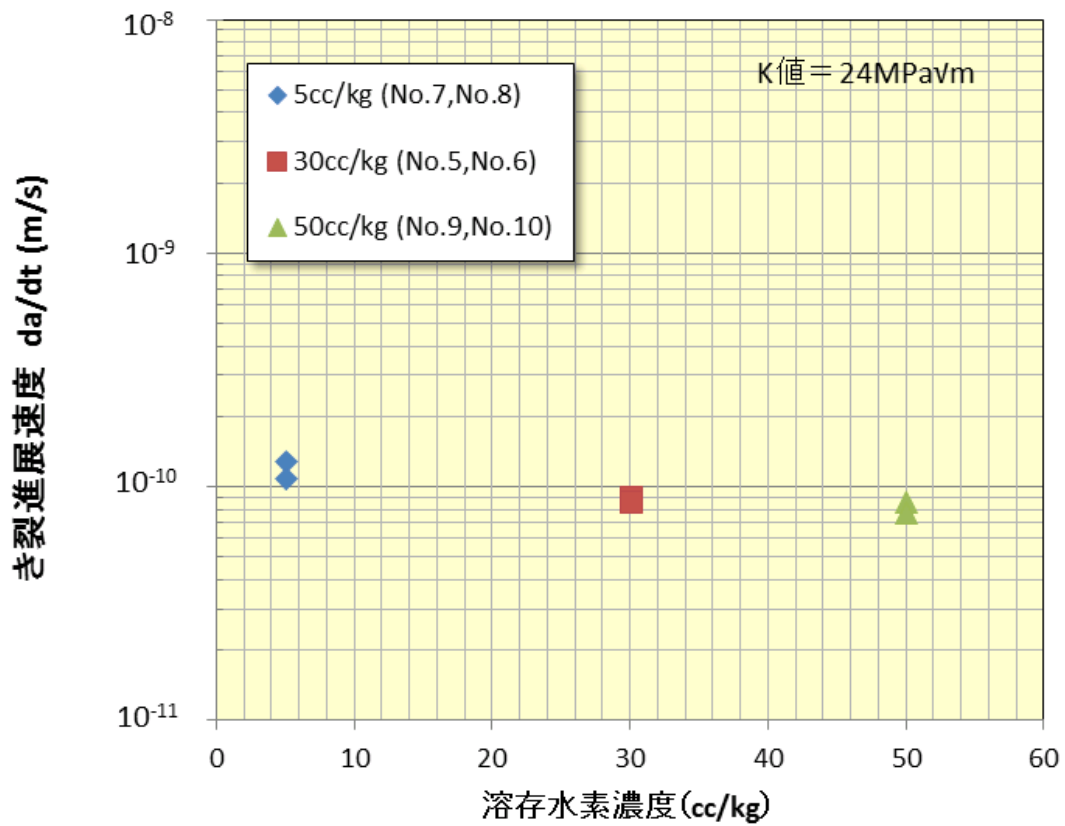


図 4.2.2-30 き裂進展速度に対する DH 濃度依存性

表 4.2.2-7 各 DH 濃度におけるき裂進展速度比(30cc/kg ベース)

DH 濃度	5 cc/kg	30 cc/kg	50 cc/kg
本試験 (Zn 注入)	1.3	1	0.9
文献値* (Zn 注入なし)	1.6	1	0.5

\*図 4.2.2-31 からの読み取り値

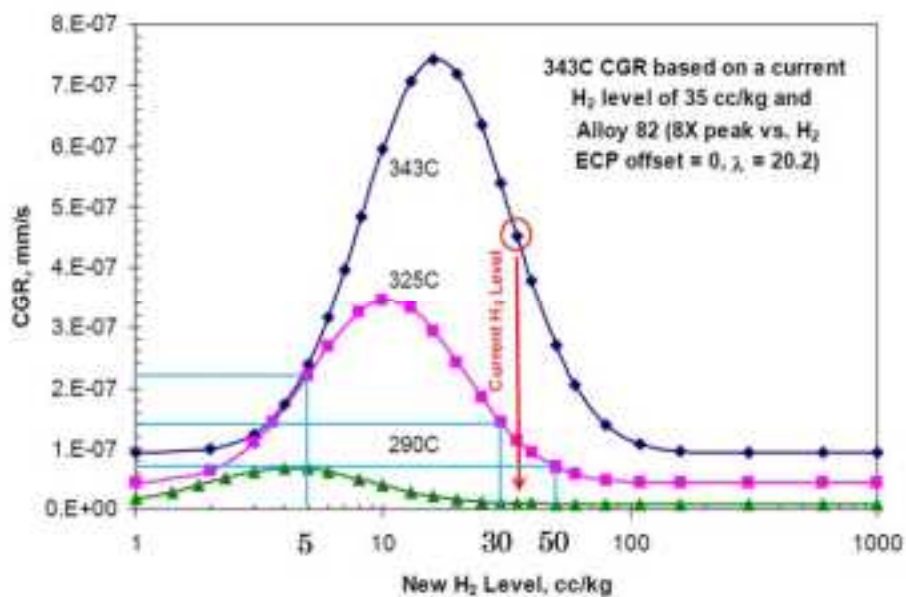


図 4.2.2-31 き裂進展速度に対する DH 濃度依存性<sup>[4.2.2-5]</sup>

表 4.2.2-8 き裂進展速度及び酸化皮膜外観状況に対する結果一覧

DH 濃度 (cc/kg)	試験後の酸化皮膜外観状況
5	<一般部> ・外観上、相対的に薄い様相であった。 <き裂部(疲労予き裂及び SCC 進展領域)> ・外観上、相対的に厚い様相であった。
30	<一般部> ・外観上相対的に厚い様相であった。 <き裂部(疲労予き裂及び SCC 進展領域)> ・外観上、5cc/kg 条件と比較して薄い様相であった。
50	・一般部及びき裂部の酸化皮膜は外観上、薄い様相であった。

表 4.2.2-9 各水質条件におけるき裂進展速度に対する考察

DH 濃度 (cc/kg)	き裂進展速度に対する考察
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>・他の水質と比較して NiO が最も安定。</li> <li>・一般部の酸化皮膜は外観上薄い様相であり、皮膜中に Zn が取り込まれ、緻密で安定な酸化皮膜を形成している可能性が考えられる。</li> <li>・一方、予き裂部及び SCC 進展部の皮膜は厚い酸化皮膜が認められ、今回の試験条件(試験開始 K 値：23MPa<math>\sqrt{m}</math>)ではき裂進展速度が速く、き裂内部(先端)まで Zn 注入の効果が発揮されなかった可能性がある。</li> <li>・より低い K 値条件ではき裂先端まで Zn 注入の効果が発揮され、き裂進展速度が低下する可能性が考えられる。</li> </ul>
30	<ul style="list-style-type: none"> <li>・一般部では黒色の酸化皮膜が認められたものの、予き裂部及び SCC 進展部は 5cc/kg 条件と比較して、外観上、薄い酸化皮膜を形成している様相であった。</li> </ul>
50	<ul style="list-style-type: none"> <li>・Ni 安定な条件であり、Zn 注入の有無によらずき裂進展速度は小さかったものと考えられる。</li> </ul>

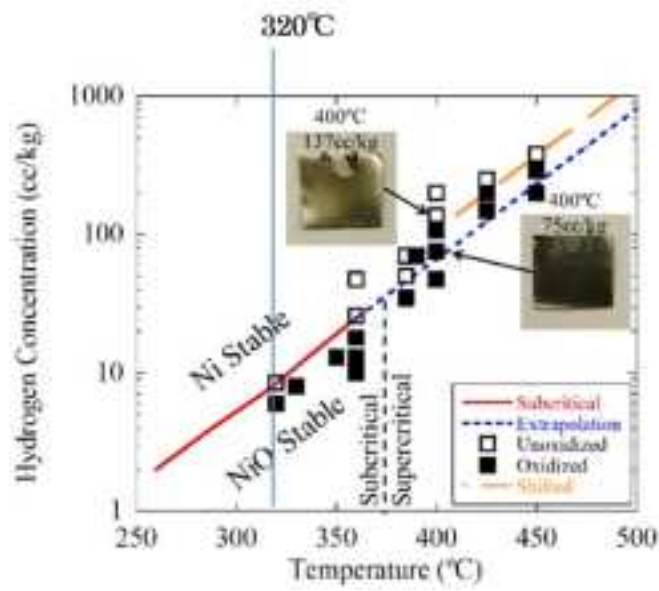
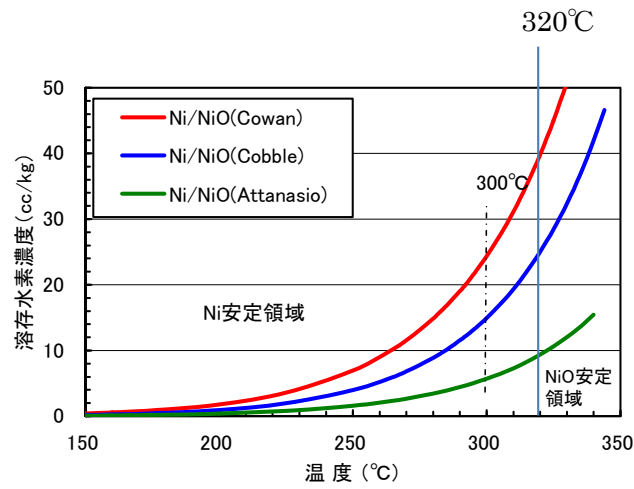


図 4.2.2-32 Ni/NiO 平衡水素濃度に対する温度の影響  
(上図：既往報告を整理した図、下図[4.2.2-6])

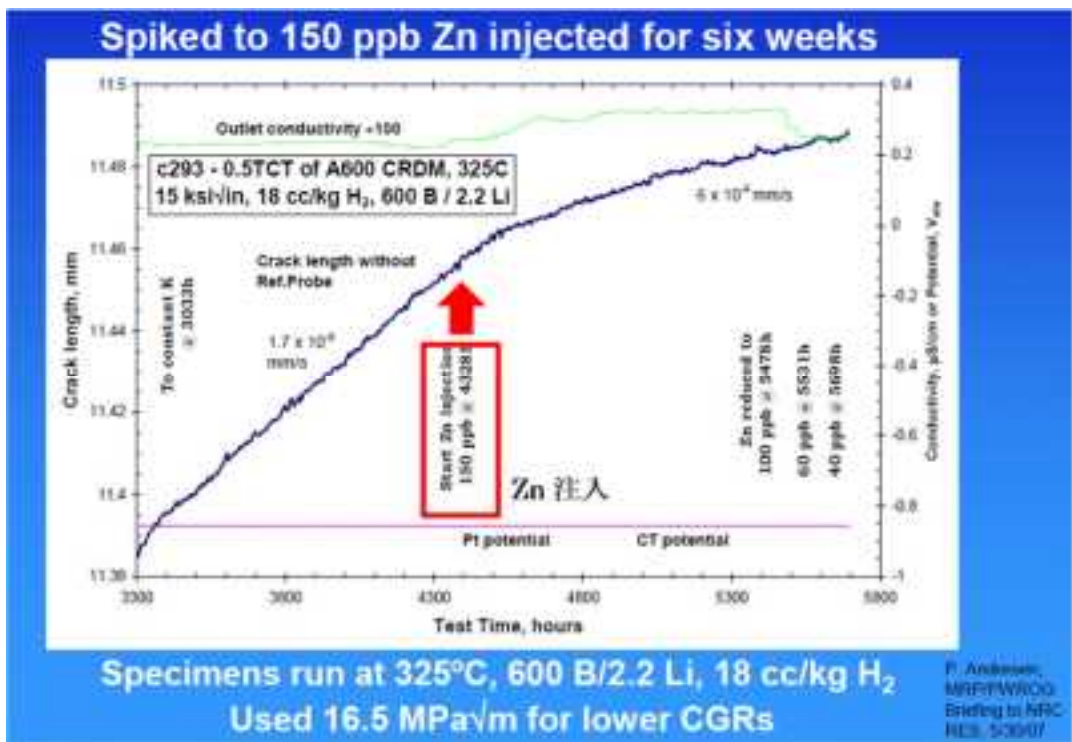


図 4.2.2-33 低 K 値条件(15 ksi√in)における Zn 注入のき裂進展速度への影響[4.2.2-7]

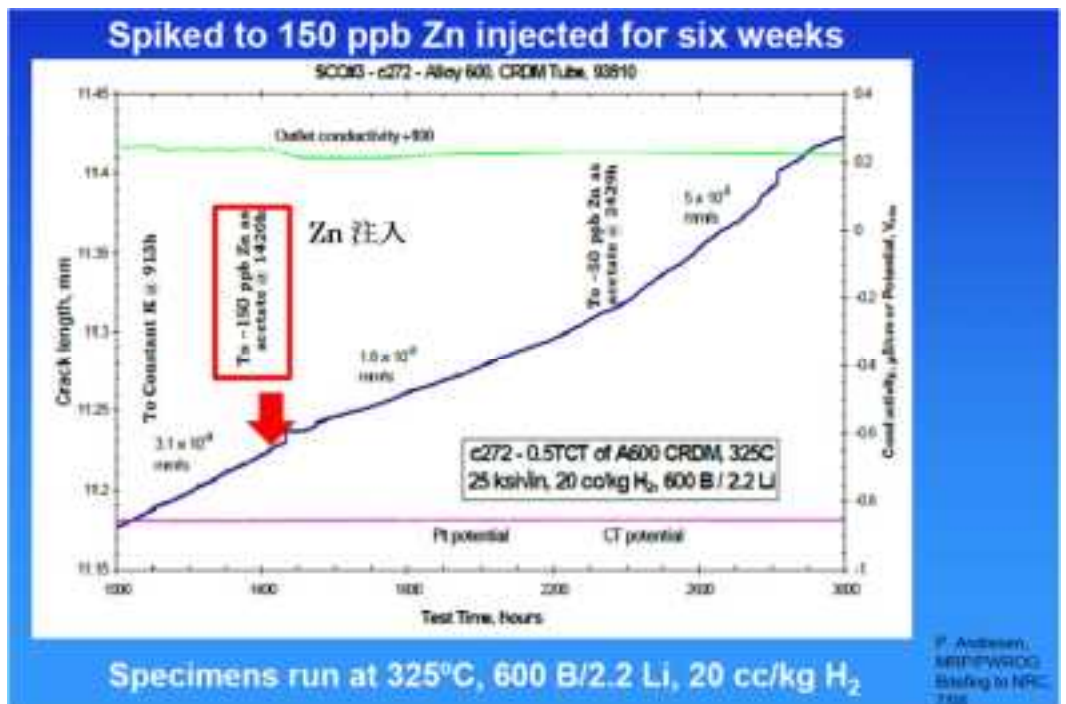


図 4.2.2-34 中 K 値(25 ksi√in)条件における Zn 注入のき裂進展速度への影響[4.2.2-7]

備考 : 1 ksi√in = 1.08MPa√m

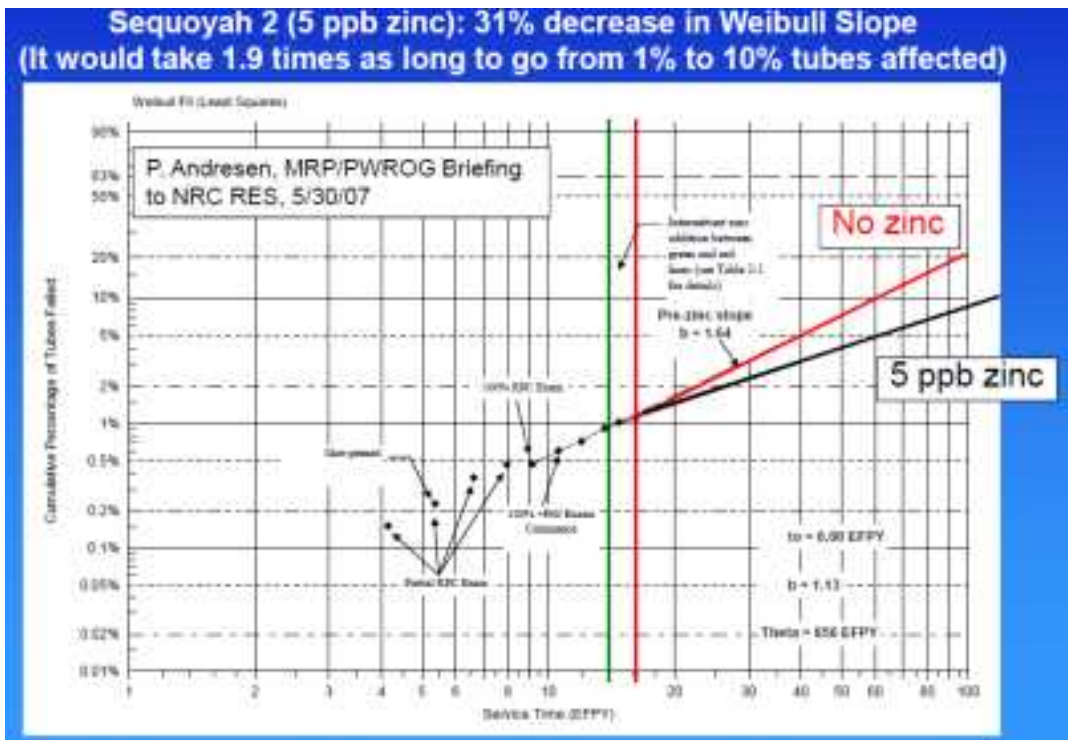
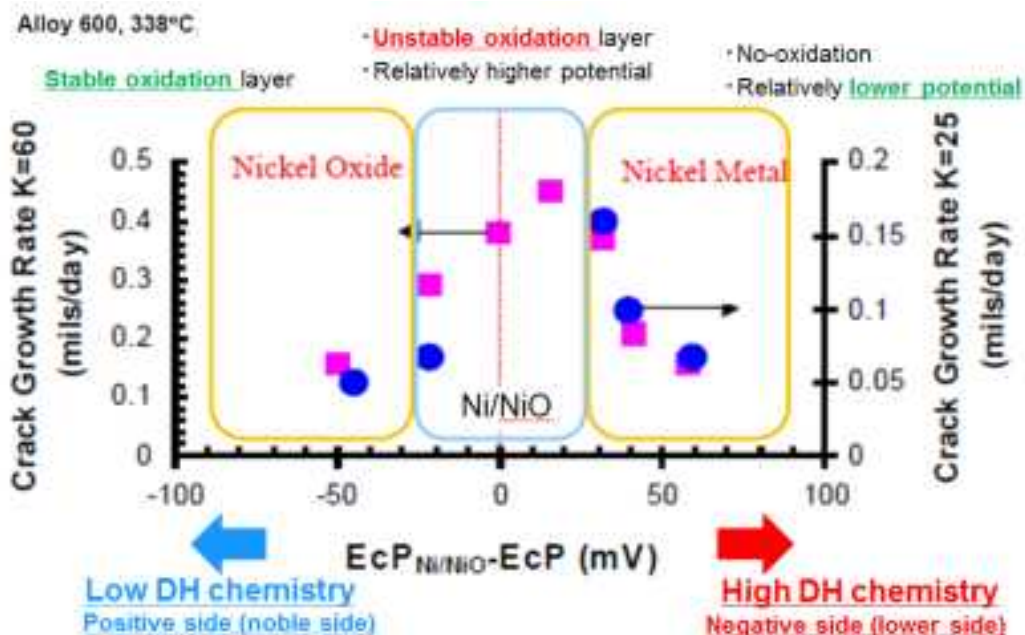


図 4.2.2-35 SG 損傷確率に対する Zn 注入の影響評価(ワイブル分布)[4.2.2-7]



【解説】

- ・PWSCC 進展速度が DH 濃度に対してピークを示す事については未だ研究者間で議論されている段階であるが、ピーク位置が Ni/NiO 平衡水素濃度近傍に認められるという報告がある。
- ・き裂進展速度に対する Ni/NiO 平衡水素濃度の影響については、腐食電位とき裂先端の皮膜安定性から考察されており、鋼 DH 側では Ni 安定となり腐食電位は低くなり腐食環境としてはより還元環境となるため腐食感受性は低くなる。一方で低 DH 側では腐食電位は貴側にシフトするものの、NiO 安定となるためき裂先端に保護皮膜が形成されるため割れ感受性は低くなると考えている。
- ・つまり Ni/NiO 平衡水素濃度近傍はき裂先端における皮膜形成が不安定であり、かつ腐食電位が相対的に高い条件となるため、き裂進展速度が高くなるとの解釈がなされている。

図 4.2.2-36 600 合金のき裂進展速度に対する相対腐食電位の影響<sup>[4.2.2-8]</sup>

(横軸：Ni/NiO 平衡水素濃度における腐食電位基準とした腐食電位)

## (2) 水のラジオリシスと腐食電位に及ぼす水質パラメータ影響評価

### a. 背景と目的

PWR 一次系水(RCS 水)には高濃度の水素を注入しているため、PWSCC 等の電気化学的な事象を伴うと考えられる材料劣化と腐食電位(ECP)の関連を考慮する必要性が低く、これまでに収集された既往の知見は限定的である。一方、近年、溶存水素濃度(DH)の最適化検討が進められており、ニッケル基合金やステンレス鋼の経年化に対する RCS 水中の DH や微量添加元素の影響検討へのニーズが高まってきており、特に原子炉内での放射線による RCS 水のラジオリシスで生成する  $O_2$  や  $H_2O_2$  等の酸化剤濃度と ECP、材料劣化の相関について、既往知見に基づいた検討が必要となってきた。

DH は ECP と直接的な関係に有ることや水のラジオリシスによって生成する放射線分解生成物が ECP に影響すること等の知見に基づいて、水のラジオリシスと ECP の関係評価が広く実施されている。これまでの知見によると水のラジオリシス解析では“ $H_2+OH \rightleftharpoons H_2O+H^\bullet$ ”の反応がキーであり、この反応に係る速度定数と G 値が重要であるが、一方で用いる数値(データセット)によって、放射線分解生成物、特に長寿命の酸化種である  $H_2O_2$ 、 $O_2$  の濃度が変化し、ECP にも影響することも知られている。加えて室温における反応速度定数及び G 値は整備されてきているが、現状では、高温(約  $300^\circ C$ )において利用可能な信頼性の高いデータセットが整備されているとは言い難い。

そこで本項では、特に PWR 一次系水(RCS 水)における水のラジオリシスで生成する酸化剤濃度と ECP の関係評価に着目して既往研究成果の調査と整理を行った。併せて、使用する数値(反応速度定数、G 値)の不確かさを考慮してパラメータ計算を行って放射線分解生成物( $H_2O_2$ 、 $O_2$ )の生成量に及ぼす影響の大きい因子を明らかにした。



## b. PWR一次系水(RCS水)を対象としたラジオリシスの検討

表 4.2.2-10 に示す評価条件で計算を実施して、放射線分解生成物の濃度の差異について評価した。

### ①G値の影響

下記の 3 ケースについて、溶存水素濃度(以下 DH 濃度と略す)をパラメータにして、O<sub>2</sub> 濃度と H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 濃度を計算した。

- ・ ケース 1 : 表 4.2.2-11<sup>[4.2.2-9, 10]</sup>の現行のデータを使用
- ・ ケース 2 : 表 4.2.2-11 の Sunaryo<sup>[4.2.2-11]</sup>らのデータを使用
- ・ ケース 3 : 表 4.2.2-11 の Macdonald<sup>[4.2.2-12]</sup>のデータを使用

なお、反応速度定数は、いずれも表 4.2.2-12 の AECL のデータを使用した。

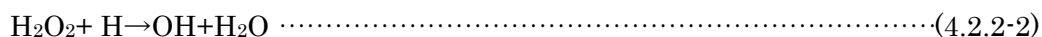
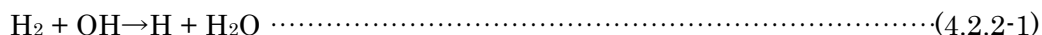
いずれのケースも、DH 濃度 0.5~30 cc/kg-H<sub>2</sub>O の範囲で、定常濃度に到達した。図 4.2.2-37 はその例として示す。また定常に達したときの濃度と DH 濃度の関係を図 4.2.2-38 に示すが、この図から以下のことがわかった。

(a)いずれのケースも、DH 濃度が低くなるにつれて、O<sub>2</sub> 濃度と H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 濃度が高くなる傾向にある。

(b)H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 濃度は、ケース 1 が最も低く、ケース 2 とケース 3 の方が高い値を示している。

(c)O<sub>2</sub> 濃度は、ケース 2 が最も低い値を示している。

上記(a)については、H<sub>2</sub> を添加することで、以下の反応が連鎖的に進行することで、水の分解が抑制されたと考えられる(図 4.2.2-39 参照)。



上記(b)のケース 1 で H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 濃度が低くなったのは、の使用する G 値において、現行のモデルの H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> の G 値が小さいことが考えられる。また、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 濃度が変化することで、O<sub>2</sub> 濃度にも影響したと考えられる。G 値は、他の化学種の G 値に比べてばらつきが大きく、今後精度向上が望まれる。

### ②反応速度定数の影響

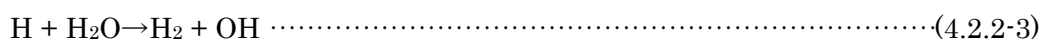
水素添加時の主反応を表 4.2.2-12 の黄色のセルで示す。このうち、水の分解抑制に影響が大きいと考えられる反応式 No.32b に着目して、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 濃度と O<sub>2</sub> 濃度を計算することで、濃度への影響を把握した。

ケース 1 を基本にして、DH 濃度 30 cc/kg-H<sub>2</sub>O の場合について、反応式(4.2.2-1)の反応速度定数を 10 倍にした場合(ケース 1-a)の計算結果を図 4.2.2-40 に示す。なお、他の反応速度定数および G 値は、ケース 1 と同じ値とした。この図から、反応式(4.2.2-1)の反応速度定数が大きくなると O<sub>2</sub> 濃度が大きく低下することが分かる。これは、図 4.2.2-39 の連鎖反応が進行することにより、O<sub>2</sub> と H ラジカルとの反応が促進されたためと考

えられる。

一方、反応式(4.2.2-2)の反応速度定数を 10 倍にした場合(ケース 1-b)の計算結果を図 4.2.2-41 に示す。この図から、反応式(4.2.2-2)の反応速度定数が大きくなると O<sub>2</sub> 濃度が大きく低下することが分かる。

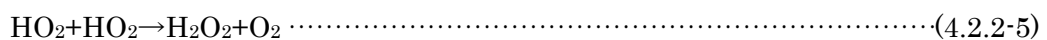
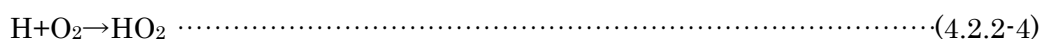
次に、DH 濃度を 5 cc/kg-H<sub>2</sub>O に低下した場合について、同様に反応式(4.2.2-1)と反応式(4.2.2-2)の反応速度定数を変化させたときの H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 濃度と O<sub>2</sub> 濃度を計算した。さらに、H<sub>2</sub> を添加した際の水の分解反応抑制には、下記に示す反応式(4.2.2-1)の逆反応が重要と考えられている。そこで、(4.2.2-3)式についても、反応速度定数を変化させても、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 濃度と O<sub>2</sub> 濃度に及ぼす影響を確認した。



H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> の定常濃度について整理した結果を表 4.2.2-13 に示す。この表から、DH=5 cc/kg-H<sub>2</sub>O の場合において、反応式(4.2.2-2)については、反応速度定数の違いによる濃度の影響は殆ど見られない。しかし、反応式(4.2.2-1)と反応式(4.2.2-3)の反応速度定数による H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 濃度と O<sub>2</sub> 濃度の変化が見られる。このことから、今後反応式(4.2.2-1)と反応式(4.2.2-3)の反応速度定数の精度を向上させることが望まれる。

### ③ 溶存酸素の影響

起動時には、一次冷却水中の溶存酸素は、ヒドラジン添加による O<sub>2</sub> スキャベンジングによって除去される。しかし、酸素が残存していた場合には、水の放射線分解によって過酸化水素が生成することが懸念される。そこで、溶存酸素濃度が運転中の制限値(0.1ppm)相当で存在した場合について、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> の濃度を計算した。計算結果を図 4.2.2-42 に示す。この図から、十分時間が経つと、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> の濃度は低下して、水の分解が抑制される。これは、主に以下の反応による。



計算条件は異なるが、酸素を含んだ水を照射したときの計算例を図 4.2.2-43 に示す。この図においても、同様に H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> の濃度が低下していることが分かる。

表 4.2.2-10 評価条件

項目	設定値	
	項目	数値
水質条件*1	pH(at 300°C)	6.8
	ボロン濃度(ppm)	1200
	溶存水素濃度(cc/kg-H <sub>2</sub> O)	0.5、1、5、15、30(5 ケース)
照射条件*1	γ線の線量率(W/g)	1.5
	高速中性子線の線量率(W/g)	5.0
	α線の線量率(W/g)*2	0.786
	熱中性子束(n/cm <sup>2</sup> /sec)	4.2E+13
データセット	G 値	表 4.2.2-11 参照 現行の反応速度定数をベースに、G 値の違いによる濃度への影響を評価する。
	反応速度定数	表 4.2.2-12 参照 キーとなる反応の文献値をパラメータとして、濃度への影響を評価する。 G 値は、現行の値をベースとする。

\*1 : PWR 一次系(4 ループ)の代表的な条件、H26 年度調査委託「原子炉構造材料劣化に関わる水質影響の調査」調査報告書(MHI 資料 ZCS-GE-150019(改1))における解析条件から引用した。

\*2 : <sup>10</sup>B(n, α)<sup>7</sup>Li 反応による。

表 4.2.2-11 評価に使用した G 値

モデルの種類	放射線の種類	温度(°C)	化学種						文献	備考
			e <sub>aq</sub> <sup>-</sup>	H	OH	H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	HO <sub>2</sub>		
現行モデル	γ線	300	3.43	1.57	5.74	0.64	0.27	0	A.J.Elliot, 2009	現行の使用数値
	高速中性子	300	1.29	0.47	2.87	1	0.4	0.03	同上	
	α線	20	0.04	0.16	0.1	1.7	1.3	0.3	G.H.Jenks,1965	
Sunaryo	γ線	300	3.58	0.92	4.79	0.64	0.495	0	G.R.Sunaryo,2008	
	高速中性子	300	0.68	0.52	1.66	1.52	1.29	0		
	α線	300	0.6	0.5	1.7	1.6	1.24	0.04		
Macdonald	γ線	285	4.15	1.08	3.97	0.62	1.25	0	M.U.Macdonald et al.,2007	
	高速中性子	285	0.93	0.5	1.09	0.88	0.99	0.04		
	α線	270-300	0.13	0.12	0.45	1.65	1.55	0		

表 4.2.2-12 反応速度定数の一覧(色のついたセルは、水の分解に寄与する主要な反応)

放射線分解反応式(1/2)				放射線分解反応式(2/2)					
No.	反応式	反応速度定数(L/mol/sec)(高温)			No.	反応式	反応速度定数(L/mol/sec)(高温)		
		300°C AECL	300°C Sunaryo	300°C Macdonald			300°C AECL	300°C Sunaryo	300°C Macdonald
R 2	eaq <sup>-</sup> + eaq <sup>-</sup> + 2H <sub>2</sub> O → H <sub>2</sub> + 2OH <sup>-</sup>	1.85E+10	6.59E+11	5.68E+10	R 23f	H <sub>2</sub> O → H <sup>+</sup> + OH <sup>-</sup>	6.52E-02	6.90E-02	2.96E-04
R 3	H <sup>+</sup> + H <sup>+</sup> → H <sub>2</sub>	1.04E+11	1.00E+11	1.14E+11	R 23b	H <sup>+</sup> + OH <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> O	1.13E+12	1.07E+12	1.64E+12
R 4	OH <sup>+</sup> + OH <sup>+</sup> → H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	9.86E+09	2.09E+10	5.12E+10	R 24f	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> → H <sup>+</sup> + HO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	2.52E+01	4.15E+00	-
R 5	eaq <sup>-</sup> + H <sup>+</sup> + H <sub>2</sub> O → H <sub>2</sub> + OH <sup>-</sup>	4.97E+11	5.66E+11	2.84E+11	R 24b	H <sup>+</sup> + HO <sub>2</sub> <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	5.68E+11	6.12E+11	-
R 6	eaq <sup>-</sup> + OH <sup>+</sup> → OH <sup>-</sup>	3.72E+11	1.40E+11	2.73E+11	R 25f	OH <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O + HO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	1.36E+11	1.47E+11	6.90E+09
R 7	H <sup>+</sup> + OH <sup>+</sup> → H <sub>2</sub> O	6.34E+10	6.87E+10	2.27E+11	R 25b	HO <sub>2</sub> <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> O → H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + OH <sup>-</sup>	1.76E+08	1.39E+08	1.16E+05
R 8	eaq <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> → OH <sup>+</sup> + OH <sup>-</sup>	2.85E+11	2.76E+11	1.48E+11	R 27f	OH <sup>+</sup> + OH <sup>-</sup> → H <sub>2</sub> O + O <sup>-</sup>	1.36E+11	1.47E+11	-
R 9	eaq <sup>-</sup> + O <sub>2</sub> → O <sub>2</sub> <sup>-</sup>	2.18E+11	2.78E+11	2.16E+11	R 27b	O <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> O → OH <sup>+</sup> + OH <sup>-</sup>	1.76E+08	1.39E+08	-
R 11	eaq <sup>-</sup> + HO <sub>2</sub> <sup>+</sup> → HO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	1.61E+11	1.78E+11	2.27E+11	R 28f	HO <sub>2</sub> <sup>+</sup> → H <sup>+</sup> + O <sub>2</sub> <sup>-</sup>	1.55E+05	1.98E+05	9.09E+06
R 12	H <sup>+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> → H <sub>2</sub> O + OH <sup>+</sup>	2.15E+09	1.13E+09	1.69E+09	R 28b	H <sup>+</sup> + O <sub>2</sub> <sup>-</sup> → HO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	5.68E+11	6.12E+11	5.68E+11
R 13	H <sup>+</sup> + O <sub>2</sub> → HO <sub>2</sub> <sup>+</sup>	6.06E+10	1.03E+11	2.16E+11	R 30b	eaq <sup>-</sup> + H <sup>+</sup> → H <sup>+</sup>	7.11E+11	5.15E+11	2.73E+11
R 14	H <sup>+</sup> + HO <sub>2</sub> <sup>+</sup> → H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (or 2OH)	2.14E+11	7.78E+10	2.27E+11	R 31f	H <sup>+</sup> + OH <sup>-</sup> → eaq <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> O	8.01E+09	4.22E+10	2.27E+08
R 15	H <sup>+</sup> + O <sub>2</sub> <sup>-</sup> → HO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	2.14E+11	7.78E+10	2.27E+11	R 31b	eaq <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> O → H <sup>+</sup> + OH <sup>-</sup>	2.01E+03	9.94E+03	1.82E+02
R 16	OH <sup>+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> → HO <sub>2</sub> <sup>+</sup> + H <sub>2</sub> O	4.23E+08	5.91E+08	4.24E+08	R 32f	H <sup>+</sup> + H <sub>2</sub> O → H <sub>2</sub> + OH <sup>+</sup>	2.09E+03	5.77E+03	1.18E-03
R 17	OH <sup>+</sup> + O <sub>2</sub> <sup>-</sup> → OH <sup>-</sup> + O <sub>2</sub>	8.98E+10	8.97E+10	1.36E+11	R 32b	H <sub>2</sub> + OH <sup>+</sup> → H <sup>+</sup> + H <sub>2</sub> O	7.83E+08	1.40E+09	1.41E+09
R 18	OH <sup>+</sup> + HO <sub>2</sub> <sup>+</sup> → H <sub>2</sub> O + O <sub>2</sub>	3.20E+10	3.20E+10	1.36E+11	R 35	O <sup>-</sup> + HO <sub>2</sub> <sup>-</sup> → OH <sup>-</sup> + O <sub>2</sub> <sup>-</sup>	8.76E+10	-	-
R 19	HO <sub>2</sub> <sup>+</sup> + HO <sub>2</sub> <sup>+</sup> → H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	4.10E+07	2.69E+07	1.03E+08	R 36	O <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> → H <sup>+</sup> + OH <sup>-</sup>	1.55E+09	1.75E+09	-
R 22a	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> → 2OH <sup>+</sup>	-	2.14E-01	2.85E-01					

注) 文献に記載がないものは、'-'とした。

注) 文献に記載がないものは、'-'とした。

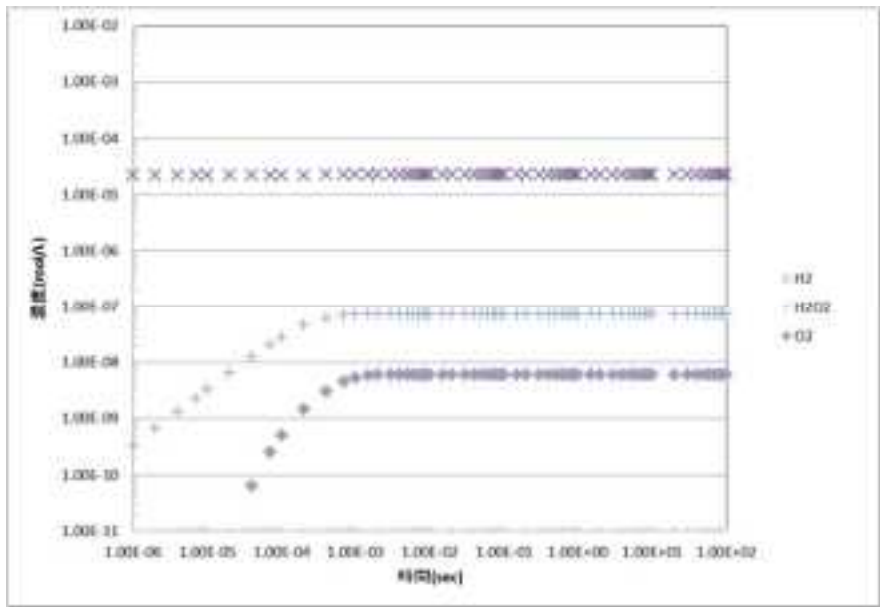


図 4.2.2-37 放射線分解生成物の時間変化(ケース 1、DH 濃度 0.5cc/kg-H<sub>2</sub>O)

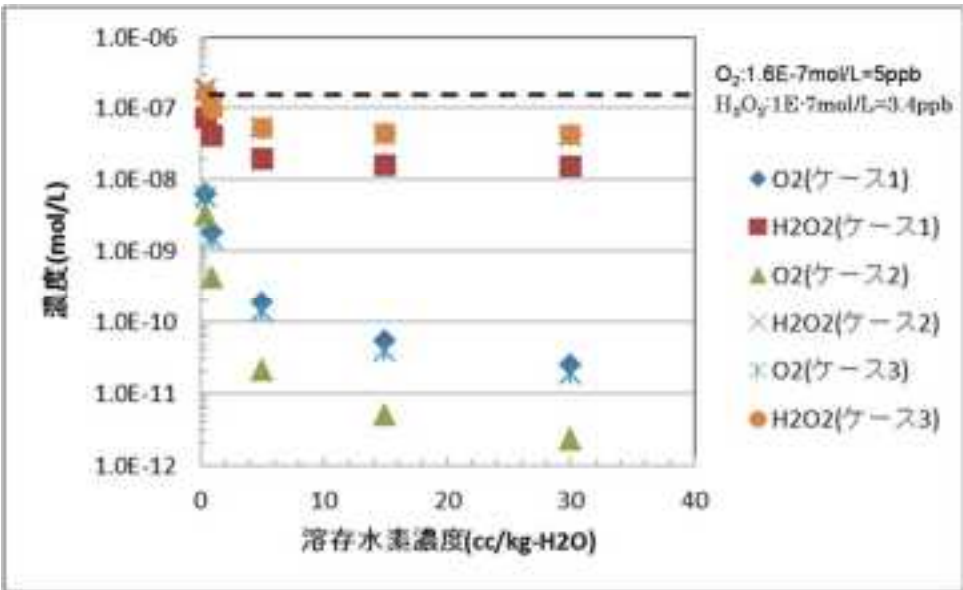


図 4.2.2-38 放射線分解生成物濃度と DH 濃度の関係

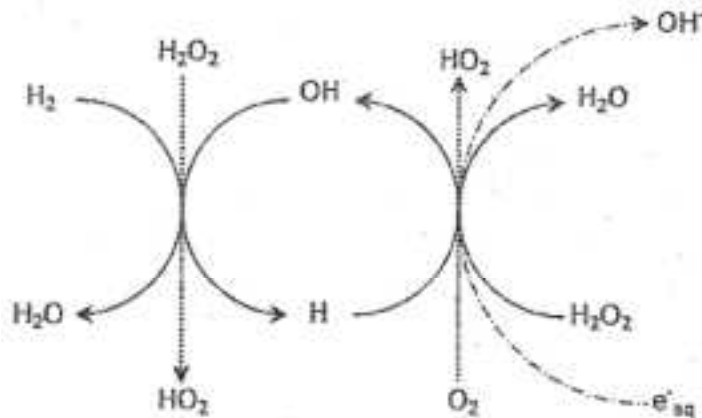


Figure1: The chain reaction mechanism  
(dot line: breaking chain reaction, solid line:  
chain reaction, dash dot line: support chain reaction)

図 4.2.2-39 水素添加時の連鎖反応のメカニズム<sup>[4.2.2-13]</sup>

表 4.2.2-13 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 濃度と O<sub>2</sub> 濃度の相対変化(DH=5 cc/kg-H<sub>2</sub>O の場合)

ケースNo.	反応式No.			定常濃度(mol/l)		相対濃度*		備考
	R32b (3.4.1-1)式	R12 (3.4.1-2)式	R32f (3.4.1-3)式	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	
1	1	1	1	1.97E-08	1.89E-10	1.0	1.0	リファレンスケース
q1	10	1	1	1.48E-08	1.48E-11	0.8	0.1	(3.4.1-1)式の影響確認
q2	0.1	1	1	7.19E-08	5.91E-09	3.7	31.3	
r1	1	10	1	1.92E-08	1.89E-10	1.0	1.0	(3.4.1-2)式の影響確認
r2	1	0.1	1	1.97E-08	1.89E-10	1.0	1.0	
s1	1	1	10	4.69E-08	2.46E-09	2.4	13.1	(3.4.1-3)式の影響確認
s2	1	1	0.1	1.70E-08	8.28E-11	0.9	0.4	

\* :リファレンスケースに対する相対値

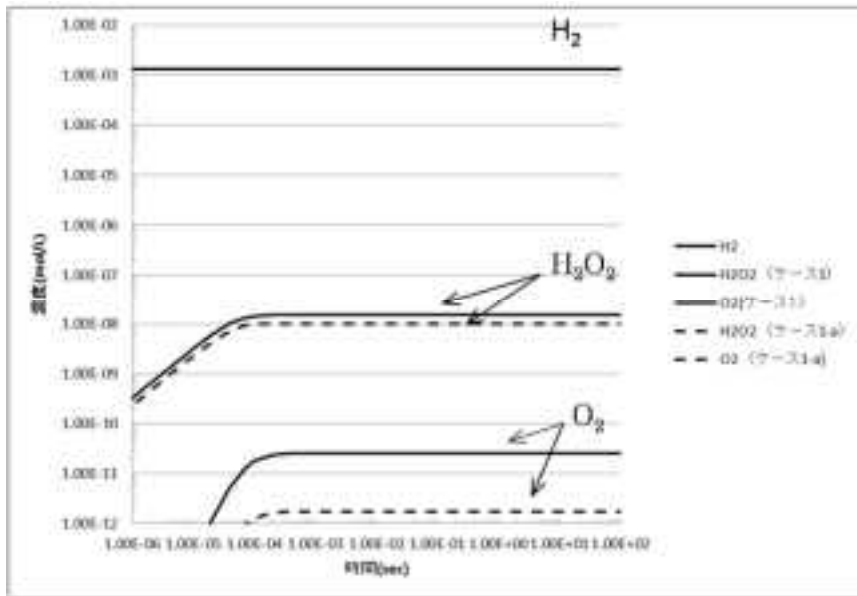


図 4.2.2-40 O<sub>2</sub>濃度と H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>濃度の時間変化(DH 濃度 30 cc/kg-H<sub>2</sub>O)  
(ケース 1 の反応式(4.2.2-1)をパラメータにした)

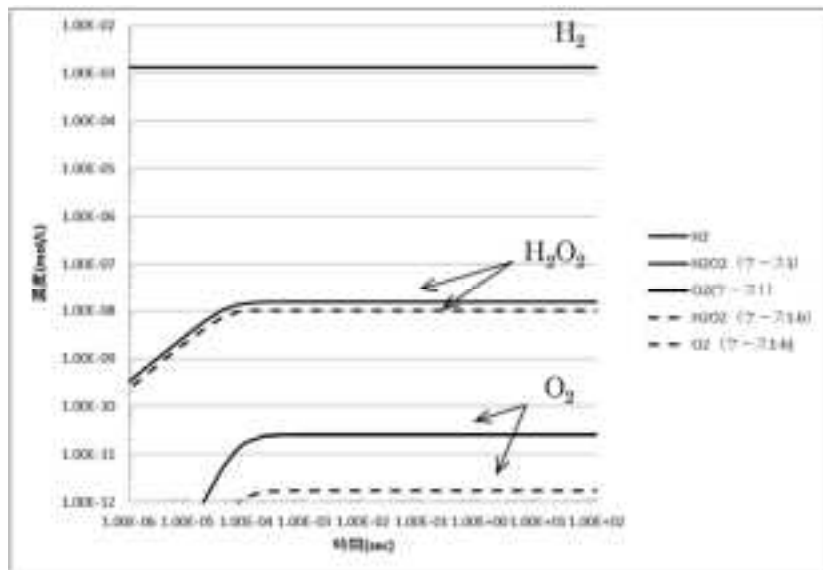


図 4.2.2-41 O<sub>2</sub>濃度と H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>濃度の時間変化(DH 濃度 30 cc/kg-H<sub>2</sub>O)  
(ケース 1 の反応式(4.2.2-2)をパラメータにした)

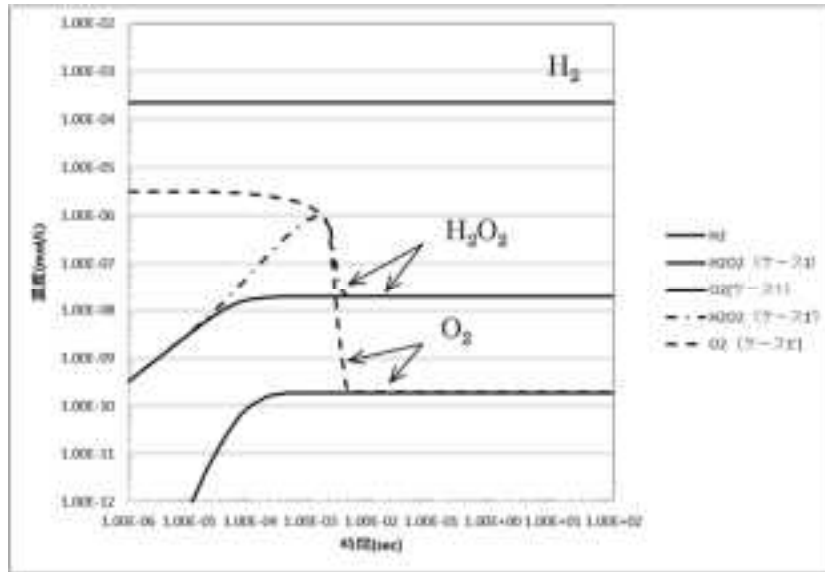


図 4.2.2-42 ケース 1 のデータセットに基づく濃度変化  
(溶存水素 : 5cc/kg-H<sub>2</sub>O、溶存酸素濃度 : 0.1ppm)

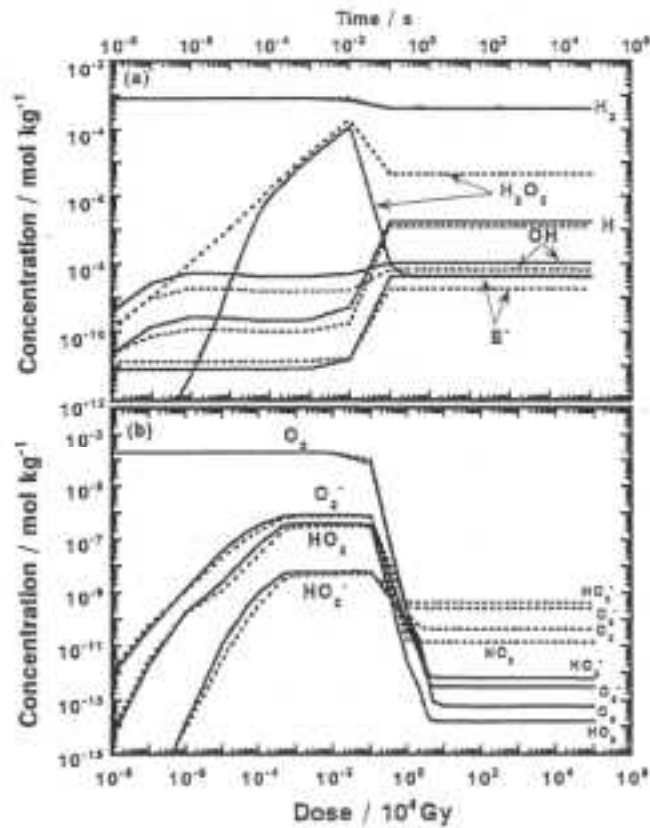


Fig. 4. Calculated behavior of radiolysis products in ground water induced by fast neutron-irradiation with dose rate of 10 kGy/h,  $T = 250^\circ\text{C}$ . Present (---), A. Burns (—).

図 4.2.2-43 溶存酸素を含む水を高温(250°C)で中性子照射したときの計算例[4.2.2-14]



### c. PWR一次系水(RCS水)を対象としたECP評価の検討

#### ①既往知見の整理

PWR 一次系水質に係わる最新の文献調査により、ECP 評価の妥当性を示すための高温における ECP の測定データを調査、整理した。また、海外における ECP 評価の動向について調査した。

その上で、今後必要となる ECP 評価のための測定条件(水質、温度、流動条件など、できる限り公開可能なプラント情報)を整理し、調査した結果に基づき、不足しているデータ等や評価結果の検証方法などの課題を抽出した。

#### i)国内BWRでのECP測定

BWR の水質環境における ECP の測定データおよび計算値を図 4.2.2-44 に示す。O<sub>2</sub> 濃度と H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 濃度が高くなると、ECP も高くなる傾向にある。O<sub>2</sub> 濃度よりも H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 濃度の方が、ECP への影響が大きい。

#### ii)国内PWRでのECP測定

PWR 炉心条件での冷却材中の溶存水素濃度を変化させたときの腐食電位を評価した結果を図 4.2.2-45 に示す。この図において、ECP の測定値は、溶存水素濃度が高くなるにつれて、低下する傾向にあった。図中の計算値は、下記に示す酸化性化学種の濃度(Ox)と還元性化学種の濃度(Red)の比と ECP の相関式を用いて計算したもので、溶存水素濃度が低いほど、Ox/Red 比が高くなるため、ECP が高くなり、測定値と同様の傾向を示した。

#### iii)海外の動向

PWR 一次系水質条件での ECP を測定した事例を以下に示す。

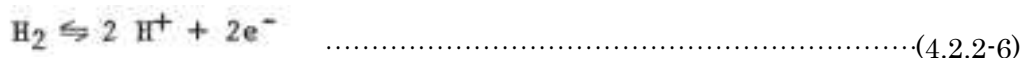
#### (ア)PWR一次冷却水(非照射場)(A. Molander et al., 1986)(スウェーデン) [4.2.2-17]

PWR 一次系水質(表 4.2.2-14 参照)における種々の材料の ECP を測定した。図 4.2.2-46 に示す様に、ホットレグから試料採取ラインの途中にオートクレーブを設けて、オートクレーブに入り口と出口の2ヶ所で ECP を測定した。炉心から測定系までの時間は、約 10sec である(炉心内の照射場での測定ではない)。

定常状態での測定結果を図 4.2.2-47 に示す。いずれの材料も ECP は約-700 mV 程度に維持されている。ECP が若干上昇傾向にあるのは、温度が低下傾向にあることによる。また、停止時と起動時の ECP の測定結果をそれぞれ図 4.2.2-48 と図 4.2.2-49 に示す。停止時には、pH の上昇、溶存水素濃度の低下、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> の生成に伴い、ECP が上昇した。起動時には、pH の上昇、H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> と O<sub>2</sub> 濃度の急激な低下(数 ppm から 10ppb 以下)により、ECP が低下した。

運転中は、水素が添加されているため、ECP は下記の反応によって電位が支配されて

いると考えられる。



pH=7.3、DH=4ppm、T=255°Cにおける上記反応における電位は、-758 mV<sub>SHE</sub>であり、測定値との差は 45 mV であり、よく一致していた。

(イ)一次系水質条件(照射の影響)(R. W, Bosch et al., 2007)(ベルギー) [4.2.2-18]

PWR 水質条件におけるステンレス鋼(ANSI304 と ANSI316)の ECP 測定を材料試験炉の PWR ループで実施した(図 4.2.2-50 参照)。水質条件を表 4.2.2-15 に示す。

ECP の測定は、照射場と非照射場で実施している。ECP 測定場所における温度と炉出力を図 4.2.2-51 に示す。また、ECP の測定結果を図 4.2.2-52 に示す。この図から、照射場と非照射場で ECP にあまり差はみられず、平均的には約-780 mV であった。ECP の値は、300°Cでの水素を含んだ水の電位に近い値であった。

照射中は、γ線加熱による温度上昇とコンプトン効果により、アノード電流密度が増加する。一方、カソード電流密度は、放射線分解による生成物の影響で上昇する。照射によって酸化膜が成長することで、アノード電流密度を低下させて、結果的に、照射場と非照射場で ECP にあまり差がなくなると説明されている(図 4.2.2-53 の下図(COFIMA 部分))。

(ウ)一次系水質条件(プロトン照射) (フランス) [4.2.2-19]

PWR 運転条件におけるステンレス鋼の腐食に及ぼす照射効果に関するデータは少ないため、PWR 一次系水質に近い条件でプロトン照射した試験により ECP を測定した。試験装置を図 4.2.2-54 に示す。内容積は 30ml 程度で、容器は Zr 合金をあらかじめ空気中で 500°Cで加熱させて酸化したものを用いた。

試料には、厚さ 1mm のステンレス鋼(316L)を用いた。セル内の水溶液は、[B]=1000ppm, [Li]=2ppm で、Ar/H<sub>2</sub> 4%(O<sub>2</sub><0.2ppm)のガスで脱気した。溶存水素濃度は、厳密に PWR 水質に固執したものではない。

プロトン照射には、加速器(サイクロトロン)を用いて、試料を通過するエネルギー(34MeV)で、フラックスは 6.6×10<sup>11</sup>~6.6×10<sup>15</sup> H<sup>+</sup>/m<sup>2</sup>/sec とした。参照電極(Pt)は、照射によって水の放射線分解で生成する酸素の影響を受けない様、試料から離れた位置に設置した。

プロトン照射したときの ECP の測定結果を図 4.2.2-55 に示す。この図から、低いフラックスの照射(IR01~IR03)では、ECP に及ぼす照射の影響は見られなかった。4 回目の照射(IR04)では、照射によって 50 分で ΔE=-18 mV の低下が見られた。IR05 では、ΔE=-25 mV 低下しているが、その後、緩やかに電位が上昇している。

照射による急激な電位の低下は、金属と溶液の境界における水の放射線分解生成物の

生成による影響と考えられる。照射後においても、安定な放射線分解生成物は残るため、電位に影響する。照射前後で安定な電位が異なるのは、溶存している H<sub>2</sub> 濃度が放射線分解によって変化したためと考えられる。試験結果を理解するための放射線分解コードを用いた検討は、今後の重要なステップとされている。

図 4.2.2-56 から、照射中と照射を停止したときでの電位の変化は、低温では温度との相関が見られるが、高温(235℃以上)では、温度の影響が見られなくなる傾向にある。放射線分解生成物(G 値)や放射線分解反応の反応速度の温度依存性が関係していると考えられるが、文献中には説明の記載はない。

## ②ECP評価に必要なデータと課題

前項では、水の放射線分解評価を実施したが、本評価結果に基づき、今後、材料健全性の指標となる ECP を評価する必要がある。ECP 評価のためのフローを図 4.2.2-57 に示す。ECP 評価モデルは、元々BWR 水質条件の評価のために開発されたものであるが、PWR においても基本的には、本モデルが適用できると考えられる。ただし、評価にあたって、電気化学的なデータや冷却水の流動に関わるデータが必要となってくるが、現状では、BWR に関するデータしかなく、これを利用せざるを得ない。

水の放射線分解および ECP の評価において、今後、必要と思われるデータを表 4.2.2-16 に示す。PWR の方がより高温である(最大 320℃)ため、熱流動等の温度依存性のあるものについては、外挿できると考えられる。一方、金属の腐食に関するデータは、PWR 水質条件での実験で取得する必要があるが、当面は、現状の BWR のデータで対応する。

ECP 評価モデルに基づく評価結果を上述の前項で調査した ECP の測定データと比較することで、妥当性を検討することとする。

前項で検討した様に、溶存水素濃度が低くなると、水の放射線分解による H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 及び O<sub>2</sub> 濃度が高くなるため、ECP 評価モデルを作成することで、ECP に及ぼす照射の影響を評価することができる。ただし、ラジカル自体(H、OH など)の ECP への影響は、これまで検討されておらず、将来的な課題である。

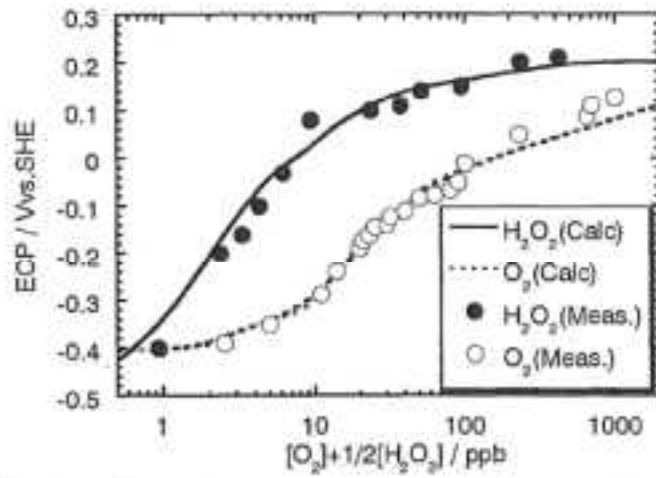


Fig. 11 Comparison between experimentally obtained ECP<sup>(3)</sup> and calculated ECP<sup>(2)</sup>

図 4.2.2-44 ECP と H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 及び O<sub>2</sub> 濃度の関係(Y. Wada et al., 2000) [4.2.2-15]

$$\text{ECP} = 350 \cdot \log(\text{Ox/Red}) - 100, \quad (4)$$

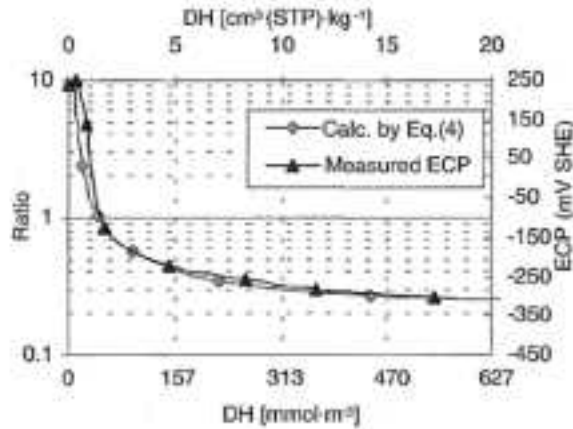


Fig. 6 In-pile stainless steel ECP (SHE) and ratio of reactive oxidizing species to reactive reducing species in INCA loop as function of DH level (1,600 ppm B and 2 ppm Li)

図 4.2.2-45 ECP と溶存水素濃度の関係[4.2.2-16]

表 4.2.2-14 PWR 一次系の水質条件[4.2.2-17]

Table 1. Reactor coolant chemistry. Unit operating data at Ringhals 4.

pH	(300°C)	7.3
Lithium	ppm	3.5 - 0.7
Chloride	ppb	< 5
Fluorid	ppb	< 20
Hydrogen	ml/kg	35 - 45
Sulphate	ppb	4 - 7
Phosphate	ppb	< 3
Silica	ppb	150 - 20
Magnesium	ppb	< 2
Potassium	ppb	< 5
Calcium	ppb	< 20
Sodium	ppb	1 - 3
Iron	ppb	2 - 5
Chrom	ppb	< 1
Nickel	ppb	< 1

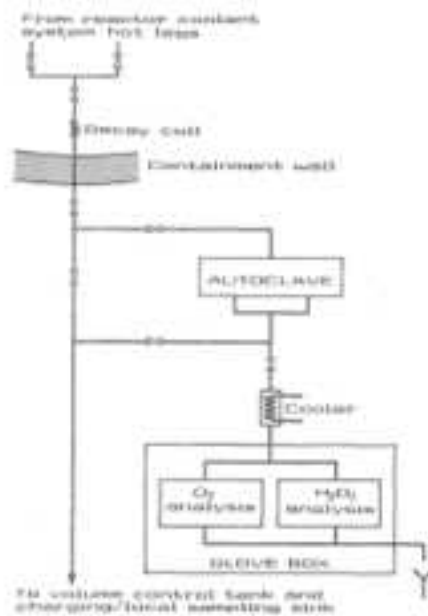


Figure 1. Measuring equipment installed in primary coolant sampling system.

図 4.2.2-46 試料採取系に設置した測定装置[4.2.2-17]

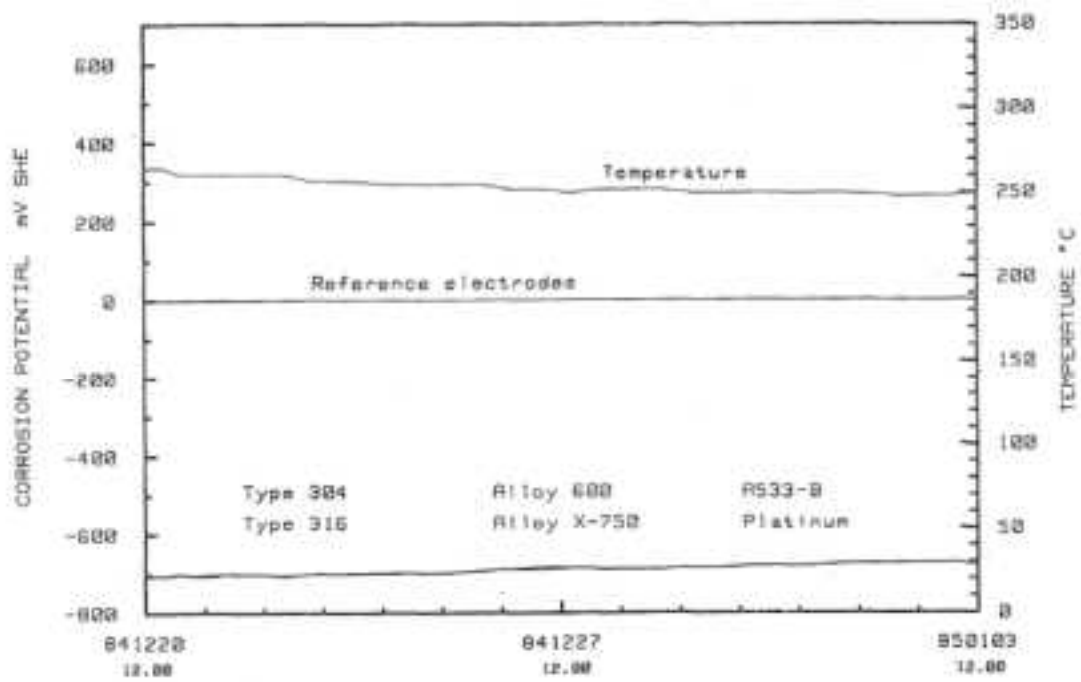


Figure 4. Corrosion potentials during steady reactor operation.

図 4.2.2-47 定常運転状態における ECP の測定例[4.2.2-17]

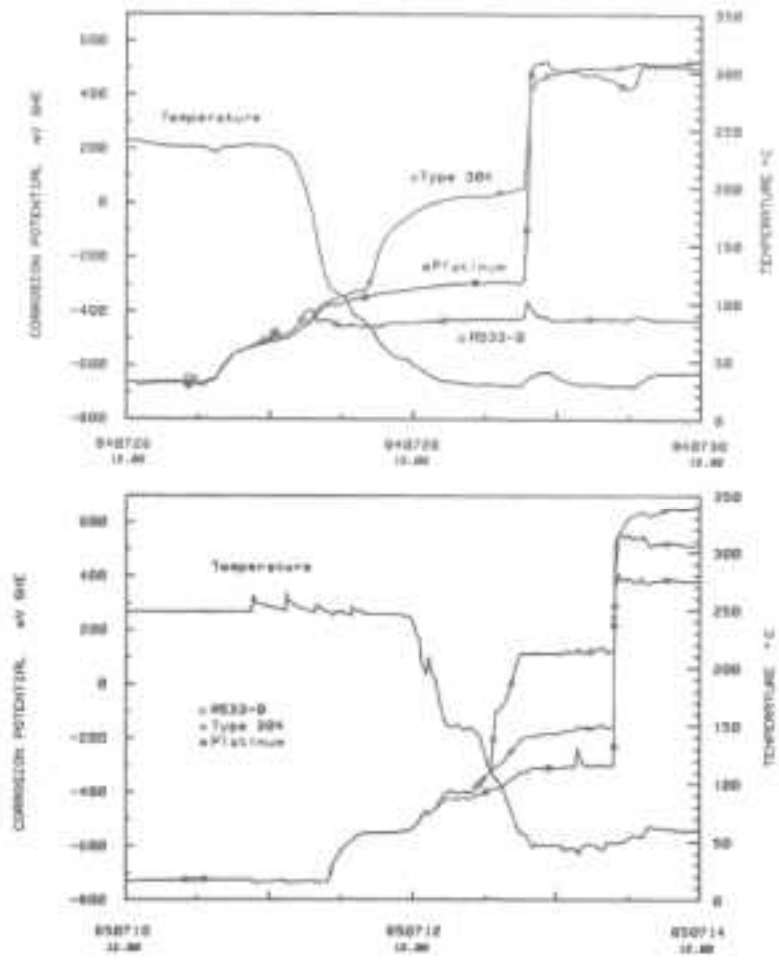


Figure 9. Corrosion potentials during shut-down procedures in 1984 and 1985.

図 4.2.2-48 停止時における ECP の測定例[4.2.2-17]

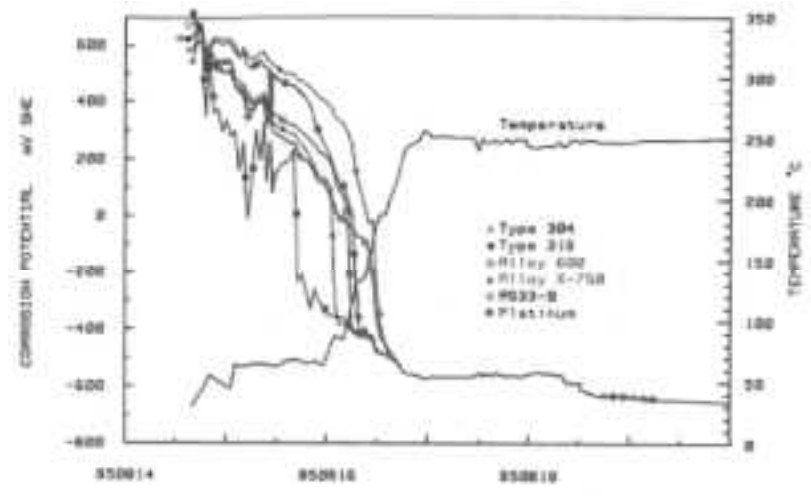


Figure 10. Corrosion potentials during start-up procedure in 1985.

図 4.2.2-49 起動時における ECP の測定例[4.2.2-17]

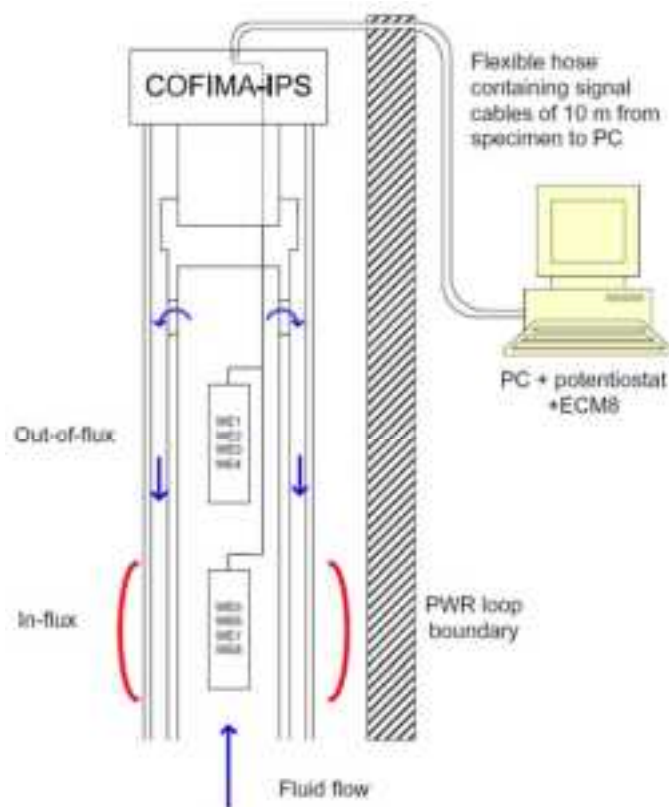


Fig. 3. Schematic of the electrode assembly in the PWR loop.

図 4.2.2-50 PWR ループにおける ECP 測定 の 概念 図 [4.2.2-18]

表 4.2.2-15 PWR 一次系 の 水 質 条 件 [4.2.2-18]

Table 1 Characteristics for IPS3 of the PWR loop CALLISTO	
<i>Nuclear data</i>	
Thermal flux	$0.9-1.0 \times 10^{14}$ n/cm <sup>2</sup> /s
<i>Thermohydraulic data</i>	
Temperature	295-305 °C
Pressure	150-157 bar
Flow rate	±1.1 kg/s
<i>Chemical data</i>	
Boric acid	400 ppm B
Lithium hydroxide	±2 ppm Li
pH	±7.0 (25 °C) and ±7.3 (300 °C)
Hydrogen variations	20-36 cc H <sub>2</sub> (STP)/kg



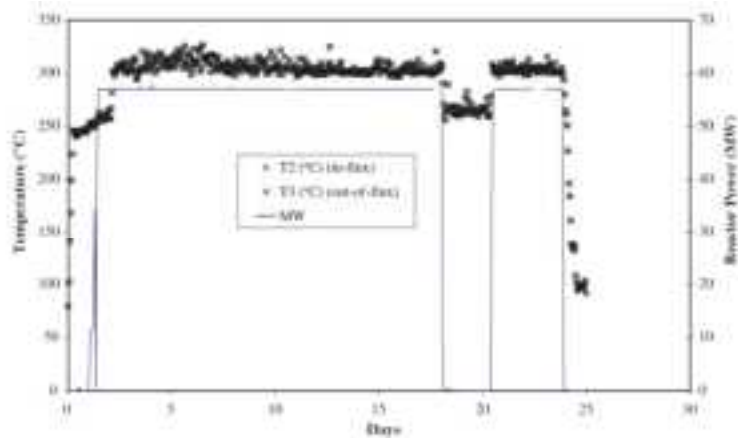


Fig. 5. Water temperature in the CALLISTO PWR loop in and out-of-flux. The distance between T2 and T3 is approximately 1 m.

図 4.2.2-51 ECP 測定場所における温度と炉出力[4.2.2-18]

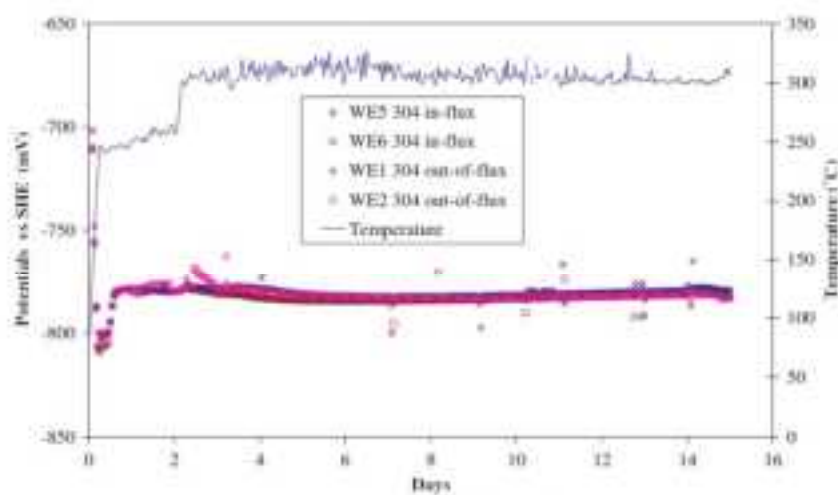


Fig. 6. ECP values of stainless steel 304 in PWR-water at 300 °C.

図 4.2.2-52 300°Cでのステンレス鋼の ECP の測定結果[4.2.2-18]

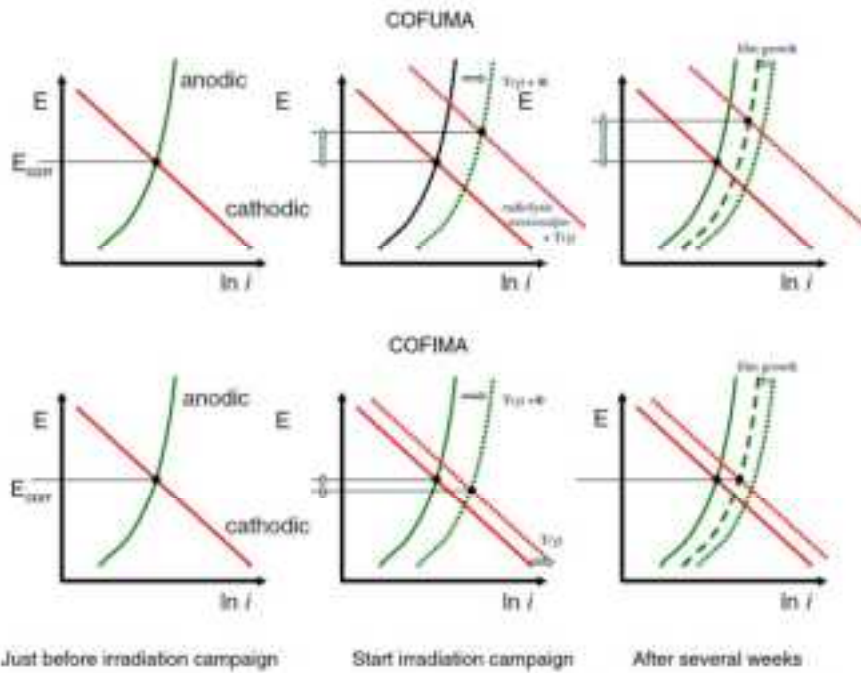


Fig. 10. Evans diagrams explaining the possible difference in ECP evolutions due to radiation between the COFUMA (pure water at 90 °C) and COFIMA (PWR-water 300 °C) irradiation experiments.

注)COFUMA：核融合炉材料の腐食(水素添加なし)、

COFIMA：原子炉材料の腐食(水素添加あり)

図 4.2.2-53 照射による ECP の変化の説明図[4.2.2-18]

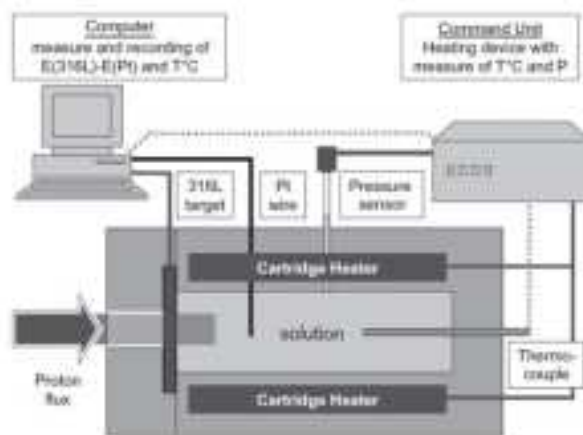


Fig. 1. The high pressure and high temperature electrochemical cell (HP-HV cell).

図 4.2.2-54 高温高圧での ECP 測定装置[4.2.2-19]

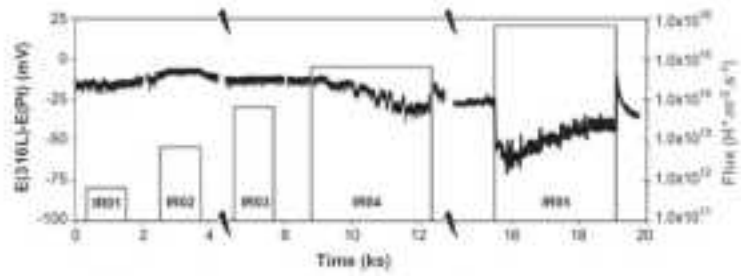


Fig. 3. Influence of the proton flux  $H^+$  22 MeV from  $6.0 \times 10^{11}$  to  $6.0 \times 10^{15} H^+ cm^{-2} s^{-1}$  on the difference of potential between stainless steel and platinum at 300 °C and 90 bar.

図 4.2.2-55 300°Cにおける ECP に及ぼすプロトン照射効果[4.2.2-19]

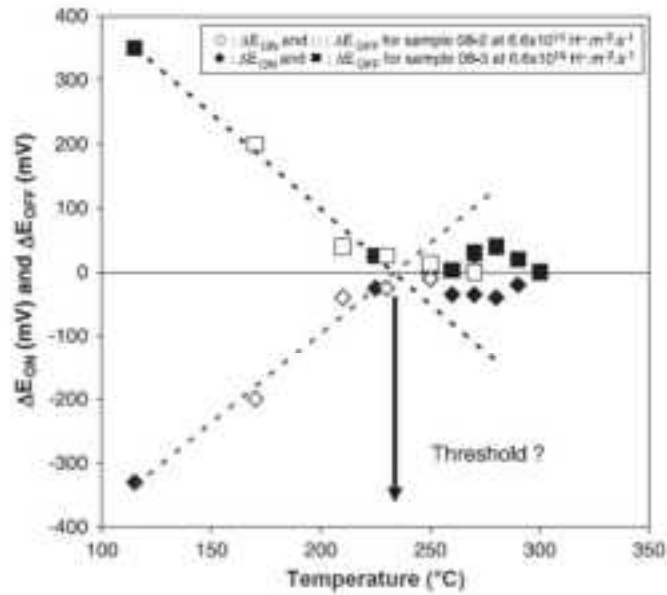


Fig. 7. Potential shift as a function of the temperature when putting the beam on and off, for  $6.6 \times 10^{15} H^+ m^{-2} s^{-1}$  irradiations when decreasing the temperature for sample 08-3 and for  $6.6 \times 10^{14} H^+ m^{-2} s^{-1}$  irradiations when increasing temperature with sample 08-2.

図 4.2.2-56 照射直後の電位変化( $\Delta E_{ON}$ )と照射停止したときの電位変化( $\Delta E_{OFF}$ )の温度との関係[4.2.2-19]

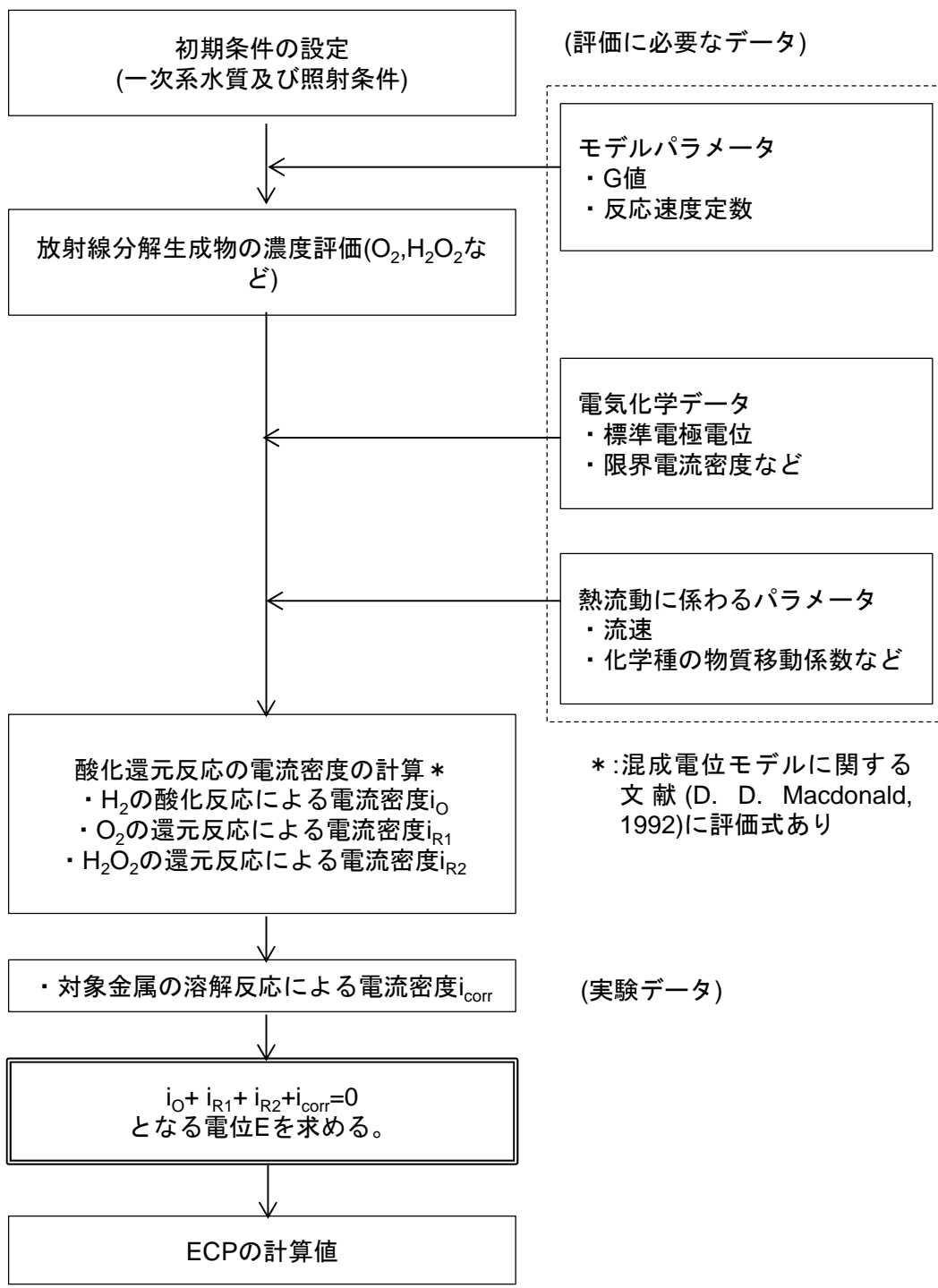


図 4.2.2-57 ECP 計算のフロー図

表 4.2.2-16 評価に必要なデータ\*の現状と今後の対応

	BWR	PWR	課題	今後の対応
1.放射線分解モデル (1)G 値 ・ $\gamma$ 線 ・ 高速中性子線 ・ $\alpha$ 線 ( $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ )	○ △ —	○ △ ×	高温でのデータあり データあるが、不確かさあり 室温のデータのみ	$\alpha$ 線の高温のデータはないが、 $\alpha$ 線のエネルギー寄与は大きくないため、当面は現行のデータで問題ないと考ええる。
(2) 反応速度定数	△	△	高温でのデータセットあり 温度依存性については、不確かさあり	キー反応の反応速度定数の精度向上が必要である。
2.ECP モデル (1)高温での金属の腐食電流密度 ( $i_{\text{corr}}$ )	○	△	PWR 一次系水質条件では SUS304 表面に不動態膜が形成されることで影響は小さい可能性あり	実験でしか求まらないが、当面は文献値を使用する。
(2)材料表面への化学種の物質移動速度に係わるデータ	○	○	PWR の温度まで外挿することで適用可能。	文献に評価式あり [4.2.2-12, 13]。
(3)プラントデータ (線量率、流速等)	△	△	プラント固有の設計データあり	PWR の設計データを入手する。
(4)ラジカルとの反応	×	×	OH などの酸化性ラジカルの影響については不明	実施機関はなく、将来的な課題。

\*) ○：評価に使えるデータあり  
△：データはあるが、不確かさを伴う  
×：データなし

d. 4.2.2章(2)項のまとめ

水の放射線分解評価及び ECP に関する文献を調査した結果、以下のことが分かった。

- (1)放射線分解によって生成する  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{O}_2$  の濃度は、溶存水素濃度が低くなるほど、上昇する傾向にあるが、 $\text{H}_2\text{O}_2$  濃度は  $\text{O}_2$  濃度よりも数桁高い。
- (2)反応速度定数をパラメータとした計算の結果、 $\text{O}_2$  濃度は最大で数 10 倍異なるが、 $\text{H}_2\text{O}_2$  濃度の差異は数倍程度である。
- (3)照射前に若干の酸素(0.1ppm)が残留しても、放射線分解反応によって酸素は消費されて、初期の  $\text{O}_2$  濃度がゼロの場合と殆ど変らない濃度まで低下する。
- (4)海外で PWR 水質での ECP を測定した結果では、水素が添加されたときの電位が維持されることが確認されている。
- (5)ECP には、照射による水の分解生成物の影響があることが示唆されるデータが報告されている。

e. 4.2.2章の参考文献

- [4.2.2-1] 独立行政法人 原子力安全基盤機構、”平成 17 年度 Ni 基合金応力腐食割れ (SCC)進展評価技術調査(定荷重試験)に関する報告書”平成 18 年 7 月
- [4.2.2-2] Journal of the Institute of Nuclear Safety System, Vol.13 2006, p179.
- [4.2.2-3] 小川ら、8th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Systems-Water Reactors
- [4.2.2-4] 山本ら、12th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Systems-Water Reactors
- [4.2.2-5] 14th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, Virginia Beach, VA, August 23-27, 2009
- [4.2.2-6] Tyler Moss, Gary S. Was, 16th International Conference on Environmental Degradation 2013
- [4.2.2-7] NRC レポート <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1126/ML11266A011.pdf>
- [4.2.2-8] EPRI, “Materials Reliability Program Mitigation of PWSCC in Nickel-Base Alloys by Optimizing Hydrogen in the Primary Water”, MRP-213 (2007)
- [4.2.2-9] A. J. Elliot, The reaction set, rate constants and g-values for the simulation of the radiolysis of light water over the range 20°C to 350°C based on information available in 2008, AECL, 153-127160-450-001 rev. 0, (2009)
- [4.2.2-10] G. H. Jenks, Effects of reactor operation on HFIR coolant, ORLN-3438 (1965)
- [4.2.2-11] G. R. Sunaryo and M. Domae, Numerical Simulation on Effect of Methanol Addition on Coolant Radiolysis in Pressurized Water Reactor, Journal of Nuclear Science and Technology, 45 (12) (2008) 1261
- [4.2.2-12] M. U. Macdonald et al., The impact of radiolytic yield on the calculated ECP in PWR primary coolant circuits, J. Nucl. Mat. 362 (2007) 1
- [4.2.2-13] P. Lertnaisatt et al., Computer modeling of inhibition of  $\alpha$ -radiolysis of water by H<sub>2</sub> addition, 第 54 回放射線化学討論会 要旨集 10-06, 平成 23 年 9 月 28 日-30 日, 大阪大学
- [4.2.2-14] G. R. Sunaryo et al., Radiolysis of water at elevated temperature-III. Simulation of radiolytic products at 25 and 250°C under the irradiation with  $\gamma$ -rays and fast neutrons, Radiat. Phys. Chem. 45 (5) (1995) 703
- [4.2.2-15] Y. Wada et al., Effects of Hydrogen Peroxide on Intergranular Stress Corrosion Cracking of Stainless Steel in High Temperature Water (III), J. Nucl. Sci. Technol., 37, (2000) 901

- [4.2.2-16] H. Takiguchi et al, Optimization of Dissolved Hydrogen Concentration for Control of Primary Coolant Radiolysis in Pressurized Water Reactors, J. Nucl. Sci. and Technol, 41 (5) (2004) p601
- [4.2.2-17] A. Molander et al., Corrosion potential measurements in reactor water of a PWR, Water chemistry for nuclear reactor systems 4 BNES, London, (1986) p161
- [4.2.2-18] R. W, Bosch et al., In-Pile electrochemical measurements on ANSI304 and ANSI316 in PWR conditions -Experimental results, J. Nucl. Mat360 (2007) 304
- [4.2.2-19] B. Muzeau et al., Electrochemical behavior of stainless steel in PWR primary coolant conditions: Effects of radiolysis, J. Nucl. Mat419 (2011) 241
- [4.2.2-20] M. U. Macdonald et al., The impact of radiolytic yield on the calculated ECP in PWR primary coolant circuits, J. Nucl. Mat. 362 (2007) 1
- [4.2.2-21] D. D. Macdonald, Viability of Hydrogen Water Chemistry for Protecting In-Vessel Components of Boiling Water Reactors, Corrosion 48 (3) (1992) 194



### 4.2.3 照射材データの調査・整理

#### (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・整理してデータシートに纏めると共に、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。

#### (2)材料照射データの調査

##### a. 調査方法

##### ①対象とする材料特性

##### i)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、応力腐食割れなどき裂の発生が想定され、き裂の存在を前提とした健全性評価を行う場合には、き裂の発生条件として応力やひずみ、時間などとともに、き裂の進展速度が必要な情報である。さらに、き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 4.2.3(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 4.2.3(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。したがって、PWR 分野については、引張特性、破壊靱性、IASCC 発生、応力緩和、スエリングを対象とした。

BWR では炉心シュラウドや上部格子版の IASCC き裂が健全性評価上重要とされており、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。したがって、BWR 分野では、引張特性、破壊靱性、IASCC 発生、IASCC 進展、応力緩和を対象とした。

## ii)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碎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た、高速中性子炉の照射は 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。

## ②対象とする文献

論文や報告書等の公開情報を対象に調査した。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、データ(測定値)の代表値、最確値を与える式に基づいて材料パラメータ間の相関を検討する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。

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。
- 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)

## b. 調査結果

4.2.3(2)章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 4.2.3-1~表 4.2.3-12 に示す。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 分野は表 4.2.3-1~表 4.2.3-6 に、BWR 分野は表 4.2.3-7~表 4.2.3-12 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。具体的には照射温度が 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。なお表中の左列「No.」は引用文献 4.2.3-x の x に合致させた。

### ①PWR分野

#### i)引張特性(表4.2.3-1)

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 4.2.3(2)-3~15)、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、使用済みのシング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 製部材としてシングルプラグ、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り、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、BOR60 によるデータが報告されている 4.2.3(2)-16~20)。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 4.2.3(2)-21,22)。

#### ii)硬さ(表4.2.3-2)

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 4.2.3(2)-4,5)、使用済みのシング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。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。

### iii)破壊靱性(表4.2.3-3)

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 4.2.3(2)-3)。その他には、バッフルボルトを用いた試験結果 4.2.3(2)-23)と高照射のシンプルチューブを用いた試験結果 4.2.3(2)-13)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 10mm 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 0.5TCT や 1TCT 試験片を用いた試験が報告されている 4.2.3(2)-25)。

### iv)IASCC発生(表4.2.3-4)

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 4.2.3(2)-4)。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 4.2.3(2)-7,9,26~28,31)。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 4.2.3(2)-29,30)。

### v)応力緩和・クリープ(表4.2.3-5)

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 4.2.3(2)-4)。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℃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℃のクリープ試験を報告している 4.2.3(2)-32)。

最近の 300℃付近の試験が 2 例報告されており、Garnier らが OSIRIS や BOR60 による 320~325℃でのチューブ内圧クリープ試験 4.2.3(2)-33)、Foster らが Halden 炉による 290~330℃での単軸引張クリープ試験を報告している 4.2.3(2)-34)。

EBR-II を用いた 370℃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 4.2.3(2)-35)。

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。

vi) スエリング(表4.2.3-6)

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 4.2.3(2)-4.5,17,33-39)。CW316SS 製のシング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、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。

表 4.2.3-1 PWR 分野の引張特性の文献

No	文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
3	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 (シンプルチ ューブ)	記載なし	5, 25 dpa	引張試験 RT, 325°C	6
		海外 PWR	304 (シンプルプ ラグ)	記載なし	3.25 dpa	引張試験 RT, 325°C	4
		米国 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	記載なし	0.005~51 dpa	引張試験 RT, 300, 350°C	32
		米国 PWR	CW316 (熱遮蔽体ボ ルト)	記載なし	0.4 dpa	引張試験 RT, 300, 350°C	12
		米国 PWR	304 (燃料ノズル 他)	記載なし	0.12, 1.5 dpa	引張試験 RT, 300, 350°C	19
4	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 (バッフルボ ルト)	310~340°C	4~12 dpa	引張試験 290, 320, 340°C	20
		国内 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	290~310°C	4~72 dpa	引張試験 290, 320, 340°C	20
5	福谷ら INSS MONOGRAPH No.4	国内 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	304~313°C	6, 35, 53 dpa	引張試験 320°C	12
6	Fukuya et al., J.Nucl.Sci.Tech. 41(2004)673	国内 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	304~313°C	6, 35, 53 dpa	引張試験 320°C	
7	Fukuya et al., J.Nucl.Mater. 378(2008)211	国内 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	305°C	73 dpa	引張試験 RT, 320°C	
8	Fukuya et al., J.Nucl.Sci.Tech. 45(2008)452	国内 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	313°C	35 dpa	引張試験 320°C	4
9	Shogan et al. 10th EDM, 2001	海外 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	記載なし	20, 46 dpa	引張試験 RT, 360°C	6
10	Connerman et al. 10th EDM, 2001	海外 PWR	CW316, 347 (バッフルボ ルト) 304(ロック バー)	記載なし	4~21 dpa	引張試験 RT, 320°C	9
11	Connerman et al. 12th EDM, 2005	海外 PWR (Ringhals 2)	CW316 (シンプルチ ューブ)	290, 320°C	28, 35, 65 dpa	引張試験 RT, 320, 340°C	16
12	EPRI Report 1015332 Sept. 2007	米国 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	記載なし	6~76 dpa	引張試験 290~340°C	18
13	Toivonen et al. Fontevraud 6, 2006	仏 PWR (Chooz A)	304 (バッフル板)	300°C	30 dpa	引張試験 RT, 300, 340°C	3
14	Jenssen et al. Fontevraud 6, 2006	海外 PWR (Ringhals 2)	CW316 (シンプルチ ューブ)	記載なし	24, 29, 65 dpa	引張試験 RT, 320°C	12

注) No.は引用文献 4.2.3(2)-x の x に合致

表 4.2.3-1 PWR 分野の引張特性の文献(続き)

No	文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
15	Jenssen et al. Fontevraud 7, 2010	海外 PWR (Ringhals 2)	CW316 (シングルチ ューブ)	290~321°C	76 dpa	引張試験 RT, 320°C	4
16	Robertson et al. ASTM STP1325, 1999	ORR, HFIR	316	60, 200, 330, 400°C	7, 18 dpa	引張試験 60~400°C	24
17	Horsten et al. J.Nucl.Mater. 212-215(1994)514	HFR Petten	316L(N)	223, 323, 423°C	10 dpa	引張試験 RT~577°C	39
18	Pokor et al. J.Nucl.Mater. 326(2004)30	OSIRIS BOR60	304, CW316	330°C	5 dpa 100 dpa	引張試験 330°C	16
19	Fujimoto et al. 12th EDM, 2005	BOR60	CW316	330°C	18, 42 dpa	引張試験 330°C	6
20	Jenssen et al. 15th EDM, 2011	BOR60	CW316, 316, 304L	320°C	5~48 dpa	引張試験 330°C	14
21	Yoshitake et al. ASTM STP1405, 2001	EBR-II	CW316	371~444°C	0.9~40 dpa	引張試験 RT, 377~432°C	17
22	Allen et al. ASTM STP1447, 2003	EBR-II	CW316	371~386°C	10~47 dpa	引張試験 370°C	8

注) No.は引用文献 4.2.3(2)-x の x に合致



表 4.2.3-2 PWR 分野の硬さの文献

No	文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
3	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℃	4~12 dpa	ビッカース硬さ 500g	10
		国内 PWR	CW316 (シンプルチューブ)	290~310℃	4~72 dpa	ビッカース硬さ 500g	16
5	福谷ら INSS MONOGRAPH No.4	国内 PWR	CW316 (シンプルチューブ)	292~323℃	0.7~73 dpa	ビッカース硬さ 500g	16
38	Edwards et al. J.Nucl.Mater.317(2003)32	海外 PWR (Tihange 2)	CW316 (バップルボルト)	320~343℃	8~20 dpa	ビッカース硬さ 500g	3

注) No.は引用文献 4.2.3(2)-x の x に合致

表 4.2.3-3 PWR 分野の破壊靱性の文献

No	文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
3	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	0.005~33 dpa	破壊靱性試験 円筒試験片 RT, 300, 350°C	28
		米国 PWR	CW316 (熱遮蔽体ボ ルト)	記載なし	0.1~1 dpa	破壊靱性試験 R-CT 試験片 RT, 300, 350°C	3
		米国 PWR	304 (熱遮蔽体取 付ピン)	記載なし	0.08 dpa	破壊靱性試験 R-CT 試験片 RT, 300, 350°C	3
		米国 PWR	304 (燃料ノズル 他)	記載なし	1.5 dpa	破壊靱性試験 棒状試験片 RT, 300, 350°C	6
23	EPRI Report 1003069 Nov. 2001	米国 PWR	CW316 (バッフルボ ルト)	記載なし	6~18 dpa	破壊靱性試験 円筒試験片 RT, 320°C	7
24	EPRI Report 1008204 Sep. 2004	米国 PWR	CW316 (バッフルボ ルト)	記載なし	6~18 dpa		
13	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, 65 dpa	破壊靱性試験 円筒 PLT 試験片 RT, 320°C	6
25	EPRI Report 1012079 Sep. 2005	PWR	304 (バッフル板, フォーマ板)	記載なし	0.1~13 dpa	破壊靱性試験 0.5, 1TCT 試験 片 320°C	5

注) No.は引用文献 4.2.3(2)-x の x に合致

表 4.2.3-4 PWR 分野の IASCC 発生の文献

No	文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
4	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℃	5~20 dpa	定荷重 SCC 試験 C リング試験片 一次系模擬水 340℃	27
		海外 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	290~310℃	6~74 dpa	定荷重 SCC 試験 C リング試験片 一次系模擬水 320, 340℃	54
26	Nishioka et al. J.Nucl.Sci.Tech. 45(2008)1072	国内 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	299~322℃	20, 38, 72 dpa	定荷重 SCC 試験 引張試験片 一次系模擬水 320℃	10
27	Fujii et al. Fontevraud 7, 2010	国内 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	298℃	38 dpa	定荷重 SCC 試験 引張試験片 一次系模擬水 320℃, DH 変化	8
11	Connerman et al. 12th EDM, 2005	海外 PWR (Ringhals 2)	CW316 (シンプルチ ューブ)	記載なし	17~65 dpa	定荷重 SCC 試験 O リング試験片 一次系模擬水 340℃	28
9	Shogan et al. 10th EDM, 2001	海外 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	記載なし	1~32 dpa	定荷重 SCC 試験 C リング試験片 一次系模擬水 330℃	30
28	Freyer et al. 13th EDM, 2007	米国 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	記載なし	12~76 dpa	定荷重 SCC 試験 O リング試験片 一次系模擬水 340℃	76
29	Pokor et al. Fontevraud 7, 2010	仏 PWR (Chooz A)	304 (バップル板)	300℃	30 dpa	定荷重 SCC 試験 引張試験片 一次系模擬水 340℃	11
30	Toivonen et al. Fontevraud 6, 2006	仏 PWR (Chooz A)	304 (バップル板)	300℃	30 dpa		
31	Bosch et al. J.Nucl.Mater. 461(2015)112	海外 PWR (Tihange 2)	CW316 (シンプルチ ューブ)	300℃	45~80 dpa	定荷重 SCC 試験 O リング試験片 一次系模擬水 320℃	38

注) No.は引用文献 4.2.3(2)-x の x に合致

表 4.2.3-5 PWR 分野の応力緩和・クリープの文献

No	文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
4	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	Halden 炉	CW316	290, 340℃	1 dpa	単軸クリープ試 験	11
32	Grossbeck et al. J.Nucl.Mater. 179-181(1991)130	ORR	316, CW316	60~330℃	8 dpa	チューブ内圧試 験 (クリープ)	34
33	Garnier et al. Fontevraud 7, 2010	BOR60, OSIRIS, EBR-II	304L, CW316	320℃ 325℃ 370℃	120 dpa 10 dpa 10 dpa	チューブ内圧試 験 (クリープ)	約 40
34	J.P Foster et al. 15th EDM, 2011	Halden 炉	304L, CW316	290℃ 330℃	~1 dpa	単軸引張試験 (クリープ, 緩和)	約 40
35	Kenfield et al. J.Nucl.Mater. 66(1977)238	EBR-II	CW316	370℃	~1 dpa	ベントビーム試 験 (応力緩和)	70

注) No.は引用文献 4.2.3(2)-x の x に合致

表 4.2.3-6 PWR 分野のスエリングの文献

No	文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
4	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	10~71 dpa	TEM 観察	4
		海外 PWR	CW316 (バップルボ ルト)	298, 340°C	10, 20 dpa	TEM 観察	2
5	福谷ら INSS MONOGRAPH No.4	国内 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	292~323°C	0.7~73 dpa	TEM 観察	13
36	Fukuya et al. J.Nucl.Sci.Tech.43(20 06)159	国内 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	292~323°C	0.7~73 dpa	TEM 観察	
19	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, 65 dpa	TEM 観察	6
37	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, 65 dpa	TEM 観察	3
37	Chung et al. NUREG/CR-6897	海外 PWR	CW316 (バップルボ ルト)	290, 329°C	9, 18 dpa	TEM 観察	2
37	Chung et al. NUREG/CR-6897	海外 PWR	347(バップ ルボルト) 304(ロック バー)	290, 329°C	9~25 dpa	TEM 観察	8
38	Edwards et al. J.Nucl.Mater.317(200 3)32	海外 PWR (Tihange 2)	CW316 (バップルボ ルト)	320~343°C	8~20 dpa	TEM 観察	3
39	Edwards et al. J.Nucl.Mater.384(200 9)249	海外 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	290, 315°C	33, 70 dpa	TEM 観察	2
40	Foster et al. J.Nucl.Mater. 224(1995)207	海外 PWR	CW316 (シンプルチ ューブ)	305~315°C	35 dpa	TEM 観察	1
41	Pokor et al. Fontevraud 6, 2006	海外 PWR 他	CW316, 304L	310~365°C	10~25 dpa	TEM 観察	25
42	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 観察	6

注) No.は引用文献 4.2.3(2)-x の x に合致

## ②BWR分野

### i)引張特性(表4.2.3-7)

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 4.2.3(2)-43,44)。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 4.2.3(2)-45~52)。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 4.2.3(2)-52~54)。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 4.2.3(2)-53)。

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 4.2.3(2)-56~59)。

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。

### ii)硬さ(表4.2.3-8)

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 4.2.3(2)-43,44)。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 4.2.3(2)-46~51,60)。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。

### iii)破壊靱性(表4.2.3-9)

国プロジェクトとして原子力安全基盤機構が実施した 0.5TCT 試験片の JMTR 照射のデータが報告されている 4.2.3(2)-43)。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 4.2.3(2)-61)、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、0.24TCT から最大で 1.5TCT までの試験片のデータが報告されている 4.2.3(2)-49,52,62)。研究炉のデータは、JMTR のほかに Halden 炉で照射した 1/4TCT のデータが ANL から報告されている 4.2.3(2)-63~65)。また、圧力容器のステンレスクラッド材について、模擬し

て作成した溶金を JMTR で照射したデータが報告されている 4.2.3(2)-66)。

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 4.2.3(2)-63,64)。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 4.2.3(2)-60)。

#### iv)IASCC発生(表4.2.3-10)

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 4.2.3(2)-67)と海外 BWR の実機部材による 3 点曲げ試験 4.2.3(2)-68)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。

#### v)IASCC進展(表4.2.3-11)

国プロジェクトとして原子力安全基盤機構が実施した 0.5TCT 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 4.2.3(2)-43,44,69,70)。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、0.5TCT までの試験片のデータが報告されている 4.2.3(2)-48,53)。

研究炉照射材のデータは、JMTR のほかに Halden 炉照射材 4.2.3(2)-72,73)、BOR60 で 320°C で照射した 8 mmRCT のデータが報告されている 4.2.3(2)-74)。

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 4.2.3(2)-45)と Halden 炉 4.2.3(2)-76~78)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。

#### vi)応力緩和・クリープ(表4.2.3-12)

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 4.2.3(2)-43)、4.2.3(2)-78~82)。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 4.2.3(2)-43)。JMTR では他にも 3 dpa 以内でのベントビーム法 4.2.3(2)-78)や単軸引張法 4.2.3(2)-81)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  
4.2.3(2)-82)。

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  
4.2.3(2)-79,80)。



表 4.2.3-7 BWR 分野の引張特性の文献

No	文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
43	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℃	1~1.5 dpa	引張試験 288℃	40
		JMTR	溶接金属 308L, 316, 316L	286~288℃	1~1.5 dpa	引張試験 288℃	14
44	Takakura et al. 14th EDM, 2009	JMTR	316L, 304L	284~288℃	1~12.7 dpa	引張試験 288℃	20
45	児玉光弘 博士論文	国内 BWR	304, 316 (炉内計装管 等)	288℃	0.4~20 dpa	引張試験 288℃	27
46	K. Fukuya, et al. 6th EDM, 1993	国内 BWR	304, 304L, 316L, 316NG, 347, 347L	288℃	1~3 dpa	引張試験 288℃	48
47	M. Kodama, et al. 8th EDM, 1997	国内 BWR	304, 304L, 316L, 316NG, 347, 347L	288℃	1~3 dpa	引張試験 288℃	54
48	Ooki et al. 12th EDM, 2005	国内 BWR	304(シュラ ウド) 316(上部格 子板)	288℃	0.5~2 dpa	引張試験 288℃	8
49	Torimaru et al. Fontevraud 7, 2010	国内 BWR	304(シュラ ウド) 316(上部格 子板)	288℃	0.2~2 dpa	引張試験 288℃	8
50	2007NISA 公募研究	国内 BWR	304(シュラ ウド) 316(上部格 子板)	288℃	0.5~1.5 dpa	引張試験 288℃	8
51	2008NISA 公募研究	国内 BWR	304(シュラ ウド) 316(上部格 子板)	288℃	0.5 dpa	引張試験 288℃	8
51	2008NISA 公募研究	JMTR	316L	288℃	1.2 dpa	引張試験 288℃	2
52	Demma et al. 13th EDM, 2007	海外 BWR	304L(制御 棒) 304(上部格 子板)	288℃	5, 12 dpa	引張試験 288℃	6
52	Demma et al. 13th EDM, 2007	国内 BWR	304(制御棒)	288℃	7.4, 8.4 dpa	引張試験 288℃	4
53	Jenssen et al. 15th EDM, 2011	海外 BWR	304L(制御 棒)	270~288℃	7.7 dpa	引張試験 288℃	1
54	Jenssen et al. Fontevraud 7, 2010	海外 BWR	304 (ガイドチュ ープ)	288℃	50 dpa	引張試験 288℃	5

注) No.は引用文献 4.2.3(2)-x の x に合致

表 4.2.3-7 BWR 分野の引張特性の文献(続き)

No	文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
55	Nakamura et al. 13th EDM, 2007	BWR	304L	288°C	3.5 dpa	引張試験 288°C	2
56	仲田清智ら, 日本金属学会誌 52 (1988)1023	ATR	304, 304L, 316L, 316NG	287°C	1~3 dpa	引張試験 288°C	30
57	Jacobs et al. 3rd EDM, 1987	ATR	304, 304L, 316L, 316NG	287°C	1~3 dpa	引張試験 288°C	30
58	Kaji et al. 13th EDM, 2007	JMTR	304	273°C	1.2 dpa	引張試験 273°C	10
59	Karlsen et al. 14th EDM, 2009	BR2	CW304	300°C	2 dpa	引張試験 300°C	6

注) No.は引用文献 4.2.3(2)-x の x に合致

表 4.2.3-8 BWR 分野の硬さの文献

No	文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
43	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℃	1~1.5 dpa	HV0.5	6
44	Takakura et al. 14th EDM, 2009	JMTR	316L, 304L	284~288℃	1~12.7 dpa	HV015	10
46	K. Fukuya, et al. 6th EDM, 1993	国内 BWR	304, 304L, 316L, 316NG, 347, 347L	288℃	1~3 dpa	HV1	32
47	M. Kodama, et al. 8th EDM, 1997	国内 BWR	304, 304L, 316L, 316NG, 347, 347L	288℃	1~3 dpa	HV0.5	54
50	2007NISA 公募研究	国内 BWR	304(シュラ ウド) 316(上部格 子板)	288℃	0.5~1.5 dpa	HV0.5	8
51	2008NISA 公募研究	国内 BWR	304(シュラ ウド) 316(上部格 子板)	288℃	0.5 dpa	HV0.5	4
60	Torimaru et al. J. ASTM Int. 2(2005)JAI12843	国内 BWR	304	288℃	0.5~2 dpa	HV0.5	

注) No.は引用文献 4.2.3(2)-x の x に合致

表 4.2.3-9 BWR 分野の破壊靱性の文献

No	文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
43	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℃	0.9~1.9 dpa	破壊靱性試験 0.5TCT 288℃	7
61	発電設備技術検査協会 平成 3 年度原子力プラ 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℃	3~10 dpa	破壊靱性試験 CT,3 点曲げ,SR 288℃	25
49	Torimaru et al. Fontevraud 7, 2010	国内 BWR	304(シュラ ウド) 316(上部格 子板)	288℃	0.2~2 dpa	破壊靱性試験 0.5~1.5TCT 288℃	15
52	Demma et al. 13th EDM, 2007	海外 BWR	304L(制御 棒) 304(上部格 子板)	288℃	5, 12 dpa	破壊靱性試験 0.5TCT 288℃	12
52	Demma et al. 13th EDM, 2007	国内 BWR	304(制御棒)	288℃	7.4, 8.4 dpa	破壊靱性試験 0.5TCT 288℃	4
62	Ehrnsten et al. Fontevraud 6, 2006	海外 BWR	304L, 316L (制御棒)	288℃	2.7~8.7 dpa	破壊靱性試験 0.24TCT RT, 150, 288℃	15
63	Chopra, et al. 13th EDM, 2007	Halden 炉	304, 304HAZ, CF8M	296~305℃	2.3 dpa	破壊靱性試験 1/4TCT 288℃	8
64	Chopra, et al. NUREG/CR-6826, 2003	Halden 炉	304, 316, CF8M	288℃	1.2 dpa	破壊靱性試験 0.24TCT 288℃	11
65	Chen et al. 14th EDM, 2009	Halden 炉	304, 316	293℃	2 dpa	破壊靱性試験 0.24TCT 288℃	4
66	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℃	0.1~0.2 dpa	破壊靱性試験 0.24TCT 288℃	28

注) No.は引用文献 4.2.3(2)-x の x に合致

表 4.2.3-10 BWR 分野の IASCC 発生の文献

No	文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
67	Katsura et al. 6th EDM, 1993	国内 BWR	304, 316 (炉内計装管 等)	288°C	0.7~18 dpa	定荷重 SCC 試験 引張試験片 0.02, 32ppmDO 288°C	34
68	Jacobs et al. Corrosion, 49(1993)650	海外 BWR	304	288°C	0.1~5 dpa	定荷重 SCC 試験 曲げ板試験 32ppmDO 288°C	30

注) No.は引用文献 4.2.3(2)-x の x に合致

表 4.2.3-11 BWR 分野の IASCC 進展の文献

No	文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
43	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℃	1~13.5 dpa	照射後 SCC 試験 0.5TCT 288℃純水	66
44	Takakura et al. 14th EDM, 2009	JMTR	304, 304L 316L, 316NG 溶接金属	286~288℃	1~13.5 dpa	照射後 SCC 試験 0.5TCT 288℃純水	
69	Kaji et al. 14th EDM, 2009	JMTR	304, 304L 316L, 316NG 溶接金属	286~288℃	1~13.5 dpa	照射後 SCC 試験 0.5TCT 288℃純水	
70	Chatani et al. 13th EDM, 2007	JMTR	304, 304L 316L, 316NG 溶接金属	286~288℃	1~13.5 dpa	照射後 SCC 試験 0.5TCT 288℃純水	
48	Ooki et al. 12th EDM, 2005	国内 BWR	304(シュラ ウド) 316(上部格 子板)	288℃	0.5~2 dpa	照射後 SCC 試験 0.5TCT 288℃純水	23
71	Jenssen et al. 11th EDM, 2003	BWR	304L (制御棒)	288℃	12 dpa	照射後 SCC 試験 8mmCT 288℃純水	3
53	Jenssen et al. 15th EDM, 2011	海外 BWR	304L (制御棒)	270~288℃	7.7 dpa	照射後 SCC 試験 0.5TCT 288℃純水	1
72	Chopra et al. 11th EDM, 2003	Halden 炉	304,316	288℃	1,3 dpa	照射後 SCC 試験 1/4TCT 288℃純水	17
73	Chopra et al. 12th EDM, 2005	Halden 炉	304, 316 溶金, HAZ	288℃	1,3 dpa	照射後 SCC 試験 1/4TCT 288℃純水	
75	Kaji et al. J.Nucl.Sci.Tech. 45(2008)725	JMTR 照射 JMTR 炉内試験	304	288℃	~1 dpa	炉内 SCC 試験 0.4TCT 288℃	8
76	Karlsen et al. 12th EDM, 2005 HWR-770	BWR 照射 Halden 炉内試験	304L, 316NG, 347	280℃	1~10 dpa	炉内 SCC 試験 0.4TCT 280℃純水	50
74	Jenssen et al. 14th EDM, 2009	BOR60	304L, 316, 316Ti	320℃	5~25 dpa	照射後 SCC 試験 8mmRCT 288℃純水	約 30

注) No.は引用文献 4.2.3(2)-x の x に合致

表 4.2.3-11 BWR 分野の IASCC 進展の文献(続き)

No	文献	照射炉	材料	照射温度	照射量	試験方法	データ数
76	Karlsen et al. 12th EDM, 2005	BWR 照射 Halden 炉内試験	304L, 304	335℃	~2 dpa	炉内 SCC 試験 0.4TCT 335℃1 次系模擬	約 25
77	Karlsen et al. 17th EDM, 2015	BWR 照射 Halden 炉内試験	304L 316L	280℃	3~13 dpa	炉内 SCC 試験 0.4TCT 280℃純水 320CPWR 模擬 水	66

注) No.は引用文献 4.2.3(2)-x の x に合致

表 4.2.3-12 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
43	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℃	1.9 dpa	C リング試験	60
78	Ishiyama et al. 11th EDM, 2005	JMTR	304, 316L, XM-19	288℃	3 dpa	C リング試験 ベントビーム試 験	45
79	Obata et al. J.ASTM Int. 3(2006)JAI12348	JMTR	304 溶接部	288℃	1, 3.5 dpa	中性子回折 残留応力測定	9
80	Ishiyama et al. J.Nucl.Mater. 408(2011)153	JMTR	316L 溶接部	288℃	0.9, 1.9, 4.1 dpa	中性子回折 残留応力測定	12
81	Kaji et al. J.Nucl.Mater. 307-311(2002)331	JMTR	316L	288℃	2.5 dpa	単軸引張試験片	10
82	Causey et al. J.Nucl.Mater. 90(1980)216	Chalk River 炉	304, X-750 他	67, 287℃	~1 dpa	ベントビーム試 験	25

注) No.は引用文献 4.2.3(2)-x の x に合致



c. 5.3.2(2)章の引用文献

- 4.2.3(2)-1) 発電用原子力設備規格 維持規格(2012年版)、日本機械学会
- 4.2.3(2)-2) 炉内構造物点検評価ガイドライン、原子力安全推進協会、「炉内構造物点検評価ガイドラインについて」JANIS-VIP-0.3 第4版
- 4.2.3(2)-3) 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
- 4.2.3(2)-4) 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
- 4.2.3(2)-5) 福谷耕司, 西岡弘雅, 藤井克彦, 「ステンレス鋼の軽水炉照射挙動」INSS MONOGRAPHS No.4, 2009
- 4.2.3(2)-6) K. Fukuya, M. Nakano, K. Fujii, T. Torimaru, “IASCC susceptibility and slow tensile properties of highly-irradiated 316 stainless steels,” J. Nucl. Sci. Tech., 41 (2004) 673.
- 4.2.3(2)-7) K. Fukuya, H. Nishioka, K. Fujii, M. Kamaya, T. Miura, T. Torimaru, “Fracture behavior of austenitic stainless steels irradiated in PWR,” J. Nucl. Mater., 378 (2008) 211.
- 4.2.3(2)-8) K. Fukuya, H. Nishioka, K. Fujii, T. Torimaru, “Effects of dissolved hydrogen and strain rate on IASCC behavior in highly irradiated stainless steels,” J. Nucl. Sci. Tech., 45 (2008) 452.
- 4.2.3(2)-9) R. P. Shogan, T. R. Mager, “Susceptibility of Type 316 Stainless Steel to Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking in a PWR Environment,” Proc. 10th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, NACE, (2001) .
- 4.2.3(2)-10) J. M. Conermann, R. P. Shogan, D. R. Forsyth, L. W. Wilson, H. T. Tang, “Characterization of Baffle-Former Bolts Removed from Service in US PWRs,” Proc. 10th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, NACE, (2001) .
- 4.2.3(2)-11) J. Conermann, R. Shogan, K. Fujimoto, T. Yonezawa, Y. Yamaguchi, “Irradiation effects in a highly irradiated cold worked stainless steel removed from a commercial PWR,” Proc. 12th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, TMS, p. 277, 2005.
- 4.2.3(2)-12) EPRI Report 1015332, “Materials Reliability Program: Characterization of Type 316 Cold Worked Stainless Steel Highly Irradiated Under PWR Operating Conditions (International IASCC Advisory Committee Phase 3 Program Final Report) (MRP-214) ,”

Sept. 2007.

- 4.2.3(2)-13) A. Toivonen, P. Aaltonen, W. Karlsen, U. Ehrnsten, J. -P. Massoud, J. -M. Boursier, "Post-irradiation SCC investigations on highly-irradiated core internals component materials," Proc. 6th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 6) , FNES, 2006.
- 4.2.3(2)-14) A. Jenssen, V. Grigoriev, R. Jakobsson, P. Efsing, "Fracture resistance evaluation of a fluc thimble irradiated to 65 dpa in a PWR," Proc. 6th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 6) , FNES, 2006.
- 4.2.3(2)-15) A. Jenssen, P. Efsing B. Forssgren, B. Bengtsson, M. Molin, "Examination of Highly Irradiated Stainless Steels from BWR and PWR Reactor Pressure Vessel Internals," Proc. 7th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 7) , FNES, 2010.
- 4.2.3(2)-16) J. P. Robertson, I. Ioka, A. F. Rowcliffe, M. L. Grossbeck, S. Jitsukawa, "Temperature dependence of the deformation behavior of type 316 stainless steel after low temperature neutron irradiation," Effects of radiation on Materials: 18th Int. Symp., ASTM STP 1325, ASTM, 1999, p. 671.
- 4.2.3(2)-17) M. G. Horsten, M. I. de Vries, "Tensile properties of type 316L (N) stainless steel irradiated to 10 displacement per atom," J. Nucl. Mater., 212-215 (1994) 514.
- 4.2.3(2)-18) C. Pokor, Y. Brechet, P. Dubuisson, J-P. Massoud, X. Averty, "Irradiation damage in 304 and 316 stainless steels: experimental investigation and modeling. Part II: irradiation induced hardening," J. Nucl. Mater., 326 (2004) 30.
- 4.2.3(2)-19) K. Fujimoto, T. Yonezawa, E. Wachi, Y. Yamaguchi, M. Nakano, R. P. Shogan, J. P. Massoud, T. R. Mager "Effect of the accelerated irradiation and hydrogen/helium gas on IASCC characteristics for highly irradiated austenitic stainless steels," Proc. 12th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, TMS, p. 299, 2005.
- 4.2.3(2)-20) A. Jenssen, J. Stjärnsäter, R. Pathania, "Crack Growth Rates of Irradiated Commercial Stainless Steels in BWR and PWR Environments," Proc. 15th Int. Conf. Environmental Degradation of

Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, TMS, p. 1229, 2010

- 4.2.3(2)-21) Y. Yoshitake, I. Yamagata, N. Akasaka, Y. Nakamura, H. Tsai, J. Cole, T. Allen, "Behavior of irradiated type 316 stainless steels under low-strain-rate tensile conditions," J. ASTM Int., 2 (2005) JAI12346.
- 4.2.3(2)-22) T. R. Allen, H. Tsai, J. I. Cole, J. Ohta, K. Dohi, H. Kusanagi, "Properties of 20% cold-worked 316 stainless steel irradiated at low dose rate," J. ASTM Int., 1 (2004) JAI11252.
- 4.2.3(2)-23) EPRI Report 1003069, "Materials Reliability Program: Hot Cell Testing of Baffle/Former Bolts Removed from Two Lead PWR Plants," November 2001.
- 4.2.3(2)-24) EPRI Report 1008204, "A Review of Radiation Embrittlement for Stainless Steels for PWRs (MRP-79) - Revision 1," September 2004.
- 4.2.3(2)-25) EPRI Report 1012079, "Materials Reliability Program: Fracture Toughness Testing of Decommissioned PWR Core Internals Material Samples (MRP-160)," September 2005.
- 4.2.3(2)-26) H. Nishioka, K. Fukuya, K. Fujii, T. Torimaru, "IASCC initiation in highly irradiated stainless steels under uniaxial constant load conditions," J. Nucl. Sci. Tech., 45 (2008) 1072.
- 4.2.3(2)-27) K. Fujii, H. Nishioka, K. Fukuya, T. Torimaru, "Effects of dissolved hydrogen on IASCC behavior," Proc. 7th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 7) , FNES, 2010.
- 4.2.3(2)-28) P. D. Freyer, T. R. Mager, M. A. Burke, "Hot cell crack initiation testing of various heats of highly irradiated 316 stainless steel components obtained from three commercial PWRs," Proc. 13th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, NACE, 2007.
- 4.2.3(2)-29) C. Pokor, A. Toivonen, M. Wintergerst, U. Ehrnsten, W. Karlsen, J. -P. Massoud, "Determination of the time to failure curve as a function of stress for a highly irradiated AISI 304 stainless steel after constant load tests in simulated PWR water environment," Proc. 7th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 7) , FNES, 2010.
- 4.2.3(2)-30) A. Toivonen, P. Aaltonen, W. Karlsen, U. Ehrnstén, J-P. Massoud, J-M. Boursier, "Post-irradiation SCC investigation on highly-irradiated core

- internals component materials,” Proc. 6th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 6) , FNES, 2006.
- 4.2.3(2)-31) R. W. Bosch, M. Vankeerberghen, R. Gérard, F. Somville, “Crack initiation testing of thimble tube material under PWR conditions to determine a stress threshold for IASCC,” J. Nucl. Mater., 461 (2015) 112.
- 4.2.3(2)-32) M. L. Grossbeck, L. K. Mansur, “Low-temperature irradiation creep of fusion reactor structural materials,” J. Nucl. Mater., 179-181 (1991) 130.
- 4.2.3(2)-33) J. Garnier, P. Dubuisson, C. Pokor, E. Lemaire, N. Monteil, J. -P. Massoud, “Relaxation and irradiation creep of PWR baffle bolt materials,” Proc. 7th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 7) , FNES, 2010.
- 4.2.3(2)-34) J. P. Foster, T. M. Karlsen, “Irradiation creep and irradiation stress relaxation of 316 and 304L stainless steels in thermal and fast neutron spectrum reactors,” Proc. 15th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, TMS, 2011.
- 4.2.3(2)-35) T. A. Kenfield, H. J. Busboom, W. K. Appleby, “In-reactor stress relaxation in bending of 20% cold-worked 316 stainless steel,” J. Nucl. Mater., 66 (1977) 238.
- 4.2.3(2)-36) K. Fukuya, K. Fujii, H. Nishioka, Y. Kitsunai, “Evolution of microstructure and microchemistry in cold-worked 316 stainless steels under PWR irradiation,” J. Nucl. Sci. Tech., 43 (2006) 159.
- 4.2.3(2)-37) H. M. Chung, “Assessment of Void Swelling in Austenitic Stainless Steel Core Internals,” NUREG/CR-6897, ANL-04/28, 2006.
- 4.2.3(2)-38) D. J. Edwards, E. P. Simonen, F. A. Garner, L. R. Greenwood, B. M. Oliver, S. M. Bruemmer, “Influence of irradiation temperature and dose gradients on the microstructural evolution in neutron-irradiated 316SS,” J. Nucl. Mater., 317 (2003) 32.
- 4.2.3(2)-39) D. J. Edwards, F. A. Garner, S. M. Bruemmer, P. Efsing, “Nano-cavities observed in a 316SS PWR flux thimble tube irradiated to 33 and 70 dpa,” J. Nucl. Mater., 384 (2009) 249.
- 4.2.3(2)-40) J. P. Foster, D. L. Porter, D. L. Harrod, T. R. Mager, M. G. Burke, “316 stainless steel cavity swelling in a PWR,” J. Nucl. Mater., 224 (1995)

207.

- 4.2.3(2)-41) C. Pokor, Y. Thebault, J-P. Massoud, M. Delnondedieu, D. Loizard, P. Dubuisson, J. Kočík, E. Keilová, E. Lemaire, N. Ligneau, “Microstructural evolution of neutron irradiated stainless steels: Comparison between irradiations in experimental reactors and in pressurized water reactors,” Proc. 6th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 6), FNES, 2006.
- 4.2.3(2)-42) C. Panait, E. Fargeas, M. Tommy-Martin, S. Miloudi, P. Moulart, N. Monteil, C. Pokor, “Metallurgical examinations update of baffle bolts removed from operating French PWR Microstructural investigations of a baffle to former bolt located on a high level of the internal structures,” Proc. 8th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to LWRs’ Safety, Performance and Reliability (Fontevraud 8), FNES, 2014.
- 4.2.3(2)-43) 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
- 4.2.3(2)-44) 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 condition,” Proc. 14th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, CNS, 2009.
- 4.2.3(2)-45) 児玉光弘, 「中性子照射したオーステナイト系ステンレス鋼の応力腐食割れに及ぼす微細組織変化の影響に関する研究」, 博士論文(北海道大学)
- 4.2.3(2)-46) K. Fukuya, S. Shima, K. Nakata, S. Kasahara, A. J. Jacobs, G. P. Wozadlo, S. Suzuki, M. Kitamura, “Mechanical properties and IASCC susceptibility in irradiated stainless steels,” Proc. 6th Int. Symp. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, TMS, 1993.
- 4.2.3(2)-47) M. Kodama, S. Nishimura, Y. Tanaka, S. Suzuki, K. Fukuya, S. Shima, K. Nakata, T. Kato, “Mechanical properties of various kinds of irradiated austenitic stainless steels,” Proc. 8th Int. Symp. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors, ANS, 1997.
- 4.2.3(2)-48) S. Ooki, Y. Tanaka, K. Takamori, S. Suzuki, S. Tanaka, Y. Saito, T. Nakamura, T. Kato, K. Chatani, M. Kodama, “Study on SCC growth

- behavior of BWR core shroud,” Proc. 12th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, TMS, 2005.
- 4.2.3(2)-49) T. Torimaru, M. Kodama, S. Tanaka, T. Nakamura, K. Kumagai, K. asano, “Fracture Toughness of Austenitic Stainless Steels after BWR Irradiation,” Proc. 7th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 7) , FNES, 2010.
- 4.2.3(2)-50) NISA 事業茨城クラスタのデータ, 平成 24 年度高経年化技術評価高度化事業 成果報告書<第 1 分冊>, 平成 25 年 3 月, 株式会社三菱総合研究所
- 4.2.3(2)-51) NISA 事業茨城クラスタのデータ, 平成 24 年度高経年化技術評価高度化事業 成果報告書<第 1 分冊>, 平成 25 年 3 月, 株式会社三菱総合研究所
- 4.2.3(2)-52) A. Demma, R. Carter, A. Jenssen, T. Torimaru, R. Gamble, “Fracture toughness of highly irradiated stainless steels in boiling water reactors,” Proc. 13th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, NACE, 2007.
- 4.2.3(2)-53) A. Jenssen, J. Stjärnsäter, R. Pathania, “Crack Growth Rates of Irradiated Commercial Stainless Steels in BWR and PWR Environments,” Proc. 15th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, TMS, 2011.
- 4.2.3(2)-54) A. Jenssen, P. Efsing, B. Forssgren, B. Bengtsson, M. Molin, “Examination of Highly Irradiated Stainless Steels from BWR and PWR Reactor Pressure Vessel Internals,” Proc. 7th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 7) , FNES, 2010.
- 4.2.3(2)-55) T. Nakamura, M. Koshiishi, T. Torimaru, Y. Kitsunai, K. Takakura, K. Nakata, M. Ando, Y. Ishiyama, A. Jenssen, “Correlation between IASCC Growth Behavior and Plastic Zone Size of Crack Tip in 3. 5 dpa Neutron Irradiated Type 304L SS CT Specimen,” Proc. 13th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, NACE, 2007.
- 4.2.3(2)-56) 仲田清智, 吉田寿美, 正岡功, 斉藤隆, A. J. Jacobs, G. P. Wozadlo, W. J. S. Yang, “オーステナイトステンレス鋼の機械的性質に及ぼす 560K での中性子照射の影響,” 日本金属学会誌, 50 (1988) 1023.
- 4.2.3(2)-57) A. J. Jacobs, G. P. Wozadlo, K. Nakata, T. Yoshida, I. Masaoka, “Radiation effects on the stress corrosion and other selected properties

- of type-304 and type-316 stainless steels,” Proc. 3th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, TMS, 1987.
- 4.2.3(2)-58) Y. Kaji, H. Ugachi, T. Tsukada, Y. Matsui, M. Ohmi, N. Nagata, K. Dozaki, H. Takiguchi, “Comparison of SCC growth rate between in-core and ex-core tests in BWR simulated high temperature water,” Proc. 13th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, NACE, 2007.
- 4.2.3(2)-59) W. Karlsen, S. Van Dyke, “The effect of prior cold-work on the deformation behavior of neutron irradiated AISI 304 austenitic stainless steel,” Proc. 14th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, ANS, 2009.
- 4.2.3(2)-60) T. Torimaru, M. Kodama, S. Tanaka, T. Nakamura, K. Asano, K. Kumagai, “Neutron Flux Effect on the Irradiation Hardening of Type 304 Stainless Steel,” J. ASTM Int., 2 (2005) JAI12843.
- 4.2.3(2)-61) 発電設備技術検査協会, 平成 3 年度原子力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.
- 4.2.3(2)-62) U. Ehrnstén, K Wallin, S. van Dyck, P. Ould, “Fracture toughness of stainless steels irradiated up to ~9 dpa in commercial BWRs,” Proc. 6th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 6), FNES, 2006.
- 4.2.3(2)-63) O. K. Chopra, E. E. Gruber, W. J. Shack, “Fracture toughness of irradiated wrought and cast austenitic stainless steels in BWR environment,” Proc. 13th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, NACE, 2007.
- 4.2.3(2)-64) O. K. Chopra, E. E. Gruber, W. J. Shack, “Fracture Toughness and Crack Growth Rates of Irradiated Austenitic Stainless Steels,” NUREG/CR-6826, ANL-03/22, August 2003.
- 4.2.3(2)-65) Y. Chen, O. K. Chopra, Y. Yang, W. J. Shack, B. Alexandreanu, E. E. Gruber, A. S. Rao, “Crack growth rates and fracture toughness of neutron irradiated grain-boundary engineered austenitic stainless steels,” Proc. 14th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, ANS, 2009.
- 4.2.3(2)-66) T. Tobita, M. Udagawa, Y. Chimi, Y. Nishiyama, K. Onizawa, “Effect of neutron irradiation on the mechanical properties of weld overlay cladding for reactor pressure vessel,” J. Nucl. Mater., 452 (2014) 61.

- 4.2.3(2)-67) R. Katsura, J. Morisawa, M. Kodama, S. Nishimura, S. Suzuki, S. Shima, M. Tamamoto, "Effect of stress on IASCC in irradiated austenitic stainless steels," Proc. 6th Int. Symp. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, TMS, 1993.
- 4.2.3(2)-68) A. J. Jacobs, G. P. Wozadlo, G. M. Gordon, "Use of a constant deflection test to evaluate susceptibility to irradiation-assisted stress corrosion cracking," Corrosion, 49 (1993) 650.
- 4.2.3(2)-69) Y. Kaji, Y. Miwa, A. Shibata, J. Nakano, T. Tsukada, K. Takakura, K. Nakata, "Influence of microstructure on IASCC growth behavior of neutron irradiated type 304 austenitic stainless steels in simulated BWR condition," Proc. 14th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, ANS, 2009.
- 4.2.3(2)-70) K. Chatani, K. Takakura, M. Ando, K. Nakata, S. Tanaka, Y. Ishiyama, M. Hishida, Y. Kaji, "IASCC Crack Growth Rate of Neutron Irradiated Low Carbon Austenitic Stainless Steels in Simulated BWR Condition," Proc. 13th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, NACE, 2007.
- 4.2.3(2)-71) A. Jenssen, P. Efsing, K. Gott, P-O. Andersson, "Crack growth behavior of irradiated type 304L stainless steel in simulated BWR environment," Proc. 11th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, ANS, 2003.
- 4.2.3(2)-72) O. K. Chopra, E. E. Gruber, W. J. Shack, "Crack growth behavior of irradiated austenitic stainless steels in high-purity water at 289°C," Proc. 11th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, ANS, 2003.
- 4.2.3(2)-73) O. K. Chopra, B. Alexandreanu, E. E. Gruber, W. J. Shack, "Crack growth behavior of irradiated austenitic stainless steel weld and heat affected zone material in high-purity water at 289°C," Proc. 12th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, TMS, 2005.
- 4.2.3(2)-74) A. Jessen, J. Stharnsater, R. Pathania, "Crack growth rate testing of fast reaction irradiated type 304L and 316L SS in BWR and PWR environments," Proc. 14th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, ANS, 2009.
- 4.2.3(2)-75) Y. Kaji, H. Ugachi, T. Tsukada, J. Nakano, Y. Matsui, K. Kawamata, A.



- Shibata, M. Ohmi, N. Nagata, K. Dozaki, H. Takiguchi, "In-core SCC growth behavior of type 304 stainless steel in BWR simulated high-temperature water at JMTR," *J. Nucl. Sci. Tech.*, 45 (2008) 725.
- 4.2.3(2)-76) T. M. Karlsen, P. Bennett, N. W. Hogberg, "In-core Crack growth rate Studies on Irradiated Austenitic Stainless Steels in BWR and PWR Conditions in the Halden Reactor," *Proc. 12th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors*, TMS, 2005., Halden report HWR-556, 1998, HWR-770, 2004.
- 4.2.3(2)-77) T. M. Karlsen, M. Ahonen, M. Helin, J. Nakano, "In-pile crack growth rate testing of irradiated 304L and 316L stainless steels in PWR and BWR environments," *Proc. 17th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors*, ANS, 2015.
- 4.2.3(2)-78) Y. Ishiyama, K. Nakata, M. Obata, H. Anzai, S. Tanaka, "Stress Relaxation Caused by Neutron-Irradiation at 561 K in Austenitic Stainless Steels," *Proc. 11th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors*, ANS, 2003.
- 4.2.3(2)-79) M. Obata, J. H. Root, Y. Ishiyama, K. Nakata, H. Sakamoto, H. Anzai, K. Asano, "Radiation-Induced Stress Relaxation of Welded Type 304 Stainless Steel Evaluated by Neutron Diffraction," *J. ASTM Int.*, 3 (2006) JAI12348.
- 4.2.3(2)-80) Y. Ishiyama, R. B. Rogge, M. Obata, "Radiation-induced stress relaxation in high temperature water of type 316L stainless steel evaluated by neutron diffraction," *J. Nucl. Mater.*, 408 (2011) 153.
- 4.2.3(2)-81) Y. Kaji, Y. Miwa, T. Tsukada, M. Kikuchi, S. Kita, M. Yonekawa, J. Nakano, H. Tsuji, H. Nakajima, "Evaluation of in-pile and out-of-pile stress relaxation in 316L stainless steel under uniaxial loading," *J. Nucl. Mater.*, 307-311 (2002) 331.
- 4.2.3(2)-82) A. R. Causey, G. J. C. Carpenter, S. R. MacEwan, "In-reactor stress relaxation of selected metals and alloys at low temperatures," *J. Nucl. Mater.*, 90 (1980) 216.

### (3)調査した照射材データの整理

#### a. 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。

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

データシートにおける番号を文献データとして記載 例: 1-2、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を記載 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  $n/m^2$  ( $E>0.1$  MeV)、 $n/m^2$  ( $E>1$  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  
$$1 \text{ dpa} = 7 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 \text{ (E>1 MeV)} = 1.5 \times 10^{25} \text{ n/m}^2 \text{ (E>0.1 MeV)}$$
- ・ 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、平板試験片、
- ・ 平行部面積(mm<sup>2</sup>)  
ゲージ部の断面積を記載
- ・ 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( $1/s$ )  
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、出典  
注記事項、出典等を記載

### ③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( $^{\circ}C$ )  
試験温度を記載
- 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
- ・ 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、出典  
注記事項、出典等を記載

#### ④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 4.2.3-1 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、(サイドグループを除いた)正味厚さ、試験片幅、き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 4.2.3-2 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、 $J_Q$ 、 $J_{1mm}$ 、 $J_{IC}$ 、Tearing Modulus、換算 K 値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 カーブと 0.2 mm オフセットラインの交点の J 値、 $J_{1mm}$ 、はき裂進展量 1 mm における J 値、 $J_{IC}$  は平面ひずみ状態における  $J_Q$  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 値は J 積分値から次式で換算される靱性値である。

$$K = \sqrt{\frac{E \cdot J}{(1 - \nu^2)}}$$

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: 0.5TCT、円筒
- 試験片厚さ(mm)  
試験片の公称厚さ(図 4.2.3-1 の B)を記載
- 正味厚さ(mm)  
サイドグループを除いた正味の厚さ(図 4.2.3-1 の B<sub>n</sub>)を記載
- 試験片幅(mm)  
試験片の幅(図 4.2.3-1 の H)を記載
- 機械き裂長さ(mm)  
機械加工時のき裂先端と荷重点の距離(図 4.2.3-1 の a<sub>n</sub>)を記載
- 初期き裂長さ(mm)  
疲労予き裂導入後のき裂先端と荷重点の距離(図 4.2.3-1 の a<sub>0</sub>)を記載
- 初期リガメント(mm)  
疲労予き裂導入後のき裂先端と試験片単の距離(図 4.2.3-1 の L)を記載
- 疲労予き裂長さ(mm)  
導入した疲労予き裂の長さを記載
- き裂方向  
き裂の進展方向と圧延方向等の関係を記載
- J<sub>Q</sub>(kJ/m<sup>2</sup>)  
測定した破壊靱性値 J<sub>Q</sub> を記載
- J<sub>1mm</sub>(kJ/m<sup>2</sup>)  
き裂進展量 1mm の時の破壊靱性値を記載
- J<sub>1C</sub>(kJ/m<sup>2</sup>)  
測定した平面ひずみ破壊靱性値を記載  
所定の試験片厚さに関する判定条件を満たす場合の J<sub>Q</sub> 値
- 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 値を記載
- 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

- ・破壊靱性曲線
  - J 値と中性子照射量の関係を示す図の文献にあるかどうかを有無で記載
- ・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
- ・備考、出典
  - 注記事項、出典等を記載

#### ⑤IASCC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る。定ひずみ速度のいわゆる SSRT 試験は、最近では定量データとして扱われることほとんどないためここでは対象外とした。

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 発生データ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<sub>SHE</sub>)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、単軸試験片
- ・平行部面積(mm<sup>2</sup>)
  - 単軸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
- ・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

破断しな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、出典

注記事項、出典等を記載

## ⑥IASCC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き裂長さを測定し、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、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、き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。

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。

- ・ 試験片形状

試験片の形状を記載 例: 0.5TCT、CDCB

- ・ 試験温度(°C)

試験温度を記載



- ・試験片厚さ(mm)  
試験片の公称厚さ(図 4.2.3-1 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 4.2.3-1 の Bn)を記載
- ・負荷制御方法  
定期的除荷等を行った場合はそれを記載 例 cyclic
- ・試験時間(hr)  
き裂進展速度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)  
応力拡大係数を記載
- ・き裂進展速度(mm/s)と進展速度符号  
進展速度を記載  
き裂進展がみられな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
- ・溶存酸素濃度(ppm)  
試験水環境の溶存酸素濃度を記載
- ・溶存水素濃度(ppm)  
試験水環境の溶存水素濃度を記載
- ・出口導電率(μS/m)  
試験ループの出口導電率を記載
- ・不純物濃度(ppm)  
試験水の塩素や硫酸痕の濃度を記載
- ・ECP(mV<sub>SHE</sub>)  
試験環境の ECP の測定値や設定値を記載
- ・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
- ・備考、出典  
注記事項、出典等を記載

#### ⑦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。

#### i) 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 20mm、厚さ 2mm、3×5×10mm

- ・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

測定の環境を記載 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℃など

- ・照射前応力、照射後応力(MPa)

中性子回折等による測定データを記載

- ・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

- ・照射前圧痕幅、照射後圧痕幅(mm)

Cリング試験での圧痕測定データを記載

- ・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

- ・ひずみ量

測定されたひずみ量

- ・備考、出典

注記事項、出典等を記載

ii) 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:  $5\phi \times 100\text{mm}$

・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

・備考

クリープ式やその係数のデータが示されている場合はそれを記載

⑧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(/ $\text{m}^3$ )

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

- 備考、出典

注記事項、出典等を記載

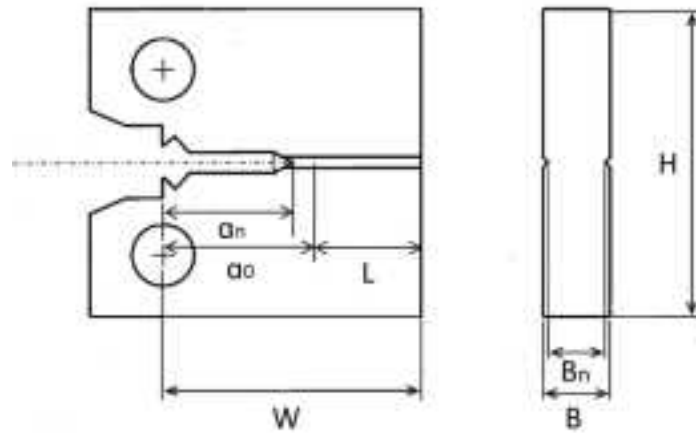


図 4.2.3-1 CT 試験片の寸法記号

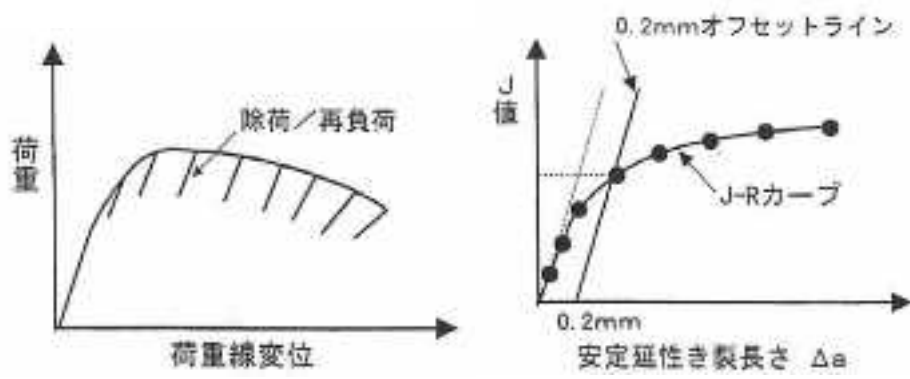


図 4.2.3-2 除荷コンプライアンス法

## b. 結果(データシートの概要)

データシートには文献より読み込んだデータを掲載した。なお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はなく、一部は図からの読み取ったデータも入力している。前章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。なお本報告書中で、文献から例示や評価検討等に必要な図表を引用した場合、すべてキャプションに出典を記載した。

各特性のデータシートの概要は以下のとおりである。

### ①引張特性

#### i) PWR分野(付録: 引張特性(PWR分野)データシート1~5)

引張特性については、表 4.2.3-1 に示した文献のデータをデータシートに入力した。PWR 実機部材のデータはすべてのデータを入力した(DB No. 1~14)。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を入力した。DB No.15 の ORR や DB No.16 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 BOR60 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.20 と 21 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。

#### ii) BWR分野(付録: 引張特性(BWR分野)データシート1~5)

引張特性については、表 4.2.3-7 に示した文献のデータをデータシートに入力した。BWR 実機部材や実機照射の公開データはすべて収録した。研究炉では、DB No.1、2、16 の JMTR、DB No.14、15 の ATR、DB No.17 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。

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」<sup>引用文献注)</sup>の開示に基づいて収録した。

### ②硬さ

#### i) PWR分野(付録: 硬さ(PWR分野)データシート1)

硬さについては、表 4.2.3-2 に示した 4 文献のデータをデータシートに入力した。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.1 と No.2 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、照射量と温度が一対一対応しないデータのみとなっている。DB No.3 のデータでは一部対応している。

ii) BWR分野(付録: 硬さ(BWR分野)データシート1~2)

硬さについては、表 4.2.3-8 に示した文献のデータをデータシートに入力した。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.7 は硬さ増加量のデータが報告され硬さ値はなかった。DB No.7 を除いて、全ての硬さデータで対応する 288℃の引張試験データが報告されていた。

③破壊靱性

i) PWR分野(付録: 破壊靱性(PWR分野)データシート1)

破壊靱性については、表 4.2.3-3 に示した4文献のデータをデータシートに入力した。いずれも PWR 実機の部材のデータである。DB No.1~No.3 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.4 は Chooz A 廃炉材の 304 製バップル板が素材であり、0.5TCT や 1TCT の試験片が用いられている。

ii) BWR分野(付録: 破壊靱性(BWR分野)データシート1~2)

破壊靱性については、表 4.2.3-9 に示した文献のデータをデータシートに入力した。BWR 実機部材のデータは DB. No.2~5 である。DB No.2 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 7mm 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.3 では照射量は低いがシュラウド厚さ(38mm)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、0.5TCT や 1TCT の試験片が用いられている。試験温度は 288℃か室温である。DB No.9 は圧力容器クラッド材のデータである。

④IASCC発生

i) PWR分野(付録: IASCC発生(PWR分野)データシート1~4)

IASCC 発生については、表 4.2.3-4 に示した文献のデータをデータシートに入力した。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.1 の原子力安全基盤機構のバップルフォーマボルトと DB No.8 のフランスの 304SS 製バップ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.7 の Westinghouse 社(以下 WH)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いた。

#### ii) BWR分野(付録: IASCC発生(BWR分野)データシート1)

IASCC 発生については、表 4.2.3-10 に示した 2 文献のデータをデータシートに入力した。BWR 実機の部材のデータであり、DB No.1 は単軸定荷重試験で 20 dpa までの試験材、DB No.2 は 3 点曲げ試験で 5 dpa 以下の試験材のデータである。

### ⑤IASCC進展

#### i) PWR分野

PWR 分野を対象とした IASCC き裂進展データについては、今年度は調査対象外とした。

#### ii) BWR分野(付録: IASCC進展(BWR分野)データシート1~3)

IASCC のき裂進展については、表 4.2.3-11 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をデータシートに入力した。BOR 60 で 320℃の温度で照射された材料のデータや、き裂進展試験の水環境温度が 300℃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.2~4 である。DB No.2 では照射量は低いがシュラウド厚さ(38mm)の CT 試験片が使用されている。No.3、4 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.1 の JMTR 照射材試験データと、DB No.5 の Halden 炉照射材の試験データを入力している。DB No.1 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.6 ~8 は照射材の炉内 SCC 試験であり、DB No.6 は JMTR で、DB No.7、8 は Halden 炉で得られたデータである。

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」<sup>引用文献注)</sup>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。

### ⑥応力緩和・クリープ

#### i) PWR分野(付録: 応力緩和・クリープ(PWR分野)データシート1~4)

応力緩和・クリープについては、表 4.2.3-5 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した。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た。



ii) BWR分野(付録: 応力緩和・クリープ(BWR分野)データシート1~3)

応力緩和については、表 4.2.3-12 に示した応力緩和の 6 文献のデータをデータシートに入力した。DB No.1~5 はいずれも JMTR 照射による国内データであり、DB No.6 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(CB No.1、2)、曲げ試験(DB No.2、6)、単軸引張試験(DB No.5)、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.3、4)など多様である。

⑦スエリング

i) PWR分野(付録: スエリング(PWR分野)データシート1~2)

スエリングについては、表 4.2.3-6 に示した文献のデータをデータシートに入力した。これらはすべて PWR 実機の部材のデータであり、シングルチューブやバップルボルトの 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。

ii) BWR分野

BWR 分野を対象としたスエリングデータについては、今年度は調査対象外とした。

### c. データの検討

#### ①引張特性と硬さ

オーステナイト系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 4.2.3-3 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℃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<sup>4.2.3(3)-1</sup>。冷間加工の影響については、図 4.2.3-4 に示すように、300℃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<sup>4.2.3(3)-2</sup>、照射による増分は図 4.2.3-5 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<sup>4.2.3(3)-3</sup>。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、上記の知見に従い、照射温度と冷間加工の有無で分類して検討した。

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 4.2.3-15 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おり、引張データと同様に、材料条件(組成等)や照射条件(中性子束等)により増加の傾向が異なることを示す。

#### i) PWR分野

PWR 分野のデータでは溶体化材のデータは少ないが 320℃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 4.2.3-6 に、溶体化材について図 4.2.3-7 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、溶体化材はデータが少ないが 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くなることと対応している。

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℃の範囲で変えたデータが報告されている。図 4.2.3-8 に耐力について試験温度を 290℃、320~325℃、340~350℃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。

試験温度が室温のデータが比較的多くあり、図 4.2.3-9 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℃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℃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℃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。

## ii) 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℃である。

耐力、引張強さ、一様伸び、全伸びの照射量依存性を、304系溶体化材について図4.2.3-10に、316系について図4.2.3-11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た。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。

冷間加工材のデータは少ないが、図4.2.3-12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。

図4.2.3-13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。

図4.2.3-14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℃、PWR分野が300~350℃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℃付近(290~350℃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。

## iii) 硬さとの関係

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<sup>4.2.3(3)-4</sup>、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( $\Delta HV$ )の関係が報告されている<sup>4.2.3(3)-5</sup>。

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

図 4.2.3-16 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う範囲  
と考えられる。

図 4.2.3-17 に硬さと耐力の関係を示す。データはすべて 304 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  
の関係と同等以下のばらつきとなっている。

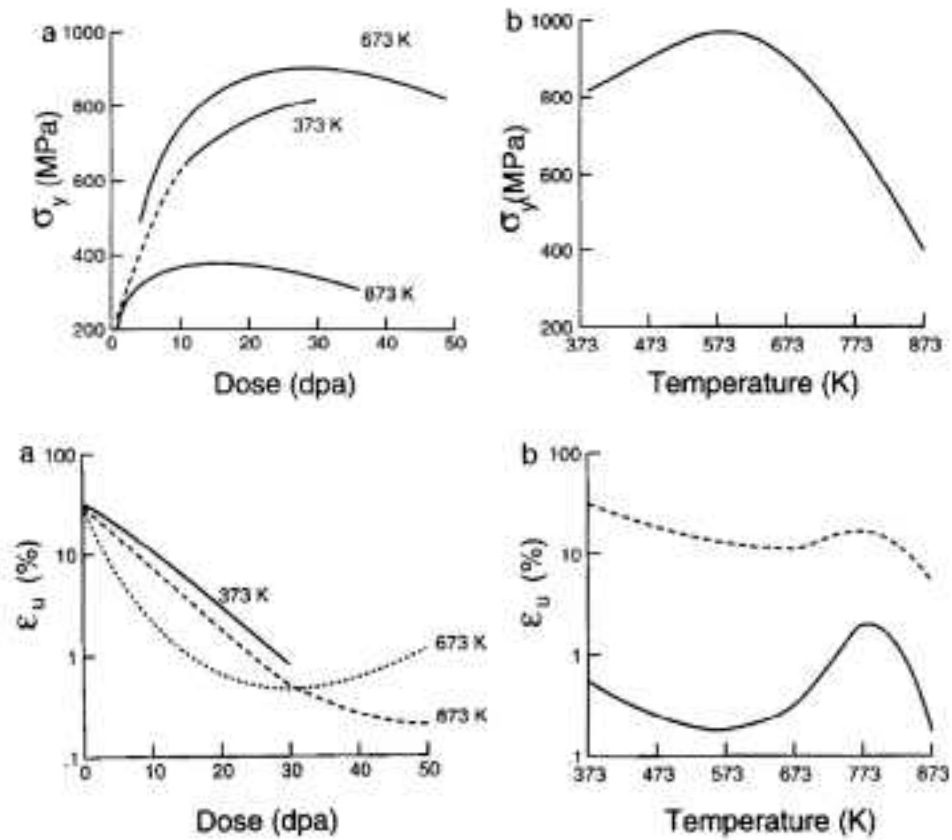


図 4.2.3-3 溶体化ステンレス鋼の耐力と一様伸びの  
照射量と照射温度による変化 4.2.3(3)-1)

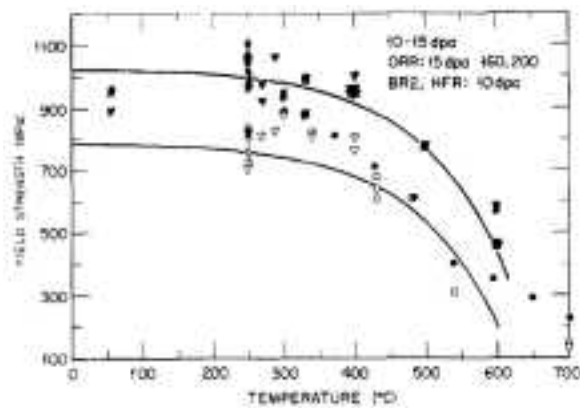


図 4.2.3-4 照射ステンレス鋼(10-15 dpa)の耐力の温度依存性 4.2.3(3)-2)  
上の線は冷間加工材、下の線は溶体化材の傾向を示す。

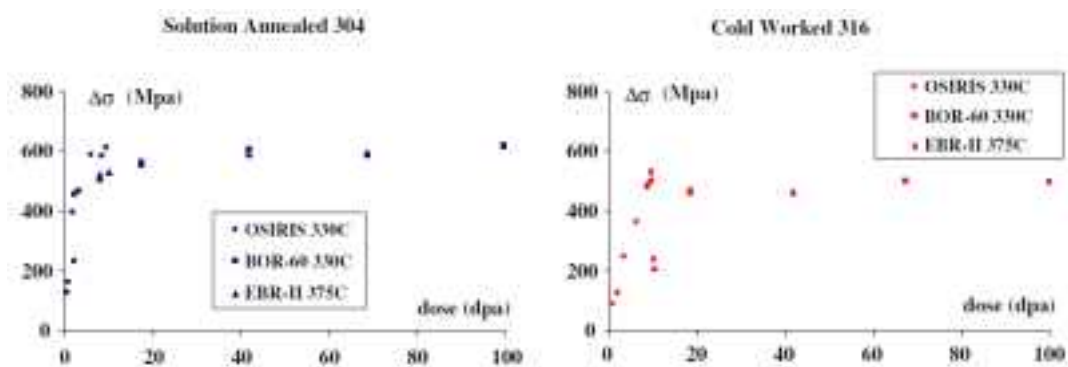


図 4.2.3-5 照射による耐力増加の比較(溶体化 304SS と冷間加工 316SS)

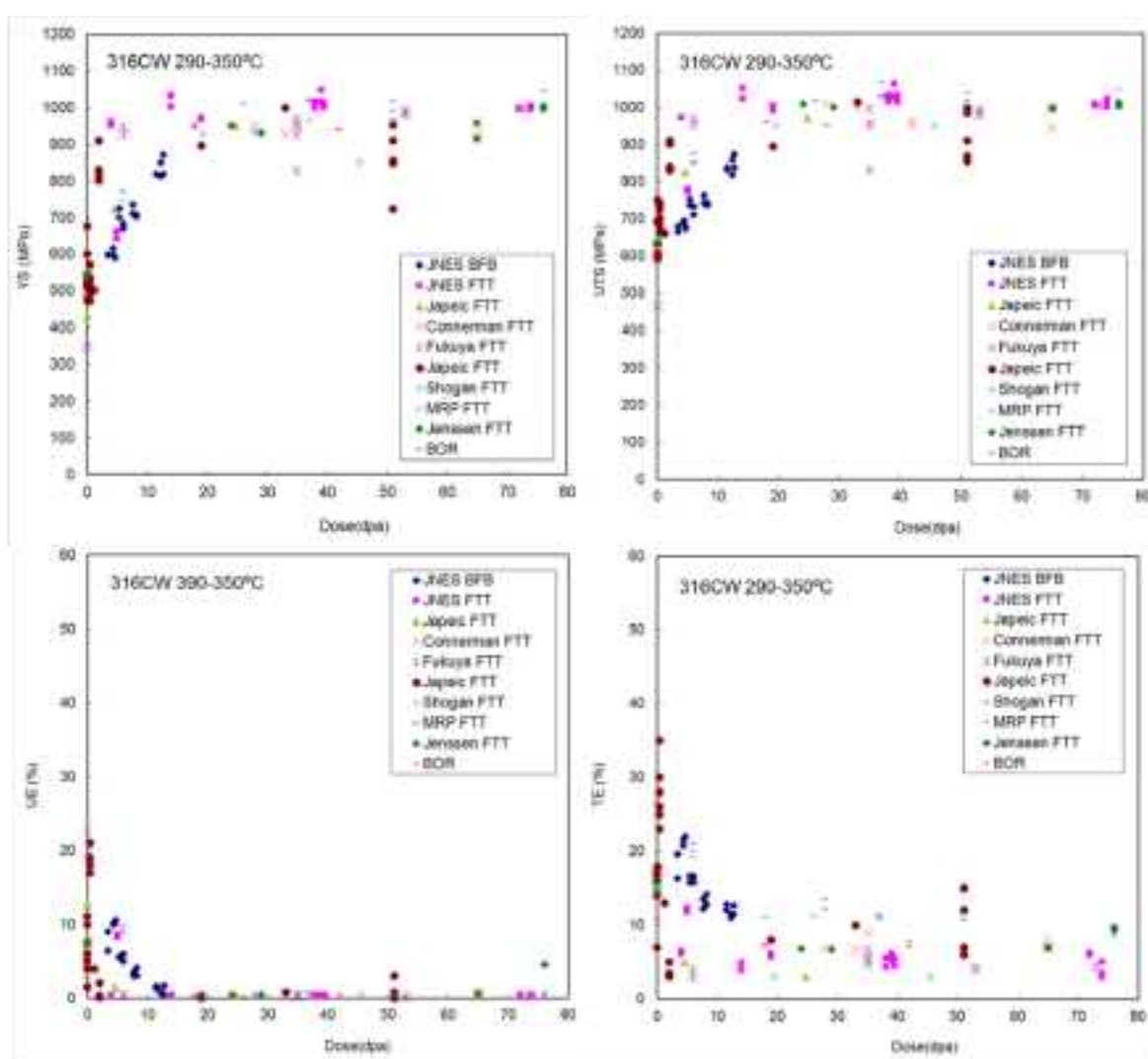


図 4.2.3-6 冷間加工 316SS の引張特性データ(PWR 分野)

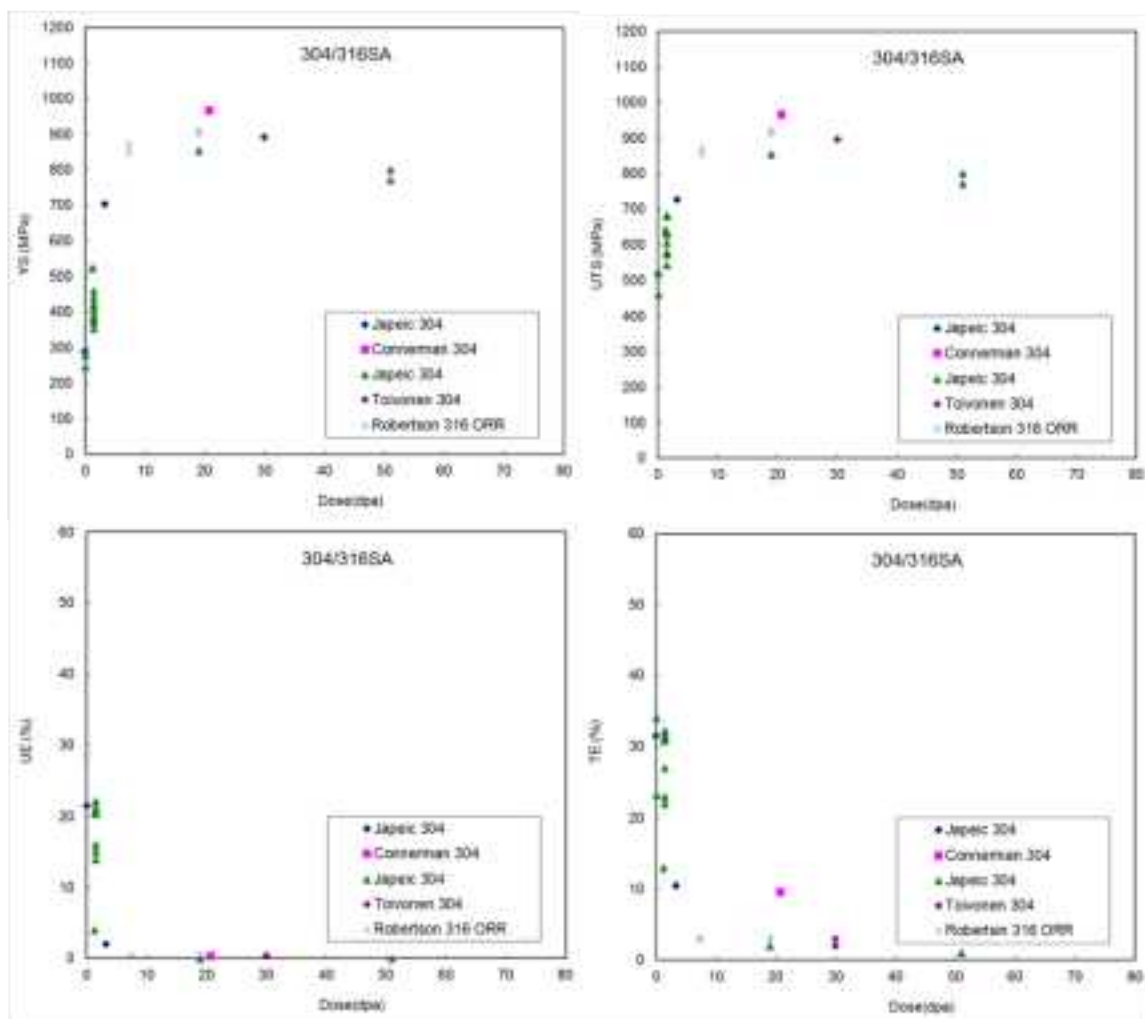


図 4.2.3-7 溶体化材 304/316SS の引張特性データ(PWR 分野)

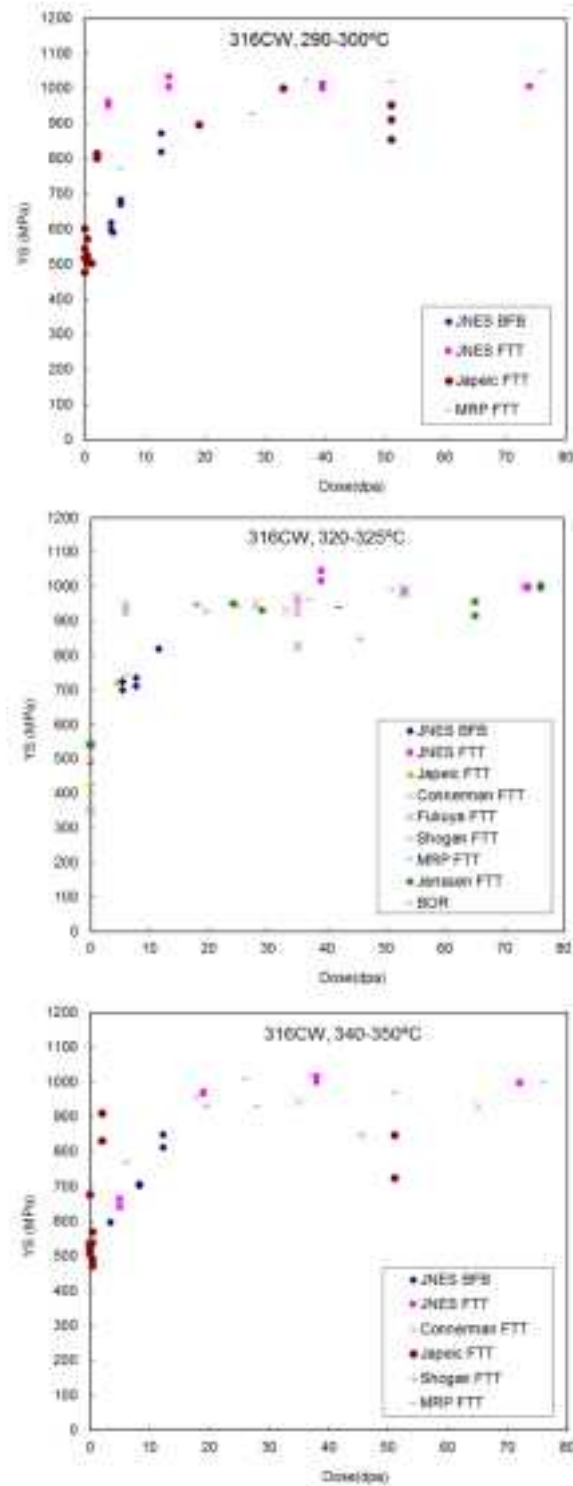


図 4.2.3-8 冷間加工 316SS の耐力の試験温度による違い(PWR 分野)



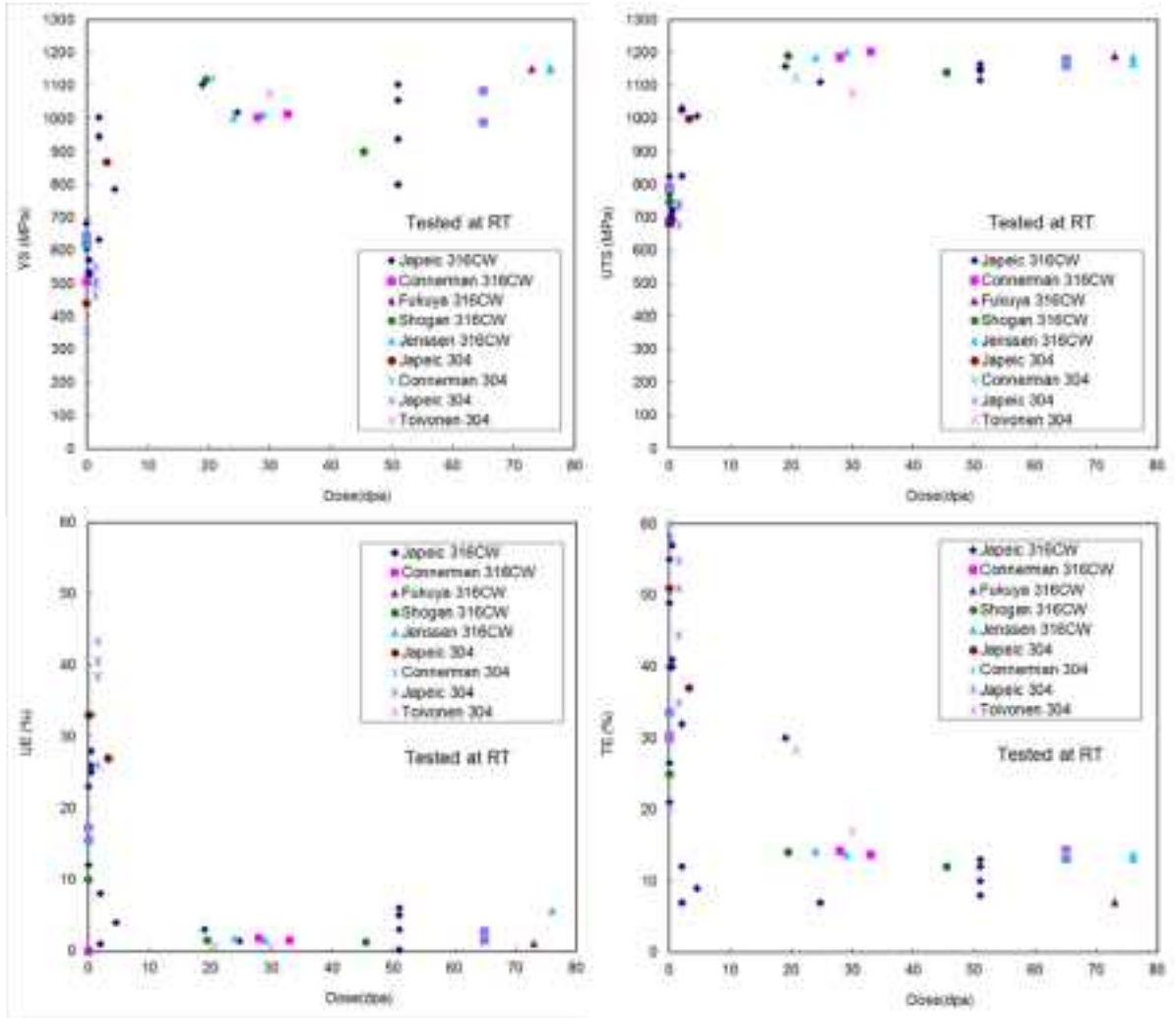


図 4.2.3-9 照射後の室温引張データ(PWR 分野)

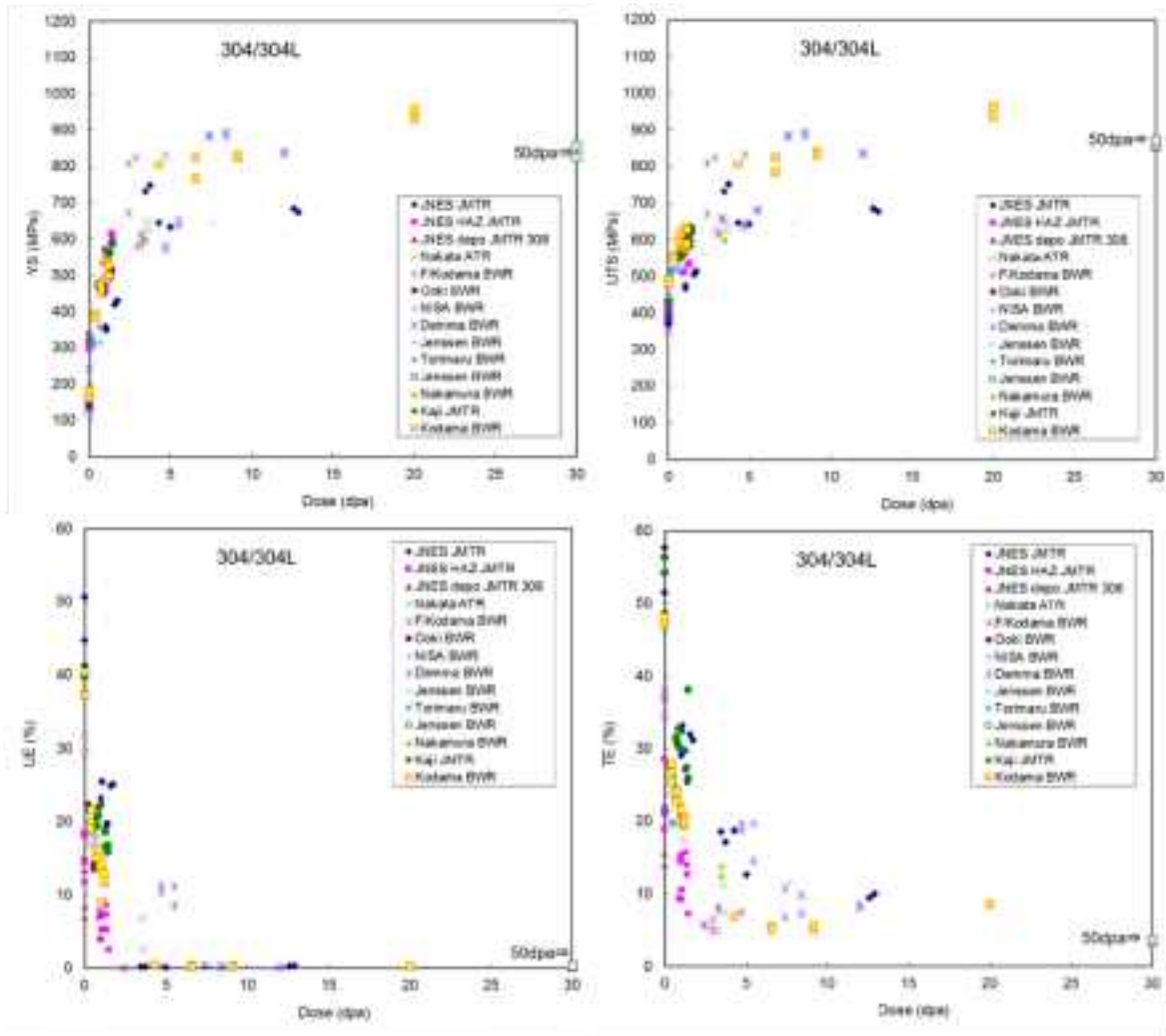


図 4.2.3-10 溶体化 304/304LSS の引張特性データ(BWR 分野)

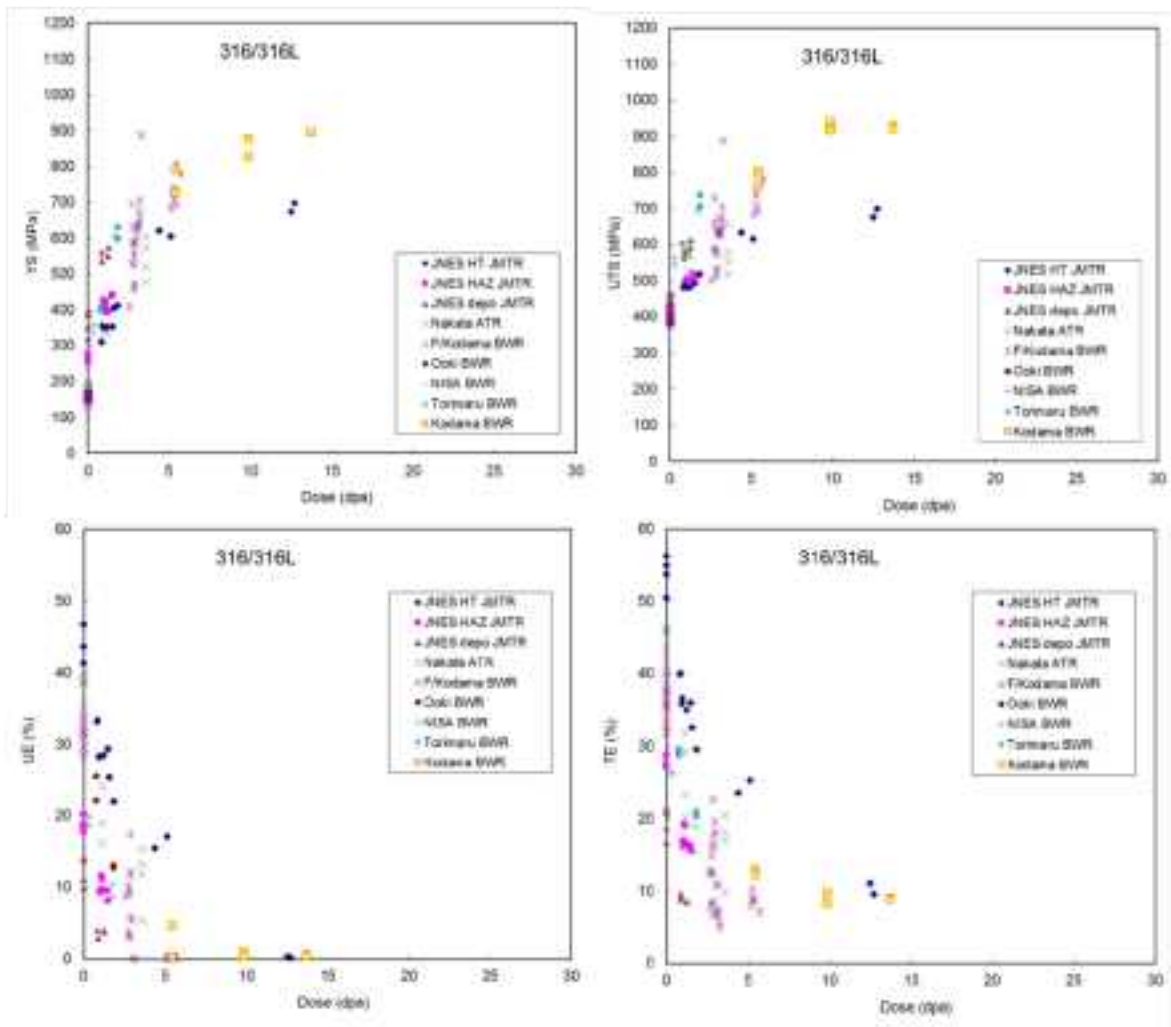


図 4.2.3-11 溶体化 316/316LSS の引張特性データ(BWR 分野)

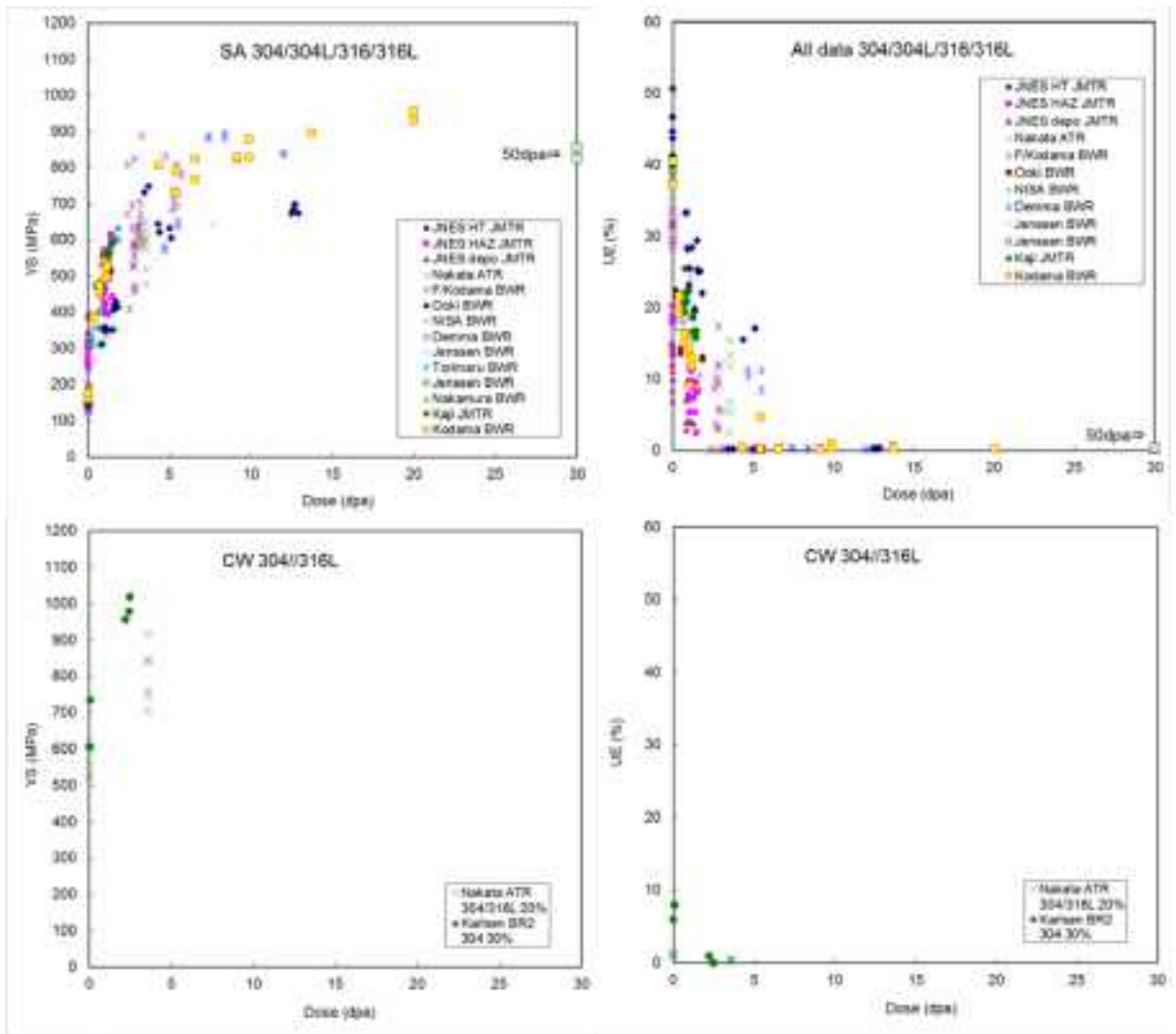


図 4.2.3-12 冷間加工材と溶体化材の耐力と一様伸びの比較(BWR 分野)

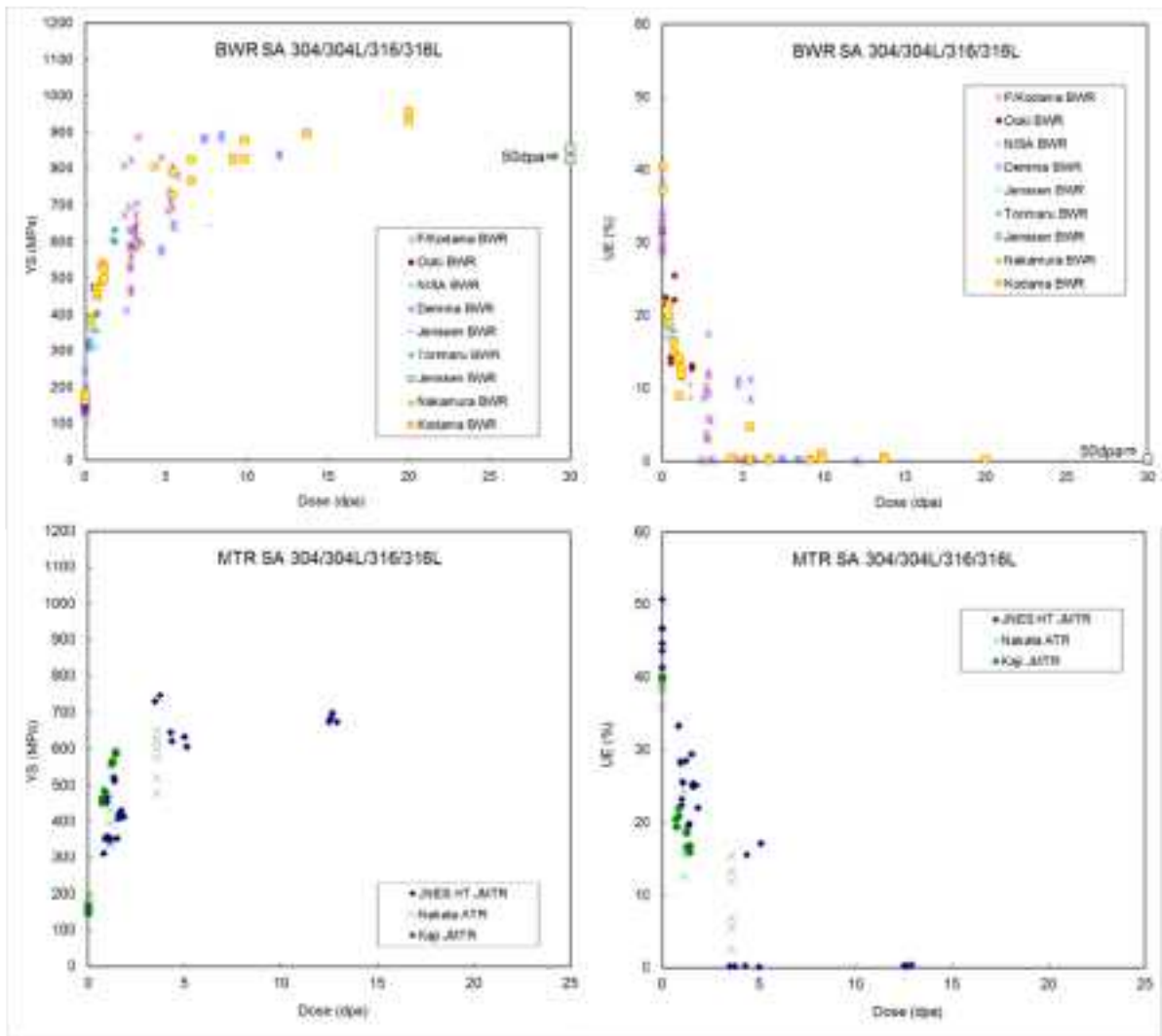


図 4.2.3-13 BWR 照射材と研究炉照射材の耐力と一様伸びの比較(BWR 分野)

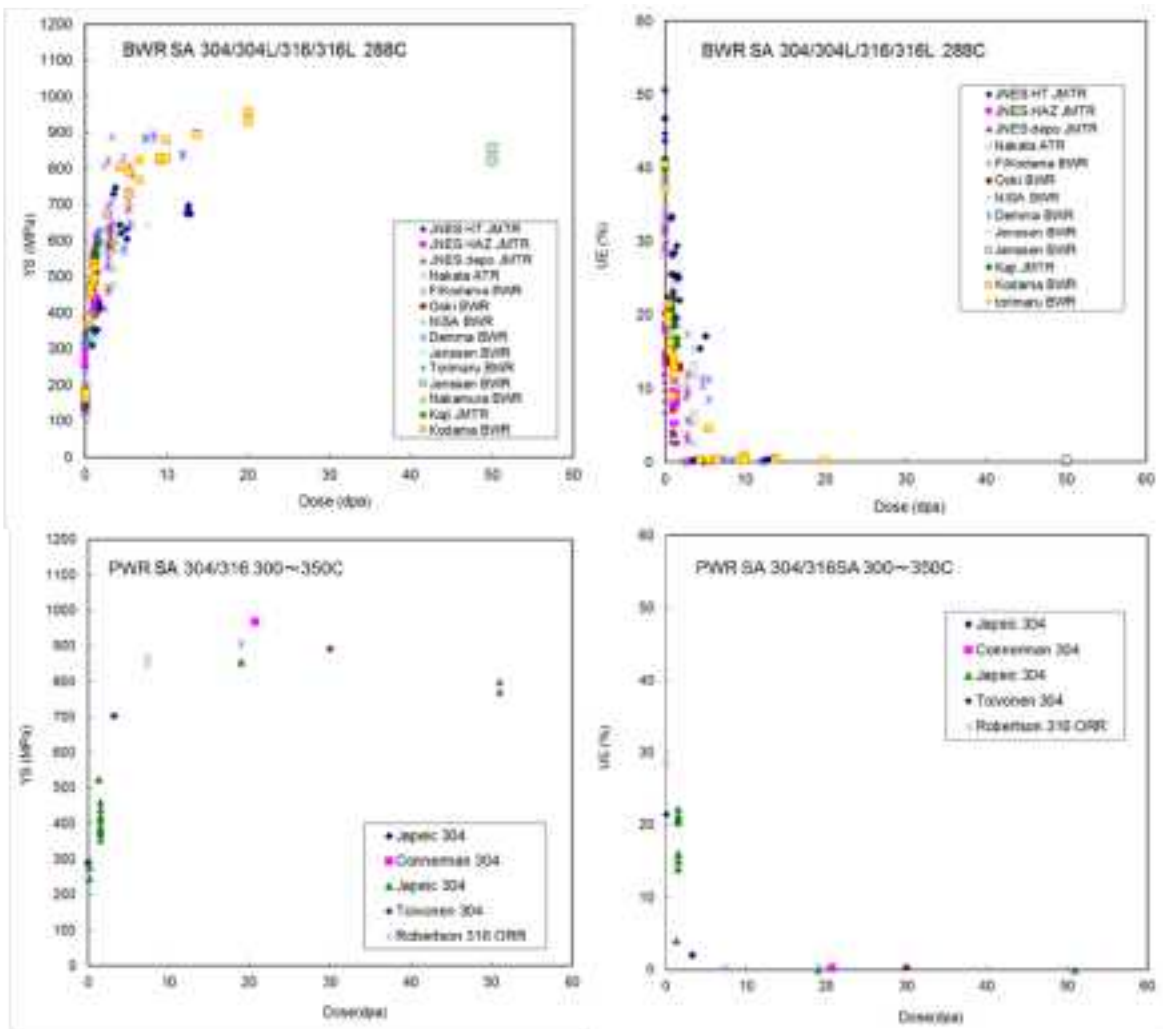


図 4.2.3-14 BWR 分野(288°C)と PWR 分野(300~350°C)の溶体化材の耐力と一様伸びの比較

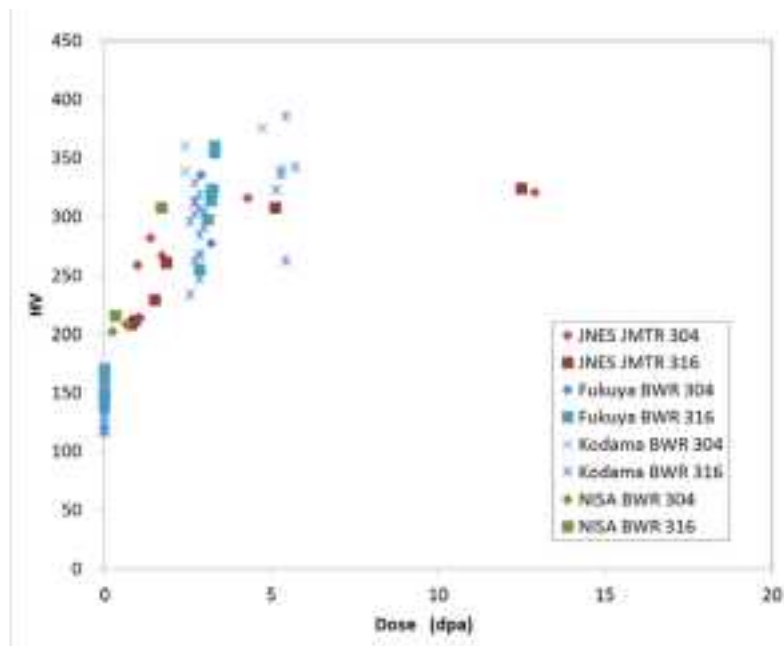
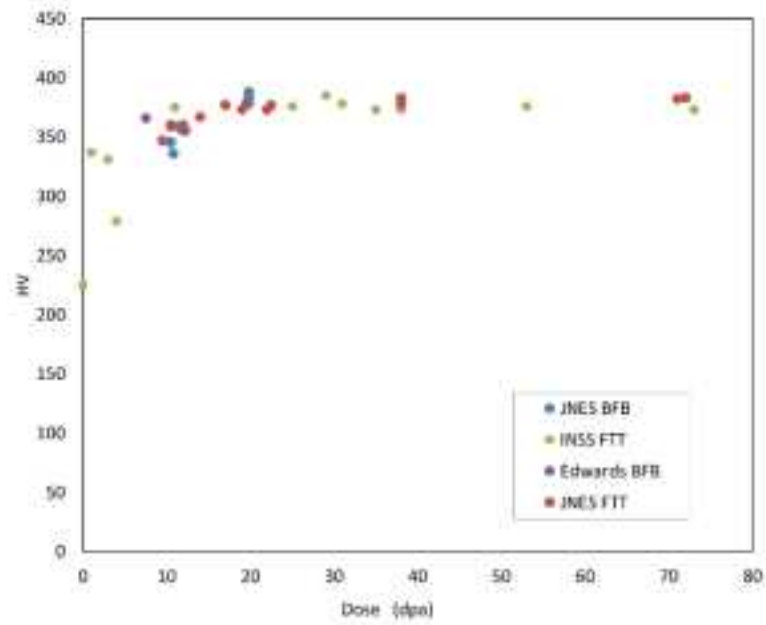


図 4.2.3-15 PWR 分野(上)と BWR 分野(下)の硬さの照射量依存性

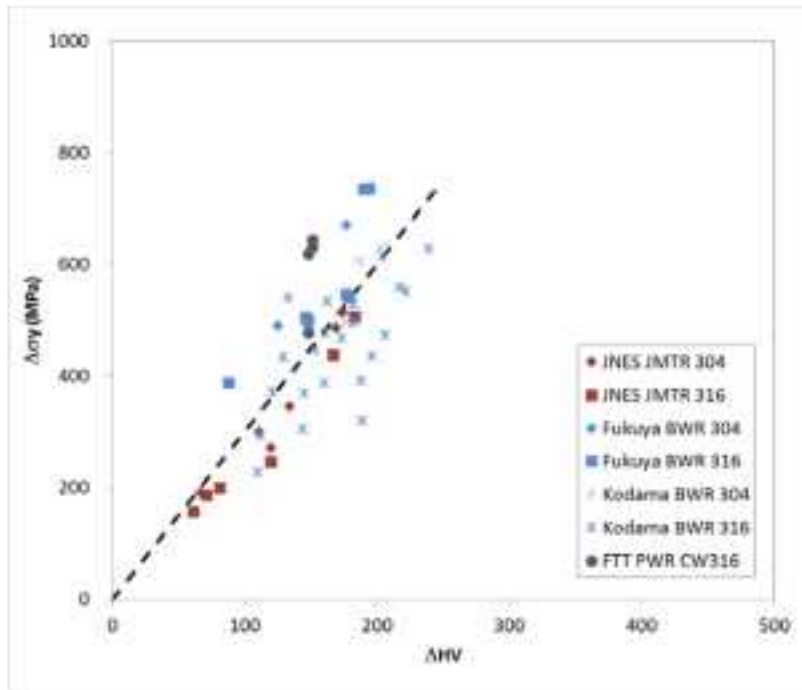


図 4.2.3-16 硬さ増加量と耐力増加量の関係

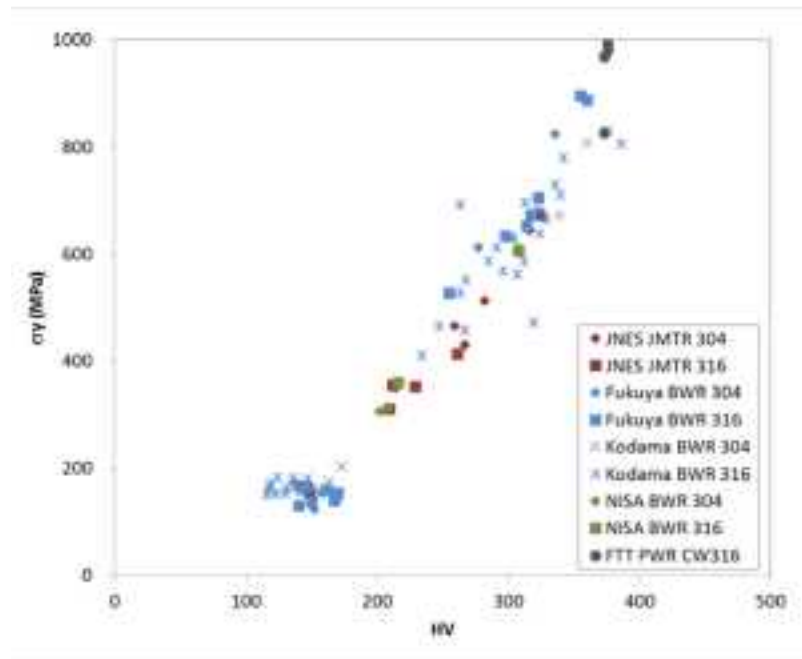


図 4.2.3-17 硬さと耐力の関係



## ② 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。

### i) PWR分野

PWR 分野のデータは、実機から取出されたシング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 4.2.3-18 に PWR 分野の 300～350℃での破壊靱性データを示す。試験片は肉厚 1mm 以下のチューブ、直径約 9mm の RCT、直径約 4mm 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/m<sup>2</sup> 以下であり、高照射では 50 kJ/m<sup>2</sup> 以下となっている。

## ii) 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 系のデータが豊富である。図 4.2.3-19 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 1.5TCT 相当のデータも報告されている<sup>4.2.3(3)-6</sup>。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/m<sup>2</sup>以下の低い値を示すデータ<sup>4.2.3(3)-7</sup>と Ehrnsten らの 500 kJ/m<sup>2</sup>近い高い破壊靱性値を示すデータ<sup>4.2.3(3)-8</sup>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 らのデータではき裂方向により系統的な破壊靱性値の差が見られている<sup>4.2.3(3)-7</sup>。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 方向は圧延面をき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。

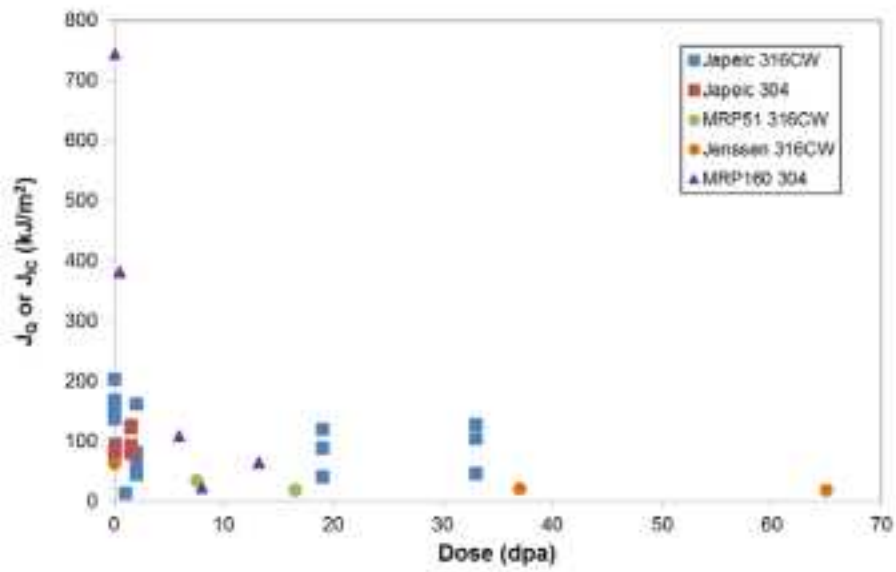


図 4.2.3-18 PWR 分野の破壊靱性データ

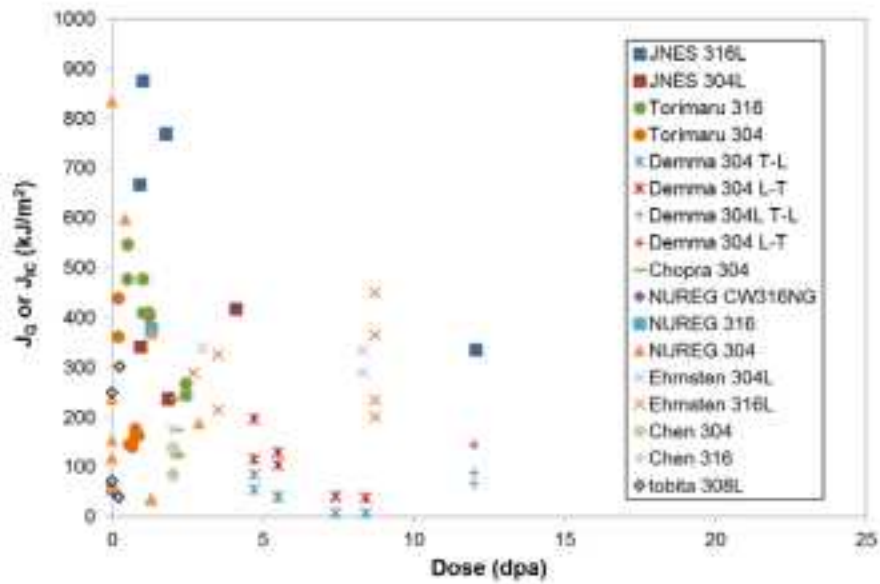


図 4.2.3-19 BWR 分野の破壊靱性データ

### ③IASCC発生

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き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。

#### i) 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製のシング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4.2.3-20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4.2.3-20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℃、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4.2.3(3)-9)のデータ以外はすべて定荷重条件のデータである。定荷重試験ではNishiokaら4.2.3(3)-10)とToivonenら4.2.3(3)-11)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4.2.3-21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℃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4.2.3(3)-12)。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4.2.3(3)-13)。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4.2.3(3)-10)。

#### ii) 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4.2.3(3)-14)とKatsuraらの単軸定荷重試験のデータ4.2.3(3)-15)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4.2.3-22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。

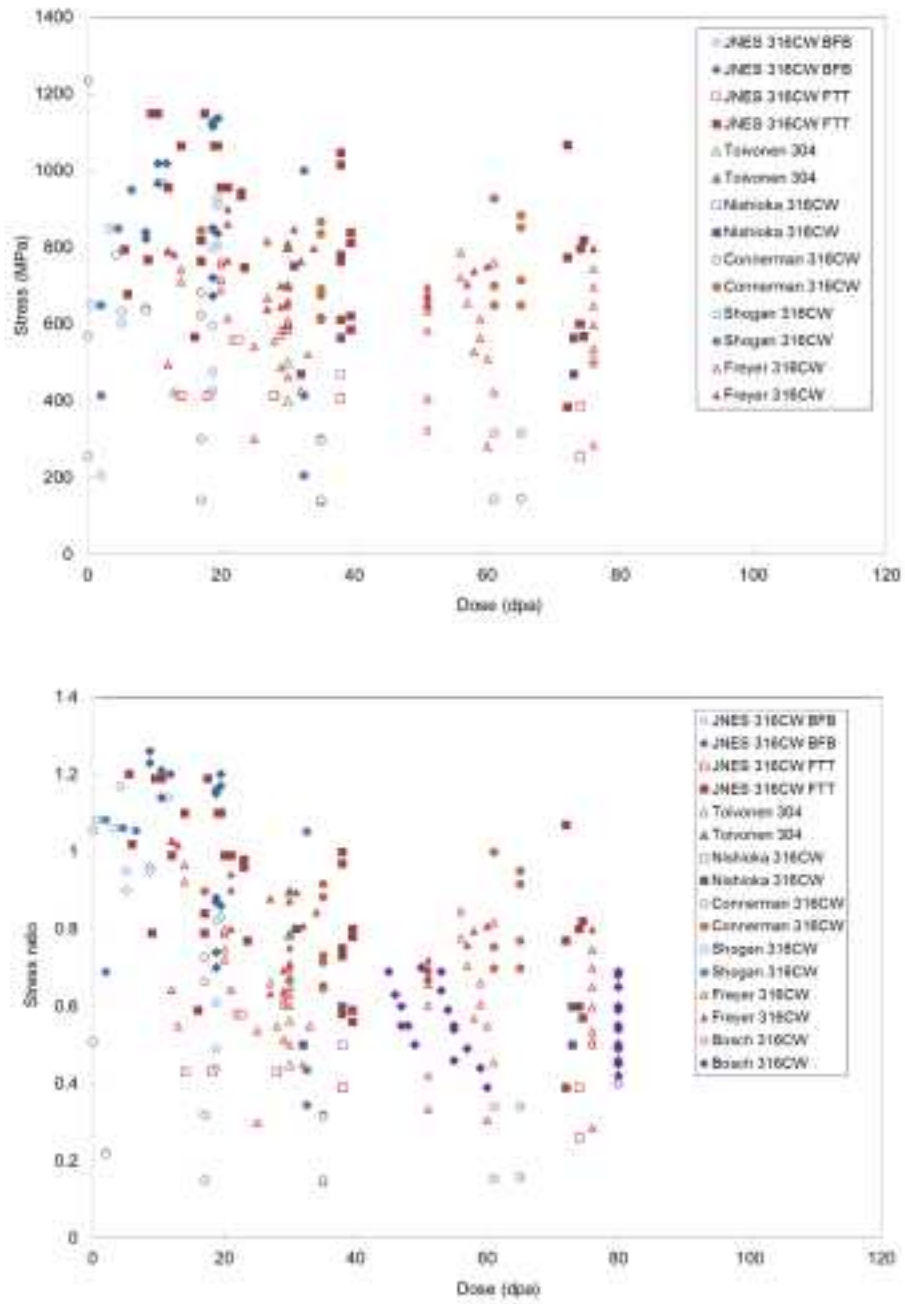


図 4.2.3-20 PWR 分野の IASCC 発生データ  
 上は負荷応力との関係、下は応力比との関係

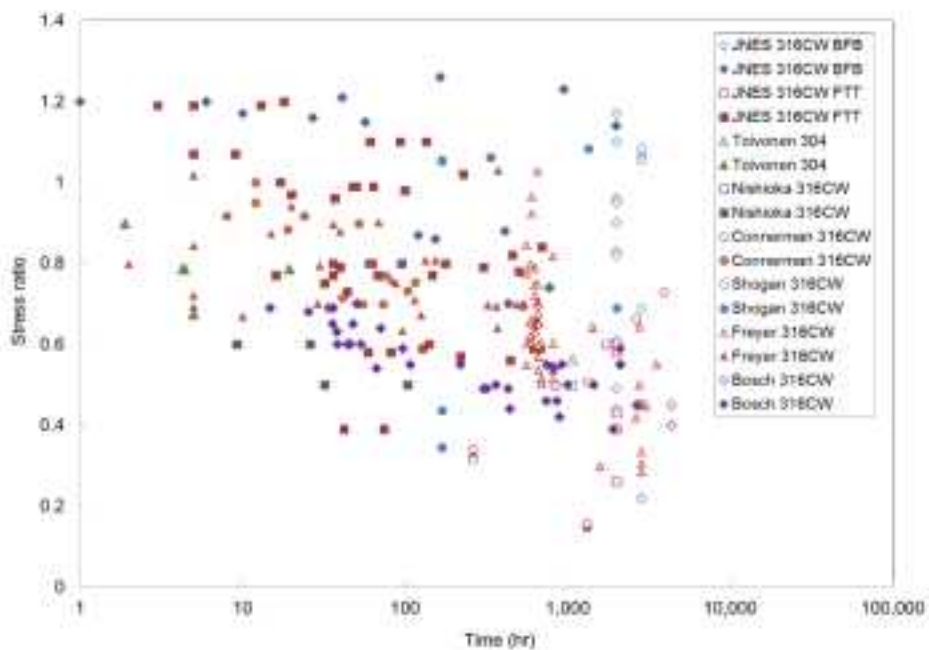


図 4.2.3-21 PWR 分野の IASCC 発生時間データ

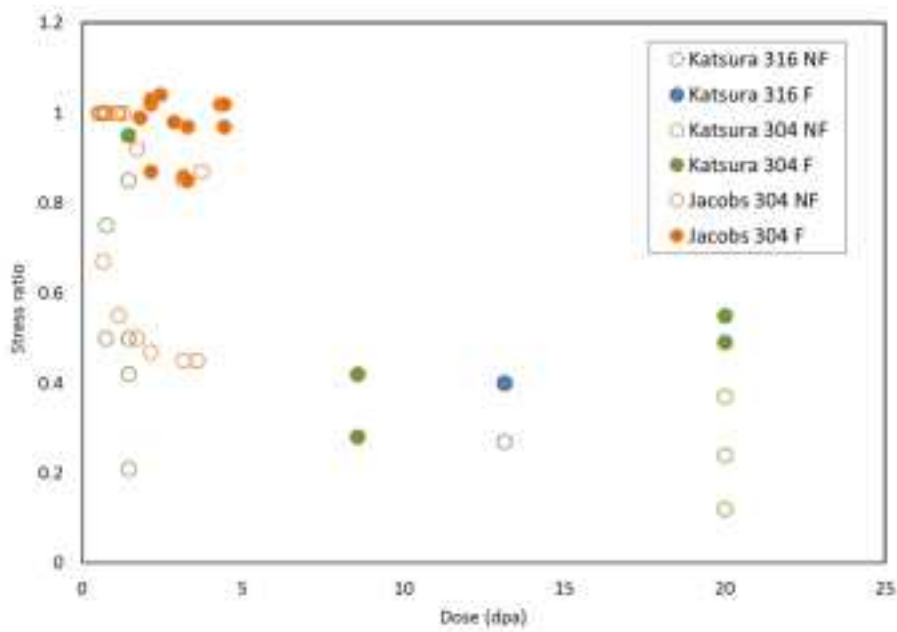


図 4.2.3-22 BWR 分野の IASCC 発生データ

#### ④IASCC進展

##### i) PWR分野

PWR 分野を対象とした IASCC 進展については、今年度は調査対象外とした。

##### ii) BWR分野

き裂進展試験は国内で比較的多くのデータが報告されている (4.2.3(3)-12,16~20)。図 4.2.3-23 に国内での試験で得られている進展データを NWC と HWC の環境条件で分けて示した。また、図 4.2.3-24 には同じデータの K 値依存性を示す。BWR 実機材と JMTR 照射材のデータがあるが、低照射量では同じような進展速度の範囲にある。高照射量までの系統的なデータは原子力安全基盤機構の IASCC プロジェクトの JMTR 照射材のものであり、NWC では照射量に対して明瞭な飽和傾向が見られる。NWC では  $10^{-9}$  m/s を超えるデータがあるが、HWC ではそれ以下となっている。

海外ではき裂進展試験は、Halden 炉による炉内試験(in-pile)が多く行われている (4.2.3(3)-21)。図 4.2.3-25 は、照射後試験(PIE)と炉内試験に分けてプロットした図である。また、図 4.2.3-26 は同じデータの K 値依存性を示す。照射量や水質の違いも含んだデータであるが、全体としてのばらつきの範囲は大きく、炉内試験と炉外試験ではばらつきの範囲に大きな違いは見られない。詳細な比較は今後の課題である。



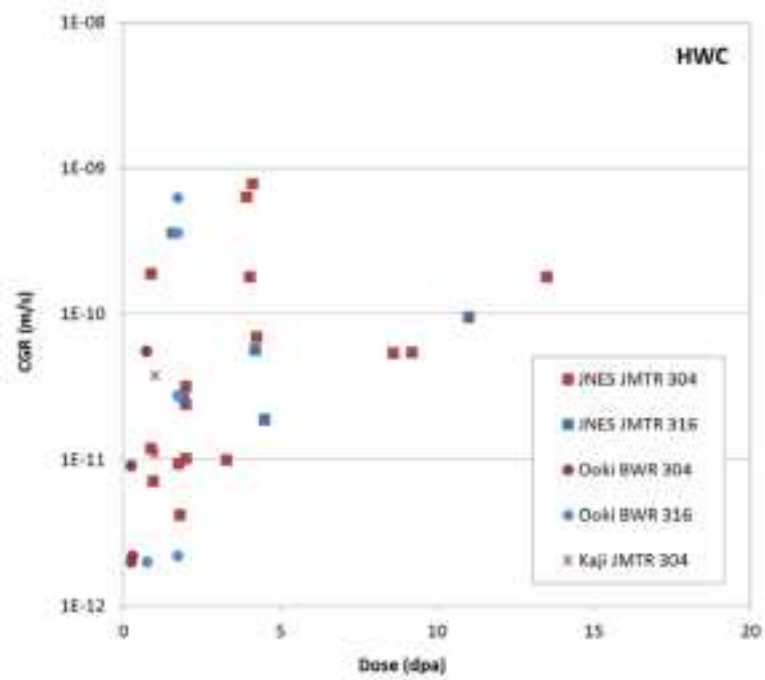
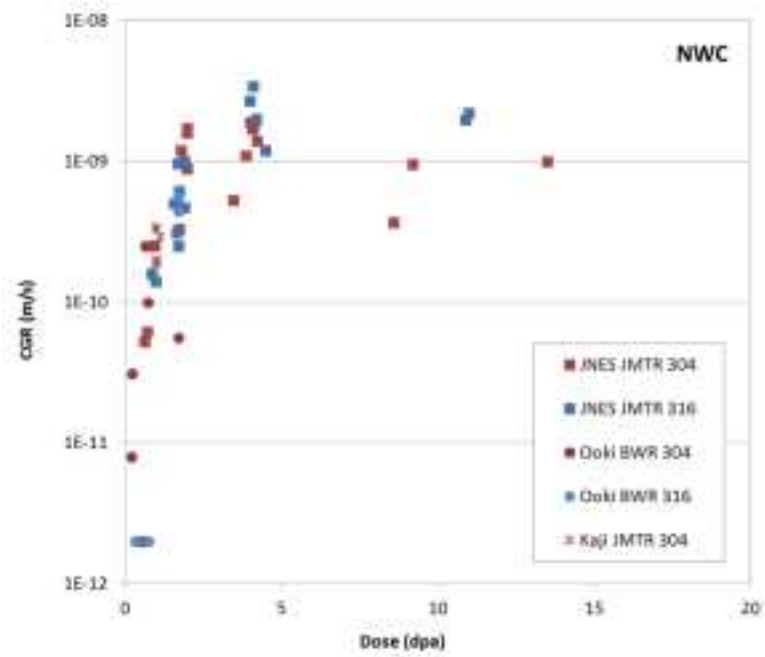


図 4.2.3-23 国内データの NWC(上)と HWC(下)でのき裂進展速度の照射量依存性

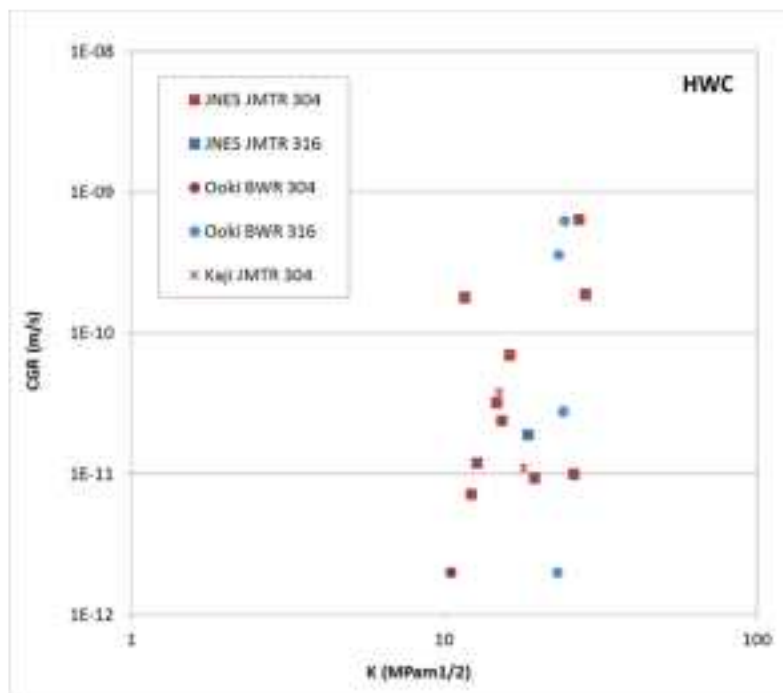
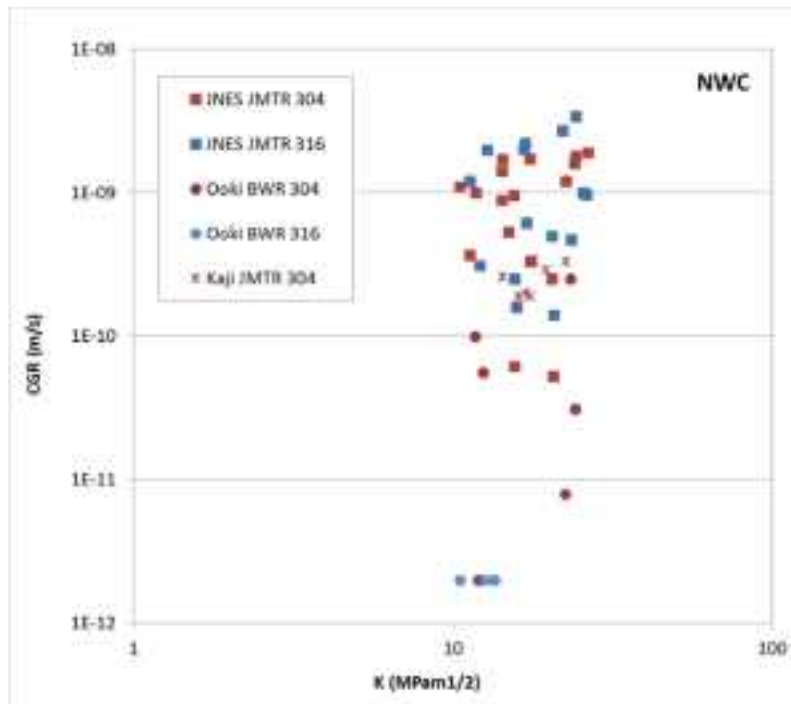


図 4.2.3-24 国内データの NWC(上)と HWC(下)でのき裂進展速度の K 値依存性

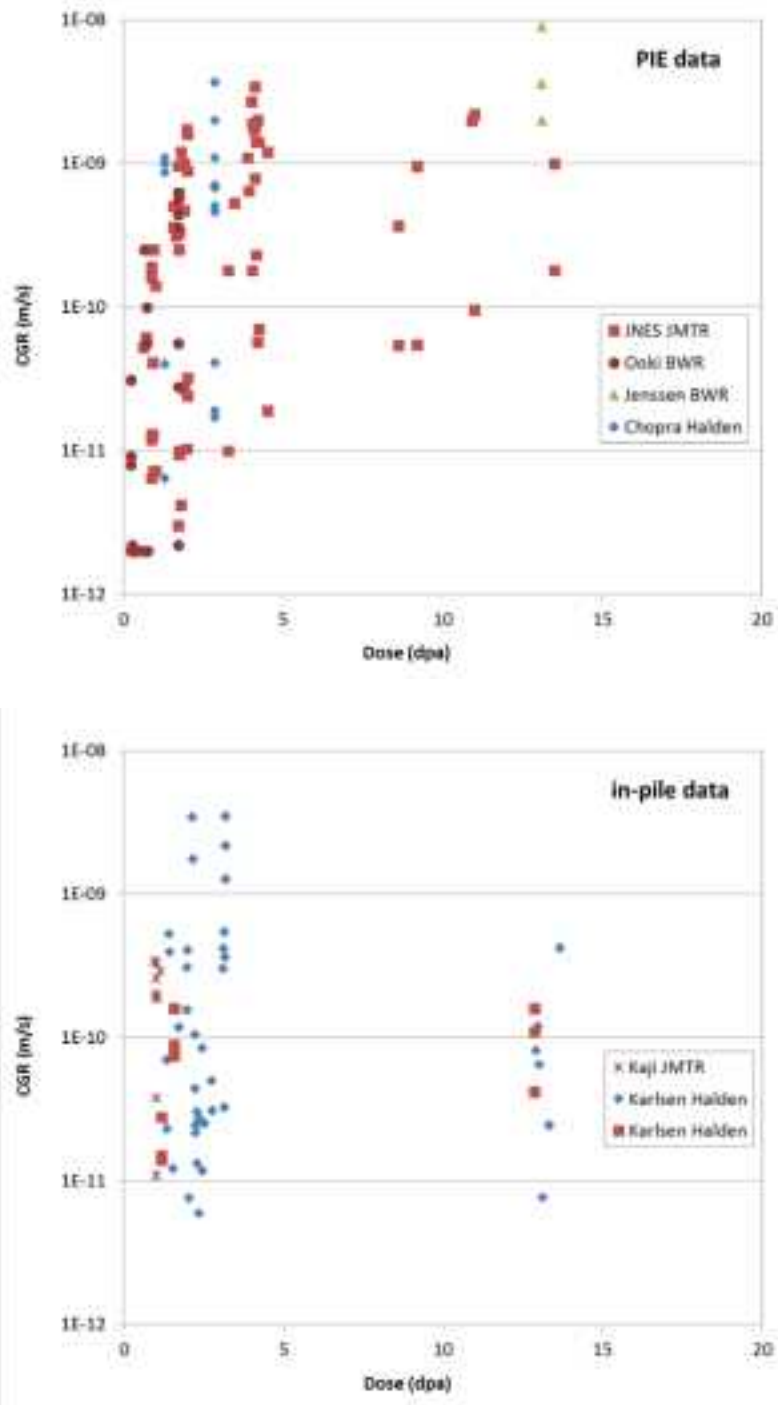


図 4.2.3-25 照射後試験(上)と炉内試験(下)でのき裂進展速度の照射量依存性

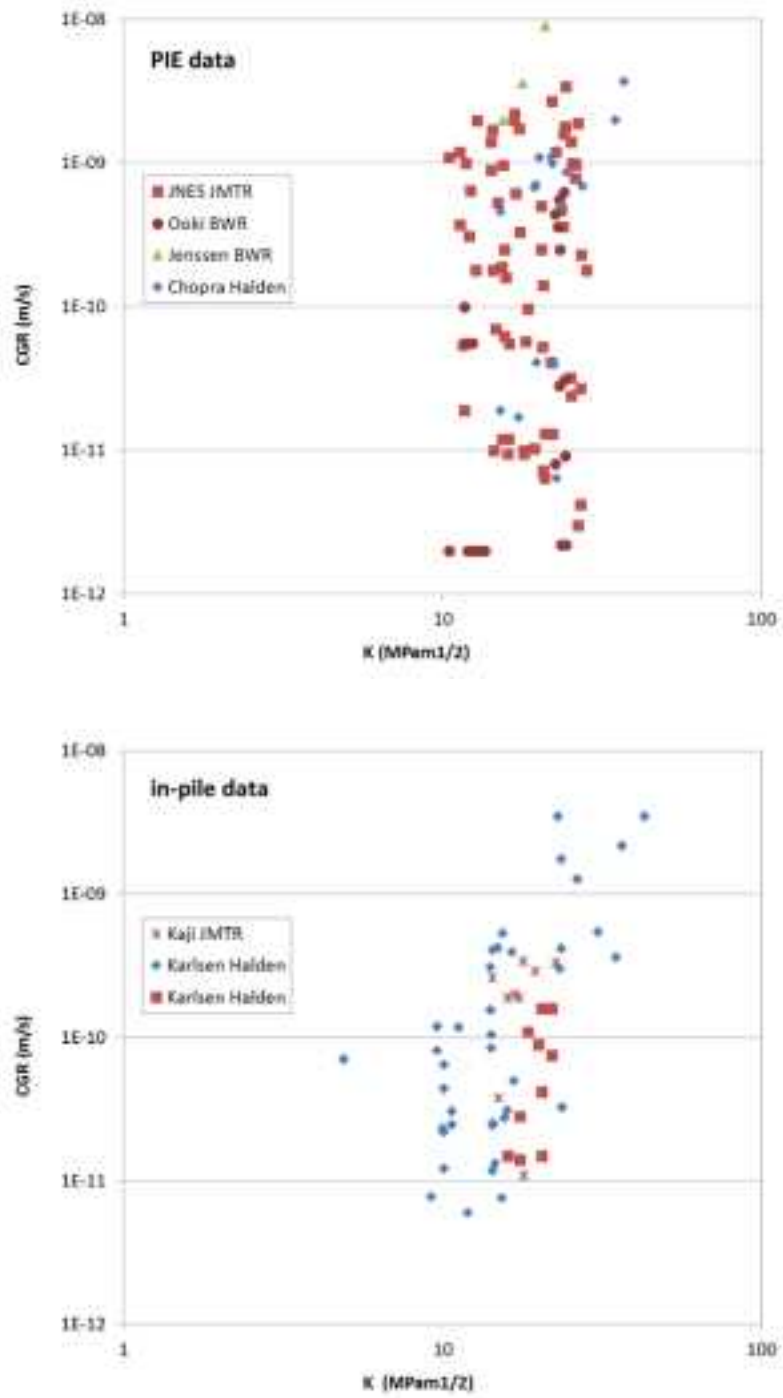


図 4.2.3-26 照射後試験(上)と炉内試験(下)でのき裂進展速度の照射量依存性

## ⑤ 応力緩和・クリープ

### i) PWR分野

PWR 分野では、320°C前後のクリープ試験が報告されている<sup>4.2.3(3)-12,22,23</sup>。クリープデータは、多くの場合、下記のような照射クリープの式(クリープひずみ $\varepsilon$ 、応力 $\sigma$ 、照射量 $F$ )に当てはめて係数を求める方法で整理されている。

$$\varepsilon = A_1 \sigma [1 - \exp(-A_2 F)] + A_3 \sigma^n F$$

多くの文献では、定常クリープを応力に比例するとして(すなわち  $n=1$  として)整理し、定常クリープ  $A_3$  を報告している。表 4.2.3-13 はクリープ試験や緩和試験による定常クリープ速度をまとめたものである。2~4×10<sup>-6</sup> /MPa/ dpa の範囲の値が報告されている。

### ii) BWR分野

BWR 分野では、約 290°Cの JMTR 照射による溶体化した 304 系と 316L 系の応力緩和試験データが多く得られている。図 4.2.3-27 に応力比の照射量依存性を示す。この図には JNES の IASCC プロジェクトのデータで提案されている式<sup>4.2.3(3)-12</sup>である

$$\sigma/\sigma_0 = \exp[-0.19F]$$

による傾向線も示した。多くのデータの応力比は照射量の増加でほぼ比例して減少する。データは傾向線よりも小さいが、減少の仕方はこの傾向線にほぼ従っている。これは傾向線が初期緩和量を考慮していないためであり、初期緩和量は材料や試験片形状の違いで大きく異なるが、定常緩和領域の緩和速度はあまり大きく変わらないことを示している。

表 4.2.3-13 PWR 分野の照射クリープ・緩和試験による定常クリープ速度

文献	照射炉	材料	温度(°C)	負荷応力(MPa)	クリープ速度 ( $10^{-6}$ / MPa/ dpa)
4.3.5-2	OSIRIS	SA304L	325	128-187	4.6
		CW316	325	128-187	2.9
	BOR 60	SA304L	320	127-220	3.7
		CW316	320	127-220	2.8
4.3.5-3	Halden	CW316	330	345	2.3, 3.0
			330	205, 275	2.1
		SA304L	290	110	2.2
			290	92	3.2

注: CW は冷間加工、SA は溶体化熱処理を示す

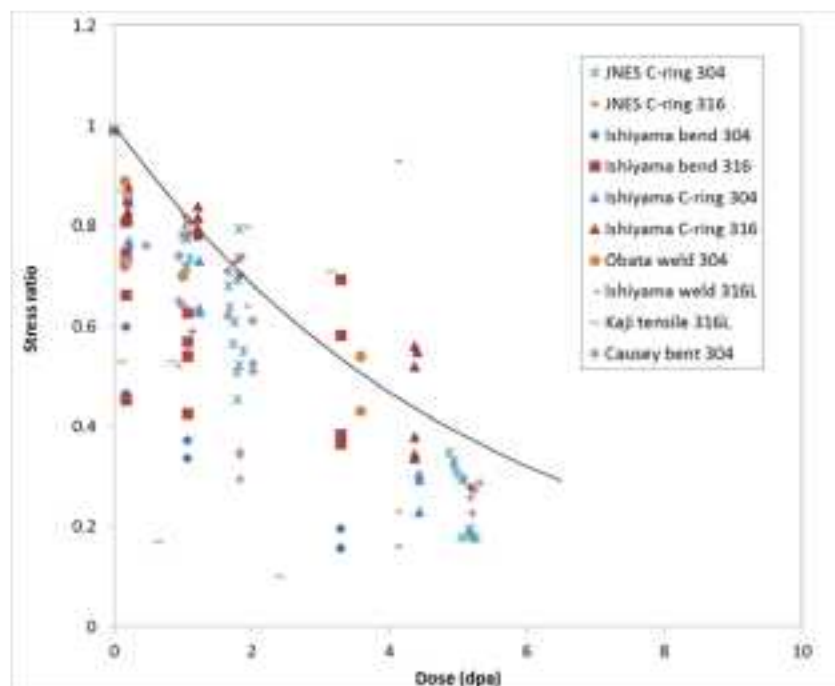


図 4.2.3-27 BWR 分野の応力緩和試験による応力比の照射量依存性

## ⑥スエリング

### i) PWR分野

PWR 実機から取出された冷間加工 316SS 製のシングルチューブとボルトの TEM 観察のデータが多く報告されている。304SS と 347SS について報告例は極めて少ない 4.2.3(3)-24,25)。図 4.2.3-28 にスエリング量と照射量との関係を示す。シングルチューブのスエリングは高照射量まで 0.05%以下であり、ボルトのスエリングは 10 dpa 付近では 0.1%を超えているものがある。図 4.2.3-29 は軽水炉条件でのスエリングの予測に用いられている次の式 4.2.3(3)-26)を用いて、320℃で中性子束を  $10^{-10} \sim 10^{-7}$  dpa/s に変化させた時の計算値を示している。

$$S = A \cdot \left( \frac{\dot{F} \cdot 10^7}{1.25} \right)^{-0.73} \cdot \left( \frac{F}{4.9} \right)^2$$

$$A = \exp(-1.592 + 0.245T - 1.210T^2 - 1.384T^3 - 1.204T^4)$$

$$T = \frac{(T - 490)}{100}$$

ここで、各パラメータの単位は、スエリング S は%、温度 T は℃、損傷速度  $\dot{F}$  は dpa/s、照射量 F は dpa である。

スエリングのデータは値が小さく計算値との整合性はよくわからない。ボルトのスエリングがシングルチューブよりも高いのは、照射温度はシングルチューブで 290～325℃、ボルトは 340℃以上との評価があり、またボルトはシングルチューブよりも中性子束が低いことから、温度と中性子束の影響がみられている可能性がある。ただし、キャビティが見られないデータも多く、軽水炉条件の温度と中性子束の影響の程度の把握は今後の課題である。

### ii) BWR分野(付録:)

BWR 分野ではスエリングを評価対象としていないため、調査対象外とした。

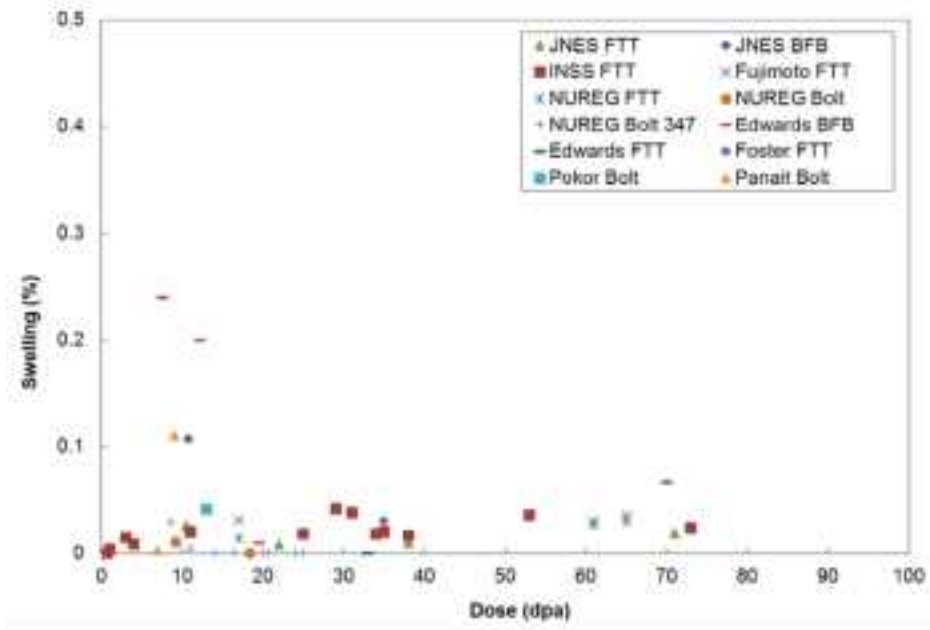


図 4.2.3-28 PWR 分野のスエリングデータ

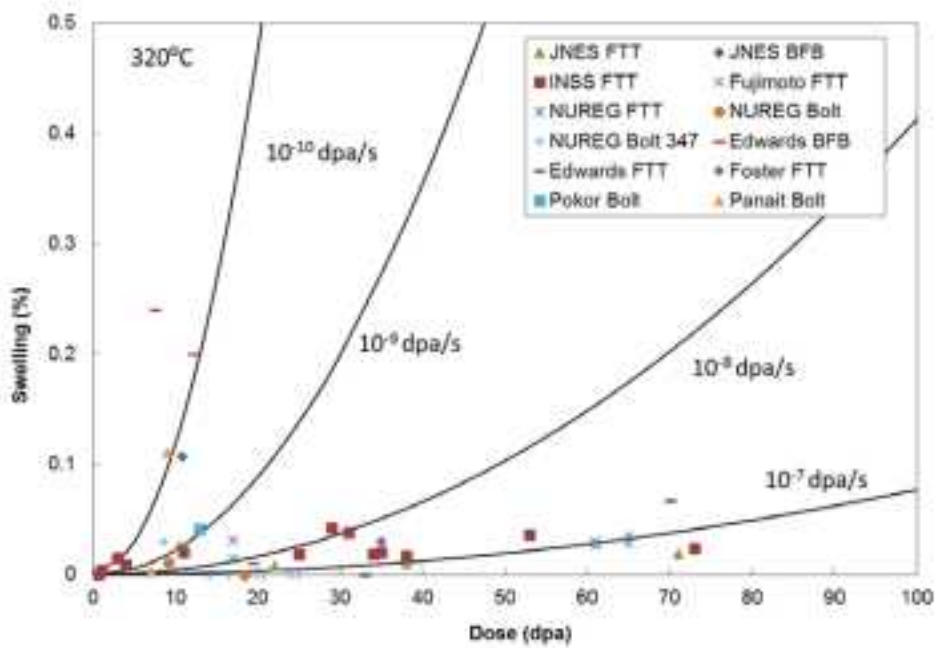


図 4.2.3-29 スエリングデータとスエリング傾向式



#### d. データのばらつき

引張特性、破壊靱性、IASCC 特性、応力緩和・クリープ、スエリングについて照射データの検討を行ってきたが、文献から集められるデータには大きなばらつきが存在する。データの比較検討や傾向式の作成においては、照射データの数が限られるため、多くの場合は材料(溶体化 304SS と冷間加工 316SS[等])と照射温度(BWR と PWR)など限られた分類で区分して照射量に対する変化を検討することとなる。このような限られた分類では、データ毎の材料の違い、照射温度の違い、試験方法の違いにより当然ばらつきが生ずる。

材料試験では未照射材の試験においても種々のばらつきの要因が存在する。複数の機関がそれぞれ独自の方法や装置で試験を行う場合には、比較的単純な引張試験においても、次のようなばらつき要因があると考えられる。

- ・ 素材の組成や熱処理のばらつき、
- ・ 試験片の素材内の採取位置や採取方向の違いによるばらつき、
- ・ 試験片の形状やサイズによるばらつき、
- ・ 荷重やひずみの負荷速度、試験温度、雰囲気などの試験条件のばらつき、
- ・ 荷重やひずみなどの測定方法によるばらつき、

照射材の試験においては、そのような未照射材の試験での要因に加えて、照射材の採取、照射条件の測定や評価、ホットラボでの試験などに付随する照射材特有のばらつきの要因が存在すると考えられる。そのような要因として考えられるものを以下に列挙する。

##### ①試験材に関するもの

実機の炉内から取出された部材や試験片は、表面状態が多様であり、機械加工等による仕上げ状態や炉水環境中での表面腐食の状態は、部材の場所や使用期間の違いで異なっている。そのため取出したままの表面状態で試験を行うと、機械的性質や腐食特性のばらつきの要因となりうる。取出し後の試験片加工で表面を取り去るような場合にはこの影響はない。

##### ②試験材の採取に関するもの

実機から部材の一部を採取するような場合 例えば、長尺の部材を燃料プール内で切断するような場合には切断位置の正確さが劣る場合があり、炉内にあった時の位置の精度が悪い場合がある。このような場合には次に述べる照射条件の推定の精度が悪くなる。試験炉照射の場合にはそのような問題はほとんどないと考えられる。

### ③試験材の照射条件に関するもの

実機から取り出した部材を素材とする試験では、試験片の中性子照射量、中性子束、温度を計算で推定する必要がある。中性子場の計算は輸送コードなどが使用されるが、計算コードの性能(2次元か3次元か)、空間メッシュの数(細かいほど良い)、核データの精度(縮約データの群分割数)などで誤差が変化する。3次元計算と炉心内のドシメトリーによる中性子束等の精度を確認する検討がPWRとBWRで行われており<sup>4.2.3(3)-27,28</sup>、少なくとも10%程度の誤差を含むと考えられる。表4.2.3-14はPWRの監視試験キャプセルのドシメータによる中性子束の計算値と測定値の比の例であり、使用するコードと断面積の組合せで10%程度の違いがあることを示している<sup>4.2.3(3)-27</sup>。放射化量の測定などで校正する場合もあるが、計算自体の精度の向上にはならない。照射温度は熱解析計算で推定されるが、発熱量、周辺流量、計算コード自体の精度に影響される。特に厚い板材の内部や流れが複雑な部位などでは温度の推定精度は高くない可能性がある。

試験炉照射の場合は、代表位置(制御点)の熱電対による測定が行われるが、測定されない試験片の温度は計算値で推定される。その計算では、発熱量は輸送計算コードの精度に影響され、除熱量は照射キャプセル内での試験片の相対配置の精度などに影響されるため、相当の誤差を含む可能性がある。また、中性子束勾配の大きい位置の試験片では、試験片内で照射量と温度に分布が生ずる場合がある。

### ④照射環境の変動に関するもの

中性子照射の効果には、外部条件として温度、中性子束、応力が影響するが、それらの変動する場合には影響が変わっている可能性がある。特に、実機の部材では運転サイクル中に中性子束、温度、圧力が変化する場合がありますそれがデータのばらつき要因になっている場合が考えられる。例えば、図4.2.3-30に示すようにPWRでは運転サイクル中の冷却水のボロン濃度の変動により、サイクル内で構造物の $\gamma$ 線加熱が変動し温度も変動すると計算されているが<sup>4.2.3(3)-29</sup>、材料の照射温度は平均値で表されている。起動停止時の温度と中性子束の関係によっては、低温時に照射を受けている場合にはマイクロ組織に影響する可能性もある。

試験炉照射では、実機に比較して運転サイクルが短いことと、試験片加熱を $\gamma$ 加熱のみで行う場合は起動時に低温で照射されている場合があり、同様な影響がある可能性がある。

このような温度と照射の組合せが影響をもつことはすでに知られているが<sup>4.2.3(3)-30</sup>、その影響の程度を評価することは現状では困難である。

⑤ホットラボでの試験に関するもの

放射線量の高い試験片の加工は必然的にホットラボ内で行われるため、形状によってはラボ外と同等の加工精度を保証することは困難な場合がある。特に、微小試験片では加工精度の影響は大きくなる。最近ホットラボ内の放電加工も可能になっており加工精度は大幅に改善されているが、古いデータについては加工精度もばらつき要因になっている可能性がある。

表 4.2.3-14 PWR の監視試験キャプセルのドシメータによる中性子束の計算値と測定値の比の例 4.2.3(3)-27)

		$^{54}\text{Fe}$ ( $n, p$ ) $^{54}\text{Mn}$	$^{59}\text{Ni}$ ( $n, p$ ) $^{59}\text{Co}$	$^{63}\text{Cu}$ ( $n, \alpha$ ) $^{60}\text{Co}$	$^{238}\text{U}$ ( $n, f$ ) $^{237}\text{Cs}$	$^{237}\text{Np}$ ( $n, f$ ) $^{237}\text{Cs}$	Average (Standard Deviation)
TORT	BUGLE-96	0.94	1.12	0.91	0.96	1.12	1.01 (0.10)
DORT	JSD-100	0.90	1.04	1.19	0.92	1.19	1.05 (0.14)
	BUGLE-96	0.94	1.13	0.95	0.96	1.14	1.03 (0.10)
	JSSTD	0.91	1.09	0.96	0.92	1.04	0.98 (0.08)
MCNP1	JENDL3.2	0.90	1.05	0.96	0.76	0.80	0.89 (0.12)
MCNP2	JENDL3.2	0.88	1.04	0.96	0.79	0.83	0.90 (0.10)

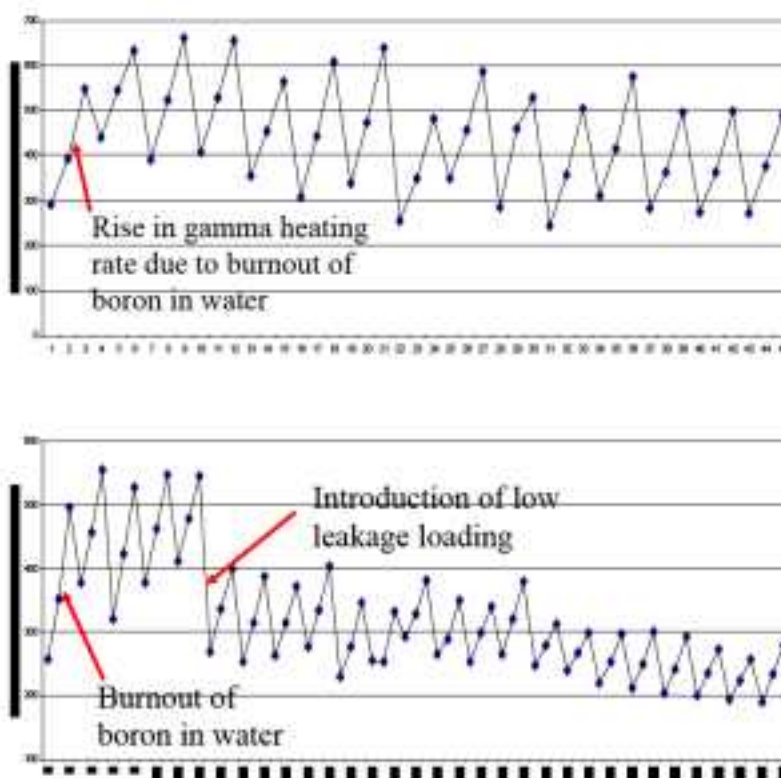


図 4.2.3-30 計算による PWR バッフルボルトの  $\gamma$ 線加熱率(BTU/hr lb.)のサイクル毎の変動 (上は通常運転の場合、下は低漏洩燃料配置の場合)4.2.3(3)-29)

e. 4.2.3(3)章の引用文献

- 4.2.3(3)-1) G. E. Lucas, "The evolution of mechanical property change in irradiated austenitic stainless steels", *J. Nucl. Mater.*, 206(1993)287.
- 4.2.3(3)-2) J. E. Pawel, A. F. Rowcliffe, G. E. Lucas, S. J. Zinkle, "Irradiation performance of stainless steels for ITER application", *J. Nucl. Mater.*, 239(1996)126.
- 4.2.3(3)-3) C. Pokor, Y. Brechet, P. Dubuisson, J-P. Massoud, X. Averty, "Irradiation damage in 304 and 316 stainless steels: experimental investigation and modeling. Part II: irradiation induced hardening," *J. Nucl. Mater.*, 326(2004)30.
- 4.2.3(3)-4) 笠田竜太, 「原子炉・核融合炉材料の照射硬化評価のための硬さ試験とナノインデンテーション」, *材料試験技術*, 60(2015)18.
- 4.2.3(3)-5) J. T. Busby, M. C. Hash, G. S. Was, "The relationship between hardness and yield stress in irradiated austenitic and ferritic steels", *J. Nucl. Mater.*, 336(2005)267.
- 4.2.3(3)-6) T. Torimaru, M. Kodama, S. Tanaka, T. Nakamura, K. Kumagai, K. asano, "Fracture Toughness of Austenitic Stainless Steels after BWR Irradiation", *Proc. 7th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 7)*, FNES, 2010.
- 4.2.3(3)-7) A. Demma, R. Carter, A. Jenssen, T. Torimaru, R. Gamble, "Fracture toughness of highly irradiated stainless steels in boiling water reactors", *Proc. 13th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors*, NACE, 2007.
- 4.2.3(3)-8) U. Ehrnstén, K Wallin, S. van Dyck, P. Ould, "Fracture toughness of stainless steels irradiated up to ~9 dpa in commercial BWRs", *Proc. 6th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 6)*, FNES, 2006.
- 4.2.3(3)-9) R. P. Shogan, T. R. Mager, "Susceptibility of Type 316 Stainless Steel to Irradiation Assisted Stress Corrosion Cracking in a PWR Environment", *Proc. 10th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems-Water Reactors*, NACE, (2001).
- 4.2.3(3)-10) A. Toivonen, P. Aaltonen, W. Karlsen, U. Ehrnsten, J. -P. Massoud, J. -M. Boursier, "Post-irradiation SCC investigations on highly-irradiated core internals component materials", *Proc. 6th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of*

LWRs (Fontevraud 6), FNES, 2006.

- 4.2.3(3)-11) H. Nishioka, K. Fukuya, K. Fujii, T. Torimaru, “IASCC initiation in highly irradiated stainless steels under uniaxial constant load conditions”, *J. Nucl. Sci. Tech.*, 45(2008)1072.
- 4.2.3(3)-12) 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
- 4.2.3(3)-13) 福谷耕司, 西岡弘雅, 藤井克彦, 「ステンレス鋼の軽水炉照射挙動」INSS MONOGRAPHS No. 4, 2009
- 4.2.3(3)-14) R. A. J. Jacobs, G. P. Wozadlo, G. M. Gordon, “Use of a constant deflection test to evaluate susceptibility to irradiation-assisted stress corrosion cracking”, *Corrosion*, 49(1993)650.
- 4.2.3(3)-15) R. Katsura, J. Morisawa, M. Kodama, S. Nishimura, S. Suzuki, S. Shima, M. Tamamoto, “Effect of stress on IASCC in irradiated austenitic stainless steels”, *Proc. 6th Int. Symp. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors*, TMS, 1993.
- 4.2.3(3)-16) 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 condition”, *Proc. 14th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors*, CNS, 2009.
- 4.2.3(3)-17) S. Ooki, Y. Tanaka, K. Takamori, S. Suzuki, S. Tanaka, Y. Saito, T. Nakamura, T. Kato, K. Chatani, M. Kodama, “Study on SCC growth behavior of BWR core shroud”, *Proc. 12th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors*, TMS, 2005.
- 4.2.3(3)-18) Y. Kaji, H. Ugachi, T. Tsukada, Y. Matsui, M. Ohmi, N. Nagata, K. Dozaki, H. Takiguchi, “Comparison of SCC growth rate between in-core and ex-core tests in BWR simulated high temperature water”, *Proc. 13th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors*, NACE, 2007.
- 4.2.3(3)-19) Y. Kaji, Y. Miwa, A. Shibata, J. Nakano, T. Tsukada, K. Takakura, K. Nakata, “Influence of microstructure on IASCC growth behavior of neutron irradiated type 304 austenitic stainless steels in simulated BWR condition”, *Proc. 14th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors*, ANS, 2009.

- 4.2.3(3)-20) K. Chatani, K. Takakura, M. Ando, K. Nakata, S. Tanaka, Y. Ishiyama, M. Hishida, Y. Kaji, "IASCC Crack Growth Rate of Neutron Irradiated Low Carbon Austenitic Stainless Steels in Simulated BWR Condition", Proc. 13th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, NACE, 2007.
- 4.2.3(3)-21) T. M. Karlsen, P. Bennett, N. W. Hogberg, "In-core Crack growth rate Studies on Irradiated Austenitic Stainless Steels in BWR and PWR Conditions in the Halden Reactor", Proc. 12th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, TMS, 2005., Halden report HWR-556, 1998, HWR-770, 2004.
- 4.2.3(3)-22) J. Garnier, P. Dubuisson, C. Pokor, E. Lemaire, N. Monteil, J. -P. Massoud, "Relaxation and irradiation creep of PWR baffle bolt materials", Proc. 7th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 7), FNES, 2010.
- 4.2.3(3)-23) J. P. Foster, T. M. Karlsen, "Irradiation creep and irradiation stress relaxation of 316 and 304L stainless steels in thermal and fast neutron spectrum reactors", Proc. 15th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, TMS, 2011.
- 4.2.3(3)-24) H. M. Chung, "Assessment of Void Swelling in Austenitic Stainless Steel Core Internals", NUREG/CR-6897, ANL-04/28, 2006.
- 4.2.3(3)-25) C. Pokor, Y. Thebault, J-P. Massoud, M. Delnondedieu, D. Loizard, P. Dubuisson, J. Kočík, E. Keilová, E. Lemaire, N. Ligneau, "Microstructural evolution of neutron irradiated stainless steels: Comparison between irradiations in experimental reactors and in pressurized water reactors ", Proc. 6th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 6), FNES, 2006.
- 4.2.3(3)-26) T. Matsubara, T. Tsutsui, Y. kamei, M. Kitsu, "Stress evaluation of baffle former bolt for IASCC failure prediction", Proc. 7th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 7), FNES, 2010.
- 4.2.3(3)-27) K. Fukuya, H. Nakata, I. Kimura, M. Ohmura, Y. Kitagawa, T. Ito, K. Shin, "Three dimensional radiation transport analyses in PWR with TORT and MCNP", Proc. 11th Int. Symp. on Reactor Dosimetry, World Scientific, (2003) p. 59.

- 4.2.3(3)-28) S. Sitaraman, R. T. Chiang, R. M. Kruger, A. L. Jenkins, K. Asano, K. Koyabu, “BWR neutron fluence computation using MF3D”, Reactor Dosimeter: Radiation Metrology and Assessment, ASTM STP1398, ASTM, 2001.
- 4.2.3(3)-29) F. A. Garner, L. R. Greenwood, “Survey of Recent Developments Concerning the Understanding of Radiation Effects on Stainless Steels Used in the LWR Power Industry”, Proc. 11th Int. Conf. environment Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactor, ANS, 2003.
- 4.2.3(3)-30) M. Horiki, T. Yoshiie, Q. Xu, M. Iseki, M. Kiritani, “Defect structures introduced in iron under varying temperature neutron irradiation”, J. Nucl. Mater., 283-287(2000)282.
- 引用文献注) 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」(原子力規制委員会原子力規制庁所管)



#### (4) 相関式の検討

##### a. 背景と概要

中性子照射を受けた原子炉構造物の健全性を評価するためには、照射材の各種特性について照射量などをパラメータとする様々な特性に対する具体的な式(相関式)が必要となる。このような式で規格化されている例は、国内では日本電気協会の JEAC4201-2007 に規定されている原子炉圧力容器の延性脆性遷移温度と上部棚エネルギー<sup>4.2.3(4)-1</sup>、日本機械学会の発電用原子力設備規格の維持規格に示されている SCC 進展速度式などがある<sup>4.2.3(4)-2</sup>。

一方原子炉構造物の健全性評価には、破壊靱性や IASCC に関して信頼性の高い相関式が必要であり、それらに対する検討が必要である。原子炉構造物の照射特性評価のもっとも基本となる機械的性質においては、米国 EPRI により MRP-135-Rev.1 として照射ステンレス鋼の構成式モデル<sup>4.2.3(4)-3</sup>が報告され、有限要素法による解析評価に利用できる式として作成されているが、国内では炉内構造物のステンレス鋼を対象とした規格や推奨されているものはないのが現状である。

そこで本章では、軽水炉への適用を念頭に、照射ステンレス鋼の引張特性、破壊靱性、IASCC 発生、IASCC 進展、応力緩和・クリープについて、報告されている相関式の調査を行った。また引張特性については、前章(2)で収集した収集整理したデータを用いて、強度と延性の相関式と応力ひずみ関係の相関式を検討した。

なお引張特性以外の材料特性を表す式において、予測線(prediction curve)や傾向線(disposition curve、trend curve)など様々な呼び方があるが、本報告では全て相関式との呼称に統一した。

##### b. 引張特性

###### ① 耐力等の相関式

###### i) 既存の相関式

照射ステンレス鋼の引張特性では耐力の変化について多くの報告がある。基本的な考え方は、照射による耐力の増加 $\Delta\sigma_y$ は転位ループの形成量に比例するという考え方であり、転位ループの数密度を  $N$ 、サイズを  $d$  として、

$$\Delta\sigma_y = \alpha M \mu b (N \cdot d)^{1/2}$$

で表される。 $M$  は Taylor 因子、 $\mu$  はせん断係数、 $b$  は転位のバーガースベクトルの大きさ、 $\alpha$  は硬化係数である。転位ループの数密度は照射量  $F$  に比例して増加しやがて飽和するので、その傾向は

$$N \propto 1 - \exp(-b \cdot F)$$

で表現される。これらの関係から、照射後の耐力 $\sigma_y$ は未照射での耐力 $\sigma_0$ と増加分の和として、

$$\sigma_y = \sigma_0 + a[1 - \exp(-b \cdot F)]^{1/2}$$

を用いることができる。また、耐力増加自体の飽和性からより単純な

$$\sigma_y = \sigma_0 + a[1 - \exp(-b \cdot F)]$$

が広く用いられている。軽水炉条件の場合 4.2.3(4)・4-7)だけでなく、より高温の高速炉照射条件 4.2.3(4)・8)でも用いられている。特定のデータベースに対して、 $a$  と  $b$  を最小二乗法などで決定している。例えば、PWR で照射される冷間加工 316SS では実機照射材のデータに基づいて次のような式が提案されている 4.2.3(4)・5)。なお、 $F$  は  $\text{n/cm}^2$ ( $E > 0.1 \text{ MeV}$ )の単位である。

$$\text{室温: } \sigma_y = 275 + 800[1 - \exp(-F/2 \times 10^{21})] \quad \sigma_y > \sigma_{unirr}$$

$$\text{高温: } \sigma_y = 200 + 700[1 - \exp(-F/2 \times 10^{21})] \quad \sigma_y > \sigma_{unirr}$$

照射による耐力の変化には照射温度や中性子束も影響することが知られており、それらを考慮した式が提案されている。照射温度に関しては、Grossbeck らが  $50 \sim 650^\circ\text{C}$  の範囲でステンレス鋼の強度と伸びに対して表 4.2.3-15 のような依存性を提案している 4.2.3(4)・9)。基本的な関数形は温度を  $T$  として、耐力については、

$$a\{1 - \exp[-(b - T)/c]\}$$

一様伸びについては、

$$a\{1 - \exp[-(b - T)^2/c]\}$$

破断伸びについては、

$$a + bT + cT^2 + dT^3$$

を提案している。

中性子束 $\phi$ の影響を考慮した関数形として、Torimaru らは耐力について次の式を提案

している 4.2.3(4)・6)。

$$\sigma_y = [a \cdot \ln(F) - b] \phi^{1/4}$$

また、Fukuya らは耐力の式の係数に中性子束の影響を考慮して次の式を提案している 4.2.3(4)・7)。

$$\sigma_y = \sigma_0 + a[1 - \exp(-F/b)]$$

$$a = a_1 \cdot \ln(\phi) + a_2、$$

$$b = b_1 \cdot \ln(\phi) + b_2$$

材料条件の影響については、上記で紹介した式は溶体化 304SS など特定の材料データ群を対象に係数が決められている。EPRI MRP-135-Rev.1 の提案式では冷間加工率の影響を考慮している 4.2.3(4)・3)。MRP-135-Rev.1 式は、引張特性のパラメータを照射量  $d$  と冷間加工度  $c$  と試験温度  $T$  としており、照射温度は 330°C に固定した式である。それぞれのパラメータの影響を表す関数形は

$$\xi(d) = g_0 + g_1[1 - \exp(-d/d_1)] + g_2 \exp(-d/d_2)$$

$$\eta(c) = f_0 + f_1[1 - \exp(-c/c_1)] + f_2 \exp(-c/c_2)$$

$$\zeta(T) = \exp[-m(T - 330)]$$

を採用している。

## ii) 基本式の設定

引張特性に関して検討したように、軽水炉条件のデータは PWR 分野では冷間加工 316SS、BWR 分野では溶体化 304 系と 316 系に集中している。PWR 分野のデータでは照射温度と試験温度は 290~350°C の範囲にあるが、照射温度が不明のデータが多いこと、試験温度で区分してもデータに顕著な違いが見られないことから、温度をパラメータとする必要性は大きくないと判断される。BWR 分野のデータは照射温度と試験温度が 290°C 付近の極めて限られた範囲であるので、温度をパラメータにする必要性は低いと判断される。BWR では 304 系と 316 系、さらに通常の炭素濃度の材料と低炭素の L グレードのデータがあるが、これらによる系統的な違いは見られていない。また、中性子束は多くのデータに記載されておらずパラメータとするのは困難であると判断される。以上のようなデータベースの現状から、相関式は中性子照射量だけをパラメータとすることとした。

データベースの耐力、引張強さ、一様伸び、破断伸びのいずれも、よく知られたよう

な照射初期にほぼ照射量に比例して変化しその後飽和する傾向を示しており、このような傾向を表現するモデルとしてこれまでもよく用いられている次の式を用いることとした。

$$x = c + a \cdot [1 - \exp(-F/b)]$$

x は耐力(YS)、引張強さ(UTS)、一様伸び(UE)、破断伸び(TE)の照射後の値、F は照射量、a、b、c は定数である。第 1 項の c は照射前の値に相当し、第 2 項の

$$a \cdot [1 - \exp(-F/b)]$$

は照射による変化分に相当する。

### iii) データの選択

データベースの現状から、PWR 分野に相当する照射条件の冷間加工 316SS と、BWR 分野に相当する照射条件(温度が 288°C 前後)の溶体化 304/316SS(L グレードを含む)の 2 つデータ群について相関式が作成可能である。

冷間加工 316SS については以下の基準でフィッティングに使用するデータを選択した。

- ・材料 冷間加工 316SS のデータ
- ・温度 照射温度と試験温度のいずれもが 290~350°C の範囲のデータ
- ・ひずみ速度 10<sup>-6</sup>/s 以上

ひずみ速度の下限は、高照射量では 10<sup>-6</sup>/s 以下になると不活性ガス雰囲気でも粒界破壊が発生することが報告されているため 4.2.3(4)-10、粒界破壊の可能性のあるデータを除外するためである。

表 4.2.3-16 と表 4.2.3-17 に PWR 分野と BWR 分野の選択されたデータを示す。

PWR 分野では上記の選択基準ですべての冷間加工 316SS の 126 データを使用した。BWR 分野では 201 データを使用した。一様伸びと破断伸びが報告されていないデータも含む。また、図 4.2.3-10~図 4.2.3-12 に示したデータの内、12 dpa 付近の JMTR 照射材データ(DBNo.で 1-9、1-10、1-19、1-20)は明らかに飽和傾向から外れるため除外している。

### iv) 得られた相関式

上記のデータベースと相関式について、最小二乗法で決定した係数と標準偏差を表 4.2.3-18 に示す。最小二乗法には EXCEL の SOLVER を用いており、重みは使用していない。

PWR 分野については以下の式が得られた。sd は標準偏差である。

$$\text{耐力(MPa): } YS = 525 + 441 \cdot [1 - \exp(-F/7.75)] \quad sd = 84 \text{ MPa}$$

$$\text{引張強さ(MPa): } UTS = 655 + 343 \cdot [1 - \exp(-F/9.70)] \quad sd = 72 \text{ MPa}$$

$$\text{一様伸び(%): } UE = 11.2 - 10.6 \cdot [1 - \exp(-F/6.05)] \quad sd = 3.9\%$$

$$\text{破断伸び(%): } TE = 18.1 - 10.9 \cdot [1 - \exp(-F/18.1)] \quad sd = 5.4\%$$

図 4.2.3-31～図 4.2.3-34 に PWR 分野の耐力、引張強さ、一様伸び、破断伸びについて、相関式とデータの関係を示す。耐力と引張強さの相関式は、20 dpa までに大きく変化し 20～30 dpa でほぼ飽和している。飽和までの増加傾向は原子力安全基盤機構の IASCC 事業の BFB のデータにやや近い傾向となっている。飽和レベルは耐力が 966 MPa、引張強さが 998 MPa となっている。一様伸びと破断伸びも 20 dpa まで大きく変化し 20～30 dpa でほぼ飽和している。飽和レベルは、一様伸びが 0.6%、破断伸びが 7.2% である。

BWR 分野については以下の式が得られた。

$$\text{耐力(MPa): } YS = 194 + 623 \cdot [1 - \exp(-F/2.37)] \quad sd = 82 \text{ MPa}$$

$$\text{引張強さ(MPa): } UTS = 441 + 451 \cdot [1 - \exp(-F/4.54)] \quad sd = 68 \text{ MPa}$$

$$\text{一様伸び(%): } UE = 34.5 - 33.0 \cdot [1 - \exp(-F/1.68)] \quad sd = 6.2\%$$

$$\text{破断伸び(%): } TE = 40.3 - 31.5 \cdot [1 - \exp(-F/1.65)] \quad sd = 6.9\%$$

図 4.2.3-35～図 4.2.3-38 に BWR 分野の耐力、引張強さ、一様伸び、破断伸びについて、相関式とデータの関係を示す。耐力と引張強さの相関式は、10 dpa までに大きく変化し 15 dpa でほぼ飽和している。飽和レベルは耐力が 817 MPa、引張強さが 892 MPa であり、10%程度異なっている。数 dpa 以上の Kodama らの BWR 照射材データの耐力と引張強さが相関式よりも大きくなっている。一様伸びと破断伸びは 5 dpa まで大きく変化し 10 dpa でほぼ飽和しており、耐力などよりはやや低照射量で飽和する傾向になっている。飽和レベルは、一様伸びが 1.5%、破断伸びが 8.8% である。

得られた相関式は、全体としてデータの傾向をほぼ再現しており、飽和傾向や飽和レベルも従来の知見の範囲にある。

表 4.2.3-15 Grossbeck による照射ステンレス鋼の耐力の温度依存性式 4.2.3(4)-9

Empirical relations for the austenitic alloys AISI Type 316 and PCA

	Yield strength, MPa			
	18 to 25 MPa	37 MPa	55 MPa	50 MPa
Uniform Elongation, %				
Austenitic Alloys				
Annealed	$YU = 1005 \left[ 1 - \exp\left\{ \frac{-465(T-1)}{1100} \right\} \right] + 236$	$YU = 875 \left[ 1 - \exp\left\{ \frac{-1660(T-1)}{1100} \right\} \right] + 96$	$YU = 875 \left[ 1 - \exp\left\{ \frac{-1780(T-1)}{1100} \right\} \right] - 143$	$YU = 771 \left[ 1 - \exp\left\{ \frac{-1570(T-1)}{1000} \right\} \right] - 85$
Cold Worked	$YU = 1025 \left[ 1 - \exp\left\{ \frac{-465(T-1)}{1100} \right\} \right]$	$YU = 875 \left[ 1 - \exp\left\{ \frac{-1660(T-1)}{1100} \right\} \right]$		
Total Elongation, %				
316 SS				
Annealed	$TE = 2.1 \exp\left\{ \frac{-(T-600)^2}{18,000} \right\} + 0.23$	$TE = 0.2 \exp\left\{ \frac{-(T-600)^2}{1800} \right\} + 0.2$		
Cold Worked	$TE = 5.1 \exp\left\{ \frac{-(T-600)^2}{19,000} \right\} + 0.23$	$TE = 4.5 \exp\left\{ \frac{-(T-600)^2}{19,000} \right\} + 0.2$		
PCA				
Annealed	$TE = 1.5 \exp\left\{ \frac{-(T-600)^2}{18,000} \right\} + 0.23$	$TE = 1.24 \exp\left\{ \frac{-(T-600)^2}{1800} \right\} + 0.2$		
Cold Worked	$TE = 1.5 \exp\left\{ \frac{-(T-600)^2}{18,000} \right\} + 0.23$	$TE = 2.8 \exp\left\{ \frac{-(T-600)^2}{1800} \right\} + 0.2$		
Aged + Dr		$TE = 4.5 \exp\left\{ \frac{-(T-600)^2}{19,000} \right\} + 0.2$		
Total Elongation, %				
316 SS				
Annealed	$TE = 22 \exp^{-T/200} + 2.6$		$TE = 22.8 - 0.188 T + 4.06 \times 10^{-4} T^2 - 3.75 \times 10^{-7} T^3$	
Cold Worked	$TE = 7 \times 10^{-4} (T-315)^2$		$TE = -9.8 \times 10^{-7} [(T-300) + (T-300)(T-400)] + 2.8$	
PCA				
Annealed		$TE = 12.8 - 8.7 \times 10^{-7} T + 4.18 \times 10^{-9} T^2 - 1.28 \times 10^{-11} T^3$	$TE = 22.8 - 0.188 T + 4.06 \times 10^{-4} T^2 - 3.75 \times 10^{-7} T^3$	$TE = 28 \exp^{-T/200} - 0.4$
Cold Worked	$TE = 2.6$	$TE = 12.5 - 0.7 \times 10^{-6} T + 1.18 \times 10^{-8} T^2 - 1.28 \times 10^{-11} T^3$	$TE = -9.8 \times 10^{-7} [(T-300) + (T-300)(T-400)] + 2.8$	
Aged + DM		$TE = 14.8 - 6.122 T + 1.12 \times 10^{-4} T^2 - 3.23 \times 10^{-7} T^3$		

表 4.2.3-16 引張特性の相関式に用いたデータ(PWR 分野)

No.	DB	試験片 番号	照射炉	鋼種	冷間加工 率 (%)	照射量 (dpaへの換算を含む)		照射量 (dpa)	中性子束 (dpa/s)	照射 温度 (°C)	試験 温度 (°C)	引張 速度 (/s)	0.2% 耐力 (MPa)	引張 強さ (MPa)	一様 伸び (%)	全伸び (%)
						(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)	(dpa)									
1	1-4	K2B2B	海外PWR	CW316	10~12	1.00E+22	0.0007	0.0007	-	-	325	1×10 <sup>-4</sup>	434	614	13	16
2	1-5	K6B2	海外PWR	CW316	10~12	7.00E+25	4.55	4.55	-	-	325	1×10 <sup>-4</sup>	724	827	1.5	5
3	1-6	5B1C2	海外PWR	CW316	10~12	3.80E+26	24.7	24.7	-	-	325	1×10 <sup>-4</sup>	951	972	0.55	3
4	2-39	D11A	Connecticut Yankee	CW316	20	5.00E+24	0.4	0.4	-	-	291	1.7X10 <sup>-6</sup>	524	738	21	30
5	2-40	D1B	Connecticut Yankee	CW316	20	5.00E+24	0.4	0.4	-	-	289	1.7X10 <sup>-6</sup>	572	738	21	35
6	2-5	4A3	H.B.Robinson	CW316	10~12	3.00E+23	0.02	0.02	-	-	300	1.7X10 <sup>-6</sup>	600	752	11	18.0
7	2-6	3A3	H.B.Robinson	CW316	10~12	9.00E+22	0.009	0.009	-	-	300	1.7X10 <sup>-6</sup>	517	690	10	14.0
8	2-7	1B5	D.C.Cook	CW316	10~12	7.50E+26	51	51	-	-	300	1.7X10 <sup>-6</sup>	952	1,000	0.8	7.0
9	2-9	7B4	D.C.Cook	CW316	10~12	4.90E+26	33	33	-	-	300	1.7X10 <sup>-6</sup>	1,000	1,015	0.8	10.0
10	2-15	C7C3	H.B.Robinson	CW316	10~12	3.00E+25	2	2	-	-	300	1.7X10 <sup>-6</sup>	802	839	0.4	3.5
11	2-16	C7C4	H.B.Robinson	CW316	10~12	3.00E+25	2	2	-	-	300	1.7X10 <sup>-6</sup>	815	903	2	5
12	2-25	3B3	D.C.Cook	CW316	10~12	3.00E+22	0.003	0.003	-	-	300	1.7X10 <sup>-6</sup>	545	634	6	17
13	2-26	2C10	H.B.Robinson	CW316	10~12	9.00E+22	0.009	0.009	-	-	300	1.7X10 <sup>-6</sup>	476	600	4	16
14	2-27	2B10	D.C.Cook	CW316	10~12	1.60E+25	1.2	1.2	-	-	300	1.7X10 <sup>-6</sup>	503	662	4	13
15	2-28	2A4	H.B.Robinson	CW316	10~12	2.80E+26	19	19	-	-	300	1.7X10 <sup>-6</sup>	896	896	0	8
16	2-29	1A3	H.B.Robinson	CW316	10~12	7.50E+26	51	51	-	-	300	1.7X10 <sup>-6</sup>	910	910	0	12
17	2-30	1B3	D.C.Cook	CW316	10~12	7.50E+26	51	51	-	-	300	1.7X10 <sup>-6</sup>	855	855	0	15
18	2-45	11B	Connecticut Yankee	CW316	20	5.00E+24	0.4	0.4	-	-	300	1.7X10 <sup>-6</sup>	503	681	17	25
19	2-46	13B	Connecticut Yankee	CW316	20	5.00E+24	0.4	0.4	-	-	300	1.7X10 <sup>-6</sup>	507	703	19	26
20	2-9	4A1	H.B.Robinson	CW316	10~12	3.00E+23	0.02	0.02	-	-	350	1.7X10 <sup>-6</sup>	538	634		
21	2-10	3A1	H.B.Robinson	CW316	10~12	9.00E+22	0.009	0.009	-	-	350	1.7X10 <sup>-6</sup>	676	696	1.5	7.0
22	2-11	1A5	H.B.Robinson	CW316	10~12	7.50E+26	51	51	-	-	350	1.7X10 <sup>-6</sup>	724	869	3	6.0
23	2-12	1B6	D.C.Cook	CW316	10~12	7.50E+26	51	51	-	-	350	1.7X10 <sup>-6</sup>	948	986	0.8	6.0
24	2-17	C7C5	H.B.Robinson	CW316	10~12	3.00E+25	2	2	-	-	350	1.7X10 <sup>-6</sup>	811	911	0.2	3
25	2-18	C7C6	H.B.Robinson	CW316	10~12	3.00E+25	2	2	-	-	350	1.7X10 <sup>-6</sup>	831	831	0.1	3
26	2-31	3B2	D.C.Cook	CW316	10~12	3.00E+22	0.003	0.003	-	-	350	1.7X10 <sup>-6</sup>	524	607	5	16
27	2-32	2C8	H.B.Robinson	CW316	10~12	9.00E+22	0.003	0.003	-	-	350	1.7X10 <sup>-6</sup>	510	593	6	17
28	2-41	LD3	Connecticut Yankee	CW316	20	5.00E+24	0.4	0.4	-	-	350	1.7X10 <sup>-6</sup>	490	696	21	28
29	2-42	LD4	Connecticut Yankee	CW316	20	5.00E+24	0.4	0.4	-	-	350	1.7X10 <sup>-6</sup>	538	745	18	26
30	2-47	11A	Connecticut Yankee	CW316	20	5.00E+24	0.4	0.4	-	-	350	1.7X10 <sup>-6</sup>	473	664	21	28
31	2-48	D1A	Connecticut Yankee	CW316	20	5.00E+24	0.4	0.4	-	-	350	1.7X10 <sup>-6</sup>	570	726	17	23
32	3-1	E3-1	海外PWR	CW316	20	-	4.35	4.35	8.3E-09	311	290	3×10 <sup>-4</sup>	617	697	10.0	20.8
33	3-2	E3-2	海外PWR	CW316	20	-	4.35	4.35	8.3E-09	311	290	3×10 <sup>-4</sup>	598	689	10.2	21.6
34	3-7	A3-10	海外PWR	CW316	20	-	4.68	4.68	8.9E-09	310	290	3×10 <sup>-4</sup>	590	676	10.5	22.0
35	3-8	E3-7	海外PWR	CW316	20	-	6.03	6.03	1.1E-08	309	290	3×10 <sup>-4</sup>	683	734	6.0	16.6
36	3-9	E3-8	海外PWR	CW316	20	-	6.03	6.03	1.1E-08	309	290	3×10 <sup>-4</sup>	671	712	5.0	15.8
37	3-14	E3-13	海外PWR	CW316	20	-	12.7	12.7	2.4E-08	330	290	3×10 <sup>-4</sup>	872	875	0.5	11.5
38	3-15	E3-14	海外PWR	CW316	20	-	12.7	12.7	2.4E-08	330	290	3×10 <sup>-4</sup>	819	839	1.7	12.6
39	3-3	E3-3	海外PWR	CW316	20	-	5.39	5.39	1.0E-08	317	320	3×10 <sup>-4</sup>	701	738	5.6	15.8
40	3-4	E3-4	海外PWR	CW316	20	-	5.39	5.39	1.0E-08	317	320	3×10 <sup>-4</sup>	726	754	5.5	16.7
41	3-10	E3-9	海外PWR	CW316	20	-	7.7	7.7	1.5E-08	319	320	3×10 <sup>-4</sup>	736	763	3.5	13.5
42	3-11	E3-10	海外PWR	CW316	20	-	7.7	7.7	1.5E-08	319	320	3×10 <sup>-4</sup>	712	742	3.0	12.2
43	3-16	E3-15	海外PWR	CW316	20	-	11.5	11.5	2.2E-08	332	320	3×10 <sup>-4</sup>	819	837	1.3	12.8
44	3-17	E3-16	海外PWR	CW316	20	-	11.5	11.5	2.2E-08	332	320	3×10 <sup>-4</sup>	819	833	1.6	12.0
45	3-5	E3-5	海外PWR	CW316	20	-	3.42	3.42	6.5E-09	317	340	3×10 <sup>-4</sup>	598	680	9.0	19.6
46	3-6	E3-6	海外PWR	CW316	20	-	3.42	3.42	6.5E-09	317	340	3×10 <sup>-4</sup>	598	666	6.4	16.3
47	3-12	E3-11	海外PWR	CW316	20	-	8.23	8.23	1.6E-08	320	340	3×10 <sup>-4</sup>	707	744	4.1	14.2
48	3-13	E3-12	海外PWR	CW316	20	-	8.23	8.23	1.6E-08	320	340	3×10 <sup>-4</sup>	702	737	3.1	12.8
49	3-18	E3-17	海外PWR	CW316	20	-	12.3	12.3	2.3E-08	335	340	3×10 <sup>-4</sup>	850	858	0.6	11.0
50	3-19	E3-18	海外PWR	CW316	20	-	12.3	12.3	2.3E-08	335	340	3×10 <sup>-4</sup>	813	819	0.8	11.4
51	4-1	E4-1	国内PWR	CW316	12	-	4	4	8.3E-09	290	290	3×10 <sup>-4</sup>	962	974	0.4	6.4
52	4-2	E4-2	国内PWR	CW316	12	-	4	4	8.3E-09	290	290	3×10 <sup>-4</sup>	950	973	0.4	6.2
53	4-5	E4-5	国内PWR	CW316	12	-	14	14	2.9E-08	290	290	3×10 <sup>-4</sup>	1,033	1,051	0.4	3.9
54	4-6	E4-6	国内PWR	CW316	12	-	14	14	2.9E-08	290	290	3×10 <sup>-4</sup>	1,003	1,023	0.5	4.9
55	4-9	E4-9	国内PWR	CW316	12	-	39.5	39.5	8.2E-08	292	290	3×10 <sup>-4</sup>	1,012	1,033	0.5	4.5
56	4-10	E4-10	国内PWR	CW316	12	-	74	74	1.5E-07	295	290	3×10 <sup>-4</sup>	1,000	1,015	0.4	5.6
57	4-15	E4-15	国内PWR	CW316	12	-	74	74	1.5E-07	295	290	3×10 <sup>-4</sup>	1,005	1,018	0.4	3.5
58	4-16	E4-16	国内PWR	CW316	12	-	74	74	1.5E-07	295	290	3×10 <sup>-4</sup>	1,005	1,022	0.5	2.9
59	4-11	E4-11	国内PWR	CW316	12	-	39	39	8.1E-08	295	320	3×10 <sup>-4</sup>	1,017	1,027	0.4	5.3
60	4-12	E4-12	国内PWR	CW316	12	-	39	39	8.1E-08	295	320	3×10 <sup>-4</sup>	1,047	1,063	0.4	6.1
61	4-17	E4-17	国内PWR	CW316	12	-	74	74	1.5E-07	300	320	3×10 <sup>-4</sup>	997	1,003	0.4	3.5
62	4-18	E4-18	国内PWR	CW316	12	-	74	74	1.5E-07	300	320	3×10 <sup>-4</sup>	1,000	1,010	0.4	5.0
63	4-3	E4-3	国内PWR	CW316	12	-	5	5	1.0E-08	308	340	3×10 <sup>-4</sup>	642	772	8.2	11.8
64	4-4	E4-4	国内PWR	CW316	12	-	5	5	1.0E-08	308	340	3×10 <sup>-4</sup>	663	780	8.6	12.3
65	4-7	E4-7	国内PWR	CW316	12	-	19	19	3.9E-08	323	340	3×10 <sup>-4</sup>	971	992	0.5	5.7
66	4-8	E4-8	国内PWR	CW316	12	-	19	19	3.9E-08	323	340	3×10 <sup>-4</sup>	968	1,005	0.5	6.1
67	4-13	E4-13	国内PWR	CW316	12	-	38	38	7.9E-08	301	340	3×10 <sup>-4</sup>	1,000	1,016	0.5	5.6
68	4-14	E4-14	国内PWR	CW316	12	-	38	38	7.9E-08	301	340	3×10 <sup>-4</sup>	1,015	1,033	0.4	4.3
69	4-19	E4-19	国内PWR	CW316	12	-	72	72	1.5E-07	310	340	3×10 <sup>-4</sup>	998	1,009	0.5	6.2
70	4-20	E4-20	国内PWR	CW316	12	-	72	72	1.5E-07	310	340	3×10 <sup>-4</sup>	997	1,007	0.4	6.0

表 4.2.3-16 引張特性の相関式に用いたデータ(PWR 分野)(続き)

No.	DB	試験片 番号	照射炉	鋼種	冷間加 工率	照射量 (dpaへの換算を含む)		照射量 dpa	中性子束 (dpa/s)	照射 温度 (°C)	試験 温度 (°C)	引張 歪速度 (/s)	0.2% 耐力 (MPa)	引張 強さ (MPa)	一様 伸び (%)	全伸び (%)
						(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)	(dpa)									
71	5-1	Unirra	国内PWR	CW316	-	-	0	0	0	-	320	1.1X10 <sup>-4</sup>	349	465	19.1	24.7
72	5-2	Unirra	国内PWR	CW316	-	-	0	0	0	-	320	1.1X10 <sup>-4</sup>	350	465	22.5	26.8
73	5-3	D1	国内PWR	CW316	-	9.0E+25	6	6	2.0E-08	323	320	1.1X10 <sup>-4</sup>	946	968	0.4	2.9
74	5-4	D1	国内PWR	CW316	-	9.0E+25	6	6	2.0E-08	323	320	1.1X10 <sup>-4</sup>	928	952	0.5	3.9
75	5-5	J	国内PWR	CW316	-	5.0E+26	35	35	1.0E-07	313	320	1.1X10 <sup>-4</sup>	827	832	0.3	4.8
76	5-6	J	国内PWR	CW316	-	5.0E+26	35	35	1.0E-07	313	320	1.1X10 <sup>-4</sup>	969	998	0.4	5.3
77	5-7	L	国内PWR	CW316	-	8.0E+26	53	53	1.0E-07	304	320	1.1X10 <sup>-4</sup>	981	981	0.2	4.2
78	5-8	L	国内PWR	CW316	-	8.0E+26	53	53	1.0E-07	304	320	1.1X10 <sup>-4</sup>	993	993	0.2	4.2
79	6-2	M	国内PWR	CW316	-	-	73	73	1.5E-07	305	320	1.1X10 <sup>-4</sup>	999	1,007	0.4	4.3
80	6-3	L	国内PWR	CW316	-	-	53	53	1.4E-07	304	320	1.1X10 <sup>-4</sup>	987	987	0.2	4.2
81	7-3	J	国内PWR	CW316	-	5.3E+26	35	35	1.3E-07	313	320	1.1X10 <sup>-4</sup>	954	954	0.2	5.8
82	7-4	J	国内PWR	CW316	-	5.3E+26	35	35	1.3E-07	313	320	1.1X10 <sup>-4</sup>	926	955	0.3	6.7
83	8-2	E	海外PWR	CW316	~12	0	0	0	-	-	360	-	540	640	12	15
84	8-4	C	海外PWR	CW316	~12	3.00E+26	19.5	19.5	-	-	360	-	930	950	0.5	3
85	8-6	B	海外PWR	CW316	~12	7.00E+26	45.5	45.5	-	-	360	-	850	950	0.5	3
86	10-3	-	Ringhals-2	CW316	-	0	0	0	-	290	320	8.3X10 <sup>-5</sup>	539	638	7.3	14.5
87	10-4	-	Ringhals-2	CW316	-	0	0	0	-	290	320	8.3X10 <sup>-5</sup>	544	636	7.6	15.7
88	10-9	-	Ringhals-2	CW316	-	-	33	33	-	-	320	8.3X10 <sup>-5</sup>	931	1,001	0.5	6.7
89	10-10	-	Ringhals-2	CW316	-	-	28	28	-	-	320	8.3X10 <sup>-5</sup>	951	1,009	0.5	6.8
90	10-14	-	Ringhals-2	CW316	-	-	65	65	-	320	320	8.3X10 <sup>-5</sup>	916	998	0.7	6.9
91	10-15	-	Ringhals-2	CW316	-	-	65	65	-	320	320	8.3X10 <sup>-5</sup>	957	1,000	0.6	7
92	10-5	-	Ringhals-2	CW316	-	0	0	0	-	290	340	8.3X10 <sup>-5</sup>	498	604	7.8	17.3
93	10-6	-	Ringhals-2	CW316	-	0	0	0	-	290	340	8.3X10 <sup>-5</sup>	514	596	7.2	17
94	10-11	-	Ringhals-2	CW316	-	-	35	35	-	-	340	8.3X10 <sup>-5</sup>	946	954	0.3	9
95	10-16	-	Ringhals-2	CW316	-	-	65	65	-	320	340	8.3X10 <sup>-5</sup>	929	946	0.3	7.8
96	11-1	BV-3B4-A	Beaver Valley-1	CW316	15	-	6	6	1.3E-08	-	290	-	772	874	9.32	21
97	11-2	BV-2B4-A	Beaver Valley-1	CW316	15	-	51	51	1.1E-07	-	290	-	1,018	1,040	0.42	11.8
98	11-8	HBR-10A4-A1	H.B.Robinson-2	CW316	15	-	28	28	9.0E-08	-	290	-	928	951	0.42	12.1
99	11-13	RG-4B-2A	Ringhals-2	CW316	15	-	37	37	5.8E-08	-	290	-	1,022	1,065	0.85	11.1
100	11-14	RG-2C-2A	Ringhals-2	CW316	15	-	76	76	1.2E-07	-	290	-	1,045	1,049	0.42	8.6
101	11-3	BV-3B4-B	Beaver Valley-1	CW316	15	-	6	6	1.3E-08	-	320	-	744	849	9.83	20.1
102	11-4	BV-2B4-B	Beaver Valley-1	CW316	15	-	51	51	1.1E-07	-	320	-	990	1,018	0.47	10.6
103	11-9	HBR-10A4-A2	H.B.Robinson-2	CW316	15	-	28	28	9.0E-08	-	320	-	937	953	0.47	13.4
104	11-15	RG-4B-2B	Ringhals-2	CW316	15	-	37	37	5.8E-08	-	320	-	965	1,033	0.76	11.5
105	11-16	RG-2C-2B	Ringhals-2	CW316	15	-	76	76	1.2E-07	-	320	-	997	1,006	0.25	9.8
106	11-5	BV-3B4-C	Beaver Valley-1	CW316	15	-	6	6	1.3E-08	-	340	-	769	854	8.64	19.2
107	11-6	BV-3B1-A	Beaver Valley-1	CW316	15	-	26	26	5.8E-08	-	340	-	1,010	1,017	0.2	11.2
108	11-7	BV-2B4-C	Beaver Valley-1	CW316	15	-	51	51	1.1E-07	-	340	-	968	1,001	0.59	11.4
109	11-10	HBR-9B4-A1	H.B.Robinson-2	CW316	15	-	18	18	5.8E-08	-	340	-	956	961	0.2	11
110	11-11	HBR-10A4-A3	H.B.Robinson-2	CW316	15	-	28	28	9.0E-08	-	340	-	928	951	0.42	12.1
111	11-17	RG-4B-2C	Ringhals-2	CW316	15	-	37	37	5.8E-08	-	340	-	1,018	1,027	0.38	10.8
112	11-18	RG-2C-2C	Ringhals-2	CW316	15	-	76	76	1.2E-07	-	340	-	997	1,020	0.85	9.9
113	14-3	A1-320	Ringhals-2	CW316	15	-	76	76	-	290-321	320	-	1,005	1,011	4.6	9.3
114	14-4	B2-320	Ringhals-2	CW316	15	-	76	76	-	290-321	320	-	997	1,003	4.6	9.8
115	13-2	-	Ringhals-2	CW316	15	-	0	0	(23YEAR)	-	320	-	539	638	7.3	14.5
116	13-3	-	Ringhals-2	CW316	15	-	0	0	(23YEAR)	-	320	-	544	636	7.6	15.7
117	13-6	-	Ringhals-2	CW316	15	-	29	29	(23YEAR)	-	320	-	931	1,001	0.5	6.7
118	13-7	-	Ringhals-2	CW316	15	-	24	24	(23YEAR)	-	320	-	951	1,009	0.5	6.8
119	13-10	-	Ringhals-2	CW316	15	-	65	65	(23YEAR)	-	320	-	916	998	0.7	6.9
120	13-11	-	Ringhals-2	CW316	15	-	65	65	(23YEAR)	-	320	-	957	1,000	0.6	7.0
121	18-1	B46	BOR60	CW316	-	-	0	0	9.0E-07	330	330	-	486	614	2.7	10.8
122	18-2	B47	BOR60	CW316	-	-	0	0	9.0E-07	330	330	-	488	604	4.5	14
123	18-3	B90	BOR60	CW316	-	-	18	18	9.0E-07	330	330	-	944	961	0.4	7.3
124	18-4	B91	BOR60	CW316	-	-	18	18	9.0E-07	330	330	-	949	962	0.4	7.1
125	18-5	B85	BOR60	CW316	-	-	42	42	9.0E-07	330	330	-	940	965	0.5	7.7
126	18-6	B86	BOR60	CW316	-	-	42	42	9.0E-07	330	330	-	939	949	0.4	7.1



表 4.2.3-17 引張特性の相関式に用いたデータ(BWR 分野)

No.	DB	試験片番号	照射炉	鋼種	熱処理条件	照射量 (dpaへの換算を含む)		中性子束 (フラックス)	照射温度 (°C)	試験温度 (°C)	引張速度 (/s)	0.2% 耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	全伸び (%)
						(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)	(dpa)								
1	1-1	A035	JMTR	316L	溶体化	0.00.E+00	0.00	-	-	288	3.0E-04	168	382	41.3	50.5
2	1-2	A036	JMTR	316L	溶体化	0.00.E+00	0.00	-	-	288	3.0E-04	156	399	43.7	53.8
3	1-3	A132	JMTR	316L	溶体化	5.78.E+24	0.94	2.41E-07	287.0	288	3.0E-04	352	485	28.4	36.6
4	1-4	A134	JMTR	316L	溶体化	5.11.E+24	0.91	2.36E-07	287.0	288	3.0E-04	355	494	28.2	35.9
5	1-5	A238	JMTR	316L	溶体化	8.98.E+24	1.57	2.17E-07	284.3	288	3.0E-04	407	514	25.4	32.6
6	1-6	A233	JMTR	316L	溶体化	1.09.E+25	1.84	2.57E-07	284.3	288	3.0E-04	414	520	22.0	29.6
7	1-7	A346	JMTR	316L	溶体化	3.04.E+25	5.11	2.32E-07	287.3	288	3.0E-04	606	616	17.1	25.3
8	1-8	A348	JMTR	316L	溶体化	2.51.E+25	4.37	2.00E-07	287.3	288	3.0E-04	621	635	15.5	23.6
9	1-11	H035	JMTR	304L	溶体化	0.00E+00	0.00	-	-	288	3.0E-04	159	373	41.3	51.6
10	1-12	H036	JMTR	304L	溶体化	0.00E+00	0.00	-	-	288	3.0E-04	159	369	39.9	48.7
11	1-13	H134	JMTR	304L	溶体化	5.68E+24	1.06	2.45E-07	287.0	288	3.0E-04	350	466	25.5	33.3
12	1-14	H135	JMTR	304L	溶体化	6.17E+24	1.04	2.57E-07	287.0	288	3.0E-04	358	476	25.6	32.5
13	1-15	H241	JMTR	304L	溶体化	8.96E+24	1.59	2.28E-07	286.8	288	3.0E-04	420	506	25.0	32.0
14	1-16	H234	JMTR	304L	溶体化	1.03E+25	1.72	2.37E-07	286.8	288	3.0E-04	430	514	25.1	31.2
15	1-17	H337	JMTR	304L	溶体化	2.46E+25	4.29	1.97E-07	286.9	288	3.0E-04	645	646	0.3	18.7
16	1-18	H343	JMTR	304L	溶体化	2.94E+25	5.01	2.28E-07	287.4	288	3.0E-04	633	643	0.1	12.7
17	2-1	R033	JMTR	304	溶体化	0.00E+00	0.00	-	-	288	3.0E-04	166	415	50.7	57.7
18	2-2	R034	JMTR	304	溶体化	0.00E+00	0.00	-	-	288	3.0E-04	144	416	44.7	54.3
19	2-3	R133	JMTR	304	溶体化	5.56E+24	1.00	2.40E-07	288.0	288	3.0E-04	466	566	22.4	29.1
20	2-4	R134	JMTR	304	溶体化	5.99E+24	0.99	2.33E-07	288.0	288	3.0E-04	453	562	23.2	29.9
21	2-5	R232	JMTR	304	溶体化	7.75E+24	1.35	1.88E-07	288.1	288	3.0E-04	521	596	19.5	27.5
22	2-6	R235	JMTR	304	溶体化	7.82E+24	1.37	1.95E-07	288.1	288	3.0E-04	512	583	19.8	25.5
23	2-7	R332	JMTR	304	溶体化	1.96E+25	3.47	1.59E-07	286.2	288	3.0E-04	731	732	0.2	18.6
24	2-8	R333	JMTR	304	溶体化	2.17E+25	3.74	1.72E-07	286.2	288	3.0E-04	748	752	0.2	17.2
25	2-9	W033	JMTR	316NG	溶体化	0.00E+00	0.00	-	-	288	3.0E-04	154	392	46.7	56.3
26	2-10	W034	JMTR	316NG	溶体化	0.00E+00	0.00	-	-	288	3.0E-04	151	393	46.8	55.0
27	2-11	W133	JMTR	316NG	溶体化	4.92E+24	0.85	2.04E-07	288.3	288	3.0E-04	312	483	34.4	40.1
28	2-12	W134	JMTR	316NG	溶体化	5.04E+24	0.81	1.96E-07	288.3	288	3.0E-04	311	481	33.2	40.0
29	2-13	W231	JMTR	316NG	溶体化	7.16E+24	1.21	1.67E-07	288.0	288	3.0E-04	352	482	28.5	35.0
30	2-14	W235	JMTR	316NG	溶体化	9.04E+24	1.51	2.08E-07	288.1	288	3.0E-04	353	494	29.4	36.0
31	3-1		国内BWR	304		0	0.00		288	288		163	491	37.3	47.3
32	3-2		国内BWR	304		0	0.00		288	288		179	480	40.5	48.2
33	3-3		国内BWR	304		2.6E+24	0.37		288	288		391	555	20.0	26.8
34	3-4		国内BWR	304		2.6E+24	0.37		288	288		392	550	19.1	25.3
35	3-5		国内BWR	304		2.6E+24	0.37		288	288		384	550	21.6	27.9
36	3-6		国内BWR	304		5.0E+24	0.71		288	288		451	582	16.5	22.7
37	3-7		国内BWR	304		5.0E+24	0.71		288	288		459	593	15.0	22.7
38	3-8		国内BWR	304		5.0E+24	0.71		288	288		475	617	16.4	24.2
39	3-9		国内BWR	304		7.2E+24	1.03		288	288		538	576	9.0	19.7
40	3-10		国内BWR	304		7.2E+24	1.03		288	288		539	634	13.5	21.9
41	3-11		国内BWR	304		7.2E+24	1.03		288	288		491	582	14.3	21.6
42	3-12		国内BWR	304		8.3E+24	1.19		288	288		531	628	12.9	20.7
43	3-13		国内BWR	304		8.3E+24	1.19		288	288		525	585	11.7	19.3
44	3-14		国内BWR	304		8.3E+24	1.19		288	288		499	590	11.9	19.9
45	3-15		国内BWR	304		3.0E+25	4.29		288	288		806	807	0.5	6.9
46	3-16		国内BWR	304		4.6E+25	6.57		288	288		768	785	0.4	5.5
47	3-17		国内BWR	304		4.6E+25	6.57		288	288		825	825	0.2	5.2
48	3-18		国内BWR	304		6.4E+25	9.14		288	288		825	839	0.3	5.2
49	3-19		国内BWR	304		6.4E+25	9.14		288	288		831	831	0.2	5.7
50	3-20		国内BWR	304		1.4E+26	20.00		288	288		932	936	0.3	8.6
51	3-21		国内BWR	304		1.4E+26	20.00		288	288		958	963	0.3	8.6
52	3-22		国内BWR	316		3.8E+25	5.43		288	288		729	762	4.7	12.7
53	3-23		国内BWR	316		3.8E+25	5.43		288	288		792	799	0.3	12.3
54	3-24		国内BWR	316		6.9E+25	9.86		288	288		828	940	1.0	9.8
55	3-25		国内BWR	316		6.9E+25	9.86		288	288		879	917	0.4	8.3
56	3-26		国内BWR	316		9.6E+25	13.71		288	288		897	930	0.6	9.0
57	3-27		国内BWR	316		9.6E+25	13.71		288	288		896	922	0.4	8.9
58	4-1	-	国内BWR	COM304	溶体化	2.02E+25	2.89	-	288	288	3.6E-04	824	824		5.1
59	4-2	-	国内BWR	COM304	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.6E-04	154	427		34.7
60	4-3	-	国内BWR	304L	溶体化	2.33E+25	3.33	-	288	288	3.6E-04	586	656		7.9
61	4-4	-	国内BWR	304L	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.6E-04	128	376		37.9
62	4-5	-	国内BWR	304L-NL	溶体化	2.33E+25	3.33	-	288	288	3.6E-04	600	660		8.2
63	4-6	-	国内BWR	304L-NL	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.6E-04	145	387		36.9
64	4-7	-	国内BWR	HP304L	溶体化	2.07E+25	2.96	-	288	288	3.6E-04	581	623		6.5
65	4-8	-	国内BWR	HP304L	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.6E-04	128	348		37.0
66	4-9	-	国内BWR	HP304L-Mb	溶体化	2.24E+25	3.20	-	288	288	3.6E-04	613	613		4.9
67	4-10	-	国内BWR	HP304L-Mb	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.6E-04	123	356		38.3
68	4-11	-	国内BWR	COM316L	溶体化	2.31E+25	3.30	-	288	288	3.6E-04	888	888		5.0
69	4-12	-	国内BWR	COM316L	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.6E-04	154	442		37.1
70	4-13	-	国内BWR	316L	溶体化	2.26E+25	3.23	-	288	288	3.6E-04	705	704		5.8
71	4-14	-	国内BWR	316L	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.6E-04	165	425		35.5
72	4-15	-	国内BWR	316L-PI	溶体化	2.00E+25	2.86	-	288	288	3.6E-04	528	528		16.1
73	4-16	-	国内BWR	316L-PI	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.6E-04	140	398		37.8
74	4-17	-	国内BWR	316L-NL	溶体化	2.24E+25	3.20	-	288	288	3.6E-04	674	674		11.0
75	4-18	-	国内BWR	316L-NL	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.6E-04	129	373		39.1
76	4-19	-	国内BWR	HP316L	溶体化	2.16E+25	3.09	-	288	288	3.6E-04	635	635		6.9
77	4-20	-	国内BWR	HP316L	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.6E-04	137	389		40.1
78	4-23	-	国内BWR	316NG	溶体化	2.07E+25	2.96	-	288	288	3.6E-04	590	673		19.6
79	4-24	-	国内BWR	316NG	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.6E-04	172	450		40.3
80	4-25	-	国内BWR	HP316NG	溶体化	2.24E+25	3.20	-	288	288	3.6E-04	653	653		6.8
81	4-26	-	国内BWR	HP316NG	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.6E-04	148	426		41.5

表 4.2.3-17 引張特性の相関式に用いたデータ(BWR 分野)(続き)

No.	DB	試験片番号	照射炉	鋼種	熱処理条件	照射量 (dpaへの換算を含む)		中性子束 (フラックス)	照射温度	試験温度	引張速度	0.2% 耐力	引張強さ	一様伸び	全伸び
	No	No.	-	-	-	(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)	(dpa)	(dpa/s)	(°C)	(°C)	(s)	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)
82	5-1	-	国内BWR	304	溶体化	3.30E+25	4.71	-	288	288	3.3E-04	832	832	0.2	7.5
83	5-2	-	国内BWR	304	溶体化	1.70E+25	2.43	-	288	288	3.3E-04	808	808	0.1	5.8
84	5-3	-	国内BWR	304	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	203	455	31.7	36.8
85	5-4	-	国内BWR	304L	溶体化	1.70E+25	2.43	-	288	288	3.3E-04	672	672	0.1	5.6
86	5-5	-	国内BWR	304L	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	175	400	29.3	34.1
87	5-6	-	国内BWR	316	溶体化	1.90E+25	2.71	-	288	288	3.3E-04	696	730	3.8	8.1
88	5-7	-	国内BWR	316	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	163	460	31.6	36.0
89	5-8	-	国内BWR	316L	溶体化	3.60E+25	5.14	-	288	288	3.3E-04	684	684	0.1	8.0
90	5-9	-	国内BWR	316L	溶体化	1.90E+25	2.71	-	288	288	3.3E-04	632	658	9.5	12.8
91	5-10	-	国内BWR	316L	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	156	421	38.5	42.9
92	5-11	-	国内BWR	316L-NL	溶体化	3.70E+25	5.29	-	288	288	3.3E-04	730	738	0.4	10.2
93	5-12	-	国内BWR	316L-NL	溶体化	2.00E+25	2.86	-	288	288	3.3E-04	562	584	3.0	6.7
94	5-13	-	国内BWR	316L-NL	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	171	397	31.9	36.0
95	5-14	-	国内BWR	316L-NM	溶体化	2.00E+25	2.86	-	288	288	3.3E-04	458	514	5.8	8.6
96	5-15	-	国内BWR	316L-NM	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	153	401	34.5	38.4
97	5-16	-	国内BWR	316L-PI(A)	溶体化	3.70E+25	5.29	-	288	288	3.3E-04	739	739	0.2	9.1
98	5-17	-	国内BWR	316L-PI(A)	溶体化	2.00E+25	2.86	-	288	288	3.3E-04	466	574	17.4	22.6
99	5-18	-	国内BWR	316L-PI(A)	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	172	419	29.5	34.2
100	5-19	-	国内BWR	316L-PI(B)	溶体化	2.00E+25	2.86	-	288	288	3.3E-04	588	642	11.7	17.6
101	5-20	-	国内BWR	316L-PI(B)	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	154	418	30.9	35.4
102	5-21	-	国内BWR	316L-PI-NM	溶体化	2.00E+25	2.86	-	288	288	3.3E-04	472	533	9.3	12.4
103	5-22	-	国内BWR	316L-PI-NM	溶体化	3.80E+25	5.43	-	288	288	3.3E-04	693	693	0.2	13.1
104	5-23	-	国内BWR	316L-PI-NM	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	153	393	33.7	37.6
105	5-24	-	国内BWR	316L-PM-NM	溶体化	4.00E+25	5.71	-	288	288	3.3E-04	780	780	0.2	7.2
106	5-25	-	国内BWR	316L-PM-NM	溶体化	2.10E+25	3.00	-	288	288	3.3E-04	613	626	5.5	10.8
107	5-26	-	国内BWR	316L-PM-NM	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	166	401	31.5	35.4
108	5-27	-	国内BWR	316L-PI-NL	溶体化	3.70E+25	5.29	-	288	288	3.3E-04	711	711	0.2	8.7
109	5-28	-	国内BWR	316L-PI-NL	溶体化	1.90E+25	2.71	-	288	288	3.3E-04	528	583	10.2	14.9
110	5-29	-	国内BWR	316L-PI-NL	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	159	379	30.9	31.7
111	5-30	-	国内BWR	HP316L	溶体化	2.10E+25	3.00	-	288	288	3.3E-04	631	631	0.2	18.2
112	5-31	-	国内BWR	HP316L	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	163	392	28.2	31.9
113	5-32	-	国内BWR	HP316L-NM	溶体化	2.20E+25	3.14	-	288	288	3.3E-04	638	638	0.1	7.5
114	5-33	-	国内BWR	HP316L-NM	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	165	388	33.3	37.3
115	5-34	-	国内BWR	6L-PI-NM(Zr-Mo)	溶体化	1.80E+25	2.57	-	288	288	3.3E-04	410	502	8.7	12.5
116	5-35	-	国内BWR	6L-PI-NM(Zr-Mo)	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	183	391	29.5	33.4
117	5-36	-	国内BWR	HP316L-NL	溶体化	1.90E+25	2.71	-	288	288	3.3E-04	586	590	3.2	7.8
118	5-37	-	国内BWR	HP316L-NL	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	150	379	32.5	36.2
119	5-42	-	国内BWR	316NG	溶体化	3.80E+25	5.43	-	288	288	3.3E-04	807	807	0.2	8.7
120	5-43	-	国内BWR	316NG	溶体化	2.00E+25	2.86	-	288	288	3.3E-04	552	635	12.1	16.4
121	5-44	-	国内BWR	316NG	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.3E-04	180	422	28.7	32.7
122	6-1	S-2	国内BWR	304	受入まま	1.60E+24	0.23	-	288	288	-	321	517	21.5	27.6
123	6-2	S-2	国内BWR	304	受入まま	1.60E+24	0.23	-	288	288	-	311	513	22.4	27.6
124	6-3	S-3	国内BWR	304	受入まま	3.60E+24	0.51	-	288	288	-	477	559	13.5	19.6
125	6-4	S-3	国内BWR	304	受入まま	3.60E+24	0.51	-	288	288	-	469	547	14.2	19.9
126	6-5	T-1	国内BWR	316	受入まま	1.30E+25	1.86	-	288	288	-	630	737	12.7	20.9
127	6-6	T-1	国内BWR	316	受入まま	1.30E+25	1.86	-	288	288	-	599	705	13.1	20.3
128	6-7	T-1	国内BWR	316	受入まま	5.40E+24	0.77	-	288	288	-	400	603	25.5	29.6
129	6-8	T-1	国内BWR	316	受入まま	5.40E+24	0.77	-	288	288	-	404	601	22.1	28.8
130	7-1	-	BWR	304	-	1.60E+24	0.23	-	288	288	3.3E-04	321	517	21.5	27.6
131	7-2	-	BWR	304	-	1.60E+24	0.23	-	288	288	3.3E-04	311	513	22.4	27.6
132	7-3	-	BWR	304	-	3.60E+24	0.51	-	288	288	3.3E-04	477	559	13.5	19.6
133	7-4	-	BWR	304	-	3.60E+24	0.51	-	288	288	3.3E-04	469	547	14.2	19.9
134	7-5	-	BWR	316	-	1.30E+25	1.86	-	288	288	3.3E-04	630	737	12.7	20.9
135	7-6	-	BWR	316	-	1.30E+25	1.86	-	288	288	3.3E-04	599	705	13.1	20.3
136	7-7	-	BWR	316	-	5.40E+24	0.77	-	288	288	3.3E-04	400	603	25.5	29.6
137	7-8	-	BWR	316	-	5.40E+24	0.77	-	288	288	3.3E-04	404	601	22.1	28.8
138	8-1	B15R%TT04	国内BWR	304	受入まま	4.50E+24	0.64	-	288	288	3.0E-04	314	512	17.8	24.4
139	8-2	B15R%TT05	国内BWR	304	受入まま	4.50E+24	0.64	-	288	288	3.0E-04	356	532	17.7	24.8
140	8-3	B15R%TT06	国内BWR	304	受入まま	4.50E+24	0.64	-	288	288	3.0E-04	352	525	16.1	23.3
141	8-4	B15R%TT07	国内BWR	304	受入まま	4.50E+24	0.64	-	288	288	3.0E-04	361	551	18.2	26.1
142	8-7	B15R2TT21	国内BWR	316	受入まま	1.20E+25	1.71	-	288	288	3.0E-04	608	700	10.5	19.0
143	8-8	B15R2TT22	国内BWR	316	受入まま	1.20E+25	1.71	-	288	288	3.0E-04	603	693	8.7	15.4
144	9-1	TT05	国内BWR	304	受入まま	1.60E+24	0.23	-	288	288	3.0E-04	306	520	17.0	21.5
145	9-2	TT06	国内BWR	304	受入まま	1.60E+24	0.23	-	288	288	3.0E-04	304	508	18.3	23.7
146	9-3	TT23	国内BWR	316	受入まま	2.30E+24	0.33	-	288	288	3.0E-04	360	563	19.9	26.3
147	9-4	TT24	国内BWR	316	受入まま	2.30E+24	0.33	-	288	288	3.0E-04	334	545	18.7	26.2
148	9-5	TT01	JMTR	316L	溶体化	9.40E+24	1.34	-	288	288	3.0E-04	418	531	14.9	22.5
149	9-6	TT02	JMTR	316L	溶体化	9.40E+24	1.34	-	288	288	3.0E-04	383	525	15.9	22.4
150	9-7	A041	JMTR	316L	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.0E-04	125	386	34.7	41.6
151	9-8	A042	JMTR	316L	溶体化	0.00E+00	0.00	-	288	288	3.0E-04	126	381	34.2	41.2

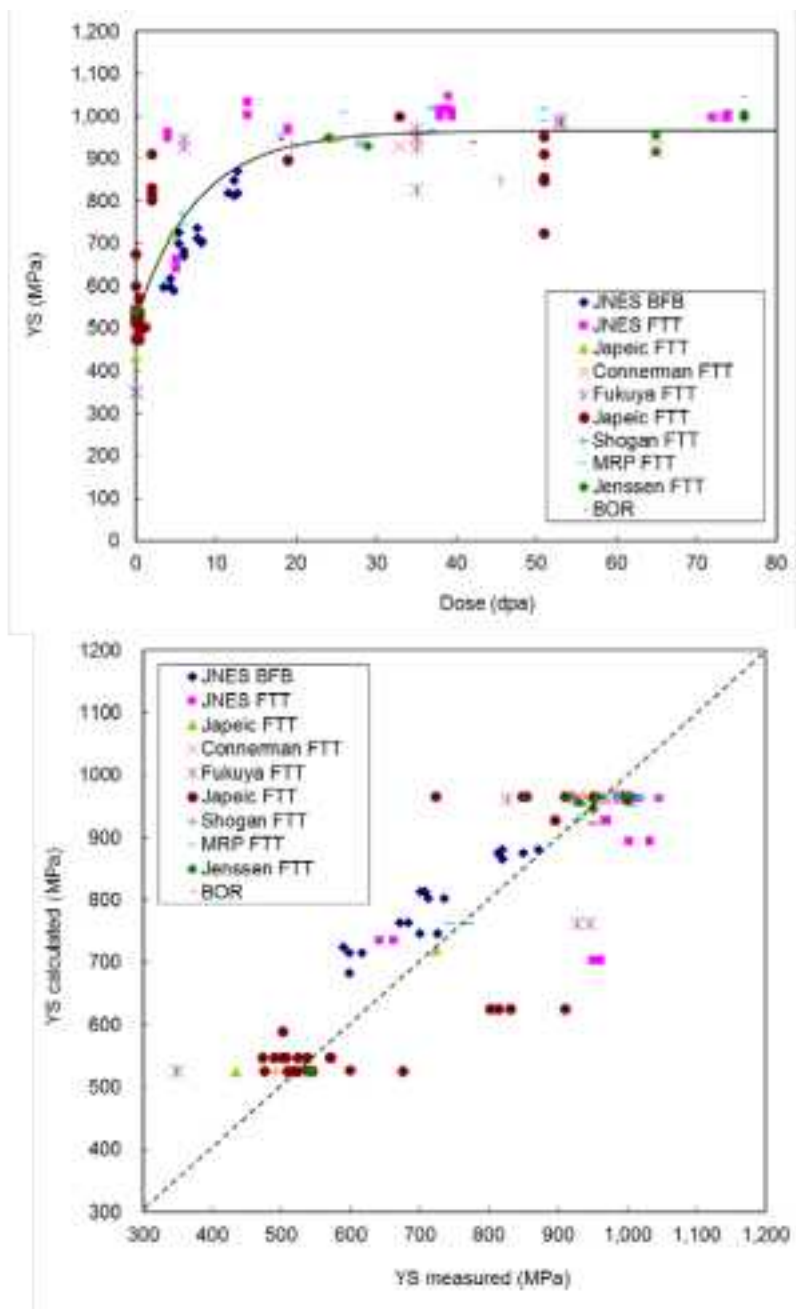
表 4.2.3-17 引張特性の相関式に用いたデータ(BWR 分野)(続き)

No.	DB	試験片番号	照射炉	鋼種	熱処理条件	照射量		中性子束 (フラックス)	照射温 度	試験温 度	引張速度 度	0.2% 耐力	引張強 さ	一様伸 び	全伸び
						(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)	(dpa)								
152	10-1	57960	海外BWR	304L	受入まま	0.00E+00	0.00	-	-	300	-	139	391		
153	10-2	57954	海外BWR	304L	受入まま	0.00E+00	0.00	-	-	300	-	152	411		
154	10-3	57952	海外BWR	304L	受入まま	0.00E+00	0.00	-	-	300	-	141	394		
155	10-4	55439	海外BWR	304L	受入まま	0.00E+00	0.00	-	-	300	-	163	385		
156	10-5		海外BWR	304L	-	9.10E+25	12.00	-	-	288	-	841	834	0	9
157	10-6		海外BWR	304L	-	9.10E+25	12.00	-	-	288	-	837	837	0	8
158	10-13	183039	海外BWR	304	-	3.30E+25	4.70	-	-	288	-	582	644	11	19
159	10-14	183039	海外BWR	304	-	3.30E+25	4.70	-	-	288	-	572	634	10	20
160	10-15	183039	海外BWR	304	-	3.90E+25	5.50	-	-	288	-	651	681	11	20
161	10-16	183039	海外BWR	304	-	3.90E+25	5.50	-	-	288	-	638	683	9	15
162	10-17	A	国内BWR	304	-	5.20E+25	7.40	-	-	288	-	886	886	0	11
163	10-18	A	国内BWR	304	-	5.20E+25	7.40	-	-	288	-	881	881	0	7
164	10-19	B	国内BWR	304	-	8.40E+25	8.40	-	-	288	-	895	895	0	10
165	10-20	B	国内BWR	304	-	8.40E+25	8.40	-	-	288	-	883	883	0	7
166	10-21	183039	未照射	304	420°Cx4.5h	0.00E+00	0.00	-	-	300	-	244	428		
167	10-22	183039	未照射	304	420°Cx4.5h	0.00E+00	0.00	-	-	300	-	244	428		
168	11-1	SW03	Barseback 1	304L	-	5.40E+21	7.70	2.70E-08	270-288	288	-	643	643	0.1	11.6
169	12-3	2	BWR	304	-	-	50.00	-	-	288	-	857	857	0.2	3.6
170	12-4	3	BWR	304	-	-	50.00	-	-	288	-	857	858	0.2	3.4
171	12-5	5	BWR	304	-	-	50.00	-	-	288	-	825	871	0.4	3.7
172	13-1	#1	BWR	304L	-	2.10E+25	3.50	5.10E+13	-	288	3.3E-04	600	600		12.6
173	13-2	#2	BWR	304L	-	2.10E+25	3.50	5.10E+13	-	288	3.3E-04	600	600		13.9
174	14-21	-	ATR	304	溶体化	0.00E+00	0.00	-	287.0	288	4.0E-04	172	443	41.3	48.0
175	14-22	-	ATR	304	溶体化	8.00E+24	1.14	-	287.0	288	4.0E-04	553	639	12.6	17.5
176	14-23	-	ATR	304	溶体化	2.50E+25	3.57	-	287.0	288	4.0E-04	649	649	6.8	11.2
177	14-26	-	ATR	304L	溶体化	0.00E+00	0.00	-	287.0	288	4.0E-04	170	401	38.3	46.3
178	14-27	-	ATR	304L	溶体化	8.00E+24	1.14	-	287.0	288	4.0E-04	475	586	15.5	20.0
179	14-28	-	ATR	304L	溶体化	2.50E+25	3.57	-	287.0	288	4.0E-04	626	626	2.5	7.3
180	14-1	-	ATR	316L	溶体化	0.00E+00	0.00	-	287.0	288	4.0E-04	198	442	39.0	46.0
181	14-2	-	ATR	316L	溶体化	8.00E+24	1.14	-	287.0	288	4.0E-04	397	572	19.0	23.3
182	14-3	-	ATR	316L	溶体化	2.50E+25	3.57	-	287.0	288	4.0E-04	478	552	11.9	16.9
183	14-4	-	ATR	HPL	溶体化	0.00E+00	0.00	-	287.0	288	4.0E-04	154	387	39.5	45.8
184	14-5	-	ATR	HPL	溶体化	8.00E+24	1.14	-	287.0	288	4.0E-04	430	568	16.2	20.1
185	14-6	-	ATR	HPL	溶体化	2.50E+25	3.57	-	287.0	288	4.0E-04	520	520	5.4	9.8
186	14-11	-	ATR	316NG	溶体化	0.00E+00	0.00	-	287.0	288	4.0E-04	190	462	35.8	44.0
187	14-12	-	ATR	316NG	溶体化	8.00E+24	1.14	-	287.0	288	4.0E-04	340	577	28.0	31.8
188	14-13	-	ATR	316NG	溶体化	2.50E+25	3.57	-	287.0	288	4.0E-04	604	658	15.4	20.5
189	14-14	-	ATR	HPNG	溶体化	0.00E+00	0.00	-	287.0	288	4.0E-04	164	415	38.5	46.2
190	14-15	-	ATR	HPNG	溶体化	8.00E+24	1.14	-	287.0	288	4.0E-04	337	529	24.2	29.2
191	14-16	-	ATR	HPNG	溶体化	2.50E+25	3.57	-	287.0	288	4.0E-04	575	577	13.3	18.1
192	16-1	-	JMTR	304	10°Cx0.5h+v	4.90E+24	0.70	-	273	273	-	461	560	20.5	31.6
193	16-2	-	JMTR	304	10°Cx0.5h+v	5.90E+24	0.84	-	273	273	-	484	578	20.9	32.8
194	16-3	-	JMTR	304	10°Cx0.5h+v	8.70E+24	1.24	-	273	273	-	558	611	18.6	29.8
195	16-4	-	JMTR	304	10°Cx0.5h+v	1.00E+25	1.43	-	273	273	-	592	633	16.8	38.2
196	16-5	-	JMTR	304	10°Cx0.5h+v	0.00E+00	0.00	-	273	273	-	168	432	40.0	54.3
197	16-6	-	JMTR	304	10°Cx0.5h+v	5.10E+24	0.73	-	273	288	-	451	551	19.4	31.0
198	16-7	-	JMTR	304	10°Cx0.5h+v	6.00E+24	0.86	-	273	288	-	482	572	22.0	30.3
199	16-8	-	JMTR	304	10°Cx0.5h+v	9.00E+24	1.29	-	273	288	-	566	613	16.7	27.2
200	16-9	-	JMTR	304	10°Cx0.5h+v	1.00E+25	1.43	-	273	288	-	588	625	15.9	26.0
201	16-10	-	JMTR	304	10°Cx0.5h+v	0.00E+00	0.00	-	273	288	-	154	433	39.9	56.4

表 4.2.3-18 得られた引張特性の相関式

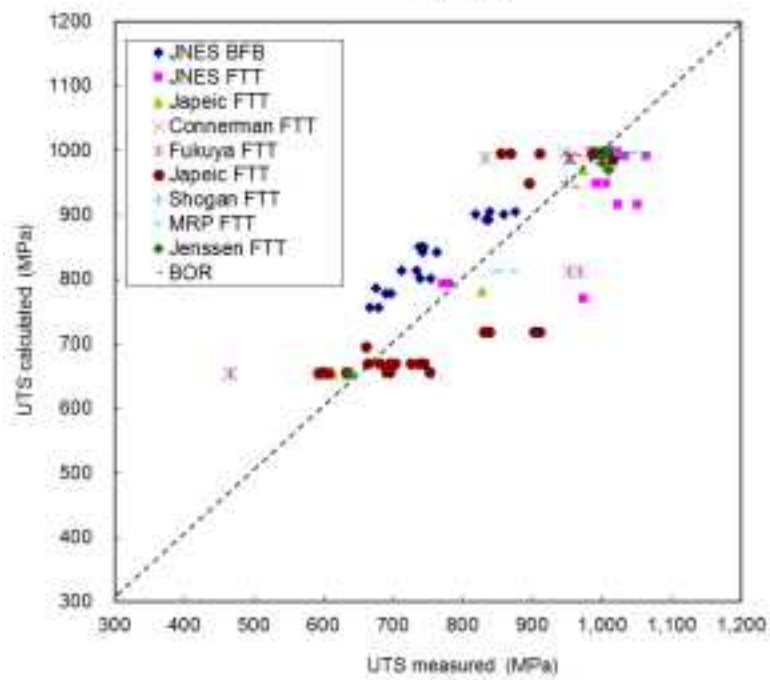
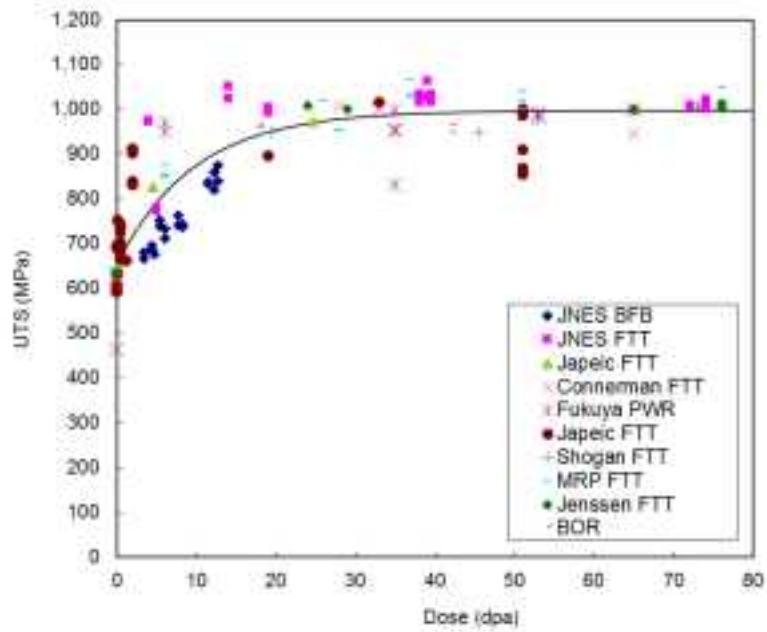
$$x = c + a \cdot [1 - \exp(-F/b)]$$

対象	係数	耐力 YS MPa	引張強さ UTS MPa	一様伸び UE %	破断伸び TE %
PWR 分野 冷間加工 316SS 290~350℃	a	441.0	342.5	-10.63	-10.94
	b	7.749	9.697	6.047	9.445
	c	525.1	654.7	11.18	18.10
	標準偏差 sd	84.0	72.0	3.9	5.4
	データ数	126	126	126	126
BWR 分野 溶体化 304/316SS 288℃	a	622.7	450.8	-32.97	-31.48
	b	2.371	4.535	1.677	1.653
	c	194.1	441.4	34.48	40.28
	標準偏差 sd	81.7	68.3	6.2	6.9
	データ数	201	201	161	195



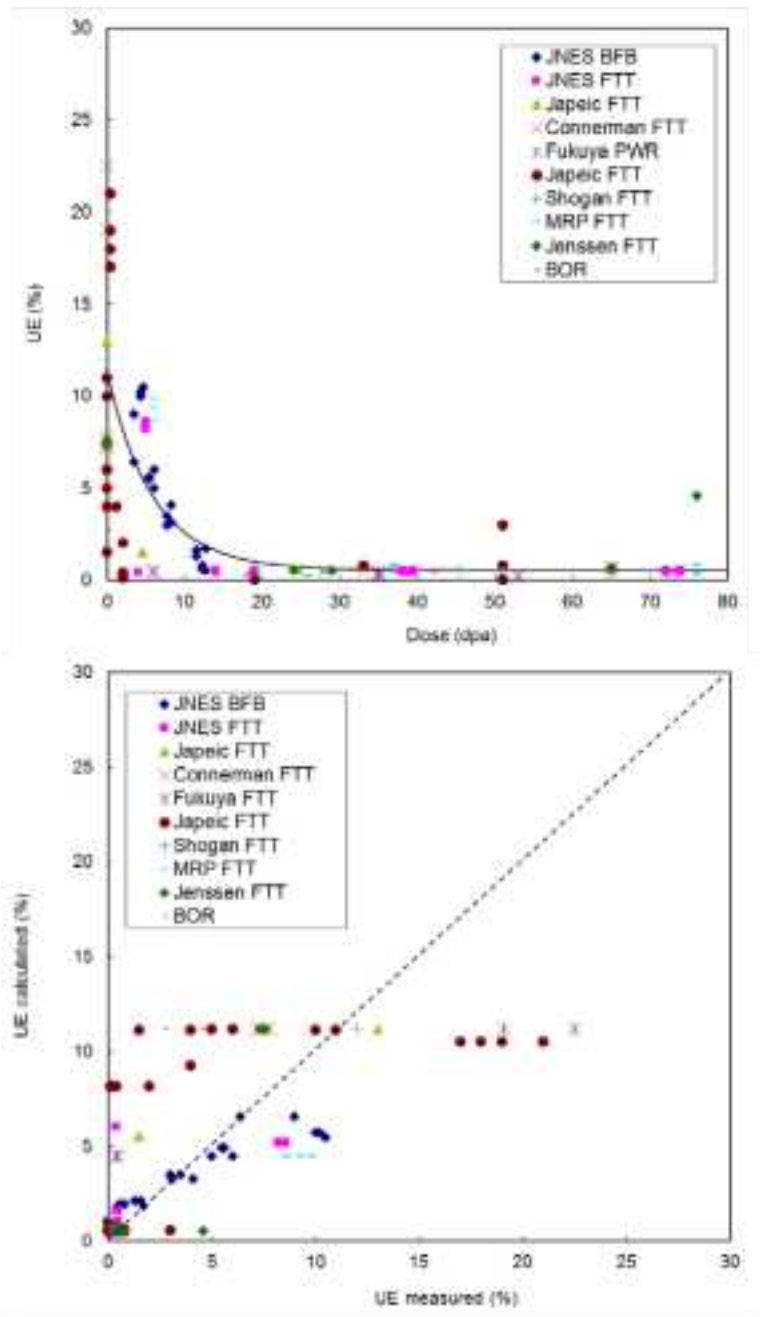
$$YS = 525.1 + 441.0 \cdot [1 - \exp(-F/7.749)] \quad \sigma=84.0$$

図 4.2.3-31 耐力の相関式とデータの関係(PWR 分野)



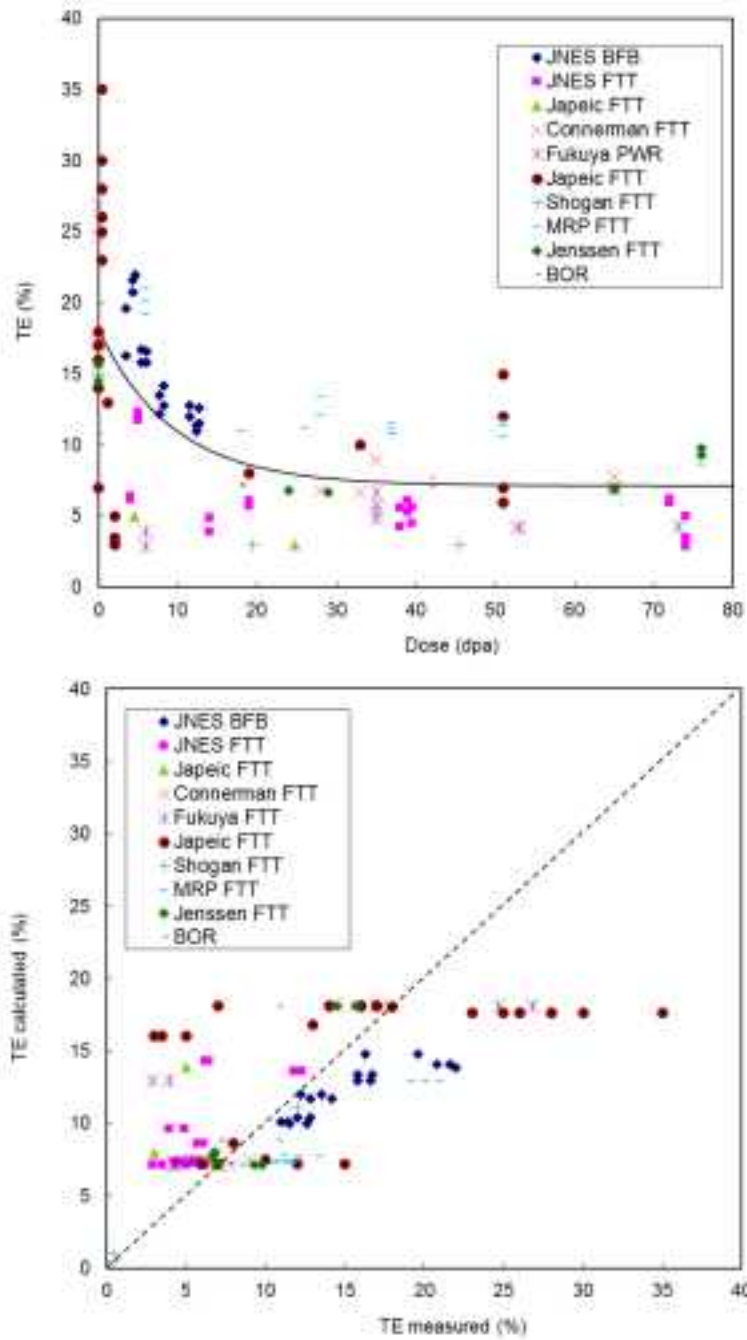
$$UTS = 654.7 + 342.5 \cdot [1 - \exp(-F/9.697)] \quad \sigma=72.0$$

図 4.2.3-32 引張応力の相関式とデータの関係(PWR 分野)



$$UE = 11.18 - 10.63 \cdot [1 - \exp(-F/6.047)] \quad \sigma=3.9$$

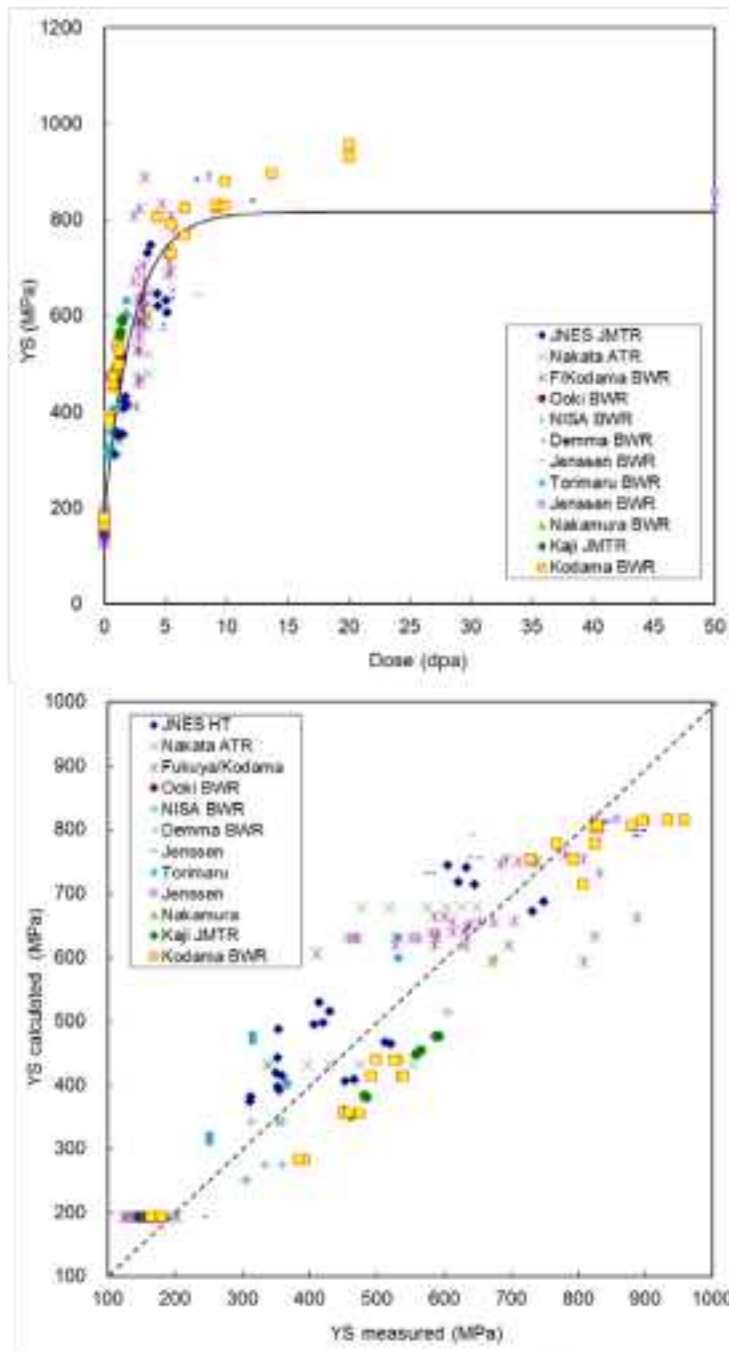
図 4.2.3-33 一様伸びの相関式とデータの関係(PWR 分野)



$$TE = 18.10 - 10.94 \cdot [1 - \exp(-F/9.445)] \quad \sigma=5.4$$

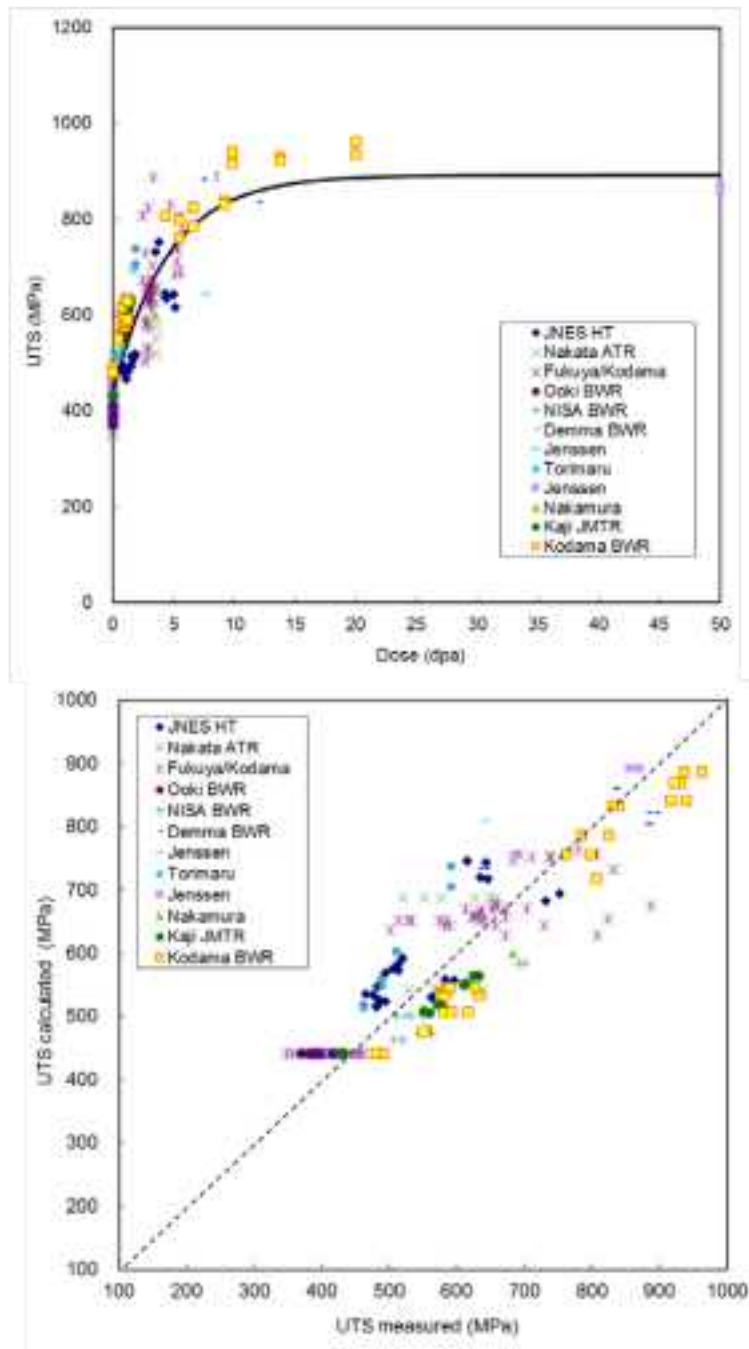
図 4.2.3-34 破断伸びの相関式とデータの関係(PWR 分野)





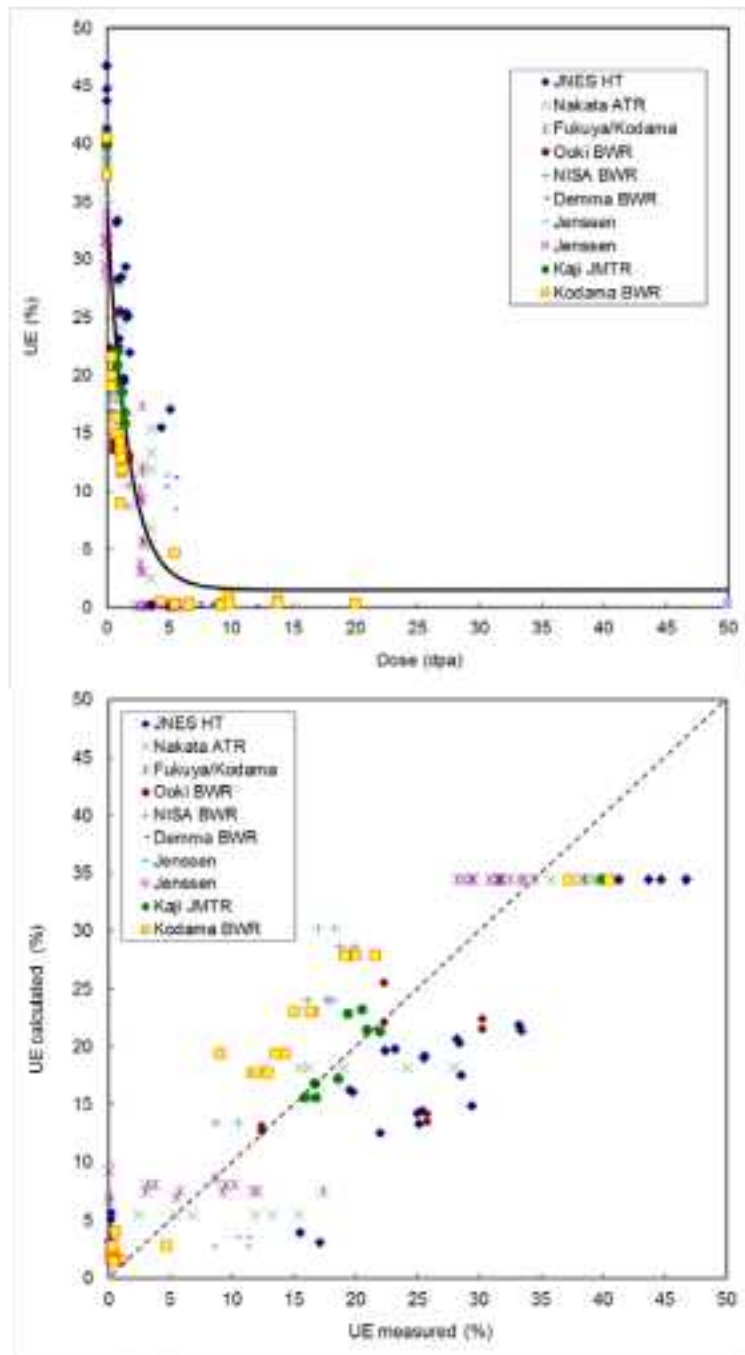
$$YS = 194.1 + 622.7 \cdot [1 - \exp(-F/2.371)] \quad \sigma=81.7$$

図 4.2.3-35 耐力の相関式とデータの関係(BWR 分野)



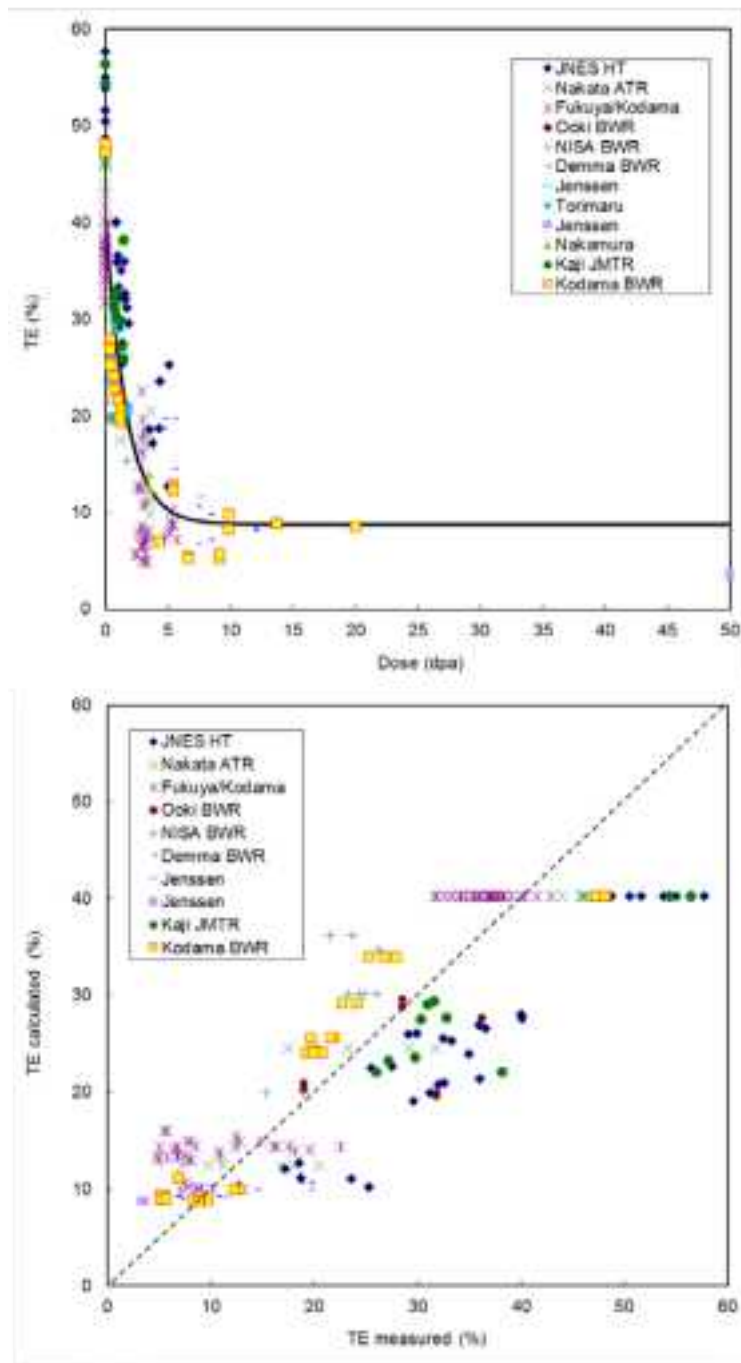
$$UTS = 441.4 + 450.8 \cdot [1 - \exp(-F/4.535)] \quad \sigma=68.3$$

図 4.2.3-36 引張強さの相関式とデータの関係(BWR 分野)



$$UE = 34.48 - 32.97 \cdot [1 - \exp(-F/1.677)] \quad \sigma=6.2$$

図 4.2.3-37 一様伸びの相関式とデータの関係(BWR 分野)



$$TE = 40.28 - 31.48 \cdot [1 - \exp(-F/1.653)] \quad \sigma=6.9$$

図 4.2.3-38 破断伸びの相関式とデータの関係(BWR 分野)

## ②応力ひずみ関係式

### i) 既存関係式

オーステナイトステンレス鋼の応力ひずみ関係式として比較的良好に知られているのは、Ramberg-Osgood 式、Voce-Palm 式、Ludwik 式、Swift 式である。真応力 $\sigma$ 、塑性ひずみ $\varepsilon$ の関係の基本的な形は以下のとおりである。

#### Ramberg-Osgood 式

$$\varepsilon = \sigma/E + (\sigma/H)^{1/n}$$

#### Voce-Palm 式

$$\sigma = \sigma_y + (\sigma_u - \sigma_y)[1 - \exp(-c\varepsilon)]$$

#### Ludwik 式

$$\sigma = \sigma_y + k\varepsilon^n$$

#### Swift 式

$$\sigma = k(a + \varepsilon)^n$$

なお $\sigma_y$ は降伏応力(耐力)、 $\sigma_u$ は引張強さ、 $n$ 、 $c$ 、 $k$ 、 $a$ 等は定数である。

照射ステンレス鋼に適用する場合には、照射材の応力ひずみ線の形状によく適合するとともに、パラメータを照射量等の関数として適切に表現できる必要がある。前 2 式は構造評価に使用されることが多く、EPRI MRP-135-Rev.1 に示されている式 4.2.3(4-3)は Voce-Palm 式を基本としている。この式は降伏応力と引張強さで形状が決められるが、自由パラメータが 1 個しかなくフィッティングの自由度は大きくない。Ramberg-Osgood 式は弾性を含む式でありフィッティングは難しいとされる。

Voce-Palm 式に基づく EPRI MRP-135-Rev.1 の構成式を以下に示すが、未照射材の冷間加工率( $r$ )や試験温度( $T$ )の依存性を考慮し、照射材では照射量( $d$ )と温度( $T$ )を考慮しており複雑である。なお、照射材の温度は照射温度と試験温度の区別が曖昧である。

$$\sigma = \sigma'_Y + \Delta\sigma' [1 - \exp(-(\varepsilon - \sigma'_Y/E)/\varepsilon'_0)]$$

$$\begin{cases} \sigma'_Y = \sigma'_U - \Delta\sigma' \\ \sigma'_U = \sigma'_{0.2} + \Delta\sigma \\ \Delta\sigma' = \Delta\sigma / \exp(-0.002/\varepsilon_0) \quad \varepsilon_0 = 0.2486829 \\ \Delta\sigma = \sigma_U - \sigma_Y \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma'_{0.2} = \phi_{0.2} \sigma_{0.2} \\ \phi_{0.2} = \exp[-(m_1 + m_2 \sigma_{0.2}) \cdot (T - 330)] \\ \sigma_{0.2} = \sigma_{0.2}^{CW} + (\sigma_{0.2}^{\max} - \sigma_{0.2}^{CW}) \{1 - \exp(-d/d_0)\} \\ \sigma_{0.2}^{CW} = \sigma_{0.2}^0 + 2(\sigma_{0.2}^{\max} - \sigma_{0.2}^0)r - (\sigma_{0.2}^{\max} - \sigma_{0.2}^0)r^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \sigma'_U = \phi_U \sigma_U \\ \phi_U = \exp[-(m_1 + m_2 \sigma_U) \cdot (T - 330)] \\ \sigma_U = \sigma_U^{CW} + (\sigma_U^{\max} - \sigma_U^{CW}) \{1 - \exp(-d/d_0)\} \\ \sigma_U^{CW} = \sigma_U^0 + 2(\sigma_U^{\max} - \sigma_U^0)r - (\sigma_U^{\max} - \sigma_U^0)r^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \varepsilon'_0 = \varepsilon_0 \varepsilon'_U & \varepsilon_U, \varepsilon_T = C_0 + C_1 T + C_2 T^2 + C_3 T^3 + C_4 T^4 \\ \varepsilon'_U = \varepsilon_U \eta_3 \xi_3 & \eta_{3,4} = f_0 + f_1 \{1 - \exp(-r/r_1)\} + f_2 \exp(-r/r_2) \\ \varepsilon'_T = \varepsilon'_U + \Delta\varepsilon' & \xi_{3,4} = g_0 + g_1 \{1 - \exp(-d/d_1)\} + g_2 \exp(-d/d_2) \\ \Delta\varepsilon' = (\varepsilon_T - \varepsilon_U) \eta_4 \xi_4 \end{cases}$$

$\sigma_{0.2}^0$ は未照射の溶体化材の耐力、 $\sigma_U^0$ は未照射の溶体化材の引張強さ、 $\sigma_{0.2}^{\max}$ は照射後の溶体化材の耐力、 $\sigma_U^{\max}$ は照射後の溶体化材の引張強さ、 $\varepsilon_U$ は未照射の溶体化材の一様伸び、 $\varepsilon_T$ は未照射の溶体化材の全伸びである。

Ludwik 式と Swift 式は照射した面心立方金属(FCC 金属)の応力ひずみ関係に適することが報告されており、特に Swift 式は自由パラメータが 3 個と自由度が高く照射ステンレス鋼へのフィッティングの適合性が良いと報告されている 4.2.3(4)-11~14)。図 4.2.3-39 に例を示すように照射材の応力ひずみ曲線は照射量の増加により未照射材の応力ひずみ曲線の高応力側にシフトするという挙動を示す。Swift 式はこの挙動を適切に表現できる式となっている。Swift 式のステンレス鋼照射材への適用性については Gussev らが検討しており 4.2.3(4)-12)、n は 0.5 が適切であること、k、a は図 4.2.3-40 に示すように k は照射によりほとんど変化しないことと a は照射量にほぼ比例して増加することが知られている。また、試験温度や粒径の影響が議論されている。照射量による変化は、原子力安全基盤機構の IASCC プロジェクトで得られた JMTR 照射した 316L でも同じ傾向が確認されている 4.2.3(4)-13)。

軽水炉の構造物(冷間加工 316SS と溶体化 304SS)を念頭に置いて Swift 式による応力ひずみ関係を検討した結果が AREVA 社から報告されている 4.2.3(4)-15)。定数 k は引張試験の試験温度 T の関数として次のように与えている。

$$k(T) = \max(1335 - 1.37 \cdot T; 952)$$

定数  $a$  を耐力と関係づけて次のように表している。

$$a = -(\sigma_y/k)^2 + 0.002$$

耐力については、試験温度  $T$  に依存する未照射の値と照射量  $F$  に依存する増加量の和として、

$$\sigma_y(T, F) = \sigma_y(T) + \Delta\sigma_y(F)$$

で表し、最終的に次の式を提案している。

$$\sigma(\varepsilon, F, T) = \sqrt{[\sigma_y(T) + \Delta\sigma_y(F)]^2 + k^2(T)(\varepsilon - 0.002)}$$

なお、冷間加工 316SS と溶体化 304SS の耐力には次の式を提案している。

$$\text{冷間加工 316SS : } \sigma_y(T) = \min(709; -1.40T + 991)、$$

$$\Delta\sigma_y(F) = 453[1 - \exp(-0.27F)]$$

$$\text{溶体化 304SS: } \sigma_y(T) = \min(358; -1.40T + 640)、$$

$$\Delta\sigma_y(F) = 652[1 - \exp(-0.42F)]$$

## ii) 基本式の設定

前項 i) で述べたように、照射ステンレス鋼の応力ひずみ関係には **Swift** 式が適切と考えられる。これまでの知見に従い  $n=1/2$  の **Swift** 式を用いて応力ひずみ関係式を検討することとした。

## iii) 作成の考え方

原子炉構造物の健全性評価を行う場合、対象とする照射を受けた構造材料の応力ひずみ関係を入手可能なデータから決定する必要がある。容易に知ることができる情報は、材料の規格、照射量、使用温度であり、当該材料の応力ひずみ曲線は特別な試験を行わない限り得られない情報である。一方、耐力等の引張特性は前章で検討したように相関式から推定可能である。したがって、耐力等の引張特性の推定値や測定値から応力ひずみ関係式が作成できることが望ましいと考えられる。ここでは引張特性から **Swift** 型の応力ひずみ関係式を作成することとした。耐力と引張強さから **Swift** 式の  $a$  と  $k$  を決定する方法は **Kamaya** の方法 4.2.3(4)・16)に準じた。

iv) 応力ひずみ関係式の作成

真応力を $\sigma$ 、真ひずみを $\varepsilon$ 、工学的応力を $S$ 、工学的ひずみを $e$ とすると、Swift式

$$\sigma = k(a + \varepsilon)^{1/2}$$

において、降伏応力に対応する関係は次のとおりであり、

$$\sigma_y = k(a + \varepsilon_y)^{1/2}、\sigma_y = S_y \exp(\varepsilon_y)$$

なお、 $\varepsilon_y = \ln(1 + e_y)$ 、 $e_y = 0.002 + S_y/E$ である。

引張強さに対応する関係は次のとおりである。

$$\partial\sigma/\partial\varepsilon = \sigma、\sigma_u = S_u \exp(\varepsilon_u)$$

これから、

$$\varepsilon_u + a = 1/2、\sigma_u = k/\sqrt{2}$$

となる。

これらの式から、 $a$ と $k$ を $S_y$ と $S_u$ で表す式として

$$\ln(S_u/S_y) = \left[ \frac{1+e_y}{(k/S_y)} \right]^2 - \ln\left( \frac{1+e_y}{(k/S_y)} \right) - \ln\sqrt{2} - 1/2$$

$$a = \left[ \frac{1+e_y}{(k/S_y)} \right]^2 - \ln(1 + e_y)$$

または、

$$a = 1/2 + \ln\sqrt{2} - \ln(k/S_u)$$

が得られる。

$k$ の陽な解は得られないため、 $k/S_y$ を応力比 $S_u/S_y$ の近似関数、

$$k/S_y = f(S_u/S_y)$$

として表すこととした。具体的には、4章の引張特性データから、応力比 $S_u/S_y$ を1~3



の範囲、耐力 $S_y$ を 150～900 MPa の範囲、ヤング率  $E$ を 100～200GPa の範囲として計算して  $k$  を求め、次のような 4 次の近似式を作成した。

$$k/S_y = -0.072 \cdot (S_u/S_y)^4 + 0.786 \cdot (S_u/S_y)^3 - 3.15 \cdot (S_u/S_y)^2 + 7.90 \cdot (S_u/S_y) - 3.87$$

図 4.2.3-41 に作成した  $k/S_y$  と  $S_u/S_y$  の関係を示す。これらの関係式を用いて耐力  $S_y$  と引張強さ  $S_u$  から  $a$  と  $k$  を決定することができる。

照射ステンレス鋼では耐力と引張応力(応力比)は対応関係があるので、耐力と応力比の関係を表す相関式を準備することにより耐力の推定値や測定値だけで応力ひずみ関係式を求めることが可能である。前章で相関式の作成に使用したデータを用いて耐力と応力比の相関式を作成した。照射ステンレス鋼では照射量が高くなり耐力が飽和すると応力比は 1 に漸近する傾向であるので、関数形は次の式を選択した。

$$S_u/S_y = 1/[1 - \exp(a \cdot S_y + b)]$$

PWR 分野の冷間加工 316SS と BWR 分野の溶体化 304/316SS について最小二乗法によるフィッティングを行い、次の相関式を得た。sd は標準偏差である。

$$\text{PWR 分野} : S_u/S_y = 1/[1 - \exp(-0.00380 \cdot S_y + 0.2291)] \quad \text{sd}=0.0769$$

$$\text{BWR 分野} : S_u/S_y = 1/[1 - \exp(-0.00435 \cdot S_y + 0.1885)] \quad \text{sd}=0.1226$$

図 4.2.3-42 に作成した相関式とデータの関係を示す。大きなばらつきなく耐力から応力比、引張強さを推定することが可能である。

図 4.2.3-43 に示すように、一連の関係式を用いることにより、入手可能な情報とデータに応じて評価の対象となる照射ステンレス鋼の応力ひずみ関係式を推定可能である。

#### v) 応力ひずみ曲線との比較

上記で作成した応力ひずみ関係式と測定された応力ひずみ曲線を比較した。比較は応力ひずみ曲線が入手できた 4 種の材料で実施した。BWR 条件については JNES の IASCC プロジェクトにおいて JMTR 照射された 316LSS と 304SS であり、316LSS は 5.1 dpa、304SS は 1.3 dpa まで照射されている。照射温度と試験温度は 288℃ 付近である。PWR 条件については原子力安全基盤機構の IASCC プロジェクトで試験された冷間加工 316SS 製のシングルチューブとバップルフォーマボルトであり、シングルチューブは 8 dpa まで、ボルトは約 5 dpa のデータで、試験温度は 340℃ である。これらのデータはホットセル内の引張試験機で取得されており、荷重とクロスヘッド変位の測定データであり、公称応力公称ひずみ曲線のデータである。

まず公称応力( $s$ )と公称ひずみ( $e$ )のデータを真応力( $\sigma$ )と真ひずみ( $\epsilon$ )のデータへ以下の式で換算した。

$$\epsilon = \ln(1 + e)$$

$$\sigma = s \cdot \exp(\epsilon) = s(1 + e)$$

$$e = d - d_y + 0.002$$

$d$  はプルロッドの相対変位、 $d_y$  は耐力相当のプルロッドの相対変位である。

これらの測定による公称応力公称ひずみ曲線と換算した真ひずみ真応力曲線を、前章で述べた応力ひずみ関係式で計算した曲線を比較した。計算は以下の4つの場合を行った。

- ・各真応力真ひずみデータに Swift 式を直接当てはめて得られた応力ひずみ関係式
- ・耐力と引張強さの測定値から作成した応力ひずみ関係式
- ・耐力の測定値から作成した応力ひずみ関係式
- ・材料と照射量から作成した応力ひずみ関係式

BWR 条件について、図 4.2.3-44 に 316LSS での比較、図 4.2.3-45 に 304SS での比較を示す。また、PWR 条件の冷間加工 316SS について、図 4.2.3-46 にシンプルチューブでの比較、図 4.2.3-47 にバップルフォーマボルトでの比較を示す。耐力の評価値に 80 MPa の標準偏差があるため、塑性領域の開始点がデータとは必ずしも一致しないが、塑性域の加工硬化の挙動はよく再現できていると判断される。今回提案した応力ひずみ関係では、対象材の耐力の推定が精度よくできれば応力ひずみ関係が精度よく作成できると考えられる。

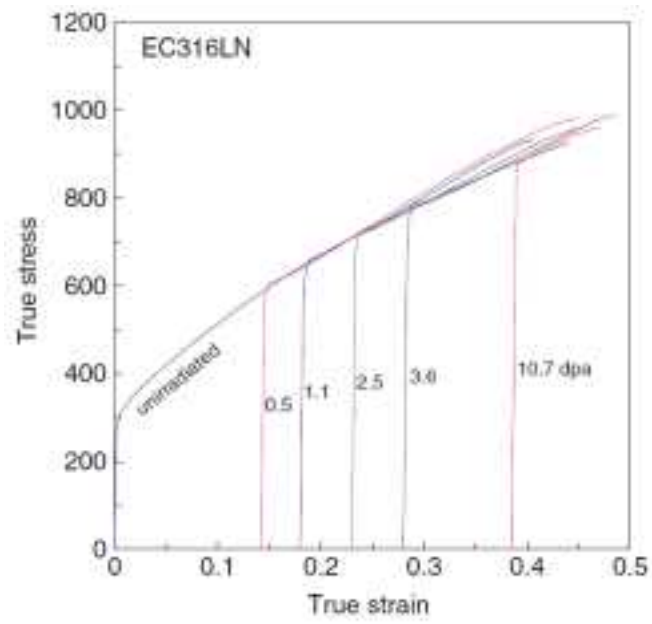


図 4.2.3-39 ステンレス鋼の応力ひずみ関係の照射による変化の例 4.2.3(4)-14

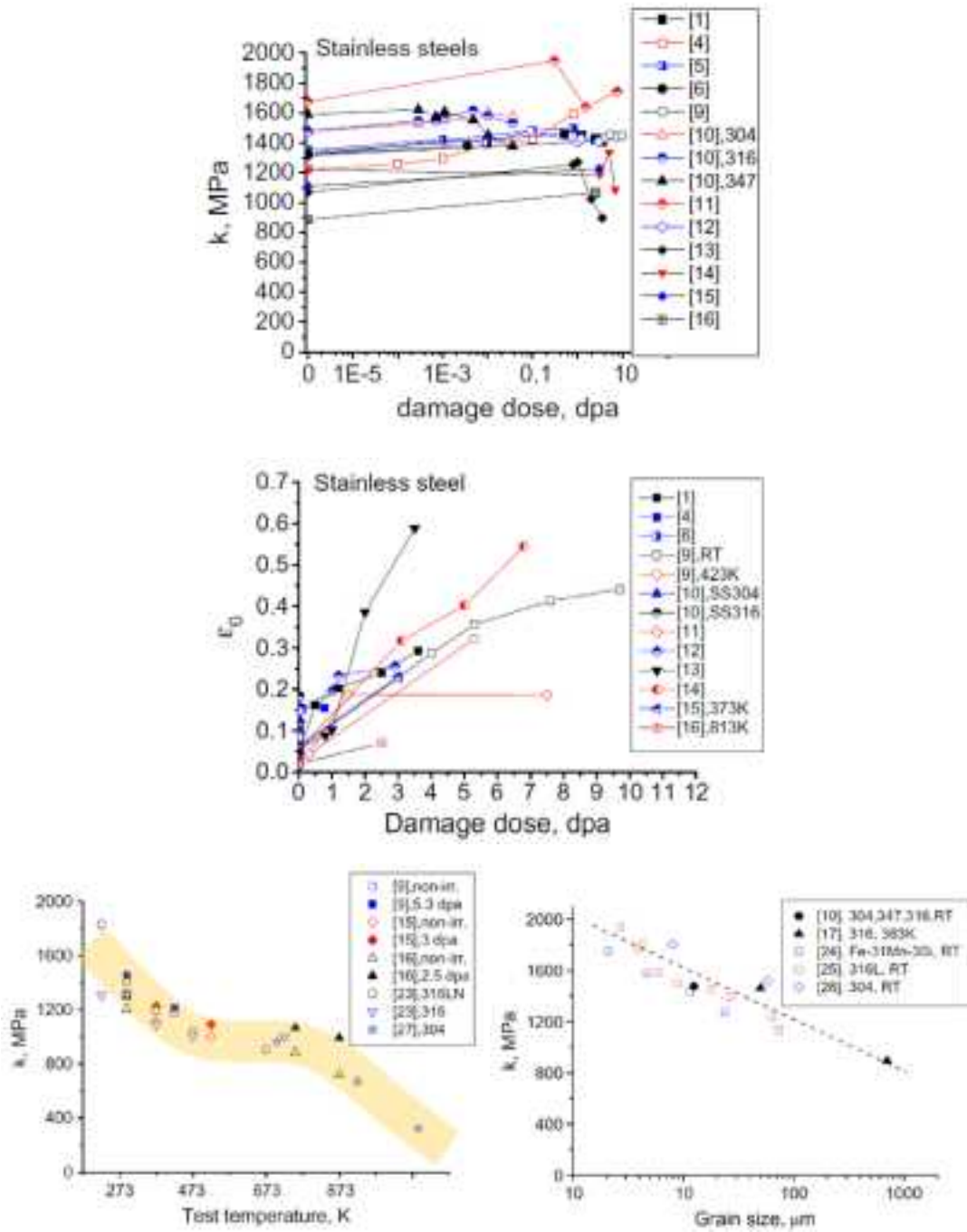
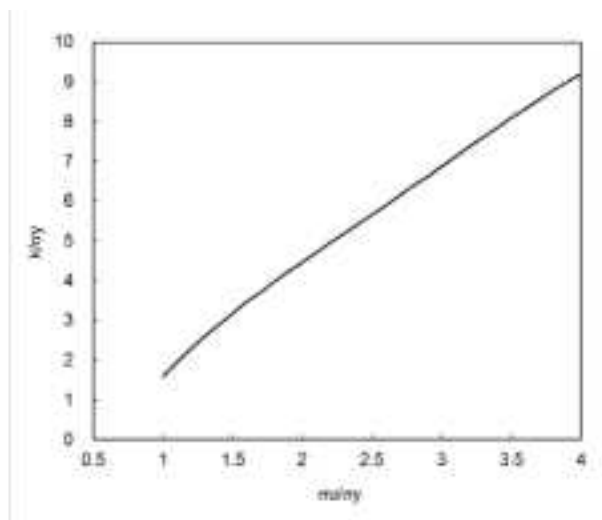


図 4.2.3-40 ステンレス鋼照射材に適用した Swift 式のパラメータの例 4.2.3(4)-12



$$k/S_y = -0.072 \cdot (S_u/S_y)^4 + 0.786 \cdot (S_u/S_y)^3 - 3.15 \cdot (S_u/S_y)^2 + 7.90 \cdot (S_u/S_y) - 3.87$$

図 4.2.3-41  $k/S_y$ と $S_u/S_y$ の関係

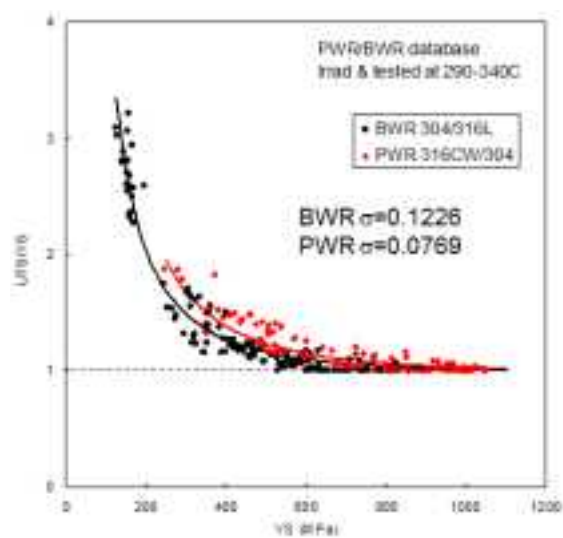


図 4.2.3-42 データから作成した耐力と応力比の関係

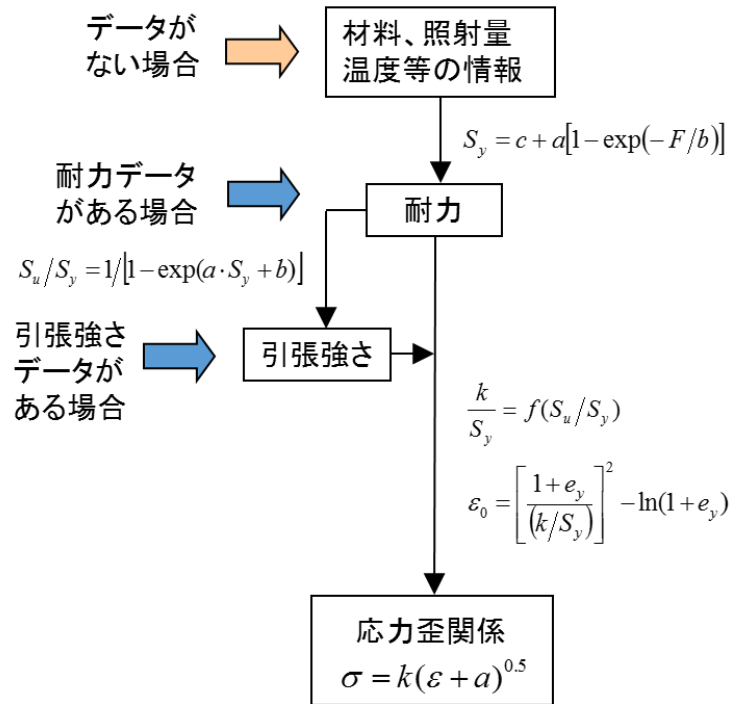


図 4.2.3-43 応力ひずみ関係式の導出のフロー

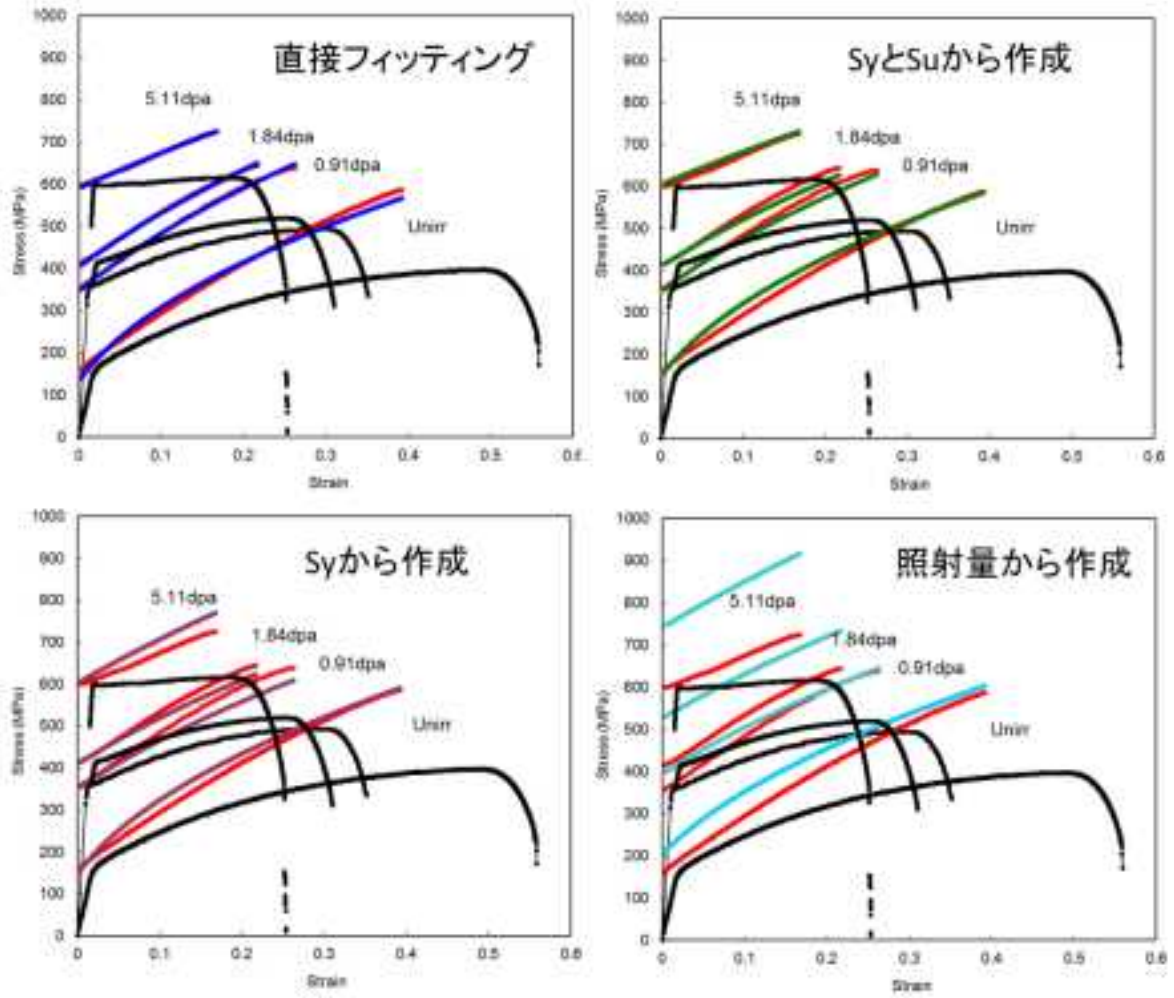


図 4.2.3-44 BWR 条件の 316LSS での応力ひずみ曲線の比較

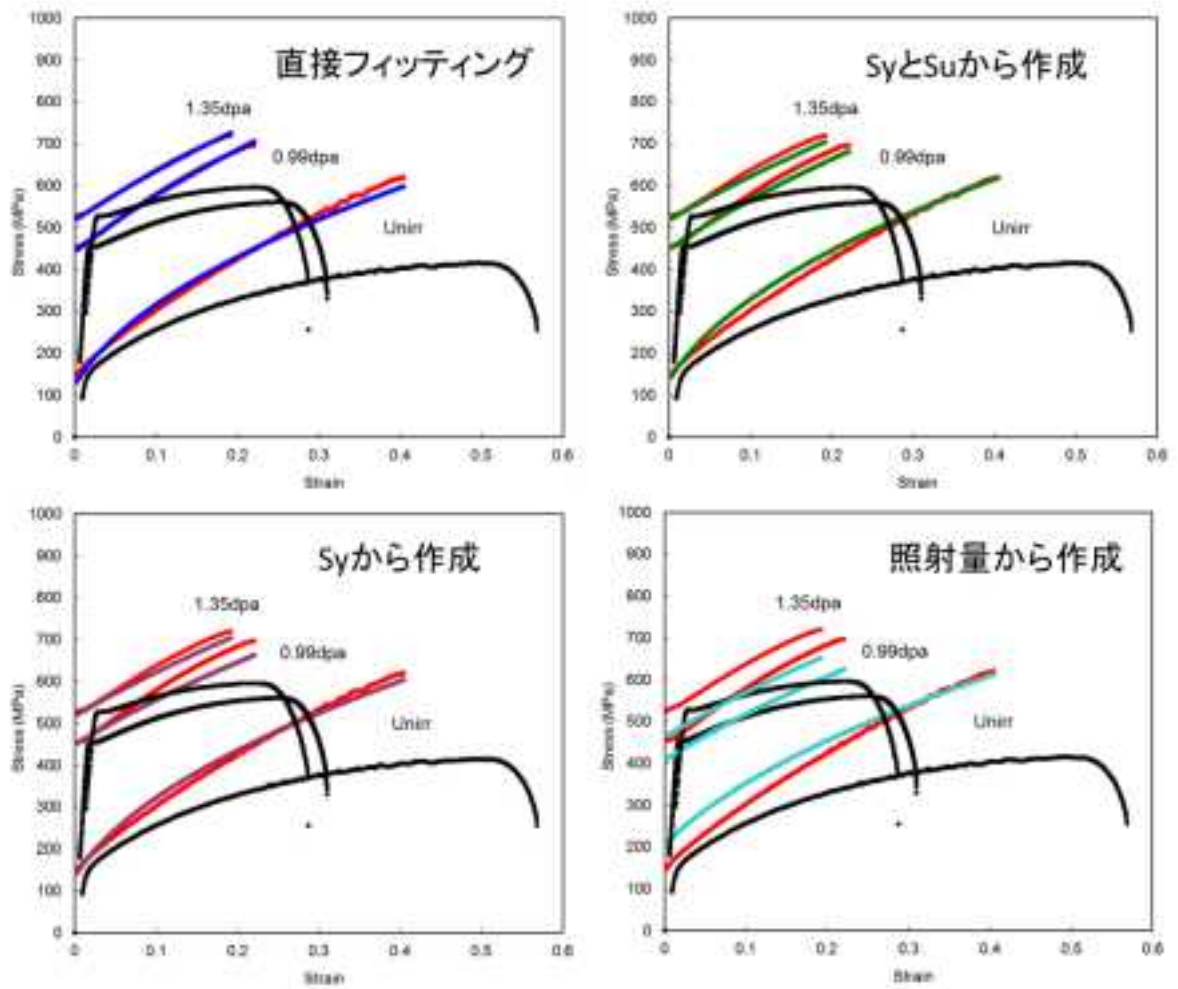


図 4.2.3-45 BWR 条件の 304SS での応力ひずみ曲線の比較



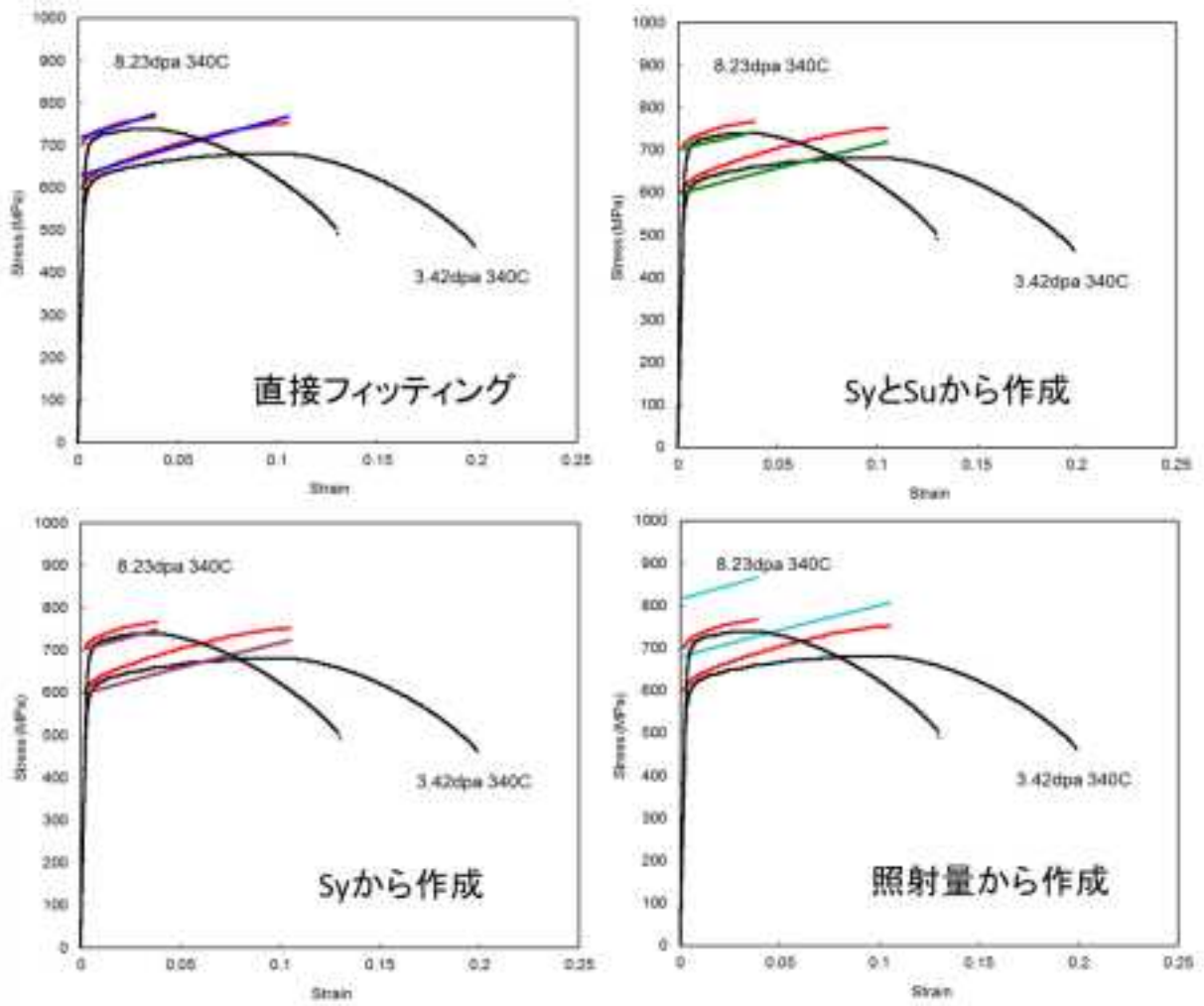


図 4.2.3-46 PWR 条件の冷間加工 316SS 製シンプルチューブでの  
応力ひずみ曲線の比較

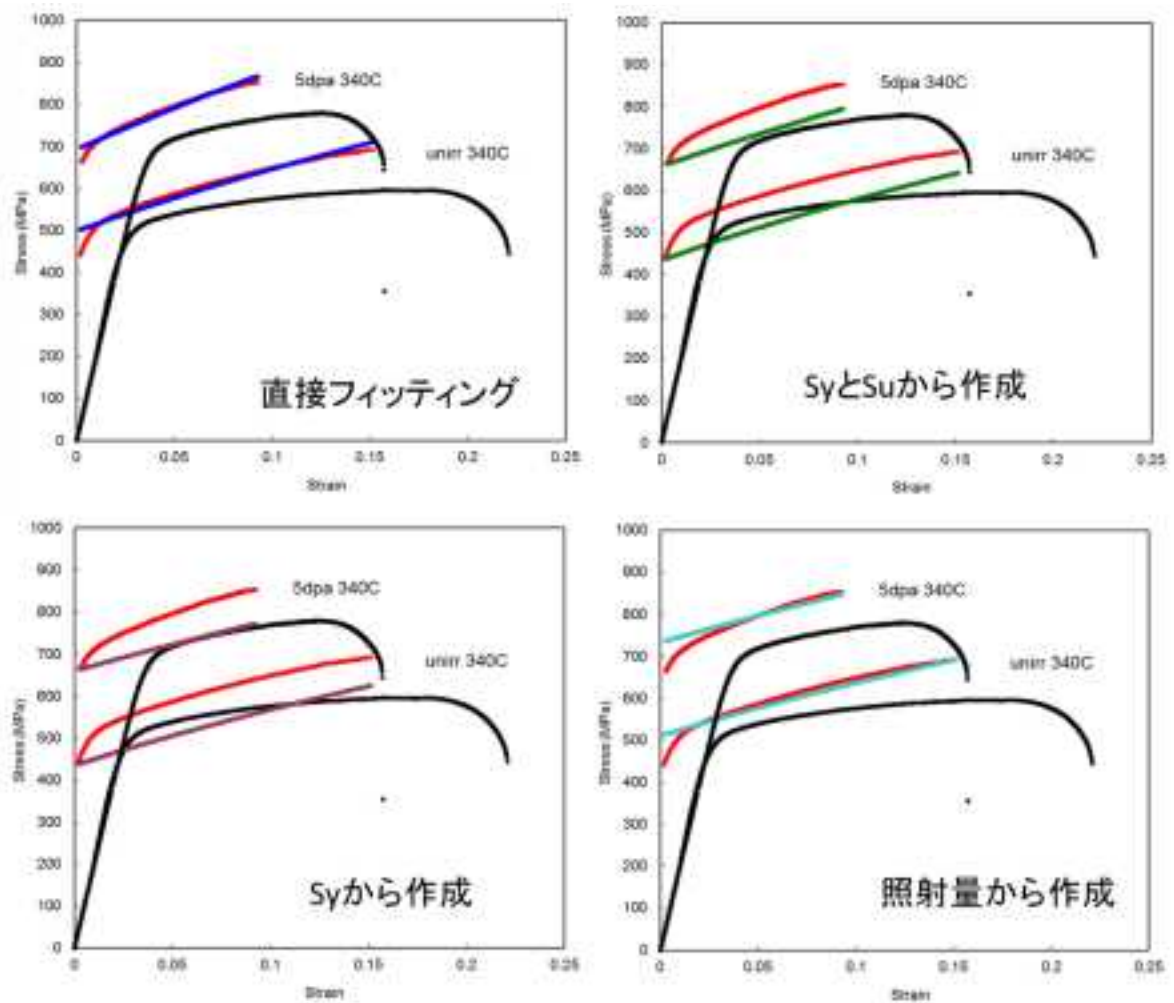


図 4.2.3-47 PWR 条件の冷間加工 316SS 製バッフルフォーマボルトでの  
応力ひずみ曲線の比較

### c.破壊靱性

#### ①破壊靱性値

破壊靱性については米国の NRC や EPRI で検討が行われている。破壊靱性は引張特性と類似の照射量依存性を示し、照射量の増加とともに減少しある照射量以上で飽和する傾向を示す。

Chopra らは図 4.2.3-48 に示すように、高速炉と軽水炉で照射された、照射温度が 90～427℃、試験温度が 250～427℃のデータを整理して、次の下限線を提案している 4.2.3(4)-17,18)。

$$J_{IC}(kJ/m^2) = 7.5 + 110 \cdot \exp[-0.35(dpa)^{1.4}]$$

この下限線は、靱性が低下するしきい照射量が 0.3～0.5 dpa、しきい以下の照射量での最小値が 118 kJ/m<sup>2</sup>、靱性値が飽和する照射量が 5 dpa、飽和の最小靱性値が 7.5 kJ/m<sup>2</sup>となっている。の下の図は鋳造材や溶接金属で、上の図はそれ以外の板材等であるが、いずれも下限性で包絡されている。

EPRI は同じ照射温度と試験温度範囲のデータベースに基づいて、図 4.2.3-49 に示すように評価用の下限線として次の式を設定している 4.2.3(4)-19~22)。

$$K_{JC}(MPa\sqrt{m}) = 180 - 142 \cdot [1 - \exp(-dpa)]$$

飽和の最小値は 38 MPa√m である。

WH も同様な検討から、下限値を同じとして飽和する照射量が 10 dpa 付近の別の式を報告している 4.2.3(4)-23)。

$$K_{JC}(MPa\sqrt{m}) = 38 + 175 \cdot \exp(-0.3 \cdot dpa)$$

図 4.2.3-50 には WH の傾向線とデータの関係を示す。

図 4.2.3-51 に前章で作成したデータシートのデータと上記の傾向線との関係を示す。破壊靱性値  $K(MPa\sqrt{m})$  と弾塑性破壊靱性値  $J(kJ/m^2)$  の関係は次の式で換算した。

$$K = [E \cdot J / (1 - \nu^2)]^{1/2}$$

E はヤング率で 193 GPa、 $\nu$  はポワソン比で 0.29 を用いた。

#### ②J-R曲線

延性き裂の進展抵抗を表しており、き裂進展量  $\Delta a$  と J の関係は一般には次式で表現さ

れる。

$$J = C \cdot (\Delta a)^n$$

C と n は材料、照射量等に依存する定数である。

Chopra らは  $J_{IC}$  の傾向式の場合と同様なデータで検討を行い、図 4.2.3-52 に示すように C について次のようなデータの下限線を報告している 4.2.3(4)-17)。

$$C = 25 + 175 \cdot \exp[-0.35(dpa)^{1.4}]$$

n については、未照射材では 0.35~0.70 の範囲、照射材では 0.16~0.65 の範囲であり、中央値である 0.37 を提案している。

EPRI は同じ照射温度と試験温度範囲のデータベースに基づいて、図 4.2.3-53 に示すように C と n についての以下の式を設定している 4.2.3(4)-19~22)。

$$C = [1217.9 \times 6.697 \times 10^{10} + 0.3908 \cdot F^{0.5563}] / [6.697 \times 10^{10} + F^{0.5563}]$$
$$n = 1 / [4.962 - 0.02439 \cdot F^{0.09976}]$$

F は照射量で単位は  $n/cm^2$  ( $E > 1$  MeV) である。適用範囲は最大  $3 \sim 3.3 \times 10^{21}$   $n/cm^2$  (約 5 dpa) であり、この照射量以下での弾塑性破壊力学評価に使用するとしている。図 4.2.3-54 にはこの式による J-R 曲線の計算値と元となったデータを示す。

### ③機構論的なモデル式

き裂先端近傍のマイクロメカニクスに基づいて、材料の破壊抵抗を降伏応力や流動応力や延性と関連づける試みは多く提案されている。

照射を受けたステンレス鋼については、Wolfer と Jones によるレビュー 4.2.3(4)-24) で破壊靱性と機械的性質の関係が調べられており、一様な塑性変形が起こるような条件では、Krafft のモデル 4.2.3(4)-25) が 20% 冷間加工 316SS の照射材の傾向を表すことができるとしている。Hamilton らは Krafft のモデルを改良して、次のような修正 Krafft モデルを提案している 4.2.3(4)-26,27)。

$$K_{IC} = \frac{\sigma_y}{(1-2\nu)} \left[ \pi(1+n)d^*(\epsilon_f E / \sigma_y)^{1+n} \right]^{1/2}$$

$\sigma_y$  は耐力、 $\epsilon_f$  は真破断ひずみ、E はヤング率、 $\nu$  はポワソン比、n はひずみ硬化指数、 $d^*$  は破壊のプロセスゾーンのサイズである。ひずみ硬化指数は次の式で与えられ、

$$N = \ln(\sigma_u/\sigma_y)/\ln(E\varepsilon_u/\sigma_y)$$

$\sigma_u$  と  $\varepsilon_u$  は真引張強さと真一様ひずみであり、 $n$  の値は小さく 0.03 程度の値である。 $d^*$  はディンプル間隔のようなデータがない場合は、平均粒径が使用できるとしている。図 4.2.3-55 に示すように、370~380°C で照射された 20% 冷間加工 316SS では測定値と予測値は良く合っているとされている。

照射量が高い場合など転位チャンネルによる局所変形が顕著になると、上記とは別の扱いが必要となるとされる。Odette と Lucas らは照射ステンレス鋼の変形と破壊についての一連の検討を行っている 4.2.3(4)-28~30)。き裂が進展するための先端の応力ひずみ条件として次の一般式を示している。

$$K_{Jc} \sim C_1 \sqrt{E' \epsilon^* l^* \sigma_0} \sim C_2 \sqrt{E' \delta^* \sigma_0}$$

$E'$  は平面ひずみ弾性係数、 $\epsilon^*$  は臨界局所破壊ひずみ、 $l^*$  は臨界のマイクロ組織距離、 $\sigma_0$  は流動応力、 $\delta^*$  は臨界き裂先端開口量である。

さらに、照射材と未照射材の特性から次式

$$\epsilon_{irr}^*/\epsilon_{unirr}^* = e_{u}^{irr}/e_{u}^{unirr}$$

を仮定し、 $C_1$  と  $l$  は照射に影響されないとして、照射材と未照射材の  $K_{Jc}$  の比を、流動応力と一様伸びの比として、

$$K_{Jc}^{irr} = K_{Jc}^{unirr} \sqrt{\frac{e_u^{irr} \sigma_0^{irr}}{e_u^{unirr} \sigma_0^{unirr}}}$$

という関係を示した。図 4.2.3-56 は 230~430°C の範囲の照射温度と試験温度のデータとこのモデルでの傾向を比較しており、傾向をよく再現しているとしている。

Nishimura らは、軽水炉で照射されたステンレス鋼の延性破壊についてボイド合体型の破壊機構に基づいて検討を行い、次のような破断ひずみ  $\bar{\epsilon}_f$  の経験式と破壊靱性  $J_{Ic}$  の式を提案している 4.2.3(4)-30)。

$$\bar{\epsilon}_f = A \cdot \ln[\gamma + \delta\{1 - \exp(-\beta F)\}]^{-1/2}$$

$\gamma$ 、 $\delta$ 、 $\beta$  はフィッティング定数で、 $A$  は単軸状態では加工硬化率  $n$  により次式で表され

る。

$$A = (1 - n) / \sinh\{\sqrt{3}(1 - n)/2\}$$

破壊靱性値は上記の破断伸び $\bar{\epsilon}_f$ と流動応力 $\sigma_{flow}$ を用いて

$$J_{IC} = m'[\sigma_{flow} + A_1 F^n] \cdot \bar{\epsilon}_f$$

という式を提案している。図 4.2.3-57 は EBR-II で照射されたステンレス鋼のデータについて、照射材と未照射材の  $J_{IC}$  の比で整理した計算値とデータの比較であり、照射による減少傾向が示されている。

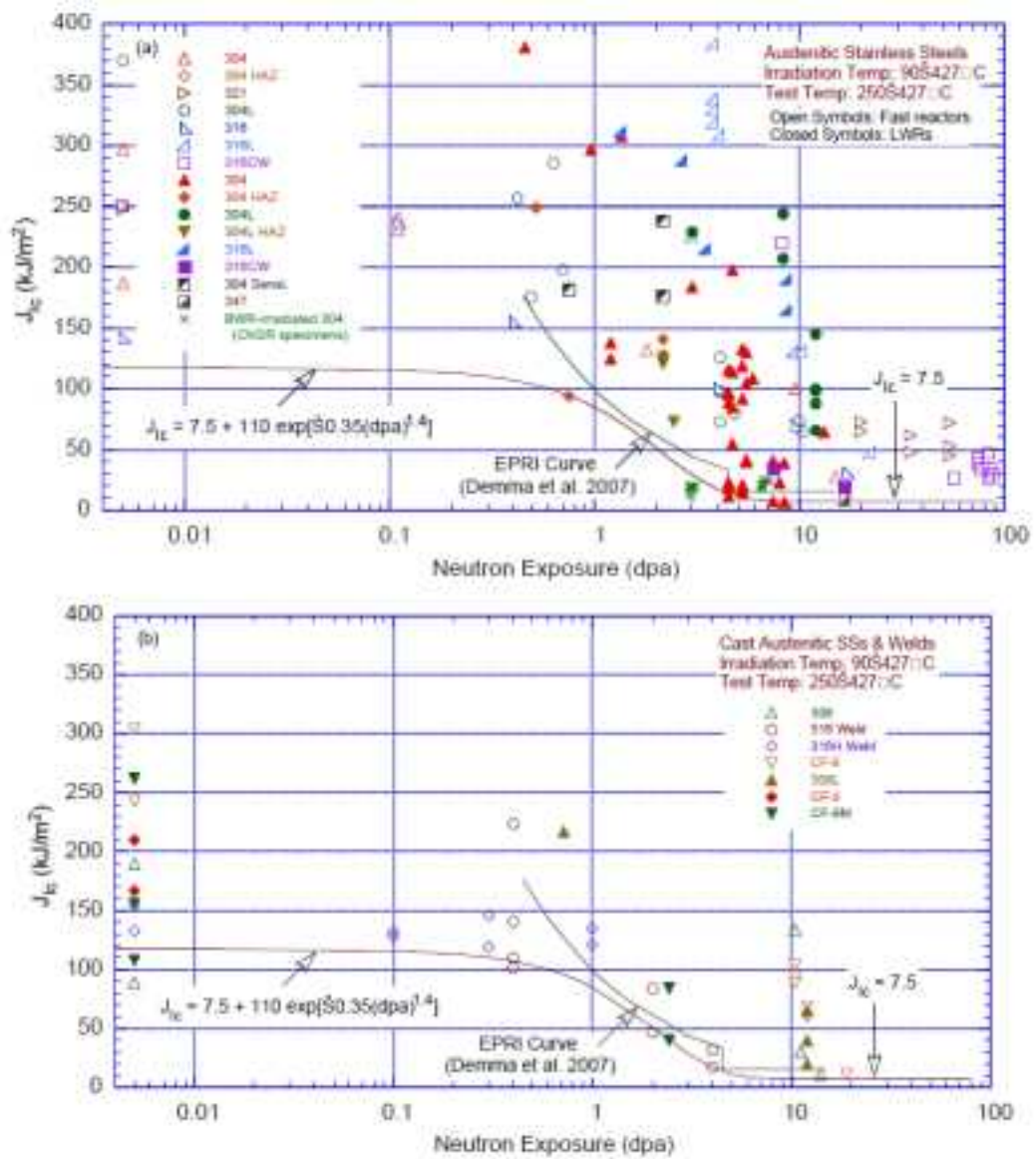


図 4.2.3-48 Chopra らによる破壊靱性データと下限線 4.2.3(4)-17

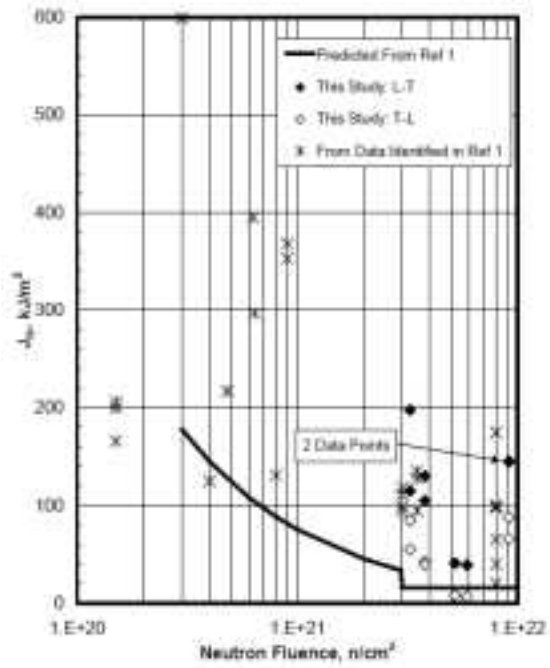


図 4.2.3-49 EPRI の破壊靱性値の下限線 4.2.3(4)-21)

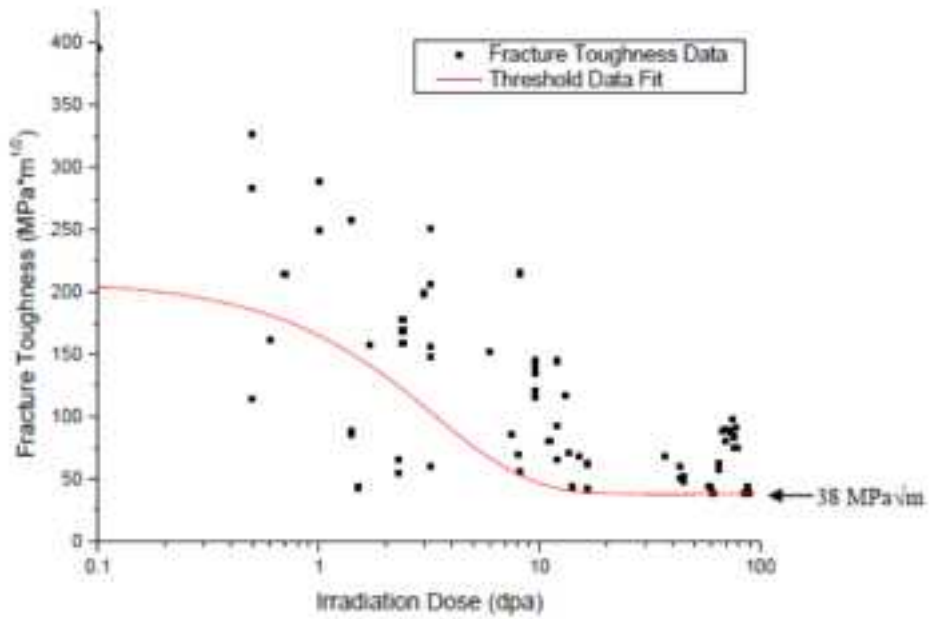


図 4.2.3-50 WH の破壊靱性値の下限線 4.2.3(4)-23)



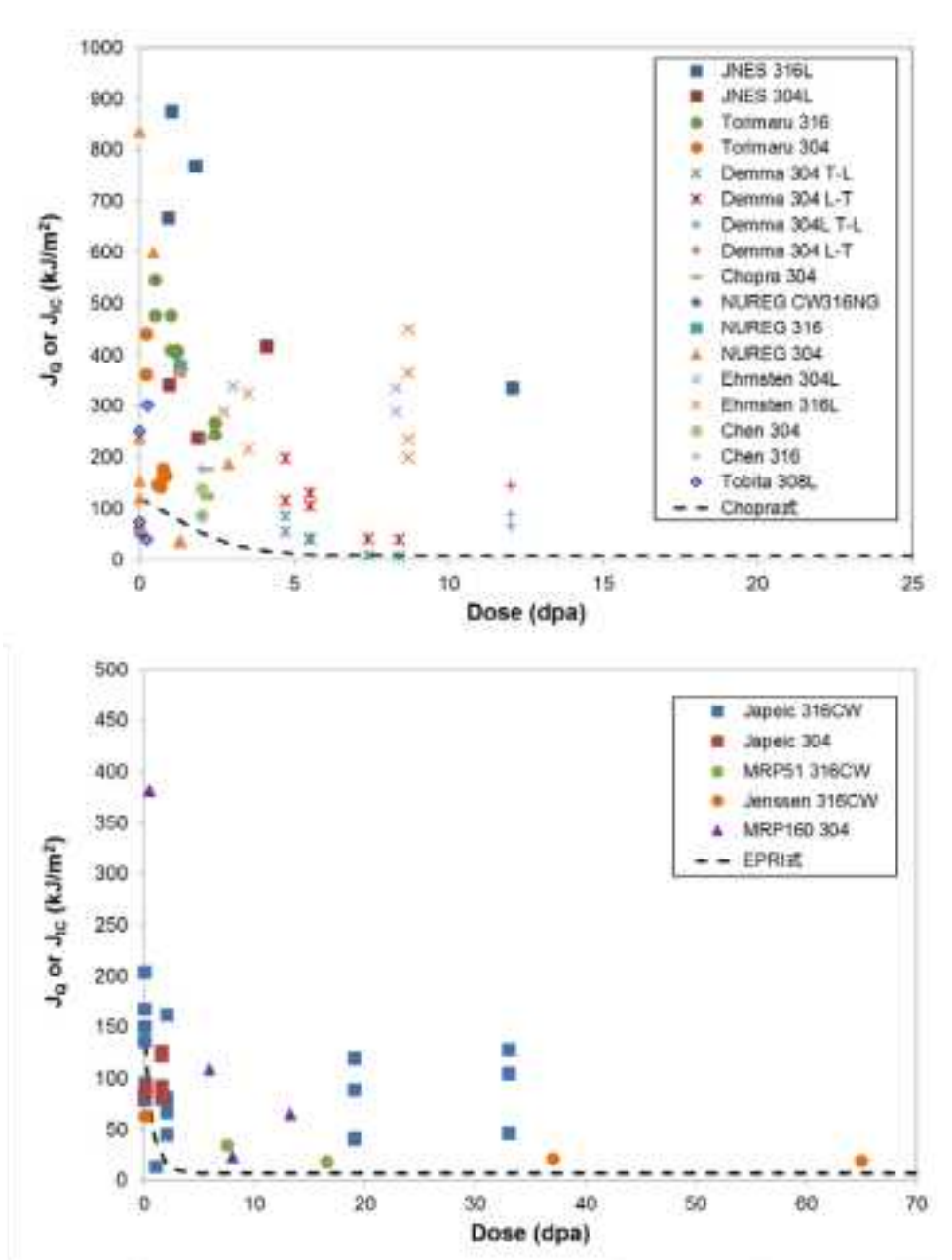


図 4.2.3-51 破壊靱性データと既存の相関式による傾向  
(上：BWR 分野、下：PWR 分野)

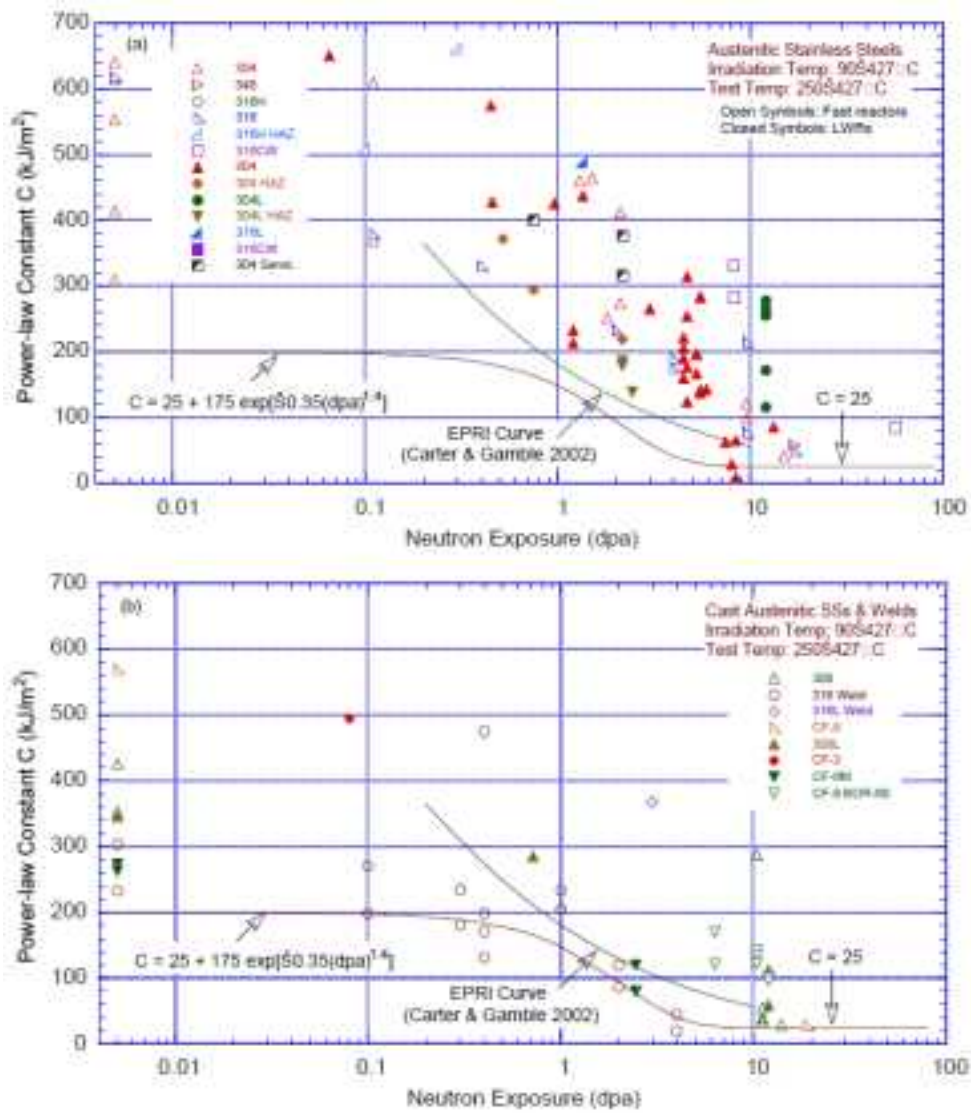


図 4.2.3-52 Chopra らによる J-R 曲線( $J = C \cdot (\Delta a)^n$ )の係数  $C$  とその下限線 4.2.3(4)・17

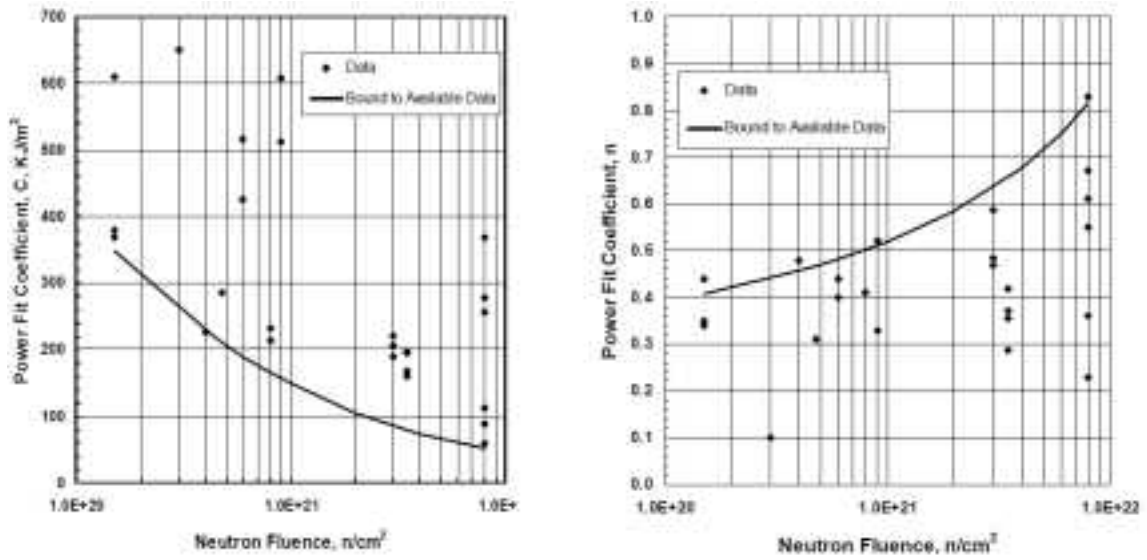


図 4.2.3-53 EPRI による J-R 曲線( $J = C \cdot (\Delta a)^n$ )の定数 C と n とその限界線 4.2.3(4)-20

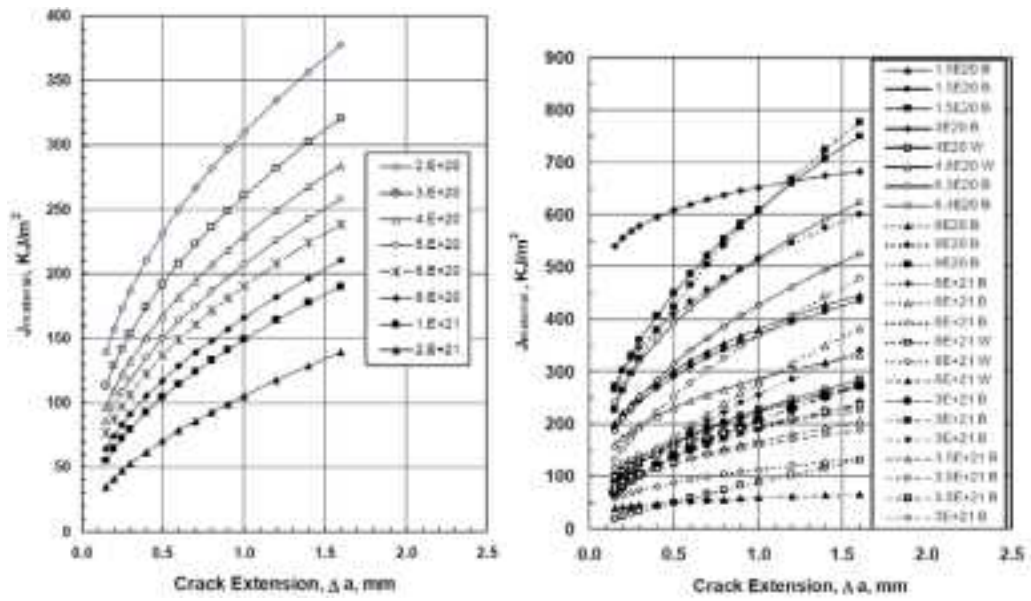


図 4.2.3-54 EPRI の傾向式による J-R 曲線(左)と元となったデータ(右)4.2.3(4)-20

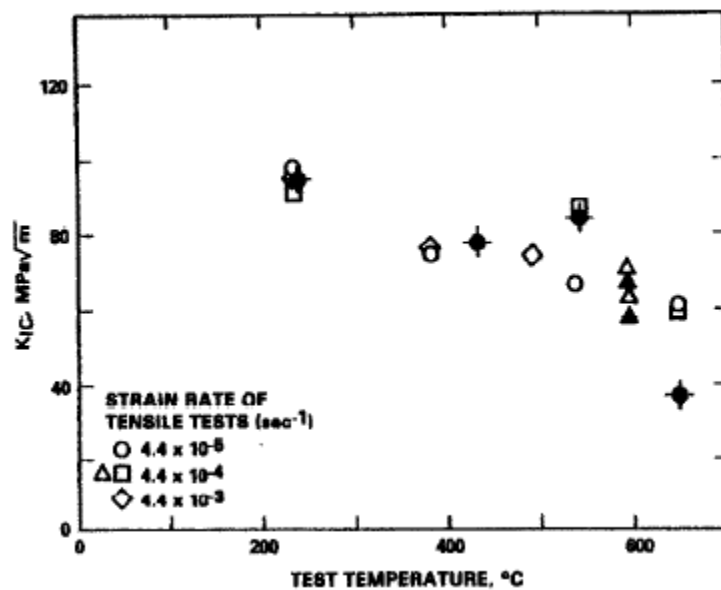


図 4.2.3-55 修正 Krafft モデルによる 20%冷間加工 316SS 照射材の破壊靱性の  
 予測値(白点)と測定値(黒点)の比較 4.2.3(4)-26

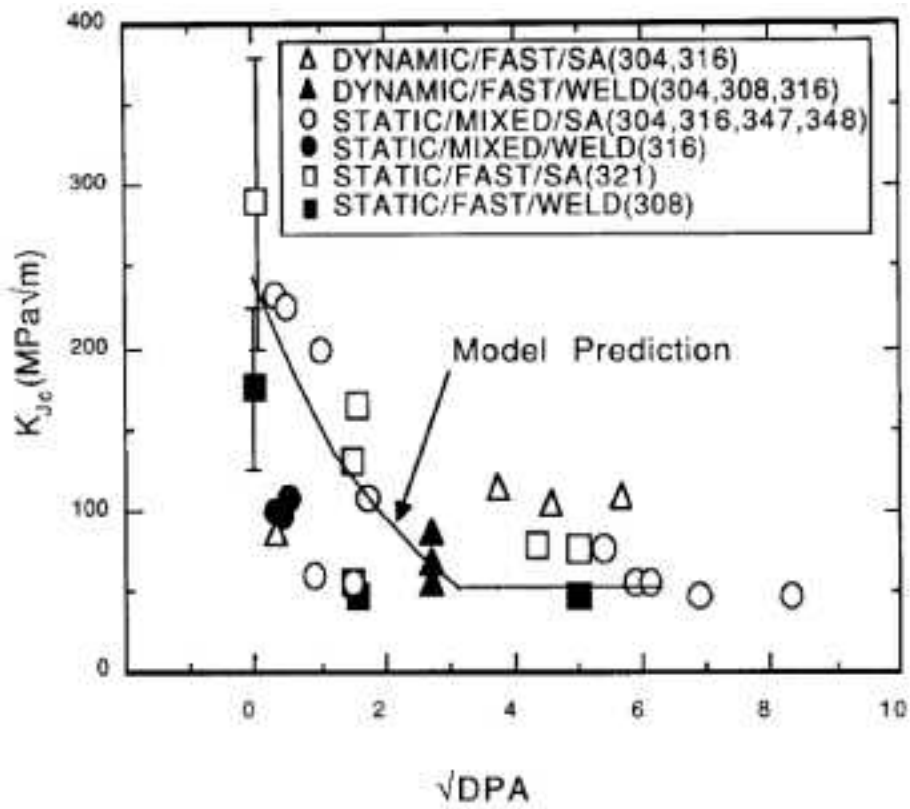


図 4.2.3-56 Odette らのモデルによる 300 シリーズのステンレス鋼の破壊靱性のデータと予測傾向 4.2.3(4)-28)

Material	Irradiation temp. K	Fluence n/m <sup>2</sup> (E>0.1MeV)	Test temp. K	J <sub>IC</sub> kJ/m <sup>2</sup>	J <sub>IC,ir</sub> /J <sub>IC,0</sub>	Reference
Type 316	-	0	700	448	1.00	Mills, W.J [19]
	673-700	4.0-6.0E+26	700	31	0.07	
Type 304	-	0	700	1070	1.00	
	673-700	5.00E+26	700	28	0.03	
Type 308 weld metal	-	0	700	89	1.00	Dufresne, J., et al. [21]
	673-700	5.00E+26	700	11	0.12	
AISI 304	-	0	673	184	1.00	
	673-702	8.22E+26	673	135	0.73	
AISI 304 weld metal	-	0	673	80	1.00	
	673-702	8.18E+25	673	11	0.14	
AISI 316L	-	0	673	86	1.00	
	673-702	6.31E+25	673	114	1.32	
AISI 316L weld metal	-	0	673	56	1.00	Michel, D.J. et al. [20]
	673-702	7.51E+25	673	15	0.27	
20% cold worked Type 316	-	0	700	250	1.00	
	700	1.60E+26	700	220	0.88	
Type 308 weld metal	-	0	700	190	1.00	
	700	2.00E+26	700	30	0.16	

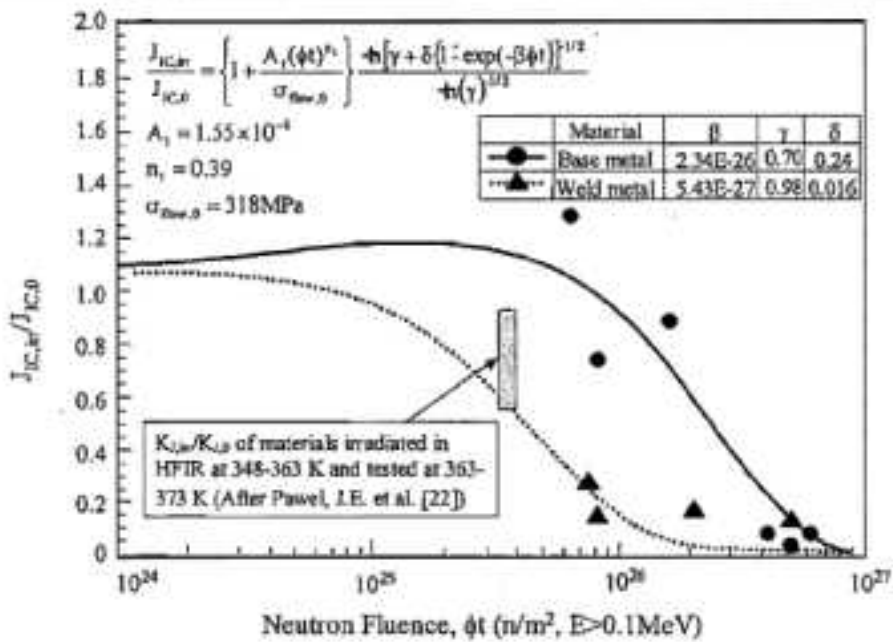


図 4.2.3-57 Nishimura らのモデルによる照射ステンレス鋼の破壊靱性(照射材と未照射材の比)のデータと予測傾向 4.2.3(4)-30

#### d. IASCC発生

IASCC 発生の評価は、PWR 炉内構造物の健全性評価におけるボルトでのき裂発生において不可欠であるため、IASCC 発生試験とデータに基づく検討が広く行われている。IASCC 発生試験は、照射後試験として照射材に PWR 一次系模擬水中で応力を負荷して破断の有無と破断までの時間を調べる方法で行われており、照射量、負荷応力、水質がパラメータである。一般には、照射量に対して IASCC が発生する下限の応力(しきい応力とも呼ばれる)の傾向、あるいは、ある照射量とある負荷応力で発生するまでの時間の傾向が示されている。

Takakura らは、原子力安全基盤機構の IASCC プロジェクトで得られたシンプルチューブとボルトの定荷重試験データを主としたデータベースに基づき、図 4.2.3-58 に示すような下限線を提案している 4.2.3(4)-31)。具体的な関数式は示されていない。シンプルチューブとボルトは異なる傾向があり、高照射量側の下限線がシンプルチューブは 400 MPa 付近、ボルトは 600 MPa 付近と別々に設定されている。いずれも冷間加工 316SS であるが、材料条件と照射条件に多くの異なる点があり、結晶粒径とそれによる局所変形の違い、表面硬化層の有無(ボルトでは表面層除去、シンプルチューブは硬化層有)が影響していると考えられている。これらの傾向線は、原子力安全推進協会の PWR 炉内構造物点検ガイドライン[バップルフォーマボルト](第 2 版)で暫定として引用されている 4.2.3(4)-32)。

Nishioka らは、シンプルチューブ材の引張試験片による単軸定荷重のデータを主とするデータから、図 4.2.3-59 に示すような下限線を示している 4.2.3(4)-33)。400 MPa 付近の飽和傾向線となっている。

EPRI はシンプルチューブを用いて多数のデータを取得しており、Pathania らにより報告された下限線を図 4.2.3-60 に示す 4.2.3(4)-34)。耐力比で表した下限線は、5 dpa まで 100%、20 dpa で 50%まで低下し、20 dpa より高い照射量では 50%で一定としている。50%の下限線は Nishioka らのデータで引かれていると考えられる。EPRI は炉内構造物評価のしきい値を検討しており、IASCC については図 4.2.3-61 に示すように

$$\text{Stress}(MPa) = -158.4 \cdot \ln(dpa) + 789.65$$

というスクリーニングレベルを提案している 4.2.3(4)-35)。

Freyer らは、米国の Beaver Valley 炉と H.B.Robinson 炉、スウェーデンの Ringhals 炉のシンプルチューブで得られた O リング試験に基づき、図 4.2.3-62 に示すような IASCC の応力しきい値を提案している 4.2.3(4)-36)。そのしきい値は耐力比で表して、約 12 dpa の 100%から約 25 dpa で 62%に低下し、25 dpa 以上では 62%で一定としている。ANL の Chopra らは、図 4.2.3-63 に示すような公開データに基づく整理と下限線を示しており、10 dpa 以上で耐力比 50%としている 4.2.3(4)-17,37)。なお、図 4.2.3-63 は、

Pathania らによる図 4.2.3-60 とほとんど同じデータとなっている。

フランスの EDF は Chooz A 炉の 304SS 製バッフル板について定荷重 SCC を VTT で行っており、Pokor らは図 4.2.3-64 に示すような下限線を報告している 4.2.3(4)-38)。下限線は、通常の PWR 一次系水質では約 10 dpa 以上で 450 MPa であり、高 Li の水質 (3.5ppm Li、通常水質は 2.1ppm Li) では 350 MPa としており、高 Li で低下している。また、EDF は PWR 炉内構造物評価用の工学的評価式を検討しており 4.2.3(4)-39)、IASCC 発生については、図 4.2.3-65 に示すように耐力比と照射量について感受性領域の下限を提案している。照射量 dpa の関数として耐力比 $\sigma/\sigma_y$ の具体的な式が次のように与えられている。高照射量側でも飽和しない式となっている。

$$\begin{aligned} 4 \text{ dpa 以下} : & \quad \sigma/\sigma_y = 1 \\ 4 \text{ dpa} \sim 25 \text{ dpa} : & \quad \sigma/\sigma_y = 1.095 - 0.024 \cdot \text{dpa} \\ 25 \text{ dpa 以上} : & \quad \sigma/\sigma_y = 0.545 - 0.0025 \cdot \text{dpa} \end{aligned}$$

Bosch らはベルギーの Tihange 2 号炉のシングルチューブの O リング試験片の定荷重試験を行い、図 4.2.3-66 に示すような下限線を提案している 4.2.3(4)-40)。この図で青の点線は上記の図 4.2.3-65 に示した EDF の下限式である。Bosch らは、下限は耐力比で約 40%であり照射量による低下傾向は未確定であるとしている。

以上述べた下限線はいずれも低荷重試験のデータに基づく単純な傾向線である。PWR 実機から取り出されたシングルチューブやボルト(冷間加工 316SS)や機器部材(304SS)の試験データであり、試験条件は温度が 320~340°C、水質が 2ppmLi、500~1200ppmB で、試験時間は 600 から 4000 時間である。材料や試験条件の違いを考慮した傾向線はほとんど知られていない。物理的な機構を考慮したモデルの検討例は少ないが、2 件報告されている。

Fukuya らは、PWR での IASCC しきい応力( $\sigma_{IASCC}$ )は、表面硬化層も含めた実効的耐力( $\sigma_y^{eff}$ )と粒界 Cr 濃度( $C_{Cr}$ )で決まるとして、データの下限に合わせた次のような半経験式を提案している 4.2.3(4)-7)。

$$\sigma_{IASCC} = (1000 - 3.6 \cdot \sigma_y^{eff}) \cdot (0.26 \cdot C_{Cr} - 1.66)$$

このモデルでは、耐力と粒界 Cr 濃度は、反応速度論モデルで照射温度と中性子束を考慮して詳細に計算する方法と、温度と中性子束を変数とした簡易式を使用する方法が提案されている。図 4.2.3-67 に示すよう、シングルチューブとボルトについて、照射条件(温度と中性子束)や表面硬化層の有無を反映した異なる下限線が得られている。

Fedorova らは、IASCC の発生応力を粒界すべりによるクリープ破断応力としてモデル化し、データの下限線に合わせて次の式を提案している 4.2.3(4)-41)。



$$\sigma_{th}^{IASC} = 415 \cdot \exp[-0.0256 \cdot (dpa - 3)] + 217$$

図 4.2.3-68 に示すように、高照射量側で低下が継続する傾向線となっている。

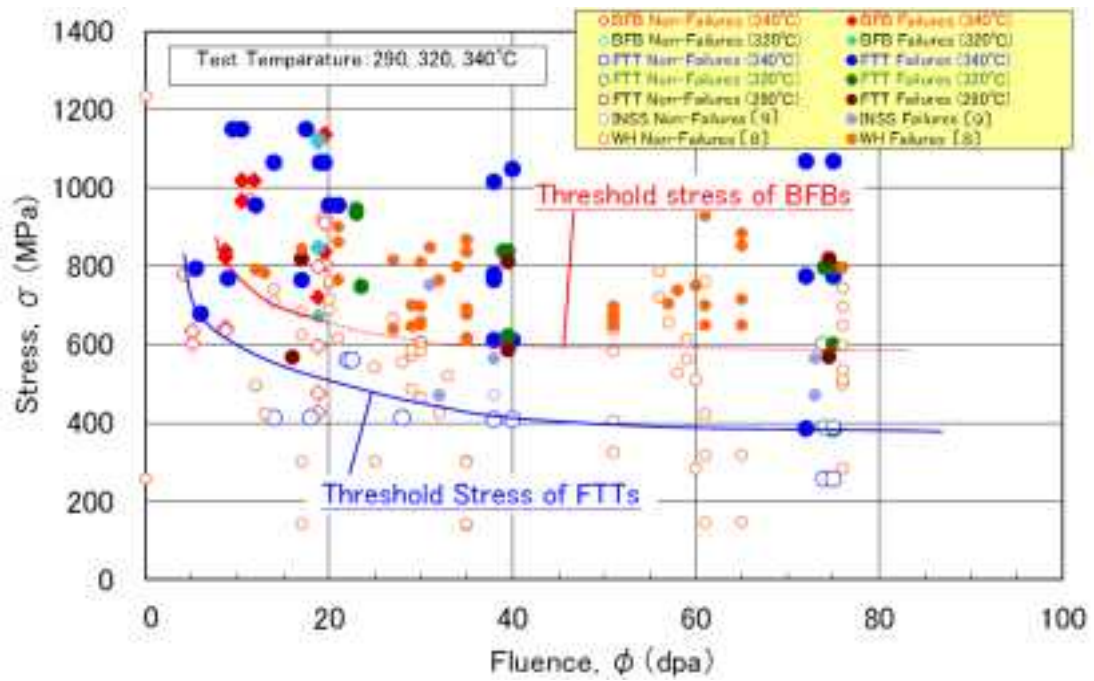


図 4.2.3-58 Takakura らによる PWR での IASCC 発生の下限傾向線 4.2.3(4)-31

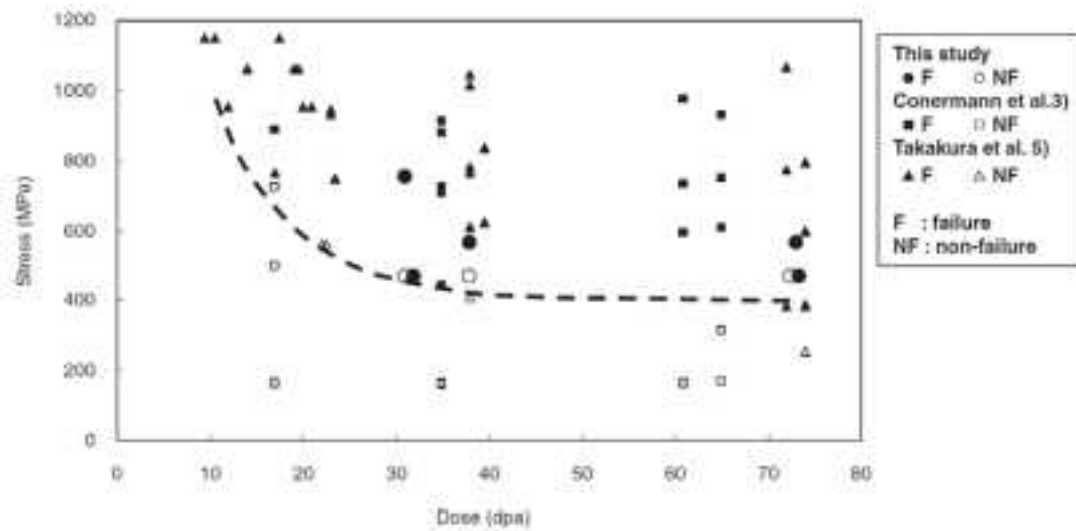


図 4.2.3-59 Nishioka らによる PWR での IASCC 発生の下限傾向線 4.2.3(4)-33

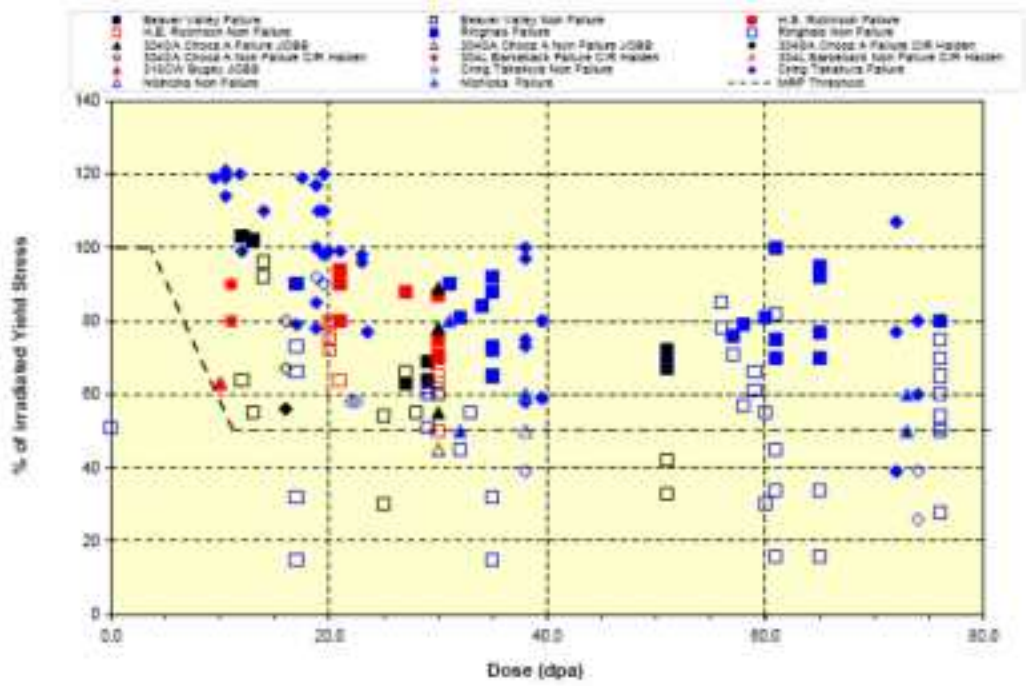


図 4.2.3-60 EPRI の Pathania らによる PWR での IASCC 発生の下限傾向線 4.2.3(4)-34

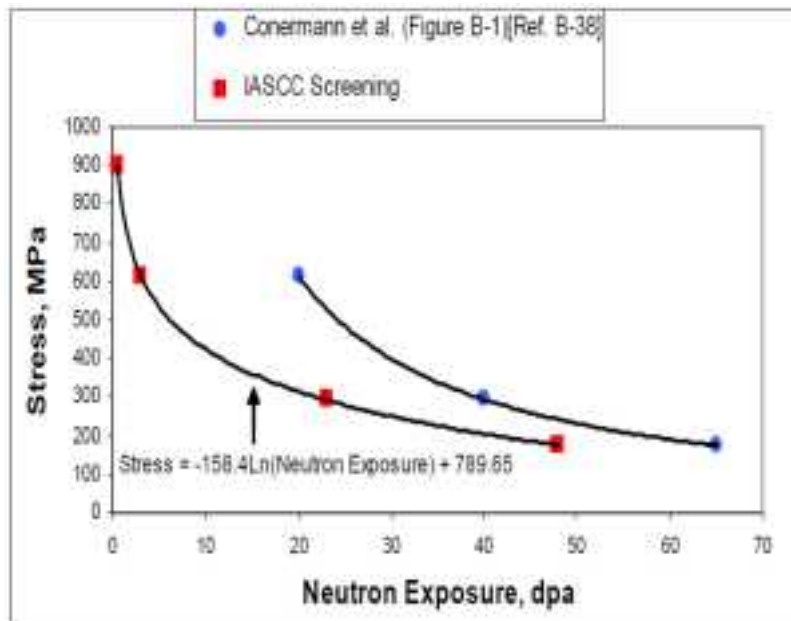


図 4.2.3-61 EPRI による IASCC スクリーニングレベル 4.2.3(4)-35

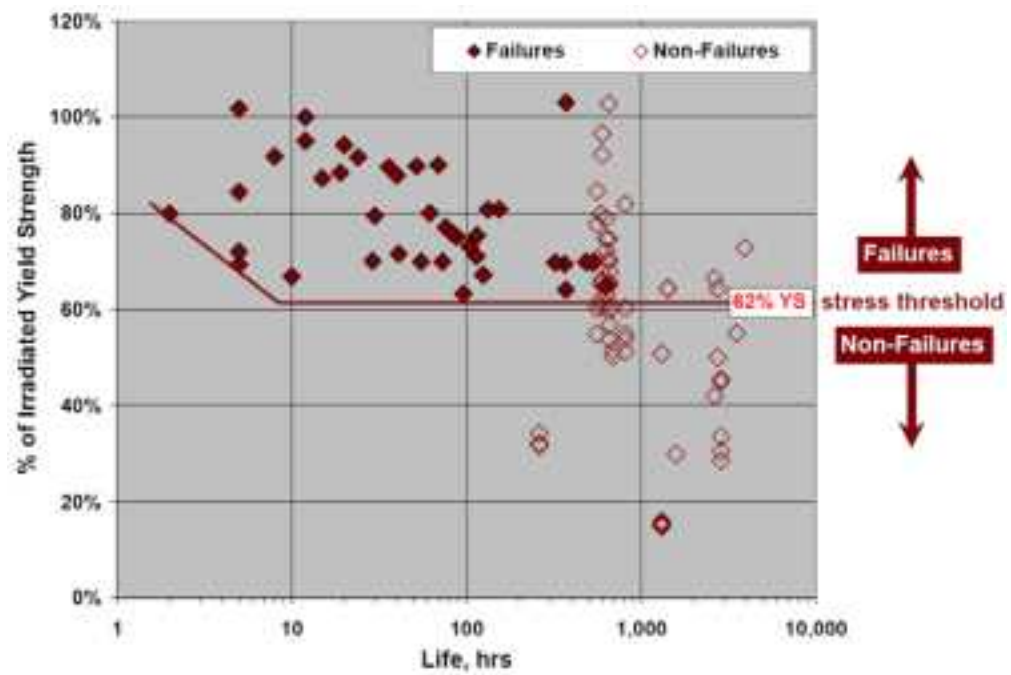
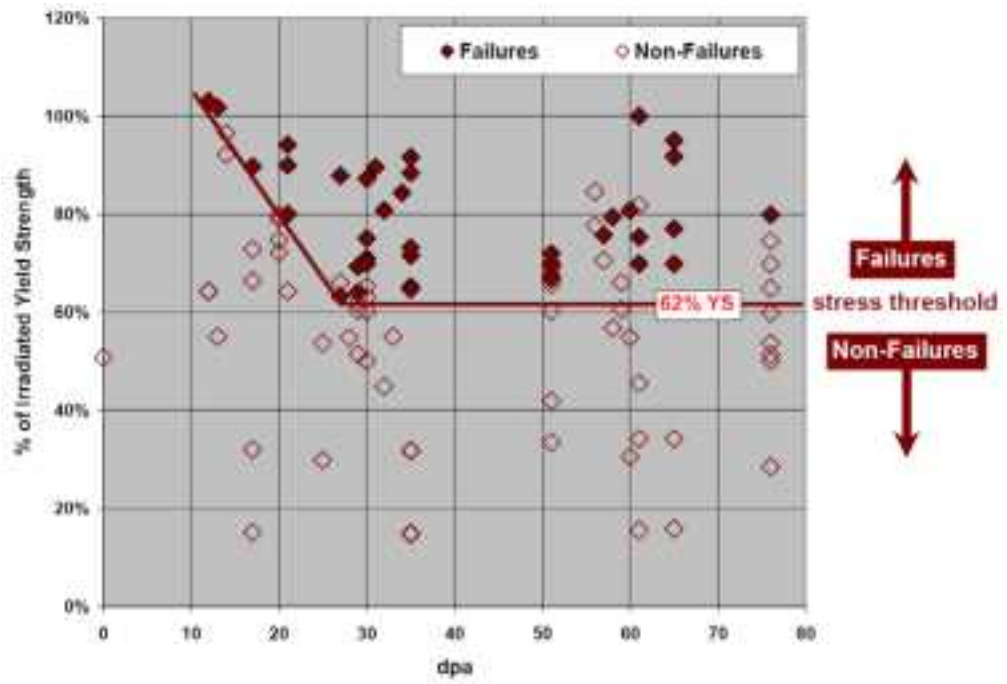


図 4.2.3-62 Freyer らによる PWR での IASCC 発生の下限傾向線 4.2.3(4)-36

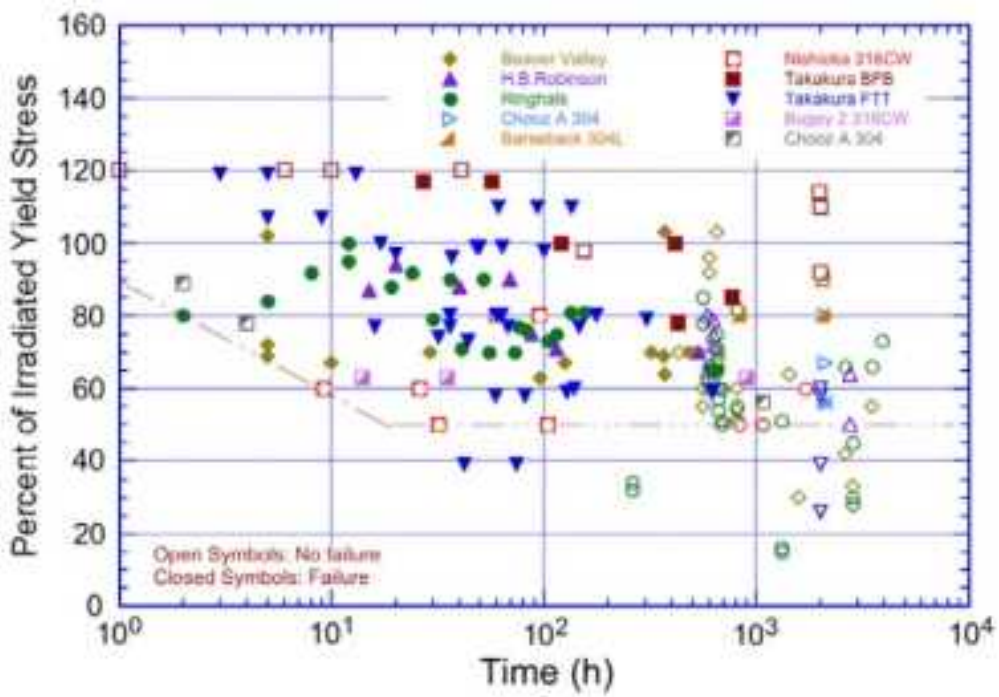
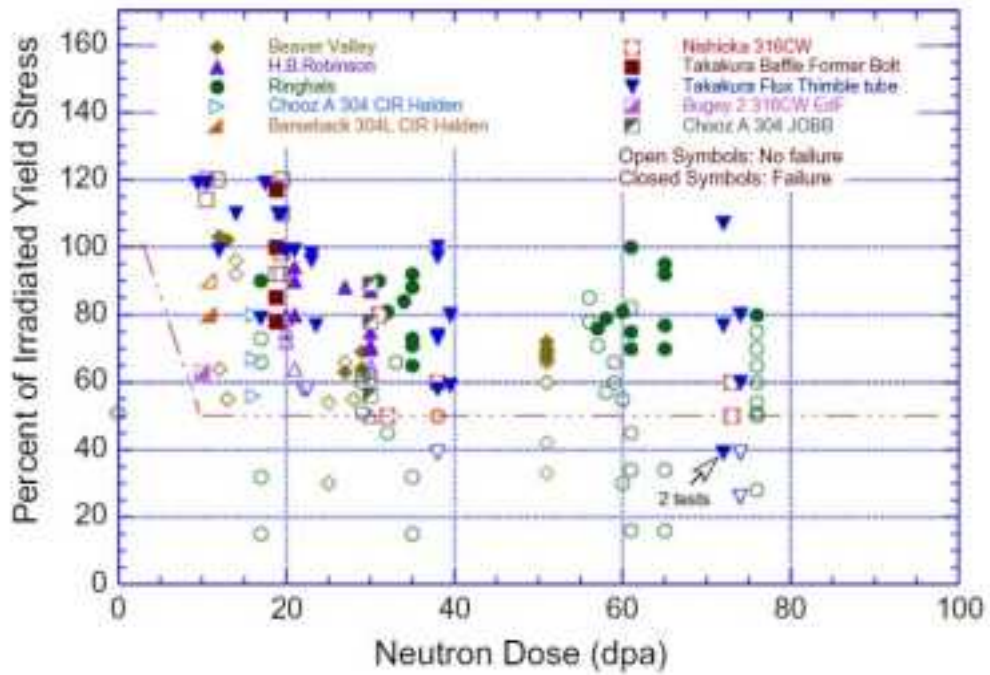


図 4.2.3-63 Chopra らによる PWR での IASCC 発生の下限傾向線 4.2.3(4)-17

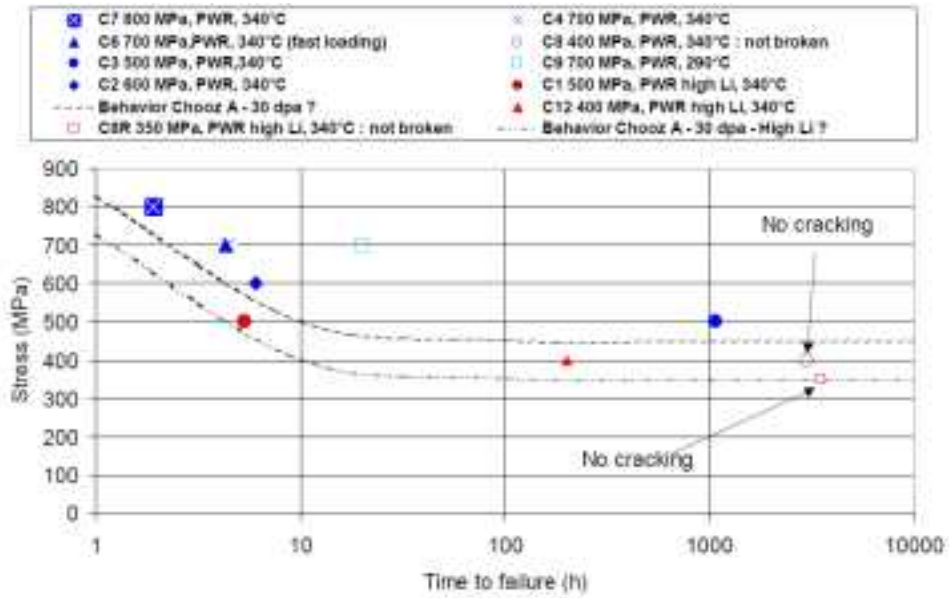


図 4.2.3-64 Pokor らによる PWR での IASCC 発生の下限傾向線 4.2.3(4)-38)

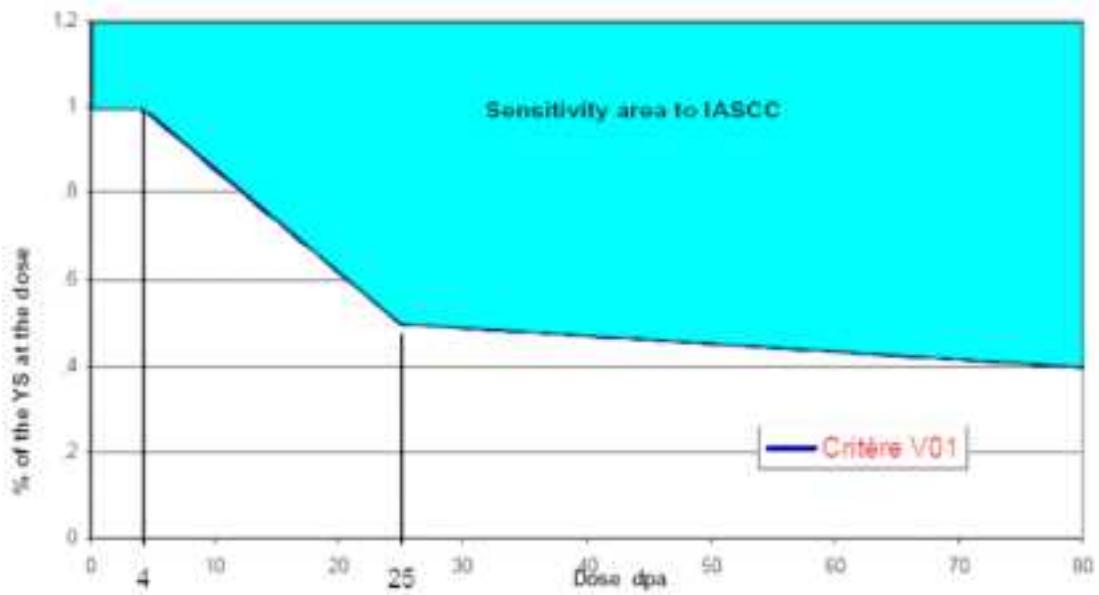


図 4.2.3-65 Pokor らによる PWR での IASCC 発生領域 4.2.3(4)-39)

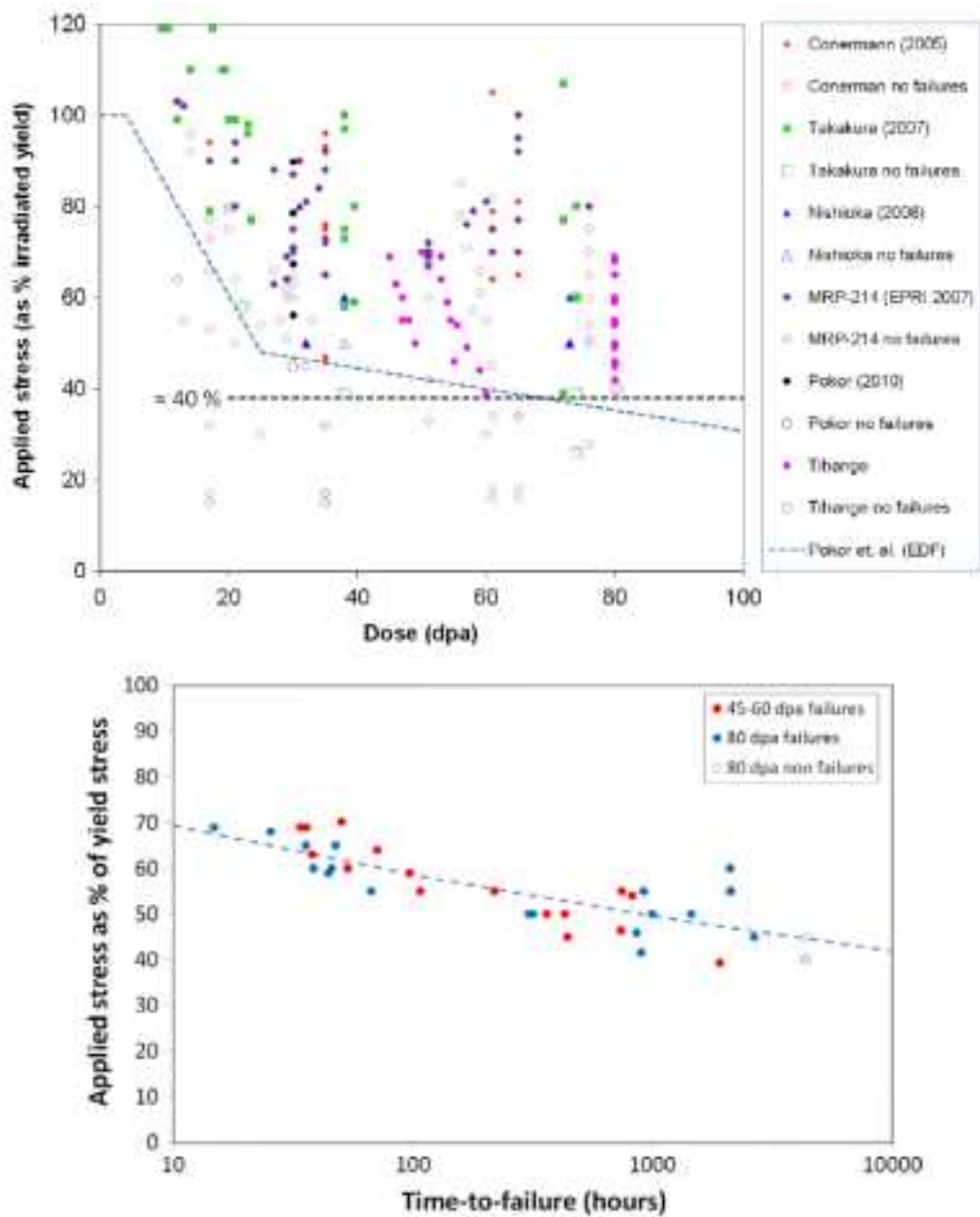


図 4.2.3-66 Bosh らによる PWR での IASCC 発生の下限傾向線 4.2.3(4)-40

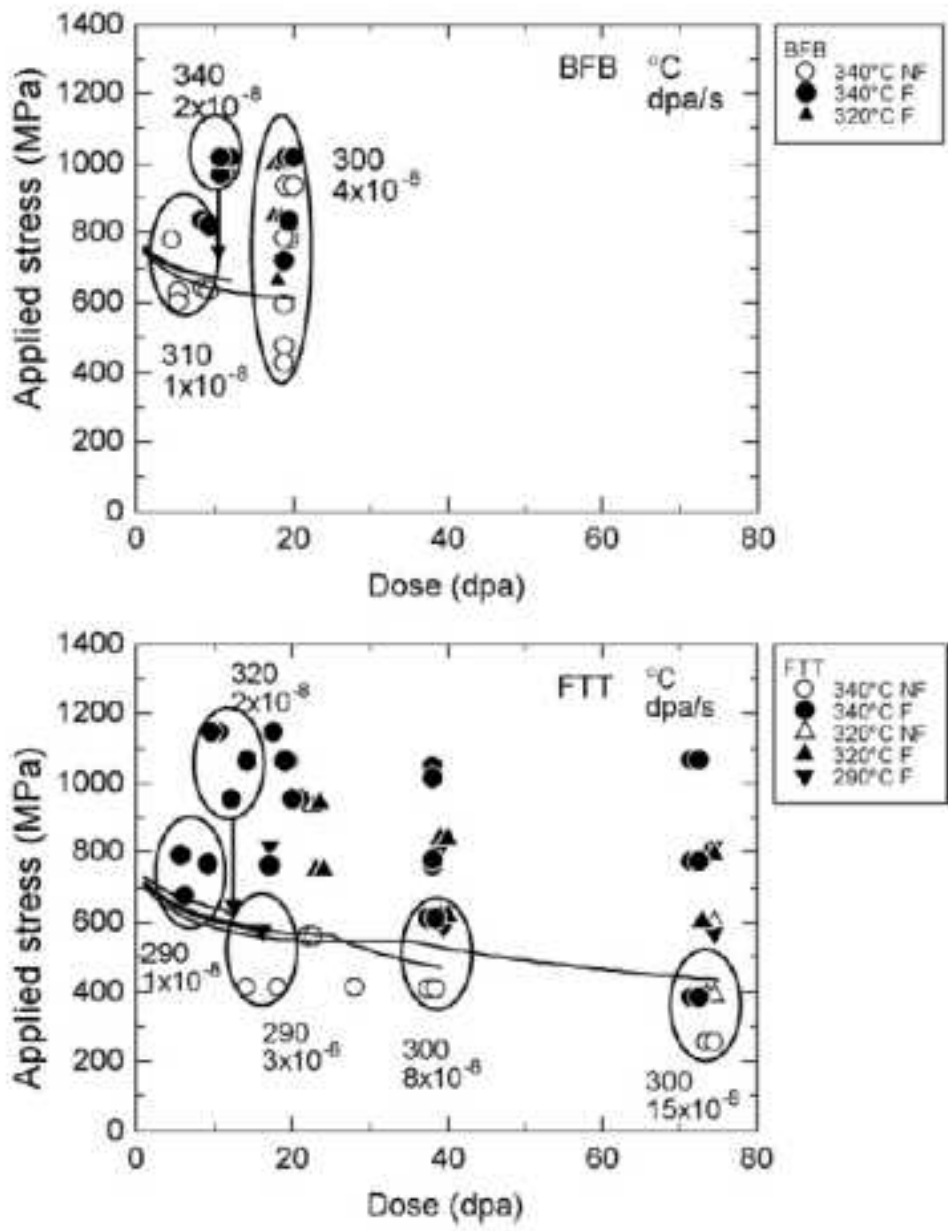


図 4.2.3-67 Fukuya らのモデルによる IASCC のしきい応力 4.2.3(4)・7



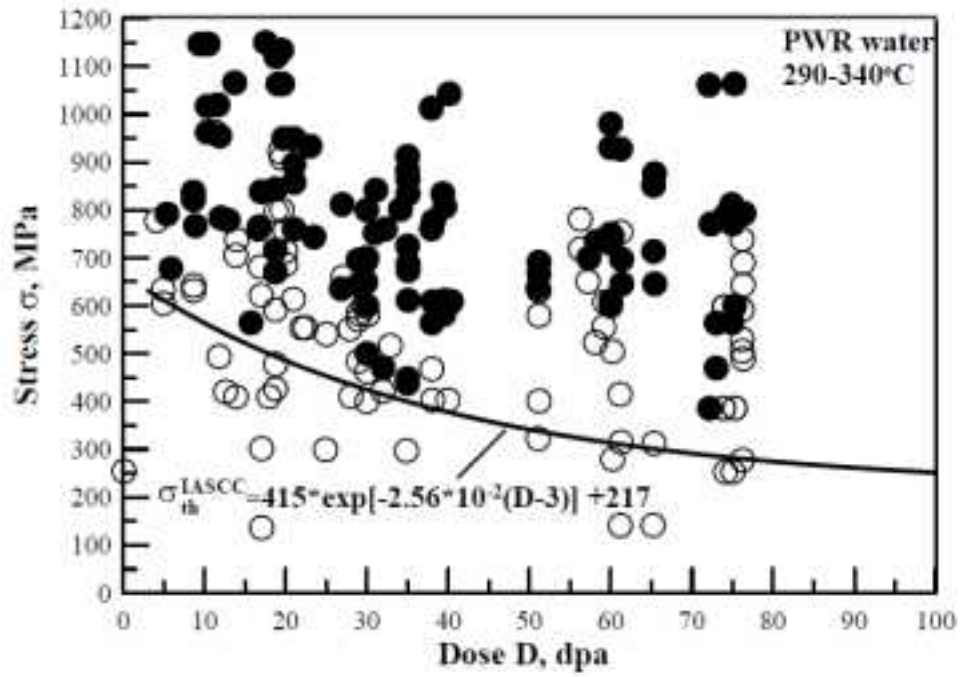


図 4.2.3-68 Fedorova らのモデルによる IASCC のしきい応力 4.2.3(4)・41)

#### e. IASCC進展

IASCC 進展の評価は、BWR 炉内構造物の健全性評価におけるシュラウド等でのき裂サイズの評価において不可欠であるため、IASCC 進展試験とデータに基づく検討が広く行われている。また、PWR においても厚板構造物である炉心さうの溶接部では BWR のシュラウドと同様な評価が行われる場合があるため、同様な進展試験とデータに基づく検討が行われているが BWR に比較して試験例は多くない。

IASCC 進展試験は、照射後試験として照射材の CT 試験片に応力を負荷し、ポテンシャルドロップ法によりオンラインでき裂長さを計測する方法で行われている。また、同様な試験を試験炉の中で行う炉内試験も Halden 炉や JMTR で行われている。材料、照射量、負荷応力(応力拡大係数)、水質などがパラメータである。一般には、IGSCC の進展速度での取り扱いを拡張した取り扱いが行われ、き裂進展速度( $da/dt$ )と応力拡大係数(K 値)の関係

$$da/dt = C \cdot K^n$$

における定数 C と K 値について照射量等の影響を考慮する検討がされている。

国内では Takakura らが、原子力安全基盤機構の IASCC プロジェクトで得られた JMTR 照射材のデータに基づき、304LSS と 316LSS のき裂進展速度式を定式化している(4.2.3(4)-42,43)。き裂進展速度は低照射量では照射量に依存して増加しその後飽和するので、照射量(D)の依存項で補正した次の式を基本式とし、最小二乗法でデータにフィッティングして係数を決定している。

$$da/dt = C \cdot K^n \cdot D^m$$

BWR の通常水質 NWC(ECP > +140 mV<sub>SHE</sub>)に対して進展速度式を報告している。なお、単位は $da/dt$ (m/s)、 $K$ (MPa $\sqrt{m}$ )、 $D$ (dpa)である。

$$316L: da/dt = 4.60 \times 10^{-12} \cdot K^{1.23} \cdot D^{1.83} \quad (D < 4 \text{ dpa})$$

$$da/dt = 5.85 \times 10^{-11} \cdot K^{1.23} \quad (4 \text{ dpa} < D < 11 \text{ dpa})$$

$$304L: da/dt = 8.13 \times 10^{-12} \cdot K^{1.22} \cdot D^{1.95} \quad (D < 2.1 \text{ dpa})$$

$$da/dt = 3.48 \times 10^{-11} \cdot K^{1.22} \quad (2.1 \text{ dpa} < D < 13 \text{ dpa})$$

適用範囲はフィッティングしたデータの範囲から決まっており、照射量の上限は 11~13 dpa、 $K=10\sim30$  MPa $\sqrt{m}$  である。図 4.2.3-69 に 316LSS と 304LSS についてデータと進展速度式の値の関係を示す。

また、国内で BWR の炉内構造物の評価に関して、日本機械学会の維持基準 4.2.3(4)-2

や原子力安全推進協会の炉内構造物点検ガイドラインで参照されてきたのは、発電設備技術検査協会が実施したプロジェクトで GE が作成したモデル式である 4.2.3(4)・45)。照射による感受性の変化を、鋭敏化度と同様な耐食性の変化と照射硬化による機械的性質の変化として扱いモデル化したもので、き裂先端電流密度の変化に対する定数  $n$  と、き裂先端ひずみ速度の補正係数  $C$  を用いて次の式が用いられている。

$$da/dt = 7.8 \times 10^{-2} \cdot n^{3.6} \cdot (CK^4)^n$$

進展速度  $da/dt$  は mm/s 単位、応力拡大係数  $K$  は  $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$  単位である。  $C$  について、照射量  $F(\text{n/m}^2(\text{E}>1 \text{ MeV}))$  単位) に対して次の式を与えている。

$$\begin{aligned} C &= 4.1 \times 10^{-14} & F < 1.4 \times 10^{23} \text{ n/cm}^2 \\ C &= 1.14 \times 10^{-13} \cdot \ln(F) - 4.98 \times 10^{-12} & 1.4 \times 10^{23} < F < 3 \times 10^{25} \text{ n/cm}^2 \\ C &= 6.59 \times 10^{-13} & F > 3 \times 10^{25} \text{ n/cm}^2 \end{aligned}$$

$n$  は腐食電位、導電率、照射量により複雑に変化し、図の形で示されている。

EPRI は様々な試験プロジェクトからのデータを収集するとともに、試験条件によるデータの質を詳細に検討して選別したデータに対して、き裂進展の傾向線を作成している。BWR の NWC に相当する高 ECP と、BWR の HWC と PWR に相当する低 ECP の 2 種を対象として、適切な保守性を担保するためデータ分布の 75% が含まれるような 75% 傾向線を提案している。き裂進展速度  $da/dt(\text{mm/s})$  の基本式は、温度  $T(^{\circ}\text{C})$  と応力拡大係数  $K(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$  と照射後耐力  $\sigma_{0.2}(\text{MPa})$  をパラメータとした次の式である。

$$da/dt = C \cdot \exp[-Q/R \cdot (1/T - 1/T_{ref})] \cdot \sigma_{0.2}^v \cdot K^u$$

$Q$  は活性化エネルギー、 $R$  はガス定数、 $T_{ref}$  は参照温度、 $C, v, u$  は定数である。PWR と BWR で共通式とするため温度をパラメータとし、照射量の代わりに耐力をパラメータとしているのが特徴である。データフィッティングで得られた 75% 傾向線に対応する係数は表 4.2.3-19 のとおりである。表の値を用いて、288 $^{\circ}\text{C}$  での BWR の NWC と HWC の式、PWR でよく使われる 325 $^{\circ}\text{C}$  での式を計算した結果は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} da/dt (NWC, 288^{\circ}\text{C}) &= 2.84 \times 10^{-17} \cdot \sigma_{0.2}^{2.675} \cdot K^{2.486} \\ da/dt (HWC, 288^{\circ}\text{C}) &= 1.35 \times 10^{-17} \cdot \sigma_{0.2}^{2.547} \cdot K^{2.504} \\ da/dt (PWR, 325^{\circ}\text{C}) &= 4.73 \times 10^{-17} \cdot \sigma_{0.2}^{2.547} \cdot K^{2.504} \end{aligned}$$

なお、材料は 300 シリーズのオーステナイトステンレス鋼で共通であり、耐力の推定に

は 5.1.1 節で紹介した EPRI の開発した耐力相関式が使われている 4.2.3(4-3)。図 4.2.3-70 は耐力を 700 MPa とした時の各式による傾向線とデータの関係を示している。データのばらつきが大きい、データの 75% を包絡するように傾向線が設定されていることがわかる。

ANL の Chopra は、NUREG-0313 に示された非照射のステンレス鋼のき裂進展速度に関する次式をベースに、照射による A の変化を検討している 4.2.3(4-17)。

$$da/dt = A \cdot K^{2.161}$$

なお、非照射材では BWR における鋭敏化ステンレス鋼の高溶存酸素環境(8ppm)で  $A = 2.1 \times 10^{-13}(\text{m/s})$  とされている。

照射材では図 4.2.3-71 に示されているようにしきい照射量を定め、それ以下では NUREG-0313 の値を用いるが、それ以上で照射量とともに進展速度が増加するとしている。BWR NWC ではしきい照射量は 0.45 dpa で A を与える式は、

$$A = 1.21 \times 10^{-12} + 2.65 \times 10^{-12} \cdot \log(dpa)$$

BWR HWC ではしきい照射量は 2.7 dpa で A を与える式は、

$$A = 2.76 \times 10^{-12} + 6.82 \times 10^{-12} \cdot \log(dpa)$$

が示されている。この式でデータの 75% が包絡されるとしている。PWR については BWR HWC のデータと合わせて整理されており、図 4.2.3-72 のように、しきい照射量は約 3 dpa で A を与える式は、

$$A = -1.79 \times 10^{-9} + 4.42 \times 10^{-10} \cdot \log(dpa)$$

が示されている。以上の式はいずれも材料は 300 シリーズのオーステナイトステンレス鋼で共通である。

照射量の代わりに照射材の耐力をパラメータとした傾向線も検討しており、BWR NWC ではき裂進展速度が増加し始めるしきい耐力は約 300 MPa で A を与える式は、

$$A = -1.0 \times 10^{-9} + 4.3 \times 10^{-8} \cdot \log(\sigma_y)$$

BWR HWC ではしきい耐力は約 550 MPa で A を与える式は、

$$A = -2.7 \times 10^{-8} + 1.0 \times 10^{-8} \cdot \log(\sigma_y)$$

が示されている。

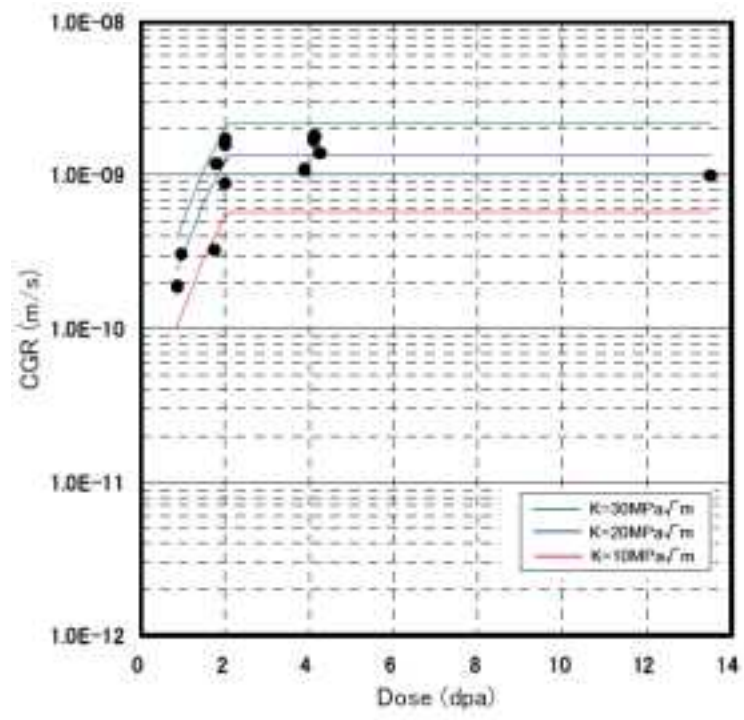
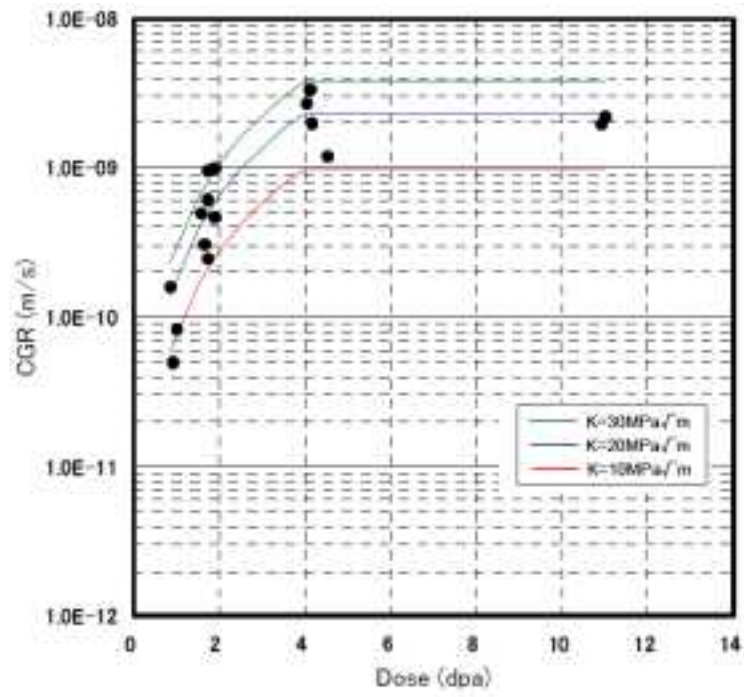


図 4.2.3-69 Takakura らによる BWR NWC における  
 (上)316L と(下)304L のき裂進展式 4.2.3(4)~(43)

表 4.2.3-19 EPRI のき裂進展傾向線の係数 4.2.3(4)-46)

Constant	NWC	Low-ECP HWC & PWR
Coefficient C for 75 <sup>th</sup> percentile of calibration data	$2.84 \times 10^{-17}$	$2.90 \times 10^{-17}$
Activation Energy Q (kJ/mol)	72.20	94.61
Gas constant, R (J/(mol-K))	8.314	8.314
Reference Temperature, $T_{ref}$	288°C	310°C
Exponent $\mu$ on K	2.486	2.504
Exponent $\nu$ on $a_{0.2}$	2.675	2.547

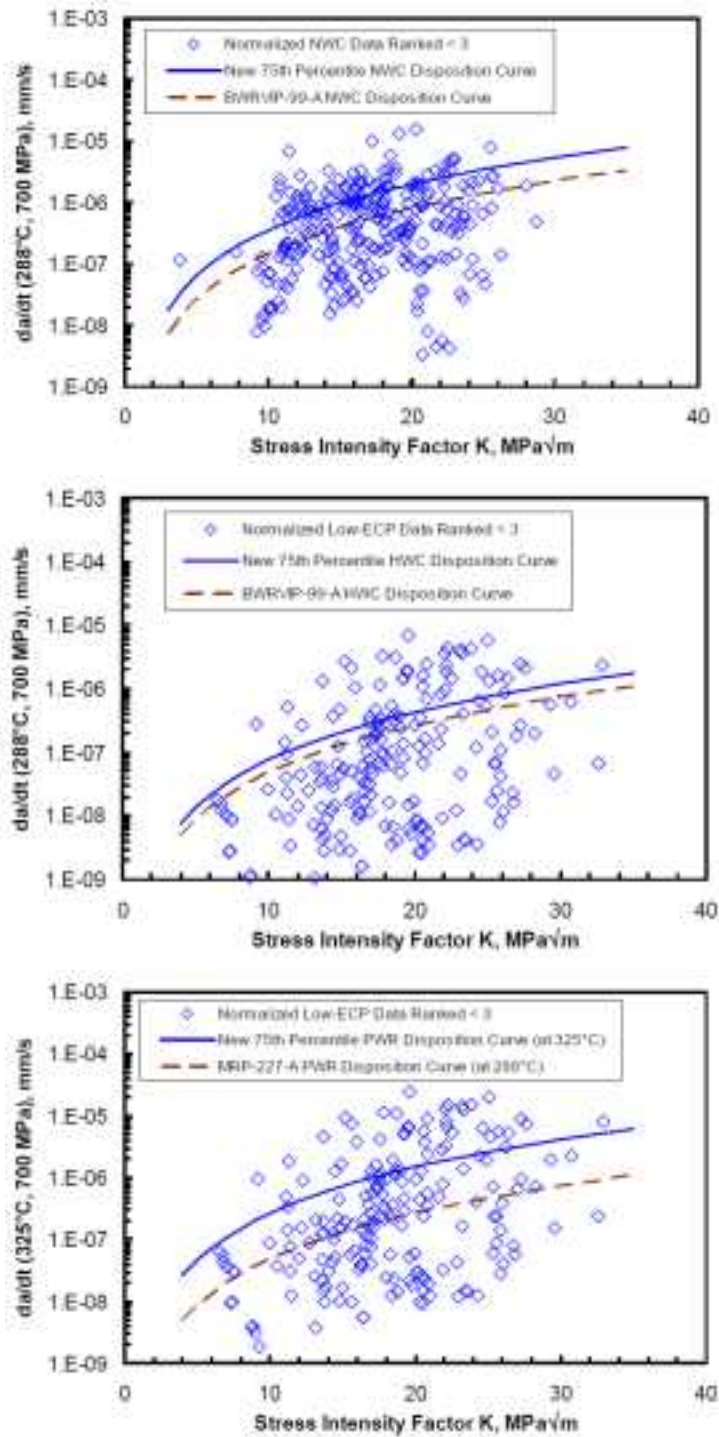


図 4.2.3-70 EPRI の 75%き裂進展傾向線(耐力~700 MPa)<sup>4.2.3(4)-47</sup>  
 (上)BWR NWC, 288°C (中)BWR HWC, 288°C (下)PWR, 325°C



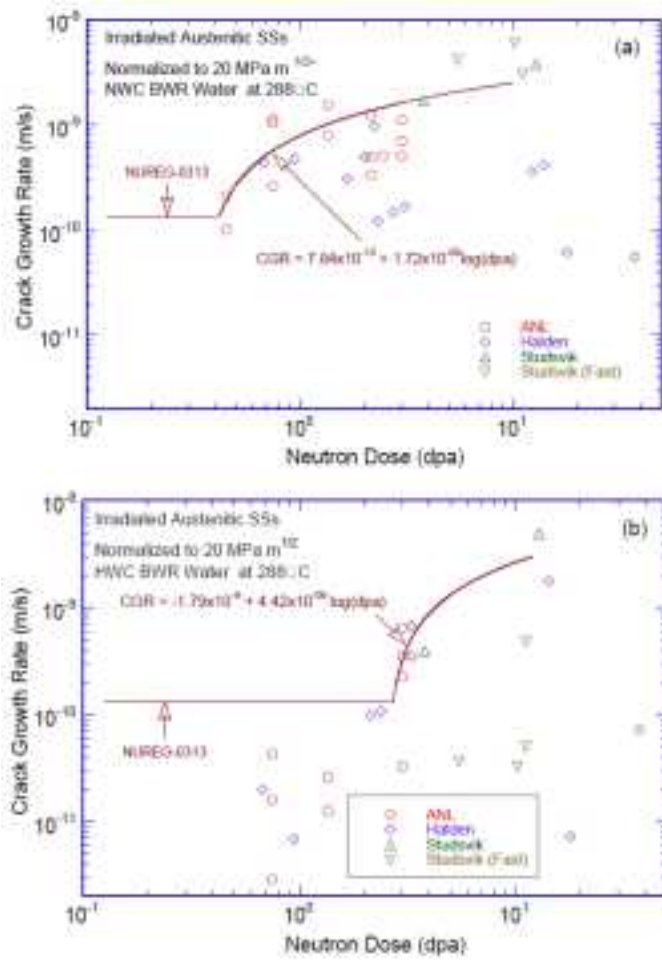


図 4.2.3-71 Chopra による BWR のき裂進展傾向線(上)NWC(下)HWC<sup>4.2.3(4)-17</sup>

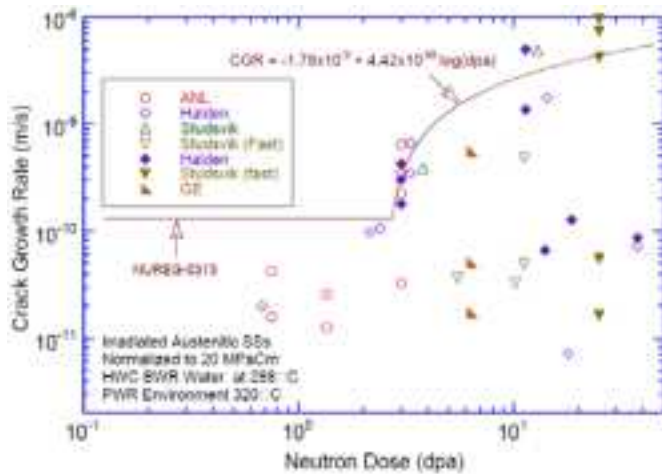


図 4.2.3-72 Chopra による PWR と BWR HWC のき裂進展傾向線 <sup>4.2.3(4)-17</sup>

f. 応力緩和・クリープ

クリープは一定応力下でのひずみ増加、応力緩和は一定ひずみ下での応力低下であり、照射場ではいずれも促進され、構造物に負荷されている応力とひずみに時間変化をもたらす現象である。炉内構造物においては、ボルトの負荷応力や溶接部の残留応力の緩和、き裂がある場合にはき裂先端の応力場の緩和を生ずるので、健全性評価において取り入れるべき重要な現象であり、適切な傾向式等が必要である。

照射クリープは次に述べるスエリングと相関があり、応力を $\sigma$ 、定常クリープ速度を $\dot{\varepsilon}$ 、スエリング量を $S$ とすると、次のような関係がある。

$$\dot{\varepsilon}/\sigma = B_0 + DS$$

$B_0$ はクリープコンプライアンス、 $D$ はクリープスエリング結合係数である。

軽水炉ではスエリングは大きくないので無視すると、クリープひずみは照射量を $F$ として次のようにあらわされることが多い。

$$\varepsilon = A_1\sigma[1 - \exp(-A_2F)] + A_3\sigma^n F$$

この式の第1項は遷移クリープ、第2項は定常クリープに相当する。定常クリープ項の応力の乗数 $n$ は低応力では $n=1$ とされるが、高応力では $n=2\sim 5$ と大きくなる。

応力緩和での応力比(初期応力 $\sigma_0$ )を表す式は、弾性ひずみが弾性係数 $E$ として $\sigma/E$ で表されるので、低応力( $n=1$ )の場合は次のように表される。

$$\sigma/\sigma_0 = \exp[-E\{A_1(1 - \exp(-A_2F)) + A_3F\}]$$

遷移クリープによる緩和を除いた定常緩和は次の式で表される。

$$\sigma/\sigma_0 = \exp(-EA_3F)$$

①BWR分野の応力緩和式

BWRの炉内温度である290℃付近の応力緩和に関する式を調査した。

原子力安全基盤機構のIASCCプロジェクトでは、Cリング試験とビードオン溶接の試験のデータに基づき、304, 304L, 316LSSに共通した次のような緩和式を提示している。

$$\sigma/\sigma_0 = \exp(-0.19 \cdot F)$$

$F$ は dpa 単位の照射量である。弾性係数を $E = 194\text{GPa}$ とすると、 $A_3 = 9.7 \times 10^{-7} / \text{MPa/}$

dpa である。図 4.2.3-73 に示すように、データには一次緩和がほとんど見られず定常緩和式で良いフィッティングが得られている。

国内では BWR グループがベントビームと C リング試験片の JMTR 照射によるデータから緩和式を検討しており、Ishiyama らが報告している。図 4.2.3-74 に示すように、同一材でも試験片形状により初期緩和のないデータと初期緩和が比較的大きいデータがみられるが、定常緩和挙動は大きく異ならない。後者について初期緩和を含めた式でフィッティングした結果を表 4.2.3-20 に示す。定常緩和の係数  $A_3$  は  $0.57 \sim 1.8 \times 10^{-6}$  / MPa/ dpa の範囲であり、平均値は  $1.1 \times 10^{-6}$  / MPa/ dpa である。

ビードオン溶接部の残留応力を中性子回折で測定したデータについては、原子力安全基盤機構の IASCC プロジェクトの試験データ 4.2.3(4)-50)と BWR グループの試験データ 4.2.3(4)-51)を合わせた検討が行われており、図 4.2.3-75 に示すように  $A_3 = 1.8 \times 10^{-6}$  / MPa/ dpa が報告されている。

300°C 付近の応力緩和データとしては Causey らのデータがあり 4.2.3(4)-52)、 $A_3$  に相当するクリープ係数として 570K(297°C)で  $1.1 \times 10^{-6}$  / MPa/ dpa を報告している。

## ②PWR分野のクリープ式

PWR の炉内温度である 350°C 付近までの応力緩和・クリープに関する式を調査した。原子力安全基盤機構の IASCC プロジェクトで、冷間加工 316SS について高応力(約 600 MPa まで)のクリープ試験データに基づき、次のようなクリープを提示している 4.2.3(4)-42)。図 4.2.3-76 に示すように、高応力側でクリープが加速されることを考慮して、第 2 項の定常クリープ項に応力の 3 乗に依存する成分を加えたのが特徴となっている。

$$\varepsilon = A\sigma \cdot [1 - \exp(-A'F)] + B_0\sigma \cdot (1 + B_1\sigma^3) \cdot F$$

各係数の値として、 $A = 0.733 \times 10^{-6}$  / MPa、 $A' = 4.3$  / dpa、 $B_0 = 0.975 \times 10^{-6}$  / MPa/ dpa、 $B_1 = 3.28 \times 10^{-9}$  / MPa<sup>3</sup> が示されている。

EPRI の MRP-175 では、図 4.2.3-77 に示すように、収集された応力緩和データを包絡するようにスクリーニングレベルとして次のような式が提案されていた。

$$\sigma/\sigma_0 = \exp[-0.774(1 - \exp(-23F)) - 0.668F]$$

MRP-135 Rev.1 では、構成式のクリープ成分について、主として高温までの内圧クリープ試験データの整理に基づいて、クリープ一般式の  $A_3$  に相当するクリープコンプライアンスを提案している 4.2.3(4)-3)。図 4.2.3-78 に示すように、250~500°C の温度範囲で、冷間加工 316 SS では  $A_3 = 2.185 \times 10^{-6}$  / MPa/ dpa、溶体化 304SS では  $A_3 = 3.058 \times 10^{-6}$  / MPa/ dpa を提案している。

最近、研究炉による新しい試験が進められている。Halden 炉での 290～330℃の照射下で冷間加工 316SS と溶体化 304LSS の単軸引張条件におけるクリープ試験結果が Foster らにより報告されている 4.2.3(4)-53,54)。次のような照射クリープ式でデータ整理を行っている。

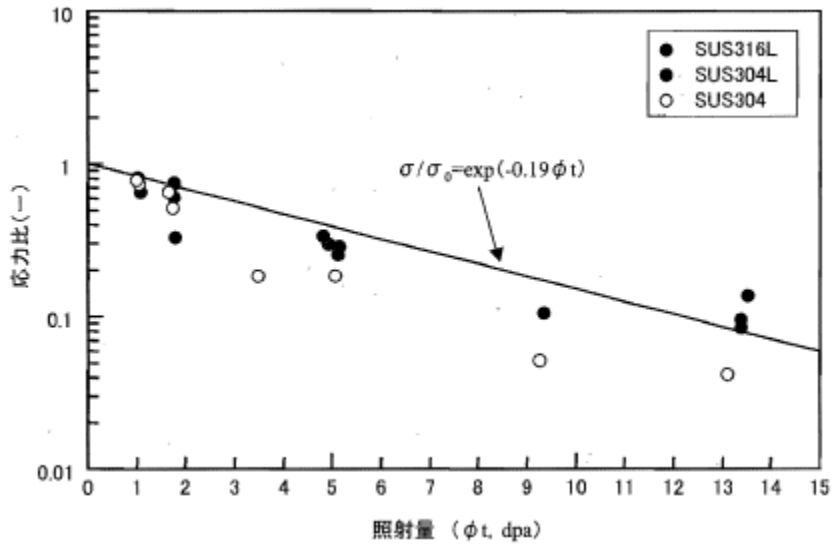
$$\varepsilon = A\sigma \cdot [1 - \exp(-B \cdot F)] + C\sigma F$$

表 4.2.3-21 に係数を示すが、定常クリープの係数 C は、330℃の冷間加工 316SS では  $2 \sim 3.6 \times 10^{-6} / \text{MPa} / \text{dpa}$ 、290℃の溶体化 304LSS では  $2.2 \sim 3.2 \times 10^{-6} / \text{MPa} / \text{dpa}$  となっている。

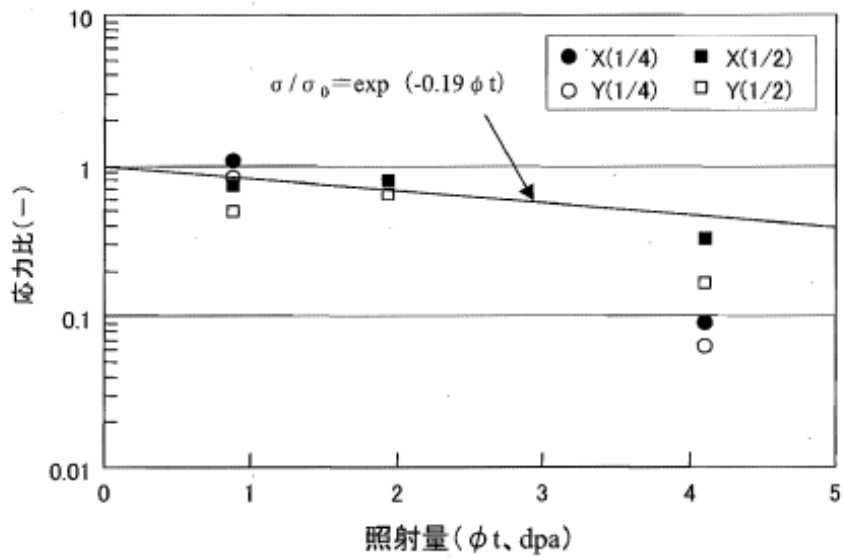
CEA と EDF により行われた OSIRIS 炉と BOR 60 炉を用いたクリープ試験が Garnier らにより報告されている 4.2.3(4)-55)。試験温度は OSIRIS 炉が 325℃、BOR 60 炉が 320℃である。クリープひずみが現れる潜伏期  $\eta$  を考慮して次のような定常クリープ式で整理している。

$$\varepsilon = A_1(\sigma F - \eta)$$

図 4.2.3-79 に初期のクリープデータと式の係数を示す。定常クリープの係数 A1 は、冷間加工 316SS が  $3.7 \sim 4.6 \times 10^{-6} / \text{MPa} / \text{dpa}$ 、溶体化 304L が  $2.8 \sim 2.9 \times 10^{-6} / \text{MPa} / \text{dpa}$  となっている。



(1)C リング試験による応力緩和



(2)ビードオン溶接(316L)による応力緩和

図 4.2.3-73 原子力安全基盤機構の IASCC プロジェクトによる応力緩和式 4.2.3(4)-42)

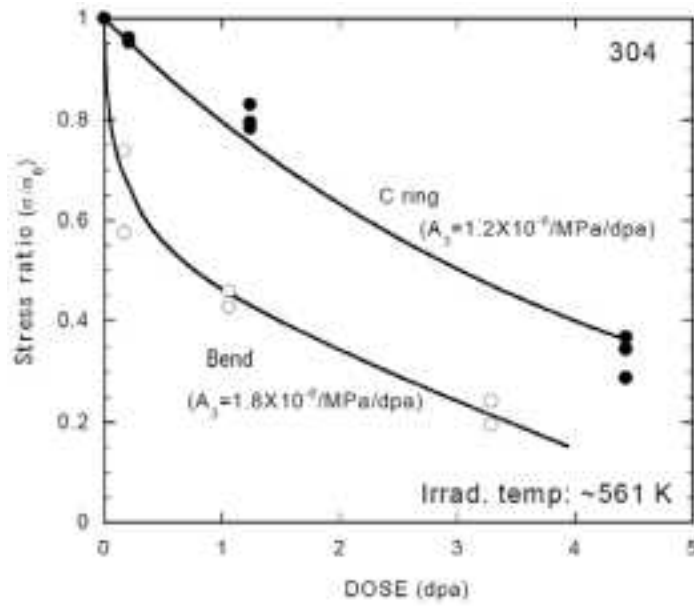


図 4.2.3-74 Ishiyama らによる応力緩和データでの定常緩和の係数の例 4.2.3(4)-49)

表 4.2.3-20 Ishiyama らによる応力緩和式 4.2.3(4)-49)

$$\sigma/\sigma_0 = \exp[-E\{A_1(1 - \exp(-A_2F)) + A_3F\}] \text{ の係数}$$

試験片	材料	A <sub>1</sub> ×10 <sup>-6</sup> / MPa	A <sub>2</sub> / dpa	A <sub>3</sub> ×10 <sup>-6</sup> / MPa/ dpa	初期応力 MPa
ベント ビーム	304	2.1	24	1.8	245
	316L-1	-	-	1.2	228
	316L-2	1.8	24	0.83	227
C リング	304	-	-	1.2	123-189
	316L-1	-	-	1.0	114-172
	316L-2	-	-	0.57	192-283

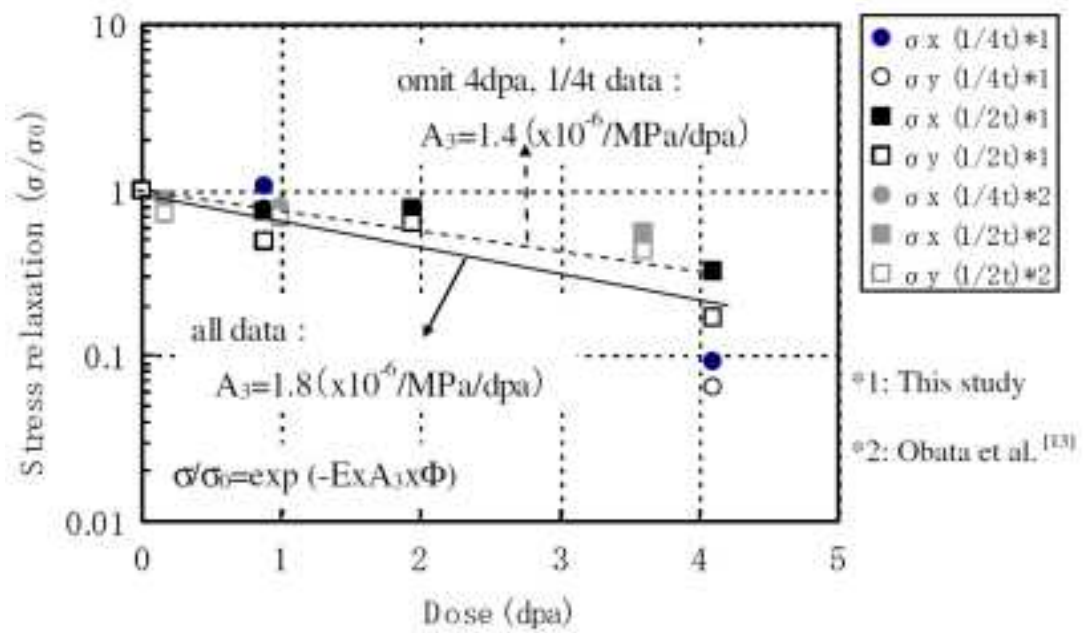


図 4.2.3-75 Ishiyama らによるビードオン溶接部の残留応力の応力緩和式 4.2.3(4)-50

$$\varepsilon = A \cdot \sigma \cdot [1 - \exp(-A' \cdot F)] + B_0 \cdot \sigma (1 + B_1 \cdot \sigma^2) \cdot F$$

- $\varepsilon$  : クリープ歪み (-)  
 $\sigma$  : 応力 (MPa)  
 $A$  : 係数  $A = 0.733 \times 10^{-5} / \text{MPa}$ ,  
 $A'$  : 係数  $A' = 4.3 / \text{dpa}$   
 $B_0$  : 係数  $B_0 = 0.975 \times 10^{-8} / (\text{dpa} \cdot \text{MPa})$   
 $B_1$  : 係数  $B_1 = 0.328 \times 10^{-8} \text{MPa}^{-2}$   
 $F$  : 照射量 (dpa)

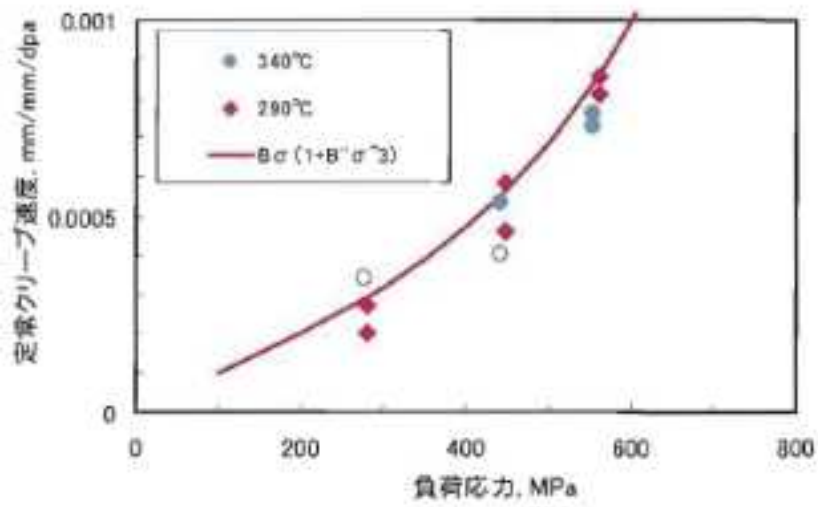


図 4.2.3-76 原子力安全基盤機構の IASCC プロジェクトによる照射クリープ式 4.2.3(4)-42)



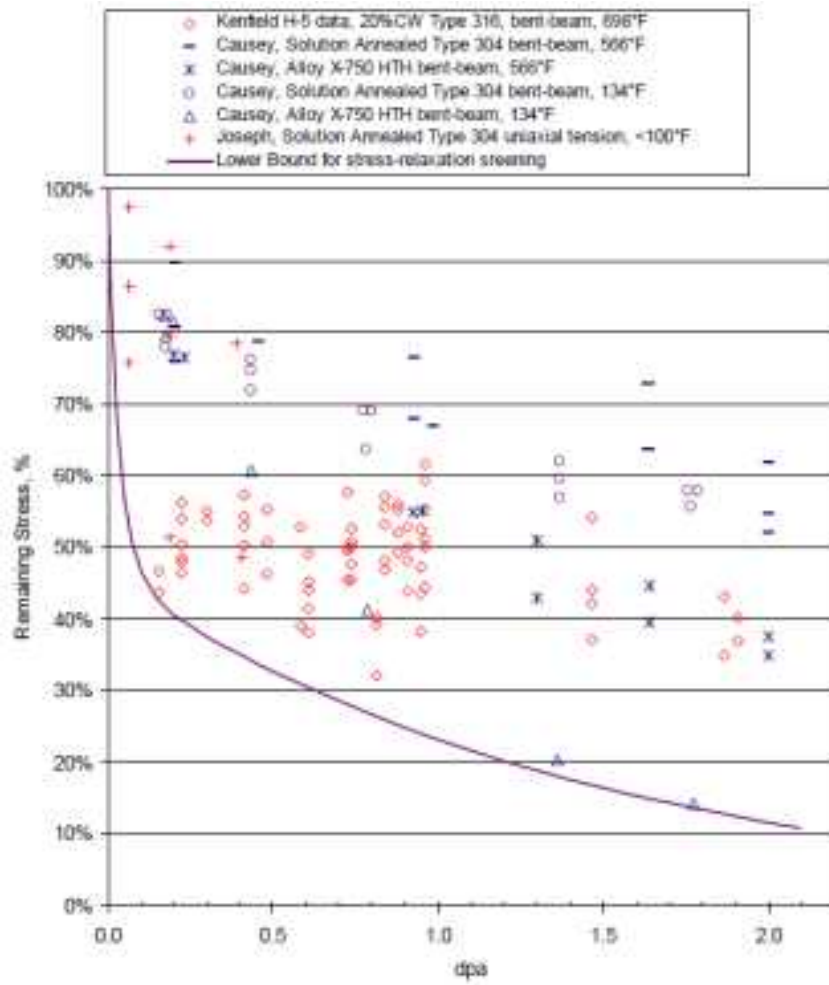


図 4.2.3-77 EPRI MRP-175 のスクリーニングクライテリアに示された  
応力緩和データとフィッティング式 4.2.3(4)-35)

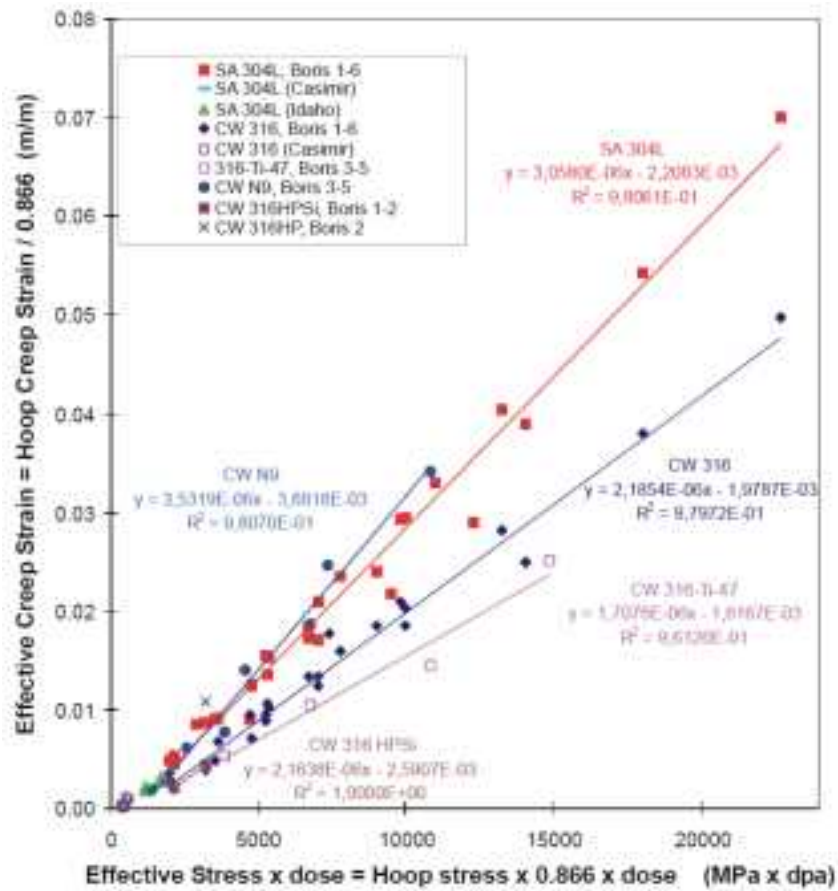


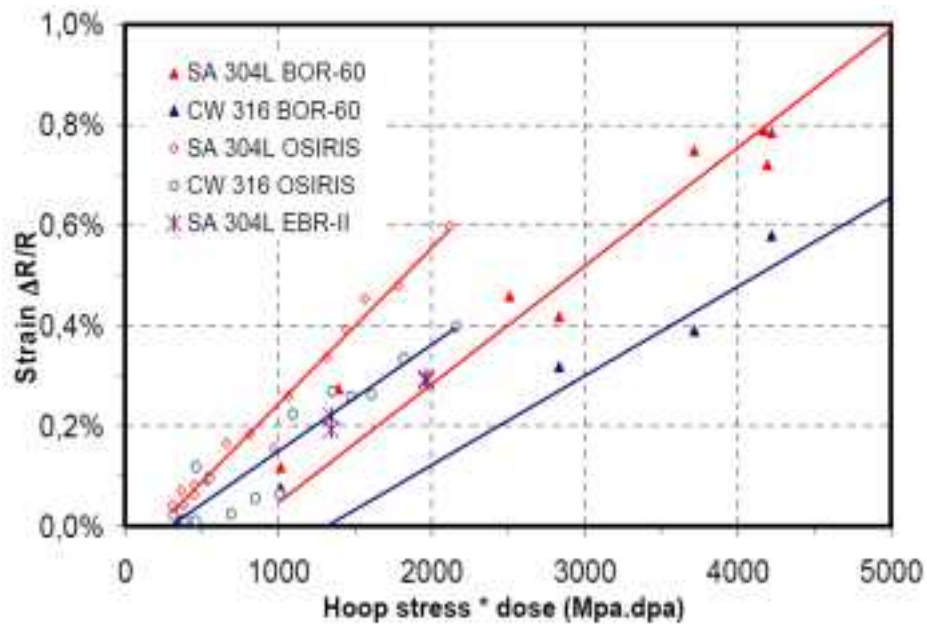
図 4.2.3-78 EPRI MRP-135 Rev.1 の照射クリープのクリープコンプライアンス 4.2.3(4)-3

表 4.2.3-21 Foster らによる Halden 炉での応力緩和・クリープ試験結果 4.2.3(4)-54

$$\epsilon = A\sigma \cdot [1 - \exp(-B \cdot F)] + C\sigma F \text{の係数}$$

Material	Unit*	Sample Type	Stress (MPa)	T (°C)	Test Type
CW 316 SS	1	Rod	275	330	Stress Relaxation
CW 316 SS	2	Rod	205	330	Stress Relaxation
CW 316LN SS	3	Tube	345	330	Creep
CW 316 SS	6	Rod	28	330	Qualification
SA 304L SS	7	Tube	110	290	Creep
SA 304L SS	8	Tube	92	290	Creep
CW 316 SS N lot	9	Tube	345	370	Stress Relaxation
CW 316 SS	11	Rod	345	330	Creep
CW 316 SS	12	Rod	345	330	Creep

Material	Unit	T (°C)	A (10 <sup>-6</sup> /MPa)	C (10 <sup>-6</sup> /MPa-dpa)	B (/dpa)	Study
CW 316 SS	11	330	0.45	2.6	50	This study
	12	330	0.24	3.0	50	This study
	1 & 2	330	0.10	2.1		This study
CW 316 SS N Lot	9	370	0.20	3.7		This study
		450	3.9			Ref. 8
		377			1.2	Ref. 7
SA 304L SS	7	290		2.2		This study
		290		3.2		This study
		390		0.38		Ref. 9
CW 316LN SS	3	330		0.27 (initial)		This study
		330		1.6 (subsequent)		This study



Material	Coefficient	Symbol	Unit	OSIRIS	BOR-60
SA 304L	$A_1$		$10^{-8} \text{ MPa}^{-1} \cdot \text{dpa}^{-1}$	4.6	3.7
	$n$		$10^7 \text{ MPa} \cdot \text{dpa}$	0.18	0.73
CW 316	$A_1$		$10^{-8} \text{ MPa}^{-1} \cdot \text{dpa}^{-1}$	2.9	2.8
	$n$		$10^7 \text{ MPa} \cdot \text{dpa}$	0.25	1.2

図 4.2.3-79 Garnier らによる OSIRIS 炉と BOR60 炉による  
照射クリープデータとクリープ式の係数 4.2.3(4)-55)

g. スエリング

スエリングは高温照射で顕著に表れる現象であり、材料組成や中性子束に極めて敏感である。軽水炉の温度はスエリングが起こる下限の温度に近く、BWR では無視できるとされ PWR の比較温度の高いフォーマ板等の構造物で発生するとされる。スエリングが不均等に起こるとボルトの負荷応力を増加させ IASCC 発生に至る可能性があるため、正確な評価が求められている。ただし、スエリングには中性子束の影響が強く表れるため、炉心領域や研究炉のような高中性子束で得られたデータをそのまま低中性子束の部材のスエリングの評価に使用するのとは適切ではない。

国内で PWR の評価に用いられているスエリング式は、EBR-II の炉内部材の 304L を対象に Foster らが作成したスエリング式 4.2.3(4)-56) をベースに、EBR-II の遮蔽体等のデータで中性子束(損傷速度)の影響を取り入れて改良した次のような式である 4.2.3(4)-57)。

$$S = A \cdot (\dot{F} \cdot 10^7 / 1.25)^{-0.73} \cdot (F / 4.9)^2$$
$$A = \exp(-1.591 + 0.245T - 1.210T^2 - 1.384T^3 - 1.204T^4)$$
$$T = (T - 490) / 100$$

単位は、スエリング S は%、温度 T は℃、損傷速度  $\dot{F}$  は dpa/s、照射量 F は dpa である。この式では、スエリングピーク温度は 490℃として、損傷速度の影響は乗数で-0.73 の依存性としている。

EPRI の MRP-135 Rev.1 には、EBR-II のデータに基づいた検討により、スエリング速度について次のような式が示されている 4.2.3(4)-3)。

溶体化 304 :

$$\dot{S} = 2 \cdot F \cdot \dot{F}^{-0.731} \cdot \exp[22.106 - 18558 / (T + 273.15)]$$

冷間加工 316 :

$$\dot{S} = 0.9 [10 + 2F(1 - \exp(-0.01F))] \cdot \dot{F}^{-0.731} \cdot \exp[22.106 - 18558 / (T + 273.15)]$$

単位は、スエリング速度  $\dot{S}$  は%/dpa、温度 T は℃、損傷速度  $\dot{F}$  は  $10^{-7}$  dpa/s、照射量 F は dpa である。損傷速度の乗数は-0.731 であり国内のものと同じであるが、ほぼ共通の EBR-II のデータを用いているためと考えられる。

応力の影響についても検討されており、応力による増加分として次の式が示されている。

$$\Delta S = \dot{S} \cdot \Delta F \cdot (1 + 0.005\sigma)$$

単位は、スエリング増加分は%、応力なしのスエリング速度  $\dot{S}$  は%/dpa、照射量の増分  $\Delta F$

は dpa、フォンミーヌス応力 $\bar{\sigma}$ は MPa である。

EDFの Pokor らは、構成式のスエリング項として次のような式を示している 4.2.3(4)-58)。

$$S = R \left[ F + \frac{1}{\alpha} \log \left( \frac{1 + \exp(\alpha(F_0 - F))}{1 + \exp(\alpha F)} \right) \right]$$

R は温度の関数であり次の式が示されている。

$$R = R^0 \zeta_g(T)$$

$$\zeta_g(T) = \frac{1}{2} \left( 1 + \tanh(\mu_g(T - T_c^g)) \right)$$

F は照射量であり、R, a などはパラメータであるが、具体的な数値は示されていない。  
なお、このスエリング式では Bates らが 1980 年に提案した式 4.2.3(4)-59)を使用している。

h. 4.2.3(4)章の引用文献

- 4.2.3(4)-1) 原子炉構造材の監視試験方法 JEAC4201-2007, 日本電気協会 原子力規格委員会.
- 4.2.3(4)-2) 発電用原子力設備規格 維持規格(2012年版), 日本機械学会.
- 4.2.3(4)-3) EPRI report 1020958, “Material Reliability Program: Development of Material Constitutive Model for Irradiated Austenitic Stainless Steels (MRP-135-Rev. 1), “ October, 2010.
- 4.2.3(4)-4) G. R. Odette, G. E. Lucas, “The effects of intermediate temperature irradiation on the mechanical behavior of 300-series austenitic stainless steels”, J. Nucl. Mater. , 179-181(1991)572.
- 4.2.3(4)-5) H. Arai, S. Masamori, T. R. Mager, M. akiyama, T. Okubo, Y. Mishima, “Irradiation embrittlement of PWR reactor internals”, ASME/JSME Nuclear Engineering Conference, vol. 2, ASME 1993, p. 101.
- 4.2.3(4)-6) T. Torimaru, M. Kodama, S. Tanaka, T. Nakamura, K. Asano, K. Kumagai, “Neutron flux effect on the irradiation hardening of type 304 stainless steel”, J. ASTM Int. , 2(2005) JAI12843.
- 4.2.3(4)-7) K. Fukuya, K. Fujii, H. Nishioka, K. Takakura, K. Nakata, “A Prediction Model of IASCC Initiation Stress for Bolts in PWR Core Internals”, Nucl. Eng. Design, 420(2010)473.
- 4.2.3(4)-8) R. L. Fish, N. S. Cannon, G. L. Wire, “Tensile property correlation for highly irradiated 20 percent cold-worked type 316 stainless steel”, Effects of radiation on Materials, ASTM STP683, ASTM, 1979, p. 450.
- 4.2.3(4)-9) M. L. Grossbeck, “Empirical relations for tensile properties of austenitic stainless steels irradiated in mixed-spectrum reactors”, J. Nucl. Mater. , 179-181(1991)568.
- 4.2.3(4)-10) K. Fukuya, M. Nakano, K. Fujii, T. Torimaru, “IASCC susceptibility and slow tensile properties of highly-irradiated 316 stainless steels”, J. Nucl. Sci. Tech. , 41(2004)673.
- 4.2.3(4)-11) S. Jitsukawa, M. L. Grossbeck, A. Hishinuma, “Stress-strain relations of irradiated stainless steels below 673K”, J. Nucl. Mater. , 191-194(1992)790.
- 4.2.3(4)-12) M. N. Gussev, T. S. Byun, J. T. Busby, “Description of strain hardening behavior in neutron-irradiated fcc metals”, J. Nucl. Mater. , 427(2012)62.
- 4.2.3(4)-13) 橋内裕寿, 茶谷一宏, 越石正人, 「中性子照射ステンレス鋼の高精度な応力-ひずみ線図」, 日本原子力学会「2015年春の年会」C33.

- 4.2.3(4)-14) T. S. Byun, K. Farrell, “Plastic instability in polycrystalline metals after low temperature irradiation”, *Acta Mater.* , 52(2004)1597.
- 4.2.3(4)-15) E. Hubert, S. Chapuliot, M. Coret, L. Fournier, K. Fleurisson, M. Zouari, “Development of material constitutive model for irradiated austenitic stainless steels: Elastic-plastic model”, *Proc. 8th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations and Operating Experience to LWRs’ Safety, Performance and Reliability (Fontevraud 8)*, FNES, 2014.
- 4.2.3(4)-16) M. Kamaya, “Stress-strain curve estimation procedures for stainless steels based on yield and ultimate strengths”, *Eng. Frac. Mech.* , 127(2014)194.
- 4.2.3(4)-17) O. K. Chopra, “Degradation of LWR core internal materials due to neutron irradiation”, *NUREG/CR-7027, ANL-10/11*, December 2010.
- 4.2.3(4)-18) O. K. Chopra, A. S. Rao, “A review of irradiation effects on LWR core internal materials – neutron embrittlement”, *J. Nucl. Mater.*, 412(2011) 195.
- 4.2.3(4)-19) *Materials Reliability Program: PWR Internals Material Aging Degradation Mechanism Screening and Threshold Values (MRP-175)* . EPRI, Palo Alto, CA: 2005. 1012081.
- 4.2.3(4)-20) R. G. Carter, R. M. Gamble, “Assessment of the fracture toughness of irradiated stainless steel for BWR core shrouds”, *Fontevraud 5*, 2002.
- 4.2.3(4)-21) A. Demma, R. Carter, A. Jenssen, T. Torimaru, R. Gamble, “Fracture toughness of highly irradiated stainless steels in boiling water reactors”, *Proc. 13th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, NACE*, 2007.
- 4.2.3(4)-22) S. Fyfe, H. Xu, A. Demma, R. Carter, R. Gamble, P. Scott, “Fracture toughness of irradiated stainless steel in nuclear power systems”, *Proc. 14th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, ANS*, 2009.
- 4.2.3(4)-23) J. K. McKinley, E. W. Deemer, R. J. Jacko, R. G. Lott, “Crack growth rate and fracture toughness of austenitic stainless steels in a PWR primary water environment”, *Proc. 14th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, ANS*, 2009.
- 4.2.3(4)-24) W. G. Wolfer, R. H. Jones, “Flow and fracture of alloys in the fusion environment”, *J. Nucl. Mater.*, 103&104 (1981) 1305.



- 4.2.3(4)-25) J. M. Krafft, "Correlation of plane strain crack toughness with strain hardening coefficients of a low, medium and a high strength steel", *Appl. Mater. Res.*, 3 (1964) 88.
- 4.2.3(4)-26) M. L. Hamilton, F. A. Garner, "Correlation of fracture toughness with tensile properties for irradiated 20% cold-worked 316 stainless steel", *J. Nucl. Mater.*, 122&123 (1984) 106.
- 4.2.3(4)-27) M. L. Hamilton, F. A. Garner, W. J. S. Yang, "Prediction of fracture toughness in irradiated AISI 316 based on a tensile-toughness correlation", *Nucl. Tech.*, 10 (1986) 405.
- 4.2.3(4)-28) G. R. Odette, G. E. Lucas, "The effects of intermediate temperature irradiation on the mechanical behavior of 300-series austenitic stainless steels", *J. Nucl. Mater.*, 179-181 (1991) 572.
- 4.2.3(4)-29) G. R. Odette, G. E. Lucas, "Deformation and fracture in irradiated austenitic stainless steels", *J. Nucl. Mater.*, 191-194 (1992) 50.
- 4.2.3(4)-30) S. Nishimura, H. Sakamoto, T. Kato, "Study on ductile fracture strain and fracture toughness of irradiated austenitic stainless steels", *Effects of radiation on Materials: 21st Int. Symp., ASTM STP 1447, ASTM, 2004, p. 15.*
- 4.2.3(4)-31) K. Takakura, K. Nakata, K. Fujimoto, K. Sakima, N. Kubo, "IASCC Properties of Cold Worked 316 Stainless Steel in PWR Primary Water", *Proc. 14th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, ANS, 2009.*
- 4.2.3(4)-32) PWR 炉内構造物点検評価ガイドライン[バッフルフォーマボルト] (第2版)、JANSI-VIP-05-第2版、原子力安全推進協会、平成26年3月。
- 4.2.3(4)-33) H. Nishioka, K. Fukuya, K. Fujii, T. Torimaru, "IASCC initiation in highly irradiated stainless steels under uniaxial constant load conditions", *J. Nucl. Sci. Tech.*, 45 (2008) 1072.
- 4.2.3(4)-34) R. Pathania, R. Carter, A. Demma, "Overview of EPRI research on effects of irradiation on LWR internals", *Proc. 7th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 7), FNES, 2010.*
- 4.2.3(4)-35) EPRI report 1012081, "Materials Reliability Program: PWR Internals Material Aging Degradation Mechanism Screening and Threshold Values (MRP-175)", December 2005.
- 4.2.3(4)-36) P. D. Freyer, T. R. Mager, M. A. Burke, "Hot cell crack initiation testing of various heats of highly irradiated 316 stainless steel components

- obtained from three commercial PWRs”, Proc. 13th Int. Conf. Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System - Water Reactors, NACE, 2007.
- 4.2.3(4)-37) O. K. Chopra, A. S. Rao, “A review of irradiation effects on LWR core internal materials – IASCC susceptibility and crack growth rates of austenitic stainless steels”, J. Nucl. Mater., 409 (2011) 235.
- 4.2.3(4)-38) C. Pokor, A. Toivonen, M. Wintergerst, U. Ehrnsten, W. Karlsen, J. -P. Massoud, “Determination of the time to failure curve as a function of stress for a highly irradiated AISI 304 stainless steel after constant load tests in simulated PWR water environment”, Proc. 7th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 7), FNES, 2010.
- 4.2.3(4)-39) C. Pokor, G. Courtemanche, JL. Flejou, M. Tommy-Martin, I. Rupp, B. Tanguy, J-P. Massoud, N. Monteil, “IASCC of Core Internals of PWRs : EDF R&D and Engineering program to assess internals lifetime management”, Proc. 7th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 7), FNES, 2010.
- 4.2.3(4)-40) R. W. Bosch, M. Vankeerberghen, R. Gérard, F. Somville, “Crack initiation testing of thimble tube material under PWR conditions to determine a stress threshold for IASCC”, J. Nucl. Mater., 461(2015) 112.
- 4.2.3(4)-41) V. Fedorova, B. Margolin, “Method for estimation of pressure vessel internals lifetime on IASCC criterion”, Proc. ASME 2013 Pressure Vessels and Piping Conference PVP2013, PVP2013-97949, 2013.
- 4.2.3(4)-42) 平成 20 年度照射誘起応力腐食割れ(IASCC)評価技術に関する報告書、原子力安全基盤機構、平成 21 年 7 月
- 4.2.3(4)-43) K. Takakura, S. Tanaka, T. Nakamura, K. Chatani, Y. kaji, “IASCC evaluation method for irradiated core internal structures in BWR power plants”, Proc. ASME 2010 Pressure Vessels & Piping Division / K-PVP Conference PVP2010, ASME, PVP2010-25293, 2010.
- 4.2.3(4)-44) BWR 炉内構造物点検評価ガイドライン[炉心シュラウド ](第 5 版)、原子力安全推進協会 炉内構造物等点検評価ガイドライン検討会、平成 27 年 3 月
- 4.2.3(4)-45) 発電設備技術検査協会, 「プラント長寿命化技術開発調査報告書」(昭和 60 年度～平成 8 年度)

- 4.2.3(4)-46) E. D. Eason, R. Pathania, “Disposition curves for irradiation-assisted stress corrosion cracking of austenitic stainless steels in light water reactor environments”, Proc. ASME 2015 Pressure Vessels & Piping Conference PVP2015, ASME, PVP2015-45323, 2015.
- 4.2.3(4)-47) E. D. Eason, R. Pathania, “Irradiation-assisted stress corrosion crack growth rates of austenitic stainless steels in light water reactor environments”, Proc. 17th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, NACE, 2015.
- 4.2.3(4)-48) W. S. Hazelton, W. H. Koo, “Technical report on material selection and processing guideline for BWR coolant pressure boundary piping, Final report”, NUREG-0313, Rev. 2, 1988.
- 4.2.3(4)-49) Y. Ishiyama, K. Nakata, M. Obata, H. Anzai, S. Tanaka, T. Tsukada, K. Asano, “Stress Relaxation Caused by Neutron-Irradiation at 561 K in Austenitic Stainless Steels”, Proc. 11th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors, ANS, 2003.
- 4.2.3(4)-50) Y. Ishiyama, R. B. Rogge, M. Obata, “Radiation-induced stress relaxation in high temperature water of type 316L stainless steel evaluated by neutron diffraction”, J. Nucl. Mater., 408 (2011) 153.
- 4.2.3(4)-51) M. Obata, J. H. Root, Y. Ishiyama, K. Nakata, H. Sakamoto, H. Anzai, K. Asano, “Radiation-Induced Stress Relaxation of Welded Type 304 Stainless Steel Evaluated by Neutron Diffraction”, J. ASTM Int., 3 (2006) JAI12348.
- 4.2.3(4)-52) A. R. Causey, G. J. C. Carpenter, S. R. MacEwan, “In-reactor stress relaxation of selected metals and alloys at low temperatures”, J. Nucl. Mater., 90 (1980) 216.
- 4.2.3(4)-53) J. P. Foster, T. Karlsen, “Irradiation creep and irradiation stress relaxation of 316 and 304L stainless steel”, 14th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, ANS, 2009.
- 4.2.3(4)-54) J. P. Foster, T. Karlsen, “Irradiation creep and irradiation stress relaxation of 316 and 304L stainless steel in thermal and fast neutron spectrum reactors”, 15th Int. Conf. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems, TMS, 2011.
- 4.2.3(4)-55) J. Garnier, P. Dubuisson, C. Pokor, E. Lemaire, N. Monteil, J. -P. Massoud, “Relaxation and irradiation creep of PWR baffle bolt

- materials”, Proc. 7th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 7), FNES, 2010.
- 4.2.3(4)-56) J. P. Foster, J. E. Flinn, “Residual stress behavior in fast neutron irradiated SA AISI 304L stainless steel cylindrical tubing, J. Nucl. Mater., 89 (1980) 99.
- 4.2.3(4)-57) T. Matsubara, T. Tsutsui, Y. kamei, M. Kitsuo, “Stress evaluation of baffle former bolt for IASCC failure prediction”, Proc. 7th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 7), FNES, 2010.
- 4.2.3(4)-58) C. Pokor, G. Courtemanche, JL. Flejou, M. Tommy-Martin, I. Rupp, B. Tanguy, J-P. Massoud, N. Monteil, “IASCC of Core Internals of PWRs : EDF R&D and Engineering program to assess internals lifetime management”, Proc. 7th Int. Symp. Contribution of Materials Investigations to Improve the Safety and Performance of LWRs (Fontevraud 7), FNES, 2010.
- 4.2.3(4)-59) J. F. Betas, M. K. Korenko, “Empirical development of irradiation-induced swelling design equations”, Nucl. Technol. 48 (1980) 303.

### 4.3 材料照射キャプセル及び照射後試験装置等の整備

#### 4.3.1 照射脆化キャプセルの点検維持

本年度は、組立後 JMTR で保管しているキャプセルにおいて、計装線の絶縁性能の低下が確認されたものについて、部分解体し補修を行った。また、保管中に性能低下等が確認されなかったキャプセルについては、性能維持及び劣化防止ための点検維持作業を行った。

- ・「照射脆化キャプセル補修用レジューサの製作」

キャプセルの補修については、レジューサ部を切断して行い、切断した部品の再利用が不可能であるため、切断部の部品であるレジューサについて再製作を行った。

- ・「照射脆化キャプセル補修用品の購入」

キャプセルの補修作業を行うための、補修用品を購入した。

- ・「照射脆化キャプセル補修用補償導線の購入」

熱電対の補修作業に用いる、熱電対用補償導線を購入した。

- ・「照射脆化キャプセルの輸送」

補修作業は原子力科学研究所工作工場において行うため、計装線の絶縁性能の低下が確認された照射脆化大型試験片キャプセル 2 体（10M-03AG、12M-02AG）及び照射脆化キャプセル 2 体（12M-04AG、12M-07AG）については、JMTR から原子力科学研究所工作工場への輸送を実施した。

図 4.3.1-1 に補修用レジューサの写真を、図 4.3.1-2 に補修用品、補修用補償導線の写真を示す。



図 4.3.1-1 補修用レジューサ



図 4.3.1-2 補修用品、補修用補償導線

#### 4.3.2 疲労試験機の整備

照射済みのシャルピー衝撃試験片から切り出した小型試験片(Mini-CT)を用いた、材料特性試験(疲労予き裂導入試験、破壊靱性試験および高温予荷重効果(WPS)試験)を実施するため、疲労試験機及び恒温槽を本年度に整備した。

##### ①疲労試験機

荷重範囲	: ±10 kN
構造	: 2本柱 上部アクチュエータ式
本体寸法	: 幅 960×奥行 856.5×高さ 2857 mm
試験空間	: 幅 440×高さ 600 mm
制御方式	: 電磁式アクチュエータ
ロードフレーム	: 2本支柱型ロードフレーム モーターによりクロスヘッドが昇降可能
アクチュエータ	: 試験軸心上に負荷を与えるアクチュエータがあるシリンダー駆動 方向は、試験軸方向(上下)可動範囲は、60 mm
開口変位計	: 測定範囲 3～3.5mm

##### ②恒温槽

温度範囲	: -150℃～+290℃
本体寸法	: 幅 440×奥行 745×高さ 600 mm
試験室寸法	: 幅 240×奥行 400×高さ 400 mm
冷却方式	: 窒素ガス噴射方式
加熱方式	: ヒーター加熱

#### 4.3.3 画像寸法測定機の整備

NCフライス盤、放電加工機を用いて製作した小型試験片(Mini-CT)及びSS-3型引張試験片の寸法測定を実施するため、画像寸法測定機及び表面粗さ測定機を本年度に整備した。

図4.3.3-1に画像寸法測定機、図4.3.3-2に表面粗さ測定機を示す。

##### 画像寸法測定機

測定範囲	: 24mm×18mm～1.9mm×1.4mm
観察倍率	: 12×～160×
幅測定繰返し精度	: $\sigma = 0.5 \mu\text{m}$
作動距離	: 75mm
撮像素子	: 400万画素モノクロ C-MOS
ステージ	: XY ストローク 184mm×88mm (電動) XY 移動速度 10mm/s e c XY ステージサイズ 上面 215mm×165mm (回転プレート $\phi$ 140mm) Z ストローク 90mm(電動) 回転機構 $\pm 180^\circ$ チルト機構 $\pm 30^\circ$
耐環境性	: 使用周辺温度 15～30℃、使用周辺湿度 35～80%

##### 表面粗さ測定機

測定範囲	: 25mm(X軸)、800 $\mu\text{m}$ ,80 $\mu\text{m}$ ,8 $\mu\text{m}$ (Z軸)
分解能	: 0.01 $\mu\text{m}$ ～0.0001 $\mu\text{m}$
測定力	: 0.75mN
対応規格	: JIS1982、JIS1994、JIS2001、ISO1997、ANSI、VDA





図 4.3.3-1 画像寸法測定機

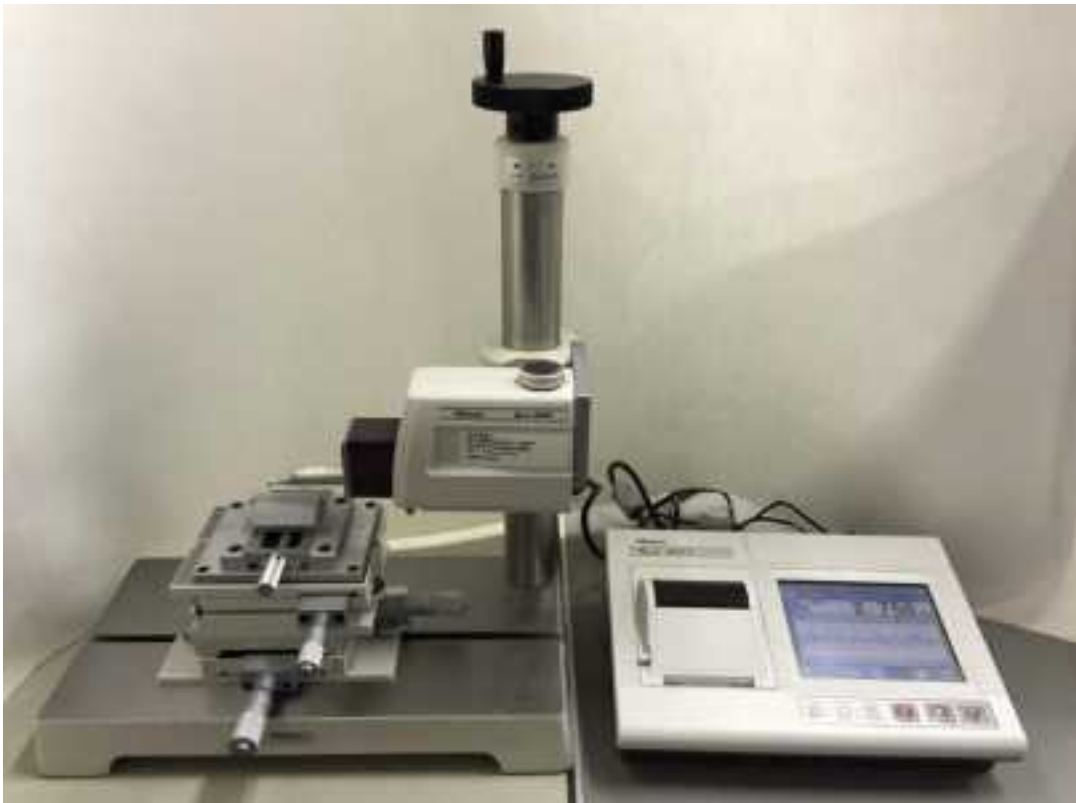


図 4.3.3-2 表面粗さ測定機

#### 4.3.4 放電加工装置の整備

##### 4.3.4.1 概要

放電加工装置は、原子力規制庁受託事業「軽水炉照射材料健全性評価研究」における原子炉压力容器鋼の照射脆化に関する試験研究に資する装置である。本装置の整備および点検によりマスターカーブ法の適用性確認などの試験研究に供する 0.16T-CT 試験片等の製作が可能である。

##### 4.3.4.2 放電加工装置の整備

本装置は、コンクリートセル内へ設置する予定であるため、遠隔操作での操作性を考慮し、各種電極および加工液循環フィルタの交換、専用治具等の脱着が容易にできる構造に整備を行った。

本装置は、セル内に設置する加工機本体および加工液循環ポンプ、セル外に設置する操作盤から構成される。放電加工装置を図 4.3.4-1 に示す。また、放電加工で生じる電極消耗を抑制する目的として、純タングステン電極（1.8t×20w×40L、3.0t×20w×40L）を加工用予備品として購入した。

本装置の整備および点検の結果、仕様並びに所期性能を十分満足していることを確認した。



図 4.3.4-1 放電加工装置

### 4.3.5 NCフライス盤の整備

#### 4.3.5.1 概要

NCフライス盤は、原子力規制庁受託事業「軽水炉照射材料健全性評価研究」における原子炉圧力容器鋼の照射脆化に関する試験研究に資する装置である。本装置の整備および点検によりマスターカーブ法の適用性確認などの試験研究に供する0.16T-CT試験片等の製作が可能である。

#### 4.3.5.2 NCフライス盤の整備

NCフライス盤はホットラボ施設コンクリートセル内へ設置し使用する予定である。そのため遠隔操作による装置操作を考慮し整備を行った。主軸の部分については遠隔操作での取外し交換が可能な構造とし、バイスについても試料が正確かつ容易にセッティング可能に整備した。また、試料の水平及び直角度を保持できる専用治具の制作を行った。

本装置は、セル内に設置する装置本体、セル外に設置する操作盤から構成される。NCフライス盤を図4.3.5-1、専用治具を図4.3.5-2に示す。

本装置の整備および点検の結果、所期性能を満足していることを確認した。



図 4.3.5-1 NCフライス盤



図 4.3.5-2 専用治具

#### 4.3.6. 照射済ステンレス鋼試験片の保管管理

##### (1)はじめに

本事業の照射誘起応力腐食割れ(IASCC)試験では、JMTR を用いて中性子照射したステンレス鋼の試験片を準備し(ベース照射の実施)、照射下き裂進展試験やホットラボを用いた照射後試験等に供する計画としている。それに先立ち、既存の中性子照射済試験片から、照射下き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、き裂進展速度評価及びそれに関連した評価に資する試験を実施して先行的にデータを取得することとしている。

旧原子力安全基盤機構が実施した「低炭素ステンレス鋼 SCC 進展への中性子照射影響実証」(以下 ENI 事業)では Halden 炉を用いたステンレス鋼試験片への中性子照射の実績がある。ここで照射された試験片の中性子照射量範囲は  $1 \times 10^{23} \sim 5 \times 10^{24} \text{ n/m}^2$ (4 照射レベル L1、L2、L3、L4 のレベル)であり、特に照射レベル L3、L4 は照射下き裂進展試験マトリクスでの照射量範囲に合致していることから、先行試験への活用が期待される。

そこで本項目では、既存の照射ステンレス鋼試験片活用の一環として、日本核燃料開発(株)(以下 NFD)のホットラボで保管されている ENI 事業の照射済試験片残材の保管管理を行った。

##### (2)実施内容

###### a. 照射済試験片の保管状態確認

照射済試験片の保管状態確認作業として、照射済試験片を保管用水密容器から取り出し、ホットセル内のデジタルマイクロスコープを用いて刻印を確認し外観写真を撮影した。確認作業の状況を図 4.3.6-1~2 に示す。

確認時の試験片外観写真を写真 4.3.6-1~112 に示す。保管状態確認後、対象の照射済試験片は再び保管用水密容器に収納し保管を継続した。

なお試験片 ID. 4W41、64HC901、KY04 については、平成 27 年度に MEXT 公募研究にて使用したため、2016 年 3 月時点での最終形態の確認結果を写真 4.3.6-14、-98 および-111 に示した。また、試験片 ID. 64HC405 は、平成 27 年度に照射後き裂進展試験に使用したため、平成 28 年年 3 月時点での最終形態を写真 4.3.6-92 に示した。

###### b. 保管用水密容器の点検作業

保管用水密容器の状態に問題がないことを目視にて点検した。点検作業は毎月 1 回程度の頻度で実施した。

##### (3)まとめ

NFD のホットラボで保管中の ENI 事業で中性子照射した照射済試験片の保管管理を

実施し、未使用、使用済共に、すべての残材が問題なく保管されていることを確認した。  
平成 27 年度末時点での試験片リストを添付資料に示す。

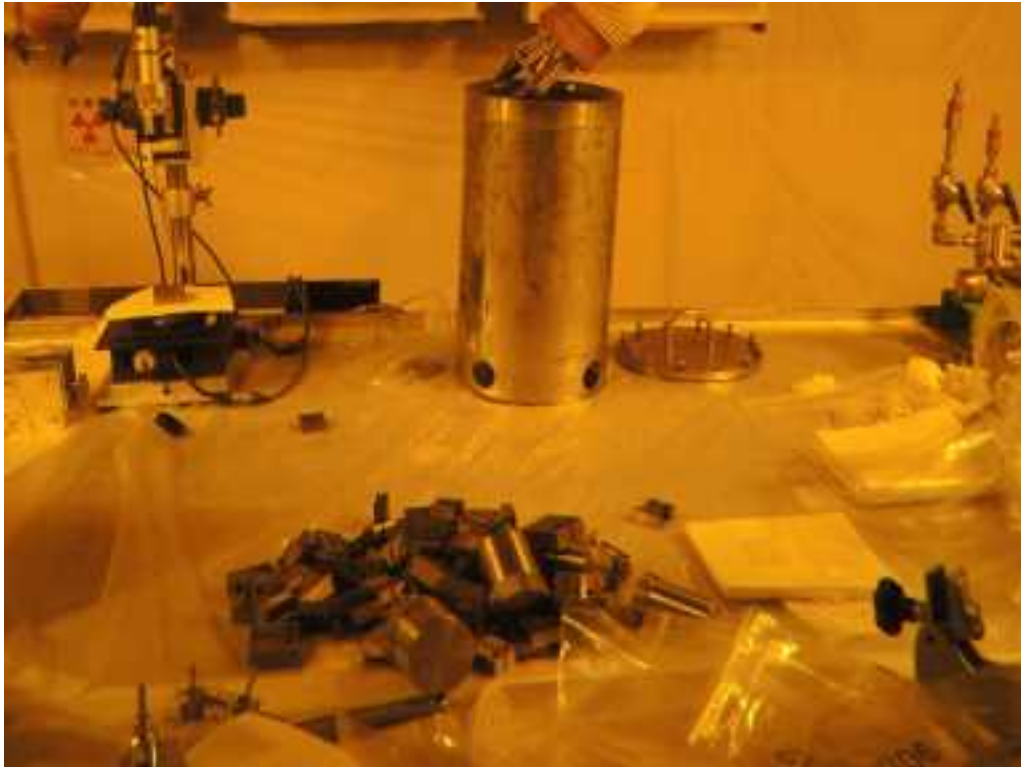


a. 対象試験片を保管中の水密容器のホットセルへの移動



b. 対象試験片を保管中の水密容器番号の確認

図 4.3.6-1 試験片確認作業状況



c. 水密容器からの対象試験片取り出し



d. 個々の試験片の保管状態の確認作業

図 4.3.6-2 試験片確認作業状況

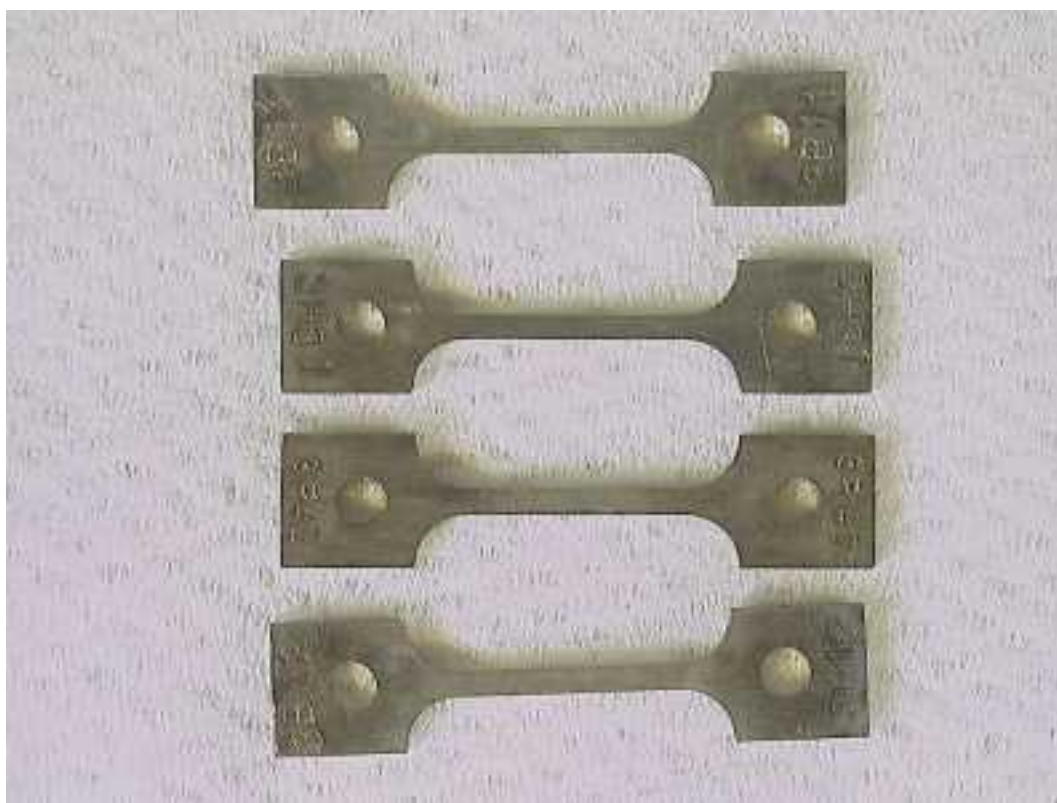


写真 4.3.6-1 試験片外観写真(3B11、3H31、3B42、3B12)

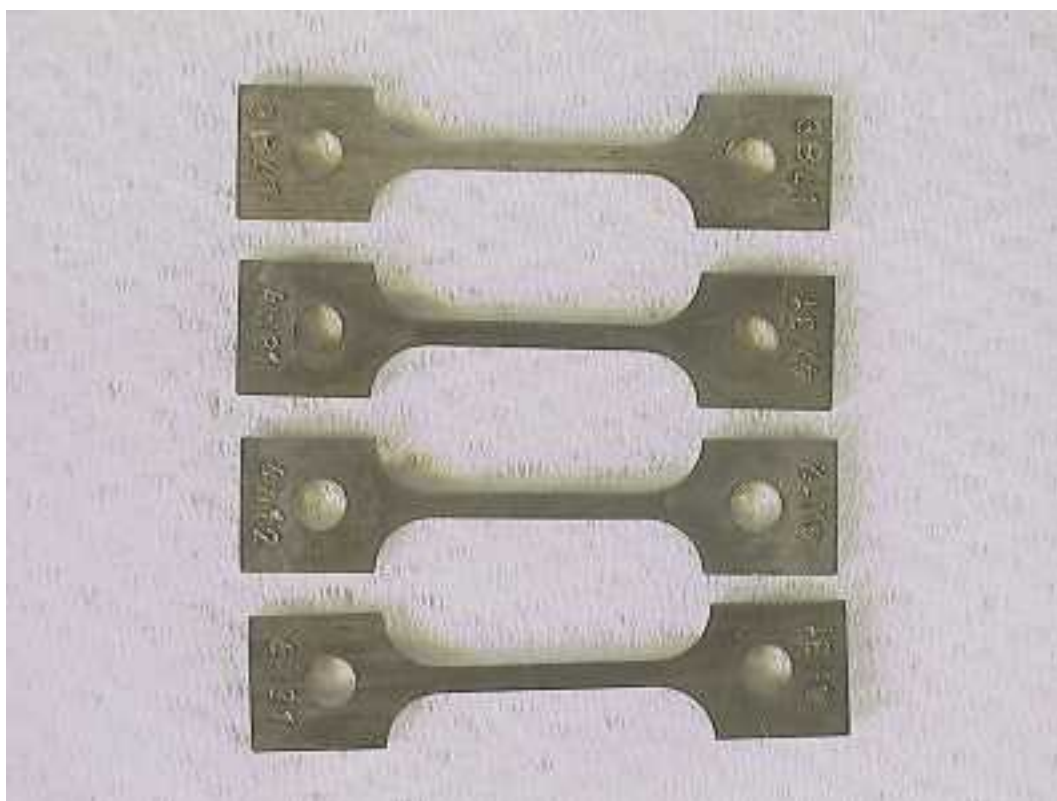


写真 4.3.6-2 試験片外観写真(3B41、4W31、4W12、4H31)



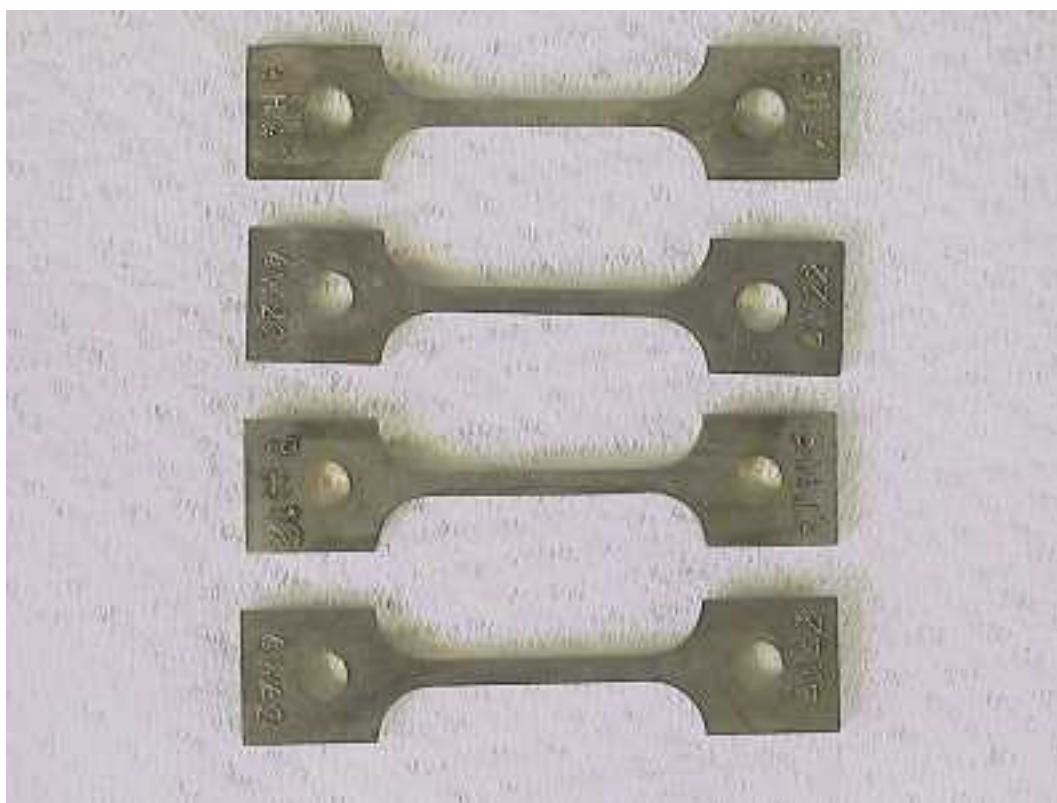


写真 4.3.6-3 試験片外観写真(3H41、4W22、3H12、4W42)

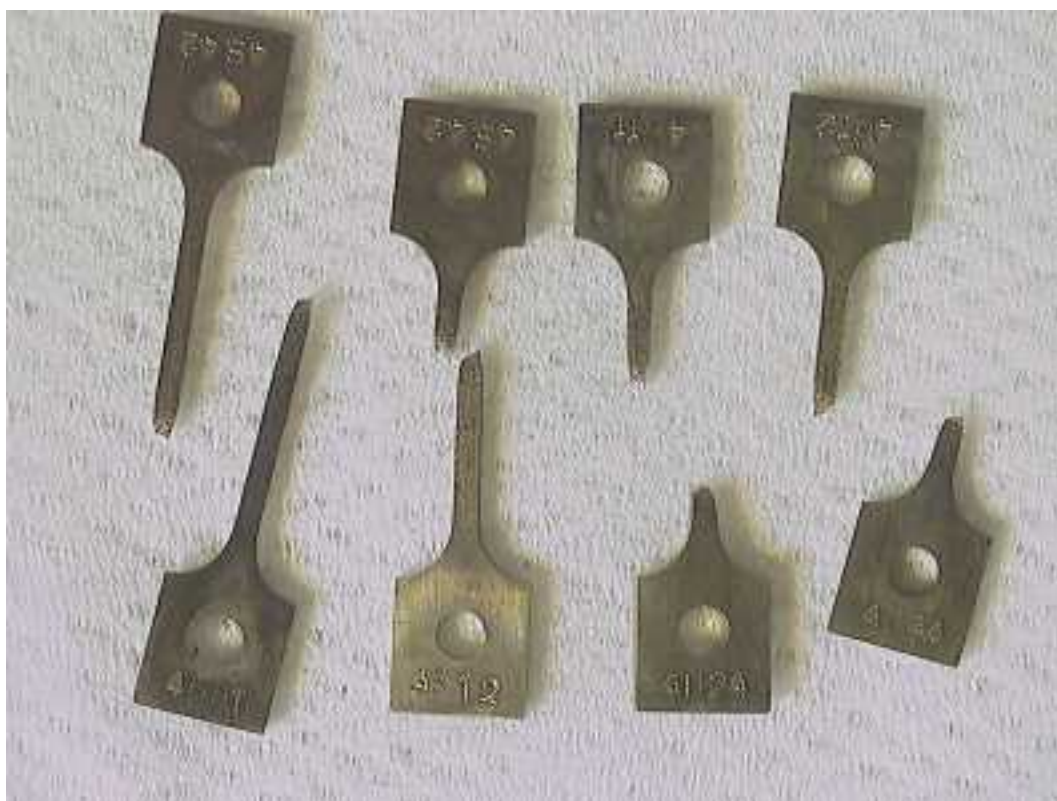


写真 4.3.6-4 試験片外観写真(4B42、4H91、4B12、4H11、4H24、4H12、4H44)

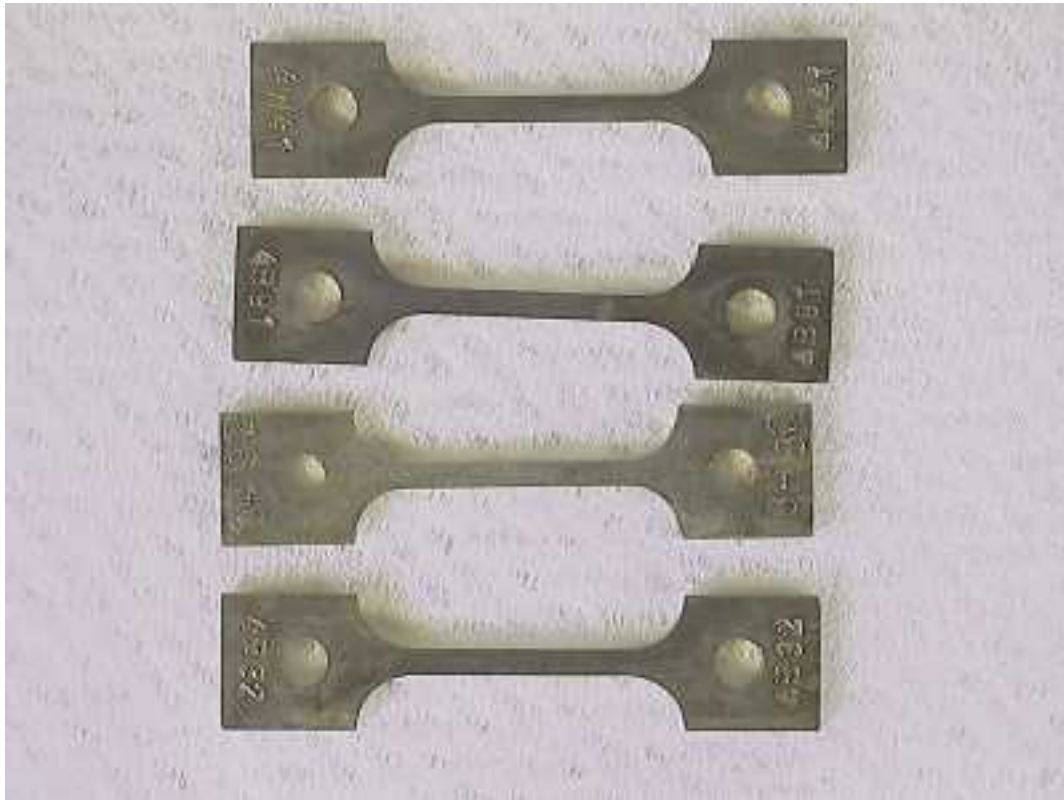


写真 4.3.6-5 試験片外観写真(4W41、4B91、3H32、4B32)



写真 4.3.6-6 試験片外観写真(4H21、4H22、4H41、4H14、4B41)



写真 4.3.6-7 試験片外観写真(4H24、4B11、4H42、4H23、4H13、4H92、4B21、4H43)

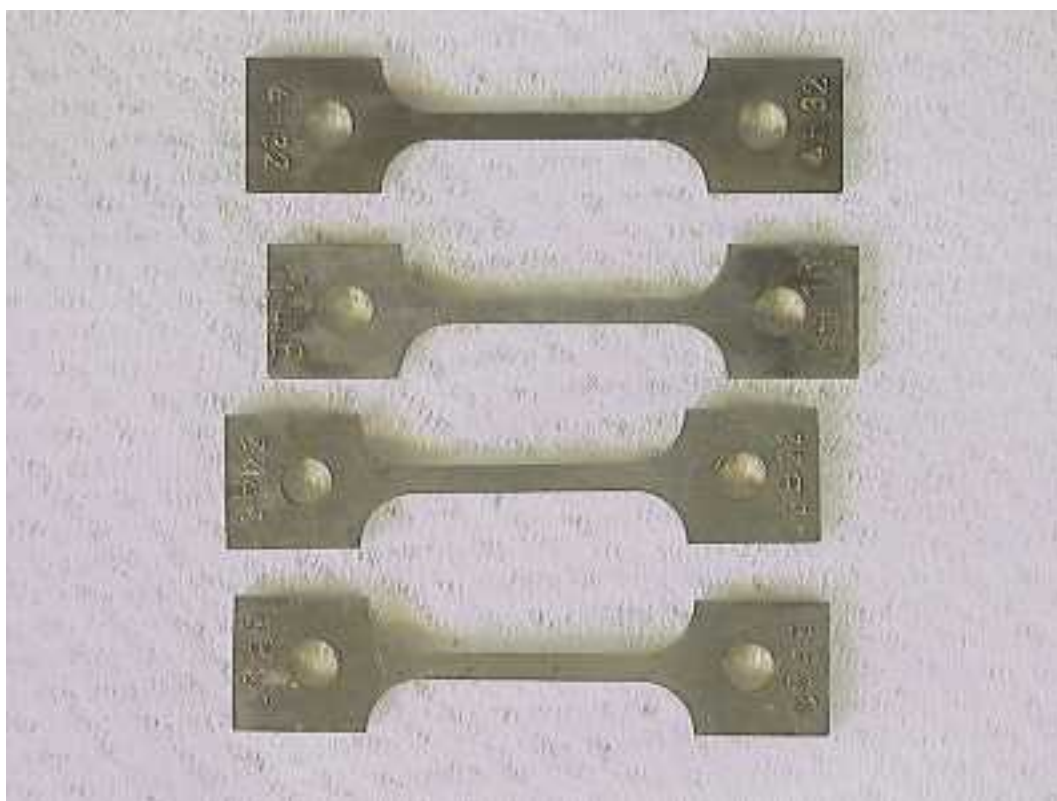


写真 4.3.6-8 試験片外観写真(4H32、3H11、3B22、3B21)

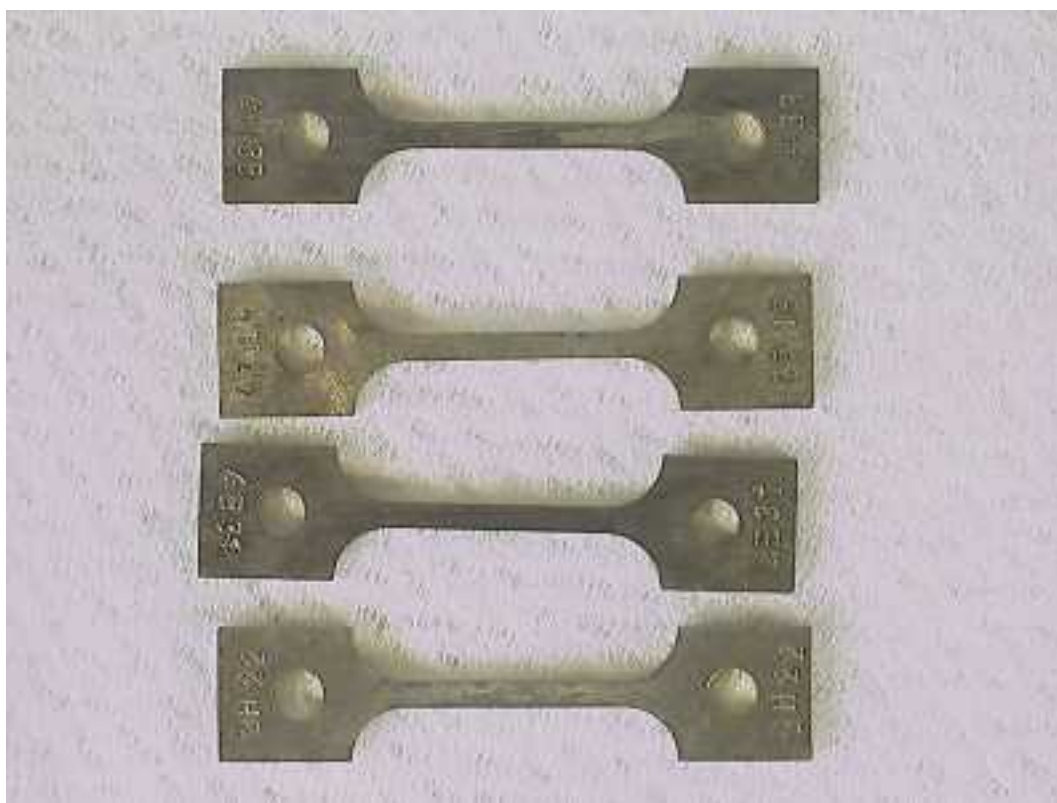


写真 4.3.6-9 試験片外観写真(4H33、3H42、4B31、3H22)

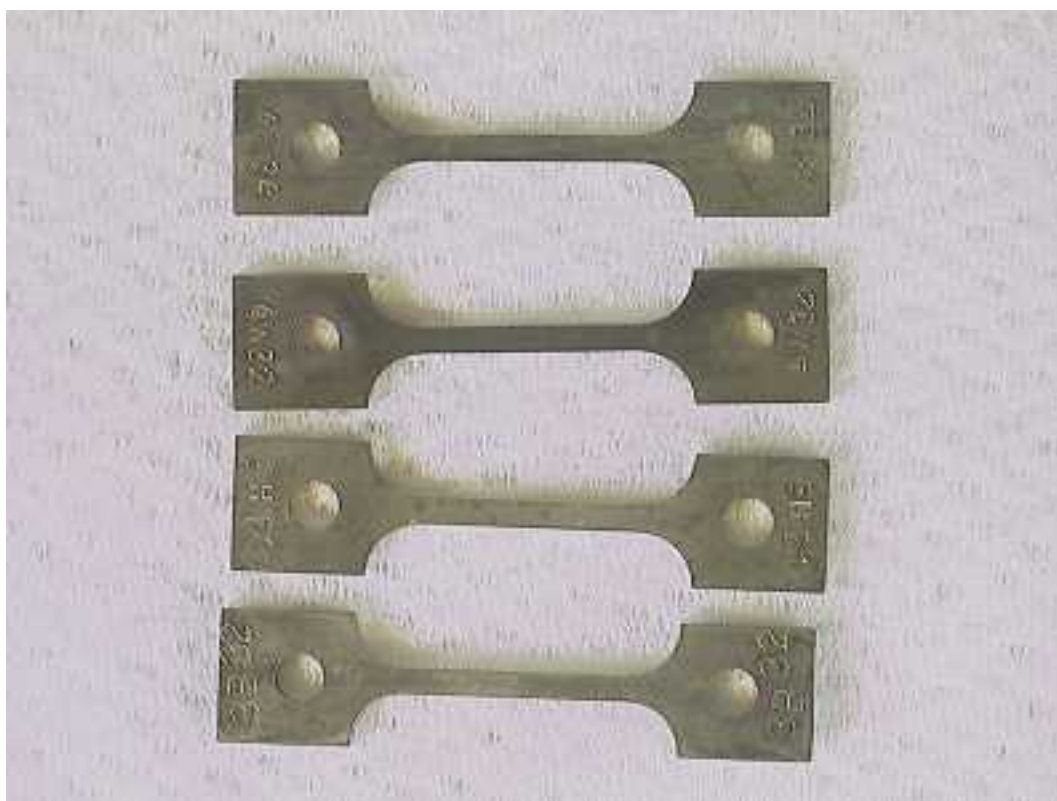


写真 4.3.6-10 試験片外観写真(4H34、4W32、3H21、3B32)



写真 4.3.6-11 試験片外観写真(4H44、4B22、4H12、4H42、4H14、4H22)



写真 4.3.6-12 試験片外観写真(4H92)

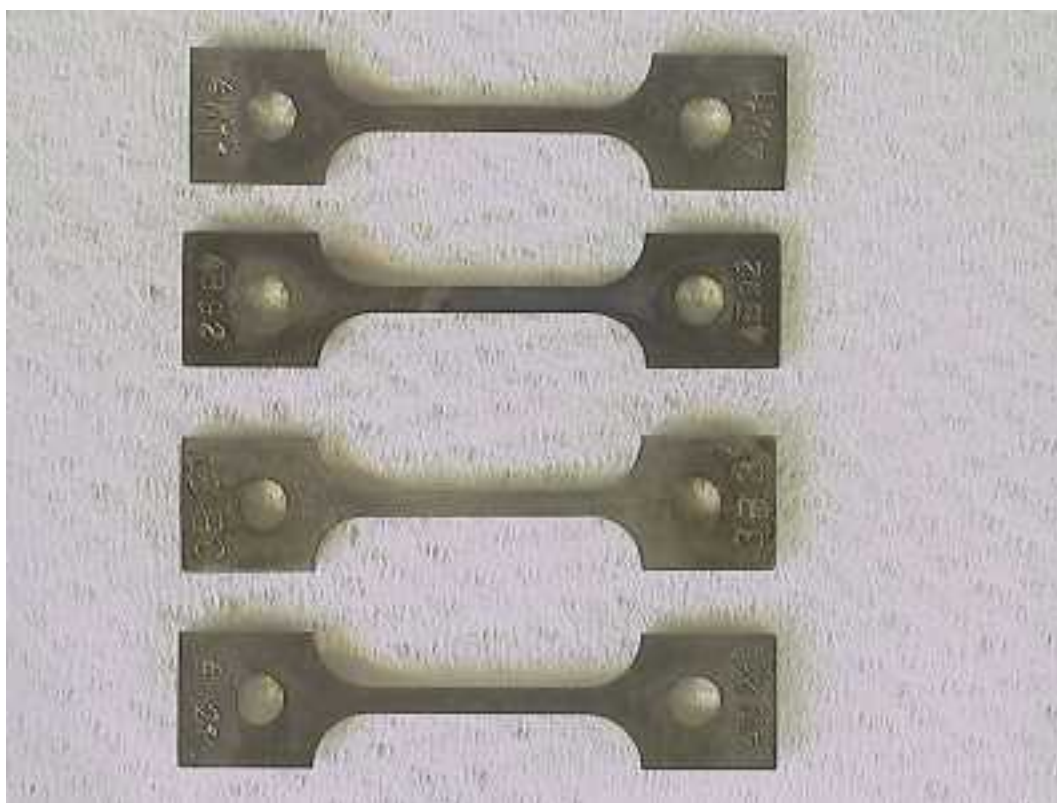


写真 4.3.6-13 試験片外観写真(4W11、4B92、3B31、4W21)

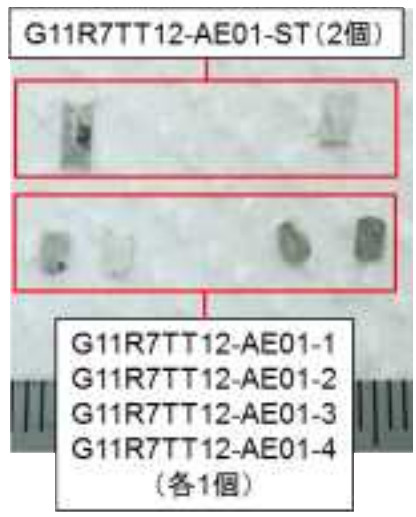
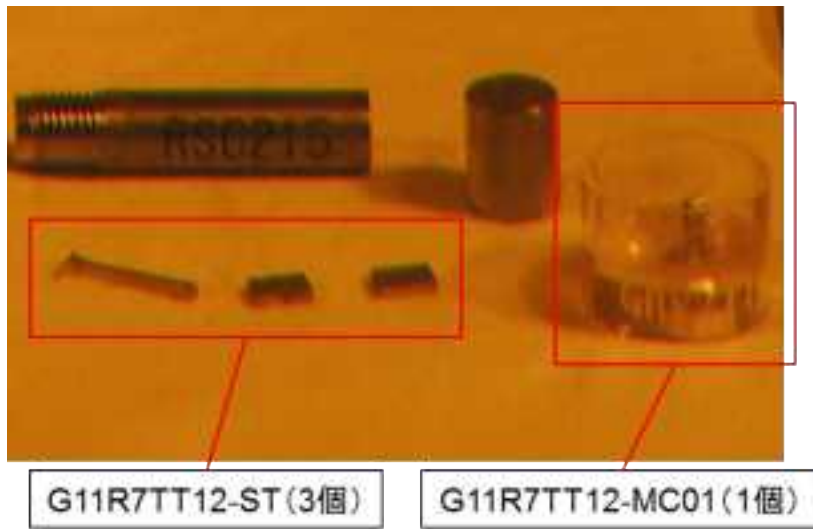


写真 4.3.6-14 試験片外観写真(4W41)



写真 4.3.6-15 試験片外観写真(63BC101)

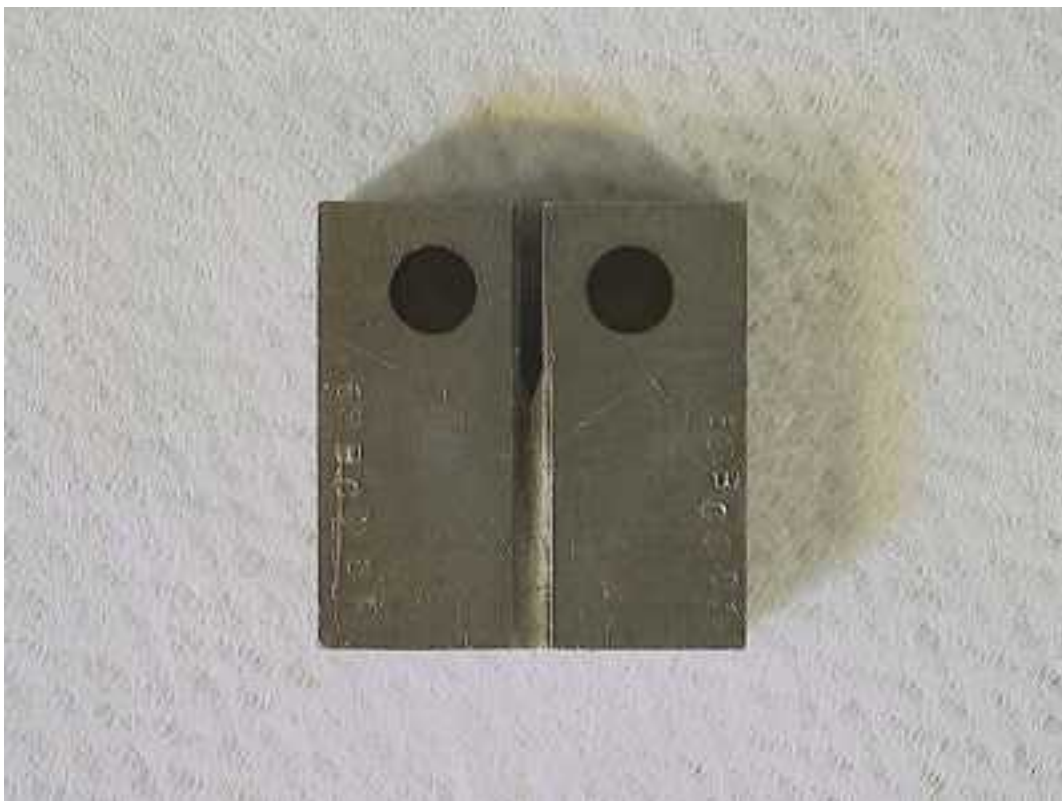


写真 4.3.6-16 試験片外観写真(63BC201)



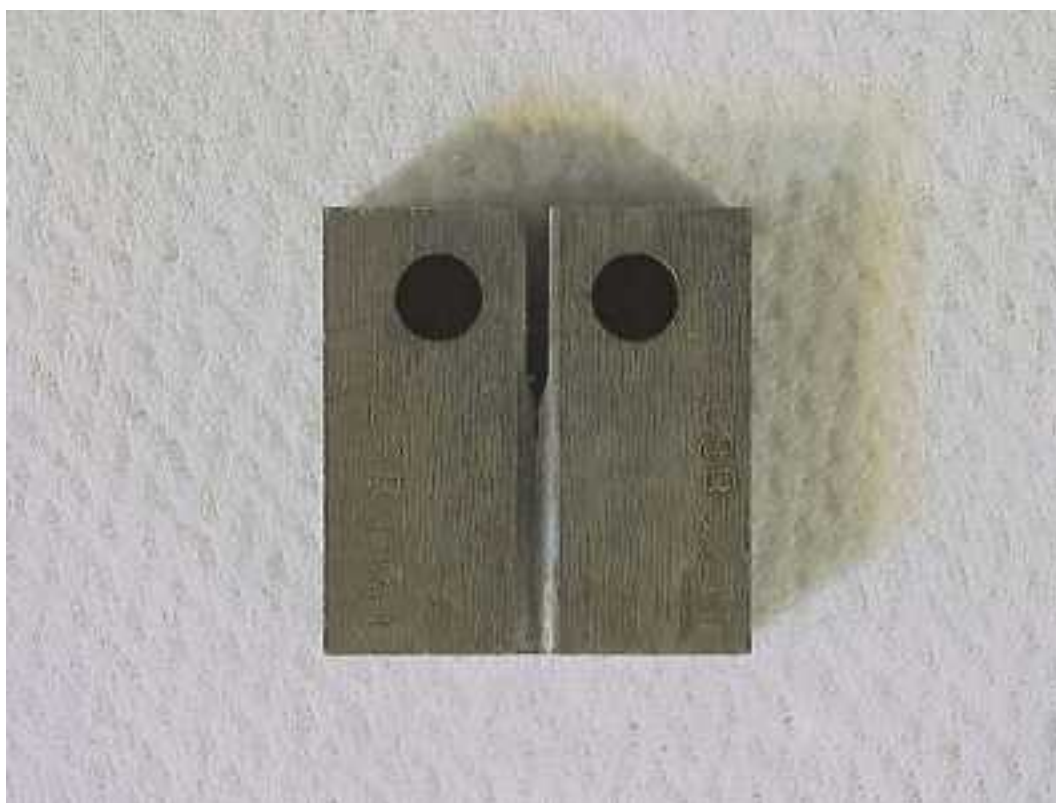


写真 4.3.6-17 試験片外観写真(63BC301)



写真 4.3.6-18 試験片外観写真(63BC401)



写真 4.3.6-19 試験片外観写真(63HC101)

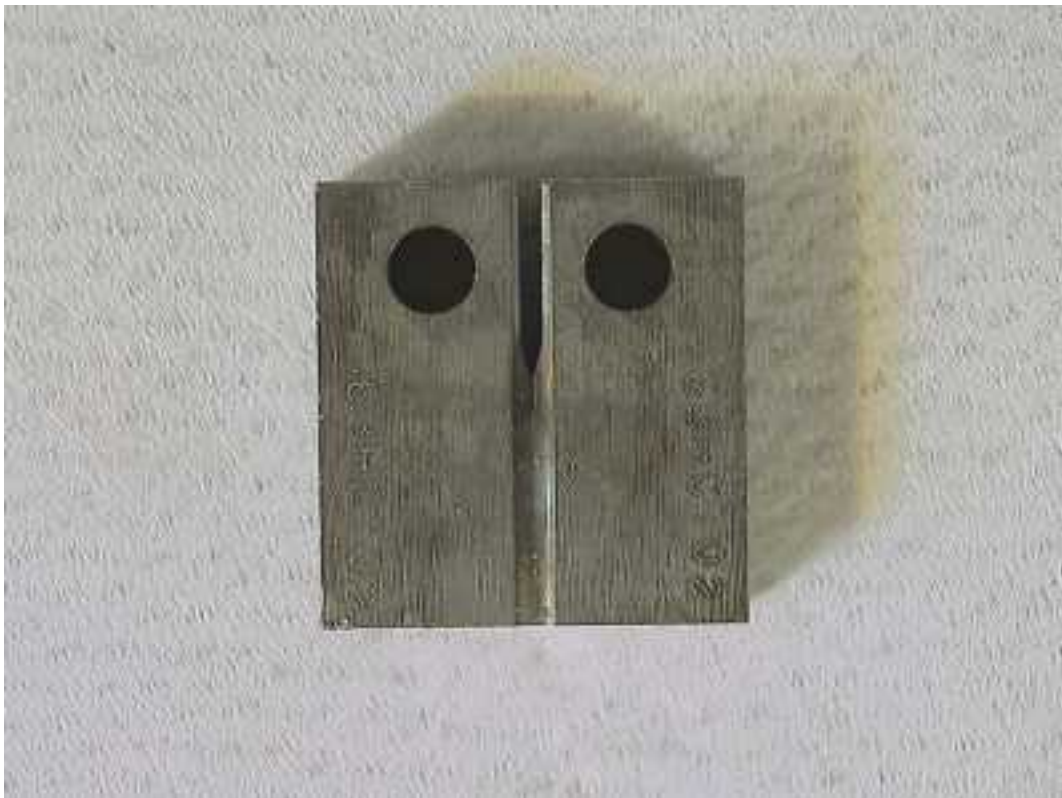


写真 4.3.6-20 試験片外観写真(63HC102)

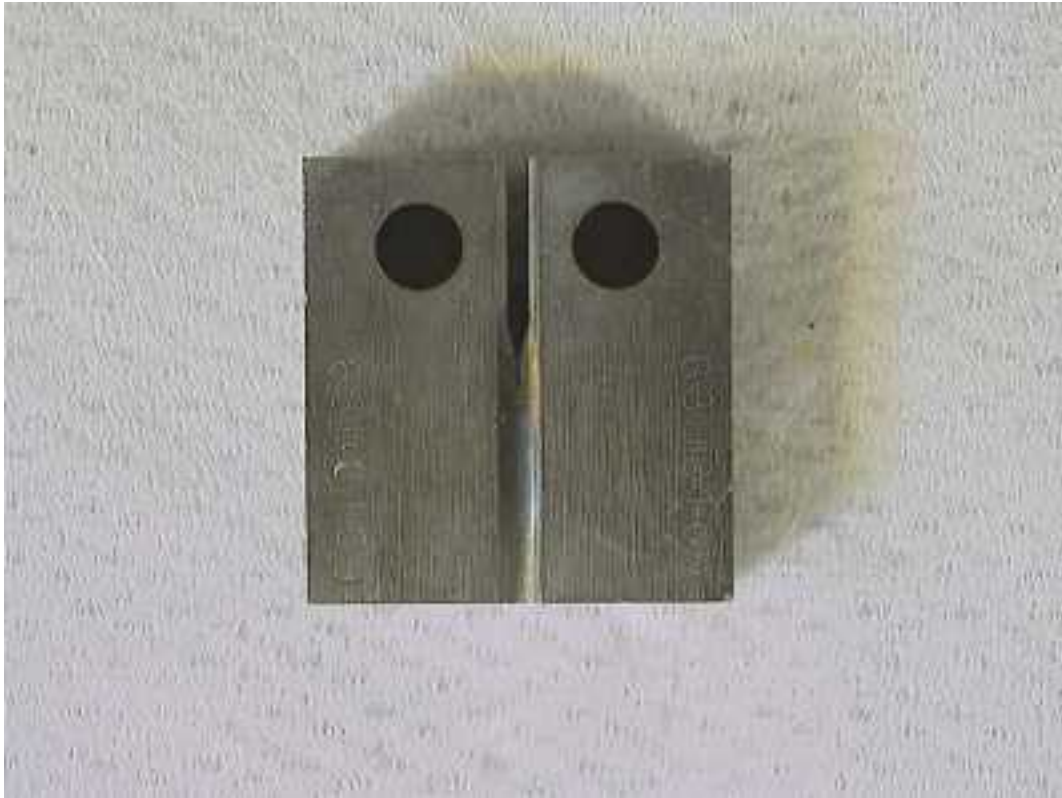


写真 4.3.6-21 試験片外観写真(63HC103)



写真 4.3.6-22 試験片外観写真(63HC104)



写真 4.3.6-23 試験片外観写真(63HC105)

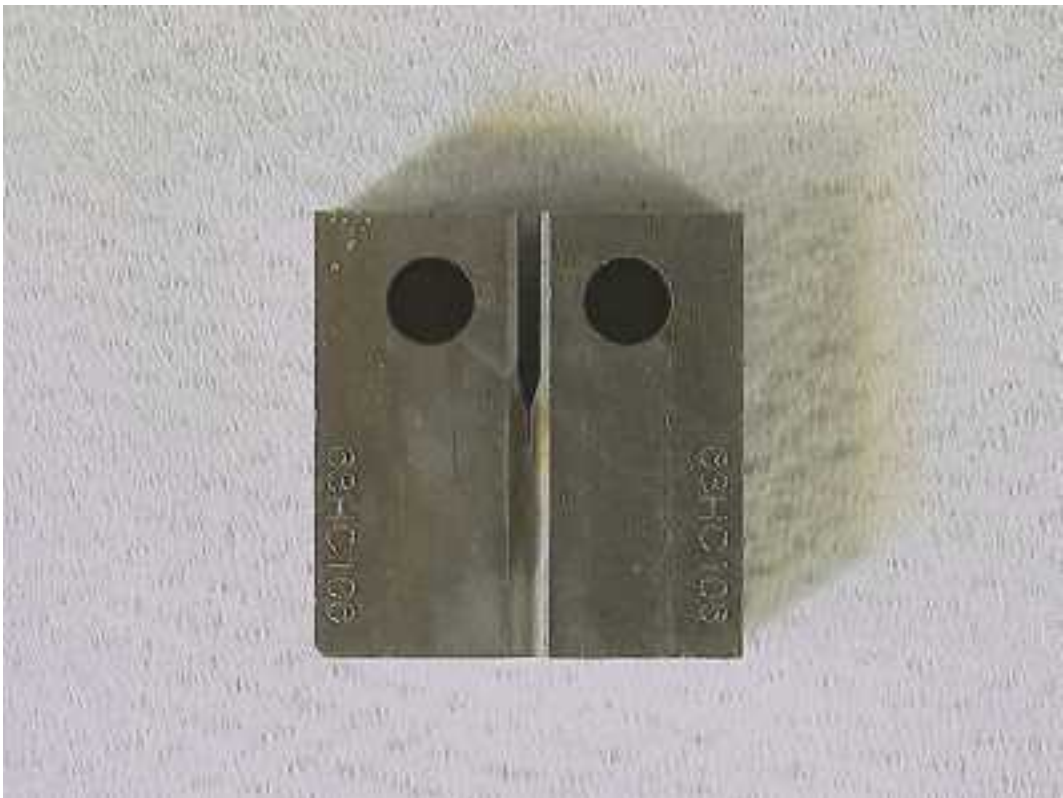


写真 4.3.6-24 試験片外観写真(63HC106)

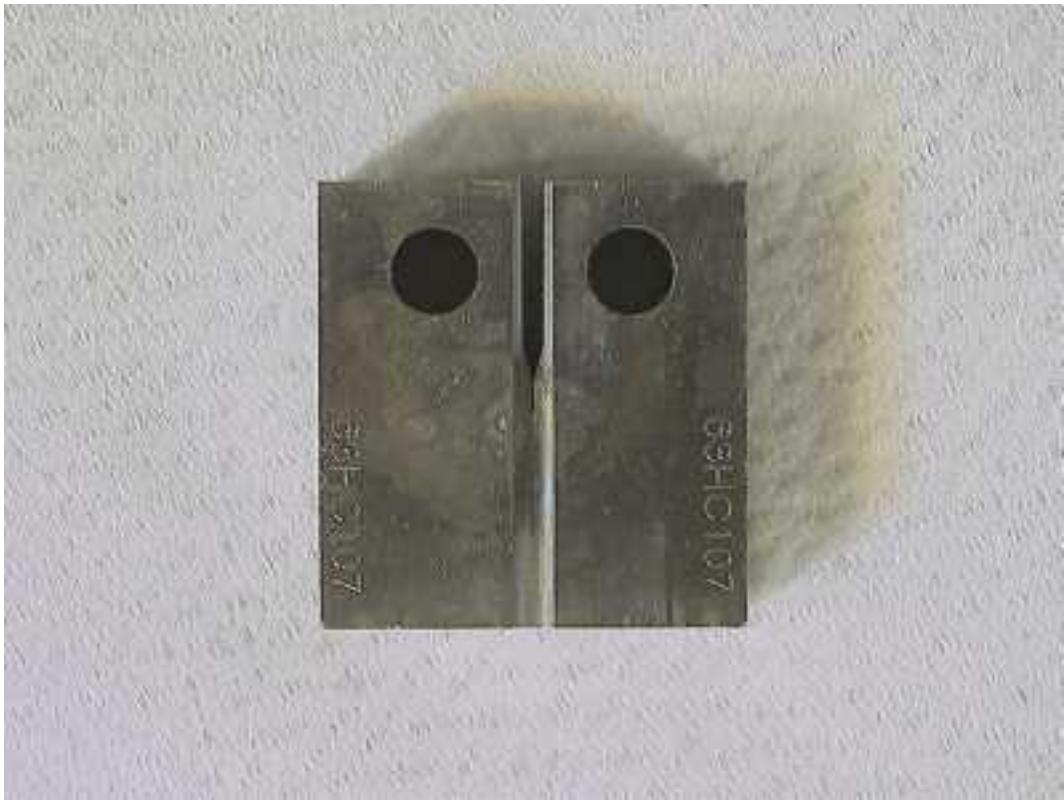


写真 4.3.6-25 試験片外観写真(63HC107)



写真 4.3.6-26 試験片外観写真(63HC108)



写真 4.3.6-27 試験片外観写真(63HC111)



写真 4.3.6-28 試験片外観写真(63HC121)

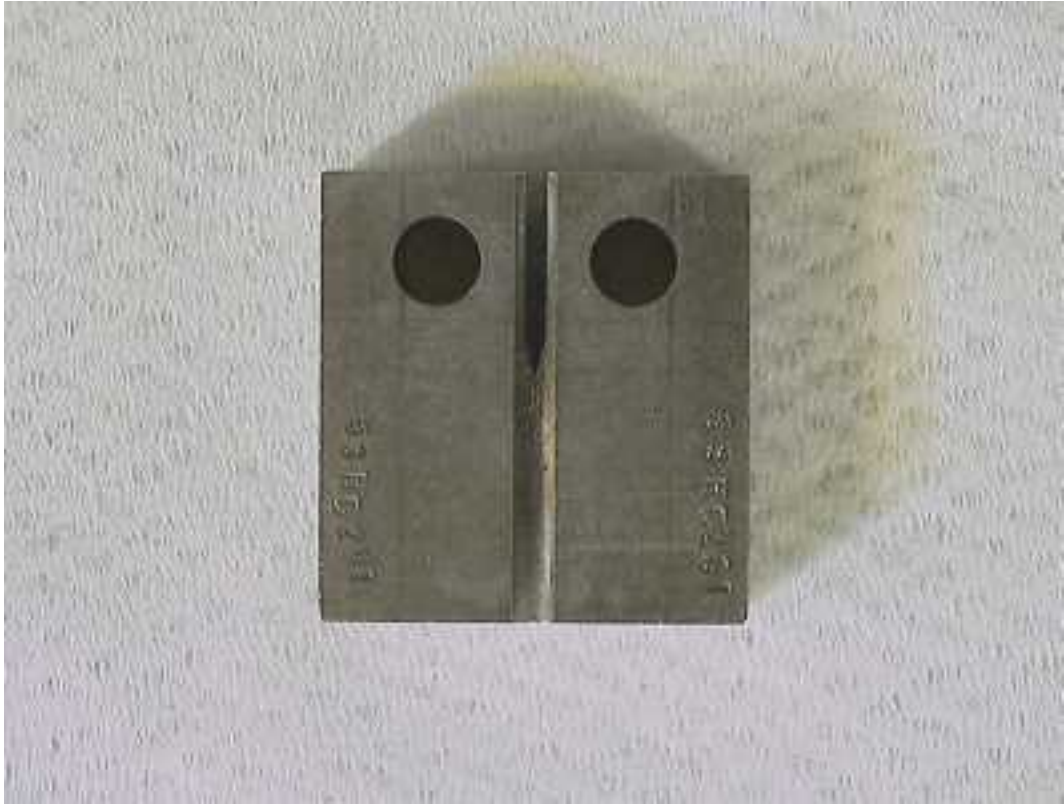


写真 4.3.6-29 試験片外観写真(63HC201)



写真 4.3.6-30 試験片外観写真(63HC202)



写真 4.3.6-31 試験片外観写真(63HC203)

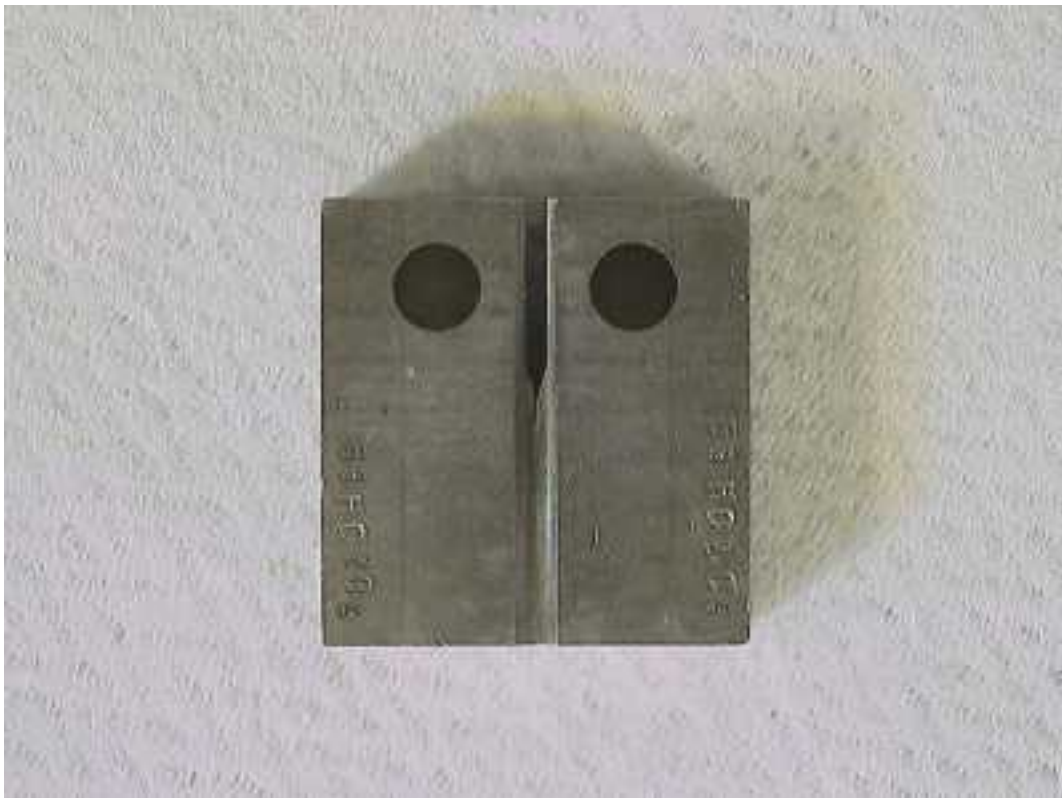


写真 4.3.6-32 試験片外観写真(63HC204)



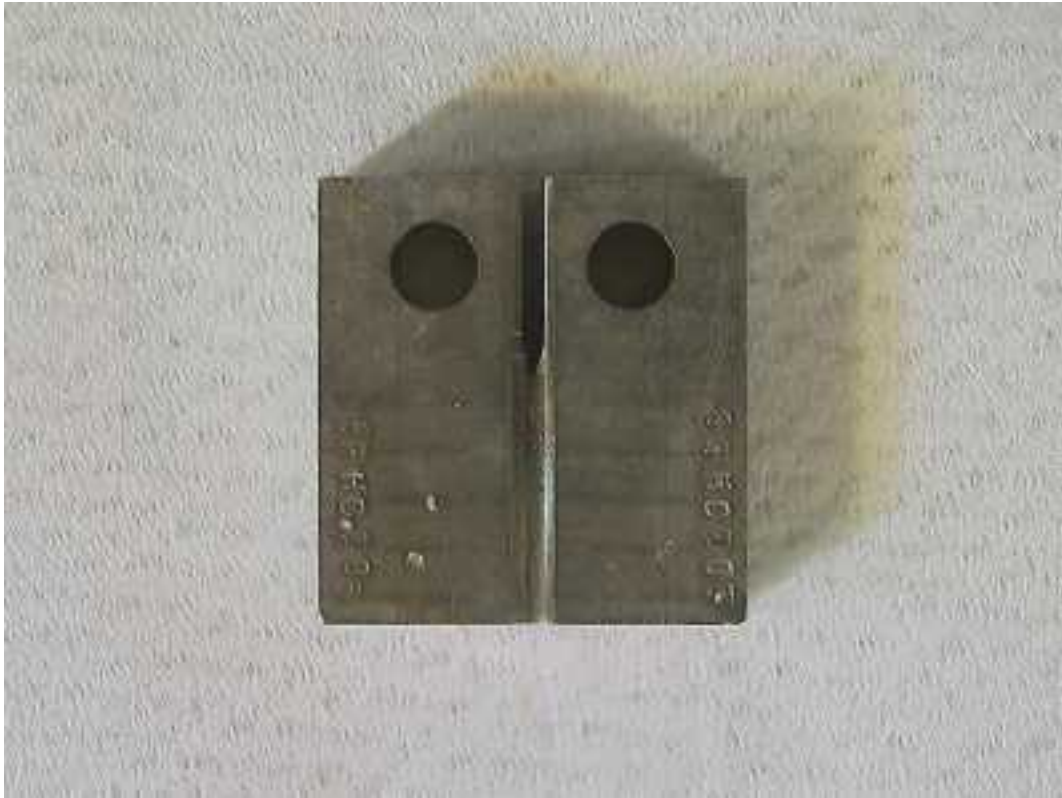


写真 4.3.6-33 試験片外観写真(63HC205)

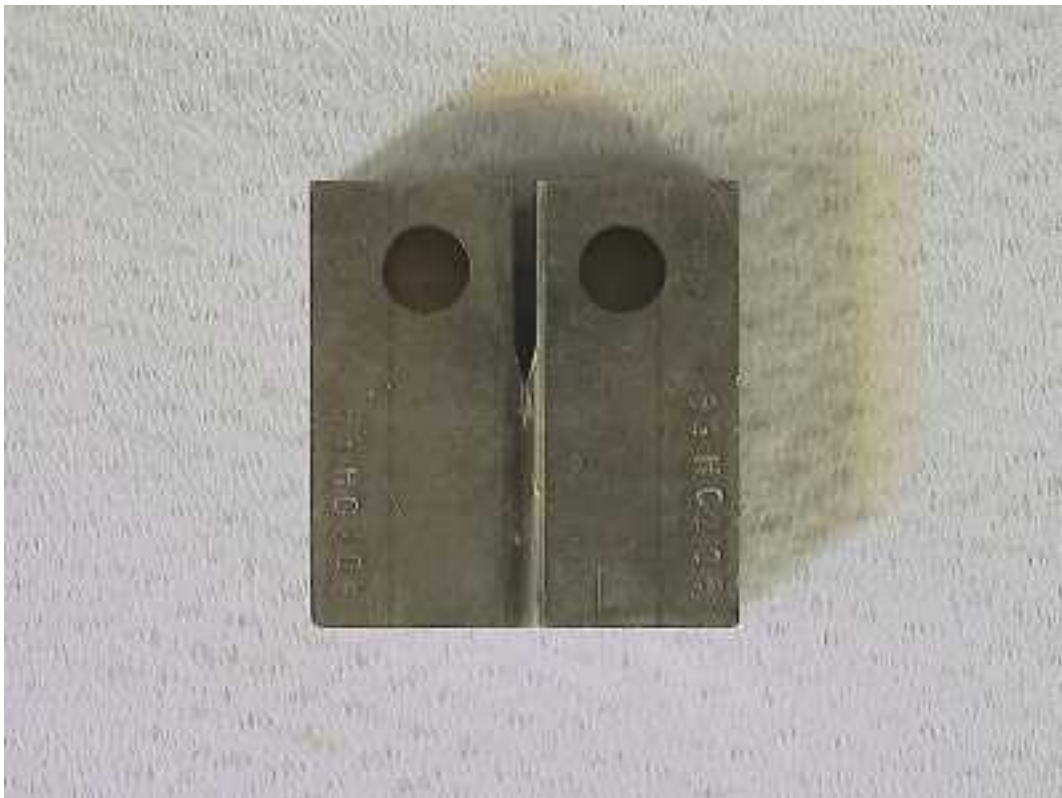


写真 4.3.6-34 試験片外観写真(63HC206)



写真 4.3.6-35 試験片外観写真(63HC207)

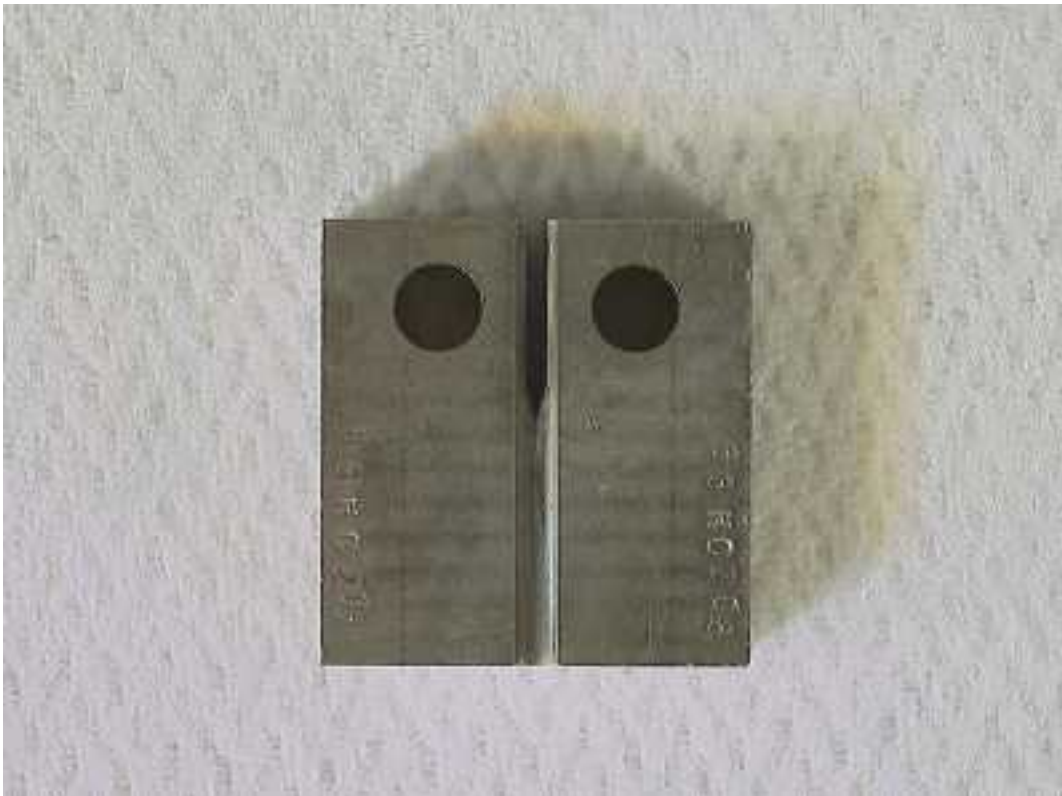


写真 4.3.6-36 試験片外観写真(63HC208)



写真 4.3.6-37 試験片外観写真(63HC211)



写真 4.3.6-38 試験片外観写真(63HC221)



写真 4.3.6-39 試験片外観写真(63HC301)

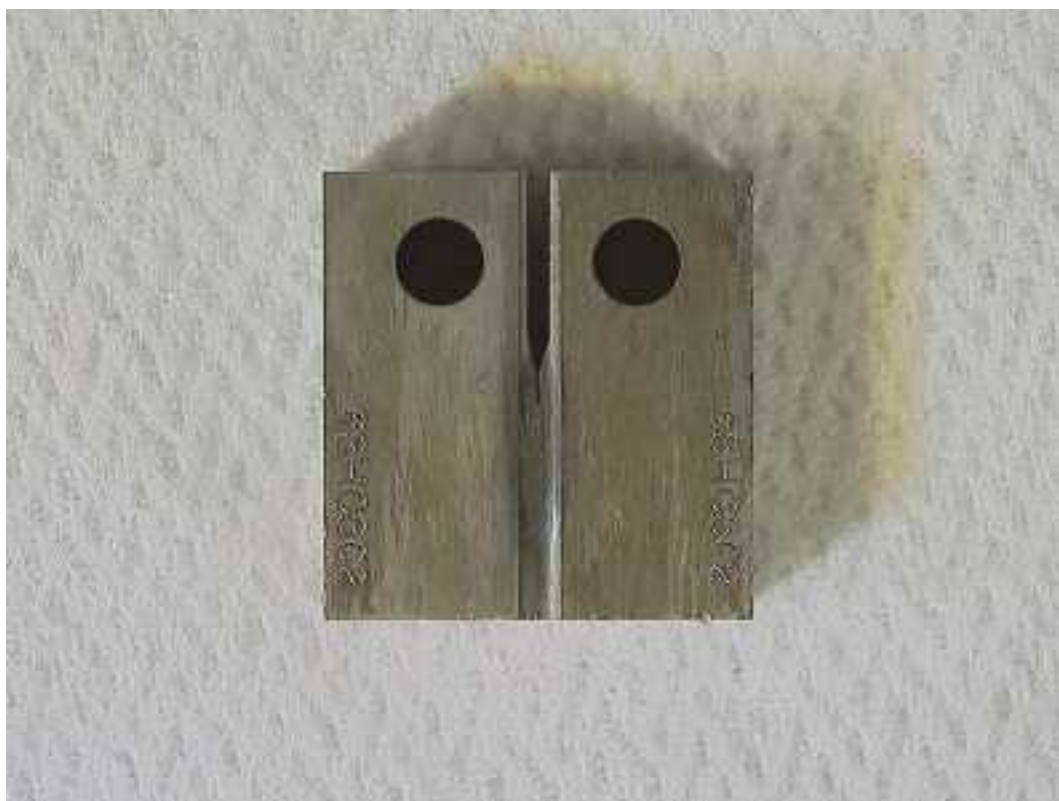


写真 4.3.6-40 試験片外観写真(63HC302)



写真 4.3.6-41 試験片外観写真(63HC303)



写真 4.3.6-42 試験片外観写真(63HC304)



写真 4.3.6-43 試験片外観写真(63HC305)



写真 4.3.6-44 試験片外観写真(63HC306)

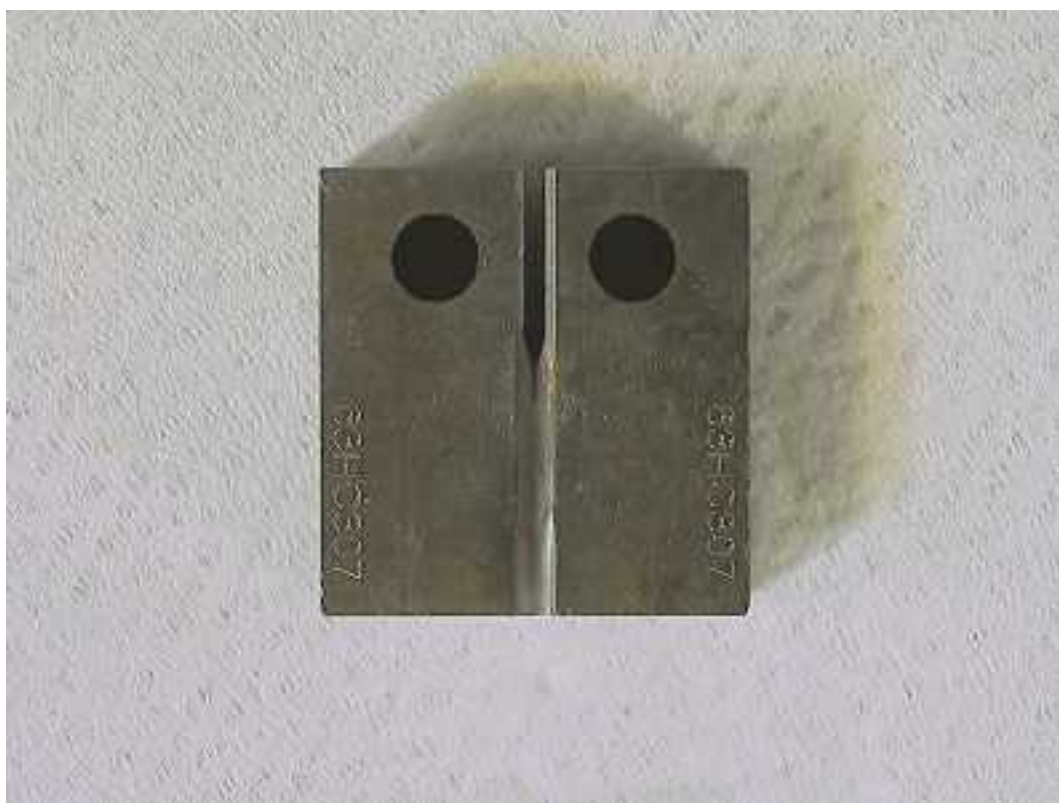


写真 4.3.6-45 試験片外観写真(63HC307)



写真 4.3.6-46 試験片外観写真(63HC311)



写真 4.3.6-47 試験片外観写真(63HC321)



写真 4.3.6-48 試験片外観写真(63HC322)





写真 4.3.6-49 試験片外観写真(63HC401)



写真 4.3.6-50 試験片外観写真(63HC402)



写真 4.3.6-51 試験片外観写真(63HC403)



写真 4.3.6-52 試験片外観写真(63HC404)



写真 4.3.6-53 試験片外観写真(63HC405)

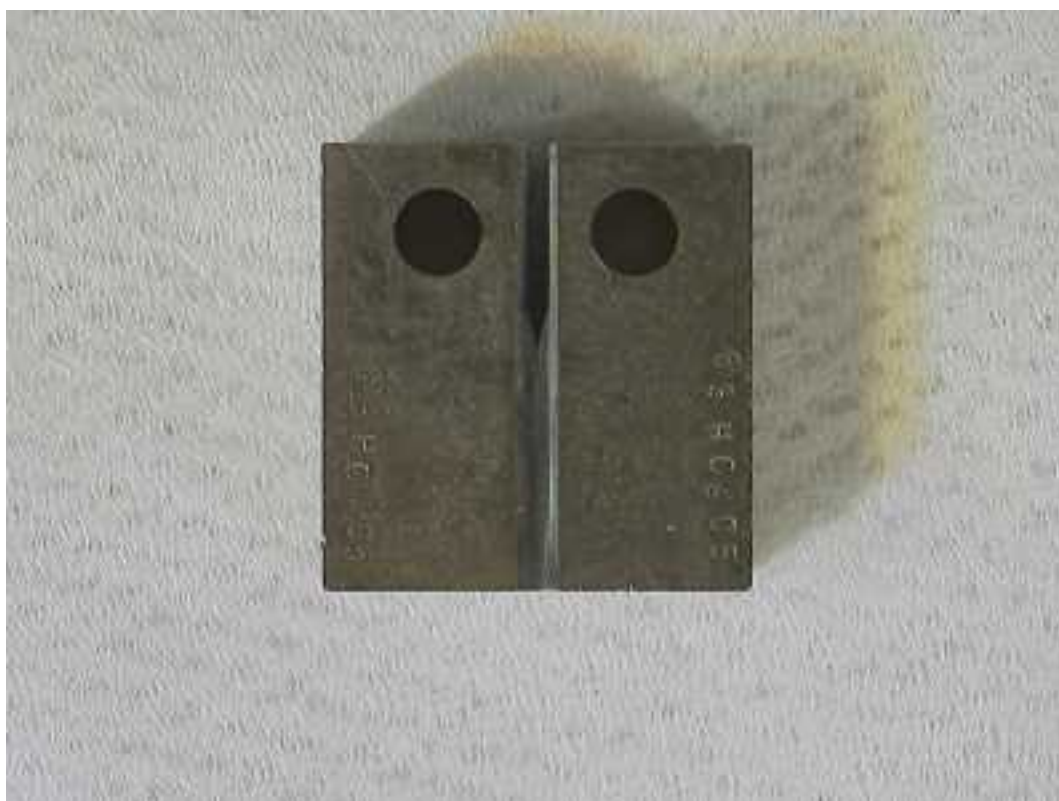


写真 4.3.6-54 試験片外観写真(63HC406)



写真 4.3.6-55 試験片外観写真(63HC407)



写真 4.3.6-56 試験片外観写真(63HC411)



写真 4.3.6-57 試験片外観写真(63HC421)



写真 4.3.6-58 試験片外観写真(63HC422)



写真 4.3.6-59 試験片外観写真(63HV101)



写真 4.3.6-60 試験片外観写真(63HV102)



写真 4.3.6-61 試験片外観写真(63HV201)



写真 4.3.6-62 試験片外観写真(63HV202)



写真 4.3.6-63 試験片外観写真(63HV301)



写真 4.3.6-64 試験片外観写真(63HV302)





写真 4.3.6-65 試験片外観写真(63HV401)



写真 4.3.6-66 試験片外観写真(63HV402)



写真 4.3.6-67 試験片外観写真(64BC101)

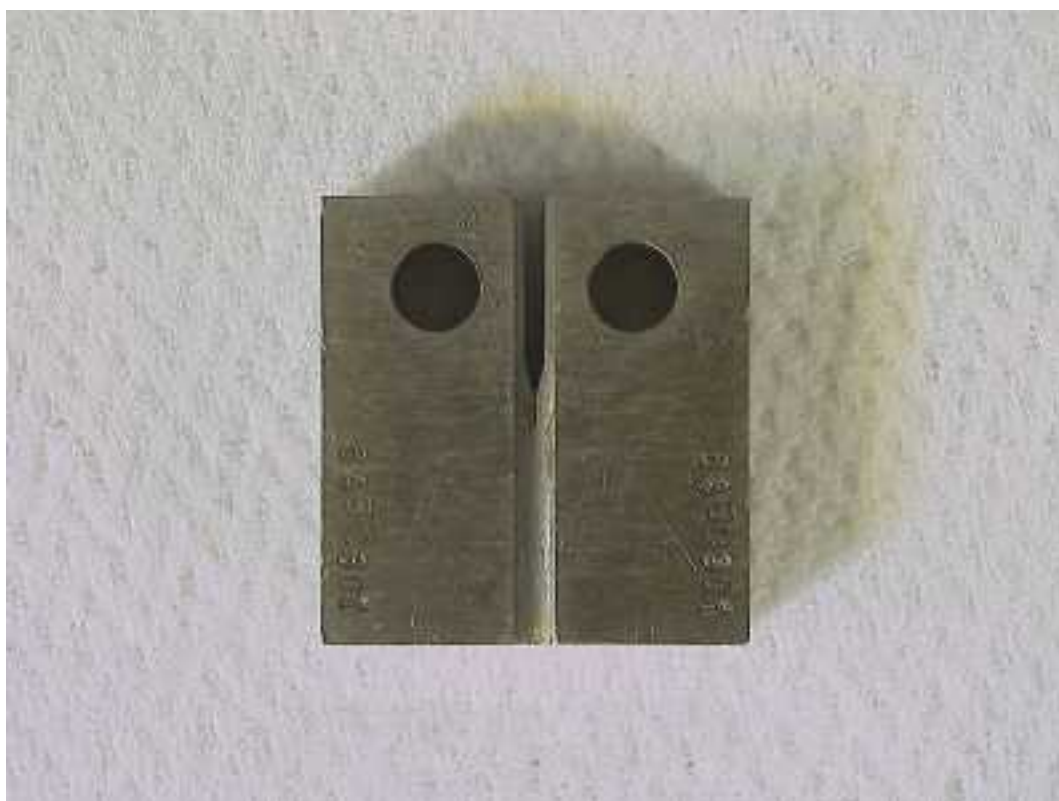


写真 4.3.6-68 試験片外観写真(64BC301)



写真 4.3.6-69 試験片外観写真(64HC102)

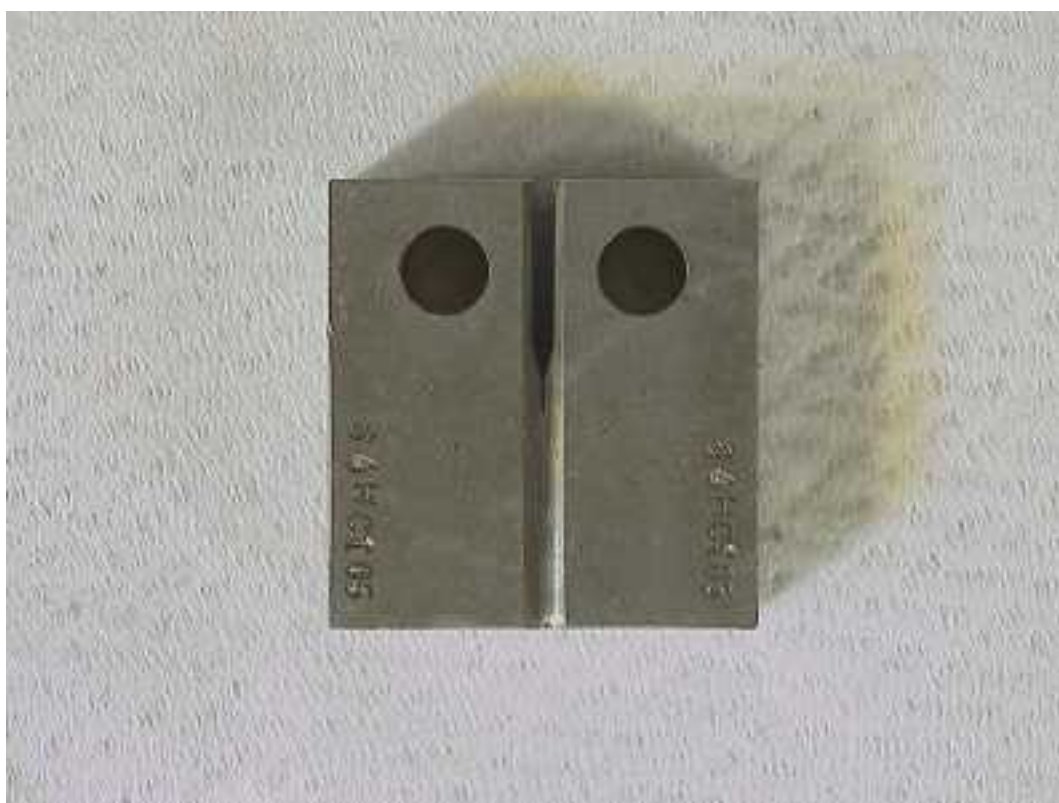


写真 4.3.6-70 試験片外観写真(64HC104)



写真 4.3.6-71 試験片外観写真(64HC105)

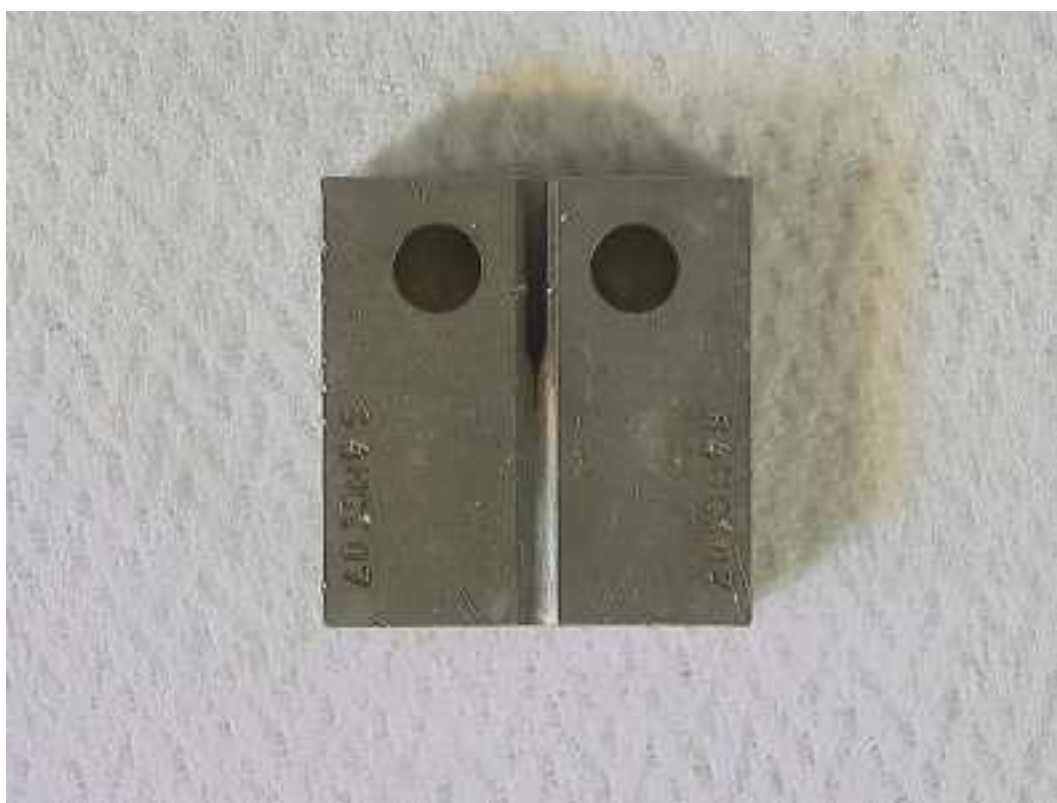


写真 4.3.6-72 試験片外観写真(64HC107)



写真 4.3.6-73 試験片外観写真(64HC108)



写真 4.3.6-74 試験片外観写真(64HC111)



写真 4.3.6-75 試験片外観写真(64HC112)



写真 4.3.6-76 試験片外観写真(64HC121)



写真 4.3.6-77 試験片外観写真(64HC201、64HC203、64HC211)



写真 4.3.6-78 試験片外観写真(64HC202)



写真 4.3.6-79 試験片外観写真(64HC205)



写真 4.3.6-80 試験片外観写真(64HC207)





写真 4.3.6-81 試験片外観写真(64HC208)



写真 4.3.6-82 試験片外観写真(64HC212)



写真 4.3.6-83 試験片外観写真(64HC221)



写真 4.3.6-84 試験片外観写真(64HC302)



写真 4.3.6-85 試験片外観写真(64HC303)



写真 4.3.6-86 試験片外観写真(64HC304)



写真 4.3.6-87 試験片外観写真(64HC307)



写真 4.3.6-88 試験片外観写真(64HC311)



写真 4.3.6-89 試験片外観写真(64HC312)



写真 4.3.6-90 試験片外観写真(64HC321)



写真 4.3.6-91 試験片外観写真(64HC322)



写真 4.3.6-92 試験片外観写真(64HC405)

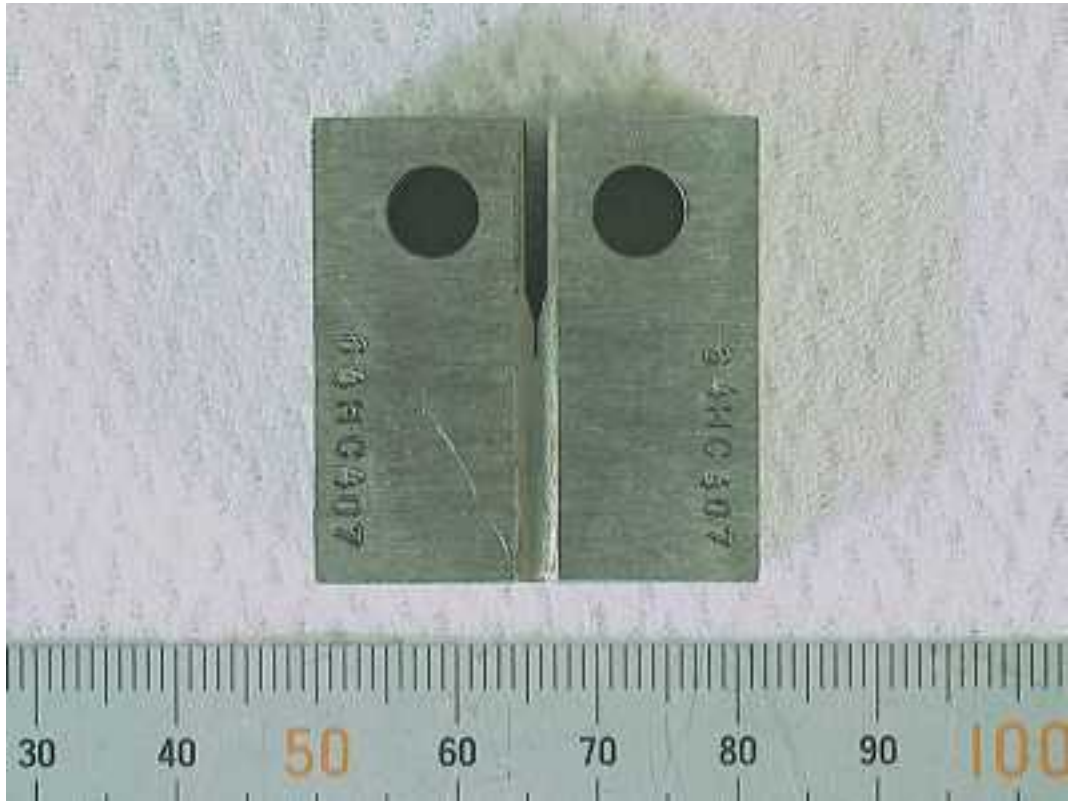


写真 4.3.6-93 試験片外観写真(64HC407)



写真 4.3.6-94 試験片外観写真(64HC411)



写真 4.3.6-95 試験片外観写真(64HC412)

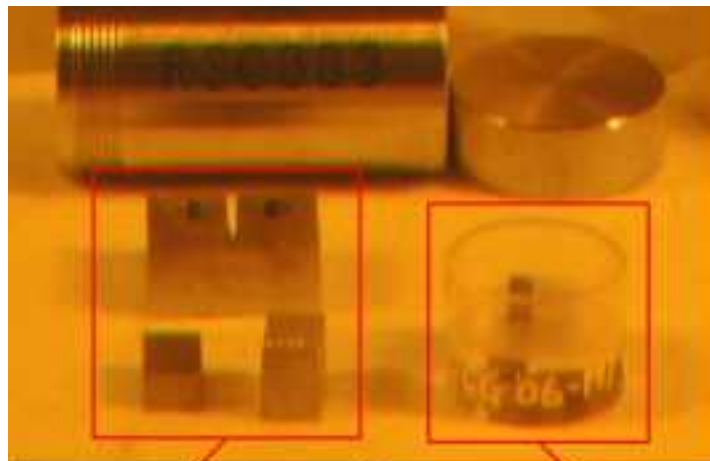


写真 4.3.6-96 試験片外観写真(64HC421)





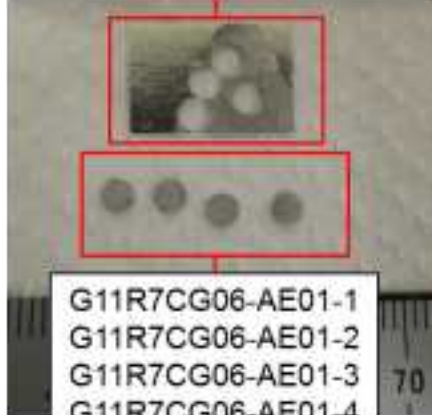
写真 4.3.6-97 試験片外観写真(64HC422)



G11R7CG06-ST (3個)

G11R7CG06-MC01 (1個)

G11R7CG06-AE01-ST (1個)



G11R7CG06-AE01-1  
 G11R7CG06-AE01-2  
 G11R7CG06-AE01-3  
 G11R7CG06-AE01-4  
 (各1個)



G11R7CG06-AE01-APT (2個)

写真 4.3.6-98 試験片外観写真(64HC901)



写真 4.3.6-99 試験片外観写真(64HC902)

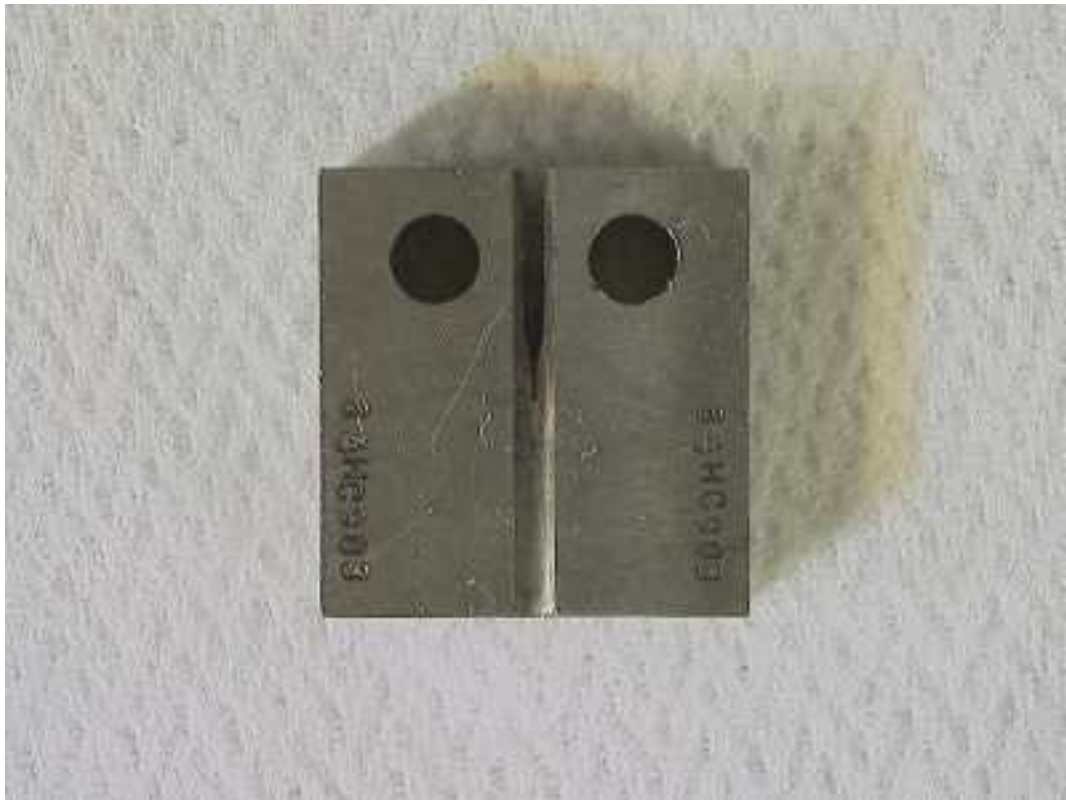


写真 4.3.6-100 試験片外観写真(64HC903)

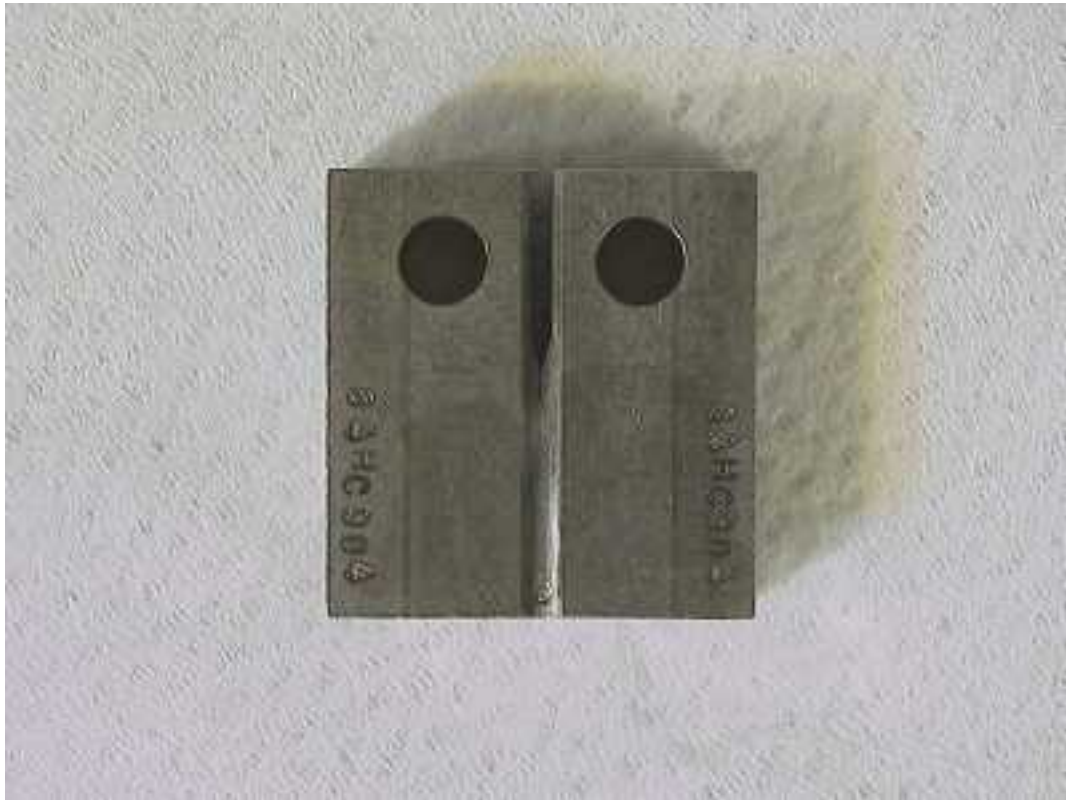


写真 4.3.6-101 試験片外観写真(64HC904)



写真 4.3.6-102 試験片外観写真(64HV301)



写真 4.3.6-103 試験片外観写真(64HV302)

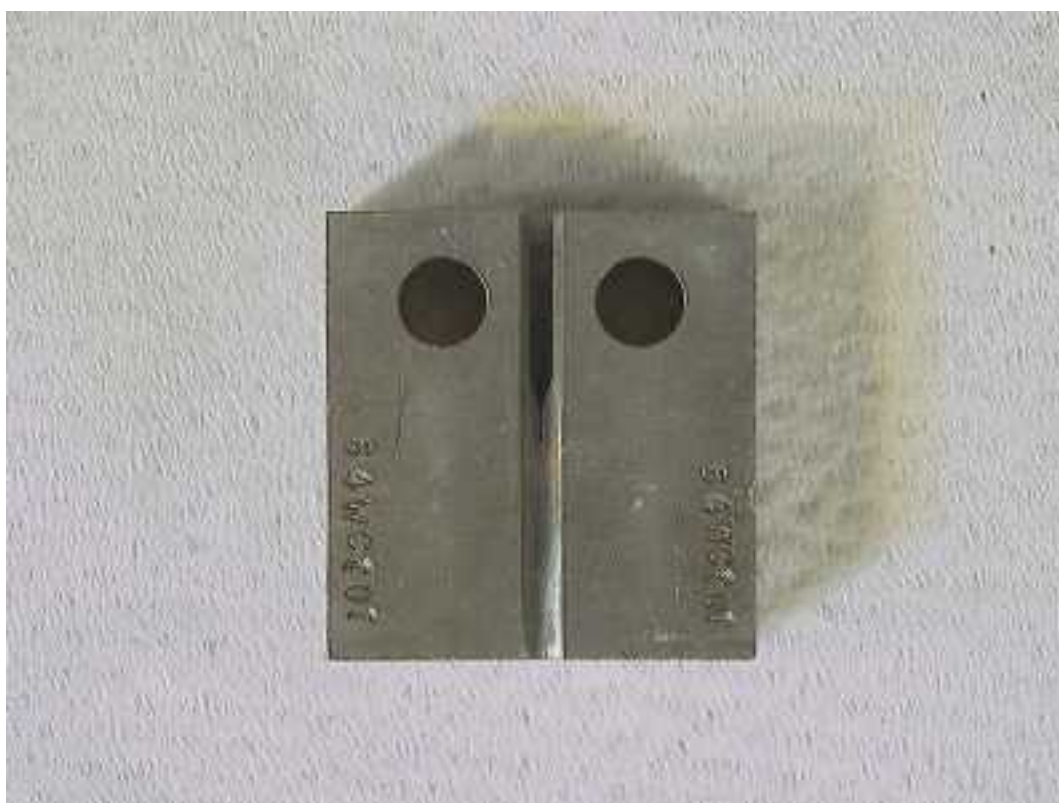


写真 4.3.6-104 試験片外観写真(64WC101)



写真 4.3.6-105 試験片外観写真(64WC201)



写真 4.3.6-106 試験片外観写真(64WC301)



写真 4.3.6-107 試験片外観写真(64WC401)

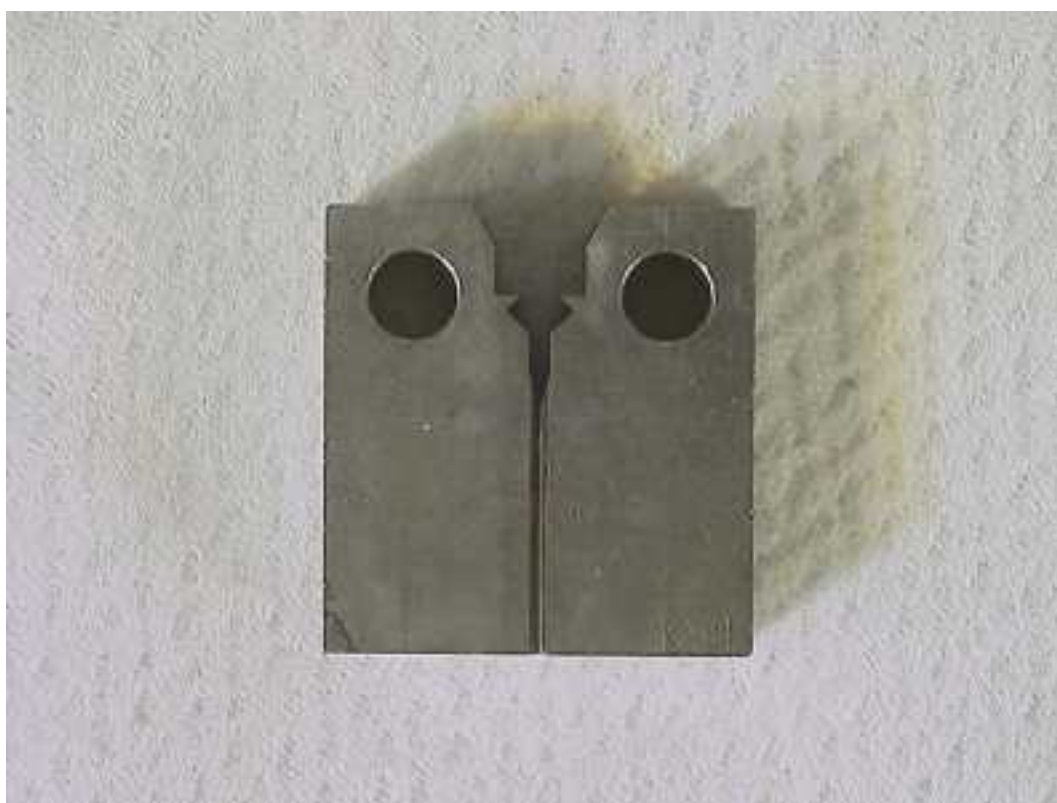


写真 4.3.6-108 試験片外観写真(KY01)

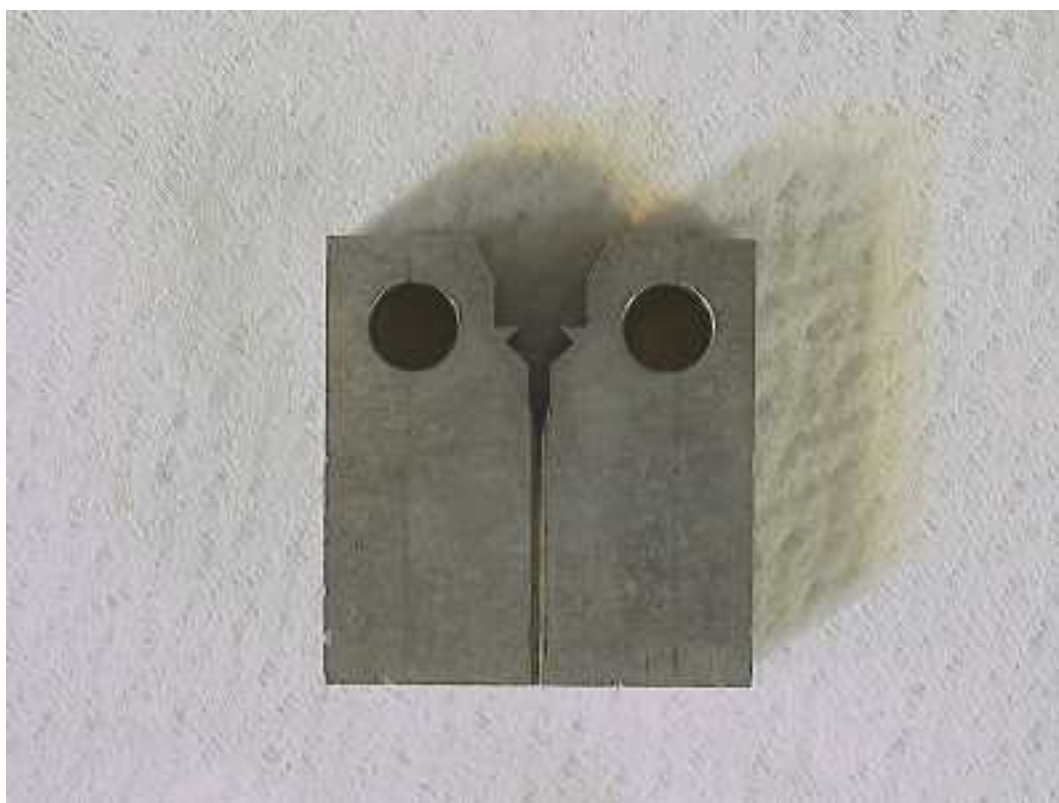
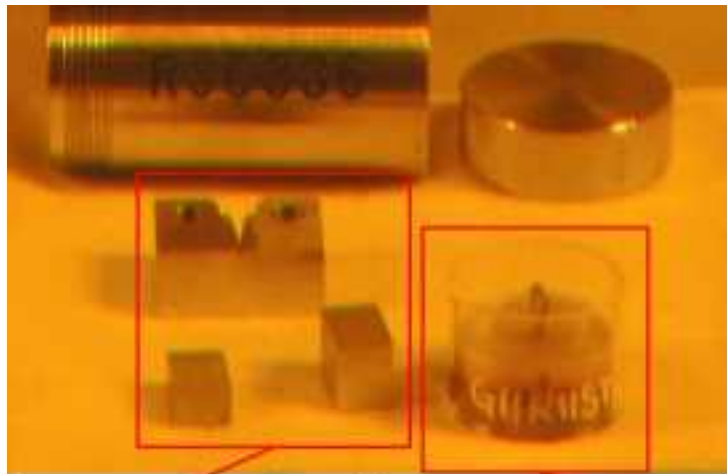


写真 4.3.6-109 試験片外観写真(KY02)



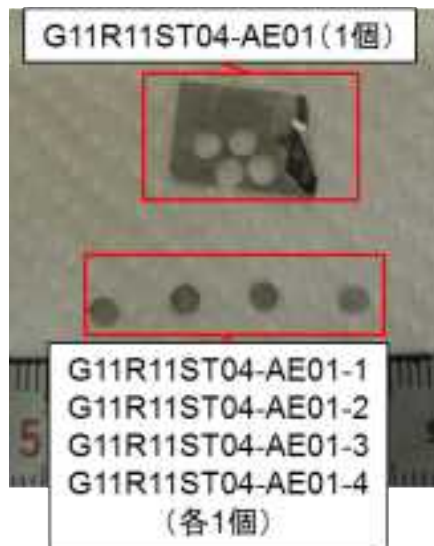
写真 4.3.6-110 試験片外観写真(KY03)





G11R11ST04-ST (3個)

G11R11ST04-MC01 (1個)



G11R11ST04-AE01-APT (2個)

写真 4.3.6-111 試験片外観写真(KY04)



写真 4.3.6-112 試験片外観写真(63HC211)

#### 4.3.7 サンプルングラインの敷設作業

標記作業は、新規に 4 系統分のサンプルング配管、電磁弁、電磁弁制御盤、手動弁、減圧弁等を、キュービクル内炉プール貫通孔からサブキュービクル内に設置されている既設のサンプルングボックスまでサンプルングラインを敷設するための作業である。

新規サンプルングラインの設計検討について以下に示す。

##### (1) 新規サンプルング配管の冷却方法及び配管経路の設計検討

照射下における腐食環境を評価する上で重要な過酸化水素( $H_2O_2$ )を精度良く評価するためには、過酸化水素の分解を抑制する必要がある。そのために、冷却方法及び配管経路の設計検討を行った。既設のサンプルングラインは、キャプセル出口配管から接続ユニット及び案内管を介して、キュービクル内に設置してあるサンプルング冷却管で冷却後、サンプルングボックスで採取するため、サンプルング水の冷却に時間を要する。

サンプルング水の冷却方法は、接続ユニット内のキャプセル出口配管からサンプルング配管を分岐し、炉プール水により急冷する設計とした。炉プール水による冷却効果は、2013 年度に実施した調整運転により実証されている。配管の径路については、既設装置の配置、操作等を考慮した最短経路で敷設する設計とした。

##### (2) 新規サンプルング水の減圧及び流量調節方法

既設のサンプルングラインは高圧水の減圧及び流量を調整するための装置が設置されているが、新設するサンプルング配管は、既設のサンプルングラインを介さず、最短経路で敷設するため、サンプルングボックス内に減圧弁及び流量調節弁を設けることで対応した。

##### (3) サブキュービクル内配管の遮蔽設置

原子炉運転中、サブキュービクル内でサンプルング水を採取する作業員は、キャプセルからの放射性物質を含む水を取り扱うため、被ばくする恐れがあり、なおかつ新設するサンプルング配管は、最短経路で敷設するため高線量と予想される。そのため、サブキュービクル内の配管の表面線量を算出して遮蔽計算を実施し、サブキュービクル内のサンプルング配管には遮蔽体を設置した。遮蔽体の設置については、遮蔽体のアングルの設置強度を評価し、線量に応じて鉛板を追加できる構造とした。

##### (4) 電磁弁の選定

サンプルングラインを切替えるために、運転中でも遠隔操作が可能な電磁弁を選定した。電磁弁は、キュービクル内に配置し、サブキュービクル内に設置する制御盤から操作を行うことにより、運転中でも被ばくすることなく操作できる。また、電磁弁はノーマルオープンのものを選定し、運転中、何らかの原因で電磁弁が動作不能の場合でも、サブキュービクルに設置した手動弁により操作を行うことができる。

電磁弁の選定については、新設サンプリング配管の温度及び圧力を考慮して、ドイツ RSG 社の電磁弁(272 シリーズ)を採用した。当該電磁弁の材質は、SUS316TI であり SUS316 にチタンを約 0.4%混ぜ込んだもので耐食性に優れて、強度も SUS304 と同等であり、性能及び使用について問題のないことを確認した。また、電磁弁両端のシール及び継手の接続については、スエジ製のものが使用できるため、互換性に問題ないことを確認した。

本敷設作業及び材料確認検査、作動試験、溶接検査、耐圧・漏えい試験等を行い異常の無いことを確認した。図 4.3.7-1 にサンプリングラインの敷設作業の写真、図 4.3.7-2 に新規サンプリングラインと既設装置の配置概略、図 4.3.7-3 に新規サンプリングラインの全体配置図をそれぞれ示す。



図 4.3.7-1 サンプリングラインの敷設作業の写真

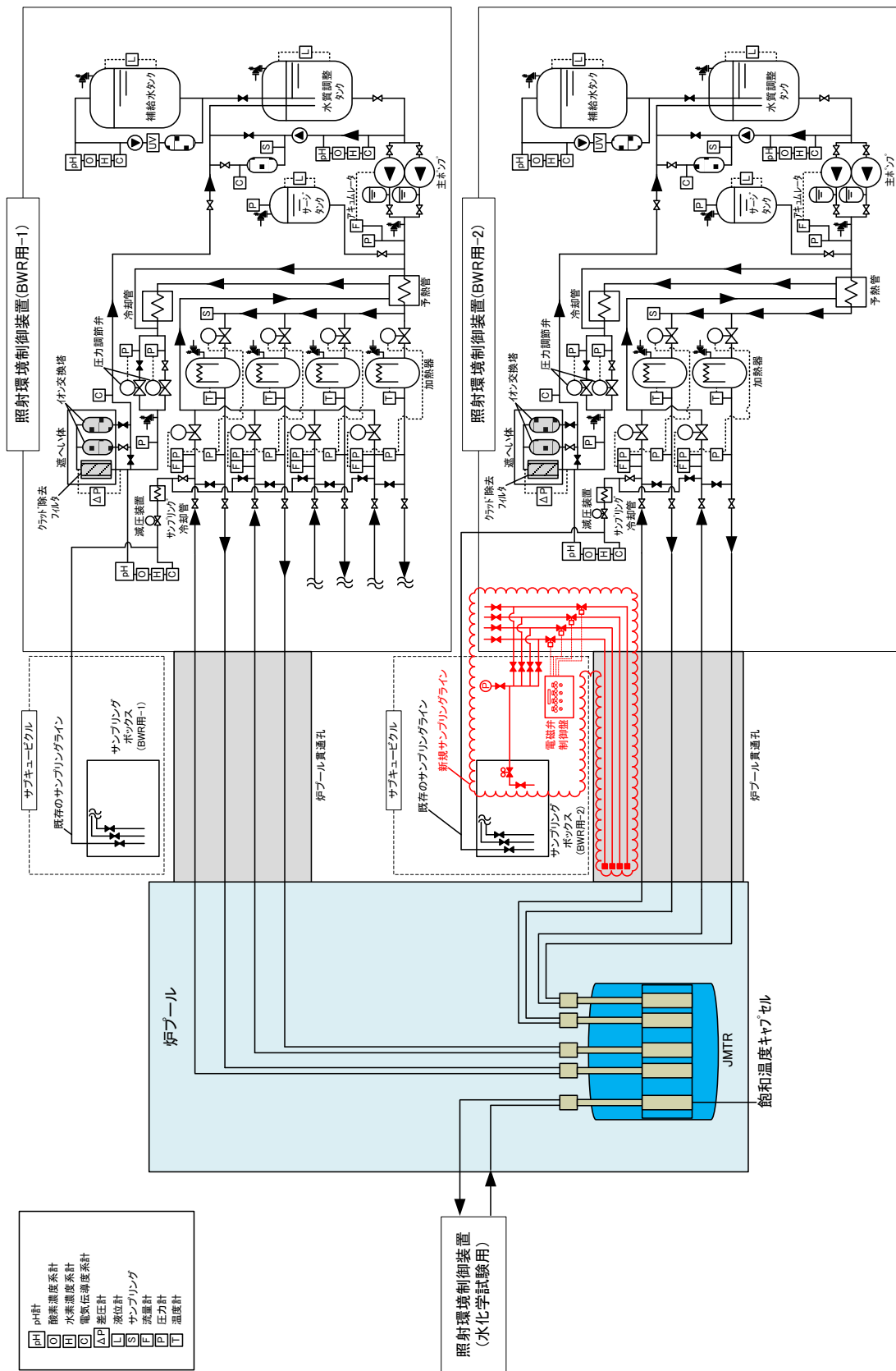


図 4.3.7-2 新規サンプリングラインと既設装置の配置概略

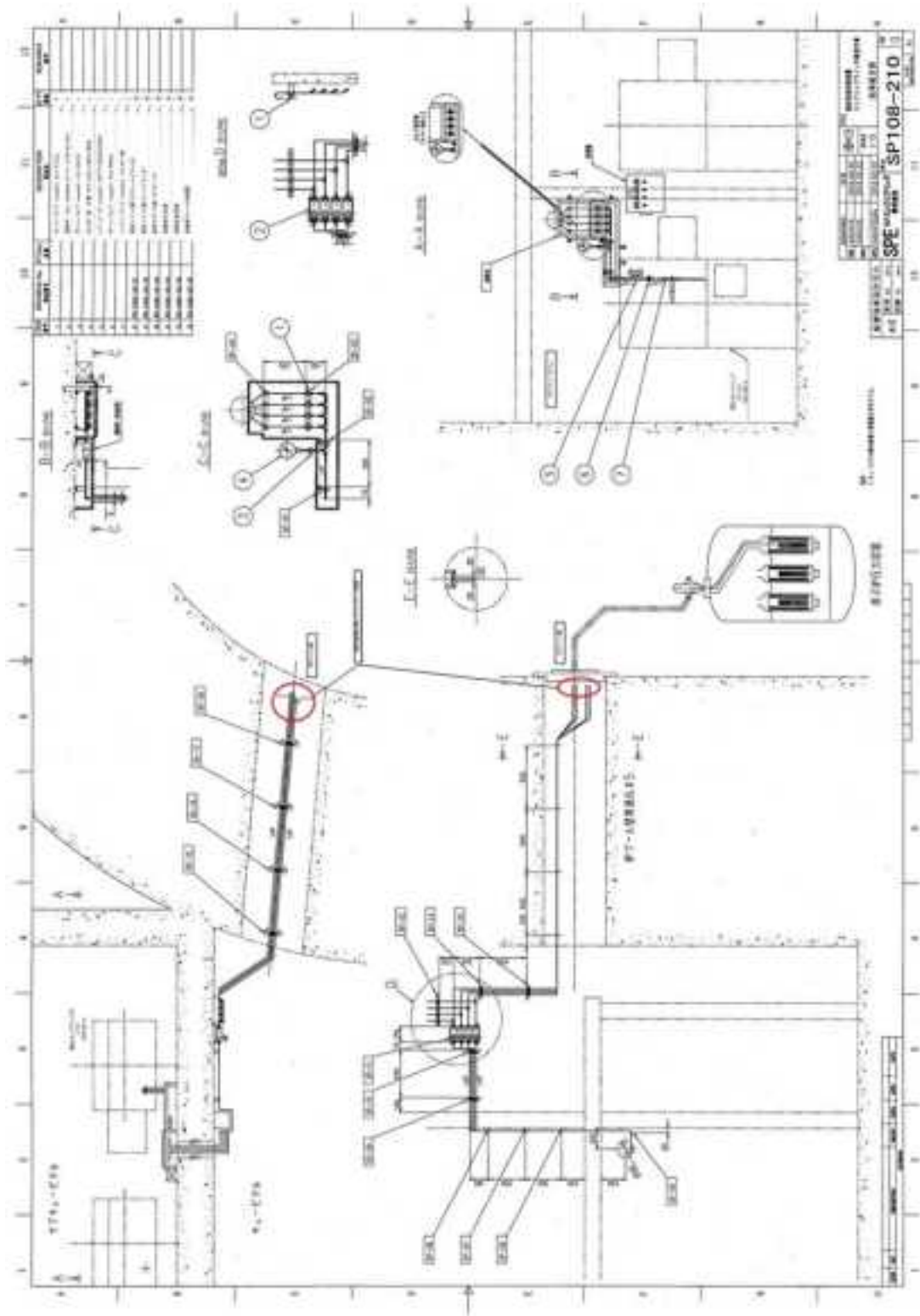


図 4.3.7-3 新規サンプリングラインの全体配置図

## 5. おわりに

平成27年度「軽水炉照射材料健全性評価研究」事業では、平成26年度までに実施した研究課題の整理結果、材料基礎特性評価試験結果などの成果を踏まえて、照射環境下での材料及び燃料の健全性に関する次の試験等を実施した。

①照射脆化試験

②照射誘起応力腐食割れ (IASCC: Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking) 試験

③燃料照射試験

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

これらの結果、JMTR再稼働の遅れによる事業計画への影響を最小限にとどめ、照射データの取得等を着実に進めた。

## 付録

### 4.2.3 章 照射材データの調査・整理

照射ステンレス鋼に関するデータシート



# 引張特性(PWR分野)データシート1/5

DB No.	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)																		熱処理等	冷間加工率 (%)	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス) (dpa/s)	照射温度 (°C)	試験環境	試験温度 (°C)	試験片形状	平行部面積 (mm <sup>2</sup> )	平行部長さ (mm)	採取方向	引張歪速度 (/s)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	全伸び (%)	絞り (%)	加工硬化指数	応力-歪線図	備考	出典			
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co	Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)	(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)	(dpa)																										
1-1	K2B2A	-	海外PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.75	1.75	0.014	0.011	13.1	17.5	2.64	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	1.00E+22	-	0.00065	-	-	-	27	短冊円弧型	3.23	12.7	軸方向	1E-04	503	696	15.5	26.5	-	-	-	-	-	-	有	照射量dpaについては、n/m <sup>2</sup> からの換算(6.5dpa=1026n/m <sup>2</sup> ) 引張特性のうち、空白欄は文献中にデータ記載無し 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	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		
1-2	K6B1A	-	海外PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.75	1.75	0.014	0.011	13.1	17.5	2.64	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	7.00E+25	-	4.55	-	-	-	27	短冊円弧型	3.23	12.7	軸方向	1E-04	786	1007	4	9	-	-	-	-	-	-	有				
1-3	5B1C1	-	海外PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.75	1.75	0.014	0.011	13.1	17.5	2.64	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	3.80E+26	-	24.7	-	-	-	27	短冊円弧型	3.23	12.7	軸方向	1E-04	1020	1110	1.4	7	-	-	-	-	-	-	有				
1-4	K2B2B	-	海外PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.75	1.75	0.014	0.011	13.1	17.5	2.64	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	1.00E+22	-	0.00065	-	-	-	-	-	325	短冊円弧型	3.23	12.7	軸方向	1E-04	434	614	13	16	-	-	-	-	-			-	有
1-5	K6B2	-	海外PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.75	1.75	0.014	0.011	13.1	17.5	2.64	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	7.00E+25	-	4.55	-	-	-	-	-	325	短冊円弧型	3.23	12.7	軸方向	1E-04	724	827	1.5	5	-	-	-	-	-			-	有
1-6	5B1C2	-	海外PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.75	1.75	0.014	0.011	13.1	17.5	2.64	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	3.80E+26	-	24.7	-	-	-	-	-	325	短冊円弧型	3.23	12.7	軸方向	1E-04	951	972	0.55	3	-	-	-	-	-			-	有
1-7	JPU1	-	海外PWR	水中	シンプルチューブ	-	304SS	304	0.069	0.55	1.52	0.023	0.021	8.28	18.54	0.32	-	-	-	-	-	0.12	Bal.	溶体化	-	0	-	0	-	-	-	-	-	27	中実丸棒型	3.23	12.7	軸方向	1E-04	441	683	33	51	-	-	-	-	-			-	有
1-8	KTP1A	-	海外PWR	水中	シンプルチューブ	-	304SS	304	0.057	0.64	1.90	0.030	0.024	9.01	18.24	0.44	-	-	-	-	-	0.13	Bal.	溶体化	-	5.00E+25	-	3.25	-	-	-	-	-	27	中実丸棒型	3.23	12.7	軸方向	1E-04	869	1000	27	37	-	-	-	-	-			-	有
1-9	JPU2	-	海外PWR	水中	シンプルチューブ	-	304SS	304	0.069	0.55	1.52	0.023	0.021	8.28	18.54	0.32	-	-	-	-	-	0.12	Bal.	溶体化	-	0	-	0	-	-	-	-	-	325	中実丸棒型	3.23	12.7	軸方向	1E-04	290	517	21.5	31.5	-	-	-	-	-			-	有
1-10	KTP1B	-	海外PWR	水中	シンプルチューブ	-	304SS	304	0.057	0.64	1.90	0.030	0.024	9.01	18.24	0.44	-	-	-	-	-	0.13	Bal.	溶体化	-	5.00E+25	-	3.25	-	-	-	-	-	325	中実丸棒型	3.23	12.7	軸方向	1E-04	703	727	2	10.5	-	-	-	-	-			-	有
2-1	6A3	-	H.B.Robinson	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.048	0.43	1.67	0.017	0.01	13.21	17.21	2.24	-	-	-	-	-	0.069	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	5.00E+22	-	0.005	-	-	-	-	-	22	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	608	824	23	40.0	-	-	-	-	-	-	-	無	
2-2	3A2	-	H.B.Robinson	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.048	0.43	1.67	0.017	0.01	13.21	17.21	2.24	-	-	-	-	-	0.069	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	9.00E+22	-	0.009	-	-	-	-	-	-	23	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	683	793	10	21.0	-	-	-	-	-	-	-	無
2-3	1A6	-	H.B.Robinson	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.048	0.43	1.67	0.017	0.01	13.21	17.21	2.24	-	-	-	-	-	0.069	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	7.50E+26	-	51	-	-	-	-	-	26	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	938	1,151	6	13.0	-	-	-	-	-	-	-	無	
2-4	1B4	-	D.C.Cook	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.019	0.38	1.69	0.024	0.008	12.3	16.42	2.18	-	-	-	-	-	0.068	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	7.50E+26	-	51	-	-	-	-	-	26	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	800	1,117	5	12.0	-	-	-	-	-	-	-	無	
2-5	4A3	-	H.B.Robinson	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.048	0.43	1.67	0.017	0.01	13.21	17.21	2.24	-	-	-	-	-	0.069	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	3.00E+23	-	0.02	-	-	-	-	-	300	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	600	752	11	18.0	-	-	-	-	-	-	-	無	
2-6	3A3	-	H.B.Robinson	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.048	0.43	1.67	0.017	0.01	13.21	17.21	2.24	-	-	-	-	-	0.069	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	9.00E+22	-	0.009	-	-	-	-	-	300	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	517	690	10	14.0	-	-	-	-	-	-	-	無	
2-7	1B5	-	D.C.Cook	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.019	0.38	1.69	0.024	0.008	12.3	16.42	2.18	-	-	-	-	-	0.068	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	7.50E+26	-	51	-	-	-	-	-	300	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	952	1,000	0.8	7.0	-	-	-	-	-	-	-	無	
2-8	7B4	-	D.C.Cook	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.019	0.38	1.69	0.024	0.008	12.3	16.42	2.18	-	-	-	-	-	0.068	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	4.90E+26	-	33	-	-	-	-	-	300	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	1,000	1,015	0.8	10.0	-	-	-	-	-	-	-	無	
2-9	4A1	-	H.B.Robinson	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.048	0.43	1.67	0.017	0.01	13.21	17.21	2.24	-	-	-	-	-	0.069	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	3.00E+23	-	0.02	-	-	-	-	-	350	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	538	634	-	-	-	-	-	-	-	-	-	無	
2-10	3A1	-	H.B.Robinson	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.048	0.43	1.67	0.017	0.01	13.21	17.21	2.24	-	-	-	-	-	0.069	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	9.00E+22	-	0.009	-	-	-	-	-	350	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	676	696	1.5	7.0	-	-	-	-	-	-	-	無	
2-11	1A5	-	H.B.Robinson	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.048	0.43	1.67	0.017	0.01	13.21	17.21	2.24	-	-	-	-	-	0.069	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	7.50E+26	-	51	-	-	-	-	-	350	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	724	869	3	6.0	-	-	-	-	-	-	-	無	
2-12	1B6	-	D.C.Cook	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.019	0.38	1.69	0.024	0.008	12.3	16.42	2.18	-	-	-	-	-	0.068	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	7.50E+26	-	51	-	-	-	-	-	350	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	848	986	0.8	6.0	-	-	-	-	-	-	-	-	無
2-13	C7C1	-	H.B.Robinson	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.048	0.43	1.67	0.017	0.01	13.21	17.21	2.24	-	-	-	-	-	0.069	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	3.00E+25	-	2	-	-	-	-	-	26	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	946	1,026	1	7	-	-	-	-	-	-	-	無	
2-14	C7C2	-	H.B.Robinson	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.048	0.43	1.67	0.017	0.01	13.21	17.21	2.24	-	-	-	-	-	0.069	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	3.00E+25	-	2	-	-	-	-	-	26	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	1,004	1,032	1	12	-	-	-	-	-	-	-	無	
2-15	C7C3	-	H.B.Robinson	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.048	0.43	1.67	0.017	0.01	13.21	17.21	2.24	-	-	-	-	-	0.069	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	3.00E+25	-	2	-	-	-	-	-	300	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	802	839	0.4	3.5	-	-	-	-	-	-	-	無	
2-16	C7C4	-	H.B.Robinson	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.048	0.43	1.67	0.017	0.01	13.21	17.21	2.24	-	-	-	-	-	0.069	Bal.	1065-1175°C	10 <sup>12</sup>	3.00E+25	-	2	-	-	-	-	-	300	チューブ型	3.23	12.7	軸方向	1.7E-06	815	903	2	5	-	-	-	-	-	-	-	無	
2-17	C7C5	-	H.B.Robinson	水中	シンプルチューブ	-																																														







# 引張特性(PWR分野)データシート5/5

DB	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)																熱処理等	冷間加工率 (%)	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス)	照射温度 (°C)	試験環境	試験温度 (°C)	試験片形状	平行部面積 (mm <sup>2</sup> )	平行部長さ (mm)	採取方向	引張歪速度 (/s)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	全伸び (%)	絞り (%)	加工硬化指数	応力-歪線図	備考	出典
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co	Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)			(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)	(dpa)																			
20-1	ET11	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	14.0	1.63E-07	438	大気	432	平板型	3	19	軸方向	1E-03	583	689	8.8	11.3	-	-	無	引張特性のうち、空白欄はデータ無し	Yoshitake et al., ASTM STP1405, 2001	
20-2	NT12	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	19.2	1.06E-07	432	大気	429	平板型	3	19	軸方向	1E-03	643	750	8.0	10.3	-	-	無			
20-3	ET10	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	19.5	2.28E-07	432	大気	430	平板型	3	19	軸方向	1E-03	588	701	8.8	11.5	-	-	無			
20-4	NT11	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	30.1	1.66E-07	422	大気	432	平板型	3	19	軸方向	1E-03	683	770	6.7	9.3	-	-	無			
20-5	ET08	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	30.2	3.52E-07	417	大気	430	平板型	3	19	軸方向	1E-03	707	770	5.3	8.5	-	-	無			
20-6	ET15	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	0.9	1.00E-08	371	大気	383	平板型	3	19	軸方向	1E-03	568	687	11.4	14.5	-	-	無			
20-7	NT15	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	2.2	1.20E-08	371	大気	23	平板型	3	19	軸方向	1E-03	792	916	17.8	26.4	-	-	無			
20-8	ET06	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	9.1	1.06E-07	374	大気	377	平板型	3	19	軸方向	1E-03	786	856	2.9	6.2	-	-	無			
20-9	NT01	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	13.6	7.50E-08	375	大気	380	平板型	3	19	軸方向	1E-03	791	861	3.3	6.6	-	-	無			
20-10	NT08	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	40.5	2.23E-07	409	大気	428	平板型	3	19	軸方向	1E-03	709	776	5.4	7.8	-	-	無			
20-11	ET03	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	30.2	3.52E-07	425	大気	429	平板型	3	19	軸方向	1E-03	613	719	8.6	11.9	-	-	無			
20-12	NT04	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	40.5	2.24E-07	417	大気	428	平板型	3	19	軸方向	1E-03	670	744	6.7	9.4	-	-	無			
20-13	ET04	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	19.2	2.24E-07	435	大気	428	平板型	3	19	軸方向	1E-03	568	701	10.5	13.8	-	-	無			
20-14	NT05	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	30.1	1.66E-07	425	大気	428	平板型	3	19	軸方向	1E-03	649	739	7.6	10.3	-	-	無			
20-15	ET05	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	9.1	1.06E-07	444	大気	429	平板型	3	19	軸方向	1E-03	545	667	10.4	13.9	-	-	無			
20-16	NT09	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	14.2	7.80E-08	436	大気	429	平板型	3	19	軸方向	1E-03	610	752	8.4	11.8	-	-	無			
20-17	ET14	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	0.041	0.64	1.19	0.033	0.023	11.34	17.48	2.61	-	-	-	0.35	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	0.9	1.00E-08	371	大気	427	平板型	3	19	軸方向	1E-03	569	689	10.9	14.2	-	-	無			
21-1	S2T1	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	冷間加工	20	-	-	1.0	-	371	大気	370	-	-	-	-	4E-05	511	628	10.2	16.5	-	-	無	引張特性のうち、空白欄はデータ無し	Allen et al., ASTM STP1447, 2003		
21-2	S2T2	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	冷間加工	20	-	-	1.0	7.60E-08	371	大気	370	-	-	-	-	4E-05	473	597	12.0	15.4	-	-	無					
21-3	S1T1	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	冷間加工	20	-	-	20.0	1.20E-07	375	大気	370	-	-	-	-	4E-05	677	810	2.9	5.3	-	-	無					
21-4	S1T2	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	冷間加工	20	-	-	20.0	1.20E-07	375	大気	370	-	-	-	-	4E-05	680	824	3.5	6.6	-	-	無					
21-5	S1T3	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	冷間加工	20	-	-	30.0	1.80E-07	376	大気	370	-	-	-	-	4E-05	767	805	2.3	4.8	-	-	無					
21-6	S1T4	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	冷間加工	20	-	-	30.0	1.80E-07	376	大気	370	-	-	-	-	4E-05	676	805	2.3	5.1	-	-	無					
21-7	S1T5	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	冷間加工	20	-	-	47.0	2.80E-07	385	大気	370	-	-	-	-	4E-05	741	790	0.9	2.8	-	-	無					
21-8	S1T6	-	EBR II	Na中	Hexagonal ducts	-	316SS	CW316	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	冷間加工	20	-	-	47.0	2.80E-07	385	大気	370	-	-	-	-	4E-05	770	787	0.5	1.9	-	-	無					





# 引張特性(BWR分野)データシート3/5

DB	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)																熱処理等	冷間加工率	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス)	照射温度	試験環境	試験温度	試験片形状	平行部面積	平行部長さ	引張速度	0.2%耐力	引張強さ	一様伸び	全伸び	絞り	加工硬化指数	応力歪線図	備考	出典
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co	Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)			(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)	(dpa)																		
5-1	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	304	304	0.060	0.48	0.81	0.028	0.002	8.52	18.29	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	溶体化	-	4.7E+17	3.30E+25	4.71	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	832	832	0.2	7.5	-	0.015	有			
5-2	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	304	304	0.060	0.48	0.81	0.028	0.002	8.52	18.29	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	溶体化	-	4.7E+17	1.70E+25	2.43	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	808	808	0.1	5.8	-	0.012	有			
5-3	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	304	304	0.060	0.48	0.81	0.028	0.002	8.52	18.29	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	203	455	31.7	36.8	-	-	有			
5-4	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	304L	304L	0.013	0.40	1.18	0.026	0.002	9.22	18.65	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	溶体化	-	4.7E+17	1.70E+25	2.43	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	672	672	0.1	5.6	-	0.030	-			
5-5	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	304L	304L	0.013	0.40	1.18	0.026	0.002	9.22	18.65	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	175	400	29.3	34.1	-	-	-			
5-6	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316	316	0.040	0.64	1.28	0.033	0.003	10.87	16.94	2.12	-	-	-	-	0.220	-	-	Bal.	溶体化	-	-	1.90E+25	2.71	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	696	730	3.8	8.1	-	-	-		
5-7	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316	316	0.040	0.64	1.28	0.033	0.003	10.87	16.94	2.12	-	-	-	-	0.220	-	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	163	460	31.6	36.0	-	-	-		
5-8	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L	316L	0.016	0.59	1.18	0.033	0.001	12.66	17.51	2.13	-	-	-	-	0.026	-	-	Bal.	溶体化	-	5.1E+17	3.60E+25	5.14	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	684	684	0.1	8.0	-	0.008	有		
5-9	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L	316L	0.016	0.59	1.18	0.033	0.001	12.66	17.51	2.13	-	-	-	-	0.026	-	-	Bal.	溶体化	-	5.3E+17	1.90E+25	2.71	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	632	658	9.5	12.8	-	0.086	有		
5-10	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L	316L	0.016	0.59	1.18	0.033	0.001	12.66	17.51	2.13	-	-	-	-	0.026	-	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	156	421	38.5	42.9	-	-	有		
5-11	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-NL	316L	0.019	0.50	0.86	0.028	0.003	12.72	16.86	2.34	-	-	-	-	0.003	-	-	Bal.	溶体化	-	5.3E+17	3.70E+25	5.29	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	730	738	0.4	10.2	-	0.041	-		
5-12	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-NL	316L	0.019	0.50	0.86	0.028	0.003	12.72	16.86	2.34	-	-	-	-	0.003	-	-	Bal.	溶体化	-	5.6E+17	2.00E+25	2.86	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	562	584	3.0	6.7	-	0.064	-		
5-13	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-NL	316L	0.019	0.50	0.86	0.028	0.003	12.72	16.86	2.34	-	-	-	-	0.003	-	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	171	397	31.9	36.0	-	-	-		
5-14	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-NM	316L	0.017	0.52	1.37	0.025	0.002	14.11	16.52	2.23	-	-	-	-	0.017	-	-	Bal.	溶体化	-	5.6E+17	2.00E+25	2.86	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	458	514	5.8	8.6	-	0.108	-		
5-15	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-NM	316L	0.017	0.52	1.37	0.025	0.002	14.11	16.52	2.23	-	-	-	-	0.017	-	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	153	401	34.5	38.4	-	-	-		
5-16	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI(A)	316L	0.010	0.50	0.88	0.012	0.001	12.18	16.62	2.16	-	-	-	-	0.036	-	-	Bal.	溶体化	-	5.3E+17	3.70E+25	5.29	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	739	739	0.2	9.1	-	0.031	有		
5-17	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI(A)	316L	0.010	0.50	0.88	0.012	0.001	12.18	16.62	2.16	-	-	-	-	0.036	-	-	Bal.	溶体化	-	5.6E+17	2.00E+25	2.86	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	466	574	17.4	22.6	-	0.163	有		
5-18	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI(A)	316L	0.010	0.50	0.88	0.012	0.001	12.18	16.62	2.16	-	-	-	-	0.036	-	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	172	419	29.5	34.2	-	-	-		
5-19	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI(B)	316L	0.010	0.46	0.98	0.013	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	0.037	-	-	Bal.	溶体化	-	-	2.00E+25	2.86	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	588	642	11.7	17.6	-	-	-		
5-20	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI(B)	316L	0.010	0.46	0.98	0.013	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	0.037	-	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	154	418	30.9	35.4	-	-	-		
5-21	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI-NM	316L	0.016	0.52	1.34	0.010	0.002	12.86	16.14	2.29	-	-	-	-	0.014	-	-	Bal.	溶体化	-	5.6E+17	2.00E+25	2.86	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	472	533	9.3	12.4	-	0.126	-		
5-22	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI-NM	316L	0.016	0.52	1.34	0.010	0.002	12.86	16.14	2.29	-	-	-	-	0.014	-	-	Bal.	溶体化	-	-	3.80E+25	5.43	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	693	693	0.2	13.1	-	0.060	-		
5-23	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI-NM	316L	0.016	0.52	1.34	0.010	0.002	12.86	16.14	2.29	-	-	-	-	0.014	-	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	153	393	33.7	37.6	-	-	-		
5-24	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PM-NM	316L	0.013	0.49	0.91	0.019	0.000	12.46	16.84	2.20	-	-	-	-	0.010	-	-	Bal.	溶体化	-	5.7E+17	4.00E+25	5.71	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	780	780	0.2	7.2	-	0.009	-		
5-25	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PM-NM	316L	0.013	0.49	0.91	0.019	0.000	12.46	16.84	2.20	-	-	-	-	0.010	-	-	Bal.	溶体化	-	5.8E+17	2.10E+25	3.00	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	613	626	5.5	10.8	-	0.059	-		
5-26	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PM-NM	316L	0.013	0.49	0.91	0.019	0.000	12.46	16.84	2.20	-	-	-	-	0.010	-	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	166	401	31.5	35.4	-	-	-		
5-27	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI-NL	316L	0.014	0.49	0.92	0.011	0.000	12.47	16.88	2.21	-	-	-	-	0.003	-	-	Bal.	溶体化	-	5.3E+17	3.70E+25	5.29	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	711	711	0.2	8.7	-	0.028	-		
5-28	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI-NL	316L	0.014	0.49	0.92	0.011	0.000	12.47	16.88	2.21	-	-	-	-	0.003	-	-	Bal.	溶体化	-	5.3E+17	1.90E+25	2.71	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	528	583	10.2	14.9	-	0.125	-		
5-29	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI-NL	316L	0.014	0.49	0.92	0.011	0.000	12.47	16.88	2.21	-	-	-	-	0.003	-	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	大気中	288	平板型	3.6	25	3.3E-04	159	379	30.9	31.7	-	-	-		
5-30	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	HP316L	316L	0.014	0.05	0.91	0.0																																		



# 引張特性(BWR分野)データシート4/5

DB	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)																熱処理等	冷間加工率 (%)	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス)	照射温度 (°C)	試験環境	試験温度 (°C)	試験片形状	平行部面積 (mm <sup>2</sup> )	平行部長さ (mm)	引張速度 (1/s)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	全伸び (%)	絞り	加工硬化指数	応力歪線図	備考	出典
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co	Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)			(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)	(dpa)																		
9-1	TT05		国内BWR	水中	シュラウド	-	304	304	0.040	0.61	0.94	0.019	0.003	9.27	18.35	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	1.6E+24	0.23	-	288	大気中	288	平板型	1.5	6	3.0E-04	306	520	17.0	21.5	66	-	有	7E+24n/m <sup>2</sup> =1dpa換算	2008NISA公募研究	
9-2	TT06		国内BWR	水中	シュラウド	-	304	304	0.040	0.61	0.94	0.019	0.003	9.27	18.35	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	1.6E+24	0.23	-	288	大気中	288	平板型	1.5	6	3.0E-04	304	508	18.3	23.7	49	-	有				
9-3	TT23		国内BWR	水中	上部格子板	-	316	316	0.059	0.70	1.62	0.030	0.006	11.46	17.40	2.39	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	2.3E+24	0.33	-	288	大気中	288	平板型	1.5	6	3.0E-04	360	563	19.9	26.3	56	-	有			
9-4	TT24		国内BWR	水中	上部格子板	-	316	316	0.059	0.70	1.62	0.030	0.006	11.46	17.40	2.39	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	2.3E+24	0.33	-	288	大気中	288	平板型	1.5	6	3.0E-04	334	545	18.7	26.2	53	-	有			
9-5	TT01		JMTR	水中	-	CT試験片	316L	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	-	Bal.	溶体化	-	-	9.4E+24	1.34	-	288	大気中	288	平板型	1.5	6	3.0E-04	418	531	14.9	22.5	65	-	有			
9-6	TT02		JMTR	水中	-	CT試験片	316L	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	-	Bal.	溶体化	-	-	9.4E+24	1.34	-	288	大気中	288	平板型	1.5	6	3.0E-04	383	525	15.9	22.4	62	-	有			
9-7	A041		未照射	-	-	-	316L	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	大気中	288	平板型	4	16	3.0E-04	125	386	34.7	41.6	71	-	有			
9-8	A042		未照射	-	-	-	316L	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	大気中	288	平板型	4	16	3.0E-04	126	381	34.2	41.2	77	-	有			
10-1	57960		未照射	-	制御棒	-	304L	304L	0.018	0.60	1.15	0.015	0.004	10.65	18.17	0.03	-	-	-	-	-	0.028	-	Bal.	受入まま	-	-	0	0	-	-	大気中	300	平板型	-	-	-	139	391	-	-	-	-	-	-	
10-2	57954		未照射	-	制御棒	-	304L	304L	0.023	0.59	1.01	0.016	0.003	10.36	18.62	0.03	-	-	-	-	-	0.023	-	Bal.	受入まま	-	-	0	0	-	-	大気中	300	平板型	-	-	-	152	411	-	-	-	-	-	-	
10-3	57952		未照射	-	制御棒	-	304L	304L	0.024	0.59	1.01	0.016	0.003	10.36	18.62	0.08	-	-	-	-	-	0.023	-	Bal.	受入まま	-	-	0	0	-	-	大気中	300	平板型	-	-	-	141	394	-	-	-	-	-	-	
10-4	55439		未照射	-	制御棒	-	304L	304L	0.017	0.53	1.13	0.020	0.007	11.36	18.78	-	-	-	-	-	-	0.021	-	Bal.	受入まま	-	-	0	0	-	-	大気中	300	平板型	-	-	-	163	385	-	-	-	-	-	-	
10-5			海外BWR	水中	制御棒	-	304L	304L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	-	-	-	9.1E+25	12	-	-	大気中	288	平板型	-	-	-	841	834	0.1	8.5	-	-	-	-		
10-6			海外BWR	水中	制御棒	-	304L	304L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	-	-	-	9.1E+25	12	-	-	大気中	288	平板型	-	-	-	837	837	0.1	8.1	-	-	-	-		
10-7	57960		未照射	-	制御棒	-	304L	304L	0.018	0.60	1.15	0.015	0.004	10.65	18.17	-	-	-	-	-	-	0.028	-	Bal.	受入まま	-	-	0	0	-	-	大気中	RT	平板型	-	-	-	221	541	-	-	-	-	-	-	
10-8	57954		未照射	-	制御棒	-	304L	304L	0.023	0.59	1.01	0.016	0.003	10.36	18.62	-	-	-	-	-	-	0.023	-	Bal.	受入まま	-	-	0	0	-	-	大気中	RT	平板型	-	-	-	230	545	-	-	-	-	-	-	
10-9	57952		未照射	-	制御棒	-	304L	304L	0.024	0.59	1.01	0.016	0.003	10.36	18.62	-	-	-	-	-	-	0.023	-	Bal.	受入まま	-	-	0	0	-	-	大気中	RT	平板型	-	-	-	221	533	-	-	-	-	-	-	
10-10	55439		未照射	-	制御棒	-	304L	304L	0.017	0.53	1.13	0.020	0.007	11.36	18.78	-	-	-	-	-	-	0.021	-	Bal.	受入まま	-	-	0	0	-	-	大気中	RT	平板型	-	-	-	299	528	-	-	-	-	-	-	
10-11	183039		未照射	-	上部格子板	-	304	304	0.048	0.60	1.28	0.035	0.013	9.0	17.9	-	-	-	-	-	-	0.035	-	Bal.	420°C x 4.5h	-	-	0	0	-	-	大気中	RT	平板型	-	-	-	328	606	-	-	-	-	-	-	
10-12	183039		未照射	-	上部格子板	-	304	304	0.048	0.60	1.28	0.035	0.013	9.0	17.9	-	-	-	-	-	-	0.035	-	Bal.	420°C x 4.5h	-	-	0	0	-	-	大気中	RT	平板型	-	-	-	328	606	-	-	-	-	-	-	
10-13	183039		海外BWR	水中	上部格子板	-	304	304	0.048	0.60	1.28	0.035	0.013	9.0	17.9	-	-	-	-	-	-	0.035	-	Bal.	-	-	-	3.3E+25	4.7	-	-	大気中	288	平板型	-	-	-	582	644	11.3	18.7	-	-	-	-	
10-14	183039		海外BWR	水中	上部格子板	-	304	304	0.048	0.60	1.28	0.035	0.013	9.0	17.9	-	-	-	-	-	-	0.035	-	Bal.	-	-	-	3.3E+25	4.7	-	-	大気中	288	平板型	-	-	-	572	634	10.4	19.7	-	-	-	-	
10-15	183039		海外BWR	水中	上部格子板	-	304	304	0.048	0.60	1.28	0.035	0.013	9.0	17.9	-	-	-	-	-	-	0.035	-	Bal.	-	-	-	3.9E+25	5.5	-	-	大気中	288	平板型	-	-	-	651	681	11.2	19.7	-	-	-	-	
10-16	183039		海外BWR	水中	上部格子板	-	304	304	0.048	0.60	1.28	0.035	0.013	9.0	17.9	-	-	-	-	-	-	0.035	-	Bal.	-	-	-	3.9E+25	5.5	-	-	大気中	288	平板型	-	-	-	638	683	8.5	14.5	-	-	-	-	
10-17	A		国内BWR	水中	制御棒	-	304	304	0.047	0.85	1.45	0.026	0.030	8.51	0.03	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	-	-	-	5.2E+25	7.4	-	-	大気中	288	平板型	-	-	-	886	886	0.3	10.7	-	-	-	-		
10-18	A		国内BWR	水中	制御棒	-	304	304	0.047	0.85	1.45	0.026	0.030	8.51	0.03	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	-	-	-	5.2E+25	7.4	-	-	大気中	288	平板型	-	-	-	881	881	0.4	6.8	-	-	-	-		
10-19	B		国内BWR	水中	制御棒	-	304	304	0.070	0.60	1.39	0.028	0.028	8.32	19.01	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	-	-	-	8.4E+25	8.4	-	-	大気中	288	平板型	-	-	-	895	895	0.2	9.8	-	-	-	-		
10-20	B		国内BWR	水中	制御棒	-	304	304	0.070	0.60	1.39	0.028	0.028	8.32	19.01	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	-	-	-	8.4E+25	8.4	-	-	大気中	288	平板型	-	-	-	883	883	0.3	7.2	-	-	-	-		
10-21	183039		未照射	-	上部格子板	-	304	304	0.048	0.60	1.28	0.035	0.013	9.0	17.9	-	-	-	-	-	-	0.035	-	Bal.	420°C x 4.5h	-	-	0	0	-	-	大気中	300	平板型	-	-	-	244	428	-	-	-	-	-	-	
10-22	183039		未照射	-	上部格子板	-	304	304	0.048	0.60	1.28	0.035	0.013	9.0	17.9	-	-	-	-	-	-	0.035	-	Bal.	420°C x 4.5h	-	-	0	0	-	-	大気中	300	平板型	-	-	-	244	428	-	-	-	-	-	-	
11-1	SW03		海外BWR		制御棒	-	SA 304L	304L	0.022	0.24	1.07	0.015	0.002	10.45	18.42	-	-	-	-	-	-	0.025	-	Bal.	-	-	-	5.40E+21	7.7	2.70E-08	270-288	大気中	288	-	-	-	643	643	0.1	11.6	-	-	-	-	-	Jenssen et al. 15 th EDM
12-1	1		BWR	水中	ガイドチューブ	-	304	304	0.011	0.45	1.17	0.018	0.007	10.16	18.25	0.25	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	-	-	-	50	-	-	-	大気中	RT	円弧状	-	-	-	931	1130	0.7	12.3	-	-	有	-		
12-2	4																																													



# 硬さ(PWR分野)データシート1/1

DB	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)														熱処理等	冷間加工率 (%)	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス)	照射温度 (°C)	測定方法	測定環境	測定温度 (°C)	測定組織	試験荷重 (kg)	保持時間 (sec)	測定数	硬さ	ばらつき	硬さ増加	単位	引張データ	引張試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	全伸び (%)	備考	出典			
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co			Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)	(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)																						(dpa)		
1-1	B3-15	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	11.8	2.2E-08	342	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	5	356	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	測定結果は、5点の平均値	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
1-2	B3-16	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	10.5	2.0E-08	338	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	5	345	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-	
1-3	B3-13	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	11.4	2.2E-08	340	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	5	359	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-	
1-4	B3-14	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	10.5	2.0E-08	338	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	5	346	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-	
1-5	G3-9	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	10.8	2.0E-08	340	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	5	336	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-	
1-6	B3-29	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	19.8	3.8E-08	298	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	5	383	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-	
1-7	B3-30	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	19.8	3.8E-08	298	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	5	388	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-	
1-8	B3-31	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	19.8	3.8E-08	298	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	5	386	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-	
1-9	B3-32	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	19.8	3.8E-08	298	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	5	388	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-	
1-10	G3-15	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	19.8	3.8E-08	298	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	5	378	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-	
2-1	B4-11	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	10.5	2.2E-08	323	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	359	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
2-2	B4-12	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	9.5	2.0E-08	323	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	347	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
2-3	G4-2	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	10.5	2.2E-08	308	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	360	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
2-4	B4-9	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	14	2.9E-08	323	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	367	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
2-5	B4-10	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	12	2.5E-08	323	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	360	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
2-6	B4-27	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	19.5	4.0E-08	308	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	378	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
2-7	B4-28	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	19	3.9E-08	308	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	373	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
2-8	G4-4	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	22	4.6E-08	308	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	373	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
2-9	B4-20	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	22.5	4.7E-08	290	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	377	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
2-10	B4-30	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	17	3.5E-08	308	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	377	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
2-11	G4-6	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	38	7.9E-08	302	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	382	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
2-12	B4-47	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	38	7.9E-08	302	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	383	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
2-13	B4-48	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	38	7.9E-08	302	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	378	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
2-14	B4-65	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	72	1.5E-07	311	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	383	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
2-15	B4-66	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	72	1.5E-07	311	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	383	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
2-16	G4-8	-	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	12	-	-	71	1.5E-07	311	ビカース	大気中	室温	母材	1	-	10	382	-	-	HV1	無	-	-	-	-	-	-	-	-
3-1	Unirra A	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.04	0.62	1.63	0.022	0.006	12.61	16.94	2.22	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	1038-1177°C	15	-	-	0	0	-	ビカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	225	-	-	HV0.5	有	320	349	465	19.1	24.7	2本の引張試験データに 対しては、同じ硬さ測定 結果が当てはまるものと して記載	福谷ら INSS MONOGRAPH No.4	
3-2	Unirra A	国内PWR	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.04	0.62	1.63	0.022	0.006	12.61	16.94	2.22	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	1038-1177°C	15	-	-	0	0	-	ビカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	225	-	-	HV0.5	有	320	350	465	22.5	26.8	-	-	
3-3	B																																																		

# 硬さ(BWR分野)データシート1/2

DB	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)																熱処理等	冷間加工率 (%)	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス)	照射温度 (°C)	測定方法	測定環境	測定温度 (°C)	測定試験片	測定組織	試験荷重 (kg)	保持時間 (sec)	測定数	硬さ	ばらつき	硬さ増加	単位	引張データ	引張試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	全伸び (%)	備考	出典
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co	Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)			(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)	(dpa)																							
1-1	R033	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS304(HT)	304	0.050	0.65	1.20	0.024	0.004	8.93	18.58	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	5	148	141-152	-	HV0.5	有	288	166	415	50.7	57.7			
1-2	R133	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS304(HT)	304	0.050	0.65	1.20	0.024	0.004	8.93	18.58	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	溶体化	-	-	5.56E+24	1.00	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	5	259	254-265	111	HV0.5	有	288	466	566	22.4	29.1				
1-3	R235	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS304(HT)	304	0.050	0.65	1.20	0.024	0.004	8.93	18.58	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	溶体化	-	-	7.82E+24	1.37	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	5	282	278-288	134	HV0.5	有	288	512	583	19.8	25.5				
1-4	H305	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	5	147	142-151	-	HV0.5	有	288	159	373	41.3	51.6			
1-5	H134	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	5.68E+24	1.06	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	5	214	207-219	67	HV0.5	有	288	350	466	25.5	33.3				
1-6	H234	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	1.03E+25	1.72	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	5	267	263-270	120	HV0.5	有	288	430	514	25.1	31.2				
1-7	H341	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	2.46E+25	4.29	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	5	316	314-318	169	HV0.5	有	288	645	646	0.3	18.7				
1-8	A035	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	5	141	136-146	-	HV0.5	有	288	168	382	41.3	50.5			
1-9	A134	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	5.11E+24	0.91	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	5	212	206-220	71	HV0.5	有	288	355	494	28.2	35.9				
1-10	A233	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	1.09E+25	1.84	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	5	261	255-265	120	HV0.5	有	288	414	520	22.0	29.6				
1-11	A339	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	3.04E+25	5.11	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	5	308	305-312	167	HV0.5	有	288	606	616	17.1	25.3				
1-12	W033	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS316(NG)HT	316NG	0.012	0.56	0.91	0.017	0.005	11.05	16.51	2.34	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	5	143	140-146	-	HV0.5	有	288	153	392	46.7	56.3		
1-13	W134	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS316(NG)HT	316NG	0.012	0.56	0.91	0.017	0.005	11.05	16.51	2.34	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	5.04E+24	0.81	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	5	209	195-217	66	HV0.5	有	288	311	481	33.2	40.0			
1-14	W235	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS316(NG)HT	316NG	0.012	0.56	0.91	0.017	0.005	11.05	16.51	2.34	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	9.04E+24	1.51	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	5	229	225-233	86	HV0.5	有	288	353	494	29.4	36.0			
2-1	A035	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	-	141	-	-	HV0.5	有	288	168	382	41.3	50.5			
2-2	A134	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	5.11E+24	0.91	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	-	212	-	-	HV0.5	有	288	355	494	28.2	35.9				
2-3	A233	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	1.09E+25	1.84	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	-	261	-	-	HV0.5	有	288	414	520	22.0	29.6				
2-4	A339	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	3.04E+25	5.11	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	-	308	-	-	HV0.5	有	288	606	616	17.1	25.3				
2-5	-	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	7.51E+25	12.50	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	-	324	-	-	HV0.5	有	288	674	676	0.3	11.1				
2-6	H035	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	-	147	-	-	HV0.5	有	288	159	373	41.3	51.6			
2-7	H134	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	5.68E+24	1.06	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	-	214	-	-	HV0.5	有	288	350	466	25.5	33.3				
2-8	H234	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	1.03E+25	1.72	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	-	267	-	-	HV0.5	有	288	430	514	25.1	31.2				
2-9	H341	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	2.46E+25	4.29	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	-	316	-	-	HV0.5	有	288	645	646	0.3	18.7				
2-10	-	-	JMTR	水中	-	引張試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	7.74E+25	12.90	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	30	-	321	-	-	HV0.5	有	288	674	677	0.4	10.0				
3-1	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	COM304	304	0.061	0.42	0.85	0.025	0.004	8.16	18.06	-	-	-	-	-	0.040	-	Bal.	溶体化	-	-	2.02E+25	2.89	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	1	-	-	336	-	-	HV1	有	288	824	824	-	5.1				
3-2	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	COM304	304	0.061	0.42	0.85	0.025	0.004	8.16	18.06	-	-	-	-	-	0.040	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	1	-	-	159	-	-	HV1	有	288	154	427	-	34.7				
3-3	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	HP304L-Mo	304L	0.016	0.05	0.88	0.004	0.001	10.06	18.52	0.19	-	-	-	-	-	0.032	-	Bal.	溶体化	-	-	2.24E+25	3.20	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	1	-	-	277	-	-	HV1	有	288	613	613	-	4.9			
3-4	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	HP304L-Mo	304L	0.016	0.05	0.88	0.004	0.001																																						

# 硬さ(BWR分野)データシート2/2

DB	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)														熱処理等	冷間加工率 (%)	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス)	照射温度 (°C)	測定方法	測定環境	測定温度 (°C)	測定試験片	測定組織	試験荷重 (kg)	保持時間 (sec)	測定数	硬さ	ばらつき	硬さ増加	単位	引張データ	引張試験温度 (°C)	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	一様伸び (%)	全伸び (%)	備考	出典	
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co			Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)	(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)																							(dpa)
4-1	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	304	304	0.060	0.48	0.81	0.028	0.002	8.52	18.29	-	-	-	-	-	-	Bal.	溶体化	-	-	4.7E+17	3.30E+25	4.71	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	376	-	-	HV0.5	有	288	832	832	0.2	7.5	7E24n/m <sup>2</sup> =1dpa換算	M. Kodama, et al. Proc. Of 8th Int. Symp. On Environmental Degradation, 1997, 831-838 (ANS)	
4-2	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	304	304	0.060	0.48	0.81	0.028	0.002	8.52	18.29	-	-	-	-	-	-	Bal.	溶体化	-	-	4.7E+17	3.30E+25	2.43	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	360	-	-	HV0.5	有	288	808	808	0.1	5.8			
4-3	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	304	304	0.060	0.48	0.81	0.028	0.002	8.52	18.29	-	-	-	-	-	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	173	-	-	HV0.5	有	288	203	455	31.7	36.8			
4-4	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	304L	304L	0.013	0.40	1.18	0.026	0.002	9.22	18.65	-	-	-	-	-	-	Bal.	溶体化	-	-	4.7E+17	1.70E+25	2.43	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	339	-	-	HV0.5	有	288	672	672	0.1	5.6			
4-5	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	304L	304L	0.013	0.40	1.18	0.026	0.002	9.22	18.65	-	-	-	-	-	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	163	-	-	HV0.5	有	288	175	400	29.3	34.1			
4-6	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316	316	0.040	0.64	1.28	0.033	0.003	10.87	16.94	2.12	-	-	-	-	0.220	-	Bal.	溶体化	-	-	1.90E+25	2.71	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	313	-	-	HV0.5	有	288	696	730	3.8	8.1			
4-7	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316	316	0.040	0.64	1.28	0.033	0.003	10.87	16.94	2.12	-	-	-	-	0.220	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	151	-	-	HV0.5	有	288	163	460	31.6	36.0			
4-8	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L	316L	0.016	0.59	1.18	0.033	0.001	12.66	17.51	2.13	-	-	-	-	0.026	-	Bal.	溶体化	-	-	5.1E+17	3.60E+25	5.14	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	323	-	-	HV0.5	有	288	684	684	0.1			8.0
4-9	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L	316L	0.016	0.59	1.18	0.033	0.001	12.66	17.51	2.13	-	-	-	-	0.026	-	Bal.	溶体化	-	-	5.3E+17	1.90E+25	2.71	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	302	-	-	HV0.5	有	288	632	658	9.5			12.8
4-10	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L	316L	0.016	0.59	1.18	0.033	0.001	12.66	17.51	2.13	-	-	-	-	0.026	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	141	-	-	HV0.5	有	288	156	421	38.5	42.9			
4-11	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-NL	316L	0.019	0.50	0.86	0.028	0.003	12.72	16.86	2.34	-	-	-	-	0.003	-	Bal.	溶体化	-	-	5.3E+17	3.70E+25	5.29	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	336	-	-	HV0.5	有	288	730	738	0.4			10.2
4-12	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-NL	316L	0.019	0.50	0.86	0.028	0.003	12.72	16.86	2.34	-	-	-	-	0.003	-	Bal.	溶体化	-	-	5.6E+17	2.00E+25	2.86	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	307	-	-	HV0.5	有	288	562	584	3.0			6.7
4-13	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-NL	316L	0.019	0.50	0.86	0.028	0.003	12.72	16.86	2.34	-	-	-	-	0.003	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	119	-	-	HV0.5	有	288	171	397	31.9	36.0			
4-14	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-NM	316L	0.017	0.52	1.37	0.025	0.002	14.11	16.52	2.23	-	-	-	-	0.017	-	Bal.	溶体化	-	-	5.6E+17	2.00E+25	2.86	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	267	-	-	HV0.5	有	288	458	514	5.8			8.6
4-15	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-NM	316L	0.017	0.52	1.37	0.025	0.002	14.11	16.52	2.23	-	-	-	-	0.017	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	123	-	-	HV0.5	有	288	153	401	34.5	38.4			
4-16	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI(A)	316L	0.010	0.50	0.88	0.012	0.001	12.18	16.62	2.16	-	-	-	-	0.036	-	Bal.	溶体化	-	-	5.6E+17	2.00E+25	2.86	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	247	-	-	HV0.5	有	288	466	574	17.4			22.6
4-17	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI(A)	316L	0.010	0.50	0.88	0.012	0.001	12.18	16.62	2.16	-	-	-	-	0.036	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	135	-	-	HV0.5	有	288	172	419	29.5	34.2			
4-18	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI(B)	316L	0.010	0.46	0.98	0.013	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	0.037	-	Bal.	溶体化	-	-	2.00E+25	2.86	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	285	-	-	HV0.5	有	288	588	642	11.7	17.6			
4-19	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI(B)	316L	0.010	0.46	0.98	0.013	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	0.037	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	156	-	-	HV0.5	有	288	154	418	30.9	35.4			
4-20	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI-NM	316L	0.016	0.52	1.34	0.010	0.002	12.86	16.14	2.29	-	-	-	-	0.014	-	Bal.	溶体化	-	-	5.6E+17	2.00E+25	2.86	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	319	-	-	HV0.5	有	288	472	533	9.3			12.4
4-21	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI-NM	316L	0.016	0.52	1.34	0.010	0.002	12.86	16.14	2.29	-	-	-	-	0.014	-	Bal.	溶体化	-	-	3.80E+25	5.43	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	263	-	-	HV0.5	有	288	693	693	0.2	13.1			
4-22	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI-NM	316L	0.016	0.52	1.34	0.010	0.002	12.86	16.14	2.29	-	-	-	-	0.014	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	130	-	-	HV0.5	有	288	153	393	33.7	37.6			
4-23	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PM-NM	316L	0.013	0.49	0.91	0.019	0.000	12.46	16.84	2.20	-	-	-	-	0.010	-	Bal.	溶体化	-	-	5.7E+17	4.00E+25	5.71	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	342	-	-	HV0.5	有	288	780	780	0.2			7.2
4-24	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PM-NM	316L	0.013	0.49	0.91	0.019	0.000	12.46	16.84	2.20	-	-	-	-	0.010	-	Bal.	溶体化	-	-	5.8E+17	2.10E+25	3.00	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	291	-	-	HV0.5	有	288	613	626	5.5			10.8
4-25	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PM-NM	316L	0.013	0.49	0.91	0.019	0.000	12.46	16.84	2.20	-	-	-	-	0.010	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	138	-	-	HV0.5	有	288	166	401	31.5	35.4			
4-26	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI-NL	316L	0.014	0.49	0.92	0.011	0.000	12.47	16.88	2.21	-	-	-	-	0.003	-	Bal.	溶体化	-	-	5.3E+17	3.70E+25	5.29	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	340	-	-	HV0.5	有	288	711	711	0.2			8.7
4-27	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI-NL	316L	0.014	0.49	0.92	0.011	0.000	12.47	16.88	2.21	-	-	-	-	0.003	-	Bal.	溶体化	-	-	5.3E+17	1.90E+25	2.71	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	263	-	-	HV0.5	有	288	528	583	10.2			14.9
4-28	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片	316L-PI-NL	316L	0.014	0.49	0.92	0.011	0.000	12.47	16.88	2.21	-	-	-	-	0.003	-	Bal.	溶体化	-	-	0	0	-	288	ビッカース	大気中	室温	母材	0.5	-	-	118	-	-	HV0.5	有	288	159	379	30.9	31.7			
4-29	-	-	国内BWR	水中	-	引張試験片</																																												









# IASCC発生(PWR分野)データシート1/4

DB	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)														熱処理等	冷間加工率	照射量			中性子束(フラックス)	照射温度	試験温度	試験環境					試験片形状	平行部面積	平行部長さ	採取方向	負荷方式	負荷力	0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$	応力比 $\sigma/\sigma_y$	試験時間	導電率	ECP	割れ有無	備考	出典						
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co			Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)	(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)				(dpa)	(dpa/s)	(°C)	(°C)	DO (ppm)															DH (ppm)	DH (cc/kg)	B (ppm)	Li (ppm)	(MPa)	(MPa)
1-1	B3-29	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	19.5	3.7E-08	298	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	805	850	0.83	> 2,000	-	-	無		
1-2	B3-30	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	19.5	3.7E-08	298	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	836	850	0.86	154	-	-	有		
1-3	B3-13	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	11.4	2.2E-08	340	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	966	850	1.14	> 2,000	-	-	無		
1-4	B3-14	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	10.5	2.0E-08	338	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	966	850	1.14	1,988	-	-	有		
1-5	B3-31	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	19.5	3.7E-08	298	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	925	850	1.10	> 2,000	-	-	無		
1-6	B3-32	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	19.5	3.7E-08	298	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	910	850	1.10	> 2,000	-	-	無		
1-7	B3-15	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	11.8	2.2E-08	342	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	1,018	850	1.20	1	-	-	有		
1-8	B3-16	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	10.5	2.0E-08	338	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	1,018	850	1.21	41	-	-	有		
1-9	B3-33	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	19.5	3.7E-08	298	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	1,136	850	1.20	6	-	-	有		
1-10	B3-34	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	19.5	3.7E-08	298	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	1,135	850	1.17	10	-	-	有		
1-11	B3-27	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	18.8	3.6E-08	306	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	798	850	0.82	> 2,000	-	-	無		
1-12	B3-28	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	18.8	3.6E-08	306	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	720	850	0.74	770	-	-	有		
1-13	B3-24	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	18.8	3.6E-08	302	320	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	850	850	0.88	413	-	-	有		
1-14	B3-25	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	18.8	3.6E-08	302	320	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	845	850	0.87	121	-	-	有		
1-15	B3-26	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	18.8	3.6E-08	302	320	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	673	850	0.70	430	-	-	有		
1-16	B3-22	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	18.8	3.6E-08	302	320	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	1,126	850	1.16	27	-	-	有		
1-17	B3-23	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	18.8	3.6E-08	302	320	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	1,114	850	1.15	57	-	-	有		
1-18	B3-11	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	8.7	1.7E-08	307	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	838	667	1.26	165	-	-	有		
1-19	B3-12	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	8.7	1.7E-08	307	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	822	667	1.23	950	-	-	有		
1-20	B3-2	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	4.2	8.0E-09	311	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	780	667	1.17	> 2,000	-	-	無		
1-21	B3-9	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	8.7	1.7E-08	307	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	642	667	0.96	> 2,000	-	-	無		
1-22	B3-10	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	8.7	1.7E-08	307	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	636	667	0.95	> 2,000	-	-	無		
1-23	B3-20	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	18.8	3.6E-08	302	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	595	970	0.61	> 2,000	-	-	無		
1-24	B3-18	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	18.8	3.6E-08	302	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	427	970	0.44	> 2,000	-	-	無		
1-25	B3-19	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	18.8	3.6E-08	302	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	476	970	0.49	> 2,000	-	-	無		
1-26	B3-1	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	5.1	9.7E-09	315	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	633	667	0.95	> 2,000	-	-	無		
1-27	B3-3	-	海外PWR	水中	BFB	-	316SS	CW316	0.05	0.55	1.55	0.021	0.025	12.45	17.71	2.26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	Bal.	冷間加工	20	-	-	-	5.1	9.7E-09	315	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	602	667	0.90	> 2,000	-	-	無		
2-1	B4-9	-	国内PWR	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	-12	-	-	-	14	2.9E-08	323	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	1,064	968	1.10	135	-	-	有			
2-2	B4-11	-	国内PWR	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25	16.25	2.36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	冷間加工	-12	-	-	-	10.5	2.2E-08	323	340	-	-	30	1,200	2	Cリング	-	-	周方向	定荷重	1,149	968	1.19	3	-	-	有			
2-3	B4-12	-	国内PWR	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.06	0.63	1.68	0.02	0.005	12.25																																									

# IASCC発生(PWR分野)データシート2/4

DB	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)														熱処理	冷間加工率 (%)	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス)	照射温度 (°C)	試験温度 (°C)	試験環境					試験片形状	平行部面積 (mm <sup>2</sup> )	平行部長さ (mm)	採取方向	負荷方式	負荷応力 (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	応力比 (σ/σ <sub>y</sub> )	試験時間 (hr)	導電率 (μS/m)	ECP (mV <sub>SSE</sub> )	割れ有無	備考	出典			
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co			Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)	(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)				(dpa)	DO (ppm)	DH (ppm)	DH (cc/kg)	B (ppm)															Li (ppm)		
4-1	SR09	-	国内PWR	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.04	0.62	1.63	0.022	0.006	12.61	16.94	2.22	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	1038-1177°C	10-12	5.7E+26	-	38	7.8E-08	298	320	-	-	5	500	2	引張試験片	1.49	5	軸方向	定荷重	564	940	0.6	> 1,050	-	-	無		Fuji et al., Fontevraud 7, 2010	
4-2	SR10	-	国内PWR	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.04	0.62	1.63	0.022	0.006	12.61	16.94	2.22	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	1038-1177°C	10-12	5.7E+26	-	38	7.8E-08	298	320	-	-	5	500	2	引張試験片	1.49	5	軸方向	定荷重	564	940	0.6	> 1,050	-	-	無			
4-3	SR11	-	国内PWR	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.04	0.62	1.63	0.022	0.006	12.61	16.94	2.22	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	1038-1177°C	10-12	5.7E+26	-	38	7.8E-08	298	320	-	-	5	500	2	引張試験片	1.49	5	軸方向	定荷重	658	940	0.7	> 1,030	-	-	無			
4-4	SR12	-	国内PWR	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.04	0.62	1.63	0.022	0.006	12.61	16.94	2.22	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	1038-1177°C	10-12	5.7E+26	-	38	7.8E-08	298	320	-	-	5	500	2	引張試験片	1.49	5	軸方向	定荷重	658	940	0.7	> 1,030	-	-	無			
4-5	SR09	-	国内PWR	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.04	0.62	1.63	0.022	0.006	12.61	16.94	2.22	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	1038-1177°C	10-12	5.7E+26	-	38	7.8E-08	298	320	-	-	5	500	2	引張試験片	1.49	5	軸方向	定荷重	752	940	0.8	368	-	-	有			
4-6	SR10	-	国内PWR	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.04	0.62	1.63	0.022	0.006	12.61	16.94	2.22	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	1038-1177°C	10-12	5.7E+26	-	38	7.8E-08	298	320	-	-	5	500	2	引張試験片	1.49	5	軸方向	定荷重	752	940	0.8	200	-	-	有			
4-7	SR13	-	国内PWR	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.04	0.62	1.63	0.022	0.006	12.61	16.94	2.22	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	1038-1177°C	10-12	5.7E+26	-	38	7.8E-08	298	320	-	-	45	500	2	引張試験片	1.49	5	軸方向	定荷重	376	940	0.4	> 1,031	-	-	有			
4-8	SR14	-	国内PWR	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.04	0.62	1.63	0.022	0.006	12.61	16.94	2.22	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	1038-1177°C	10-12	5.7E+26	-	38	7.8E-08	298	320	-	-	45	500	2	引張試験片	1.49	5	軸方向	定荷重	470	940	0.5	46	-	-	有			
5-1	F1	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	-	0	0.0E+00	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	257	506	0.51	> 1,311	-	-	無		Connerman et al., 12th EDM, 2005
5-2	F1	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	0	0.0E+00	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	1,234	506	2.44	> 3,928	-	-	無			
5-3	E1	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	17	2.7E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	844	940	0.90	52	-	-	有			
5-4	E2	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	17	2.7E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	142	940	0.15	> 1,311	-	-	無			
5-5	E2	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	17	2.7E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	684	940	0.73	> 3,928	-	-	無			
5-6	E3	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	17	2.7E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	301	940	0.32	> 262	-	-	無			
5-7	E3	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	17	2.7E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	624	940	0.66	> 2,635	-	-	無			
5-8	B1	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	35	5.5E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	836	946	0.88	19	-	-	有			
5-9	B1	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	35	5.5E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	139	946	0.15	> 1,311	-	-	無			
5-10	B2	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	35	5.5E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	676	946	0.71	41	-	-	有			
5-11	B3	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	35	5.5E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	302	946	0.32	> 262	-	-	無			
5-12	B3	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	35	5.5E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	617	946	0.65	638	-	-	有			
5-13	D1	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	35	5.5E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	867	946	0.92	24	-	-	有			
5-14	D2	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	35	5.5E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	142	946	0.15	> 1,311	-	-	無			
5-15	D2	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	35	5.5E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	692	946	0.73	104	-	-	有			
5-16	D3	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	35	5.5E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	299	946	0.32	> 262	-	-	無			
5-17	D3	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	35	5.5E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	612	946	0.65	619	-	-	有			
5-18	C2	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	61	9.6E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	144	929	0.16	> 1,311	-	-	無			
5-19	C2	-	Ringhals 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.045	0.43	1.70	0.026	0.01	13.3	17.4	2.69	-	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	冷間加工	15	-	61	9.6E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	Oリング	-	-	周方向	定荷重	700	929	0.75	115	-	-	有			
5-20	C3																																																			

# IASCC発生(PWR分野)データシート3/4

DB	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)														熱処理等	冷間加工率	照射量			中性子束(フラックス)	照射温度	試験温度	試験環境					試験片形状	平行部面積	平行部長さ	採取方向	負荷方式	負荷力σ <sub>p</sub>	0.2%耐力σ <sub>0.2</sub>	応力比σ <sub>p</sub> /σ <sub>0.2</sub>	試験時間	導電率	ECP	割れ有無	備考	出典		
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co			Fe	(%)	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)				(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)	(dpa)	(dpa/s)	(°C)	(°C)															DO (ppm)	DH (ppm)
7-1	BV-1B4-D	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	12	2.7E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	494	769	0.64	> 1,425	-	-	無		Freyer et al., 13th EDM, 2007
7-2	BV-1B4-C	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	12	2.7E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	495	769	0.64	> 1,425	-	-	無		
7-3	BV-1B4-D	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	12	2.7E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	790	769	1.03	> 653	-	-	無		
7-4	BV-1B4-C	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	12	2.7E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	792	769	1.03	> 372	-	-	有		
7-5	BV-1B4-A	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	13	2.9E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	423	769	0.55	> 3,516	-	-	無		
7-6	BV-1B4-B	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	13	2.9E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	782	769	1.02	> 5	-	-	有		
7-7	BV-1B3-B	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	14	3.1E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	709	769	0.92	> 600	-	-	無		
7-8	BV-1B3-A	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	14	3.1E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	742	769	0.96	> 600	-	-	無		
7-9	BV-1B2-D	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	25	5.5E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	301	1,010	0.30	> 1,585	-	-	無		
7-10	BV-1B2-D	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	25	5.5E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	542	1,010	0.54	> 813	-	-	無		
7-11	BV-1B1-B	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	27	6.0E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	639	1,010	0.63	> 96	-	-	有		
7-12	BV-1B1-A	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	27	6.0E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	667	1,010	0.66	> 600	-	-	無		
7-13	BV-1B1-C	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	28	6.2E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	554	1,010	0.55	> 558	-	-	無		
7-14	BV-1B1-E	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	29	6.4E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	646	1,010	0.64	> 370	-	-	有		
7-15	BV-1B1-F	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	29	6.4E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	700	1,010	0.69	> 5	-	-	有		
7-16	BV-1B1-G	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	30	6.7E-08	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	608	1,010	0.60	> 558	-	-	無		
7-17	BV-2B-3C	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	51	1.1E-07	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	324	968	0.33	> 2,858	-	-	無		
7-18	BV-2B-3B	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	51	1.1E-07	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	406	968	0.42	> 2,632	-	-	無		
7-19	BV-2B-3C	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	51	1.1E-07	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	583	968	0.60	> 813	-	-	無		
7-20	BV-2B3-F	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	51	1.1E-07	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	635	968	0.66	> 660	-	-	無		
7-21	BV-2B3-E	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	51	1.1E-07	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	647	968	0.67	> 10	-	-	有		
7-22	BV-2B-3B	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	51	1.1E-07	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	650	968	0.67	> 125	-	-	有		
7-23	BV-2B3-D	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	51	1.1E-07	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	655	968	0.68	> 660	-	-	無		
7-24	BV-2B1-J	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	51	1.1E-07	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	671	968	0.69	> 365	-	-	有		
7-25	BV-2B1-H	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	51	1.1E-07	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	673	968	0.70	> 531	-	-	無		
7-26	BV-2B1-L	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	51	1.1E-07	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	674	968	0.70	> 322	-	-	有		
7-27	BV-2B1-I	-	Beaver Valley 1	水中	シンプルチューブ	-	316SS	CW316	0.060	0.46	1.62	0.022	0.016	13.23	16.84	2.25	-	-	-	-	-	-	0.078	Bal.	冷間加工	15	-	-	51	1.1E-07	-	340	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	675	968	0.70	> 531	-	-	無</		

# IASCC発生(PWR分野)データシート4/4

DB	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)																熱処理等	冷間加工率 (%)	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス)	照射温度 (°C)	試験温度 (°C)	試験環境					試験片形状	平行部面積 (m <sup>2</sup> )	平行部長さ (mm)	採取方向	負荷方式	負荷応力σ (MPa)	0.2%耐力σ <sub>0.2</sub> (MPa)	応力比σ/σ <sub>y</sub>	試験時間 (hr)	導電率 (μS/m)	ECP (mV <sub>SSE</sub> )	割れ有無	備考	出典
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co	Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)			(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)	(dpa)	DO (ppm)				DH (ppm)	DH (cc/kg)	B (ppm)	Li (ppm)															
9-1	TTO-01-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	690	1,000	0.69	14.8	-	-	有			
9-2	TTO-02-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	680	1,000	0.68	25.5	-	-	有			
9-3	TTO-03-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	650	1,000	0.65	47.7	-	-	有			
9-4	TTO-04-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	650	1,000	0.65	35.8	-	-	有			
9-5	TTO-05-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	600	1,000	0.60	38.5	-	-	有			
9-6	TTO-06-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	600	1,000	0.60	44.4	-	-	有			
9-7	TTO-07-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	590	1,000	0.59	2,106	-	-	有			
9-8	TTO-08-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	600	1,000	0.60	45.9	-	-	有			
9-9	TTO-09-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	550	1,000	0.55	2,109	-	-	有			
9-10	TTO-10-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	550	1,000	0.55	2,122	-	-	有			
9-11	TTO-11-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	540	1,000	0.54	67	-	-	有			
9-12	TTO-12-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	550	1,000	0.55	918	-	-	有			
9-13	TTO-13-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	490	1,000	0.49	304	-	-	有			
9-14	TTO-14-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	500	1,000	0.50	998	-	-	有			
9-15	TTO-15-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	490	1,000	0.49	318	-	-	有			
9-16	TTO-16-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	500	1,000	0.50	1,451	-	-	有			
9-17	TTO-17-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	450	1,000	0.45	2,658	-	-	有			
9-18	TTO-18-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	450	1,000	0.45	> 4,350	-	-	無			
9-19	TTO-19-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	400	1,000	0.40	> 4,350	-	-	無			
9-20	TTO-20-80	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	80	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	400	1,000	0.40	> 4,350	-	-	無			
9-21	TTO-1-031	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	45	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	690	1,000	0.69	34	-	-	有			
9-22	TTO-1-032	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	46	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	630	1,000	0.63	38	-	-	有			
9-23	TTO-1-033	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	47	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	600	1,000	0.60	53.5	-	-	有			
9-24	TTO-1-034	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	47	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	550	1,000	0.55	107.5	-	-	有			
9-25	TTO-1-035	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	48	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	550	1,000	0.55	219	-	-	有			
9-26	TTO-1-041	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	53	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	690	1,000	0.69	36	-	-	有			
9-27	TTO-1-042	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	53	-	-	320	-	-	30	1,000	2	オリング	-	-	周方向	定荷重	640	1,000	0.64	71	-	-	有			
9-28	TTO-1-043	-	Tihange 2	水中	シブチチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.53	1.79	0.022	0.009	12.8	17.0	2.68	-	-	-	-	-	0.07	Bal.	冷間加工	20	-	-	54	-</																						

# IASCC発生(BWR分野)データシート1/1

DB No.	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)														熱処理等	冷間加工率 (%)	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス)	照射温度 (°C)	試験温度 (°C)	試験環境					試験片形状	平行部面積 (mm <sup>2</sup> )	平行部長さ (mm)	採取方向	負荷方式	負荷応力σ (MPa)	0.2%耐力σ <sub>0.2</sub> (MPa)	応力比σ/σ <sub>0.2</sub>	試験時間 (hr)	導電率 (μS/m)	ECP (mV <sub>SHE</sub> )	割れ有無	SCC発生	備考	出典					
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co			Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)	(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)				(dpa)	DO (ppm)	DH (ppm)	DH (cc/kg)	B (ppm)																Li (ppm)				
1-1	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	5.1E+24	0.7	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	231	-	0.5	> 2000	-	-	-	無	有	-	-		
1-2	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	5.1E+24	0.7	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	231	-	0.5	> 2000	-	-	-	無	有	-	-		
1-3	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	5.1E+24	0.7	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	347	-	0.75	> 2020	-	-	-	無	有	-	-		
1-4	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	5.1E+24	0.7	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	347	-	0.75	> 2020	-	-	-	無	有	-	-		
1-5	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	5.1E+24	0.7	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	463	-	1.0	> 2020	-	-	-	無	有	-	-		
1-6	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	5.1E+24	0.7	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	463	-	1.0	> 2020	-	-	-	無	有	-	-		
1-7	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	1.0E+25	1.4	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	116	-	0.21	> 2020	-	-	-	無	有	-	-		
1-8	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	1.0E+25	1.4	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	116	-	0.21	> 2020	-	-	-	無	有	-	-		
1-9	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	1.0E+25	1.4	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	231	-	0.42	> 2020	-	-	-	無	有	-	-		
1-10	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	1.0E+25	1.4	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	231	-	0.42	> 2020	-	-	-	無	有	-	-		
1-11	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	1.0E+25	1.4	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	347	-	0.5	> 2020	-	-	-	無	有	-	-		
1-12	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	1.0E+25	1.4	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	347	-	0.5	> 2020	-	-	-	無	有	-	-		
1-13	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	1.0E+25	1.4	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	463	-	0.85	> 2020	-	-	-	無	有	-	-		
1-14	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	1.0E+25	1.4	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	463	-	0.85	> 2020	-	-	-	無	有	-	-		
1-15	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	1.0E+25	1.4	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	521	-	0.95	> 1119	-	-	-	有	有	-	-	ピンホール破断	-
1-16	-	304A	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.53	1.64	0.026	0.006	9.20	18.6	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	1.0E+25	1.4	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	521	-	0.95	> 1669	-	-	-	有	有	-	-	ピンホール破断	-
1-18	-	304B	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.51	1.69	0.029	0.007	10.20	18.65	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	6.0E+25	8.6	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	231	-	0.28	> 2053	-	-	-	無	有	-	-		
1-19	-	304B	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.51	1.69	0.029	0.007	10.20	18.65	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	6.0E+25	8.6	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	231	-	0.28	> 917	-	-	-	有	有	-	-	ピンホール破断	-
1-20	-	304B	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.51	1.69	0.029	0.007	10.20	18.65	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	6.0E+25	8.6	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	347	-	0.42	> 97	-	-	-	有	有	-	-		
1-21	-	304B	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.51	1.69	0.029	0.007	10.20	18.65	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	受入まま	-	-	6.0E+25	8.6	-	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	347	-	0.42	> 2020	-	-	-	無	有	-	-		
1-22	U-1	304C	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.37	1.75	0.03	0.014	9.03	18.14	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2 Bal.	受入まま	-	-	1.4E+26	20	9.0E-08	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	116	-	0.12	> 5003	-	-	-	無	有	-	-		
1-23	U-2	304C	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.37	1.75	0.03	0.014	9.03	18.14	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2 Bal.	受入まま	-	-	1.4E+26	20	9.0E-08	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	116	-	0.12	> 5003	-	-	-	無	有	-	-		
1-24	U-3	304C	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.37	1.75	0.03	0.014	9.03	18.14	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2 Bal.	受入まま	-	-	1.4E+26	20	9.0E-08	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	231	-	0.24	> 5003	-	-	-	無	有	-	-		
1-25	U-4	304C	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.37	1.75	0.03	0.014	9.03	18.14	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2 Bal.	受入まま	-	-	1.4E+26	20	9.0E-08	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	231	-	0.24	> 5003	-	-	-	無	有	-	-		
1-26	U-5	304C	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.37	1.75	0.03	0.014	9.03	18.14	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2 Bal.	受入まま	-	-	1.4E+26	20	9.0E-08	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	347	-	0.37	> 5003	-	-	-	無	有	-	-		
1-27	U-6	304C	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.37	1.75	0.03	0.014	9.03	18.14	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2 Bal.	受入まま	-	-	1.4E+26	20	9.0E-08	288	288	32	-	-	-	-	円弧	4.8	6	-	定荷重	347	-	0.37	> 5003	-	-	-	無	有	-	-		
1-28	U-9	304C	国内BWR	水中	炉内計装管	-	304	304	0.05	0.37	1.75	0.03	0.014	9.03	18.14	-	-	-	-	-	-	-	-	0.2 Bal.	受入まま	-	-	1.4E+26	20	9.0E-08	288	288	32	-	-	-																			

# IASCC進展(BWR分野)データシート1/3

DB	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)														熱処理等	冷間加工率 (%)	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス) (dpa/s)	照射温度 (°C)	試験片形状	試験温度 (°C)	試験片厚さ (mm)	有効試験片厚さ (mm)	負荷制御方式	試験時間 (hr)	応力拡大係数 (MPa√m)	き裂進展速度 (m/s)	溶存酸素濃度 (ppm)	溶存水素濃度 (ppm)	出口導電率 (μS/m)	不純物濃度 (ppm)	ECP (mV <sub>SHE</sub> )	破面SEM写真	備考	出典		
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co			Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)	(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)																			(dpa)	
1-1	A103	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	5.16E+24	0.86	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	120	16.1	< 1.20E-11	0.02	-	19	< 0.005	-240	-	原子力安全基盤機構、H20年度IASCCに関する報告書(09基材種0012)。 Tkakura et al., 14th EDM, 2009. Kaji et al., 14th EDM, 2009. Chatani et al., 13th EDM, 2005	-	
1-2	A104	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	5.93E+24	0.99	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	553	20.5	< 7.20E-12	0.02	-	19	< 0.005	-230	-			
1-3	A203	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	1.00E+25	1.73	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	819	18.0	< 1.00E-11	0.01	-	19	< 0.005	-200	-			
1-4	A204	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	1.03E+25	1.72	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	410	16.0	< 9.40E-12	0.02	-	19	< 0.005	-240	有			
1-5	A207	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	1.03E+25	1.70	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	1650	26.3	< 2.50E-12	0.02	-	19	< 0.005	-240	-			
1-6	H101	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	5.62E+24	0.94	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	526	20.7	< 7.20E-12	0.02	-	19	< 0.005	-230			-
1-7	H102	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	5.22E+24	0.87	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	121	15.4	< 1.20E-11	0.02	-	19	< 0.005	-240	-			
1-8	H204	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	1.19E+25	1.99	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	130	25.2	< 3.20E-11	0.02	-	19	< 0.005	-240	-			
1-9	H204	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	1.19E+25	1.99	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	170	25.3	< 2.40E-11	0.02	-	19	< 0.005	-270	-			
1-10	H205	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	1.04E+25	1.74	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	420	18.0	< 9.40E-12	0.02	-	19	< 0.005	-240	-			
1-11	S304	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304(HAZ)	304	0.050	0.65	1.20	0.024	0.004	8.93	18.58	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	溶接継手	-	-	2.00E+25	3.28	-	262-302	0.5TCT	288	6.4	6.1	-	106	14.5	< 1.00E-11	0.01	-	12	< 0.005	-200	-			
1-12	G102	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS316L(DEPO)	溶金 316L	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	Bal.	溶接金属	-	-	5.41E+24	0.90	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	325	22.1	< 1.30E-11	0.02	-	19	< 0.005	-240	-			
1-13	P102	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶接金属	-	-	5.23E+24	0.87	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	323	21.0	< 1.30E-11	0.02	-	19	< 0.005	-240	-			
1-14	A301	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	2.71E+25	4.50	-	262-302	0.5TCT	288	6.4	6.1	-	458	11.7	1.90E-11	0.01	-	19	< 0.005	-200	有			
1-15	A302	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	2.49E+25	4.20	-	262-302	0.5TCT	288	6.4	6.1	-	412	18.2	5.70E-11	0.01	-	19	< 0.005	-200	-			
1-16	A202	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	9.35E+24	1.56	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	371	23.9	3.60E-10	0.05	-	19	< 0.005	-30	-			
1-17	A208	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	1.13E+25	1.90	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	142	27.1	< 2.70E-11	0.02	-	19	< 0.005	-230	有			
1-18	H302	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	2.35E+25	3.92	-	262-302	0.5TCT	288	6.4	6.1	-	366	12.2	6.40E-10	0.03	-	19	< 0.005	-20	-			
1-19	H403	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	8.11E+25	13.50	-	262-302	0.5TCT	288	5.8	5.5	-	303	12.7	1.80E-10	0.01	-	13	< 0.005	-150	-			
1-20	H303	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	2.50E+25	4.23	-	262-302	0.5TCT	288	6.4	6.1	-	535	14.7	7.00E-11	0.01	-	19	< 0.005	-50	-			
1-21	H102	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	5.22E+24	0.87	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	474	15.3	1.90E-10	0.02	-	19	< 0.005	140	-			
1-22	H206	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	1.19E+25	1.98	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	730	19.4	1.03E-11	0.01	-	19	< 0.005	-200	-			
1-23	H305	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	2.50E+25	4.11	-	262-302	0.5TCT	288	6.4	6.1	-	535	26.0	7.90E-10	0.01	-	19	< 0.005	-50	-			
1-24	H201	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304L(HT)	304L	0.009	0.58	0.85	0.020	0.001	9.78	18.43	-	-	-	-	-	-	0.05	Bal.	溶体化	-	-	1.07E+25	1.78	-	262-302	0.5TCT	288	12.7	12.0	-	1654	27.0	4.20E-12	0.02	-	19	< 0.005	-200	-			
1-25	R404	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304(HT)	304	0.050	0.65	1.20	0.024	0.004	8.93	18.58	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	溶体化	-	-	5.18E+25	8.60	-	262-302	0.5TCT	288	5.8	5.5	-	216	11.6	5.40E-11	0.01	-	12	< 0.005	-200	-			
1-26	R406	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304(HT)	304	0.050	0.65	1.20	0.024	0.004	8.93	18.58	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	溶体化	-	-	5.55E+25	9.20	-	262-302	0.5TCT	288	5.8	5.5	-	215	16.2	5.50E-11	0.01	-	12	< 0.005	-200	-			
1-27	R303	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304(HT)	304	0.050	0.65	1.20	0.024	0.004	8.93	18.58	-	-	-	-	-	-	0.04	Bal.	溶体化	-	-	2.40E+25	4.02	-	262-302	0.5TCT	288	6.4	6.1	-	138	28.3	1.80E-10	0.01	-	19	< 0.005	-200	有			
1-28	A404	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS316L(HT)	316L	0.008	0.43	0.83	0.023	0.001	12.55	17.54	2.11	-	-	-	-	-	0.02	Bal.	溶体化	-	-	6.61E+25	11.00	-	262-302	0.5TCT	288	5.8	5.5	-	215	18.5	9.60E-11	0.01	-	12	< 0.005	-200	-			
1-29	S301	-	JMTR	水中	-	CT試験片	SUS304(HAZ)	HAZ_304	0.050	0.65	1.20	0.024	0.004	8.93	18.58																																









# 応力緩和・クリープ(PWR分野)データシート2/4

DB	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)													熱処理等	冷間加工率 (%)	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス)	照射温度 (°C)	試験方法	試験片形状	測定方法	測定環境	測定温度 (°C)	照射前応力 $\sigma_0$ (MPa)	照射後応力 $\sigma$ (MPa)	照射前曲率	照射後曲率	照射前圧痕幅 (mm)	照射後圧痕幅 (mm)	照射前後の応力比 $\sigma/\sigma_0$	歪量 (%)	代表式または係数	備考	出典			
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N			Co	Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)																			(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)	(dpa)	
8-1	304	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	304SS	304	0.05	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	1.0	-	$\sigma/\sigma_0 = \exp[-E\{A_1(1-\exp(-A_2\phi)) + A_3\phi\}]$	グラフからの数値読み取り	Ishiyama et al., 11th EDM, 2005	
8-2	304	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	304SS	304	0.05	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.96	-	【304】 $A_1: 0 \text{ MPa}$ , $A_2: 0 \text{ dpa}$ $A_3: 1.2 \times 10^{-5} \text{ MPa/dpa}$ Initial stress: 123-189MPa			
8-3	304	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	304SS	304	0.05	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.78	-				
8-4	304	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	304SS	304	0.05	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.82	-				
8-5	304	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	304SS	304	0.05	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.29	-				
8-6	304	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	304SS	304	0.05	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.34	-				
8-7	304	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	304SS	304	0.05	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.35	-				
8-8	316L(1)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-	【316L(1)】 $A_1: 0 \text{ MPa}$ , $A_2: 0 \text{ dpa}$ $A_3: 1.0 \times 10^{-5} \text{ MPa/dpa}$ Initial stress: 114-172MPa		
8-9	316L(1)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.90	-				
8-10	316L(1)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.95	-				
8-11	316L(1)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.81	-				
8-12	316L(1)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.92	-				
8-13	316L(1)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.94	-				
8-14	316L(1)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.56	-				
8-15	316L(1)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.61	-				
8-16	316L(1)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.64	-				
8-17	316L(2)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.01	0.46	0.98	0.011	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	-	-	-	0.0365	0.01	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-				
8-18	316L(2)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.01	0.46	0.98	0.011	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	-	-	-	0.0365	0.01	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.95	-				
8-19	316L(2)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.01	0.46	0.98	0.011	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	-	-	-	0.0365	0.01	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.86	-				
8-20	316L(2)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.01	0.46	0.98	0.011	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	-	-	-	0.0365	0.01	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.92	-				
8-21	316L(2)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.01	0.46	0.98	0.011	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	-	-	-	0.0365	0.01	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.38	-				
8-22	316L(2)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.01	0.46	0.98	0.011	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	-	-	-	0.0365	0.01	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.39	-				
8-23	316L(2)	-	JMTR	Heガス	-	C-ring	316LSS	316L	0.01	0.46	0.98	0.011	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	-	-	-	0.0365	0.01	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.42	-				
8-24	304	-	JMTR	Heガス	-	Bent-beam	304SS	304	0.05	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-	$\sigma/\sigma_0 = \exp[-E\{A_1(1-\exp(-A_2\phi)) + A_3\phi\}]$			
8-25	304	-	JMTR	Heガス	-	Bent-beam	304SS	304	0.05	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.56	-					
8-26	304	-	JMTR	Heガス	-	Bent-beam	304SS	304	0.05	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.72	-				
8-27	304	-	JMTR	Heガス	-	Bent-beam	304SS	304	0.05	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.41	-				
8-28	304	-	JMTR	Heガス	-	Bent-beam	304SS	304	0.05	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.44	-				
8-29	304	-	JMTR	Heガス	-	Bent-beam	304SS	304	0.05	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.20	-				
8-30	304	-	JMTR	Heガス	-	Bent-beam	304SS	304	0.05	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	-	0.06	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	0.24	-				
8-31	316L(1)	-	JMTR	Heガス	-	Bent-beam	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	1050°C+0.5h	0	-	0	-	298	応力緩和(リング式)	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	-				
8-32	316L(1)	-	JMTR	Heガス	-	Bent-beam	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.0																																			

# 応力緩和・クリープ(PWR分野)データシート3/4

DB	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)																熱処理等	冷間加工率 (%)	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス)	照射温度 (°C)	試験方法	試験片形状	測定方法	測定環境	測定温度 (°C)	照射前応力 $\sigma_0$ (MPa)	照射後応力 $\sigma$ (MPa)	照射前曲率	照射後曲率	照射前圧痕幅 (mm)	照射後圧痕幅 (mm)	照射前後の応力比 $\sigma/\sigma_0$	歪量 (%)	代表式または係数	備考	出典
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co	Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)			(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)	(dpa)																			
12-1	-	-	JMTR	-	-	引張試験片	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	Bal.	1065°C×77min	0	-	-	0.1	-	288	応力緩和(準軸引張式)	7.1mm <sup>2</sup> ×30mm	-	-	-	-	-	-	-	-	0.88	-	-	-				
12-2	-	-	JMTR	-	-	引張試験片	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	Bal.	1065°C×77min	0	-	-	0.1	-	288	応力緩和(準軸引張式)	7.1mm <sup>2</sup> ×30mm	-	-	-	-	-	-	-	-	0.81	-	-	-				
12-3	-	-	JMTR	-	-	引張試験片	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	Bal.	1065°C×77min	0	-	-	0.7	-	288	応力緩和(準軸引張式)	7.1mm <sup>2</sup> ×30mm	-	-	-	-	-	-	-	-	0.00	-	-	-				
12-4	-	-	JMTR	-	-	引張試験片	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	Bal.	1065°C×77min	0	-	-	0.9	-	288	応力緩和(準軸引張式)	7.1mm <sup>2</sup> ×30mm	-	-	-	-	-	-	-	-	0.52	-	-	-				
12-5	-	-	JMTR	-	-	引張試験片	316LSS	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	Bal.	1065°C×77min	0	-	-	2.5	-	288	応力緩和(準軸引張式)	7.1mm <sup>2</sup> ×30mm	-	-	-	-	-	-	-	-	0.10	-	-	-				

# 応力緩和・クリープ (PWR分野)データシート4/4

DB	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)																		熱処理等	冷間加工率 (%)	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス)	照射温度 (°C)	試験方法	試験片形状	測定方法	照射前応力σ <sub>0</sub> (MPa)	照射後応力σ (MPa)	照射後の応力比σ/σ <sub>0</sub>	照射時間 (hr)	歪量 (%)	定常クリープ速度 (mm/m/dpa)	代表式または係数	備考	出典
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co	Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)	(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)	(dpa)																			
1-1	685-ES4	-	Halden	Arガス	-	引張試験片	316SS	CW316	0.05	0.61	1.81	0.009	0.004	12.96	16.38	2.18	-	-	-	-	-	-	0.01	Bal.	冷間加工	20	-	-	1	3.0E-08	340	クープ(単軸引張式)	3.1mm×50mm	炉内測定	552	276	0.5	-	-	-	-	3.4E-04	-	-	-
1-2	685-ES5	-	Halden	Arガス	-	引張試験片	316SS	CW316	0.05	0.61	1.81	0.009	0.004	12.96	16.38	2.18	-	-	-	-	-	-	0.01	Bal.	冷間加工	20	-	-	1	3.0E-08	340	クープ(単軸引張式)	3.1mm×50mm	炉内測定	552	442	0.8	-	-	-	-	4.0E-04	-	-	-
1-3	686-ES5	-	Halden	Arガス	-	引張試験片	316SS	CW316	0.05	0.61	1.81	0.009	0.004	12.96	16.38	2.18	-	-	-	-	-	-	0.01	Bal.	冷間加工	20	-	-	1	3.0E-08	340	クープ(単軸引張式)	3.1mm×50mm	炉内測定	552	442	0.8	-	-	-	-	5.3E-04	-	-	-
1-4	685-ES6	-	Halden	Arガス	-	引張試験片	316SS	CW316	0.05	0.61	1.81	0.009	0.004	12.96	16.38	2.18	-	-	-	-	-	-	0.01	Bal.	冷間加工	20	-	-	1	3.0E-08	340	クープ(単軸引張式)	3.1mm×50mm	炉内測定	552	552	1.0	-	-	-	-	7.6E-04	-	-	-
1-5	686-ES6	-	Halden	Arガス	-	引張試験片	316SS	CW316	0.05	0.61	1.81	0.009	0.004	12.96	16.38	2.18	-	-	-	-	-	-	0.01	Bal.	冷間加工	20	-	-	1	3.0E-08	340	クープ(単軸引張式)	3.1mm×50mm	炉内測定	552	552	1.0	-	-	-	-	7.3E-04	-	-	-
1-6	685-ES7	-	Halden	Arガス	-	引張試験片	316SS	CW316	0.05	0.61	1.81	0.009	0.004	12.96	16.38	2.18	-	-	-	-	-	-	0.01	Bal.	冷間加工	20	-	-	1	3.0E-08	290	クープ(単軸引張式)	3.1mm×50mm	炉内測定	560	280	0.5	-	-	-	-	2.7E-04	-	-	-
1-7	686-ES7	-	Halden	Arガス	-	引張試験片	316SS	CW316	0.05	0.61	1.81	0.009	0.004	12.96	16.38	2.18	-	-	-	-	-	-	0.01	Bal.	冷間加工	20	-	-	1	3.0E-08	290	クープ(単軸引張式)	3.1mm×50mm	炉内測定	560	280	0.5	-	-	-	-	2.0E-04	-	-	-
1-8	685-ES8	-	Halden	Arガス	-	引張試験片	316SS	CW316	0.05	0.61	1.81	0.009	0.004	12.96	16.38	2.18	-	-	-	-	-	-	0.01	Bal.	冷間加工	20	-	-	1	3.0E-08	290	クープ(単軸引張式)	3.1mm×50mm	炉内測定	560	448	0.8	-	-	-	-	4.6E-04	-	-	-
1-9	686-ES8	-	Halden	Arガス	-	引張試験片	316SS	CW316	0.05	0.61	1.81	0.009	0.004	12.96	16.38	2.18	-	-	-	-	-	-	0.01	Bal.	冷間加工	20	-	-	1	3.0E-08	290	クープ(単軸引張式)	3.1mm×50mm	炉内測定	560	448	0.8	-	-	-	-	5.8E-04	-	-	-
1-10	685-ES9	-	Halden	Arガス	-	引張試験片	316SS	CW316	0.05	0.61	1.81	0.009	0.004	12.96	16.38	2.18	-	-	-	-	-	-	0.01	Bal.	冷間加工	20	-	-	1	3.0E-08	290	クープ(単軸引張式)	3.1mm×50mm	炉内測定	560	560	1.0	-	-	-	-	8.1E-04	-	-	-
1-11	686-ES9	-	Halden	Arガス	-	引張試験片	316SS	CW316	0.05	0.61	1.81	0.009	0.004	12.96	16.38	2.18	-	-	-	-	-	-	0.01	Bal.	冷間加工	20	-	-	1	3.0E-08	290	クープ(単軸引張式)	3.1mm×50mm	炉内測定	560	560	1.0	-	-	-	-	8.6E-04	-	-	-
2-1	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	60	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	40	-	-	-	-	-	1.12	-	-	-	
2-2	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	60	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	80	-	-	-	-	-	0.2	-	-	-	
2-3	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	60	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	125	-	-	-	-	-	0.62	-	-	-	
2-4	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	60	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	170	-	-	-	-	-	1	-	-	-	
2-5	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	60	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	170	-	-	-	-	-	1.15	-	-	-	
2-6	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	330	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	40	-	-	-	-	0.05	-	-	-	-	
2-7	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	330	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	80	-	-	-	-	0.1	-	-	-	-	
2-8	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	330	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	170	-	-	-	-	0.22	-	-	-	-	
2-9	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	330	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	170	-	-	-	-	0.25	-	-	-	-	
2-10	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	330	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	260	-	-	-	-	0.42	-	-	-	-	
2-11	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	330	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	340	-	-	-	-	0.62	-	-	-	-	
2-12	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	400	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	40	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	
2-13	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	400	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	80	-	-	-	-	0.05	-	-	-	-	
2-14	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	400	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	170	-	-	-	-	0.2	-	-	-	-	
2-15	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	400	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	260	-	-	-	-	0.35	-	-	-	-	
2-16	-	US PCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	CW316	0.05	0.44	1.8	0.01	-	16.3	14.0	2.3	-	0.24	0.0003	-	-	0.003	Bal.	冷間加工	25	-	-	8	-	400	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	340	-	-	-	-	0.43	-	-	-	-	
2-17	-	JPCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	316	0.06	0.50	1.8	0.027	-	15.6	14.2	2.3	-	0.24	0.003	-	-	0.002	Bal.	溶体化	-	-	-	8	-	60	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	80	-	-	-	-	0.15	-	-	-	-	
2-18	-	JPCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	316	0.06	0.50	1.8	0.027	-	15.6	14.2	2.3	-	0.24	0.003	-	-	0.002	Bal.	溶体化	-	-	-	8	-	60	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	150	-	-	-	-	0.58	-	-	-	-	
2-19	-	JPCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	316	0.06	0.50	1.8	0.027	-	15.6	14.2	2.3	-	0.24	0.003	-	-	0.002	Bal.	溶体化	-	-	-	8	-	330	クープ(チューブ内圧式)	4.57φ×25.4mm	炉外測定	-	80	-	-	-	-	0.05	-	-	-	-	
2-20	-	JPCA	ORR	-	-	チューブ試験片	316SS	316	0.06	0.50	1.8	0.027	-	15.6	14.2	2.3	-	0.24	0.003	-	-	0.002	Bal.	溶体化	-	-	-																		



# 応力緩和(BWR分野)データシート2/3

DB No.	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)																熱処理等	冷間加工率 (%)	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス)	照射温度 (°C)	試験方法	試験片形状	測定方法	測定温度 (°C)	照射前応力 (MPa)	照射後応力 (MPa)	照射前圧痕幅 (<さび無)	照射後圧痕幅 (<さび無)	照射前曲率 (mm)	照射後曲率 (mm)	照射前圧痕幅 (mm)	照射後圧痕幅 (mm)	照射前後の応力比	備考	出典		
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co	Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)			(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)	(dpa)																				
2-1	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	304	304	0.050	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	9.10E+23	0.17	8.20E-08	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.466	Y.Ishiyama et al., Proc. of 11th Degra, 2003, p.920.	
2-2	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	304	304	0.050	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	9.10E+23	0.17	8.20E-08	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.598		
2-3	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	304	304	0.050	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	5.85E+24	1.06	9.81E-08	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.371		
2-4	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	304	304	0.050	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	5.85E+24	1.06	9.81E-08	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.336		
2-5	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	304	304	0.050	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	1.90E+25	3.29	1.27E-07	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.157		
2-6	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	304	304	0.050	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	1.90E+25	3.29	1.27E-07	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.196		
2-7	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	316L	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	溶体化	-	-	9.10E+23	0.17	8.20E-08	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-		0.808
2-8	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	316L	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	溶体化	-	-	9.10E+23	0.17	8.20E-08	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.745		
2-9	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	316L	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	溶体化	-	-	5.85E+24	1.06	9.81E-08	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.569		
2-10	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	316L	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	溶体化	-	-	5.85E+24	1.06	9.81E-08	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.626		
2-11	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	316L	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	溶体化	-	-	1.90E+25	3.29	1.27E-07	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.365		
2-12	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	316L	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	溶体化	-	-	1.90E+25	3.29	1.27E-07	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.383		
2-13	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	316L-PI	316L	0.010	0.46	0.98	0.011	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	-	-	-	0.037	0.01	Bal.	溶体化	-	-	9.10E+23	0.17	8.20E-08	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-		0.662
2-14	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	316L-PI	316L	0.010	0.46	0.98	0.011	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	-	-	0.037	0.01	Bal.	溶体化	-	-	9.10E+23	0.17	8.20E-08	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.453		
2-15	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	316L-PI	316L	0.010	0.46	0.98	0.011	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	-	-	0.037	0.01	Bal.	溶体化	-	-	5.85E+24	1.06	9.81E-08	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.54		
2-16	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	316L-PI	316L	0.010	0.46	0.98	0.011	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	-	-	0.037	0.01	Bal.	溶体化	-	-	5.85E+24	1.06	9.81E-08	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.425		
2-17	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	316L-PI	316L	0.010	0.46	0.98	0.011	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	-	-	0.037	0.01	Bal.	溶体化	-	-	1.90E+25	3.29	1.27E-07	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.692		
2-18	-	-	JMTR	Heガス	-	曲げ	316L-PI	316L	0.010	0.46	0.98	0.011	0.002	12.15	17.59	2.18	-	-	-	-	-	-	0.037	0.01	Bal.	溶体化	-	-	1.90E+25	3.29	1.27E-07	288	曲げ	50X80.7mm	曲率測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.581		
2-19	-	-	JMTR	Heガス	-	Cリング	304	304	0.050	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	1.14E+24	0.21	1.01E-07	288	Cリング	φ40X3mm	2点間距離測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.846		
2-20	-	-	JMTR	Heガス	-	Cリング	304	304	0.050	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	1.14E+24	0.21	1.01E-07	288	Cリング	φ40X3mm	2点間距離測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.769		
2-21	-	-	JMTR	Heガス	-	Cリング	304	304	0.050	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	1.14E+24	0.21	1.01E-07	288	Cリング	φ40X3mm	2点間距離測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.763		
2-22	-	-	JMTR	Heガス	-	Cリング	304	304	0.050	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	6.86E+24	1.24	1.15E-07	288	Cリング	φ40X3mm	2点間距離測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.730		
2-23	-	-	JMTR	Heガス	-	Cリング	304	304	0.050	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	6.86E+24	1.24	1.15E-07	288	Cリング	φ40X3mm	2点間距離測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.635		
2-24	-	-	JMTR	Heガス	-	Cリング	304	304	0.050	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	6.86E+24	1.24	1.15E-07	288	Cリング	φ40X3mm	2点間距離測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.627		
2-25	-	-	JMTR	Heガス	-	Cリング	304	304	0.050	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	2.65E+25	4.43	1.71E-07	288	Cリング	φ40X3mm	2点間距離測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.304		
2-26	-	-	JMTR	Heガス	-	Cリング	304	304	0.050	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	2.65E+25	4.43	1.71E-07	288	Cリング	φ40X3mm	2点間距離測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.294		
2-27	-	-	JMTR	Heガス	-	Cリング	304	304	0.050	0.55	0.91	0.004	0.003	8.32	18.35	-	-	-	-	-	-	-	0.060	0.02	Bal.	溶体化	-	-	2.65E+25	4.43	1.71E-07	288	Cリング	φ40X3mm	2点間距離測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.230		
2-28	-	-	JMTR	Heガス	-	Cリング	316L	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	溶体化	-	-	1.14E+24	0.20	9.65E-08	288	Cリング	φ40X3mm	2点間距離測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.860		
2-29	-	-	JMTR	Heガス	-	Cリング	316L	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.	溶体化	-	-	1.14E+24	0.20	9.65E-08	288	Cリング	φ40X3mm	2点間距離測定	20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.851		
2-30	-	-	JMTR	Heガス	-	Cリング	316L	316L	0.008	0.51	0.95	0.018	0.006	12.58	16.49	2.16	-	-	-	-	-	-	0.032	0.02	Bal.</																							







# スエリング(PWR分野)データシート2/2

DB	試験片番号	材料番号	照射炉	照射環境	採取部位	照射時形状	詳細鋼種	鋼種	材料組成(wt%)														熱処理等	冷間加工率	照射量 (dpaへの換算を含む)			中性子束 (フラックス)	照射温度 (°C)	測定方法	キャビティ有無	平均サイズ (nm)	密度 (/m3)	スエリング (%)	備考	出典			
									C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Nb	Ti	B	Cu	N	Co			Fe	(n/m <sup>2</sup> E>0.1MeV)	(n/m <sup>2</sup> E>1MeV)										(dpa)		
11-1	-	-	Chooz A	水中	Baffle coener	-	CW304SS	CW304	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	冷間加工	-	-	-	<2.5	-	300-320	TEM	無	-	-	-	-	-	-
11-2	-	-	Chooz A	水中	Baffle coener	-	CW304SS	CW304	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	冷間加工	-	-	-	2.5	-	300-320	TEM	無	-	-	-	-	-	-
11-3	-	-	Chooz A	水中	Baffle coener	-	CW304SS	CW304	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	冷間加工	-	-	-	3.2	-	300-320	TEM	無	-	-	-	-	-	-
11-4	-	-	Chooz A	水中	Baffle coener	-	CW304SS	CW304	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	冷間加工	-	-	-	15.2-21.6	-	300-320	TEM	無	-	-	-	-	-	-
11-5	-	-	海外PWR	水中	Baffle plates	-	SA304LSS	304L	0.022	0.36	1.79	0.032	0.0007	9.86	18.61	-	-	-	0.0005	0.25	0.061	0.064	Bal.	溶体化	-	-	-	28	-	310	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
11-6	-	-	海外PWR	水中	Baffle plates	-	SA304LSS	304L	0.022	0.36	1.79	0.032	0.0007	9.86	18.61	-	-	-	0.0005	0.25	0.061	0.064	Bal.	溶体化	-	-	-	35	-	310	TEM	有	-	<1E21	-	-	-	-	
11-7	-	-	海外PWR	水中	Baffle bolts	-	316SS	CW316	0.054	0.68	1.12	0.027	0.0220	10.60	16.60	2.25	-	<0.01	0.0005	0.24	0.023	0.120	Bal.	冷間加工	15	-	-	10	-	320	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
11-8	-	-	海外PWR	水中	Baffle bolts	-	316SS	CW316	0.054	0.68	1.12	0.027	0.0220	10.60	16.60	2.25	-	<0.01	0.0005	0.24	0.023	0.120	Bal.	冷間加工	15	-	-	13	-	345-365	TEM	有	10.4	7E+20	-	-	-	-	
11-9	-	-	海外PWR	水中	Baffle bolts	-	316SS	CW316	0.054	0.68	1.12	0.027	0.0220	10.60	16.60	2.25	-	<0.01	0.0005	0.24	0.023	0.120	Bal.	冷間加工	15	-	-	24.4	-	330	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
11-10	-	-	海外PWR	水中	Baffle bolts	-	316SS	CW316	0.054	0.68	1.12	0.027	0.0220	10.60	16.60	2.25	-	<0.01	0.0005	0.24	0.023	0.120	Bal.	冷間加工	15	-	-	25	-	310	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
11-11	-	-	Osiris	水中	Baffle plates	-	SA304SS	304	0.022	0.36	1.79	0.032	0.0007	9.86	18.61	-	-	-	0.0005	0.25	0.061	0.064	Bal.	溶体化	-	-	-	0.8	-	320	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
11-12	-	-	Osiris	水中	Baffle plates	-	SA304SS	304	0.022	0.36	1.79	0.032	0.0007	9.86	18.61	-	-	-	0.0005	0.25	0.061	0.064	Bal.	溶体化	-	-	-	2.0	-	320	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
11-13	-	-	Osiris	水中	Baffle plates	-	SA304SS	304	0.022	0.36	1.79	0.032	0.0007	9.86	18.61	-	-	-	0.0005	0.25	0.061	0.064	Bal.	溶体化	-	-	-	3.4	-	320	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
11-14	-	-	SM	水中	Baffle plates	-	SA304SS	304	0.022	0.36	1.79	0.032	0.0007	9.86	18.61	-	-	-	0.0005	0.25	0.061	0.064	Bal.	溶体化	-	-	-	4.3	-	300	TEM	有	1.6	9.9E+22	-	-	-	-	
11-15	-	-	SM	水中	Baffle plates	-	SA304SS	304	0.022	0.36	1.79	0.032	0.0007	9.86	18.61	-	-	-	0.0005	0.25	0.061	0.064	Bal.	溶体化	-	-	-	4.5	-	300	TEM	有	-	6.0E+21	-	-	-	-	
11-16	-	-	BOR60	Na中	Baffle plates	-	SA304SS	304	0.022	0.36	1.79	0.032	0.0007	9.86	18.61	-	-	-	0.0005	0.25	0.061	0.064	Bal.	溶体化	-	-	-	20.0	-	320	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
11-17	-	-	BOR60	Na中	Baffle plates	-	SA304SS	304	0.022	0.36	1.79	0.032	0.0007	9.86	18.61	-	-	-	0.0005	0.25	0.061	0.064	Bal.	溶体化	-	-	-	40.0	-	320	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
11-18	-	-	Osiris	水中	Baffle bolts	-	316SS	CW316	0.054	0.68	1.12	0.027	0.0220	10.60	16.60	2.25	-	<0.01	0.0005	0.24	0.023	0.120	Bal.	冷間加工	15	-	-	0.8	-	320	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
11-19	-	-	Osiris	水中	Baffle bolts	-	316SS	CW316	0.054	0.68	1.12	0.027	0.0220	10.60	16.60	2.25	-	<0.01	0.0005	0.24	0.023	0.120	Bal.	冷間加工	15	-	-	2.0	-	320	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
11-20	-	-	Osiris	水中	Baffle bolts	-	316SS	CW316	0.054	0.68	1.12	0.027	0.0220	10.60	16.60	2.25	-	<0.01	0.0005	0.24	0.023	0.120	Bal.	冷間加工	15	-	-	3.4	-	320	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
11-21	-	-	SM	水中	Baffle bolts	-	316SS	CW316	0.054	0.68	1.12	0.027	0.0220	10.60	16.60	2.25	-	<0.01	0.0005	0.24	0.023	0.120	Bal.	冷間加工	15	-	-	5.4	-	300	TEM	有	-	2.4E+22	-	-	-	-	
11-22	-	-	SM	水中	Baffle bolts	-	316SS	CW316	0.054	0.68	1.12	0.027	0.0220	10.60	16.60	2.25	-	<0.01	0.0005	0.24	0.023	0.120	Bal.	冷間加工	15	-	-	5.6	-	300	TEM	有	-	9.0E+21	-	-	-	-	
11-23	-	-	BOR60	Na中	Baffle bolts	-	316SS	CW316	0.054	0.68	1.12	0.027	0.0220	10.60	16.60	2.25	-	<0.01	0.0005	0.24	0.023	0.120	Bal.	冷間加工	15	-	-	10.0	-	320	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
11-24	-	-	BOR60	Na中	Baffle bolts	-	316SS	CW316	0.054	0.68	1.12	0.027	0.0220	10.60	16.60	2.25	-	<0.01	0.0005	0.24	0.023	0.120	Bal.	冷間加工	15	-	-	20.0	-	320	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
11-25	-	-	BOR60	Na中	Baffle bolts	-	316SS	CW316	0.054	0.68	1.12	0.027	0.0220	10.60	16.60	2.25	-	<0.01	0.0005	0.24	0.023	0.120	Bal.	冷間加工	15	-	-	40.0	-	320	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
12-1	-	-	海外PWR	水中	BFB head	-	316SS	CW316	0.042	0.76	1.82	0.012	0.038	12.90	16.20	2.721	-	-	-	0.061	-	0.078	Bal.	冷間加工	12	-	-	9	-	312	TEM	有	3	2.0E+21	-	-	-	-	
12-2	-	-	海外PWR	水中	BFB shank(15mm/head)	-	316SS	CW316	0.042	0.76	1.82	0.012	0.038	12.90	16.20	2.721	-	-	-	0.061	-	0.078	Bal.	冷間加工	12	-	-	7	-	325	TEM	有	6	9.8E+21	-	-	-	-	
12-3	-	-	海外PWR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	24.4	-	330	TEM	無	-	-	-	-	-	-	
12-4	-	-	海外PWR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7	-	333	TEM	有	7.7	1.0E+22	-	-	-	-	
12-5	-	-	海外PWR	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11.9	-	342	TEM	有	8.6	6.1E+21	-	-	-	-	
12-6	-	-	海外PWR	-	シングルチューブ	-	316SS	CW316	0.044	0.75	1.75	0.014	0.011	13.10	17.5	2.64	-	-	-	-	-	0.040	Bal.	冷間加工	-	-	-	35	-	300	TEM	有	1	6.0E+23	-	-	-	-	

## 付録

### 4.3.6 章 照射済ステンレス鋼試験片の保管管理

保管中の照射済ステンレス鋼試験片リスト

(平成 28 年 3 月現在)

付録表 1(1) NFD で保管中の照射済試験片(旧 JNES ENI 事業)(未使用その 1)

No	刻印	材質	形状	管理 個数	使用の 有無	備考
1	3B11	SUS316L/BM	平板引張試験片	1	未使用	
2	3B12	SUS316L/BM	平板引張試験片	1	未使用	
3	3B21	SUS316L/BM	平板引張試験片	1	未使用	
4	3B22	SUS316L/BM	平板引張試験片	1	未使用	
5	3B31	SUS316L/BM	平板引張試験片	1	未使用	
6	3B32	SUS316L/BM	平板引張試験片	1	未使用	
7	3B41	SUS316L/BM	平板引張試験片	1	未使用	
8	3B42	SUS316L/BM	平板引張試験片	1	未使用	
9	3H11	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	未使用	
10	3H12	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	未使用	
11	3H21	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	未使用	
12	3H22	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	未使用	
13	3H31	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	未使用	
14	3H32	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	未使用	
15	3H41	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	未使用	
16	3H42	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	未使用	
17	4B31	SUS316L/BM	平板引張試験片	1	未使用	
18	4B32	SUS316L/BM	平板引張試験片	1	未使用	
19	4B91	SUS316L/BM	平板引張試験片	1	未使用	
20	4B92	SUS316L/BM	平板引張試験片	1	未使用	
21	4H31	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	未使用	
22	4H32	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	未使用	
23	4H33	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	未使用	
24	4H34	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	未使用	
25	4W11	SUS316L/DEPO	平板引張試験片	1	未使用	
26	4W12	SUS316L/DEPO	平板引張試験片	1	未使用	
27	4W21	SUS316L/DEPO	平板引張試験片	1	未使用	
28	4W22	SUS316L/DEPO	平板引張試験片	1	未使用	

付録表 1(2) NFD で保管中の照射済試験片(旧 JNES ENI 事業)(未使用その 2)

No	刻印	材質	形状	管理 個数	使用の 有無	備考
29	4W31	SUS316L/DEPO	平板引張試験片	1	未使用	
30	4W32	SUS316L/DEPO	平板引張試験片	1	未使用	
31	4W42	SUS316L/DEPO	平板引張試験片	1	未使用	
32	63BC101	SUS316L/BM	0.5TCT	1	未使用	
33	63BC201	SUS316L/BM	0.5TCT	1	未使用	
34	63BC301	SUS316L/BM	0.5TCT	1	未使用	
35	63BC401	SUS316L/BM	0.5TCT	1	未使用	
36	63HC101	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
37	63HC102	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
38	63HC103	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
39	63HC104	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
40	63HC105	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
41	63HC106	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
42	63HC107	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
43	63HC108	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
44	63HC111	SUS316L/HAZ	0.7TCT	1	未使用	
45	63HC121	SUS316L/HAZ	0.5TCDCB	1	未使用	
46	63HC201	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
47	63HC202	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
48	63HC203	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
49	63HC204	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
50	63HC205	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
51	63HC206	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
52	63HC207	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
53	63HC208	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
54	63HC211	SUS316L/HAZ	0.7TCT	1	未使用	
55	63HC221	SUS316L/HAZ	0.5TCDCB	1	未使用	
56	63HC301	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
57	63HC302	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	

付録表 1(3) NFD で保管中の照射済試験片(旧 JNES ENI 事業)(未使用その 3)

No	刻印	材質	形状	管理 個数	使用の 有無	備考
58	63HC303	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
59	63HC304	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
60	63HC305	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
61	63HC306	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
62	63HC307	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
63	63HC311	SUS316L/HAZ	0.7TCT	1	未使用	
64	63HC321	SUS316L/HAZ	0.5TCDCB	1	未使用	
65	63HC322	SUS316L/HAZ	0.5TCDCB	1	未使用	
66	63HC401	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
67	63HC402	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
68	63HC403	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
69	63HC404	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
70	63HC405	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
71	63HC406	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
72	63HC407	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
73	63HC411	SUS316L/HAZ	0.7TCT	1	未使用	
74	63HC421	SUS316L/HAZ	0.5TCDCB	1	未使用	
75	63HC422	SUS316L/HAZ	0.5TCDCB	1	未使用	
76	63HV101	SUS316L/HAZ	硬さ試験片	1	未使用	
77	63HV102	SUS316L/HAZ	硬さ試験片	1	未使用	
78	63HV201	SUS316L/HAZ	硬さ試験片	1	未使用	
79	63HV202	SUS316L/HAZ	硬さ試験片	1	未使用	
80	63HV301	SUS316L/HAZ	硬さ試験片	1	未使用	
81	63HV302	SUS316L/HAZ	硬さ試験片	1	未使用	
82	63HV401	SUS316L/HAZ	硬さ試験片	1	未使用	
83	63HV402	SUS316L/HAZ	硬さ試験片	1	未使用	
84	64BC101	SUS316L/BM	0.5TCT	1	未使用	
85	64BC301	SUS316L/BM	0.5TCT	1	未使用	
86	64HC102	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	

付録表 1(4) NFD で保管中の照射済試験片(旧 JNES ENI 事業)(未使用その 4)

No	刻印	材質	形状	管理 個数	使用の 有無	備考
87	64HC104	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
88	64HC105	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
89	64HC107	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
90	64HC108	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
91	64HC111	SUS316L/HAZ	0.7TCT	1	未使用	
92	64HC112	SUS316L/HAZ	0.7TCT	1	未使用	
93	64HC121	SUS316L/HAZ	0.5TCDCB	1	未使用	
94	64HC202	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
95	64HC205	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
96	64HC207	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
97	64HC208	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
98	64HC212	SUS316L/HAZ	0.7TCT	1	未使用	
99	64HC221	SUS316L/HAZ	0.5TCDCB	1	未使用	
100	64HC302	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
101	64HC303	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
102	64HC304	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
103	64HC307	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
104	64HC311	SUS316L/HAZ	0.7TCT	1	未使用	
105	64HC312	SUS316L/HAZ	0.7TCT	1	未使用	
106	64HC321	SUS316L/HAZ	0.5TCDCB	1	未使用	
107	64HC322	SUS316L/HAZ	0.5TCDCB	1	未使用	
108	64HC407	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
109	64HC411	SUS316L/HAZ	0.7TCT	1	未使用	
110	64HC412	SUS316L/HAZ	0.7TCT	1	未使用	
111	64HC421	SUS316L/HAZ	0.5TCDCB	1	未使用	
112	64HC422	SUS316L/HAZ	0.5TCDCB	1	未使用	
113	64HC902	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
114	64HC903	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
115	64HC904	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	

付録表 1(5) NFD で保管中の照射済試験片(旧 JNES ENI 事業)(未使用その 5)

No	刻印	材質	形状	管理 個数	使用の 有無	備考
116	64HV301	SUS316L/HAZ	硬さ試験片	1	未使用	
117	64HV302	SUS316L/HAZ	硬さ試験片	1	未使用	
118	64WC101	SUS316L/DEPO	0.5TCT	1	未使用	
119	64WC201	SUS316L/DEPO	0.5TCT	1	未使用	
120	64WC301	SUS316L/DEPO	0.5TCT	1	未使用	
121	64WC401	SUS316L/DEPO	0.5TCT	1	未使用	
122	KY01	SUS304L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
123	KY02	SUS304L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	
124	KY03	SUS304L/HAZ	0.5TCT	1	未使用	

付録表 2(1) NFD で保管中の照射済試験片(旧 JNES ENI 事業)(使用済その 1)

No	刻印	材質	形状	管理 個数	使用の 有無	備考
125	4B11	SUS316L/BM	平板引張試験片	1	使用済	
126	4B12	SUS316L/BM	平板引張試験片	2	使用済	
127	4B21	SUS316L/BM	平板引張試験片	1	使用済	
128	4B22	SUS316L/BM	平板引張試験片	2	使用済	
129	4B41	SUS316L/BM	平板引張試験片	1	使用済	
130	4B42	SUS316L/BM	平板引張試験片	2	使用済	
131	4H11	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	使用済	
132	4H12	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	2	使用済	
133	4H13	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	使用済	
134	4H14	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	2	使用済	
135	4H21	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	使用済	
136	4H22	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	2	使用済	
137	4H23	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	使用済	
138	4H24	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	2	使用済	
139	4H41	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	使用済	
140	4H42	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	2	使用済	
141	4H43	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	使用済	
142	4H44	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	2	使用済	
143	4H91	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	1	使用済	
144	4H92	SUS316L/HAZ	平板引張試験片	2	使用済	
145	4W41	SUS316L/DEPO	平板引張試験片	12	使用済	
146	64BC201	SUS316L/BM	0.5TCT	1	使用済	
147	64BC401	SUS316L/BM	0.5TCT	1	使用済	
148	64HC101	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	使用済	
149	64HC103	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	使用済	
150	64HC106	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	使用済	
151	64HC201	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	使用済	
152	64HC203	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	使用済	
153	64HC204	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	使用済	



付録表 2(2) NFD で保管中の照射済試験片(旧 JNES ENI 事業)(使用済その 2)

No	刻印	材質	形状	管理 個数	使用の 有無	備考
154	64HC206	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	使用済	
155	64HC211	SUS316L/HAZ	0.7TCT	1	使用済	
156	64HC401	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	使用済	
157	64HC403	SUS316L/HAZ	0.5TCT	1	使用済	
158	64HC405	SUS316L/HAZ	0.5TCT	2	使用済	
159	64HC901	SUS316L/HAZ	0.5TCT	11	使用済	
160	KY04	SUS304L/HAZ	0.5TCT	11	使用済	