

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

独立行政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26年度軽水炉燃材料詳細健全性調査」として、(独)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	3
2.1 目的	3
2.2 事業内容	3
2.2.1 平成 25 年度まで	3
2.2.2 平成 26 年度	4
2.3 専門部会	6
3. 平成 26 年度の事業概要	7
3.1 燃料照射試験	7
3.2 材料照射試験	8
4. 燃料照射試験に関する実施内容	
4.1 燃料照射試験計画	10
5. 材料照射試験に関する実施内容	
5.1 照射脆化試験	11
5.1.1 既存照射材を用いた試験	12
5.1.2 高温予荷重(WPS)効果に関する試験	34
5.1.3 き裂伝播停止破壊靱性(K _{Ia})に関する試験	127
5.1.4 原子炉圧力容器鋼の照射脆化に関する微細組織分析	195
5.2 照射下 IASCC 試験	208
5.2.1 CT 試験片のき裂内皮膜分析	222
5.2.2 水中におけるき裂進展試験片の荷重付与による変形評価試験	288
5.2.3 き裂進展試験ユニットの特性試験	311
5.2.4 照射ステンレス鋼等の変形とき裂進展挙動への影響評価試験	361
5.3 材料照射キャプセル及び照射後試験装置等の整備	
5.3.1 照射脆化評価用大型試験片照射キャプセル部品の製作	559
5.3.2 照射脆化評価用照射キャプセル部品の製作	559
5.3.3 照射下き裂進展試験用照射キャプセルの製作	566
5.3.4 照射下試験技術の総合動作確認試験用キャプセルの製作	569
5.3.5 キャプセルヒータの購入	576
5.3.6 原子炉圧力容器鋼照射用試験片の製作	577
5.3.7 照射キャプセル用き裂進展試験ユニットの製作	581
5.3.8 ガス圧制御装置の整備	592
5.3.9 材料照射試験装置を用いた荷重制御性の改良	604
5.3.10 放電加工装置及び NC フライス盤のセル内設置	629
5.3.11 スポット溶接治具の製作	630
5.3.12 照射後応力腐食割れ試験装置用ナットランナー保持装置の製作	635
6. おわりに	637

付録 5.2.1 CT 試験片のき裂内皮膜分析

①CT 試験片の疲労き裂表面(破面)の SEM 観察

②0.5T-CT 試験片疲労き裂断面の SEM 観察

③CT 試験片のき裂表面に形成した酸化皮膜の TEM 観察

1. はじめに

軽水炉燃料は軽水炉内の高い負荷環境で長期間使用されるため、被覆管の腐食、水素吸収及び中性子照射量の増大、燃料ペレット中の核分裂生成物(FP)の蓄積の進行などによる燃料特性の変化は異常過渡時及び事故時挙動などに影響を及ぼす。安全評価においては、想定される事象を超える範囲について燃料挙動を考慮した上で、燃料の健全性が維持される限界条件を把握し、一定の安全余裕を確保し適切に燃料の破損限界の判断基準を設定する必要がある。このため、燃料の健全性を考えるに当たっては、過渡時にペレットと被覆管の機械的相互作用(PCMI)などで燃料が破損する形態及びその影響を把握し、その現象に影響を及ぼす要因を適切に考慮した安全評価を行う必要がある。ここで注意すべきは、出力過渡時に系統的な燃料破損を生じうる現象が、低燃焼度領域での応力腐食割れ(SCC)から高燃焼度域では被覆管の水素脆化に外面割れに変わるなど、考慮すべき破損モードや要因が大きく変わる場合がある点である。このため、安全評価において考慮すべき破損モードや要因を明らかにし、適切な判断基準を用いる必要がある。このためには、高負荷環境で使用された燃料の状態の変化や、これに伴う事故及び異常過渡時の破損限界等について信頼性の高いデータが不可欠である。

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。電気事業者は維持規格⁽¹⁾等の検査基準に基づきこうした劣化(き裂発生の有無)を検査するとともに、検出した場合には健全性評価を行って修理・取替の判断をしている。さらに、原子力発電所の運転開始後30年を目途に総合的な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25年9月25日、原子力規制委員会)⁽¹⁾⁽²⁾において「運転期間延長認可制度及び高経年化対策制度に係る技術的知見の整備」、「燃料の規制基準に係る技術的知見の整備」等を安全研究が必要な研究分野として位置づけた。

「軽水炉燃材料詳細健全性調査(平成18～30年度(予定))」は、(独)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燃料及び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26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) 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 25 年 9 月 25 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。燃料はエネルギー発生源であるとともに放射性物質の最大保有源であり、原子力安全を確保する上で根幹の機能を有している。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25年9月25日、原子力規制委員会）⁽²⁻¹⁾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「運転期間延長認可制度及び高経年化対策制度に係る技術的知見の整備」のため、高経年化技術評価の妥当性確認において必要となる、設備、機器、構造物に想定される経年劣化事象の発生、進展及び影響評価に関する研究を実施し、従来の高経年化技術評価手法の高度化を図るとともに、運転期間延長認可制度の導入等の新しい規制制度に対応するための技術的知見を整備する。また、「燃料の規制基準に係る技術的知見の整備」に必要となる試験装置等の維持管理等を行う。

材料照射試験では、高経年化対策制度及び運転期間延長認可制度において点検・評価の対象となる設備、機器、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圧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。

燃料照射試験では、「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。

2.2 事業内容

2.2.1 平成25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、平成23年度の燃料照射試験では、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った。平成24~25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圧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継続するとともに、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。

2.2.2 平成26年度

平成26年度においては、次の実施を計画した。

(1)燃料照射試験

①試験設備

燃料異常過渡試験を実施するための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って、安全の維持を図る。

具体的には以下に掲げる事項を実施する。

○燃料異常過渡試験装置

- ・燃料異常過渡試験装置の点検
- ・安全弁分解整備
- ・キャプセル冷却設備水分析装置の定期点検
- ・水環境調整設備放射線モニタの点検
- ・キャプセル制御操作盤の点検
- ・キャプセル交換機定期点検

○照射後試験装置

- ・試験燃料棒加圧封入装置高圧ガス設備定期点検

(2)材料照射試験

①試験

未照射材のデータ取得を行う。また、既往研究等での照射済み材による試験検討及びデータ取得を継続する。

具体的には以下に掲げる事項を実施する。

- ・原子炉圧力容器鋼の照射脆化に関する微細組織分析
- ・原子炉圧力容器鋼のき裂伝播停止等試験
- ・原子炉圧力容器鋼の破壊靱性試験
- ・原子炉圧力容器鋼破壊靱性試験片の力学解析
- ・CT試験片のき裂内皮膜分析
- ・水中におけるき裂進展試験片の荷重付与による変形評価試験
- ・き裂進展ユニットの特性試験
- ・照射ステンレス鋼等の変形とき裂進展挙動への影響評価試験

②試験設備

照射下のキャプセルに高温高圧水を供給するために整備した材料照射試験装置、照射後に照射脆化及び応力腐食割れに関する試験を実施するために必要な装置等について、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って、安全の維持を図る。照射に必要な材料照射キャプセルの製作等を行う。また、照射後試験等に必要な装置の整備等を継続する。

具体的には以下に掲げる事項を実施する。

○材料照射試験装置

- ・高圧水用逃し弁・安全弁の分解点検
- ・ガス用安全弁の点検
- ・水素・ヘリウムガス供給系の点検
- ・水質調節計の点検
- ・照射試験装置の盤および工業計器点検
- ・高圧循環ポンプの点検
- ・圧力調整弁の点検
- ・材料照射試験装置を用いた荷重制御性の改良検討
- ・応力腐食割れ試験装置の点検
- ・高温水中腐食電位センサー健全性評価装置の点検

- ・応力腐食割れ試験用計測機器の点検・校正
- ・高温用ロードセル等の点検・校正
- ・照射脆化評価用大型試験片照射キャプセル部品の製作
- ・照射脆化評価用照射キャプセル部品の製作
- ・照射下き裂進展試験用照射キャプセル部品の製作
- ・照射下き裂進展模擬試験用キャプセルの製作
- ・キャプセルヒータの購入
- ・原子炉圧力容器鋼照射用試験片の製作
- ・応力腐食割れ試験比較用試験片の製作
- ・照射キャプセル用き裂進展試験ユニットの製作
- ・き裂進展試験用治具の製作

○照射後試験装置

- ・微細構造観察装置の点検
- ・破壊靱性試験装置の点検
- ・シャルピー衝撃試験機の点検
- ・照射後応力腐食割れ試験装置の点検
- ・ガス圧制御装置の整備
- ・放電加工装置の点検
- ・NCフライス盤の点検
- ・放電加工装置及びNCフライス盤のセル内設置
- ・放電加工装置の加工用予備品の購入
- ・スポット溶接治具の製作
- ・照射後応力腐食割れ試験装置用ナットランナー治具の製作

平成26年度の実施内容の概要を3章に、詳細は燃料照射試験及び材料照射試験についてそれぞれ、4章及び5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25年9月25日）。

3. 平成26年度の事業概要

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

(1)試験設備の点検・整備：

①燃料異常過渡試験、②中性子照射脆化試験及び③照射誘起応力腐食割れ(IASCC: Irradiation-Assisted Stress Corrosion Cracking)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、②及び③の照射に必要な材料照射キャプセル及び部品の製作を行った。

(2)試験：

②及び③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。

3.1 燃料照射試験

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。燃料はエネルギー発生源であるとともに放射性物質の最大保有源であり、原子力安全を確保する上で根幹の機能を有している。原子力安全の更なる向上には、深層防護の徹底と各層の防護レベルを高めることによる安全の継続的改善が必要である。すなわち、シビアアクシデント回避策や影響緩和のみならず、その前段となる異常の発生防止や拡大防止が重要となる。福島第一原子力発電所の事故を受け、新型燃料である10×10燃料の導入に対する当面の優先度は低くなっているが、従来のジルカロイと比較してFeの濃度を高めて耐食性を改良したジルコニウム合金被覆管や添加物を加えることにより被覆管との相互作用を小さくした燃料ペレットの採用などの設計改良がなされている10×10燃料は、プラントの安全性の向上にも寄与するものであり、異常の発生防止や拡大防止に繋がる。

本事業では、10×10燃料の異常過渡時における破損メカニズムなど燃料健全性の評価に重要となる知見を得るために破損限界確認試験を実施する。

改良被覆管等を用いた10×10燃料の照射試験は海外で行われている。これらの高度化燃料の破損限界試験をJMTRにおいて実施するためには、燃料を発電用原子炉から取り出し輸送・検査して試験用に加工するなどの試験前準備、燃料を発電用原子炉の異常過渡事象を模擬した条件で照射して破損限界を調べる異常過渡試験、破損の状態など燃料の変化を詳しく検査する照射後試験など一連の作業を実施する必要がある。高燃焼度燃料は多量の放射性物質を含有することから、これらの作業には特殊な装置が必要であるため複数年にわたりこれら試験装置（燃料異常過渡試験装置）の整備を実施してきた。

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26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。

これらの燃料異常過渡試験に関する事業成果については4章にまとめた。

3.2 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。

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1T-CT試験片のデータによって確認する。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。そこで、本年度は、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実施した。

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、現行の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。そこで本年度は、平成25年度までに検討した照射試験計画の内容を踏まえ、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部品や試験装置等の整備を進めた。また、照射下き裂進展試験に用いる荷重負荷ユニットなど必要な試験技術の炉外での特性評価を進めるとともに、JMTR再稼動前の炉内(非照射下)で照射下試験技術の総合的な動作確認を実施するためのキャプセルを製作した。更に、照射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材料表面のマイクロ組織観察等を実施した。

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、5.1～5.3章にまとめた。

4. 燃料照射試験に関する実施内容

4.1 燃料照射試験計画

燃料照射試験の全体計画を図 4.1- 1に示す。平成18年度から燃料異常過渡試験装置の概念検討を開始し、平成23年度までに装置整備を完了した。装置整備に並行して、強制対流キャプセルや熱流動解析コードなどの技術開発を進めるとともに、平成22年度には試験に供する10x10型BWR燃料の欧日輸送を実施するとともに燃料棒製作などに着手した。異常過渡試験は平成23年度より凍結となったものの、試験開始の判断がなされた際に迅速に試験を開始できるよう、装置の維持などの必要な措置は継続する。

本年度は、燃料異常過渡試験を実施するため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。また、試験燃料棒の加工に用いる加圧封入装置の保守点検等を実施した。

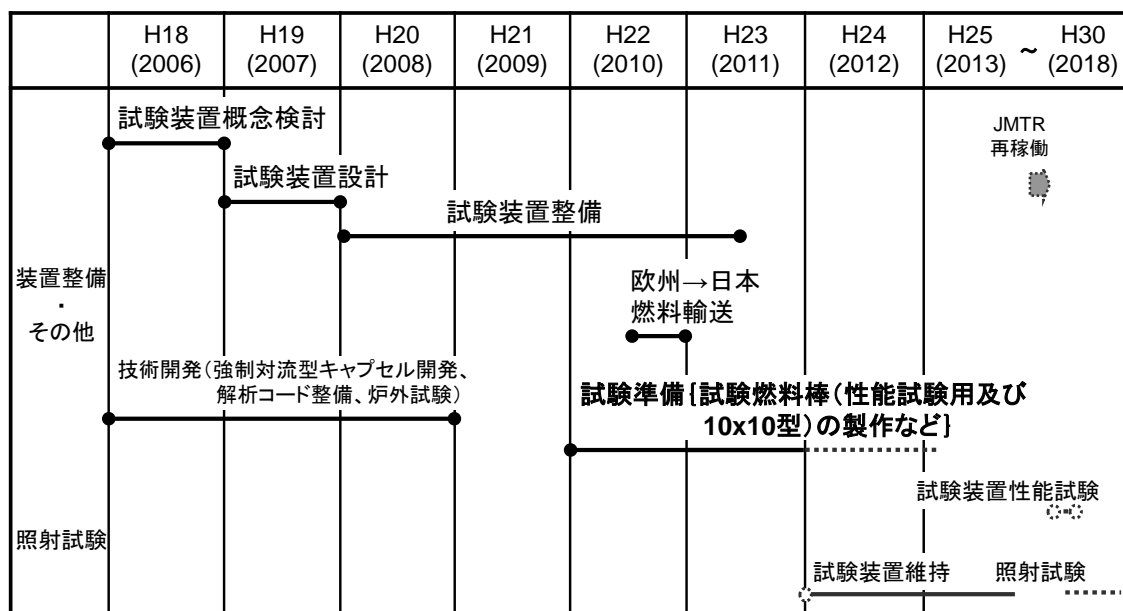


図 4.1- 1 燃料照射試験計画

5. 材料照射試験に関する実施内容

5.1 照射脆化試験

本試験では、3.2で述べたように、監視試験片サイズの破壊靱性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-CT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。これにより、高照射量領域での1T-CT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。また、高脆化材について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。

本年度は、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実施した。

5.1.1 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、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、及び参照温度 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、シャルピーデータが取得されている JNES 事業等の照射材試験片から、0.16 インチ厚 CT (0.16T-CT) 試験片及び引張試験片を製作した。また、同材料の未照射保管材から、1 インチ厚 CT (1T-CT) 試験片、0.16T-CT 試験片及び引張試験片を製作し、一部の破壊靱性試験に着手した。ホットラボにおいては、照射材から 0.16T-CT 試験片を加工する方法について検討を進めた。

5.1.1.1 既存照射材及び未照射保管材からの試験片製作等

昨年度、JNES 事業等 (5.1.1-1)(5.1.1-2) 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、0.16T-CT 試験片を採取して破壊靱性試験を行うための材料を選定した。表 5.1.1-1 に、試験に使用できる照射材の一覧を示す。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 0.16T-CT 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た。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 5.1.1-2 に示す。

本年度に製作した試験片の一覧を表 5.1.1-3 に示す。照射材については、3B 材と Steel B 材について、0.16T-CT 試験片と引張試験片を製作した。前者は、次年度に参照温度 T_0 を評価するために 10 個セットを放電加工により製作した(事業者 A)。後者は、加工法による寸法精度の違いを調べることを目的に、フライス加工により 2 個を製作した(事業者 B)。事業者 A による 3B 材からの試験片採取方法の模式図と試験片の外観を図 5.1.1-1 に、事業者 B による Steel B 材からの同図を図 5.1.1-2 に示す。照射材 0.16T-CT の寸法測定結果を表 5.1.1-4 に、照射材引張試験片の寸法測定結果を表 5.1.1-5 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。事業者 B により製作された Steel B 材 2 個の試験結果を表 5.1.1-6 及び図 5.1.1-4 に示す。

また、未照射保管材から、1T-CT、0.16T-CT 及び引張試験片を製作した(表 5.1.1-3)。未照射保管材 0.16T-CT 試験片の寸法測定結果を表 5.1.1-7 に、未照射保管材 1T-CT 試験片の寸法測定結果を表 5.1.1-8 に、未照射保管材引張試験片の寸法測定結果を表 5.1.1-9 に示す。このうち、1T-CT 試験片については破壊靱性試験を実施して参照温度を評価した。試験結果を表 5.1.1-10 及び図 5.1.1-5 に示す。全ての材料について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。図 5.1.1-6 にシャルピー遷移温度と参照温度の相関を示す。3B 材、5B 材及び 5W 材とも既往研究 (5.1.1-3)~(5.1.1-5) の材料と同じ範囲に分布しており、両者の相関が良好であることを確認した。

5.1.1.2 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 0.16T-CT 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 0.16T-CT 試験片を製作するため、 $10\text{mm} \times 5\text{mm}$ の鋼材ブロックを購入し、コールドモックアップ試験を行った。その結果、マニプレータ等を用いてセル内で 0.16T-CT 試験片を製作しようとした場合、NC フライス盤で加工した際に発生するバリ等の影響により、試験片の寸法公差を満足できない場合があることが分かった。

その為、バリの発生を抑え、寸法公差を満足する様フライス盤にて加工していた試験片外形加工を、放電加工で行う手法へ改定することとした。改定後の試験片外形加工手順案を図 5.1.1-7 に示す。この案に用いる放電加工治具は次年度に製作する。また、NC フライス盤用の試験片保持治具の改良を行い、一度のチャッキングでピン穴及びナイフエッジの加工ができるようにした。改良した試験片保持治具を図 5.1.1-8 に示す。

また、ホットセル内では困難な顕微鏡による目視確認から、除荷コンプライアンス法による疲労予き裂長さ測定へ変更するために、予き裂なしの 0.16T-CT 試験片を製作し、条件を変えて疲労予き裂導入試験を行い、疲労予き裂の導入条件を検討した。検討の結果、試験片への疲労予き裂の条件を以下の通りとした。

負荷方法：応力拡大係数を予き裂の進展とともに漸減
振幅 ： $18\text{MPa}m^{0.5}$
応力比 ： 0.111

5.1.1.3 既存照射材及び未照射保管材からの試験片製作等まとめ

照射材について、3B 材と Steel B 材について、0.16T-CT 試験片と引張試験片を製作した。また未照射保管材から、1T-CT、0.16T-CT 及び引張試験片を製作し、1T-CT 試験片から参照温度を評価した。本年度に製作したこれら試験片は、次年度に試験を実施し、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、及び参照温度 T_0 とシャルピー遷移温度 T_{41J} の相関を確認する。また、既存照射材からの試験片製作を追加し、照射材データの拡充を進める。

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、バリの発生を抑え、寸法公差を満足する様フライス盤にて加工していた試験片外形加工を、放電加工で行う手法へ改定することとした。また、疲労予き裂の導入条件を検討した。次年度は放電加工用の治具を製作して試験片加工精度の確認を行うとともに、ホットセル内へのフライス盤と放電加工機の設置を実施する。

参考文献

- (5.1.1-1) 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
- (5.1.1-2) 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
- (5.1.1-3) 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).
- (5.1.1-4) 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
- (5.1.1-5) 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) .

表 5.1.1-1 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 ¹⁹ n/cm ²	初期RT _{NDT} °C	シャルピー遷移温度T _{41J} , °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 [5.1.1-1]	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 [5.1.1-1]	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 [5.1.1-2]	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 5.1.1-2 選定した照射材および優先順位

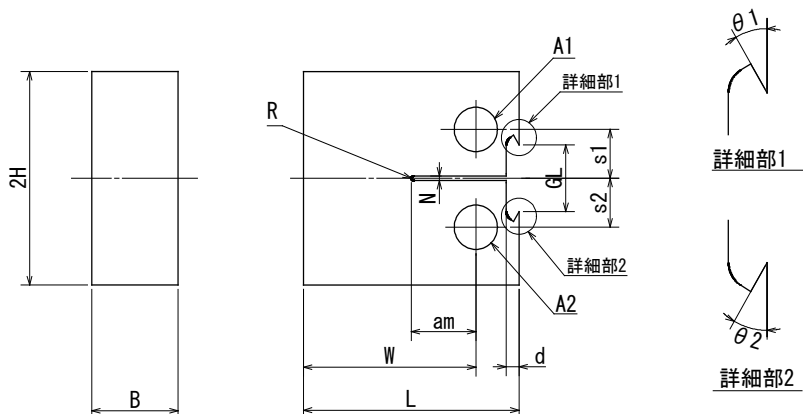
優先順位	①		②	③	④	⑤	⑥
材料ID	3B	Steel B	5B-B	B4(L)	B4(H)	5B-A	5W-B
特徴等	脆化が少なく未照射材に近い		T _{41J} シフトが大きい	初期USEが低い	初期USEが低く脆化が大きい	②と同じ材料で脆化が少ない	溶接金属で脆化が大きい

表 5.1.1-3 製作した試験片の一覧

材料ID		3B	Steel B	5B	B4	5W
照射材	Mini-C(T), 個	10	2			
	引張試験片, 本	6	※			
未照射材	1T-C(T), 個	14	※	14		14
	参照温度T ₀ , °C	-72	※	-79		-57
	Mini-C(T), 個	12	10	12	12	12
	引張試験片, 本	6	※	6	6	6

※：既往データ有

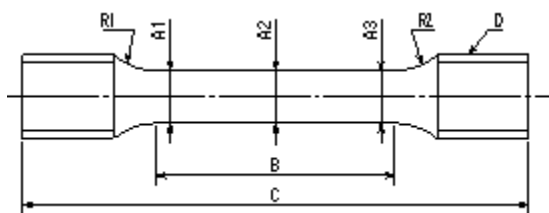
表 5.1.1-4 照射材 0.16TCT 試験片の寸法



材料 (照射材)	ID	B	2H	L	W	am	N
		4±0.08	9.6±0.08	10±0.08	8±0.04	3±0.04	0.08
3B	3B-4-A-1	4.01	9.61	10.01	7.99	2.99	0.20
	3B-4-A-2	4.01	9.61	10.00	7.98	3.00	0.20
	3B-9-A-1	4.01	9.61	10.00	7.99	3.00	0.20
	3B-9-A-2	4.00	9.62	10.00	7.99	3.00	0.20
	3B-9-B-1	4.00	9.62	10.00	7.99	3.00	0.20
	3B-9-B-2	4.01	9.62	10.00	7.99	3.00	0.20
	3B-10-B-1	4.01	9.62	10.00	7.99	3.00	0.20
	3B-10-B-2	4.01	9.62	10.00	7.99	2.99	0.20
	3B-13-A-1	4.01	9.62	10.01	7.99	3.00	0.20
	3B-13-A-2	4.01	9.62	10.01	8.00	3.00	0.20
Steel B	B01	3.97	9.57	9.98	8.00	3.01	0.40
	B02	4.00	9.60	10.00	8.02	2.97	0.45
製作誤差の最大値		0.03	0.03	0.02	0.02	0.03	

材料 (照射材)	ID	d	A1	A2	GL	s1	s2
		0.6	2±0.04	2±0.04	3±0.04	2.2±0.04	2.2±0.04
3B	3B-4-A-1	0.60	2.01	2.01	3.02	2.20	2.20
	3B-4-A-2	0.60	2.01	2.00	3.02	2.20	2.20
	3B-9-A-1	0.60	2.01	2.01	3.03	2.20	2.20
	3B-9-A-2	0.60	2.01	2.01	3.03	2.20	2.20
	3B-9-B-1	0.60	2.01	2.01	3.03	2.20	2.19
	3B-9-B-2	0.60	2.01	2.01	3.02	2.20	2.20
	3B-10-B-1	0.60	2.00	2.00	3.01	2.20	2.20
	3B-10-B-2	0.60	2.01	2.00	3.02	2.20	2.19
	3B-13-A-1	0.60	2.00	2.00	3.02	2.20	2.20
	3B-13-A-2	0.60	2.00	2.00	3.02	2.20	2.20
Steel B	B01	0.70	1.99	1.99	3.01	2.21	2.19
	B02	0.70	2.00	1.99	2.97	2.22	2.18
製作誤差の最大値		0.10	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02

表 5.1.1-5 照射材引張試験片の寸法

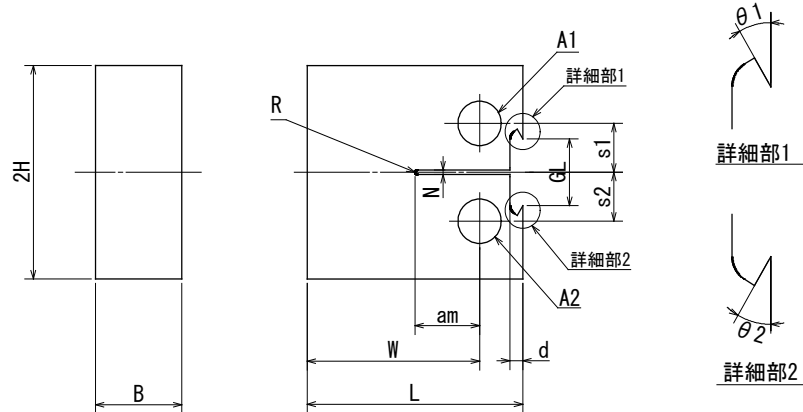


符号	平行部	A			B	C	D	R	
	測定方位	$(\phi 2.5 \pm 0.02)$			(11.3 ± 0.2)	(24 ± 0.2)	$(M4 \times 0.7)$	(3.1以上)	
		A1	A2	A3				R1	R2
3B-3-B-①	0°方位	2.5	2.5	2.5	11.4	24.1	良	3.1	3.1
	90°方位	2.49	2.5	2.49					
3B-3-B-②	0°方位	2.51	2.51	2.5	11.4	24.1	良	3.1	3.1
	90°方位	2.51	2.51	2.5					
3B-3-B-③	0°方位	2.51	2.51	2.5	11.4	24.1	良	3.1	3.1
	90°方位	2.51	2.51	2.5					
3B-3-B-④	0°方位	2.5	2.5	2.5	11.4	24.1	良	3.1	3.1
	90°方位	2.51	2.51	2.5					
3B-8-A-①	0°方位	2.5	2.51	2.51	11.4	24.1	良	3.1	3.1
	90°方位	2.5	2.5	2.51					
3B-8-A-②	0°方位	2.49	2.49	2.5	11.4	24.1	良	3.1	3.1
	90°方位	2.5	2.5	2.5					

表 5.1.1-6 照射材(Steel B)の破壊靱性試験結果

材料 (照射材)	試験片 ID	試験温度, °C	Pmax, kN	B, mm	BN, mm	W, mm	a0, mm	Je, kJ/m ²	Jp, kJ/m ²	Jc, kJ/m ²	KJc, MPa√m	KJc (limit)	KJc(1T), MPa√m	Validity
SteelB	B01	-60	1.81	3.97	3.97	8.00	3.85	9.2	3.8	13.0	55.3	130.4	42.2	valid
	B02	-50	48.67	4.00	4.00	8.02	3.93	5.8	1.5	7.3	41.2	127.6	33.4	valid

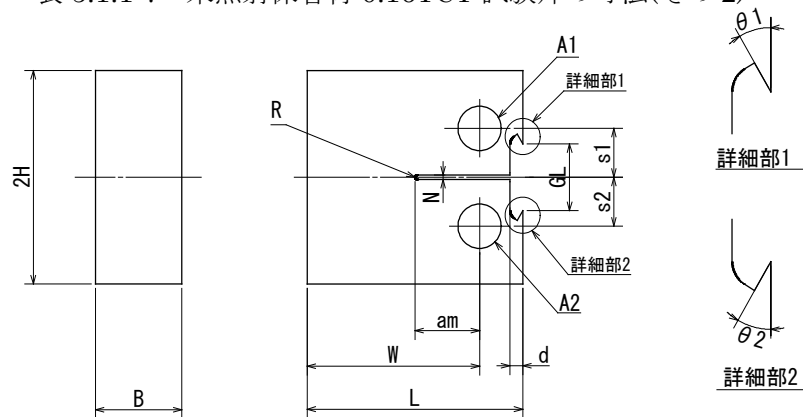
表 5.1.1-7 未照射保管材 0.16TCT 試験片の寸法(その 1)



材料 (未照射保管材)	ID	B 4±0.08	2H 9.6±0.08	L 10±0.08	W 8±0.04	am 3±0.04	N 0.08
3B	3B-1	4.04	9.65	10.00	8.00	3.31	0.18
	3B-2	4.04	9.65	10.00	8.00	3.29	0.19
	3B-3	4.04	9.64	10.00	8.01	3.30	0.19
	3B-4	4.04	9.64	10.00	8.02	3.31	0.19
	3B-5	4.04	9.65	10.00	8.01	3.30	0.19
	3B-6	4.04	9.64	10.00	8.00	3.29	0.19
	3B-7	4.04	9.64	10.00	8.00	3.29	0.19
	3B-8	4.04	9.64	9.99	8.00	3.28	0.19
	3B-9	4.04	9.65	10.00	8.01	3.29	0.19
	3B-10	4.04	9.64	10.00	8.01	3.29	0.19
	3B-11	4.04	9.64	10.00	8.01	3.29	0.19
	3B-12	4.04	9.64	10.00	8.01	3.30	0.19
製作誤差の最大値		0.04	0.05	0.01	0.02	0.31	

材料 (未照射保管材)	ID	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
3B	3B-1	0.60	1.99	1.99	2.98	2.18	2.23
	3B-2	0.60	1.99	1.99	2.97	2.17	2.22
	3B-3	0.60	1.99	1.99	2.99	2.17	2.22
	3B-4	0.60	2.00	2.00	2.99	2.18	2.22
	3B-5	0.60	1.99	2.00	2.99	2.16	2.24
	3B-6	0.60	2.00	1.99	3.01	2.17	2.22
	3B-7	0.60	1.99	2.00	3.03	2.20	2.21
	3B-8	0.60	2.00	2.00	3.04	2.19	2.19
	3B-9	0.60	1.99	2.00	3.03	2.19	2.20
	3B-10	0.60	1.99	2.00	3.06	2.20	2.19
	3B-11	0.60	1.99	2.00	3.01	2.20	2.20
	3B-12	0.60	1.99	2.00	3.02	2.21	2.20
製作誤差の最大値		0.00	0.01	0.01	0.06	0.04	0.04

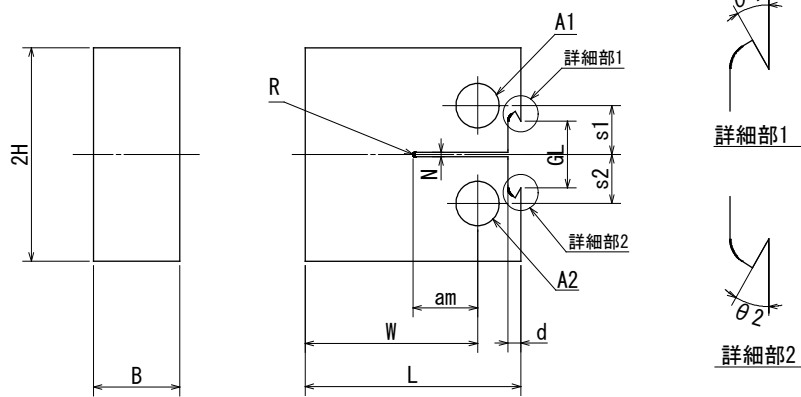
表 5.1.1-7 未照射保管材 0.16TCT 試験片の寸法(その 2)



材料 (未照射保管材)	ID	B 4±0.08	2H 9.6±0.08	L 10±0.08	W 8±0.04	am 3±0.04	N 0.08
5B	5B-1	4.04	9.65	10.00	8.02	3.31	0.19
	5B-2	4.04	9.65	10.00	8.02	3.31	0.19
	5B-3	4.04	9.65	10.00	8.01	3.30	0.19
	5B-4	4.04	9.64	10.00	8.02	3.31	0.19
	5B-5	4.04	9.64	10.00	8.00	3.30	0.19
	5B-6	4.04	9.65	10.00	8.02	3.31	0.19
	5B-7	4.04	9.64	10.00	8.00	3.29	0.19
	5B-8	4.04	9.64	10.00	8.01	3.30	0.19
	5B-9	4.04	9.65	10.00	8.01	3.30	0.19
	5B-10	4.04	9.65	10.00	8.02	3.30	0.19
	5B-11	4.04	9.64	9.99	8.01	3.30	0.19
	5B-12	4.04	9.64	9.99	8.02	3.31	0.19
製作誤差の最大値		0.04	0.05	0.01	0.02	0.31	

材料 (未照射保管材)	ID	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	5B-1	0.60	1.99	1.99	2.98	2.20	2.20
	5B-2	0.60	1.99	1.99	2.98	2.20	2.19
	5B-3	0.60	1.99	2.00	2.99	2.21	2.20
	5B-4	0.60	1.99	1.99	2.98	2.19	2.20
	5B-5	0.60	1.99	2.00	2.98	2.21	2.19
	5B-6	0.60	1.99	2.00	3.01	2.19	2.22
	5B-7	0.60	1.99	1.99	3.01	2.21	2.18
	5B-8	0.60	1.99	1.99	3.02	2.22	2.18
	5B-9	0.60	1.99	1.99	3.01	2.21	2.20
	5B-10	0.60	1.99	2.00	3.02	2.21	2.20
	5B-11	0.60	1.99	1.99	2.98	2.20	2.21
	5B-12	0.60	1.99	1.99	3.00	2.20	2.19
製作誤差の最大値		0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02

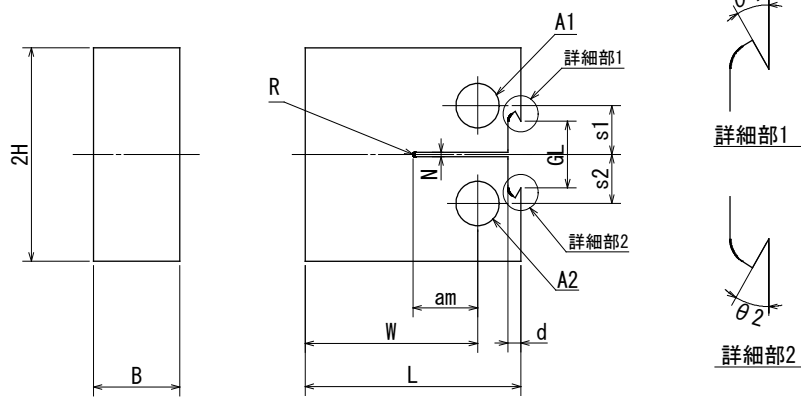
表 5.1.1-7 未照射保管材 0.16TCT 試験片の寸法(その 3)



材料 (未照射保管材)	ID	B 4±0.08	2H 9.6±0.08	L 10±0.08	W 8±0.04	am 3±0.04	N 0.08
5W	5WB-1	4.04	9.64	10.00	8.01	3.30	0.19
	5WB-2	4.04	9.64	9.99	8.03	3.32	0.19
	5WB-3	4.04	9.64	9.99	8.01	3.31	0.19
	5WB-4	4.04	9.64	9.99	8.01	3.30	0.19
	5WB-5	4.04	9.64	10.00	8.01	3.31	0.19
	5WB-6	4.04	9.64	10.00	8.02	3.31	0.19
	5WB-7	4.04	9.64	10.00	8.02	3.31	0.19
	5WB-8	4.04	9.64	9.99	8.02	3.31	0.19
	5WB-9	4.04	9.64	10.00	8.01	3.30	0.19
	5WB-10	4.04	9.64	10.00	8.02	3.31	0.19
	5WB-11	4.04	9.64	10.00	8.01	3.31	0.19
	5WB-12	4.04	9.64	9.99	8.01	3.30	0.19
製作誤差の最大値		0.04	0.04	0.01	0.03	0.32	

材料 (未照射保管材)	ID	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
5W	5WB-1	0.60	2.00	2.00	3.01	2.19	2.21
	5WB-2	0.60	1.99	2.00	3.00	2.18	2.21
	5WB-3	0.60	1.99	1.99	3.01	2.18	2.20
	5WB-4	0.60	1.99	1.99	3.01	2.19	2.21
	5WB-5	0.60	1.99	1.99	2.99	2.19	2.21
	5WB-6	0.60	1.99	1.99	3.00	2.19	2.21
	5WB-7	0.60	1.99	1.99	2.98	2.19	2.21
	5WB-8	0.60	2.00	1.99	3.00	2.19	2.21
	5WB-9	0.60	2.00	1.99	2.99	2.18	2.21
	5WB-10	0.60	1.99	2.00	3.00	2.18	2.22
	5WB-11	0.60	1.99	1.99	3.00	2.18	2.21
	5WB-12	0.60	1.99	1.99	3.00	2.19	2.19
製作誤差の最大値		0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02

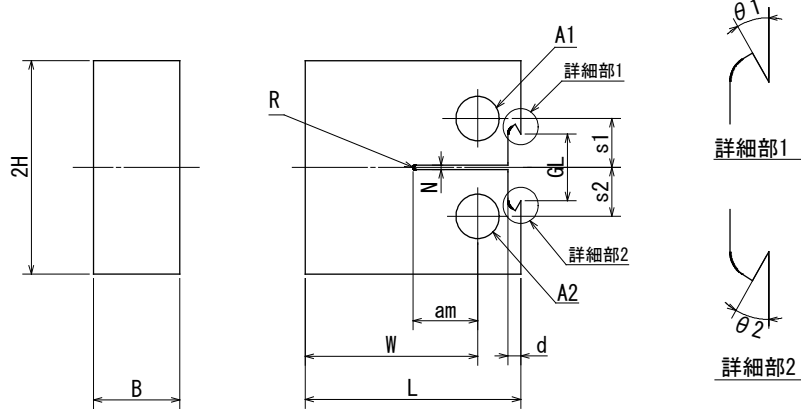
表 5.1.1-7 未照射保管材 0.16TCT 試験片の寸法(その 4)



材料 (未照射保管材)	ID	B 4±0.08	2H 9.6±0.08	L 10±0.08	W 8±0.04	am 3±0.04	N 0.08
B4	B4-1	4.04	9.65	10.00	8.00	3.28	0.19
	B4-2	4.03	9.65	10.00	8.00	3.27	0.19
	B4-3	4.03	9.65	10.00	8.00	3.28	0.19
	B4-4	4.04	9.64	10.00	8.00	3.29	0.19
	B4-5	4.04	9.65	10.00	7.99	3.27	0.19
	B4-6	4.04	9.65	10.00	8.00	3.29	0.19
	B4-7	4.04	9.65	10.00	8.00	3.29	0.19
	B4-8	4.04	9.64	10.00	8.00	3.29	0.19
	B4-9	4.04	9.65	10.00	8.00	3.29	0.19
	B4-10	4.04	9.65	10.00	8.01	3.30	0.19
	B4-11	4.04	9.64	9.99	8.00	3.30	0.19
	B4-12	4.04	9.64	9.99	7.99	3.28	0.19
製作誤差の最大値		0.04	0.05	0.01	0.01	0.30	

材料 (未照射保管材)	ID	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
B4	B4-1	0.60	1.99	2.00	3.02	2.20	2.21
	B4-2	0.60	1.99	1.99	3.01	2.19	2.21
	B4-3	0.60	1.99	2.00	3.02	2.18	2.21
	B4-4	0.60	1.99	2.00	3.01	2.19	2.21
	B4-5	0.60	1.99	1.99	3.00	2.19	2.21
	B4-6	0.60	2.00	1.99	3.00	2.19	2.21
	B4-7	0.60	1.99	1.99	3.00	2.19	2.21
	B4-8	0.60	1.99	1.99	2.99	2.20	2.20
	B4-9	0.60	2.00	2.00	3.00	2.18	2.22
	B4-10	0.60	1.99	2.00	3.00	2.18	2.22
	B4-11	0.60	1.99	1.99	3.03	2.20	2.20
	B4-12	0.60	1.99	2.00	3.02	2.20	2.20
製作誤差の最大値		0.00	0.01	0.01	0.03	0.02	0.02

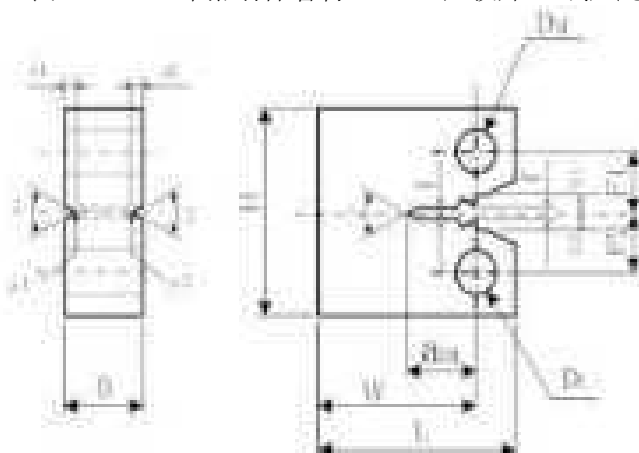
表 5.1.1-7 未照射保管材 0.16TCT 試験片の寸法(その 5)



材料 (未照射保管材)	ID	B 4±0.08	2H 9.6±0.08	L 10±0.08	W 8±0.04	am 3±0.04	N 0.08
Steel B	BC01	3.98	9.59	9.98	7.98	3.33	0.45
	BC02	3.99	9.59	10.01	8.00	3.30	0.45
	BC03	3.99	9.60	10.01	8.00	3.30	0.44
	BC04	3.99	9.60	10.01	8.00	3.29	0.45
	BC05	3.99	9.59	10.01	8.01	3.28	0.47
	BC06	4.00	9.59	10.02	8.01	3.31	0.45
	BC07	3.99	9.59	10.02	8.01	3.30	0.44
	BC08	3.99	9.58	10.01	8.00	3.33	0.44
	BC09	3.99	9.59	10.01	8.01	3.33	0.45
	BC10	3.99	9.58	10.01	7.99	3.29	0.44
製作誤差の最大値		0.02	0.02	0.02	0.02	0.33	

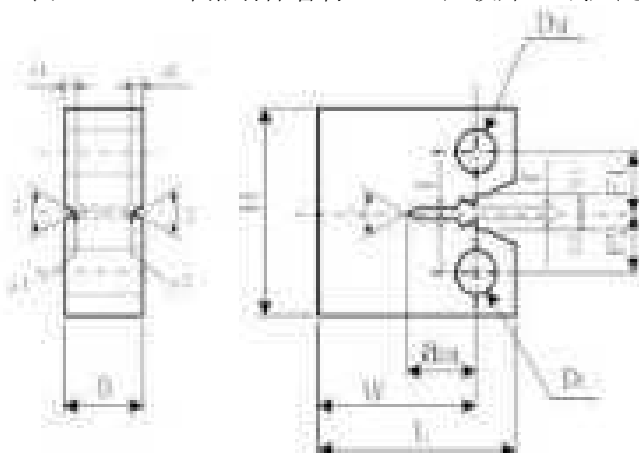
材料 (未照射保管材)	ID	d 0.6	A1 2±0.04	A2 2±0.04	GL 3±0.04	s1 2.2±0.04	s2 2.2±0.04
Steel B	BC01	0.63	2.03	2.02	2.98	2.20	2.20
	BC02	0.66	2.02	2.02	2.97	2.18	2.22
	BC03	0.64	2.03	2.02	2.98	2.22	2.16
	BC04	0.64	2.03	2.02	2.99	2.22	2.17
	BC05	0.65	2.03	2.02	2.99	2.18	2.20
	BC06	0.64	2.03	2.02	2.97	2.20	2.19
	BC07	0.64	2.03	2.02	3.02	2.22	2.17
	BC08	0.65	2.03	2.01	2.96	2.20	2.18
	BC09	0.65	2.03	2.02	3.04	2.22	2.18
	BC10	0.63	2.03	2.02	3.04	2.18	2.19
製作誤差の最大値		0.06	0.03	0.02	0.04	0.02	0.04

表 5.1.1-8 未照射保管材 1T-CT 試験片の寸法(その 1)



基準値	L	H	B	W	a_m	Du	DL	F1	F2	f
符号	$63.5_{-0.2}^0$	$60.96_{-0.2}^0$	25.4 ± 0.1	50.8 ± 0.25	23.4 ± 0.1	$\phi 12.7 \pm 0.13$	$\phi 12.7 \pm 0.13$	18.03	18.03	5.00 ± 0.1
3B-1	63.5	60.94	25.4	50.79	23.3	12.75	12.75	18.03	18.06	5.02
3B-2	63.5	60.94	25.4	50.80	23.4	12.74	12.76	18.03	18.06	4.97
3B-3	63.5	60.92	25.4	50.80	23.4	12.72	12.74	18.02	18.05	5.01
3B-4	63.5	60.93	25.4	50.81	23.4	12.72	12.72	18.00	18.07	5.01
3B-5	63.5	60.92	25.4	50.81	23.4	12.81	12.81	17.99	18.07	5.01
3B-6	63.5	60.93	25.4	50.80	23.4	12.71	12.71	18.00	18.07	5.01
3B-7	63.5	60.91	25.4	50.81	23.4	12.71	12.71	17.99	18.08	5.01
3B-8	63.5	60.92	25.4	50.81	23.4	12.70	12.70	18.00	18.07	5.00
3B-9	63.5	60.91	25.4	50.80	23.4	12.72	12.73	17.99	18.08	5.01
3B-10	63.5	60.93	25.4	50.81	23.4	12.71	12.71	18.01	18.05	5.01
3B-11	63.5	60.92	25.4	50.79	23.4	12.71	12.71	18.00	18.06	5.01
3B-12	63.5	60.91	25.4	50.79	23.4	12.70	12.71	18.00	18.07	5.01
3B-13	63.5	60.93	25.4	50.80	23.3	12.71	12.71	18.00	18.06	5.00
3B-14	63.5	60.92	25.4	50.79	23.3	12.71	12.72	17.99	18.07	5.00
基準値	G1	G2	l	a	d1	d2	$\theta 1$	$\theta 2$	$\rho 1$	$\rho 2$
符号	6.5	6.5	3	30°	1	1	45°	45°	R0.5	R0.5
3B-1	6.5	6.5	3	29° 26'	1	1	45° 37'	44° 51'	0.5	0.5
3B-2	6.5	6.5	3	29° 21'	1	1	44° 50'	44° 54'	0.5	0.5
3B-3	6.5	6.5	3	29° 23'	1	1	45° 24'	45° 57'	0.5	0.5
3B-4	6.5	6.5	3	29° 26'	1	1	45° 48'	45° 54'	0.5	0.5
3B-5	6.5	6.5	3	29° 22'	1	1	44° 32'	44° 33'	0.5	0.5
3B-6	6.5	6.5	3	29° 25'	1	1	45° 58'	45° 02'	0.5	0.5
3B-7	6.5	6.5	3	29° 27'	1	1	44° 53'	45° 58'	0.5	0.5
3B-8	6.5	6.5	3	29° 26'	1	1	45° 02'	45° 00'	0.5	0.5
3B-9	6.5	6.5	3	29° 23'	1	1	44° 52'	44° 41'	0.5	0.5
3B-10	6.5	6.5	3	29° 20'	1	1	45° 02'	45° 38'	0.5	0.5
3B-11	6.5	6.5	3	29° 17'	1	1	45° 07'	44° 13'	0.5	0.5
3B-12	6.5	6.5	3	29° 26'	1	1	44° 45'	45° 12'	0.5	0.5
3B-13	6.5	6.5	3	29° 27'	1	1	44° 53'	45° 17'	0.5	0.5
3B-14	6.5	6.5	3	29° 30'	1	1	45° 04'	45° 05'	0.5	0.5

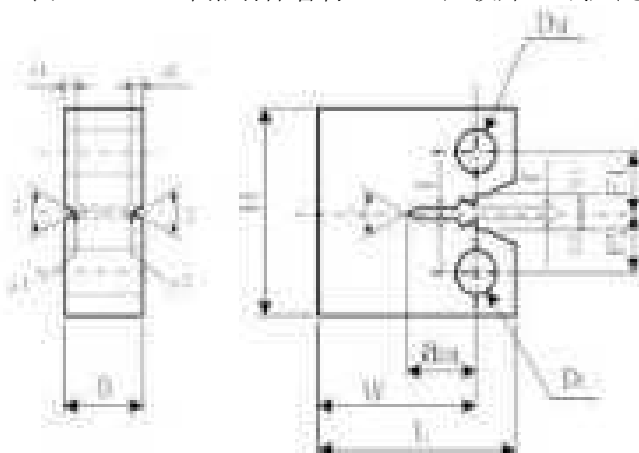
表 5.1.1-8 未照射保管材 1T-CT 試験片の寸法(その 2)



基準値	L	H	B	W	a _m	Du	DL	F1	F2	f
符号	63.5 ⁰ _{0.2}	60.96 ⁰ _{0.2}	25.4±0.1	50.8±0.25	23.4±0.1	φ12.7±0.13	φ12.7±0.13	18.03	18.03	5.00±0.1
5B-1	63.5	60.94	25.4	50.78	23.4	12.71	12.71	18.02	18.05	5.02
5B-2	63.5	60.93	25.4	50.80	23.4	12.71	12.71	18.02	18.05	5.01
5B-3	63.5	60.93	25.4	50.80	23.4	12.72	12.73	18.02	18.04	5.03
5B-4	63.5	60.92	25.4	50.79	23.4	12.71	12.72	17.99	18.08	5.01
5B-5	63.5	60.91	25.4	50.80	23.4	12.73	12.73	17.98	18.08	5.02
5B-6	63.5	60.93	25.4	50.80	23.4	12.71	12.72	18.02	18.05	5.01
5B-7	63.5	60.93	25.4	50.79	23.4	12.72	12.72	18.03	18.04	5.01
5B-8	63.5	60.93	25.4	50.79	23.4	12.71	12.72	18.01	18.06	5.01
5B-9	63.5	60.93	25.4	50.81	23.4	12.71	12.72	18.00	18.07	5.01
5B-10	63.5	60.93	25.4	50.80	23.4	12.73	12.74	18.01	18.06	5.01
5B-11	63.5	60.93	25.4	50.79	23.4	12.71	12.73	18.01	18.07	5.02
5B-12	63.5	60.94	25.4	50.80	23.4	12.74	12.74	18.00	18.06	5.01
5B-13	63.5	60.94	25.4	50.80	23.4	12.72	12.71	18.00	18.06	5.03
5B-14	63.5	60.94	25.4	50.80	23.4	12.71	12.71	18.00	18.06	5.00

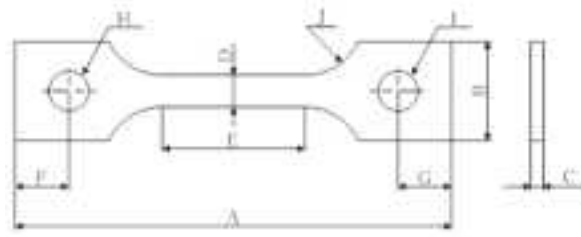
基準値	G1	G2	l	a	d1	d2	θ 1	θ 2	ρ 1	ρ 2
符号	6.5	6.5	3	30°	1	1	45°	45°	R0.5	R0.5
5B-1	6.5	6.5	3	29° 31'	1	1	44° 52'	44° 58'	0.5	0.5
5B-2	6.5	6.5	3	29° 29'	1	1	44° 55'	45° 08'	0.5	0.5
5B-3	6.5	6.5	3	29° 32'	1	1	45° 07'	44° 58'	0.5	0.5
5B-4	6.5	6.5	3	29° 32'	1	1	44° 56'	44° 46'	0.5	0.5
5B-5	6.5	6.5	3	29° 29'	1	1	45° 01'	45° 07'	0.5	0.5
5B-6	6.5	6.5	3	29° 29'	1	1	44° 55'	44° 52'	0.5	0.5
5B-7	6.5	6.5	3	29° 25'	1	1	44° 58'	44° 49'	0.5	0.5
5B-8	6.5	6.5	3	29° 29'	1	1	44° 54'	45° 05'	0.5	0.5
5B-9	6.5	6.5	3	29° 30'	1	1	44° 50'	44° 54'	0.5	0.5
5B-10	6.5	6.5	3	29° 32'	1	1	45° 10'	44° 35'	0.5	0.5
5B-11	6.5	6.5	3	29° 31'	1	1	44° 56'	44° 51'	0.5	0.5
5B-12	6.5	6.5	3	29° 33'	1	1	44° 33'	45° 22'	0.5	0.5
5B-13	6.5	6.5	3	29° 24'	1	1	45° 02'	45° 16'	0.5	0.5
5B-14	6.5	6.5	3	29° 24'	1	1	45° 03'	45° 07'	0.5	0.5

表 5.1.1-8 未照射保管材 1T-CT 試験片の寸法(その 3)



基準値	L	H	B	W	a_m	D_u	D_L	F1	F2	f
符号	$63.5_{-0.2}^0$	$60.96_{0.2}^0$	25.4 ± 0.1	50.8 ± 0.25	23.4 ± 0.1	$\phi 12.7 \pm 0.13$	$\phi 12.7 \pm 0.13$	18.03	18.03	5.00 ± 0.1
5WB-1	63.5	60.94	25.4	50.81	23.4	12.72	12.72	18.01	18.06	5.03
5WB-2	63.5	60.93	25.4	50.80	23.4	12.72	12.71	18.03	18.03	5.03
5WB-3	63.5	60.96	25.4	50.79	23.4	12.71	12.71	18.00	18.07	5.04
5WB-4	63.5	60.95	25.4	50.78	23.4	12.73	12.74	18.01	18.06	5.04
5WB-5	63.5	60.95	25.4	50.79	23.4	12.73	12.75	18.00	18.06	5.04
5WB-6	63.5	60.95	25.4	50.79	23.4	12.74	12.74	18.00	18.07	5.02
5WB-7	63.5	60.95	25.4	50.80	23.4	12.71	12.72	18.01	18.06	5.05
5WB-8	63.5	60.95	25.4	50.80	23.4	12.70	12.71	17.99	18.08	5.03
5WB-9	63.5	60.96	25.4	50.80	23.4	12.72	12.71	17.99	18.08	5.04
5WB-10	63.5	60.95	25.4	50.82	23.4	12.71	12.72	18.00	18.08	5.04
5WB-11	63.5	60.96	25.4	50.81	23.4	12.73	12.73	18.01	18.06	5.04
5WB-12	63.5	60.93	25.4	50.81	23.3	12.72	12.73	18.01	18.06	5.02
5WB-13	63.5	60.94	25.4	50.79	23.4	12.71	12.72	18.01	18.06	5.04
5WB-14	63.5	60.93	25.4	50.80	23.4	12.71	12.72	18.00	18.07	5.03
基準値	G1	G2	l	a	d1	d2	$\theta 1$	$\theta 2$	$\rho 1$	$\rho 2$
符号	6.5	6.5	3	30°	1	1	45°	45°	R0.5	R0.5
5WB-1	6.5	6.5	3	$29^\circ 27'$	1	1	$44^\circ 48'$	$44^\circ 58'$	0.5	0.5
5WB-2	6.5	6.5	3	$29^\circ 27'$	1	1	$44^\circ 36'$	$44^\circ 26'$	0.5	0.5
5WB-3	6.5	6.5	3	$29^\circ 24'$	1	1	$44^\circ 05'$	$44^\circ 49'$	0.5	0.5
5WB-4	6.5	6.5	3	$29^\circ 24'$	1	1	$44^\circ 27'$	$44^\circ 35'$	0.5	0.5
5WB-5	6.5	6.5	3	$29^\circ 19'$	1	1	$44^\circ 53'$	$45^\circ 01'$	0.5	0.5
5WB-6	6.5	6.5	3	$29^\circ 25'$	1	1	$45^\circ 03'$	$45^\circ 15'$	0.5	0.5
5WB-7	6.5	6.5	3	$29^\circ 22'$	1	1	$45^\circ 01'$	$45^\circ 07'$	0.5	0.5
5WB-8	6.5	6.5	3	$29^\circ 23'$	1	1	$44^\circ 41'$	$44^\circ 49'$	0.5	0.5
5WB-9	6.5	6.5	3	$29^\circ 29'$	1	1	$45^\circ 20'$	$45^\circ 24'$	0.5	0.5
5WB-10	6.5	6.5	3	$29^\circ 27'$	1	1	$45^\circ 01'$	$44^\circ 40'$	0.5	0.5
5WB-11	6.5	6.5	3	$29^\circ 21'$	1	1	$45^\circ 20'$	$45^\circ 11'$	0.5	0.5
5WB-12	6.5	6.5	3	$29^\circ 35'$	1	1	$44^\circ 56'$	$45^\circ 24'$	0.5	0.5
5WB-13	6.5	6.5	3	$29^\circ 23'$	1	1	$44^\circ 57'$	$44^\circ 30'$	0.5	0.5
5WB-14	6.5	6.5	3	$29^\circ 31'$	1	1	$44^\circ 49'$	$45^\circ 03'$	0.5	0.5

表 5.1.1-9 未照射保管材引張試験片の寸法



基準値	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
符号	25±0.05	4.95±0.05	0.76 ^{+0.00} _{-0.05}	1.524±0.024	7.62	3.81	3.81	φ 1.86±0.05	φ 1.86±0.05	R3.95±0.1
3BT-1	25.04	4.97	0.75	1.539	7.61	3.82	3.81	1.84	1.85	3.94
3BT-2	25.05	4.98	0.75	1.539	7.60	3.81	3.82	1.87	1.84	3.96
3BT-3	25.04	4.97	0.75	1.542	7.63	3.82	3.82	1.86	1.84	3.93
3BT-4	25.03	4.98	0.75	1.542	7.60	3.82	3.82	1.84	1.84	3.96
3BT-5	25.04	4.98	0.76	1.535	7.61	3.82	3.82	1.84	1.84	3.95
3BT-6	25.04	4.98	0.75	1.537	7.62	3.81	3.82	1.84	1.86	3.94
3BL-1	25.03	4.98	0.73	1.548	7.64	3.83	3.82	1.84	1.85	3.91
3BL-2	25.02	4.98	0.73	1.548	7.63	3.82	3.82	1.84	1.86	3.94
3BL-3	25.03	4.98	0.72	1.547	7.62	3.81	3.81	1.85	1.83	3.92
5BT-1	25.02	4.96	0.73	1.540	7.59	3.82	3.82	1.85	1.85	3.94
5BT-2	25.02	4.97	0.73	1.546	7.65	3.81	3.82	1.86	1.84	3.88
5BT-3	25.03	4.97	0.73	1.540	7.59	3.82	3.82	1.85	1.85	4.00
5BT-4	25.02	4.97	0.73	1.540	7.60	3.83	3.83	1.84	1.85	3.94
5BT-5	25.03	4.98	0.74	1.539	7.61	3.82	3.82	1.85	1.85	3.94
5BT-6	25.03	4.97	0.73	1.534	7.60	3.81	3.82	1.84	1.84	3.95
5BL-1	25.01	4.98	0.75	1.548	7.62	3.83	3.82	1.85	1.84	3.92
5BL-2	25.01	4.98	0.75	1.545	7.62	3.81	3.82	1.84	1.83	3.91
5BL-3	25.02	4.97	0.75	1.546	7.62	3.81	3.83	1.85	1.84	3.93
5WT-1	25.04	4.97	0.75	1.530	7.65	3.82	3.82	1.84	1.85	3.88
5WT-2	25.03	4.96	0.74	1.536	7.64	3.80	3.82	1.84	1.84	3.94
5WT-3	25.03	4.97	0.76	1.526	7.62	3.83	3.82	1.86	1.85	3.90
5WT-4	25.03	4.97	0.75	1.536	7.64	3.81	3.81	1.85	1.84	3.90
5WT-5	25.04	4.97	0.75	1.535	7.63	3.81	3.82	1.84	1.85	3.92
5WT-6	25.03	4.97	0.75	1.532	7.63	3.82	3.81	1.84	1.85	3.93
5WL-1	25.03	4.97	0.74	1.535	7.62	3.82	3.83	1.84	1.85	3.93
5WL-2	25.03	4.98	0.75	1.540	7.64	3.82	3.82	1.84	1.85	3.90
5WL-3	25.02	4.97	0.75	1.535	7.64	3.81	3.83	1.84	1.85	3.92
B4T-1	25.03	4.98	0.74	1.531	7.60	3.83	3.83	1.84	1.85	3.96
B4T-2	25.03	4.99	0.73	1.530	7.55	3.82	3.82	1.85	1.85	4.05
B4T-3	25.03	4.99	0.73	1.531	7.66	3.81	3.82	1.85	1.85	3.90
B4T-4	25.03	4.98	0.72	1.527	7.60	3.84	3.82	1.83	1.85	3.96
B4T-5	25.03	4.98	0.73	1.526	7.63	3.82	3.82	1.84	1.85	3.93
B4T-6	25.03	4.98	0.74	1.524	7.62	3.79	3.82	1.85	1.83	3.92
B4T-7	25.03	4.98	0.73	1.528	7.60	3.82	3.83	1.84	1.85	3.95
B4T-8	25.04	4.98	0.73	1.530	7.61	3.83	3.83	1.84	1.83	3.94
B4T-9	25.02	4.98	0.73	1.521	7.61	3.82	3.82	1.85	1.84	3.95

表 5.1.1-10 未照射保管材(1T-CT)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	Pmax, kN	B, mm	BN, mm	W, mm	a0, mm	Je, kJ/m ²	Jp, kJ/m ²	Jc, kJ/m ²	KJc, MPa√m	KJc (limit)	Validity	参照温度 To, °C
3B(母材)	3B-1	-60	62.93	25.45	23.46	50.79	26.28	60.1	36.1	96.2	147.5	309.4	valid	-72
	3B-2	-70	48.67	25.45	23.45	50.80	26.22	35.5	5.0	40.5	95.9	313.6	valid	
	3B-3	-70	40.18	25.45	23.45	50.80	26.24	24.3	2.0	26.2	77.2	313.5	valid	
	3B-4	-70	54.62	25.45	23.45	50.81	26.57	46.7	12.2	58.9	115.6	311.4	valid	
	3B-5	-70	55.50	25.45	23.44	50.81	26.65	48.8	14.2	62.9	119.5	310.9	valid	
	3B-6	-70	51.35	25.45	23.44	50.80	26.61	41.6	8.2	49.7	106.2	311.1	valid	
	3B-7	-70	50.58	25.45	23.45	50.81	26.95	42.1	9.1	51.2	107.8	309.0	valid	
5B(母材)	5B-1	-50	64.37	25.45	23.44	50.78	26.71	66.7	56.1	122.8	166.4	309.7	valid	-79
	5B-2	-60	57.80	25.45	23.44	50.80	26.72	53.6	17.9	71.5	127.2	313.1	valid	
	5B-3	-60	64.25	25.45	23.44	50.80	26.62	65.4	42.9	108.2	156.5	313.8	valid	
	5B-4	-60	63.61	25.45	23.44	50.79	26.47	62.9	34.1	97.0	148.1	314.7	valid	
	5B-5	-60	26.86	25.45	23.43	50.80	26.28	10.9	0.3	11.2	50.4	316.0	valid	
	5B-6	-60	54.25	25.45	23.43	50.80	26.65	46.8	10.8	57.6	114.2	313.6	valid	
	5B-7	-60	64.56	25.45	23.43	50.79	26.80	67.6	61.0	128.6	170.6	312.5	valid	
5W(溶接金属)	5WB-1	-60	55.78	25.44	23.44	50.81	26.26	47.1	6.8	53.9	110.4	338.0	valid	-57
	5WB-2	-60	50.82	25.44	23.45	50.81	26.04	38.0	3.9	41.9	97.4	339.5	valid	
	5WB-3	-60	57.12	25.44	23.45	50.79	26.16	48.8	7.3	56.1	112.6	338.5	valid	
	5WB-4	-60	51.05	25.44	23.43	50.79	26.05	38.5	3.6	42.1	97.6	339.3	valid	
	5WB-5	-60	51.92	25.44	23.43	50.79	26.33	41.2	4.8	46.0	102.0	337.3	valid	
	5WB-6	-60	56.49	25.44	23.43	50.79	26.08	47.3	6.3	53.6	110.1	339.1	valid	
	5WB-7	-60	45.01	25.43	23.44	50.80	26.55	31.8	2.5	34.3	88.1	335.9	valid	

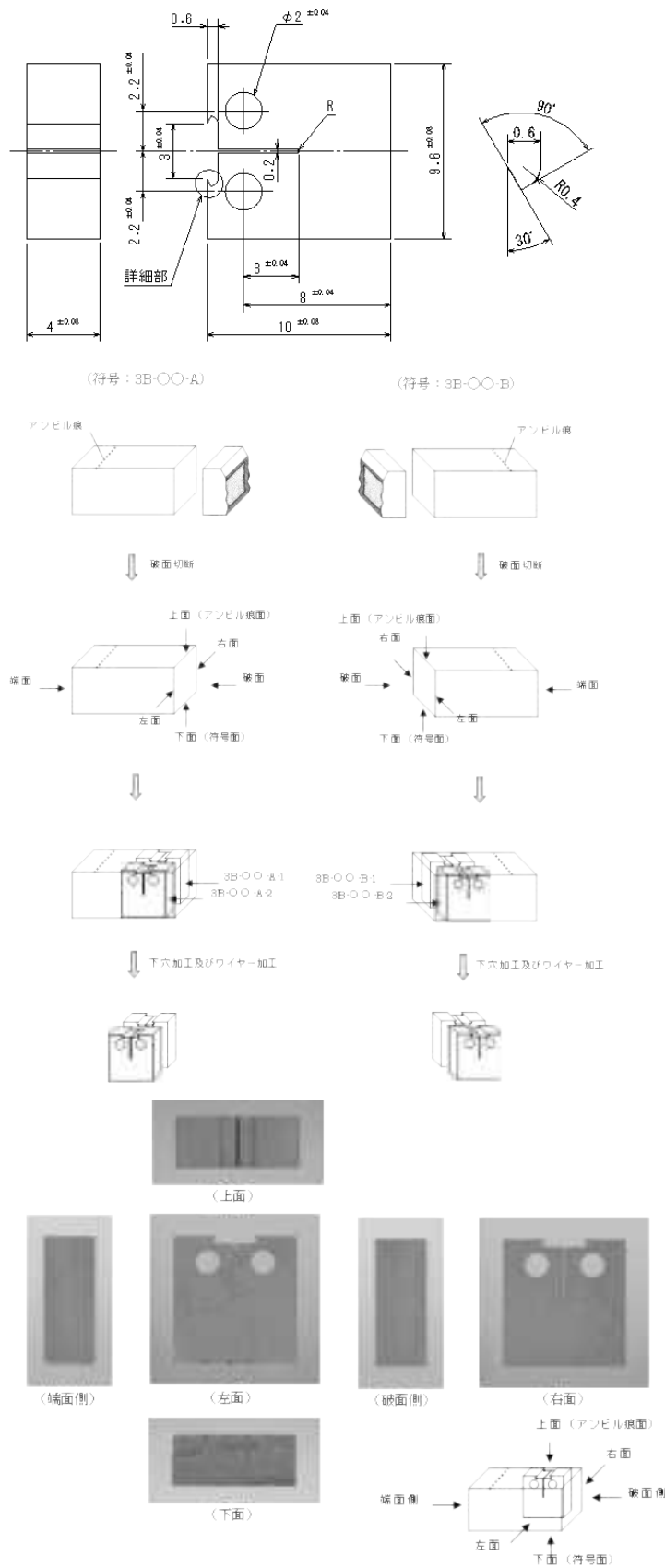
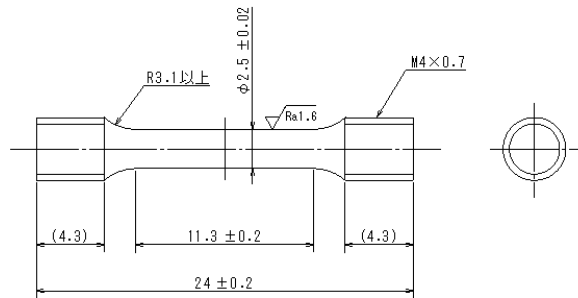
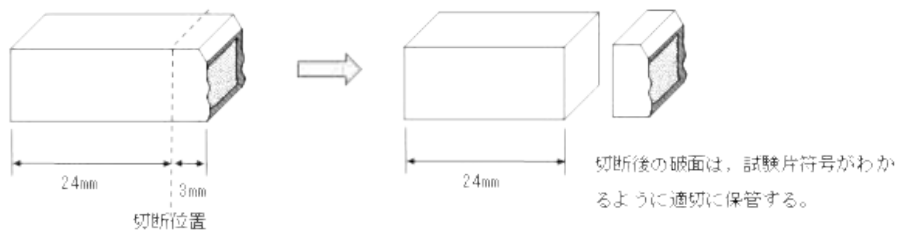


図 5.1.1-1 3B 材からの放電加工による 0.16T-CT 試験片採取方法の模式図

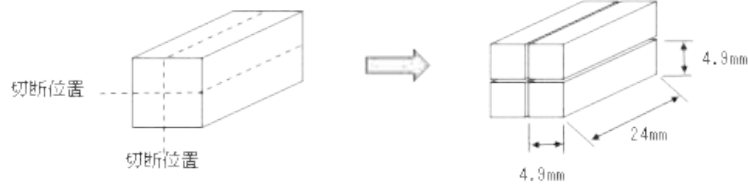


① 破面切断



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。

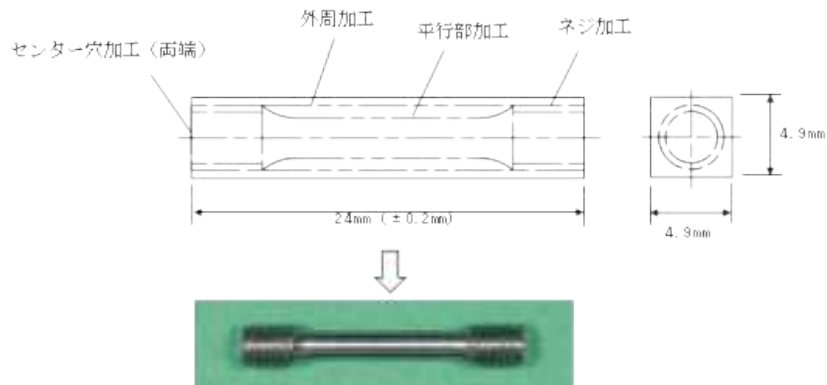


図 5.1.1-3 3B 材からの引張試験片採取方法の模式図

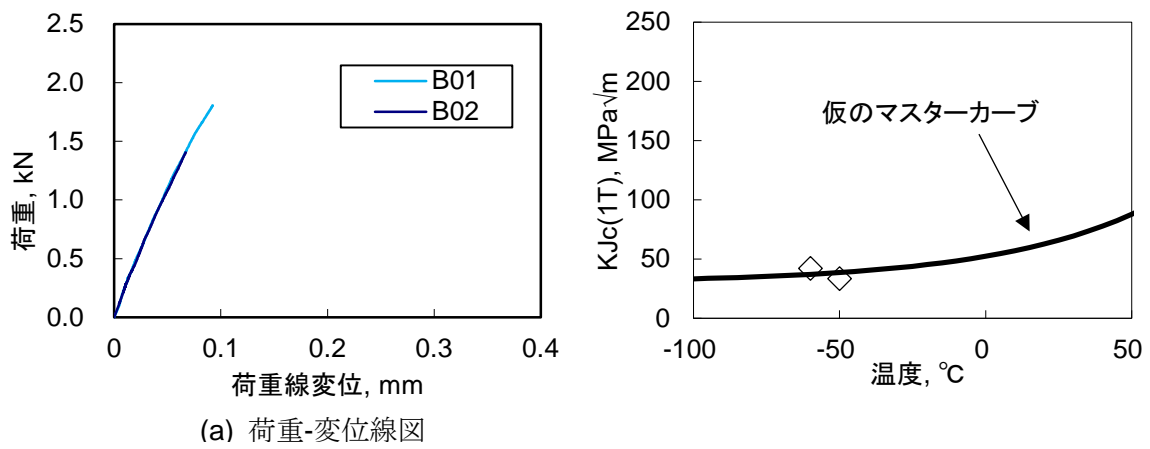


図 5.1.1-4 照射材(Steel B)の破壊靱性試験結果

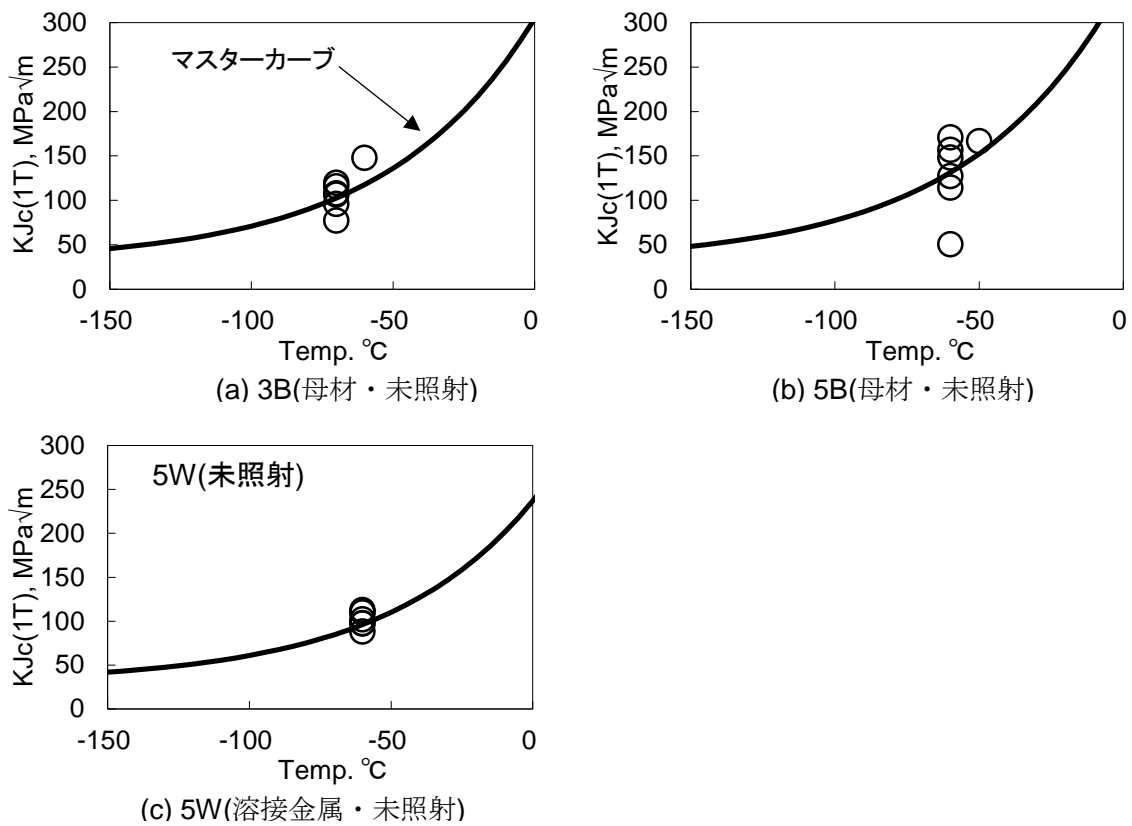


図 5.1.1-5 未照射保管材 1T-CT の破壊靱性試験結果

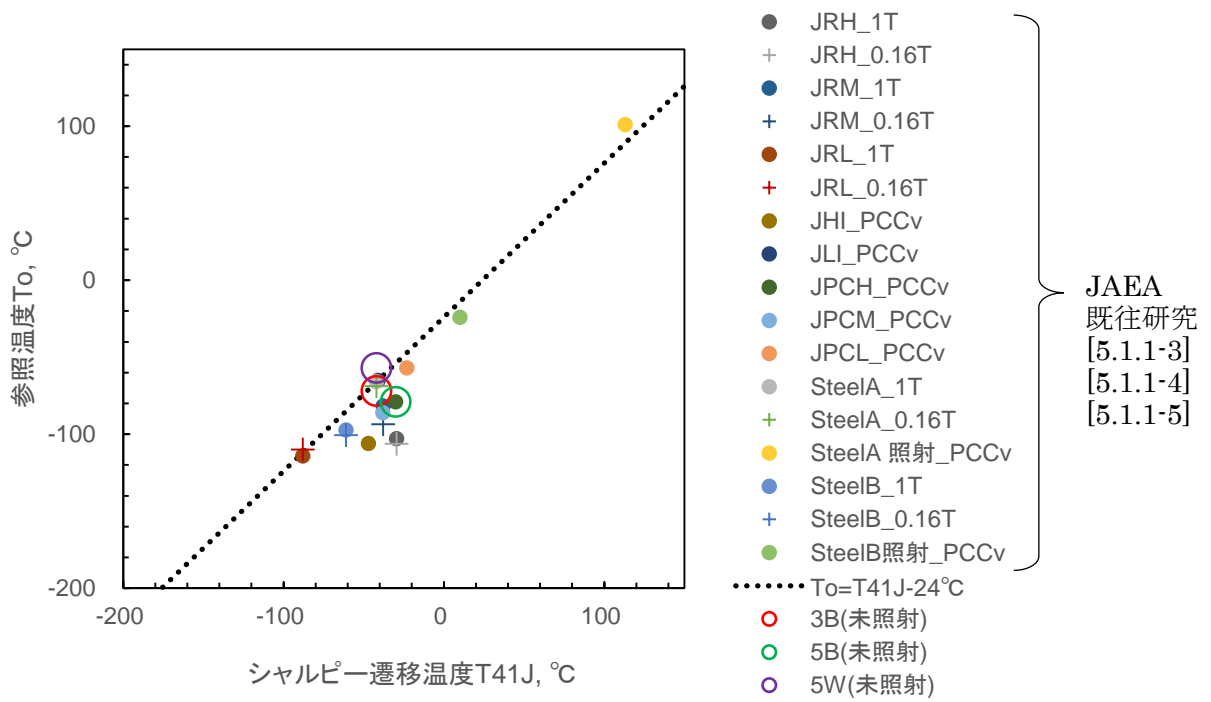


図 5.1.1-6 シャルピー遷移温度と参照温度の相関

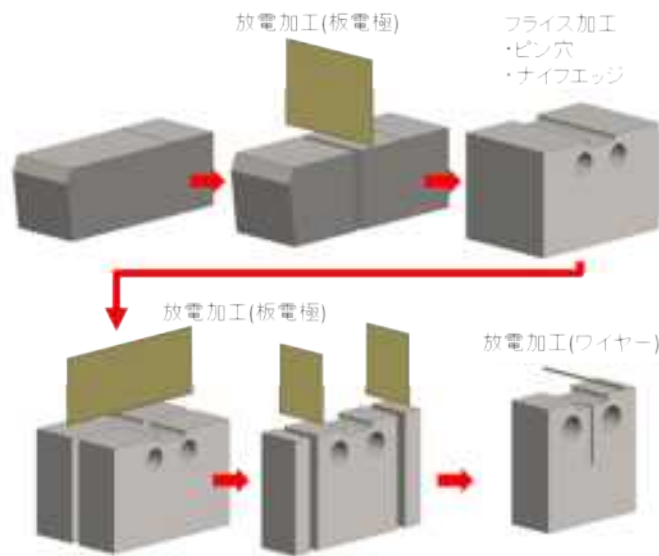


図 5.1.1-7 0.16T-CT 試験片外形加工手順

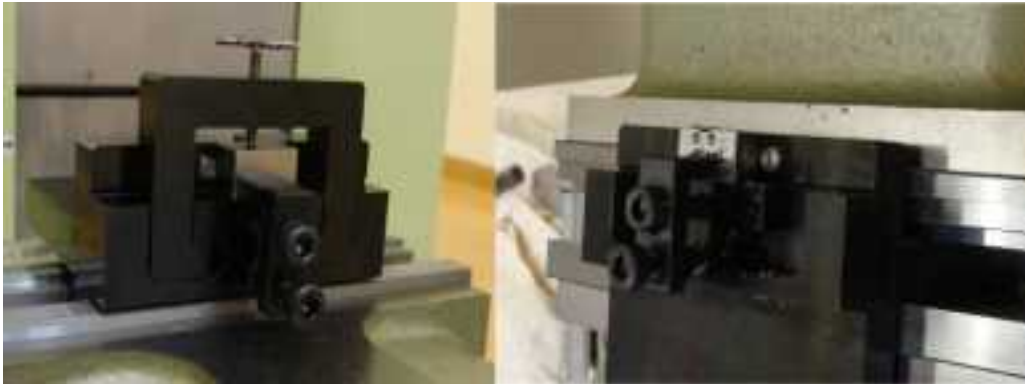


図 5.1.1-8 改良した NC フライス盤用 0.16T-CT 試験片保持治具

5.1.2 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)時における構造健全性評価に用いられようとしている評価項目の一つに高温予荷重(WPS)効果がある。温度と応力拡大係数が減少する過程では、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。未照射材については多くの研究により WPS 効果が実証されているが照射材に関する報告は少ない。

実機において WPS 効果を確認するためには、監視試験片から小型の破壊靱性試験片を製作し WPS 試験を実施する方法が考えられる。昨年度は、未照射材 1T-CT 試験片を用いて PTS 過渡の模擬を含む 7 種類の WPS 試験波形により、WPS 効果を実証した。本年度は、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。

また、実機の想定き裂(10mm 深さ×60mm 幅)における評価のためには、解析モデルを整備し、実験データを元に解析により WPS 効果を評価する手法の整備が必要になる。本年度は、試験片寸法に依存しない WPS 効果の評価手法の検討を目的として、有限要素解析 (FEA) に基づいて、ローカルアプローチ(LA)法を用いた解析を行い、本年度及び昨年度に実施した 1T-CT 試験片による WPS 試験データとの比較検証を行った。

また、WPS 効果に関する文献の調査結果を付録として章末に記載する。

5.1.2.1 未照射材を用いた WPS 試験

(1) 供試材及び試験片

昨年度に調達した PWR 比較標準材から、1 インチ、0.4 インチ及び 0.16 インチ厚 CT 試験片(それぞれ 1T-CT、0.4T-CT 及び 0.16T-CT と呼ぶ。)を製作した。供試材のマスターカーブ法に基づく参照温度 T_0 は、図 5.1.2-1 に示すように、 -111°C である。各寸法の試験片を 8 個ずつ合計 24 個の試験片を製作した。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、 $1/4T$ もしくは $3/4T$ 近傍とした(T : 供試材板厚)。

試験片の形状及び寸法を図 5.1.2-2 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、1T-CT 試験片及び 0.4T-CT 試験片は予き裂導入後にサイドグループを加工した。

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 0.2mm 以上) |
| ・ 疲労予き裂長さ | : | (1T-CT) 約 2mm (目標)
(0.4T-CT) 約 1.3mm (目標) |

(0.16T-CT) 約 0.8mm (目標)

・周波数 : 10～30Hz

製作した試験片の寸法は、すべて JEAC 4216-2011^(5.1.2-1)の規格寸法を満足していた。なお、1T-CT 試験片及び 0.4T-CT 試験片では荷重線で開口変位を測定し、0.16T-CT 試験片では試験片前面に設けたナイフエッジで開口変位を測定した。0.16T-CT 試験片に対する開口変位から荷重線変位への換算式を式(5.1.2-1)に示す。

$$\delta = \left[\frac{1 + a_0/W}{1.5 + a_0/W} \right] \delta_0 \quad (5.1.2-1)$$

ここで、

δ : 荷重線変位(mm)

δ_0 : 0.16T-CT 試験片で計測した開口変位(mm)

W : 0.16T-CT 試験片の試験片幅(mm)

a_0 : 0.16T-CT 試験片の初期のき裂長さ(mm)

(2) WPS 試験条件

後述のローカルアプローチ(LA)法を用いた解析モデルを単純にする観点から、本年度の WPS 波形は比較的単純な LUCF(Load→Unload→Cool→Fracture)とした。再負荷(破壊)時の試験温度は、試験装置の制約(LN₂噴霧により安定的に冷却可能な温度)や供試材の参照温度 (PWR 比較標準材の T_0 は約-110℃であり、試験温度は $T_0 - 50℃$ 以上であることが望ましい)等を考慮し、-160℃とした。WPS 効果を確認するためには、再負荷時の破断点(K_{Jc} 値)が $K_{Jc(\text{med})}$ よりも明らかに高く分布していることを示す必要がある。すなわち、予荷重時に少なくとも再負荷時の温度(-160℃)における $K_{Jc(\text{med})}$ を超える K_J まで負荷を行う必要がある。-160℃における $K_{Jc(\text{med})}$ は 1T-CT、0.4T-CT、0.16T-CT 試験片に対してそれぞれ 58、68、80MPa \sqrt{m} である。さらに、 K_{Jc} のばらつきを考慮した場合には再負荷時の温度(-160℃)の $K_{Jc(0.95)}$ を超える K_J を負荷することが望ましく、これを満足する K_J は、1T-CT、0.4T-CT、0.16T-CT 試験片に対してそれぞれ 75、89、107MPa \sqrt{m} となる。

したがって、0.16T-CT 試験片で WPS 効果を確認するためには、少なくとも K_J で 80MPa \sqrt{m} 、ばらつきを考慮した場合は 107MPa を超える予荷重を行うことが望ましいため、0.16T-CT 試験片に対する予荷重時の K_J の目標値は 110MPa \sqrt{m} とした。なお、他の試験片(1T-CT 及び 0.4T-CT 試験片)についても 0.16T-CT 試験片に合わせて $K_J=110MPa\sqrt{m}$ を目標に予荷重を行った。なお、予荷重時の温度は、以下を考慮して-50℃とした。WPS 試験の波形と各試験片のメディアン($K_{Jc(\text{med})}$)カーブ(1T-CT の場合はマスターカーブに相当)との関係を図 5.1.2-3 に示す。

【予荷重温度選定で考慮した項目】

- ・1T-CT 試験片に対する予荷重時の K_J がマスターカーブの $K_{Jc(0.05)}$ を下回る(予荷重時に破壊させないため)。
- ・0.16T-CT 試験片に対する予荷重時の K_J が $K_{Jc(limit)}$ を下回る。
- ・昨年度の 1T-CT 試験片の WPS 負荷波形(-50°Cで K_J が最大値)との整合性を考慮。

(3) WPS 試験結果

荷重-開口変位の関係を図 5.1.2-4 に示す。ここで、0.16T-CT 試験片の荷重-開口変位の開口変位は荷重線変位ではない。開口変位は温度と開口変位の関係より低温時のクリップゲージの出力を補正し、負荷開始時の開口変位が 0mm となるよう設定して負荷を開始した。補正に用いた伸び計出力と温度の関係を図 5.1.2-5 に示す。

それぞれの試験片寸法での荷重-変位関係は試験片によらず、ほぼ同じ挙動を示していた。一方、1T-CT 試験片では-50°Cでの予荷重時の塑性挙動が小さく、破壊時の最大荷重が予荷重時の最大荷重以下であったのに対し、試験片寸法が 0.4T-CT、0.16T-CT と小さくなるのに伴って予荷重時の塑性挙動が大きくなり、予荷重時の最大荷重に対する破壊時の最大荷重の比率も増加する傾向が認められた。また、1T-CT 及び 0.4T-CT 試験片では-160°Cでの再負荷時にほぼ弾性領域の範囲内で破壊する傾向が認められたが、0.16T-CT 試験片では荷重-開口変位が直線領域から若干外れて塑性領域に入ったところで破壊する傾向が認められた。

試験片の破面外観を図 5.1.2-6 に、き裂長さの測定結果を表 5.1.2-1 に示す。き裂長さ a_0 は、JEAC4201-2011 に基づき破面開放後に 9 か所で測定(両端 2 点を平均)した疲労予き裂長さ a_f の 8 点の平均値にノッチ長さ a_n を加算して算出した。疲労予き裂の形状は、1T-CT、0.4T-CT、0.16T-CT 試験片ともに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、疲労予き裂先端に明確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式(5.1.2-2)～(5.1.2-6)より求めた。

$$K_{Jc} = \sqrt{J_c \frac{E}{1-\nu^2}} \quad (5.1.2-2)$$

$$J_c = J_e + J_p \quad (5.1.2-3)$$

$$J \text{ 積分の弾性成分 : } J_e = \frac{(1-\nu^2)K_e^2}{E} \quad (5.1.2-4)$$

$$J \text{ 積分の塑性成分} : J_p = \frac{\eta \cdot A_p}{B_N \cdot b_0} \quad (5.1.2-5)$$

$$K_e = \left[\frac{1000P}{(BB_N W)^{1/2}} \right] f\left(\frac{a_0}{W}\right) \quad (5.1.2-6)$$

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

ここで、

- ν : ポアソン比(0.3 を使用)
- η : $\eta = 2 + 0.522(b_0/W)$
- 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-a₀)
- 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_e : $A_p = A - A_e$
- A : 荷重-変位線図下の面積

$$K_{Jc(1T)} = 20 + (K_{Jc(xT)} - 20) \times (B_{xT}/B_{1T})^{0.25} \quad (5.1.2-7)$$

ここで、

- $K_{Jc(1T)}$: 1T-CT 換算した K_{Jc} (MPa \sqrt{m})
- $K_{Jc(xT)}$: 各試験片寸法別の K_{Jc} (MPa \sqrt{m})
- B_{xT} : 各試験片寸法別の試験片板厚(m)
- B_{1T} : 1T-CT 試験片の試験片板厚(=0.0254m)

試験結果を表 5.1.2-2 に示す。なお、ヤング率は JEAC 4216-2011 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 $E(\text{MPa}) = 202 \cdot 100 - 62.6T(^{\circ}\text{C})$ より算出した。

試験結果とマスターカーブの関係を試験片の寸法毎に図 5.1.2-7 に示す。なお、予荷重時及び破壊時の K_J 及びマスターカーブは式(5.1.2-7)を用いて 1T(1 インチ厚さ)相当に換算した結果も併記した。1T-CT 試験片及び 0.4T-CT 試験片については、-160 $^{\circ}\text{C}$ における破壊靱

性の中央値 $K_{Jc(\text{med})}$ よりも高い K_{Jc} で破壊しており、WPS 効果が認められた。一方、0.16T-CT 試験片については、 $K_{Jc(\text{med})}$ と比べて同程度であり、明確な WPS 効果は認められなかった。

前述のように-50℃での予荷重 K_{JWPS} が約 $110\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ となるように WPS 試験は行っている。試験片寸法が-160℃での破断時の K_{Jc} に与える影響を確認するために、 $(K_{Jc}-K_{JWPS})/K_{JWPS}$ と板厚との関係を図 5.1.2-8 に示す。本研究で得られたデータについて、0.4T-CT 試験片の $(K_{Jc}-K_{JWPS})/K_{JWPS}$ が 0.16T-CT 及び 1T-CT 試験片のそれに比べて高くなる傾向が認められたが、明確な板厚に対する依存は認められなかった。本研究では 0.16T~1T の範囲のデータしか得られていないため、図 5.1.2-8 には更に大きなサイズについても実施した文献データ (5.1.2-2) との比較を示しているが、板厚に対する依存は明確には認められなかった。

図 5.1.2-9 に、0.16T-CT と 1T-CT の予荷重除荷後の塑性変形領域の比較を示す。 $K_{Jc(\text{limit})}$ 未満の荷重にもかかわらず、0.16T-CT は予荷重時にリガメントの大部分が塑性変形している。図 5.1.2-10 に予荷重除荷後のリガメント部の残留応力分布を示す。1T-CT はき裂先端から 1mm 深さまで圧縮応力が生じているのに対し、0.16T-CT は 0.1mm 程度であり圧縮応力範囲が非常に狭い。これはリガメントの大部分が塑性変形しているためと考えられ、WPS 効果が明確に生じなかった原因であると考えられる。

参考文献

- (5.1.2-1) 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).
- (5.1.2-2) S. Chapuliot et al., “WPS criterion proposition based on experimental data base interpretation”, Fontevraud 7, (2010).

表 5.1.2-1 き裂長さ測定結果

(a) 1TCT 試験片

試験片 符号	試験温度 (°C)	板厚 B (mm)	ノッチ長さ a _n (mm)	疲労予き裂長さ a _f (mm)										予き裂長さの差 Δa _f =Max(a _f -a _{fave})	き裂長さ a ₀ (mm)	Validity判定基準寸法		き裂のValidity判定	
				①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	平均			Max(0.025B, 0.6mm)	Max(0.05B, 0.5mm)	a _f ≥Max(0.025B, 0.6mm)	Δa _f ≤Max(0.05B, 0.5mm)
1TCT-01	-160	25.44	22.41	2.74	3.11	3.30	3.38	3.43	3.35	3.23	3.03	2.73	3.19	0.47	25.60	0.64	1.27	OK	OK
1TCT-02	-160	25.44	22.41	2.71	3.09	3.23	3.28	3.32	3.29	3.21	3.07	2.75	3.15	0.44	25.56	0.64	1.27	OK	OK
1TCT-03	-160	25.44	22.42	2.73	3.02	3.20	3.24	3.25	3.25	3.13	3.00	2.76	3.10	0.37	25.52	0.64	1.27	OK	OK
1TCT-04	-160	25.44	22.40	2.80	3.13	3.29	3.36	3.37	3.38	3.29	3.14	2.82	3.22	0.42	25.62	0.64	1.27	OK	OK
1TCT-05	-160	25.44	22.44	2.76	3.05	3.26	3.31	3.30	3.31	3.25	3.10	2.82	3.17	0.41	25.61	0.64	1.27	OK	OK
1TCT-06	-160	25.44	22.41	2.79	3.06	3.21	3.30	3.33	3.35	3.27	3.13	2.85	3.18	0.39	25.59	0.64	1.27	OK	OK
1TCT-07	-160	25.44	22.42	2.74	2.98	3.07	3.17	3.25	3.16	3.15	3.03	2.80	3.07	0.34	25.49	0.64	1.27	OK	OK
1TCT-08	-160	25.44	22.43	2.74	3.00	3.09	3.17	3.19	3.16	3.10	3.01	2.71	3.05	0.34	25.48	0.64	1.27	OK	OK

(b) 0.4TCT 試験片

試験片 符号	試験温度 (°C)	板厚 B (mm)	ノッチ長さ a _n (mm)	疲労予き裂長さ a _f (mm)										予き裂長さの差 Δa _f =Max(a _f -a _{fave})	き裂長さ a ₀ (mm)	Validity判定基準寸法		き裂のValidity判定	
				①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	平均			Max(0.025B, 0.6mm)	Max(0.05B, 0.5mm)	a _f ≥Max(0.025B, 0.6mm)	Δa _f ≤Max(0.05B, 0.5mm)
0.4TCT-01	-160	10.24	9.00	1.65	1.73	1.80	1.85	1.88	1.89	1.83	1.80	1.66	1.80	0.16	10.80	0.60	0.51	OK	OK
0.4TCT-02	-160	10.24	9.02	1.76	1.94	2.03	2.08	2.09	2.07	2.03	1.91	1.70	1.98	0.28	11.00	0.60	0.51	OK	OK
0.4TCT-03	-160	10.24	9.02	1.62	1.77	1.84	1.90	1.94	1.92	1.88	1.84	1.70	1.84	0.22	10.86	0.60	0.51	OK	OK
0.4TCT-04	-160	10.24	9.02	1.70	1.85	1.97	2.03	2.04	2.08	2.01	1.92	1.77	1.95	0.25	10.97	0.60	0.51	OK	OK
0.4TCT-05	-160	10.24	9.00	1.69	1.83	1.91	1.96	1.99	1.99	1.91	1.82	1.68	1.88	0.21	10.88	0.60	0.51	OK	OK
0.4TCT-06	-160	10.24	9.02	1.84	1.96	2.00	2.04	2.05	2.07	2.04	1.99	1.87	2.00	0.16	11.02	0.60	0.51	OK	OK
0.4TCT-07	-160	10.24	9.00	1.73	1.80	1.87	1.92	1.95	1.95	1.92	1.84	1.73	1.87	0.14	10.87	0.60	0.51	OK	OK
0.4TCT-08	-160	10.24	8.95	1.67	1.81	1.87	1.90	1.90	1.88	1.86	1.79	1.65	1.83	0.18	10.78	0.60	0.51	OK	OK

(c) 0.16TCT 試験片

試験片 符号	試験温度 (°C)	板厚 B (mm)	ノッチ長さ a _n (mm)	疲労予き裂長さ a _f (mm)										予き裂長さの差 Δa _f =Max(a _f -a _{fave})	き裂長さ a ₀ (mm)	Validity判定基準寸法		き裂のValidity判定	
				①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	平均			Max(0.025B, 0.6mm)	Max(0.05B, 0.5mm)	a _f ≥Max(0.025B, 0.6mm)	Δa _f ≤Max(0.05B, 0.5mm)
0.16TCT-01	-160	4.02	3.03	0.83	1.01	1.12	1.17	1.18	1.18	1.13	1.03	0.83	1.08	0.25	4.10	0.60	0.50	OK	OK
0.16TCT-02	-160	4.02	3.04	0.82	1.02	1.08	1.12	1.16	1.15	1.10	1.02	0.80	1.06	0.25	4.09	0.60	0.50	OK	OK
0.16TCT-03	-160	4.03	3.03	0.88	1.08	1.14	1.15	1.16	1.14	1.11	1.02	0.85	1.08	0.24	4.12	0.60	0.50	OK	OK
0.16TCT-04	-160	4.03	3.03	0.82	0.99	1.05	1.08	1.11	1.11	1.06	0.99	0.82	1.03	0.21	4.05	0.60	0.50	OK	OK
0.16TCT-05	-160	4.03	3.03	0.82	1.00	1.10	1.13	1.15	1.12	1.05	0.97	0.79	1.04	0.25	4.07	0.60	0.50	OK	OK
0.16TCT-06	-160	4.03	3.05	0.79	0.97	1.04	1.10	1.12	1.12	1.10	1.03	0.85	1.04	0.25	4.08	0.60	0.50	OK	OK
0.16TCT-07	-160	4.03	3.02	0.84	1.00	1.08	1.13	1.15	1.14	1.07	0.99	0.81	1.05	0.24	4.07	0.60	0.50	OK	OK
0.16TCT-08	-160	4.03	3.02	0.84	0.98	1.07	1.11	1.10	1.09	1.03	0.93	0.77	1.01	0.24	4.04	0.60	0.50	OK	OK

表 5.1.2-2 WPS 試験結果(その 1)

(a) 1TCT 試験片 (予荷重時)

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状				最大荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	弾性K K _e (MPa√m)	K _{JWPS} (MPa√m)	1T相当 K _{JWPS(1T)} (MPa√m)
			幅 W	厚さ B	正味厚さ B _N	き裂長さ a ₀							
PWR 比較標準材	1TCT-01	-50	50.81	25.44	20.48	25.60	53.62	46.0	9.4	55.4	101.9	111.8	111.8
	1TCT-02	-50	50.80	25.44	20.48	25.56	53.71	46.0	11.7	57.6	101.8	114.0	114.1
	1TCT-03	-50	50.81	25.44	20.52	25.52	54.32	46.7	9.0	55.7	102.6	112.1	112.2
	1TCT-04	-50	50.81	25.44	20.53	25.62	53.35	45.6	9.4	54.9	101.4	111.3	111.3
	1TCT-05	-50	50.82	25.44	20.53	25.61	54.10	46.8	9.3	56.1	102.7	112.5	112.5
	1TCT-06	-50	50.82	25.44	20.53	25.59	53.25	45.2	8.7	54.0	101.0	110.3	110.3
	1TCT-07	-50	50.82	25.44	20.55	25.49	54.44	46.6	11.3	58.0	102.5	114.3	114.4
	1TCT-08	-50	50.82	25.44	20.54	25.48	54.14	46.1	11.4	57.5	101.9	113.8	113.9

(b) 1TCT 試験片 (破壊時)

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状				最大荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	弾性K K _e (MPa√m)	K _{Jc} (MPa√m)	1T相当 K _{Jc(1T)} (MPa√m)
			幅 W	厚さ B	正味厚さ B _N	き裂長さ a ₀							
PWR 比較標準材	1TCT-01	-160	50.81	25.44	20.48	25.60	37.31	21.6	0.0	21.6	70.9	70.9	70.9
	1TCT-02	-160	50.80	25.44	20.48	25.56	50.33	39.1	0.9	40.0	95.4	96.5	96.6
	1TCT-03	-160	50.81	25.44	20.52	25.52	39.61	24.0	0.0	24.1	74.8	74.9	74.9
	1TCT-04	-160	50.81	25.44	20.53	25.62	34.05	18.0	0.2	18.1	64.7	65.0	65.0
	1TCT-05	-160	50.82	25.44	20.53	25.61	51.69	41.3	0.1	41.4	98.1	98.2	98.3
	1TCT-06	-160	50.82	25.44	20.53	25.59	41.44	26.5	0.0	26.5	78.6	78.6	78.6
	1TCT-07	-160	50.82	25.44	20.55	25.49	29.67	13.4	0.3	13.7	55.9	56.4	56.5
	1TCT-08	-160	50.82	25.44	20.54	25.48	42.51	27.5	0.0	27.5	80.0	80.0	80.1

表 5.1.2-2 WPS 試験結果(その 2)

(c) 0.4TCT 試験片 (予荷重時)

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状				最大荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	弾性K K _e (MPa√m)	K _{JWPS} (MPa√m)	1T相当 K _{JWPS(1T)} (MPa√m)
			幅 W	厚さ B	正味厚さ B _N	き裂長さ a ₀							
PWR 比較標準材	0.4TCT-01	-50	20.31	10.24	8.34	10.80	10.06	29.6	23.4	53.0	81.7	109.3	91.1
	0.4TCT-02	-50	20.33	10.24	8.33	11.00	9.61	28.7	19.7	48.4	80.5	104.5	87.3
	0.4TCT-03	-50	20.33	10.24	8.32	10.86	9.88	29.0	19.5	48.5	80.9	104.6	87.4
	0.4TCT-04	-50	20.33	10.24	8.31	10.97	9.67	28.9	21.2	50.1	80.7	106.3	88.8
	0.4TCT-05	-50	20.32	10.24	8.35	10.88	9.75	28.4	21.3	49.7	80.1	105.9	88.4
	0.4TCT-06	-50	20.32	10.24	8.33	11.02	9.67	29.3	21.7	51.0	81.3	107.2	89.5
	0.4TCT-07	-50	20.31	10.24	8.33	10.87	9.78	28.7	21.5	50.2	80.4	106.4	88.8
	0.4TCT-08	-50	20.26	10.24	8.34	10.78	9.99	29.3	20.5	49.8	81.3	106.0	88.5

(d) 0.4TCT 試験片 (破壊時)

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状				最大荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	弾性K K _e (MPa√m)	K _{Jc} (MPa√m)	1T相当 K _{Jc(1T)} (MPa√m)
			幅 W	厚さ B	正味厚さ B _N	き裂長さ a ₀							
PWR 比較標準材	0.4TCT-01	-160	20.31	10.24	8.34	10.80	12.00	40.8	1.6	42.4	97.5	99.4	83.3
	0.4TCT-02	-160	20.33	10.24	8.33	11.00	9.69	28.3	0.0	28.3	81.2	81.2	68.8
	0.4TCT-03	-160	20.33	10.24	8.32	10.86	11.65	39.0	0.0	39.0	95.4	95.4	80.1
	0.4TCT-04	-160	20.33	10.24	8.31	10.97	12.32	45.3	1.9	47.2	102.8	104.9	87.7
	0.4TCT-05	-160	20.32	10.24	8.35	10.88	11.09	35.6	0.1	35.8	91.1	91.3	76.8
	0.4TCT-06	-160	20.32	10.24	8.33	11.02	13.23	53.0	4.4	57.4	111.1	115.7	96.2
	0.4TCT-07	-160	20.31	10.24	8.33	10.87	11.94	41.3	0.7	42.0	98.1	98.9	82.9
	0.4TCT-08	-160	20.26	10.24	8.34	10.78	12.74	46.1	2.7	48.8	103.6	106.7	89.1

表 5.1.2-2 WPS 試験結果(その 3)

(e) 0.16TCT 試験片 (予荷重時)

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状				最大荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	弾性K K _e (MPa√m)	K _{JWPS} (MPa√m)	1T相当 K _{JWPS(1T)} (MPa√m)
			幅 W	厚さ B	正味厚さ B _N	き裂長さ a ₀							
PWR 比較標準材	0.16TCT-01	-50	8.02	4.02	4.02	4.10	2.01	13.9	36.6	50.5	56.0	106.7	74.7
	0.16TCT-02	-50	8.01	4.02	4.02	4.09	2.04	14.2	36.7	50.9	56.5	107.1	75.0
	0.16TCT-03	-50	8.02	4.03	4.03	4.12	2.04	14.3	35.9	50.2	56.8	106.4	74.5
	0.16TCT-04	-50	8.02	4.03	4.03	4.05	2.09	14.4	37.6	52.0	57.0	108.3	75.7
	0.16TCT-05	-50	8.02	4.03	4.03	4.07	2.06	14.1	37.3	51.4	56.3	107.7	75.3
	0.16TCT-06	-50	8.03	4.03	4.03	4.08	2.10	14.7	39.0	53.7	57.6	110.1	76.8
	0.16TCT-07	-50	8.01	4.03	4.03	4.07	2.08	14.4	38.9	53.3	56.9	109.6	76.5
	0.16TCT-08	-50	8.03	4.03	4.03	4.04	2.09	14.1	37.9	52.0	56.4	108.3	75.7

(f) 0.16TCT 試験片 (破壊時)

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状				最大荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	弾性K K _e (MPa√m)	K _{Jc} (MPa√m)	1T相当 K _{Jc(1T)} (MPa√m)
			幅 W	厚さ B	正味厚さ B _N	き裂長さ a ₀							
PWR 比較標準材	0.16TCT-01	-160	8.02	4.02	4.02	4.10	2.87	27.4	2.8	30.2	79.9	83.9	60.3
	0.16TCT-02	-160	8.01	4.02	4.02	4.09	2.70	24.2	0.0	24.2	75.1	75.1	54.8
	0.16TCT-03	-160	8.02	4.03	4.03	4.12	2.73	24.9	0.0	24.9	76.2	76.2	55.5
	0.16TCT-04	-160	8.02	4.03	4.03	4.05	2.40	18.3	0.0	18.3	65.2	65.2	48.6
	0.16TCT-05	-160	8.02	4.03	4.03	4.07	2.85	26.2	1.0	27.2	78.1	79.6	57.6
	0.16TCT-06	-160	8.03	4.03	4.03	4.08	2.88	26.8	0.0	26.8	79.0	79.0	57.2
	0.16TCT-07	-160	8.01	4.03	4.03	4.07	2.74	24.3	0.0	24.3	75.2	75.2	54.9
	0.16TCT-08	-160	8.03	4.03	4.03	4.04	2.84	25.2	0.0	25.2	76.6	76.6	55.7

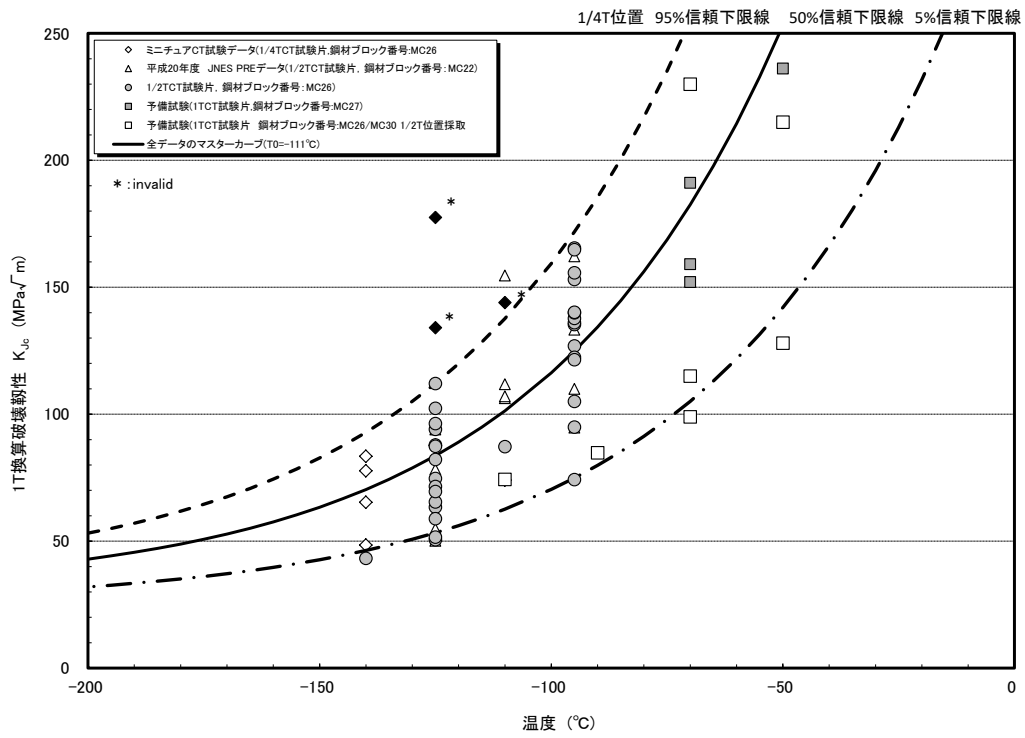
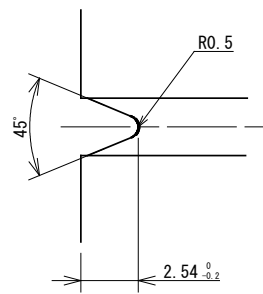
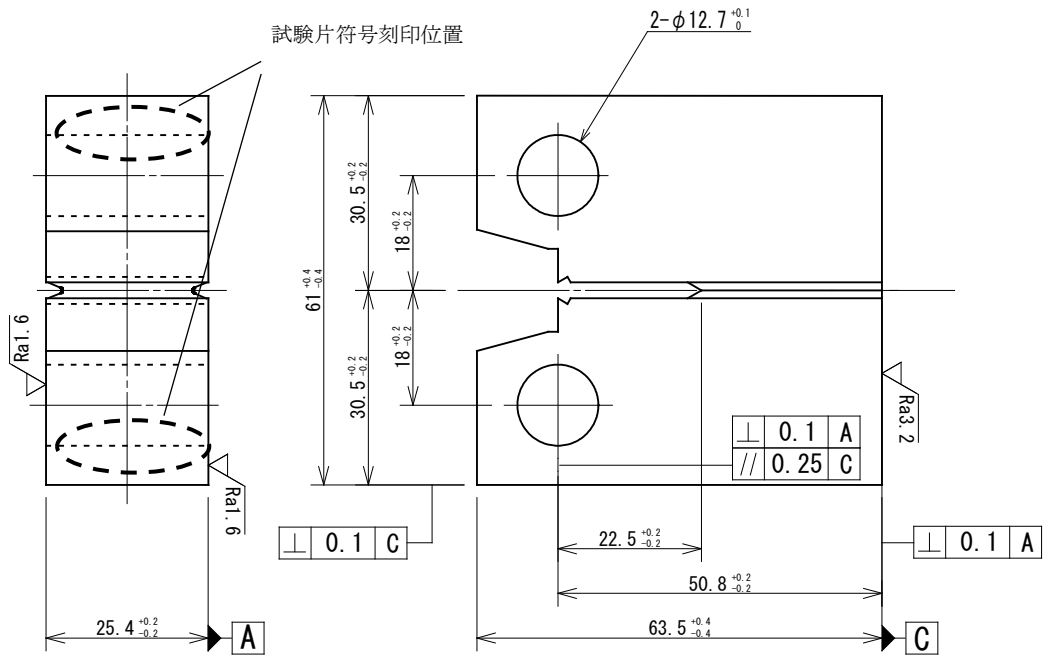
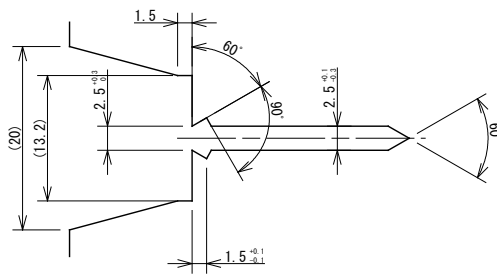


図 5.1.2-1 PWR 比較標準材の破壊靱性試験結果(1/4T、3/4T 採取位置)



サイドグリーブ部 詳細

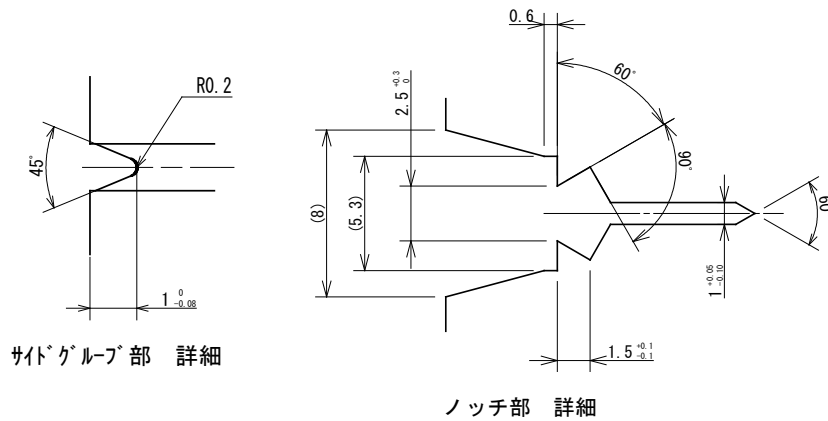
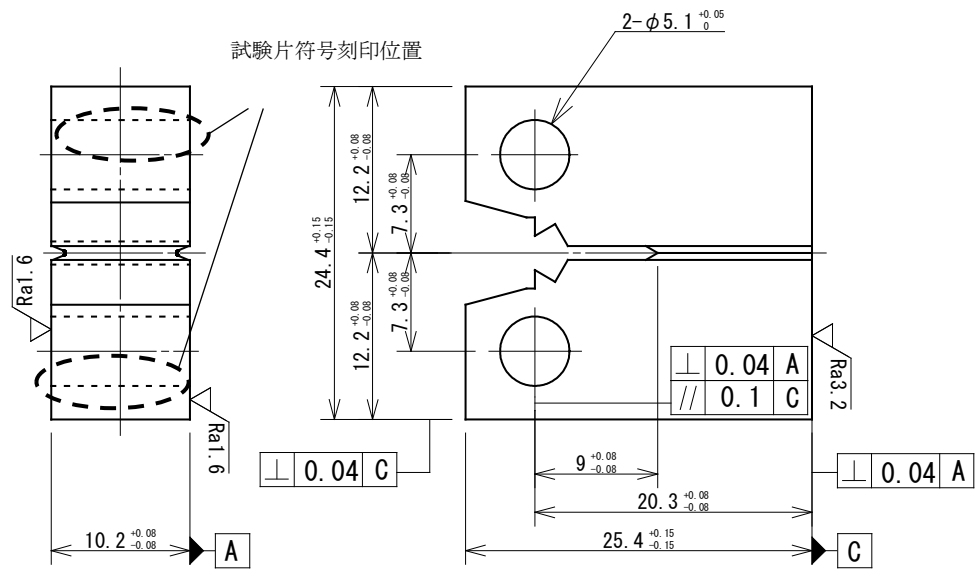


ノッチ部 詳細

単位(mm)

(a) 1TCT 試験片

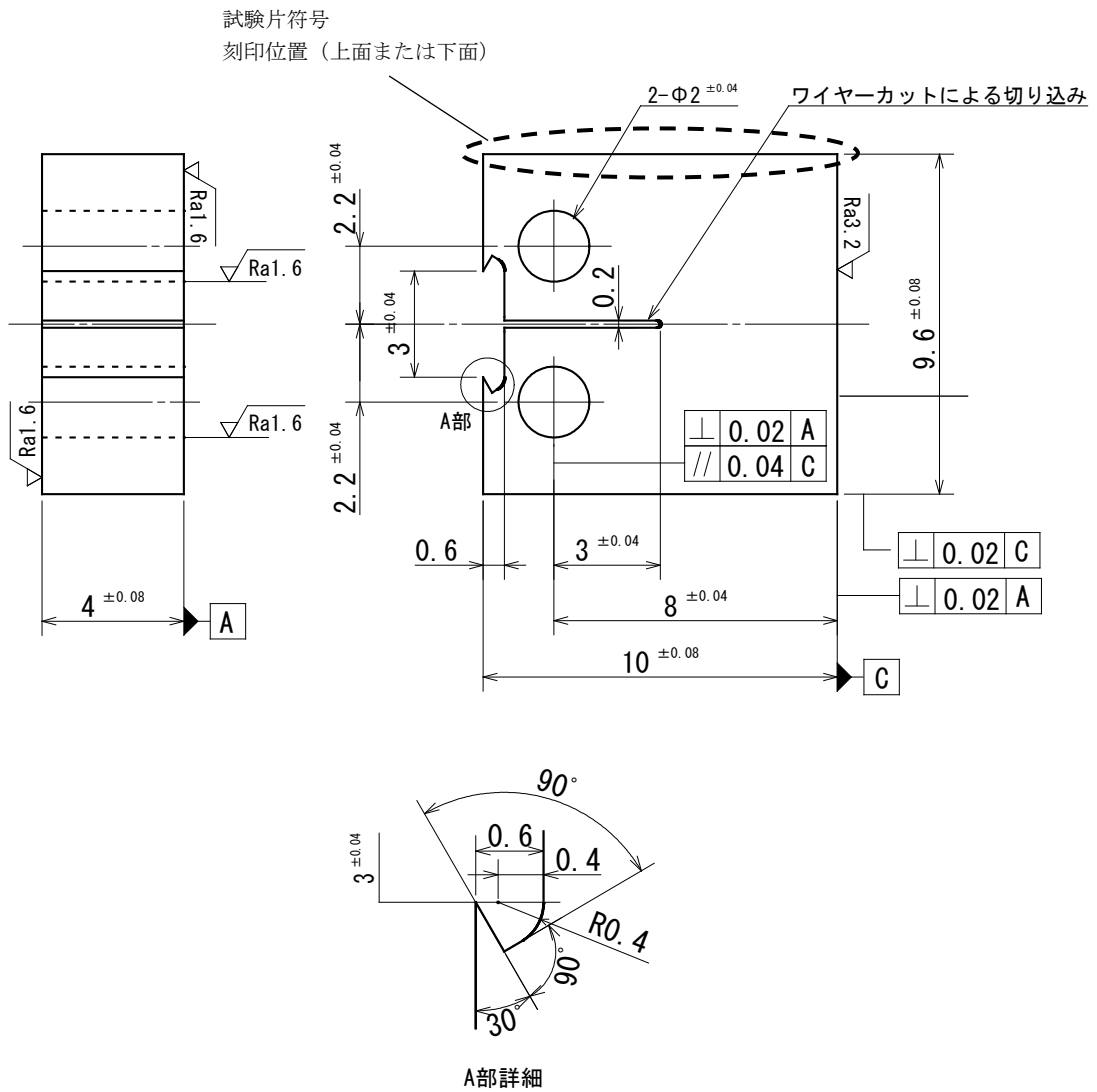
図 5.1.2-2 CT 試験片の形状及び寸法(その 1)



単位(mm)

(b) 0.4TCT 試験片

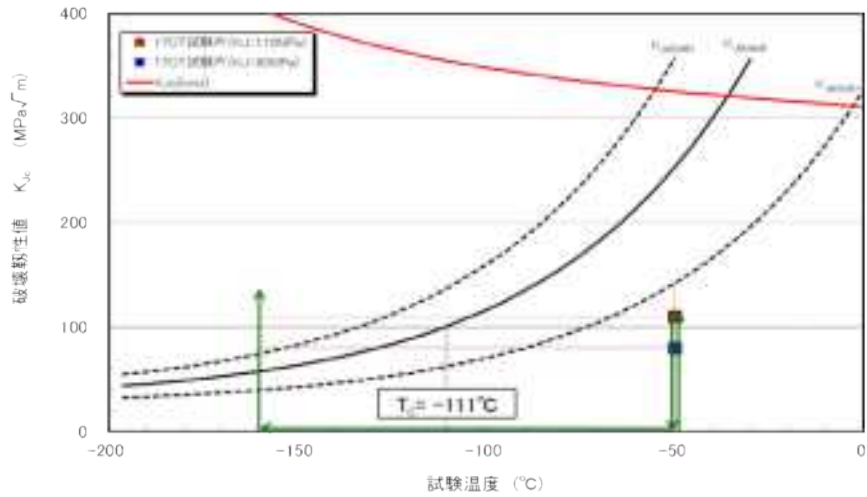
図 5.1.2-2 CT 試験片の形状及び寸法(その 2)



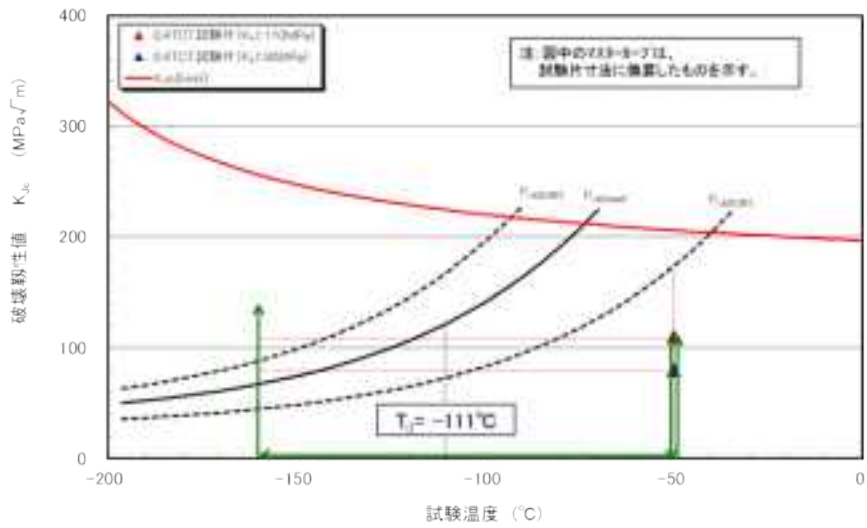
単位(mm)

(c) 0.16TCT 試験片

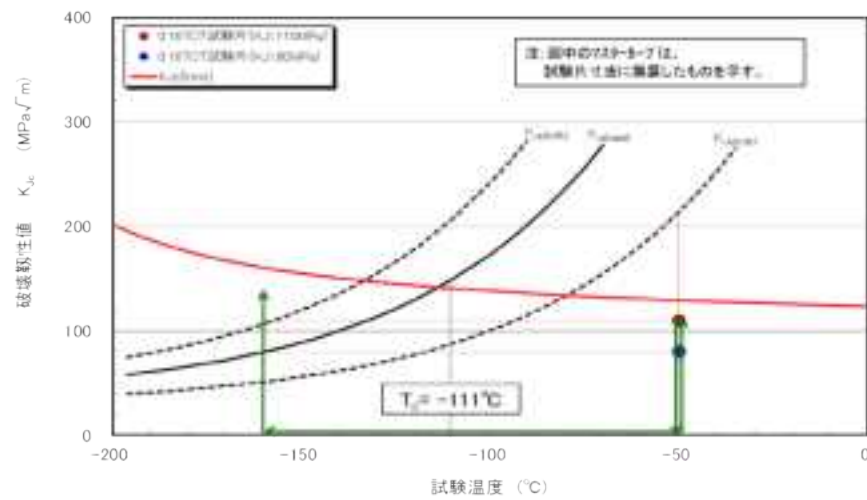
図 5.1.2-2 CT 試験片の形状及び寸法(その 3)



(1T-CT 試験片)

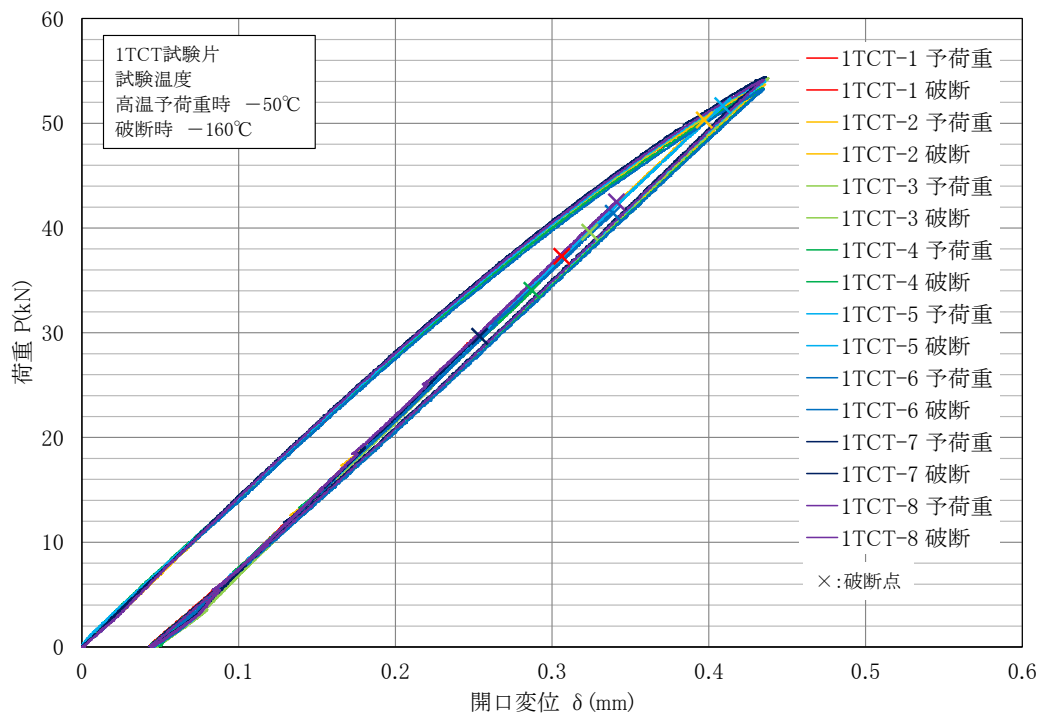


(0.4T-CT 試験片)

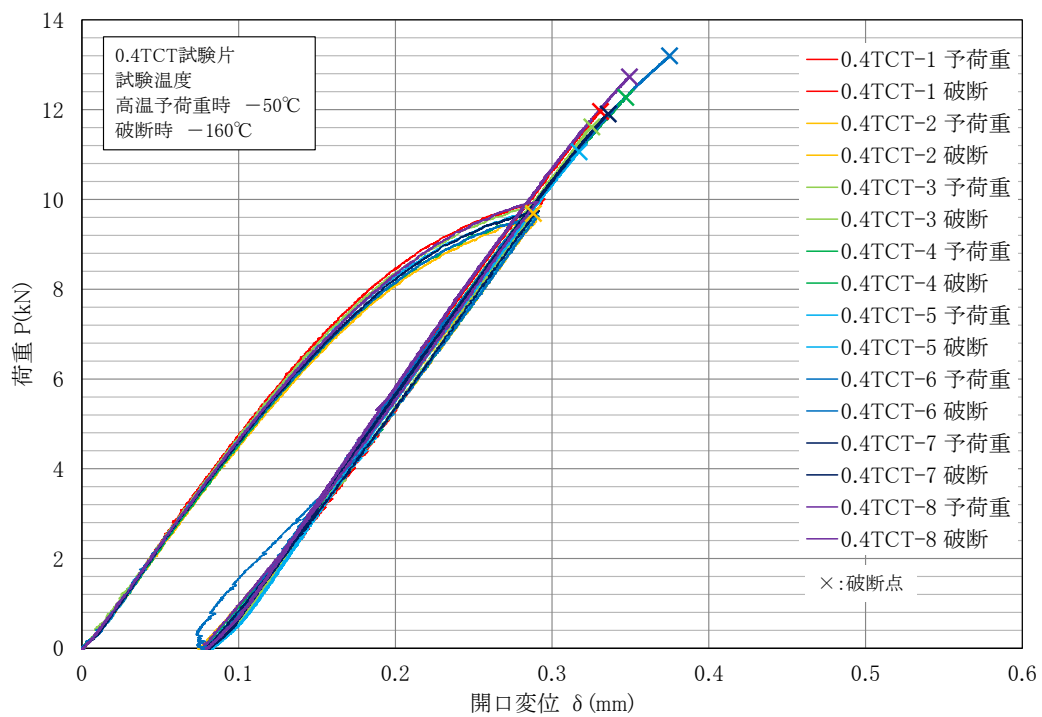


(0.16T-CT 試験片)

図 5.1.2-3 WPS 試験の波形(LUCF サイクル)とマスターカーブとの関係

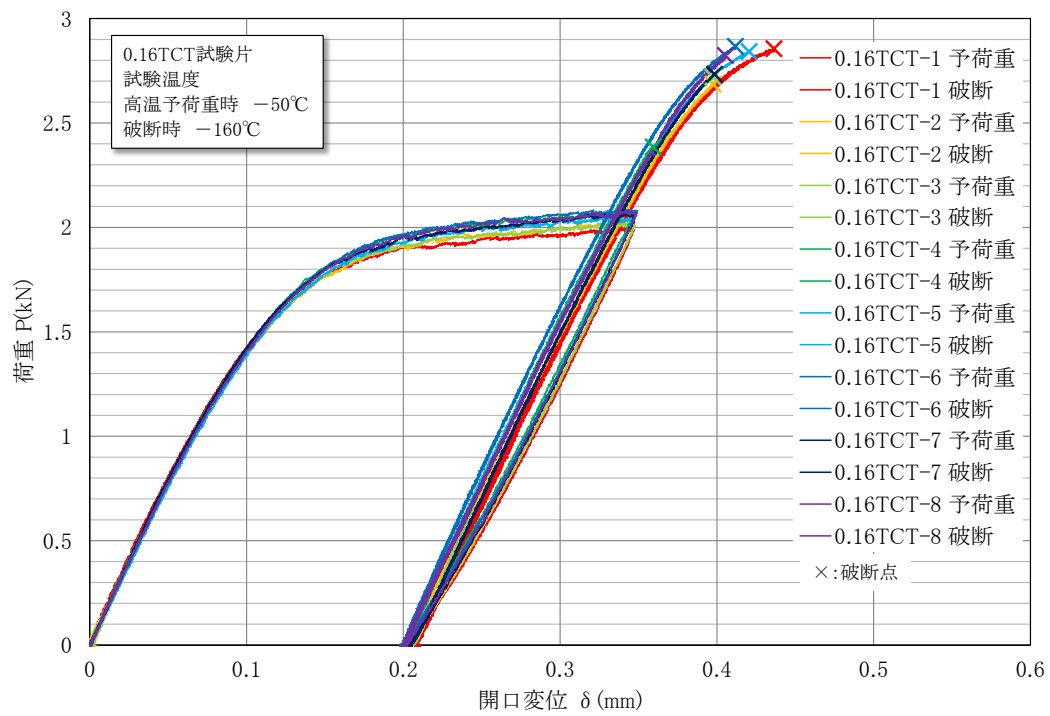


(1TCT 試験片)



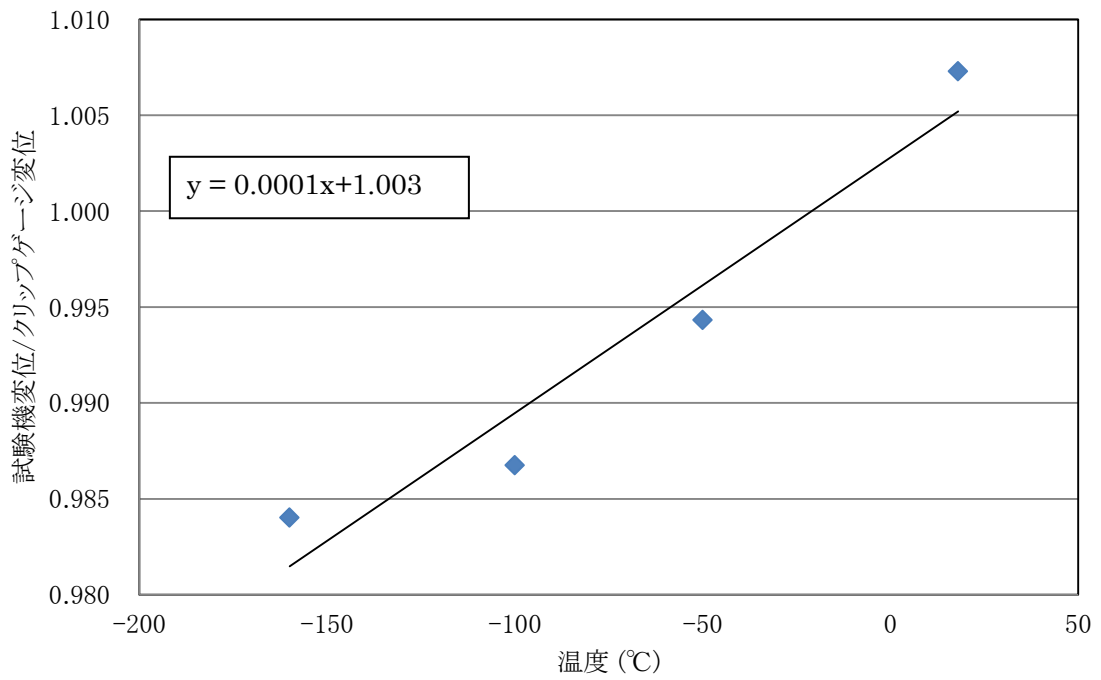
(0.4TCT 試験片)

図 5.1.2-4 荷重-開口変位の関係(その 1)

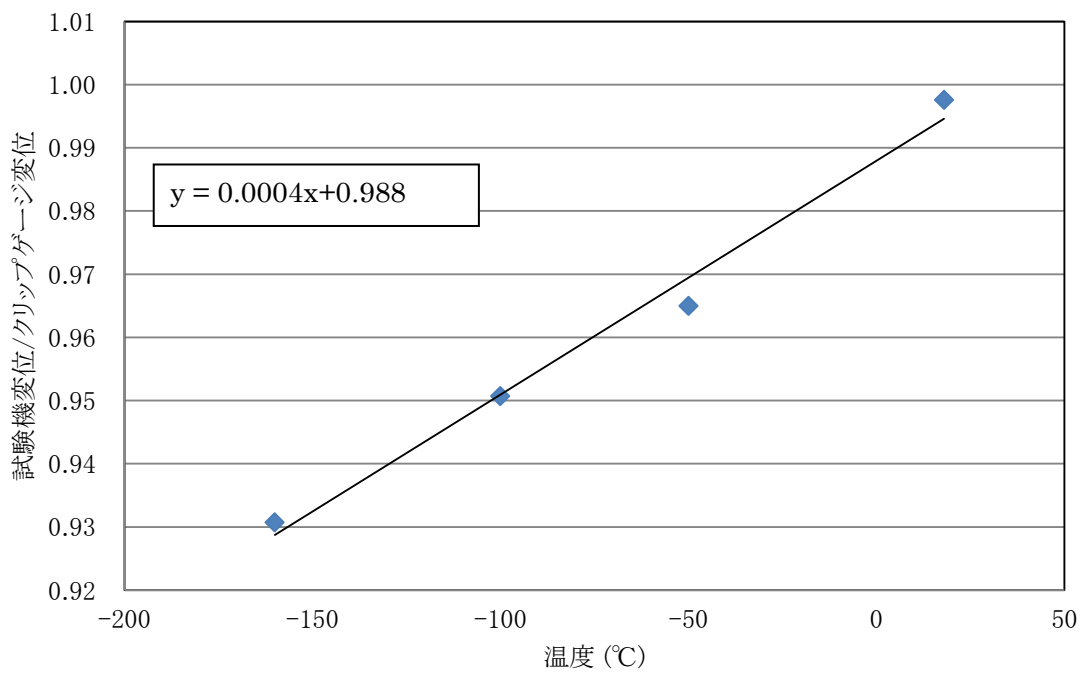


(0.16T-CT 試験片)

図 5.1.2-4 荷重-開口変位の関係(その 2)



(a) 1T-CT 試験片, 0.4T-CT 試験片用 (G.L.=2.5mm)



(b) 0.16T-CT 試験片用 (G.L.=3.0mm)

図 5.1.2-5 伸び計出力-温度の関係

破面				
ID	1TCT-01	1TCT-02	1TCT-03	1TCT-04
破面				
ID	1TCT-05	1TCT-06	1TCT-07	1TCT-08

図 5.1.2-6 破面観察結果 (その 1)









破面				
ID	0.4TCT-01	0.4TCT-02	0.4TCT-03	0.4TCT-04
破面				
ID	0.4TCT-05	0.4TCT-06	0.4TCT-07	0.4TCT-08

図 5.1.2-6 破面観察結果 (その 2)



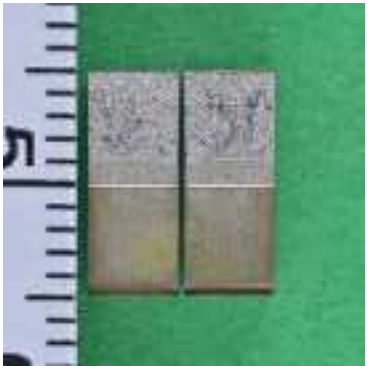
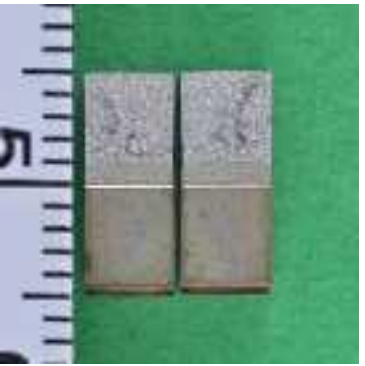




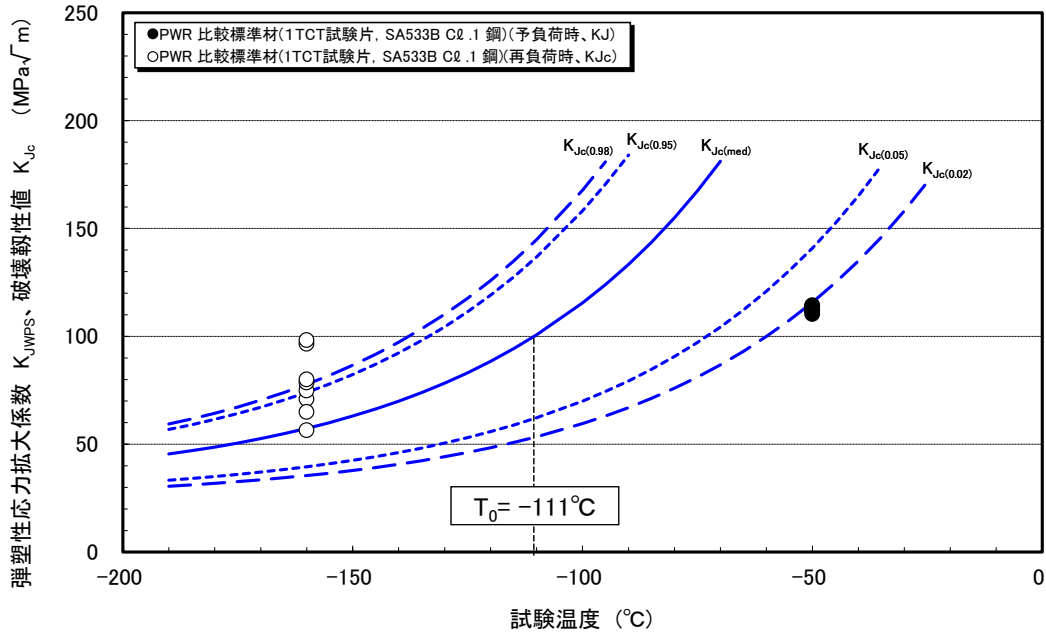
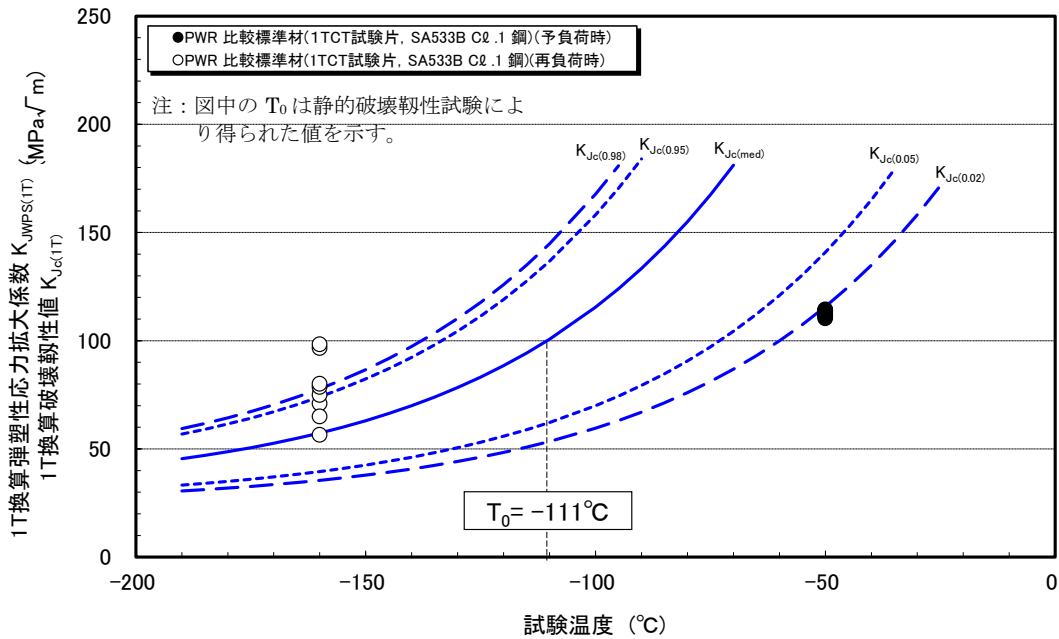
破面				
ID	0.16TCT-01	0.16TCT-02	0.16TCT-03	0.16TCT-04
破面				
ID	0.16TCT-05	0.16TCT-06	0.16TCT-07	0.16TCT-08

図 5.1.2-6 破面観察結果 (その 3)

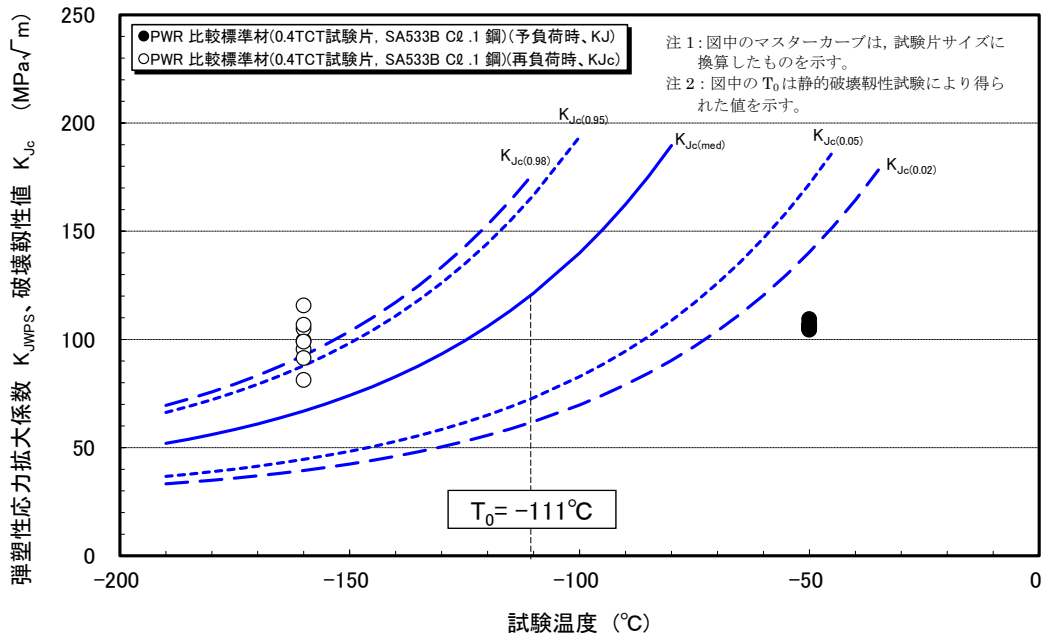


(a) 1TCT 試験片

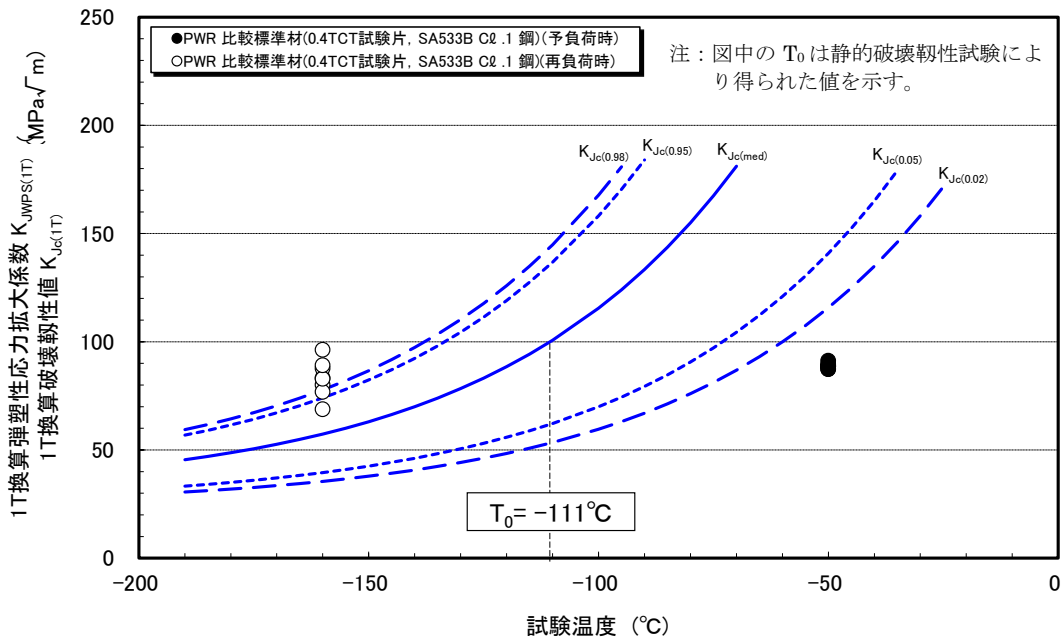


(b) 1TCT 試験片 (1T 換算)

図 5.1.2-7 試験結果とマスターカーブの関係(その 1)

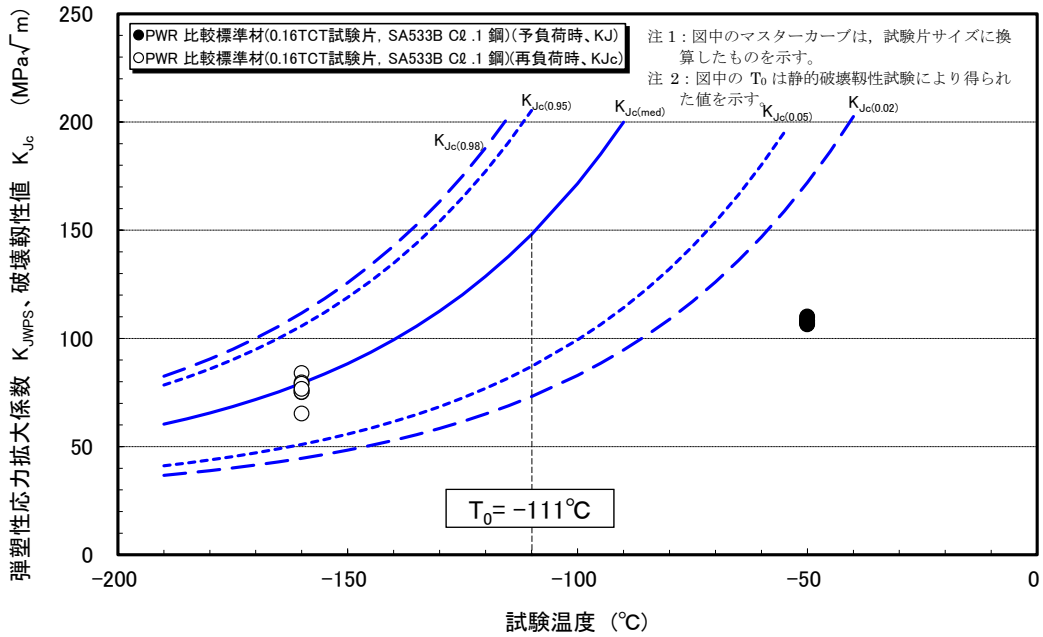


(c) 0.4TCT 試験片

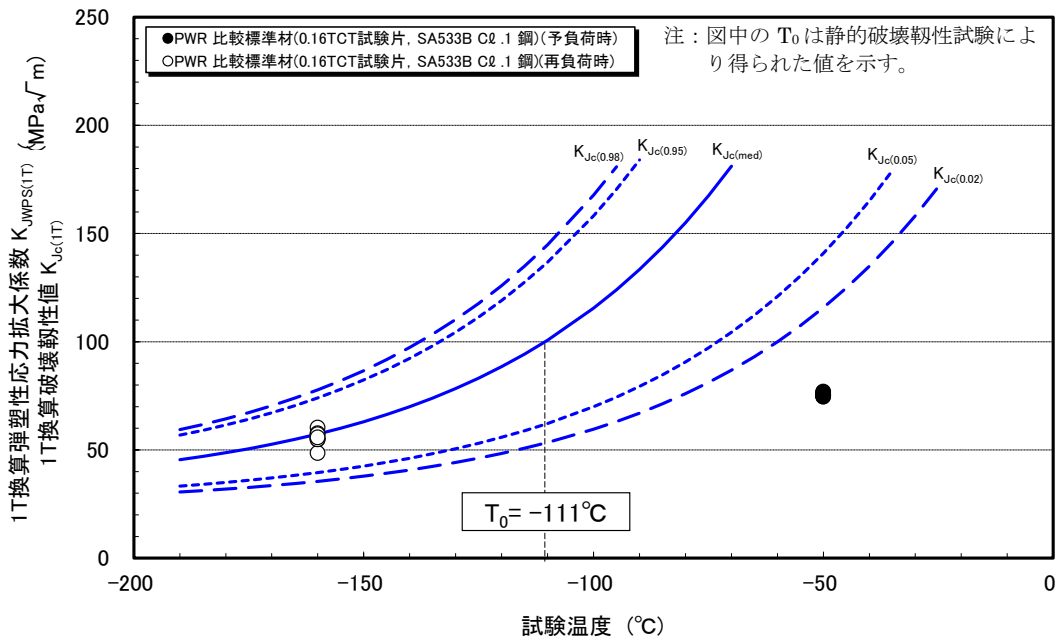


(d) 0.4TCT 試験片 (1T 換算)

図 5.1.2-7 試験結果とマスターカーブの関係(その 2)

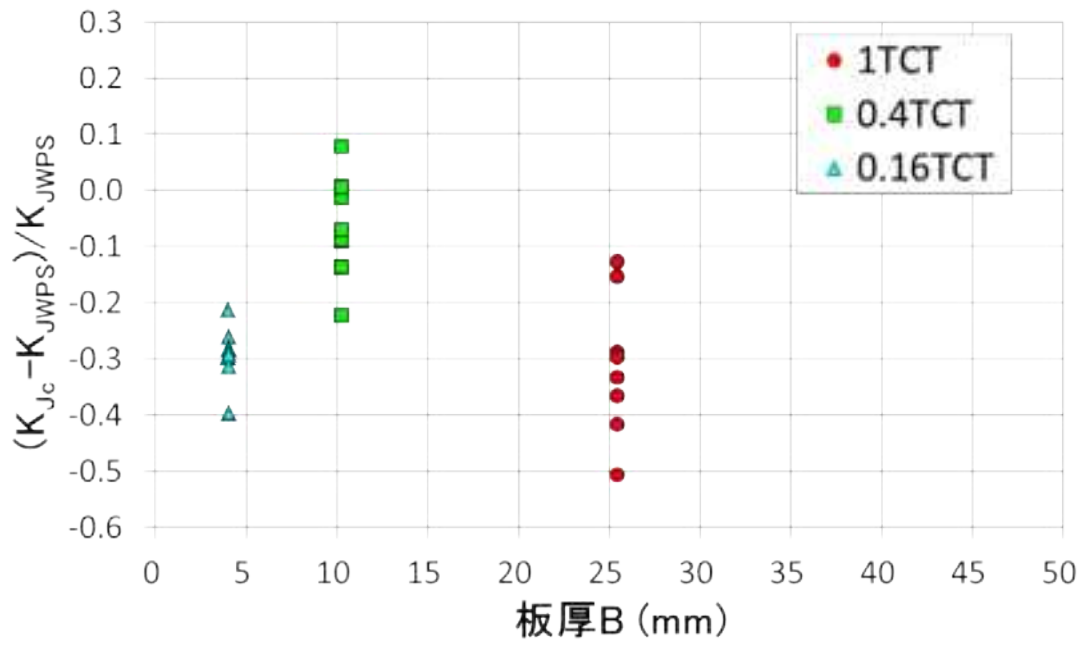


(e) 0.16TCT 試験片

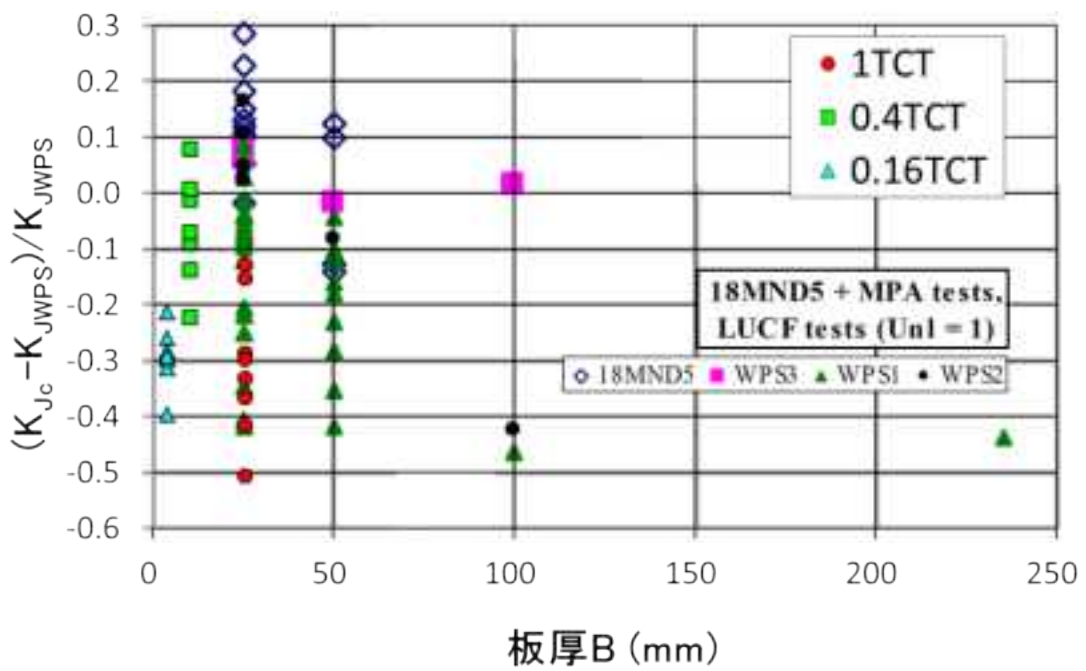


(f) 0.16TCT 試験片 (1T 換算)

図 5.1.2-7 試験結果とマスターカーブの関係(その3)

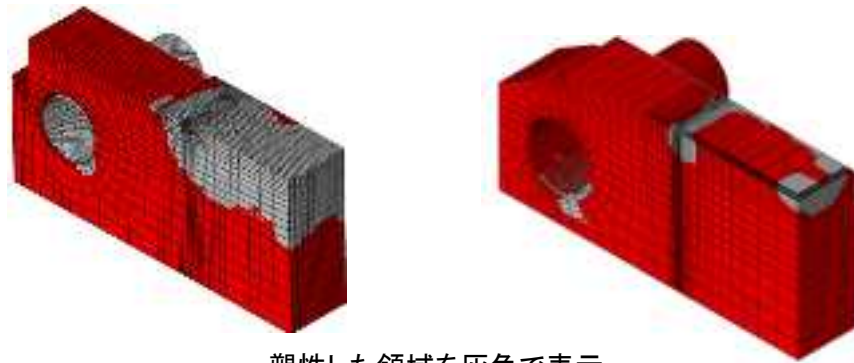


(a) 今回の試験結果



(b) 文献データ (5.1.2-2) との比較

図 5.1.2-8 $(K_{Jc} - K_{JWPS}) / K_{JWPS}$ と板厚との関係



塑性した領域を灰色で表示

0.16T-CT 板厚 4 mm

1T-CT 板厚 25.4 mm

図 5.1.2-9 予荷重除荷後の塑性変形領域

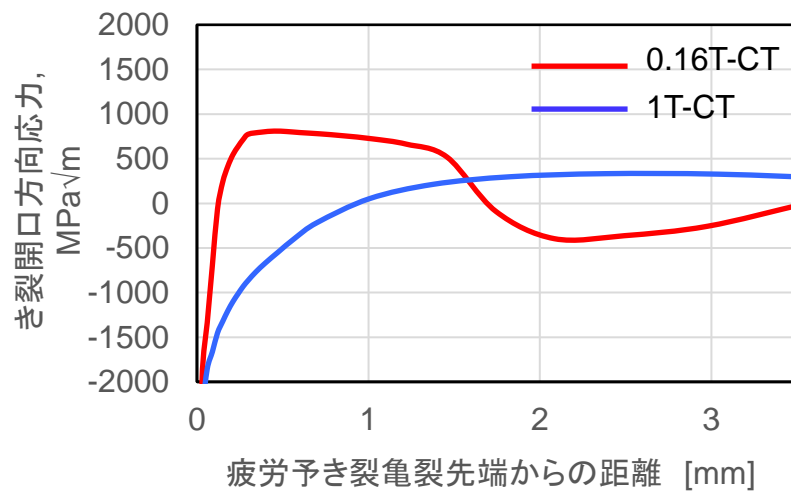


図 5.1.2-10 予荷重除荷後のリガメント部の残留応力分布

5.1.2.2 WPS 効果の解析的検討

平成 25 年度の WPS 効果に対する LA 法の適用に関して、国内外の文献を調査した結果、WPS 荷重負荷後の低温域への遷移領域における塑性ひずみの考慮が必要であることが確認された。LA 法のモデルとして適用されている Beremin モデルは単調荷重条件における評価として適用されており、WPS サイクルのような除荷を含む荷重条件ではそのまま適用するには課題があり、W. Lefevre らにより修正 Beremin モデルが提案されている^(5.1.2-3)。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、破壊が進行するという考え方を導入することで、温度依存性を考慮したへき開破壊モデルとしている。

本項では、WPS 効果の予測に対する LA 法適用に関して、修正 Beremin モデルを適用したプログラムの試解析を行い、前項 5.1.2.1 で実施した WPS 効果の寸法依存性の確認試験データとの比較検証を行った。また、昨年度の WPS 試験条件(6 条件)においても同様の解析を行った。

(1) 解析モデル

本解析で用いた 1T-CT 試験片の形状を図 5.1.2-11 に示す。試験片はき裂長さ a と試験片のピンから背面までの距離の比 (a/W) が 0.5 となるように予き裂をモデル化した。解析モデルを図 5.1.2-12 に示す。本解析では FEA コードとして Abaqus を用いた。FEA モデルは 1/4 対称モデルとし、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図 5.1.2-13 に示すように、サイドグループ部のき裂先端近傍については、3 軸方向それぞれで 10 要素は一つの要素の大きさが $0.03\text{mm} \times 0.03\text{mm} \times 0.03\text{mm}$ となるように分割した。CT 試験片に荷重を負荷するため、ピン部には仮想的に要素を作成した。また、WPS 試験の除荷時に塑性ひずみの残留に伴うき裂面上要素の変形により、対称面を超えて要素が変形する現象を抑えるために、図 5.1.2-14 のようにき裂面上に板状の剛体壁を作成した。

(2) 材料物性

本解析で用いた材料物性値を表 5.1.2-3、真応力-真ひずみ線図を図 5.1.2-15 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を使用した。また、真ひずみが 0.1 を超える領域については真ひずみが 0.09 から 0.1 の間の傾きを延長して与えた。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)^(5.1.2-1)の解説 MCT-1300 記載の次式を用いて与えた。

$$E = 202100 - 62.6 \times T$$

ここで、E : ヤング率 (MPa)、T : 温度 (°C)

なお、材料物性で対応する温度が存在しない計算条件の場合、本評価で用いた解析コード

Abaqus では以下の条件の材料物性が適用される。

- 20℃より高い温度：20℃の物性値
- 20℃～-50℃：20℃と-50℃の物性値を線形補間した物性値
- -50℃～-100℃：-50℃と-100℃の物性値を線形補間した物性値
- -100℃～-150℃：-50℃と-100℃の物性値を線形補間した物性値
- -150℃より低い温度：-150℃の物性値

(3) 荷重・境界条件

解析モデルへの荷重負荷条件を図 5.1.2-16 に示す。荷重はピン穴中心の線上に存在する節点をダミー節点に拘束して X 軸並進自由度が一定の変位となるように定義した。

境界条件を図 5.1.2-17 に示す。本解析は 1/4 モデルを用いたため、き裂面、及び試験片中央面に対称条件を設定した。また、ピン穴中心の節点には Y 軸並進方向を拘束した。

温度は FEA モデルの節点全てに一律で負荷した。

ここで J 積分値は除荷過程では正しく評価できないことから、以下の手順で評価を行った。

- ① WPS 荷重までの J 積分値は弾塑性解析結果にて評価
- ② WPS 荷重時における塑性分の J 積分値を弾塑性解析結果の J 積分値と弾性解析結果の J 積分値から次式にて評価

$$J_{PLASTIC}(F_{WPS}) = J_{ELASTIC-PLASTIC}(F_{WPS}) - J_{ELASTIC}(F_{WPS}) \quad (5.1.2-8)$$

ここで、

$J_{PLASTIC}(F_{WPS})$: WPS 荷重時における塑性分の J 積分値

$J_{ELASTIC-PLASTIC}(F_{WPS})$: WPS 荷重時の弾塑性解析結果の J 積分値

$J_{ELASTIC}(F_{WPS})$: WPS 荷重時の弾性解析結果の J 積分値

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

$$J(F_{after-WPS}) = J_{ELASTIC}(F_{after-WPS}) + J_{PLASTIC}(F_{WPS}) \quad (5.1.2-9)$$

ここで、

$J(F_{after-WPS})$: WPS 荷重以降の J 積分値

$J_{ELASTIC}(F_{after-WPS})$: WPS 荷重以降の弾性解析結果の J 積分値

$J_{PLASTIC}(F_{WPS})$: WPS 荷重時における塑性分の J 積分値

(4) 解析条件

解析条件を表 5.1.2-4 に示す。解析条件は大別して 3 つあり、条件 A は材料固有のワイブルパラメータ m 、及び σ_u の算出を目的とし、条件 B は本年度 5.1.2.1 項で実施した単純な波形の WPS 試験(LUCF: Load→Unload→Cool→Fracture)を想定し、条件 C は平成 25 年度の WPS 試験 6 種を想定したものである。

条件 A の荷重条件を表 5.1.2-5 に示す。条件 A ではワイブルパラメータの取得に必要となる、累積破壊確率に対する J 積分値を包括できる荷重を単調に負荷した。

条件 B の荷重条件を表 5.1.2-6 に示す。荷重の大きさは目標とする J 積分値(K_J)相当の値が出力される荷重値を試解析によって求め、予荷重として負荷した。

条件 C の荷重条件を表 5.1.2-7 に示す。また、条件 C の解析ステップの概念を図 5.1.2-18 に示す。条件 C の 6 通りの条件は、Point1、Point2 での温度、荷重条件が異なる。

(5) ワイブル応力評価方法

ワイブル応力は、FEA 結果からワイブル応力(Weibull stress) σ_w を求めるプロセスと、パラメータ m に関する反復計算のプロセスにて算出する。 σ_w は Beremin モデルに基づき、次式で定義される。

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_u} = \left[\frac{1}{V_0} \int_V \left(\frac{\sigma_I}{\sigma_u} \right)^m dV \right]^{\frac{1}{m}} \quad (5.1.2-10)$$

ここで、 V_f : 破壊プロセスゾーンの体積

V_0 : マイクロクラックが平均的に 1 個含まれる材料の破壊基本体積

σ_{eff} : プロセスゾーン内の有効応力(例えば最大主応力)

m : 材料定数(マイクログラックの寸法分布のみに依存)

積分範囲 V は σ_I 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 σ_u を消去した次式がワイブル応力の式として表される。

$$\sigma_w = \left[\frac{1}{V_0} \int_V \sigma_I^m dV \right]^{\frac{1}{m}} \quad (5.1.2-11)$$

このワイブル応力 σ_w で評価したき裂材の脆性破損確率は破壊時のワイブル応力 $\sigma_{w, cr}$ を用いて、次式に示す材料固有の 2 母数 Weibull 分布に従う。

$$P_f(\sigma_w, cr) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_w, cr}{\sigma_u}\right)^m\right] \quad (5.1.2-12)$$

しかしながら、上述の Beremin モデルは単調荷重条件における評価であり、WPS 試験のような除荷を含む荷重条件ではそのまま適用するには問題がある。そこで、W. Lefevre らによりき裂先端領域の塑性ひずみが増加しているときのみ破壊が進行するという考え方を導入し、温度依存性を考慮したへき開破壊モデルに修正したモデルが提案されている。具体的には、荷重除荷が発生する場合、図 5.1.2-19(2)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^(5.1.2-3,-4)が提唱されている。

$$\sigma_w = \sigma_u(\theta_{ref}) \times \left[\frac{1}{V_0} \int_V \max_{(u \leq t, \dot{p}(t) > 0)} \left\{ \left(\frac{\sigma_I(t)}{\sigma_u(\theta)} \right)^m \right\} dV \right]^{\frac{1}{m}} \quad (5.1.2-13)$$

ここで、 $\sigma_I(t)$: ある時刻 t におけるプロセスゾーン内の有効応力(例えば最大主応力)

$\dot{p}(t)$: 累積塑性変形増分

$\sigma_u(\theta)$: 温度依存性を考慮したへき開特性応力

θ_{ref} : 参照温度(オリジナルの Beremin モデルと等価となる温度)

ここでは累積塑性変形 \dot{p} が増加した場合のみ、ワイブル応力を更新する。また更新の際も数値の最大を取り続けるためワイブル応力が減少することはない。条件 B、C の解析評価では修正 Beremin モデルに基づく評価を実施した。また、き裂材の脆性破壊確率は、次式に示す材料固有の 2 母数 Weibull 分布に従うことから、脆性破損確率を P_f とすると、 $\ln(1/1-P_f)$ と σ_w が傾き m の直線関係となり、 σ_w が求まれば次式から破損確率が求められる。

$$P_f(\sigma_w, cr(t)) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_w, cr(t)}{\sigma_u(\theta_{ref})}\right)^m\right] \quad (5.1.2-14)$$

(6) ワイブルパラメータ設定条件

ワイブルパラメータ m 、 σ_u を求めるために使用した K_{Jc} 値および J 積分値を表 5.1.2-8 に示す。これらのパラメータ値は参照温度が -110°C となるマスターカーブから求めた値である。

(7) ワイブルパラメータ算出計算結果

図 5.1.2-20 に試験片中央(FE モデル対称面上)におけるき裂前方のき裂開口方向応力分布、図 5.1.2-21 にき裂前方の最大主応力分布を示す。図 5.1.2-22 にき裂前方 0.1mm 位置での最大主応力の板厚方向分布を示す。また、図 5.1.2-23 にワイブル応力と J 積分値の関係、図 5.1.2-24 に破壊限界ワイブル応力分布を示す。

各温度域において求めたワイブルパラメータを表 5.1.2-9 に示す。ワイブルパラメータ m 値は-110、-50℃のときは 14.2 で同じであったが、-160℃の場合、59.6 と非常に高い値であった。一般的に、構造用鋼の m 値は 10~50 程度の範囲(5.1.2-5)とされており、マスターカーブにおける破壊靱性値の差が小さくなったことで収束性が悪くなったことが要因と考えられる。なお、m 値は温度に依存しない係数(5.1.2-6)とも報告されていることから、m 値は 14.2 一定としてワイブル応力の算出を行った。

一方、 σ_u に関しては、図 5.1.2-25、5.1.2-26 に示すように遷移温度以上の領域において温度依存性があり、温度が高くなるにつれて σ_u は高くなる(5.1.2-7、8)とされている。今回の評価結果でも-50℃では σ_u が高くなる傾向が見られている。以上の結果を考慮して、WPS 解析(条件 B、C)に適用する最終的なワイブルパラメータとして、表 5.1.2-10 に示す値を適用した。なお、各温度の間は線形補間することによって値を与えた。

(8) WPS 試験条件におけるワイブル応力評価結果

WPS 試験条件である条件 B、C について、前項で求めた表 5.1.2-10 のワイブルパラメータ m、 σ_u 値を使用してワイブル応力評価を行った。

図 5.1.2-27 に解析と試験の荷重-開口変位を重ね書きしたものを示す。解析結果は試験片の荷重-開口変位のことをよく再現できていることを確認している。

図 5.1.2-28~図 5.1.2-34 にワイブル応力-荷重関係、ワイブル応力- K_J 関係を示す。グラフには解析結果として修正 Beremin モデルでの評価結果に加えて、-160℃(C1、C2 は-130℃)条件での単調引張の解析評価結果と、従来の Beremin モデルによる評価結果を重ねて表示した。合わせて、単調引張での解析評価結果に対する累積破損確率 5%、50%、95%相当のワイブル応力をグラフに実線(50%)、点線(5、95%)にて追記している。

図 5.1.2-28~図 5.1.2-34 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累積破損確率に表現し直したグラフを図 5.1.2-35~図 5.1.2-41 に示す。累積破損確率- K_J 関係のグラフには、マスターカーブによる設定値も追記している。

図 5.1.2.2-42~図 5.1.2.2-55 に相当塑性ひずみとき裂開口方向応力について、モデル全体とき裂近傍拡大のコンタ図を示す。き裂開口方向応力は-800~1600MPa の範囲を 12 分割してコンタを色分けし、相当塑性ひずみは 0~0.24 の範囲で 12 分割してコンタ図を作成した。コンタ図は表 5.1.2-6、表 5.1.2-7 の各条件の荷重の変化点で出力してお

り、各図の一番右側のコンタ図は、最大破断荷重値相当である。

条件 B1 では、WPS 試験の破壊時の K_J が、単調引張評価で累積破損確率が 90% となる K_J を超えることから、WPS 効果によって破壊靱性値が上昇していることが分かる。LA による解析結果においては、等しい K_J を負荷した時のワイブル応力は、単調引張時に比べ WPS 試験で低く、高い K_J を負荷しないと破壊限界ワイブル応力に達しないことから WPS 効果を模擬できていると考えられる。

条件 C1 は実機相当の PTS 過渡模擬条件である。破壊時の K_J は単調引張時に比べわずかに高くなっているが、 K_J が高くなるにつれて WPS 試験と単調引張試験の差が小さくなり、WPS 効果が小さくなる。

条件 C2 では単調引張評価で累積破損確率が 90% 以上となる K_J 以上で破壊しており、WPS 効果が確認できる。条件 C1 との比較から、予荷重が大きいことにより WPS 効果がより顕著に表れていることが確認できる。また、ワイブル応力を比較すると単調引張荷重に比べ WPS 試験では破壊に至る破壊限界ワイブル応力が高くなっている。

条件 C3～C6 についても、単調引張評価では破損確率が 80% 以上となる荷重以上で破壊しており、WPS 効果が確認できる。条件 C3 と条件 C2 から冷却温度による効果を比較すると、冷却温度が低い方が単調引張に比べ同じ K_J でのワイブル応力が低くなる傾向にあるが、予荷重による効果と比較すると軽微な差であった。また、条件 C3～条件 C6 から除荷時の K_J と破壊時の K_J 、及びワイブル応力を比較すると、除荷時の K_J が高いほど破壊時の K_J も高く、ワイブル応力でもその傾向を再現する結果が得られている。

条件 C1～C6 の中で C4、C6 における WPS 効果による破壊靱性値の増加が大きいことが、この違いについて、図 5.1.2.2-44～図 5.1.2.2-55 に示す応力・塑性ひずみコンタ図を比較した。条件 C4、C6 以外では除荷時にき裂先端周辺に高い圧縮応力が発生していること、再負荷時にき裂先端に生じるき裂開口方向応力がき裂先端の圧縮応力が大きいほど高いことがわかる。このことから、き裂先端の応力集中が緩和されることが WPS 効果による破壊荷重値の上昇につながっていると考えられる。その原因として、除荷時のき裂先端の圧縮応力分布(圧縮応力の大きさ、拡がり)やき裂の鈍化が考えられる。

以上のことから、修正 Beremin モデルを用いたワイブル応力評価により、WPS 効果による破壊靱性値の上昇が評価できることが確認された。また、本年度及び H25 年度に実施した試験結果と比較すると、試験ではワイブル応力の累積破損頻度の高い領域で破壊していることから、修正 Beremin モデルを用いたワイブル応力による破損確率は保守的な評価といえる。

本項目の修正 Beremin モデルに基づくワイブル応力評価では保守的に WPS 効果を再現できたが、WPS 時の破壊限界ワイブル応力や破壊靱性値のばらつきを精度よく評価できていないため、今後さらなる検討を進める。

参考文献

- (5.1.2-3) W.Lefevre et al., “A modified Beremin model to simulate the warm pre-stress effect” , Nuclear Engineering and Design 216, pp.27-42, (2002).
- (5.1.2-4) 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).
- (5.1.2-5) Minami et al., “Method of constraint loss correction of CTOD fracture toughness for fracture assessment of steel components” , Engineering Fracture Mechanics, 73, pp.1996-2020, (2006).
- (5.1.2-6) U.S.NRC, “Temperature Dependence of Weibull Stress Parameters: Studies Using the Euro-Material Similar to ASME A508 Class-3 Steel” , NUREG/CR-6930, (2007).
- (5.1.2-7) B.Tanguy et al., “Ductile to brittle transition of an A508 steel characterized by Charpy impact test. Part- II : modeling of the Charpy transition curve” , Engineering Fracture Mechanics, 72, pp.413-434, (2005).
- (5.1.2-8) B.Tanguy et al., “ Assesment of Pressure Vessel Steel Irradiation Embrittlement up to 40 Years using local approach to fracture modeling: Application to the French Surveillance Program ” , PVP2011-58020, Proceedings of ASME PVP2011, (2011).

表 5.1.2-3 各温度における物性値

温度 T (°C)	ヤング率 E (MPa)	ポアソン比 ν	降伏点応力 σ_y (MPa)	線膨張係数 α ($\times 10^{-6}$)
20	200848	0.3	488	12.62
-50	205230		536	
-100	208360		611	
-150	211490		751	

表 5.1.2-4 解析条件

	条件 番号	条件内容	計算 ステップ 数	温度 T(°C) の変化
ワイブル パラメータ 算出	A1	-50°C ワイブルパラメータ算出計算	1	-50
	A2	-110°C ワイブルパラメータ算出計算	1	-110
	A3	-160°C ワイブルパラメータ算出計算	1	-160
平成 26 年 度 WPS 試 験	B1	平成 26 年度 WPS 試験条件を模 擬	4	-50→-160
平成 25 年 度 WPS 試 験	C1	平成 25 年度 WPS 試験条件 条件 1 を模擬	3	0→-50→- 130
	C2	平成 25 年度 WPS 試験条件 条件 2 を模擬	3	0→-50→- 130
	C3	平成 25 年度 WPS 試験条件 条件 3 を模擬	3	0→-50→- 160
	C4	平成 25 年度 WPS 試験条件 条件 4 を模擬	3	0→-50→- 160
	C5	平成 25 年度 WPS 試験条件 条件 5 を模擬	3	0→-50→- 160
	C6	平成 25 年度 WPS 試験条件 条件 6 を模擬	3	0→-50→- 160

表 5.1.2-5 条件 A 荷重条件

条件番号	温度 T(°C)	最大負荷荷重 F(kN)
A1	-50	90
A2	-110	80
A3	-160	50

表 5.1.2-6 条件 B1 荷重条件

ステップ	温度及び K _J 値		荷重(kN)
	温度 T(°C)	K _J 値(MPa√m)	
Initial	-50	0	0
1	-50	110	53
2	-50	0	0
3	-160	0	0
4	-160	120 程度	60

表 5.1.2-7 条件 C 荷重条件

条件 番号	条件	Point1 降温と同時に負荷増加			Point2 降温と同時に負荷減少			確認事項	
		P _{JWP} s (kN)	K _{J WPS} (MPa√m)	温度 (°C)	P ₂ (kN)	K ₂ (MPa√m)	温度 (°C)		
C1	1	44.7	80	-50	0	0	-130	K 値(K _{J WPS})(実機相当)	
C2	2	61.5	110					-160	K 値(K _{J WPS})の影響
C3	3						温度の影響		
C4	4				55.9	100	負荷減少時の K ₂ 影響		
C5	5				14.0	25	負荷減少時の K ₂ 影響		
C6	6	32.4	58		負荷減少時の K ₂ 影響				

表 5.1.2-8 条件 A で使用した K_{Jc} 値と J 積分値

累積破損 確率 (%)	温度(°C)					
	-160(-150)		-110		-50	
	K_{Jc} 値 (MPa√m)	J 積分値 (kJ/m ²)	K_{Jc} 値 (MPa√m)	J 積分値 (kJ/m ²)	K_{Jc} 値 (MPa√m)	J 積分値 (kJ/m ²)
2.5	38.7	6.444E+00	55	1.321E+01	120.1	6.396E+01
5	42.3	7.699E+00	61.7	1.663E+01	139.4	8.616E+01
10	46.7	9.384E+00	70	2.140E+01	162.9	1.177E+02
20	52.2	1.172E+01	80.3	2.816E+01	192.4	1.641E+02
30	56.2	1.359E+01	87.8	3.367E+01	213.8	2.027E+02
40	59.6	1.528E+01	94.1	3.867E+01	232.1	2.389E+02
50	62.7	1.692E+01	100	4.367E+01	248.9	2.747E+02
60	65.8	1.863E+01	105.8	4.889E+01	265.4	3.123E+02
70	69.1	2.055E+01	111.8	5.459E+01	282.8	3.546E+02
80	72.8	2.280E+01	118.8	6.164E+01	302.5	4.057E+02
90	77.7	2.598E+01	128	7.156E+01	329	4.799E+02
95	81.6	2.865E+01	135.3	7.995E+01	350	5.432E+02
97.5	84.9	3.101E+01	141.5	8.745E+01	367.6	5.992E+02

表 5.1.2-9 条件 A で計算されたワイブルパラメータ

条件番号	温度 (°C)	m 値	σ_u (MPa)
A1	-50	14.2	2335
A2	-110	14.2	2148
A3	-160	59.6	2182

表 5.1.2-10 ワイブルパラメータ温度依存性

温度 (°C)	m 値	σ_u (MPa)
-50	14.2	2335
-110		2148
-160		2148

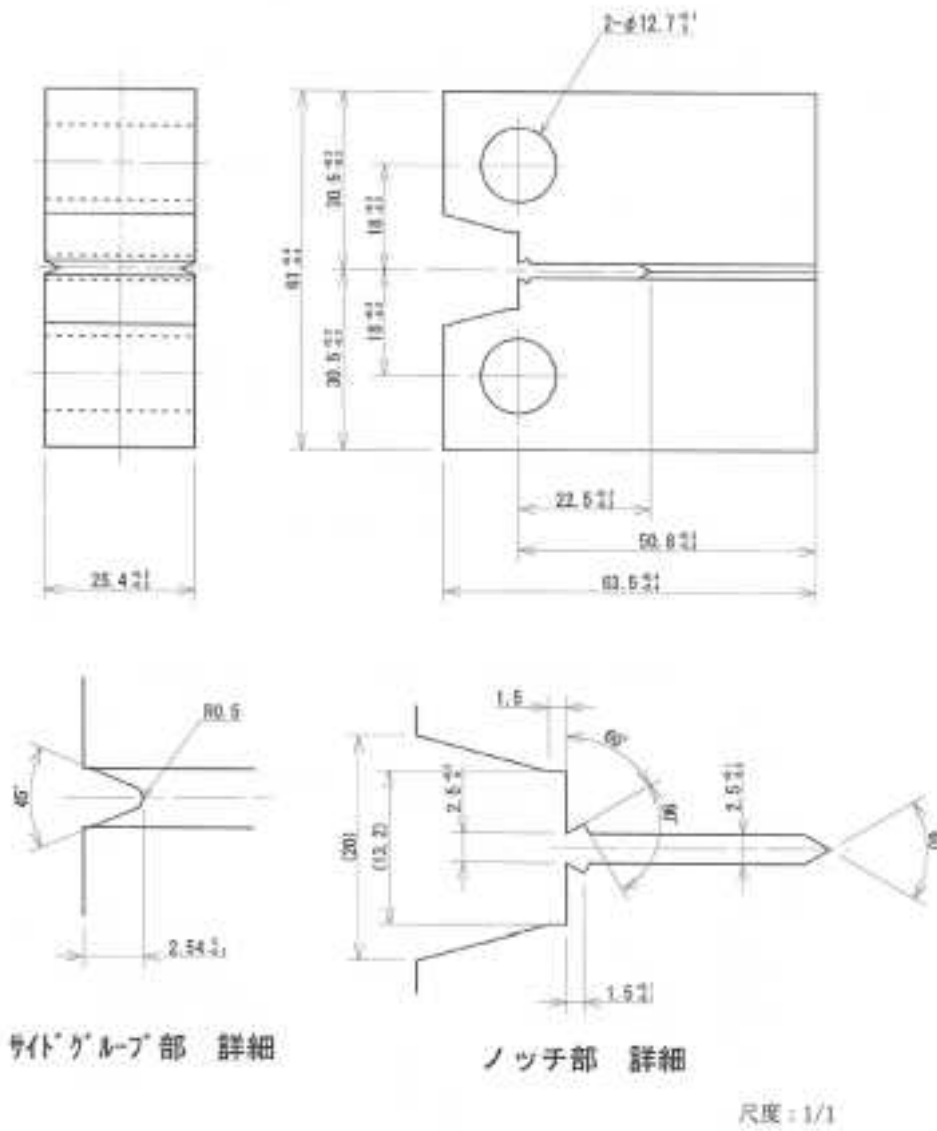


図 5.1.2-11 1T-CT 試験片形状

総節点数：146582
総要素数：136921

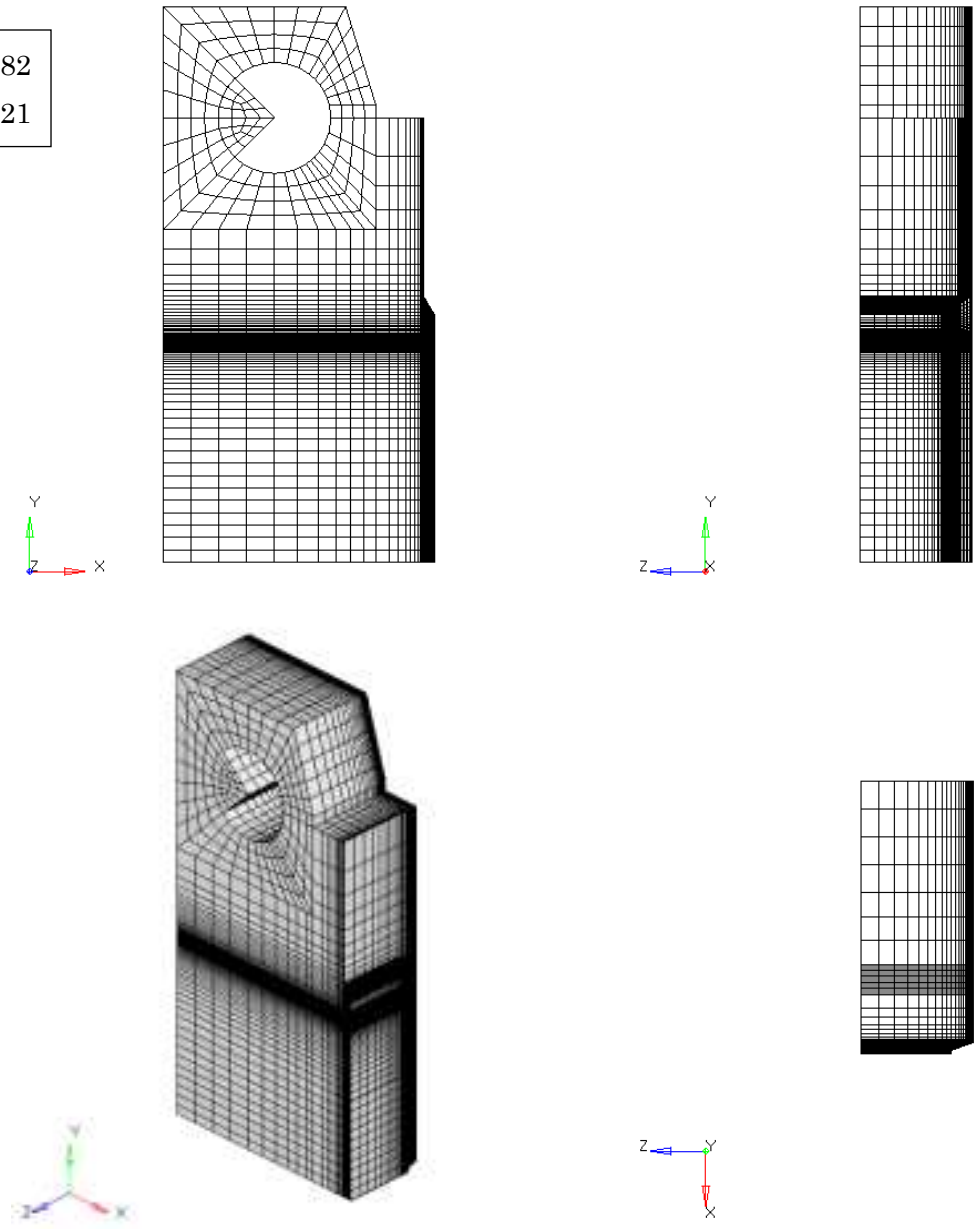


図 5.1.2-12 1T-CT 解析モデル

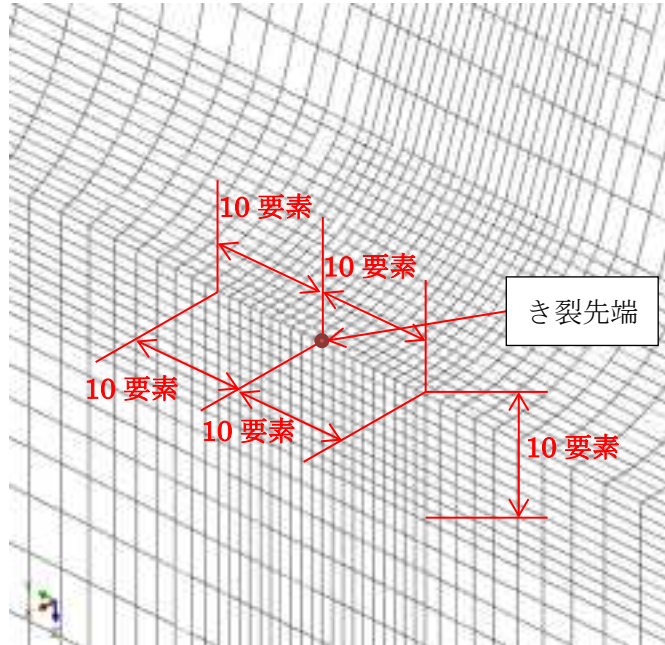


図 5.1.2-13 き裂先端近傍の分割

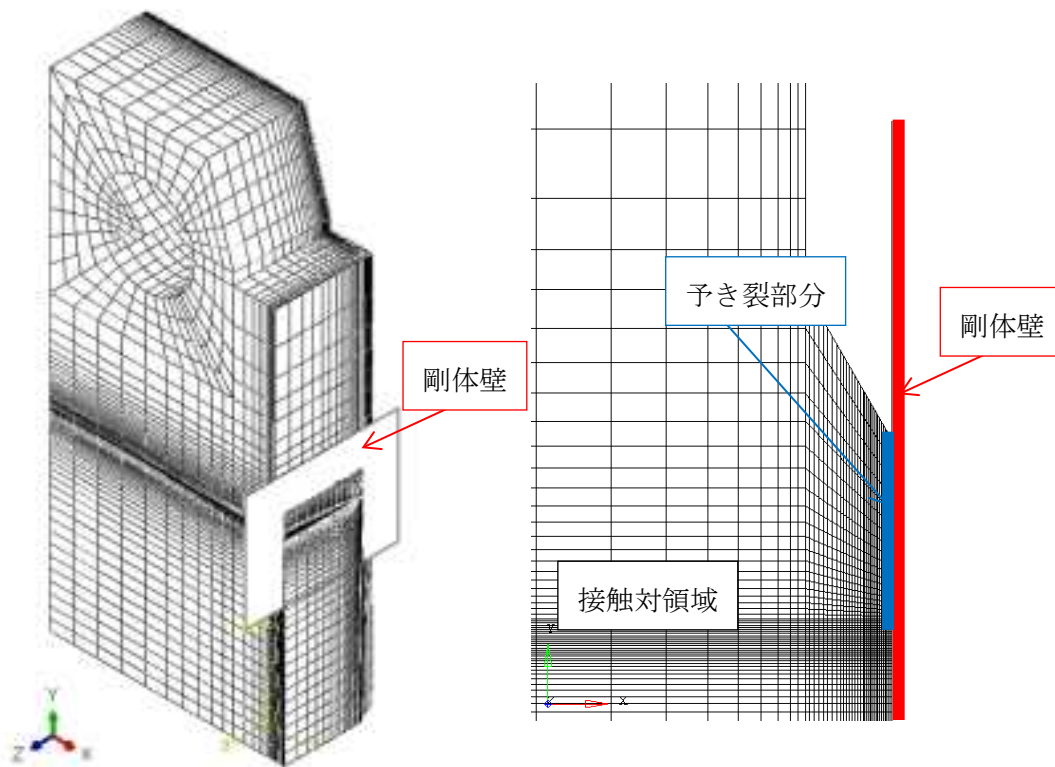
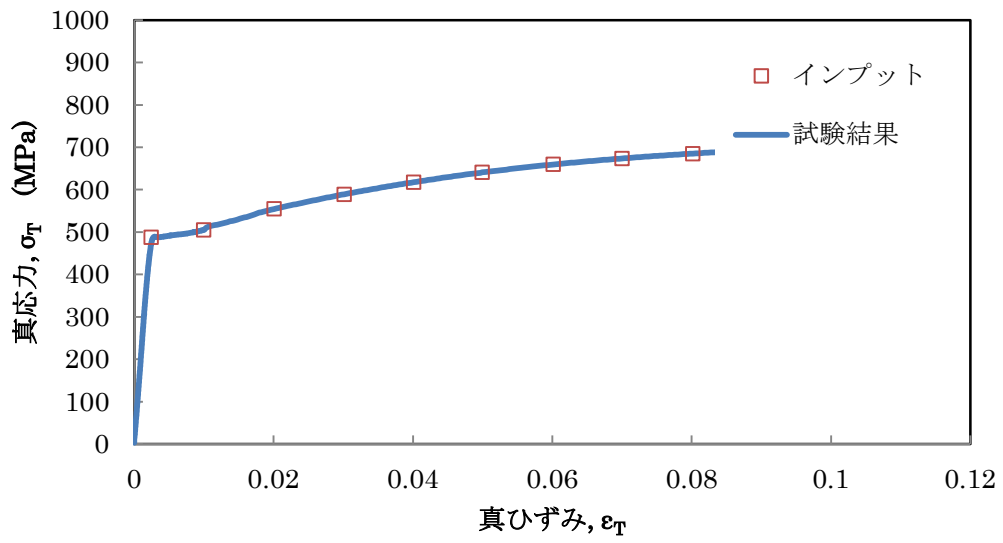
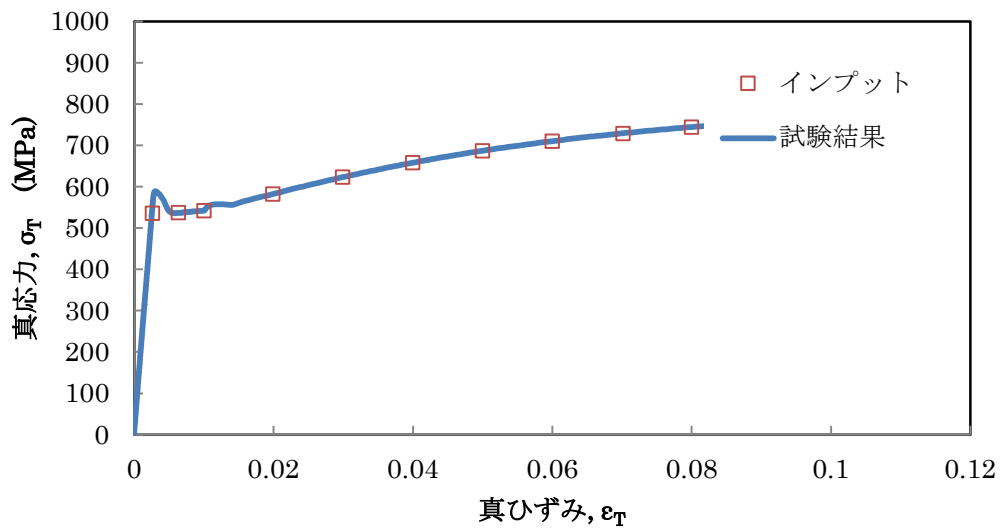


図 5.1.2-14 き裂面上の接触条件

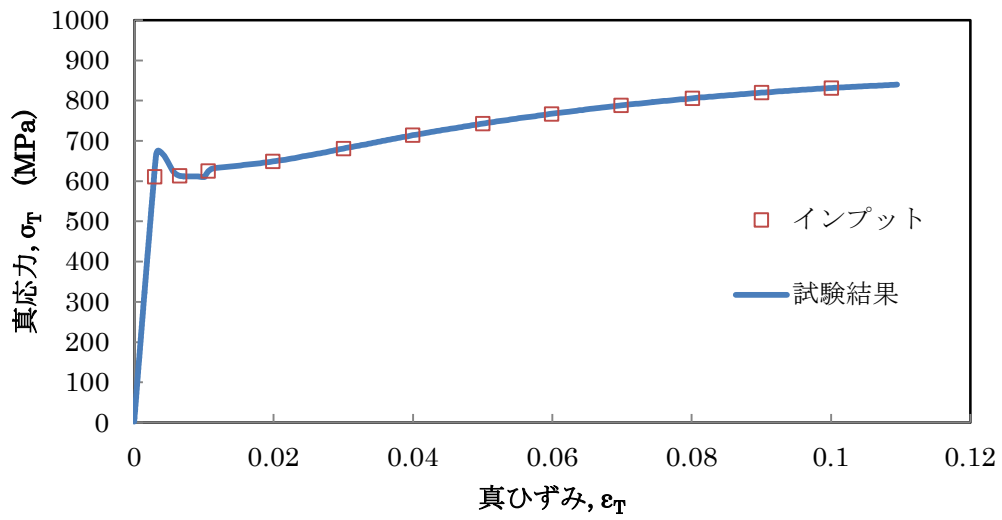


(a) 20°C

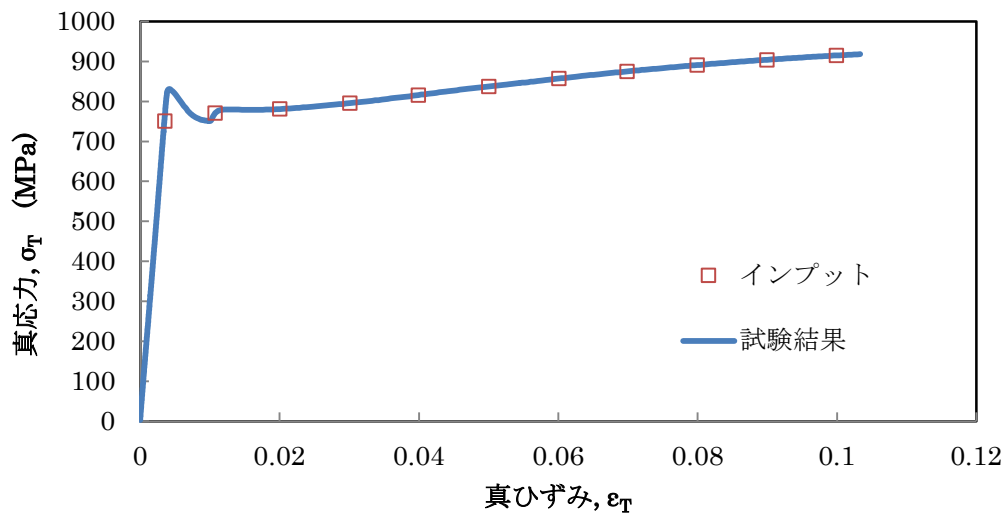


(b) -50°C

図 5.1.2-15(その 1) 真応力-真ひずみ線図



(c) -100°C



(d) -150°C

図 5.1.2-15(その 2) 真応力-真ひずみ線図

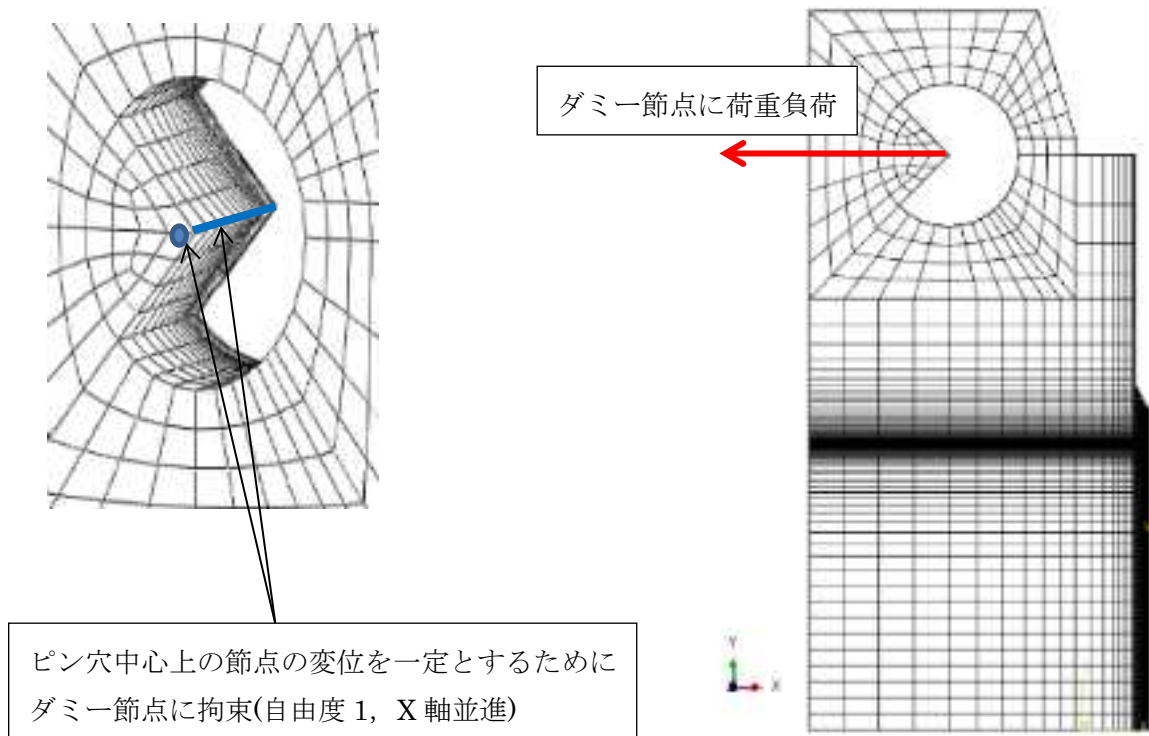


図 5.1.2-16 荷重負荷条件図

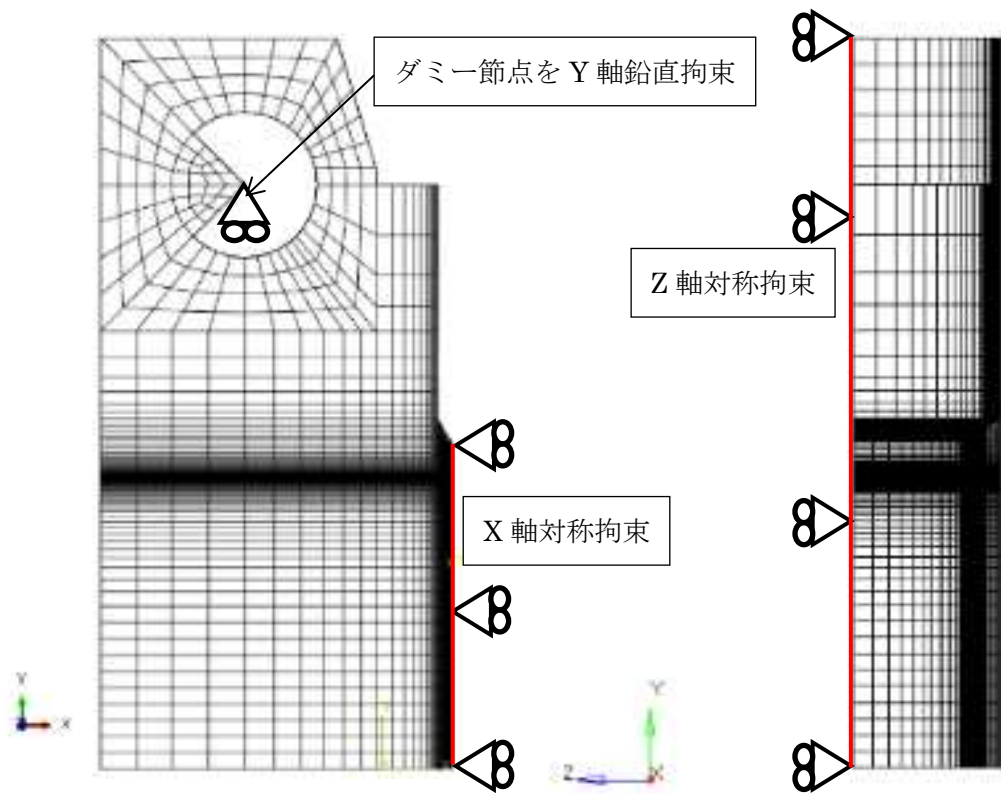


図 5.1.2-17 境界条件設定図

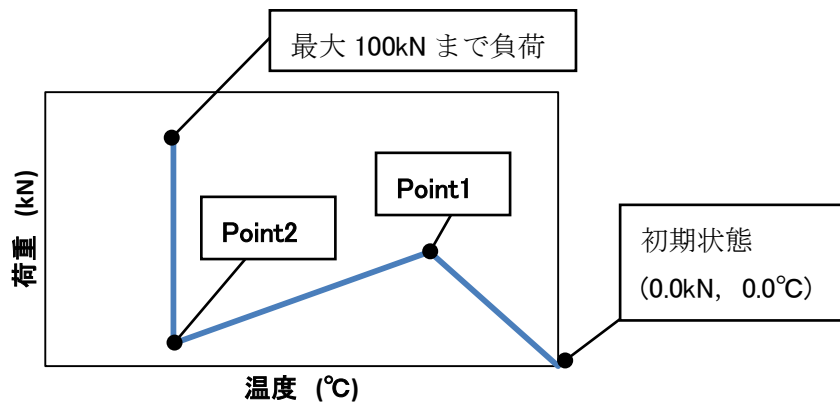
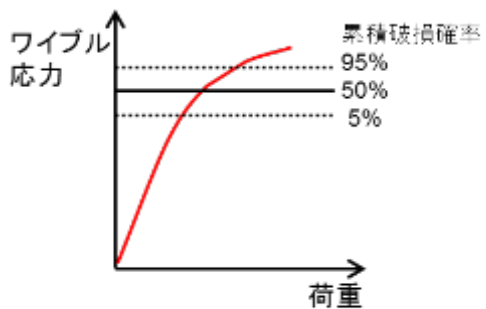


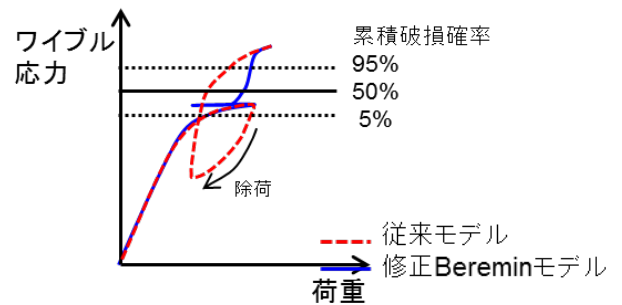
図 5.1.2-18 条件 C の計算条件の入力点の模式図

単調増加荷重の場合は、従来モデルと修正 Beremin モデルの違いはない

修正 Beremin モデルを用いることで、除荷時の累積破損確率の低下事象が避けられるため、適切な評価可能

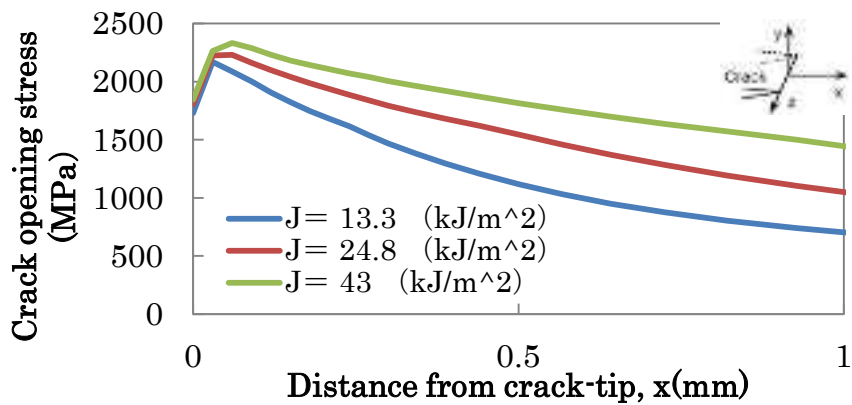


(1) 単調増加荷重の場合

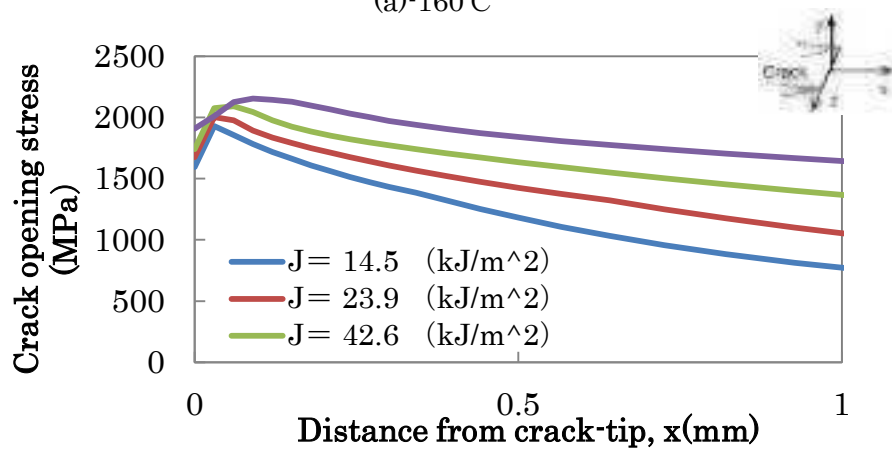


(2) 除荷が含まれる荷重負荷の場合

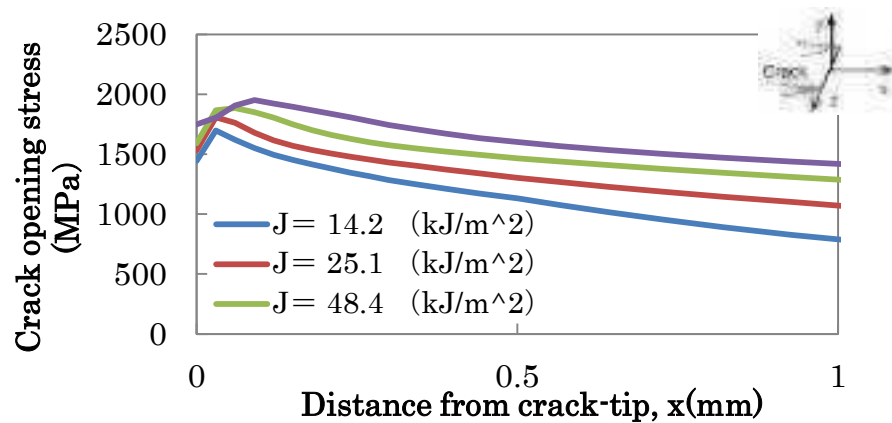
図 5.1.2-19 従来モデルと修正 Beremin モデルの違い



(a)-160°C

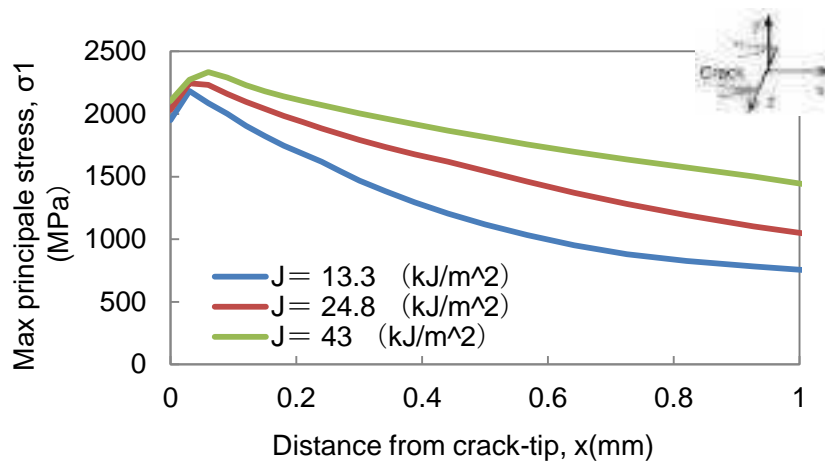


(b)-110°C

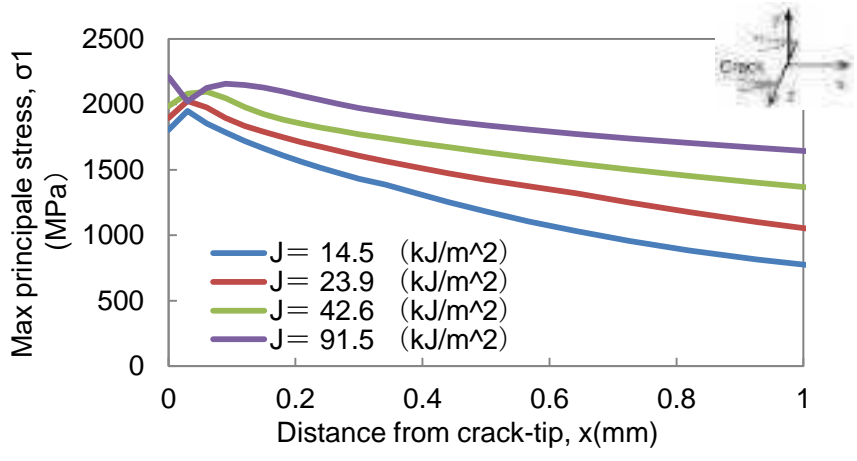


(c)-50°C

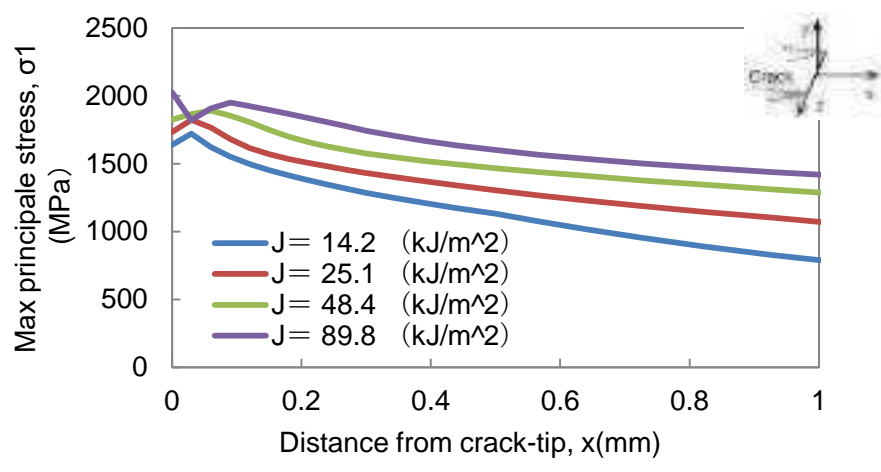
図 5.1.2-20 き裂前方のき裂開口方向応力分布



(a)-160°C

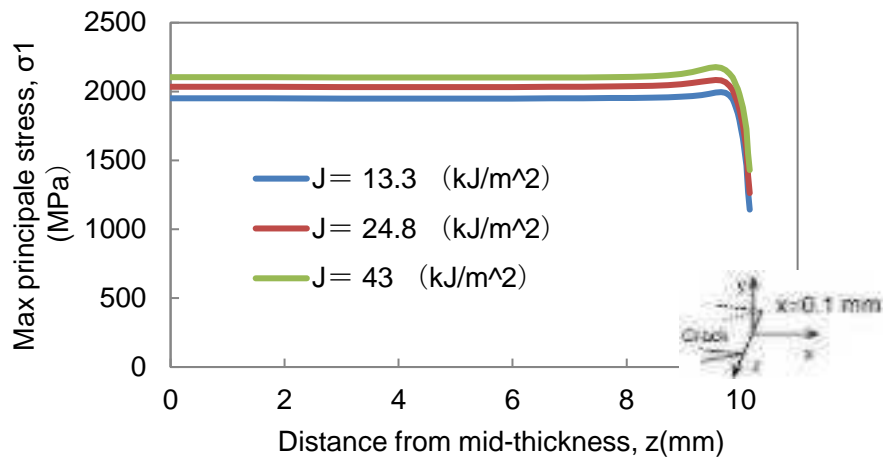


(b)-110°C

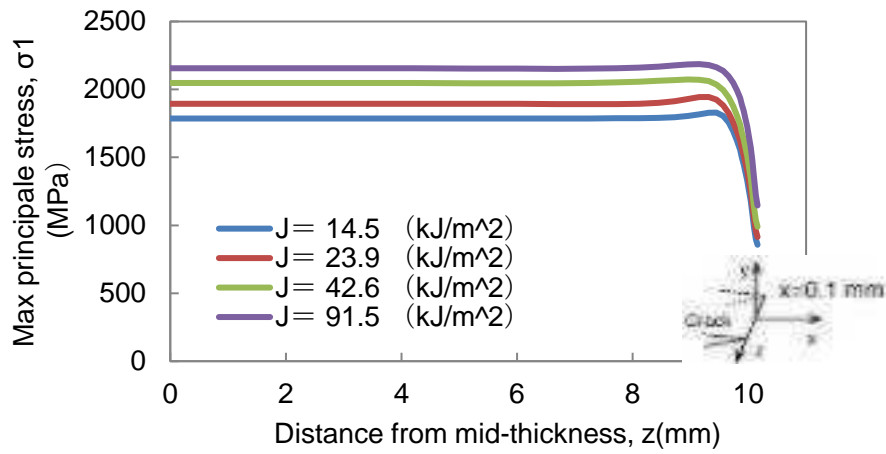


(c)-50°C

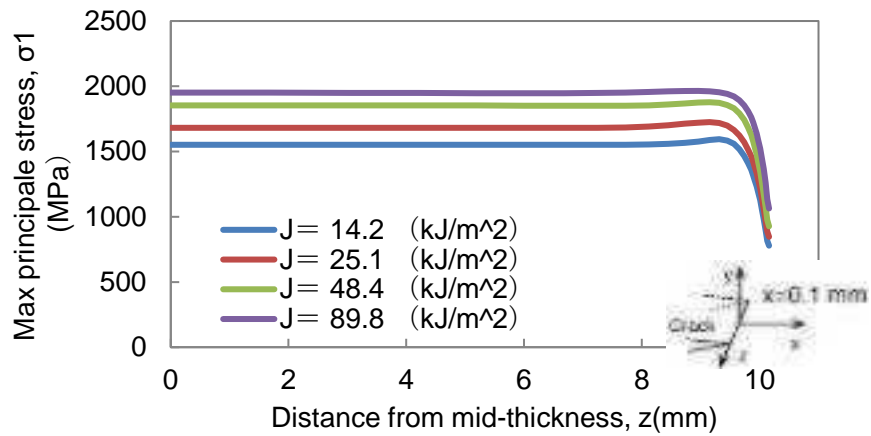
図 5.1.2-21 き裂前方の最大主応力分布



(a)-160°C

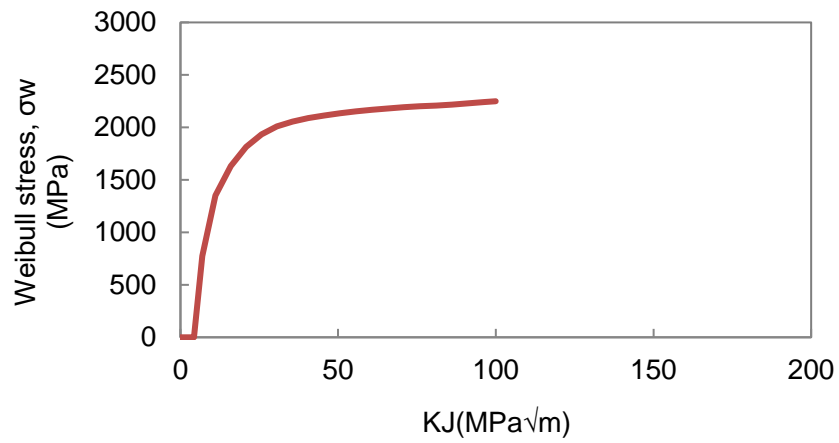


(b)-110°C

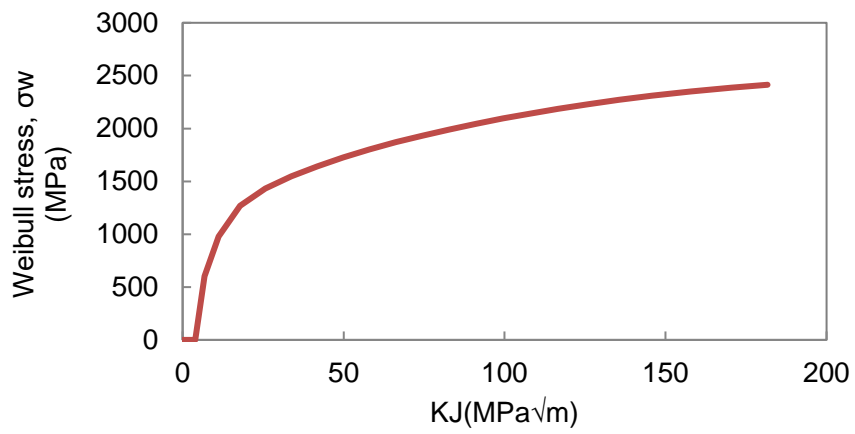


(c)-50°C

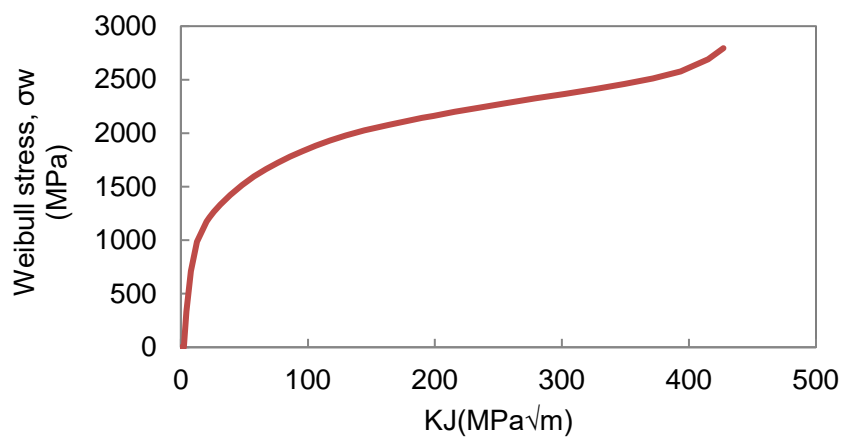
図 5.1.2-22 き裂前方 0.1mm 位置での最大主応力の板厚方向分布



(a)-160°C

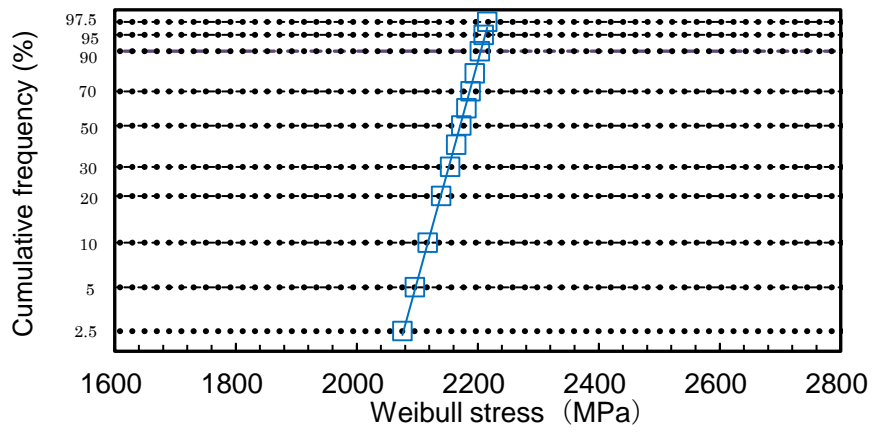


(b)-110°C

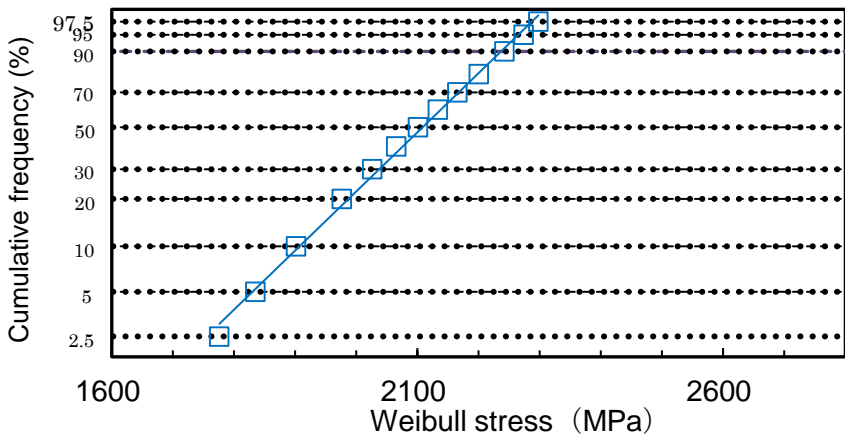


(c)-50°C

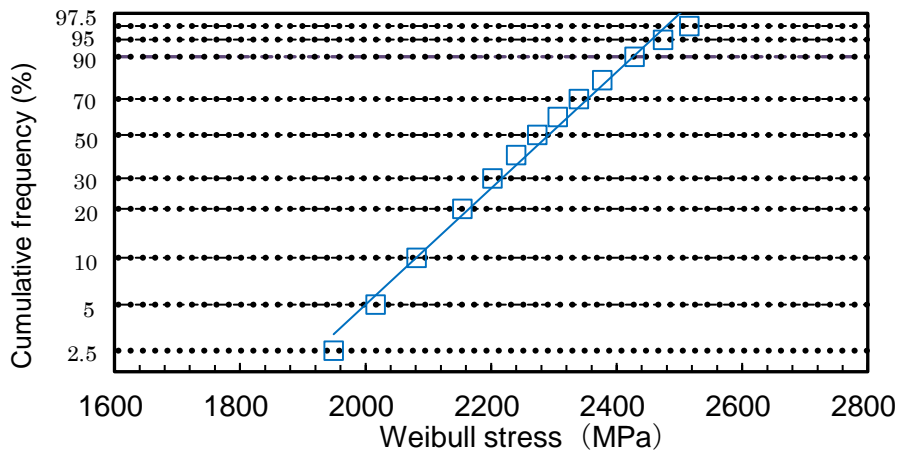
図 5.1.2-23 ワイブル応力-K_J値の関係



(a)-160°C



(b)-110°C



(c)-50°C

図 5.1.2-24 破壊限界ワイブル応力分布

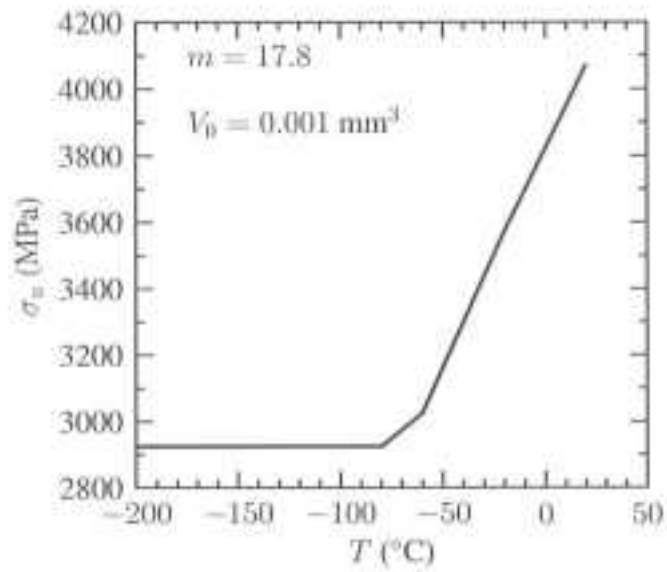


図 5.1.2-25 σ_u の温度依存性 (その 1 : A508 Cl.3) (5.1.2-6)

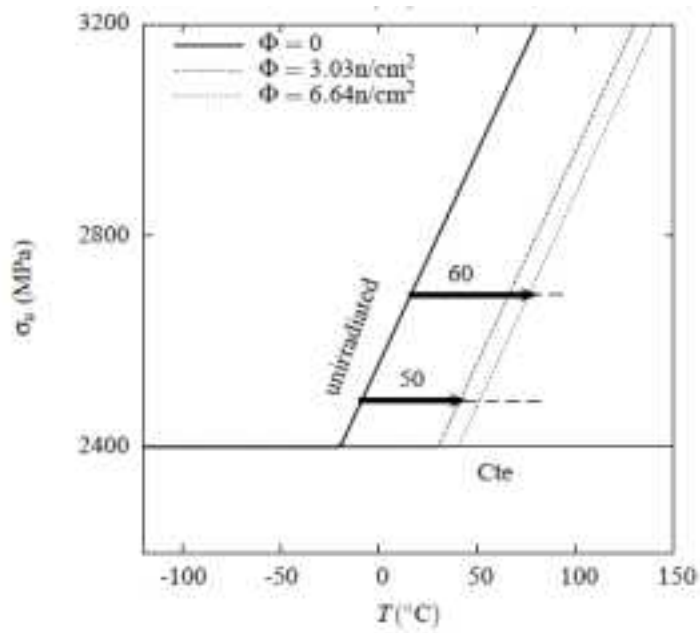
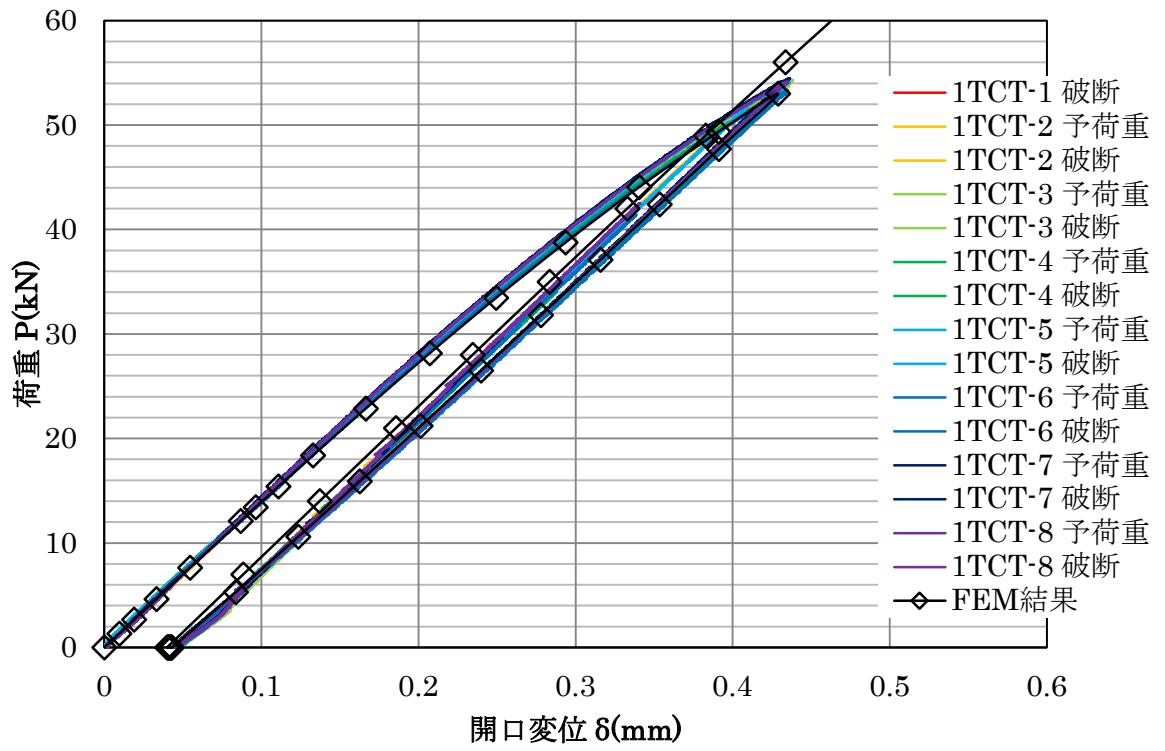
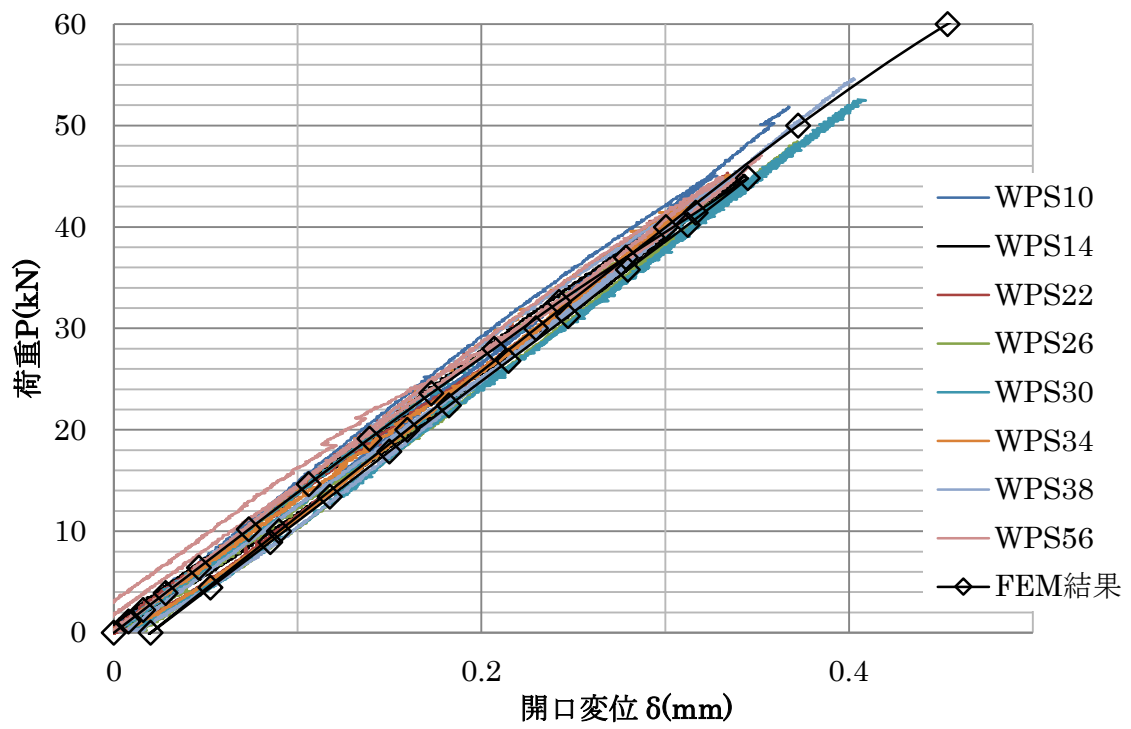


図 5.1.2-26 σ_u の温度依存性 (その 2 : 16MND5) (5.1.2-7)

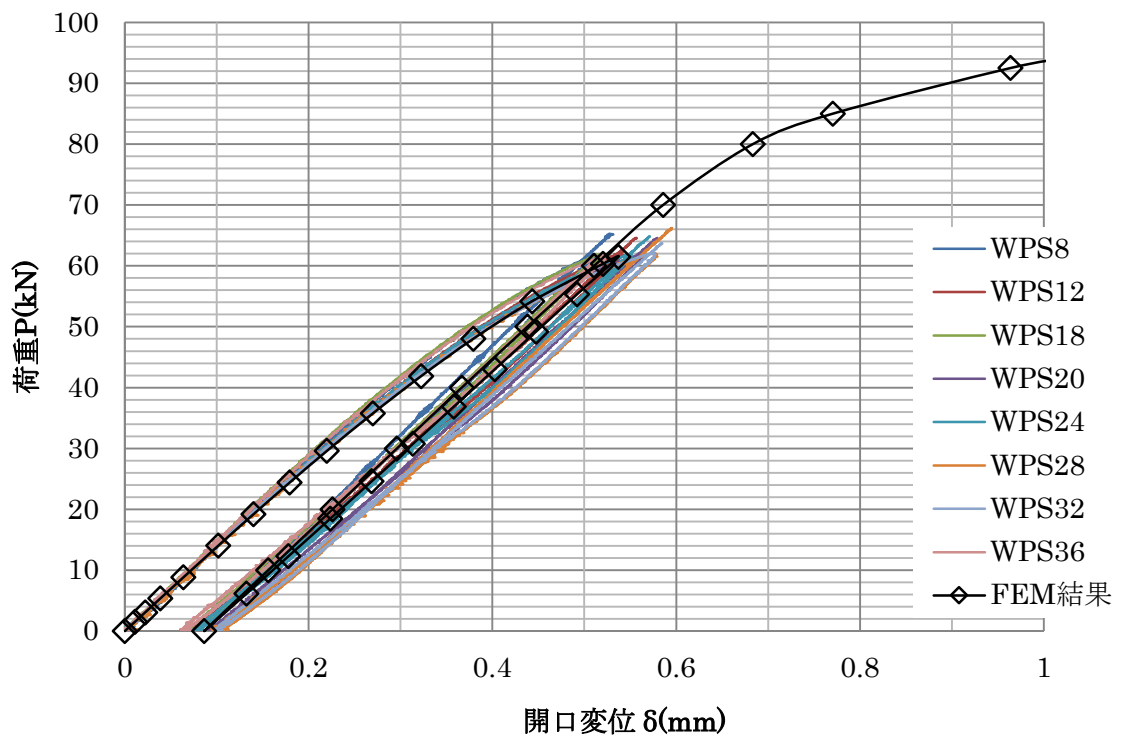


(a) B1

図 5.1.2-27 荷重-開口変位関係(その1)

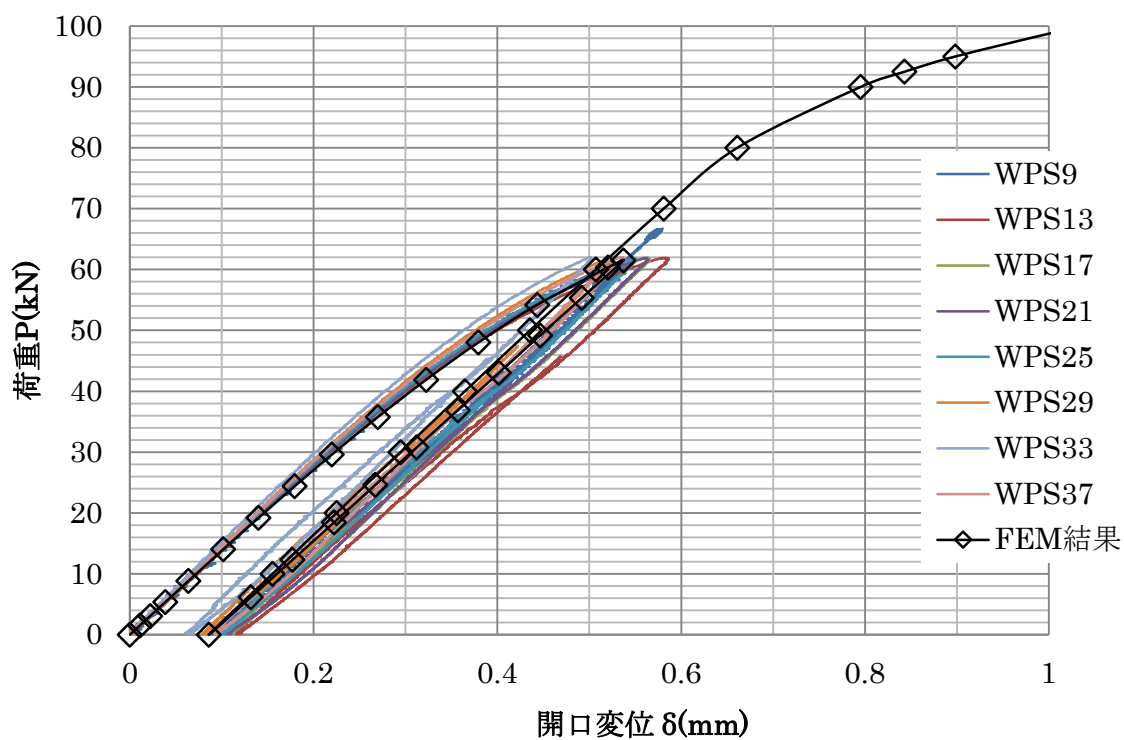


(b) C1

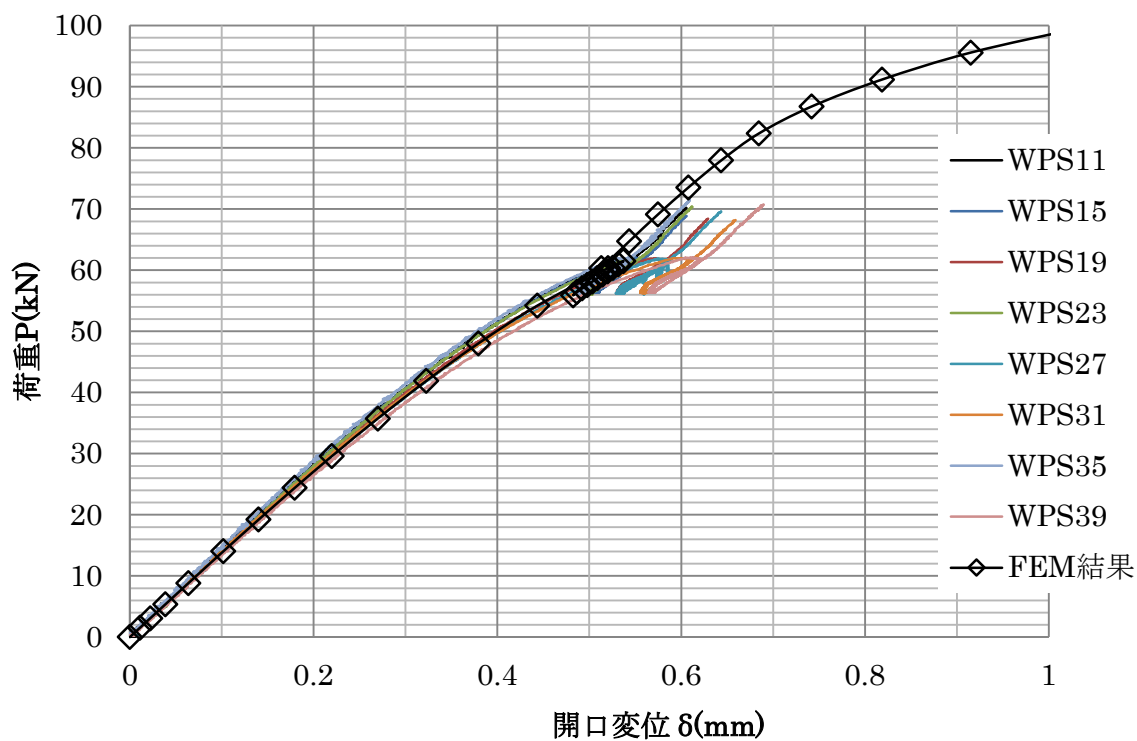


(c) C2

図 5.1.2-27 荷重-開口変位関係(その 2)

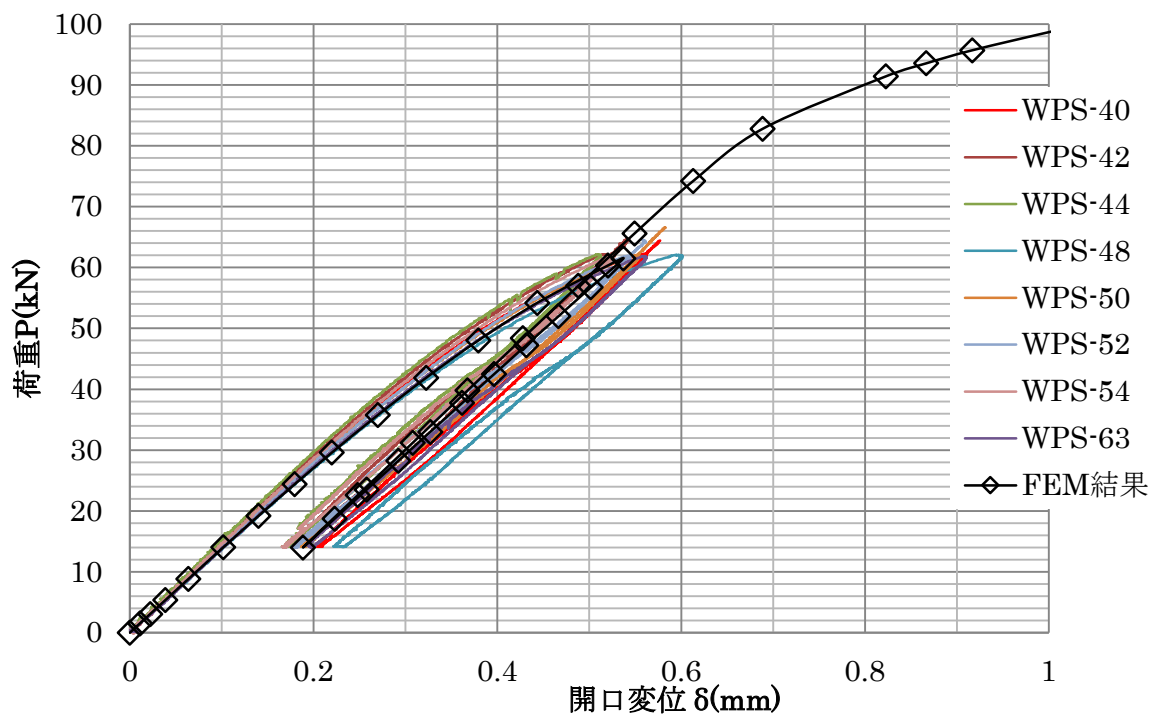


(d) C3

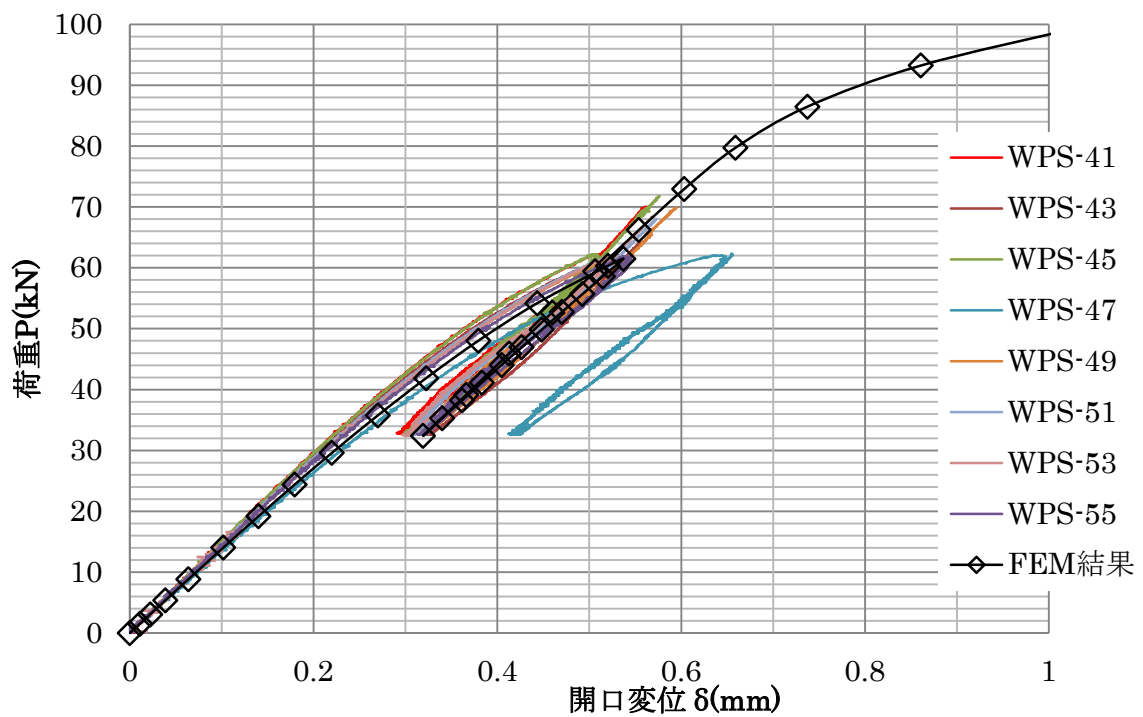


(e) C4

図 5.1.2-27 荷重-開口変位関係(その 3)

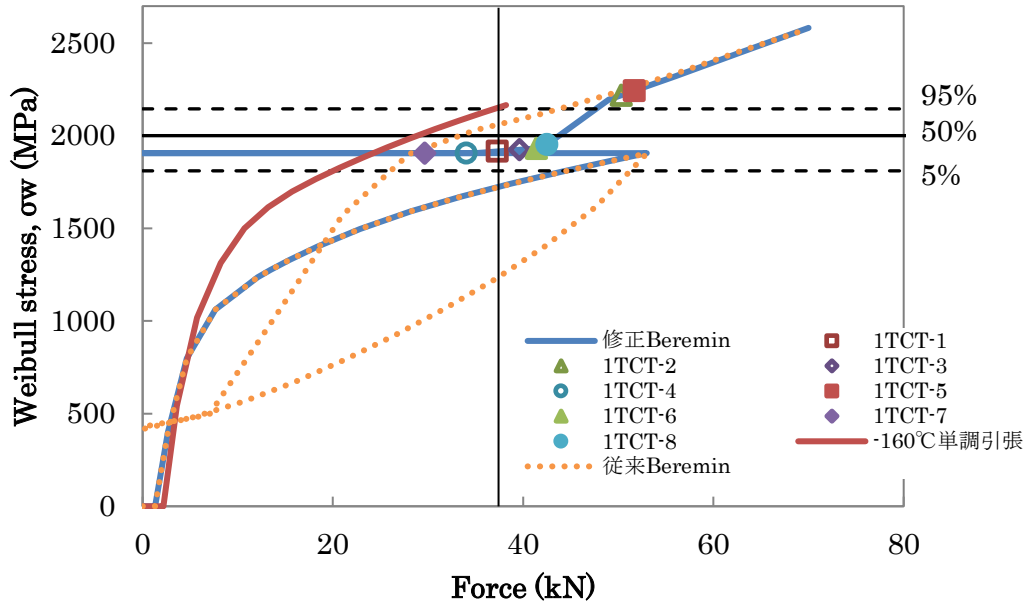


(f) C5

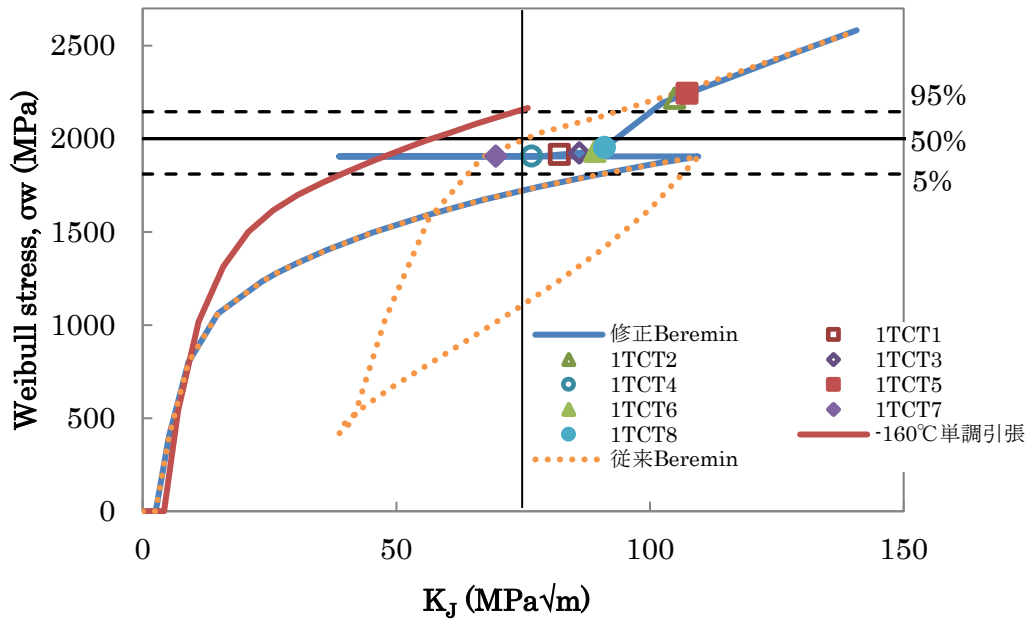


(g) C6

図 5.1.2-27 荷重-開口変位関係(その 4)

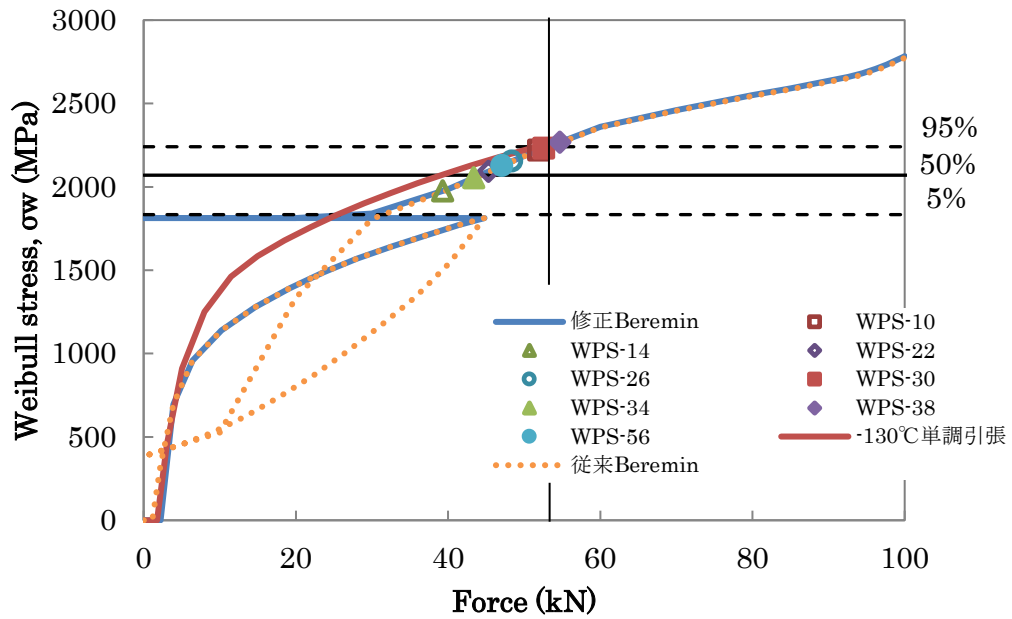


(a) ワイブル応力-荷重関係

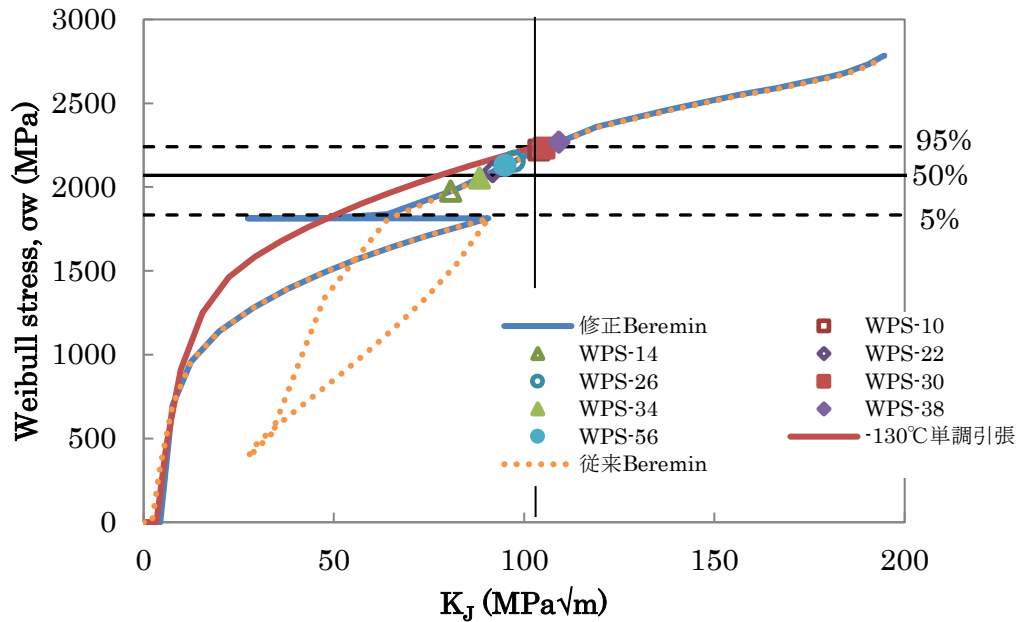


(b) ワイブル応力- K_J 関係

図 5.1.2-28 ワイブル評価結果 WPS 試験条件 B1

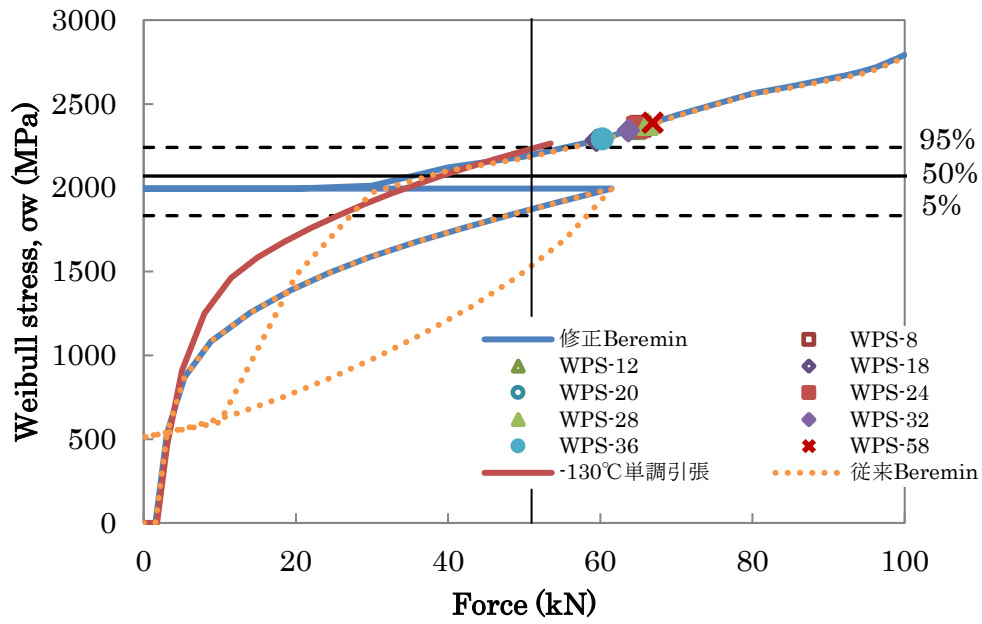


(a) ワイブル応力-荷重関係

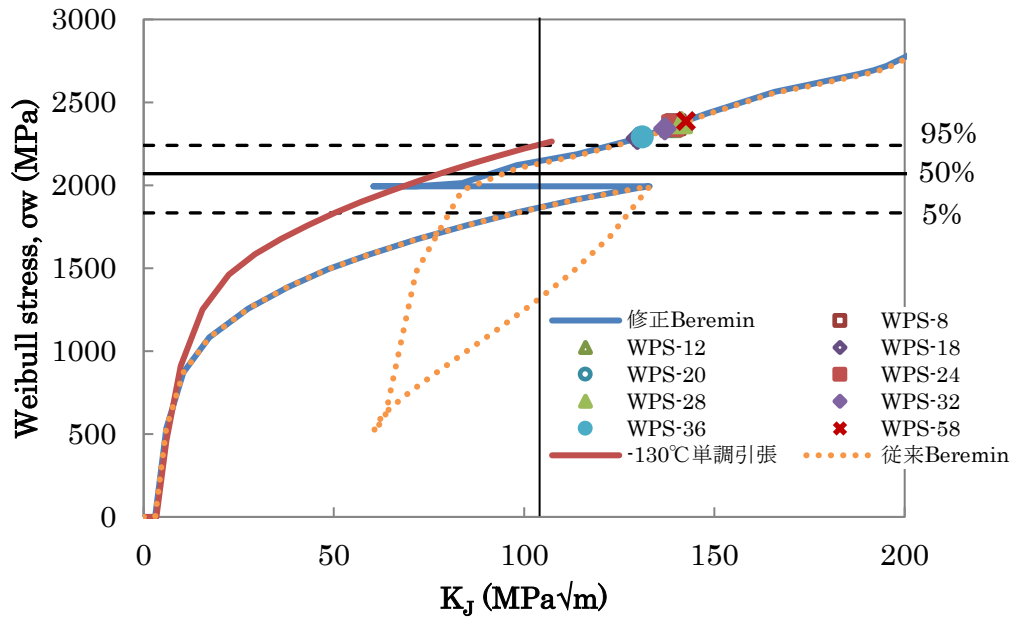


(b) ワイブル応力- K_J 関係

図 5.1.2-29 ワイブル評価結果 WPS 試験条件 C1

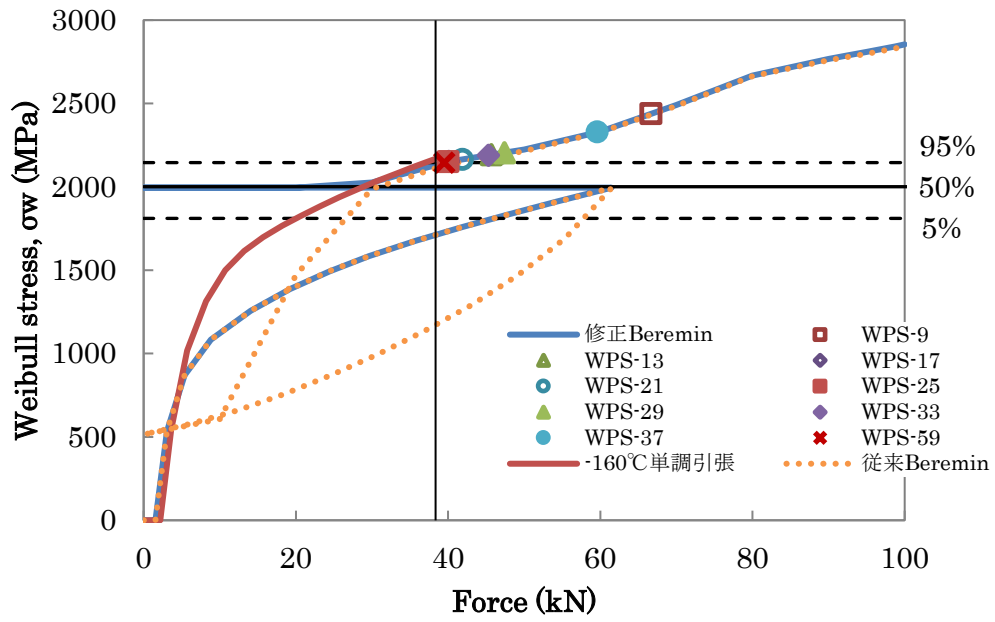


(a) ワイブル応力-荷重関係

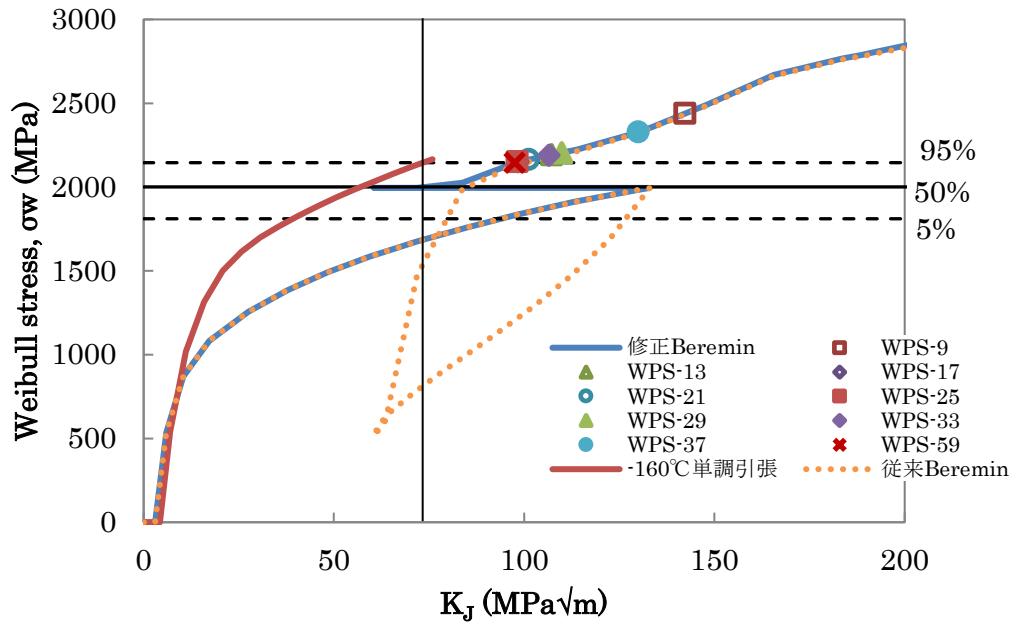


(c) ワイブル応力- K_J 関係

図 5.1.2-30 ワイブル評価結果 WPS 試験条件 C2

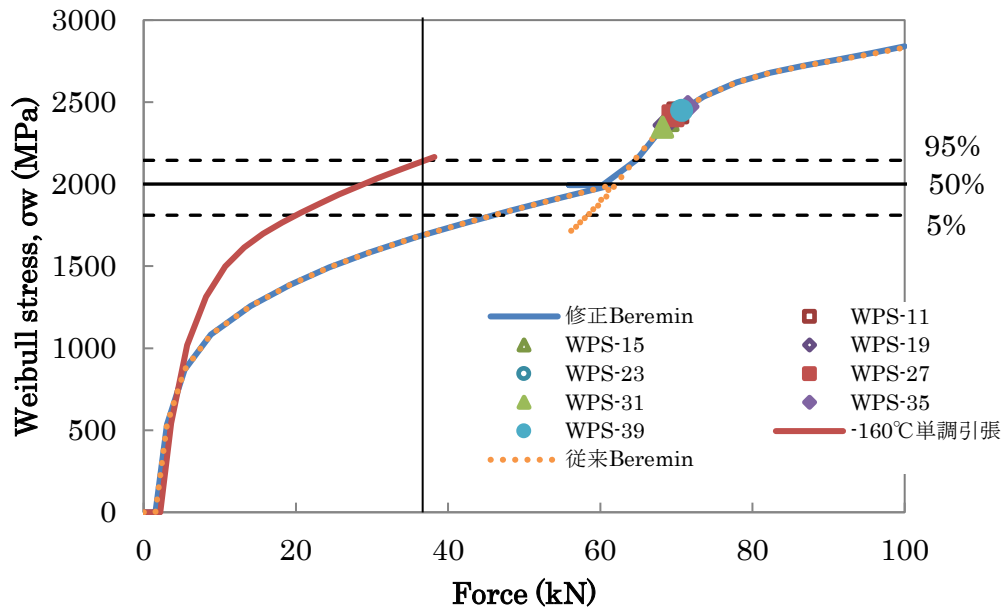


(a) ワイブル応力-荷重関係

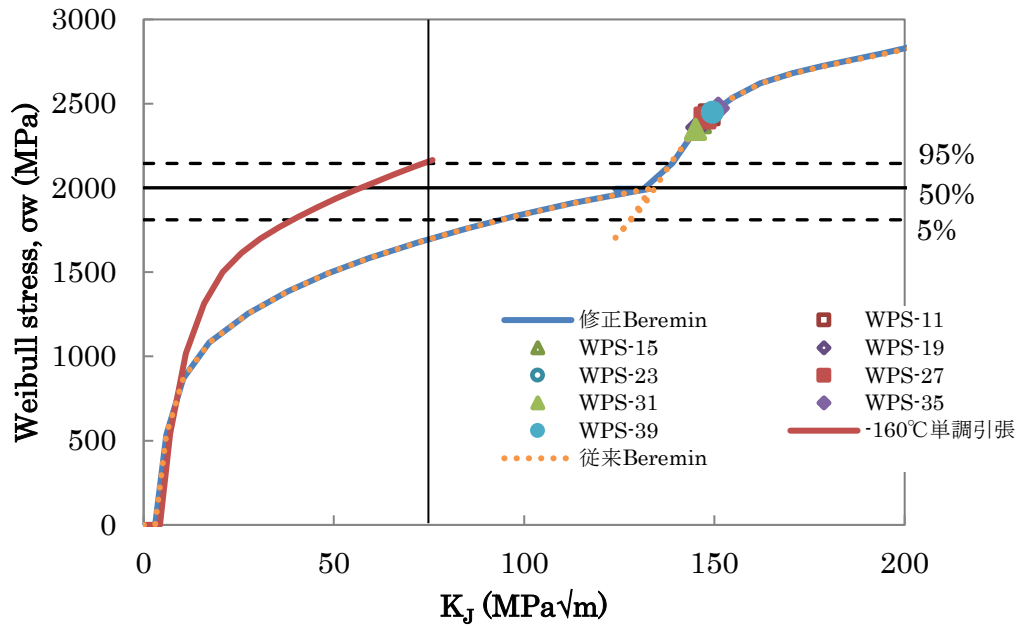


(b) ワイブル応力- K_J 関係

図 5.1.2-31 ワイブル評価結果 WPS 試験条件 C3

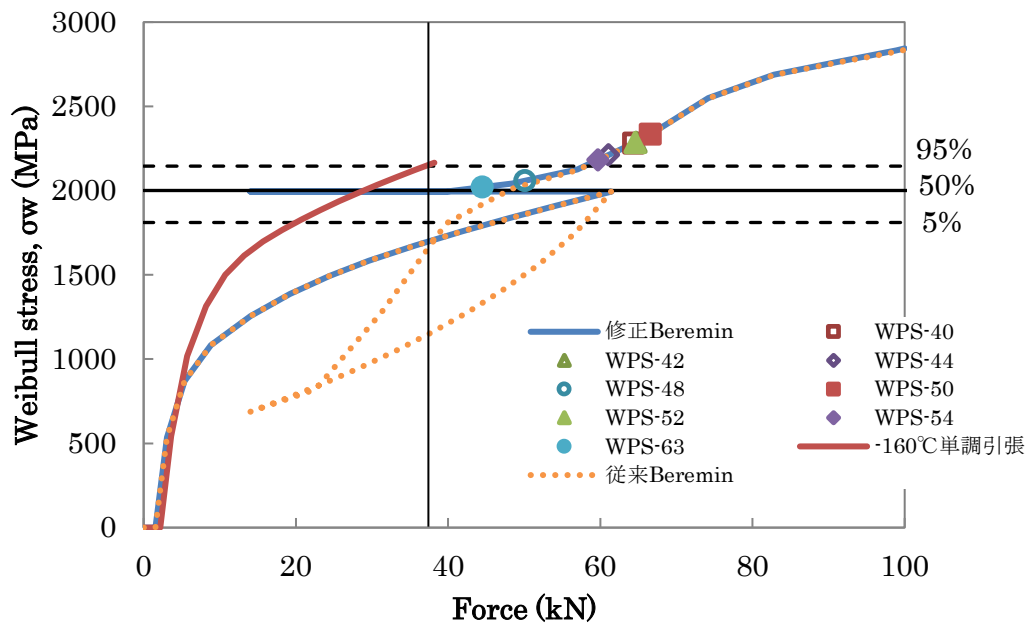


(a) ワイブル応力-荷重関係

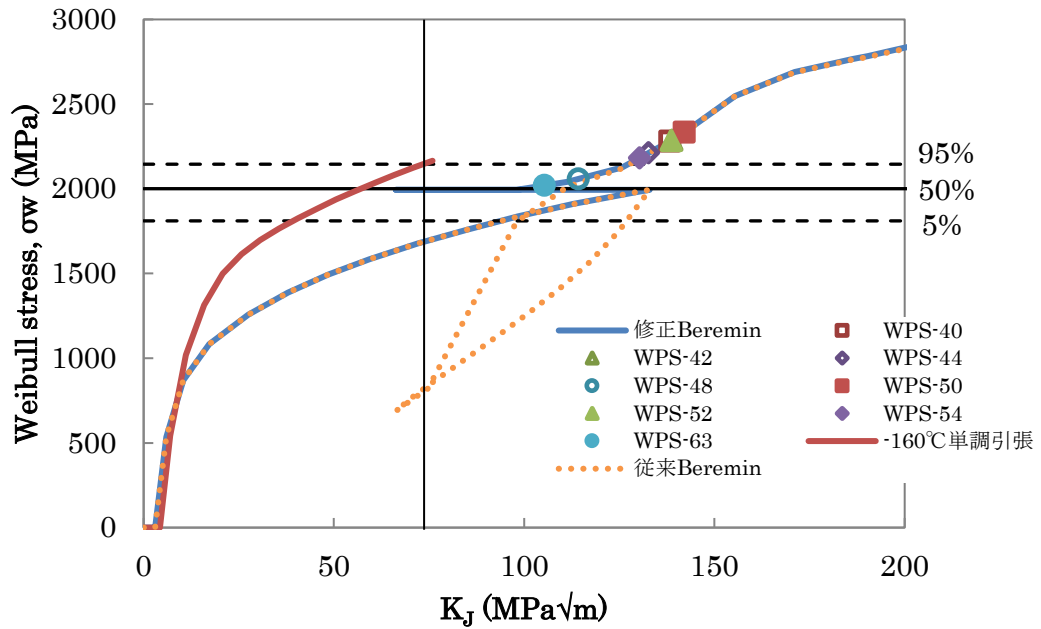


(c) ワイブル応力-K_J関係

図 5.1.2-32 ワイブル評価結果 WPS 試験条件 C4

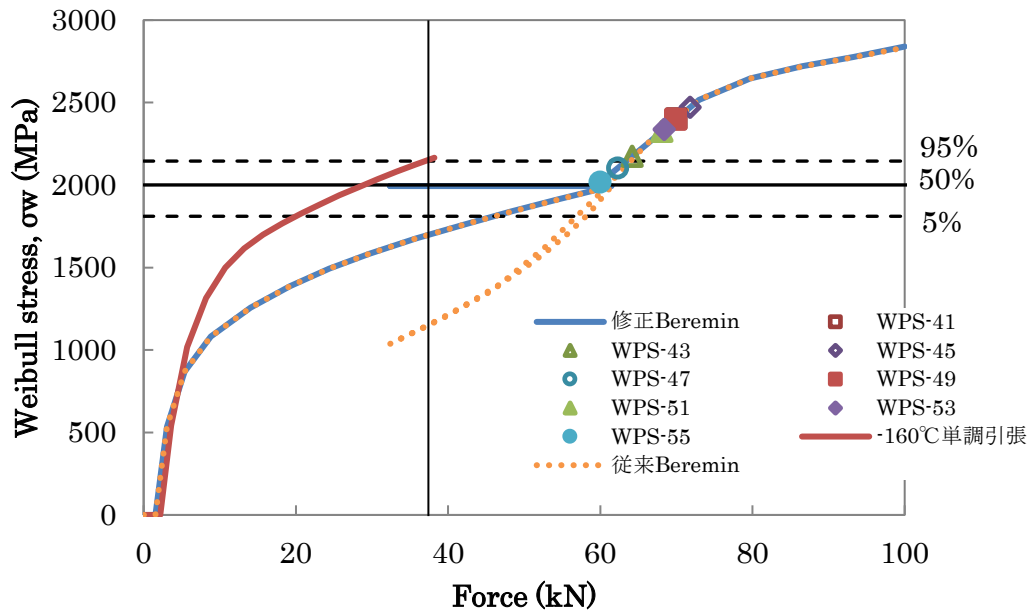


(a) ワイブル応力-荷重関係

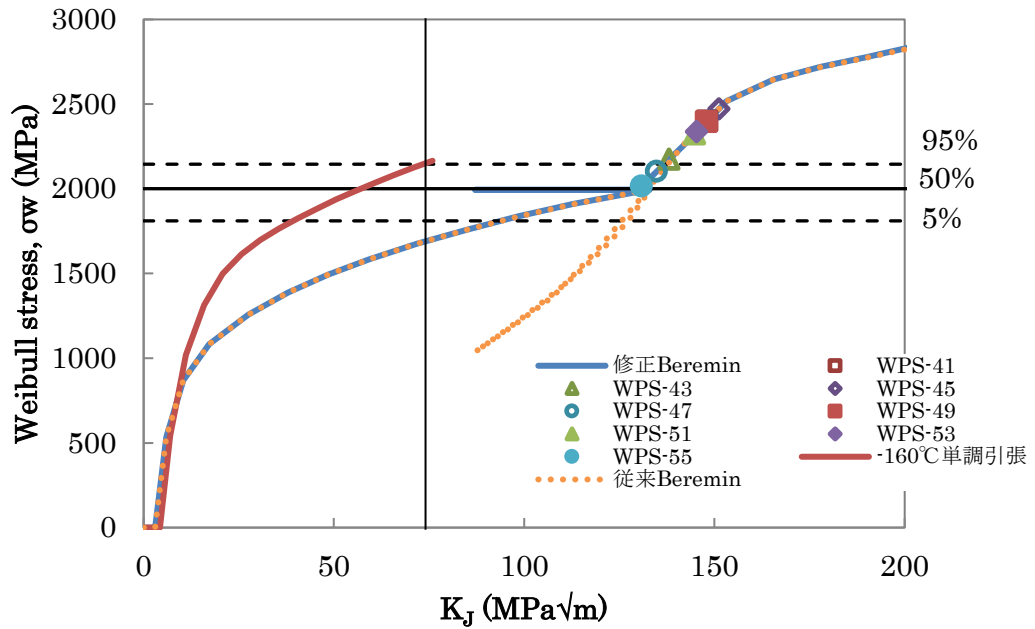


(b) ワイブル応力- K_J 関係

図 5.1.2-33 ワイブル評価結果 WPS 試験条件 C5

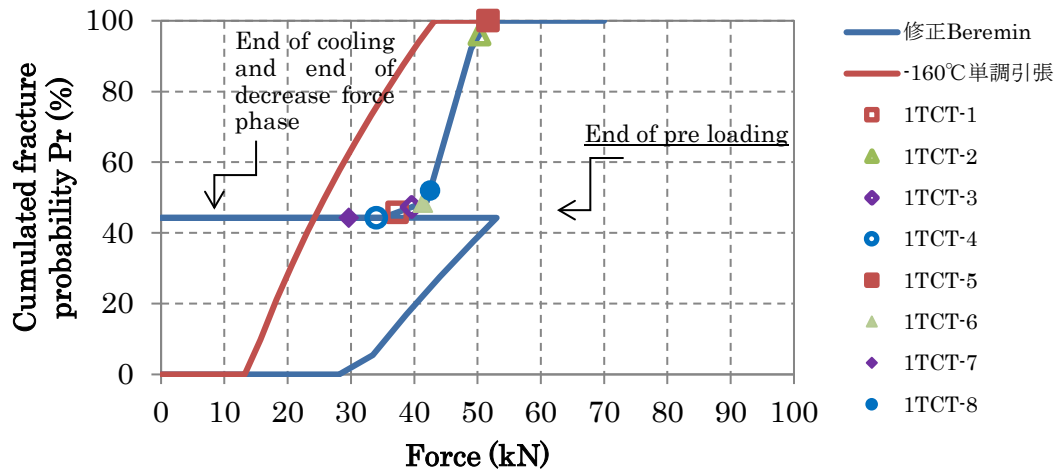


(a) ワイブル応力-荷重関係

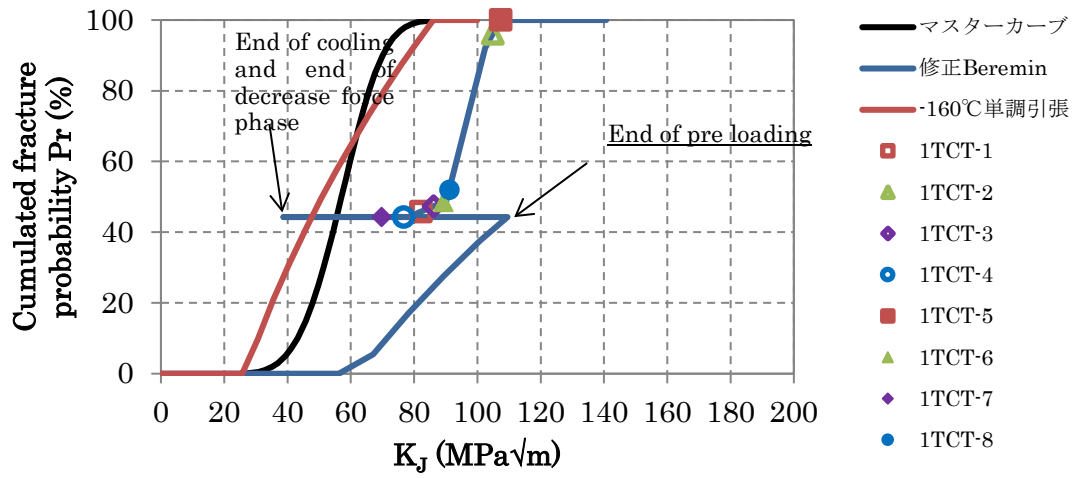


(b) ワイブル応力- K_J 関係

図 5.1.2-34 ワイブル評価結果 WPS 試験条件 C6

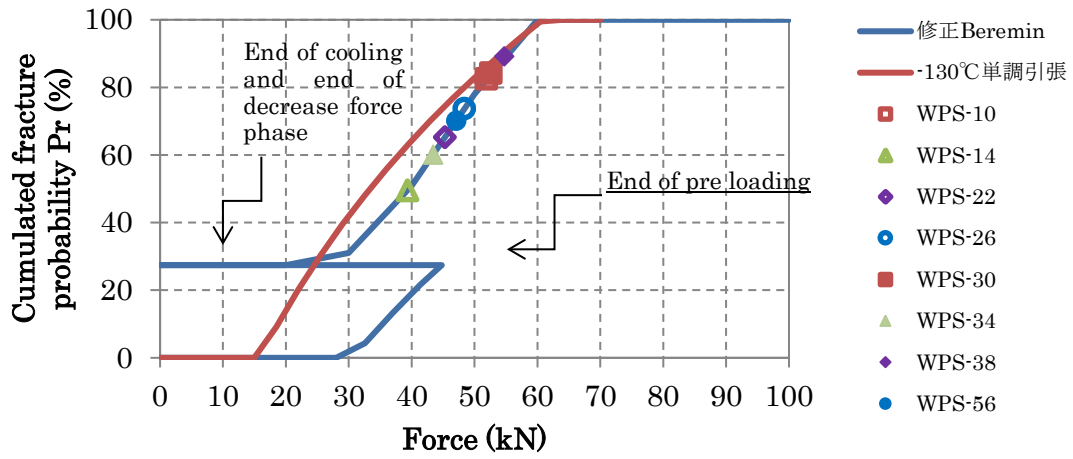


(a) 累積破損確率－荷重関係

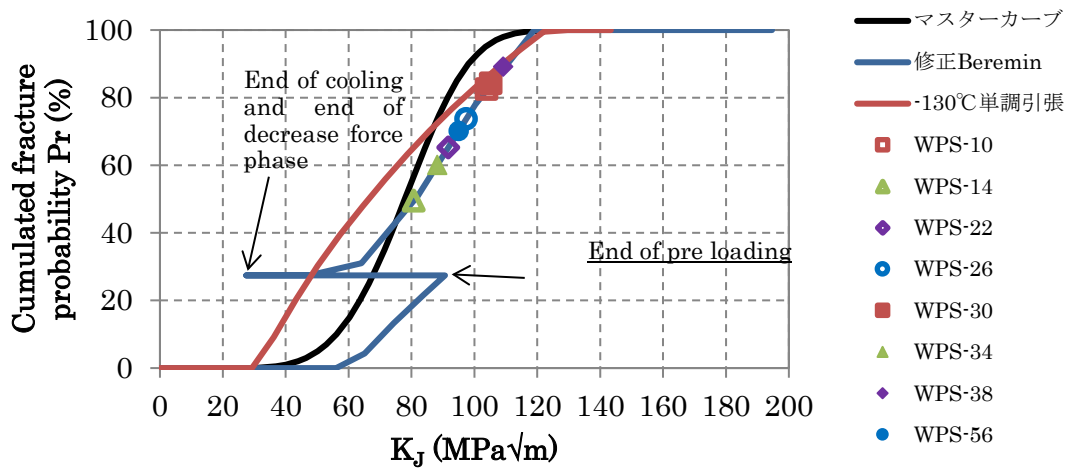


(b) 累積破損確率－ K_J 関係

図 5.1.2-35 累積破損確率評価結果 WPS 試験条件 B1

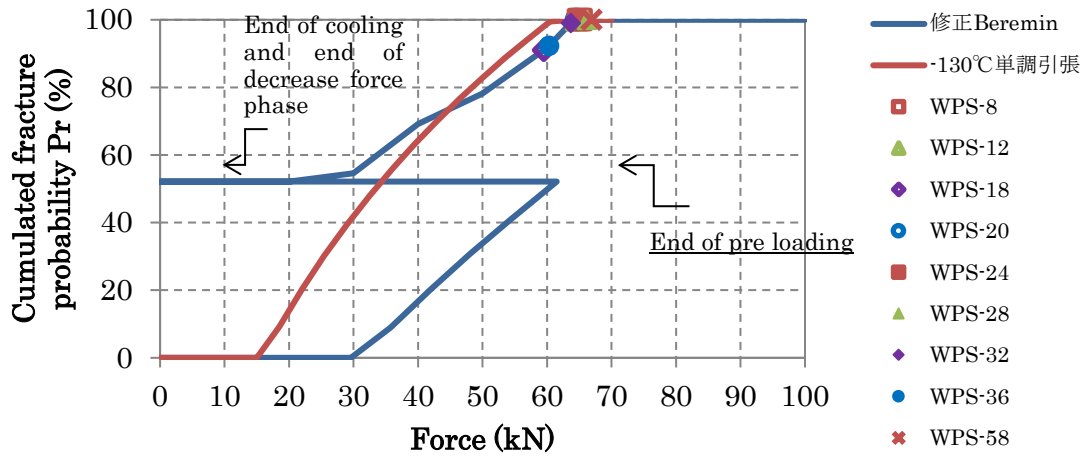


(a) 累積破損確率－荷重関係

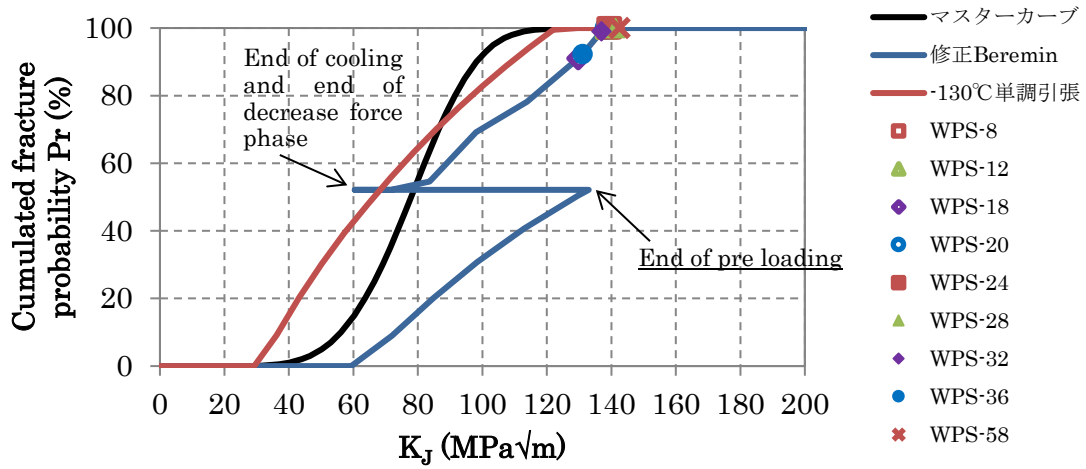


(b) 累積破損確率－ K_J 関係

図 5.1.2-36 累積破損確率評価結果 WPS 試験条件 C1

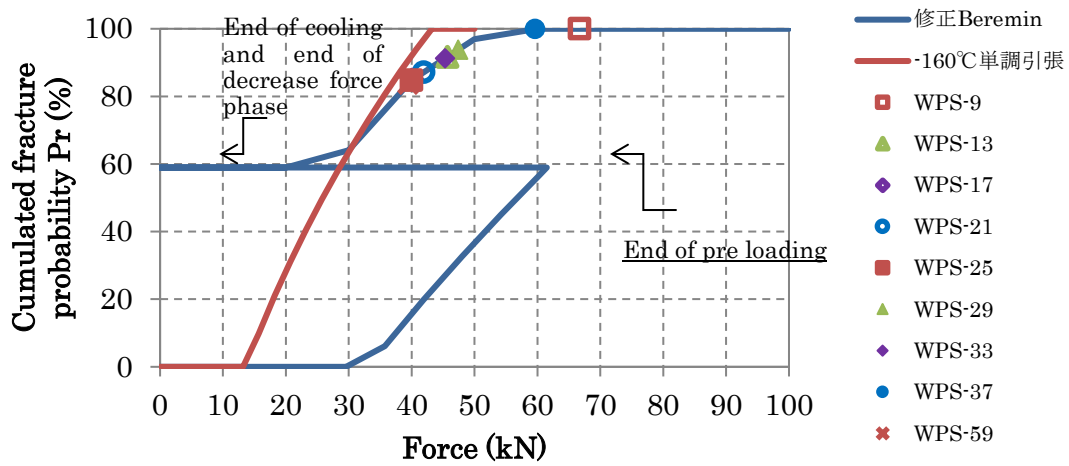


(a) 累積破損確率－荷重関係

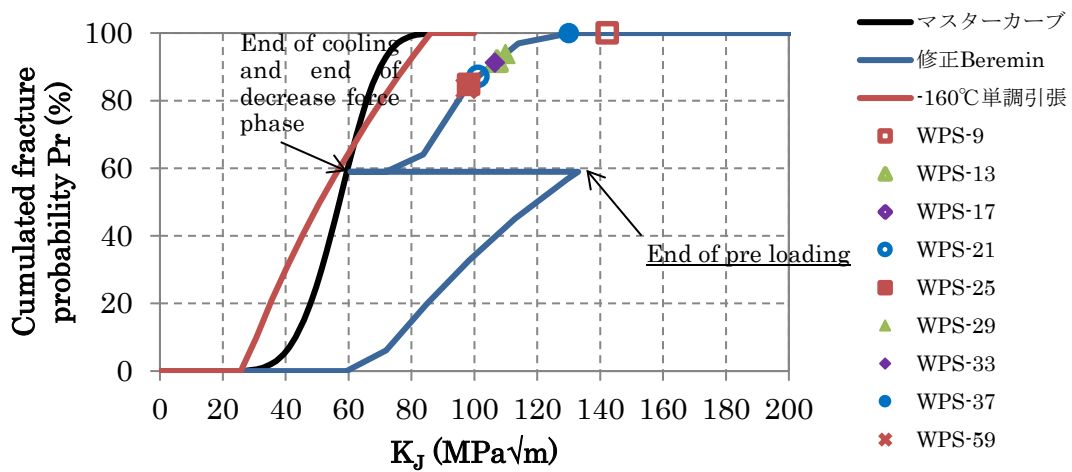


(b) 累積破損確率－ K_J 関係

図 5.1.2-37 累積破損確率評価結果 WPS 試験条件 C2

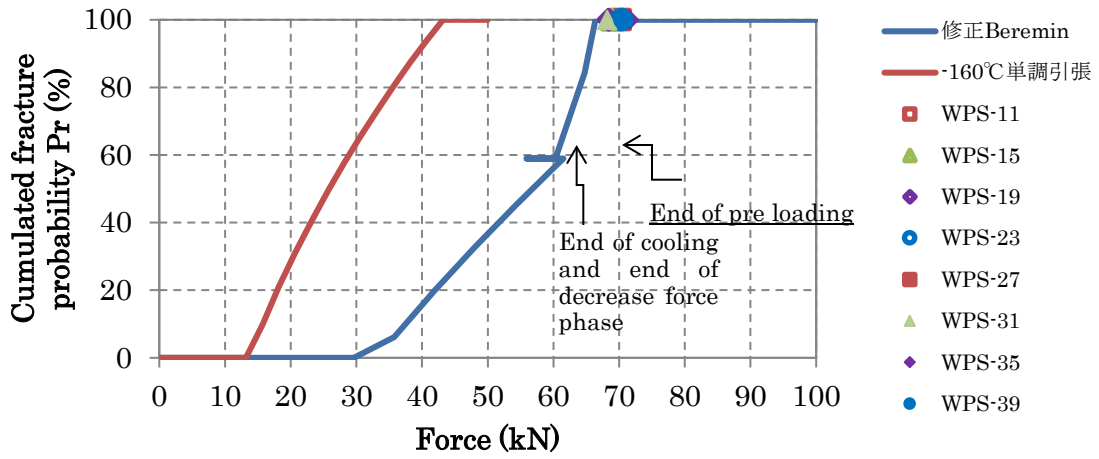


(a) 累積破損確率－荷重関係

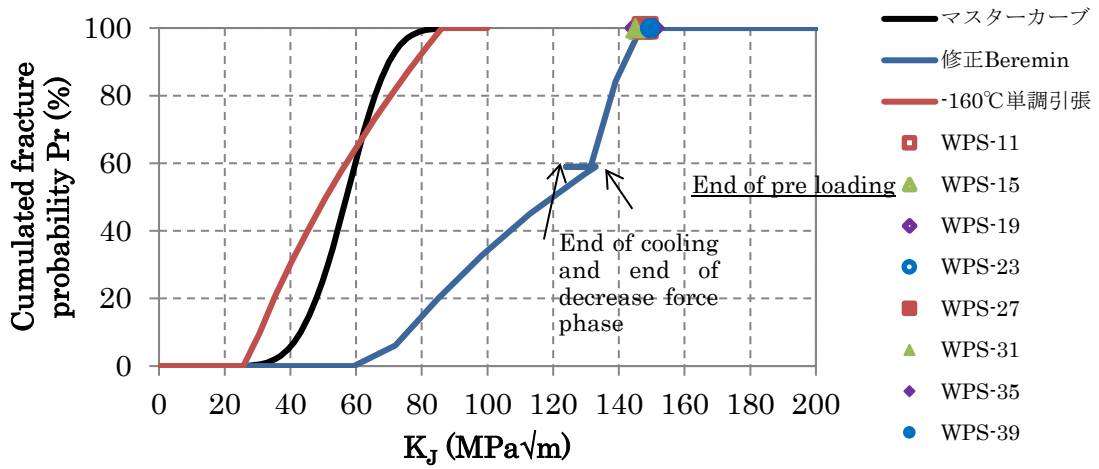


(b) 累積破損確率－ K_J 関係

図 5.1.2-38 累積破損確率評価結果 WPS 試験条件 C3

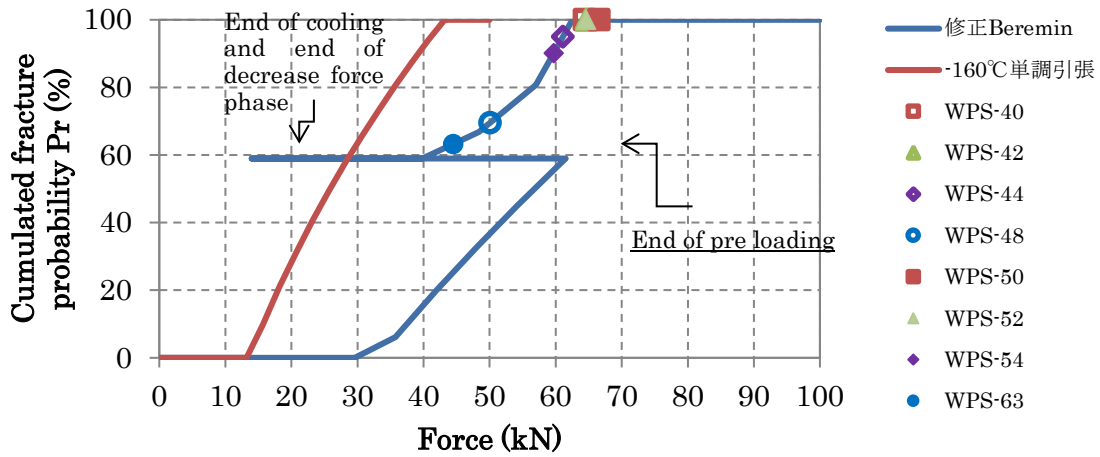


(a) 累積破損確率－荷重関係

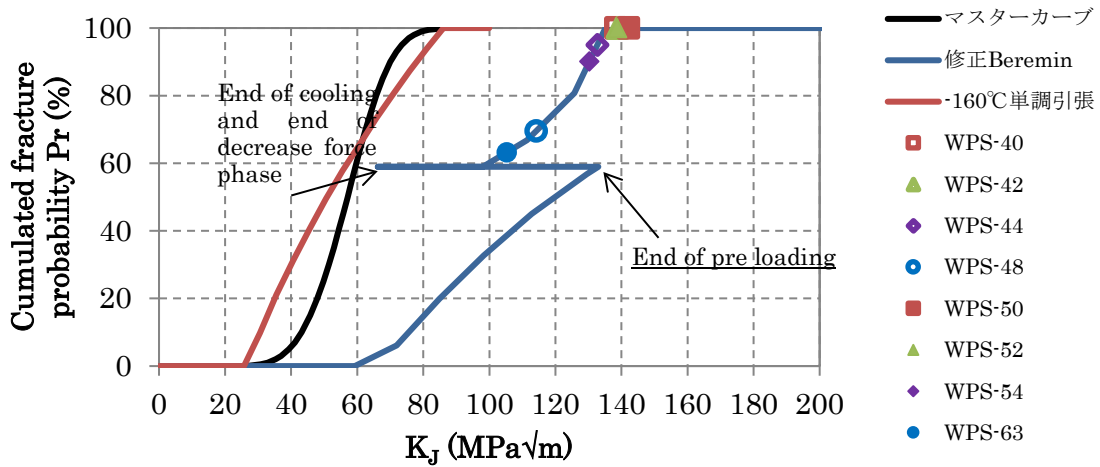


(b) 累積破損確率－ K_J 関係

図 5.1.2-39 累積破損確率評価結果 WPS 試験条件 C4

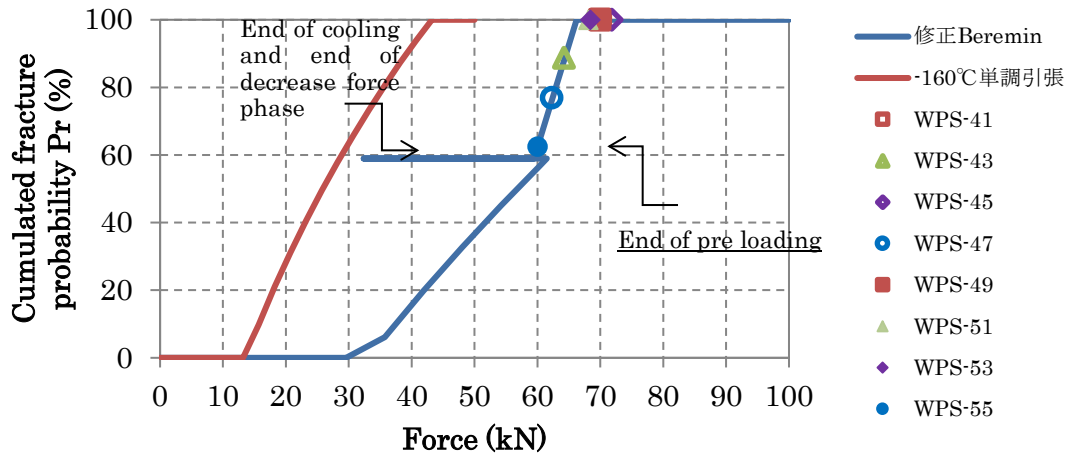


(a) 累積破損確率－荷重関係

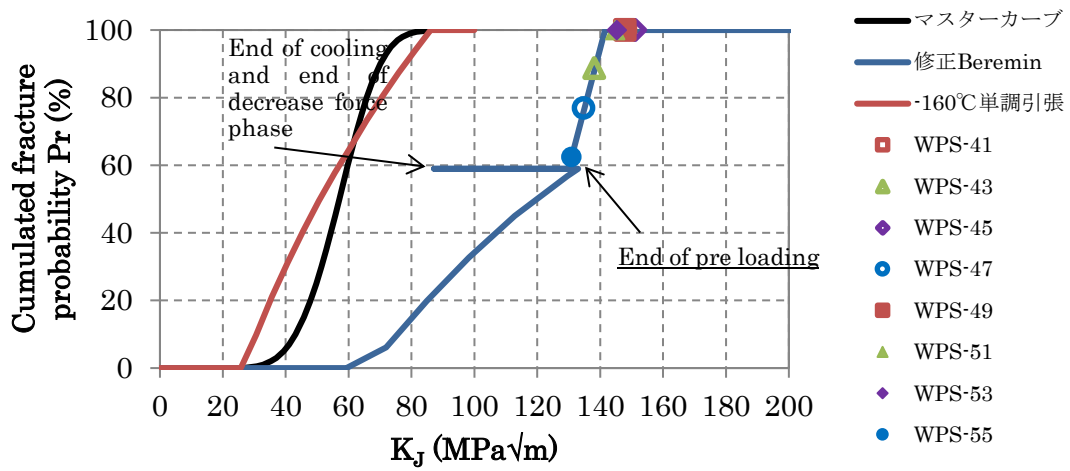


(b) 累積破損確率－ K_J 関係

図 5.1.2-40 累積破損確率評価結果 WPS 試験条件 C5



(a) 累積破損確率－荷重関係



(b) 累積破損確率－ K_J 関係

図 5.1.2-41 累積破損確率評価結果 WPS 試験条件 C6

K_J (MPa \sqrt{m})	109.536	38.756	39.342	115.096
T(°C)	-50	-50	-160	-160
全体図				
拡大図				

図 5.1.2-42 き裂開口方向応力コンタ WPS 試験条件 B1

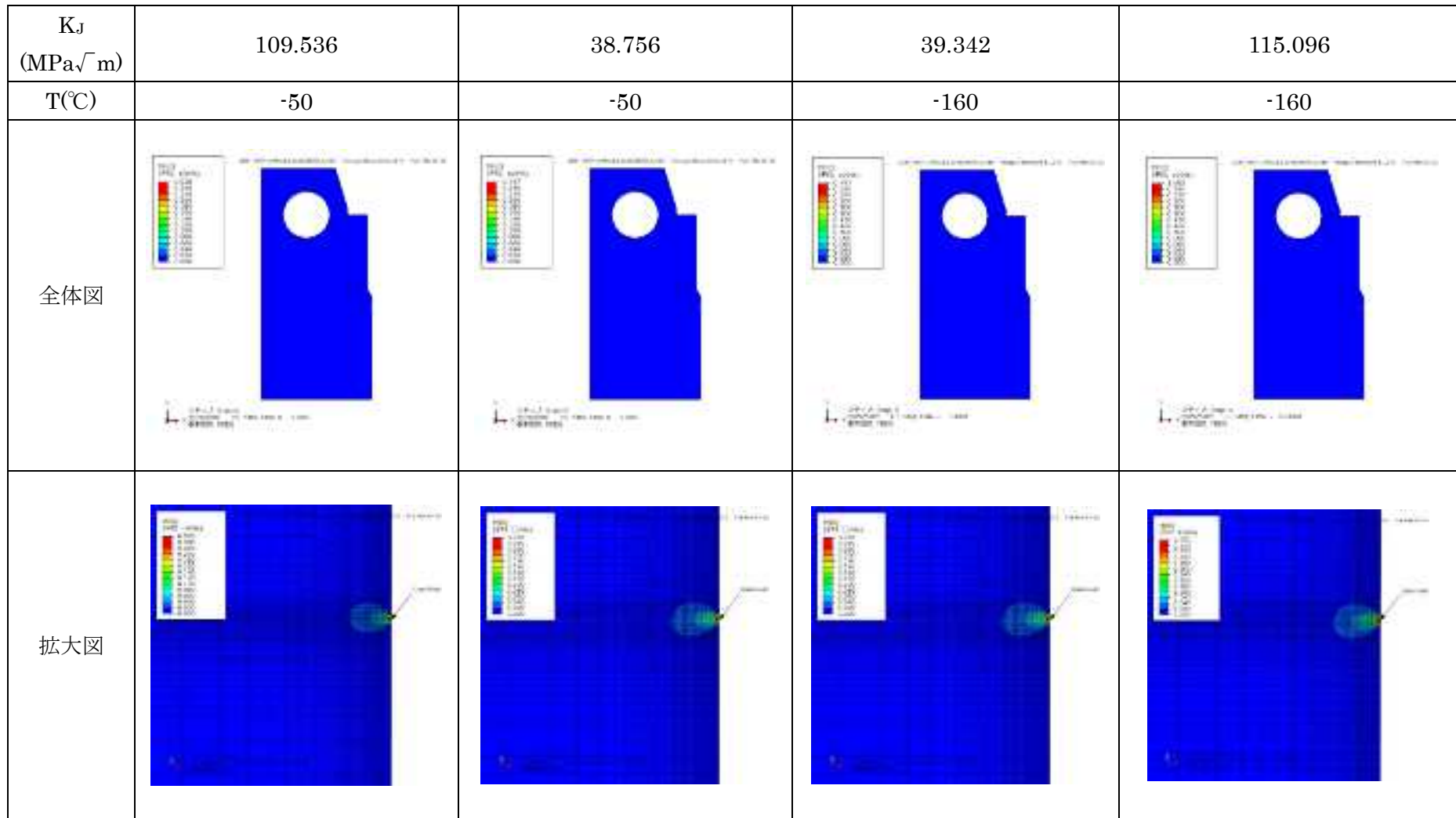


図 5.1.2-43 相当塑性ひずみコンタ WPS 試験条件 B1

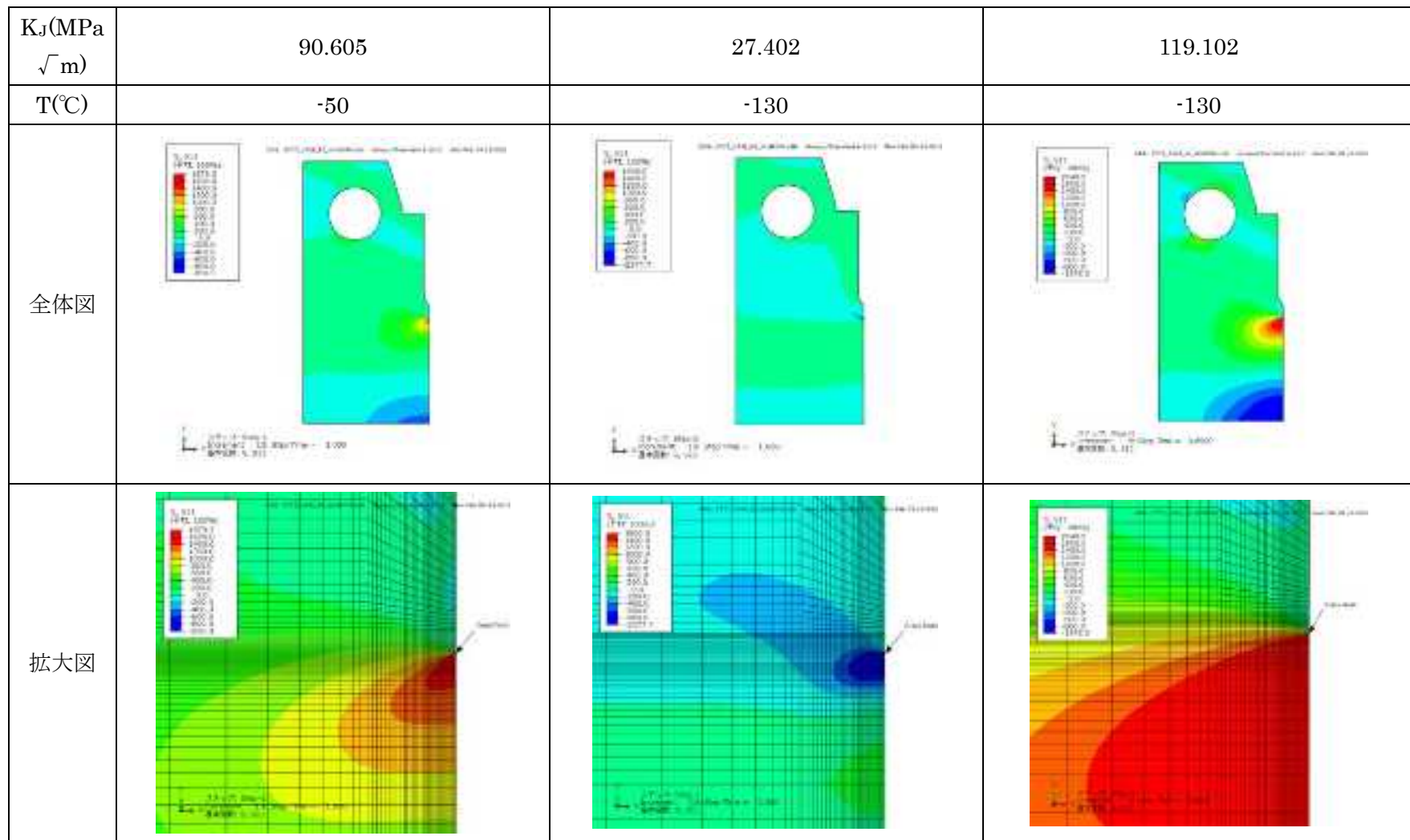


図 5.1.2-44 き裂開口方向応力コンタ WPS 試験条件 C1

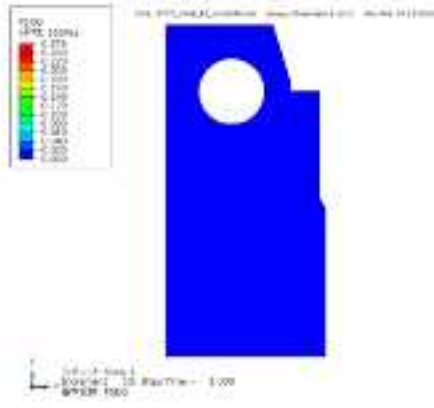
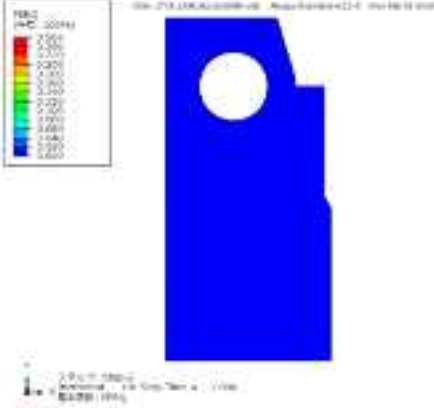
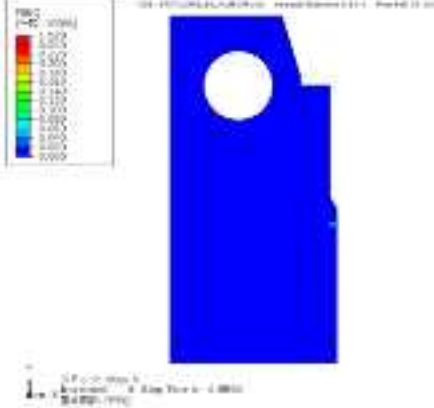
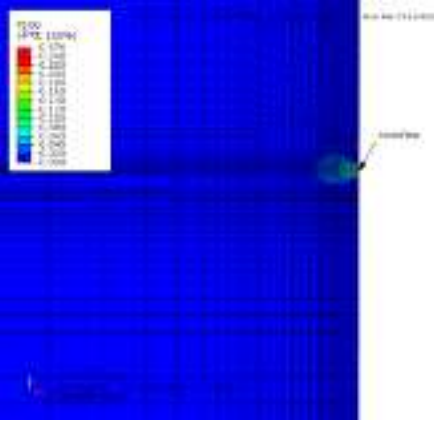
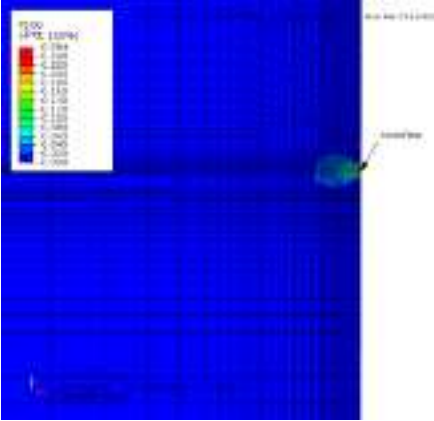
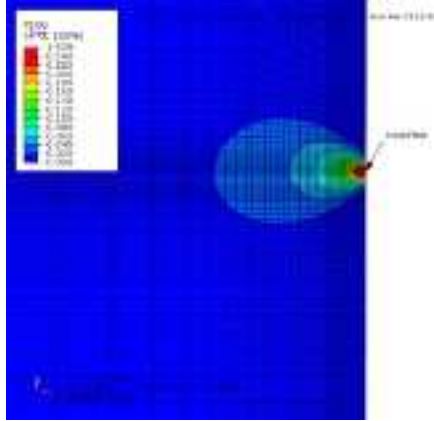
$K_J(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	90.605	27.402	119.102
$T(^{\circ}\text{C})$	-50	-130	-130
全体図			
拡大図			

図 5.1.2-45 相当塑性ひずみコンタ WPS 試験条件 C1

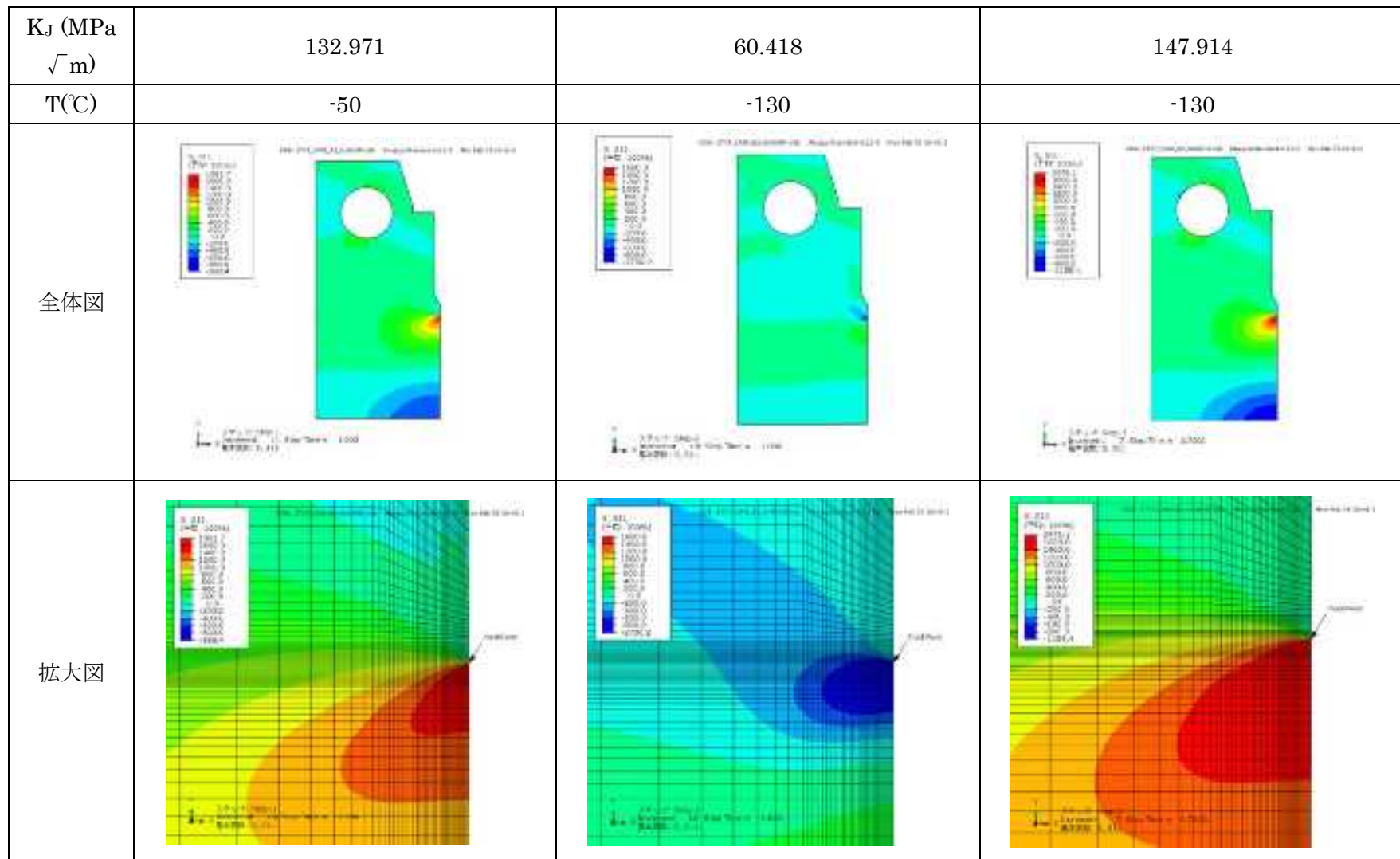


図 5.1.2-46 き裂開口方向応力コンタ WPS 試験条件 C2

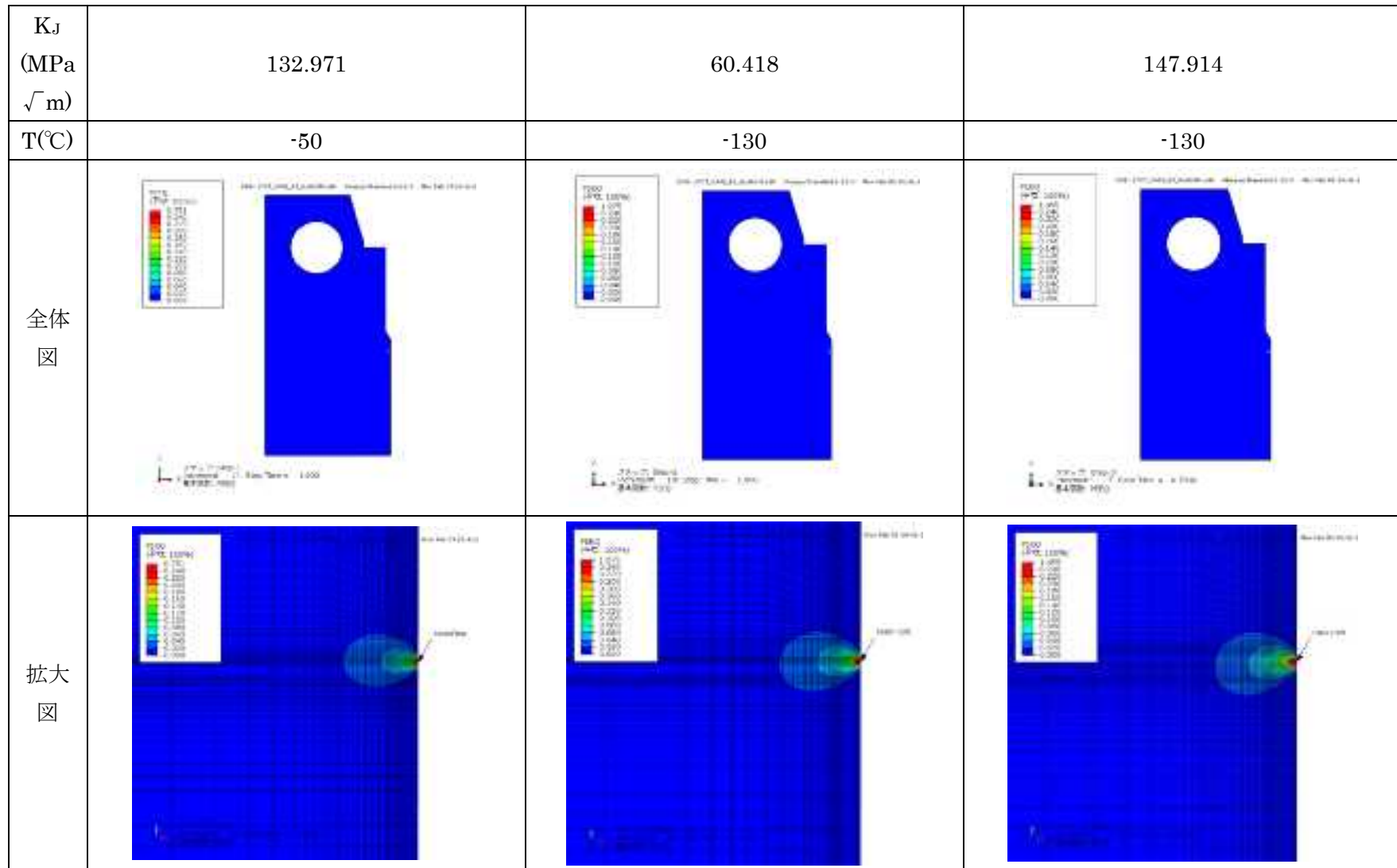


図 5.1.2-47 相当塑性ひずみコンタ WPS 試験条件 C2

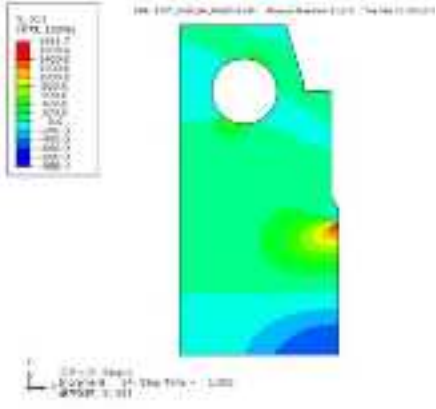
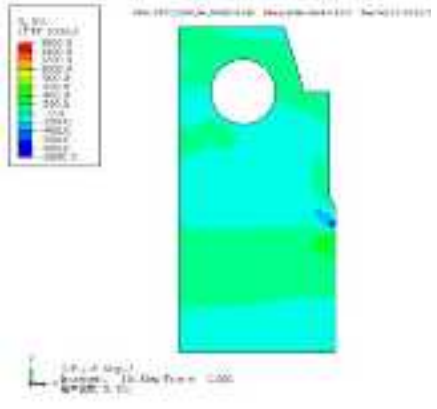
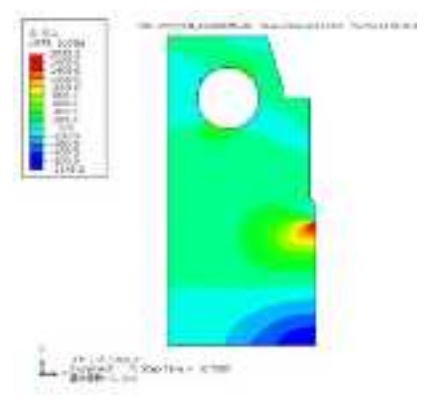
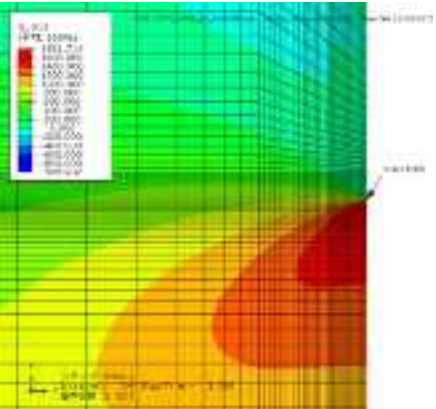
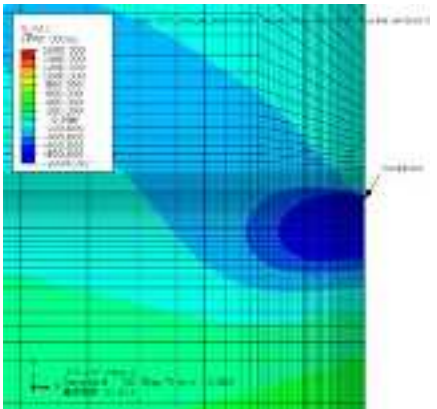
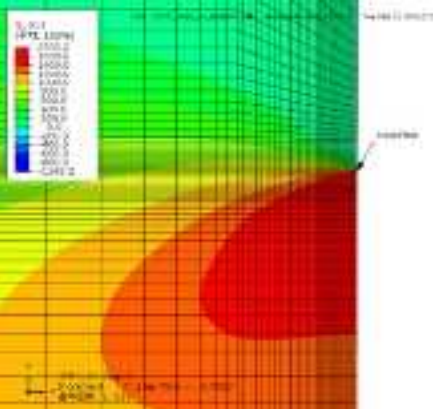
KJ(MPa√ m)	132.971	60.597	148.040
T(°C)	-50	-160	-160
全体図			
拡大図			

図 5.1.2-48 き裂開口方向応力コンタ WPS 試験条件 C3

K_J (MPa \sqrt{m})	132.971	60.597	148.040
T(°C)	-50	-160	-160
全体図			
拡大図			

図 5.1.2-49 相当塑性ひずみコンタ WPS 試験条件 C3

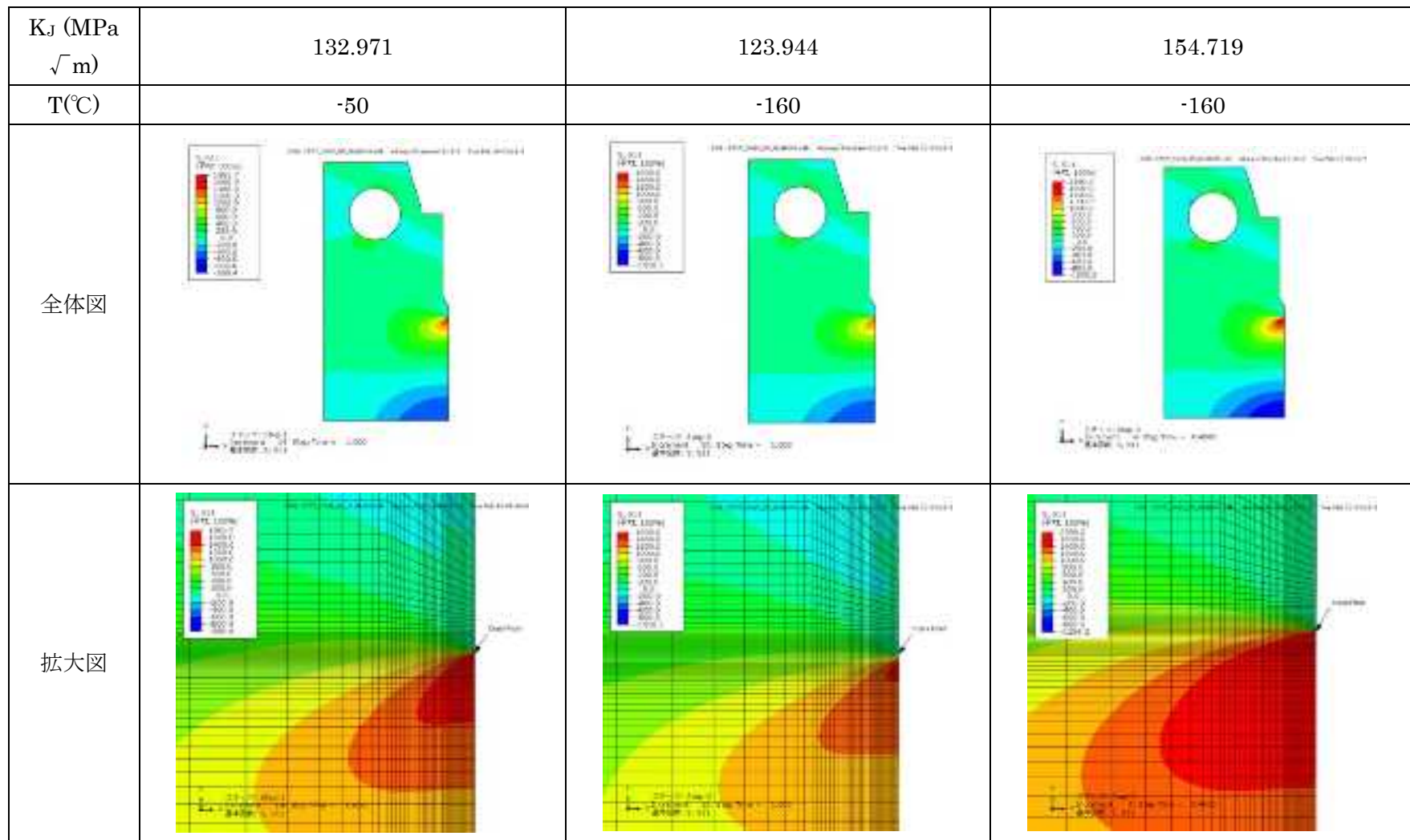


図 5.1.2-50 き裂開口方向応力コンタ WPS 試験条件 C4

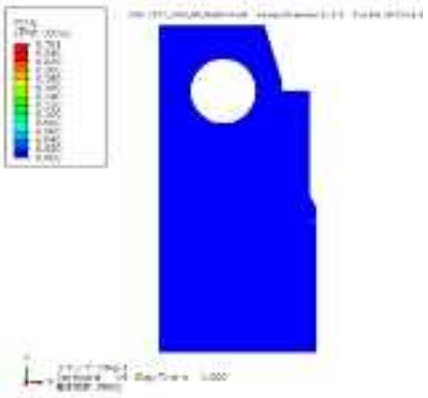
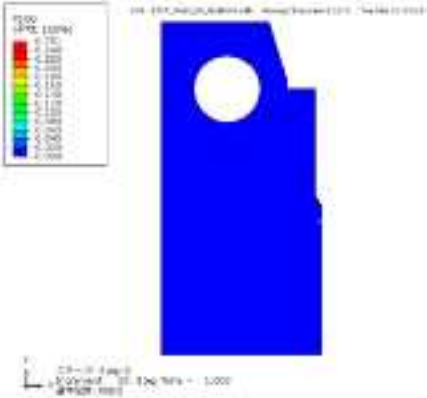
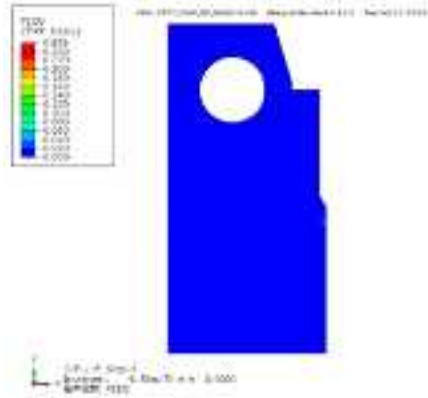
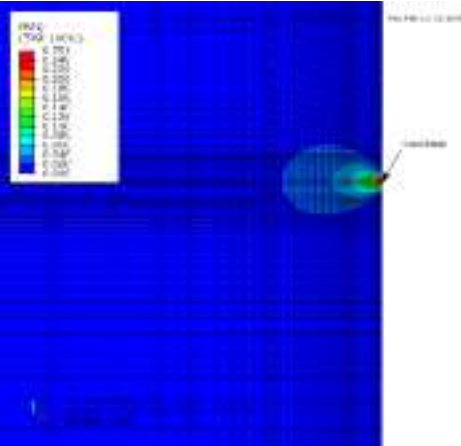
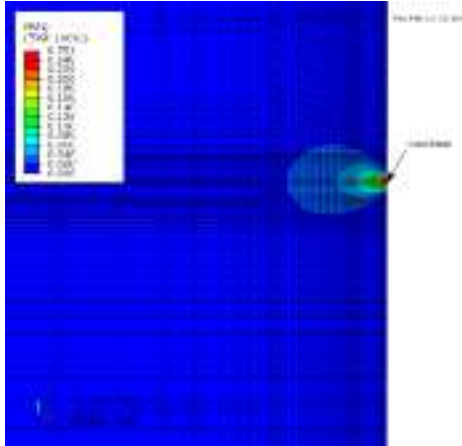
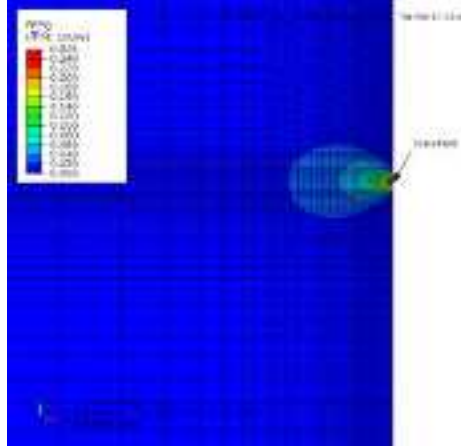
K _J (MPa \sqrt{m})	132.971	123.944	154.719
T(°C)	-50	-160	-160
全体図			
拡大図			

図 5.1.2-51 相当塑性ひずみコンタ WPS 試験条件 C4

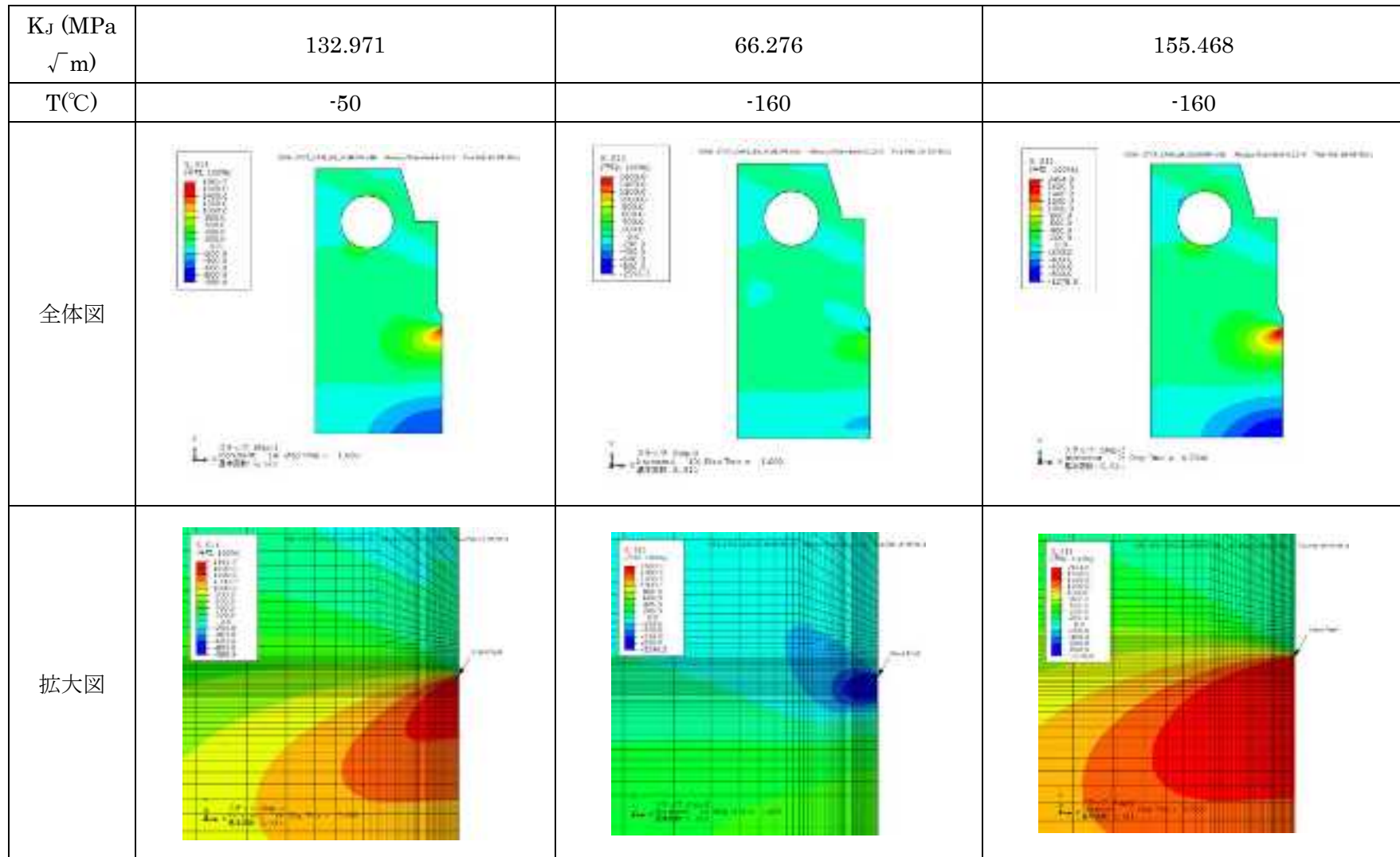


図 5.1.2-52 き裂開口方向応力コンタ WPS 試験条件 C5

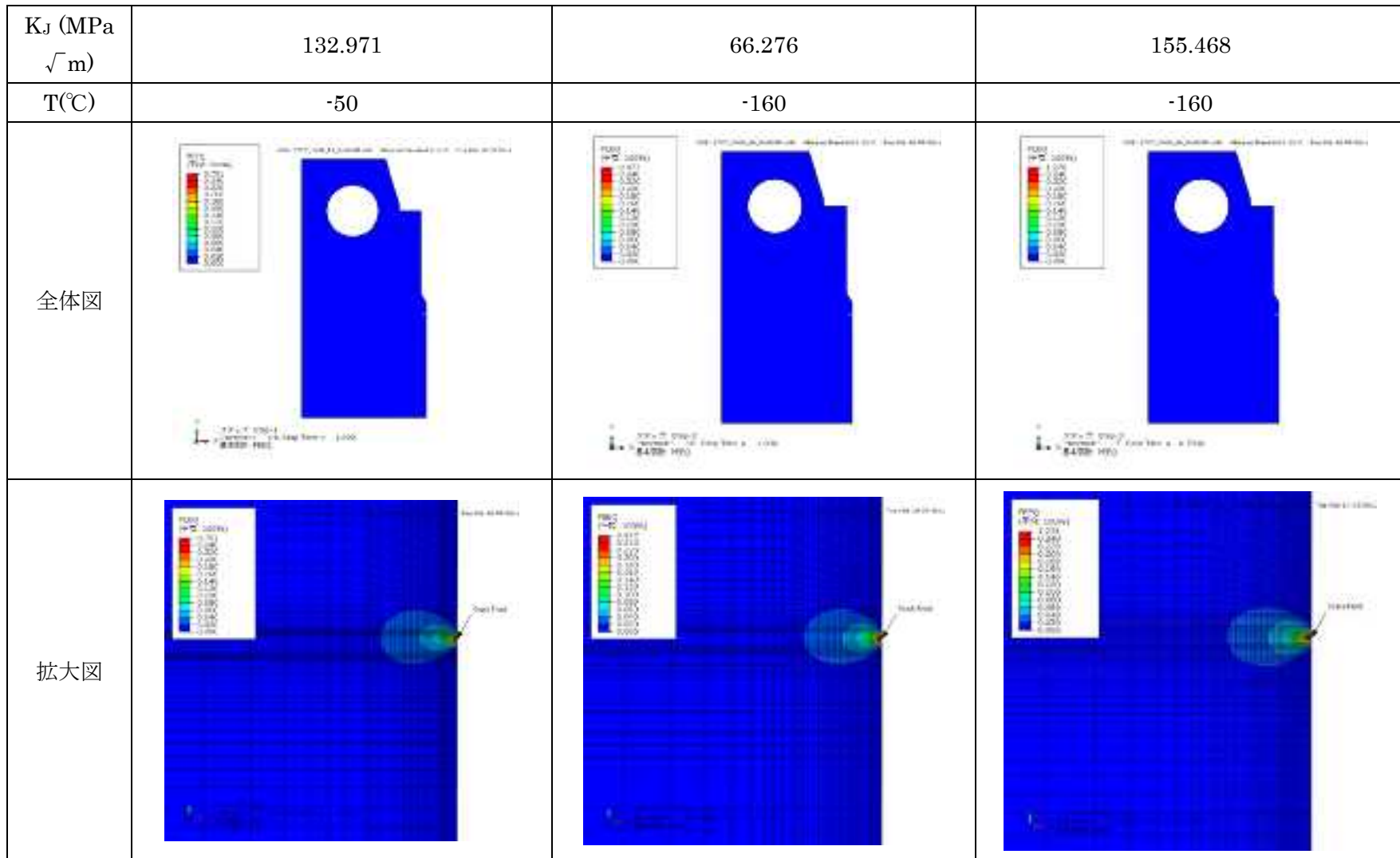


図 5.1.2-53 相当塑性ひずみコンタ WPS 試験条件 C5

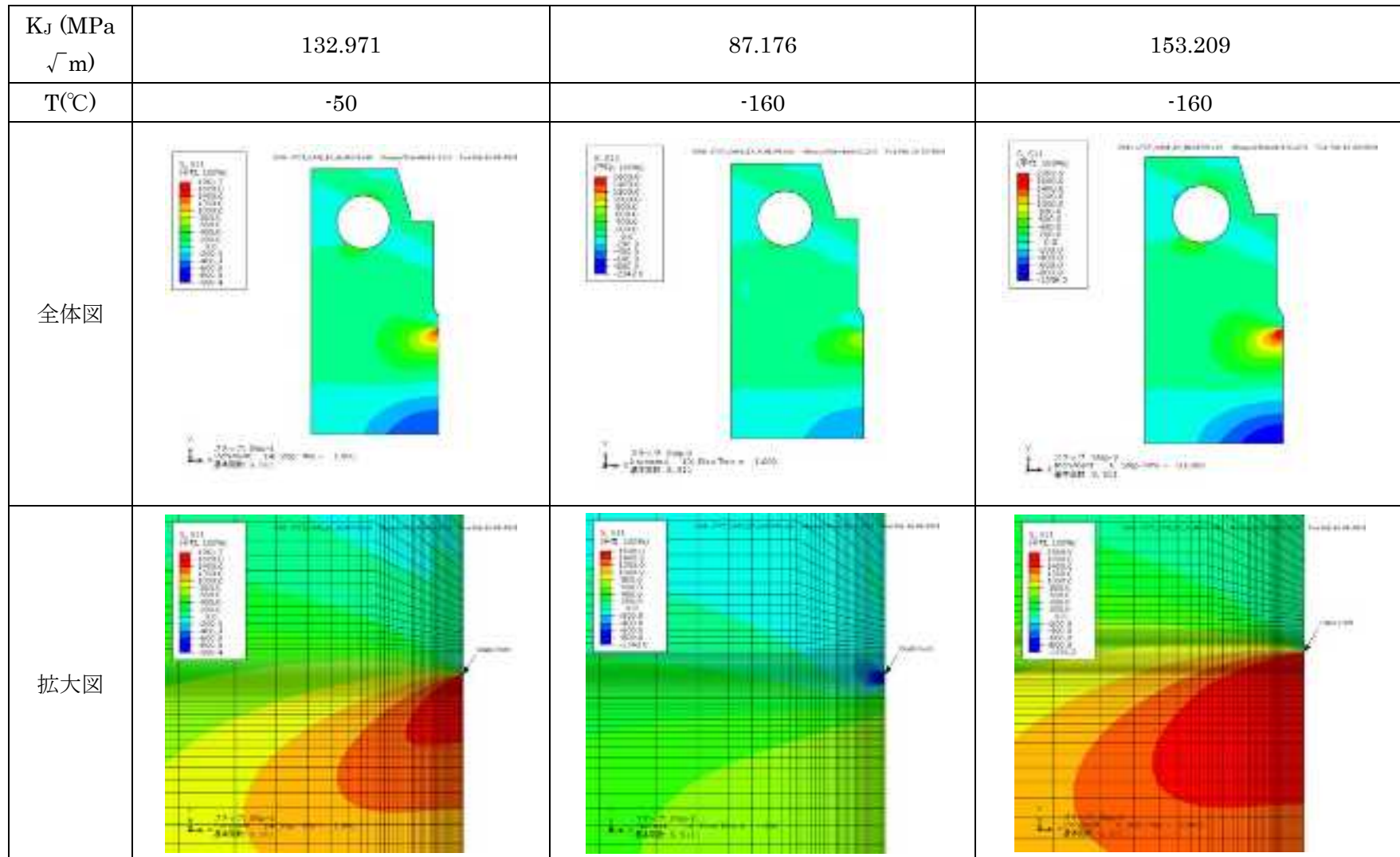


図 5.1.2-54 き裂開口方向応力コンタ WPS 試験条件 C6

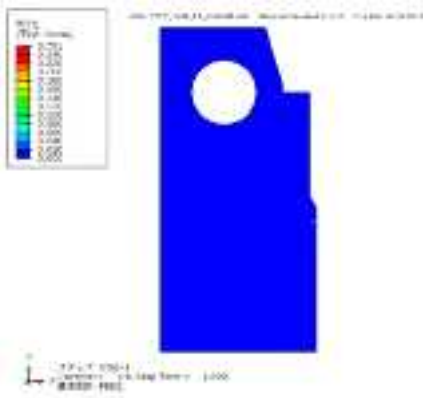
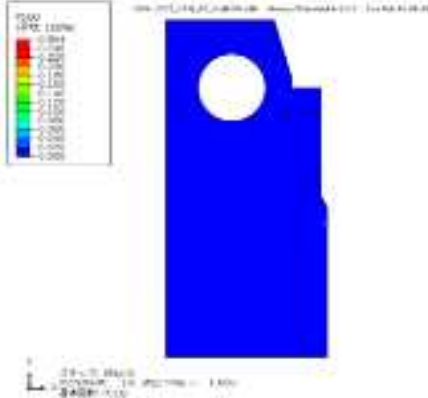
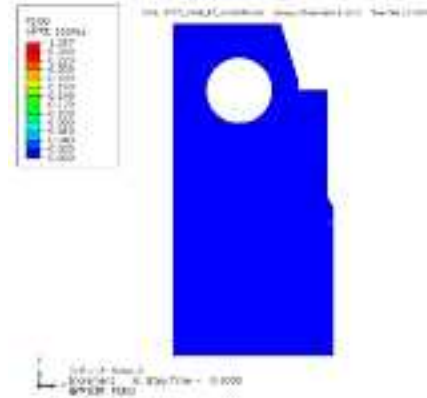
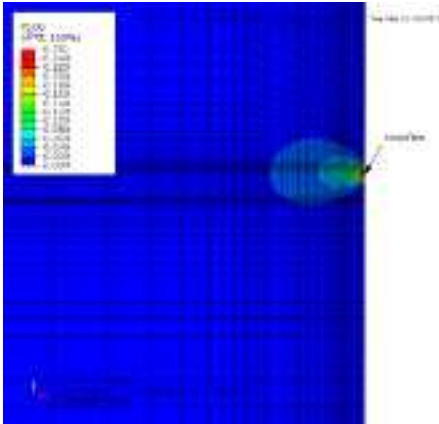
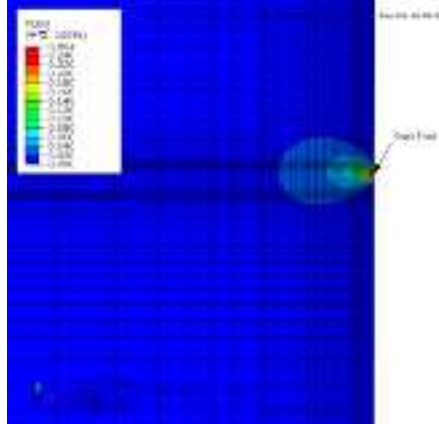
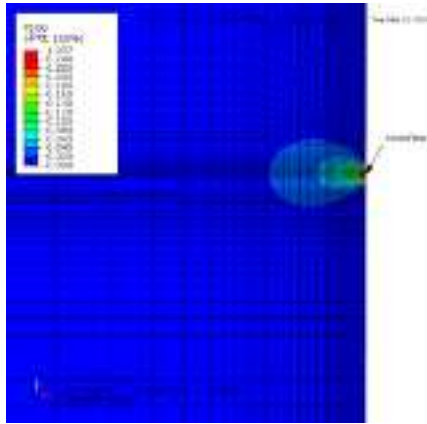
K_I (MPa \sqrt{m})	132.971	87.176	153.209
T(°C)	-50	-160	-160
全体図			
拡大図			

図 5.1.2-55 相当塑性ひずみコンタ WPS 試験条件 C6

5.1.2.3 ワイブル応力算出ツールの改良・整備

破壊靱性値を測定するためには、塑性拘束の強い深いき裂を有するコンパクトテンション型の試験片が用いられる。昨年度は、原子炉圧力容器鋼の破壊靱性試験片および原子炉圧力容器を対象に、試験片寸法等を変化させた場合の弾塑性解析を実施し、破壊靱性マスターカーブ法に関する拘束効果及びワイブル応力の評価を行った、しかし従来のワイブル応力算出法では単調荷重における評価を想定しており、高温予荷重効果のような温度変化や塑性ひずみ分布変化を考慮していない。本年度は、温度変化や塑性ひずみを考慮したローカルアプローチに基づくワイブル応力評価手法を整備した。ワイブル応力算出ツールの計算時に用いるモデルとして温度依存性を考慮した修正 Beremin モデルとひずみを考慮した修正 Beremin モデル、さらに両者を組み合わせた計算モデルを整備した。改良したワイブル応力算出ツールでは表 5.1.2-8 に示す項目を考慮した計算が可能である。

前項で実施した修正 Beremin モデルに基づくワイブル応力評価では保守的に WPS 効果を再現できたが、破壊限界ワイブル応力や破壊靱性値のばらつきに対しては十分な整合性が得られていない、また、本年度実施した WPS 試験で 0.16T-CT では明確な WPS 効果が見られなかったことについても、原因の候補として塑性領域の分布の違いがあることから、本年度整備したツールをもとに塑性ひずみを考慮したワイブル応力評価を次年度検討する。

(1) 温度依存性を考慮した修正 Beremin モデルの整備

温度依存性を考慮できる修正 Beremin モデル (式 (5.1.2-15)) に基づいてワイブル応力算出ツールを整備した。ここでは、へき開特性応力とワイブルパラメータに対して温度依存性を持たせるものとし、温度に対する値については計算時にデータテーブル形式で設定する。

$$\frac{\sigma_w(t)}{\sigma_u(\theta_{ref})} = \left[\frac{1}{V_o} \int_{V_f} \left[\max_{(\tau \leq t, \dot{p}(\tau) > 0)} \frac{\sigma_I(\tau)}{\sigma_u(\theta)} \right]^{m(\theta)} dV_f \right]^{\frac{1}{m(\theta)}} \quad (5.1.2-15)$$

- $\sigma_I(\tau)$: ある時刻 τ におけるプロセスゾーン内の有効応力 (例えば最大主応力)
- $p(\tau)$: 累積塑性変形
- $\sigma_u(\theta)$: 温度依存性を考慮したへき開特性応力 (データテーブルで入力。入力温度間では線形内挿値を適用)
- $m(\theta)$: 温度依存性を考慮したワイブルパラメータ (データテーブルで入力。入力温度間では線形内挿値を適用)
- θ_{ref} : 参照温度

具体的なワイルド応力算出の流れを以下に示す。

1. Abaqus から出力した各 `frame=increment`(以下 `inc`)のレポートファイル(.rpt)から積分点ごとの応力データ(S)、積分点ごとの相当塑性ひずみデータ(PEEQ)、要素体積データ(EVOL)、節点ごとの温度データ(NT11)を読み込む。なお、節点ごとの温度データを各要素に割り当てる際には Abaqus 入力ファイルの情報を用いて、節点と要素を対応付ける。
2. 各要素で用いる有効応力 σ_I (最大主応力 or 静水圧応力)は要素内の積分点の平均値を用いる。なお、有効応力が負の場合は 0.0 として扱う。
3. 各要素で用いる相当塑性ひずみ(PEEQ)は要素内の各積分点の最大値を用いる。
4. 各要素の温度(NT11)については、要素を構成する節点の持つ温度の平均値を用いる。
5. ユーザーが入力した温度依存性を考慮したへき開特性応力 $\sigma_u(temp)$ のテーブルデータの値を要素の温度 (θ) で線形補間して、各要素の $\frac{\sigma_I(\tau)}{\sigma_u(\theta)}$ を計算する。
6. 算出した $\frac{\sigma_I(\tau)}{\sigma_u(\theta)}$ の値は `inc` ごとに保持しておき、その時刻以前の `inc` において算出した値を含めた中から最大値を選択する。ただし、要素内の塑性相当ひずみ(PEEQ)が 1 つ前の `inc` と比較して増加しているものに限る。
7. 選択した $\frac{\sigma_I(\tau)}{\sigma_u(\theta)}$ の最大値と要素体積データを元に $\left[\frac{1}{V_0} \int_{V_f} \left[\max_{(\tau \leq t, \dot{p}(\tau) > 0)} \frac{\sigma_I(\tau)}{\sigma_u(\theta)} \right]^{m(\theta)} dV_f \right]^{\frac{1}{m(\theta)}}$ を計算する。具体的には、選択された最大値に対して、手順 5 と同様に要素の温度で線形補間した $m(\theta)$ で累乗した値に要素体積(EVOL)をかけた値を計算し、これを全要素分足し合わせる。
8. 得られた値を V_0 で割り、さらに $1/m(\theta)$ で累乗する。

手順 7 で計算された値は $\frac{\sigma_w(t)}{\sigma_u(\theta_{ref})}$ に相当するため、へき開特性応力 $\sigma_u(temp)$ のテーブルデータ

を参照温度で補間した $\sigma_u(\theta_{ref})$ をかけ、 $\sigma_w(t)$ を求める。

(2) ひずみを考慮した修正 Beremin モデルの整備

ひずみを考慮できる修正 Beremin モデルについて、式 (5.1.2-16) のモデルを計算できるように応力算出ツールを整備した。従来の計算モデルに対し、 ε_p の項を追加している。 ε_p については Abaqus の PE、PEEQ、PEMAG から選択できるものとした。PE を選択した場合は PE11、PE22、PE33 の平均値が用いられる。また、その要素ごとの値についても各積分点の最大値を用いるか、平均値を用いるかを選択可能である。

$$\sigma_w = \left[\frac{1}{V_0} \int_{V_p} \varepsilon_p \sigma_1^m dV_f \right]^{\frac{1}{m}} \quad (5.1.2-16)$$

ε_p : τ 局所的な塑性ひずみ

具体的なワイブル応力算出の流れを以下に示す。

1. Abaqus から出力した各 inc の.rpt から積分点ごとの S、積分点ごとの PEEQ、要素体積データ EVOL、積分点ごとの塑性ひずみデータ(ε_p として扱う)を読み込む。塑性ひずみデータについては、PE、PEEQ、PEMAG、PEP から選択できるものとし、PE の場合は PE11、PE22、PE33 の平均値を用いる。
2. 各要素で用いる有効応力 σ_f (最大主応力 or 静水圧応力)は要素内の積分点の平均値を用いる。なお、有効応力が負の場合は 0.0 として扱う。
3. 各要素で用いる PEEQ は要素内の各積分点の最大値を用いる。
4. 各要素の塑性ひずみ(ε_p)の値については、各積分値の最大値もしくは平均値を用いる。
5. 各要素ごとの σ_f を m で累乗した値に塑性ひずみの値(ε_p)を積算する。
6. 手順 4 で得られた値を全要素分足し合わせた値を V0 で割り、さらに 1/m で累乗する。

(3) 温度依存性及びひずみを考慮した計算モデルの整備

温度依存性を考慮できる修正 Beremin モデルとひずみを考慮できる修正 Beremin モデルを組み合わせ、温度依存性とひずみの両方を考慮できる計算モデル(式 (5.1.2-17))をワイブル応力算出ツールに整備した。

$$\frac{\sigma_w(t)}{\sigma_u(\theta_{ref})} = \left[\frac{1}{V_0} \int_{V_f} \varepsilon_p \left[\max_{(\tau \leq t, \dot{p}(\tau) > 0)} \frac{\sigma_I(\tau)}{\sigma_u(\theta)} \right]^{m(\theta)} dV_f \right]^{\frac{1}{m(\theta)}} \quad (5.1.2-17)$$

- $\sigma_I(\tau)$: ある時刻 τ におけるプロセスゾーン内の有効応力 (例えば最大主応力)
- $p(\tau)$: 累積塑性変形
- $\sigma_u(\theta)$: 温度依存性を考慮したへき開特性応力 (データテーブルで入力。入力温度間では線形内挿値を適用)
- $m(\theta)$: 温度依存性を考慮したワイブルパラメータ (データテーブルで入力。入力温度間では線形内挿値を適用)
- θ_{ref} : 参照温度
- ε_p : 局所的な塑性ひずみ

具体的なワイブル応力算出手順を以下に示す。

1. Abaqus から出力した各 inc の.rpt から積分点ごとの S、積分点ごとの PEEQ、EVOL、積分点ごとの塑性ひずみデータ(ε_p として扱う)、節点ごとの温度データ(NT11)を読み込む。塑性ひずみデータについては、PE、PEEQ、PEMAG から選択できるものとし、PE の場合は PE11、PE22、PE33 の平均値を用いる。
2. 各要素で用いる有効応力 σ_I (最大主応力 or 静水圧応力)は要素内の積分点の平均値を用いる。なお、有効応力が負の場合は 0.0 として扱う。
3. 各要素で用いる PEEQ は要素内の各積分点の最大値を用いる。
4. 各要素の温度(NT11)については、要素を構成する節点の持つ温度の平均値を用いる。

5. 各要素の塑性ひずみ(ϵ_p)の値については、各積分点の最大値もしくは平均値を用いる。
6. 入力した温度依存性を考慮したへき開特性応力 $\sigma_u(temp)$ のテーブルデータの値を要素の温度 (θ) で線形補間して、各要素の $\frac{\sigma_I(\tau)}{\sigma_u(\theta)}$ を計算する。
7. 算出した $\frac{\sigma_I(\tau)}{\sigma_u(\theta)}$ の値は inc ごとに保持しておき、その時刻以前の inc において算出した値を含めた中から最大値を選択する。ただし、要素内の塑性相当ひずみが 1 つ前の inc と比較して増加しているものに限る。
8. 選択した $\frac{\sigma_I(\tau)}{\sigma_u(\theta)}$ の最大値と要素体積データを元に $\left[\frac{1}{V_0} \int_{V_f} \left[\max_{(\tau \leq t, \dot{p}(\tau) > 0)} \frac{\sigma_I(\tau)}{\sigma_u(\theta)} \right]^{m(\theta)} dV_f \right]^{\frac{1}{m(\theta)}}$ を計算する。具体的には、選択された最大値に対して、手順 6 と同様に要素の温度で線形補間した $m(\theta)$ で累乗した値に、塑性ひずみ(ϵ_p)の値と要素体積をかけた値を計算し、これを全要素足し合わせる。
9. 得られた値を V_0 で割り、さらに $1/m(\theta)$ で累乗する。
10. 手順 7 で計算された値は $\frac{\sigma_w(t)}{\sigma_u(\theta_{ref})}$ に相当するため、へき開特性応力 $\sigma_u(temp)$ のテーブルデータを参照温度で補間した $\sigma_u(\theta_{ref})$ をかけ、 $\sigma_w(t)$ を求める。

表 5.1.2-8 計算で考慮できる項目と用いる計算モデル

温度依存性の考慮	ひずみの考慮	計算に用いるモデル
×	×	従来モデル
○	×	温度依存性を考慮した修正 Beremin モデル
×	○	ひずみを考慮した修正 Beremin モデル
○	○	温度依存性とひずみを考慮したモデル

5.1.2.4 高温予荷重(WPS)効果に関する試験のまとめ

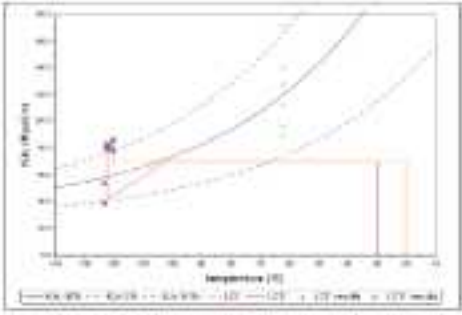
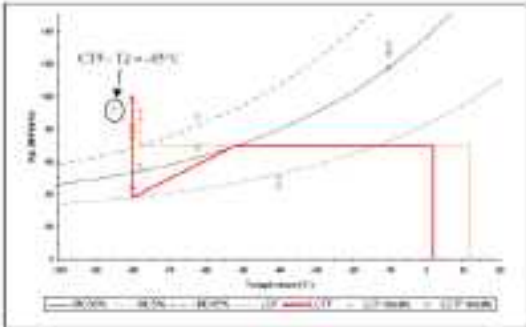
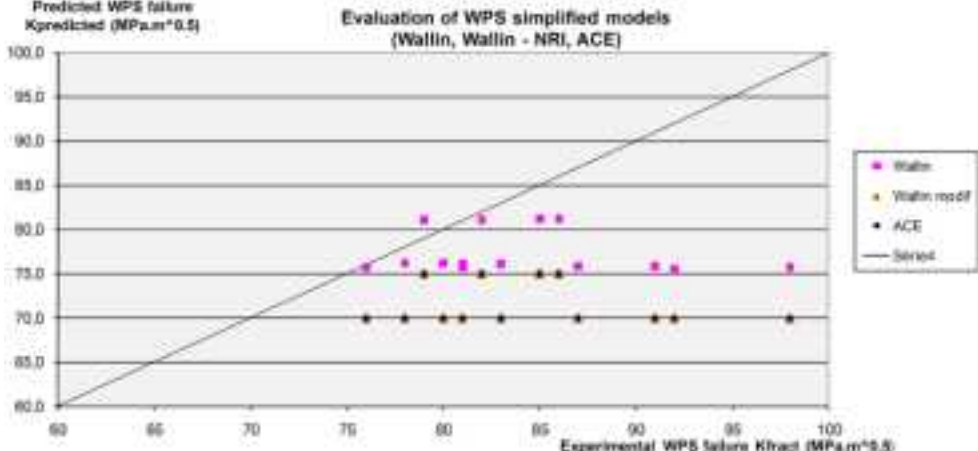
本年度は、昨年度と同じ PWR 比較標準材から 1T-CT、0.4T-CT 及び 0.16T-CT 試験片を製作した。WPS 効果の寸法依存性を調べることに着目し、全ての試験片サイズの予荷重条件(LUCF)を揃えた。試験の結果、1T-CT 試験片及び 0.4T-CT 試験片については、 -160°C における破壊靱性の中央値 $K_{Jc(\text{med})}$ よりも高い値で破壊しており、WPS 効果が認められたが、0.16T-CT 試験片については明確な WPS 効果は認められなかった。これは、予荷重負荷時に 0.16T-CT のリガメントの大部分が塑性変形し、圧縮応力が残っている範囲が非常に狭いため、WPS 効果が明確に生じなかったものと考えられる。また、本研究で得られたデータ及び文献データについて調査した結果、WPS 効果の板厚に対する明確な依存は認められなかった。次年度は監視試験片から採取可能な 0.16T-CT による WPS 効果の確認を目的に、0.16T-CT について降伏応力高く塑性変形が生じにくいより低温で予荷重を加え、LUCF 及び LCF(Load→Cool→Fracture)等の荷重条件で WPS 効果の確認を行う。

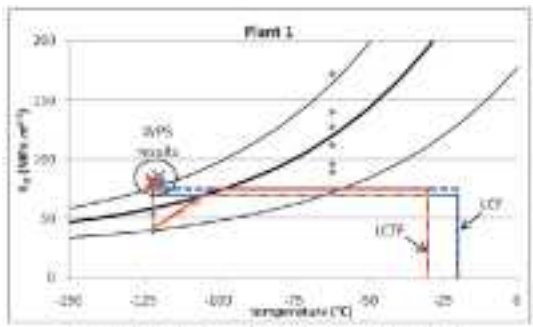
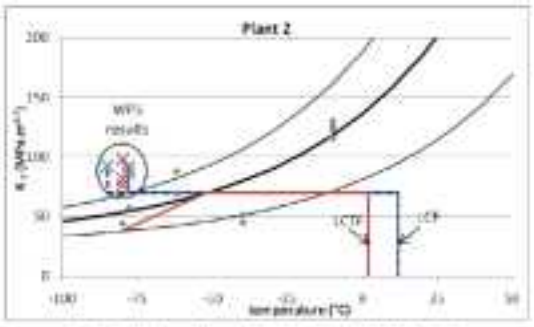
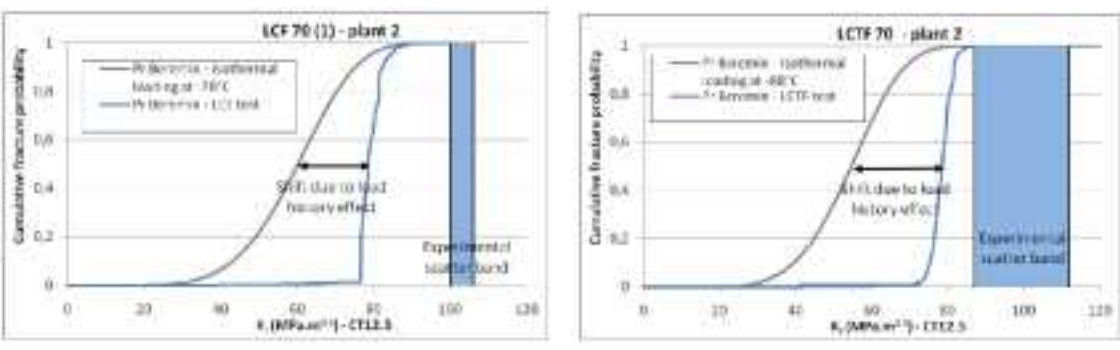
WPS 効果に対するローカルアプローチ法のモデルとして、修正 Beremin モデル(き裂先端領域の塑性ひずみが増加しているときのみ、破壊が進行するという考え方を適用したプログラムの試解析を行い、1T-CT の試験データとの比較検証を行った。その結果、修正 Beremin モデルを用いたワイブル応力評価により、WPS 効果による破壊靱性値の上昇が評価できることが確認できた。また、試験データはワイブル応力の累積破損頻度の高い領域に分布していることから、保守的な評価が行えることが示された。しかし、WPS 時の破壊限界ワイブル応力や破壊靱性値のばらつきについては精度良く評価できていないため、次年度は、本年度整備したひずみを考慮したワイブル応力算出ツールを用いた解析や、ワイブルパラメータ算出方法の改良等を行い評価精度の向上を進める。また、本年度に実施した 0.4T-CT 及び 0.16T-CT、次年度実施する 0.16T-CT 試験の解析を行い、試験結果との比較検証を行う。これらの検討を通じ、実機の想定き裂における WPS 効果を評価する手法の整備を進める。

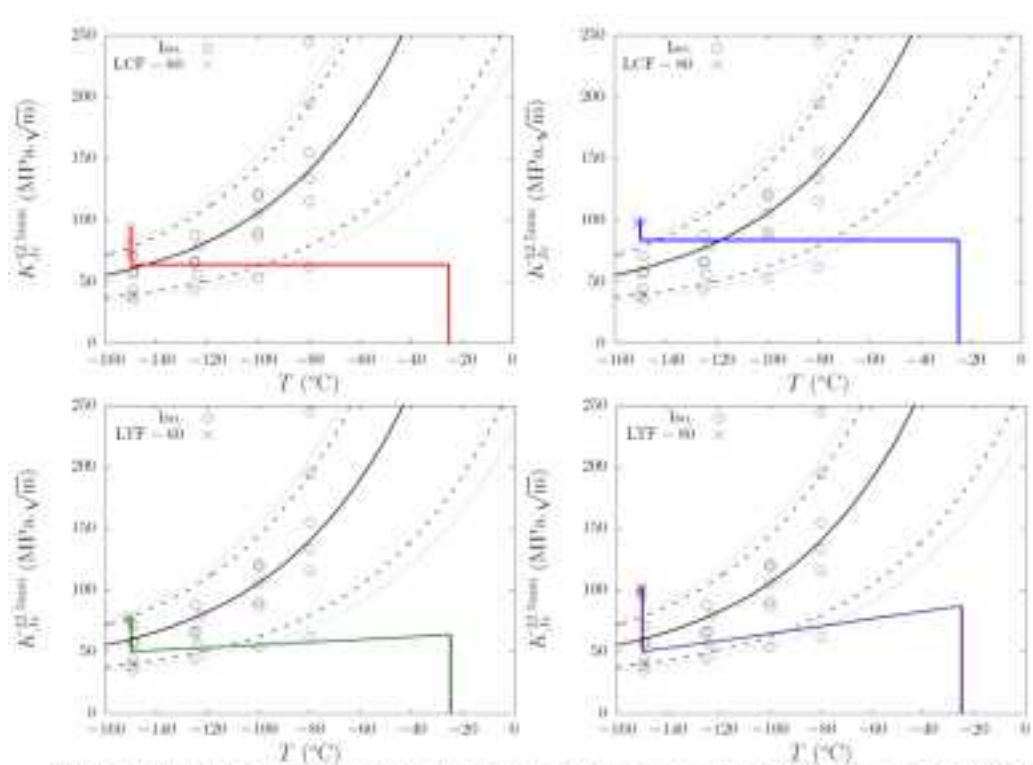
5.1.2.5 WPS 効果に関する文献の調査結果

文献整理番号 1

文献名		NESC VII SYNTHESIS: A EUROPEAN PROJECT FOR APPLICATION OF WPS IN RPV ASSESSMENT INCLUDING BIAXIAL LOADING
出典	誌名	Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference
	筆者	Dominique Moinereau, Stéphane Chapuliot, Stéphane Marie, Clémentine Jacquemoud
	Vol.	PVP2014-28076
目的		各 WPS 効果の予測モデルの検証。
実施内容		18MND5 (A533B 相当材) から採取した、十字型試験片及び PTS-D 試験片 (Pressurised Thermal Shock Disk) について LCTF と LCF の波形で WPS 試験を行った。 さらに、Wallin モデル及び ACE モデルなどによる解析を行い、NESC VII WPS データベースの試験結果と比較を行った。
要約	結論	<p>WPS 試験の結果、十字型試験片について破壊発生時の K 値 K_{FRAC} が増加し、いずれもマスターカーブの 95% 信頼限界を超えるデータが得られた。また、PTS-D 試験片については冷却過程での破壊は認められなかった。</p> <p>Fig. 19 に示すように、実験値と予測値を比較すると、Wallin モデルでは非保守的な予測結果となるケースも認められたが、ACE モデル及び Wallin-NRI モデルについては保守的な予測結果となることが認められた。</p>
		<p>The figure consists of three scatter plots arranged in a 2x2 grid (with the bottom-right cell empty). Each plot shows $K_{fract_predicted}$ [MPa$m^{3/2}$] on the y-axis versus $K_{fract_experimental}$ [MPa$m^{3/2}$] on the x-axis, both ranging from 50 to 100. A solid diagonal line represents the 1:1 relationship. Data points are categorized by prediction confidence levels: 5% (blue circles), 50% (red squares), and 95% (green triangles). - Top-left: Wallin model. Shows significant scatter, with many points falling below the 1:1 line, indicating non-conservative predictions. - Top-right: ACE model. Points are clustered around the 1:1 line, indicating more accurate predictions. - Bottom-left: Wallin-NRI model. Points are also clustered around the 1:1 line, indicating more accurate predictions.</p>
		<p>Figure 19: Example of application of WPS simplified models on EDF data</p>

文献名	EFFECT OF WARM PRE-STRESS ON HIGHLY IRRADIATED PRESSURE VESSEL STEEL
出典	誌名 Proceedings of the ASME 2014 Pressure Vessels & Piping Conference
	筆者 Dominique Moinereau, Caroline Landron, Malik Ait Bachir, Eric Garbay
	Vol. PVP2014-28078
目的	照射による WPS 効果への影響の検証
実施内容	<p>2 プラントのカプセルに装荷されていた曲げ試験片から 1/2TCT 試験片(照射量: 5×10^{19}, $6.5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$)を採取し, LCF 及び LCTF (Load-Cool-Transient-Fracture, Fig7 参照)の 2 波形で WPS 試験を実施した。</p> <p>さらに, 4 種類の工学モデル(Chell&Haigh, Wallin, Wallin-NRI, ACE)による評価も行った。</p>
要約	<p>Fig. 6 及び Fig. 7 に WPS 試験の結果を示しており, LCF 及び LCTF のいずれについても WPS 効果が認められた。</p> <p>Fig. 9 に示すように, 実験値と予測値を比較すると, いずれのモデルについても保守的な予測結果となることが認められた。</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;">   </div> <p>Figure 6: WPS results on Plant 1 (LCF & LCTF WPS cycles) Figure 7: WPS results on Plant 2 (LCF & LCTF WPS cycles)</p> <div style="text-align: center;"> <p>結論</p>  <p>Figure 9: Example of tests interpretation with WPS simplified models (Wallin, Wallin-NRI, ACE)</p> </div>

文献名	Warm pre-stress experiments on highly irradiated reactor pressure vessel steel
出典	誌名 Fontevraud 8
出典	筆者 Caroline Landron, Malik Aït-Bachir, Dominique Moinereau, Eric Molinié, Eric Garbay
出典	Vol. 0-T01-034
目的	照射による WPS 効果への影響の検証
実施内容	2 プラントのカプセルに装荷されていた曲げ試験片から 1/2TCT 試験片(照射量: 5×10^{19} , $6.5 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$)を採取し, LCF 及び LCTF の 2 波形で WPS 試験を実施した。さらに, Beremin モデルによる累積損傷確率の評価も行った。
要約	<p>Fig. 5 及び Fig. 6 に WPS 試験の結果を示しており, LCF 及び LCTF のいずれについても WPS 効果が認められた。</p> <p>Fig. 8 に示すように, 試験結果と解析値を比較すると, Beremin モデルにより得られた累積破損確率はばらつきを考慮した試験結果によりも保守的な予測結果となることが認められた。</p>    <p>Figure 8: Cumulative fracture probability given by FE analysis based on local approach (Beremin model)</p>

文献名	Warm prestress effect on highly irradiated A508 C13 RPV steel
出典	誌名 Fontevraud 8
筆者	J. Hure, C. Vaille, P. Wident, D. Moinereau, C. Landron, C. Benhamou, S. Chapuliot, B. Tanguy
Vol.	O-T01-055
目的	照射による WPS 効果への影響の検証
実施内容	16MND5 (A508 C1.3 相当材) から試験片を採取し、オシリス MTR 炉で最大 $13 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ まで照射。さらに、照射前後での引張試験、シャルピー衝撃試験、破壊靱性試験 (試験片形状: 0.5TCT) 及び WPS 試験を実施。
要約	<p>Fig. 6 及び Fig. 7 に照射前後の WPS 試験の結果を示しており、照射材及び未照射材のいずれについても WPS 効果が認められた。</p> <p>さらに、Fig. 8 に示すように、Wallin モデル及び ACE モデルにより WPS 後の靱性を評価した結果、試験データに比べ、Wallin モデルについては非保守側の評価となることが認められたが、ACE モデルについては全て保守側の評価となることが認められた。</p>  <p>結論</p> <p>Figure 6: Thermomechanical paths used on CT specimens to assess the WPS effect, on unirradiated material, compared to experimental toughness results and Master Curve isoprobabilities curves with $T_0 = -93^\circ\text{C}$</p>

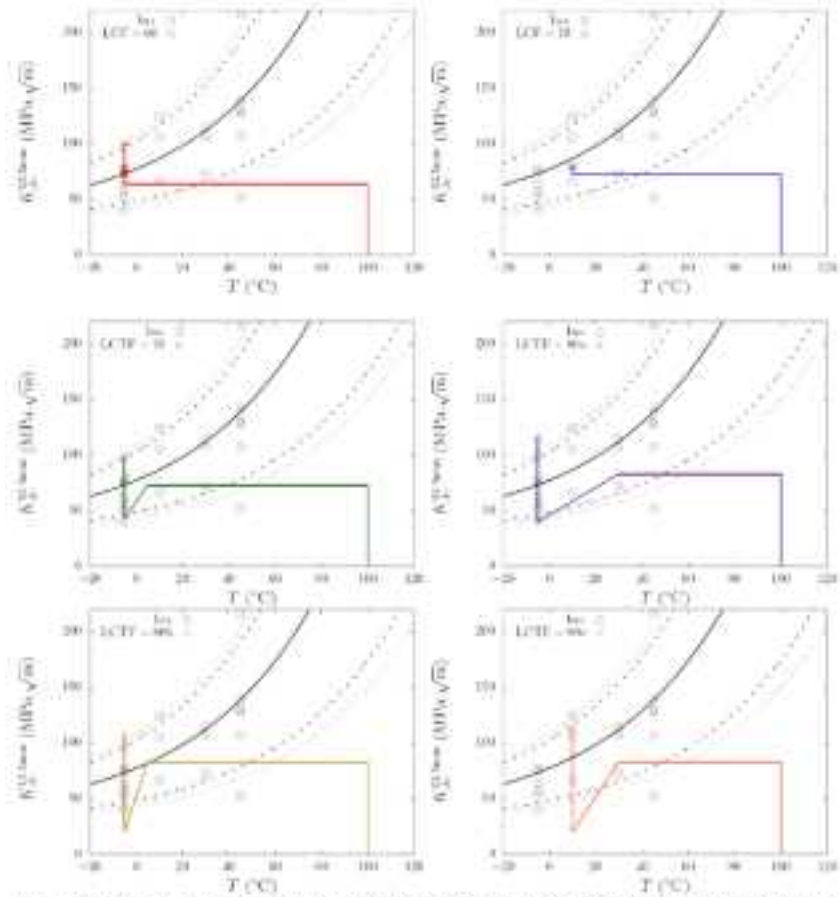


Figure 7: Thermo-mechanical paths used on CT specimens to assess the WPS effect, an irradiated material with a mean fluence of $13.5 \cdot 10^{19} \text{ n.cm}^{-2}$, compared to experimental toughness results and Master Curve isoprobabilities curves with $T_0 = 33^\circ\text{C}$.

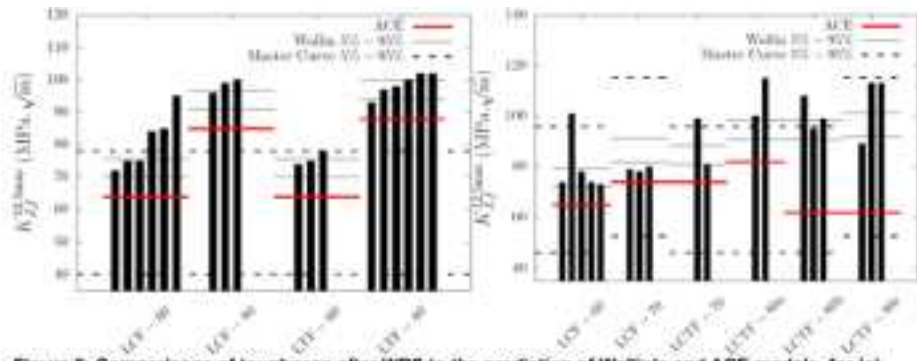


Figure 8: Comparisons of toughness after WPS to the prediction of Wallin's and ACE models, for (a) unirradiated and (b) irradiated material.

文献名	WPS criterion proposition based on experimental data base interpretation
出典	誌名 Fontevraud 7
	筆者 Stephane. Chapuliot, Jean-Pierre Izard, Dominique Moinereau, Stephane Marie
	Vol. 022-A141-T01
目的	WPS 効果に影響を及ぼすパラメータの検討
実施内容	試験データを収集し、パラメトリックスタディを行うことで、WPS 効果に影響するパラメータの抽出を実施した。
要約	<p>Fig. 7 に WPS 効果への板厚の影響を示しており、LCF 及び LTF (Load-Transient-Fracture) では板厚の増加による $(K_f - K_{WPS}) / K_{WPS}$ の僅かな減少が認められたが、LUCF については WPS1 材に僅かな減少が認められているのみで、材料に依存すると考えられる。</p>
	<p>Fig. 8 に WPS 効果への予荷重のレベル K_{WPS} の影響を示しており、いずれの波形についても K_{WPS} の増加による $(K_f - K_{WPS}) / K_{WPS}$ の減少が明確に認められた。</p>
	<p>Fig. 9 に WPS 効果への予荷重時の温度と再負荷時の温度の差の影響を示しており、いずれの波形についても温度の差が $(K_f - K_{WPS}) / K_{WPS}$ に与える影響は認められなかった。</p>
結論	<p>Figure 7: Effect of thickness on reloading capability</p>
	<p>Figure 8: Effect of pre loading level on reloading capability</p>
	<p>Figure 9: Influence of the temperature or yield stress limit</p>

5.1.3 き裂伝播停止破壊靱性(K_{Ia})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が必要である。したがって、脆性き裂発生に関する破壊靱性(K_{Ic})に加えて、き裂伝播停止破壊靱性(K_{Ia})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_{Ia} 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_0 と K_{Ia} 、及び計装シャルピーで得られるき裂伝播停止荷重 F_a と K_{Ia} 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 K_{Ia} データを拡充し、 T_0 との相関を評価した。また、PWR 比較標準材を用いて計装シャルピー試験を実施し、 K_{Ia} との相関を調査した。

5.1.3.1 未照射材を用いた K_{Ia} 試験

(1) 供試材及び試験片

平成 21 年度に製作した鋼材 JRM 材 (M6-1) 及び JRH 材 (H6-1) を用いて、試験片を製作した。供試材の材料特性、化学成分、機械的特性及びシャルピー衝撃特性を表 5.1.3-1 に示す。 K_{Ia} 試験に用いる試験片は、ASTM E1221-12 「Standard Test Method for Determining Plane-Strain Crack-Arrest Fracture Toughness、 K_{Ia} 、 of Ferritic Steels」(5.1.3-1)に規定された Compact Crack Arrest (CCA)試験片とした。CCA 試験片の種類と製作数量を表 5.1.3-2 に示す。昨年度に実施した K_{Ia} 試験にて、1 インチの CCA 試験片でも脆化溶接ビードから脆性き裂が発生し、 K_{Ia} の寸法に関する有効性判定条件を満足したことが確認されたため、今年度は板厚 2 インチ及び 1 インチの CCA 試験片を製作した。試験片本数は、各供試材ともに 1TCCA 試験片と 2TCCA 試験片の合計が 10 体以上となるように製作した。試験片の採取方向は、き裂伝播方向が主圧延方向と一致するようにし、板厚方向の採取位置については、1/4T 及び 3/4T(T: 供試材板厚)とした。それぞれの試験片の形状及び寸法を図 5.1.3-1 に示す。製作した試験片の寸法は、いずれも ASTM E1221-12 の寸法公差を満足した。ただし、図 5.1.3-1 中のノッチ幅 N を小さく設定すると溶接棒との隙間が狭くなるため、脆化溶接ビードの施工性が悪くなる可能性がある。したがって、 N については規格の範囲内で極力大きくなるように設定した。そのため、2TCCA 試験片と 1TCCA 試験片は相似形状にはなっていない。また、2TCCA 試験片では低温での負荷時の治具破損を避けるため、試験片の治具接触部に面取りを実施している。試験片のノッチ先端にはき裂発生のための脆化溶接ビードを設けた。脆化溶接ビード用の溶接棒は、JEAC 4202 「フェライト鋼の落重試験方法」(5.1.3-2)の落重試験片の溶接ビード製作時に使用される溶接棒を使用した。溶接条件は平成 8 年の火力原子力発電技術協会・ K_{IR} 検討会当時の CCA 試験片の

製作条件に関する弊社資料を参考にし、予熱は実施しないこととした。また、基本的な溶接条件は、落重試験片製作時の溶接方法を参考にした。脆化溶接ビードには切欠きルート半径 $\rho=0.35\text{mm}$ (最大)で、 45° の V ノッチを放電加工にて施工した。サイドグループは V ノッチ加工後に加工した。

(2) K_{Ia} 試験方法

ASTM E1221 に準拠して K_{Ia} 試験を行うため、サポートブロック、ガイド、くさび、ナイフエッジ、恒温槽等を含む試験装置を準備した。試験装置の状況を図 5.1.3-2 に示す。試験片表面の熱電対設置位置は、ASTM E1221 に従い V ノッチ先端からき裂伝播方向に 25.4 mm 離れた位置とした(サイドグループからの距離は約 5 mm)。試験開始前には試験片内の温度の均一性を確保するため、所定の温度に到達してから 30 分間以上保持した。試験中は試験温度 $\pm 3^\circ\text{C}$ の範囲内で試験温度を制御した。試験前には試験片、サポートブロック、ガイド、くさびなどの接触する箇所には低温用グリス (HP-300 東レ・ダウコーニング製) を塗布し、ガイドとくさび間の摩擦を低減した。

試験条件を以下に示す。

冷媒	: エタノール
冷却方法	: エタノールのドライアイス冷却
試験機	: $\pm 200\text{kN}$ 試験機(島津製作所: SURVOPULSER)
制御	: 変位制御
押込速度	: 2.5 mm/min (クロスヘッド変位)
伸び計	: MTS 632.03-3X の 632.03F-3X (005) の 047-400-332 (GL=6 mm)

くさびの押込条件・手順については、ASTM E1221 で開口変位や負荷回数が決められているため、それに基づいて試験を実施した。試験では図 5.1.3-3 に示すように荷重と開口変位を測定するが、初回の変位量 $[(\delta_o)_1]_{\max}$ 、各回の変位量の増分 $[(\delta_o)_n]_{\max}$ 及び最大変位量 $[\delta_o]_{\text{limit}}$ は式(5.1.3-1)～式(5.1.3-3)にて決定される。JRM 材の $[\delta_o]_{\text{limit}}$ は 1TCCA 試験片で約 1.2mm、2TCCA 試験片で約 1.9mm、JRH 材の $[\delta_o]_{\text{limit}}$ は 1TCCA 試験片で約 1.25mm、2TCCA 試験片で約 2.0mm であった。なお、ヤング率は $E(\text{MPa})=207,000-87(T(^{\circ}\text{C})-20)$ の関係より算出した。

$$[(\delta_o)_1]_{\max}=0.69 \sigma_{YS} W \sqrt{(B_N/B)/Ef(a_0/W)} \quad (5.1.3-1)$$

$$[(\delta_o)_n]_{\max}=[1.0+0.25(n-1)]0.69 \sigma_{YS} W \sqrt{(B_N/B)/Ef(a_0/W)} \quad (5.1.3-2)$$

$$[\delta_o]_{\text{limit}}=1.50 \sigma_{YS} W \sqrt{(B_N/B)/Ef(a_0/W)} \quad (5.1.3-3)$$

$$f(x)=(1-x)^{0.5}(0.748-2.176x+3.56x^2-2.55x^3+0.62x^4)$$

$$x = a/W$$

ここで、

E	: ヤング率 =207、000-87(T(°C)-20)(MPa)
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)
a ₀	: 初期切欠き長さ(m)
σ _{YS}	: 降伏強さ(MPa)
T	: 試験温度(°C)
n	: サイクル数

試験温度での JRM 材及び JRH 材の降伏強さは、引張試験より得られた 0.2%耐力と温度の関係から、図 5.1.3-4 のデータをフィッティングして評価した式(5.1.3-4)～式(5.1.3-5)で推定した。

JRM 材

$$\sigma_{YS} = 126 + 230 \exp\{109/(T+273.15)\} \quad (\text{MPa}) \quad (5.1.3-4)$$

JRH 材

$$\sigma_{YS} = 112 + 260 \exp\{103/(T+273.15)\} \quad (\text{MPa}) \quad (5.1.3-5)$$

T : 試験温度 (°C)

試験終了後は加熱(370°C×5 時間)により試験片の破面を着色し、K_{Ia}試験により伝播・停止したき裂長さを破面から測定した。き裂長さは、サイドグループ底での試験片板厚 B_Nを 4 等分した 1/4、2/4、3/4 の位置で測定し、これら 3 点の平均値を停止き裂長さ a_aとした。

(3) K_{Ia}評価方法

き裂発生時の K 値である K₀及びき裂伝播停止靱性の暫定値 K_{Qa}^(5.1.3-1)は式(5.1.3-6)より求めた。

$$K = E \delta f(x) \sqrt{(B/B_N)/\sqrt{(W)}} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (5.1.3-6)$$

$$f(x) = (1-x)^{0.5} (0.748 - 2.176x + 3.56x^2 - 2.55x^3 + 0.62x^4)$$

$$x = a/W$$

$$d_0 = \delta_0 \cdot (\delta_p)_{n-1}$$

$$d_a = 0.5[\delta_0 + \delta_a - (\delta_p)_1 - (\delta_p)_{n-1}]$$

ここで、

E	: ヤング率=207、000-87(T(°C)-20)(MPa)
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)
a ₀	: 初期切欠き長さ(m)
a _a	: き裂伝播停止時のき裂長さ(m)
δ	: 開口変位(m)
(δ _p) ₁	: 第1サイクル終了時の変位オフセット(m)
(δ _p) _{n-1}	: 最終サイクル終了時のトータル変位オフセット(m)
n	: サイクル数

き裂発生時の K_0 を評価する際には式(5.1.3-6)にて $a=a_0$ 及び $\delta=d_0$ として評価し、き裂伝播停止靱性の暫定値 K_{Qa} を評価する際には $a=a_a$ 及び $\delta=d_a$ として評価した。さらに式(5.1.3-7)～式(5.1.3-11)に示す条件 A～E のすべてを満足する場合にデータは有効と判断し、 K_{Ia} データとして表記した。

条件 A	未破断部分のリガメント	: $W - a_a \geq 0.15W$	(5.1.3-7)
条件 B	未破断部分のリガメント	: $W - a_a \geq 1.25(K_a/\sigma_{Yd})^2$	(5.1.3-8)
条件 C	試験片板厚	: $B \geq 1.0(K_a/\sigma_{Yd})^2$	(5.1.3-9)
条件 D	き裂の進展長さ	: $a_a - a_0 \geq 2N$	(5.1.3-10)
条件 E	き裂の進展長さ	: $a_a - a_0 \geq (K_0/\sigma_{Ys})^2/2\pi$	(5.1.3-11)

ここで、

N	: 試験片のノッチ幅(m)
K_0	: き裂発生時の K 値(MPa \sqrt{m})
K_a	: き裂伝播停止時の K 値(MPa \sqrt{m})
σ_{Ys}	: 静的な降伏強さ(MPa)
σ_{Yd}	: 動的な降伏強さ(MPa)

(一般的な構造用鋼材では σ_{Yd} は σ_{Ys} より 205MPa 大きい値に設定)

(4) K_{Ia} 試験結果

K_{Ia} 試験結果を表 5.1.3-3 に示す。今回 K_{Ia} 試験を行った試験片では、1TCCA-M-5 (試験

温度：-20℃）及び 2TCCA-H-3（試験温度：-20℃）を除き、全ての試験片が条件 A～E を満足した。なお、脆性き裂が発生しなかった試験片及び Invalid となった試験片の結果は後述する T_{KIa} の評価には用いていない。JRM 材の荷重-開口変位の結果を図 5.1.3-5 に、JRH 材の荷重-開口変位の結果を図 5.1.3-6 に示す。ASTM E1221 では開口変位 δ_a はき裂発生後約 0.1 秒後の値と定義されているが、き裂発生後約 0.1～0.3 秒後の安定した開口変位を開口変位 δ_a とした。なお、脆性き裂が発生しなかった試験片では、荷重-開口変位関係において一定の変位以上での荷重増加の鈍化が認められた。これは、脆性き裂が発生せず、延性き裂が成長したためと推定される。

JRM 材の破面を図 5.1.3-7 に、JRH 材の破面を図 5.1.3-8 に示す。また、き裂長さの計測結果を表 5.1.3-4 に示す。JRM 材及び JRH 材のいずれも -40℃ 以下の低温側では、き裂伝播停止後の破面先端は平坦であり、進展領域の未破断部や内部のみでき裂が進展するトンネリングは顕著ではなかった。一方、-20℃ の高温側ではこれらが顕著であった。

有効な K_{Ia} データについて ASTM E1221-12 APPENDIX-X2^(5.1.3-1) に規定されている最尤推定法を用いて参照温度 T_{KIa} を算出した。なお、参照温度 T_{KIa} は式(5.1.3-12)にて K_{Ia} の中央値が $100\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ に対応する温度である。

$$K_{Ia(\text{med})} = 30 + 70 \exp\{0.019(T - T_{KIa})\} \quad (\text{MPa}\sqrt{\text{m}}) \quad (5.1.3-12)$$

最尤推定法では、式(5.1.3-13)に従い $T_{KIa} \pm 50^\circ\text{C}$ の範囲の試験温度で得られたデータを用いて、参照温度 T_{KIa} を決定する。i 番目の温度範囲における有効な試験片数 r_i と i 番目の温度範囲の試験片の重み係数 n_i を表 5.1.3-5 に示す。ここで、 r_i 及び n_i は式(5.1.3-14)を満足する必要があるため、 T_{KIa} を評価するためには最低 6 個の有効な K_{Ia} データが必要となる。

$$\sum_{i=1}^n \frac{\ln K_{Ia(i)} \exp[0.019(T_i - T_{KIaQ})]}{30 + 70 \exp[0.019(T_i - T_{KIaQ})]} - \sum_{i=1}^n \frac{\ln(30 + 70 \exp[0.019(T_i - T_{KIaQ})]) \times \exp[0.019(T_i - T_{KIaQ})]}{30 + 70 \exp[0.019(T_i - T_{KIaQ})]} = 0 \quad (5.1.3-13)$$

$$\sum_{i=1}^6 r_i n_i \geq 1 \quad (5.1.3-14)$$

ここで、

$K_{Ia(i)}$ = 試験温度 T_i における K_{Ia}

n = 有効な K_{Ia} データ数

また、標準偏差 σ については式(5.1.3-15)より算出される。

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n \{\ln K_{Ia(i)} - \ln(30 + 70 \exp[0.019(T_i - T_{KIa}))]\}^2}{n} \quad (5.1.3-15)$$

上下限の信頼範囲については式(5.1.3-15)より算出された標準偏差 σ を用いて、式(5.1.3-16)により定義される。ここで、 z は標準正規分布の確率 xx に対応する累積分布の逆数となる。

$$K_{Ia(0.xx)} = \exp\{\ln(K_{Ia(\text{med})}) + z \sigma\} \quad (5.1.3-16)$$

表 5.1.3-6 に JRM 材及び JRH 材の T_{KIa} と標準偏差 σ を示す。また、温度と K_{Ia} データの関係を図 5.1.3-9 に示す。図中には式(5.1.3-12)にて表される 50%信頼線と式(5.1.3-16)にて表される 5%及び 95%信頼限界線も併記した。これらの評価により、JRM 材の T_{KIa} は 7°C、JRH 材の T_{KIa} は -11°C であり、標準偏差 σ は JRM 材が 0.126、JRH 材が 0.101 であった。表 5.1.3-6 に示した国内 PWR 比較標準材の標準偏差 σ が 0.103~0.188 の範囲であることから、JRM 材及び JRH 材の標準偏差 σ との間に明確な差は認められなかった。

(5) K_{Ia} 試験結果の考察

国内原子炉圧力容器鋼の未照射材については、過去に以下のプロジェクト及び委員会にて K_{Ia} 試験が実施され、データが取得されている。

国内原子炉圧力容器鋼材の K_{Ia} データ

- ・日本溶接協会 HST 委員会(7HST、8HST、9HST 小委員会)データ (5.1.3-3)~(5.1.3-5)
- ・発電設備技術検査協会 原子炉容器加圧熱衝撃試験(PTS)データ (5.1.3-6)
- ・火力原子力発電技術協会 構造基準委員会 KIR 検討会データ (5.1.3-7)
- ・日本溶接協会 TS 委員会(0TS、1TS、2TS 小委員会)データ (5.1.3-8)~(5.1.3-10)
- ・H25 年度 き裂伝播停止試験並びに WPS 効果実証試験報告データ (5.1.3-11)

そこで、これらのデータと今回取得された JRH 材及び JRM 材の K_{Ia} データとの比較を実施した。上述の国内原子炉圧力容器鋼材の K_{Ia} データは ASTM E1221-88(5.1.3-12)の基準に準拠してスクリーニングを行った後のデータを用いた。図 5.1.3-10 に JRH 材及び JRM と国内原子炉圧力容器鋼材の K_{Ia} データの比較結果を示す。JRH 材及び JRM 材の結果は国内原子炉圧力容器鋼材のばらつきの範囲内に分布することが確認された。図 5.1.3-11 に $T_{RT_{NDT}}$ にて整理した K_{Ia} データを比較した結果を示す。

次に、 K_{Jc} に対する参照温度 T_o と K_{Ia} に対する参照温度 T_{KIa} の相関性について検討を行った。これらの関係については Wallin(5.1.3-13)や EricksonKirk(5.1.3-14)により検討が行われて

おり、 T_0 が高くなるほど T_0 と T_{KIa} との差が小さくなる傾向があり、式(5.1.3-17)や式(5.1.3-18)に示す相関式が提案されている。

Wallin の相関式

$$\begin{aligned} \Delta T &= T_{KIa} - T_0 \\ &= \exp\{5 \cdot (T_0 + 273) / 136.3^\circ\text{C} + \sigma_y / (683.3\text{MPa})\} \end{aligned} \quad (5.1.3-17)$$

EricksonKirk の相関式

$$T_{KIa} = T_0 + 44.1 \cdot \exp\{-0.006 \cdot (T_0)\} \quad (5.1.3-18)$$

JRM 材及び JRH 材の T_0 と T_{KIa} の値を用いて、Wallin 及び EricksonKirk の相関式との関係を確認した。図 5.1.3-12 及び図 5.1.3-13 にこれらの相関式との比較結果を示す。なお、図 5.1.3-10 に示す通り、JRM 材と JRH 材の降伏応力は国内 PWR 比較標準材と大きな差は無いことから、図 5.1.3-12 の実線は国内 PWR 比較標準材の 1/4T 位置の室温における平均降伏応力($\sigma_y=486\text{MPa}$)を用いて式(5.1.3-17)により求めた ΔT と T_0 の関係である。また、これらの図中にはドイツのプロジェクト CARISMA(Crack Initiation and Arrest of Irradiated Steel Materials、2004～2008 年)及びその後継プロジェクトである CARINA(Characteristics of Irradiated German RPV Materials、2008～2012 年)にて得られた原子炉压力容器鋼の K_{Ia} データ(5.1.3-15)～(5.1.3-17)も含めている。今回取得したデータに基づき評価した JRM 材及び JRH 材の T_0 と T_{KIa} の関係は、Wallin 及び EricksonKirk の相関式とほぼ整合するものであった。

前掲の表 5.1.3-6 には今回実施した JRM 材及び JRH 材の試験データ数と有効なデータ数を示しており、比較のため、昨年度評価した国内 PWR 比較標準材のデータも併せて示している。国内 PWR 比較標準材では全て有効なデータであったが、JRM 材及び JRH 材については無効なデータが認められた。特に、JRH 材では JRM 材に比べて無効なデータが多く認められている。構造基準委員会 KIR 検討会 活動報告書(最終報告)【第 1 種容器の破壊靱性規定策定】(平成 8 年 3 月)^(5.1.3-7)によると、低靱性材については高温側で有効なデータが得られにくい傾向が報告されており、今回の結果は傾向的に一致すると考えられる。したがって、ホットセル内で脆化ビードの施工とノッチ加工が可能な場合でも、照射により靱性が低下した材料では、脆性き裂が発生しにくい可能性があり、有効な T_{KIa} を取得するためには、多くの試験片が必要になることが考えられる。

表 5.1.3-1 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	σ_y , MPa	σ_u , MPa	突合伸, %	温度, °C	σ_y , MPa	σ_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	558	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_{r30} (°C)	RT_{NDT} (°C)	USE (J)
JRH	-33	-12	86
JRM	-43	-30	160

表 5.1.3-2 CCA 試験片の種類と製作数量

試験片 種類	試験片 板厚	試験片 採取位置	数量		備考
			JRM 材	JRH 材	
1TCCA	1 インチ (25.4mm)	1/4T、3/4T	6	6	
2TCCA	2 インチ (50.8mm)	1/4T、3/4T	5 (予備：3)	8	
合計			14	14	

T：供試材板厚

表 5.1.3-3 K_{Ia} 試験結果

(a) JRM 材

供試材	試験片サイズ	試験片符号	採取位置	試験温度 T (°C)	試験片形状				き裂長さ		開口変位					破壊発生時 K ₀ (MPa√m)	伝播停止時 K _{Qa} (MPa√m)	判断基準				
					W (mm)	B (mm)	B _N (mm)	N (mm)	初期a ₀ (mm)	停留時a _a (mm)	(δp) ₁ (mm)	(δp) _{n-1} (mm)	δ ₀ (mm)	δ _a (mm)	[δ ₀] _{limit} (mm)			A	B	C	D	E
M6-1	1T	1TCCA-M-01	1/4T	-20	99.94	25.53	19.18	9.44	35.62	74.93	0.031	0.188	1.086	1.124	1.16	177	91.4	○	○	○	○	○
M6-1	1T	1TCCA-M-02	3/4T	-40	99.93	25.53	19.18	9.43	35.63	80.16	0.040	0.069	0.721	0.781	1.18	129	56.1	○	○	○	○	○
M6-1	1T	1TCCA-M-03	1/4T	-60	99.95	25.51	19.20	9.42	35.64	68.93	0.049	0.049	0.639	0.685	1.21	118	65.1	○	○	○	○	○
M6-1	1T	1TCCA-M-04	3/4T	-20	99.95	25.51	19.20	9.45	35.63	68.52	0.027	0.137	1.026	1.060	1.16	175	101.2	○	○	○	○	○
M6-1	1T	1TCCA-M-05	1/4T	-20	99.92	25.51	19.20	9.45	35.61	79.77	0.038	0.261	1.256	1.303	1.16	196	91.2	○	×	○	○	○
M6-1	1T	1TCCA-M-06	3/4T	-40	99.93	25.51	19.20	9.42	35.62	76.36	0.040	0.146	0.951	1.020	1.18	160	79.7	○	○	○	○	○
M6-1	2T	2TCCA-M-01	1/4T	-20	169.34	51.08	38.18	12.64	59.21	124.26	0.086	0.139	1.225	1.345	1.92	167	86.0	○	○	○	○	○
M6-1	2T	2TCCA-M-02	3/4T	-20	169.30	51.08	38.18	12.63	59.16	123.45	0.077	0.128	1.294	1.389	1.92	180	91.9	○	○	○	○	○
M6-1	2T	2TCCA-M-03	1/4T	-20	169.44	50.95	38.35	12.60	59.22	119.46	0.093	0.146	1.068	1.128	1.93	141	76.1	○	○	○	○	○
M6-1	2T	2TCCA-M-04	3/4T	-20	169.35	50.97	38.28	12.64	59.18	109.67	0.093	0.093	0.945	1.002	1.93	131	76.6	○	○	○	○	○
M6-1	2T	2TCCA-M-05	1/4T	0	169.43	50.97	38.29	12.62	59.22	113.63	0.080	0.128	1.248	1.314	1.90	171	97.3	○	○	○	○	○

(b) JRH 材

供試材	試験片サイズ	試験片符号	採取位置	試験温度 T (°C)	試験片形状				き裂長さ		開口変位					破壊発生時 K ₀ (MPa√m)	伝播停止時 K _{Qa} (MPa√m)	判断基準				
					W (mm)	B (mm)	B _N (mm)	N (mm)	初期a ₀ (mm)	停留時a _a (mm)	(δp) ₁ (mm)	(δp) _{n-1} (mm)	δ ₀ (mm)	δ _a (mm)	[δ ₀] _{limit} (mm)			A	B	C	D	E
H6-1	1T	1TCCA-H-01	1/4T	-20	99.95	25.53	19.15	9.46	/	/	/	/	/	/	1.21	/	/	/	/	/	/	
H6-1	1T	1TCCA-H-02	3/4T	-40	99.95	25.52	19.13	9.45	35.64	76.69	0.042	0.042	0.690	0.741	1.23	129	59.8	○	○	○	○	○
H6-1	1T	1TCCA-H-03	1/4T	-60	99.92	25.51	19.21	9.43	35.70	77.72	0.051	0.051	0.721	0.772	1.27	134	60.4	○	○	○	○	○
H6-1	1T	1TCCA-H-04	3/4T	-40	99.93	25.51	19.20	9.42	35.61	80.58	0.042	0.073	0.805	0.869	1.24	145	61.9	○	○	○	○	○
H6-1	1T	1TCCA-H-05	1/4T	-40	99.93	25.51	19.16	9.44	35.70	77.90	0.046	0.168	0.945	0.989	1.24	154	73.8	○	○	○	○	○
H6-1	1T	1TCCA-H-06	3/4T	-20	99.93	25.51	19.15	9.44	/	/	/	/	/	/	1.21	/	/	/	/	/	/	
H6-1	2T	2TCCA-H-01	1/4T	0	169.37	51.01	38.21	12.64	/	/	/	/	/	/	2.01	/	/	/	/	/	/	
H6-1	2T	2TCCA-H-02	3/4T	-20	169.32	51.07	38.20	12.66	59.18	129.24	0.086	0.142	1.391	1.482	2.01	192	90.4	○	○	○	○	○
H6-1	2T	2TCCA-H-03	1/4T	-20	169.49	50.92	38.22	12.65	59.19	129.46	0.097	0.484	2.267	2.338	2.02	274	137.1	○	×	○	○	○
H6-1	2T	2TCCA-H-04	3/4T	-20	169.50	50.92	38.26	12.63	59.22	131.21	0.095	0.155	1.248	1.380	2.02	168	78.9	○	○	○	○	○
H6-1	2T	2TCCA-H-05	1/4T	-20	169.50	50.92	38.25	12.64	59.21	139.97	0.091	0.292	1.820	1.938	2.02	235	96.0	○	○	○	○	○
H6-1	2T	2TCCA-H-06	3/4T	-20	169.45	50.91	38.26	12.64	/	/	/	/	/	/	2.02	/	/	/	/	/	/	
H6-1	2T	2TCCA-H-07	1/4T	-40	169.40	50.92	38.23	12.63	59.23	121.96	0.100	0.100	1.062	1.150	2.06	149	76.5	○	○	○	○	○
H6-1	2T	2TCCA-H-08	3/4T	-40	169.41	50.94	38.24	12.65	59.22	96.94	0.000	0.000	0.772	0.830	2.06	120	80.2	○	○	○	○	○

注) 有効性判定の条件 A~E は以下の通り

- ・条件 A 未破断部分のリガメント : $W - a_a \geq 0.15W$
- ・条件 B 未破断部分のリガメント : $W - a_a \geq 1.25 (K_a / \sigma_{Yd})^2$
- ・条件 C 試験片板厚 : $B \geq 1.0 (K_a / \sigma_{Yd})^2$
- ・条件 D き裂の進展長さ : $a_a - a_0 \geq 2N$
- ・条件 E き裂の進展長さ : $a_a - a_0 \geq (K_0 / \sigma_{Ys})^2 / 2\pi$

斜線部は脆性き裂が非発生 of 試験結果

表 5.1.3-4 き裂長さの計測結果(その 1)

(a) JRM 材 (左 : 1TCCA 試験片、右 : 2TCCA 試験片)

試験片符号	測定位置	a ₀ (mm)	試験き裂長さ b (mm)	a ₀ +b (mm)	平均 き裂長さ (mm)	試験温度 (°C)
1TCCA-M-01	1/4(上)	35.62	38.96	74.58	74.93	-20
	2/4(中)		39.81	75.43		
	3/4(下)		39.15	74.77		
1TCCA-M-02	1/4(上)	35.63	44.42	80.05	80.16	-40
	2/4(中)		44.63	80.26		
	3/4(下)		44.53	80.16		
1TCCA-M-03	1/4(上)	35.64	32.53	68.17	68.93	-60
	2/4(中)		33.05	68.69		
	3/4(下)		34.29	69.93		
1TCCA-M-04	1/4(上)	35.63	34.24	69.87	68.52	-20
	2/4(中)		33.81	69.44		
	3/4(下)		30.61	66.24		
1TCCA-M-05	1/4(上)	35.61	43.87	79.48	79.77	-20
	2/4(中)		44.42	80.03		
	3/4(下)		44.19	79.80		
1TCCA-M-06	1/4(上)	35.62	40.73	76.35	76.36	-40
	2/4(中)		40.97	76.59		
	3/4(下)		40.52	76.14		

試験片符号	測定位置	a ₀ (mm)	試験き裂長さ b (mm)	a ₀ +b (mm)	平均 き裂長さ (mm)	試験温度 (°C)
2TCCA-M-01	1/4(上)	59.21	63.06	122.27	124.26	-20
	2/4(中)		65.87	125.08		
	3/4(下)		66.21	125.42		
2TCCA-M-02	1/4(上)	59.16	62.91	122.07	123.45	-20
	2/4(中)		64.53	123.69		
	3/4(下)		65.43	124.59		
2TCCA-M-03	1/4(上)	59.22	58.87	118.09	119.46	-20
	2/4(中)		61.10	120.32		
	3/4(下)		60.74	119.96		
2TCCA-M-04	1/4(上)	59.18	48.63	107.81	109.67	-20
	2/4(中)		51.67	110.85		
	3/4(下)		51.17	110.35		
2TCCA-M-05	1/4(上)	59.22	56.03	115.25	113.63	0
	2/4(中)		53.70	112.92		
	3/4(下)		53.51	112.73		

表 5.1.3-4 き裂長さの計測結果(その 2)

(b) JRH 材 (左 : 1TCCA 試験片、右 : 2TCCA 試験片)

試験片符号	測定位置	a ₀ (mm)	試験き裂長さ b (mm)	a ₀ +b (mm)	平均 き裂長さ (mm)	試験温度 (°C)
1TCCA-H-01	1/4(上)	35.64	脆性き裂非発生			-20
	2/4(中)					
	3/4(下)					
1TCCA-H-02	1/4(上)	35.64	41.04	76.68	76.69	-40
	2/4(中)		40.78	76.42		
	3/4(下)		41.34	76.98		
1TCCA-H-03	1/4(上)	35.70	42.01	77.71	77.72	-60
	2/4(中)		41.90	77.60		
	3/4(下)		42.14	77.84		
1TCCA-H-04	1/4(上)	35.61	45.15	80.76	80.58	-40
	2/4(中)		44.57	80.18		
	3/4(下)		45.19	80.80		
1TCCA-H-05	1/4(上)	35.70	41.87	77.57	77.90	-40
	2/4(中)		42.23	77.93		
	3/4(下)		42.50	78.20		
1TCCA-H-06	1/4(上)	35.64	脆性き裂非発生			-20
	2/4(中)					
	3/4(下)					

試験片符号	測定位置	a ₀ (mm)	試験き裂長さ b (mm)	a ₀ +b (mm)	平均 き裂長さ (mm)	試験温度 (°C)
2TCCA-H-01	1/4(上)	59.18	脆性き裂非発生			0
	2/4(中)					
	3/4(下)					
2TCCA-H-02	1/4(上)	59.18	72.04	131.22	129.24	-20
	2/4(中)		70.22	129.40		
	3/4(下)		67.92	127.10		
2TCCA-H-03	1/4(上)	59.19	73.01	132.20	129.46	-20
	2/4(中)		70.63	129.82		
	3/4(下)		67.17	126.36		
2TCCA-H-04	1/4(上)	59.22	71.01	130.23	131.21	-20
	2/4(中)		71.78	131.00		
	3/4(下)		73.19	132.41		
2TCCA-H-05	1/4(上)	59.21	81.84	141.05	139.97	-20
	2/4(中)		80.99	140.20		
	3/4(下)		79.46	138.67		
2TCCA-H-06	1/4(上)	59.23	脆性き裂非発生			-20
	2/4(中)					
	3/4(下)					
2TCCA-H-07	1/4(上)	59.23	61.26	120.49	121.96	-40
	2/4(中)		62.82	122.05		
	3/4(下)		64.11	123.34		
2TCCA-H-08	1/4(上)	59.22	38.65	97.87	96.94	-40
	2/4(中)		38.23	97.45		
	3/4(下)		36.28	95.50		

表 5.1.3-5 最尤推定法における重み係数

温度範囲 i	($T - T_{K1a}$)の範囲 (°C)	重み係数 n_i
1	50 ~ -10	1/6
2	-10 ~ -28	1/7
3	-29 ~ -35	1/8
4	-36 ~ -41	1/9
5	-41 ~ -45	1/10
6	-46 ~ -50	1/11

表 5.1.3-6 JRM 材及び JRH 材の T_{KIa} 評価結果

(a) JRM 材及び JRH 材

供試材	試験 データ数	K_{Ia} 有効 データ数	評価有効 データ数 *1	T_{KIa} *2 (°C)	標準偏差 σ	T_o *3 (°C)	RT_{NDT} (°C)
JRM	11	10	9	-7	0.126	-82	-30
JRH	14	9	9	-11	0.101	-103	-12

(b) 国内 PWR 比較標準材 (5.1.3-11)

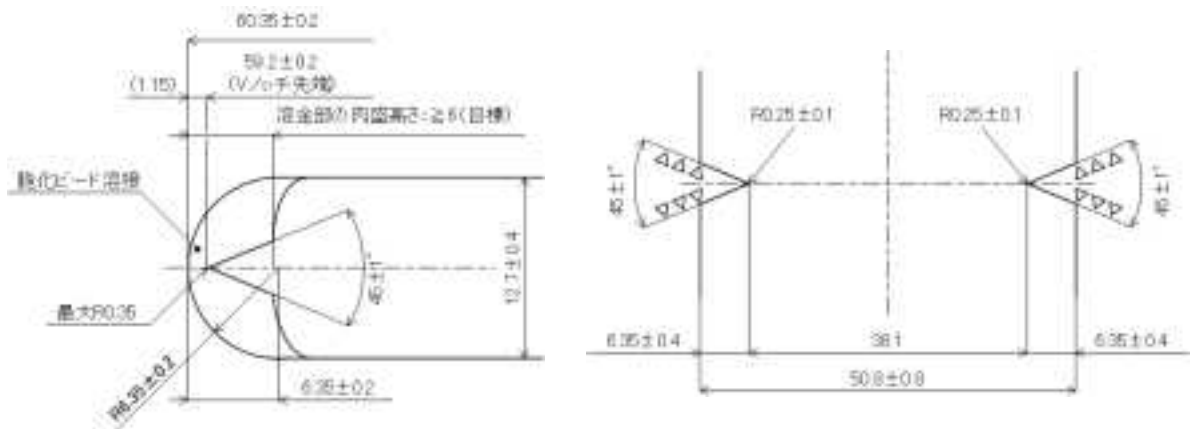
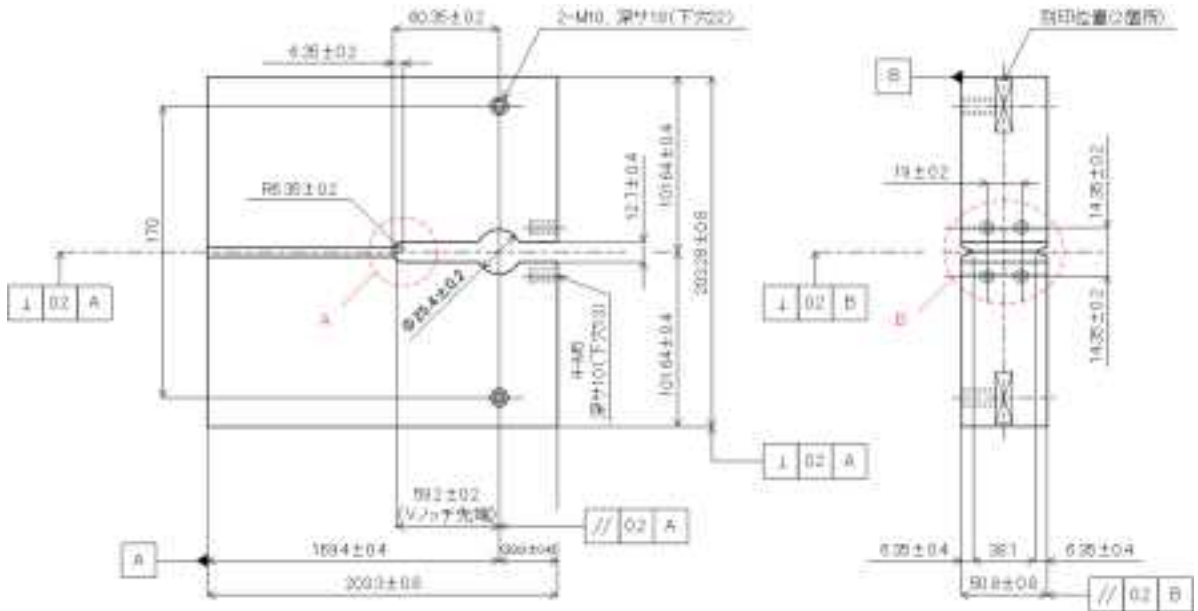
データ区分	試験 データ数	K_{Ia} 有効 データ数	評価有効 データ数 *1	T_{KIa} *2 (°C)	標準偏差 σ	T_o *3 (°C)	RT_{NDT} (°C)
1TCCA (1/2T)	10	10	8	5	0.188	-97	-30°C
1TCCA (1/4T)	8	8	7	(-5)*4	(0.120)	-111	
1TCCA (1/2T、1/4T)	18	18	15	1	0.138	-110	
2TCCA、 1TCCA (1/4T)	12	12	11	-4	0.103	-111	
2TCCA、 1TCCA (1/2T、1/4T)	22	22	19	0	0.128	-110	

*1: T_{KIa} 評価に使用したデータ数

*2: T_{KIa} (K_{Ia} に対する参照温度)

*3: T_o (K_{Jc} に対する参照温度)

*4: T_{KIa} は invalid



A 部

B 部

単位 (mm)

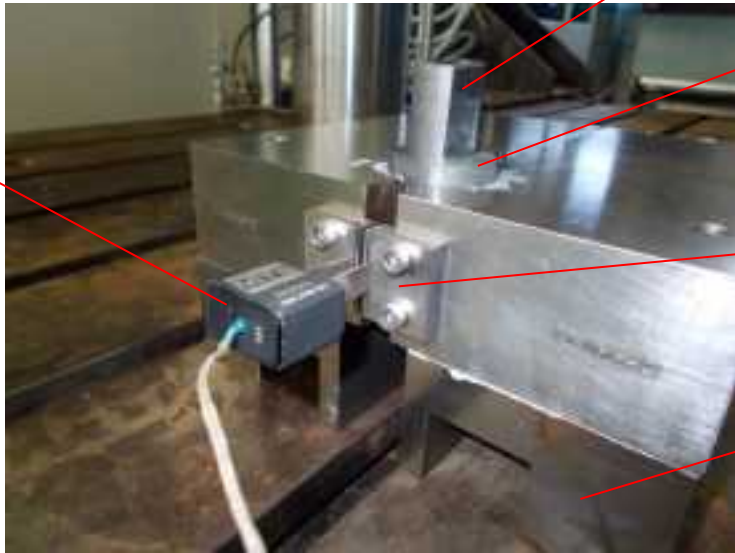
注) 脆化ビードの目標高さ : 6 mm 以上

(b) 2TCCA 試験片

図 5.1.3-1 CCA 試験片の形状及び寸法(その 2)



くさび



伸び計

ガイド

ナイフエッジ治具

サポートブロック



使用グリス：モリコート フッソ・超高性能 HP-300 東レ・ダウコーニング

図 5.1.3-2 CCA 試験片及びき裂伝播停止試験装置の外観状況

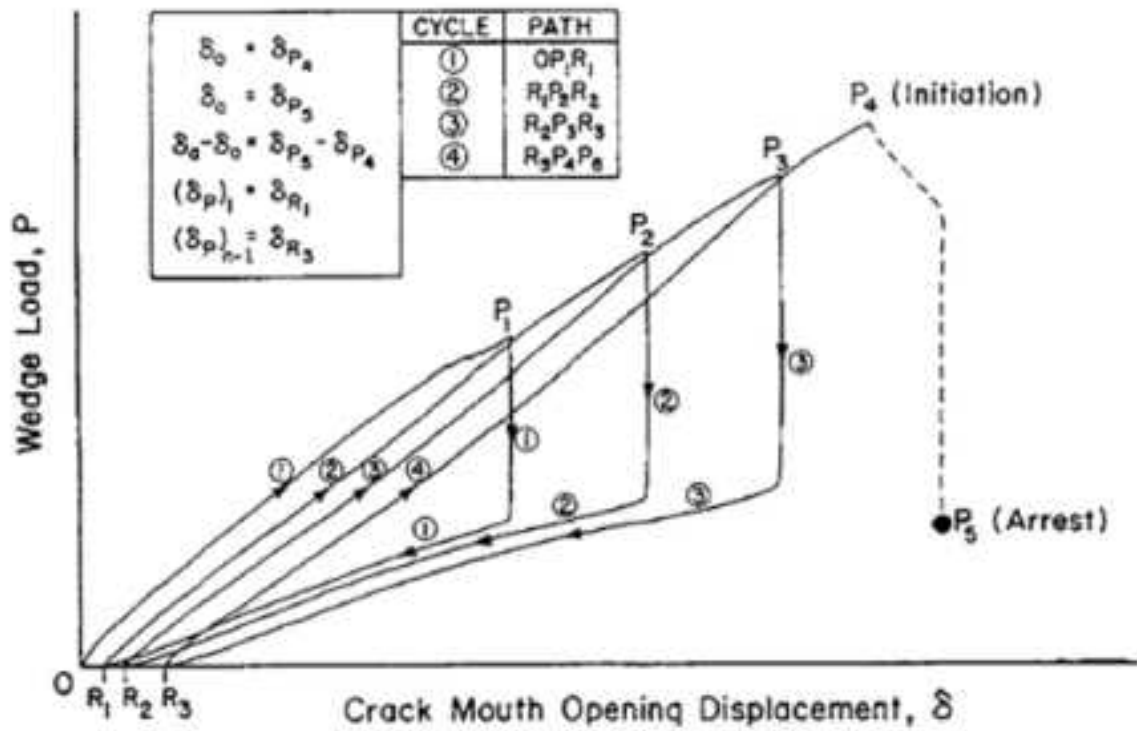


図 5.1.3-3 繰り返し負荷法における試験片の荷重-き裂開口変位の記録の例

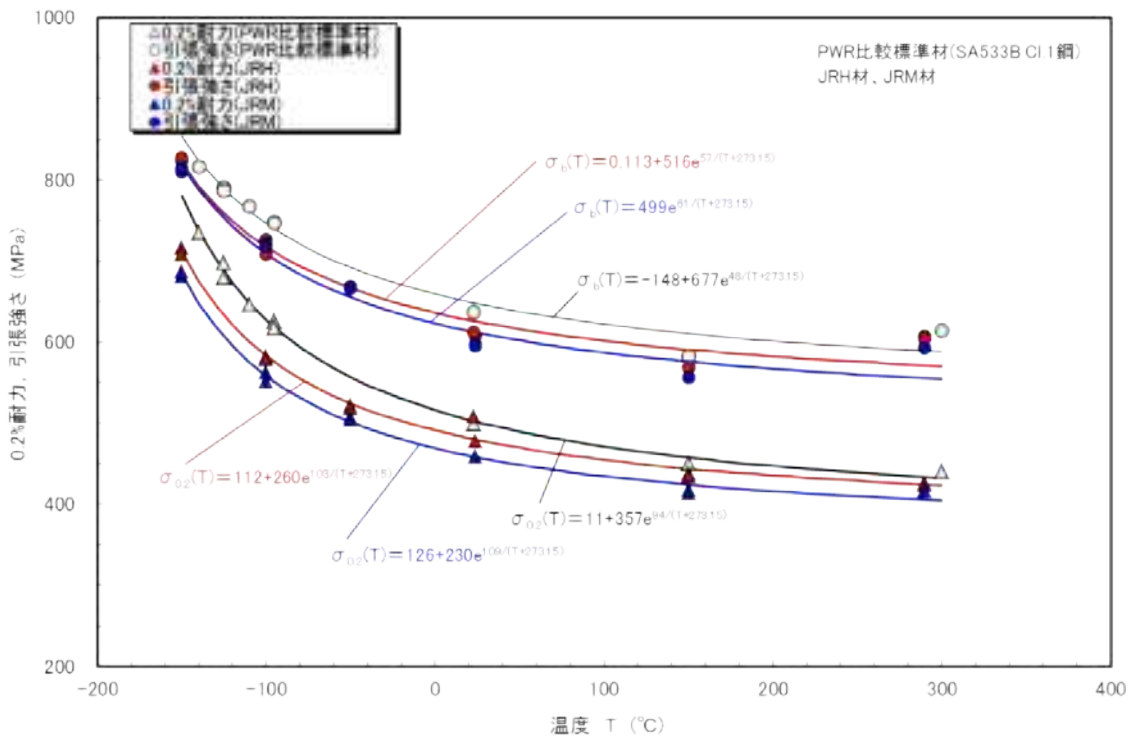
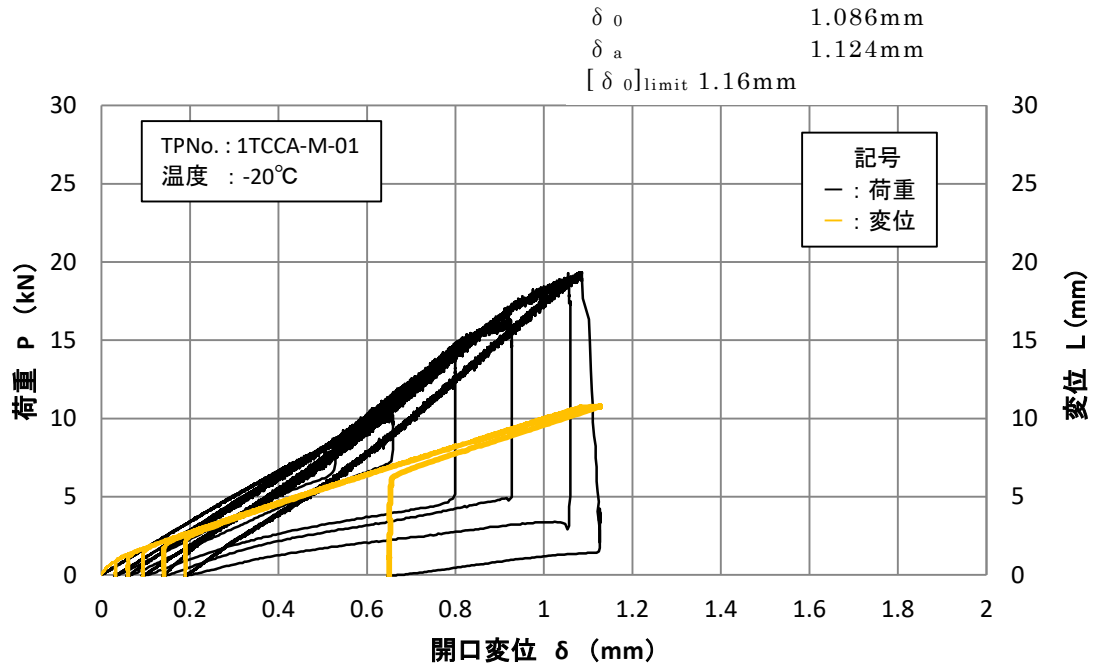
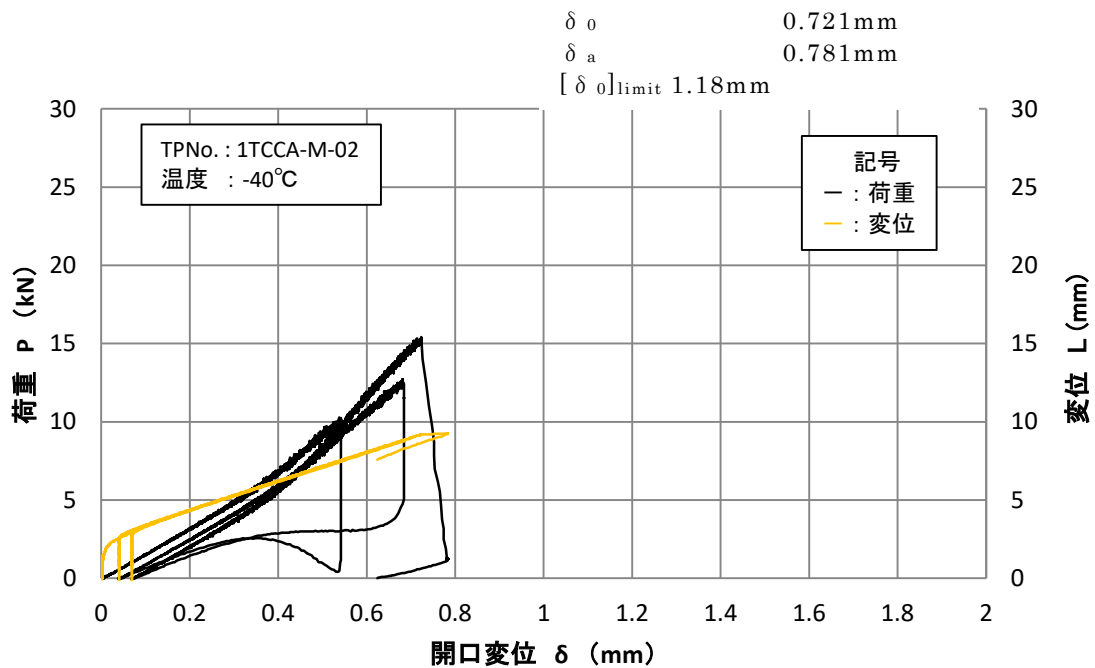


図 5.1.3-4 JRM 材及び JRH 材の 0.2%耐力及び引張強さの温度依存性

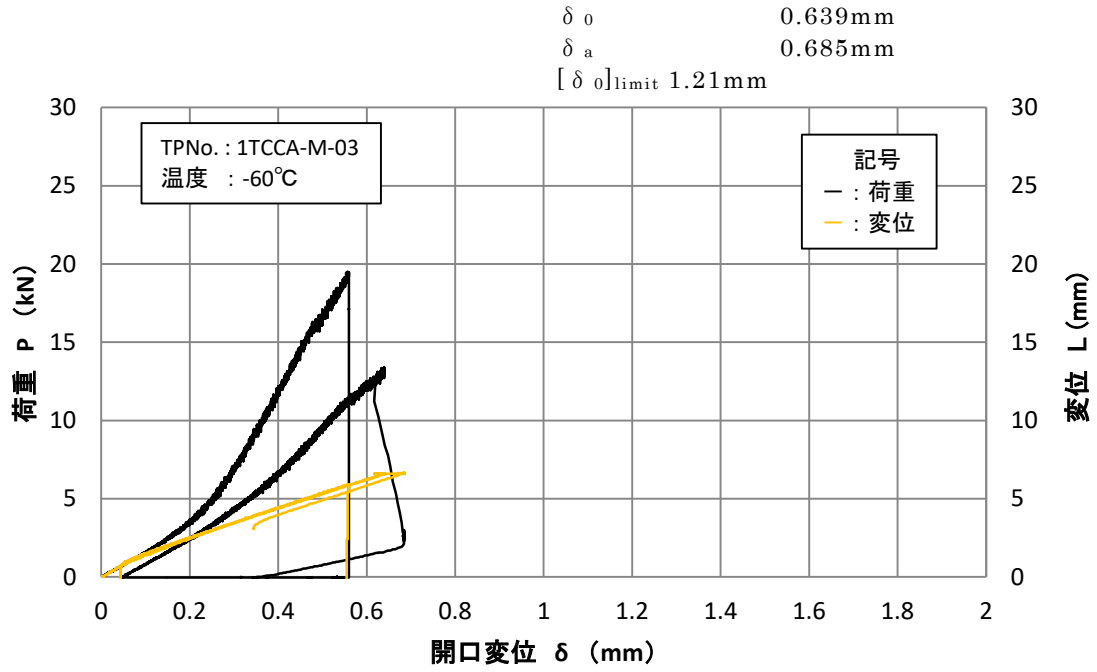


(試験片符号:1TCCA-M-01 試験温度:-20°C 供試材:JRM 材)

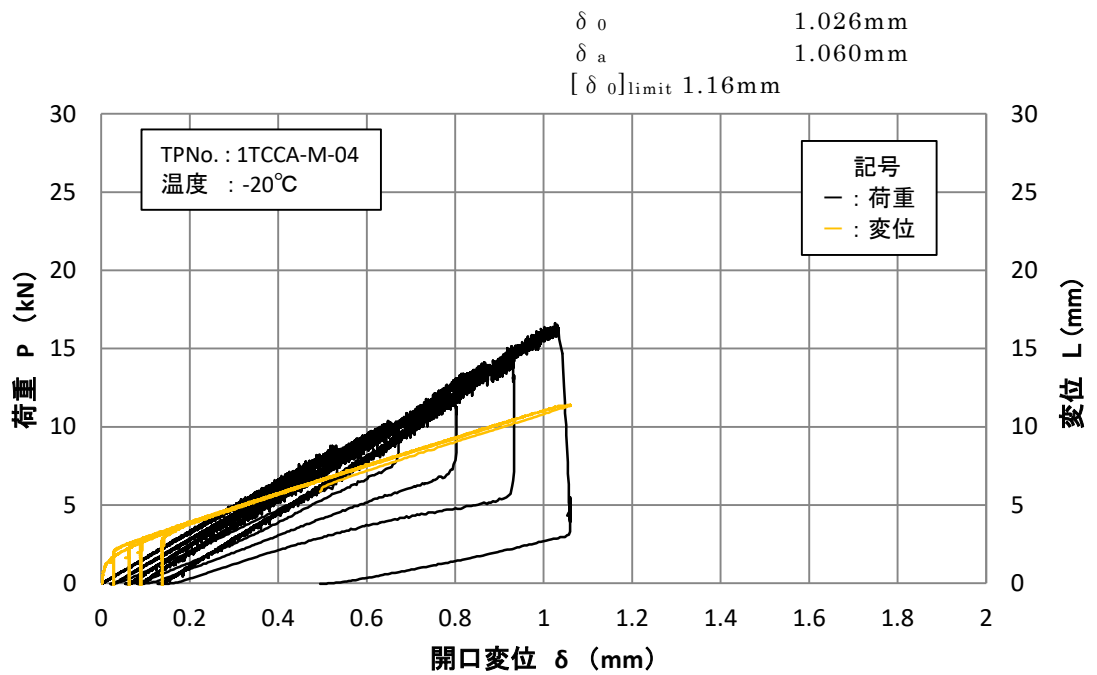


(試験片符号:1TCCA-M-02 試験温度:-40°C 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-5 荷重-開口変位の結果(その 1)

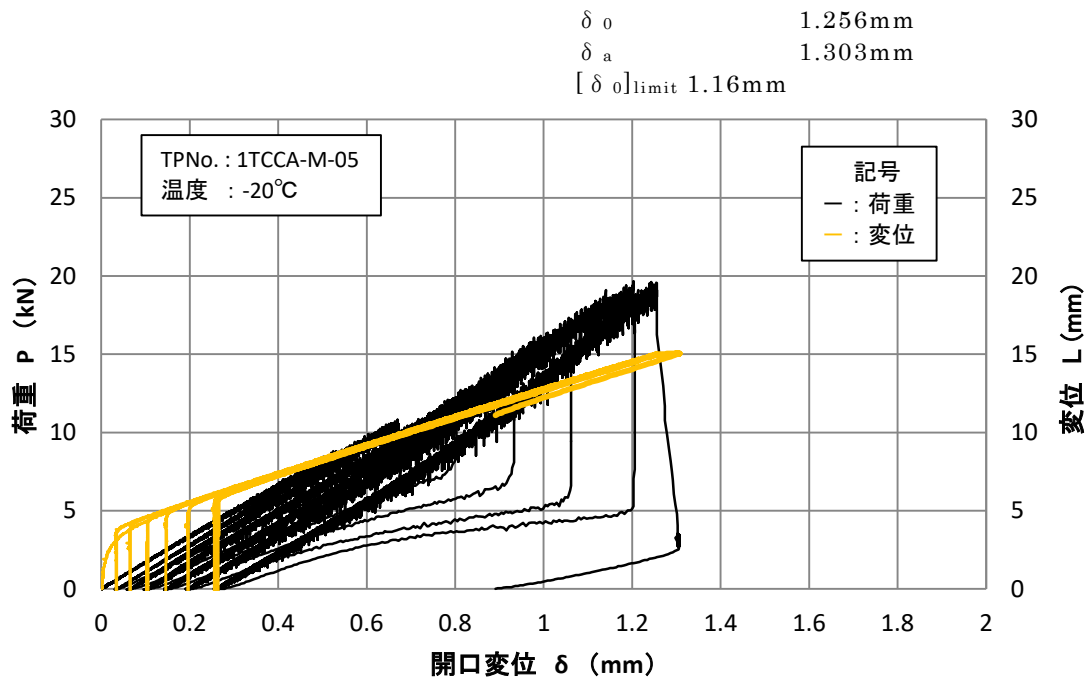


(試験片符号:1TCCA-M-03 試験温度:-60°C 供試材:JRM 材)

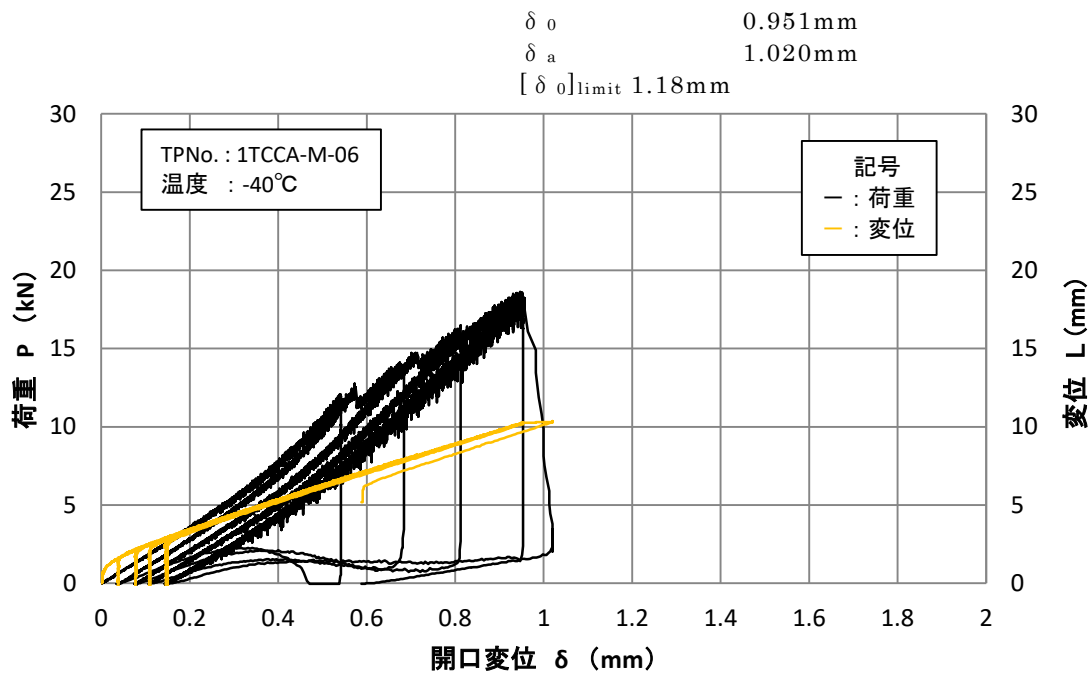


(試験片符号:1TCCA-M-04 試験温度:-20°C 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-5 荷重-開口変位の結果(その 2)

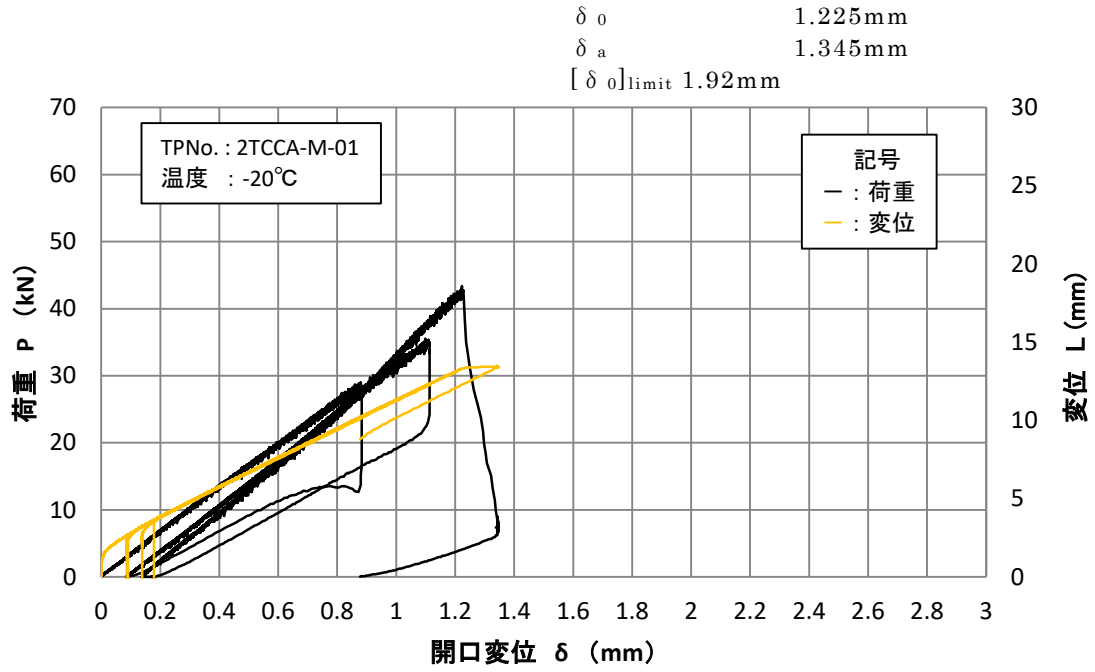


(試験片符号:1TCCA-M-05 試験温度:-20°C 供試材:JRM 材)

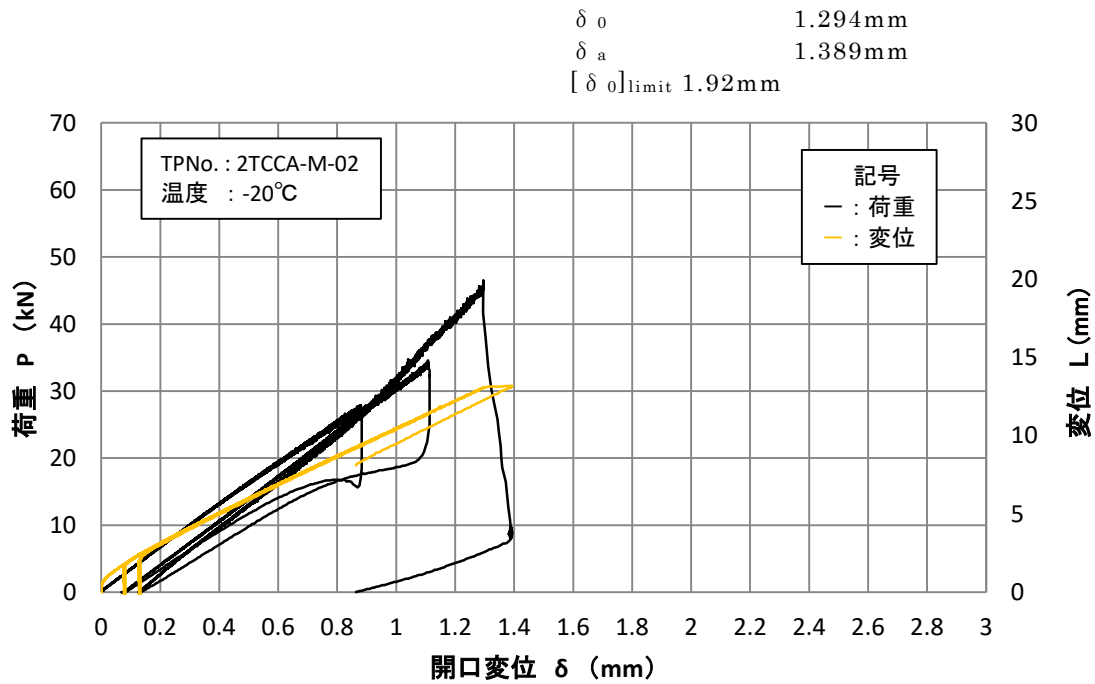


(試験片符号:1TCCA-M-06 試験温度:-40°C 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-5 荷重-開口変位の結果(その 3)

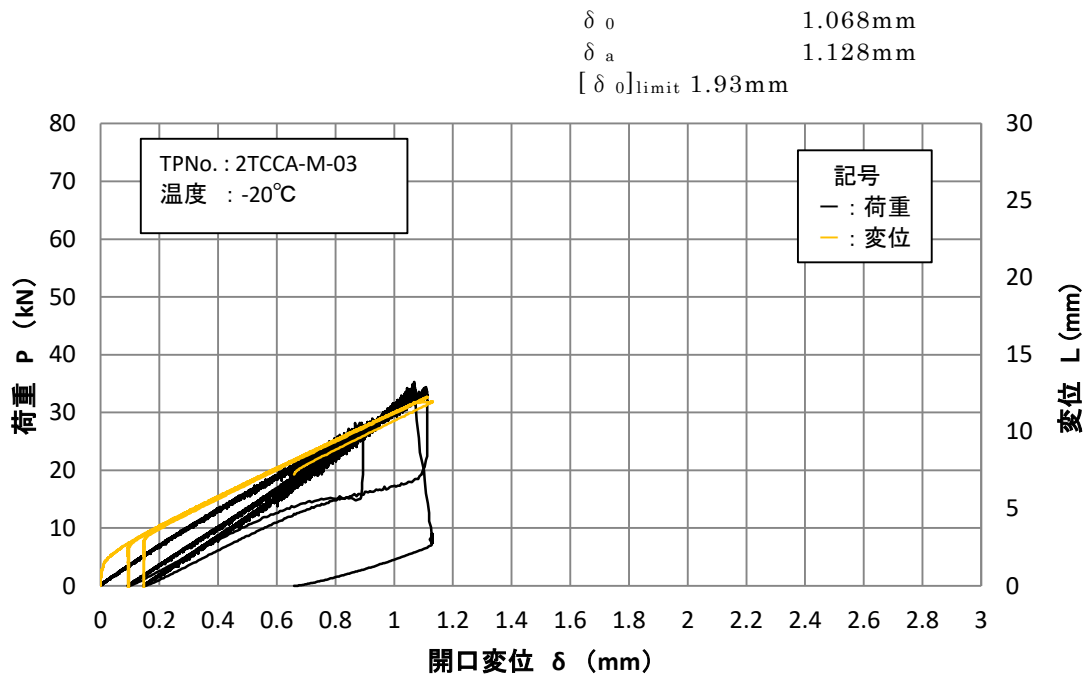


(試験片符号:2TCCA-M-01 試験温度:-20°C 供試材:JRM 材)

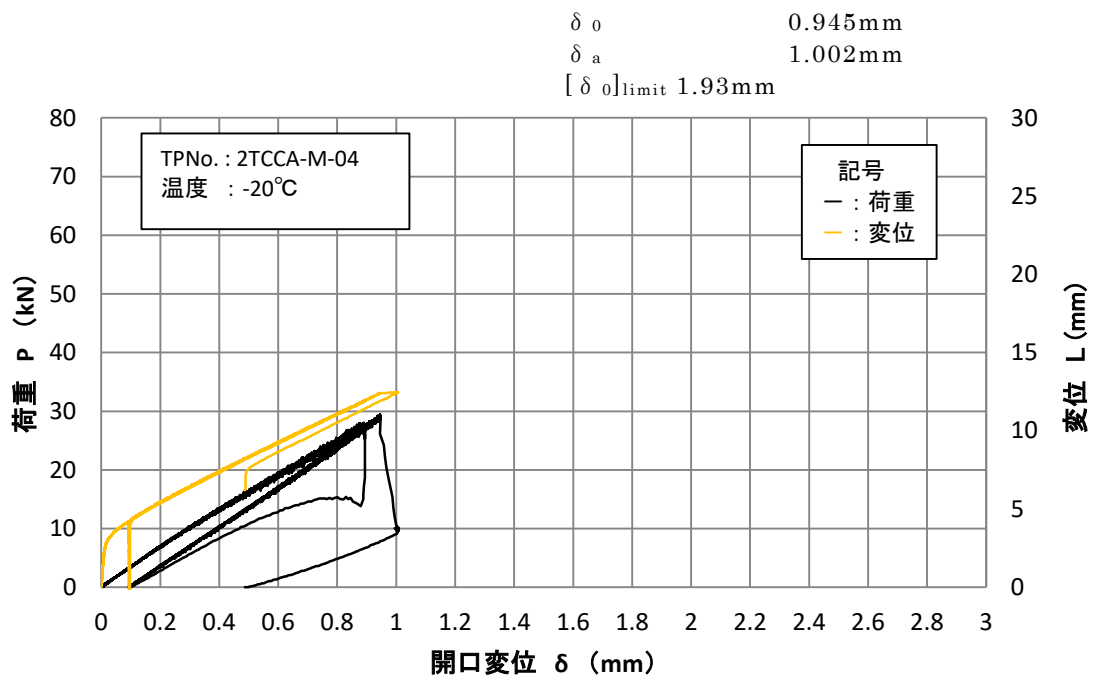


(試験片符号:2TCCA-M-02 試験温度:-20°C 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-5 荷重-開口変位の結果(その 4)



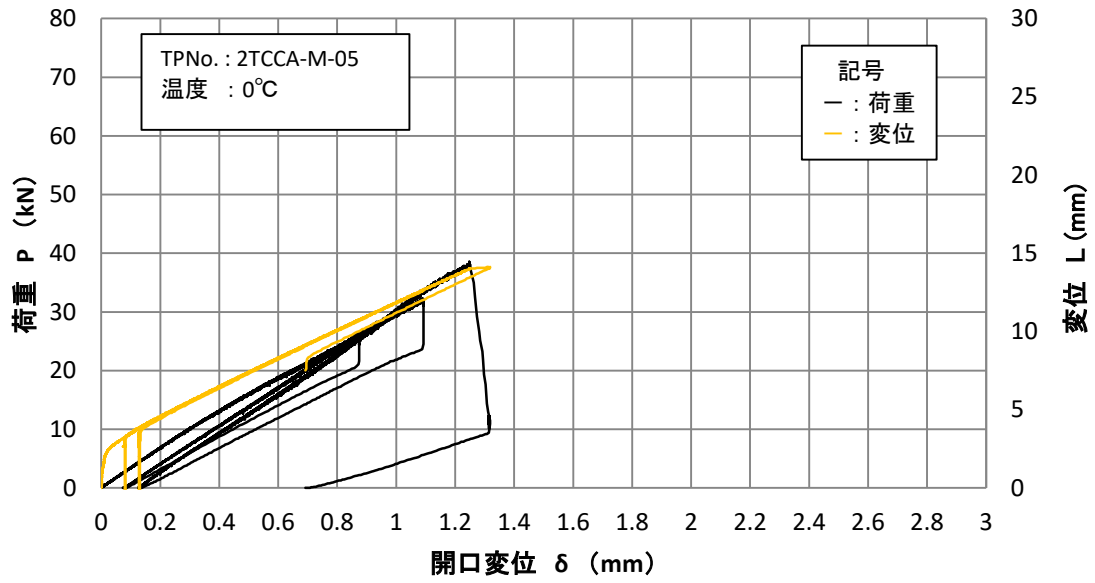
(試験片符号:2TCCA-M-03 試験温度:-20°C 供試材:JRM 材)



(試験片符号:2TCCA-M-04 試験温度:-20°C 供試材:JRM 材)

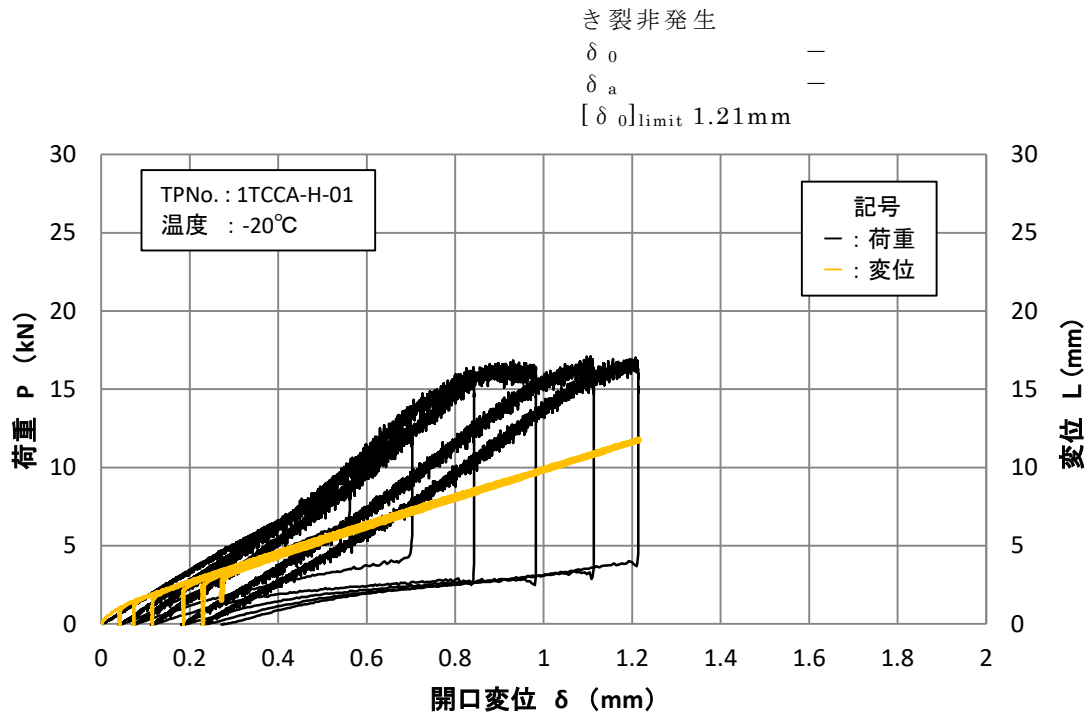
図 5.1.3-5 荷重-開口変位の結果(その 5)

δ_0 1.248mm
 δ_a 1.314mm
 $[\delta_0]_{\text{limit}}$ 1.90mm

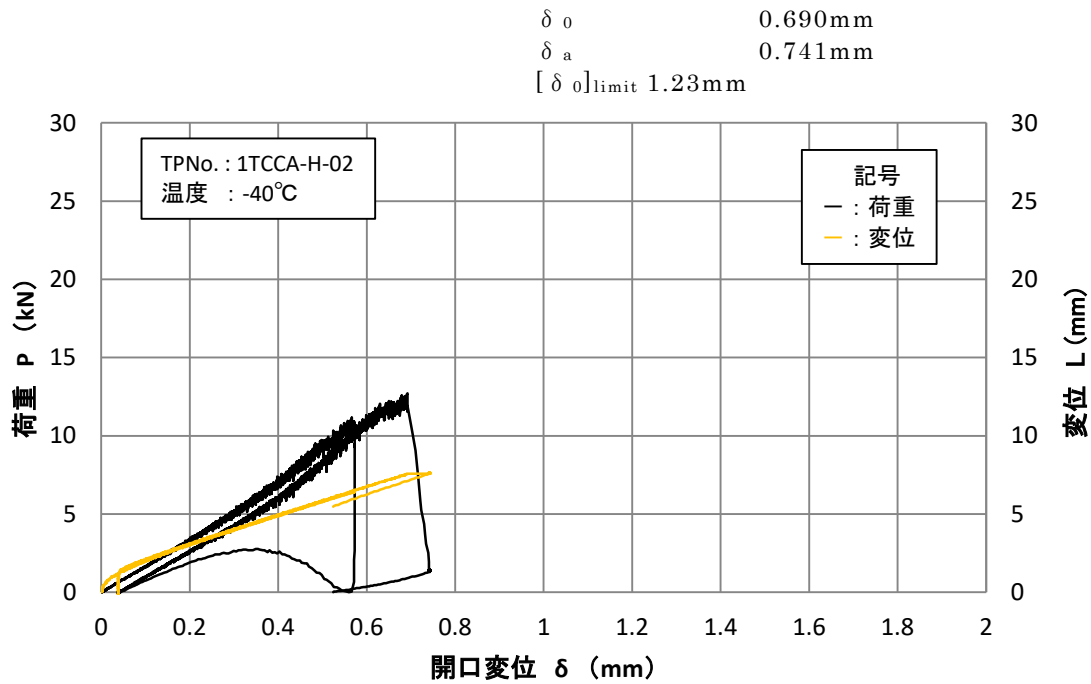


(試験片符号:2TCCA-M-05 試験温度:0°C 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-5 荷重-開口変位の結果(その 6)

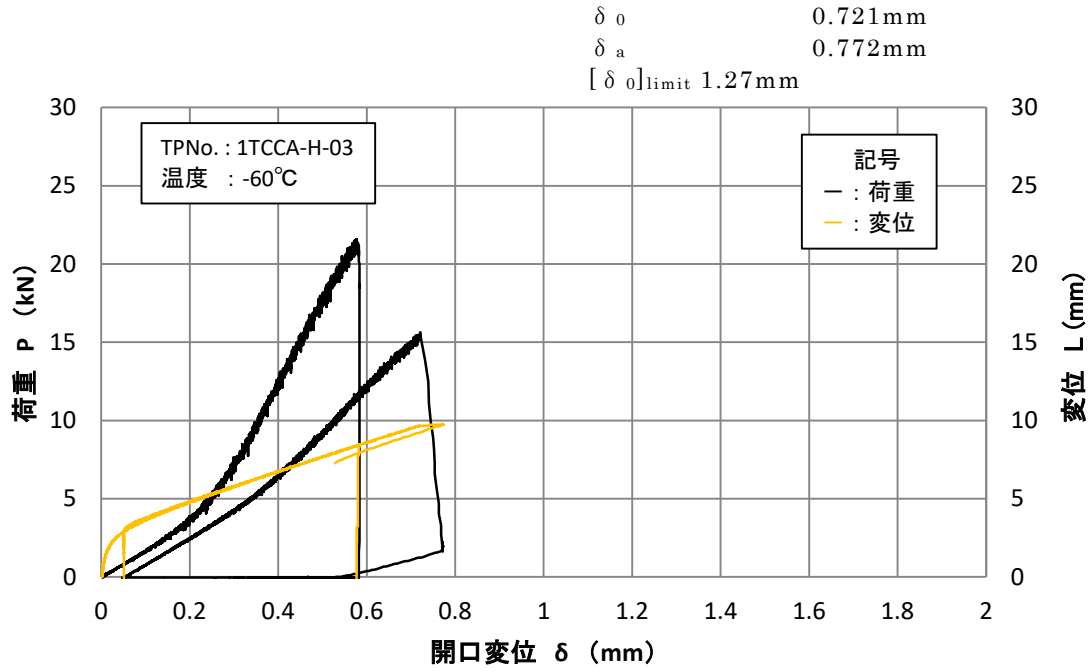


(試験片符号:1TCCA-H-01 試験温度:-20°C 供試材:JRH 材)

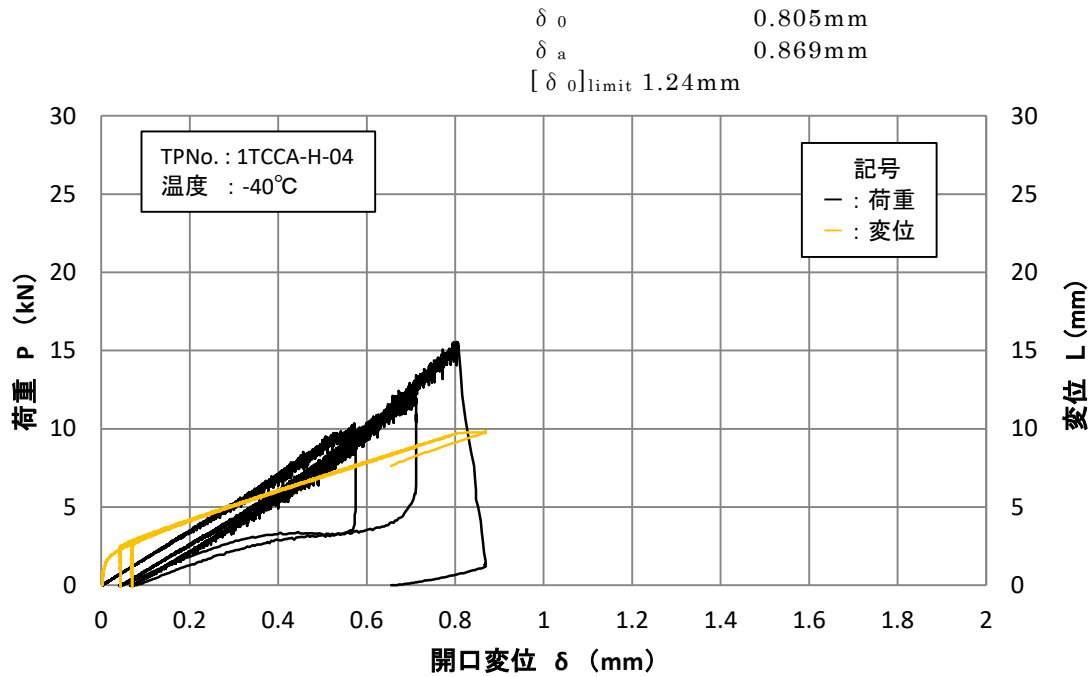


(試験片符号:1TCCA-H-02 試験温度:-40°C 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-6 荷重-開口変位の結果(その 1)

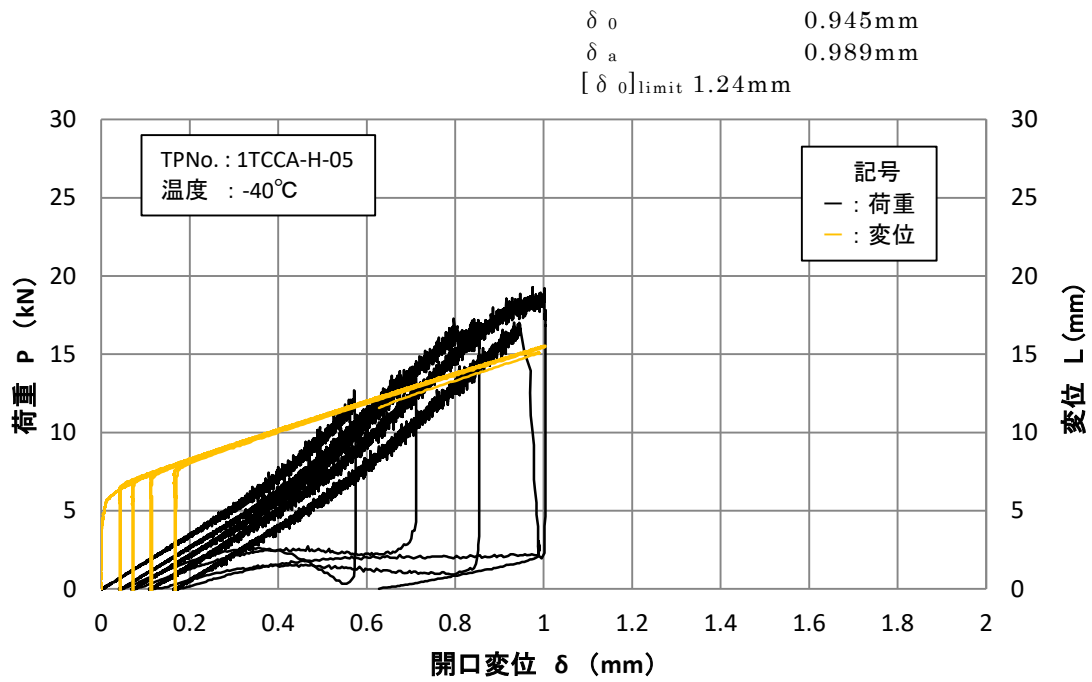


(試験片符号:1TCCA-H-03 試験温度:-60°C 供試材:JRH 材)

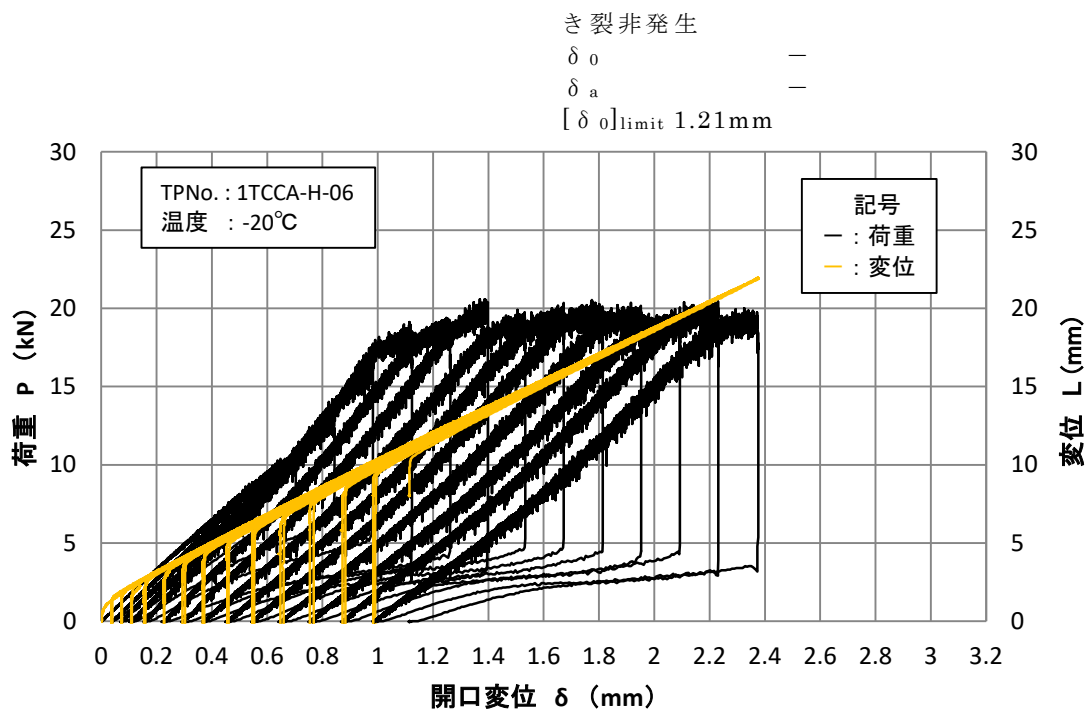


(試験片符号:1TCCA-H-04 試験温度:-40°C 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-6 荷重-開口変位の結果(その 2)

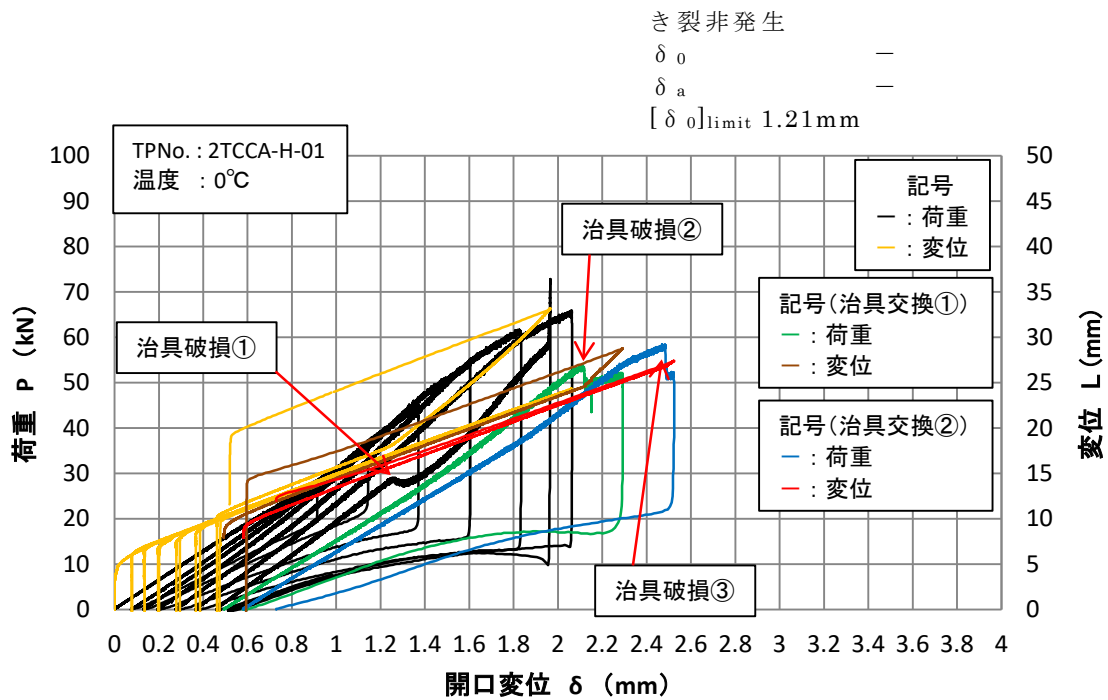


(試験片符号:1TCCA-H-05 試験温度:-40°C 供試材:JRH 材)

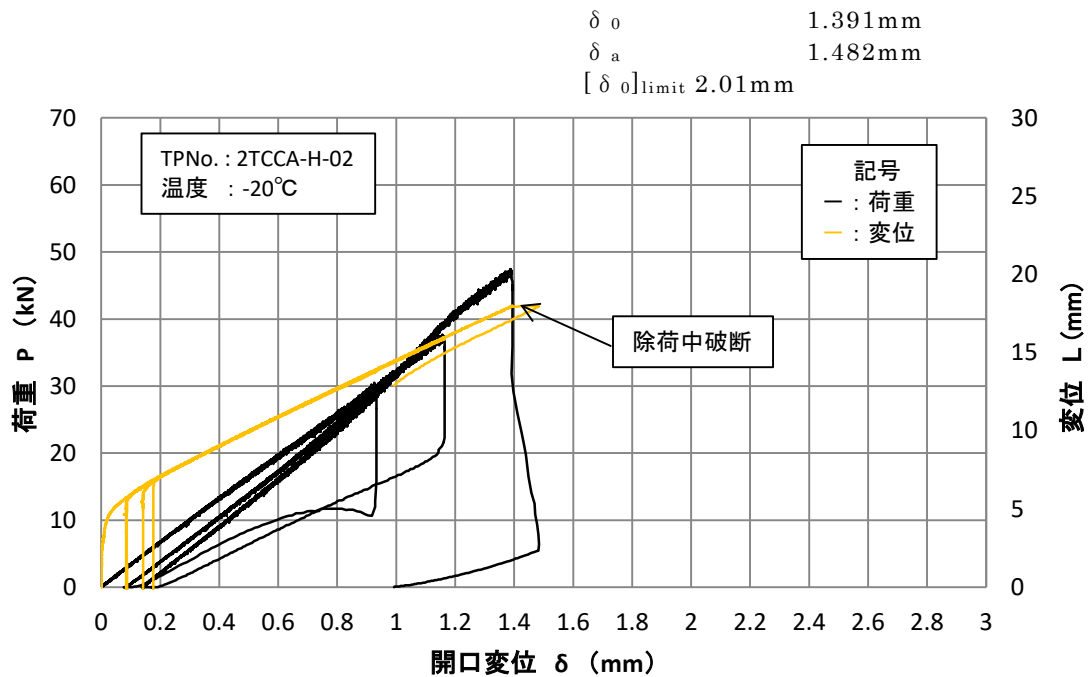


(試験片符号:1TCCA-H-06 試験温度:-20°C 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-6 荷重-開口変位の結果(その 3)

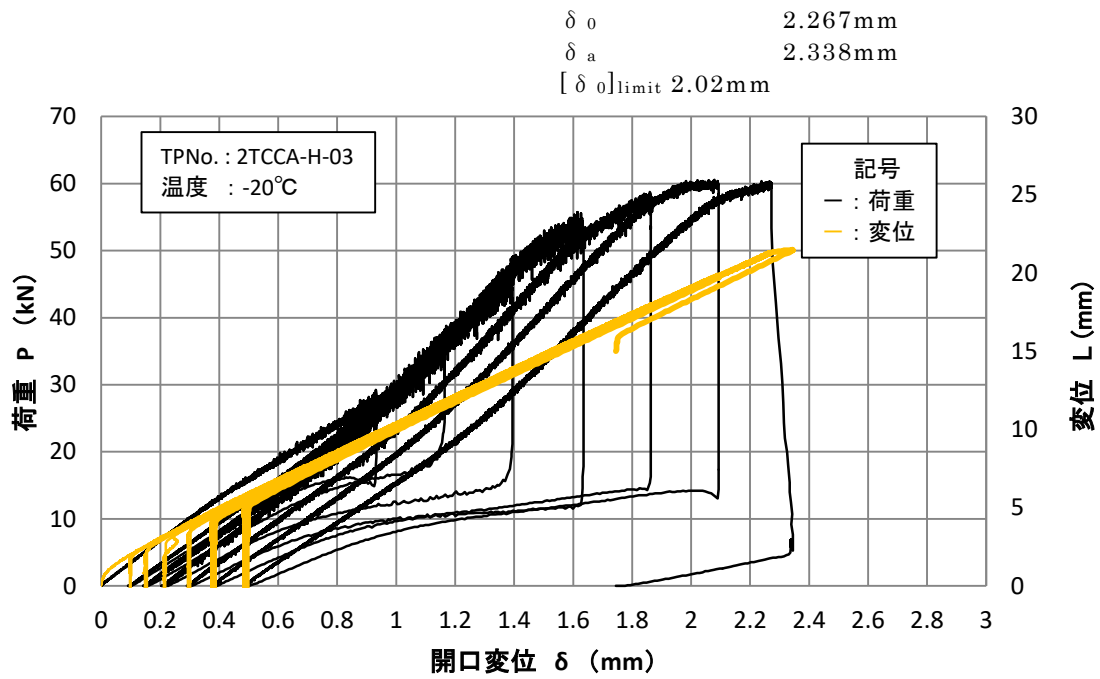


(試験片符号:2TCCA-H-01 試験温度:0°C 供試材:JRH 材)

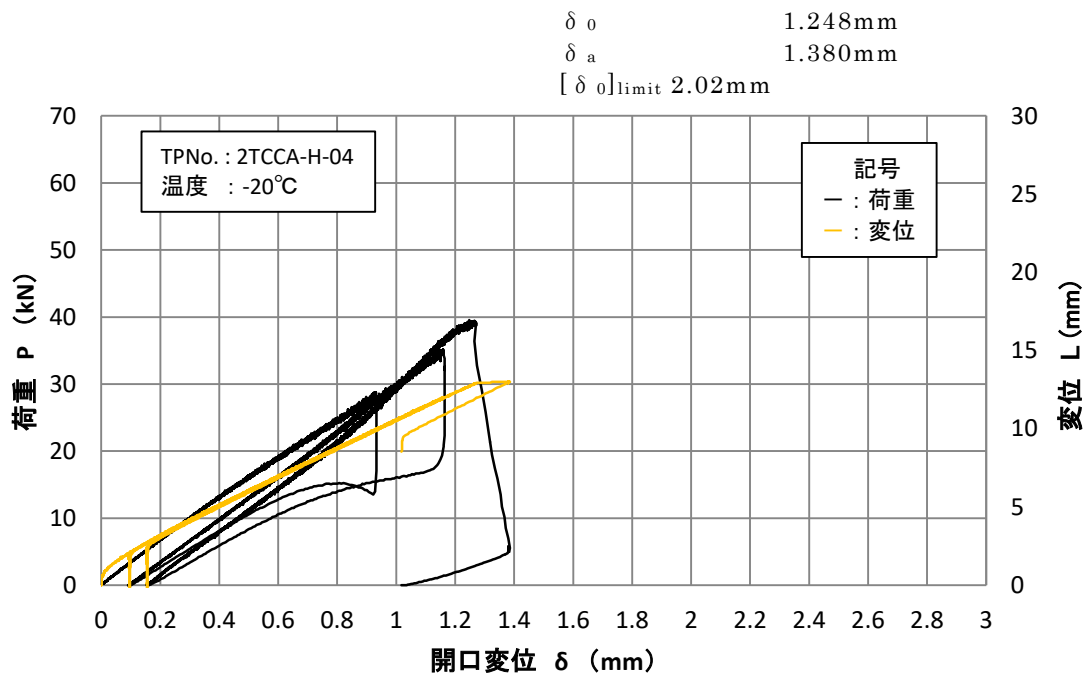


(試験片符号:2TCCA-H-02 試験温度:-20°C 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-6 荷重-開口変位の結果(その 4)

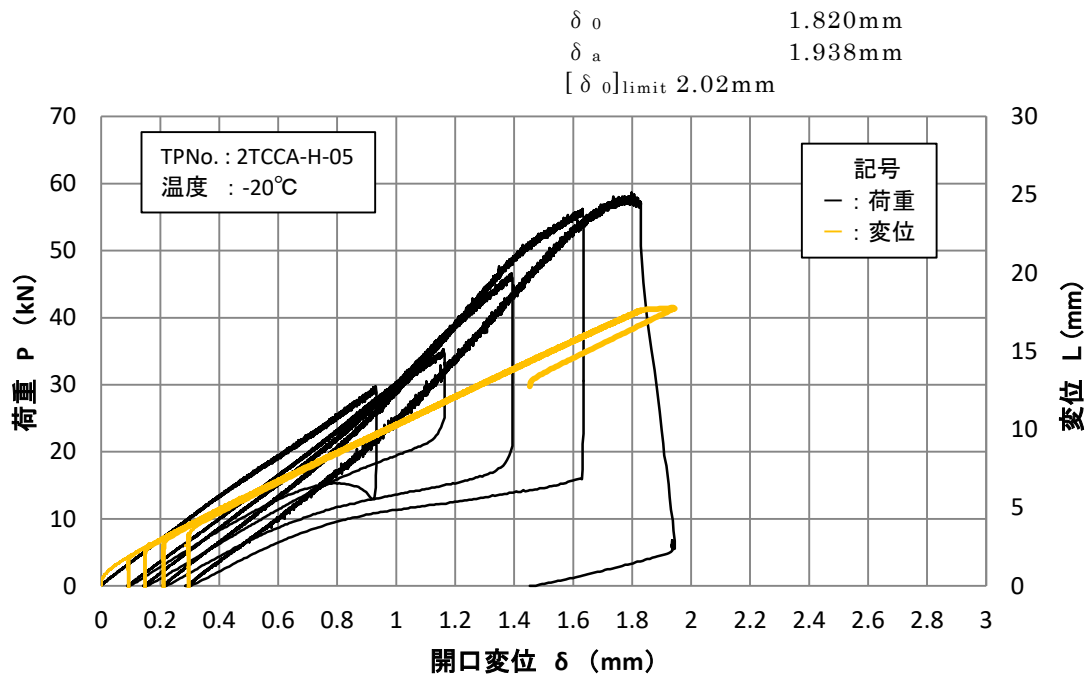


(試験片符号:2TCCA-H-03 試験温度:-20°C 供試材:JRH 材)

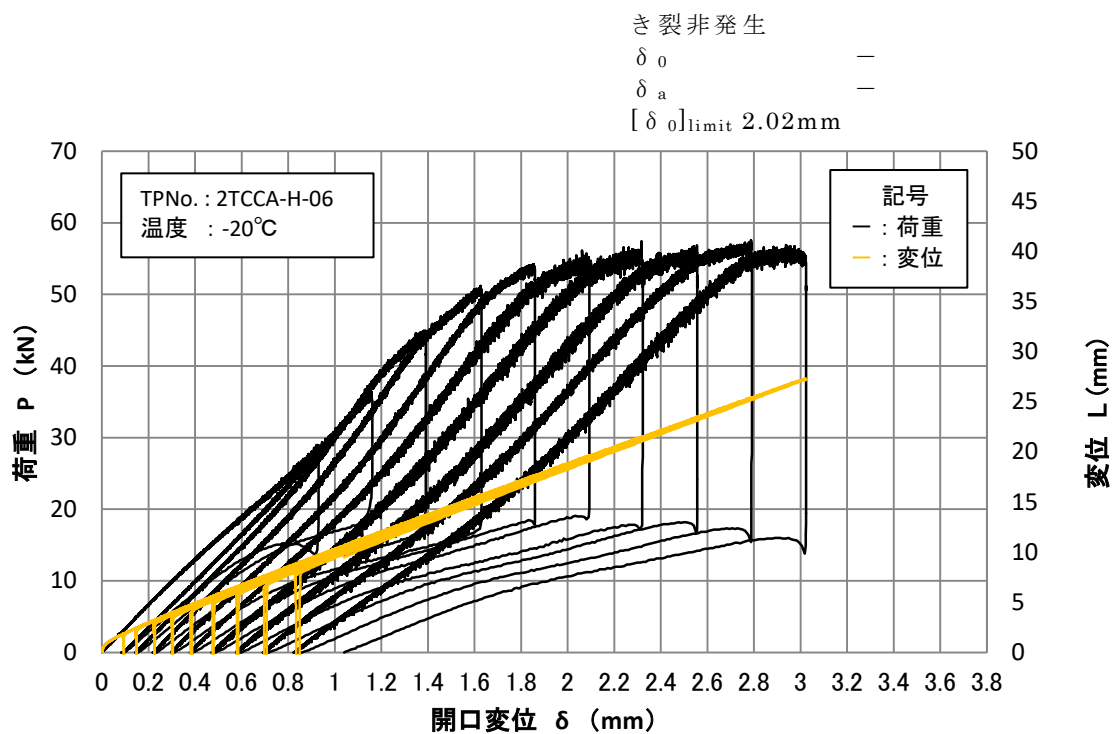


(試験片符号:2TCCA-H-04 試験温度:-20°C 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-6 荷重-開口変位の結果(その 5)

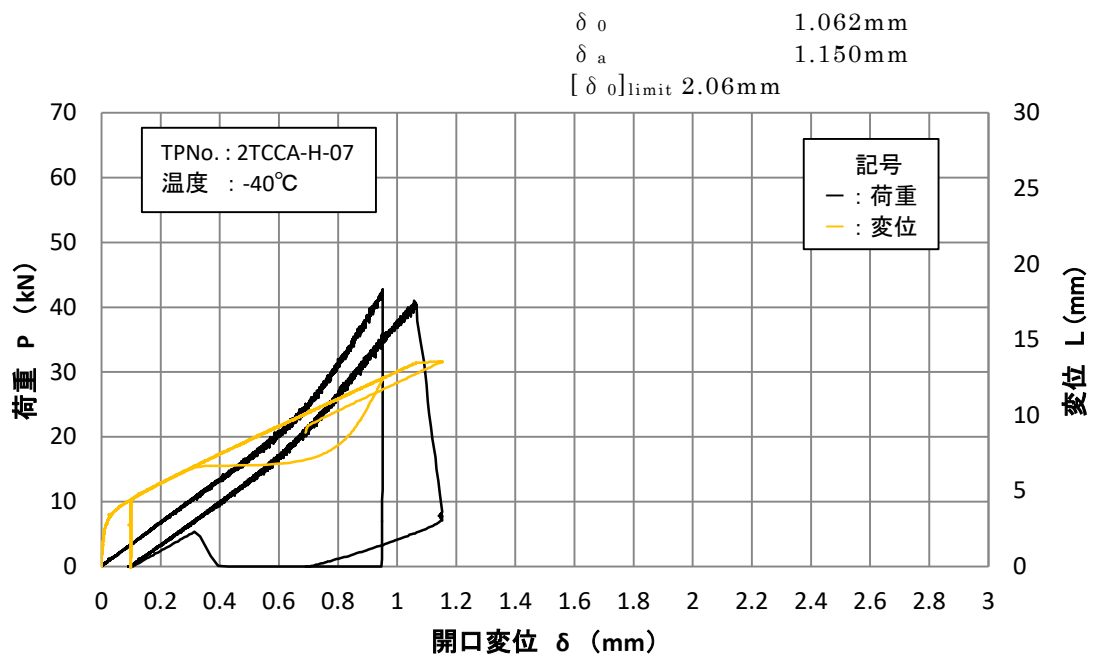


(試験片符号:2TCCA-H-05 試験温度:-20°C 供試材:JRH 材)

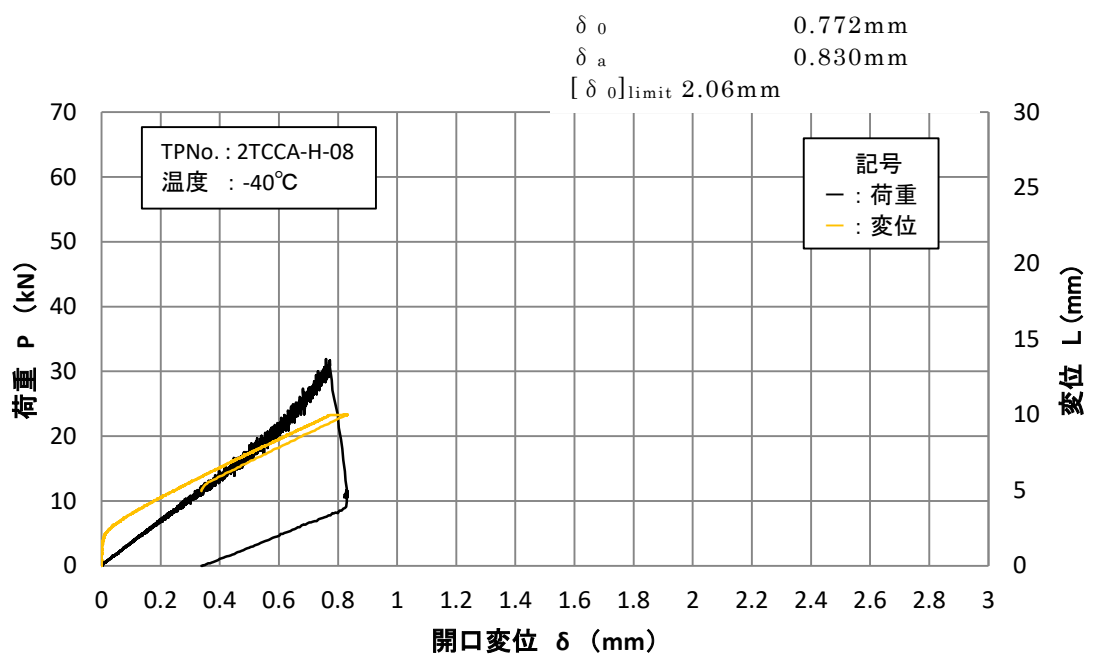


(試験片符号:2TCCA-H-06 試験温度:-20°C 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-6 荷重-開口変位の結果(その 6)



(試験片符号:2TCCA-H-07 試験温度:-40°C 供試材:JRH 材)



(試験片符号:2TCCA-H-08 試験温度:-40°C 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-6 荷重-開口変位の結果(その 7)



(a) 破面正面

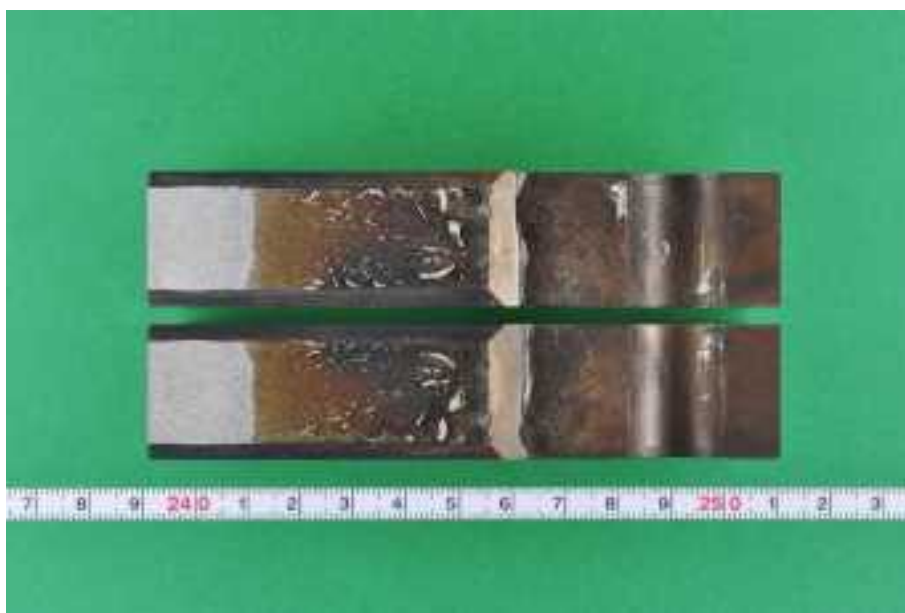


(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:1TCCA-M-01 試験温度:-20℃ 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-7 試験片の破面状況(その 1)



(a) 破面正面

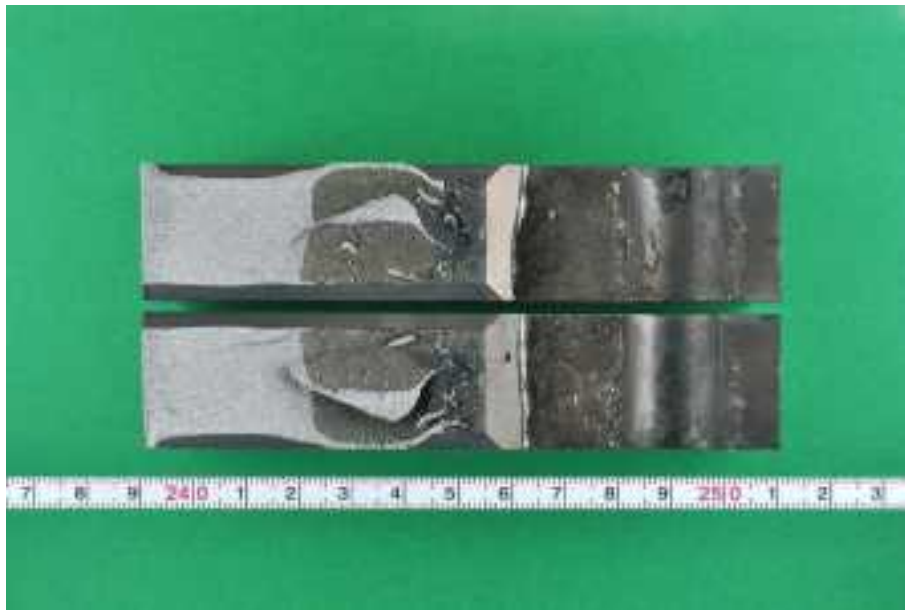


(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:1TCCA-M-02 試験温度:-40℃ 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-7 試験片の破面状況(その 2)



(a) 破面正面

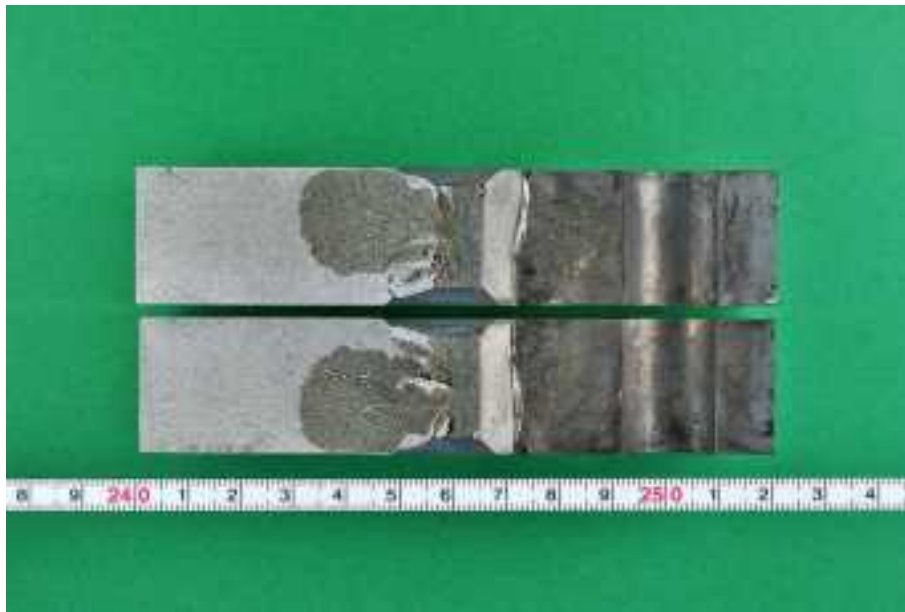


(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:1TCCA-M-03 試験温度:-60℃ 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-7 試験片の破面状況(その 3)



(a) 破面正面



(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:1TCCA-M-04 試験温度:-20℃ 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-7 試験片の破面状況(その 4)



(a) 破面正面



(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:1TCCA-M-05 試験温度:-20℃ 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-7 試験片の破面状況(その 5)



(a) 破面正面

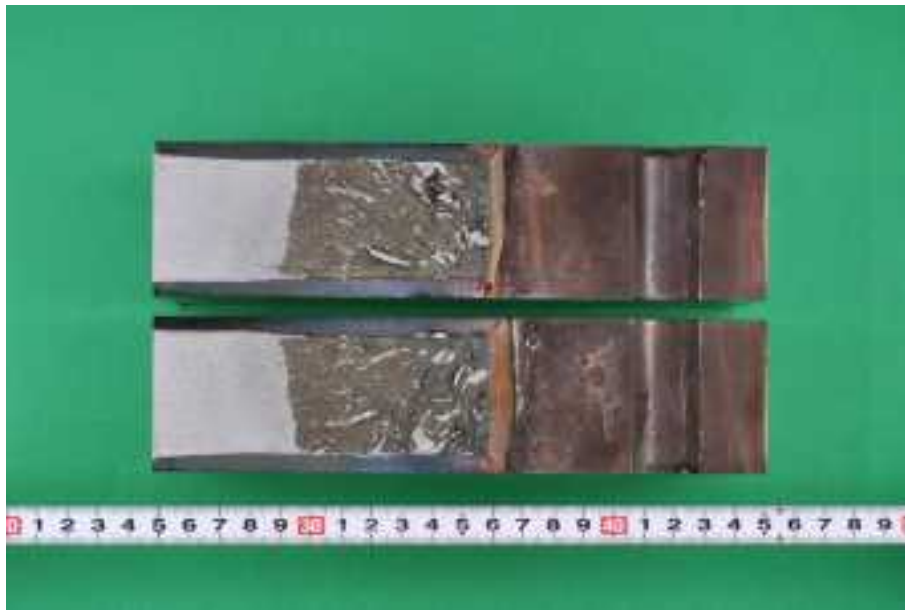


(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:1TCCA-M-06 試験温度:-40℃ 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-7 試験片の破面状況(その 6)



(a) 破面正面



(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:2TCCA-M-01 試験温度:-20℃ 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-7 試験片の破面状況(その 7)



(a) 破面正面

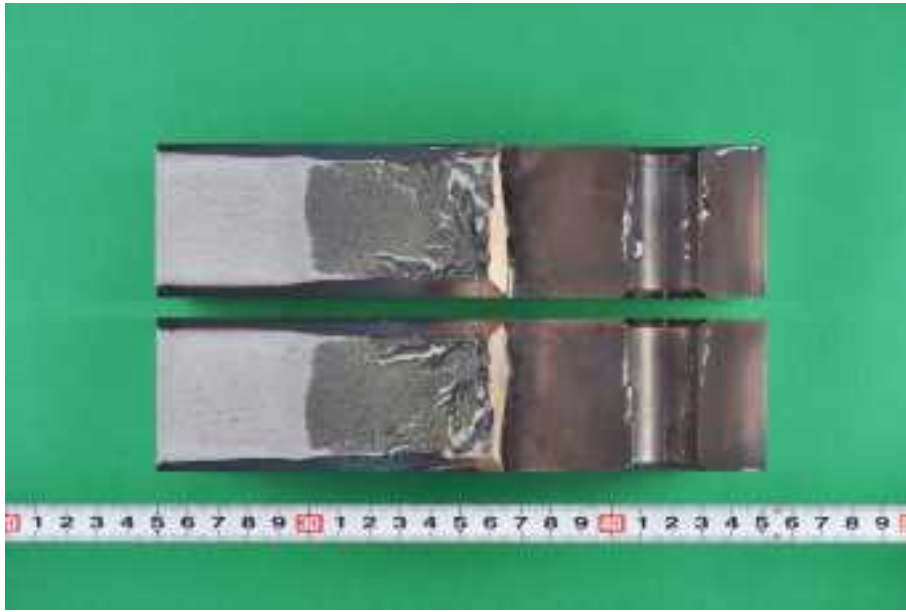


(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:2TCCA-M-02 試験温度:-20℃ 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-7 試験片の破面状況(その 8)



(a) 破面正面

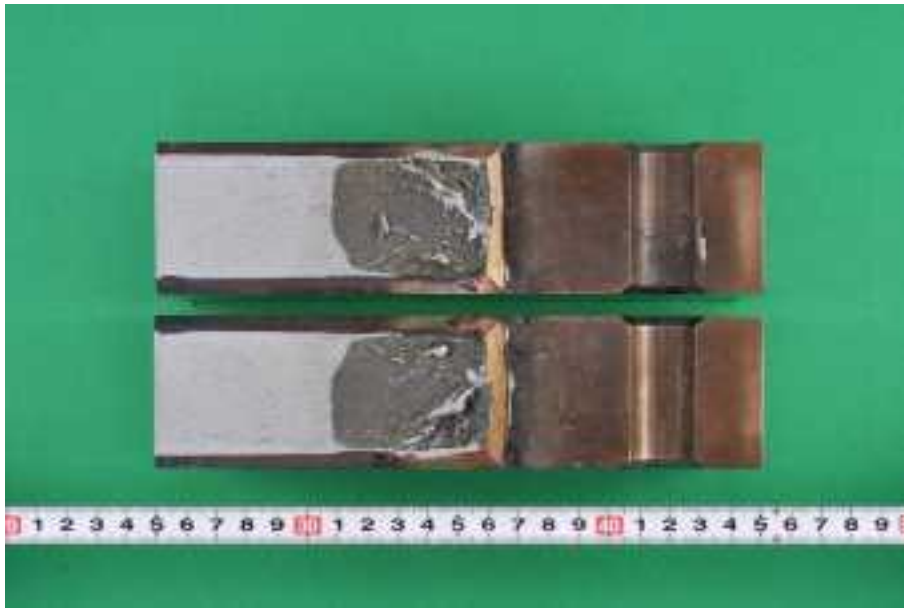


(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:2TCCA-M-03 試験温度:-20℃ 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-7 試験片の破面状況(その 9)



(a) 破面正面

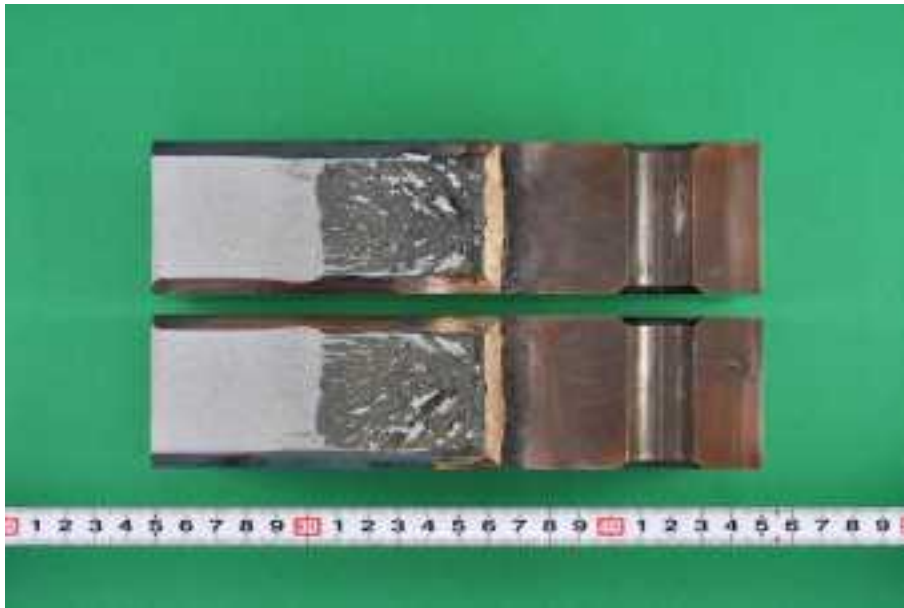


(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:2TCCA-M-04 試験温度:-20℃ 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-7 試験片の破面状況(その 10)



(a) 破面正面



(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:2TCCA-M-05 試験温度:0℃ 供試材:JRM 材)

図 5.1.3-7 試験片の破面状況(その 11)



(a) 破面正面



(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:1TCCA-H-02 試験温度:-40℃ 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-8 試験片の破面状況(その 1)



(a) 破面正面

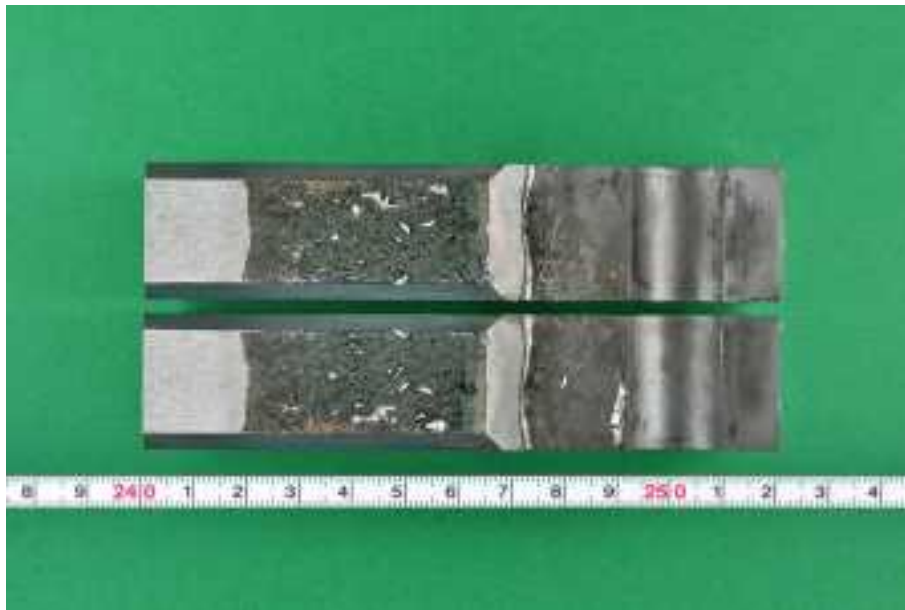


(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:1TCCA-H-03 試験温度:-60℃ 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-8 試験片の破面状況(その 2)



(a) 破面正面



(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:1TCCA-H-04 試験温度:-40℃ 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-8 試験片の破面状況(その 3)



(a) 破面正面



(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:1TCCA-H-05 試験温度:-40℃ 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-8 試験片の破面状況(その 4)



(a) 破面正面



(b) 破面斜視

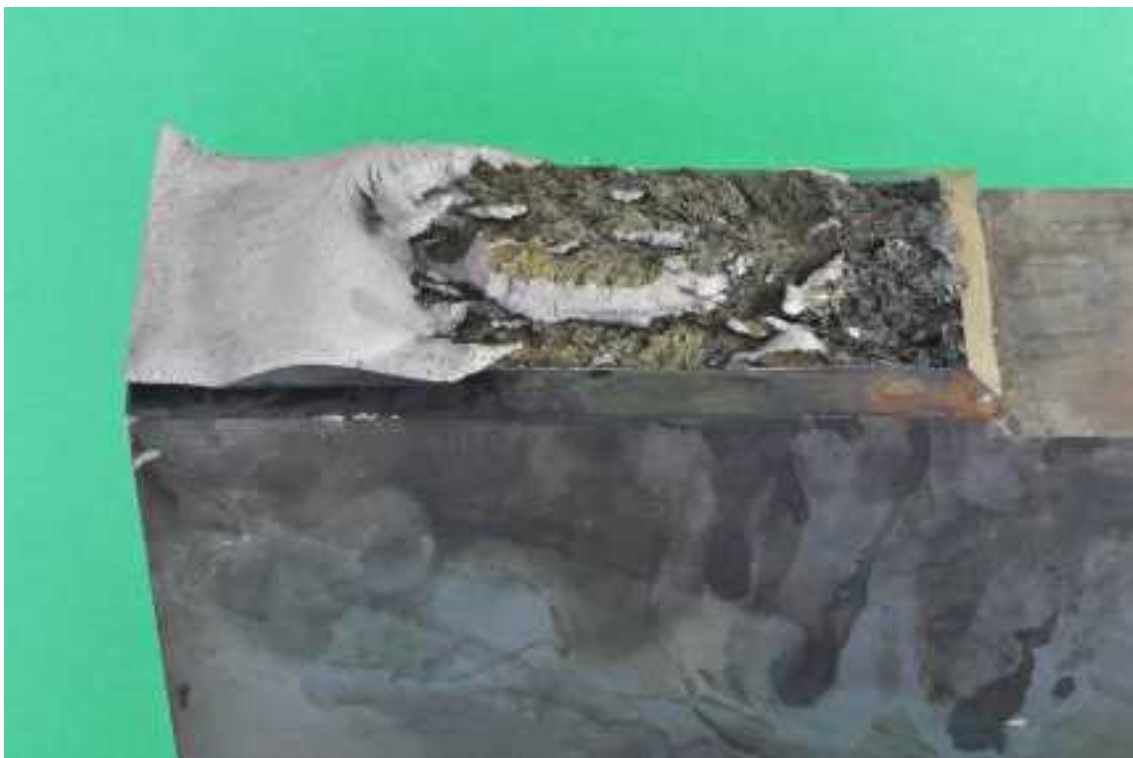
×1

(試験片符号:2TCCA-H-02 試験温度:-20℃ 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-8 試験片の破面状況(その 5)



(a) 破面正面



(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:2TCCA-H-03 試験温度:-20℃ 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-8 試験片の破面状況(その 6)



(a) 破面正面

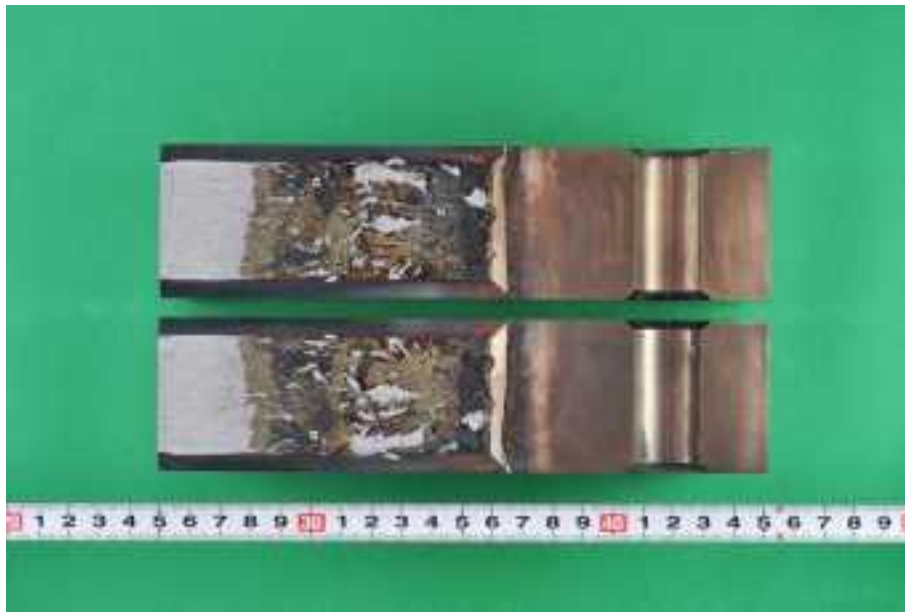


(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:2TCCA-H-04 試験温度:-20℃ 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-8 試験片の破面状況(その 7)



(a) 破面正面

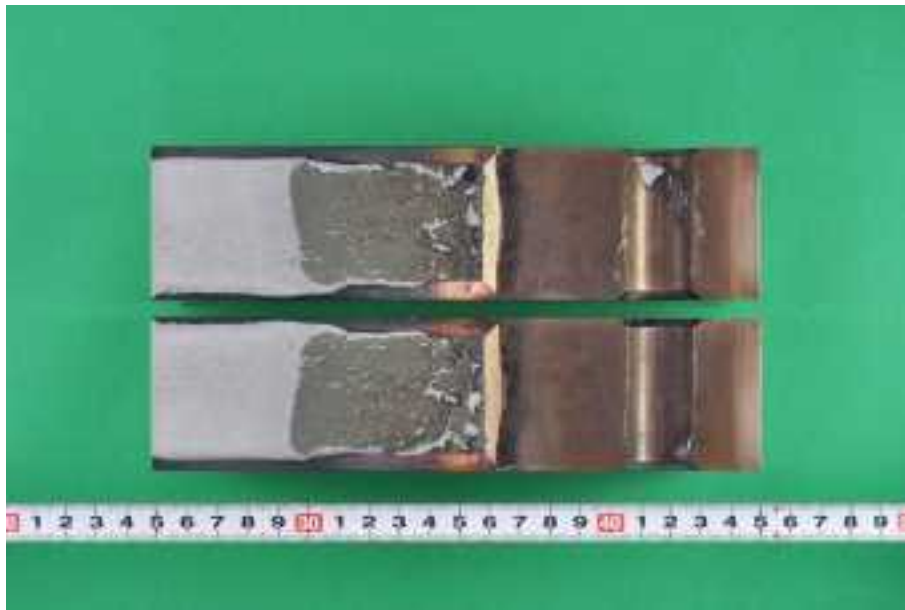


(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:2TCCA-H-05 試験温度:-20℃ 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-8 試験片の破面状況(その 8)



(a) 破面正面



(b) 破面斜視

×1

(試験片符号:2TCCA-H-07 試験温度:-40℃ 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-8 試験片の破面状況(その 9)



(a) 破面正面

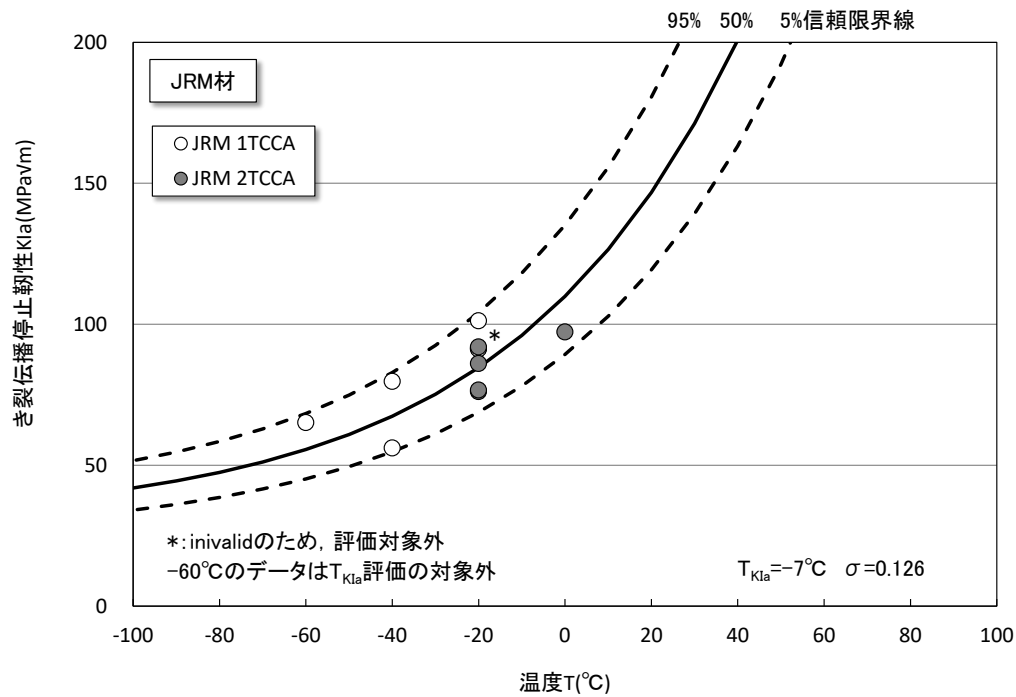


(b) 破面斜視

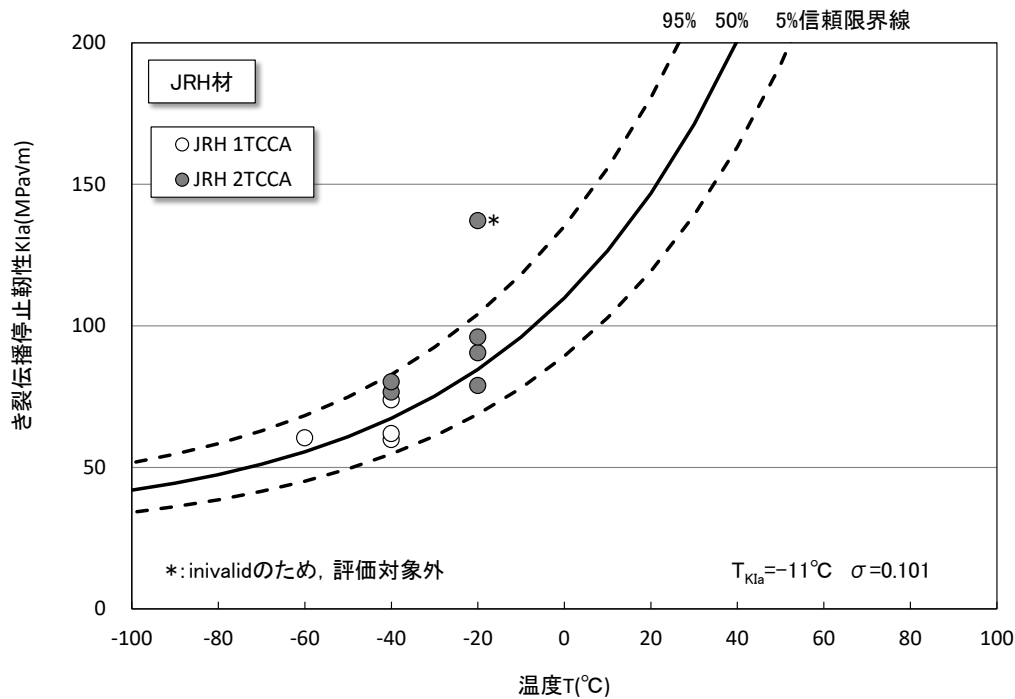
×1

(試験片符号:2TCCA-H-08 試験温度:-40℃ 供試材:JRH 材)

図 5.1.3-8 試験片の破面状況(その 10)



(1) JRM 材



(2) JRH 材

図 5.1.3-9 温度とき裂伝播停止靱性 K_{Ia} の関係

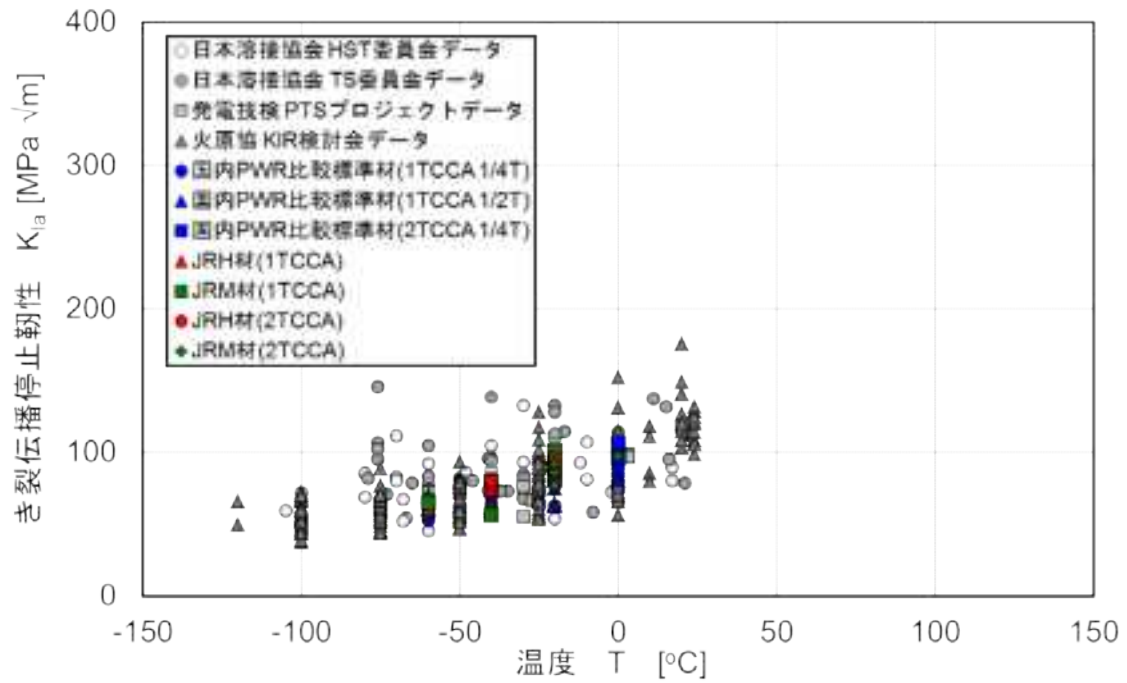


図 5.1.3-10 JRM 材・JRH 材と国内原子炉压力容器鋼材の温度 T と K_{Ia} データの比較

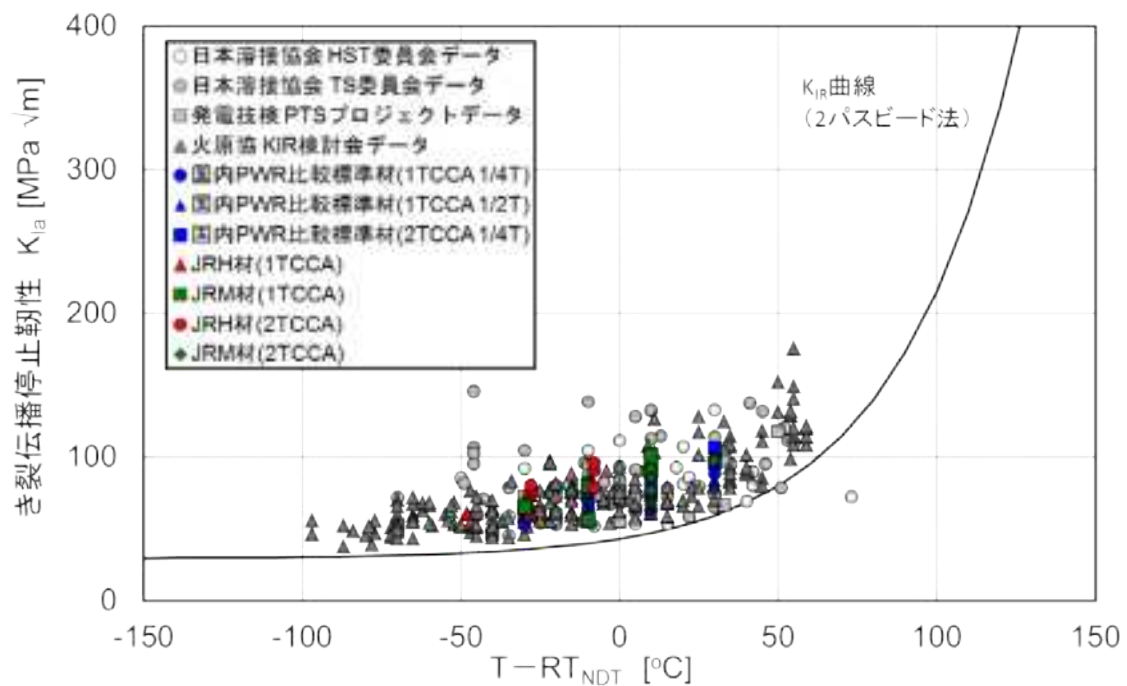


図 5.1.3-11 JRM 材・JRH 材と国内原子炉压力容器鋼材の $T - RT_{NDT}$ と K_{Ia} データの比較

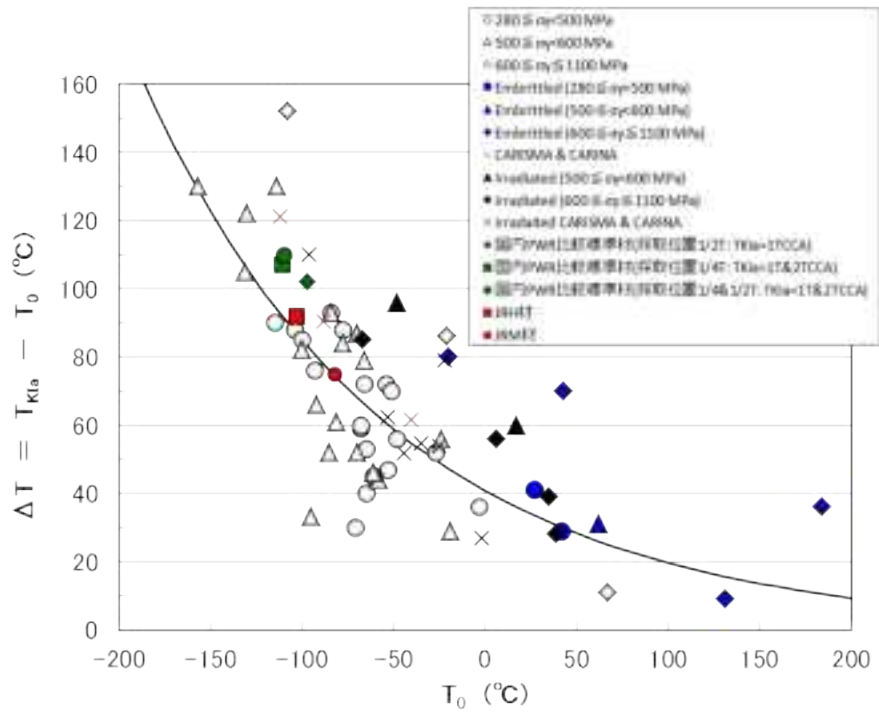


図 5.1.3-12 T_0 と $T_{KIa} - T_0$ の関係及び Wallin の相関式との比較

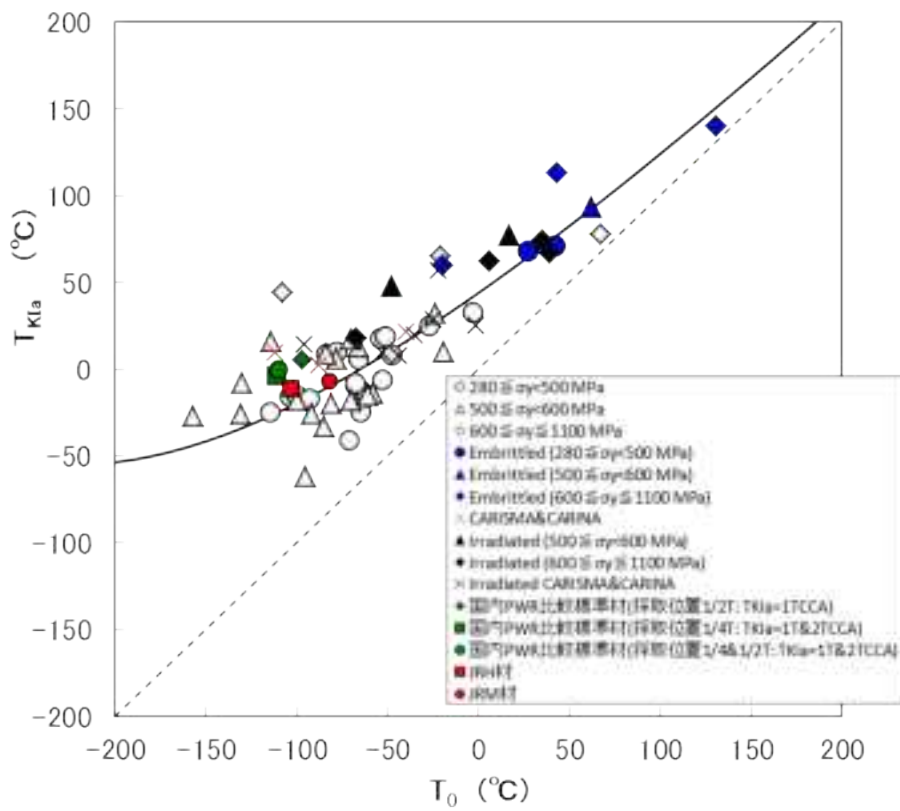


図 5.1.3-13 T_0 と T_{KIa} の関係及び Erickson-Kirk の相関式との比較

5.1.3.2 計装シャルピー試験

(1) シャルピー衝撃試験片の製作

K_{Ia} に関するマスターカーブ参照温度 T_{KIa} との相関が報告されている計装化シャルピー試験におけるパラメータ T_{Fa4kN} (脆性き裂伝播停止荷重 $Fa=4kN$ に相当する温度)を評価するため、PWR 比較標準材から計装化シャルピー衝撃試験に使用する試験片の製作を行った。供試材は、平成 25 年度「き裂伝播停止試験並びに WPS 効果実証試験」にて K_{Ia} 試験及び WPS 試験に使用した国内 PWR 比較標準材(SA533B C1.1 鋼)の未照射材を用いた。試験片は、JIS Z2242-2005 「金属材料のシャルピー衝撃試験方法」(5.1.3-18)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)となるよう合計 20 体の試験片を加工した。試験片の形状及び寸法を図 5.1.3-14 に示す。製作した試験片の外観を図 5.1.3-15 に、試験片の寸法を表 5.1.3-7 に示す。製作した試験片の寸法は、すべて JIS Z2242-2005 の寸法公差を満足していた。

(2) 計装シャルピー衝撃試験結果

300J 計装シャルピー試験機を用いて、 $-100^{\circ}C$ ～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 5.1.3-8 に示す。図 5.1.3-16 に、シャルピー遷移曲線を示す。 $Fa=4kN$ に相当する温度は上部棚に近い範囲であり、重点的に試験を行った。図 5.1.3-17 に示すように、計測した荷重の時刻歴から、脆性き裂伝播停止の荷重(Fa)を評価した。ここで、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。本研究では、き裂伝播停止後に衝撃波形が落ち着くまでの範囲(約 0.0001～0.0003 秒)の範囲で 3 次曲線にフィッティングすることでき裂伝播停止点を決定した(図 5.1.3-17 右図)。表 5.1.3-9 に、シャルピー衝撃試験結果と Fa の評価結果を示す。図 5.1.3-18 に、脆性き裂が発生した試験片の荷重-時間線図を示す。

(3) パラメータ T_{Fa4kN} の評価

既往研究 (5.1.3-19、20、21、22)では、試験温度と Fa の関係を、次の式でフィッティングすることにより T_{Fa4kN} の温度を評価している。

$$Fa = 4 \times \exp\left(\frac{T - T_{Fa4kN}}{A}\right) \quad (5.1.3-19)$$

ここで、 Fa はき裂伝播停止点の荷重、 T は試験温度、 T_{Fa4kN} と A は最小二乗法でのフィッティングで決める係数である。図 5.1.3-19 に、 T_{Fa4kN} の評価結果を示す。本年度の試験結果からは、 $T_{Fa4kN} = -7.8^{\circ}C$ 、 $A = 27.4$ と評価できた。昨年度の実験から、PWR 比較標準材の $TKIa$ は約 $0^{\circ}C$ である(表 5.1.3-6)。図 5.1.3-20 に T_{KIa} と T_{Fa4kN} の相関を、既往研究のデータと併せて示す。本研究で用い

た PWR 比較標準材は、既往データの分布の中心付近に位置している。全データの標準偏差は $\sigma=12.4^{\circ}\text{C}$ であり、 T_{K1a} と T_{Fa4kN} との間に以下の式で表される良い相関があることが確認できた。

$$T_{\text{K1a}} = T_{\text{Fa4kN}} + 11.5^{\circ}\text{C} \quad \sigma = 12.4^{\circ}\text{C} \quad (5.1.3-20)$$

表 5.1.3-7 シャルピーV ノッチ衝撃試験片の寸法測定結果

試験片 符号	A	B	C	D	E	F	G	H	I
		55± 0.6	27.5±0.4	27.5±0.4	10±0.05	10±0.05	45° ±2°	R0.25± 0.025	2
CV-01	55.02	27.57	27.45	10.00	10.01	45° 05'	0.245	2.0	8.05
CV-02	55.02	27.56	27.46	10.01	10.01	45° 11'	0.242	2.0	8.04
CV-03	55.02	27.56	27.46	10.00	10.01	45° 14'	0.232	2.0	8.04
CV-04	55.02	27.57	27.45	10.01	10.01	45° 18'	0.234	2.0	8.04
CV-05	55.02	27.56	27.46	10.01	10.01	45° 38'	0.247	2.0	8.04
CV-06	55.01	27.55	27.46	10.01	10.01	44° 57'	0.238	2.0	8.04
CV-07	55.01	27.55	27.46	10.01	10.01	44° 26'	0.237	2.0	8.04
CV-08	55.02	27.55	27.47	10.01	10.01	44° 22'	0.241	2.0	8.04
CV-09	55.01	27.56	27.45	10.01	10.01	44° 41'	0.247	2.0	8.04
CV-10	55.02	27.55	27.47	10.01	10.01	44° 34'	0.238	2.0	8.04
CV-11	55.01	27.47	27.54	10.01	10.01	45° 02'	0.248	2.0	8.01
CV-12	55.01	27.50	27.51	10.01	10.01	45° 03'	0.246	2.0	8.01
CV-13	55.02	27.49	27.53	10.01	10.01	45° 04'	0.246	2.0	8.02
CV-14	55.02	27.49	27.53	10.01	10.01	45° 04'	0.247	2.0	8.02
CV-15	55.02	27.50	27.52	10.01	10.01	45° 00'	0.245	2.0	8.01
CV-16	55.02	27.58	27.44	10.01	10.01	44° 17'	0.231	2.0	8.02
CV-17	55.02	27.60	27.42	10.01	10.01	44° 58'	0.231	2.0	8.01
CV-18	55.02	27.60	27.42	10.01	10.01	44° 49'	0.235	2.0	8.02
CV-19	55.02	27.62	27.40	10.01	10.01	44° 59'	0.230	2.0	8.02
CV-20	55.02	27.59	27.43	10.01	10.01	44° 38'	0.237	2.0	8.02

注)A~Iの各部については以下のとおり。

表 5.1.3-8 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 ²)	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 5.1.3-9 シャルピー衝撃試験結果

ID	試験温度, °C	吸収エネルギー, J	Fa, kN
CV-01	13.5	195	脆性き裂発生無
CV-02	13.5	198	脆性き裂発生無
CV-03	-20	131	3.05
CV-04	-40	94	1.65
CV-05	-60	81	0
CV-06	-80	40	0
CV-07	-100	15	0
CV-08	0	150	6.15
CV-09	0	207	脆性き裂発生無
CV-10	-10	148	2.8
CV-11	-10	155	4.4
CV-12	-5	166	3.25
CV-13	-5	143	3.55
CV-14	0	152	5.6
CV-15	-15	156	3.85

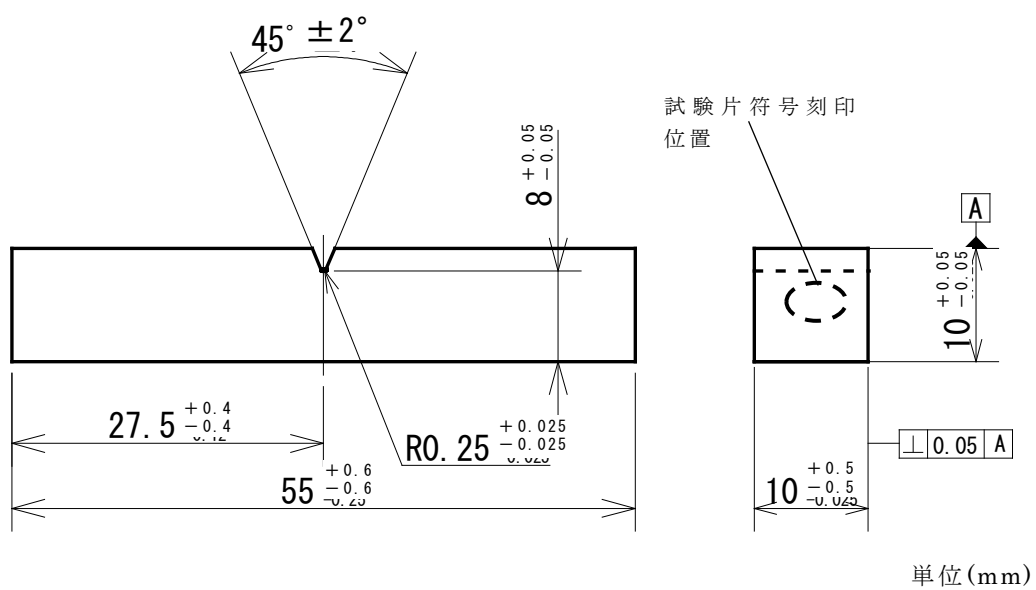
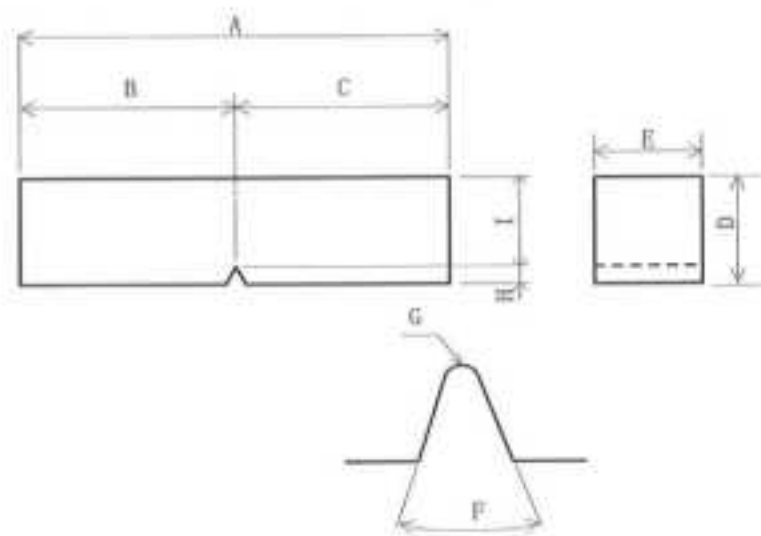


図 5.1.3-14 JIS シャルピーVノッチ衝撃試験片の形状及び寸法

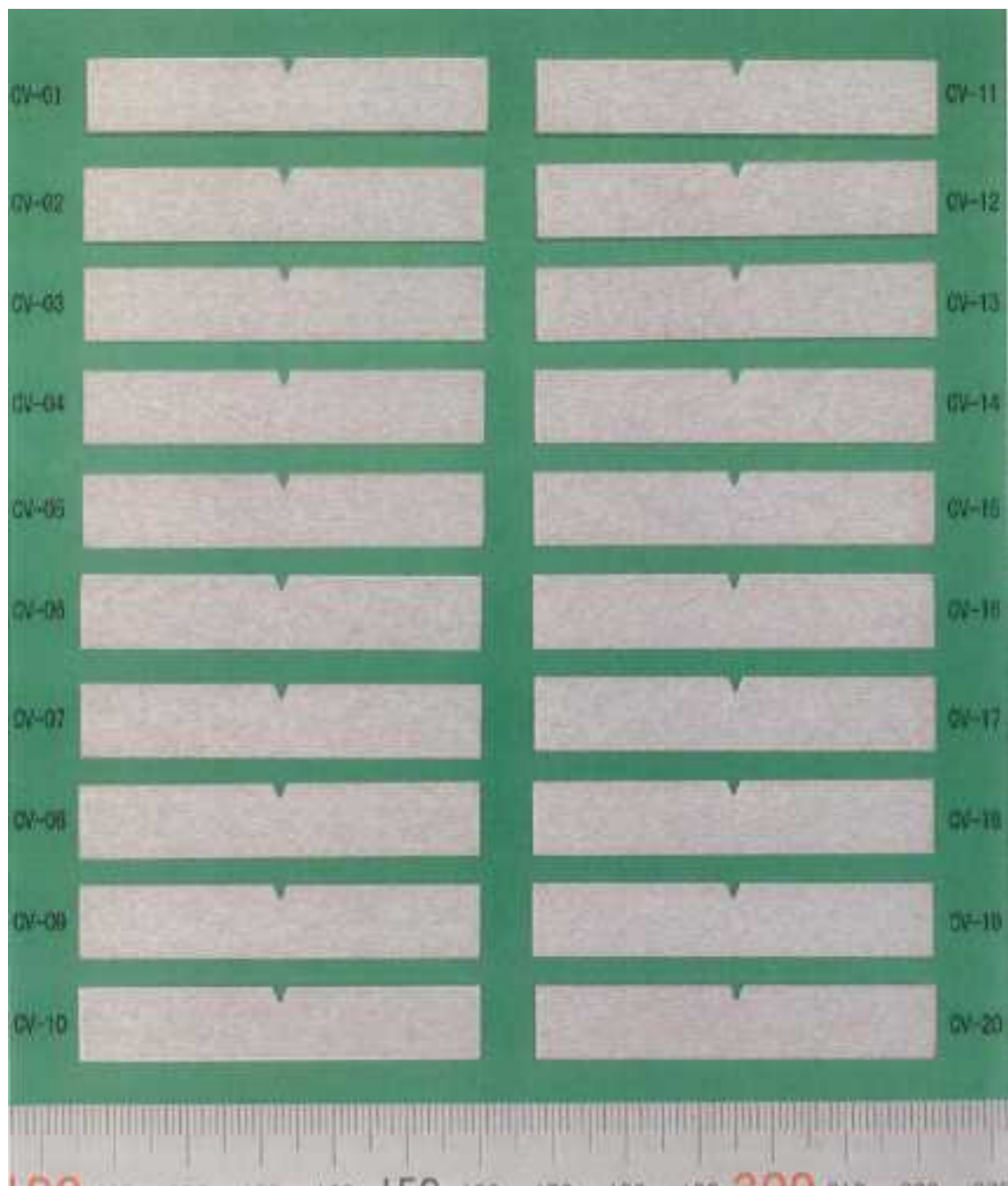


図 5.1.3-15 JIS シャルピーV ノッチ衝撃試験片の外観状況

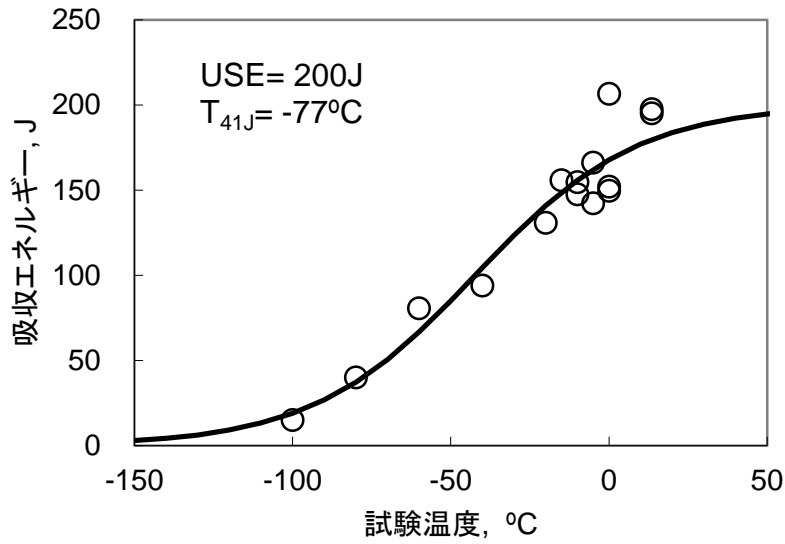


図 5.1.3-16 シャルピー遷移曲線

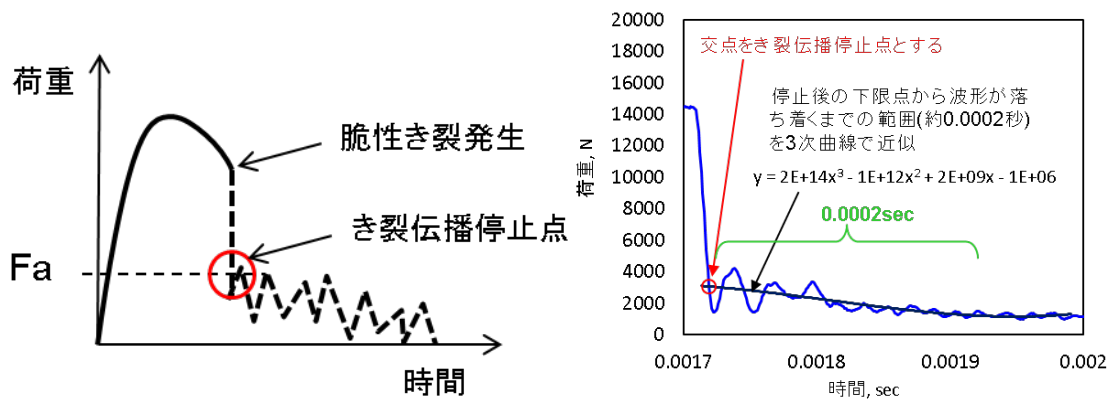


図 5.1.3-17 脆性き裂伝播停止荷重(Fa)の定義と評価方法

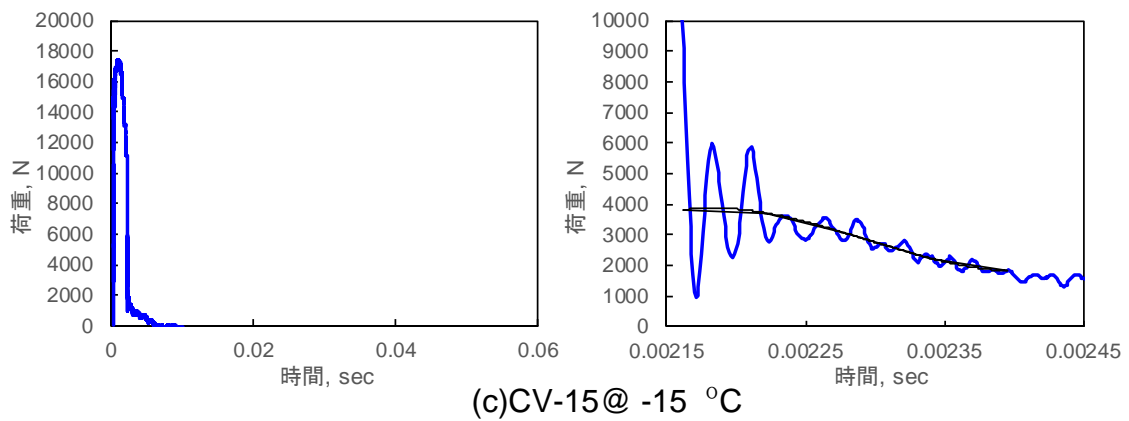
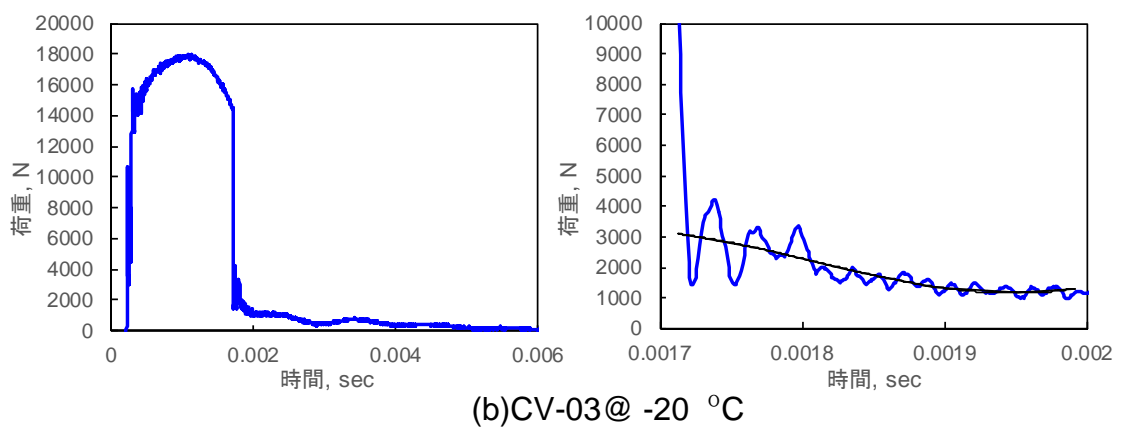
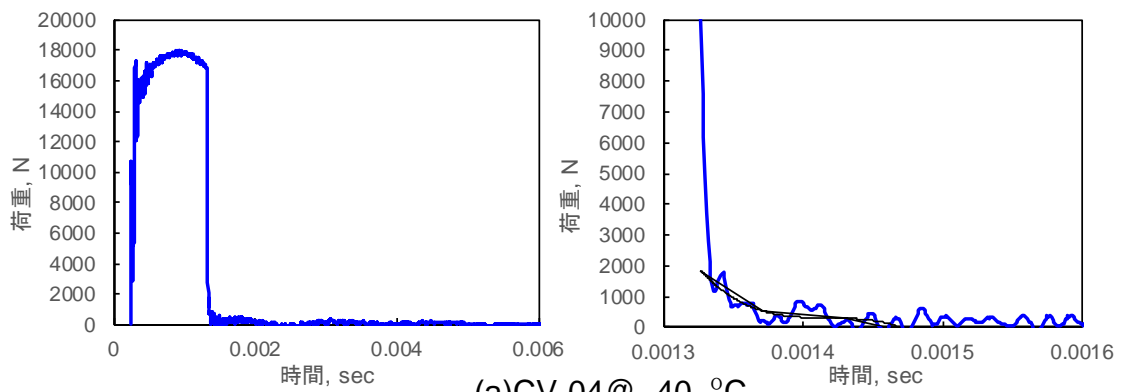


図 5.1.3-18 荷重-時間線図(その 1)

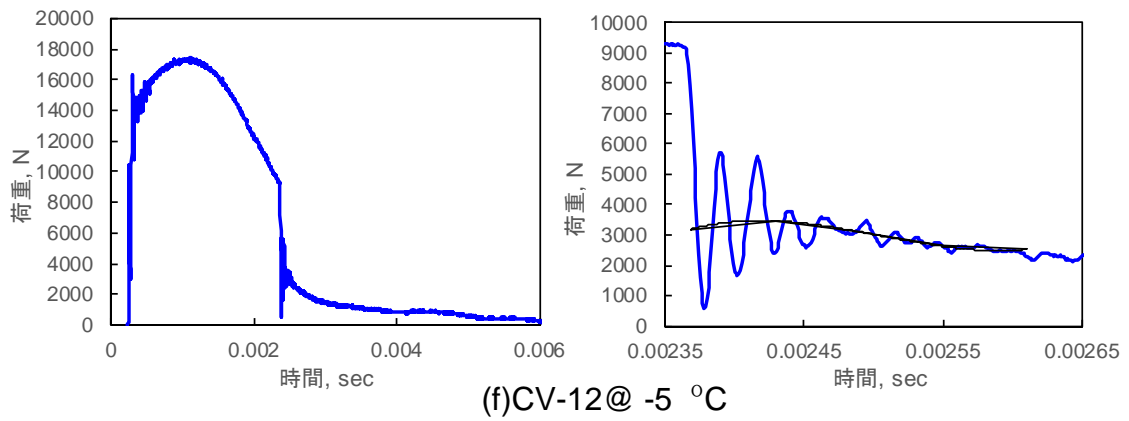
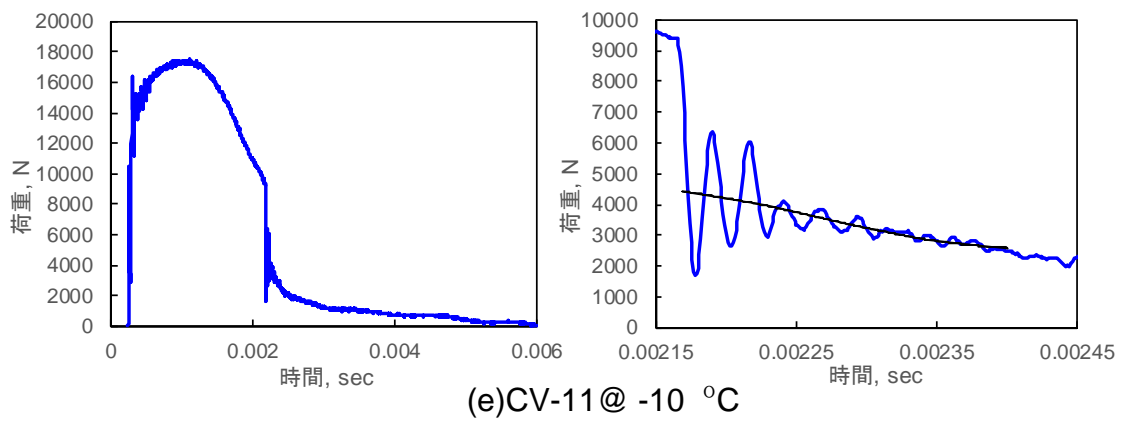
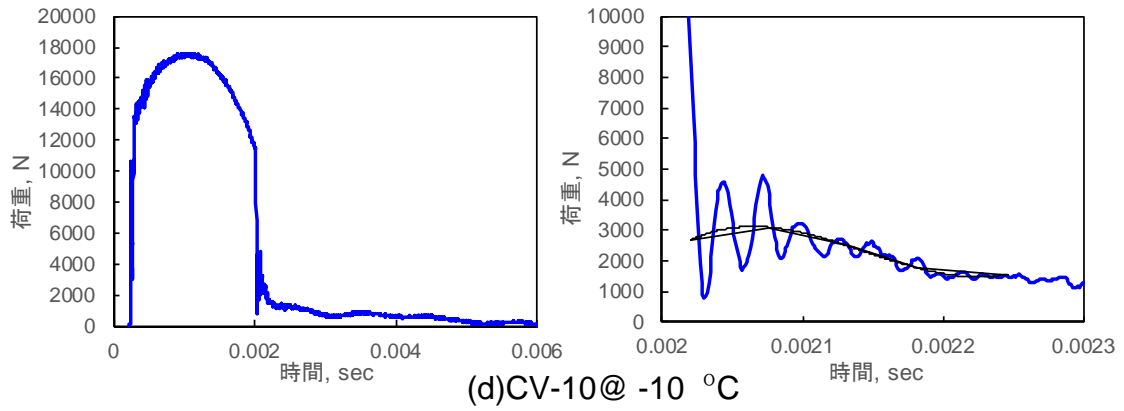
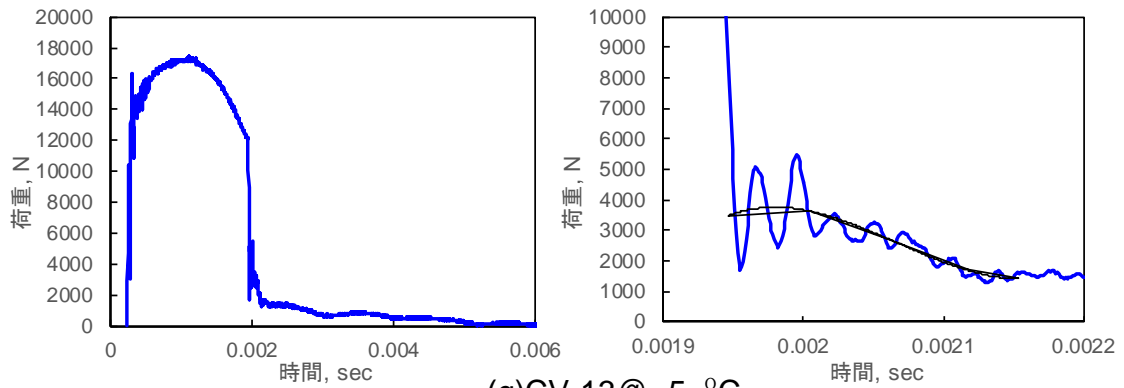
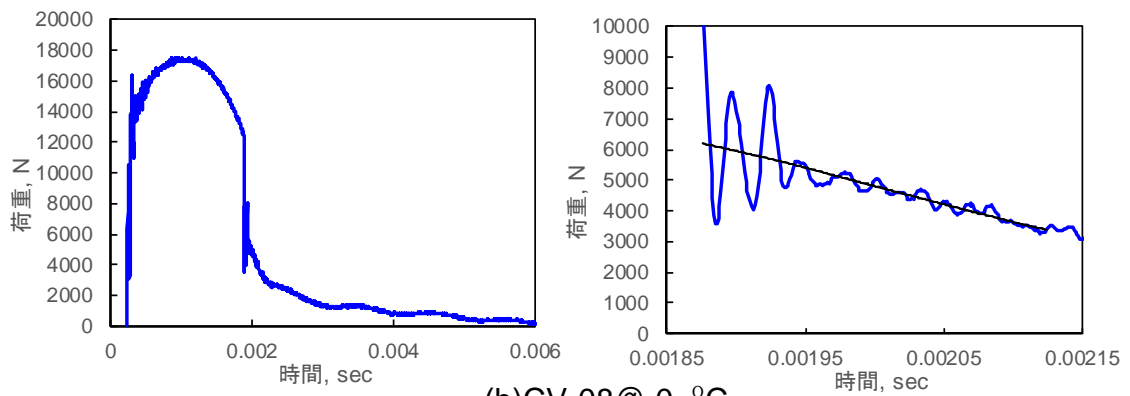


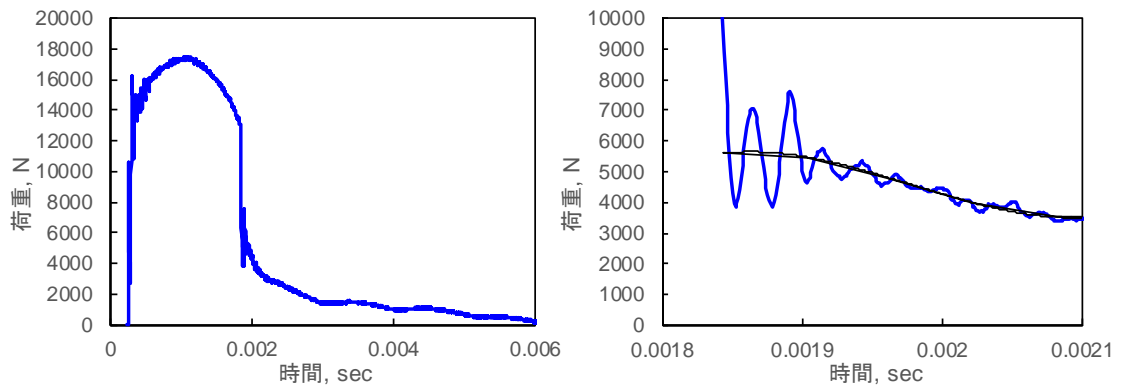
図 5.1.3-18 荷重-時間線図(その 2)



(g)CV-13@ -5 °C



(h)CV-08@ 0 °C



(i)CV-14@0 °C

図 5.1.3-18 荷重-時間線図(その 3)

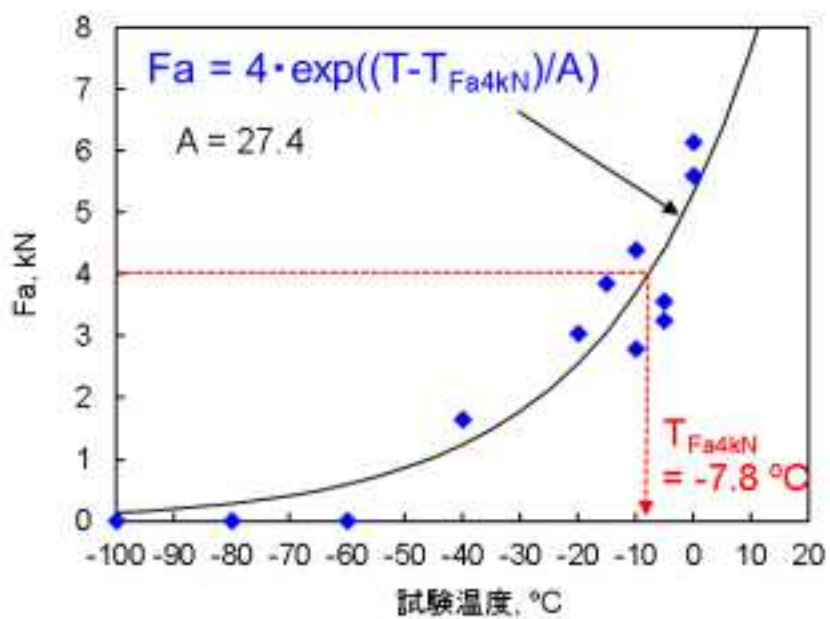


図 5.1.3-19 T_{Fa4kN} の評価結果

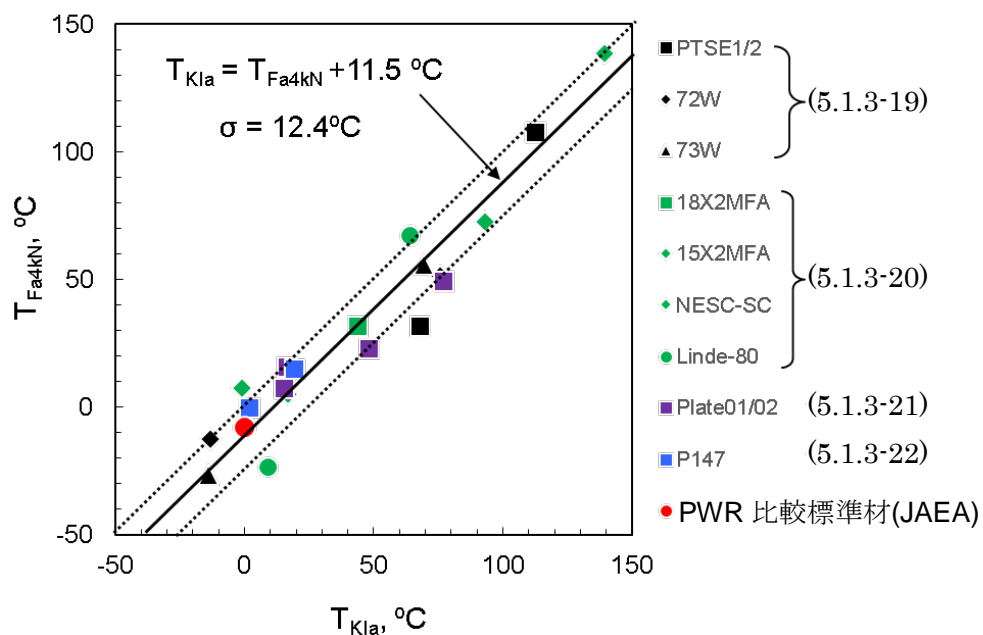


図 5.1.3-20 T_{KIa} と T_{Fa4kN} の相関

5.1.3.3 き裂伝播停止破壊靱性(K_{Ia})に関する試験のまとめ

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、破壊靱性参照温度 T_0 と K_{Ia} 参照温度 T_{KIa} の相関、及び計装シャルピー試験における脆性き裂伝播停止荷重 F_a と T_{KIa} の相関について、未照射材を用いた検討を行った。

前者に関し、Wallin 及び EricksonKirk の相関式の両方に整合する、 T_0 と T_{KIa} との間の相関が確認できた。これにより、試験済み監視試験片から小型試験片(0.16T-CT)を採取して破壊靱性参照温度 T_0 を得ることで、 K_{Ia} の温度依存性を評価できることがわかった。

後者に関しても、計装シャルピー試験における脆性き裂伝播停止荷重 $F_a=4kN$ 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。これにより、監視試験を行う際、計装シャルピー試験機を用いることで、 K_{Ia} の温度依存性を評価できることがわかった。

以上、2通りの手法で、本来は大型試験片が必要になるき裂伝播停止破壊靱性 K_{Ia} を、監視試験片を用いて間接的に評価できることを示すことができた。次年度は、既存照射材の計装シャルピーデータの整理を行い、 T_{Fa4kN} と T_{KIa} との相関について調査を進める。また、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_0 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

- (5.1.3-1) ASTM E1221-12、“Standard Test Method for Determining Plane-Strain Crack-Arrest Fracture Toughness, K_{Ia} , of Ferritic Steels”、(2012).
- (5.1.3-2) 一般社団法人日本電気協会 原子力規格委員会 JEAC 4202-2004 “フェライト鋼の落重試験方法”、(2004).
- (5.1.3-3) 日本溶接協会 原子力研究委員会 7HST 小委員会、“原子力压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).
- (5.1.3-4) 日本溶接協会 原子力研究委員会 8HST 小委員会、“原子力压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).
- (5.1.3-5) 日本溶接協会 原子力研究委員会 9HST 小委員会、“原子力压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).
- (5.1.3-6) 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 [原子炉压力容器加圧熱衝撃試験][総まとめ版]、(平成 4 年 3 月).
- (5.1.3-7) 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).
- (5.1.3-8) 日本溶接協会 原子力研究委員会 0TS 小委員会、“軽水炉压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).
- (5.1.3-9) 日本溶接協会 原子力研究委員会 1TS 小委員会、“軽水炉压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).

- (5.1.3-10) 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).
- (5.1.3-11) H25 年度委託研究“き裂伝播停止試験並びに WPS 効果実証試験”報告書、(2014)
- (5.1.3-12) ASTM E1221-88、“Standard Test Method for Determining Plane-Strain Crack-Arrest Fracture Toughness, K_{Ia} , of Ferritic Steels”(1998).
- (5.1.3-13) K.Wallin、 et al.、“Master Curve based Correlation between Static Initiation Toughness K_{Ic} and Crack Arrest Toughness K_{Ia} ”、24th MPA-Seminar、(1998).
- (5.1.3-14) 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).
- (5.1.3-15) H.Hein、 et al.、“CARINA-A programme for experimental investigation of the irradiation behavior of German reactor pressure vessel materials” VGB Power Tech 5、(2013).
- (5.1.3-16) H.Hein、 et al.、“CARINA-A programme for experimental investigation of the irradiation behavior of German reactor pressure vessel materials” VGB Power Tech 5、(2013).
- (5.1.3-17) F.Obermeier、 et al.、“CRACK ARREST TEST RESULTS OF UNIRRADIATED AND IRRADIATED GERMAN RPV STEELS”、PVP2013-97954、(2013).
- (5.1.3-18) JIS Z2242-2005、“金属材料のシャルピー衝撃試験方法”、(2005).
- (5.1.3-19) K. Wallin, ESIS20, pp.165-176 (1996).
- (5.1.3-20) Planman T, SMiRT-14, G11/1 (1997).
- (5.1.3-21) Elisabeth Keim, PVP2007-26506 (2007).
- (5.1.3-22) K. Müller, G. Pusch, Elsevier Science LTd. And ESIS, pp.263-270, (2002).

5.1.4 原子炉圧力容器鋼の照射脆化に関する微細組織分析

原子炉圧力容器鋼は、中性子照射だけでなく 300°C 近い運転温度にさらされており、圧力容器では炉心からの位置により中性子照射量、照射速度等が異なることから、中性子照射以外の熱時効が脆化に及ぼす影響を調べる必要がある。

そこで、300°C 及び 400°C において 140,000 時間(約 16 年)という長期間の熱時効を施した炭素鋼について 3 次元アトムプローブ(APT)及び陽電子消滅法による微細組織分析を行った。炭素鋼の化学成分を表 5.1.4-1 に示す。APT 用の試料は、走査電子顕微鏡-集束イオンビーム(SEM/FIB Dual beam)装置を用いて製作し、分析装置としてレーザー補助局所電極型アトムプローブ(CAMECA 社製、LEAP 4000X-HR)を用いた。測定中の試料温度は 35K に保持し、DC 正の定常電圧を印加しながら、電圧パルス(DC 電圧の 15~20% のパルス高、周波数：~250kHz)、もしくはパルスレーザー(エネルギー：50~80pJ、波長：355nm、周波数：~250kHz)により電界蒸発を誘起して測定を実施した。陽電子消滅法による分析では陽電子線源として ^{22}Na を使用し、陽電子寿命と陽電子消滅同時計数ドップラー広がり(CDB)法による測定を実施した。

(1) APT による観察結果

300°C 熱時効材の APT 観察結果を図 5.1.4-1 に示す。(a)、(b)は電圧パルス、(c)はパルスレーザーによる 3 つのデータを取得した。400°C 熱時効材の APT 観察結果を図 5.1.4-2 に示す。(a)は電圧パルス、(b)-(e)はパルスレーザーによる 5 つのデータを取得した。300°C 熱時効材、400°C 熱時効材それぞれの観察された粒界(GB)を青い矢印で示す。400°C 熱時効材ではまれに Cu 富裕析出物を観察されたため(d)、(e)に緑の矢印で示す。

300°C 熱時効材、400°C 熱時効材ともにそれぞれのマトリックス中ではほぼ均一な元素分布が観察された。その化学成分を表 5.1.4-2 に示す。比較のため、供試鋼の化学成分を at.% に換算したのも記載している。APT 観察による溶質元素の化学成分分析値は、300°C 熱時効材、400°C 熱時効材ともに C、P、Mo 濃度において熱時効前の炭素鋼の化学成分の値より低い値となっていた。これは、これらの溶質元素が炭化物や粒界等に局所的に濃化したことでマトリックス中の濃度が低下したためと考えられる。300°C 熱時効材と 400°C 熱時効材の溶質元素濃度の違いは、300°C 熱時効材では Mn：約 1.1at.%、Cu：約 0.11at.%、Cr：約 0.16at.% であるのに対し、400°C 熱時効材では Mn：約 0.53at.%、Cu：約 0.029at.%、Cr：約 0.087at.% であった。これはこれらの溶質元素がより高温な熱時効により、局所的に濃化していると考えられる。その他の溶質元素では大きな違いは見られなかった。

300°C 熱時効材(a)の粒界近傍の溶質元素の 1 次元濃度プロファイルを図 5.1.4-3 に示し、400°C 熱時効材(a)の粒界近傍の溶質元素 1 次元濃度プロファイルを図 5.1.4-4 に示す。粒界近傍での P の偏析について、ピーク濃度が 300°C 熱時効材で約 0.24at.%、400°C 熱時効材では約 0.56at.% であった。

(2) 陽電子消滅法による分析結果

炭素鋼の 300°C 及び 400°C 熱時効材の陽電子寿命スペクトルを図 5.1.4-5 に示す。参考のため、純 Fe の測定結果も示す。300°C 熱時効材および 400°C 熱時効材では、純 Fe に比べて陽電子寿命が長いことから、空孔型欠陥への陽電子捕獲が生じていると考えられる。図 5.1.4-6 に、陽電子寿命スペクトルの解析結果を示す。参考のため、純 Fe バルクおよび純 Fe 中単空孔における陽電子寿命値^(5.1.4-1)も示す。300°C 熱時効材、及び 400°C 熱時効材どちらもスペクトルは 2 成分で良くフィッティングされ、150ps~165ps 程度の長寿命成分と 80ps 程度の短寿命成分に成分分離できた。陽電子平均寿命は、300°C 熱時効材で 119.4ps、400°C 熱時効材で 116.1ps であり、いずれの試料も純 Fe バルクでの値よりも長かった。一方、未熱時効材での陽電子平均寿命値 (126.6ps) よりも短かった。これは、長期間の熱時効によって空孔型欠陥が回復したことを示唆する。

図 5.1.4-7 に、300°C 及び 400°C 熱時効材の CDB 測定から得られた運動量分布を純 Fe の運動量分布に対する比率曲線として示す。参考のため純 Cu の純 Fe に対する比率曲線も示す。いずれの試料においても高運動量領域における比率曲線の形状は平坦であり、純 Cu の比率曲線で見られる $25 \times 10^{-3} \text{ moc}$ 付近の幅広いピークは見られなかった。

図 5.1.4-8 に、得られた比率曲線における低運動量成分(LMCF、 $< 4 \times 10^{-3} \text{ moc}$)と高運動量成分(HMCF、 $18 \sim 30 \times 10^{-3} \text{ moc}$)の相関図を示す。参考のため、純 Fe、純 Cu および中性子照射した純 Fe (JMTR で、照射量 $8.3 \times 10^{18} \text{ n/cm}^2$ ・照射温度 100°C) の相関をプロットした。いずれの熱時効材の結果も、相関点は未照射純 Fe と中性子照射した純 Fe を結ぶ線上にあり、未照射純 Fe に近かった。これは、陽電子の消滅サイトの周囲は Fe 原子が支配的であり、Cu 不純物がほとんど存在していないことを示している。

以上の結果、マトリックス中の化学成分の変化から、熱時効による炭化物や粒界などへの溶質元素の局所的濃化の可能性が示唆されたが、陽電子消滅法からは陽電子の消滅サイト周囲の元素はほぼ Fe 原子であり、熱時効による明瞭な変化は見られなかった。熱時効による脆化への影響を調べるためには、より長時間の熱時効や、機械的性質との関係を調べる必要がある。

参考文献

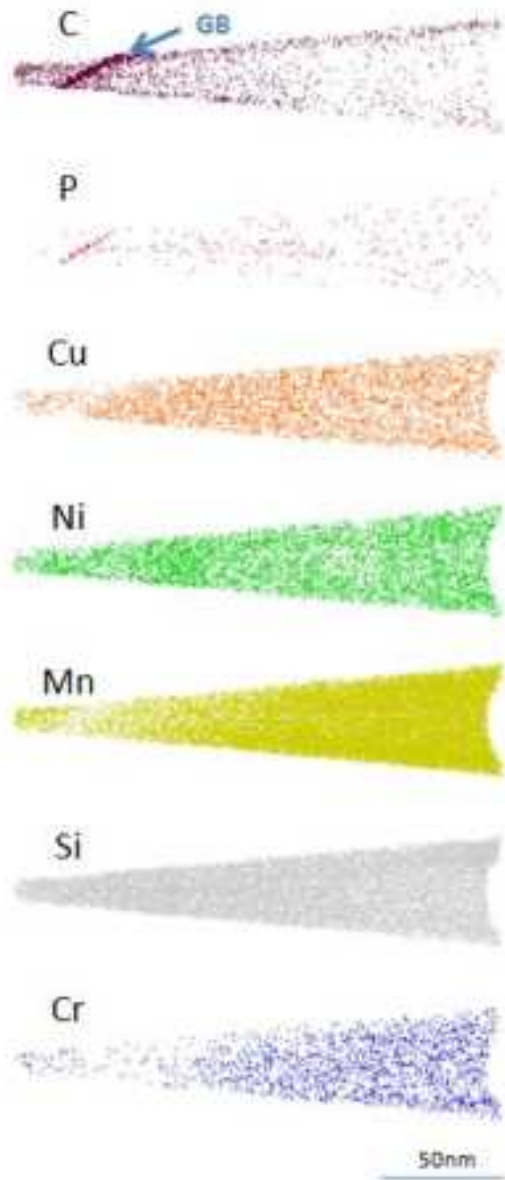
- (5.1.4-1) H. Ohkubo, Z. Tang, Y. Nagai, M. Hasegawa, T. Tawara, M. Kiritani, *Mat. Sci. Eng. A.* 350 (2003) 95.

表 5.1.4-1 炭素鋼の化学成分 (wt.%)

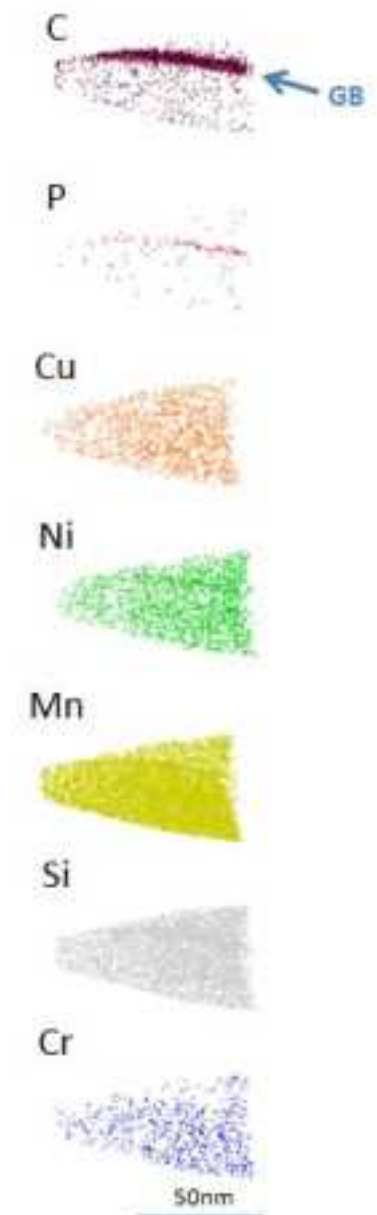
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	N
0.10	0.23	1.1	0.014	0.015	0.14-0.19	0.17	0.096	0.54	0.027	0.0060

表 5.1.4-2 炭素鋼の化学成分と APT で得られた熱時効材のマトリックス中の化学成分 (at.%)

材料	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Al	N
炭素鋼	0.46	0.46	1.1	0.014	0.026	0.14	0.16	0.10	0.31	0.056	0.024
300℃熱時効材	0.035	0.32	1.1	0.0011	0.018	0.11	0.19	0.16	0.020	0.024	0.012
400℃熱時効材	0.012	0.29	0.53	0.0051	0.013	0.029	0.15	0.087	0.0086	0.014	0.014

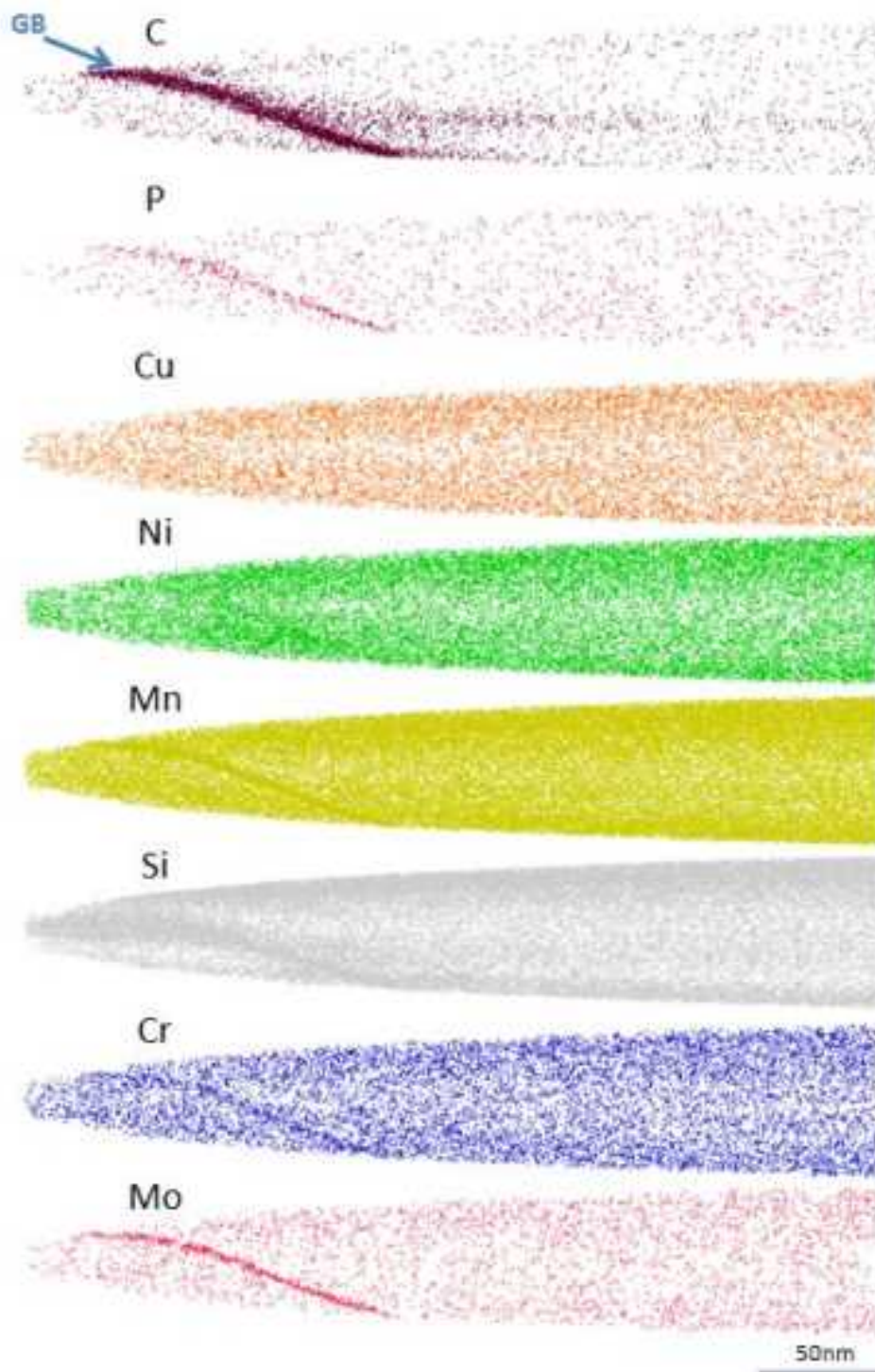


(a) 電圧パルス (540 万原子)



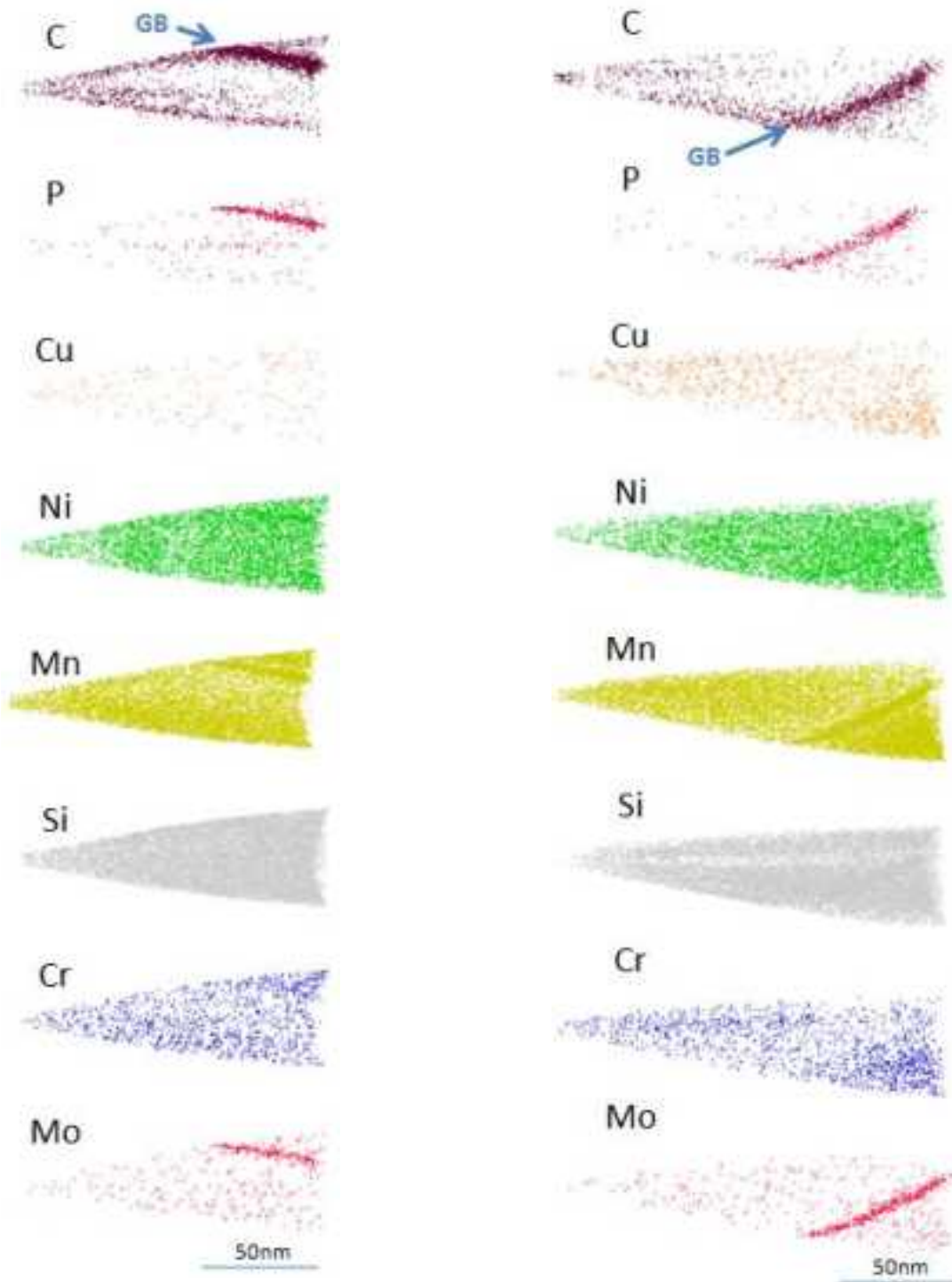
(b) 電圧パルス 220 万原子

図 5.1.4-1 300°C熱時効材の APT 観察結果(1/2)



(c) パルスレーザー (2600 万原子)

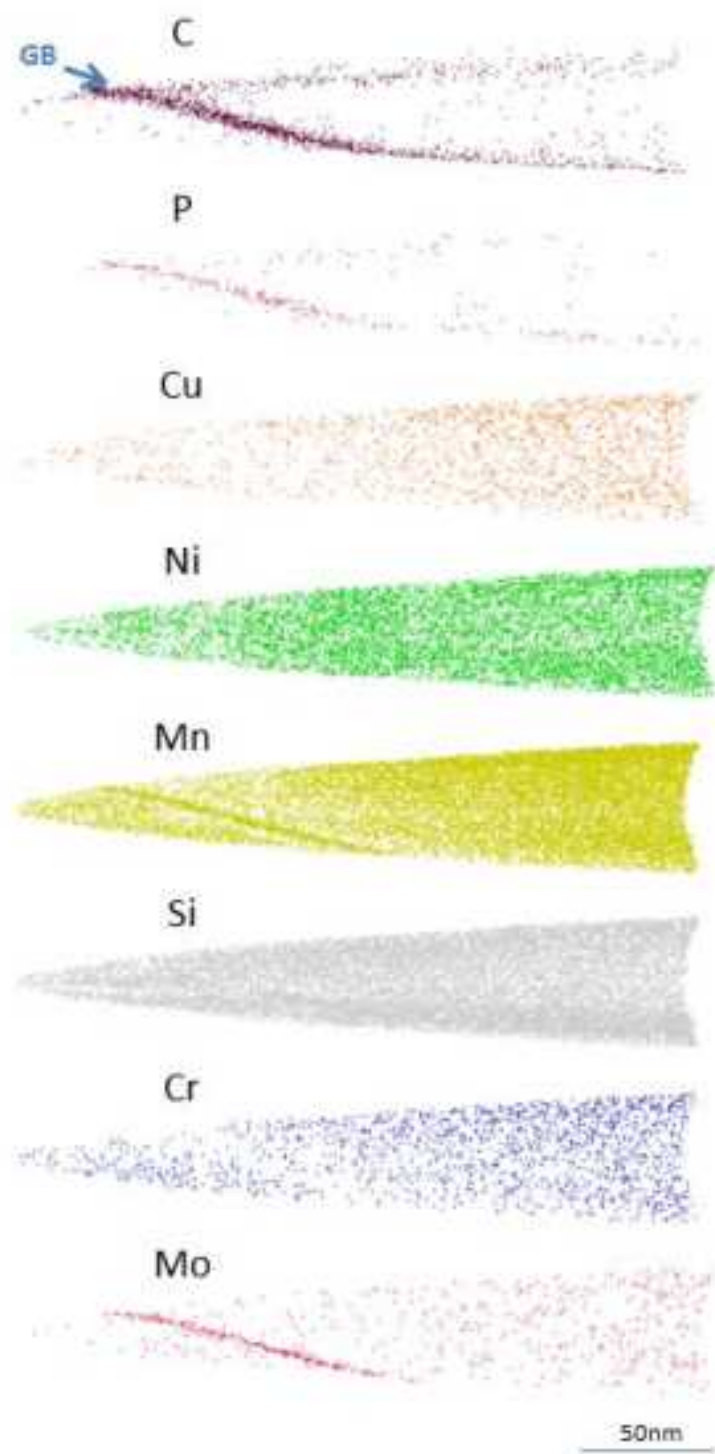
図 5.1.4-1 300°C熱時効材の APT 観察結果(2/2)



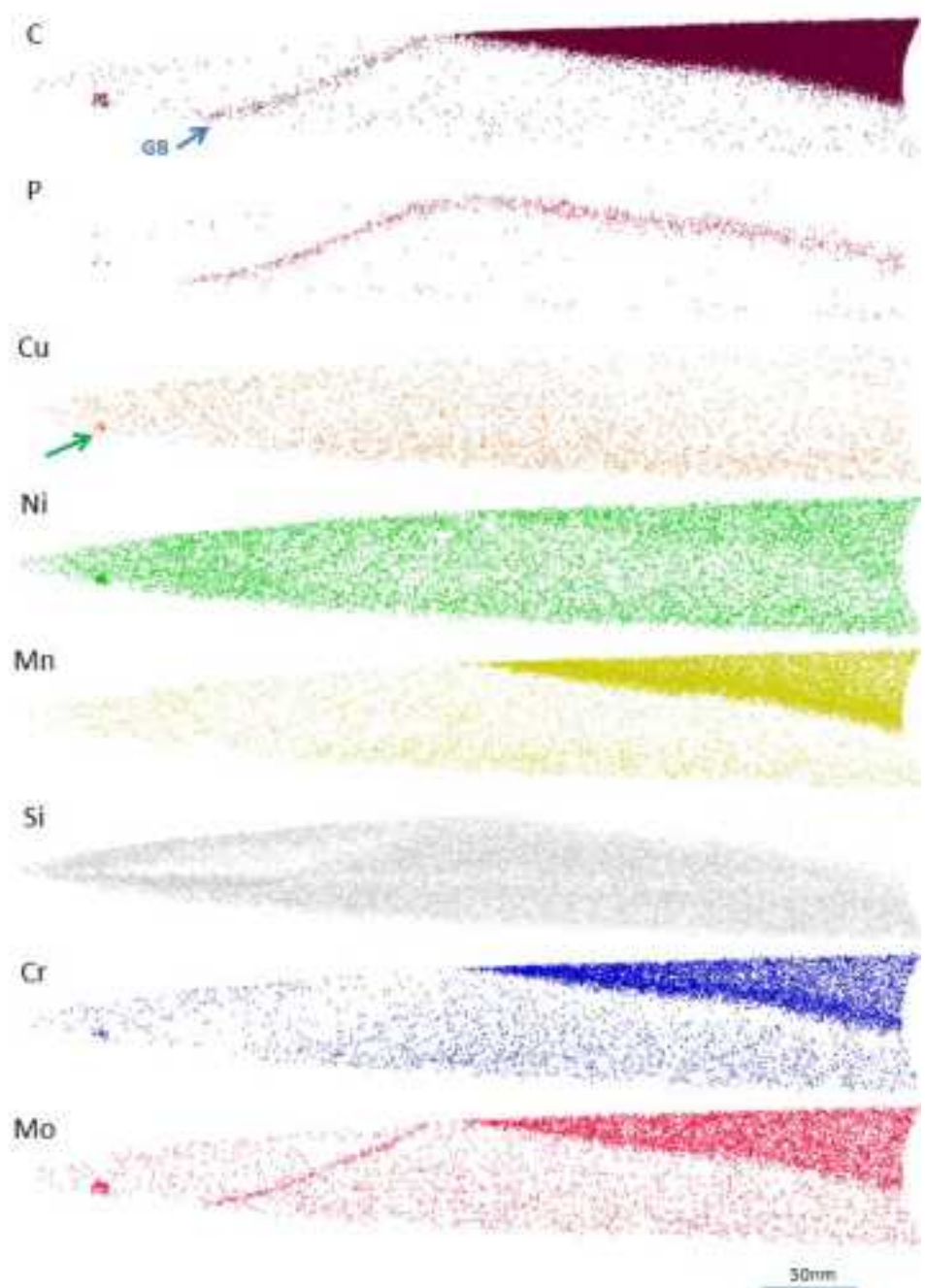
(a) 電圧パルス (340 万原子)

(b) パルスレーザー (340 万原子)

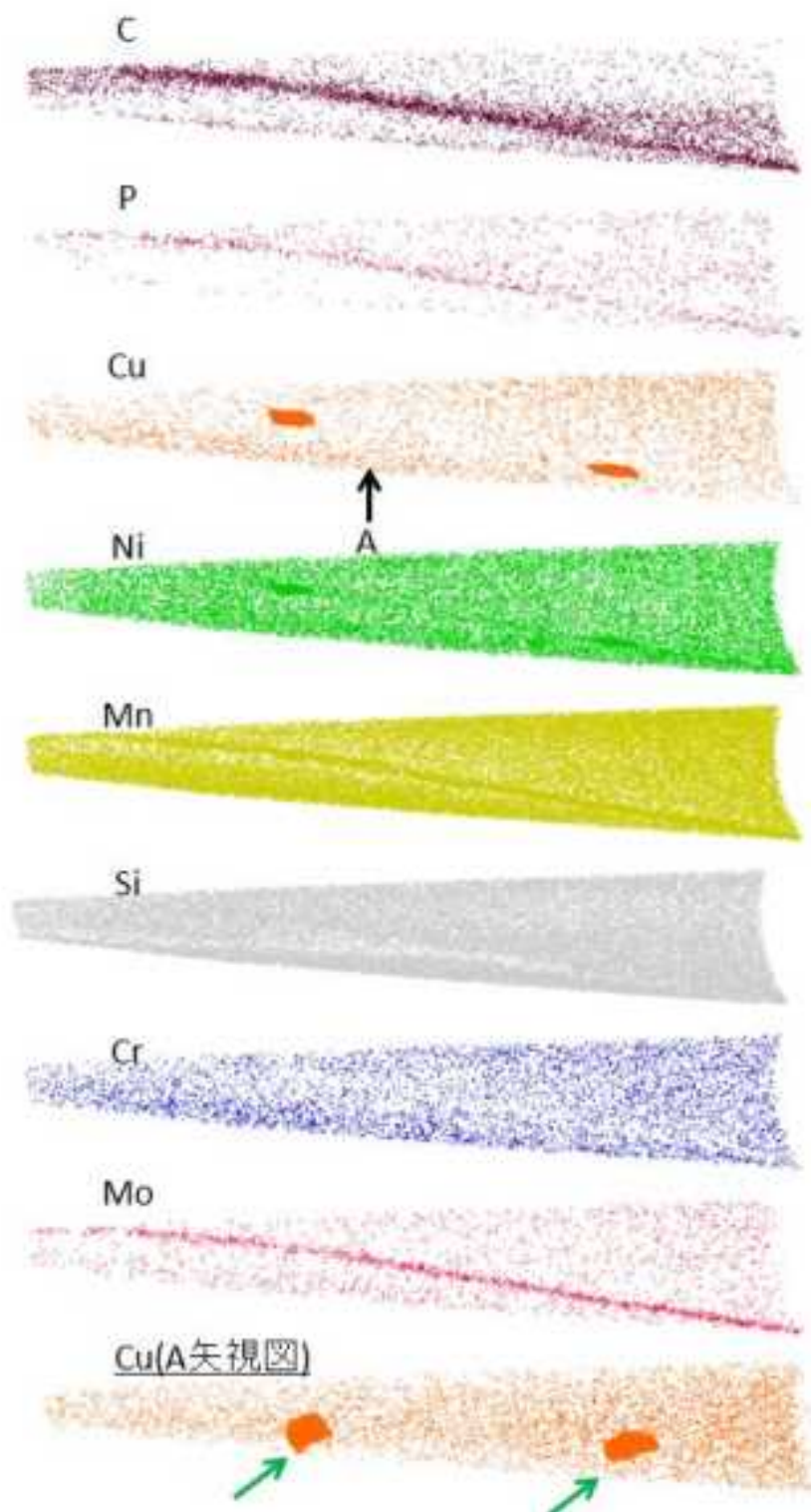
図 5.1.4-2 400°C熱時効材の APT 観察結果(1/4)



(c) パルスレーザー (980万原子)
 図 5.1.4-2 400°C熱時効材の APT 観察結果(2/4)



(d) パルスレーザー (3700 万原子)
 図 5.1.4-2 400°C熱時効材の APT 観察結果(3/4)



(e) パルスレーザー (2960 万原子)

図 5.1.4-2 400°C熱時効材の APT 観察結果(4/4)

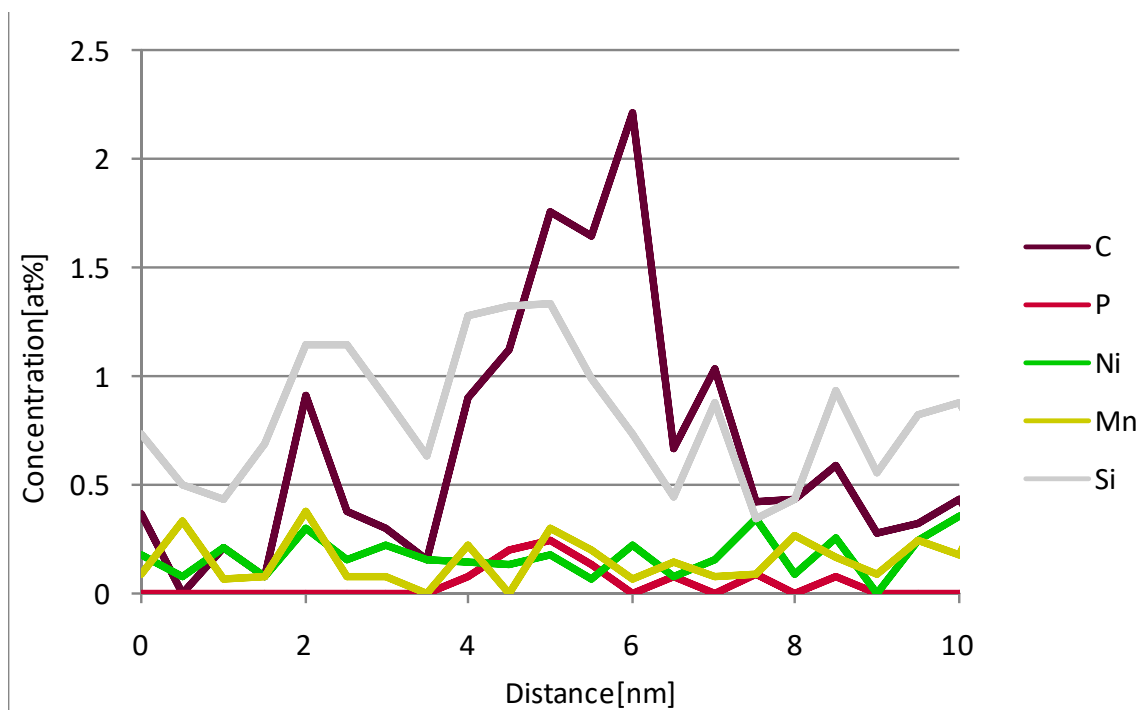


図 5.1.4-3 300°C熱時効材(a)の粒界近傍の溶質元素 1次元濃度プロファイル

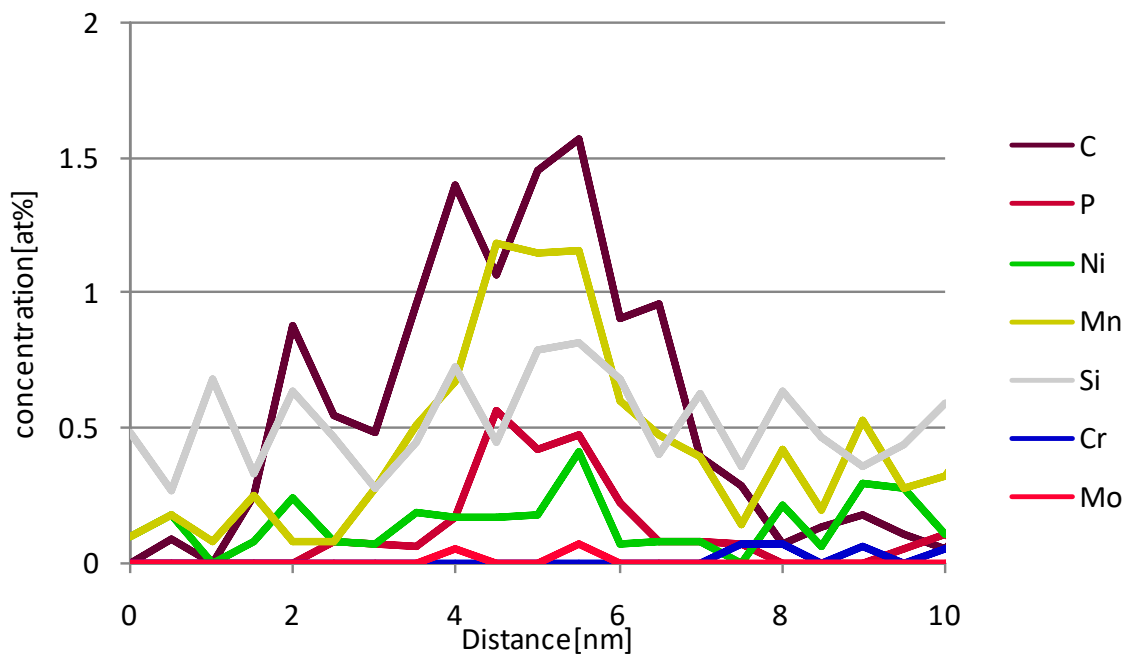


図 5.1.4-4 400°C熱時効材(a)の粒界近傍の溶質元素 1次元濃度プロファイル

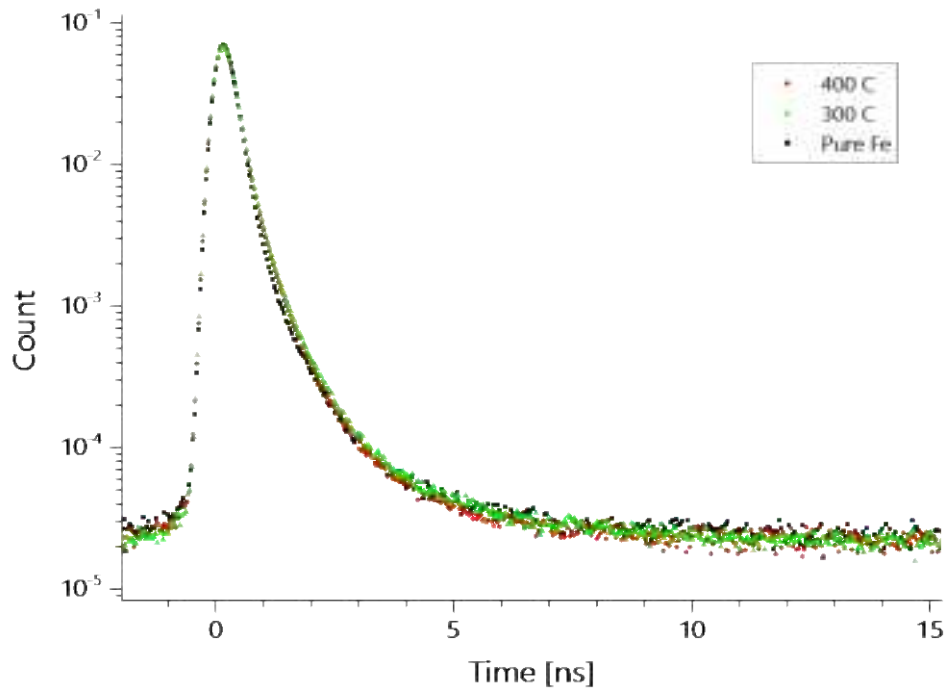


図 5.1.4-5 陽電子寿命スペクトル

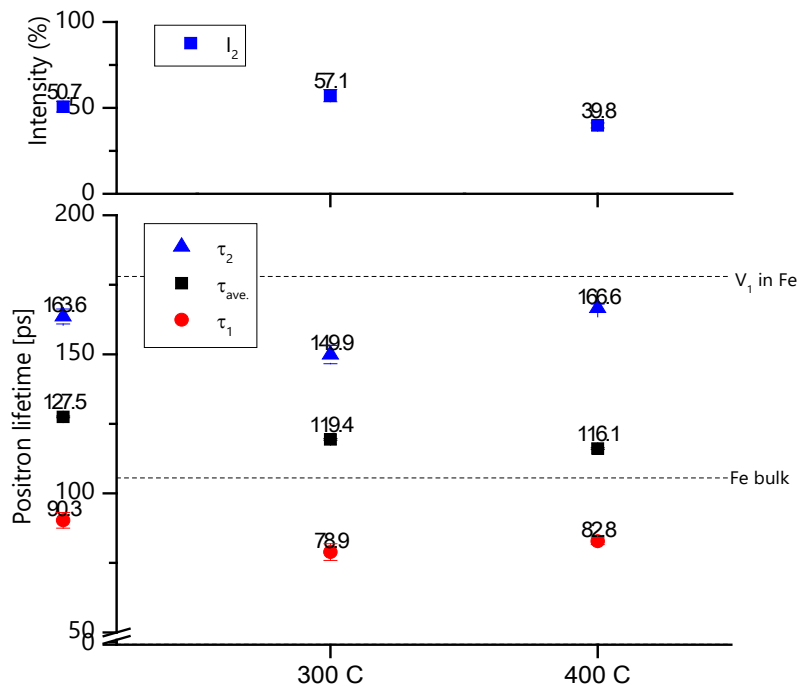


図 5.1.4-6 陽電子寿命解析結果

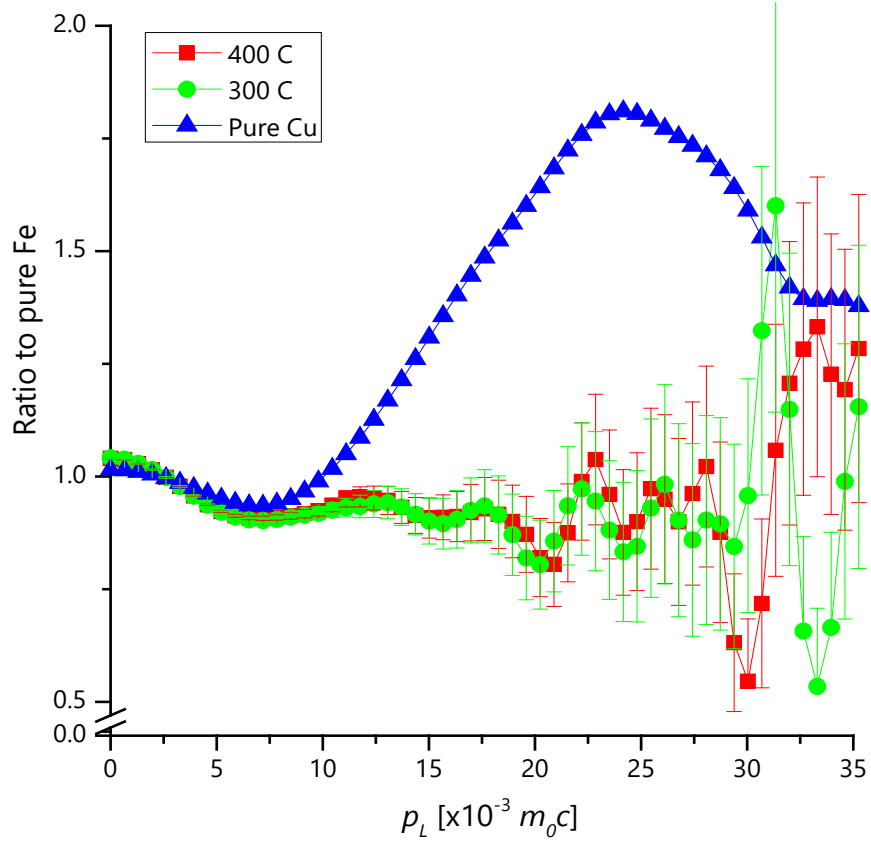


図 5.1.4-7 CDB 測定結果 (純 Fe 基準の比率曲線)

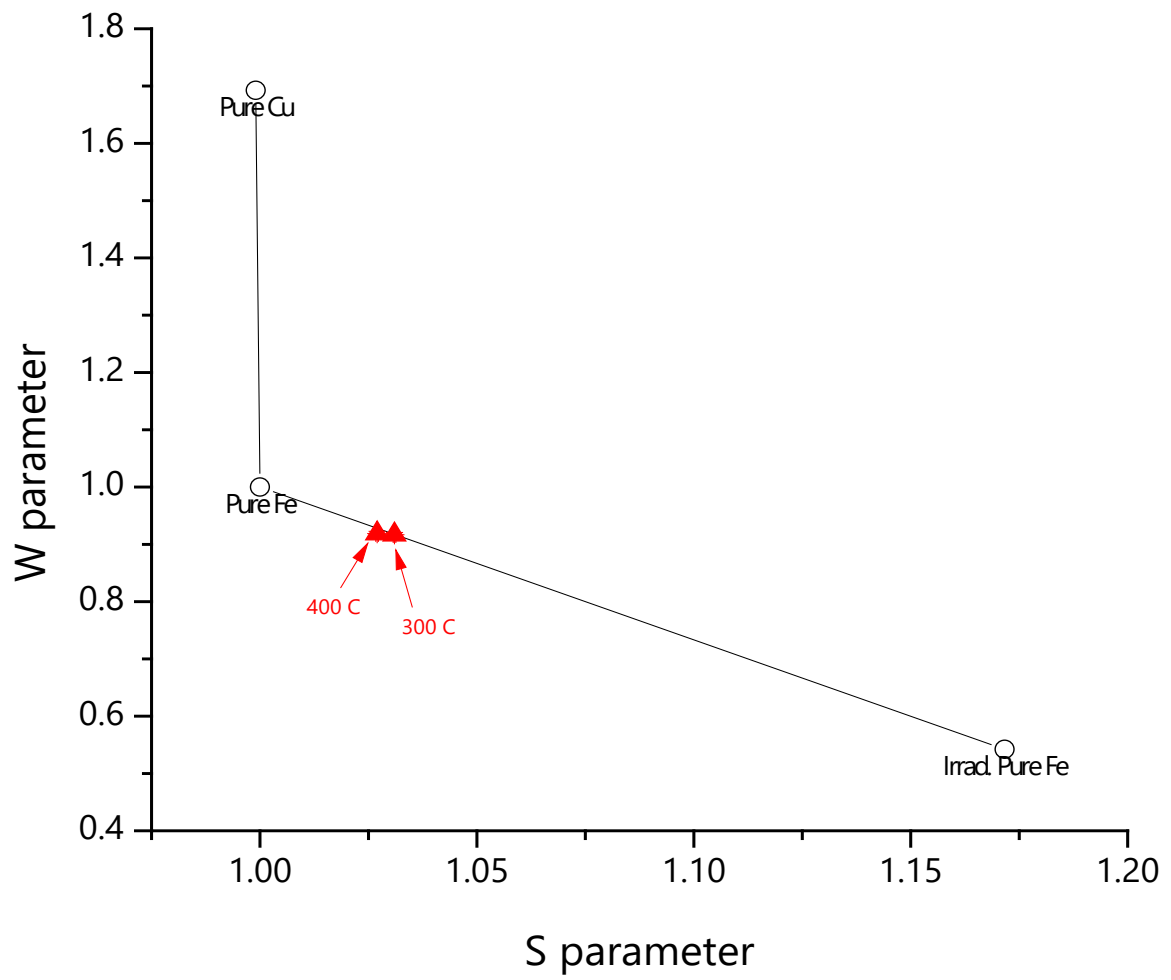


図 5.1.4-8 CDB 測定結果(LMCF($4 \times 10^{-3} \text{ m}_0 c$)と HMCF($18 \sim 30 \times 10^{-3} \text{ m}_0 c$)の相関図)

5.2 照射下 IASCC 試験

(1) 照射下 IASCC 試験

照射下 IASCC 試験の目的は、BWR 炉心構成材料の一つであるオーステナイト系ステンレス鋼のき裂進展速度に及ぼす照射下その場効果を検証し、照射後試験(PIE)で得られたデータの保守性を確認すると共に、放射線分解水質下でのき裂進展速度に及ぼす腐食電位(ECP)低減の影響を確認することにある。そのため、照射環境下における材料及び水化学に及ぼすその場効果に着目した照射下 IASCC き裂進展試験を実施し、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 IASCC に着目した炉内構造物の健全性評価において照射下その場効果の影響を明確化し、PIE データに基づいた健全性評価の妥当性を検証する計画である。

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、今回の再検討を踏まえて具体化を行った。

平成 24～25 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行った。またベース照射及び PIE 計画の詳細化に資するため、非照射材及び既存の JMTR 照射材を用いた材料基礎特性評価試験を実施した。更に照射下き裂進展試験用キャプセルと JMTR ホットラボで実施する PIE に必要な機器等の準備を行った。

平成 26 年度は、平成 25 年度に引き続き、非照射材及び既存照射材を用いた材料基礎特性評価試験を継続するとともに、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。PIE データの先行取得に向けて、JMTR ホットラボに整備した装置を用いた既存照射材のき裂進展試験に着手し、試験準備を進めた。また、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部品等の製作、及び試験装置の整備・改良・保守を行った。さらに、き裂進展試験ユニットの特性評価を進め、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するとともに、JMTR 再稼働前の炉内(非照射下)で照射下試験技術の総合的な動作確認を実施するためのキャプセルを製作した。

(2) 既存照射材を用いたき裂進展試験

本事業では、JMTR でベース照射した SUS316L 試験片を用いて照射下き裂進展試験を行い、照射下でのき裂進展挙動と PIE で得られたき裂進展挙動との比較により、照射下その場効果の影響を確認する計画である。しかし、JMTR からのベース照射材が得られるまでに時間を要することから、既存の照射材を活用し、先行的に PIE データを取得することを計画している。

本年度は、本事業での照射試験マトリクス及び既往研究(JNES ENI 事業 (5.2-1~2))での照射・試験データ取得状況等を考慮して、既存照射材を用いて先行実施する照射後き裂進展試験の優先順位を検討した。検討の際の考え方は以下の通りである。

- 照射材において、環境影響が現れる試験条件を確認すること

本事業では照射環境(放射線による水の放射線分解)の影響を確認することが主目的であるため、材料影響(照射量及び母材/HAZの違いによる硬化・偏析等)や応力影響(応力拡大係数(K 値)の増大)に埋もれずに環境影響(腐食電位(ECP)低減効果)が現れるような試験条件を選定することで、照射環境の影響も確認できることが期待される。

- 効率的なデータ取得が可能な試験条件であること

JMTR でのベース照射材を得るまでの期間で、き裂進展速度の定量的な評価を行えるように、き裂進展速度が比較的速くなる試験条件を優先して実施し、効率的なデータ取得を目指す。

- 既往研究でのデータとの比較により、本事業での試験の信頼性を確認できること

本事業で JMTR ホットラボに整備した試験装置を用いて本試験を実施する計画であり、今回が本試験装置で取得する初めての照射材データとなる。そのため、既往研究でデータが取得されている試験条件を含めて試験を実施し、データを比較することにより装置及び試験データの信頼性を確認する。

以上の考え方を踏まえて検討した既存照射材を用いたき裂進展試験の優先順位と、本事業での照射試験マトリクスとの対応を表 5.2-1 に示す。最初に実施する試験条件は、

- 照射量： $5 \times 10^{24} \text{ n/m}^2 (\text{E} > 1 \text{ MeV})$
- 材質： SUS316L(HAZ)
- 水質： 高 ECP 条件

とすることとした。

本年度は上記の照射量・材質条件を満たす照射済み試験片を入手し、JMTR ホットラボ

に輸送した。またホットラボセル内での遠隔操作による試験準備～試験が問題なく実施できるように、治具類の整備(5.3.11～5.3.12 章参照)や手順確認を進めるとともに、作業者の熟練度を高めるために模擬試験片を用いた試験準備作業を実施した。図 5.2-1 に模擬試験片を用いたホットラボセル内での一連の試験準備作業の状況を示す。本年度中に試験準備までの一通りの作業が実施できることを確認できたため、次年度に模擬試験片による高温水中き裂進展試験での最終確認後、照射済み材試験片を用いた試験に移行する予定である。

参考文献

- (5.2-1) (独)原子力安全基盤機構「平成 22 年度 低炭素ステンレス鋼 SCC 進展への中性子照射影響実証に関する報告書」(平成 24 年 11 月)。
- (5.2-2) 高倉 賢一「低炭素ステンレス鋼の SCC 進展速度への中性子照射の影響」(平成 26 年 9 月 10 日、日本原子力学会 2014 年秋の大会)。

表 5.2-1 既存照射材試験の優先順位と本事業での照射試験マトリクスとの対応

中性子照射量 (n/m ²)(>1 MeV)		3×10 ²⁴		5×10 ²⁴ ~ 1×10 ²⁵ の範囲で1レベル				3×10 ²⁵					
		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)	
ECPL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	○	○	※				※					

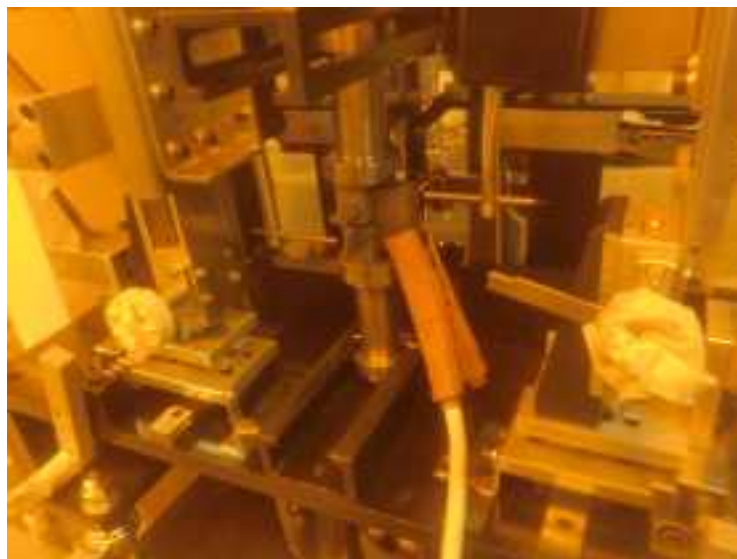
H27年度以降 取得予定
(3~5×10²⁴ n/m²)

H26~27年度 先行実施
(5×10²⁴ n/m², HAZ材)

- ・○: 実施(繰返し数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、繰返し数2の要否を検討
- ・高ECP(≥100 mV_{SHE})に引続き、水素注入により低ECP(≤100 mV_{SHE})に環境条件を移行して試験を実施



(a) 模擬試験片、試験片荷重ピン、チャックの組立

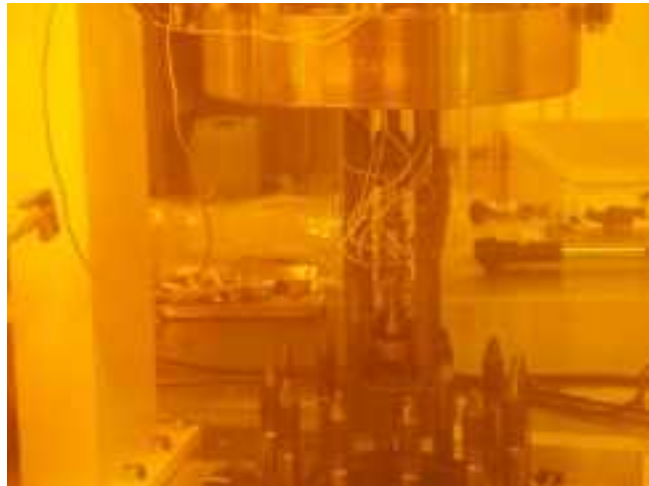


(b) 模擬試験片への PDM 計測線のスポット溶接(スポット溶接治具を使用)

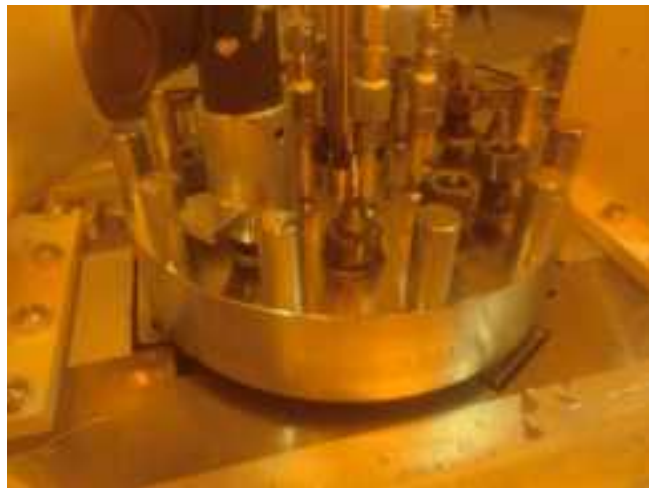


(c) スポット溶接時のモニターカメラ画像

図 5.2-1 ホットラボセル内での遠隔操作による試験準備作業状況



(d) 模擬試験片、チャックを試験機に設置



(e) オートクレーブのナット締め(ナットランナー治具を使用)



(f) 試験準備完了

図 5.2-1 ホットラボセル内での遠隔操作による試験準備作業状況(つづき)

(2) 応力腐食割れ試験比較用試験片の製作

照射下き裂進展試験で使用する荷重負荷機構(き裂進展試験ユニット)の特性把握及び制御性・試験精度の向上のため、炉外のオートクレーブ内での高温水中 SCC 進展試験の実績を蓄積していく必要がある。本年度は、き裂進展試験ユニットに取り付けて試験をするための試験片を製作した。

炉外試験を効率的に進めるため、比較的き裂進展速度が速い SUS304 熱鋭敏化材と、照射により硬化した材料特性を模擬できる SUS316L の 20%冷間圧延材から、き裂進展試験ユニットに取り付けが可能な形状の 0.5 インチ厚さコンパクトテンション(0.5T-CT)試験片を製作した。図 5.2-2~3 に、実際の照射下き裂進展試験で使用する形状の「ウイング溶接型 0.5T-CT 試験片」及び「ウイング」、図 5.2-4 に、溶接部を省いて簡略化した形状の「ウイング一体型 0.5T-CT 試験片」の寸法・形状図を示す。また、図 5.2-5 にウイング溶接型 0.5T-CT 試験片とウイングとの組立図を示す。

素材から形状加工した各 0.5T-CT 試験片に、大気中で疲労予き裂を導入した。下記に予き裂導入条件を示す。

- 繰り返し荷重の周波数は 10~30Hz 程度まで、応力比 R が 0.1 の正弦波とし、室温大気中で行った。
- 最終的な最大応力拡大係数 K_{max} は、 $10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ を目標とした。
- 疲労予き裂導入後の最終的な予き裂長さ a は、試験片幅 W との比が 0.44 から 0.45 の範囲に入るようにした。
- き裂長さは試験片側面を目視等で確認し、両表面でのき裂長さの差は、極力小さくなるように調整した。

疲労予き裂導入後にサイドグループ(半径 2 mm の円弧型、片側 5%(0.635 mm)の深さ)を加工した。製作した試験片の一覧を表 5.2-2 に示す。全ての 0.5T-CT 試験片において、大気中で導入した疲労予き裂長さは両表面とも 1.1 mm($a=11.3 \text{ mm}$)及び最終 K_{max} 値は $9.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった。製作した試験片の外観を図 5.2-6~8 に示す。今回製作した試験片は、本年度に実施したき裂進展試験ユニットの特性試験(5.2.3 章参照)の結果を踏まえて、次年度に炉外試験で使用する予定である。

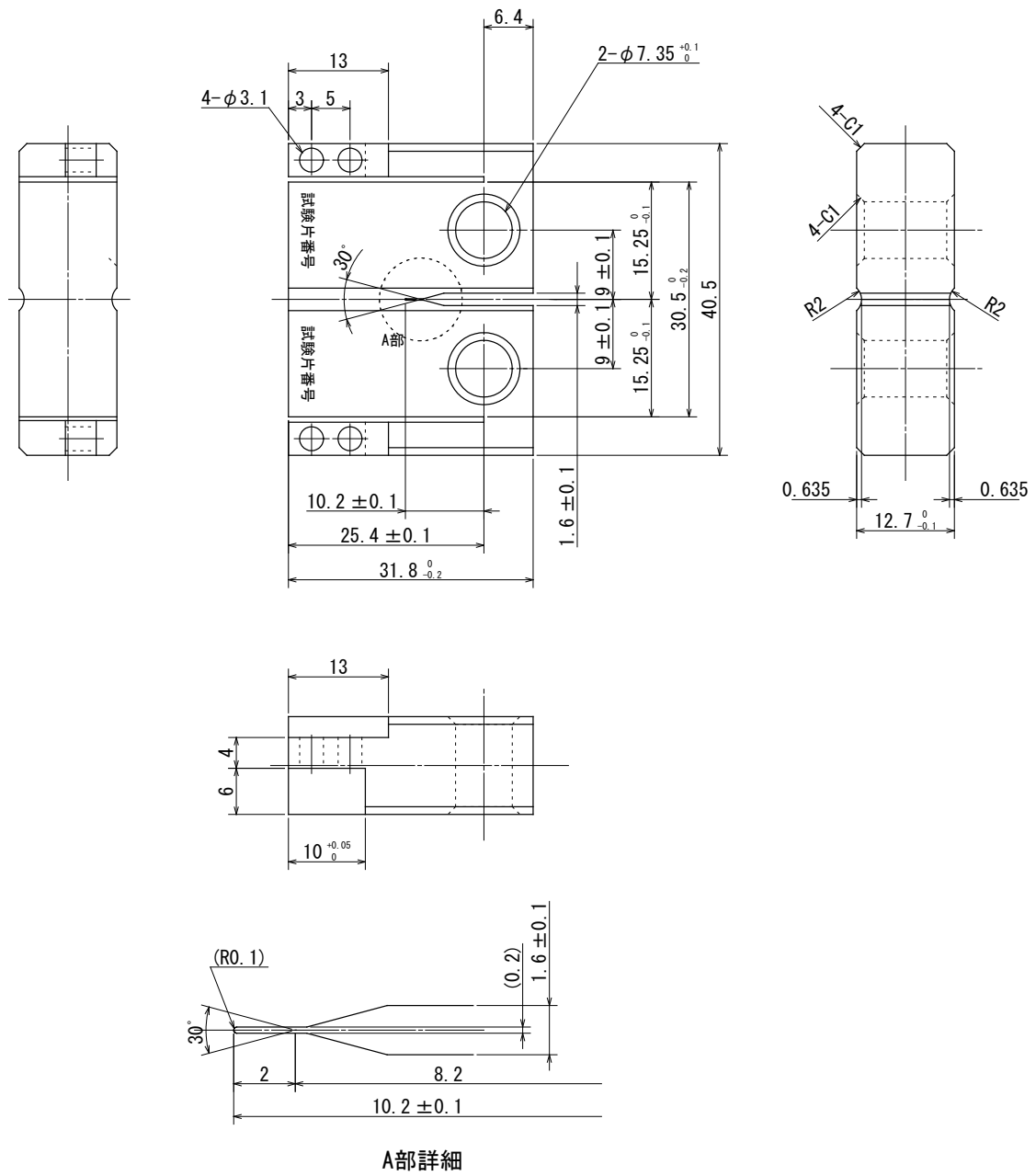
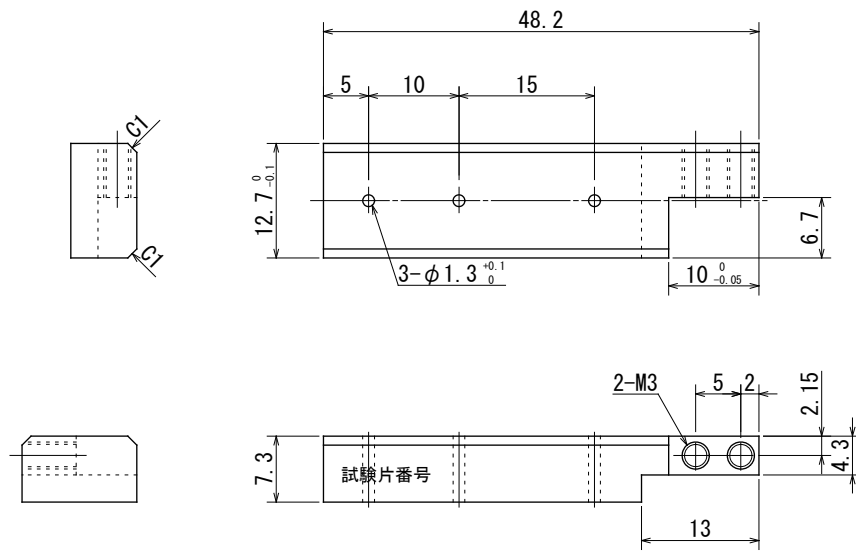
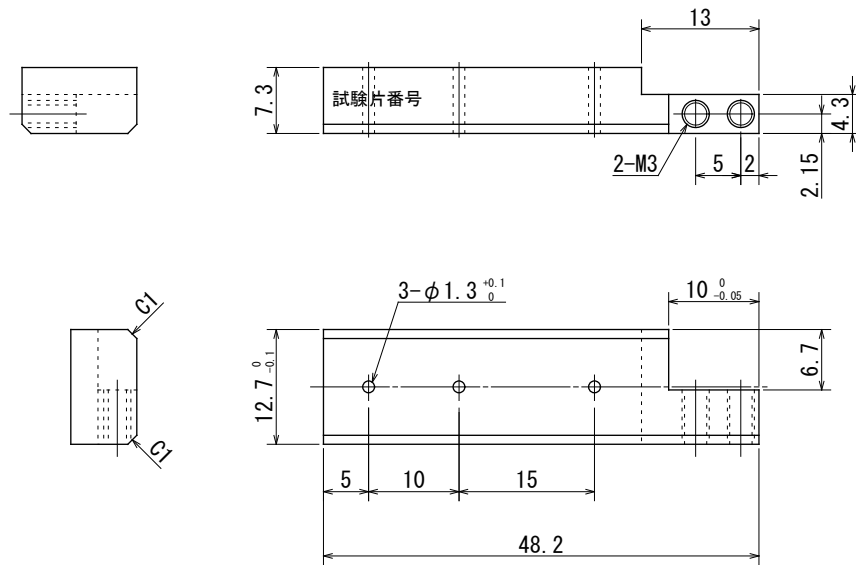


図 5.2-2 ウイング溶接型 0.5T-CT 試験片の寸法・形状図

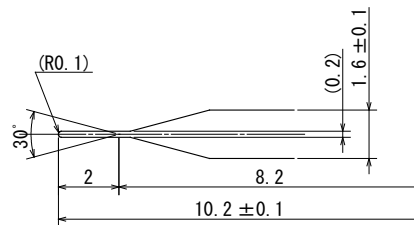
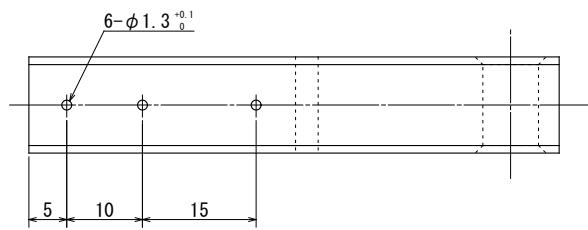
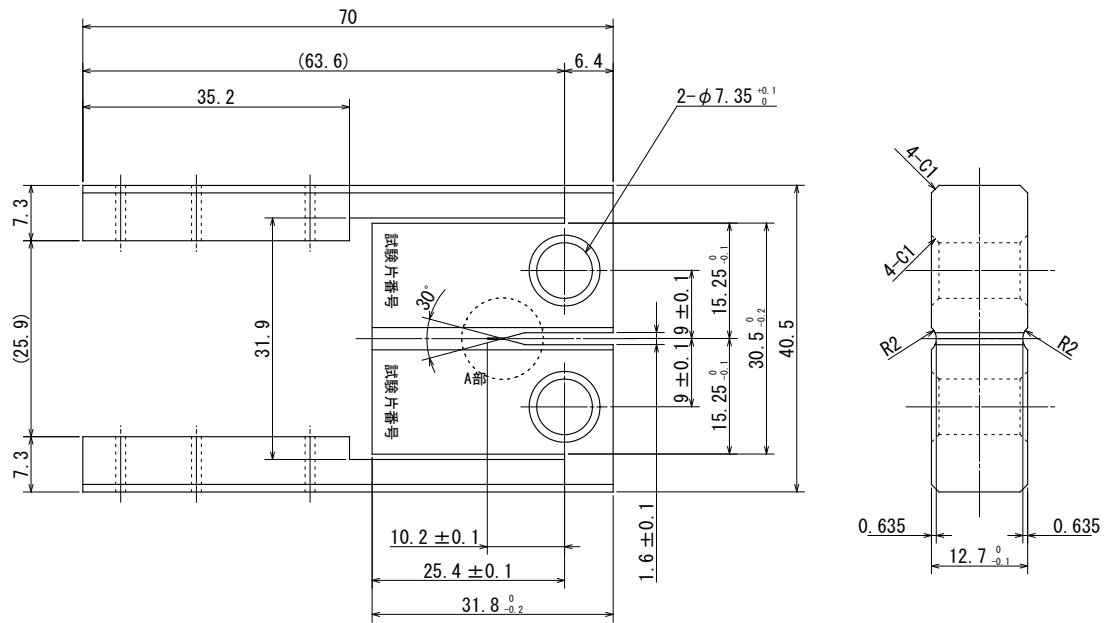


(a) ウイング(左側)



(b) ウイング(右側)

図 5.2-3 ウイングの寸法・形状図



A部詳細

図 5.2-4 ウィンゲータ型 0.5T-CT 試験片の寸法・形状図

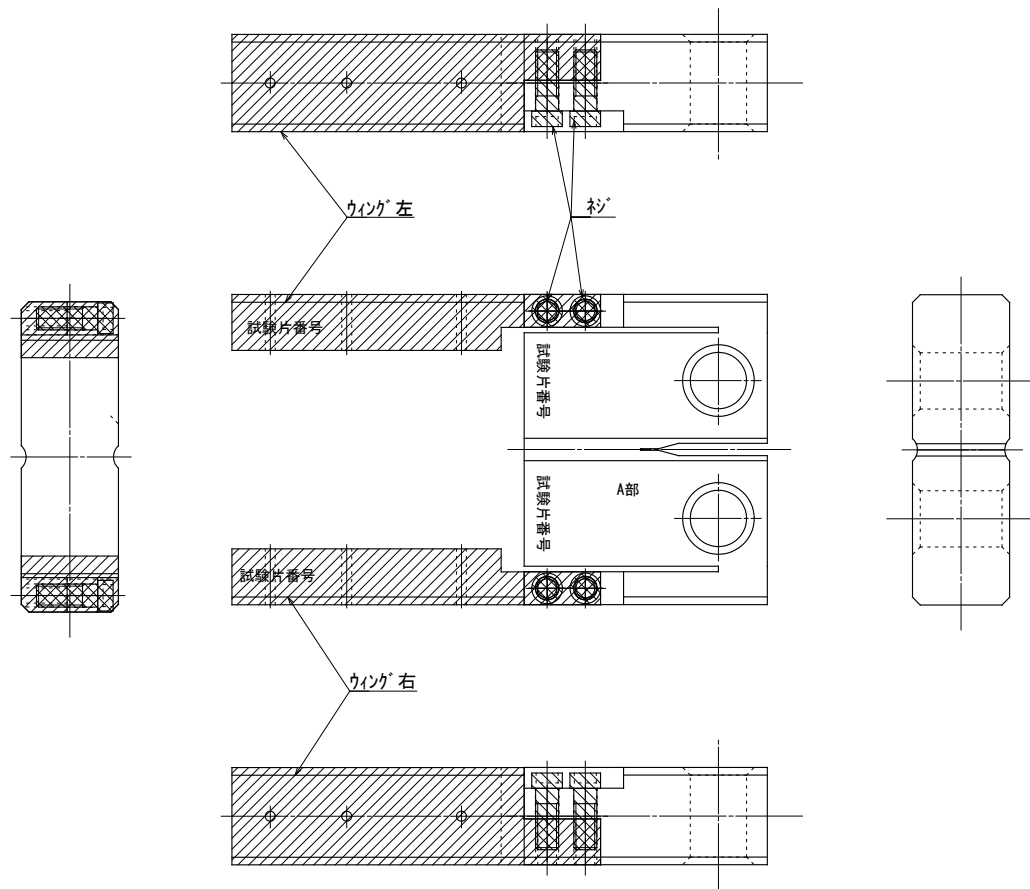


図 5.2-5 ウイング溶接型 0.5T-CT 試験片・ウイング組立図

表 5.2-2 製作した試験片の一覧

No.	試験片	採取方向	形状	材質	試験片番号
1	ウイング溶接型 0.5T-CT 試験片	T-L (き裂方向が 圧延方向と 平行)	図 5.2-2	SUS316L 20%冷間圧延材	FB1
2					FB2
3					FB3
4					FB4
5				SUS304 熱鋭敏化材	GB1
6					GB2
7					GB3
8					GB4
9	ウイング(左側)	/	図 5.2-3 (a)	SUS316L 20%冷間圧延材	F-L1
10					F-L2
11					F-L3
12					F-L4
13				SUS304 熱鋭敏化材	G-L1
14					G-L2
15					G-L3
16					G-L4
17	ウイング(右側)	/	図 5.2-3 (b)	SUS316L 20%冷間圧延材	F-R1
18					F-R2
19					F-R3
20					F-R4
21				SUS304 熱鋭敏化材	G-R1
22					G-R2
23					G-R3
24					G-R4
25	ウイング一体型 0.5T-CT 試験片	T-L (き裂方向が 圧延方向と 平行)	図 5.2-4	SUS316L 20%冷間圧延材	FW1
26					FW2
27					FW3
28					FW4
29				SUS304 熱鋭敏化材	GW5
30					GW6
31					GW7
32					GW8



(a) FB1



(b) FB2



(c) FB3



(d) FB4



(e) GB1



(f) GB2

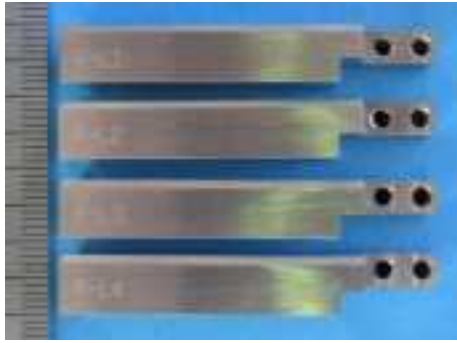


(g) GB3

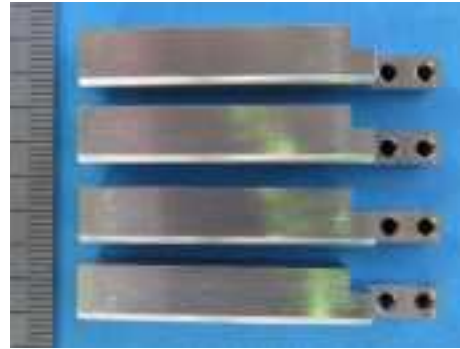


(h) GB4

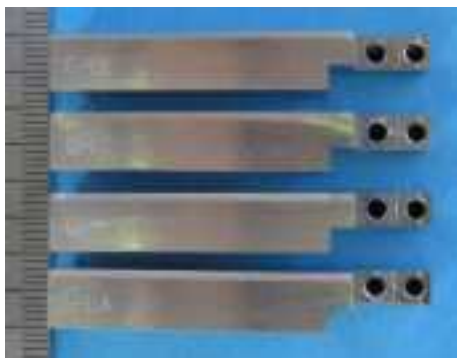
図 5.2-6 製作したウイング溶接型 0.5T-CT 試験片の外観



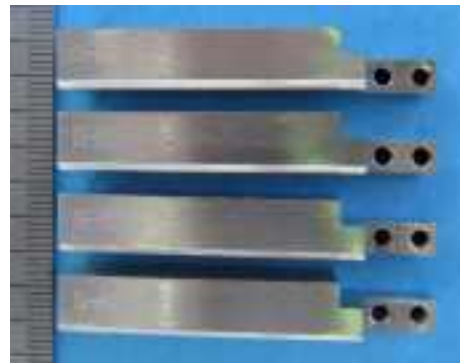
(a) F-L1~F-L4



(b) F-R1~F-R4

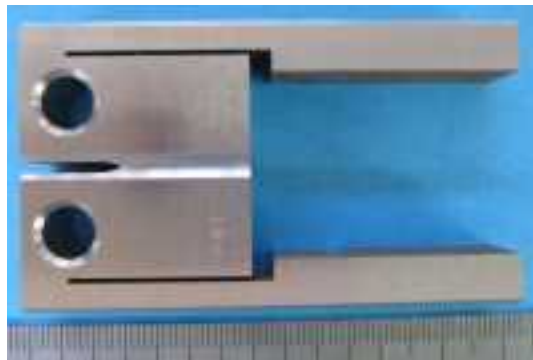


(c) G-L1~G-L4

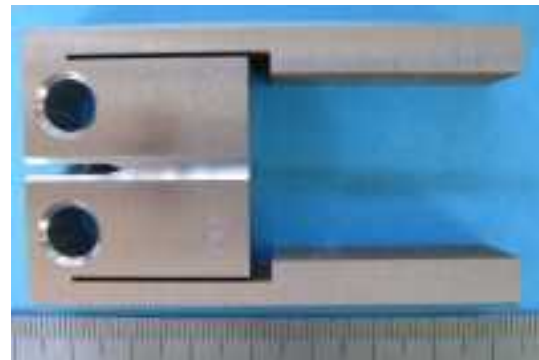


(d) G-R1~G-R4

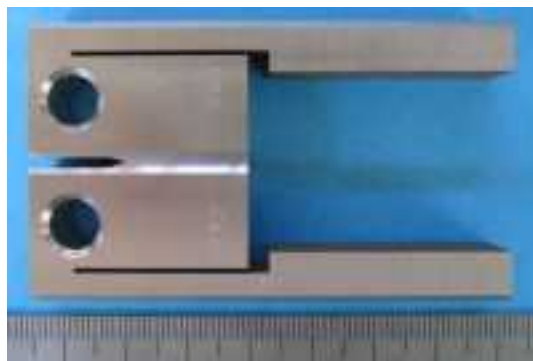
図 5.2-7 製作したウイングの外観



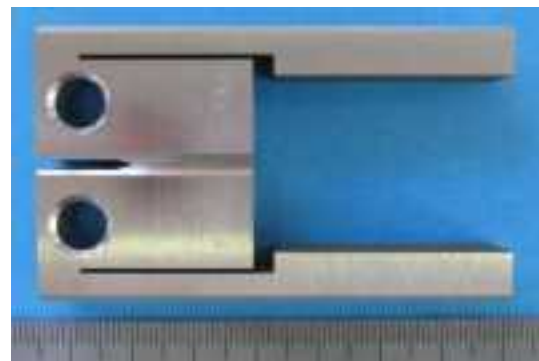
(a) FW1



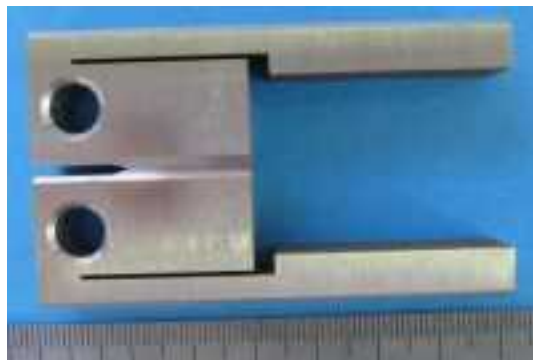
(b) FW2



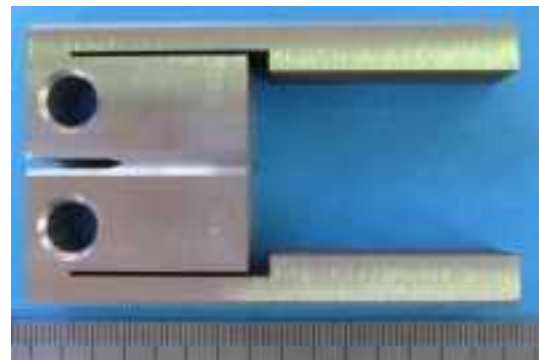
(c) FW3



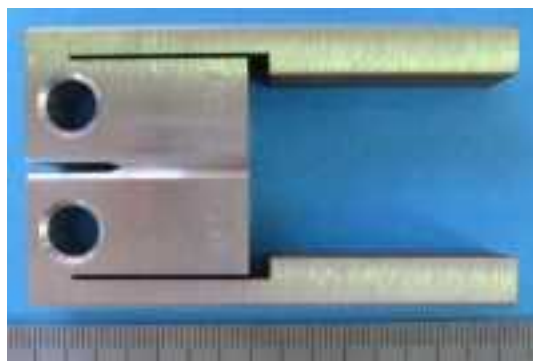
(d) FW4



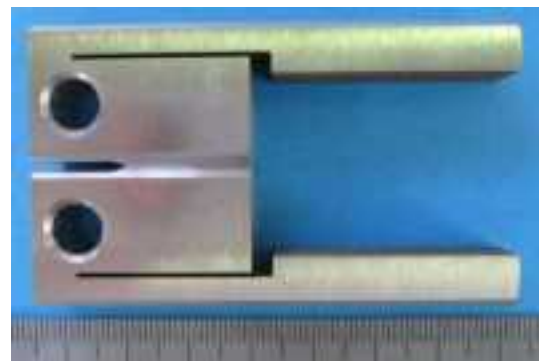
(e) GW5



(f) GW6



(g) GW7



(h) GW8

図 5.2-8 製作したウイング一体型 0.5T-CT 試験片の外観

5.2.1 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)ことが知られており、照射下き裂進展試験の主な目的は、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。

き裂先端の酸化を加速させる要因の一つとして照射環境下のバルク水中における水のラジオリシスが挙げられるが、これについては主に ECP センサーを使った環境評価の検討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の評価に対して ECP センサーを使った環境評価手法を適用することは技術的に容易でないことから、例えば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評価することが有効であると考えられる。

そこで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 5.2.1-1 は浸漬試験に用いた標準型 0.5T-CT 試験片及び板厚の半分の標準型 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最長 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 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 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 、溶存酸素濃度(DO)は 2ppm となるように調整した。なおオートクレーブ内での負荷荷重設定の都合上、浸漬試験は同一条件にて 2 バッチに分けて実施した。

b. 皮膜観察用試験片の加工

(i)CT試験片の切断

高温水に浸漬した 0.5T-CT 試験片は、ワイヤー放電加工にて、図 5.2.1-1 に示す赤色破線位置で 3 個に切断した。なお 3 個に切断する際の位置は以下の通りとした。

- ・ 図 5.2.1-1(1)に示す標準板厚の CT 試験片は、①側の板厚端部から約 7 mm の板厚の試験片(切断片①)と、③側の板厚端部から約 1 mm の板厚の試験片(切断片③)、並びに残部(切断片②)の 3 個に切断した。
- ・ 図 5.2.1-1(2)に示す板厚半分の 0.5T-CT 試験片は、①側の板厚端部から約 3.5 mm の板厚の試験片(切断片①)と、③側の板厚端部から 1 mm 以下の板厚の試験片(切断片③)、並びに残部(切断片②)の 3 個に切断した。

(ii)破面開放

前項で切断した切断片①は、以下に示す条件により大気中での疲労き裂進展により破面開放した。

- ・ 高温水中浸漬試験時(=破面開放開始時)のき裂長さ：11.4 mm
- ・ $K_{max}=20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 相当の最大荷重、応力比 $R=0.7$ 、周波数 20Hz で疲労き裂進展
- ・ その後 $K_{max}=25 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 相当の最大荷重、 $R=0.1$ 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。

(iii)断面観察用試験片の研磨

0.5T-CT 試験片より切断した切断片②を、き裂内の酸化皮膜観察に用いるため、以下に示す方法で観察面を研磨した。

- ① 耐水研磨紙(320 番～900 番)
- ② バフ研磨(研磨紙 # 2000 相当)
- ③ バフ布及び研磨剤研磨(粒度 $3 \mu\text{m} \sim 1 \mu\text{m}$)

研磨後、き裂内酸化皮膜の断面観察用試験片として用いた。

c. 破面上に形成した酸化皮膜の観察

破面解放後の切断片①の破面を対象に、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 5 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 4 箇所、倍率 3 水準(1000 倍、5000 倍、20000 倍)とした。図 5.2.1-2 に SEM 観察位置例を示すとおり、観察位置(a)～(c)は板厚中央(切断線)近傍、観察位置(d)はサイドグループ脇より選択した。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。

d. き裂内酸化皮膜の断面観察

観察面研磨後の切断片②を用い、疲労き裂部分(図 5.2.1-3)の断面を、FE-SEM を用いてき裂内に形成した酸化皮膜を観察した。観察条件は以下の通りとした。

加速電圧： 5.0 kV

観察倍率： 低倍でのつなぎ観察 500 倍

高倍での詳細観察 1000 倍、5000 倍、20000 倍

観察箇所： CT 試験片板厚中央とサイドグループ脇のき裂に対し、4 箇所選定

写真撮影： 反射電子像および二次電子像

e. CT試験片き裂内酸化皮膜のTEM観察

破面 SEM 観察結果を参考に表 1 に示す試験片と観察位置を選定し、表面に形成した酸化皮膜層の断面 TEM 観察を実施した。

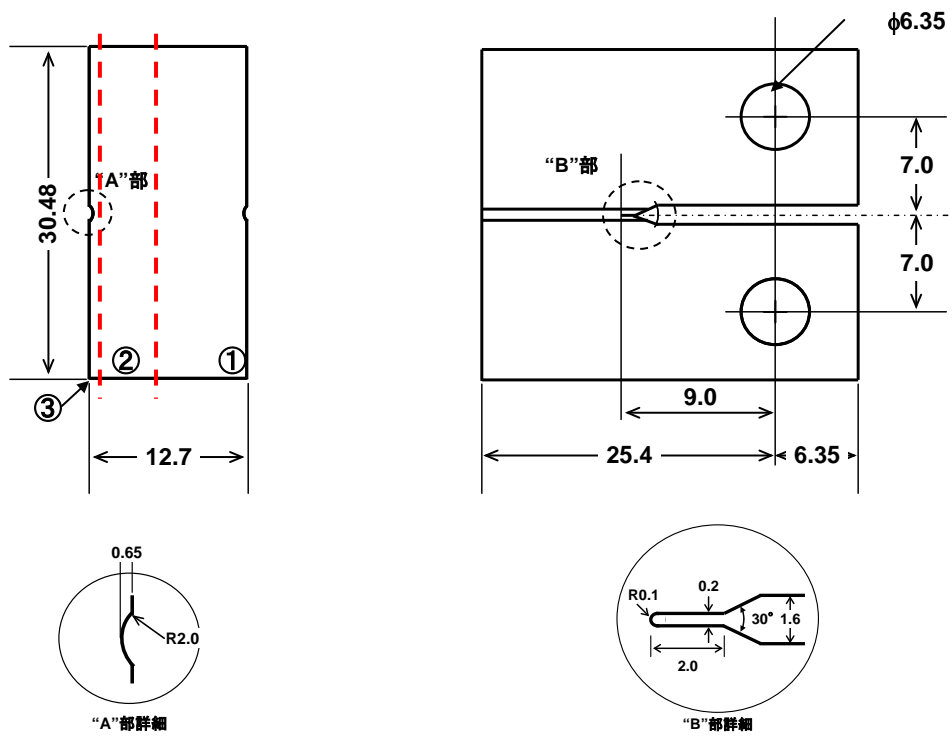
TEM 観察用試験片は、まず破面観察に供した切断片②の表面にカーボン蒸着を施し、FIB 装置のマイクロサンプリングユニットにて目的箇所を含む微小切片を摘出した。その後 Cu 製メッシュに固定して、薄膜化を行った。

採取した TEM 観察用試験片を対象として、図 5.2.1-4 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。

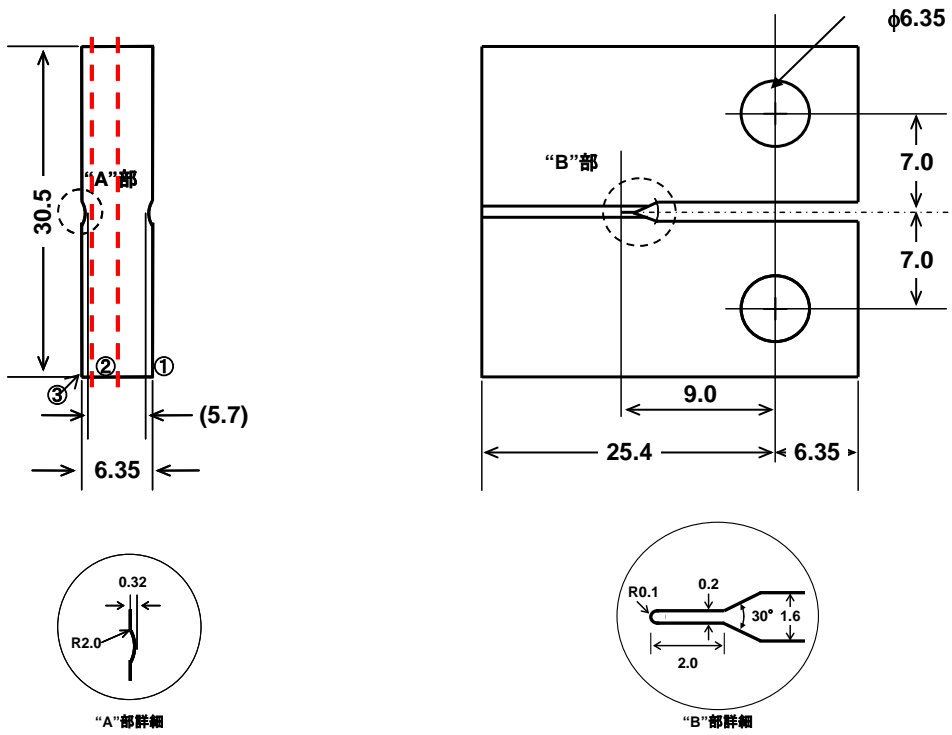
表 1 0.5T-CT 試験片の疲労き裂内に生成した酸化皮膜分析試験マトリクス

ID	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	
A	SUS316L (溶体化)	標準型 0.5T-CT	12.7	図 5.2.1-1(1)	6TLA	2ppmDO 224 時間浸漬 負荷荷重あり(3.0 kN)	○	○	き裂先端 1 箇所 サイドグループ脇 1 箇所
B	SUS316L (溶体化)	標準型 0.5T-CT	12.7	図 5.2.1-1(1)	6TSA	2ppmDO 224 時間浸漬 負荷荷重なし	○	○	き裂先端 1 箇所 サイドグループ脇 1 箇所
C	20%冷間加工 SUS316L	標準型 0.5T-CT	12.7	図 5.2.1-1(1)	V6L5	2ppmDO 224 時間浸漬 負荷荷重あり(7.2 kN)	○	○	き裂先端 1 箇所 サイドグループ脇 1 箇所
D	20%冷間加工 SUS316L	標準型 0.5T-CT (板厚半分)	6.4	図 5.2.1-1(2)	FTLA	2ppmDO 224 時間浸漬 負荷荷重あり(3.6 kN)	○	○	き裂先端 1 箇所 サイドグループ脇 1 箇所
E	20%冷間加工 SUS316L	標準型 0.5T-CT (板厚半分)	6.4	図 5.2.1-1(2)	FTLB	2ppmDO 224 時間浸漬 負荷荷重なし	○	○	き裂先端 1 箇所 サイドグループ脇 1 箇所

凡例 ○: 実施 -: 実施せず



(1)0.5T-CT 試験片



(2)板厚半分の 0.5T-CT 試験片

図 5.2.1-1 0.5T-CT 試験片の概略寸法と切断位置(破線)(単位 mm)

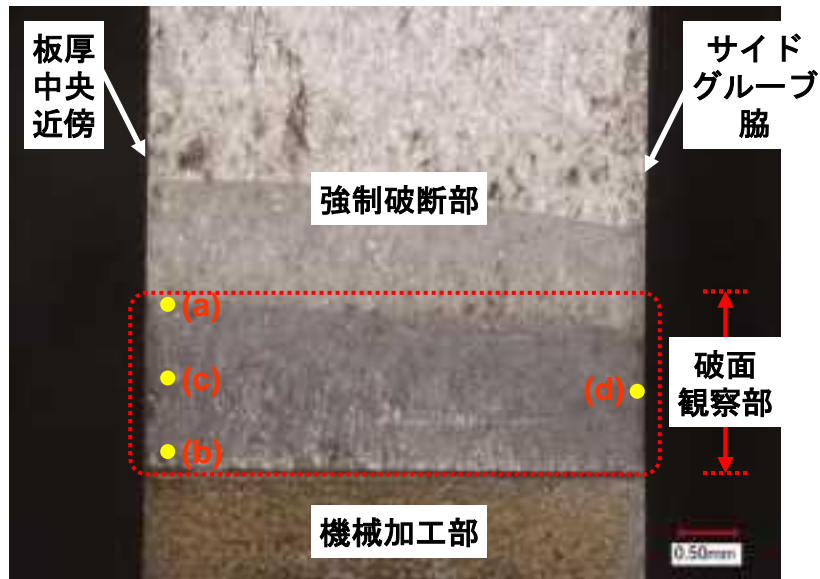


図 5.2.1-2 破面解放後の CT 試験片の各部呼称と SEM 観察位置(黄色丸位置)(例)

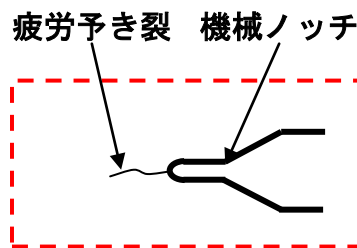


図 5.2.1-3 き裂内酸化皮膜の断面観察方法(イメージ)

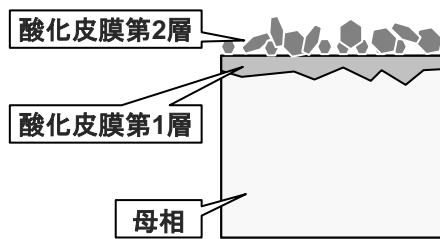


図 5.2.1-4 FIB で採取した酸化皮膜 TEM 観察用試験片(イメージ)

(3)試験結果

a.浸漬試験後及びワイヤー放電加工後のCT試験片の外観

図 5.2.1-5 は、浸漬試験前後の CT 試験片の外観を示す。いずれも温度 290℃、溶存酸素 2ppm の高温水に浸漬していたことから、試験片の表面には酸化皮膜の形成が認められた。また図 5.2.1-6 はワイヤー放電加工後の CT 試験片を板厚方向から観察した結果を示す。ワイヤー切断により、概ね計画通りの厚さの試験片①～③に分割できた。

b.破面解放後のCT試験片の外観及びビデオマイクロスコープ観察

図 5.2.1-7 は破面解放した試験片①の外観を、また図 5.2.1-8 はき裂表面(破面)をビデオマイクロスコープで観察した結果を示す。各試験片とも元の板厚の凡そ半分の厚さに切断したもので、写真の右側が元の 0.5T-CT 試験片板厚の中央近傍に設けた切断線位置である。いずれの試験片も、機械加工部に茶褐色の皮膜と破面観察部に灰白色の皮膜の形成が認められた。また写真上方の金属光沢部分は、疲労き裂進展によって強制的に破断させた強制破断部である。なお試験片 ID. 6TLA の破面観察部に金属光沢が認められたが、これは浸漬試験前の予き裂導入時にき裂の枝分かれが生じ、破面開放の際に割れ残った部分であると推察される。

この結果から、224 時間の高温水浸漬によってき裂表面に酸化皮膜が形成することを確認した。

c.高温水浸漬したCT試験片の疲労き裂表面(破面)のSEM観察

図 5.2.1-9 は、3.0 kN の荷重負荷し、温度 290℃、溶存酸素 2ppm の高温水に 224 時間浸漬した ID. 6TLA の破面 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 $K=約 12.8 MPa\sqrt{m}$ に相当し、平成 25 年度までに実施してきた 20%冷間圧延材の 0.5T-CT 試験片と開口量で概ね一致する条件である。図 5.2.1-9 (1)は板厚中央のき裂先端近傍、図 5.2.1-9(2)は板厚中央の機械加工部先端近傍、図 5.2.1-9(3)は板厚中央のき裂長さの中間点近傍、図 5.2.1-9(4)はサイドグループ脇をそれぞれ観察した結果である。

皮膜観察の結果、観察位置によってき裂表面の酸化皮膜の形態が相違していることが判る。浸漬時間 224 時間の段階では、図 5.2.1-9 (1)の板厚中央のき裂先端近傍に比べて図 5.2.1-9(2)の機械加工部先端近傍や図 5.2.1-9(4)のサイドグループ脇において酸化がより進行したと考えられる。その理由として、機械加工部先端近傍やサイドグループ脇においては高温水の入替に伴って酸素が十分に供給されて酸化反応がより進行しやすく、一方き裂先端や中間地点では高温水の入替が頻繁でない分酸化反応がより緩やかに進行していたためと考えられる。

図 5.2.1-10 は、荷重を負荷せずに温度 290℃、溶存酸素 2ppm の高温水に 224 時間浸漬した ID. 6TSA の破面 SEM 観察結果を示す。荷重を負荷した ID. 6TLA と比べ、き裂

先端近傍ではブロック状の酸化物の形成は顕著でなかった。これは、浸漬試験中に荷重負荷していなかった分き裂は開口しておらず、高温水による酸化反応が ID. 6TLA よりも緩やかであったためと考えられる。一方、機械加工部先端近傍やサイドグループ脇に形成した酸化皮膜は、き裂先端に比べてブロック状組織の成長が見られた。これは、荷重負荷の有無によって当該部分の開口量に若干の相違はあるものの、高温水の流通があり、より早く酸化が進んだためと考えられる。

なお CT 試験片 ID. V6L5、FTLA 及び FTLB の破面 SEM 観察結果は、付録に掲載した。

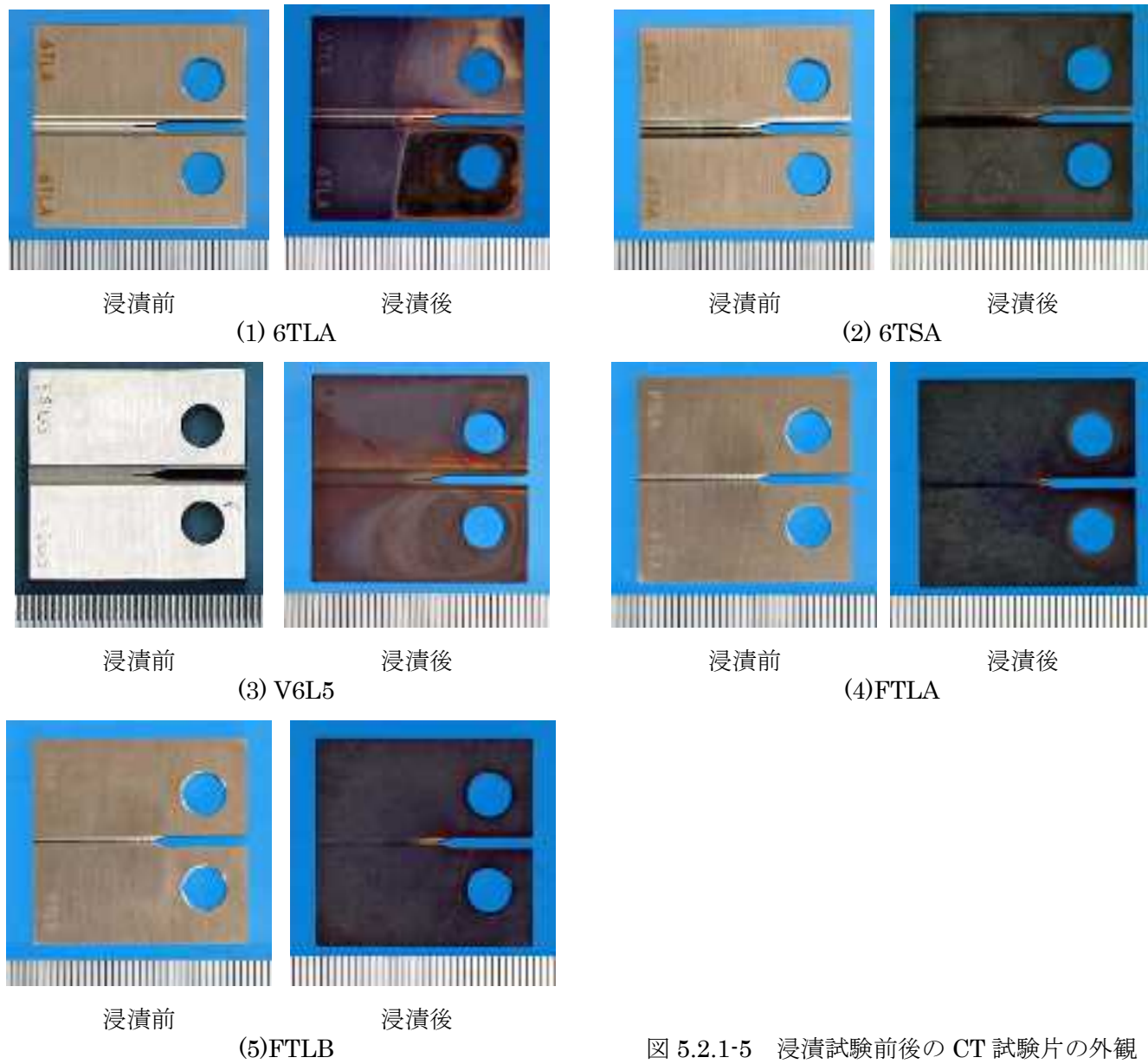


図 5.2.1-5 浸漬試験前後の CT 試験片の外観

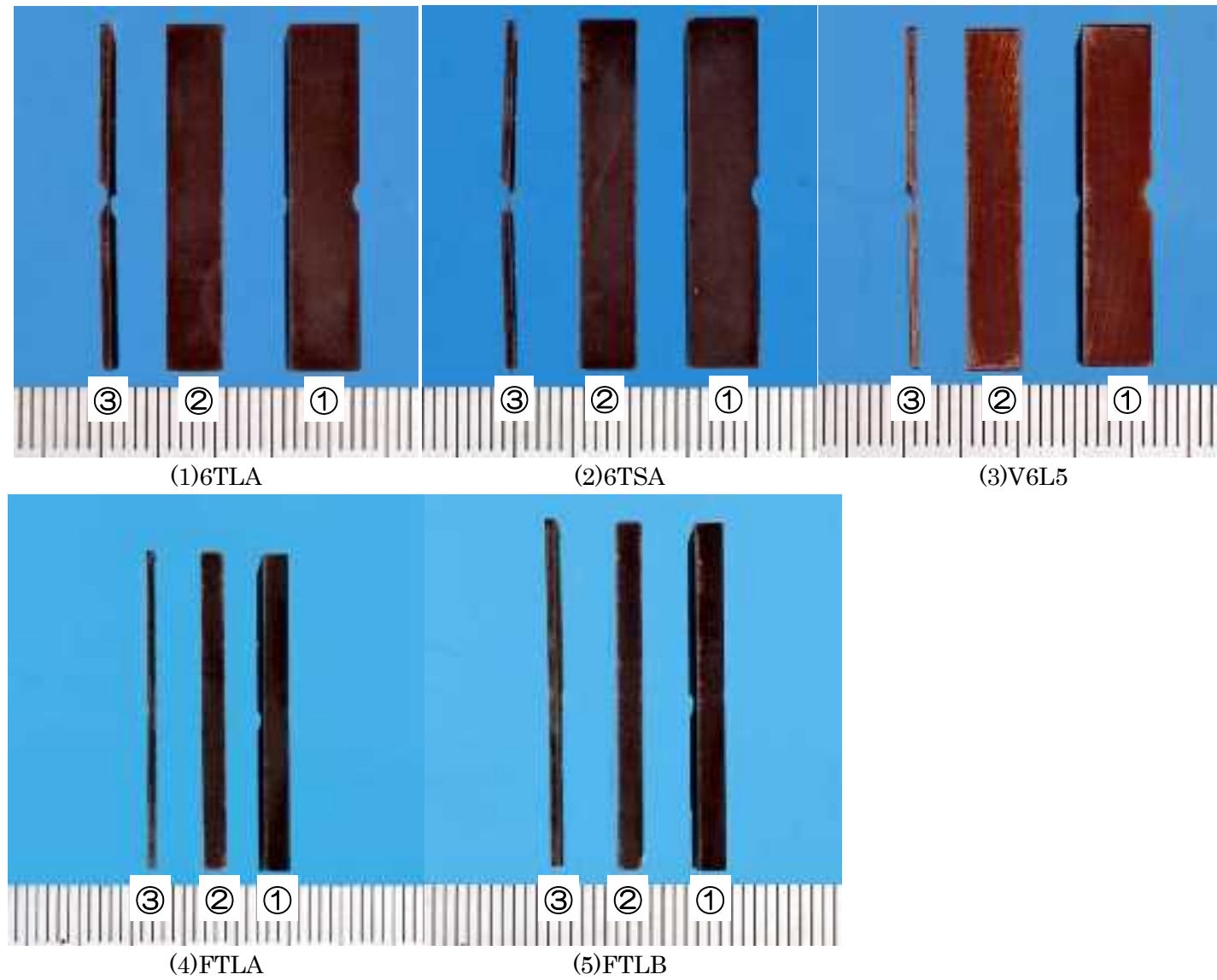


図 5.2.1-6 ワイヤ放電加工後の板厚方向からの試験片外観

①破面開放用切断片 ②板厚中央断面及びサイドグループ(SG)脇断面観察用切断片 ③残試験片



(1)6TLA



(2)6TSA



(3)V6L5



(4)FTLA



(5)FTLB

図 5.2.1-7 破面開放後の 0.5T-CT 試験片(破面開放用切断片①)の外観



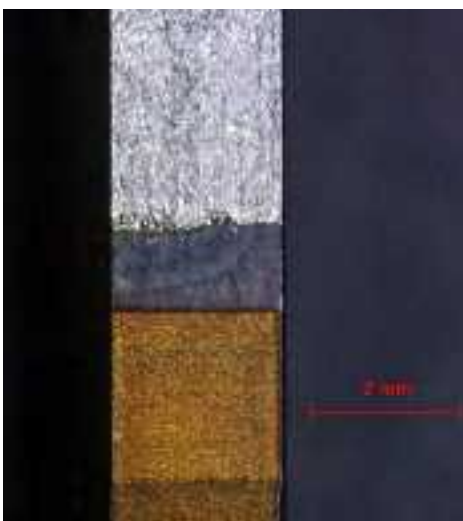
(1)6TLA



(2)6TSA



(3)V6L5



(4)FTLA



(5)FTLB

図 5.2.1-8 破面開放後の試験片①のビデオマイクロスコープ観察結果

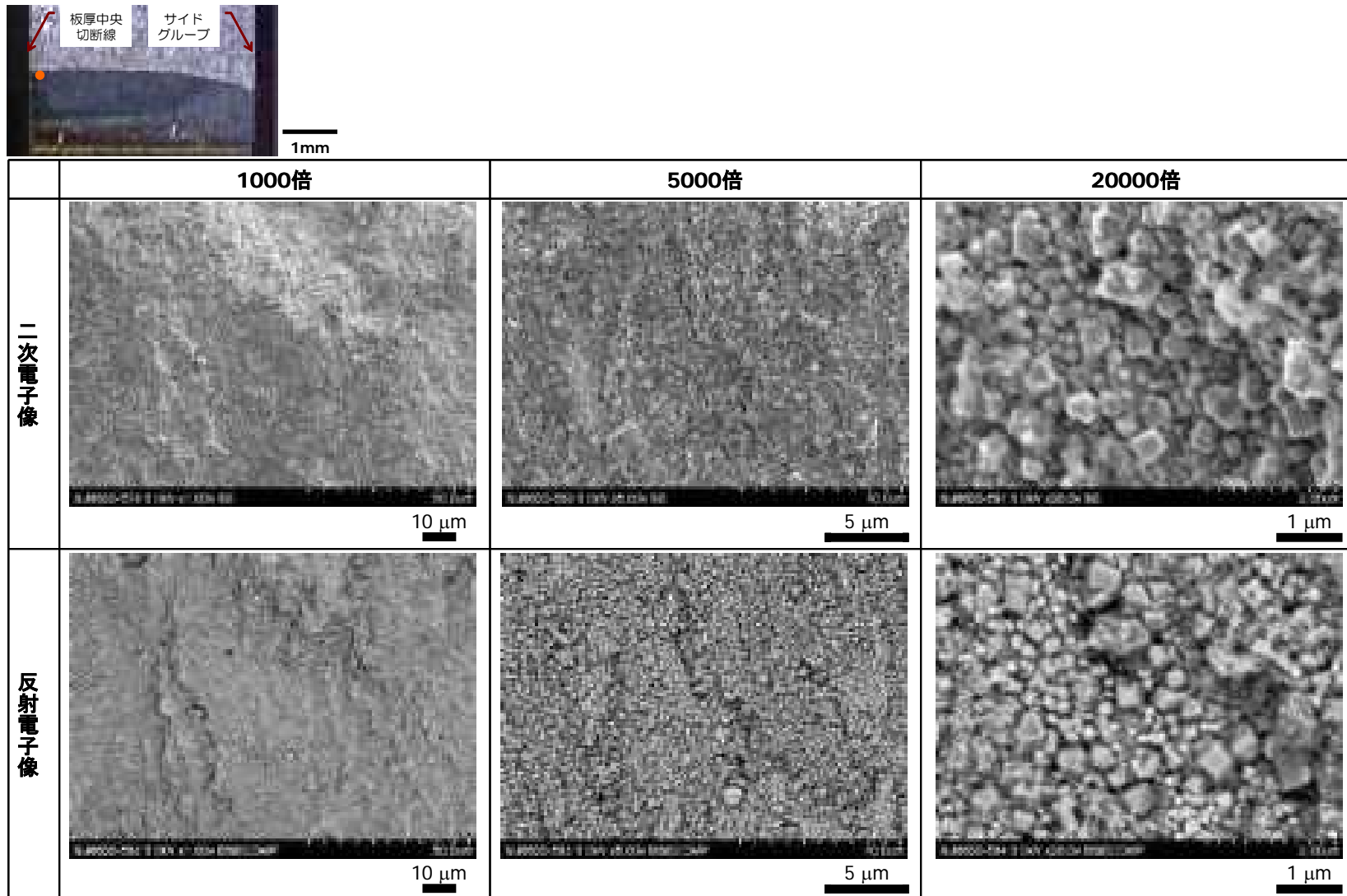


図 5.2.1-9(1) 0.5T-CT 試験片(6TLA)の疲労き裂内に形成した酸化皮膜の破面 SEM 観察結果:観察位置(1)(き裂先端近傍)

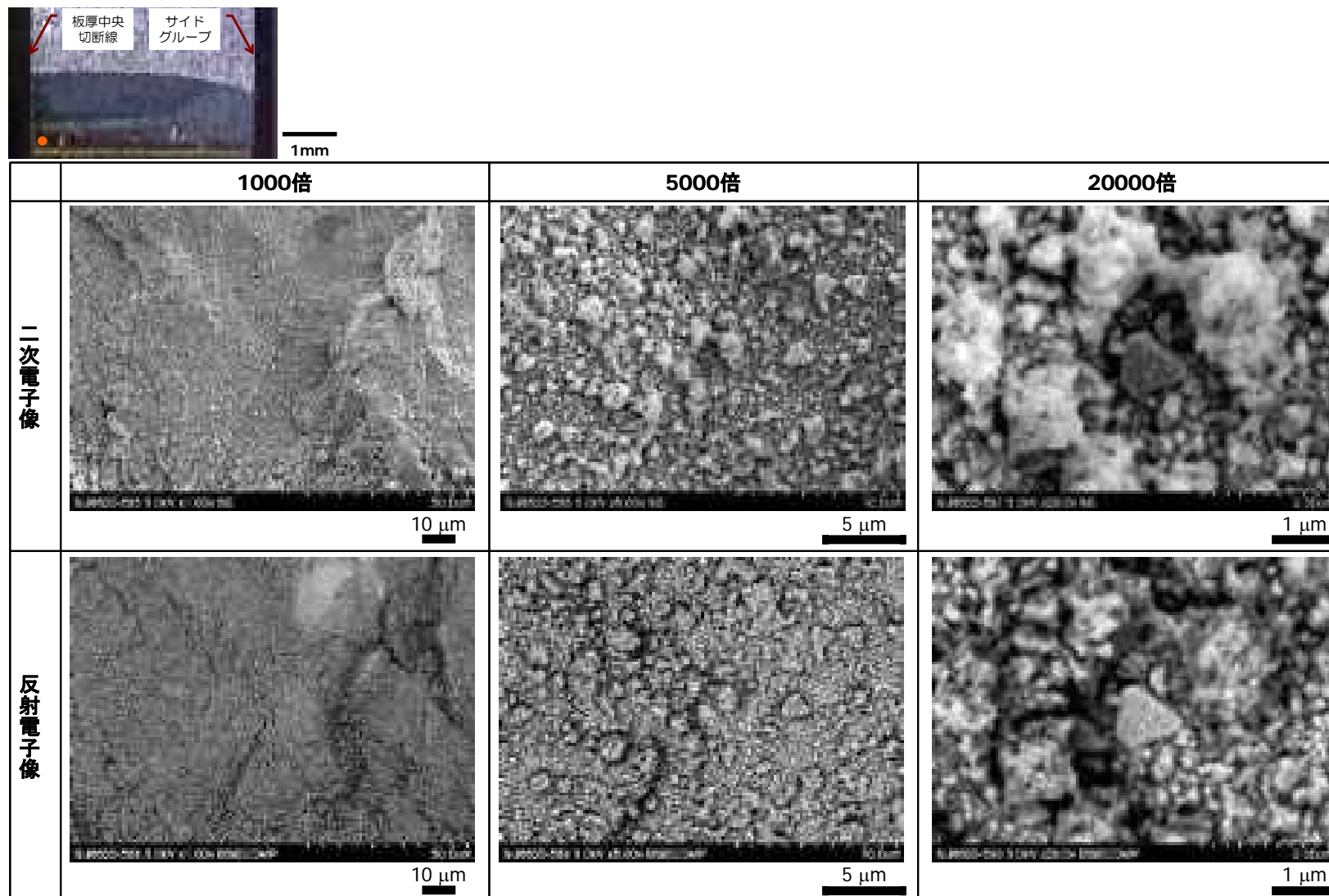


図 5.2.1-9(2) 0.5T-CT 試験片(6TLA)の疲労き裂内に形成した酸化皮膜の破面 SEM 観察結果:観察位置(2)(機械加工部先端近傍)

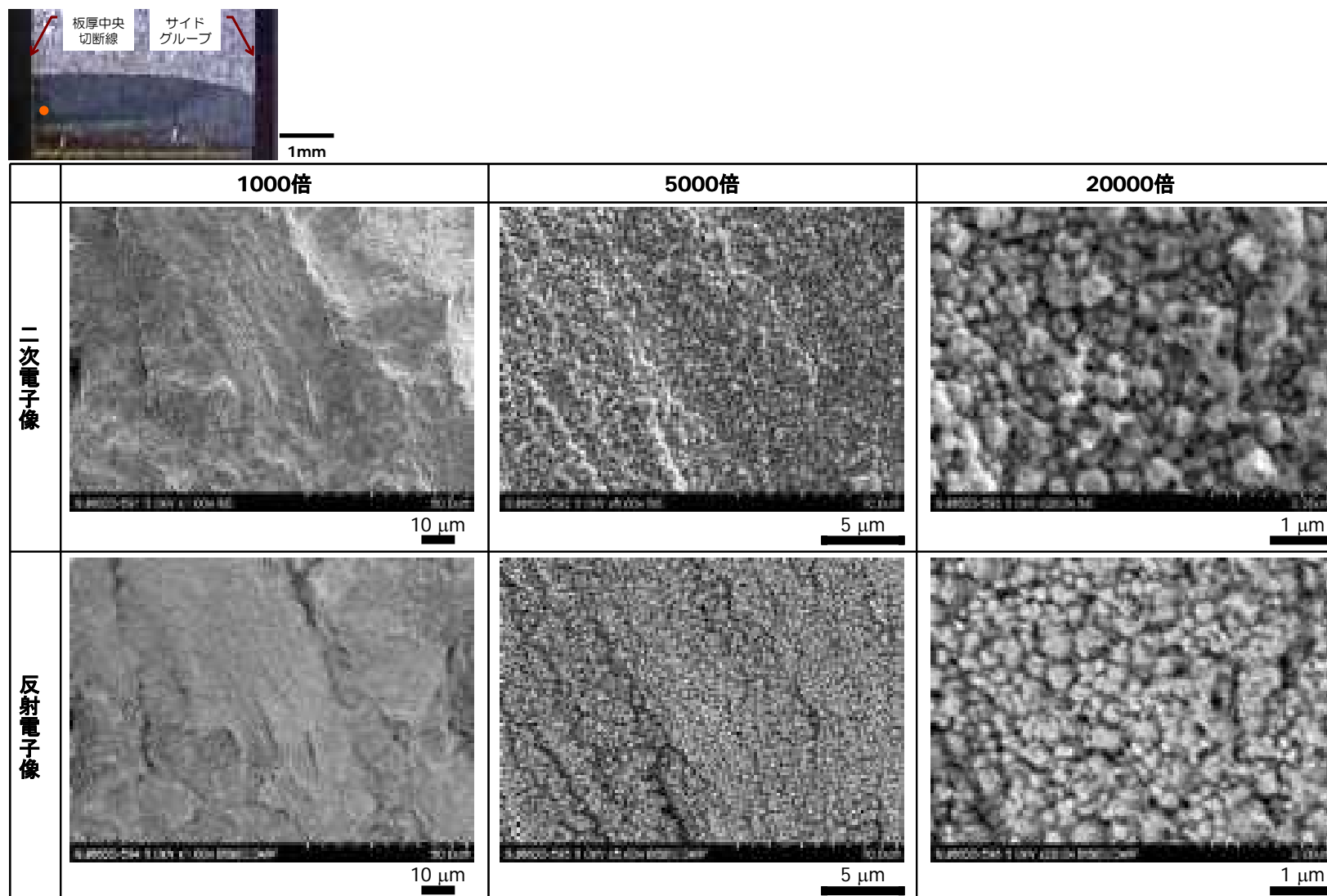


図 5.2.1-9 (3) 0.5T-CT 試験片(6TLA)の疲労き裂内に形成した酸化皮膜の破面 SEM 観察結果:観察位置(3)(き裂長さ中間位置近傍)

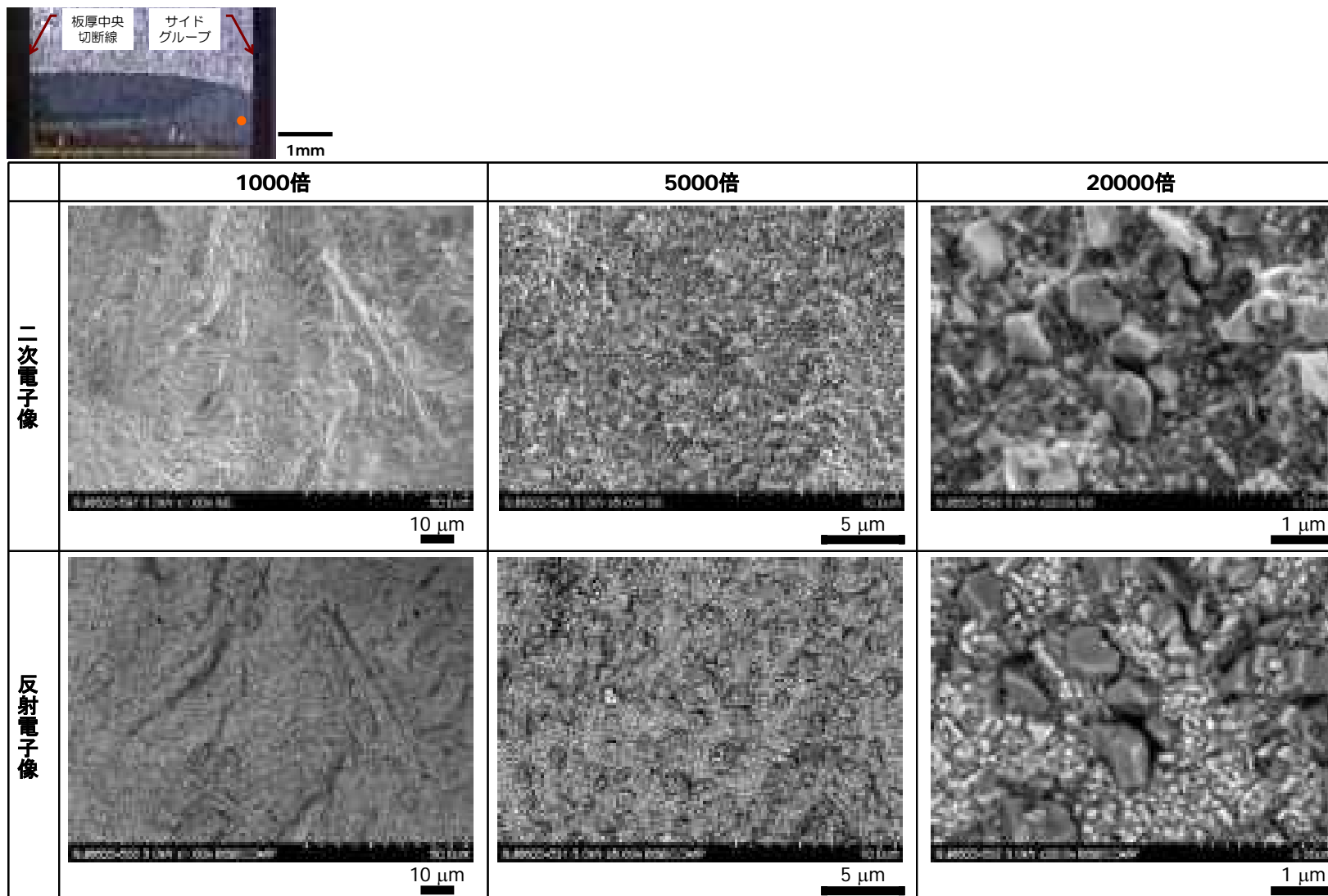


図 5.2.1-9 (4) 0.5T-CT 試験片(6TLA)の疲労き裂内に形成した酸化皮膜の破面 SEM 観察結果:観察位置(4)(サイドグループ脇)

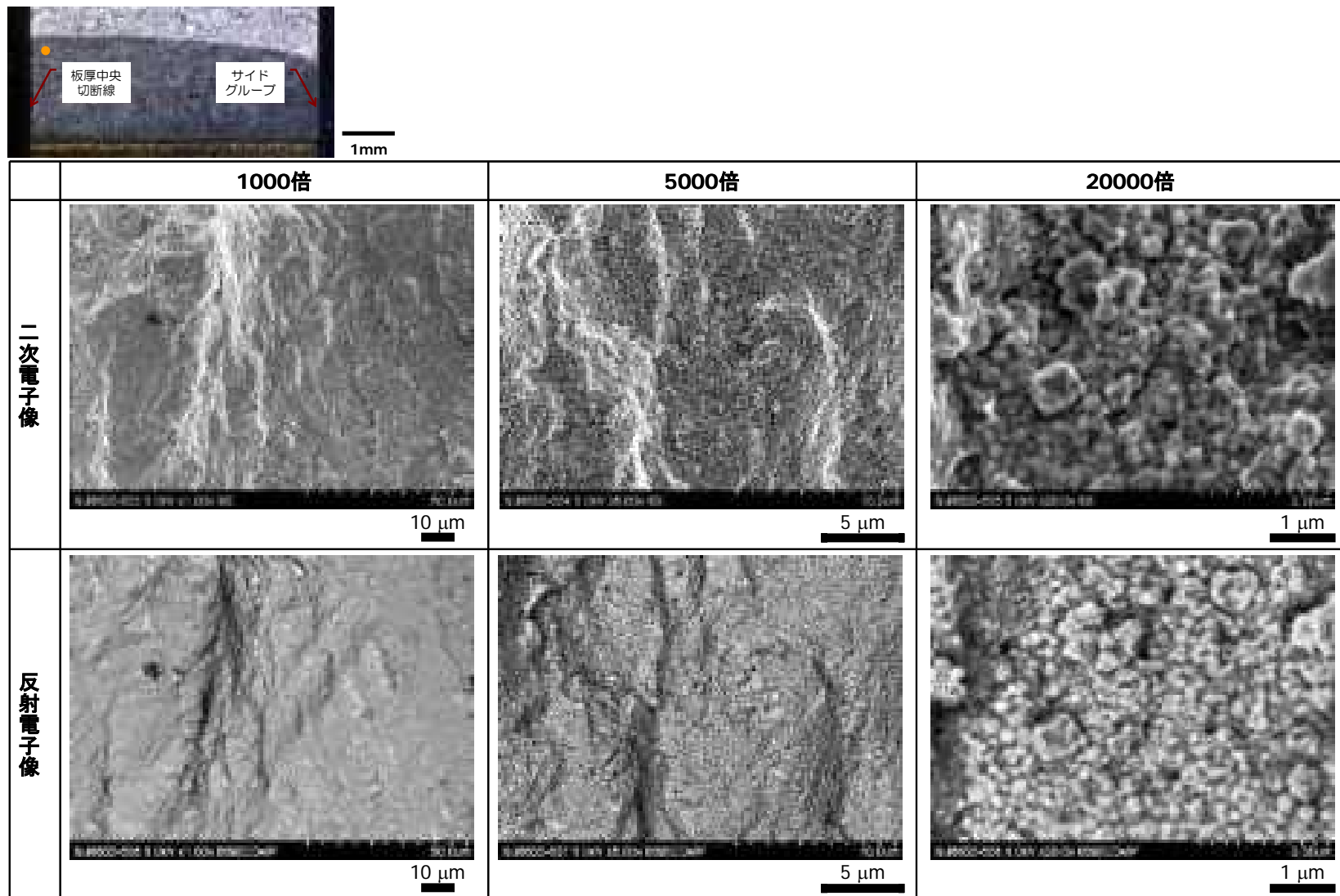


図 5.2.1-10(1) 0.5T-CT 試験片(6TSA)の疲労き裂内に形成した酸化皮膜の破面 SEM 観察結果:観察位置(1)(き裂先端近傍)

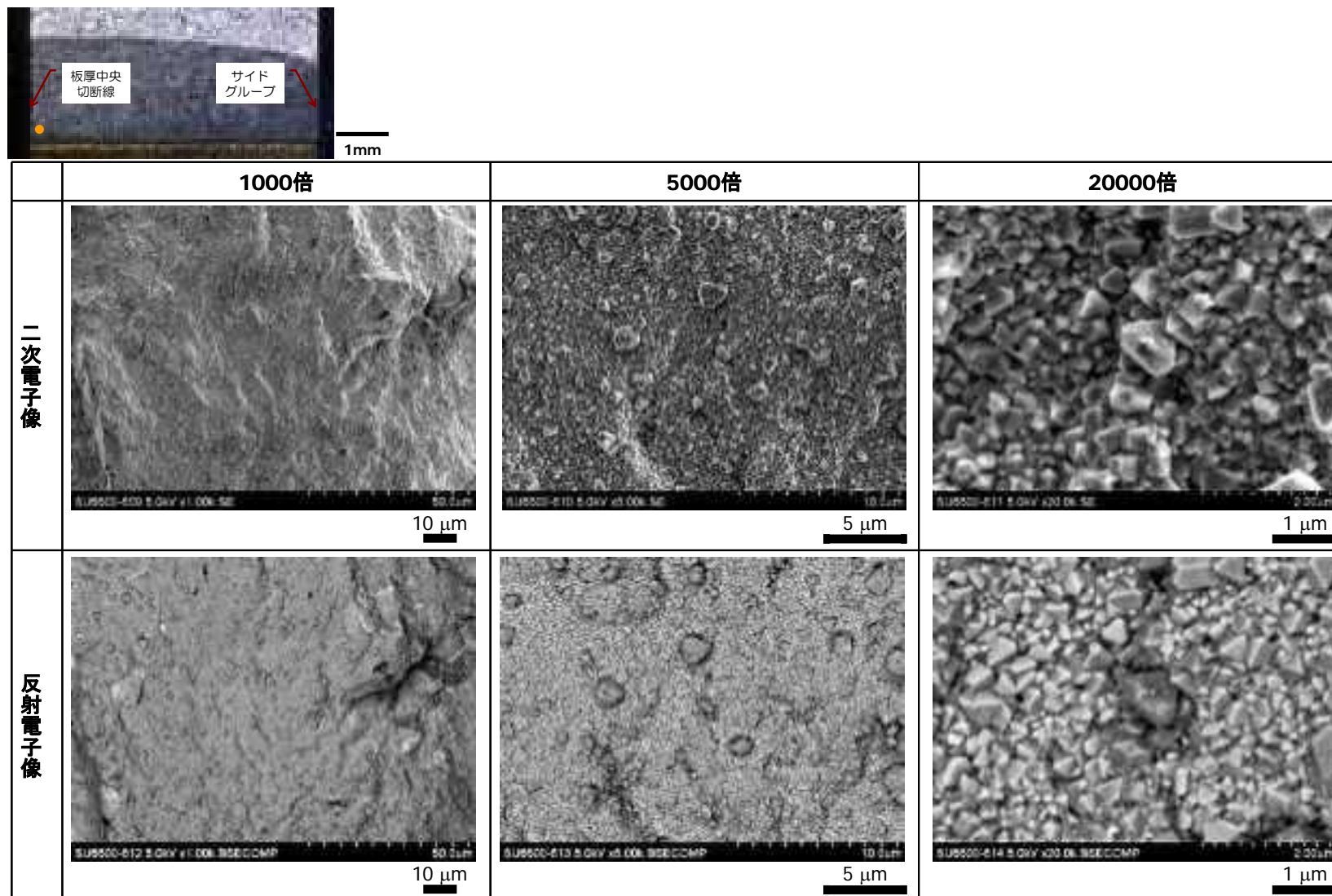


図 5.2.1-10 (2) 0.5T-CT 試験片(6TSA)の疲労き裂内に形成した酸化皮膜の破面 SEM 観察結果:観察位置(2)(機械加工部先端近傍)

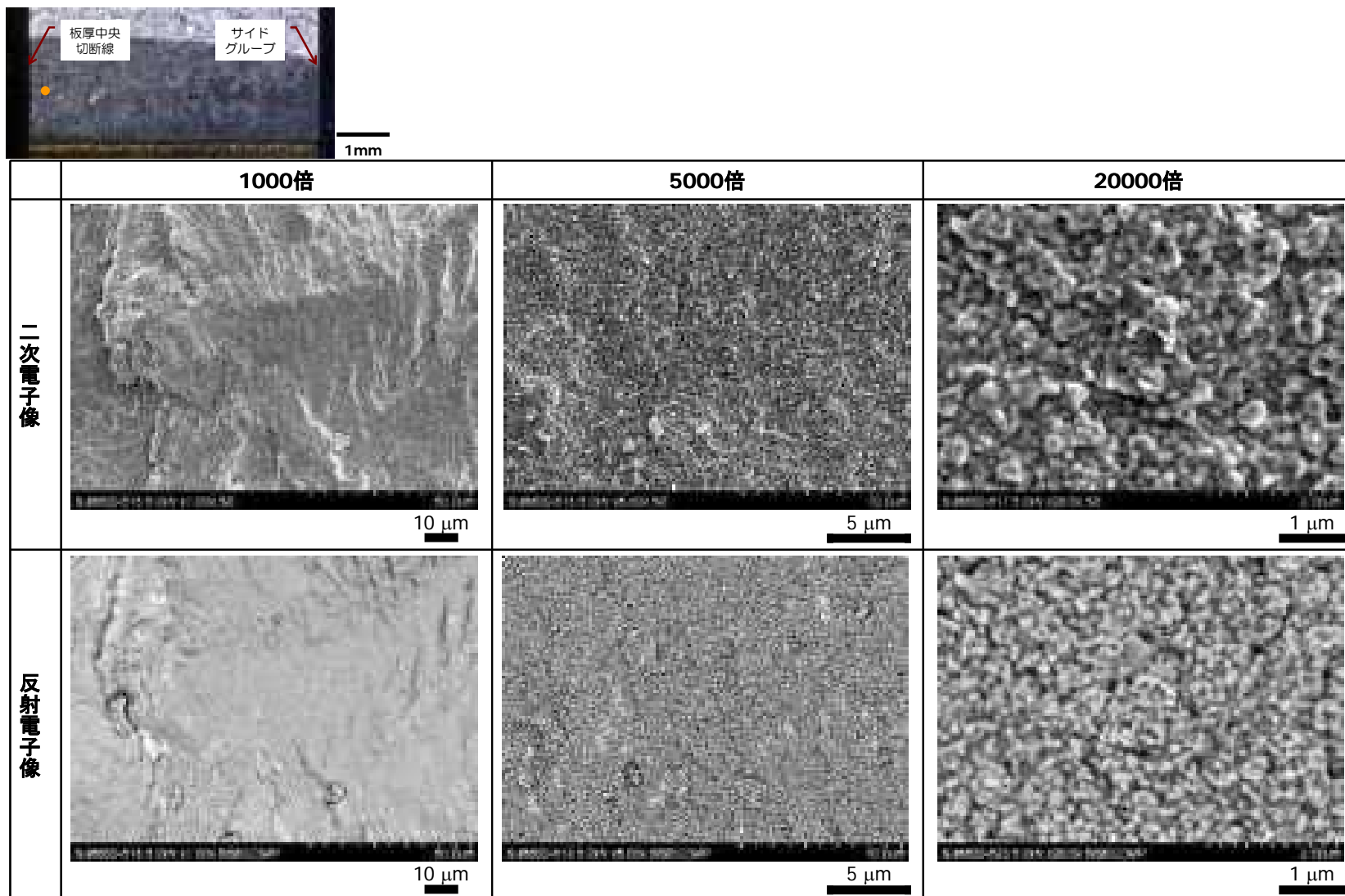


図 5.2.1-10 (3) 0.5T-CT 試験片(6TSA)の疲労き裂内に形成した酸化皮膜の破面 SEM 観察結果:観察位置(3)(き裂長さ中間位置近傍)

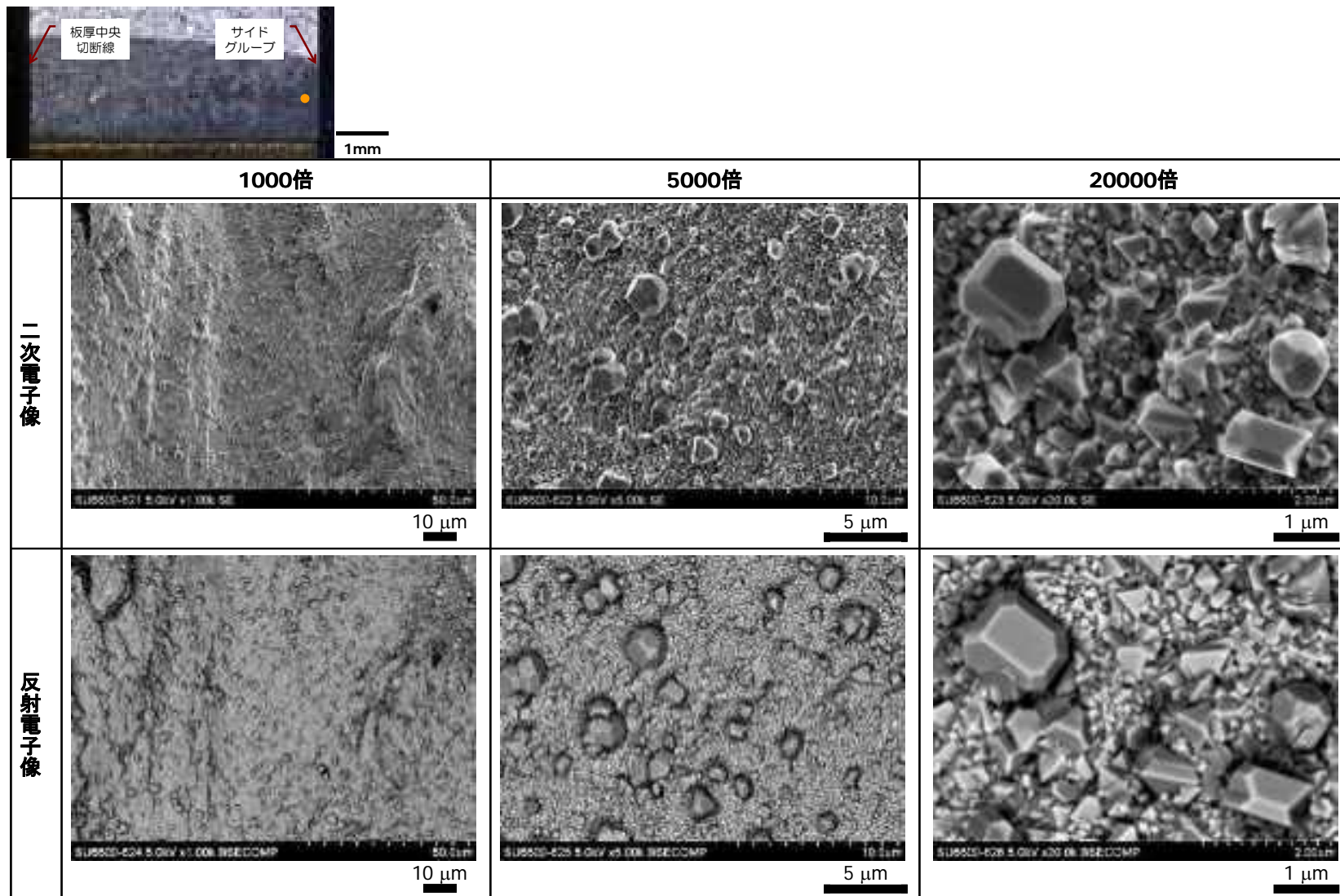


図 5.2.1-10 (4) 0.5T-CT 試験片(6TSA)の疲労き裂内に形成した酸化皮膜の破面 SEM 観察結果:観察位置(4)(サイドグループ脇)

d. 高温水浸漬した0.5T-CT試験片疲労き裂断面のSEM観察

(i) 荷重負荷した溶体化SUS316L材0.5T-CT試験片の疲労き裂内酸化皮膜観察

図 5.2.1-11 は、3.0 kN の荷重負荷し、温度 290℃、溶存酸素 2ppm の高温水に 224 時間浸漬した CT 試験片(6TLA)の疲労き裂を、断面より SEM 観察した結果(反射電子像)を示す。平成 25 年度までに実施してきた 20%冷間圧延材の 0.5T-CT 試験片と開口量を合わせるため、荷重を 3.0 kN とした。き裂長さ 11.4 mm に対してき裂先端での応力拡大係数 $K=約 12.8 MPa\sqrt{m}$ に相当する。板厚中央のき裂とサイドグループ脇のき裂のいずれにおいても、導入した疲労き裂が認められた。

図 5.2.1-12(1)~(8)は、図 5.2.1-11(1)に示した板厚中央部のき裂に対して、枠で囲った箇所を中心に拡大して観察した結果(二次電子像及び反射電子像)で、図 5.2.1-12 (1)~(2)はき裂先端、図 5.2.1-12 (3)~(4)はき裂先端の近傍、図 5.2.1-12(5)~(6)はき裂長さ全体の間位置、図 5.2.1-12(7)~(8)は機械加工部先端近傍をそれぞれ示す。図 5.2.1-12 (1)のき裂先端の反射電子像においてき裂の内部には酸化皮膜だけでなく母相と同様の濃さの領域も認められた。これは疲労き裂を進展させた時に形成する破面上の凹凸や微小な枝分かれ、若しくはき裂断面観察用試験片を加工した際に母相の小片(バリ)がき裂内部に埋まったものに起因すると考えられる。開口部分の表面領域に、母相(明るく見える領域)よりもやや暗い灰色を示す領域が認められた。やや暗い灰色の領域を中心に EDX の線分析を行ったところ、図 5.2.1-12 (2)に示すように酸素濃度が上昇していた。反射電子像の結像原理より、やや暗い領域は母相よりも分子量(または平均の原子量)の小さい物質で構成されていること、また EDX の結果酸素が存在していることから、やや暗い灰色の領域は酸化物であると推察される。また図 5.2.1-12(3)から(8)に示すように、疲労き裂近傍のやや暗い灰色の領域(酸化皮膜)は、き裂先端部で見られたよりも拡大していることが判る。このことは、き裂先端よりもその他の部位の方が高温水中の酸素が十分に供給されたため、酸化皮膜の成長が促進されたことが示唆される。

一方図 5.2.1-13(1)~(8)は、図 5.2.1-11(2)に示したサイドグループ脇のき裂に対し、枠で囲った箇所を中心に拡大して観察した結果(二次電子像及び反射電子像)を示す。図 5.2.1-13(1)及び(2)において、母相と同じ明るさの小片がき裂内部に認められているが、その間を埋めるように暗い灰色の酸化皮膜の形成が認められた。一方図 5.2.1-13(3)~(8)に示すように、き裂の長さ方向位置での酸化皮膜成長に大きな差異は認められなかった。

以上のことより、荷重負荷によって開口させた 0.5T-CT 試験片の板厚中央近傍のき裂先端においては、高温水の溶存酸素の供給が他の領域よりも相違するため、酸化皮膜の成長が抑制されることが考えられる。また 0.5T-CT 試験片の板厚内部の応力分布などの FEM 解析結果より、サイドグループ近傍は試験片の板厚中央に比べて応力集中が大きいことが知られており、開口量が大きくなったと考えられる。その結果、サイドグループ脇のき裂先端近傍には酸素が十分に供給されたため、き裂の長さ方向によらず酸化皮膜は成長できたものと考えられる。

(ii) 静置した溶体化SUS316L材0.5T-CT試験片の疲労き裂内酸化皮膜観察

図 5.2.1-14 は、荷重負荷せずに温度 290°C、溶存酸素 2ppm の高温水に 224 時間浸漬した CT 試験片(6TSA)のき裂を断面より SEM 観察した結果(反射電子像)を示す。板厚中央のき裂とサイドグループ脇のき裂のいずれにおいても導入した疲労き裂が認められた。

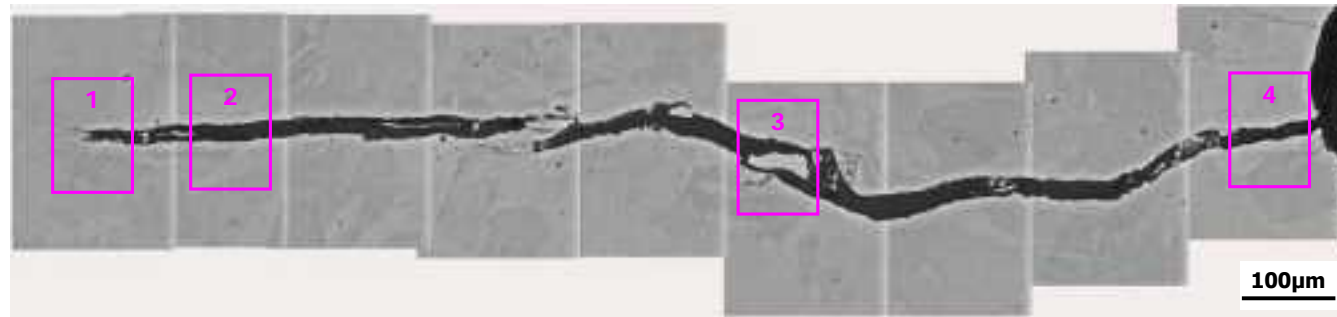
図 5.2.1-15(1)~(8)は、図 5.2.1-14(1)に示した板厚中央部のき裂に対し、枠で囲った箇所を中心に拡大して観察した結果(二次電子像及び反射電子像)で、図 5.2.1-15 (1)~(2)はき裂先端、図 5.2.1-15 (3)~(4)はき裂先端の近傍、図 5.2.1-15 (5)~(6)はき裂長さ全体の間中間位置、図 5.2.1-15 (7)~(8)は機械加工部先端近傍をそれぞれ示す。荷重負荷の無い場合においても、き裂の内部には酸化皮膜だけでなく母相と同様の濃さの領域も認められた。これは疲労き裂を進展させた時に形成する破面上の凹凸や微小な枝分かれ、若しくはき裂断面観察用試験片を加工した際に母相の小片(バリ)がき裂内部に埋まったものに起因すると考えられる。

荷重負荷した場合の反射電子像と比較すると、母相及び小片の間にやや暗い灰色の酸化皮膜の形成が認められたが、き裂長さ方向での相違は荷重負荷条件のときに比べてあまり顕著ではなかった。この理由として、荷重負荷無しで静置した場合は浸漬試験中のき裂開口量は小さく、その結果高温水からの酸素の供給はき裂長さ方向に同程度となったためと考えられる。

図 5.2.1-16 (1)~(8)は、図 5.2.1-14(2)に示したサイドグループ脇のき裂に対して枠で囲った箇所を中心に拡大して観察した結果(二次電子像及び反射電子像)で、図 5.2.1-16 (1)~(2)はき裂先端、図 5.2.1-16 (3)~(4)はき裂先端の近傍、図 5.2.1-16 (5)~(6)はき裂長さ全体の間中間位置、図 5.2.1-16 (7)~(8)は機械加工部先端近傍をそれぞれ示す。図 5.2.1-16 (1)~(2)に示すように、き裂先端ではやや暗い灰色の領域の形成は認められるが、FE-SEM-EDX の線分析から、酸素濃度の顕著な上昇は認められなかった。また図 5.2.1-16 (3)~(6)に見られるような反射電子像で黒く見えている箇所を二次電子像と比較すると、表面からややくぼんだ形状となっていることが推測される。また EDX 線分析結果でも分析元素のカウンタ数がいずれも減少していることから平滑な表面となっていないことが考えられ、SEM 観察の結果だけで評価するには注意を要する。

以上、同条件で高温水に浸漬した場合であっても、荷重を負荷することによって疲労き裂内の酸化皮膜形成が促進されることが判った。但し反射電子像の濃淡による酸化相と母相の区分はあくまで目安であり、また母相表面に形成した酸化膜とき裂を埋めるように形成した酸化物の区別も難しいため、引き続き前章に記載した破面観察結果や、断面観察時の元素分析(EDX 等)、TEM 観察等のデータに係る知見を拡充し、総合的に評価することが必要である。

なお CT 試験片 ID. V6L5、FTLA 及び FTLB のき裂内断面 SEM 観察の結果は付録に掲載した。



(1)板厚中央



(2)サイドグループ脇

図 5.2.1-11 CT 試験片(6TLA)のき裂断面 SEM 観察結果及び拡大観察位置(視野 1~4)

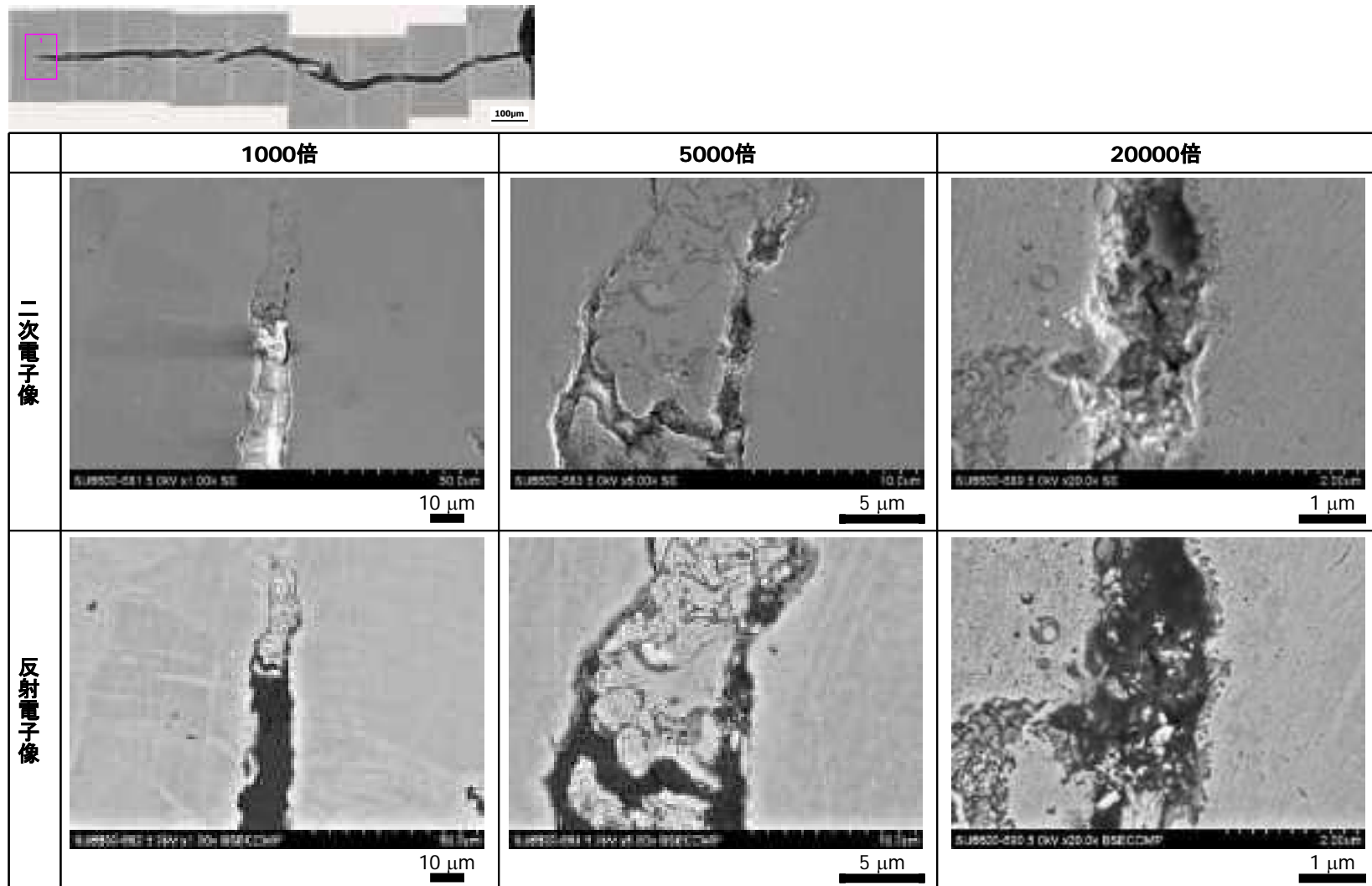


図 5.2.1-12(1) CT 試験片(6TLA)板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野1 き裂先端

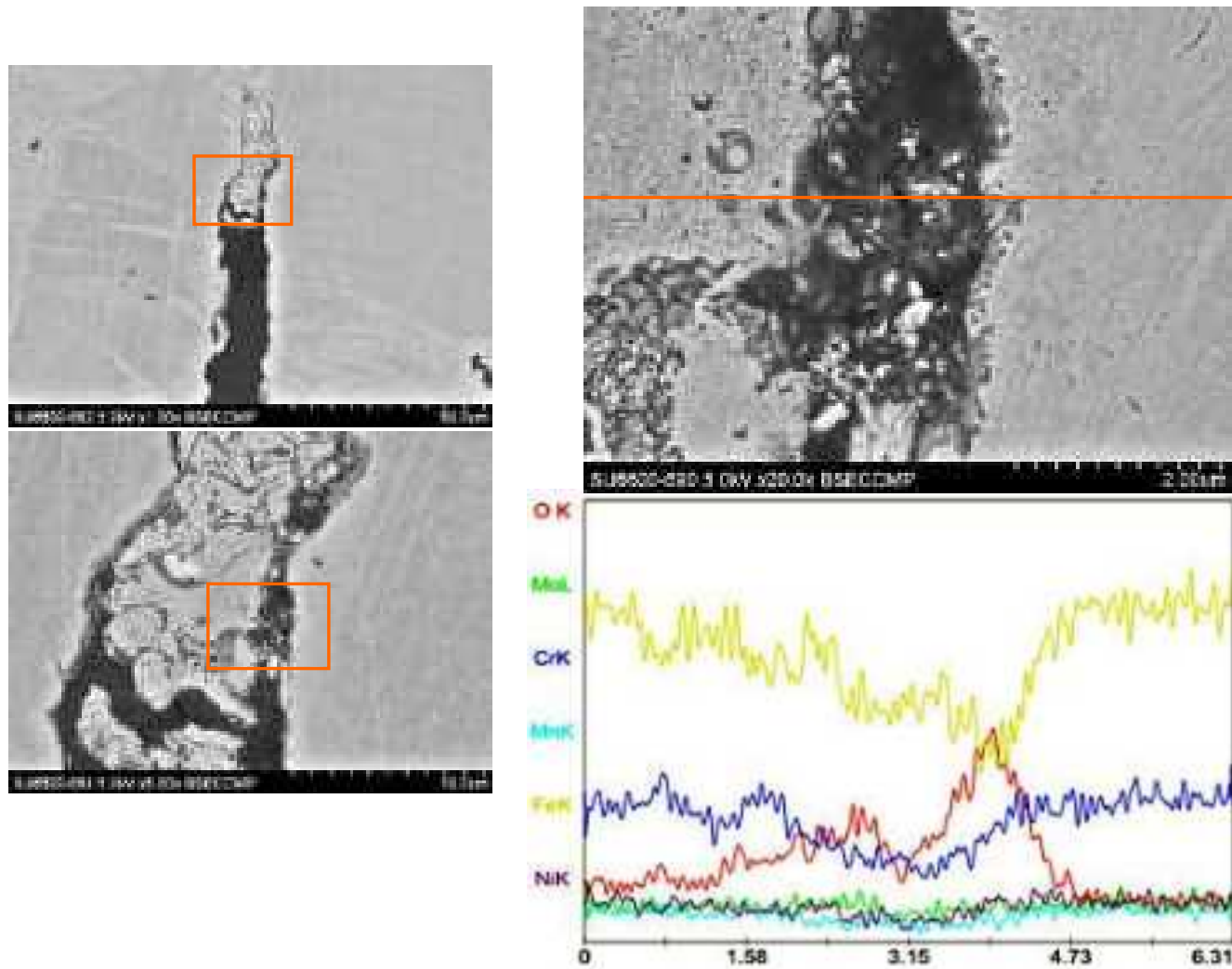


図 5.2.1-12(2) CT 試験片(6TLA)板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端 EDX 線分析
(観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)



	1000倍	5000倍	20000倍
二次電子像			
反射電子像			

図 5.2.1-12(3) CT 試験片(6TLA)板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 2 き裂先端近傍

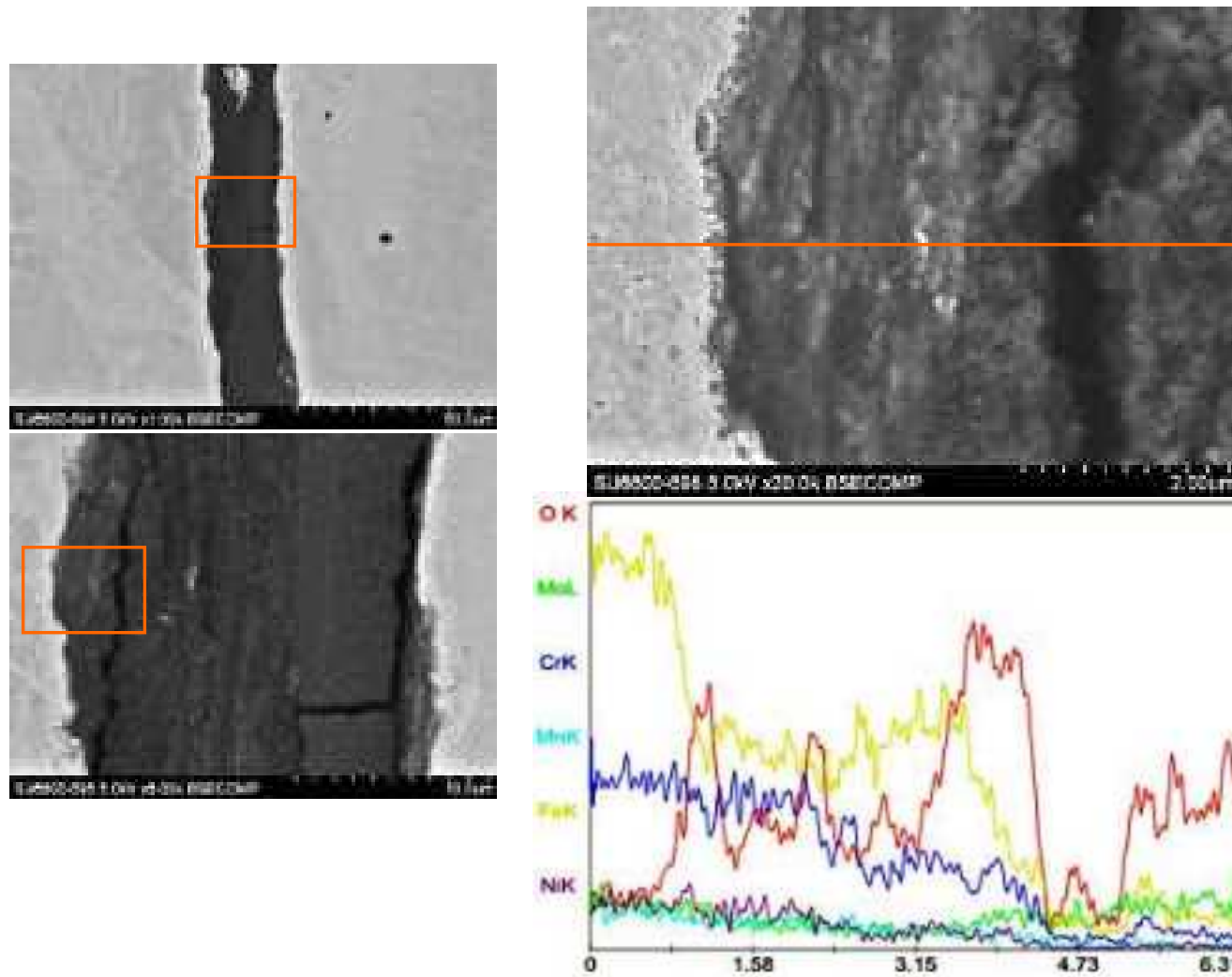


図 5.2.1-12(4) CT 試験片(6TLA)板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端近傍 EDX 線分析
(観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

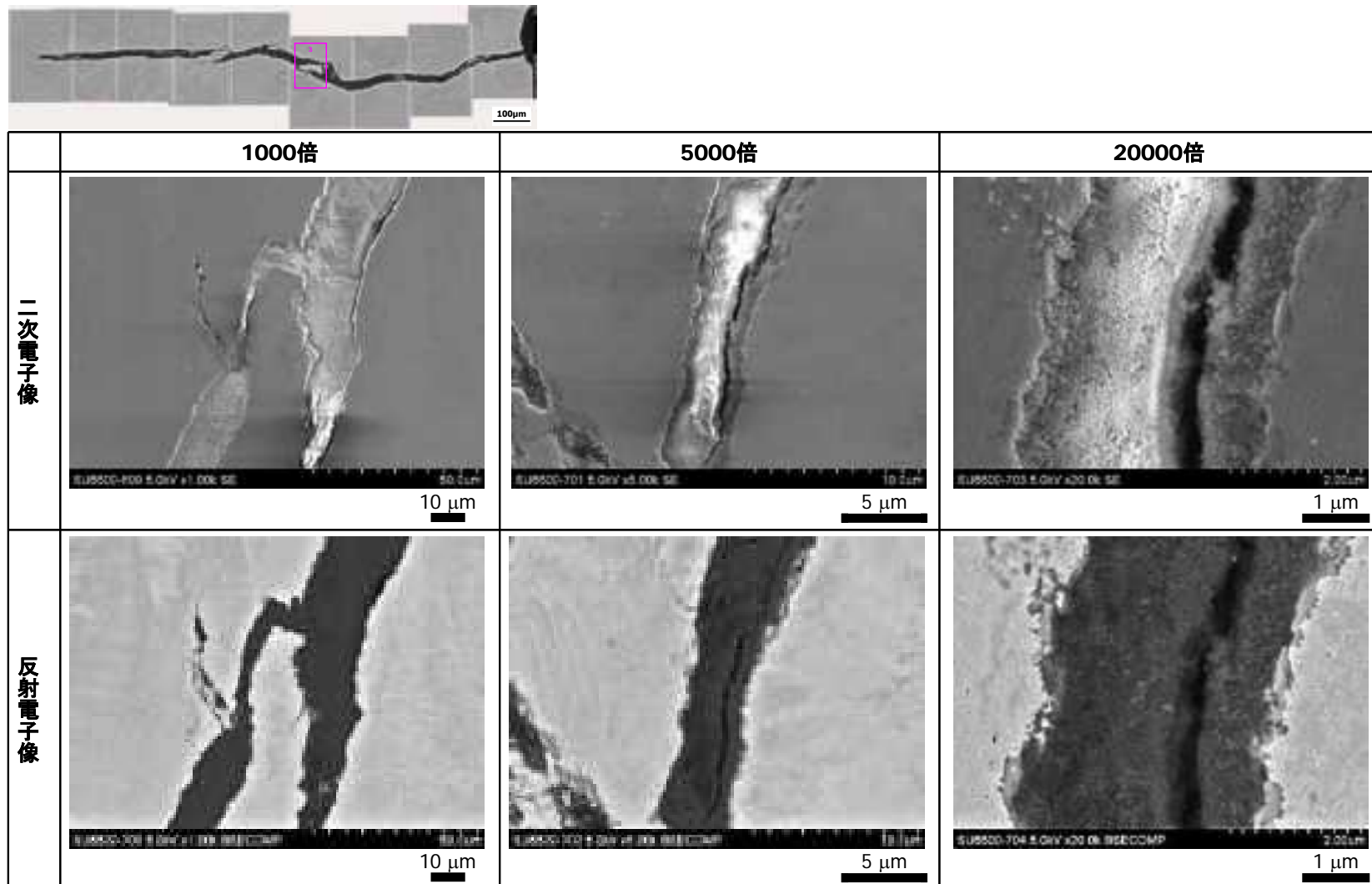


図 5.2.1-12 (5) CT 試験片(6TLA) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 3 き裂長さ中間位置

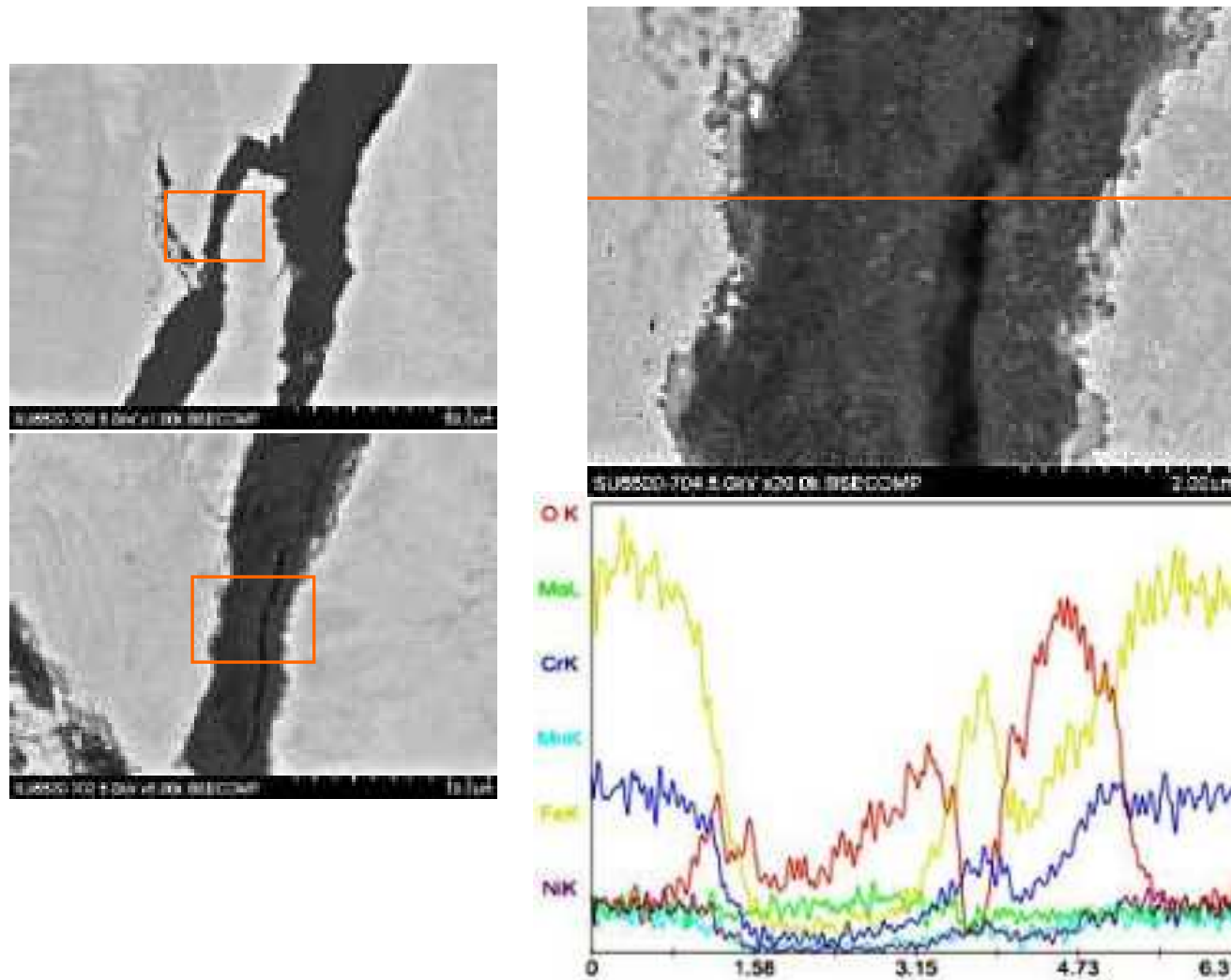


図 5.2.1-12 (6) CT 試験片(6TLA) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 3 き裂長さ中間位置 EDX 線分析
(観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

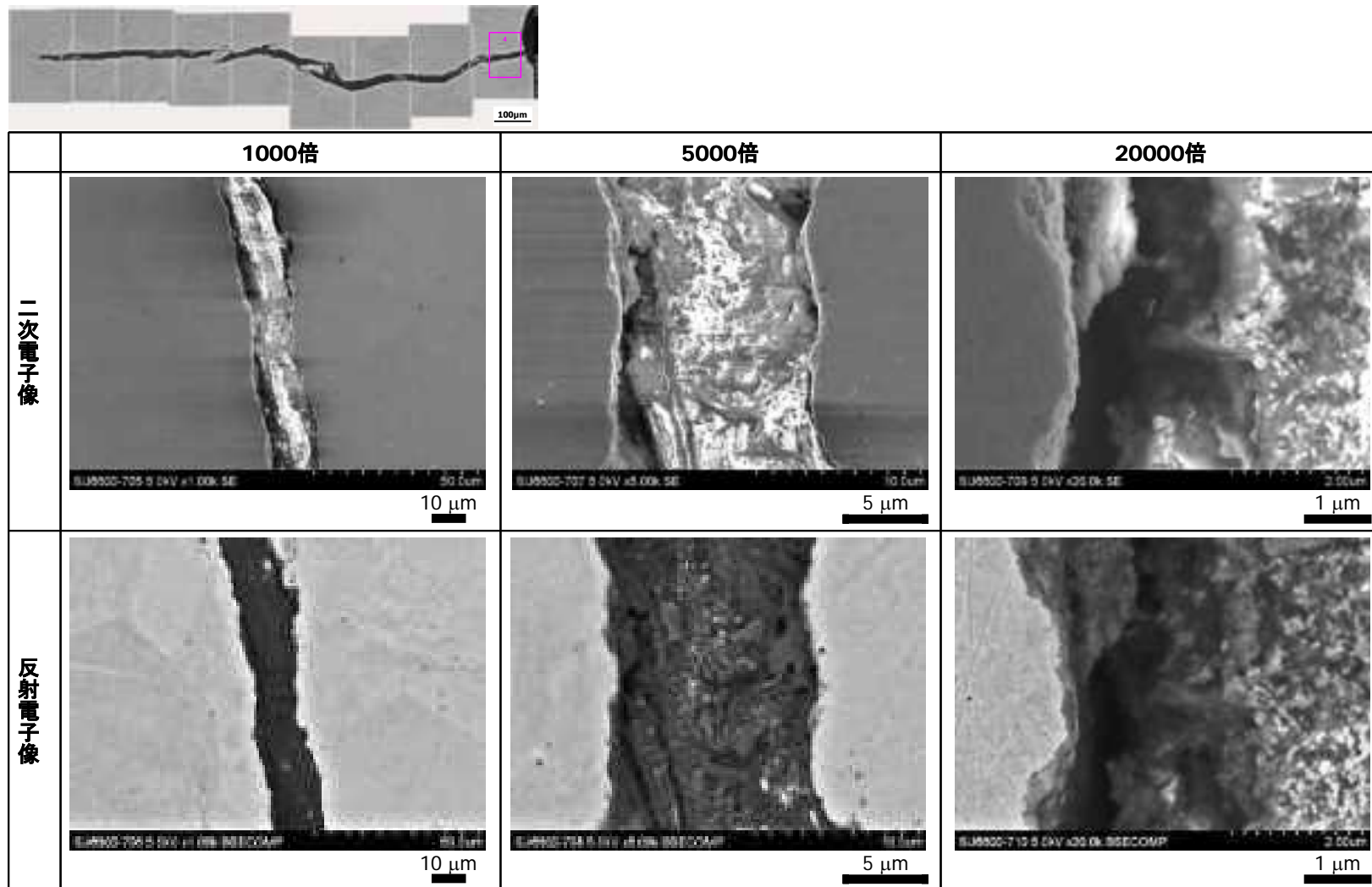


図 5.2.1-12 (7) CT 試験片(6TLA)板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍

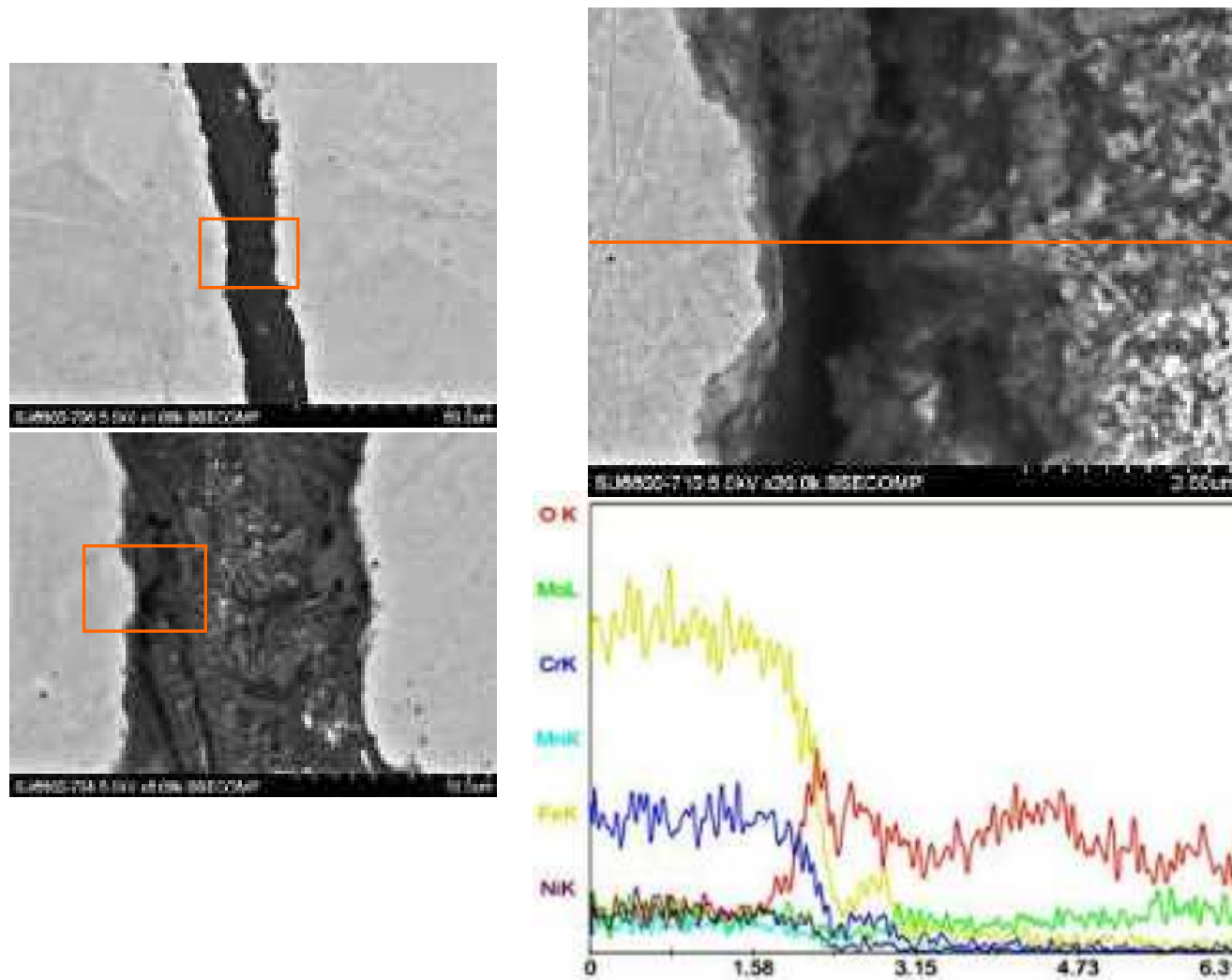


図 5.2.1-12 (8) CT 試験片(6TLA)板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍 EDX 線分析
(観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

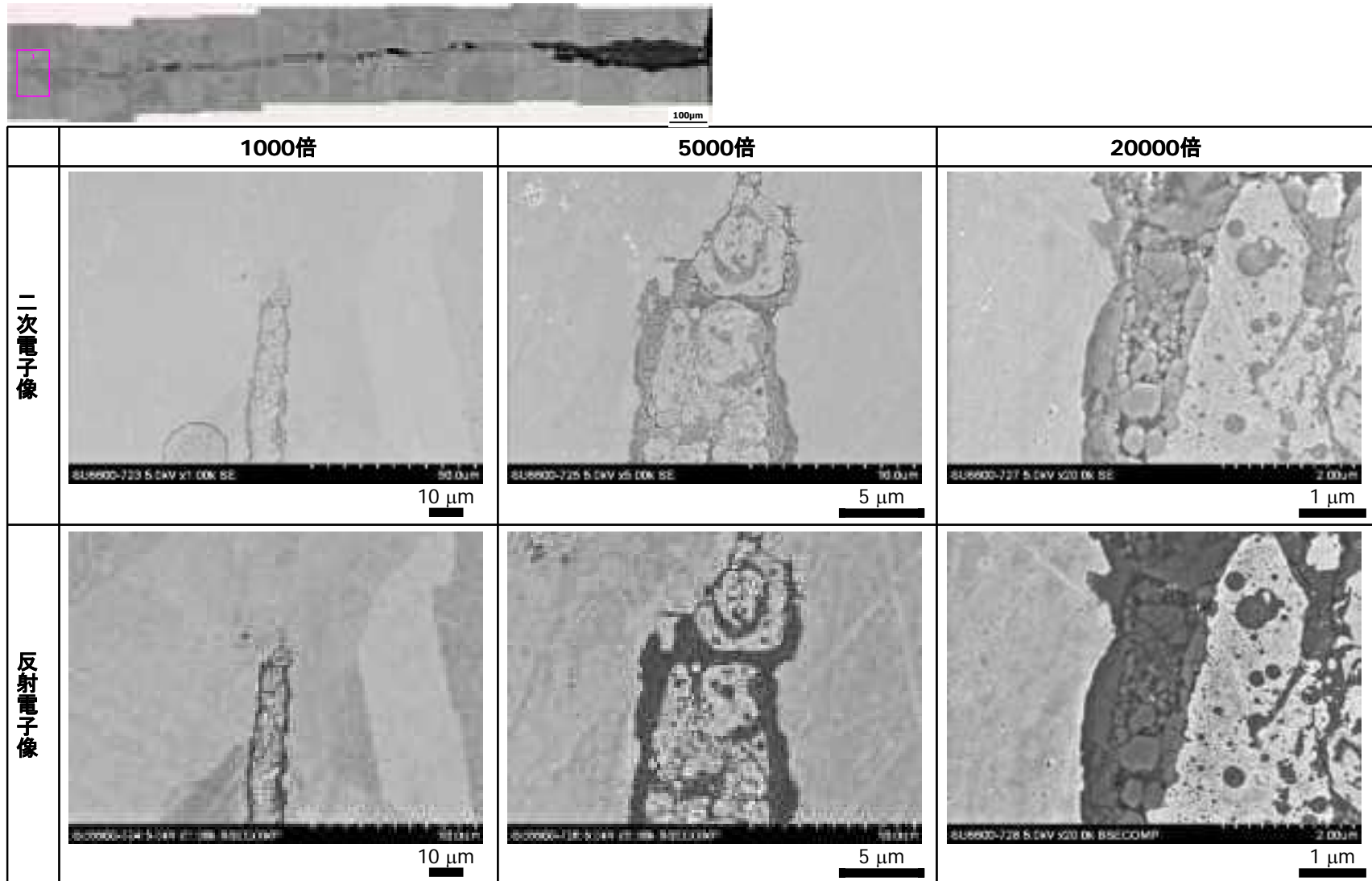


図 5.2.1-13(1) CT 試験片(6TLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端

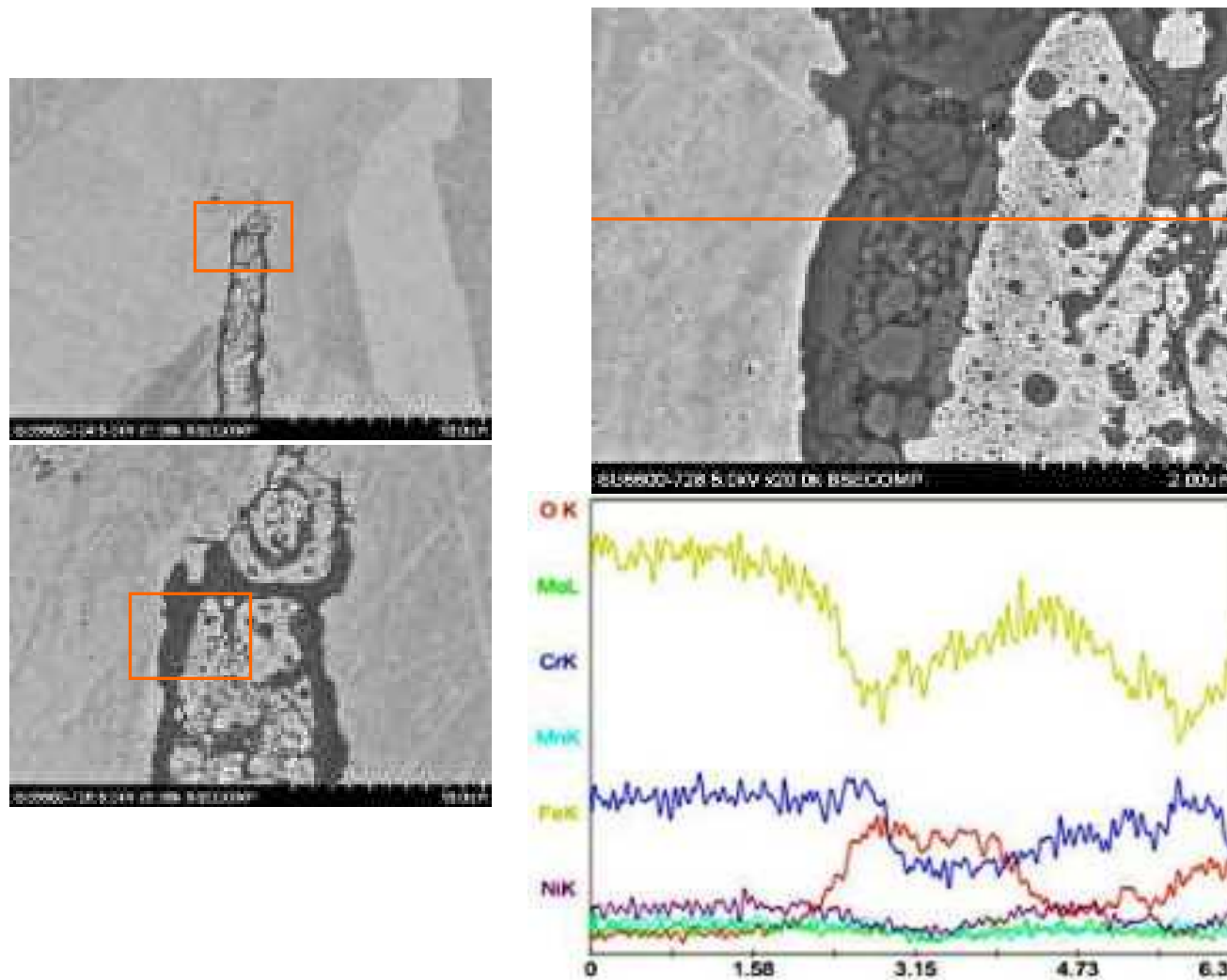


図 5.2.1-13 (2) CT 試験片(6TLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端 EDX 線分析
(観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

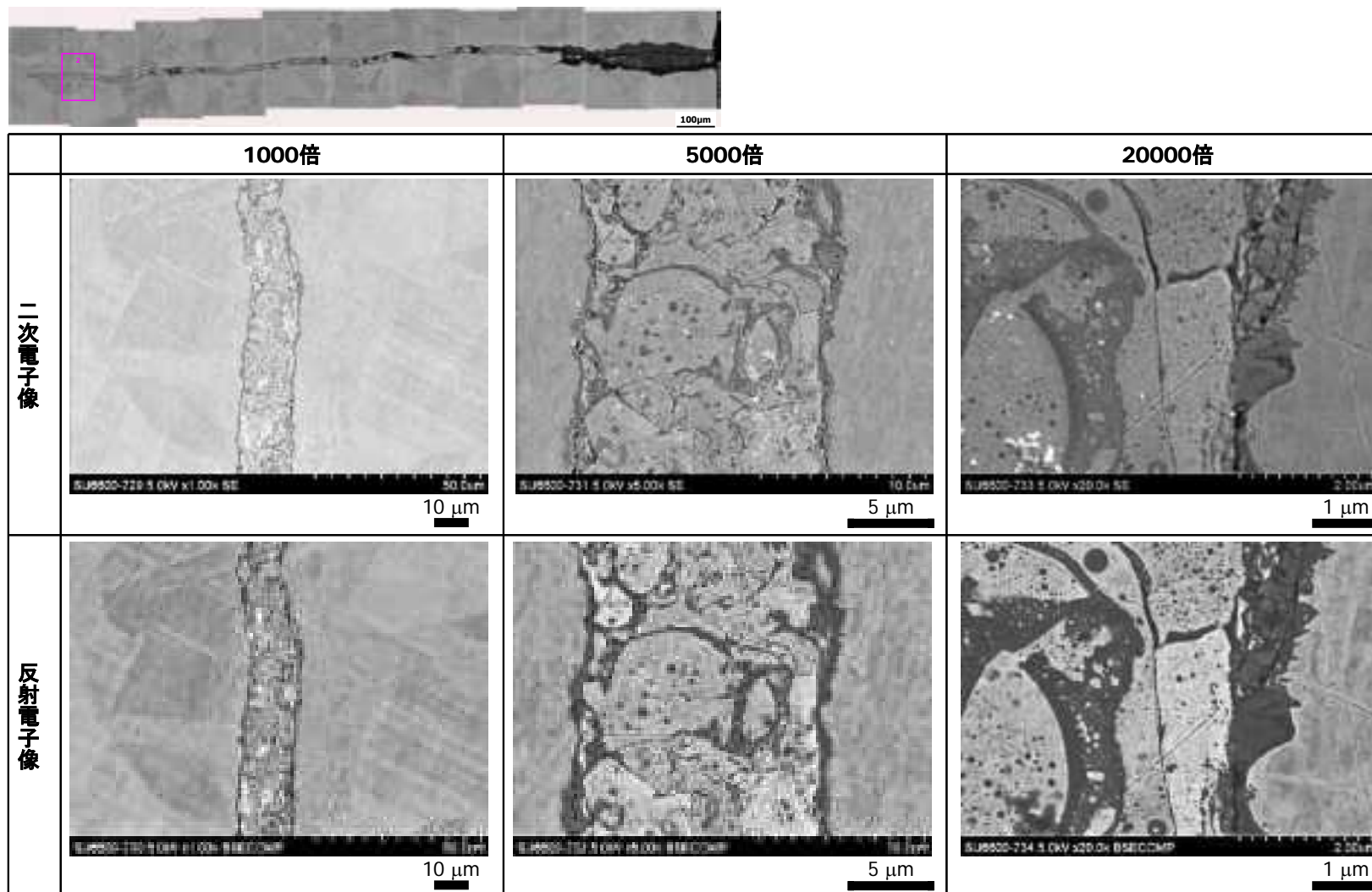


図 5.2.1-13 (3) CT 試験片(6TLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果:観察位置観察位置:視野 2 き裂先端近傍

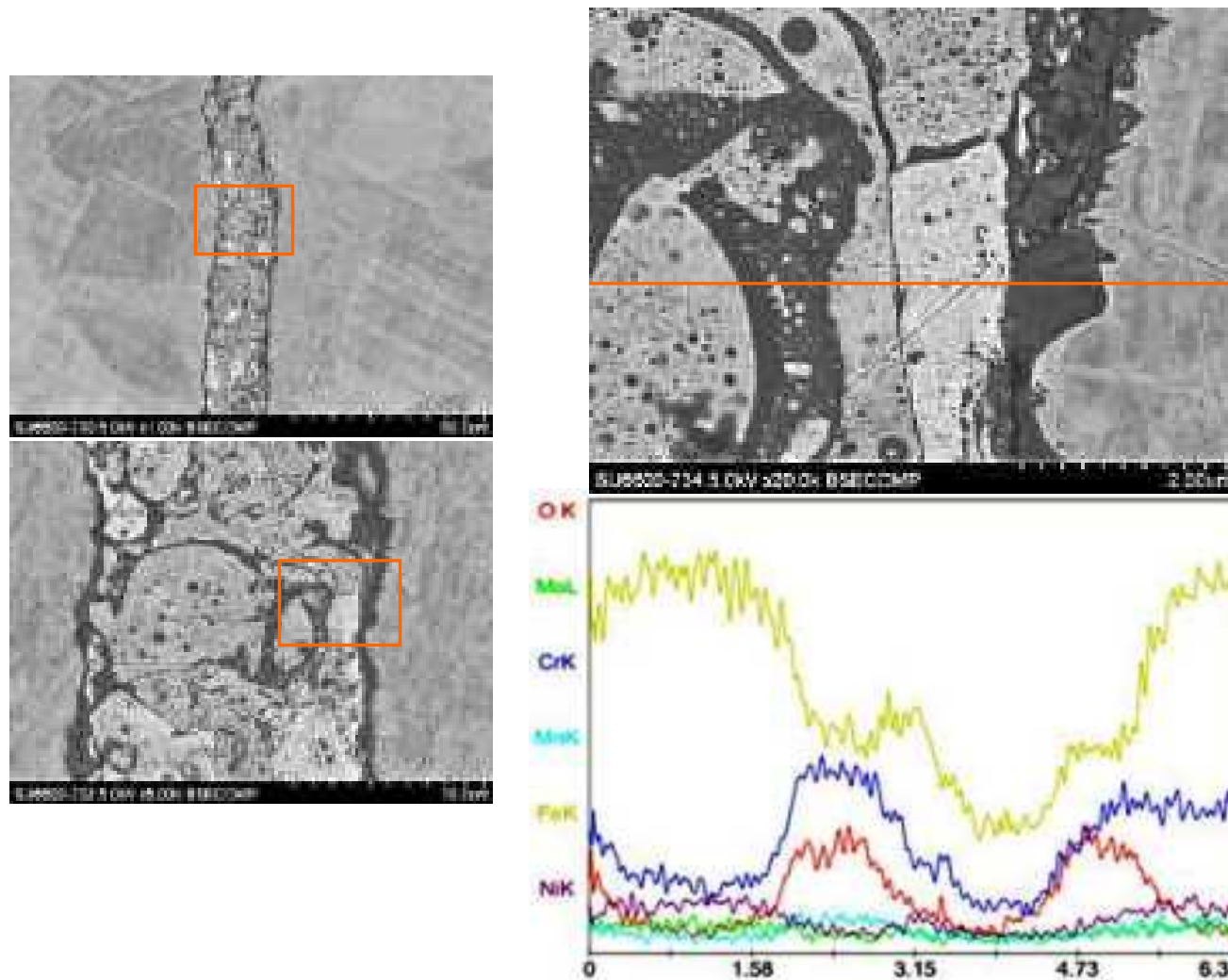


図 5.2.1-13 (4) CT 試験片(6TLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果:観察位置観察位置:視野 2 き裂先端近傍 EDX 線分析
(観察箇所:左図上下の四角部分 線分析箇所:右上反射電子像のオレンジ色の線)

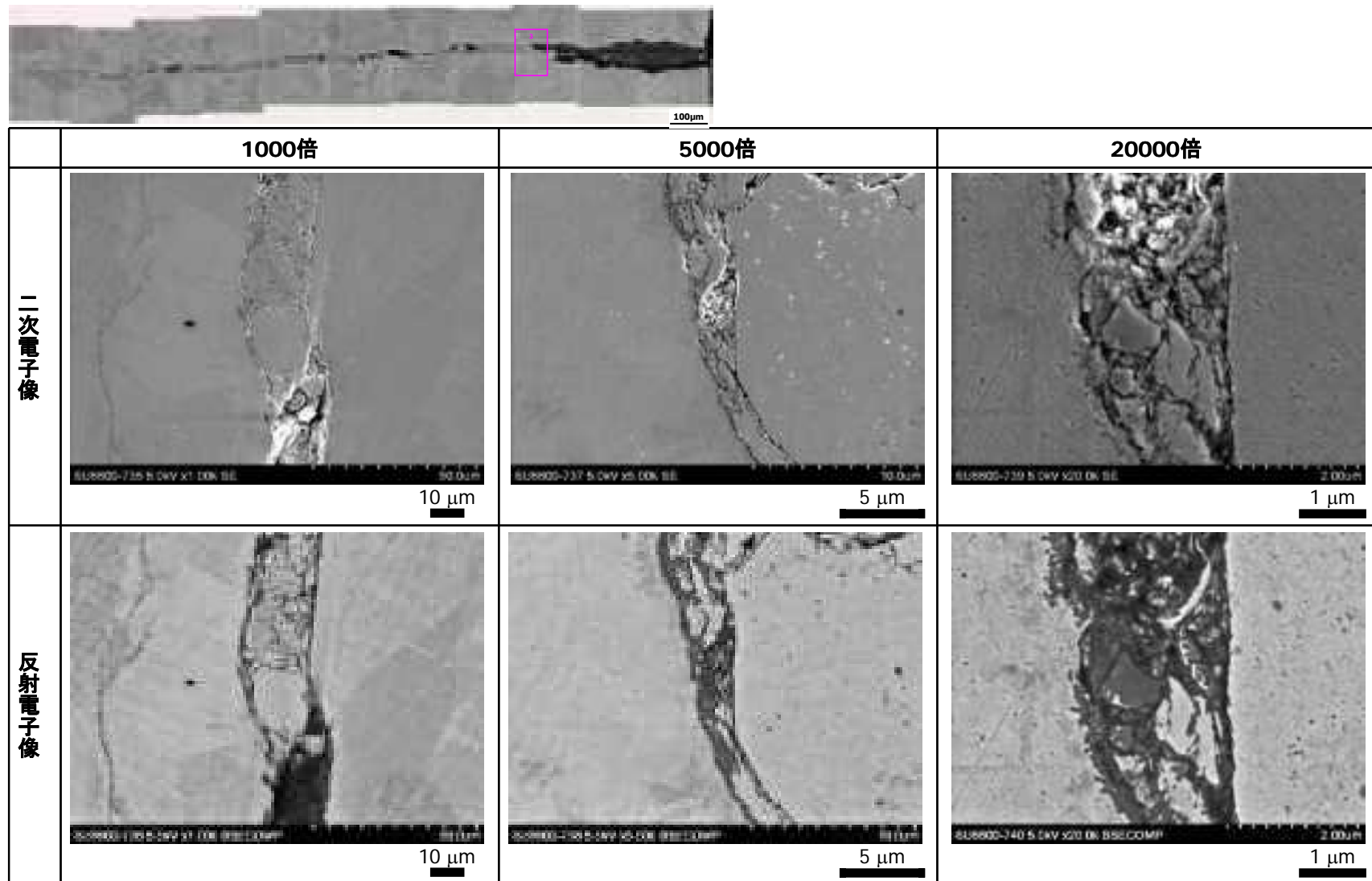


図 5.2.1-13 (5) CT 試験片(6TLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 3 き裂長さ中間位置

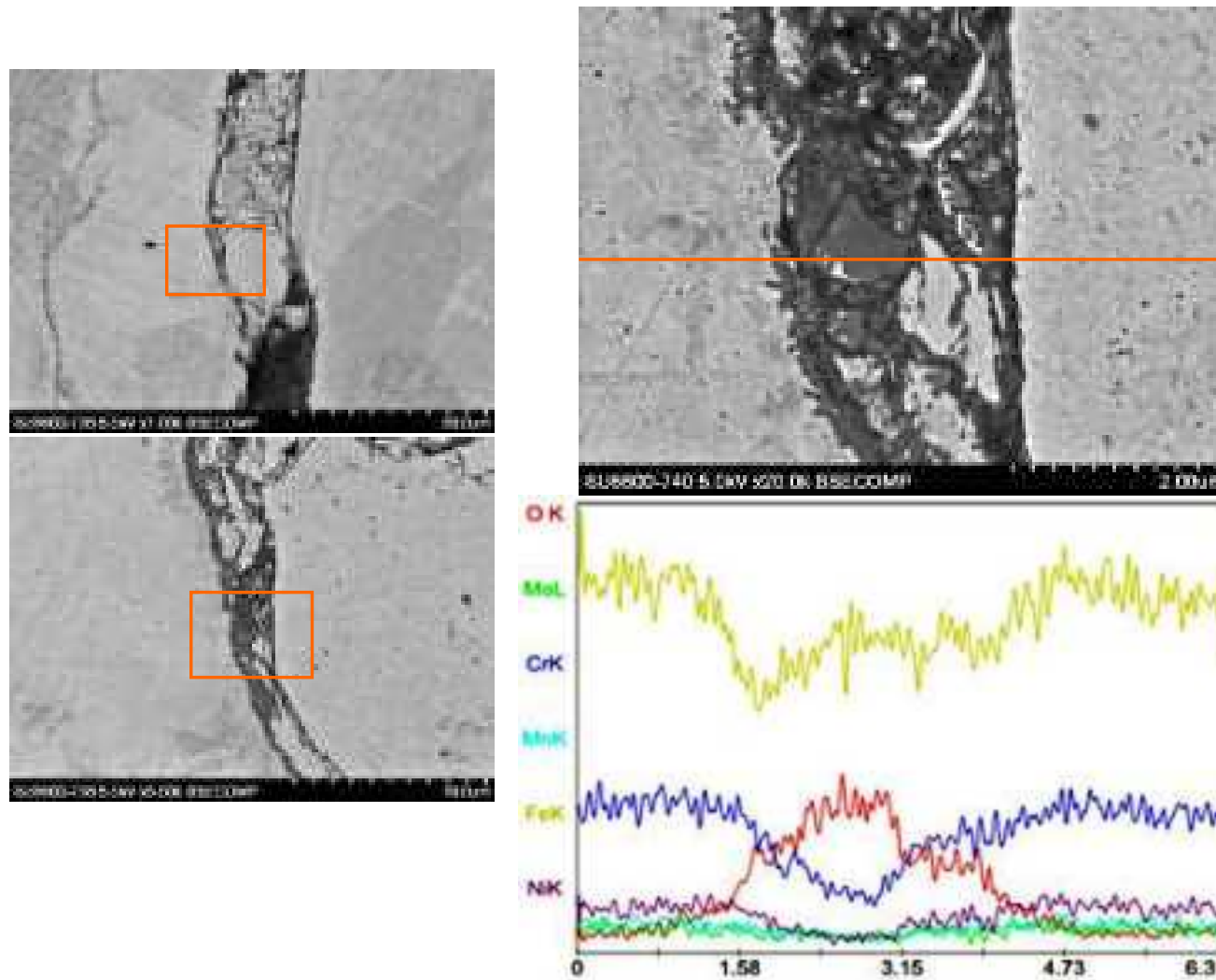


図 5.2.1-13 (6) CT 試験片(6TLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 3 き裂長さ中間位置 EDX 線分析
(観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

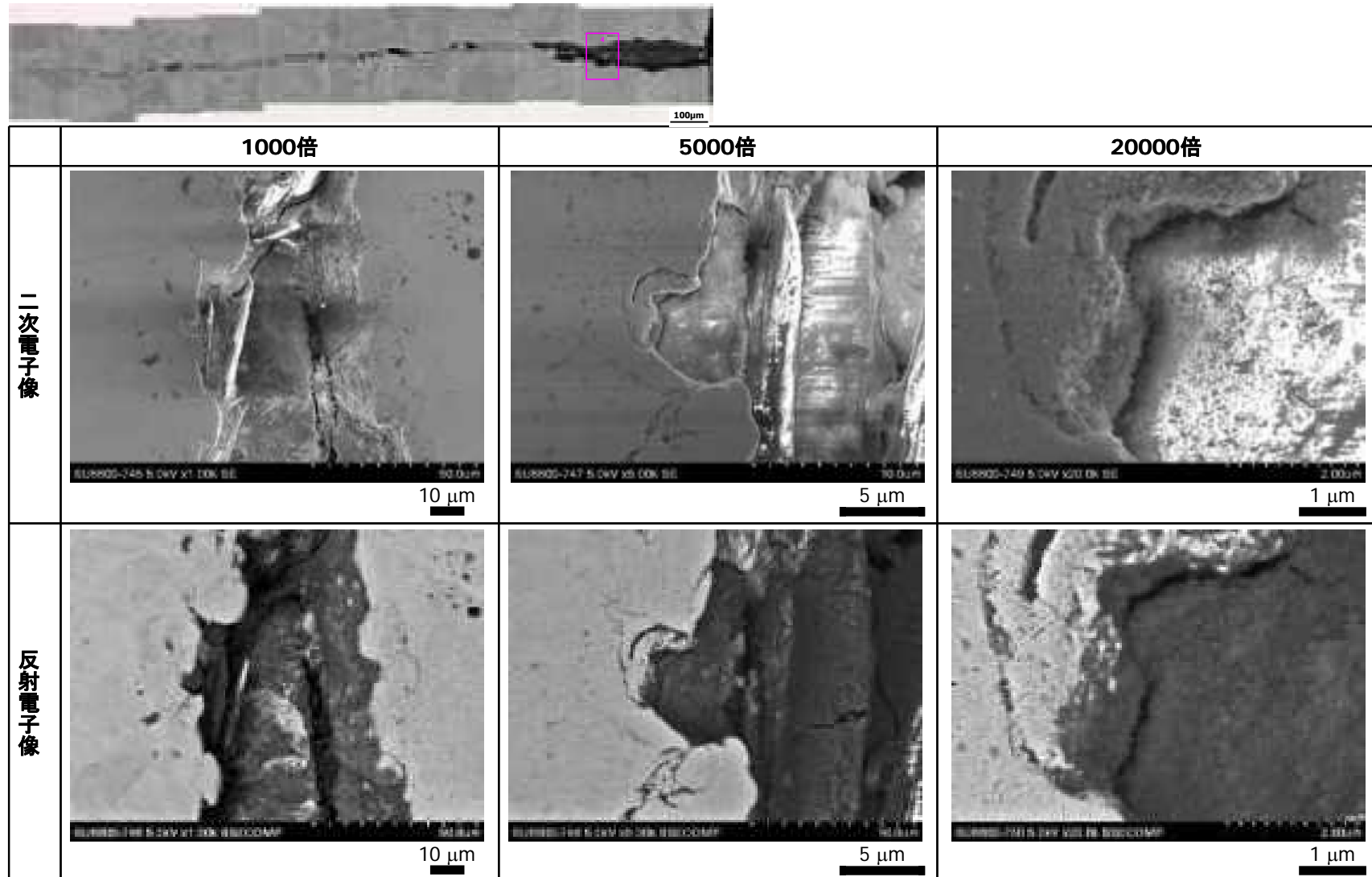


図 5.2.1-13 (7) CT 試験片(6TLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍

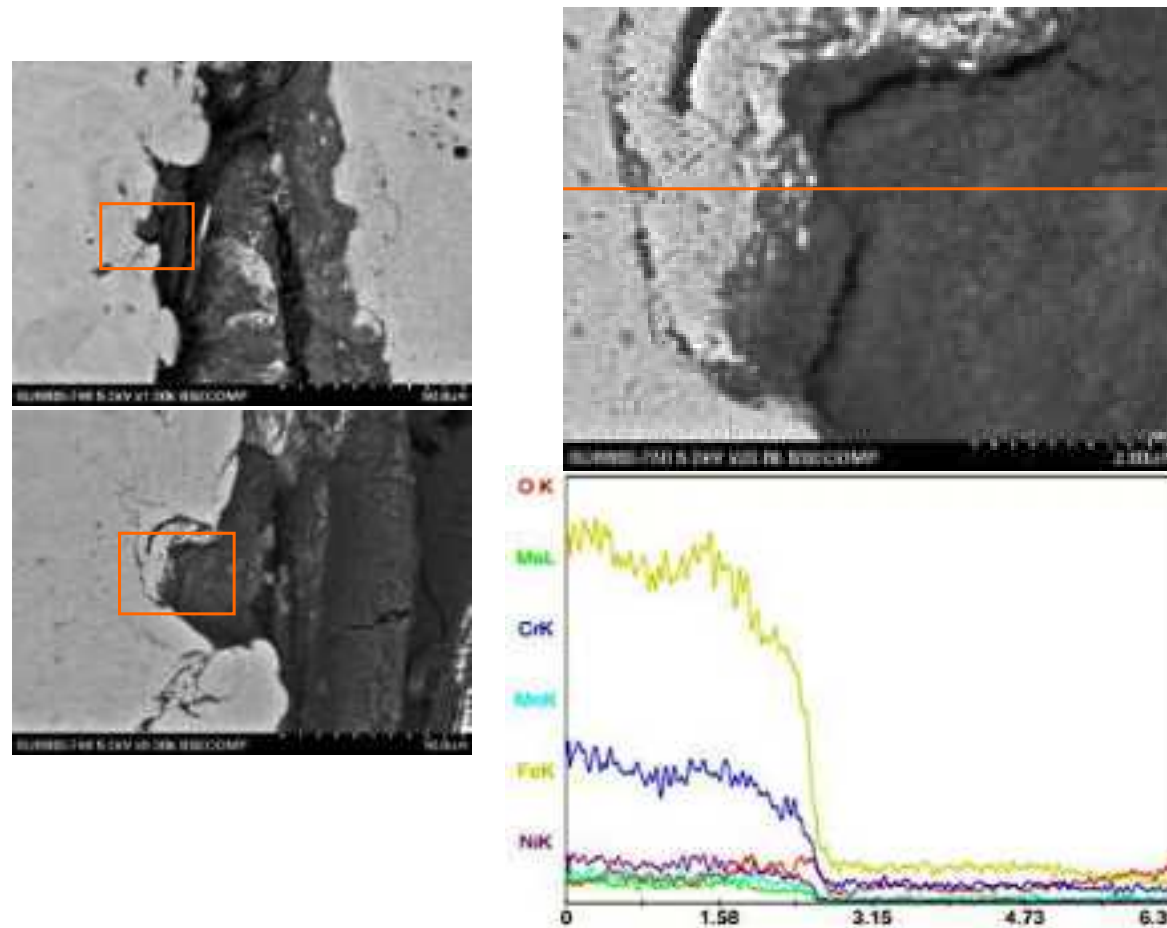


図 5.2.1-13 (8) CT 試験片(6TLA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍 EDX 線分析
 (観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)



(1)板厚中央



(2)サイドグループ脇

図 5.2.1-14 CT 試験片(6TSA)のき裂断面 SEM 観察結果及び拡大観察位置(視野 1~4)

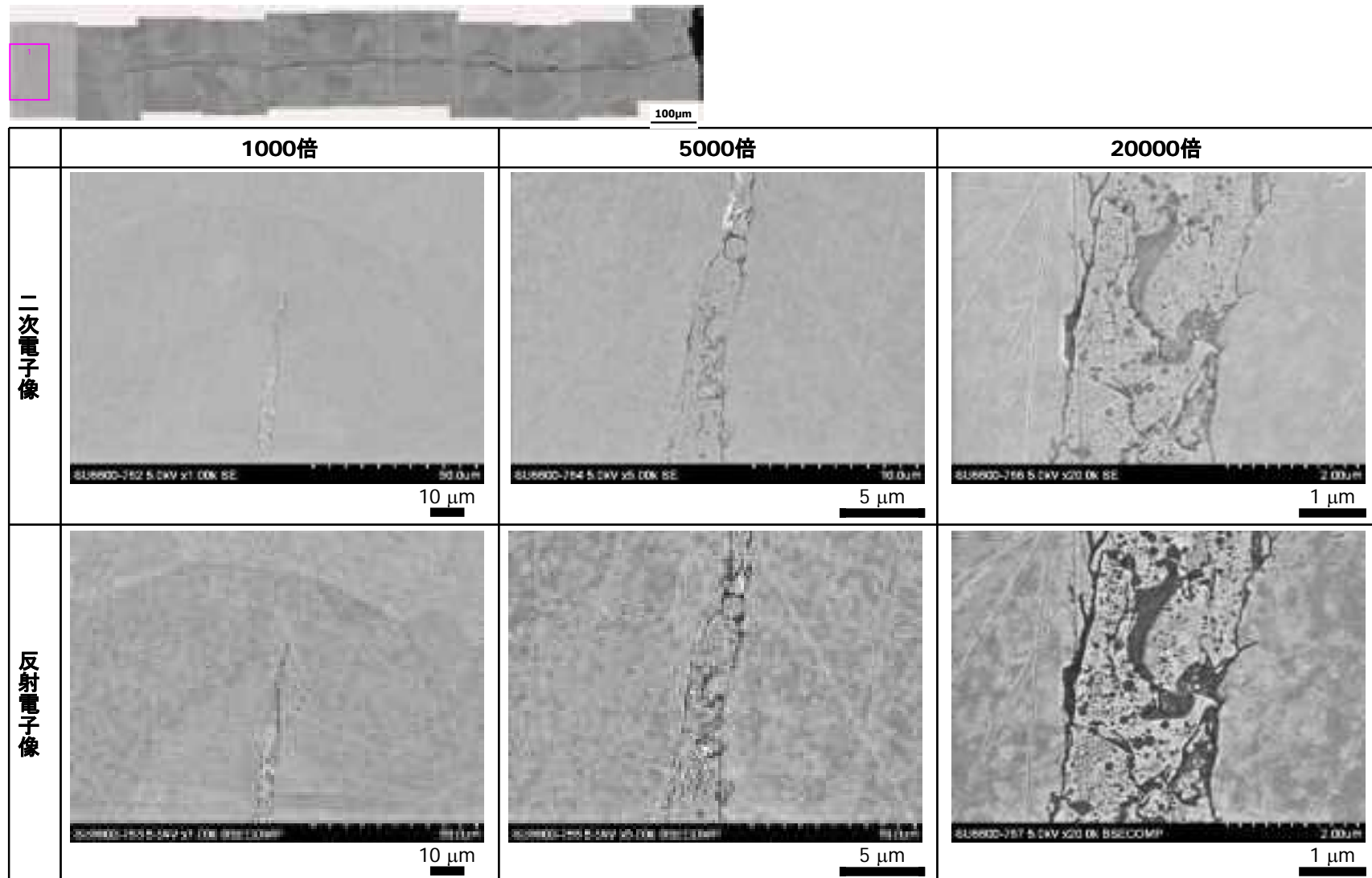


図 5.2.1-15(1) CT 試験片(6TSA)板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端

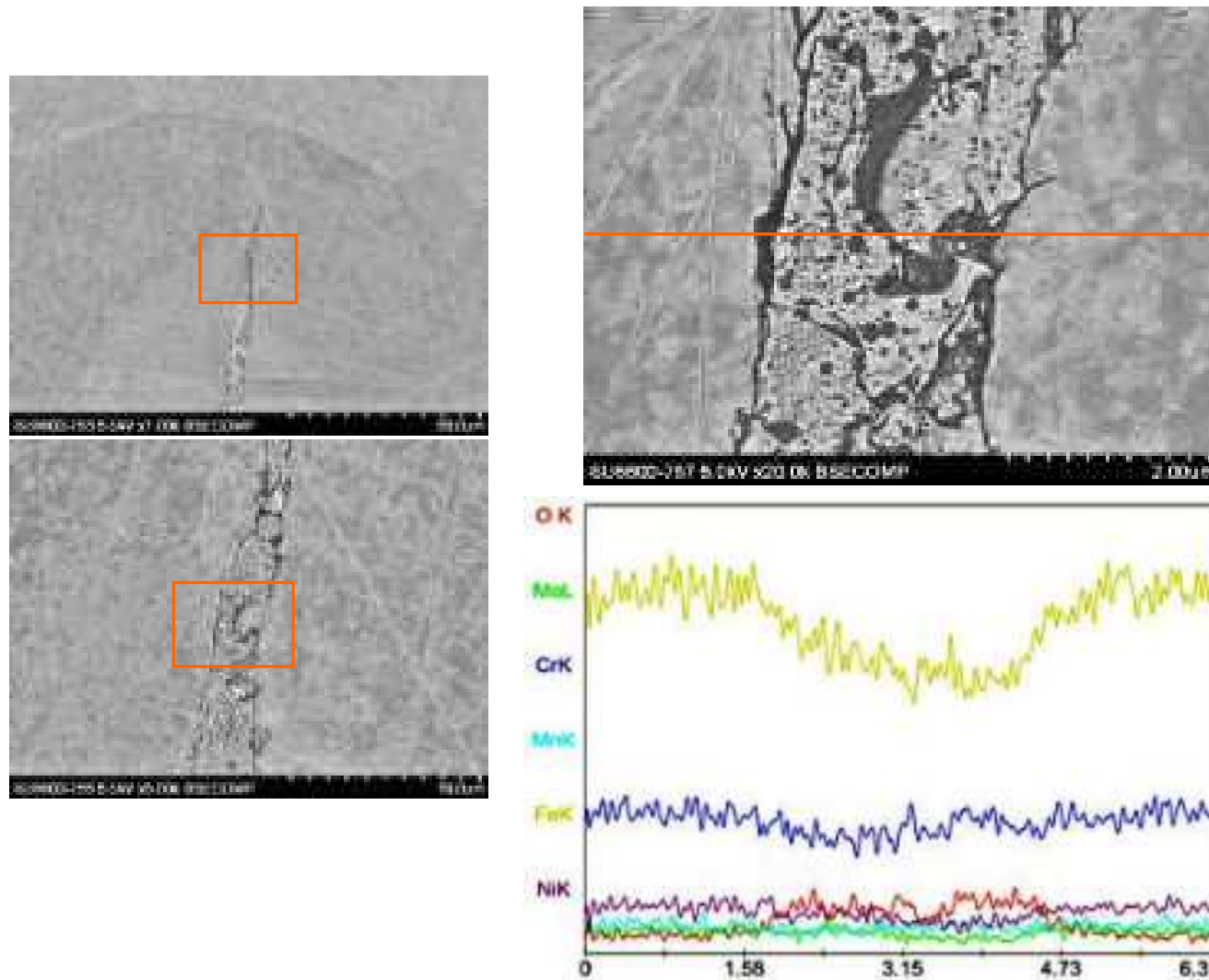


図 5.2.1-15 (2) CT 試験片(6TSA)板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端 EDX 線分析
(観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

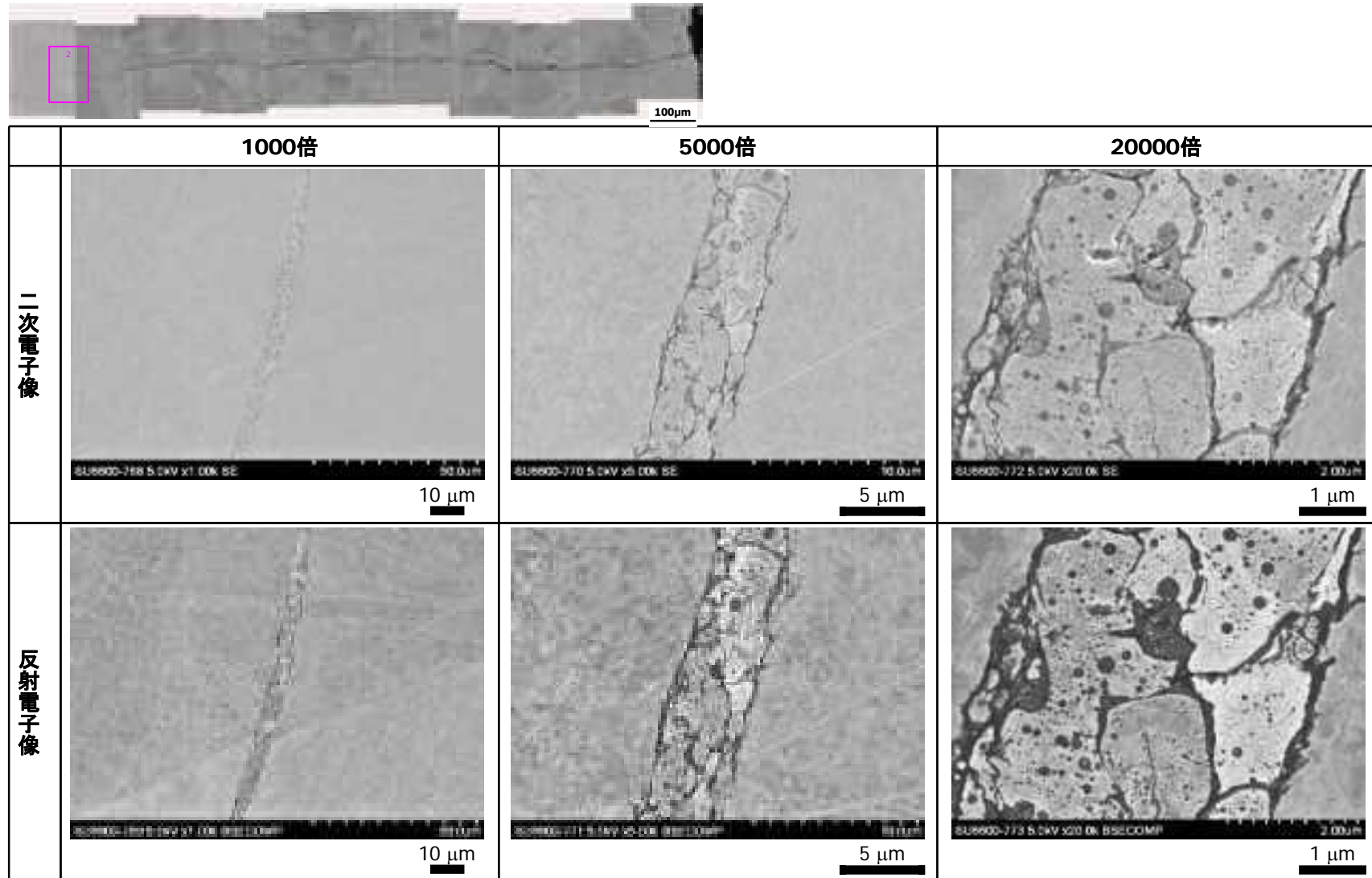


図 5.2.1-15 (3) CT 試験片(6TSA)板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 2 き裂先端近傍

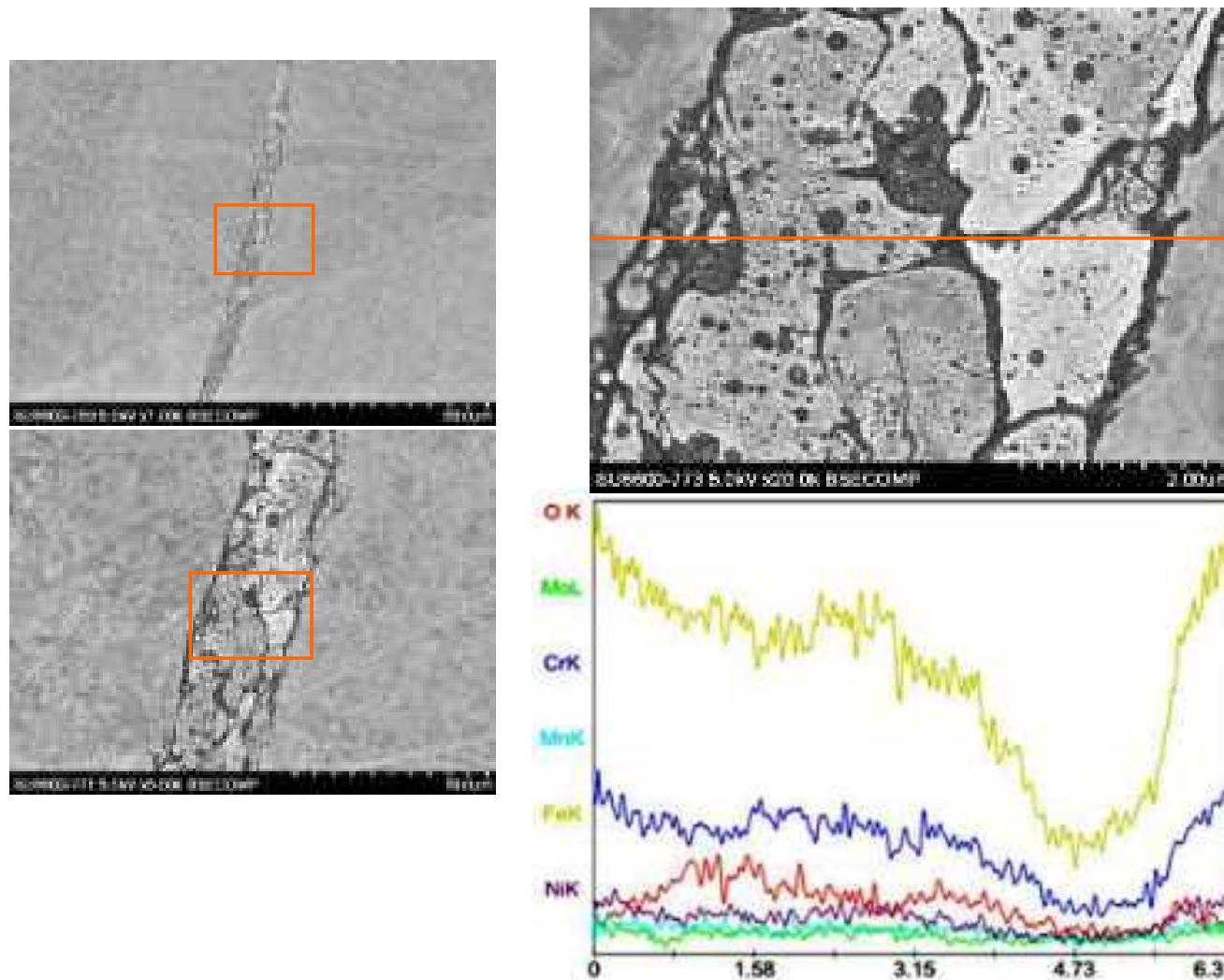


図 5.2.1-15 (4) CT 試験片(6TSA)板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 2 き裂先端近傍 EDX 線分析
(観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

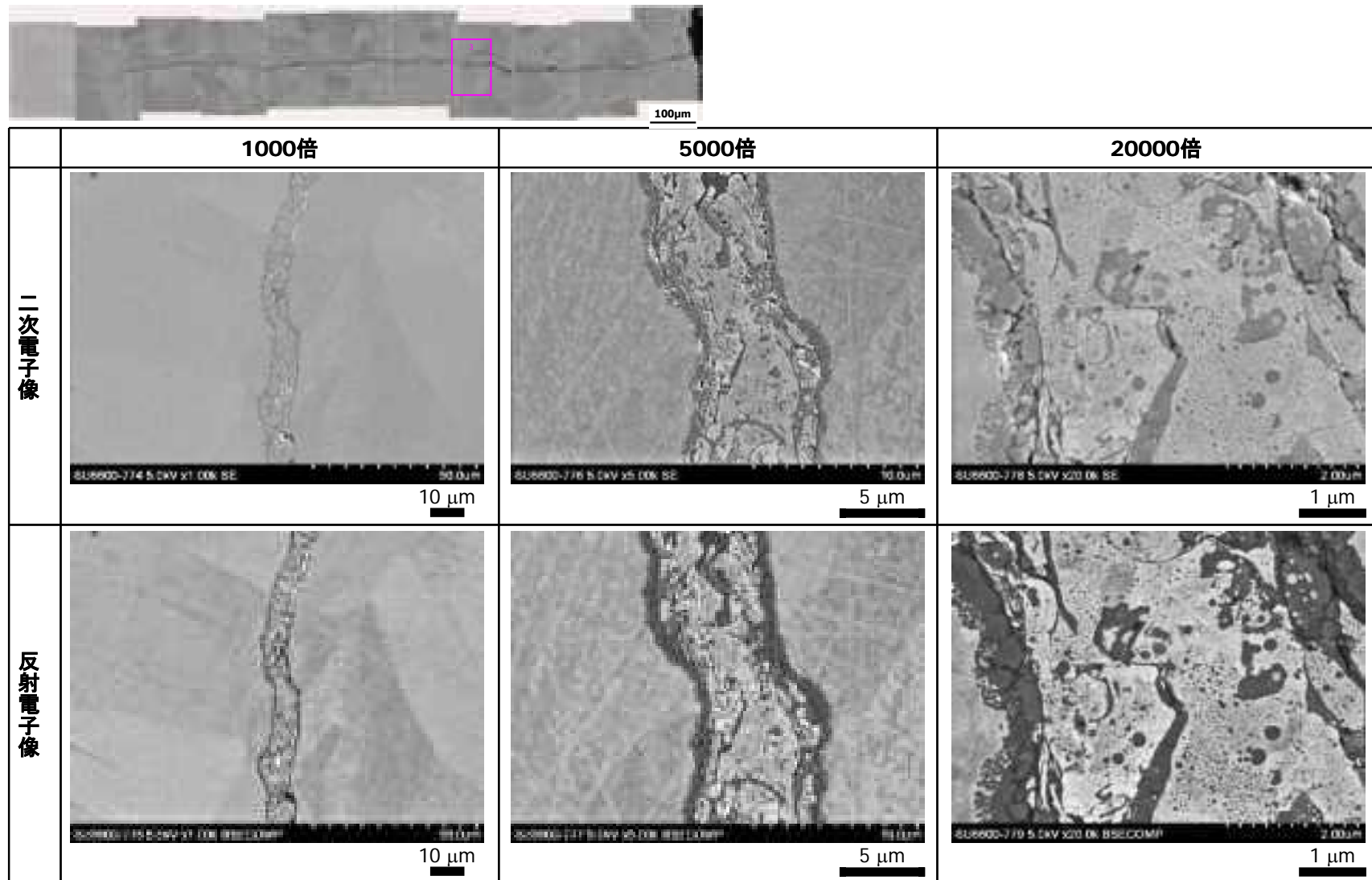


図 5.2.1-15 (5) CT 試験片(6TSA) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 3 き裂長さ中間位置

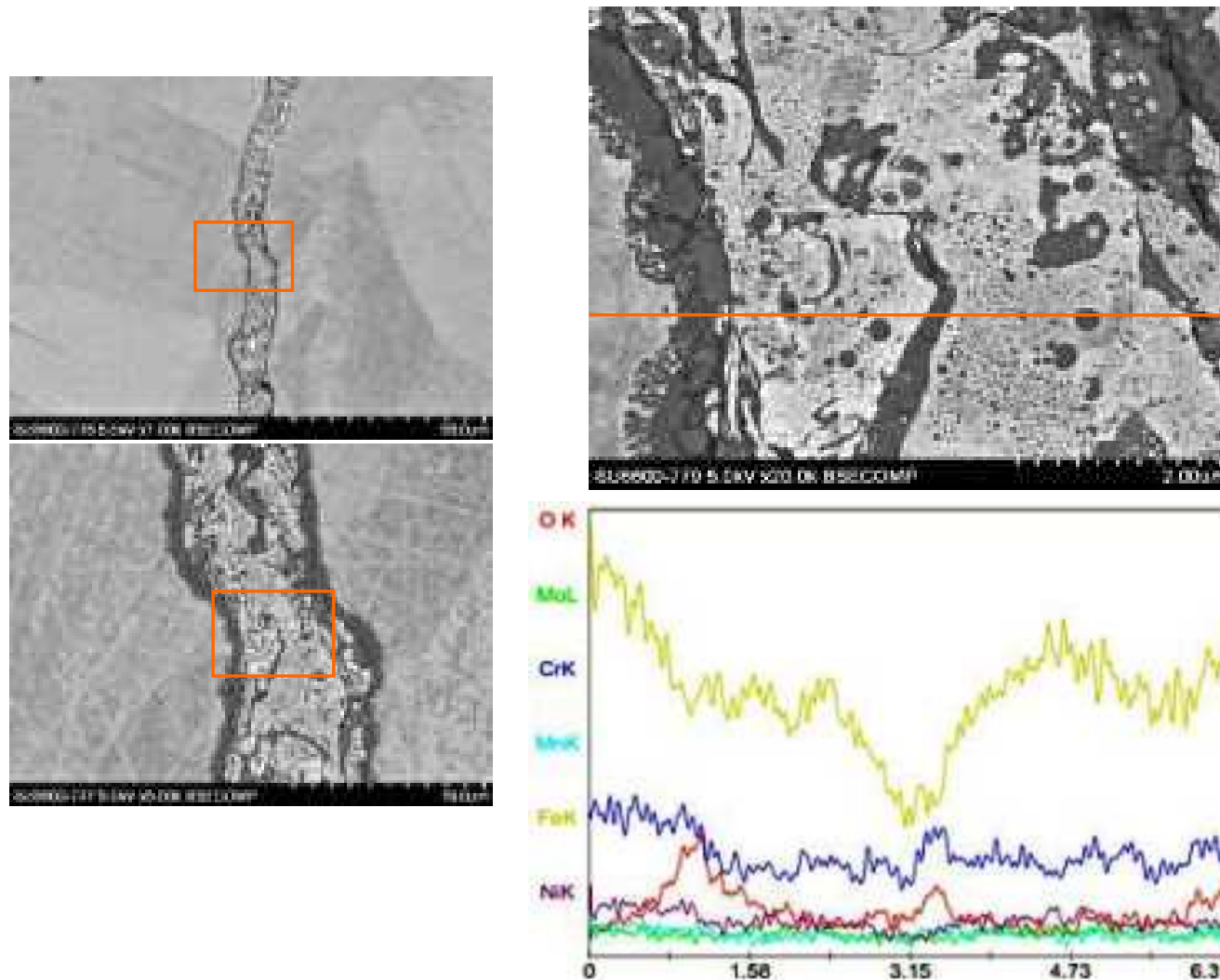


図 5.2.1-15 (6) CT 試験片(6TSA) 板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 3 き裂長さ中間位置 EDX 線分析
(観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

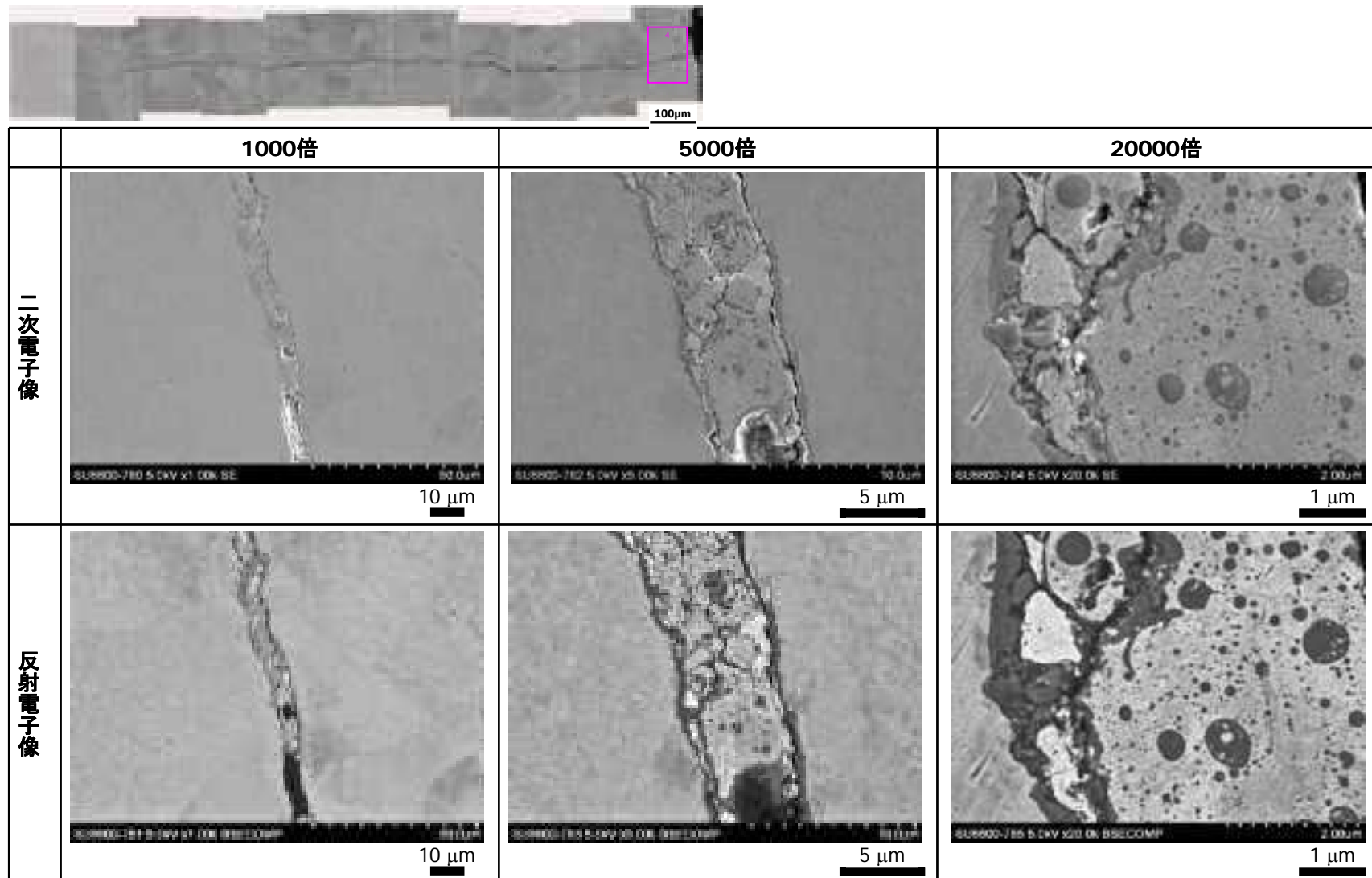


図 5.2.1-15 (7) CT 試験片(6TSA)板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍

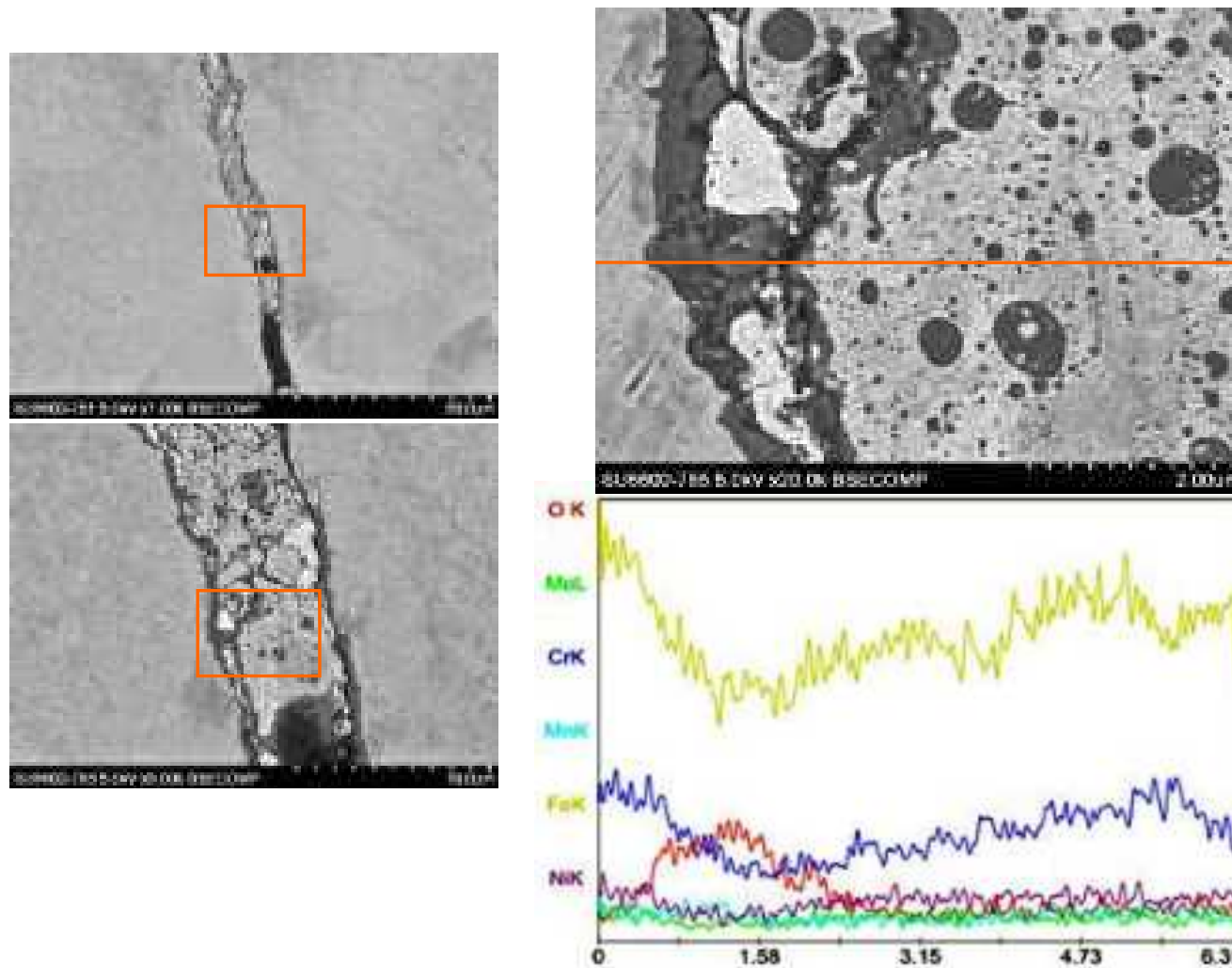


図 5.2.1-15 (8) CT 試験片(6TSA)板厚中央のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍 EDX 線分析
(観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

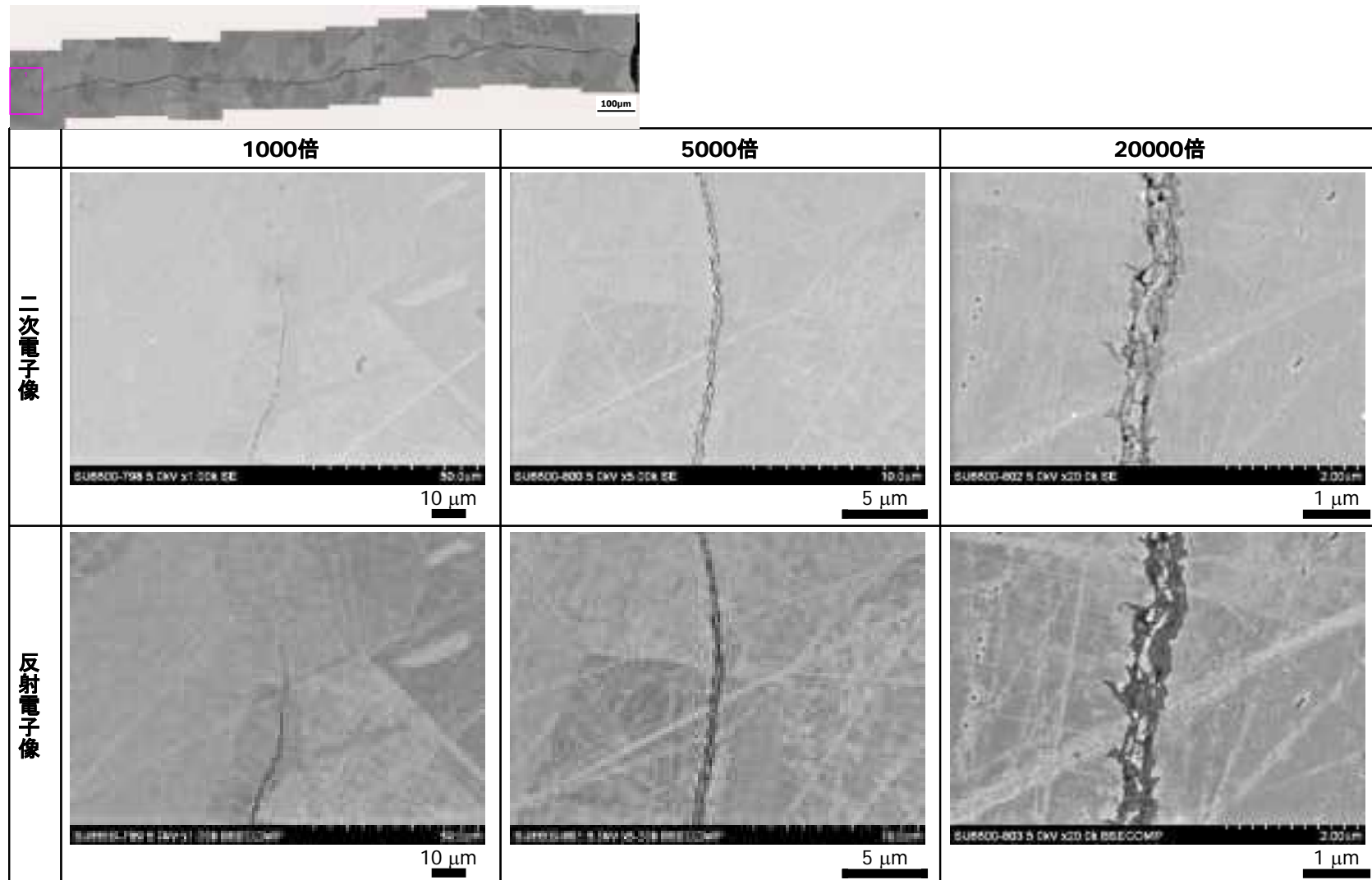


図 5.2.1-16(1) CT 試験片(6TSA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端)

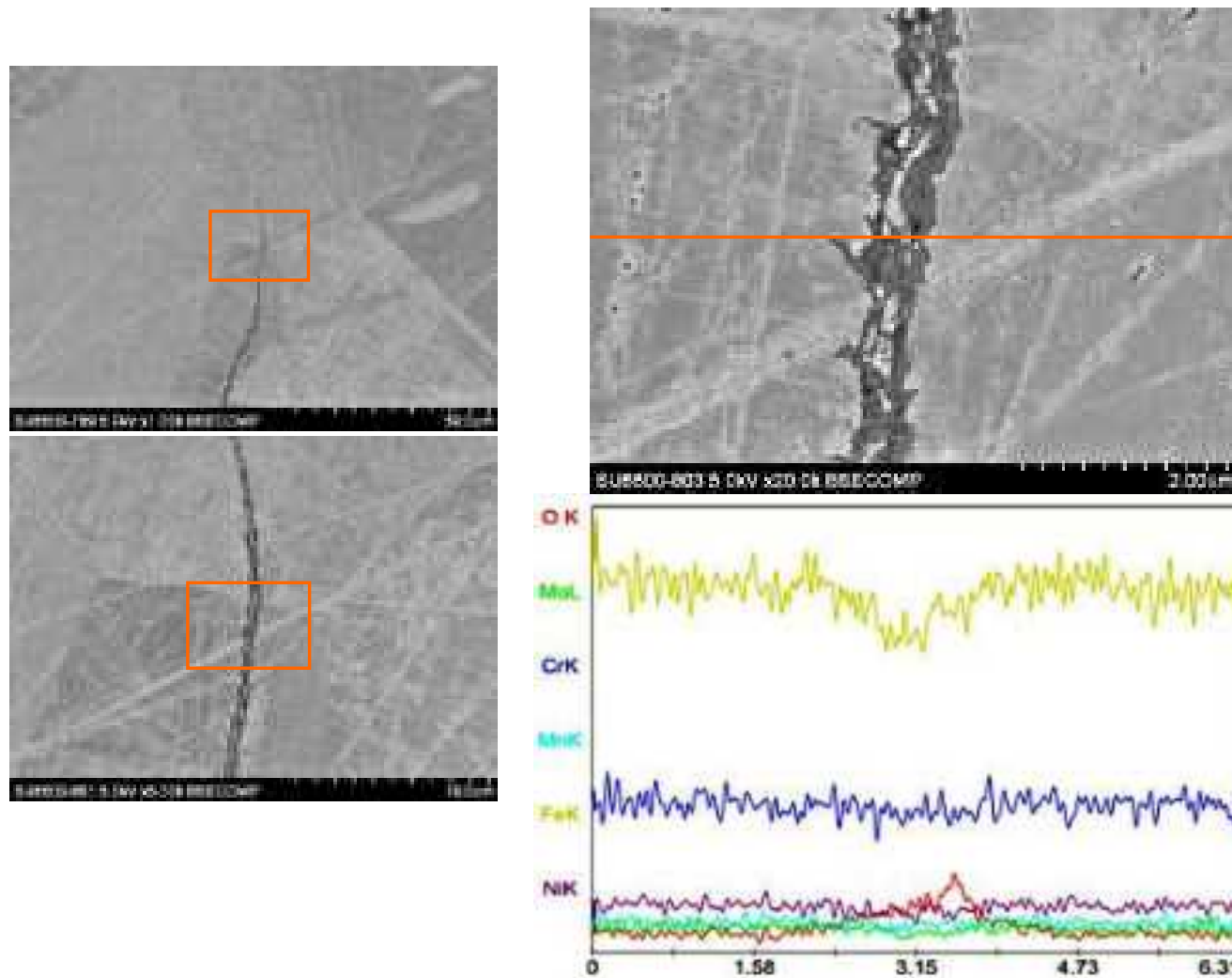


図 5.2.1-16 (2) CT 試験片(6TSA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 1 き裂先端) EDX 線分析
(観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

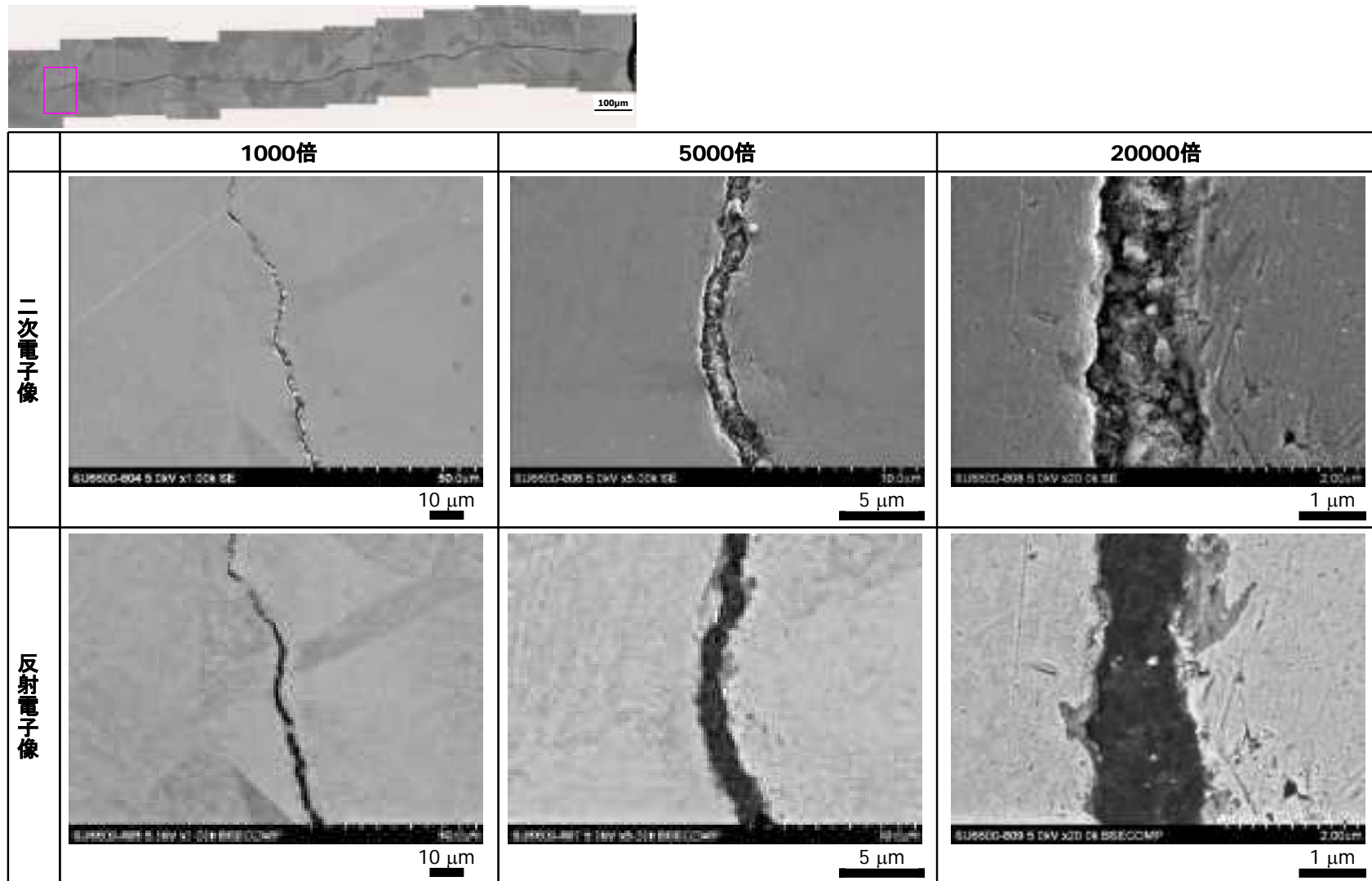


図 5.2.1-16 (3) CT 試験片(6TSA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果:観察位置観察位置:視野 2 き裂先端近傍

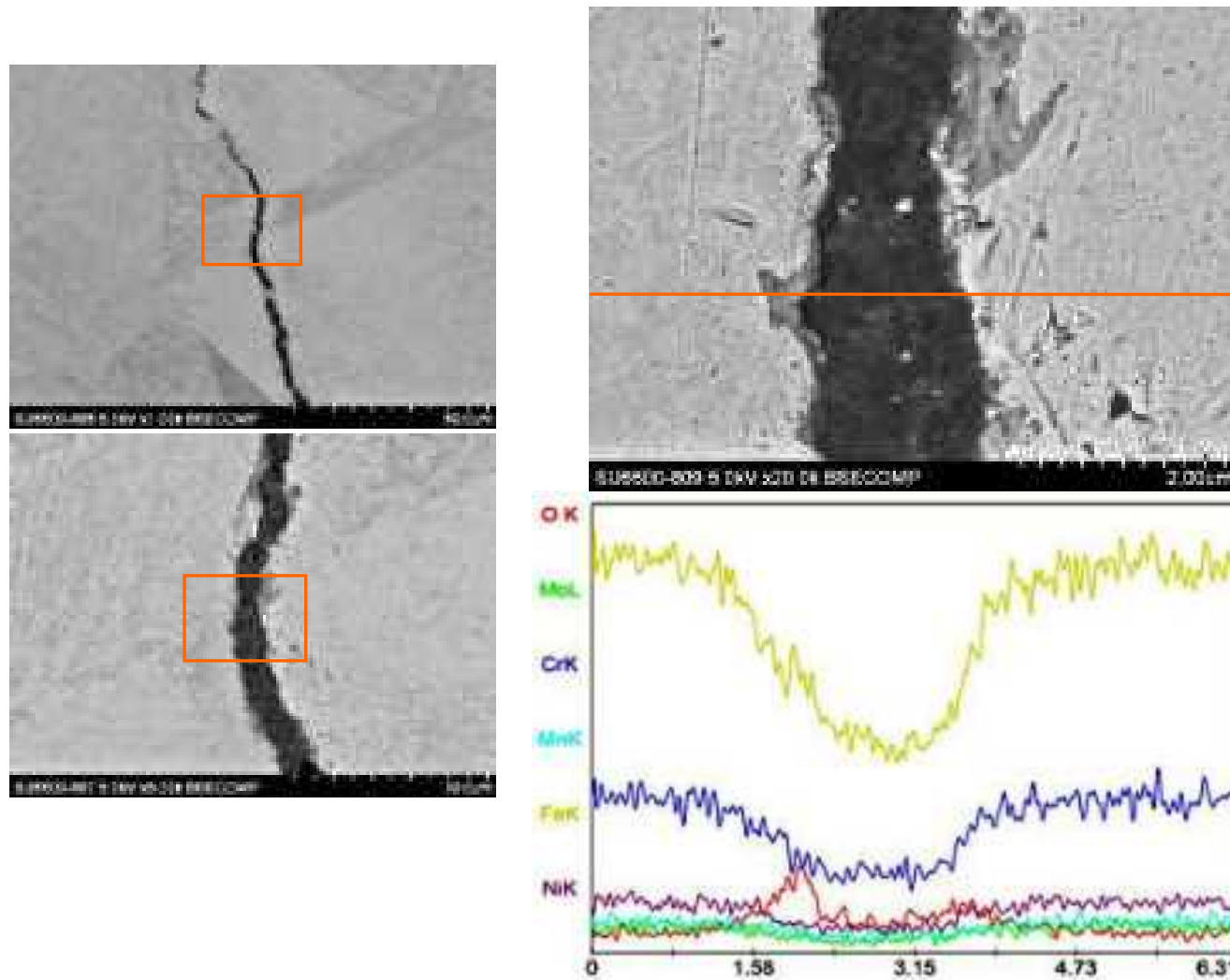


図 5.2.1-16 (4) CT 試験片(6TSA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果:観察位置観察位置:視野 2 き裂先端近傍 EDX 線分析
(観察箇所:左図上下の四角部分 線分析箇所:右上反射電子像のオレンジ色の線)

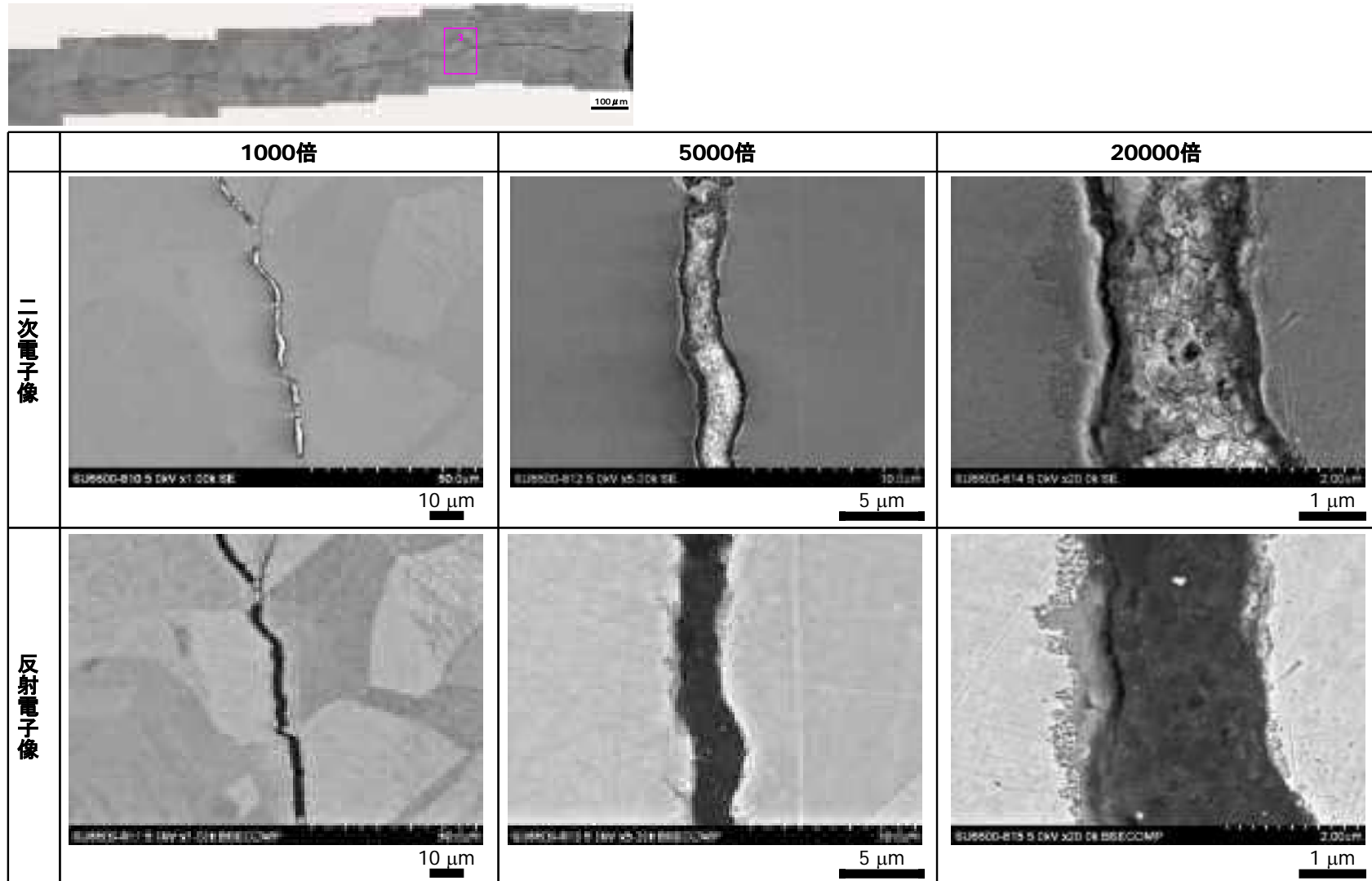


図 5.2.1-16 (5) CT 試験片(6TSA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果:観察位置観察位置:視野 3 き裂長さ中間位置

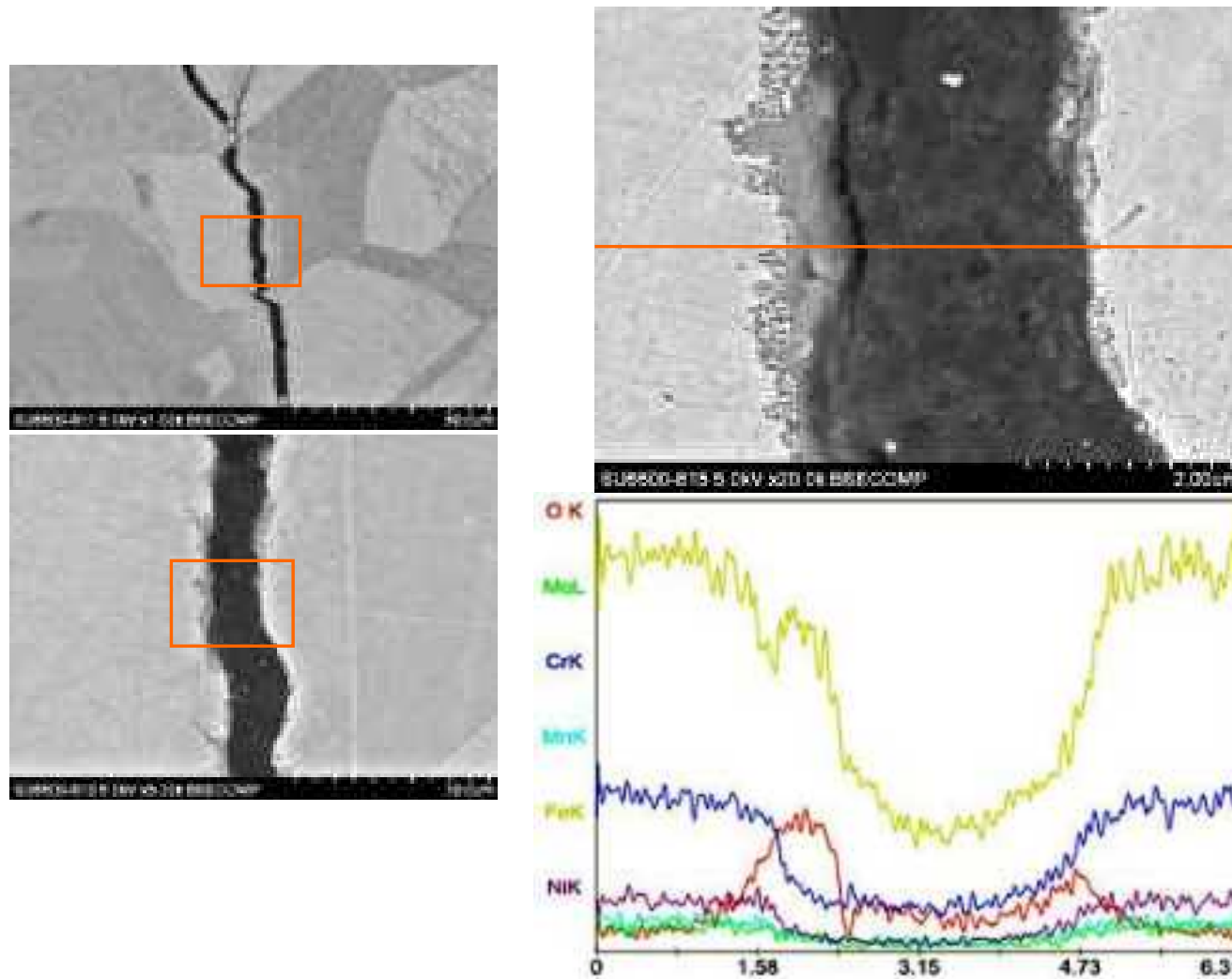


図 5.2.1-16 (6) CT 試験片(6TSA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果:観察位置観察位置:視野 3 き裂長さ中間位置 EDX 線分析
(観察箇所:左図上下の四角部分 線分析箇所:右上反射電子像のオレンジ色の線)

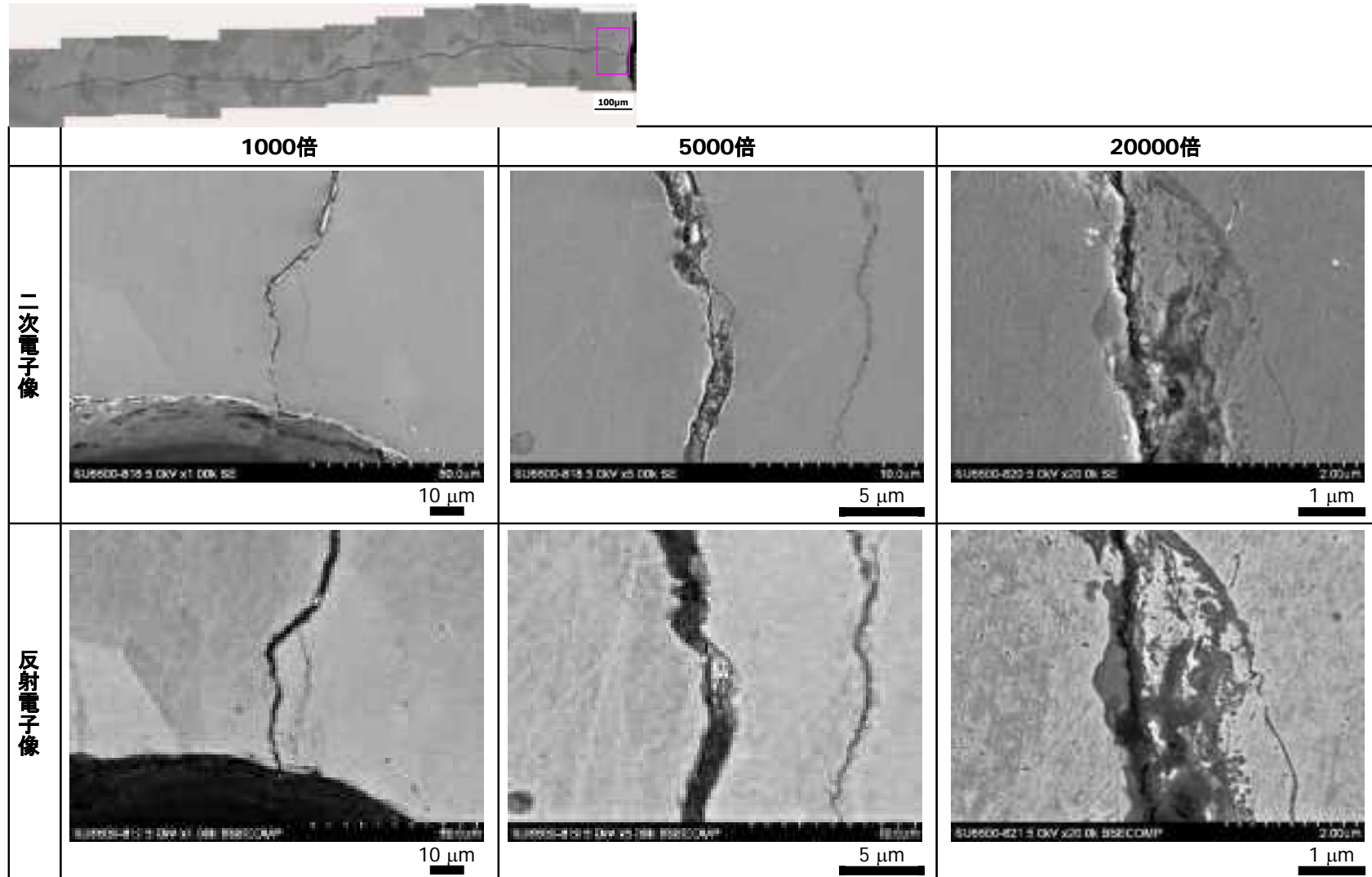


図 5.2.1-16 (7) CT 試験片(6TSA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍

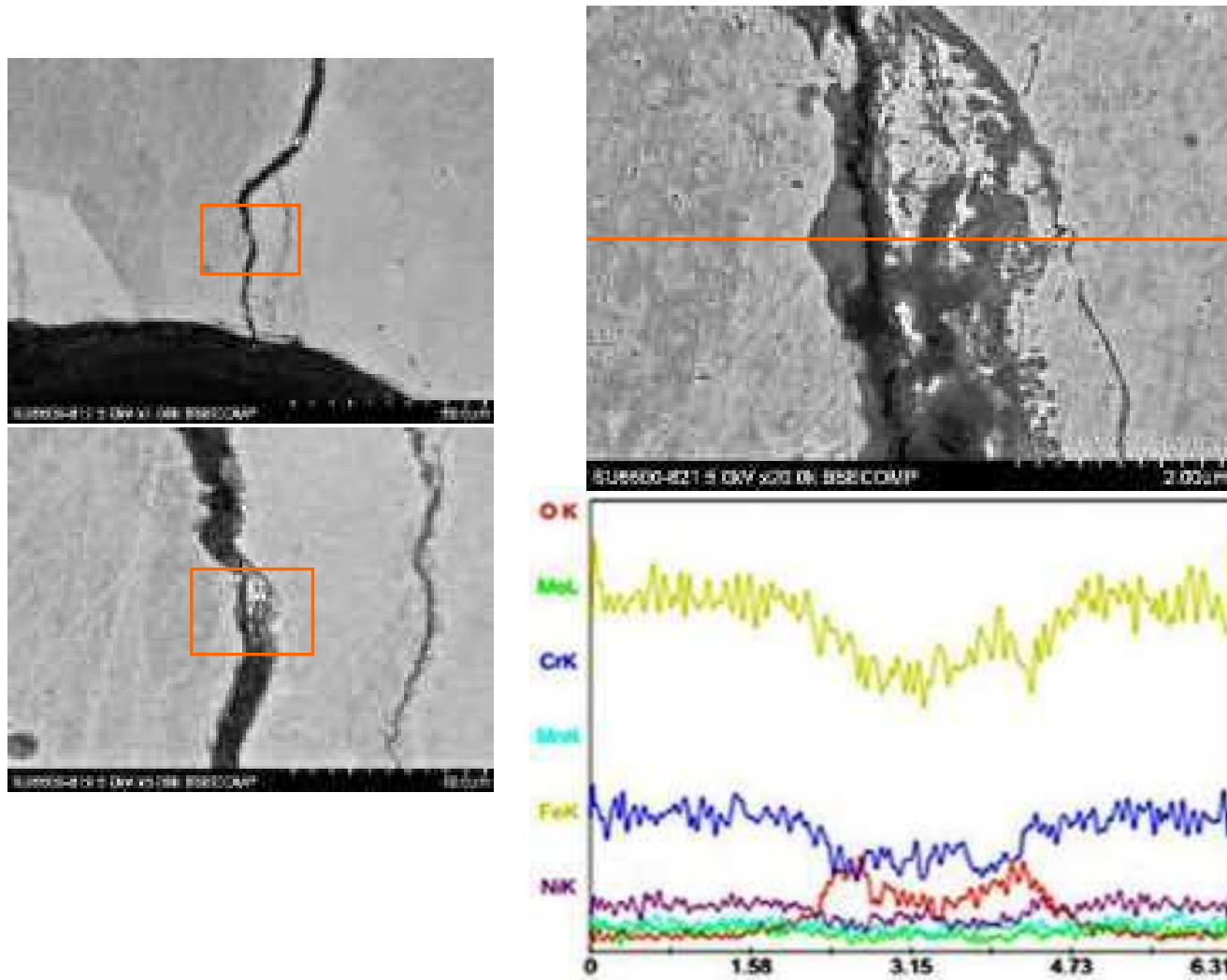


図 5.2.1-16 (8) CT 試験片(6TSA)サイドグループ脇のき裂断面 SEM 観察結果 観察位置：視野 4 機械加工部近傍 EDX 線分析
(観察箇所：左図上下の四角部分 線分析箇所：右上反射電子像のオレンジ色の線)

e. CT試験片のき裂表面に形成した酸化皮膜のTEM観察

(i) 荷重負荷した溶体化SUS316L材0.5T-CT試験片の疲労き裂内酸化皮膜観察

荷重を 3.0 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 CT 試験片(6TLA)を破面開放し、き裂先端近傍とサイドグループ脇の破面から FIB 法で TEM 観察試験片を採取し、酸化皮膜の深さ方向(断面)のマイクロ組織観察を行った。図 5.2.1-17 は、(a)き裂先端近傍と、(b)サイドグループ脇から TEM 観察試験片を採取した位置を示す。

板厚中央のき裂先端部(図 5.2.1-17(a))の観察結果を図 5.2.1-18 に、また図 5.2.1-18 の領域①を詳細に観察した結果を図 5.2.1-19 に示す。図 5.2.1-19 に示すように、制限視野回折と STEM モードでの Z コントラスト像より、最下層のステンレス鋼の上に微結晶状態に近い組織スピネル構造の組織が形成し、表層に近い位置には比較的結晶性の高いブロック状の組織の 3 層からなることが判った。なお Z コントラスト像においては、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によって濃淡が相違することから、それぞれの層を EDX で分析した。その結果ステンレス鋼母相に近い内層は Cr リッチで Fe を含む酸化物(FeCr_2O_4 等)、表層に近いブロック状組織(外層)は主に Fe_3O_4 であることが判った。

一方サイドグループ脇から採取した試験片の TEM 観察結果を図 5.2.1-20～図 5.2.1-21 に示す。最下層のステンレス鋼の上に、Cr、Ni を含むスピネル構造の微細組織から成る内層と、外層(Fe_3O_4)の形成が認められた。前述した板厚中央近傍のき裂先端での酸化皮膜と比較すると、内層はやや厚くより成長していたことが判る。またサイドグループ脇の内層は Cr の濃度が減少しており、酸化が進むことによって皮膜を構成する元素が変化することが示唆された。

(ii) 静置した溶体化SUS316L材0.5T-CT試験片の疲労き裂内酸化皮膜観察

荷重を負荷せずに温度 290°C、溶存酸素 2ppm の高温水に 224 時間浸漬した CT 試験片(6TSA)についても、同様にき裂先端近傍の酸化皮膜の深さ方向(断面)のマイクロ組織観察を行った。図 5.2.1-22 は、(a)き裂先端近傍と、(b)サイドグループ脇から TEM 観察試験片を採取した位置を示す。

板厚中央のき裂先端部(図 5.2.1-22 (a))の観察結果を図 5.2.1-23 に、また図 5.2.1-23 の領域①を詳細に観察した結果を図 5.2.1-24 に示す。図 5.2.1-24 に示すように、制限視野回折と STEM モードでの Z コントラスト像より、最下層のステンレス鋼の上に比較的結晶性の高いブロック状の組織の形成が認められたが、荷重負荷条件下で観察されたような微結晶状態に近い組織スピネル構造の内層は認められなかった。一方 Z コントラスト像において母相とブロック組織の間に濃淡がやや異なる層の形成が認められた。EDX 分析結果(原子%)から、この層は母相と化学成分が類似した化学成分であることが判った。このことより、この試験片から採取した試験片板厚中央のき裂先端では、荷重負荷が無かつ

たため高温水から十分に酸素が供給されず、スピネル状の酸化皮膜まで成長していなかったものと推察される。

一方サイドグループ脇から採取した試験片の TEM 観察結果を図 5.2.1-25～図 5.2.1-26 に示す。最下層のステンレス鋼の上に、Cr、Ni を含むスピネル構造の微細組織から成る内層と、外層(Fe_3O_4)の形成が認められた。この結果は、荷重負荷条件で高温水に浸漬したケースと同様であった。

以上のことより、0.5T-CT 試験片に荷重負荷することによってき裂の開口量が相違してその結果き裂先端の環境に影響すること、特に負荷荷重が小さくき裂の開口量が小さい時ほどその影響は大きくなることが示唆された。すなわちこのことは、環境中のき裂進展速度評価の試験パラメータである荷重負荷は、き裂先端における応力因子として評価するだけでなく、き裂内の環境因子への影響と言った観点からも検討する必要があると考えられる。

なお CT 試験片 V6L5 のき裂先端近傍及びサイドグループ脇、CT 試験片 FTLB のき裂先端近傍の TEM 観察結果は添付資料 3 に掲載した。



図 5.2.1-17 CT 試験片(6TLA)の TEM 観察用試験片採取位置
 (a)板厚中央き裂先端 (b)サイドグループ脇

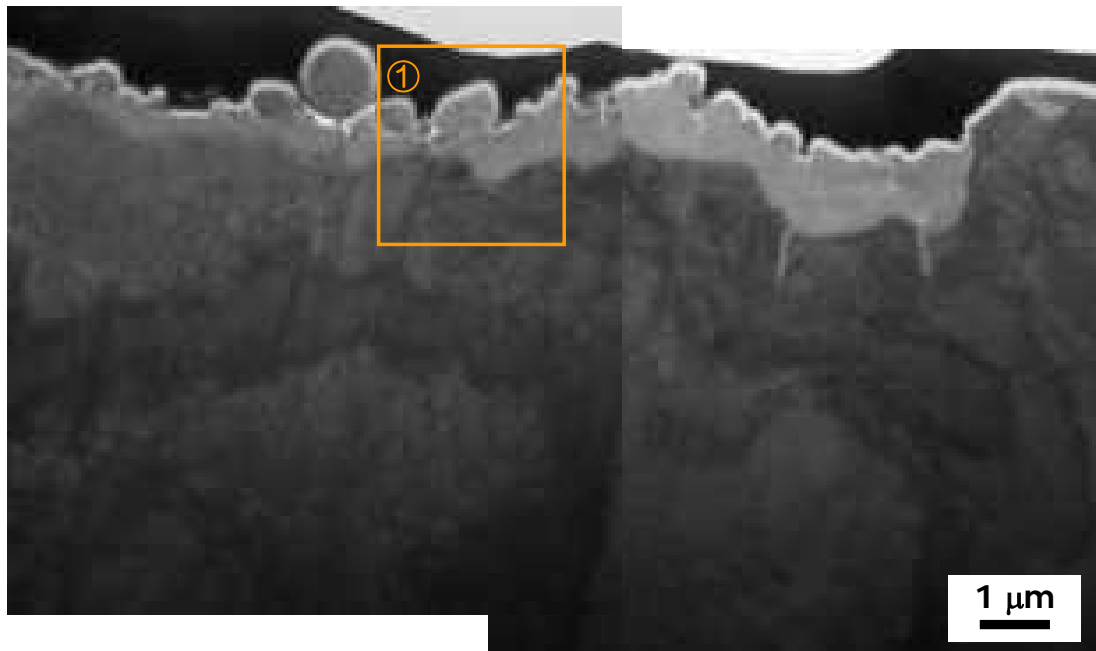
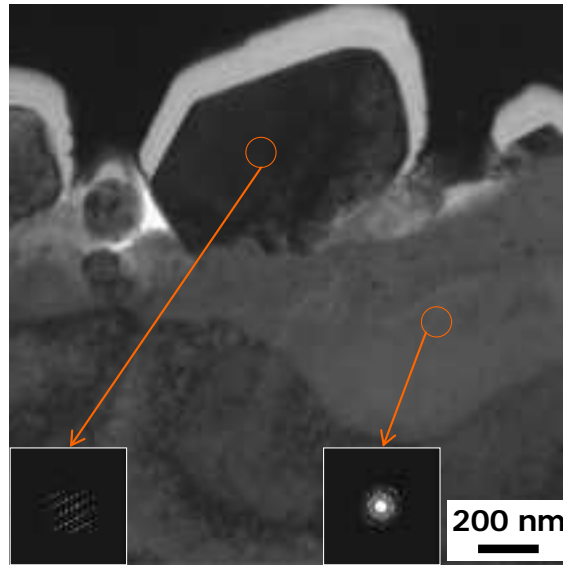
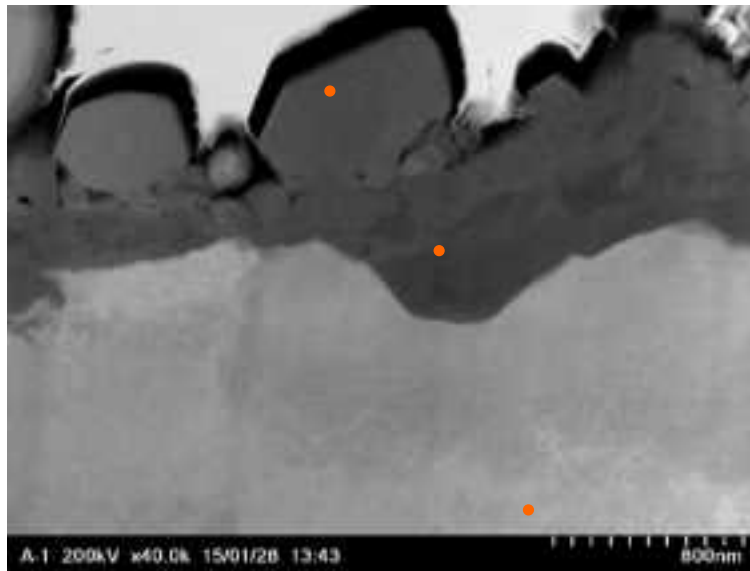


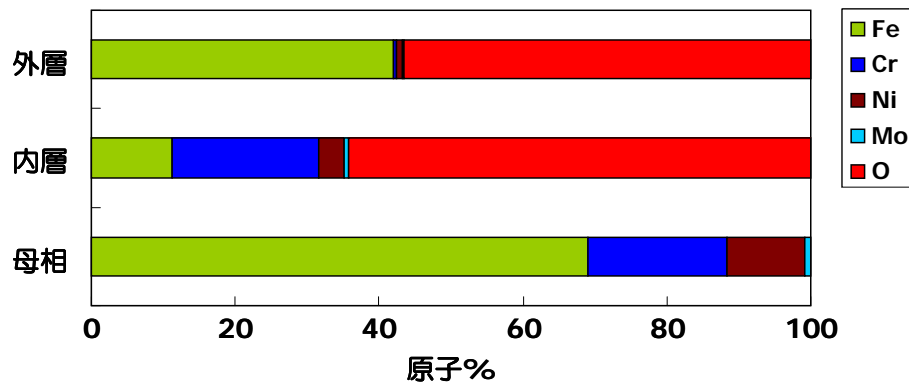
図 5.2.1-18 CT 試験片(6TLA)板厚中央き裂先端近傍(図 5.2.1-17(a)部)の
 酸化皮膜の断面 TEM 観察結果(明視野像)
 橙色枠：高倍率での詳細観察箇所



(1)領域①の拡大(明視野像)



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



(3)EDX 分析結果(原子%)

図 5.2.1-19 CT 試験片(6TLA)板厚中央き裂先端近傍の酸化皮膜構造の詳細観察結果

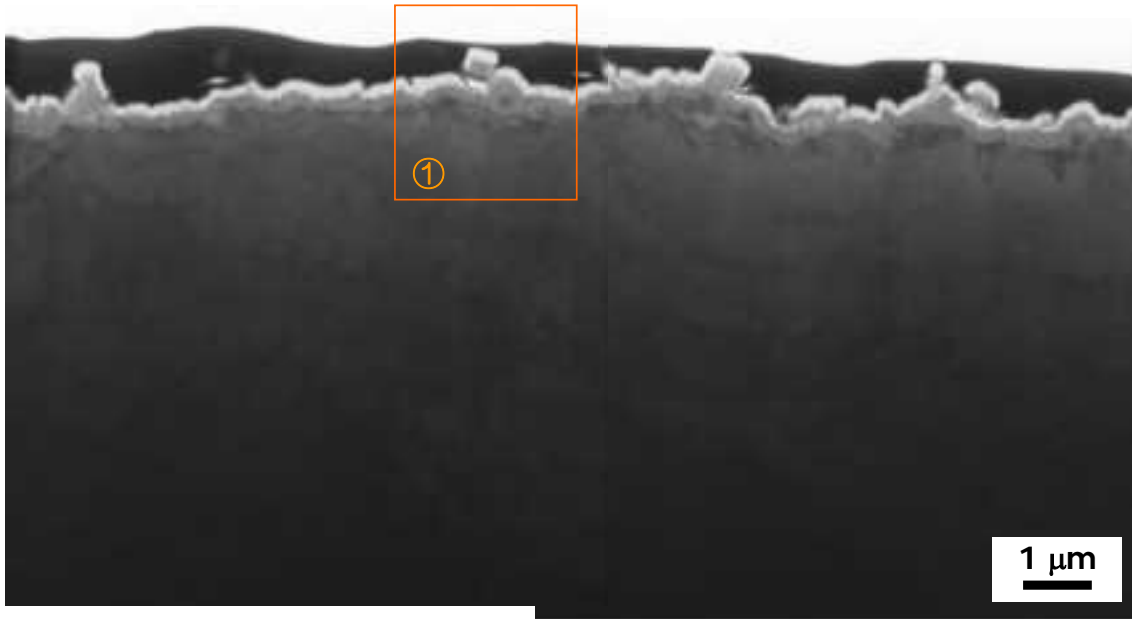
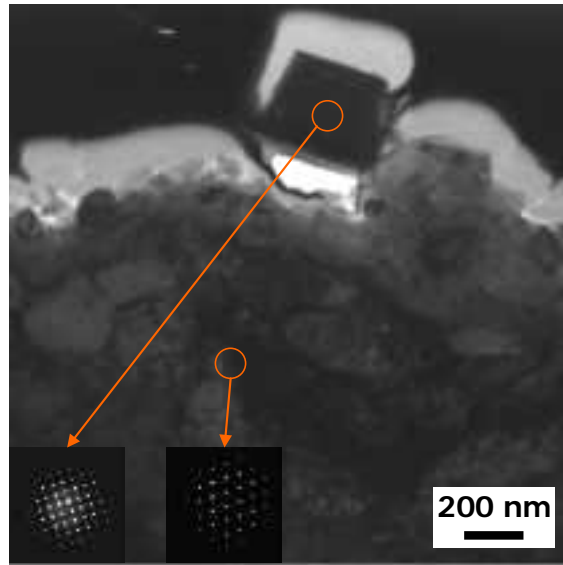
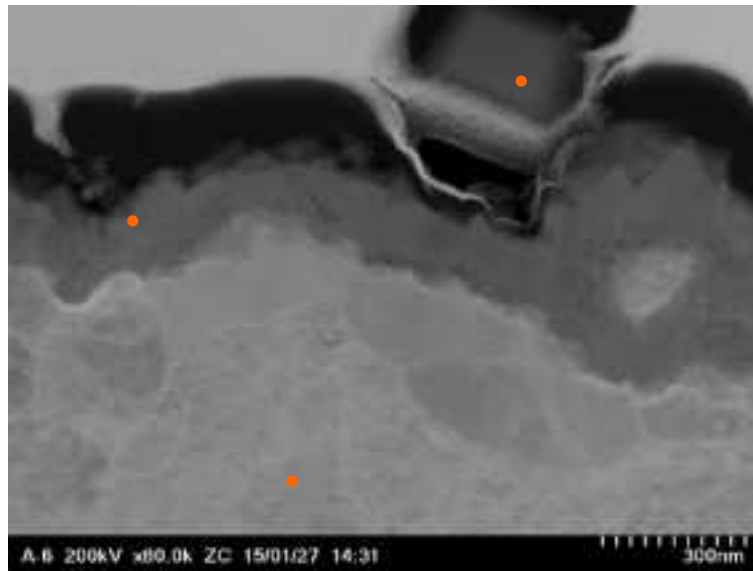


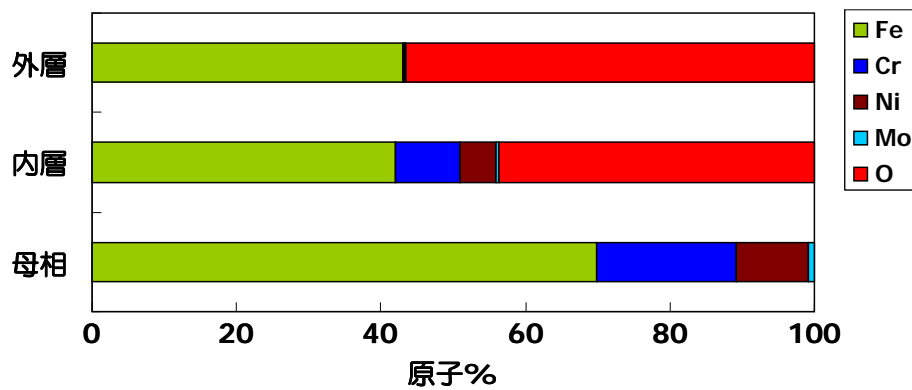
図 5.2.1-20 CT 試験片(6TLA)サイドグループ脇の(図 5.2.1-17(b)部)の
酸化皮膜の断面 TEM 観察結果(明視野像)
橙色枠：高倍率での詳細観察箇所



(1)領域①の拡大(明視野像)



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



(3)EDX 分析結果(原子%)

図 5.2.1-21 CT 試験片(6TLA)サイドグループ脇の酸化皮膜構造の詳細観察結果



図 5.2.1-22 CT 試験片(6TLS)の TEM 観察用試験片採取位置
 (a)板厚中央き裂先端 (b)サイドグループ脇

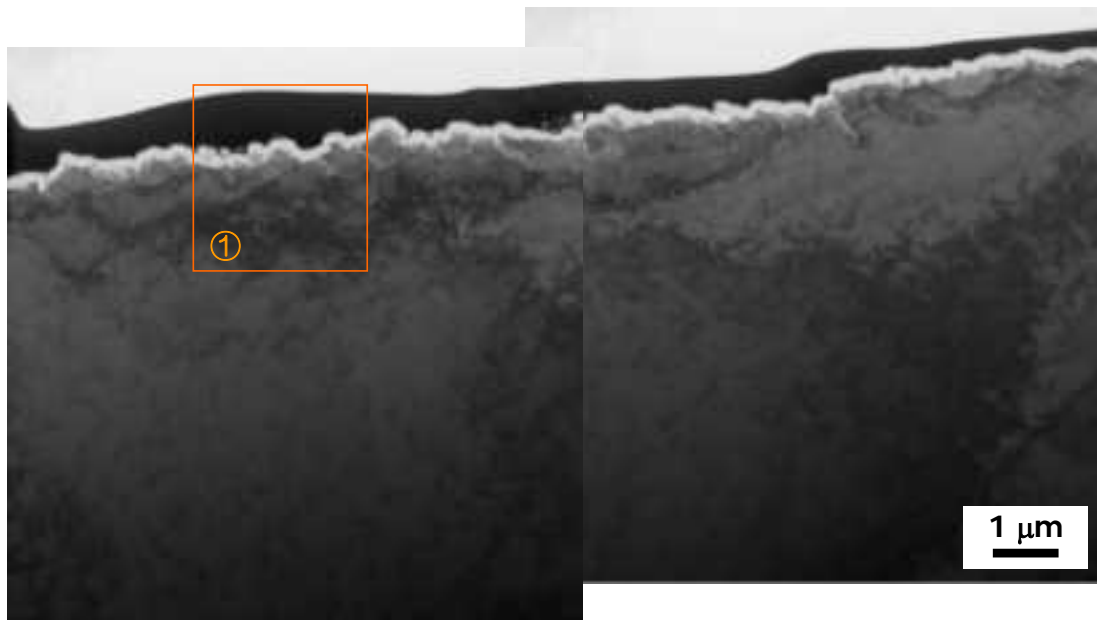
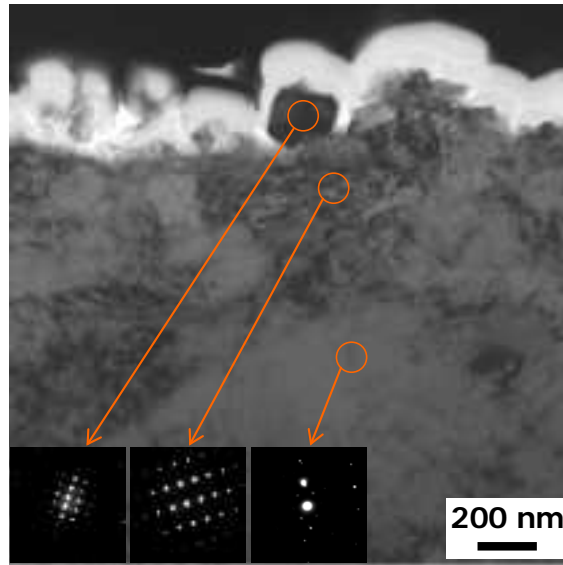
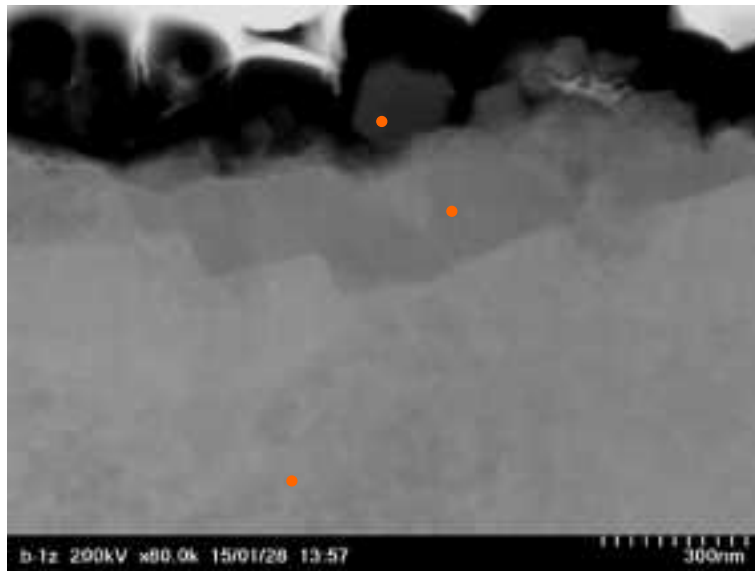


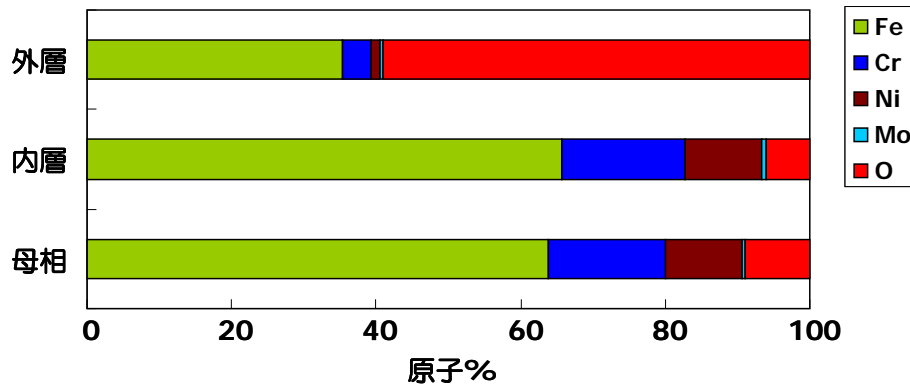
図 5.2.1-23 CT 試験片(6TSA)板厚中央き裂先端部の酸化皮膜の TEM 観察結果
 橙色枠：高倍率での詳細観察箇所



(1)領域①の拡大(明視野像)



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



(3)EDX 分析結果(原子%)

図 5.2.1-24 CT 試験片(6TSA)板厚中央き裂先端近傍の酸化皮膜構造の詳細観察結果

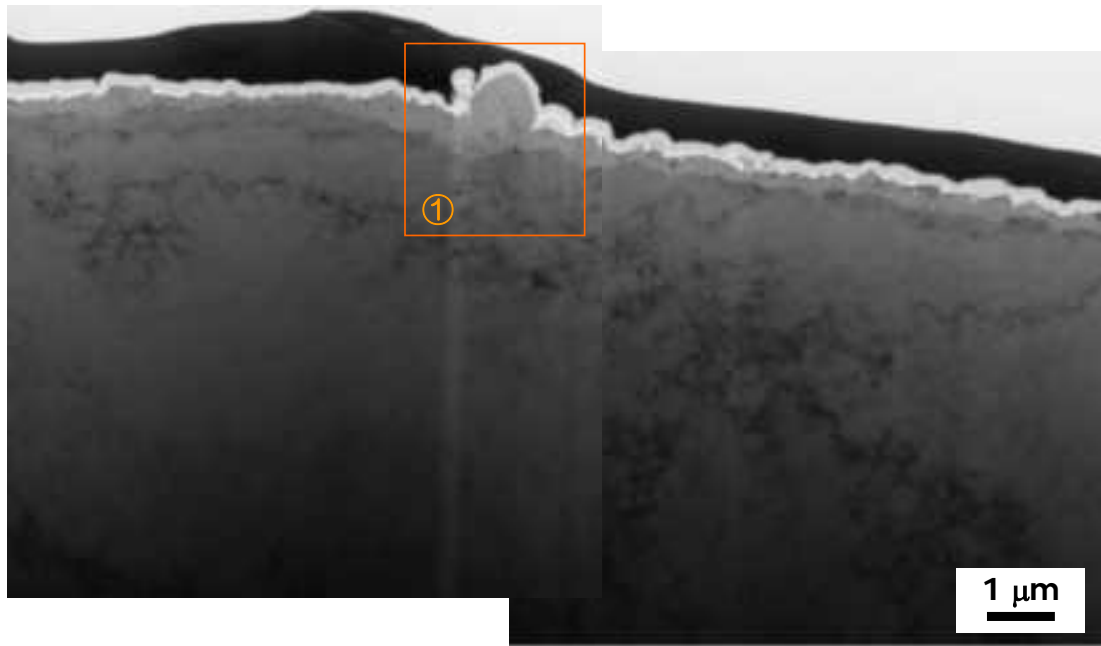
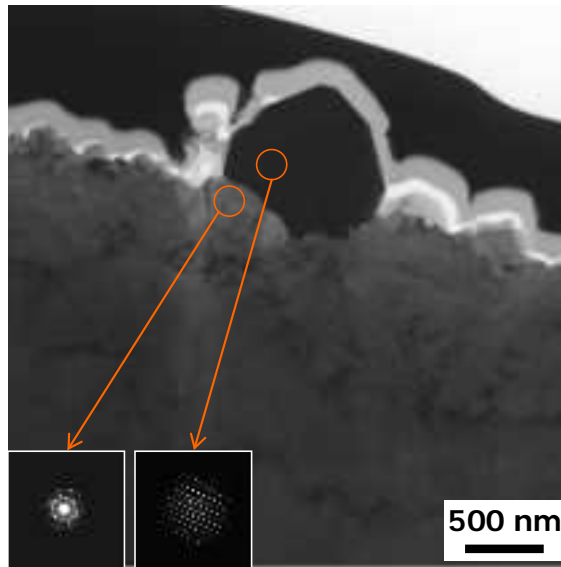
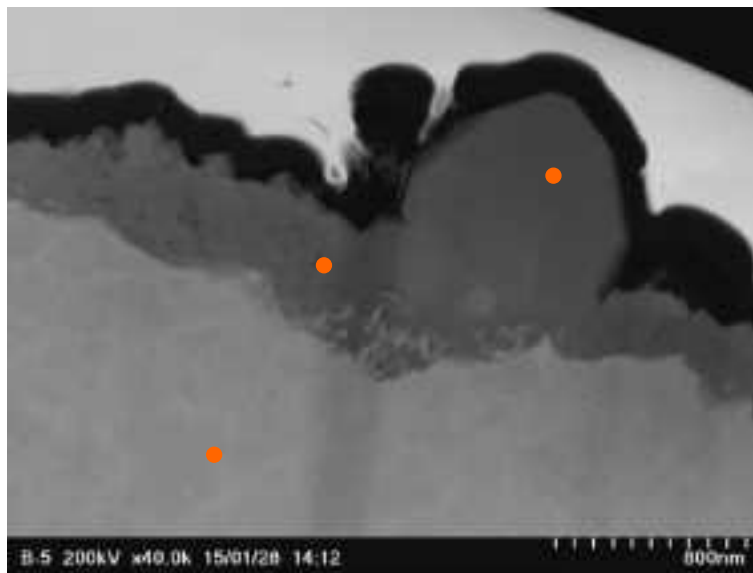


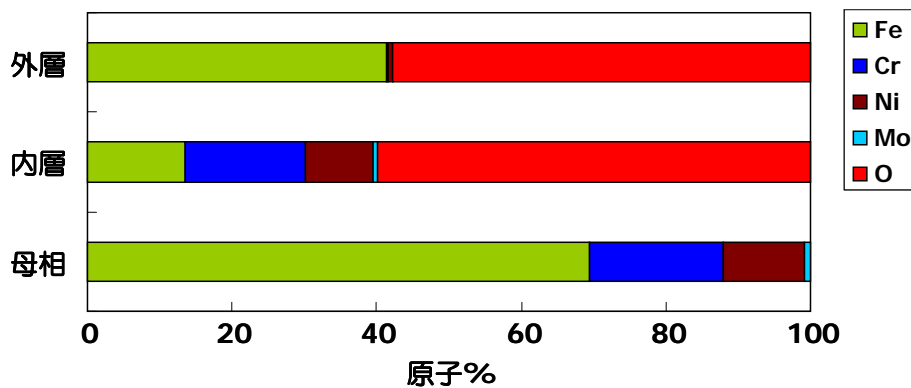
図 5.2.1-25 CT 試験片(6TLS)サイドグループ脇の酸化皮膜の TEM 観察結果
橙色枠：高倍率での詳細観察箇所



(1)領域①の拡大(明視野像)



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



(3)EDX 分析結果(原子%)

図 5.2.1-26 CT 試験片(6TLA)サイドグループ脇の酸化皮膜構造の詳細観察結果

5.2.2 水中におけるき裂進展試験片の荷重付与による変形評価試験

(1)概要と目的

本事業では JMTR 炉心において照射下でのき裂進展試験(以下、照射下き裂進展試験)の実施を計画中であり、そこでは外圧(高温高压水:9~10 MPa)とベローズ内圧(ガス圧制御)によって生じる内外圧差でベローズを収縮させ、これを推力として 0.5T-CT 試験片(以下 CT 試験片)に荷重を負荷する荷重負荷ユニットを用いることとしている。

一般に CT 試験片を用いた高温水環境でのき裂進展試験は、オートクレーブ中に設置したプルロッドを用いて CT 試験片へ荷重を負荷し、ロードセルにより荷重を計測しながら試験を行うものである。一方荷重負荷ユニットを用いたき裂進展試験では、その構造上、試験中に負荷荷重を直接モニターできないと言う制約がある。そこで本事業では、試験実施に先立ち、専用の高温水用ロードセルを用いて、荷重負荷ユニットの推力(ベローズ差圧)と負荷荷重の関係を事前に求め、ベローズ差圧を制御することで CT 試験片への負荷荷重を設定する方法の確立を進めている。

本項では、照射下き裂進展試験方法の確立に向けた基礎データ収集の一環として、CT 試験片への負荷荷重の定量評価に資することを目的に、CT 試験片の背面に金属キャプセルに封じたひずみゲージを取り付け、常温及び高温水中においてひずみゲージの信号から CT 試験片の開口量を評価する技術について検討を行った。またその結果から、CT 試験片に付与された荷重と背面ひずみを定量的に比較し、CT 試験片に付与された荷重を評価するための関係を導くための検討を行った。

(2)試験準備

a.SUS304材の鋭敏化熱処理と冷間圧延加工

SUS304(概略寸法 幅 150×長さ 250(圧延方向)×厚さ 35 mm)に対して 650°C×8 時間熱処理後空冷の鋭敏化熱処理を行った。使用した SUS304 の化学成分を表 5.2.2-1 に示す。

熱処理後、SUS304 材を圧下率 20%(板厚換算)の冷間圧延した。圧延加工に当たっては、出来るだけ歪みの無いように支給材の圧延方向端部にテーパ加工及び表面のフライス加工を行った。

本試験においては、鋭敏化熱処理後に冷間圧延加工した材料を供試材とした。供試材の外観を図 5.2.2-1 に示す。

b. 供試材の基礎特性試験

(i)EPR測定

JIS G0580 に準拠し、繰返し数 2 にて EPR 測定を実施した。図 5.2.2-2 に測定結果を示す。繰返し数 2 の試験結果より再活性化率(粒径補正前)の平均値は 38.4%で、熱処理によって十分に鋭敏化していた。

(ii)金属組織観察

JIS G0553(マクロ組織)及び JIS G571(ミクロ組織)に準拠した金属組織観察を実施した。観察条件の概要は下記の通りとした。

- ・ 観察対象: 横断面、圧延面(T、L 方向)
- ・ 観察倍率: 12.5 倍(マクロ組織、連続写真)、100 倍及び 500 倍(ミクロ組織)

図 5.2.2-3 に金属組織観察結果を示す。鋭敏化熱処理により粒界が選択的にエッチングされる溝状組織となっていたが、粒内の介在物等に特徴的な組織は認められなかった。またミクロ組織に及ぼす圧延方向の影響は顕著ではなかった。

(iii)引張試験

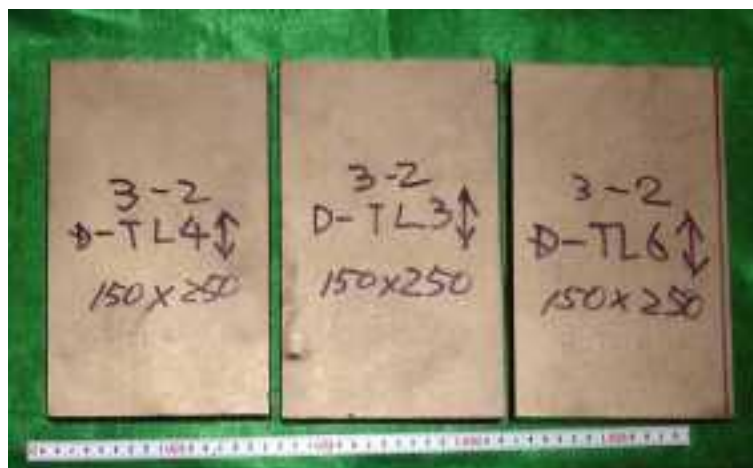
JIS G0567 に準拠した引張試験を実施した。試験条件の概略は下記の通りとした。

- ・ 引張試験片: JIS G0567 II-6 型試験片に準拠
- ・ 引張試験片採取方向: 圧延方向に対し、垂直(板幅)方向
- ・ 試験温度: 室温及び 290℃(いずれも大気中)
- ・ 試料数: 各試験温度につき 2 本(繰返し数: 2)
- ・ 取得データ: 応力-ひずみ線図(デジタルデータ)に基づいて、0.2%耐力、引張強さ、伸び、絞りを求める
試験前後の試験片外観写真を撮影する

図 5.2.2-4 に引張試験前後の試験片の外観を示す。いずれの試験片においてもゲージ部で破断していた。引張試験の結果を表 5.2.2-1 に示す。

表 5.2.2-1 供試材の化学成分(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.06	0.38	0.84	0.027	0.003	8.10	18.11	Bal.



(1)素材

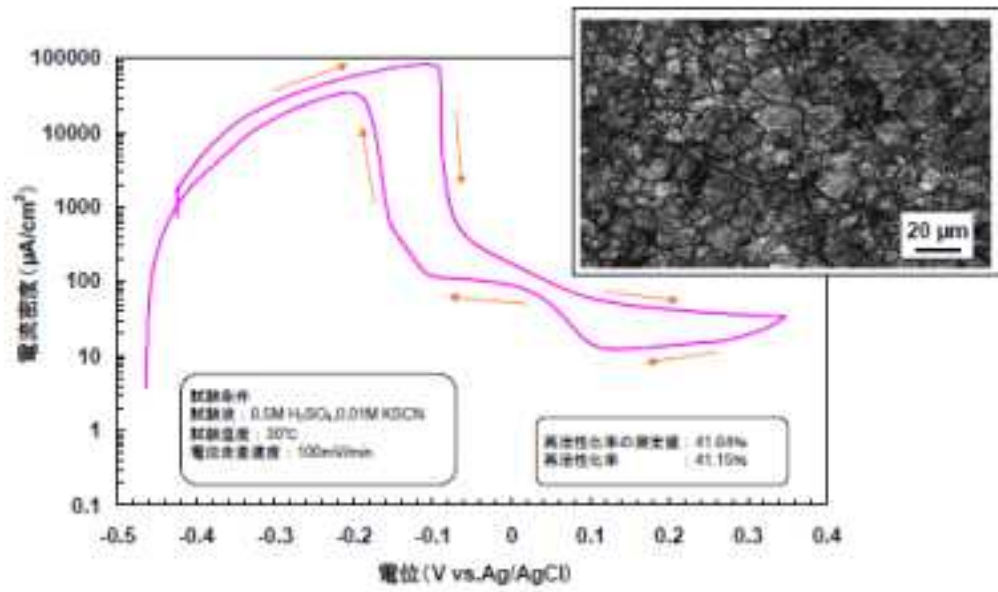


(2)鋭敏化熱処理後

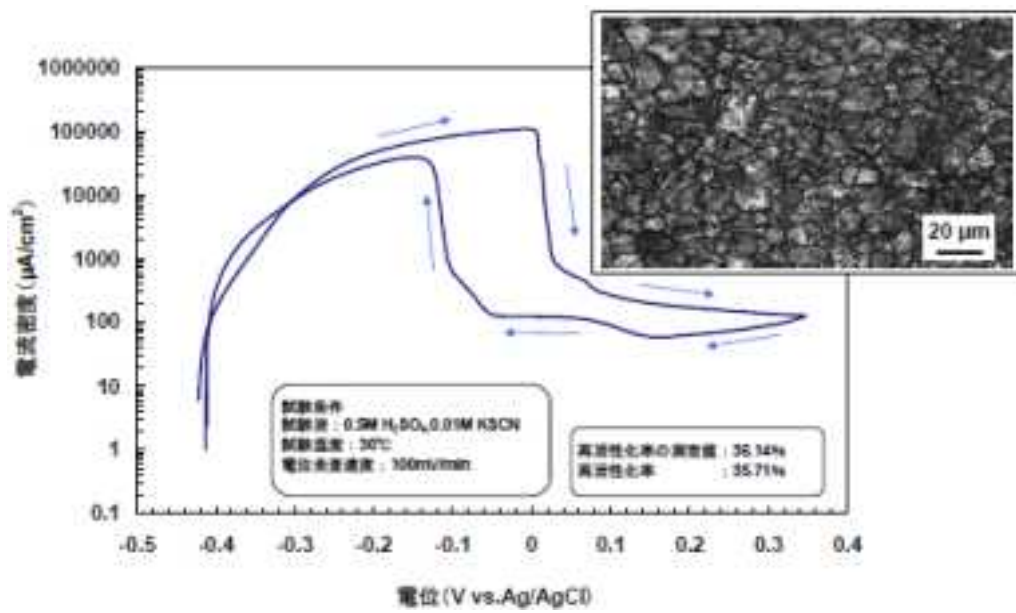


(3)20%冷間圧延加工後

図 5.2.2-1 供試材の外観

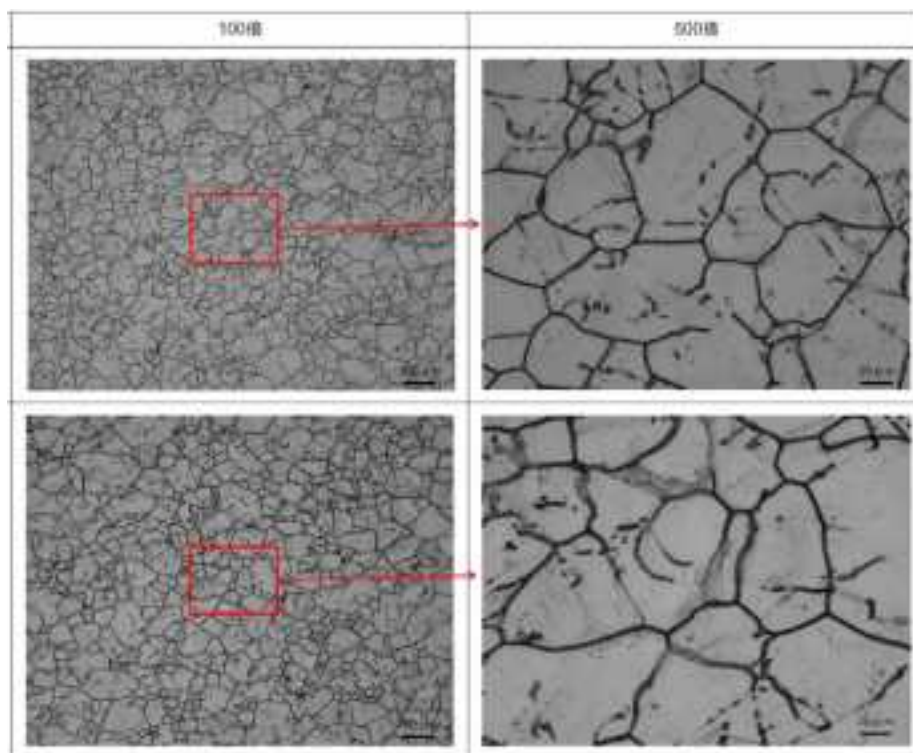


(1)試験片①

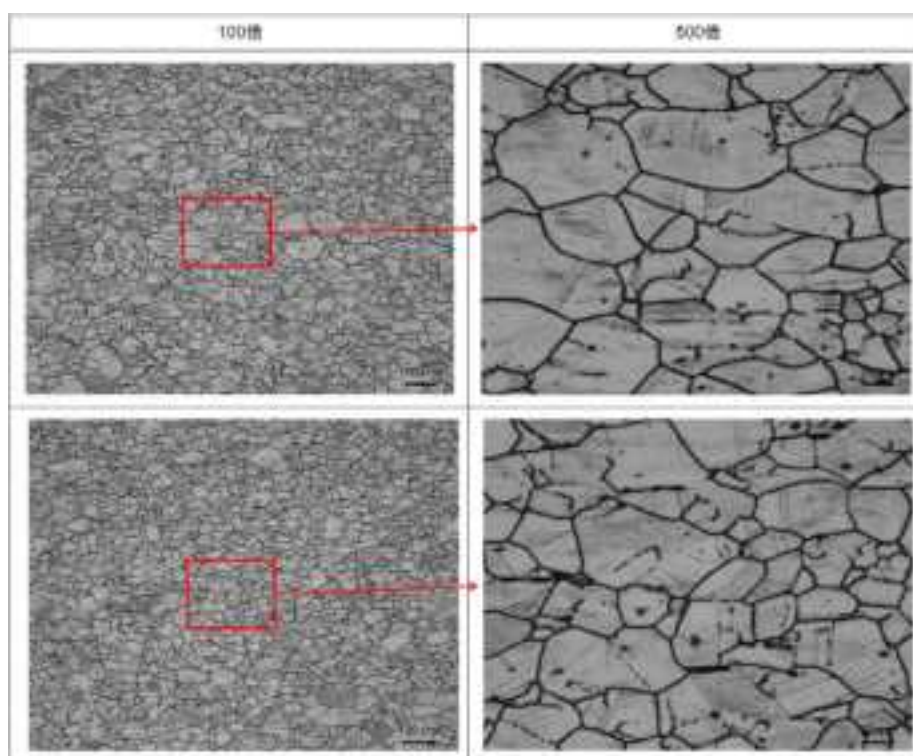


(2)試験片②

図 5.2.2-2 EPR 試験結果



(1) 圧延方向と平行方向(L方向)



(2) 圧延方向と直行方向(T方向)

図 5.2.2-3 供試材の金属組織(ミクロ)観察結果



図 5.2.2-4 引張試験前後の試験片の外観

表 5.2.2-2 引張試験結果まとめ

	0.2%耐力(MPa)	引張強さ(MPa)	伸び(%)	絞り(%)
室温	734	978	25.5	54.6
290℃	627	766	10.3	51.0

いずれのデータも繰返し数 2 の平均値

c.試験片の準備

(i)ウイング付0.5T-CT試験片の加工

供試材から、図 5.2.2-5 に示すウイング一体型 0.5T-CT 試験片を加工した。試験片の採取位置は、供試材の圧延方向と試験片の開口部が垂直となる方向の板厚中心から採取した。また、採取に当たっては、供試材圧延方向端部から 30 mm 以上離れた位置から採取した。

図 5.2.2-6 に製作したウイング付 0.5T-CT 試験片の外観(例)を示す。

(ii)疲労き裂導入

CT 試験片に、室温大気中にて疲労き裂を導入した。目標値とする疲労き裂長さは試験片の用途によって 1.2 mm~6.3 mm とした。導入条件は、疲労き裂導入終了時における最終 K_{max} 値が $12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下(目標値)となるように段階的に荷重を下げた。また、疲労き裂長さ及び各段階での荷重を記録した。

表 5.2.2-3 に各試験片に導入した疲労き裂長さ結果を示す。

(iii)ひずみゲージの取り付け

図 5.2.2-7 にひずみゲージを貼付したウイング付 0.5T-CT 試験片の外観(例)を示す。使用するひずみゲージは、異なる 2 種類(A 社及び B 社)の金属カプセル型ひずみゲージ(以下、背面ゲージ①及び②と呼ぶ)を選定し、スポット溶接により、CT 試験片の背面に貼付した。背面ゲージ①を貼付したものを 6 個、背面ゲージ②を貼付したものを 2 個とした。

(iv)PDM信号線の取り付け

試験片のウイングに PDM 信号線(電流用 1 組、電位差用 2 組)を溶接にて設置した。PDM 信号線は、テフロン等で表面を絶縁被覆した $0.5 \text{ mm}\phi$ のニッケル線を用いた。図 5.2.2-8 に PDM 信号線を溶接したウイング付 0.5T-CT 試験片の外観(例)を示す。

(v)疲労き裂長さと背面ゲージ、PDM校正曲線の関係データ取得

背面ゲージ①を貼付した CT 試験片(いずれも大気中疲労き裂長さ 1.2 mm: 目標値)を用いて、室温大気中において疲労き裂進展試験を実施した。この時、き裂を進展させながら背面ゲージのデータと PDM 信号データを同時に取得した。なお PDM 信号を取得するため、試験片と荷重ピンの間に絶縁カラーを設置した。

試験要領の概要を以下に示す。

- ・試験片を疲労試験機に装着し、PDM 信号を取得するための直流交番電源をセット
 - ・応力拡大係数の最大値(K_{max})換算で $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 程度(目安)となるよう変動荷重を設定
 - ・室温においてき裂長さ a と試験片板幅 $W(=25.4 \text{ mm})$ の比 a/W が 0.45~0.65 となる範囲で疲労き裂進展試験を実施
(途中、データ取得時のき裂長さを測定するため、図 5.2.2-3 に例示するような荷重条件にて適宜破面にビーチマークを付与)
 - ・き裂長さ測定点において PDM 電流を印加してその時の電位差 V_1 、 V_2 を測定
- 以上の試験ををき裂長さが $a/W=0.65$ を超えるまで 5 回以上繰り返し、PDM 信号と実

際のき裂長さの関係を求めた。その間、背面ゲージのデータを適宜測定した。なおき裂進展試験中のき裂長さ a は、CT 試験片の側面を直接観察した。

試験終了後、き裂長さ a を実測するため疲労き裂を導入して破面開放し、PDM 信号 ($V_1/(V_2-V_1)$) と背面ゲージのデータを取得した位置におけるき裂の長さの関係を、破面観察結果より求めた。

図 5.2.2-10 に負荷荷重の繰返し数と荷重条件及びウィング付き 0.5T-CT 試験片の背面に貼付したひずみゲージ信号の関係を示す。また図 5.2.2-11 に繰返し荷重付与による当該試験片の疲労き裂の観察結果を示す。さらに図 5.2.2-12 に当該試験片より求めた PDM 校正直線を示す。これらの結果は、以降の試験の基礎データとして活用した。

なお背面ゲージ②についても同様の試験を実施し、ひずみゲージの相違によって大きなバラつきが無いことを確認した。

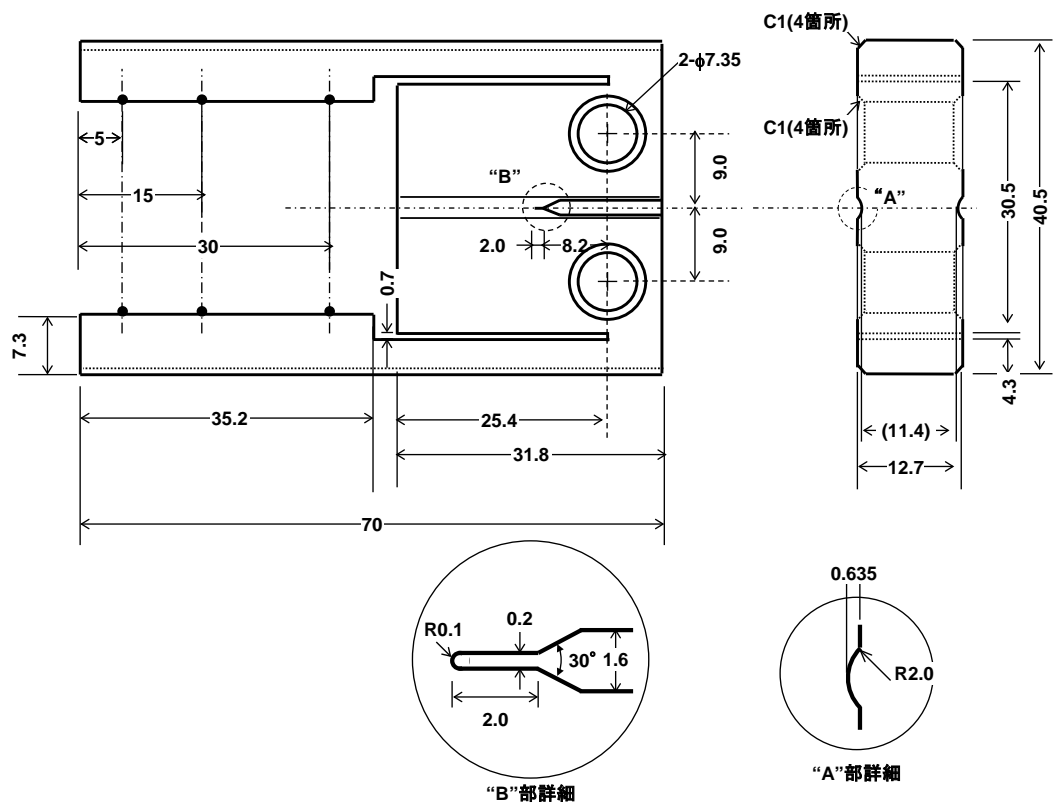


図 5.2.2-5 製作するウィングー一体型 0.5T-CT 試験片の形状
(ウィング部黒丸位置は PDM 信号線の溶接位置を示す)

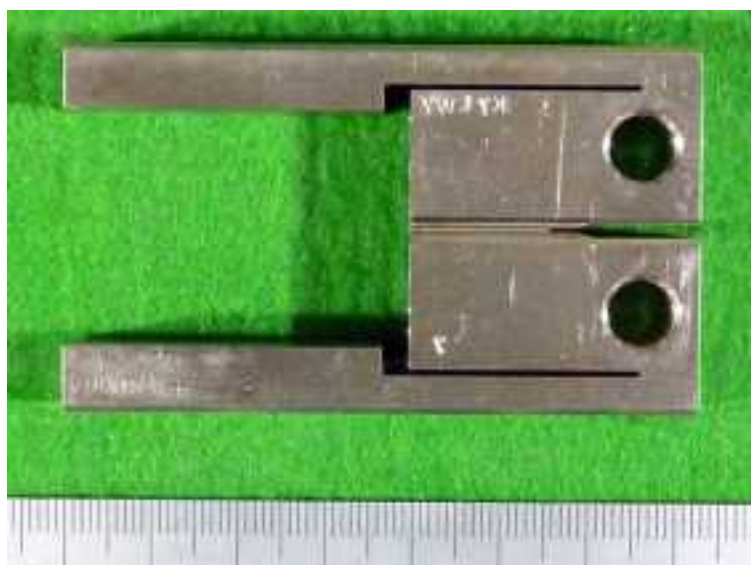


図 5.2.2-6 ウィングー一体型 0.5T-CT 試験片の外観(例)

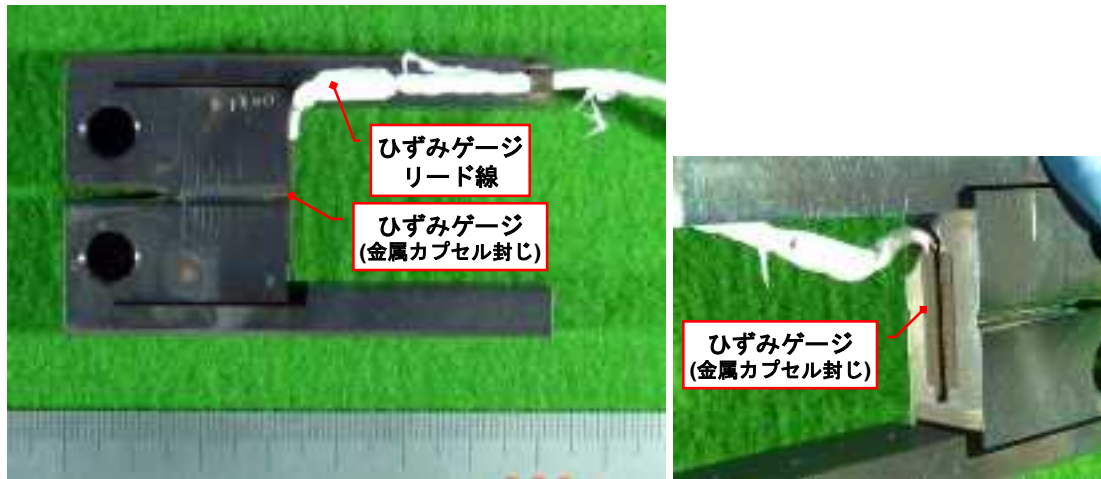


図 5.2.2-7 ウィング付 0.5T-CT 試験片へのひずみゲージ貼付状況(例)(開口部の背面側)

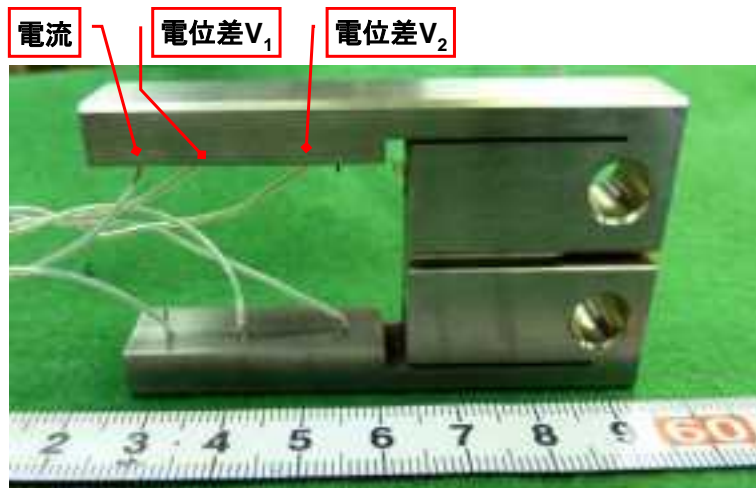


図 5.2.2-8 PDM 信号線を取付けたウィング付 0.5T-CT 試験片の外観(例)

表 5.2.2-3 ウィング付 0.5T-CT 試験片の疲労き裂導入作業結果

No.	試験片 番号	目標き裂 長さ(mm)	最大荷重 (kN)	最少荷重 (kN)	繰返し数 (N)	き裂長さ (mm)	Kmax (Mpa \sqrt{m})	備 考
1	KTLW3	11.4	4.00	0.40	88,000	10.75	16.2	
			3.50	0.35	228,000	10.89	14.4	
			3.25	0.33	238,000	10.99	13.5	
			3.00	0.30	257,000	11.12	12.6	
			2.80	0.28	277,000	11.32	12.0	
2	KTLW4	14.0	5.00	0.50	60,750	11.07	20.9	
			4.50	0.45	85,000	11.84	20.5	
			4.25	0.43	91,000	12.58	21.1	
			4.00	0.40	100,000	12.11	19.2	
			3.75	0.38	104,000	12.38	18.2	
			3.50	0.35	109,000	12.47	17.1	
			3.25	0.33	114,000	12.54	16.3	
			3.00	0.30	140,000	12.91	15.5	
			2.75	0.28	147,000	12.95	14.3	
			2.50	0.25	168,000	13.15	13.3	
			2.25	0.23	202,000	13.44	12.4	
			2.10	0.21	211,000	13.50	11.7	
2.00	0.20	261,000	13.77	11.5				
3	KTLW5	11.4	4.50	0.45	66,000	10.86	18.4	
			4.00	0.40	72,000	10.97	16.5	
			3.75	0.38	77,000	11.06	15.7	
			3.50	0.35	88,000	11.29	15.0	
			3.25	0.33	94,000	11.33	14.0	
			3.00	0.30	111,000	11.52	13.2	
			2.80	0.28	132,000	11.71	12.6	
4	KTLW6	11.4	4.50	0.45	68,000	10.95	18.6	
			4.25	0.43	70,500	10.98	17.6	
			4.00	0.40	76,000	11.12	16.8	
			3.50	0.35	86,500	11.32	15.0	
			3.00	0.30	95,000	11.37	13.0	
			2.80	0.28	119,000	11.69	12.5	

表 5.2.2-3 ウィング付 0.5T-CT 試験片の疲労き裂導入作業結果(続き)

No.	試験片 番号	目標き裂 長さ(mm)	最大荷重 (kN)	最少荷重 (kN)	繰返し数 (N)	き裂長さ (mm)	Kmax ($\text{Mpa}\sqrt{\text{m}}$)	備 考
7	KTLW7	17.0	5.00	0.50	58,000	11.33	21.5	
			4.50	0.45	84,000	12.20	21.4	
			4.25	0.43	86,000	12.25	20.3	
			4.00	0.40	104,000	12.77	20.3	
			3.75	0.38	107,000	12.83	19.2	
			3.50	0.35	115,000	12.99	18.3	
			3.25	0.33	118,000	13.05	17.1	
			3.00	0.30	141,000	13.38	16.4	
			2.75	0.28	147,000	13.47	15.3	
			2.50	0.25	207,000	14.44	15.8	
			2.25	0.23	230,000	14.73	14.8	
			2.00	0.20	273,000	15.26	14.3	
			1.80	0.18	294,000	15.48	13.3	
			1.60	0.16	338,000	15.87	12.6	
			1.50	0.15	358,000	16.00	12.1	
			1.40	0.14	378,000	16.15	11.6	
			1.30	0.13	436,000	16.50	11.4	
1.20	0.12	531,000	17.00	11.5				
8	KTLW8	14.0	3.50	0.35	24,000	11.60	15.5	
			3.00	0.30	70,000	12.00	13.9	
			2.75	0.28	94,000	12.14	13.0	
			2.50	0.25	146,000	12.39	12.1	
			2.25	0.23	227,000	12.89	11.6	
			2.10	0.21	323,000	13.37	11.5	
			2.00	0.20	406,000	13.90	11.7	

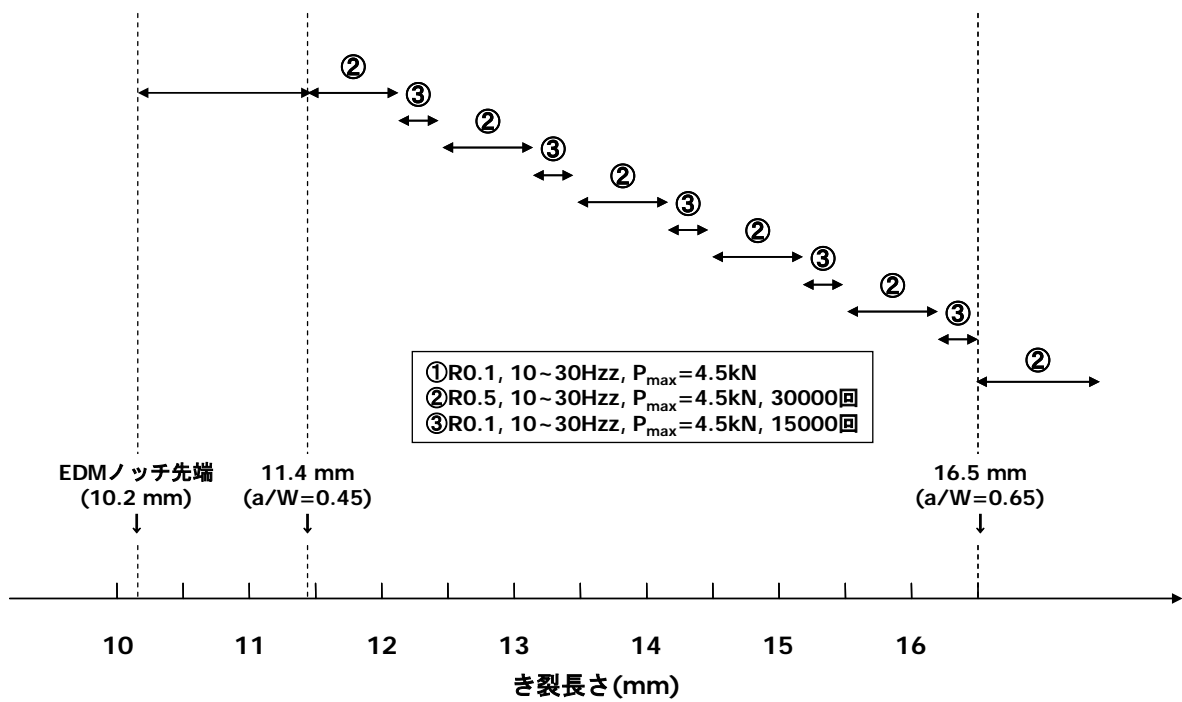


図 5.2.2-9 個々のき裂長さにおける PDM 信号と背面ゲージデータ取得試験の荷重条件例

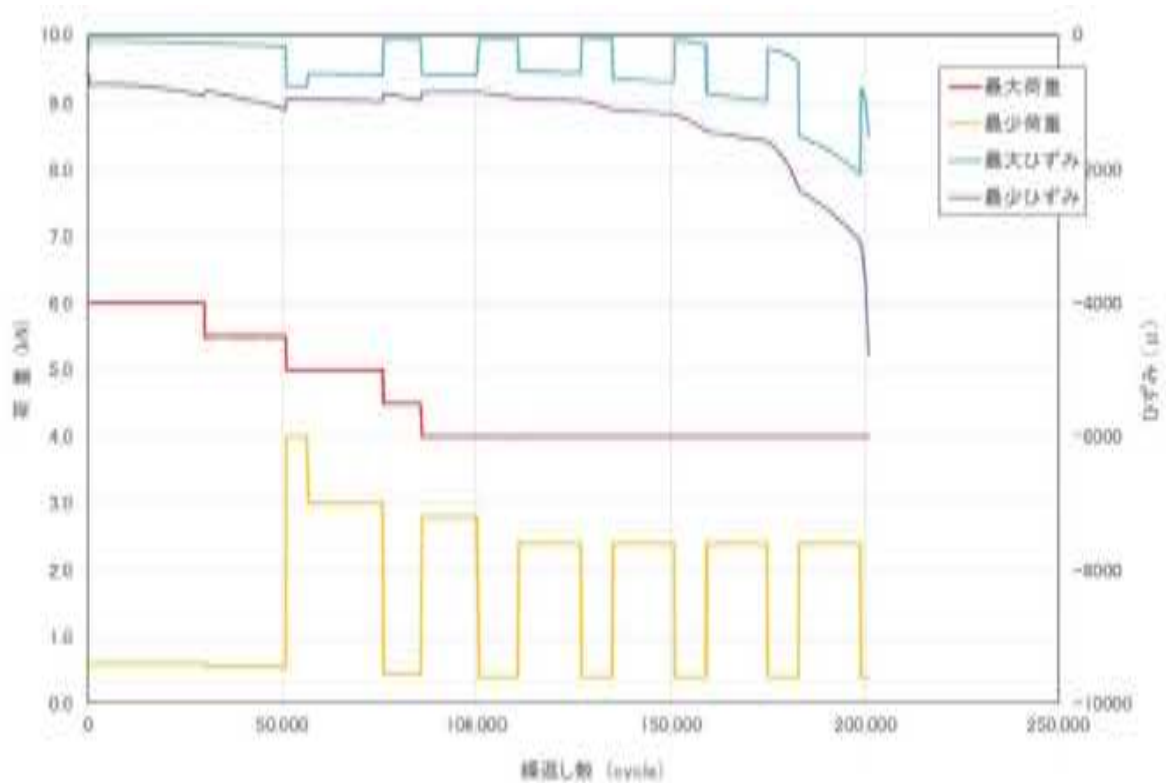
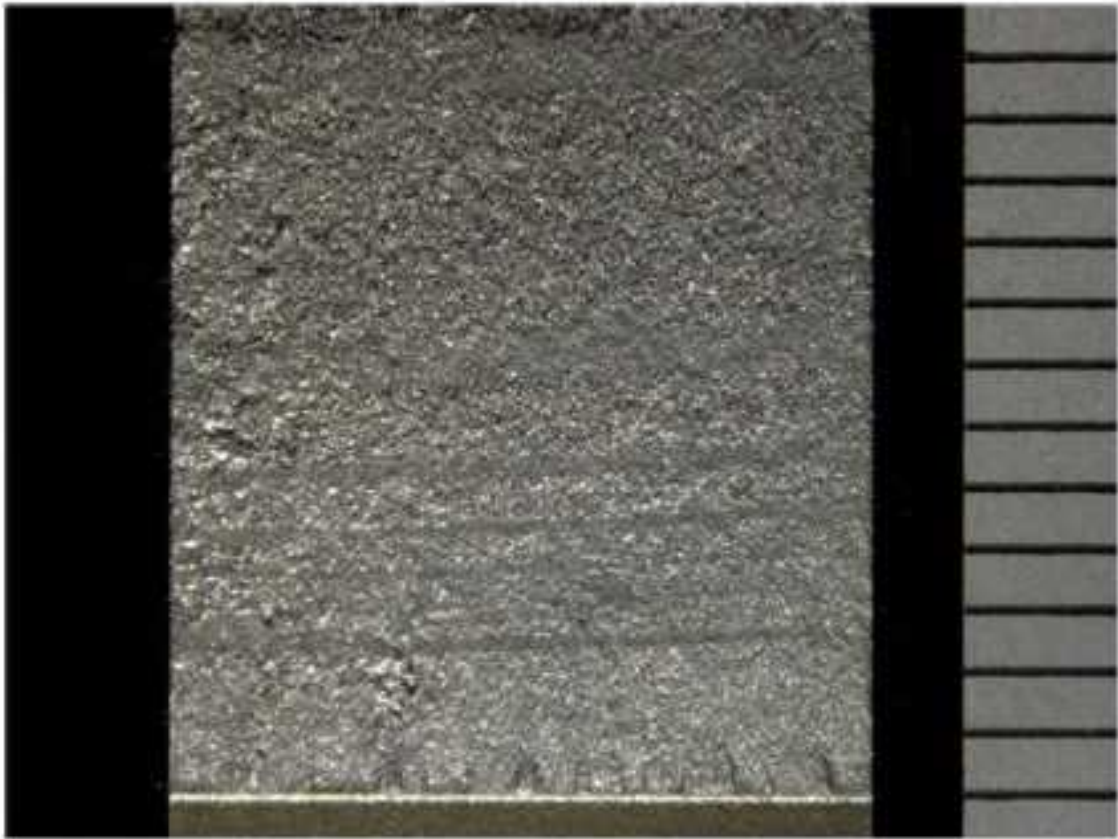


図 5.2.2-10 大気中における繰返し数と荷重とひずみ(背面ゲージ①)の関係



- ピチマーク1: 2.40mm
- ピチマーク2: 3.1mm
- ピチマーク3: 3.64mm
- ピチマーク4: 4.33mm
- ピチマーク5: 5.22mm
- ピチマーク6: 6.90mm

図 5.2.2-11 背面ゲージ①を貼付したウイング付 0.5T-CT 試験片に導入した大気中疲労き裂

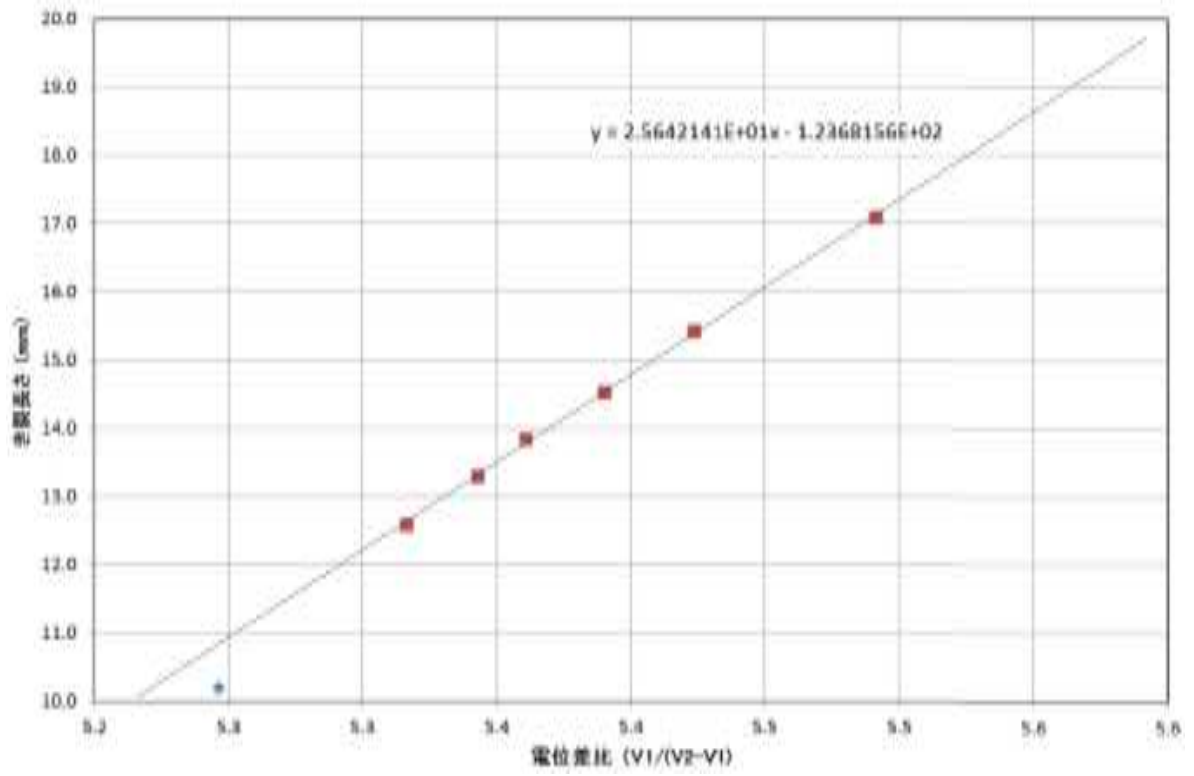


図 5.2.2-12 PDM 信号 V_1 、 V_2 とき裂長さの関係(PDM 校正直線)

(3)水中におけるCT試験片変形量測定試験

表 5.2.2-4 は、水中において荷重負荷した CT 試験片変形量測定試験マトリクスを示す。この試験では、背面ゲージ①を貼付し、表 5.2.2-4 にて規定した長さの疲労き裂を導入したウィング付 0.5T-CT 試験片を使用した。また PDM 信号を取得するため試験片と荷重ピンの間に絶縁カラーを設置した。

試験要領の概要を以下に示す。

- ・背面ゲージと PDM 信号線を取り付けた CT 試験片を、絶縁カラーを介してオートクレーブのプルロッドに装荷
- ・290°Cまたは室温の高温高圧水(圧力約 8.5 MPa)において、CT 試験片に規定範囲の荷重(K 値換算で 11~35 MPa√m)を連続的に変化させて負荷し、背面ゲージの値と PDM 信号を記録(3 回繰返してデータ取得)
- ・試験終了後、室温大気中においてそれぞれの CT 試験片に疲労き裂を導入して破面開放し、破面観察より大気中で導入した疲労き裂長さを評価

図 5.2.2-13 は、水中での CT 試験片変形量測定試験のため、ウィング付 0.5T-CT 試験片をオートクレーブ内にセットした状況(例)を示す。

図 5.2.2-14(1)~(3)は、温度 290°C 圧力 8 MPa の高温水中で荷重付与した時の背面ひずみと PDM 信号の関係を示す。なお一般的に CT 試験片のひずみゲージ貼付部で生じるひずみは圧縮ひずみのため負の値として表記するが、ここでは絶対値を表記し「背面ひずみ」と呼ぶ[5.2.2-1]。背面ひずみは荷重の変化に追従して変化していることが判る。またここではき裂は進展していないので PDM 信号(き裂長さに比例)に増減は無く、ばらつきの範囲でほぼ一定の値を示していた。また図 5.2.2-14(4)に示すように、疲労き裂 3.8 mm の場合についてのみ室温高圧水中においても同様のデータを取得し、同様の傾向を示すことを確認した。

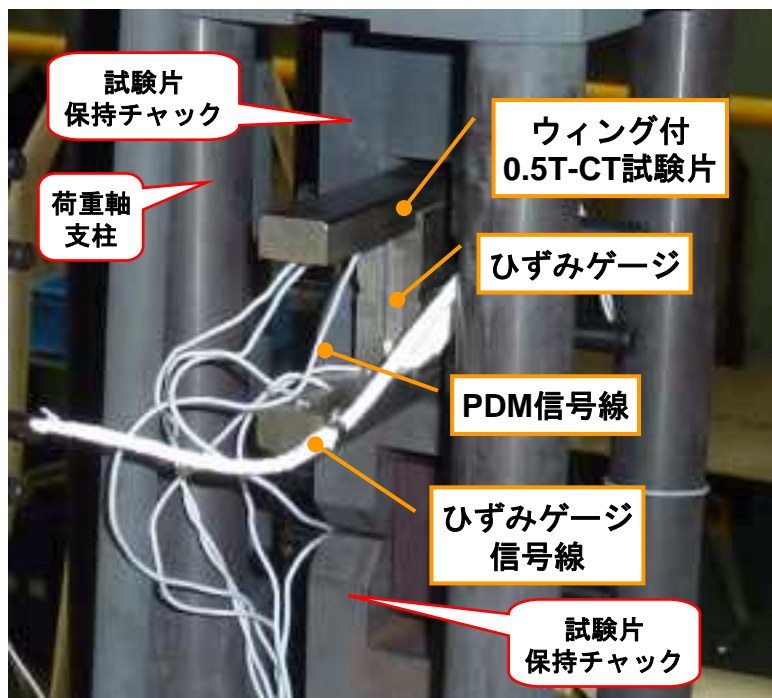
また図 5.2.2-15 は負荷荷重と背面ひずみの関係を示す。背面ひずみは 0.5T-CT 試験片の開口量に比例し、同一荷重負荷の場合疲労き裂が長いほど背面ひずみ(試験片の開口量)は大きくなることが判っている[5.2.2-1]。今回の結果においてもその傾向が観察された。また疲労き裂長さ 3.8 mm のケースにおいて室温と高温のデータの比較を行ったところ一致したため、図 5.2.2-15 中で 2 つのデータは重なってプロットされた。

以上のことより、CT 試験片の背面にひずみゲージ①を貼付したことによって PDM への影響は無く、これまでの知見[5.2.2-1]と等価なデータが取得できることが判った。また温度補正方法についても問題ないことを確認した。

表 5.2.2-4 水中におけるウィング付 0.5T-CT 試験片の変形量測定試験マトリクス

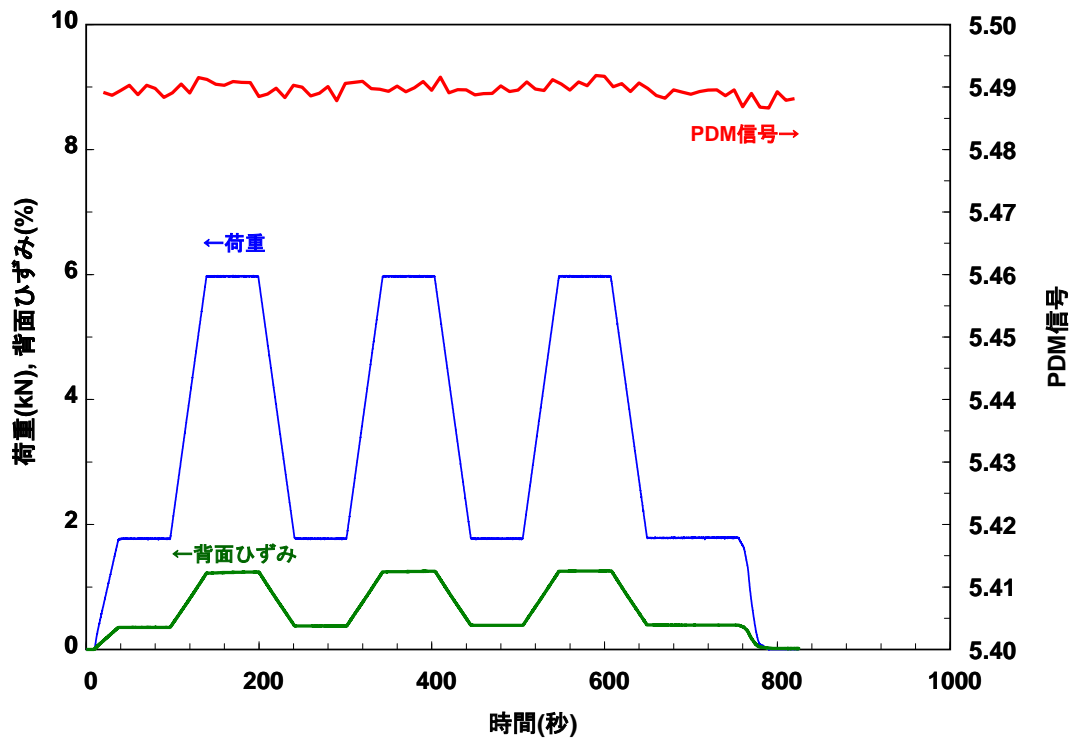
疲労き裂長さ	1.2 mm(a/W=0.45)	3.8 mm(a/W=0.55)	6.3 mm(a/W=0.65)
K 値範囲 ^{※)}	11~35 MPa√m		
荷重	2.5~8.2 kN	1.8~6.0 kN	1.2~4.1 kN
室温	—	○	—
290°C	○	○	○

※) 室温での K 値有効範囲の上限: 46.8 MPa√m
 290°Cでの K 値有効範囲の上限: 42.7 MPa√m

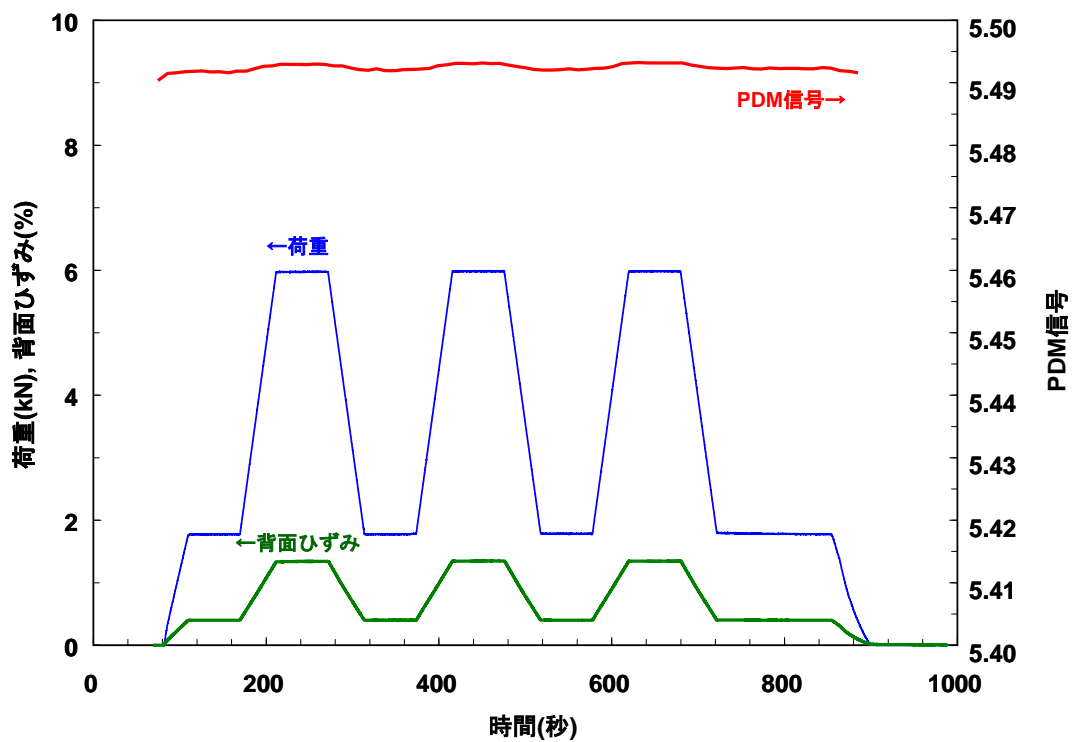


(1)試験開始前

図 5.2.2-13 ウィング付 0.5T-CT 試験片を用いた高温水中荷重負荷試験の準備状況
 (オートクレーブ内に試験片をセット)

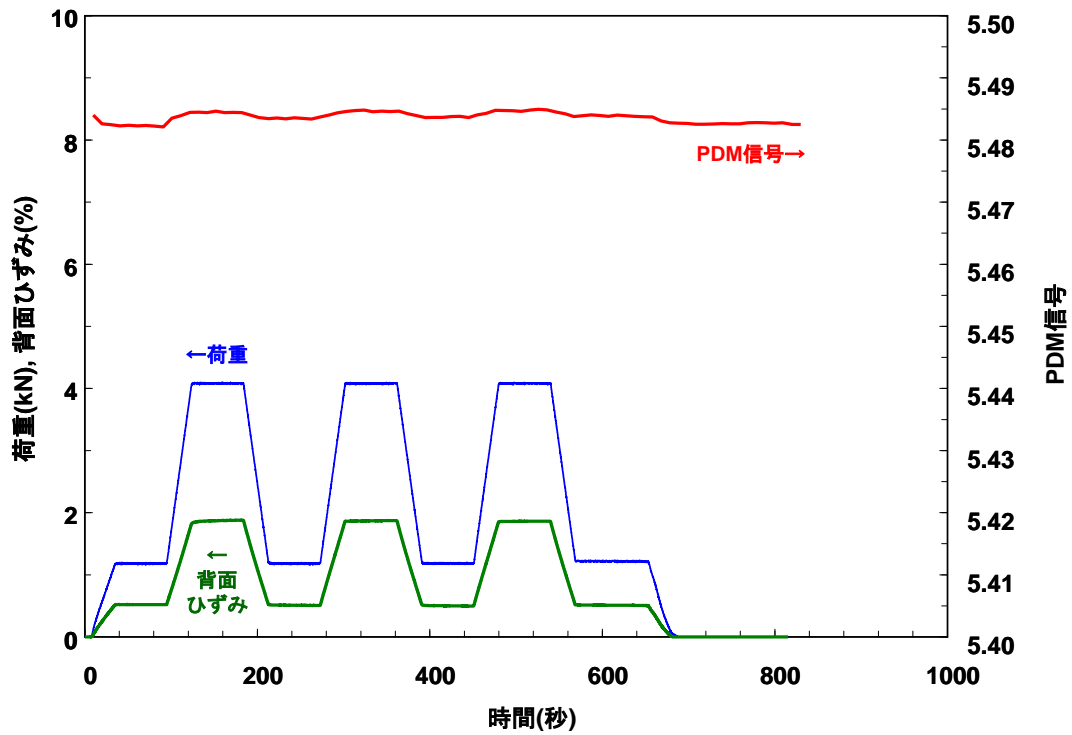


(1)疲労き裂長さ 1.2 mm($a/W=0.45$) 温度 290°C

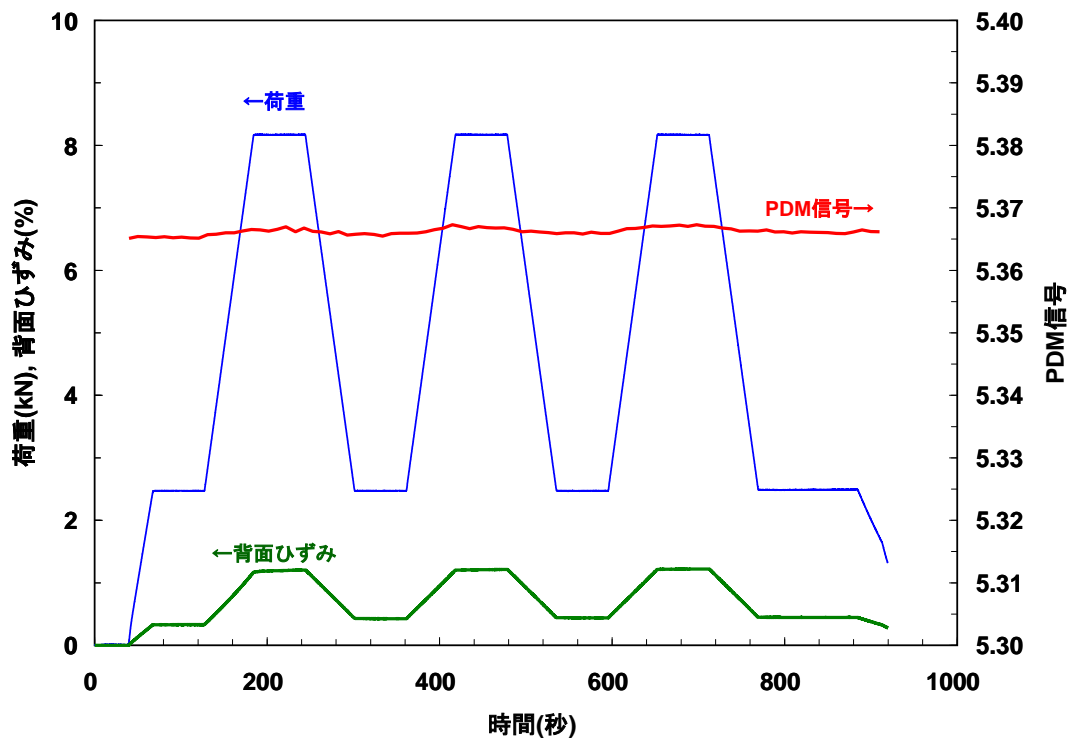


(2)疲労き裂長さ 3.8 mm($a/W=0.55$) 温度 290°C

図 5.2.2-14 水中におけるウィング付 0.5T-CT 試験片の変形量測定試験結果
(試験環境：温度 290°C 圧力 約 8.5 MPa)



(3)疲労き裂長さ 6.3 mm($a/W=0.65$) 温度 290°C



(4)疲労き裂長さ 3.8 mm($a/W=0.55$) 温度 室温

図 5.2.2-14 水中におけるウィング付 0.5T-CT 試験片の変形量測定試験結果(続き)
(試験環境: 温度 290°C及び室温($a=3.8$ mmのみ) 圧力 約 8.5 MPa)

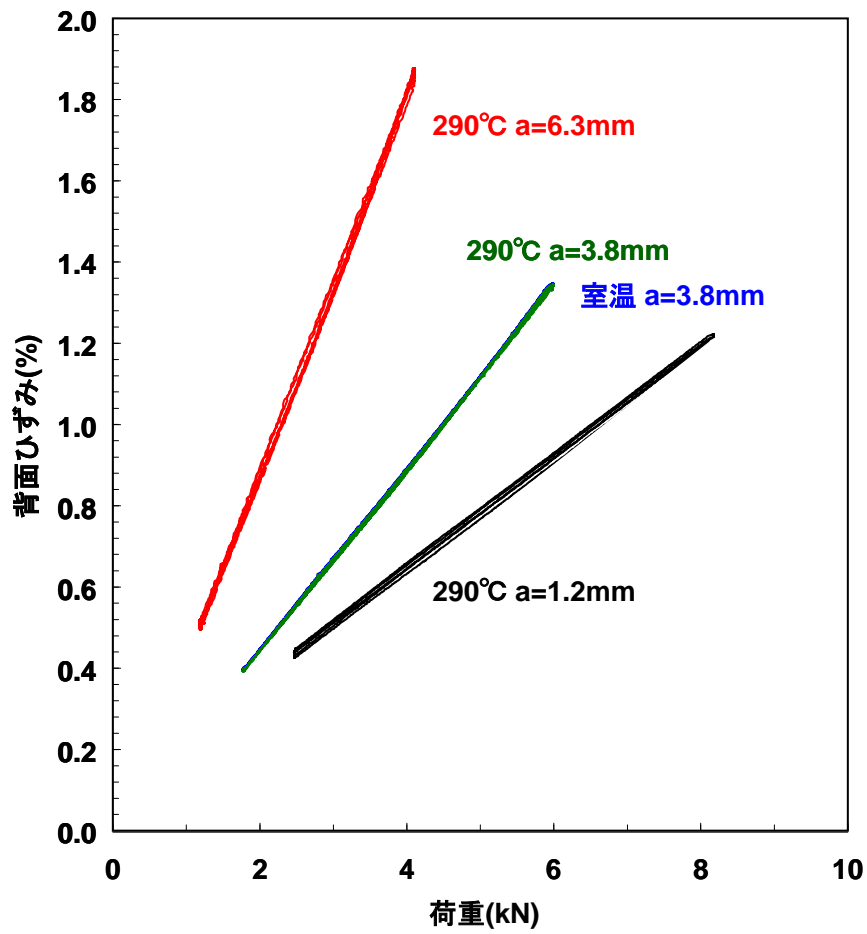


図 5.2.2-15 ウィング付 0.5T-CT 試験片における負荷荷重と背面ひずみの関係
 (疲労き裂長さ $a=1.2$ 、 3.8 、 6.3 mm)
 (試験環境：温度 290°C及び室温($a=3.8$ mm のみ) 圧力 約 8.5 MPa)

(4) 高温水中における背面ゲージの信頼性確認試験

背面ゲージ①を貼付したウィング付 0.5T-CT 試験片をオートクレーブ内に装荷し、環境中疲労き裂進展試験を実施した。なお PDM 測定との共存性確認のため、これらの試験片に PDM 信号線を取り付け、絶縁カラーを試験片と荷重ピンの間に設置し、試験装置及び試験条件は以下の通りとした。

- ・試験装置: 温度 290°C、圧力 8~9 MPa の高温高压水を生成する循環式オートクレーブ
- ・試験水質: 温度 290°C 圧力 8~9 MPa
- ・溶存酸素(入口): 8ppm
- ・導電率(入口): 0.2 μ S/cm 以下
- ・荷重条件: 環境中疲労き裂導入時の変動荷重条件(台形波)
 K_{max} : 8.5 MPa \sqrt{m} (最大荷重 2.0kN)(試験開始時)
 : 19.7 MPa \sqrt{m} (最大荷重 4.6 kN)(荷重条件変更時)
 応力比: 0.5~0.6(試験開始)
 周波数: 0.05~0.1Hz

浸漬試験終了後、大気中で疲労き裂を進展させて破面開放し、ビデオマイクロスコープを用いて高温水環境中でのき裂進展状況を確認し、き裂の進展量を求めた。

図 5.2.2-16 は高温水中において疲労き裂進展に用いたウィング付 0.5T-CT 試験片の試験後の外観を示す。図 5.2.2-16 (1)は破面解放前にウィングと試験片背面(ひずみゲージ貼付部)を切断した状況を示し、図 5.2.2-16(2)は破面解放後の破面のビデオマイクロスコープ観察結果を示す。図 5.2.2-16(2)より環境中におけるき裂進展量を求めた。

図 5.2.2-17 は高温水中疲労き裂進展試験における荷重条件とき裂長さの変化を示す。試験開始時の荷重条件を 2.0 kN から 1.0 kN(応力比 0.5)としていたが、き裂進展状況を勘案して最大荷重を 4.6 kN から 2.7 kN(応力比 0.58)に変更した。その結果き裂は 11.2 mm から 14.2 mm に進展した。

図 5.2.2-18 は高温水中疲労き裂進展試験における背面ひずみの変化を、最大負荷荷重と最小負荷荷重時の関係で示す。この結果より、負荷荷重条件は変えていないが、き裂進展に伴って背面ひずみ(すなわち開口量)が大きくなっていることが判る。

以上の結果より、金属カプセルに封じたひずみゲージをウィング付 0.5T-CT 試験片の背面に溶接して開口量を評価することにより、き裂の進展に伴う試験片荷重を評価することができ、合わせて応力拡大係数(K 値)の直接検証が可能であることを確認した。

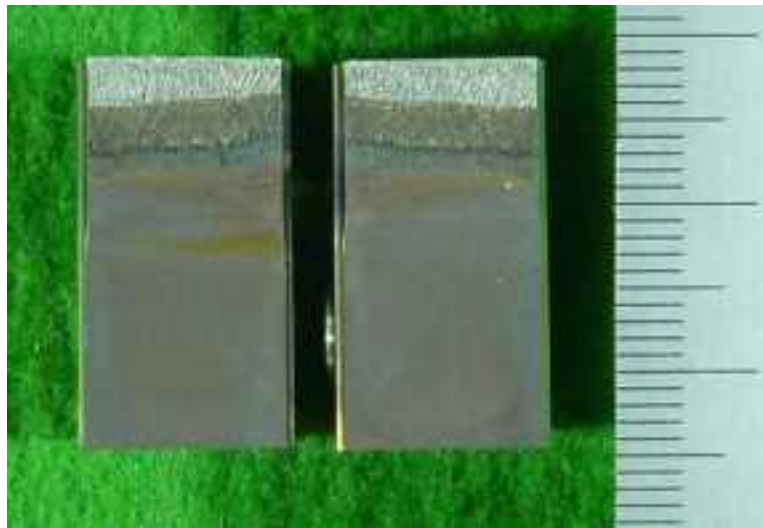
(5)参考文献

[5.2.2-1] 笠原他、日本原子力学会「2015 年春の年会」0 予稿集 (C39) (2015)



(1)試験終了後の試験片状況

(破面開放のためウイングとひずみゲージ貼付部を切断)



(2)大気中で疲労き裂進展によって破面開放した試験片

図 5.2.2-16 高温水中疲労き裂進展試験後のウイング付 0.5T-CT 試験片の破面

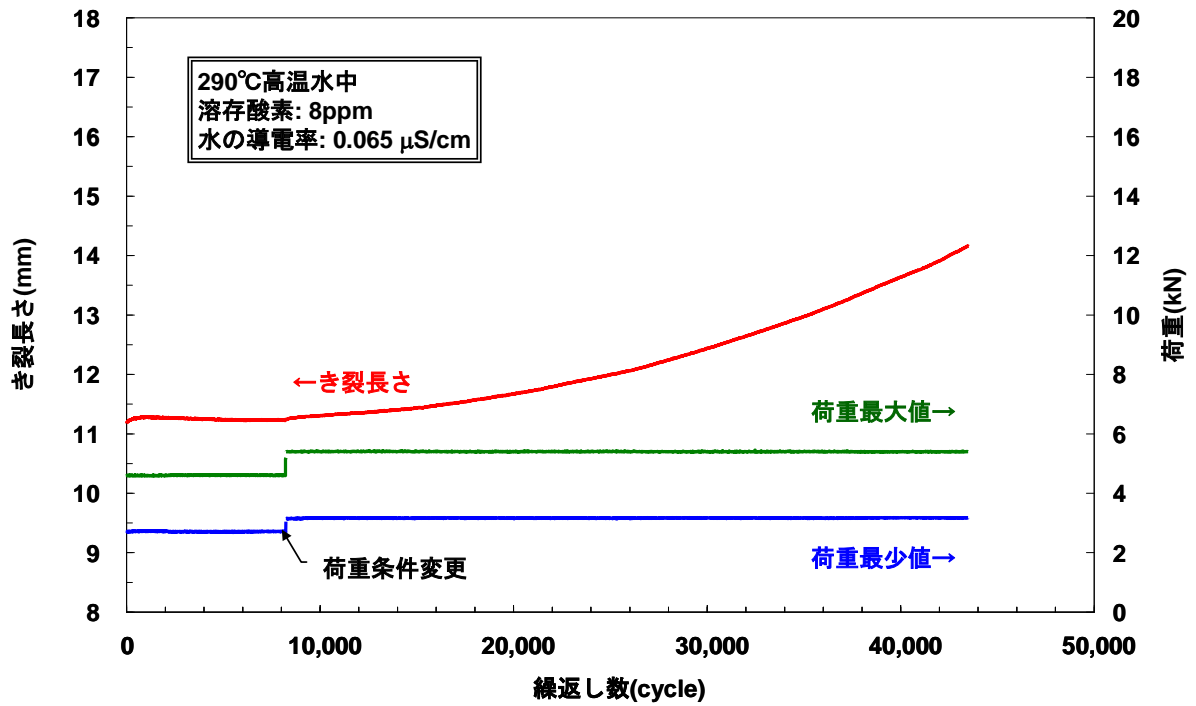


図 5.2.2-17 高温水中疲労き裂進展試験における荷重条件とき裂長さ

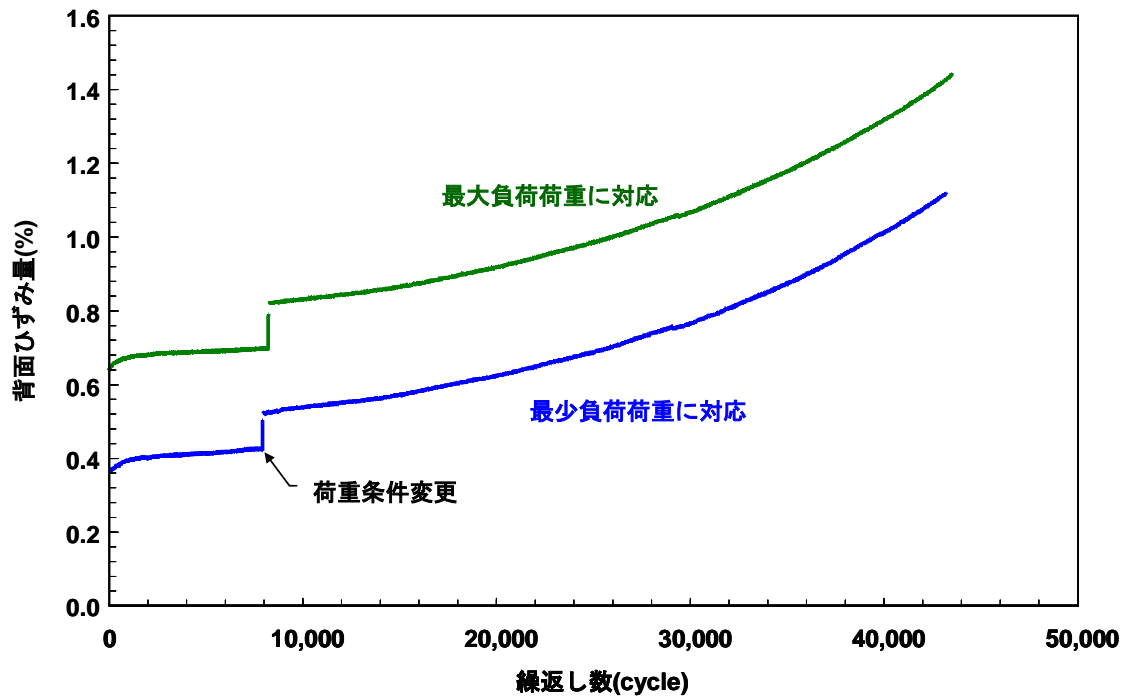


図 5.2.2-18 高温水中疲労き裂進展試験におけるき裂進展に伴う背面ひずみの変化

5.2.3 き裂進展試験ユニットの特性試験

5.2.3.1 概要

照射下き裂進展試験では、JMTR に装荷した照射キャプセル内の高温高压水環境下で照射済み 0.5 インチ厚さコンパクトテンション(0.5T-CT)試験片に荷重を負荷し、き裂長さの変化をモニターする必要がある。このときに使用する荷重負荷治具であるき裂進展試験ユニット(以下、ユニットという)は、高温高压水中において試験片に引張荷重を負荷するため、小型ベローズを用いて内部のガス圧と外部の水圧との差圧(以下、ベローズ差圧という)でベローズを収縮させ、テコの原理で試験荷重を増幅する構造になっている。しかし、照射キャプセル内では、照射環境に置かれることやスペースの制約もあり、試験片に負荷される荷重を実測することができない。そのため、照射下でのき裂進展試験に先立って、炉外試験により高温高压水中におけるベローズ差圧と試験荷重の関係を精度良く評価しておく必要がある。

本試験では、炉外のオートクレーブ及び高温水循環装置を用いて、ユニットの高温高压水中荷重測定を行うとともに、ユニットを用いた SCC 進展試験を実施し、ユニットの荷重制御方法について確認した。

5.2.3.2 ユニットの高温高压水中荷重測定

(1) 試験内容

オートクレーブ内にユニット、ベローズおよび高温用ロードセルを取付け、オートクレーブ内試験水圧(約 8.5 MPa)とベローズ内窒素ガス圧(3.5~8.5 MPa)により得られるベローズ差圧と、ロードセルに出力された作用点荷重の関係を求めた。以下に試験条件を示すとともに、表 5.2.3-1 にユニットの組合せ、図 5.2.3-1 にユニットの高温高压水中荷重測定試験概念図、図 5.2.3-2 にユニット及びロードセルの組合せ図、図 5.2.3-3 にユニット及びロードセルのオートクレーブ内設置概念図を示す。

<試験条件>

- ・ 試験水温度： 室温および高温(288~290℃)
- ・ 試験水圧力： 約 8.5 MPa
- ・ ボンベ 2 次圧(窒素ガス)： 約 9.5 MPa
- ・ 水の導電率： $\leq 0.3 \mu\text{S/m}$ (入口、出口)
- ・ ベローズ内部ガス圧： 約 3~9 MPa(試験水圧力との最大差圧 6 MPa)
- ・ 目標出力荷重(ロードセル)： 0~7 kN(全負荷モード)
3~5 kN(部分負荷モード 1)
2~4 kN(部分負荷モード 2)
- ・ 測定データ： 水圧、ベローズガス圧、ロードセル作用点荷重、ユニット近傍温度

- ・ ユニット数： 4ユニット
- ・ 支点ピン： 3種類
- ・ 試験パターン
 - STEP 1： 室温高圧水中での荷重測定(室温 1 回目)
 - STEP 2： 高温高圧水中での荷重測定(高温 1 回目)
 - STEP 3： 室温高圧水中での荷重測定(室温 2 回目)
 - STEP 4： 高温高圧水中での荷重測定(高温 2 回目)
 - STEP 5： 室温高圧水中での荷重測定(室温 3 回目)

(2) ユニット荷重測定(組合せ①)の試験手順

1) 試験準備

ベローズ、ロードセルとともにユニットを図 5.2.3-2 の模式図の様に組立て、オートクレーブ内に設置した。この際、試験容器との干渉を避けながらベローズ推力以外の荷重(自重は除く)がロードセルに加わることの無い様、適切なサポート治具を用いた。ユニットの設置後、ガス圧制御装置(5.3.8 章参照)及び計測機器との接続、オートクレーブの蓋締め、通水を行った。

2) STEP 1： 室温荷重測定(室温 1 回目)

i. 試験開始

オートクレーブ内水圧を 0.4 MPa に昇圧後、ガス圧制御装置によりガス圧を水圧に追従させながら、オートクレーブ水圧を 8.5 MPa まで上昇(昇圧速度:20 kPa/s 以下)させた。水圧安定後、以下の試験を実施した。

ii. 目標荷重 0~7 kN(全負荷モード)

ガス圧制御装置により荷重が 7 kN となるようにベローズ差圧設定値を段階的に変更した。但し、荷重が 7 kN に達しない時の上限差圧を 5 MPa とした。目標到達後、ベローズ差圧が 0~4.50 MPa の間で昇降圧(昇降圧速度:20 kPa/s)を繰り返すようにガス圧を制御し、ロードセルにより荷重測定を行った。3 サイクル終了後、測定を終了した。目標荷重とベローズ差圧の関係を表 5.2.3-2 に示す。

iii. 目標荷重 3~5 kN(部分負荷モード 1)

ガス圧制御装置により荷重が 5 kN となるようにベローズ差圧設定値を段階的に変更した。目標到達後、ベローズ差圧が 1.70~3.40 MPa の間で昇降圧(昇降圧速度:20 kPa/s)を繰り返すようにガス圧を制御し、ロードセルにより荷重測定を行った。3 サイクル終了後、測定を終了した。目標荷重とベローズ差圧の関係を表 5.2.3-2 に示す。

iv. 目標荷重 2~4 kN(部分負荷モード 2)

ガス圧制御装置により荷重が 4 kN となるようにベローズ差圧設定値を段階的に変更した。目標到達後、ベローズ差圧が 0.90~2.80 MPa の間で昇降圧(昇降圧速度：20 kPa/s)を繰り返すようにガス圧を制御し、ロードセルにより荷重測定を行った。3 サイクル終了後、測定を終了した。目標荷重とベローズ差圧の関係を表 5.2.3-2 に示す。

v. 試験終了

ガス圧制御装置によりガス圧を水圧に追従させながら、オートクレーブ水圧を 0.4 MPa に降圧(降圧速度:20kPa/s 以下)し、ガス圧制御装置停止、オートクレーブ水圧を大気圧に降圧し、室温荷重測定①を終了した。

3) STEP 2：高温荷重測定(高温 1 回目)

上記 2) i.と同様に水圧安定後、水温を 288℃まで昇温し、水温安定後、上記 2) ii.~v.と同様の試験を高温で実施した。目標荷重とベローズ差圧の関係を表 5.2.3-2 に示す。

4) STEP 3：室温荷重測定(室温 2 回目)

上記 3)の高温荷重測定終了後、水圧を維持したまま水温を室温まで降温させ、上記 2) ii.~v.と同様に試験を実施した。目標荷重とベローズ差圧の関係を表 5.2.3-2 に示す。

5) STEP 4：高温荷重測定(高温 2 回目)

上記 3)と同様に試験を実施した。目標荷重とベローズ差圧の関係を表 5.2.3-2 に示す。

6) STEP 5：室温荷重測定(室温 3 回目)

上記 4)と同様に試験を実施した。目標荷重とベローズ差圧の関係を表 5.2.3-2 に示す。

7) オートクレーブ開放、ユニット等の取り外し

ガス圧制御装置によりガス圧を水圧に追従させながら、オートクレーブ水圧を 0.4 MPa に降圧(降圧速度：20 kPa/s 以下)し、ガス圧制御装置停止、オートクレーブ水圧を大気圧まで降圧したことを確認した後、オートクレーブ内の排水・開放、ユニットおよびベローズを取り外した。

(3) ユニット荷重測定(組合せ②～⑦)の試験手順

組合せ①と同様の手順で試験を実施した。なお、組合せ③以降の試験では、STEP 4(高温 2 回目)及び STEP 5(室温 3 回目)において、ベローズ差圧ゼロ時点でロードセルのゼロ点補正を実施することとした。目標荷重とベローズ差圧の関係を表 5.2.3-3～5 に示す。

(4) ユニット荷重測定の試験結果

図 5.2.3-4～5.2.3-10 にユニットの荷重測定試験結果、写真 5.2.3-1～2 に試験前後のユニット設置状況の外観写真の一例を示す。

全ての組合せ(①～⑦)について、図 5.2.3-4～10 に示すように、ベローズ差圧ゼロ時の荷重のゼロ点補正をして正味の荷重を見ると、室温および高温のいずれの条件においても 5 MPa のベローズ差圧で 7 kN に到達しない結果となった。

ベローズ差圧－荷重曲線の挙動は、目標出力荷重 0～7 kN(全負荷モード)の場合、いずれの測定においても負荷時と除荷時の挙動が異なるヒステリシス曲線を示した。具体的には、負荷時の挙動は差圧の上昇と共に荷重も直線的に増加したが、除荷時は途中で差圧と荷重の減少比率が変化し変曲点を持つ曲線となった。3 回連続で実施した時の繰り返し精度は、ほぼ線図が重なっており良い再現性を示していた。

また、室温条件の測定では、ベローズ差圧の上昇、下降と共に、荷重は滑らかに上昇、下降する波形であったが、高温条件では、ベローズ差圧の上昇時、急激に荷重値が上昇する階段状の波形がみられ、この傾向は下降時にも同様にみられた。

次に温度条件毎に比較すると、室温 1 回目の測定では、最大荷重 7 kN 時の差圧が他と比較して小さく、下降時の挙動が他の 2 つとは異なり、比較的高差圧側に変曲点があるヒステリシス曲線であった。室温 2 回目及び室温 3 回目のヒステリシスの形状はほぼ一致した。一方、高温条件で比較した場合は、2 回の測定がほぼ一致した。この傾向は、高温水中で一度使用したことのあるユニットや支点ピンを使用した場合も含めて、全ての組合せでみられた。

このように、ユニットをセッティング後、最初に高温にしたことで状態が安定化していることから、高温水条件に浸漬されることにより表面に生成する酸化スケール等の影響で摩擦抵抗が変化したため、ヒステリシスの形状が変化したものと考えられる。

目標出力荷重が 3～5 kN(部分負荷モード 1)や 2～4 kN(部分負荷モード 2)の場合も同様に差圧－荷重曲線はヒステリシスループを描いたが、ヒステリシスの幅が狭くなり、組合せによってはほぼ直線的な挙動を示す場合もあった。

組合せ⑤～⑦(図 5.2.3-8～10)を比較すると、支点ピン径が小さくなるほど、ヒステリシスの幅が小さくなる傾向が見られた。このことから、支点ピン部の摩擦がヒステリシスの発生に大きく関与していることが確認できた。

荷重測定試験前後のユニット設置状況については、いずれの組合せにおいても、写真

5.3.2-1～2 に示すように、ユニット本体やベローズ、ベローズガスチューブがオートクレーブ内壁と十分な間隔を維持して設置されており、各部位においても接触・干渉を示すような明瞭な変化は観察されなかった。

5.2.3.3 ユニットを用いた SCC 進展試験

(1) 試験内容

ユニットとガス圧制御装置及びループ付オートクレーブを用いて高温高圧水中 SCC 進展試験を行った。

試験中き裂のオンラインモニタリングを直流電位差法(以下、PDM 法)にて行い、試験終了後の破面観察及び試験時間、PDM データよりき裂進展速度を算出した。

以下に試験条件を示すとともに、図 5.3.2-11 にユニットを用いた SCC 進展試験の概念図、写真 5.3.2-3 に試験片取付状況の外観写真を示す。

<試験条件>

- ・ 試験片： ウィンゲ一体型 0.5T-CT 試験片(SUS304 鋭敏化熱処理材)(図 5.2.3-12)
- ・ 温度： 288°C
- ・ 圧力： 9 MPa 程度
- ・ 水の導電率： 入口 $\leq 0.1 \mu\text{ S/cm}$ (室温)
出口 $\leq 0.2 \mu\text{ S/cm}$ (室温)(目標値)
- ・ 溶存酸素濃度： 8 ppm
- ・ 溶存水素濃度： 200 ppb
(溶存酸素/溶存水素濃度はオートクレーブ入口側の濃度で制御し、試験状況を見ながら随時調整した)
- ・ pH： 6～7 程度(室温または約 25°C)
- ・ 循環流量： 30 L/h (圧力容器容量 8 L 3.7 回/h)
(圧力容器の容量分を 1 時間に 3 回以上入れ替わる流量)
- ・ 腐食電位測定： 試験中、参照電極に対し、SUS304 試料及び Pt 試料の腐食電位を計測した。
- ・ PDM 計測： 試験片ウィンゲ部に所定の間隔で PDM 計測用のリード線を取付けた。
リード線の材質には絶縁被覆を施した SUS 線を用いた。図 5.2.3-12 にリード線取り付け位置を示す。
- ・ 荷重負荷方式： ユニット及びガス圧制御装置によるベローズ差圧テコ式
- ・ 環境中予き裂導入時の荷重負荷条件：
 - ・ K 値^{※1}： 15→18→19.5 MPa $\sqrt{\text{m}}$ (ベローズ差圧により負荷)
 - ・ 応力比(R)： 0.7
 - ・ 周波数： 0.01～0.0001 Hz

波形： 三角波またはそれに同等な波形

試験時間： 約 550 時間

- ・ 定荷重試験時の荷重負荷条件：

K 値^{※1}： 19.5 MPa√m(ベローズ差圧により負荷)

試験時間： 約 300 時間

(※1 側面き裂及び差圧－荷重曲線より算出した値)

(2) SCC 進展試験結果

図 5.2.3-13 に試験環境及び腐食電位の測定結果、図 5.2.3-14 にベローズガス圧と水圧の経時変化、写真 5.2.3-4 に試験前後の試験片外観、写真 5.2.3-5 に CT 試験片破面の外観写真およびビデオマイクロ拡大観察、写真 5.2.3-6～7 に破面 SEM 観察像、図 5.2.3-14 に破面のトレース図、図 5.2.3-15 にき裂長さの経時変化を示す。

図 5.2.3-13 に示すように、試験温度は $288 \pm 1^\circ\text{C}$ の範囲で安定していた。水の導電率は、入口側は試験期間中 $0.1 \mu\text{S/cm}$ 以下で安定し、出口側は $0.2 \mu\text{S/cm}$ 以下で安定していた。

NWC 環境条件での溶存酸素濃度は制御を行った入口側は $8 \pm 0.2 \text{ ppm}$ の範囲で安定し、出口側は $7.7 \sim 7.9 \text{ ppm}$ の範囲で安定した。HWC 環境条件での溶存水素濃度は入口側・出口側共に $200 \pm 20 \text{ ppb}$ で安定していた。

NWC 環境条件での腐食電位は試験開始と共に徐々に上昇し、試験時間 300 h 経過したあたりから安定し、SUS304 が約 150 mV vs. SHE 、Pt が約 200 mV vs. SHE を示した。HWC 環境条件への変更後は、時間の経過と共に低下し、試験終了時点では SUS304 が約 -520 mV vs. SHE 、Pt が約 -480 mV vs. SHE を示した。

図 5.2.3-14 に示すように、ベローズ外面にあたるオートクレーブ内の水圧は細かな変動はみられるが、 $8.6 \pm 0.2 \text{ MPa}$ の範囲で安定していた。

ベローズガス圧について、定荷重条件の期間中は、目標差圧に対して $\pm 5\%$ 程度のバラツキがみられた。なお、ベローズガス圧は途中、差圧が小さい試験荷重 P_{\min} 側で停止する状態が時折みられ、最長で 40 h 程度連続で停止する期間があった。これはガス圧制御装置の制御特性に起因するものであるため、今後改善を検討している。

また、試験期間中の pH は $6.2 \sim 6.4$ の範囲であった。

写真 5.2.3-4 に示すように、試験後の試験片外面はいずれも高温純水中に曝された場合に生じる褐色の皮膜がみられた。

写真 5.2.3-5 および図 5.2.3-14 に示すように、強制破断後の破面の外観から、大気中予き裂先端から色調の異なる破面が確認され、大気中予き裂部や強制破断部とは破面形状が異なっており、先端にはひげ状にき裂が認められたことから SCC き裂が進展していると思われる。

写真 5.2.3-6～7 に示すように、破面の SEM 観察において、粒内および粒界の破面が

みられた。粒内型の破面は大気中予き裂の前縁に試験片板厚の全体でみられ、大気中予き裂導入時の記録から環境中で生じたものと推察される。また、粒界型の破面は板厚の中央付近のみで進展していた。

図 5.2.3-15 に示すように、各変動荷重条件および定荷重条件のいずれの条件においても PDM によるき裂長さ測定においてき裂の進展がみられた。

き裂長さの経時変化から算出したき裂進展速度は、NWC 模擬環境条件では 1.8×10^{-10} m/s であった。但し、規格案 (5.2.3-1) の基準に準じ、暫定き裂進展速度とした。なお、比較として HWC 模擬環境条件のき裂進展速度を算出すると 6.0×10^{-11} m/s であった。

一方、評価区間の平均き裂長さとして試験後の荷重測定で求めた試験荷重より応力拡大係数を算出すると $K=24.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ となった。これを発電用原子力設備維持規格 (5.2.3-2) にある BWR 通常炉内水質環境中の SCC き裂進展速度線図と比較すると鋭敏化 304 材の値よりも若干低い値を示しており、概ね妥当な値であると思われる。

このように、ベローズガス圧の制御によりユニットを用いて試験片への負荷荷重を制御し、環境中予き裂導入から定荷重試験及び水素注入までの一連の試験を実施し、SCC 進展試験手順が問題なく実施できることを確認した。

参考文献

- (5.2.3-1) 社団法人腐食防食協会：フォーラム [主題] 軽水炉水環境中における応力腐食き裂進展試験方法， 2009.7.13(東京), p.69～78.
- (5.2.3-2) 日本機械学会：発電用原子力設備 維持規格 JSME S NA1-2004.

表 5.2.3-1 ユニットとベローズの組合せ

組合せ番号	ユニット No.	ベローズ No.	支点ピン径	備考
①	AB1	B1	φ5.99 mm	
②	AB2	B2	φ5.99 mm	
③	AB4	A5	φ5.99 mm	SCC 試験前
④	AB4	A5	φ5.99 mm	SCC 試験後
⑤	AB3	B3	φ5.99 mm	支点ピン径 の影響調査
⑥	AB3	B3	φ5.95 mm	
⑦	AB3	B3	φ5.91 mm	

表 5.2.3-2 組合せ①(ユニット AB1/ベローズ B1)の目標荷重とベローズ差圧の関係

組合せ 番号	STEP	負荷モード (目標荷重)	最小差圧 (MPa)	最大差圧 (MPa)
①	1(室温 1 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.50
		部分負荷(3~5 kN)	1.70	3.40
		部分負荷(2~4 kN)	0.90	2.80
	2(高温 1 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.50
		部分負荷(3~5 kN)	1.30	3.20
		部分負荷(2~4 kN)	0.80	2.50
	3(室温 2 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.90
		部分負荷(3~5 kN)	1.50	3.60
		部分負荷(2~4 kN)	0.90	2.90
	4(高温 2 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.50
		部分負荷(3~5 kN)	1.30	3.20
		部分負荷(2~4 kN)	0.80	2.50
	5(室温 3 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.90
		部分負荷(3~5 kN)	1.60	3.60
		部分負荷(2~4 kN)	0.90	2.90

表 5.2.3-3 組合せ②(ユニット AB2/ベローズ B2)及び組合せ③(ユニット AB4/ベローズ A5(SCC 試験前))の目標荷重とベローズ差圧の関係

組合せ 番号	STEP	負荷モード (目標荷重)	最小差圧 (MPa)	最大差圧 (MPa)
②	1(室温 1 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.40
		部分負荷(3~5 kN)	1.50	3.20
		部分負荷(2~4 kN)	1.00	2.50
	2(高温 1 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.40
		部分負荷(3~5 kN)	1.20	3.10
		部分負荷(2~4 kN)	0.70	2.40
	3(室温 2 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.80
		部分負荷(3~5 kN)	1.50	3.50
		部分負荷(2~4 kN)	0.90	2.70
	4(高温 2 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.50
		部分負荷(3~5 kN)	1.20	3.10
		部分負荷(2~4 kN)	0.70	2.50
	5(室温 3 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.90
		部分負荷(3~5 kN)	1.50	3.40
		部分負荷(2~4 kN)	0.90	2.70
③	1(室温 1 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.80
		部分負荷(3~5 kN)	1.70	3.40
		部分負荷(2~4 kN)	1.00	2.80
	2(高温 1 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.80
		部分負荷(3~5 kN)	1.40	3.40
		部分負荷(2~4 kN)	0.80	2.70
	3(室温 2 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	5.00
		部分負荷(3~5 kN)	1.70	3.60
		部分負荷(2~4 kN)	1.10	2.90
	4(高温 2 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	5.00
		部分負荷(3~5 kN)	1.90	3.80
		部分負荷(2.2~2.9 kN)	1.67	2.39
	5(室温 3 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	5.00
		部分負荷(3~5 kN)	2.00	3.90
		部分負荷(2.2~2.9 kN)	1.77	2.39

表 5.2.3-4 組合せ④(ユニット AB4/ペローズ A5(SCC 試験後))及び組合せ⑤(ユニット AB3(支点ピン径：φ5.99 mm)/ペローズ B3)の目標荷重とペローズ差圧の関係

組合せ 番号	STEP	負荷モード (目標荷重)	最小差圧 (MPa)	最大差圧 (MPa)
④	1(室温 1 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.90
		部分負荷(3~5 kN)	1.60	3.50
		部分負荷(2~4 kN)	0.90	2.80
	2(高温 1 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.80
		部分負荷(3~5 kN)	1.50	3.40
		部分負荷(2~4 kN)	0.80	2.70
	3(室温 2 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	5.00
		部分負荷(3~5 kN)	1.60	3.60
		部分負荷(2~4 kN)	1.00	2.90
	4(高温 2 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	5.00
		部分負荷(3~5 kN)	1.80	3.80
		部分負荷(2~4 kN)	1.20	3.10
	5(室温 3 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	5.00
		部分負荷(3~5 kN)	1.90	4.10
		部分負荷(2~4 kN)	1.30	3.30
⑤	1(室温 1 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.50
		部分負荷(3~5 kN)	1.60	3.20
		部分負荷(2~4 kN)	1.00	2.50
	2(高温 1 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.60
		部分負荷(3~5 kN)	1.30	3.30
		部分負荷(2~4 kN)	0.70	2.60
	3(室温 2 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.90
		部分負荷(3~5 kN)	1.50	3.50
		部分負荷(2~4 kN)	0.90	2.80
	4(高温 2 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	5.00
		部分負荷(3~5 kN)	1.70	3.60
		部分負荷(2~4 kN)	1.10	2.90
	5(室温 3 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	5.00
		部分負荷(3~5 kN)	1.90	3.90
		部分負荷(2~4 kN)	1.20	3.20

表 5.2.3-5 組合せ⑥(ユニット AB3(支点ピン径：φ5.95 mm)/ベローズ B3)及び組合せ⑦
(ユニット AB3(支点ピン径：φ5.91 mm)/ベローズ B3)の目標荷重とベローズ差圧の関係

組合せ 番号	STEP	負荷モード (目標荷重)	最小差圧 (MPa)	最大差圧 (MPa)
⑥	1(室温 1 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.50
		部分負荷(3~5 kN)	1.60	3.30
		部分負荷(2~4 kN)	1.00	2.70
	2(高温 1 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.60
		部分負荷(3~5 kN)	1.40	3.30
		部分負荷(2~4 kN)	0.80	2.60
	3(室温 2 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.90
		部分負荷(3~5 kN)	1.50	3.50
		部分負荷(2~4 kN)	0.90	2.80
	4(高温 2 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	5.00
		部分負荷(3~5 kN)	1.80	3.60
		部分負荷(2~4 kN)	1.20	2.90
	5(室温 3 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	5.00
		部分負荷(3~5 kN)	2.00	3.90
		部分負荷(2~4 kN)	1.30	3.20
⑦	1(室温 1 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.60
		部分負荷(3~5 kN)	1.70	3.30
		部分負荷(2~4 kN)	1.10	2.70
	2(高温 1 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.50
		部分負荷(3~5 kN)	1.40	3.20
		部分負荷(2~4 kN)	0.80	2.60
	3(室温 2 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	4.90
		部分負荷(3~5 kN)	1.70	3.50
		部分負荷(2~4 kN)	1.00	2.80
	4(高温 2 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	5.00
		部分負荷(3~5 kN)	1.80	3.60
		部分負荷(2~4 kN)	1.20	2.90
	5(室温 3 回目)	全負荷(0~7 kN)	0.00	5.00
		部分負荷(3~5 kN)	2.00	3.90
		部分負荷(2~4 kN)	1.30	3.20

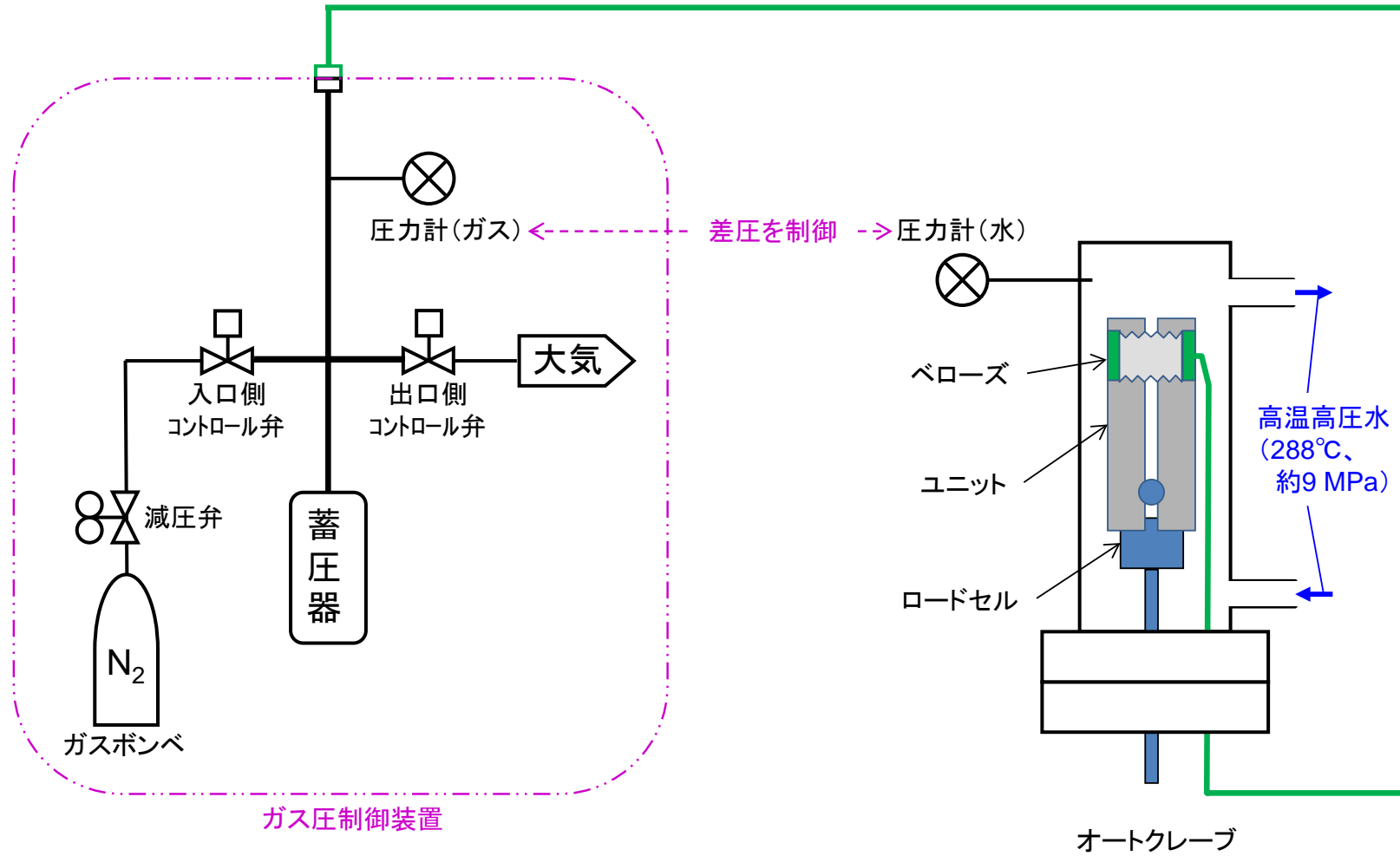


図 5.2.3-1 ユニットの高温高压水中荷重測定試験概念図

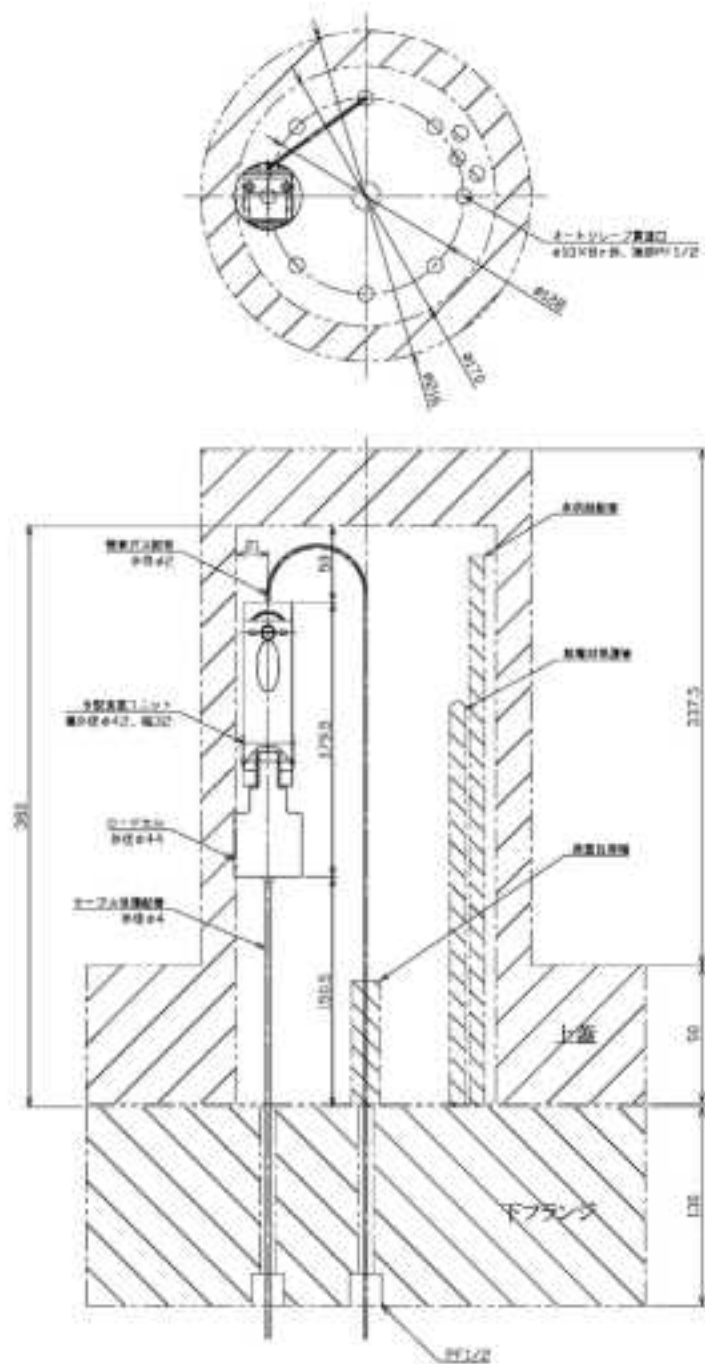


図 5.2.3-3 ユニット及びロードセルのオートクレープ内設置概念図

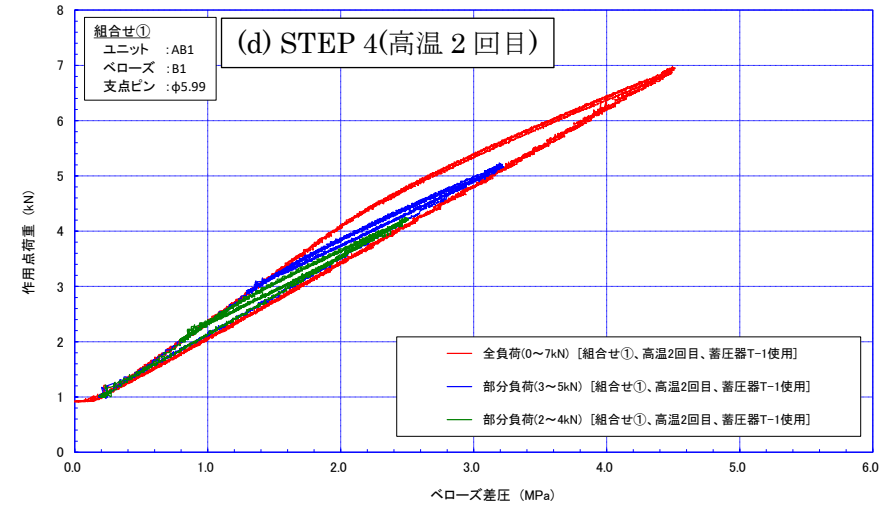
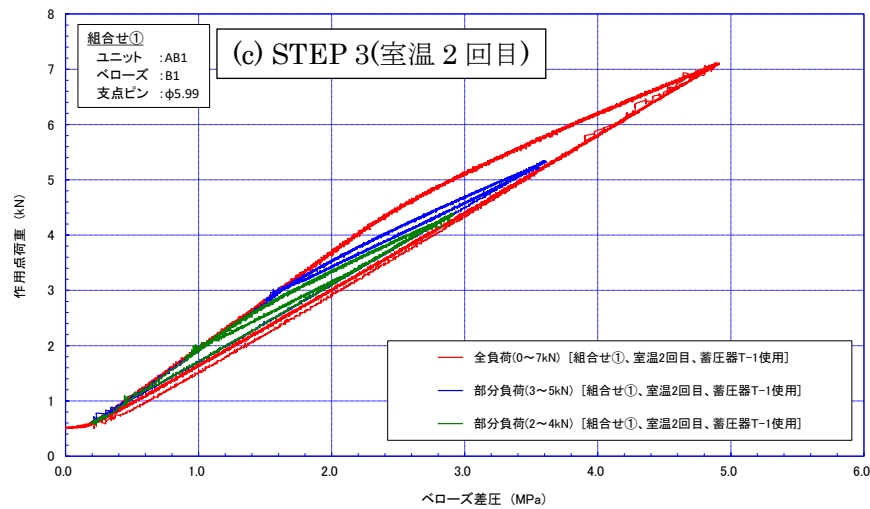
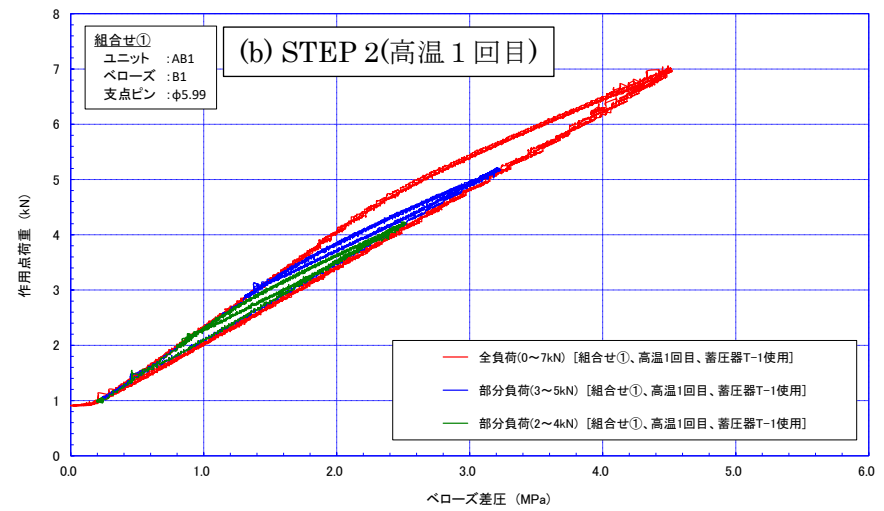
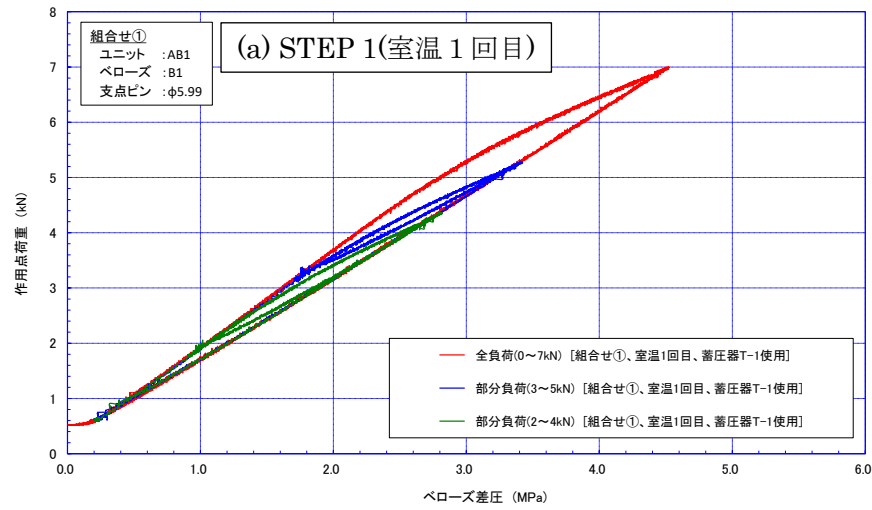


図 5.2.3-4 ユニットの荷重測定試験結果(組合せ①: ユニット AB1/ベローズ B1)

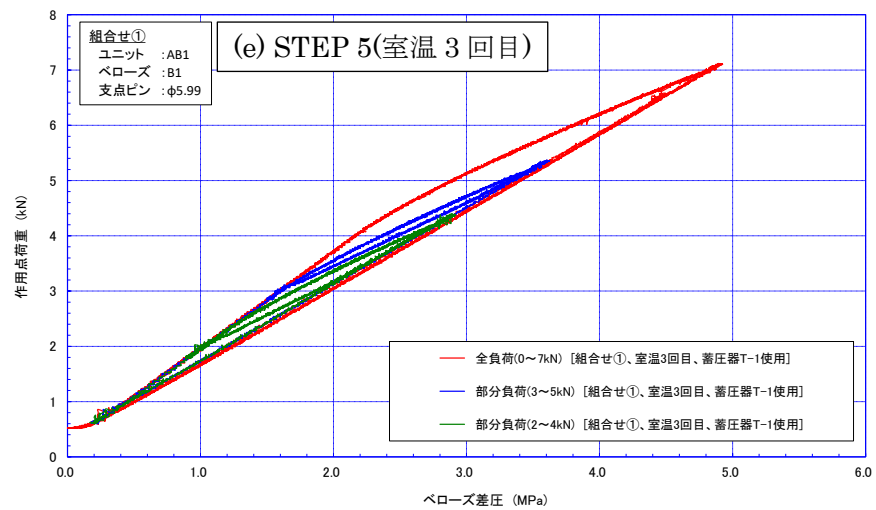


図 5.2.3-4 ユニットの荷重測定試験結果(組合せ①)：ユニット AB1/ベローズ B1(つづき)

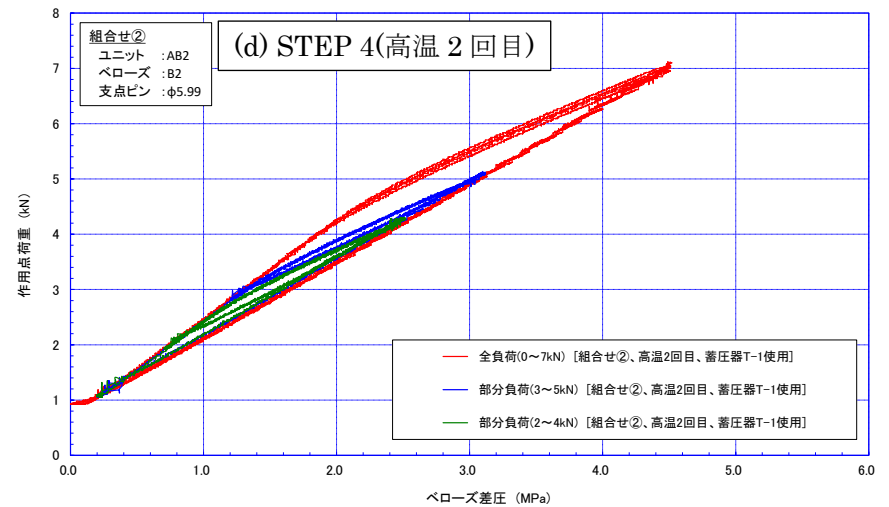
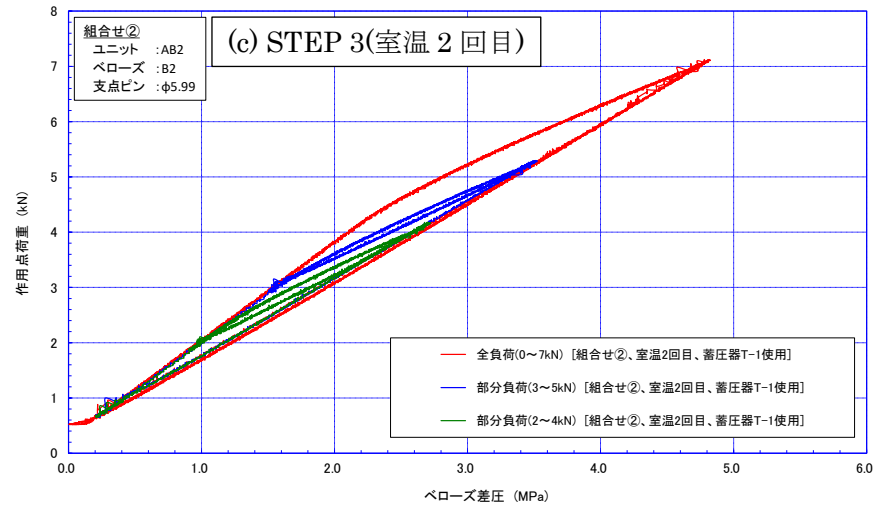
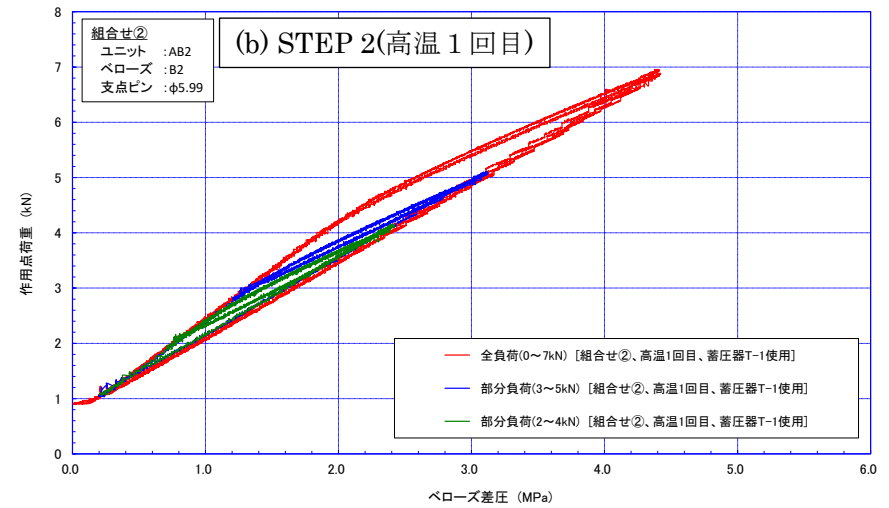
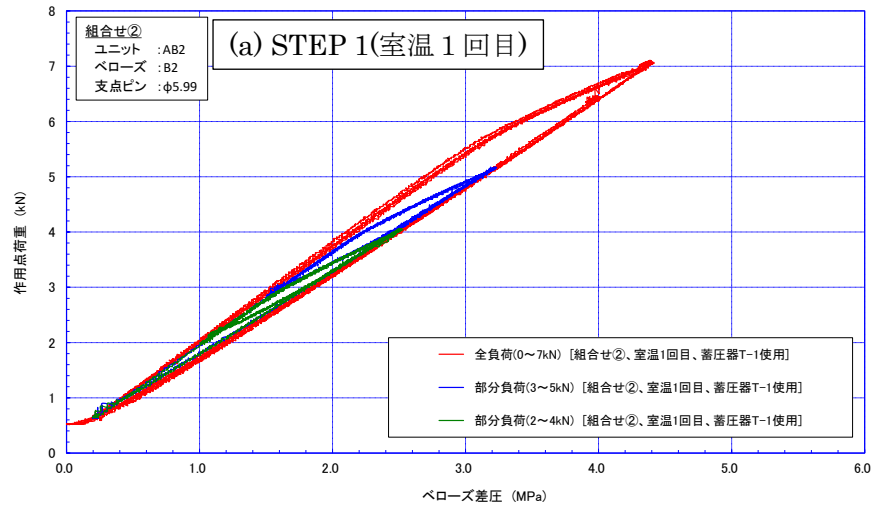


図 5.2.3-5 ユニットの荷重測定試験結果(組合せ②: ユニット AB2/ベローズ B2)

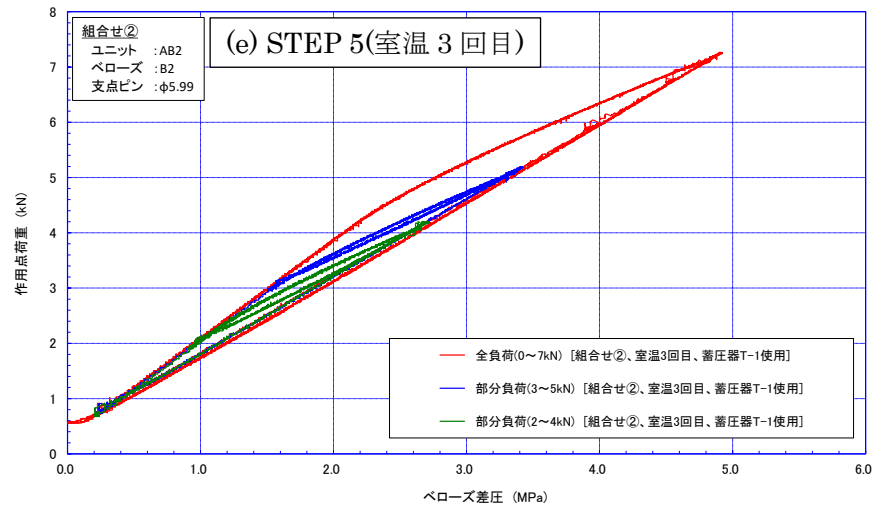


図 5.2.3-5 ユニットの荷重測定試験結果(組合せ②)：ユニット AB2/ペローズ B2)(つづき)

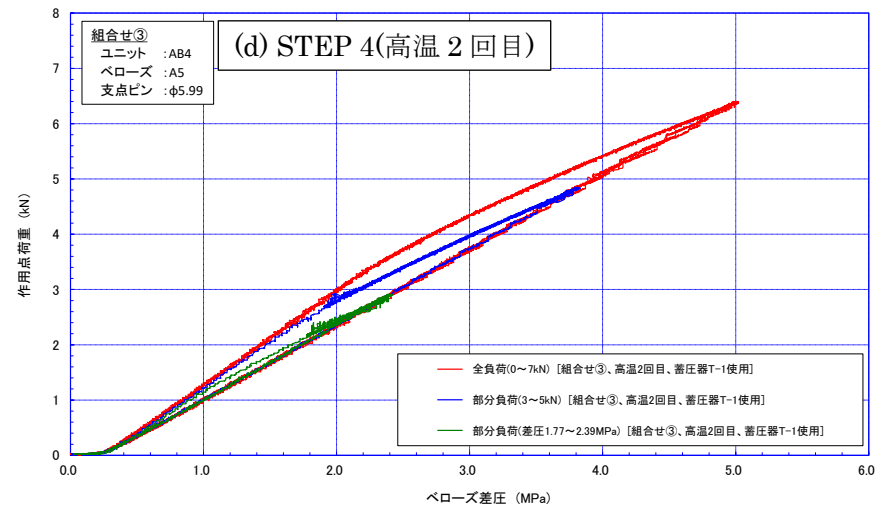
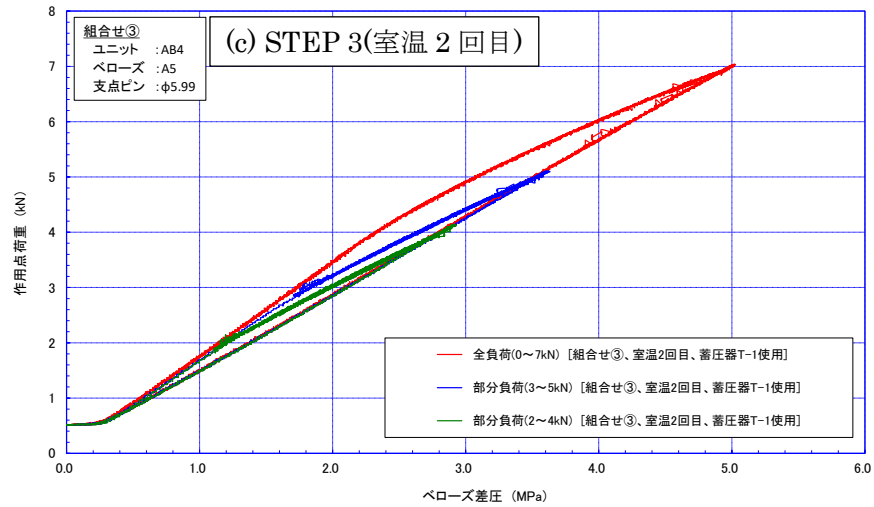
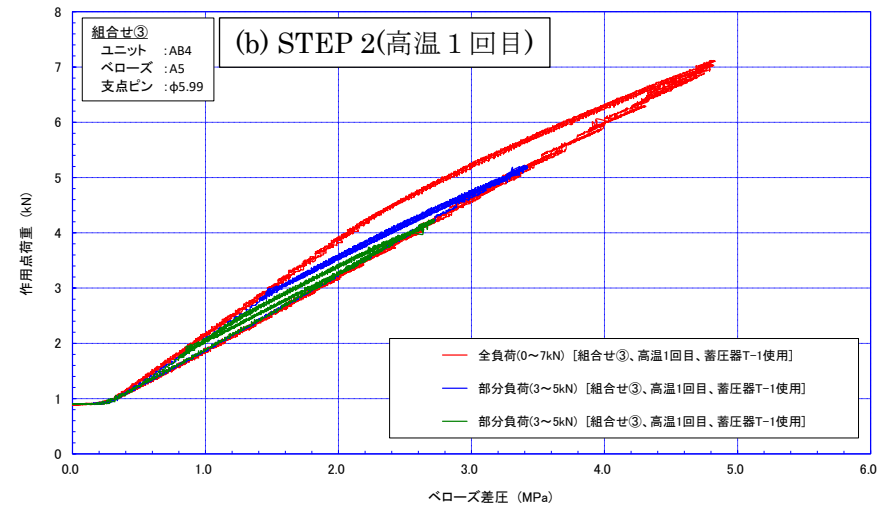
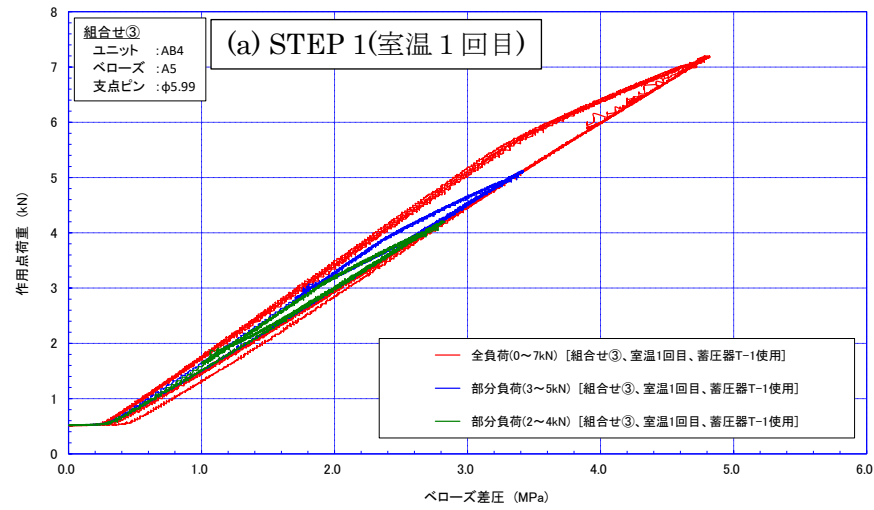


図 5.2.3-6 ユニットの荷重測定試験結果(組合せ③) : ユニット AB4/ベローズ A5(SCC 試験前)

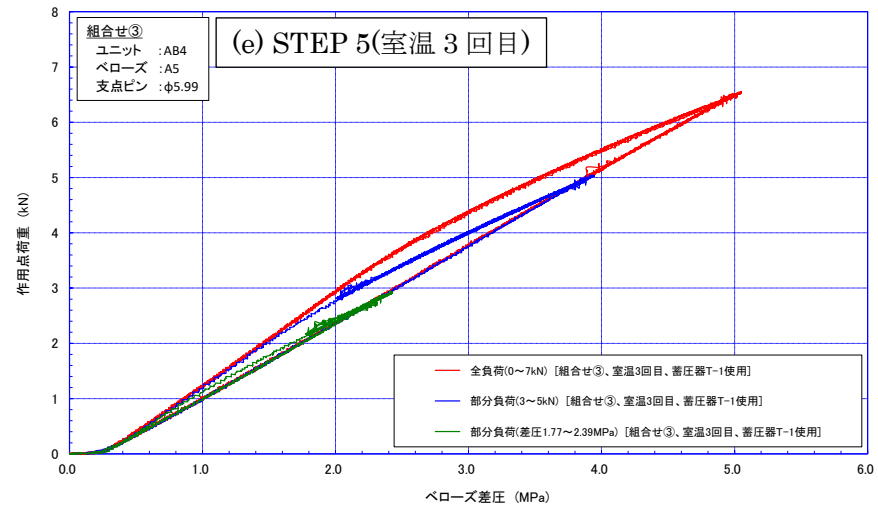


図 5.2.3-6 ユニットの荷重測定試験結果(組合せ③)：ユニット AB4/ペロース A5(SCC 試験前))(つづき)

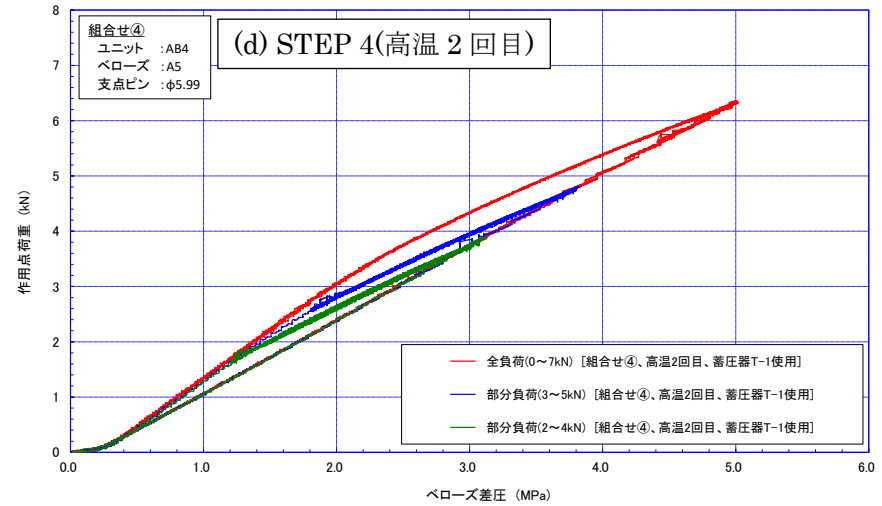
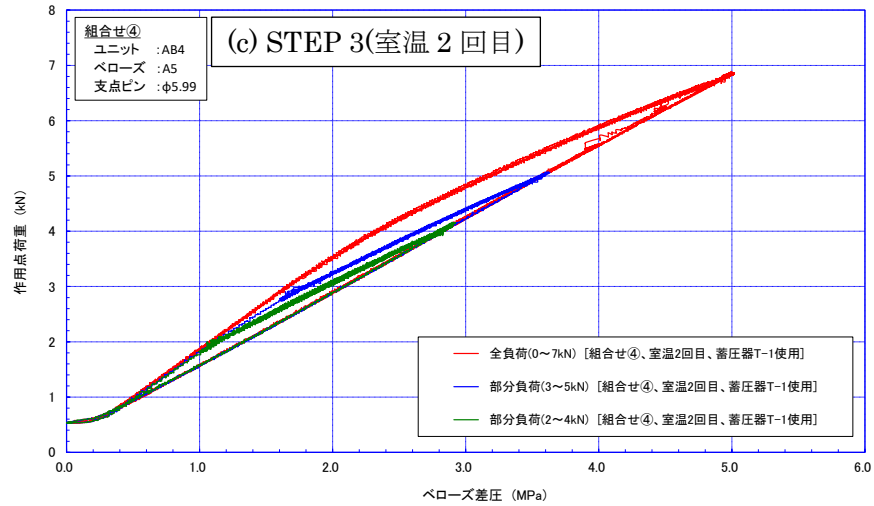
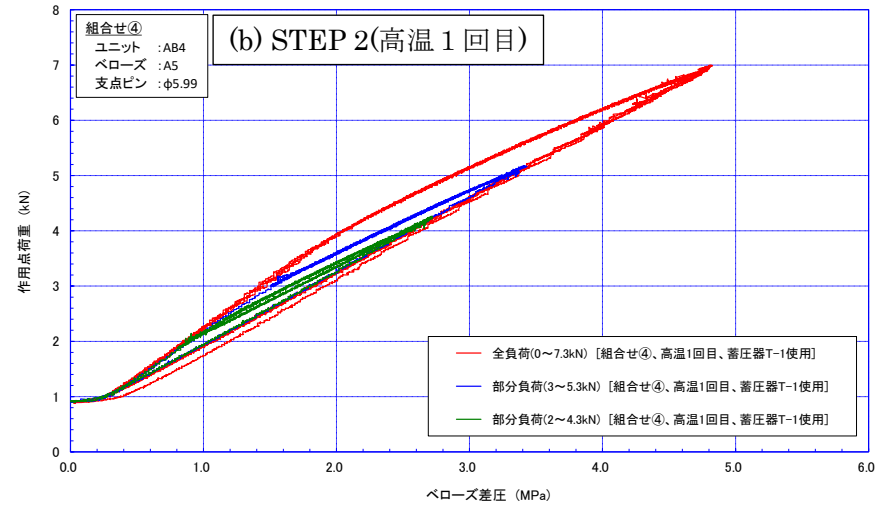
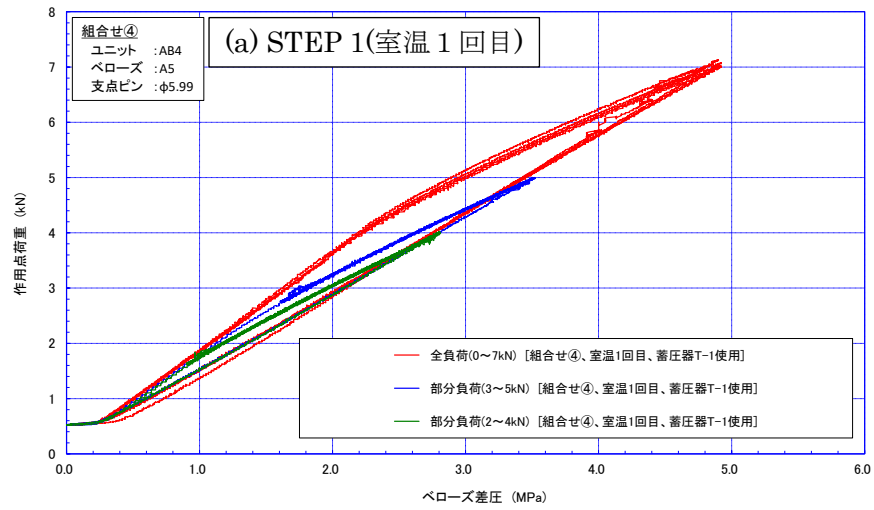


図 5.2.3-7 ユニットの荷重測定試験結果(組合せ④) : ユニット AB4/ベローズ A5(SCC 試験後)

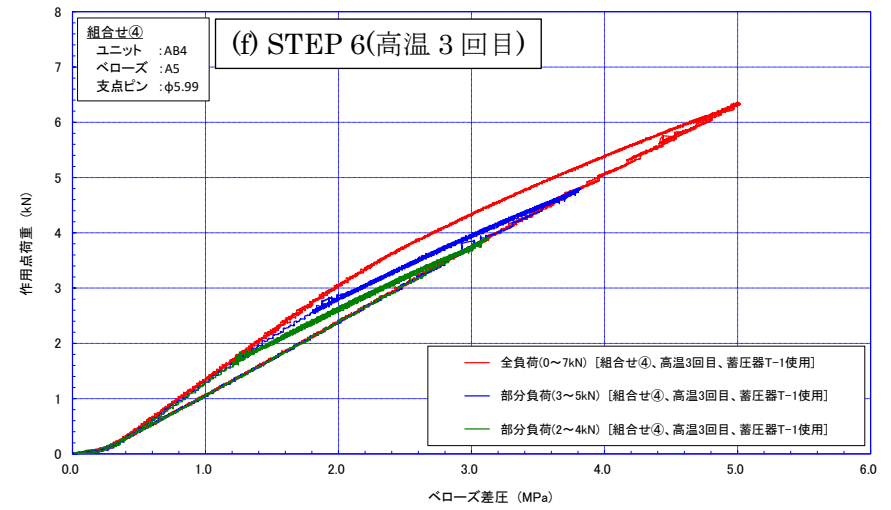
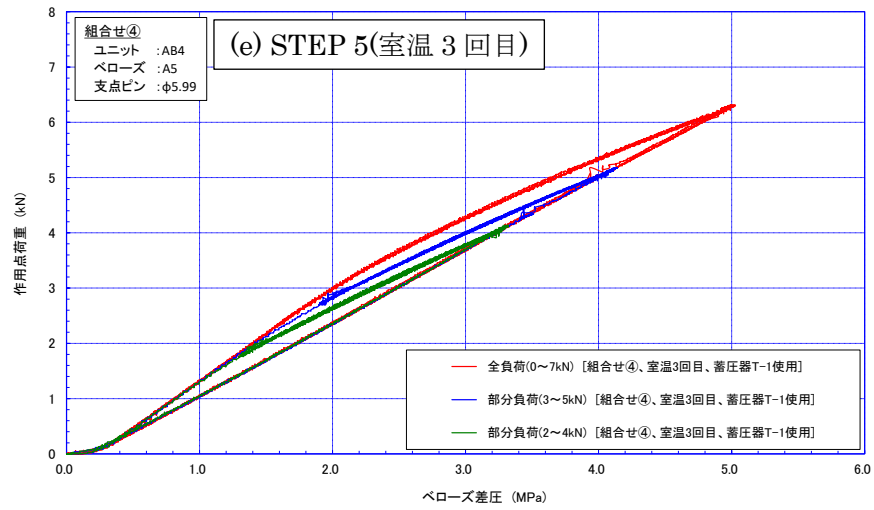


図 5.2.3-7 ユニットの荷重測定試験結果(組合せ④ : ユニット AB4/ペローズ A5(SCC 試験後))(つづき)

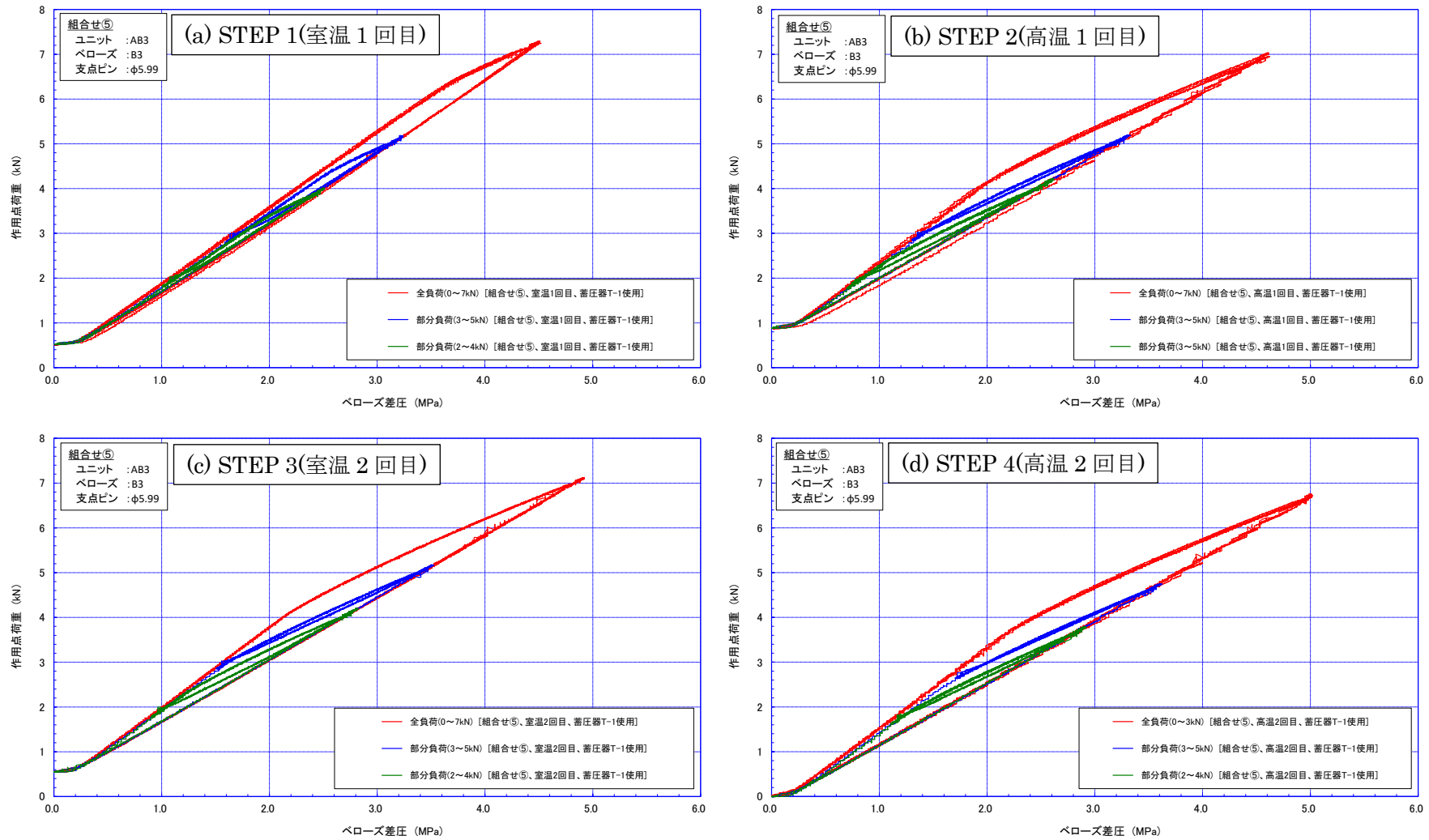


図 5.2.3-8 ユニットの荷重測定試験結果(組合せ⑤：ユニット AB3/ペローズ B3(支点ピン径： $\phi 5.99$ mm))

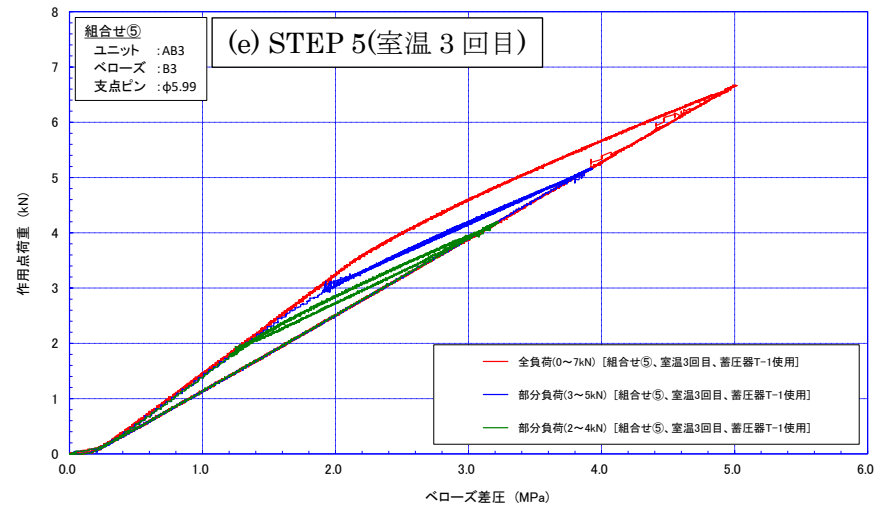


図 5.2.3-8 ユニットの荷重測定試験結果(組合せ⑤) : ユニット AB3/ペローズ B3(支点ピン径 : $\phi 5.99$ mm))(つづき)

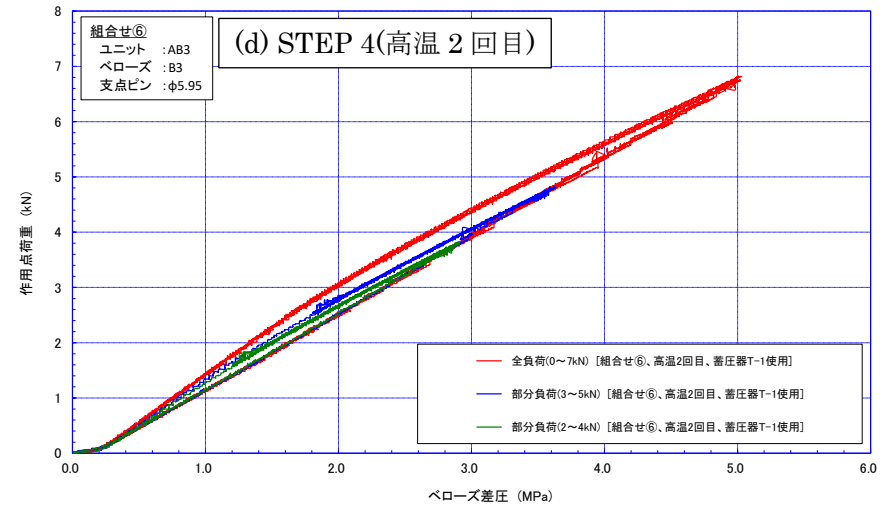
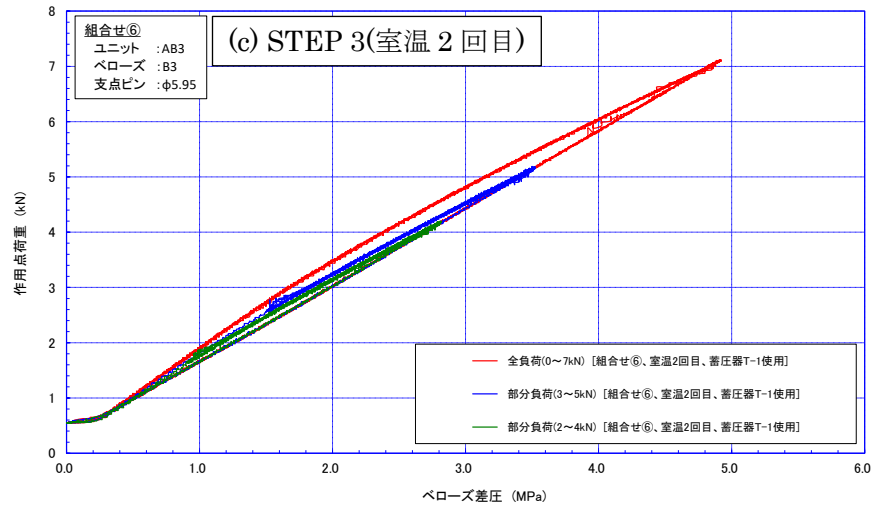
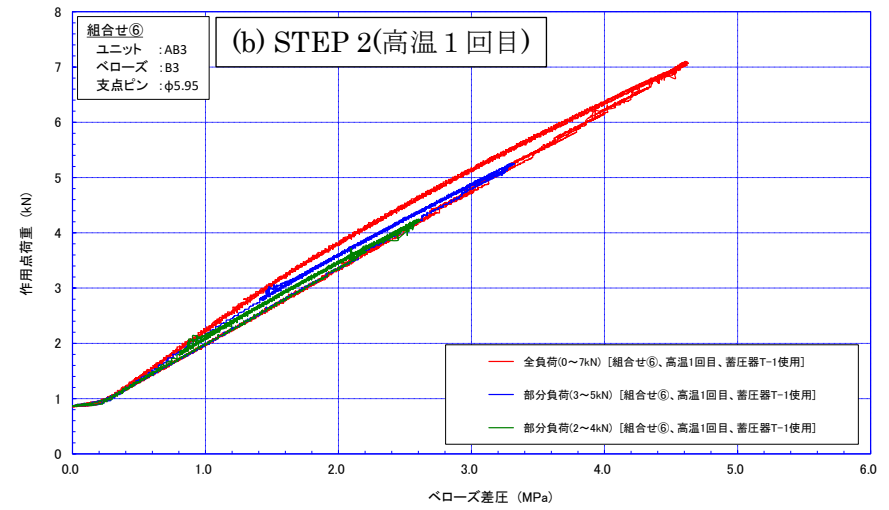
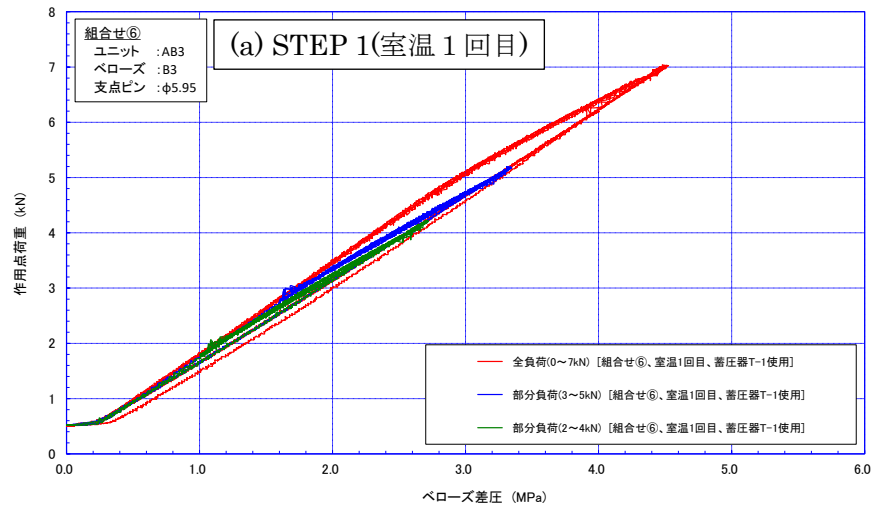


図 5.2.3-9 ユニットの荷重測定試験結果(組合せ⑥：ユニット AB3/ペローズ B3(支点ピン径： $\phi 5.95$ mm))

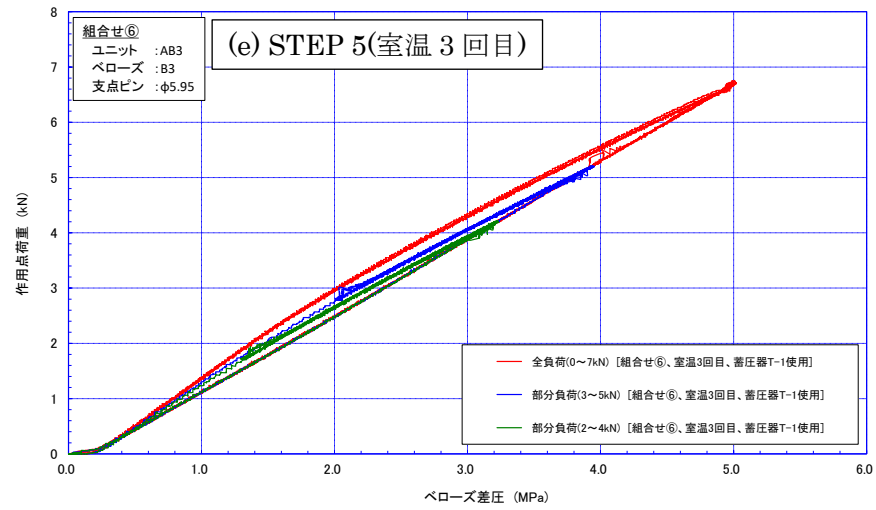


図 5.2.3-9 ユニットの荷重測定試験結果(組合せ⑥ : ユニット AB3/ペローズ B3(支点ピン径 : φ 5.95 mm))(つづき)

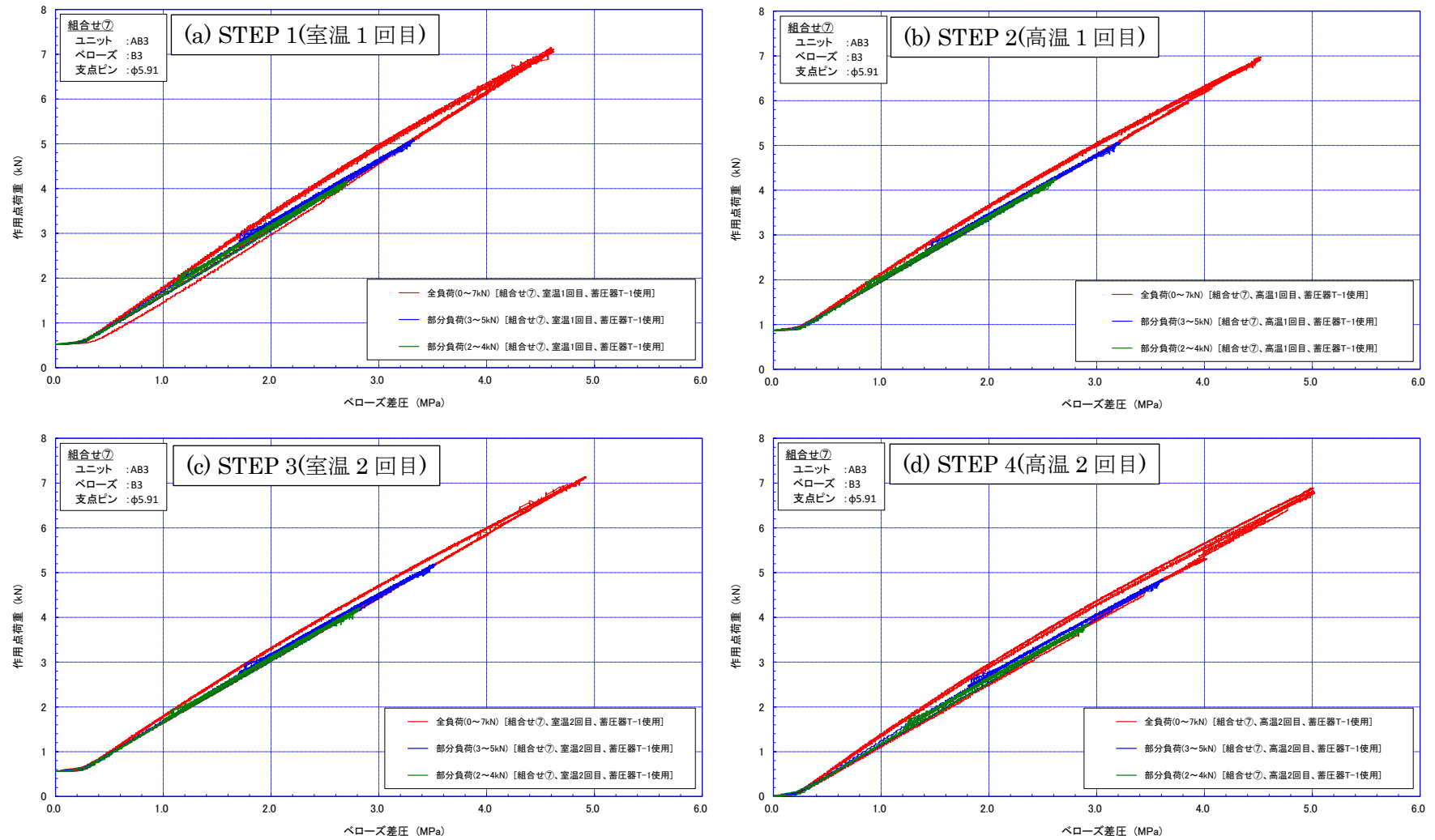


図 5.2.3-10 ユニットの荷重測定試験結果(組合せ⑦ : ユニット AB3/ペローズ B3(支点ピン径 : $\phi 5.91$ mm))

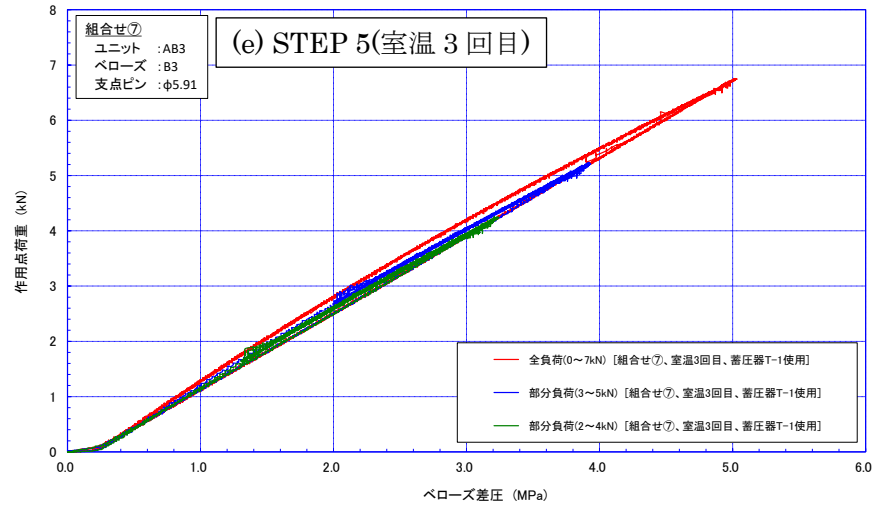


図 5.2.3-10 ユニットの荷重測定試験結果(組合せ⑦：ユニット AB3/ペローズ B3(支点ピン径：φ 5.91 mm))(つづき)

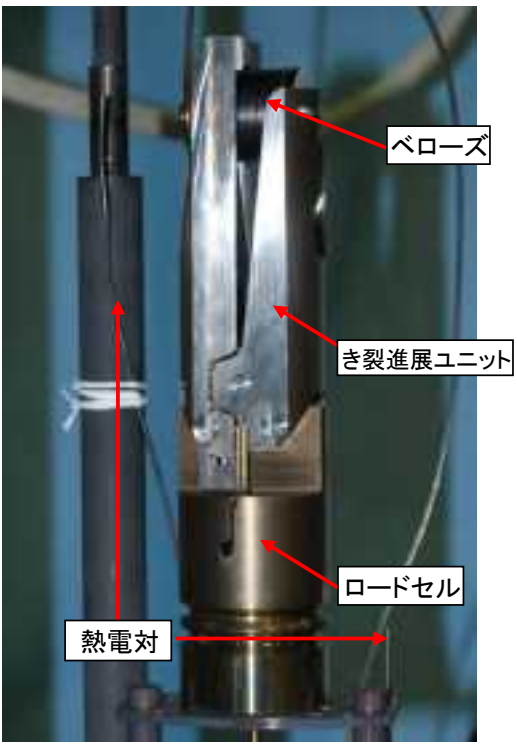


写真 5.2.3-1 ユニット設置状況(組合せ①/試験前)



写真 5.2.3-2 ユニット設置状況(組合せ①/試験後)

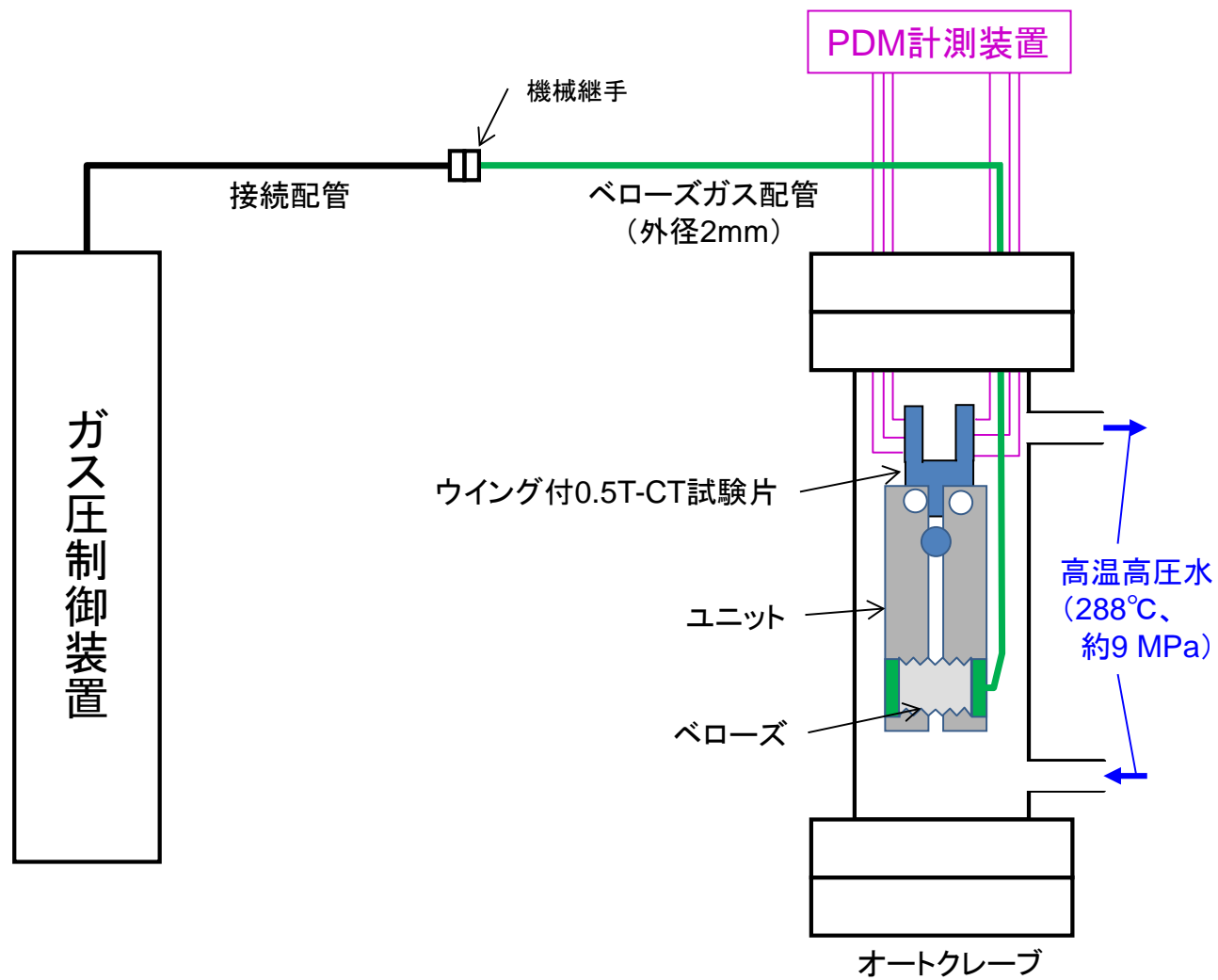


図 5.2.3-11 ユニットを用いた SCC 進展試験の概念図

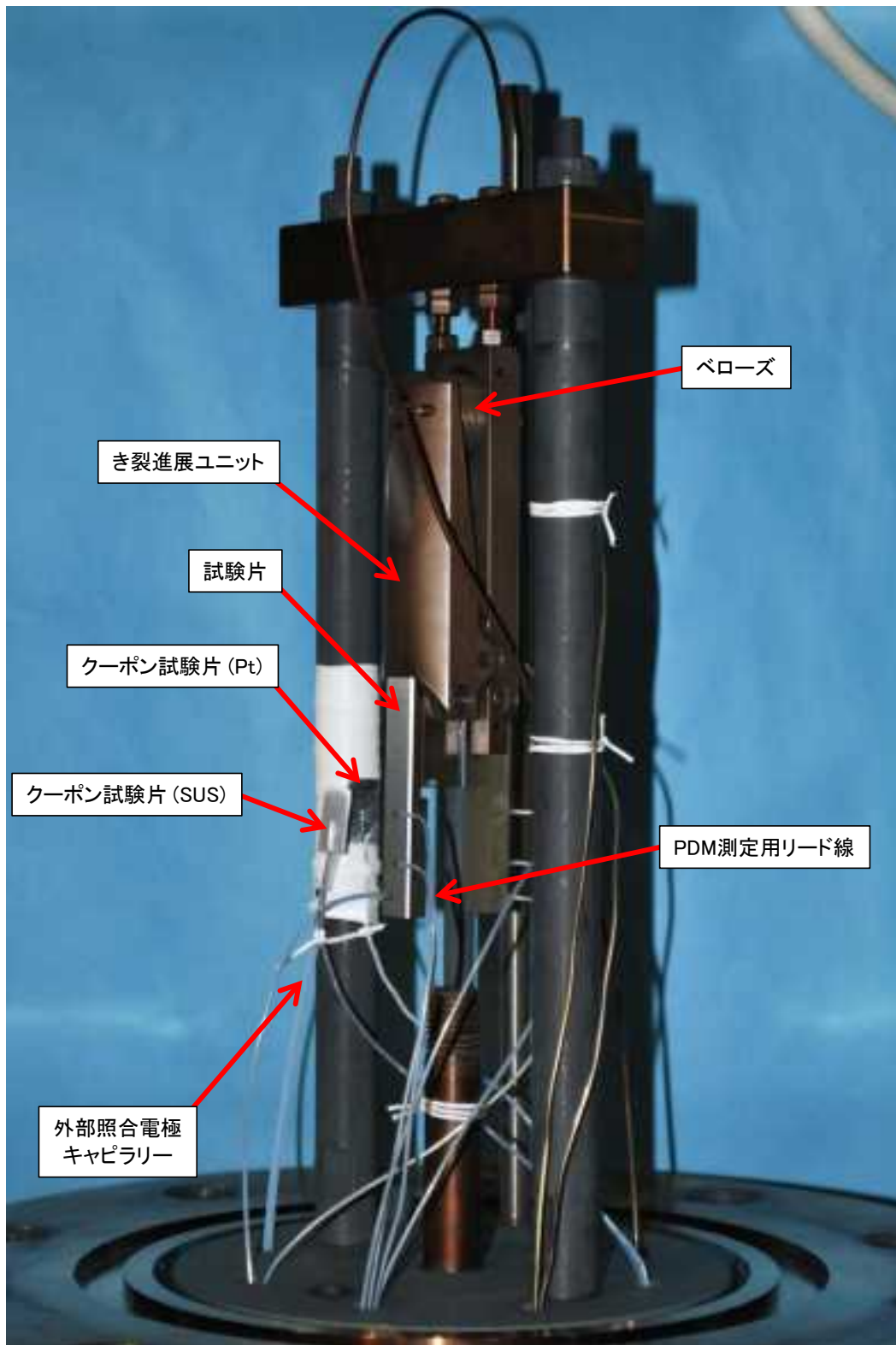


写真 5.2.3-3 試験片取付状況(試験前)

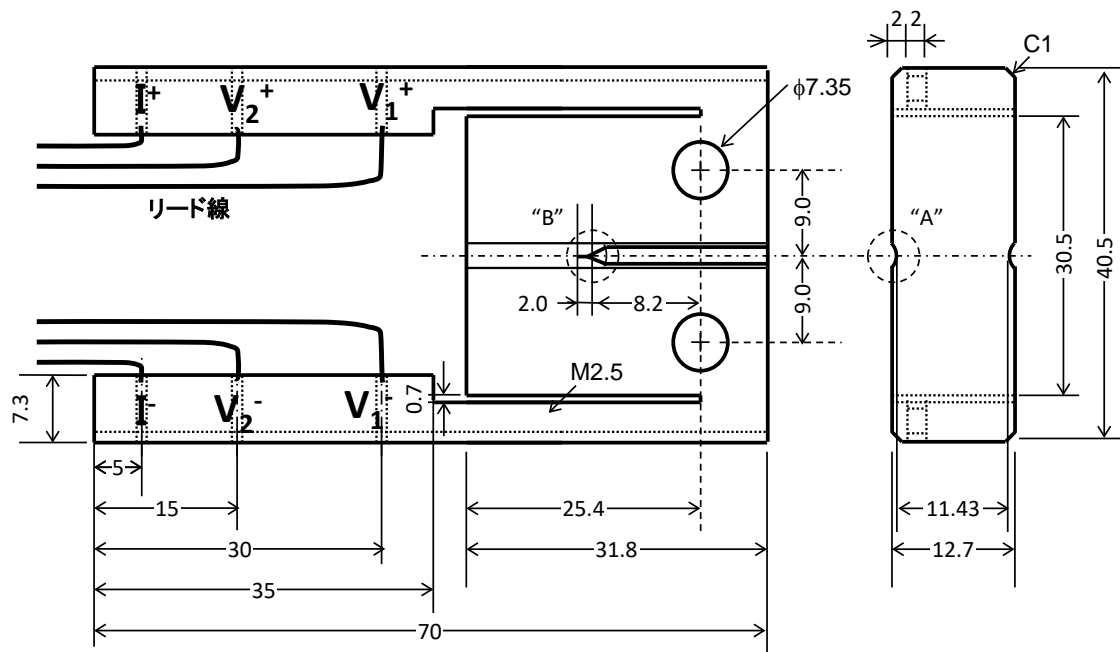


図 5.2.3-12 ウィング一体型 0.5T-CT 試験片形状と PDM 計測用電極取り付け位置

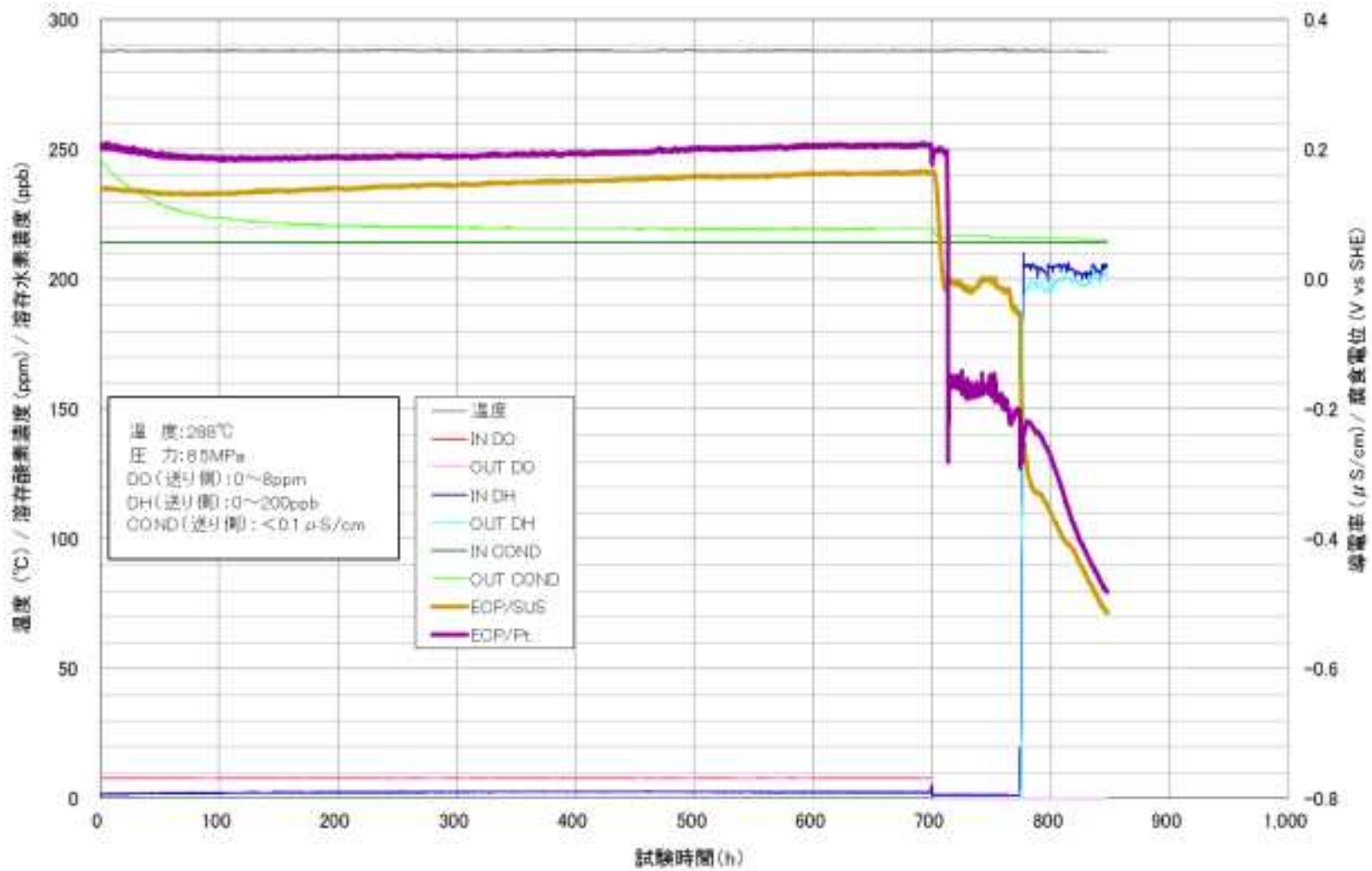


図 5.2.3-13 試験環境及び腐食電位の経時変化

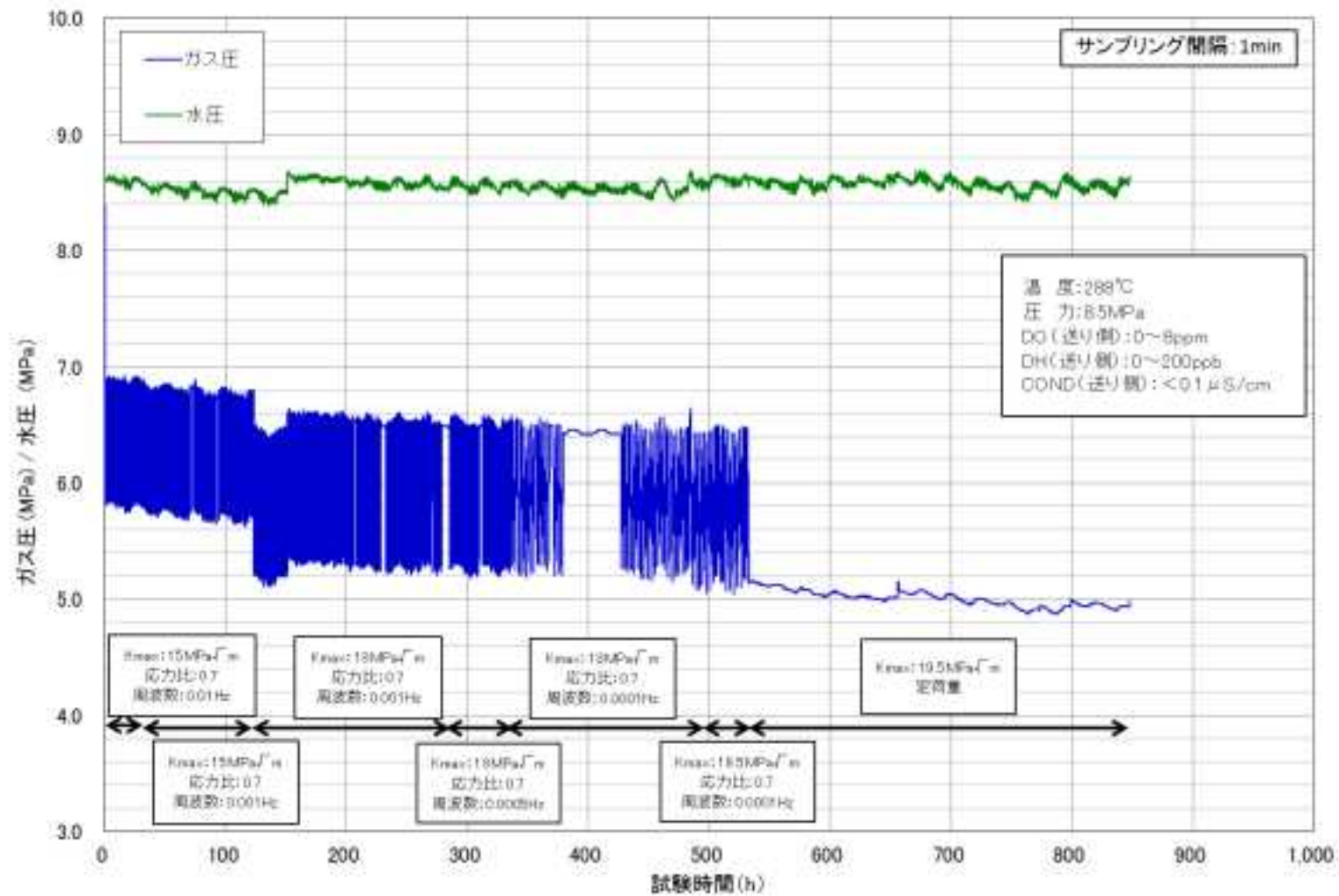
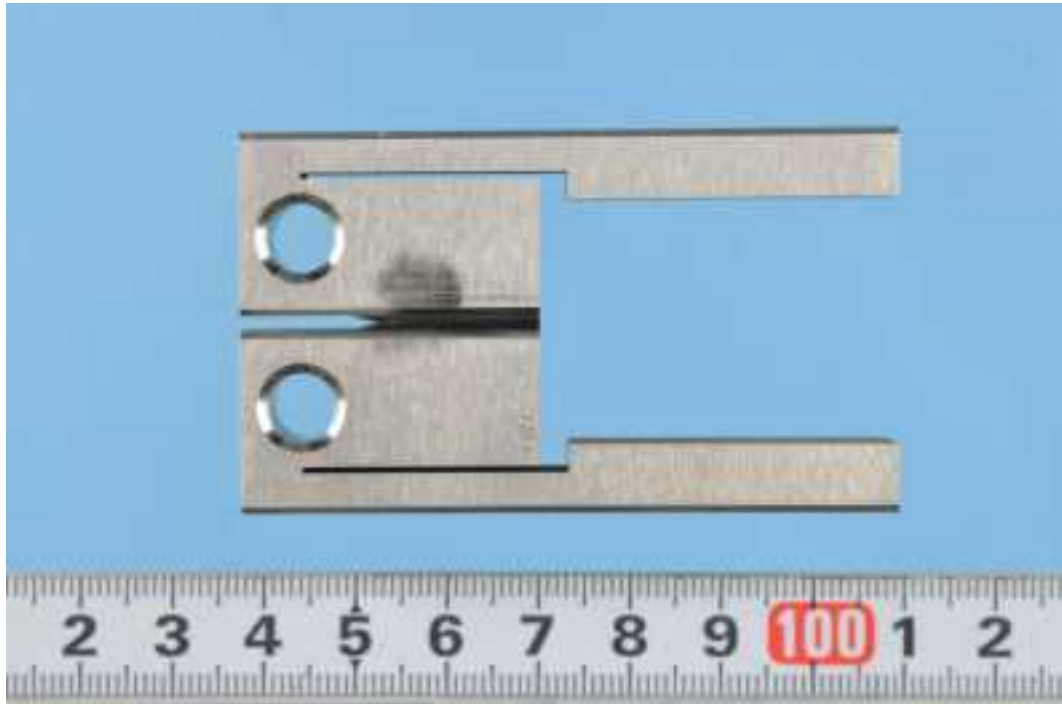
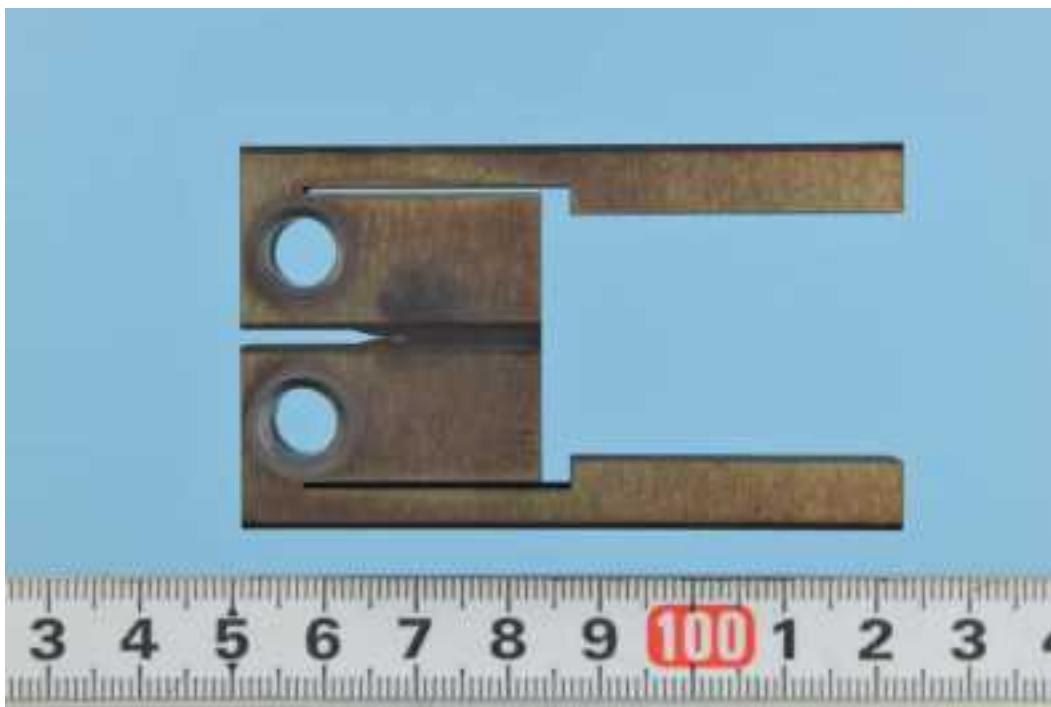


図 5.2.3-14 ベローズガス圧と水圧の経時変化

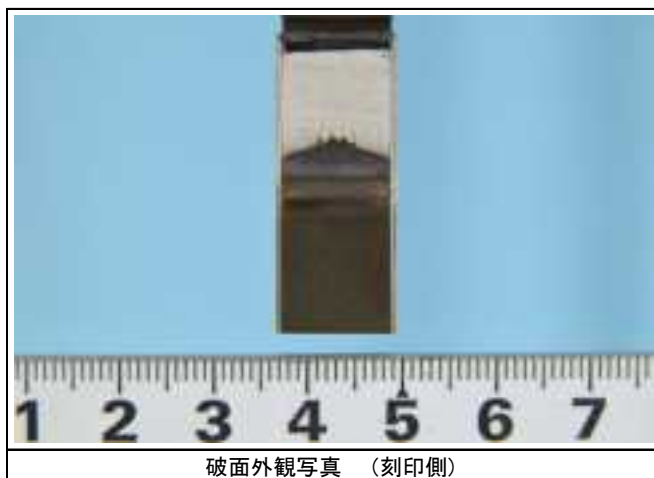


試験前

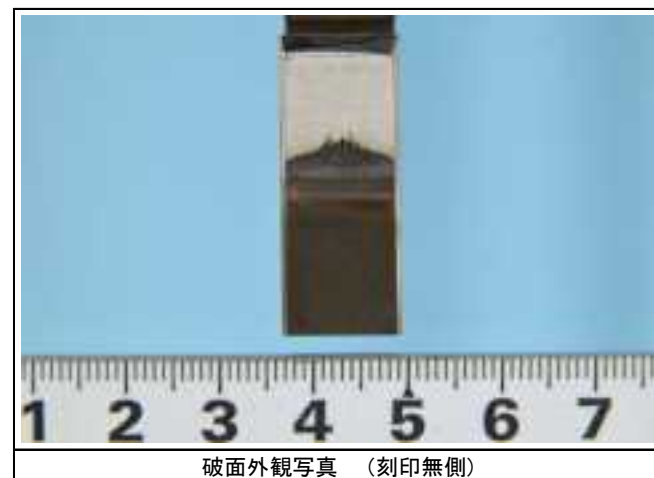


試験後

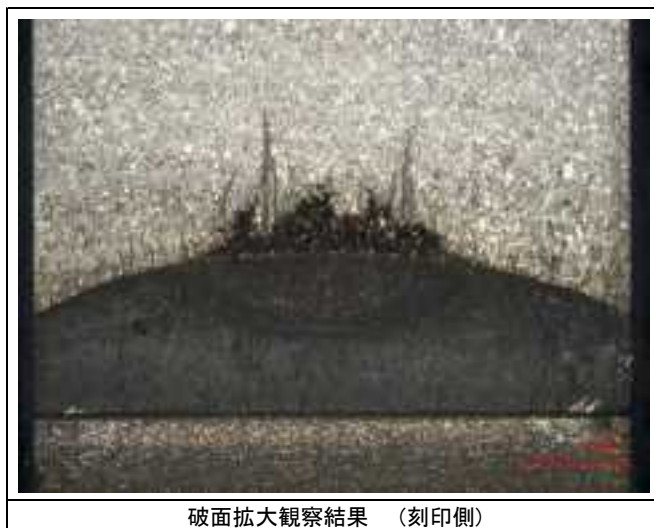
写真 5.2.3-4 試験前後の試験片外観



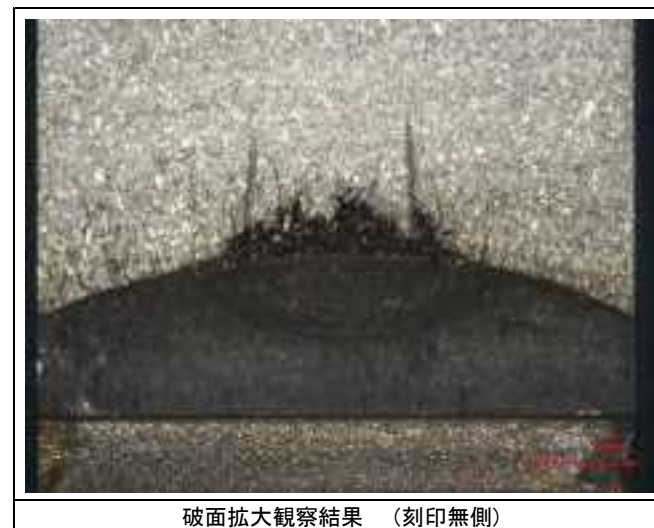
破面外観写真 (刻印側)



破面外観写真 (刻印無側)



破面拡大観察結果 (刻印側)



破面拡大観察結果 (刻印無側)

写真 5.2.3-5 CT 試験片破面の外観写真及びビデオマイクロ拡大観察

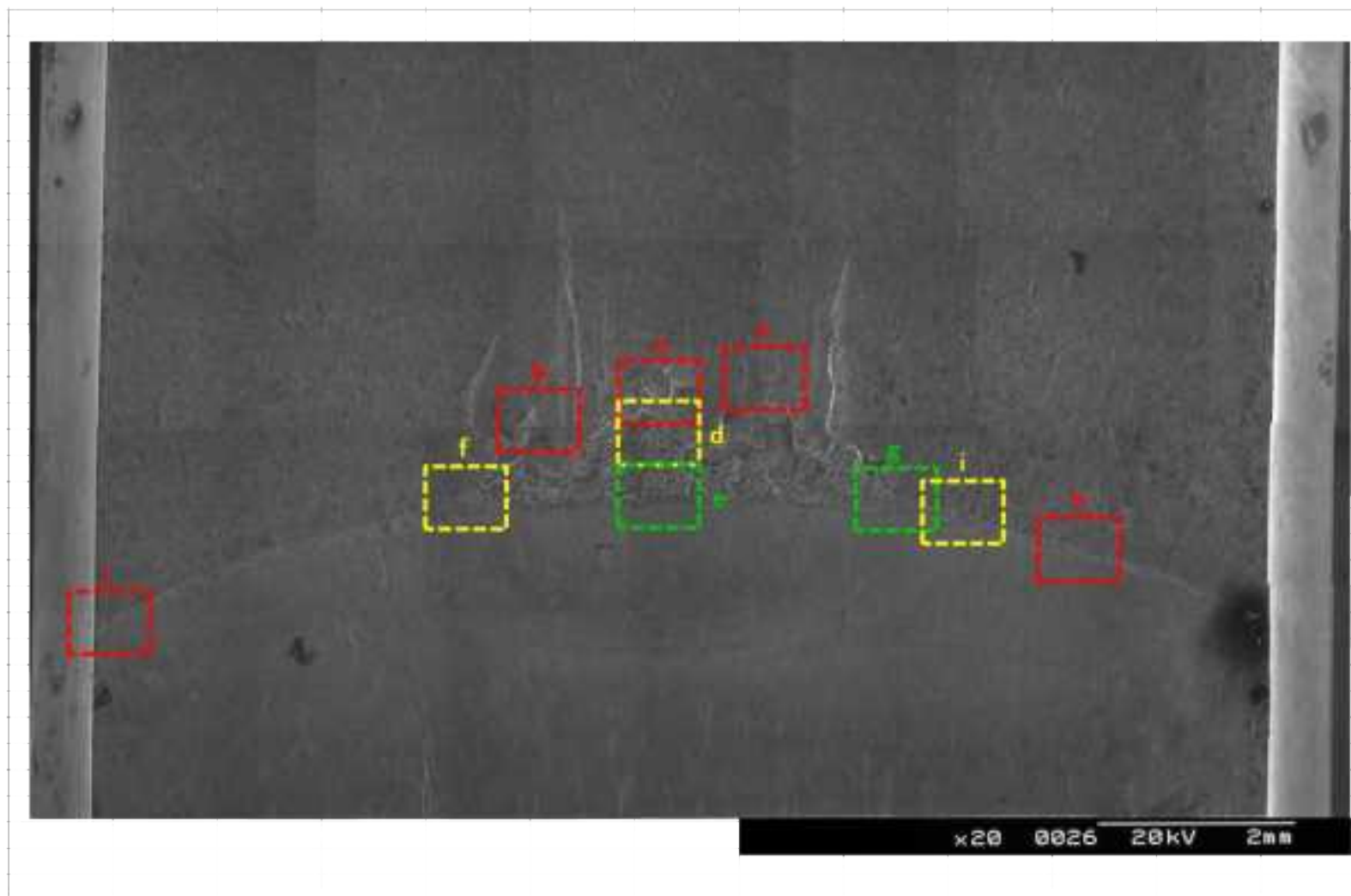
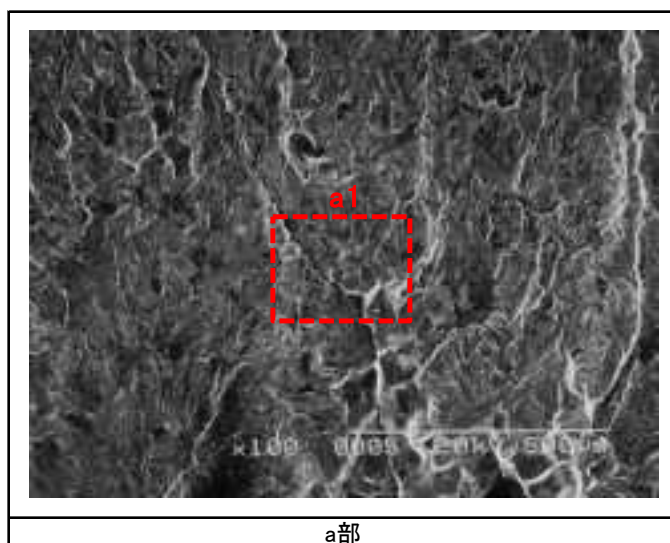
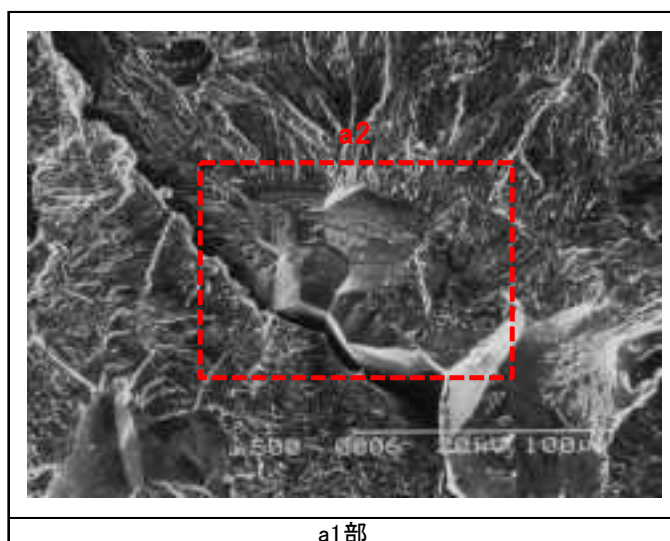


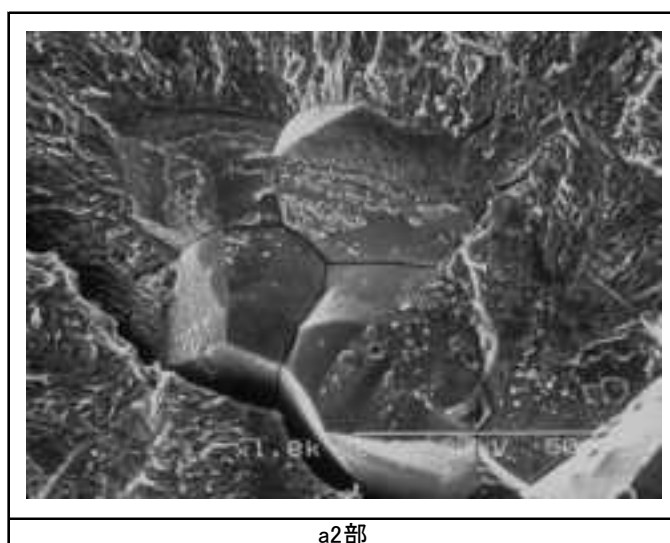
写真 5.2.3-6 破面 SEM 観察写真(全景)



a部

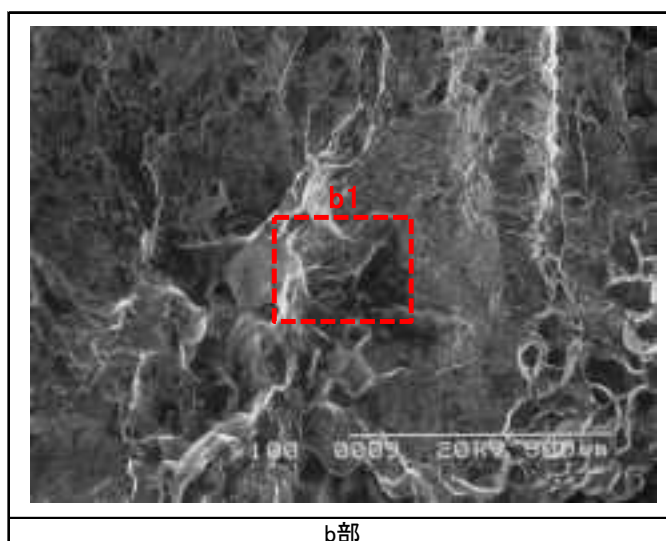


a1部

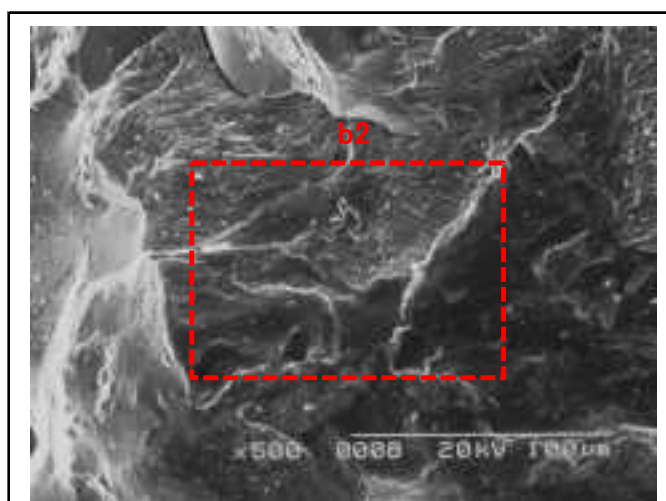


a2部

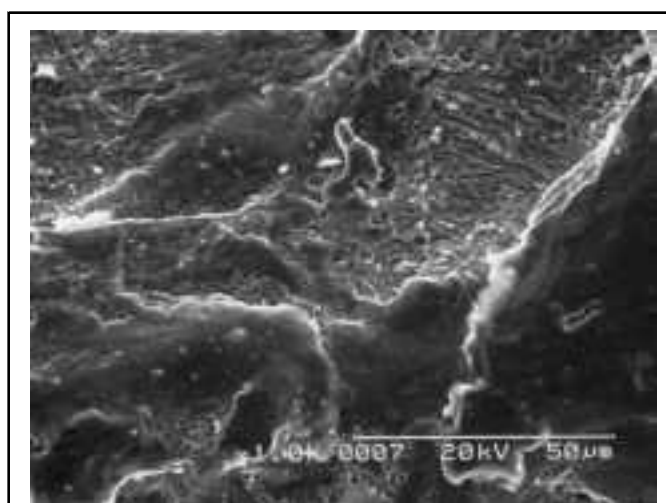
写真 5.2.3-7(a) 破面 SEM 観察写真(a 部拡大)



b部

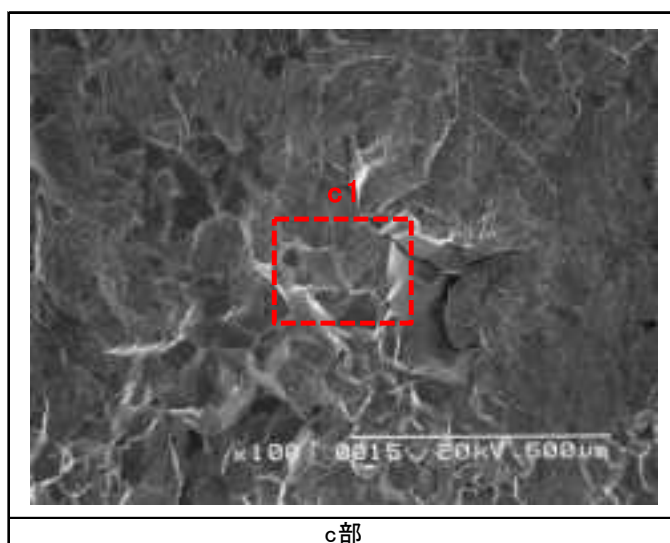


b1部

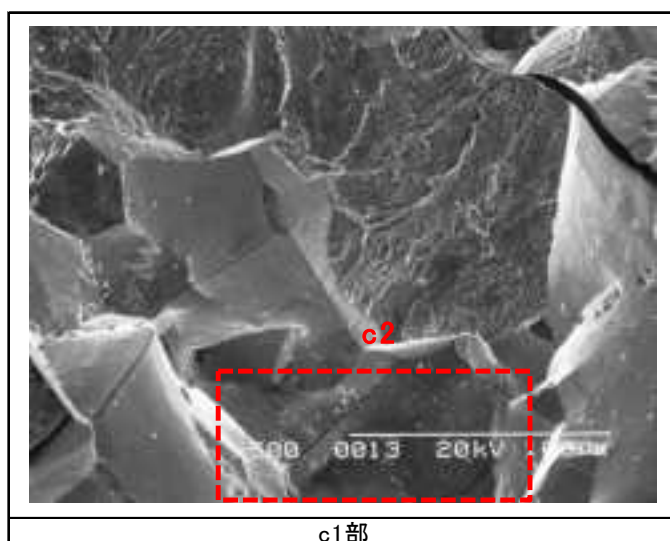


b2部

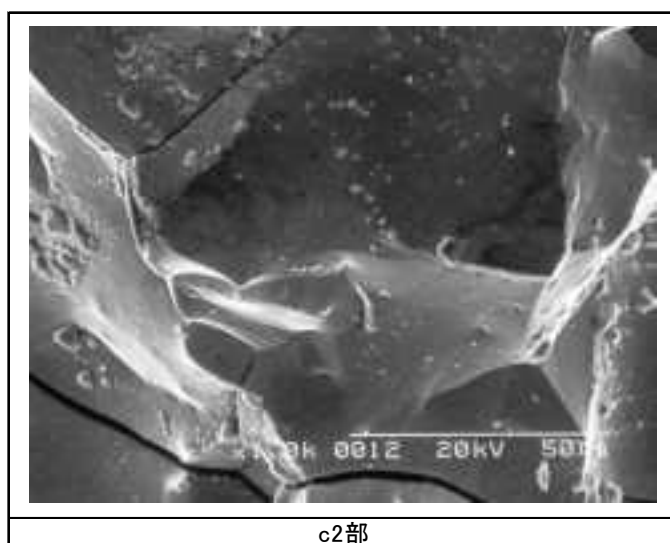
写真 5.2.3-7(b) 破面 SEM 観察写真(b 部拡大)



c部

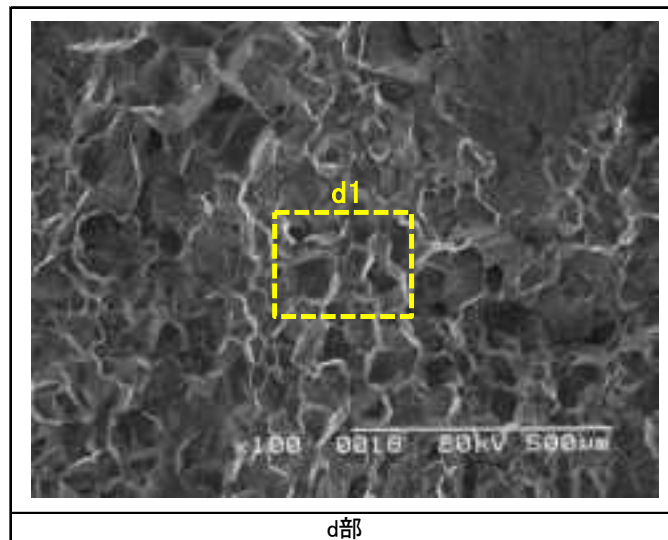


c1部

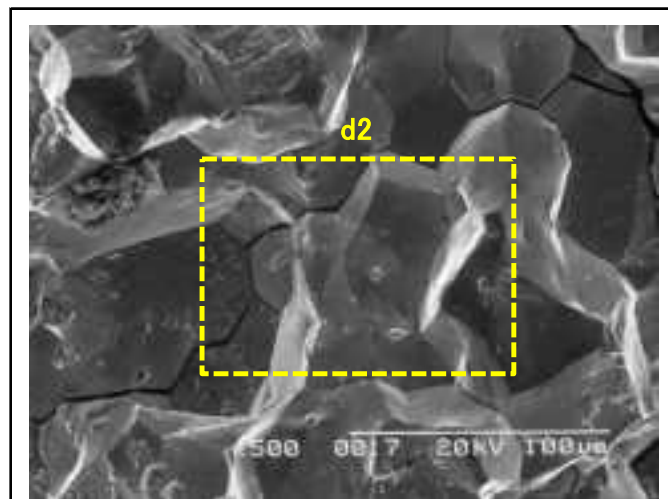


c2部

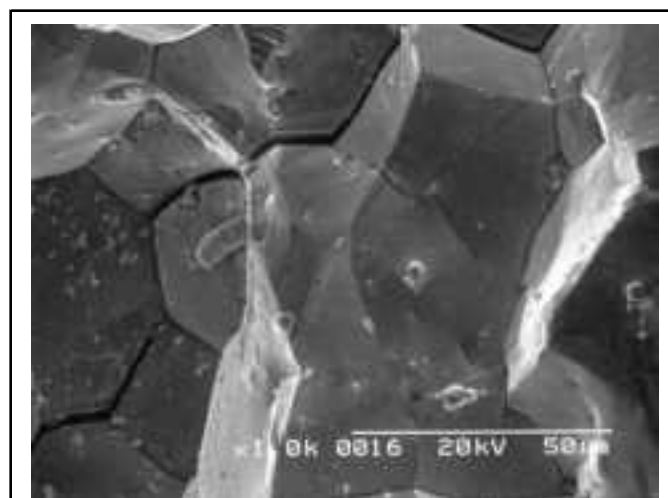
写真 5.2.3-7(c) 破面 SEM 観察写真(c 部拡大)



d部



d1部



d2部

写真 5.2.3-7(d) 破面 SEM 観察写真(d 部拡大)