

平成 29 年度原子力規制庁委託成果報告書

軽水炉照射材料健全性評価研究

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構

平成 30 年 3 月

本報告書は、原子力規制委員会原子力規制庁からの委託により実施した業務の成果をとりまとめたものです。

本報告書に関する問い合わせは、原子力規制庁までお願いします。

目 次

1. はじめに	1
2. 事業内容	2
2.1 目的	2
2.2 事業全体概要	2
2.3 平成 29 年度の実施計画	3
3. 平成 29 年度の実施内容	6
3.1 破壊力学評価に係る試験	6
3.1.1 供試材の製作	9
3.1.2 基礎試験	133
3.1.3 PTS 模擬試験	287
3.1.4 原子炉圧力容器鋼の溶接残留応力解析	391
3.2 関連温度移行量評価に関する研究	404
3.2.1 関連温度移行量の統計解析	404
3.2.2 原子炉圧力容器の照射脆化に関わる微細組織分析	498
3.2.3 監視試験片採取位置の代表性に係る試験	586
3.3 最新知見の調査	635
3.3.1 PTS 模擬試験に関する既往知見の調査	635
3.3.2 学会等における最新情報調査	644
3.3.3 最新知見の調査のまとめ	672
4. おわりに	674

1. はじめに

原子炉圧力容器は一次系耐圧機器の中で最も重要な機器の一つであり、最新の科学的・合理的な評価を行い、その健全性を維持する必要がある。そのためには現在整備されている基準及び民間規格の安全裕度を常に最新の知見で見直し、改善を図ることが重要である。現在反映する必要がある課題として高照射量領域の照射データの拡充、民間規格や海外の規格に採用されているクラッド溶接及び負荷履歴を考慮した健全性評価の反映が挙げられる。

上記の課題を踏まえて、「軽水炉照射材料健全性評価研究(平成18～31年度(予定)、旧事業名：軽水炉燃材料詳細健全性調査)」では、原子炉圧力容器の中性子照射脆化について、加圧熱衝撃事象を模擬する試験を実施すると共に、照射材等を用いた破壊靱性データの取得及び微細組織等の分析と解析を行い、健全性評価手法の保守性確認のための知見を整備する。これにより、運転期間延長に係る劣化状況評価及び高経年化技術評価の妥当性確認並びに民間規格の技術評価のための技術的知見の整備、拡充を図るとともに、必要に応じて亀裂の解釈等の規制要求事項の更新に資する。

本報告書は、平成29年度事業の実施結果についてまとめたものである。

2. 事業内容

2.1 目的

本事業は、「今後推進すべき安全研究の分野及びその実施方針(平成29年度以降の安全研究に向けて)」(平成28年7月13日、原子力規制委員会)^(2.1-1)において原子炉施設の材料・構造に係る安全研究プロジェクトに位置づけられており、原子炉材料の放射線による劣化事象のうち原子炉圧力容器の中性子照射脆化(以下「照射脆化」という。)の評価手法の保守性確認に必要なデータを取得し、高経年化技術評価及び運転期間延長認可制度に係る劣化状況評価の審査並びに学協会規格の技術評価に資することを目的とする。

具体的には、審査対象の機器及び構造物に想定される経年劣化事象のうち照射脆化に着目し、実機材料の活用検討を含めて照射脆化に関する試験及び分析を体系的に実施して破壊に対する材料の抵抗値(破壊靱性)への照射影響について検討する。またこれらの調査研究の遂行に必要な試験装置等の整備・維持管理を行う。照射材等の試験、分析で収集、評価した結果は、国の高経年化技術評価の妥当性確認及び民間規格の技術評価に資するための技術的知見として整備する。

2.2 事業全体概要

図2.2-1に日本電気協会電気技術規程JEAC-4206^(2.2-1) ^(2.2-2)における原子炉圧力容器の健全性評価法の概要を示す。健全性評価においては、評価時期の材料の破壊に対する抵抗力(破壊靱性)を予測・評価し、原子炉圧力容器の内面に想定した亀裂において加圧熱衝撃(PTS)事象の際に生じる亀裂の進展力(応力拡大係数)を比較することにより健全性を評価する。さらに、2016年度版^(2.2-2)の改定においては、想定欠陥としてクラッド下の半楕円欠陥が規定され、詳細評価として高温予荷重(WPS)効果・亀裂伝播停止を考慮可能としている。このような規格の改定等、事業を取り巻く環境の変化及びこれまでの事業における知見の蓄積を考慮し、本事業で対象とする課題の整理を行った。図2.2-2に本事業で対象とする健全性評価における課題を示す。ここでは、破壊靱性評価、関連温度移行量評価、健全性判定に関する評価及び破壊力学評価に分類して整理を行っている。事業開始当初は破壊靱性評価に係る試験及び脆化メカニズムの調査に主眼をおいていたが、平成25年度より健全性判定に関する評価に係る試験、平成27年度より破壊力学評価に係る試験、平成28年度より関連温度移行量評価に係る試験を開始した。破壊靱性評価及び健全性判定に関する評価については平成28年度で終了しており、平成29年度から平成31年度にかけては、破壊力学評価に係る試験及び関連温度移行量評価に係る試験に注力する計画である。以下、本事業におけるこれまでの主な実施内容、及び平成29年度の実施内容を記す。

破壊靱性評価に関しては、平成20年度から24年度にかけてPWR標準材(S1材)及びCu含有率等を変化させた3種類の圧延材(A533B鋼)とその溶接継手材を用いて引張試験、シャルピー衝撃試験、破壊靱性試験を実施し破壊靱性値への試験片寸法効果に関するデータを取得した。平成25年度には、破壊靱性等機械的特性の板厚内分布の調査を行い、板厚表面近傍の

破壊靱性が良好であることを確認した。平成26年度から平成28年度にかけては、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を実施し、板厚4 mmの破壊靱性試験片(Mini-C(T))の破壊靱性マスターカーブ法への適用性を確認すると共に、未照射材及び照射材のシャルピー遷移温度と破壊靱性参照温度の相関を確認した。

健全性判定に関する評価に関して、平成25年度から平成27年度にかけて亀裂伝播停止破壊靱性(K_{Ia})に係る試験を実施した。ここでは未照射材を用いて取得した K_{Ia} と計装シャルピーデータとの相関を確認すると共に、既往研究における照射材の計装シャルピーデータを活用して照射材の K_{Ia} 評価を行い、照射による K_{Ia} のシフトが破壊靱性のシフトよりも小さいことを確認した。平成25年度から平成28年度にかけて高温予荷重(WPS)効果に係る試験を実施し、JEAC4206-2016版の詳細評価で取り入れられた応力拡大係数が低下する過程で破壊しないことを確認した。また、WPS効果である再負荷時のみかけの破壊靱性値の上昇を確認すると共に、WPS効果の工学的な評価モデルの適用性を確認した。

破壊力学評価に関して、平成27年度は小規模溶解によるラゴ試験を実施し、室温以上で破壊靱性試験を可能とする高い参照温度の達成が望める鋼材(低靱性鋼)の仕様を検討した。また、PTS模擬試験設備の設計を完了し製作に着手した。平成28年度は、低靱性鋼の仕様を決定し、製作に着手した。また、PTS模擬試験設備の整備を進めるとともに、クラッド下亀裂の導入方法に係る検討を行った。平成29年度は、低靱性鋼を製作すると共に、クラッド溶接を実施し、溶接後熱処理条件の検討を行った。PTS模擬試験のための基礎試験として、C(T)試験片によるPTS温度域におけるWPS試験、及びクラッド下半楕円亀裂を付与した平板試験体を用いた破壊試験を実施した。また、PTS模擬試験設備の検証試験を実施すると共に、PTS模擬試験に供する十字型試験体の製作に着手した。

関連温度移行量評価に関して、平成28年度は監視試験データの統計解析及び中性子照射材の微細組織分析に係る準備を行った。また、板厚1/4位置から採取される監視試験片の代表性を確認するため、クラッド下溶接熱影響部を含む板厚内破壊靱性分布取得のための準備として、クラッド付き鋼材を製作した。平成29年度は、監視試験データの統計解析を進めると共に、3次元アトムプローブ法及びオージェ電子分光法を用いた照射材の微細組織分析に着手した。また、板厚内破壊靱性分布取得が可能な既存照射材の調査を行うと共に、未照射材の板厚内破壊靱性分布取得に着手した。

2.3 平成29年度の実施計画

① 破壊力学に係る試験

(1)PTS 模擬試験に供するために十分な板厚(約 200 mm)を持つ低靱性鋼を製作するとともに、シャルピー遷移曲線、破壊靱性等、破壊力学評価に必要な機械的特性を取得する。

(2)破壊靱性試験片と原子炉圧力容器内面のステンレスオーバーレイクラッド(以下「クラッド」という。)下半楕円欠陥に対する拘束効果の差異を確認するため、実機を模し

て施したクラッド下に半楕円欠陥を付与した平板試験体(長さ 600 mm、幅 200 mm、板厚 50 mm 以上)による曲げ試験を実施し、得られた荷重と変位の関係を用いて弾塑性有限要素解析を行い、脆性破壊発生時における亀裂先端の応力拡大係数(見かけの破壊靱性値)を評価する。

- (3)PTS 事象に対する破壊力学による健全性評価手法の保守性を総合的に確認するための PTS 模擬試験の準備を行う。PTS 時の熱応力分布、クラッド下亀裂への 2 軸負荷を模擬するため、健全性評価において想定するクラッド下半楕円欠陥を付与した十字型 2 軸曲げ試験体(全長 3800×3800 mm、板厚 150 mm 以上)の一部を製作する。また、本試験体に、最大 8MN 程度の荷重を負荷しつつ、PTS 事象を模擬して試験体のクラッド側を運転温度から室温付近まで冷水で急冷することができる PTS 模擬試験設備を整備し、性能確認のための試運転を行う。
- (4)原子炉圧力容器を模擬した鋼材の板厚内各部から試験片を採取し、破壊靱性等の機械的特性を取得する。

②脆化予測法に係る研究

- (1)ベイズ統計とモンテカルロ計算に基づいて確率分布を推定可能なプログラムを整備するとともに、監視試験データを用いた解析を行い、化学成分や中性子照射条件を入力パラメータとして脆化量の指標である関連温度移行量の最確値及び確信区間を評価する。
- (2)高照射量領域まで中性子照射された実機と同等の原子炉圧力容器鋼を用いて、三次元アトムプローブ及びオージェ電子分光による微細組織分析を行うとともに、破壊靱性データを取得するための準備及び試験を実施する。

平成29年度の実施内容の詳細について、3章にまとめた。

参考文献

- (2.1-1) 原子力規制委員会「今後推進すべき安全研究の分野及びその実施方針(平成 29 年度以降の安全研究に向けて)」(平成 28 年 7 月 13 日).
- (2.2-1) 社団法人日本電気協会 原子力規格委員会 JEAC 4206-2007“原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法”, (2007)
- (2.2-2) 一般社団法人日本電気協会 原子力規格委員会 JEAC 4206-2016“原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法”, (2016)

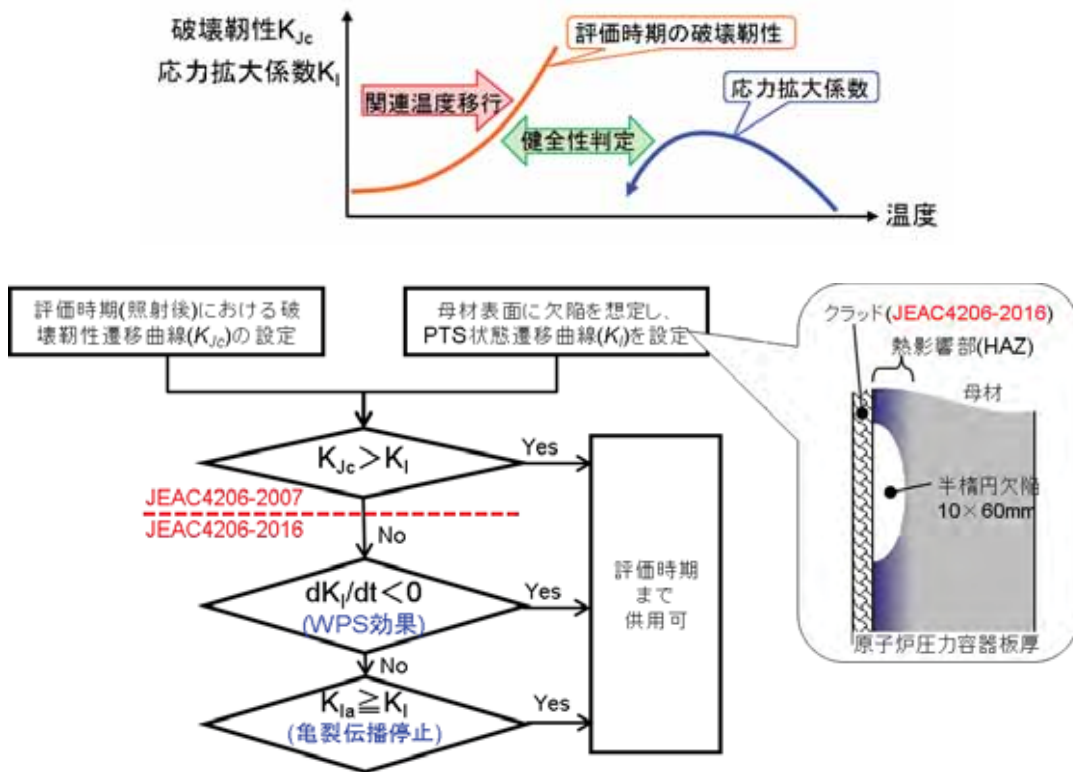


図2.2-1 原子炉压力容器の健全性評価法の概要(2.2-1) (2.2-2).

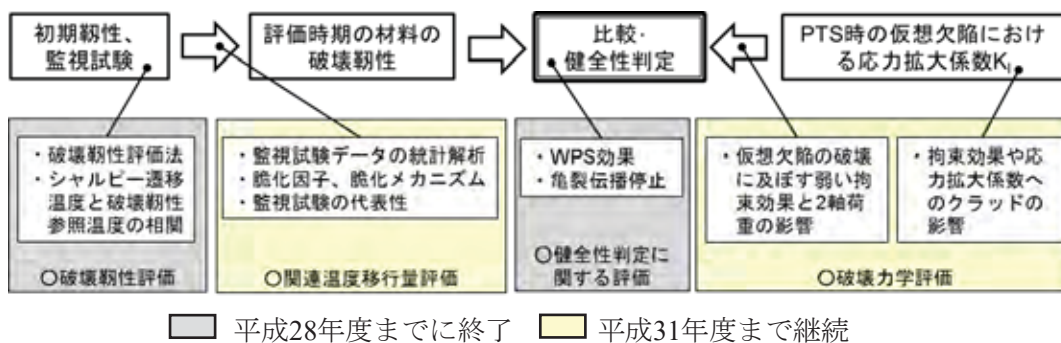


図2.2-2 本事業で対象とする健全性評価における課題

3. 平成29年度の実施内容

3.1 破壊力学評価に係る試験

加圧熱衝撃(PTS)事象時の健全性評価においては、低合金鋼であるRPV内面に半楕円欠陥(亀裂)を想定し、内圧と熱応力による亀裂先端の応力拡大係数と、材料の破壊靱性を比較することで健全性を確認している。

ここで、半楕円亀裂においては、材料の破壊靱性を評価するために用いるC(T)試験片等に比して亀裂への拘束が弱く、見かけの破壊靱性が高くなることが予想される。一方、C(T)試験片等に負荷される単軸荷重に対して、RPV内面においては2軸荷重が付加されることから拘束を強める効果が生じ、上記の見かけの破壊靱性の上昇が抑制されると考えられる。また、一定温度・単調荷重条件で評価を行う破壊靱性試験に対し、PTS事象は温度低下に伴って負荷が増減する過渡事象であることから、高温予荷重(WPS)効果によって見かけの破壊靱性が高くなる場合も考えられる。さらに、改訂されたJEAC4206-2016ではRPV内面のステンレスオーバーレイクラッド(以下、クラッド)下の埋没半楕円欠陥(亀裂)を想定することになったことから、クラッドが亀裂最深点の拘束効果や応力拡大係数へ影響を及ぼすことが考えられる。以上のC(T)試験片等と想定欠陥との亀裂形状や負荷条件の違いが重畳することにより、PTS事象においてRPVは材料本来の破壊靱性よりも高い応力拡大係数まで破壊しないことが予想される。すなわち、現行の健全性評価手法にはある程度の保守性が確保されていると考えられる。

本事業では、健全性評価手法の保守性を総合的に確認するため、照射脆化による破壊靱性の低下を模擬した材料(低靱性鋼)を製作し、クラッド下半楕円亀裂に熱衝撃+2軸荷重を負荷する試験(PTS模擬試験)及び関連する試験を実施する。図3.1-1に、PTS模擬試験のイメージを示す。実機規模の板厚を有する大型の十字型試験体を製作し、クラッド下の半楕円亀裂の位置する2軸荷重負荷領域に熱衝撃を与える試験を実施する。熱応力と2軸曲げ荷重の組み合わせにより、PTS事象時の応力拡大係数のカーブを元にした負荷を与え、応力拡大係数が低下する過程では破壊しないことや、材料本来の破壊靱性よりも高い応力拡大係数まで破壊しないことを確認する。図3.1-2に、試験計画全体のフローを示す。PTS模擬試験の準備の基礎試験として、C(T)試験片等により材料の基本的な材料特性を取得すると共に、WPS効果の確認試験を実施する。半楕円亀裂を付与した平板試験体により、亀裂の拘束効果やクラッドの影響を確認する。また、これら試験に並行してクラッド溶接残留応力の評価及びローカルアプローチ(LA)法^{*1}による破壊確率の評価手法の整備を実施する。最終的に、PTS模擬試験を実施し、材料本来の破壊靱性に対する裕度等を確認する。以降、平成29年度の成果として、低靱性鋼の製作、基礎試験、PTS模擬試験、クラッド溶接残留応力評価の詳細について報告する。

※1：ローカルアプローチ(LA)法とは、最弱リンクモデルに基づき破壊確率を評価できる手法であり、亀裂の拘束状態に影響されない。破壊以前の温度履歴や負荷履歴も考慮可能である。

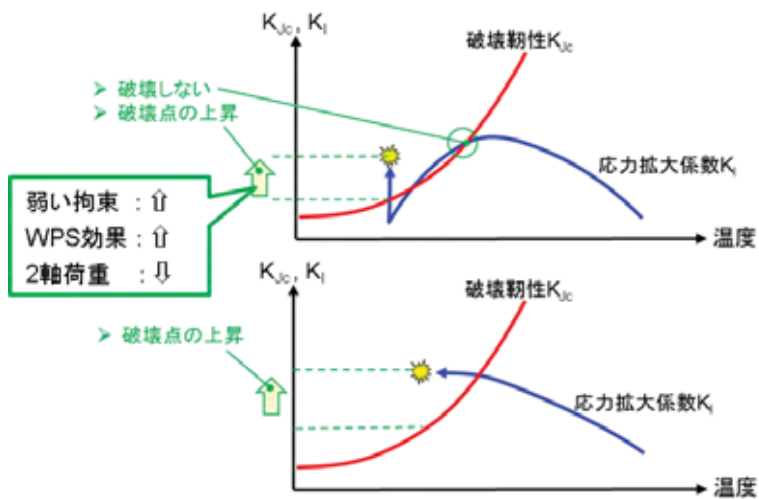
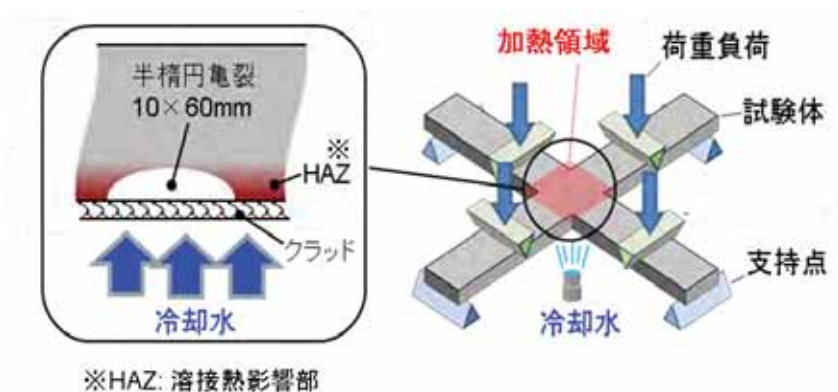


図3.1-1 PTS模擬試験のイメージ

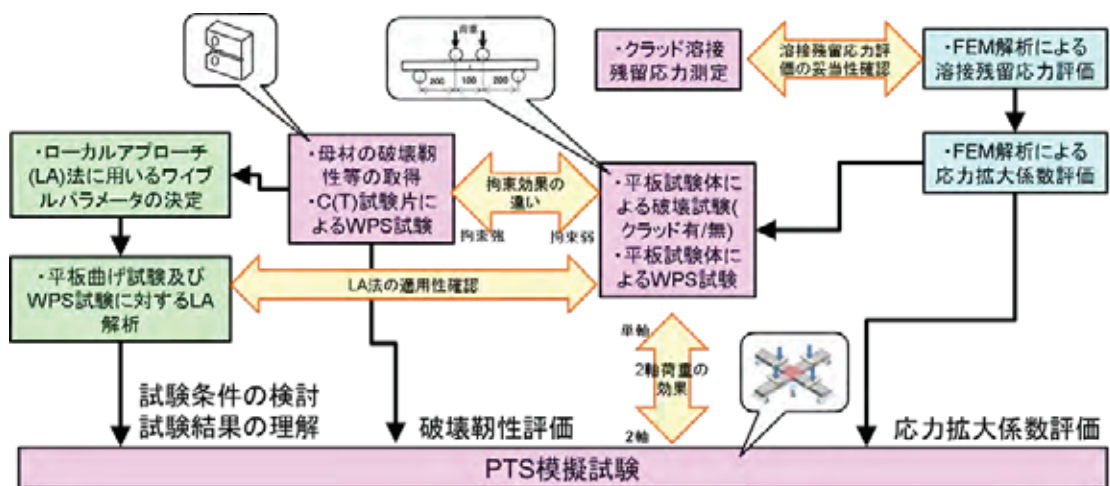


図3.1-2 破壊力学評価に係る試験のフロー

3.1.1 供試材の製作

原子炉圧力容器(RPV)の加圧熱衝撃(PTS)事象を想定した健全性評価(JEAC 4206-2016)では、RPVの内面のクラッド下の母材表面に10 mm深さの亀裂(半楕円欠陥)を想定し、内圧と熱応力によって亀裂先端に生じる応力集中(応力拡大係数)と、材料の破壊に対する抵抗値(破壊靱性値)を比較することによって健全性を確認している。

一般に材料の破壊靱性値の基礎データとしてCT試験片等を使った評価結果が用いられているが、RPVの内面の想定欠陥と試験片では亀裂先端の拘束状態の相違により力学条件等が異なることも知られており、想定欠陥を付与した試験体を用いた健全性評価手法の保守性確認が必要である。また改訂後のJEAC4206-2016ではRPV内面のステンレスオーバーレイクラッド(以下、クラッド)に埋没した欠陥(亀裂)を想定することになったことから、クラッド施工によって表面を拘束した想定欠陥を対象とした試験での確認も重要である。

そこで、JEAC4206-2016で規定された健全性評価の保守性確認試験に資する供試材として、①原子炉圧力容器鋼鋼材(未照射材/初期プラント模擬材)、及び②原子炉圧力容器鋼脆化材(低靱性鋼)をそれぞれ製作した。以下にその結果について述べる。

3.1.1.1 原子炉圧力容器鋼鋼材の製作(未照射材/初期プラント模擬材)

(1)目的

RPV鋼の照射脆化を把握するための監視試験片は母材の板厚内部1/4位置から採取されていることを勘案し、母材の表面近傍の溶接熱影響部(HAZ)の破壊靱性や健全性評価対象部位である深さ10 mm位置の破壊靱性に対し、クラッド施工時の溶接による熱影響を評価することが重要である。

そこで、板厚内部1/4位置の破壊靱性をもって母材の破壊靱性を代表させることの保守性を確認するため、比較的初期に建設された国内PWRプラントのクラッド付原子炉圧力容器鋼を模擬した供試体(以下初期プラント模擬材)を製作した。本項では、その内容について平成28年度の成果を一部再録して述べる。

(2)初期プラント模擬材の母材の調達

①初期プラント模擬材母材の仕様検討

比較的初期に建設された国内PWRプラントに材料を供給していたメーカーでは、製作に用いる設備が更新されていたことを勘案し、仕様の検討に当たって現有設備を用いて目標とする仕様を得られることを確認するための事前試験を実施した。事前試験では、C量、P量、S量を変化させた6種類の小規模溶解供試材を製作し、機械的性質試験として引張試験及びシャルピー衝撃試験を実施した。各材料の化学成分を表3.1.1.1-1に、また機械的性質試験結果を表3.1.1.1-2に示す。

事前試験の結果、小規模溶解供試材と実機規模の大量溶解で製作した供試材のサイズの相違による影響を考慮すると小規模溶解供試材の鋼種 C の成分系が最適であると評価された。以上の結果より、比較的初期に建設された国内 PWR プラントに用いられた原子炉圧力容器鋼(A 533Gr.B Cl.1 相当)の平均的な仕様及び特性を考慮して、表 3.1.1.1-3 及び表 3.1.1.1-4 の通り仕様を決定した。

調達する物量は、幅(W)が約 1,000 mm、長さ(L)が約 2,500 mm、厚さ(t)が約 200 mm の板材を 1 枚とした。なお圧延方向は L 方向とした。また表 3.1.1.1-5 に示す試験・検査を実施することとした。

②初期プラント模擬材の調達及び試験結果

実機規模の大量溶解で製作した初期プラント模擬材用母材の化学成分を表 3.1.1.1-6 に、外観写真を図 3.1.1.1-1 に示す。

外観・寸法・非破壊検査等の結果を表 3.1.1.1-7、表 3.1.1.1-8 及び図 3.1.1.1-2 に示す。また母材の引張試験、落重試験及びシャルピー衝撃試験結果を表 3.1.1.1-9、表 3.1.1.1-10、表 3.1.1.1-11 に示す。いずれの試験結果も仕様を満足していることを確認した。

表 3.1.1.1-1 小規模溶解供試材の化学成分

項目	化学成分(wt.%)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	
要求値	溶鋼 分析	0.15~0.40	1.15~1.50	0.010~ 0.020	0.010~ 0.020	0.40~0.70	≦0.15	0.45~0.60	0.10~ 0.16	
	製品 分析	0.18~0.25	0.20~0.30	0.010~ 0.020	0.010~ 0.020	0.50~0.65	≦0.15	0.40~0.60	0.10~0.16	
実績値	鋼種 A	0.19	0.25	1.46	0.011	0.014	0.10	0.50	0.13	
	鋼種 B	0.19	0.25	1.46	0.018	0.008	0.10	0.50	0.13	
	鋼種 C	0.19	0.25	1.46	0.018	0.014	0.10	0.50	0.13	
	鋼種 D	0.19	0.25	1.46	0.018	0.020	0.10	0.50	0.13	
	鋼種 E	0.19	0.25	1.46	0.025	0.014	0.10	0.50	0.13	
	鋼種 F	0.23	0.25	1.46	0.018	0.020	0.10	0.50	0.13	

表 3.1.1.1-2 事前試験における小規模溶解供試材の機械的性質試験結果

鋼種	引張試験(室温)			シャルピー衝撃試験	
	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び (%)	vT _{r30} (°C)	USE (°C)
A	435~467	577~605	23.8~26.6	-16~-14	76~91
B	443~469	583~611	25.4~26.4	-32~-26	114~134
C	446~469	586~611	23.4~26.2	-17~-13	80~90
D	443~470	582~611	23.8~26.6	-6~-4	62~68
E	451~470	584~607	24.2~26.8	-16~-6	77~87
F	474~504	615~643	22.0~25.2	-3~-4	59~65

表 3.1.1.1-3 初期プラント模擬材用母材の化学成分の仕様値

項目	化学成分(製品分析)(wt.%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
仕様値	0.18~ 0.25	0.20~ 0.30	1.20~ 1.55	0.010~ 0.020	0.010~ 0.020	0.50~ 0.65	≤0.15	0.40~ 0.60	0.10~ 0.16

表 3.1.1.1-4 初期プラント模擬材用母材の機械的性質の仕様値

試験項目	項目	仕様値
引張特性	0.2%耐力(MPa)	420~510
	引張強さ(MPa)	580~640
	伸び(%)	18 以上
シャルピー衝撃特性	上部棚吸収エネルギー(3 個の平均)(J)	135±45
	vT _{r30} (°C)	-20±20

表 3.1.1.1-5 初期プラント模擬材用母材の試験・検査項目

化学分析	溶鋼分析、製品分析
機械的性質試験	引張試験、シャルピー衝撃試験、落重試験、曲げ試験
冶金試験	サルファプリント、非金属介在物、結晶粒度
非破壊検査	浸透探傷試験(PT)、磁粉探傷試験(MT)、超音波探傷試験(UT)
その他	外観検査及び寸法検査

表 3.1.1.1-6 初期プラント模擬材用母材の化学成分分析結果

項目	化学成分(wt.%)									
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	
溶鋼分析	≤0.25	0.15~0.40	1.15~1.50	0.010~0.020	0.010~0.020	0.40~0.70	≤0.15	0.45~0.60	0.10~0.16	
製品分析	0.18~0.25	0.20~0.30	1.20~1.55	0.010~0.020	0.010~0.020	0.50~0.65	≤0.15	0.40~0.60	0.10~0.16	
溶鋼分析	0.19	0.24	1.46	0.014	0.014	0.60	0.10	0.50	0.13	
製品分析	0.19	0.25	1.43	0.013	0.014	0.58	0.10	0.48	0.13	
要求値										
実績値										



図 3.1.1.1-1 初期プラント模擬材用母材の外観写真
(長さ(L)約 2,500 mm、幅(W)約 1,000 mm、厚さ(t)が約 200 mm)

表 3.1.1.1-7 初期プラント模擬材用母材の外観・寸法・非破壊検査結果

試験項目	詳細	仕様	結果
外観検査	-	使用上有害な欠陥がないこと。 (欠陥がある場合は、グラインダにより手入れする。)	合格
寸法検査	-	JIS G 3193 の寸法許容差を満足すること。	合格
浸透探傷試験(PT)	鋼板の表裏面	JSME 設計建設規格 PVB-2426 の判定基準を満足すること。	合格 (記録すべき指示なし)
磁粉探傷試験(MT)	鋼板の端面	JSME 設計建設規格 PVB-2425 の判定基準を満足すること。	合格 (記録すべき指示なし)
超音波探傷試験(UT)	鋼板の全体積	JSME 設計建設規格 PVB-2421 の判定基準を満足すること。	合格 (記録すべき指示なし)

表 3.1.1.1-8 初期プラント模擬材用母材の曲げ、結晶粒度、非金属介在物試験

試験項目	結果
曲げ試験	わん曲部の外側に割れなし
結晶粒度(結晶粒度番号)	7.8
非金属介在物	0.046%

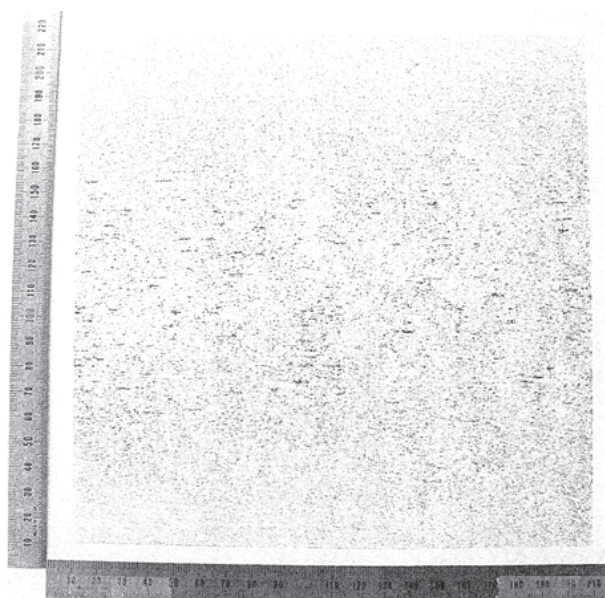


図 3.1.1.1-2 初期プラント模擬材母材のサルファプリント試験結果

表 3.1.1.1-9 初期プラント模擬材用母材の引張試験結果

試験温度	試験片採取方向	ID.	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び(%)	絞り(%)
24°C	L	AT1	485	599	30	71
		BT1	485	595	30	72
	T	AT2	483	592	27	66
		BT2	482	594	29	66
150°C	T	AT3	399	531	21.0	68
		AT4	404	534	21.5	68
		BT3	404	535	21.0	65
		BT4	401	531	21.0	68
290°C	T	AT5	386	548	19.0	64
		AT6	377	548	18.5	66
		BT5	372	549	19.5	63
		BT6	385	546	18.0	63
-50°C	T	AT7	501	662	27.3	68.0
		AT10	490	660	29.3	67.5
		BT7	490	647	28.3	66.9
		BT10	487	656	29.0	66.8
-100°C	T	AT8	570	720	29.7	65.3
		AT11	570	721	29.0	64.1
		BT8	561	715	30.0	66.1
		BT11	564	715	30.7	37.1
-150°C	T	AT9	691	797	27.0	61.4
		AT12	696	794	27.7	60.5
		BT9	692	792	28.0	62.5
		BT12	684	794	27.3	60.7

表 3.1.1.1-10 初期プラント模擬材用母材の落重試験結果

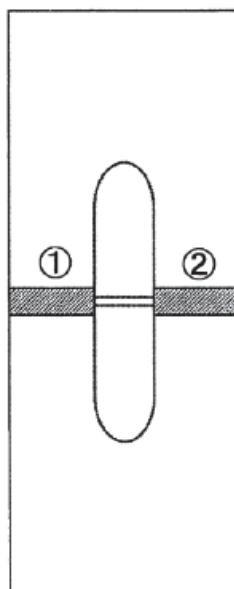
・個別データ

試験温度	試験片 ID	亀裂長さ (mm)		結果
		①	②	
-40℃	AD1	16.1	破断	破断
	AD2	-	-	-
-45℃	AD3	破断	8.0	破断
	AD4	-	-	-
-35℃	AD5	16.7	16.0	非破断
	AD6	4.2	4.0	非破断
-20℃	AD7	3.0	2.0	非破断
	AD8	2.4	2.0	非破断

・まとめ

$T_{NDT}(^{\circ}C)$	$RT_{NDT}(^{\circ}C)$	亀裂長さ (mm)
-40	-33	16.7

刻印側



落重試験用試験片

表 3.1.1.1-11 初期プラント模擬材用母材のシャルピー衝撃試験結果

・個別データ

試験温度	試験片 ID	吸収エネルギー(J)		横膨出量 (mm)	延性破面率 (%)
		結果	平均		
-12°C	AC1	65	61	1.00	35
	AC2	72		1.05	40
	AC3	45		0.75	30
-40°C	AC4	32	32	0.45	20
	AC5	26		0.40	15
	AC6	37		0.60	25
-60°C	AC7	19	16	0.25	10
	AC8	16		0.15	5
	AC9	13		0.15	5
-80°C	AC10	9	10	0.05	5
	AC11	9		0.05	5
	AC12	11		0.10	5
20°C	AC13	100	91	1.50	75
	AC14	86		1.35	65
	AC15	88		1.30	100
40°C	AC16	120	122	1.80	100
	AC17	126		1.90	100
	AC18	119		1.85	100
60°C	AC19	123	129	1.90	100
	AC20	13		1.95	100
	AC21	124		1.90	100
-7°C	AC22	75	68	1.10	50
	AC23	66		1.05	40
	AC24	62		1.00	40

・まとめ

$vT_{r30}(^{\circ}\text{C})$	$vT_{r50}(^{\circ}\text{C})$	$vT_{r35\text{mils}}(^{\circ}\text{C})$	$vT_{rs}(^{\circ}\text{C})$	$T_{cv}(^{\circ}\text{C})$	$T_{cv-33}(^{\circ}\text{C})$
-28	-7	-14	-2	-7	-40



シャルピー衝撃試験用試験片

(3)溶接継手の製作

前項で調達した初期プラント模擬材用母材を、図 3.1.1.1-3 に示すように L 方向に 2 等分し、一方は母材評価用、もう一方は溶接継手評価用とした。

溶接継手の製作には、溶接継手評価用の板材を更に L 方向に等分に切断して約 250 mm(W)×約 2500 mm(L)×約 200 mm(t)を 2 枚とし、この 2 枚をサブマージドアーク溶接 (SAW)で L 方向突合せして溶接継手とした。

以下、結果について詳細に記す。

①溶接金属の仕様

初期プラント模擬材の溶接継手施工に当たり、比較的初期に建設された国内 PWR プラントの平均的な特性となるよう、初期のプラントと同等の JIS Z3183 S642-MN 該当品として、溶接棒(US-56B)を約 430 kg とフラックス(MF-27)を約 1300 kg 調達し、製作に使用した。溶接継手製作用の溶接材料の外観写真を図 3.1.1.1-4 に示す。

②溶接継手の製作

初期プラント模擬材の溶接継手製作に当たり、開先形状は、比較的初期に建設された国内 PWR プラントの RPV 下部胴の軸方向溶接線で用いられた代表的な形状及び溶接条件を参考として設定した。図 3.1.1.1-5 に溶接継手の開先形状を示す。

SAW の溶接条件と施工実績を表 3.1.1.1-12 に、また溶接後熱処理条件と施工実績を表 3.1.1.1-13 に示す。なお熱処理時間は、ステンレス鋼による肉盛溶接(オーバーレイクラッド: 後述)後と合わせて 3.5 時間(210 分)以上になるように実施することとし、継手溶接後は 25 分間実施した。

製作した溶接継手の外観を図 3.1.1.1-6 に示す。

③溶接継手の検査

溶接継手製作時には、開先面は磁粉探傷試験(MT)、溶接部は放射線透過試験(RT)、超音波探傷試験(UT)、磁粉探傷試験(MT)でそれぞれ検査した。検査結果を表 3.1.1.1-14 に示す。検査の結果有意な欠陥は存在せず、仕様を満足した溶接継手の製作を完了した。

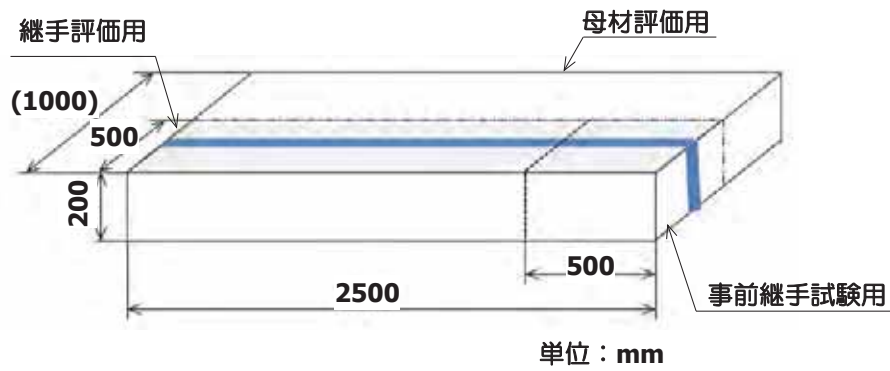


図 3.1.1.1-3 初期プラント模擬材用母材の形状及び板取り



(1)フラックス(MF-27)

(2)溶接棒(US-56B)

図 3.1.1.1-4 初期プラント模擬材継手用の溶接材料の外観写真

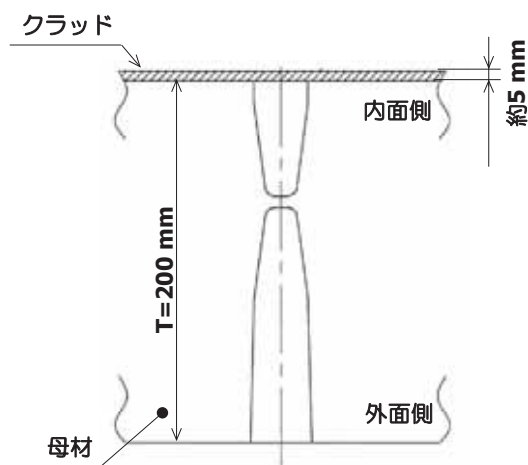


図 3.1.1.1-5 初期プラント模擬材の溶接継手開先形状

表 3.1.1.1-12 継手溶接条件

項目	仕様	実績
溶接方法	SAW	SAW
電流(A)	500~680	540~620
電圧(V)	27~32	28~29
速度(cm/分)	30~62	60~62
予熱温度(°C)	≧150	≧154
パス間温度(°C)	≦260	≦196

表 3.1.1.1-13 溶接後熱処理条件

項目	仕様	実績
温度(°C)	595~635	595~605
時間(分)	≧210 (継手溶接後とクラッド施工後の合計時間)	25 (継手溶接後のみ)
昇温速度(°C/hr)	Max.55	Max.49
降温速度(°C/hr)	Max.55	Max.50



図 3.1.1.1-6 継手溶接後の外観写真

表 3.1.1.1-14 初期プラント模擬材の継手溶接部検査結果

非破壊検査項目	項目	仕様	実績値
開先面検査	磁粉探傷試験 (MT)	JSME 溶接規格 N-1100 の規定を満足 すること。	合格
開先合せ検査	-	-	合格
溶接部検査 (表面)	磁粉探傷試験 (MT)	JSME 溶接規格 N-1100 の規定を満足 すること。	合格
溶接部検査 (体積)	放射線透過試験 (RT)	JSME 溶接規格 N-1100 の規定を満足 すること。	合格
溶接部検査 (体積)	超音波探傷試験 (UT)	JSME 溶接規格 N-1100 の規定を満足 すること。	合格

(4)ステンレスオーバーレイクラッド(クラッド)施工

①クラッド用溶接金属の仕様

初期プラント模擬材溶接継手に対し、ステンレス鋼による肉盛溶接(オーバーレイクラッド)を実施するため、1970年代のプラントに使用されていたクラッド溶接材料と同等のJIS Z3322 YB308-F 該当品(溶接棒: US-B309L、フラックス: PF-B1)を調達した。図 3.1.1.1-7 にクラッド用溶接材料の外観写真を示す。なお調達量は、溶接棒は約 340 kg、フラックスは約 600 kg とした。

②クラッド溶接施工

比較的初期に建設された国内 PWR プラントの代表的な溶接条件を参考に、L 方向の 1 層盛としたクラッド溶接施工を実施した。施工条件と実績を表 3.1.1.1-15 に、また施工後の熱処理条件と実績を表 3.1.1.1-16 に示す。なお熱処理時間は、継手溶接施工後の 25 分と合わせて 3.5 時間(210 分)以上になるように実施した。

溶接完了後の外観を図 3.1.1.1-8 に示す。

③クラッド溶接部の検査

クラッド溶接前後の溶接継手に対して、溶接前の表面検査(MT)と溶接部検査(PT)を実施した。検査結果を表 3.1.1.1-17 に示す。検査の結果有意な欠陥は存在せず、仕様を満足した溶接継手を含む初期プラント模擬材の製作を完了した。



(1)溶接棒(US-B309L)



(2)フラックス(PF-B1)

図 3.1.1.1-7 ステンレスオーバーレイクラッド用溶接材料の外観写真

表 3.1.1.1-15 クラッド溶接施工条件

項目	仕様	実績
溶接方法	SAW	SAW
電流(A)	750~950	850
電圧(V)	26~30	28
速度(cm/分)	12~18	14
予熱温度(°C)	≥150	≥165
パス間温度(°C)	≤260	≤189

表 3.1.1.1-16 クラッド溶接施工後の熱処理条件

項目	仕様	実績
温度	595~635°C	595~605°C
時間	≥210 min (継手溶接後とオーバーレイ クラッド後の合計時間)	195 min (クラッド溶接後のみ) 220 min (継手溶接後とオーバーレイ クラッド後の合計時間)
昇温速度	Max.55°C/hr	Max.49°C/hr
降温速度	Max.55°C/hr	Max.50°C/hr



図 3.1.1.1-8 クラッド溶接施工後の初期プラント模擬材(溶接継手)の外観写真

表 3.1.1.1-17 クラッド溶接部の検査結果

試験項目	項目	仕様	実績値	
非破壊 検査	磁粉探傷試験 (MT)	開先面検査	JSME 溶接規格 N-1100 の規定を満足すること。	合格
	超音波探傷試験 (UT)	溶接部検査 (体積)	JSME 溶接規格 N-1100 の規定を満足すること。	合格

(5)初期プラント模擬材の試験

クラッド溶接施工後の初期プラント模擬材溶接継手に対し、表 3.1.1.1-18 に示すように、JSME 溶接規格 N-1100 の規定に準拠し磁粉探傷試験(MT)と浸透探傷試験(PT)を実施し、問題ないことを確認した。

その後溶接線方向(L 方向)に対して端部から 500 mm を切り出し、試験片製作に用いる素材とした。図 3.1.1.1-9 に試験片の採取位置を示す。溶接金属、溶融境界部、熱影響部の評価に用いた各種試験片は、開先深さが深い外面側より採取した。

継手の溶接金属部に対して、シャルピー衝撃試験、引張試験、落重試験、及びクラッド溶接部に対して化学成分分析、金相観察(フェライト量の測定を含む)、非破壊検査、を実施した。試験に用いた試験片形状を図 3.1.1.1-10 に示す。

以下に試験結果を示す。いずれの試験結果も仕様値を満足していることを確認した。

①シャルピー衝撃試験(溶接金属部)

JIS Z2242(2005)に準拠し、長手軸方向が溶接線に垂直、ノッチの深さ方向が溶接線に平行となる試験片 18 本により吸収エネルギー、横膨出量、延性破面率、 vT_{R30} 、 vT_{R50} 、 $vT_{R35mils}$ 、 vT_{RS} 、 T_{CV} 、 T_{CV-33} を測定した。

試験後の試験片外観を図 3.1.1.1-11 に示し、結果のまとめを表 3.1.1.1-19 に示す。

②引張試験(溶接金属部)

JIS Z 2241(2011)に準拠し、室温で長手軸方向が溶接線に平行となる試験片 3 本により、0.2%耐力、引張強さ、伸び、絞りを測定した。

試験後の試験片外観を図 3.1.1.1-12 に示し、結果のまとめを表 3.1.1.1-20 に示す。

③落重試験(溶接金属部)

JEAC 4202(1984)に準拠し、試験片の長手方向が圧延方向に垂直となる方向から採取した試験片 4 体を用い、無延性遷移温度(T_{NDT})を決定した。

結果のまとめを表 3.1.1.1-21 に示す。

④化学成分分析(溶接金属部)

溶接金属部に対し、C、Si、Mn、P、S、Ni、Mo、Cu の 8 元素について分析を行った。結果のまとめを表 3.1.1.1-22 に示す。

⑤金相観察(溶接金属部及び溶融境界線近傍)

溶接金属部の溶融境界線近傍を中心に、倍率 100 倍及び 400 倍で、溶接金属、溶融境界部、溶接熱影響部の金属組織を観察した。

図 3.1.1.1-13 は溶接金属部の観察結果を示す。

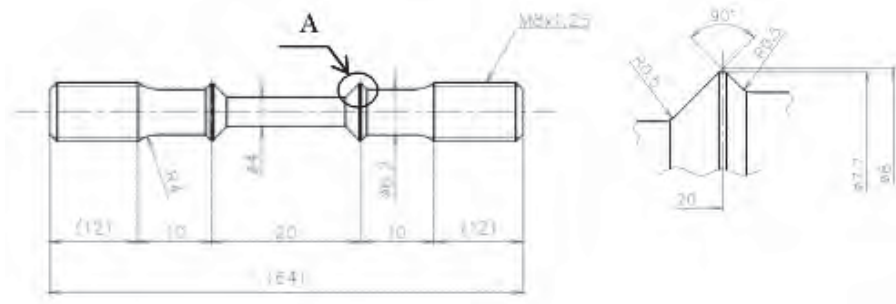
⑥化学成分分析(クラッド溶接部)

クラッド部に対し、C、Si、Mn、P、S、Ni、Cr、Cu、Co 9 元素について分析を行った。
結果のまとめを表 3.1.1.1-23 に示す。

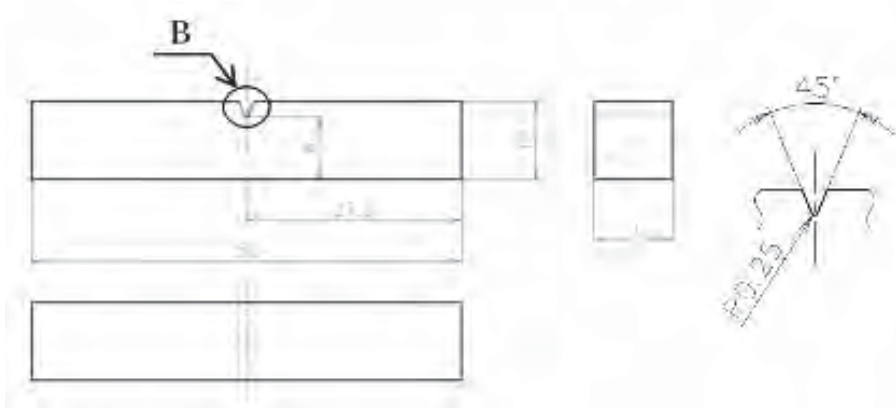
⑦金相観察(クラッド溶接部)及びフェライト量分析

クラッド溶接部の溶融境界線近傍を中心に、倍率 100 倍及び 400 倍で、溶接金属、溶融境界部、溶接熱影響部の金属組織を観察すると共に、フェライト量分析を実施した。

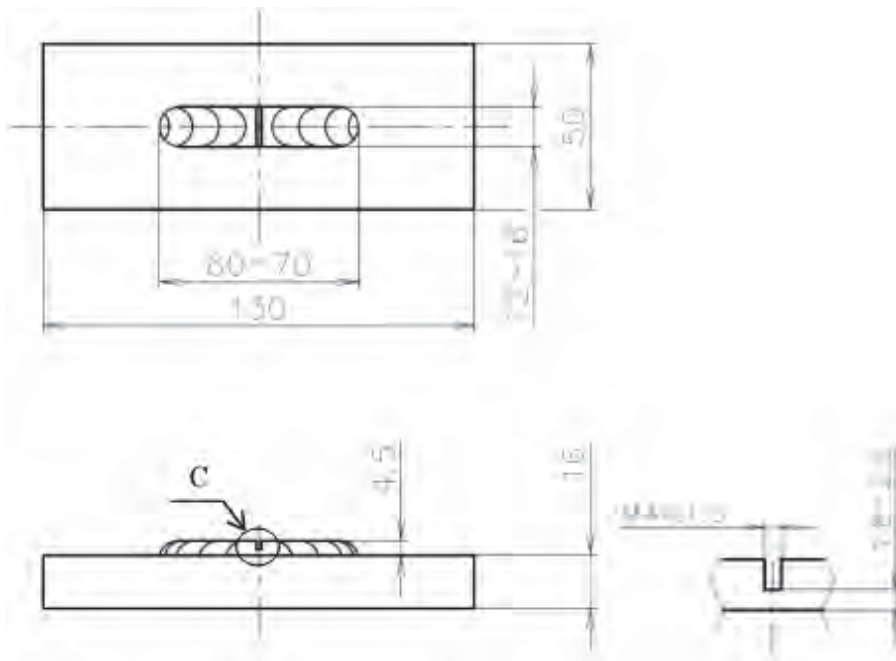
図 3.1.1.1-14 はクラッド溶接部の観察結果を示す。またフェライト量分析結果を表 3.1.1.1-24 に示す。



(1)引張試験片(右は A 部詳細)



(2)シャルピー衝撃試験片(右は B 部詳細)

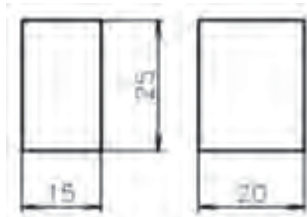


(3)落重試験(右は C 部詳細)

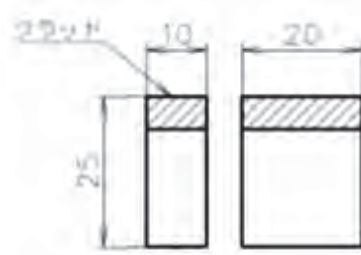
図 3.1.1.1-10 初期プラント模擬材の材料試験用試験片形状



(4)金属組織試験片



(5)化学分析試験片



(6)化学分析試験片及び金属組織試験片
(クラッド付)

図 3.1.1.1-10 初期プラント模擬材の材料試験用試験片形状(続き)

表 3.1.1.1-18 初期プラント模擬材クラッド溶接部の非破壊検査結果

項目	仕様値	実績値
磁粉探傷試験(MT)	JSME 溶接規格 N-1100 の規定に従う。	合格
浸透探傷試験(PT)		合格

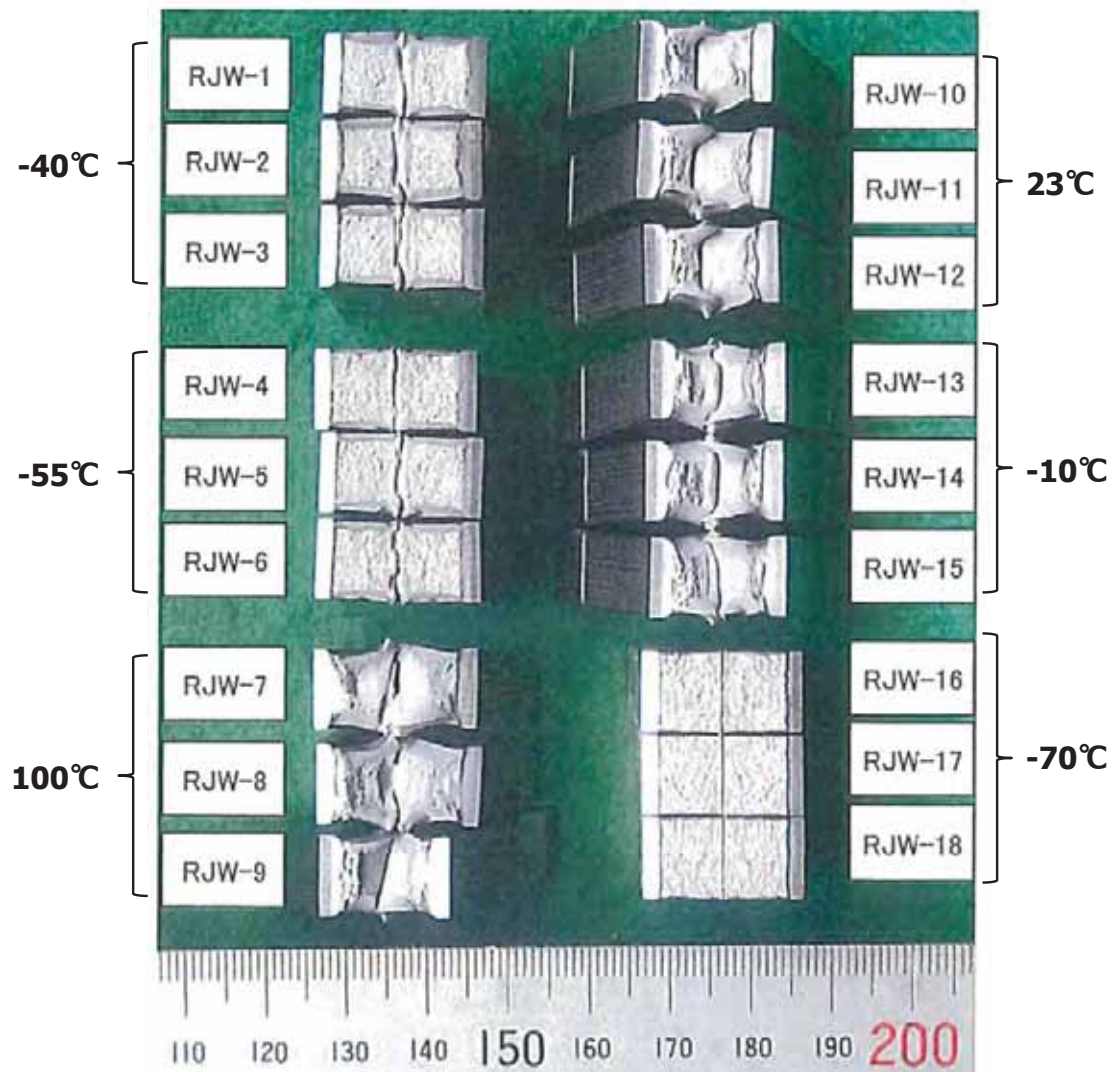


図 3.1.1.1-11 初期プラント模擬材のシャルピー衝撃試験片破面写真

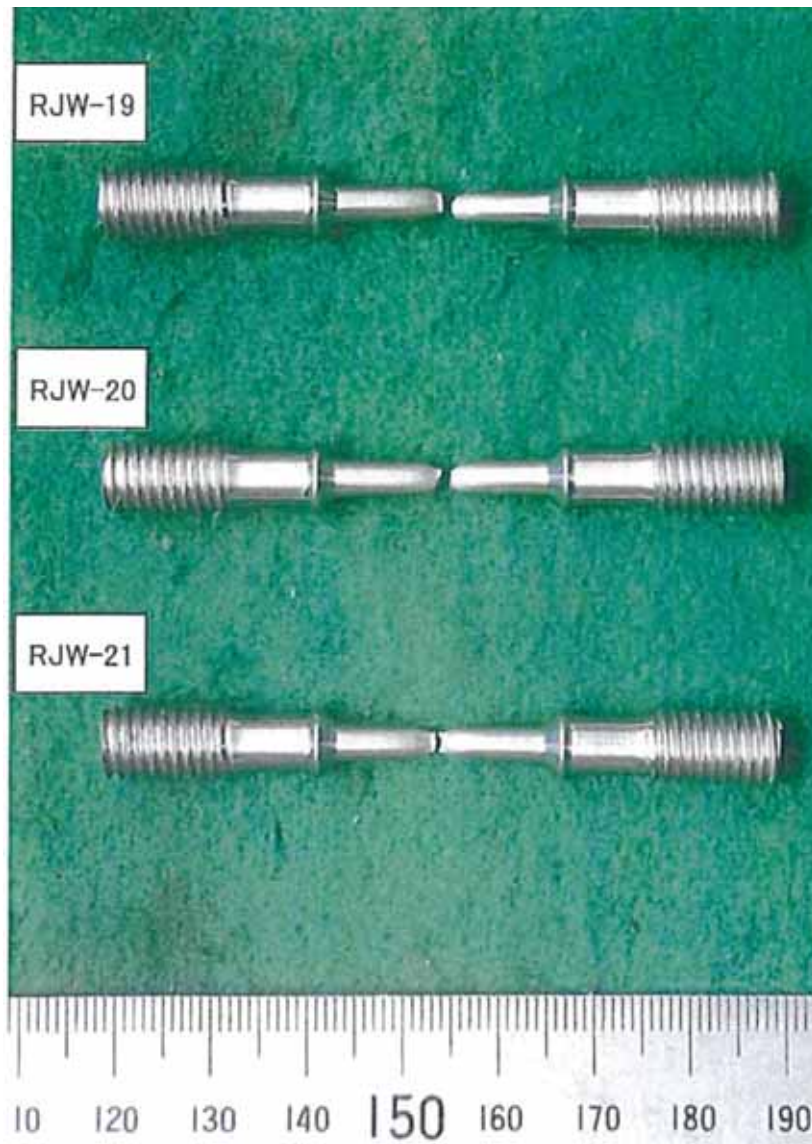
表 3.1.1.1-19 初期プラント模擬材のシャルピー衝撃試験結果(溶接金属部)

・個別データ

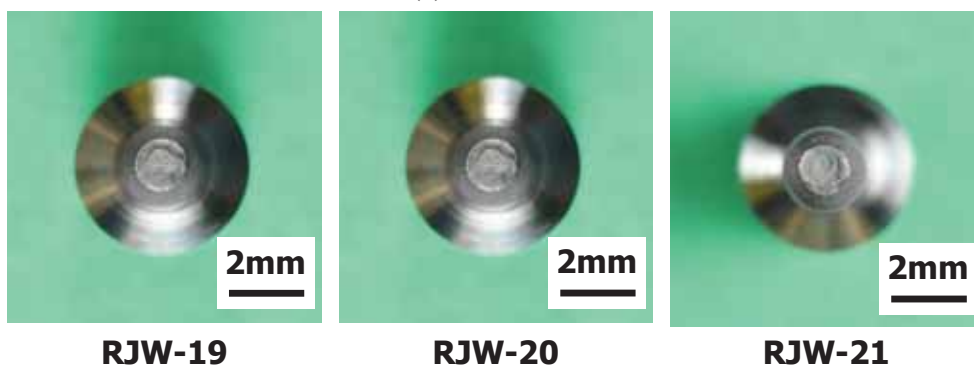
試験温度	試験片 ID	吸収エネルギー(J)		横膨出量(mm)	延性破面率(%)
		結果	平均		
-40℃	RJW-1	57	59	1.04	45
	RJW-2	60		1.10	50
	RJW-3	61		0.99	45
-55℃	RJW-4	18	17	0.47	30
	RJW-5	10		0.55	25
	RJW-6	24		0.52	35
100℃	RJW-7	191	187	2.56	100
	RJW-8	189		2.43	100
	RJW-9	182		2.46	100
室温(23℃)	RJW-10	160	166	2.20	90
	RJW-11	162		2.25	90
	RJW-12	176		2.32	90
-10℃	RJW-13	95	91	2.15	80
	RJW-14	92		2.20	80
	RJW-15	85		2.05	80
-70℃	RJW-16	6	9	0.36	5
	RJW-17	10		0.20	5
	RJW-18	10		0.26	5

・まとめ

$vT_{r30}(^{\circ}\text{C})$	$vT_{r50}(^{\circ}\text{C})$	$vT_{r35\text{mils}}(^{\circ}\text{C})$	$vT_{rs}(^{\circ}\text{C})$	$T_{cv}(^{\circ}\text{C})$	$T_{cv-33}(^{\circ}\text{C})$
-43	-27	-45	-40	-27	-60



(1)突合せ写真



(2)破面写真

図 3.1.1.1-12 初期プラント模擬材の引張試験片破面写真

表 3.1.1.1-20 初期プラント模擬材の引張試験結果(溶接金属部)

試験温度	試験片採取方向	ID.	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び(%)	絞り(%)
23°C	L	RJW-19	537	631	22	76
		RJW-20	537	641	22	74
		RJW-21	526	637	21	71

表 3.1.1.1-21 初期プラント模擬材の落重試験結果(溶接金属部)

項目	実績値				
	ID	試験温度	A	B	判定
亀裂長さ	RJW-22	-70°C	-	15.8 mm	●
	RJW-23	-65°C	-	10.0 mm	●
	RJW-24	-60°C	8.4 mm	11.7 mm	⊙
	RJW-25	-60°C	11.0 mm	8.3 mm	⊙
T _{NDT}	-65°C				
RT _{NDT}	-60°C				

判定

- :無効 溶接ビートの切欠き底に割れが発生していない、又は、所定の試験条件が満足されていない場合
- ⊙:非破断 溶接ビートの切欠底部に割れが発生しているが、溶接ビートを置いた面のいずれの端までも割れが進行していない場合
- :破断 溶接ビートを置いた面の片側端まで割れが発生した場合
- :破断 溶接ビートを置いた面の両側端まで割れが発生した場合

表 3.1.1.1-22 初期プラント模擬材の化学成分の仕様値と実績値(溶接金属部)

項目	化学成分(wt.%)							
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cu
仕様	0.06~ 0.11	0.18~ 0.38	1.00~ 1.50	0.010~ 0.020	0.010~ 0.020	0.80~ 1.10	0.42~ 0.55	0.10~ 0.20
実績	0.093	0.32	1.29	0.012	0.013	0.86	0.49	0.11

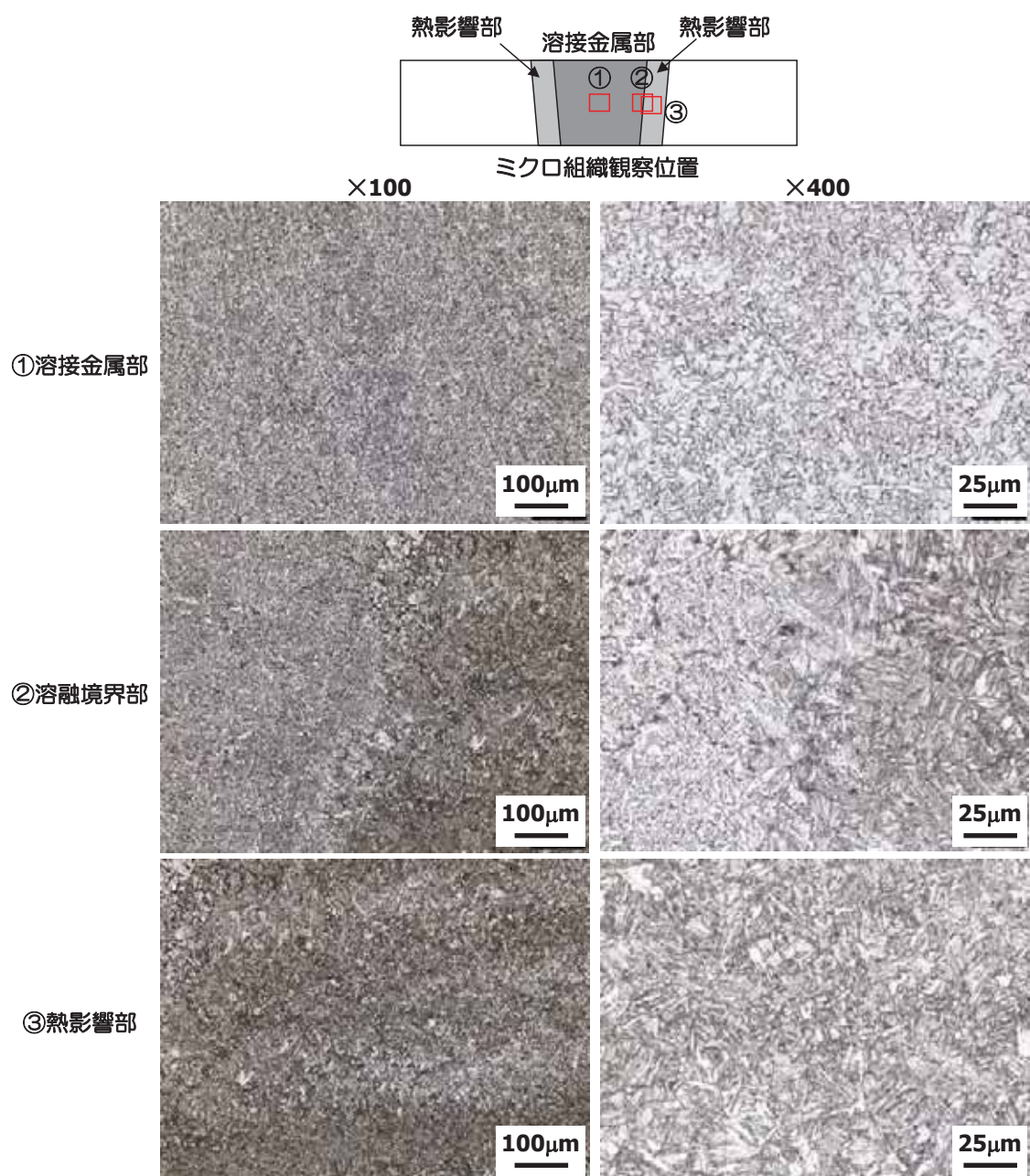


図 3.1.1.1-13 初期プラント模擬材(溶接継手部)のマイクロ組織試験結果(符号: RJW-33)

表 3.1.1.1-23 初期プラント模擬材のクラッド溶接金属の化学成分の仕様値と実績値

	化学成分(wt.%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Co
仕様	≤0.08	≤1.00	≤2.00	≤0.03	≤0.03	9.00~11.00	19.00~22.00	≤0.10	≤0.10
実績	0.052	0.47	1.37	0.019	0.003	10.54	19.91	0.06	0.09

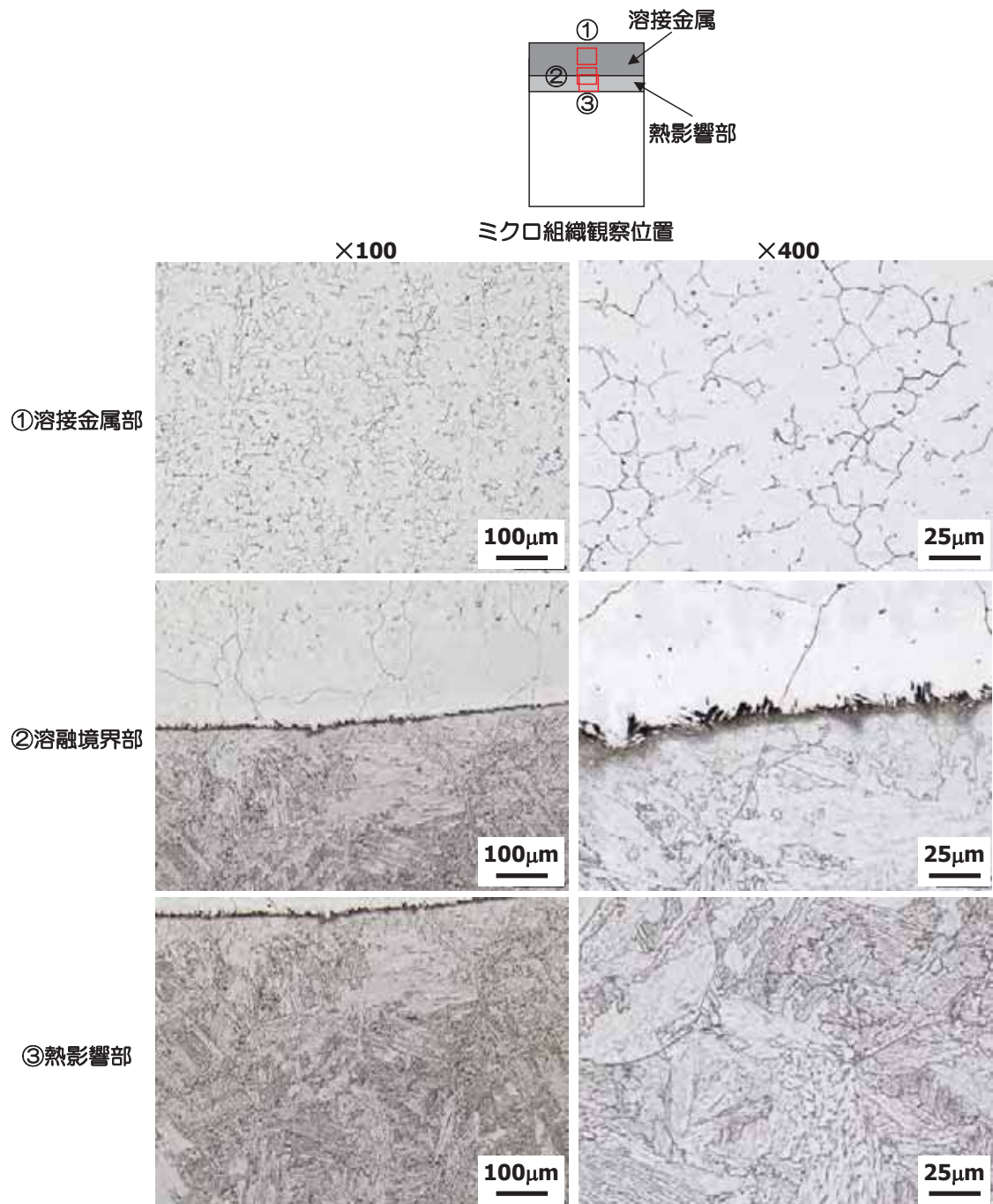


図 3.1.1.1-14 初期プラント模擬材(クラッド溶接部近傍)のマイクロ組織試験結果
(符号: RJW-35)

表 3.1.1.1-24 初期プラント模擬材のクラッド溶接部のフェライト量分析結果

分析位置	仕様値	実績値
クラッド溶接金属表面	5FN~15FN	7FN

FN: フェライトナンバー

(6) 初期プラント模擬材の製作に係るまとめ

RPV 鋼の健全性評価では母材の板厚内部 1/4 位置から採取された監視試験片のデータ等に基づいて照射脆化の評価が行われている。一方実機の熱過渡時に想定される加圧熱衝撃を勘案した健全性評価では、RPV 表面のクラッドと原子炉压力容器鋼の境界から深さ 10 mm 位置の母材を対象とした破壊評価を行うこととなっている。これらを勘案すると、評価対象部位におけるクラッド施工時の溶接熱影響を評価し、板厚内部 1/4 位置の破壊靱性評価をもって代表させることの保守性確認が必要である。

そこで比較的初期に建設された国内 PWR プラントのクラッド付原子炉压力容器鋼を模擬した供試体(以下初期プラント模擬材)を製作し、上記の技術課題に対応することとした。主な結果を以下に示す。

- ・ 比較的初期に建設された国内 PWR プラントの RPV 鋼を模擬したクラッド付原子炉压力容器鋼(初期プラント模擬材)の仕様を検討した。
- ・ 平成 28 年度までに実施した事前試験の結果に基づいて、実機規模に相当する溶解にて初期プラント模擬材用の母材を製作した。
- ・ 母材を用いて溶接継手を製作し、その後表面部にステンレスクラッド施工を行い初期プラント模擬材とした。
- ・ 母材、溶接継手の溶接金属部、クラッド溶接金属部の化学成分及び機械的性質が当初の仕様を満たしており、また金属組織観察等を実施して供試体として問題ないことを確認し、初期プラント模擬材の製作を完了した。

初期プラント模擬材は、後述する監視試験片採取位置の代表性に係る試験の供試材として活用を図る。

3.1.1.2 原子炉圧力容器鋼脆化材の製作(低靱性鋼)

(1)目的

実機の過渡時の加圧熱衝撃(PTS)条件下において、RPVのクラッド下想定欠陥がどのようにふるまうか、またCT試験片等を用いた破壊評価が保守的であるかどうかの確認が必要である。そのため本事業では、クラッド下半楕円亀裂を有する実機規模板厚の大型の十字型試験体を用い、2軸荷重負荷した想定欠陥領域に熱衝撃を与えるPTS模擬試験を計画中である。

そこで、PTS模擬試験の十字型試験体に供するため、照射脆化によって破壊靱性値が低下した状態を模擬した材料(低靱性鋼)を製作した。本項では、その内容について平成28年度の成果を一部再録して述べる。

(2)小規模ラボ溶解材試験による予備検討

実機RPV用材料と同規模の低靱性鋼の製作に先立ち、小規模ラボ溶解材試験による予備検討を実施した。材料供給メーカーの過去の製造実績において目標値に近い結果が得られている成分系をベースとして、C量、S量、P量等の化学成分を変化させた材料(小規模ラボ溶解材)を製作し、熱処理条件等をパラメータとして機械的性質を評価した。

①小規模ラボ溶解材の試験マトリクス

マスターカーブ法適用のためには粒界破壊を極力抑えることが必要である。そこで靱性を低下させるものの粒界破壊の頻度上昇を招くPは過剰に添加せず、C量とS量の調整で低靱性化を図ることを基本的な考え方とし、材料供給メーカーでの過去の製造実績に基づいて小規模ラボ溶解材の化学成分目標値を検討した。

小規模ラボ溶解材は、まず50kg溶解で製造した板材に対し実機と同じ焼入れ温度条件とし、一部条件では結晶粒の粗大化による靱性低下を狙ってより高温の焼入れ温度とした。また靱性低下を狙い、実機より低温として硬化させることを中心に焼戻し温度条件とした。

こうして製作した小規模ラボ溶解材に対し、圧延方向に平行に亀裂が進展する位置で衝撃試験、引張試験、破壊靱性試験を行った。

②供試材と試験方法

a. 化学成分・供試材形状

表 3.1.1.2-1 は小規模ラボ溶解材(9種)の化学成分の目標値を示し、特徴を以下に記す。

- ・ A1材: 過去に実績のある低靱性均質材相当材料
- ・ B1材: A1材のC量を増加した材料
- ・ B3材: B1材のS添加量を増加した材料
- ・ B4材: B3材のS添加量を増加した材料

- ・ C1 材: B1 材の C 量を増加した材料
- ・ C2 材: C2 材の S 量を増加した材料
- ・ P1 材: B1 材の P 量を増加した材料
- ・ P2 材: P1 材の P 量を増加した材料
- ・ P3 材: P2 材の P 量を増加した材料

S 量の増加は、上部棚吸収エネルギーを低下させることで遷移温度の上昇による靱性低下を狙ったものである。また C 量の増加は、強度を上昇させることで靱性低下を狙っている。さらに粒界脆化を促進し、靱性低下に寄与する P 量の効果を確認することとした。またいずれの供試材の機械的性質とも、0.2%耐力で 700 MPa 以上、破壊靱性試験における参照温度(T_0)で 150°C 以上、となることを目標とした。

これら 9 種類の化学成分(目標値)の材料を 50 kg VIM 小規模溶解供試材で溶解、造塊、鍛造、熱間圧延を経て小規模ラボ溶解材の板材とした。表 3.1.1.2-2 に化学成分の実績値を、また小規模ラボ溶解材の形状(35 mm^t×130 mm^w×750 mm^l)と板取を図 3.1.1.2-1 に示す。それぞれの小規模ラボ溶解材は、予備熱処理として焼ならしを行って 140 mm^lのブロックとした。その後調質熱処理として焼入れ・焼戻しを加え、材料試験に供した。

b. 熱処理

焼入れ温度は、実機製造条件に近い 980°C を基本とした。一方で結晶粒の粗大化による靱性低下を狙い、一部の試験片では 1050°C での焼入れも実施した。また最終熱処理条件(焼戻し温度)は硬化による破壊靱性値の低下を図るため、550°C、480°C を中心に実施し、実機製造時に近い 600°C を最も高い条件とした。

c. 試験方法

予備試験を合理的に進めるため、供試材と熱処理条件の組み合わせを絞り込みながら狙った機械的特性が得られるかどうかを確認しながら、幾つかのステップに分けて以下の試験を実施した。

引張試験は、JIS Z 2242 に準拠し、JIS Z 2201 14A 号(φ10 mm×50 mm GL)を用いて実施した。試験温度は室温とし、試験本数は各 2 本とした。また 98.07 N(10 kgf)の試験力でビッカース硬さ試験を実施した。

シャルピー衝撃試験は、JIS Z 2241 に準拠し、JIS Z 2202 V ノッチ試験片(図 3.1.1.2-2)を用いて実施した。試験温度は 0°C~240°C とし、試験本数は 24 本または 12 本とした。

破壊靱性試験は、JEAC 4216-2011 に準拠し、クラッド施工時の熱影響評価用としてサイドグループなしの 0.16TCT 試験片(図 3.1.1.2-3)と、試験片寸法の影響確認用としてサイドグループありの 0.5TCT 試験片(図 3.1.1.2-4)を用いた。0.16TCT 試験片及び 0.5TCT 試験片の板取りを図 3.1.1.2-5 ~図 3.1.1.2-9 に示す。いずれの試験片も、圧延方向(L 方向)に亀裂進展するように採取した。試験温度は 0°C~150°C とし、試験本数は各 1~8 体とした。

③試験結果

a. 引張試験

図 3.1.1.2-10 に小規模ラボ溶解材の室温での引張試験結果を示す。C 量が最も少ない A1 材の 0.2%耐力は仕様値である 700 MPa 以上を満足していなかった。また、A1 材よりも C 量のみを増加させた B1 材、B3 材及び B4 材も、A1 材よりも若干上昇はしたものの 700 MPa を上回らなかった。B1 材、B3 材、B4 材からさらに C 量を増加した C1 材は 700 MPa を上回り、仕様を満足していた。また、B1 材、B3 材、B4 材の P 量を増加した P1 材、P2 材及び P3 材も仕様値を満足していた。

引張強さは A1 材、B1 材、B3 材及び B4 材で有意な差は認められなかった。C1 材、C2 材、P1 材、P2 材及び P3 材では C 量及び P 量が多いことから、A1 材及び B1、B3、B4 材と比較して引張強さが上昇した。

伸びと絞りは、C 量を調整した A1 材、B1 材、B3 材、B4 材、C1 材及び C2 材においてほぼ同等であった。一方、P 量を調整した P1 材、P2 材、P3 材の伸びと絞りは、他の材料と比較して若干小さい傾向を示した。

b. ビッカース硬さ

図 3.1.1.2-11(a)に小規模ラボ溶解材のビッカース硬さ試験(試験力 98.07 N)の結果を示す。これらの材料では焼戻し温度が低くなるとともに硬さが上昇する傾向も認められた。また P1 材、P2 材、P3 材を比較すると P 量の増加とともに硬さが若干上昇する傾向が見られたが、焼戻し温度 525°C と 480°C の範囲では硬さの差は顕著でなかった。

図 3.1.1.2-11(b)は共通の焼戻し条件である 600°C×4 時間での C 量と硬さの関係を示す。C 量の上昇とともに若干硬さが上昇する傾向が認められた。

表 3.1.1.2-1 小規模ラボ溶解材の化学成分目標値

鋼種	化学成分製品狙い値 (wt%)												
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V	Al	Ceq	
SQV2A規定値	≤0.25	0.15/ 0.40	1.15/ 1.50	≤0.020	≤0.020	0.40/ 0.70	—	—	0.45/ 0.60	—	—	—	
A1	0.25	0.40	1.45	0.030	0.002	0.50	0.14	0.20	0.60	≤0.01	<0.005	0.70	
B1	0.30	0.40	1.45	0.030	0.002	0.50	0.14	0.20	0.60	≤0.01	<0.005	0.70	
B3	0.30	0.40	1.45	0.030	0.010	0.50	0.14	0.20	0.60	≤0.01	<0.005	0.75	
B4	0.30	0.40	1.45	0.030	0.020	0.50	0.14	0.20	0.60	≤0.01	<0.005	0.75	
C1	0.35	0.40	1.45	0.030	0.002	0.50	0.14	0.20	0.60	≤0.01	<0.005	0.80	
C2	0.35	0.40	1.45	0.030	0.010	0.50	0.14	0.20	0.60	≤0.01	<0.005	0.80	
P1	0.30	0.40	1.45	0.040	0.002	0.50	0.14	0.20	0.60	≤0.01	<0.005	0.75	
P2	0.30	0.40	1.45	0.050	0.002	0.50	0.14	0.20	0.60	≤0.01	<0.005	0.75	
P3	0.30	0.40	1.45	0.060	0.002	0.50	0.14	0.20	0.60	≤0.01	<0.005	0.75	

$$Ceq = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14(V:0.003\%として算出)$$

表 3.1.1.2-2 小規模ラボ溶解材における化学成分実績値

鋼種	化学成分製品分析値 (wt%)												
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V	Al	Ceq	
SQV2A規定値	≤0.25	0.15/ 0.40	1.15/ 1.50	≤0.020	≤0.020	0.40/ 0.70	—	—	0.45/ 0.60	—	—	—	
A1	0.25	0.40	1.40	0.029	0.002	0.50	0.14	0.20	0.60	0.003	0.005	0.691	
B1	0.30	0.40	1.40	0.028	0.002	0.49	0.14	0.20	0.60	0.003	0.005	0.740	
B3	0.30	0.40	1.42	0.029	0.010	0.49	0.14	0.20	0.60	0.003	0.005	0.744	
B4	0.30	0.41	1.46	0.030	0.020	0.51	0.14	0.20	0.63	0.003	0.005	0.759	
C1	0.35	0.40	1.44	0.030	0.003	0.51	0.14	0.20	0.61	0.003	0.005	0.800	
C2	0.35	0.40	1.46	0.029	0.010	0.50	0.14	0.20	0.62	0.003	0.005	0.806	
P1	0.30	0.40	1.42	0.046	0.002	0.51	0.15	0.20	0.63	0.003	0.005	0.754	
P2	0.30	0.40	1.45	0.057	0.002	0.50	0.14	0.20	0.62	0.003	0.005	0.754	
P3	0.31	0.40	1.44	0.070	0.002	0.51	0.15	0.20	0.63	0.003	0.005	0.767	

$$Ceq = C + Mn/6 + Si/24 + Ni/40 + Cr/5 + Mo/4 + V/14$$

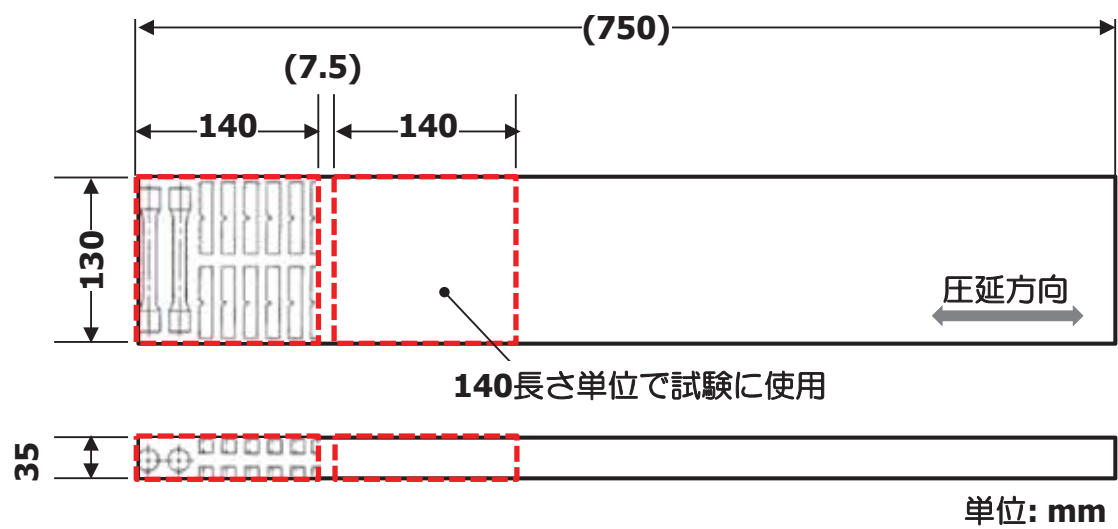


図 3.1.1.2-1 小規模ラボ溶解材の形状

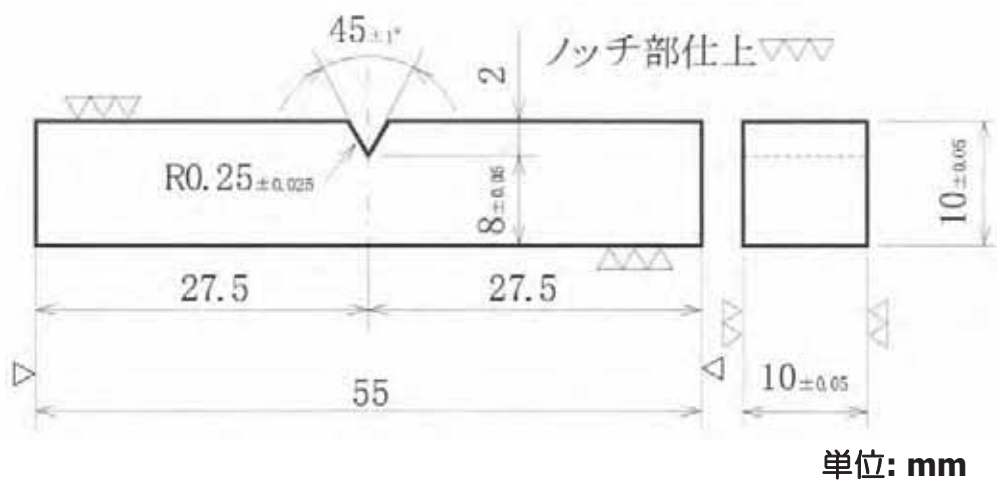
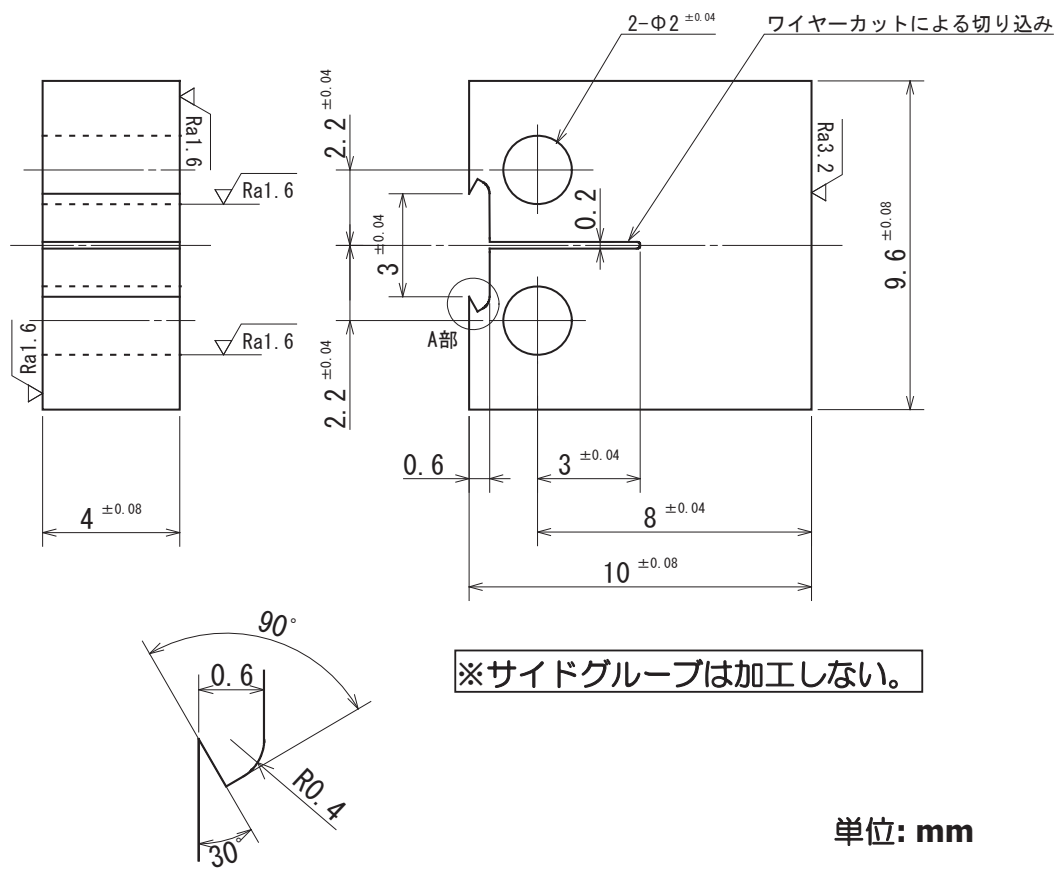


図 3.1.1.2-2 予備試験に用いたシャルピー衝撃試験片形状



A部詳細

図 3.1.1.2-3 予備試験に用いたサイドグループなし 0.16TCT 試験片の形状及び寸法

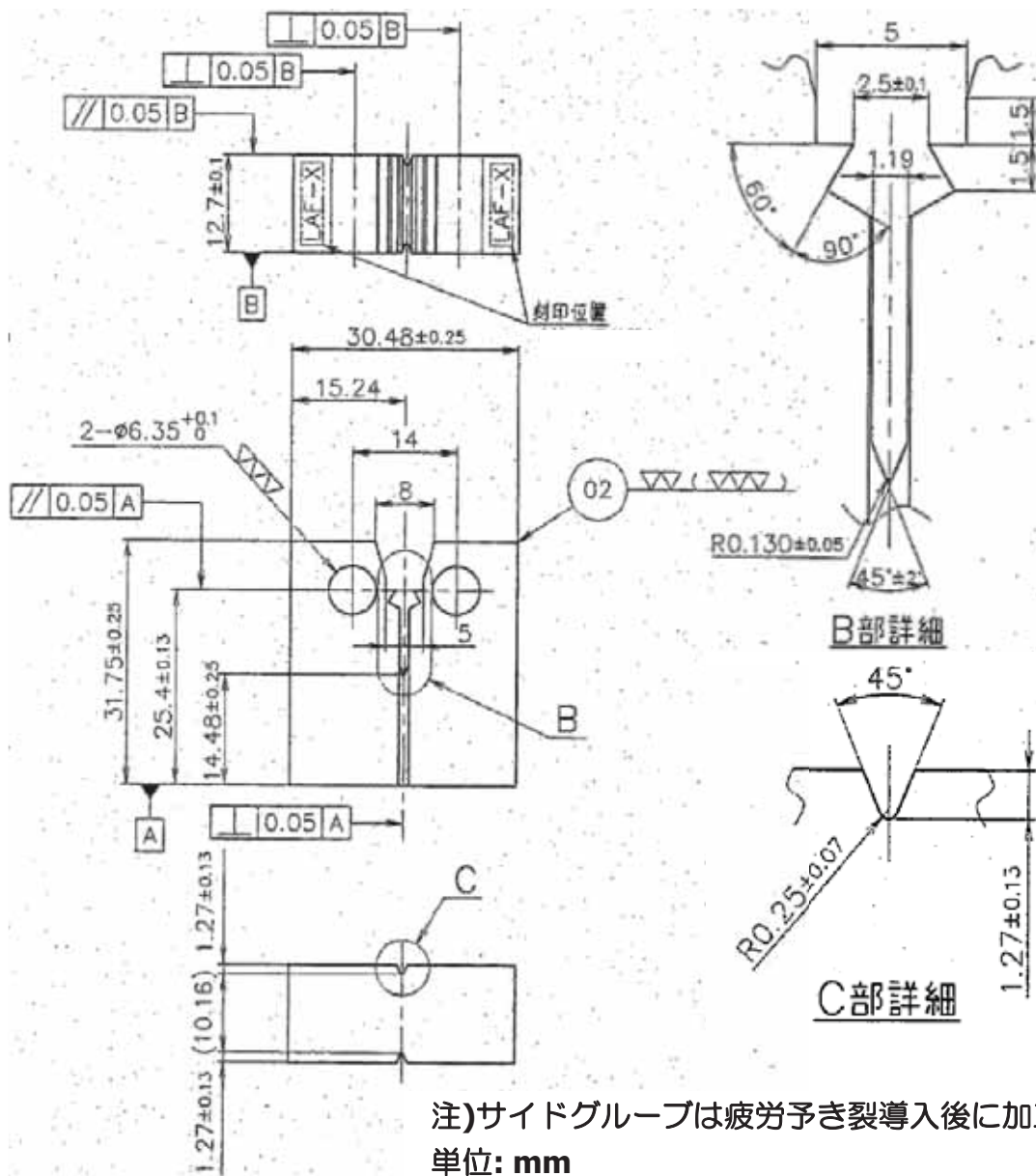


図 3.1.1.2-4 予備試験に用いたサイドグループあり 0.5TCT 試験片の形状及び寸法

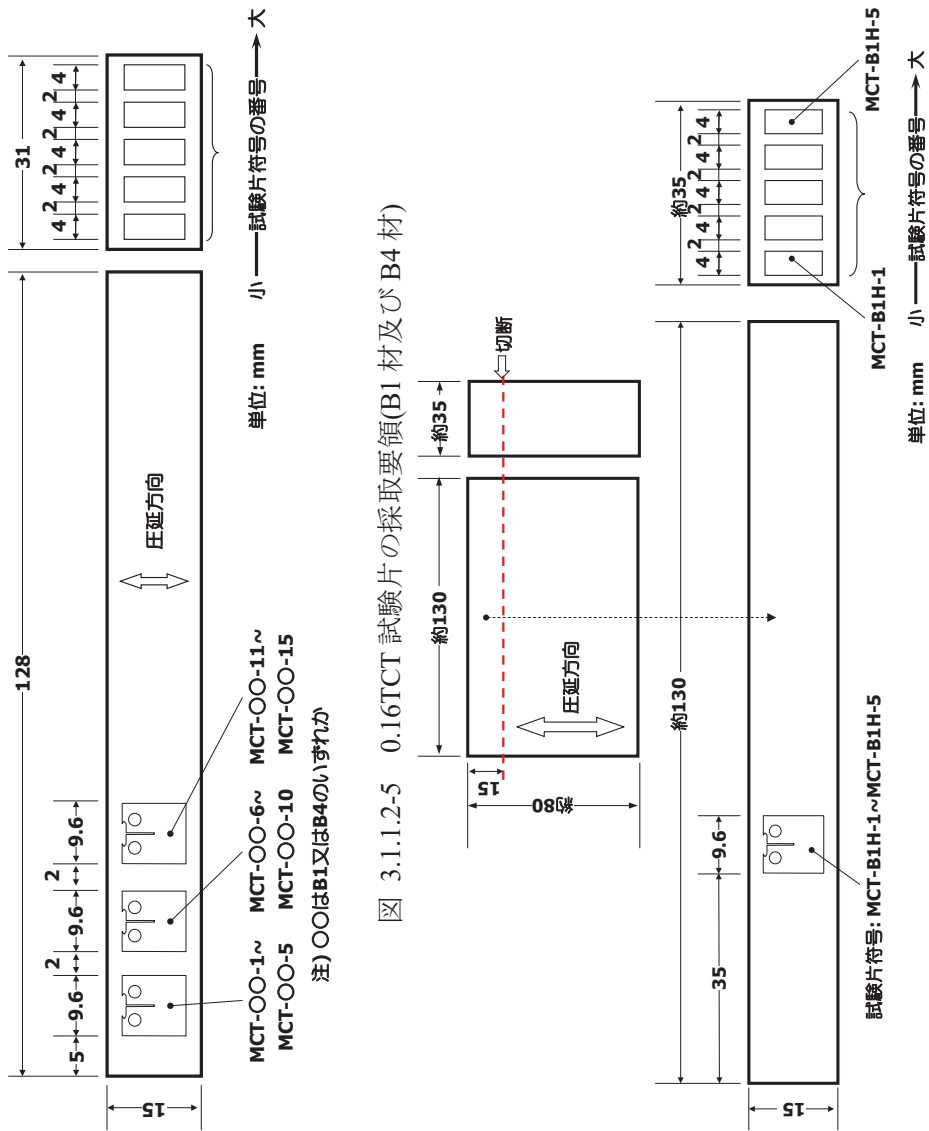


図 3.1.1.2-6 0.16TCT 試験片の採取要領(BIH材)

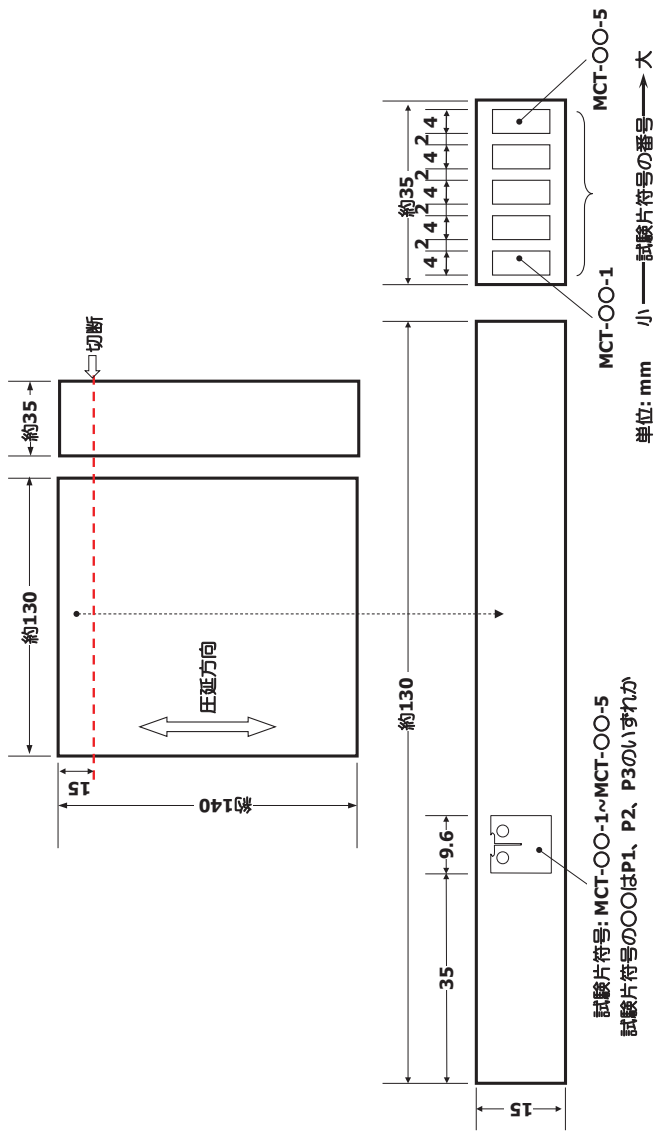


図 3.1.1.2-7 0.16TCT 試験片の採取要領(P1材、P2材、P3材)

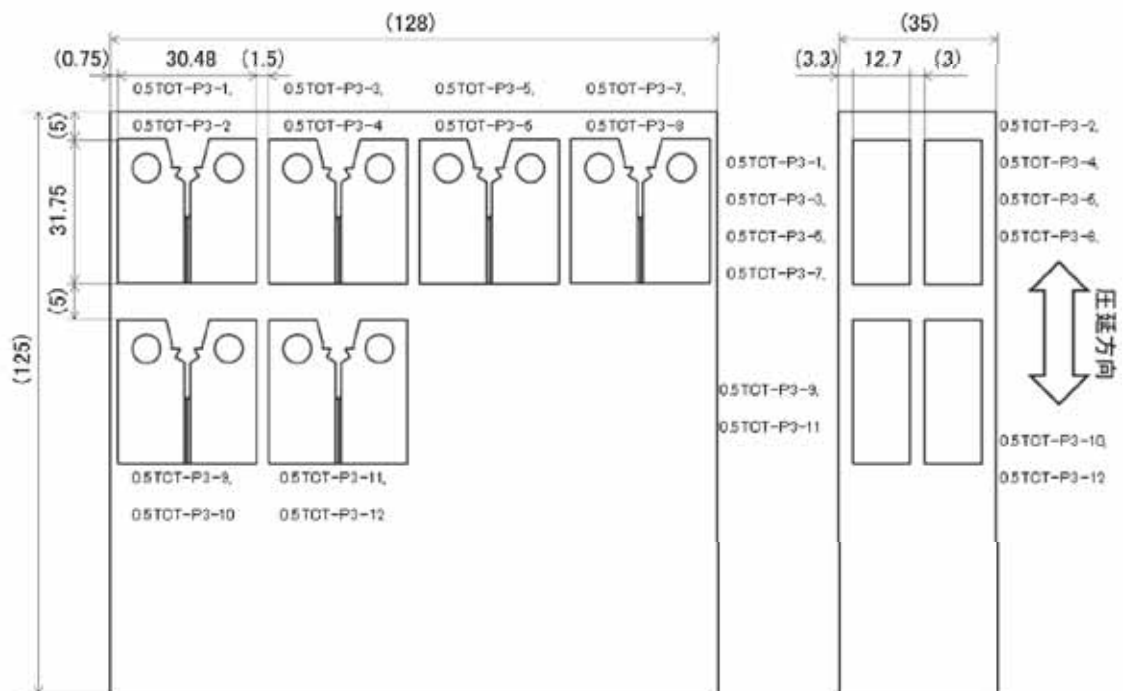


図 3.1.1.2-8 0.5TCT 試験片の採取要領(P3 材)(単位: mm)

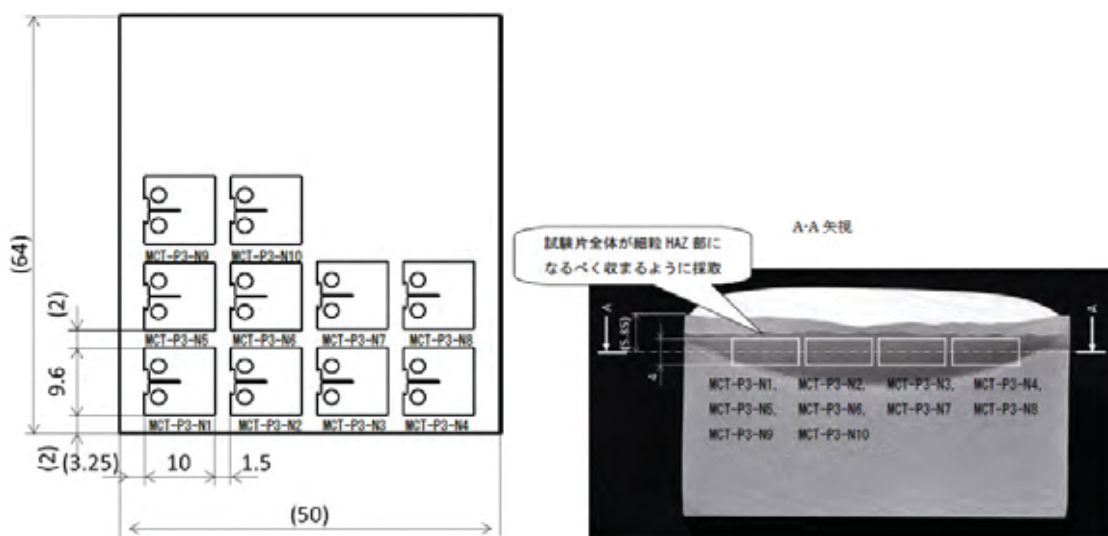
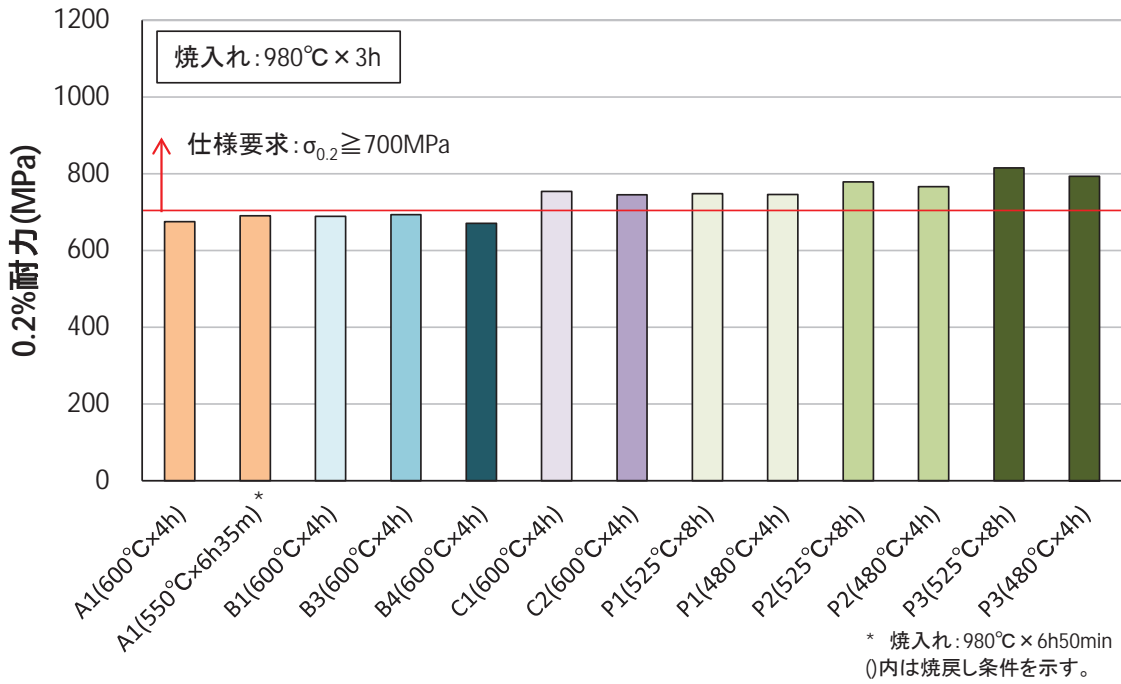
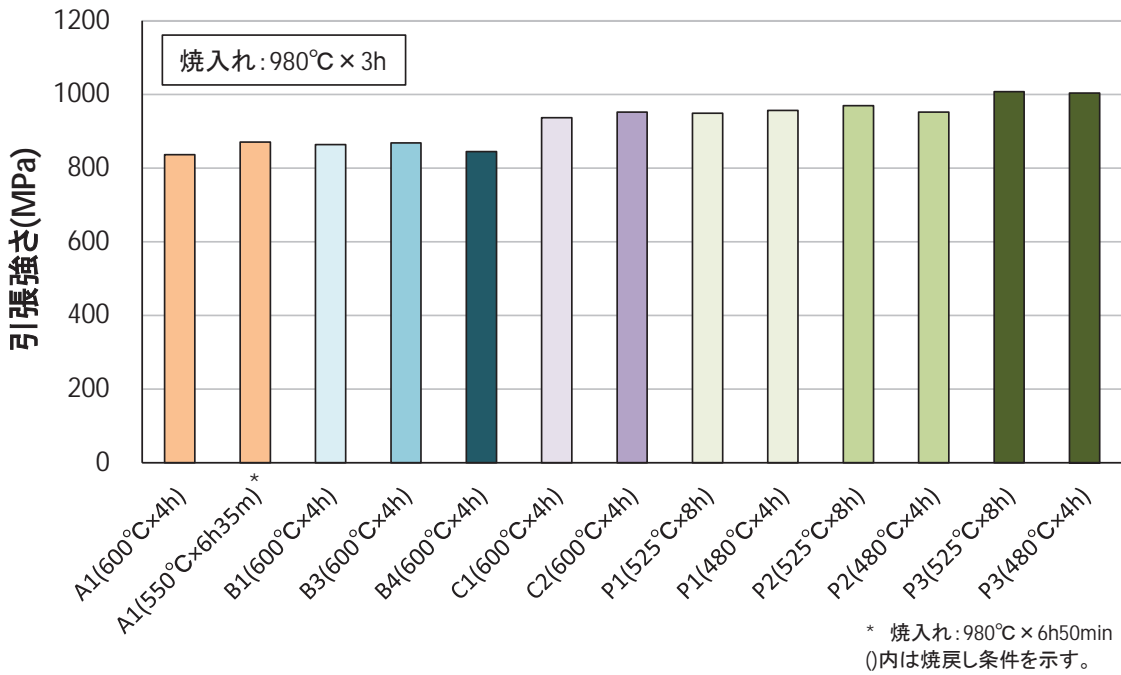


図 3.1.1.2-9 0.16TCT 試験片の採取要領(P3 材 HAZ)(単位: mm)

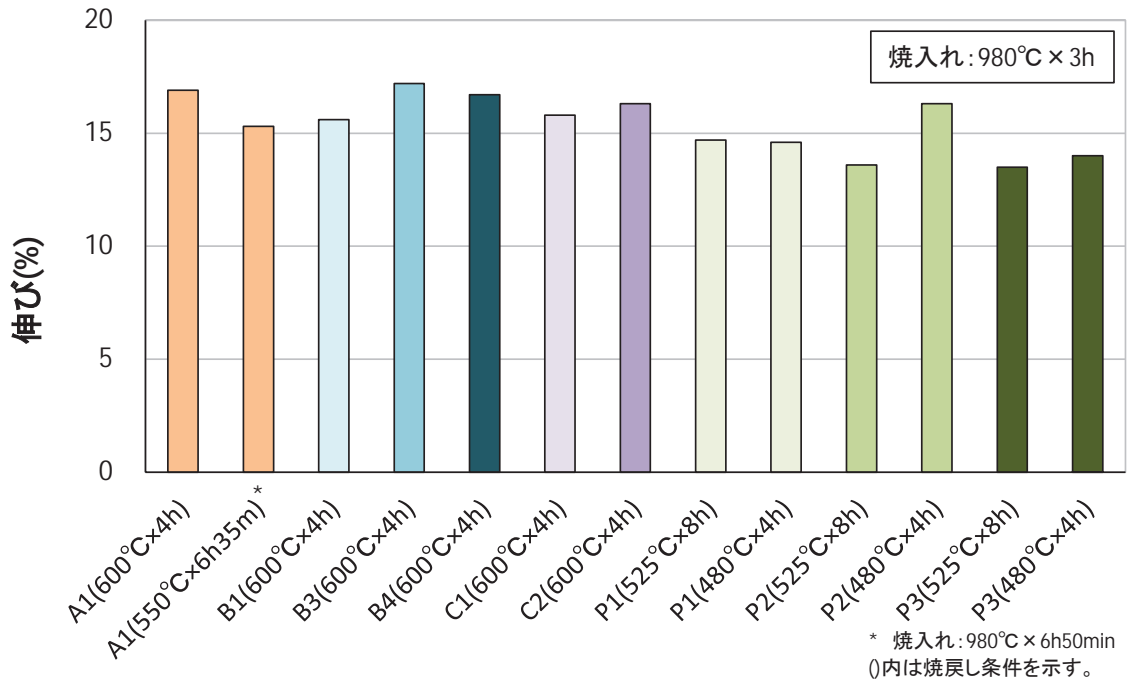


(a) 0.2%耐力

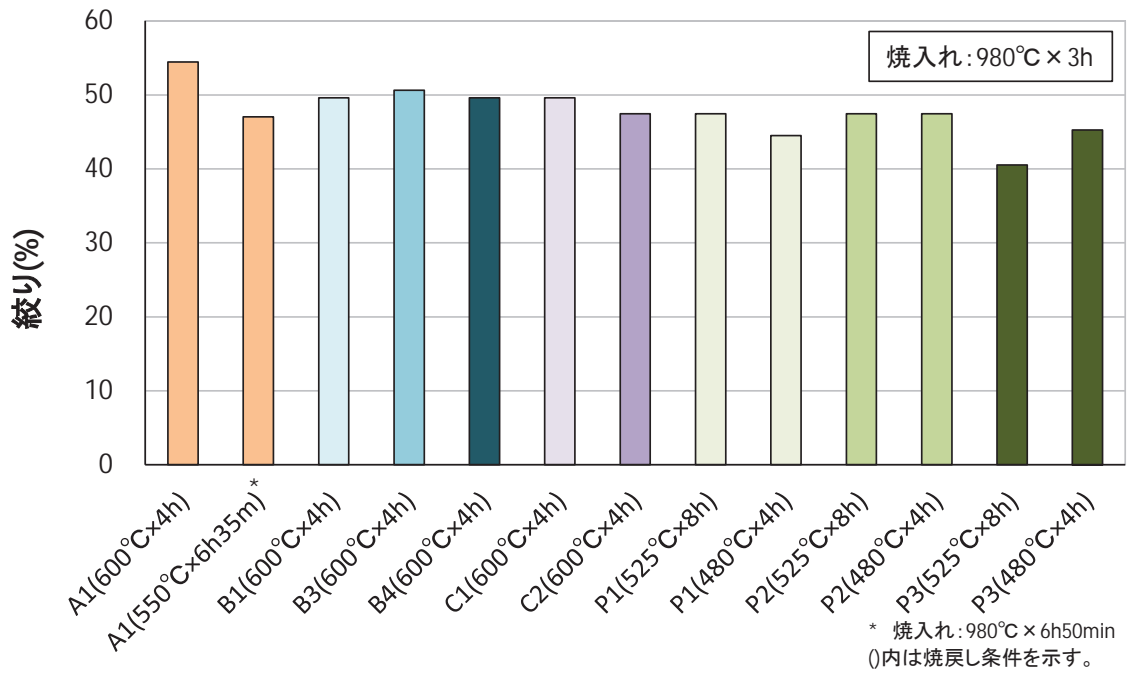


(b) 引張強さ

図 3.1.1.2-10(1) 小規模ラボ溶解材の引張特性

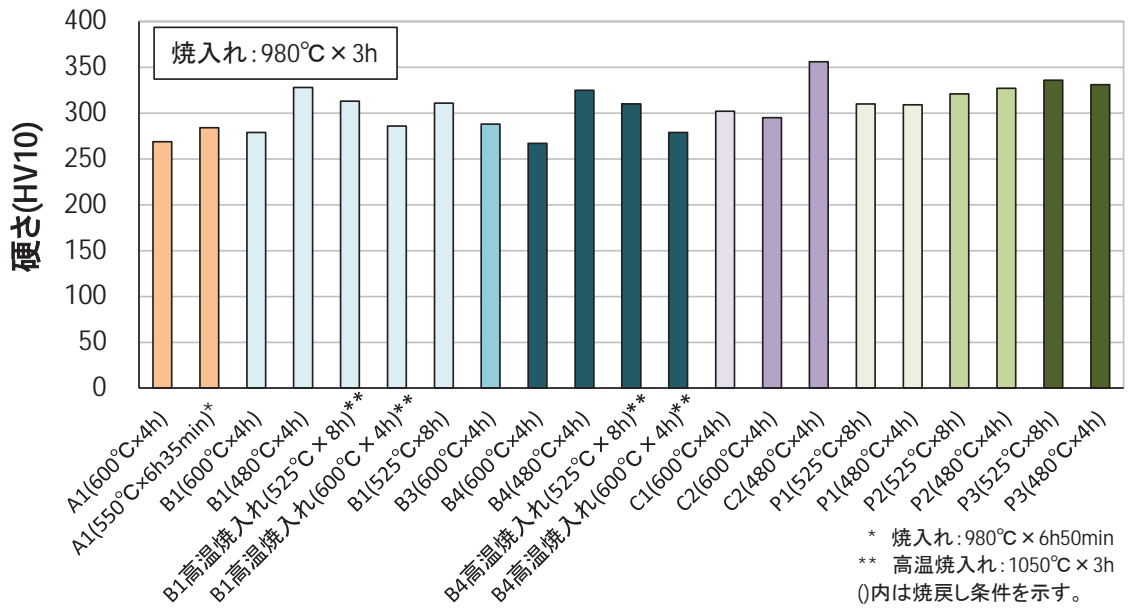


(c) 伸び

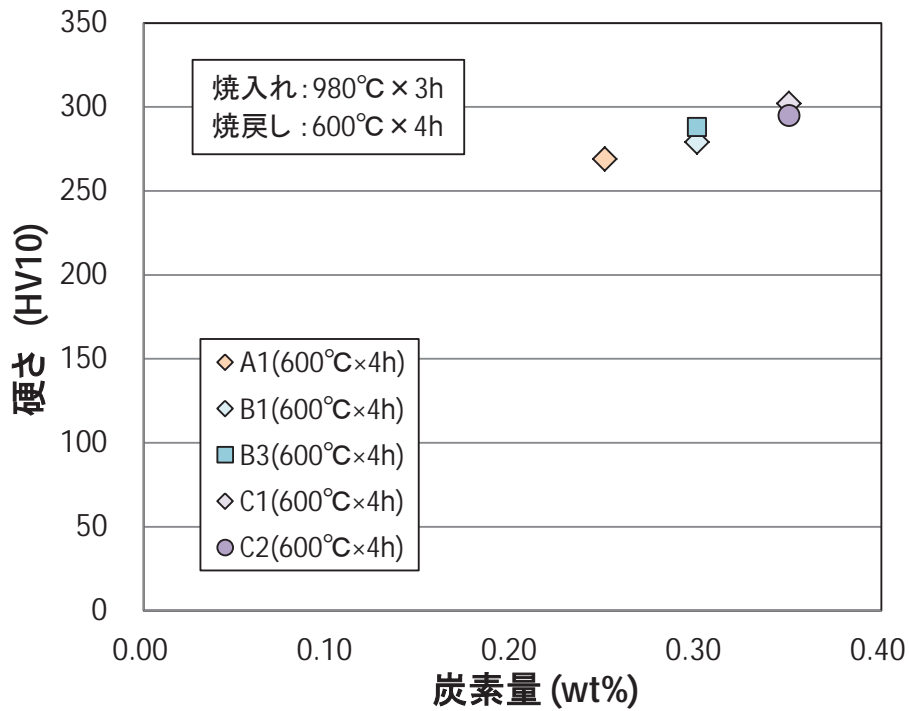


(d) 絞り

図 3.1.1.2-10(2) 小規模ラボ溶解材の引張特性



(a) 小規模ラボ溶解材のビッカース硬さ試験結果



(b) C 量の影響比較

図 3.1.1.2-11 小規模ラボ溶解材のビッカース硬さ試験結果

c. シャルピー衝撃試験結果

図 3.1.1.2-12 に小規模ラボ溶解材のシャルピー衝撃試験結果を示す。また図 3.1.1.2-13 ~図 3.1.1.2-23 にシャルピー衝撃試験片の破面 SEM 観察結果を示す。

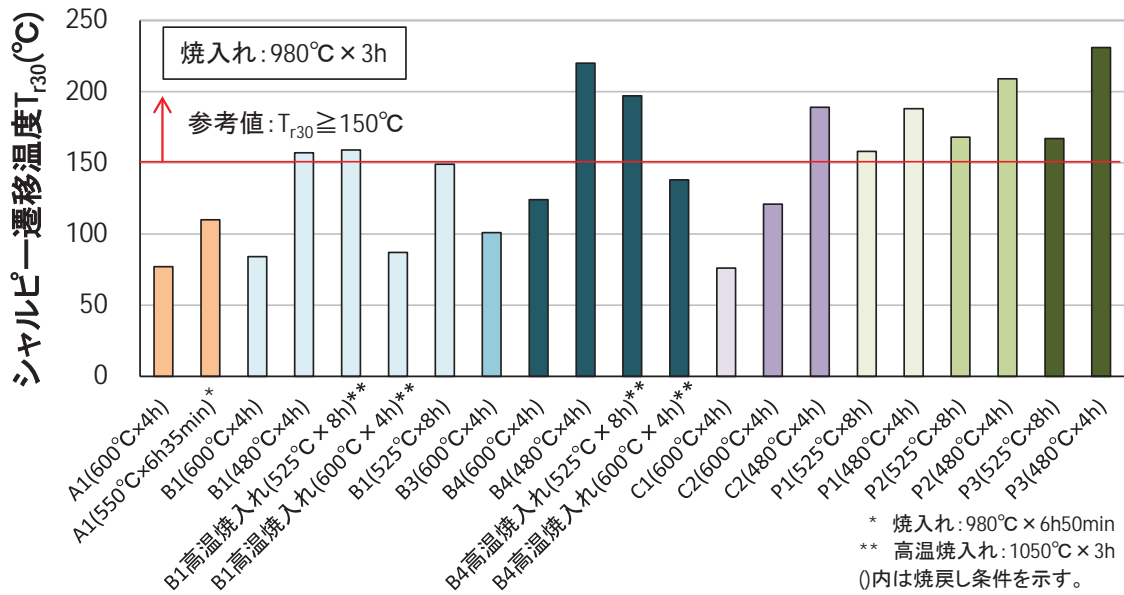
全ての材料において、焼戻し温度を低くするとシャルピー遷移温度 T_{r30} が上昇する傾向が認められた。また B1 材及び B4 材の結果より、高温での焼入れの方が T_{r30} は高くなることが判った。

A1 材、B1 材及び C1 材の焼き戻し条件 $600^{\circ}\text{C}\times 4$ 時間の結果を比較すると、C 量が T_{r30} に及ぼす影響は顕著に表れていないものと思われる。一方、B4 材や C2 材等の S を多く含むものは、他の A 材、B 材及び C 材と比較して、 T_{r30} が高くなる傾向であった。

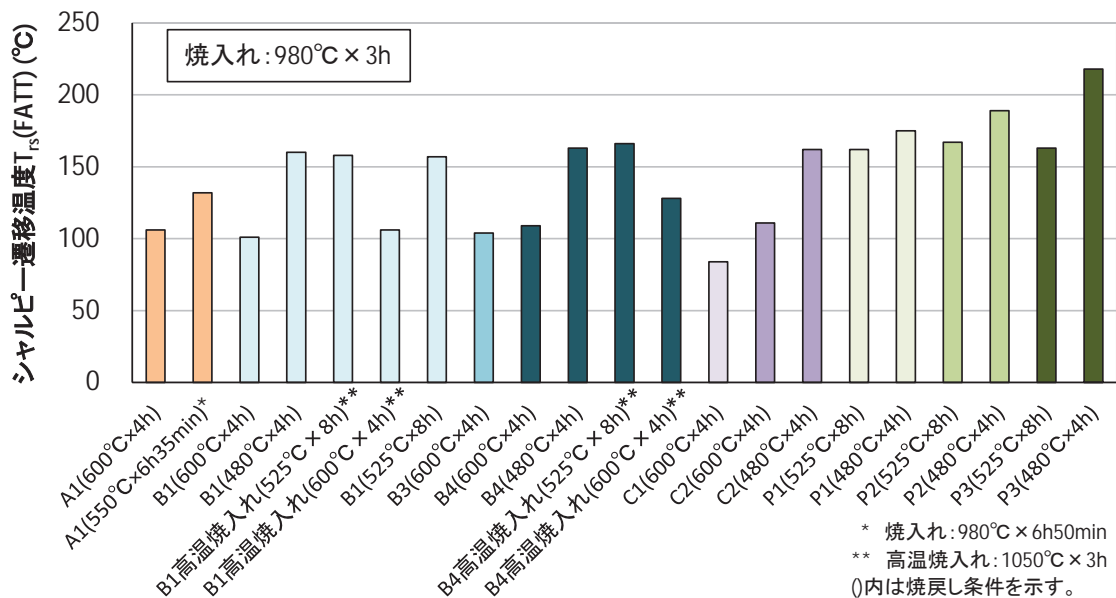
P1 材、P2 材、P3 材の比較より、P 量が多くなると T_{r30} が高くなる傾向がある。このことより、P 量が T_{r30} に与える影響は大きいと考えられ、特に焼戻し温度を 480°C とした場合にその傾向が顕著であった。

シャルピー遷移温度 $T_{rs}(\text{FATT})$ も T_{r30} と同様の傾向であり、小規模ラボ溶解材においても、脆性破面率と吸収エネルギーは良く対応していることを確認した。

上部棚吸収エネルギー(USE)は、焼戻し温度を高くする程上昇する傾向が見られた。A1 材、B1 材及び C1 材の焼き戻し温度 600°C の結果の比較より、C 量が多くなるにつれて低下した。また B 材と C 材を比較より、S 量が多くなると USE が低下する傾向が認められた。

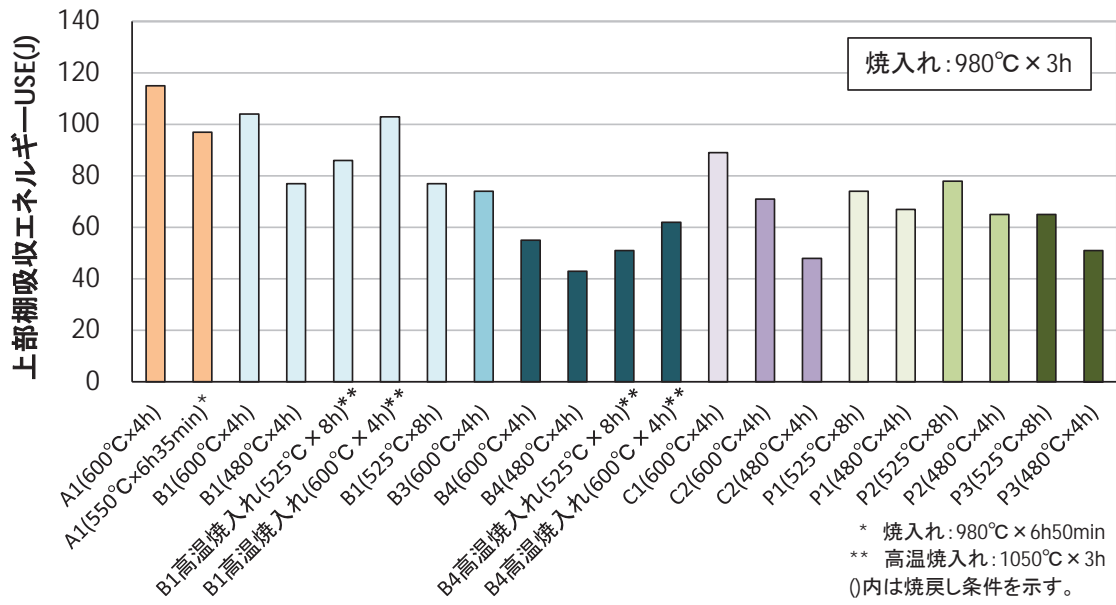


(a) シャルピー遷移温度 T_{r30}



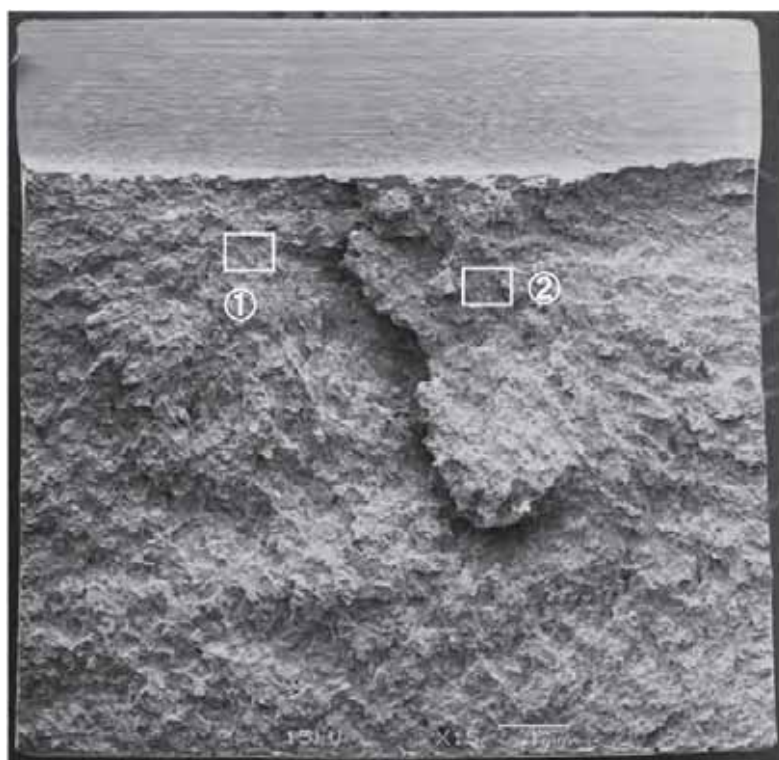
(b) シャルピー遷移温度 T_{rs} (FATT)

図 3.1.1.2-12(1) 小規模ラボ溶解材のシャルピー衝撃試験結果

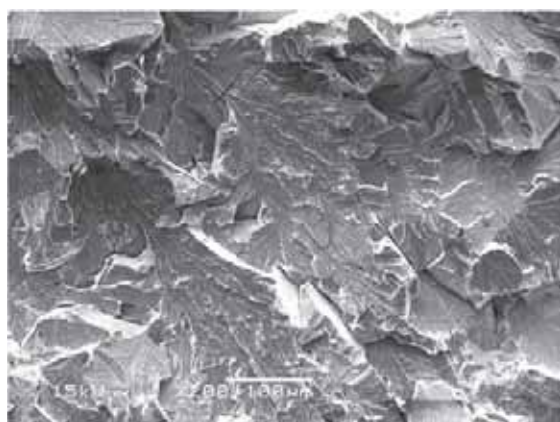


(c) 上部棚吸収エネルギーUSE

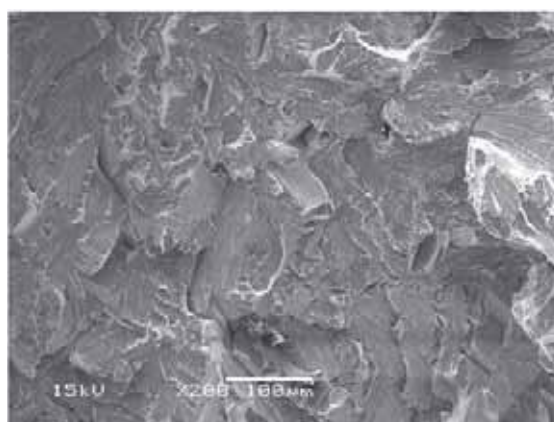
図 3.1.1.2-12(2) 小規模ラボ溶解材のシャルピー衝撃試験結果



(a)破面全体(粒界破面率: 0%)

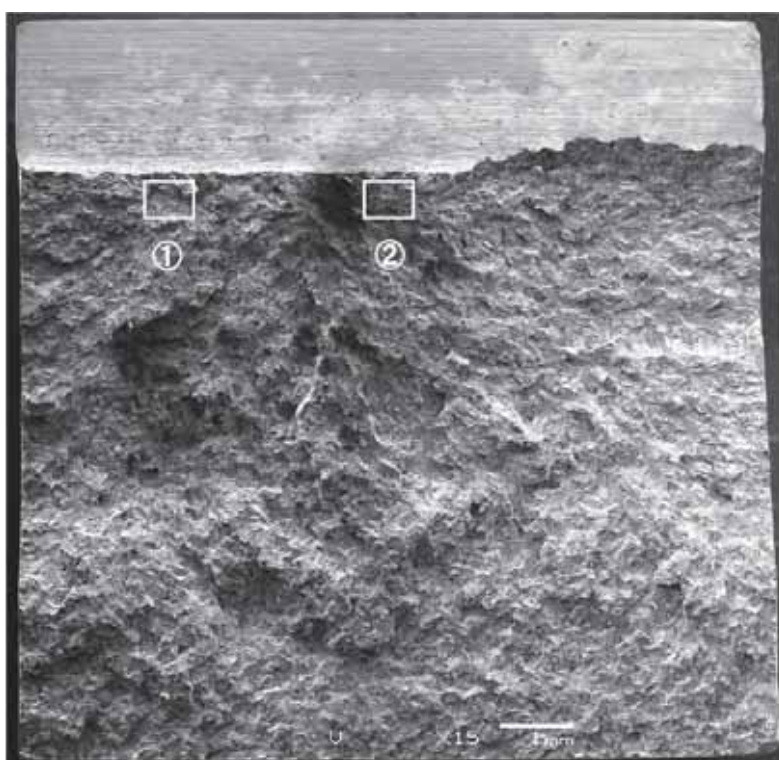


(b)①部拡大

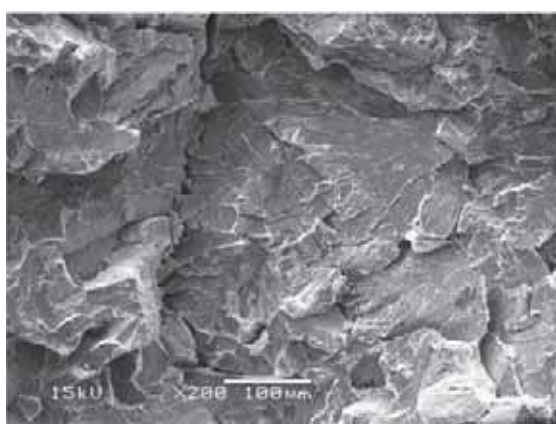


(c)②部拡大

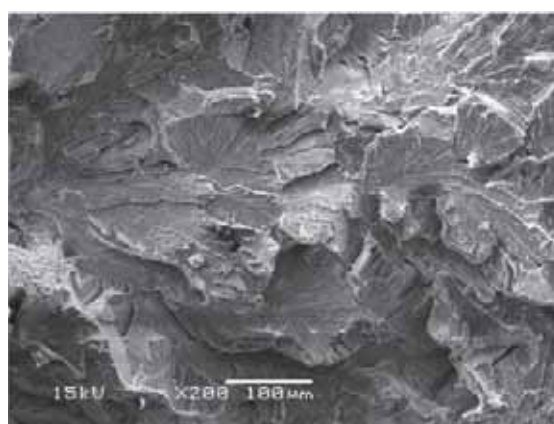
図 3.1.1.2-13 小規模ラボ溶解材のシャルピー衝撃試験破面写真
 (A1 材、980°C焼入れ、600°C×4 時間焼戻し、試験片 No.C19、試験温度: 0°C)
 (吸収エネルギー: 21J、延性破面率: 5%)



(a)破面全体(粒界破面率: 0%)

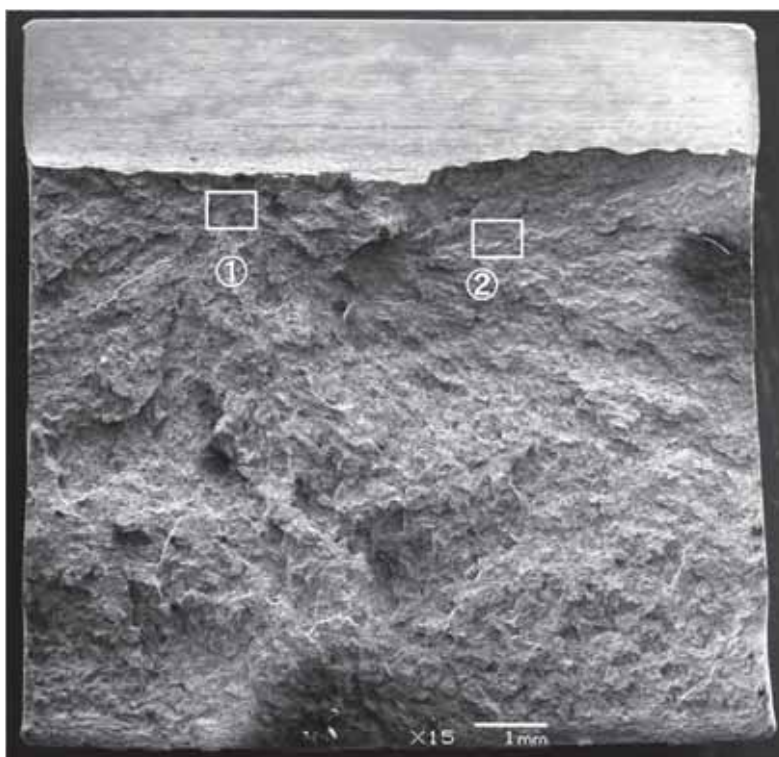


(b)①部拡大

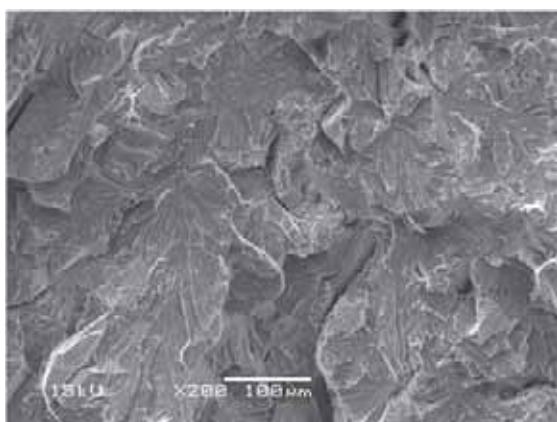


(c)②部拡大

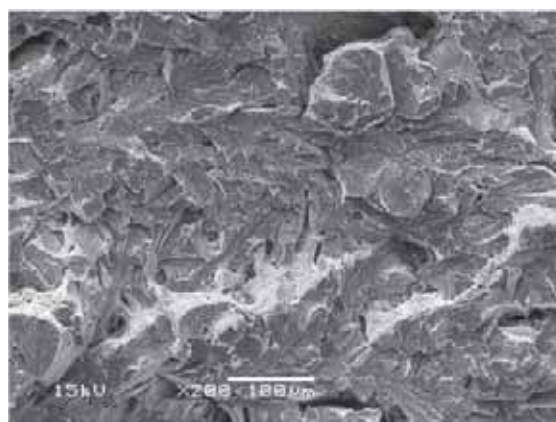
図 3.1.1.2-14 小規模ラボ溶解材のシャルピー衝撃試験破面写真
 (A1 材、980°C焼入れ、550°C×6 時間 35 分焼戻し、試験片 No.C22、試験温度: 20°C)
 (吸収エネルギー: 11J、延性破面率: 5%)



(a)破面全体(粒界破面率: 0%)

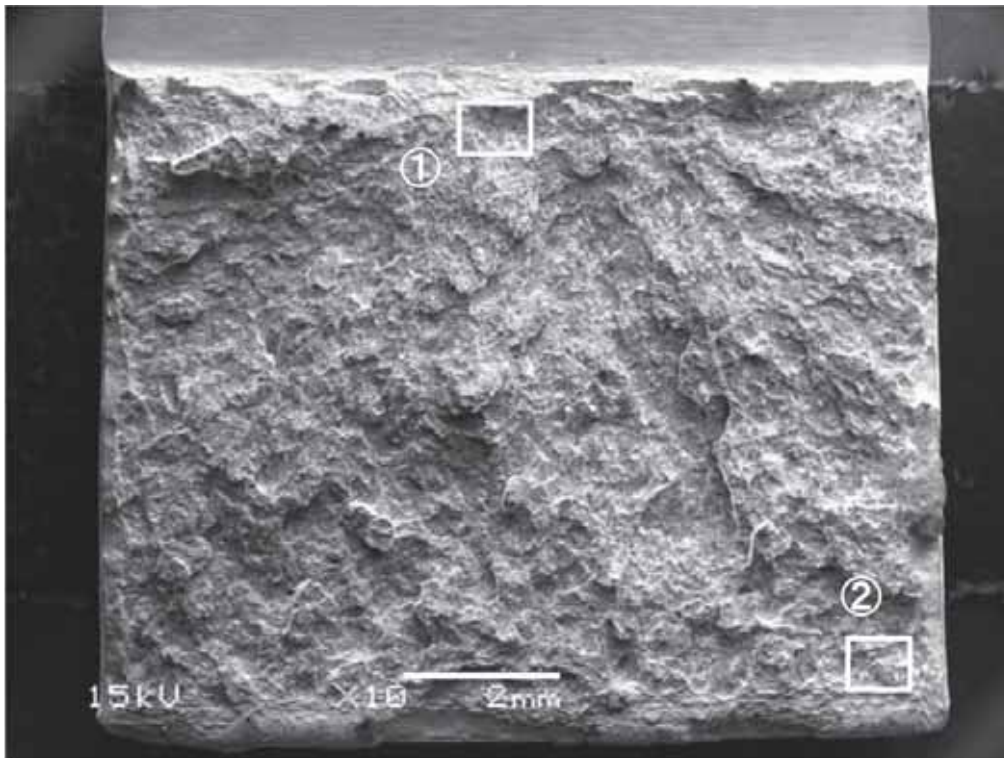


(b)①部拡大

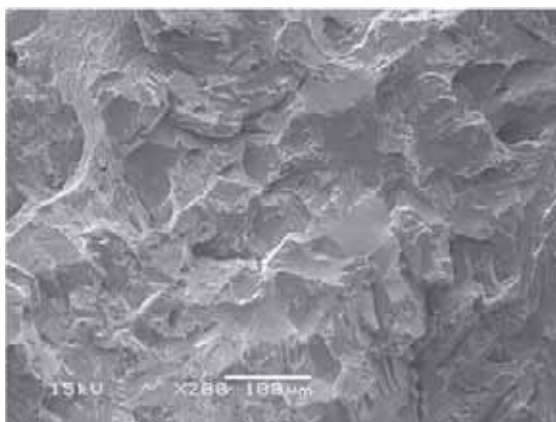


(c)②部拡大

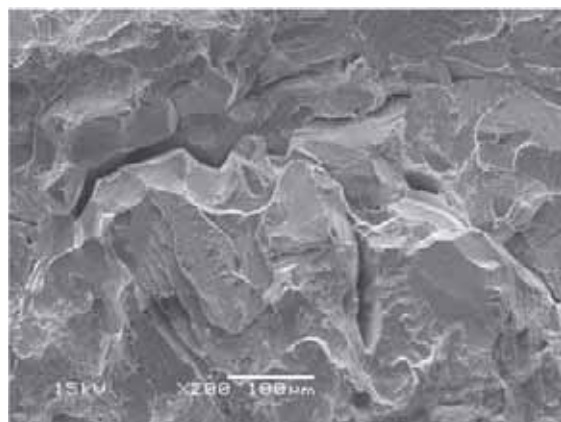
図 3.1.1.2-15 小規模ラボ溶解材のシャルピー衝撃試験破面写真
 (B1 材、980°C焼入れ、600°C×4 時間焼戻し、試験片 No.C22、試験温度: 20°C)
 (吸収エネルギー: 19J、延性破面率: 5%)



(a)破面全体(粒界破面率: <1%)



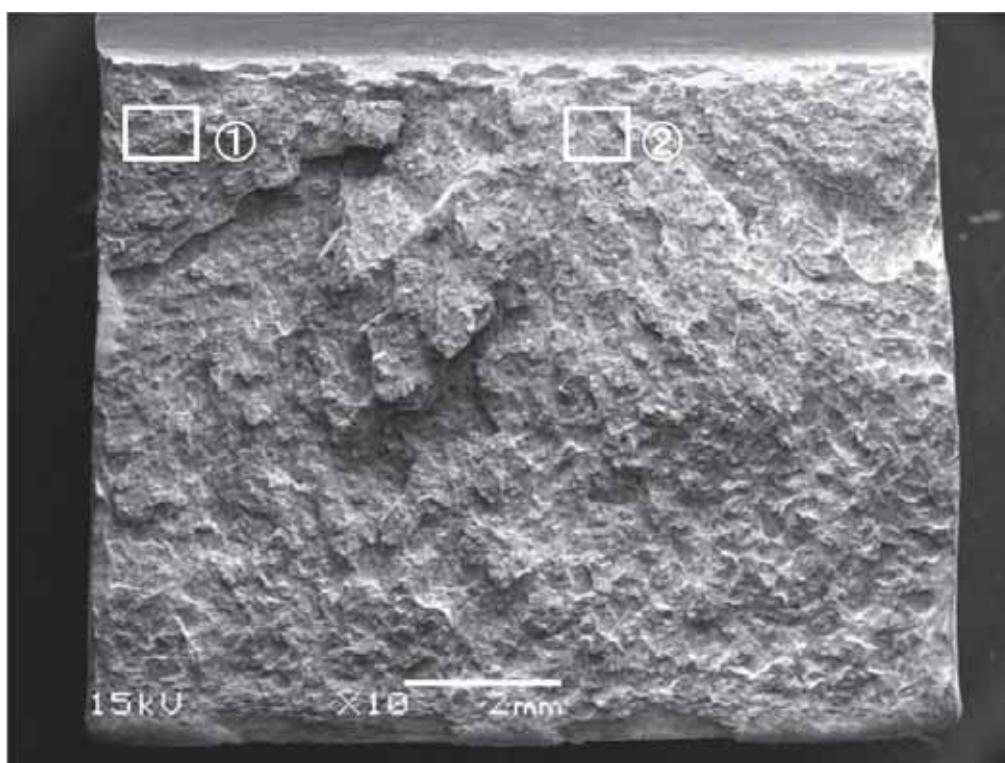
(b)①部拡大



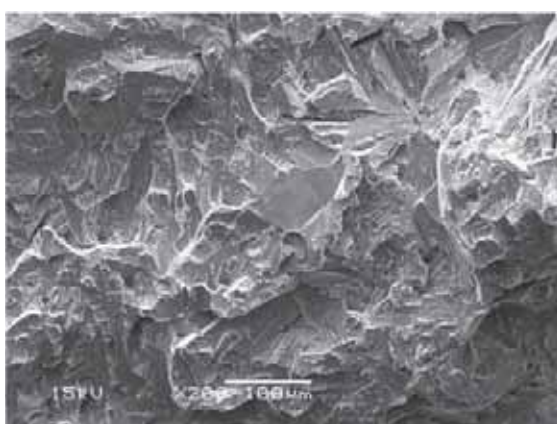
(c)②部拡大

※粒界破壊を含む箇所を優先的に観察

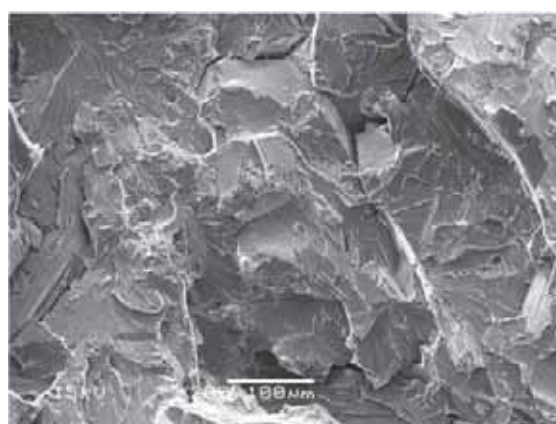
図 3.1.1.2-16 小規模ラボ溶解材のシャルピー衝撃試験破面写真
 (B1 材、980°C焼入れ、480°C×4 時間焼戻し、試験片 No.: C2、試験温度: 100°C)
 (吸収エネルギー: 24J、延性破面率: 15%)



(a)破面全体(粒界破面率: <1%)



(b)①部拡大



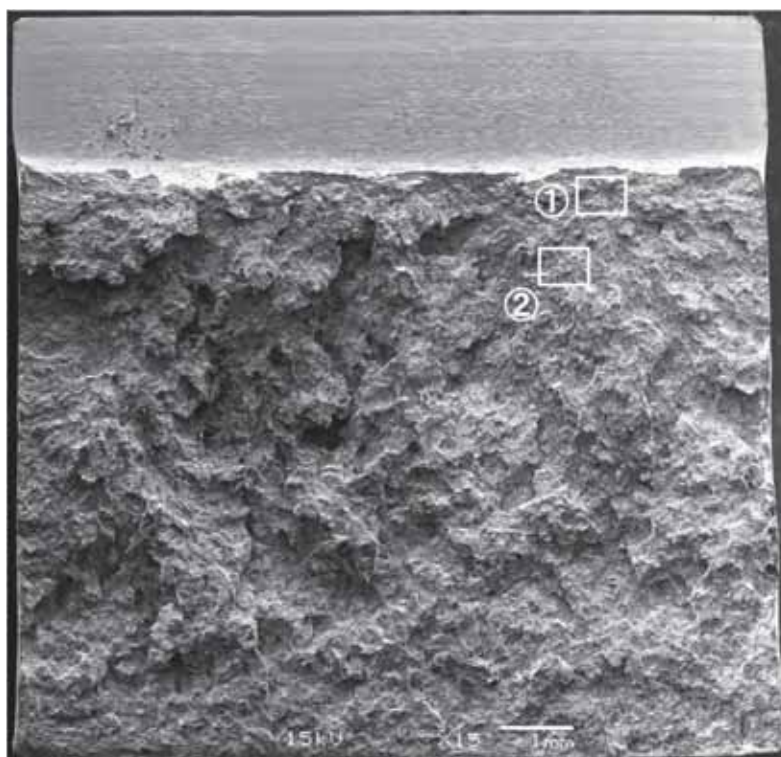
(c)②部拡大

※粒界破壊を含む箇所を優先的に観察

図 3.1.1.2-17 小規模ラボ溶解材のシャルピー衝撃試験破面写真

(B1 材、980°C焼入れ、525°C×8 時間焼戻し、試験片 No.: C22、試験温度: 80°C)

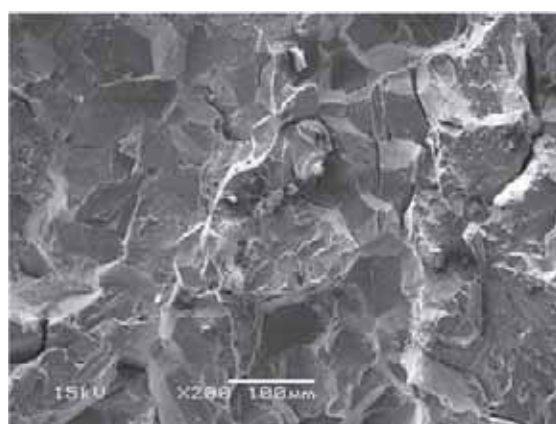
(吸収エネルギー: 23J、延性破面率: 10%)



(a)破面全体(粒界破面率: <1%)



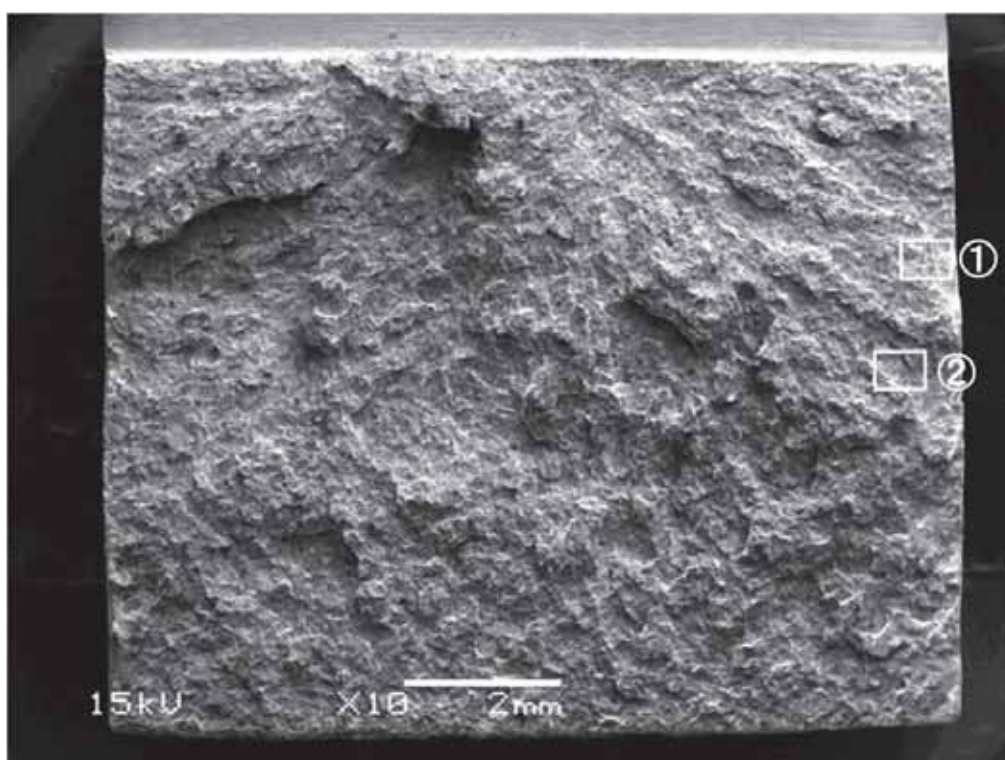
(b)①部拡大



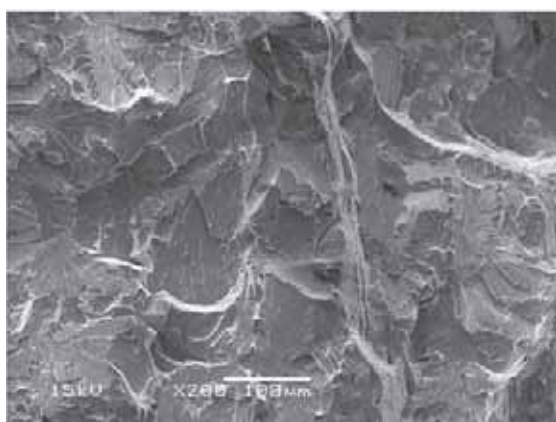
(c)②部拡大

※粒界破壊を含む箇所を優先的に観察

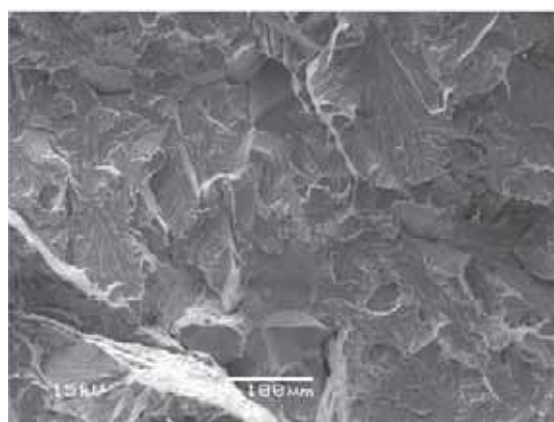
図 3.1.1.2-18 小規模ラボ溶解材のシャルピー衝撃試験破面写真
(B3材、980℃焼入れ、600℃×4時間焼戻し、試験片 No.C16、試験温度: 0℃)
(吸収エネルギー: 20J、延性破面率: 5%)



(a)破面全体(粒界破面率: <1%)



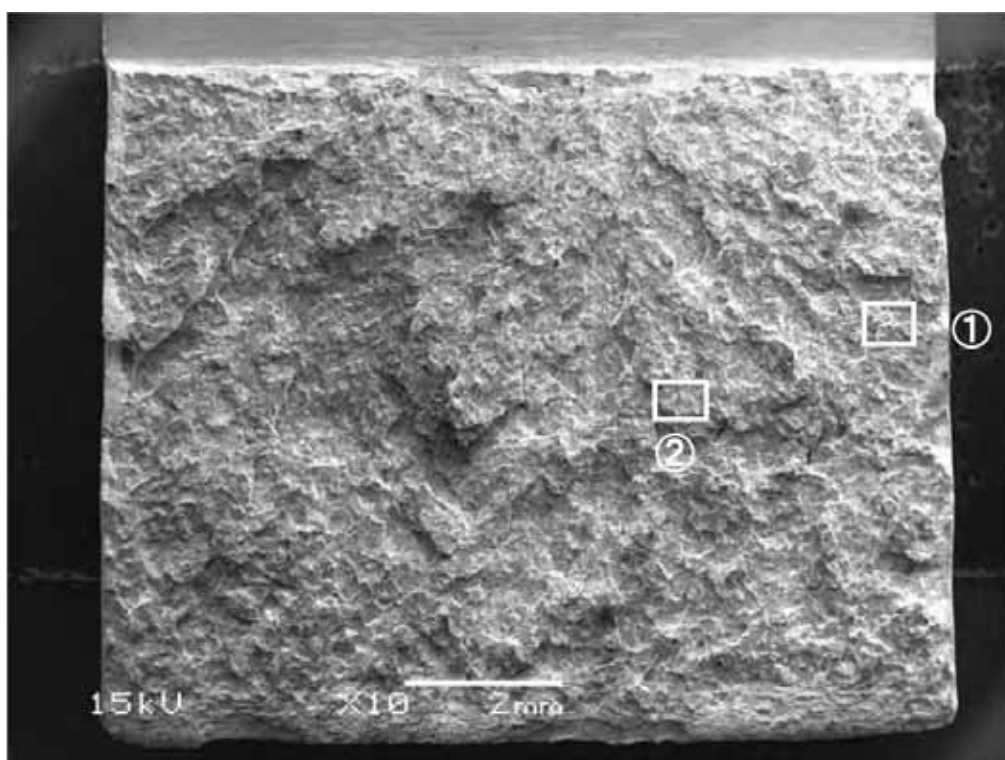
(b)①部拡大



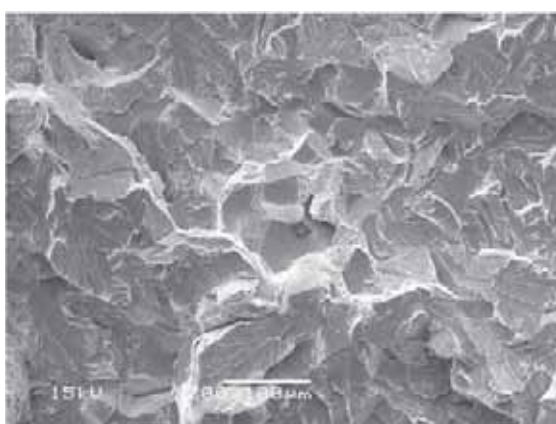
(c)②部拡大

※粒界破壊を含む箇所を優先的に観察

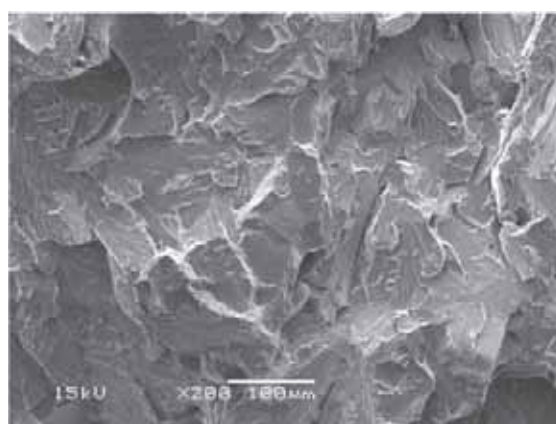
図 3.1.1.2-19 小規模ラボ溶解材のシャルピー衝撃試験破面写真
(B4材、980℃焼入れ、600℃×4時間焼戻し、試験片 No.C16、試験温度:0℃)
(吸収エネルギー: 9J、延性破面率: 15%)



(a)破面全体(粒界破面率: <1%)



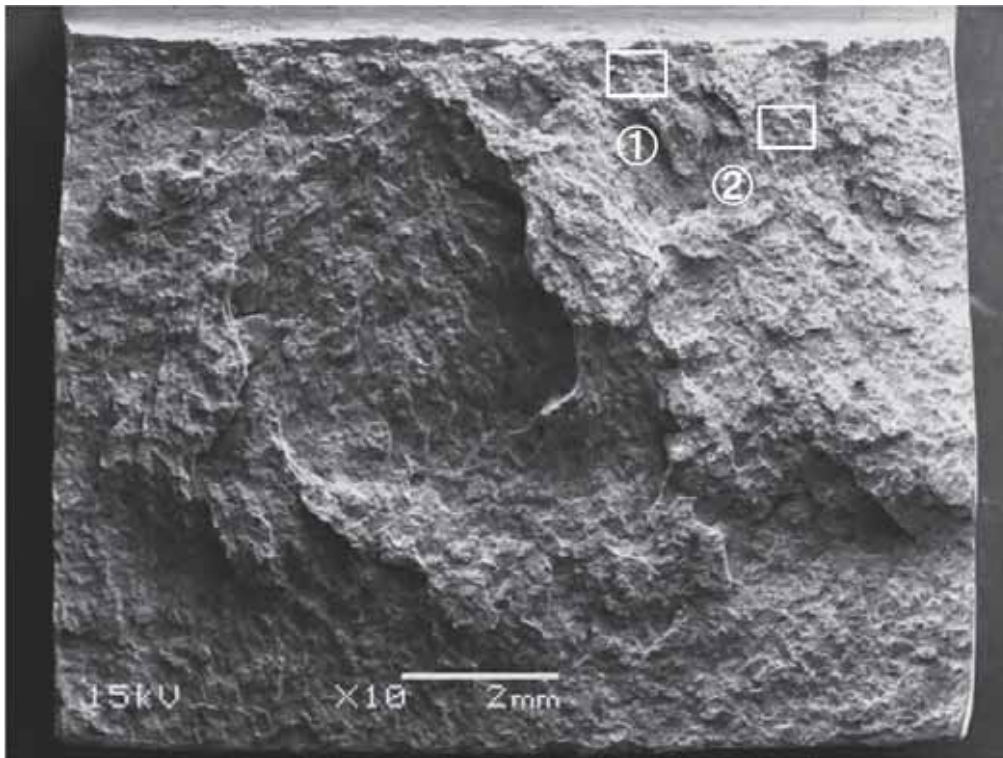
(b)①部拡大



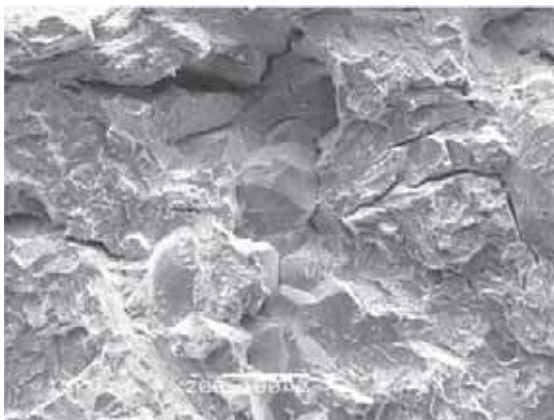
(c)②部拡大

※粒界破壊を含む箇所を優先的に観察

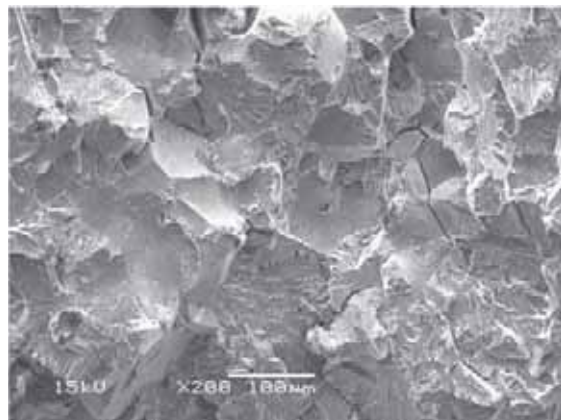
図 3.1.1.2-20 小規模ラボ溶解材のシャルピー衝撃試験破面写真
(B4 材、980°C焼入れ、480°C×4 時間焼戻し、試験片 No.C2、試験温度: 100°C)
(吸収エネルギー: 19J、延性破面率: 10%)



(a)破面全体(粒界破面率: 8%)



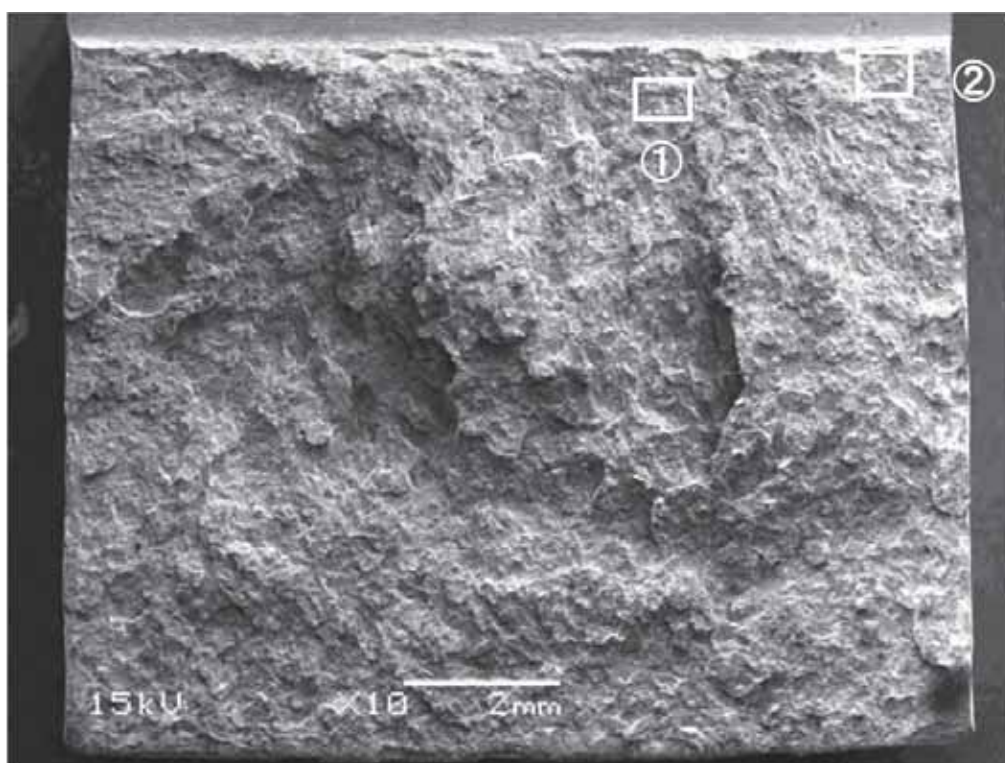
(b)①部拡大



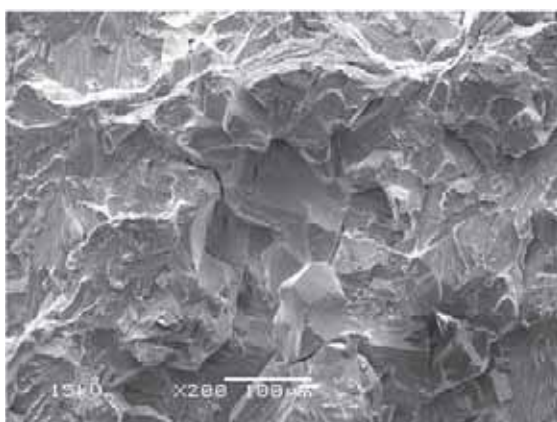
(c)②部拡大

※粒界破壊を含む箇所を優先的に観察

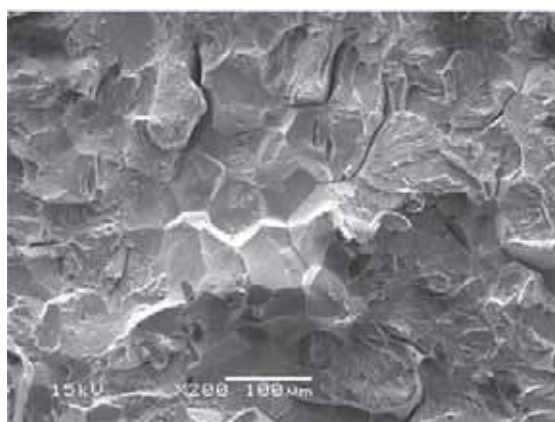
図 3.1.1.2-21 小規模ラボ溶解材のシャルピー衝撃試験破面写真
 (C1 材、980℃焼入れ、600℃×4 時間焼戻し、試験片 No.C16、試験温度: -20℃)
 (吸収エネルギー: 17J、延性破面率: 5%)



(a)破面全体(粒界破面率: 6%)



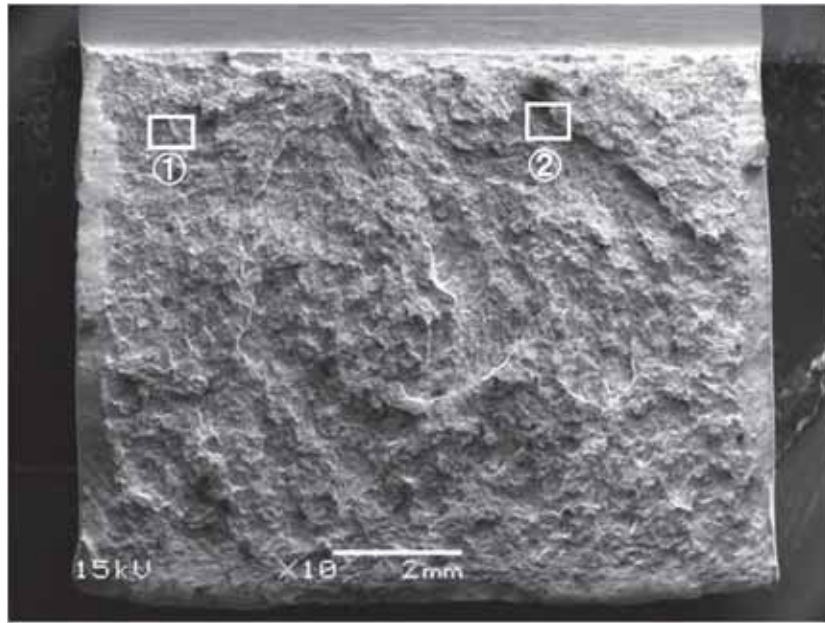
(b)①部拡大



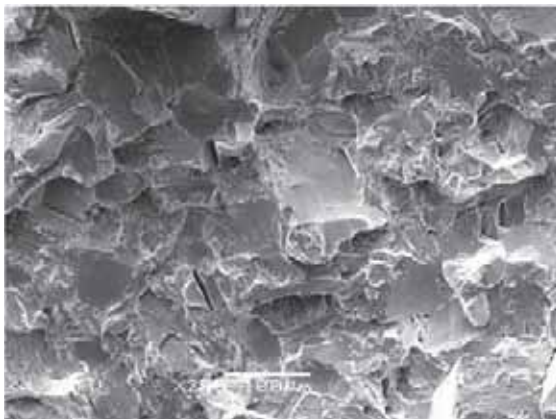
(c)②部拡大

※粒界破壊を含む箇所を優先的に観察

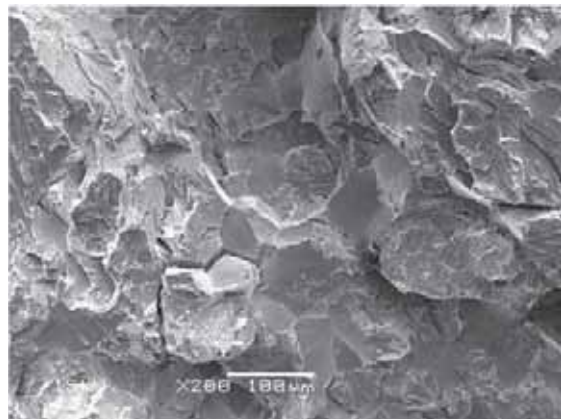
図 3.1.1.2-22 小規模ラボ溶解材のシャルピー衝撃試験破面写真
(C2 材、980°C焼入れ、600°C×4 時間焼戻し、試験片 No.C16、試験温度: 0°C)
(吸収エネルギー: 20J、延性破面率: 5%)



(a)破面全体(粒界破面率: 11%)



(b)①部拡大



(c)②部拡大

※粒界破壊を含む箇所を優先的に観察

図 3.1.1.2-23 小規模ラボ溶解材のシャルピー衝撃試験破面写真
 (C2 材、980°C焼入れ、480°C×4 時間焼戻し、試験片 No.C2、試験温度: 100°C)
 (吸収エネルギー: 21J、延性破面率: 15%)

d. 破壊靱性

図 3.1.1.2-24～図 3.1.1.2-32 は、各供試材の破壊靱性試験における荷重-変位線図と及びマスターカーブ評価結果、また表 3.1.1.2-3～表 3.1.1.2-11 は破壊靱性試験結果をそれぞれ示す。ここで図 3.1.1.2-25 及び表 3.1.1.2-4 に示す B1H 材は、B1 材に対して高温焼入れ(1050°C)を適用した材料である。また P3 材に対しては、クラッド溶接による溶接熱影響部(HAZ)及び焼戻脆性を促して破壊靱性を低下させるためのステップクーリング(SC)熱処理した材料についても試験を行った。その結果を図 3.1.1.2-30、表 3.1.1.2-10 及び表 3.1.1.2-11 に示す。なおステップクーリング(以下 SC)の熱処理条件を図 3.1.1.2-31 に示す。

B1 材では MCT-B1-14、B1H 材では MCT-B1H-3、P3 材では MCT-P3-2、MCT-P3-3 及び 0.5TCT-P3-11 の 3 体でポップインの発生が認められ、それぞれポップインを破壊とみなして破壊靱性 K_{Jc} を評価した。また、MCT-B1H-1 及び MCT-B1H-2 の 2 体については、規格の Validity 条件(0.2 mm)を若干上回る延性亀裂成長が観察された。

破壊靱性試験の評価には、ポアソン比 0.3、またヤング率として

$$192,600 - 59.6 T (\text{MPa}; T \text{ は試験温度} (^{\circ}\text{C}))$$

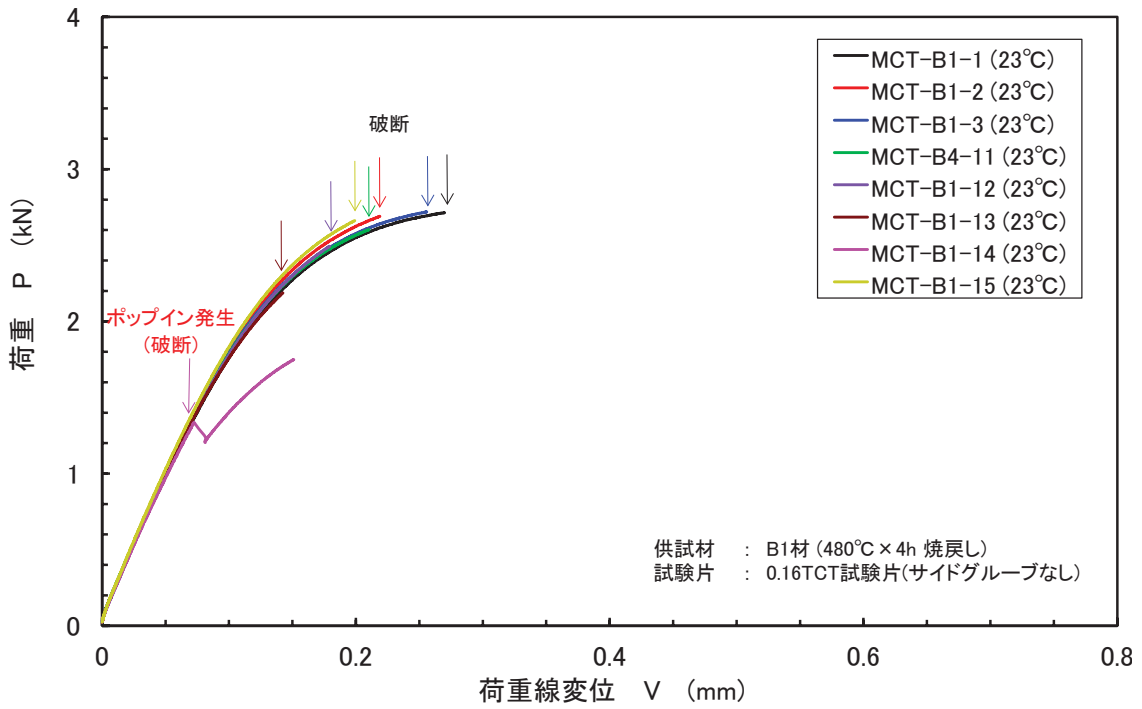
を用いた。なお B1 材及び B4 材については引張試験データが得られていないため、0.2% 耐力を 700 MPa とし、P1 材は 746 MPa、P2 材は 779 MPa、P3 材は 815 MPa とした。各材料のマスターカーブの参照温度 T_0 は以下の通りであった。これらの結果をまとめて図 3.1.1.2-33 に示す。

- ・ B1 材: $T_0 = 53^{\circ}\text{C}$ (Valid な値)
- ・ B4 材: $T_0 = 65^{\circ}\text{C}$ (Valid な値)
- ・ B1H 材: $T_0 = 21^{\circ}\text{C}$ (Invalid な暫定値、延性亀裂成長データ考慮せず)
- ・ P1 材: $T_0 = 41^{\circ}\text{C}$ (Invalid な暫定値、延性亀裂成長データ考慮せず)
- ・ P2 材: $T_0 = 77^{\circ}\text{C}$ (Invalid な暫定値、延性亀裂成長データ考慮せず)
- ・ P3 材: $T_0 = 89^{\circ}\text{C}$ (Valid な値)
- ・ P3 材 HAZ: $T_0 = 39^{\circ}\text{C}$ (Invalid な暫定値、延性亀裂成長データ考慮せず)
- ・ P3 材(SC): $T_0 = 159^{\circ}\text{C}$ (Invalid な暫定値)

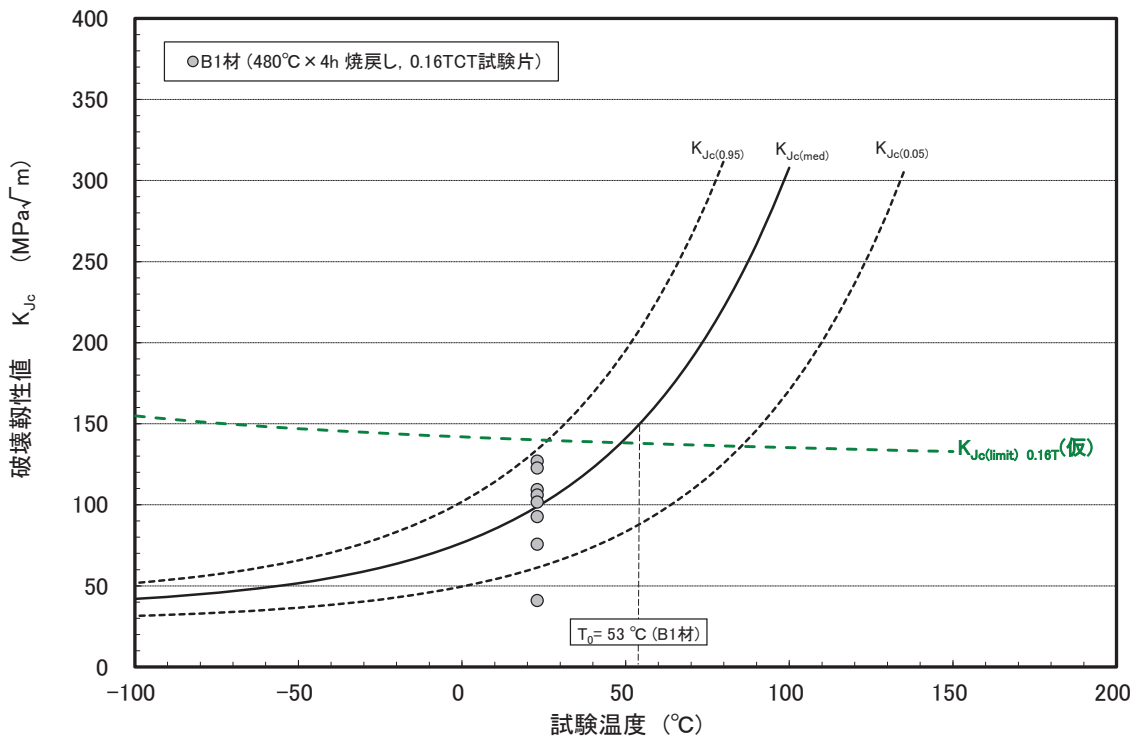
いずれの材料も、通常の熱処理では機械的性質の目標である $T_0 \geq 150^{\circ}\text{C}$ は満たさなかったが、P2 及び P3 材の T_0 が高く、低い靱性値となっていることが判った。

さらに B1 材、B4 材及び P3 材の代表的な破壊靱性試験片について SEM による破面観察を実施した。それらの結果を図 3.1.1.2-34～図 3.1.1.2-41 に示す。いずれも粒界破面が若干観察されたが、へき開破面が主体であり、起点部の破面はへき開破壊であった。一方 P3 材の 0.5TCT 試験片について粒界破面率を観察した結果を図 3.1.1.2-42 に示すように、SC 無しの場合は全破面の 1% が粒界破面であったのに対し、SC 有りの場合は粒界破面率が 37% に著しく上昇していることが確認され、他の試験片に比べて粒界破面の割合が大きかった。破壊靱性評価においてはマスターカーブ法を適用することが前提である

ため、特に亀裂先端近傍ではへき開破壊が主体となることが必要となる。SC 有りの P3 材では亀裂先端近傍で粒界破壊が主体となっているため、マスターカーブ法適用の観点からふさわしくない事が確認された。このようなことから、SC 施工 P3 材では焼戻脆性の効果によって T_0 の目標値を上回る結果であったが、粒界破面率の観点から本試験材への適用が困難であると考えられる。

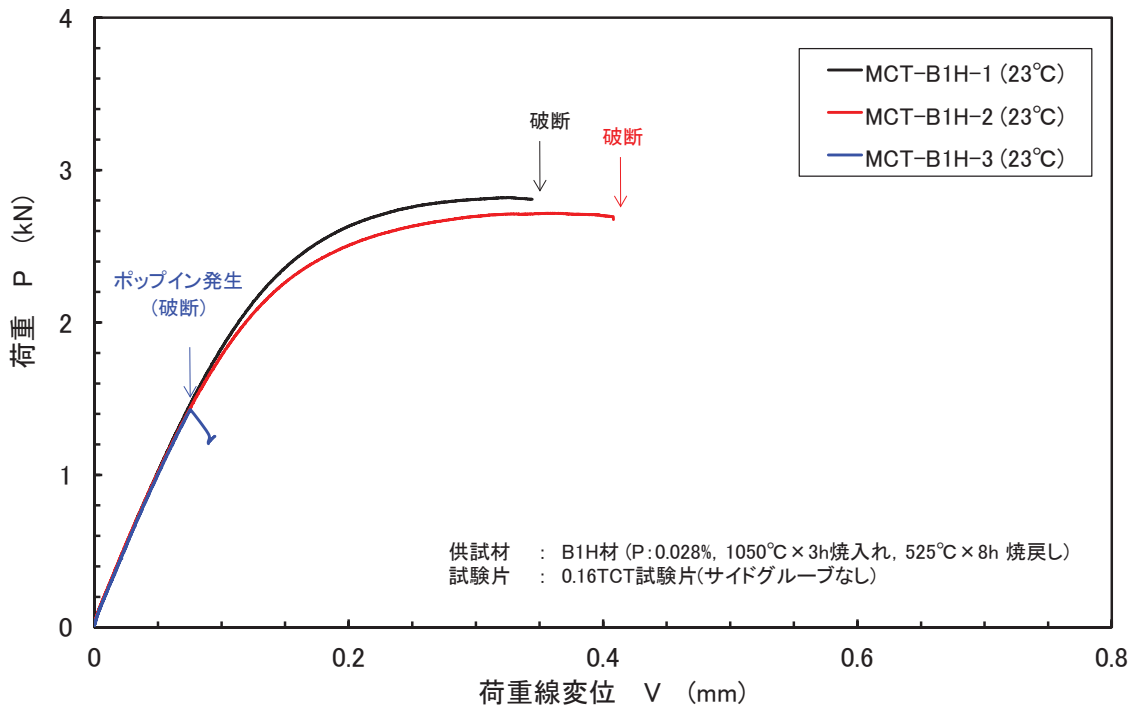


(a)荷重-変位曲線

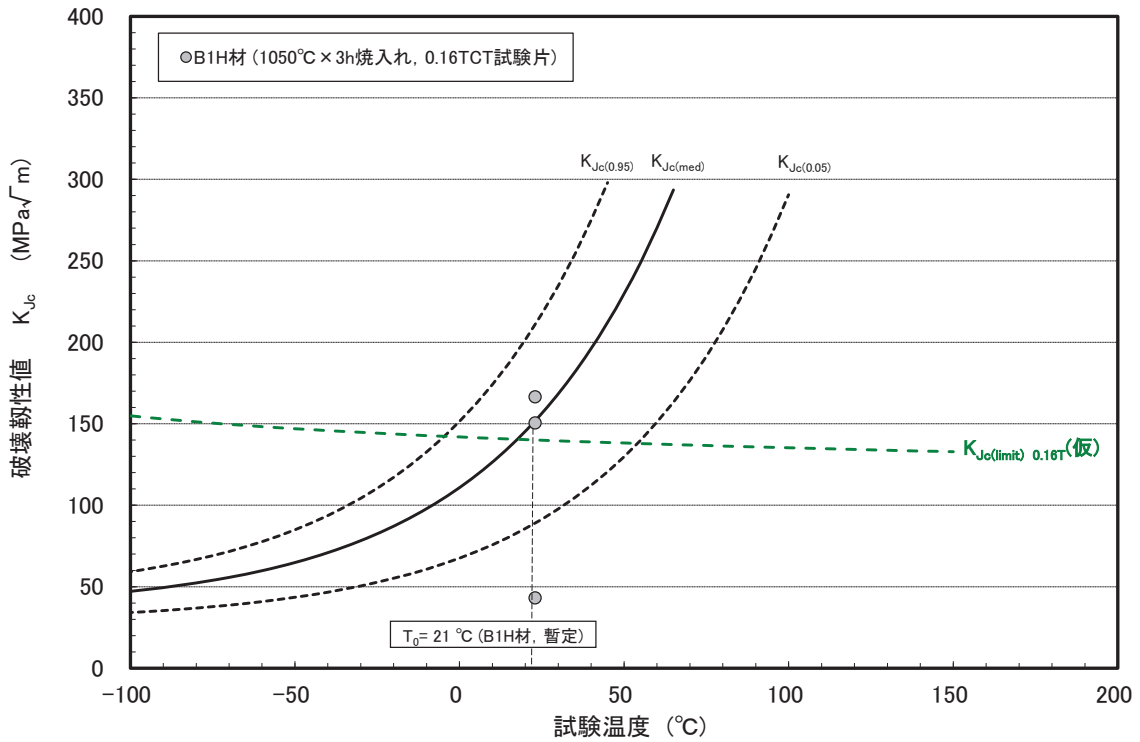


(b)破壊靱性データ

図 3.1.1.2-24 小規模ラボ溶解材(B1材)の0.16TCT試験片による破壊靱性試験結果

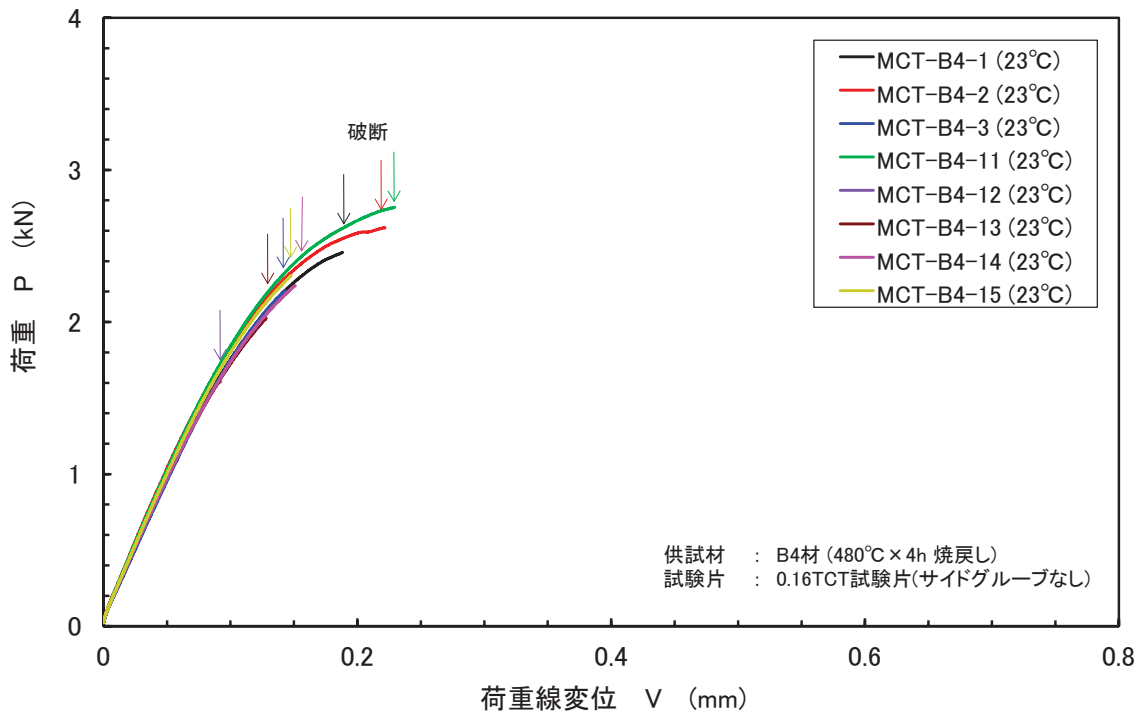


(a) 荷重-変位曲線

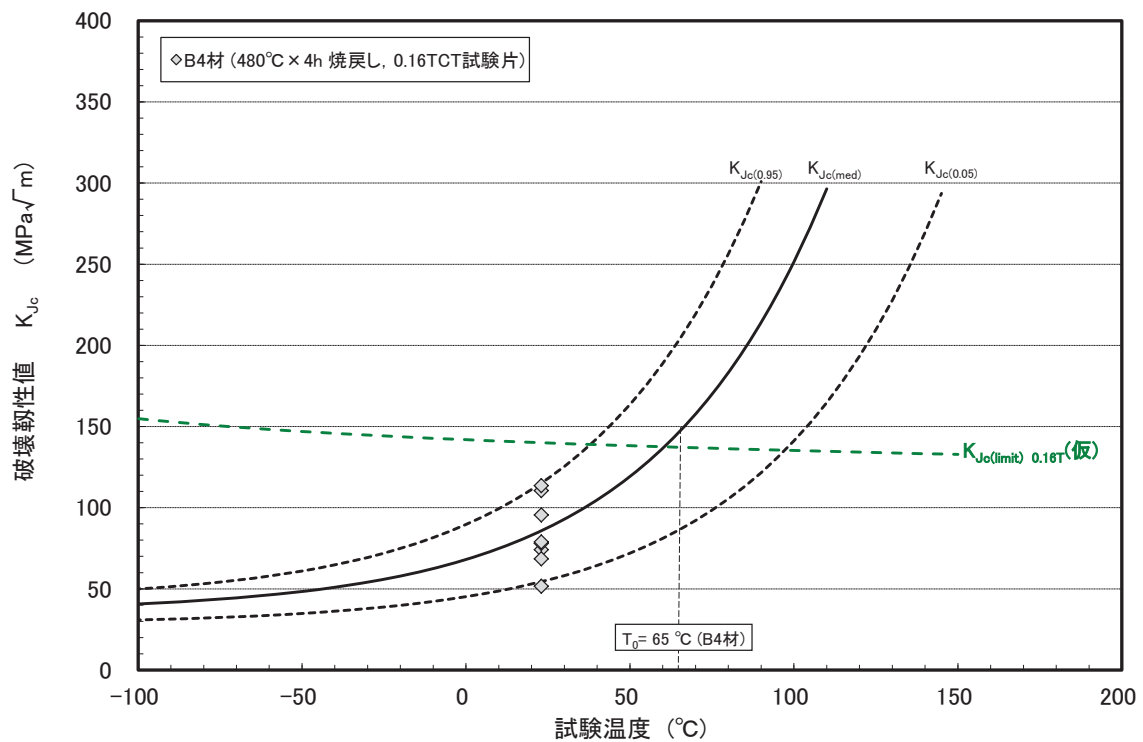


(b) 破壊靱性データ

図 3.1.1.2-25 小規模ラボ溶解材(B1H材)の0.16TCT試験片による破壊靱性試験結果

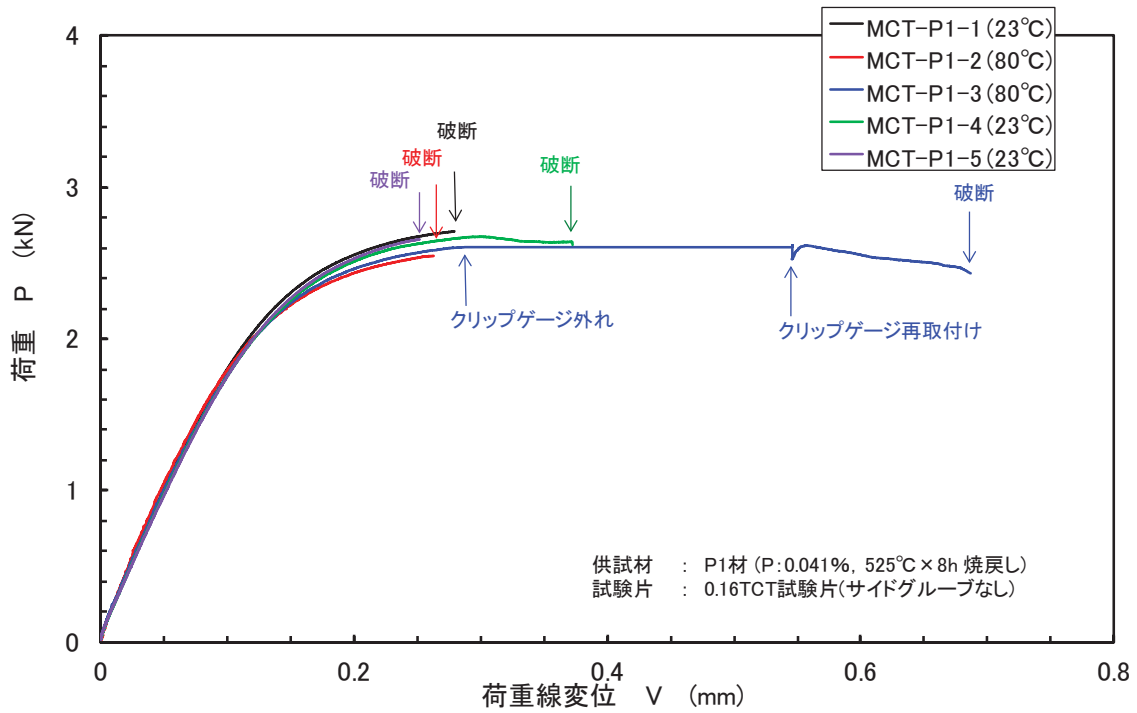


(a) 荷重-変位曲線

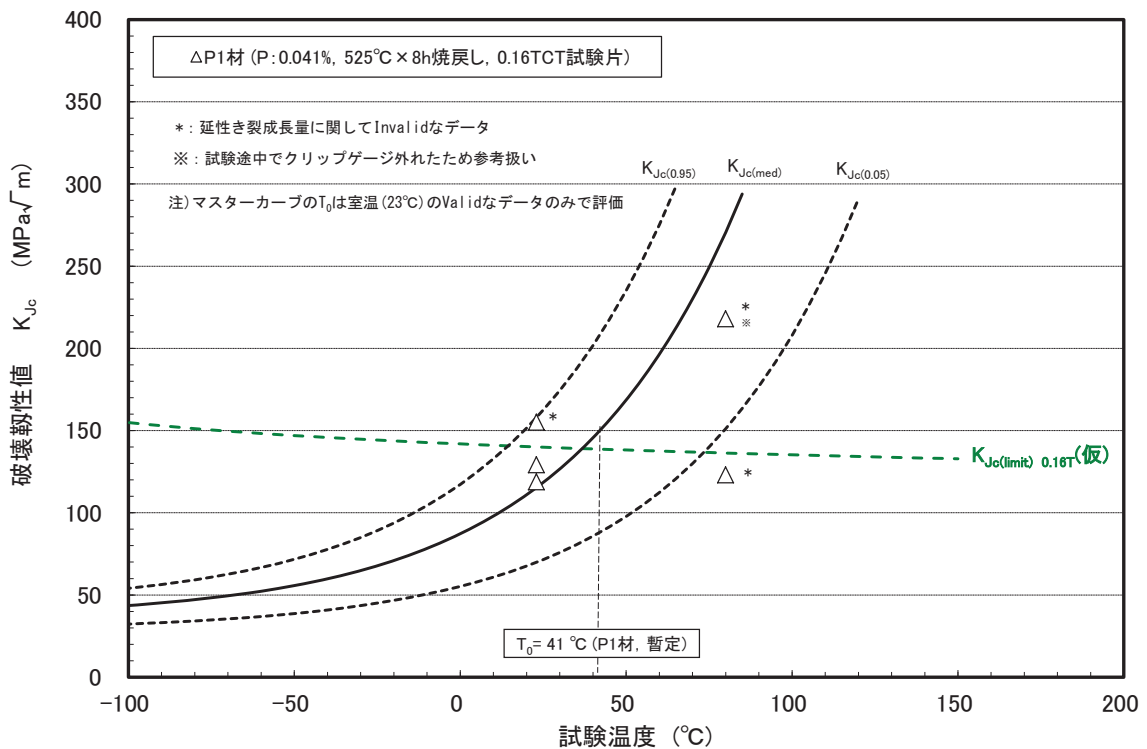


(b) 破壊靱性データ

図 3.1.1.2-26 小規模ラボ溶解材(B4材)の0.16TCT試験片による破壊靱性試験結果

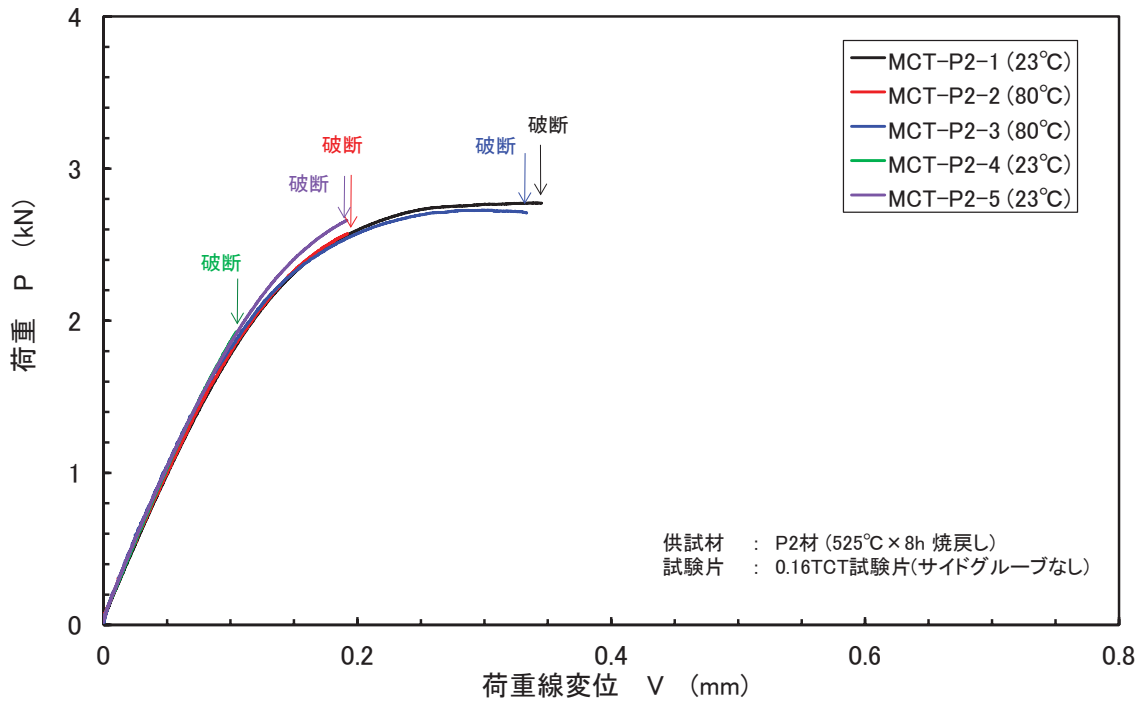


(a) 荷重-変位曲線

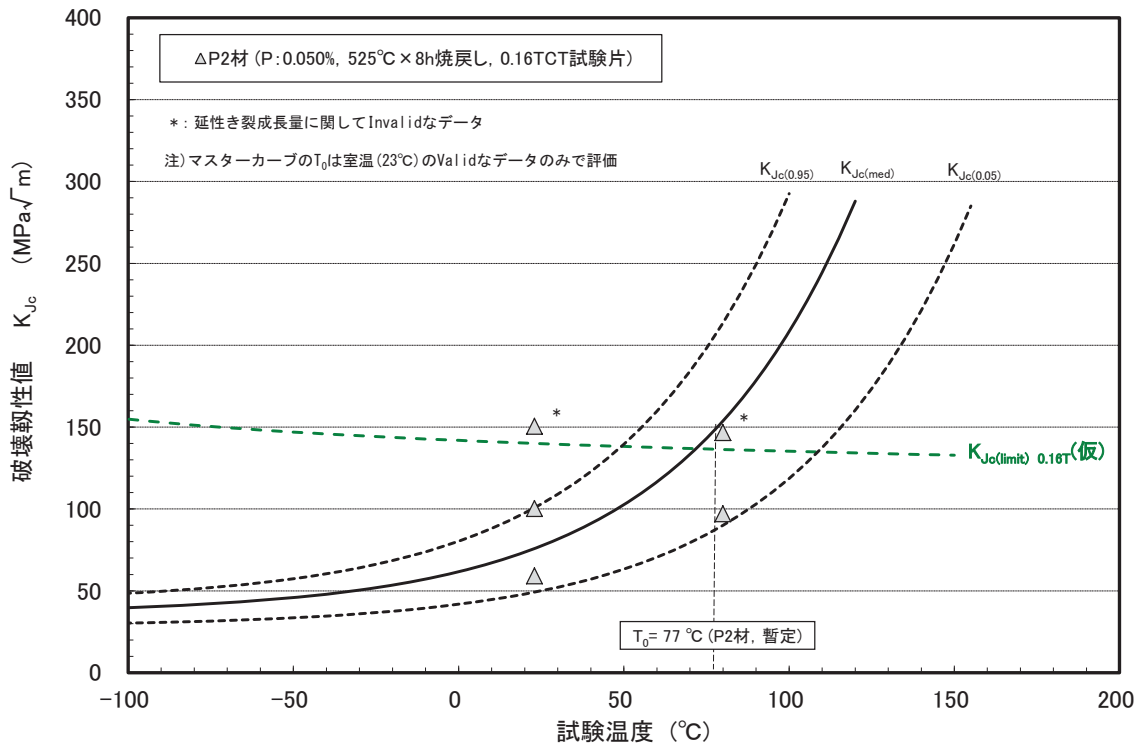


(b) 破壊靱性データ

図 3.1.1.2-27 小規模ラボ溶解材(P1材)の0.16TCT試験片による破壊靱性試験結果

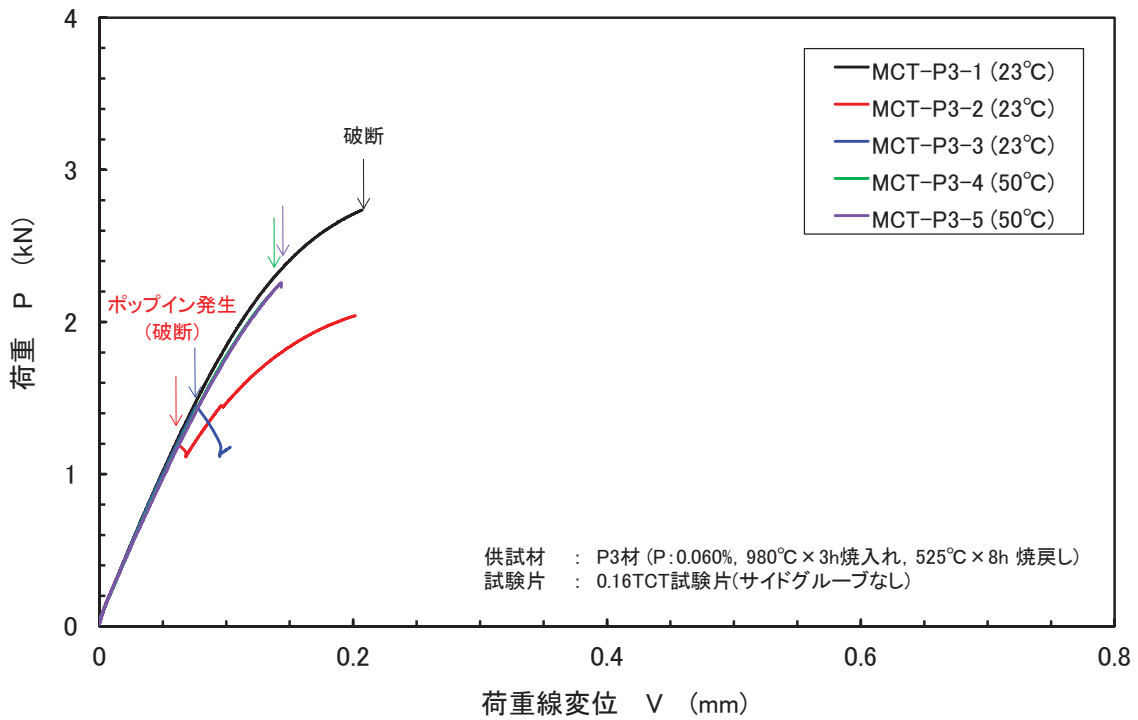


(a) 荷重-変位曲線

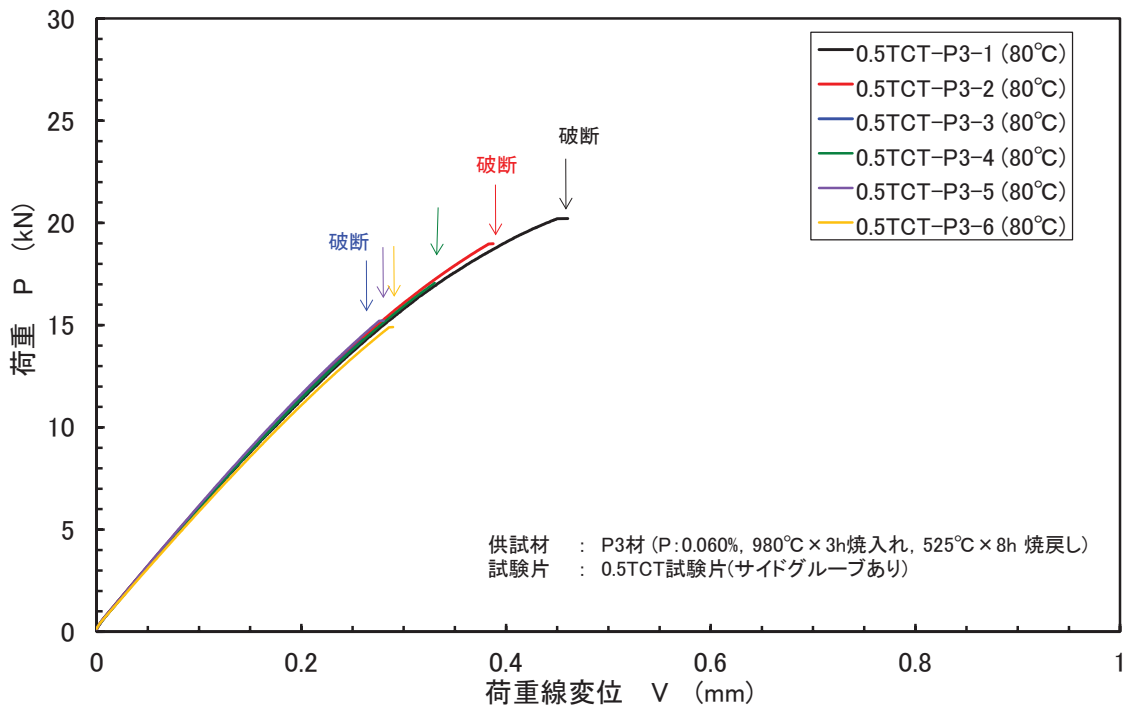


(b) 破壊靱性データ

図 3.1.1.2-28 小規模ラボ溶解材(P2 材)の 0.16TCT 試験片による破壊靱性試験結果

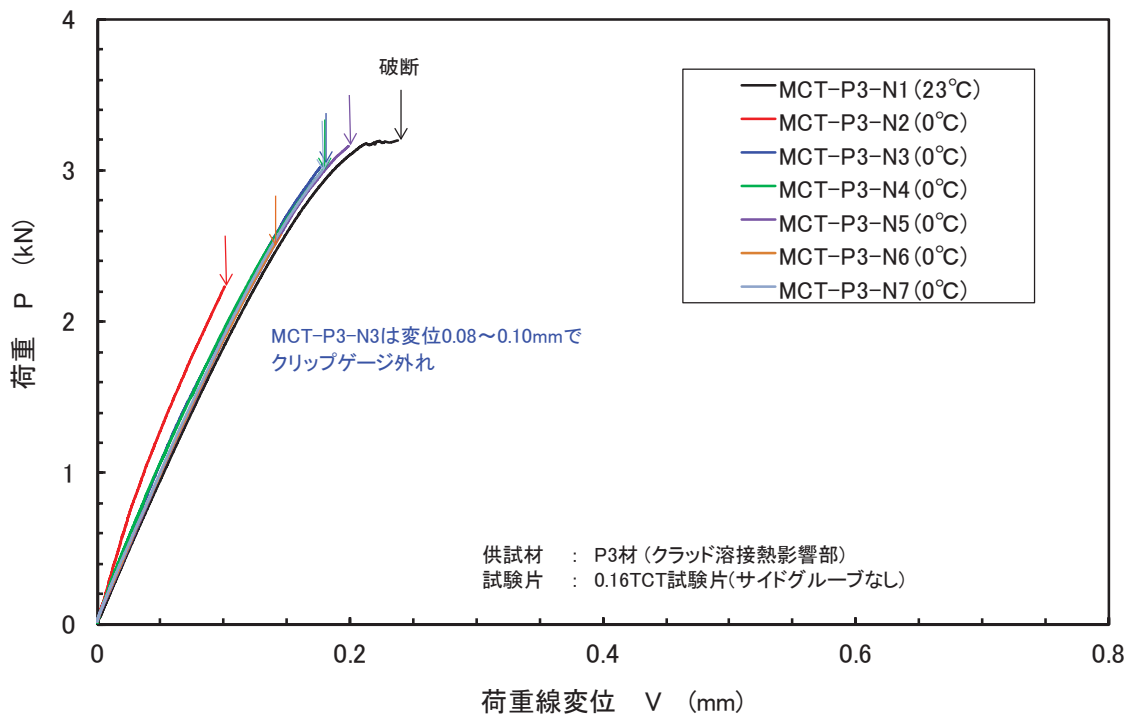


(a) 荷重－変位曲線(0.16TCT 試験片)

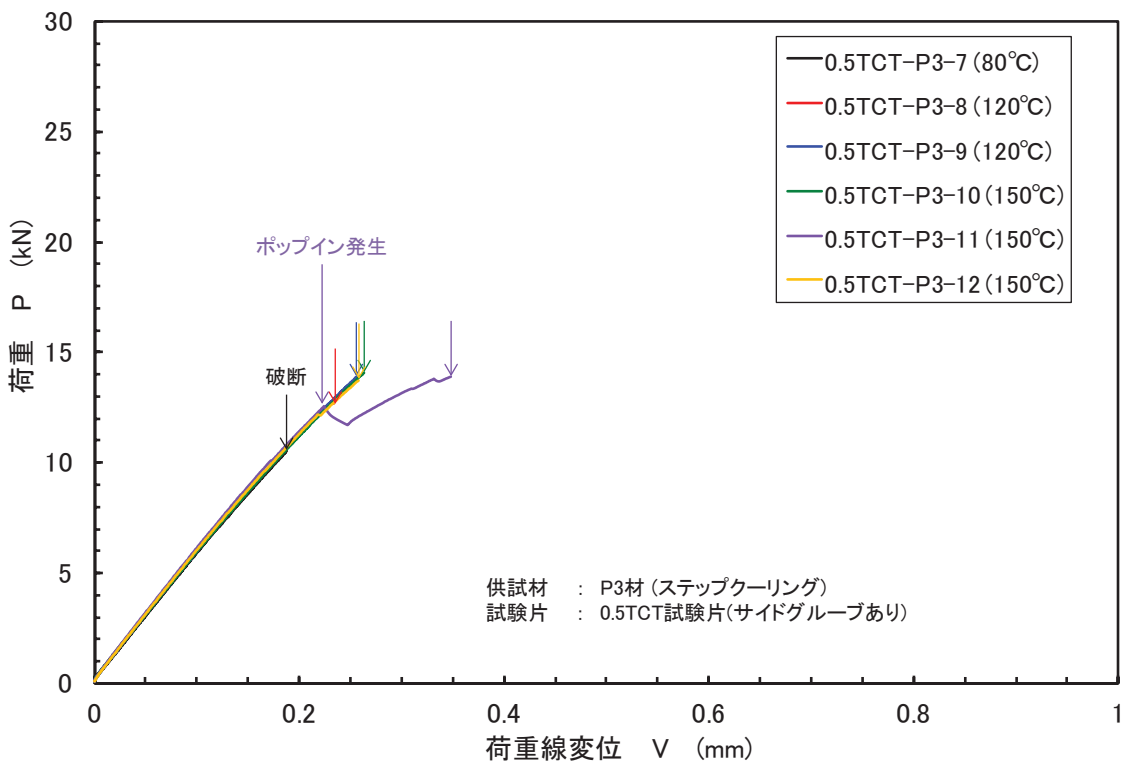


(b) 荷重－変位曲線(0.5TCT 試験片)

図 3.1.1.2-29 小規模ラボ溶解材(P3 材)の0.16TCT 及び 0.5TCT 試験片による破壊靱性試験結果



(c) 荷重-変位曲線(HAZ、0.16TCT 試験片)



(d) 荷重-変位曲線(SC、0.5TCT 試験片)

図 3.1.1.2-30 小規模ラボ溶解材(P3 材 HAZ 及び SC)の
0.16TCT 及び 0.5TCT 試験片による破壊靱性試験結果

表 3.1.1.2-3 小規模ラボ溶解材(BI 材)の 0.16TCT 試験片による破壊靭性試験結果

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)			延性き裂成長量 (mm)		破断荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	破壊靭性 K _{Je} (MPa√m)	IT相当破壊靭性 K _{Je(IT)} (MPa√m)	K _{Je(Limit)} (MPa√m)	K _{Je(Limit)} に対する Validity	
			幅 W	厚さ B	正味厚さ E _N	き裂長さ a ₀	板厚平均									最大
BI材	MCT-BI-1	23	8.02	4.03	4.03	4.27	0.05	0.07	30.8	45.9	76.7	127	87.5	135.8	valid	
	MCT-BI-2	23	8.00	4.03	4.03	4.18	0.04	0.06	28.5	28.3	56.8	109	76.4	136.9	valid	
	MCT-BI-3	23	7.99	4.03	4.03	4.19	0.05	0.07	29.5	42.0	71.5	123	84.8	136.5	valid	
	MCT-BI-11	23	7.99	4.03	4.03	4.22	0.04	0.06	27.7	25.9	53.5	106	74.3	136.0	valid	
	MCT-BI-12	23	8.00	4.03	4.03	4.19	0.04	0.07	24.6	16.3	40.9	92.7	65.9	136.7	valid	
	MCT-BI-13	23	7.98	4.03	4.03	4.16	0.04	0.07	18.8	8.5	27.3	75.7	55.1	136.9	valid	
	MCT-BI-14	23	8.01	4.03	4.03	4.24	0.04	0.05	7.4	0.6	7.9	40.9	33.2	136.0	valid	
	MCT-BI-15	23	7.98	4.03	4.03	4.13	0.04	0.05	27.1	22.1	49.1	102	71.5	137.4	valid	

注)MCT-BI-14 については、ポップイン発生時で破壊靭性を評価。

表 3.1.1.2-4 小規模ラボ溶解材(BIH 材)の 0.16TCT 試験片による破壊靭性試験結果

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)			延性き裂成長量 (mm)		破断荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	破壊靭性 K _{Je} (MPa√m)	IT相当破壊靭性 K _{Je(IT)} (MPa√m)	K _{Je(Limit)} (MPa√m)	K _{Je(Limit)} に対する Validity	
			幅 W	厚さ B	正味厚さ E _N	き裂長さ a ₀	板厚平均									最大
BIH材	MCT-BIH-1	25	8.01	4.02	4.02	4.15	0.15	0.24	30.3	77.3	107.7	150	102	142.0	invalid	
	MCT-BIH-2	25	8.02	4.02	4.02	4.23	0.16	0.25	29.6	102.2	131.8	166	112	140.7	invalid	
	MCT-BIH-3	25	8.04	4.02	4.02	4.19	0.00	0.00	8.0	0.9	8.8	43.1	34.6	141.8	valid	

注)MCT-BIH-3 については、ポップイン発生時で破壊靭性を評価。

表 3.1.1.2-5 小規模ラボ溶解材(B4材)の0.16TCT試験片による破壊靭性試験結果

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)				延性き裂成長量 (mm)		破断荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	破壊靭性 K _{IC} (MPa√m)	IT相当破壊靭性 K _{IC(IT)} (MPa√m)	K _{IC(limt)} に対する Validity
			幅 W	厚さ B	正味厚さ B _N	き裂長さ a ₀	平均	最大							
B4材	MCT-B4-1	23	7.99	4.03	4.03	4.18	0.04	0.06	2.40	19.5	43.4	95.5	67.7	138.7	valid
	MCT-B4-2	23	7.99	4.03	4.03	4.15	0.05	0.07	2.62	31.6	58.1	110	77.1	137.2	valid
	MCT-B4-3	23	8.01	4.03	4.03	4.19	0.03	0.05	2.21	8.9	26.1	74.1	54.2	126.0	valid
	MCT-B4-11	23	7.99	4.03	4.03	4.14	0.07	0.11	2.75	29.0	32.4	114	79.0	137.4	valid
	MCT-B4-12	23	8.01	4.03	4.03	4.23	0.01	0.02	1.61	10.6	2.1	12.6	38.9	126.1	valid
	MCT-B4-13	23	8.02	4.03	4.03	4.21	0.02	0.04	2.02	6.0	22.3	81.4	50.6	136.7	valid
	MCT-B4-14	23	7.98	4.02	4.02	4.18	0.02	0.03	2.24	19.7	9.2	28.9	77.9	136.9	valid
	MCT-B4-15	23	7.99	4.03	4.03	4.18	0.02	0.04	2.31	20.3	3.7	29.5	57.1	137.0	valid

表 3.1.1.2-6 小規模ラボ溶解材(P1材)の0.16TCT試験片による破壊靭性試験結果

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)				延性き裂成長量 (mm)		破断荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	破壊靭性 K _{IC} (MPa√m)	IT相当破壊靭性 K _{IC(IT)} (MPa√m)	K _{IC(limt)} に対する Validity	
			幅 W	厚さ B	正味厚さ B _N	き裂長さ a ₀	板厚平均	最大								
																厚さ B
P1材	MCT-P1-1	23	8.02	4.02	4.02	4.18	0.11	0.16	2.71	28.7	50.7	79.5	129	88.9	141.7	valid
	MCT-P1-2	80	8.01	4.02	4.02	4.17	0.13	0.26	2.55	25.8	47.5	73.3	123	85.0	140.4	valid
	MCT-P1-3	80	8.02	4.02	4.02	4.18	0.35	0.60	2.43	23.6	206.5	230.1	218	145	140.4	invalid
	MCT-P1-4	23	8.01	4.02	4.02	4.19	0.20	0.31	2.67	28.4	86.0	114.3	155	105	141.3	invalid
	MCT-P1-5	23	8.01	4.00	4.00	4.20	0.07	0.09	2.66	28.5	38.7	67.2	119	82.2	141.1	valid

表 3.1.1.2-7 小規模ラボ溶解材(P2材)の0.16TCT試験片による破壊靭性試験結果

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)				延性き裂成長量 (mm)		破断荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	破壊靭性 K _{IC} (MPa√m)	IT相当破壊靭性 K _{IC(IT)} (MPa√m)	K _{IC(limt)} に対する Validity	
			幅 W	厚さ B	正味厚さ B _N	き裂長さ a ₀	板厚平均	最大								
																厚さ B
P2材	MCT-P2-1	23	8.04	4.02	4.02	4.25	0.17	0.29	2.77	31.4	76.4	107.8	151	102	143.8	invalid
	MCT-P2-2	80	8.02	4.02	4.02	4.18	0.07	0.10	2.57	26.4	19.2	45.6	97.0	68.6	143.5	valid
	MCT-P2-3	80	8.00	4.02	4.02	4.17	0.17	0.29	2.71	29.3	74.8	104.1	147	100	143.3	invalid
	MCT-P2-4	23	8.01	4.02	4.02	4.15	0.00	0.01	1.93	14.3	2.3	16.6	59.1	44.6	145.1	valid
	MCT-P2-5	23	8.00	4.02	4.02	4.15	0.04	0.06	2.66	27.3	20.5	47.8	100	70.6	144.9	valid

表 3.1.1.2-8 小規模ラボ溶解材(P3材)の0.16TCT試験片による破壊靱性試験結果

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)			延性き裂成長量 (mm)		破断荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	破壊靱性 K _{IC} (MPa√m)	IT相当破壊靱性 K _{IC(IT)} (MPa√m)	K _{IC(limit)} に対する Validity	
			幅 W	厚さ B	正味厚さ E _N	き裂長さ a ₀	振厚平均								最大
P3材	MCT-P3-1	24	8.04	4.02	4.02	4.20	0.07	0.10	29.5	24.3	53.8	106	145.4	valid	
	MCT-P3-2	24	8.01	4.02	4.02	4.19	0.03	0.06	5.8	0.6	6.4	36.5	145.0	valid	
	MCT-P3-3	24	8.02	4.02	4.02	4.18	0.00	0.02	8.2	0.9	9.1	43.7	145.4	valid	
	MCT-P3-4	50	8.02	4.02	4.02	4.18	0.04	0.07	18.9	6.1	25.1	72.3	136.6	valid	
	MCT-P3-5	50	8.02	4.02	4.02	4.20	0.02	0.04	20.5	6.9	27.4	75.5	136.3	valid	

注)MCT-P3-2 及び MCT-P3-3 については、ポップイン発生時で破壊靱性を評価。

表 3.1.1.2-9 小規模ラボ溶解材(P3材)の0.5TCT試験片による破壊靱性試験結果

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)			延性き裂成長量 (mm)		破断荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	破壊靱性 K _{IC} (MPa√m)	IT相当破壊靱性 K _{IC(IT)} (MPa√m)	K _{IC(limit)} に対する Validity	
			幅 W	厚さ B	正味厚さ E _N	き裂長さ a ₀	振厚平均								最大
P3材	0.5TCT-P3-1	80	25.41	12.75	10.25	13.37	0.24	0.49	65.6	31.4	97.0	141.5	240.8	valid	
	0.5TCT-P3-2	80	25.42	12.75	10.24	13.27	0.13	0.16	19.0	17.3	73.7	123.3	241.9	valid	
	0.5TCT-P3-3	80	25.43	12.74	10.26	13.35	0.05	0.11	14.3	3.7	36.3	86.5	241.2	valid	
	0.5TCT-P3-4	80	25.42	12.74	10.25	13.34	0.06	0.12	17.1	9.9	56.3	107.8	241.2	valid	
	0.5TCT-P3-5	80	25.42	12.75	10.24	13.25	0.05	0.08	15.2	4.9	40.9	91.9	242.1	valid	
	0.5TCT-P3-6	80	25.42	12.73	10.23	13.43	0.07	0.10	14.9	5.3	41.6	92.7	240.3	valid	

表 3.1.1.2-10 小規模ラボ溶解材(P3材 HAZ)の0.16TCT試験片による破壊靱性試験結果

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)			延性き裂成長量 (mm)		破断荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	破壊靱性 K _{IC} (MPa√m)	IT相当破壊靱性 K _{IC(IT)} (MPa√m)	K _{IC(limit)} に対する Validity	
			幅 W	厚さ B	正味厚さ E _N	き裂長さ a ₀	板厚平均								最大
P3-HAZ材	MCT-P3-N1	23	7.99	4.00	4.00	4.20	0.18	0.27	41.8	29.9	71.8	122.8	140.7	valid	
	MCT-P3-N2	0	7.99	4.00	4.00	4.17	0.02	0.03	19.7	4.7	24.5	72.0	141.8	valid	
	MCT-P3-N3	0	7.98	4.00	4.00	4.16	0.05	0.07	36.5	13.0	49.6	102.0	141.8	valid	
	MCT-P3-N4	0	7.98	4.00	4.00	4.19	0.04	0.05	36.6	13.5	50.2	103.0	136.8	valid	
	MCT-P3-N5	0	7.99	4.01	4.01	4.19	0.06	0.08	40.0	14.2	54.1	107.0	137.0	valid	
	MCT-P3-N6	0	8.02	4.00	4.00	4.20	0.03	0.04	24.9	3.7	28.7	78.0	137.3	valid	
	MCT-P3-N7	0	8.00	4.00	4.00	4.21	0.04	0.05	36.4	9.2	45.6	98.3	136.8	valid	

注) MCT-P3-N3 については、試験途中でクリップゲージ外れあり。

表 3.1.1.2-11 小規模ラゴ溶解材(P3 材 SC)の 0.5TCT 試験片による破壊靱性試験結果

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)		延性き裂成長量 (mm)		破断荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	破壊靱性 K _{IC} (MPa√m)	IT相当破壊靱性 K _{IC(IT)} (MPa√m)	K _{IC(limit)} (MPa√m)	K _{IC(limit)} に対する Validity		
			幅 W	厚さ B	正味厚さ B _n	き裂長さ a ₀									平均	最大
P3材 (ステップ クレーリング)	0.5TCT-P3-7	80	25.42	12.75	10.28	13.47	0.01	0.03	10.5	18.1	1.2	19.5	63.4	58.5	239.9	valid
	0.5TCT-P3-8	120	25.43	12.75	10.25	13.35	0.02	0.06	12.7	26.0	3.9	29.8	78.0	68.8	239.7	valid
	0.5TCT-P3-9	120	25.41	12.75	10.26	13.41	0.04	0.08	13.9	31.7	4.2	35.9	85.5	75.1	238.9	valid
	0.5TCT-P3-10	150	25.42	12.75	10.28	13.39	0.10	0.18	14.1	32.7	4.7	37.3	86.7	76.1	238.2	valid
	0.5TCT-P3-11	150	25.42	12.76	10.29	13.21	0.22	0.42	12.6	24.9	3.1	27.8	74.9	68.2	240.1	valid
	0.5TCT-P3-12	150	25.42	12.74	10.28	13.37	0.26	0.48	13.7	30.7	5.8	36.6	85.9	75.5	238.7	valid

注) 0.5TCT-P3-11 については、ポップイン発生時に破壊靱性を評価。

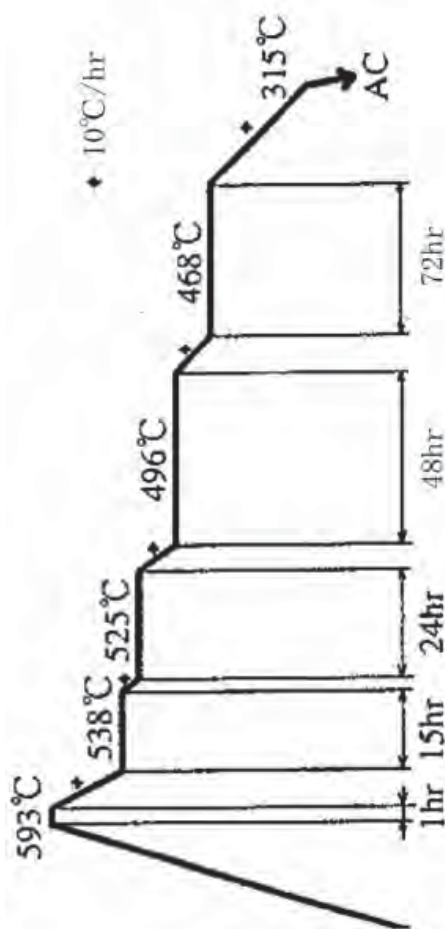


図 3.1.1.2-31 ステップクレーリング(SC)熱処理条件

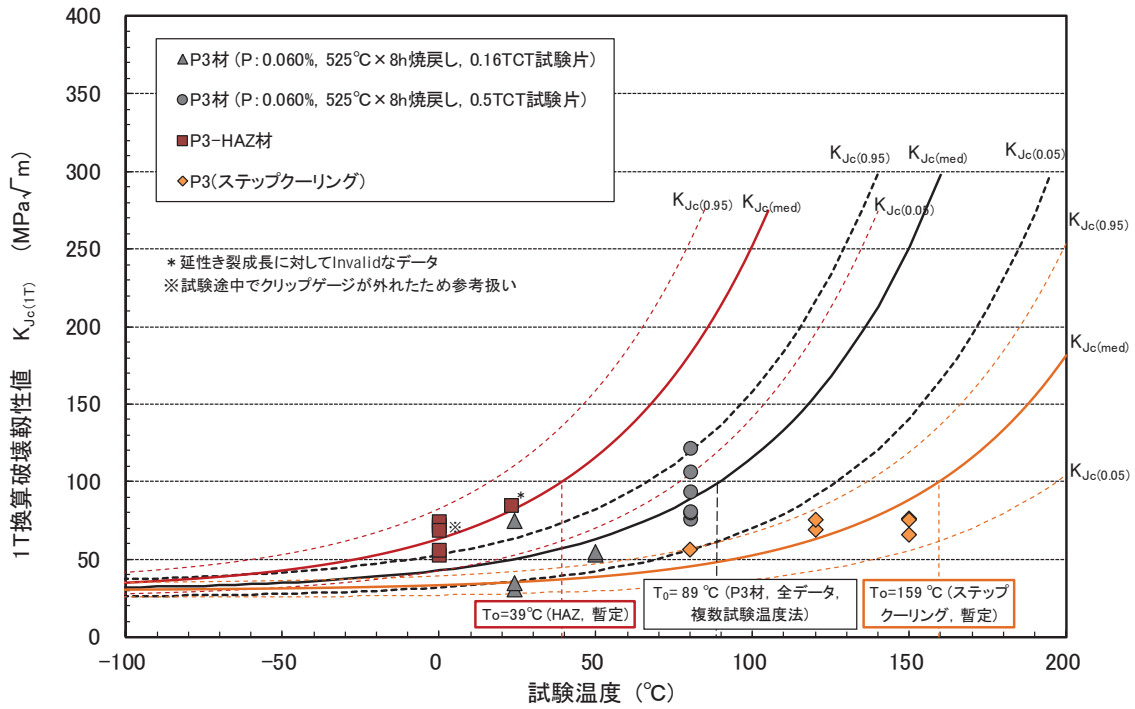


図 3.1.1.2-32 小規模ラボ溶解材(P3 材)の破壊靱性試験結果まとめ

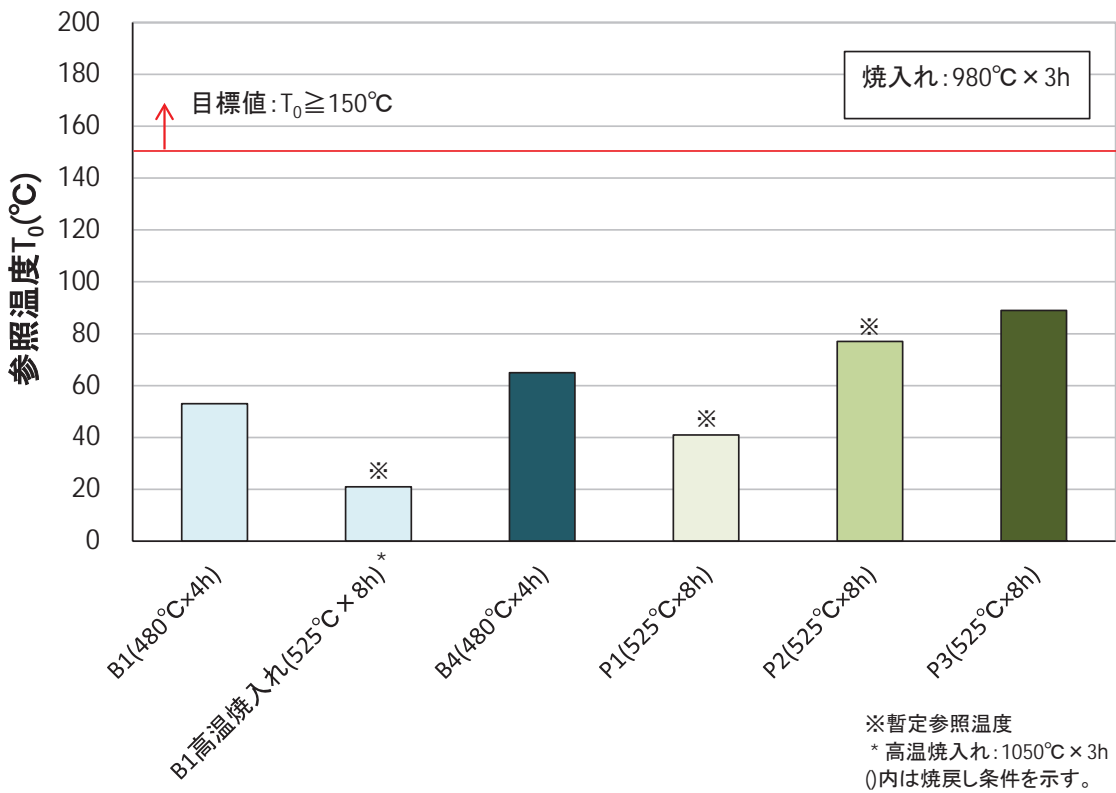


図 3.1.1.2-33 小規模ラボ溶解材の破壊靱性マスターカーブ参照温度の比較

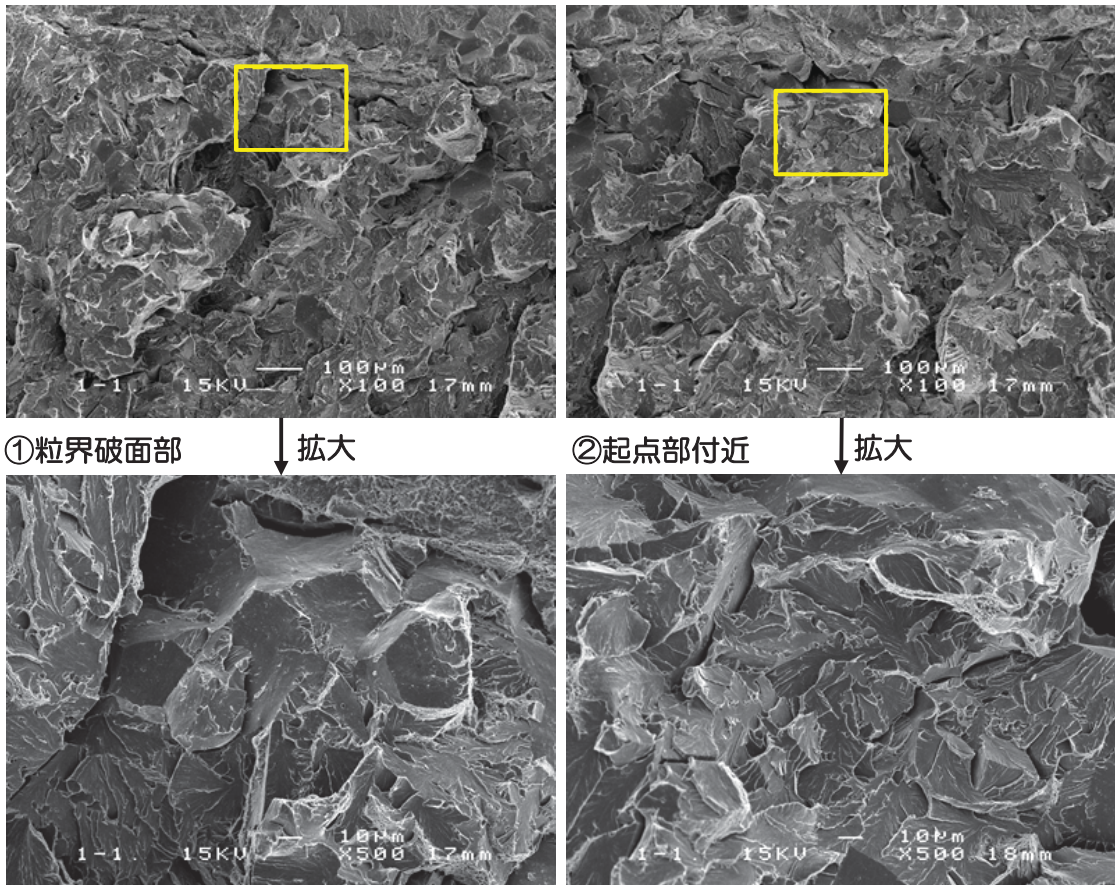
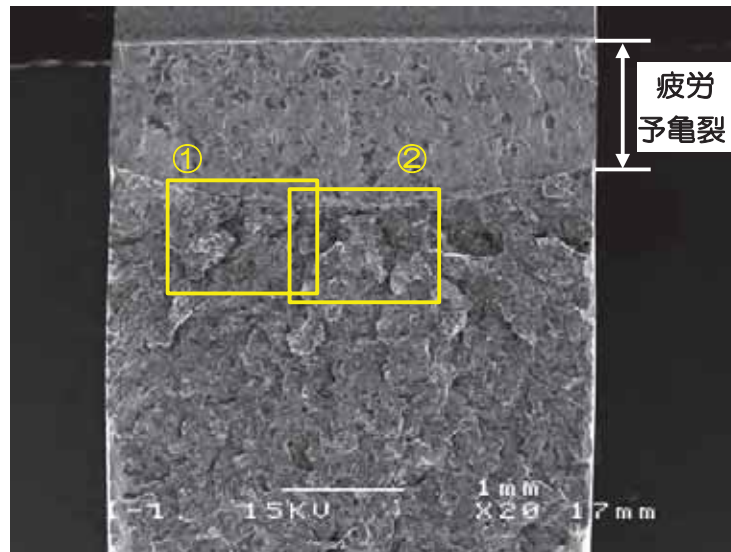


図 3.1.1.2-34 SEMによる0.16TCT試験片の破面観察結果
(B1材、符号:MCT-B1-1、 $K_{Jc}=127 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

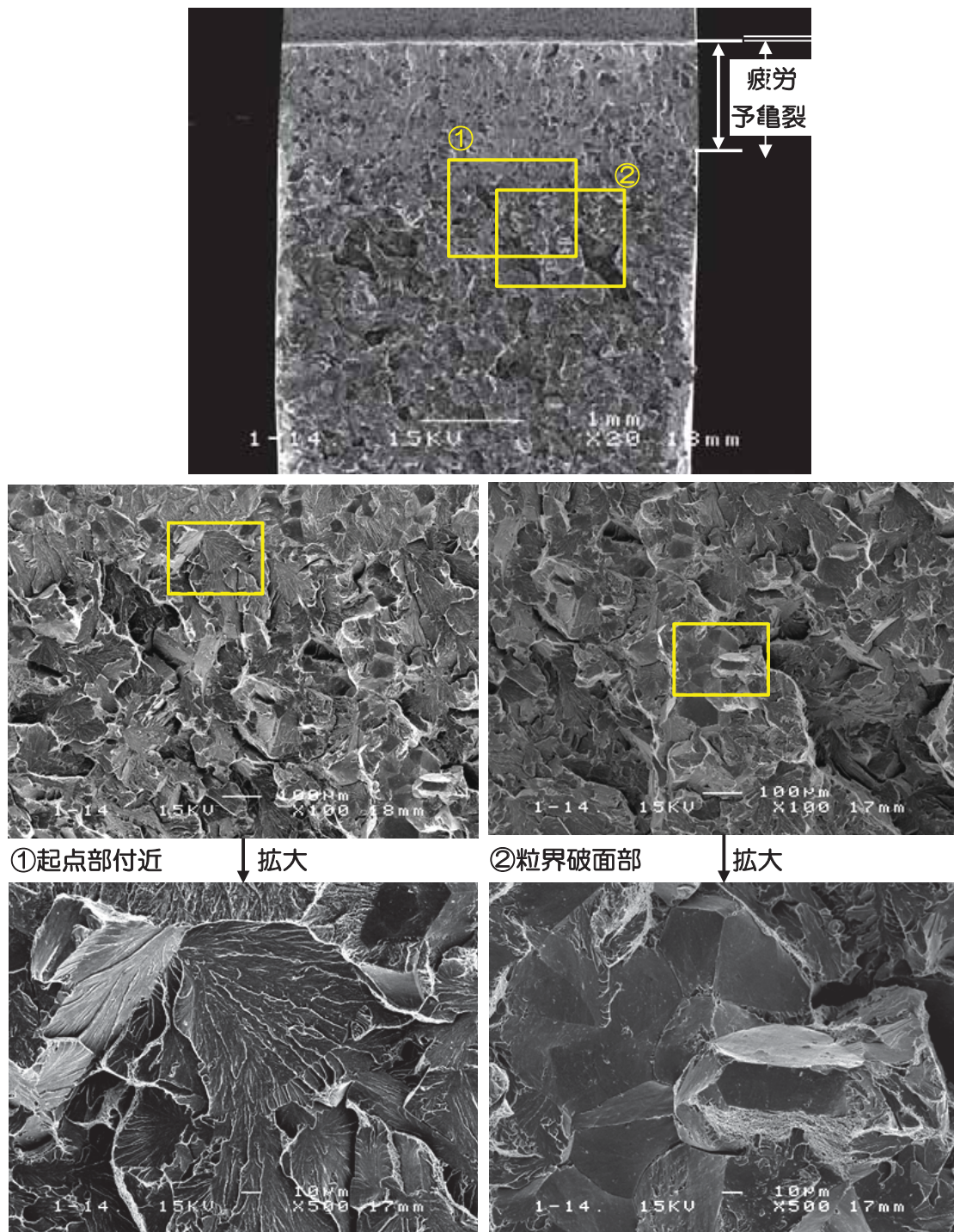


図 3.1.1.2-35 SEMによる0.16TCT試験片の破面観察結果
 (B1材、符号:MCT-B1-14、 $K_{Jc}=40.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

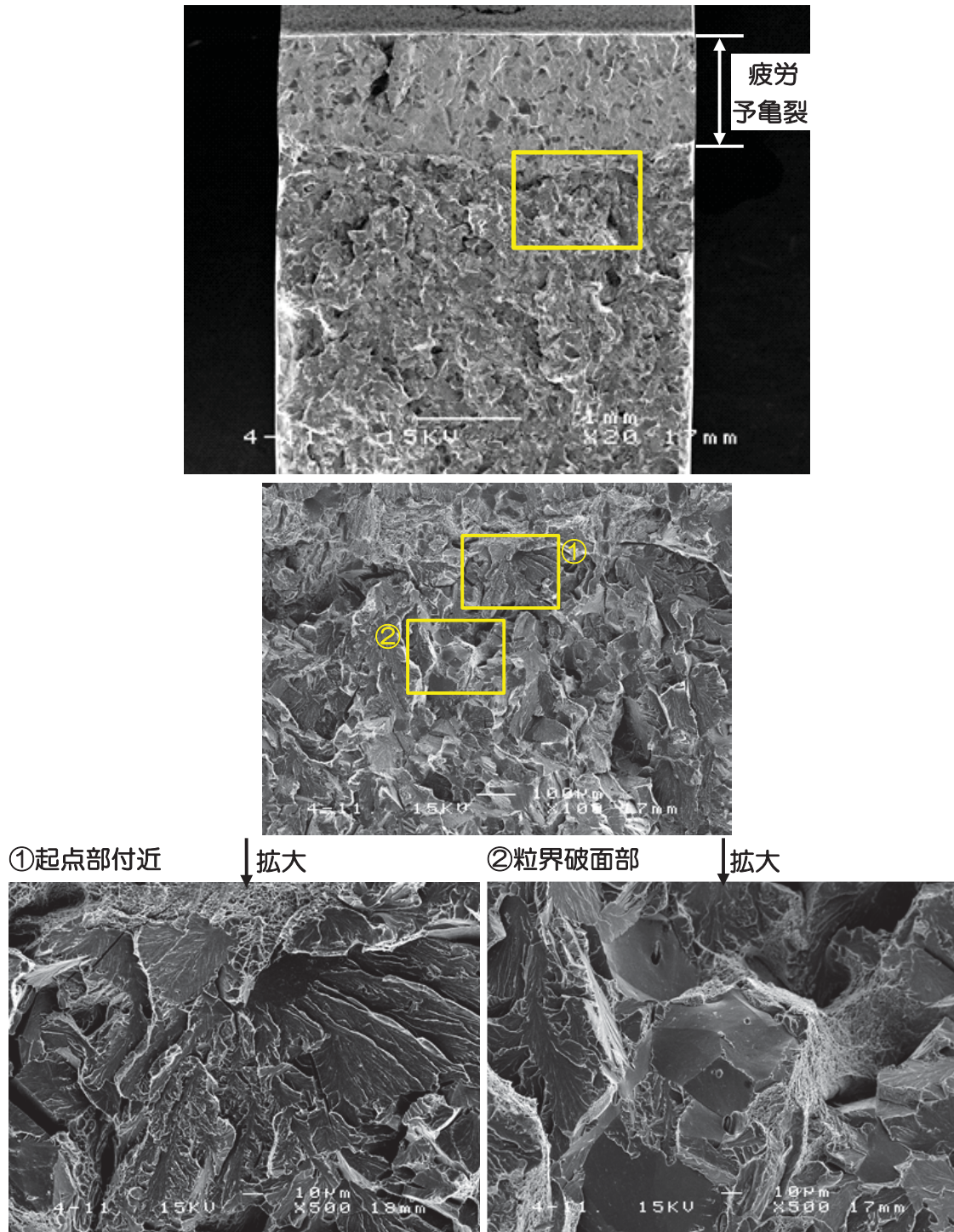


図 3.1.1.2-36 SEMによる0.16TCT試験片の破面観察結果
(B4材、符号: MCT-B4-11、 $K_{Ic}=114 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

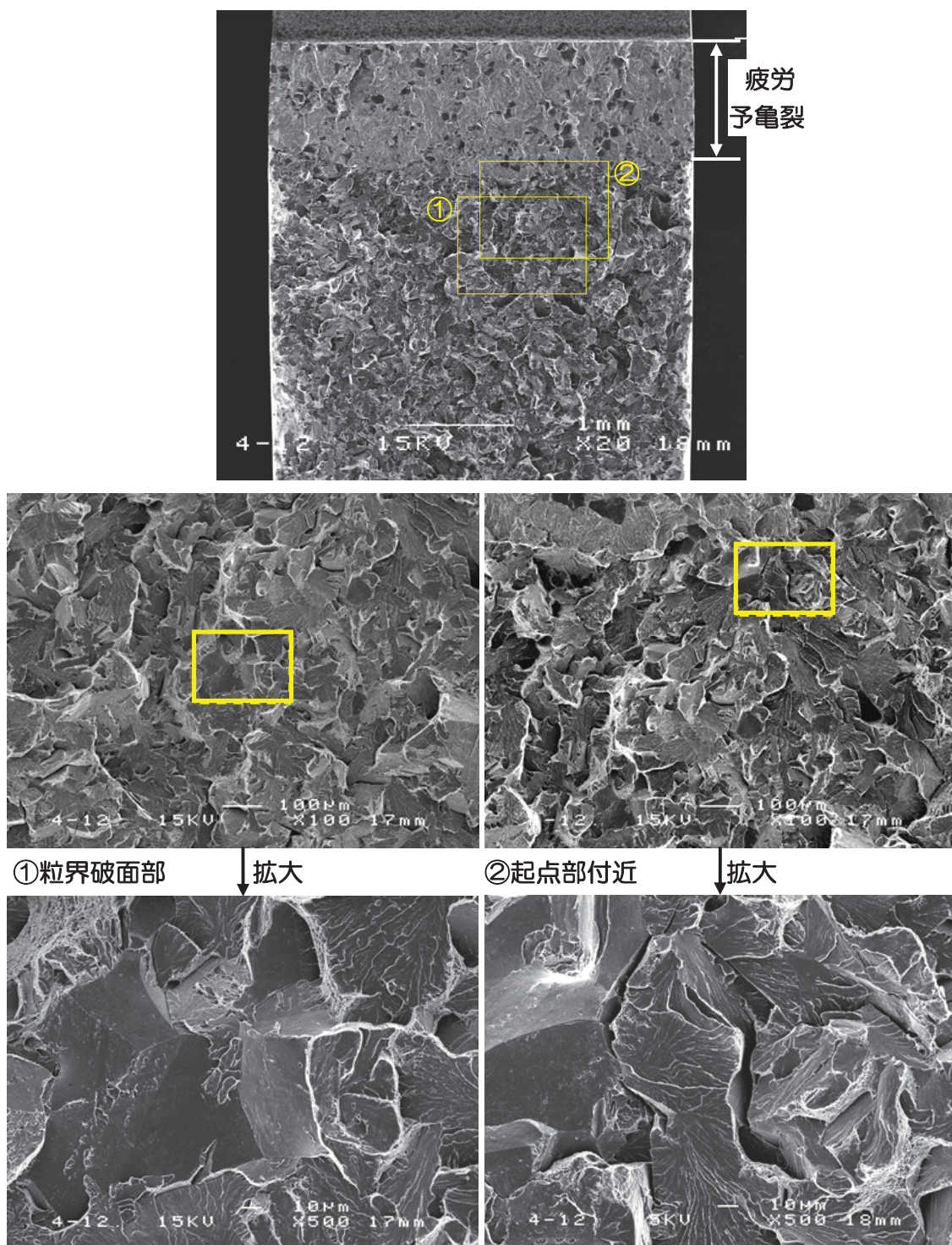


図 3.1.1.2-37 SEMによる0.16TCT試験片の破面観察結果
(B4材、符号: MCT-B4-12、 $K_{Jc}=51.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

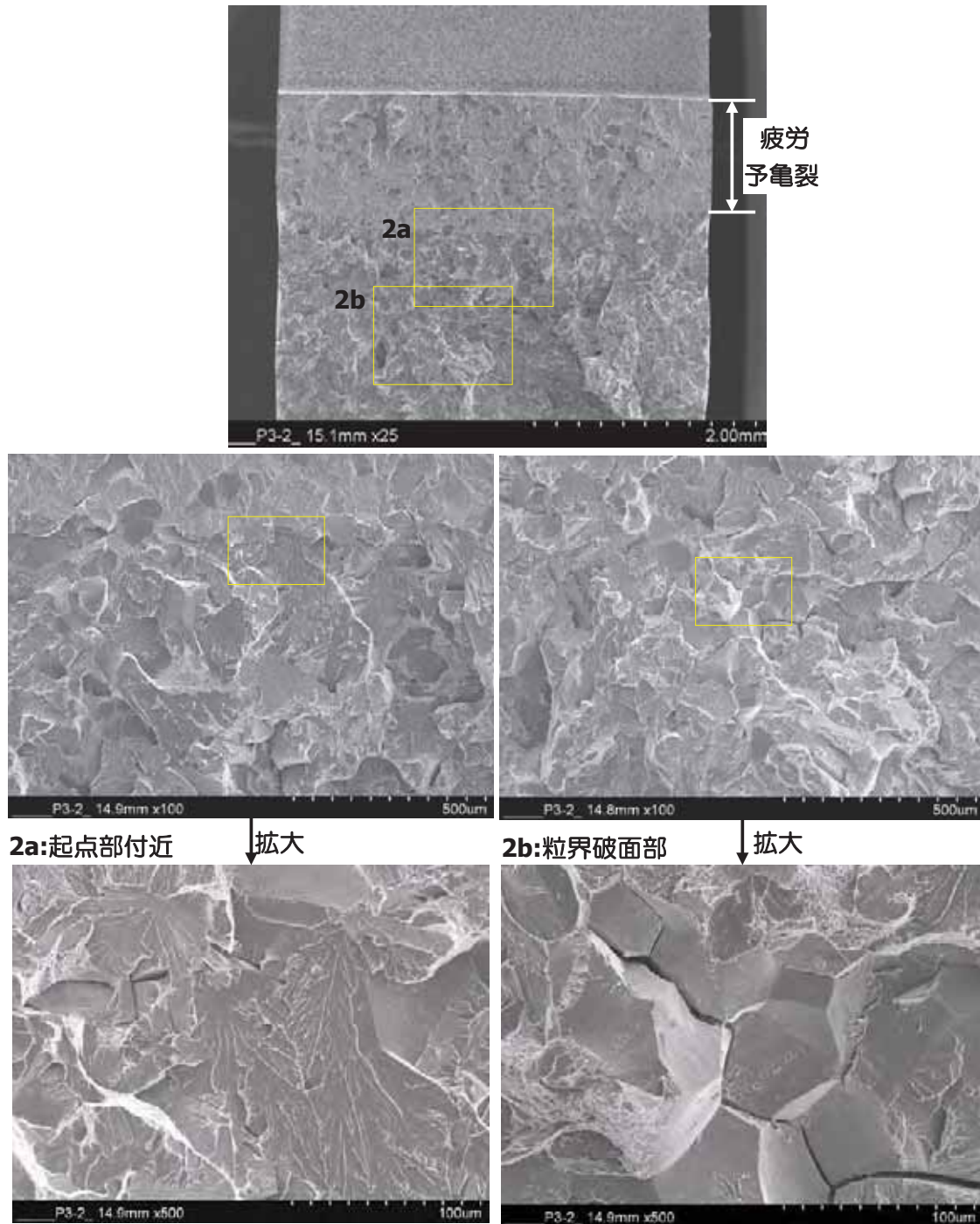


図 3.1.1.2-38 SEMによる0.16TCT試験片の破面観察結果
(P3材、符号: MCT-P3-2、 $K_{Jc}=36.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

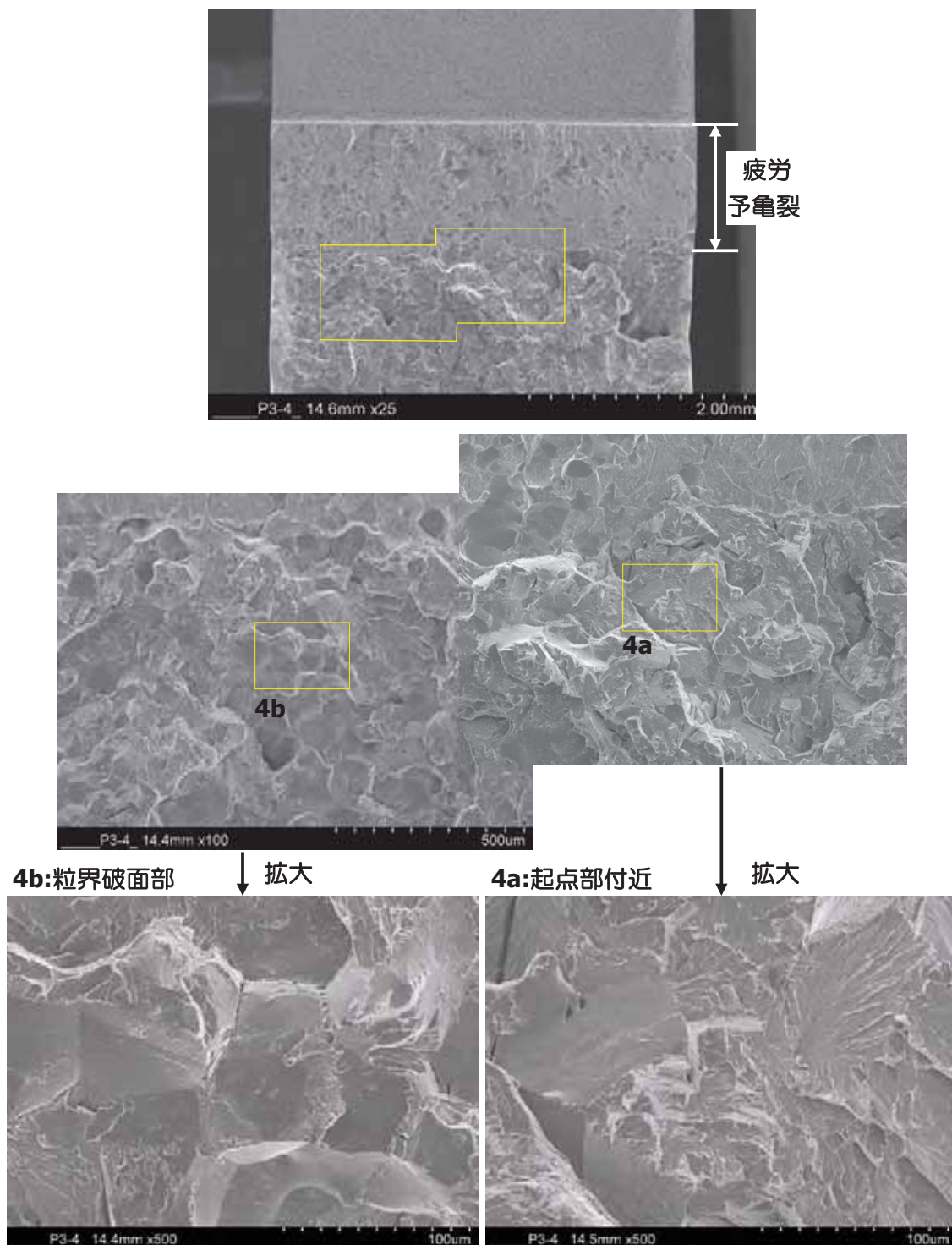


図 3.1.1.2-39 SEMによる0.16TCT試験片の破面観察結果
(P3材、符号: MCT-P3-4、 $K_{Jc}=72.3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

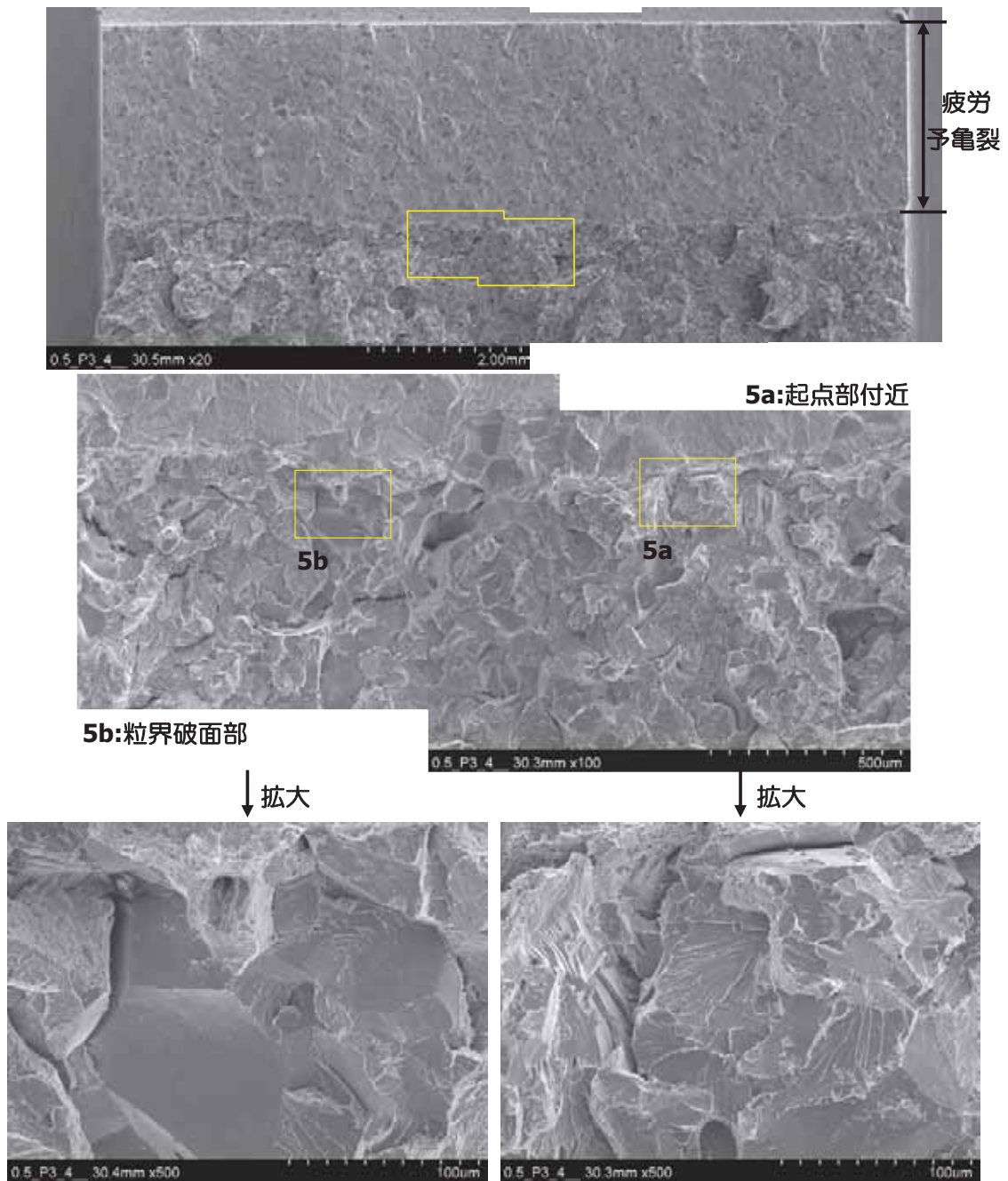
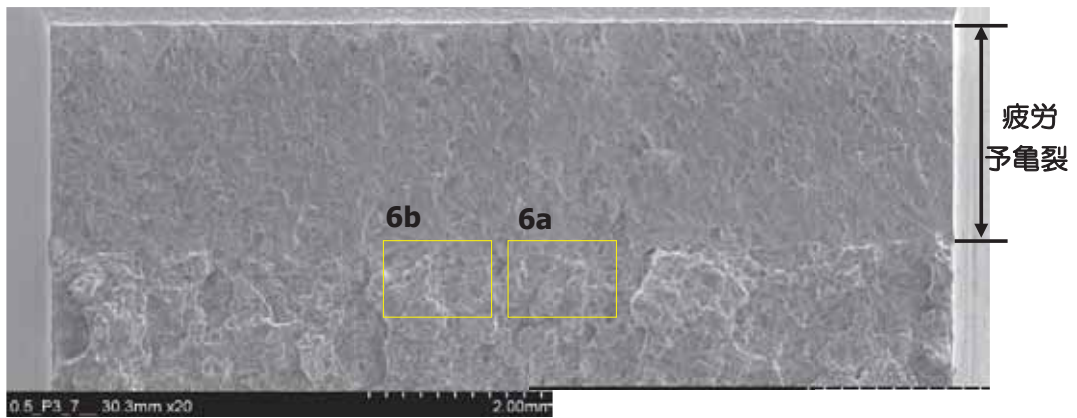
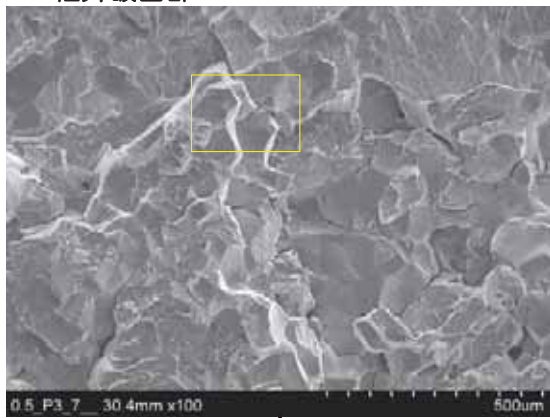


図 3.1.1.2-40 SEMによる0.5TCT試験片の破面観察結果
(P3材、符号: 0.5TCT-P3-4、 $K_{Jc}=107.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)



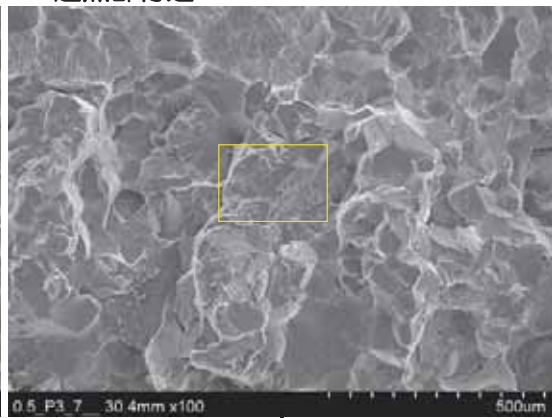
6b:粒界破面部



↓ 拡大



6a:起点部付近



↓ 拡大

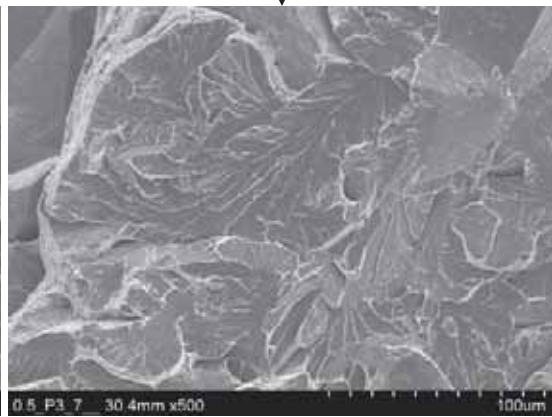
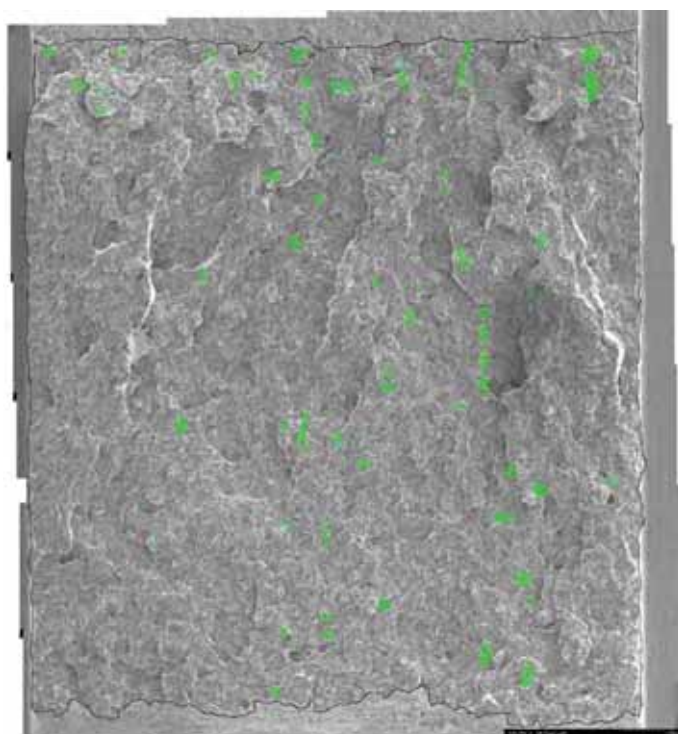


図 3.1.1.2-41 SEMによる0.5TCT試験片の破面観察結果
(P3材SC、符号:0.5TCT-P3-7、 $K_{Ic}=63.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)

P3材
符号：**0.5TCT-P3-4**
粒界破面率：**1%**

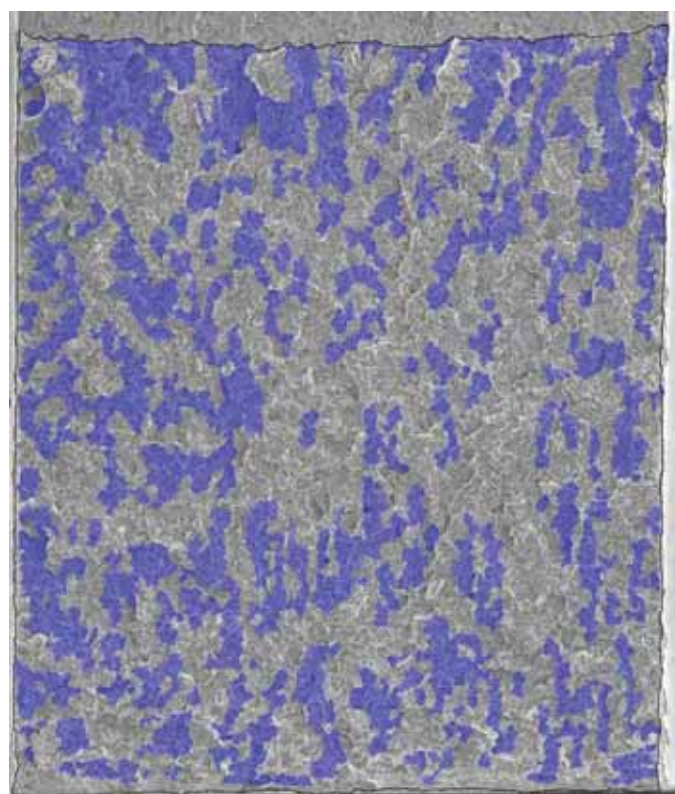
■：粒界破面



1mm

P3材ステップクーリング
符号：**0.5TCT-P3-7**
粒界破面率：**37%**

■ 粒界破面



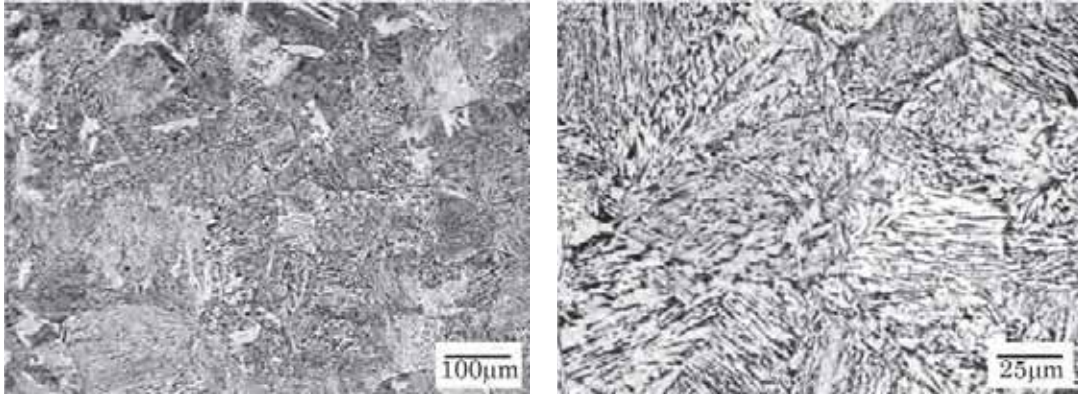
1mm

図 3.1.1.2-42 SEM による 0.5TCT 試験片の粒界破面率測定結果

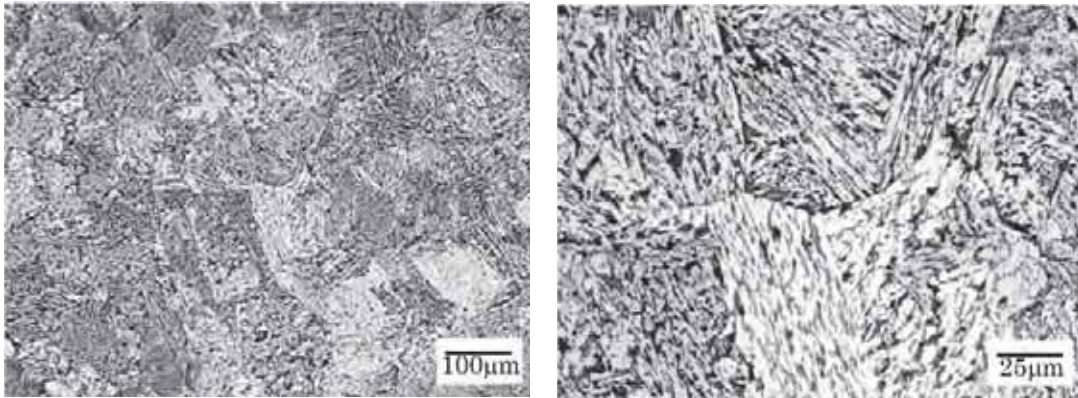
e. ミクロ組織

図 3.1.1.2-43 ~図 3.1.1.2-47 に小規模ラボ溶解材のミクロ組織観察結果を示す。基本的にベイナイト組織であるが、C 量の増加に伴い微細な針状組織の割合が増加する傾向が見られた。

図 3.1.1.2-48 にはクラッド施工した P3 材の断面組織観察結果を示す。HAZ の大きさはクラッド中央部で最大で、クラッド境界から約 9 mm 深さであった。クラッド境界から母材へ進むにつれて、粗粒 HAZ、細粒 HAZ、母材と変化していることが確認された。

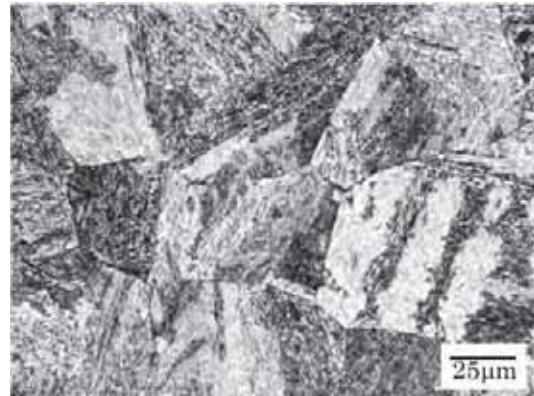
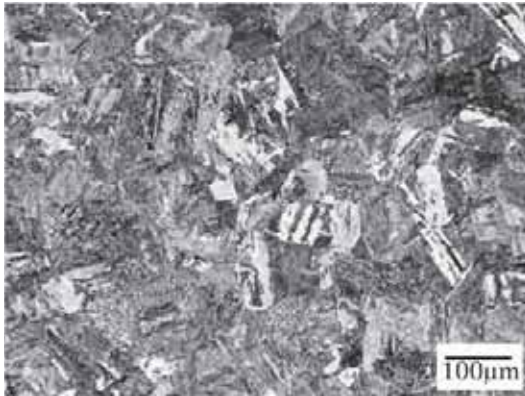


(1)A1 材(980°C焼入れ、600°C×4 時間焼戻し、ビッカース硬さ 269HV)

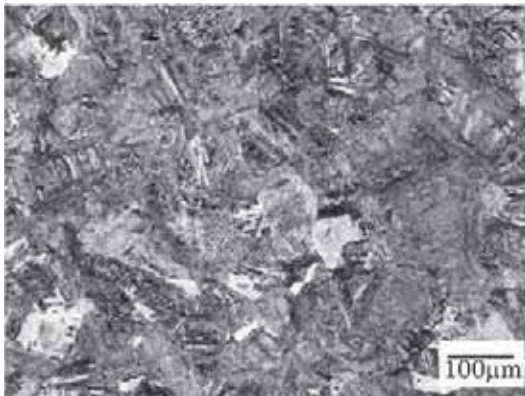


(2)A1 材(980°C焼入れ、550°C×6 時間 35 分焼戻し、ビッカース硬さ 284HV)

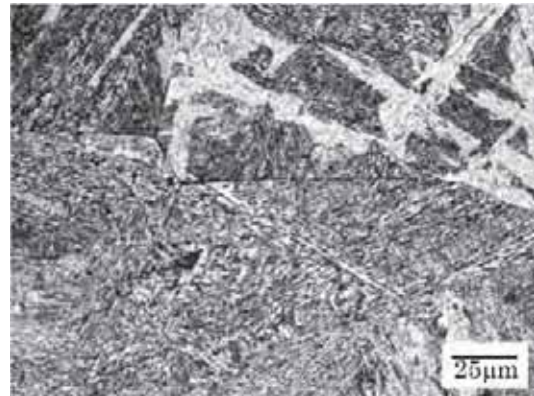
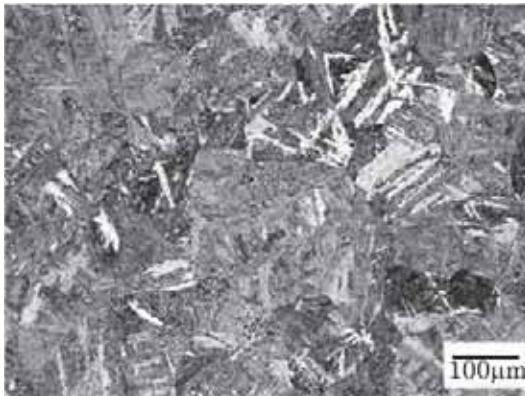
図 3.1.1.2-43 小規模ラボ溶解材(A1 材)の各熱処理条件でのマイクロ組織観察結果



(1)B1 材(980°C焼入れ、600°C×4 時間焼戻し、ビッカース硬さ 279HV)

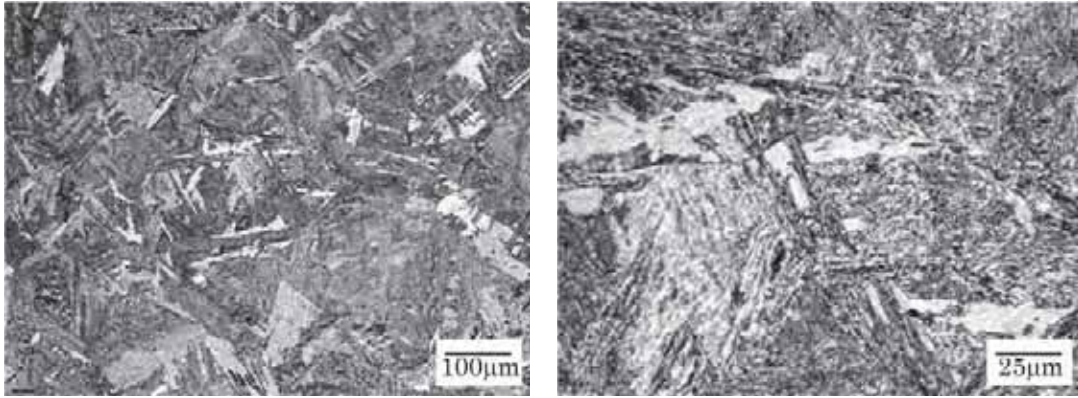


(2)B1 材(980°C焼入れ、480°C×4 時間焼戻し、ビッカース硬さ 328HV)

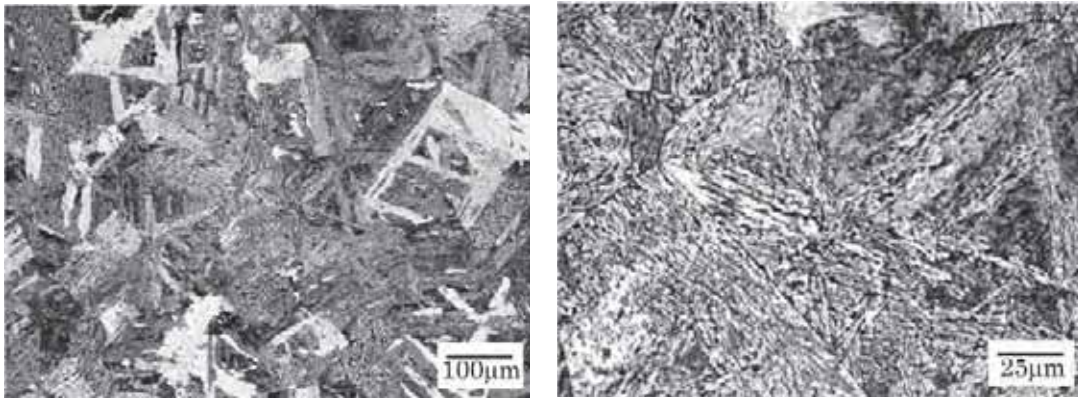


(3)B1 材(980°C焼入れ、525°C×8 時間焼戻し、ビッカース硬さ 311HV)

図 3.1.1.2-44(1) 小規模ラボ溶解材(B1 材)の各熱処理条件でのマイクロ組織観察結果

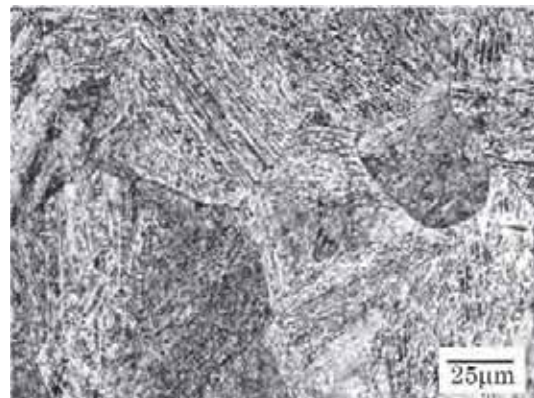
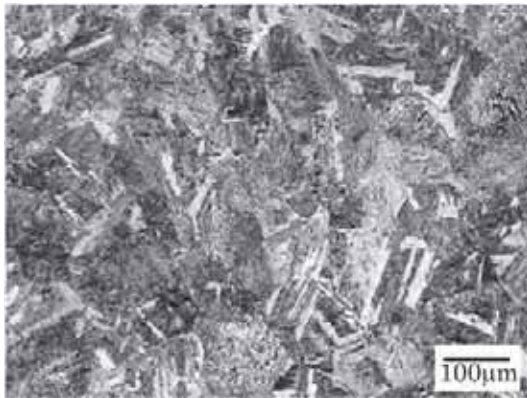


(4)B1 材(1050°C焼入れ、525°C×8 時間焼戻し、ビッカース硬さ 313HV)

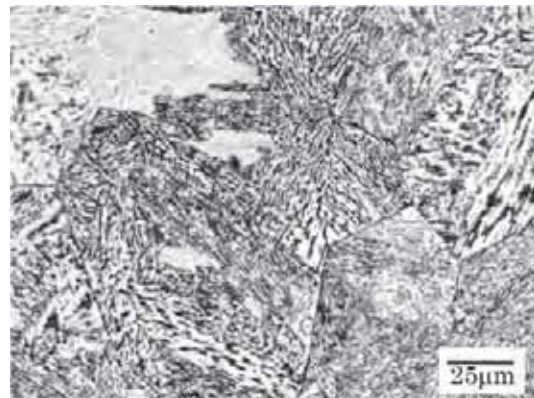
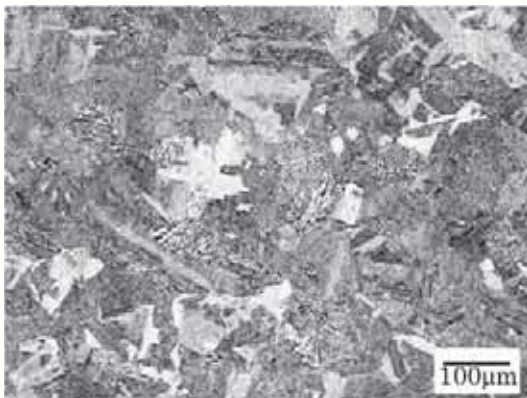


(5)B1 材(1050°C焼入れ、600°C×4 時間焼戻し、ビッカース硬さ 286HV)

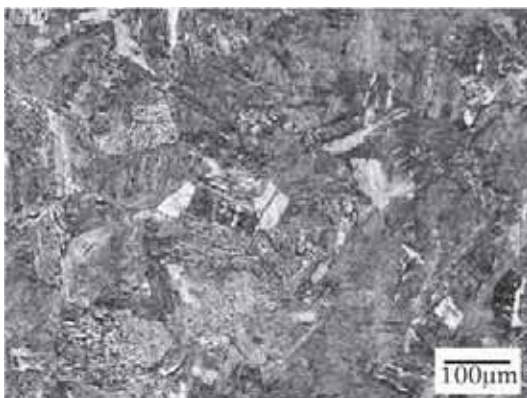
図 3.1.1.2-44(2) 小規模ラボ溶解材(B1 材)の各熱処理条件でのマイクロ組織観察結果



(1)B3 材(980°C焼入れ、600°C×4 時間焼戻し、ビッカース硬さ 288HV)

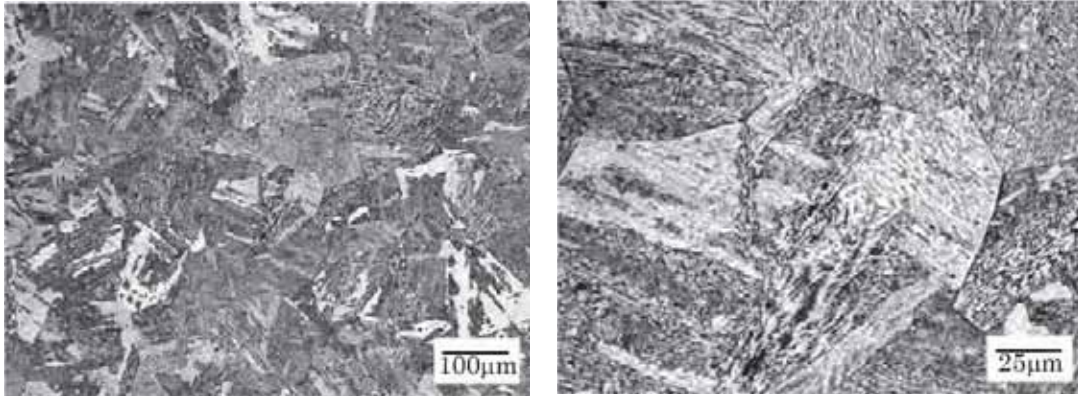


(2)B4 材(980°C焼入れ、600°C×4 時間焼戻し、ビッカース硬さ 267HV)

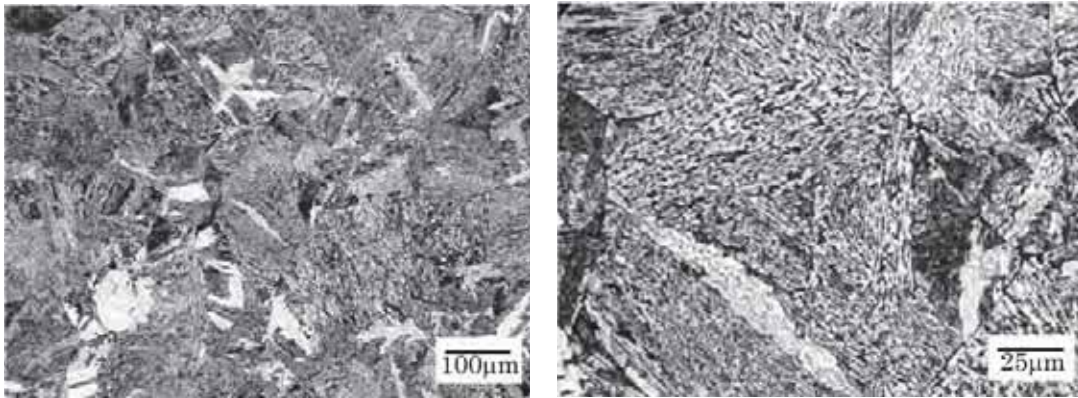


(3)B4 材(980°C焼入れ、480°C×4 時間焼戻し、ビッカース硬さ 325HV)

図 3.1.1.2-45(1) 小規模ラボ溶解材(B3、B4 材)の各熱処理条件でのマイクロ組織観察結果

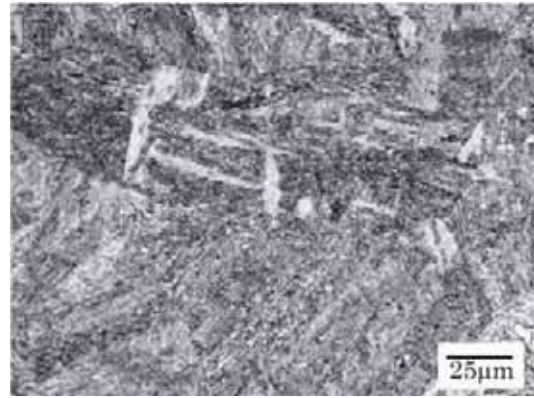
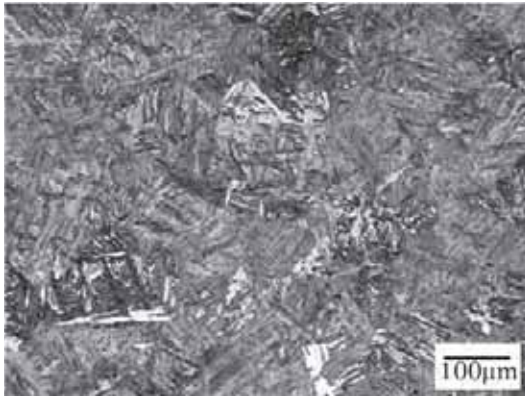


(4)B4 材(1050°C焼入れ、525°C×8 時間焼戻し、ビッカース硬さ 310HV)

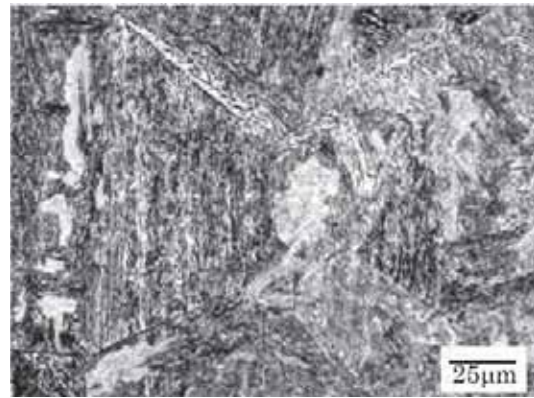
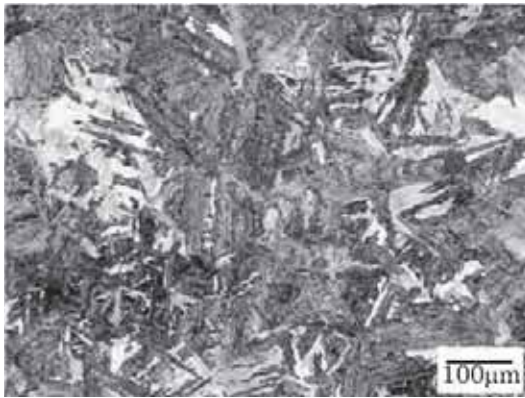


(5)B4 材(1050°C焼入れ、600°C×4 時間焼戻し、ビッカース硬さ 279HV)

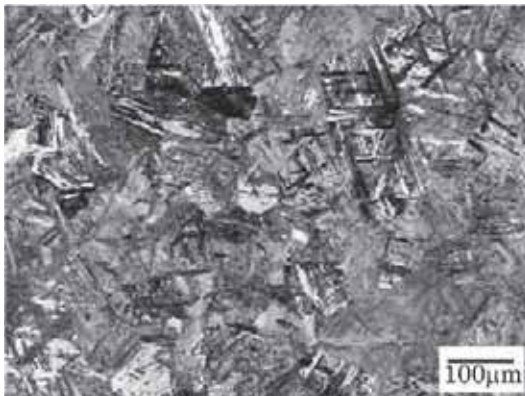
図 3.1.1.2-45(2) 小規模ラボ溶解材(B3、B4 材)の各熱処理条件でのマイクロ組織観察結果



(1)C1 材(980℃焼入れ、600℃×4 時間焼戻し、ビッカース硬さ 302HV)

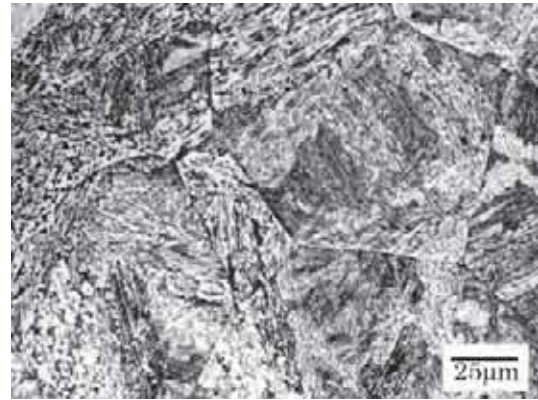
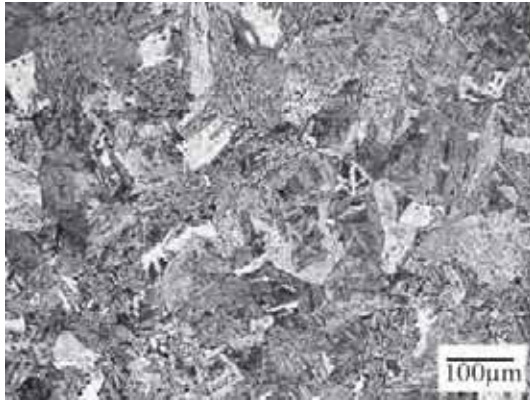


(2)C2 材(980℃焼入れ、600℃×4 時間焼戻し、ビッカース硬さ 295HV)

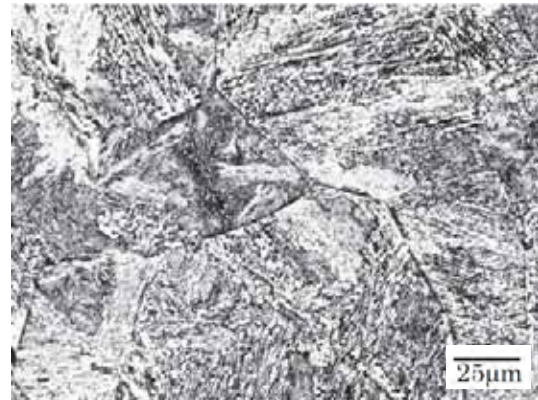
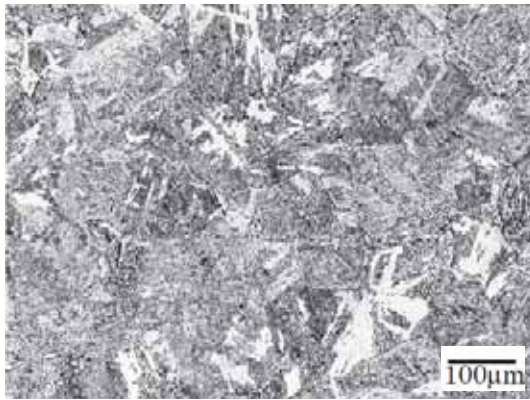


(3)C2 材(980℃焼入れ、480℃×4 時間焼戻し、ビッカース硬さ 356HV)

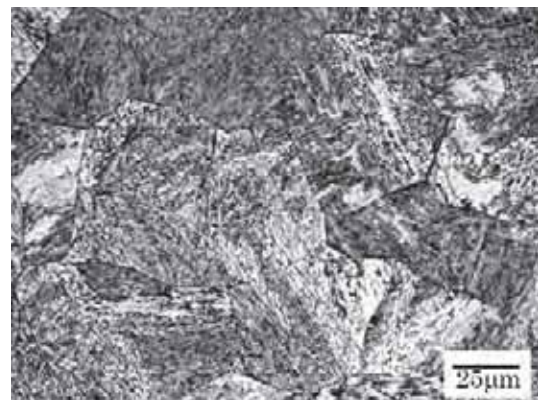
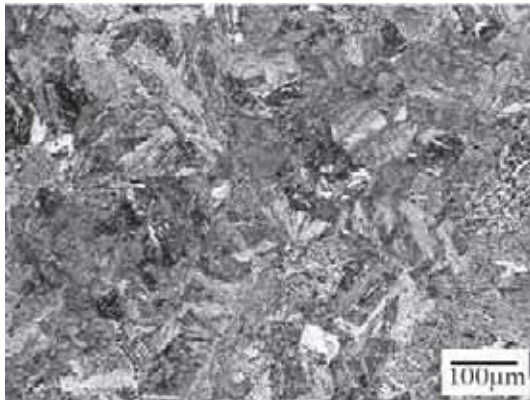
図 3.1.1.2-46 小規模ラボ溶解材(C1、C2 材)の各熱処理条件でのマイクロ組織観察結果



(1)P1 材(980°C焼入れ、525°C×8 時間焼戻し、ビッカース硬さ 310HV)

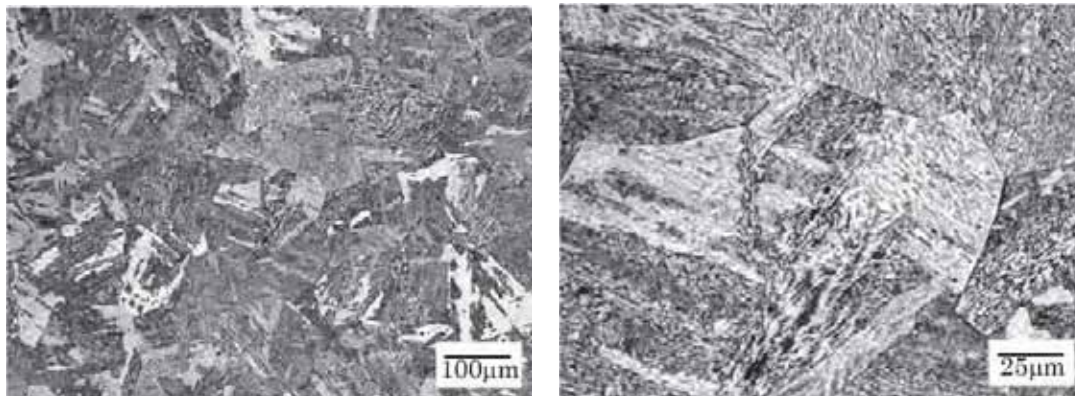


(2)P1 材(980°C焼入れ、480°C×4 時間焼戻し、ビッカース硬さ 309HV)

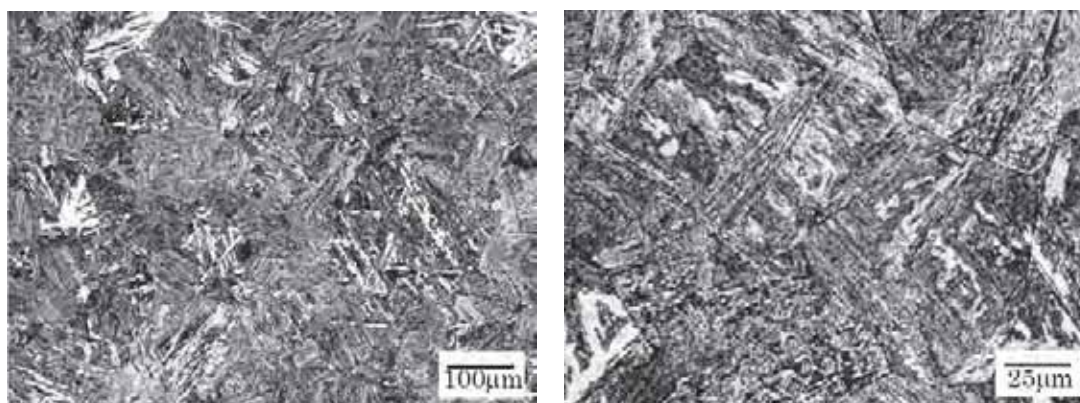


(3)P2 材(980°C焼入れ、525°C×8 時間焼戻し、ビッカース硬さ 321HV)

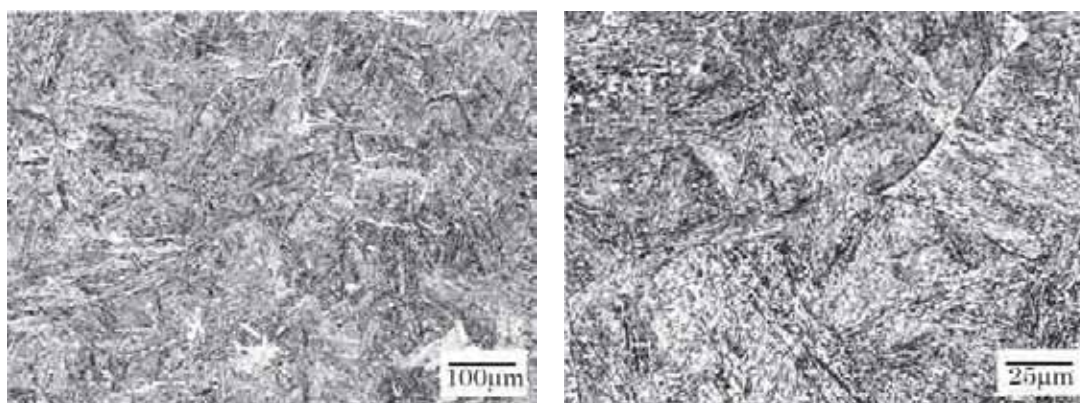
図 3.1.1.2-47(1) 小規模ラボ溶解材(P1、P2、P3 材)の各熱処理条件でのマイクロ組織観察結果



(4)P2 材(980℃焼入れ、480℃×8 時間焼戻し、ビッカース硬さ 327HV)



(5)P3 材(980℃焼入れ、525℃×8 時間焼戻し、ビッカース硬さ 336HV)



(6)P3 材(980℃焼入れ、480℃×4 時間焼戻し、ビッカース硬さ 331HV)

図 3.1.1.2-47(2) 小規模ラボ溶解材(P1、P2、P3 材)の各熱処理条件でのマイクロ組織観察結果

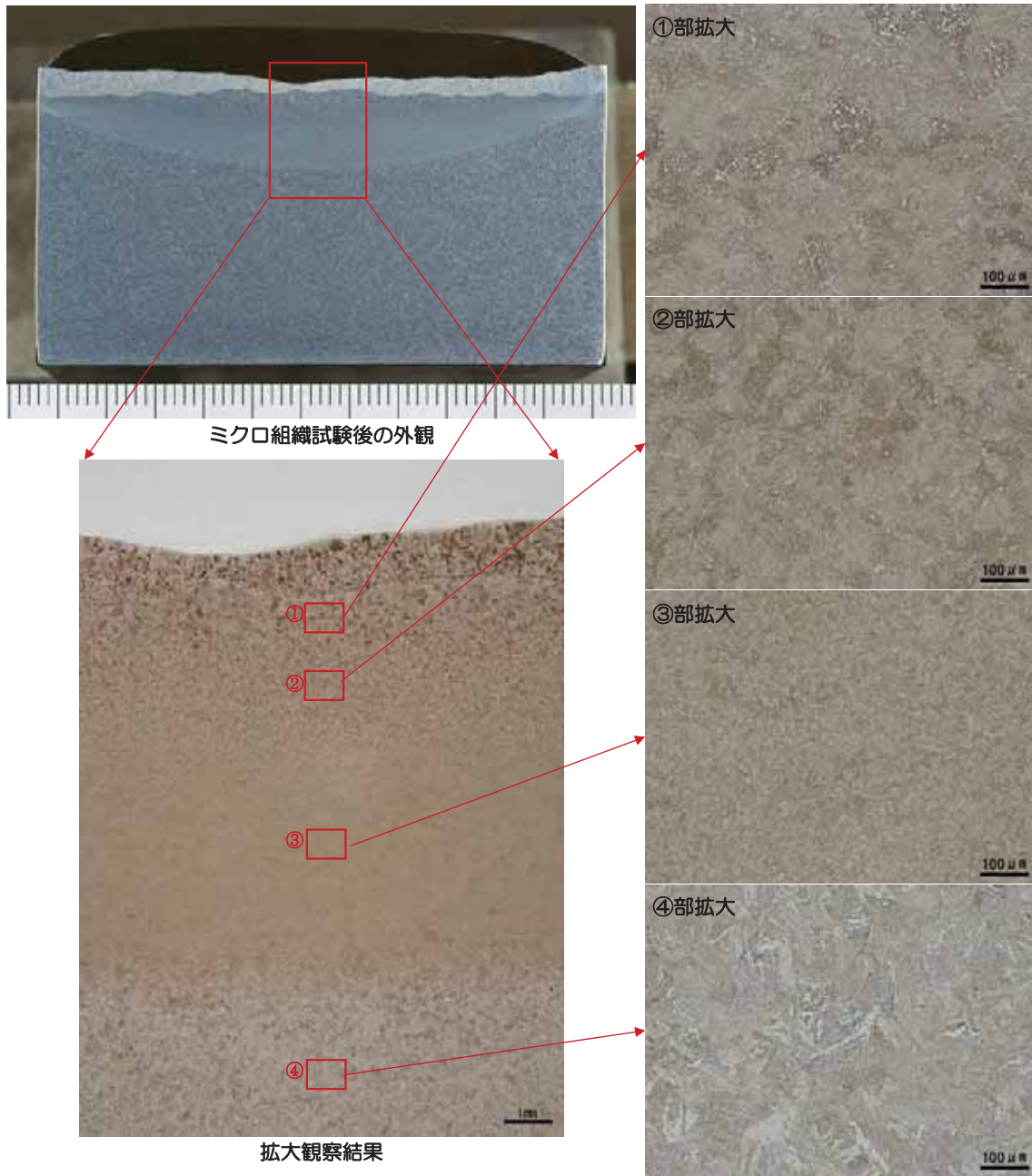


図 3.1.1.2-48 クラッド施工後の P3 材のマイクロ組織試験結果

④小規模ラボ溶解材試験のまとめ

表 3.1.1.2-12 に小規模ラボ溶解材試験結果のまとめを示す。

今回製作した小規模ラボ溶解材のうち、参照温度 T_0 が 150°C 以上となったものは見出せなかった。その中で P2 材及び P3 材の T_0 はそれぞれ 77°C 、 89°C であり、低い破壊靱性であった。また SC 施工した P3 材において T_0 が 159°C を示したものの、粒界破壊が支配的であったことからマスターカーブ法を適用した破壊靱性評価が行えない可能性が高いと思われる。

以上の結果より、P 量が少なめでかつ熱処理で粒界偏析を調整する余地のある P2 材の化学成分を低靱性鋼に採用することとした。

表 3.1.1.2-12 小規模ラボ溶解材試験結果まとめ

マスターカーブ法適用のため、粒界破面率を極力抑えることを狙い、Pは過剰に添加せず他の成分を調整することで低靱性化を志向した。

STEP	鋼種	狙い	焼入れ	焼戻し	vTr30 (°C)	T0 (°C)	USE (J)	CT粒界破面率 (%) ※1	シャルピー粒界破面率 (%) ※2
STEP1	A1: 0.25C-0.030P-0.002S	低靱性均質材※3の実績をトレース	980°C × 3hr水冷	600°C × 4hr空冷	77	—	115	—	0
	B1: 0.30C-0.028P-0.002S	強度増による靱性低下(C増加)			84	—	104	—	0
	B3: 0.30C-0.029P-0.010S	強度増及び低USEによる靱性低下(C、S増加)			101	—	74	—	<1
STEP2	HOLD	—	—	—	—	—	—	—	

A1、B1、B3のいずれも目標靱性達成は厳しいと判断。C、Sをさらに増加させた材料を試作した。

STEP3	B4: 0.30C-0.030P-0.020S	さらに低USEによる靱性低下(S増加)	980°C × 3hr水冷	600°C × 4hr空冷	124	—	55	—	<1
	C1: 0.35C-0.030P-0.003S	さらに強度増による靱性低下(C増加)			76	—	89	—	8
	C2: 0.35C-0.029P-0.010S	さらに低USE、強度増による靱性低下(C、S増加)			121	—	71	—	6

C増加による低靱性効果は少なかった。高C材では溶接が難しくなることが懸念され、候補から外した。B1とB4を本命とし、C2をバックアップの位置付けで、最低値を見るために仮焼戻し(480°C)状態で試験した。

STEP4	B1: 0.30C-0.028P-0.002S	最低値確認(仮焼戻しで試験)	980°C × 3hr水冷	480°C × 4hr空冷	157	53	77	—	<1
	B4: 0.30C-0.030P-0.020S				220	65	43	—	<1
	C2: 0.35C-0.029P-0.010S				189	—	48	—	11

B1、B4の480°C焼戻しでvTr30は上昇したものの、MiniCTによるT0は60°C程度に留まった。さらに低靱性を狙う必要があり、P増加させた。また、焼入れ温度高温化も対象に加えた。焼戻し条件はクラッド材の要素試験結果から選定したものを採用。

STEP5-1	B1H: 0.30C-0.028P-0.002S	結晶粒粗大化による低靱性化(高温焼入れ)	1050°C × 3hr水冷	525°C × 8hr空冷	159	21(暫定)	86	—	—
	B4H: 0.30C-0.030P-0.020S				197	—	51	—	—
STEP5-2	P1: 0.30C-0.046P-0.002S	粒界偏析による低靱性化(P増加)	980°C × 3hr水冷	525°C × 8hr空冷	158	41(暫定)	74	—	2
	P2: 0.30C-0.057P-0.002S				168	77(暫定)	78	—	6
	P3: 0.31C-0.070P-0.002S				167	89	65	1	41
STEP5-3	P3H: 0.31C-0.070P-0.002S	結晶粒粗大化かつ粒界偏析による低靱性化(高温焼入れ、P増加)	1050°C × 3hr水冷	525°C × 8hr空冷	—	—	—	—	—

P2、P3である程度の低靱性が得られたものの、目標のT0 ≥ 150°Cは未達。P3Hはクラッド施工性に問題があり試験を中断。

STEP5-2'	P3: 0.31C-0.070P-0.002S	粒界偏析促進による低靱性化(P増加、ステップクーリング)	980°C × 3hr水冷	525°C × 8hr空冷 →ステップクーリング	—	159(暫定)	—	37	—
----------	-------------------------	------------------------------	---------------	-----------------------------	---	---------	---	----	---

当該STEPでの変更箇所を赤字で示している。

※1 CT試験片の破面全体から求めた割合。

※2 シャルピー衝撃試験片のノッチ下1mm × 1mm程度の範囲から求めた割合。

※3 発電技検PTS委員会で用いた低靱性均質材。

P2: 最終的に選定した候補材(P2)

(3)低靱性鋼の調達

①小規模ラボ溶解材試験結果に基づく材料仕様検討

小規模ラボ溶解材試験結果で比較的高い T_0 を示したP2材の化学成分及び機械的性質を参考として、低靱性鋼の化学成分と機械的性質の仕様を表 3.1.1.2-13 及び表 3.1.1.2-14 に示す。また低靱性鋼に施工するクラッド材料を手配・調達する。

調達する物量は、幅(W)が約 2100 mm、長さ(L)が約 5900 mm、厚さ(t)が約 200 mm の板材を 1 枚とし、表 3.1.1.2-15 に示す試験・検査を実施する。

表 3.1.1.2-13 低靱性鋼母材の化学成分の仕様値

項目	化学成分(wt.%)								
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
溶鋼分析	0.27~ 0.32	0.25~ 0.42	1.15~ 1.50	0.057~ 0.062	0.005 以下	0.40~ 0.70	0.20 以下	0.55~ 0.64	0.01 以下
製品分析	0.25~ 0.35	0.30~ 0.50	1.15~ 1.50	0.055~0 .065	0.005 以下	0.40~ 0.70	0.20 以下	0.57~ 0.67	0.01 以下

表 3.1.1.2-14 低靱性鋼母材の機械的性質の仕様値

試験項目	項目	仕様値
引張特性	0.2%耐力	700 MPa 以上

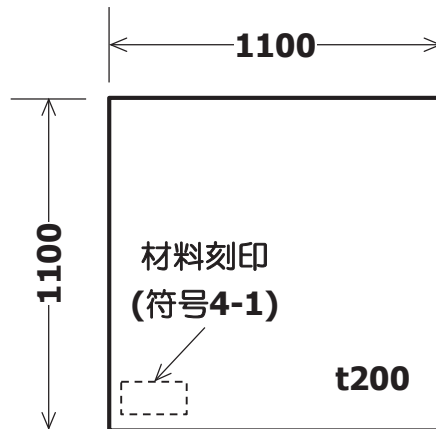
表 3.1.1.2-15 低靱性鋼母材の試験・検査項目

化学分析	溶鋼分析、製品分析
機械的性質試験	引張試験、シャルピー衝撃試験、落重試験、曲げ試験
冶金試験	サルファプリント、非金属介在物、結晶粒度
非破壊検査	浸透探傷試験(PT)、磁粉探傷試験(MT)、超音波探傷試験(UT)
その他	外観検査及び寸法検査

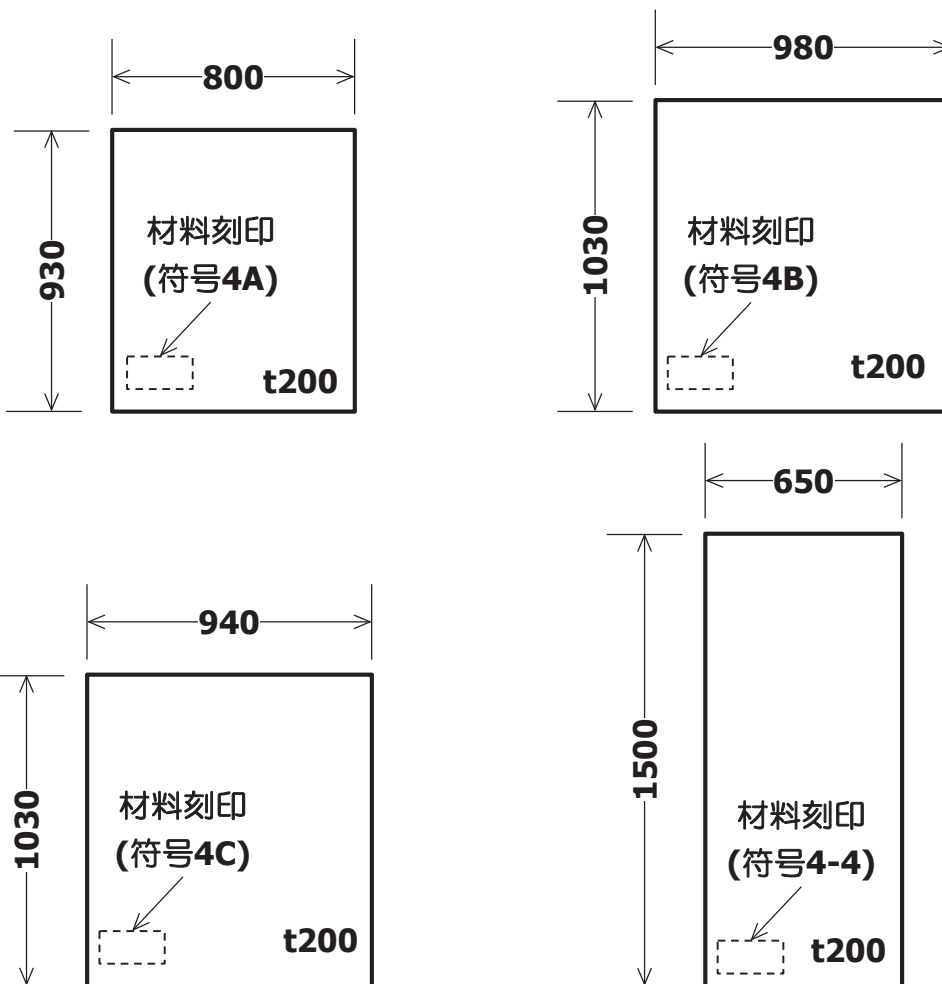
②低靱性鋼母材の調達及び試験結果

実機規模の大量溶解で製作した低靱性鋼の幅(W)が約 2,100 mm、長さ(L)が約 5,900 mm、厚さ(t)が約 200 mm の板 1 枚製作し、図 3.1.1.2-49 に示す形状に切断して調達した。母材の化学成分を表 3.1.1.2-16 に示す。また外観・寸法・非破壊検査等の結果を表 3.1.1.2-17 及び表 3.1.1.2-18、並びに図 3.1.1.2-50 に示す。化学成分及びその他試験共に仕様を満足することを確認した。

なお低靱性鋼は十字型試験体を使った試験に供する目的で調達したことを踏まえ、シャルピー衝撃試験、落重試験、引張試験、曲げ試験、結晶粒度測定は、十字型試験体と同等のクラッド及び最終熱処理条件後に実施することとし、次項に結果を記す。

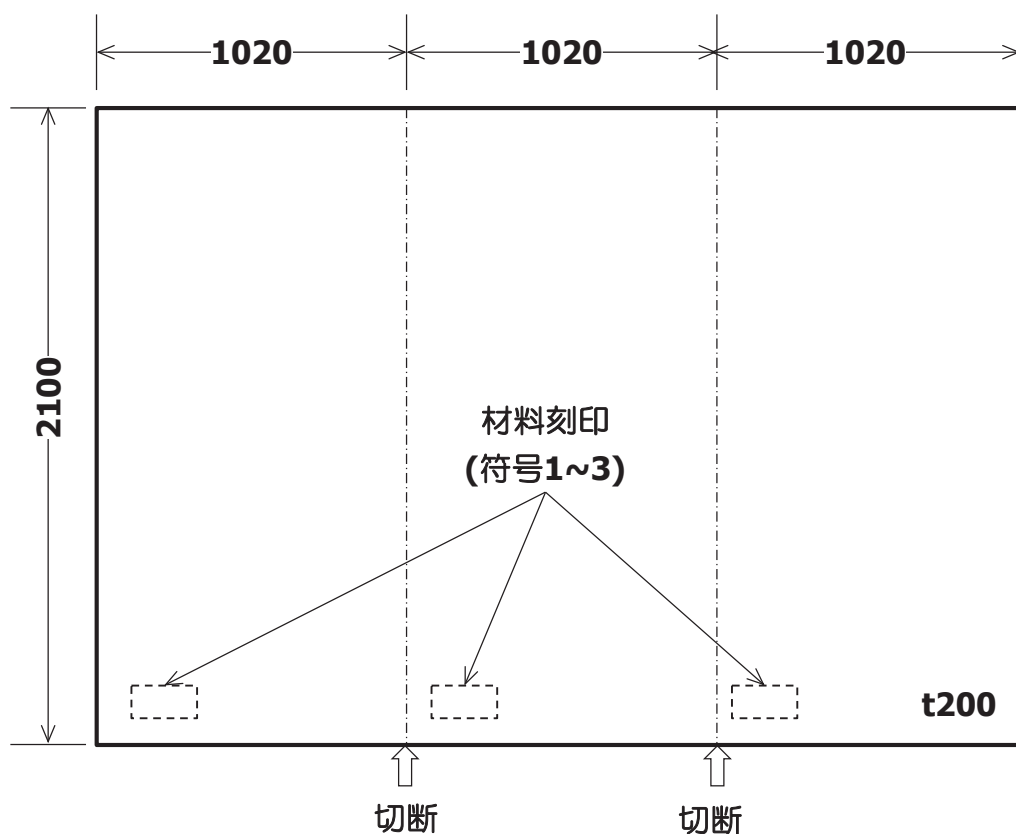


(1) 材料特性確認用



(2) 小型試験体用

図 3.1.1.2-49(1) 低靱性鋼調達時の形状



(3) 十字型試験体用

図 3.1.1.2-49(2) 低靱性鋼調達時の形状

表 3.1.1.2-16 低靱性鋼の化学成分

項目		化学成分(wt.%)								
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
仕様	溶鋼分析	0.27~ 0.32	0.25~ 0.42	1.15~ 1.50	0.057~ 0.062	0.005 以下	0.40~ 0.70	0.20 以下	0.55~ 0.64	0.01 以下
	製品分析	0.25~ 0.35	0.30~0. 50	1.15~1. 50	0.055~ 0.065	0.005 以下	0.40~0. 70	0.20 以下	0.57~0. 67	0.01 以下
実績	溶鋼分析	0.29	0.35	1.46	0.059	0.001	0.47	0.13	0.61	0.003
	製品分析	0.29	0.36	1.47	0.059	0.001	0.47	0.11	0.61	0.003

表 3.1.1.2-17 低靱性鋼の冶金試験、外観・寸法、非破壊検査

試験項目	詳細	仕様	結果
外観検査	-	使用上有害な欠陥がないこと。 (欠陥がある場合は、グラインダにより手入れする。)	合格
寸法検査	-	JIS G 3193 の寸法許容差を満足すること。	合格
浸透探傷試験(PT)	鋼板の表裏面	JSME 設計建設規格 PVB-2426 の判定基準を満足すること。	合格 (記録すべき指示なし)
磁粉探傷試験(MT)	鋼板の端面	JSME 設計建設規格 PVB-2425 の判定基準を満足すること。	合格 (記録すべき指示なし)
超音波探傷試験(UT)	鋼板の全体積	JSME 設計建設規格 PVB-2421 の判定基準を満足すること。	合格 (記録すべき指示なし)

表 3.1.1.2-18 低靱性鋼の非金属介在物試験

試験項目	結果
非金属介在物	0.008%

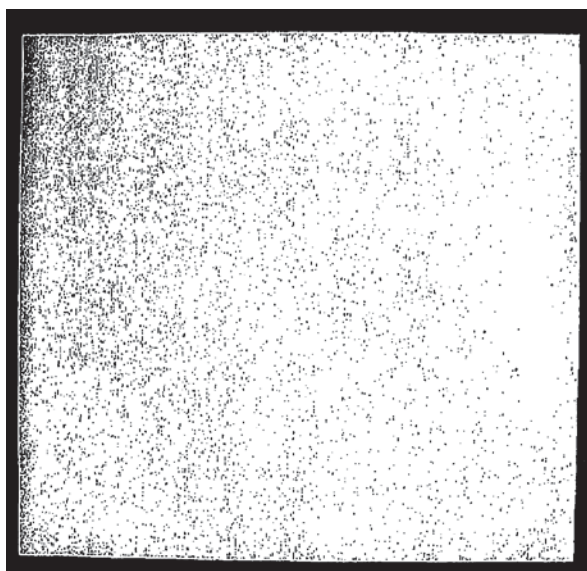


図 3.1.1.2-50 低靱性鋼のサルファプリント試験結果

③クラッド施工した低靱性鋼試験体の製作

図 3.1.1.2-51 に示すように、低靱性鋼の板から、後述する材料特性試験用試験体として約 1100 mm×約 1100 mm×約 200 mm の板を切り出した。なお図中の供試材ブロックは、後述する最終熱処理条件の検討に供した試験体の採取位置のイメージを示す。この板を図 3.1.1.2-52 に示すように 3 つに切断し、材料特性試験用①及び②と残材とした。材料特性試験用①及び②については、表裏面を 25 mm ずつ切削して 150 mm 厚さとした後、①は片面のみ、②は両面にクラッド溶接施工を行った。溶接条件を表 3.1.1.2-19 に示す。また試験体の外観写真を図 3.1.1.2-53 に示す。なおこの試験体は材料特性を確認するために製作したものであることから、クラッド施工後の非破壊検査は割愛した。

④材料特性試験

a. 最終熱処理条件検討のための試験及び結果

最終熱処理条件検討のため、 $150\text{ mm}^L \times 200\text{ mm}^W \times 150\text{ mm}^t$ の供試材ブロック(図 3.1.1.2-51 参照)に 480°C 及び 510°C の 2 条件の熱処理を施し、クラッド施工による熱影響 (HAZ) 部及びクラッド境界から 10 mm 位置に対して、破壊靱性参照温度 T_0 (暫定値) を取得した。試験片は HAZ からも採取するため、0.16TCT 試験片を用い、採取方向は小規模ラボ溶解材と同様に T-L 方向とした。図 3.1.1.2-54 に採取位置を示す。

図 3.1.1.2-55 は 480°C と 510°C の最終熱処理した低靱性鋼母材の破壊靱性値 K_{Jc} 及び荷重-変位曲線を示す。また、室温及び 40°C での試験温度についての破面 SEM 観察結果を図 3.1.1.2-56~図 3.1.1.2-59 に示す。また図 3.1.1.2-60 は低靱性鋼 HAZ に関し、同様に破壊靱性値 K_{Jc} 及び荷重-変位曲線を示す。さらに表 3.1.1.2-20 と表 3.1.1.2-21 は、0.16TCT 試験片による低靱性鋼母材と低靱性鋼 HAZ の破壊靱性試験結果のまとめを示す。

低靱性鋼母材の 480°C×4 時間熱処理での T_0 は 52°C、510°C×4 時間熱処理での T_0 は 58°C であり、両者に明確な差は認められなかったものの、実際の十字型試験体での試験温度に近い 40°C では 480°C×4 時間熱処理の方が破壊靱性値が低い傾向であった。一方いずれの熱処理条件でも低靱性鋼 HAZ の T_0 は 60°C であった。破壊靱性試験後の試験片の破面 SEM 観察の結果より、亀裂発生部における破面形態はへき開に粒界が混在するものであり、熱処理温度による明確な差は認めにくいものの、わずかに 510°C×4 時間の方が粒界が多い傾向であった。これらの結果から、最終熱処理条件の候補として 480°C×4 時間とした。

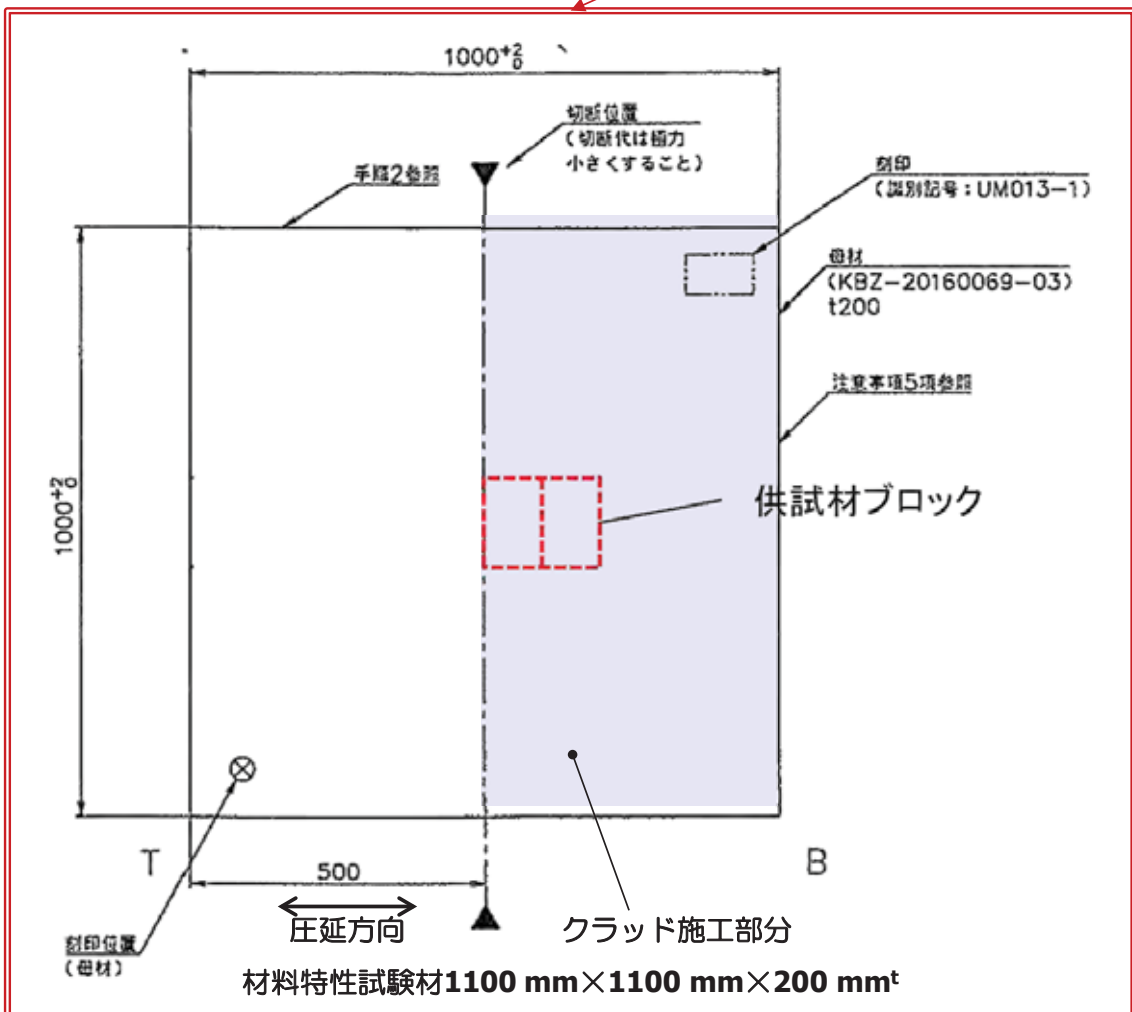
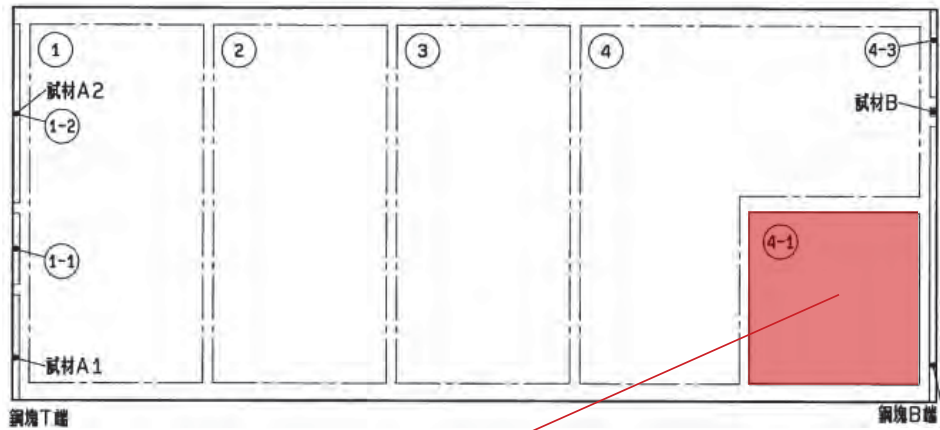


図 3.1.1.2-51 最終熱処理条件検討用供試材ブロック

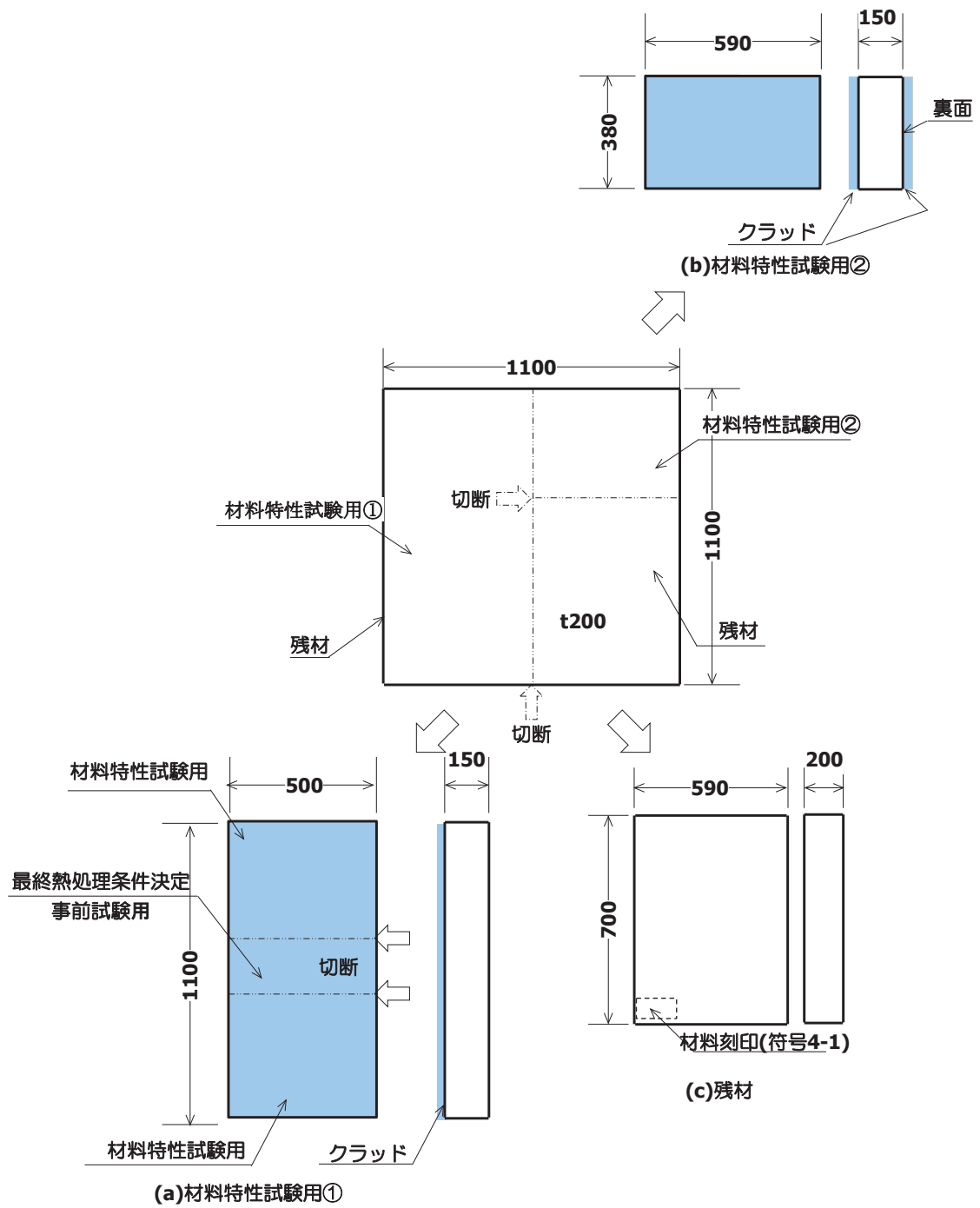


図 3.1.1.2-52 材料特性試験用試験体形状(単位: mm)

表 3.1.1.2-19 クラッド溶接条件(材料特性試験用①)

項目	材料特性試験用①	材料特性試験用②	
		表 ^{注)}	裏 ^{注)}
溶接方法	SAW	SAW	SAW
電流(A)	850	850	850
電圧(V)	29	28	28
速度(cm/分)	14	18	18
予熱温度(°C)	≥ 166	≥ 155	≥ 163
パス間温度(°C)	≤ 189	≤ 188	≤ 193

注)刻印を正面に見た時に天側が表面、地側が裏面

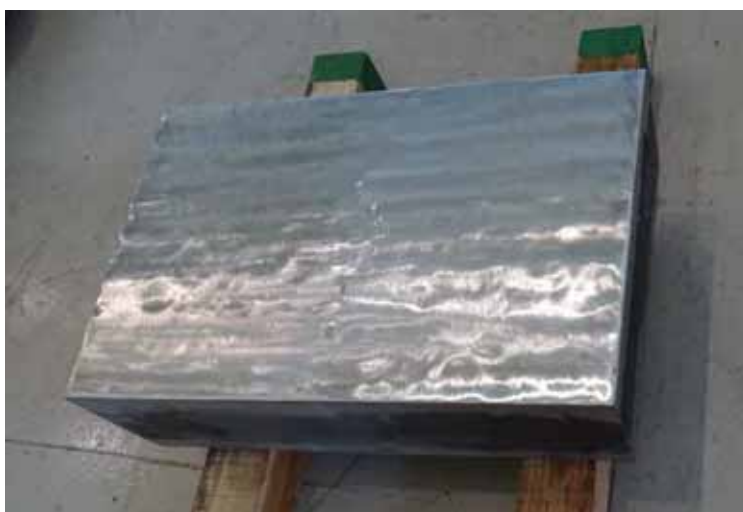


図 3.1.1.2-53 材料特性試験用試験体②の外観写真

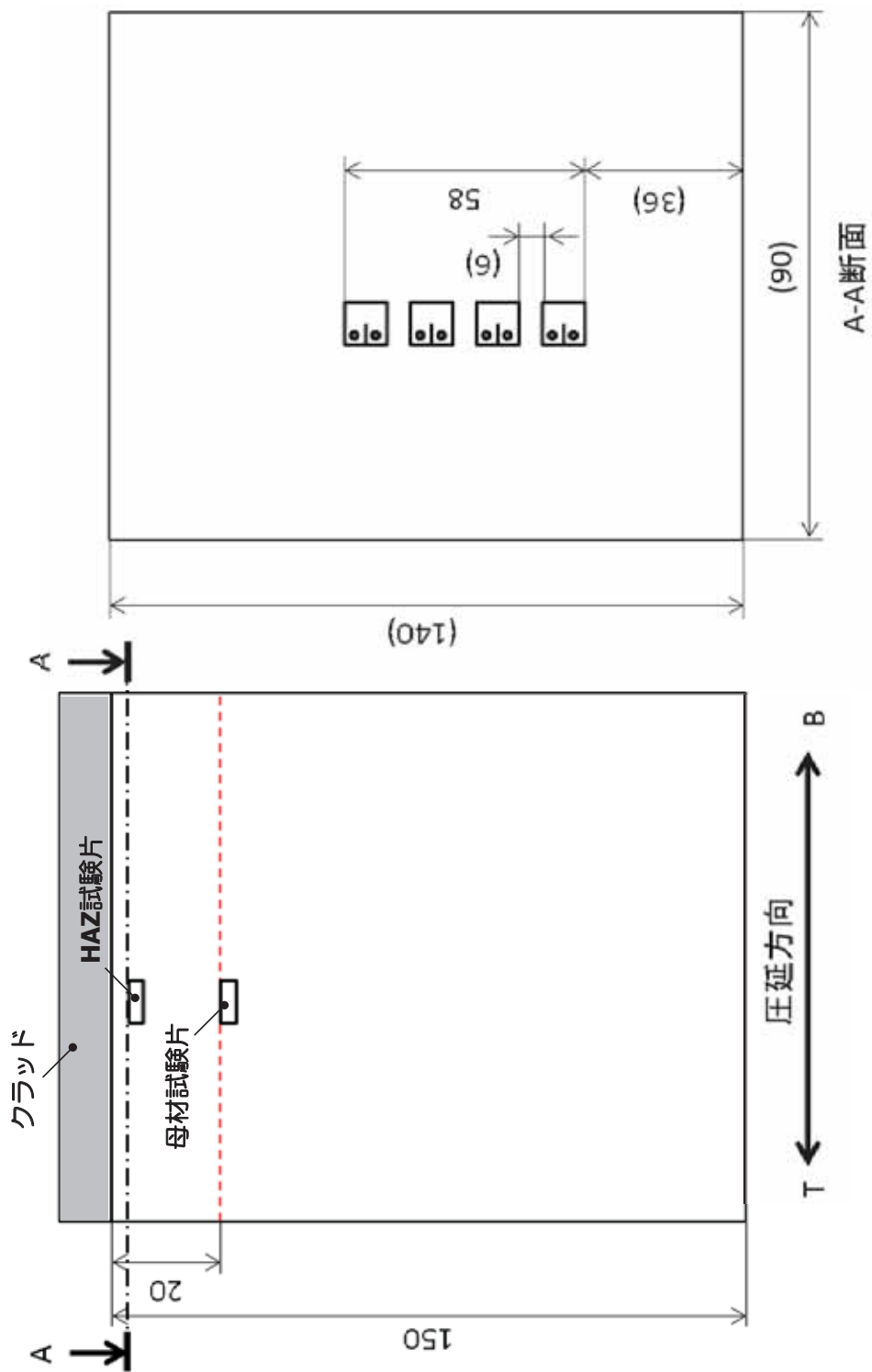


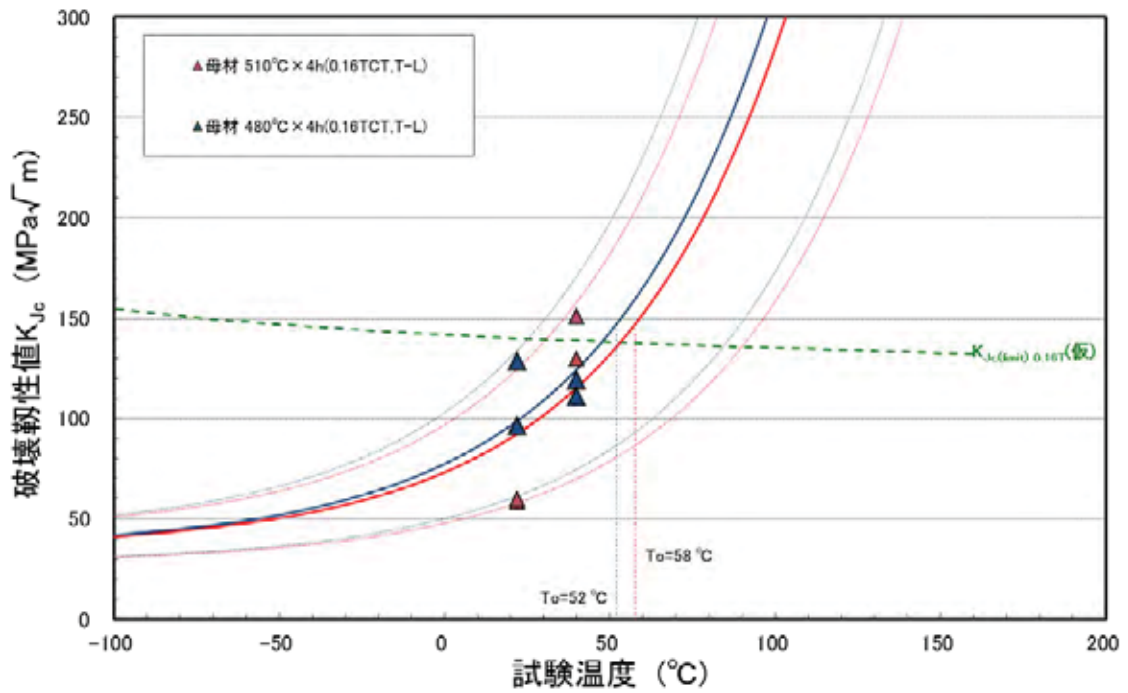
図 3.1.1.2-54 最終熱処理条件検討用供試材ブロックからの 0.16TCT 試験片採取位置

表 3.1.1.2-20 低靱性鋼(母材)の0.16TCT試験片による破壊靱性試験結果

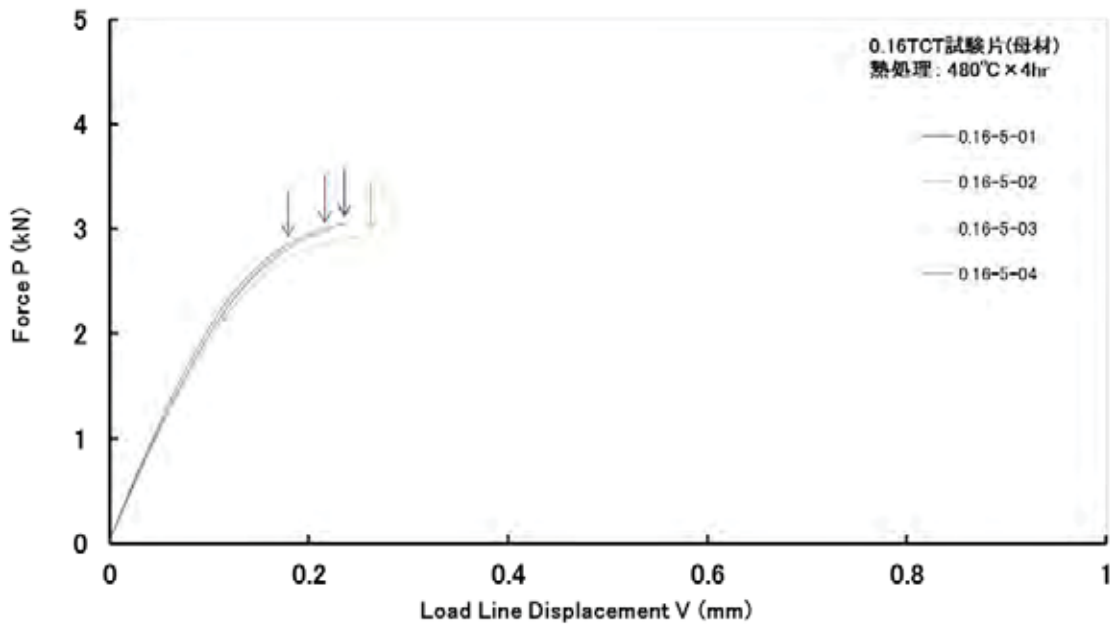
材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)				延性き裂成長量 (mm)	破断荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	破壊靱性 K _{Jc} (MPa√m)	IT相当破壊靱性 K _{Jc(IT)} (MPa√m)	K _{Jc(limit)} に対する Validity
			幅 W	厚さ B	正味厚さ									
					B _N	a ₀								
母材 480°C× 4h(0.16TCT, -L)	0.16-5-01	40	8.00	4.03	4.03	3.94	3.05	30.5	37.5	68.0	119.3	82.6	139.9	valid
	0.16-5-02	40	8.00	4.02	4.02	3.98	2.98	30.2	28.6	58.7	110.8	77.3	139.2	valid
	0.16-5-03	22	7.99	4.02	4.02	4.08	2.93	31.5	46.9	78.5	128.4	88.4	138.5	valid
	0.16-5-04	22	7.99	4.02	4.02	4.00	2.79	26.9	17.2	44.1	96.2	68.1	139.9	valid
材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)				延性き裂成長量 (mm)	破断荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	破壊靱性 K _{Jc} (MPa√m)	IT相当破壊靱性 K _{Jc(IT)} (MPa√m)	K _{Jc(limit)} に対する Validity
			幅 W	厚さ B	正味厚さ									
					B _N	a ₀								
母材 510°C× 4h(0.16TCT, -L)	0.16-4-01	40	8.01	4.02	4.02	3.91	3.29	34.7	45.9	80.7	129.9	89.3	140.6	valid
	0.16-4-02	40	8.01	4.02	4.02	4.01	3.15	34.3	74.5	108.9	150.8	102.5	138.8	invalid
	0.16-4-03	22	8.01	4.02	4.02	3.87	2.13	14.0	2.2	16.2	58.4	44.2	142.6	valid
	0.16-4-04	22	8.01	4.02	4.02	4.04	2.01	14.2	2.7	16.9	59.6	45.0	139.6	valid

表 3.1.1.2-21 低靱性鋼(HAZ)の0.16TCT試験片による破壊靱性試験結果

材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)				延性き裂成長量 (mm)	破断荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	破壊靱性 K _{Jc} (MPa√m)	IT相当破壊靱性 K _{Jc(IT)} (MPa√m)	K _{Jc(limit)} に対する Validity
			幅 W	厚さ B	正味厚さ									
					B _N	a ₀								
HAZ 480°C× 4h(0.16TCT, -L)	0.16-5H-01	0	8.00	4.02	4.02	3.97	2.34	18.2	2.8	21.0	66.7	49.5	142.4	valid
	0.16-5H-02	40	8.00	4.02	4.02	4.08	3.27	39.3	28.1	67.3	118.6	82.2	137.4	valid
	0.16-5H-03	22	8.01	4.02	4.02	4.28	2.79	33.2	11.5	44.8	97.0	68.6	135.3	valid
	0.16-5H-04	22	8.00	4.02	4.02	4.00	3.37	39.0	14.8	53.8	106.3	74.4	140.1	valid
材料	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)				延性き裂成長量 (mm)	破断荷重 P (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	破壊靱性 K _{Jc} (MPa√m)	IT相当破壊靱性 K _{Jc(IT)} (MPa√m)	K _{Jc(limit)} に対する Validity
			幅 W	厚さ B	正味厚さ									
					B _N	a ₀								
HAZ 510°C× 4h(0.16TCT, -L)	0.16-4H-01	0	8.00	4.02	4.02	4.07	2.02	14.7	1.7	16.4	58.9	44.5	140.6	valid
	0.16-4H-02	40	8.00	4.02	4.02	4.05	3.18	36.3	28.4	64.7	116.3	80.8	138.0	valid
	0.16-4H-03	22	8.00	4.02	4.02	4.03	2.72	26.0	7.5	33.5	83.9	60.3	139.6	valid
	0.16-4H-04	22	8.00	4.02	4.02	4.07	3.19	36.9	26.9	63.7	115.8	80.4	138.9	valid

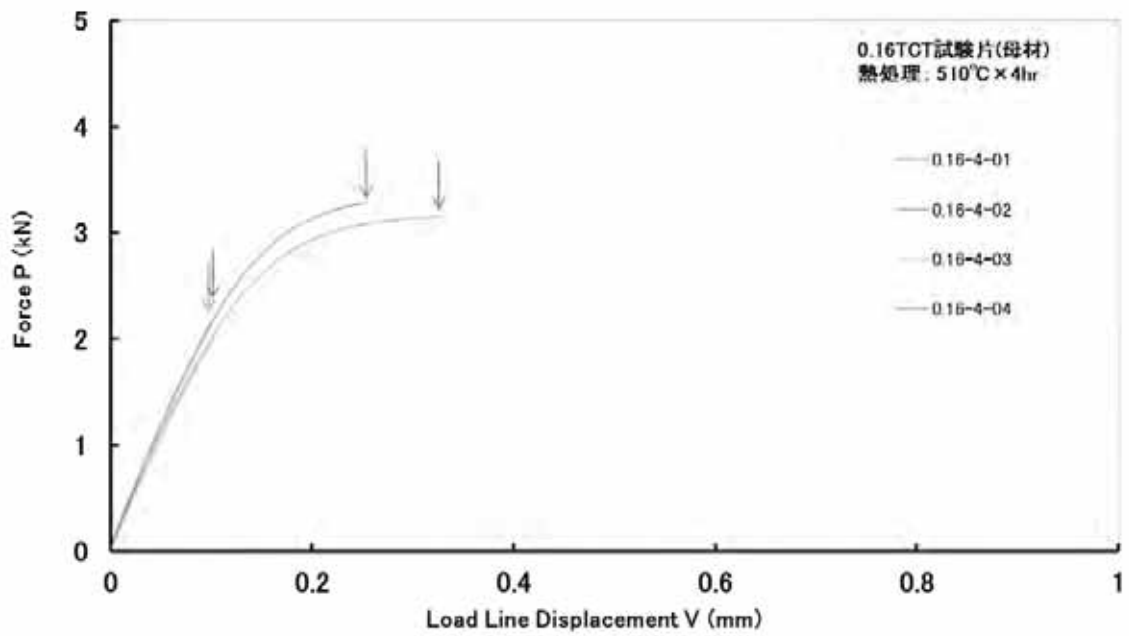


(a) 破壊靱性データ



(b) 荷重-変位曲線(480°C×4時間)

図 3.1.1.2-55(1) 低靱性鋼母材の0.16TCT試験片による破壊靱性試験結果



(c) 荷重-変位曲線(510°C×4時間)

図 3.1.1.2-55(2) 低靱性鋼母材の 0.16TCT 試験片による破壊靱性試験結果

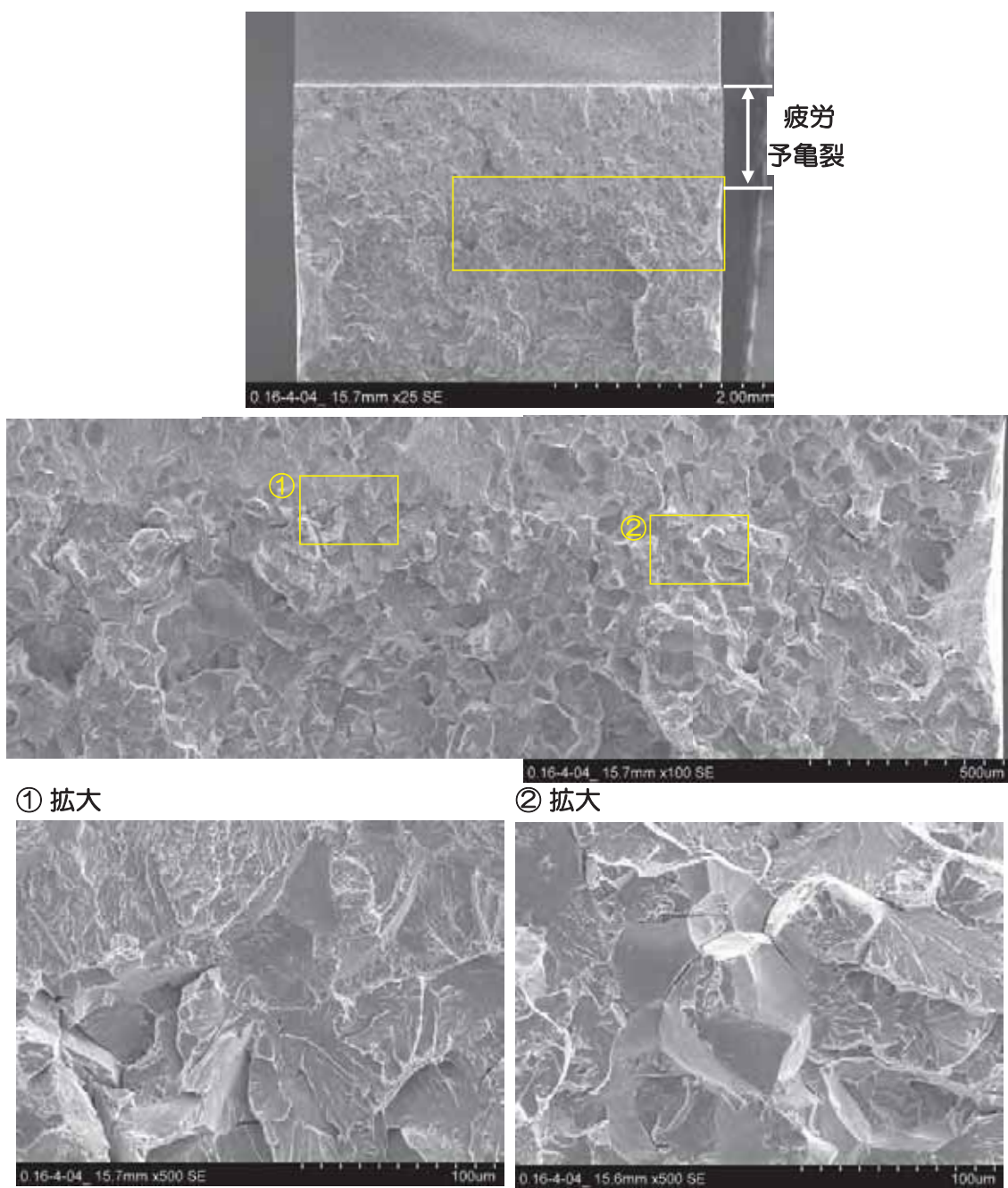


図 3.1.1.2-56 低靱性鋼母材の SEM 破面観察結果(0.16TCT 試験片)
 (熱処理: 480°C × 4 時間、符号: 0.16-5-04、試験温度: 室温)

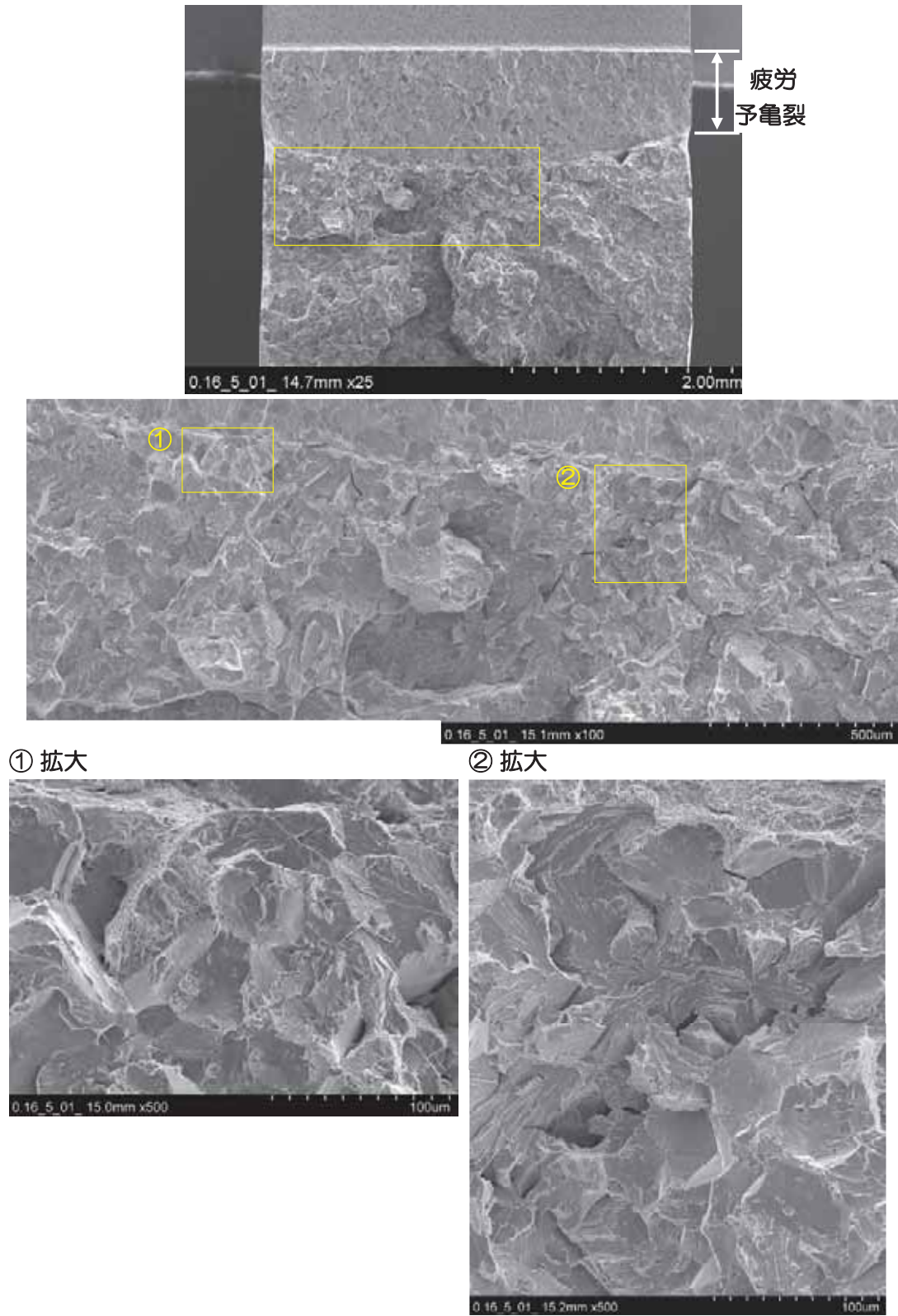


図 3.1.1.2-57 低靱性鋼母材の SEM 破面観察結果(0.16TCT 試験片)
 (熱処理: 480°C×4 時間、符号: 0.16-5-01、試験温度: 40°C)

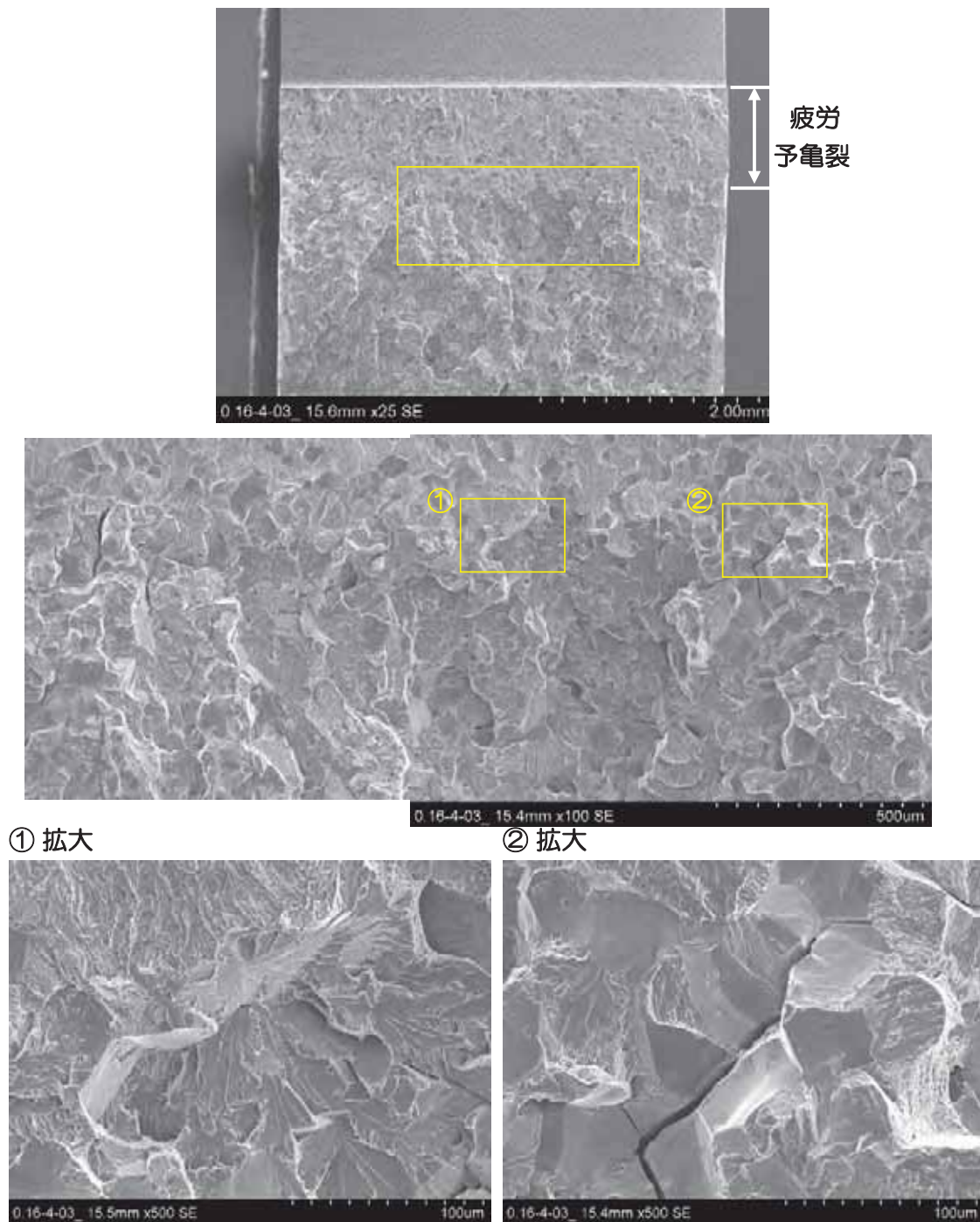


図 3.1.1.2-58 低靱性鋼母材の SEM 破面観察結果(0.16TCT 試験片)
 (熱処理: 510°C×4 時間、符号: 0.16-4-03、試験温度: 室温)

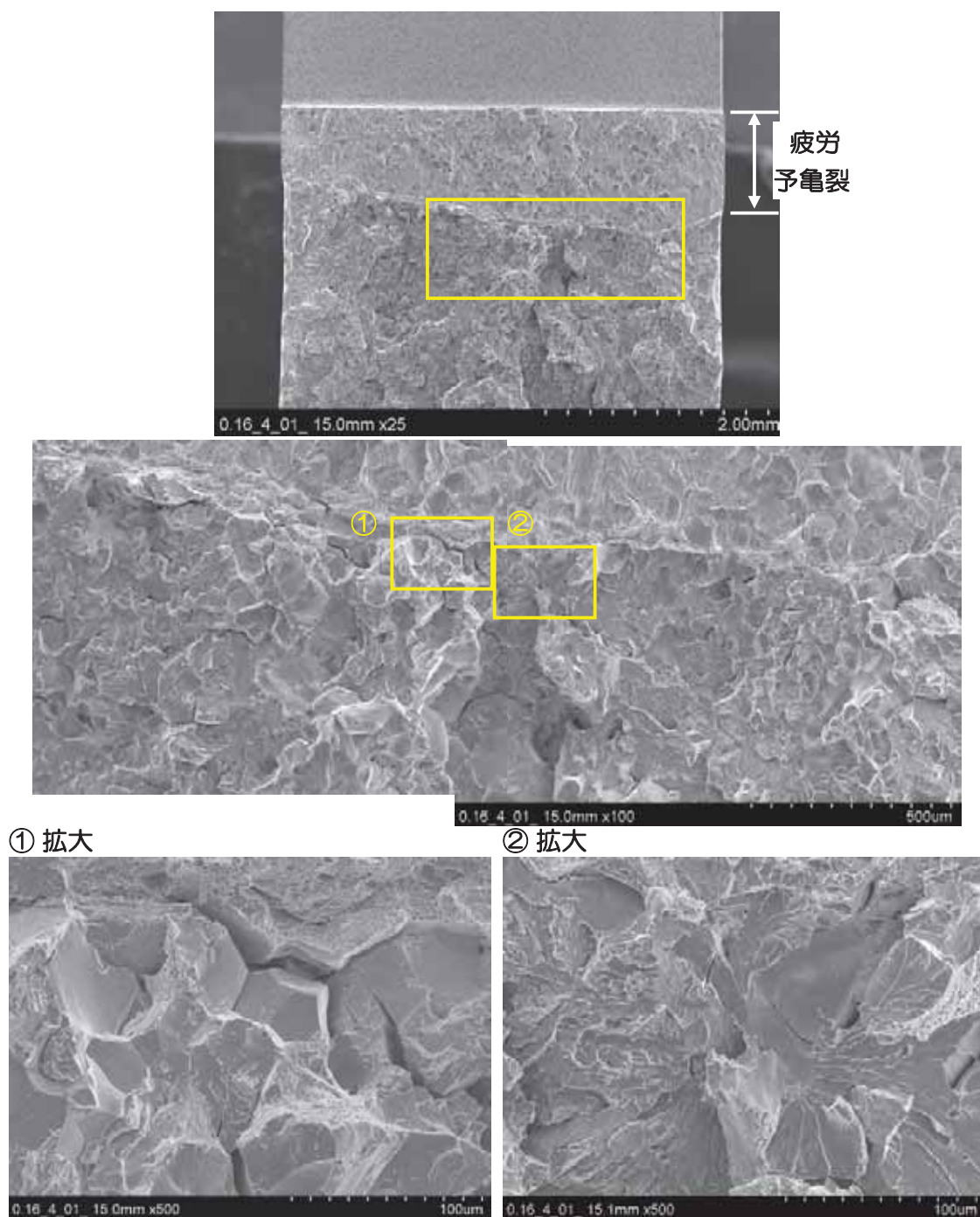
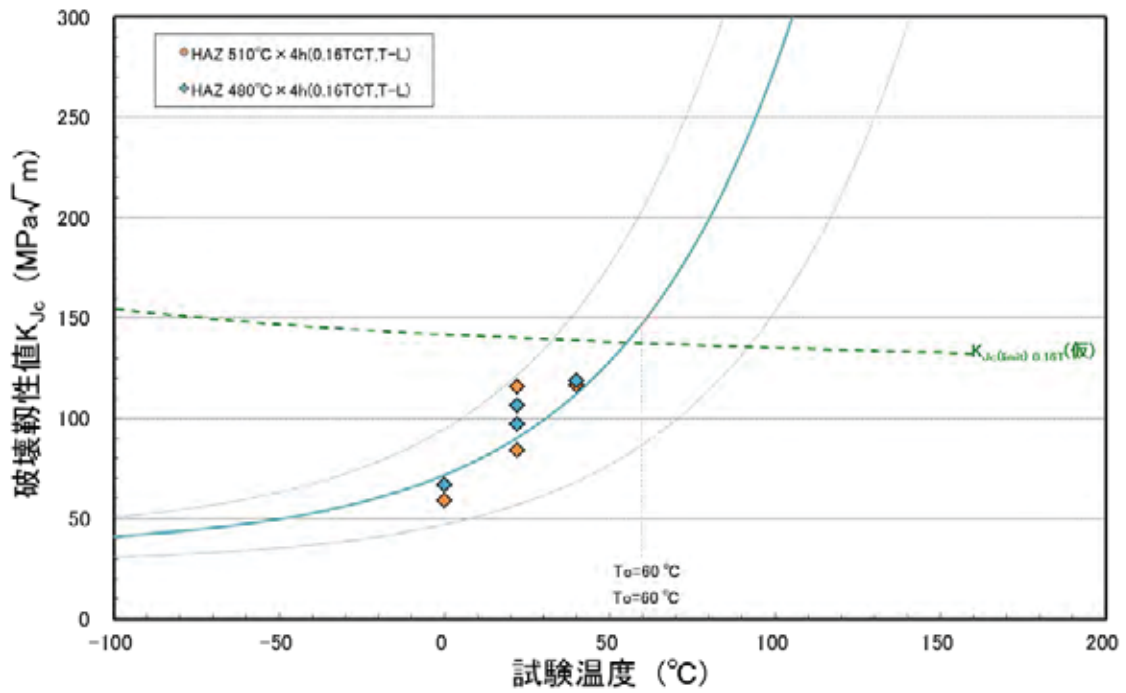
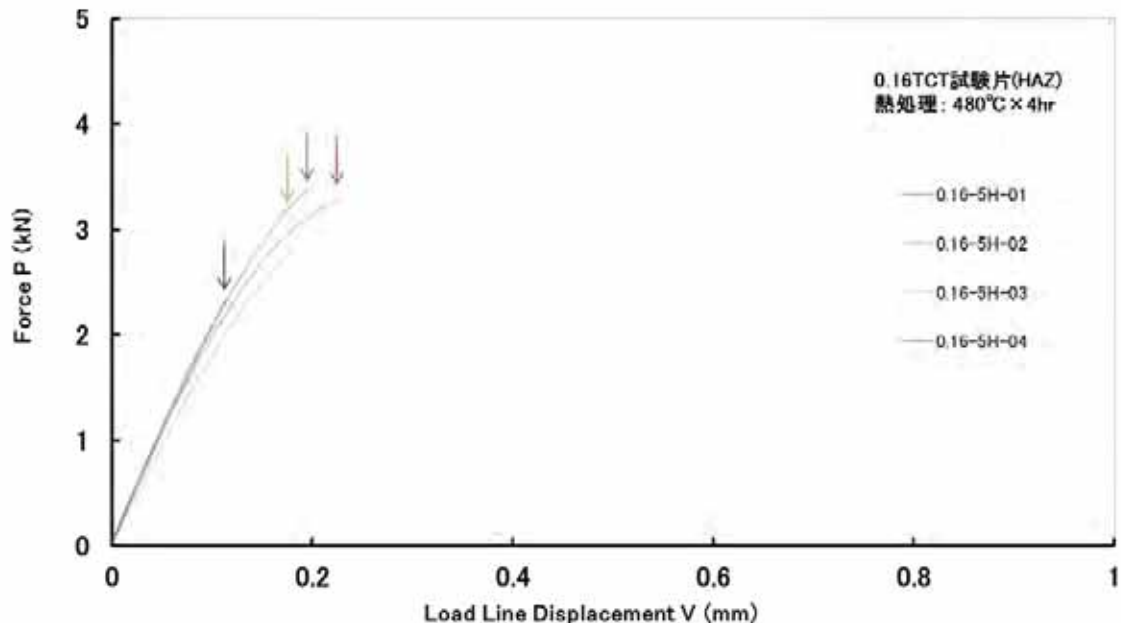


図 3.1.1.2-59 低靱性鋼母材の SEM 破面観察結果(0.16TCT 試験片)
 (熱処理: 510°C×4 時間、符号: 0.16-4-01、試験温度: 40°C)

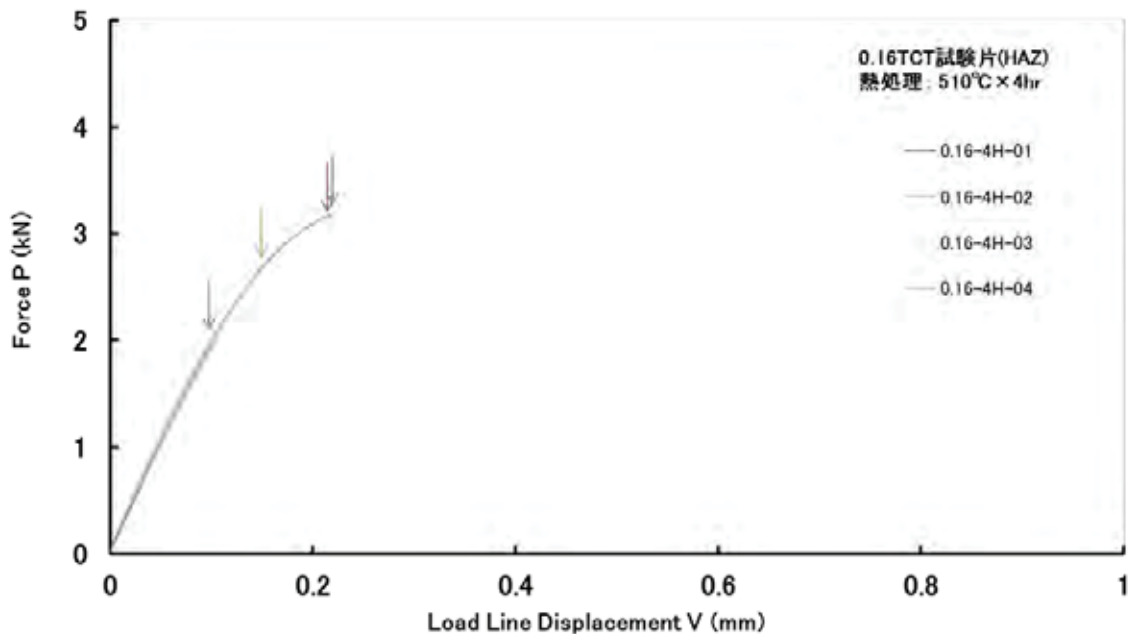


(a) 破壊靱性データ



(b) 荷重-変位曲線(480 $^{\circ}\text{C} \times 4$ 時間)

図 3.1.1.2-60(1) 低靱性鋼 HAZ の 0.16TCT 試験片による破壊靱性試験結果



(c) 荷重-変位曲線(510°C×4時間)

図 3.1.1.2-60(2) 低靱性鋼 HAZ の 0.16TCT 試験片による破壊靱性試験結果

b. 最終熱処理施工した低靱性鋼母材の材料試験

クラッド施工した低靱性鋼に 480°C×4 時間の最終熱処理を施した供試体の、圧延時の板厚(200 mm)に対して 1/4 に相当する位置から試験片を採取し、引張試験、曲げ試験、シャルピー衝撃試験、落重試験、結晶粒度測定を行った。それぞれの試験方法と結果を以下に示す。

引張試験は、JIS Z 2242(2011)に準拠し、長手軸方向が圧延方向に平行となる方向(L 方向)及び垂直になる方向(T 方向)の試験片各 1 本を用い、室温にて実施した。表 3.1.1.2-22 及び図 3.1.1.2-61 に引張試験結果を示す。L 方向、T 方向ともに、仕様値である 0.2%耐力 700 MPa 以上を満足していた。

曲げ試験は、JIS Z 2248(2014)に準拠し、長手方向が圧延方向に垂直になる方向の試験片 1 本を用い、室温で曲げ角度 30°での曲げ試験を行った。図 3.1.1.2-62 に曲げ試験結果を示す。わん曲部の外側に割れないことを確認した。

シャルピー衝撃試験は、JIS Z 2242(2005)に準拠し、長手方向が圧延方向に平行となる方向(L-S 方向)及び長手軸方向が圧延方向に垂直となる方向(T-S 方向)から採取した試験片各 18 本を用い、吸収エネルギー、横膨出量、延性破面率、 vT_{r30} 、 vT_{r50} 、 $vT_{r35mils}$ 、 vT_{rs} 、 T_{cv} 、 T_{cv-33} を測定した。図 3.1.1.2-63、図 3.1.1.2-64 及び表 3.1.1.2-23 にシャルピー衝撃試験の結果を示す。

落重試験は、JEAC 4202(1984)に準拠し、試験片の長手方向が圧延方向に垂直となる方向から採取した試験片 8 体を用い、無延性遷移温度(T_{NDT})を決定した。一部の試験片については、溶接ビートの切欠き底ではなくビードの重なり部から割れ発生していた。表 3.1.1.2-24 に試験結果を示す

結晶粒度試験は、JIS G 0551(2013)に準拠し、圧延方向に平行な断面について結晶粒度を測定した。図 3.1.1.2-65 に結晶粒度試験結果を示す。

以上、クラッド付低靱性鋼の母材及びクラッド施工による HAZ の機械的性質データ及び結晶粒度データの取得を完了した。これらのクラッド付低靱性鋼の基礎特性データを用い、引き続き十字型試験体への適用及び最終熱処理条件の検討を実施する。

表 3.1.1.2-22 低靱性鋼(最終熱処理 480℃×4 時間)の引張試験結果(母材)

試験温度	試験片採取方向	ID.	0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	伸び(%)	絞り(%)
23℃	L	TT-2-L1	796	986	17.4	47.6
	T	TT-2-C1	788	976	17.6	45.0



(a) L 方向



(b) T 方向

図 3.1.1.2-61 引張試験片破面写真




<p>曲げ角度: 30° 荷重: 237kN 亀裂の発生: 無</p>	<p>試験片外観写真</p> 
	<p>わん曲部の状況</p> 
	

図 3.1.1.2-62 曲げ試験結果



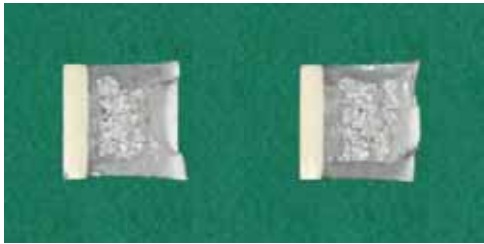

<p>試験温度: 260℃ 温度領域: USE 吸収エネルギー: 81~87J 延性破面率: 100% 横膨出量: 1.30~1.36 mm</p>	
<p>試験温度: 220℃ 温度領域: 遷移領域 吸収エネルギー: 66~90J 延性破面率: 85~95% 横膨出量: 1.02~1.34 mm</p>	
<p>試験温度: 200℃ 温度領域: 遷移領域 吸収エネルギー: 53~57J 延性破面率: 65~70% 横膨出量: 0.93~0.97 mm</p>	
<p>試験温度: 180℃ 温度領域: 遷移領域 吸収エネルギー: 35~43J 延性破面率: 40~45% 横膨出量: 0.65~0.72 mm</p>	

図 3.1.1.2-63 (1) 低靱性鋼(最終熱処理 480℃×4 時間)のシャルピー衝撃試験後の破面状況(L-S 方向)

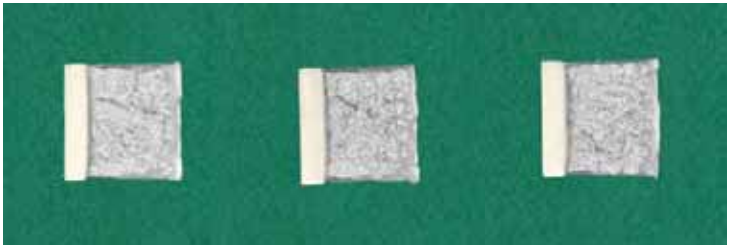


<p>試験温度: 140℃ 温度領域: 遷移領域 吸収エネルギー: 25~29J 延性破面率: 20% 横膨出量: 0.45~0.61 mm</p>	
<p>試験温度: 80℃ 温度領域: 遷移領域 吸収エネルギー: 18J 延性破面率: 0% 横膨出量: 0.26 mm</p>	
<p>試験温度: 60℃ 温度領域: 下部棚 吸収エネルギー: 9~16J 延性破面率: 0~10% 横膨出量: 0.13~0.31 mm</p>	

図 3.1.1.2-63 (2) 低靱性鋼(最終熱処理 480℃×4 時間)のシャルピー衝撃試験後の破面観察結果(L-S 方向)





<p>試験温度: 260℃ 温度領域: USE 吸収エネルギー: 79~87J 延性破面率: 100% 横膨出量: 1.17~1.39 mm</p>	
<p>試験温度: 220℃ 温度領域: 遷移領域 吸収エネルギー: 53~74J 延性破面率: 60~95% 横膨出量: 0.84~1.16 mm</p>	
<p>試験温度: 200℃ 温度領域: 遷移領域 吸収エネルギー: 53~59J 延性破面率: 65% 横膨出量: 0.82~0.95 mm</p>	
<p>試験温度: 180℃ 温度領域: 遷移領域 吸収エネルギー: 34~48J 延性破面率: 40~50% 横膨出量: 0.61~0.74 mm</p>	

図 3.1.1.2-64 (1) 低靱性鋼(最終熱処理 480℃×4 時間)のシャルピー衝撃試験後の破面観察結果(T-S 方向)





<p>試験温度: 260℃ 温度領域: USE 吸収エネルギー: 79~87J 延性破面率: 100% 横膨出量: 1.17~1.39 mm</p>	
<p>試験温度: 220℃ 温度領域: 遷移領域 吸収エネルギー: 53~74J 延性破面率: 60~95% 横膨出量: 0.84~1.16 mm</p>	
<p>試験温度: 200℃ 温度領域: 遷移領域 吸収エネルギー: 53~59J 延性破面率: 65% 横膨出量: 0.82~0.95 mm</p>	
<p>試験温度: 180℃ 温度領域: 遷移領域 吸収エネルギー: 34~48J 延性破面率: 40~50% 横膨出量: 0.61~0.74 mm</p>	

図 3.1.1.2-64 (2) 低靱性鋼(最終熱処理 480℃×4 時間)のシャルピー衝撃試験後の破面観察結果(T-S 方向)

表 3.1.1.2-23 低靱性鋼(最終熱処理 480°C×4 時間)のシャルピー衝撃試験結果まとめ

項目	L-S 方向	T-S 方向
上部棚吸収エネルギー (3 個の平均)(J)	84	83
$vT_{r30}(^{\circ}\text{C})$	172	168
$vT_{r50}(^{\circ}\text{C})$	218	232
$vT_{r35\text{mils}}(^{\circ}\text{C})$	193	203
$vT_{rs}(^{\circ}\text{C})$	184	181
$T_{cv}(^{\circ}\text{C})$	235	258
$T_{cv-33}(^{\circ}\text{C})$	202	225

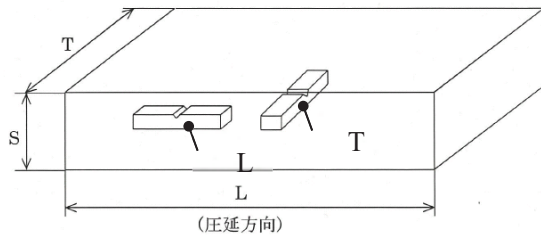










表 3.1.1.2-24 低靱性鋼の落重試験結果(採取位置: 20 mm 深さ位置(板厚 1/4 位置))

試験片 符号	採取 方向	試験温度(°C)				試験後外観写真	NDT 温度 T _{NDT} (°C)	
		105	115	120	125			
DW-2-1	T-S	●					125	
DW-2-3			○					
DW-2-4			○					
DW-2-5					⊕			
DW-2-6					○			
DW-2-7					●			
DW-2-2						⊕		
DW-2-8						⊕		

判定

- :無効 溶接ビートの切欠き底に割れが発生していない、又は、所定の試験条件が満足されていない場合
- ⊕:非破断 溶接ビートの切欠き底部に割れが発生しているが、溶接ビートを置いた面のいずれの端までも割れが進行していない場合
- :破断 溶接ビートを置いた面の片側端まで割れが発生した場合
- :破断 溶接ビートを置いた面の両側端まで割れが発生した場合


試験片 符号	結晶粒度測定に用いた組織観察写真(代表)	結晶粒度	平均結晶粒径 (μm)
GB-2-1		5.0	62.5

図 3.1.1.2-65 結晶粒度測定結果

(4) 低靱性鋼の製作に係るまとめ

実機過渡時の加圧熱衝撃(PTS)条件下において、RPVのクラッド下想定欠陥がどのようにふるまうか、またC(T)試験片等を用いた破壊評価が保守的であるかどうかの確認が必要であり、クラッド下半楕円亀裂を有する実機規模板厚の大型の十字型試験体を用い、2軸荷重負荷した想定欠陥領域に熱衝撃を与えるPTS模擬試験を計画中である。

PTS模擬試験の十字型試験体に供するため、照射脆化によって破壊靱性値が低下した状態を模擬した材料(低靱性鋼)を製作した。主な結果を以下に示す。

- ・ PTS模擬試験の十字型試験体に供するため、照射脆化によって破壊靱性値が低下した状態を模擬した材料(低靱性鋼)の仕様を検討した。
- ・ 小規模ラボ溶解材試験の結果に基づいて、実機規模に相当する溶解にて低靱性鋼の母材を製作した。
- ・ 低靱性鋼母材表面部にステンレスクラッド施工を行いクラッド付低靱性鋼を製作した。
- ・ クラッド付低靱性鋼母材の破壊靱性試験結果に基づき、最終熱処理条件として $480^{\circ}\text{C}\times 4$ 時間を選定した。
- ・ 十字型試験体への適用及び最終熱処理条件の検討に資するため、最終熱処理後の低靱性鋼母材及びクラッド施工による熱影響(HAZ)部の機械的性質等の基礎特性データ取得を完了した。

製作した低靱性鋼は、PTS模擬試験及びその予備検討試験において、引き続き活用を図る予定である。

3.1.1.3 タブ板用材料・溶接材料の調達

(1)調達結果

十字型試験体の製作に用いるタブ板用鋼板として、幅(W)が約 2,000 mm、長さ(L)が約 6,000 mm、厚さ(t)が約 200 mm の SQV2B(JIS 材)を 1 枚調達した。化学成分を表 3.1.1.3-1 に、また機械的性質を表 3.1.1.3-2 に示す。

十字型試験体とタブ板を溶接する溶接材料として、タブ板(SQV2B/JIS 材)の強度仕様値(0.2%耐力、引張強さ)以上となるような低合金耐熱鋼用である Mn-Mo 鋼用溶接材料を 1500 kg 調達した。溶接金属の成分は表 3.1.1.3-3、機械的性質は表 3.1.1.3-4 に示す通りである。

(2)本章まとめ

PTS 模擬試験用十字型試験体の製作に用いるタブ板用鋼板及び溶接材料の調達を完了した。

表 3.1.1.3-1 タブ板用鋼板の化学成分

項目	化学成分(製品分析)(wt.%)						
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo
仕様値	0.25 以下	0.15~ 0.40	1.15~ 1.50	0.020 以下	0.020 以下	0.40~ 0.70	0.45~ 0.60
実績値	0.19	0.23	1.41	0.007	0.001	0.67	0.58

表 3.1.1.3-2 タブ板用鋼板の機械的性質

試験項目	項目	仕様値	実績値
引張特性 (試験温度: 室温)	0.2%耐力(MPa)	≥480	552
	引張強さ(MPa)	620~790	692
	伸び(%)	≥13	24
シャルピー 衝撃特性 (試験温度: -20℃)	吸収エネルギー	3個の平均(J)	≥47 ^{*1}
		個別の値(J)	≥40 ^{*1}
			169
			178、175、153

※1: 仕様値は室温

表 3.1.1.3-3 タブ板溶接材料の化学成分

項目	化学成分(wt.%)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
仕様値	≤0.15	≤1.00	≤1.60	≤0.03	≤0.03	≤0.050	0.40~ 0.65
実績値	0.07	0.61	1.35	0.01	0.01	0.40	0.56

表 3.1.1.3-4 タブ板溶接材料の機械的性質

項目	引張強さ ^{※)} (MPa)	0.2%耐力 ^{※)} (MPa)	伸び(%) ^{※)}	吸収エネルギー(J) ^{※※)}	
				最低値	3個の平均
仕様値	≥620	≥530	≥17	≥20	≥27
実績値	734	655	23	61、87、64	71

※)試験温度: 室温 ※※) 試験温度: -18℃

3.1.2 基礎試験

PTS 模擬試験の準備として、C(T)試験片等により材料の基本的な材料特性を取得すると共に、WPS 効果の確認試験、及び半楕円亀裂を付与した平板試験体により亀裂の拘束効果やクラッドの影響を確認するための試験を実施する。また、これら試験に並行してローカルアプローチ(LA)法による破壊確率の評価手法の整備を行う。

平成 29 年度は PTS の温度域における高温予荷重(WPS)効果の確認を行うと共にローカルアプローチ解析を実施し、クラッド下半楕円亀裂を付与した平板試験体による破壊試験に着手した。なお、3.1.1 供試材の製作において述べたように、クラッド溶接後熱処理の検討を引き続き実施しているため、基本的な材料特性は平成 30 年度に評価する。

3.1.2.1 高温予荷重効果確認試験

WPS 効果とは、高温時に予め荷重を受けた場合に、破壊靱性が見かけ上増加する現象である。JEAC4206-2016 においては、応力拡大係数が低下する過程で破壊しないとして詳細評価に取り入れられている。平成 28 年度までに PWR 比較標準材を用いて低温で WPS 試験を行い、試験片の寸法効果や WPS 効果の工学的評価モデルの適用性に関する検討を実施した。平成 29 年度は、低靱性鋼を用いて PTS の温度域における WPS 効果の確認試験を実施した。

(1) 試験条件の検討

試験に用いた低靱性鋼の化学成分を表 3.1.2.1-1 に、C(T)試験片を用いた破壊試験の試験マトリクスを表 3.1.2.1-2 に示す。2 種類の熱処理条件(短時間 SC 材及び 525°C×8h 材)の低靱性鋼を対象に、単一温度での単調負荷を加える破壊試験又は温度変化及び予荷重を加える破壊試験を実施した。

短時間 SC 材及び 525°C×8h 熱処理材については、いずれも破壊靱性値に及ぼす温度依存性を確認するため、単一温度で単調負荷での試験を 2 温度で実施した。さらに、525°C×8h 熱処理材については、温度変化及び予荷重の影響について確認するため、Load⇒Unload⇒Cool⇒Fracture (LUCF) の負荷波形の破壊試験を実施した。LUCF の予荷重時の温度と負荷レベル及び再負荷時の温度については、先行して実施した単一温度での単調負荷による破壊試験の結果を踏まえて、温度変化及び予荷重の影響が明確に確認できると予想される条件に設定した。

破壊試験は、表 3.1.2.1-2 に示すケース 1～ケース 5 の 5 つの各試験条件に対して 4 体ずつ、合計 20 体の C(T)試験片について実施した。

表 3.1.2.1-1 低靱性鋼の化学成分(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	Mo	V	Al
0.29	0.36	1.47	0.058	0.001	0.47	0.11	0.20	0.61	0.003	0.005

表 3.1.2.1-2 低靱性鋼 C(T)試験片を用いた破壊試験の試験マトリクス

試験	熱処理	試験片	負荷波形	予荷重条件		破壊条件 (再荷重条件)	試験数
				温度 T_{WPS} (°C)	目標負荷レベル K_{JWPS} (MPa \sqrt{m})	温度 T_{FRAC} (°C)	
ケース 1	短時間 SC 材	0.4T-C(T)	単一温度 単調負荷	—	—	室温	4
ケース 2				—	—	150 又は 200	4
ケース 3	525°C× 8h 材	0.4T-C(T)	単一温度 単調負荷	—	—	40	4
ケース 4				—	—	80	4
ケース 5			LUCF*	150	90	5	4

*: Load(負荷)⇒Unload(除荷)⇒Cool(冷却)⇒Fracture(破壊)

(2) 試験片採取位置および疲労予き裂導入条件

熱処理(PWHT)済のクラッド付き低靱性鋼の鋼板から T-S 方向となるように C(T)試験片を採取した。試験片の採取位置は、試験片のスリット先端部がクラッドと母材の境界部から約 10mm となるような位置とした。C(T)試験片の採取前に、予めクラッド付き低靱性鋼の断面マクロ組織観察を行い、クラッドと母材の境界部を明確にした上で、採取位置を決定した。

図 3.1.2.1-1 に 0.4T-C(T)試験片の形状及び寸法を示す。また、図 3.1.2.1-2 にクラッド付き低靱性鋼の鋼板からの C(T)試験片の採取位置を、図 3.1.2.1-3 に採取要領の例をそれぞれ示す。さらに、C(T)試験片の採取前に実施したクラッド付き低靱性鋼鋼板の断面マクロ組織観察結果の例を図 3.1.2.1-4 に示す。

試験片の採取後に、以下に示す条件で疲労予亀裂を導入した。

- ・ 応力比 : $R \leq 0.1$ (正弦波)
- ・ 導入初期の最大 K 値 : $K_{max} \leq 20 \text{ MPa}\sqrt{m}$

- ・ 最終段階の最大 K 値 : $K_{max} \leq 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$
- ・ 最終段階で導入する亀裂長さ : 0.2mm 以上
- ・ 疲労予亀裂長さ : 約 1.3mm
- ・ 周波数 : 10～30Hz

表 3.1.2.1-3 に、各試験片の疲労予亀裂導入記録を示す。

疲労予亀裂導入後に、試験片の両側面に板厚の約 10%の深さのサイドグループを加工した。

表 3.1.2.1-4 に、各試験片について試験片製作後の寸法記録を示す。製作した 20 体の C(T) 試験片の主要部の寸法は、一部の試験片を除いて、いずれも寸法公差内に収まっており、特に問題ないことを確認した。

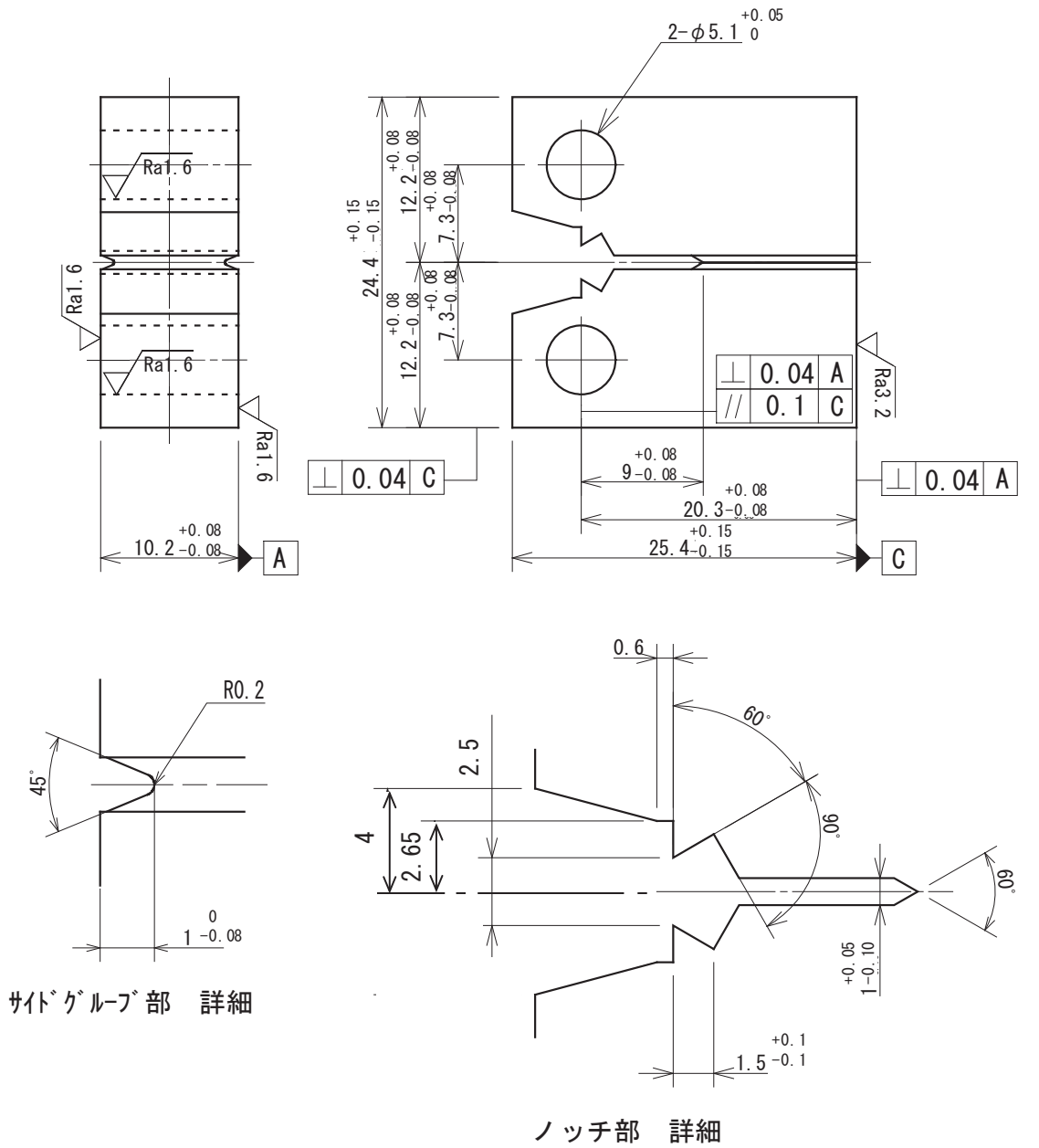
(3) 破壊靱性試験及び WPS 試験法

C(T)試験片を用いた破壊試験は、基本的に JEAC4216-2015^(3.1.2.1-1)に準拠して実施した。なお、表 3.1.2.1-2 に示した 5 ケースのうち、ケース 5 の LUCF 波形の試験については、厳密には該当する試験規格がないものの、適用可能な範囲については JEAC4216-2015 に準じて試験を行った。いずれの試験も、室温大気中で初期の K 値の増加速度が $0.1 \sim 2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m/s}}$ (荷重から算出する K 値)の範囲となるよう試験機のストローク速度を決定した後、変位制御で実施した。

試験後の破壊靱性の評価には、以下の物性値を使用した。

- ・ ヤング率 : JEAC 4216-2015 の解説 MCT-1300 に従い、次式で算出
 $E = 202,100 - 62.6T$ (MPa) , T :温度(°C)
- ・ ポアソン比 : 0.3 (温度によらず一定とする)
- ・ 降伏強さ : 室温の降伏強さ σ_y を 700 MPa とし WES1108-1995^(3.1.2.1-2)に記載の降伏強さの温度依存性式により算出

なお、525°C×8h 材のケース 3 及びケース 4 で得られた破壊靱性値 K_{Jc} を用いて、JEAC 4216-2015 の複数試験温度法に基づきマスターカーブの参照温度 T_0 を算出した。



単位：mm

注) サイドグループは、疲労予亀裂導入後に加工。

図 3.1.2.1-1 0.4T-C(T)試験片の形状及び寸法

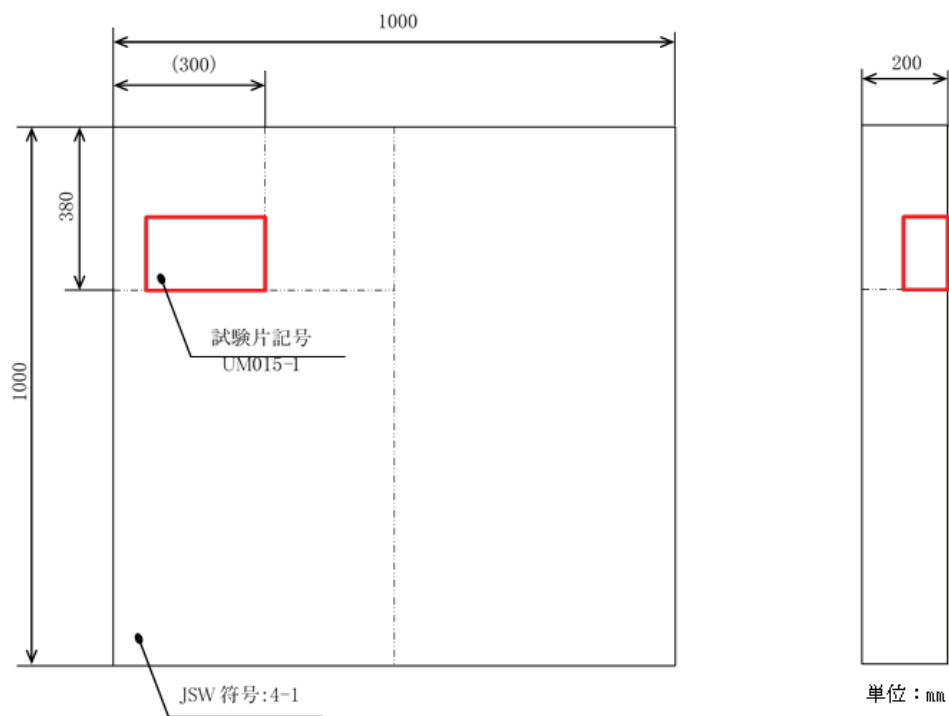


図 3.1.2.1-2 クラッド付き低靱性鋼鋼板の概要

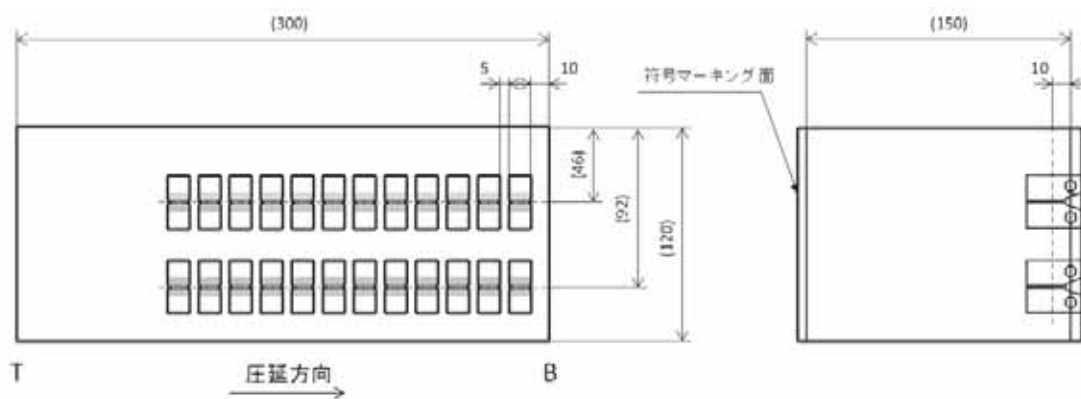


図 3.1.2.1-3 クラッド付き低靱性鋼鋼板からの 0.4T-C(T)試験片の採取要領

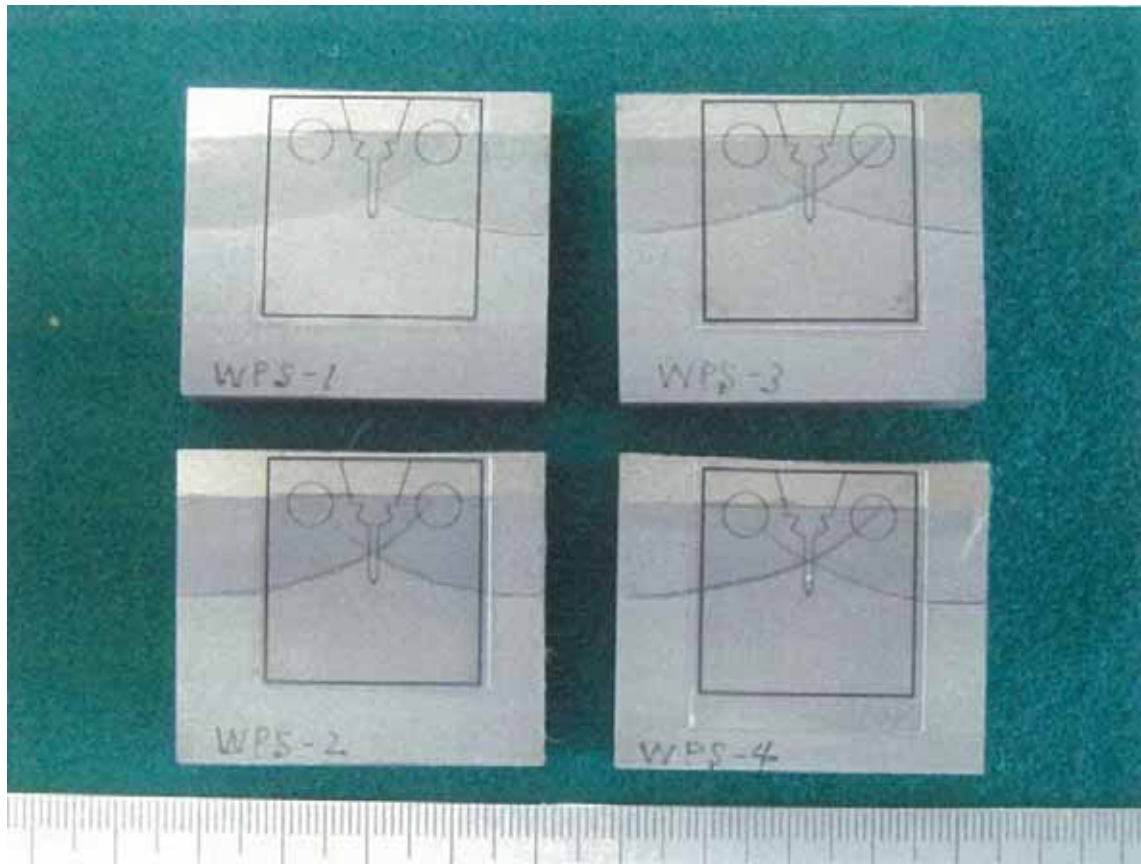


図 3.1.2.1-4 0.4T-C(T)試験片の採取要領前に実施した断面マクロ組織観察の例

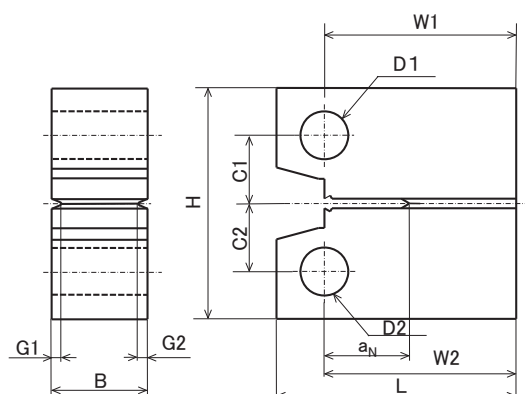
表 3.1.2.1-3 (1) 0.4T-C(T)試験片への疲労予亀裂導入記録 (短時間 SC 材)

供試材	試験片 符号	最大荷重 P_{max} (N)	最小荷重 P_{min} (N)	周波 数 (Hz)	亀裂長さ (mm)		繰返し数 (回)
					a_1	a_2	
低靱性 鋼 (短時間 SC 材)	WPS-1-1	3100	310	30	0.4	0.4	49,000
		2600	260	30	0.8	0.8	75,000
		2200	220	30	1.3	1.3	110,000
	WPS-1-2	3100	310	30	0.3	0.5	40,800
		2600	260	30	0.9	0.8	57,200
		2200	220	30	1.3	1.3	115,600
	WPS-2-1	3100	310	30	0.2	0.6	40,000
		2600	260	30	0.9	0.7	70,000
		2200	220	30	1.3	1.3	103,000
	WPS-2-2	3100	310	30	0.3	0.7	50,000
		2600	260	30	0.9	0.8	70,000
		2200	220	30	1.3	1.3	103,000
	WPS-2-12	3100	310	30	0	0.9	24,400
		2600	260	30	0.8	1.0	29,300
		2200	220	30	1.3	1.4	96,500
	WPS-1-12	3100	310	30	0.4	0.5	54,500
		2600	260	30	0.8	0.8	77,100
		2200	220	30	1.3	1.3	110,500
	WPS-1-9	3100	310	30	0.4	0.5	57,200
		2600	260	30	0.8	0.8	87,900
		2200	220	30	1.3	1.3	123,800
	B10-01	3100	310	30	0.4	0.4	46,700
		2600	260	30	0.8	0.8	64,500
		2200	220	30	1.3	1.3	92,500

表 3.1.2.1-3 (2) 0.4T-C(T)試験片への疲労予亀裂導入記録 (525°C×8h 材)

供試材	試験片 符号	最大荷重 P_{max} (N)	最小荷重 P_{min} (N)	周波 数 (Hz)	亀裂長さ (mm)		繰返し数 (回)
					a_1	a_2	
低靱性 鋼 (525°C ×8h 材)	5A-1	3100	310	30	0.4	0.4	50,000
		2600	260	30	0.8	0.9	65,000
		2200	220	30	1.3	1.3	88,000
	5A-2	3100	310	30	0.5	0.4	36,000
		2600	260	30	0.9	0.7	46,000
		2200	220	30	1.3	1.4	73,000
	5A-3	3100	310	30	0.4	0.5	35,000
		2600	260	30	0.8	0.8	51,000
		2200	220	30	1.3	1.3	79,000
	5A-4	3100	310	30	0.3	0.5	53,000
		2600	260	30	0.8	0.8	68,000
		2200	220	30	1.3	1.3	94,000
	5A-5	3100	310	30	0.3	0.4	36,000
		2600	260	30	0.9	0.7	54,000
		2200	220	30	1.4	1.3	83,000
	5A-6	3100	310	30	0.4	0.4	33,000
		2600	260	30	0.8	0.7	46,000
		2200	220	30	1.3	1.3	79,000
	5A-7	3100	310	30	0.3	0.4	41,000
		2600	260	30	0.7	0.8	62,000
		2200	220	30	1.3	1.3	92,500
	5A-8	3100	310	30	0.4	0.4	44,000
		2600	260	30	0.8	0.8	59,000
		2200	220	30	1.3	1.3	82,000
	WPS-1	3100	310	30	0.3	0.5	46,500
		2600	260	30	0.8	0.8	69,300
		2200	220	30	1.3	1.3	96,100
	WPS-2	3100	310	30	0.4	0.4	54,100
		2600	260	30	0.8	0.8	72,000
		2200	220	30	1.3	1.3	100,300
	WPS-3	3100	310	30	0.4	0.4	40,900
		2600	260	30	0.8	0.8	60,900
		2200	220	30	1.3	1.3	89,200
	WPS-4	3100	310	30	0.3	0.5	46,100
		2600	260	30	0.8	0.8	64,900
		2200	220	30	1.4	1.3	95,900

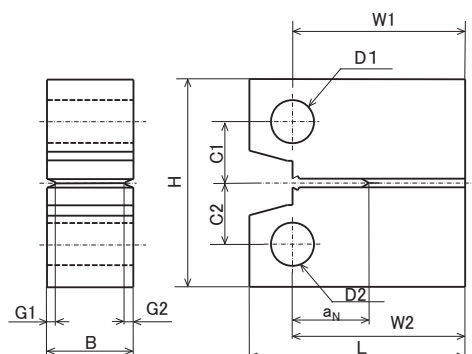
表 3.1.2.1-4 (1) 製作した 0.4T-C(T)試験の主要部寸法の記録 (短時間 SC 材)



試験片符号	主要部寸法 (mm) *1											
	H	L	W ₁	W ₂	B	a _N	C ₁	C ₂	D ₁	D ₂	G ₁	G ₂
	24.4± 0.15	25.4± 0.15	20.3± 0.08	20.3± 0.08	10.2± 0.08	9.0± 0.08	7.3± 0.08	7.3± 0.08	φ 5.1 ^{+0.05} ₋₀	φ 5.1 ^{+0.05} ₋₀	1 ⁺⁰ _{-0.08}	1 ⁺⁰ _{-0.08}
WPS-1-1	24.43	25.44	20.30	20.31	10.23	8.93	7.30	7.30	5.11	5.11	0.94	0.93
WPS-1-2	24.43	25.44	20.30	20.29	10.23	8.96	7.30	7.30	5.11	5.11	0.95	0.95
WPS-2-1	24.43	25.43	20.29	20.29	10.24	8.93	7.30	7.30	5.11	5.11	0.94	0.96
WPS-2-2	24.43	25.43	20.31	20.31	10.24	8.97	7.30	7.30	5.11	5.11	0.95	0.94
WPS-2-12	24.42	25.42	20.29	20.30	10.25	8.98	7.30	7.30	5.11	5.11	0.95	0.95
WPS-1-12	24.43	25.43	20.31	20.31	10.24	8.94	7.30	7.30	5.11	5.11	0.94	0.92
WPS-1-9	24.42	25.44	20.31	20.31	10.24	8.94	7.30	7.30	5.11	5.12	0.95	0.95
B10-01	24.44	25.47	20.31	20.31	10.23	8.98	7.31	7.30	5.11	5.11	0.96	0.95

注)*: 主要部寸法の記号は下図のとおり。

表 3.1.2.1-4 (2) 製作した 0.4T-C(T)試験の主要部寸法の記録 (525°C×8h 材)



試験片符号	主要部寸法 (mm) *1											
	H	L	W ₁	W ₂	B	a _N	C ₁	C ₂	D ₁	D ₂	G ₁	G ₂
	24.4± 0.15	25.4± 0.15	20.3± 0.08	20.3± 0.08	10.2± 0.08	9.0± 0.08	7.3± 0.08	7.3± 0.08	φ 5.1 +0.05 -0	φ 5.1 +0.05 -0	1 +0 -0.08	1 +0 -0.08
5A-1	24.42	24.96*2	20.30	20.30	10.23	8.94	7.31	7.30	5.11	5.11	0.94	0.94
5A-2	24.42	25.43	20.30	20.31	10.23	8.94	7.31	7.30	5.11	5.11	0.93	0.95
5A-3	24.42	25.42	20.30	20.30	10.23	8.93	7.31	7.30	5.11	5.11	0.94	0.94
5A-4	24.42	25.41	20.31	20.30	10.24	8.93	7.31	7.30	5.11	5.11	0.94	0.94
5A-5	24.42	25.43	20.31	20.30	10.23	8.93	7.30	7.31	5.11	5.11	0.94	0.93
5A-6	24.42	25.41	20.30	20.30	10.23	8.93	7.31	7.30	5.11	5.11	0.93	0.93
5A-7	24.42	24.92*2	20.30	20.31	10.24	8.94	7.31	7.31	5.11	5.11	0.94	0.95
5A-8	24.42	25.43	20.30	20.30	10.23	8.93	7.30	7.31	5.11	5.11	0.94	0.94
WPS-1	24.43	25.45	20.33	20.32	10.24	8.97	7.30	7.29	5.11	5.11	0.95	0.96
WPS-2	24.43	25.45	20.32	20.32	10.24	8.97	7.30	7.29	5.11	5.11	0.95	0.95
WPS-3	24.43	25.46	20.33	20.33	10.24	8.96	7.30	7.29	5.11	5.11	0.95	0.95
WPS-4	24.43	25.46	20.31	20.32	10.24	8.98	7.29	7.31	5.11	5.11	0.94	0.96

注) *1: 主要部寸法の記号は下図のとおり。

*2: 試験片を採取した位置での供試材のクラッド厚さの関係でわずかに寸法公差の範囲を下回っているが、試験上はほとんど影響ないと考えて使用。

(4) 試験結果

短時間 SC 材の単一温度における単調負荷による破壊試験について、ケース 1 の試験(室温)で得られた荷重－荷重線変位の関係を図 3.1.2.1-5 に、ケース 2 の試験(150°C及び 200°C)で得られた荷重－荷重線変位の関係を図 3.1.2.1-6 に示す。

ケース 1 の試験(室温)では、試験を実施した 4 体のすべての試験片について、単調負荷の途中で荷重－荷重線変位線図において不連続な荷重の低下と変位の増加(ポップイン)が認められたため、ポップイン発生時点で破壊靱性を評価した。一方、ケース 2 の試験(150°C及び 200°C)では、150°Cで実施した 2 体(試験片符号：B10-01 及び WPS-2-12)の試験片でポップイン発生が認められたため、ケース 1 と同様にポップイン発生時点で破壊靱性を評価したが、残りの 2 体については、最終破断に至るまでにポップインは認められなかったため、最終破断時の条件に対して破壊靱性を評価した。

表 3.1.2.1-5 に短時間 SC 材の破壊試験の結果を、図 3.1.2.1-7 に得られた破壊靱性 K_{JC} の温度依存性を示す。短時間 SC 材については、ポップインが発生した試験片の比率が大きかったため、評価された破壊靱性値は低めの傾向であった。特に、ケース 1 の室温のデータは 4 体すべてがポップイン発生時点の破壊靱性で評価されているため、破壊靱性値としては非常に低めであり、データのばらつきも小さい傾向であった。

図 3.1.2.1-8 に破壊試験後の試験片の破面外観状況を示す。ケース 2 の試験(150°C及び 200°C)では、疲労予亀裂に対して直交する方向に偏析部に沿って生じたと推定されるマクロな割れが確認され、特異な破壊形態であった。

525°C×8h 材の単一温度における単調負荷による破壊試験について、ケース 3 の試験(40°C)で得られた荷重－荷重線変位の関係を図 3.1.2.1-9 に、ケース 4 の試験(80°C)で得られた荷重－荷重線変位の関係を図 3.1.2.1-10 示す。また、ケース 5 の LUCF 負荷波形の破壊試験における荷重－荷重線変位の関係を図 3.1.2.1-11 示す。

ケース 3 及びケース 4 の試験では、短時間 SC 材のようにポップインは認められなかったため、最終破断時の条件に対して破壊靱性を評価した。また、ケース 3 及びケース 4 の結果を受けて、ケース 5 の試験では、高温予荷重効果が明確に現れるように、150°Cで $K_{JWPS}=90\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ の予荷重を付与し、5°Cで再負荷を行った結果、すべての試験片について 150°Cでの予荷重で破壊は生じず、除荷及び 5°Cでの再負荷が問題なく試験が実施できた。表 3.1.2.1-6 にケース 3 及びケース 4 の破壊試験の結果を、表 3.1.2.1-7 にケース 5 の破壊試験の結果をそれぞれ示す。また、図 3.1.2.1-12 にケース 3 及びケース 4 の試験で得られた破壊靱性 K_{JC} の温度依存性とケース 5 の破壊試験の予荷重時の K_J 及び再負荷時の破壊靱性 K_{JFRAC} を示す。ケース 3 及びケース 4 のデータより、 K_{JC} の温度依存性の傾向は明確には認められなかったが、これらのデータからマスターカーブの参照温度を評価した結果 T_0 は 54°C と評価された。

また、ケース 5 の LUCF 負荷波形の破壊試験における 5°Cでの破壊靱性値は、いずれも、このマスターカーブ($T_0=54^\circ\text{C}$)の 95%破損確率の線を上回っており、高温予荷重効果が明確に認められた。今回のケース 5 の破壊試験で得られたデータを、これまでに原子炉圧力容

器鋼等に対して報告されている高温予荷重効果に関するデータと比較して図 3.1.2.1-13 に示す。今回のデータは、文献で報告されている高温予荷重効果の傾向とほぼ整合していた。図 3.1.2.1-14 に試験片破面の外観状況を示す。

表 3.1.2.1-5 低靱性鋼(短時間SC材)の破壊試験結果 (ケース1及びケース2)

試験 ケース	試験片符号	温度 T	試験片形状 (mm)			延性亀裂成長量 (mm)		最大荷重 破断荷重 P _{max} P _c	弾性J J _e	塑性J J _p	型J J _{0.2}	破壊靱性 K _{IC}	IT相当 破壊靱性 K _{IC(IT)}	K _{IC(1mm)} に 関する Validity	延性亀裂 成長量に 関する Validity	
			幅 W	厚さ B	正味厚 E _N	亀裂長さ a ₀	板厚平 均									最大値
ケース1	WPS-1-1	23	20.3	10.2	8.36	10.81	0.00	0.00	5.0	0.3	5.3	34.1	31.3	221	Valid	
	WPS-1-2	23	20.3	10.2	8.32	10.81	0.00	0.00	5.6	0.2	5.8	35.7	32.5	221	Valid	
	WPS-2-1	23	20.3	10.2	8.33	10.75	0.00	0.00	6.7	0.1	6.8	38.7	34.9	221	Valid	
	WPS-2-2	23	20.3	10.2	8.35	10.84	0.00	0.00	4.9	0.1	5.0	33.1	30.5	221	Valid	
ケース2	B10-01	150	20.3	10.2	8.20	10.71	0.00	0.00	10.1	2.9	27.0	75.6	64.3	213	Valid	
	WPS-2-12	150	20.3	10.3	8.35	10.74	0.00	0.02	10.4	4.4	31.4	81.8	69.1	212	Valid	
	WPS-1-12	150	20.3	10.2	8.38	10.76	0.01	0.03	12.1	14.5	59.4	112	93.4	212	Valid	
	WPS-1-9	200	20.3	10.2	8.34	10.84	0.01	0.03	11.7	43.5	58.4	110	92.0	208	Valid	

注) *1: $K_{Jc} \leq K_{Jc(limit)}$ の場合「Valid」, $K_{Jc} > K_{Jc(limit)}$ の場合「Invalid」

*2: 延性亀裂成長量の最大値が 1mm 以下の場合「Valid」, 延性亀裂成長量の最大値が 1mm を超える場合「Invalid」

*3: ポップイン発生時の荷重

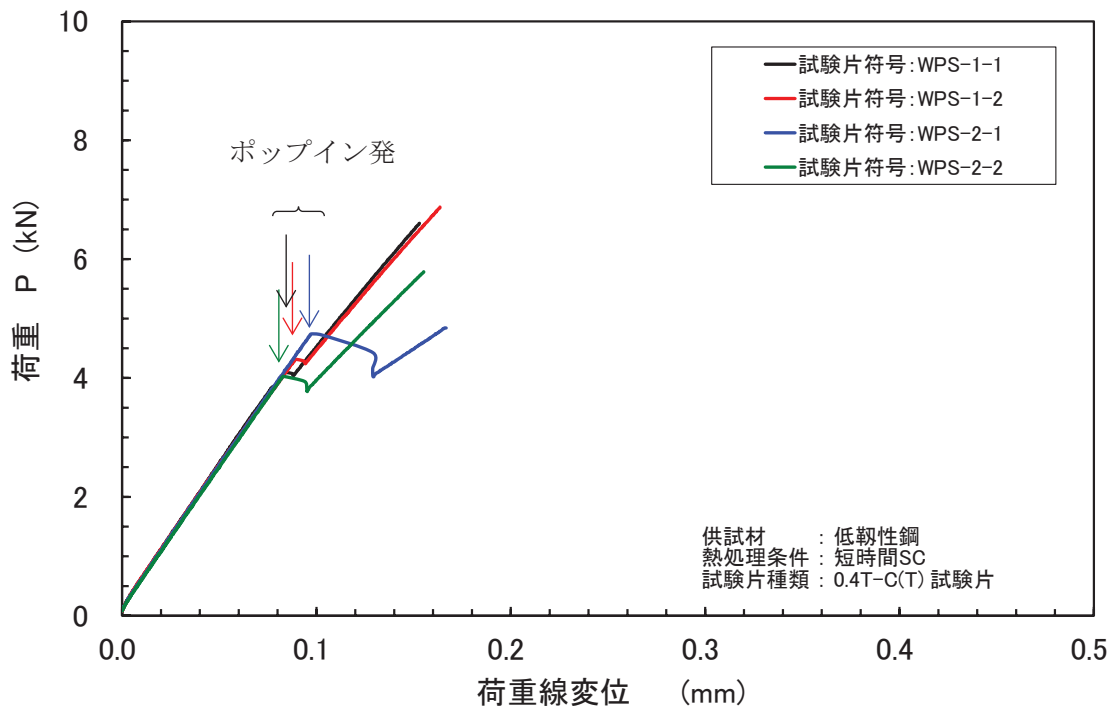


図 3.1.2.1-5 荷重－荷重線変位線図 (短時間 SC 材, ケース 1(室温))

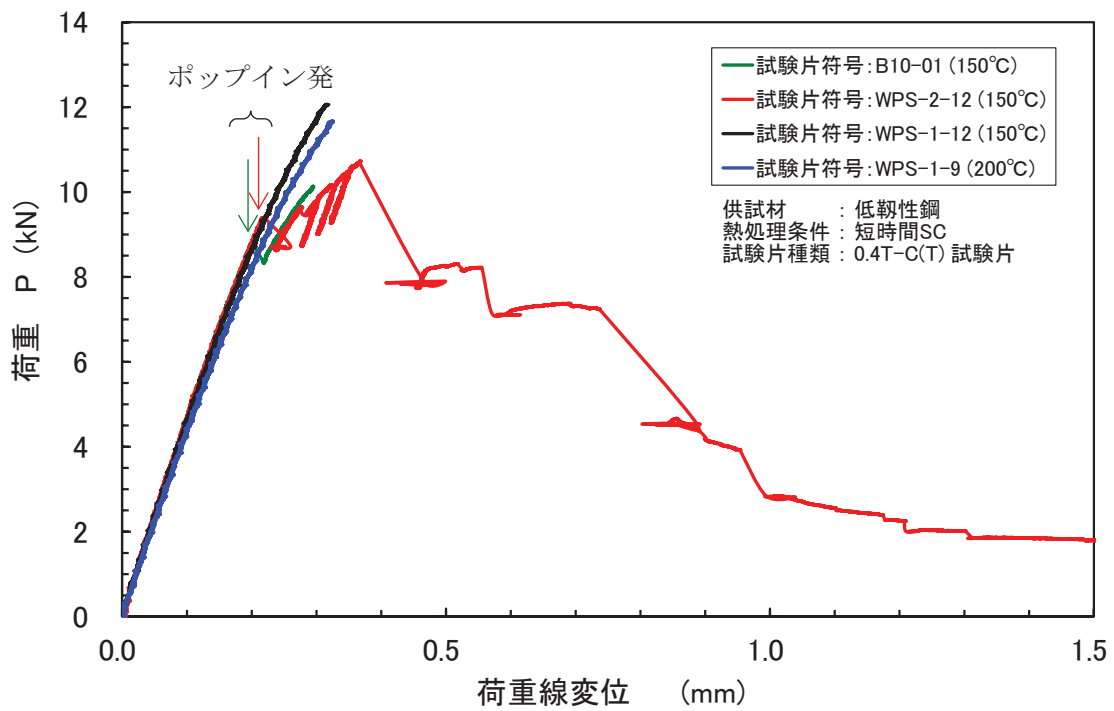


図 3.1.2.1-6 荷重－荷重線変位線図 (短時間 SC 材, ケース 2(150°C及び 200°C))

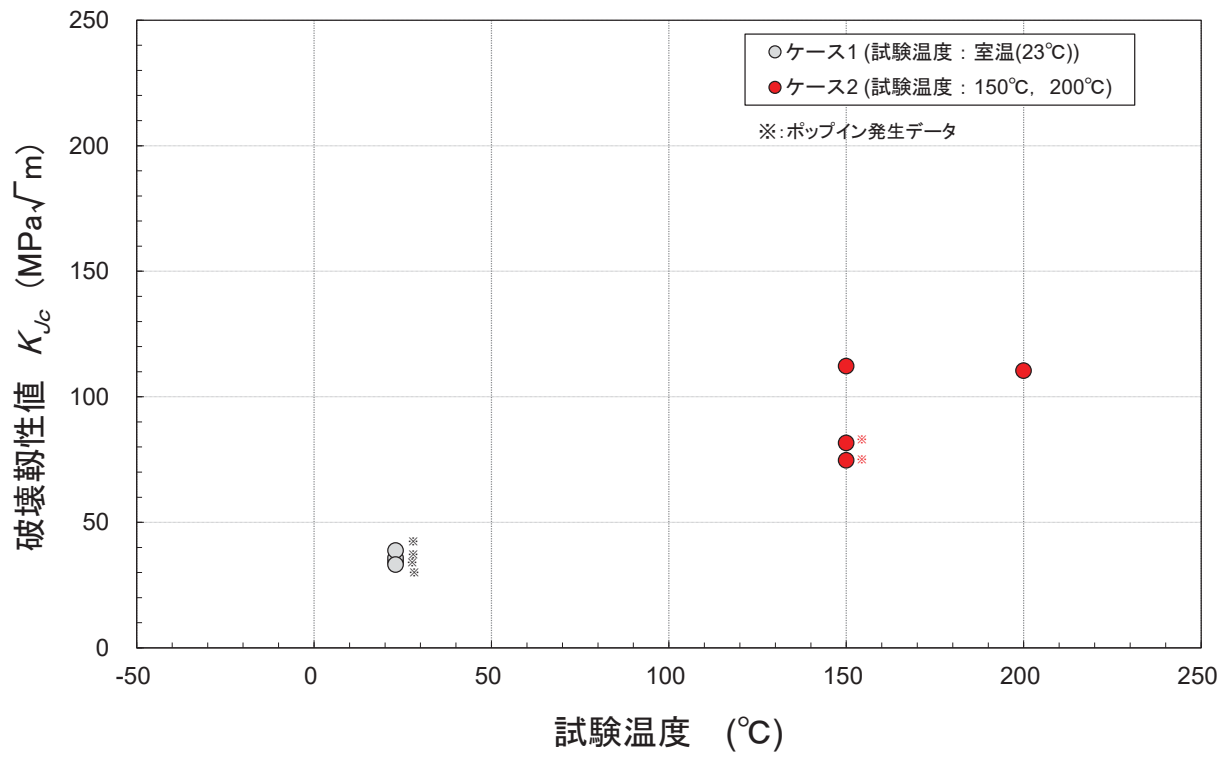
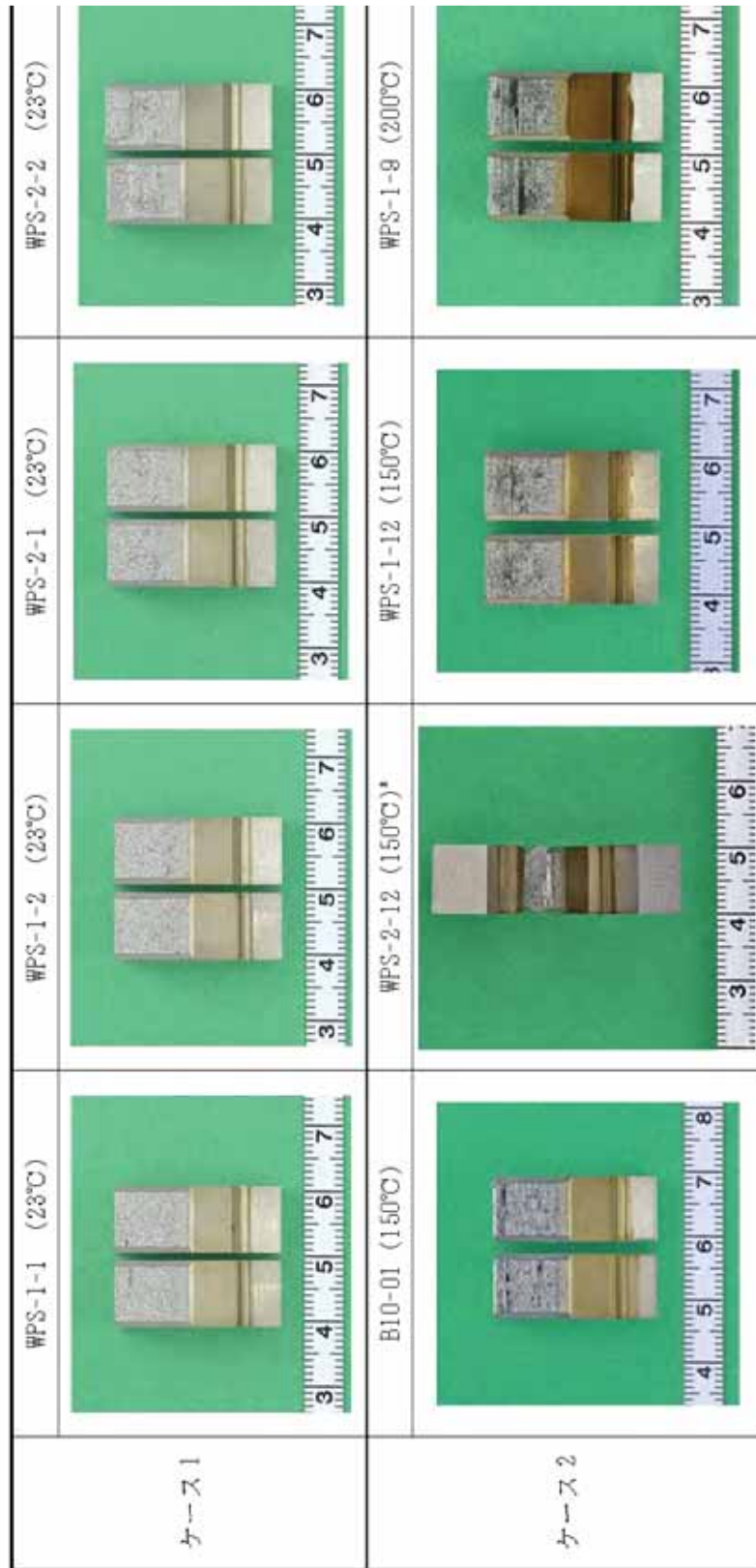


図 3.1.2.1-7 低靱性鋼(短時間 SC 材)の破壊靱性の温度依存性



注) *: WPS-2-12 については破面開放後の破面の外観写真がないため、破面開放前の外観写真である。

図 3.1.2.1-8 破壊試験後の 0.4T_C(T)試験片の破面外観状況 (低靱性鋼短時間 SC 材)

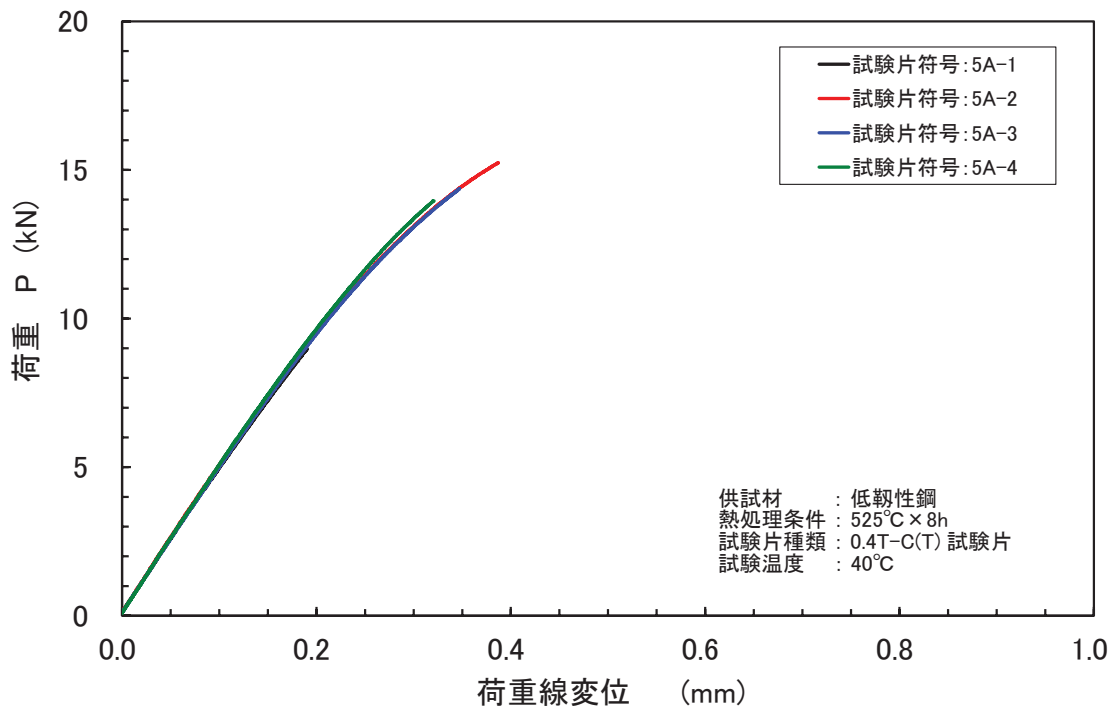


図 3.1.2.1-9 荷重－荷重線変位線図 (525°C×8h 材, ケース 3 単調負荷)

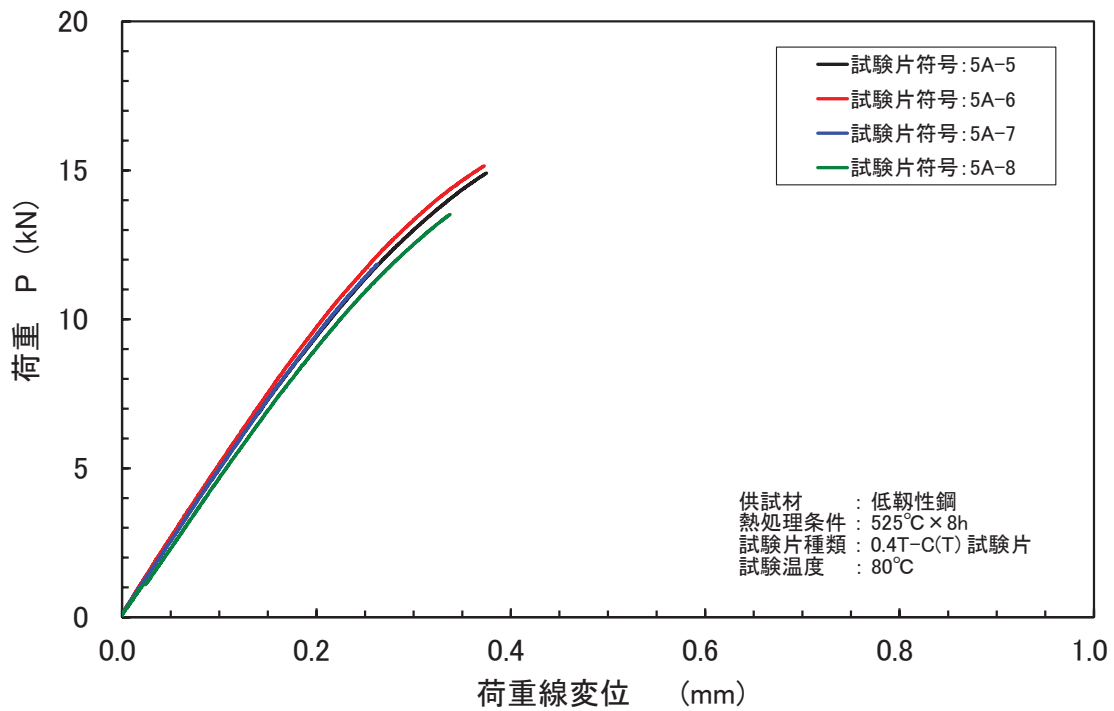


図 3.1.2.1-10 荷重－荷重線変位線図 (525°C×8h 材, ケース 4 の単調負荷)

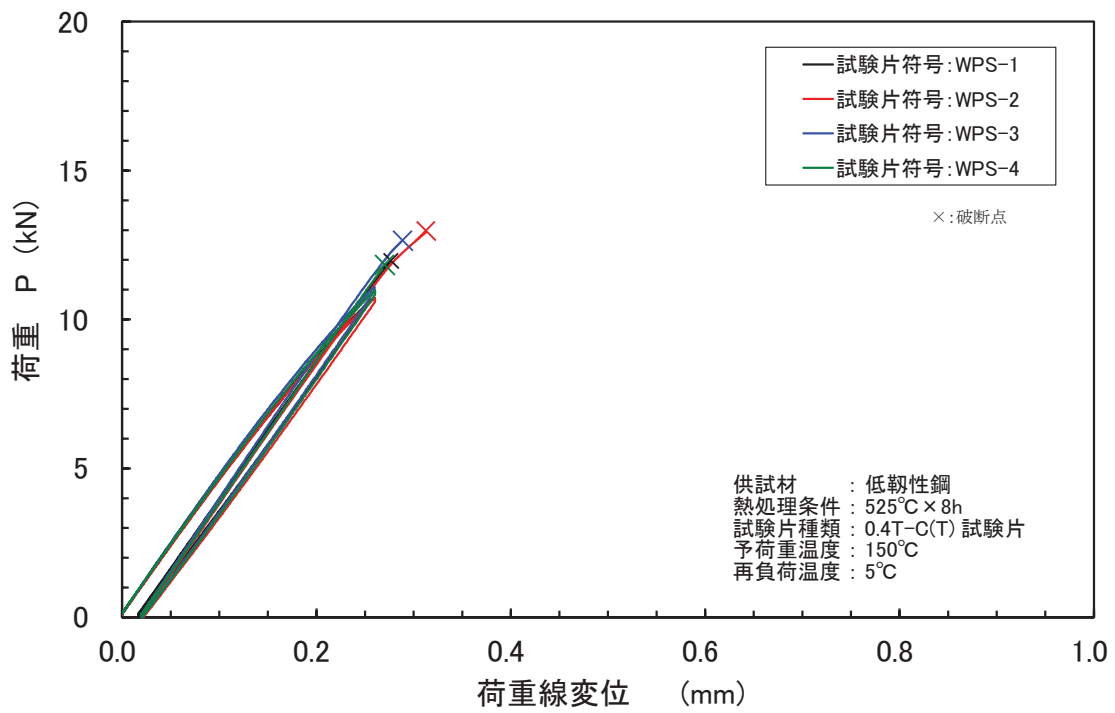


図 3.1.2.1-11 荷重－荷重線変位線図 (525°C × 8h 材, ケース 5(LUCF 波形))

表 3.1.2.1-6 低靱性鋼(525°C×8h 材)の破壊試験結果 (ケース 3 及びケース 4)

試験 ケース	試験片 符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)				延性亀裂成長量 (mm)		最大荷重 P _{max} (kN)	破断荷重 P _c (kN)	弾性J J _e (kJ/m ²)	塑性J J _p (kJ/m ²)	脆性J J _b (kJ/m ²)	J _c (kJ/m ²)	破壊靱性 K _{Jc} (MPa√m)	1T相当 破壊靱性 K _{Jc(1T)} (MPa√m)	K _{Jc(1mm)} に関する Validity	延性亀裂 成長量に 関する Validity
			幅 W	厚さ B	正味厚さ B _n	電裂長さ a ₀	初厚平 均	最大値										
ケース3	5A-1	40	20.3	10.2	8.34	10.62	0.03	0.07	8.98	8.98	24.1	2.0	26.1	73.9	62.9	221	Valid	Valid
	5A-2	40	20.3	10.2	8.34	10.61	0.08	0.17	15.2	15.2	66.9	25.8	94.7	141	116	222	Valid	Valid
	5A-3	40	20.3	10.2	8.34	10.61	0.06	0.10	14.4	14.4	61.7	16.7	78.4	128	106	222	Valid	Valid
	5A-4	40	20.3	10.2	8.34	10.51	0.05	0.11	14.0	14.0	56.6	12.1	68.8	120	99.6	223	Valid	Valid
ケース4	5A-5	80	20.3	10.2	8.35	10.54	0.12	0.15	14.9	14.8	65.2	23.1	88.3	136	112	219	Valid	Valid
	5A-6	80	20.3	10.2	8.35	10.49	0.14	0.19	15.2	15.2	67.0	24.4	91.4	137	113	220	Valid	Valid
	5A-7	80	20.3	10.2	8.35	10.64	0.11	0.12	11.9	11.9	42.7	5.6	48.4	99.9	83.7	218	Valid	Valid
	5A-8	80	20.3	10.2	8.35	10.64	0.12	0.16	13.5	13.5	55.4	15.3	70.7	121	100	218	Valid	Valid

注) *1: $K_{Jc} \leq K_{Jc(limit)}$ の場合 「Valid」, $K_{Jc} > K_{Jc(limit)}$ の場合 「Invalid」

*2: 延性亀裂成長量の最大値が 1mm 以下の場合 「Valid」, 延性亀裂成長量の最大値が 1mm を超える場合 「Invalid」

*3: ポップイン発生時の荷重

表 3.1.2.1-7 (1) 低靱性鋼(525°C×8h 材)の破壊試験結果 (ケース 5, 予荷重時)

試験 ケース	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)				最大荷重 P_{max} (kN)	弾性 J J_e (kJ/m ²)	塑性 J J_p (kJ/m ²)	J_{WPS} (kJ/m ²)	弾塑性応力 拡大係数 K_{JWPS} (MPa√m)
			幅 W	厚さ B	正味厚さ B_N	亀裂長さ a_0					
ケース 5	WPS-1	150	20.3	10.2	8.33	10.81	10.7	35.4	6.3	41.7	94.0
	WPS-2	150	20.3	10.2	8.34	10.82	10.7	36.0	6.5	42.6	94.9
	WPS-3	150	20.3	10.2	8.34	10.75	11.1	37.5	6.8	44.3	96.9
	WPS-4	150	20.3	10.2	8.34	10.74	11.0	36.7	6.2	42.9	95.3

表 3.1.2.1-7 (2) 低靱性鋼(525°C×8h 材)の破壊試験結果 (ケース 5, 再荷重時)

試験 ケース	試験片符号	温度 T (°C)	試験片形状 (mm)				破断荷重 P_c (kN)	弾性 J J_e (kJ/m ²)	塑性 J J_p (kJ/m ²)	J_c (kJ/m ²)	破壊靱性 K_{JFRACT} (MPa√m)	1T 相当破壊靱性 $K_{JFRACT(1T)}$ (MPa√m)
			幅 W	厚さ B	正味厚さ B_N	亀裂長さ a_0						
ケース 5	WPS-1	5	20.3	10.2	8.33	10.81	12.0	42.5	1.6	44.2	98.9	82.9
	WPS-2	5	20.3	10.2	8.34	10.82	12.9	49.9	6.6	56.5	112	93.2
	WPS-3	5	20.3	10.2	8.34	10.75	12.7	46.7	3.5	50.2	106	88.1
	WPS-4	5	20.3	10.2	8.34	10.74	11.9	40.8	0.7	41.5	96.0	80.5

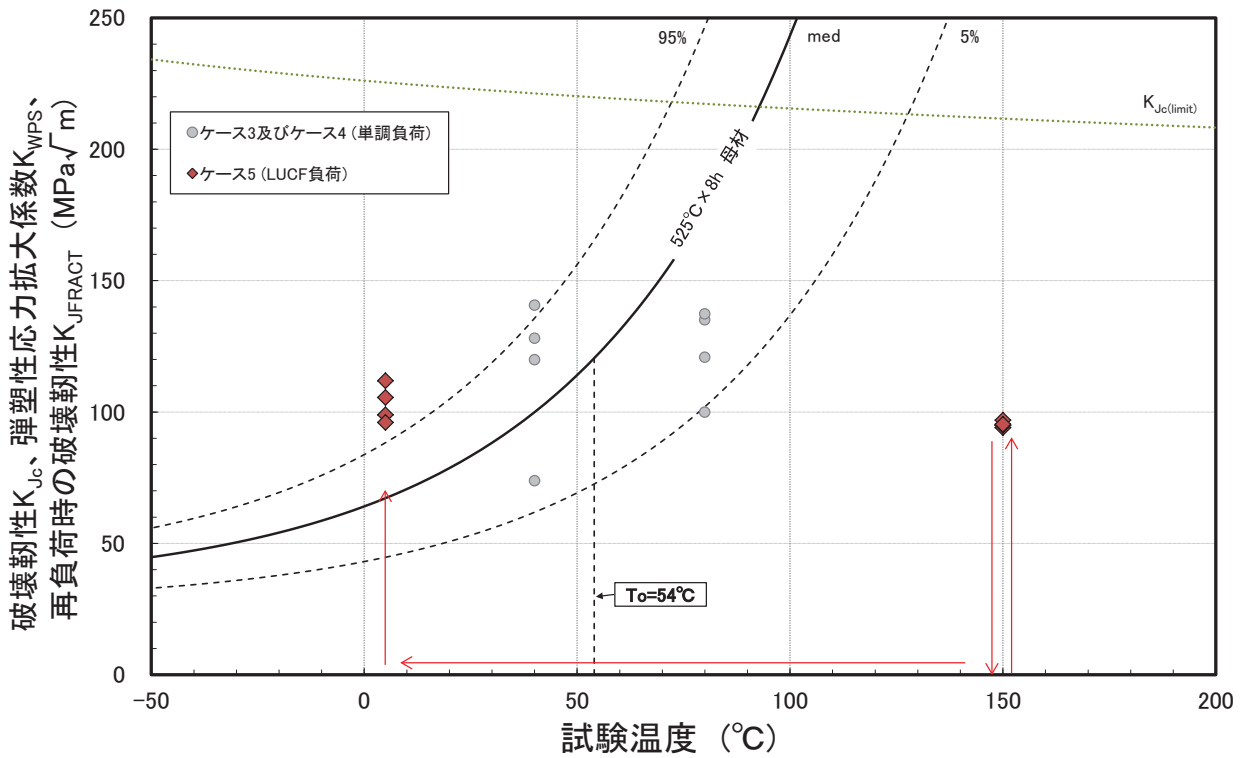


図 3.1.2.1-12 低靱性鋼(525°C×8h 材)の破壊靱性の温度依存性及びLUCF 負荷に対する結果

$$U_{n1} = (K_{JWPS} - K_2) / K_{JWPS}$$

$$R_{cap} = (K_f - K_2) / K_{JWPS}$$

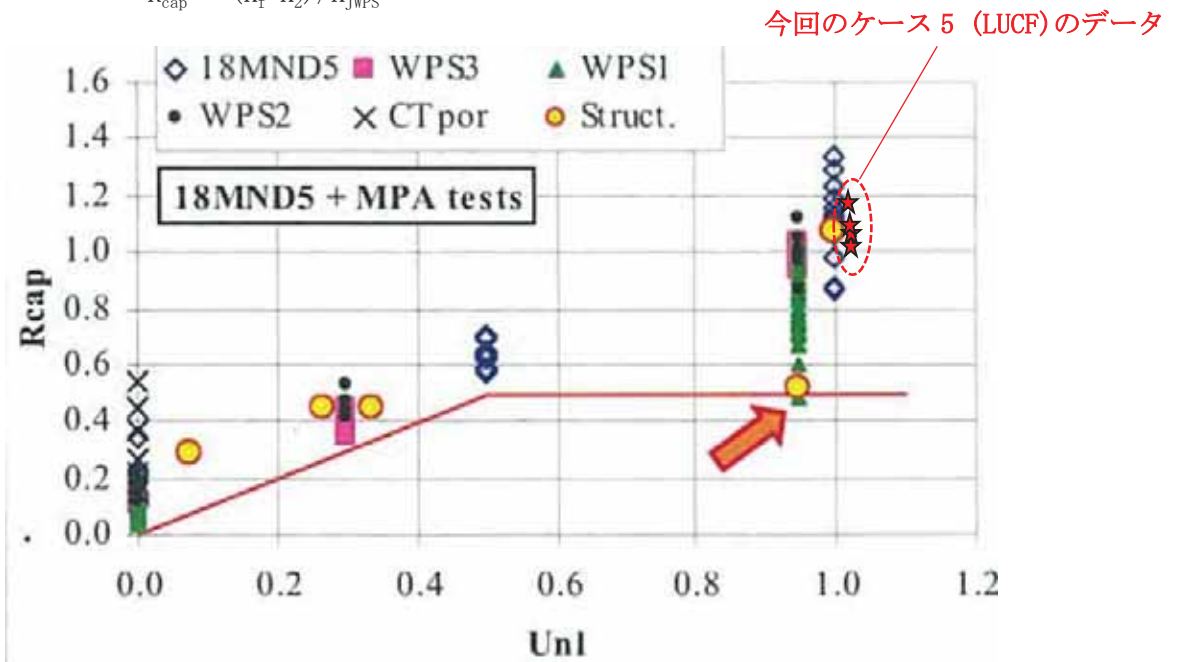


図 3.1.2.1-13 高温予荷重効果に関する工学モデルとの比較の例(ACE モデル)^(3.1.2.1-3)

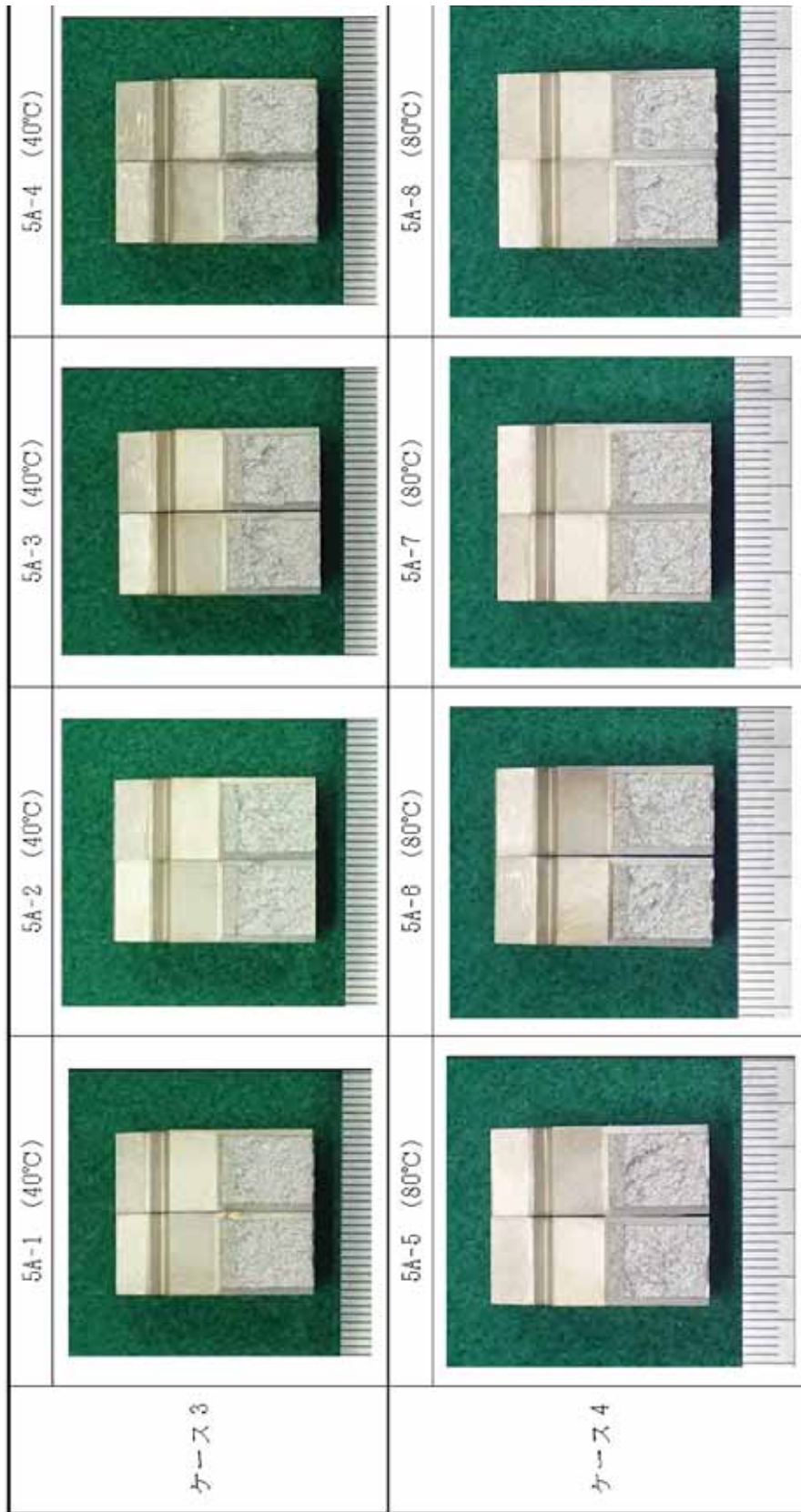


図 3.1.2.1-14 (1) 破壊試験後の 0.4T-C(T)試験片の破面外観状況 (525°C×8h 材)

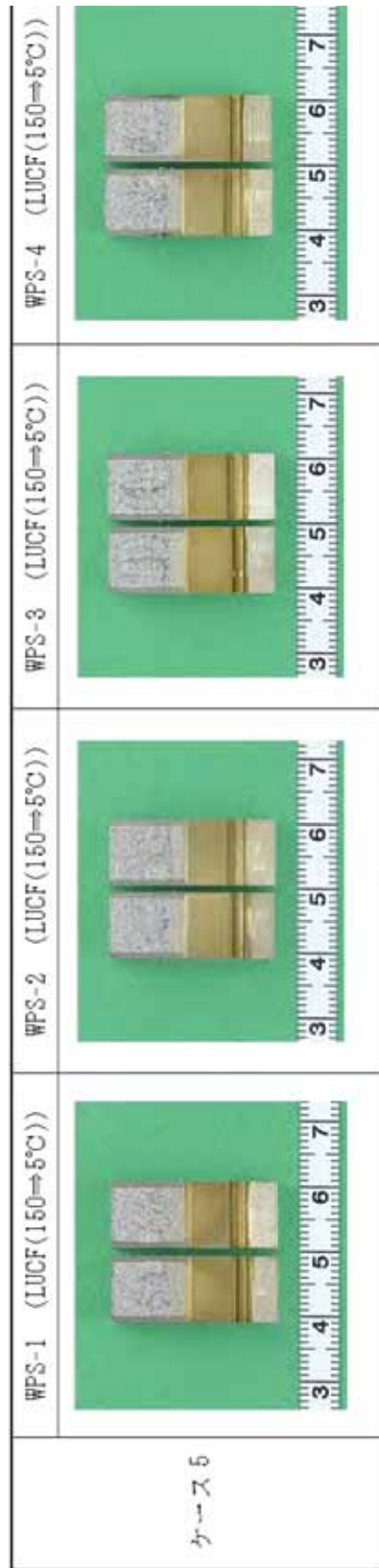


図 3.1.2.1-14 (2) 破壊試験後の 0.4T-C(T)試験片の破面外観状況 (525°C×8h 材)

(5) WPS 試験のまとめ

原子炉圧力容器の加圧熱衝撃事象を模擬した破壊試験の評価を行うための基礎データ取得を目的として、2種類の熱処理(短時間ステップクーリング(SC)及び525°C×8hの熱処理)を施した低靱性鋼を用いて破壊靱性試験及びWPS試験を実施した。得られた主な結果は以下のとおりである。

- 1) 短時間SC材について、単一温度での単調負荷による破壊試験を2温度(室温及び高温)で行った結果、室温では4体のすべて、高温では4体のうち2体でポップインが発生した。ポップインが発生した試験片については、ポップイン発生時の破壊靱性で評価を行ったため、破壊靱性値としては非常に低めであり、データのばらつきも小さい傾向であった。また、高温で実施したケース2の試験(150°C及び200°C)では、疲労予亀裂に対して直交する方向に偏析部に沿って生じたと推定されるマクロな割れが確認された。
- 2) 525°C×8hの熱処理材について、単一温度での単調負荷による破壊試験を2温度(40°C及び80°C)で行い、得られた8体のデータを用いてマスターカーブの参照温度 T_0 を評価した結果、 $T_0=54^\circ\text{C}$ となった。
- 3) 525°C×8hの熱処理材については、LUCF負荷波形(予荷重温度：150°C、予荷重レベル： $K_{JWPS}=90\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 、再負荷温度：5°C)の破壊試験を行った結果、2温度(40°C及び80°C)のデータに基づき評価したマスターカーブの95%破損確率を上回る破壊靱性が得られ、高温予荷重効果が明確に認められた。高温予荷重効果については、これまでに原子炉圧力容器鋼に対して報告されている傾向とほぼ整合していた。

参考文献

- (3.1.2.1-1) 日本電気協会 原子力規格委員会 電気技術規程 原子力編，“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”，JEAC4216-2015.
- (3.1.2.1-2) 一般社団法人日本溶接協会 WES1108-1995 “亀裂開口変位(CTOD)試験方法,” (1995)
- (3.1.2.1-3) S.Chapuliot, J.P.Izard, D.Moinereau and S. Marie, “WPS Criterion proposition based on experimental data base interpretation”, Fontevraud 7, (2010).

3.1.2.2 ローカルアプローチ解析

ローカルアプローチ(LA)法とは、亀裂の拘束状態に影響を受けない評価手法であり、最弱リンクモデルに基づき負荷(応力拡大係数等)に対する破壊確率を算出できる。ただし、オリジナルのローカルアプローチモデルである Beremin モデルは単調荷重条件における評価法として適用されており、WPS のような除荷を含む単調でない荷重条件ではそのまま適用するには課題があるとされ、W. Lefevre らにより修正 Beremin モデルが提案されている(3.1.2.2-1)。修正 Beremin モデルはき裂先端領域の塑性ひずみ増加が発生しているときのみ、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に修正している。

そこで、本章では、WPS 効果の予測へのローカルアプローチ法適用に関して修正 Beremin モデルを取り入れたプログラムで試解析を行い、3.1.2.1 高温予荷重効果確認試験で実施した 0.4TCT 試験片の WPS 効果確認試験データとの比較検証を行った。

(1) 解析モデル

試験片の予き裂は、板厚内予き裂の平均値となるようにモデル化した。解析モデルを図 3.1.2.2-1 に示す。FE モデルは 1/4 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サイドグループ部のき裂先端は、図 3.1.2.2-2 に示すように 3 軸方向に 10 要素分は一つの要素が 0.03mm×0.03mm×0.03mm のサイズとなるように分割を実施した。荷重負荷点となるピン部には仮想的に要素を作成した。また、WPS 計算では除荷時の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 3.1.2.2-3 のようにき裂面上に板状の剛体要素を作成し、き裂面上の要素が対称面を超える変形を発生させないように定義した。

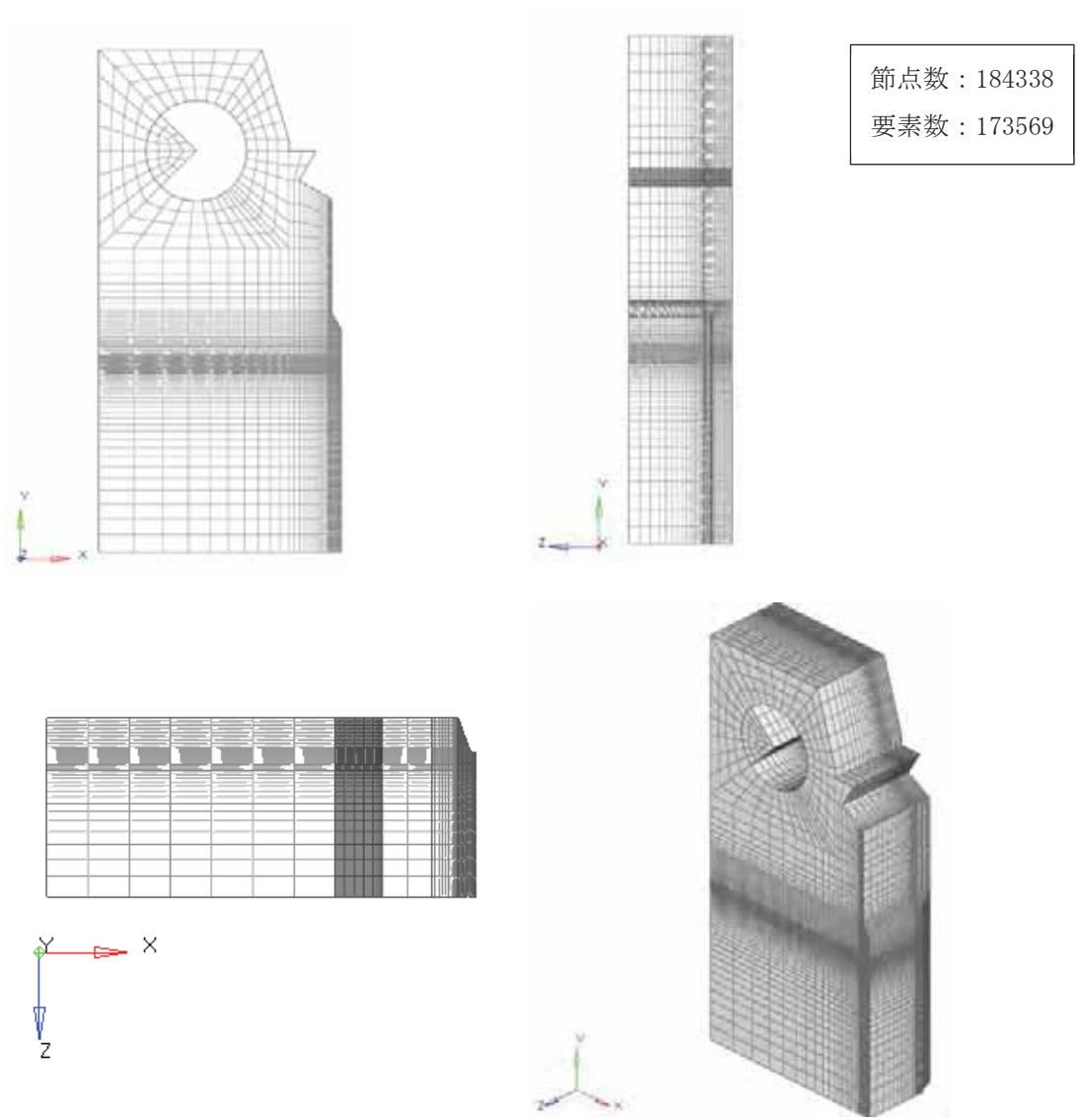


図 3.1.2.2-1 解析モデル

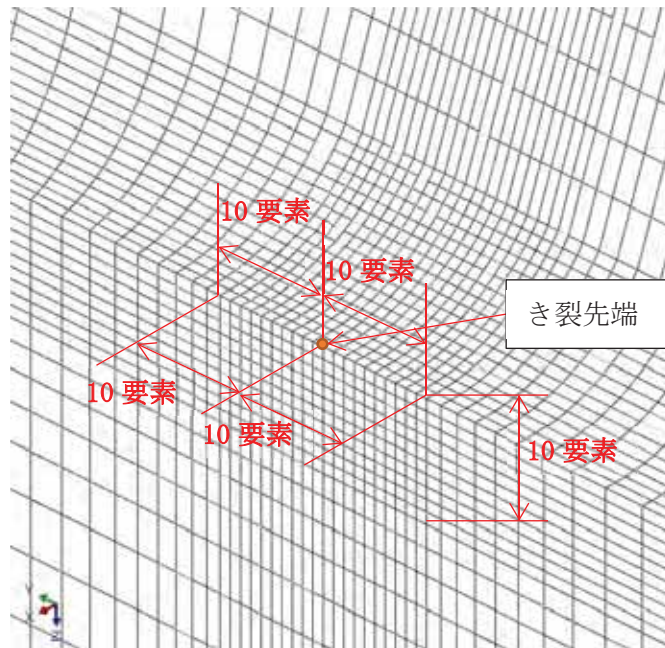


図 3.1.2-2 き裂先端の分割図

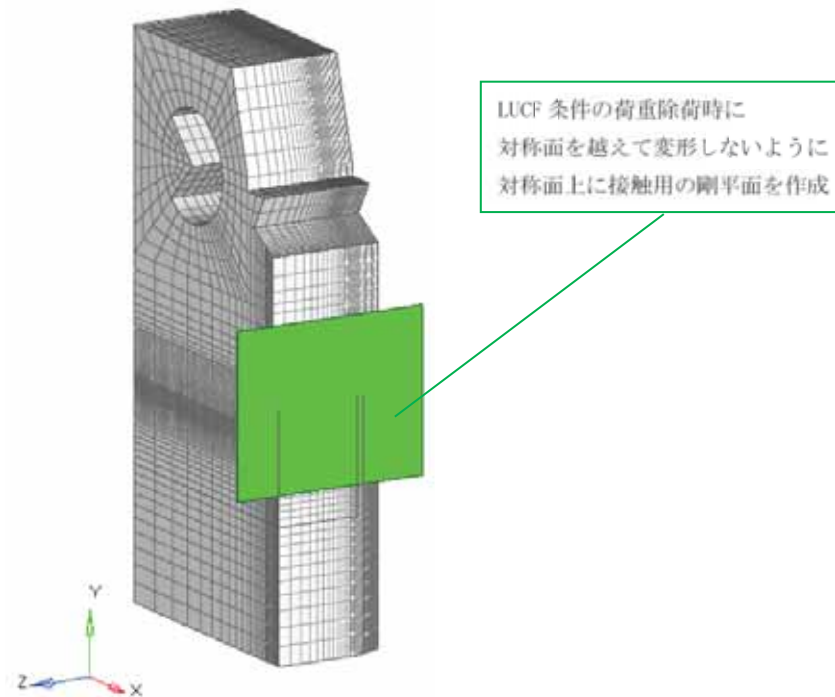


図 3.1.2.2-3 き裂面上の接触条件

(2) 材料物性

材料特性について、5℃、150℃の0.2%耐力と引張強さを表 3.1.2.2-1 に示す値に設定し、ASME SecⅧ Div2 の Annex3-D に記載の真応力-真ひずみの関係式から図 3.1.2.2-4 に示すように設定した。なお、ヤング率は JEAC4216-2015 の解説 MCT-1300 記載の次式により設定した。

$$E = 202100 - 62.6 \times T \quad (3.1.2.2-1)$$

ここで、E : ヤング率 (MPa)、T : 温度 (℃)

表 3.1.2.2-1 物性値

温度 T (℃)	ヤング率 E (MPa)	ポアソン比 ν	0.2%耐力 σ_y (MPa)	引張強さ (MPa)	線膨張係数 α ($\times 10^{-6}$)
5	201787	0.3	850	1100	12.62
20	200848		-	-	12.62
50	198970		-	-	12.79
75	197405		-	-	12.94
100	195840		-	-	13.09
125	194275		-	-	13.23
150	192710		750	950	13.38

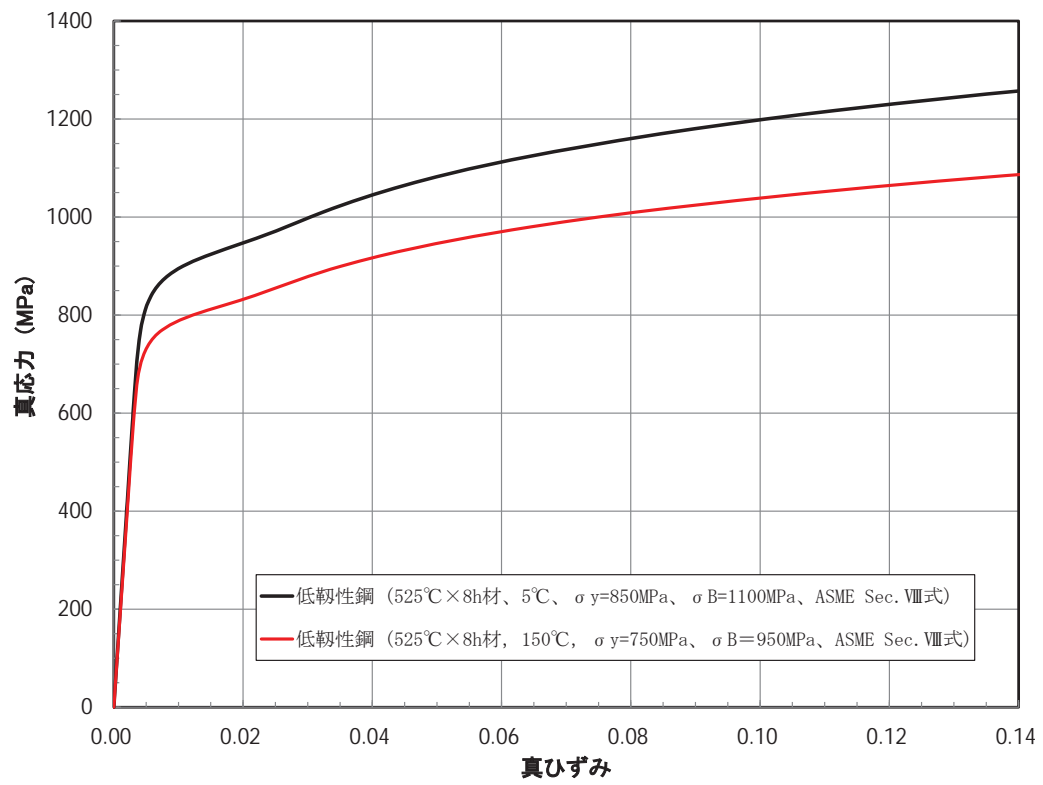


図 3.1.2.2-4 真応力-真ひずみ線図

(3) 荷重・境界条件

荷重条件を図 3.1.2.2-5 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として 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 3.1.2.2-6 に示す。本解析では 1/4 モデルであるためき裂面、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。

また、温度は FE モデルの節点全てに一律で負荷した。

ここで WPS サイクルは除荷過程を含むことから、J 値の評価は以下の手順で行った。

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

$$J_{PLASTIC}(F_{WPS}) = J_{ELASTIC-PLASTIC}(F_{WPS}) - J_{ELASTIC}(F_{WPS}) \quad (3.1.2.2-2)$$

ここで、

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

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

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

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

$$J(F_{after-WPS}) = J_{ELASTIC}(F_{after-WPS}) + J_{PLASTIC}(F_{WPS}) \quad (3.1.2.2-3)$$

ここで、

$J(F_{after-WPS})$: WPS 予荷重以降の J 値

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

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

なお、比較評価として、上記のように解析から得られる J 値(K_J 値)だけでなく、WPS 予荷重、再負荷それぞれ単独で、荷重・開口変位から ASTM1921 の式を用いて求めた J 値による評価も行った。

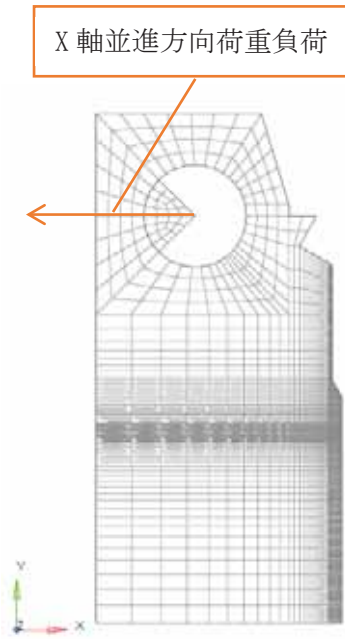


图 3.1.2.2-5 荷重条件图

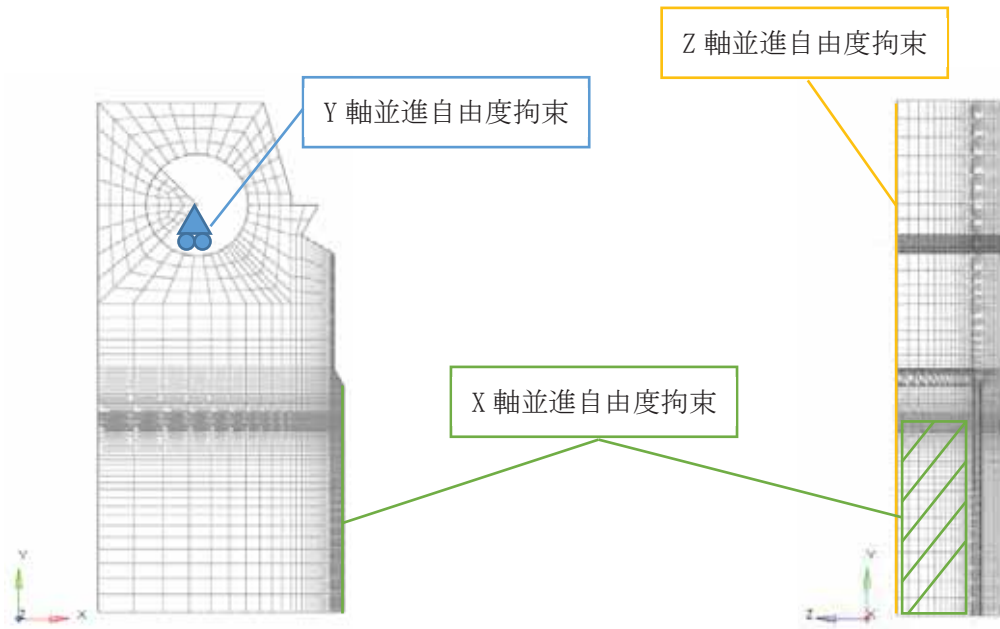


图 3.1.2.2-6 境界条件

(4) 解析ケース

解析条件を表 3.1.2.2-2 に示す。予荷重条件は、3.1 章で実施した試験結果に合わせた。解析では 2 ケースを実施し、両ケースの比較により WPS 効果を確認した。

表 3.1.2.2-2 解析条件

ケース		負荷 パターン	サイド グループ 有無	平均 予き裂 長さ (mm)	予荷重		再負荷	備考 (目的)
					温度 (°C)	K_{JWPS} (MPa√m)	温度 (°C)	
1	0.4TCT	単調	有	10.78	-	-	+5	ケース 1 と 2 の比較 で、WPS 効果を確認。
2	0.4TCT	LUCF	有		+150	95.3	+5	

(5) ワイブル応力評価方法

ワイブル応力は、構造解析コード Abaqus の解析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 は次式で定義される。

$$\frac{\sigma_w}{\sigma_u} = \left[\frac{1}{V_0} \int_V \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_u} \right)^m dV \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3.1.2.2-4)$$

ここで、 σ_1 は最大主応力、 m は形状パラメータ、 V_0 はある一定の体積、積分範囲 V は σ_1 が降伏応力を超えるか、もしくは塑性ひずみが発生した領域である。一般には σ_u を消去した形式がワイブル応力の式として以下のように表される。

$$\sigma_w = \left[\frac{1}{V_0} \int_V \sigma_1^m dV \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3.1.2.2-5)$$

本解析でのワイブル応力評価では通常、式(3.1.2.2-4)の右辺の $(\sigma_1/\sigma_u)^m$ の最大値を取り続けるので、式(3.1.2.2-4)を変形させた次式を内部で計算している。

$$\sigma_w = \sigma_u \times \left[\frac{1}{V_0} \int_V \max \left\{ \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_u} \right)^m \Big|_{t=n}, \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_u} \right)^m \Big|_{t=n-1} \right\} dV \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3.1.2.2-6)$$

脆性破壊確率を 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 が求めれば破壊確率が求められる。

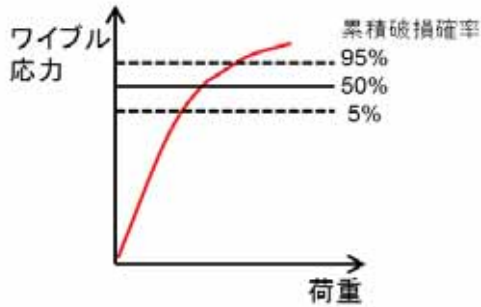
また、WPS 試験のような荷重除荷を伴う評価に対応できるように、ワイブル応力評価方法を変更した。具体的には、荷重除荷が発生する場合、図 3.1.2.2-7 (2) に示すように荷重と共にワイブル応力の数値が減少する現象を防ぐために次式のような修正 Beremin モデル (3.1.2.2-1, 3.1.2.2-2) が唱されている。

$$\sigma_w = \sigma_u(T(t)) \times \left[\frac{1}{V_0} \int_V \max_{(u \leq t, \dot{p}(u) > 0)} \left\{ \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_u(T(u))} \right)^m \right\} dV \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3.1.2.2-7)$$

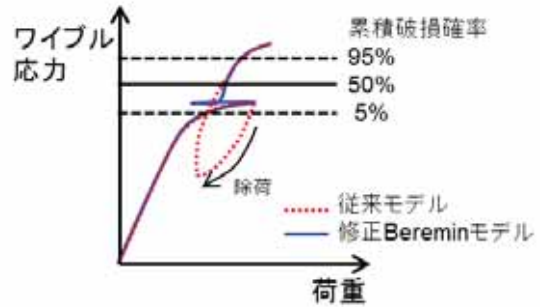
式(3.1.2.2-7)では累積塑性変形増分 p が増加した場合のみ、ワイブル応力を更新する。また更新の際も数値の最大を取り続けるためワイブル応力が減少することはない。本解析評価では修正 Beremin モデルに基づく評価を実施した。

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 3.1.2.2-7 従来モデルと修正 Beremin モデルの違い

(6) ワイブルパラメータ算出

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} 値を表 3.1.2.2-3 に示す。これらの数値は参照温度 $T_0=54^\circ\text{C}$ のマスターカーブから求めた値である。

各温度域において求めたワイブルパラメータを表 3.1.2.2-4 に示す。ワイブルパラメータ m 値は 3 温度でのばらつきが大きくなった。一般に文献等 (3.1.2.2-3) では、構造用鋼の m 値は 10~50 程度の範囲とされているので、今回の算出結果はその範囲内であるため問題ないが、 m 値は温度に依存しない係数 (3.1.2.2-4) されていることから、再負荷温度である 5°C の m 値 31.5 で一定とすることとした。

一方、尺度パラメータ σ_u に関しては、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 (3.1.2.2-5, 3.1.2.2-6) されている。そこで、 $m=31.5$ としたときの σ_u を改めて算出し、その値を用いることとした。また、 σ_u は 150°C まで必要となるため、 σ_u の $54\sim 105^\circ\text{C}$ の勾配をそのまま 105°C 以上でも適用することとした。

以上の結果を考慮して、本解析に適用する最終的なワイブルパラメータとして、表 3.1.2.2-5 に示す値を適用する。なお、各温度の間は線形補間とする。

表 3.1.2.2-3 ワイブルパラメータ算出時に使用した K_{Jc} 値

累積破損確率 (%)	温度(°C)		
	5	54	105
	K_{Jc} 値 (MPa√m)	K_{Jc} 値 (MPa√m)	K_{Jc} 値 (MPa√m)
2.5	40.6	63.9	126.7
5	44.6	72.4	147.3
10	49.4	82.7	172.4
20	55.5	95.6	203.8
30	59.9	105.0	226.7
40	63.7	113.0	246.1
50	67.2	120.4	264.0
60	70.6	127.6	281.6
70	74.1	135.2	300.1
80	78.2	143.9	321.2
90	83.7	155.5	349.4
95	88.0	164.7	371.8
97.5	91.6	172.5	390.6

表 3.1.2.2-4 ワイブルパラメータ算出結果

温度 (°C)	m 値	σ_u (MPa)
5	31.5	2568
54	45.2	2709
105	26.5	2808

表 3.1.2.2-5 ワイブルパラメータ温度依存性

温度 (°C)	m 値	σ_u (MPa)
5	31.5	2568
54		2656
105		2818
150		2961

(7) WPS 試験条件を用いたワイブル応力評価

図 3.1.2.2-8 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(図中では FEM 解析)は試験の荷重-開口変位の関係と概ね一致しているが、解析の方が荷重やや小さく評価されている。この原因としては、解析ではヤング率については規格値、応力・ひずみ曲線は推定値を適用していることが影響している。

図 3.1.2.2-9 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(ケース 2)に加えて、再負荷温度である+5°C(ケース 1)での単調引張の解析評価結果を重ねて表示している。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。なお、ワイブル応力- K_J 関係に関して、 K_J は WPS 予荷重時の J 積分値の塑性分を除荷以降に足し合わせる方法と、WPS 予荷重、再負荷それぞれ単独で荷重-開口変位から ASTM1921 の式を用いて求めた方法の 2 種類で評価した。

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 3.1.2.2-10 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。また、 K_J のグラフについては、先述と同様に 2 種類の評価で実施した。

これらのワイブル応力評価結果のグラフには、ケース 2 に相当する試験結果を重ね書きしているが、累積破損確率 95%を超える領域に位置している。この原因としては、応力-ひずみ曲線を 0.2%耐力及び引張強さから仮想的に設定していることから、特に 0.2%耐力において試験片材料よりも解析の方が低めに設定されている可能性があることと、ワイブルパラメータ算出時に参照温度 $T_0=54^{\circ}\text{C}$ としてマスターカーブから任意の K_{Jc} 値を適用して評価しているが、本材料におけるマスターカーブの適用性や参照温度の妥当性が十分に確認できていないこともあり、それらがワイブルパラメータの算出に影響している可能性も考えられる。

材料特性やマスターカーブが仮の値としての評価ではあるが、WPS 負荷(ケース 2: 修正 Beremin モデル)と単調引張負荷(ケース 1)のワイブル応力は同等であり、WPS 効果は得られないことが確認できる。

除荷以降の K_J 値の算出方法として 2 種類採用したが、WPS 予荷重時の K_J 値の塑性分を除荷以降に足し合わせる方法では、塑性分の K_J 値が大きいため、ワイブル応力- K_J 関係において、 K_J 値の増加に対するワイブル応力の増加量が大きくなり、図 3.1.2.2-10 (b-1)に示すように、小さいバラつき範囲内で破壊する結果となっている。一方、再負荷時の荷重-開口変位から J 値(K_J 値)を算出した方法では、同じワイブル応力値で比較すると、図 3.1.2.2-10(b-2)に示すように、WPS 負荷(修正 Beremin モデル)が単調増加負荷よりも K_J 値が小さくなる結果となっており、WPS 予荷重時の J 値の塑性分を無視していることで、 K_J 値が低めに評価されていると考えられる。そのため、WPS 負荷のような除荷過程を含む K_J 値の評価方法については、適切な評価方法の検討が今後も必要と考えられる。

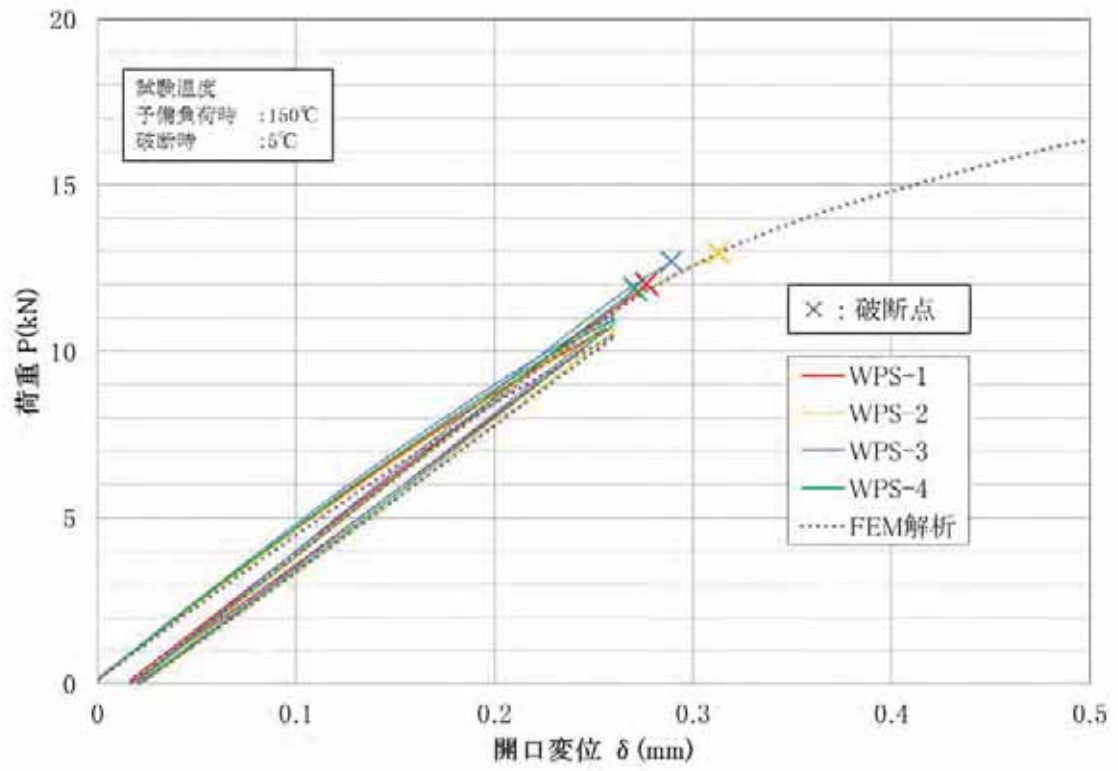
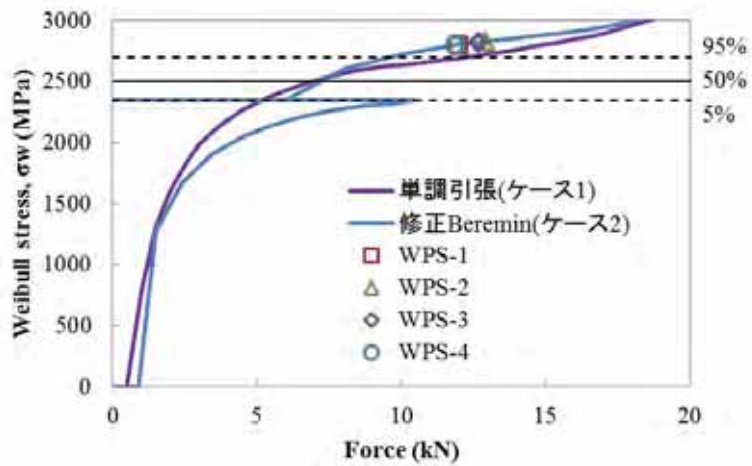
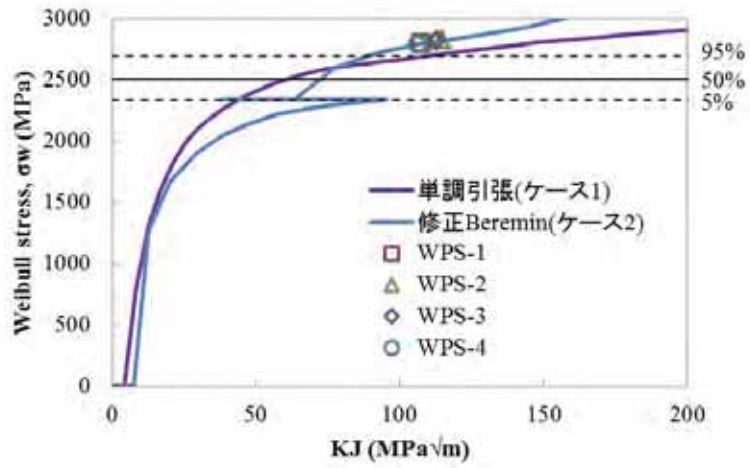


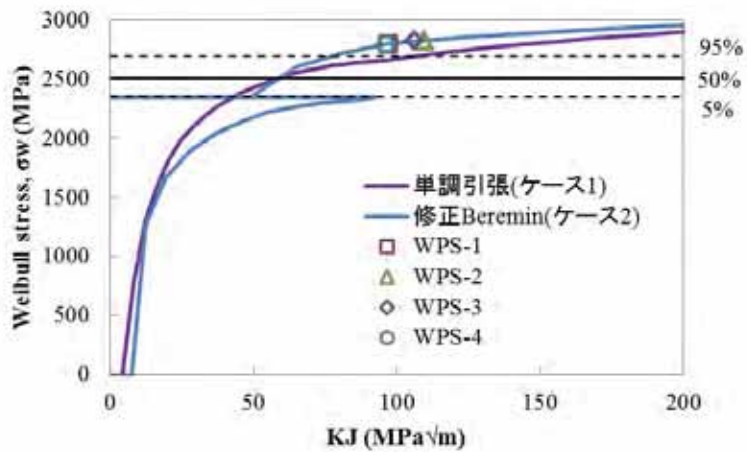
図 3.1.2.2-8 荷重-開口変位関係



(a) ワイブル応力-荷重関係

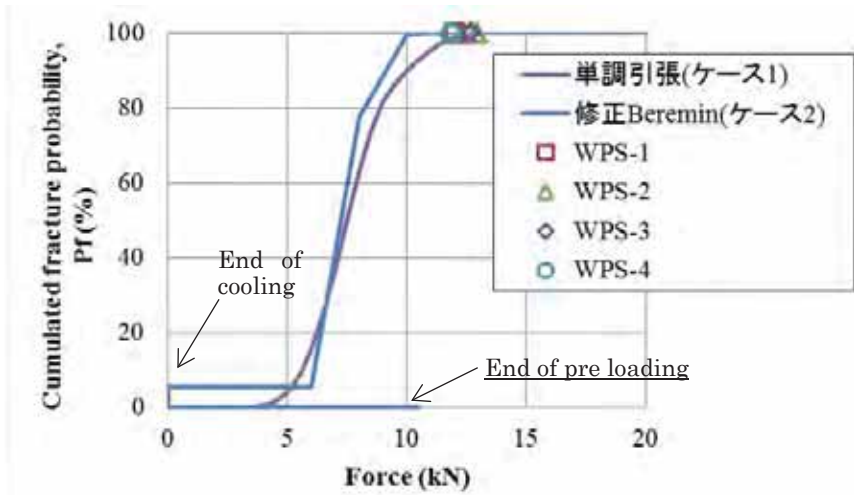


(b-1) ワイブル応力- KJ 関係 (WPS 予荷重時の KJ 値塑性分を除荷以降の KJ 値に計算)

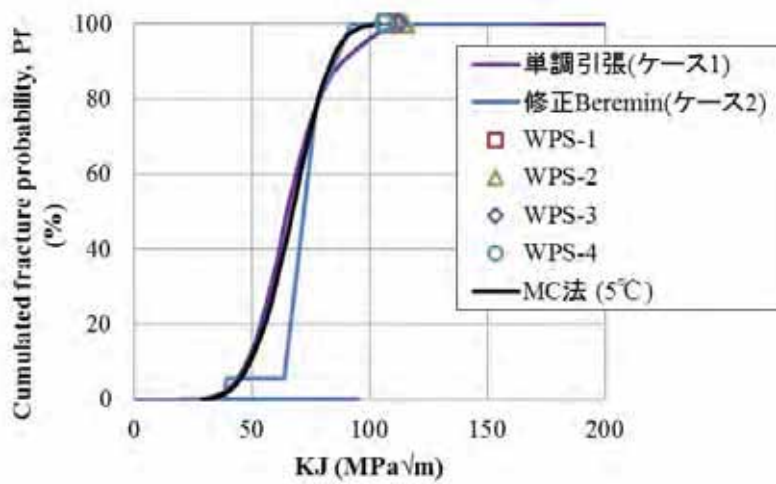


(b-2) ワイブル応力- KJ 関係 (KJ 値を予荷重, 再荷重過程それぞれで計算 (ASTM))

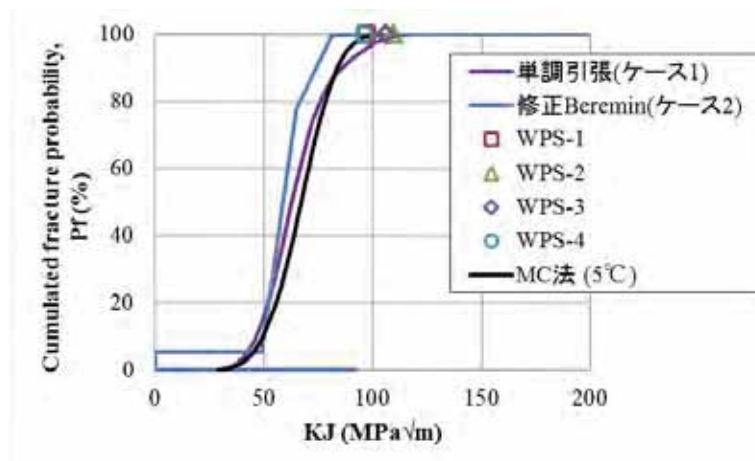
図 3.1.2.2-9 ワイブル評価結果



(a) 累積破損確率－荷重関係



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



(b-2) 累積破損確率－ KJ 関係 (KJ 値を予荷重, 再荷重過程それぞれで計算 (ASTM))

図 3.1.2.2-10 累積破損確率評価結果

(8) ローカルアプローチ解析のまとめ

低靱性鋼を用いた室温以上の温度域における破壊靱性試験及び WPS 試験について、ローカルアプローチ解析を行い、WPS 効果を評価した。WPS 負荷と単調引張負荷のワイブル応力は同等であり、WPS 効果は得られないという評価となり、試験結果の傾向とは一致しなかった。

本材料におけるマスターカーブの適用性や参照温度の妥当性が十分に確認できていないためワイブルパラメータの算出に影響している可能性が考えられる。また、WPS 負荷のような除荷過程を含む K_I 値の評価方法についても、適切な評価方法の検討が今後も必要と考えられる。

参考文献

- (3.1.2.2-1) W.Lefevre et al., “A modified Beremin model to simulate the warm pre-stress effect”, Nuclear Engineering and Design 216, pp.27-42, 2002
- (3.1.2.2-2) 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
- (3.1.2.2-3) 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.
- (3.1.2.2-4) 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.
- (3.1.2.2-5) 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.
- (3.1.2.2-6) 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.

3.1.2.3 半楕円亀裂を付与した平板試験体による破壊試験

半楕円亀裂においては、材料の破壊靱性を評価するために用いる C(T)試験片等に比して亀裂への拘束が弱く、見かけの破壊靱性が高くなることが予想される。平成 29 年度及び平成 30 年度にかけて、半楕円亀裂を付与した平板試験体による破壊試験を実施し、亀裂の拘束効果に係るデータを取得する計画である。平成 29 年度は、クラッド下 HAZ からの破壊を防止しかつ高い参照温度(T_0)を得られる熱処理条件を検討するため、クラッドの溶接法及び熱処理を変えた 6 体の破壊試験を実施した。

各試験ケースを表 3.1.2.3-1 に示す。まず、CT 試験で母材と HAZ の靱性が同等であった $510^{\circ}\text{C}\times 4\text{h}$ の条件で平板試験(1 体目)を行い、HAZ 割れが回避出来るかを確認するとともに HAZ 部に応力緩和を施して、HAZ 割れのリスクを低減した試験体(6 体目)も製作し、試験を行った。その結果、HAZ 割れが回避できなかったため、HAZ を軟化させることを目的として、PWHT 温度を高くした試験を 4 ケース(2~5 体目)実施した。その内の 1 体(5 体目)は、PWHT 温度以外に HAZ 割れのリスクを低減させる目的でクラッドを被覆アーク溶接(SMAW)で施工した。

表 3.1.2.3-1 各試験ケースの目的

試験体	熱処理条件	応力緩和のための R 加工	クラッドの溶接方法	目的
1 体目	$510^{\circ}\text{C}\times 4\text{h}$	—	サブマージドアーク溶接	CT 試験で母材と HAZ の靱性が同等であった $510^{\circ}\text{C}\times 4\text{h}$ の条件で平板試験体の破壊強度を確認。
2 体目	$525^{\circ}\text{C}\times 8\text{h}$	—	サブマージドアーク溶接	HAZ を軟化させる目的で PWHT 温度を高くし、その効果を確認。
3 体目	$580^{\circ}\text{C}\times 4\text{h}$	—	サブマージドアーク溶接	
4 体目	$600^{\circ}\text{C}\times 4\text{h}$	—	サブマージドアーク溶接	
5 体目	$580^{\circ}\text{C}\times 4\text{h}$	—	被覆アーク溶接	HAZ 割れのリスクを低減させる目的で行った被覆アーク溶接の効果を確認。
6 体目	$510^{\circ}\text{C}\times 4\text{h}$	有	サブマージドアーク溶接	HAZ 割れのリスクを低減させる目的で行った HAZ 部の応力緩和効果を確認。

(1) 破壊試験装置

試験概要図を図 3.1.2.3-1 に示す。試験装置の写真を図 3.1.2.3-2 に示す。装置は荷重容量±10MN 疲労装置(MTS 社)を使用した。本装置は 0.5mm/sec 以下の変位制御が可能である。試験治具を図 3.1.2.3-3 に示す。試験体に付与する曲げモーメントを大きくするため、内スパン 60mm、外スパン 500mm の試験治具を製作した。また、破壊試験中のき裂全体の成長を把握する目的で PDM(Potential Drop Method)計測を実施した。PDM 計測装置を表 3.1.2.3-2、図 3.1.2.3-4 に示す。

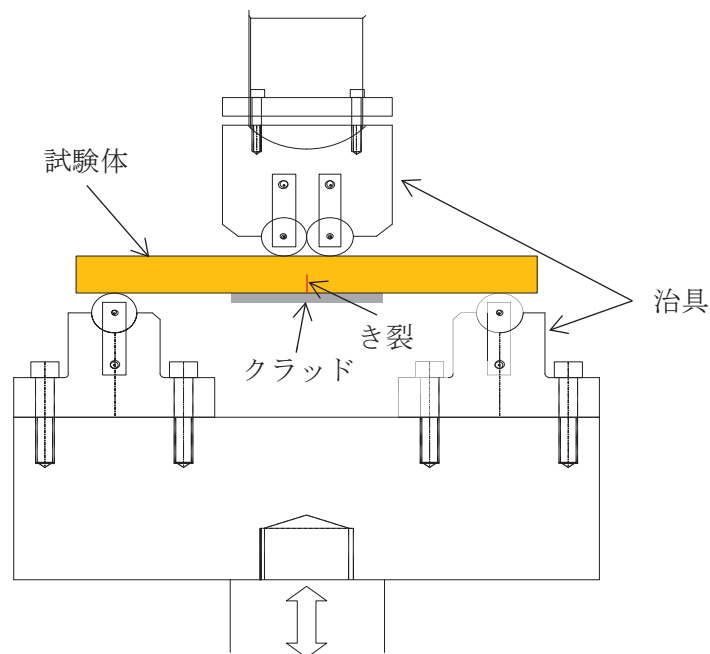


図 3.1.2.3-1 試験概要図



図 3.1.2.3-2 ±10MN 電気油圧式サーボ疲労試験装置(MTS 社製)

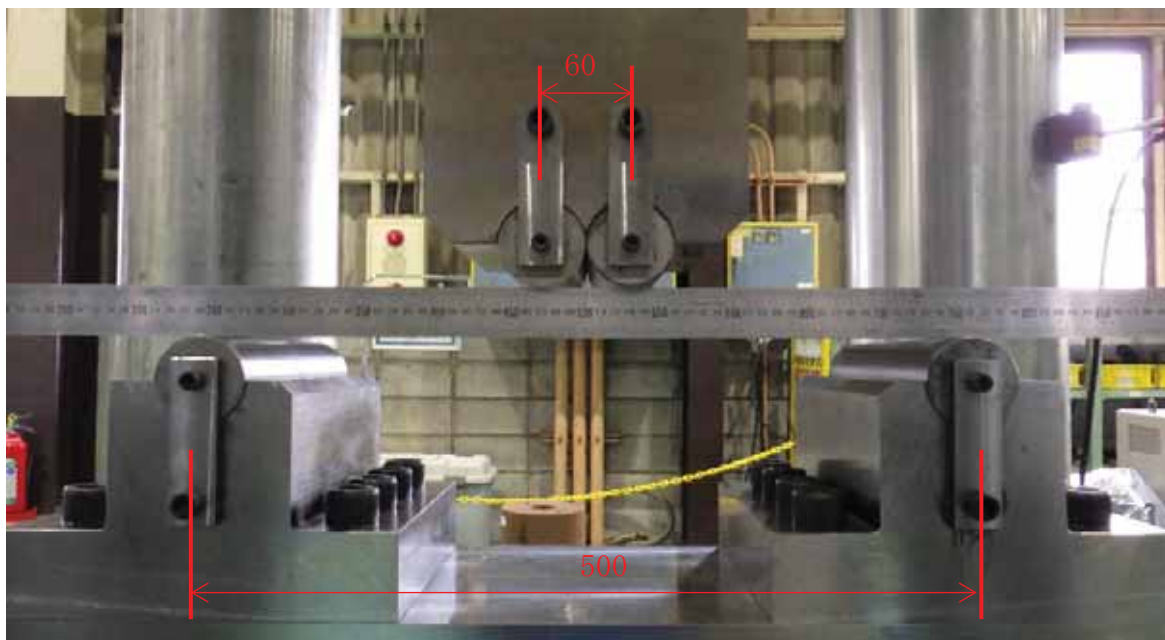


図 3.1.2.3-3 試験治具

表 3.1.2.3-2 PDM 計測装置

装置	メーカー	型番
電圧計測器	KEYSIGHT	34972A (収録速度 1Hz)
定電流発生装置	菊水電子	PAD8-50L

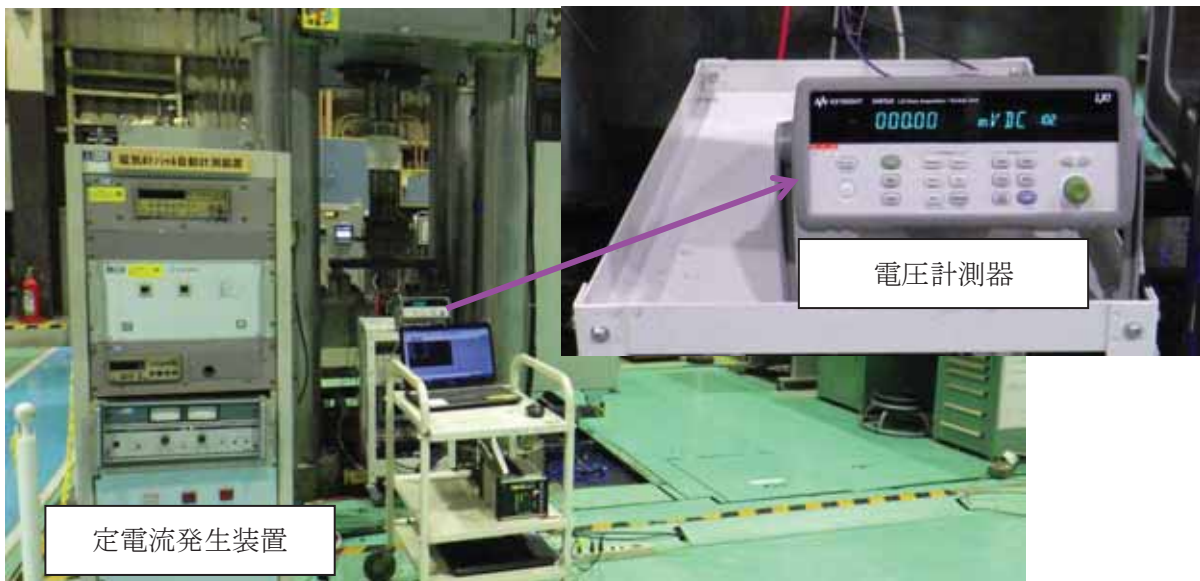


図 3.1.2.3-4 PDM 計測装置

(2) 平板試験体の製作

平板試験体の製作に用いる材料は、図 3.1.2.3-5 に示す JSW 符号 4A の材料を用いた。切り出した材料には新たに図 3.1.2.3-5 に示す刻印を打刻した。刻印はローストレス刻印(先端 0.8mmMin.)により打刻した。STEP1 の状態に外形加工した後に、STEP2 の状態に EDM スリットを加工した。主な加工条件を表 3.1.2.3-3 に示す。

計測用センサーの取付け位置を図 3.1.2.3-6 に示す。センサーは、荷重のバランスを確認するために測定するひずみゲージとき裂寸法をモニタリングするための PDM 用端子を設置した。

疲労予き裂導入は、最終の最大応力拡大係数が $15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下になるように設定した。目安として初期・中期・最終の各時期での最大応力を設定した。最大荷重条件を表 3.1.2.3-4 に示す。

また、クラッド溶接により試験体表面はき裂が 1mm 程度埋まるため、き裂深さの狙い値は、11mm~12mm とした。疲労き裂の進展は、PDM 電圧出力を記録してき裂深さを推定した。実際のき裂形状は、破壊試験後の破面観察により評価にフィードバックする。図 3.1.2.3-7 に疲労き裂深さと電圧出力の関係を示す。図中の△、□、◇は平板ダミー試験体を用いた疲労予き裂導入試験の結果、黒の実線は試験結果の近似曲線、●は疲労予き裂深さ 3mm(進展量 3mm)の時の平板試験体の FE 解析結果である。解析と試験の結果から疲労予き裂深さ 7mm 狙いの時の PDM 電圧出力(V/V_0)は 1.72 とした。ここで、 V/V_0 は、疲労き裂中に計測した電圧/き裂 0mm の時に計測した電圧である。

疲労予き裂導入結果を表 3.1.2.3-5 に示す。 V/V_0 と繰返し回数との関係を表 3.1.2.3-6~表 3.1.2.3-11 及び図 3.1.2.3-8~図 3.1.2.3-13 に示す。また、疲労予き裂導入前の試験体幅方向の静的ひずみバランス確認結果を表 3.1.2.3-12~表 3.1.2.3-17 に示す。ひずみゲージ取付位置は図 3.1.2.3-14~図 3.1.2.3-19 に示す。荷重が大きくなるほどズレは小さくなり最終的に 1%以下となったため、荷重のバランスは問題ないと考える。

1~4、6 体目はサブマージドアーク溶接で施工した。溶接材料の銘柄を表 3.1.2.3-18 に示す。各試験体の溶接条件を表 3.1.2.3-19 に示す。また溶接範囲を図 3.1.2.3-20 に示す。5 体目は低入熱にするため被覆アーク溶接で施工した。溶接材料の銘柄を表 3.1.2.3-20 に示す。5 体目の溶接条件を表 3.1.2.3-21 に示す。また溶接範囲を図 3.1.2.3-21 に示す。施工したクラッド厚さは全て 4mm 以上である。

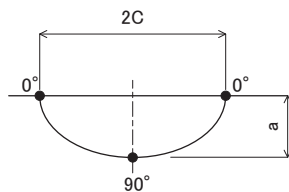
クラッド溶接の後に熱処理を実施した。熱処理条件は、表 3.1.2.3-22 に示す温度と保持時間とした。熱処理には、北浜製作所製の電気炉(ヒータ出力 30kW)を使用した。熱処理中は図 3.1.2.3-22 に示す位置に熱電対を設置し、温度を計測した。き裂周辺の試験領域が均熱であることを確認済み(図 3.1.2.3-23)であり、代表点として熱電対の設置位置を選定した。

表 3.1.2.3-3 EDM スリットの加工条件

項目	EDM 加工条件
表面長さ	$2C_0=59\text{mm}$
深さ	$a_0=5\text{mm}$
スリット幅	電極厚さ : 0.25mm

表 3.1.2.3-4 疲労予き裂導入時の最大荷重条件(狙い値)

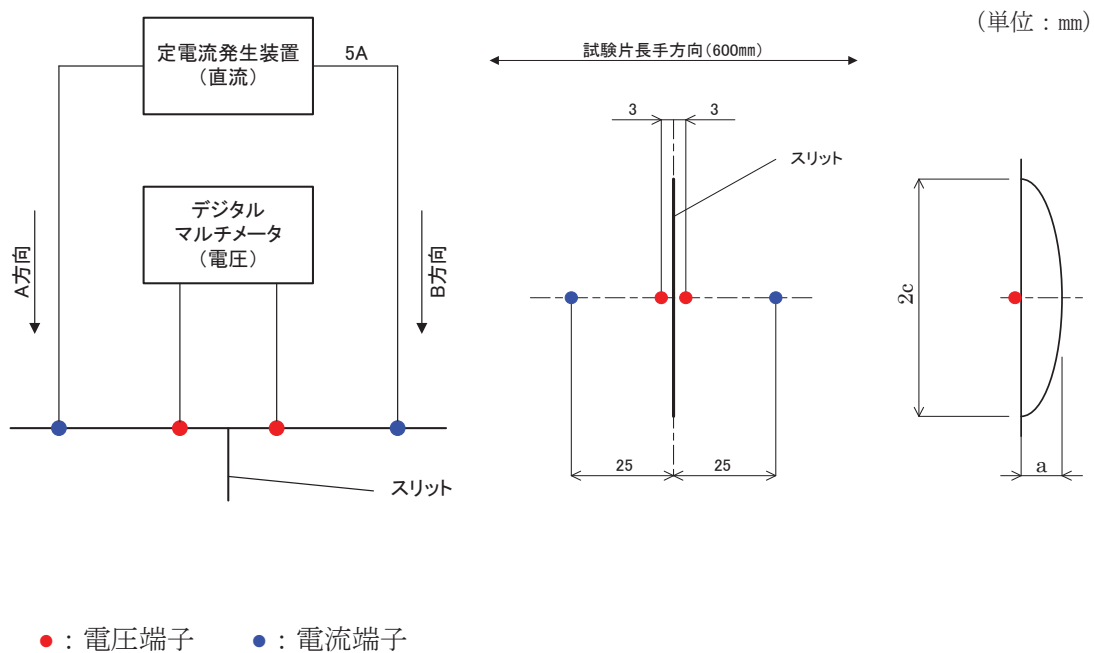
時期	表面長さ $2C(\text{mm})$	き裂深さ $a(\text{mm})$	(*1) 最大荷重 $P_{\text{max}}(\text{kgf})$	最大応力		(*2) 最大応力拡大係数 $K_{\text{max}}(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$	
				σ_{max} (kgf/mm^2)	σ_{max} (MPa)	0° (表面)	90° (最深部)
初期	59	5.0	14000	20.2	197.6	11.9	23.9
	59	7.4	14000	20.2	197.6	16.9	26.5
中期	59	7.4	10100	14.5	142.5	12.2	19.0
	59	9.8	10100	14.5	142.5	15.4	19.7
最終	59	9.8	7600	10.9	107.3	11.6	14.8
	60	12.0	7600	10.9	107.3	13.5	(*3) 14.8



(*1) : 試験装置ロードセルの荷重

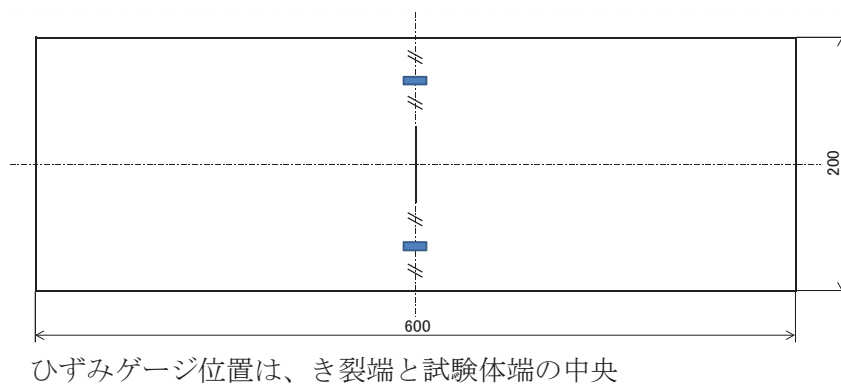
(*2) : Newman-Raju の式

(*3) : 最終 K 値は $15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下と設定



(a)PDM 計測概要

(b)PDM 端子位置



(c)ひずみゲージ取付位置

図 3.1.2.3-6 計測用センサーの取付け位置

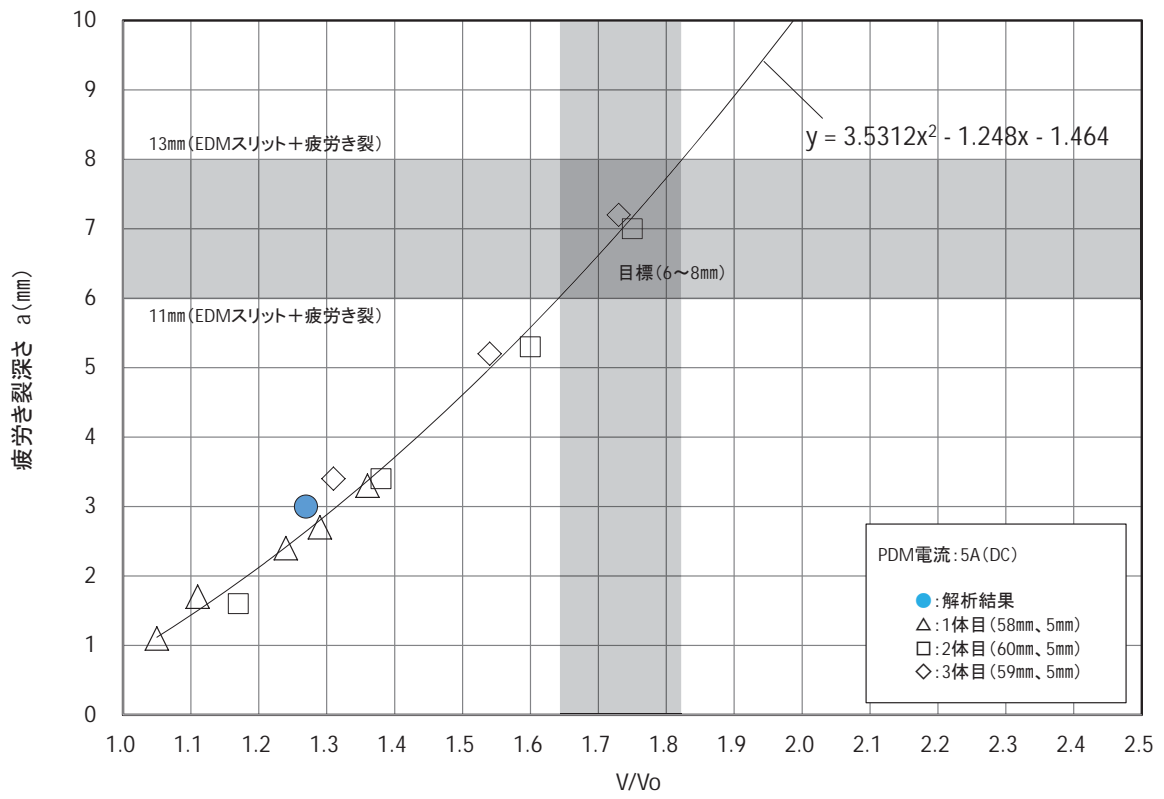


図 3.1.2.3-7 疲労き裂深さと電圧出力の関係

表 3.1.2.3-5 疲労予き裂導入結果

試験体	試験体 ID 印	総繰返し数 (cycle)	最終 V/V_0 (試験での最大荷重 負荷時に計測)	スリット端部から の表面き裂長さ (mm)	
				A	B
1 体目	JSW-4A-K-1-U	350,000	1.72	0.9	0.9
2 体目	JSW-4A-K-2-U	330,000	1.72	0.9	0.3
3 体目	JSW-4A-K-2-L	310,000	1.72	1.2	1.3
4 体目	JSW-4A-K-3-U	315,000	1.72	1.0	1.1
5 体目	JSW-4A-K-3-L	293,000	1.72	1.5	1.4
6 体目	JSW-4A-K-1-L	350,000	1.72	1.1	1.0

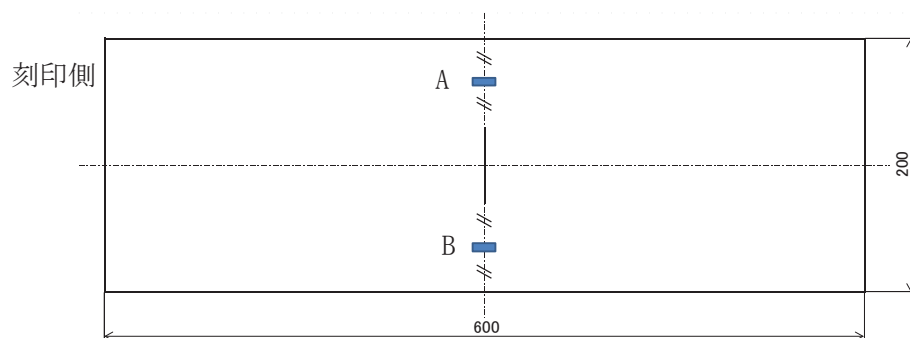


表 3.1.2.3-6 V/N₀ と繰返し回数 N の関係 (JSW-4A-K-1-U)

最大荷重 P _{max} (kN)	最小荷重 P _{min} (kN)	周波数 f (Hz)	繰返し数 N (cycles)		電圧 (mv)												V/V ₀	表面き裂長さ(mm)					
					A通電						B通電							平均	A	B			
					1回目	2回目	3回目	平均	1回目	2回目	3回目	平均											
137.3	68.6	-	0	ゼロずれ	0.0016	0.0012	0.0015	0.0058	0.0016	0.0009	0.0007	-0.0047	0.0016	0.0009	0.0007	0.0000	-	-					
				測定値	0.0072	0.0073	0.0073	-0.0032	-0.0038	-0.0040	0.0012	0.0003	0.0012	0.0012	0.0003	0.0012	0.0003	0.0000	-	-			
				ゼロずれ	0.0073	0.0082	0.0080	0.0068	-0.0039	-0.0044	-0.0038	0.0004	0.0002	0.0000	-0.0053	-0.0044	-0.0050	-0.0058	-	-			
				測定値	0.0075	0.0073	0.0082	0.0073	0.0020	0.0016	0.0010	0.0020	0.0016	0.0010	-0.0057	0.0038	0.0041	0.0045	-	-			
				ゼロずれ	0.0083	0.0087	0.0085	0.0070	-0.0038	-0.0041	-0.0045	0.0016	0.0020	0.0015	-0.0060	0.0041	0.0046	0.0042	-	-			
				測定値	0.0080	0.0081	0.0085	0.0078	-0.0041	-0.0046	-0.0042	0.0021	0.0009	0.0010	0.0069	0.0041	0.0046	0.0042	-	-			
		99.1	2	-	150,000	ゼロずれ	0.0005	0.0002	0.0010	0.0077	0.0021	0.0009	0.0010	-0.0057	0.0021	0.0009	0.0010	0.0000	-	-			
						測定値	0.0080	0.0080	0.0087	0.0077	-0.0042	-0.0041	-0.0049	0.0015	0.0013	0.0018	-0.0068	0.0015	0.0013	0.0018	-	-	
						ゼロずれ	0.0095	0.0090	0.0096	0.0086	-0.0053	-0.0057	-0.0048	0.0011	0.0008	0.0017	-0.0070	0.0011	0.0008	0.0017	-	-	
						測定値	0.0095	0.0096	0.0098	0.0089	-0.0056	-0.0062	-0.0055	0.0008	0.0000	0.0000	0.0082	-0.0056	-0.0062	-0.0055	-	-	
						ゼロずれ	0.0101	0.0100	0.0094	0.0092	0.0008	0.0000	0.0000	-0.0066	-0.0069	-0.0073	0.0008	0.0008	0.0008	0.0010	0.0000	-	-
						測定値	-0.0006	0.0005	0.0004	0.0094	-0.0061	-0.0066	-0.0061	0.0008	0.0008	0.0010	-0.0071	-0.0061	-0.0066	-0.0061	-	-	
74.5	2	10	300,000	ゼロずれ	0.0006	0.0018	0.0014	0.0101	0.0016	0.0012	0.0018	-0.0076	0.0016	0.0012	0.0018	0.0016	0.0005	-	-				
				測定値	0.0103	0.0122	0.0117	0.0101	-0.0056	-0.0065	-0.0060	0.0015	0.0002	0.0005	-0.0074	0.0015	0.0002	0.0005	0.4	0.4			
				ゼロずれ	0.0005	0.0018	0.0011	0.0100	0.0015	0.0002	0.0005	0.0015	0.0002	0.0005	-0.0074	0.0015	0.0002	0.0005	0.0087	0.0087			
				測定値	0.0105	0.0120	0.0110	0.0100	-0.0054	-0.0075	-0.0070	0.0014	0.0007	0.0013	-0.0068	0.0014	0.0007	0.0013	0.0085	0.0085			
				ゼロずれ	0.0006	0.0001	0.0007	0.0102	-0.0055	-0.0058	-0.0058	0.0014	0.0007	0.0013	-0.0068	0.0014	0.0007	0.0013	0.0085	0.0085			
				測定値	0.0107	0.0104	0.0109	0.0102	-0.0055	-0.0058	-0.0058	0.0006	0.0005	0.0005	-0.0079	-0.0055	-0.0058	-0.0058	0.55	0.55			
350,000		10	350,000	ゼロずれ	0.0000	0.0009	0.0003	0.0103	0.0006	0.0005	0.0005	-0.0079	0.0006	0.0005	0.0005	0.0005	0.85	0.85					
				測定値	0.0103	0.0113	0.0104	0.0103	-0.0072	-0.0075	-0.0073	0.0006	0.0005	0.0005	-0.0079	-0.0072	-0.0075	-0.0073	0.85	0.85			

表 3.1.2.3-7 V/N₀と繰返し回数との関係(JSW-4A-K-2-U)

最大荷重 P _{max} (kN)	最小荷重 P _{min} (kN)	周波数 f (Hz)	繰返し数 N (cycles)	電圧 (mv)												V/V ₀	表面き裂長さ(mm)						
				A通電			B通電			平均			平均	A	B								
				1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目											
				測定値	測定値	測定値	測定値	測定値	測定値	測定値	測定値	測定値											
137.3	68.6	-	0	ゼロずれ	-0.0016	-0.0019	0.0000	0.0052	-0.0019	-0.0014	-0.0018	0.0050	-0.0019	-0.0014	-0.0018	0.0050	-	-					
				測定値	0.0039	0.0031	0.0050	-0.0069	-0.0061	-0.0067	-0.0069	-0.0061	-0.0067	-0.0069	-0.0061	-0.0067	-0.0069	-0.0061	-0.0067				
				ゼロずれ	-0.0013	-0.0010	-0.0007	0.0057	-0.0009	-0.0006	0.0057	-0.0009	-0.0006	-0.0005	0.0054	-0.0009	-0.0006	-0.0005	0.0054	-	-		
				測定値	0.0044	0.0047	0.0050	-0.0057	-0.0050	-0.0044	-0.0057	-0.0050	-0.0044	-0.0044	-0.0034	-0.0034	-0.0020	-0.0018	-0.0004	-0.0054	-	-	
				ゼロずれ	-0.0010	-0.0020	-0.0001	0.0054	-0.0001	0.0054	0.0054	-0.0001	0.0054	-0.0001	0.0054	-0.0001	0.0054	-0.0001	0.0054	-0.0001	0.0054	-	-
				測定値	0.0044	0.0034	0.0054	-0.0054	-0.0054	-0.0054	-0.0054	-0.0054	-0.0054	-0.0054	-0.0054	-0.0054	-0.0054	-0.0054	-0.0054	-0.0054	-0.0054	-0.0054	
		130,000	-	10	130,000	ゼロずれ	-0.0001	-0.0009	-0.0002	0.0057	-0.0001	-0.0002	-0.0016	0.0056	-0.0001	-0.0002	-0.0016	0.0056	-	-			
						測定値	0.0057	0.0048	0.0055	-0.0074	-0.0074	-0.0071	-0.0074	-0.0074	-0.0071	-0.0074	-0.0074	-0.0071	-0.0074	-0.0074	-0.0071		
						ゼロずれ	-0.0014	-0.0013	-0.0014	0.0062	-0.0013	-0.0014	0.0062	-0.0013	-0.0014	-0.0010	0.0062	-0.0013	-0.0014	-0.0010	0.0062	-	-
						測定値	0.0049	0.0048	0.0049	-0.0072	-0.0074	-0.0075	-0.0072	-0.0074	-0.0075	-0.0072	-0.0074	-0.0075	-0.0072	-0.0074	-0.0075	-0.0072	-0.0074
						ゼロずれ	0.0000	0.0003	-0.0007	0.0063	0.0003	-0.0007	0.0063	0.0003	-0.0007	-0.0006	0.0063	0.0003	-0.0007	-0.0006	0.0063	0.0003	-0.0007
						測定値	0.0062	0.0067	0.0057	-0.0070	-0.0074	-0.0074	-0.0070	-0.0074	-0.0074	-0.0070	-0.0070	-0.0074	-0.0074	-0.0070	-0.0070	-0.0074	-0.0074
99.1	2.0	5	180,000	ゼロずれ	-0.0009	-0.0009	-0.0008	0.0070	-0.0009	-0.0008	-0.0083	0.0070	-0.0009	-0.0008	-0.0083	0.0070	-	-					
				測定値	0.0062	0.0061	0.0062	-0.0073	-0.0086	-0.0083	-0.0073	-0.0086	-0.0083	-0.0073	-0.0086	-0.0083	-0.0073	-0.0086	-0.0083				
				ゼロずれ	-0.0008	-0.0002	-0.0011	0.0074	-0.0002	-0.0011	0.0074	-0.0002	-0.0011	-0.0026	0.0074	-0.0002	-0.0011	-0.0026	0.0074	-	-		
				測定値	0.0065	0.0074	0.0061	-0.0076	-0.0100	-0.0096	-0.0076	-0.0100	-0.0096	-0.0076	-0.0100	-0.0096	-0.0076	-0.0100	-0.0096	-0.0076	-0.0100		
				ゼロずれ	-0.0012	-0.0009	-0.0009	0.0081	-0.0012	-0.0009	0.0081	-0.0012	-0.0009	-0.0013	0.0081	-0.0012	-0.0009	-0.0013	0.0081	-	-		
				測定値	0.0069	0.0072	0.0071	-0.0081	-0.0077	-0.0085	-0.0081	-0.0077	-0.0085	-0.0081	-0.0077	-0.0085	-0.0081	-0.0077	-0.0085	-0.0081	-0.0077		
74.5	2	-	225,000	ゼロずれ	-0.0013	-0.0007	-0.0009	0.0083	-0.0013	-0.0007	-0.0015	0.0083	-0.0013	-0.0007	-0.0015	0.0083	-	-					
				測定値	0.0070	0.0075	0.0074	-0.0083	-0.0086	-0.0087	-0.0083	-0.0086	-0.0087	-0.0083	-0.0086	-0.0087	-0.0083	-0.0086	-0.0087				
				ゼロずれ	-0.0012	-0.0009	-0.0008	0.0083	-0.0009	-0.0008	0.0083	-0.0009	-0.0008	-0.0022	0.0083	-0.0009	-0.0008	-0.0022	0.0083	-	-		
				測定値	0.0074	0.0072	0.0074	-0.0083	-0.0090	-0.0093	-0.0083	-0.0090	-0.0093	-0.0083	-0.0090	-0.0093	-0.0083	-0.0090	-0.0093	-0.0083	-0.0090		
				ゼロずれ	-0.0013	-0.0016	-0.0000	0.0092	-0.0013	-0.0016	-0.0000	0.0092	-0.0013	-0.0016	-0.0018	0.0092	-0.0013	-0.0016	-0.0018	0.0092	0.75	0	
				測定値	0.0080	0.0076	0.0090	-0.0080	-0.0094	-0.0095	-0.0080	-0.0094	-0.0095	-0.0080	-0.0094	-0.0095	-0.0080	-0.0094	-0.0095	-0.0080	-0.0094		
330,000	-	10	330,000	ゼロずれ	-0.0002	-0.0012	-0.0007	0.0092	-0.0002	-0.0012	-0.0011	0.0092	-0.0002	-0.0012	-0.0011	0.0092	0.9	0.25					
				測定値	0.0090	0.0081	0.0084	-0.0073	-0.0075	-0.0092	-0.0073	-0.0075	-0.0092	-0.0073	-0.0075	-0.0092	-0.0073	-0.0075	-0.0092				

表 3.1.2.3-8 V/V₀ と繰返し回数との関係(JSW-4A-K-2-L)

最大荷重 P _{max} (kN)	最小荷重 P _{min} (kN)	周波数 f (Hz)	繰返し数 N (cycles)	電圧 (mv)												V/V ₀	表面き裂長さ(mm)		
				A通電						B通電							平均	A	B
				1回目	2回目	3回目	平均	1回目	2回目	3回目	平均								
137.3	68.6	-	0	ゼロずれ	0.0003	0.0002	0.0002	0.0090	0.0005	0.0001	0.0003	0.0090	0.0005	0.0001	0.0003	0.0090	-	-	
				測定値	0.0093	0.0092	0.0092	-0.0085	-0.0090	-0.0086	-0.0085	-0.0090	-0.0086	-0.0085	-0.0090	-0.0085	-0.0090	-0.0086	-
		5	100,000	ゼロずれ	0.0000	0.0002	0.0003	0.0107	0.0005	0.0003	0.0004	0.0103	0.0005	0.0003	0.0004	0.0103	-	-	
				測定値	0.0109	0.0110	0.0107	-0.0098	-0.0100	-0.0099	-0.0098	-0.0100	-0.0099	-0.0098	-0.0100	-0.0099	-0.0100	-0.0099	-
			130,000	ゼロずれ	0.0000	0.0002	0.0003	0.0115	0.0002	0.0004	0.0002	0.0114	0.0002	0.0004	0.0002	0.0114	-	-	
				測定値	0.0116	0.0117	0.0116	-0.0112	-0.0112	-0.0110	-0.0112	-0.0112	-0.0110	-0.0112	-0.0112	-0.0110	-0.0112	-0.0110	-
		-	130,000	ゼロずれ	0.0001	0.0002	0.0003	0.0115	0.0004	0.0003	0.0003	0.0115	0.0004	0.0003	0.0003	0.0115	-	-	
				測定値	0.0116	0.0117	0.0117	-0.0111	-0.0112	-0.0111	-0.0111	-0.0112	-0.0111	-0.0111	-0.0112	-0.0111	-0.0111	-0.0111	-
		3	160,000	ゼロずれ	0.0002	0.0002	0.0000	0.0124	0.0000	0.0000	0.0000	0.0123	0.0000	0.0000	0.0000	0.0123	-	-	
				測定値	0.0125	0.0126	0.0124	-0.0121	-0.0123	-0.0124	-0.0121	-0.0123	-0.0124	-0.0121	-0.0123	-0.0124	-0.0121	-0.0123	-
99.1	2.0	-	180,000	ゼロずれ	0.0003	0.0001	0.0001	0.0131	0.0000	0.0002	0.0002	0.0130	0.0000	0.0002	0.0002	0.0130	-	-	
				測定値	0.0133	0.0132	0.0133	-0.0130	-0.0128	-0.0128	-0.0130	-0.0128	-0.0128	-0.0130	-0.0128	-0.0128	-0.0130	-0.0128	-
		-	180,000	ゼロずれ	0.0004	0.0005	0.0003	0.0130	0.0003	0.0006	0.0006	0.0130	0.0003	0.0006	0.0006	0.0130	-	-	
				測定値	0.0133	0.0136	0.0132	-0.0127	-0.0125	-0.0125	-0.0127	-0.0125	-0.0125	-0.0127	-0.0125	-0.0125	-0.0127	-0.0125	-
		3	200,000	ゼロずれ	0.0004	0.0003	0.0003	0.0139	0.0002	0.0000	0.0000	0.0140	0.0002	0.0000	0.0000	0.0140	-	-	
				測定値	0.0142	0.0142	0.0142	-0.0139	-0.0139	-0.0141	-0.0139	-0.0139	-0.0141	-0.0139	-0.0139	-0.0141	-0.0139	-0.0140	-
74.5	2.0	-	200,000	ゼロずれ	0.0000	0.0002	0.0000	0.0141	0.0000	0.0001	0.0000	0.0140	0.0000	0.0001	0.0000	0.0140	-	-	
				測定値	0.0141	0.0143	0.0141	-0.0139	-0.0140	-0.0139	-0.0139	-0.0140	-0.0139	-0.0139	-0.0140	-0.0139	-0.0139	-0.0139	-
			260,000	ゼロずれ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0148	0.0000	0.0000	0.0000	0.0148	0.0000	0.0000	0.0000	0.0148	0.5	-	
				測定値	0.0147	0.0148	0.0149	-0.0148	-0.0147	-0.0149	-0.0148	-0.0147	-0.0149	-0.0148	-0.0147	-0.0149	-0.0148	-0.0149	0.5
		5	290,000	ゼロずれ	0.0003	0.0005	0.0004	0.0152	0.0004	0.0003	0.0004	0.0150	0.0004	0.0003	0.0004	0.0150	0.9	-	
				測定値	0.0155	0.0157	0.0155	-0.0145	-0.0147	-0.0144	-0.0145	-0.0147	-0.0144	-0.0145	-0.0147	-0.0144	-0.0145	-0.0144	0.9
			310,000	ゼロずれ	0.0002	0.0000	0.0001	0.0155	0.0000	0.0000	0.0001	0.0155	0.0000	0.0000	0.0001	0.0155	1.2	1.3	
				測定値	0.0157	0.0155	0.0156	-0.0149	-0.0149	-0.0150	-0.0149	-0.0149	-0.0150	-0.0149	-0.0149	-0.0150	-0.0149	1.2	1.3

表 3.1.2.3-9 V/N₀と繰返し回数との関係(JSW-4A-K-3-U)

最大荷重 Pmax (kN)	最小荷重 Pmin (kN)	周波数 f (Hz)	繰返し数 N (cycles)	電圧 (mv)												V/V ₀	表面き裂長さ(mm)				
				A通電						B通電							平均	A	B		
				1回目	2回目	3回目	平均	1回目	2回目	3回目	平均										
137.3	68.6	-	0	ゼロずれ	0.0000	0.0008	0.0005	0.0058	-0.0013	0.0000	0.0005	0.0055	-0.0051	0.0000	0.0005	0.0055	-	-			
				測定値	0.0058	0.0066	0.0064	0.0063	-0.0051	-0.0047	-0.0063	-0.0051	-0.0047	-0.0063	-	-					
			100,000	ゼロずれ	0.0001	0.0005	0.0010	0.0067	0.0000	0.0015	0.0006	-0.0064	-0.0050	0.0065	-0.0063	0.0000	0.0006	0.0065	-	-	
				測定値	0.0069	0.0072	0.0076	0.0067	-0.0064	-0.0050	0.0055	-0.0064	-0.0050	0.0055	-0.0063	-0.0064	-0.0050	0.0055	-	-	
				ゼロずれ	0.0000	-0.0004	0.0010	0.0072	0.0012	0.0013	-0.0002	-0.0049	-0.0046	-0.0061	0.0066	-0.0060	-0.0046	-0.0061	0.0066	-	-
				測定値	0.0071	0.0068	0.0082	0.0072	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005	-0.0067	0.0005	0.0005	0.0005	-	-
99.1	2.0	-	150,000	ゼロずれ	0.0002	0.0002	0.0004	0.0076	0.0004	0.0000	0.0000	0.0073	-0.0064	0.0000	0.0000	0.0073	-	-			
				測定値	0.0079	0.0078	0.0079	0.0076	-0.0064	-0.0070	-0.0071	-0.0064	-0.0070	-0.0071	-0.0069	-0.0064	-0.0070	-0.0069	-	-	
			180,000	ゼロずれ	0.0004	0.0005	0.0002	0.0089	0.0000	0.0010	0.0006	0.0000	0.0010	0.0006	0.0081	-0.0074	-0.0060	-0.0065	-	-	
				測定値	0.0093	0.0094	0.0092	0.0089	-0.0074	-0.0060	-0.0065	-0.0074	-0.0060	-0.0065	-0.0072	-0.0074	-0.0060	-0.0065	-	-	
				ゼロずれ	0.0009	-0.0001	0.0008	0.0091	0.0006	0.0005	0.0000	0.0006	0.0005	0.0000	0.0082	-0.0067	-0.0068	-0.0075	-	-	
				測定値	0.0101	0.0088	0.0099	0.0091	-0.0067	-0.0068	-0.0075	-0.0067	-0.0068	-0.0075	-0.0074	-0.0067	-0.0068	-0.0075	-	-	
74.5	2.0	-	200,000	ゼロずれ	0.0000	0.0003	0.0002	0.0093	0.0010	0.0010	0.0084	-0.0069	0.0000	0.0084	0.0010	0.0006	-	-			
				測定値	0.0093	0.0095	0.0096	0.0093	-0.0069	-0.0064	-0.0067	-0.0069	-0.0064	-0.0067	-0.0075	-0.0069	-0.0064	-0.0067	-	-	
			200,000	ゼロずれ	0.0003	0.0000	0.0000	0.0092	0.0008	0.0008	0.0092	0.0008	0.0008	0.0085	-0.0077	0.0008	0.0008	0.0085	-	-	
				測定値	0.0096	0.0092	0.0092	0.0092	-0.0071	-0.0069	-0.0070	-0.0071	-0.0069	-0.0070	-0.0077	-0.0069	-0.0070	-0.0077	-	-	
				ゼロずれ	0.0003	0.0012	0.0005	0.0103	0.0005	0.0005	0.0006	0.0005	0.0005	0.0006	0.0092	-0.0075	-0.0077	-0.0077	0.85	-	
				測定値	0.0106	0.0116	0.0107	0.0103	-0.0075	-0.0077	-0.0077	-0.0075	-0.0077	-0.0077	-0.0082	-0.0075	-0.0077	-0.0077	0.85	-	
315,000	10	305,000	ゼロずれ	0.0000	0.0006	-0.0001	0.0105	0.0003	0.0010	0.0011	0.0093	-0.0081	0.0010	0.0011	0.0093	-	-				
			測定値	0.0104	0.0111	0.0105	0.0105	-0.0078	-0.0071	-0.0069	-0.0078	-0.0071	-0.0069	-0.0081	-0.0078	-0.0071	-0.0069	0.9	-		
		313,000	ゼロずれ	0.0006	0.0005	0.0003	0.0105	0.0003	0.0008	0.0005	0.0003	0.0008	0.0005	0.0094	-0.0078	-0.0076	0.0094	1.0	-		
			測定値	0.0111	0.0110	0.0109	0.0105	-0.0078	-0.0076	-0.0076	-0.0078	-0.0076	-0.0076	-0.0082	-0.0078	-0.0076	-0.0076	1.0	-		
			ゼロずれ	-0.0005	0.0000	0.0006	0.0106	0.0002	0.0005	0.0002	0.0002	0.0005	0.0002	0.0094	0.0002	0.0005	0.0002	1.0	1.1		
			測定値	0.0102	0.0105	0.0112	0.0106	-0.0081	-0.0076	-0.0080	-0.0081	-0.0076	-0.0080	-0.0082	-0.0081	-0.0076	-0.0080	1.0	1.1		

表 3.1.2.3-10 V/V_0 と繰返し回数 N の関係 (JSW-4A-K-3-L)

最大荷重 Pmax (kN)	最小荷重 Pmin (kN)	周波数 f (Hz)	繰返し数 N (cycles)	電圧 (mv)														V/V ₀	表面き裂長さ(mm)			
				A通電							B通電								平均	A	B	
				1回目	2回目	3回目	平均	1回目	2回目	3回目	平均											
137.3	68.6	-	0	ゼロずれ	0.0000	0.0000	0.0000	0.0088	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0088	-0.0002	-0.0088	-0.0002	-0.0088	0.0088	-	-			
				測定値	0.0088	0.0088	0.0087	0.0088	-0.0088	-0.0090	-0.0088	-0.0090	-0.0088	-0.0088	-0.0090	-0.0088	-0.0088	-0.0088	-	-		
				ゼロずれ	0.0003	0.0005	0.0006	0.0104	0.0005	0.0005	0.0006	0.0104	0.0005	0.0005	0.0006	-0.0100	-0.0105	-0.0105	0.0105	-	-	
				測定値	0.0107	0.0110	0.0110	0.0112	0.0110	0.0110	0.0110	0.0112	0.0110	0.0110	0.0110	-0.0099	-0.0100	-0.0105	0.0105	-	-	
				ゼロずれ	0.0002	0.0000	0.0000	0.0112	0.0000	0.0000	0.0112	0.0000	0.0000	0.0000	0.0004	0.0004	-0.0111	-0.0111	0.0112	-	-	
				測定値	0.0114	0.0113	0.0112	0.0112	0.0113	0.0112	0.0112	0.0112	0.0112	0.0112	0.0112	-0.0109	-0.0108	-0.0111	0.0112	-	-	
99.1	2.0	3	120,000	ゼロずれ	0.0003	0.0004	0.0005	0.0112	0.0006	0.0004	0.0004	0.0112	0.0006	0.0004	0.0004	-0.0112	0.0112	-	-			
				測定値	0.0115	0.0117	0.0115	0.0112	0.0107	0.0107	0.0108	0.0112	0.0107	0.0107	-0.0107	-0.0108	-0.0112	0.0112	-	-		
				ゼロずれ	0.0001	0.0000	0.0002	0.0122	0.0000	0.0002	0.0122	0.0000	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	-0.0121	0.0121	0.0121	-	-	
				測定値	0.0123	0.0122	0.0124	0.0122	0.0121	0.0119	0.0118	0.0122	0.0121	0.0119	-0.0119	-0.0118	-0.0121	0.0121	0.0121	-	-	
				ゼロずれ	0.0000	-0.0001	-0.0002	0.0129	0.0000	0.0000	0.0129	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0001	-0.0001	-0.0130	0.0130	0.0130	-	-	
				測定値	0.0128	0.0127	0.0128	0.0129	0.0128	0.0128	0.0128	0.0129	0.0127	0.0127	-0.0130	-0.0131	-0.0130	0.0130	0.0130	-	-	
74.5	2.0	5	180,000	ゼロずれ	-0.0002	0.0000	0.0000	0.0134	0.0000	0.0000	0.0134	0.0000	0.0000	0.0002	-0.0132	0.0133	0.0133	-	-			
				測定値	0.0132	0.0134	0.0134	0.0134	0.0133	0.0133	0.0134	0.0132	0.0132	0.0132	-0.0132	-0.0130	-0.0132	0.0133	0.0133	-	-	
				ゼロずれ	-0.0002	0.0000	-0.0003	0.0136	0.0000	0.0000	0.0136	0.0000	0.0000	0.0001	-0.0002	-0.0002	-0.0135	0.0136	0.0136	0.1	-	
				測定値	0.0135	0.0136	0.0133	0.0136	0.0136	0.0133	0.0136	0.0135	0.0136	0.0136	-0.0136	-0.0137	-0.0137	-0.0135	0.0136	0.0136	0.2	-
				ゼロずれ	-0.0001	-0.0002	-0.0001	0.0137	0.0000	0.0000	0.0137	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0137	0.0137	0.0136	-	-	
				測定値	0.0136	0.0135	0.0135	0.0137	0.0136	0.0135	0.0137	0.0136	0.0135	0.0135	-0.0135	-0.0136	-0.0136	-0.0136	0.0136	0.0136	-	-
137.3	-	-	285,000	ゼロずれ	0.0002	0.0000	0.0002	0.0150	0.0000	0.0002	0.0150	0.0005	0.0005	0.0002	-0.0149	0.0150	0.0150	1.35	1.35			
				測定値	0.0152	0.0150	0.0152	0.0150	0.0149	0.0149	0.0147	0.0150	0.0149	0.0143	-0.0147	-0.0149	0.0150	0.0150	1.35	1.35		
				ゼロずれ	0.0002	0.0000	0.0002	0.0151	0.0000	0.0000	0.0151	0.0000	0.0000	0.0002	-0.0147	-0.0147	0.0150	0.0150	1.45	1.45		
				測定値	0.0153	0.0152	0.0152	0.0151	0.0146	0.0147	0.0147	0.0151	0.0146	0.0147	-0.0147	-0.0147	0.0150	0.0150	1.45	1.45		
				ゼロずれ	-0.0001	0.0000	-0.0003	0.0151	0.0000	0.0000	0.0151	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0149	0.0151	0.0150	1.35	1.35	
				測定値	0.0151	0.0151	0.0148	0.0151	0.0149	0.0148	0.0151	0.0149	0.0148	0.0150	-0.0149	-0.0149	0.0150	0.0150	1.45	1.45		
137.3	-	-	293,000	ゼロずれ	0.0000	0.0001	-0.0001	0.0152	0.0000	0.0001	0.0152	-0.0001	0.0000	0.0000	-0.0150	0.0151	0.0151	1.45	1.4			
				測定値	0.0153	0.0153	0.0151	0.0152	0.0150	0.0151	0.0151	0.0152	0.0151	0.0150	-0.0150	-0.0150	0.0151	0.0151	1.45	1.4		

表 3.1.2.3-11 V/V_0 と繰返し回数 N の関係 (JSW-4A-K-1-L)

最大荷重 P_{max} (kN)	最小荷重 P_{min} (kN)	周波数 f (Hz)	繰返し数 N (cycles)	電圧 (mv)														表面き裂長さ(mm)				
				A通電							B通電											
				1回目		2回目		3回目		平均	1回目		2回目		3回目		平均	平均	A	B		
				1回目	2回目	3回目	平均	1回目	2回目	3回目	平均											
137.3	68.6	5	0	ゼロずれ	0.0000	0.0000	0.0002	0.0091	0.0000	0.0000	0.0001	0.0004	0.0090	0.0000	0.0000	0.0004	0.0090	—	—			
				測定値	0.0090	0.0091	0.0093	0.0091	-0.0090	-0.0089	-0.0085	-0.0090	-0.0089	-0.0085	-0.0090	—	—					
				ゼロずれ	0.0003	0.0003	0.0008	0.0100	0.0002	0.0004	0.0005	0.0002	0.0004	0.0005	0.0101	0.0002	0.0004	0.0005	0.0101	—	—	
				測定値	0.0104	0.0103	0.0108	0.0100	-0.0098	-0.0098	-0.0098	0.0100	-0.0098	-0.0098	-0.0098	0.0101	-0.0098	-0.0098	-0.0098	0.0101	—	—
				ゼロずれ	0.0002	0.0005	0.0004	0.0110	0.0000	0.0005	0.0005	0.0110	0.0000	0.0005	0.0005	0.0109	0.0000	0.0005	0.0005	0.0109	—	—
				測定値	0.0114	0.0115	0.0113	0.0110	-0.0106	-0.0107	-0.0101	0.0110	-0.0106	-0.0107	-0.0101	0.0109	-0.0106	-0.0107	-0.0101	0.0109	—	—
99.1	2.0	3	140,000	ゼロずれ	0.0000	0.0003	0.0004	0.0111	0.0001	0.0003	0.0002	0.0002	0.0111	0.0000	0.0003	0.0002	0.0111	0.0000	0.0003	0.0002		
				測定値	0.0112	0.0114	0.0115	0.0111	-0.0108	-0.0109	-0.0108	0.0111	-0.0108	-0.0109	-0.0108	0.0111	-0.0108	-0.0109	-0.0108	0.0111	—	—
				ゼロずれ	0.0002	0.0001	0.0003	0.0113	0.0000	0.0001	0.0002	0.0113	0.0000	0.0001	0.0002	0.0113	0.0000	0.0001	0.0002	0.0113	—	—
				測定値	0.0117	0.0113	0.0116	0.0113	-0.0112	-0.0111	-0.0111	0.0113	-0.0112	-0.0111	-0.0111	0.0113	-0.0112	-0.0111	-0.0111	0.0113	—	—
				ゼロずれ	0.0005	0.0003	0.0002	0.0115	0.0003	0.0002	0.0002	0.0115	0.0003	0.0002	0.0003	0.0114	0.0003	0.0002	0.0003	0.0114	—	—
				測定値	0.0119	0.0117	0.0118	0.0115	-0.0110	-0.0111	-0.0111	0.0115	-0.0110	-0.0111	-0.0111	0.0114	-0.0110	-0.0111	-0.0111	0.0114	—	—
74.5	2.0	5	150,000	ゼロずれ	0.0000	0.0002	0.0001	0.0122	0.0000	0.0002	0.0001	0.0122	0.0000	0.0002	0.0001	0.0122	0.0000	0.0002	0.0001	0.0122		
				測定値	0.0122	0.0122	0.0121	0.0122	-0.0122	-0.0123	-0.0123	0.0122	-0.0122	-0.0123	-0.0123	0.0122	-0.0122	-0.0123	-0.0123	0.0122	—	—
				ゼロずれ	0.0005	0.0005	0.0007	0.0130	0.0005	0.0004	0.0006	0.0130	0.0005	0.0004	0.0006	0.0130	0.0005	0.0004	0.0006	0.0130	—	—
				測定値	0.0134	0.0136	0.0138	0.0130	-0.0125	-0.0126	-0.0124	0.0130	-0.0125	-0.0126	-0.0124	0.0130	-0.0125	-0.0126	-0.0124	0.0130	—	—
				ゼロずれ	0.0000	0.0000	0.0002	0.0141	0.0000	0.0004	0.0003	0.0141	0.0000	0.0004	0.0003	0.0140	0.0000	0.0004	0.0003	0.0140	—	—
				測定値	0.0140	0.0141	0.0143	0.0141	-0.0138	-0.0137	-0.0137	0.0141	-0.0138	-0.0137	-0.0137	0.0140	-0.0138	-0.0137	-0.0137	0.0140	—	—
74.5	2.0	5	230,000	ゼロずれ	0.0003	0.0006	0.0005	0.0139	0.0004	0.0005	0.0004	0.0139	0.0004	0.0005	0.0004	0.0139	0.0004	0.0005	0.0004	0.0139		
				測定値	0.0142	0.0142	0.0144	0.0139	-0.0135	-0.0136	-0.0135	0.0139	-0.0135	-0.0136	-0.0135	0.0139	-0.0135	-0.0136	-0.0135	0.0139	—	—
				ゼロずれ	-0.0004	-0.0004	-0.0005	0.0151	-0.0008	-0.0006	-0.0006	0.0151	-0.0008	-0.0006	-0.0006	0.0151	-0.0008	-0.0006	-0.0006	0.0151	—	—
				測定値	0.0147	0.0148	0.0145	0.0151	-0.0158	-0.0158	-0.0159	0.0151	-0.0158	-0.0158	-0.0159	0.0151	-0.0158	-0.0158	-0.0159	0.0151	—	—
				ゼロずれ	-0.0009	-0.0008	-0.0007	0.0155	-0.0008	-0.0008	-0.0007	0.0155	-0.0008	-0.0008	-0.0007	0.0155	-0.0008	-0.0008	-0.0007	0.0155	—	—
				測定値	0.0147	0.0146	0.0148	0.0155	-0.0162	-0.0163	-0.0162	0.0155	-0.0162	-0.0163	-0.0162	0.0155	-0.0162	-0.0163	-0.0162	0.0155	1.1	1.0

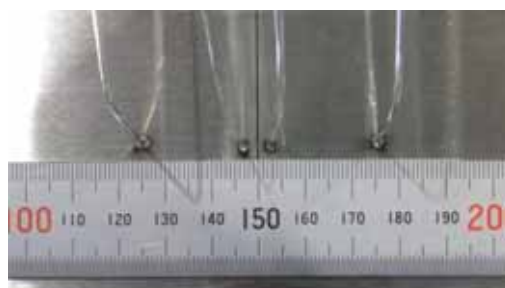
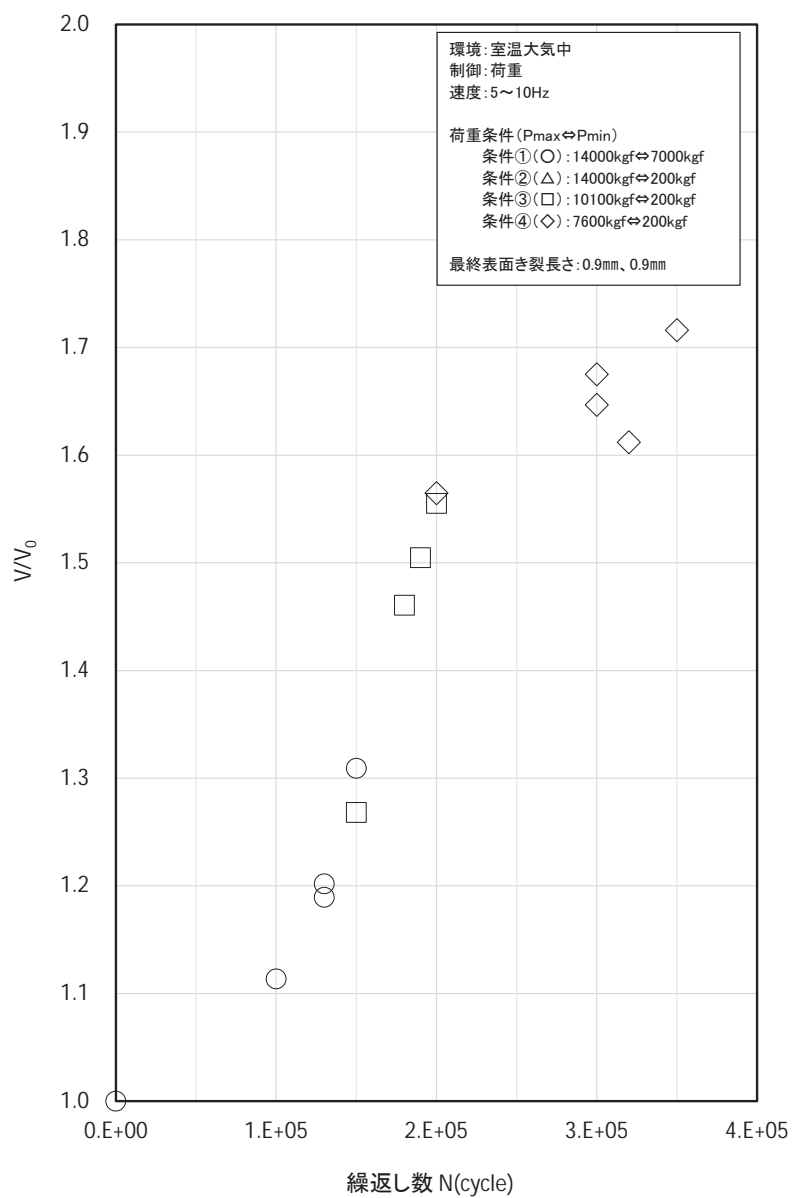


図 3.1.2.3-8 V/V₀と繰返し数の関係(JSW-4A-K-1-U)

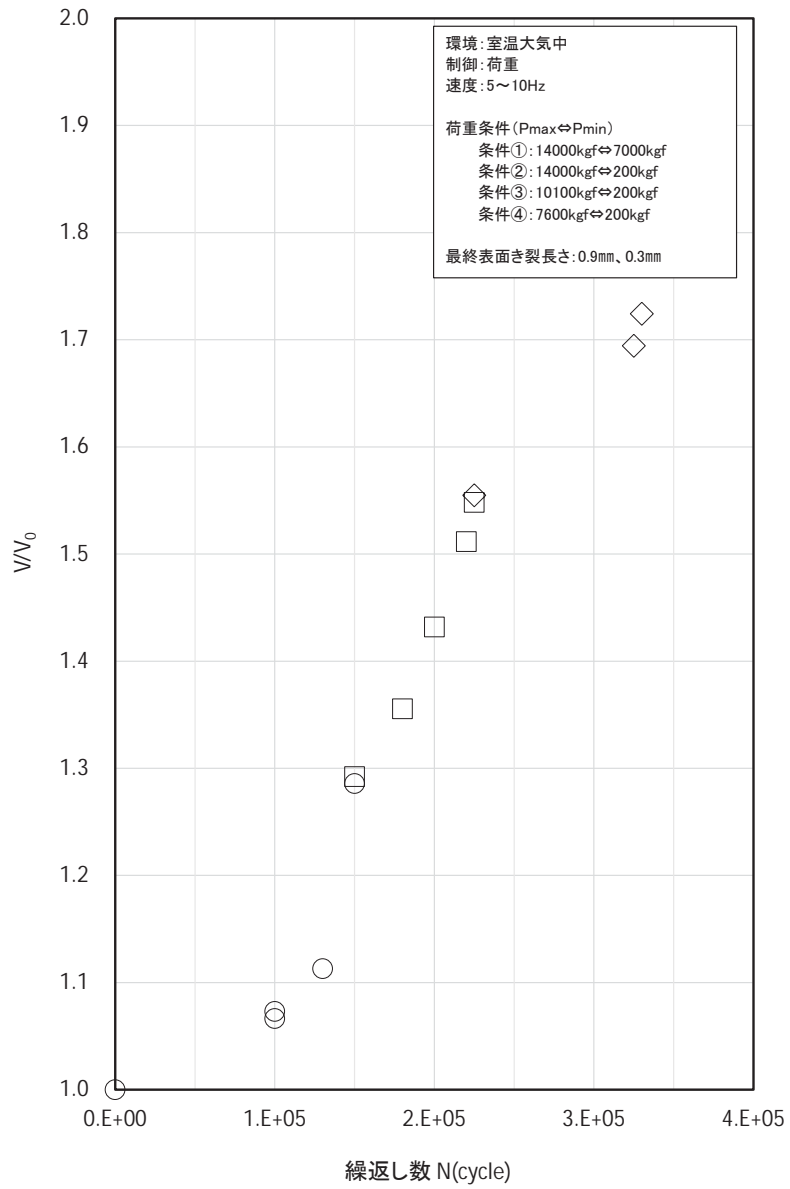


図 3.1.2.3-9 V/V₀と繰返し数の関係(JSW-4A-K-2-U)

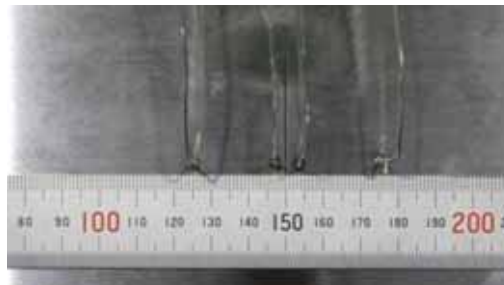
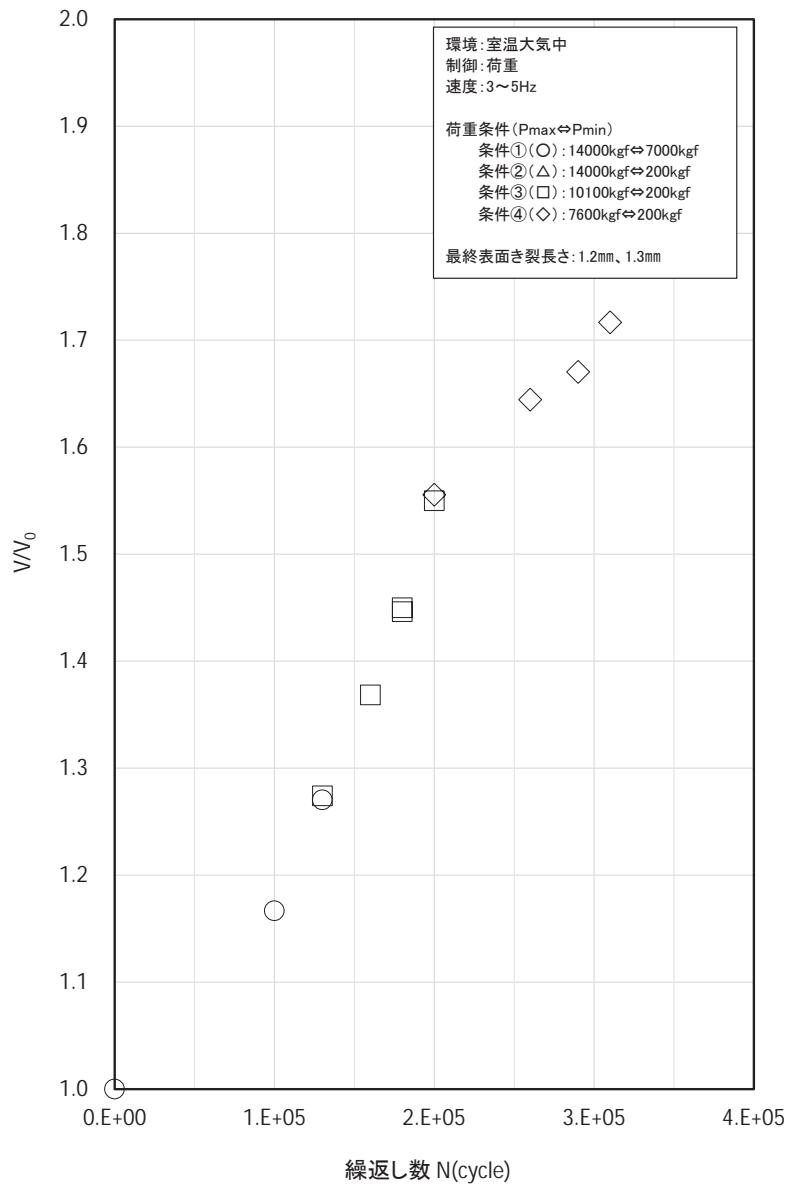


図 3.1.2.3-10 V/V₀と繰返し数の関係(JSW-4A-K-2-L)

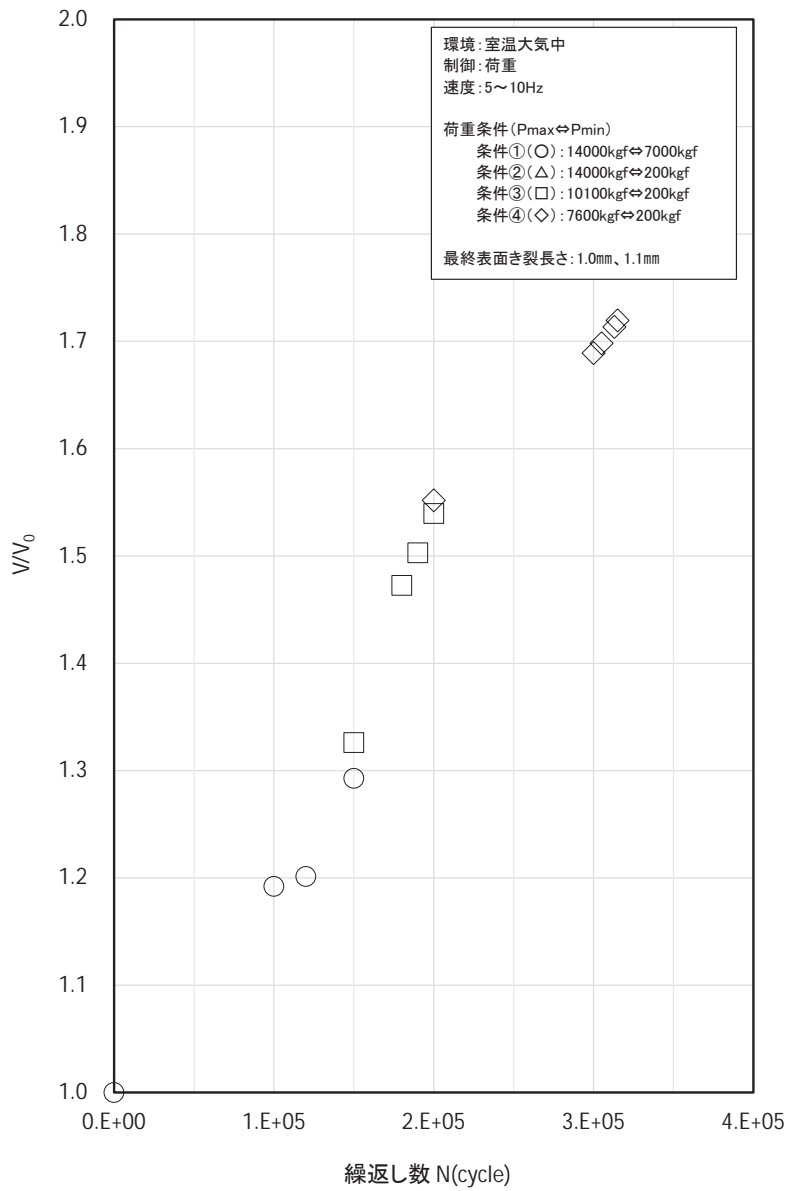


図 3.1.2.3-11 V/V₀と繰返し数の関係(JSW-4A-K-3-U)

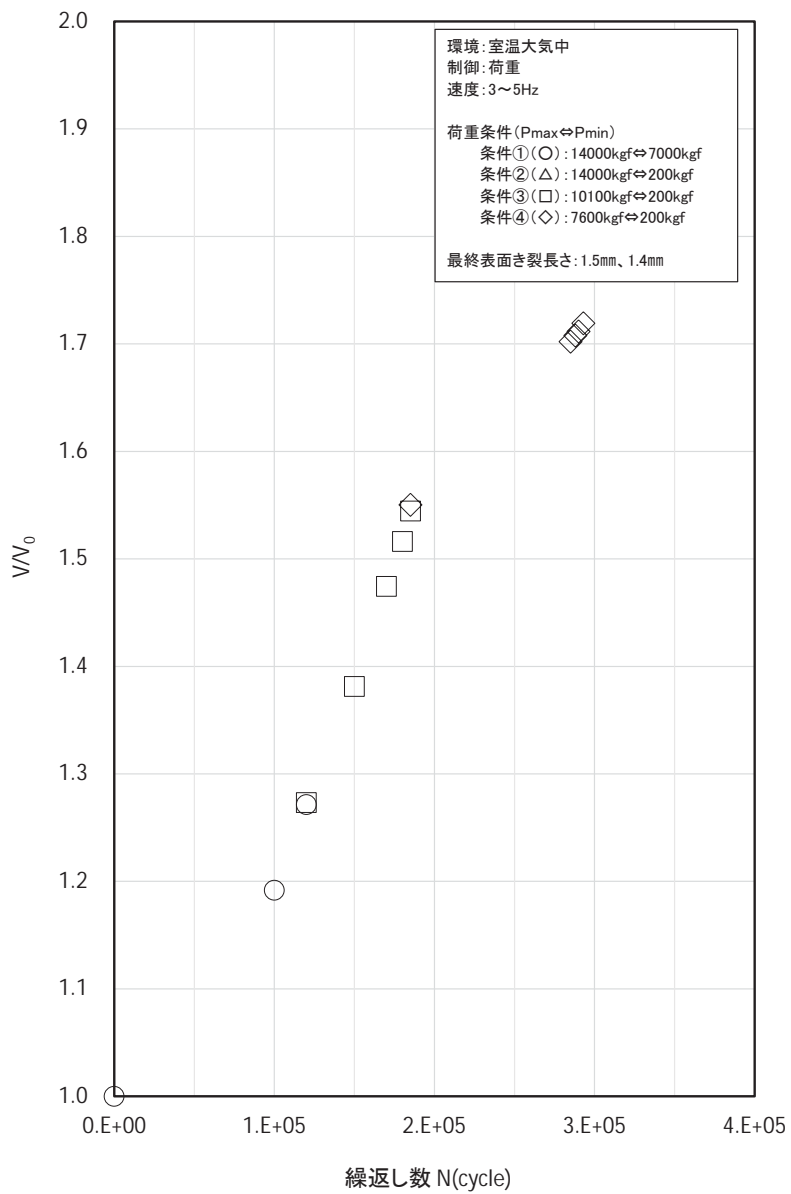


図 3.1.2.3-12 V/V₀と繰返し数の関係(JSW-4A-K-3-L)

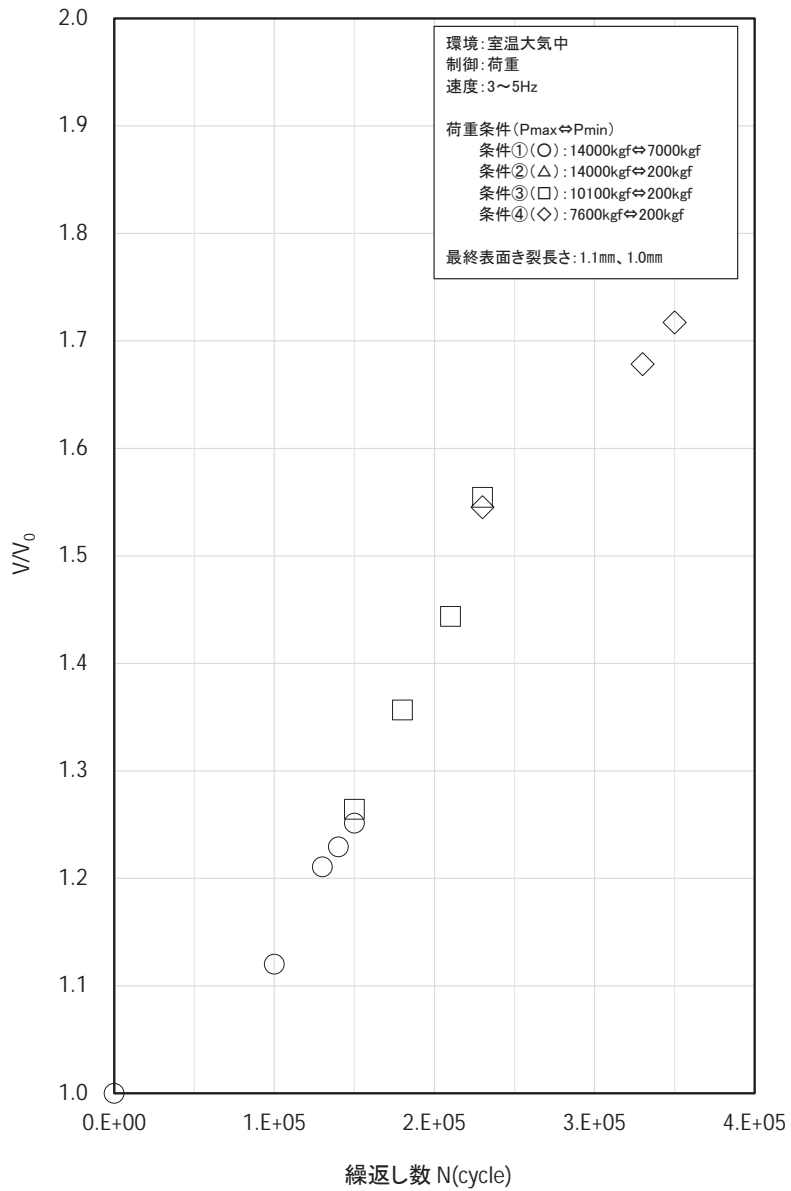


図 3.1.2.3-13 V/V₀と繰返し数の関係(JSW-4A-K-1-L)

表 3.1.2.3-12 疲労予き裂前の静的ひずみバランス(JSW-4A-K-1-U)

荷重 P(kN)	応力 σ (MPa)	JSW-4A-K-1-U				
		ひずみ				
		計測値			ズレ(%)	
		B(μ)	A(μ)	平均(μ)	B(μ)	A(μ)
0	0.0	0	0	0	—	—
10	14.4	66	68	67	-1.5	1.5
20	28.8	135	137	136	-0.7	0.7
30	43.2	203	206	204.5	-0.7	0.7
40	57.6	270	273	271.5	-0.6	0.6
50	72.0	337	339	338	-0.3	0.3
40	57.6	268	271	269.5	-0.6	0.6
30	43.2	201	205	203	-1.0	1.0
20	28.8	133	136	134.5	-1.1	1.1
10	14.4	64	65	64.5	-0.8	0.8
0	0.0	-4	-4	-4	—	—

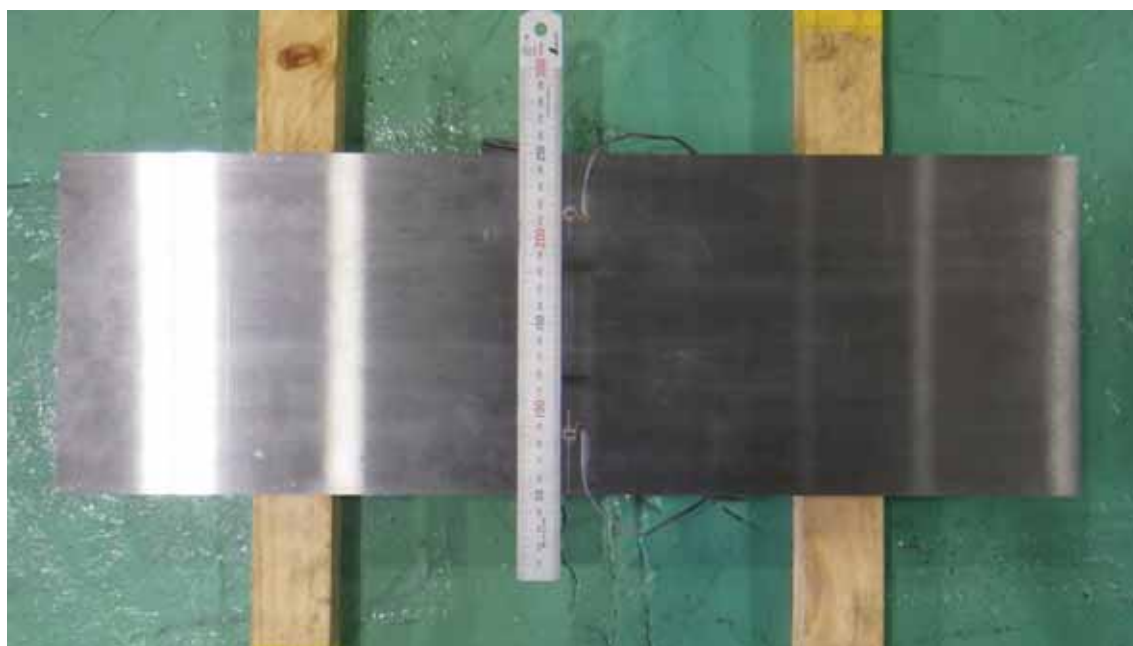


図 3.1.2.3-14 ひずみゲージの位置(JSW-4A-K-1-U)

表 3.1.2.3-13 疲労予き裂前の静的ひずみバランス(JSW-4A-K-2-U)

荷重 P(kN)	応力 σ (MPa)	JSW-4A-K-2-U				
		ひずみ				
		計測値			ズレ(%)	
		B(μ)	A(μ)	平均(μ)	B(μ)	A(μ)
0	0.0	0	0	0	—	—
10	14.4	69	67	68	1.5	-1.5
20	28.8	138	135	136.5	1.1	-1.1
30	43.2	208	202	205	1.5	-1.5
40	57.6	276	270	273	1.1	-1.1
50	72.0	344	338	341	0.9	-0.9
40	57.6	274	268	271	1.1	-1.1
30	43.2	207	201	204	1.5	-1.5
20	28.8	136	132	134	1.5	-1.5
10	14.4	66	64	65	1.5	-1.5
0	0.0	-2	-3	-2.5	—	—



図 3.1.2.3-15 ひずみゲージの位置(JSW-4A-K-2-U)

表 3.1.2.3-14 疲労予き裂前の静的ひずみバランス(JSW-4A-K-2-L)

荷重 P(kN)	応力 σ (MPa)	JSW-4A-K-2-L				
		ひずみ				
		計測値			ズレ(%)	
		B(μ)	A(μ)	平均(μ)	B(μ)	A(μ)
0	0.0	0	0	0	—	—
10	14.4	66	68	67	-1.5	1.5
20	28.8	135	135	135	0.0	0.0
30	43.2	201	202	201.5	-0.2	0.2
40	57.6	266	267	266.5	-0.2	0.2
50	72.0	333	333	333	0.0	0.0
40	57.6	267	266	266.5	0.2	-0.2
30	43.2	201	201	201	0.0	0.0
20	28.8	133	135	134	-0.7	0.7
10	14.4	66	67	66.5	-0.8	0.8
0	0.0	0	0	0	—	—

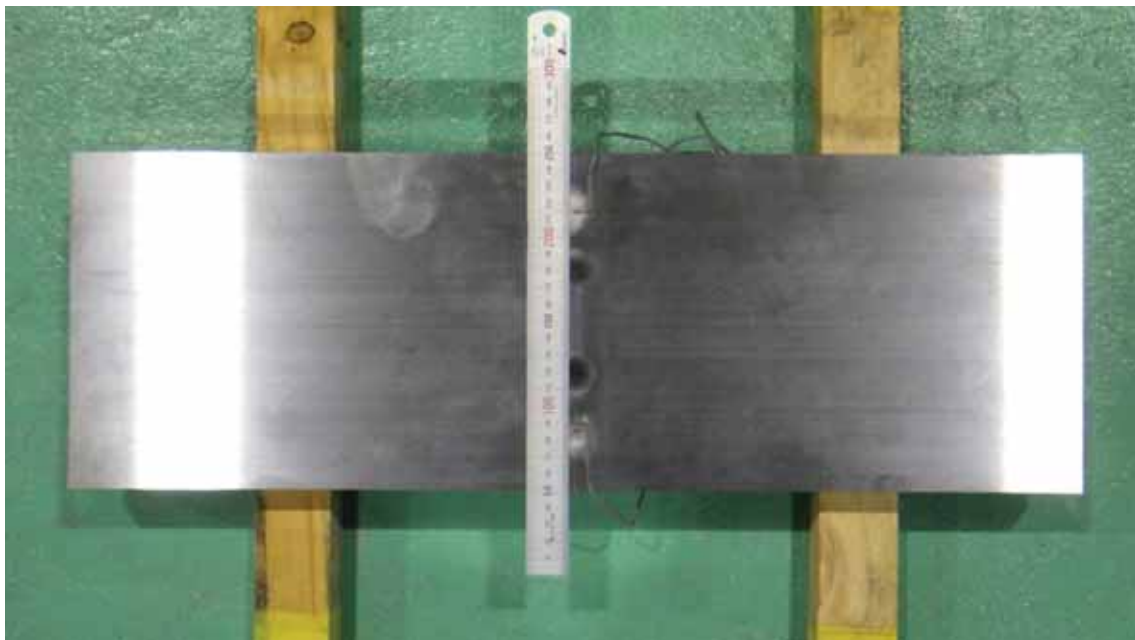


図 3.1.2.3-16 ひずみゲージの位置(JSW-4A-K-2-L)

表 3.1.2.3-15 疲労予き裂前の静的ひずみバランス(JSW-4A-K-3-U)

荷重 P(kN)	応力 σ (MPa)	JSW-4A-K-3-U				
		ひずみ				
		計測値			ズレ(%)	
		B(μ)	A(μ)	平均(μ)	B(μ)	A(μ)
0	0.0	0	0	0	—	—
10	14.4	70	68	69	1.4	-1.4
20	28.8	138	136	137	0.7	-0.7
30	43.2	207	206	206.5	0.2	-0.2
40	57.6	276	275	275.5	0.2	-0.2
50	72.0	344	343	343.5	0.1	-0.1
40	57.6	275	273	274	0.4	-0.4
30	43.2	207	204	205.5	0.7	-0.7
20	28.8	137	136	136.5	0.4	-0.4
10	14.4	68	65	66.5	2.3	-2.3
0	0.0	0	-1	-0.5	—	—

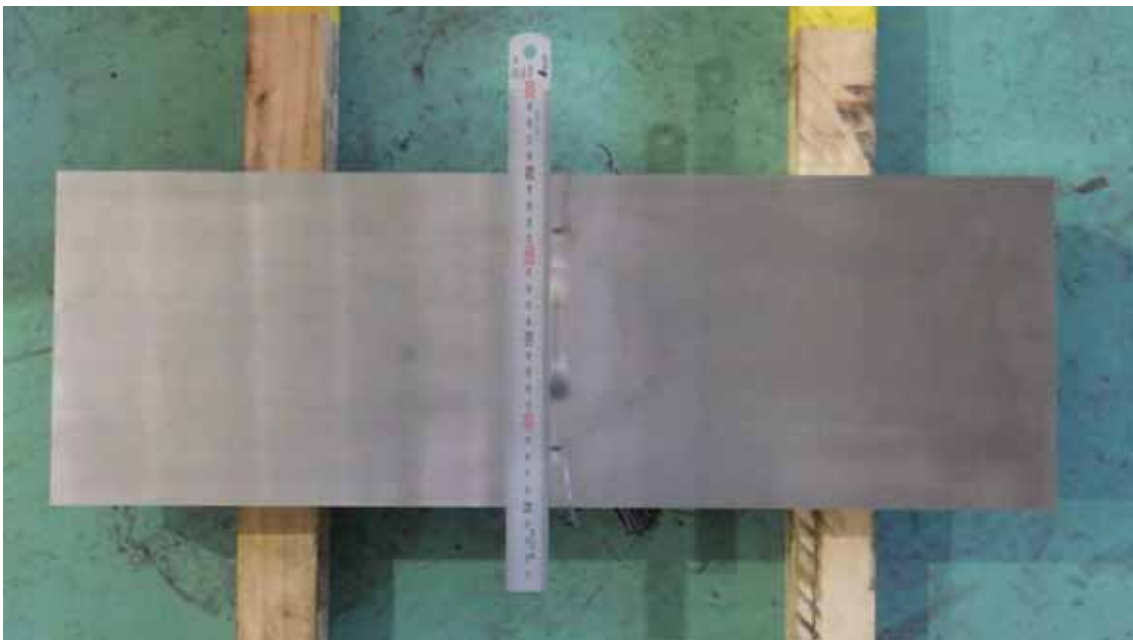


図 3.1.2.3-17 ひずみゲージの位置(JSW-4A-K-3-U)

表 3.1.2.3-16 疲労予き裂前の静的ひずみバランス(JSW-4A-K-3-L)

荷重 P(kN)	応力 σ (MPa)	JSW-4A-K-3-L				
		ひずみ				
		計測値			ズレ(%)	
		B(μ)	A(μ)	平均(μ)	B(μ)	A(μ)
0	0.0	0	0	0	—	—
10	14.4	65	64	64.5	0.8	-0.8
20	28.8	130	128	129	0.8	-0.8
30	43.2	196	194	195	0.5	-0.5
40	57.6	263	260	261.5	0.6	-0.6
50	72.0	329	327	328	0.3	-0.3
40	57.6	266	264	265	0.4	-0.4
30	43.2	198	195	196.5	0.8	-0.8
20	28.8	132	129	130.5	1.1	-1.1
10	14.4	64	63	63.5	0.8	-0.8
0	0.0	-1	0	-0.5	—	—

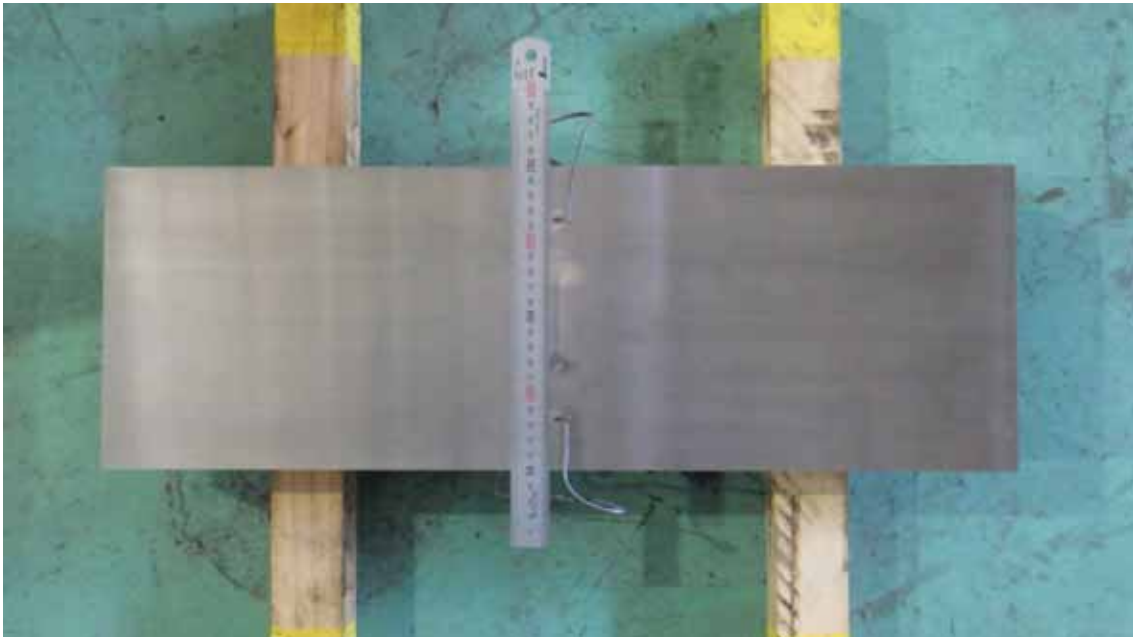


図 3.1.2.3-18 ひずみゲージの位置(JSW-4A-K-3-L)

表 3.1.2.3-17 疲労予き裂前の静的ひずみバランス(JSW-4A-K-1-L)

荷重 P(kN)	応力 σ (MPa)	JSW-4A-K-1-L				
		ひずみ				
		計測値			ズレ(%)	
		B(μ)	A(μ)	平均(μ)	B(μ)	A(μ)
0	0.0	0	0	0	—	—
10	14.4	59	64	61.5	-4.1	4.1
20	28.8	125	129	127	-1.6	1.6
30	43.2	194	198	196	-1.0	1.0
40	57.6	257	261	259	-0.8	0.8
50	72.0	324	327	325.5	-0.5	0.5
40	57.6	260	265	262.5	-1.0	1.0
30	43.2	194	199	196.5	-1.3	1.3
20	28.8	126	131	128.5	-1.9	1.9
10	14.4	59	60	59.5	-0.8	0.8
0	0.0	-9	-7	-8	—	—

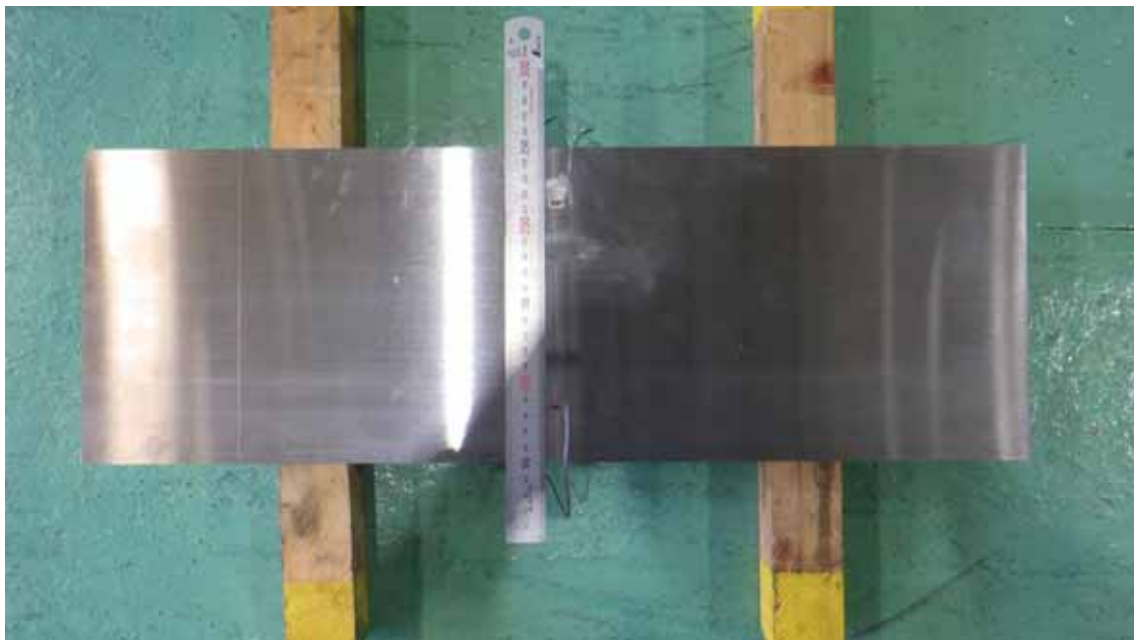


図 3.1.2.3-19 ひずみゲージの位置(JSW-4A-K-1-L)

表 3.1.2.3-18 溶接材料(1~4、6 体目)

銘柄	規格
溶接ワイヤ:US-B309L フラックス:PF-B1	JIS Z3322 YB308-F 該当

表 3.1.2.3-19 溶接条件(1~4、6 体目)

項目	実績				
溶接方法	サブマージドアーク溶接				
試験体	1	2	3	4	6
試験片記号	U JSW-4A-K-1-U	U JSW-4A-K-2-U	U JSW-4A-K-2-L	U JSW-4A-K-3-U	U JSW-4A-K-1-L
電流 [A]	850	850	850	850	850
電圧 [V]	28	28	28	28	28
速度 [cm/min.]	18	18	18	18	18
予熱温度 [°C]	≥159	≥161	≥157	≥159	≥155
パス間温度 [°C]	≤178	≤184	≤189	≤188	≤183
直後熱条件	325°C 以上 ×1hr 以上	318°C 以上×1h 以上	320°C 以上 ×1h 以上	323°C 以上×1h 以上	318°C 以上 ×1hr 以上

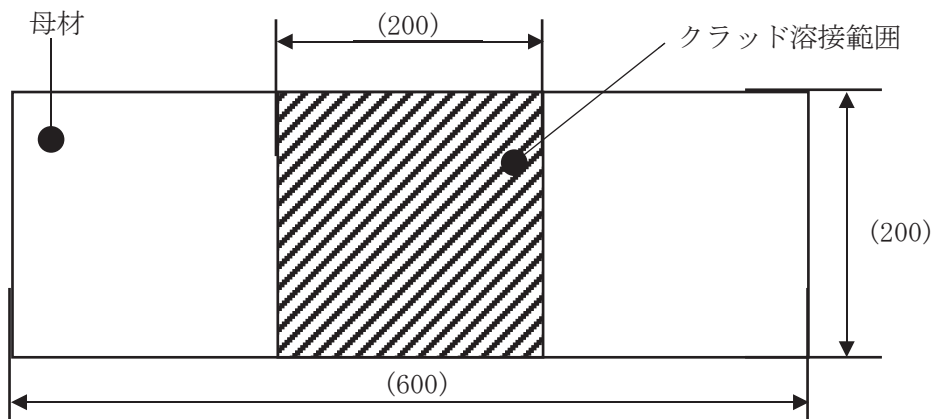


図 3.1.2.3-20 クラッド溶接範囲(2~4 体目)

表 3.1.2.3-20 溶接材料(5 体目)

銘柄	規格
溶接棒 : NC-39LK(初層)	JIS Z3221 D309L-16
NC-38LK(2 層目以降)	JIS Z3221 D308L-16

表 3.1.2.3-21 溶接条件(5 体目)

項目	実績
溶接方法	被覆アーク溶接
試験体	5
試験片記号	U JSW-4A-K-3-L
電流 [A]	140-180
電圧 [V]	22
速度 [cm/min.]	15
予熱温度 [°C]	≥ 163
パス間温度 [°C]	≤ 192
直後熱条件	335°C 以上×4h 以上

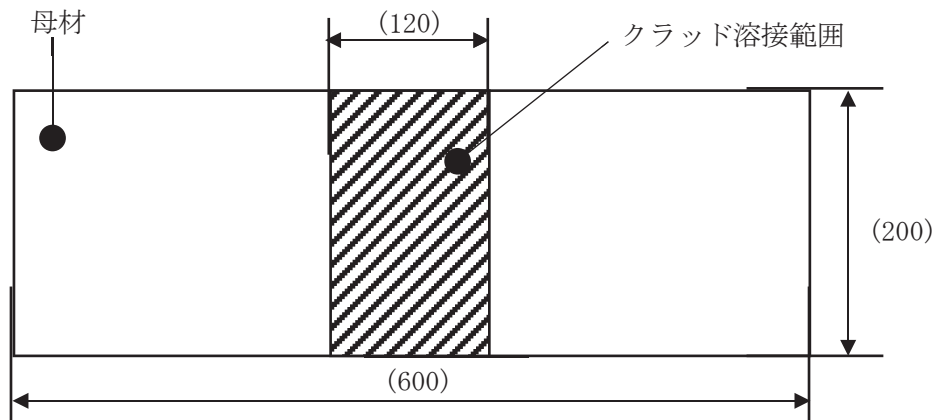
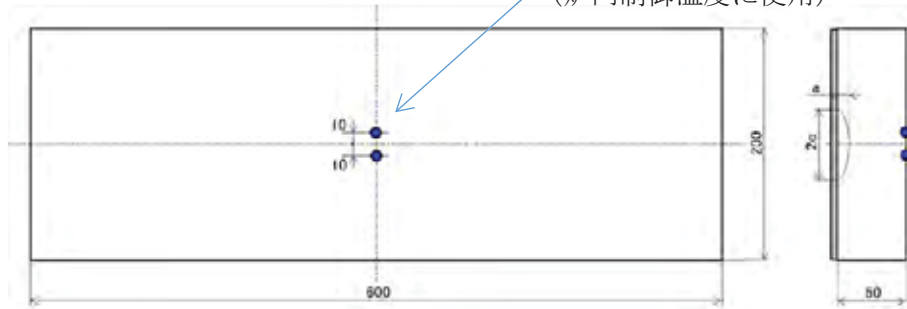


図 3.1.2.3-21 クラッド溶接範囲(5 体目)

表 3.1.2.3-22 熱処理条件

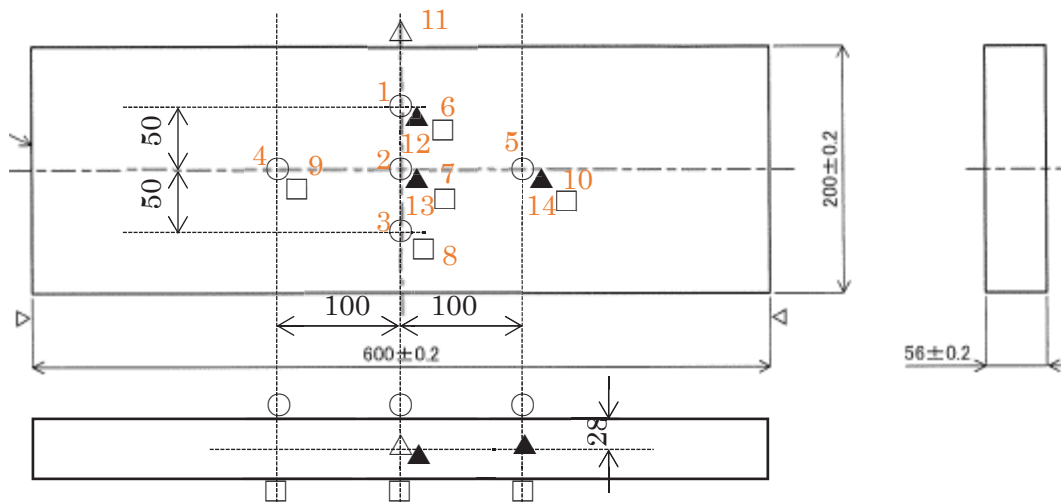
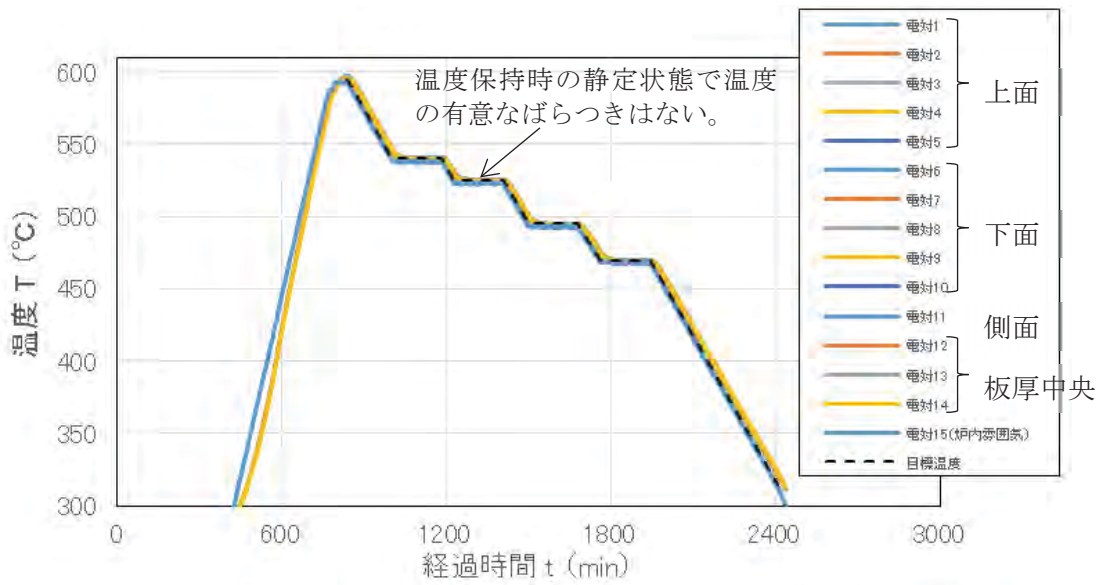
試験体	試験体刻印番号	熱処理条件
1 体目	JSW-4A-K-1-U	510°C×4h 保持
2 体目	JSW-4A-K-2-U	525°C×8h 保持
3 体目	JSW-4A-K-2-L	580°C×4h 保持
4 体目	JSW-4A-K-3-U	600°C×4h 保持
5 体目	JSW-4A-K-3-L	580°C×4h 保持
6 体目	JSW-4A-K-1-L	510°C×4h 保持

試験体下面に熱電対をつける。
(炉内制御温度に使用)



(単位 : mm)

図 3.1.2.3-22 温度計測位置



計測点

記号	位置	数量	種類
○	試験体上面	5点	被覆熱電対
□	試験体下面	5点	被覆熱電対
△	試験体側面	1点	被覆熱電対
▲	試験体板厚中央	3点	シース熱電対
—	炉内雰囲気	1点	シース熱電対

図 3.1.2.3-23 事前検証の結果(短時間ステップクーリングの保持時間短縮版)

(3) 破壊試験方法

試験マトリックスを表 3.1.2.3-23 に示す。き裂の形状は、破壊試験後に確認した値である。試験条件を表 3.1.2.3-24 に示す。荷重は変位制御で与えた。2 体目～5 体目は、破壊直後(最高荷重到達後)に負荷をすぐ停止できるように速度を落として行った。4 体目、5 体目は、載荷中 PDM が明らかに変化し破砕音が聞こえた段階で試験を一時中断し、クラッド部に空気穴を開け破面着色した後に再負荷を行った。試験は全て室温で行った。

主な計測項目を表 3.1.2.3-25 に示す。き裂全体のき裂進展の確認方法は PDM を適用し、一方向の直流(20A)を試験開始前から終了まで常時流して、き裂進展に伴う電位変化を捉えることとした。計測位置を図 3.1.2.3-24 に示す。電流端子はき裂を中心に各々25 mm離れた位置に、電位端子はき裂を中心に各々6 mmと 12 mm離れた位置に設置した。また、試験体中央のたわみとして、平板治具と受け(上側)治具の相対変位を変位計で計測した。

表 3.1.2.3-23 試験マトリックス

試験体	試験体 刻印番号	熱処理条 件	応力緩和 R 加工	クラッドの 溶接方法	き裂の形状 ※1	
					深さ (mm)	長さ (mm)
1 体目	JSW-4A-K-1-U	510°C×4h	—	サブマージド アーク溶接	10.9	61.1
2 体目	JSW-4A-K-2-U	525°C×8h	—	サブマージド アーク溶接	9.8	59.2
3 体目	JSW-4A-K-2-L	580°C×4h	—	サブマージド アーク溶接	10.4	60.4
4 体目	JSW-4A-K-3-U	600°C×4h	—	サブマージド アーク溶接	10.4	59.8
5 体目	JSW-4A-K-3-L	580°C×4h	—	被覆アーク溶 接	9.7	60.8
6 体目	JSW-4A-K-1-L	510°C×4h	有	サブマージド アーク溶接	10.6	60.7

※1：破壊試験後に確認した寸法

表 3.1.2.3-24 試験条件

試験体	試験体刻印番号	荷重の 制御方法	載荷速度 (mm/sec)	試験温度 (°C)
1 体目	JSW-4A-K-1-U	変位制御	0.05	11
2 体目	JSW-4A-K-2-U		0.02 ^{※1}	9
3 体目	JSW-4A-K-2-L		0.02 ^{※1}	9
4 体目	JSW-4A-K-3-U		0.01 ^{※2}	14、16 ^{※3}
5 体目	JSW-4A-K-3-L		0.01	16 ^{※4}
6 体目	JSW-4A-K-1-L		0.05	13

※1：試験中の微小な荷重低下が発生した際に試験停止可能なように試験速度を下げて実施。

※2：PDM 出力が変化した際に試験停止可能なように試験速度を下げて実施。

※3：試験を 2 日にわけて実施。

※4：一時中断後の 2 回目の試験温度は計測しなかったため、1 回目の試験温度のみ記載。

表 3.1.2.3-25 主な計測項目

計測項目	目的
PDM	き裂全体の成長を把握
荷重	破壊荷重を把握
変位 ^{※1}	FE 解析の妥当性検証に使用

※1：変位：平板治具と受け(上側)治具の変

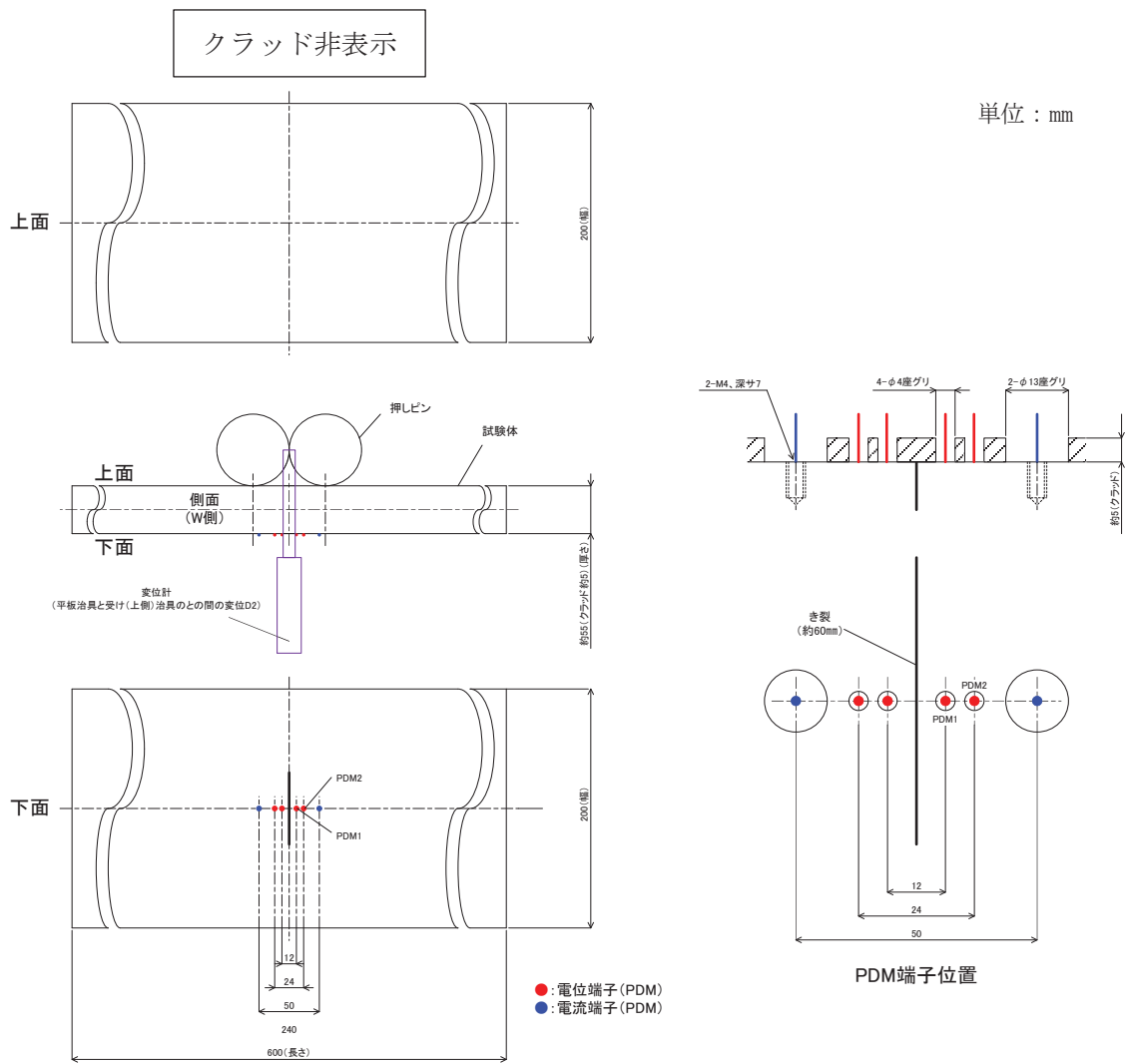


図 3.1.2.3-24 計測位置

(4) 破壊試験結果(1 体目)

① 荷重-鉛直変位の関係

平板試験における荷重-鉛直変位(作動トランスによる鉛直変位)を図 3.1.2.3-25 に示す。最終破断に至るまでほぼ線形で増加し、破断時の荷重(最大)は約 466kN であった。

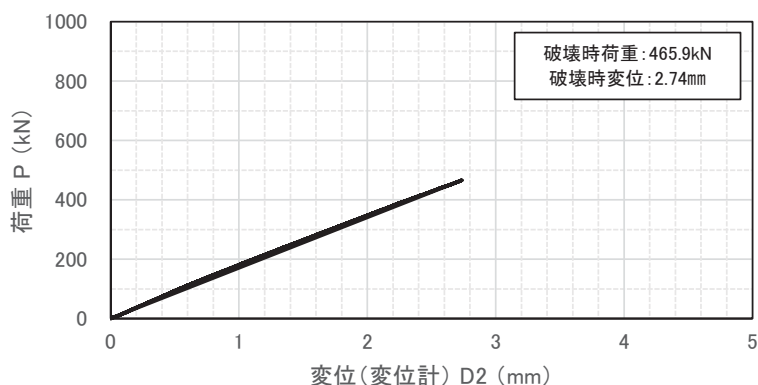


図 3.1.2.3-25 荷重-鉛直変位の関係

② 荷重-PDM 出力の関係

荷重-PDM 出力の関係を図 3.1.2.3-26 に示す。荷重 200kN 付近から、PDM 出力が増加する傾向が見られた。約 220kN から断続的な甲高い音が発生し始めており、PDM の変化開始点とほぼ対応していた。この PDM の増加と音の発生は、試験中に HAZ 部からのき裂発生・進展に対応している可能性が考えられる。

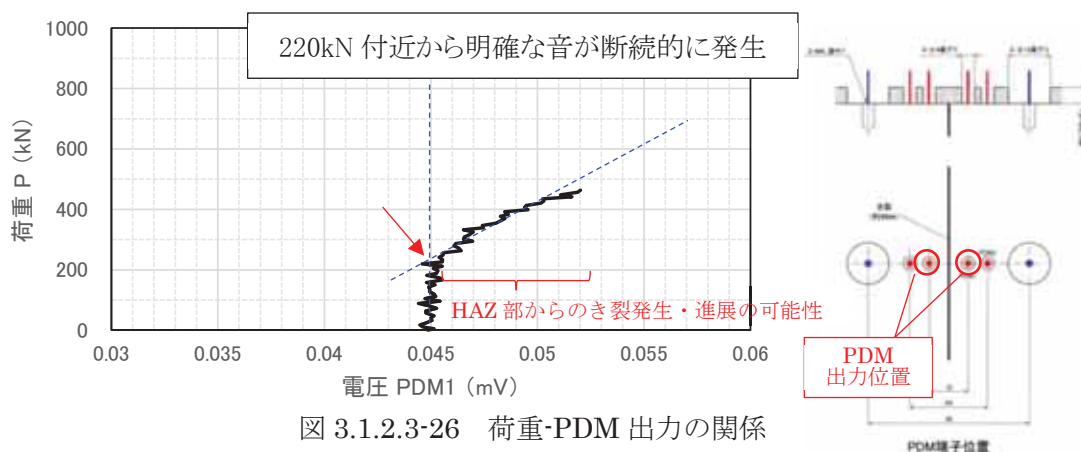


図 3.1.2.3-26 荷重-PDM 出力の関係

③ 平板破壊試験における破壊靱性評価

1 体目の平板試験に対する FE 解析を実施し、算出した K_J とマスターカーブとの比較により、亀裂の拘束効果が破壊靱性へ及ぼす影響を確認した。

解析コードは ABAQUS ver.6.12 を用い、1/4 対称モデル(図 3.1.2.3-27)に対して、クラッド溶接と溶接後熱処理(PWHT)の工程を考慮して、表 3.1.2.3-26 に示す 3STEP の解析を実施した。なお、破壊試験において HAZ 部が先行して割れたと推定される結果が確認されたため、表 3.1.2.3-27 に示すよう HAZ 部が先行して割れた状態を模擬したケースも実施した。母材は低靱性材(SQV2A 相当)、クラッドは 304 系のステンレス鋼溶接材であり、線膨張係数は複雑形状部機器配管健全性実証(IAF) (3.1.2.3-1)のデータより表 3.1.2.3-28 とした。また、母材のヤング率は JEAC4216-2015(フェライト鋼の破壊靱性参照温度 T_0 決定のための試験方法) (3.1.2.3-2)の解説 MCT-1300 の記載より、以下の式で与えた。

$$E = 202100 - 62.6 \times T \quad (3.1.2.3-1)$$

E はヤング率(MPa)、 T は温度($^{\circ}\text{C}$)である。母材の応力-ひずみ曲線は、熱処理条件 $525^{\circ}\text{C} \times 8\text{h}$ の 0°C 、 100°C 、 200°C の引張試験結果を図 3.1.2.3-28 に示すフローで補正することで設定した。 $510^{\circ}\text{C} \times 4\text{h}$ の熱処理条件に対する母材の応力-ひずみ曲線を図 3.1.2.3-29 (a) に示す。クラッドの常温 $\sim 300^{\circ}\text{C}$ の応力-ひずみ曲線は飛田ら (3.1.2.3-3)が実施したクラッド材の引張試験データの値を使用し(図 3.1.2.3-29 (c))、 300°C 以上は IAF(3.1.2.3-1)の降伏応力の比で真応力を補正した図 3.1.2.3-29 (b)を用いた。ポアソン比は 0.3 とした。

クリープ則は以下の式を用いた。

$$\dot{\epsilon} = 2.82 \times 10^{-17} \times \bar{\sigma}^{5.24} \quad \dots \text{母材} \quad (3.1.2.3-2)$$

$$\dot{\epsilon} = 1.49 \times 10^{-28} \times \bar{\sigma}^{9.98} \quad \dots \text{クラッド} \quad (3.1.2.3-3)$$

ここで、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、 $\bar{\sigma}$ はミーゼス応力を示す。

境界条件を図 3.1.2.3-30 に示す。き裂面以外の対称面を拘束した。なお、き裂②の条件では HAZ 部の割れを模擬するため、き裂と同様に HAZ 部(母材とクラッドの境界から 5mm の範囲)の対称面も拘束しない条件とした。

解析の STEP1 ではクラッドの初期温度を 188°C 、母材の初期温度を常温に設定し、常温に戻したときの熱応力解析を実施した。STEP2 では 510°C で 4 時間保持したときのクリープ解析を実施した。STEP3 では破壊試験を想定し、荷重を負荷した弾塑性解析を実施した。

試験と解析の荷重-変位関係を図 3.1.2.3-31 に示す。解析結果は試験結果と良く一致し、解析の妥当性を確認できた。HAZ 部の割れを考慮した FE 解析は割れを考慮しない FE 解析結果とほぼ同等の変形挙動を示し、HAZ 部の先行割れによる載荷点変位の変化が小さい

ことを確認した。試験の破断荷重と解析で求めた荷重と K_J の関係から推測した破断時の K_J と 1TC(T) における破壊靱性に相当するマスターカーブを比較した結果を図 3.1.2.3-32 に示す。マスターカーブの T_0 は熱処理 $510^\circ\text{C} \times 4\text{h}$ の母材の値 74°C を用いた。破断荷重に対応する K_J はき裂①の条件で $55(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ 、き裂②の条件で $58(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ と予測され、破壊靱性試験と平板破壊試験のき裂先端の塑性拘束の違いから、マスターカーブの K_{Jc} のメジアンより高くなったと考えられる。

表 3.1.2.3-26 解析ステップ

STEP	項目	解析種類	概要
1	クラッド溶接の残留応力の模擬	弾塑性解析	クラッド部に降伏応力相当の引張応力を発生させる初期温度を与えた弾塑性解析
2	PWHT の解析	クリープ解析	熱処理を模擬したクリープ解析
3	破壊試験の解析	弾塑性解析	平板試験を想定した弾塑性解析

表 3.1.2.3-27 解析ケース一覧

No.	熱処理条件	き裂形状		クラッド厚さ (mm)	HAZ 部の先行割れ	備考 (凡例の表記)
		深さ (mm)	長さ (mm)			
ケース 1	$510^\circ\text{C} \times 4\text{h}$	10.9	61.1	5.05	模擬しない	き裂① (深さ 10.9mm, 長さ 61.1mm)
ケース 2					模擬する	き裂② (き裂①+HAZ 割れ)

表 3.1.2.3-28 平均線膨張率

温度 $^\circ\text{C}$	平均線膨張率($10^{-6} 1/\text{K}$)	
	母材	クラッド
RT	12.7	15.4
100	13.0	15.9
200	13.3	16.4
300	13.9	17.2
400	14.7	17.7
500	15.2	18.2
600	15.3	18.4

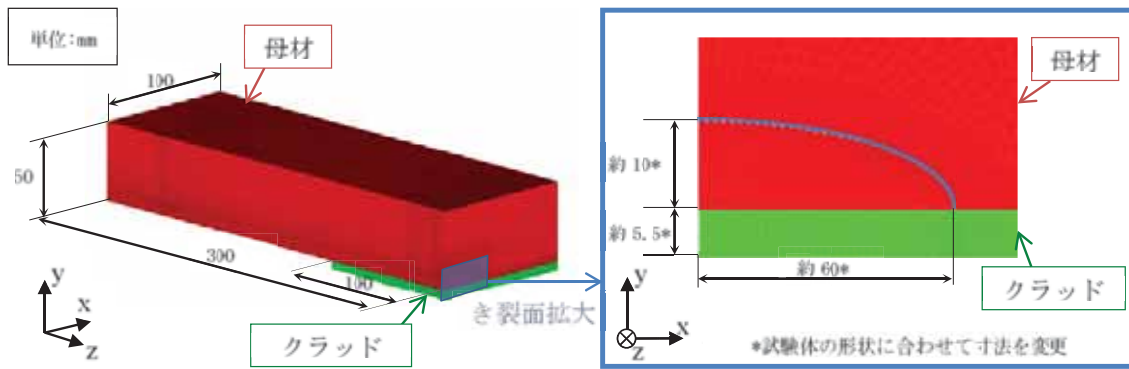


図 3.1.2.3-27 解析モデル

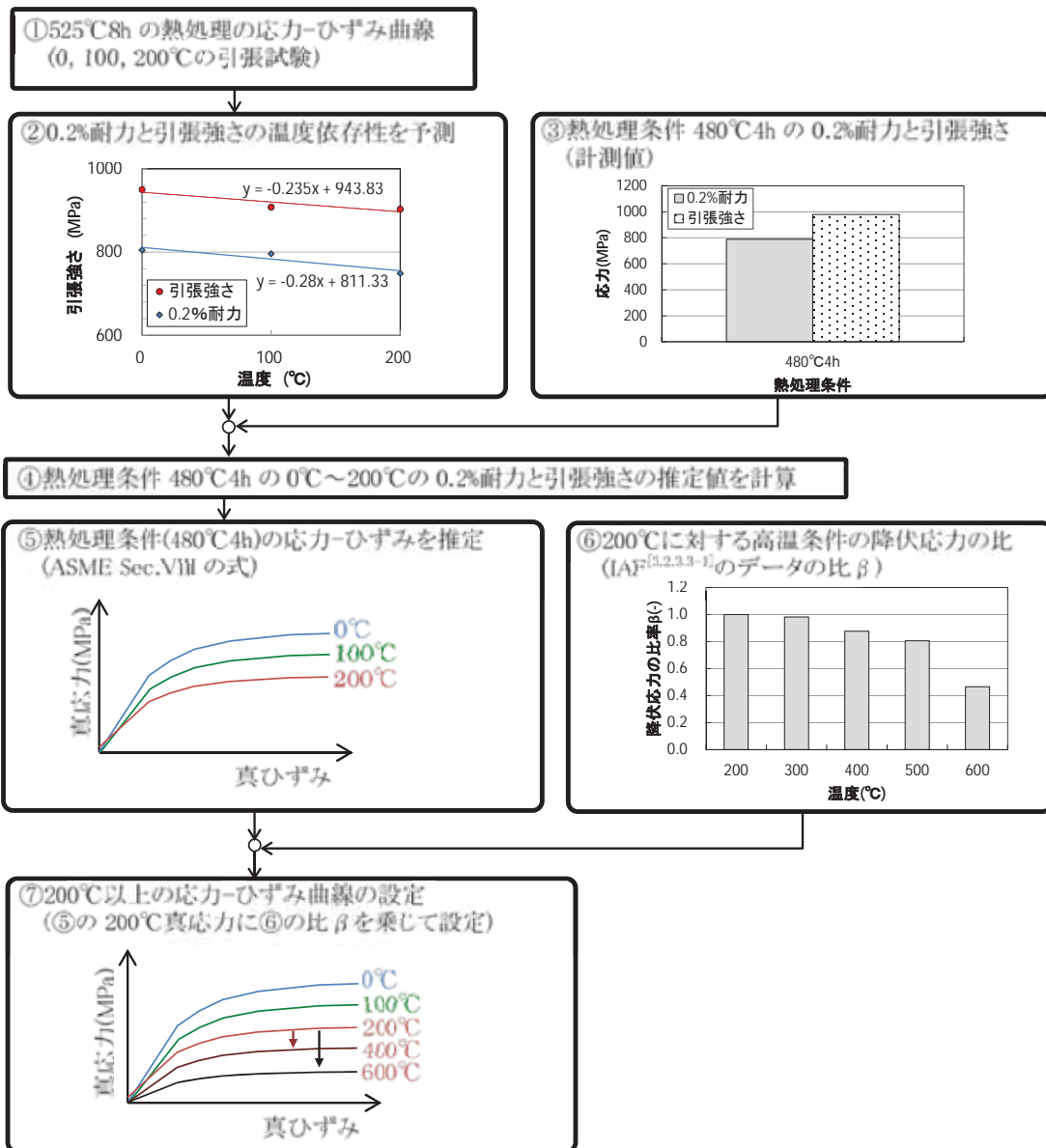


図 3.1.2.3-28 (1/2) 応力-ひずみ曲線の設定方法(熱処理前の母材)

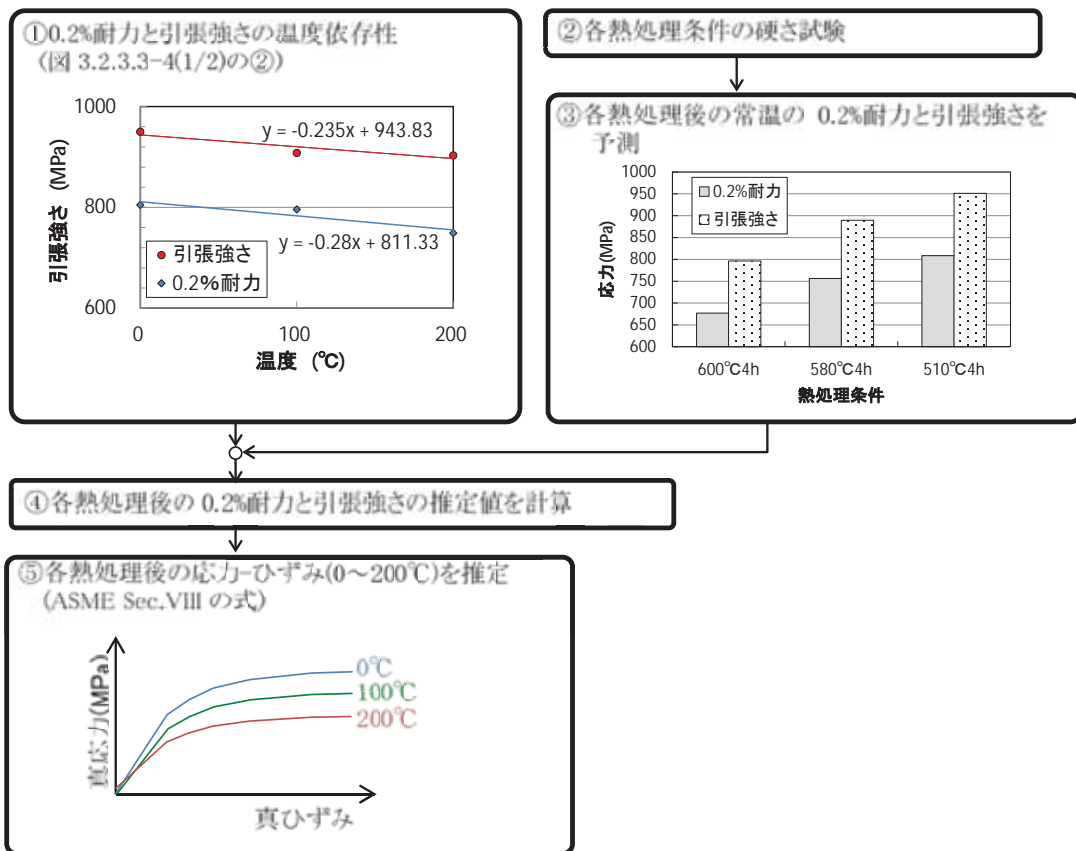
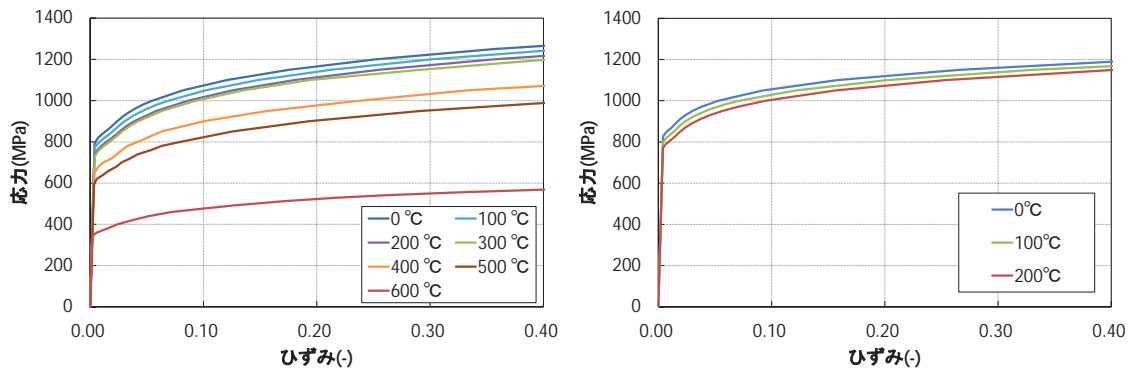
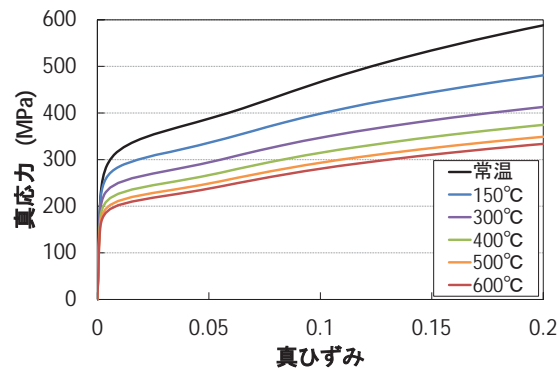


図 3.1.2.3-28 (2/2) 応力-ひずみ曲線の設定方法(熱処理後の母材)



(a)低合金鋼(熱処理前)

(b)低合金鋼(熱処理後)



(c)クラッド

図 3.1.2.3-29 応力-ひずみ曲線

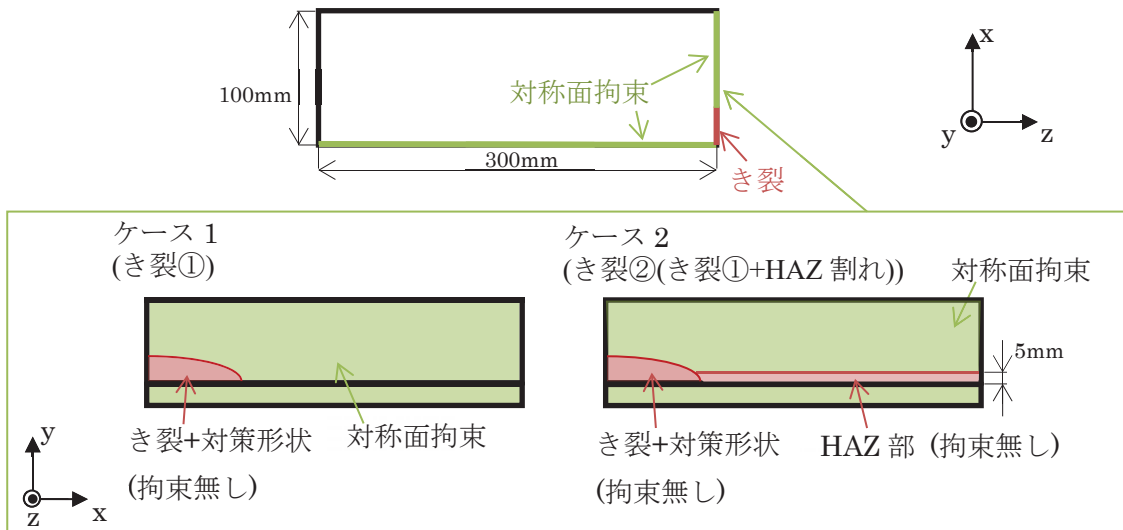


図 3.1.2.3-30 境界条件

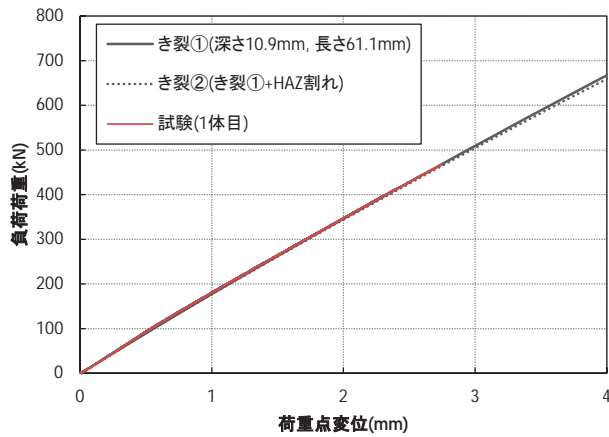
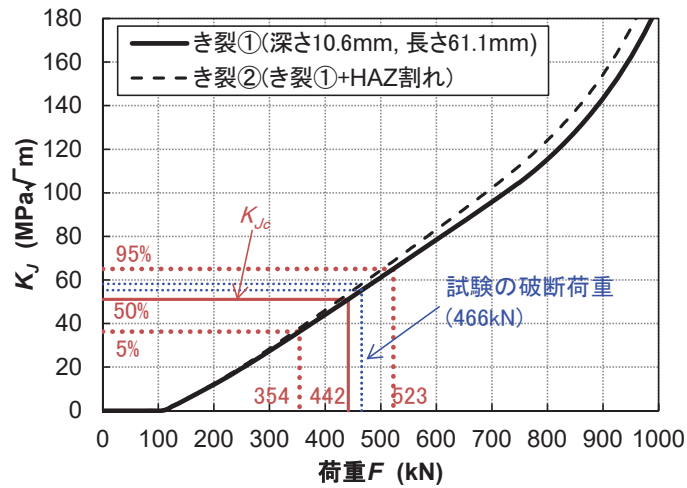
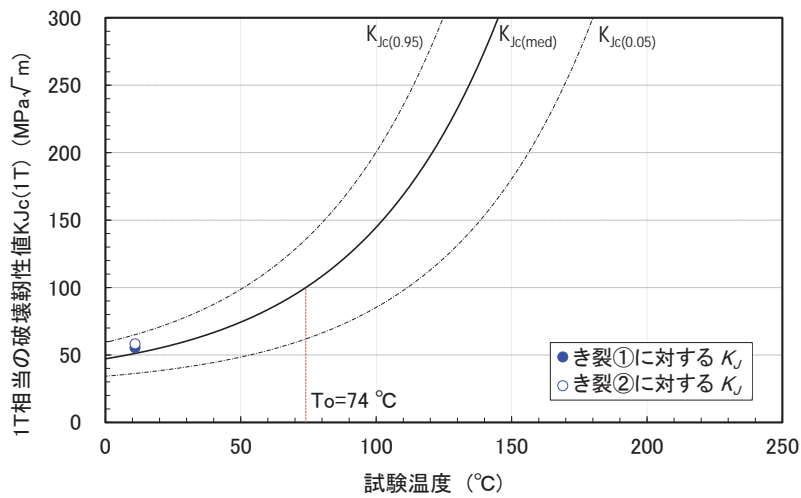


図 3.1.2.3-31 荷重-変位関係 (試験と解析の比較)



(a) FE 解析における荷重と K_J の関係



(b) 1TC(T)における破壊靱性

図 3.1.2.3-32 試験の破断荷重に対する K_J (1 体目)

④ 破面観察結果(SEM を含む)

試験後の試験体の外観及び PT の状況を図 3.1.2.3-33 に示す。試験において試験体は完全に破断に至らず、き裂は、引張側の表面(クラッド側表面)及び圧縮側の表面のいずれにも到達していなかった。また、試験体の側面において、き裂は深さ方向に約 45 mm まで進展していたが、圧縮側の表面に到達することなく停止していた。試験体の側面の状況から、熱影響部(HAZ 部)の深さは約 5 mm と推定された。

外観観察後に、破面外観状況を確認するため、試験体を加熱着色した後、繰返し荷重を加えることにより破面開放を行った。試験後の試験体の破面外観写真を図 3.1.2.3-34、図 3.1.2.3-35 に示す。クラッド直下においては、深さ約 5mm の幅(クラッド直下部の熱影響部に対応しているものと推定)で母材一般部とは明らかに破面様相の異なる領域(破面外観写真において光沢のある粗い破面)が認められ、母材一般部との境界に明確な段差が認められた。疲労予き裂先端付近の破面の詳細な観察より、き裂はクラッド直下部近傍の 2 箇所及び疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)の合計 3 箇所から発生・進展している様相が認められた。このうち、疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)から発生したき裂は、板厚方向と左右方向(試験体の幅方向)に進展していた。また、試験体の側面には、母材一般部と熱影響部の境界部と思われる箇所に、延性破壊の最終部に見られるシアリップのような凸部が見られた。なお、クラッド部にも 1~2 mm 程度のき裂(破面において褐色に見える部分)が発生・進展が観察された。

破面形態を確認するため、一方の破面について走査型電子顕微鏡(SEM)による破面の詳細観察を行った。この結果を図 3.1.2.3-36~図 3.1.2.3-41 に示す。母材一般部の破面は、いずれも粒界破面が一部混在した擬へき開破面であったのに対し、HAZ 部の破面については、クラッド直下部の粗粒 HAZ 部がほぼ全面粒界破面、母材に近い側の細粒 HAZ 部が粒の細かい擬へき開破面となっていた。なお、参考までにクラッド部の破面も観察したが、破壊試験時に生じたと推定される着色部分はディンプル破面、繰返し負荷による破面開放時に生じた無着色部分は一部ディンプルが混在した疲労破面となっていた。

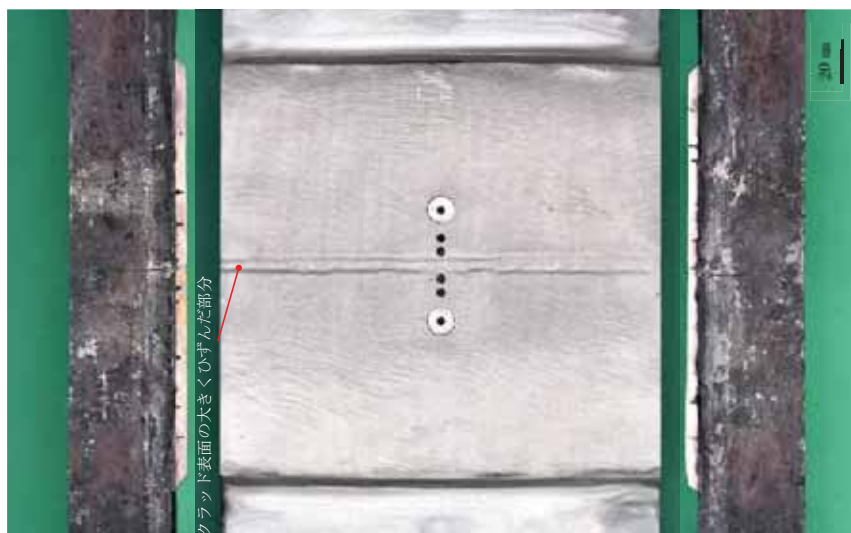
以上の試験体外観及び破面の観察結果から、1 体目の試験(クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h)では、HAZ 部における疲労予き裂先端から先行して脆性き裂が発生し、HAZ 部を進展した後、最終的に疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)を起点としてき裂が発生し、破壊したものと推定される。



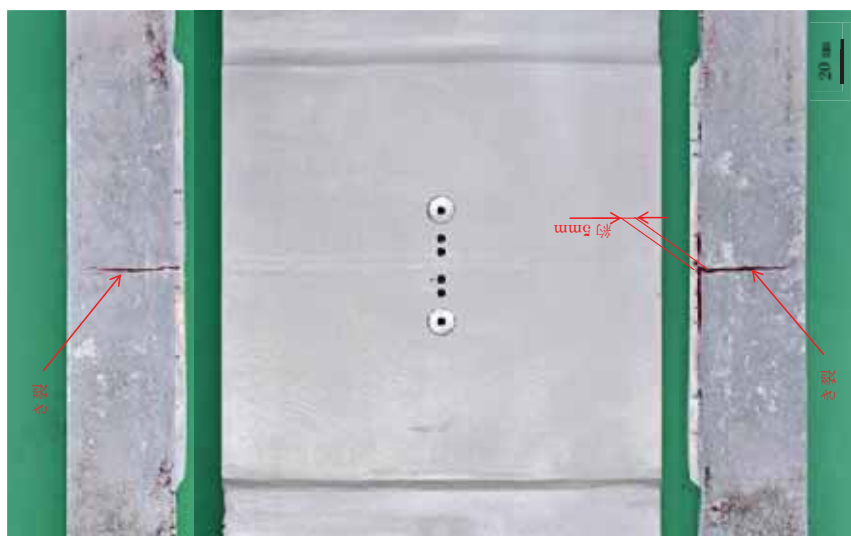
(a) 試験体の外観(全景)



- ・ 試験体は完全に破断していなかった。
- ・ 引張側(クラッド施工側)の表面の中央部付近は、大きくひずんでいたが、き裂は認められなかった。(き裂はクラッドを貫通していない。)
- ・ 試験体の側面において観察されたき裂は深さ方向に約 45 mm まで進展し、圧縮側の表面に到達することなく停止していた。



(b) 試験部の外観状況



(c) 試験部の PT 状況

図 3.1.2.3-33 試験後の試験体の外観状況 (クラッド : サブマージドアーク溶接, 熱処理 : 510°C×4h, 試験体刻印番号 : JSW-4A-K-1-1-U, 試験温度 : 室温)

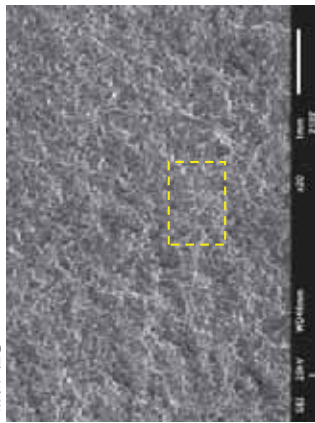


・疲労き裂(初期き裂)の長さは約61.1mm、深さは約10.9mmであり、疲労き裂は、ほぼ目標の寸法となっていた。

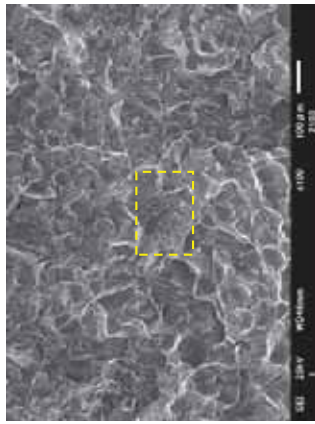
図 3.1.2.3-34 試験後の試験体の破面外観状況 (クラッド: サブマージドアーク溶接, 熱処理: 510°C×4h, 試験体刻印番号: JSW-4A-K-1-U, 試験温度: 室温)



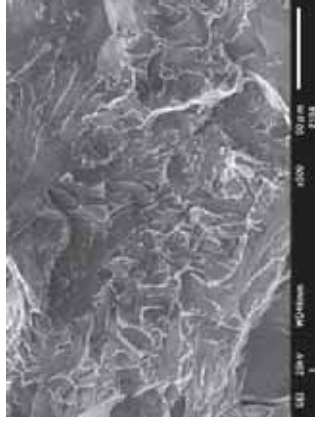
観察位置①



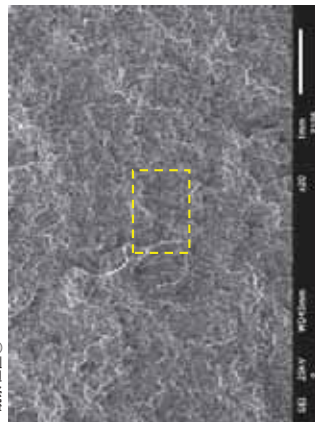
拡大



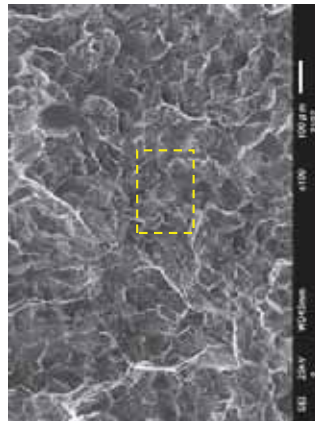
拡大



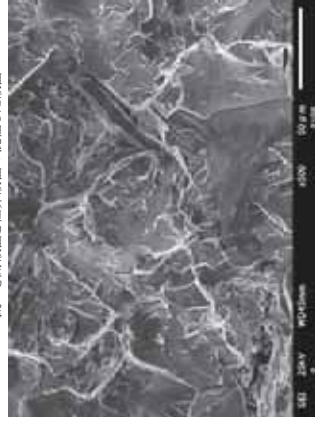
観察位置②



拡大



拡大

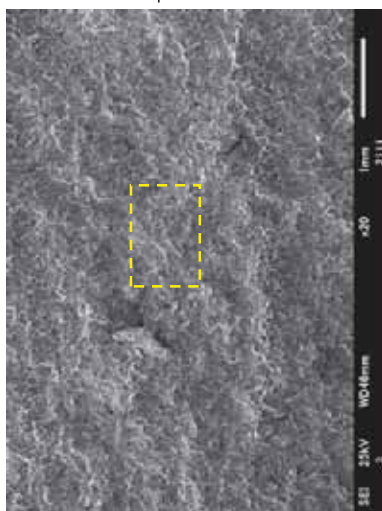


撮へき開破面と粒界破面の混在した破面

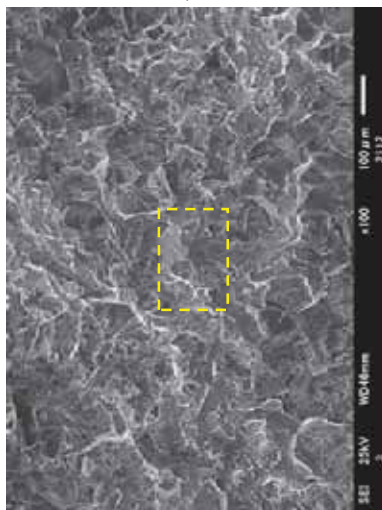
図 3.1.2.3-36 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド: サブマージドアーク溶接, 熱処理: 510°C×4h, 試験体刻印番号: JSW-4A-K-1-U, 試験温度: 室温)



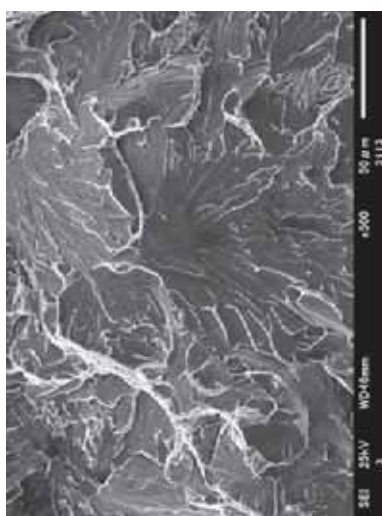
観察位置③



拡大



拡大



擬へき開破面

図 3.1.2.3-37 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド: サブマージドアーク溶接, 熱処理: 510°C×4h, 試験体刻印番号: JSW-4A-K-1-U, 試験温度: 室温)

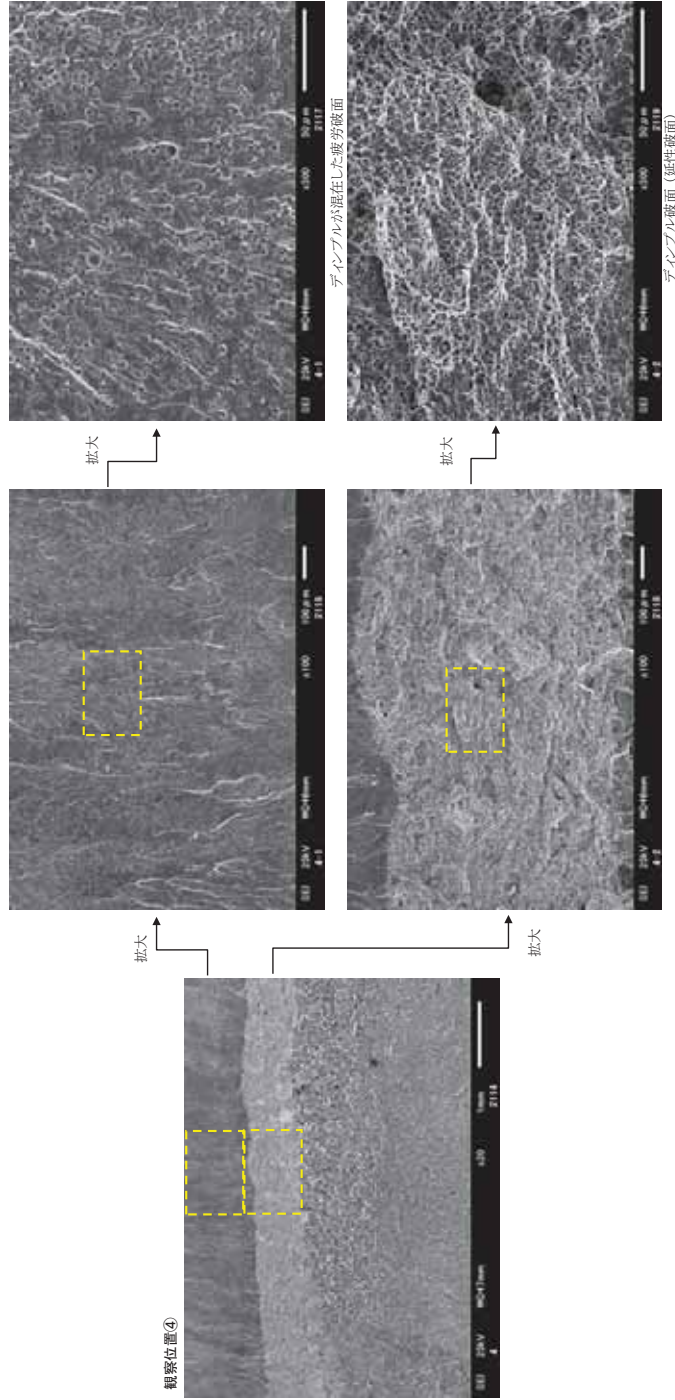


図 3.1.2.3-38 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h，試験体刻印番号：JSW-4A-K-1-U，試験温度：室温)

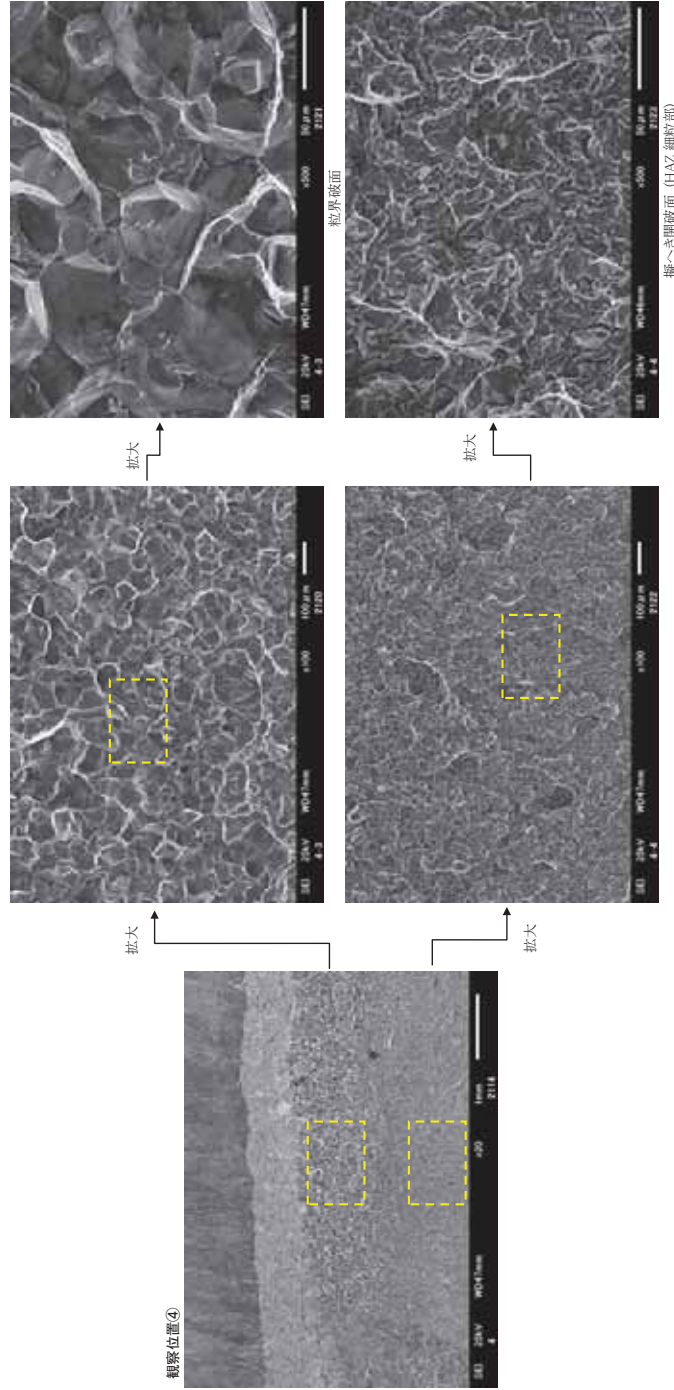


図 3.1.2.3-39 試験後の試験体の破面の SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h，試験体刻印番号：JSW-4A-K-1-U，試験温度：室温)

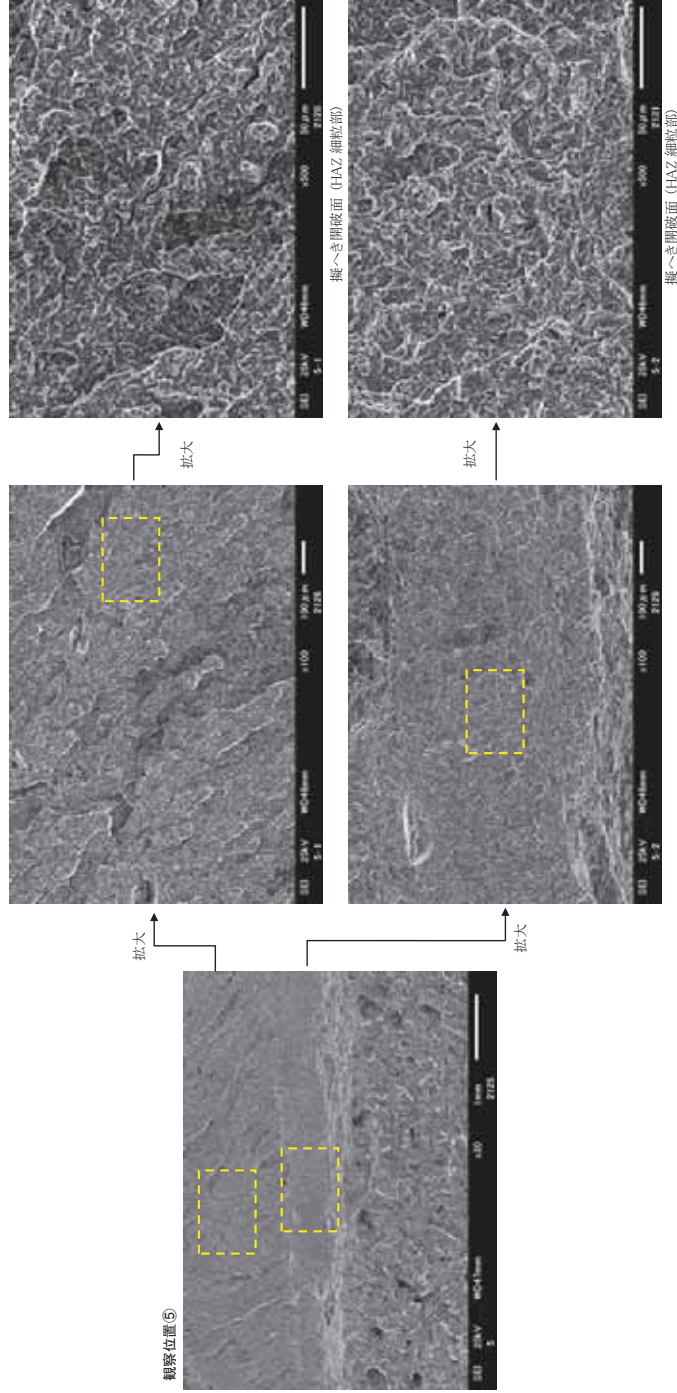


図 3.1.2.3-40 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h，試験体刻印番号：JSW-4A-K-1-U，試験温度：室温)

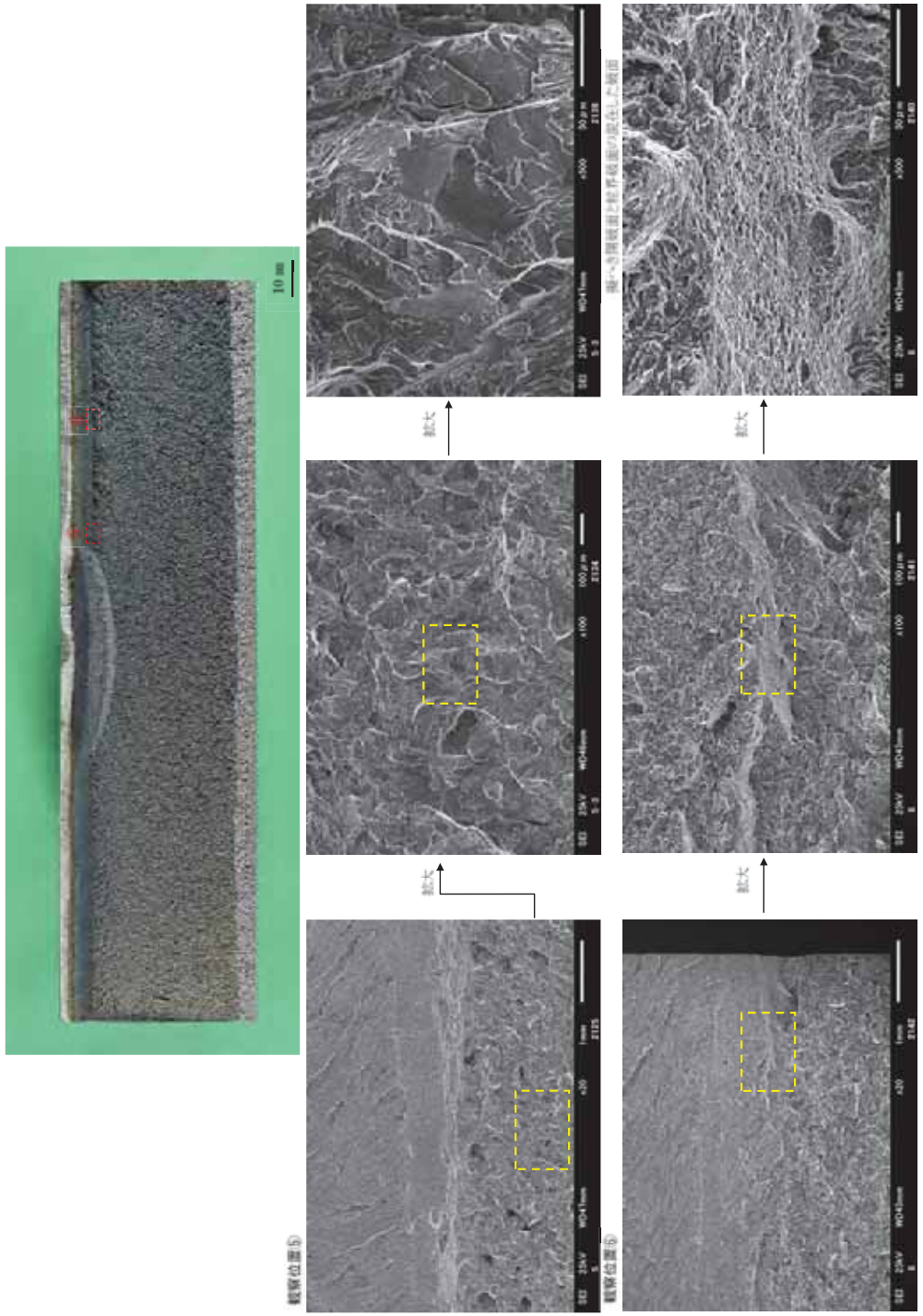


図 3.1.2.3-41 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド: サブマージドアーク溶接, 熱処理: 510°C×4h, 試験体刻印番号: JSW-4A-K-1-U, 試験温度: 室温)

(5) 破壊試験結果(2 体目)

① 荷重-鉛直変位の関係

平板試験における荷重-鉛直変位(作動トランスによる鉛直変位)を図 3.1.2.3-42 に示す。最終破断に至るまでほぼ線形で増加し、破断時の荷重(最大)は約 669kN であった。

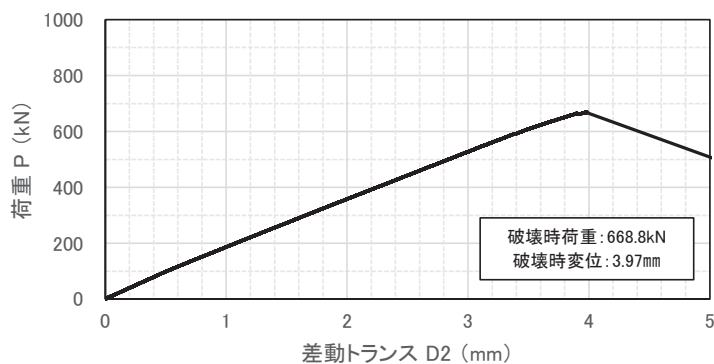


図 3.1.2.3-42 荷重-鉛直変位の関係

② 荷重-PDM 出力の関係

荷重-PDM 出力の関係を図 3.1.2.3-43 に示す。荷重 200kN 付近から、PDM 出力が増加する傾向が見られた。約 270kN から断続的な甲高い音が発生し始めており、PDM の変化開始点とほぼ対応していた。この PDM の増加と音の発生は、試験中に HAZ 部からのき裂発生・進展に対応している可能性が考えられる。

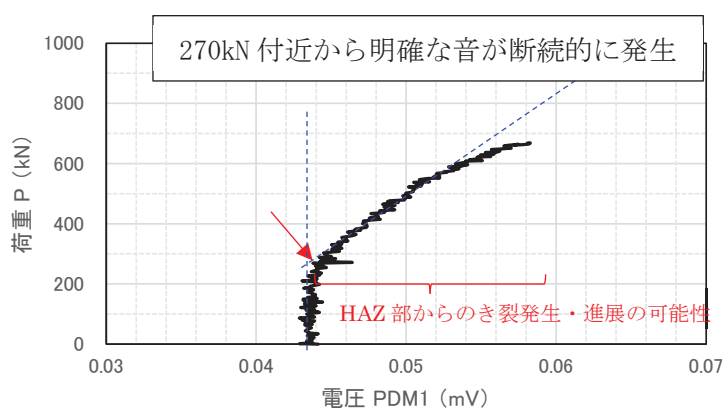


図 3.1.2.3-43 荷重-PDM 出力の関係

③ 平板破壊試験における破壊靱性評価

2 体目の平板試験に対して FE 解析を実施し、試験体が破断した時の K_J を確認した結果を以下にまとめる。

表 3.1.2.3-29 に解析ケースを示す。き裂形状とクラッド厚さ、熱処理条件、母材の応力-ひずみ曲線以外は 1 体目の解析と同様である。クラッドと熱処理前の母材の応力-ひずみ曲線は 1 体目と同様の値を用いた。熱処理後の応力-ひずみ曲線は、 $525^{\circ}\text{C}\times 8\text{h}$ の引張試験結果から設定した図 3.1.2.3-44 を用いた。

試験と解析の荷重-変位関係を図 3.1.2.3-45 に示す。解析結果は試験結果と良く一致し、解析の妥当性を確認できた。HAZ 部の割れを考慮した FE 解析は割れを考慮しない FE 解析結果とほぼ同等の変形挙動を示し、HAZ 部の先行割れによる荷点変位の変化が小さいことを確認した。試験の破断荷重と解析で求めた荷重と K_J の関係から推測した破断時の K_J と 1TC(T)における破壊靱性に相当するマスターカーブを比較した結果を図 3.1.2.3-46 に示す。マスターカーブの T_0 は熱処理 $525^{\circ}\text{C}\times 8\text{h}$ の母材の値 54°C を用いた。破断荷重に対応する K_J はき裂①の条件で $90(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ 、き裂②の条件で $96(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ と予測され、破壊靱性試験と平板破壊試験のき裂先端の塑性拘束の違いから、マスターカーブの K_{Jc} のメジアンより高くなったと考えられる。

表 3.1.2.3-29 解析ケース一覧

No.	熱処理条件	き裂形状		クラッド厚さ (mm)	HAZ 部の先行割れ	備考 (凡例の表記)
		深さ (mm)	長さ (mm)			
ケース 1	$525^{\circ}\text{C}\times 8\text{h}$	9.8	59.2	5.03	模擬しない	き裂① (深さ 9.8mm, 長さ 59.2mm)
ケース 2					模擬する	き裂② (き裂①+HAZ 割れ)

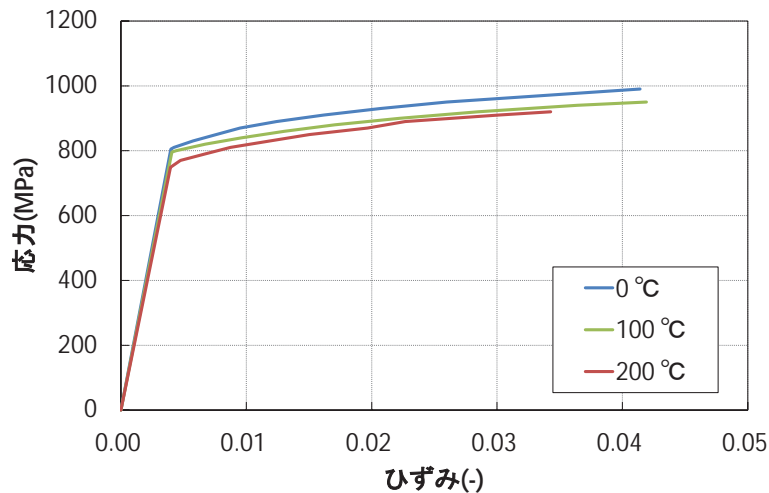


図 3.1.2.3-44 母材の応力-ひずみ曲線(熱処理条件 $525^{\circ}\text{C}\times 8\text{h}$)

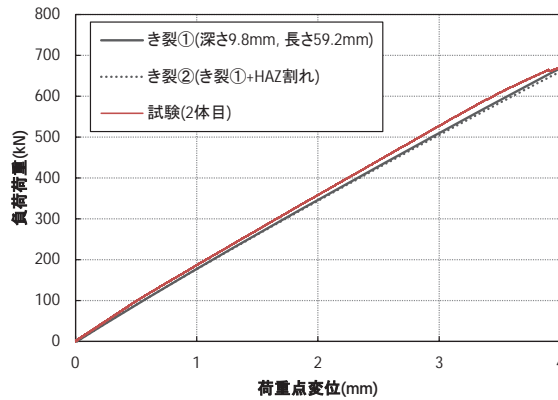
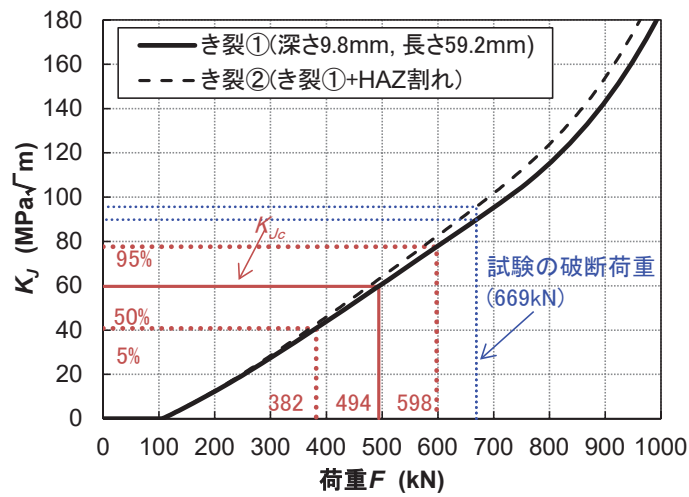
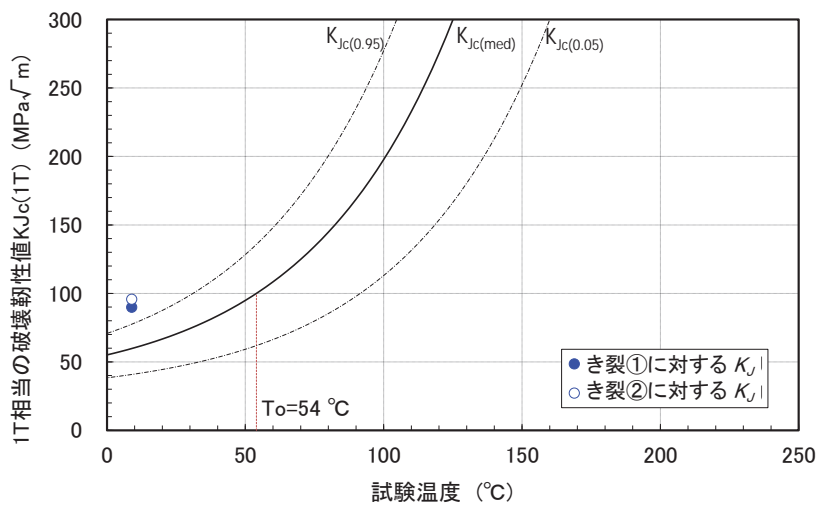


図 3.1.2.3-45 荷重-変位関係 (2 体目の試験と解析の比較)



(a) FE 解析における荷重と K_J の関係



(b) 1TC(T)における破壊靱性

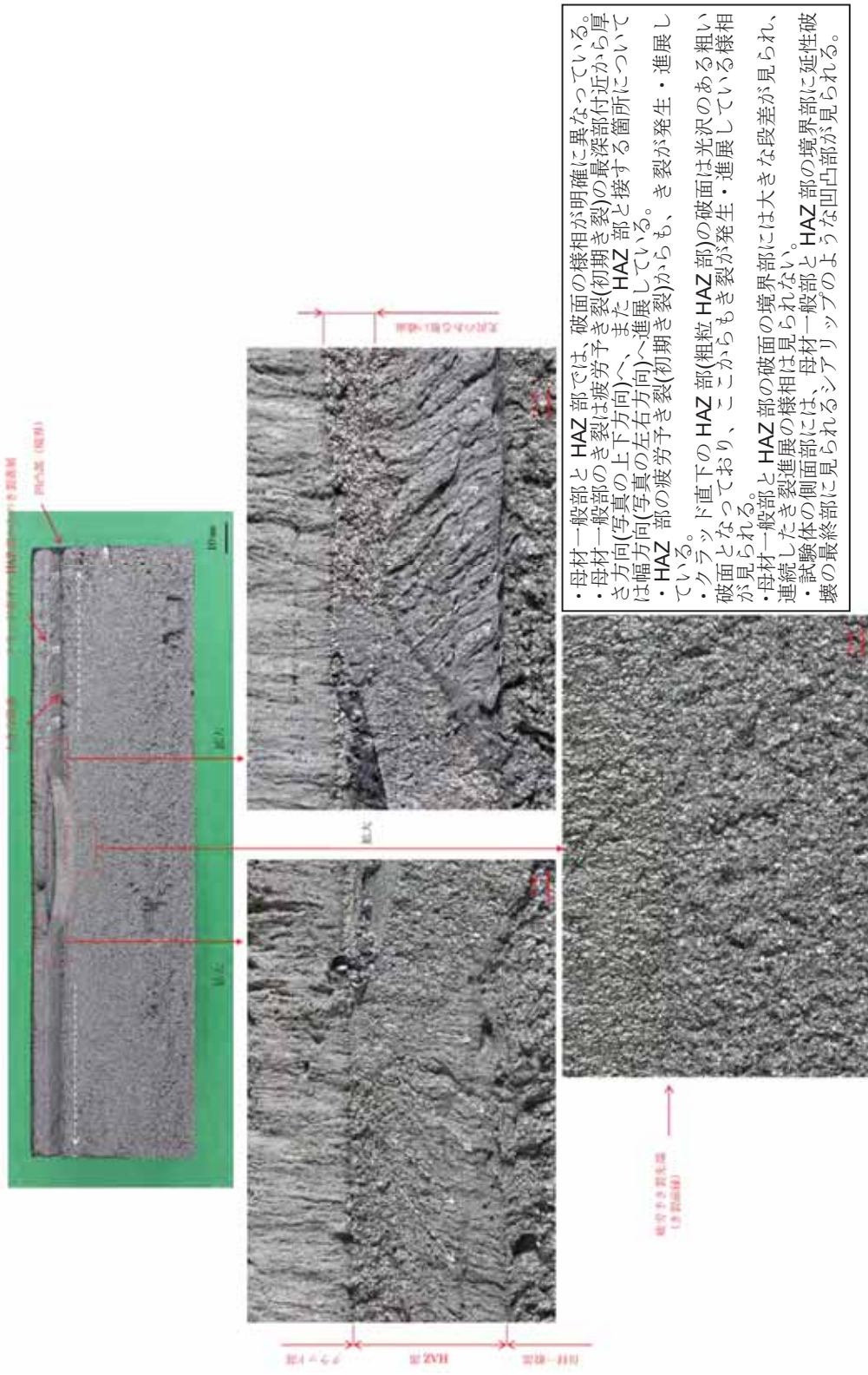
図 3.1.2.3-46 試験の破断荷重に対する K_J (2 体目)

④ 破面観察結果(SEM を含む)

2 体目の試験では、試験体は最大荷重に到達後、完全破断した。試験後の試験体の破面外観写真を図 3.1.2.3-47 に示す。1 体目の試験(クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h)と同様に、2 体目の試験の試験体についても、クラッド直下の深さ約 5mm の HAZ 部に対応する部分において母材一般部とは明らかに破面様相の異なる領域が認められ、母材一般部との境界に明確な段差が認められた。疲労予き裂先端付近の破面の詳細な観察より、き裂はクラッド直下部近傍の 2 箇所及び疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)の合計 3 箇所から発生・進展している様相が認められた。このうち、疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)から発生したき裂は、板厚方向と左右方向(試験体の幅方向)に進展していた。また、試験体の側面には、母材一般部と熱影響部の境界部と思われる箇所に、延性破壊の最終部に見られるシアリップのような凹凸部が観察された。

破面形態を確認するため、一方の破面について走査型電子顕微鏡(SEM)による破面の詳細観察を行った。この結果を図 3.1.2.3-48～図 3.1.2.3-51 に示す。母材一般部の破面は、いずれも粒界破面が一部混在した擬へき開破面であったのに対し、HAZ 部の破面については、クラッド直下部の粗粒 HAZ 部がほぼ全面粒界破面、母材に近い側の細粒 HAZ 部が粒の細かい擬へき開破面となっていた。

以上の試験体破面の観察結果から、2 体目の試験(クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：525°C×8h)についても、1 体目の試験(クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h)と同様、HAZ 部における疲労予き裂先端から先行して脆性き裂が発生し、HAZ 部を進展した後、最終的に疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)を起点としてき裂が発生し、破壊したものと推定される。



・母材一般部とHAZ部では、破面の様相が明確に異なっている。
 ・母材一般部のき裂は疲労予き裂(初期き裂)の最深部付近から厚さ方向(写真の上下方向)へ、またHAZ部と接する箇所については幅方向(写真の左右方向)へ進展している。
 ・HAZ部の疲労予き裂(初期き裂)からも、き裂が発生・進展している。
 ・クラッド直下のHAZ部(粗粒HAZ部)の破面は光沢のある粗い破面となっており、ここからもき裂が発生・進展している様相が見られる。
 ・母材一般部とHAZ部の破面の境界部には大きな段差が見られ、連続したき裂進展の様相は見られない。
 ・試験体の側面部には、母材一般部とHAZ部の境界部に延性破壊の最終部に見られるシアリップのような凹凸部が見られる。

図 3.1.2.3-47 試験後の試験体の破面外観状況(クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：525°C×8h，試験体刻印番号：JSW-4A-K-2-U，試験温度：室温)

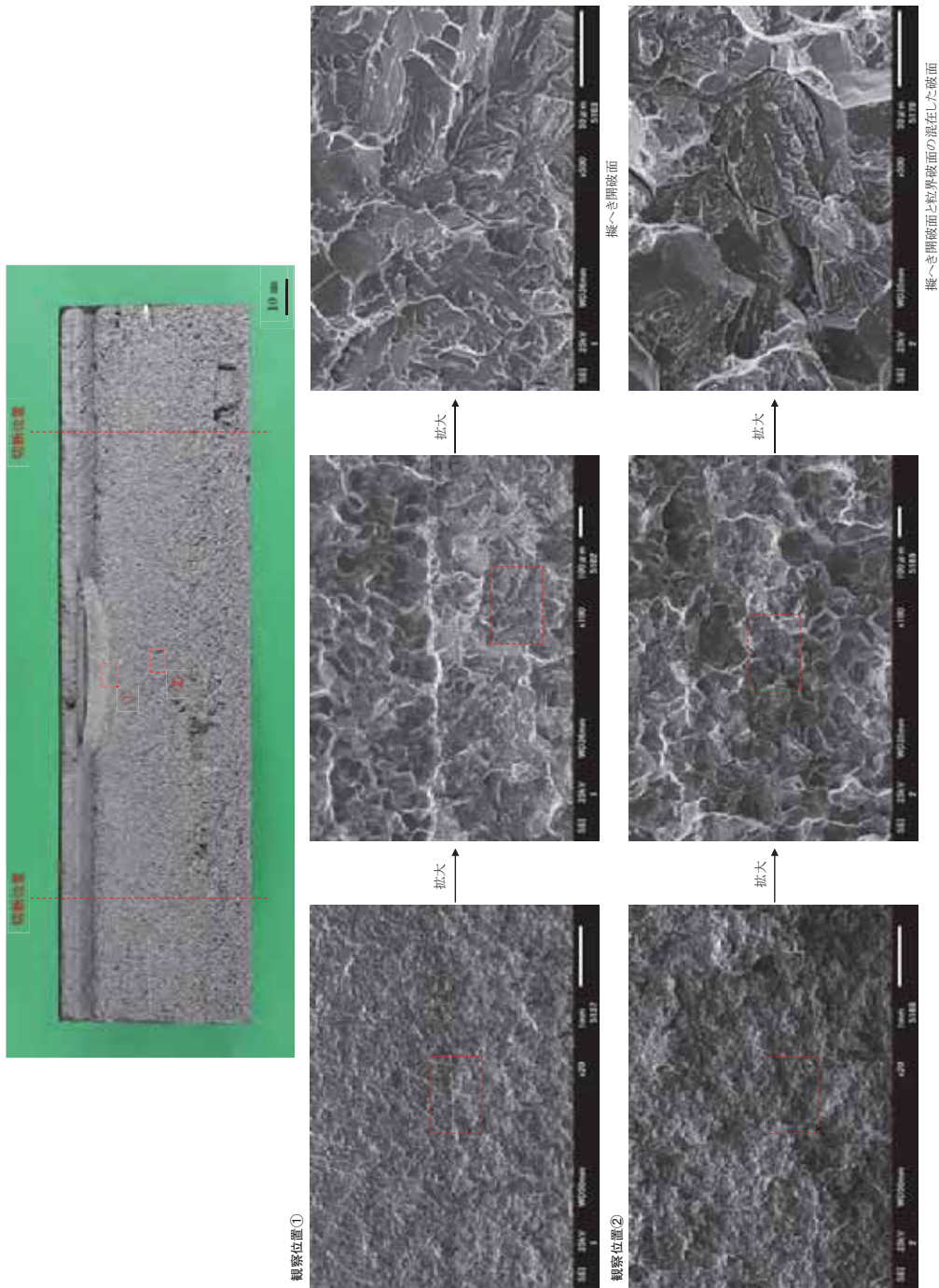


図 3.1.2.3-48 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：525°C×8h，試験体刻印番号：JSW-4A-K-2-U，試験温度：室温)

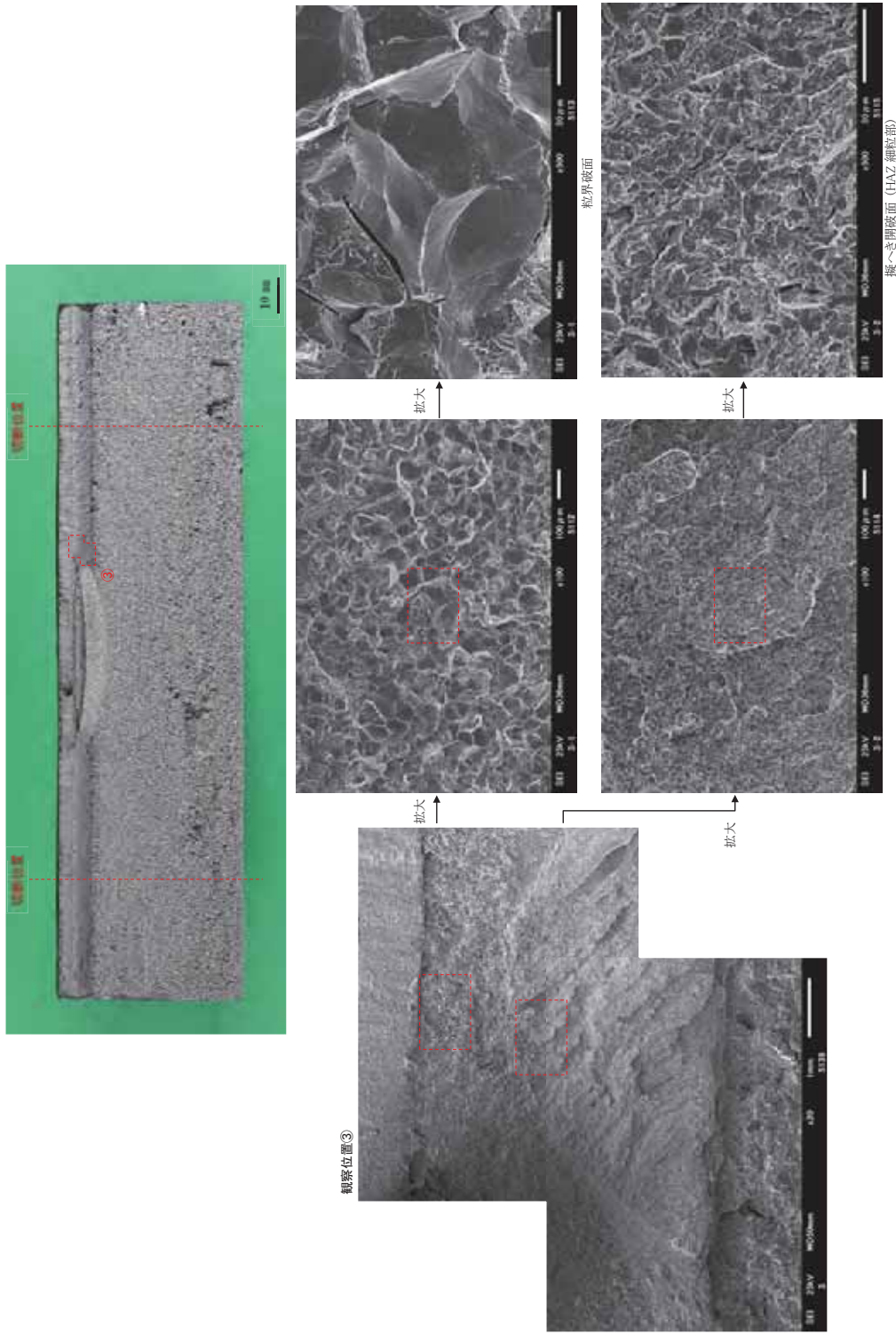


図 3.1.2.3-49 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：525°C×8h，試験体刻印番号：JSW-4A-K-2-U，試験温度：室温)

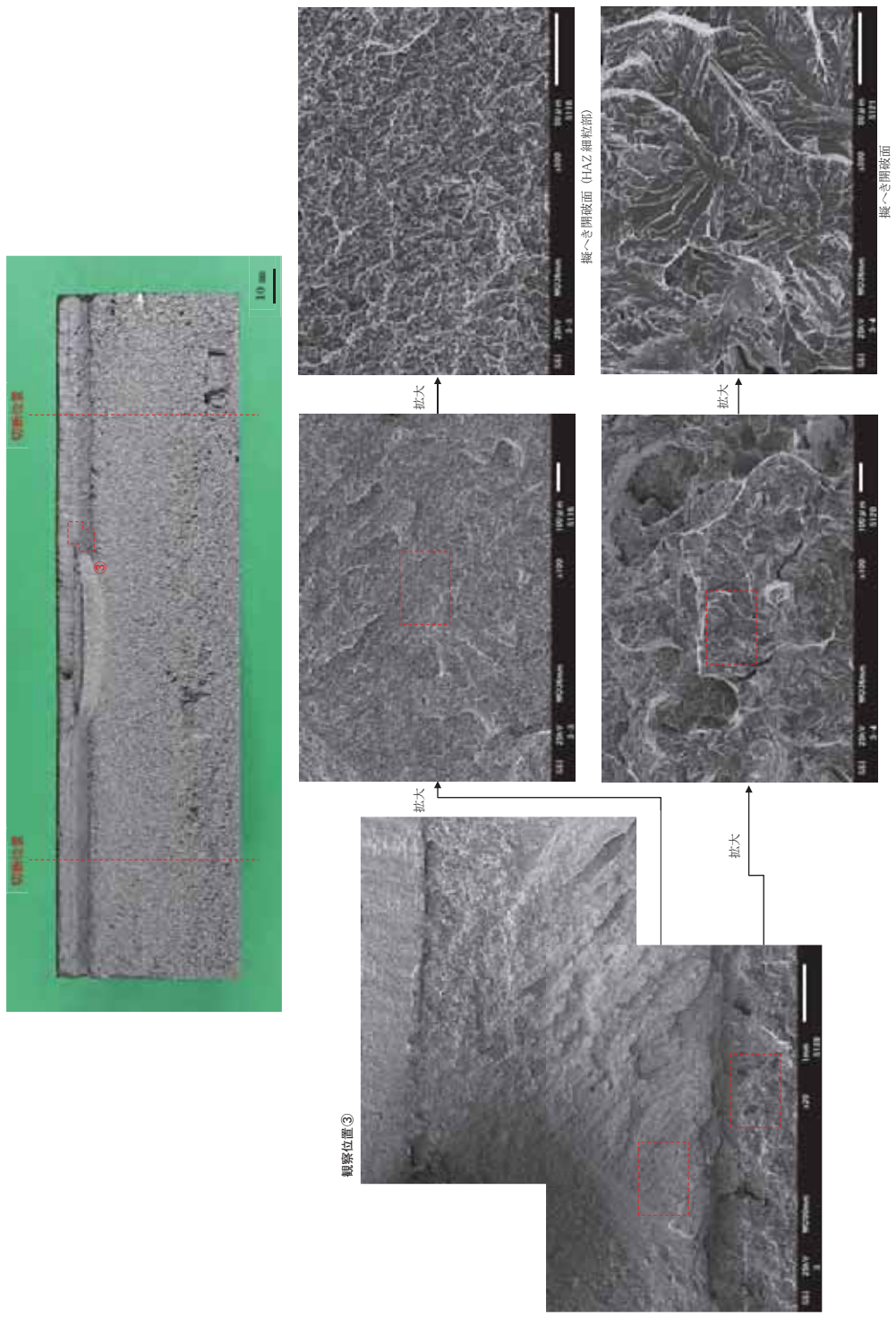


図 3.1.2.3-50 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：525°C×8h，試験体刻印番号：JSW-4A-K-2-U，試験温度：室温)

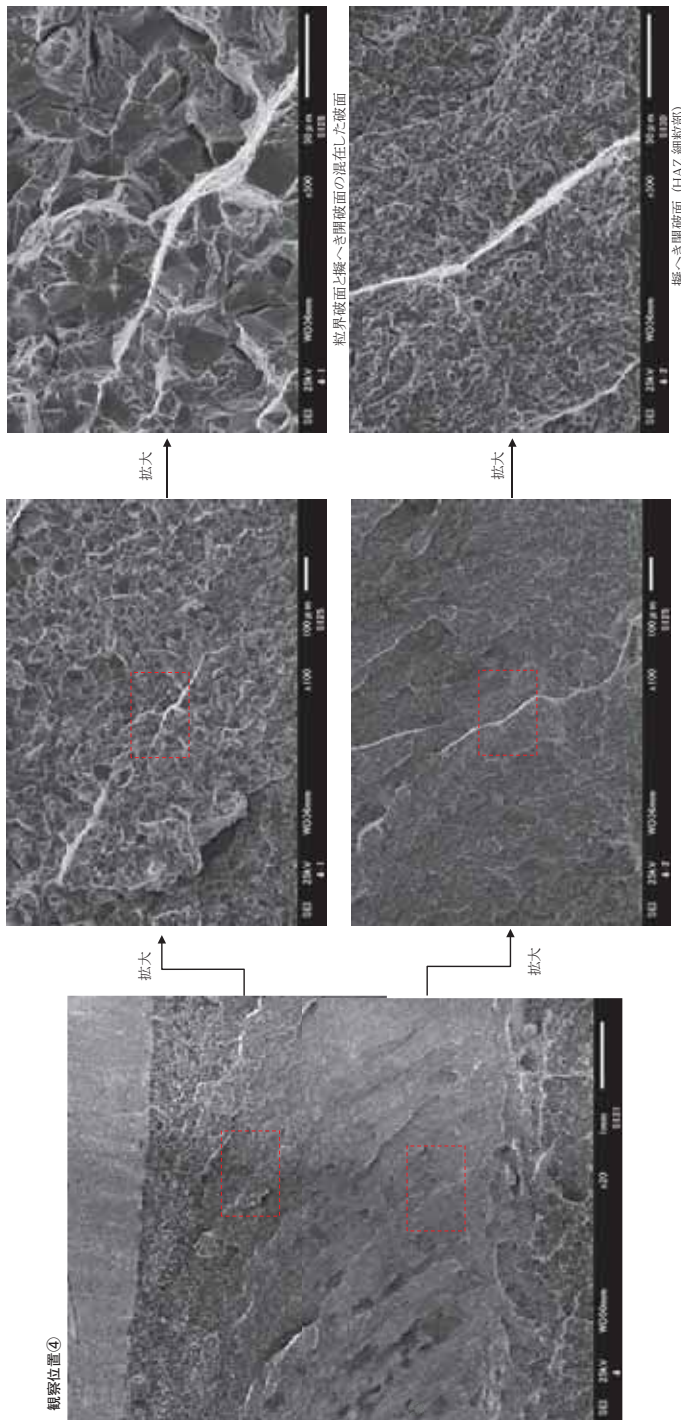


図 3.1.2.3-51 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：525°C×8h，試験体刻印番号：JSW-4A-K-2-U，試験温度：室温)

(6) 破壊試験結果(3 体目)

① 荷重-鉛直変位の関係

平板試験における荷重-鉛直変位(作動トランスによる鉛直変位)を図 3.1.2.3-52 に示す。最終破断に至るまでほぼ線形で増加し、破断時の荷重(最大)は約 554kN であった。

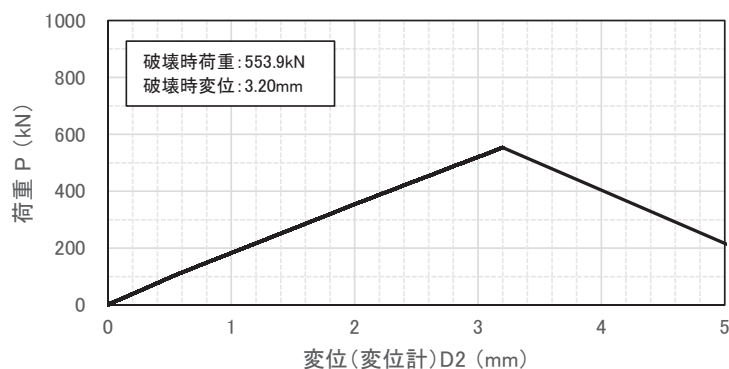


図 3.1.2.3-52 荷重-鉛直変位の関係

② 荷重-PDM 出力の関係

荷重-PDM 出力の関係を図 3.1.2.3-53 に示す。荷重 300kN 付近から、PDM 出力が増加する傾向が見られた。約 360kN から断続的な甲高い音が発生し始めており、PDM の変化開始点とほぼ対応していた。この PDM の増加と音の発生は、試験中に HAZ 部からのき裂発生・進展に対応している可能性が考えられる。

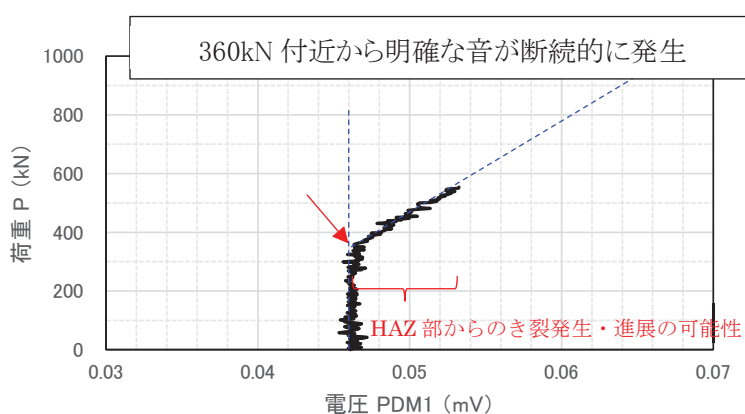


図 3.1.2.3-53 荷重-PDM 出力の関係

③ 平板破壊試験における破壊靱性評価

3 体目の平板試験に対して FE 解析を実施し、試験体が破断した時の K_J を確認した結果を以下にまとめる。

表 3.1.2.3-30 に解析ケースを示す。き裂形状とクラッド厚さ、熱処理条件、母材の応力-ひずみ曲線以外は 1 体目の解析と同様である。熱処理後の母材の応力-ひずみ曲線を、図 3.1.2.3-54 に示す。

試験と解析の荷重-変位関係を図 3.1.2.3-55 に示す。解析結果は試験結果と良く一致し、解析の妥当性を確認できた。HAZ 部の割れを考慮した FE 解析は割れを考慮しない FE 解析結果とほぼ同等の変形挙動を示し、HAZ 部の先行割れによる载荷点変位の変化が小さいことを確認した。試験の破断荷重と解析で求めた荷重と K_J の関係から推測した破断時の K_J を図 3.1.2.3-56 に示す。破断荷重に対応する K_J はき裂①の条件で $71(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ 、き裂②の条件で $75(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ となった。

表 3.1.2.3-30 解析ケース一覧

No.	熱処理条件	き裂形状		クラッド厚さ (mm)	HAZ 部の先行割れ	備考 (凡例の表記)
		深さ (mm)	長さ (mm)			
ケース 1	580°C×4h	10.4	60.4	5.05	模擬しない	き裂① (深さ 10.4mm, 長さ 60.4mm)
ケース 2					模擬する	き裂② (き裂①+HAZ 割れ)

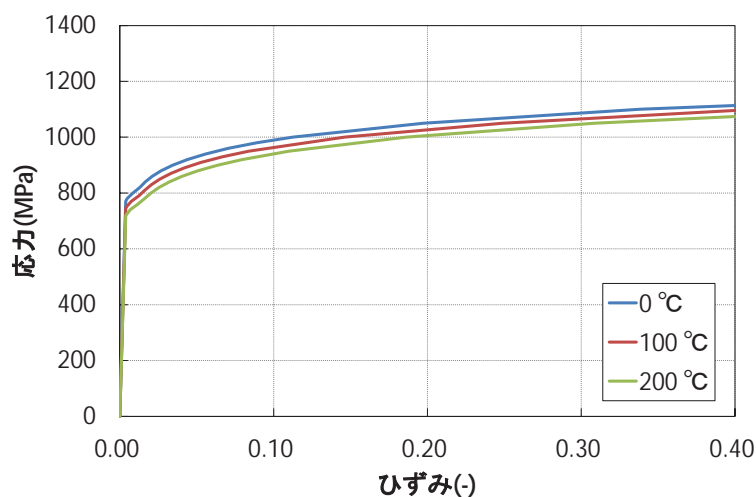


図 3.1.2.3-54 母材の応力-ひずみ曲線(熱処理条件 580°C×4h)

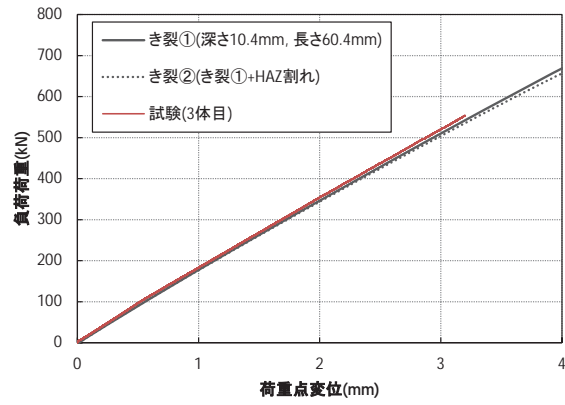


図 3.1.2.3-55 荷重-変位関係 (3 体目の試験と解析の比較)

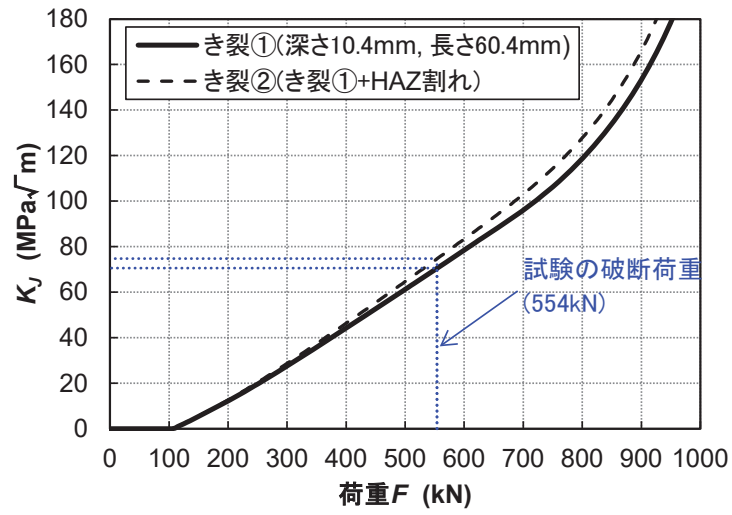


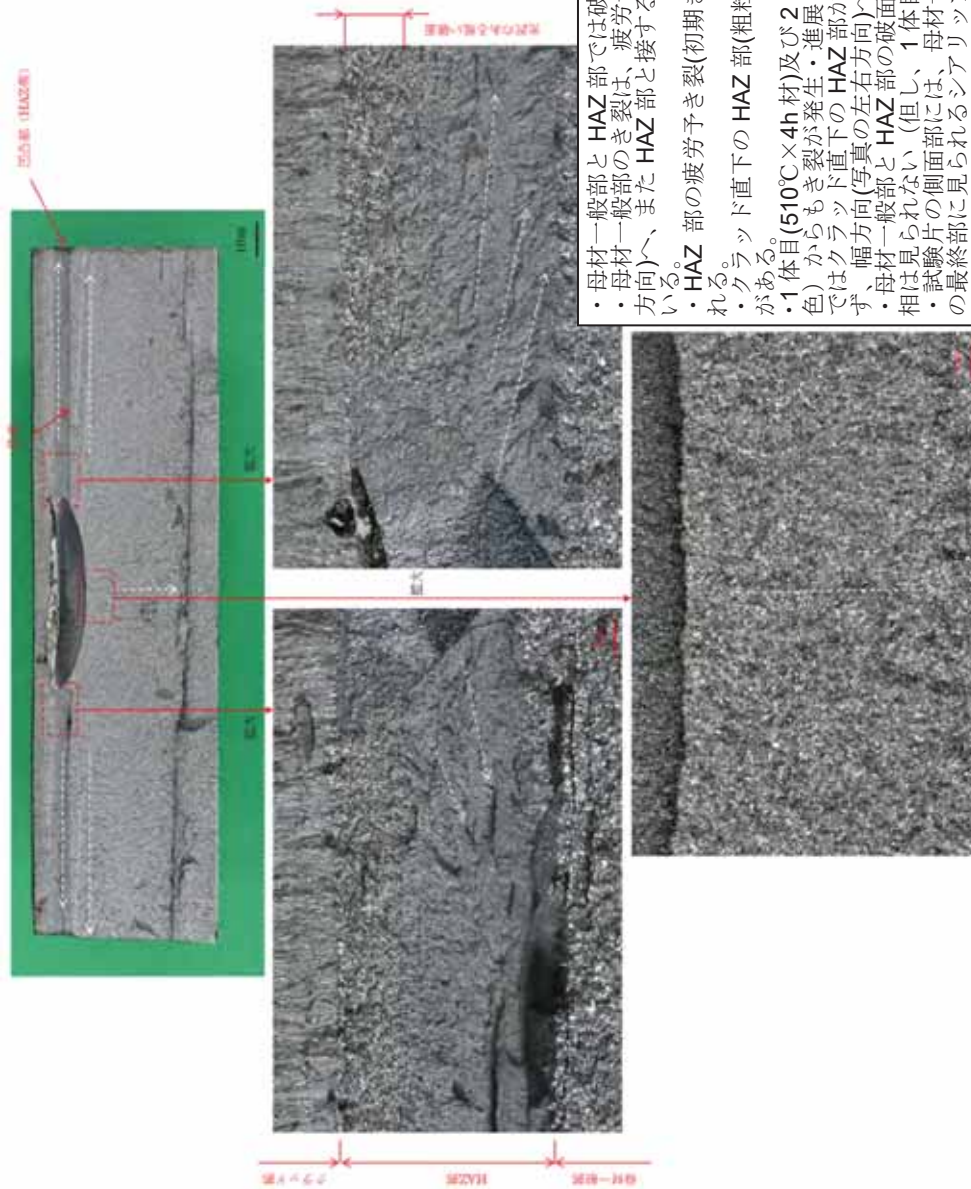
図 3.1.2.3-56 試験の破断荷重に対する K_I (3 体目)

④ 破面観察結果(SEMを含む)

3体目の試験においても、2体目の試験(クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：525°C×8h)と同様に、試験体は最大荷重に到達後、完全破断した。試験後の試験体の破面外観状況を図 3.1.2.3-57 に示す。3体目の試験の試験体についても、クラッド直下の深さ約 5mm の HAZ 部に対応する部分において母材一般部とは明らかに破面様相の異なる領域が認められ、1体目及び2体目よりも小さいものの、母材一般部との境界には段差が認められた。疲労予き裂先端付近の破面の詳細な観察より、き裂はクラッド直下部近傍の2箇所及び疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)の合計3箇所から発生・進展している様相が認められた。このうち、疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)から発生したき裂は、板厚方向と左右方向(試験体の幅方向)に進展していた。また、試験体の側面には、母材一般部と HAZ 部の境界部の HAZ 側寄りの箇所に、延性破壊の最終部に見られるシアリップのような凹凸部が観察された。

破面形態を確認するため、一方の破面について走査型電子顕微鏡(SEM)による破面の詳細観察を行った。この結果を図 3.1.2.3-58～図 3.1.2.3-61 に示す。母材一般部の破面は、いずれも粒界破面が一部混在した擬へき開破面であったのに対し、HAZ 部の破面については、クラッド直下部の粗粒 HAZ 部がほぼ全面粒界破面、母材に近い側の細粒 HAZ 部が粒の細かい擬へき開破面となっていた。

以上の試験体破面の観察結果から、3体目の試験(クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：580°C×4h)についても1体目及び2体目の試験と同様に、HAZ 部における疲労予き裂先端から先行して脆性き裂が発生し、HAZ 部を進展した後、最終的に疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)を起点としてき裂が発生し、破壊に至ったものと推定される。



・母材一般部と HAZ 部では破面の様相が明確に異なっている。
 ・母材一般部のき裂は、疲労予き裂(初期き裂)の最深部から厚さ方向(写真の上下方向)へ、また HAZ 部と接する箇所については幅方向(写真の左右方向)へ進展している。
 ・HAZ 部の疲労予き裂(初期き裂)からも、き裂が発生・進展している様相が見られる。
 ・クラッド直下の HAZ 部(粗粒 HAZ 部)の破面は、比較的破面の凹凸があり、光沢がある。
 ・1 体目(510°C×4h 材)及び 2 体目(525°C×8h 材)ではクラッド直下の HAZ 部(銀色)からもき裂が発生・進展している様相が見られたが、3 体目(580°C×4h 材)ではクラッド直下の HAZ 部からのき裂の発生・進展した様子は明確には認められず、幅方向(写真の左右方向)へのき裂進展が支配的である。
 ・母材一般部と HAZ 部の破面の境界部には段差が見られ、連続したき裂進展の様相は見られない(但し、1 体目及び 2 体目の試験よりも段差は小さい傾向)。
 ・試験片の側面部には、母材一般部と HAZ 部の境界部の HAZ 寄り側に延性破壊の最終部に見られるシアリップのような凹凸部が見られる。

図 3.1.2.3-57 試験後の試験体の破面外観状況(クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：580°C×4h，試験体刻印番号：JSW-4A-K

-2-I, 試験温度：室温)

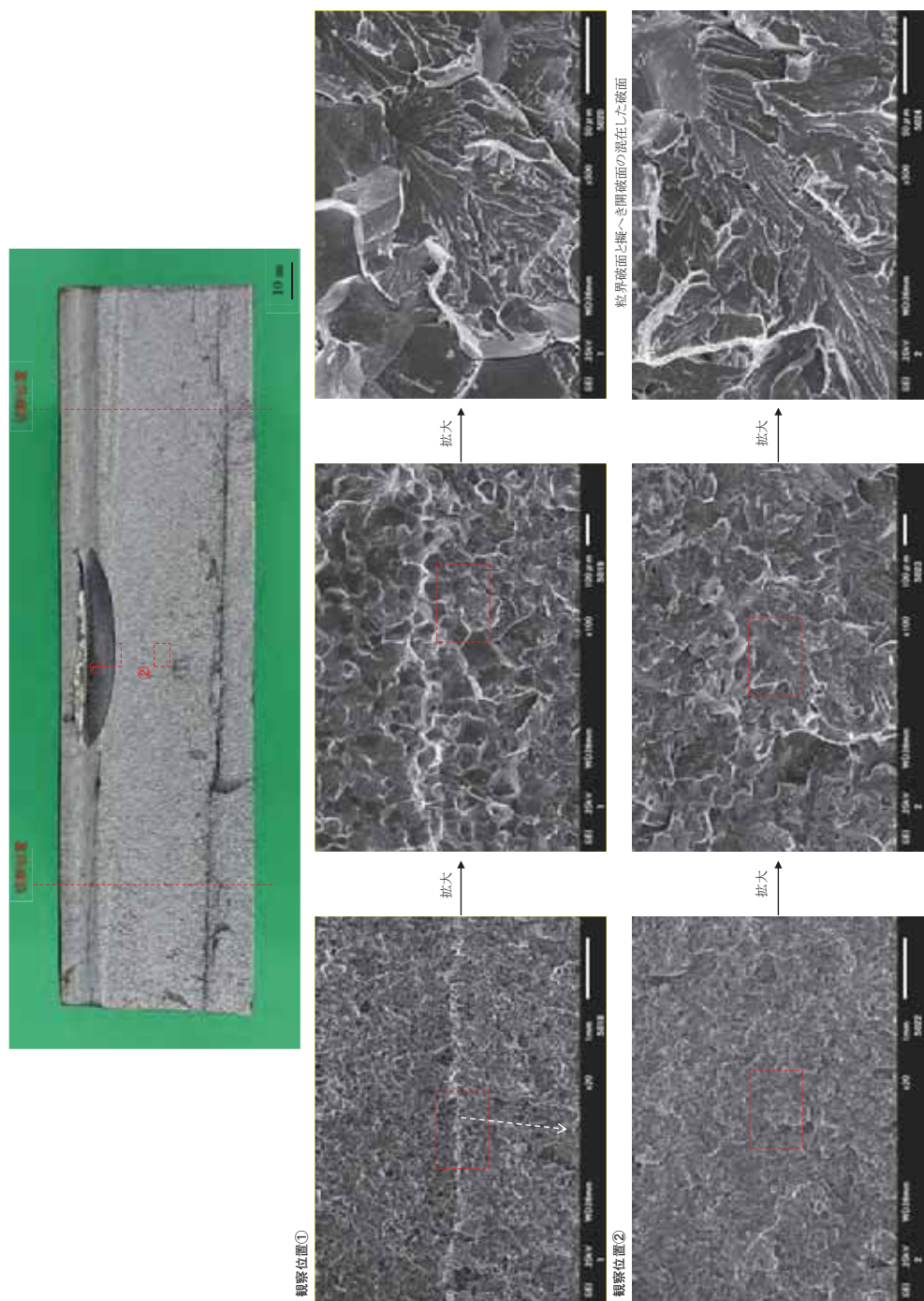


図 3.1.2.3-58 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：580°C×4h，試験体刻印番号：JSW-4A-K-2-L，試験温度：室温)

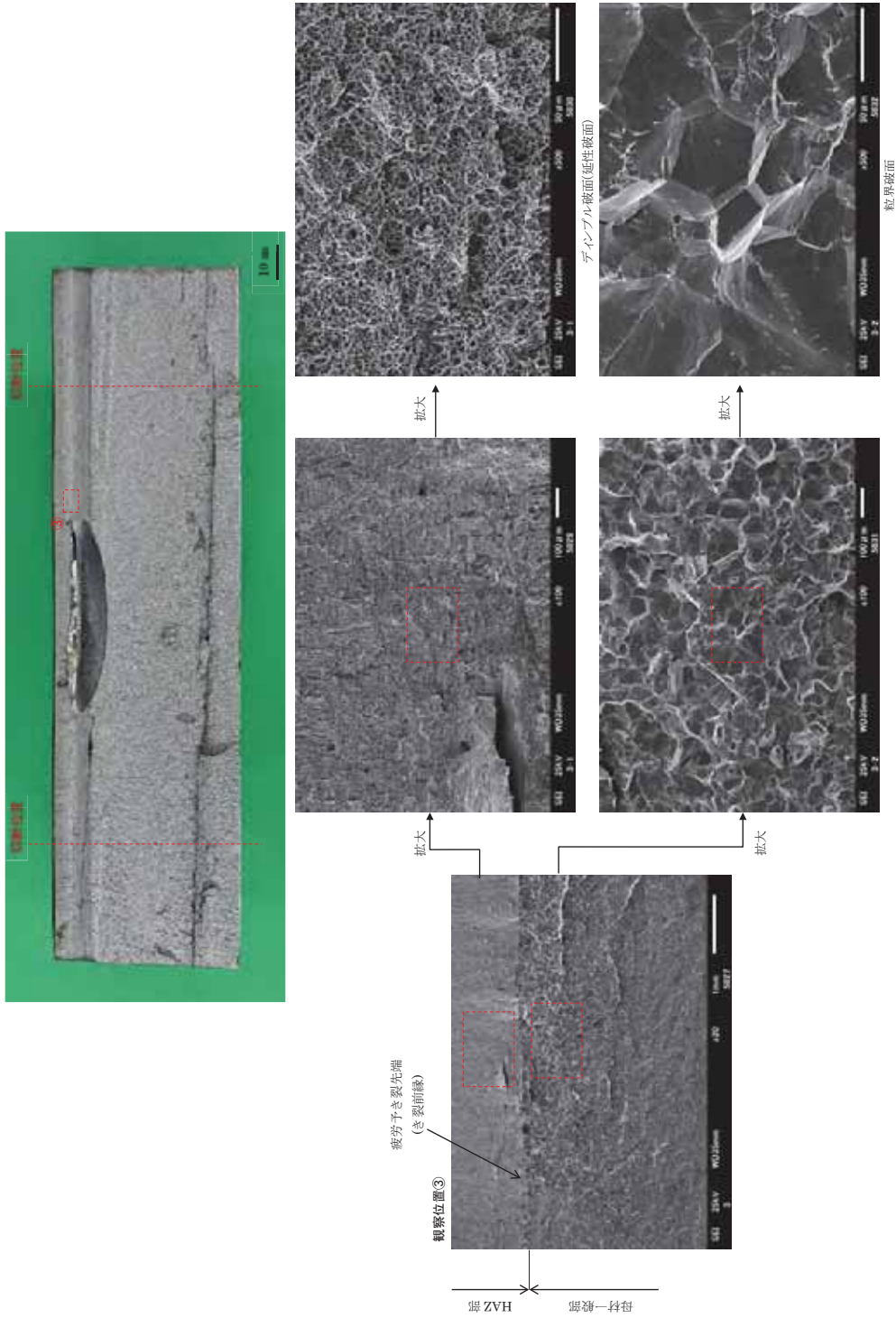


図 3.1.2.3-59 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：580°C×4h，試験体刻印番号：JSW-4A-K-2-L，試験温度：室温)

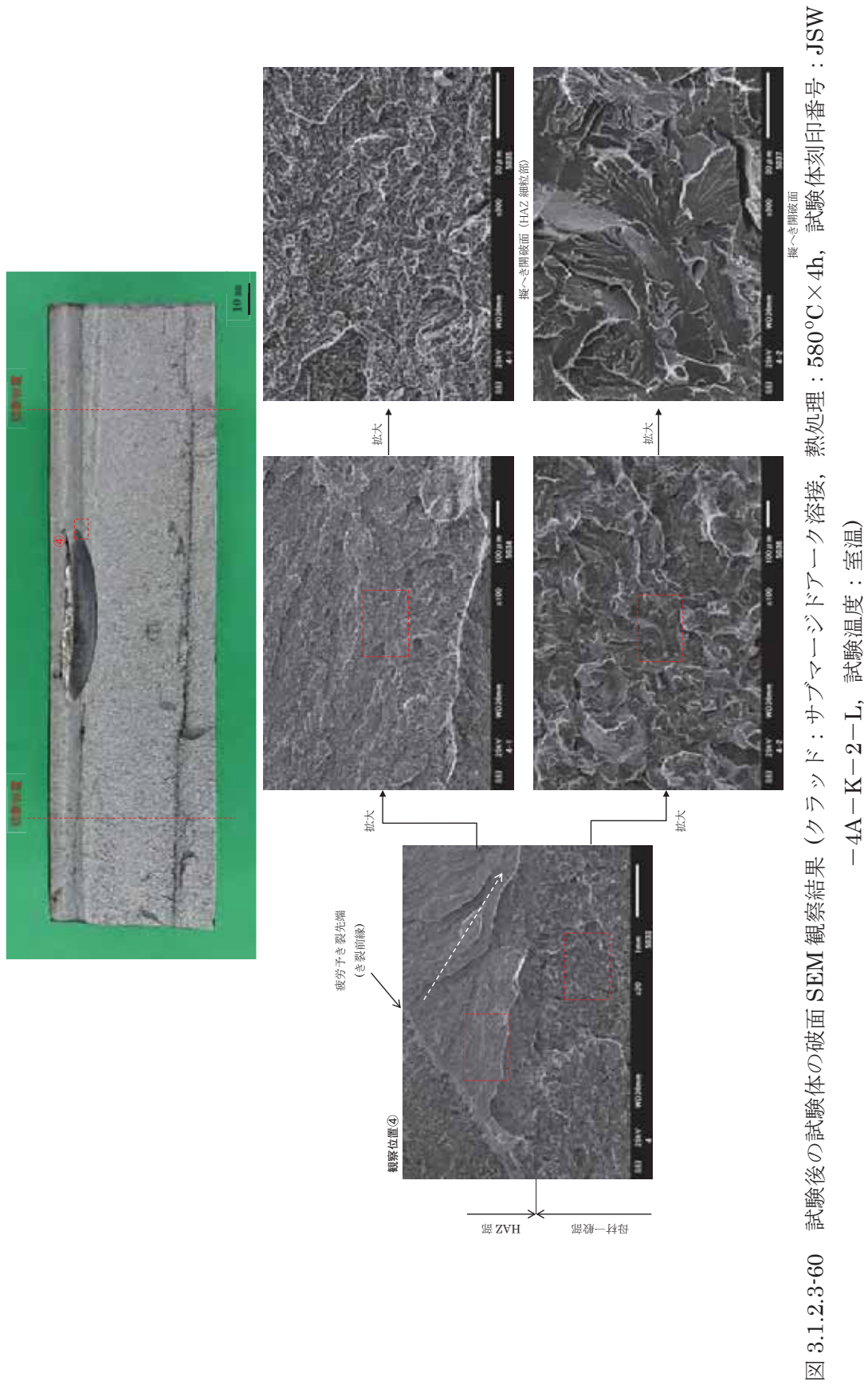
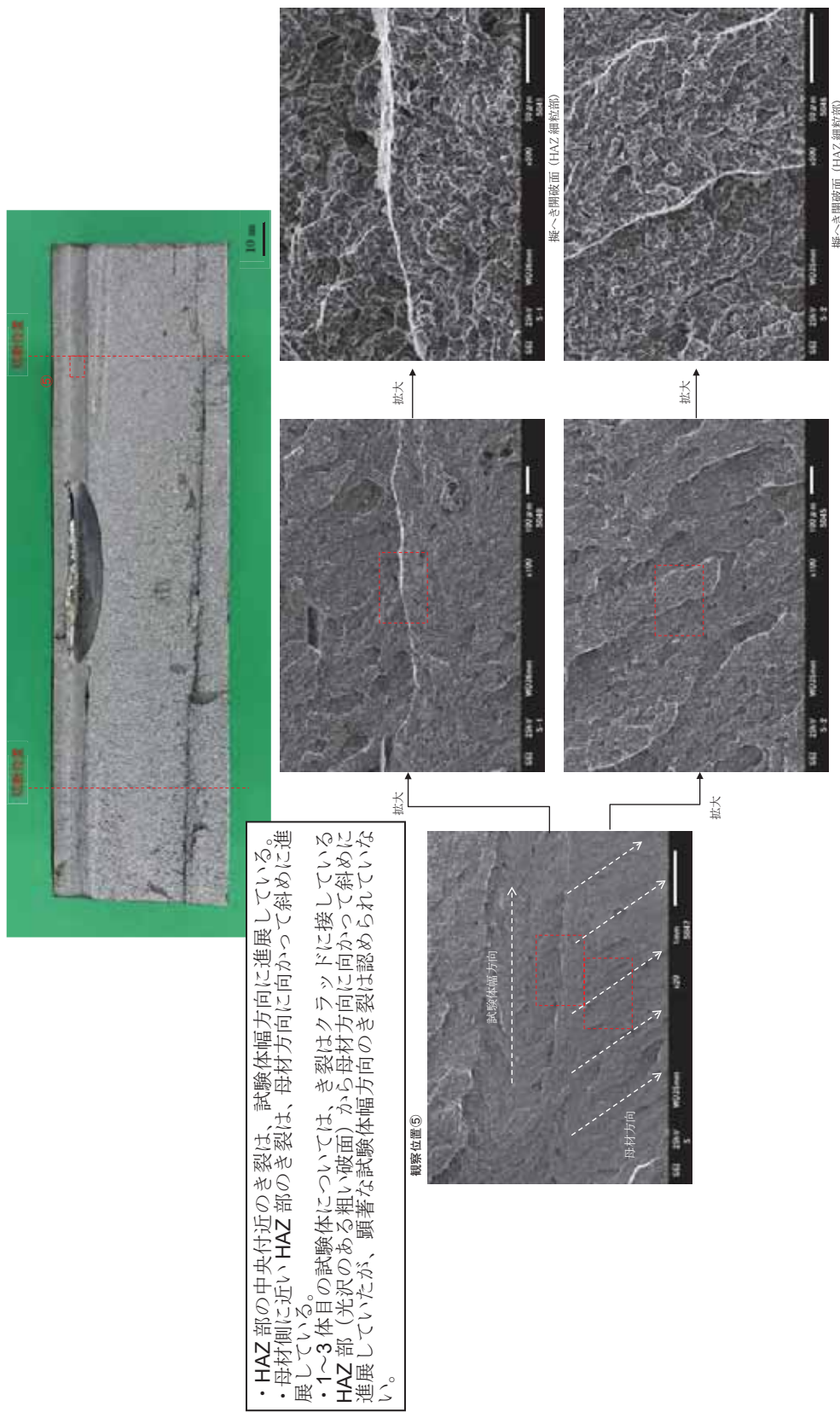


図 3.1.2.3-60 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：580°C×4h，試験体刻印番号：JSW-4A-K-2-L，試験温度：室温)



・HAZ部の中央付近のき裂は、試験体幅方向に進展している。
 ・母材側に近いHAZ部のき裂は、母材方向に向かって斜めに進展している。
 ・1~3体目の試験体については、き裂はクラッドに接しているHAZ部(光沢のある粗い破面)から母材方向に向かって斜めに進展していたが、顕著な試験体幅方向のき裂は認められていない。

(7) 破壊試験結果(4 体目)

① 荷重-鉛直変位の関係

【1 回目：PDM が明確に変化し破砕音が聞こえるまで】

平板試験における荷重-鉛直変位(作動トランスによる鉛直変位)を図 3.1.2.3-62 に示す。ほぼ線形で増加し、最終停止時の荷重は約 481kN であった。途中、PDM 出力が変化した段階で荷重を一時的に除荷し、PDM 出力の確認を行った。

なお、388kN 付近と 480kN 付近で明確な音の発生を確認した。

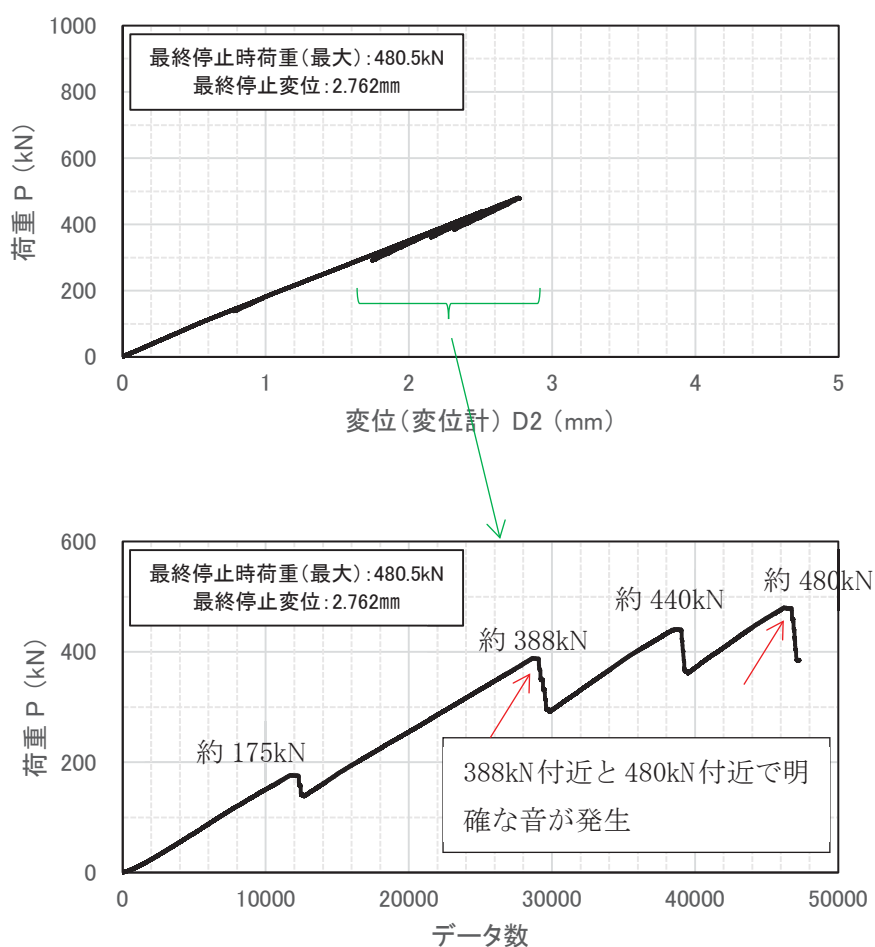


図 3.1.2.3-62 荷重-鉛直変位の関係(1 回目)

【2回目：再負荷】

平板試験における荷重-鉛直変位(作動トランスによる鉛直変位)を図 3.1.2.3-63 に示す。ほぼ線形で増加し、最終停止時の荷重は約 694kN であった。540kN 付近、640kN 付近と 680kN 付近で明確な音の発生を確認しており、その時点で荷重の僅かな低下が見られた。試験は荷重が 5%以上低下した段階で負荷を停止した。

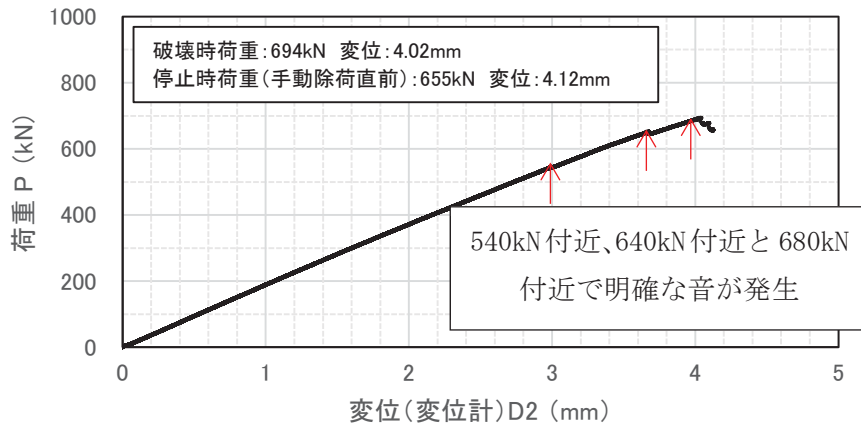


図 3.1.2.3-63 荷重-鉛直変位の関係(2回目)

② 荷重-PDM 出力の関係

【1回目：PDM が明確に変化し破砕音が聞こえるまで】

荷重-PDM 出力の関係を図 3.1.2.3-64 に示す。音が発生した辺りから PDM 出力が増加する傾向が見られた。

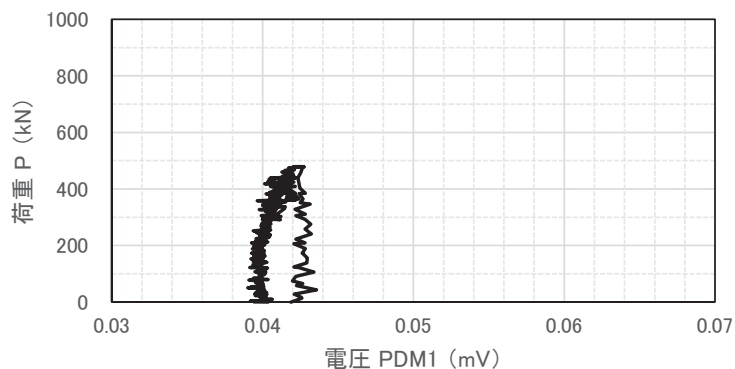


図 3.1.2.3-64 荷重-PDM 出力の関係(1回目)

【2回目：再負荷】

荷重-PDM 出力の関係を図 3.1.2.3-65 に示す。540kN 付近、640kN 付近と 680kN 付近で明確な音の発生を確認しており、PDM 出力の変化とほぼ一致していた。

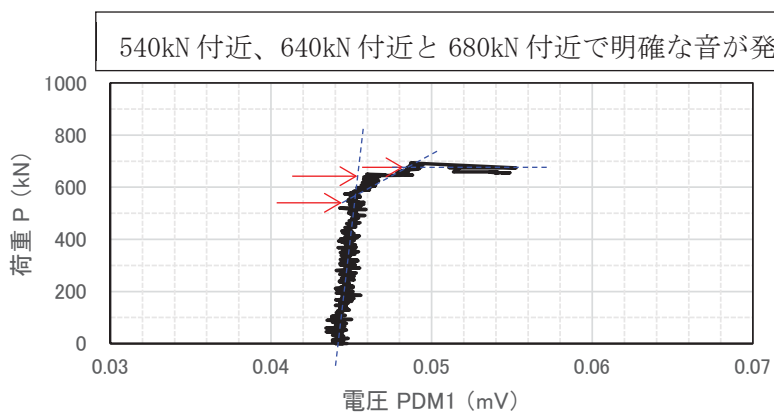


図 3.1.2.3-65 荷重-PDM 出力の関係(2回目)

③ 平板破壊試験における破壊靱性評価

4 体目の平板試験に対して FE 解析を実施し、試験体が破断した時の K_J を確認した結果を以下にまとめる。

表 3.1.2.3-31 に解析ケースを示す。き裂形状とクラッド厚さ、熱処理条件、母材の応力-ひずみ曲線以外は 1 体目の解析と同様である。熱処理後の母材の応力-ひずみ曲線を図 3.1.2.3-66 に示す。き裂形状は明確な HAZ 割れが確認されなかったため、き裂①の条件のみ解析を実施した。

試験と解析の荷重-変位関係を図 3.1.2.3-67 に示す。解析結果は試験結果と良く一致し、解析の妥当性を確認できた。解析で求めた荷重と K_J の関係を図 3.1.2.3-68 に示す。明確な音が生じた荷重での K_J は $68(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ 、 $86(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ となった。後述する破面観察結果から、音が生じた時に最深部からき裂が進展していると考えられ、 K_J が $68\sim 86(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ の条件でき裂が進展したと推測される。

表 3.1.2.3-31 解析ケース一覧

No.	熱処理条件	き裂形状 (mm)		クラッド厚さ (mm)	HAZ 部の先行割れ	備考 (凡例の表記)
		深さ (mm)	長さ (mm)			
ケース 1	600°C×4h	10*	60*	4.98	模擬しない	き裂① (深さ 10mm, 長さ 60mm)

*き裂形状は公称値を用いた。

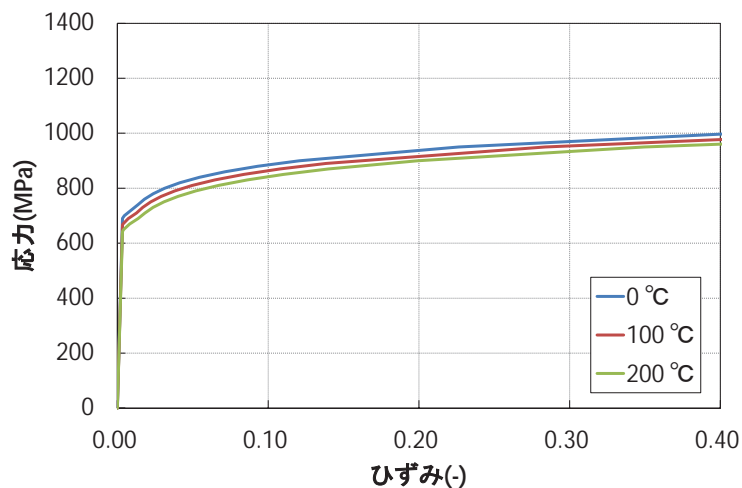


図 3.1.2.3-66 母材の応力-ひずみ曲線(熱処理条件 600°C×4h)

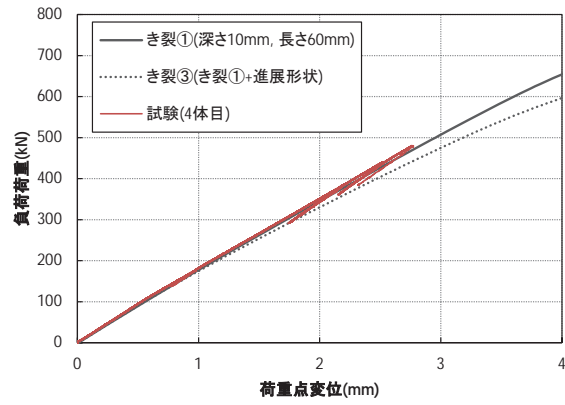


図 3.1.2.3-67 荷重-変位関係 (4 体目の試験と解析の比較)

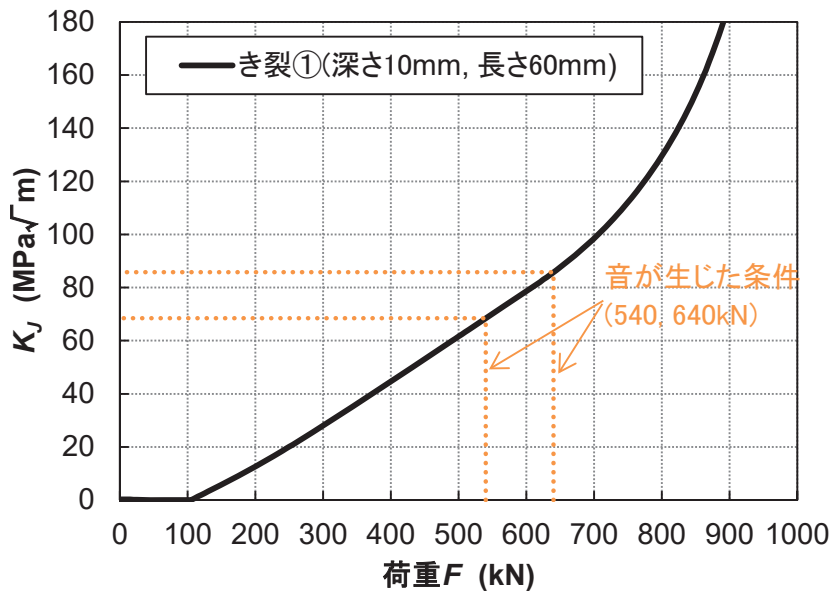


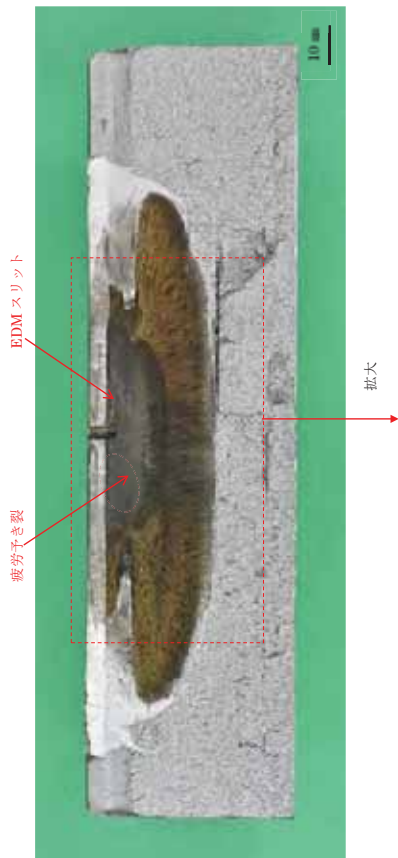
図 3.1.2.3-68 試験の破断荷重に対する K_J (4 体目)

④ 破面観察結果(SEM を含む)

4 体目の試験では、3 体目までの試験結果を踏まえ、試験体への負荷時において PDM に変化が認められた時点で試験を停止し、加熱着色を行った上で、2 回目の負荷を行い、最終的に繰返し負荷による疲労で破面開放を行った。試験後の試験体の破面外観写真を図 3.1.2.3-69～図 3.1.2.3-72 に示す。破面の外観状況より、1 回目の負荷において進展したき裂(着色された破面の部分)は、HAZ 部と母材一般部の両方に認められ、さらに疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)において色調の濃い楕円状の領域(最深部で深さ 5mm 程度)が観察される。また、HAZ 部の破面のうち、母材に近い領域では、加熱着色された領域が狭くなっており、母材に近い細粒 HAZ 部において、き裂の伝播停止と進展が断続的に繰返し生じた痕跡が認められることから、この領域の HAZ 部の靱性が高く、発生した脆性き裂の進展を阻止していると推定される。また、加熱着色された領域の破面の HAZ 部と母材一般部の境界では、1 体目～3 体目の試験で認められたような明確な段差は観察されず、連続しているように見える。

また、試験後の試験体について、細粒 HAZ 部の破面を主体に SEM 観察を行った結果を図 3.1.2.3-73～図 3.1.2.3-76 に示す。1 回目及び 2 回目の負荷で生じたと推定される破面には、擬へき開状の破面が観察され、疲労により破面開放時に生じたと推定される破面は非常に平坦で繰返し負荷によると思われる破面の損傷が認められた。また、1 回目の負荷で停止したと推定される位置においては、わずかにディンプル(延性破面)が認められた。以上の破面観察結果を基に総合的に判断すると、4 体目の試験では図 3.1.2.3-77 に示すような順序で脆性き裂が発生、進展、停止したと推定され、疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)から先行して脆性き裂が発生した可能性があると考えられる。

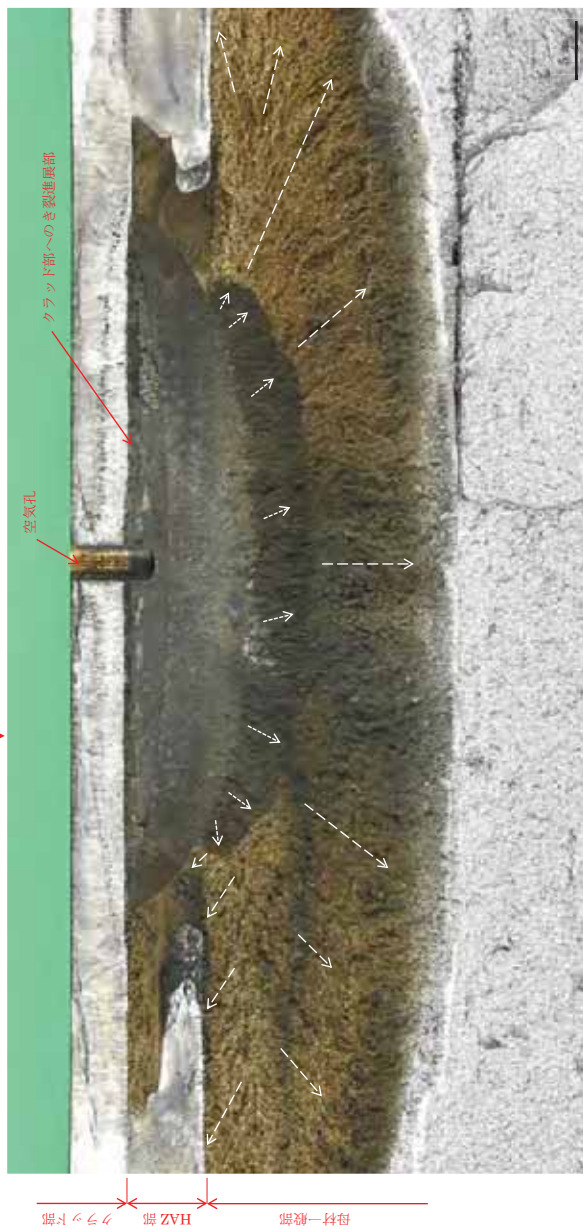
なお、このき裂進展挙動を確認するためには、今回よりもさらに早い段階で試験を停止し、破面を加熱着色した上でき裂の発生状況の確認を行う必要がある。



・1回目の負荷において進展したき裂(写真中で着色された破面の部分)は、HAZ部と母材一般部の両方に認められ、疲労予き裂の濃い半楕円状の領域(最深部で深さ5mm程度)が観察される。

・HAZ部の破面のうち、母材側に近い領域(細粒HAZ部)では、加熱着色された領域が狭くなっている。(この領域の靱性が高く、き裂進展を阻止していると推定。)

・加熱着色された領域の破面において、HAZ部と母材一般部の境界では、1体目～3体目の試験で認められたような明確な段差は観察されず、連続しているように見える。



注)写真中の矢印の向きは、破面から推定されるき裂伝播方向を示す。

図 3.1.2.3-69 試験後の試験体の破面外観状況 (クラッド: サブマージドアーク溶接, 熱処理: 600°C×4h, 試験体刻印番号: JSW-4A-K-3-U, 試験温度: 室温)

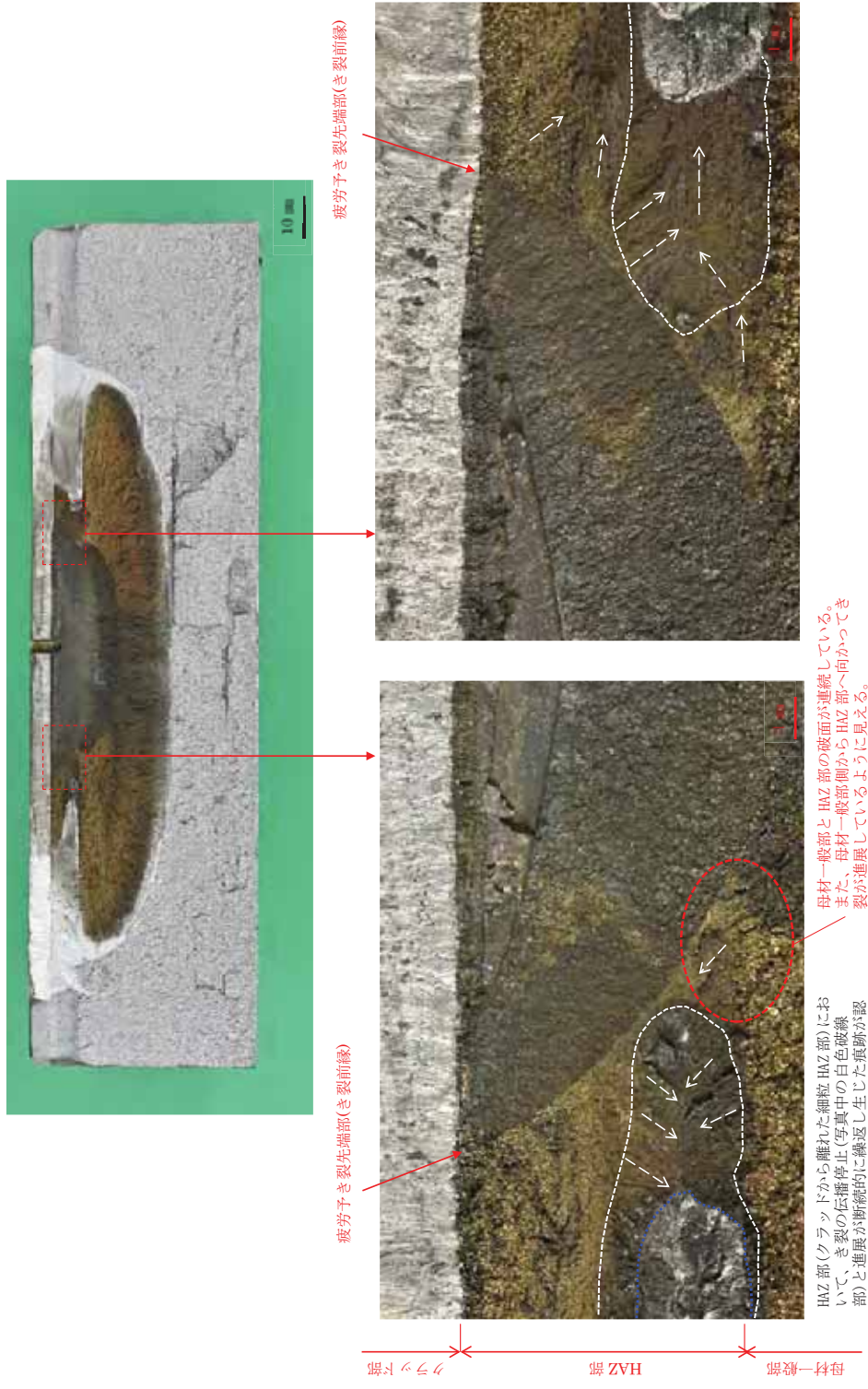


図 3.1.2.3-70 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：580°C×4h，試験体刻印番号：JSW-4A-K-2-L，試験温度：室温)

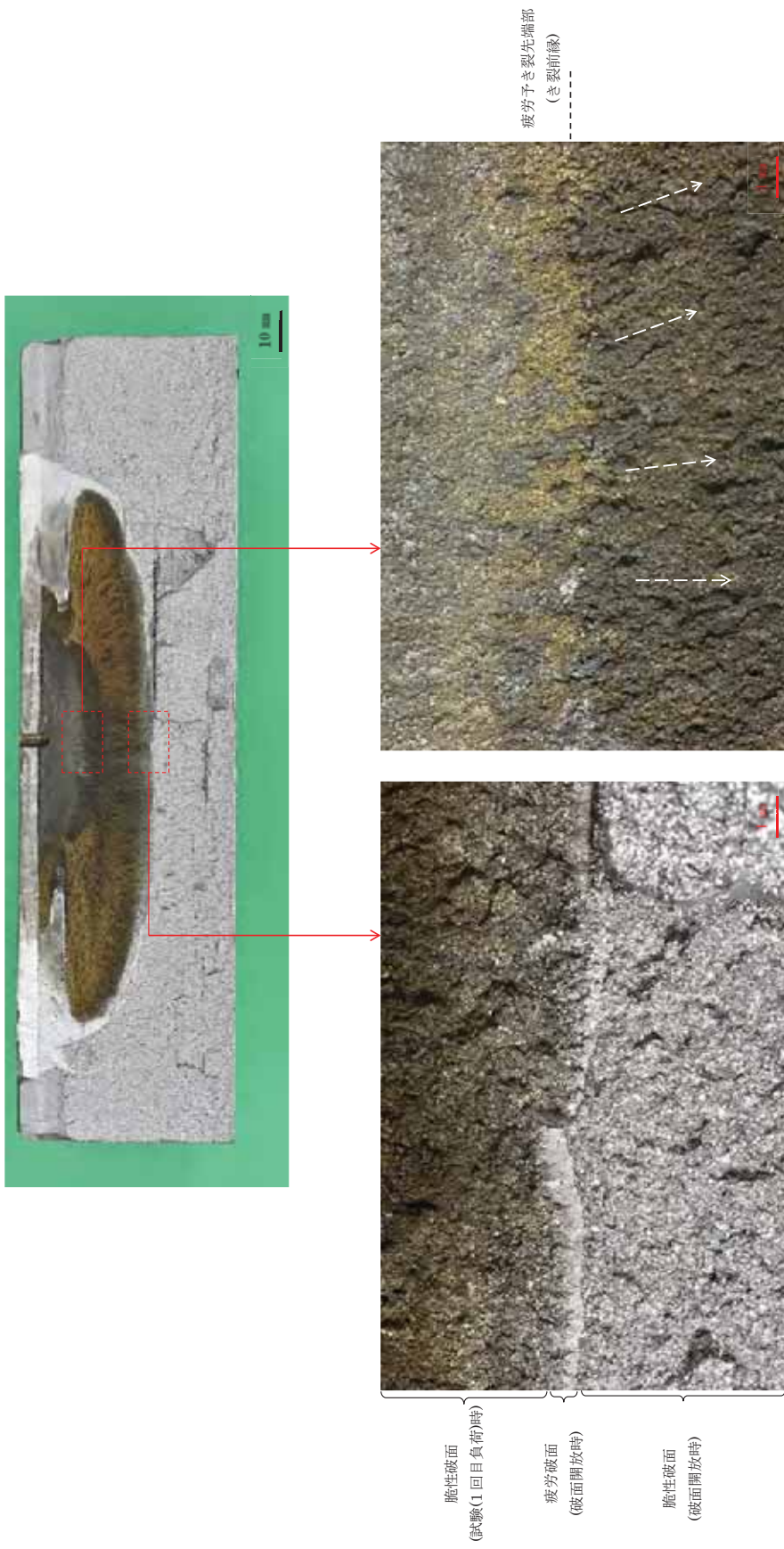


図 3.1.2.3-72 試験後の試験体の破面外観状況 (クラッド: サブマージドアーク溶接, 熱処理: 600°C×4h, 試験体刻印番号: JSW-4A-K-3-U, 試験温度: 室温)

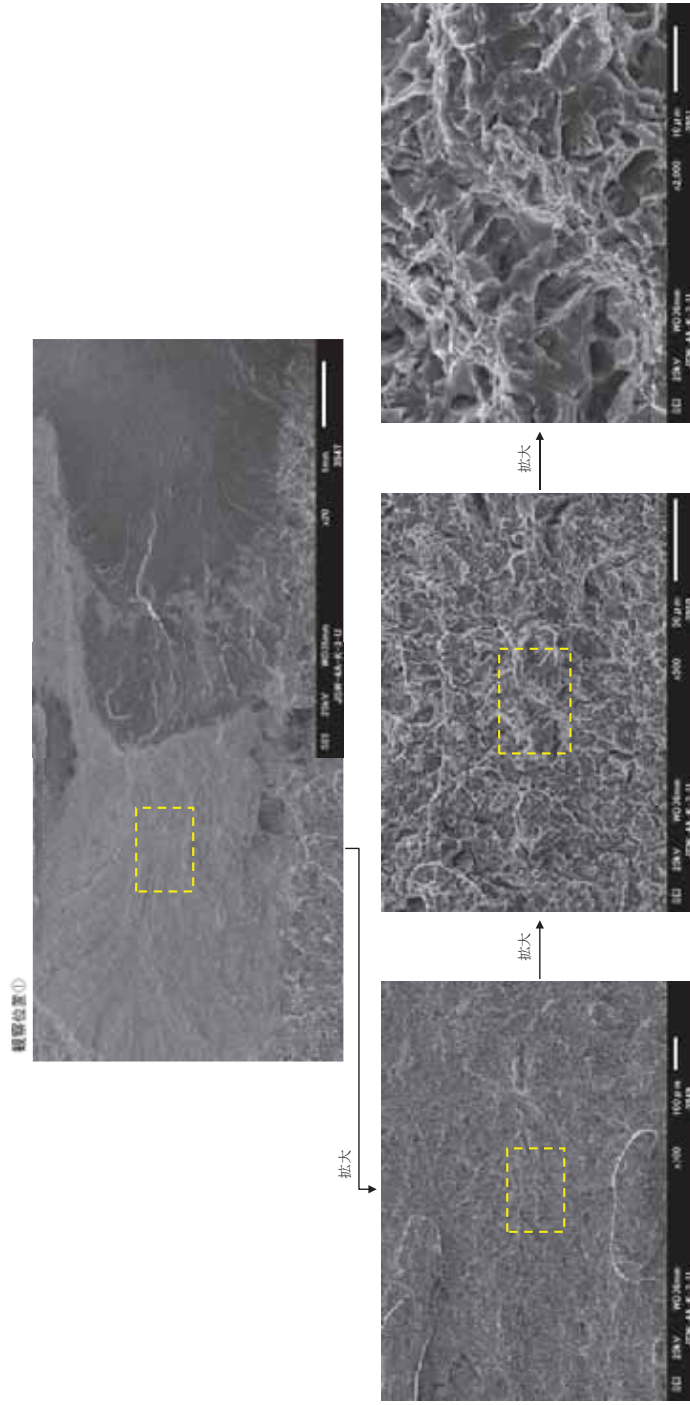
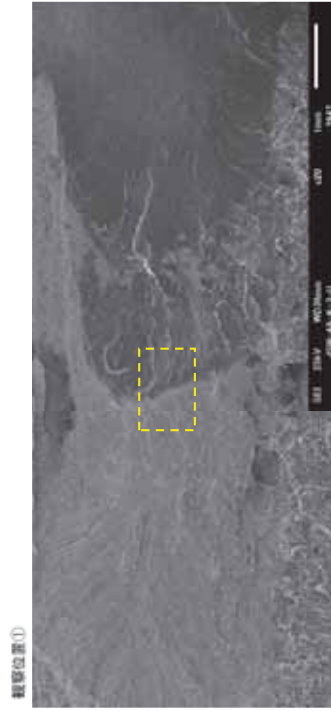


図 3.1.2.3-73 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド: サブマージドアーク溶接, 熱処理: 600°C×4h, 試験体刻印番号: JSW-4A-K-3-U, 試験温度: 室温)



着色部(褐色)と非着色部の境界部分付近にわずかにディンプルが見られることから、裂がこの位置で停止したものと推測される。

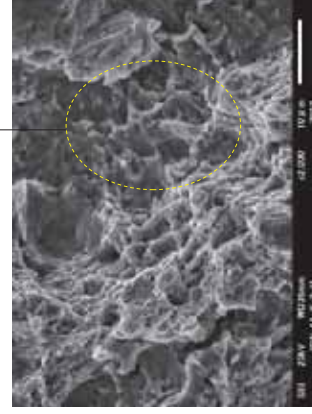
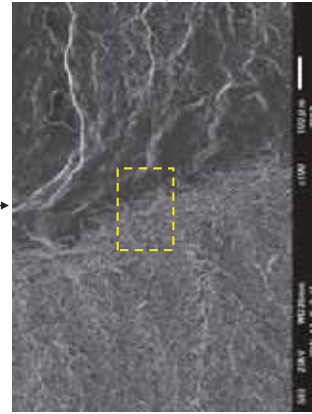


図 3.1.2.3-74 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接, 熱処理：600°C×4h, 試験体刻印番号：JSW-4A-K-3-U, 試験温度：室温)

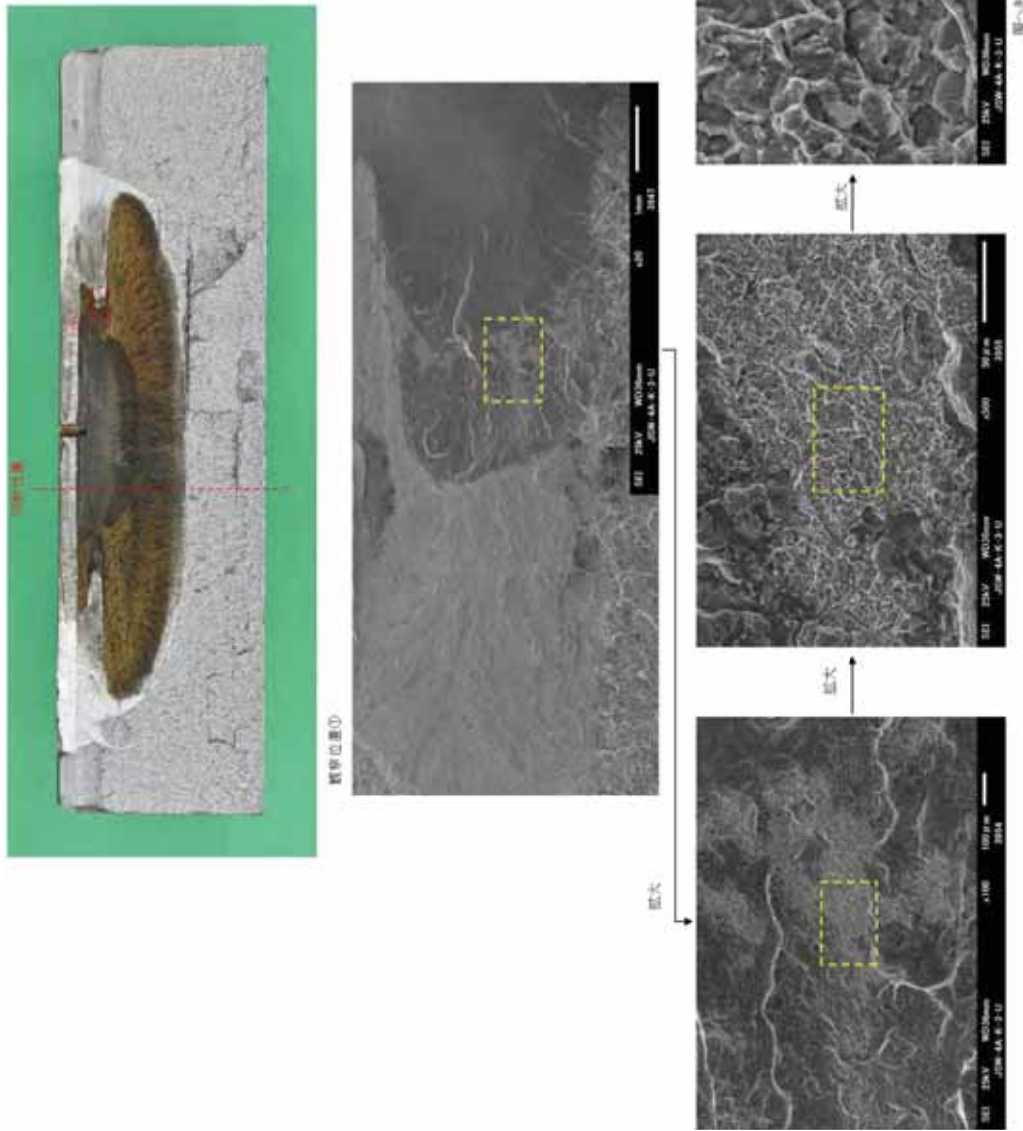


図 3.1.2.3-75 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：600°C×4h，試験体刻印番号：JSW-4A-K-3-U，試験温度：室温)

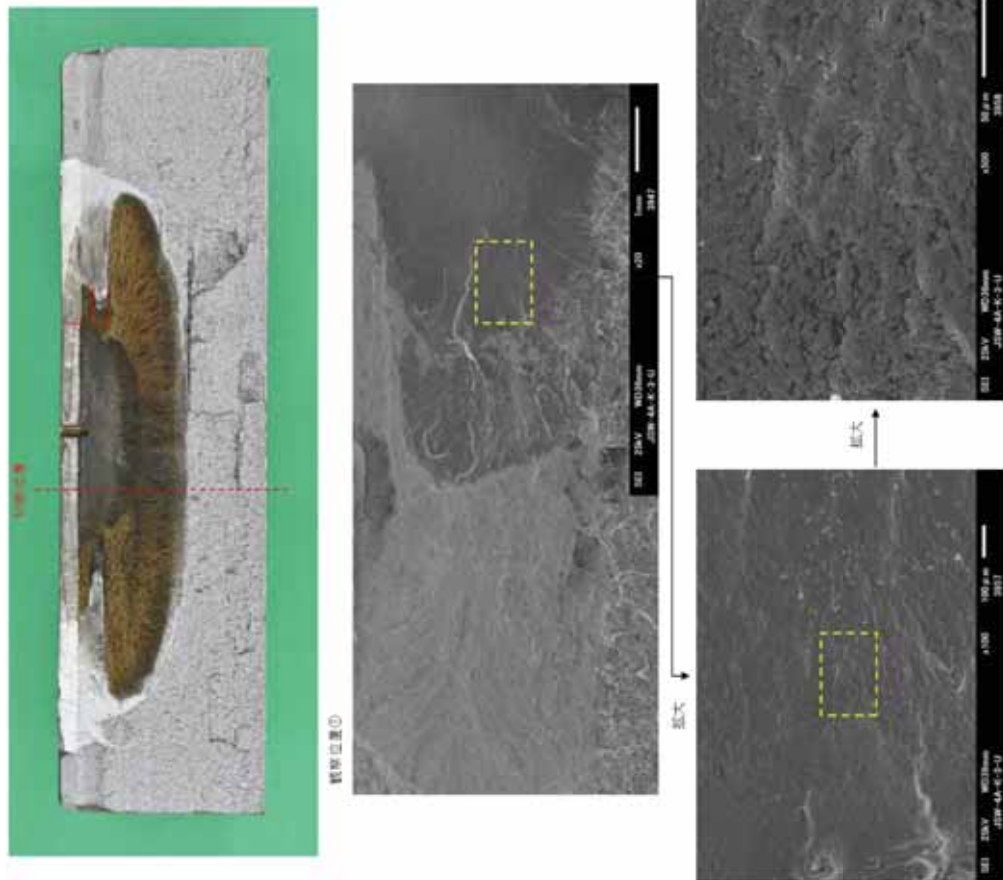


図 3.1.2.3-76 試験後の試験体の破面の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：600°C×4h，試験体刻印番号：JSW-4A-K-3-U，試験温度：室温)

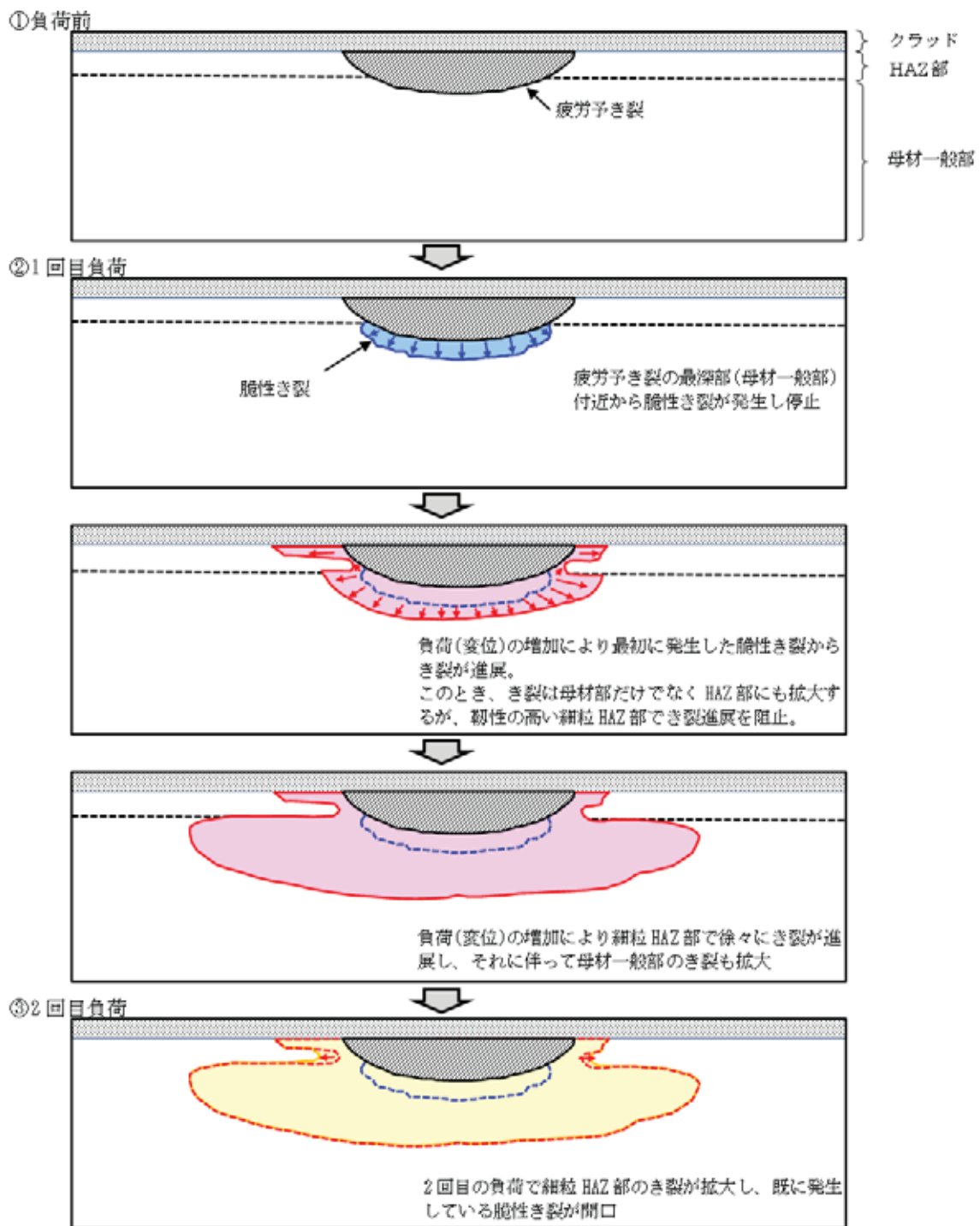


図 3.1.2.3-77 4 体目(クラッド:サブマージドアーク溶接, 熱処理:600°C×4h, 試験体刻印番号:JSW-4A-K-3-U, 試験温度:室温)で推定されるき裂進展挙動

(8) 破壊試験結果(5 体目)

① 荷重-鉛直変位の関係

【1回目：破砕音が聞こえるまで】

平板試験における荷重-鉛直変位(作動トランスによる鉛直変位)を図 3.1.2.3-78 に示す。ほぼ線形で増加し、最終停止時の荷重は 541kN であった。途中、音が発生した段階で荷重を一時的に除荷し、PDM 出力の確認を行った。522kN 付近と 541kN 付近で明確な音の発生を確認した。

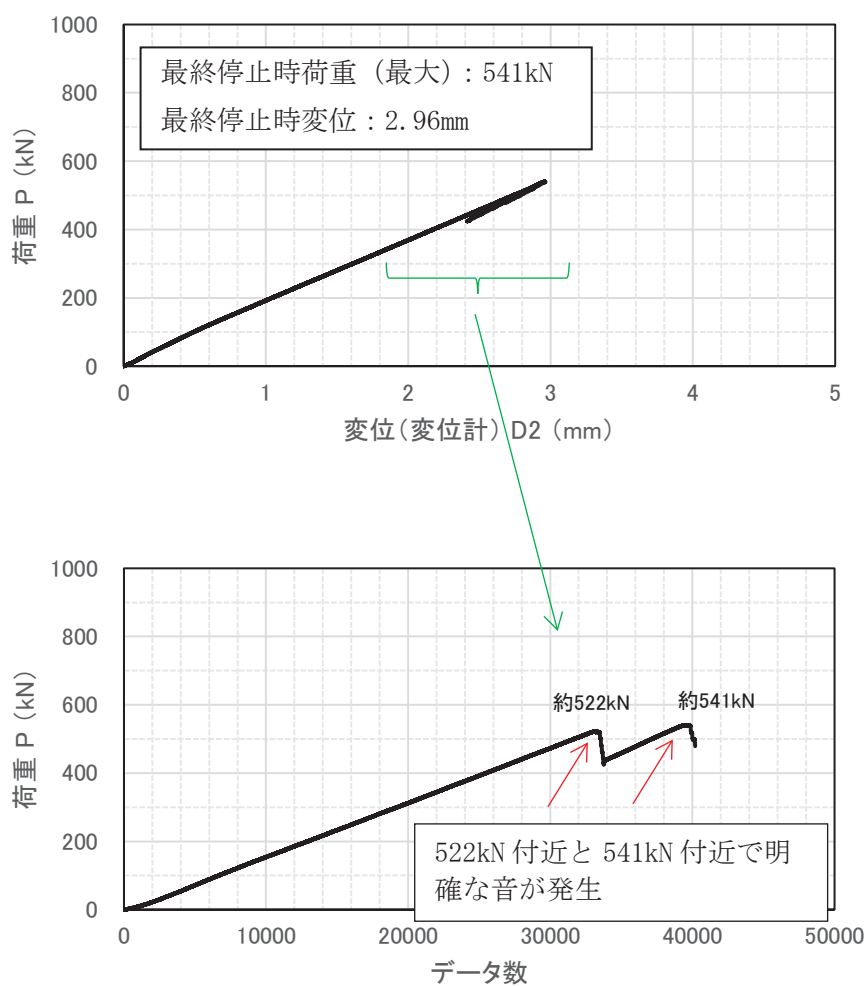


図 3.1.2.3-78 荷重-鉛直変位の関係(1 回目)

【2回目：再負荷】

平板試験における荷重-鉛直変位(作動トランスによる鉛直変位)を図 3.1.2.3-79 に示す。ほぼ線形で増加し、破断時の荷重(最大)は約 743kN であった。

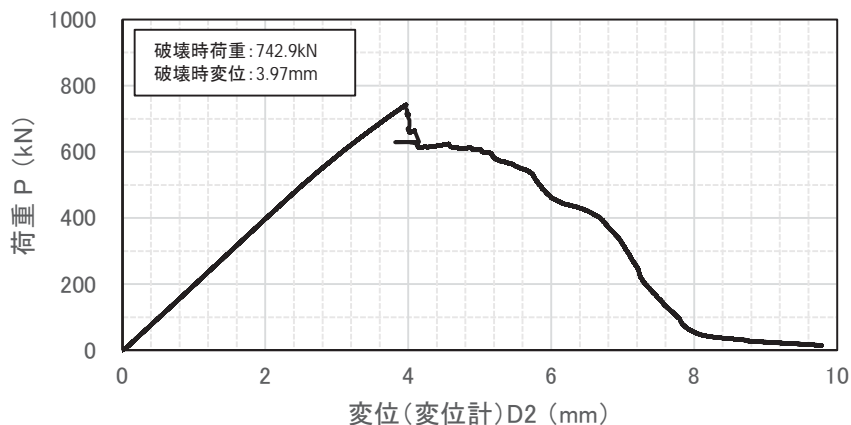


図 3.1.2.3-79 荷重-鉛直変位の関係(2回目)

② 荷重-PDM 出力の関係

【1回目：破砕音が聞こえるまで】

荷重-PDM 出力の関係を図 3.1.2.3-80 に示す。音が発生した段階で明確な PDM の変化は見られなかったが、音が発生した付近で PDM 出力が一時的に大きく変化した。

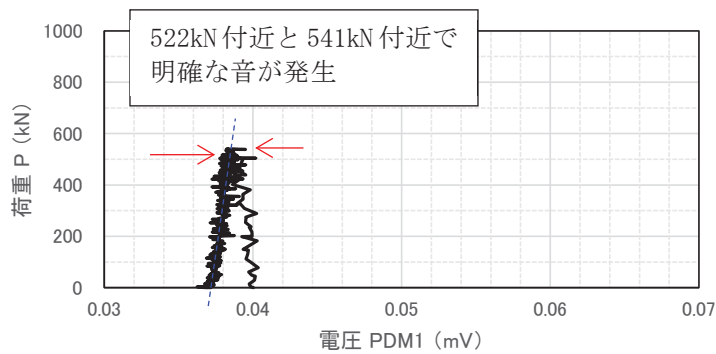


図 3.1.2.3-80 荷重-PDM 出力の関係(1回目)

③ 平板破壊試験における破壊靱性評価

5 体目の平板試験に対して FE 解析を実施し、算出した K_J から破壊靱性を確認した結果を以下にまとめる。

表 3.1.2.3-32 に解析ケースを示す。き裂形状とクラッド厚さ、熱処理条件、母材の応力-ひずみ曲線以外は 1 体目の解析と同様である。熱処理後の母材の応力-ひずみ曲線は 3 体目の破壊靱性の確認解析と同様に図 3.1.2.3-54 を用いた。

試験と解析の荷重-変位関係を図 3.1.2.3-81 に示す。解析結果は試験結果と良く一致し、解析の妥当性を確認できた。解析で求めた荷重と K_J の関係を図 3.1.2.3-82 に示す。明確な音が生じた荷重での K_J は $48(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ 、 $51(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ となった。後述する破面観察結果から、音が生じた時に最深部からき裂が進展しており、 K_J が $48\sim 51(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ の条件でき裂が進展したと推測される。

表 3.1.2.3-32 解析ケース一覧

No.	熱処理条件	き裂形状		クラッド厚さ (mm)	HAZ 部の 先行割れ	備考 (凡例の表記)
		深さ (mm)	長さ (mm)			
ケース 1	$580^\circ\text{C}\times 4\text{h}$	10*	60*	8.40	模擬 しない	き裂① (深さ 10mm, 長さ 60mm)

*き裂形状は公称値を用いた

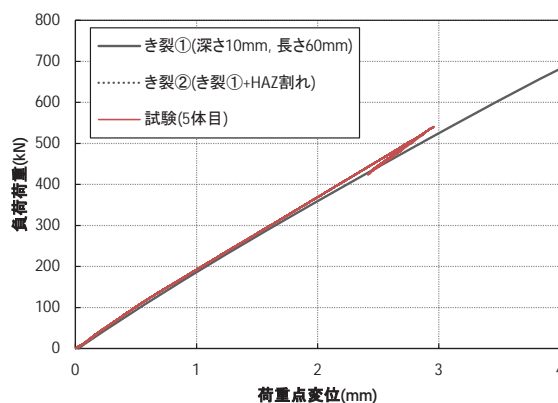


図 3.1.2.3-81 荷重-変位関係 (5 体目の試験と解析の比較)

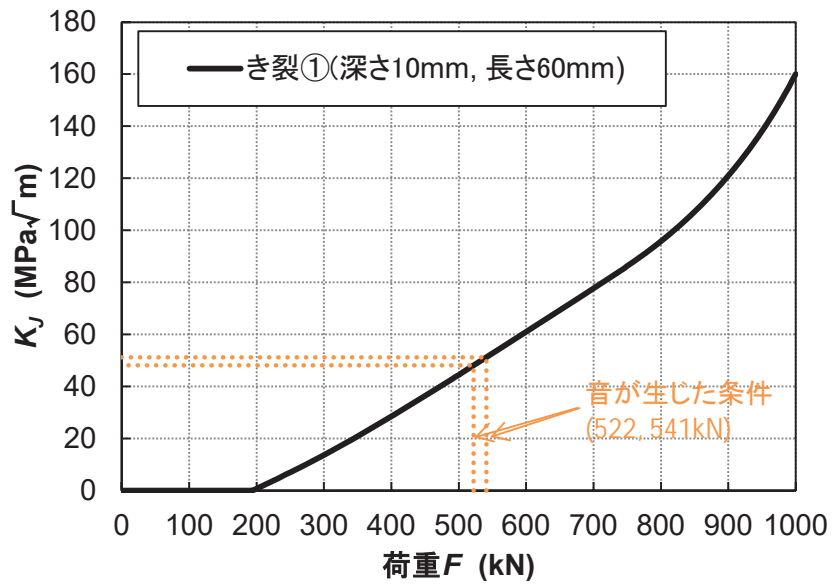


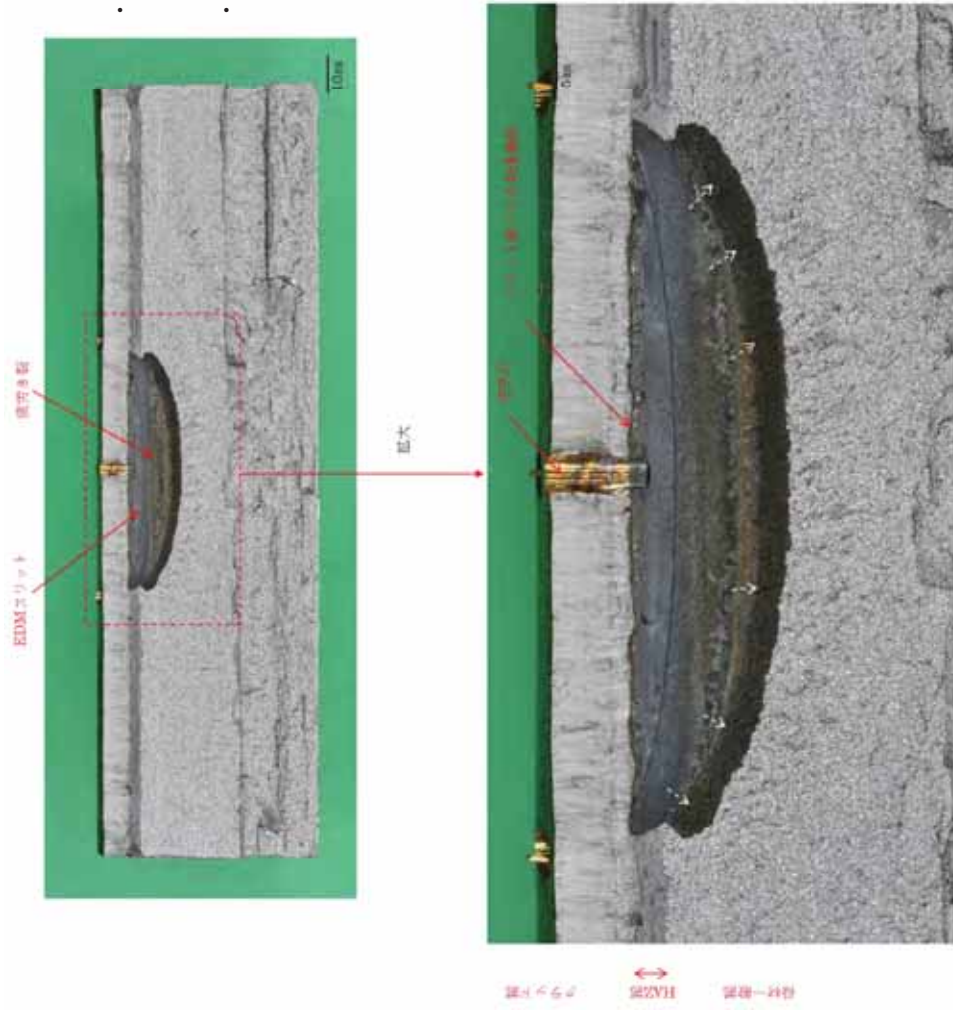
図 3.1.2.3-82 試験の破断荷重に対する K_I (5 体目)

④ 破面観察結果(SEM を含む)

5 体目の試験では、4 体目の試験結果を踏まえ、試験体への負荷時において PDM にわずかに変化が認められた時点で試験を停止し、加熱着色を行った上で、再負荷により強制的に破面開放を行った。試験後の試験体の破面外観状況を図 3.1.2.3-83～図 3.1.2.3-85 に示す。破面の外観状況より、1 回目の負荷において進展したき裂(写真中で着色された破面の部分)は半楕円状(最深部で深さ 6mm 程度)となっており、母材一般部のみに認められた。また、脆性き裂は、疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)から発生しており、HAZ 部からの脆性き裂の発生は認められなかった。

試験後の試験体について、破面の SEM 観察を行った結果を図 3.1.2.3-86～図 3.1.2.3-89 に示す。疲労予き裂先端部の破面には、粒界破面が多く認められたものの、試験時に生成した脆性破面では擬へき開破面が支配的であった。

なお、試験時に 522kN 付近及び 541kN 付近で発生した明確な音と対応するような破面の変化は、脆性破面上では確認できなかった。



- 1 回目の負荷において進展したき裂(写真中で着色された破面の部分)は、半楕円状(最深部で深さ6mm程度)となっており、母材一般部のみ認められた。脆性き裂は、疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)から発生しており、HAZ部からの発生は認められない。

図 3.1.2.3-83 試験後の試験体の破面外観状況 (クラッド: 被覆アーク溶接, 熱処理: 580°C×4h, 試験体刻印番号: JSW-4A-K-3-L, 試験温度: 室温)

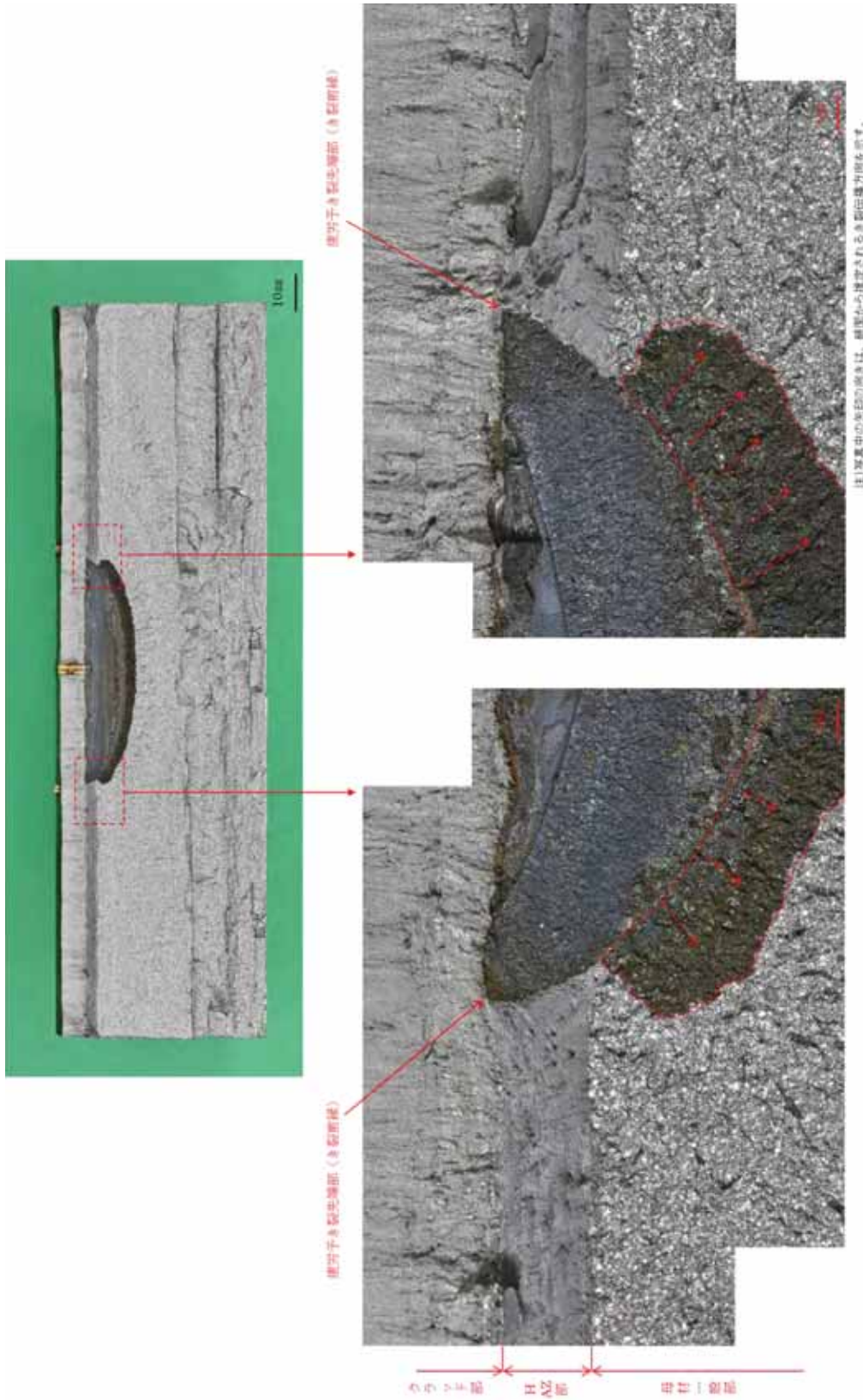


図 3.1.2.3-84 試験後の試験体の破面外観状況 (クラッド: 被覆アーク溶接, 熱処理: 580°C×4h, 試験体刻印番号: JSW-4A-K-3-L, 試験温度: 室温)

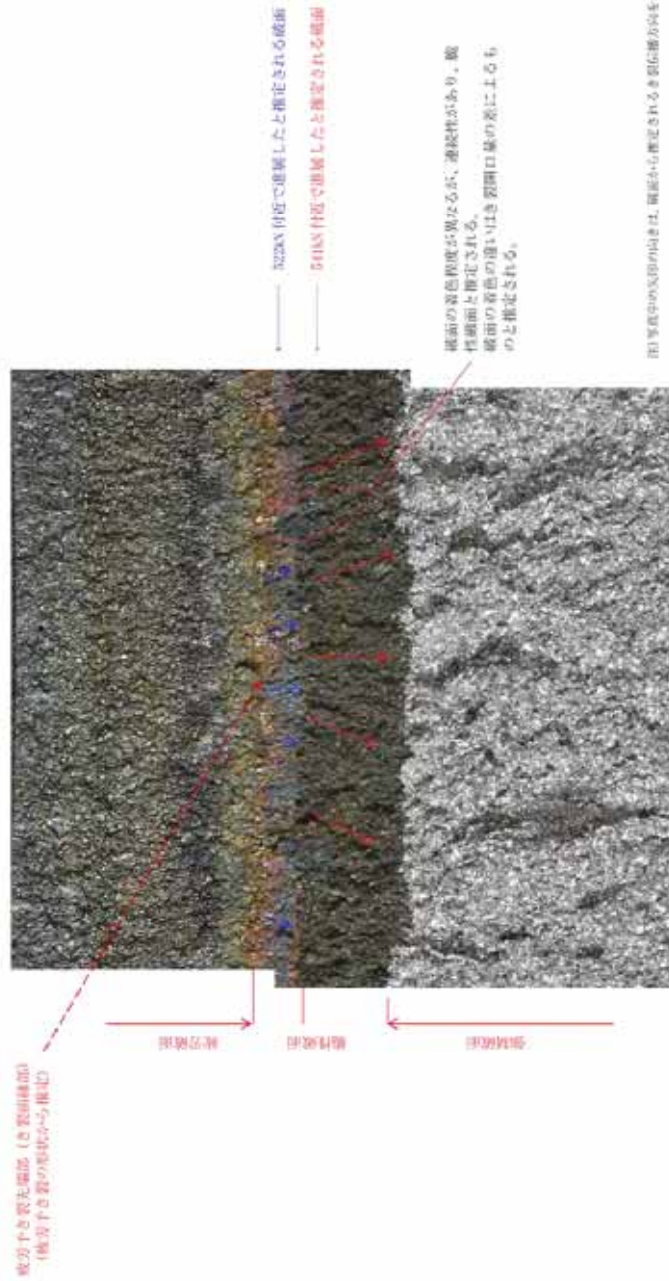


図 3.1.2.3-85 試験後の試験体の破面外観状況 (クラッド: 被覆アーク溶接, 熱処理: 580°C×4h, 試験体刻印番号: JSW-4A-K-3-L, 試験温度: 室温)

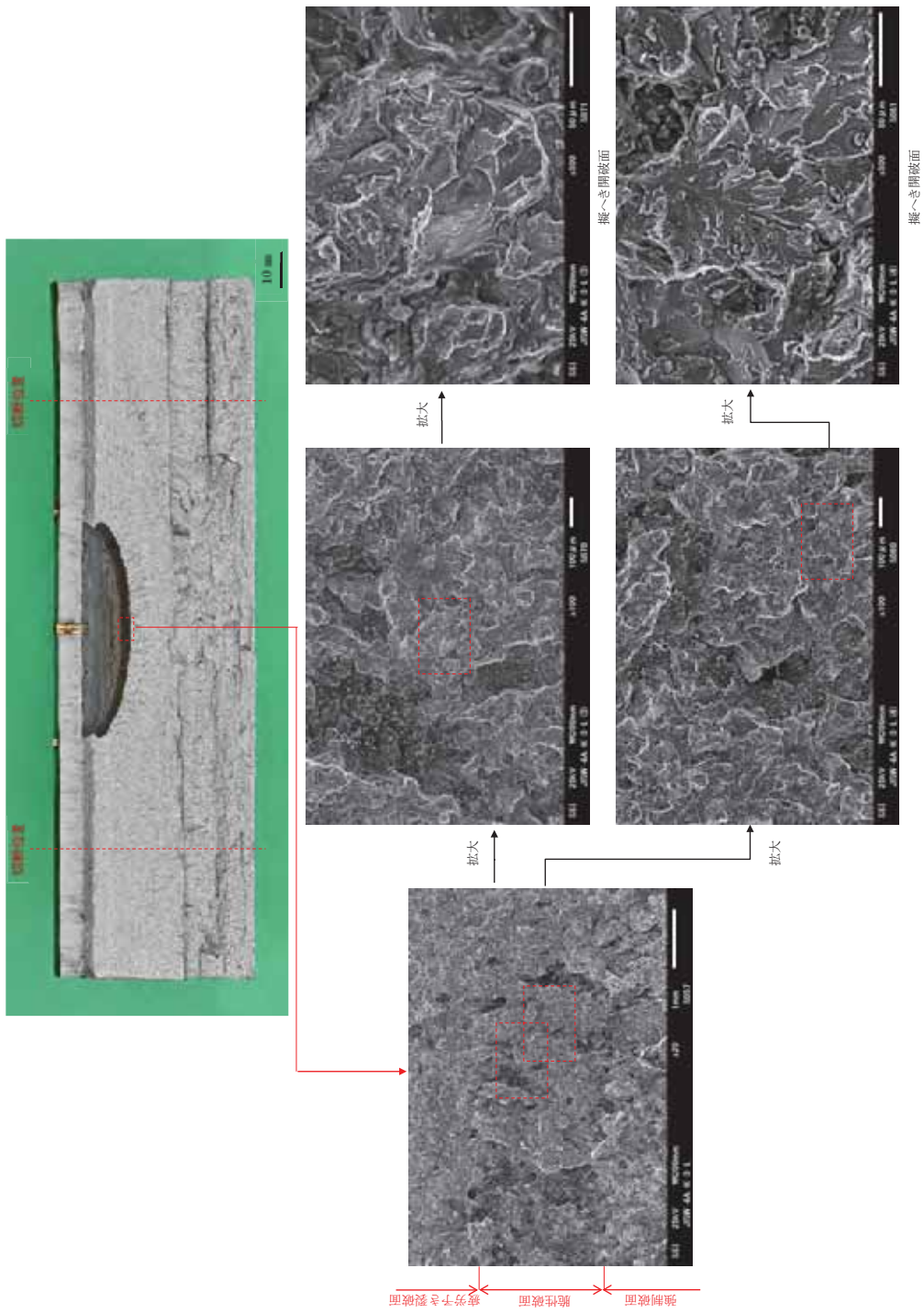
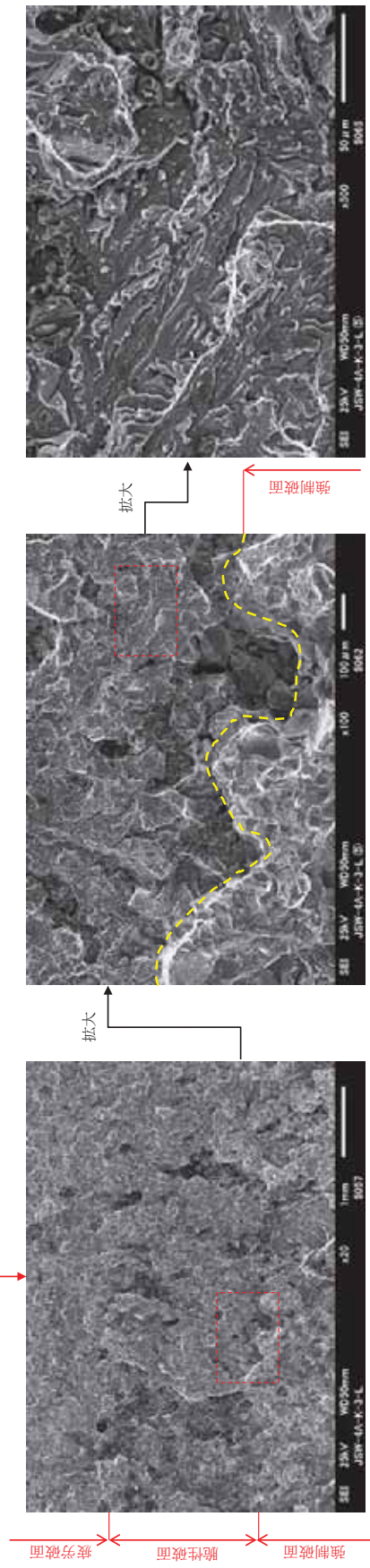
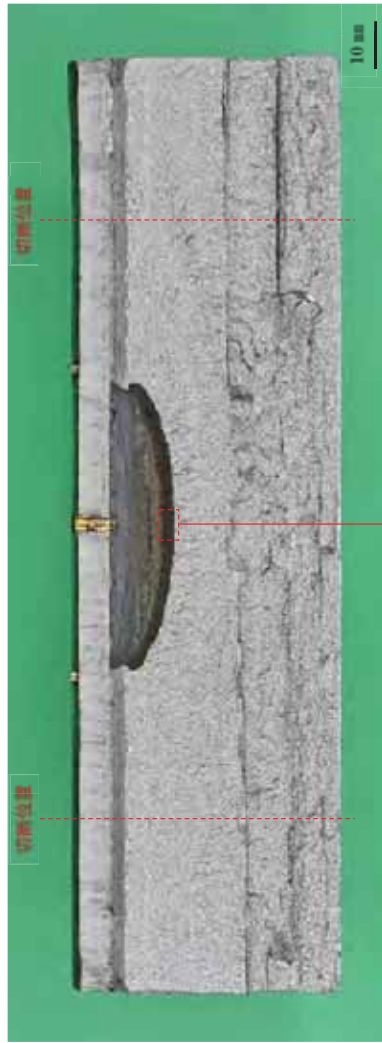


図 3.1.2.3-88 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド: 被覆アーク溶接, 熱処理: 580°C×4h, 試験体刻印番号: JSW-4A-K
-3-L, 試験温度: 室温)



擬へき開破面

図 3.1.2.3-89 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド: 被覆アーク溶接, 熱処理: 580°C×4h, 試験体刻印番号: JSW-4A-K-3-I, 試験温度: 室温)

(9) 破壊試験結果(6 体目)

① 荷重-鉛直変位の関係

平板試験における荷重-鉛直変位(作動トランスによる鉛直変位)を図 3.1.2.3-90 に示す。最終破断に至るまでほぼ線形で増加し、破断時の荷重(最大)は約 483kN であった。

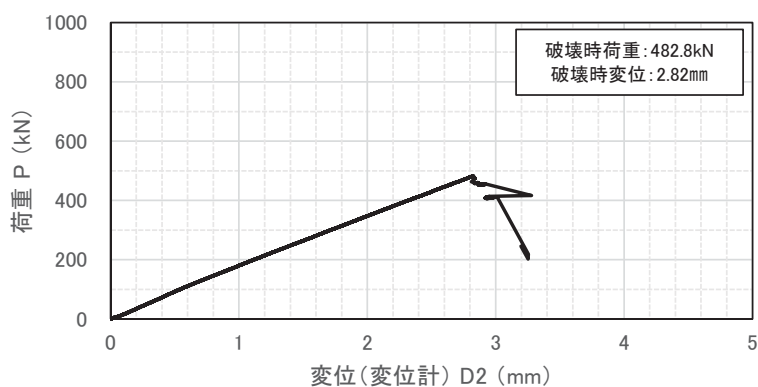


図 3.1.2.3-90 荷重-鉛直変位の関係

② 荷重-PDM 出力の関係

荷重-PDM 出力の関係を図 3.1.2.3-91 に示す。荷重 200kN 付近から、PDM 出力が増加する傾向が見られた。約 200kN から断続的な甲高い音が発生し始めており、PDM の変化開始点とほぼ対応していた。この PDM の増加と音の発生は、試験中に HAZ 部からのき裂発生・進展に対応している可能性が考えられる。

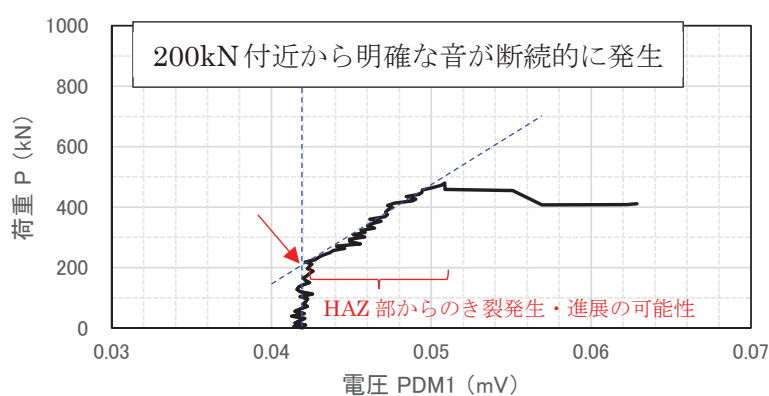


図 3.1.2.3-91 荷重-PDM 出力の関係

③ 平板破壊試験における破壊靱性の確認

6 体目の平板破壊試験に対して FE 解析を実施し、算出した K_J とマスターカーブから破壊靱性を確認した結果を以下にまとめる。

表 3.1.2.3-33 に解析ケースを示す。き裂形状以外は 1 体目の平板破壊試験の解析と同様である。6 体目の試験には HAZ 部のき裂先端の応力を緩和するために R ノッチが加工されており、図 3.1.2.3-92 に示す R ノッチを模擬したモデルを用いた。

試験と解析の荷重-変位関係を図 3.1.2.3-93 に示す。解析結果は試験結果と良く一致し、解析の妥当性を確認できた。HAZ 部の割れを考慮した FE 解析は割れを考慮しない FE 解析結果とほぼ同等の変形挙動を示し、HAZ 部の先行割れによる载荷点変位の変化が小さいことを確認した。試験の破断荷重と解析で求めた荷重と K_J の関係から推測した破断時の K_J と 1TC(T) 試験における破壊靱性に相当するマスターカーブを比較した結果を図 3.1.2.3-94 に示す。マスターカーブの T_0 は熱処理 $510^{\circ}\text{C}\times 4\text{h}$ の母材の推定値 74°C を用いた。破断荷重に対応する K_J はき裂①の条件で $61(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ 、き裂②の条件で $64(\text{MPa}\sqrt{\text{m}})$ と予測され、破壊靱性試験と平板破壊試験のき裂先端の塑性拘束の違いから、マスターカーブの K_{Jc} のメジアンより高くなったと考えられる。

表 3.1.2.3-33 解析ケース一覧

No.	熱処理条件	亀裂形状 (mm)		HAZ 部の先行割れ	備考 (凡例の表記)
		深さ	長さ		
ケース 1	$510^{\circ}\text{C}\times 4\text{h}$	10*	60*	模擬しない	き裂① (深さ 10mm, 長さ 60mm)
ケース 2				模擬する	き裂②(き裂①+HAZ 割れ)

*き裂形状は公称値+R ノッチをモデル化

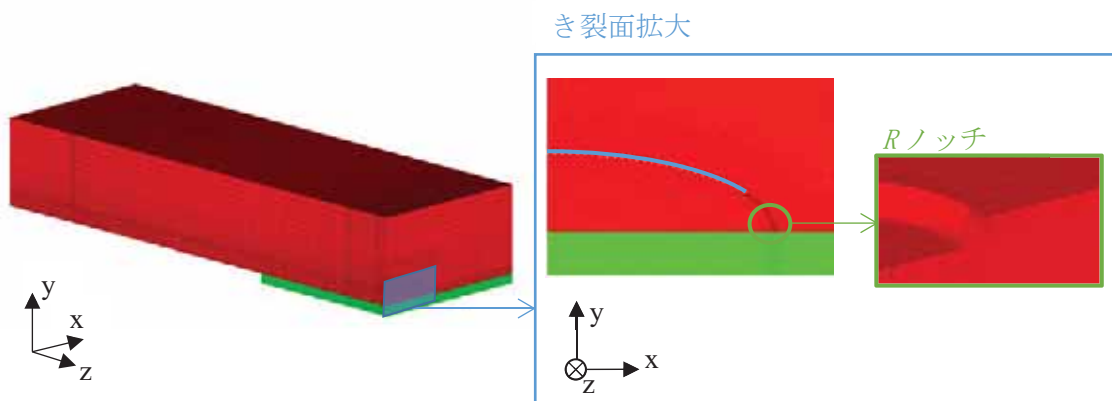


図 3.1.2.3-92 母材の応力-ひずみ曲線(熱処理条件 $510^{\circ}\text{C}\times 4\text{h}$)

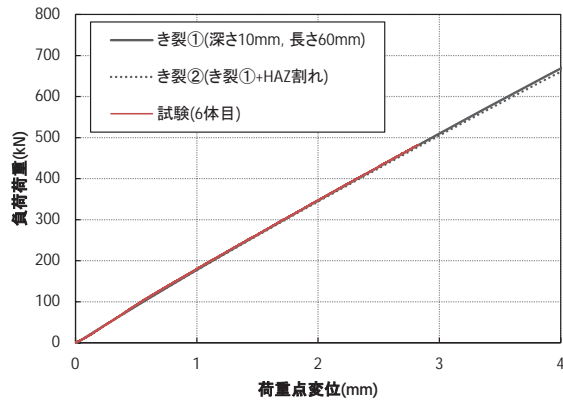
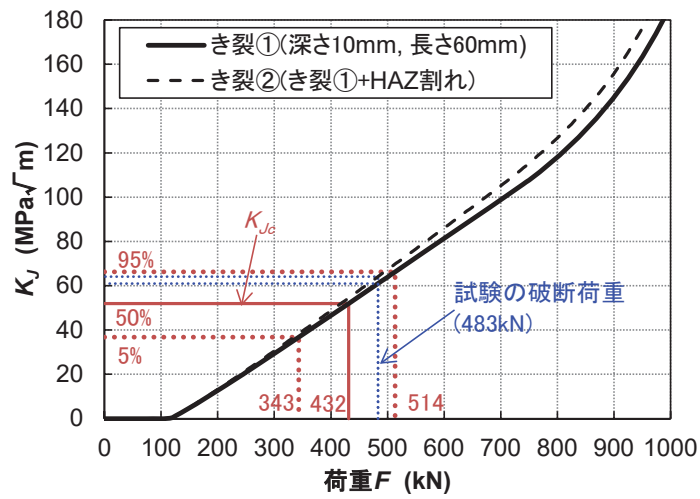
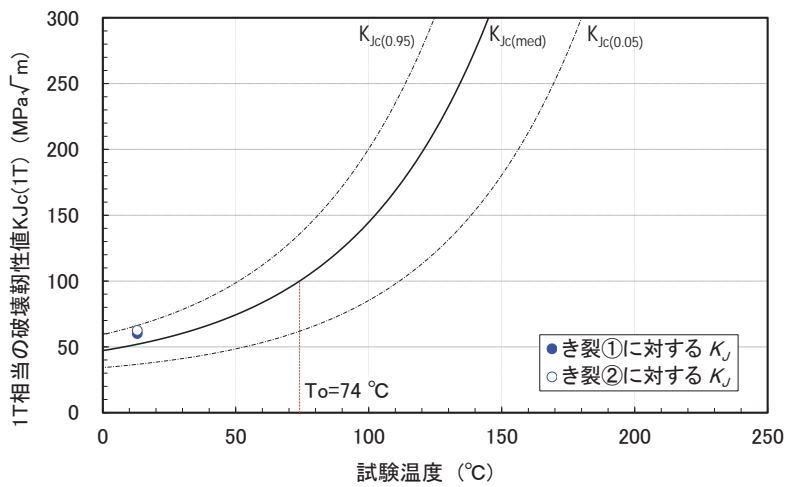


図 3.1.2.3-93 荷重-変位関係 (6 体目の試験と解析の比較)



(a) FE 解析における荷重と K_J の関係



(b) 1TCT における破壊靱性

図 3.1.2.3-94 試験の破壊荷重に対する K_J (6 体目)

④ 試験後の試験体の外観及び破面の状況

試験後の試験体の外観及びPTの状況を図 3.1.2.3-95 に示す。試験において試験体は完全に破断に至らず、き裂は、引張側の表面(クラッド側表面)及び圧縮側の表面のいずれにも到達していなかった。また、試験体の側面において、き裂は深さ方向に約 30~40 mmまで進展していたが、圧縮側の表面に到達することなく停止していた。試験体の側面の状況から、熱影響部(HAZ 部)の深さは約 5 mmと推定された。

外観観察後に、破面外観状況を確認するため、試験体を加熱着色した後、繰返し荷重を加えることにより破面開放を行った。試験後の試験体の破面外観状況を図 3.1.2.3-96、図 3.1.2.3-97 に示す。クラッド直下においては、深さ約 5mm の幅(クラッド直下部の熱影響部に対応しているものと推定)で母材一般部とは明らかに破面様相の異なる領域(破面外観写真において光沢のある粗い破面)が認められ、母材一般部との境界に明確な段差が認められた。疲労予き裂先端付近の破面の詳細な観察より、き裂は HAZ 部の 2 箇所及び疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)の合計 3 箇所から発生・進展している様相が認められた。このうち、疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)から発生したき裂は、板厚方向と左右方向(試験体の幅方向)に進展していた。また、試験体の側面には、母材一般部と熱影響部の境界部と思われる箇所に、延性破壊の最終部に見られるシアリップのような凸部が見られた。なお、クラッド部にも 1 mm程度のき裂(破面において褐色に見える部分)が発生・進展が観察された。

破面形態を確認するため、一方の破面について走査型電子顕微鏡(SEM)による破面の詳細観察を行った。この結果を図 3.1.2.3-98~図 3.1.2.3-104 に示す。母材一般部の破面は、いずれも粒界破面が一部混在した擬へき開破面であったのに対し、HAZ 部の破面については、クラッド直下部の粗粒 HAZ 部がほぼ全面粒界破面、母材に近い側の細粒 HAZ 部が粒の細かい擬へき開破面となっていた。なお、参考までにクラッド部の破面も観察したが、破壊試験時に生じたと推定される着色部分はディンプル破面となっていた。

以上の試験体外観及び破面の観察結果から、6 体目の試験(クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h，R 付与加工有)では、1 体目の試験(クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h，R 付与加工なし)と同様、HAZ 部における疲労予き裂先端から先行して脆性き裂が発生し、HAZ 部を進展した後、最終的に疲労予き裂の最深部付近(母材一般部)を起点としてき裂が発生し、破壊したものと推定され、R 付与加工の効果は明確に認められなかった。

- ・ 試験体は完全に破断していなかった。
- ・ 引張側(クラッド施工側)の表面の中央部付近は、若干ひずんでいたが、き裂は認められなかった。(き裂はクラッドを貫通していない。)
- ・ 試験体の側面において観察されたき裂は深さ方向に約 30~40 mm程度進展し、圧縮側の表面に到達することなく停止していた

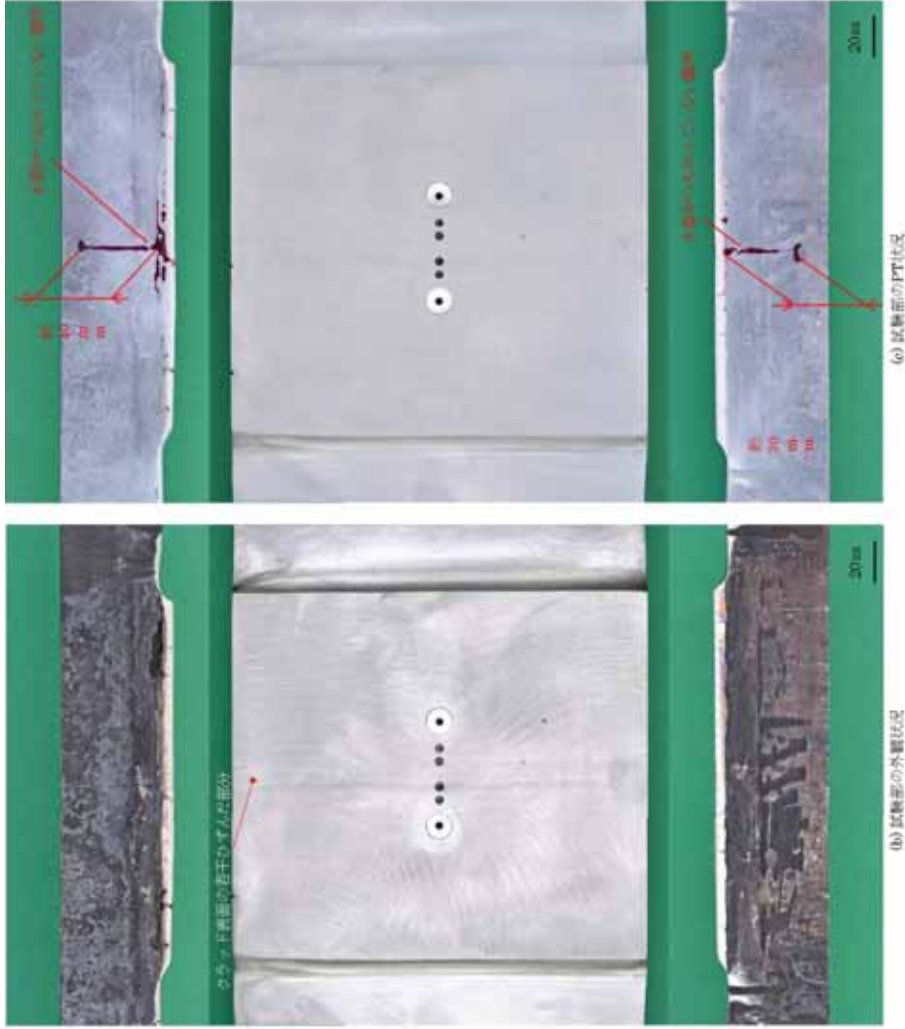
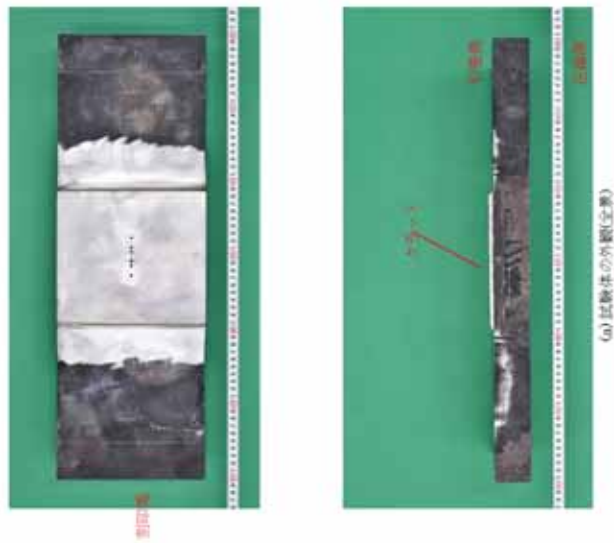
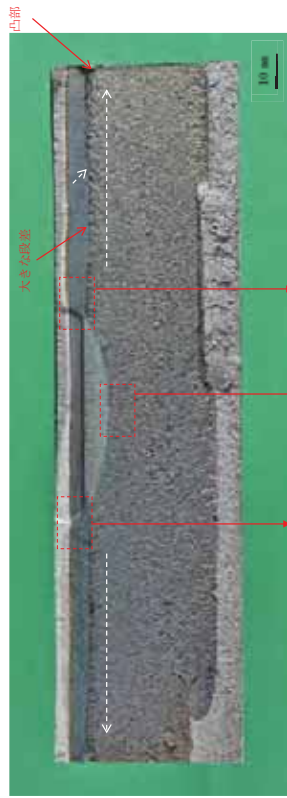


図 3.1.2.3-95 試験後の試験体の外観状況 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h，R 付与加工有，試験体刻印番号：JSW-4A-K-1-L，試験温度：室温)



- ・ 疲労予き裂 (初期き裂) の長さは約 60.7 mm、深さは約 10.6 mm であり、疲労予き裂は、ほぼ目標の寸法となっていた。

図 3.1.2.3-96 試験後の試験体の破面外觀状況 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h，R 付与加工有，試験体刻印番号：JSW-4A-K-1-L，試験温度：室温)



- 母材一般部と熱影響部では、破面の様相が明確に異なっている。
- 母材一般部のき裂は、疲労予き裂(初期き裂)の最深部付近から厚さ方向と、熱影響部(HAZ部)と接する箇所については幅方向へ進展している。
- HAZ部の疲労予き裂(初期き裂)からも、き裂が発生・進展している様相が見られる。
- クラッド直下のHAZ部(粗粒部)の破面は光沢のある粗い破面を呈しており、そこからき裂が発生・進展している様相が見られる。
- 母材一般部とHAZ部の破面の境界部には比較的大きな段差が見られ、連続したき裂進展の様相は見られない。
- 試験片側面近傍の母材一般部と熱影響部の境界部付近に、延性破壊の最終部に見られるシアリップのような凸部が見られる。
- クラッド部にも1mm程度のき裂が発生・進展している。

図 3.1.2.3-97 試験後の試験体の破面外観状況 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h，R付与加工有，試験体刻印番号：JSW-4A-K-1-L，試験温度：室温)

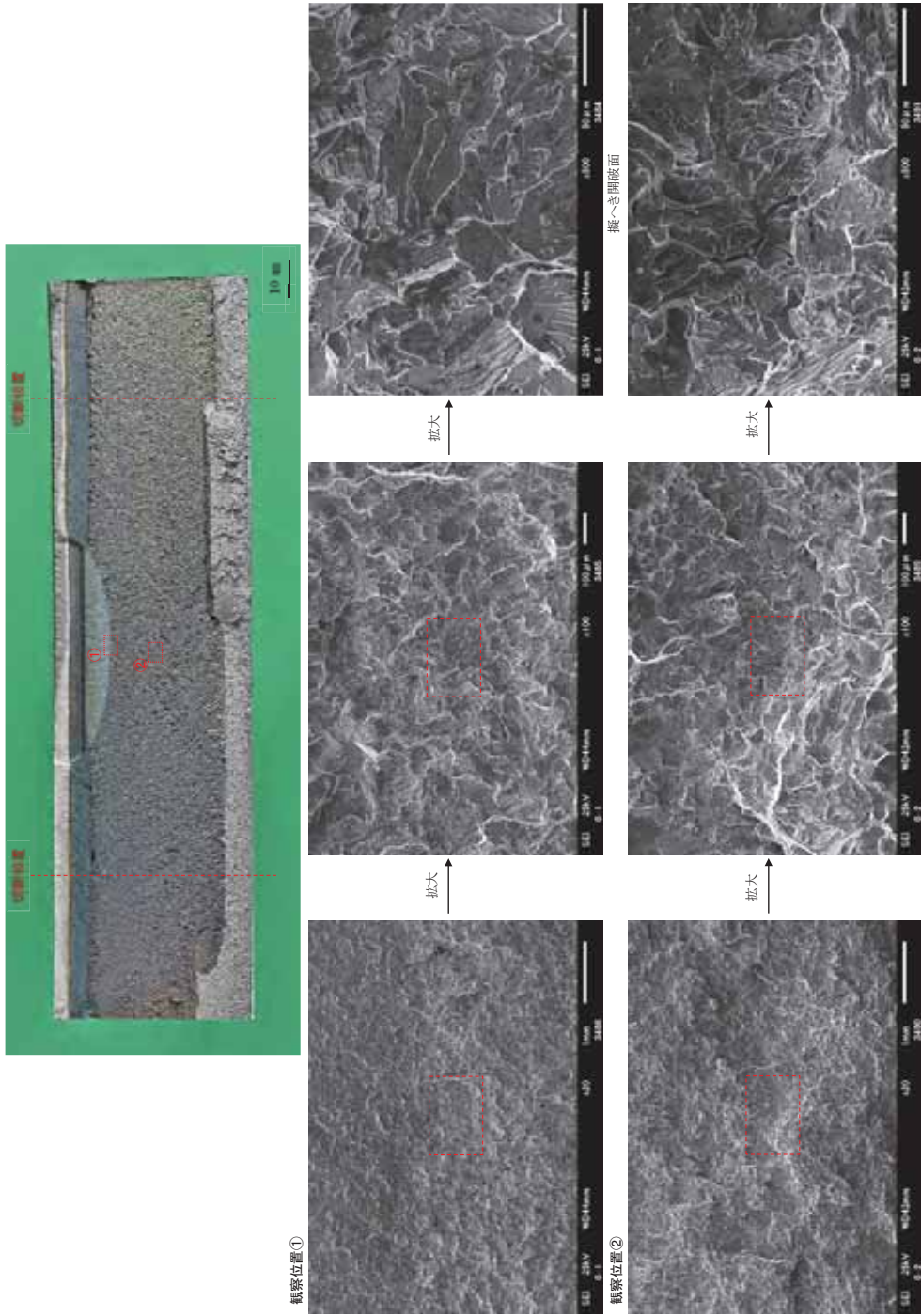
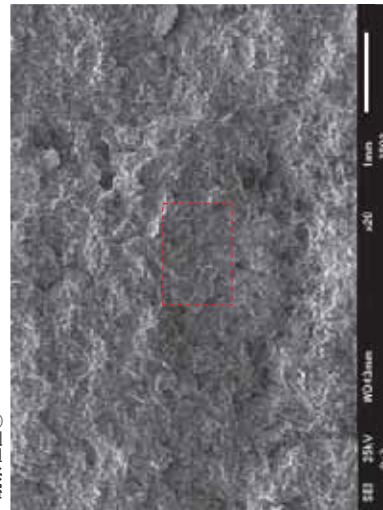


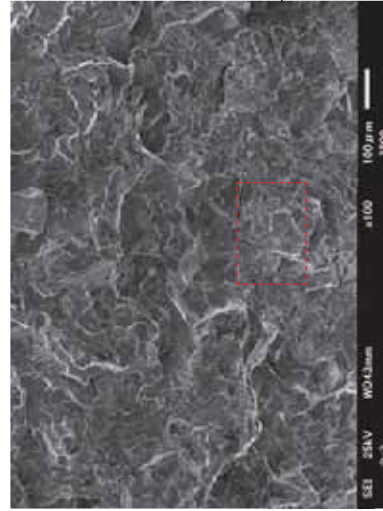
図 3.1.2.3-98 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h，R 付与加工有，試験体刻
 印番号：JSW-4A-K-1-L，試験温度：室温)



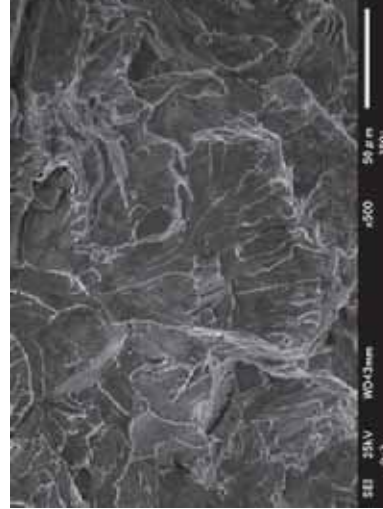
観察位置③



拡大



拡大



擬へき開破面

図 3.1.2.3-99 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド: サブマージドアーク溶接, 熱処理: 510°C×4h, R 付与加工有, 試験体刻
 印番号: JSW-4A-K-1-L, 試験温度: 室温)

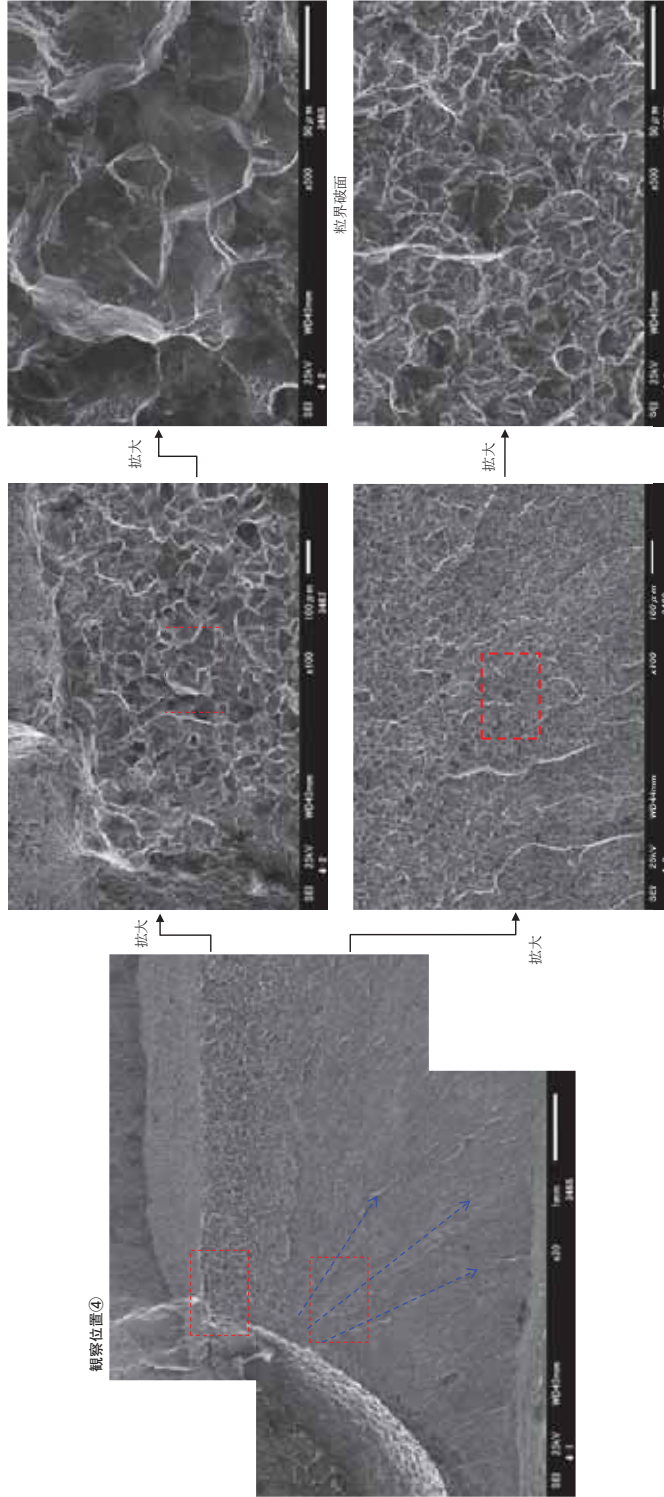


図 3.1.2.3-100 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド: サブマージドアーク溶接, 熱処理: 510°C×4h, R 付与加工有, 試験体
 刻印番号: JSW-4A-K-1-L, 試験温度: 室温)

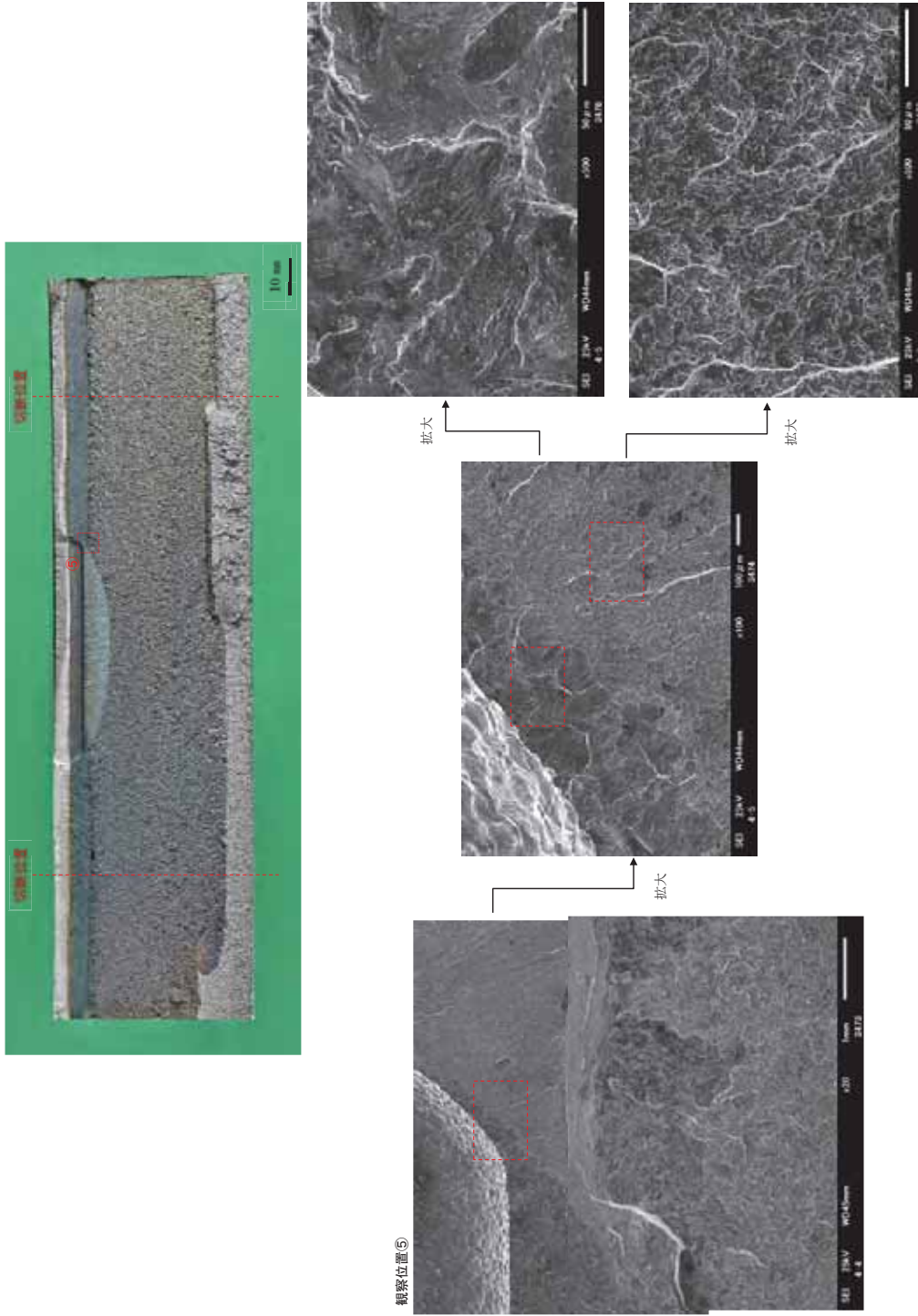
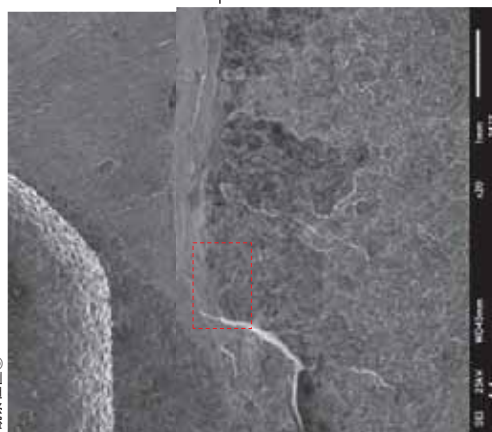


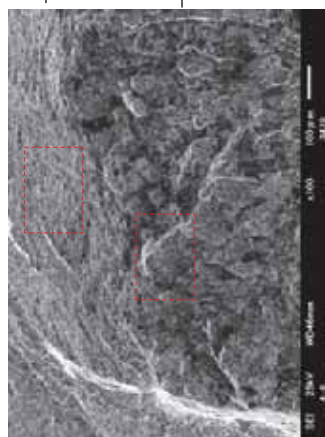
図 3.1.2.3-101 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h，R 付与加工有，試験体
 刻印番号：JSW-4A-K-1-L，試験温度：室温)



観察位置⑤



拡大



拡大

拡大

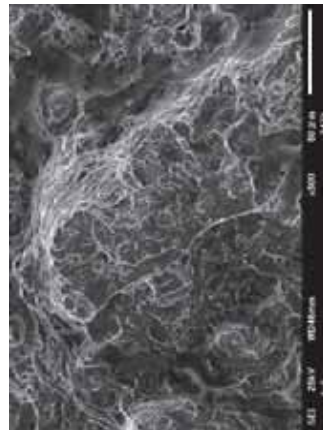
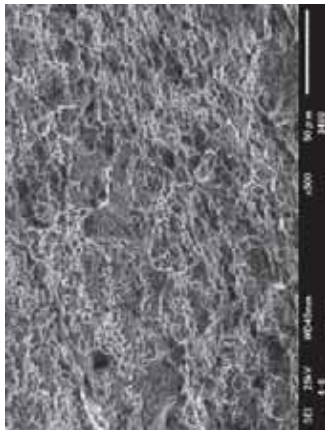


図 3.1.2.3-102 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h，R 付与加工有，試験体刻印番号：JSW-4A-K-1-L，試験温度：室温)

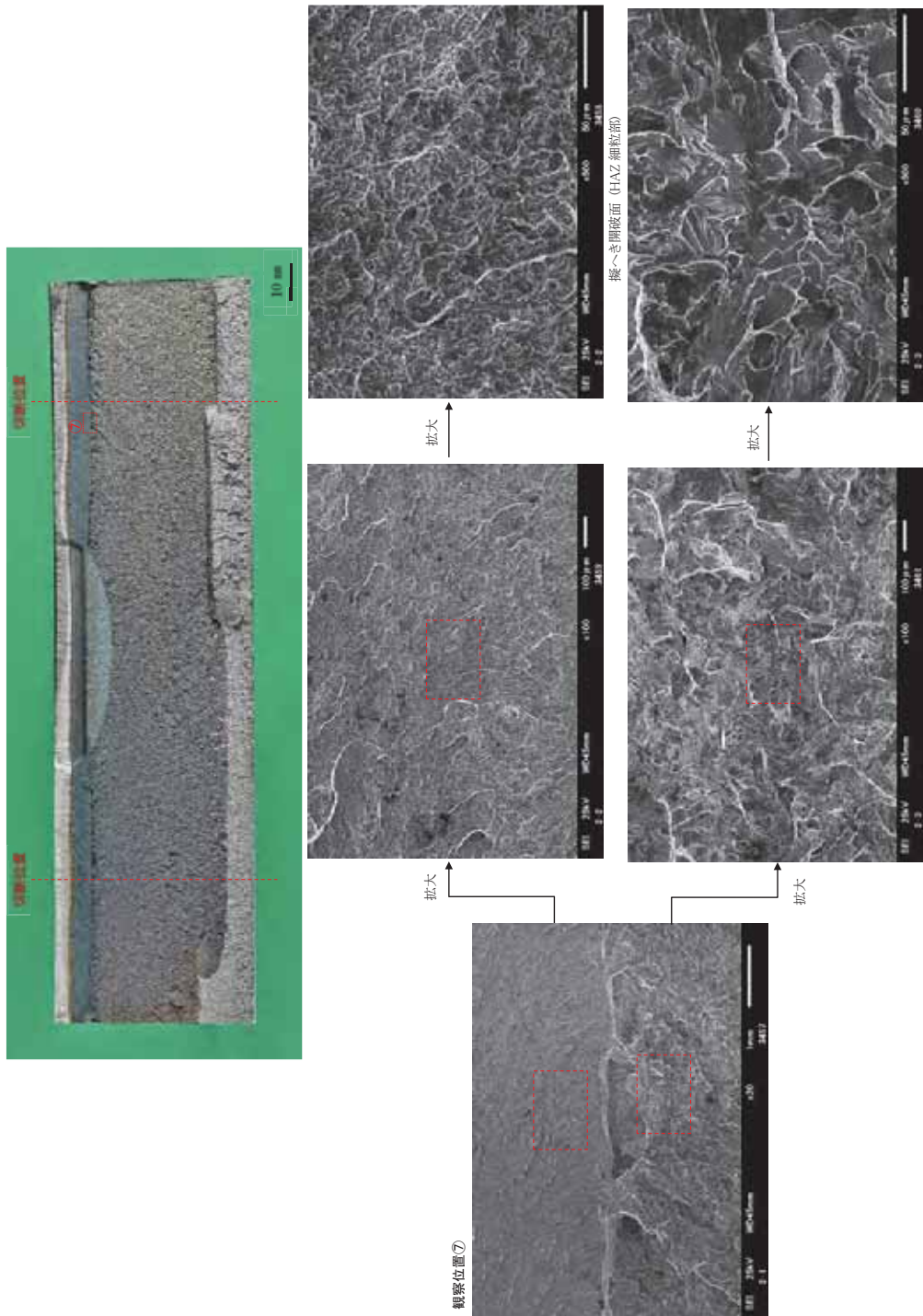


図 3.1.2.3-103 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h，R 付与加工有，試験体
 刻印番号：JSW-4A-K-1-L，試験温度：室温)



観察位置⑧

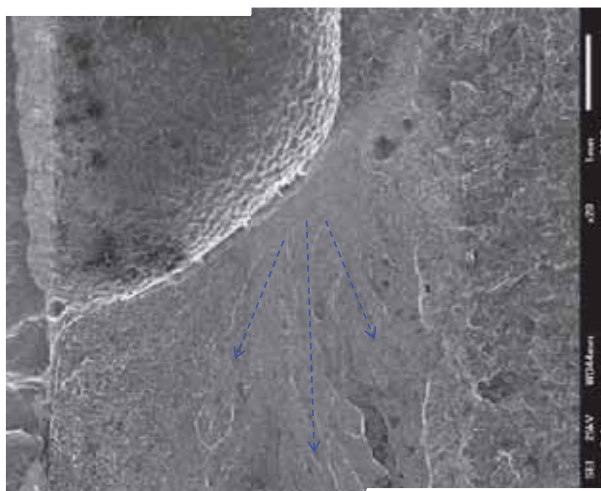


図 3.1.2.3-104 試験後の試験体の破面 SEM 観察結果 (クラッド：サブマージドアーク溶接，熱処理：510°C×4h，R 付与加工有，試験体刻印番号：JSW-4A-K-1-L，試験温度：室温)

(10) 半楕円亀裂を付与した平板試験体による破壊試験のまとめ

平成 29 年度は、主としてクラッド下 HAZ からの破壊を防止しかつ高い参照温度(T_0)を得られる熱処理条件を検討するため、クラッドの溶接法及び熱処理を変えた 6 体の破壊試験を実施した。結果として、被覆アーク溶接(SMAW) 580°C×4h の熱処理材においては、HAZ からの破壊を防止することができ、破壊は亀裂最深点の母材部から生じることを確認した。また、応力緩和のための HAZ 部の R 加工については HAZ からの割れ防止に対して有効性が確認できなかった。

また、破壊発生時の応力拡大係数を FEM 解析により評価し、SAW510°C×4h の熱処理材及び SAW525°C×8h の熱処理材については、材料本来の破壊靱性値であるマスターカーブよりも高い値で破壊すること、すなわち見かけの破壊靱性の上昇を確認した。平成 30 年度は引き続きデータ取得を進め、破壊に及ぼす半楕円亀裂の弱い拘束の効果を確認する。

参考文献

- (3.1.2.3-1) 原子力安全基盤機構, “複雑形状部機器配管健全性実証 (IAF) 事業原子炉压力容器の異材溶接部に関する高温材料特性データ集”, 2013.6
- (3.1.2.3-2) 原子力規格委員会, “JEAC4216-2015 フェライト鋼の破壊靱性参照温度 T_0 決定のための試験方法”, 2015.12
- (3.1.2.3-3) T. Tobita et al., Effect of neutron irradiation on the mechanical properties of weld overlay cladding for reactor pressure vessel, Journal. of Nuclear Materials, 452(2014) 61-68.

3.1.3 PTS模擬試験

3.1.3.1 PTS模擬試験設備検証試験

(1)目的

原子炉圧力容器の加圧熱衝撃(PTS)事象を模擬した試験として、図 3.1.3.1-1 に示すようなクラッド下亀裂を有する十字型試験体を用いた熱衝撃試験を計画中である。PTS 模擬試験は、まず十字型試験体を保持して 2 軸の曲げを与える反力フレームと載荷設備をピット内支持構造に設置する。その後十字型試験体上面に加熱設備を配置し試験体を昇温する。最後に屋外に設置した冷却設備に接続した冷却水配管より、十字型試験体下面に冷却水を噴射し、熱衝撃状態を模擬するものである。

本章では、PTS 模擬試験の全体試験計画に基づいて十字型試験体の形状や試験に必要な設備の仕様を検討し、試験設備の設計、製作、組立・据付、性能試験を行った結果について述べる。

(2) PTS模擬試験設備の概要

PTS 模擬試験は、図 3.1.3.1-1 に示すように十字型試験体に 2 軸の曲げ荷重を負荷して高温に加熱保持し、その後冷却水で急冷して熱応力を付与して非延性破壊を発生させるものである。特に PTS 模擬試験では、実機の熱過渡条件下における PTS を模擬するため、荷重負荷機構と加熱・水冷機構を有するのが特徴である。

図 3.1.3.1-2 に示すように、PTS 模擬試験設備は荷重を与える載荷設備(ジャッキシステムと反力フレーム)、加熱・冷却設備、及び周辺の計測設備からなる。また図 3.1.3.1-3 のように、冷却水の排水を貯留するために地下ピットに試験装置を設置するため、試験装置を支持する架台とピット蓋を有する。ピット内の支持構造は、反力フレームの支持、冷却水配管の支持、計測線接続のための作業ステージとしての機能を有する。加えて、十字型試験体の組立に必要な架台と疲労亀裂を導入するための設備が必要となる。

以下に各設備の概要と整備状況を示す。

①載荷設備(ジャッキシステム)

PTS 模擬試験条件を考慮し、試験体に荷重を負荷する載荷設備として油圧ジャッキとその制御装置から構成されるジャッキシステムを採用することとして要求性能を検討した。

載荷設備の概要を図 3.1.3.1-2 に示す。載荷設備は、反力フレーム上に油圧センターホールジャッキを 8 台設置し、十字型試験体の試験条件に応じてジャッキとテンションロードで、別々に制御して曲げ応力を付与する構造となっている。

ジャッキシステムの構成機器等を表 3.1.3.1-1 に示す。以下にジャッキシステムを構成する機器、構造物等の詳細について記す。

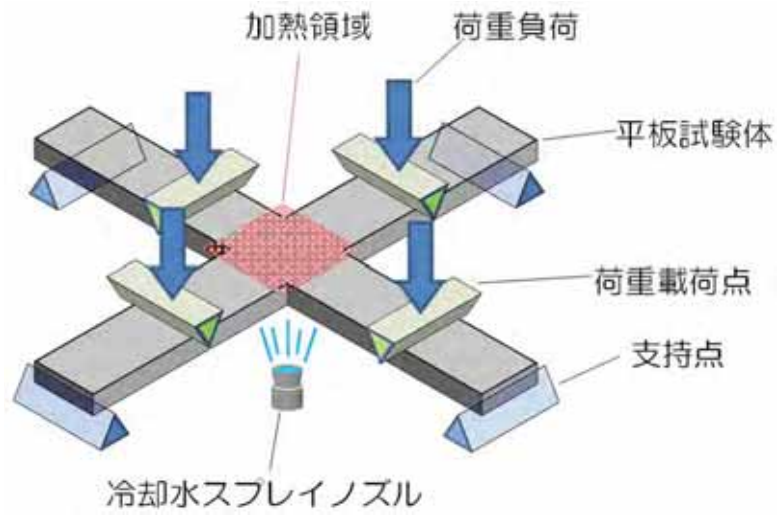


図 3.1.3.1-1 PTS 模擬試験(模式図)

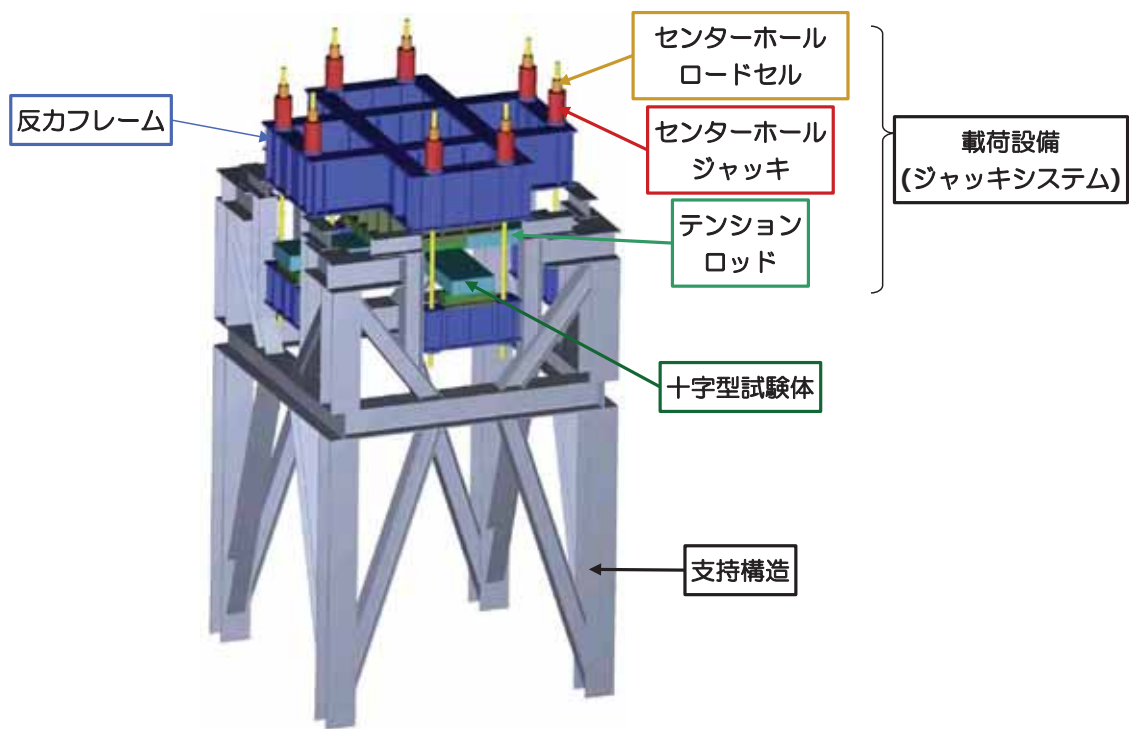


図 3.1.3.1-2 PTS 模擬試験装置の主要設備概要

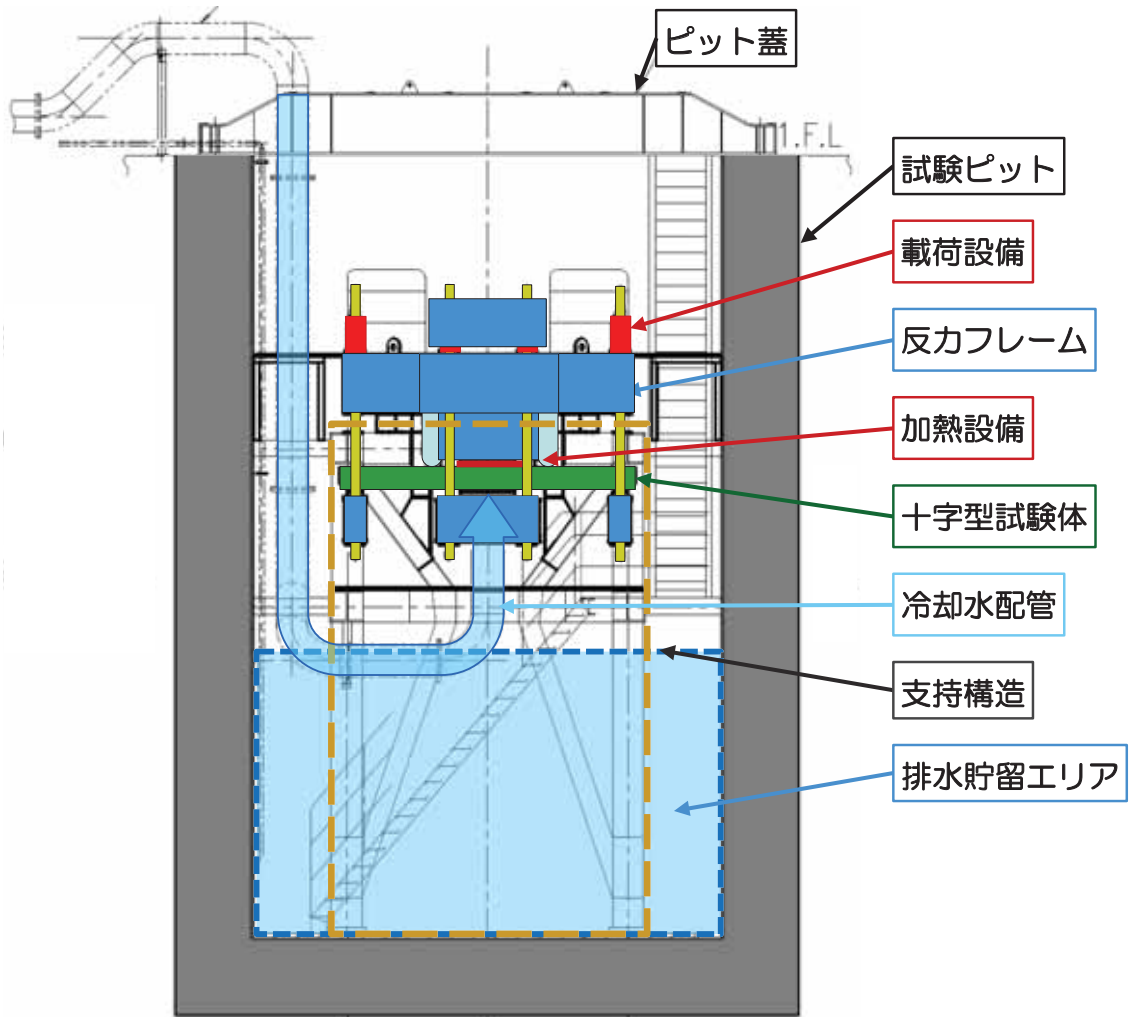


図 3.1.3.1-3 PTS 模擬試験設備の構造

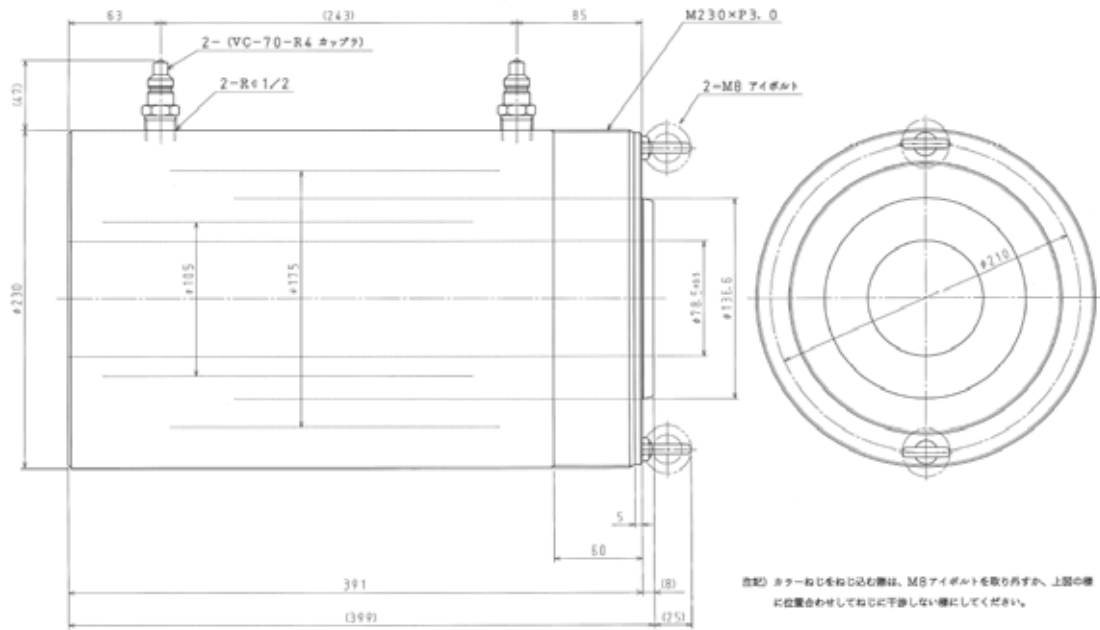
表 3.1.3.1-1 ジャッキシステムの構成機器等一覧

番号	設備名	数量
1	油圧ジャッキ	8台
2	ロードセル	8台
3	変位計	8台
4	サーボ弁ブロック	4台
5	動ひずみ計	8台
6	制御盤及び制御システム	一式
7	油圧源	1台
8	配管ポート	1台
9	油圧ホース	一式
10	制御ケーブル	一式

a.油圧ジャッキ

主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-4 に示す。

- ・形式: 複動、センターホール型(ホール径: $\phi 78.5$ mm)
- ・型番: DCR10-S325-200
- ・押し荷重: 1 MN
- ・ストローク: 200 mm
- ・外形寸法: $\phi 230 \times 399$ mm
- ・重量: 98 kgf



(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



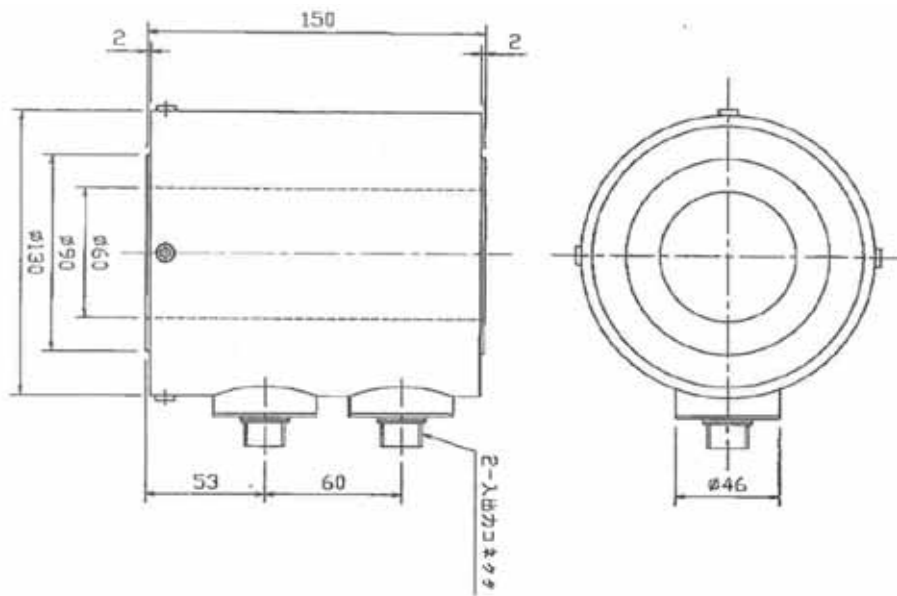
(2)外観

図 3.1.3.1-4 油圧ジャッキ

b. ロードセル

主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-5 に示す。

- ・形式: 圧縮用、センターホール型
- ・型番: CLC-1 MNS002-D
- ・容量: 1 MN
- ・定格出力: 1.5mV/V(3000 μ ひずみ)
- ・非直線性: 0.5%RO
- ・入出力抵抗: 350 Ω
- ・外形寸法: $\phi 130 \times 150$ mm
- ・重量: 8 kgf



(1)設備・機器概略図面 (単位: mm)



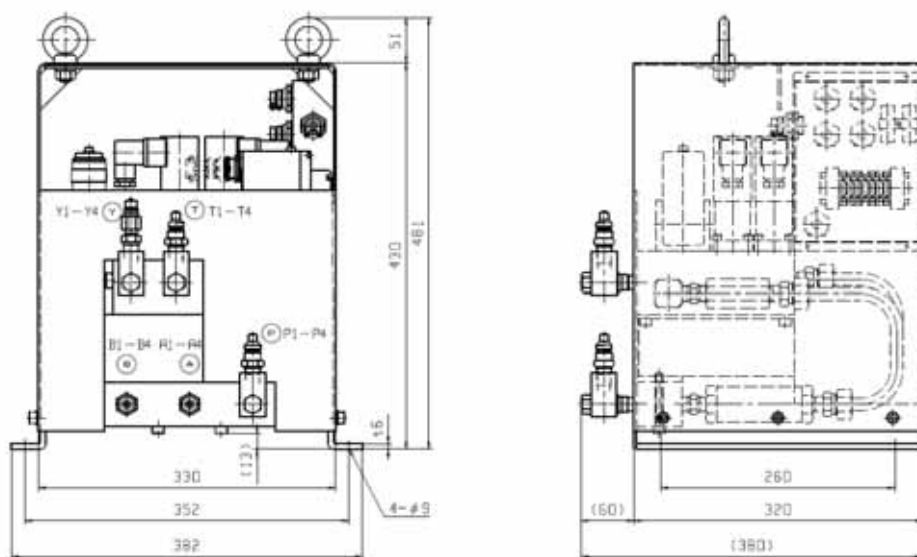
(2)外観

図 3.1.3.1-5 ロードセル

d. サーボ弁ブロック

主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-7 に示す。

- ・サーボ弁形式: 直動式
- ・最高使用圧力: 70 MPa
- ・最大流量: 10ℓ/分
- ・その他付属品: 油路閉鎖用電磁弁、チェック弁、ラインフィルタ



(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



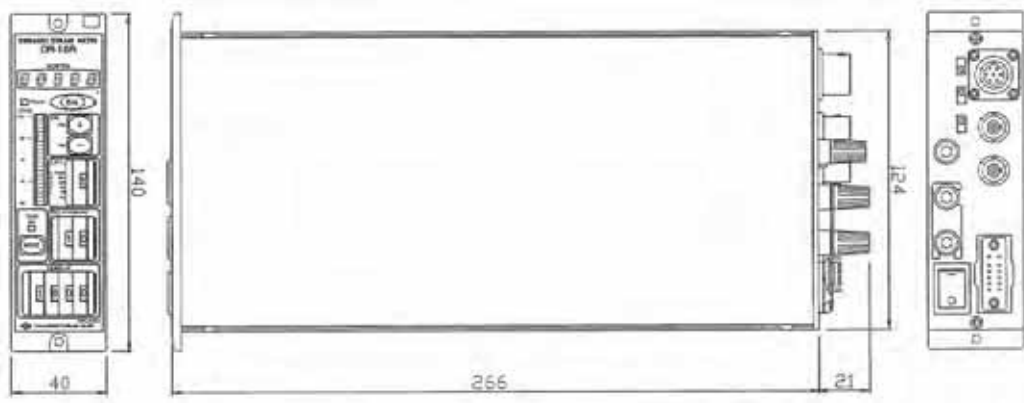
(2)外観

図 3.1.3.1-7 サーボ弁ブロック

e. 動ひずみ計

主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-8 に示す。

- ・形式: 搬送波型
- ・型番: DA-18A
- ・適用ゲージ抵抗: 60~1000 Ω
- ・ブリッジ電源: 0.5 又は 2V
- ・応答周波数範囲: DC~2.5kHz
- ・出力: $\pm 10V$
- ・外形寸法: 40×140×266 mm



(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



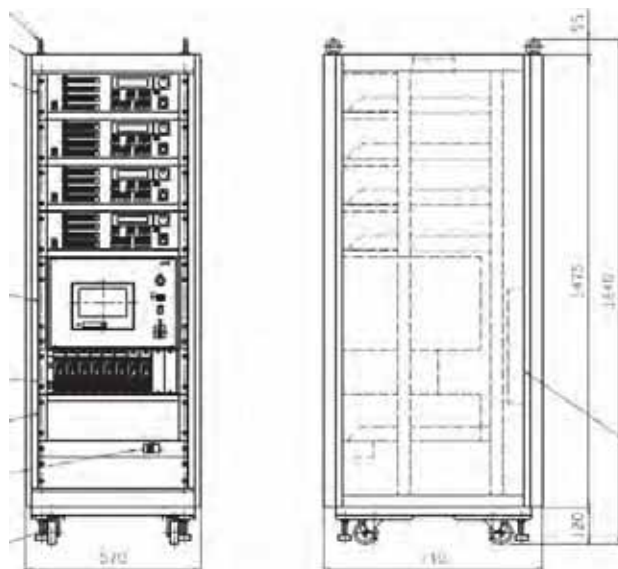
(2)外観

図 3.1.3.1-8 動ひずみ計

f. 制御盤及び制御システム

主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-9 に示す。

- ・構成: サーボコントローラ 4 台
サブコン 1 台
機側操作用ペンダント 2 台
制御用 PC 1 台
制御ソフトウェア 一式
- ・制御種類: 荷重制御、変位制御、外部信号制御
- ・外形寸法: 制御盤ラック 570×710×1640 mm



(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



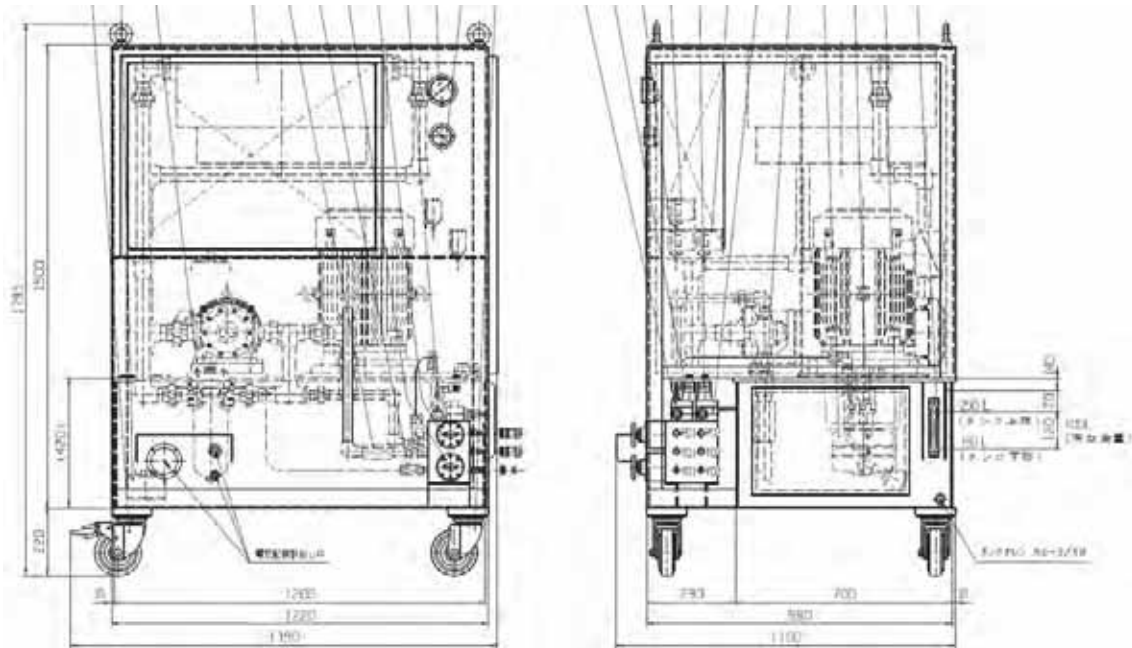
(2)外観

図 3.1.3.1-9 制御盤及び制御システム

g. 油圧源

主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-10 に示す。

- ・最高使用圧力: 70 MPa
- ・吐出量: 12ℓ/分
- ・モータ容量: 15 kW
- ・タンク油量: 250ℓ
- ・オイルクーラ: 空冷式
- ・外形寸法: 1220×1050×1720 mm



(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



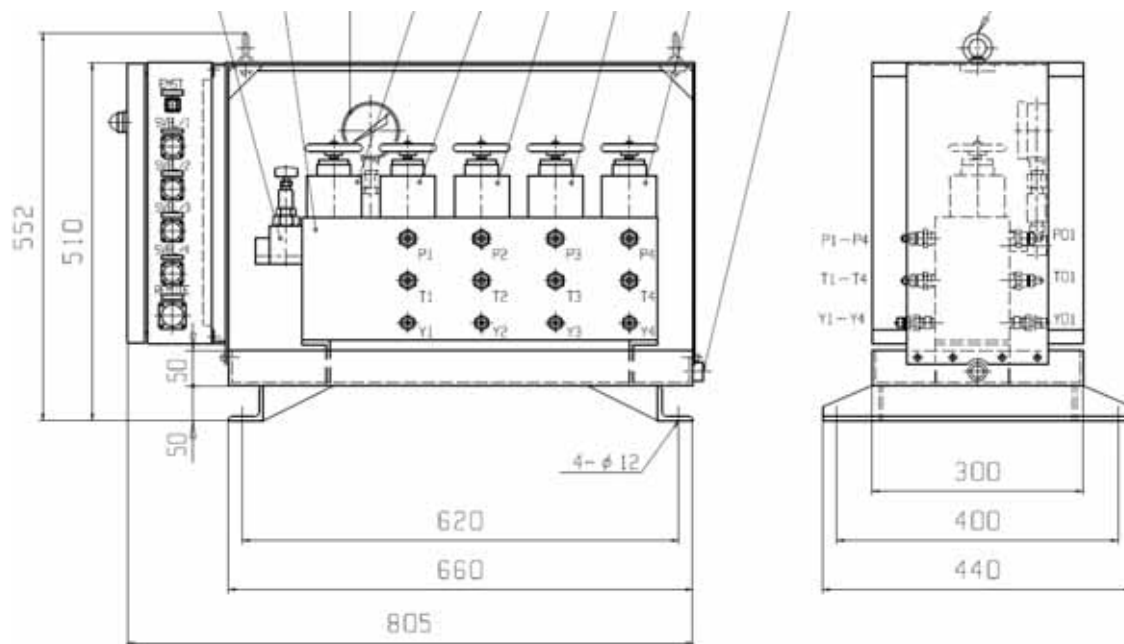
(2)外観

図 3.1.3.1-10 油圧源

h. 配管ポート

主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-11 に示す。

- ・最高使用圧力: 70 MPa
- ・油圧接続口: 油圧源側 1 系統、サーボ弁ブロック側 4 系統
- ・外形寸法: 440×805×552 mm



(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



(2)外観

図 3.1.3.1-11 配管ポート

i. 油圧ホース

主な仕様を以下に示す。また油圧ホースを使用する系統図と外観を図 3.1.3.1-12 に示す。

- ・油圧ジャッキからサーボ弁ブロック間配管: 8 セット(油圧ホース 16 本)
- ・サーボ弁ブロックから配管ポート間配管: 4 セット(油圧ホース 12 本)
- ・配管ポートから油圧源間配管: 1 セット(油圧ホース 3 本)

区分	仕舞番号	部品名	数量	ホース仕様
①	4-(14)-(a)	押引ホース	1	高圧用、1/2"×5m
	4-(14)-(b)	押引ホース	1	高圧用、1/2"×5m
	4-(14)-(c)	押引ホース	1	高圧用、1/4"×5m
②	4-(14)-(d)	押引ホース	2	高圧用、3/8"×2.0m
	4-(14)-(e)	押引ホース	2	高圧用、3/8"×2.0m
③	4-(14)-(f)	押引ホース	2	高圧用、3/8"×1.5m
	4-(14)-(g)	押引ホース	2	高圧用、3/8"×1.5m
④	4-(14)-(h)	押引ホース	8	高圧用、1/4"×1.5m
	4-(14)-(i)	押引ホース	8	高圧用、3/8"×1m
⑤	4-(14)-(k)	丁重機ホース	8	高圧用、3/8"×3口

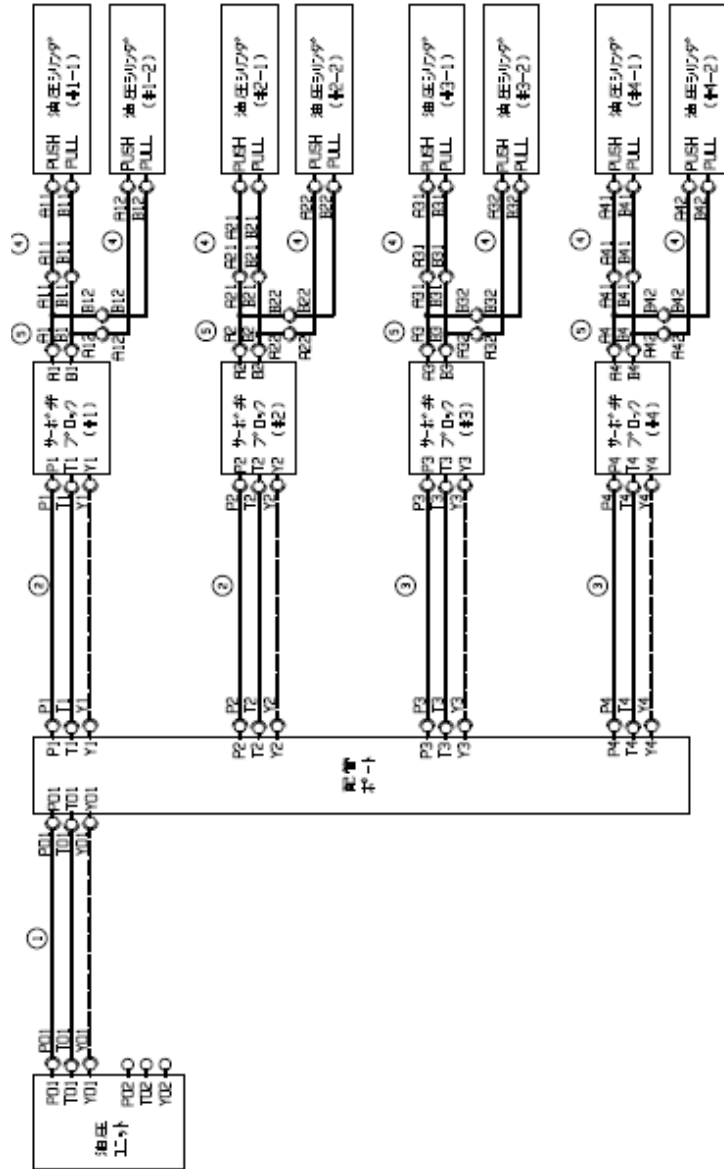


図 3.1.3.1-12 油圧ホース(系統図と外観)

j. 制御ケーブル

主な仕様を以下に示す。また制御ケーブルの構成を表 3.1.3.1-2 に、外観を図 3.1.3.1-13 に示す。

- ・ロードセル~制御盤間ケーブル: 8 セット
- ・変位計~制御盤間ケーブル: 8 セット
- ・サーボ弁ブロック~制御盤間ケーブル: 4 セット
- ・油圧源~制御盤間ケーブル: 1 セット

表 3.1.3.1-2 制御ケーブル

No.	ケーブル名称	配線区間	最大断面×長さ×本数
1	CNTL	制御ラック~油圧ユニット	(60mm 角×35 mm)× 16 m×1 本
	PRS		
2	VALVE1~4	制御ラック~サーボ弁ブロック	φ 30×30m×4 本
3	PNDT-A,-B	制御ラック~ペンダント	(60mm 角×35 mm)× 20m×2 本
	DGSV-A,-B		
4	REMOTE	制御ラック~中継ボックス	φ 42 mm×12m×1 本
5	SVBL1~4	中継ボックス~サーボ弁ブロック	φ 30 mm×20m×4 本
6	EMG	中継ボックス~非常停止ボタン	φ 25 mm×30m×1 本
7	AC200V 電源ケーブル	配電盤~油圧ユニット	φ 90 mm×12m×1 本
8	AC100V 電源ケーブル	コンセント~中継ボックス	φ 25 mm×10 m×1 本

注記 1)最大断面はコネクタ外形寸法を示す。(ケーブル外径ではない。)



図 3.1.3.1-13 制御ケーブル

② 載荷設備(反力フレーム)

図 3.1.3.1-14 に反力フレームの構成を示す。十字型試験体への荷重負荷による反力を支持するための反力フレームには、以下の性能が要求される。

- ・十字型試験体の負荷モーメントの反力で壊れないこと
- ・変形が試験に影響を及ぼさないこと
- ・ピット内に設置し、試験体を保持したまま吊り上げが可能なこと。
- ・試験体破壊後も試験体を保持してピットから取り出せること。
- ・試験体中央部の支持点は、ヒータからの熱を遮断する断熱材を有すること。

以上を勘案し、十分な剛性を有する鋼板溶接構造とした。表 3.1.3.1-3 に反力フレームの構成機器等を示す。以下に反力フレームを構成する機器、構造物等の詳細について記す。

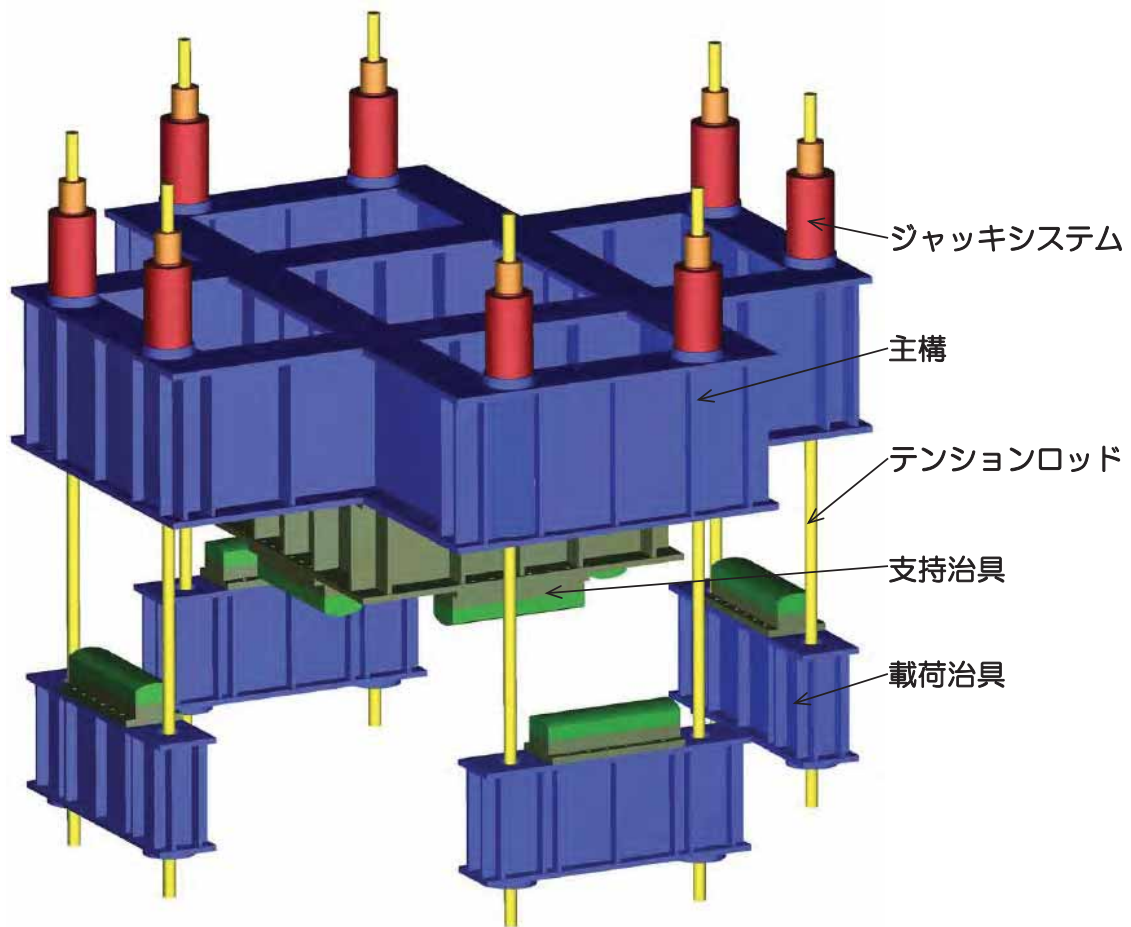


図 3.1.3.1-14 反力フレームの構成

表 3.1.3.1-3 反力フレームの構成機器等一覧

番号	設備名	数量
1	主構	1 台
2	载荷治具	4 台
3	支持治具	1 台
4	テンションロッド・ナット	8 組
5	支持点金物	8 台
6	絶縁・断熱材	一式

a. 主構

主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-15 に示す。

- ・形式: 鋼板溶接組立品
- ・主要材料: SM400
- ・外形寸法: 幅 3700×長さ 3700×高さ 764 mm
- ・重量: 6.4 ton

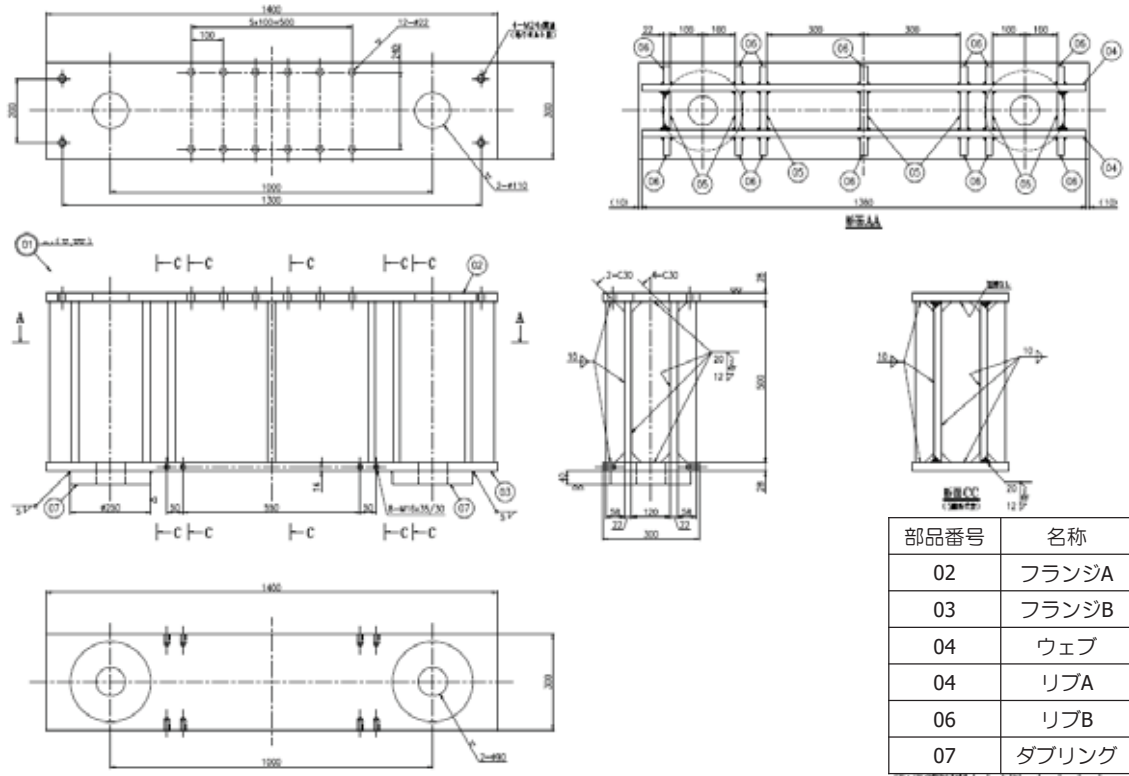


図 3.1.3.1-15(1)主構(外観)

b. 載荷治具

主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-16 に示す。

- ・形式: 鋼板溶接組立品
- ・主要材料: SS400
- ・外形寸法: 300×1400×556 mm
- ・重量: 2.4 ton(合計)



(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



(2)外観

図 3.1.3.1-16 載荷治具

c. 支持治具

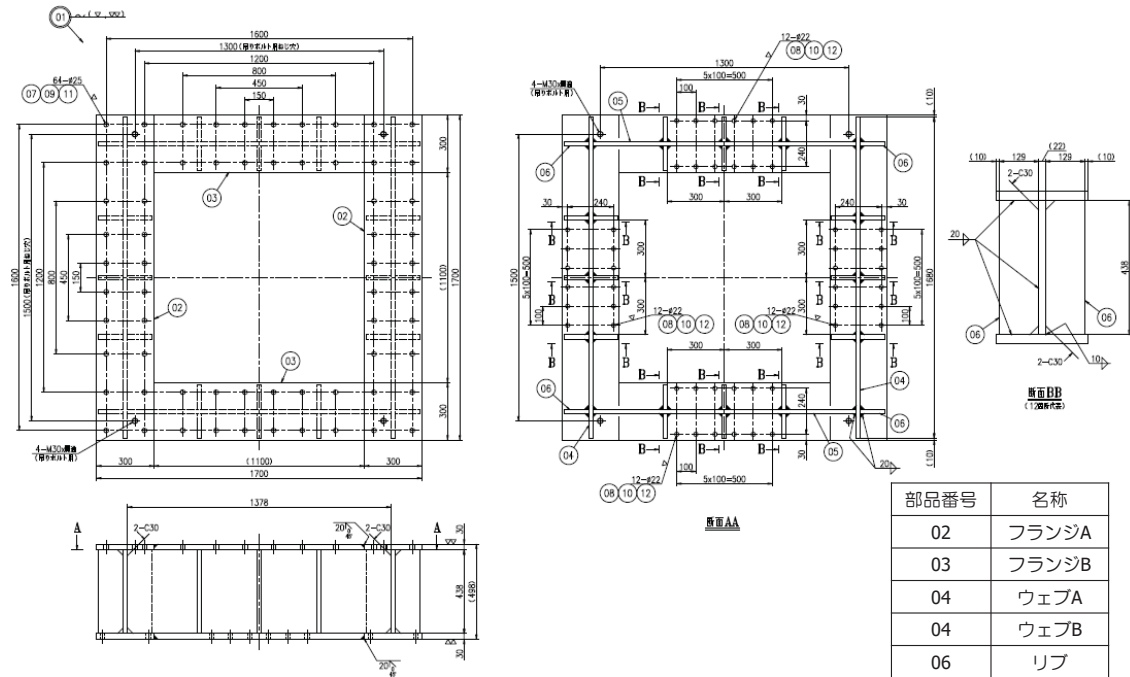
主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-17 に示す。

形式: 鋼板溶接組立品

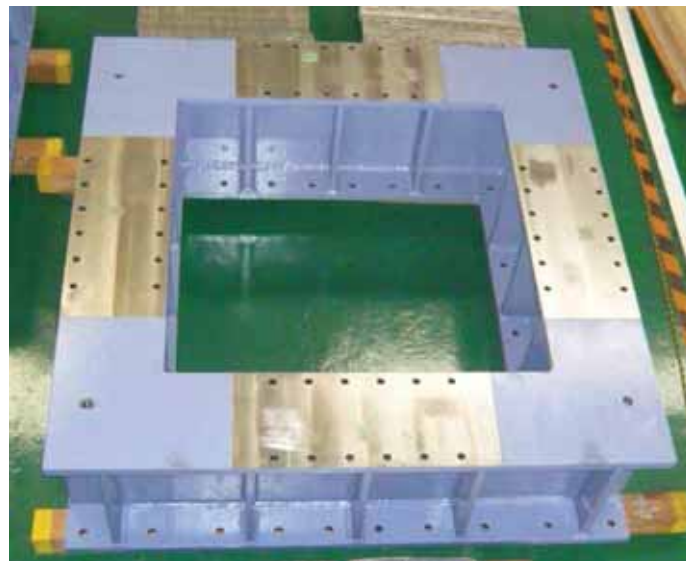
主要材料: SS400

外形寸法: 1700×1700×500 mm

重量: 1.5 ton



(1)設備・機器概略図面



(2)外観

図 3.1.3.1-17 支持治具

d. テンションロッド・ナット

主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-18 に示す。

形式: 鋼材機械加工品

主要材料: SCM435、S45C

外形寸法: $\phi 60 \times 3500$ mm

重量: 625 kgf(合計)



(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



(2)外観

図 3.1.3.1-18 テンションロッド・ナット

e. 支持点金物及び絶縁・断熱材

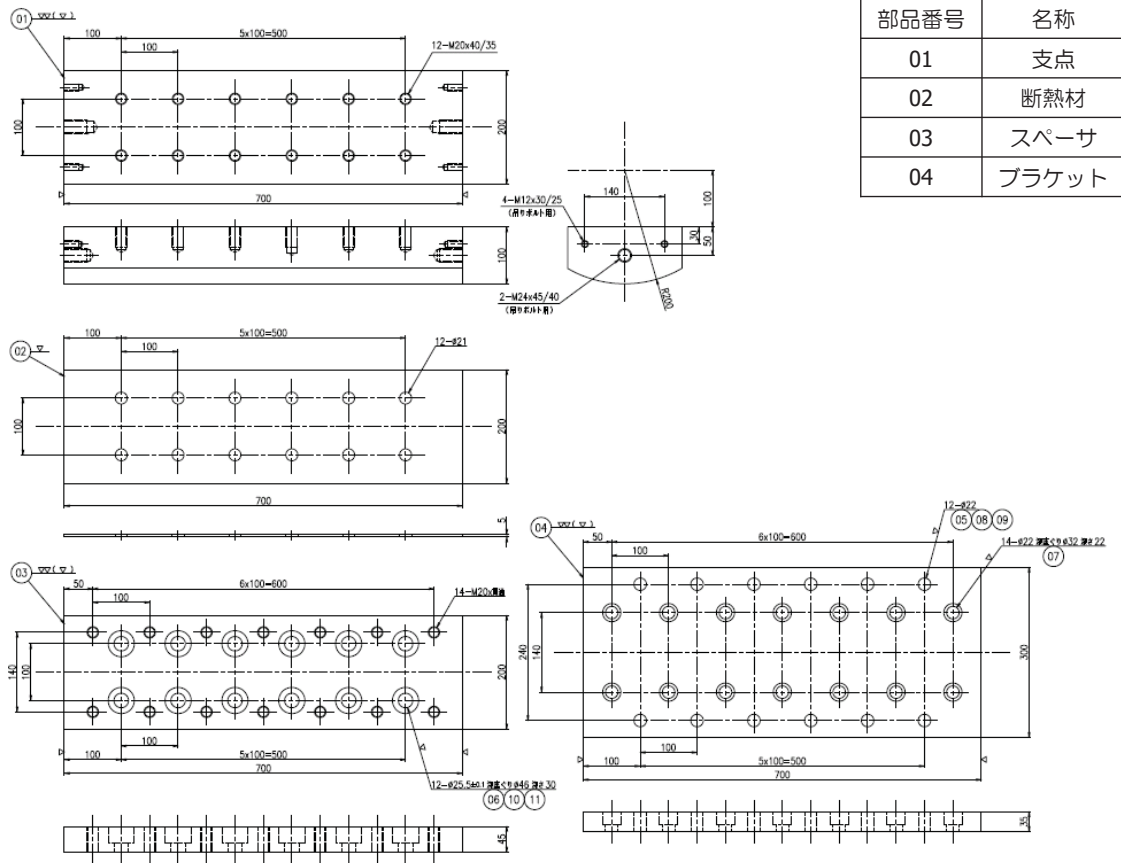
主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-19 に示す。

○支持点金物

- ・形式: 鋼板機械加工品
- ・主要材料: S45C
- ・外形寸法: 幅 300×長さ 700×高さ 180 mm(合計)
- ・重量: 1.6 ton(合計)

○絶縁・断熱材

- ・形式: 集成マイカ加工品
- ・主要材料: ダンマ 550L(商品名)
- ・外形寸法: 300×700×20 mm(合計)

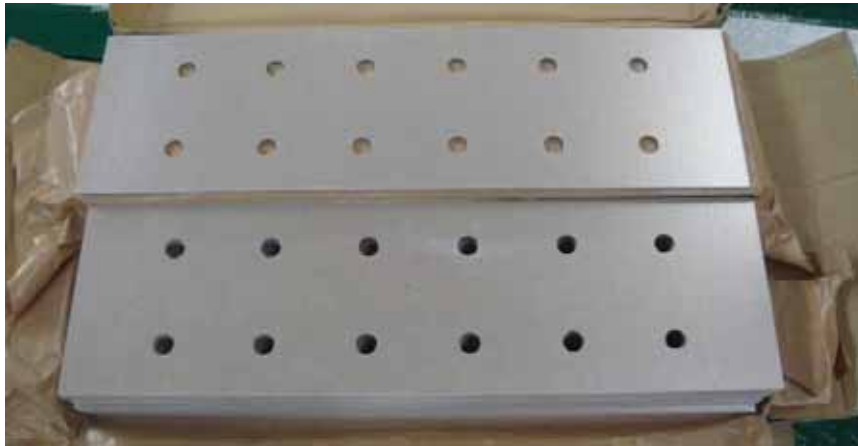


(1)設備・機器概略図面(単位: mm)

図 3.1.3.1-19(1)支持点金物及び絶縁・断熱材



(2)外觀(支持点金物)



(3)外觀(絶縁・断熱材)

図 3.1.3.1-19(2)支持点金物及び絶縁・断熱材

③加熱・冷却設備

図 3.1.3.1-20 は加熱・冷却設備の構成を示す。

冷却設備は、冷凍機と冷水貯留タンクを循環させた冷却水を所定の温度まで冷却し、試験前には冷却水スプレー用ポンプの吐出ラインを冷水貯留タンクに循環させて試験開始時にバルブ切替えによりスプレーノズルへ送水する構成となっている。試験完了後、ピットに排水した冷却水を水中ポンプで回収し、フィルターにて濾過した後、送水ポンプで冷水貯留タンクに戻すことが出来る。

一方加熱設備は、試験開始前に試験体を昇温するための加熱ヒータ、ヒータ制御盤、試験体保温材で構成される。図 3.1.3.1-21 は加熱設備におけるヒータの配置を模式的に示す。十字型試験体中央部の温度分布を均一に保つためのメインヒータと、アーム部への熱逃げを補償するための中央支点近傍の補助ヒータ 4 体の合計 5 か所に配置する。なおヒータは、マイクロヒータを板に貼りつけたプレートヒータを採用する。

加熱・冷却設備の構成機器等を表 3.1.3.1-4 に示す。主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-22~図 3.1.3.1-27 に示す。以下に加熱・冷却設備を構成する機器、構造物等の詳細について記す。

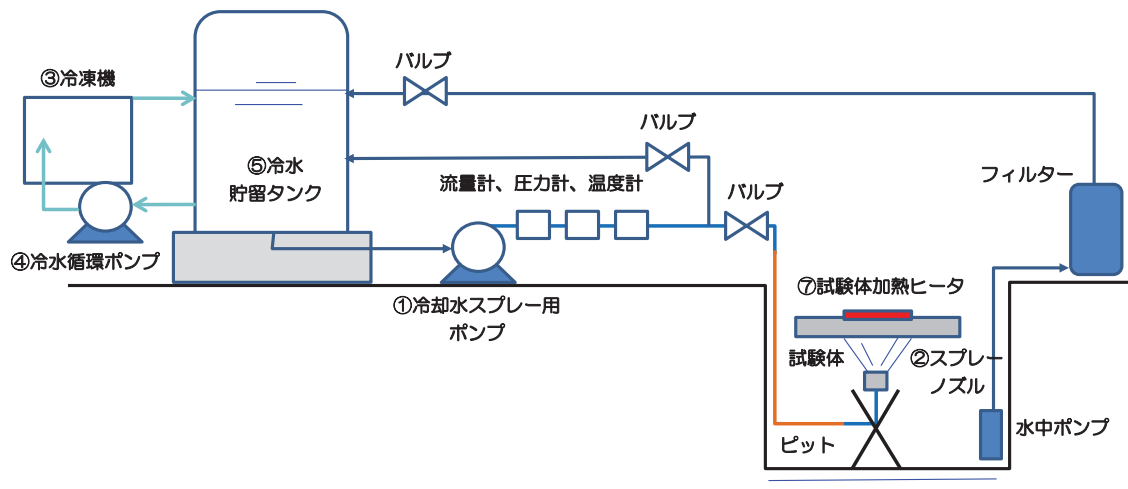


図 3.1.3.1-20 加熱・冷却設備の構成

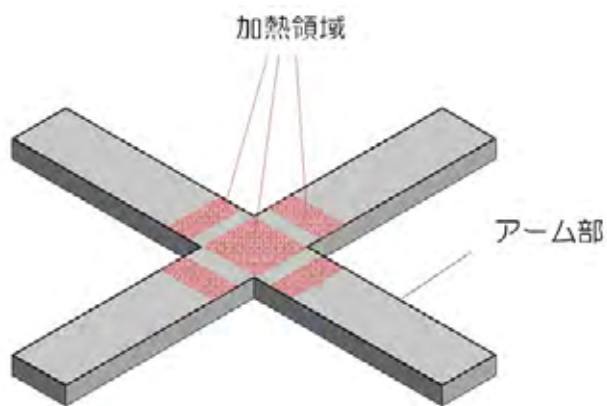
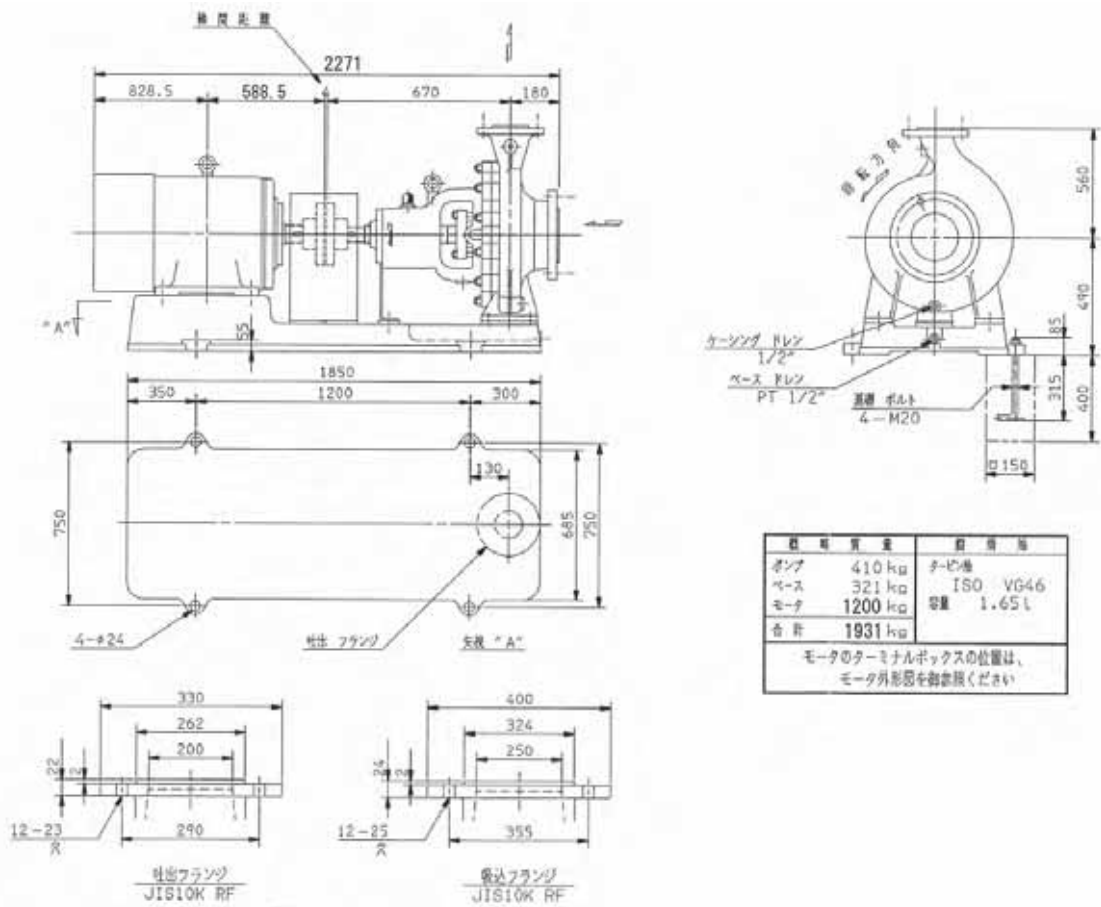


図 3.1.3.1-21 十字試験体とヒータの位置関係(模式図)

表 3.1.3.1-4 加熱・冷却設備の構成機器等一覧

名称	仕様	寸法(mm)	形状 (概略図)	数量
冷却水 スプレー用 ポンプ	NPSH: 7.2m、ポンプ効率: 80% 駆動機出力: 250 kW、 吐出量: 20m ³ /分、全揚程: 50m	幅 750 長さ 1850 高さ 1020	図 3.1.3.1-22	1 台
スプレー ノズル	材質: SUS304 ノズル径: φ20、ノズル孔数: 48	直径 836.6 高さ 320	図 3.1.3.1-23	1 台
冷凍機	冷却能力: 196.9 kW 冷水量: 24.2m ³ /h	幅 860 長さ 3400 高さ 2350	図 3.1.3.1-24	3 台
冷水循環 ポンプ	NPSH: 3.2m、ポンプ効率: 77.5% 駆動機出力 22: kW、 吐出量: 3m ³ /分、全揚程: 30m	幅 460 長さ 1265 高さ 600	図 3.1.3.1-25	1 台
冷水貯留 タンク	複合板構造 貯水量: 112m ³ (4.0×7.0×4.0) タンク質量: 5630 kg 底、側壁平均保温厚さ: 25 mm	幅 4570 長さ 7136 高さ 4062	図 3.1.3.1-26	1 台
供試体 加熱ヒータ	メインヒータ: 定格 2.5 kW 補助ヒータ: 定格 2.5 kW	幅 600 長さ 600 厚さ 10	図 3.1.3.1-27	1 式

NPSH: 有効吸込みヘッド

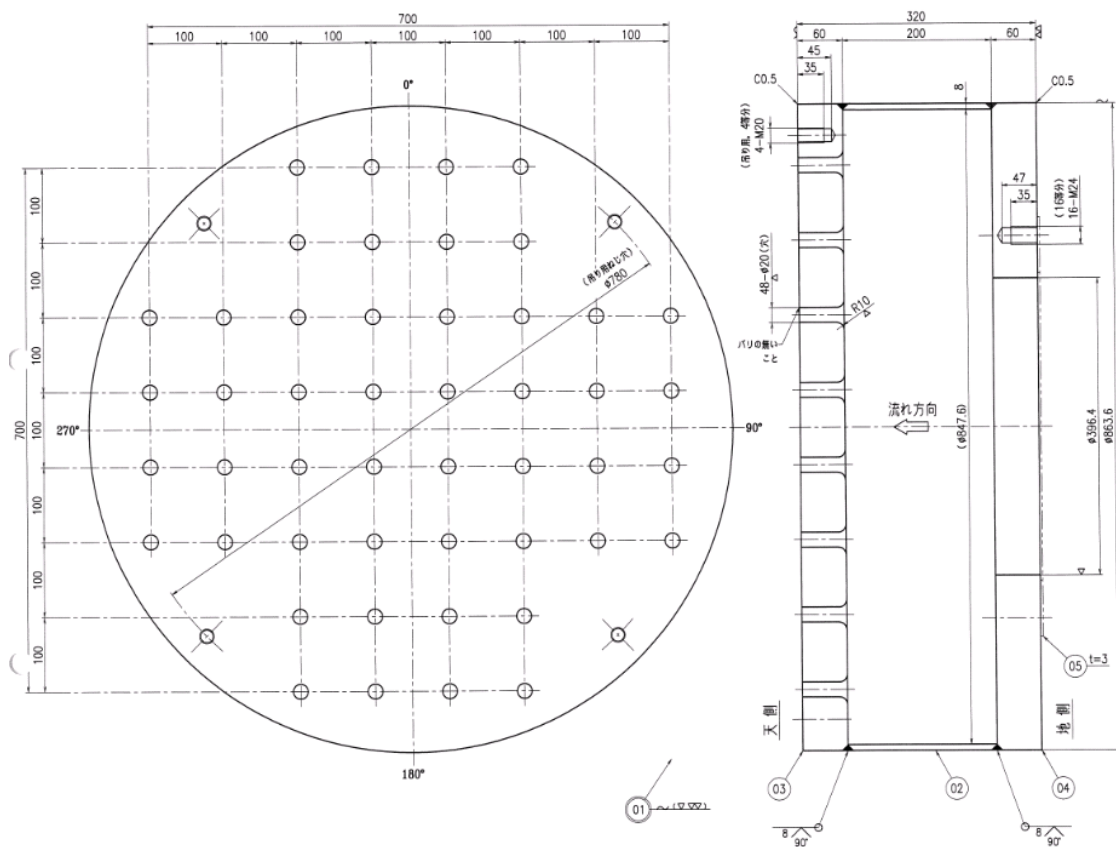


(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



(2)外観

図 3.1.3.1-22 冷却水スプレー用ポンプ

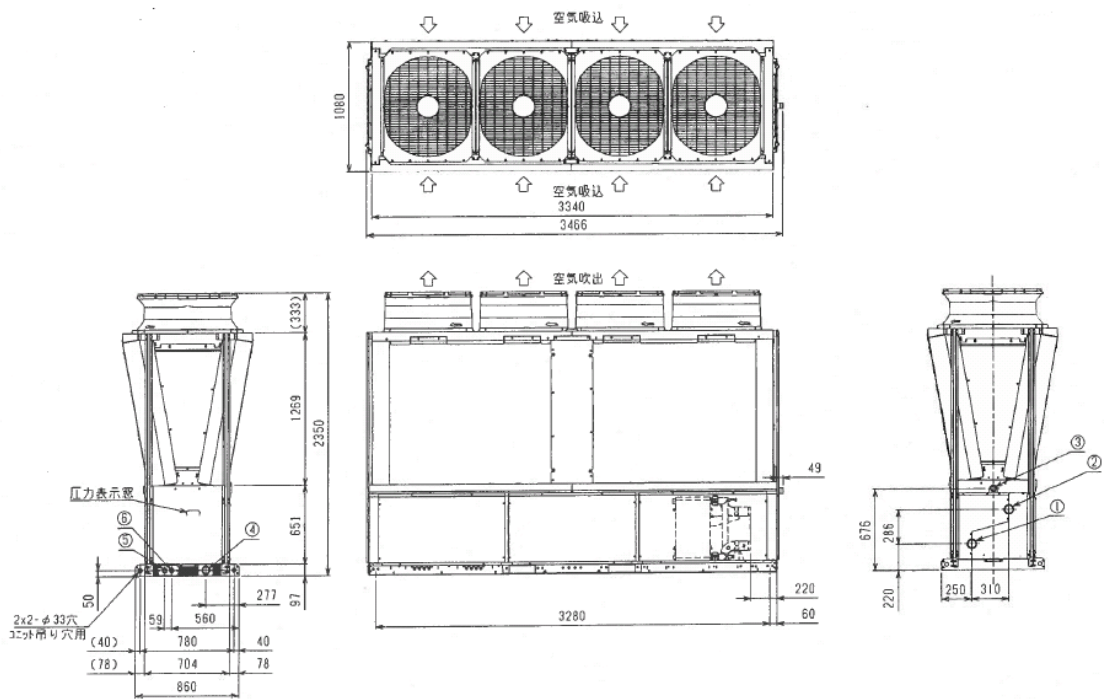


(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



(2)外観

図 3.1.3.1-23 スプレーノズル

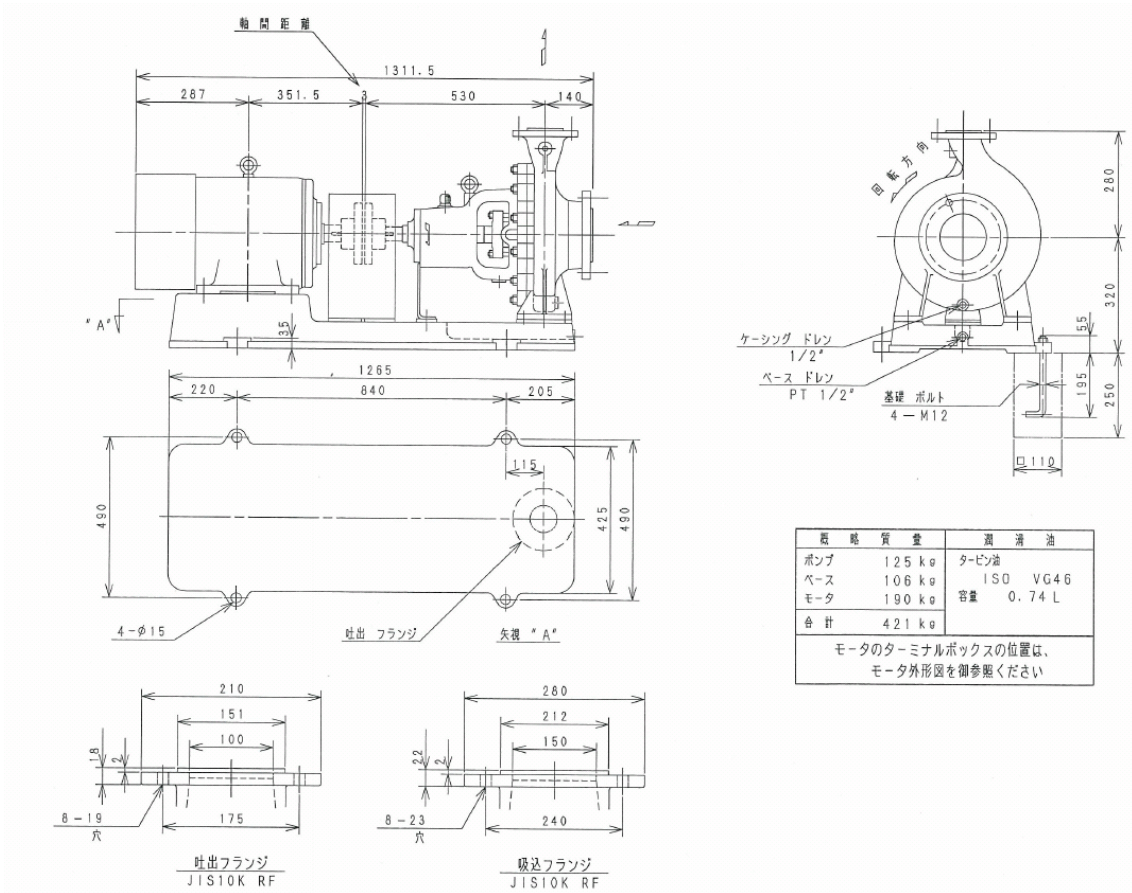


(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



(2)外觀

圖 3.1.3.1-24 冷凍機

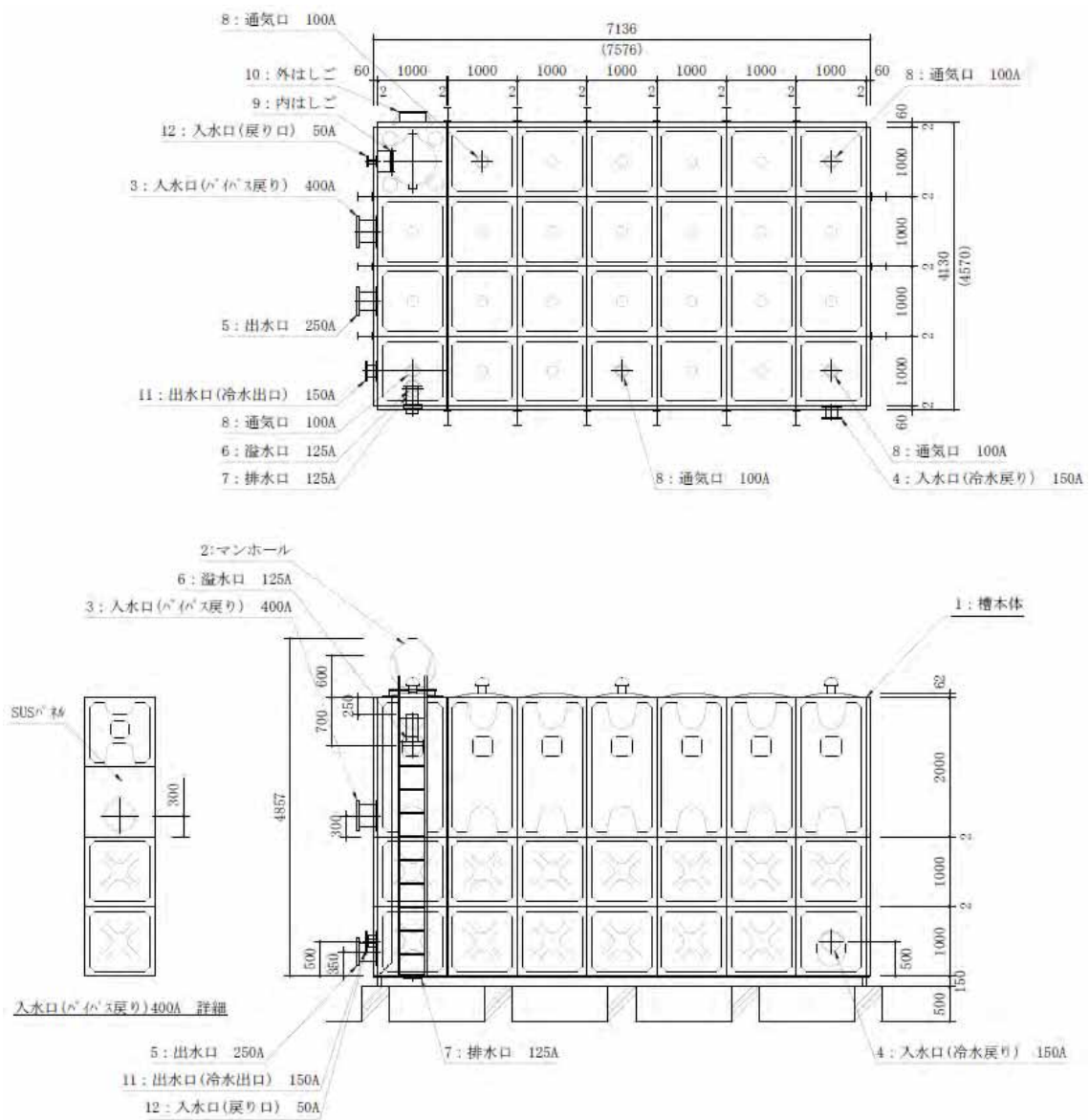


(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



(2)外観

図 3.1.3.1-25 冷水循環ポンプ



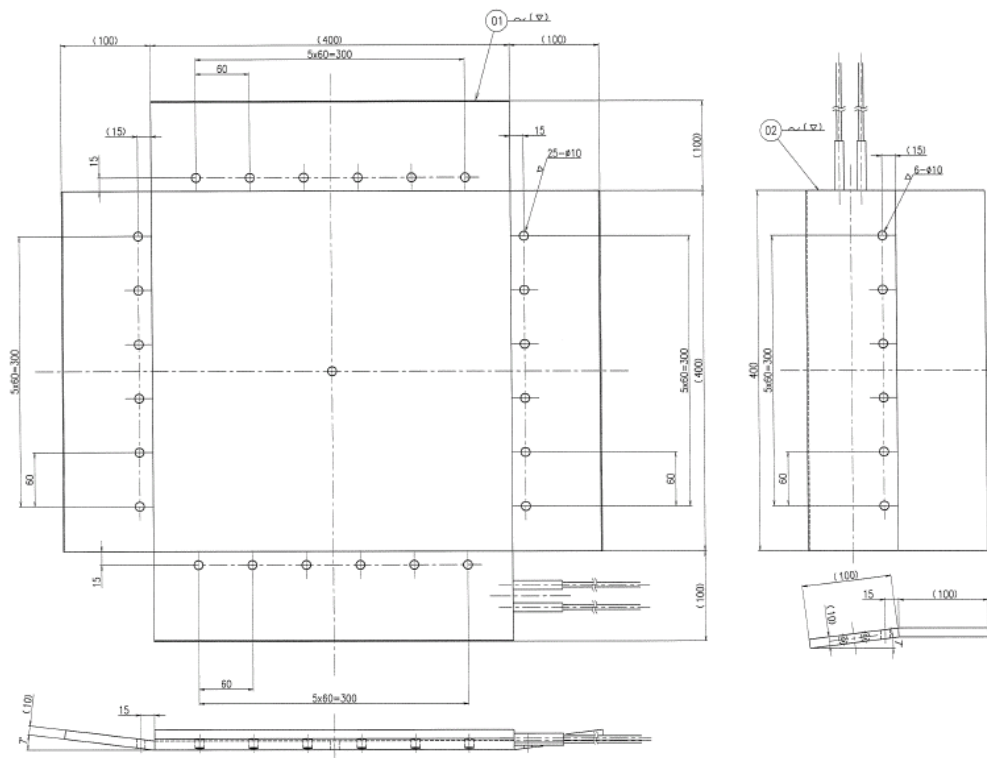
(1)設備・機器概略図面(単位: mm)

図 3.1.3.1-26(1) 冷水貯留タンク

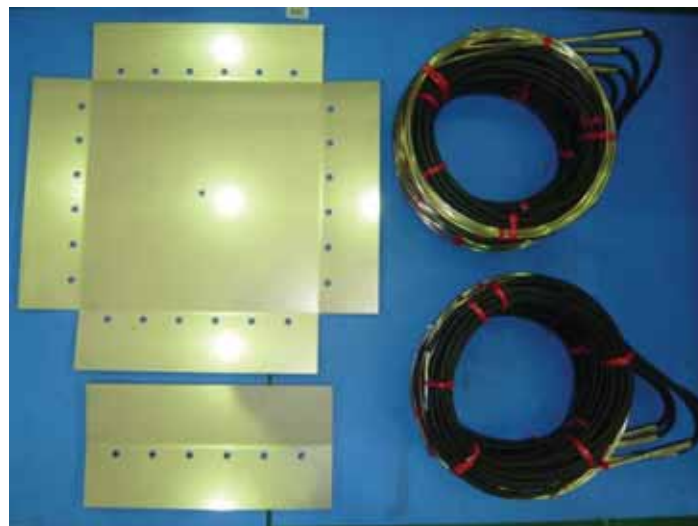


(2)外観

図 3.1.3.1-26(2) 冷水貯留タンク



(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



(2)外観

図 3.1.3.1-27 供試体加熱ヒータ

④ピット蓋

PTS 模擬試験中にピット内に水蒸気が充満するため、図 3.1.3.1-28 に示す位置に鋼製のピット蓋を設置する。ピット蓋の主な仕様を以下に示す。また構成機器等を表 3.1.3.1-5 に、設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-29 に示す。以下にピット蓋の詳細について記す。

- ・形式: 鋼板溶接組立品
- ・主要材料: SS400
- ・外形寸法: 1200×7400×800 mm
- ・重量: 5.1 ton

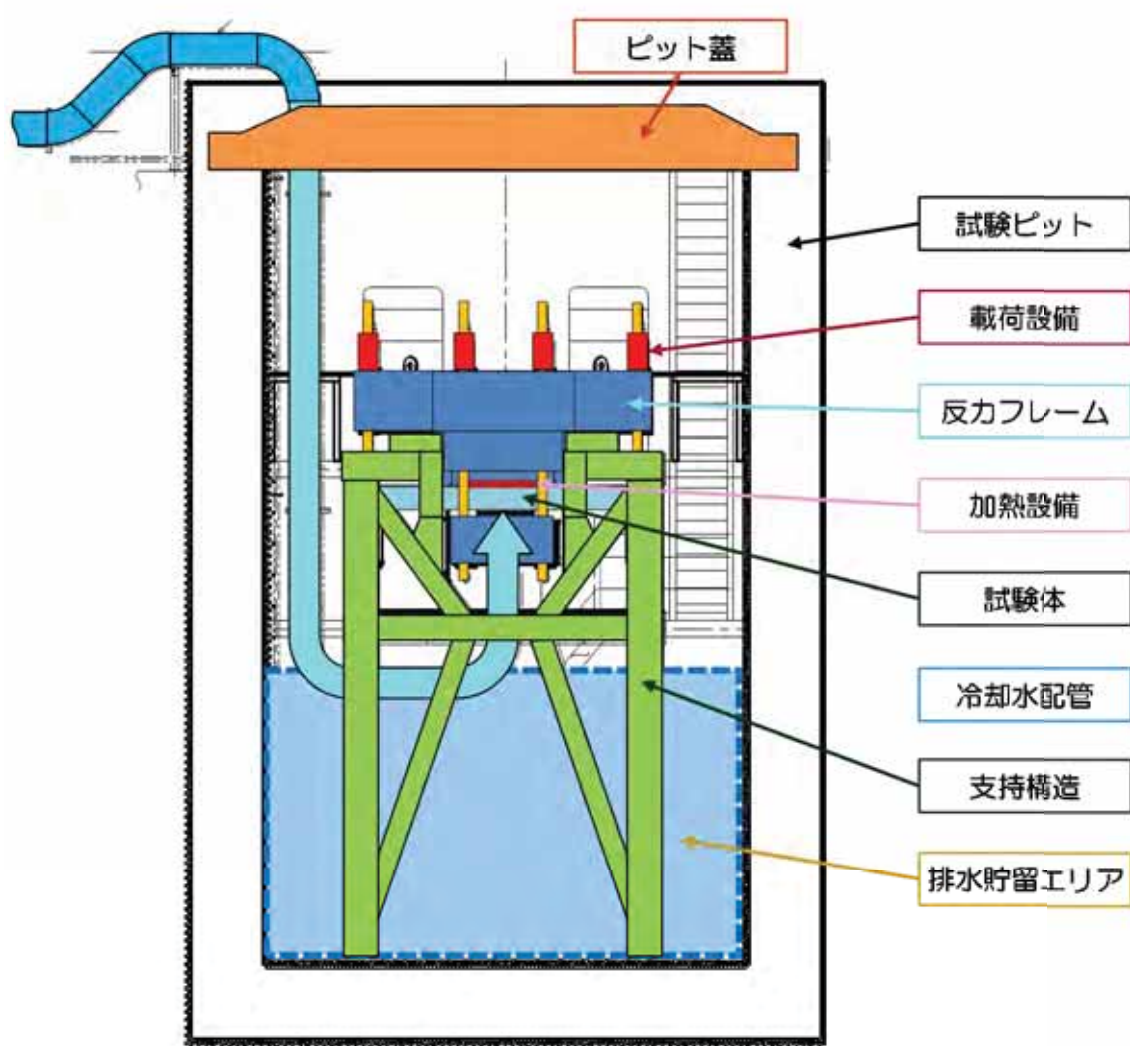
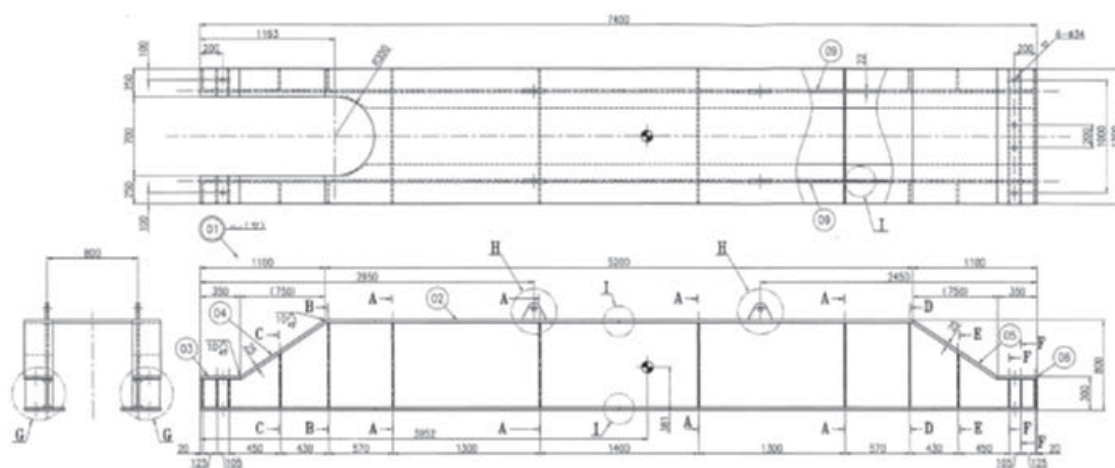


図 3.1.3.1-28 ピット内の PTS 模擬試験設備の配置(模式図)

表 3.1.3.1-5 ピット蓋の構成機器等一覧

番号	設備名	数量	備考
1	ピット蓋	1台	



(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



(2)外観

図 3.1.3.1-29 ピット蓋

⑤試験体の組立用架台

十字型試験体をピット内のPTS 模擬試験装置に設置する際の組立に用いる架台(組立用架台)の構成機器等を図 3.1.3.1-30 に示す。十字型試験体の上面に反力フレーム、下面に載荷治具を設置した状態に組立した後、吊り下げで搬入する構造となっている。また組立用架台の構成機器等を表 3.1.3.1-6 に示す。

図 3.1.3.1-31 は組立の手順を示す。まず図 3.1.3.1-31 (a)に示すように、試験体受け、載荷治具受け、反力フレーム受けを組立用架台に設置する。次に図 3.1.3.1-31 (b)に示すように中央の試験体受けに十字型試験体を搭載し、試験体上下面にセンサを取付ける等の準備を行う。続いて図 3.1.3.1-31 (c)に示す載荷治具を載荷治具受けに搭載して試験体の下面に設置する。最後に図 3.1.3.1-31 (d)に示すように、上方から反力フレームを設置してテンションロッドで一体に結合する。こうして組立した後、全体を楊重してピット内に設置する。

以下に試験体の組立用架台を構成する機器、構造物等の詳細について記す。

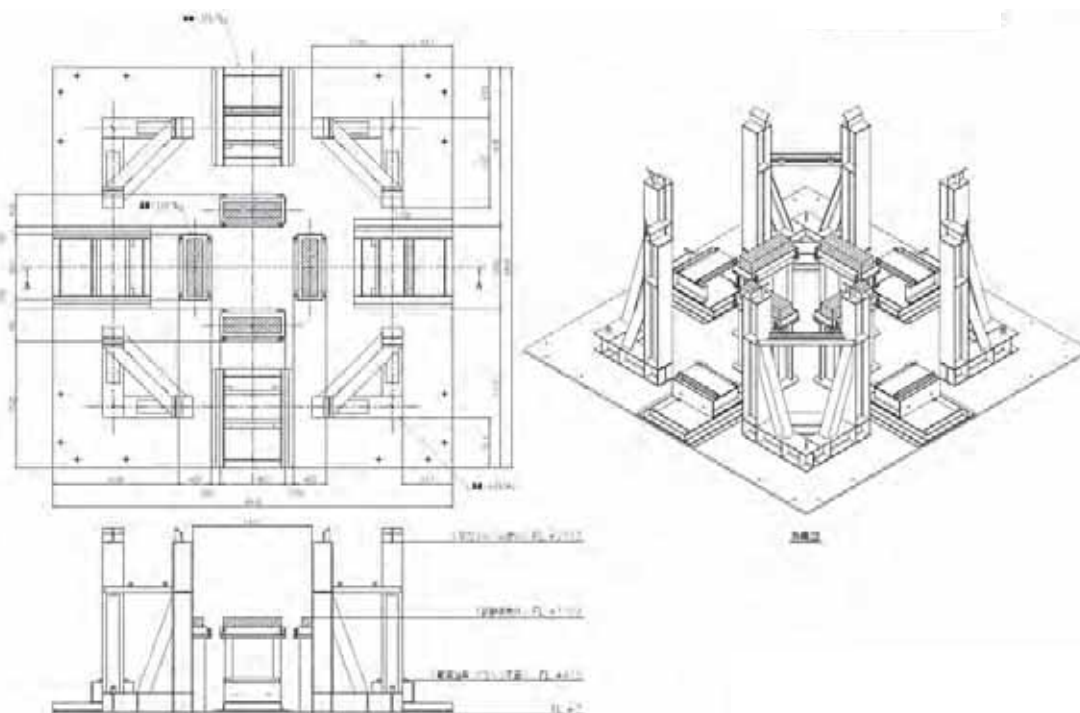


図 3.1.3.1-30 組立架台配置図(単位: mm)

表 3.1.3.1-6 組立用架台の構成機器等一覧

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

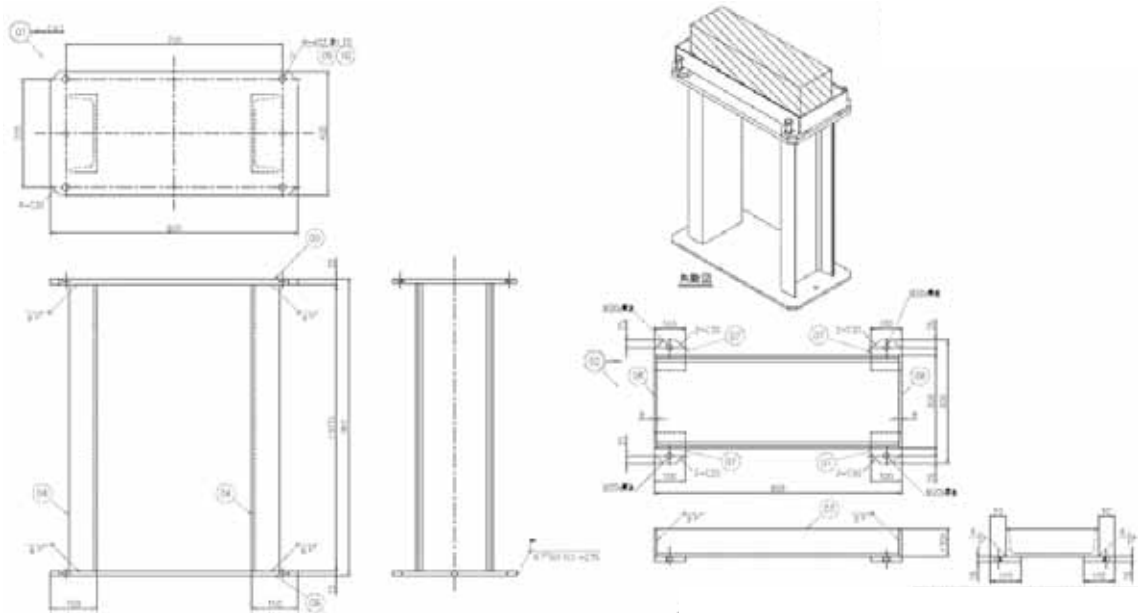


図 3.1.3.1-31 PTS 模擬試験準備時の十字型試験体等の組立手順

a. 試験体受け

主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-32 に示す。

- ・形式: 鋼板溶接組立品
- ・主要材料: SS400
- ・外形寸法: 400×800×1189 mm
- ・重量: 0.6 ton(合計)



(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



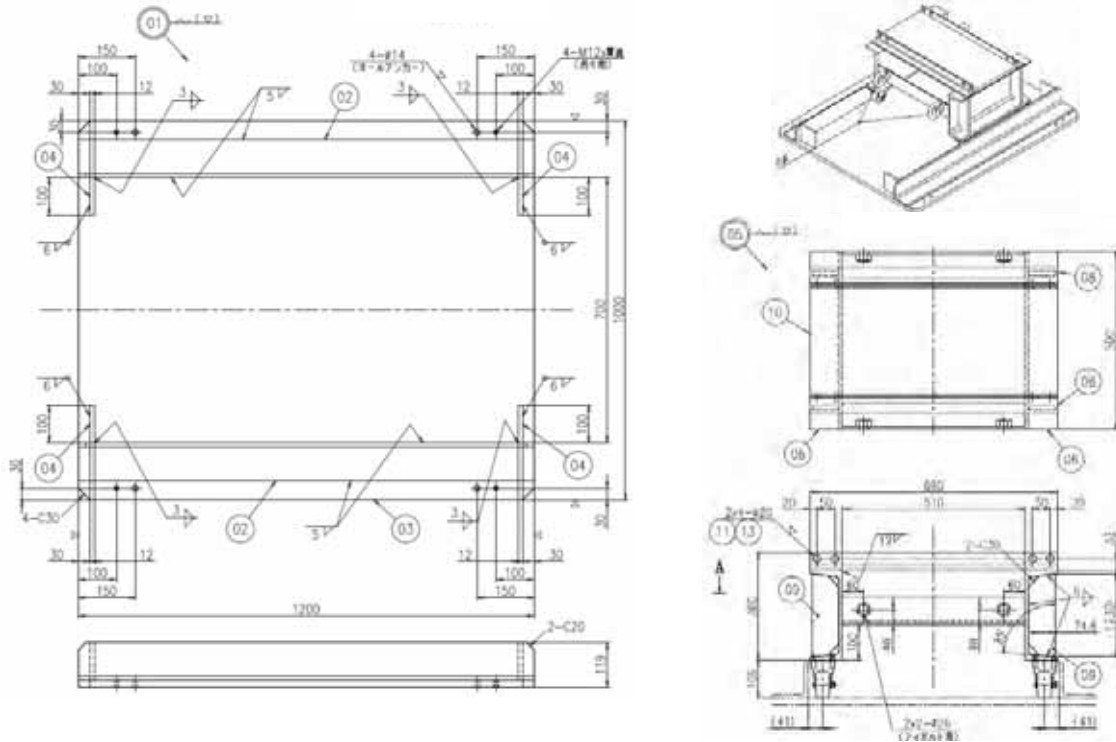
(2)外観

図 3.1.3.1-32 試験体受け

b. 載荷治具受け

主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-33 に示す。

- ・形式: 鋼板溶接組立品
- ・主要材料: SS400
- ・外形寸法: 1000×1200×422 mm
- ・重量: 1.2 ton(合計)



(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



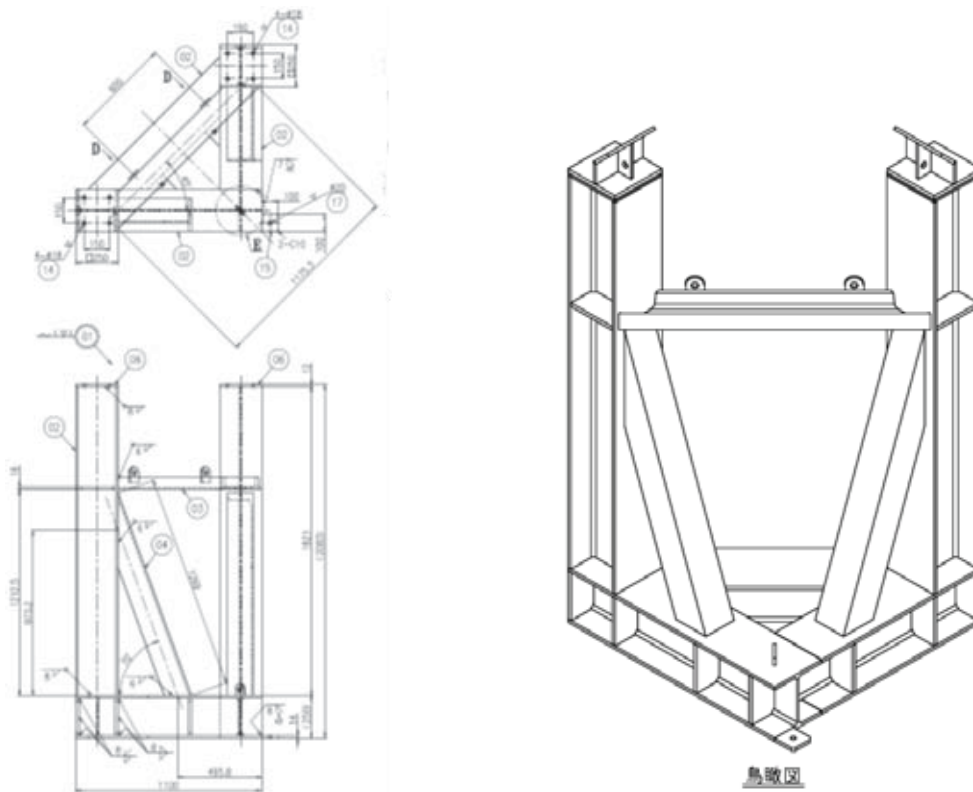
(2)外観(赤矢印部)

図 3.1.3.1-33 載荷治具受け

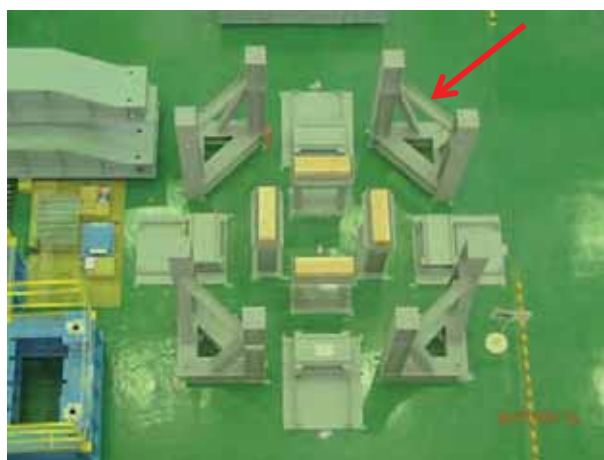
c. 反力フレーム受け

主な仕様を以下に示す。また設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-34 に示す。

- ・形式: 鋼板溶接組立品
- ・主要材料: SS400
- ・外形寸法: 1100×1100×2280 mm
- ・重量: 2.6 ton(合計)



(1)設備・機器概略図面(単位: mm)



(2)外観(赤矢印部)

図 3.1.3.1-34 反力フレーム受け

⑥ 疲労亀裂導入設備

十字型試験体の模擬欠陥は、放電加工(EDM)にて半楕円亀裂(ノッチ)を加工した後、繰り返し負荷を与えて疲労により亀裂を進展させて付与する。この過程において、疲労亀裂を導入するため、亀裂面直交方向に曲げ負荷を付与できる荷重負荷装置が必要である。

図 3.1.3.1-35 に疲労亀裂導入設備の概要を示す。十字型試験体を支持する反力フレーム上に、載荷治具、支持治具、アクチュエータ(疲労試験機)を配置して繰り返し曲げ負荷を付与することが出来、合わせて疲労亀裂の進展量をモニターするための計測器を備えている。

疲労亀裂導入設備の構成機器等を表 3.1.3.1-7 に示す。また主な仕様と、設備・機器概略図面と外観を図 3.1.3.1-36 に示す。以下に疲労亀裂導入設備を構成する機器、構造物等の詳細について記す。

○アクチュエータ

- ・荷重: 1 MN
- ・ストローク: ±150 mm
- ・外形寸法: φ 470 mm×2110 mm

○反力フレーム及び治具

- ・形式: 鋼板溶接組立品
- ・主要材料: SS400
- ・外形寸法: 2400×4200×4235 mm
- ・重量: 15.2 ton(アクチュエータ込)

○油圧源

- ・最高使用圧力: 20.6 MPa
- ・吐出流量: 262ℓ/分
- ・容量: 55 kW×2 台

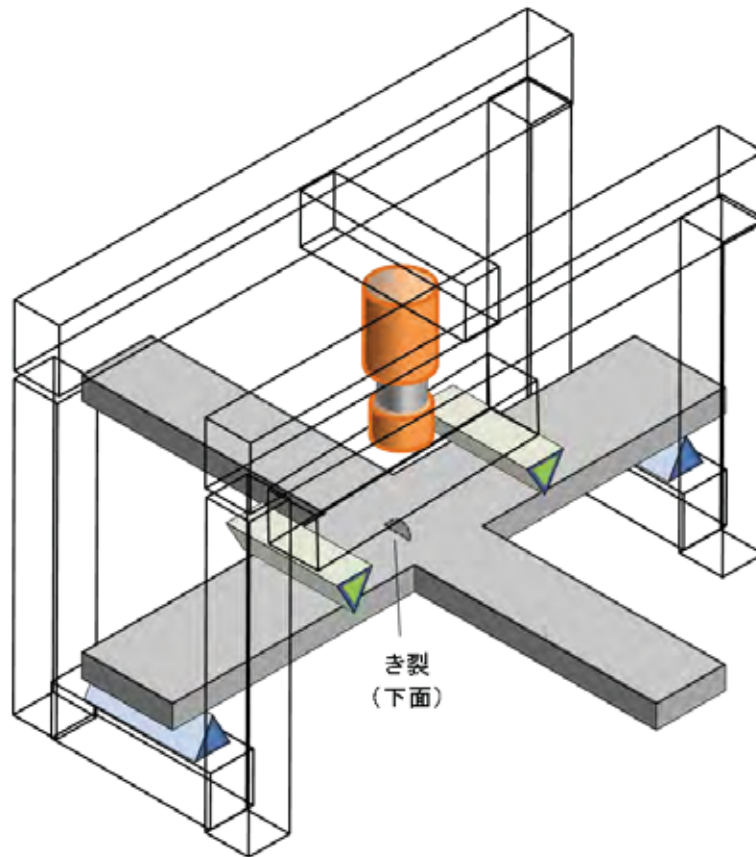


図 3.1.3.1-35 疲労亀裂導入試験機の概要(亀裂直交方向の4点曲げ試験装置)

表 3.1.3.1-7 疲労亀裂導入設備の構成機器等一覧

番号	設備名	数量	備考
1	アクチュエータ	1台	
2	反力フレーム及び治具	一式	
3	油圧源	一式	

(3)PTS模擬試験設備の試運転

①試運転の概要

表 3.1.3.1-8 に示す PTS 模擬試験設備、疲労亀裂導入設備に対し、所定の運転条件で所定の合格判定値を達成し、試験設備としての機能を満足していることを確認する。

②載荷設備(ジャッキシステム及び反力フレーム)

a. 確認事項

載荷設備の外観を図 3.1.3.1-37 に示す。PTS 模擬試験設備の試運転により、ジャッキシステムが PTS 模擬試験に必要な機能を有していることを総合的に確認する。

b. 試運転の要領

試運転には十字型試験体と同サイズの十字型ダミー試験体を用いた。ジャッキシステムの制御性を確認する上で、ジャッキの制御誤差が大きくなるよう十字型ダミー試験体の剛性を本来の十字型試験体よりも低くなるようにし、より厳しい試験条件で確認することとした。

表 3.1.3.1-9 は設備仕様と試運転における試験内容を示す。ストローク、載荷速度、荷重は油圧ジャッキ単体の性能で決まることから、油圧ジャッキ単体の性能を実測して確認した。また1台のサーボで2台のジャッキを安定して制御できることの確認を行った。なお制御性の確認においては、低荷重の方が制御が難しいことから最大荷重を 100 kN、最小荷重 10 kN として、台形波の負荷試験を行った。

試運転では、図 3.1.3.1-31 に示す組立手順に則って十字型ダミー試験体を PTS 模擬試験設備に設置した。

c. 試運転結果

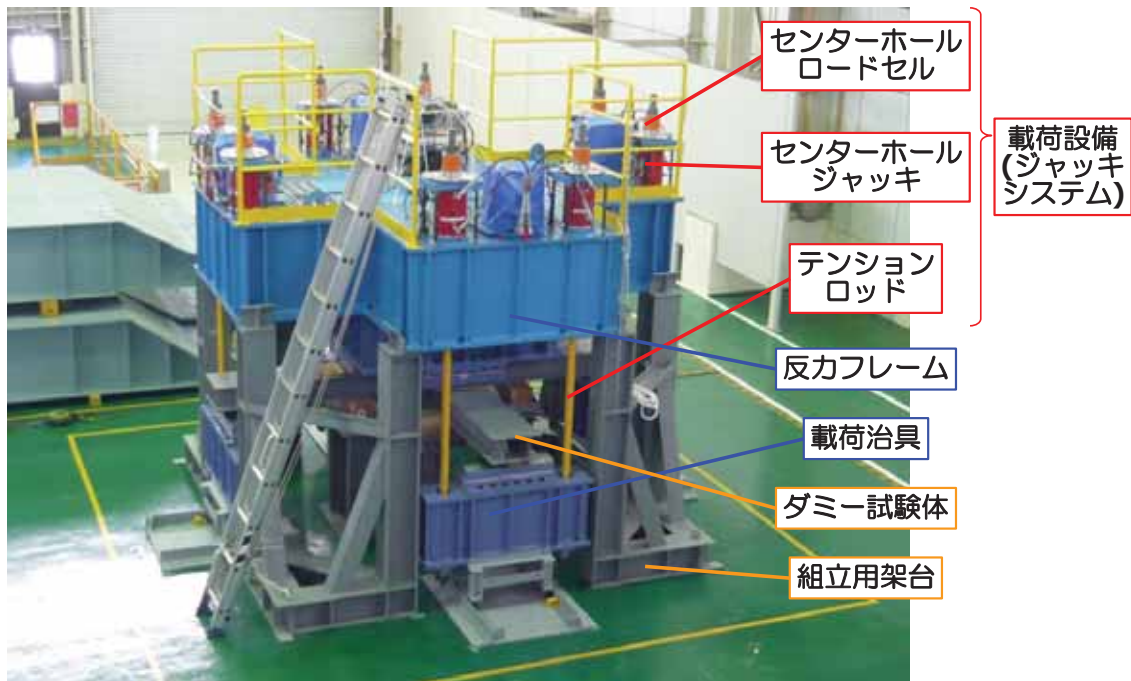
図 3.1.3.1-38 は油圧ジャッキへの制御値(図中破線)、荷重(青色実線)と変位(赤色実線)の実測値の時刻歴を示す。この図より 4 系統あるサーボ弁制御によって荷重が制御値を追従していることを確認し、PTS 模擬試験での要求仕様を満たすことを確認した。

表 3.1.3.1-8 試運転設備の構成

設備名称	主な設備構成
PTS 模擬試験設備	ジャッキシステム
	反力フレーム
	加熱・冷却設備
疲労亀裂導入設備	アクチュエータ
	反力フレーム及び治具
	油圧源

表 3.1.3.1-9 ジャッキシステムの設備仕様と試験内容

条件	設備仕様	試験内容
ストローク	200 mm(調整代 70 mm 含む)	油圧ジャッキ単体でストローク 200 mm を確認
載荷速度	60 mm/分	油圧ジャッキ単体で載荷速度 60 mm/分を確認
制御	荷重制御	荷重制御が仕様を満足することを確認
荷重	1000 kN まで負荷	油圧ジャッキ単体で 1000 kN の荷重負荷ができることを確認
サーボ制御	サーボ 1 台で 油圧ジャッキ 2 台制御	1 台のサーボで 2 台の油圧ジャッキを制御できることを確認
載荷履歴	1 方向荷重増加	台形波形付与で仕様を満足することを確認

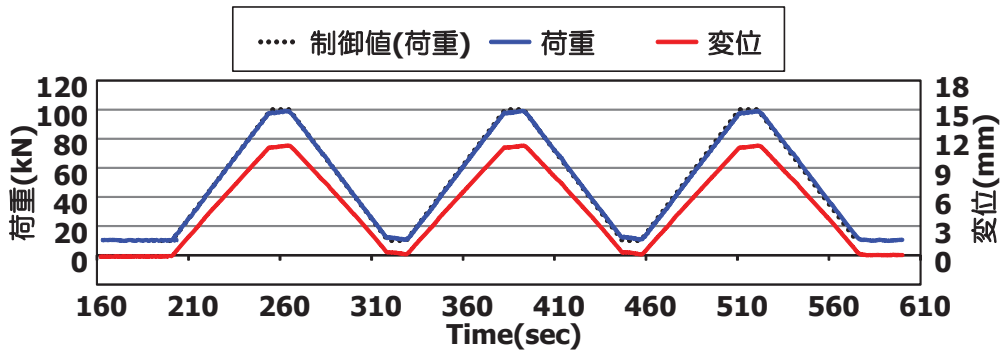


(1)反力フレームとダミー試験体を組立用架台にて組立中の状況

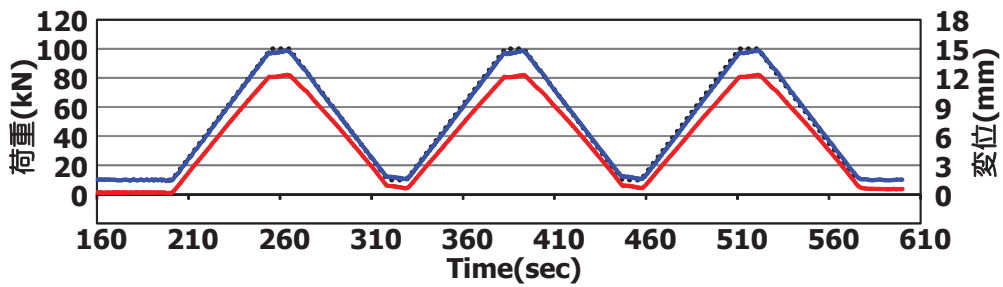


(2)ジャッキシステム、反力フレーム、ダミー試験体のピット内支持構造に設置した状況

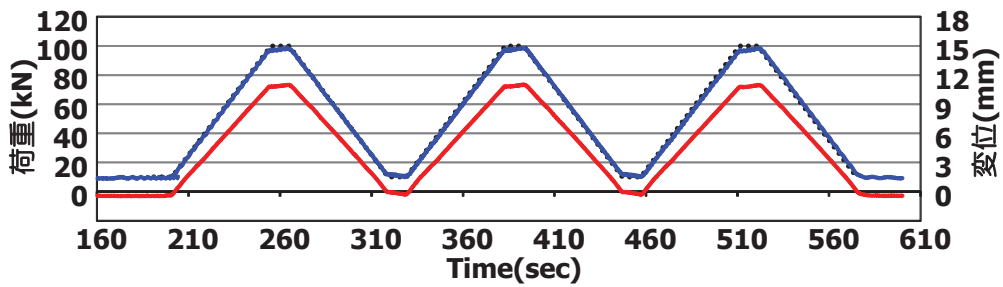
図 3.1.3.1-37 PTS 模擬試験設備の外観



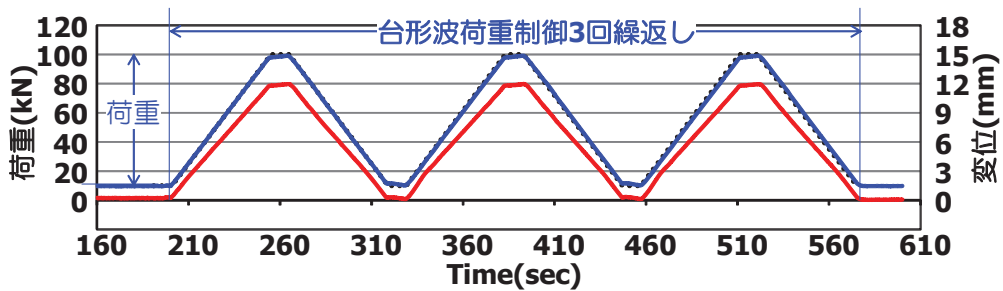
(1)測定位置#1



(2)測定位置#2



(3)測定位置#3



(4)測定位置#4

図 3.1.3.1-38 載荷設備の試運転結果(油圧ジャッキの荷重と変位の時刻歴)
最大荷重 100 kN、最小荷重 10 kN (R=0.1)

③加熱・冷却設備

a. 確認事項

図 3.1.3.1-39 は加熱・冷却設備の系統図を示す。試験装置は、4 系統(冷凍機循環ライン、冷却水循環ライン、冷却水スプレーライン、ピット戻りライン)の冷却水ラインと試験体加熱ヒーター、試験体で構成される。加熱・冷却設備の試運転により、PTS 模擬試験に必要な機能を有していることを総合的に確認する。

b. 試運転の内容及び結果

表 3.1.3.1-10 は設備仕様と試運転における試験内容を示す。以下に個々の設備に関する試運転内容と結果について示す。

i) 加熱ヒータ及び制御盤

図 3.1.3.1-40 に示す試験体加熱ヒータ表面に直接熱電対(K)を固定し、設定温度 40°C を制御信号としてヒータ出力を制御した。図 3.1.3.1-41 に昇温制御時のヒータ温度の時間経過を示す。グラフの通り、目標温度(40±2°C)に昇温し、温度制御できることを確認した。

ii) 冷却設備(水スプレー)

冷水貯留タンク内に約 100 m³ の冷却水を貯留した後バルブを開放して、図 3.1.3.1-42 に示すスプレーノズルに流量を約 3 m³/分で約 3 分給水して噴霧させた。噴霧状況はモニターにて確認した。図 3.1.3.1-43 に試運転時のスプレーノズル状況、図 3.1.3.1-44 に試運転時のスプレー流量の時間経過を示す。流量約 3m³/分にてスプレー噴霧に問題がないことを確認した。

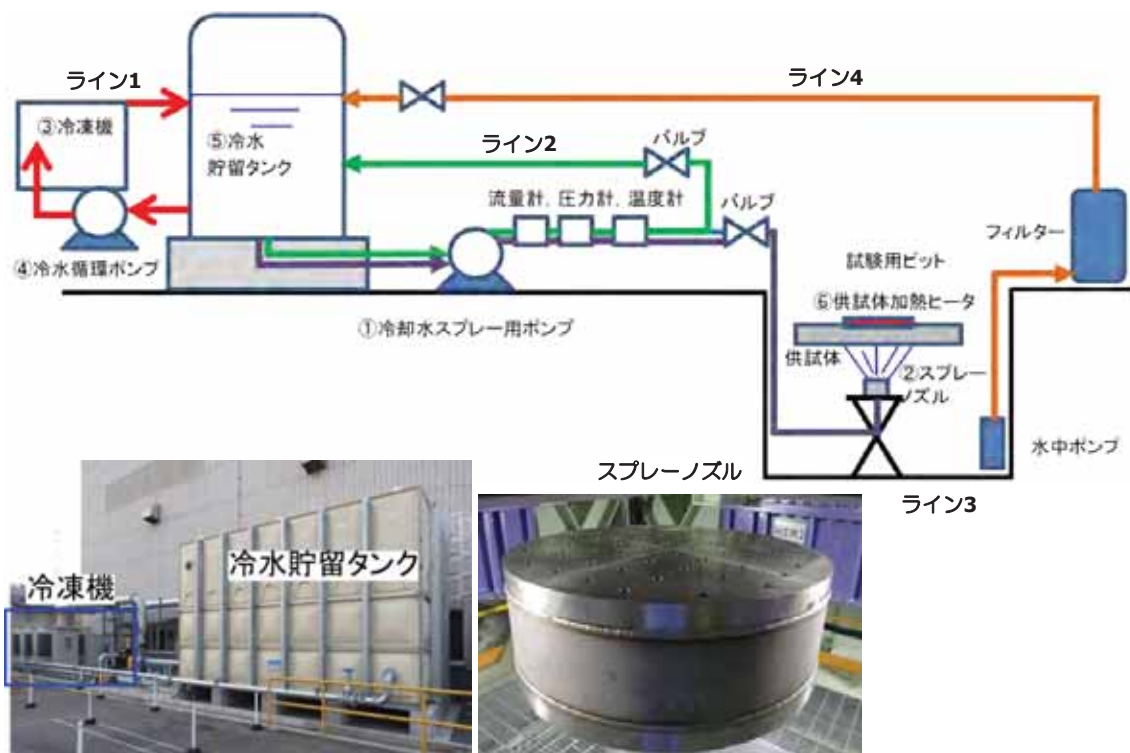


図 3.1.3.1-39 加熱・冷却設備系統図

表 3.1.3.1-10 加熱・冷却設備の仕様と試験内容

設備	設備仕様	試験内容
冷却水スプレー用ポンプ	掃出量 20m ³ /分、揚程 50m であること	<ul style="list-style-type: none"> ・タンクに貯留(100m³)した水を 7m³/分にてスプレーノズルに供給し、10 分間の動作確認を実施 (総合試験)
スプレーノズル	スプレー噴霧できること	
冷水貯留タンク	貯留容量が 100m ³ であること	
冷凍機本体	冷凍機能力が 500 kW であること	<ul style="list-style-type: none"> ・冷凍機、循環ポンプの動作確認。 ・各機器試運転にて起動停止に問題がないことを確認。(総合試験)
冷水循環ポンプ	掃出量 3m ³ /分、揚程 30m であること	
配管系統・制御盤	漏洩が無く、各機器の起動停止ができること	
加熱ヒータ及び制御盤	500℃まで昇温可能であること	<ul style="list-style-type: none"> ・ヒータ表面で 650℃まで昇温可能であることの確認 ・ヒータ単体で温度制御が可能であることを確認。



図 3.1.3.1-40 供試体加熱ヒータ

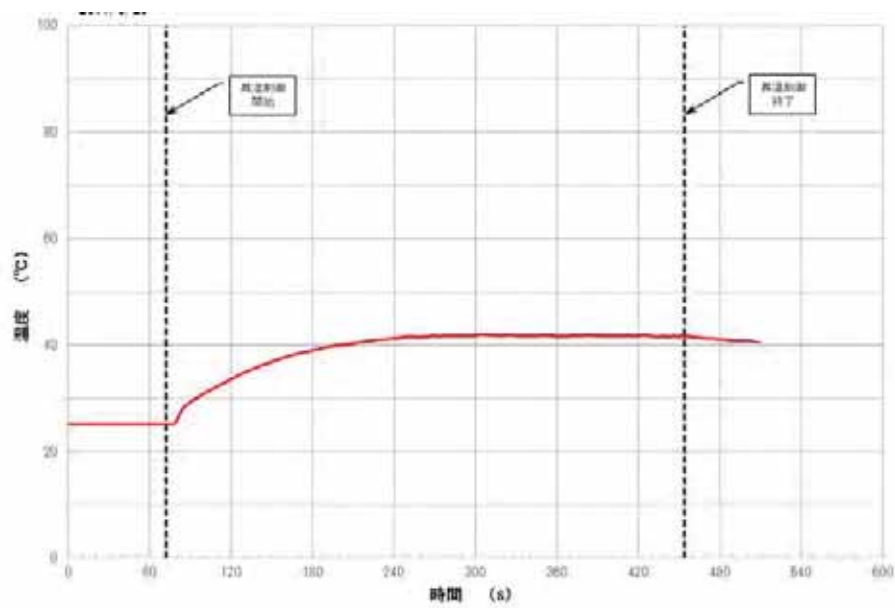


図 3.1.3.1-41 加熱設備試運転時におけるヒータ温度の時間経過

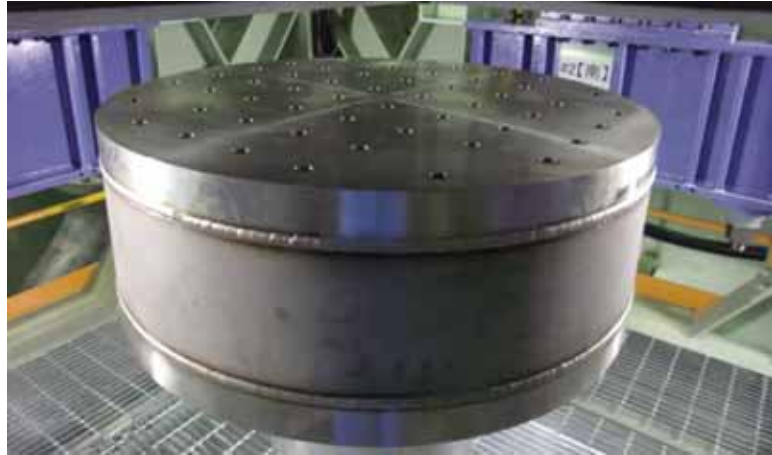


図 3.1.3.1-42 スプレーノズル

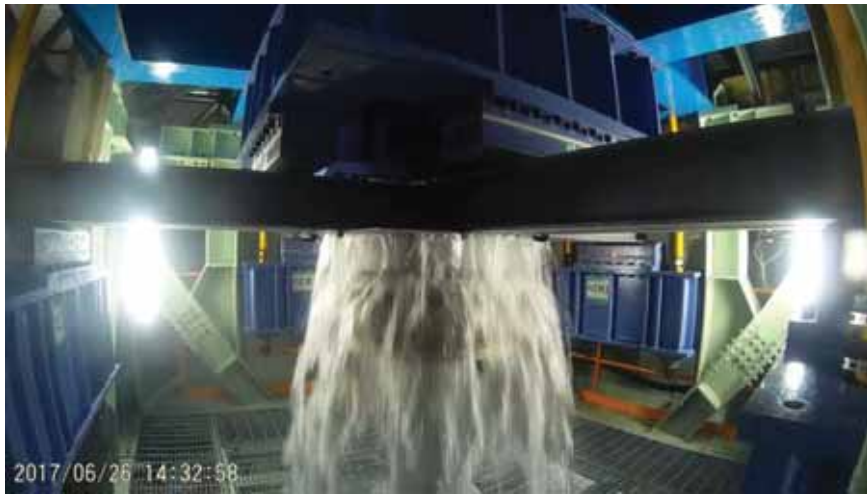


図 3.1.3.1-43 スプレー試運転状況

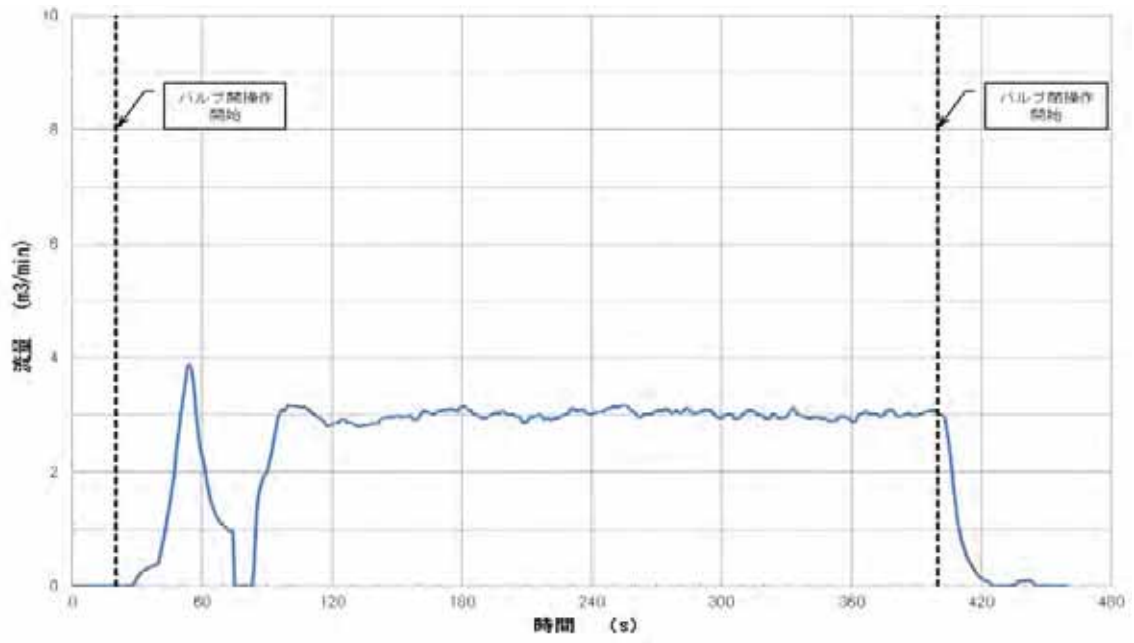


図 3.1.3.1-44 冷却設備試運転時のスプレー流量の時間経過

④疲労亀裂導入設備

a. 確認事項

図 3.1.3.1-45 は疲労亀裂導入設備の外観を示す。試験体に 1 軸の曲げ荷重を繰返し負荷させて、疲労亀裂を発生、進展させる機能を有する。疲労亀裂導入設備に対し、ダミー試験体を用いて、亀裂進展に必要な繰返し荷重が可能かどうかを変位制御試験条件にて確認する。

b. 試運転の要領

試運転には H 型鋼の 1 軸ダミー試験体を用いた。

設備仕様と試運転における試験内容を表 3.1.3.1-11 に示す。試験では、アクチュエータ内蔵の変位計でアクチュエータの変位を計測した。

c. 試運転結果

アクチュエータの変位時刻歴を図 3.1.3.1-46 に示す。この図より、ストローク及び載荷速度は試運転条件を満たすことを確認した。



図 3.1.3.1-45 疲労亀裂導入設備

表 3.1.3.1-11 設備仕様と試運転条件

条件	設備仕様	試験内容
ストローク	±10 mm(調整代±40 mm 除く)	ストロークが±10 mmであることを確認
載荷速度	0.1Hz(最低限 0.05Hz)	載荷速度 0.1Hz で荷重付与が可能であることを確認
制御	荷重制御	荷重制御が仕様を満足することを 変位制御条件で確認
荷重	800 kN まで	(変位制御のため、別途試験にて確認)
波形	サイン波形	サイン波形の荷重付与が可能であることを確認
繰返し回数	2×10 ⁶ 回	制御プログラムが正常に動作するかを確認

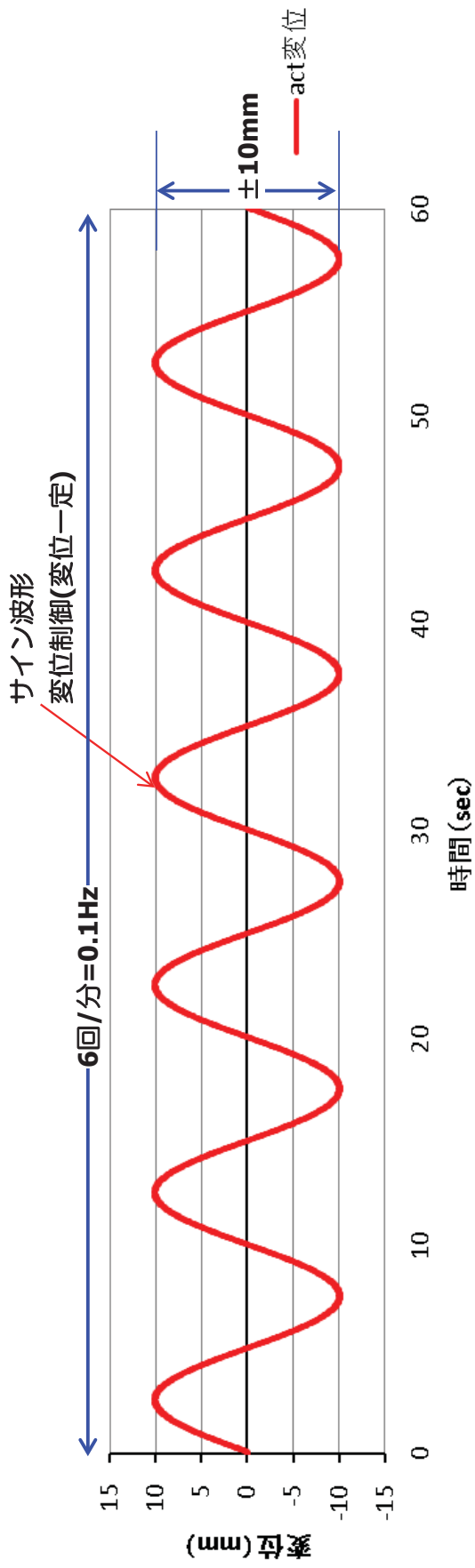


図 3.1.3.1-46 アクチュエータの変位時刻歴

(4) PTS模擬試験設備検証試験のまとめ

実機の熱過渡条件下における熱衝撃(PTS)事象を模擬した試験実施のため、十字型試験体を用い、荷重負荷機構と加熱・水冷機構を有する PTS 模擬試験設備と疲労亀裂導入設備を整備した。

その結果、各設備が所定の運転条件に対して、所定の合格判定値を達成しており、試験設備としての機能を満足していることを確認した。主な結果を以下に示す。

- ・ PTS 模擬試験の試験条件に基づいて、PTS 模擬試験に用いる載荷設備と加熱・冷却設備(PTS 模擬試験設備)、並びに疲労亀裂導入設備の仕様を検討し、それぞれの設備の詳細設計を行った。
- ・ PTS 模擬試験設備及び疲労亀裂導入設備を構成する機器、構造物等を調達、製作し、組立と据付を行った。
- ・ PTS 模擬試験設備及び疲労亀裂導入設備の試運転を行い、これらの設備が PTS 模擬試験の実施に必要な性能を満たしていることを確認した。

引き続き PTS 模擬試験の実施において、これらの設備の活用を図る。

3.1.3.2 十字型試験体の製作

クラッド下き裂を有する大型の十字型試験体を製作するために、試験体への応力整流化スリットや放電加工(EDM)ノッチの加工、疲労予き裂導入を一部の試験体に対して実施した。十字型試験体の製作フローを図 3.1.3.2-1、試験体の製作手順を図 3.1.3.2-2～図 3.1.3.2-4 に示す。

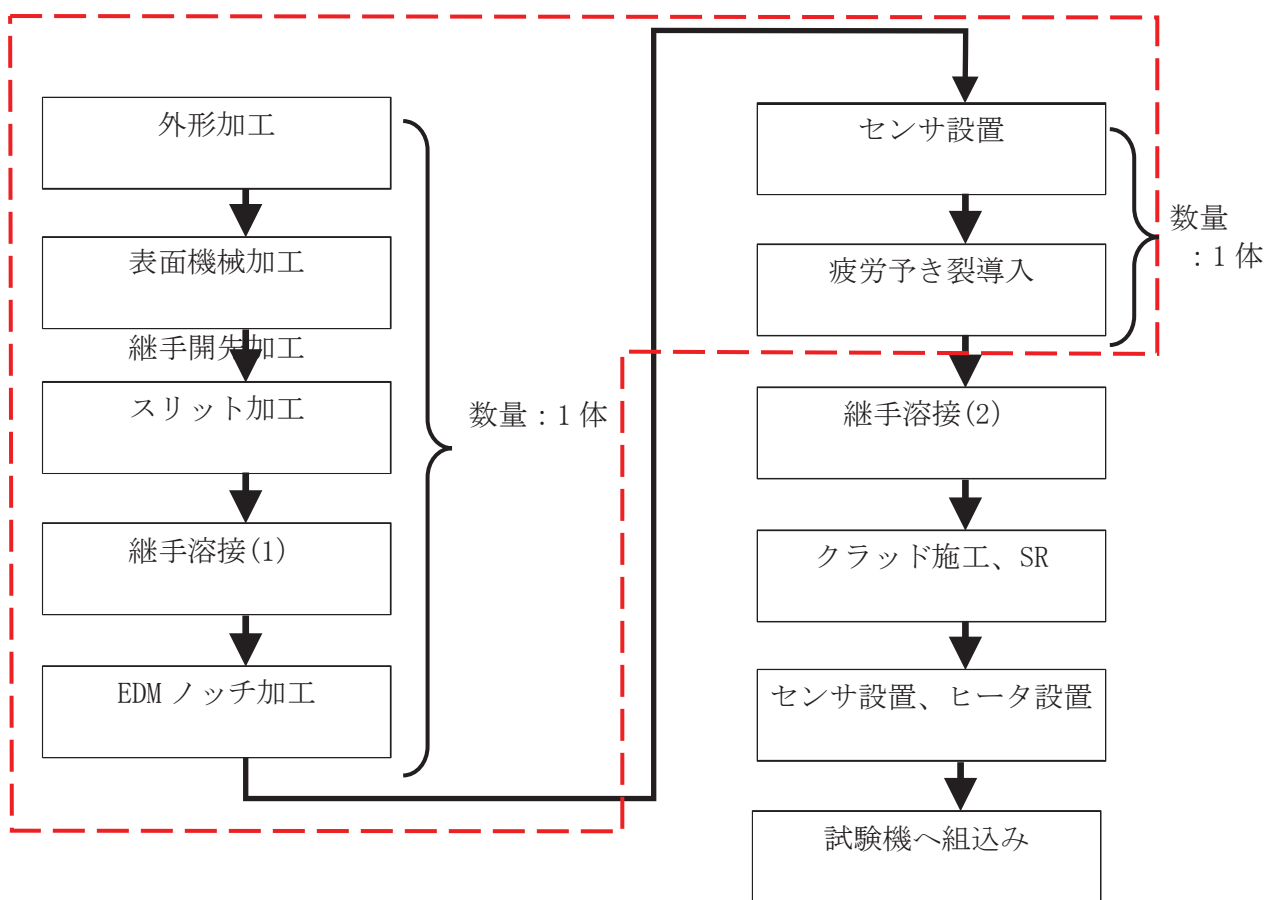


図 3.1.3.2-1 十字型試験体の製作フロー
(平成 29 年度の実施項目は破線の範囲)

① 外形加工

図 3.1.3.2-2 の形に外形加工した。

② 表面機械加工

③ 応力整流化スリット加工

応力整流化スリット形状を以下に示す。

一般部：長さ 200mm×幅 10mm

角部：長さ 190mm×幅 10mm

④ 継手溶接

図 3.1.3.2-3 に示すように、脆化材部分とアーム部を溶接で接続した。

(注)作業工程の都合により 1 軸のみ溶接し、

⑦の疲労予き裂導入後に 2 軸に継手施工

する。

⑤ EDM ノッチ加工

想定き裂より少し小さいサイズのノッチを EDM(放電加工)により施工した。

⑥ センサ設置

疲労予き裂導入のためのセンサを取付ける。センサは、荷重のバランスを確認するためのひずみゲージ及びき裂進展確認のための PDM(電気ポテンシャル法)入出力端子を設置した。

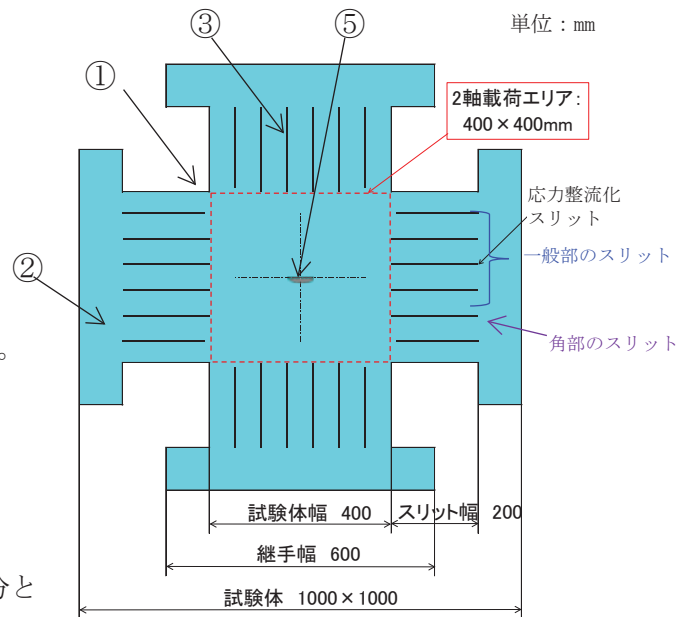


図 3.1.3.2-2 製作手順(1)

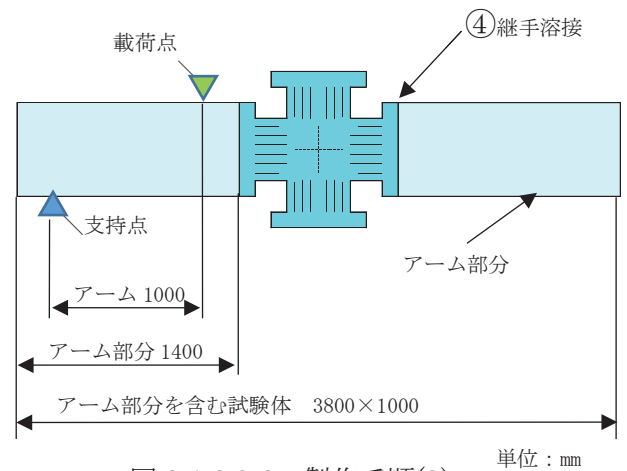


図 3.1.3.2-3 製作手順(2)

⑦ 疲労予き裂導入

図 3.1.3.2-4 に示すように、EDM によるノッチに繰返し荷重を与え、疲労予き裂を導入、進展させた。荷重負荷は、き裂直交方向に曲げ荷重を与えた。

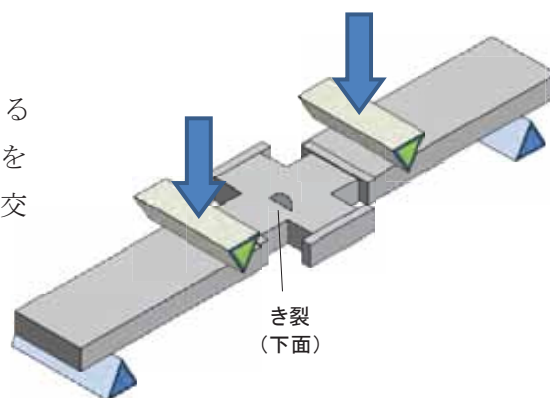


図 3.1.3.2-4 製作手順(3)

(1) 試験体採取方法

十字型試験体中央部製作に用いる材料は、図 3.1.3.2-5 に示す十字型試験体用原子炉压力容器鋼脆化材(JSW 符号 3)で示される部分を切り出して適用した。切り出した材料は、JSW の刻印が残らない方の材料を用いることから新たに JSW-3-PTS-5 の刻印を打刻した。刻印はローストレス刻印(先端 0.8mmMin.)により打刻した。

タブ板の板取形状を図 3.1.3.2-6 に示す。切り出した材料は、新たに WE045-1、WE045-2 の刻印を打刻した。

番号	試験体記号(刻印)
—	JSW 符号 : 3(16D562-1-3)
①	JSW-3-PTS-5

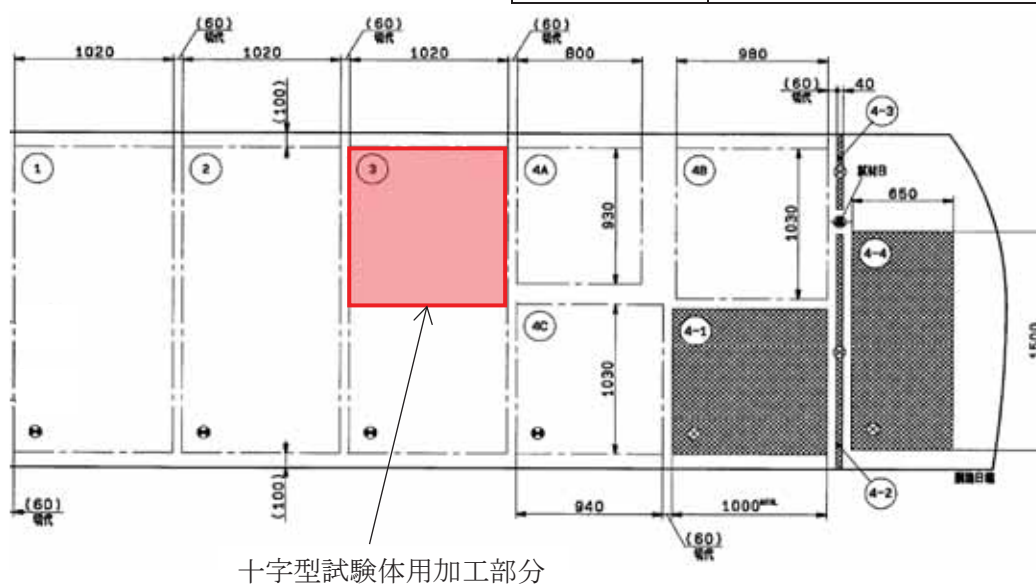
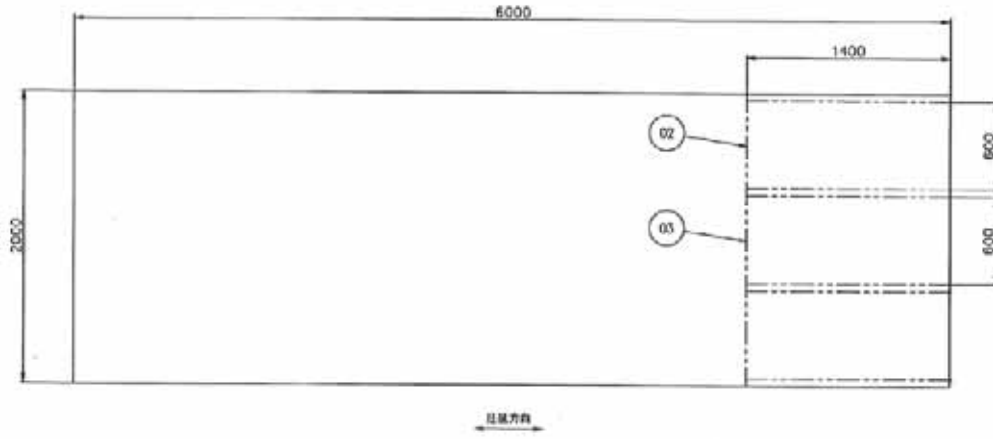


図 3.1.3.2-5 十字型試験体採取位置

番号	試験体記号(刻印)
②	WE045-1
③	WE045-2



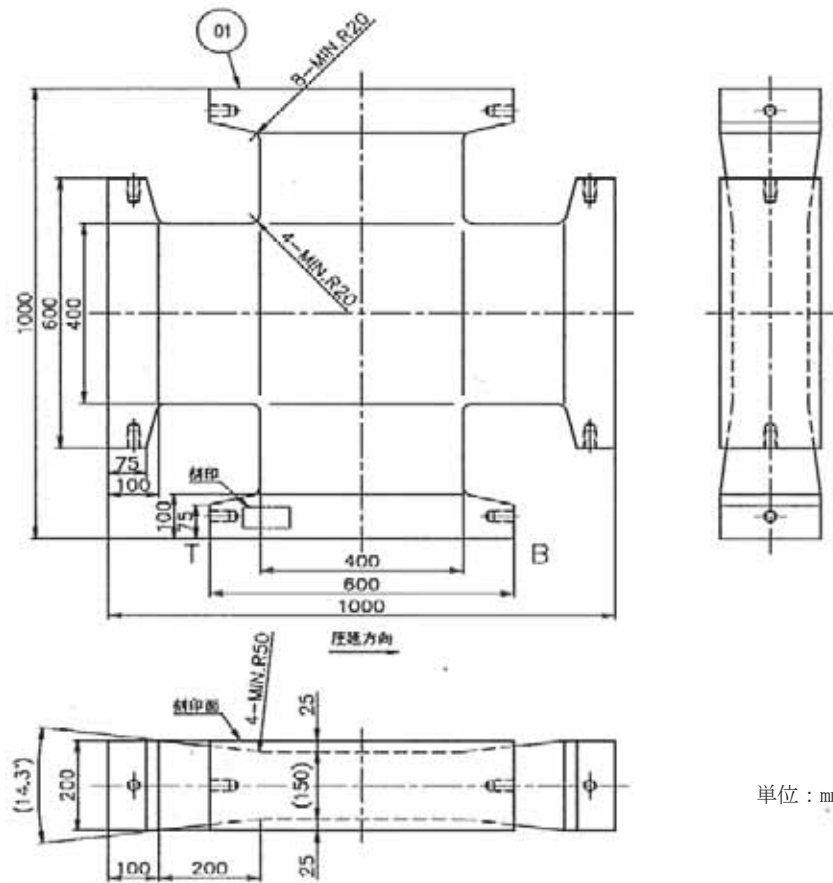
単位 : mm

図 3.1.3.2-6 タブ板採取位置

(2) 外形加工及び試験体中央部の応力整流化スリット加工

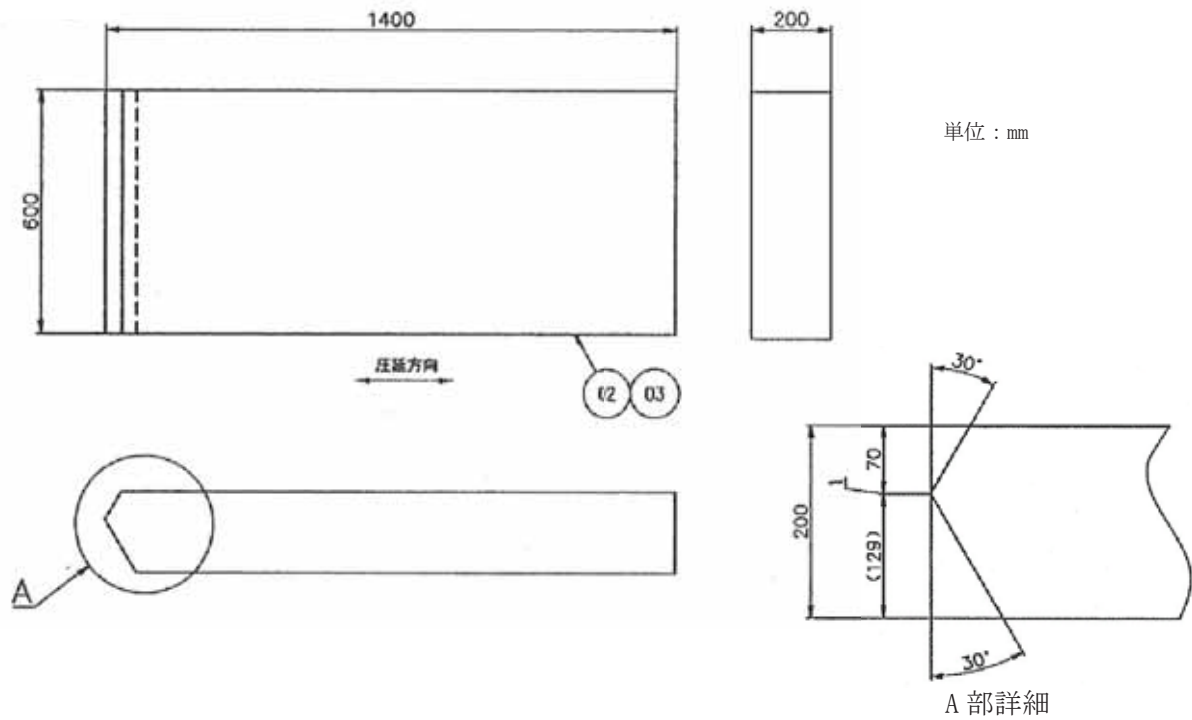
(a) 外形加工

十字型試験体中央部として切り出した板材を図 3.1.3.2-7 の状態に外形加工した。加工は切削加工で行った。タブ板の刻印番号 WE045-1 と WE045-2 に対して開先加工を行った。開先形状は図 3.1.3.2-8 の形状に加工し、十字型試験体中央部には開先加工は行わないこととした。



単位：mm

図 3.1.3.2-7 十字型試験体中央部外形加工



単位：mm

図 3.1.3.2-8 タブ板外形加工及び開先加工

(b) 応力整流化スリットの加工

応力整流化スリットは図 3.1.3.2-9 の状態に加工した。加工はワイヤーカットで行った。

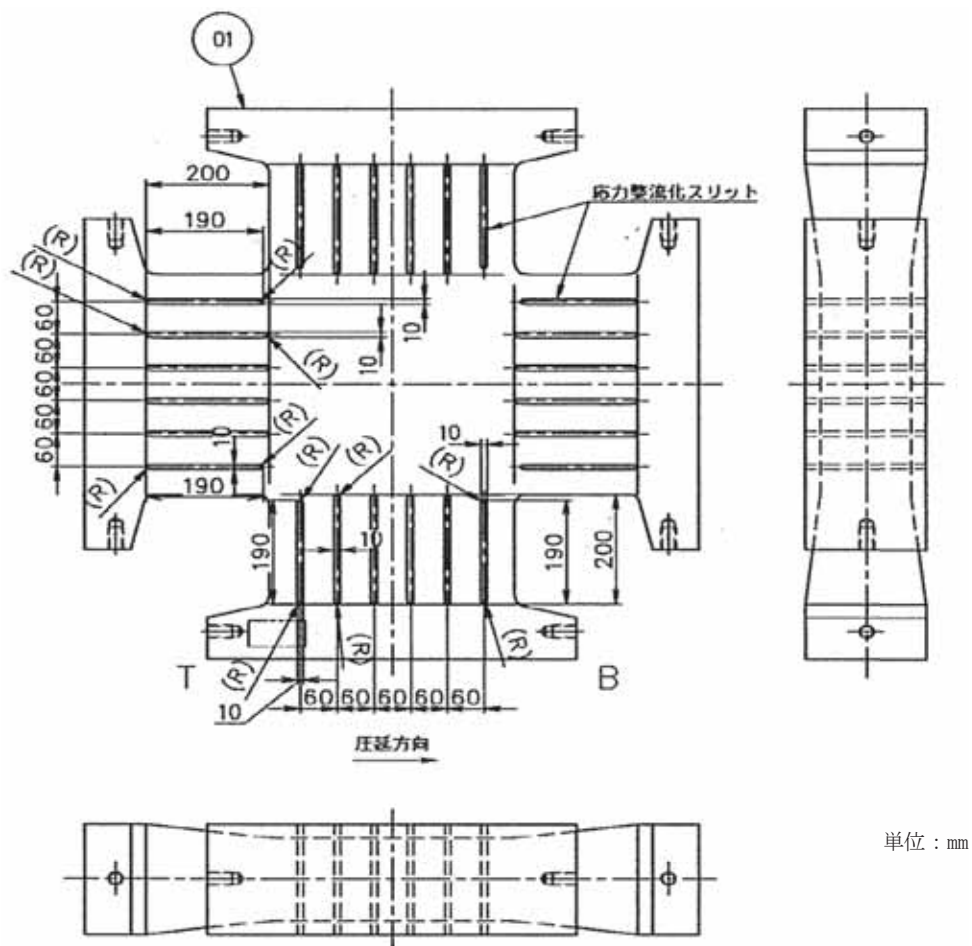


図 3.1.3.2-9 整流化スリットの加工

(3) 半楕円亀裂導入のための EDM スリット形状、加工

半楕円亀裂のスターターとなる EDM スリットは図 3.1.3.2-10 の状態に加工した。加工方法は EDM(放電加工)を用いた。主な加工条件を表 3.1.3.2-1 に示す。

表 3.1.3.2-1 EDM スリットの加工条件

項目	EDM加工条件
き裂長さ	$2C_0 = 60 \pm 0.1 \text{mm}$ (目標値)
き裂深さ	$a_0 = 9 \pm 0.1 \text{mm}$
スリット幅	電極厚さ : 0.25mm

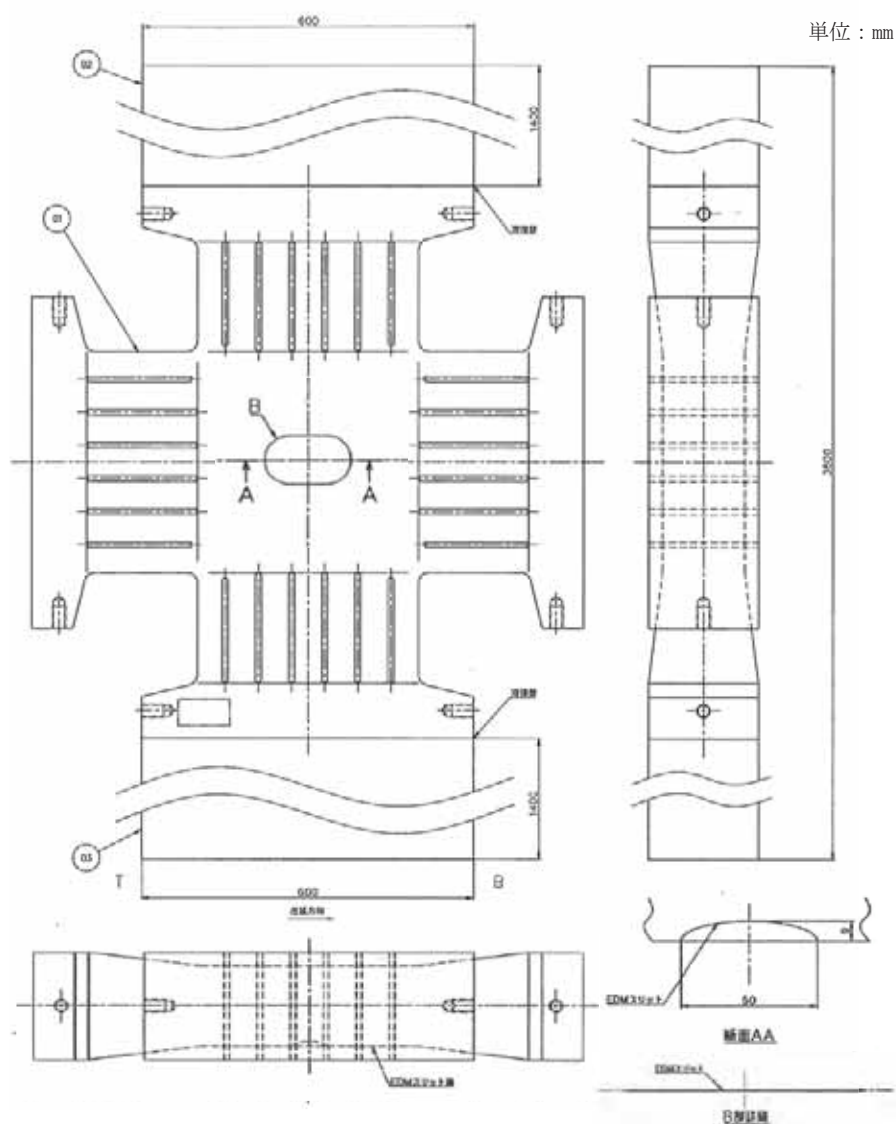


図 3.1.3.2-10 EDM スリット加工

(4) タブ板溶接(溶接金属、タブ板材料仕様、開先形状、溶接条件)

溶接材料 LB-L96(AWS A5.5 E9016-G 6)及びタブ板(SQV2B(JIS 材))を用いて、十字型試験体中央部のタブ板 2 体を溶接した。溶接材料の銘柄を表 3.1.3.2-2 に示す。タブ板は十字型試験体側の加工を極力減らすため、図 3.1.3.2-11 に示すように K 型開先を加工している。溶接条件を表 3.1.3.2-3 に示す。溶接完了後の検査記録を添付 4 及び 5 に示す。

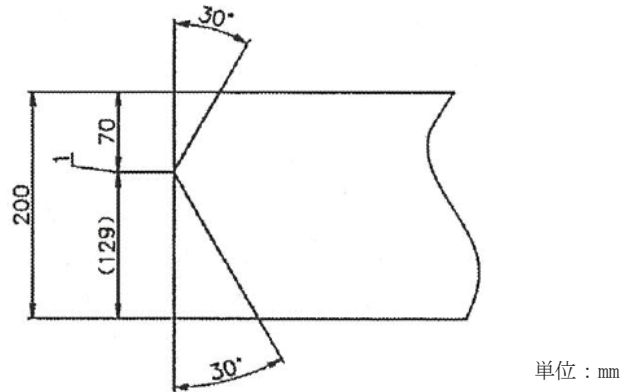


図 3.1.3.2-11 開先形状

表 3.1.3.2-2 溶接材料

銘柄	規格
溶接棒：LB-L96	AWS A5.5 E9016-G

表 3.1.3.2-3 溶接条件

項目	実績	
	被覆アーク溶接	
識別記号	WE045-1	WE045-2
電流 [A]	150-210	150-210
電圧 [V]	22-26	23-25
速度 [cm/min.]	8-9	8-9
予熱温度 [°C]	≥261	≥259
パス間温度 [°C]	≤286	≤275
直後熱条件	354-385°C×4h 以上	356-389°C×4h 以上

(5) 疲労予亀裂導入

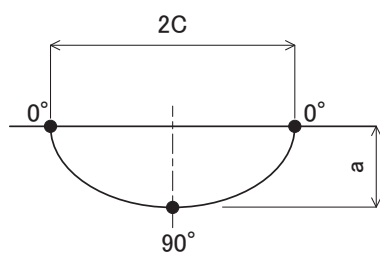
(a) 荷重条件

最大荷重は、疲労き裂導入後の破壊試験を考慮し、最終の最大応力拡大係数が $15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下になるように設定した。また、クラッド溶接により試験体表面はき裂が 1mm 程度埋まるため、き裂深さの狙い値は、 $11\text{mm}\sim 12\text{mm}$ とした。

目安として初期、後期の各時期での最大応力を設定する。最大荷重条件を表 3.1.3.2-4 に示す。

表 3.1.3.2-4 疲労予き裂導入時の最大荷重条件

時期	表面長さ 2C(mm)	き裂深さ a(mm)	(*1) 最大荷重 Pmax(kgf)	最大応力		(*2) 最大応力拡大係数 Kmax(MPa√m)	
				σmax (kgf/mm ²)	σmax (MPa)	0° (表面)	90° (最深部)
初期	60	9.0	43,000	12.4	121.9	12.2	19.2
後期	60	(*3)9.0	31,500	9.1	89.3	9.0	14.0
	61	12.0	31,500	9.1	89.3	11.2	(*4) 15.0



(*1) : 試験装置ロードセルの荷重

(*2) : Newman-Raju の式

(*3) : き裂の発生が PDM で確認できれば荷重を低下させる。

(*4) : 最終 K 値は $15\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下と設定

(b)PDM 計測によるき裂計測

疲労き裂の進展は、PDM 電圧出力を記録して、き裂深さを推定した。実際のき裂形状は、破壊試験後の破面観察により評価にフィードバックする。

計測位置を図 3.1.3.2-12 に示す。スリットを挟んだ±3mm 位置に電圧線を、±25mm の位置に電流線をパーカッションウェルダで取付けた。電流は小型平板試験体と同様に 5A とした。

初期き裂の深さが 9mm で最終の深さが 12mm になる時の PDM 電圧出力(V/V_0 ※)を FE 解析と小型平板試験体の結果から決めた。図 3.1.3.2-13 に疲労き裂深さと電圧出力の関係を示す。図中の△、□、◇は小型平板ダミー試験体を用いた疲労予き裂導入試験の結果、青の実線は試験結果の近似曲線、●は疲労予き裂深さ 3mm(進展量 3mm)の時の小型平板試験体の FE 解析結果、●は疲労予き裂深さ 3mm(進展量 3mm)の時の十字型試験体の FE 解析結果、赤の破線は小型平板試験体の解析と試験の差を十字型試験体に当てはめた場合の近似曲線である。

疲労予き裂深さ 3mm の時の十字型試験体の PDM 電圧出力(V/V_0)は 1.2 となった。小型平板試験体では解析と試験で V/V_0 の差が 0.05(疲労予き裂深さ 3mm)あったため、十字型試験体もその差を考慮し、 $V/V_0=1.25(=1.20+0.05)$ を目標に疲労予き裂の導入を行った。

※ V/V_0 =疲労き裂中に計測した電圧/き裂 0mm の時に計測した電圧

単位：mm

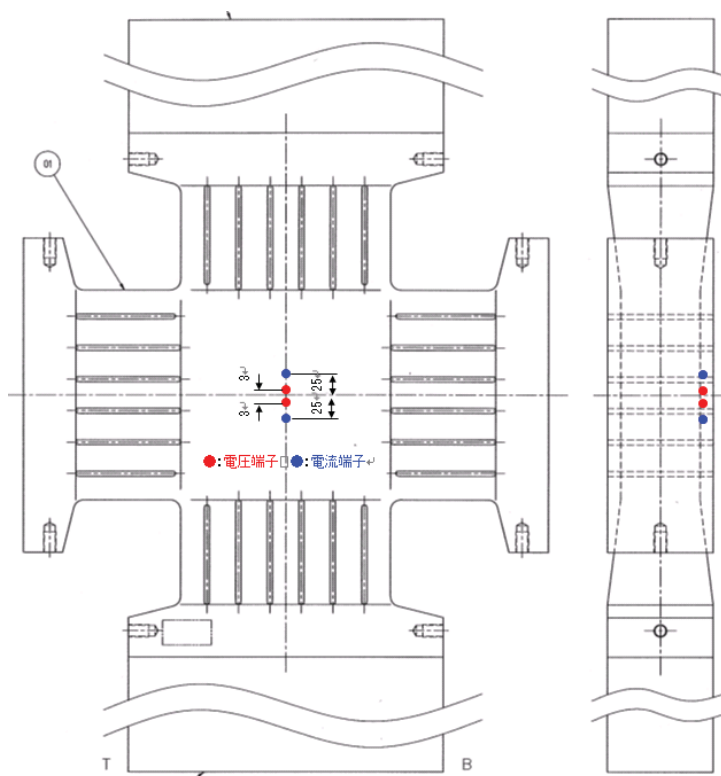


図 3.1.3.2-12 PDM 計測位置

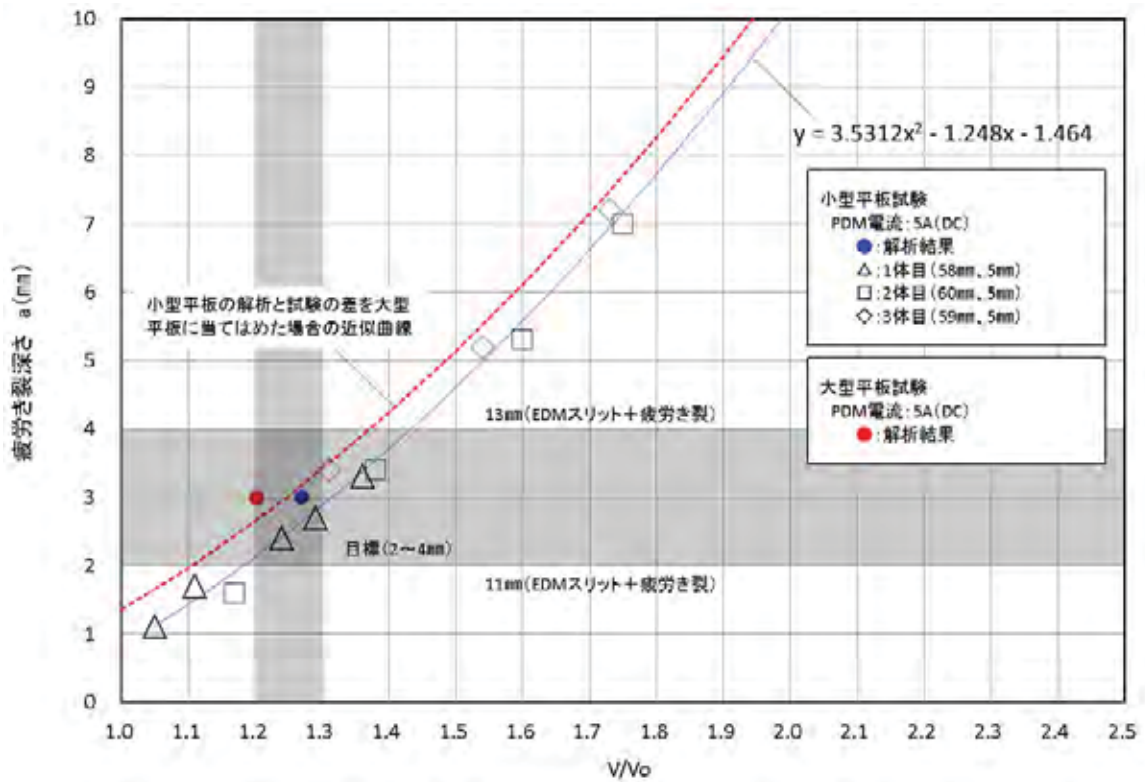


図 3.1.3.2-13 疲労き裂深さと電圧出力の関係

(c)ひずみ計測

荷重のバランスを確認する目的で試験体のひずみを計測した。計測位置を図 3.1.3.2-14、
図 3.1.3.2-15 に示す。

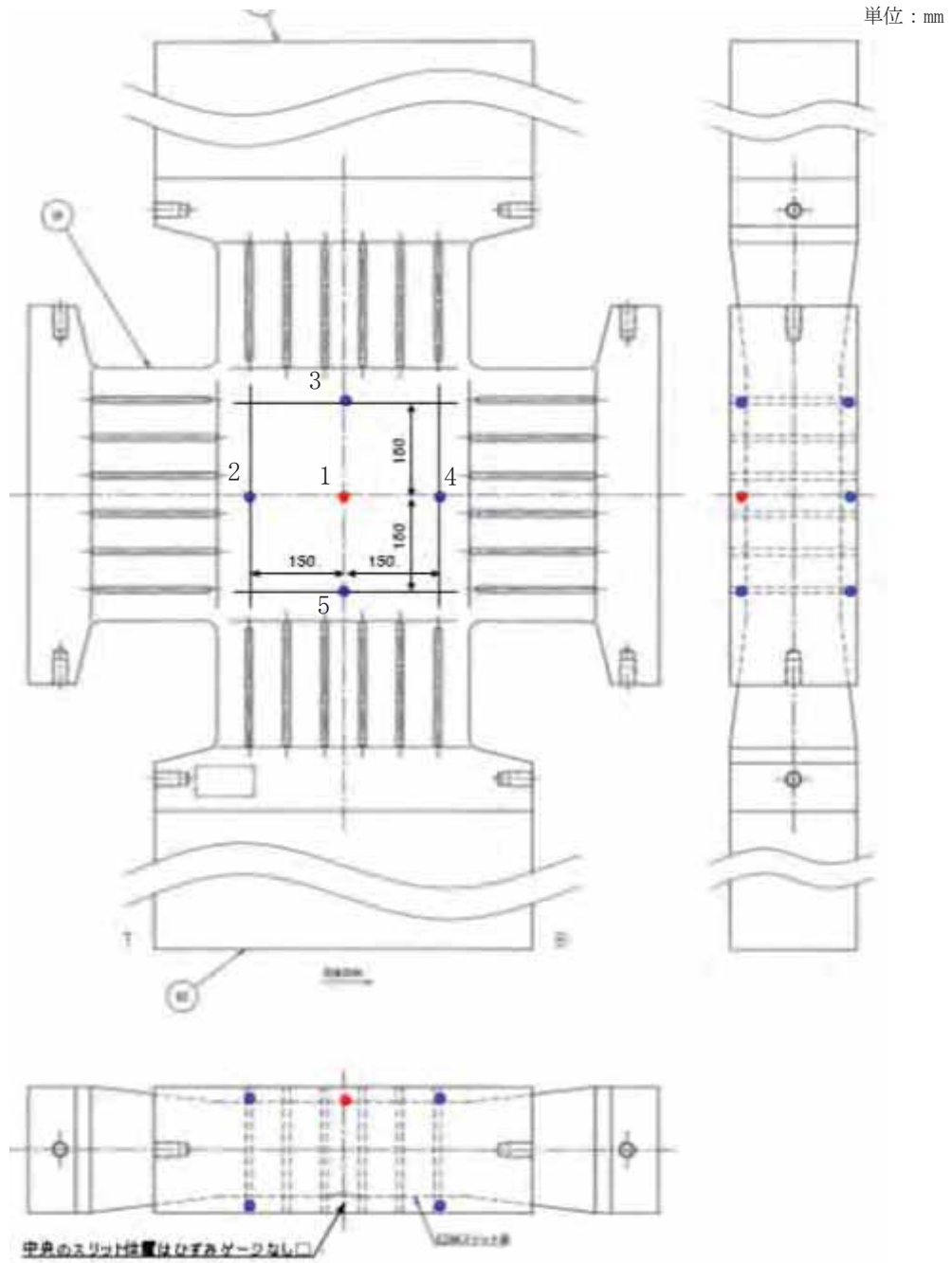
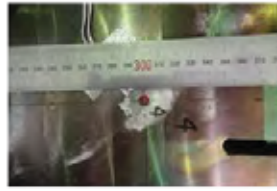
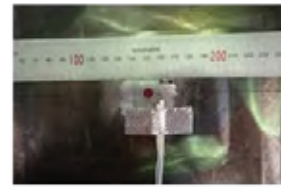
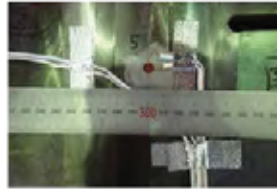
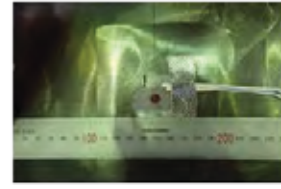


図 3.1.3.2-14 ひずみゲージ取付位置(1/2)

【スリットなし側】



【スリットあり側】

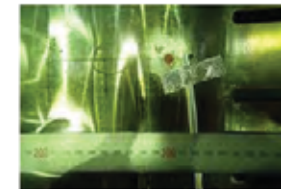
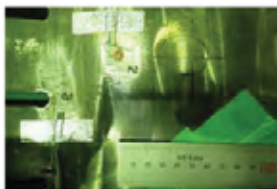
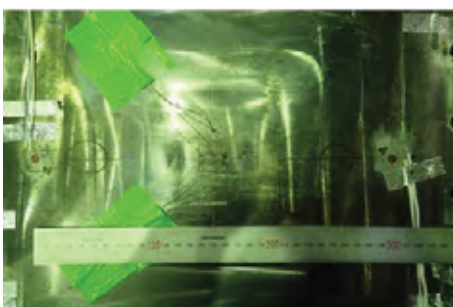
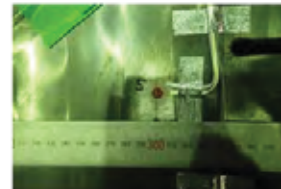


図 3.1.3.2-15 ひずみゲージ取付位置(2/2)

(d) 疲労予き裂導入結果

疲労予き裂導入結果を表 3.1.3.2-5 に示す。疲労予き裂の導入は予定通り完了した。V/V₀ と繰返し回数の関係を図 3.1.3.2-16、表 3.1.3.2-6 に示す。また、疲労予き裂前のアクチュエータ荷重-ひずみの関係を図 3.1.3.2-17、疲労予き裂前の静的ひずみバランス(計測点 2 下, 4 下)確認結果を図 3.1.3.2-18 に示す。荷重が大きくなるほどズレは小さくなり最終的に 1% 以下となったため、荷重のバランスは問題なかった。

表 3.1.3.2-5 疲労予き裂導入結果



番号	総繰返し回数 (cycle)	最終 V/V ₀	スリット端部からの表面き裂長さ (mm)	
			東側	西側
JSW-3-PTS-5	390,000	1.26	0mm	0mm

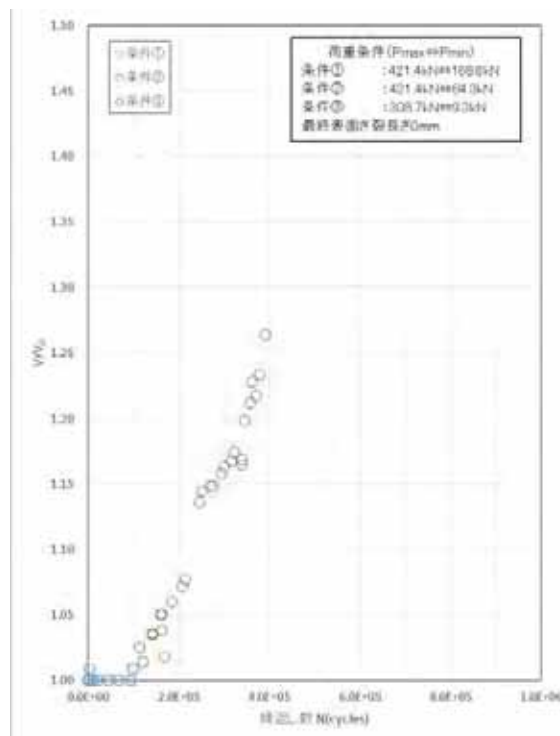


図 3.1.3.2-16 V/V₀ と繰返し回数の関係

表 3.1.3.2-6 V/V₀と繰返し回数の関係(デジタル値)

最大荷重 P _{max} (kN)	最小荷重 P _{min} (kN)	周波数 f (Hz)	繰返し数 N (cycles)	値	電圧 (mv)								V/V ₀	
					A通電				B通電					平均
					1回目	2回目	3回目	平均	1回目	2回目	3回目	平均		
421.4	168.6	-	0	ゼロずれ	0.0097	0.0094	0.0099	-0.0122	-0.0155	-0.0142	-0.0141	0.0126	0.0124	1.0000
				測定値	-0.0028	-0.0030	-0.0022	-0.0017	-0.0017	-0.0016				
421.4	168.6	0.1,0.2,0.3	2,000	ゼロずれ	0.0121	0.0124	0.0127	-0.0121	-0.0113	-0.0112	-0.0111	0.0129	0.0125	1.0088
				測定値	0.0007	0.0001	0.0002	0.0016	0.0021	0.0014				
421.4	168.6	0.1,0.2,0.3	2,000	ゼロずれ	0.0085	0.0087	0.0088	-0.0125	-0.0160	-0.0158	-0.0152	0.0123	0.0124	1.0007
				測定値	-0.0038	-0.0038	-0.0038	-0.0033	-0.0036	-0.0032				
421.4	168.6	0.3	10,000	ゼロずれ	0.0132	0.0133	0.0131	-0.0122	-0.0111	-0.0110	-0.0110	0.0124	0.0123	1.0000
				測定値	0.0012	0.0009	0.0010	0.0014	0.0014	0.0014				
421.4	168.6	0.3	10,000	ゼロずれ	-0.0063	-0.0060	-0.0057	0.0124	-0.0060	-0.0057	-0.0051	-0.0124	0.0124	1.0000
				測定値	0.0063	0.0063	0.0065	-0.0182	-0.0182	-0.0175				
421.4	168.6	0.3	20,383	ゼロずれ	-0.0054	-0.0056	-0.0049	0.0125	-0.0055	-0.0047	-0.0045	-0.0119	0.0122	1.0000
				測定値	0.0070	0.0070	0.0075	-0.0172	-0.0167	-0.0166				
421.4	168.6	0.3	45,000	ゼロずれ	-0.0045	-0.0043	-0.0040	0.0122	-0.0040	-0.0035	-0.0036	-0.0104	0.0113	1.0000
				測定値	0.0077	0.0078	0.0083	-0.0103	-0.0161	-0.0160				
421.4	168.6	0.3	68,000	ゼロずれ	-0.0050	-0.0049	-0.0048	0.0121	-0.0048	-0.0046	-0.0040	-0.0122	0.0121	1.0000
				測定値	0.0070	0.0070	0.0075	-0.0170	-0.0169	-0.0160				
421.4	168.6	0.3	93,000	ゼロずれ	-0.0065	-0.0060	-0.0055	0.0120	-0.0062	-0.0060	-0.0050	-0.0122	0.0121	1.0000
				測定値	0.0055	0.0060	0.0064	-0.0183	-0.0182	-0.0172				
421.4	168.6	0.3	100,000	ゼロずれ	0.0004	0.0000	0.0004	0.0126	0.0005	0.0001	0.0013	-0.0123	0.0125	1.0088
				測定値	0.0125	0.0127	0.0135	-0.0120	-0.0120	-0.0111				
421.4	168.6	0.3	113,446	ゼロずれ	-0.0037	-0.0035	-0.0034	0.0124	-0.0035	-0.0027	-0.0033	-0.0130	0.0127	1.0249
				測定値	0.0088	0.0089	0.0088	-0.0163	-0.0162	-0.0160				
421.4	168.6	0.3	121,000	ゼロずれ	0.0013	0.0012	0.0019	0.0127	0.0014	0.0019	0.0021	-0.0124	0.0126	1.0141
				測定値	0.0140	0.0143	0.0143	-0.0108	-0.0106	-0.0103				
421.4	84.3	0.3	141,000	ゼロずれ	-0.0035	-0.0036	-0.0033	0.0126	-0.0033	-0.0033	-0.0032	-0.0131	0.0128	1.0357
				測定値	0.0090	0.0090	0.0093	-0.0165	-0.0163	-0.0162				
421.4	84.3	0.3	161,000	ゼロずれ	-0.0030	-0.0031	-0.0022	0.0128	-0.0030	-0.0021	-0.0019	-0.0132	0.0130	1.0505
				測定値	0.0100	0.0099	0.0102	-0.0160	-0.0155	-0.0151				
308.7	9.3	0.3	161,000	ゼロずれ	-0.0025	-0.0028	-0.0026	0.0127	-0.0026	-0.0024	-0.0020	-0.0130	0.0129	1.0384
				測定値	0.0100	0.0100	0.0102	-0.0155	-0.0155	-0.0150				
308.7	9.3	0.3	167,000	ゼロずれ	-0.0020	-0.0022	-0.0033	0.0183	-0.0025	-0.0029	-0.0034	-0.0069	0.0126	1.0182
				測定値	0.0153	0.0154	0.0168	-0.0100	-0.0099	-0.0095				
308.7	9.3	0.3	184,000	ゼロずれ	0.0009	0.0015	0.0010	0.0129	0.0015	0.0015	0.0018	-0.0133	0.0131	1.0599
				測定値	0.0135	0.0143	0.0143	-0.0126	-0.0115	-0.0111				
308.7	9.3	0.3	207,000	ゼロずれ	-0.0040	-0.0036	-0.0016	0.0135	-0.0042	-0.0030	-0.0020	-0.0130	0.0133	1.0721
				測定値	0.0098	0.0100	0.0116	-0.0170	-0.0162	-0.0150				
308.7	9.3	0.3	213,000	ゼロずれ	0.0011	0.0011	0.0022	0.0134	0.0010	0.0010	0.0024	-0.0133	0.0133	1.0774
				測定値	0.0148	0.0143	0.0155	-0.0124	-0.0120	-0.0110				
308.7	9.3	0.3	245,000	ゼロずれ	0.0017	0.0023	0.0021	0.0142	0.0020	0.0034	0.0040	-0.0139	0.0141	1.1367
				測定値	0.0159	0.0163	0.0165	-0.0118	-0.0106	-0.0100				
308.7	9.3	0.3	251,000	ゼロずれ	0.0046	0.0048	0.0052	0.0145	0.0054	0.0055	0.0057	-0.0139	0.0142	1.1448
				測定値	0.0195	0.0192	0.0193	-0.0083	-0.0084	-0.0083				
308.7	9.3	0.3	269,000	ゼロずれ	-0.0034	-0.0028	-0.0013	0.0142	-0.0022	-0.0015	-0.0010	-0.0143	0.0142	1.1488
				測定値	0.0109	0.0116	0.0125	-0.0163	-0.0160	-0.0152				
308.7	9.3	0.3	275,000	ゼロずれ	0.0006	0.0003	0.0008	0.0142	0.0005	0.0010	0.0017	-0.0142	0.0142	1.1488
				測定値	0.0145	0.0146	0.0153	-0.0135	-0.0130	-0.0129				
308.7	9.3	0.3	293,000	ゼロずれ	-0.0050	-0.0046	-0.0042	0.0142	-0.0044	-0.0046	-0.0025	-0.0144	0.0143	1.1582
				測定値	0.0091	0.0098	0.0100	-0.0187	-0.0187	-0.0174				
308.7	9.3	0.3	299,000	ゼロずれ	-0.0005	-0.0006	-0.0001	0.0141	-0.0004	0.0000	-0.0001	-0.0147	0.0144	1.1636
				測定値	0.0136	0.0136	0.0139	-0.0151	-0.0150	-0.0145				
308.7	9.3	0.3	316,000	ゼロずれ	-0.0029	-0.0024	-0.0023	0.0143	-0.0026	-0.0022	-0.0012	-0.0146	0.0145	1.1677
				測定値	0.0114	0.0119	0.0120	-0.0170	-0.0168	-0.0160				
308.7	9.3	0.3	322,000	ゼロずれ	0.0000	0.0000	0.0018	0.0145	-0.0002	0.0005	0.0020	-0.0146	0.0145	1.1744
				測定値	0.0144	0.0145	0.0163	-0.0149	-0.0138	-0.0128				
308.7	9.3	0.3	339,000	ゼロずれ	-0.0038	-0.0022	-0.0005	0.0145	-0.0023	-0.0011	-0.0007	-0.0144	0.0145	1.1690
				測定値	0.0110	0.0123	0.0137	-0.0169	-0.0155	-0.0150				
308.7	9.3	0.3	339,000	ゼロずれ	-0.0020	-0.0014	-0.0017	0.0144	-0.0019	-0.0016	-0.0015	-0.0144	0.0144	1.1650
				測定値	0.0123	0.0128	0.0131	-0.0160	-0.0162	-0.0160				
308.7	9.3	0.3	345,000	ゼロずれ	-0.0020	-0.0020	-0.0020	0.0145	-0.0020	-0.0013	-0.0012	-0.0152	0.0148	1.1987
				測定値	0.0125	0.0123	0.0126	-0.0167	-0.0167	-0.0167				
308.7	9.3	0.3	356,454	ゼロずれ	-0.0055	-0.0054	-0.0052	0.0144	-0.0058	-0.0041	-0.0039	-0.0156	0.0150	1.2121
				測定値	0.0091	0.0088	0.0093	-0.0204	-0.0204	-0.0197				
308.7	9.3	0.3	361,660	ゼロずれ	-0.0055	-0.0051	-0.0048	0.0147	-0.0052	-0.0049	-0.0049	-0.0157	0.0152	1.2283
				測定値	0.0094	0.0094	0.0100	-0.0208	-0.0208	-0.0204				
308.7	9.3	0.3	370,000	ゼロずれ	-0.0045	-0.0043	-0.0040	0.0149	-0.0043	-0.0035	-0.0034	-0.0153	0.0151	1.2175
				測定値	0.0104	0.0105	0.0109	-0.0193	-0.0193	-0.0184				
308.7	9.3	0.3	378,000	ゼロずれ	-0.0005	-0.0011	-0.0009	0.0154	0.0000	-0.0006	0.0000	-0.0152	0.0153	1.2337
				測定値	0.0147	0.0146	0.0143	-0.0152	-0.0157	-0.0152				
308.7	9.3	0.3	390,000	ゼロずれ	-0.0035	-0.0034	-0.0034	0.0158	-0.0017	-0.0013	-0.0013	-0.0155	0.0156	1.2640
				測定値	0.0122	0.0124	0.0128	-0.0170	-0.0171	-0.0173				

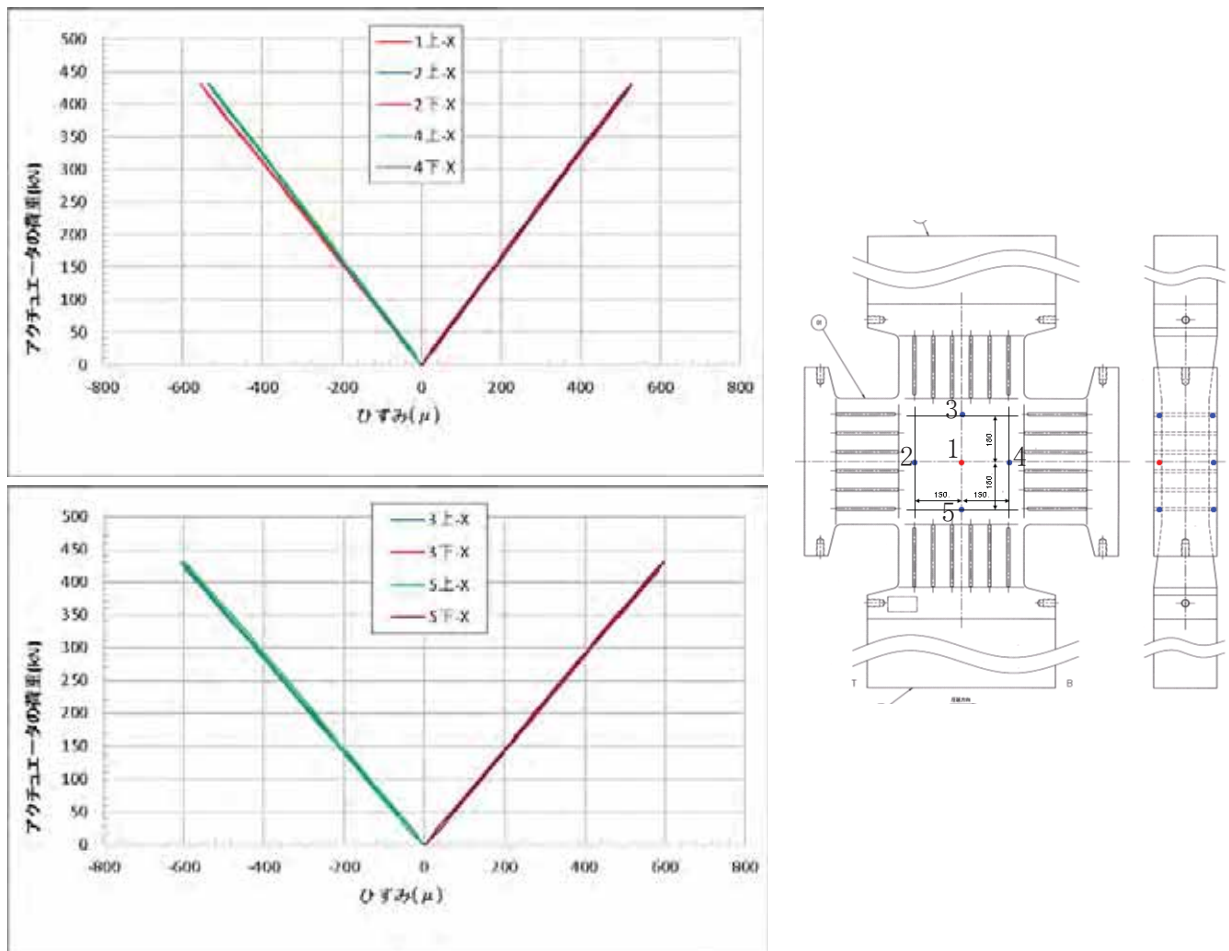


図 3.1.3.2-17 疲労予き裂前のアクチュエータ荷重-ひずみの関係

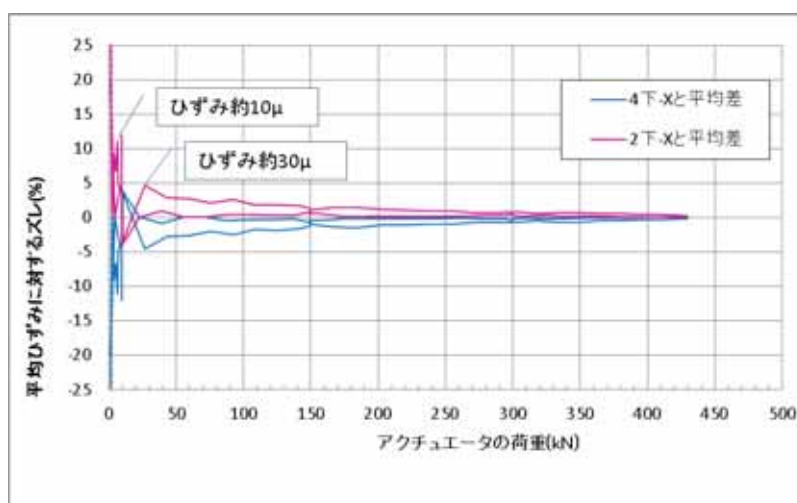


図 3.1.3.2-18 疲労予き裂前の静的ひずみバランス

(6) 十字型試験体の製作のまとめ

平成 29 年度は十字型試験体の製作に着手し、応力整流化スリットやタブ板継手溶接、放電加工(EDM)ノッチの加工、疲労予き裂導入を一部の試験体に対して計画通り完了した。

3.1.3.3 加熱・冷却検証試験体を用いた板厚内温度分布の検証試験

(1) 目的

原子炉圧力容器の PTS 事象模擬試験の実施に必要な十字型試験体及び試験装置の準備を進めている。試験のイメージを図 3.1.3.3-1 に示す。PTS 模擬試験準備の一環として、加熱・冷却設備が仕様を満足することの確認を目的に、十字型試験体と同等の大きさの大型平板試験体(以下、加熱・冷却検証試験体)を用いて加熱・冷却検証試験を行い、①試験開始前の試験体温度分布の取得、②冷却中の温度履歴から冷却スプレーによる熱伝達率(代表値)の評価を行った。本章ではそれらの結果について述べる。

(2) 加熱・冷却検証試験体の設計製作

①加熱・冷却検証試験体の設計

図 3.1.3.3-2 に加熱・冷却検証試験体概略図を示す。PTS 模擬試験での熱履歴を再現するため、加熱・冷却検証試験体は十字型試験体と同等のサイズとした。冷却スプレーにより冷却される中央部 400 mm 角×板厚 150 mm、支持部中央 1600 mm 四方の範囲を十字型試験体と同じ板厚 200 mm とした。また中央 1600 mm 四方の領域より離れた支持構造物部分には H 鋼を採用した。試験中、昇温、降温過程を経験する評価対象部位は、十字型中央から約 300 mm 角であると評価されていることから、中央 400 mm 角から 600 mm 離れた H 鋼は評価対象部位の温度履歴に影響しないと考えられる。また、加熱・冷却検証試験での伝熱形態を支配する事象は水のスプレーによる冷却の強制対流熱伝達であり、熱伝達率は評価対象部位の試験体の材質によらず冷却水の流量とスプレー噴霧状態で決定する。そこで加熱・冷却検証試験体は一般構造用圧延鋼板(SS400)を採用し、冷却面にクラッドは施工しないこととした。

②ヒーター固定治具の設計

試験体加熱ヒーター(メイン)の外観は図 3.1.3.1-40 にて既に示した通りである。また図 3.1.3.3-3 は試験体とヒーターの固定方法を示す。試験体とヒーター間に伝熱セメントを充填して密着させた後、貫通ボルト(48 本)を挿入して上下のナットを締結することでヒーターと試験体を固定する構造とした。さらに、ヒーター上部よりスプリング付きの固定ピンで試験体に押付け密着性を確保する構造となっている。

③断熱材固定治具の設計

図 3.1.3.3-4 に加熱保持中、試験直前、試験中のヒーターと冷却スプレーの状況を示す。試験体を加熱して試験開始時の温度分布とした後にスプレー噴霧面の断熱材を取り外す必要がある。そこで、ピット外から遠隔にて断熱材を取り外す機構を設計した。図 3.1.3.3-5 に機構の概念図を示すが、加熱保持中はヒンジを垂直方向に立て試験体に断熱

材を押し当てて保持し、試験直前にピット外から断熱材台車をワイヤで移動させることによりヒンジを水平方向に倒して試験体から断熱材を離脱する構造とした。

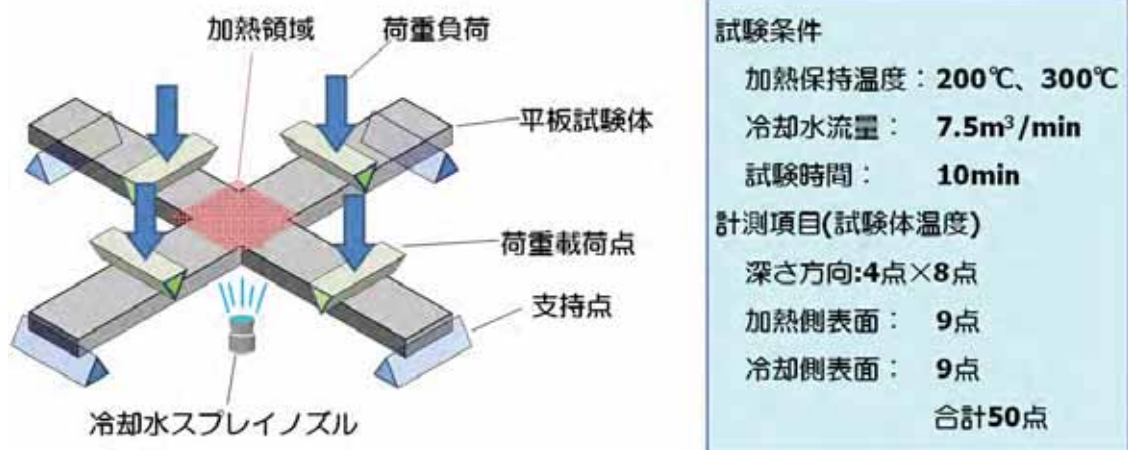


図 3.1.3.3-1 加熱・冷却検証試験(イメージ)

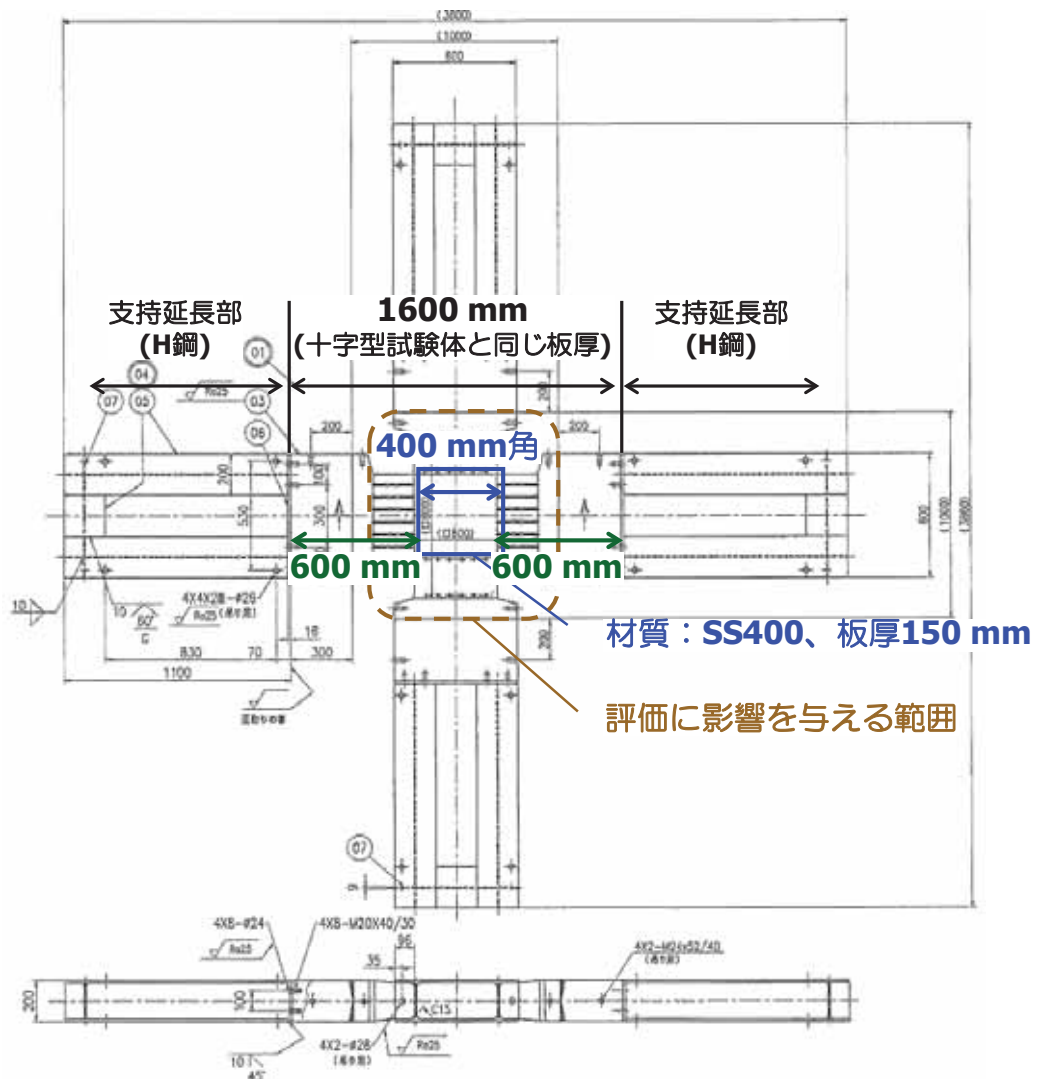


図 3.1.3.3-2 加熱・冷却検証試験体の寸法・概要

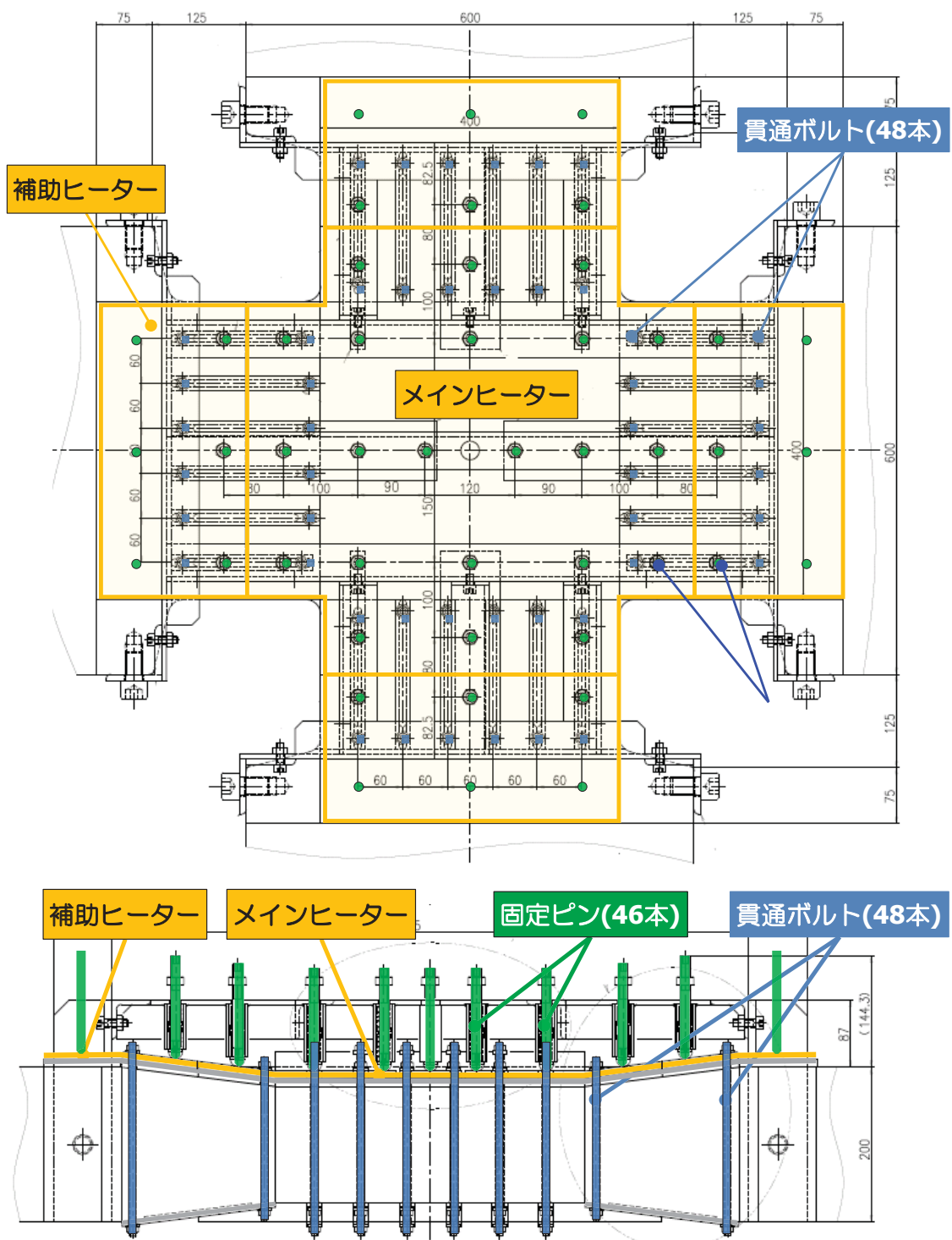


図 3.1.3.3-3 試験体とヒーターの固定方法

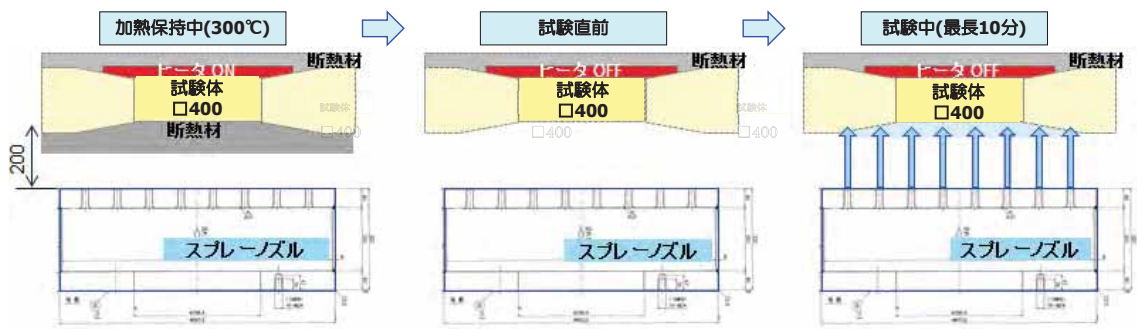


図 3.1.3.3-4 加熱・冷却時のヒーターと冷却スプレーの状況(概念図)

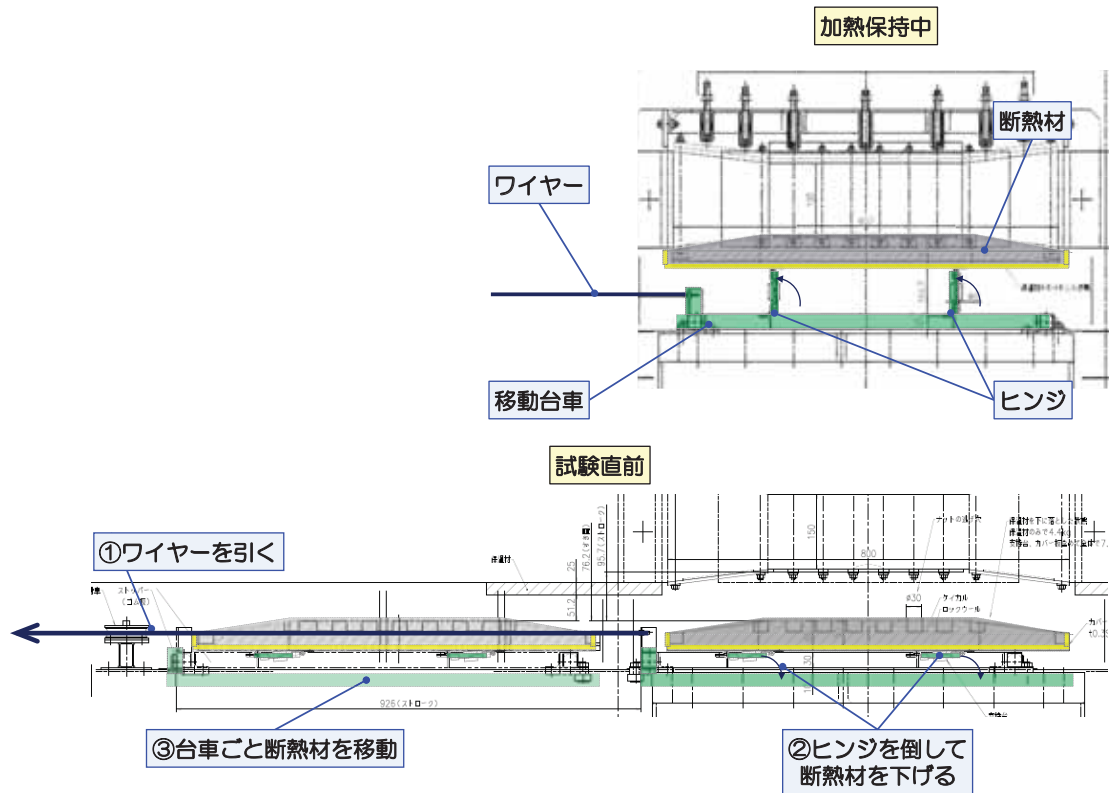


図 3.1.3.3-5 断熱材取外し機構(概念図)

(3) 加熱・冷却検証試験の準備

①加熱・冷却検証試験体の製作

加熱・冷却検証試験体の製作フローを図 3.1.3.3-6 に示す。

まず図 3.1.3.3-7 に示すように、1000 mm 角×200 mm^tの SS400 から試験体中央部の外形加工、表面機械加工、継手開先加工を行った。次に図 3.1.3.3-8 に示すように、整流化スリットおよび温度センサー埋設用のテーパー穴(加熱面φ20 mm・冷却面φ23 mm×150 mm^D)を 8 カ所を加工した。最後に図 3.1.3.3-9 に示すように支持延長部(600 mm^W×300 mm^D×200 mm^t)を溶接した。

深さ方向の温度分布を測定するための温度計測用テーパーピンの外観を図 3.1.3.3-10 及び図 3.1.3.3-11 に示す。まずテーパーピンの側面(周方向 90 度ピッチ)に温度センサー配線用の溝(1.5 mm^W×3 mm^D)と温度センサー先端を挿入するφ1.5 mm×13 mm^Dの穴を冷却面先端から 2、5、10、75 mm 位置に加工した。次に、図 3.1.3.3-11 に示すように各テーパーピンの冷却面より 2、5、10、75 mm 深さ位置に温度センサーを固定した。溝内に配線したシース部分はシルバーワイヤを溝に詰めて固定し、配線は加熱面より抜き出し、抜け防止治具を取り外した。

試験体の表面温度測定用センサーは、図 3.1.3.3-12 に示すように試験体の加熱面に 9 点(H1~H9)、冷却面に 9 点(C1~C9)設置した。また温度計測用テーパーピンは、図 3.1.3.3-13 に示すように加熱面の D1~D8 に挿入し、M8 ボルトを規定トルク(10N・m)で固定した。D1~D8 の温度センサーの配置位置(深さ)を表 3.1.3.3-1 に示す。

②ヒーター設置

加熱・冷却検証試験体の上面にメインヒーター(10 kW)1 台、補助ヒーター(2.5 kW)4 台を設置し、伝熱セメント塗布後自然乾燥させた。その後、試験体とヒーター間に伝熱セメントを充填密着させた後、貫通ボルトを締結し固定した。図 3.1.3.3-14 に伝熱セメント塗布状況、図 3.1.3.3-15 にヒーター設置状況を示す。

③加熱・冷却検証試験体の設置

図 3.1.3.3-16 に示すように、加熱・冷却検証試験体と支持構造部(H 鋼)をボルトで連結した。その後、図 3.1.3.3-17 に示すように、ヒーター上部よりスプリング付きの固定ピン(46 本)で試験体に押付け密着性を確保した。続いて図 3.1.3.3-18 に示すように、試験体を載荷治具に組込んだ。

以上の準備が終了したところで試験体をピット内に設置した。設置後、図 3.1.3.3-19 に示すように、加熱・冷却検証試験体の下面に断熱材を設置した。

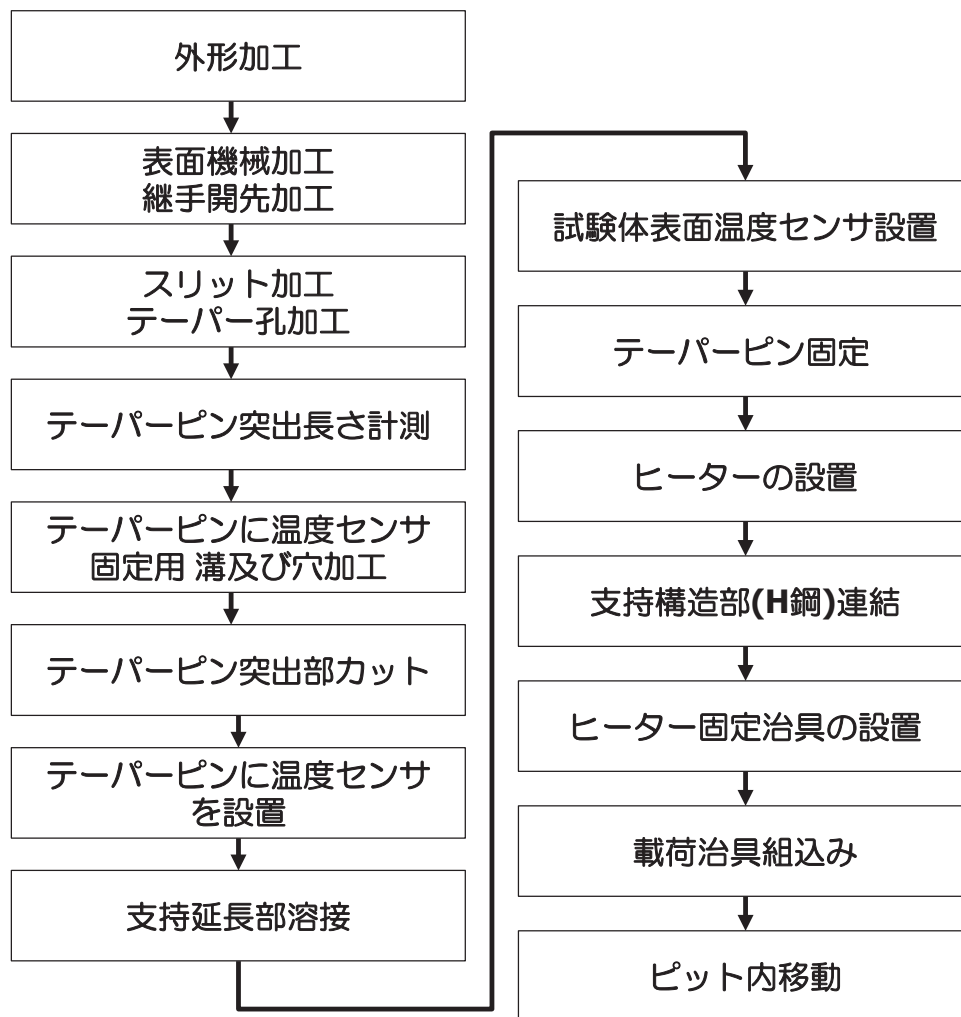


図 3.1.3.3-6 加熱・冷却検証試験体製作フロー

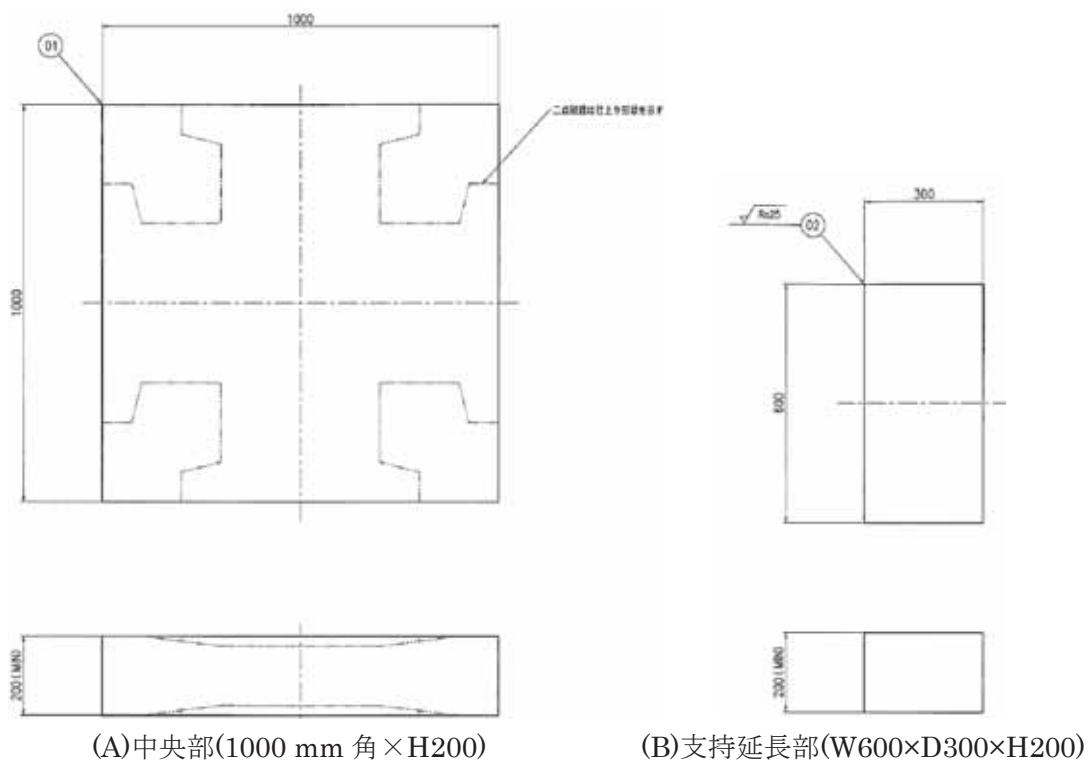


図 3.1.3.3-7 加熱・冷却検証試験体の板取図(鋼種: SS400)

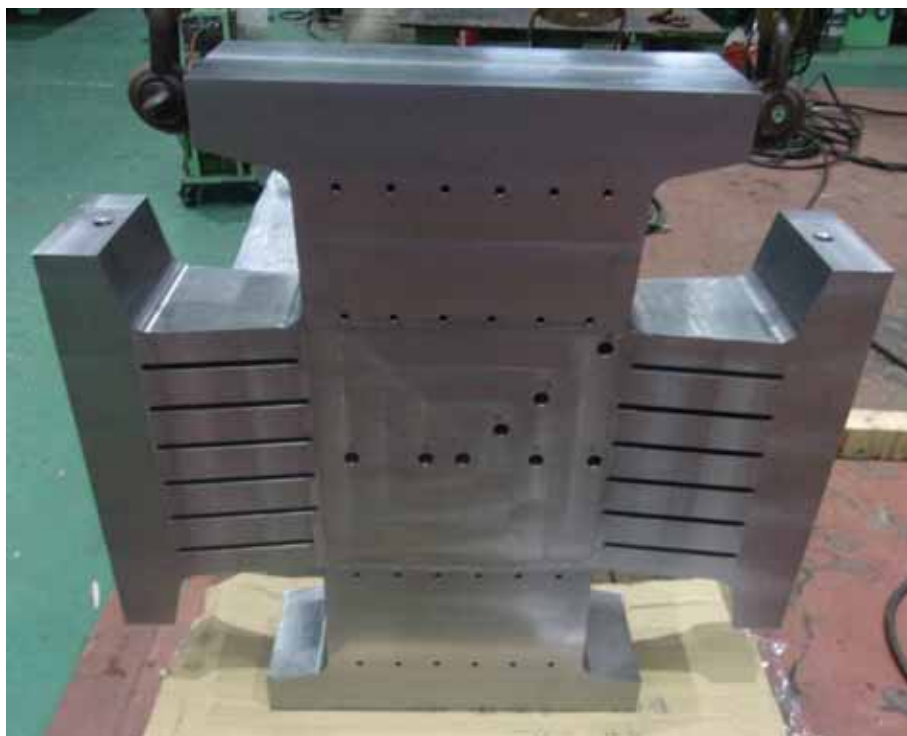


図 3.1.3.3-8 加熱・冷却検証試験体のテーパー穴、スリット加工後外観

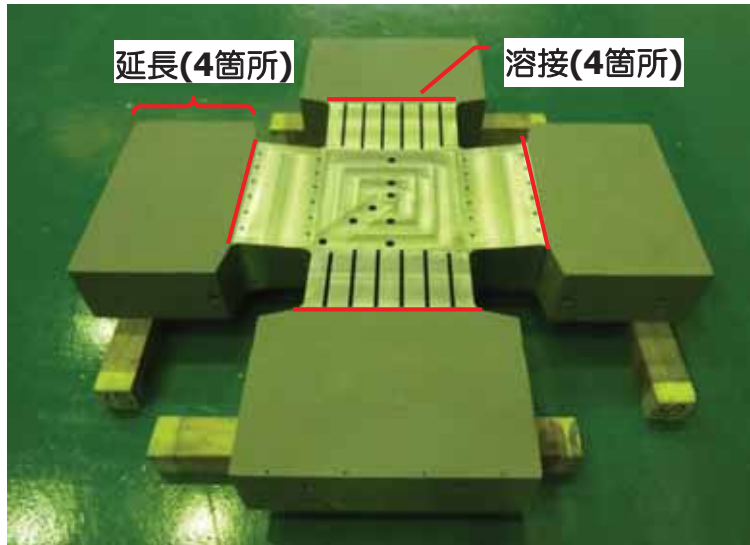


図 3.1.3.3-9 加熱・冷却検証試験体(支持延長部溶接後)

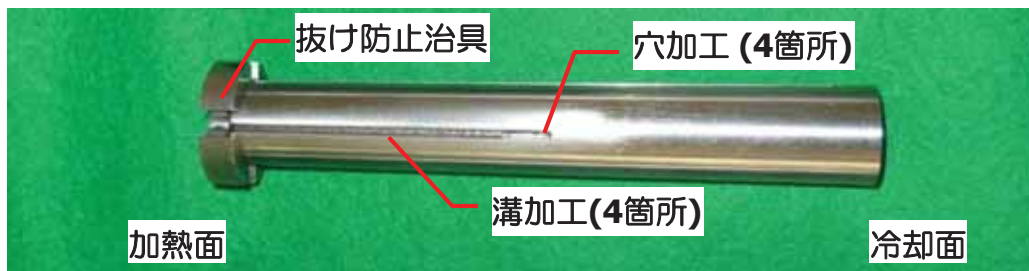
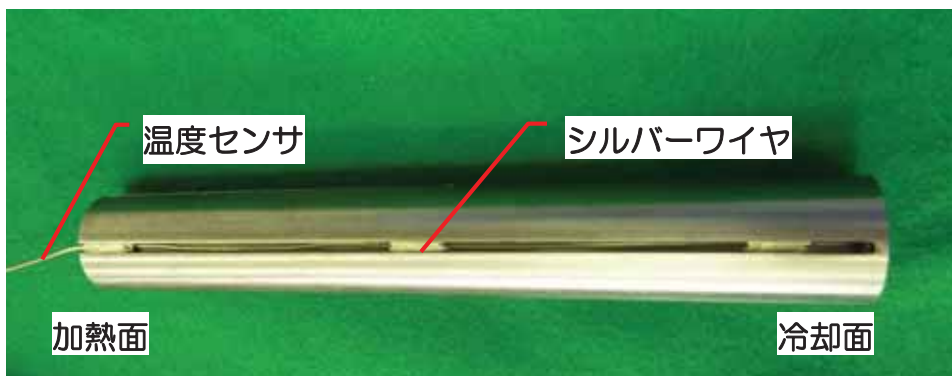


図 3.1.3.3-10 温度計測用テーパースタッフの外観



冷却面より2、5、10、75 mm位置に温度センサを設置

図 3.1.3.3-11 テーパーピンへの温度センサー設置状況

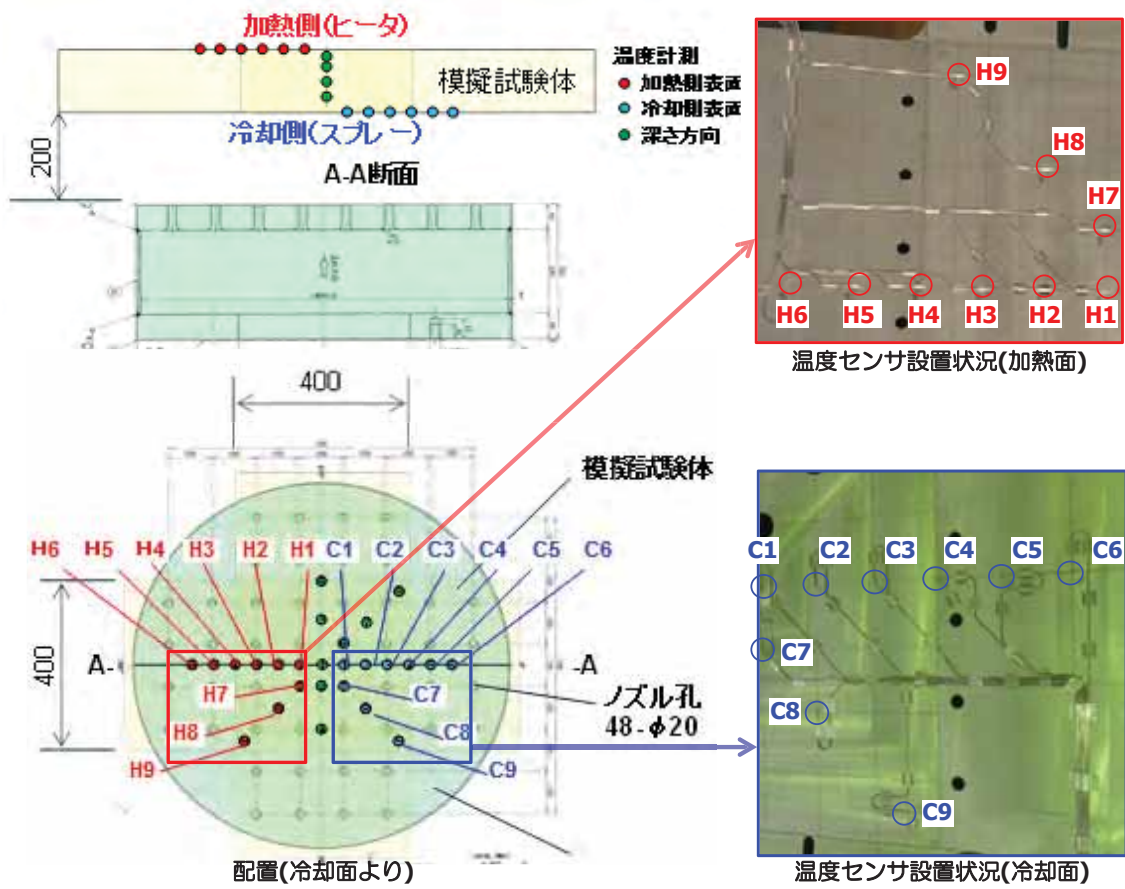


図 3.1.3.3-12 加熱・冷却検証試験体の試験体温度センサー設置位置(表面)

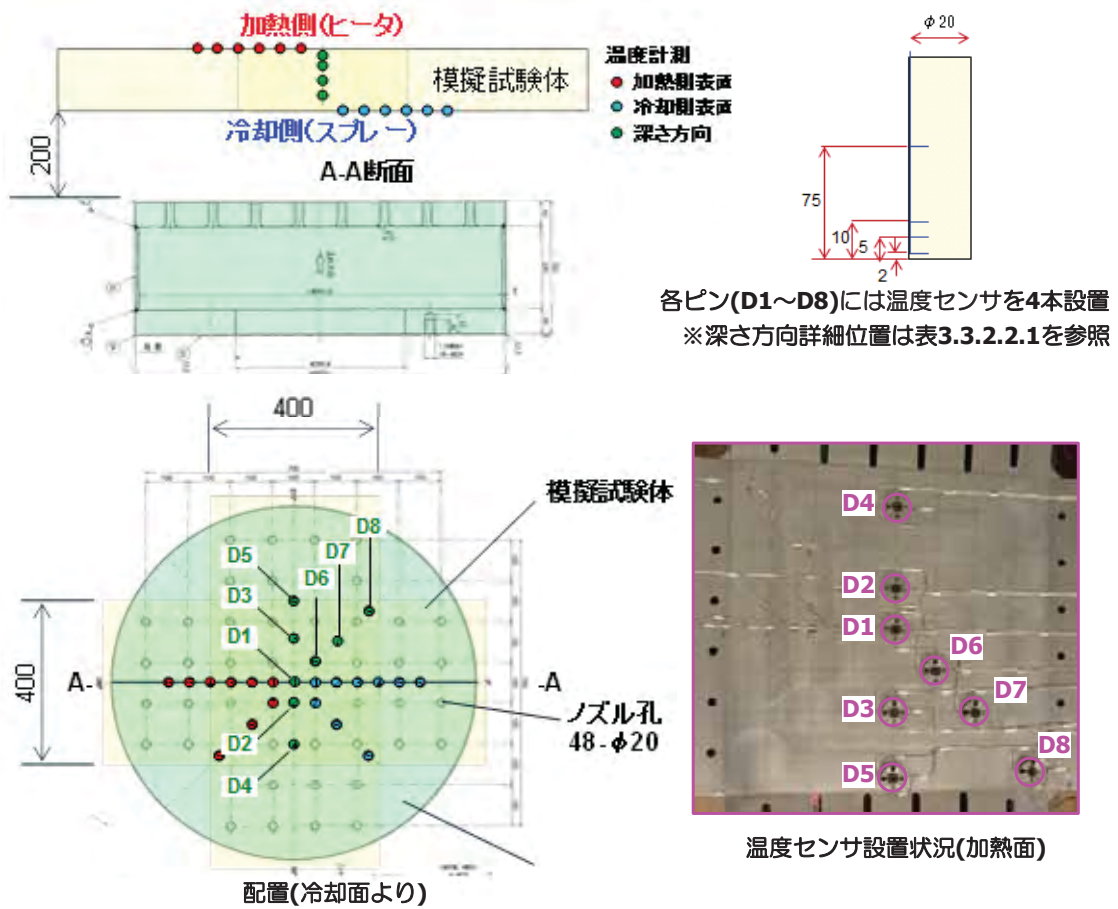


図 3.1.3.13 加熱・冷却検証試験体の試験体温度センサー位置(深さ方向)

表 3.1.3.3-1 加熱・冷却検証試験体の温度センサー深さ方向設置位置(実測値)

ピンNo	温度センサ深さ方向設置位置(mm)			
	2mm	5mm	10mm	75mm
D1	2.68	5.63	10.67	75.51
D2	2.26	5.31	10.24	75.18
D3	2.11	5.22	10.10	75.08
D4	2.11	5.07	10.01	75.06
D5	2.29	5.29	10.15	75.13
D6	2.15	5.09	10.01	75.02
D7	2.06	5.00	9.86	75.04
D8	2.10	4.95	9.93	74.90

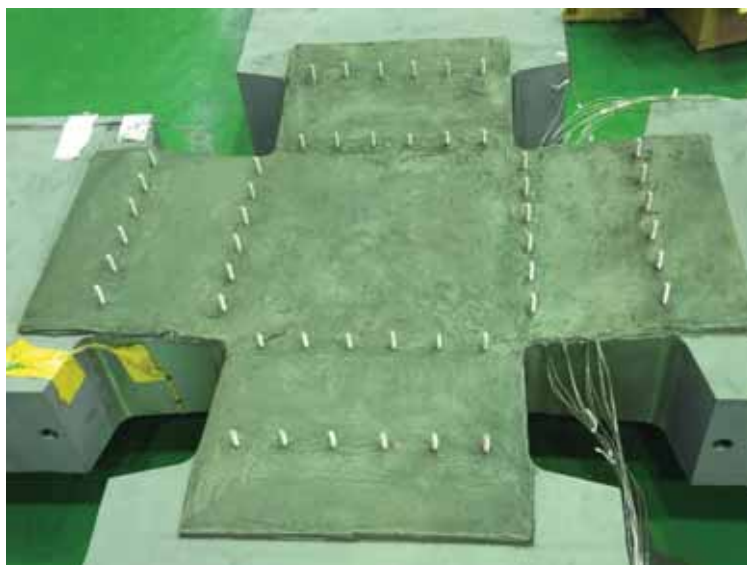


図 3.1.3.3-14 加熱・冷却検証試験体への伝熱セメント塗布状況

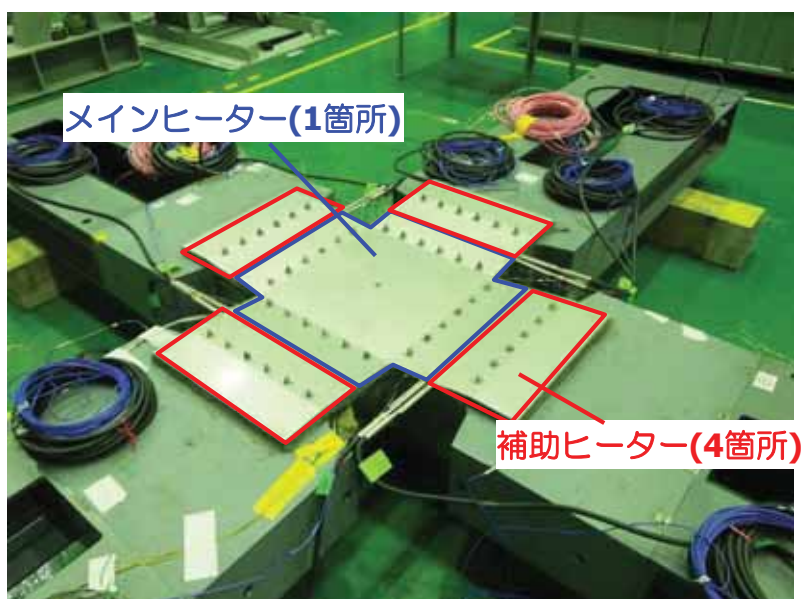


図 3.1.3.3-15 加熱・冷却検証試験体へのヒーター設置状況



図 3.1.3.3-16 加熱・冷却検証試験体と支持構造部連結状況

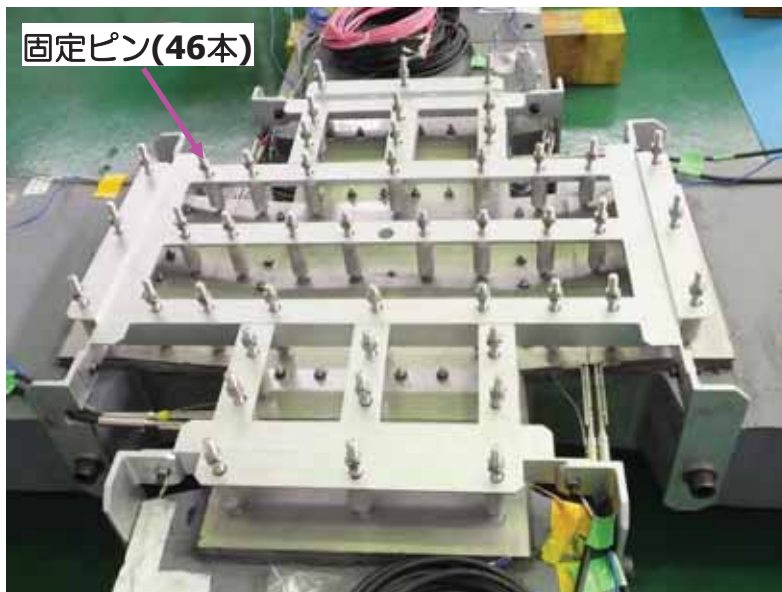


図 3.1.3.3-17 ヒーター固定治具外観



図 3.1.3.3-18 载荷治具組込状況

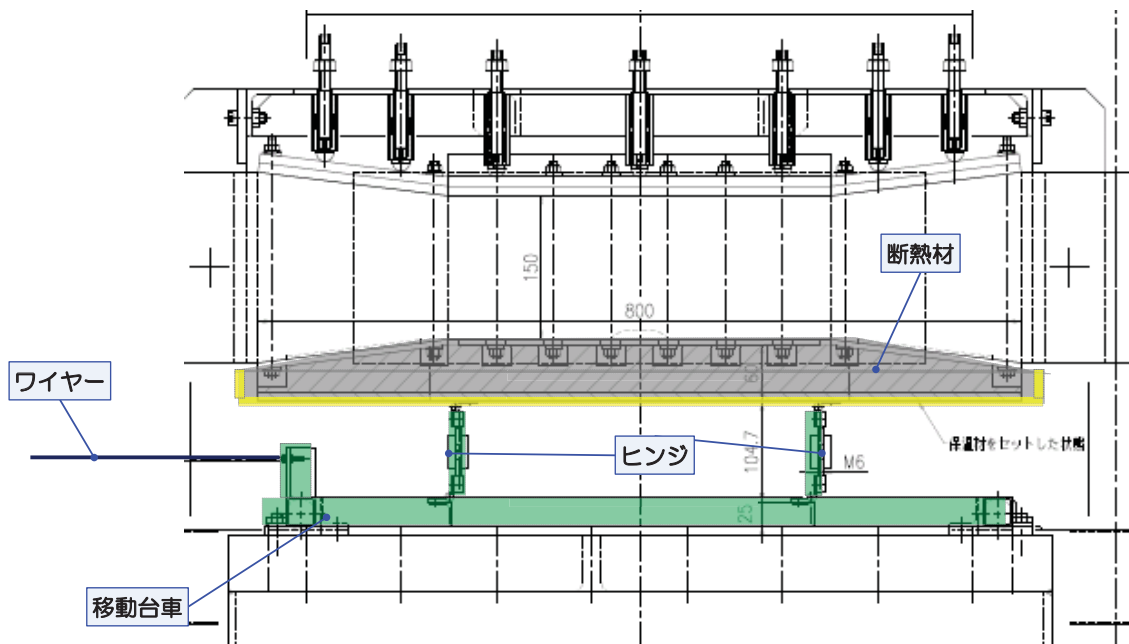


図 3.1.3.3-19 断熱材固定外観

(4)加熱・冷却検証試験

①試験の概要

板厚方向に温度センサーを埋設した加熱・冷却検証試験体を用い、加熱保持して試験開始前の温度分布を取得後、PTS 模擬試験時と同等に水を噴霧して試験体を冷却し、試験体の温度履歴を取得して冷却時の熱伝達率(熱境界条件)を評価した。試験の概要を図 3.1.3.3-20 に示す。

加熱・冷却試験条件は、以下に示す PTS 模擬試験条件を再現した。

- ・ヒーターにて試験体上面片側を加熱した後、試験体から 200 mm 離れた位置のノズルから冷水を試験体下面に噴霧して冷却し、温度履歴を取得した。
- ・試験中はピット上に蓋をして、蒸気はドラフトにて排気した。
- ・スプレー噴霧後の冷水はピット底部に溜め、試験後に排水した。

②試験条件及び計測項目

加熱・冷却検証試験条件は、加熱保持温度を $200 \pm 20^{\circ}\text{C}$ 及び $300 \pm 20^{\circ}\text{C}$ 、冷却水温度は 10°C 以下、冷却スプレーから冷水噴霧量は $7.5\text{m}^3/\text{分}$ で 10 分とした。

試験における計測項目と計測器を表 3.1.3.3-2 に示す。また計測システムの概要を図 3.1.3.3-21 に示す。

③試験手順

試験の手順を図 3.1.3.3-22 に示す。

まず計測に必要なセンサーと計測器を結線し計測器の動作を確認した。

試験体を試験温度(200 または 300°C)に保持し、同時に冷水貯留タンクに 100%満水状態に注水し、スプレーポンプを用い冷水貯留タンクへ循環し、約 5°C まで冷却した。

上記の準備が終了したところで試験体加熱ヒーターを停止、保温材駆動機構のワイヤロープをウィンチで巻き取って断熱材取り外した。続いて冷却水をスプレーポンプ循環運転から冷却水スプレーライン通水運転に切換えて規定流量($7.5\text{m}^3/\text{分}$)の冷水を噴霧し、試験体板厚方向温度分布測定した。

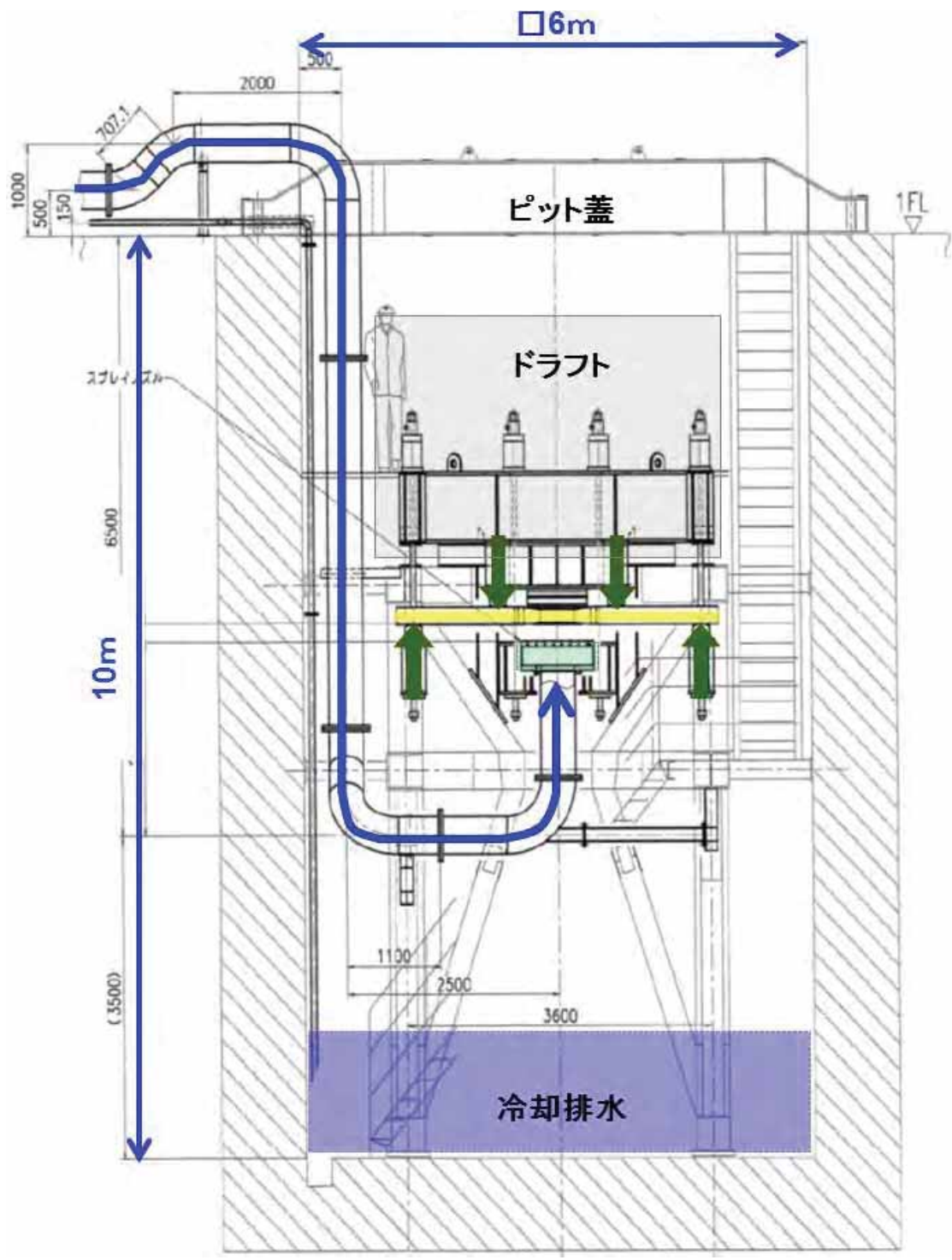


図 3.1.3.3-20 加熱・冷却検証試験の概要

表 3.1.3.3-2 計測項目及び計測機器一覧

計測項目	計測 点数	センサー	計測レンジ	単位	変換器	入力ユニット	データロガー
1 冷却水スプレッポンプ出側圧力	1	圧力変換器 KH-15	0~1	MPa	—	USS-51B 1台	UCAM-550A 2台
2 冷却水スプレッポンプ出側流量	1	電磁流量計 EGM2050C	0~10	m ³ /h	M2DYS	USV-51B 1台	
3 大気温度	1	熱電対 Type K	-200~800℃	℃	—	UST-51B 6台	
4 冷水貯留タンク温度	1	熱電対 Type K	-200~800℃	℃	—		
5 冷却水スプレッポンプライン温度	1	熱電対 Type K	-200~800℃	℃	—		
6 試験体温度(厚さ方向温度分布)	50	熱電対 Type N	-200~800℃	℃	—		

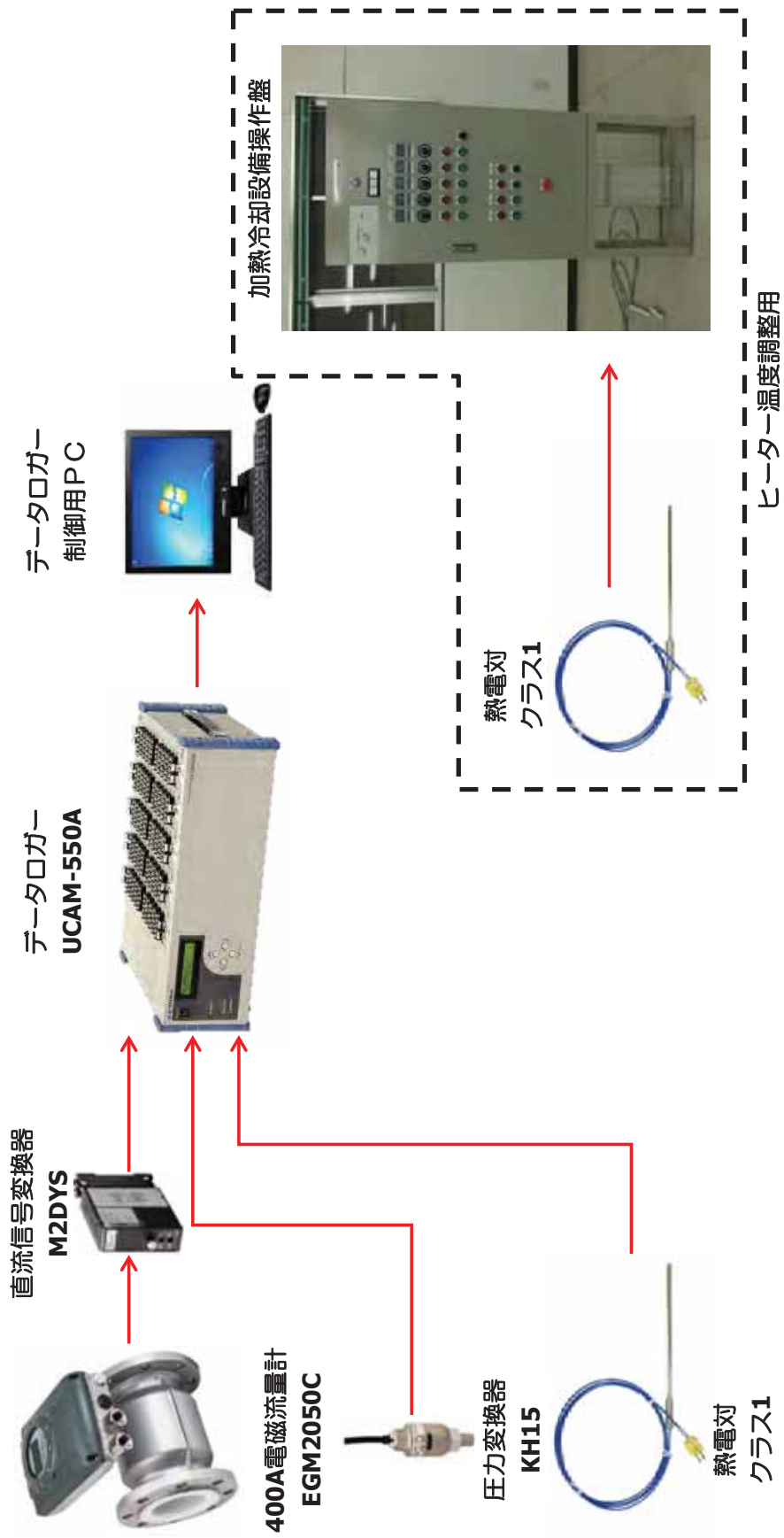


図 3.1.3.3-21 計測システム概要

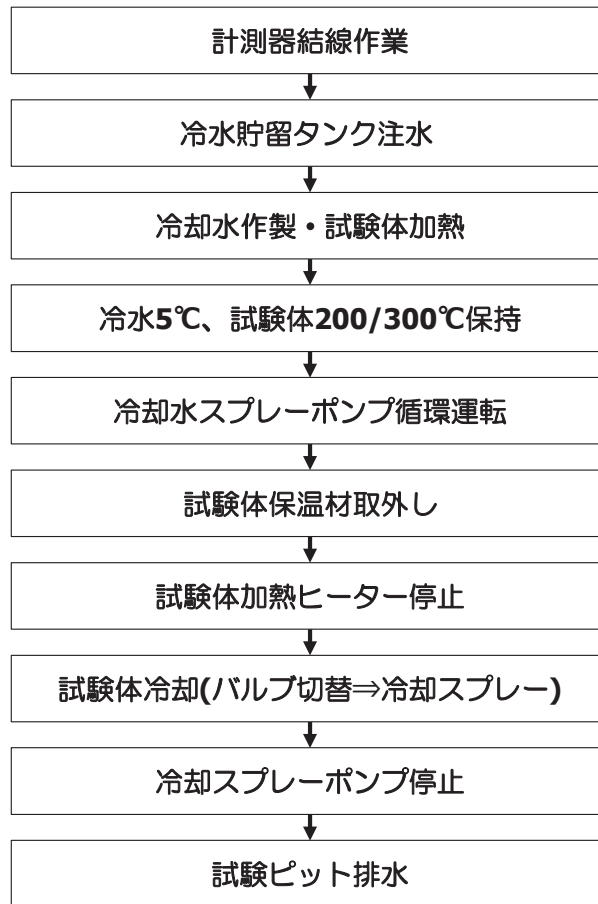


図 3.1.3.3-22 加熱・冷却検証試験フロー図

④試験結果

図 3.1.3.3-23 は試験体保持温度 200℃、また図 3.1.3.3-24 は同じく 300℃とした時の試験体の初期温度分布を示す。冷却面中心から 100 mm 範囲において、試験条件 200℃に設定した時の冷却面の温度範囲は 200℃^{+0.5}℃、加熱面と冷却面の温度差は 20℃以内であった。同様に試験条件 300℃のとき冷却面の温度範囲は 300^{+0.6}℃、加熱面と冷却面の温度差は 21℃以内であった。

図 3.1.3.3-25 は、200℃でスプレー噴霧開始から 180 秒間の温度履歴の例を示す。試験前にヒーターを切り、断熱材取外し、バルブ切替え、スプレー噴霧開始を行った。スプレー噴霧開始直後は配管内に水が充満されていないため、冷却水温度に変化が認められたが、20 秒程度経過後は 6~7℃に安定した。冷水噴霧直後から試験体温度が降下し、表面からの深さ 2、5、10、75 mm と深くなるほど緩やかな冷却速度を示した。図 3.1.3.3-26 は同様に 300℃でスプレー噴霧開始から 180 秒間の温度履歴の例を示す。

表面からの深さ 2、5、10 mm の位置で取得した温度履歴を、次式により無次元温度に換算した。

$$\theta = \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} \quad (3.1.3.3-1)$$

θ : 無次元温度 [-]

T : 計測温度 [℃]

T_2 : 2 mm 深さ、 T_5 : 5 mm 深さ、 T_{10} : 10 mm 深さ

T_{∞} : 冷水温度 [℃]、 T_0 : 初期温度 [℃]

無次元温度 θ について計測結果と 1 次元非定常伝熱解析結果の比較を行い、熱伝達率を評価した。なお加熱・冷却検証試験での熱伝達率の評価においては、流量変化時間の影響を無視できる 100 秒以降を対象とし、次式を用いて冷水噴霧開始から 100~300 秒の無次元温度差の二乗和 δ が最小となる熱伝達率を評価した。

$$\delta = \sum_{t=100\text{sec}}^{t=300\text{sec}} \left(\frac{\theta_{cal} - \theta_m}{\theta_{cal}} \right)^2 \quad (3.1.3.3-2)$$

θ_{cal} : 一次元非定常熱伝導計算 無次元温度 [-]

θ_m : 試験結果 無次元温度 [-]

図 3.1.3.3-27 に一次元非定常熱伝導解析結果と計測結果の比較より評価した熱伝達率の例(300℃、温度測定位置 D1)を示す。図の上を示す θ_{cal} (13 kW/m²K)と θ_m は一致しており、冷却スプレーの熱伝達率は 13 kW/m²K と評価された。

同様に、温度測定位置 D1 から D8 について評価した熱伝達率を図 3.1.3.3-28 に示す。D8 を除き熱伝達率は近い値をとり、平均値は $17 \text{ kW/m}^2\text{K}$ であった。D8 が異なる評価結果となった理由として、端部に近く放熱の影響により見かけ上低い値となったことが考えられる。

十字型試験体を使った PTS 模擬試験においては、熱伝達率を $17 \text{ kW/m}^2\text{K}$ として計画するのが妥当と考えられる。以上、PTS 模擬試験計画を詳細に検討するために必要な知見の収集を図ることができた。

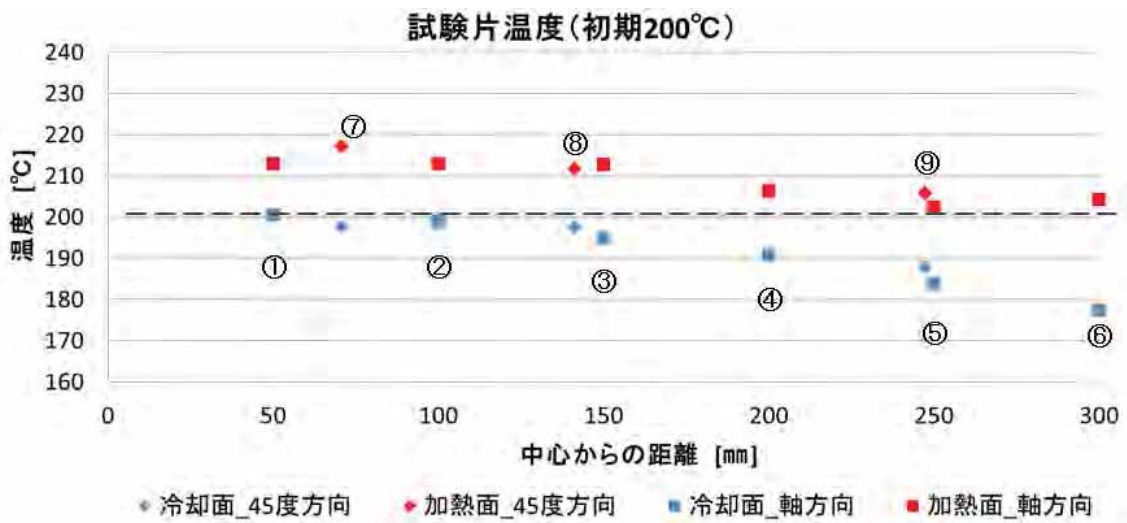
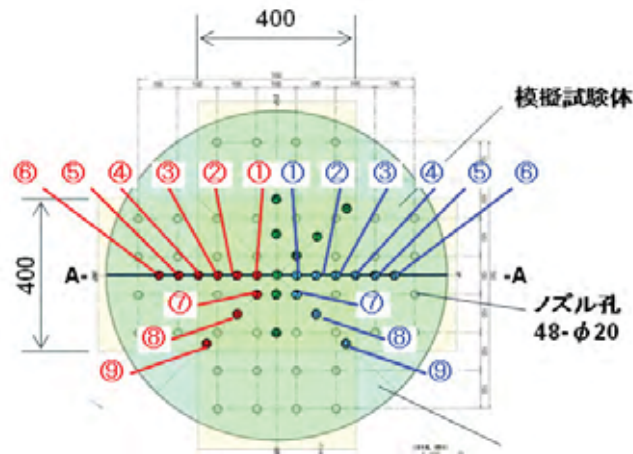


図 3.1.3.3-23 加熱・冷却検証試験体の初期温度分布(200°C)

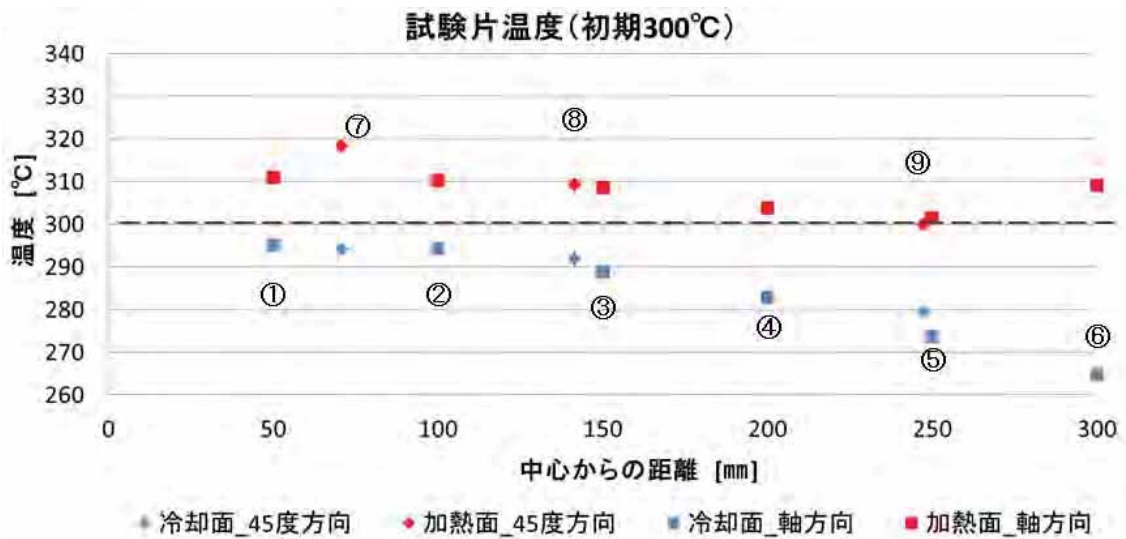


図 3.1.3.3-24 加熱・冷却検証試験体の初期温度分布(300°C)

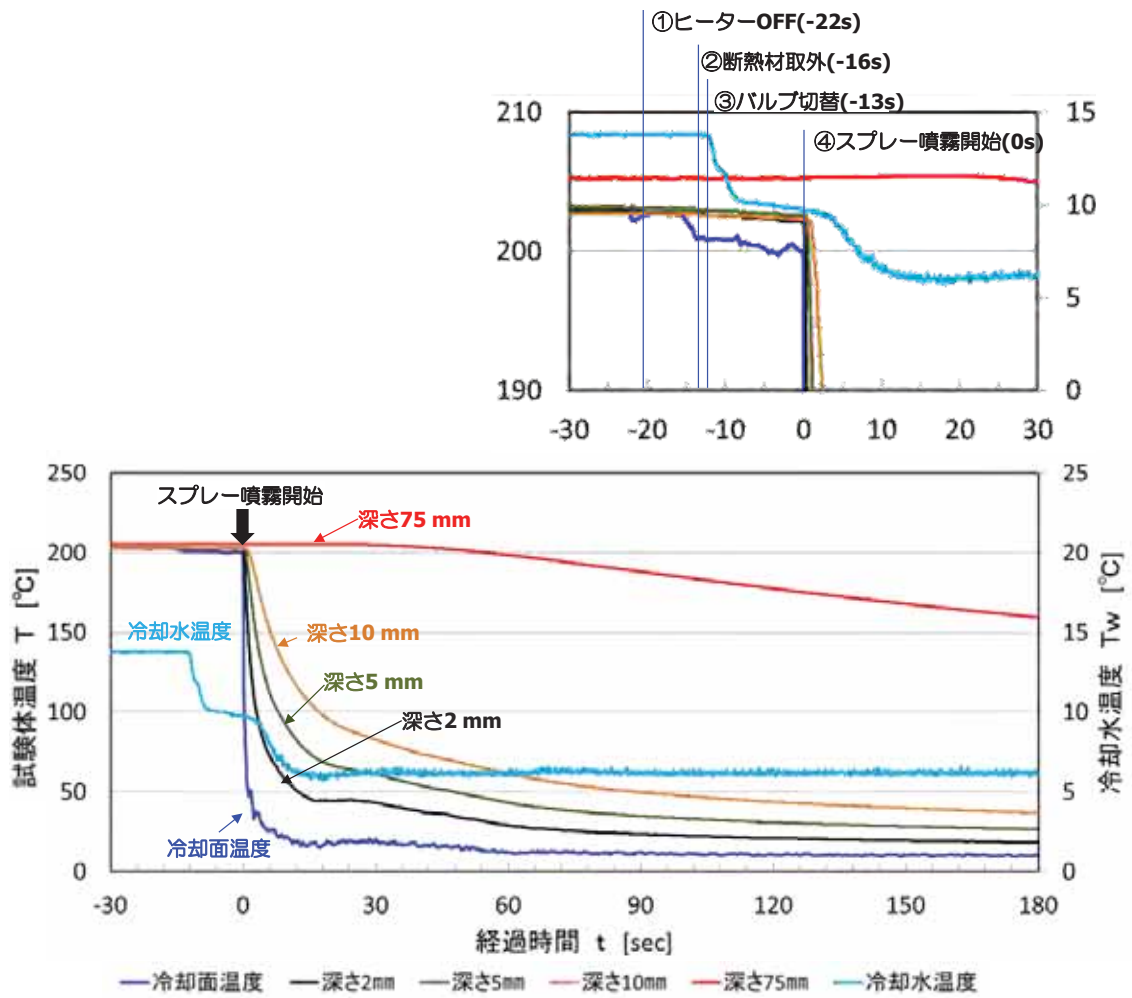


図 3.1.3.3-25 加熱・冷却検証試験体の冷却時の温度履歴(例)(200°C)

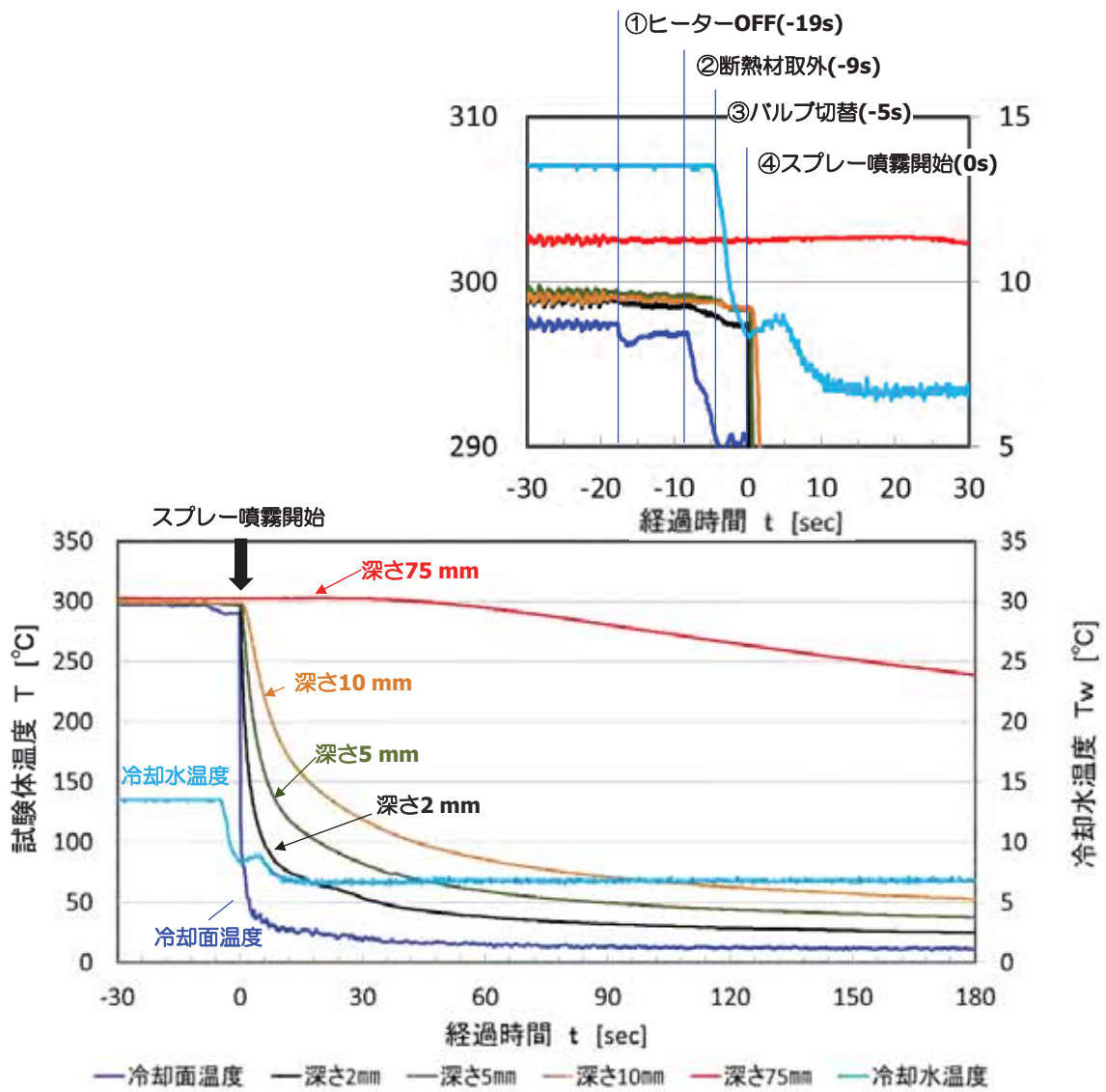


図 3.1.3.3-26 加熱・冷却検証試験体の冷却時の温度履歴(例)(300°C)

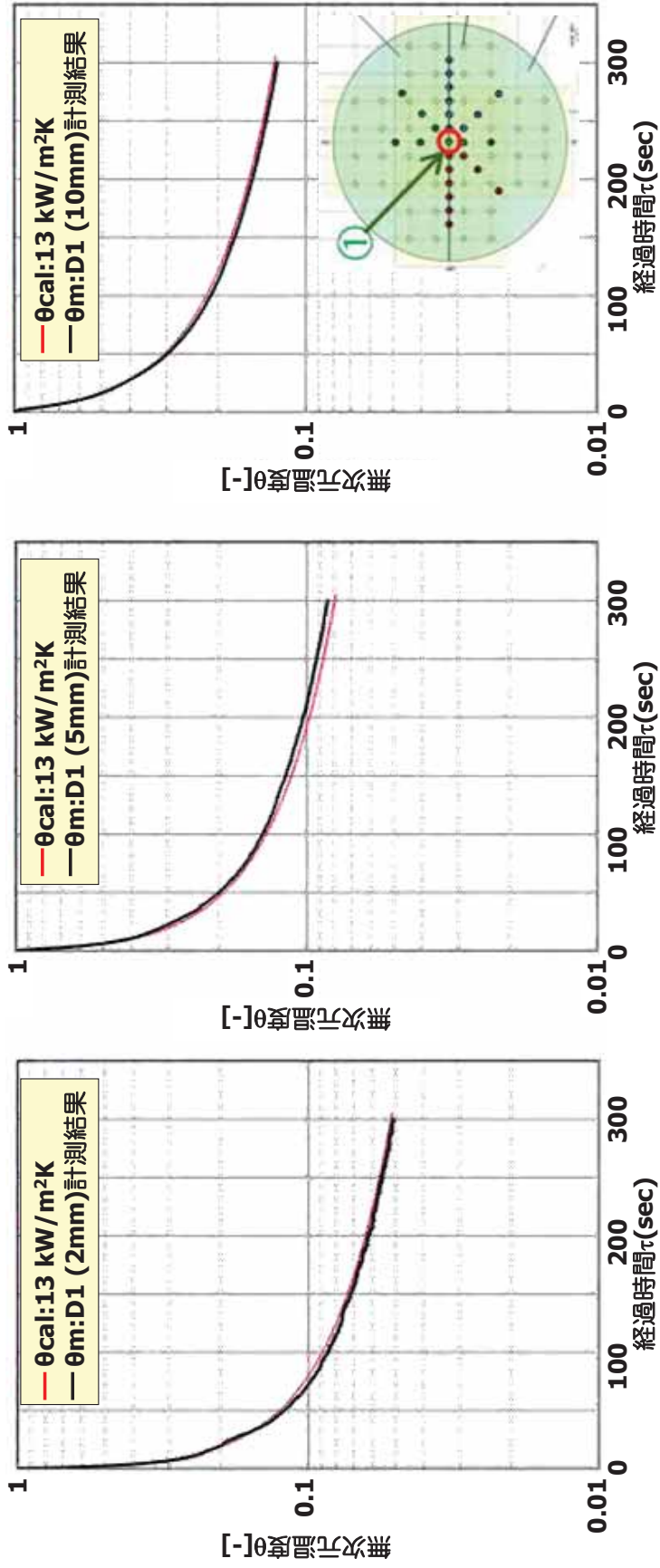


図 3.1.3.3-27 一次元非定常熱伝導解析結果と計測結果の無次元温度比較の例(300°C、測定位置 D1)

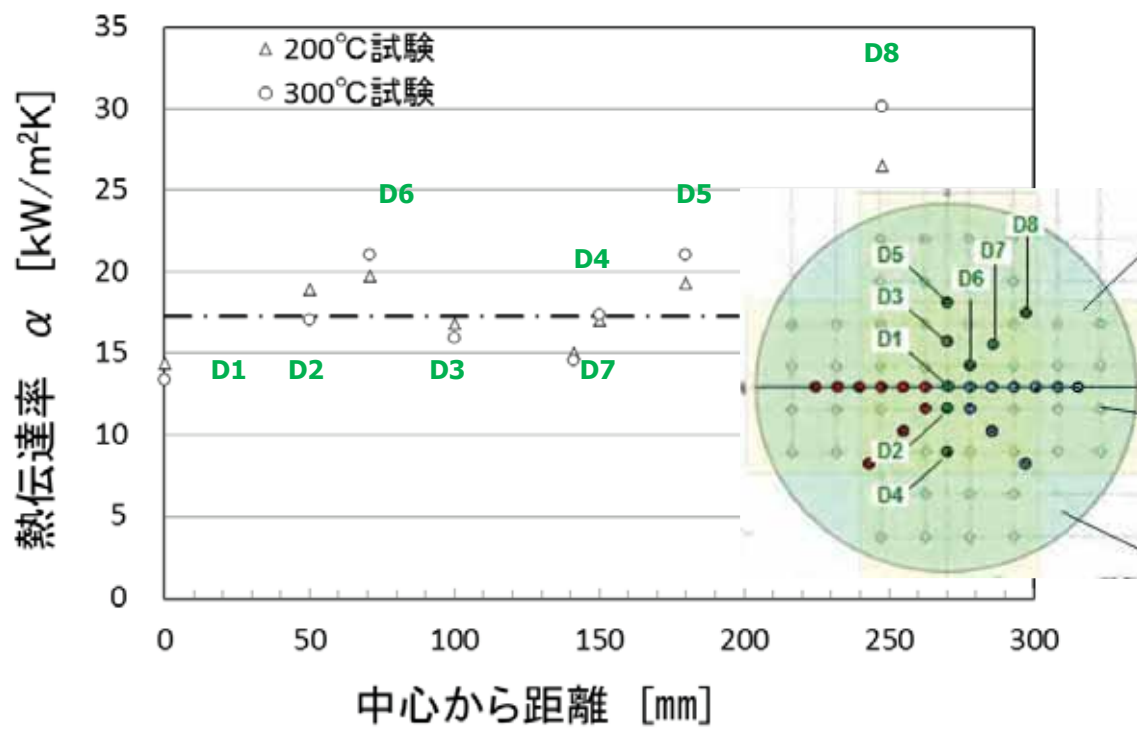


図 3.1.3.3-28 加熱・冷却検証試験体の熱伝達率評価結果

(5) 加熱・冷却検証試験体を用いた板厚内温度分布の検証試験のまとめ

実機の熱過渡条件下における熱衝撃(PTS)事象を模擬した試験実施のため、十字型試験体を用い、荷重負荷機構と加熱・水冷機構を有する PTS 模擬試験設備と疲労亀裂導入設備を整備した。

その結果、各設備が所定の運転条件に対して、所定の合格判定値を達成しており、試験設備としての機能を満足していることを確認した。主な結果を以下に示す。

- ・ PTS 模擬試験の試験条件に基づいて、PTS 模擬試験に用いる载荷設備と加熱・冷却設備(PTS 模擬試験設備)、並びに疲労亀裂導入設備の仕様を検討し、それぞれの設備の詳細設計を行った。
- ・ PTS 模擬試験設備及び疲労亀裂導入設備を構成する機器、構造物等を調達、製作し、組立と据付を行った。
- ・ PTS 模擬試験設備及び疲労亀裂導入設備の試運転を行い、これらの設備が PTS 模擬試験の実施に必要な性能を満たしていることを確認した。

引き続き PTS 模擬試験の実施において、これらの設備の活用を図る。

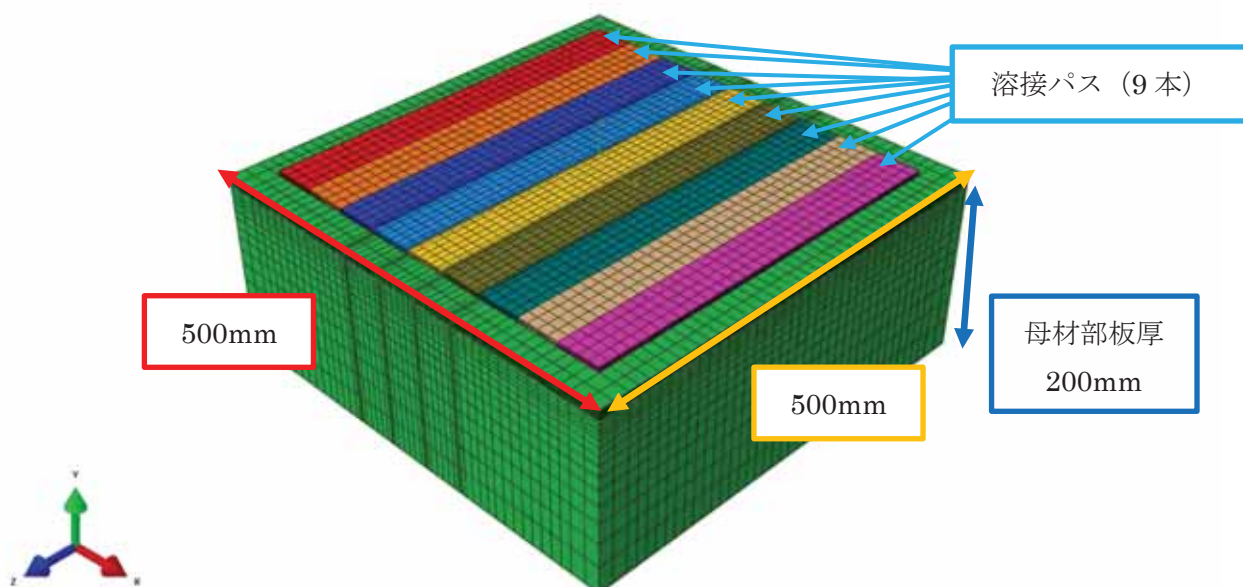
3.1.4 原子炉圧力容器鋼の溶接残留応力解析

平板試験体や十字試験体に対して、クラッド部に生じる肉盛溶接による残留応力及び残留ひずみ分布を考慮した破壊靱性試験評価手法を検討するため、また、クラッド溶接後の小型平板試験体で溶接熱影響(HAZ)部から破壊する可能性について検討するため、有限要素解析(FEA)を用いて、HAZ の相変態を考慮した上でクラッド溶接熱影響部の残留応力解析を実施した。

3.1.4.1 解析モデルの作成

原子炉圧力容器鋼のクラッド溶接による残留応力に関する FEA を行うために必要な解析モデルを既往報告 (3.1.4.1-1)を参考に Abaqus を用いて作成した。作成した解析メッシュの全体図を図 3.1.4.1-1 に、クラッド溶接部の拡大図を図 3.1.4.1-2 に示す。解析メッシュの節点数は 70567、要素数は 65360 とした。母材部の板厚は 200 mm、クラッド部の板厚は 5.5 mm とし、また、x 方向、y 方向の母材部の幅はともに 500 mm とした。クラッド部の溶接パスは、9 本とし、以下、図 3.1.4.1-1 の左から順にパス 1、パス 2、…と呼ぶ。

FEA 解析で設定した材料物性データは文献 (3.1.4.1-1)の値を参考に設定した。



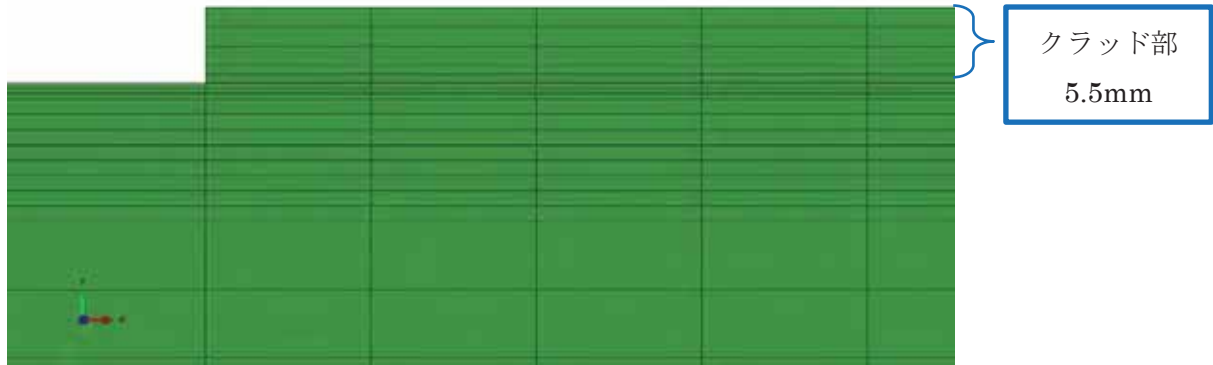


図 3.1.4.1-2 3次元溶接残留応力解析メッシュ(xy断面図拡大図)

3.1.4.2 溶接残留応力解析に必要な補助プログラムの整備

ここでは、パス間の予熱の温度を再現するために必要となる Abaqus のユーザーサブルーチンの設定について述べる。

概要

従来の解析手法では、パス間の予熱温度 150°C を模擬するため、各溶接パスに Abaqus の伝熱解析を 2 回実施する必要があった。具体的には、図 3.1.4.2-1 の左のフローに示すように、充分長い時間を設定した伝熱解析を 1 回実施し、得られた板厚内の温度履歴を確認した後に、パスの終了時の体系が約 150°C になるように伝熱解析の時間を調整して、再度解析を実施する必要があった。各溶接パスの 1 回の伝熱解析には半日から数日程度を要するため、このフローの効率化は重要な課題である。また、溶接中の解析体系の周辺温度は現実の溶接条件に合わせて 20°C としているため、このような方法でパス間の予熱を設定して解析を行った場合には、板厚内の温度は分布を持つことになるが、実際の予熱では板厚内の温度がほぼ一様に 150°C となることから、予熱条件の再現性の観点からも Abaqus の解析における予熱の設定方法の改善が必要であると考えられる。

ここでは、各パスの伝熱解析を 1 回実施すれば済むように、また、予熱温度が板厚全体で一様に 150°C になるように解析フローの変更を行った。変更後の解析フローを図 3.1.4.2-1 の右側に示す。具体的には、変更後の解析フローでは、伝熱解析において、Abaqus のユーザーサブルーチンにより、中央の要素が 150°C を下回ったら解析終了することとし、その後、次の溶接パスの解析を行う前に、雰囲気温度を 150°C にして、体系全体の温度が 150°C になるような解析ステップを追加することとした。

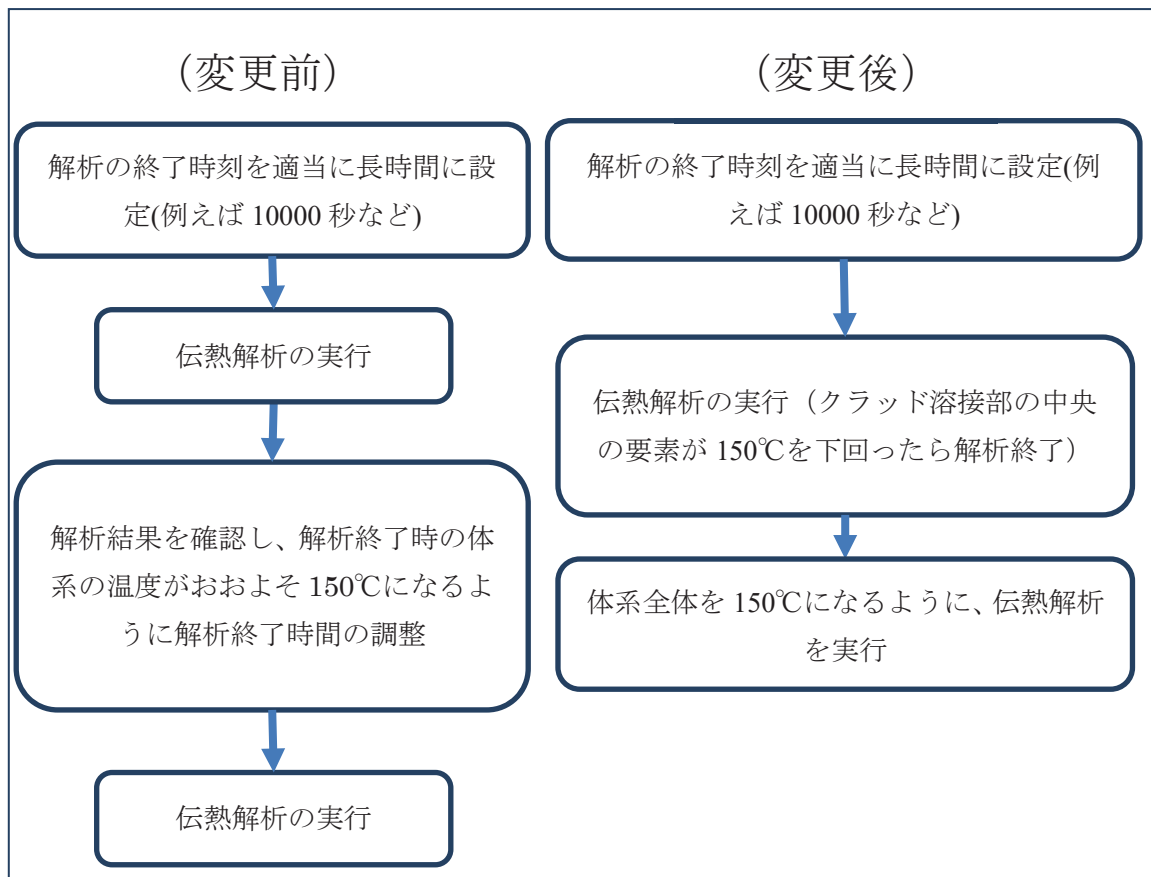


図 3.1.4.2-1 1パスの解析の流れの変更点

3.1.4.3 溶接残留応力解析の実施

図 3.1.4.1-1 の解析モデル及び作成したユーザーサブルーチンを用いて、溶接を模擬した伝熱解析及び熱弾塑性解析、及びPWHTを模擬する弾塑性クリープ解析を実行した。まず、伝熱解析を行い、体系内の温度分布及び相変態の履歴を算出した。その後、算出した伝熱解析の結果を用いて、体系内の応力分布を算出した。溶接は図 3.1.4.1-1 のパスを考慮し、その後、溶接熱処理(Post Weld Heat Treatment、以下「PWHT」という。)による応力緩和も模擬することとした。

(1) 伝熱解析

クラッド部に対する入熱履歴を用いて伝熱解析を実施した。図 3.1.4.3-1 に示した表示断面における、溶接後のマルテンサイト、ベイナイト、フェライト、オーステナイトの各相の体積分率を図 3.1.4.3-2 から図 3.1.4.3-9 に示す。また、図 3.1.4.3-12 に示す色分けのHAZ組織図を図 3.1.4.3-10 及び図 3.1.4.3-11 に示す。相分率の傾向は文献^(3.1.4.1-1)の傾向と概ね一致しており、解析が正しく行われていると考えられる。

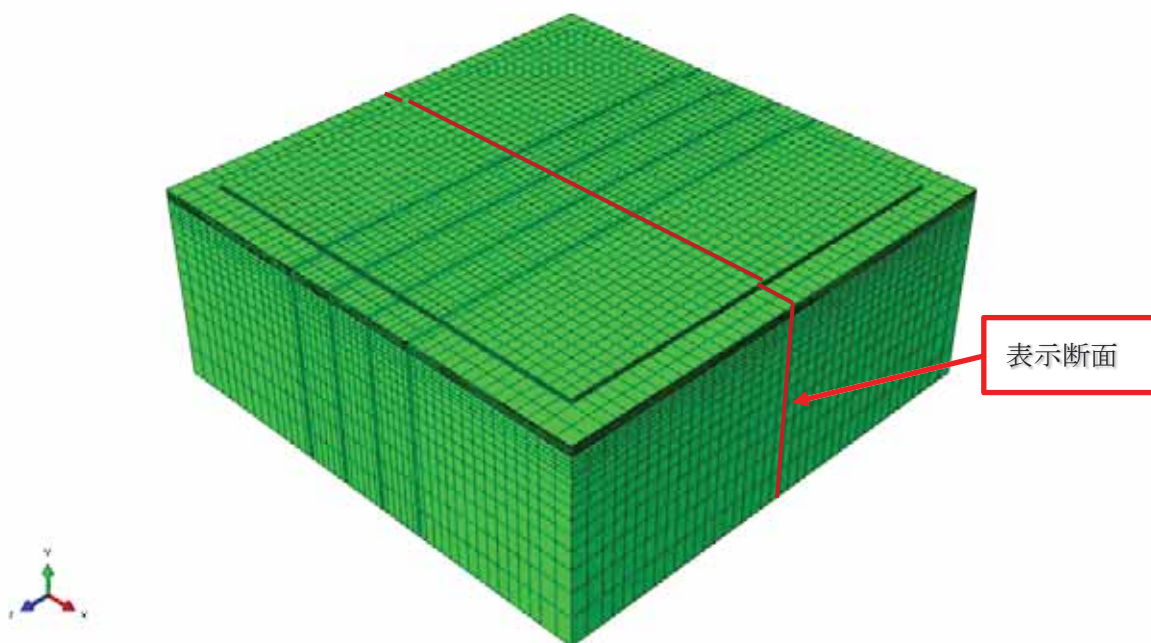


図 3.1.4.3-1 解析結果表示断面

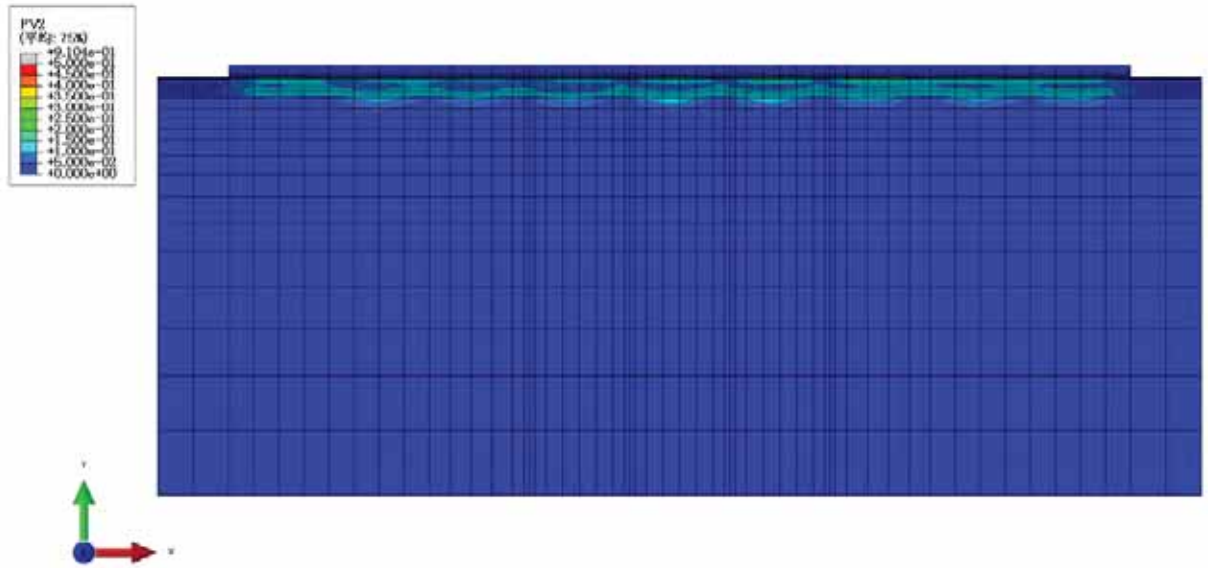


図 3.1.4.3-2 マルテンサイト(断面全体図)

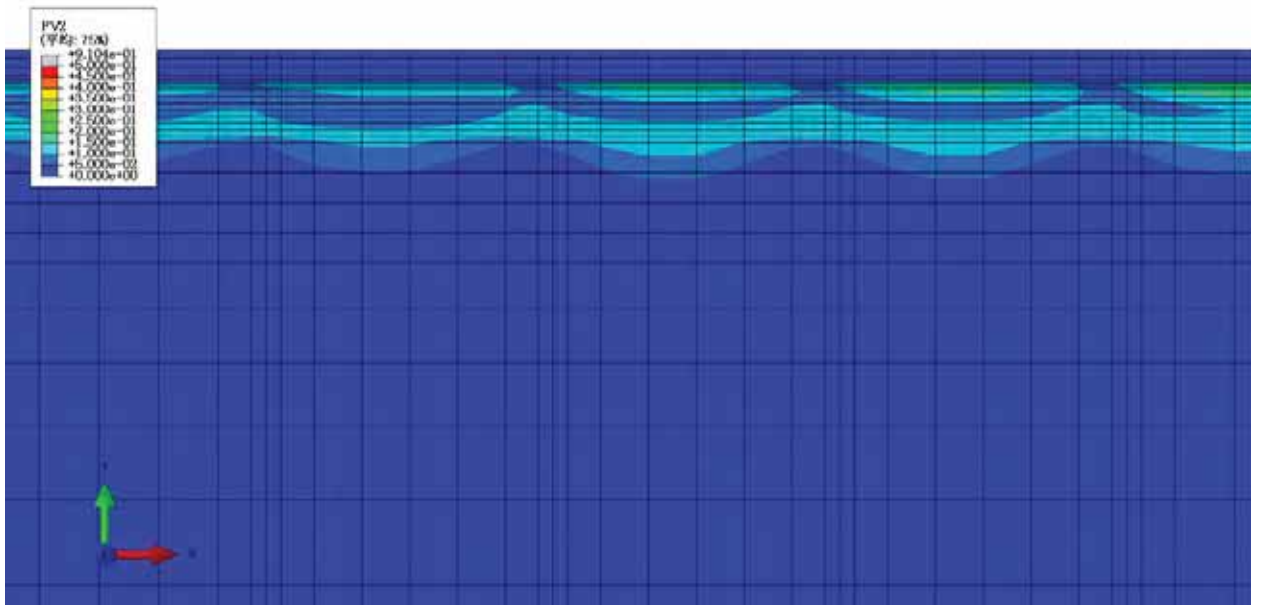


図 3.1.4.3-3 マルテンサイト(5 パス目付近拡大図)

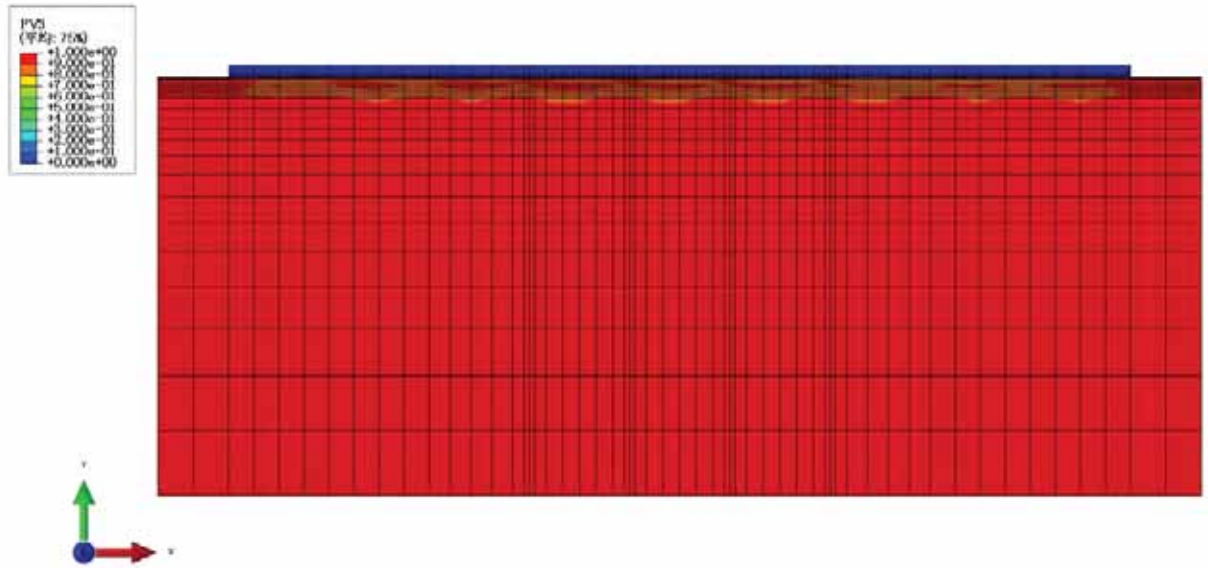


図 3.1.4.3-4 ベイナイト(断面全体図)

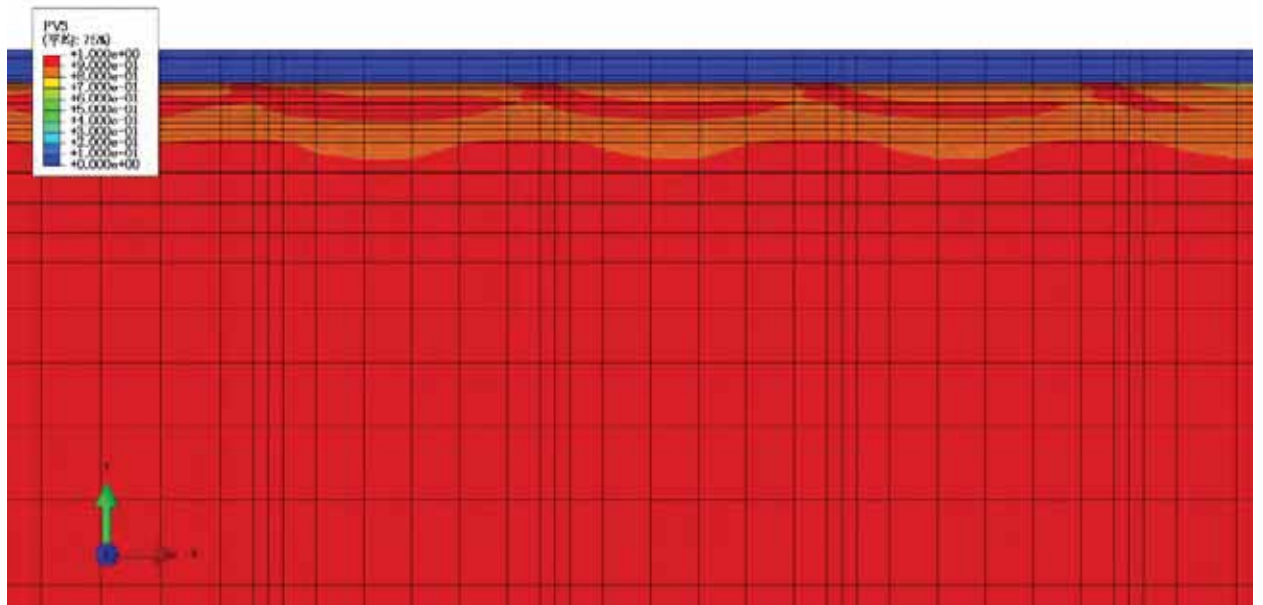


図 3.1.4.3-5 ベイナイト(5パス目付近拡大図)

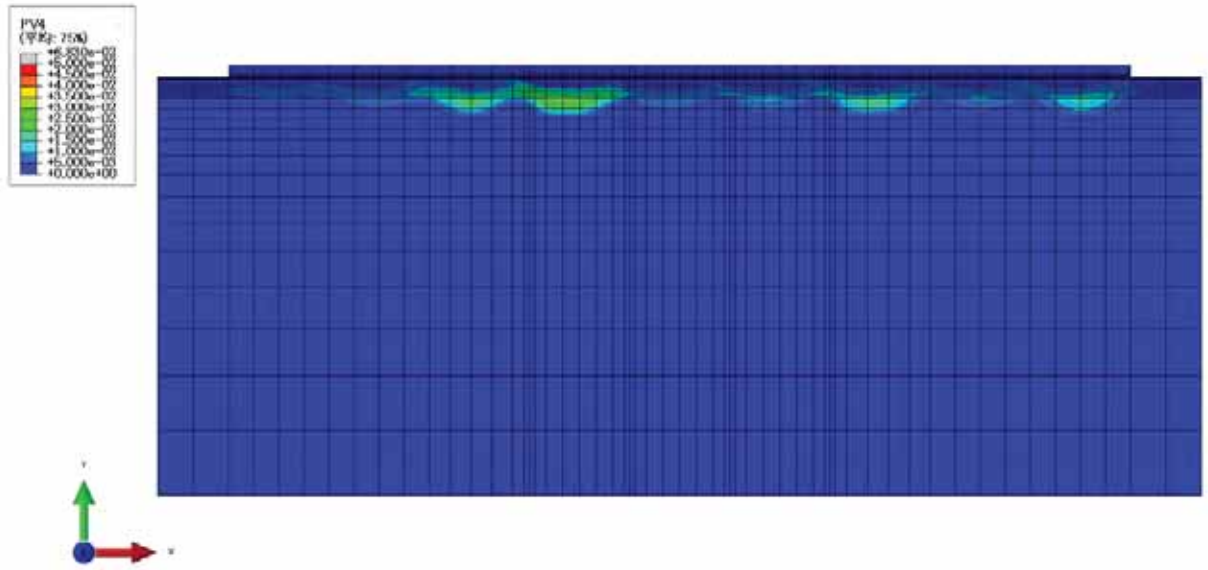


図 3.1.4.3-6 フェライト(断面全体図)

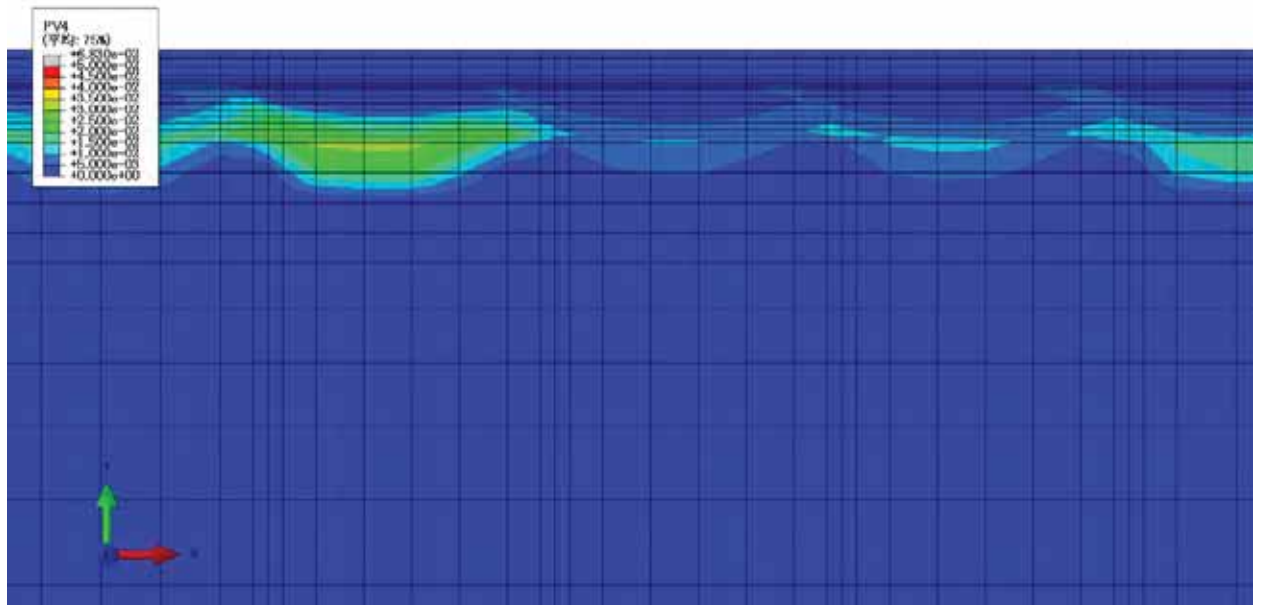


図 3.1.4.3-7 フェライト(5パス目付近拡大図)

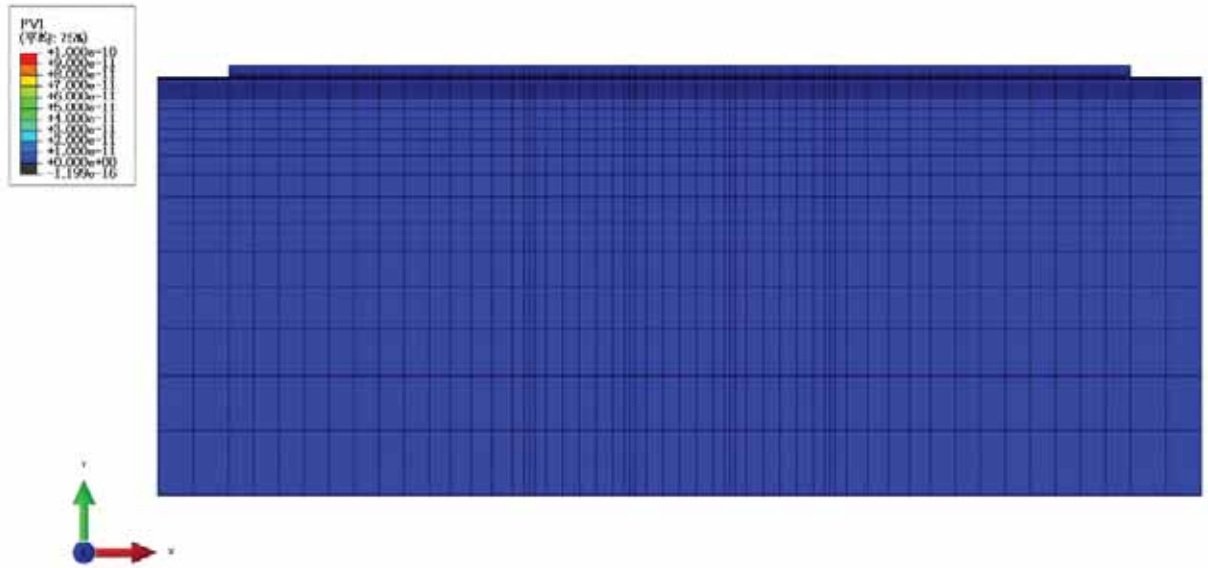


図 3.1.4.3-8 オーステナイト(断面全体図)

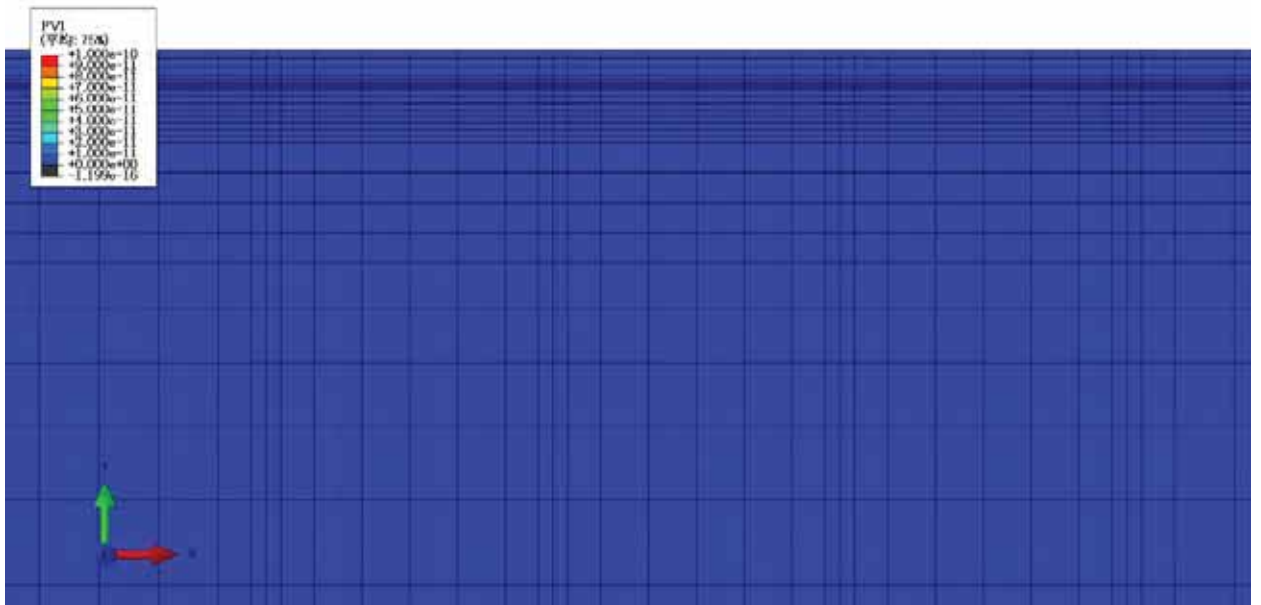


図 3.1.4.3-9 オーステナイト(5 パス目付近拡大図)

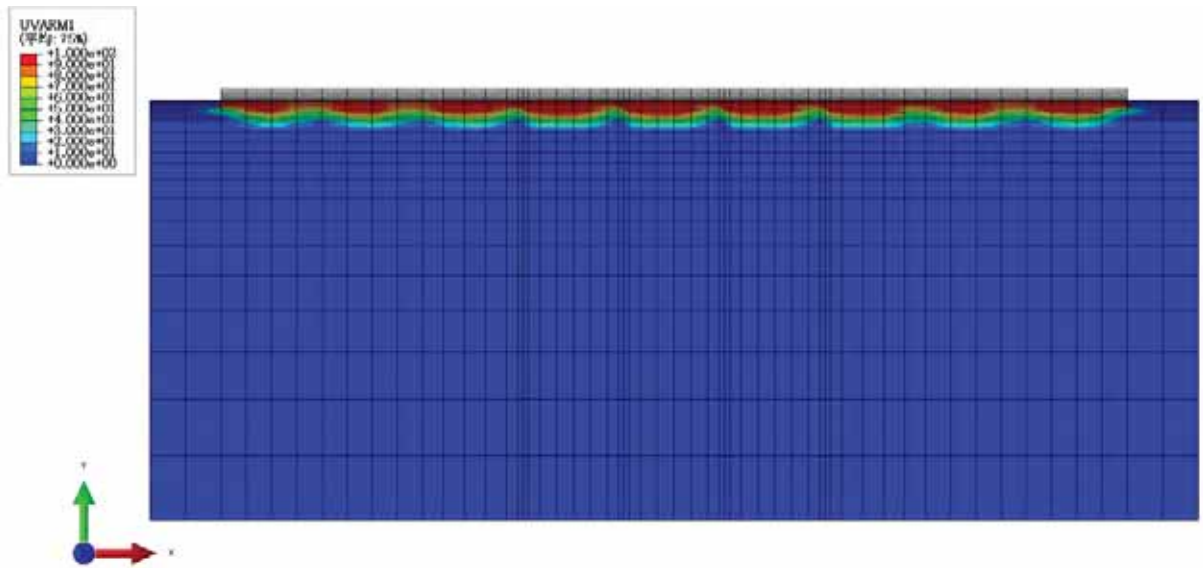


図 3.1.4.3-10 HAZ 組織の分類(HAZ 組織の分類)

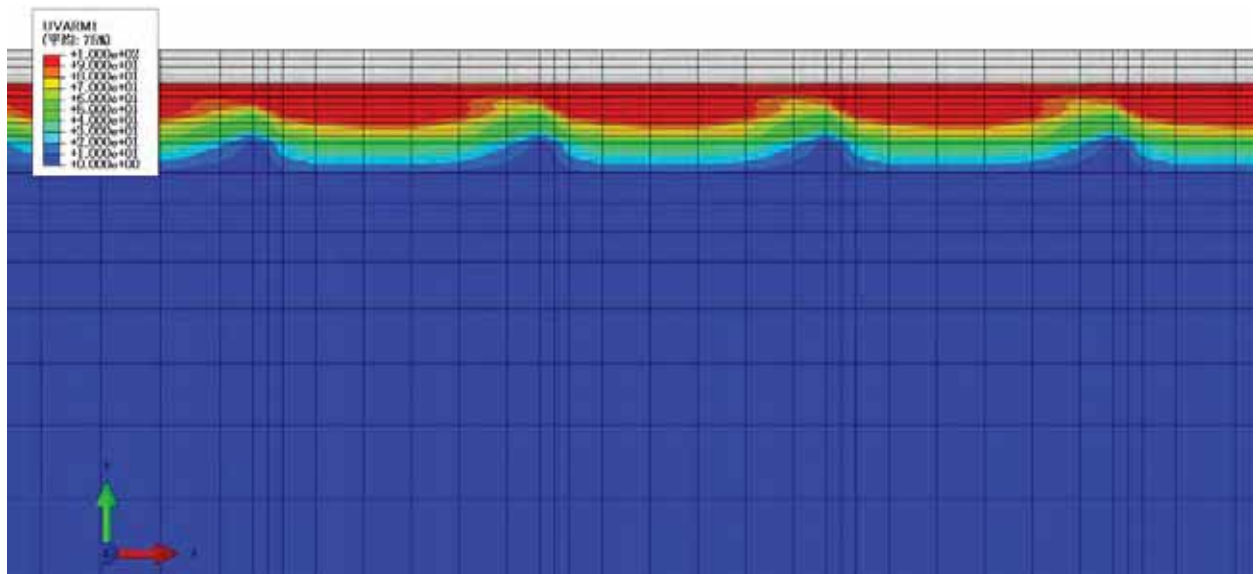


図 3.1.4.3-11 HAZ 組織の分類(5パス目付近拡大図)

色分け	数値	ICFGHAZ	40
CGHAZ	100	SCCGHAZ	80
FGHAZ1	70	SCFGHAZ	30
FGHAZ2	60	ICHAZ	20
ICCGHAZ	90	HAZ	10

図 3.1.4.3-12 図 3.1.4.3-10 及び図 3.1.4.3-11 の HAZ 組織分類の色分け

(2) 応力解析

伝熱解析の結果を用いて、応力解析を行った。図 3.1.4.3-13 に示した表示パスにおける軸方向(溶接パスと直行する方向)及び周方向(溶接パスと同じ方向)の応力分布を図 3.1.4.3-14 及び図 3.1.4.3-15 に示した。ここで、図 3.1.4.3-14 及び図 3.1.4.3-15 には、9パス目の溶接を行った後及び 620°C6 時間の PWHT 後の応力分布を示した。また、図 3.1.4.3-1 の断面における溶接後及び PWHT 後における軸方向及び周方向の応力分布を図 3.1.4.3-16 から図 3.1.4.3-19 に示す。軸方向、周方向どちらも溶接直後においてクラッド直下では圧縮の応力、少し離れたところから強い引張応力が発生している。溶接パスの中央とパスの境界においては境界部で中央部よりも浅い領域で引張が発生し、ピークも高くなる傾向が見られる。PWHT 後は残留応力が緩和される様子がみられ、PWHT 後は軸方向はパスの境界、周方向はパスの中央部で引張の応力が高い値を示しているが、PWHT 前に比較して十分低くなっていることが分かる。PWHT が十分に実施できていない場合、溶接残留応力がクラッドした亀裂の応力拡大係数に影響を及ぼす可能性が示唆される。

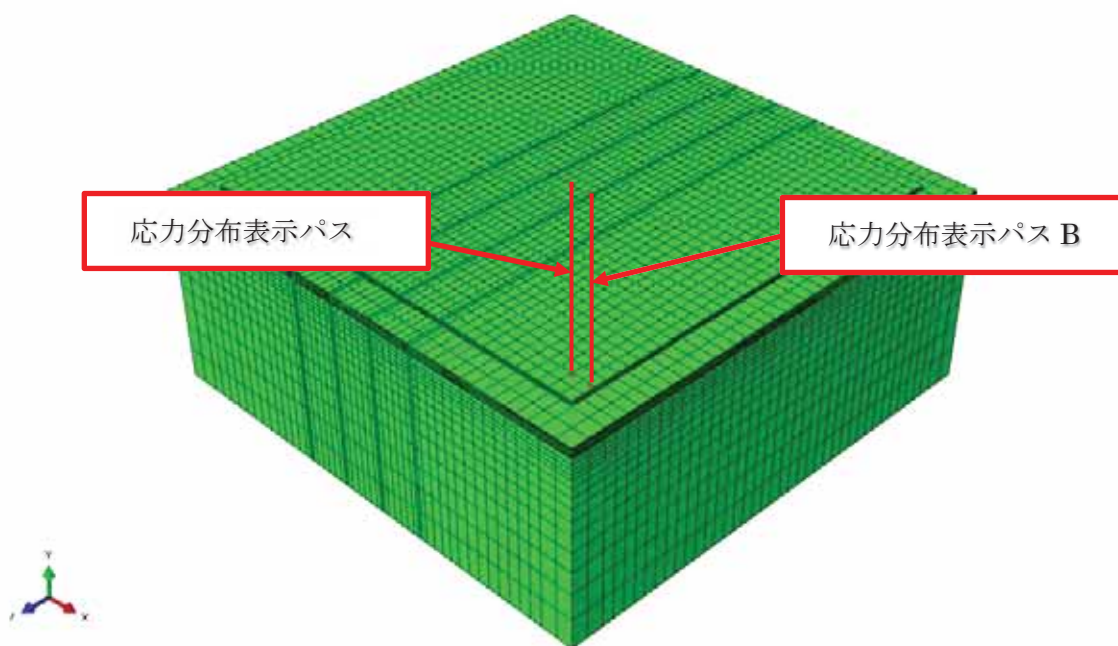


図 3.1.4.3-13 板厚方向応力分布の出力位置

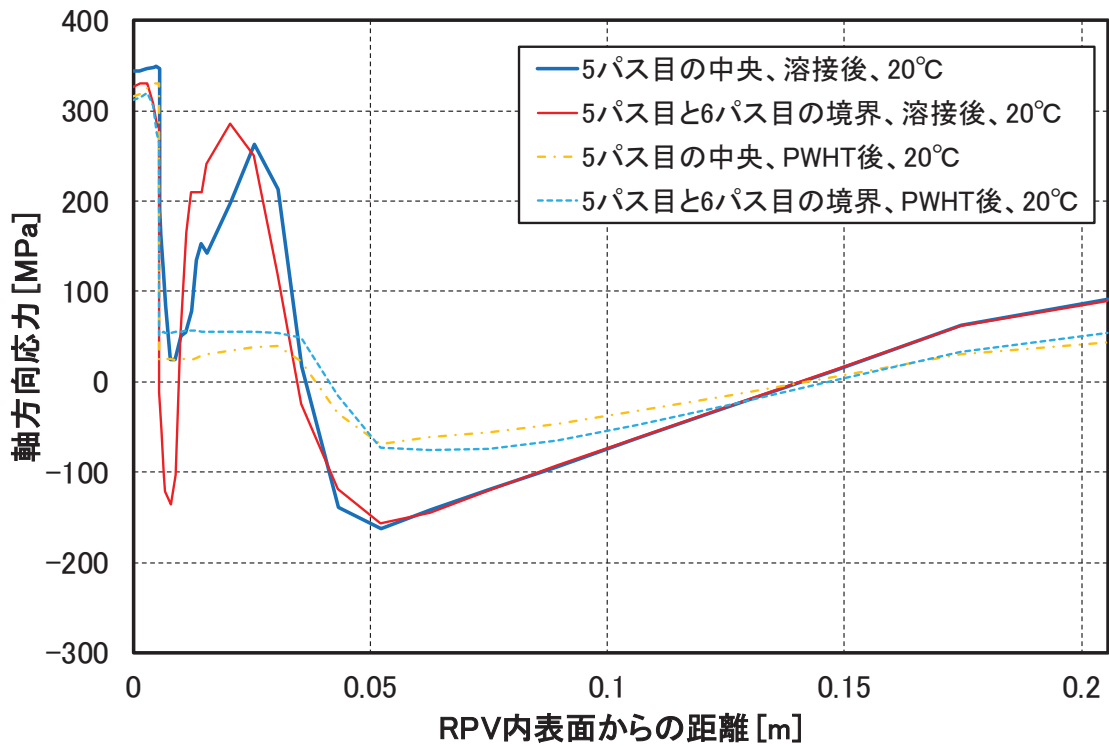


図 3.1.4.3-14 軸方向応力

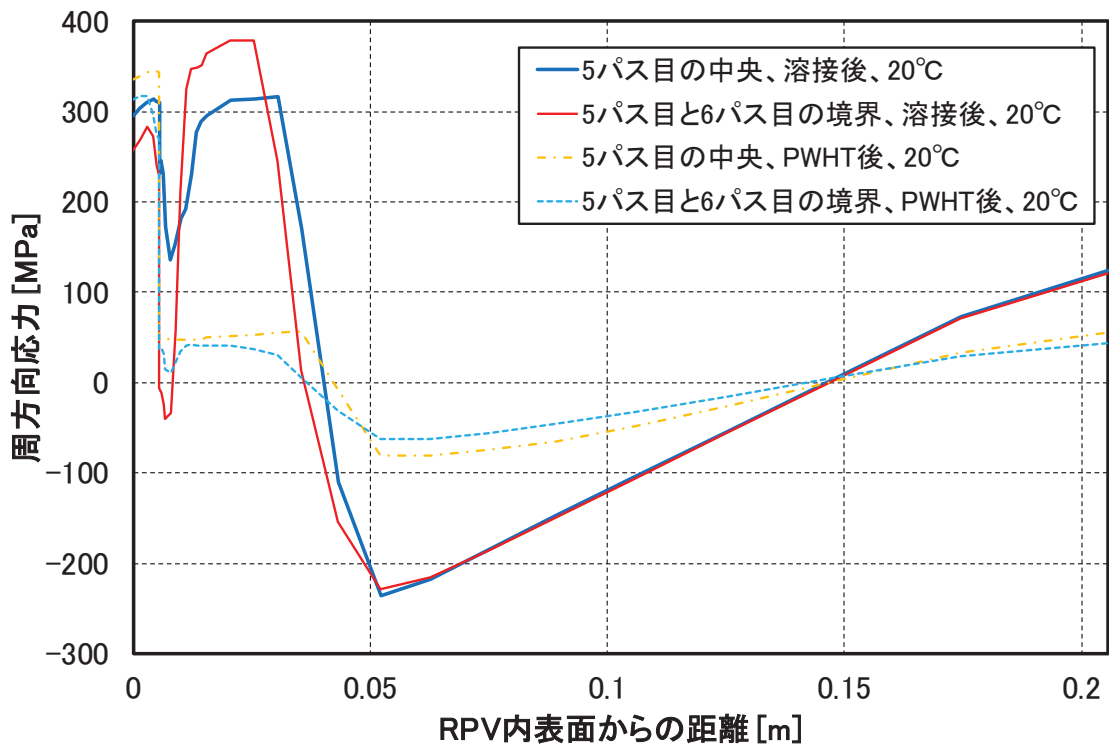


図 3.1.4.3-15 周方向応力

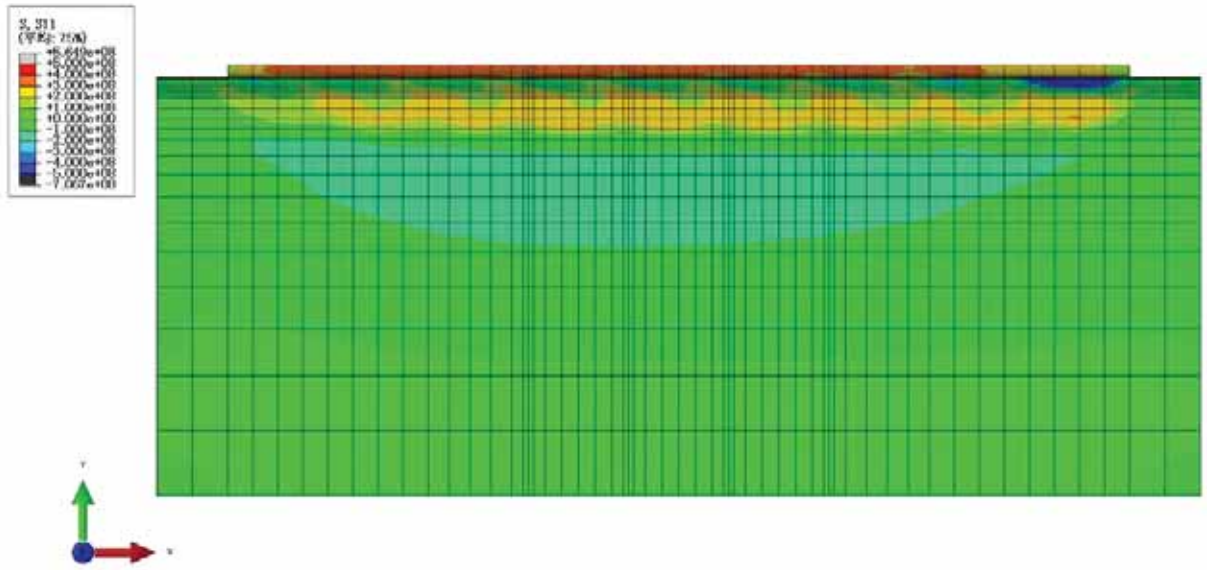


図 3.1.4.3-16 軸方向応力分布（溶接後）

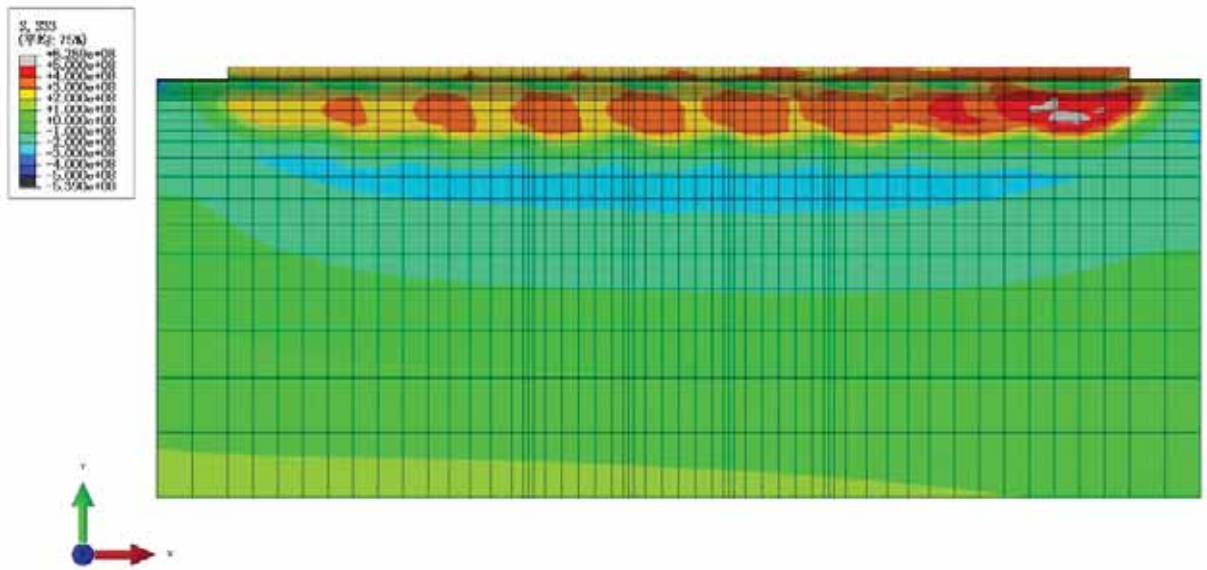


図 3.1.4.3-17 周方向応力分布（溶接後）

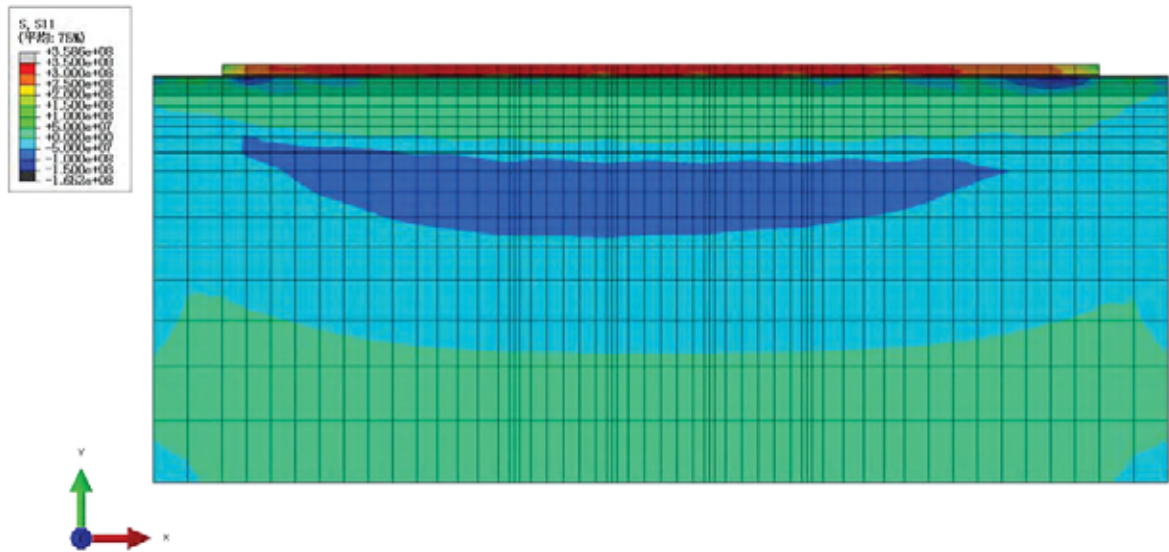


図 3.1.4.3-18 軸方向応力分布 (PWHT 後)

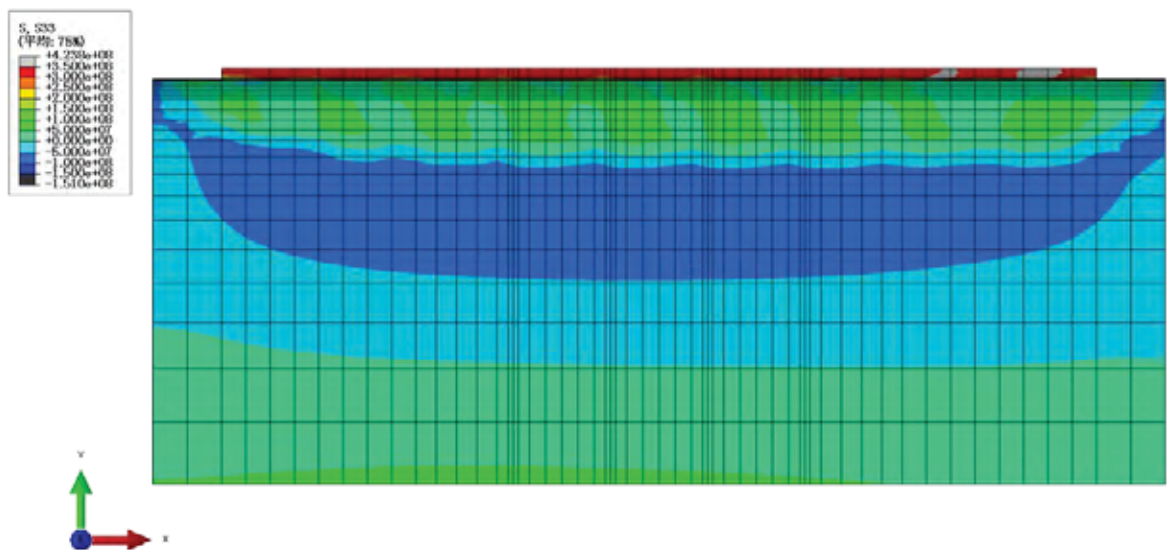


図 3.1.4.3-19 周方向応力分布 (PWHT 後)

3.1.4.4 原子炉压力容器鋼の溶接残留応力解析のまとめ

平板試験体や十字試験体を用いたクラッド部に生じる肉盛溶接による残留応力及び残留ひずみ分布を考慮した破壊靱性評価に関して、有限要素解析(FEA)に基づき、HAZ の相変態を考慮したクラッド溶接熱影響部の残留応力を解析する手法を整備した。

参考文献

- (3.1.4.1-1) J.Katsuyama, et al, “Assessment of Residual Stress Due to Overlay-Welded Cladding and Structural Integrity of a Reactor Pressure Vessel”, Journal of Pressure Vessel Technology, 135(5), 051402, (2013).

3.2 脆化予測法に係る研究

原子炉圧力容器鋼の中性子照射に伴う関連温度移行量については、材料の化学成分と中性子照射量などに対して回帰分析を行って式の形を定める現象論的手法(3.2.1-1)・(3.2.1-5)と、中性子照射に伴う材料中の溶質原子クラスターやマトリックス損傷の形成などのメカニズムに基づいてモデル式を立てる機構論的手法(3.2.1-6)・(3.2.1-7)による評価が行われている。また、原子力規制委員会において、運転期間延長認可制度および高経年化対策制度に係る安全研究の一環として、統計解析手法を用いた検討、三次元アトムプローブ等による微細組織の観察等を実施し、国として技術的知見の整備を行うとされている。(3.2.1-8) これらを受けて、本事業では関連温度移行量評価の保守性を確認するための技術的知見を整備することを目的として、平成 28 年度から平成 30 年度までの期間で関連温度移行量の統計解析および中性子照射サンプルの微細組織分析を予定する。関連温度移行量の統計解析においては、最新のベイズ統計に基づいて中性子照射条件や材料の化学成分など脆化に寄与する因子および統計的に関連温度移行量が取り得る範囲について評価し、その結果を他の手法と照合することによって関連温度移行量評価の信頼性向上に寄与する。平成 29 年度は、ノンパラメトリックベイズ (BNP)法に基づく解析の精度向上のための追加検討を実施すると共に国内原子炉圧力容器鋼の中性子照射データについて解析を実施した。BWR、PWR、母材、溶接金属などのデータ区分ごとで脆化に寄与する因子について評価した。中性子照射サンプルの微細組織分析については、中性子照射に伴う組織変化について知見を拡充するため、三次元アトムプローブを用いた溶質原子クラスター分析およびオージェ電子分光分析装置を用いた粒界偏析元素の分析を予定している。平成 29 年度は、三次元アトムプローブでは中性子照射サンプル 10 体の分析を実施した。オージェ電子分光分析では未照射材を用いた定量性に係る予備検討および中性子照射サンプルの分析に着手した。

3.2.1 関連温度移行量の統計解析

3.2.1.1 ノンパラメトリックベイズ法の概要

ノンパラメトリックベイズ(BNP)法は実測データ全体の確率分布を多変量分布の和で表現する手法であり、本解析では正規分布を用いた無限ガウス混合モデルを用いた(式(3.2.1-1))。ノンパラメトリックとは、パラメータが無いことを意味するのではなく、単一の正規分布のような少数のパラメータで記述せず、データにフィットする柔軟な無限次元の離散分布を考えることを意味する。式(3.2.1-1)の左辺は実測データ全体の確率分布、右辺が正規分布の和を表す。ここで D は実測データ、 N は正規分布、 μ および σ は多変量正規分布の平均値および標準偏差(分散-共分散行列)、 π は正規分布の重ね合わせに用いる混合比である。この時、混合比の総和、各正規分布の確率分布の和はそれぞれ 1 となる。本手法では、実測データの数やばらつきなどの複雑さを自動的に学習して正規分布の数 k を推定し、データの当てはまり度(尤度)に応じて混合比、平均値、標準偏差などの統計量を推定する。グループの統計量の推定やグループ分けのパラメータの推定にベイズの定理を用いるが、これらの確率分布は複雑で直接計算することは出来ないため、マルコフ連鎖モンテカルロ(MCMC)を多次元の確率分布の推定に適用する。

$$p(D|\pi, \mu, \sigma) = \sum_{k=1}^{\infty} \pi_k N_k(D|\mu_k, \sigma_k) \quad (3.2.1-1)$$

$$\left(\sum_{k=1}^{\infty} \pi_k = 1, \int N_k(\mathbf{D}|\mu_k, \sigma_k) d\mathbf{D} = 1 \right)$$

$$p(d_n|k) \cdot \frac{n_k}{\alpha+n-1} (k = 1, \dots, K) \quad (3.2.1-2)$$

$$p(d_n|k^{new}) \cdot \frac{\alpha}{\alpha+n-1} (k = K+1) \quad (3.2.1-3)$$

$p(d_n|k)$:尤度

d :データ

k :グループ数

n_k :グループに所属するデータ数

α :集中度パラメータ

3.2.1.2 実測データの確率分布の推定

実測データに応じた確率分布の推定は、ディレクレ過程混合モデルやそれと等価な手法である中華料理店過程(CRP: Chinese restaurant process)を用いて行われる。(3.2.1-9) ここでは CRP に基づいた解析の流れについて記載する。図 3.2.1-1 にグループ分けの流れの模式図を示す。

はじめにグループ分けを行う初期パラメータをサンプリングし、それに基づいてグループ分けを行う。

1)初期状態ではすべてのデータは一つの同じグループに所属し、データに基づいてグループの統計量 θ_1^0 が与えられる。

2)実測データを一つ(d_m)抜き出し、もともと所属していたグループの統計量を残ったデータに基づいてベイズ更新し、 θ_1 を求める。

3)抜き出したデータとグループへの当てはまり度(尤度)を用いて、抜き出したデータが所属するグループを決定する。この時、既存のグループへの所属確率および新たなグループへの所属確率は式(3.2.1-2)および式(3.2.1-3)で与えられる。尤度が高く、所属しているデータ数が多いグループに所属する確率が高くなる。これによって、データの複雑さに応じてグループ分けの数(正規分布の数)が自動的に決定されている。

4)新たに所属するグループの統計値をベイズ更新する。

2)~4)のプロセスをすべての入力データを対象に繰り返し行う。

MCMC サンプリングで集中度パラメータ α やグループの統計量を決定するパラメータ(ハイパーパラメータ)をベイズ更新する。

2)~5)のプロセス繰り返し行い、集束していることを確認する。

収束後のサンプリング結果を用いて実測データの確率分布を推定する。

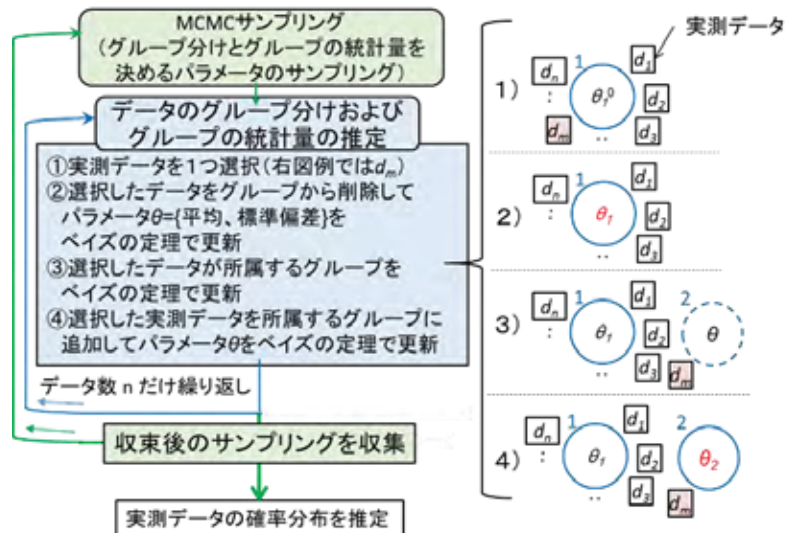


図3.2.1-1. 実測データのグループ分けのプロセスの模式図

図 3.2.1-2 に実測データの確率分布の模式図を示す。実際には中性子照射条件や化学成分など多数の入力変数を用いた解析を行うことになるが、ここでは可視化のために照射量と ΔRT_{NDT} の 2 つの入力変数に対する確率分布を示している。グループに所属するデータの特徴にしたがって、確率分布が得られており、これらを重ね合わせることで全体の確率分布を求める。このとき、グループに所属するデータ数などに基づいて混合比を決めている。

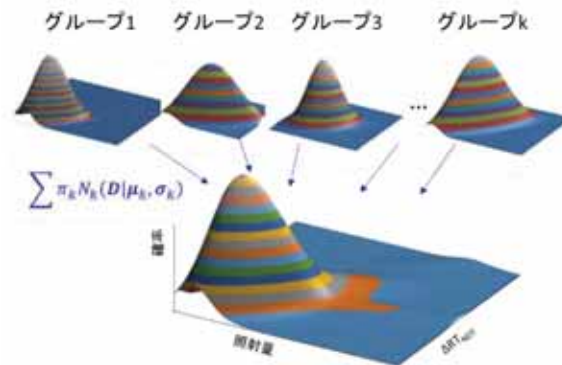


図3.2.1-2. 実測データの確率分布の推定

上記で得られた実測データの確率分布に対して、例えば、特定の照射量の断面を取ることでそれに対応した ΔRT_{NDT} の確率分布を得ることができる(図 3.2.1-3)。このような全データに対する確率分布を MCMC サンプリングごとに取得し、確率分布の中央値や周辺分布を用いて、 ΔRT_{NDT} の確信区間を推定する。

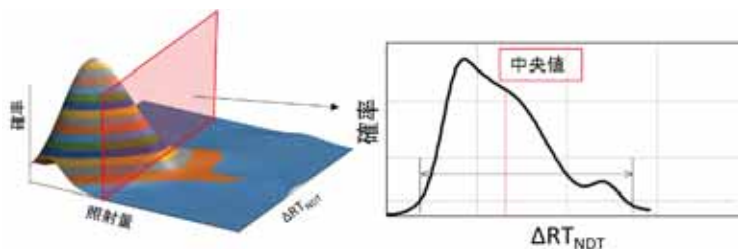


図3.2.1-3. 評価点の確率分布の模式図

3.2.1.3 平成 28 年度の実施内容

(1) 解析プログラムの整備

原子炉圧力容器鋼の化学組成、中性子照射条件、関連温度移行量等の入力変数を有する多次元のデータ(データセット)に対して、任意の評価点(中性子照射条件等の入力変数の値が一意に決まった点)に対応する関連温度移行量の最確値および確信区間を評価するため、R 言語環境(3.2.1-10) に実装可能な、計算ライブラリ DPpackage^(3.2.1-11) に機能を追加することで解析プログラムを整備した。DPpackage にはノンパラメトリックおよびセミパラメトリックベイズ推定を行う様々な関数が導入されており、応答変数(本研究では関連温度移行量(ΔRT_{NDT}))の確率分布をあらゆる関数で表現することが可能である。

本解析ではディリクレ過程正規混合モデル^(3.2.1-9) である DPcdensity 関数を採用した。DPcdensity 関数は、(n 次元の入力変数 x と 1 次元の応答変数 y をあわせた) $n+1$ 次元空間の散布点をもとにディリクレ過程正規混合モデルを適用し、MCMC を用いて条件付き確率 $P(y|x)$ や回帰曲線 $y=y(x)$ を得るものである。

① サンプルングの履歴算出機能の整備

平成 28 年度に、任意の評価点に対応する最確値と確信区間の値を算出するために必要な以下を算出する機能を整備した。

- 実測データのグループ分け履歴
- 各グループの統計量(平均・分散共分散行列)の履歴
- 評価点でのサンプルングにおける、各グループの混合比
- 評価点でのサンプルングにおける、新規グループを作成した場合の新規グループの統計量(平均・分散共分散行列)の履歴

② 確率分布の履歴を用いた解析機能の追加

任意の評価点に対応する最確値と確信区間を算出する機能を整備した。評価点に対応する確率分布の算出に必要な各グループのパラメータや混合比については、上記で出力した履歴を使用するため、同じ評価点に対して解析を実施した場合には常に同じ最確値と確信区間の値を得ることができる。また、既存解析プログラムでは確信区間の値の算出は 95% に限定されていたが、任意の値を設定して解析できるよう機能を拡張した。

③ Gelman-Rubin 統計量による解析の信頼性診断

上記で整備したプログラムを用いた解析結果において、同一の実測データと同一の入力パラメータ・関数形の組み合わせ(以下、モデル)および初期値を用いた場合であっても、複数回解析を実施したときに得られる結果が異なることがある。これはモデル自体の信頼性が低いため各解析が解空間を十分広域に渡ってサンプルングできていないことを示している。MCMC サンプラで信頼性の低いモデルを用いた時の特徴でもあることから、解析結果およびモデルの信頼性を評価する必要がある。

MCMC を用いたベイズ統計手法におけるサンプリング結果の信頼性評価手法として、サンプリングが定常状態に収束したことを Gelman-Rubin 統計量を用いて診断する方法があり、WinBUGS^(3.2.1-12) や RStan^(3.2.1-13) などの MCMC サンプラでサンプリングの収束性評価指標としてよく利用されている。Gelman-Rubin 統計量は、同一モデルにおいて複数の MCMC サンプリングを実行した際の各解析のサンプリング結果の分散と各解析間の分散がほぼ同じ値であるか否かを判定する検定量であり、式(3.2.1-4)で与えられる。この手法を DPcdensity 関数に適用し、信頼性を評価する手法について検討した。Gelman-Rubin 統計量による収束診断は DPcdensity では周辺分布自体について行うことはできないが、ディリクレ過程混合モデルのハイパーパラメータおよびグループ分割数について実施可能である^(3.2.1-14)。解析には R 言語の coda パッケージ^(3.2.1-15) の gelman.diag 関数を用い、解析回数を 3 回として評価を実施した。本解析では、Gelman-Rubin 統計量の"片側 95%信頼区間の値"が 1.1 以下であるとき、解析結果が収束していると診断している^(3.2.1-16)。

$$\hat{R} = \sqrt{1 + \frac{1}{n} \left(\frac{B}{W} - 1 \right)} \quad (3.2.1-4)$$

ここで、

$$B = \frac{n}{m-1} \sum_{i=1}^m (\bar{g}_i - \bar{g})^2, W = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{\sum_{j=1}^n (g_i^{(j)} - \bar{g}_i)^2}{n-1}$$

$$\bar{g}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n g_i^{(j)}, \bar{g} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{g}_i$$

$g_i^{(j)}$: 第 i 回目の解析の第 j 番目のサンプリング

(2) 既往文献データに基づく統計解析

整備した手法を用いて、公知となっている国内の PWR の原子炉圧力容器鋼の照射脆化データに対して解析を実施し、様々な入力変数・関数形の組み合わせ全 7680 モデルを対象とした評価から以下の結果が得られた。

- 解析回数を 3 回とした信頼性評価を実施し、Gelman-Rubin 統計量を用いて 280 の収束性の高いモデルを得た。
- 入力変数の数が過大になると収束性が良くないことが示された。
- 温度を入力変数とすると収束性が良くないことが示された。
- 収束性が高いと判断されたモデルにおいて Cu、Ni の他に Si 含有量が予測性に影響すること、さらに Fluence の関数形としてべき係数が収束性および予測性に影響することを示唆する結果を得た。

3.2.1.4 平成 29 年度実施内容

(1) 脆化への影響度を評価可能な統計指標の検討

BNP 法を用いた数値モデリングを探索的に行う場合、多様な脆化因子(入力変数)の組み合わせに対して解析を行い、得られた結果を比較することで最適入力変数の組合せを検討する方法が考えられる。一方で、BNP 法では MCMC サンプルングによる解析が必須であり、単一の解析における時間的コストが高いこと、また組み合わせ候補とする入力変数が多数ある場合、組み合わせ数が指数的に増大することが考えられる。

これに対して、応答変数の変動に対する各入力変数の影響度を評価して選定し、入力変数の組み合わせ総数をなるべく小さくすることが有効である。

ここでは、入力変数を選定するため、各入力変数の脆化への影響度を評価する解析(以下、感度解析)手法について調査し、試計算による検証結果を示す。

① 感度解析手法

応答変数に対する入力変数の影響度を評価する手法として、以下の 3 手法について検討した。

- ・ 偏順位相関係数による入力変数と応答変数の共変性の検定
- ・ 全入力変数を使用したモデルにおける統計量を用いた入力変数のランク付け
- ・ 広く使える情報量基準(WAIC)による入力変数のランク付け

検討の結果偏順位相関係数および全入力変数を使用したモデルにおける統計量を用いた入力変数のランク付けは、計算量および解析対象とするモデル式の特徴から適切でないと判断した。WAIC を用いた評価手法を採用し、後述の実測データを用いた評価を実施した。以下に各手法の詳細について記述する。

a. 偏相関係数や偏順位相関係数による入力変数と応答変数の共変性の検定

偏相関係数は多変量データに対して一つの正規分布に従うことを仮定し、入力変数-応答変数間の線形関係を評価するものであり、偏順位相関係数は多変量データに対して分布を仮定せず、入力変数-応答変数の単調性を評価するものである。

BNP 法においては、多変量データが不定個数の正規分布に分類されるため、全データに対する入力変数-応答変数間の線形関係や単調性の評価は意味を為さない可能性が高い。偏相関係数や偏順位相関係数による検定を BNP 法に適用することは難しいと考えられる。

b. 全入力変数を使用したモデルにおける統計量を用いた入力変数のランク付け

対象とする入力変数を用いたモデルで解析を実施し、得られた各グループの統計量(平均値ベクトル、分散共分散行列)を用いてランク付けを行う方法を検討した。一つのグループに対しては、相関係数などの手法でランク付けを行うことができるが、複数のグループを同時に評価し入力変数のランク付けを行う適切な手法は見つからなかった。

c. 広く使える情報量基準(WAIC)を用いた入力変数のランク付け

広く使える情報量基準^(3.2.1-17) (Widely Applicable Information Criterion、以下 WAIC)は、その期待値が汎化損失と一致する情報量基準であり、統計的推測において、確率モデルや事前分布の良さを評価できる。

WAIC は、式(3.2.1-5)～式(3.2.1-7)により導出される。 T_n は学習損失、 V_n は汎関数分散、 $p(X_i|w)$ はパラメータ w における応答変数 X_i の確率分布、 n はデータ数である。

$$T_n = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log E_w[p(X_i|w)] \quad (3.2.1-5)$$

$$V_n = \sum_{i=1}^n \{E_w[(\log p(X_i|w))^2] - E_w[\log p(X_i|w)]^2\} \quad (3.2.1-6)$$

$$\text{WAIC} = T_n + \frac{V_n}{n} \quad (3.2.1-7)$$

入力変数のランク付けとして、その入力変数を用いたモデルで得られる WAIC を用いることができる。WAIC が低いモデルの入力変数は応答変数に対して感度が高いといえる。また、複数の入力変数の組み合わせから、もっとも汎化損失が小さいモデルを選定する目的としても利用できる。

WAIC と同様にモデル選択に用いられる情報量基準として、AIC、BIC、WBIC、LOOCV による汎化損失がある。AIC は WAIC と同様にモデルの汎化損失に対応する情報量であるが、事後分布が正規分布で近似できることを仮定しており、DPcdensity のような階層的な構造を持つものに対しては使用できない。BIC はモデルの自由エネルギーに対応する情報量であるが、こちらも AIC と同様の理由で使用できない。

WBIC は BIC と同様にモデルの自由エネルギーに対応する情報量であり、また WAIC と同様に事後分布が正規分布で近似できない場合においても用いることができる。有力な情報量基準であるが、WAIC と比べて応用例は少ない。

LOOCV(leave-one-out cross-validation)による汎化損失は WAIC と同じ目的で使用できる情報量基準であり、候補の一つである。しかし、LOOCV は全データから一つだけを除いたデータセットを用いて除外したデータ点に対する予測を繰り返し実施するため、一度の学習と全データ点に対する予測のみで算出できる WAIC と比較して、計算時間が増大する。

参考文献が多く存在する点、DPcdensity 関数に用いることができる点、計算時間が過度に増大しない点から、WAIC による評価を適用した。

(2) WAIC を用いた評価に係る試計算

検討した感度解析手法のうち、理論上および解析の実行性の観点から最も適していると判断した WAIC を用いた評価に関して、入力変数が 1 つの場合と 3 つの場合それぞれについて試計算および検証を実施した。

① 1 応答変数×1 入力変数

応答変数・入力変数それぞれが 1 変数ずつのモデルについて試計算を行い、入力変数の寄与が WAIC の値に正しく反映されるかどうかの検証を行った。試計算においては、真の分布を式(3.1.2-8)とおき、入力変数 x および応答変数 y を式(3.1.2-8)に従う乱数から生成した。

$$x_i \sim \text{Uniform}(0, 1)$$

$$\text{ind. } y_i | x_i \sim \exp(-x_i)\mathcal{N}(y_i | x_i, 0.01) - (1 - \exp(-x_i))\mathcal{N}(y_i | x_i^4, 0.04) \quad (3.2.1-8)$$

$\text{Uniform}(a, b)$: a から b までの一様分布

$\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$: 平均 μ 、分散 σ^2 の正規分布

また比較のため、式(3.1.2-8)とは無関係に x を 0 から 1 までの一様分布から生成した。 x ・ y および x' ・ y の散布図を図 3.2.1-4 に示す。

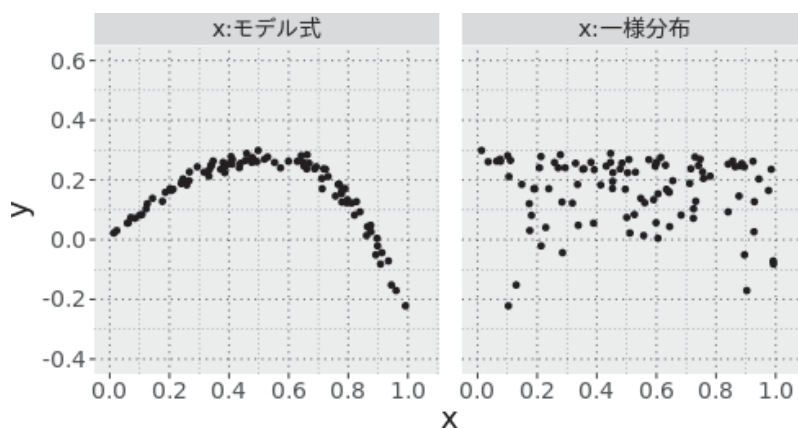


図3.2.1-4. 1 応答変数-2 種類の入力変数のテストデータ

入力変数として x もしくは x' 、応答変数として y を使い、2 ケースについてそれぞれ BNP による解析(DPcdensity)を実行し、WAIC を求めた。得られた WAIC の値を表 3.2.1-1 に示す。

表3.2.1-1. 入力変数毎の WAIC の比較

No.	入力変数	WAIC
1	式 3.2-8 をもとに生成した値	-2.482
2	式 3.2-8 とは無関係に生成した値	-0.972

表 3.2.1-1 の WAIC の値から、応答変数に寄与のある入力変数を使用したモデルのほうが、応答変数とは独立して生成された入力変数を使用したモデルよりも妥当であることが示されている。

② 1 応答変数×3 入力変数

一つの応答変数 y に対して寄与度の異なる 2 つの入力変数 x_1 、 x_2 を 2 変数もつモデルを作成し(式(3.2.1-9))、このモデルからのテストデータ(y 、 x_1 、 x_2)を生成した。また、モデル式とは無関係に 0 から 1 までの一様分布から x_3 を生成した(図 3.2.1-5)。応答変数 y への寄与度としては、式(3.2.1-9)より x_1 が x_2 より大きく、 x_3 は一切応答変数に寄与していない。また、相関係数が示す通り、 x_1 、 x_2 、 x_3 はそれぞれ互いに相関は無いものとしている。

x_1 、 x_2 、 x_3 から入力変数の組み合わせを作成して WAIC の算出を行った(表 3.2.1-2)。入力変数を 1 変数とした場合は、応答変数への寄与度の順で WAIC が低い値をとっている。また、 x_1 、 x_2 、 x_3 すべてを入力変数とするより、 x_1 、 x_2 のみを入力変数とする方が低い WAIC 値となり、 x_3 が応答変数に対して感度が低いことが WAIC から分かる。

このように、複数の入力変数を用いた場合であっても、WAIC により入力変数ごとの応答変数への感度解析を行うことができる。

$$x_{1_i} \sim \text{Uniform}(0, 1)$$

$$x_{2_i} \sim \text{Uniform}(0, 1)$$

$$y_i | x_{1_i}, x_{2_i} \overset{\text{ind.}}{\sim} 0.6 \times \{e^{-x_{1_i}} \mathcal{N}(y_i | x_{1_i}, 0.01) - (1 - e^{-x_{1_i}}) \mathcal{N}(y_i | x_{1_i}^4, 0.04)\} + 0.4 \quad (3.2.1-9)$$

$$\times \{e^{-x_{2_i}} \mathcal{N}(y_i | x_{2_i}, 0.01) - (1 - e^{-x_{2_i}}) \mathcal{N}(y_i | x_{2_i}^4, 0.04)\}$$

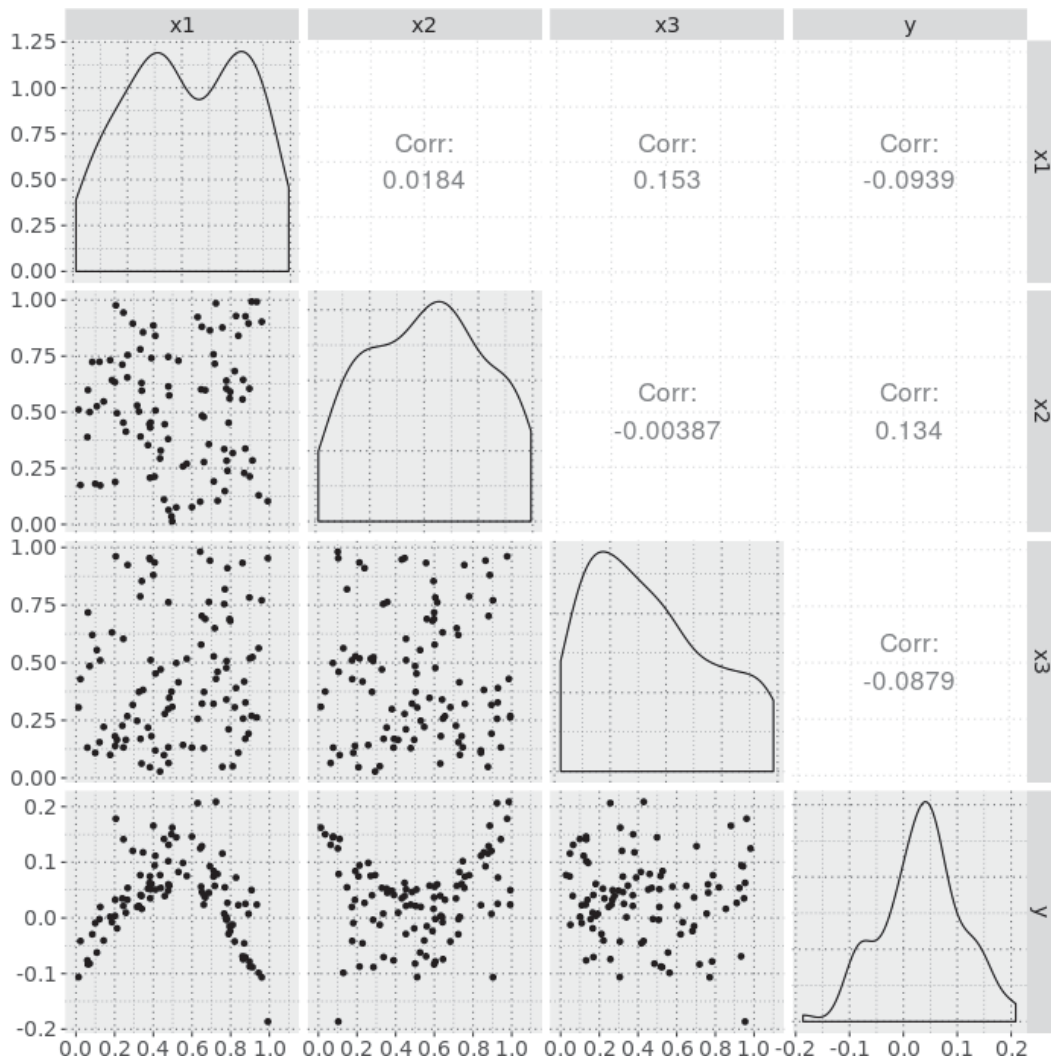


図3.2.1-5. 1 応答変数-3 種類の入力変数のテストデータ

(下三角成分:2 変数の散布図、対角成分:各変数の密度分布、上三角成分:2 変数の相関係数)

表3.2.1-2. 入力変数組み合わせごとの WAIC の比較

No.	入力変数	WAIC
1	x_1 のみ	-1.664
2	x_2 のみ	-1.350
3	x_3 のみ	-1.144
4	x_1 および x_2	-2.366
5	x_1 および x_3	-1.561
6	x_2 および x_3	-1.329
7	x_1 、 x_2 、および x_3	-2.295

(3) 平成 28 年度に実施した国内原子炉圧力容器鋼の関連温度移行量を用いた解析に対する評価

平成 28 年度に実施した解析において、3 回の解析で信頼性が高いと判断された 280 モデルについて、WAIC による評価を行った。評価条件を表 3.2.1-3 に示す。WAIC とともに、計算値と実測値の残差の標準偏差を算出した。

表3.2.1-3. WAIC 算出の条件

項目		内容
解析データ		国内原子炉圧力容器鋼の関連温度移行量
モデル		平成 28 年度の解析で信頼性が高いとされた 280 モデル
MCMC	nburn	30000
	nsave	10000
	nskip	10
解析数		3

nburn : MCMC 開始からサンプリングを開始するまでの繰り返し数。

(MCMC ここまでの繰り返しは解析に使用しない)

nsave : サンプリングする回数

nskip : サンプリング間の繰り返し数

残差の標準偏差については、平成 28 年度の結果と同等の解析結果が得られていることを確認した。

図 3.2.1-6 より、WAIC と残差の標準偏差にはおおむね相関があることが分かる。また、WAIC が近い値であっても残差の標準偏差は数度の幅を持っており、WAIC が最小のモデルと残差の標準偏差が最小のモデルが必ずしも一致していないことがわかる。

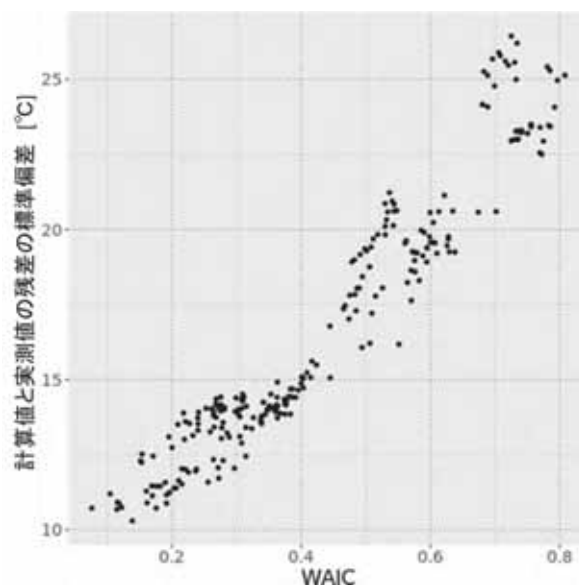


図3.2.1-6. WAIC と計算値と実測値の残差の標準偏差(公開データを用いた解析結果)

BNP 法における確率分布は、実測データに対して算出するため、実測データに対応する予測値と実測値の残差の標準偏差の評価では、過学習により低い値となる可能性が有る。

実際に過学習が生じているかを検証するため、WAIC が最小のモデルと残差の標準偏差が最小のモデルに対して、k-fold クロスバリデーションを用いて未知データに対する予測値と実測値の残差の標準偏差を評価した。

k-fold クロスバリデーションによるモデル評価の模式図を図 3.2.1-7 に示す。実測データをランダムに k 分割し、(1-k)ブロックを学習用データとし、残る 1 ブロックを予測に用いるテスト用データとする。テスト用データを切り替えながら k 通りの解析・計算を行い、すべての計算結果を用いて、計算値と実測値の残差の標準偏差を算出する。これによって、学習データに存在しない未知データに対するモデルの予測性を評価することができる。

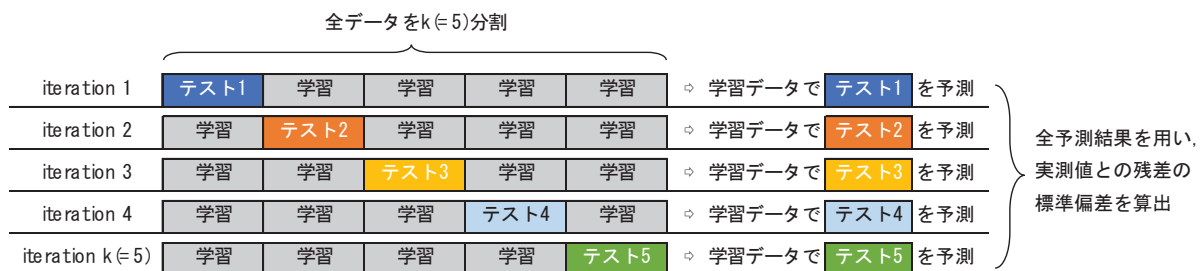


図3.2.1-7. k-fold クロスバリデーション(k=5)を用いた評価の模式図

ここでは実測データを 20 分割し(k=20)、k-fold クロスバリデーションによる計算値と実測値の残差の標準偏差を算出した。また、k-fold クロスバリデーションはデータの分割パターンによって結果が変動するため、分割データを 10 パターン用意し、それぞれについて k-fold クロスバリデーションを行った。結果を表 3.2.1-4、図 3.2.1-8 に示す。case は個別の分割パターンに相当する。k-fold クロスバリデーションによる残差の標準偏差は全ての case で WAIC が小さいモデルで低い値をとっていることから、実測データに対する残差の標準偏差が最も小さかったモデルは、実測データに対して過学習が生じており、未知データに対する予測性は WAIC が小さいモデルの方が優れていると言える。k-fold クロスバリデーションの結果は WAIC による評価結果と整合しており、WAIC が適切に汎化能力を評価できることが確認された。

表3.2.1-4. k-fold クロスバリデーションによる予測値と実測値の残差の標準偏差[°C]

case	WAIC が最小	残差の標準偏差が最小
全 case の平均	11.824	12.046
1	11.733	12.126
2	11.904	12.190
3	11.896	12.017
4	11.850	12.037
5	11.694	11.943
6	11.841	11.953
7	11.995	12.117
8	11.893	12.020
9	11.808	11.967
10	11.624	12.093

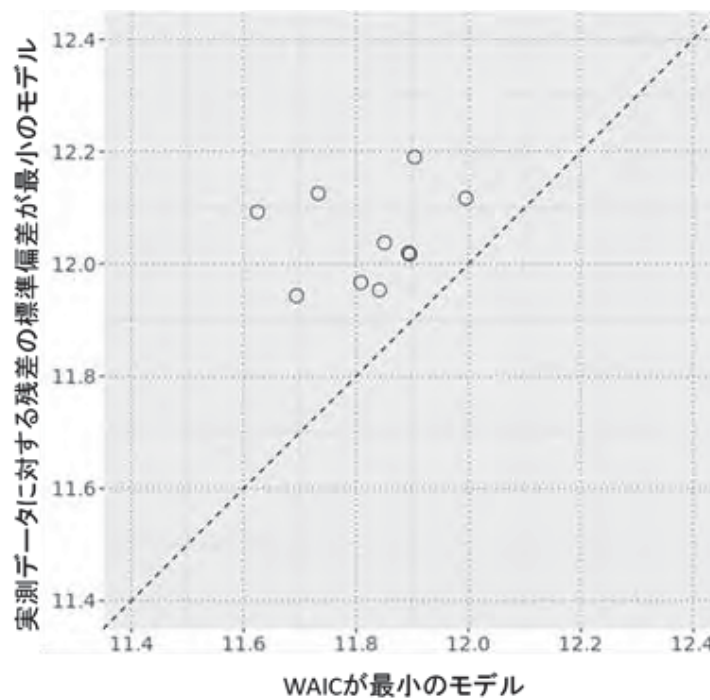


図3.2.1-8. case ごとのクロスバリデーションによる残差の標準偏差[°C]

(4) 実測データを用いた脆化因子の評価

① 解析に用いた国内原子炉圧力容器鋼の関連温度移行量データ

平成 29 年度の解析に用いた国内原子炉圧力容器鋼の関連温度移行量データの範囲を表 3.2.1-5 に、入力変数の相関を図 3.2.1-9～図 3.2.1-11 に示す。BWR、PWR、試験炉(MTR)で、それぞれ異なる範囲にデータが分類しており、特に Fluence、Flux の分布は炉型によって大きく異なることが分かる。また、入力変数同士の相関を見ると、Cu と P に正の相関があることや、Ni と RT_{NDT} 初期値に負の相関があることなどが明瞭にみられる。これらのデータを用いて、関連温度移行量に寄与する入力変数の評価や、関連温度移行量評価の不確かさに関する検討を実施した。

表3.2.1-5. 解析に用いた入力変数およびデータの範囲

	Fluence ($\times 10^{19}n/cm^2$)	Flux ($\times 10^{10}n/cm^2/s$)	Temp. ($^{\circ}C$)	Cu (wt%)	Ni (wt%)	P (wt%)	Si (wt%)	Mn (wt%)	RT_{NDT} 初期値 ($^{\circ}C$)
BWR	0.0045 ～0.22	0.021 ～6.3	276	0.01 ～0.24	0.55 ～0.99	0.002 ～0.021	0.15 ～0.42	1.16 ～1.72	-80 ～-2
PWR	0.3 ～10.0	5.8 ～19	284 ～289	0.014 ～0.2	0.18 ～1.08	0.003 ～0.014	0.14 ～0.38	1.06 ～1.52	-65 ～-21
試験炉照射	2.3 ～12.9	383 ～1100	290	0.02 ～0.25	0.57 ～1.78	0.004 ～0.019	0.13 ～0.32	1.19 ～1.55	-65 ～-8
母材(試験炉照射含まず)	0.0045 ～10.0	0.021 ～190	276 ～289	0.01 ～0.24	0.18 ～0.96	0.002 ～0.021	0.14 ～0.32	1.2 ～1.52	-45 ～-21
溶接金属(試験炉照射含まず)				0.01 ～0.19	0.63 ～1.08	0.004 ～0.016	0.15 ～0.42	1.06 ～1.72	-80 ～-12

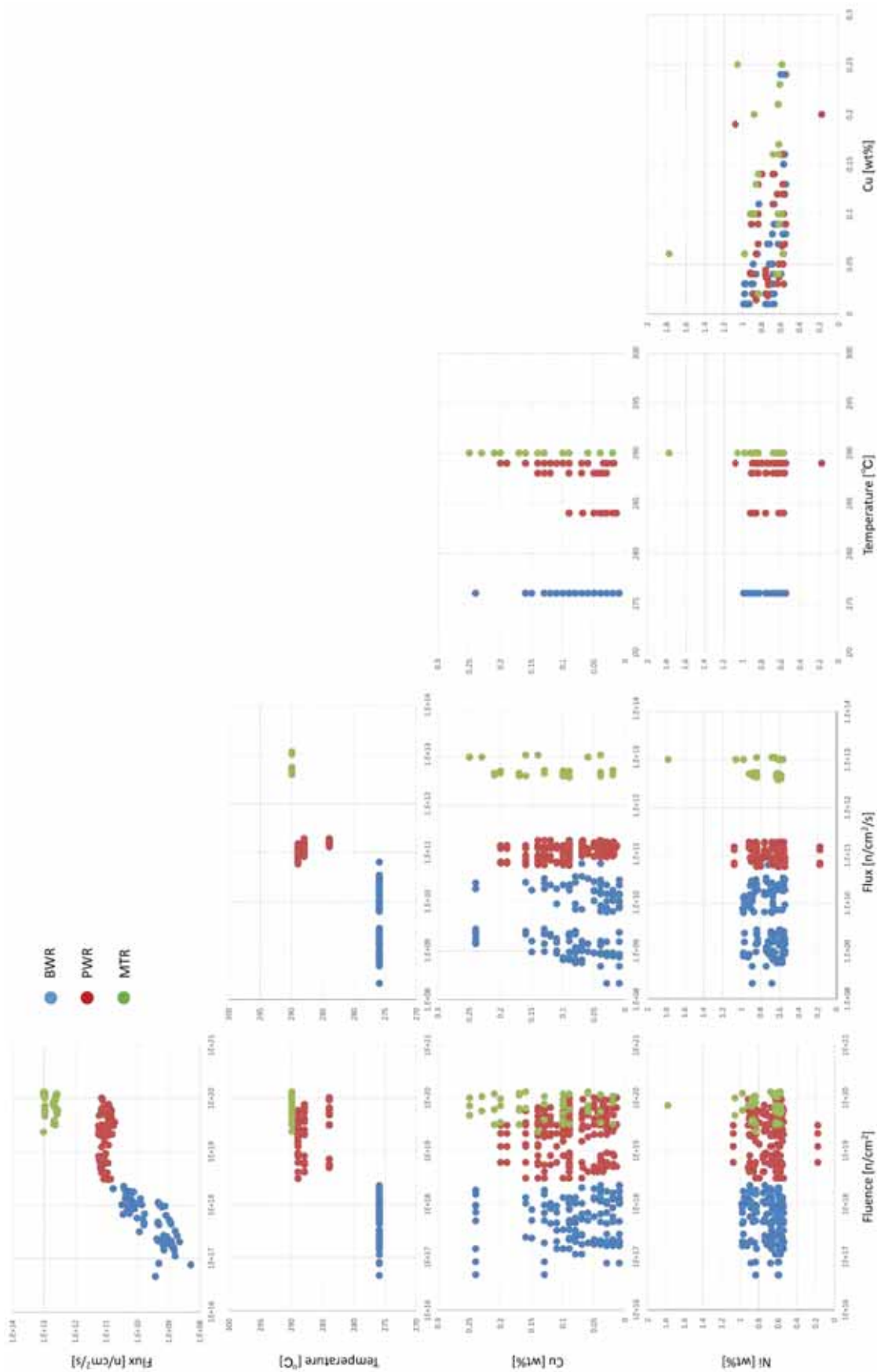


図3.2.1-9. 入力変数同士の相関 (BWR、PWR、MTR) (1/3)

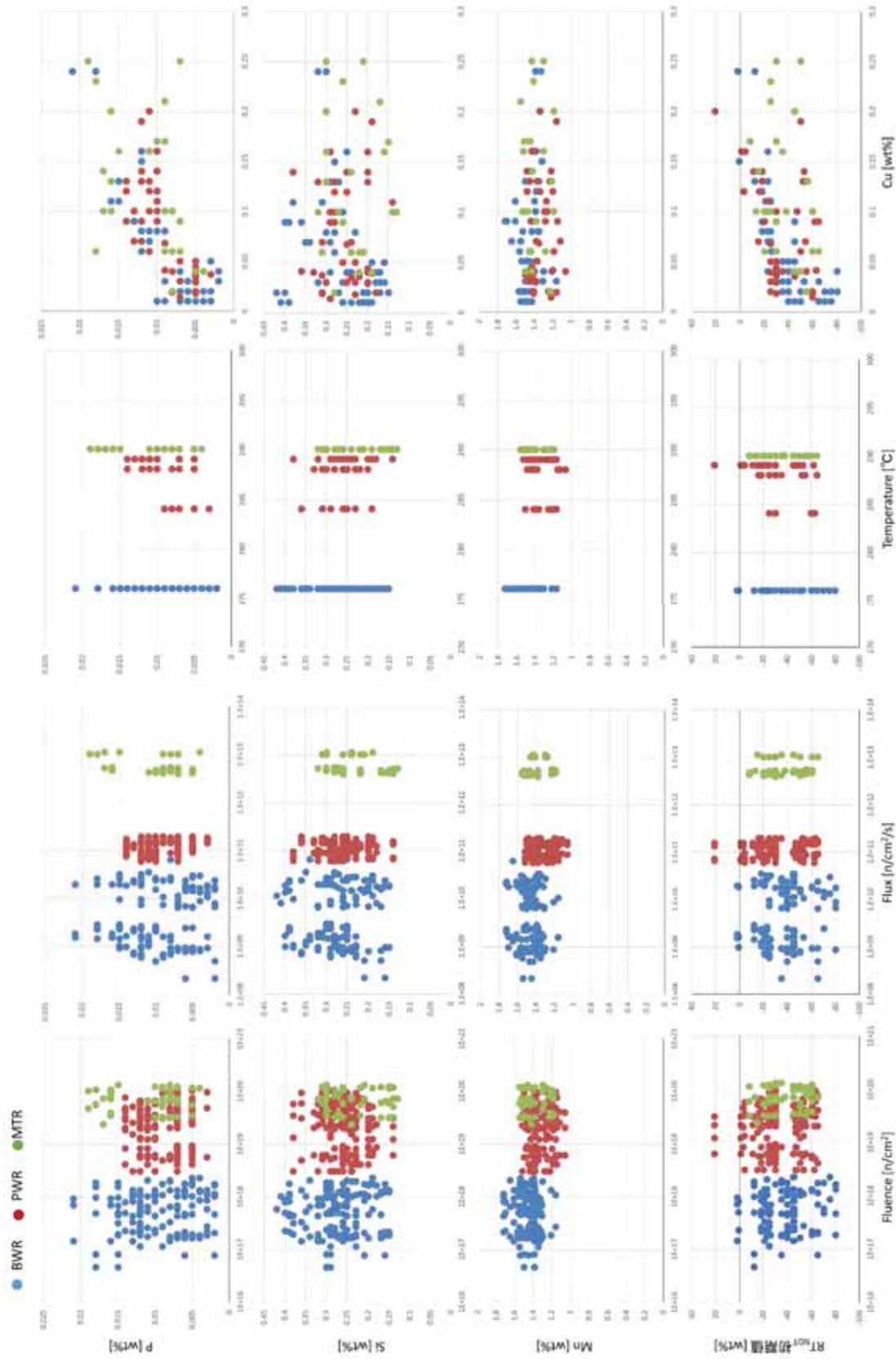


図3.2.1-10.入力変数同士の相関 (BWR、PWR、MTR) (2/3)

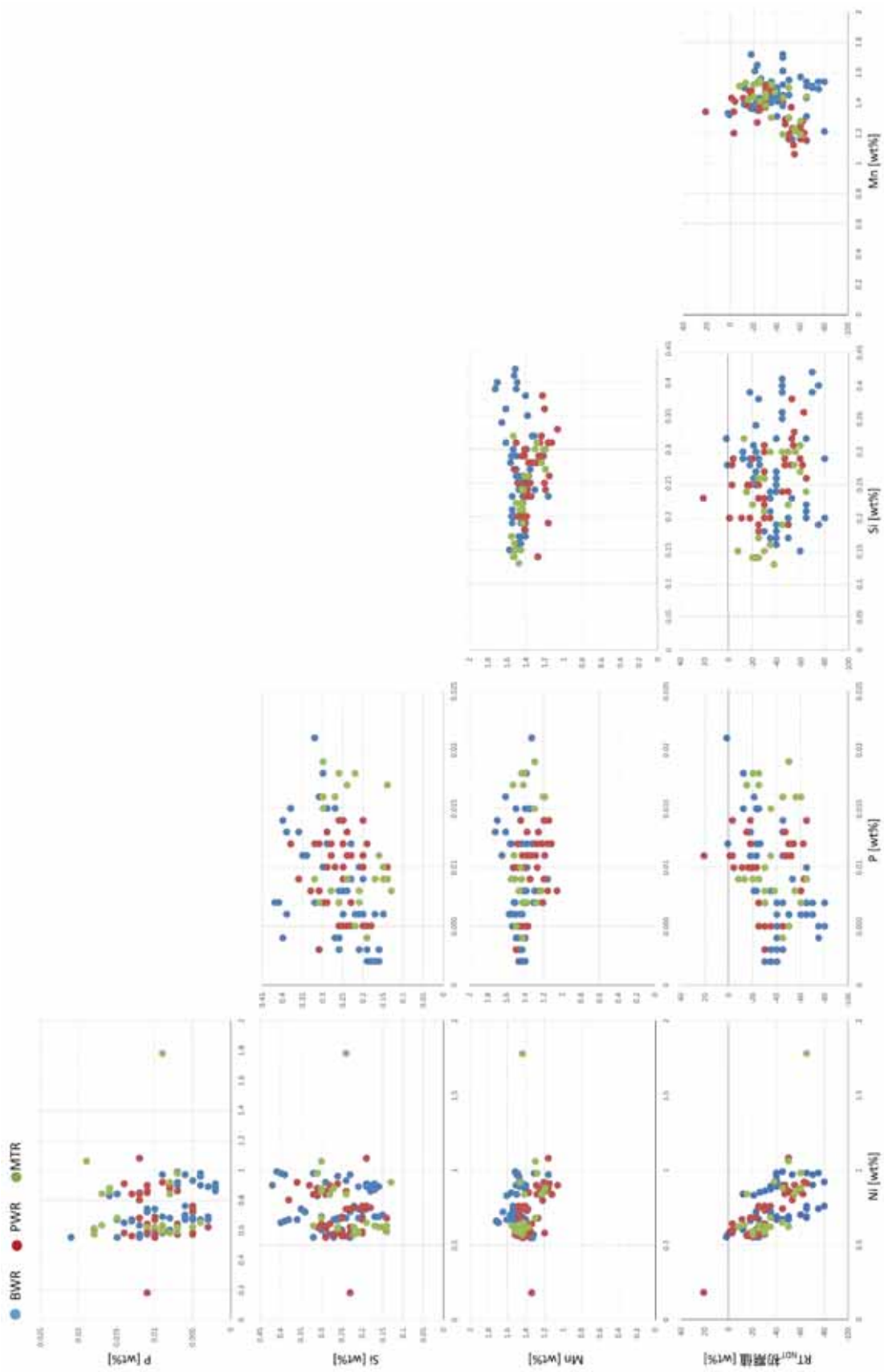


図3.2.1-11. 入力変数同士の相関 (BWR、PWR、MTR) (3/3)

② 入力変数のスクリーニング

国内原子炉圧力容器鋼の関連温度移行量データを用いて、最大 3 入力変数として材料の化学成分および照射条件の関連温度移行量への感度解析を実施し、入力変数をスクリーニングした。計算条件を表 3.2.1-6 に示す。

表3.2.1-6. 感度解析の計算条件

項目		内容
データ		国内原子炉圧力容器鋼の関連温度移行量データ(396 データ)
モデル		表 3.2.1-7 から最大 3 変数を入力変数とするモデル、総計 231 モデル(1 入力変数モデル : 11、2 入力変数モデル : 55、3 入力変数モデル : 165)
mcmc	nburn	30000
	nsave	10000
	nskip	10
解析数		1
その他		WAIC を算出

表3.2.1-7. 感度解析に用いた入力変数の候補

No.	入力変数
1	Fluence
2	Fluence05
3	Flux
4	flux05
5	Temperature
6	RT _{NDT} 初期値
7	Cu
8	Ni
9	P
10	Si
11	Mn

図 3.2.1-12 に各入力変数をもつ組合せの WAIC の箱ひげプロットを示す。箱ひげ図では、以下の値を外れ値と定義されており。外れ値は統計精度に問題があるため、取り扱いに注意が必要である。ここでは外れ値は除外して評価を実施した。

- ・ 第 1 四分位数 $-1.5 \times$ (第 3 四分位数 $-$ 第 1 四分位数)より小さな値
- ・ 第 3 四分位数 $+1.5 \times$ (第 3 四分位数 $-$ 第 1 四分位数)より大きな値

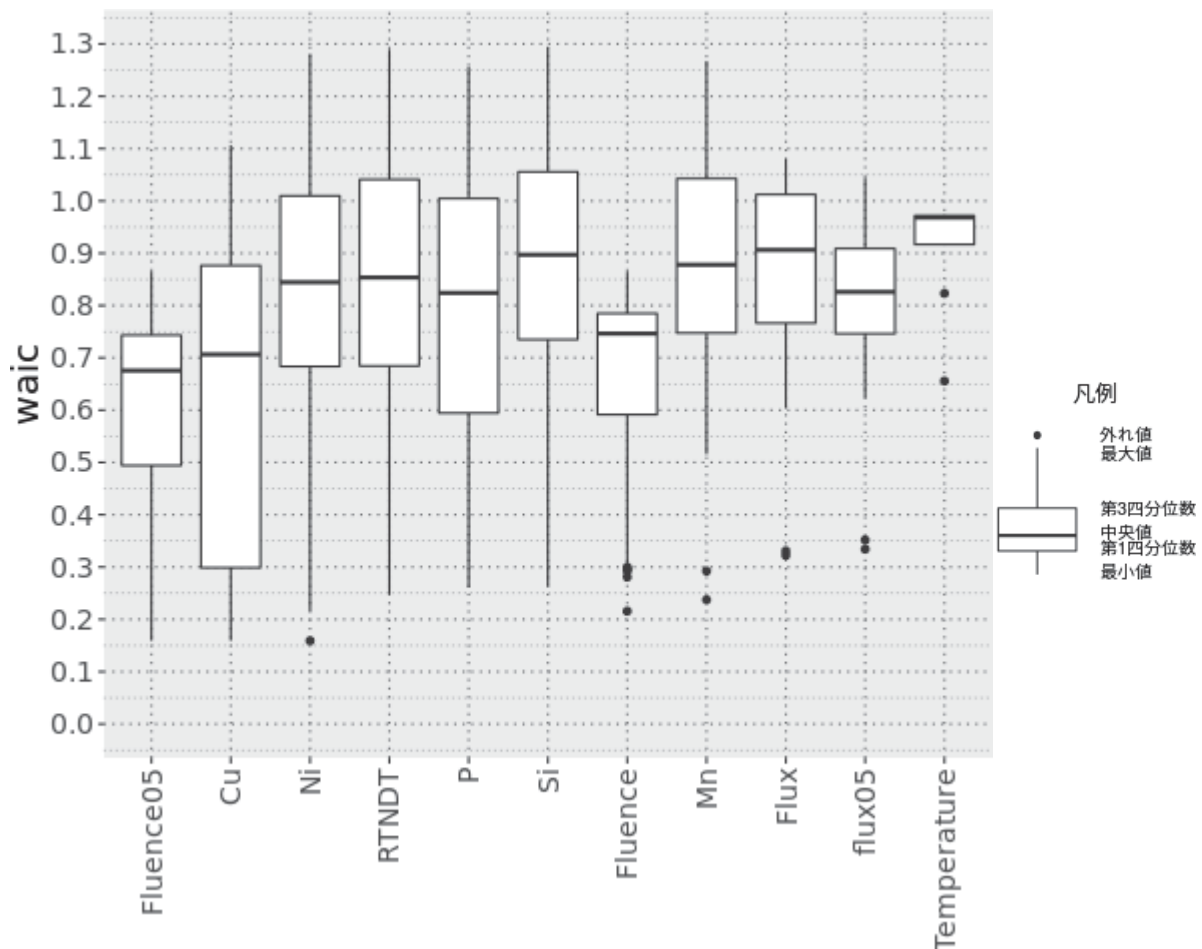


図3.2.1-12. 各入力変数を持つモデルの WAIC の分布(最小値昇順)

図 3.2.1-12 より、外れ値を除外して考えると Cu、Ni 以外の元素組成については、WAIC の最良値は P、Si、Mn の順となった。RT_NDT 初期値も WAIC を小さくする傾向にあり、脆化量への影響が確認された。Fluence はべき係数を 0.5 乗とした方がべき係数 1 乗と比較して小さな WAIC を示すことから、係数を変えた検討が有効であることが示唆された。Temperature は WAIC の値が他の入力変数と比較して良くないことから、統計評価においては入力変数候補から除外できると考えられる。

その他の入力変数については、入力変数の個数次第で変動するため、候補から除外できるかは判断できなかった。

図 3.2.1-13、図 3.2.1-14～図 3.2.1-16 に 2 入力変数と 3 入力変数における入力変数と WAIC

の関係を示す。図 3.2.1-14 より Fluence05 と Cu に別の入力変数を組み合わせた場合に WAIC が非常に低い値をとることが分かる。Fluence については、Fluence05 と挙動がよく似ているが図 3.2.1-13 から WAIC の値は常に Fluence05 を含む方が低くなることが分かる。また、図 3.2.1-14 より、Fluence-Fluence05 のペアに別の入力変数を組み合わせたモデルは、表 3.2.1-8 で示す通り、Fluence05 に別の入力変数を組み合わせたモデルより WAIC が大きく、Fluence と Fluence05 は同時に組み合わせるべきでないと考えられる。

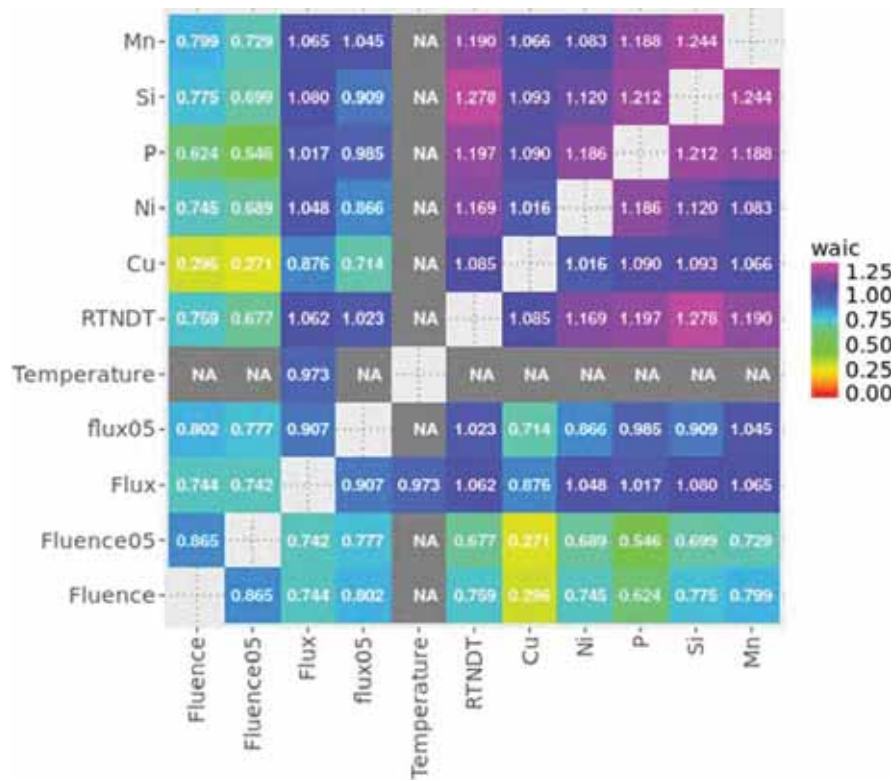


図3.2.1-13. 2入力変数モデルの WAIC

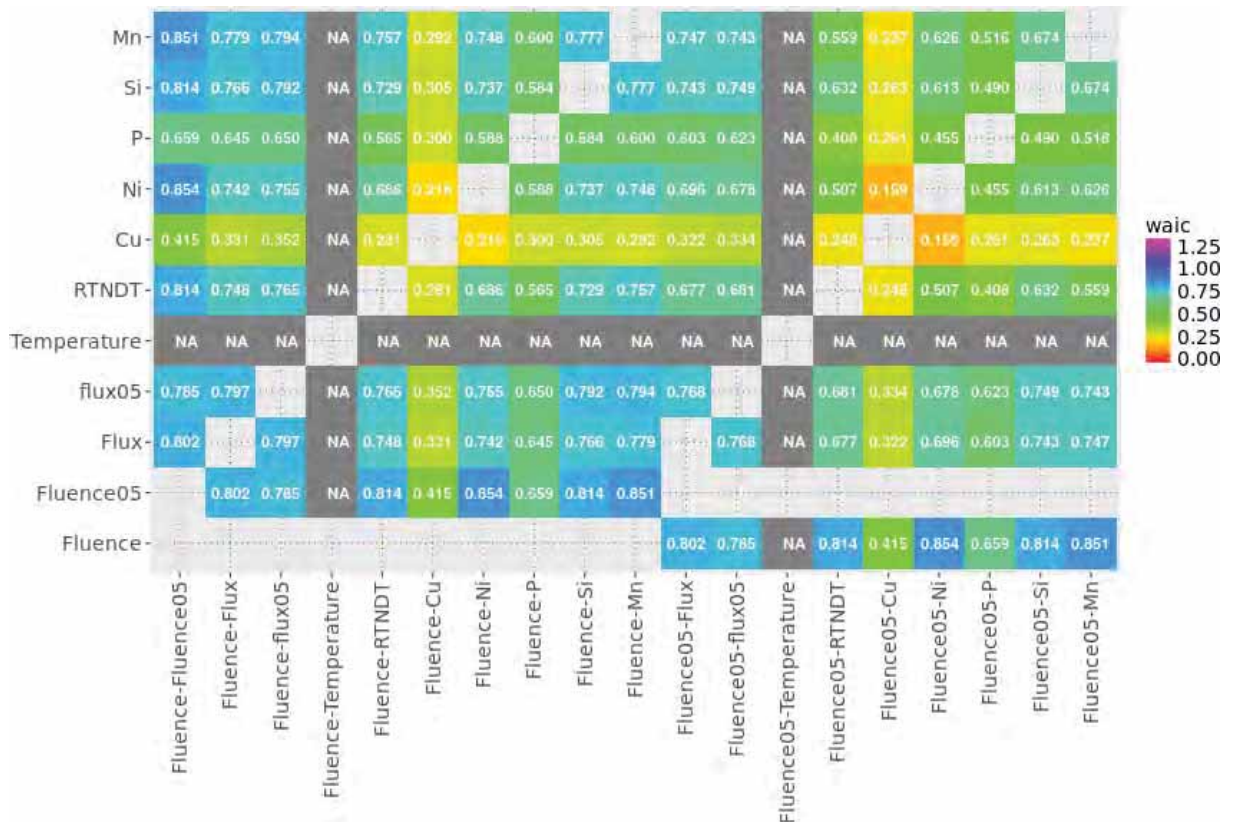


図3.2.1-14. 3入力変数の WAIC(1/3)

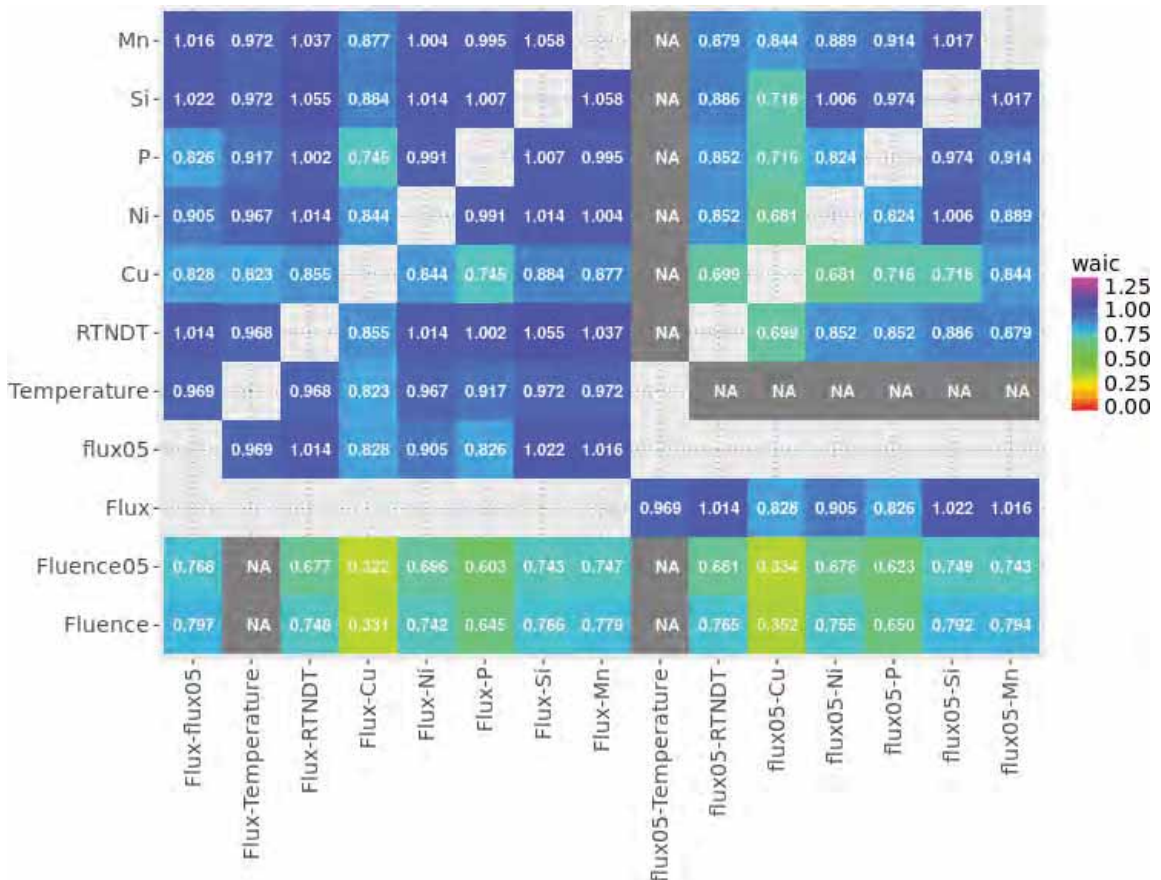


図3.2.1-15. 3入力変数モデルの WAIC(2/3)

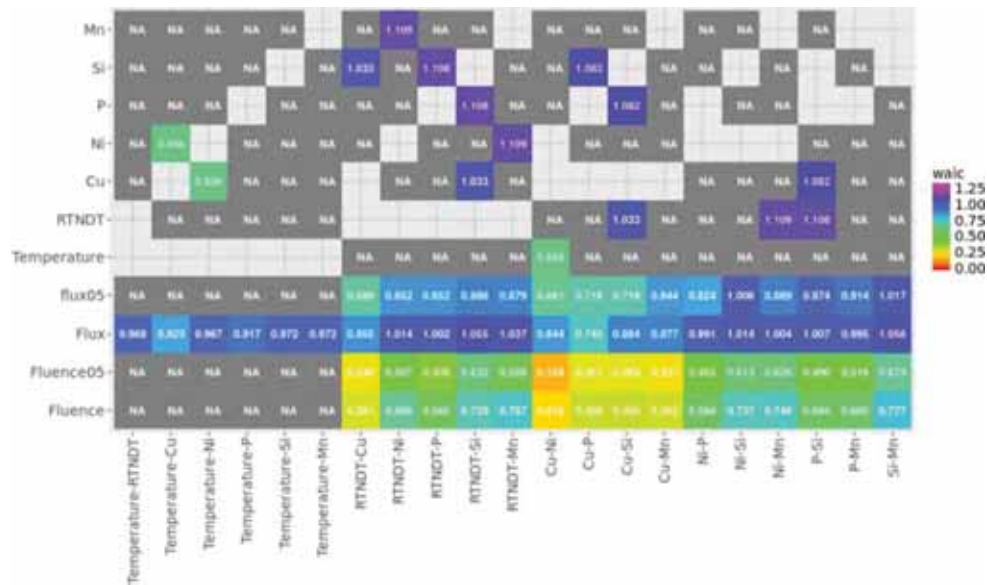


図3.2.1-16. 3入力変数モデルの WAIC(3/3)

表3.2.1-8. Fluence と入力変数の組合せと WAIC

	Flux	Flux05	Temperature	RTNDT 初期値	Cu	Ni	P	Si	Mn
Fluence	0.744	0.802	NA	0.759	0.296	0.745	0.624	0.775	0.799
Fluence05	0.742	0.777	NA	0.677	0.271	0.689	0.546	0.699	0.729
Fluence- Fluence05	0.802	0.785	NA	0.814	0.415	0.854	0.659	0.814	0.851

③ 脆化因子に係る解析

国内原子炉圧力容器鋼の関連温度移行量データに対して BNP 法に基づく解析を実施した。照射条件や材料の化学成分が脆化量に及ぼす影響を精緻に評価するため、表 3.2.1-9 に示すデータ区分それぞれに対して解析を実施し、脆化に影響する因子について評価した。

表3.2.1-9. 解析を実施したデータ区分

データ区分	データ数
全データ	396
BWR	142
PWR	206
BWR+PWR	348
母材(試験炉照射含まず)	220
溶接金属(試験炉照射含まず)	128
母材(試験炉照射含む)	252
溶接金属(試験炉照射含む)	144

入力変数として、表 3.2.1-10 に示す因子を候補とした。いずれのモデルも必ず Fluence のべき乗を入力変数として持つものとして組合せを選定した。評価に用いた入力変数の最大数と組合せ数を表 3.2.1-11 に示す。信頼性が高く、入力変数を増やすことで WAIC が小さくなることを見込めたデータ区分については最大 7 入力変数まで解析を実施している。

表3.2.1-10. 入力変数の候補

No.	因子	備考
1	Fluence のべき乗	べき係数 : 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1 全てのモデルはいずれかの Fluence のべき乗を入力変数として持つ
2	Flux のべき乗	べき係数 : 0.3、0.5、0.7、0.9、1
3	Cu	
4	Ni	
5	P	
6	Si	
7	Mn	
8	RT _{NDT} 初期値	

表3.2.1-11. 各データ区分の解析における入力変数の個数

No.	データ区分	入力変数の個数	組合せ数
1	全データ	最大 5 入力変数	2136
2	BWR	最大 5 入力変数	2136
3	PWR	最大 7 入力変数	3032
4	BWR+PWR	最大 7 入力変数	3032
5	母材(試験炉データ含まず)	最大 7 入力変数	3032
6	溶接金属(試験炉データ含まず)	最大 7 入力変数	3032
7	母材(試験炉データ含む)	最大 5 入力変数	2136
8	溶接金属(試験炉データ含む)	最大 5 入力変数	2136

それぞれのモデルに対して 3 回解析を実施して、Gelman-rubin 統計量(R-hat)を用いた収束性評価と WAIC の算出を行った。信頼性の高いモデルについては、追加で 1 度解析を実施し、計算値と実測値の残差の標準偏差を算出した。

a. 収束性評価結果

Gelman-rubin 統計量による MCMC サンプリングの信頼性評価法を用いて、データ区分ごとに信頼性が高いと見なせるモデルの割合を求めた(表 3.2.1-12)。

全データを用いた場合は信頼性の高いモデルは 10%程度であるが、BWR 及び PWR データ等のデータの細分化によって信頼性に高いモデルの割合が改善することが分かった。特に BWR のデータ区分では、極端に信頼性の高いモデルの割合が高い。これは、BWR では Flux を含めた場合の方が信頼性高い解析を実施できる傾向にあることによると考えられる。入力変数の個数と信頼性の有無を積み上げヒストグラムによって可視化した結果を図 3.2.1-17 に示す。入力変数が増加するにしたがって信頼性の高い割合が低くなる傾向にある。信頼性はデータ区分にも強く依存しており、試験炉照射データを含まない方が信頼性の高いモデルの割合が高いことが分かる。試験炉照射データは Cu や Ni などの含有量が極端に異なる材料も含まれており、それらが離散的に分布したことが信頼性影響したものと考えられる。

表3.2.1-12. 各データ区分における信頼性評価結果

No.	データ区分	信頼性が高いと判断されたモデル数	信頼性が低いと判断されたモデル数	割合[%]
1	全データ	218	1918	10.21
2	BWR	2124	12	99.44
3	PWR	1130	1902	37.27
4	BWR+PWR	560	2472	18.47
5	母材(試験炉データ含まず)	967	2065	31.89
6	溶接金属(試験炉データ含まず)	2161	871	71.27
7	母材(試験炉データ含む)	473	1663	22.14
8	溶接金属(試験炉データ含む)	1220	916	57.12

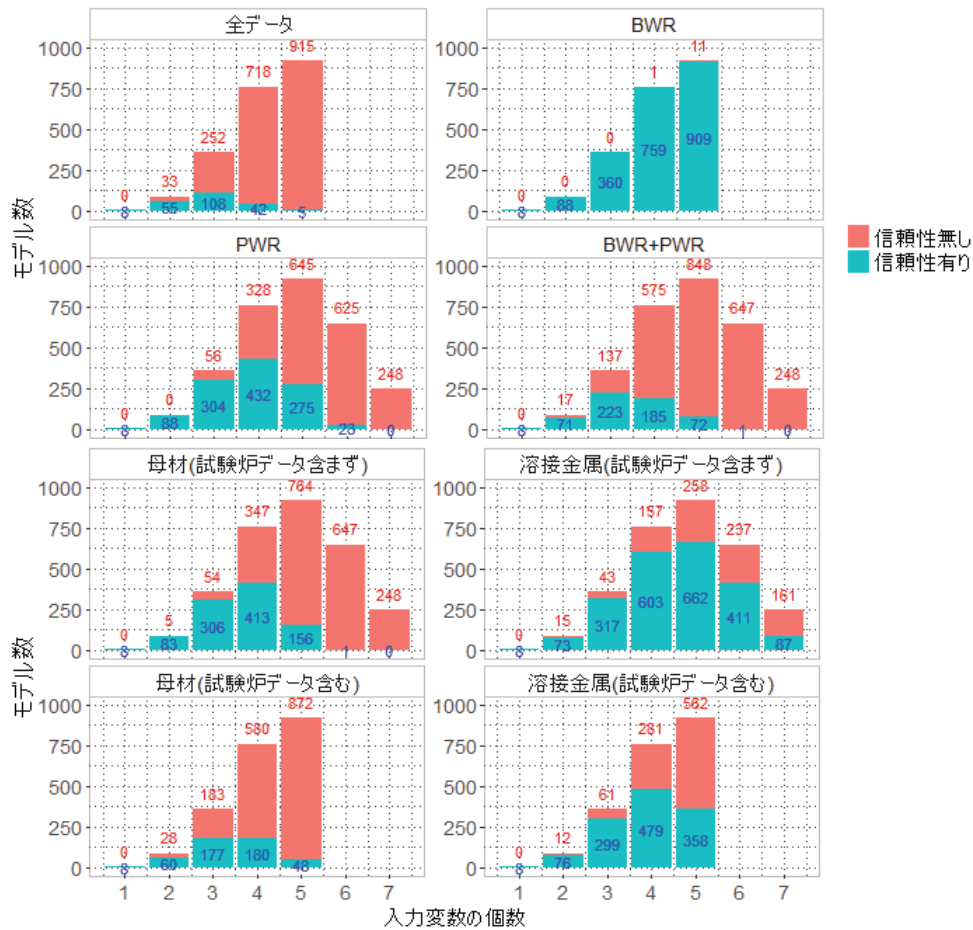


図3.2.1-17 入力変数の個数と信頼性のあるモデル数の積み上げヒストグラム

b. WAIC の評価結果

Gelman-rubin 統計量を用いて信頼性が高いと判断されたモデルについて、WAIC と各データ点の計算値と実測値の残差の標準偏差(残差の標準偏差)を算出した。

図 3.2.1-18、図 3.2.1-19 に各データ区分における WAIC と残差の標準偏差のヒストグラムを示す。なお、WAIC の絶対値はデータ区分に依存するため、データ区分毎の値を比較することは出来ない。

図 3.2.1-20 に WAIC の箱ひげプロットを示す。全データおよび BWR については、入力変数の個数が 3 もしくは 4 付近に WAIC の中央値や最小値のピークが見られる。一方で、PWR、母材、溶接金属については、入力変数の個数が増えることで WAIC の中央値が低下している。

図 3.2.1-21 の WAIC と残差の標準偏差の関係から、両者には概ね相関があることが分かる。残差の標準偏差の最小値はデータ区分にもよるが 8~10℃程度となっている。ただし、前述の通り、WAIC に対して残差の標準偏差が極端に低い値をとるモデルについては、過学習が生じている可能性が考えられる。

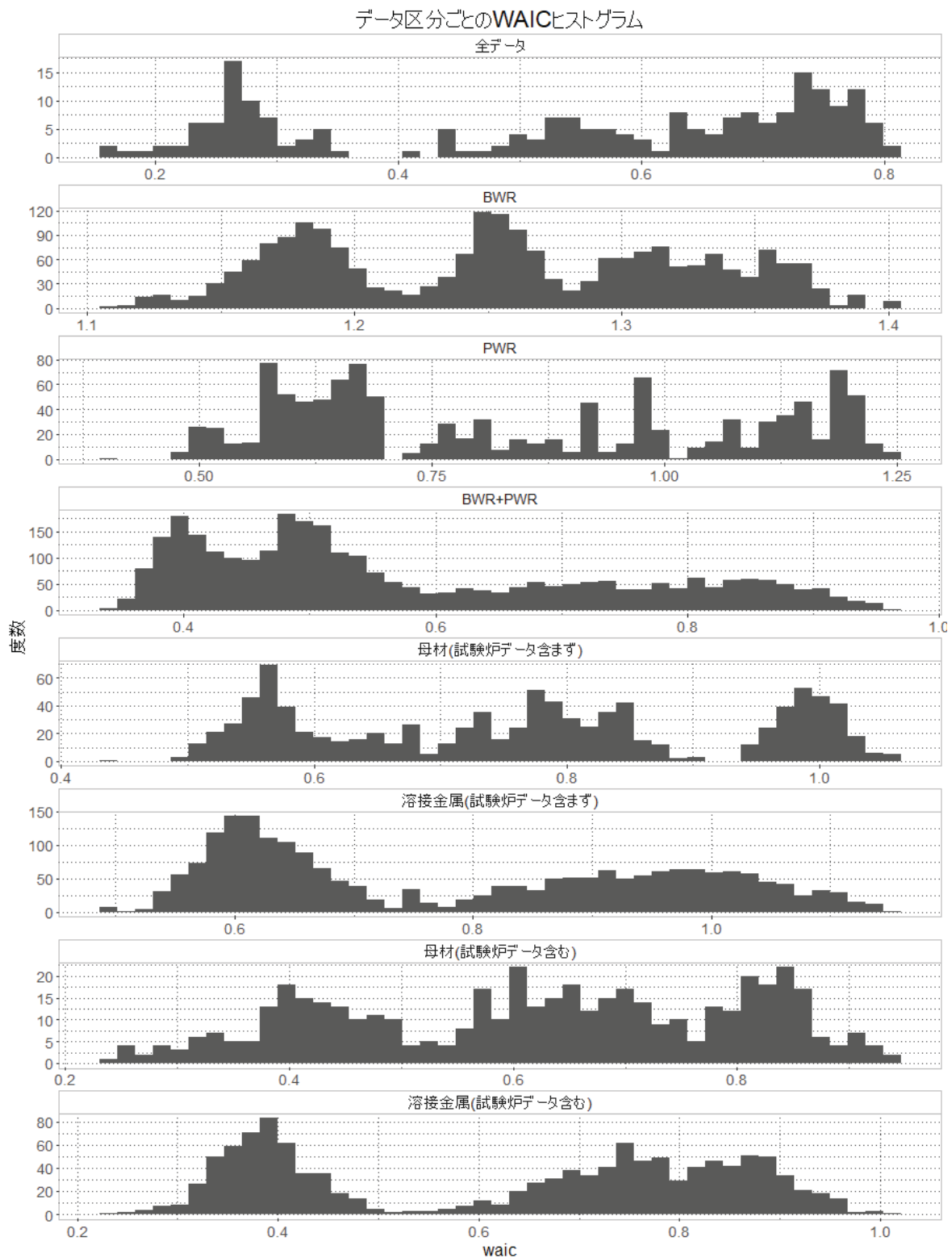


図3.2.1-18. データ区分ごとの信頼性の高いモデルの WAIC

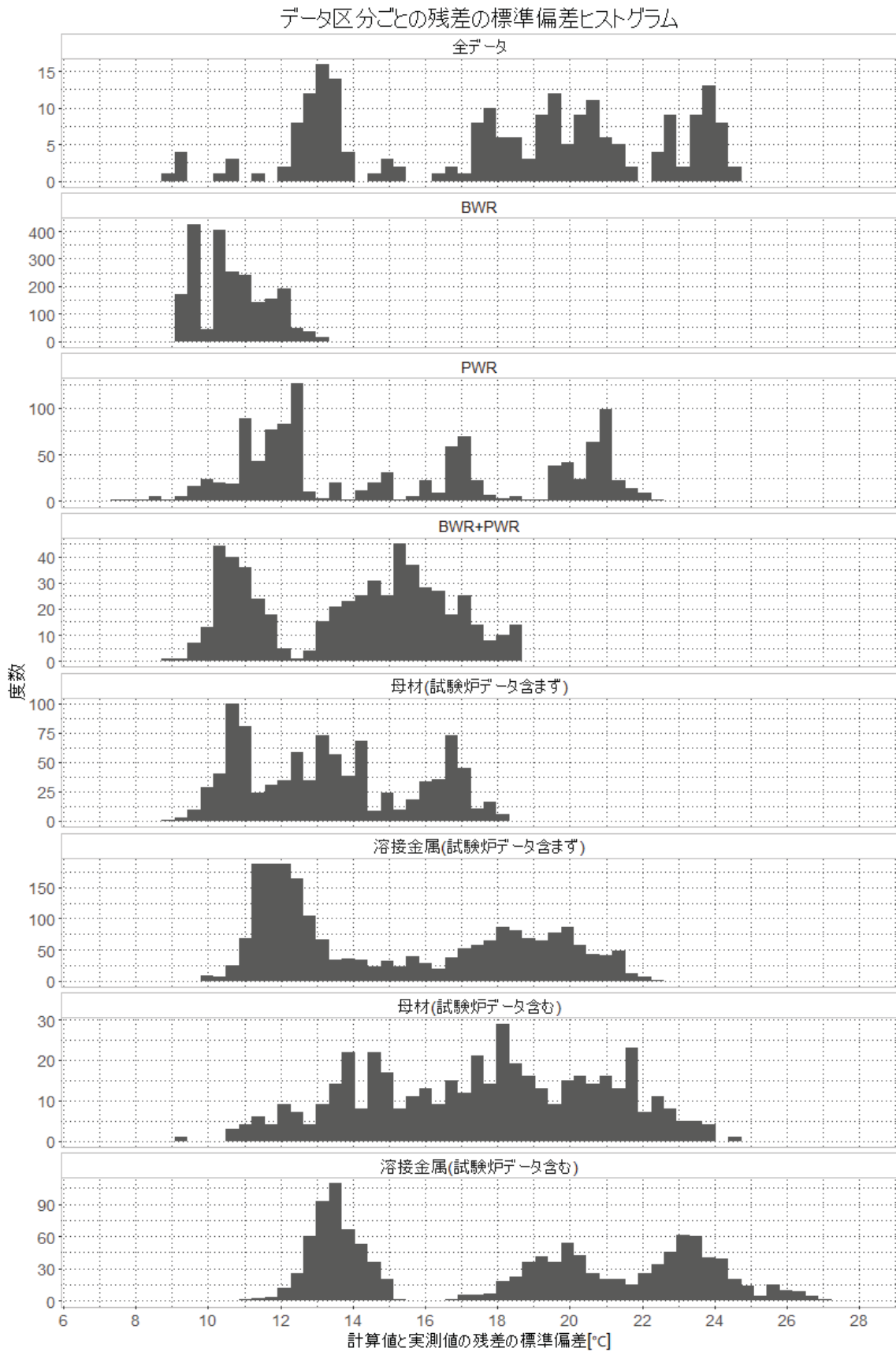


図3.2.1-19.データ区分ごとの信頼性の高いモデルの計算値と実測値の残差の標準偏差

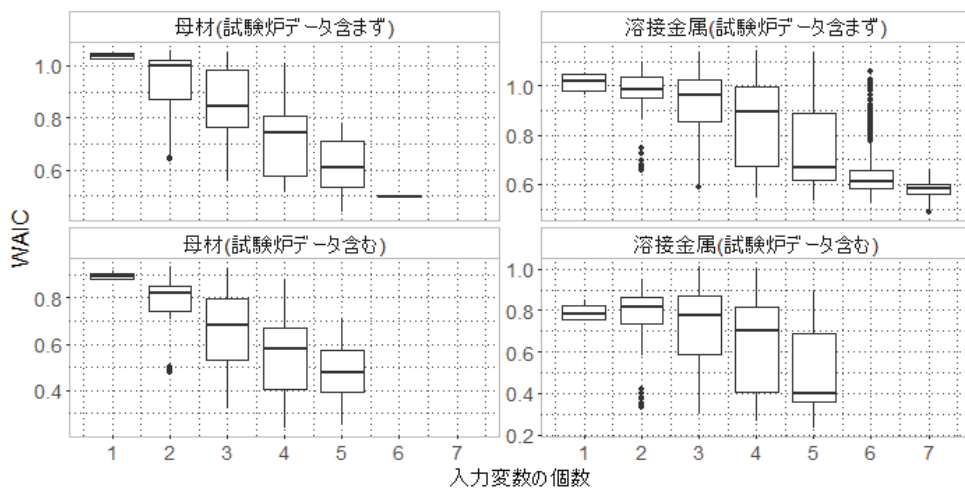
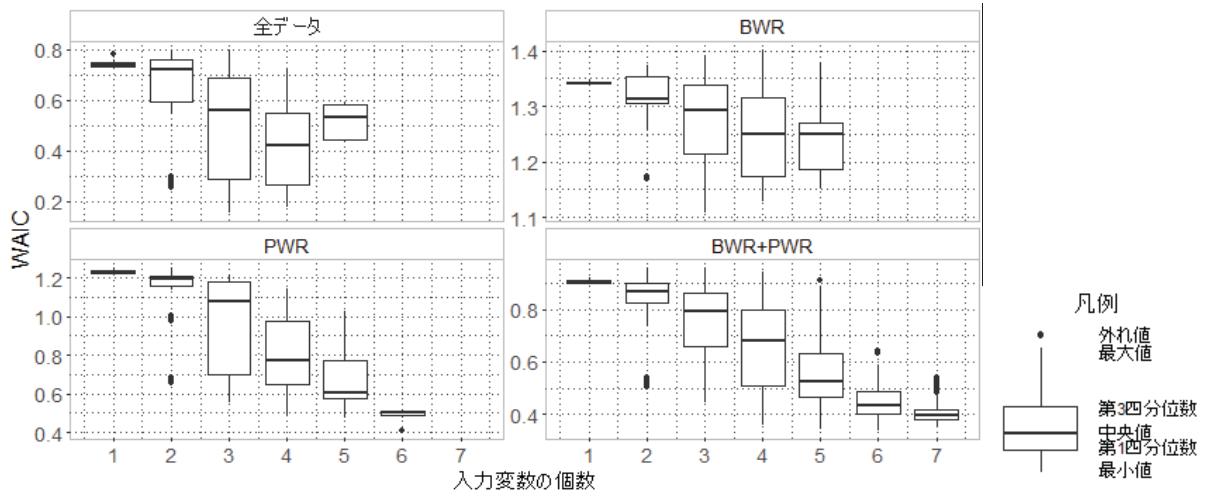


図3.2.1-20. WAIC の値と入力変数の個数

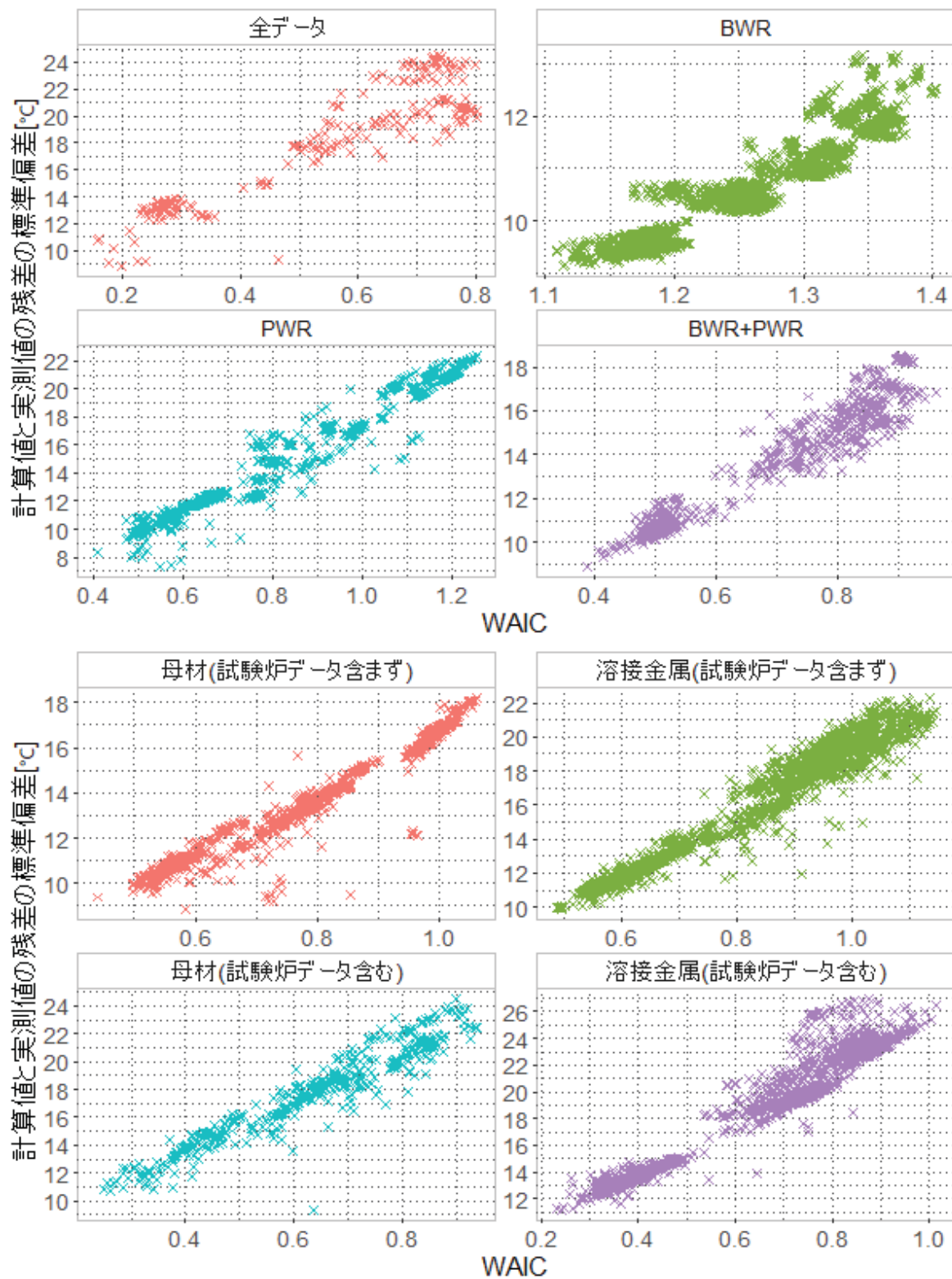


図3.2.1-21. WAIC と残差の標準偏差

c. WAIC による評価結果の詳細

各データ区分において、各入力変数と WAIC との関係性を評価した。信頼性高い解析が実施できたモデルについて、各入力変数の WAIC への影響について整理した結果を以下に示す。

・全データ

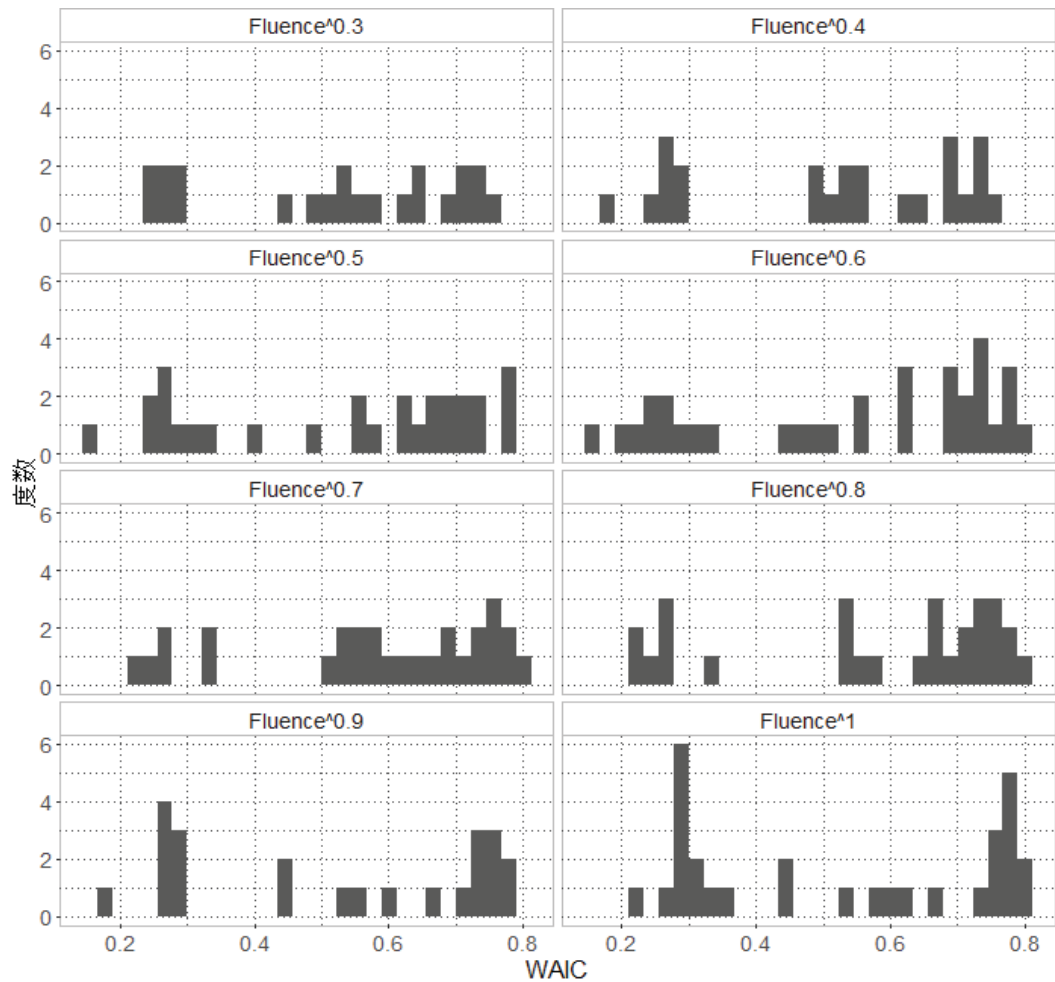


図3.2.1-22. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC ヒストグラム(全データ)

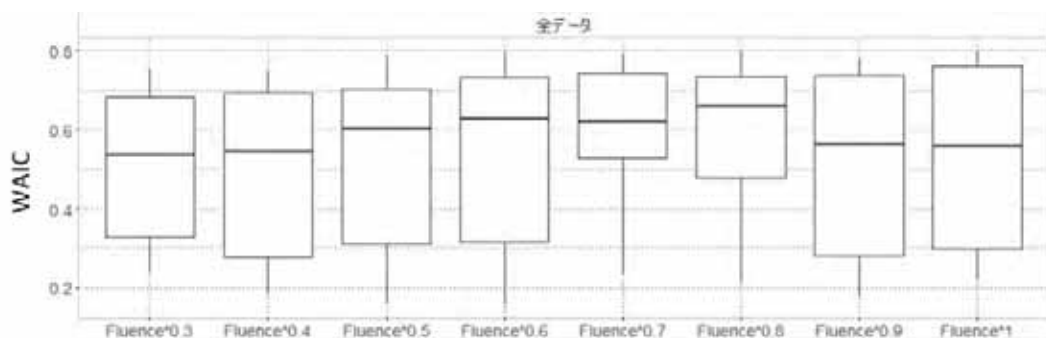


図3.2.1-23. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC の箱ひげ図(全データ)

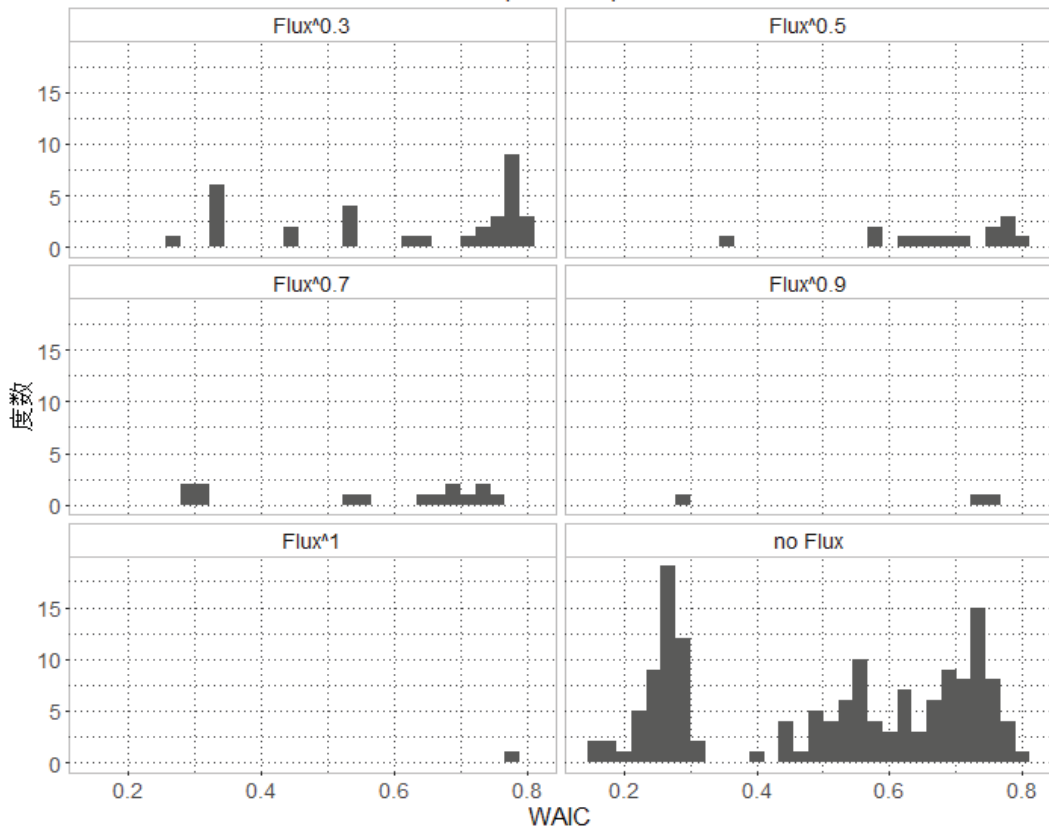


図3.2.1-24. Flux を入力変数とするモデルの WAIC ヒストグラム(全データ)

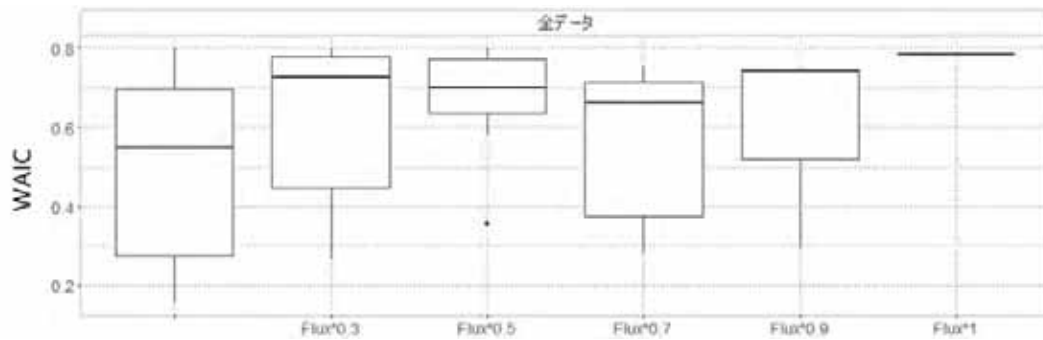


図3.2.1-25. Flux を入力変数とするモデルの WAIC の箱ひげ図(全データ)

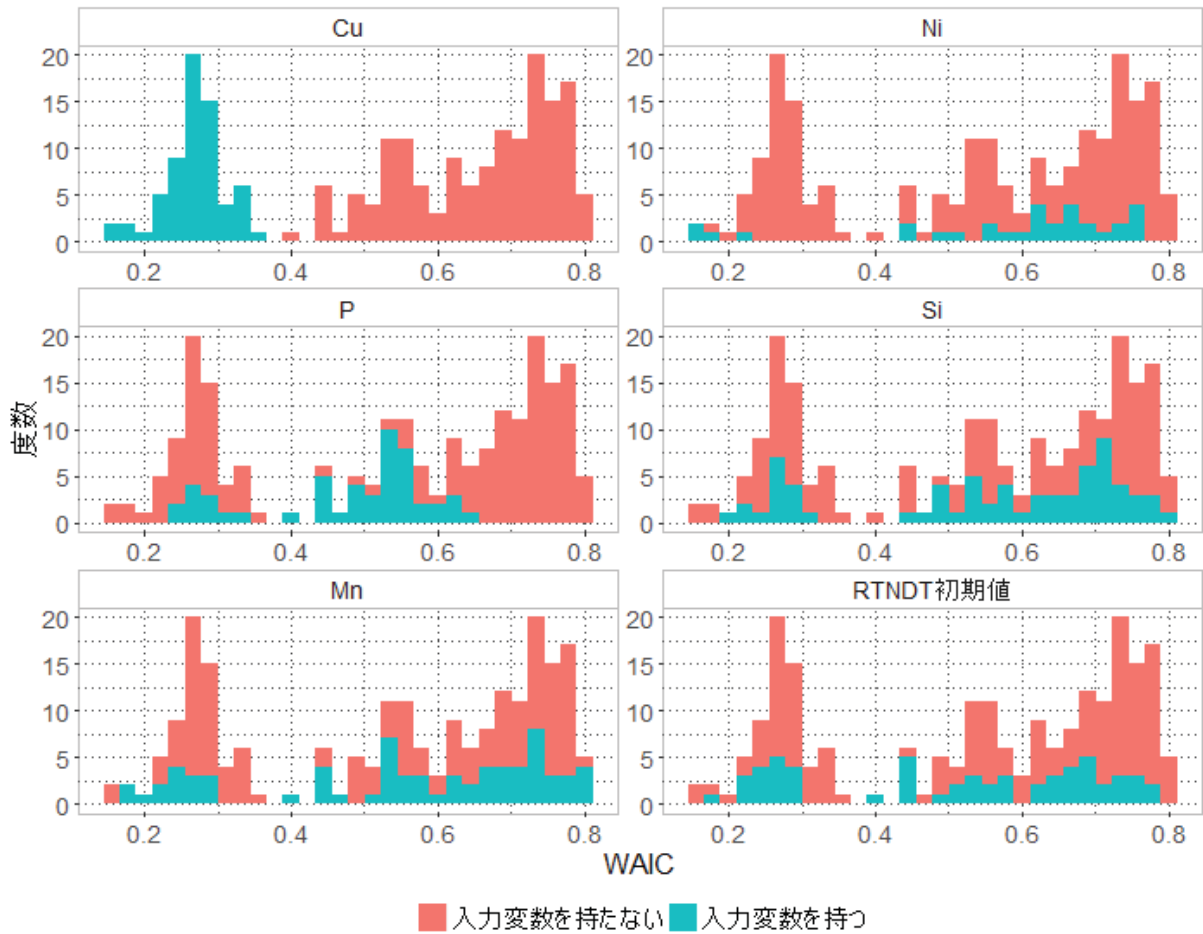


図3.2.1-26. Fluence、Flux 以外を入力変数とするモデルの WAIC ヒストグラム(全データ)

全データに対する分析の結果以下のことが言える

- Fluence は 0.5 乗から 0.6 乗程度で最も WAIC が小さい
- Flux は入力変数としない方が WAIC が小さい
- Cu、Ni を入力変数とすると WAIC の値が小さい
- Cu、Ni 以外を入力変数としても WAIC の値は小さくならない

・ BWR

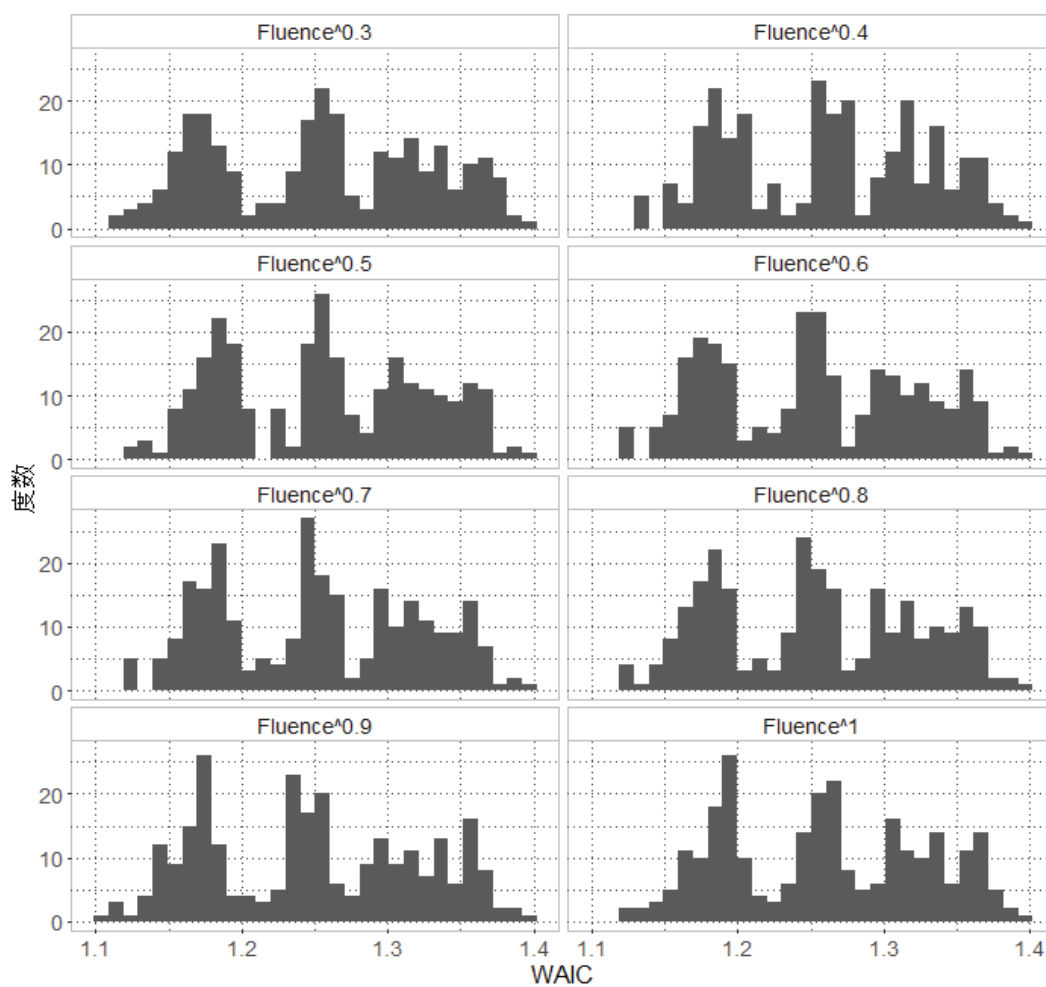


図3.2.1-27. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC ヒストグラム(BWR)

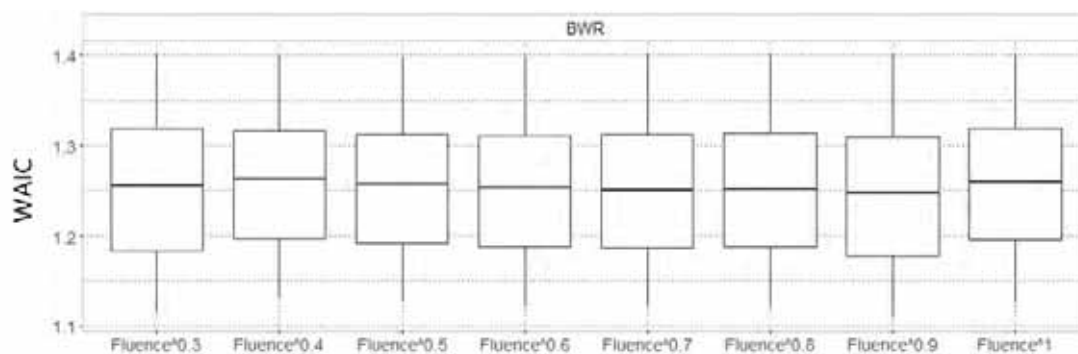


図3.2.1-28. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC の箱ひげ図(BWR)

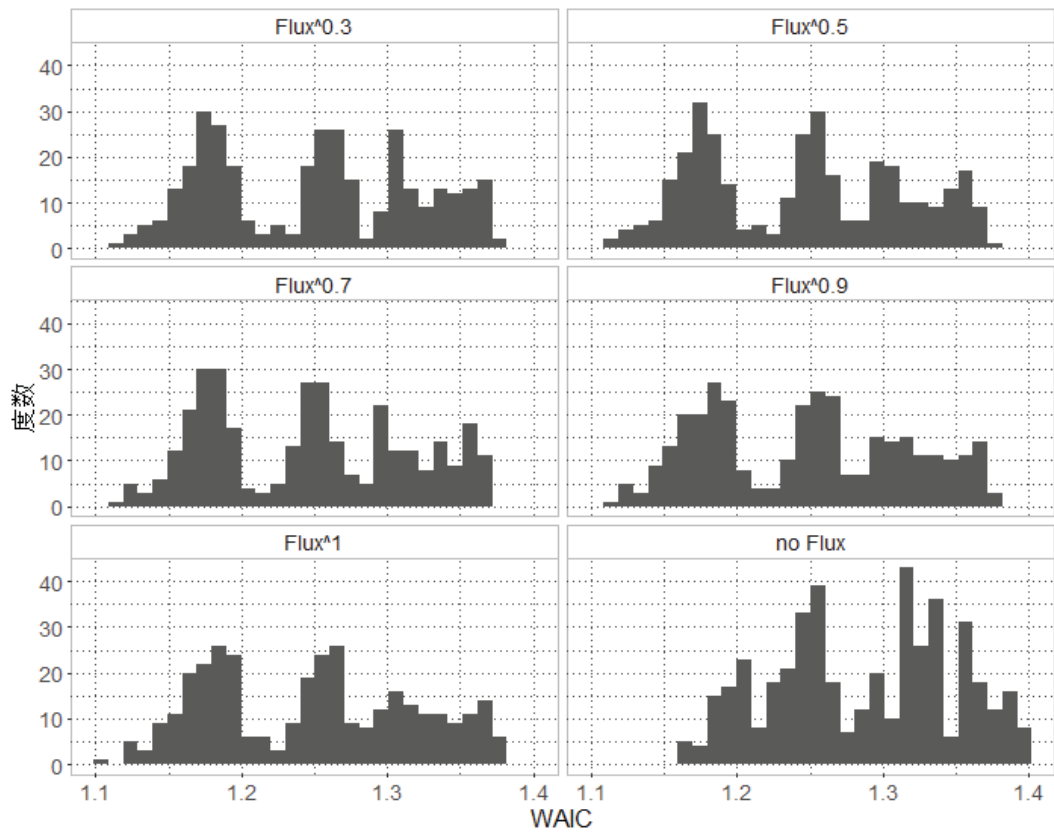


図3.2.1-29. Flux を入力変数とするモデルの WAIC ヒストグラム(BWR)

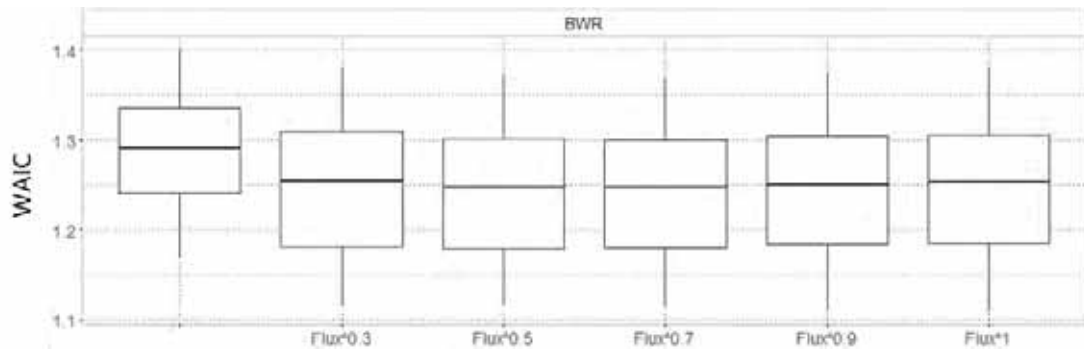


図3.2.1-30. Flux を入力変数とするモデルの WAIC の箱ひげ図(BWR)

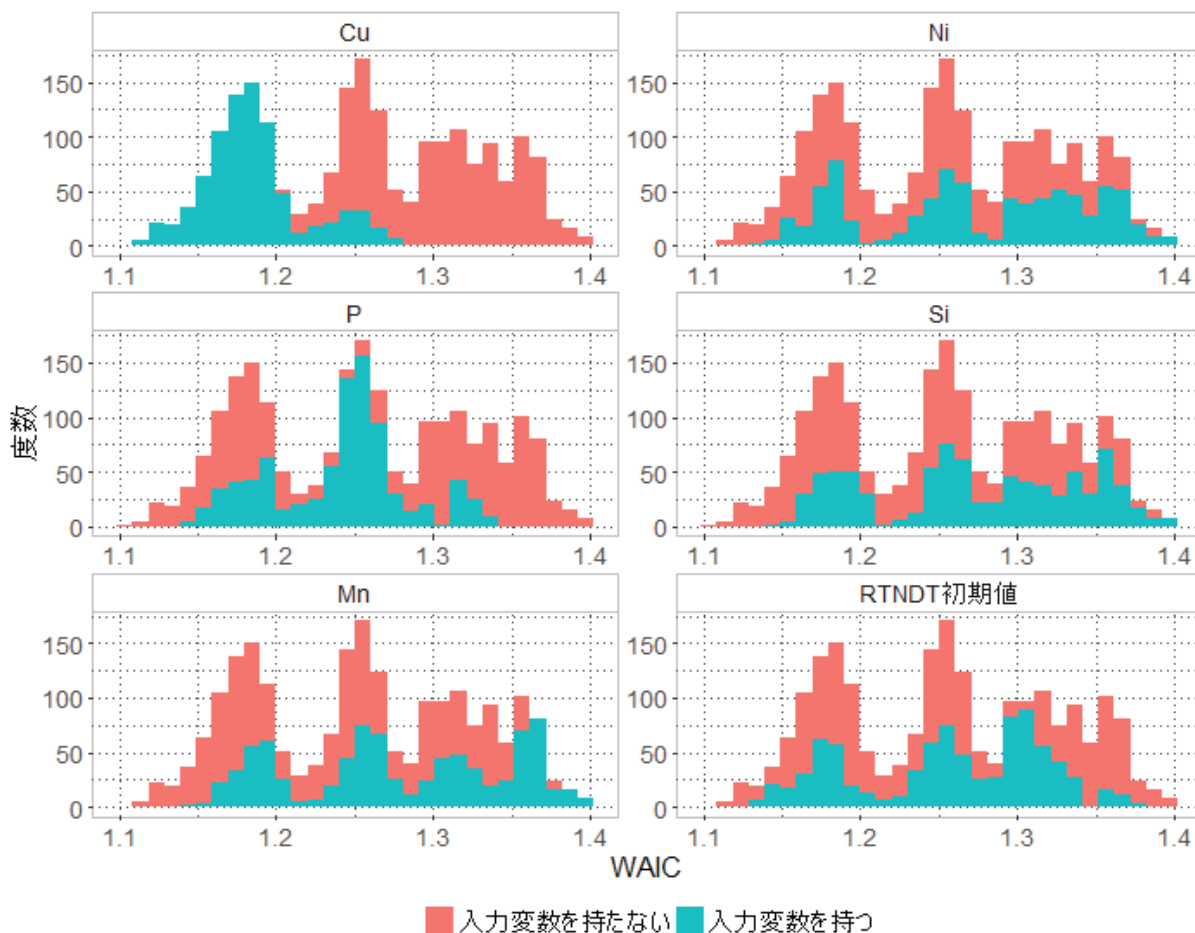


図3.2.1-31. Fluence、Flux 以外を入力変数とするモデルの WAIC ヒストグラム (BWR)

BWR データに対する分析の結果、以下のことが言える

- Fluence は 0.9 乗程度で最も小さい WAIC を示すが、べき係数違いによる影響は小さい
- Flux を入力変数とした方が明らかに WAIC が小さい。べき係数による違いは明瞭でないが、0.9 乗程度で WAIC が最小値を示す。
- Cu を入力変数とすると WAIC の値が小さく、他の入力変数を加えても WAIC は小さくならない。

・ PWR

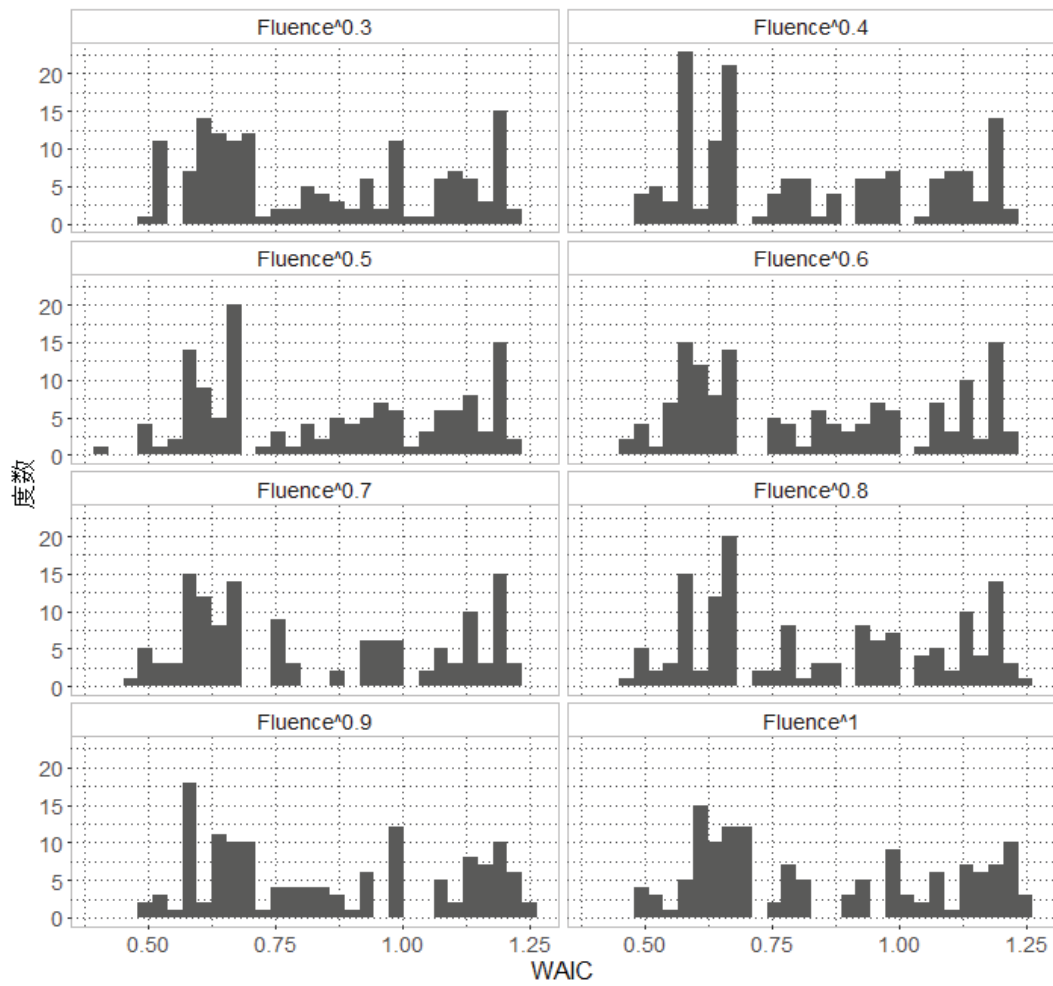


図3.2.1-32. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC ヒストグラム(PWR)

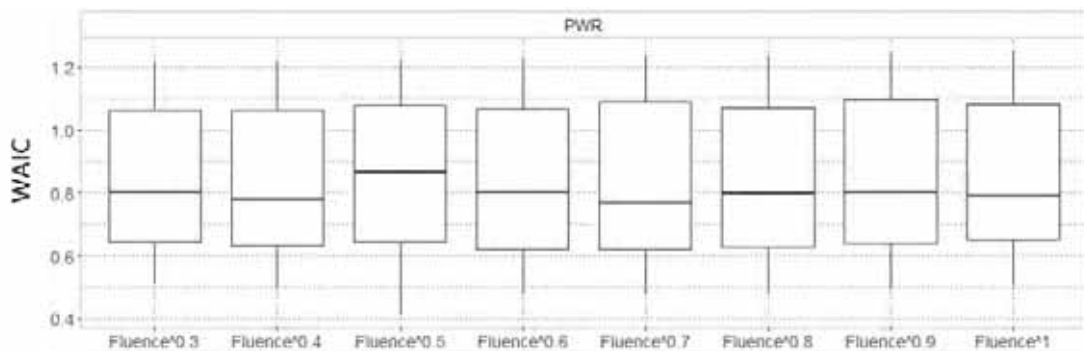


図3.2.1-33. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC の箱ひげ図(PWR)

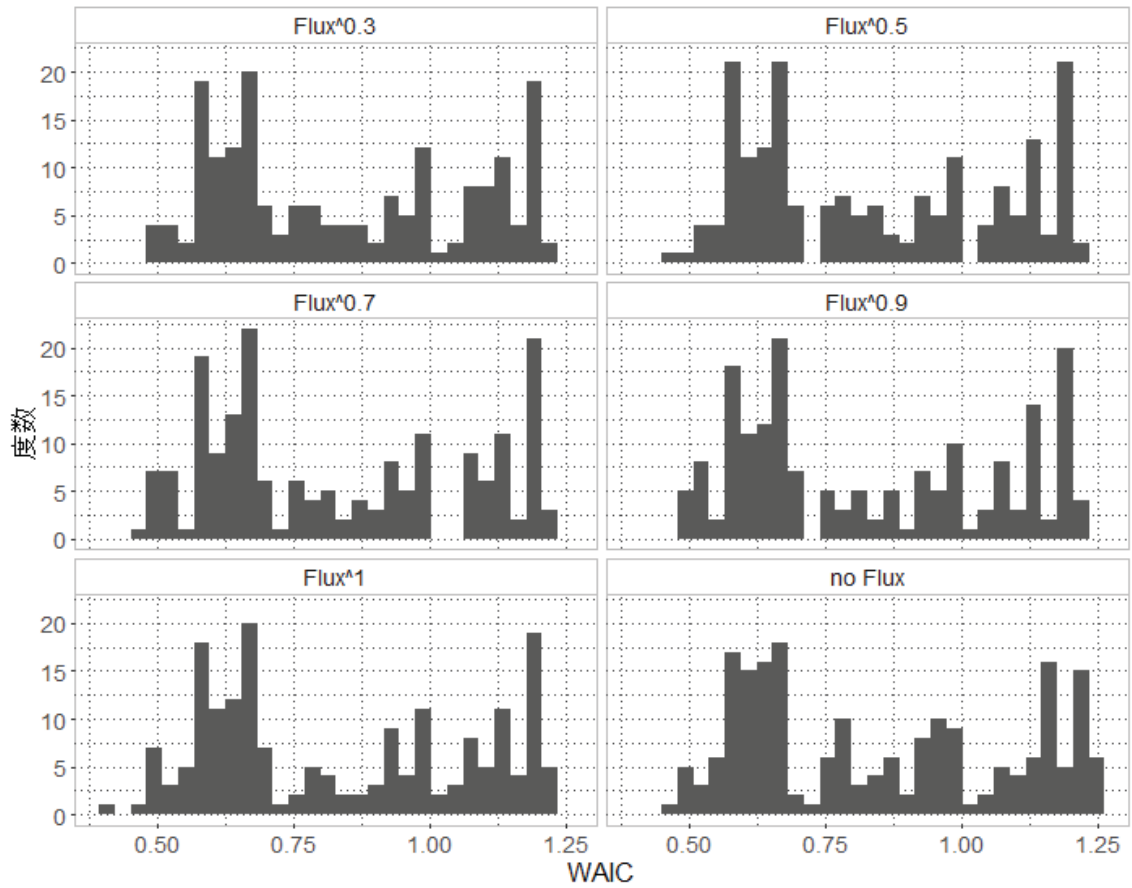


図3.2.1-34. Flux を入力変数とするモデルの WAIC ヒストグラム(PWR)

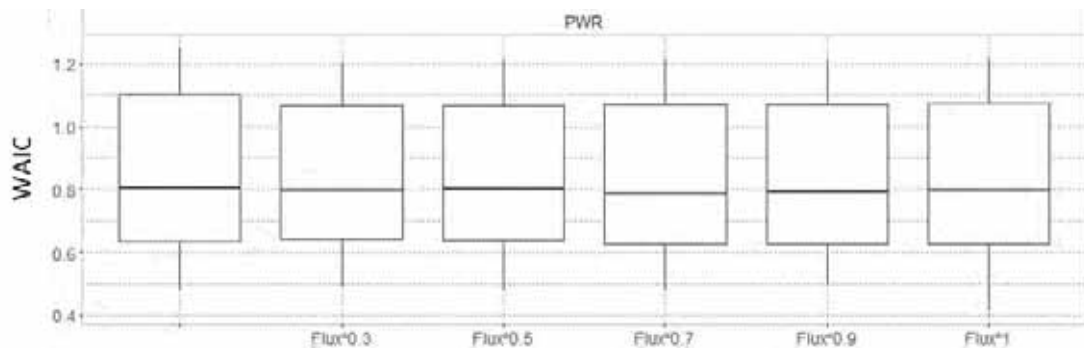


図3.2.1-35. Flux を入力変数とするモデルの WAIC の箱ひげ図(PWR)

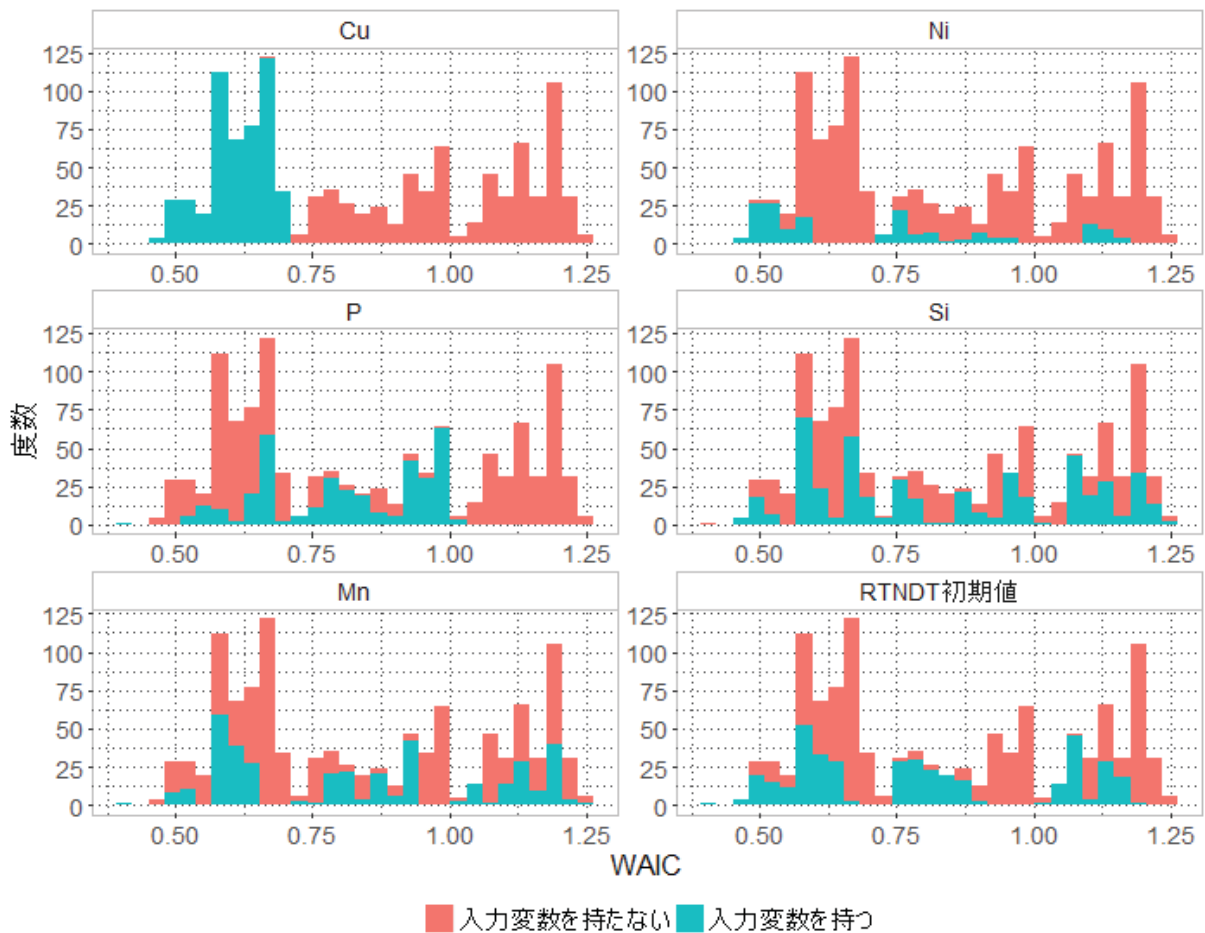


図3.2.1-36. Fluence、Flux 以外を入力変数とするモデルの WAIC ヒストグラム (PWR)

PWR に対する分析の結果、以下のことが言える

- Fluence は 0.5 乗で最も小さい WAIC を示す。ただし最も小さい WAIC を示す点は図 3.2.1-20 における外れ値に該当しているため、解析精度に注意が必要である。
- 上記の点を除外した場合、0.7 乗で WAIC が最も小さい値を示す、
- Flux は入力変数とするか否かで大きな違いは見られない。
- Cu、Ni を入力変数とすると WAIC が小さい。
- 最も小さい WAIC を示す組合せは Cu、Ni に加えて Si、RT_{NDT} 初期値を入力変数としたものである。

・ BWR+PWR

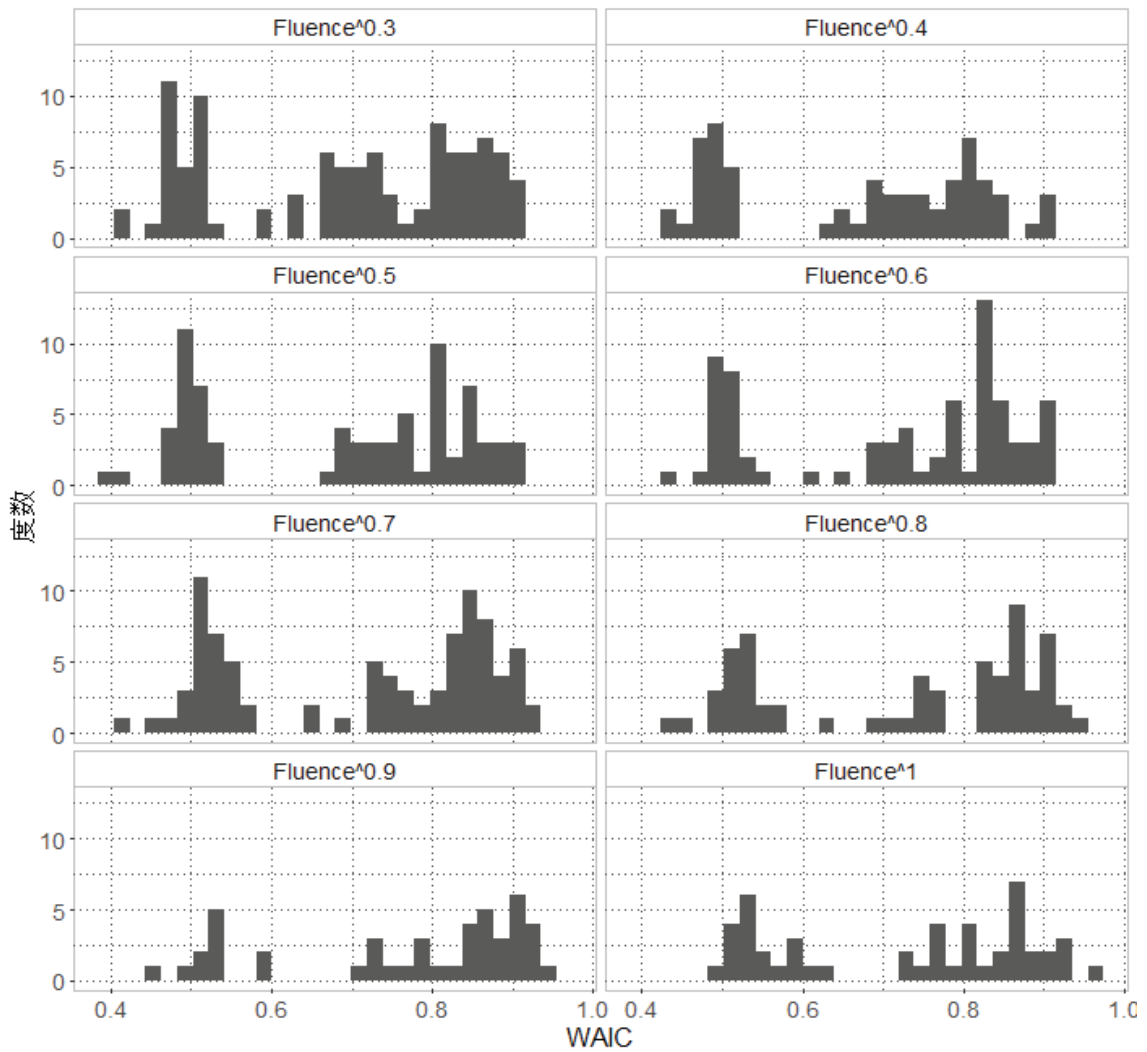


図3.2.1-37. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC ヒストグラム(BWR+PWR)

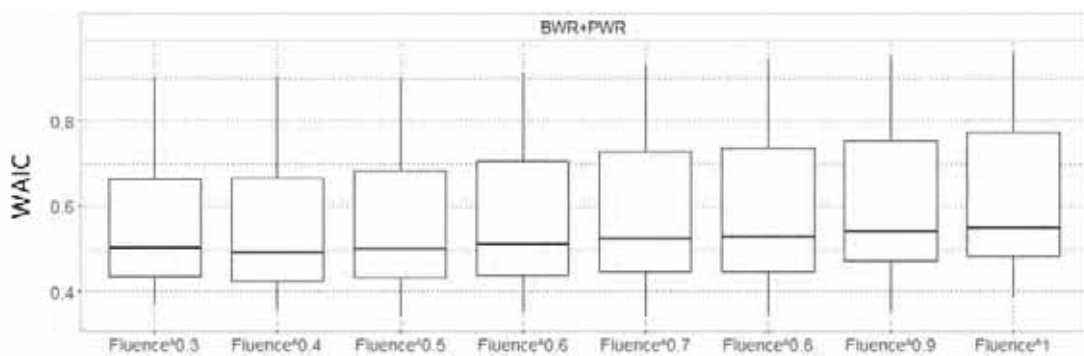


図3.2.1-38. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC の箱ひげ図(BWR+PWR)

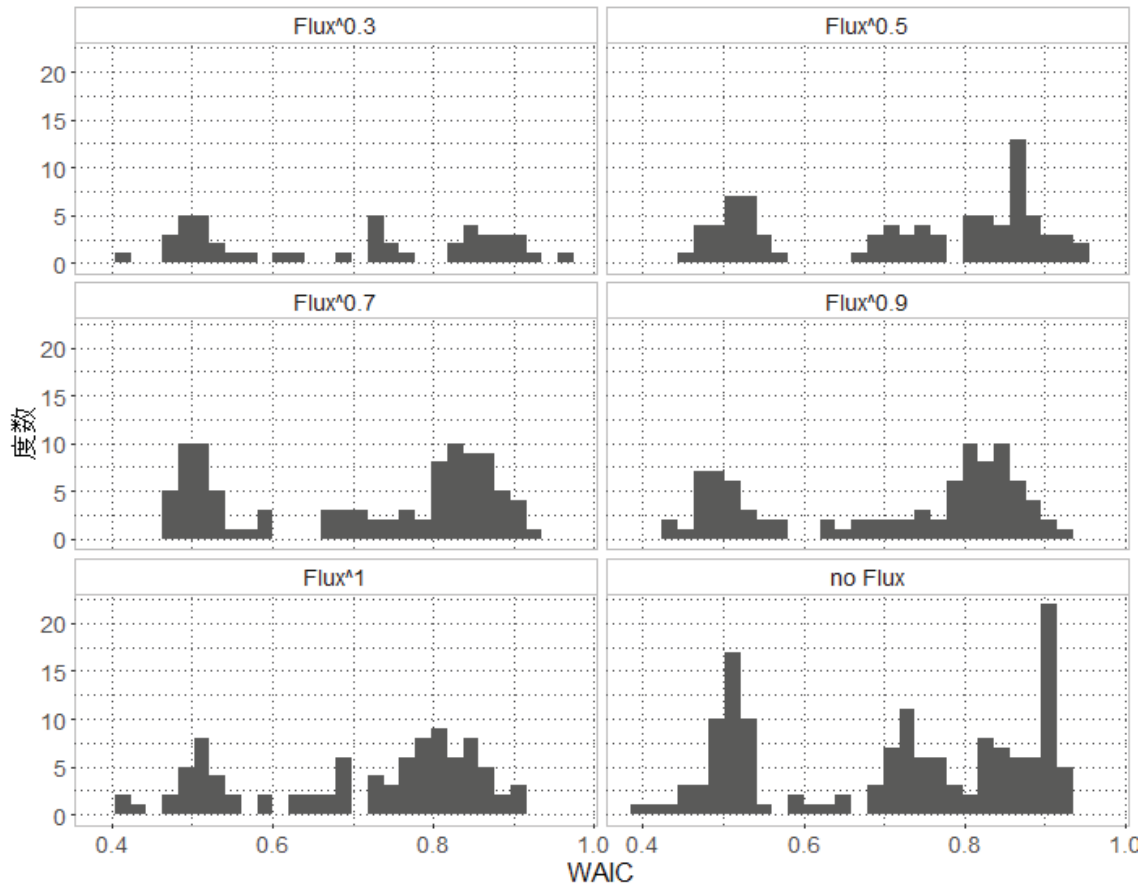


図3.2.1-39. Flux を入力変数とするモデルの WAIC ヒストグラム(BWR+PWR)

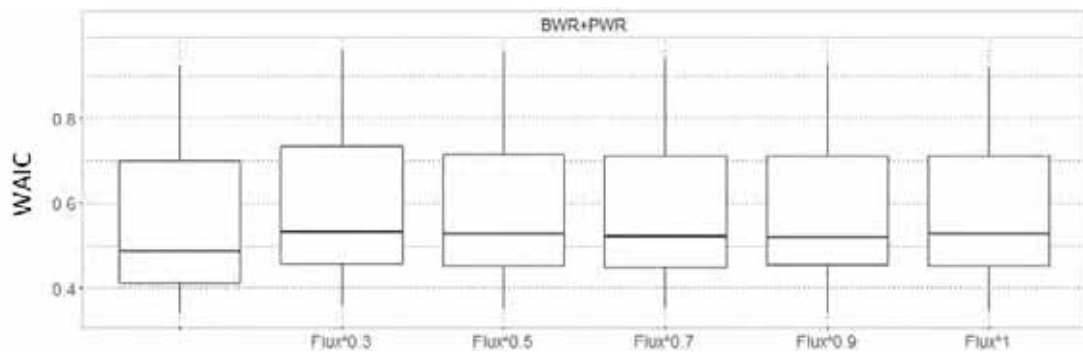


図3.2.1-40. Flux を入力変数とするモデルの WAIC の箱ひげ図(BWR+PWR)

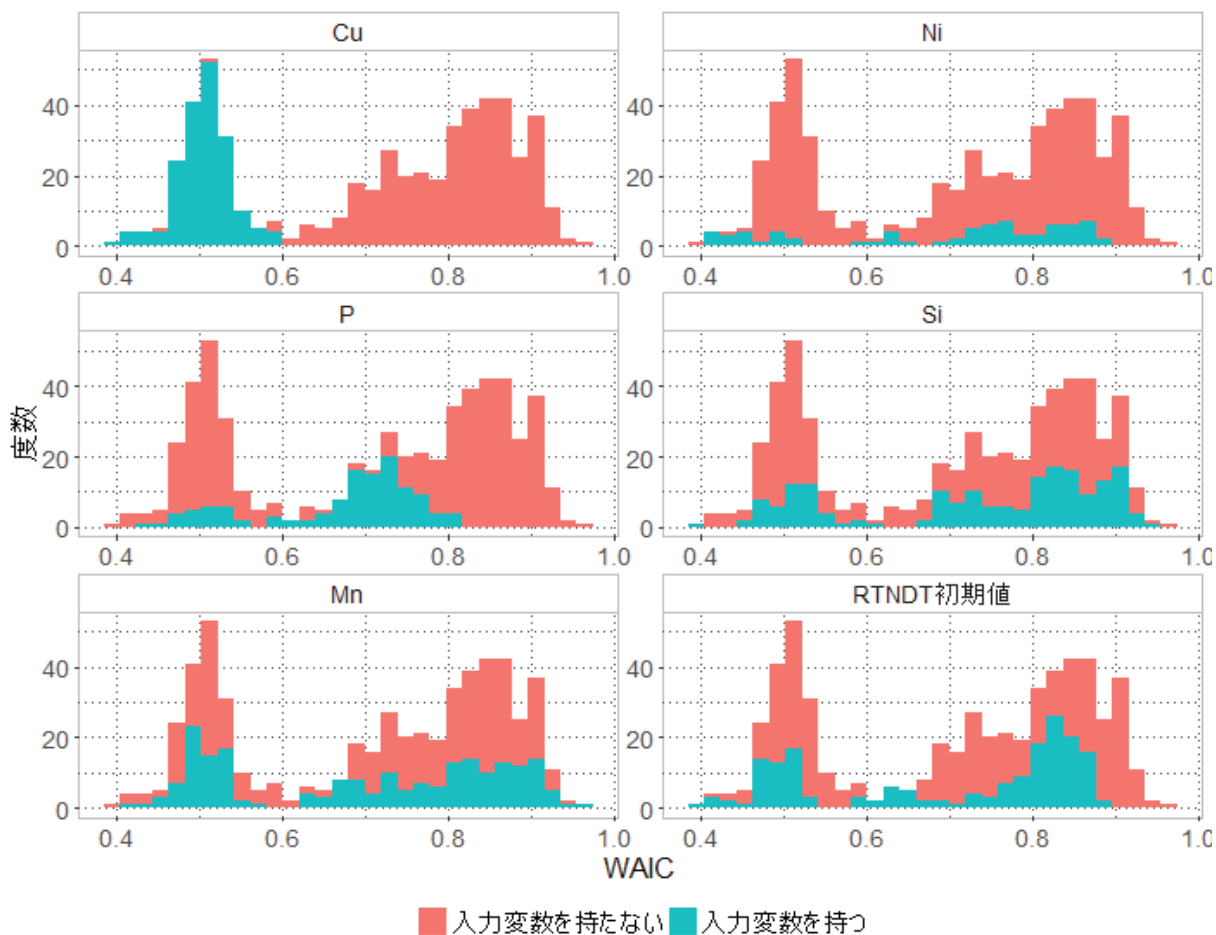


図3.2.1-41. Fluence、Flux 以外を入力変数とするモデルの WAIC ヒストグラム (BWR+PWR)

BWR+PWR データに対する分析の結果、以下のことが言える

- Fluence は 0.5 乗前後で最も WAIC が小さい
- Flux は入力変数としない方が WAIC が小さい
- Cu、Ni、RT_{NDT} 初期値を入力変数とすると WAIC の値が小さい
- WAIC が最も小さくなる入力変数の組合せは Cu、Ni、Si、RT_{NDT} 初期値であるが Si に関しては外れ値に該当する。

・母材(試験炉データ含まず)

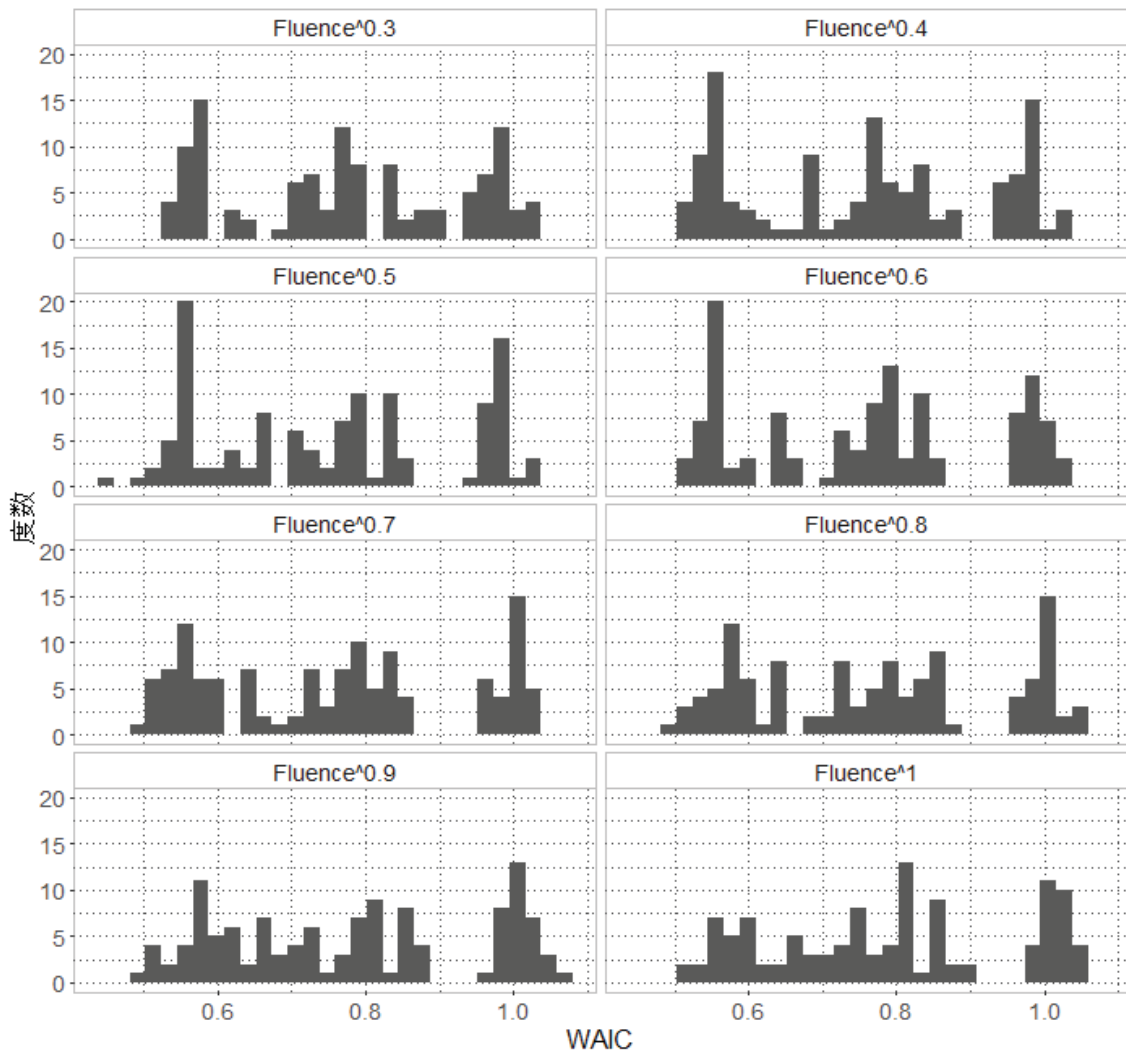


図3.2.1-42. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC のヒストグラム(母材(試験炉データ含まず))

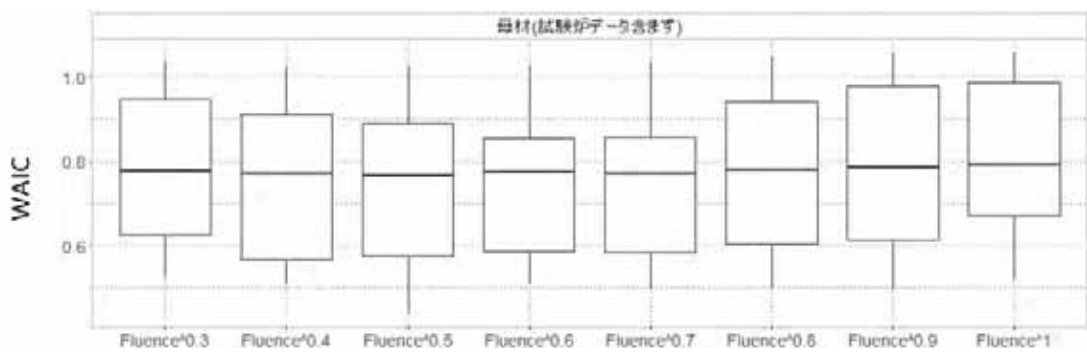


図3.2.1-43. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC 箱ひげ図(母材(試験炉データ含まず))

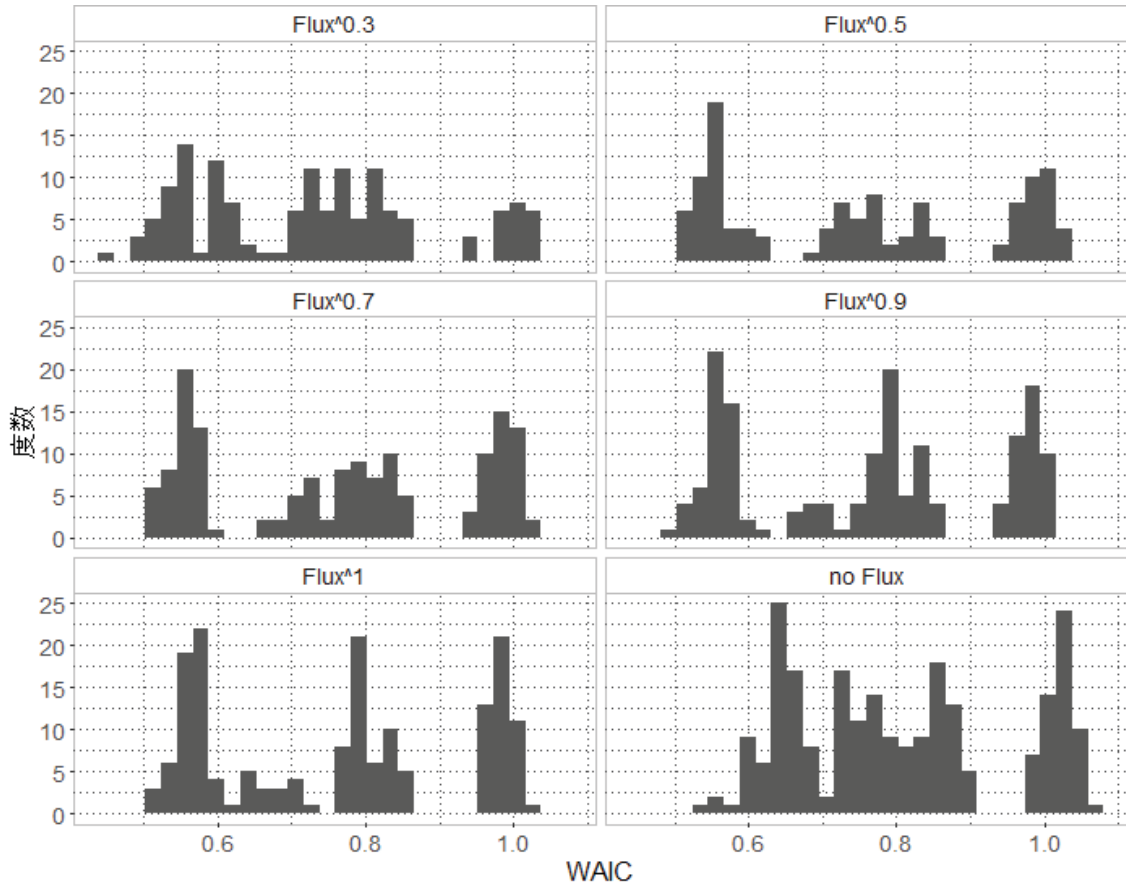


図3.2.1-44. Flux を入力変数とするモデルの WAIC ヒストグラム(母材(試験炉データ含まず))

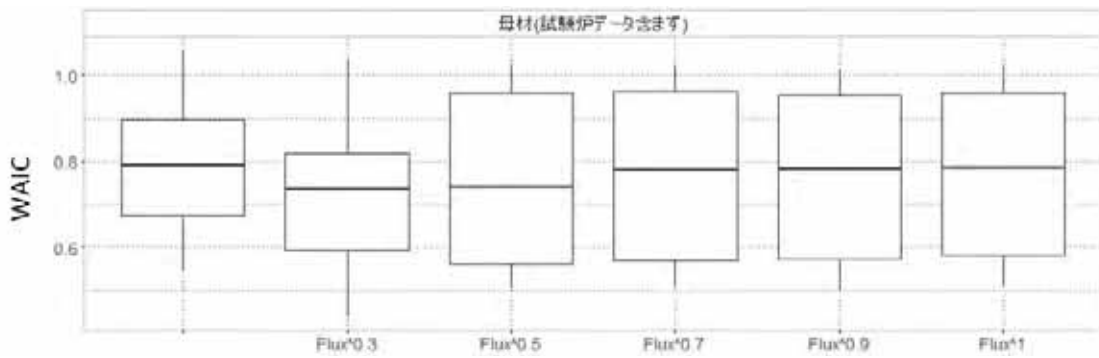


図3.2.1-45. Flux を入力変数とするモデルの WAIC の箱ひげ図(母材(試験炉データ含まず))

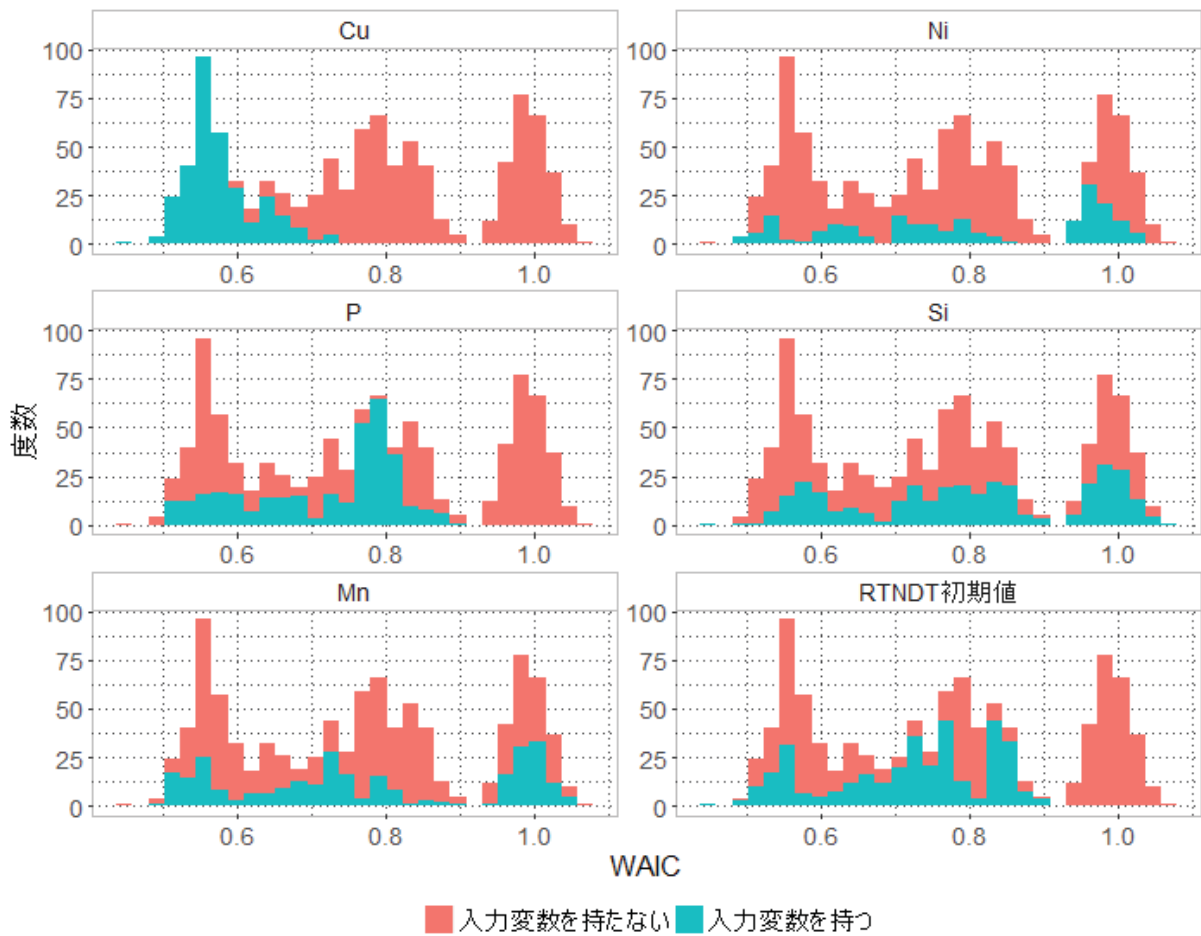


図3.2.1-46. Fluence、Flux 以外を入力変数とするモデルの WAIC ヒストグラム(母材(試験炉データ含まず))

母材(試験炉データ含まず)に対する分析の結果以下のことが言える

- ・ Fluence は 0.5 乗前後で WAIC が小さい
- ・ Flux は 0.3 乗前後で WAIC が小さい
- ・ Cu、Si、RT_{NDT} 初期値を入力変数とすると WAIC の値が小さい

・溶接金属(試験炉データ含まず)

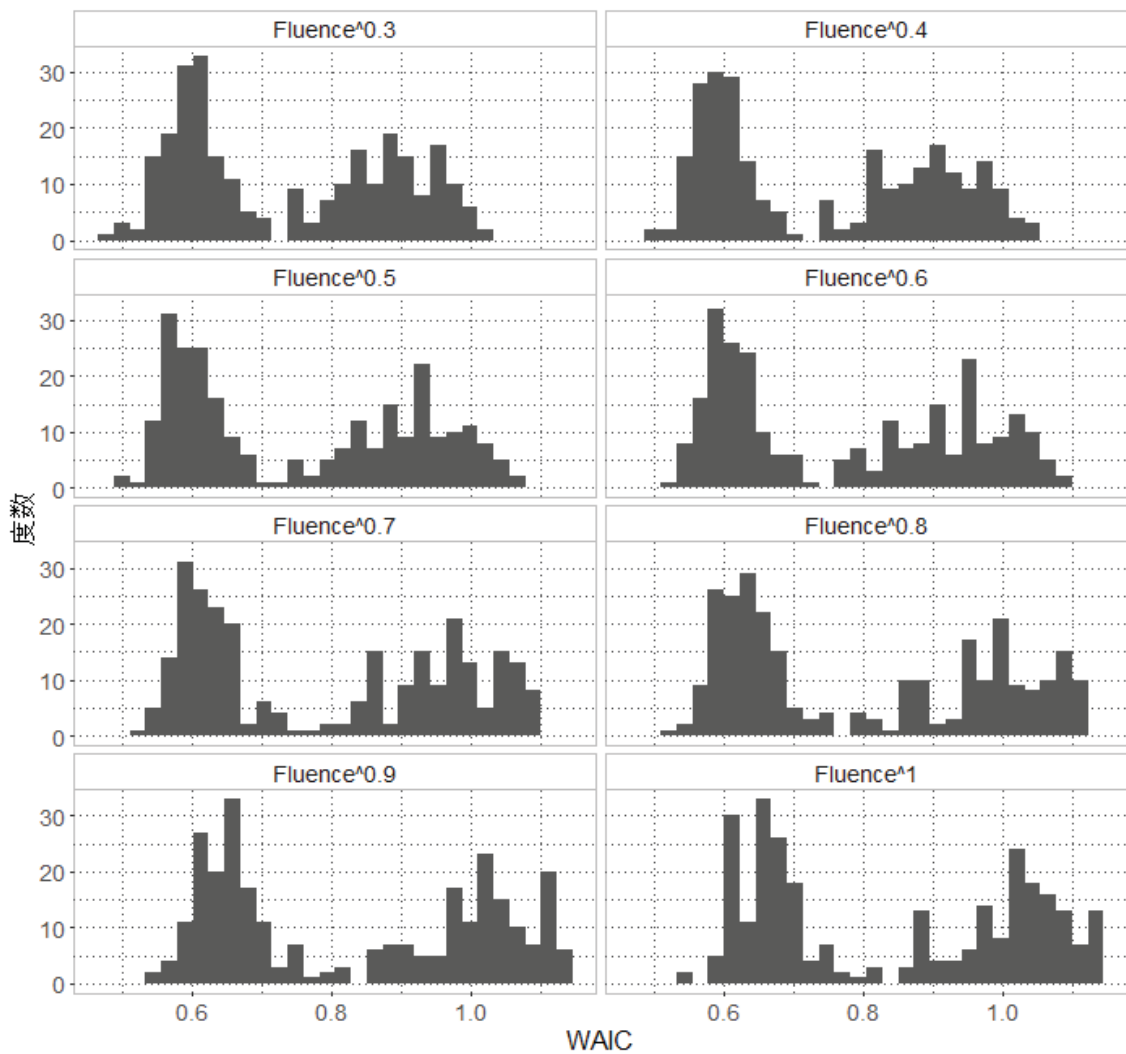


図3.2.1-47. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC のヒストグラム(溶接金属(試験炉データ含まず))

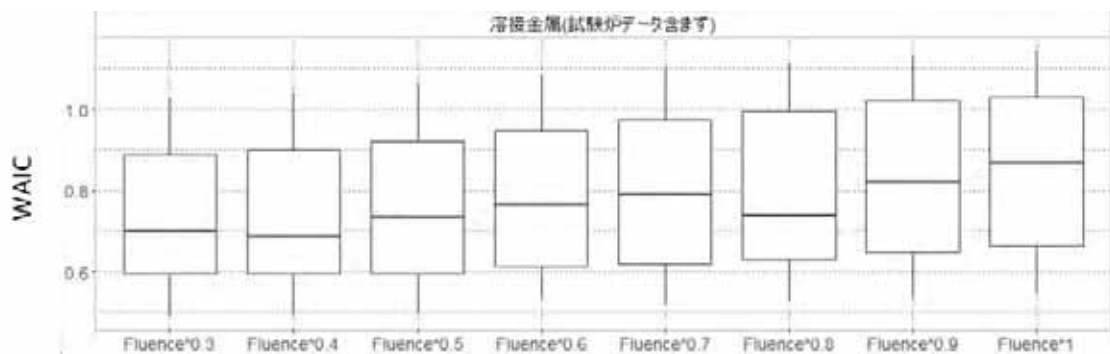


図3.2.1-48. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC の箱ひげ図(溶接金属(試験炉データ含まず))

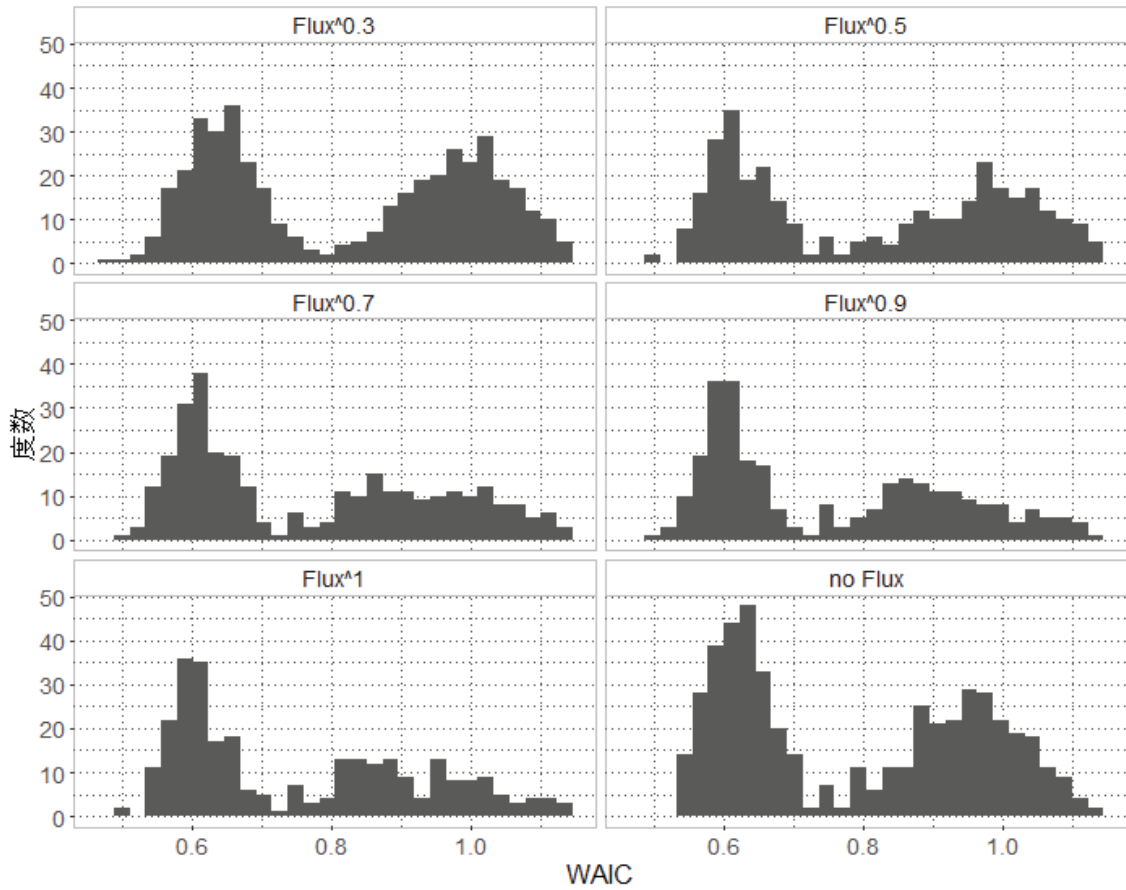


図3.2.1-49. Flux を入力変数とするモデルの WAIC のヒストグラム(溶接金属(試験炉データ含まず))

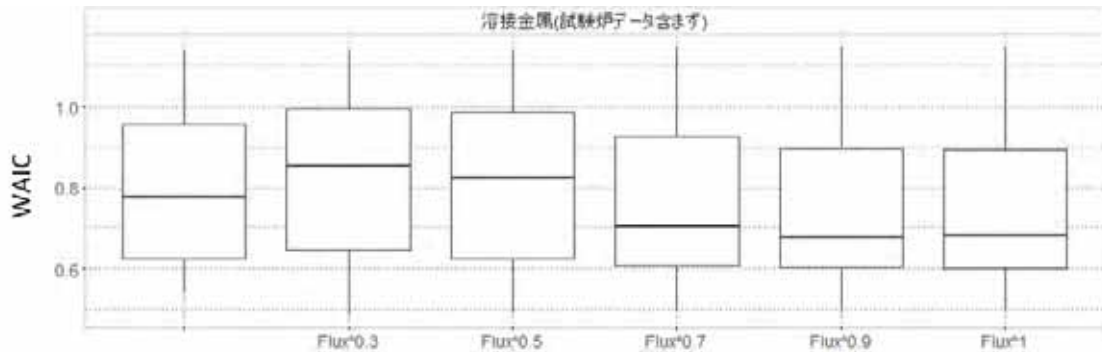


図3.2.1-50. Flux を入力変数とするモデルの WAIC の箱ひげ図(溶接金属(試験炉データ含まず))

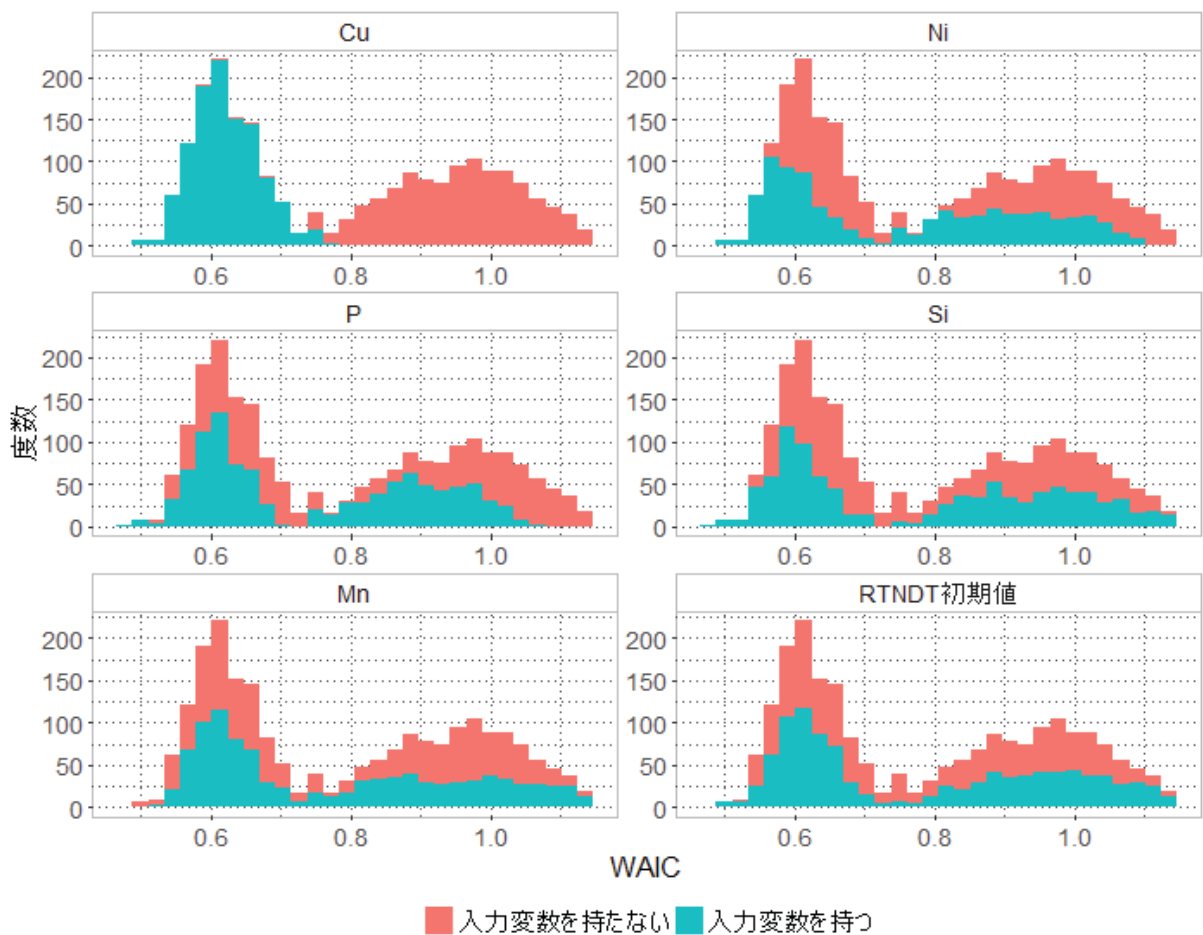


図3.2.1-51. Fluence、Flux 以外を入力変数とするモデルの WAIC ヒストグラム(溶接金属(試験炉データ含まず))

溶接金属(試験炉データ含まず)に対する分析の結果以下のことが言える

- Fluence は 0.4 乗前後で WAIC が小さい
- Flux は 0.9 乗前後で WAIC が小さい
- Cu、Ni、P、Si、RT_{NDT} 初期値を入力変数とすると WAIC が小さい

・母材(試験炉データ含む)

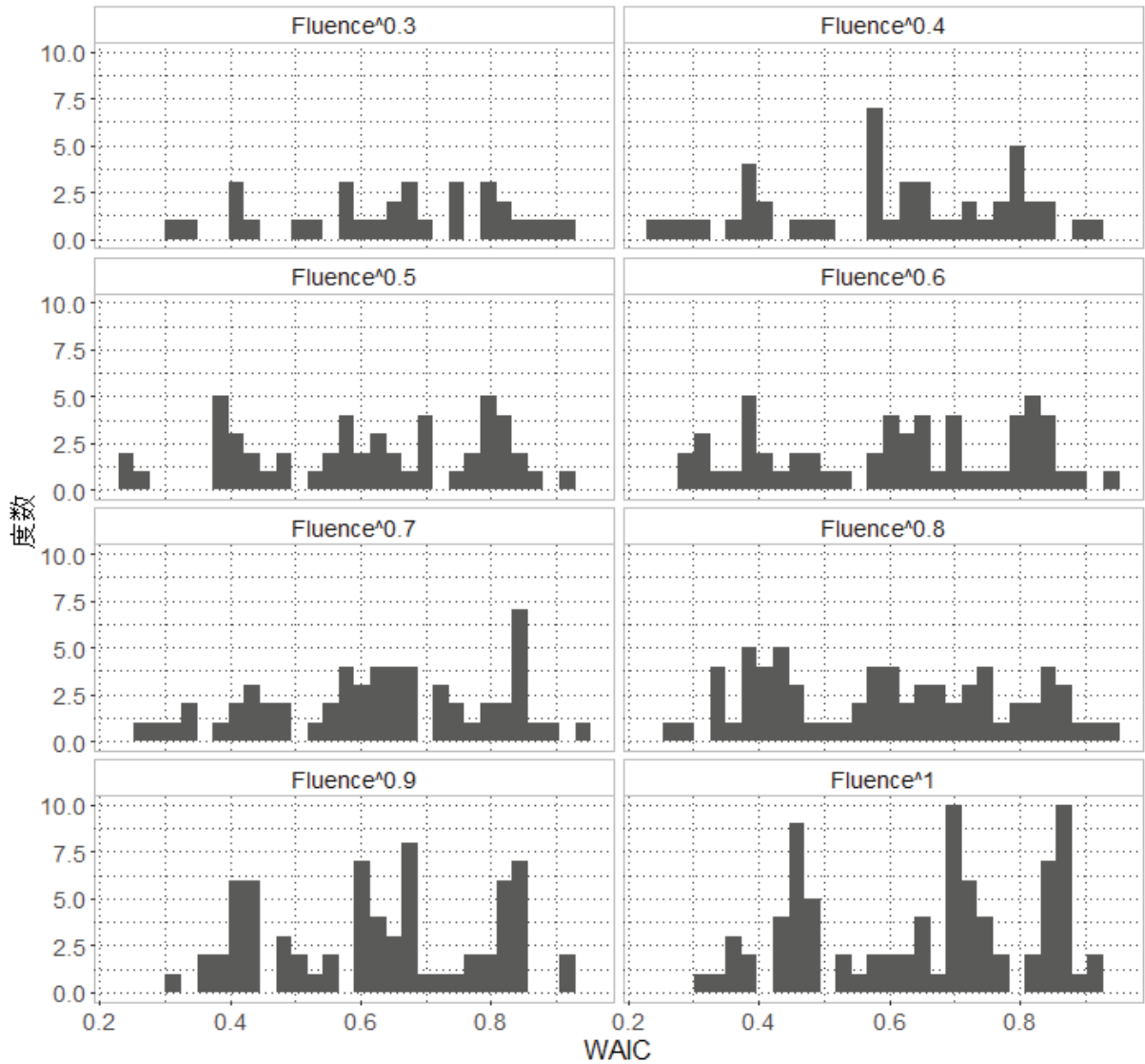


図3.2.1-52. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC_m p ヒストグラム(母材(試験炉データ含む))

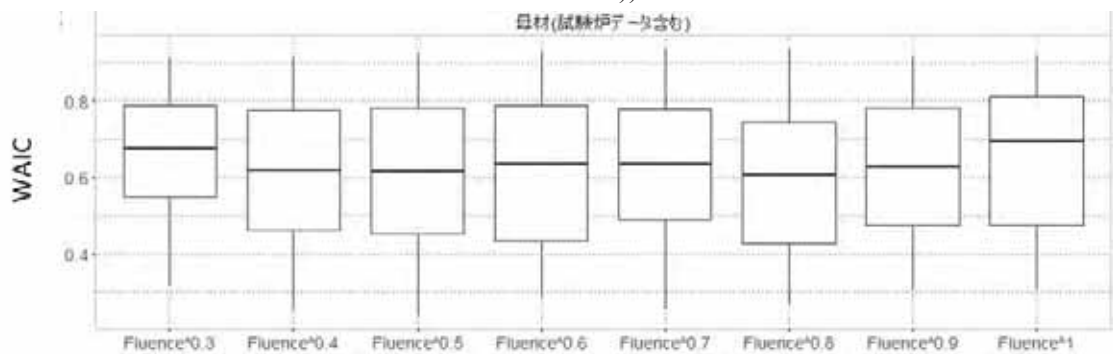


図3.2.1-53. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC の箱ひげ図(母材(試験炉データ含む))

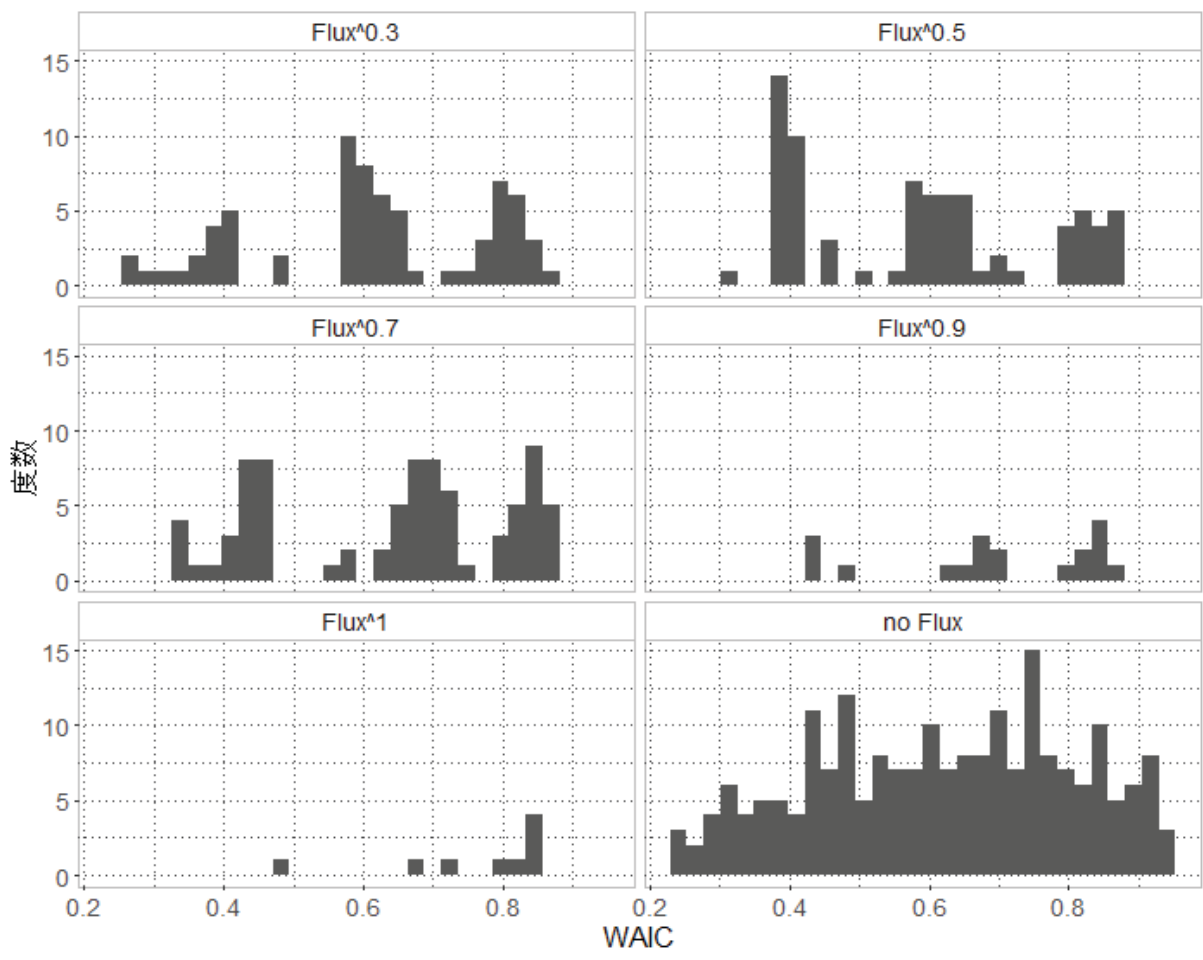


図3.2.1-54. Flux を入力変数とするモデルの WAIC のヒストグラム(母材(試験炉データ含む))

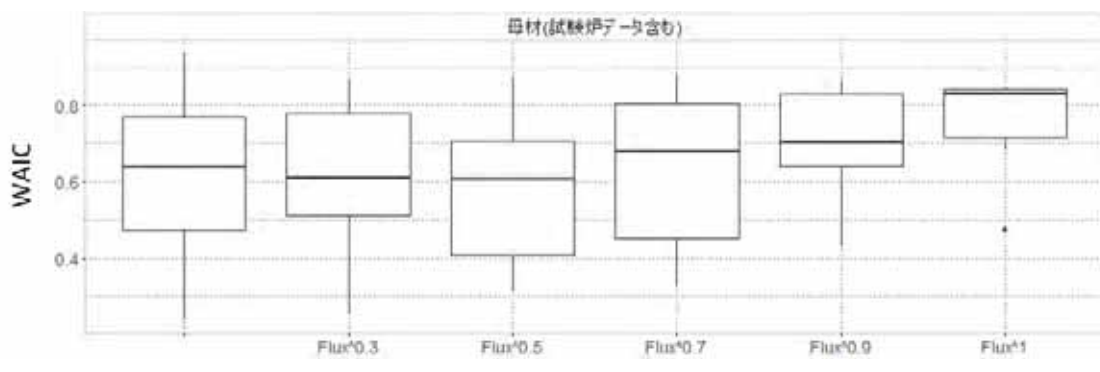


図3.2.1-55. Flux を入力変数とするモデルの WAIC の箱ひげ図(母材(試験炉データ含む))

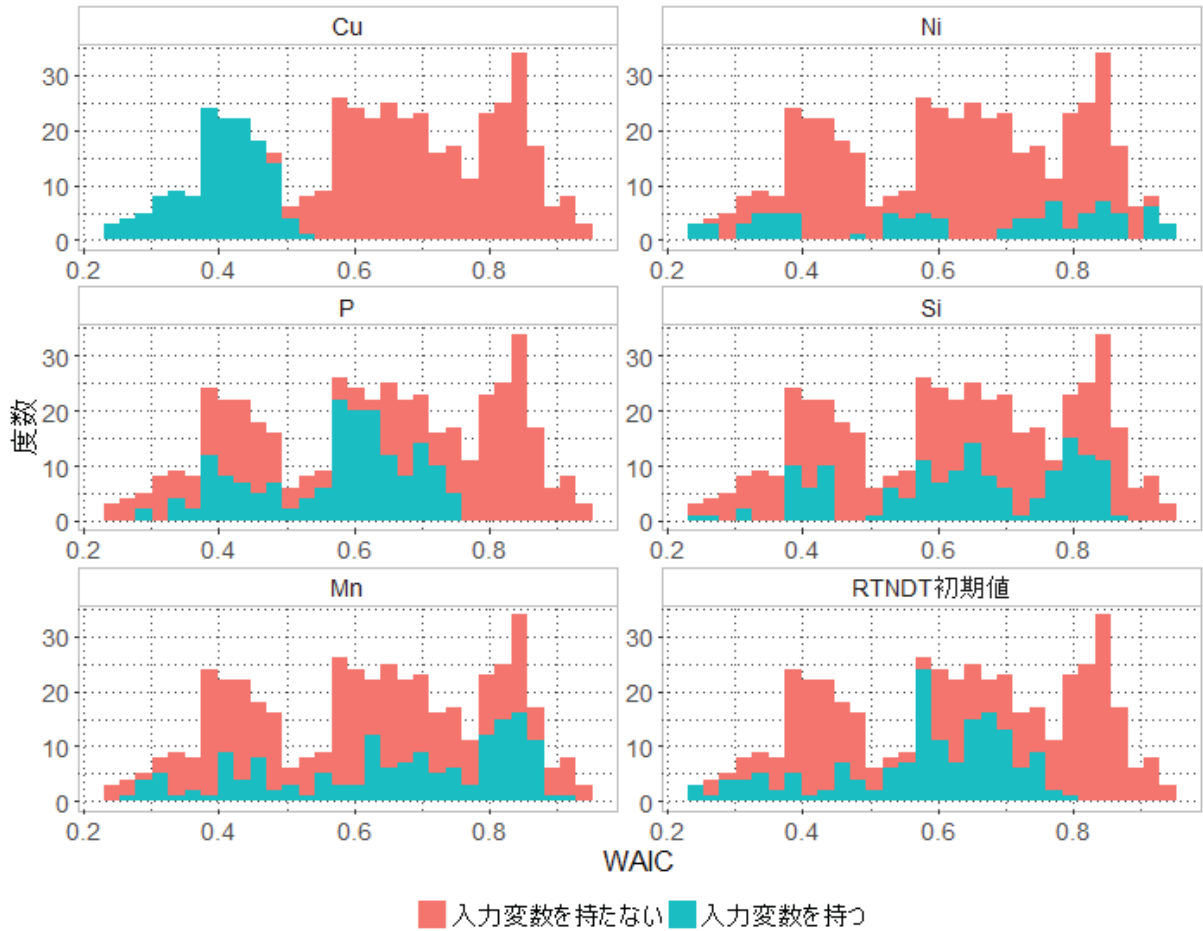


図3.2.1-56. Fluence、Flux 以外を入力変数とするモデルの WAIC のヒストグラム(母材(試験炉データ含む))

母材(試験炉データ含む)に対する分析の結果以下のことが言える

- Fluence は 0.5 乗前後で WAIC の最小値が小さい
- Flux は入力変数か 0.3 乗程度もしくは入力変数としない時に WAIC が小さい
- Cu、Ni、Si、RT_{NDT}初期値を入力変数とすると WAIC の値が小さい
- Ni を入力変数とする場合に信頼性が高いと評価される割合が少ない

・溶接金属(試験炉データ含む)

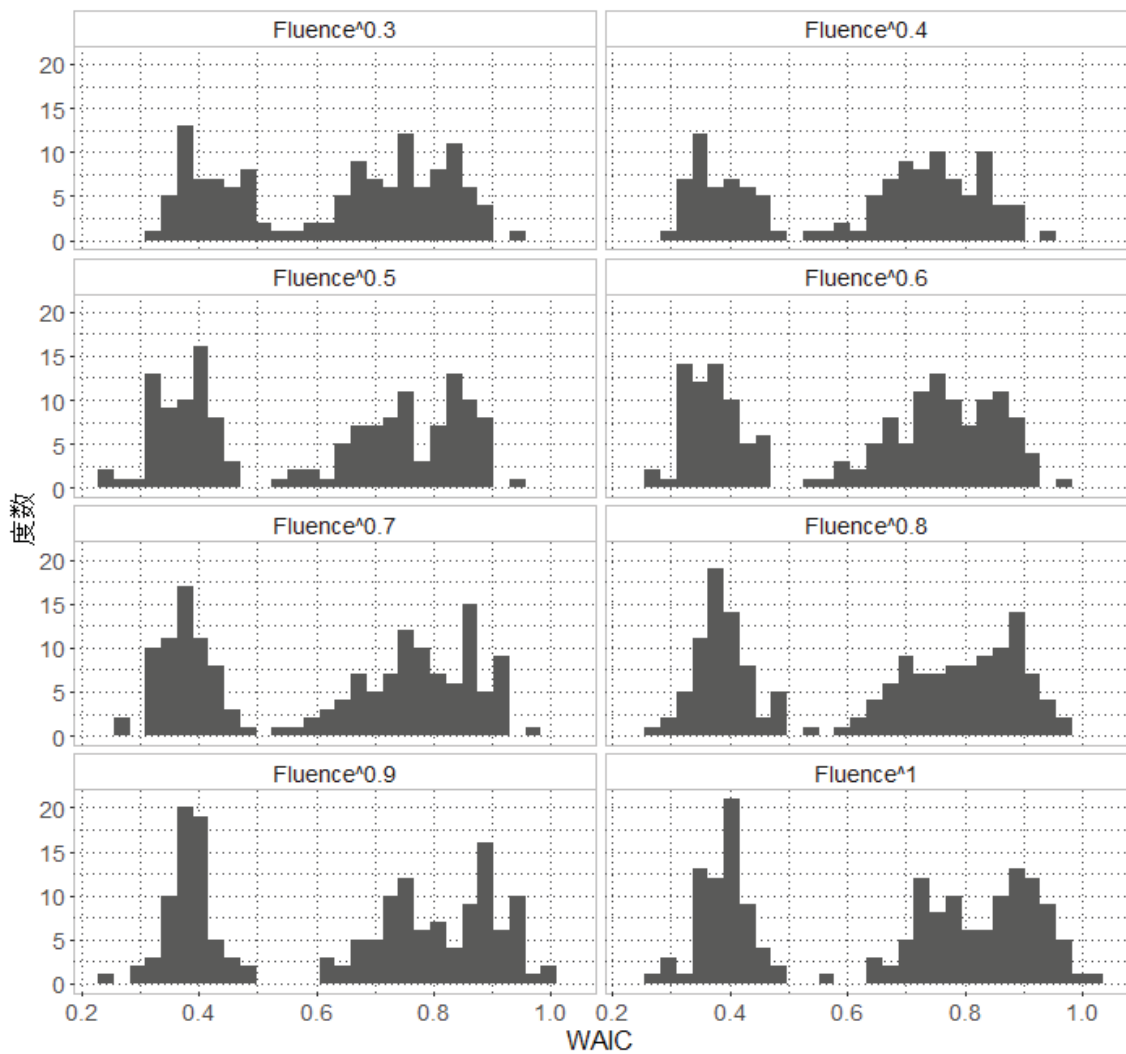


図3.2.1-57. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC のヒストグラム(溶接金属(試験炉データ含む))

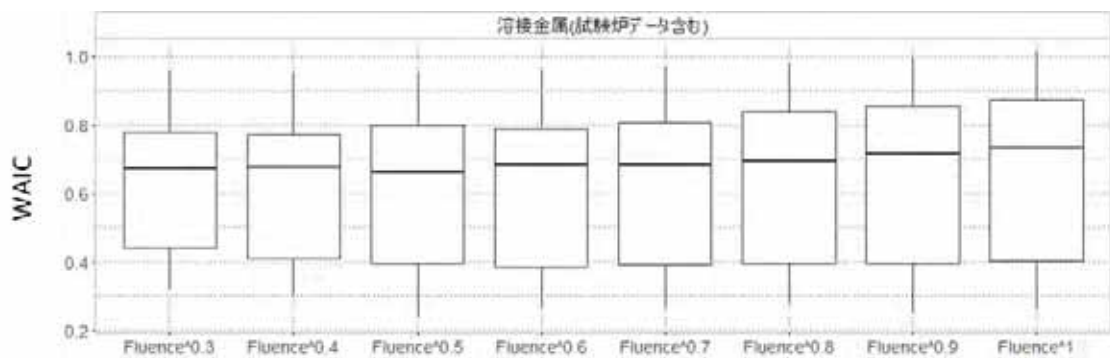


図3.2.1-58. Fluence を入力変数とするモデルの WAIC の箱ひげ図(溶接金属(試験炉データ含む))

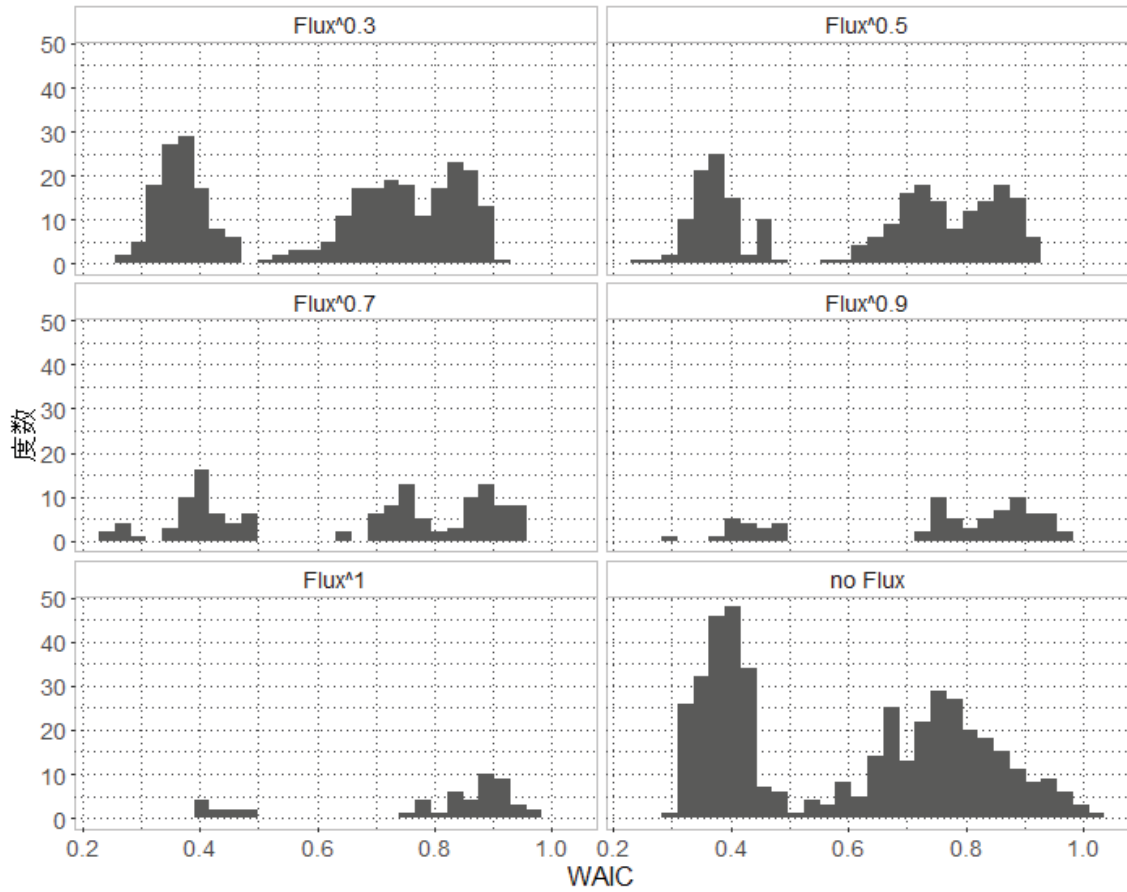


図3.2.1-59. Flux を入力変数とするモデルの WAIC のヒストグラム(溶接金属(試験炉データ含む))

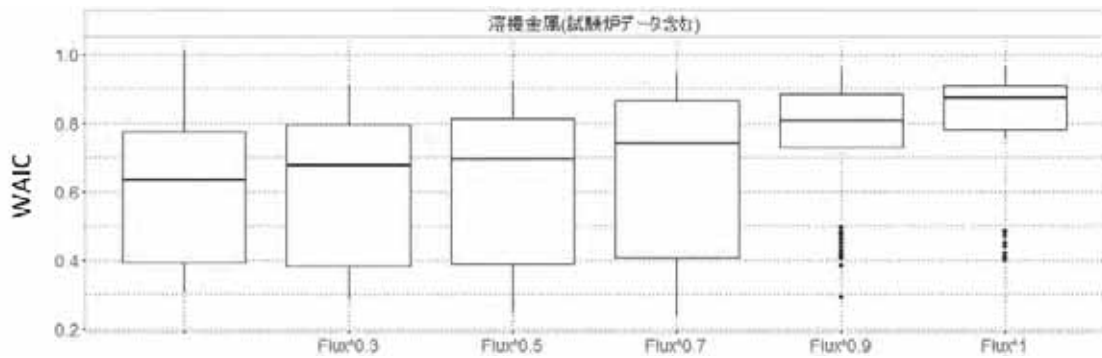


図3.2.1-60. Flux を入力変数とするモデルの WAIC の箱ひげ図(溶接金属(試験炉データ含む))

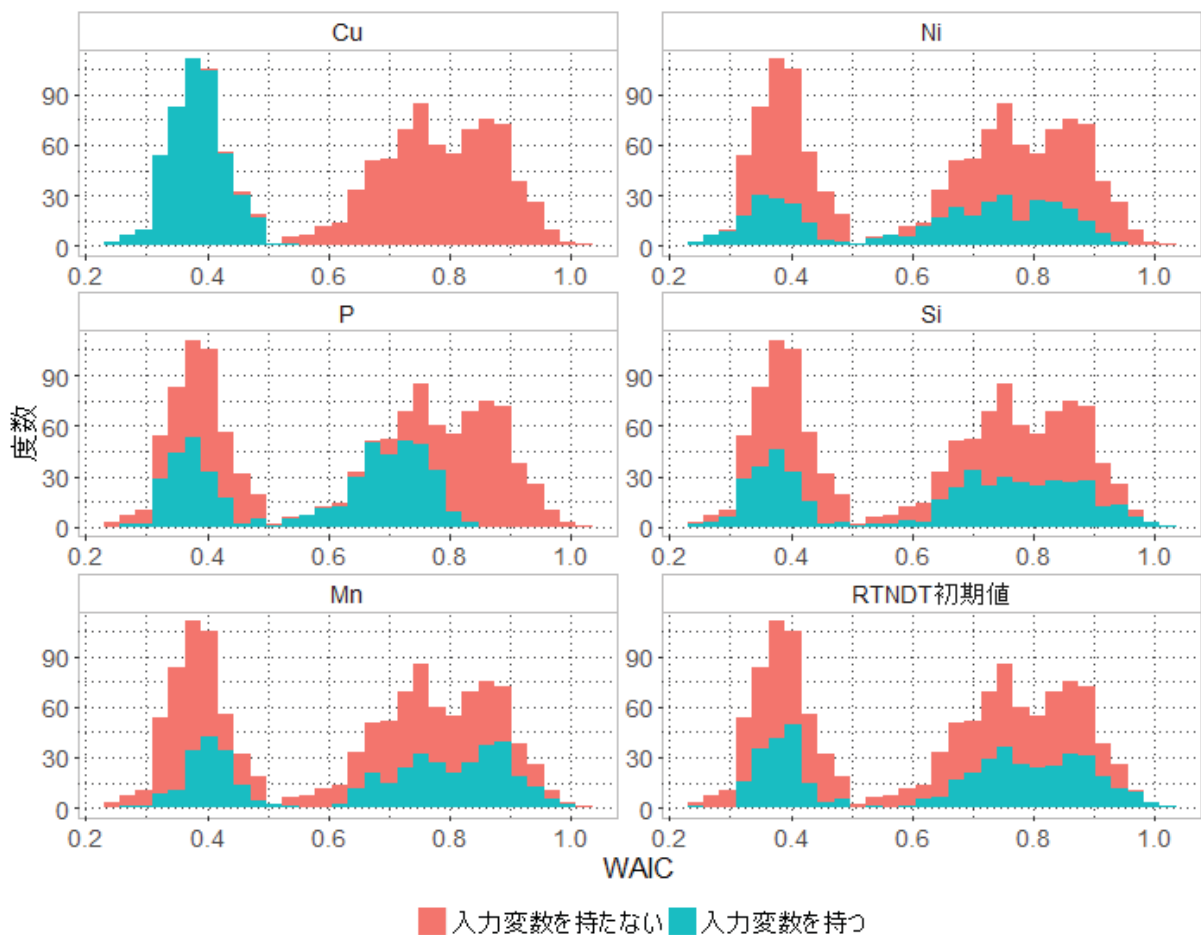


図3.2.1-61. Fluence、Flux 以外を入力変数とするモデルの WAIC のヒストグラム(溶接金属(試験炉データ含む))

溶接金属(試験炉データ含む)に対する分析の結果以下のことが言える

- Fluence は 0.5 乗前後で最も WAIC が小さい
- Flux は 0.7 乗で最も小さい WAIC を示すが、入力変数としない方が WAIC が小さい傾向にある
- Cu、Ni、Si を入力変数とすると WAIC が小さい
- Mn は入力変数とすると WAIC が大きくなる

データ区分毎の解析のまとめ

上述の各データ区分における解析の結果、WAIC が小さくなる入力変数の組合せを表 3.2.1-13 に示した。

データ区分ごとに信頼性高く、脆化傾向を最もよく表す入力変数の数や組合せが異なることが分かる。

例えば、Flux の影響は BWR で顕著に脆化に影響するが、PWR では影響が小さいことや、PWR では Ni や Si などの Cu 以外の化学成分も脆化に影響することが示唆されている。

ただし、本解析では解析回数は 3 回と限られた条件で行っており、一部のデータ区分においては外れ値も検知されていることから精度を高める追加解析の必要がある。また、試験炉データの有無によって、入力変数の候補が変わっており、照射速度等の影響によって、脆化に寄与する因子が変わっていないか、より詳細な評価を平成 30 年度に実施する予定である。

表3.2.1-13. データ区分ごとの WAIC が最小になった入力変数の組合せ*

データ区分	入力変数の組合せの候補			
	Fluence	Flux	化学成分	初期特性
全データ	Fluence ^{0.6}		Cu, Ni	
BWR	Fluence ^{0.9}	Flux ^{0.9}	Cu	
PWR	Fluence ^{0.7}		Cu, Ni, Si	RT _{NDT} 初期値
BWR+PWR	Fluence ^{0.5}		Cu, Ni,	RT _{NDT} 初期値
母材(試験炉データ含まず)	Fluence ^{0.5}	Flux ^{0.3}	Cu, Si	RT _{NDT} 初期値
溶接金属(試験炉データ含まず)	Fluence ^{0.5}	Flux ^{1.0}	Cu, Ni, P, Si	RT _{NDT} 初期値
母材(試験炉データ含む)	Fluence ^{0.4}		Cu, Ni,	RT _{NDT} 初期値
溶接金属(試験炉データ含む)	Fluence ^{0.5}	Flux ^{0.7}	Cu, Ni, Si	

*外れ値は除く

(5) 関連温度移行量および確信区間の算出

各データ区分で WAIC を小さくする入力変数の組合せを用いて関連温度移行量および確信区間の算出を行った。平成 29 年度は最も信頼性の高い入力変数の組合せの割合が高かった BWR データ区分において最も小さい WAIC を示した入力変数の組合せ(Fluence^{0.9}、Flux^{0.9}、Cu)で解析を実施した。

図 3.2.1-62、図 3.2.1-63 に Cu と Flux が異なる条件において、Fluence と ΔRT_{NDT} の関係性を評価した結果を示す。各条件において回帰曲線の最確値と 95% 確信区間を示しており、比較的データ数が多い $5 \times 10^{17} \text{n/cm}^2$ 以下の範囲では信頼区間の幅が狭くなり、データ数が少ない比較的照射量の高い(BWR データにおいて)領域では確信区間の幅が大きくなっている。特に $2 \times 10^{18} \text{n/cm}^2$ 以上の領域はデータが無く外挿となっている。また、Cu 含有量が高くなるにつれて、 ΔRT_{NDT} が高い値を示すと共に、データ数が少ないことに対応して、確信区間の幅も広がっていることが分かる。

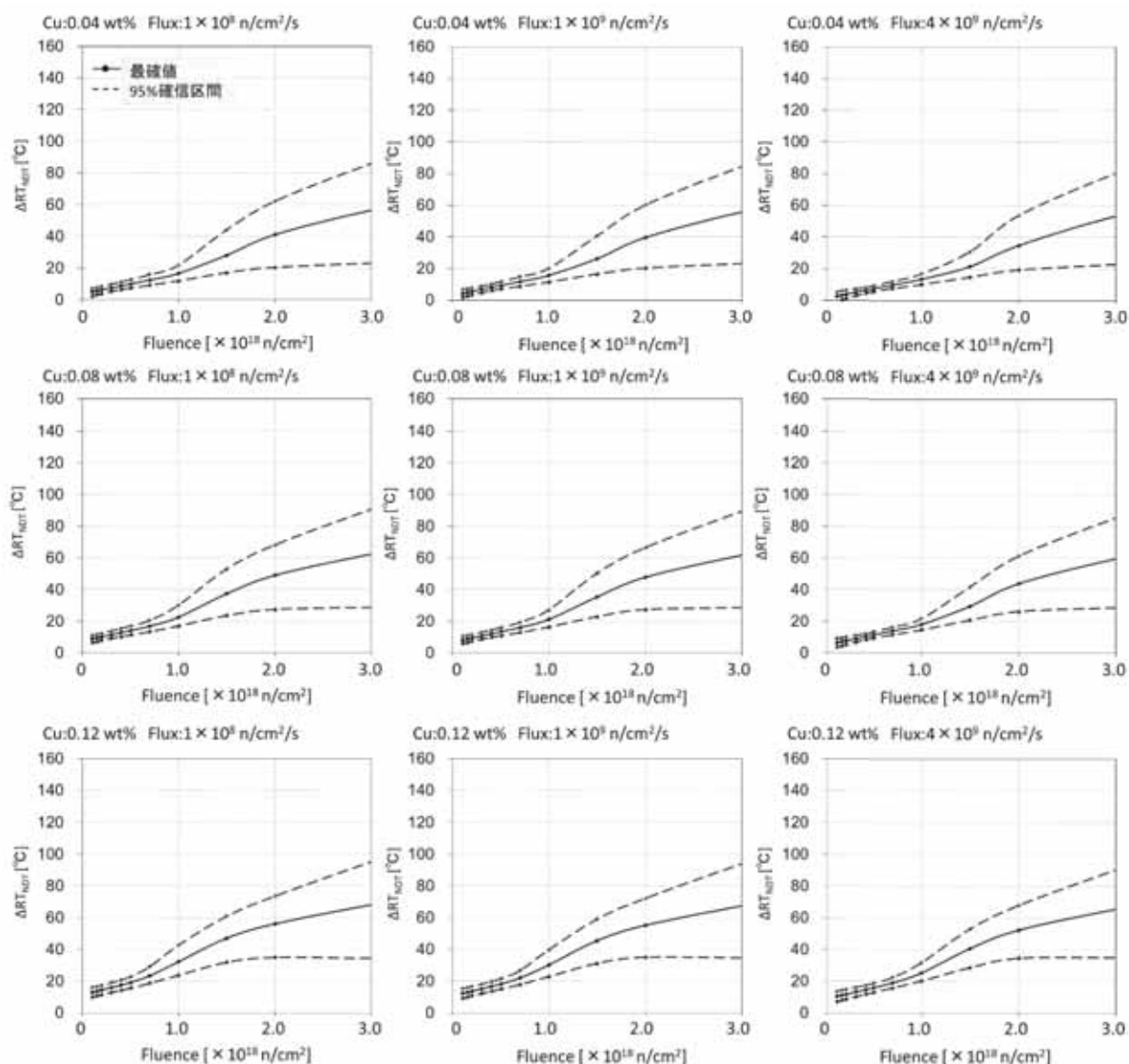


図3.2.1-62. Cu 含有量と Flux の異なる条件における ΔRT_{NDT} と Fluence の相関(1/2)

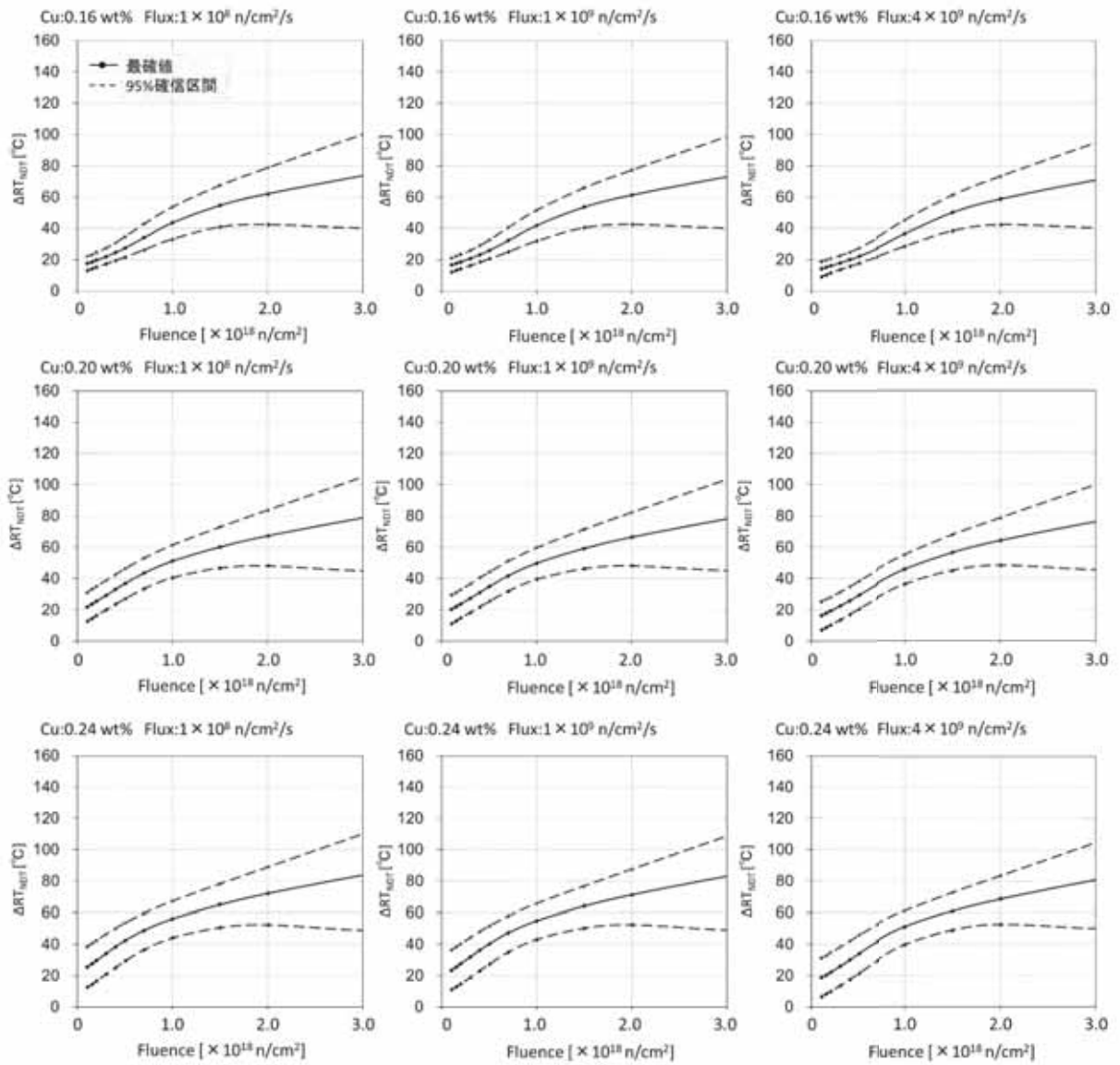


図3.2.1-63. Cu含有量とFluxの異なる条件における ΔRT_{NDT} とFluenceの相関(2/2)

図 3.2.1-64 に ΔRT_{NDT} 計算値の最確値と Fluence の関係を Cu 含有量で整理した結果を示す。Cu 含有量が低いほど、 ΔRT_{NDT} が低く、照射量が高くなるにつれて ΔRT_{NDT} の増加量が大きくなる傾向が見られる。逆に Cu 含有量が高い場合、低い照射量領域で傾きが大きく、照射量が大きくなるにつれて傾きが緩やかになっていることが分かる。

図 3.2.1-65 に Flux の異なる条件における ΔRT_{NDT} と Fluence の関係を比較した結果を示す。Flux が高いほど Fluence に対する ΔRT_{NDT} の増加量小さく、 ΔRT_{NDT} の変化が急峻になる Fluence は Cu 含有量によって異なることが分かる。

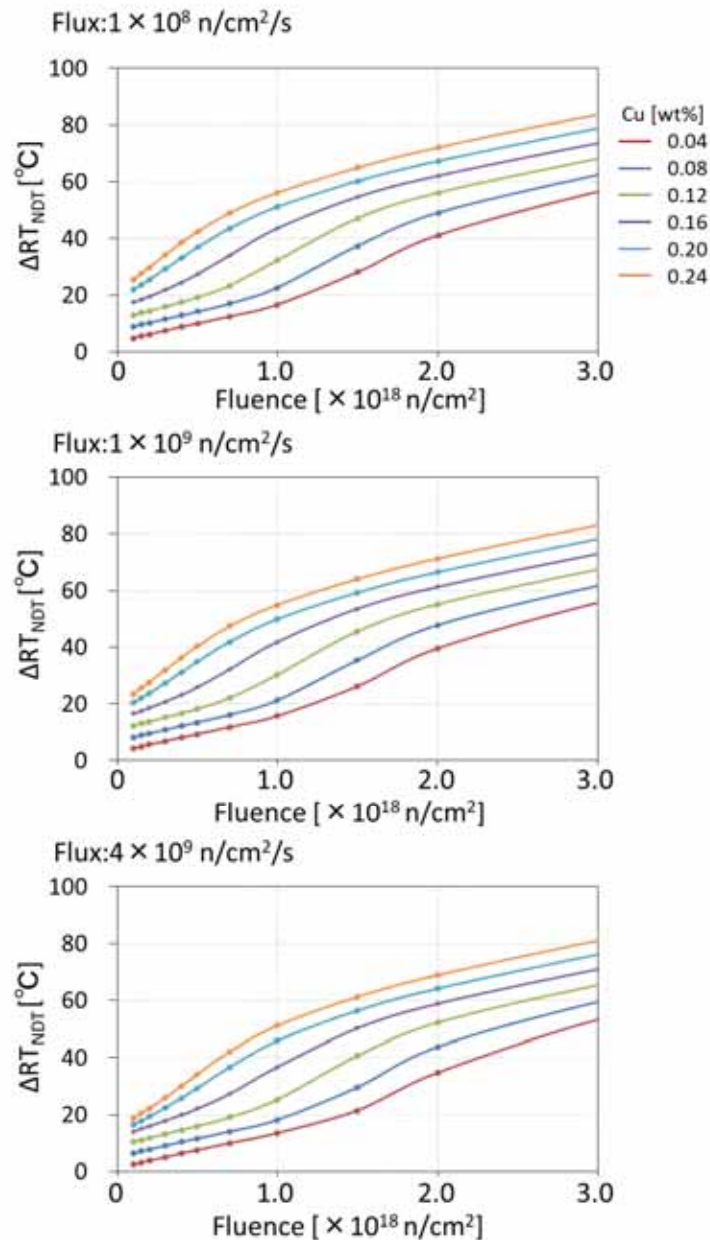


図3.2.1-64. ΔRT_{NDT} と Fluence の相関(Cu 濃度の影響)

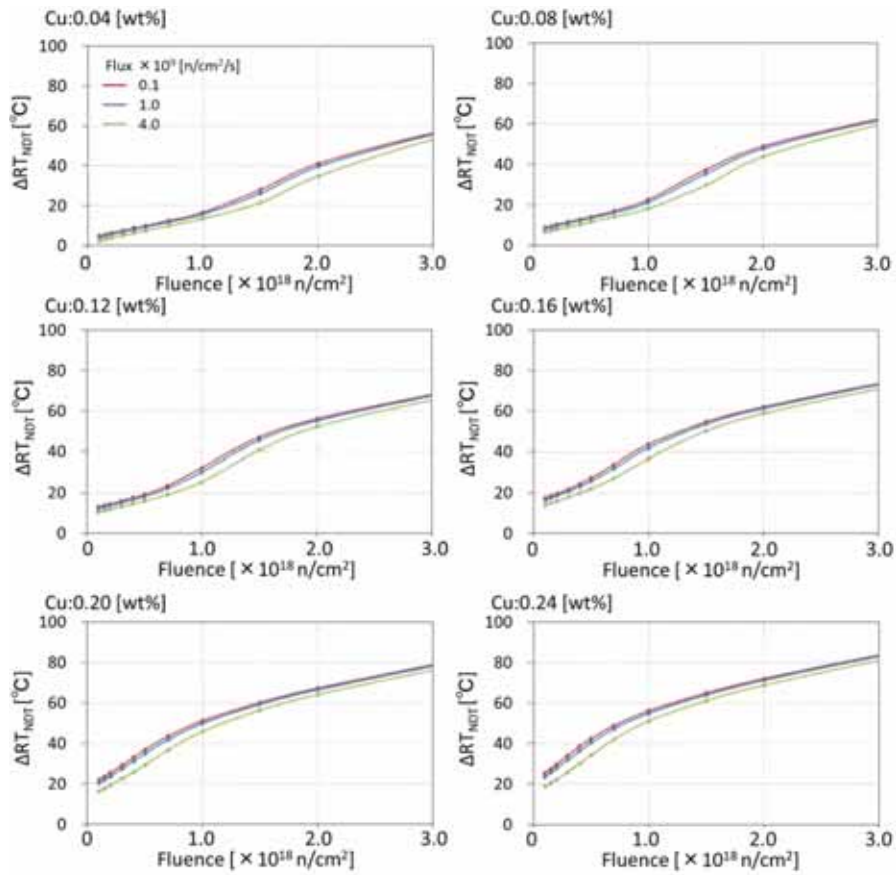


図3.2.1-65. ΔRT_{NDT}と Fluence の相関 (Flux の影響)

平成 29 年度は BWR データに対して関連温度移行量および確信区間の計算を実施し、それぞれの入力変数が脆化に対してどのように寄与しているか評価を実施した。平成 30 年度は他のデータ区分において詳細評価を実施し、データ区分ごとの脆化因子とそれらの影響を明らかにする。また、確信区間を用いて、計算値の不確かさおよび関連温度移行量評価の保守性について検討する。

(6) モデル式の係数不確かさおよび計算値の不確かさ評価手法の検討

原子炉圧力容器鋼の中性子照射に伴う関連温度移行量は、材料の化学成分と中性子照射量などに対して回帰分析を行って式の形を定める現象論的手法(3.2.1-1)・(3.2.1-5)と、中性子照射に伴う材料中の溶質原子クラスタやマトリックス損傷の形成などのメカニズムに基づいてモデル式を立てる機構論的手法(3.2.1-6)・(3.2.1-7)による評価が行われている。これらの評価では共通して、事前にモデル式を構築し、実測データに合わせこむように係数フィッティングを行っている。

係数をフィッティングする対象である実測データは、初期値のばらつき、シャルピー試験のばらつき、照射条件、鋼材の組成等さまざまな不確かさを内包しており、関連温度移行量評価の保守性を確認するためには、それらが計算値に及ぼす影響を把握することが有効である。

平成 29 年度は、それらの不確かさに基づくモデル式の係数不確かさおよび計算値の不確かさを評価する手法について検討した。

① 手法の検討

a. 階層ベイズモデルを用いたモデル式の係数分布の算出

点推定的な統計手法では、任意のモデル式の係数について推定を行なう場合、モデル式を回帰式とにおいて実測値と最も合う係数を一意に決定する。また回帰式の推定においては、実測データや各項に含まれる不確かさは回帰式全体の残差として算出され、各係数自体の誤差を算出・検討することはできない。

ベイズ統計を用いた数値予測式モデルの係数推定では、係数は分布として算出される。この分布は各項に含まれる誤差(項の決定に関する誤差等)や実測値に含まれる誤差(測定における誤差等)を反映したものであり、係数の分布に対する検討を項の不確かさに対する検討ととらえることができる。ベイズ統計を用いた係数推定では、解析的な尤度関数の決定は事実上困難であることから、MCMC サンプリングを用いた計算を行うこととなる。

b. ブートストラップ法を用いた係数分布の算出

ブートストラップ法とはモンテカルロ法の一つであり、実測データからのリサンプリングによって複数の標本を作成し(ブートストラップ標本)、これを用いてモデル係数の推定を行う手法である。ブートストラップ標本は一般的に実測データから実測データのサンプルサイズと同数をリサンプリングし作成する。ブートストラップ標本ごとに回帰式の係数を得ることができるため、十分多くのブートストラップ標本を作成することで、各係数の分布を得ることができる。また、すべてのブートストラップ標本によって得られたすべての回帰式を用いて予測値を算出することで、実測値に対応する予測値の分布を得ることができる。

② 関連温度移行量評価法への適用

ベイズ統計やブートストラップ法を用いた手法では、数値予測式モデルの各係数を分布として推定でき、係数の掛かる項の不確かさを推定することに対応する。たとえば係数分布の分散が大きい場合は、その係数の掛かる項は誤差を多く含んだものであると考えられ、また分布に偏りがある場合はその係数とその最頻値周辺の値のときに最も影響することに対応する。以上のように、従来の点推定ではできない関係性について明らかにすることが可能である。

また係数分布を算出することで、実測データの不確かさに基づいて数値的解法によって得られた係数の信頼区間を得ることができる。これを利用して計算値を算出することで、従来の標準誤差を用いた固定的な信頼区間(誤差範囲)とは異なる計算値誤差を算定することができると思われる。

ブートストラップ法を採用する上での問題点は、回帰式の係数最適化処理の計算コストを鑑みなければならない点である。一方で、ブートストラップ法はブートストラップ標本ごとの処理が独立しているため、並列計算による高速化が容易に実現できる。

これに対して、MCMC を用いた推定は一般に並列計算による高速化が困難であるとされているものの、一つあたりの計算コストの小さいという利点がある。

現時点では、計算に要する時間が短いものと考えられることから、階層ベイズを用いた手法を用いて検討を行った。

③ 使用する計算コードの検討

階層ベイズモデルを取り扱う MCMC サンプラとして、WinBUGS、Just another Gibbs sampler(以下、JAGS)、Stan を候補とし、比較を行った。表 3.2.1-14 にそれらの手法の特徴を整理した結果を示す。

表3.2.1-14. MCMC サンプラの比較

項目	WinBUGS	JAGS	Stan
R バインディング	有り(R2WinBUGS)	有り(rjags、runjags)	有り(Rstan)
サンプリング手法	ギブスサンプリング	ギブスサンプリング	ハミルトニアン モンテカルロ法、 自動微分変分ベイズ法、 L-BFGS 法
サンプリング速度	遅い	普通	普通~高速
開発状況	終了 (2007年8月6日)	継続中	継続中
ソースコード	非公開	公開	公開
その他	3コードの中で最も歴史がある	確率モデル記述言語 は WinBUGS に近い	モデル式の導関数が連続 でなければならない

いずれの MCMC サンプラも R バインディングがあるため、R 上での実行や解析結果の処理を行うことができる。サンプリング手法は WinBUGS と JAGS はギブスサンプリングを用いるが、Stan はハミルトニアンモンテカルロ法などの確率密度の導関数を考慮したサンプリング手法を用いる。これにより、一般に、Stan は WinBUGS や JAGS より高速にサンプリングを行うことができるとされる。JAGS では Stan と比較してロバストなギブスサンプリングを用いている。国内脆化予測法のモデル式^(3.2.1-18)では min 関数や max 関数があり、確率密度分布の導関数が不連続なモデルであるため、MCMC サンプリングには安定性の高い手法が必要となる。これらを踏まえ、サンプリング手法としてギブスサンプリングを用いる JAGS を採用した。

④ 確率モデルの導入

階層ベイズモデルを用いた係数の不確かさ評価手法について検討するため、電気技術規程 JEAC4201-2007^(3.2.1-18) に採用されている数式モデルを用いた評価を実施した。予測モデルの係数や予測値の標準偏差に対して事前分布を与える係数の事前分布として、一様分布モデルと正規分布モデルの2つを検討した。一様分布モデルでは、係数の再フィッティングに関する検討、正規分布モデルでは、係数の不確かさ評価に関する検討に適したモデルとして選定している。JEAC4201-2007 では $\xi_1 \sim \xi_{17}$ および η_1, η_2 を係数として用いているが、本項ではそれぞれ $\xi_{i01} \sim \xi_{i17}$ 、 $\eta_{a[1]}$ 、 $\eta_{a[2]}$ として示す。また、係数の不確かさ評価に用いる係数の初期値は JEAC4201-2007[2013 追補版]^(3.2.1-19) のものを使用した。解析対象のデータは国内の監視試験データおよび国内材の試験炉照射データとし、マイクロ組織分析結果へのフィッティング、データの重み付けは実施していない。

表3.2.1-15. 係数の一覧

係数名	本項での 表記	JEAC4201-2007 [2013 追補版]の係数値	係数名	本項での 表記	JEAC4201-2007 [2013 追補版]の係数値
ξ_1	xi01	1.6983018E-05	ξ_{11}	xi11	6.6826000E-01
ξ_2	xi02	3.5228183E-04	ξ_{12}	xi12	5.0523112E-06
ξ_3	xi03	8.3530827E-01	ξ_{13}	xi13	3.5092239E-01
ξ_4	xi04	7.1620000E-01	ξ_{14}	xi14	4.3288847E+00
ξ_5	xi05	1.1937318E+01	ξ_{15}	xi15	7.3319000E-01
ξ_6	xi06	4.9388038E-01	ξ_{16}	xi16	3.0150182E+02
ξ_7	xi07	1.7879868E+01	ξ_{17}	xi17	2.8235609E+00
ξ_8	xi08	5.7851852E+02	η_1	eta[1]	3.6670381E-07
ξ_9	xi09	6.0761276E-25	η_2	eta[2]	6.1621430E-01
ξ_{10}	xi10	0.0000000E+00			

a. 一様分布モデル

各係数(xi01~xi17、eta[1]、eta[2])および脆化量の事前分布モデルを式(3.2.1-10)~式(3.2.1-13)に示す。

各係数の事前分布は最小値をゼロ、最大値を文献値の 10 倍とする一様分布とした。ただし xi10 については、文献値(3.2.1-19) がゼロであるため、最小値 0、最大値 1 の一様分布とした。

脆化量の事前分布は予測値と標準偏差(s)に従う正規分布とし、 s についても事前分布を与えて階層化した。 s の事前分布は平均ゼロ、標準偏差を 10^3 の裾の重い半正規分布(平均値=0 未満を切り捨てた正規分布)とした。

$$xi_i \sim \text{UNIF}(0.0, 10 \cdot xi_i^{ref}) \quad (3.2.1-10)$$

$$eta_j \sim \text{UNIF}(0.0, 10 \cdot eta_j^{ref}) \quad (3.2.1-11)$$

$$dRTNDT_k \sim \text{NORM}(mu_k, 1/s_mu^2) \quad (3.2.1-12)$$

$$s_mu \sim \text{NORM}(0, 10^{-6}) T(0,) \quad (3.2.1-13)$$

- UNIF(...) : 一様分布、引数は 1.下限値、2.上限値
- NORM(...) : 正規分布、引数は 1.平均、2.分散の逆数
- NORM(...)T(0,) : 正規分布(ゼロ未満切り捨て)、引数は 1.平均、2.分散の逆数
- xi_i : xi01 から xi17($i=1, 2, \dots, 17$)
- xi_i^{ref} : xi01 から xi17 の文献値(表 3.2.1-15)
- eta_j : eta[1]と eta[2]($j=1, 2$)
- eta_j^{ref} : eta[1]と eta[2]の文献値(表 3.2.1-15)
- $dRTNDT_k$: k 番目のデータの関連温度移行量
- mu_k : サンプルされた係数値を用いた脆化予測式による、 k 番目のデータの関連温度移行量計算値
- s_mu : 脆化予測式による計算値の標準偏差

b. 正規分布モデル

各係数(xi01~xi17、eta[1]、eta[2])の事前分布モデルを式(3.2.1-14)~式(3.2.1-17)に示す。各係数の事前分布として、文献値^(3.2.1-19)を平均とする正規分布(ゼロ未満切り捨て)、各係数の事前分布の標準偏差として、平均がゼロ、標準偏差を文献値のおおよその大きさ(表 3.2.1-16)とする正規分布(ゼロ未満切り捨て)とした。ただし xi10 については文献値(JEAC4201-2001[2013年追補版]^(3.2.1-19))がゼロのため、JEAC4201-2007^(3.2.1-18)で採用された xi10 の値 2.4093E-02 を参考に、 $s_s_xi_{10}$ の事前分布を 10^{-2} とした。また、計算値と計算値の標準偏差の確率モデルは式(3.2.1-16)、式(3.2.1-17)を用いた。

$$xi_i \sim \text{NORM}(xi_i^{ref}, 1/s_{xi_i}^2)T(0,) \quad (3.2.1-14)$$

$$s_xi_i \sim \text{NORM}(0, 1/s_s_xi_i^2)T(0,) \quad (3.2.1-15)$$

$$eta_j \sim \text{NORM}(eta_j^{ref}, 1/s_eta_j^2)T(0,) \quad (3.2.1-16)$$

$$s_eta_j \sim \text{NORM}(0, 1/s_s_eta_j^2)T(0,) \quad (3.2.1-17)$$

- s_xi_i : xi01 から xi17 ($i=1, 2, \dots, 17$)の標準偏差
- $s_s_xi_i$: s_xi_i の事前分布の標準偏差
- s_eta_j : eta[1]と eta[2] ($j=1, 2$)の標準偏差
- $s_s_eta_j$: s_eta_j の事前分布の標準偏差

表3.2.1-16. 正規分布モデルでの脆化予測式係数の標準偏差の階層事前分布(正規分布)

No.	係数の標準偏差 変数名	事前分布の平均	事前分布の 標準偏差変数名	事前分布の 標準偏差値	対応する係数の 文献値
1	s_xi01	0	s_s_xi01	1E-05	1.6983018E-05
2	s_xi02	0	s_s_xi02	1E-04	3.5228183E-04
3	s_xi03	0	s_s_xi03	1E-01	8.3530827E-01
4	s_xi04	0	s_s_xi04	1E-01	7.1620000E-01
5	s_xi05	0	s_s_xi05	1E+01	1.1937318E+01
6	s_xi06	0	s_s_xi06	1E-01	4.9388038E-01
7	s_xi07	0	s_s_xi07	1E+01	1.7879868E+01
8	s_xi08	0	s_s_xi08	1E+02	5.7851852E+02
9	s_xi09	0	s_s_xi09	1E-25	6.0761276E-25
10	s_xi10	0	s_s_xi10	1E-02	0.0000000E+00
11	s_xi11	0	s_s_xi11	1E-01	6.6826000E-01
12	s_xi12	0	s_s_xi12	1E-06	5.0523112E-06
13	s_xi13	0	s_s_xi13	1E-01	3.5092239E-01
14	s_xi14	0	s_s_xi14	1E+00	4.3288847E+00
15	s_xi15	0	s_s_xi15	1E-01	7.3319000E-01
16	s_xi16	0	s_s_xi16	1E+02	3.0150182E+02
17	s_xi17	0	s_s_xi17	1E+00	2.8235609E+00
18	s_eta[1]	0	s_s_eta[1]	1E-07	3.6670381E-07
19	s_eta[2]	0	s_s_eta[2]	1E-01	6.1621430E-01

c. 冗長な係数の固定化

脆化予測式の係数には、冗長な係数の組み合わせが幾つか含まれている。このような係数の組み合わせに対しては、組み合わせの一部の係数値を固定化しても、他の係数値を変更することで同等の効果を得ることができる。表 3.2.1-17 に冗長な係数と係数の変更に伴う他の係数への影響を示す。確率モデルにおいては、これら 4 係数についてはサンプリングを行わず固定値として取り扱うこととした。

表3.2.1-17. 冗長な係数とその値の変更に相当する処理

xi04 の値を a 倍する場合		xi05 の値を b 倍する場合		xi11 の値を c 倍する場合		xi15 の値を d 倍する場合	
xi01	a 倍	xi06	1/b	xi09	1/c 倍	xi09	1/d ² 倍
xi02	a 倍			xi12	1/c 倍	xi16	d 倍
xi08	1/a 倍			xi16	\sqrt{c} 倍		
xi09	a 倍						
xi12	a 倍						
xi17	\sqrt{a} 倍						

⑤ モデル式の係数および予測値の不確かさ解析

a. 一様分布モデル

解析条件を表 3.2.1-18 に示す。

表3.2.1-18. 一様分布モデルのサンプリング条件

No.	項目	内容
1	試行回数	100000
2	バーンアウト数	50000
3	サンプリング数	1000
4	サンプリング間隔	50
5	解析回数	3
6	並列実行数	3
7	総サンプリング数	3000
8	使用したデータ	国内原子炉圧力容器鋼の関連温度移行量データ(396点)

各パラメータのサンプリング結果について、以下の図表を作成した。

- (a) coda パッケージの `gelman.diag` 関数^(3.2.1-15) で算出した `rhat`(表 3.2.1-19)
- (b) coda パッケージの `plot.mcmc` 関数^(3.2.1-15) で可視化したトレースプロット(図 3.2.1-66)と事後分布の密度分布(図 3.2.1-67)
- (c) 統計量(表 3.2.1-20)
左右対称ではない事後分布においては、代表値として平均値や中央値は不適切であるため、最大事後確率(MAP)の推定値を算出した。
- (d) 事後密度のヒストグラムと MAP 推定値、文献値の比較(図 3.2.1-68、図 3.2.1-69)

表3.2.1-19. 一様分布モデルにおける各係数および予測値の標準偏差の `rhat`

パラメータ	Point est.	Upper C.I.	パラメータ	Point est.	Upper C.I.
xi01	1.01	1.01	xi12	1.01	1.01
xi02	1.00	1.00	xi13	1.00	1.00
xi03	1.00	1.01	xi14	1.00	1.01
xi06	1.00	1.00	xi16	1.00	1.00
xi07	1.00	1.00	xi17	1.00	1.00
xi08	1.00	1.00	eta[1]	1.00	1.00
xi09	1.00	1.01	eta[2]	1.00	1.01
xi10	1.00	1.00	s_mu	1.00	1.00

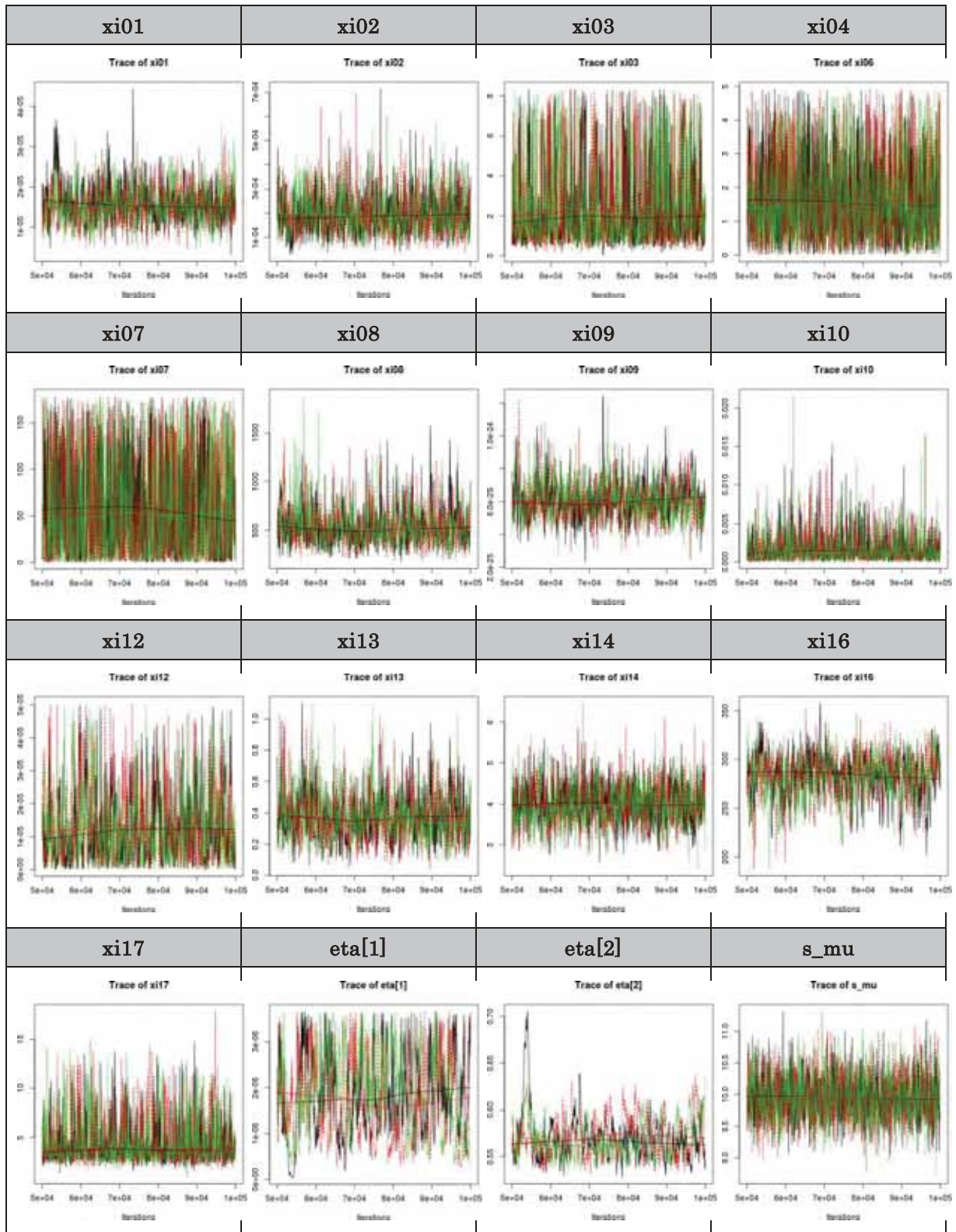


図3.2.1-66. 一様分布モデルの係数のトレースプロット

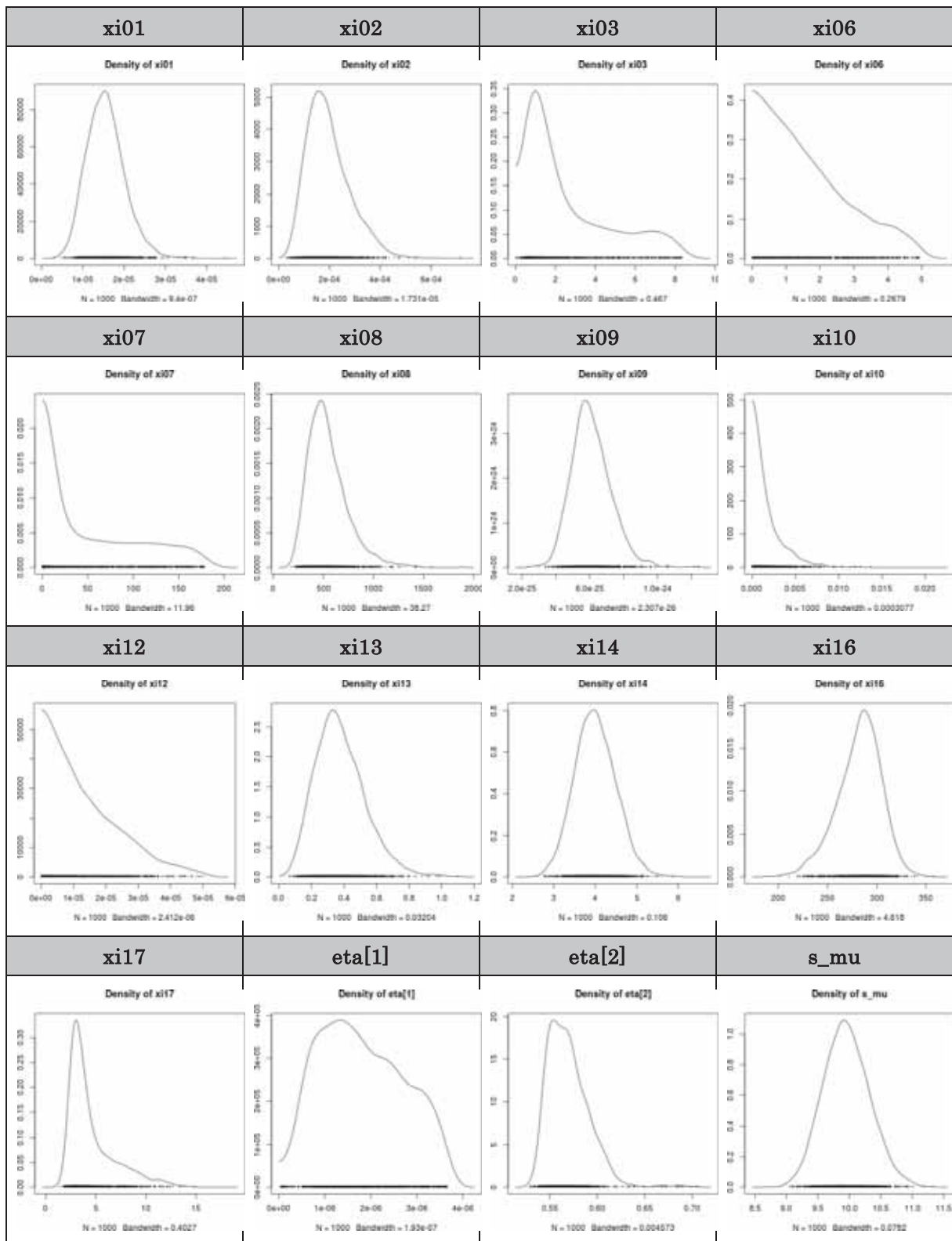


図3.2.1-67. 一様分布モデルの係数の事後分布

表3.2.1-20. 一様分布モデルのパラメータサンプリング結果の統計量

パラメータ	Lower95	Median	Upper95	Mean	SD	MAP	文献値	95%CI内	Median/文献値	Mean/文献値	MAP/文献値
xi01	7.10E-06	1.53E-05	2.46E-05	1.56E-05	4.63E-06	1.55E-05	1.70E-05	○	0.90	0.92	0.91
xi02	5.32E-05	1.82E-04	3.68E-04	1.96E-04	8.63E-05	1.53E-04	3.52E-04	○	0.52	0.56	0.44
xi03	2.27E-01	1.66E+00	7.36E+00	2.60E+00	2.19E+00	9.59E-01	8.35E-01	○	1.98	3.11	1.15
xi06	9.07E-04	1.35E+00	4.17E+00	1.64E+00	1.25E+00	4.62E-01	4.94E-01	○	2.73	3.33	0.94
xi07	4.45E-03	3.70E+01	1.62E+02	5.66E+01	5.59E+01	5.19E+00	1.79E+01	○	2.07	3.17	0.29
xi08	2.18E+02	5.08E+02	9.47E+02	5.46E+02	2.03E+02	4.75E+02	5.79E+02	○	0.88	0.94	0.82
xi09	3.90E-25	5.99E-25	8.33E-25	6.10E-25	1.18E-25	5.69E-25	6.08E-25	○	0.99	1.00	0.94
xi10	6.77E-07	1.16E-03	5.70E-03	1.83E-03	1.99E-03	4.41E-04	0.00E+00	-	-	-	-
xi12	7.06E-09	1.05E-05	3.64E-05	1.37E-05	1.13E-05	3.45E-06	5.05E-06	○	2.08	2.71	0.68
xi13	9.57E-02	3.61E-01	6.73E-01	3.80E-01	1.55E-01	3.30E-01	3.51E-01	○	1.03	1.08	0.94
xi14	3.04E+00	3.98E+00	4.96E+00	4.00E+00	4.96E-01	3.99E+00	4.33E+00	○	0.92	0.92	0.92
xi16	2.31E+02	2.84E+02	3.21E+02	2.82E+02	2.28E+01	2.86E+02	3.02E+02	○	0.94	0.94	0.95
xi17	1.70E+00	3.67E+00	9.81E+00	4.55E+00	2.39E+00	3.02E+00	2.82E+00	○	1.30	1.61	1.07
eta[1]	4.06E-07	1.71E-06	3.53E-06	1.81E-06	9.03E-07	1.32E-06	3.67E-07	×	4.66	4.94	3.61
eta[2]	5.36E-01	5.66E-01	6.10E-01	5.70E-01	2.22E-02	5.53E-01	6.16E-01	×	0.92	0.92	0.90
s_mu	9.24E+00	9.94E+00	1.07E+01	9.96E+00	3.66E-01	9.90E+00					

* 青地は文献値の 0.8 倍より低い推定値、緑地は文献値の 1.2 倍より高い推定値を示す。

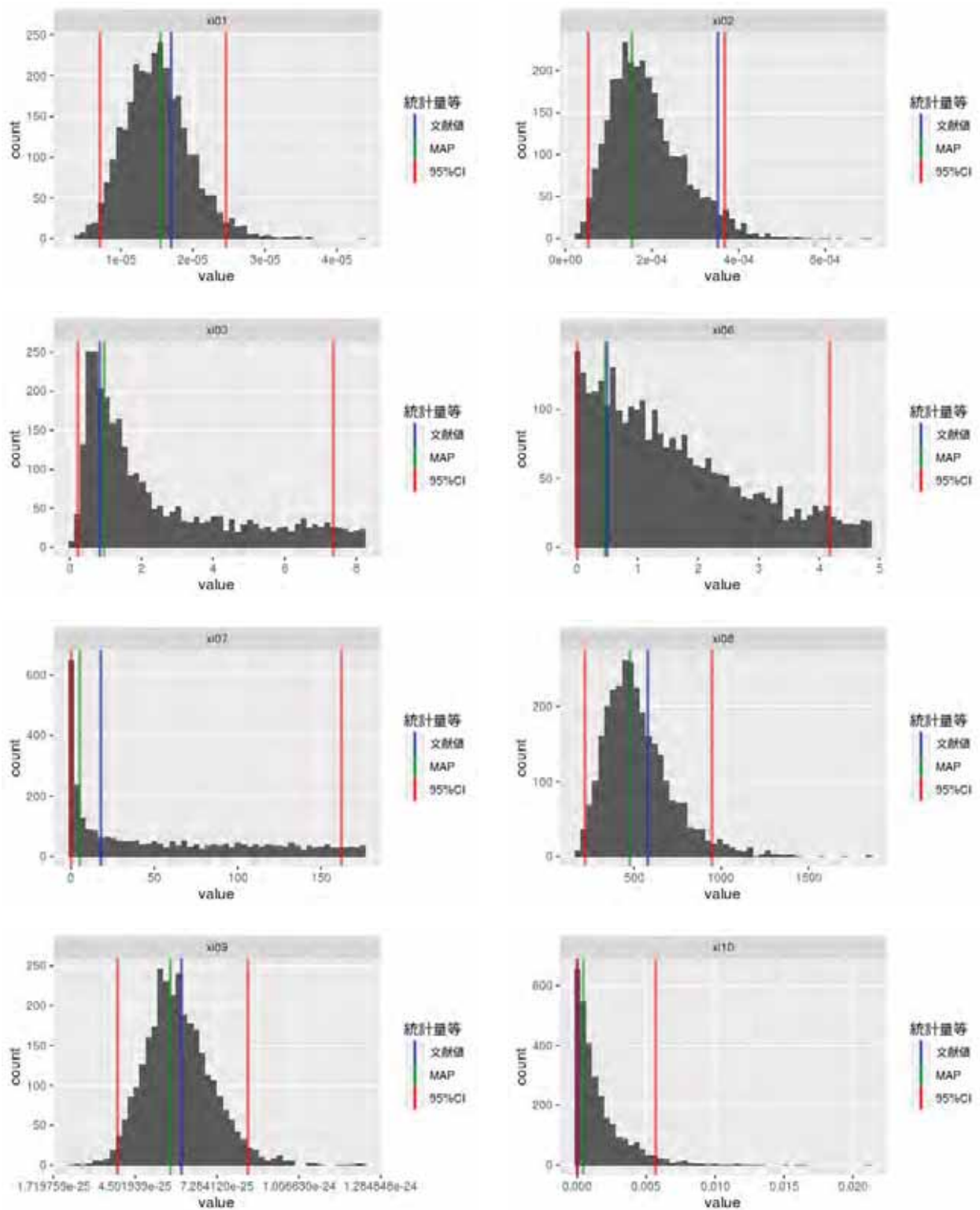


図3.2.1-68. 脆化予測式の係数の事後分布(ヒストグラム)と文献値の比較(一様分布モデル、1/2)

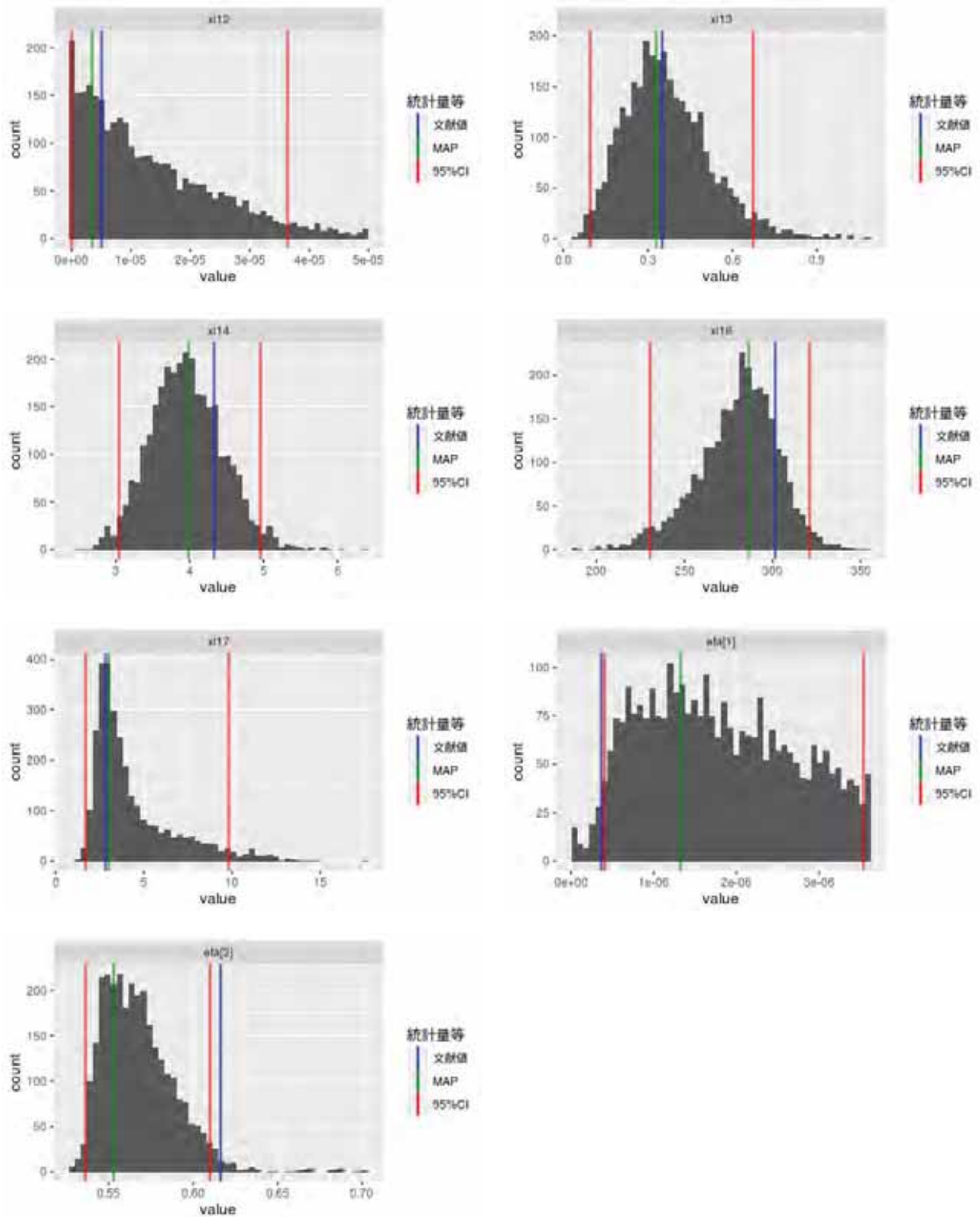


図3.2.1-69. 脆化予測式の係数の事後分布(ヒストグラム)と文献値の比較(一様分布モデル、2/2)

b. 正規分布モデル

解析条件を表 3.2.1-21 に示す。

表3.2.1-21. 正規分布モデルのサンプリング条件

No.	項目	内容
1	試行回数	30000
2	バーンアウト数	15000
3	サンプリング数	1500
4	サンプリング間隔	10
5	解析回数	3
6	総サンプリング数	4500
7	使用したデータ	国内原子炉压力容器鋼の関連温度移行量データ(396点)

各パラメータのサンプリング結果について、以下の図表を示す。

- (a) coda パッケージの `gelman.diag` 関数^(3.2.1-15) で算出した `rhat`(表 3.2.1-22)
- (b) coda パッケージの `plot.mcmc` 関数^(3.2.1-15) で可視化したトレースプロット(図 3.2.1-70、図 3.2.1-71)と事後分布の密度分布(図 3.2.1-72、図 3.2.1-73)
- (c) 統計量(表 3.2.1-23、表 3.2.1-24)
- (d) 事後密度のヒストグラムと MAP 推定値、文献値の比較(図 3.2.1-74、図 3.2.1-75)

表3.2.1-22. 正規分布モデルにおける各係数、係数の標準偏差および予測値の標準偏差の rhat

パラメータ	Point est.	Upper C.I.	パラメータ	Point est.	Upper C.I.
xi01	1.00	1.02	s_xi01	1.00	1.00
xi02	1.00	1.01	s_xi02	1.00	1.01
xi03	1.00	1.00	s_xi03	1.00	1.00
xi06	1.00	1.01	s_xi06	1.00	1.01
xi07	1.00	1.00	s_xi07	1.00	1.00
xi08	1.00	1.01	s_xi08	1.00	1.00
xi09	1.01	1.03	s_xi09	1.00	1.00
xi10	1.00	1.01	s_xi10	1.00	1.01
xi12	1.00	1.01	s_xi12	1.00	1.00
xi13	1.00	1.00	s_xi13	1.00	1.01
xi14	1.00	1.00	s_xi14	1.00	1.01
xi16	1.01	1.03	s_xi16	1.00	1.01
xi17	1.00	1.00	s_xi17	1.00	1.00
eta[1]	1.03	1.05	s_eta[1]	1.00	1.01
eta[2]	1.01	1.03	s_eta[2]	1.00	1.01
			s_mu	1.00	1.00

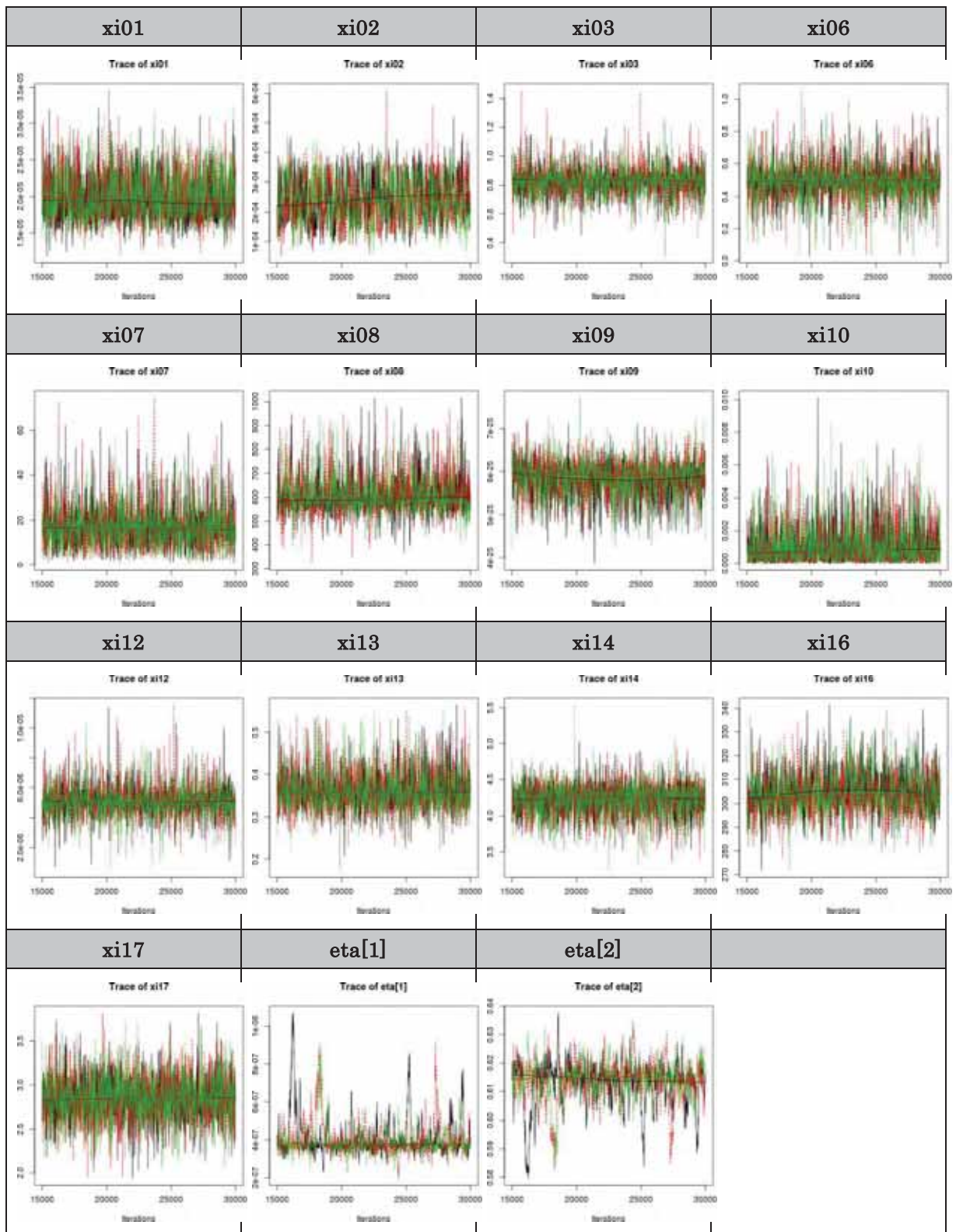


図3.2.1-70. 正規分布モデルのトレースプロット(1/2)

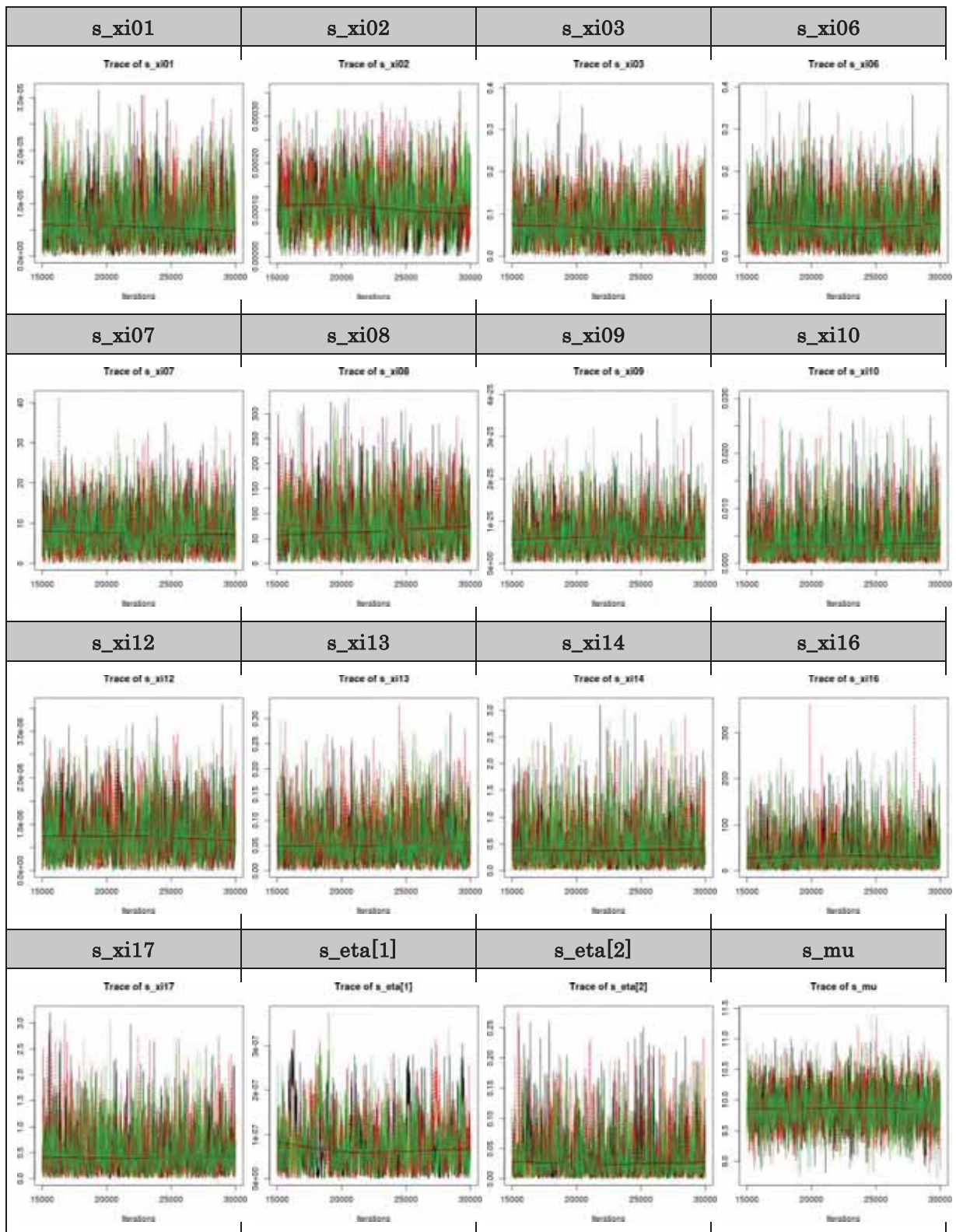


図3.2.1-71. 正規分布モデルのトレースプロット(2/2)

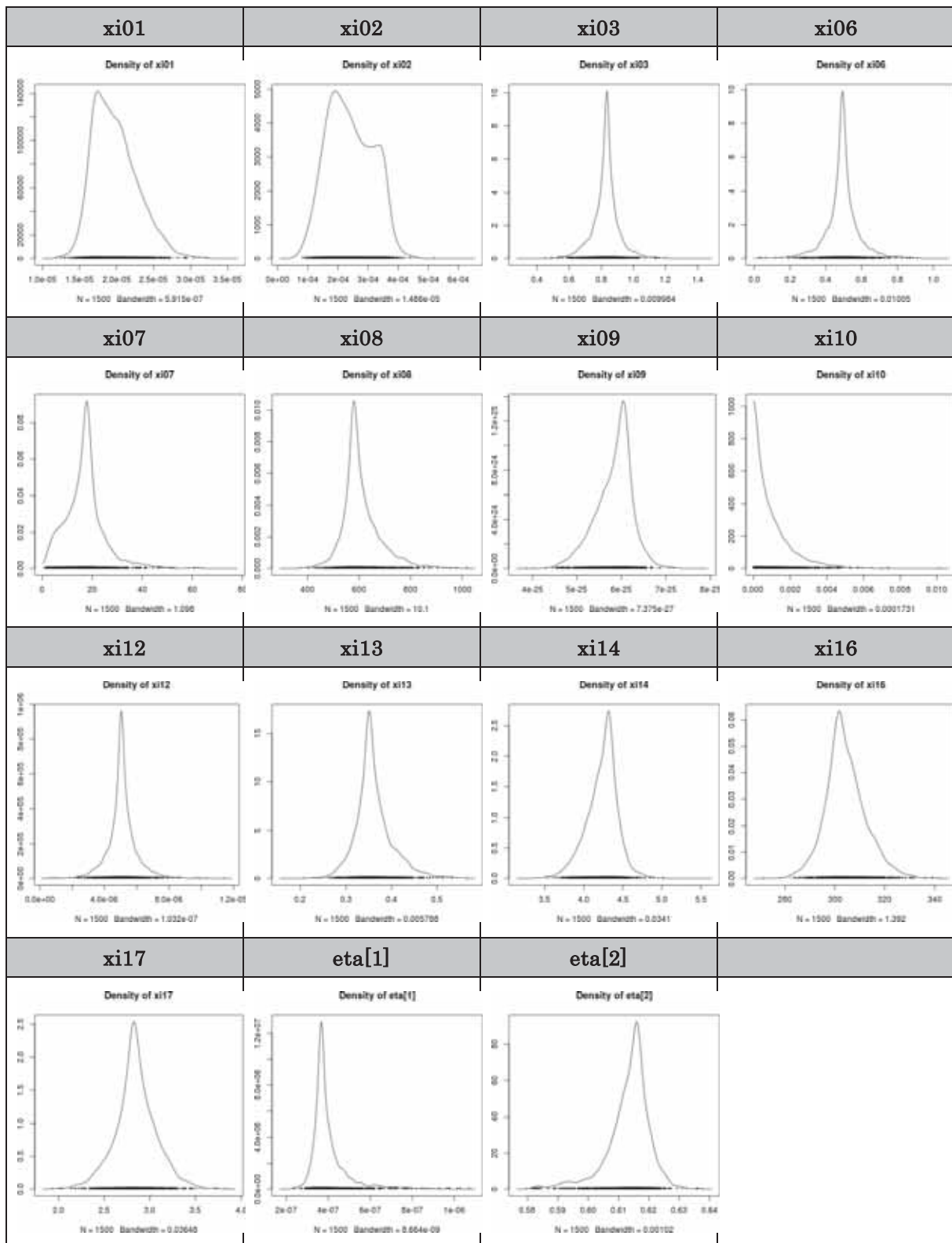


図3.2.1-72. 正規分布モデルの事後分布(1/2)

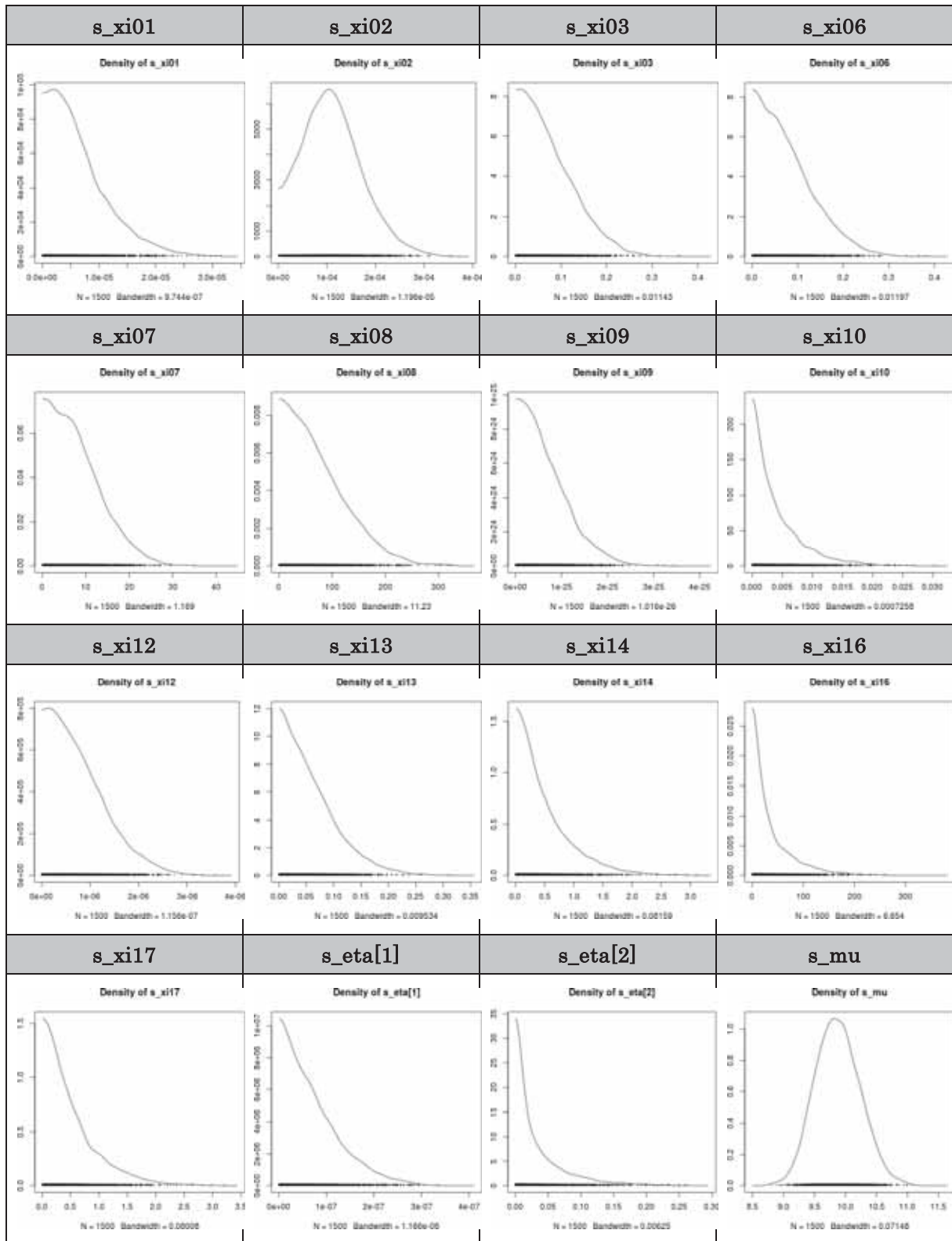


図3.2.1-73. 正規分布モデルの事後分布(2/2)

表3.2.1-23. 正規分布モデルのパラメータサンプリング結果の統計量(1/2)

パラメータ	Lower95	Median	Upper95	Mean	SD	MAP	文献値	95%CI 内	Median/文献値	Mean/文献値	MAP/文献値
x101	1.51E-05	1.93E-05	2.62E-05	1.98E-05	3.00E-06	1.73E-05	1.70E-05	○	1.14	1.17	1.02
x102	1.08E-04	2.34E-04	3.69E-04	2.40E-04	7.54E-05	1.88E-04	3.52E-04	○	0.66	0.68	0.53
x103	6.49E-01	8.33E-01	1.01E+00	8.28E-01	8.41E-02	8.35E-01	8.35E-01	○	1.00	0.99	1.00
x106	2.89E-01	4.93E-01	7.13E-01	4.92E-01	9.49E-02	4.93E-01	4.94E-01	○	1.00	1.00	1.00
x107	1.65E+00	1.72E+01	3.19E+01	1.70E+01	8.06E+00	1.78E+01	1.79E+01	○	0.96	0.95	0.99
x108	4.73E+02	5.90E+02	7.83E+02	6.08E+02	7.52E+01	5.80E+02	5.79E+02	○	1.02	1.05	1.00
x109	4.91E-25	5.91E-25	6.58E-25	5.83E-25	4.17E-26	6.05E-25	6.08E-25	○	0.97	0.96	1.00
x110	1.57E-08	6.70E-04	3.32E-03	1.02E-03	1.09E-03	1.84E-04	0.00E+00	-	-	-	-
x112	3.18E-06	5.06E-06	7.09E-06	5.10E-06	9.15E-07	5.04E-06	5.05E-06	○	1.00	1.01	1.00
x113	2.78E-01	3.54E-01	4.50E-01	3.61E-01	4.14E-02	3.51E-01	3.51E-01	○	1.01	1.03	1.00
x114	3.76E+00	4.26E+00	4.57E+00	4.23E+00	2.03E-01	4.32E+00	4.33E+00	○	0.99	0.98	1.00
x116	2.88E+02	3.03E+02	3.22E+02	3.04E+02	8.14E+00	3.02E+02	3.02E+02	○	1.01	1.01	1.00
x117	2.34E+00	2.84E+00	3.30E+00	2.84E+00	2.31E-01	2.82E+00	2.82E+00	○	1.00	1.01	1.00
eta[1]	2.84E-07	3.74E-07	6.22E-07	4.02E-07	9.10E-08	3.67E-07	3.67E-07	○	1.02	1.10	1.00
eta[2]	5.97E-01	6.15E-01	6.27E-01	6.13E-01	7.22E-03	6.16E-01	6.16E-01	○	1.00	1.00	1.00

* 青地は文献値の 0.8 倍より低い推定値を示す。

表3.2.1-24. 正規分布モデルのパラメータサンプリング結果の統計量(2/2)

パラメータ	Lower95	Median	Upper95	Mean	SD	MAP	係数の MAP 推定値
s_xi01	1.51E-09	5.32E-06	1.72E-05	6.58E-06	5.25E-06	2.30E-06	1.73E-05
s_xi02	2.04E-07	1.07E-04	2.21E-04	1.11E-04	6.07E-05	1.04E-04	1.88E-04
s_xi03	1.06E-06	6.34E-02	1.89E-01	7.63E-02	5.80E-02	2.13E-02	8.35E-01
s_xi06	2.21E-05	6.62E-02	1.96E-01	7.92E-02	6.07E-02	2.01E-02	4.93E-01
s_xi07	1.41E-03	7.03E+00	1.95E+01	8.10E+00	5.93E+00	2.11E+00	1.78E+01
s_xi08	1.09E-01	6.13E+01	1.84E+02	7.39E+01	5.70E+01	2.03E+01	5.80E+02
s_xi09	2.24E-29	5.42E-26	1.68E-25	6.62E-26	5.19E-26	2.03E-26	6.05E-25
s_xi10	7.44E-07	2.82E-03	1.34E-02	4.24E-03	4.38E-03	8.74E-04	1.84E-04
s_xi12	4.57E-10	6.66E-07	1.94E-06	7.81E-07	5.87E-07	2.27E-07	5.04E-06
s_xi13	6.51E-05	4.85E-02	1.60E-01	6.03E-02	4.96E-02	1.48E-02	3.51E-01
s_xi14	2.35E-04	3.56E-01	1.45E+00	5.03E-01	4.71E-01	1.30E-01	4.32E+00
s_xi16	1.46E-03	2.29E+01	1.30E+02	3.88E+01	4.33E+01	7.81E+00	3.02E+02
s_xi17	1.31E-05	3.76E-01	1.51E+00	5.16E-01	4.80E-01	1.28E-01	2.82E+00
s_eta[1]	3.25E-11	5.78E-08	1.91E-07	7.20E-08	6.00E-08	1.72E-08	3.67E-07
s_eta[2]	1.38E-05	1.90E-02	1.24E-01	3.55E-02	4.17E-02	6.34E-03	6.16E-01
s_mu	9.17E+00	9.86E+00	1.06E+01	9.87E+00	3.63E-01	9.80E+00	

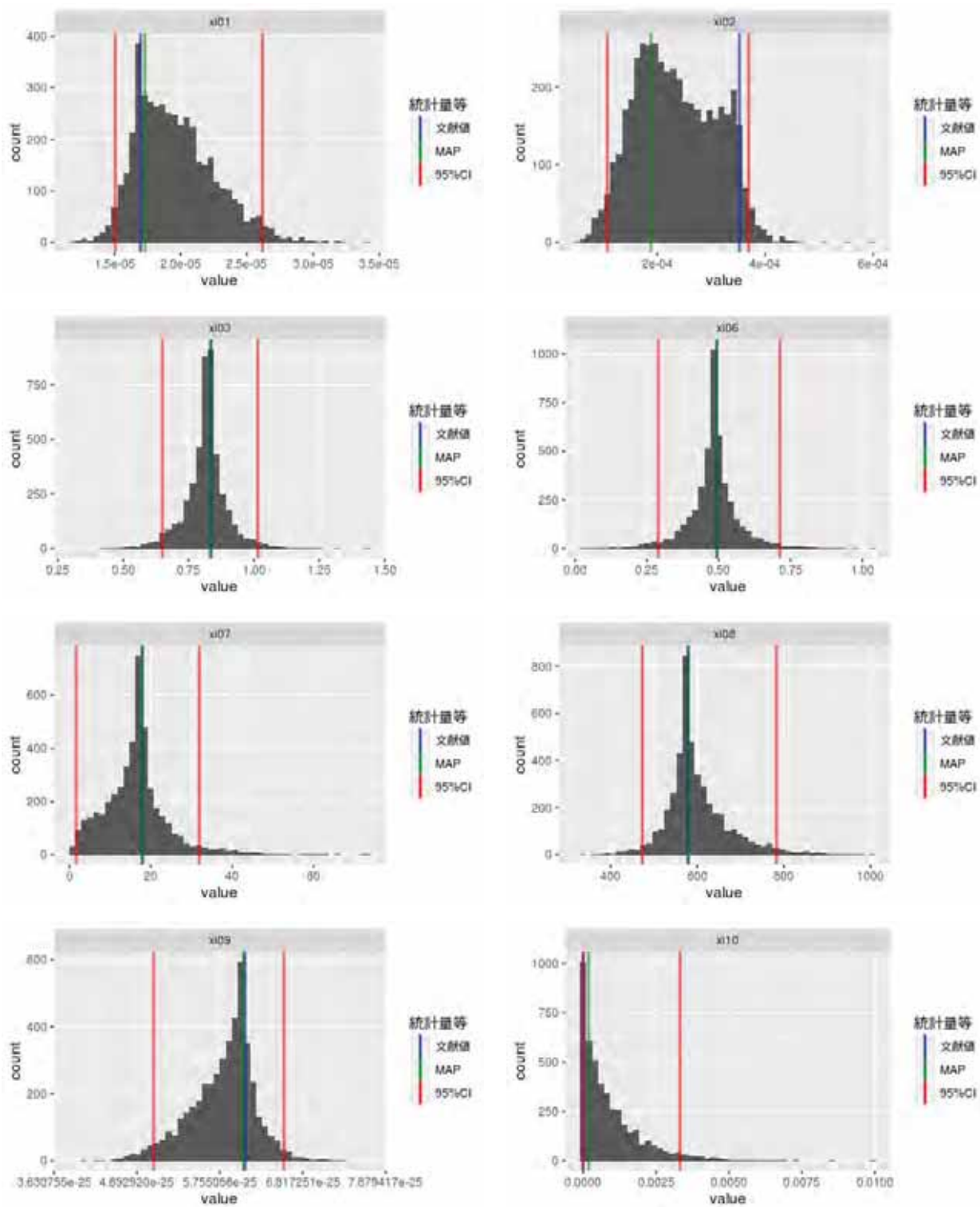


図3.2.1-74. 脆化予測式の係数の事後分布(ヒストグラム)と文献値の比較(正規分布モデル、1/2)

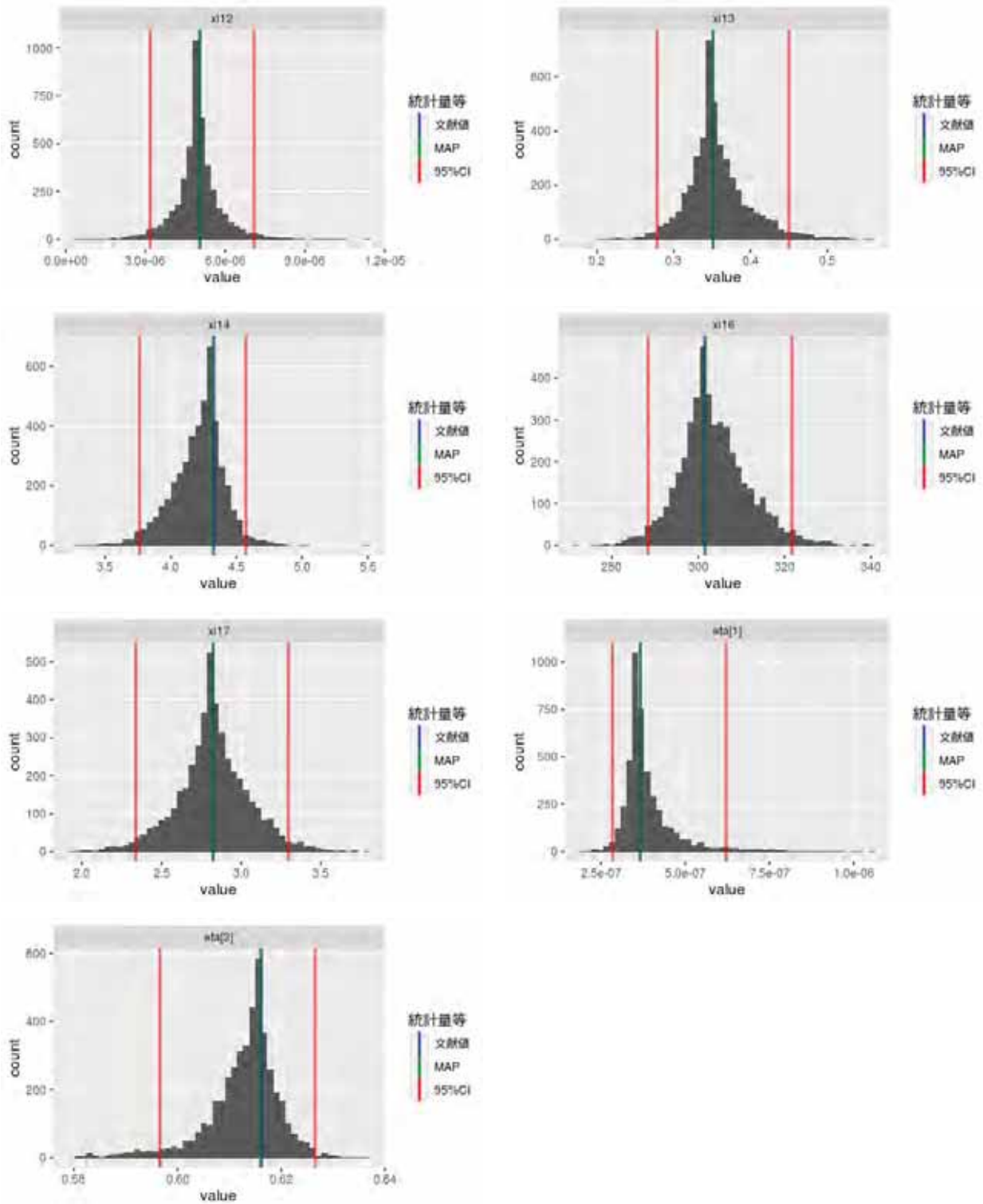


図3.2.1-75. 脆化予測式の係数の事後分布(ヒストグラム)と文献値の比較(正規分布モデル、2/2)

c. サンプルング結果の信頼性

表 3.2.1-19、表 3.2.1-22 より、一様分布モデル、正規分布モデルとも、脆化予測式の係数に関するパラメータおよび予測値の標準偏差は rhat が 1.1 以下であった。いずれのモデルも収束しており、結果の信頼性は高いとみなすことができた。

d. 脆化予測式の係数、係数の標準偏差および予測値の標準偏差の事後分布

脆化予測式の係数の事後分布(図 3.2.1-72)をみると、ほとんどの係数が一つのピークを持つ山型もしくは半山型の分布をとる。ただし正規分布モデルの xi02 のみ、複数のピークを持つ事後分布となっている。

図 3.2.1-73 より、正規分布モデルでの係数の標準偏差は、ほとんどの係数でピークトップがゼロ付近にあるが、 xi02 の標準偏差 s_xi02 のみゼロから離れた位置($1\text{E-}04$ 付近)にピークトップがある。

予測値の標準偏差(s_mu)については、一様分布モデル、正規分布モデルとも歪みのない釣鐘型をしている。

e. 各係数の MAP 推定値と文献値の比較

一様分布モデルにおいては、 xi02 、 xi07 、 xi11 、 $\text{eta}[2]$ について MAP 推定値が文献値と大きく異なっている(表 3.2.1-20、図 3.2.1-68、図 3.2.1-69)。

正規分布モデルにおいては、 xi02 以外の係数について、事後分布の平均値、中央値、MAP 推定値は文献値と近い値となった。 xi02 のみ平均値、中央値、MAP 推定値が文献値と大きく異なっていた(表 3.2.1-23、表 3.2.1-24、図 3.2.1-74、図 3.2.1-75)。図 3.2.1-72 より、 xi01 、 xi02 の事後分布は大きく歪んだ分布形状をとるが、 xi01 は平均値、中央値、MAP 推定値は文献値と近い。 xi02 は二峰性の事後分布となっており、 $1.88\text{E-}04$ と $3.52\text{E-}04$ (文献値)付近にピークがある。 $1.88\text{E-}04$ は一様分布モデルでの MAP 推定値に近い値である。また、 xi02 の標準偏差 s_xi02 は代表値が $1.04\text{E-}04$ であり、係数値の MAP 推定値に比して標準偏差が大きくなっている。 s_xi02 の事後分布はゼロ付近ではないピークトップを持っていることから xi02 は不確かさが大きいと言える。

f. 予測値の標準偏差の比較

一様分布モデルと正規分布モデルそれぞれの、脆化予測式の予測値の標準偏差の事後分布(s_mu)を比較した(図 3.2.1-76)。予測値の標準偏差の事後分布は、正規分布モデルのほうが一様分布モデルよりも、分布全体が小さい値を示している。

一様分布モデルでは、予測値の標準偏差は平均が $9.96[^\circ\text{C}]$ 、中央値が $9.94[^\circ\text{C}]$ 、MAP 推定値が $9.90[^\circ\text{C}]$ であり(図 3.2.1-76)、正規分布モデルでは平均値が $9.86 [^\circ\text{C}]$ 、中央値が $9.87[^\circ\text{C}]$ 、MAP 推定値が $9.80 [^\circ\text{C}]$ であった。いずれの代表値も正規分布モデルの方が $0.1[^\circ\text{C}]$ ほど小さい。予測値の標準偏差の標準偏差はほとんど同じ値($\sim 0.36[^\circ\text{C}]$)である。

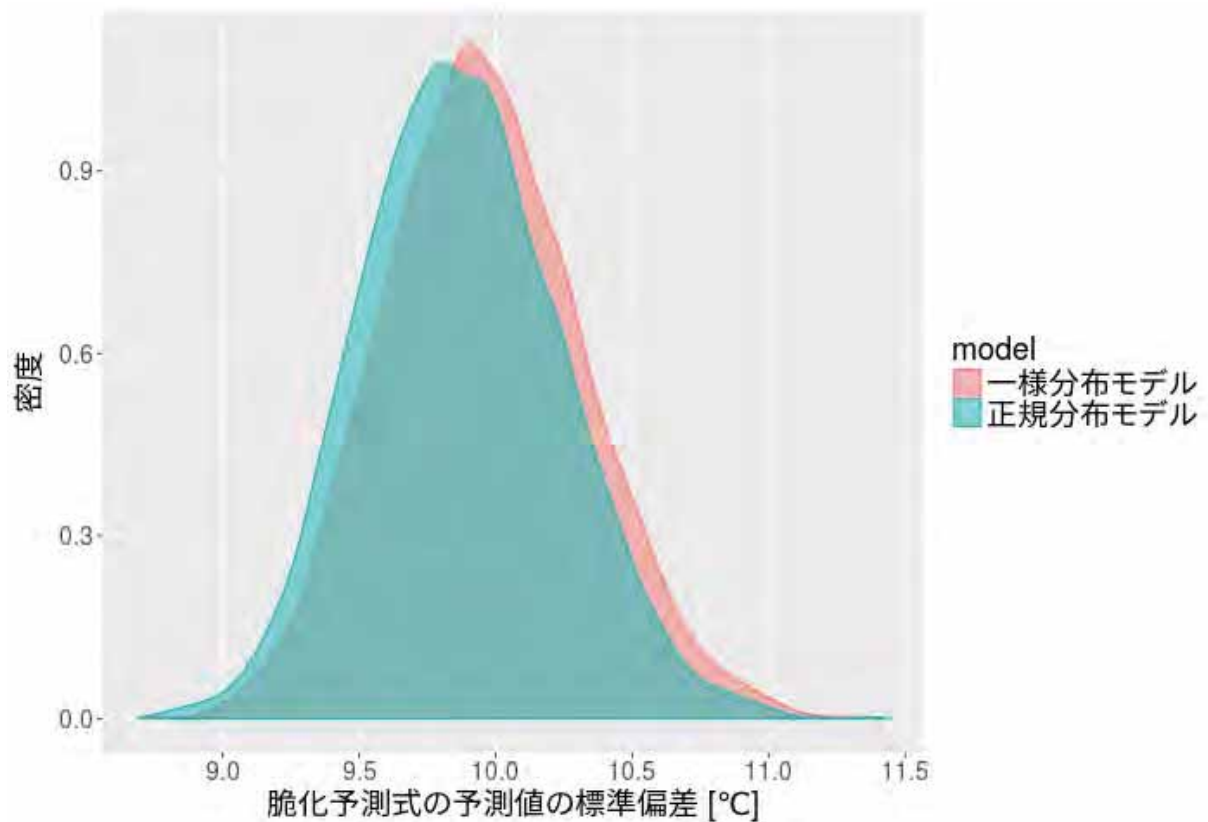


図3.2.1-76. 予測値の標準偏差の比較

- g. 一様分布モデルにおいて裾の重い事後分布をとる係数について
 一様分布モデルの xi03、xi06、xi07 の事後分布は裾の重い形状をしている(図 3.2.1-67)。
 このような分布が得られた原因を把握するため、脆化予測式における xi03、xi06、xi07 の
 取り扱いを確認した。

xi03 は脆化予測式コード内で図 3.2.1-77 のように用いられる。ここで、i はステップのインデックス、delta_C_ind は照射誘起により形成された溶質原子クラスタの数密度のステップ間での変化量である。min 関数の第一引数は((Cu_mat[i-1] + 0.02) * D_cu + 0.0001) と(delta_ft * p + C_md[i-1] * delta_tn)と xi03 の積であり、第二引数は delta_ft * p + C_md[i-1] * delta_tn そのものである。すなわち xi03 を大きくし、((Cu_mat[i-1] + 0.02) * D_cu + 0.0001)*xi03 が 1 以上の値をとる場合、xi03 は予測値や尤度に対して影響を持つことができない。

$$\text{del ta_C_ind}[i] = \min\left(\begin{aligned} & ((\text{Cu_mat}[i-1] + 0.02) * \text{D_cu} + 0.0001) * \frac{(\text{del ta_ft} * \text{p} + \text{C_md}[i-1] * \text{del ta_tn})}{\text{del ta_ft} * \text{p} + \text{C_md}[i-1] * \text{del ta_tn}} * \text{gz}[3], \\ & \text{del ta_ft} * \text{p} + \text{C_md}[i-1] * \text{del ta_tn} \end{aligned}\right);$$

図3.2.1-77. 脆化予測式での xi03(gz[3])の取り扱い

xi06 は脆化予測式コード内で図 3.2.1-78 のように用いられる。xi06→∞で(gz[5] + gz[6] * Ni) / (gz[5] + gz[6] * 0.6)→Ni/0.6 であり、xi06 が大きいほど予測値や尤度への影響が小さくなる。

$$\text{p} = \text{gz}[4] * \text{pow}\left(\frac{(1.869 - 0.00457 * \text{Ti_rrad})}{(1.869 - 0.00457 * 288)}, 2.0\right) * \text{pow}\left(\frac{(\text{gz}[5] + \text{gz}[6] * \text{Ni})}{(\text{gz}[5] + \text{gz}[6] * 0.6)}, 2.0\right);$$

図3.2.1-78. 脆化予測式での xi06(gz[6])の取り扱い

xi07 は脆化予測式コード内で図 3.2.1-79 のように用いられる。xi07→∞で(1.0 + gz[7] * Ni) / (1.0 + gz[7] * 0.6)→Ni/0.6 であり、xi07 が大きいほど予測値や尤度への影響が小さくなる。

$$\text{q} = \text{D_cu} * \text{D_cu} * \text{pow}\left(\frac{(1.0 + \text{gz}[7] * \text{Ni})}{(1.0 + \text{gz}[7] * 0.6)}, 2\right) * \text{gz}[8];$$

図3.2.1-79. 脆化予測式での xi07(gz[7])の取り扱い

これらのモデル式の形の影響を受けて係数の分布が広い裾を持つ形になったと考えられる。係数の不確かさを評価する際にはモデル式の特徴と対応させて考える必要がある。

h. 国内原子炉圧力容器鋼の関連温度移行量データによる解析結果と公開データによる解析結果の比較

国内原子炉圧力容器鋼の関連温度移行量データを用いた係数事後分布と、公開データを用いた係数事後分布の比較を実施した(一様分布モデル：図 3.2.1-80、図 3.2.1-81、正規分布モデル：図 3.2.1-82、図 3.2.1-83)。公開データでは、照射速度は炉型ごとに代表値を用いており、比較標準材の結果も含まない、計 310 データを使用した。

目視において事後分布の形状やピーク位置が大きく変化した係数は、一様分布モデルで xi02、xi08、xi09、xi12、xi13、xi14、xi16、xi17、eta[2]、正規分布モデルでは xi02、xi07、xi08、xi09 であった。また、マン・ホイットニーの U 検定(以下、MH)を実施したところ、有意差があるとは言えない係数は一様分布モデルで xi01、正規分布モデルで xi03、xi06、xi12 のみであり(表 3.2.1-25)、ほとんどの係数で有意に係数の値が異なると判断された。JEAC4201-2007^(3.2.1-18) のモデル式では、照射速度が溶質原子クラスタの項、マトリックス損傷の項それぞれに含まれていることから、照射速度に各プラント個別の値を入れたことによって、係数の値に差が見られたものと考えられる。モデル式の係数最適化においては、解析に用いるデータに係数が大きく依存することから、高照射量領域の最新のデータや Flux 等を適切に取り込むことが重要であることが示唆される。

表3.2.1-25. 使用データ間での係数事後分布の有意差検定結果

係数	一様分布モデル MH の P 値	正規分布モデル MH の P 値
xi01	0.569	<0.001**
xi02	<0.001**	<0.001**
xi03	<0.001**	0.665
xi06	0.004**	0.999
xi07	<0.001**	<0.001**
xi08	<0.001**	<0.001**
xi09	<0.001**	<0.001**
xi10	<0.001**	<0.001**
xi12	<0.001**	0.271
xi13	<0.001**	<0.001**
xi14	<0.001**	<0.001**
xi16	<0.001**	<0.001**
xi17	<0.001**	<0.001**
eta[1]	<0.001**	<0.001**
eta[2]	<0.001**	<0.001**

** p < 0.01

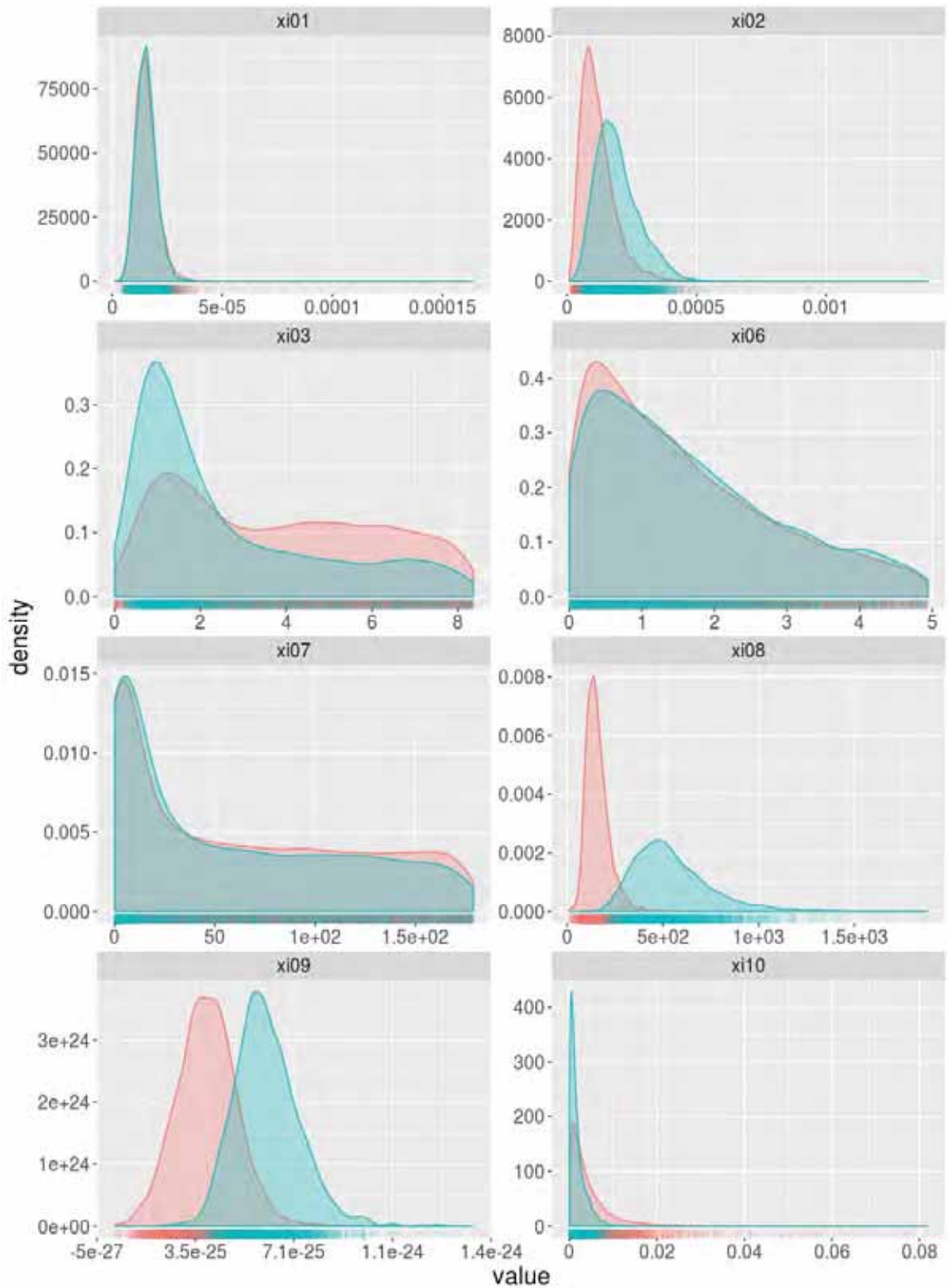


図3.2.1-80. 一様分布モデルの係数事後分布(1/2)
 (青が実測データ、赤が公開データを用いた時の係数の事後分布)

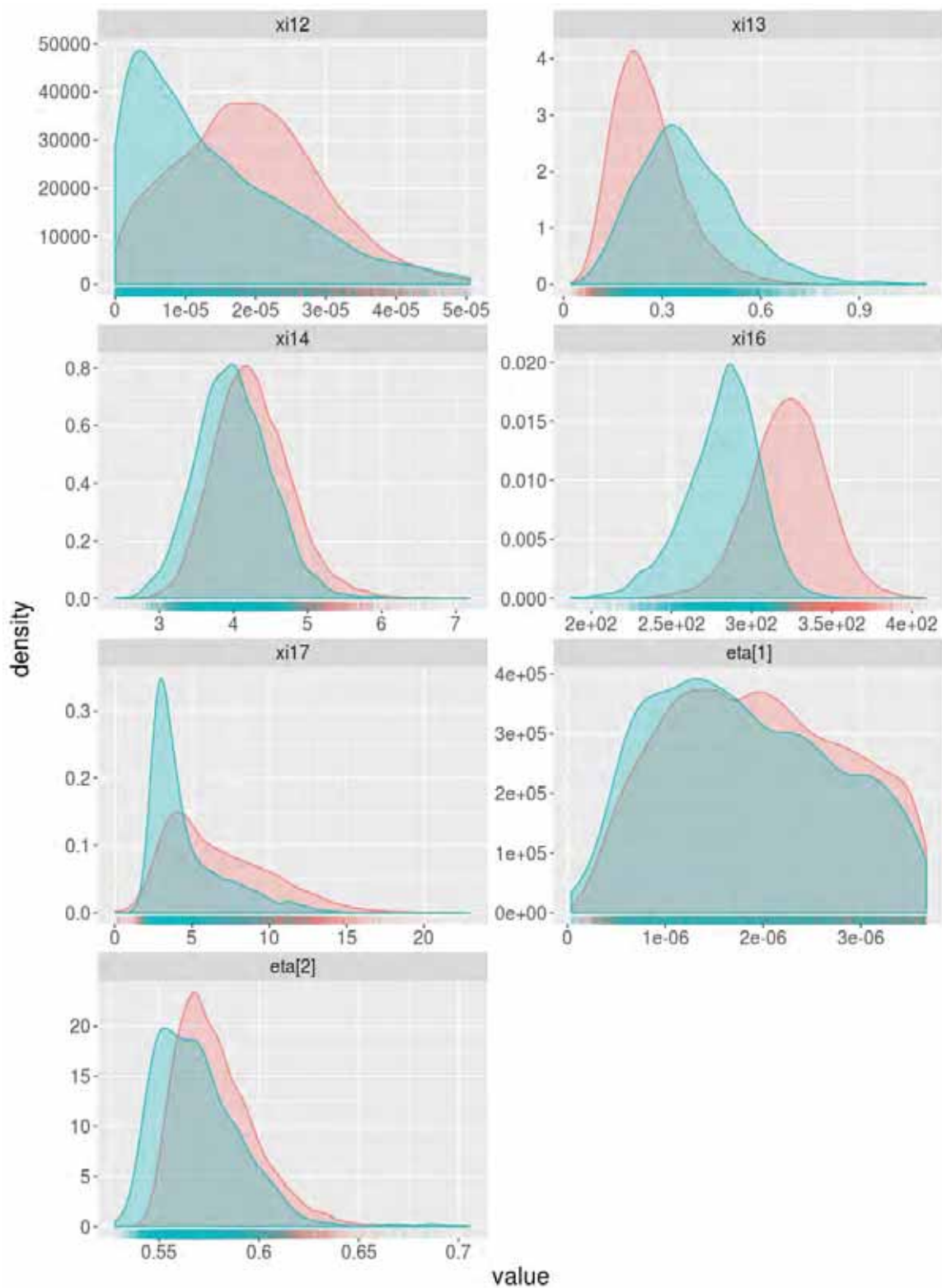


図3.2.1-81. 一様分布モデルの係数事後分布(2/2)
 (青が実測データ、赤が公開データを用いた時の係数の事後分布)

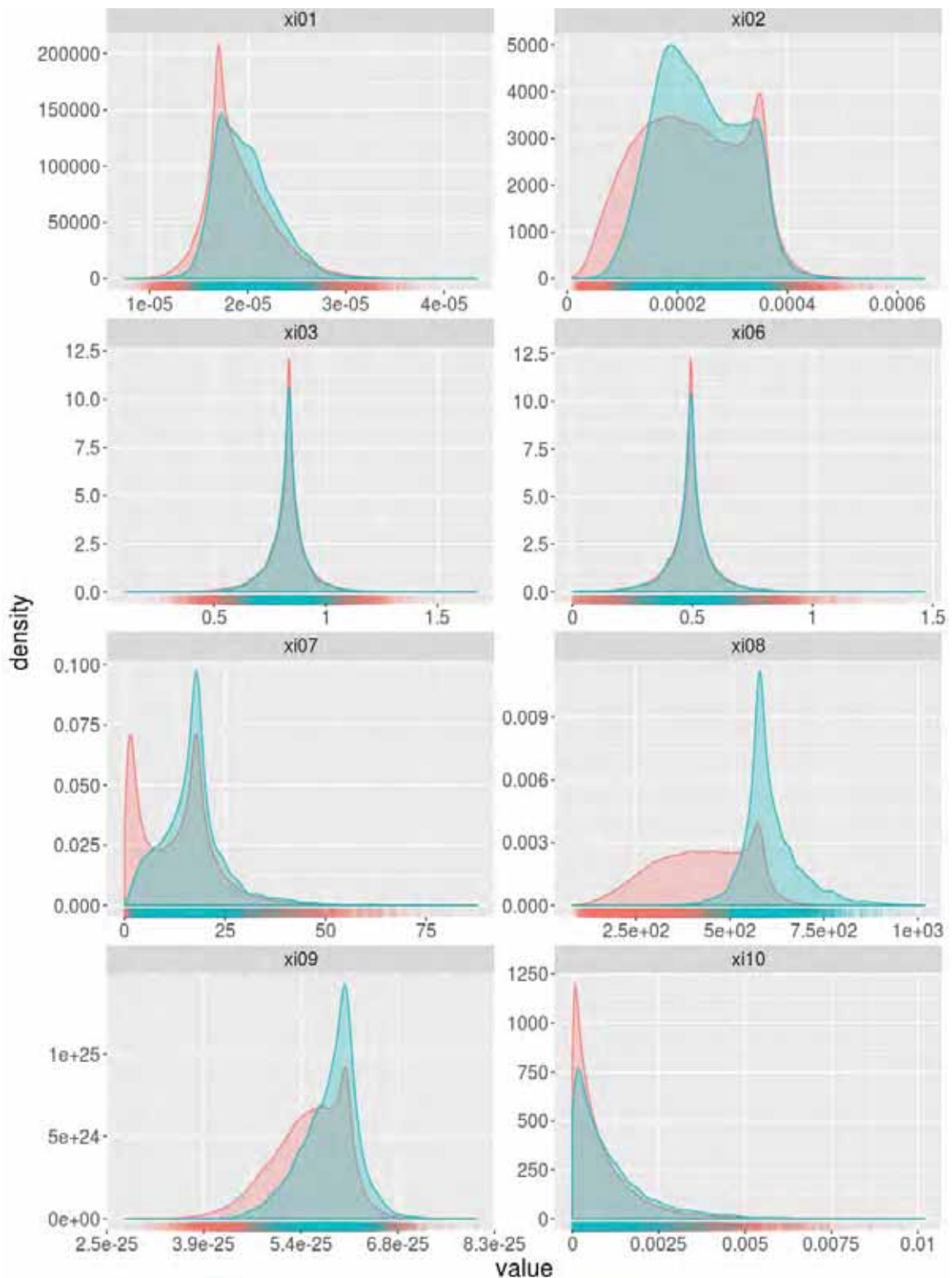


図3.2.1-82. 正規分布モデルの係数事後分布(1/2)
 (青が実測データ、赤が公開データを用いた時の係数の事後分布)

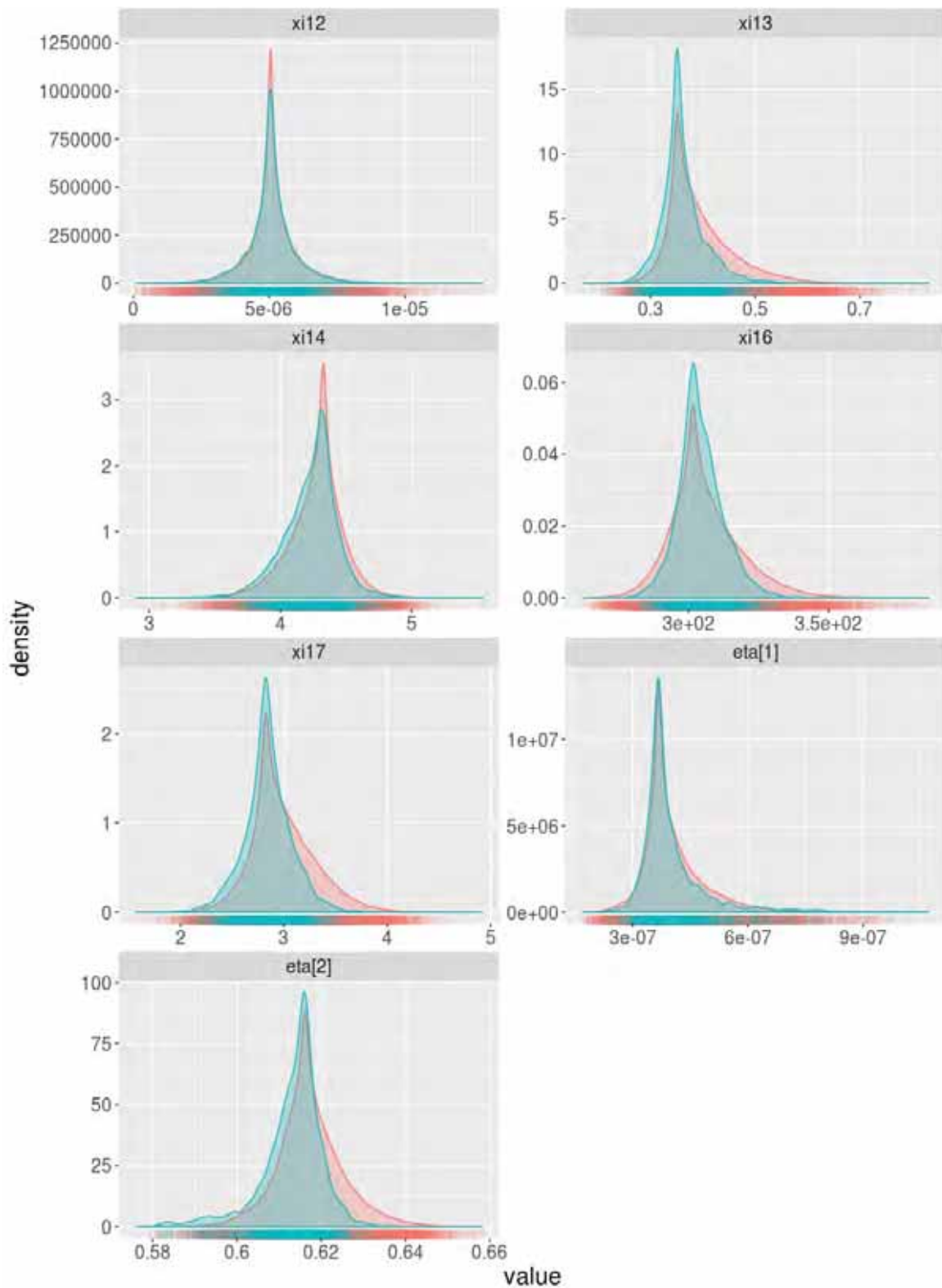


図3.2.1-83. 正規分布モデルの係数事後分布(2/2)
 (青が実測データ、赤が公開データを用いた時の係数の事後分布)

i. 係数不確かさ解析結果を用いた任意条件における脆化量の予測

以下の手順により、係数不確かさ解析による係数値および脆化量の標準偏差のサンプリング結果を用いて、任意条件における脆化量を予測することができる。

・脆化予測式計算値の推定

係数不確かさ解析によってサンプリングされた各 MCMC 試行での係数セットをもとに、予測条件で脆化予測式を計算する。得られた全計算結果から、脆化予測式計算値の平均値、中央値、95%ベイズ信頼区間の上下限の値、計算値の標準偏差を算出することができる。

・計算値 $\pm 2\sigma$ の平均および 95%ベイズ信頼区間の範囲の推定

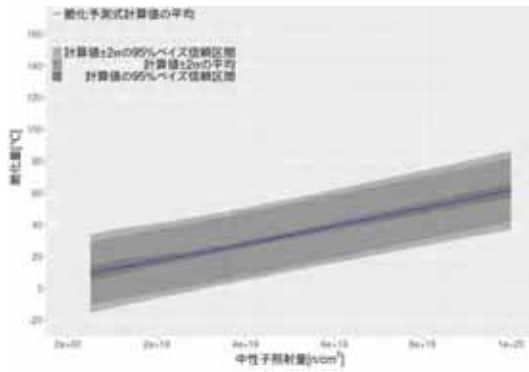
各 MCMC 試行でサンプリングされた係数セットを用いた脆化予測式の計算値に、同じくサンプリングされた脆化量予測値の標準偏差 s_{μ} を用いて、各 MCMC 試行でのサンプリング結果による計算値 $\pm 2\sigma$ の値を算出することができる。今回の推定では計算値 $\pm 2\sigma$ 値も確率変数となり、MCMC 試行回数だけ得られるため、計算値 $\pm 2\sigma$ の平均((計算値 $+ 2\sigma$)の平均と(計算値 $- 2\sigma$)の平均)および 95%ベイズ信頼区間((計算値 $+ 2\sigma$)の 95%ベイズ信頼区間の上限と(計算値 $- 2\sigma$)の 95%ベイズ信頼区間の下限)を算出する。

ここでは表 3.2.1-26 の条件に対して脆化量の予測を行い、Fluence との関係を示した(0、図 3.2.1-85)。

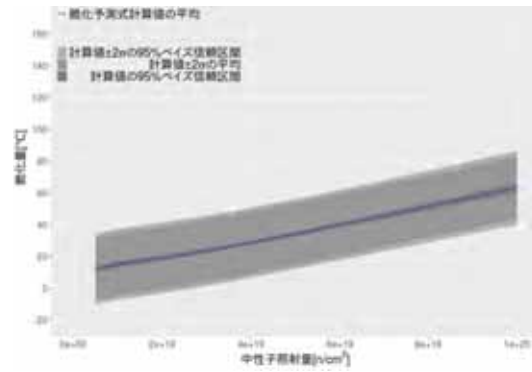
表3.2.1-26. 予測条件

case	係数モデル	Fluence [n/cm ²]	Flux [n/cm ² /s]	温度 [°C]	Cu 濃度 [mass%]	Ni 濃度 [mass%]
1	一様分布	5E+18 から 1E+20	2E+11	290	0.04	0.68
2	正規分布	5E+18 から 1E+20	2E+11	290	0.04	0.68
3	一様分布	5E+18 から 1E+20	2E+11	290	0.08	0.68
4	正規分布	5E+18 から 1E+20	2E+11	290	0.08	0.68
5	一様分布	5E+18 から 1E+20	2E+11	290	0.16	0.68
6	正規分布	5E+18 から 1E+20	2E+11	290	0.16	0.68
7	一様分布	5E+18 から 1E+20	1E+13	290	0.04	0.68
8	正規分布	5E+18 から 1E+20	1E+13	290	0.04	0.68
9	一様分布	5E+18 から 1E+20	1E+13	290	0.08	0.68
10	正規分布	5E+18 から 1E+20	1E+13	290	0.08	0.68
11	一様分布	5E+18 から 1E+20	1E+13	290	0.16	0.68
12	正規分布	5E+18 から 1E+20	1E+13	290	0.16	0.68

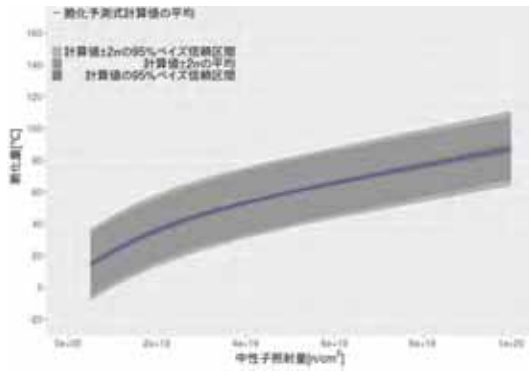
(a) case1



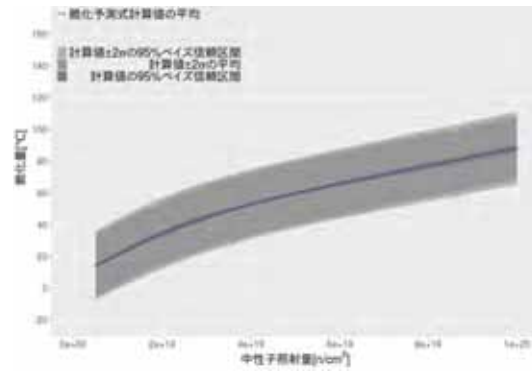
(b) case2



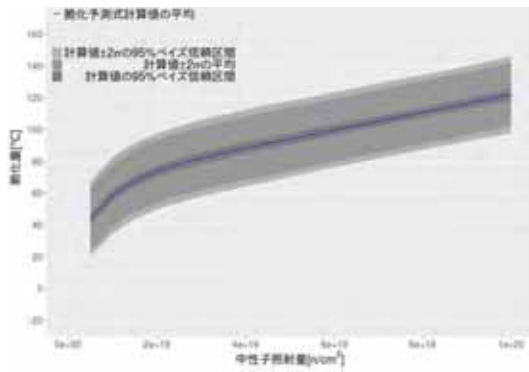
(c) case3



(d) case4



(e) case5



(f) case6

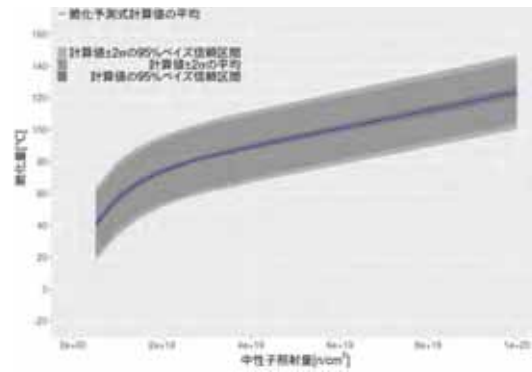
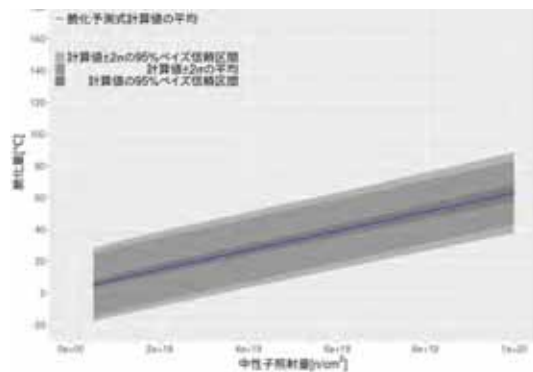
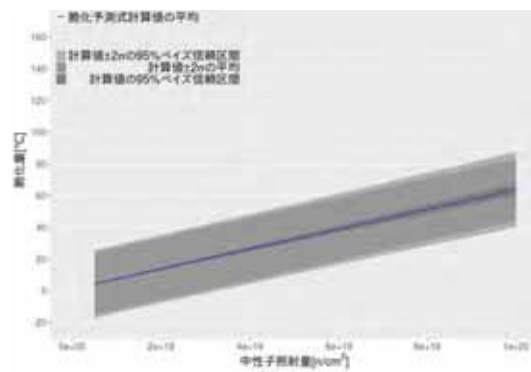


図3.2.1-84. case1~6 の予測結果

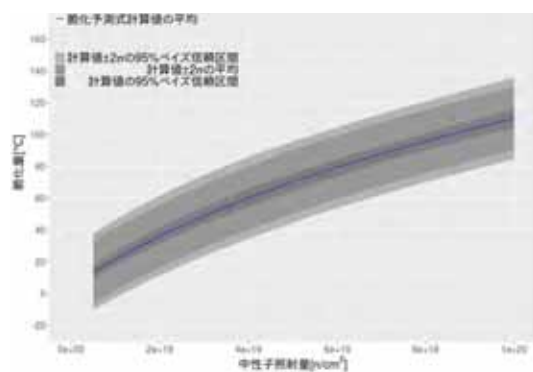
(g) case7



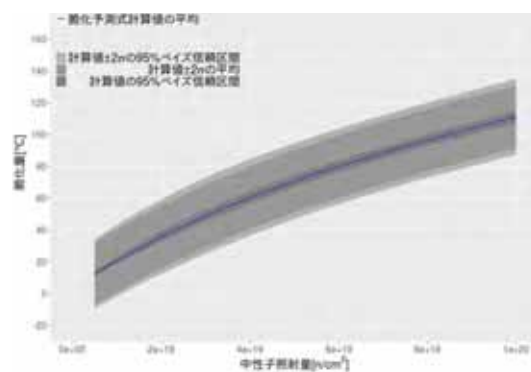
(h) case8



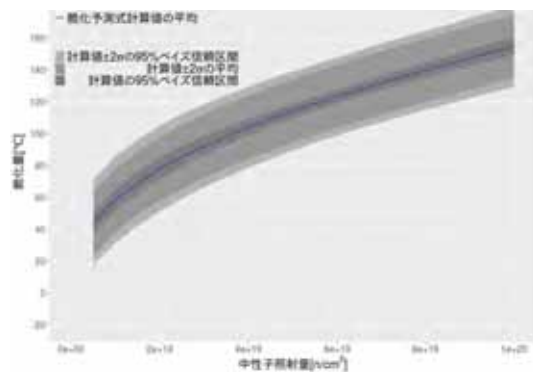
(i) case9



(j) case10



(k) case11



(l) case12

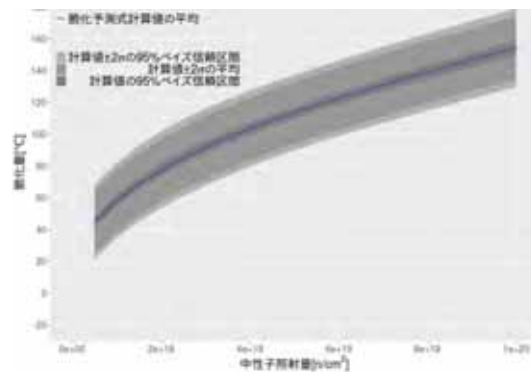


図3.2.1-85. case7~12 の予測結果

0、図 3.2.1-85 の結果から以下のことが言える。

- 係数を一様分布としたモデルと正規分布にしたモデルでは正規分布としたモデルで予測値のベイズ信頼区間が小さい
- 低 Cu では低照射量領域および高照射量領域でベイズ信頼区間の幅が広い
- 高 Cu では照射量が増加するに伴い、ベイズ信頼区間の幅が広い
- 高 Flux でベイズ信頼区間の幅が広い
- 正規分布モデルにおける回帰曲線のベイズ信頼区間の幅は広くても 5°C程度。
- 目的関数は異なるものの、実測データの不確かさに依存する脆化予測法の計算値の不確かさが実測値と脆化予測法^(3.2.1-19)による計算値の残差の標準偏差に比べて十分に小さいことが示された。

脆化予測法等のモデル式と係数フィッティングを組合せた手法において、実測データの不確かさに依存した係数の不確かさや計算結果に及ぼす影響について評価する手法について検討し、階層ベイズモデルを用いた手法に基づく評価手法を整備した。階層ベイズモデルを用いた評価手法においては、モデル式と実測データを用いて係数のフィッティングが可能であり、加えて係数の値を一意に求めるのではなく確率分布で求めることで、モデル式を用いた計算値の不確かさを算出可能である。

3.2.1.5 関連温度移行量の統計解析のまとめ

- ① 関連温度移行量に対する入力変数の影響を定量的に評価する感度解析の手法について検討し、広く使える情報量基準(WAIC)を用いて脆化因子の評価に関する解析を実施した。
- ② 国内原子炉圧力容器鋼の関連温度移行量データに対する解析を実施し、入力変数の組み合わせ候補について以下の結果を得た。
 - ・ **Temperature** を入力変数とすると、信頼性の高い解析の実施が難しく、**WAIC** も常に大きな値を取ることから、入力変数の候補から除外することとした。
 - ・ **Fluence**、**Flux**、**Cu**、**Ni**、**P**、**Si**、**Mn**、**RT_{NDT}** 初期値に関しては組み合わせに依存して異なる傾向を示すため、入力変数の候補とした。
 - ・ **Fluence** や **Flux** のべき係数によって **WAIC** に影響があることが示されたため、べき係数を変えた入力変数も候補とした。
 - ・ **Fluence** のべき乗については 2 つ以上を組み合わせてもモデルの **WAIC** は改善されなかったことから、べき係数の異なる変数を組み合わせることは候補としなかった。
- ③ 国内原子炉圧力容器鋼の関連温度移行量データを 7 つのデータ区分(**BWR**、**PWR**、**BWR+PWR**、母材、溶接金属、母材(試験炉データを含む)、溶接金属(試験炉データを含む))に分けて脆化因子に関する解析を実施し、各データ区分において、信頼性が高く **WAIC** が低い入力変数の組合せを選定した。それぞれのデータ区分において信頼性が高く **WAIC** が低いモデルの傾向がことなることが示された。例えば、**BWR** データでは **Flux** の影響が顕著にみられるのに対し、**PWR** では影響がほとんど見られなかった。
- ④ 解析の信頼性が高い **BWR** データに関して最も **WAIC** が小さくなった入力変数の組み合わせを用いて、**Fluence**、**Flux**、**Cu** 含有量に依存した関連温度移行量の最確値および 95%確信区間の算出を行った。平成 30 年度に他のデータ区分についても解析を実施し、脆化に寄与する因子の評価、およびそれらの因子が脆化を促進するのか抑制するのか詳細評価を実施する。
- ⑤ モデル式の係数および計算値の不確かさを評価手法について検討し、階層ベイズモデルによる係数フィッティングおよび係数不確かさ評価手法を整備した。係数の不確かさに基づいて、計算値の不確かさを評価できることを確認した。

参考文献

- (3.2.1-1) U. S. Nuclear Regulatory Commission Regulatory Guide 1.99 Revision 2, 1988.
- (3.2.1-2) C. Brillaud, et al., ASTM STP 956, PA, (1987) pp. 420–447.
- (3.2.1-3) M. Erickson, Proceedings of Fontevraud 7 (2010) #A105-T01.
- (3.2.1-4) P. Todeschini, et al., Proceedings of Fontevraud 7 (2010) # A084-T01.
- (3.2.1-5) M. Kirk, ASTM STP-1547, PA, (2012) pp. 20–51.
- (3.2.1-6) E. D. Eason, et al., ORNL/TM-2006/530, TN (2007).
- (3.2.1-7) N. Soneda, et al., Journal of ASTM International, 7 (2010) pp. 1–20.
- (3.2.1-8) <https://www.nsr.go.jp/data/000133414.pdf>
- (3.2.1-9) 持橋大地、“最近のベイズ理論の進展と応用[III]：ノンパラメトリックベイズ”,電子情報通信学会誌 93(1), 73-79, (2010).
- (3.2.1-10) <https://www.r-project.org/>
- (3.2.1-11) <https://cran.r-project.org/web/packages/DPpackage/index.html>
- (3.2.1-12) <https://www.mrc-bsu.cam.ac.uk/software/bugs/the-bugs-project-winbugs/>
- (3.2.1-13) <http://mc-stan.org/>
- (3.2.1-14) A.Jara, et al., DPpackage: Bayesian semi-and nonparametric modeling in R. Journal of statistical software, 40(5), 1, (2011).
- (3.2.1-15) <https://cran.r-project.org/web/packages/coda/index.html>
- (3.2.1-16) D. A. Armstrong, et al., Analyzing spatial models of choice and judgment with . CRC Press (2014).
- (3.2.1-17) <http://watanabe-www.math.dis.titech.ac.jp/users/swatanab/wbic2012.html>
- (3.2.1-18) 日本電気協会. (2007). 原子炉構造材の監視試験方法. JEAC-4201-2007.
- (3.2.1-19) 日本電気協会. (2013). 原子炉構造材の監視試験方法. JEAC-4201-2007[2013年追補版].

3.2.2 原子炉压力容器の照射脆化に関わる微細組織分析

3.2.2.1 はじめに

(1) 压力容器鋼の照射脆化への微細組織の寄与

原子炉压力容器鋼の関連温度(RT_{NDT})上昇の原因となる材料の微細組織変化として、Cu、Ni、Mn、Si等の溶質原子の集積によるクラスタの形成、転位ループ等のマトリックス欠陥の形成、P等の粒界偏析等が考えられている。このうち、溶質原子クラスタ(以降、「クラスタ」と記述)やマトリックス欠陥の形成は鋼材を硬化させ、降伏応力を増加させることから、硬化型脆化と言われている。一方、Pの粒界偏析では粒界強度が低下することによる脆化であり、鋼材の硬化を伴わないため非硬化型脆化と言われている。

これまで、中性子照射に伴うクラスタの形成はアトムプローブ(Atom Probe Tomography: APT)等を用いて調べられており、関連温度移行量(ΔRT_{NDT})とクラスタ体積率との相関等が報告されている(3.2.2.1-1)。一様にクラスタと表現されるが、その組成は様々である。比較的初期に製造されたCu含有量が高い(0.1wt%以上)材料ではCuを主体とするクラスタ(Cu富裕クラスタ)が多く形成される(3.2.2.1-2)。一方、1975年頃から作製された第二世代型の原子炉では、Cu富裕クラスタの形成を抑制するためCu含有量が0.05%程度に抑えられており、その結果Cuの少ない、Ni、Mn、Siを主体とするクラスタ(Ni-Mn-Siクラスタ)が形成される。これまでに調べられてきたクラスタと ΔRT_{NDT} との関係では、このようなクラスタ組成の違いによる影響は考慮されておらず、 ΔRT_{NDT} への寄与は同じものとして扱われている。本研究では、高照射量領域での脆化因子について確認するため、照射量の高いサンプルについてクラスタの数密度、大きさといったクラスタ性状に関するデータを取得していくが、一方でクラスタの組成にも着目したデータを取得し、これらのデータと中性子照射量や材料の化学組成(バルクの組成)との関係についての検討も行う。バルクの組成との関係については、特に平成28年度の統計解析等で予測性の改善に寄与する可能性が示唆されたSiに着目した分析を行うことを計画している(3.2.2.1-3)。

一方、非硬化型脆化については、Pの粒界偏析により粒界強度が低下し、図3.2.2.1-1に示す模式図のように、へき開強度を下回ることによって発生すると考えられている。照射による延性脆性遷移温度(Ductile to Brittle Transfer Temperature: DBTT)の上昇は、硬化に伴う移行量と粒界強度の低下に伴う移行量の和で表されることになる。照射による粒界脆化は試験炉で追照射されたマグノックス炉用の压力容器鋼の溶接金属において報告がある(3.2.2.1-4)。しかし、A533B鋼等は粒界脆化に対する感受性が非常に低いと言われており(3.2.2.1-5)、国内軽水炉で使用されている压力容器鋼程度のP含有量(0.02wt%以下)であれば、粒界脆化の顕在化の可能性は低いことが報告されている(3.2.2.1-6)。Pの粒界偏析量と照射速度との関係についてもマグノックス炉(3.2.2.1-7)やVVER(3.2.2.1-8)用の压力容器鋼の溶接金属について調べられており、モデル計算や実験から、照射速度の低い実機照射の方が試験炉照射に比べて、Pの粒界偏析量が上昇する傾向があることが報告されている。しかし、国内軽水炉用の压力容器鋼では現在のところ明確な照射速度効果を示すデータは得られて

いない。本研究では、オージェ電子分光(Auger Electron Spectroscopy: AES)分析装置を用いて、実機と試験炉で照射された同一の材料に対して P 等の粒界偏析量を分析し、照射速度効果の有無について確認を行う。また、比較的脆化量の高い中性子照射サンプルについても分析を行い、粒界脆化顕在化の有無について確認する。

本研究では、APT によるクラスタ分析について 20 サンプル、AES による粒界分析について 10 サンプルの照射サンプルの分析を予定している。このうち平成 29 年度は、APT 分析を 10 サンプル、AES 分析を 2 サンプル実施した。

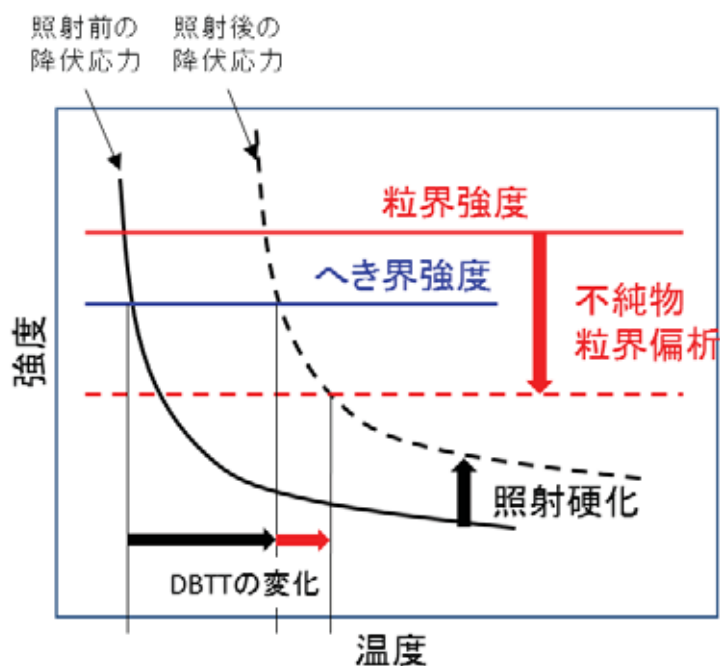


図 3.2.2.1-1 照射に伴う降伏応力、粒界強度の変化。

(2) 中性子照射サンプルの選定

平成 28 年度に、分析の対象とする中性子照射サンプルの選定、既存照射材を用いた APT 分析及びクラスタ解析の条件の検討、AES を行うための装置整備を実施した。本研究で対象とする中性子照射サンプルを表 3.2.2.1-1 に示す。国内原子炉压力容器鋼の関連温度移行量に対するノンパラメトリックベイズ法を用いた検討から、高照射量領域における関連温度移行量を評価する上で Cu、Ni の他に Si を考慮することが予測性の改善に寄与する可能性が示唆されている(3.2.2.1-3)。この解析結果に加えて、関連温度移行量への寄与が最も大きい Cu 含有量の違いや粒界に偏析する P 含有量、照射速度などを考慮して選定した。図 3.2.2.1-2 は中性子照射量と材料中の Cu、Ni、P、Si、Mn 含有量の関係を示したものである。Cu と Si の含有量が広範囲にばらついていることがわかる。また、Cu と P の含有量には正の相関があることもわかる。

平成 29 年度は、No.1 から 10 までの 10 サンプルに対して APT 分析を実施した。また、AES 分析では未照射材を用いて既往研究のデータとの比較確認を行った後に、No. 16、17 の 2 サンプルの分析を実施した。

表 3.2.2.1-1 微細組織分析に供する中性子照射サンプル

No.	化学成分(wt%)					照射量 ($\times 10^{19}$ n/cm ²)	ΔRT_{NDT} (°C)	APT	AES
	Cu	Ni	P	Si	Mn				
1	0.16	0.61	0.010	0.29	1.41	3.4	72	●	○
2						5.6	99	●	○
3	0.03	0.57	0.007	0.23	1.39	6.3	32	●	—
4						9.0	51	●	—
5	0.13	0.58	0.014	0.20	1.45	4.7	88	●	—
6	0.068	0.59	0.009	0.25	1.35	5.8	46	●	—
7						9.2	61	●	—
8	0.037	0.62	0.003	0.31	1.50	9.5	61	●	—
9	0.05	0.62	0.007	0.23	1.38	4.0	55	●	—
10						7.5	70	●	—
11	0.14	0.80	0.012	0.38	1.22	3.4	77	○	○
12						5.6	106	○	○
13	0.13	0.85	0.011	0.28	1.37	3.5	64	○	—
14						6.5	77	○	—
15	0.09	0.62	0.007	0.26	1.38	10.0	94	○	○
16						5.8	69	○	●
17						3.1	39	○	●
18						3.2	45	○	○
19						5.9	79	○	○
20						11.7	128	○	○

●：平成 29 年度に実施、○：平成 30 年度に実施予定、—：実施予定なし

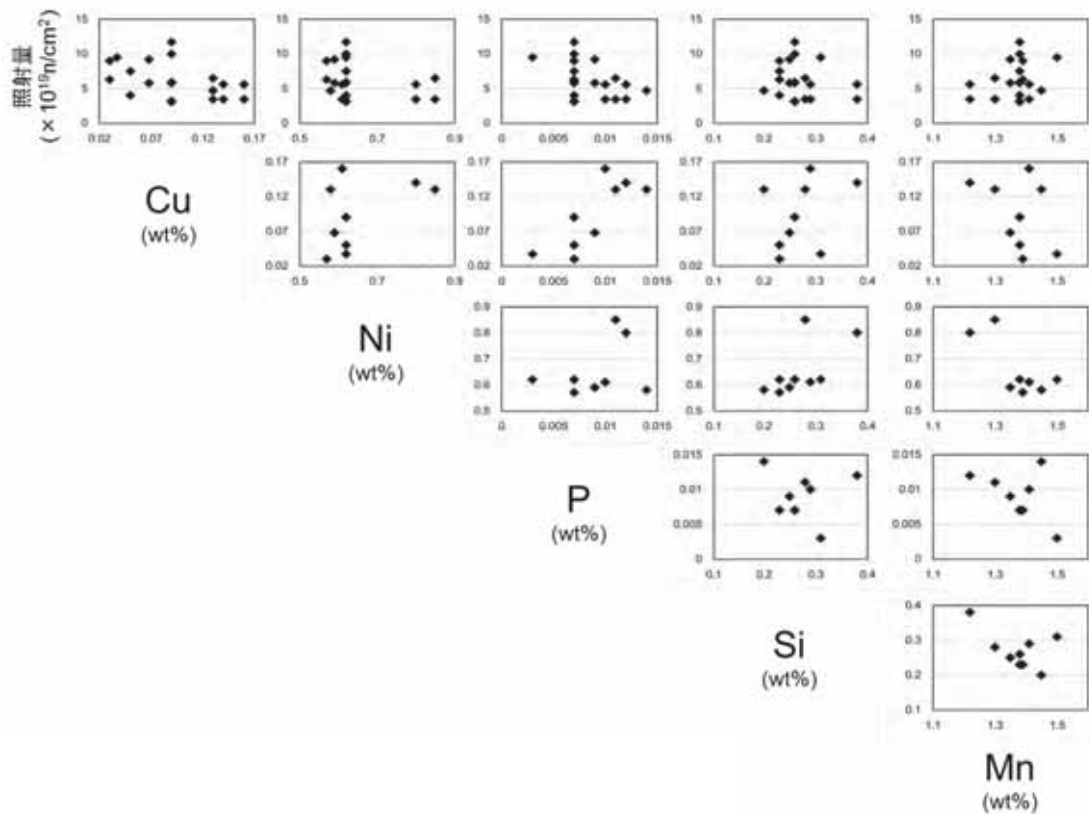


図 3.2.2.1-2 中性子照射量及び材料の化学成分の関係

参考文献

- (3.2.2.1-1) N. Soneda, et al., J ASTM Int., 7, JAI102127 (2010).
- (3.2.2.1-2) 福谷耕司ら, 「原子炉容器鋼の照射組織変化」, INSS Monographs No.1 2001, 原子力システム研究所, (2001).
- (3.2.2.1-3) 平成 28 年度 軽水炉照射材料健全性評価研究 報告書, (2017).
- (3.2.2.1-4) S.G. Druce, et al., Acta Mater., 34 (1986).
- (3.2.2.1-5) EPRI, TR-114783, (2000).
- (3.2.2.1-6) Y. Nishiyama, J. ASTM Int., 6, JAI101959 (2009).
- (3.2.2.1-7) S.G. Druce, et al., Effect of Radiation on Materials: 17th International Symposium ASTM STP1270, 119 – 137 (1996).
- (3.2.2.1-8) E.A. Kuleshova, et al., J. Nucl. Mater. 483 pp1 (2017).

3.2.2.2 三次元アトムプローブ(APT)分析

(1) サンプルの加工

① サンプルの研磨

表面の酸化膜等の除去を行うため、測定前に研磨を行った。1000番～2000番のエメリ紙で機械的に研磨して、表面の凸凹を除去した後、フッ化水素 5%過酸化水素 85%(水 10%)の溶液を用いて化学研磨を行った。

② 集束イオンビーム(FIB)による試験片の作製

APT分析を行うためには試料を針状に加工し、その先端部分を直径 100 nm 程度にする必要がある。本研究では集束イオンビーム(Focused Ion Beam: FIB)を用い、細く絞った Ga イオンビームのスパッタリングによって、サンプルの微細加工を行った。作製した APT 分析用の試験片の電子顕微鏡写真を図 3.2.2.2-1 に示す。



図 3.2.2.2-1 FIB によって作製した APT 分析用試験片

(2) 三次元アトムプローブ

① 原理

三次元アトムプローブ(APT)は、電界イオン顕微鏡(Field Ion Microscope :FIM)や位置敏感型検出器、高電圧パルス等を用いて、直径～100nm 程度の針状試料における原子の 3 次元空間分布をサブナノメートルの位置分解能で測定する実験手法である。

図 3.2.2.2-2 に最も基本的な APT の概念図を示す。先端部直径 100 nm 程度に加工した針状試料に、数 kV の直流のベース電圧と、ベース電圧に対して 10 ~ 20% のパルス状の高電圧を加えることで試料表面に 10 V/nm 程度の非常に強い電界を発生させる。この高電界によって試料再表面の原子がイオン化され真空中に放出される(電界蒸発という)。放出された陽イオンは、位置敏感イオン検出器に到達する。この位置敏感イオン検出器で得られる原子の入射位置からその原子の面内の座標を求めめる。さらに電界蒸発が試料の再表面から順序よく起こることを利用し、検出したイオンの個数に比例した深さ方向の座標を与えることにより、得られた二次元的な原子の分布を三次元に拡張する。同時に、パルス状の高電圧を印加したときから位置敏感イオン検出器に到達するまでの時間差から、イオンの飛行時間が求まる。質量と電荷の違いによって飛行時間が異なることから、各イオンの種類を特定することができる。この方式は、針の垂直方向の分解能が比較的良好、特に面間隔の大きい低指数面を検出器に対向させて測定を行なうことで、深さ方向に 1 原子層の分解能が得られるという長所がある。しかし、電界蒸発は常にパルス状高電圧のピーク時に起きる訳ではなく幅を持つ。例えば、パルス状高電圧の立ち上がり時に電界蒸発したイオンは、加速電圧が高くなり減衰時に電界蒸発したイオンは加速電圧が低くなるため、イオン毎にエネルギーが異なってくる。そのため、飛行時間の測定による質量分解能に限界があり、質量数の近い元素の分離が困難な場合がある。

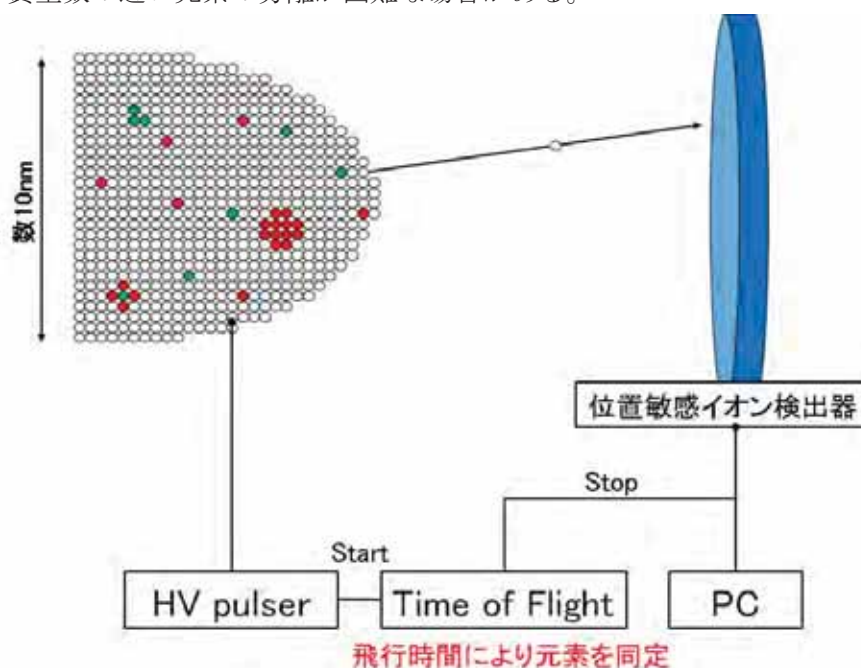


図 3.2.2.2-2 APT 分析の概念図

エネルギー補償型 APT では、質量分解能の向上のため APT にリフレクトロンという装置を具備している。図 3.2.2.2-3 にエネルギー補償型 APT の概念図を示す。リフレクトロンには、イオンの入射方向に対して逆の電界がかけられており、この電界によってイオン

は進行方向を反転させられる。イオンの持つ運動エネルギーは、同じ質量数および同じ電荷であってもイオンごとに若干異なる。そのためイオンの軌跡は、大きなエネルギーを持つほど長く、小さなエネルギーを持つほど短い距離を走ることになる。これを利用することで、同じ質量数および同じ電荷のイオンの飛行時間を揃えることができる。

一方で、リフレクトロンによって試料から検出器までの距離が長くなるため、試料-検出器間で散乱されることによってイオンの検出効率が減少する。また、試料表面から検出器までの電場を理想的な状態から若干であるが乱すため、水平方向の位置分解能がエネルギー補償なしより悪くなる。

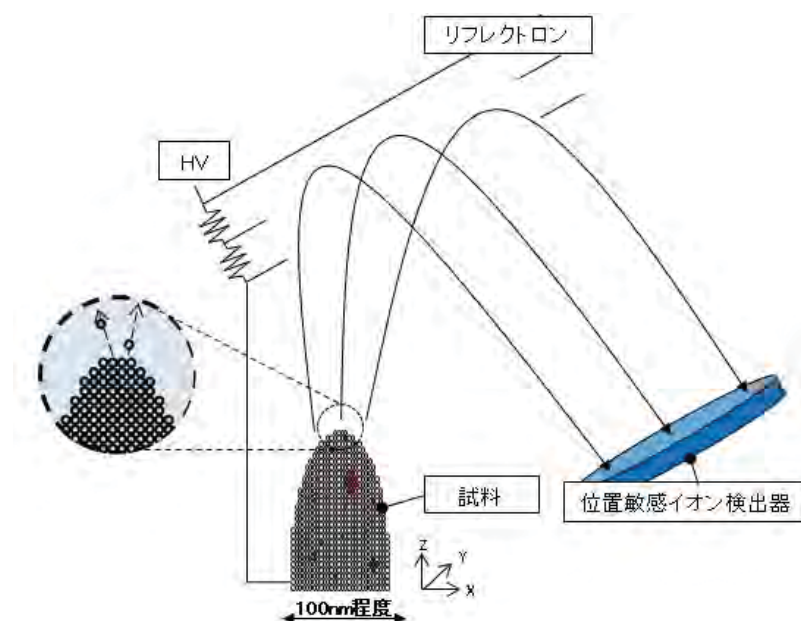


図 3.2.2.2-3 エネルギー補償型 APT 分析の概念図

局所電極型 APT 分析(Local Electrode Atom Probe :LEAP)は、従来の APT に比べて、飛躍的に大きな体積を測定することができる。図 3.2.2.2-4 に LEAP の概念図を示す。LEAP の特徴は、局所電極が針状試料先端部から数 μm ほど離れたところに設置されていることである。この局所電極を配置することによって、試料先端に電界を集中させることが可能となるため、電圧を従来の $1/2 \sim 1/3$ にすることが可能で、試料の破壊頻度を下げることができる。また、電界を集中させることにより、電圧を印加する距離が短くなり、高電圧パルスの応答が早くなる。これにより、単位時間当たりの高電圧パルス繰り返し回数を多くすることが可能となり、測定を速く行うことができる。さらには、イオンを加速する距離が非常に短いため、位置敏感型検出器を近くに配置することが可能で、より広角で大体積の測定が可能である。クラスタ分析においては、統計精度も重要となるため、多くの体積を測定できるということは非常に有効である。

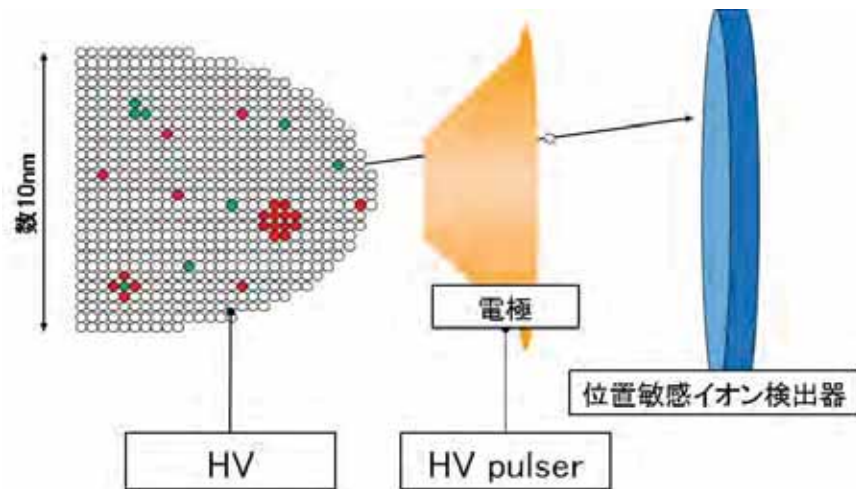


図 3.2.2.2-4 局所電極型 APT (LEAP : Local Electrode Atom Probe)の概念図

② 本研究で用いた三次元アトムプローブ

本研究では、エネルギー補償型レーザー補助局所電極型アトムプローブ(Cameca 社製、LEAP4000X-HR)を用いた。その外観を図 3.2.2.2-5 に示す。LEAP4000X-HR には、上述の局所電極、リフレクトロンが備えてある。



図 3.2.2.2-5 LEAP4000X-HR の外観

(3) クラスタ解析

三次元アトムプローブを用いた溶質原子クラスタ解析に関しては、原子同士の位置関係から凝集化を評価する方法やランダム分布からのずれを評価する手法など、様々な分析手法が提案されている。本研究では原子同士の位置関係からクラスタの核となる原子を決定し、その周辺に分布する原子をクラスタと決定する手法の一つである Erosion 法に基づく

解析を実施した。また、既往知見との比較のため、国内圧力容器鋼のクラスタ解析で実績のある再帰的探索アルゴリズムに基づく解析も実施した。本項では、まず Erosion 法及びその考えの基になっている Maximum Separation 法について紹介し、次に国内圧力容器鋼のクラスタ解析で使用される解析手法について説明する。

① Maximum Separation 法^(3.2.2.2-1)

この手法は個々の原子の位置関係から、特定の原子がクラスタの核の構成原子(コア原子)であるかを判別する手法である。三次元アトムマップ中の 2 つの溶質原子 p と q の距離 $d(p,q)$ が任意の定数 D_{max} よりも小さく、その条件を満たす溶質原子が連続して N_{min} 個以上存在するときのみに、それらの原子をクラスタと判別する。このとき、一般的に D_{max} は溶質原子がランダムに分布している場合にクラスタと判断されない距離で定義し、 N_{min} は分析対象の濃度にもよるが一般的に 7~30 という数字が用いられる。実際の解析に用いた D_{max} や N_{min} の検討内容については後述する。

② Erosion 法^(3.2.2.2-2)

Maximum Separation 法で核と認識された溶質原子から、一定の距離 L 内に存在する周辺原子をクラスタに含まれると定義する。次にクラスタの界面を定義するため、クラスタと認識されていない周辺の原子から距離 $D_{erosion}$ の範囲内にある原子をクラスタから除外する。

③ 国内圧力容器鋼のクラスタ解析で使用されるクラスタ解析手法^(3.2.2.2-3)

本手法は Erosion 法と同様に、Maximum Separation 法に基づいてクラスタに含める溶質原子を定義した後にコア元素から与えられた距離 L 内に存在するすべての原子をクラスタとして再定義する。その後、クラスタに取り込まれた周辺原子から距離 L 以内にある溶質原子が M 個未満の原子をクラスタの定義から除外する。

国内圧力容器鋼のクラスタ解析で使用されるクラスタ解析手法と Erosion 法の概要を図 3.2.2.2-6 に整理する。

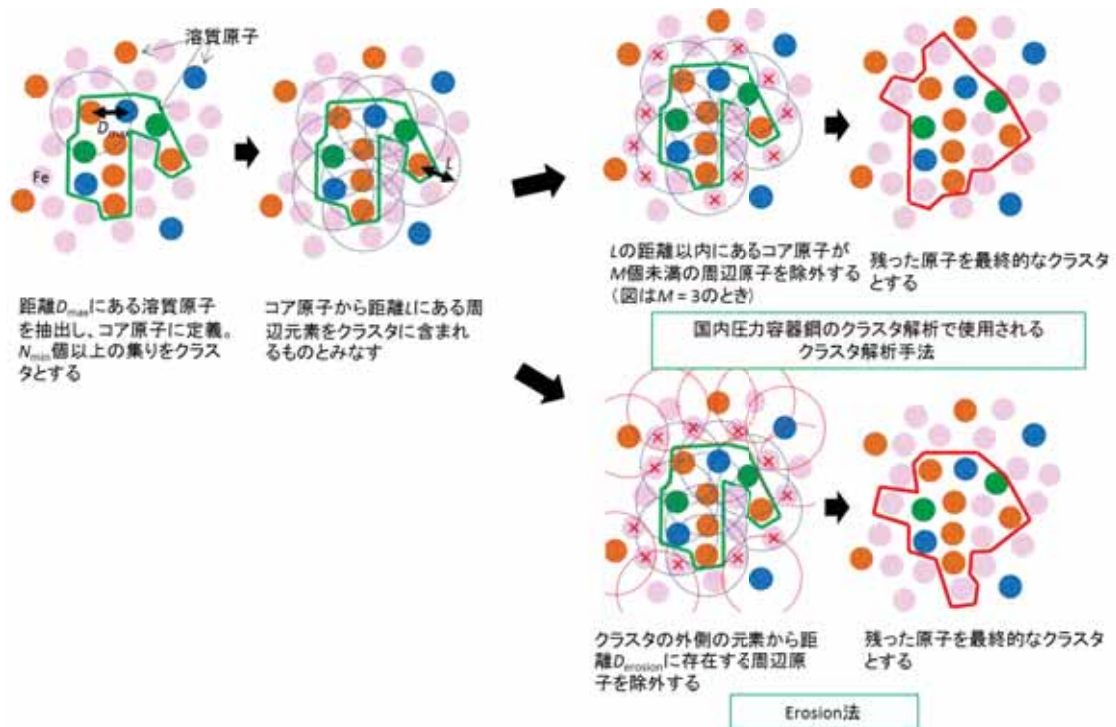


図 3.2.2.2-6 本研究で使用したクラスタ解析手法

(4) APT 分析及びクラスタ解析条件

① APT 測定および APT 分析データの再構成

APT 測定は表 3.2.2.2-1 に示す条件で実施し、データの解析には IVASver.3.6.14(Cameca 社製)を用いた。三次元再構築は、集束イオンビームを用いて製作した際の走査型電子顕微鏡像の形状を基に行った。また、 $\sim 3000V$ までの電圧のデータは電界蒸発が安定してないものとして解析から除外した。

表 3.2.2.2-1 APT 測定条件

mode	温度 (K)	Pulse Rate (kHz)	Pulse Fraction (%)	Detection Rate (%)
voltage	50	150	15	~ 0.4

② クラスタ解析条件

クラスタ解析には IVASver.3.6.14 に実装されている Erosion 法を用いた。溶質原子には Mn, Ni, Si, Cu, 58FeNi を定義した。コア原子の抽出に用いるしきい距離(D_{max})は 0.5 nm、周辺原子の抽出に用いるしきい距離(L)は 0.5 nm、コア原子の周辺原子から除外する $D_{erosion}$ の距離は 0.25 nm とした。コア原子が 20 個以上のクラスタのみを解析対象にした(N_{min})。これらのパラメータは、平成 28 年度に実施した、既存照射材の APT 分析によ

って決定している。国内圧力容器鋼のクラスタ解析で使用されるクラスタ解析手法のパラメータは(3.2.2.2-3)で使用されている値を参照し、周辺原子のうち隣接する 3 個未満の原子($M = 3$)をクラスタの定義から除外した。本解析で使用したパラメータについて表 3.2.2.2-2 に整理する。

表 3.2.2.2-2 本研究で使用したクラスタ解析アルゴリズム

	Erosion 法	国内圧力容器鋼のクラスタ解析で使用されるクラスタ解析手法
コア原子	Cu,Ni,Si,Mn (質量数 58 を含む)	Cu,Ni,Si,Mn (質量数 58 を含む)
D_{max}	0.5 nm	0.5 nm
N_{min}	20	20
L	0.5 nm	0.5 nm
$D_{erosion}$	0.25 nm	—
M	—	3

③ クラスタ解析結果の整理(クラスタ半径、数密度、体積率)

クラスタ解析により算出されたクラスタの回転半径(Radius of Gyration) l_g を用いて式 3.2.2.2-1 によりギニエ半径 r_g を計算し、クラスタの半径と定義した。

$$r_g = \sqrt{\frac{5}{3}} l_g = \sqrt{\frac{5}{3}} \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 + (y_i - \bar{y})^2 + (z_i - \bar{z})^2}{n}} \quad (3.2.2.2-1)$$

クラスタの数密度(C_{SC})は抽出されたクラスタの数を解析に用いた全体積で割ることにより求めた。数密度の誤差は式 3.2.2.2-2 によって評価した。

$$\Delta C_{SC} = \sqrt{N} / V \quad (3.2.2.2-2)$$

体積率(V_f)は全溶質原子クラスタ体積を全体積で割ることで計算した。体積率の誤差は式 3.2.2.2-3 によって評価した。

$$\Delta V_f = \sqrt{\left(\frac{1}{M_2} \times \varepsilon_1\right)^2 + \left(\frac{M_1}{M_2^2} \times \varepsilon_2\right)^2} \quad (3.2.2.2-3)$$

$$M_1 = V_{sc}, \quad \varepsilon_1 = \sqrt{M_1}$$

$$M_2 = V, \quad \varepsilon_2 = \sqrt{M_2}$$

APT で得られるデータでは質量電荷比が 29 のピークに Fe と Ni が混在しており、分離が困難となっている。そのため原子マップから組成を見積もる際にはそれぞれの元素の同位体の存在比から各々の比率を換算した。

(5) 結果

本研究で測定した、表 3.2.2.1-1 のサンプル No.1 – 10 の測定結果を次頁以降に示す。結果はサンプルごとに、1) 3次元アトムマップ、2) 溶質原子クラスタの化学組成、3) 溶質原子クラスタの半径ヒストグラム、4) 測定結果のまとめを示している。

測定結果のまとめの内訳を以下に示す。

- (a) 母相濃度(APT 分析で取得した分析領域の平均化学組成。粒界や炭化物を除いた領域の組成)
- (b) Erosion 法によって解析したクラスタの数密度、体積率、体積率の平方根、ギニエ半径、解析に使用したイオン数。及び、国内圧力容器鋼のクラスタ解析で使用される手法で求めた体積率、体積率の平方根
- (c) Erosion 法によって求めたクラスタ内の平均化学組成(クラスタ内の各原子の濃度(at%))
- (d) Erosion 法によって求めたマトリックス(測定領域全体からクラスタの領域を除いた残りの領域)の平均化学組成(クラスタ以外の領域の各原子の濃度(at%))
- (e) 解析に使用した測定番号(試験片ごとの ID)と各試験片の原子数及びクラスタ数

- ① サンプル No.1
 1) 3次元アトムマップ

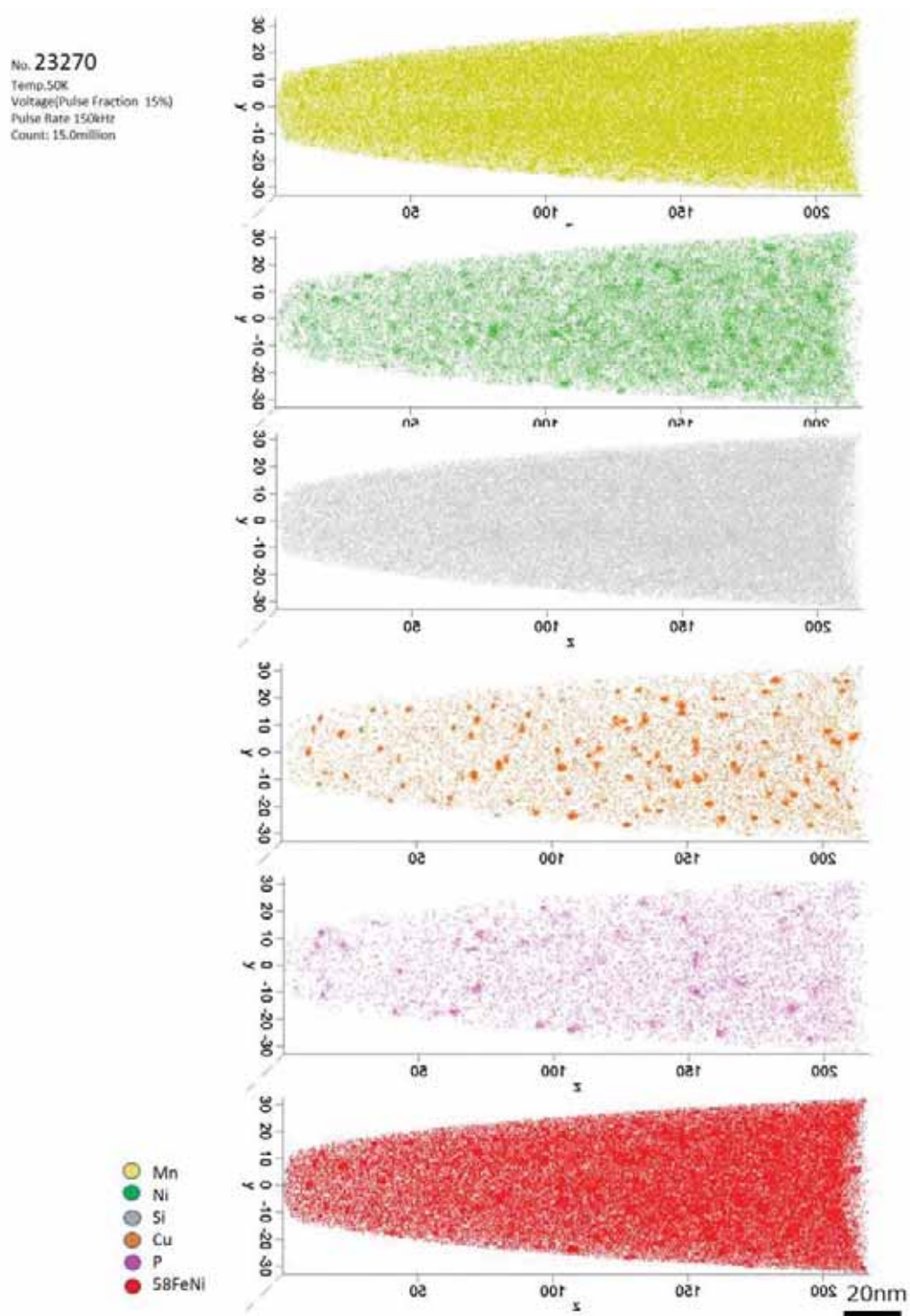


図 3.2.2.2-7 サンプル No.1 の 3次元アトムマップ

2) 溶質原子クラスタの化学組成

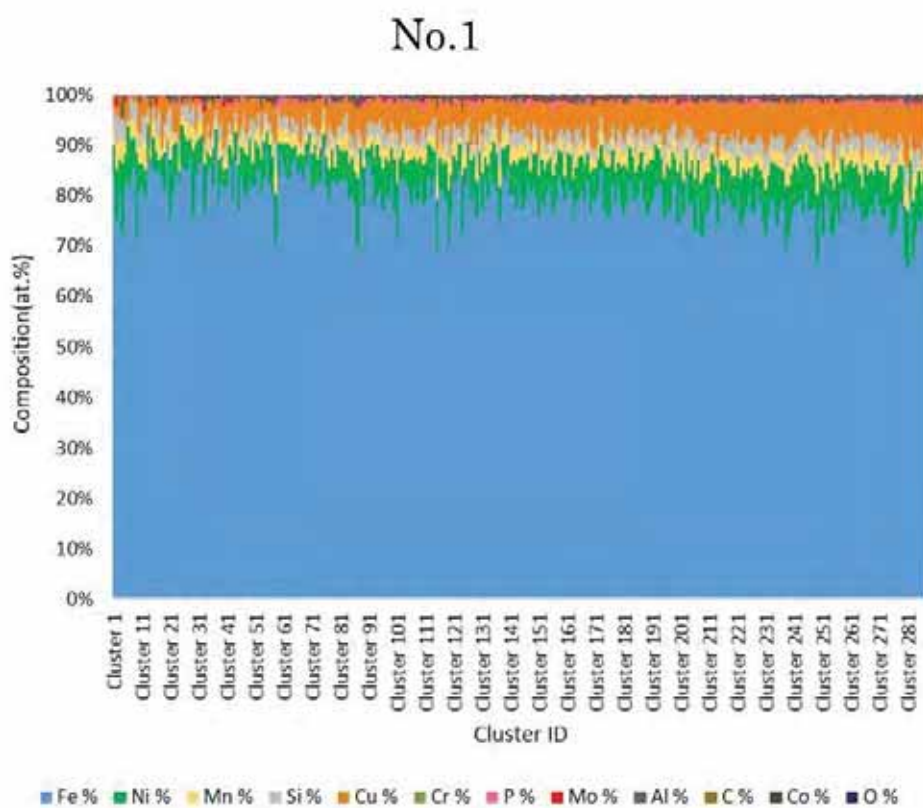


図 3.2.2.2-8 サンプル No.1 の溶質原子クラスタ化学組成

3) 半径ヒストグラム

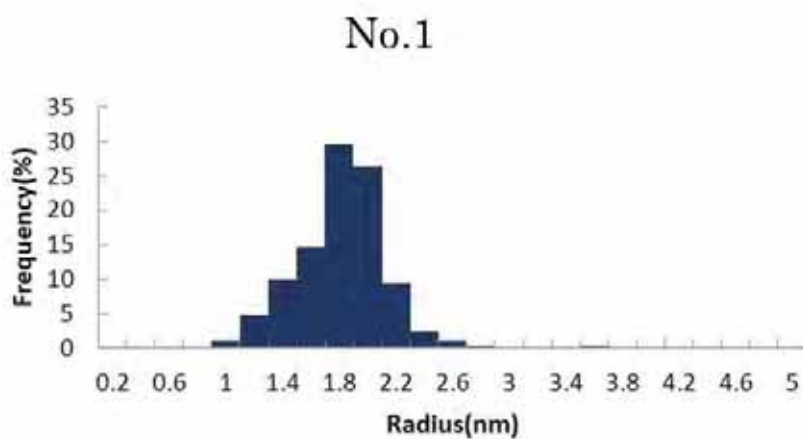


図 3.2.2.2-9 サンプル No.1 の溶質原子クラスタ半径のヒストグラム

4) 測定結果まとめ

表 3.2.2.2-3 サンプル No.1 の測定結果 まとめ

(a) 母相濃度(wt%)

母相濃度 (wt%)	Cu	Ni	P	Si	Mn
	0.13	0.63	0.03	0.32	0.90

(b) クラスタの数密度、体積率、測定原子数、ギニエ半径

	Number density(m ⁻³)	ΔC_{SC}	V_f	ΔV_f	$\sqrt{V_f}$	ion	cluster diameter(nm)
Erosion			8.82E-03	9.08E-05	9.39E-02		3.4
国内鋼で使用 される解析	2.67E+23	1.57E+22	5.45E-03	7.13E-05	7.38E-02	3.41E+07	

(c) クラスタの平均化学組成(at%)

平均クラス タ濃度(at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	68.25	6.00	4.80	2.54	4.74	0.07
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.46	0.13	0.68	0.03	0.03	0.00

(d) マトリックス組成(クラスタ以外の平均化学組成)(at%)

平均マトリ ックス濃度 (at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	88.17	0.51	0.78	0.57	0.07	0.08
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.04	0.14	0.03	0.03	0.03	0.02

(e) 測定番号、全体原子数、クラスタ数

No.	全体原子数	クラスタ数
23221	2.49E+06	30
23266	5.56E+06	30
23269	1.17E+07	99
23270	1.43E+07	129

② サンプル No.2
 1) 3次元アトムマップ

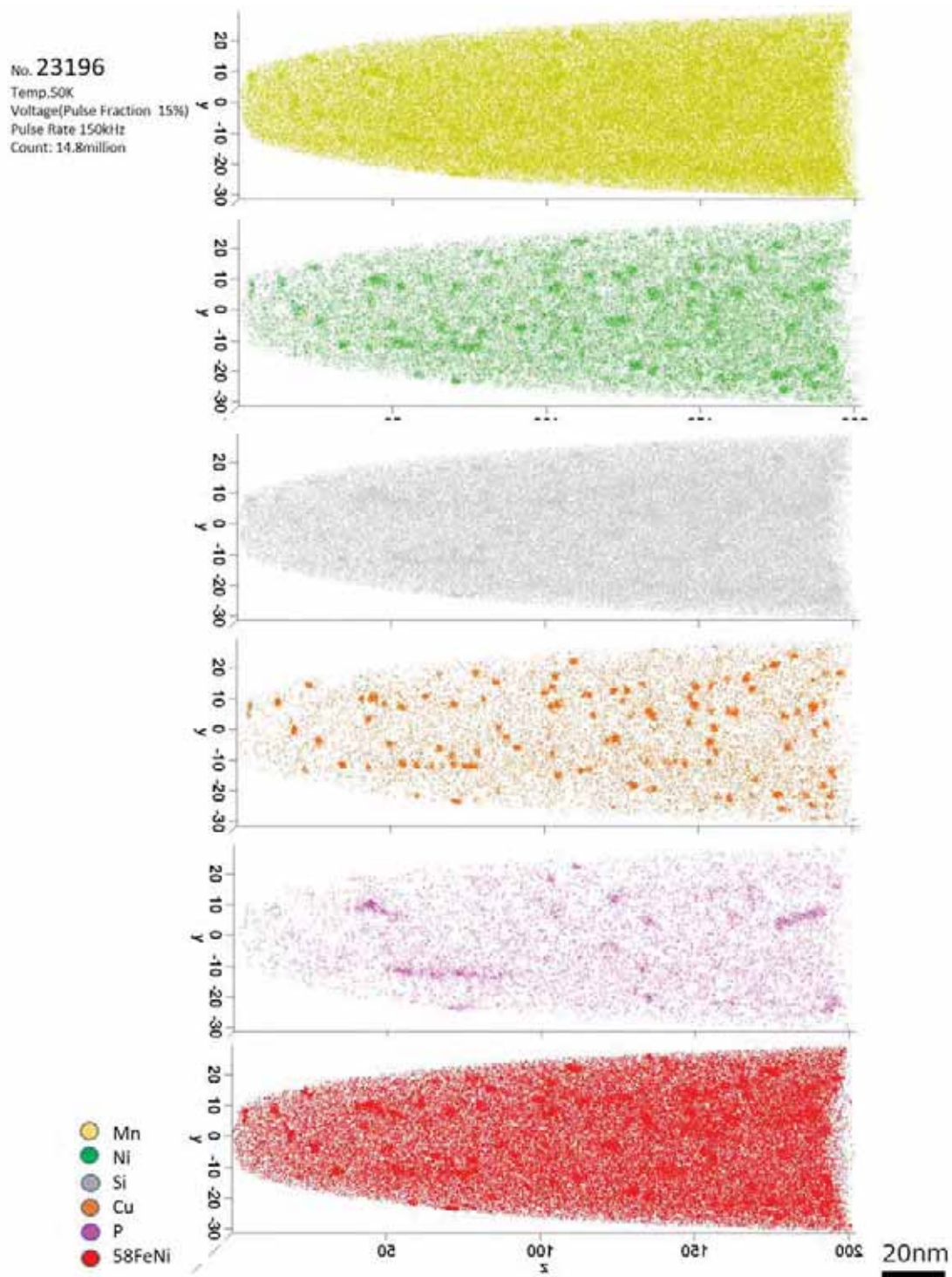


図 3.2.2.2-10 サンプル No.2 の 3次元アトムマップ

2) 溶質原子クラスタ組成

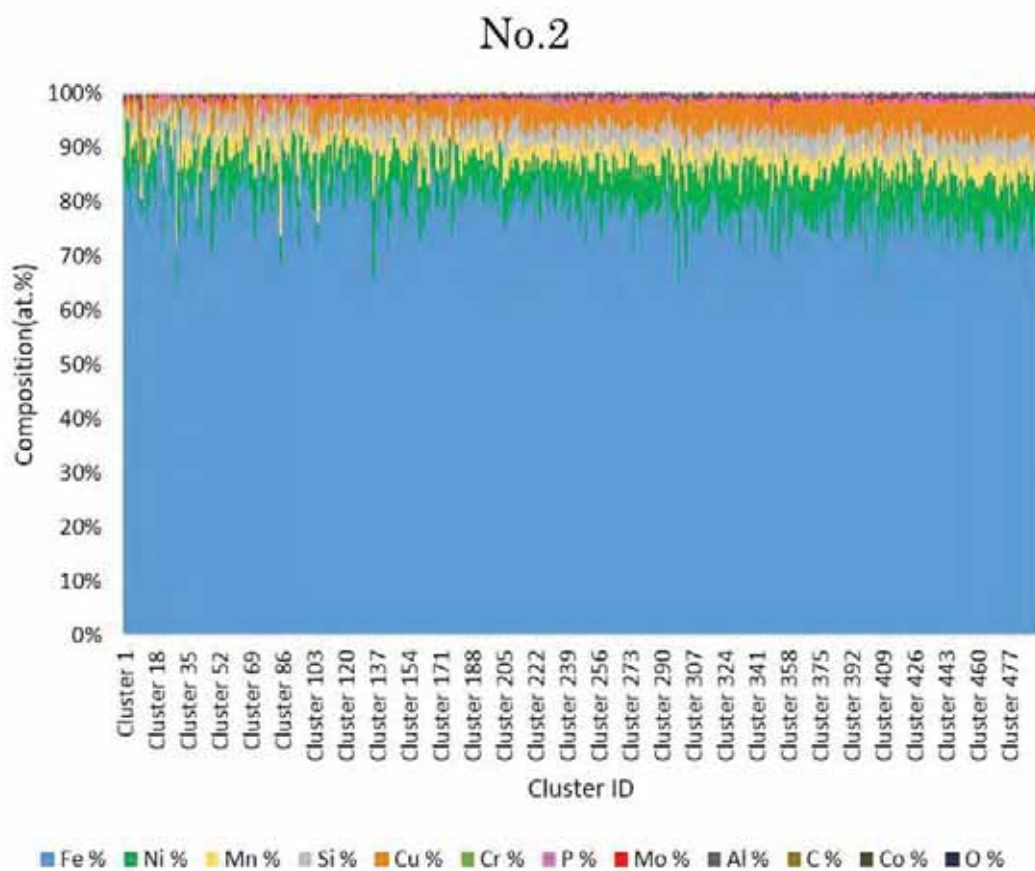


図 3.2.2.2-11 サンプル No.2 の溶質原子クラスタ化学組成

3) 半径ヒストグラム

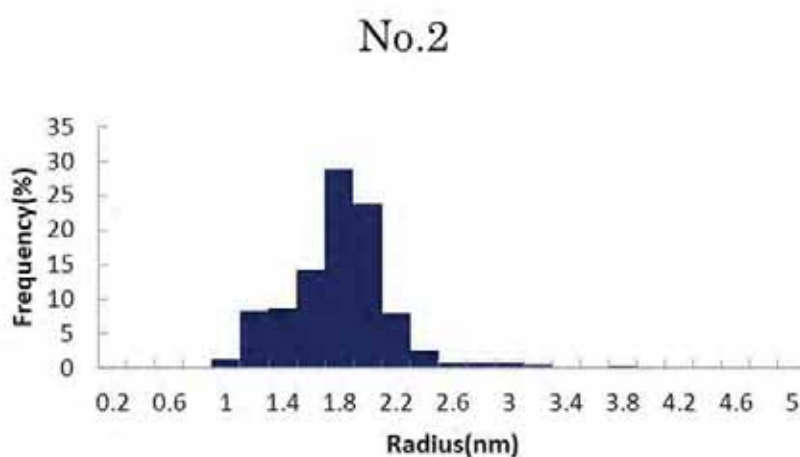


図 3.2.2.2-12 サンプル No.2 の溶質原子クラスタ半径のヒストグラム

4) 測定結果まとめ

表 3.2.2.2-4 サンプル No.2 の測定結果まとめ

(a) 母相濃度(wt%)

母相濃度 (wt%)	Cu	Ni	P	Si	Mn
	0.19	0.77	0.03	0.37	0.91

(b) クラスタの数密度、体積率、測定原子数、ギニエ半径

	Number density(m ⁻³)	ΔC_{SC}	V_f	ΔV_f	$\sqrt{V_f}$	ion	cluster diameter(nm)
Erosion	3.64E+23	2.02E+22	1.27E-02	1.20E-04	1.13E-01	2.83E+07	3.5
国内鋼で使用 される解析			8.16E-03	9.60E-05	9.03E-02		

(c) クラスタの平均化学組成(at%)

平均クラス タ濃度(at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	63.58	5.83	4.16	3.03	3.56	0.07
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.41	0.14	0.43	0.03	0.03	0.00

(d) マトリックス組成(クラスタ以外の平均化学組成)(at%)

平均マトリ ックス濃度 (at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	79.52	0.53	0.69	0.56	0.08	0.07
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.04	0.14	0.03	0.03	0.03	0.02

(e) 測定番号、全体原子数、クラスタ数

No.	全体原子数	クラスタ数
23191	5.17E+06	66
23122	1.88E+06	21
23196	1.39E+07	145
23197	7.36E+06	93

③ サンプル No.3

1) 3次元アトムマップ

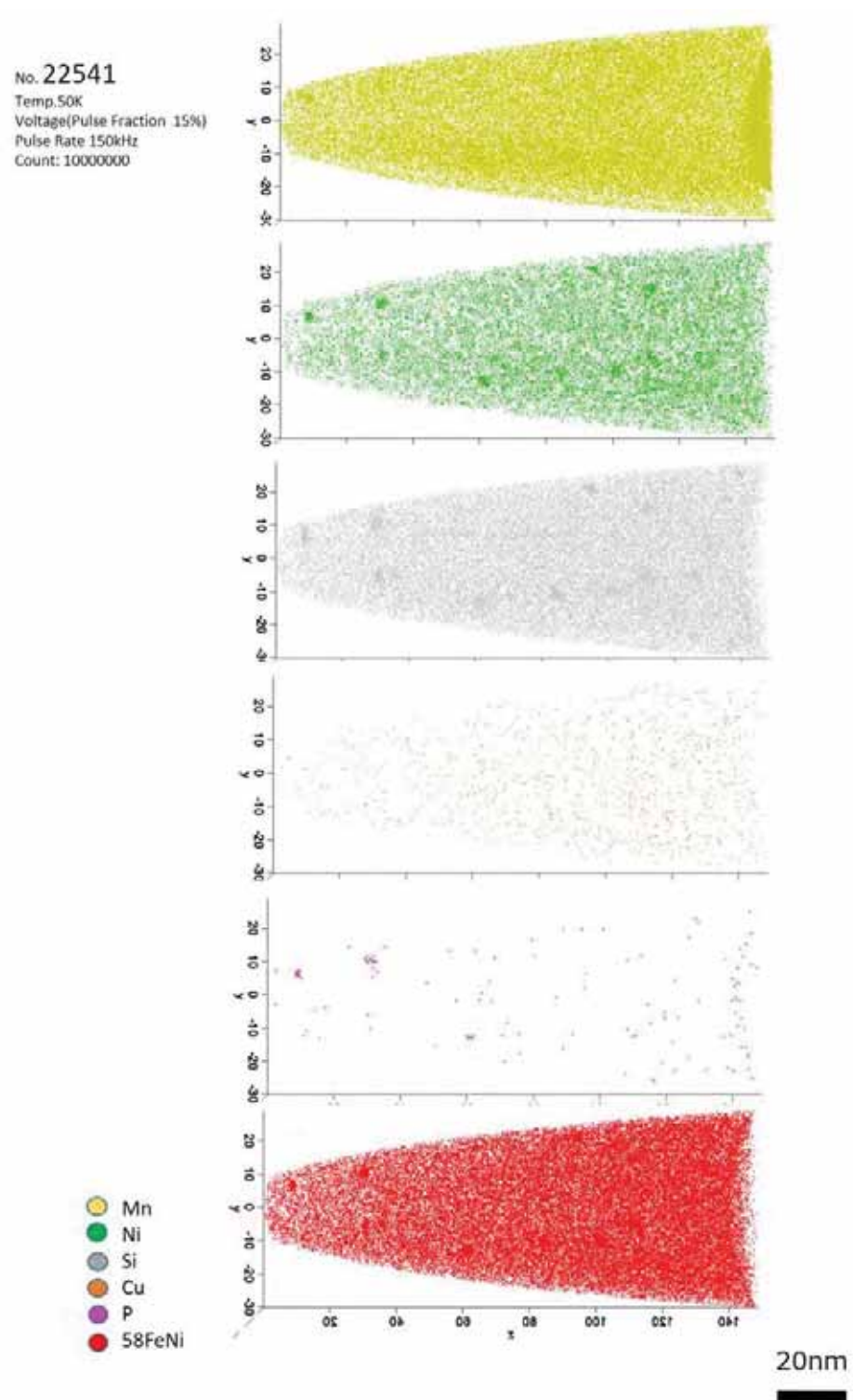


図 3.2.2.2-13 サンプル No.3 の 3次元アトムマップ

2) 溶質原子クラスタ組成

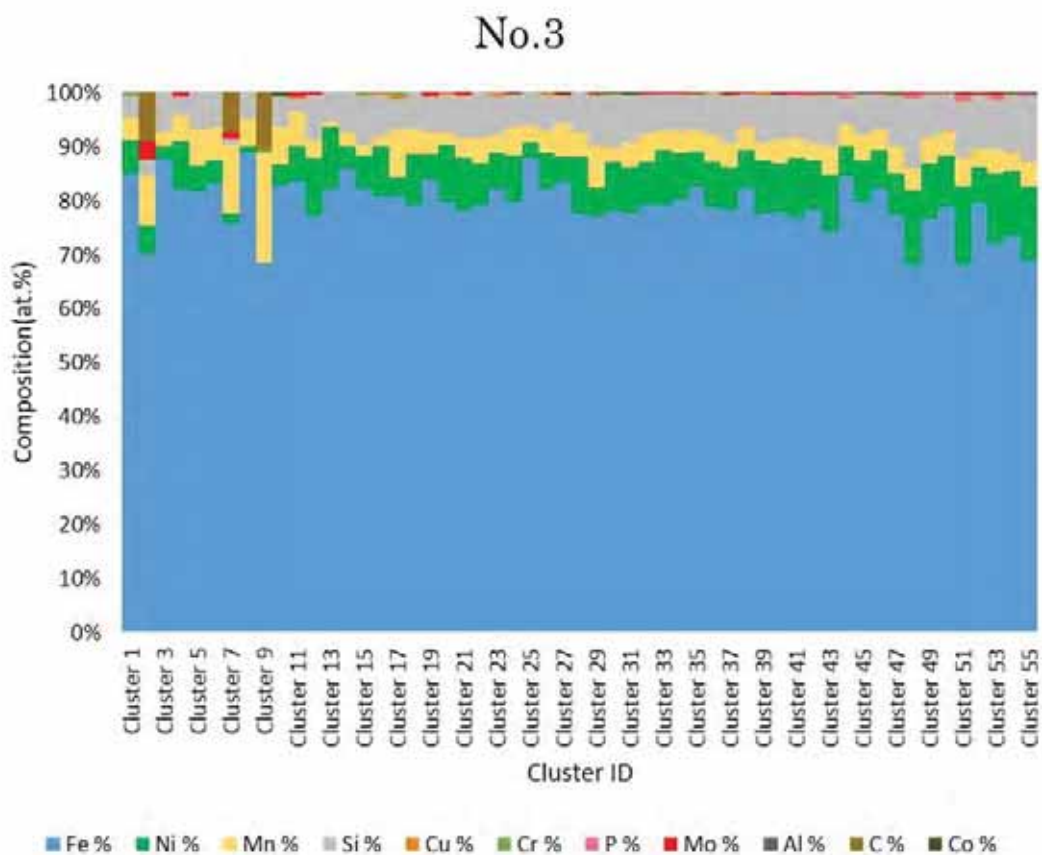


図 3.2.2.2-14 サンプル No.3 の溶質原子クラスタ化学組成

3) 半径ヒストグラム

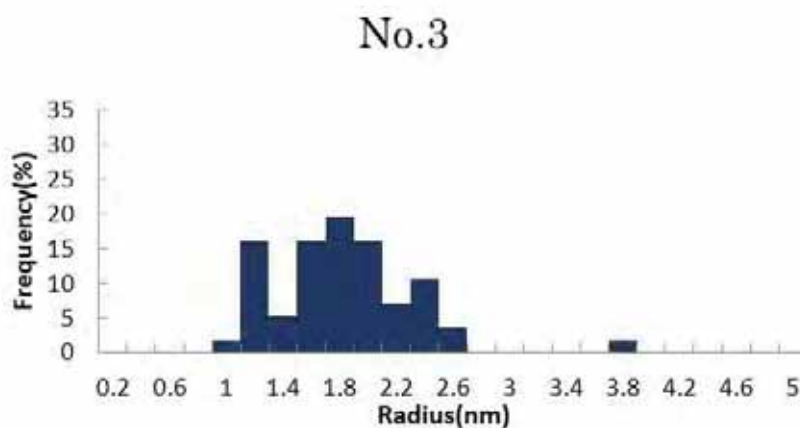


図 3.2.2.2-15 サンプル No.3 の溶質原子クラスタ半径のヒストグラム

4) 測定結果まとめ

表 3.2.2.2-5 サンプル No.3 の測定結果まとめ

(a) 母相濃度(wt%)

母相濃度 (wt%)	Cu	Ni	P	Si	Mn
	0.04	0.73	0.00	0.25	0.92

(b) クラスタの数密度、体積率、測定原子数、ギニエ半径

	Number density(m ⁻³)	ΔC_{sc}	V_f	ΔV_f	$\sqrt{V_f}$	ion	cluster diameter(nm)
Erosion			4.54E-03	7.72E-05	6.74E-02		3.5
国内鋼で使用 される解析	7.31E+22	9.77E+21	2.89E-03	6.15E-05	5.38E-02	2.42E+07	

(c) クラスタの平均化学組成(at%)

	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
平均クラス タ濃度(at%)	71.06	6.95	4.26	6.46	0.12	0.05
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.08	0.15	0.00	0.37	0.03	0.00

(d) マトリックス組成(クラスタ以外の平均化学組成)(at%)

	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
平均マトリ ックス濃度 (at%)	90.13	0.62	0.89	0.44	0.03	0.02
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.00	0.16	0.01	0.03	0.02	0.01

(e) 測定番号、全体原子数、クラスタの数

No.	全体原子数	クラスタの数
22863	1.31E+07	46
22866	1.41E+06	3
22871	4.81E+06	12

④ サンプル No.4

1) 3次元アトムマップ

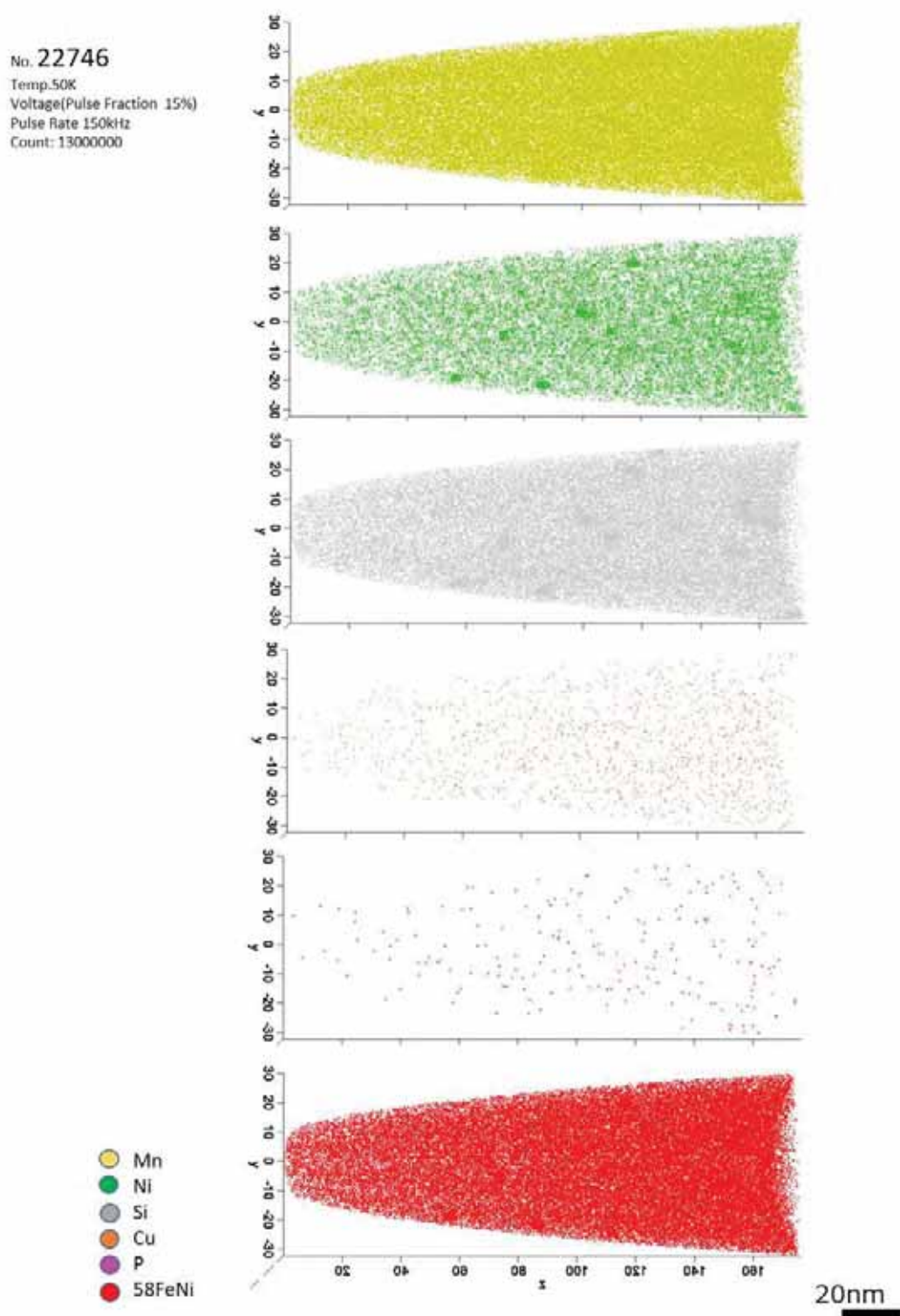


図 3.2.2.2-16 サンプル No.4 の 3次元アトムマップ

2) 溶質原子クラスター組成

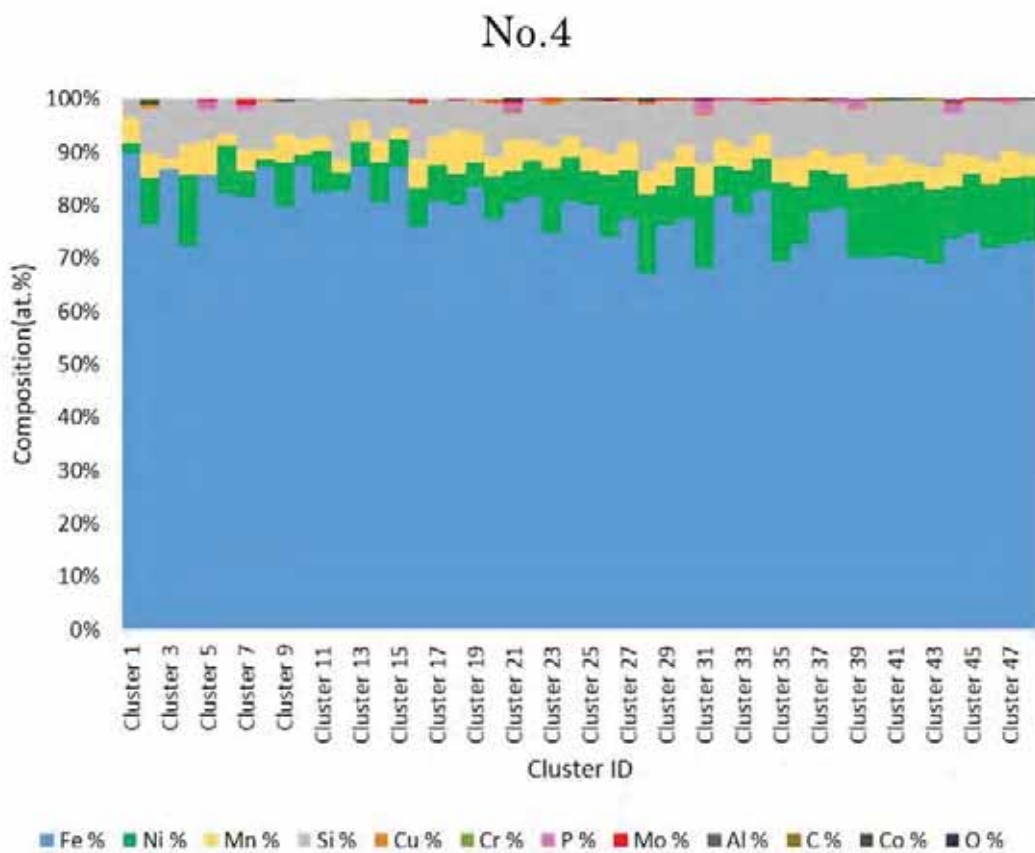


図 3.2.2.2-17 サンプル No.4 の溶質原子クラスター化学組成

3) 半径ヒストグラム

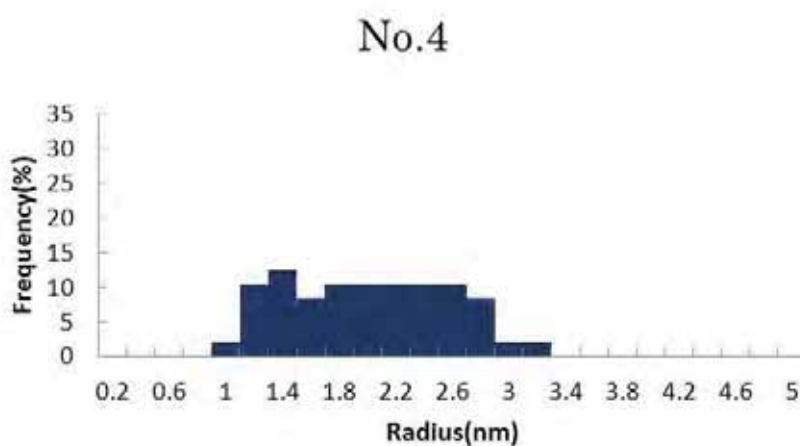


図 3.2.2.2-18 サンプル No.4 の溶質原子クラスターの半径ヒストグラム

4) 測定結果まとめ

表 3.2.2.2-6 サンプル No.4 の測定結果まとめ

(a) 母相濃度(wt%)

母相濃度 (wt%)	Cu	Ni	P	Si	Mn
	0.04	0.70	0.00	0.25	0.87

(b) クラスタの数密度、体積率、測定原子数、ギニエ半径

	Number density(m ⁻³)	ΔC_{sc}	V_f	ΔV_f	$\sqrt{V_f}$	ion	cluster diameter(nm)
Erosion			2.79E-03	6.28E-05	5.28E-02		4.0
国内鋼で使用 される解析	6.78E+22	9.78E+21	1.86E-03	5.12E-05	4.31E-02	2.24E+07	

(c) クラスタの平均化学組成(at%)

平均クラス タ濃度(at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	67.54	7.33	3.82	7.39	0.15	0.02
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.21	0.10	0.01	0.02	0.03	0.00

(d) マトリックス組成(クラスター以外の平均化学組成)(at%)

平均マトリ ックス濃度 (at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	87.43	0.57	0.79	0.42	0.03	0.03
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.00	0.17	0.01	0.02	0.02	0.01

(e) 測定番号、全体原子数、クラスタの数

No.	全体原子数	クラスタの数
22745	4.94E+06	14
22746	1.13E+07	28
22764	6.20E+06	6

⑤ サンプル No.5

1) 3次元アトムマップ

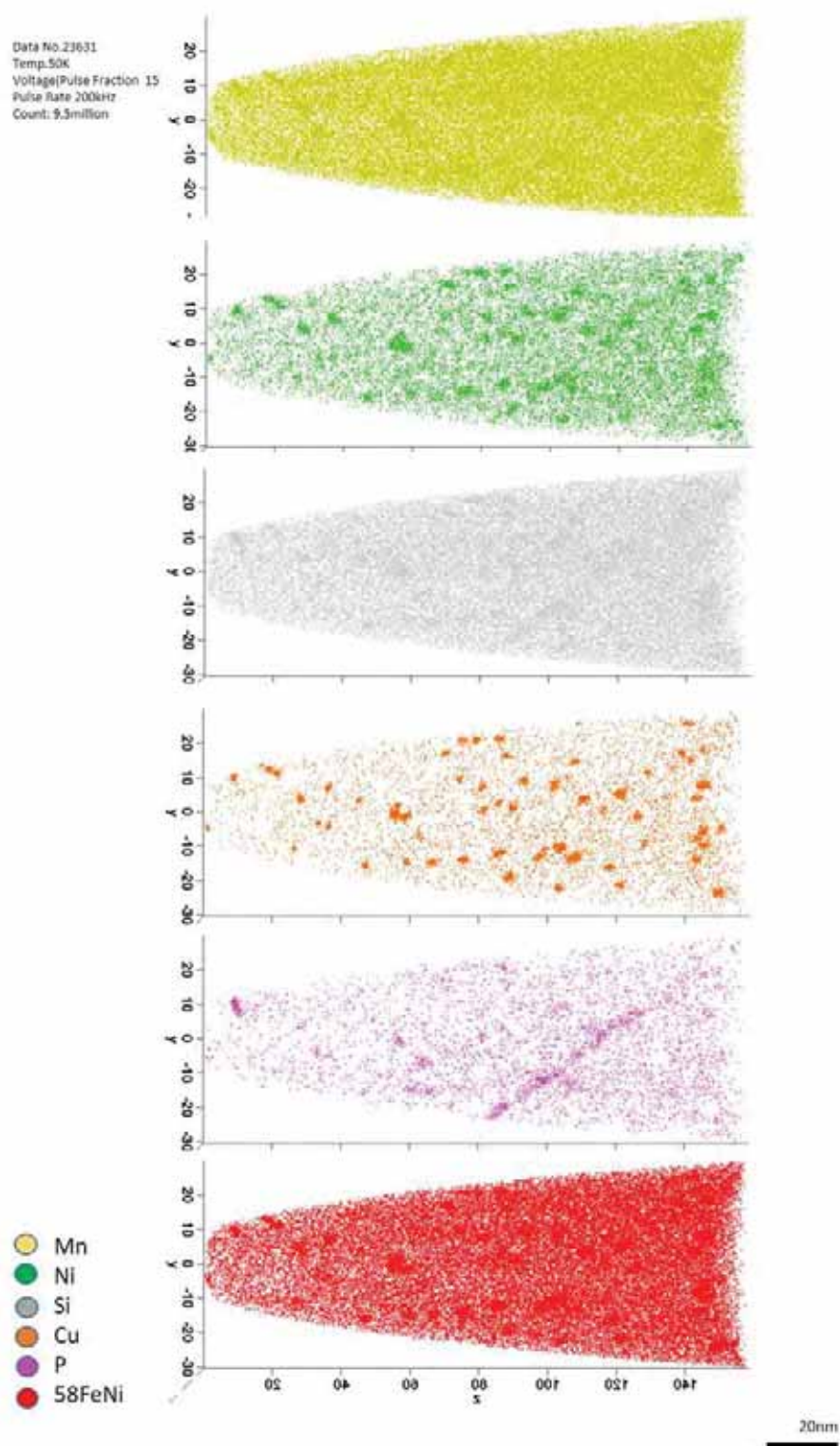


図 3.2.2.2-19 サンプル No.5 の 3次元アトムマップ

2) 溶質原子クラスタ組成



図 3.2.2.2-20 サンプル No.5 の溶質原子クラスタ化学組成

3) 半径ヒストグラム

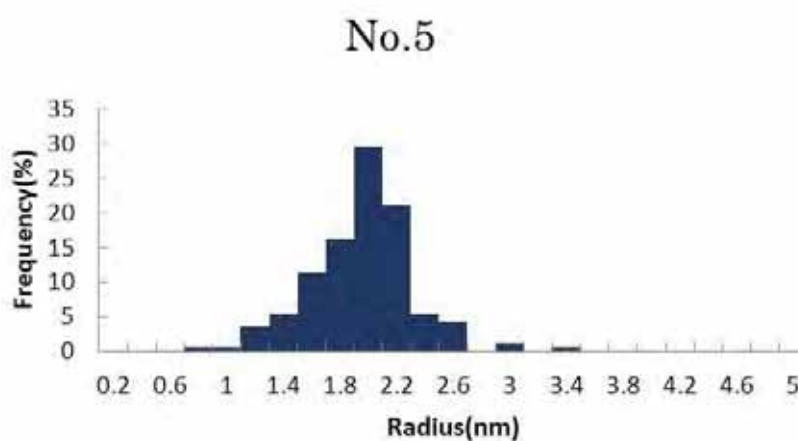


図 3.2.2.2-21 サンプル No.5 の溶質原子クラスタ半径のヒストグラム

4) 測定結果まとめ

表 3.2.2.2-7 サンプル No.5 の測定結果まとめ

(a) 母相濃度(wt%)

母相濃度 (wt%)	Cu	Ni	P	Si	Mn
	0.14	0.70	0.03	0.27	0.93

(b) クラスタの数密度、体積率、測定原子数、ギニエ半径

	Number density(m ⁻³)	ΔC_{sc}	V_f	ΔV_f	$\sqrt{V_f}$	ion	cluster diameter(nm)
Erosion			1.19E-02	1.42E-04	1.09E-01		3.7
国内鋼で使用 される解析	2.79E+23	2.17E+22	8.13E-03	1.17E-04	9.02E-02	1.88E+07	

(c) クラスタの平均化学組成(at%)

平均クラス タ濃度(at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	64.74	7.35	5.63	3.05	3.74	0.05
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.53	0.13	0.81	0.04	0.04	0.00

(d) マトリックス組成(クラスタ以外の平均化学組成)(at%)

平均マトリ ックス濃度 (at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	87.01	0.52	0.82	0.47	0.06	0.07
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.04	0.13	0.04	0.02	0.03	0.02

(e) 測定番号、全体原子数、クラスタの数

No.	全体原子数	クラスタの数
22290	1.53E+06	24
23048	3.48E+06	34
23099	3.27E+06	17
23629	3.82E+06	30
23631	6.70E+06	61

2) 溶質原子クラスタ組成



図 3.2.2.2-23 サンプル No.6 の溶質原子クラスタ化学組成

3) 半径ヒストグラム

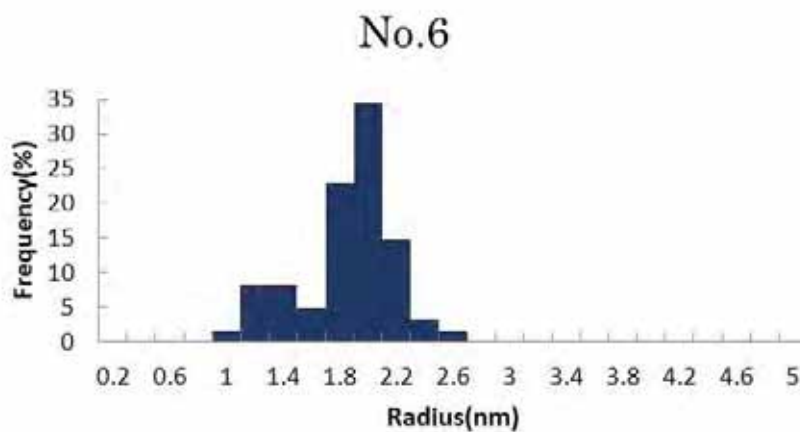


図 3.2.2.2-24 サンプル No.6 の溶質原子クラスタ半径のヒストグラム

4) 測定結果まとめ

表 3.2.2.2-8 サンプル No.6 の測定結果まとめ

(a) 母相濃度(wt%)

母相濃度 (wt%)	Cu	Ni	P	Si	Mn
	0.08	0.71	0.01	0.24	0.83

(b) クラスタの数密度、体積率、測定原子数、ギニエ半径

	Number density(m ⁻³)	ΔC_{sc}	V_f	ΔV_f	$\sqrt{V_f}$	ion	cluster diameter(nm)
Erosion			3.62E-03	7.71E-05	6.02E-02		3.5
国内鋼で使用 される解析	9.98E+22	1.28E+22	2.49E-03	6.39E-05	4.99E-02	1.93E+07	

(c) クラスタの平均化学組成(at%)

平均クラス タ濃度(at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	68.28	7.65	4.95	4.56	1.88	0.08
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.80	0.18	0.03	0.02	0.00	0.00

(d) マトリックス組成(クラスタ以外の平均化学組成)(at%)

平均マトリ ックス濃度 (at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	87.87	0.56	0.80	0.41	0.05	0.10
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.00	0.20	0.00	0.02	0.02	0.02

(e) 測定番号、全体原子数、クラスタの数

No.	全体原子数	クラスタの数
22863	1.31E+07	46
22866	1.41E+06	3
22871	4.81E+06	12

⑦ サンプル No.7
 1) 3次元アトムマップ

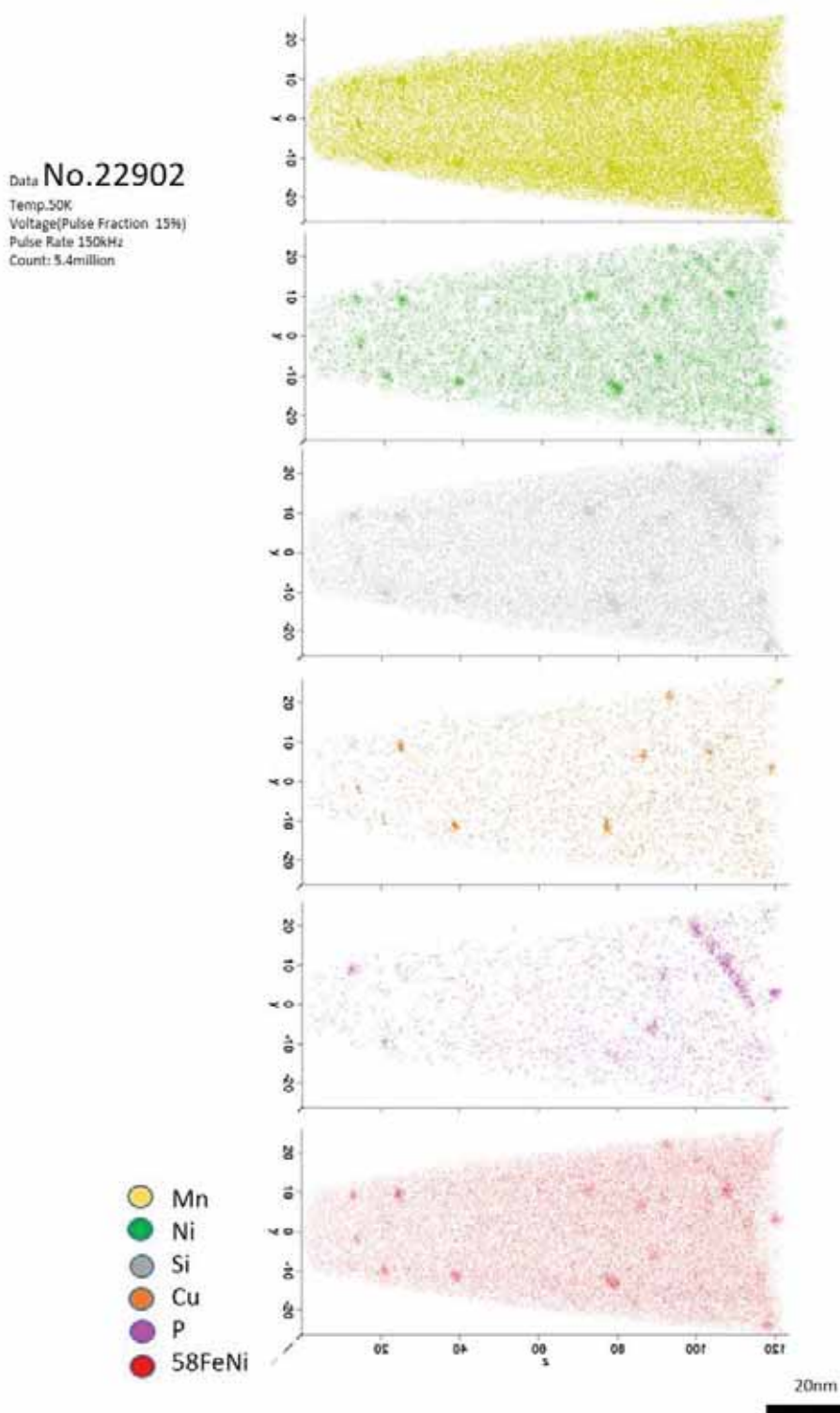


図 3.2.2.2-25 サンプル No.7 の 3次元アトムマップ

2) 溶質原子クラスタ組成

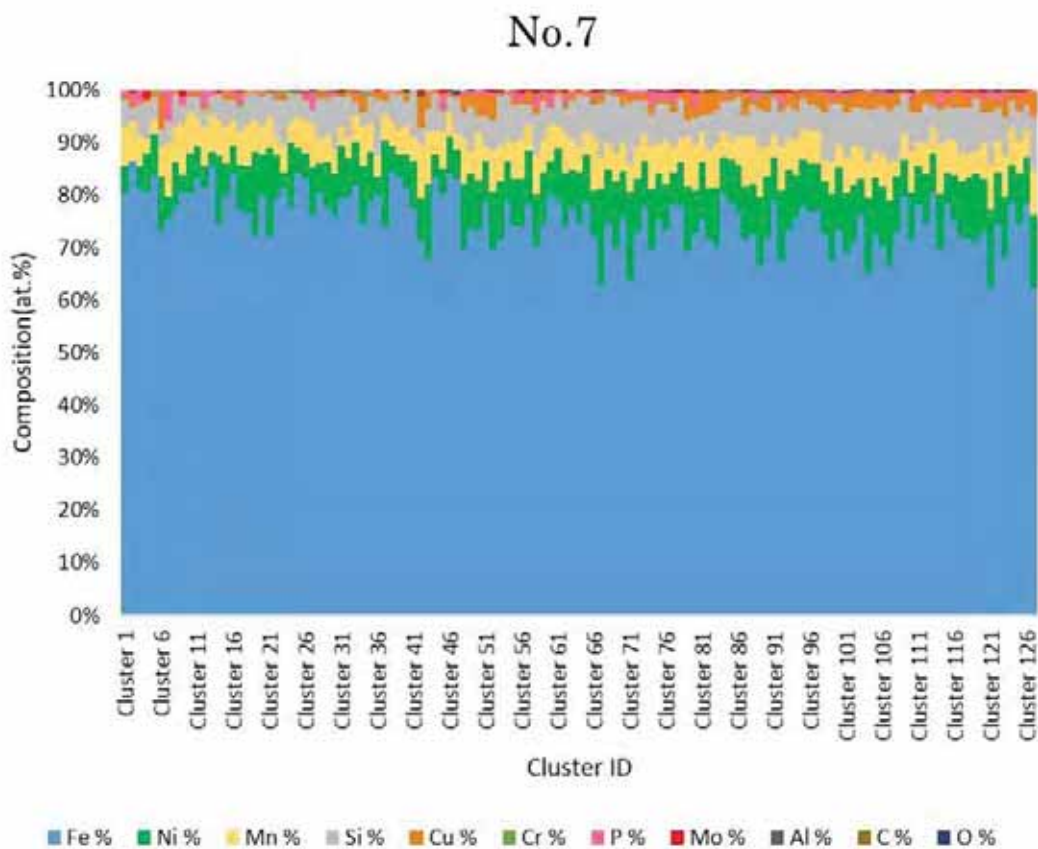


図 3.2.2.2-26 サンプル No.7 の溶質原子クラスタ化学組成

3) 半径ヒストグラム

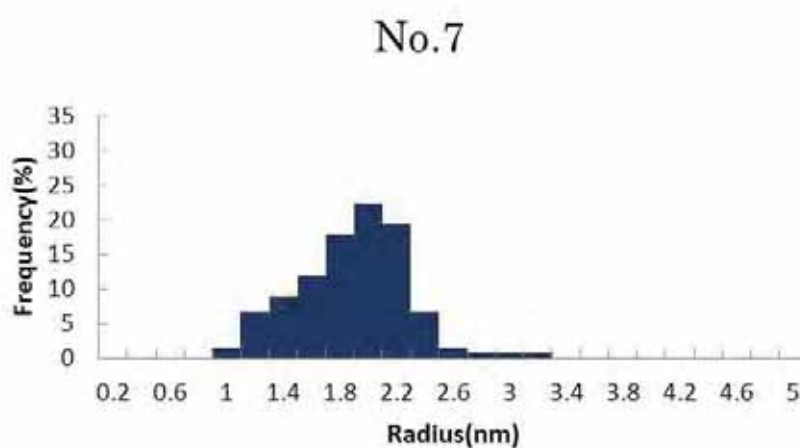


図 3.2.2.2-27 サンプル No.7 の溶質原子クラスタ半径のヒストグラム

4) 測定結果まとめ

表 3.2.2.2-9 サンプル No.7 の測定結果まとめ

(a) 母相濃度(wt%)

母相濃度 (wt%)	Cu	Ni	P	Si	Mn
	0.09	0.72	0.02	0.27	0.96

(b) クラスタの数密度、体積率、測定原子数、ギニエ半径

	Number density(m ⁻³)	ΔC_{sc}	V_f	ΔV_f	$\sqrt{V_f}$	ion	cluster diameter(nm)
Erosion			5.70E-03	8.18E-05	7.55E-02		3.6
国内鋼で使用 される解析	1.56E+23	1.35E+22	4.12E-03	6.95E-05	6.42E-02	2.71E+07	

(c) クラスタの平均化学組成(at%)

	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
平均クラス タ濃度(at%)	69.21	7.45	5.42	5.27	0.95	0.10
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.75	0.11	0.01	0.06	0.03	0.00

(d) マトリックス組成(クラスタ以外の平均化学組成)(at%)

	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
平均マトリ ックス濃度 (at%)	89.09	0.57	0.87	0.45	0.06	0.11
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.03	0.14	0.00	0.03	0.00	0.03

(e) 測定番号、全体原子数、クラスタの数

No.	全体原子数	クラスターの数
22665	1.66E+06	9
22680	4.57E+06	27
22900	2.21E+06	12
22902	4.90E+06	31
22904	2.80E+06	14
22906	3.32E+06	15
22938	3.99E+06	19
22944	3.66E+06	7

⑧ サンプル No.8

1) 3次元アトムマップ

Data No.24060
Temp.50K
Voltage(Pulse Fraction 15%)
Pulse Rate 150kHz
Count: 4.8million

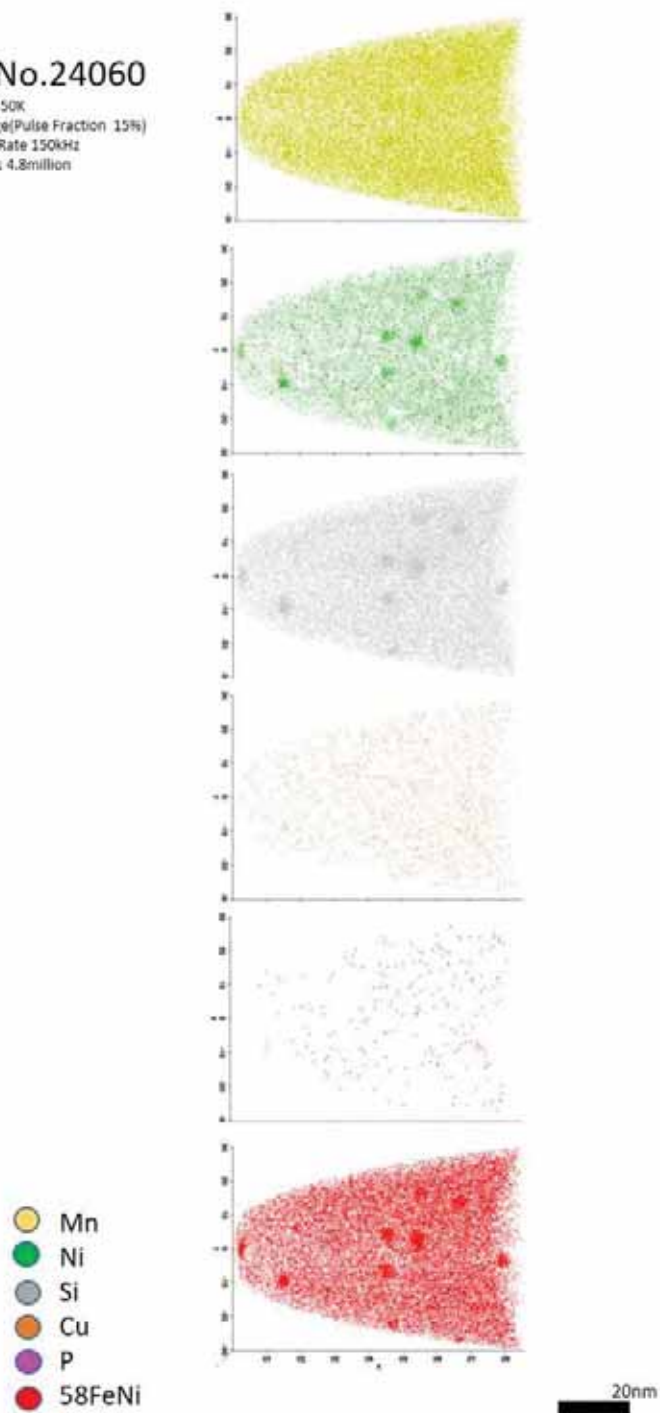


図 3.2.2.2-28 サンプル No.8 の 3次元アトムマップ

2) 溶質原子クラスタ組成

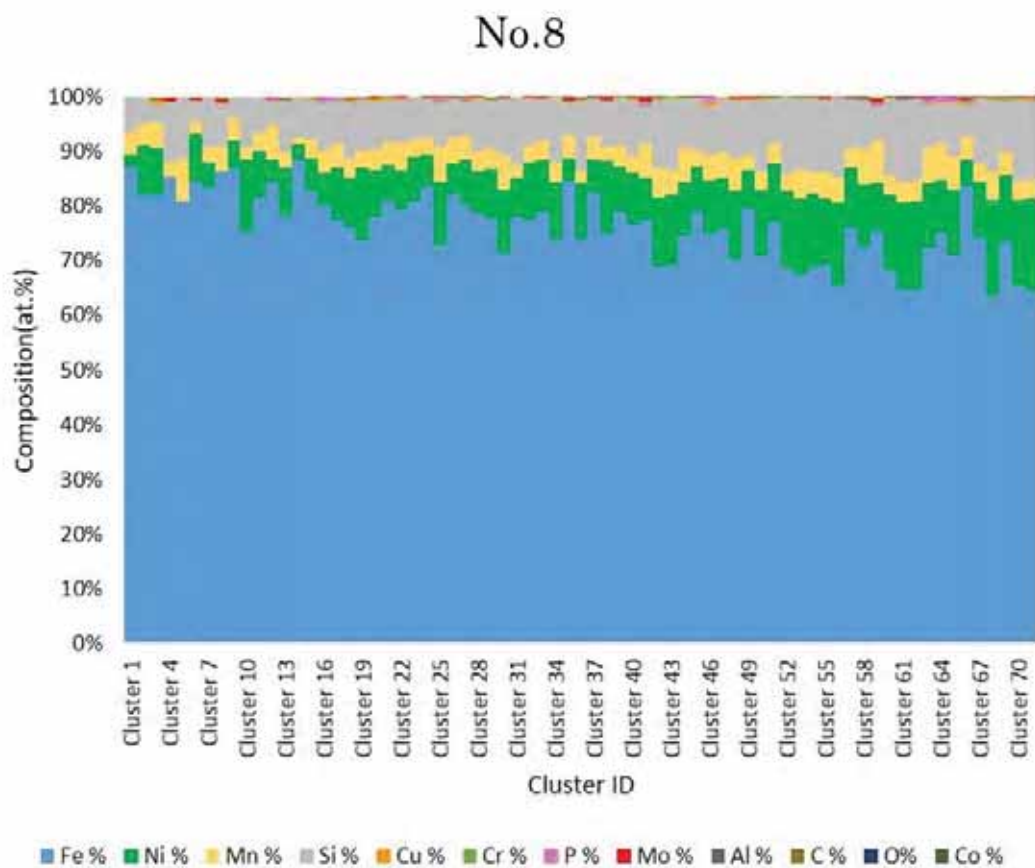


図 3.2.2.2-29 サンプル No.8 の溶質原子クラスタ化学組成

3) 半径ヒストグラム

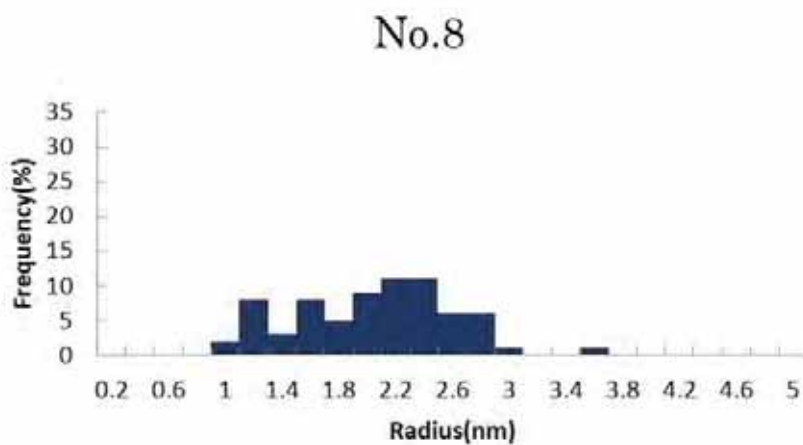


図 3.2.2.2-30 サンプル No.8 の溶質原子クラスタ半径のヒストグラム

4) 測定結果まとめ

表 3.2.2.2-10 サンプル No.8 の測定結果まとめ

(a) 母相濃度(wt%)

母相濃度 (wt%)	Cu	Ni	P	Si	Mn
	0.04	0.75	0.00	0.32	0.90

(b) クラスターの数密度、体積率、測定原子数、ギニエ半径

	Number density(m ⁻³)	ΔC_{sc}	V_f	ΔV_f	$\sqrt{V_f}$	ion	cluster diameter(nm)
Erosion			4.51E-03	8.25E-05	6.72E-02		3.9
国内鋼で使用 される解析	1.07E+23	1.27E+22	2.99E-03	6.71E-05	5.47E-02	2.10E+07	

(c) クラスターの平均化学組成(at%)

平均クラス ター濃度 (at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	66.50	8.17	3.66	8.15	0.13	0.07
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.08	0.11	0.00	0.06	0.02	0.00

(d) マトリックス組成(クラスター以外の平均化学組成)(at%)

平均マトリ ックス濃度 (at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	88.48	0.61	0.81	0.55	0.03	0.07
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.00	0.15	0.01	0.03	0.02	0.01

(e) 測定番号、全体原子数、クラスター数

No.	全体原子数	クラスターの数
24057	4.35E+06	18
24058	4.79E+06	23
24060	4.45E+06	12
24061	5.40E+06	13
24073	2.05E+06	5

⑨ サンプル No.9
1) 3次元アトムマップ

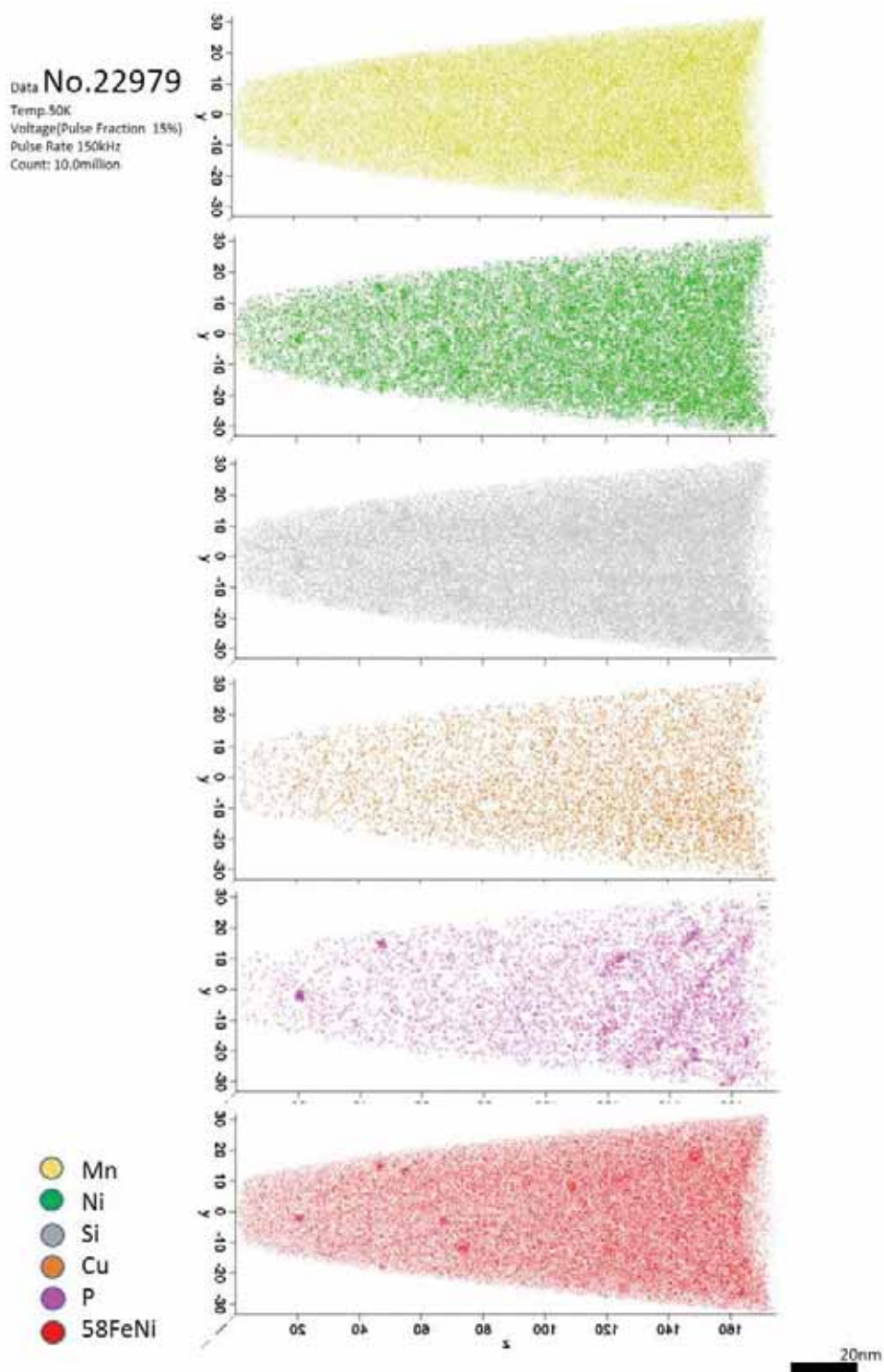


図 3.2.2.2-31 サンプル No.9 の 3次元アトムマップ

2) 溶質原子クラスタ組成

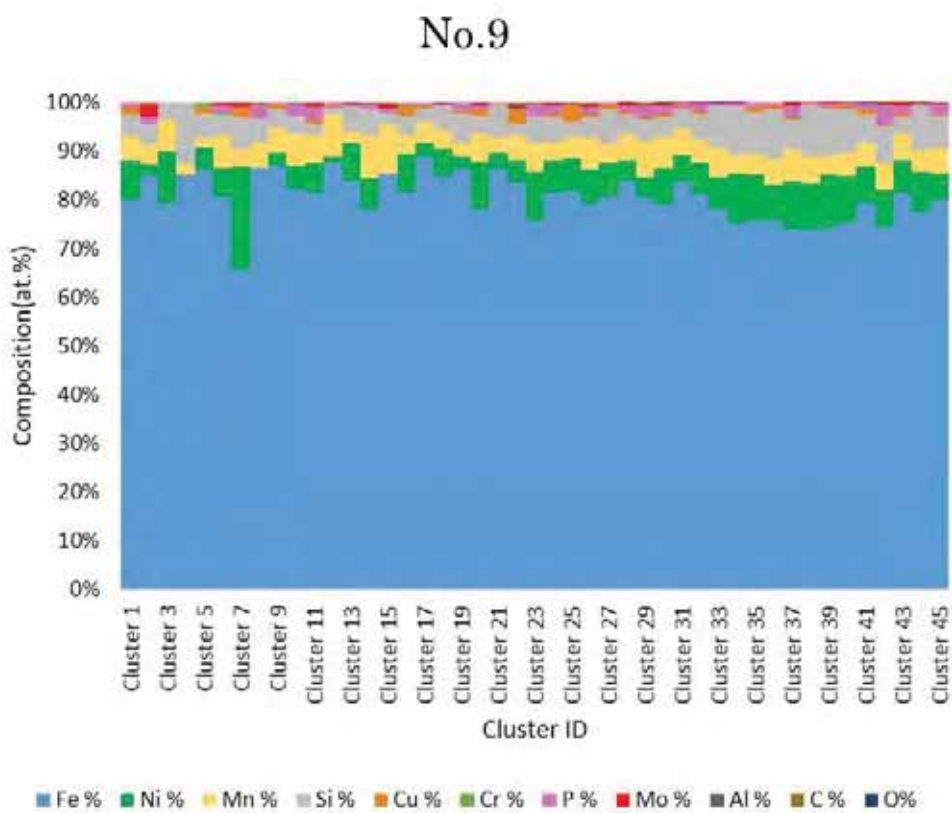


図 3.2.2.2-32 サンプル No.9 の溶質原子クラスタ化学組成

3) 半径ヒストグラム

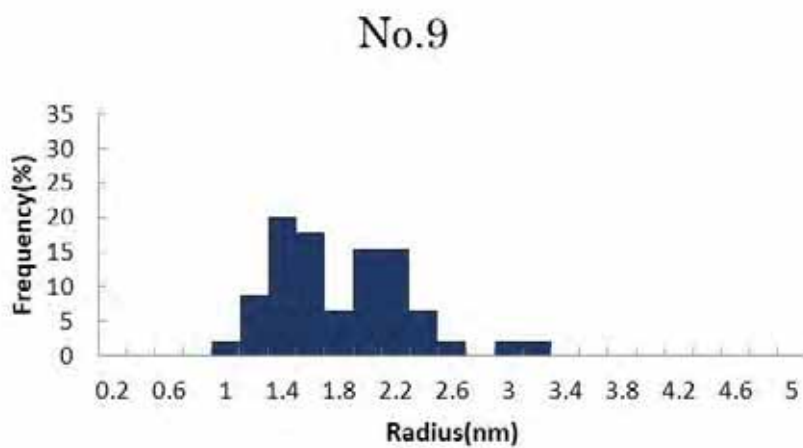


図 3.2.2.2-33 サンプル No.9 の溶質原子クラスタ半径のヒストグラム

4) 測定結果まとめ

表 3.2.2.2-11 サンプル No.9 の測定結果まとめ

(a) 母相濃度(wt%)

母相濃度 (wt%)	Cu	Ni	P	Si	Mn
	0.08	0.67	0.03	0.25	0.88

(b) クラスタの数密度、体積率、測定原子数、ギニエ半径

	Number density(m ⁻³)	ΔC_{sc}	V_f	ΔV_f	$\sqrt{V_f}$	ion	cluster diameter(nm)
Erosion			1.41E-03	4.03E-05	3.76E-02		3.4
国内鋼で使用 される解析	5.16E+22	7.69E+21	8.95E-04	3.21E-05	2.99E-02	2.76E+07	

(c) クラスタの平均化学組成(at%)

平均クラス タ濃度(at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	68.29	4.65	4.58	5.53	0.27	0.07
	P	Mo	Al	C	Co	O
	1.85	0.20	0.00	0.00	0.00	0.00

(d) マトリックス組成(クラスタ以外の平均化学組成)(at%)

平均マトリ ックス濃度 (at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	86.29	0.56	0.78	0.43	0.06	0.10
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.04	0.20	0.01	0.02	0.00	0.01

(e) 測定番号、全体原子数、クラスタの数

No.	全体原子数	クラスタの数
22978	9.01E+06	4
22979	1.04E+07	35
22983	8.16E+06	6

⑩ サンプル No.10

(1) 3次元アトムマップ

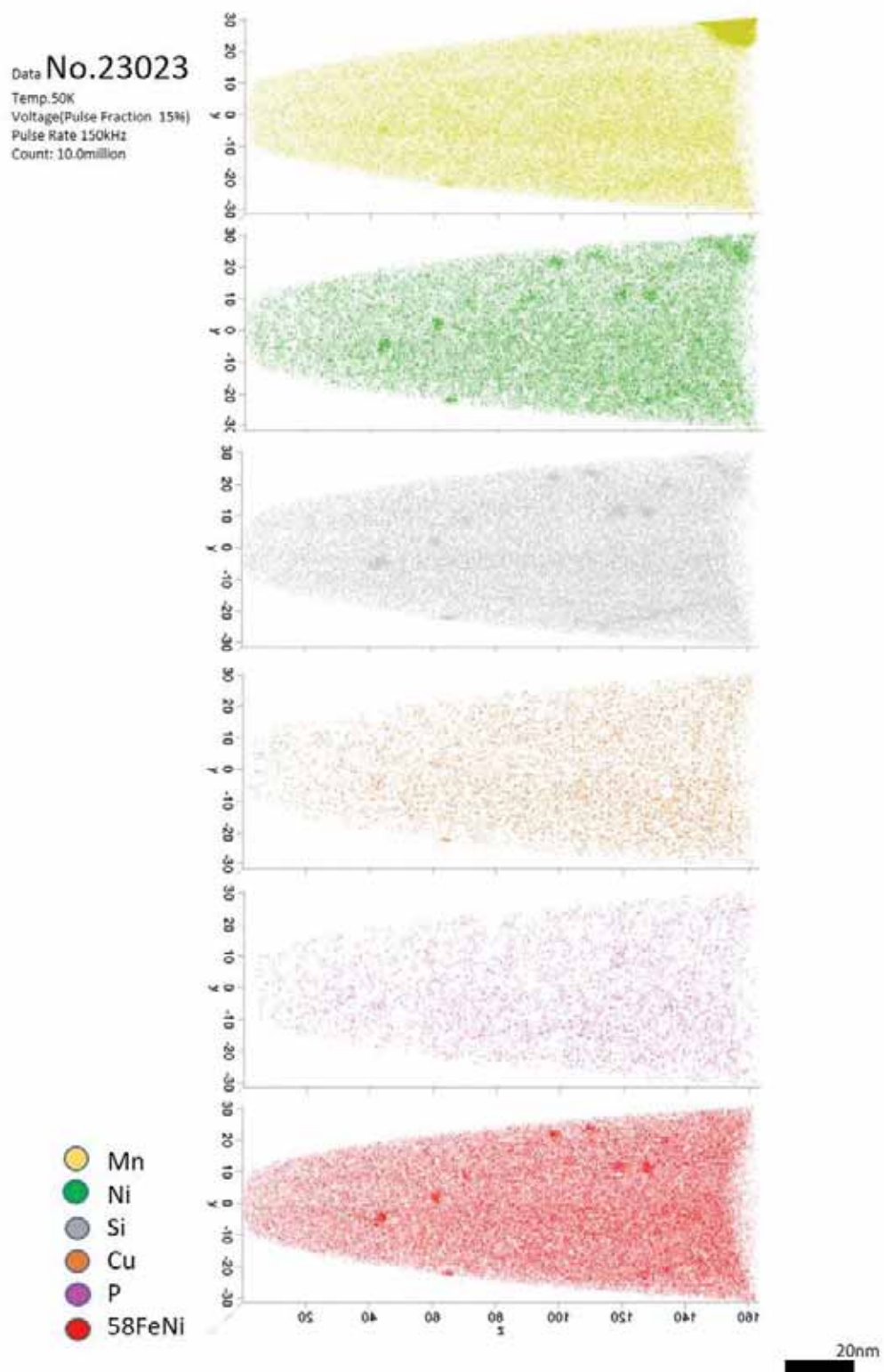


図 3.2.2.2-34 サンプル No.10 の 3次元アトムマップ

(2) 溶質原子クラスタ組成

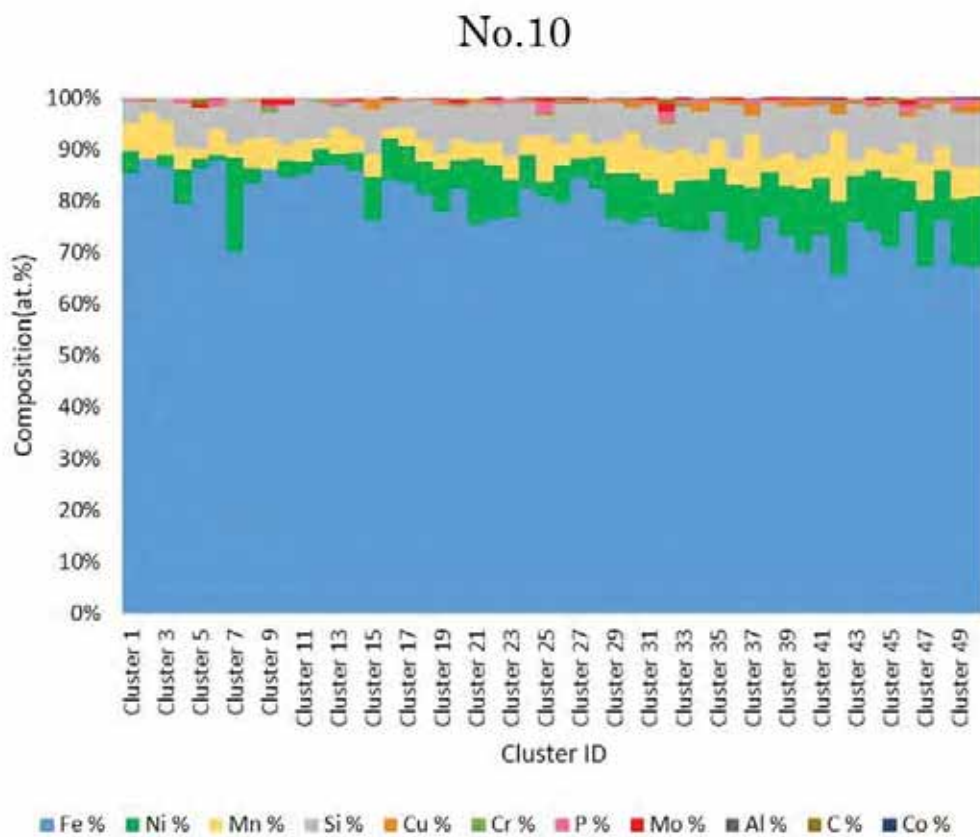


図 3.2.2.2-35 サンプル No.10 の溶質原子クラスタ化学組成

(3) 半径ヒストグラム

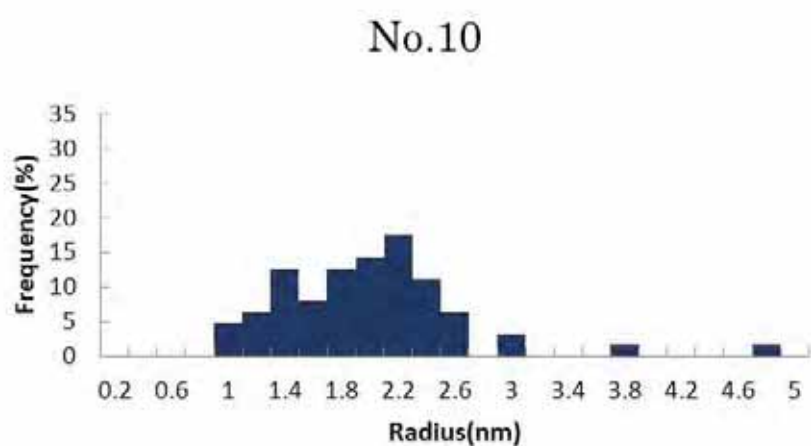


図 3.2.2.2-36 サンプル No.10 の溶質原子クラスタ半径のヒストグラム

(4) 測定結果まとめ

表 3.2.2.2-12 サンプル No.10 の測定結果まとめ

(a) 母相濃度(wt%)

母相濃度 (wt%)	Cu	Ni	P	Si	Mn
	0.08	0.74	0.02	0.25	0.90

(b) クラスタの数密度、体積率、測定原子数、ギニエ半径

	Number density(m ⁻³)	ΔC_{sc}	V_f	ΔV_f	$\sqrt{V_f}$	ion	cluster diameter(nm)
Erosion			2.60E-03	5.45E-05	5.10E-02		3.8
国内鋼で使用 される解析	7.17E+22	9.03E+21	1.75E-03	4.46E-05	4.18E-02	2.78E+07	

(c) クラスタの平均化学組成(at%)

平均クラス タ濃度(at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	68.11	6.68	4.52	6.41	0.44	0.12
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.43	0.18	0.01	0.09	0.00	0.00

(d) マトリックス組成(クラスタ以外の平均化学組成)(at%)

平均マトリ ックス濃度 (at%)	Fe	Ni	Mn	Si	Cu	Cr
	88.18	0.61	0.89	0.42	0.06	0.12
	P	Mo	Al	C	Co	O
	0.03	0.20	0.01	0.02	0.00	0.03

(e) 測定番号、全体原子数、クラスタの数

No.	全体原子数	クラスタの数
22986	1.96E+06	1
22988	2.40E+06	4
22990	5.08E+06	9
23022	6.19E+06	14
23023	9.11E+06	22
23032	3.07E+06	13

(6) 考察

① クラスタ体積率(V_f)と関連温度移行量(ΔRT_{NDT})

Erosion 法及び国内圧力容器鋼で使用されているクラスタ解析手法で求めた体積率(V_f)と関連温度移行量(ΔRT_{NDT})との関係を図 3.2.2.2-37 に示す。どちらの手法でクラスタ解析を行っても、体積率の平方根と ΔRT_{NDT} との間の比例関係が見られた。この傾向は国内圧力容器鋼に関する既往の結果とも一致する(3.2.2.2-4)。表 3.2.2.2-13 に各比例関係の傾きを示す。Erosion 法は国内圧力容器鋼で使用されているクラスタ解析手法よりも体積率を若干大きく評価した(傾きが小さくなった)。また、本研究で実施した国内圧力容器鋼で使用されているクラスタ解析の結果は既往研究結果と概ね一致した。このことから、測定装置や測定条件の違いによるクラスタ解析結果への影響は小さく、解析手法によって体積率の絶対値に違いがあることが示された。

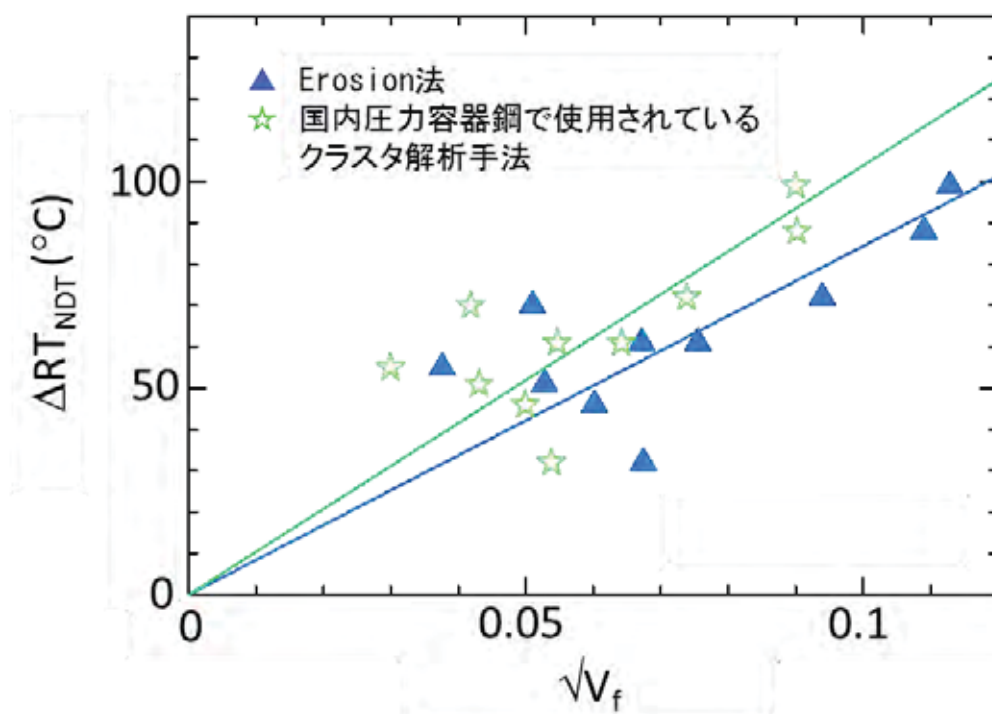


図 3.2.2.2-37 クラスタ体積率(V_f)の平方根と関連温度移行量(ΔRT_{NDT})との関係

表 3.2.2.2-13 クラスタ体積率(V_c)の平方根と
 関連温度移行量(ΔRT_{NDT})との関係のフィッティング結果

解析手法	フィッティング結果
Erosion 法	$y=8.44 \times 10^2 x$
国内圧力容器鋼で使用されている クラスタ解析手法	$y=1.04 \times 10^3 x$
(参考)既往報告データ(3.2.2.2-4)	$y=1.15 \times 10^3 x$

② Cu 含有量とクラスタ組成

以降の考察では、Cu 含有量が 0.05wt%より少ないサンプル(No.3、4、8。以下、低 Cu 材と表現する)、Cu 含有量が 0.05wt%より多く、0.1wt%より少ないサンプル(No.6、7、9、10。以下、中 Cu 材と表現する)、Cu 含有量が 0.1wt%より多いサンプル(No.1、2、5。以下、高 Cu 材と表現する)に分けて実験結果を考察する。

図 3.2.2.2-38 に低 Cu 材の 3 次元アトムマップを示す。これらはすべて $20 \times 20 \times 50 \text{ nm}^3$ の範囲に区切られている。この結果から Ni、Mn、Si の濃化が観察された。一方 Cu、P の濃化は認められなかった。

図 3.2.2.2-39 に中 Cu 材の 3 次元アトムマップを示す。この結果から Ni、Mn、Si の濃化が観察された。一方 Cu、P の濃化についてはクラスタ毎に差があった。

図 3.2.2.2-40 に高 Cu 材の 3 次元アトムマップを示す。この結果から Ni、Mn、Si と Cu の濃化が観察された。P の濃化についてはクラスタ毎に差があった。

このように、高 Cu 材では Cu 富裕クラスタが多く形成されるのに対し、低 Cu 材では Ni-Mn-Si クラスタの形成が見られ、Cu 富裕クラスタは少なくなることがわかる。

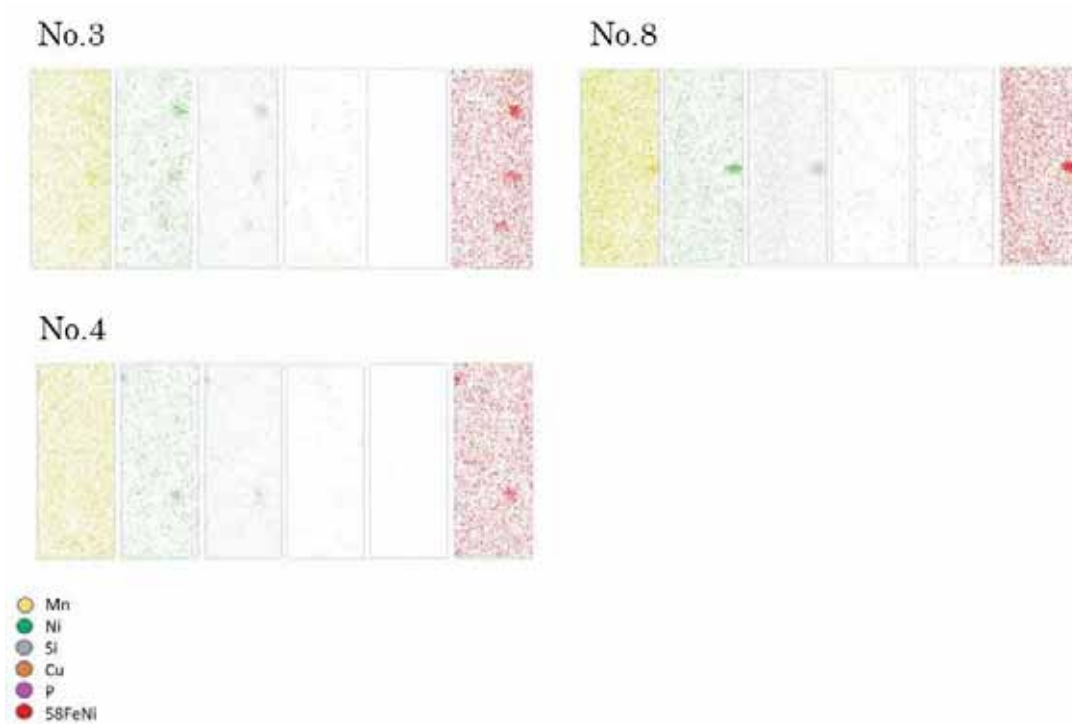


図 3.2.2.2-38 低 Cu 材(Cu: 0.03 – 0.037wt%)の 3 次元アトムマップ(20×20×50 nm³)

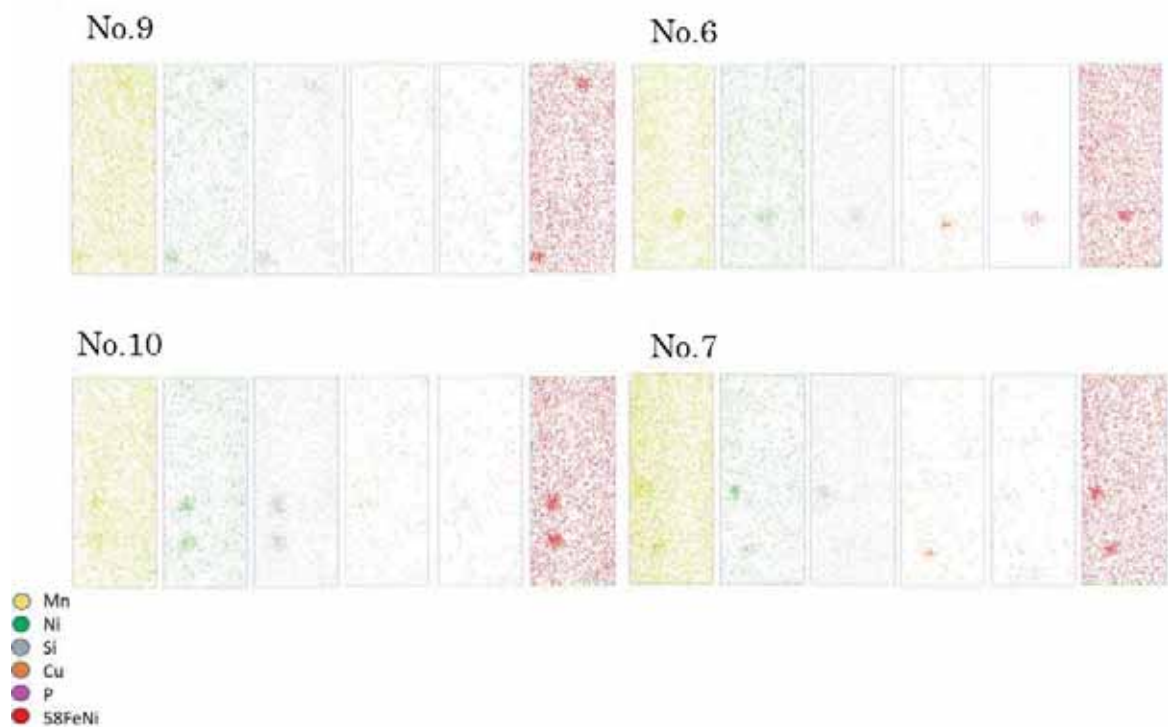


図 3.2.2.2-39 中 Cu 材(Cu: 0.05 – 0.068wt%)の 3 次元アトムマップ(20×20×50nm³)

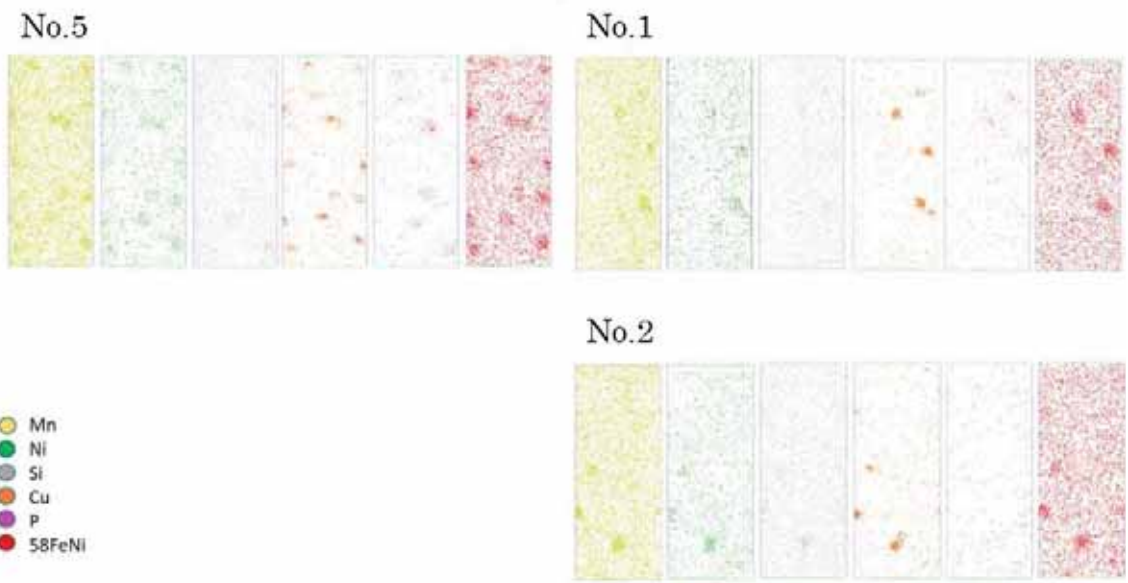


図 3.2.2.2-40 高 Cu 材(Cu: 0.13 – 0.16wt%)の 3 次元アトムマップ(20×20×50nm³)

③ Cu 含有量及び照射量とクラスタの数密度

図 3.2.2.2-41 に照射量とクラスタ数密度(C_{sc})の関係を示す。高 Cu 材と低 Cu 材の違いについても確認できるように、Cu 含有量に応じて異なる色でプロットした。照射量の増加に伴い、クラスタの数密度 C_{sc} が高くなる傾向が得られた。また、高 Cu 材ほど C_{sc} が高くなる傾向があった。

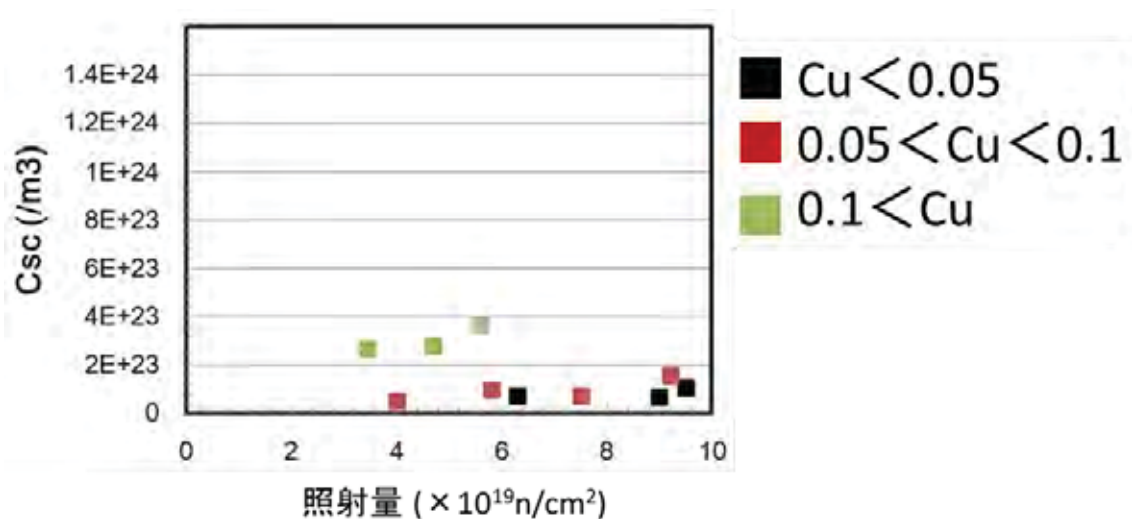


図 3.2.2.2-41 Cu 含有量及び照射量とクラスタ数密度の関係

④ Cu 含有量及び照射量とクラスタ体積率

図 3.2.2.2-42 に照射量とクラスタ体積率(V)のグラフを示す。高 Cu 材と低 Cu 材の違いについても確認できるように、Cu 含有量に応じて異なる色でプロットした。照射量の増加に伴い、クラスタ体積率が高くなる傾向が見られた。また、Cu 濃度が高いほどクラスタ体積率も高い傾向が示された。

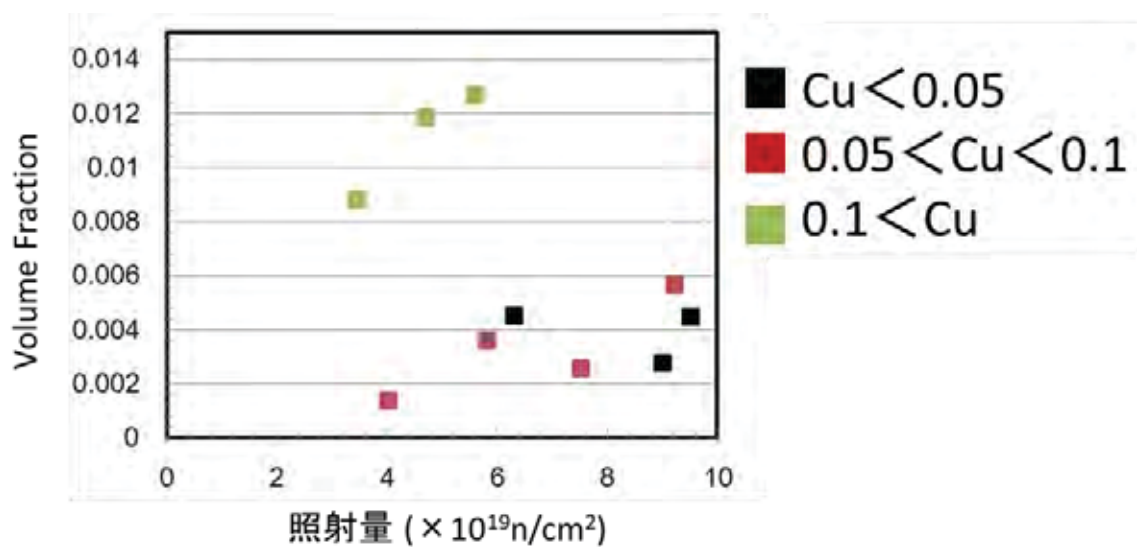


図 3.2.2.2-42 Cu 含有量及び照射量とクラスタ体積率の関係

⑤ Cu 含有量とクラスタ半径

図 3.2.2.2-43 に低 Cu 材のクラスタ半径のヒストグラムを示す。図中の N_{SC} の値は各サンプルにおけるクラスタの数を表している。図は比較のため、すべてのグラフにおいて縦軸を規格化してある。低 Cu 材では、大小様々な大きさのクラスタが形成されていることがわかる。

図 3.2.2.2-44、図 3.2.2.2-45 はそれぞれ中 Cu 材及び高 Cu 材のクラスタ半径のヒストグラムである。これらのサンプルではクラスタの大きさにばらつきが少ないことがわかる。高 Cu 材になるほど得られるクラスタの数が多いことから、低 Cu 材のクラスタの大きさがばらついているのは、統計精度の低さの影響によるものと推察される。

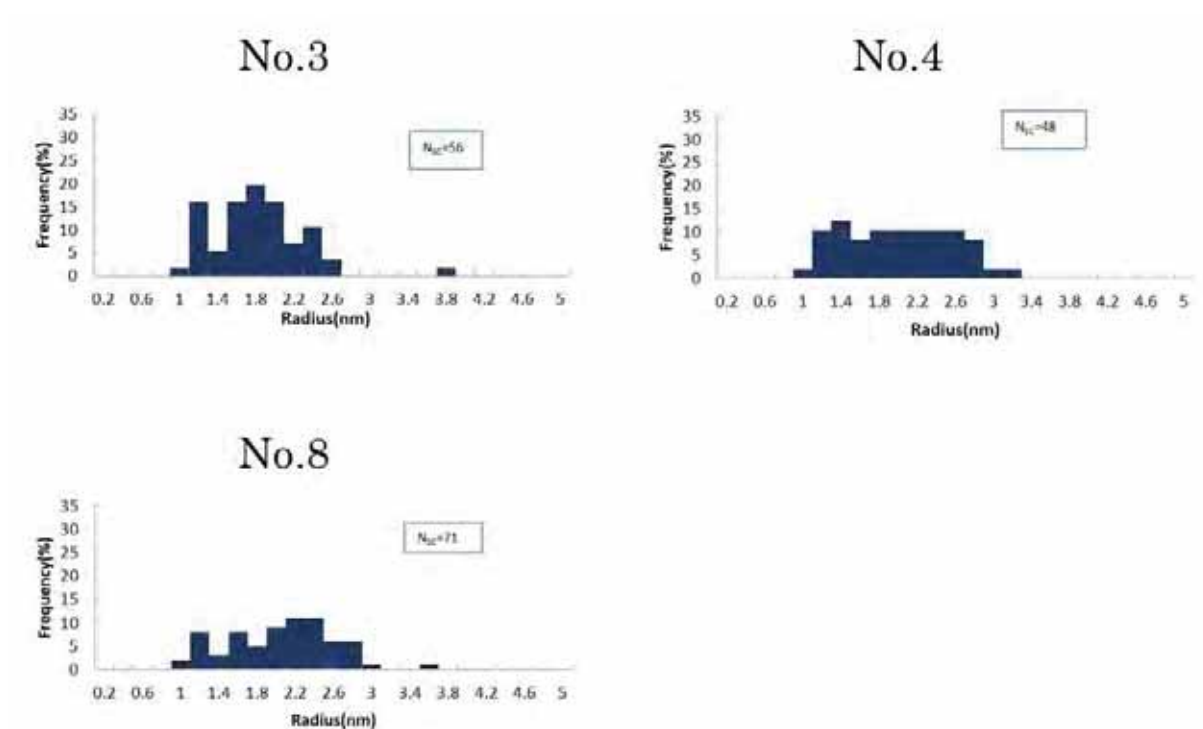


図 3.2.2.2-43 低 Cu 材の溶質原子クラスタの半径のヒストグラム

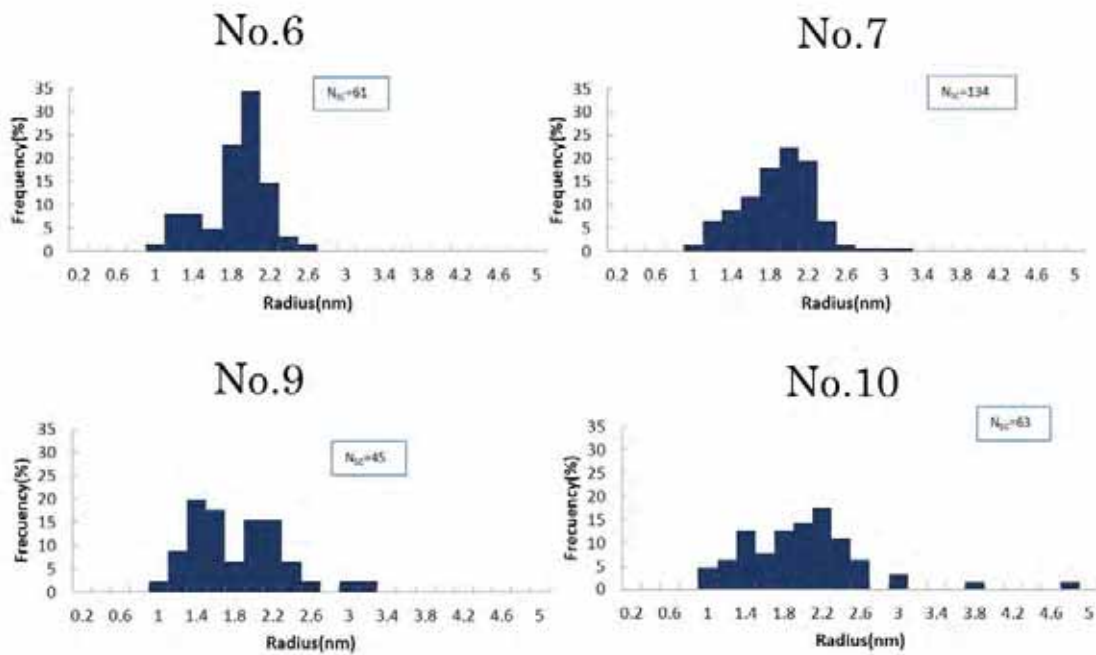


図 3.2.2.2-44 中 Cu 材の溶質原子クラスターの半径のヒストグラム

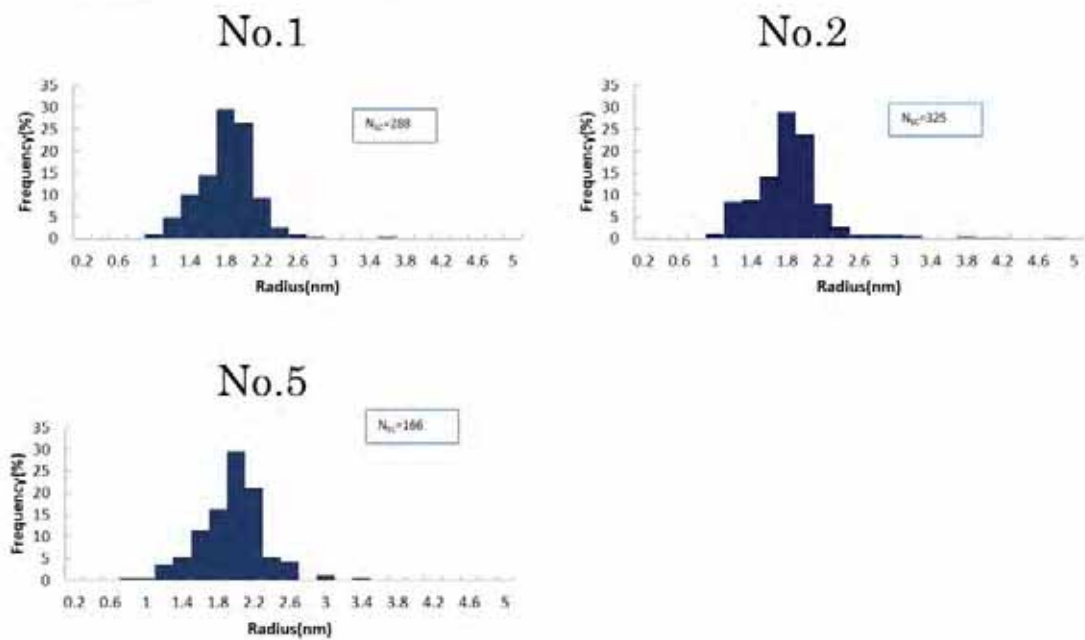


図 3.2.2.2-45 高 Cu 材の溶質原子クラスターの半径のヒストグラム

⑥ 照射によるクラスタ直径の変化

図3.2.2.2-46に照射量とクラスタ直径の関係を示す。この結果より照射量の増加に伴い、クラスタが大きくなる傾向が見られた。Cuの含有量と直径の関係については平成30年度実施予定のサンプルと合わせて評価する予定である。

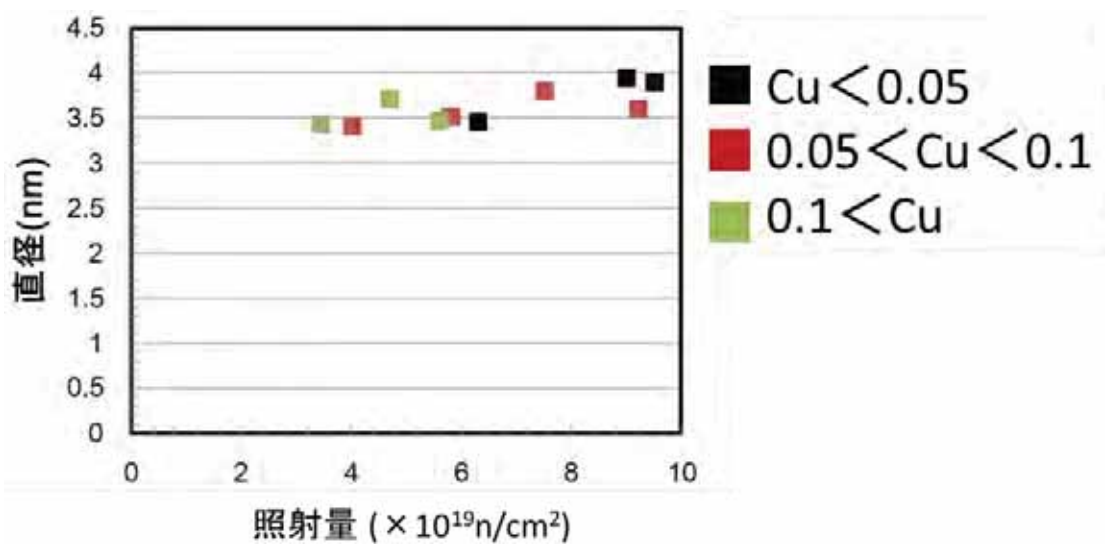


図 3.2.2.2-46 照射量とクラスタ直径の関係

⑦ 低 Cu 材、中 Cu 材、高 Cu 材における溶質原子クラスタの化学組成

図 3.2.2.2-47 に低 Cu 材、図 3.2.2.2-48 に中 Cu 材、図 3.2.2.2-49 に高 Cu 材の溶質原子クラスタの化学組成(at%)を示す。グラフはクラスタの大きさの昇順(左側が最小、右側が最大)で並べてある。

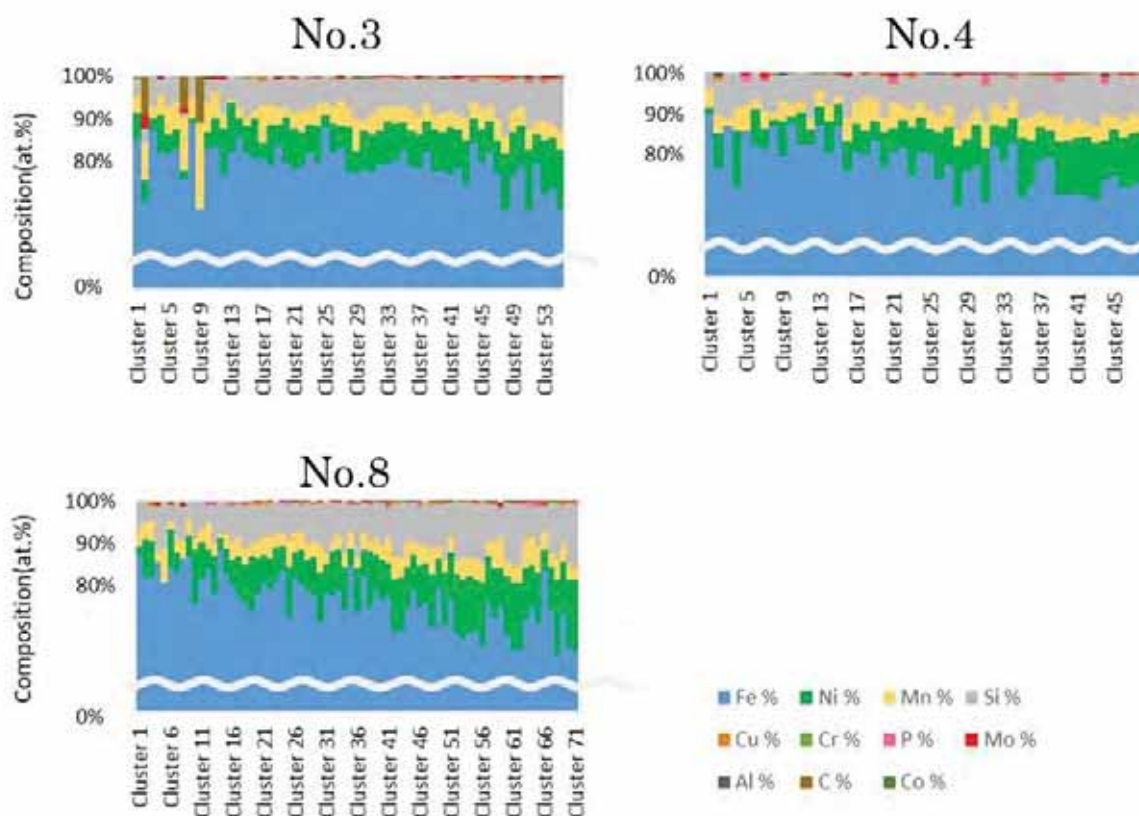


図 3.2.2.2-47 低 Cu 材における溶質原子クラスタの化学組成(at%)

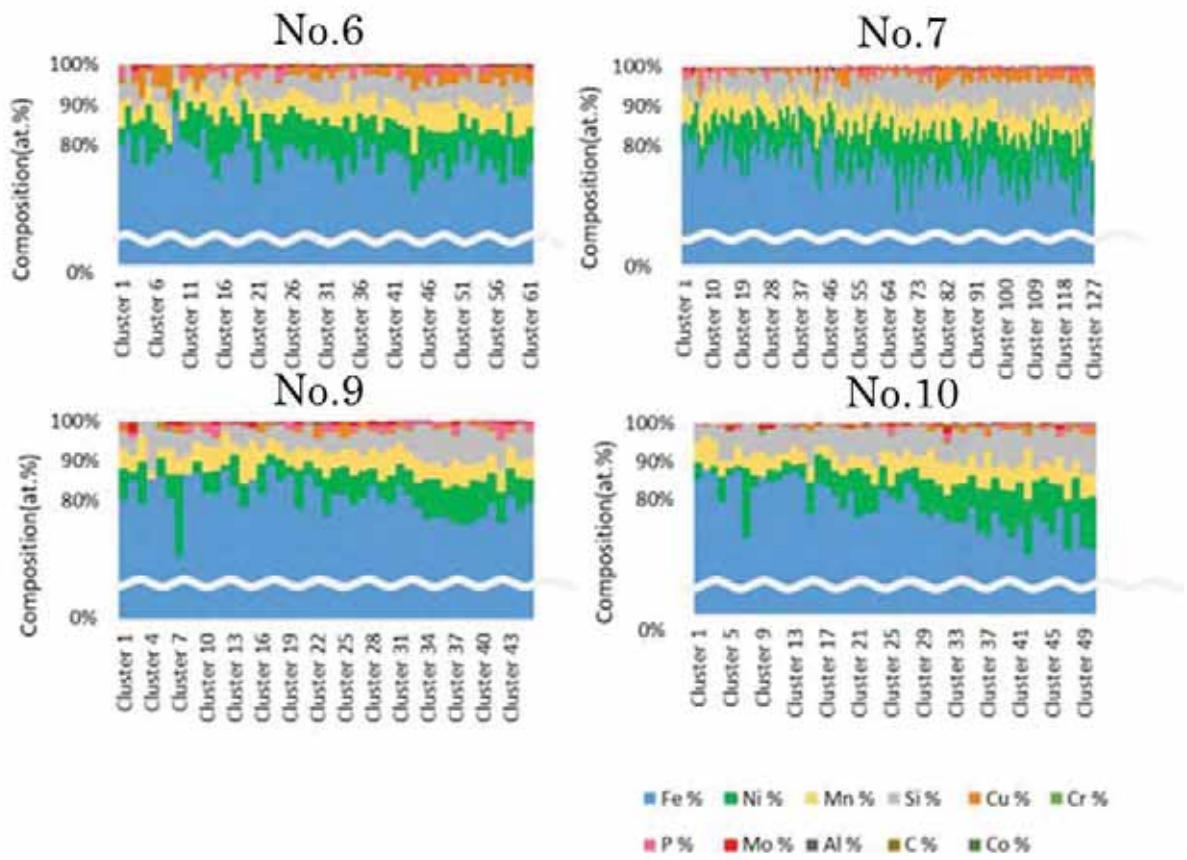


図 3.2.2.2-48 中 Cu 材における溶質原子クラスターの化学組成(at%)

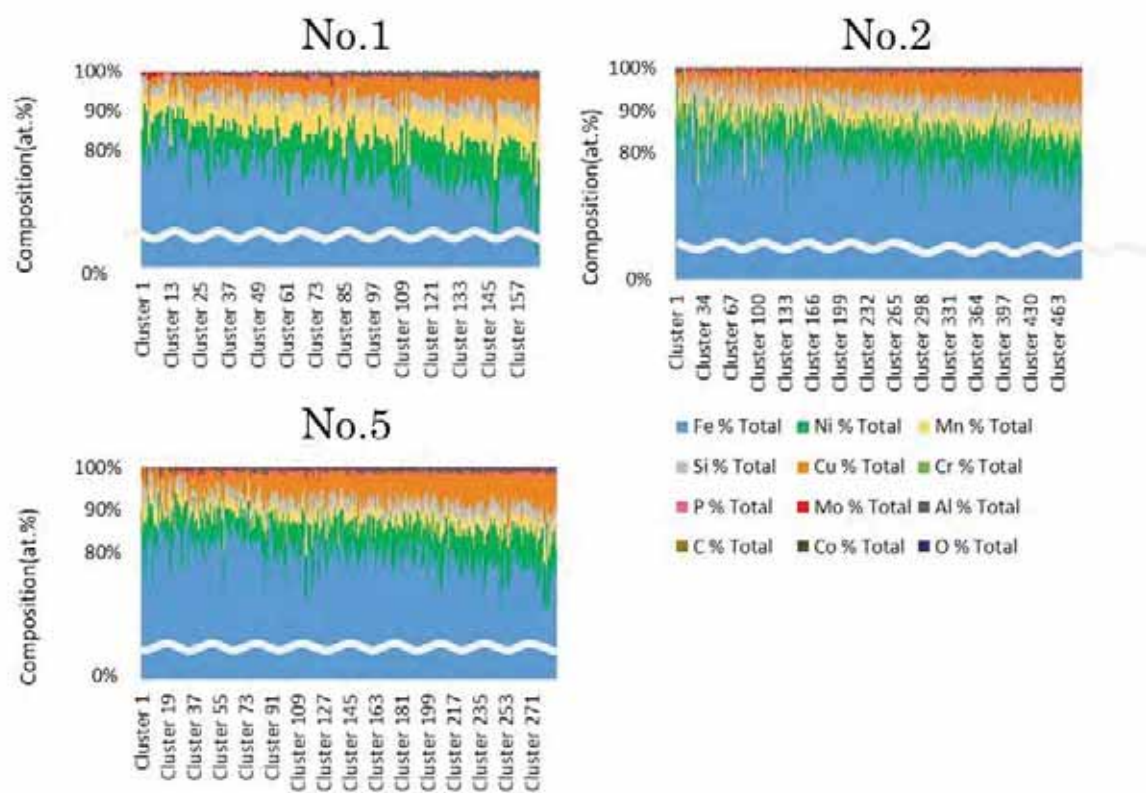


図 3.2.2.2-49 高 Cu 材における溶質原子クラスターの化学組成(at%)

⑧ クラスターの化学組成のばらつきについて

クラスター半径ヒストグラムとクラスター組成のグラフから低 Cu 材、中 Cu 材における形状のばらつきを考察した。図 3.2.2.2-50 から図 3.2.2.2-56 に半径 2nm 以上、2nm 以下の組成図と平均組成の比較を示す。3 つの試料すべてにおいて半径 2nm 以上は組成のばらつきが少なく、逆に半径 2nm 以下は組成のばらつきがある。これは APT で測定したことによる分解能の差と考えられる。

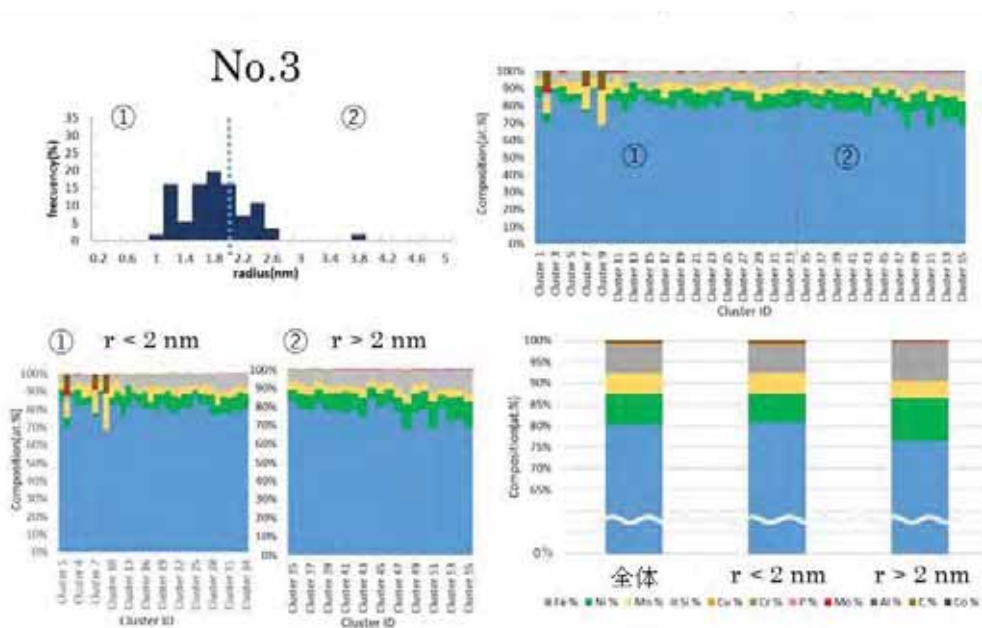


図 3.2.2.2-50 溶質原子クラスターの半径ヒストグラムと組成比較(サンプル No.3)

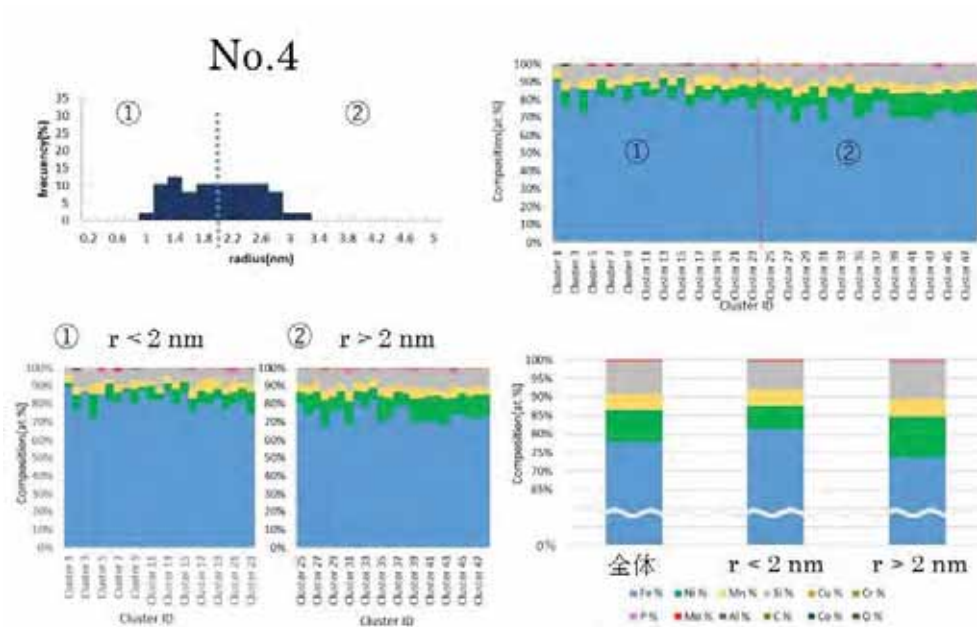


図 3.2.2-51 溶質原子クラスタの半径ヒストグラムと組成比較(サンプル No.4)

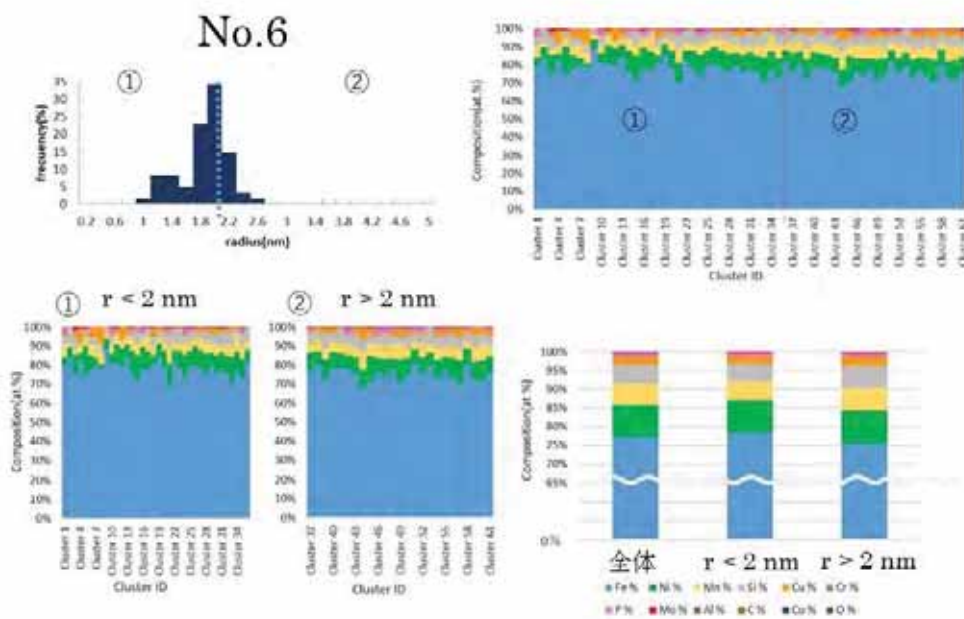


図 3.2.2-52 溶質原子クラスタの半径ヒストグラムと組成比較(サンプル No.6)

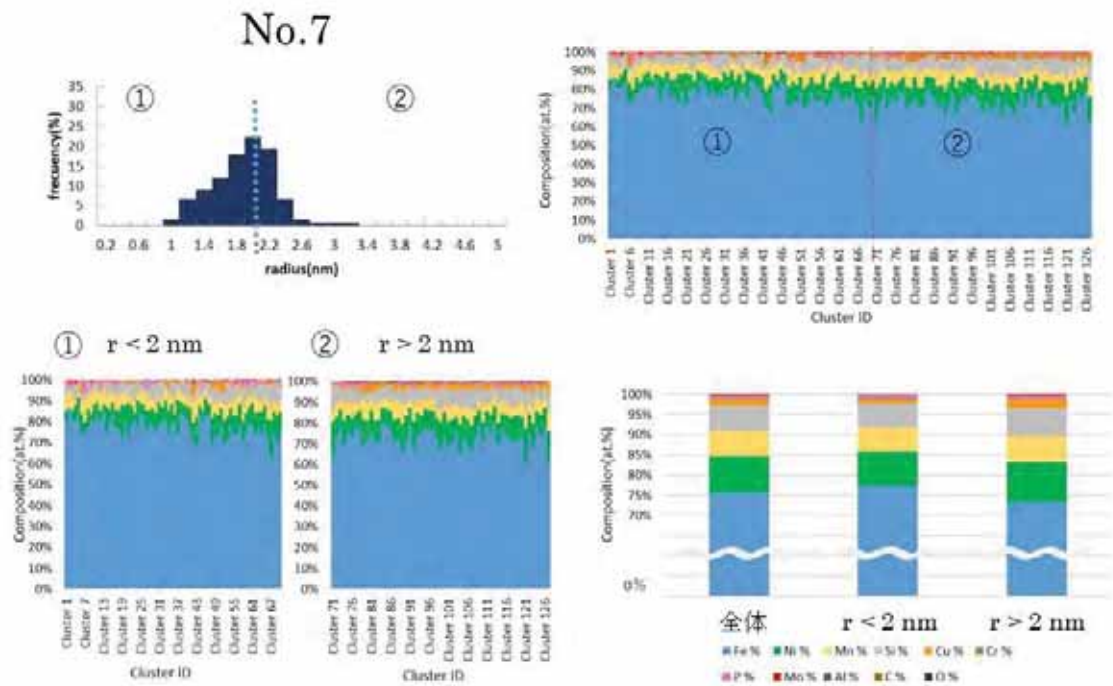


図 3.2.2-53 溶質原子クラスタの半径ヒストグラムと組成比較(サンプル No.7)

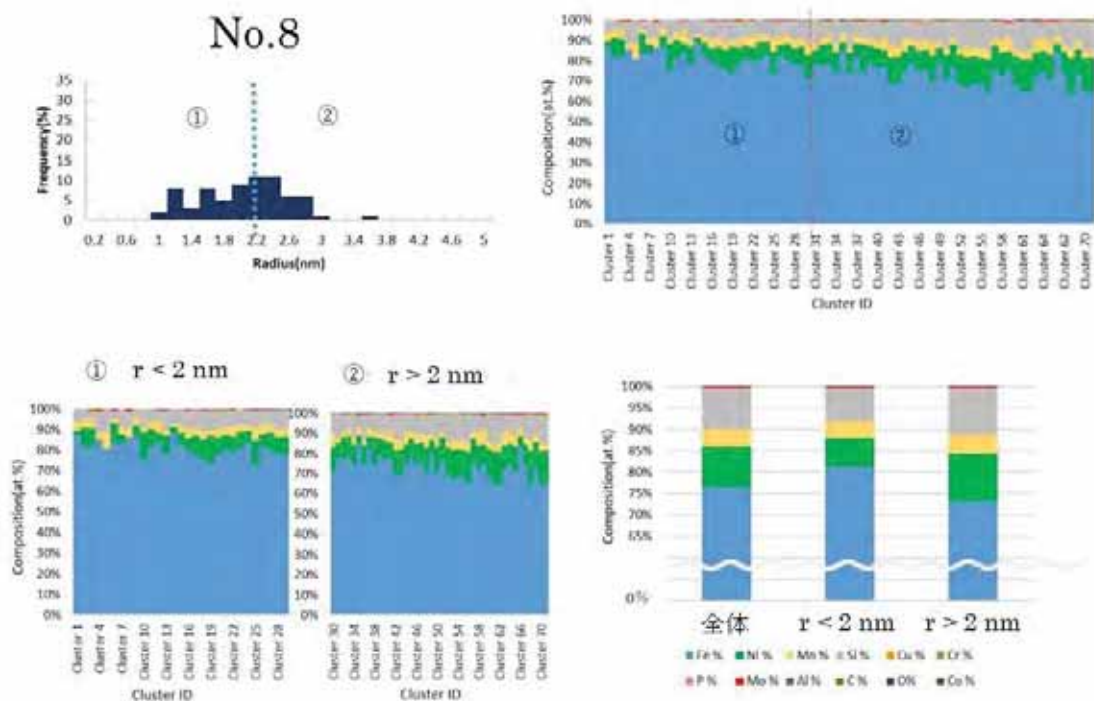


図 3.2.2-54 溶質原子クラスタの半径ヒストグラムと組成比較(サンプル No.8)

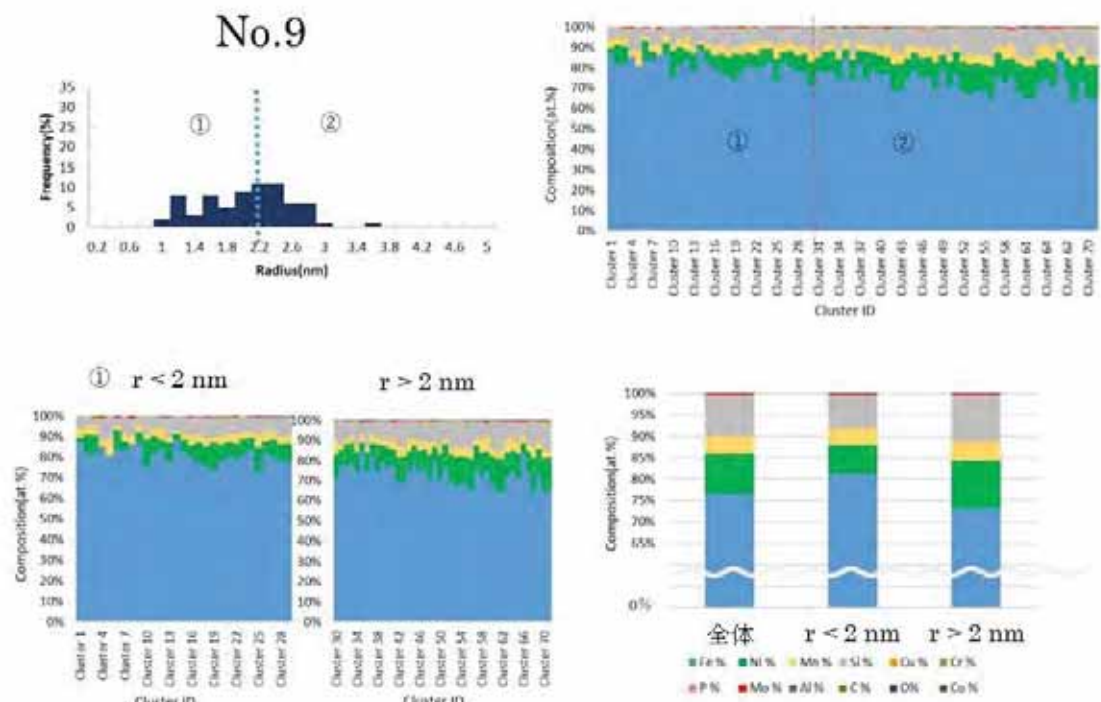


図 3.2.2-55 溶質原子クラスタの半径ヒストグラムと組成比較(サンプル No.9)

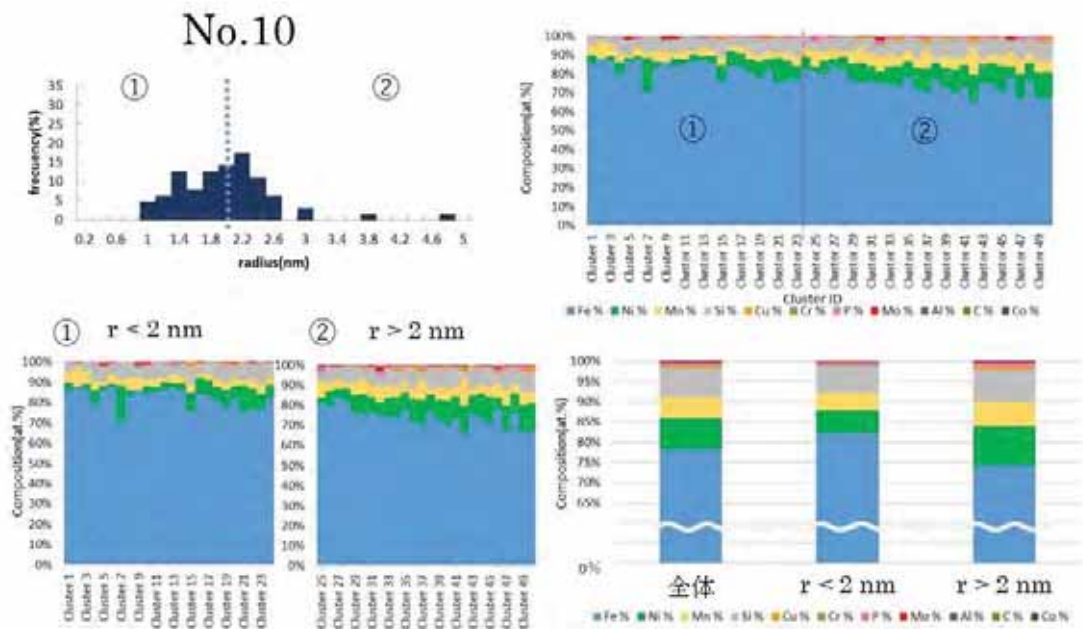


図 3.2.2-56 溶質原子クラスタの半径ヒストグラムと組成比較(サンプル No.10)

⑨ 低 Cu 材、中 Cu 材、高 Cu 材におけるクラスター半径と組成の関係

図 3.2.2.2-57 に低 Cu 材の、図 3.2.2.2-58 に中 Cu 材の、図 3.2.2.2-59 に高 Cu 材のクラスター半径と組成の関係を示す。この結果から、Cu 含有量やクラスター半径によらず、クラスター内では Ni 濃度が最も高くなっていることがわかる。また、Si 濃度について見ると、低 Cu 材では Ni 濃度と同程度に高いが、中 Cu 材では Mn 濃度と同程度、高 Cu 材では Mn 濃度より低くなっていることがわかる。

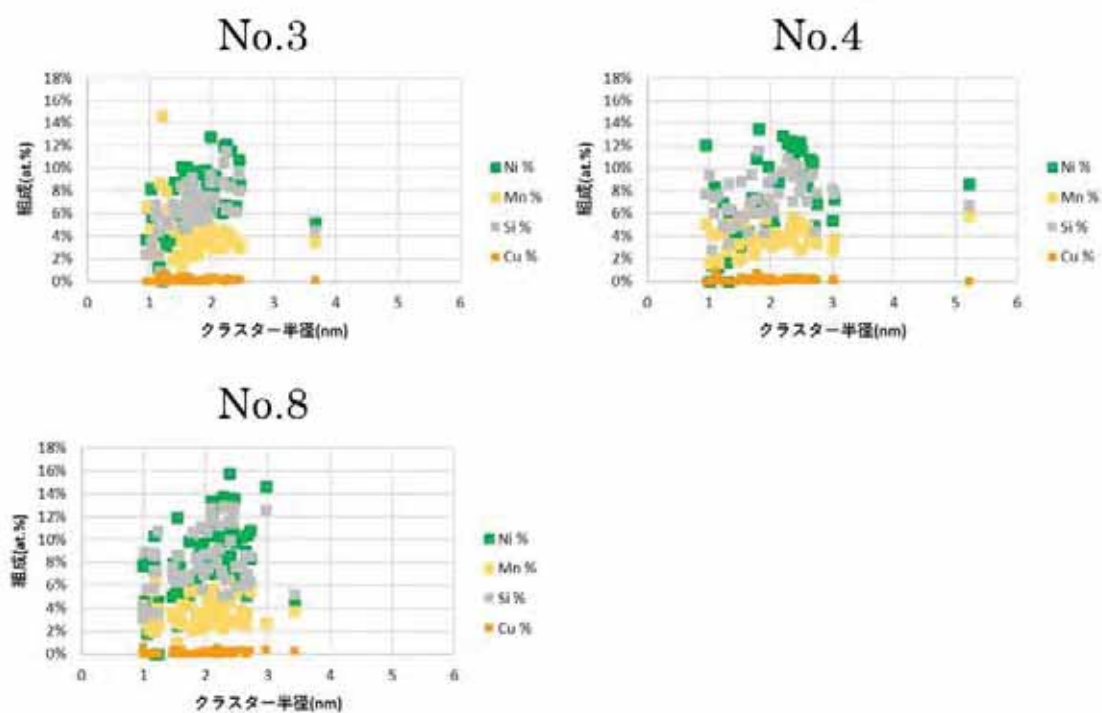


図 3.2.2.2-57 クラスタ半径と組成の関係(低 Cu 材)

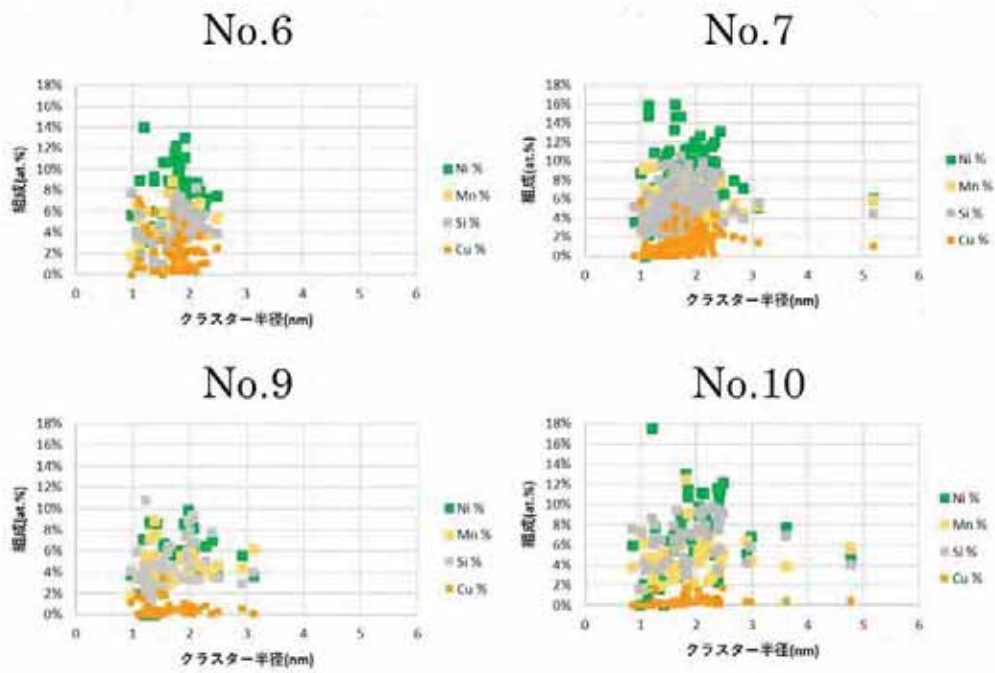


図 3.2.2.2-58 クラスタ半径と組成の関係(中 Cu 材)

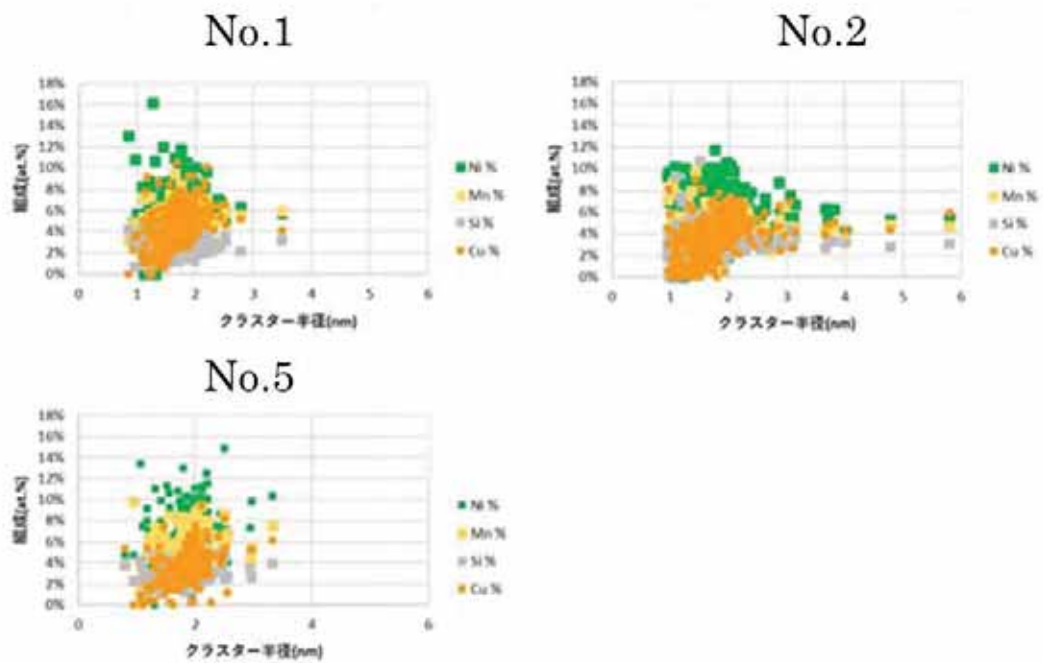


図 3.2.2.2-59 クラスタ半径と組成の関係(高 Cu 材)

⑩ クラスタの平均組成のバルク Si 濃度、Cu 濃度に対する変化

クラスタ組成のバルク Si 濃度、Cu 濃度(公称値 wt%)に対する変化を考察した。図 3.2.2.2-60 は各サンプルのクラスタの平均組成を、バルク Si 濃度及びバルク Cu 濃度に対して昇順に並べたものである。参考として、各サンプルのバルク Si 濃度及び Cu 濃度を表 3.2.2.2-14 に示す。

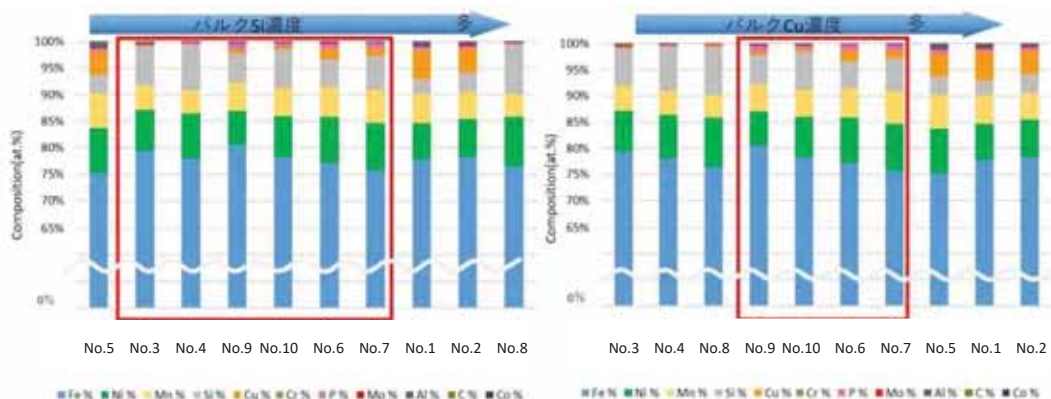


図 3.2.2.2-60 クラスタの平均組成のバルク Si 濃度及びバルク Cu 濃度に対する変化

表 3.2.2.2-14 各サンプルのバルク Si 濃度及び Cu 濃度
(Si 濃度または Cu 濃度に対して昇順に整理)

	Siバルク wt.%	Cuバルク wt.%		Cuバルク wt.%	Siバルク wt.%
No.5	0.2	0.13	No.3	0.03	0.23
No.3	0.23	0.03	No.4	0.03	0.23
No.4	0.23	0.03	No.8	0.37	0.31
No.9	0.23	0.05	No.9	0.05	0.23
No.10	0.23	0.05	No.10	0.05	0.23
No.6	0.25	0.068	No.6	0.068	0.25
No.7	0.25	0.068	No.7	0.068	0.25
No.1	0.29	0.16	No.5	0.13	0.2
No.2	0.29	0.16	No.1	0.16	0.29
No.8	0.31	0.037	No.2	0.16	0.29

⑪ バルク Cu 濃度及び母相 Cu 濃度とクラスタの各パラメータ、組成との関係

ここで、各サンプルの化学組成の公称値であるバルク濃度とは別に、APT 分析によって得られた測定領域全体の平均濃度を母相濃度と定義する。母相濃度では分析対象としていない炭化物や粒界等の領域は除かれるため、母相濃度はクラスタ近傍の化学組成をより正確に表現しているものと考えられる。そこで本研究では、化学組成とクラスタとの関係を調べるにあたり、バルク濃度だけではなく母相濃度にも着目して結果の考察を行った。

図 3.2.2.2-61 にバルク Cu 濃度及び母相 Cu 濃度と ΔRT_{NDT} 、クラスタ数密度、体積率、直径との関係を示す。参考としてバルク Cu 濃度及び母相 Cu 濃度と照射量との関係についても示す。この結果から、 ΔRT_{NDT} やクラスタ数密度はバルク Cu 濃度よりも母相 Cu 濃度の方が良い相関を示していることが分かる。また、Cu 濃度が高いほどクラスタ数密度が大きくなっている。

図 3.2.2.2-62 はバルク Cu 濃度、母相 Cu 濃度とクラスタ中の各元素の平均濃度との関係を示したものである。母相 Cu 濃度とクラスタ中 Mn、Cu、P、濃度との間には正の相関があり、クラスタ中 Si 濃度とは負の相関があることがわかる。クラスタ中の Cu 濃度と Si 濃度の和はおおよそ一定となった。

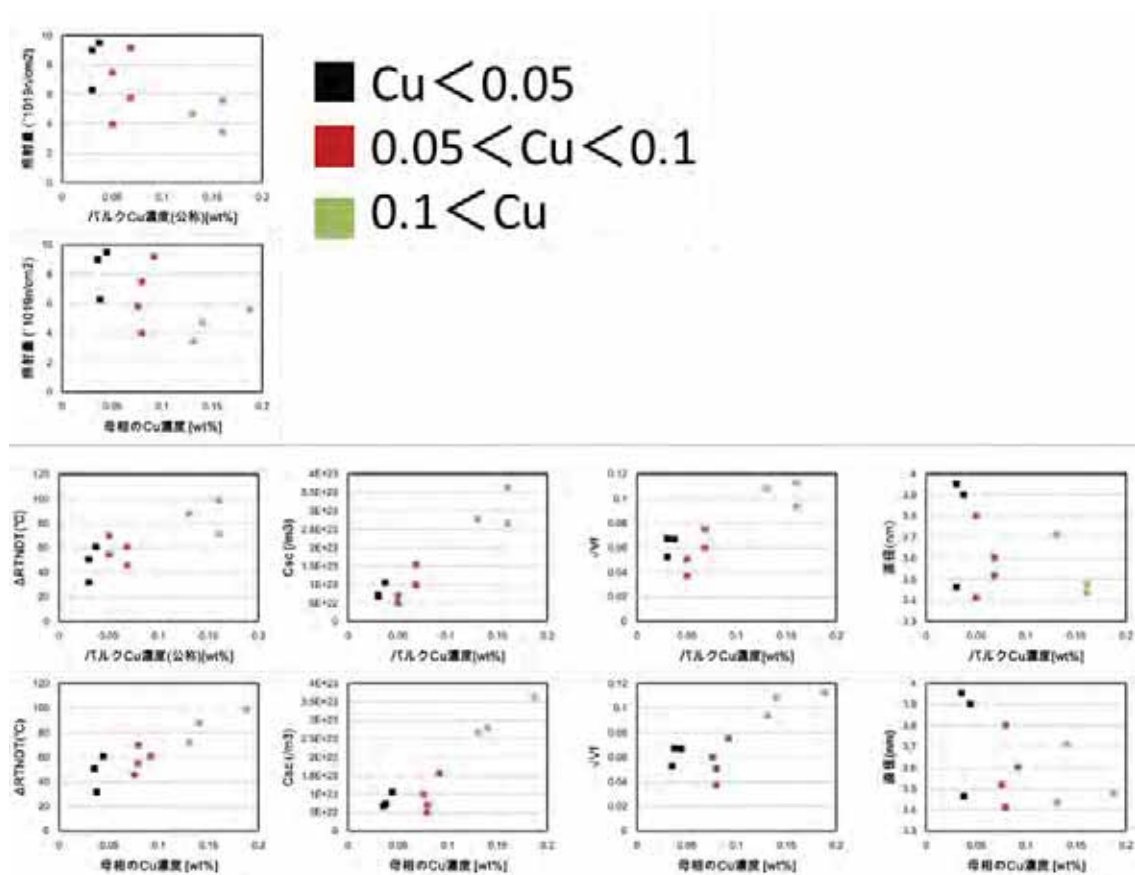


図 3.2.2.2-61 バルク Cu 濃度及び母相の Cu 濃度とクラスタの各パラメータとの関係

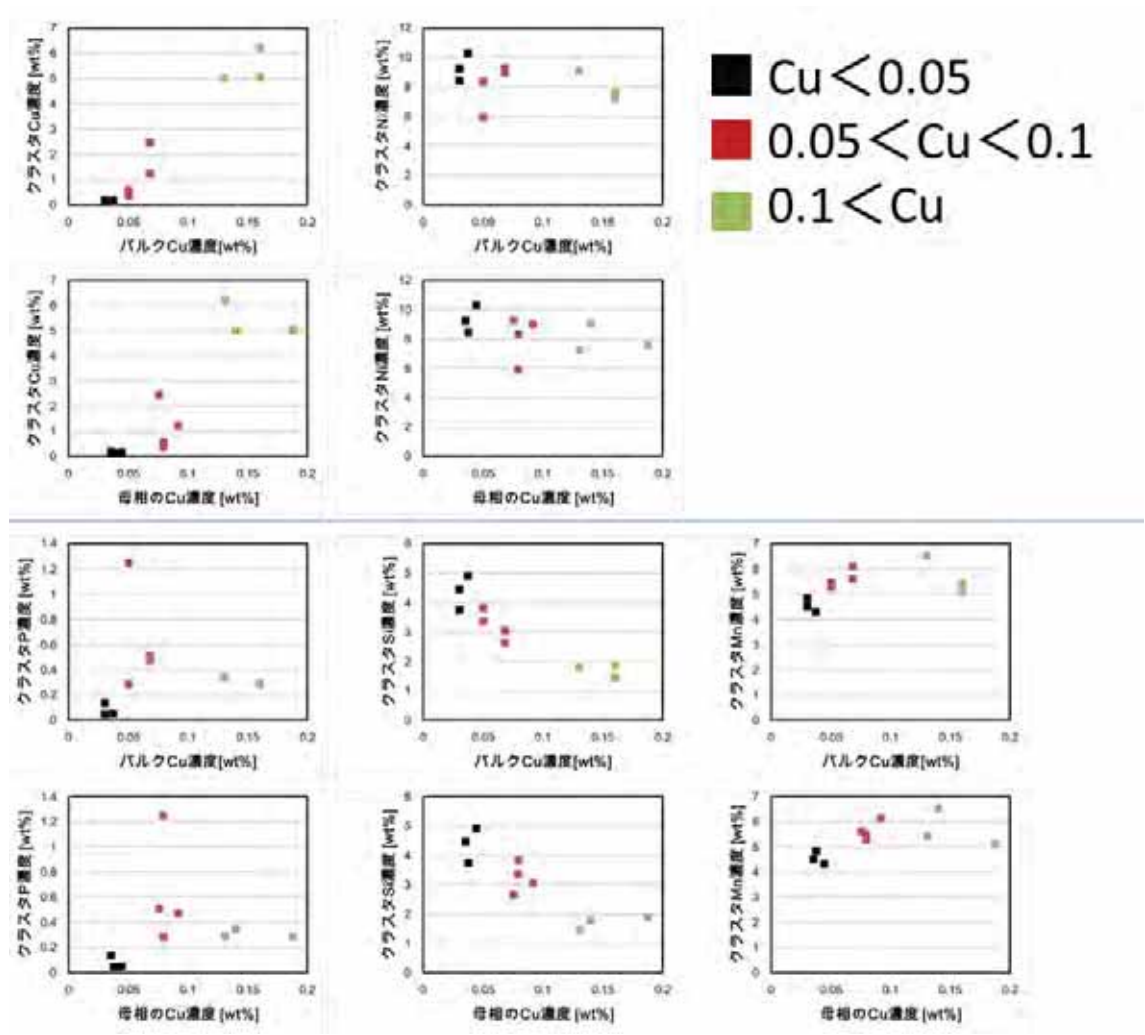


図 3.2.2.2-62 バルク Cu 濃度及び母相の Cu 濃度とクラスタ中の各元素濃度の関係

⑫ バルク Si 濃度及び母相 Si 濃度とクラスタの各パラメータ、組成との関係

図 3.2.2.2-63 にバルク Si 濃度および母相 Si 濃度と照射量、 ΔRT_{NDT} 、クラスタの数密度、体積率、直径との関係を示す。この結果から、 ΔRT_{NDT} 、クラスタ数密度、体積率は母相 Si 濃度の方が良い相関を示している。Si 濃度が高いほどクラスタ数密度が大きい傾向にある。ただし、Cu 濃度や照射量の影響もあるため、より詳細な評価が必要である。

図 3.2.2.2-64 にバルク Si および母相 Si 濃度のクラスタ中の各元素濃度との関係を示す。母相の Si 濃度とクラスタ中の各元素濃度の間には顕著な相関は見られない。

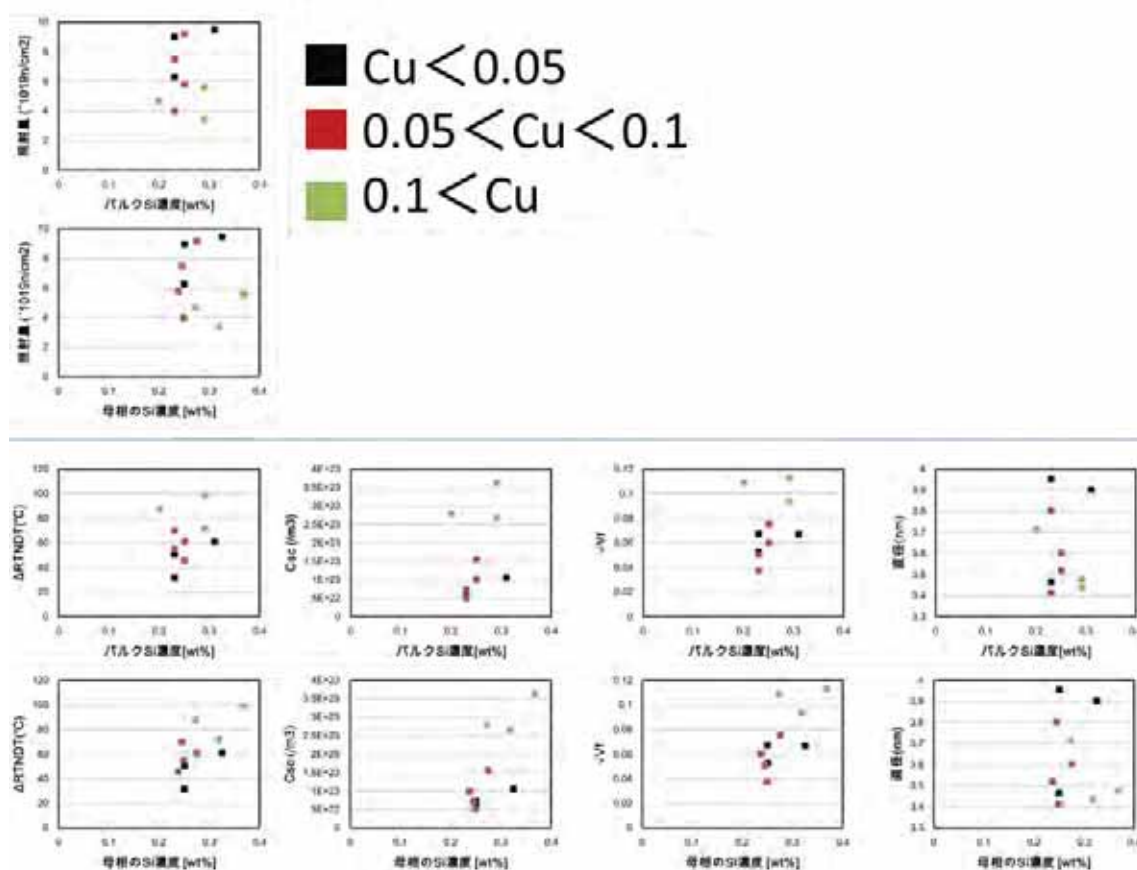


図 3.2.2.2-63 バルク Si 濃度及び母相の Si 濃度とクラスタの各パラメータとの関係

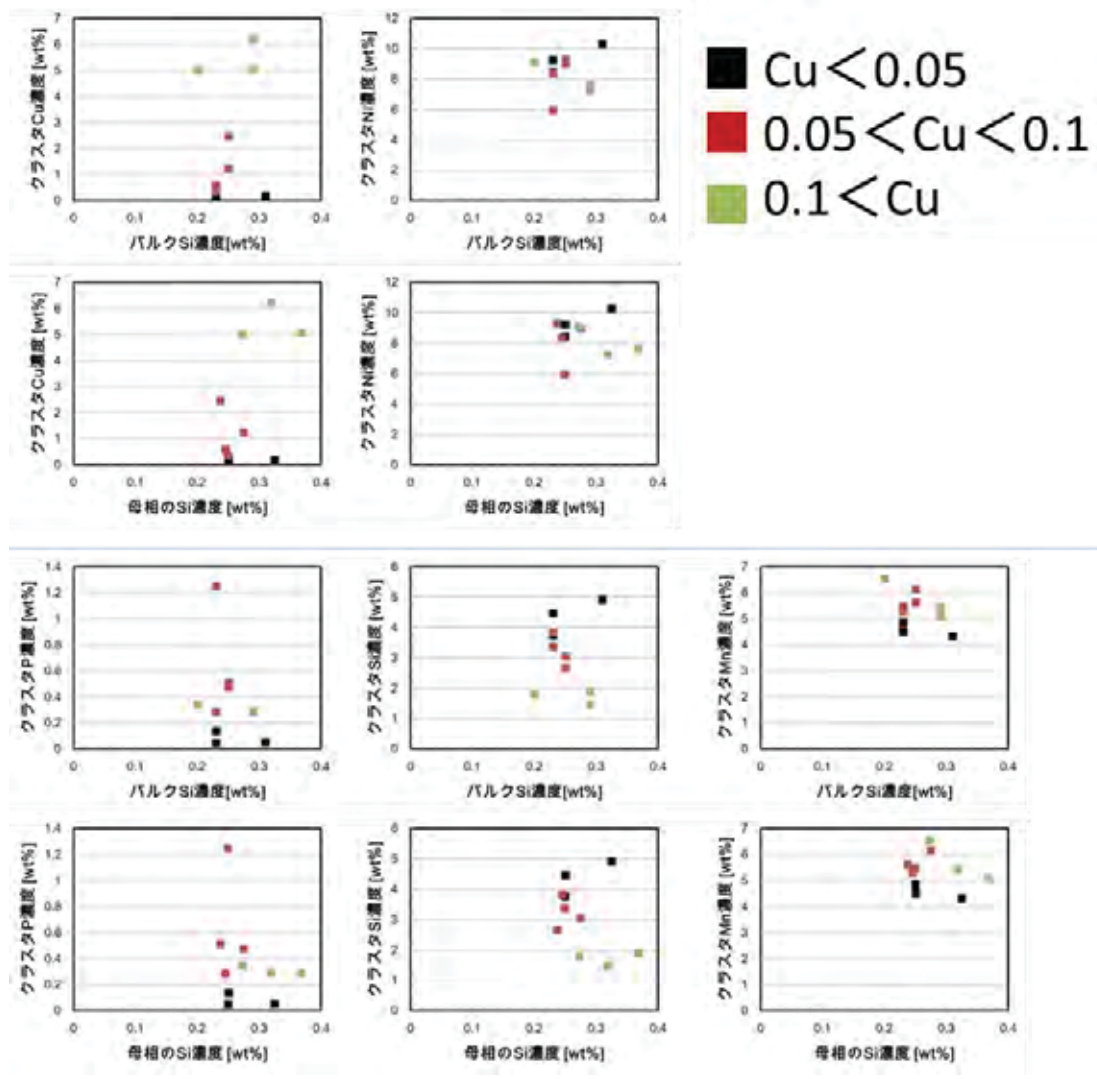


図 3.2.2.2-64 バルク Si 濃度及び母相の Si 濃度とクラスタ中の各元素濃度の関係

⑬ マトリックス濃度のバルク Si 濃度、Cu 濃度に対する変化

図 3.2.2.2-65 にマトリックス(測定領域全体からクラスタの領域を除いた残りの領域)中の各元素の濃度(at%)のバルク Si 濃度及びバルク Cu 濃度に対する変化を示す。バルク Si 濃度の増加に伴い、マトリックス中の Si の濃度も高くなる傾向があった。

図 3.2.2.2-66 にバルク及び母相 Cu 濃度とマトリックス中の各元素の濃度との関係を示す。マトリックス中の Cu、P 濃度とバルク及び母相の Cu 濃度には正の関係があることがわかる。

図 3.2.2.2-67 にバルク及び母相 Si 濃度とマトリックス中の各元素の濃度の関係を示す。母相 Si 濃度とマトリックス Mn 濃度の間には負の相関があり、マトリックス Si、Cu 濃度とは正の相関があることがわかった。

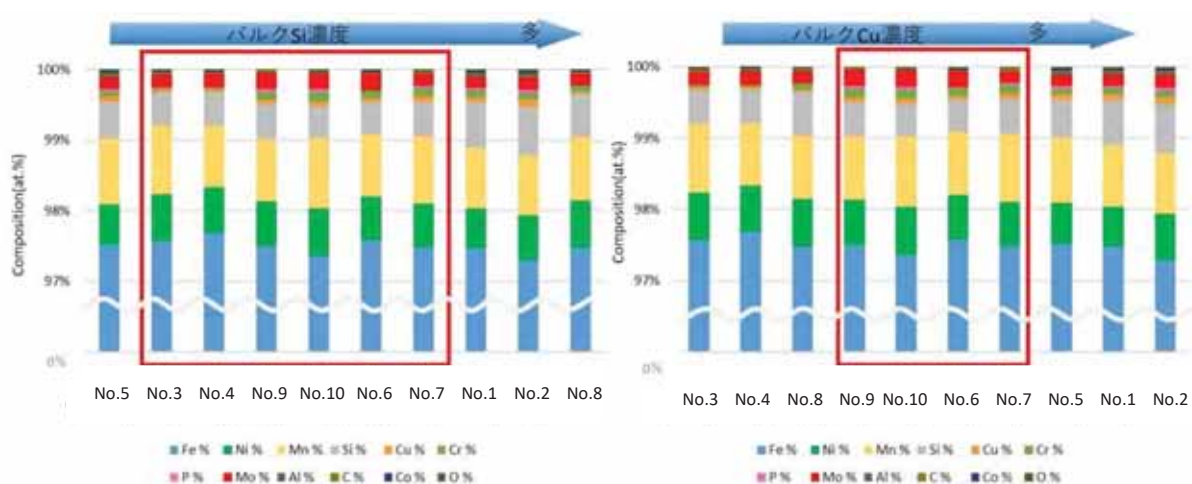


図 3.2.2.2-65 マトリックス濃度のバルク Si 濃度及びバルク Cu 濃度に対する変化

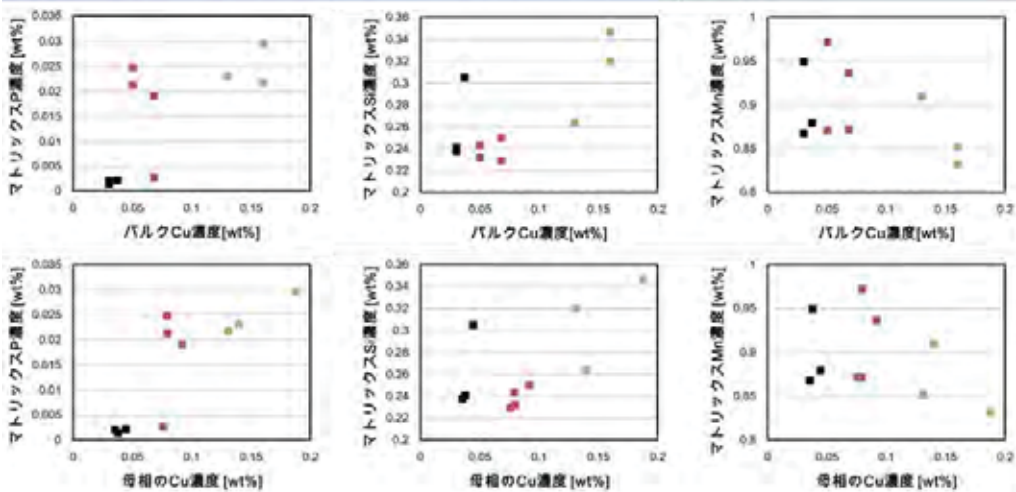
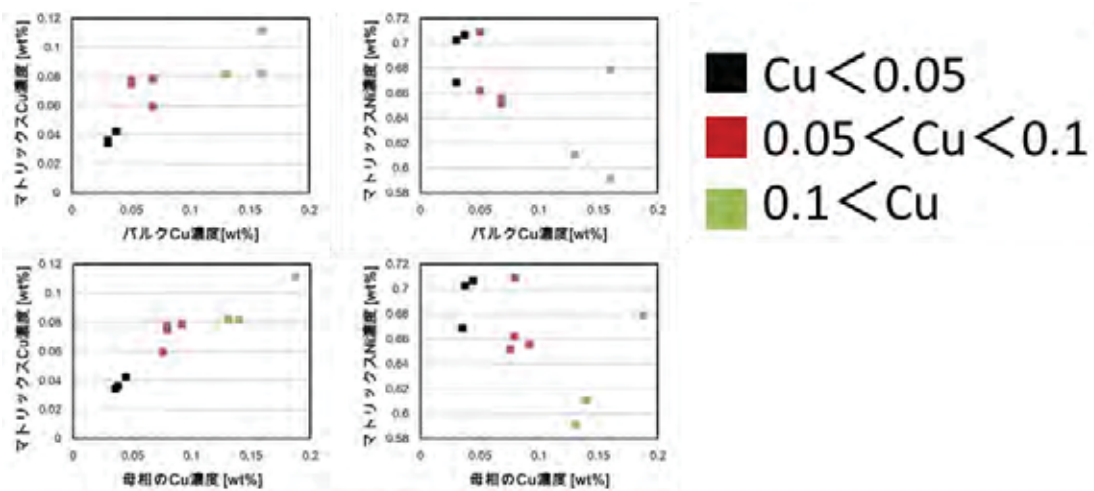


図 3.2.2.2-66 Cu 濃度とマトリックス中の各元素の濃度の関係

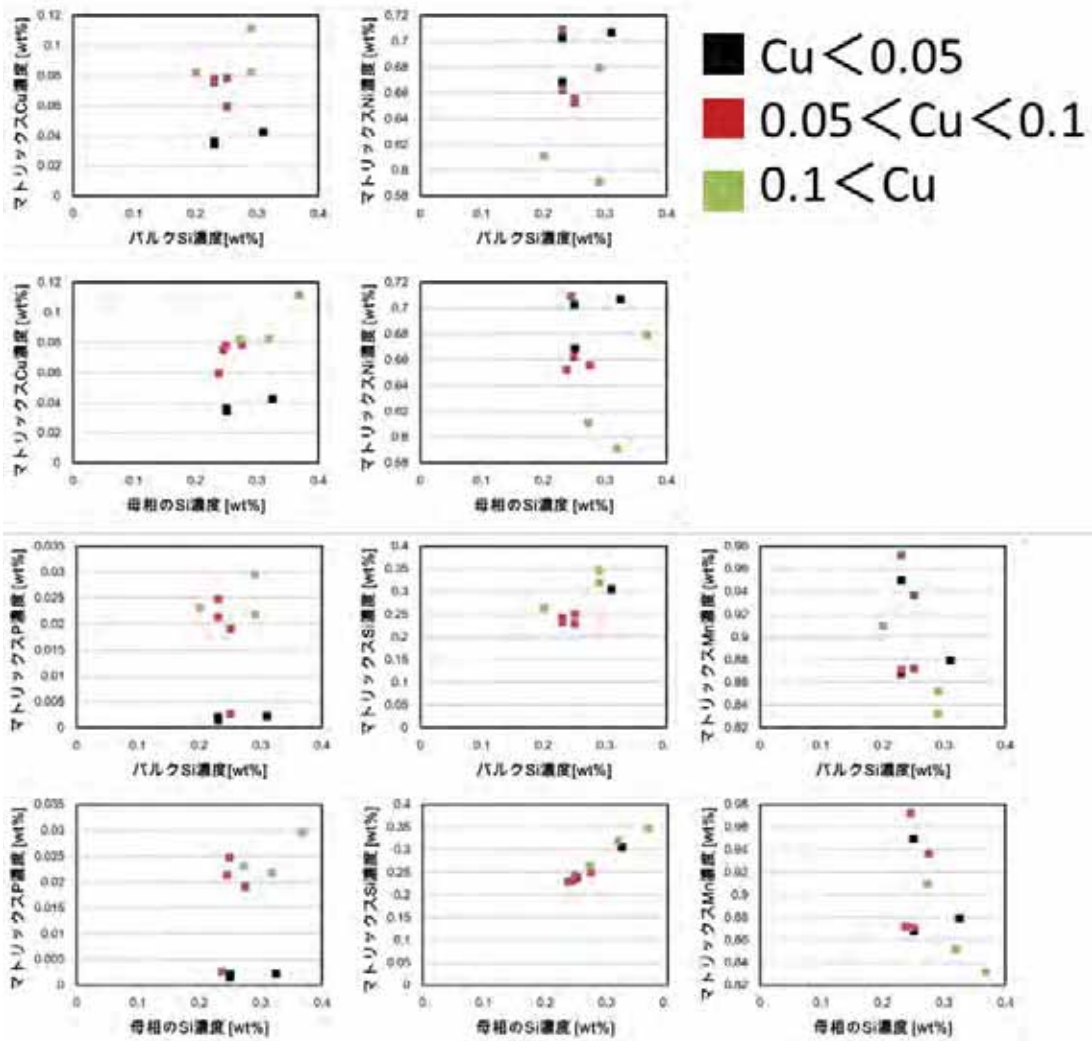


図 3.2.2-67 Si 濃度とマトリックス中の各元素の濃度の関係

⑭ APTによるバルク元素濃度の評価

母相濃度(APT 測定値)とバルク濃度(公称値)について、各元素に対して整理した結果を表 3.2.2.2-15 及び図 3.2.2.2-68 に示す。バルク Cu 濃度と母相 Cu 濃度には系統的な差は見られず、母相濃度とバルク濃度との間にはほぼ 1 : 1 の関係があった。母相 Mn 濃度はバルク Mn 濃度に比べて系統的に低くなる傾向があった。炭化物など析出物形成の影響によるものと考えられる。Si については、母相濃度がバルク濃度に比べ高くなる傾向があり、特に高 Cu 材で顕著だった。母相 Ni 濃度もバルク Ni 濃度に比べて高くなる傾向があった。P については、バルク濃度に比べ母相の濃度が高くなる傾向があったが、母相濃度の方が低くなるサンプルもあった。APT の検出感度も影響するため、P について系統的な差を議論することは難しい。

表 3.2.2.2-15 各サンプルの母相濃度(APT 測定値)とバルク濃度(公称値)

サンプル No.		Cu(wt%)	Ni(wt%)	P(wt%)	Si(wt%)	Mn(wt%)
1	母相濃度	0.11	0.60	0.007	0.34	0.93
	バルク濃度	0.16	0.61	0.010	0.29	1.41
2	母相濃度	0.12	0.63	0.007	0.36	0.90
	バルク濃度	0.16	0.61	0.010	0.29	1.41
3	母相濃度	0.01	0.51	0.001	0.29	0.99
	バルク濃度	0.03	0.57	0.007	0.23	1.39
4	母相濃度	0.01	0.52	0.002	0.27	0.91
	バルク濃度	0.03	0.57	0.007	0.23	1.39
5	母相濃度	0.19	0.65	0.008	0.28	1.00
	バルク濃度	0.13	0.58	0.014	0.20	1.45
6	母相濃度	0.04	0.49	0.003	0.27	0.98
	バルク濃度	0.07	0.59	0.009	0.25	1.35
7	母相濃度	0.06	0.53	0.006	0.30	0.97
	バルク濃度	0.07	0.59	0.009	0.25	1.35
8	母相濃度	0.04	0.75	0.003	0.32	0.90
	バルク濃度	0.04	0.62	0.003	0.31	1.50
9	母相濃度	0.03	0.59	0.004	0.28	0.83
	バルク濃度	0.05	0.62	0.007	0.23	1.38
10	母相濃度	0.03	0.51	0.004	0.24	0.99
	バルク濃度	0.05	0.62	0.007	0.23	1.38

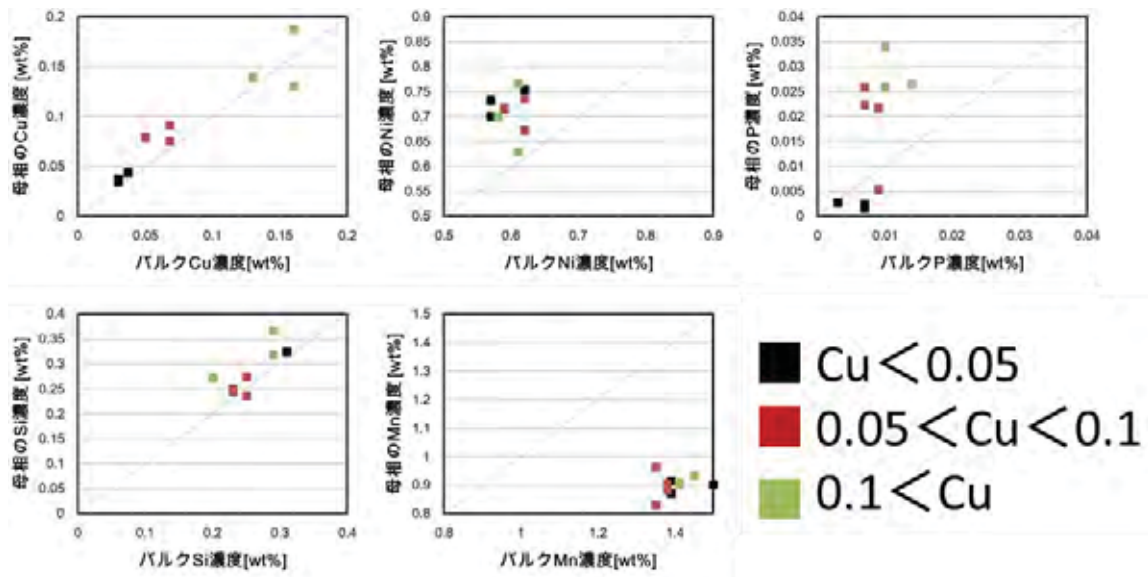


図 3.2.2.2-68 母相濃度(APT 測定値)とバルク濃度(公称値)との比較

⑮ クラスタ中の各元素の原子数の照射量依存性

同一組成の材料で照射量の異なるサンプル(No.1 と 2、No.3 と 4、No.6 と 7、No.9 と 10)について、照射に伴うクラスタ中の各元素の平均原子数の変化を図 3.2.2.2-69 に示す。クラスタ中の Ni、Si、(及び Mn)の原子数は、照射量の増加と共に増加した。一方、クラスタ中の Cu 原子数は、照射量の増加によってほとんど変化しなかった。この傾向は高 Cu 材、低 Cu 材ともに見られた。また、高 Cu 材ほど、クラスタ中の Cu 原子数が多く、Si 原子数が少ないことがわかった。

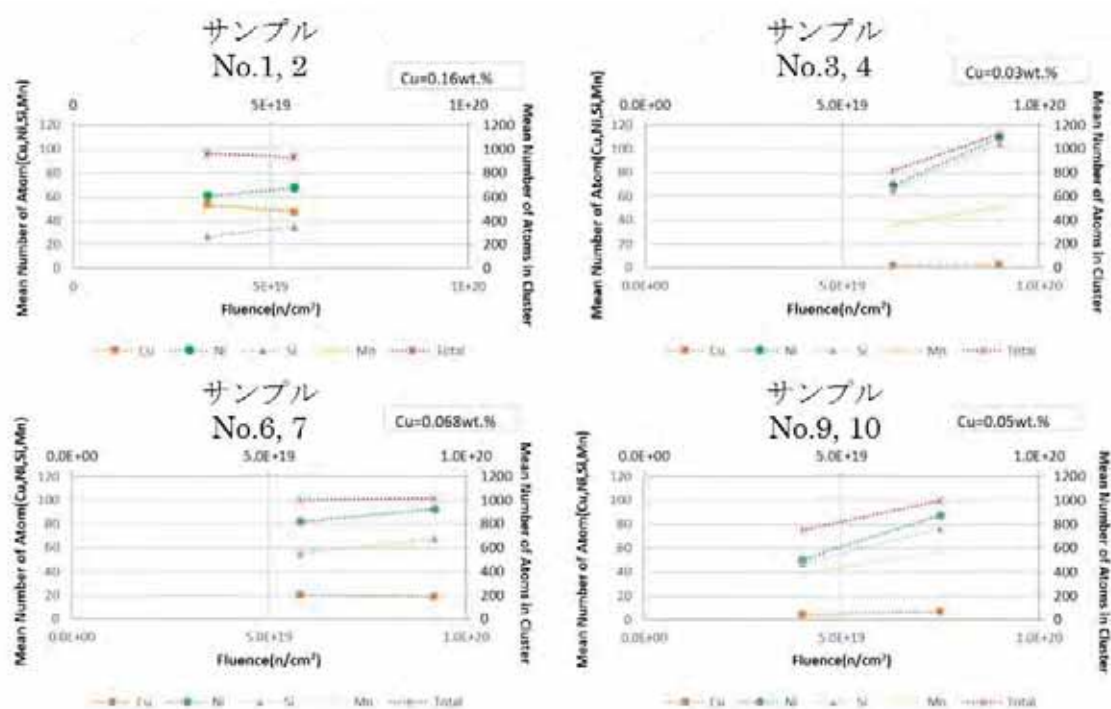


図 3.2.2.2-69 溶質原子クラスタの各元素の原子数の照射量に対する変化

⑩ 低 Cu 材、中 Cu 材、高 Cu 材におけるクラスタへの溶質原子の集積

クラスタ中の溶質原子の集積について調べるため、各元素のクラスタ中の原子数をクラスタ中の総コア原子数に対してプロットした。低 Cu 材の結果を図 3.2.2.2-70 に、中 Cu 材の結果を図 3.2.2.2-71 に、高 Cu 材の結果を図 3.2.2.2-72 に示す。上述のように、高 Cu 材ほどクラスタ中の Si の量が少なくなっていることがわかる。また、各元素の原子数はクラスタ中の総コア原子数の増加に伴いほぼ線形に変化していることもわかる。

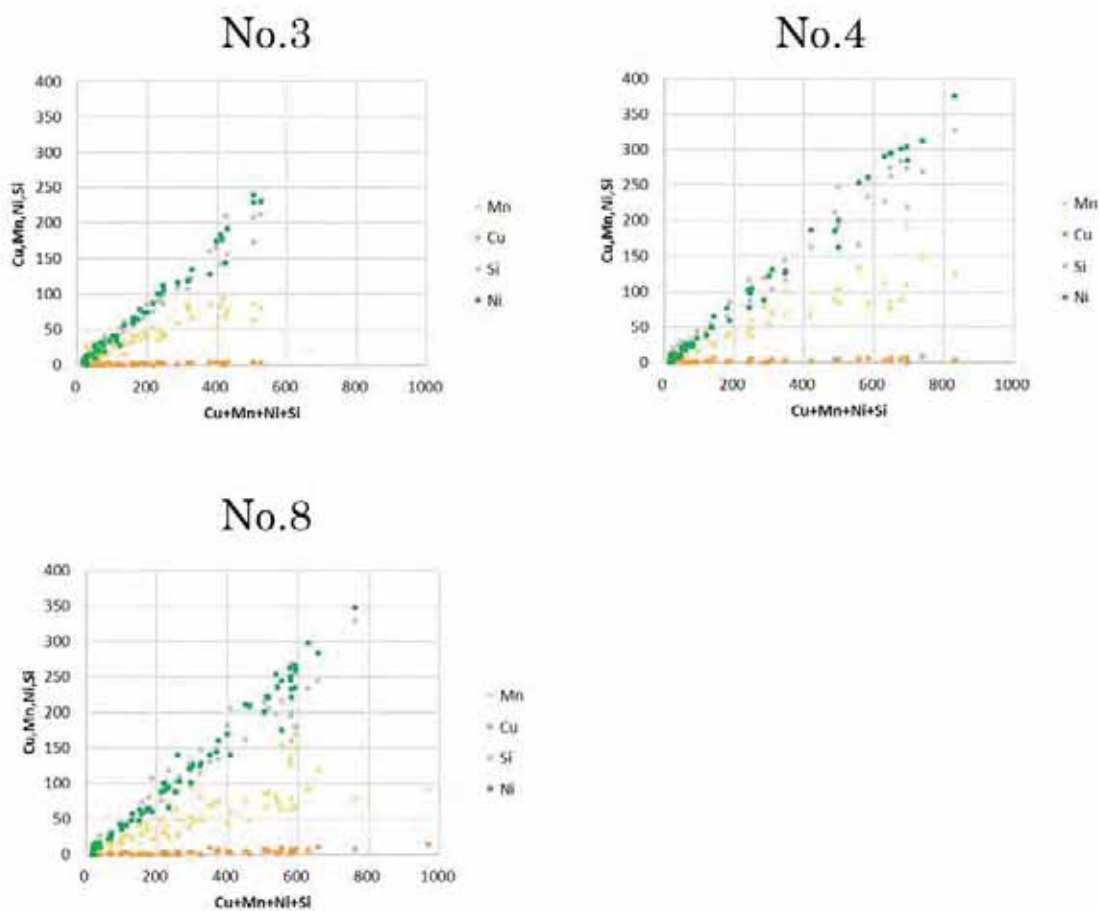


図 3.2.2.2-70 クラスタへの溶質原子の集積(低 Cu 材)

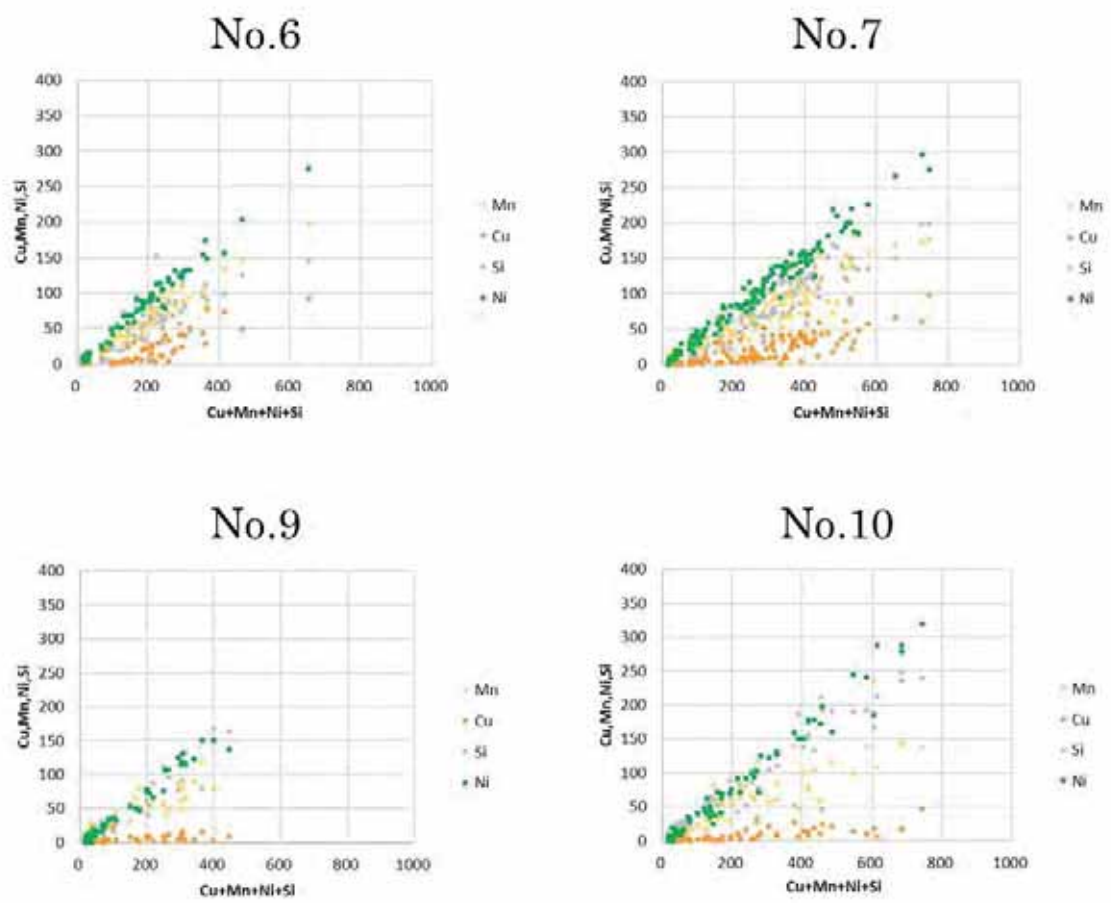


図 3.2.2.2-71 クラスタへの溶質原子の集積(中 Cu 材)

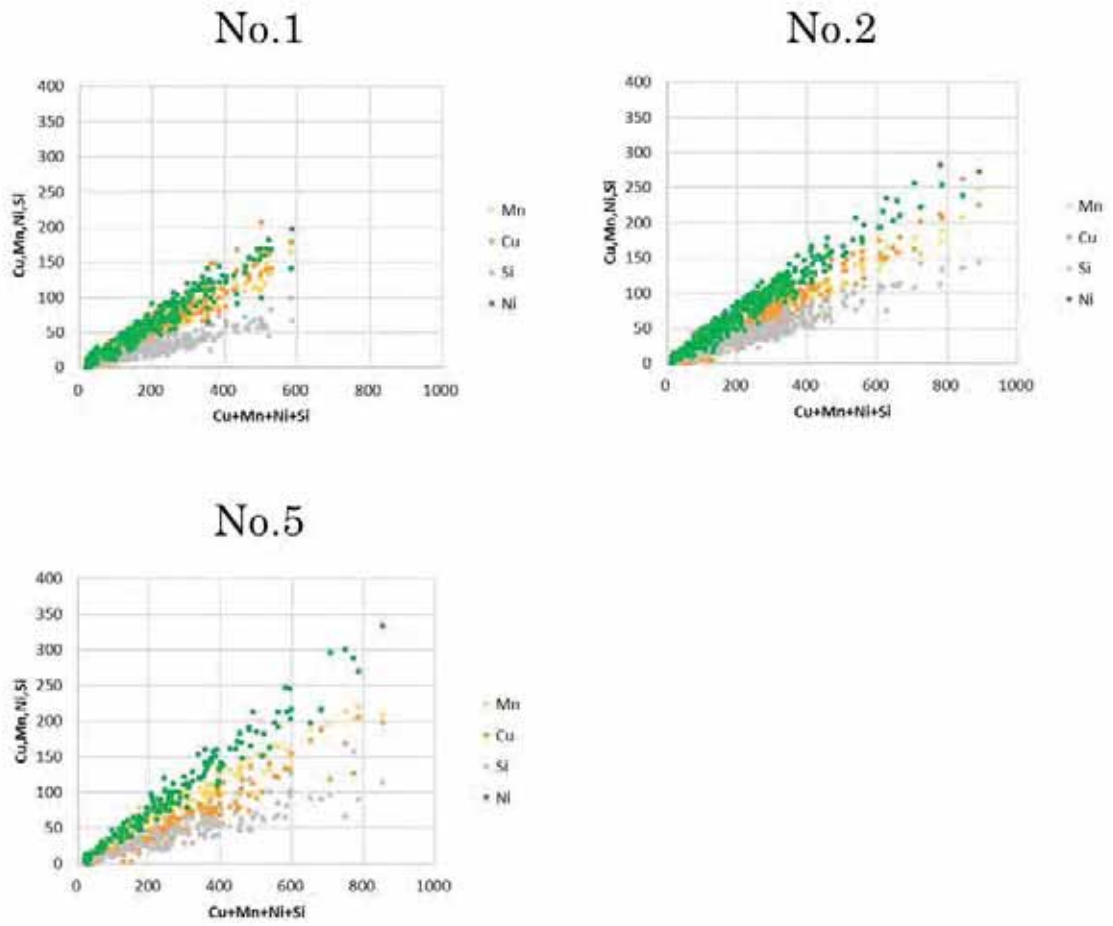


図 3.2.2.2-72 クラスタへの溶質原子の集積(高 Cu 材)

図 3.2.2.2-73 – 図 3.2.2.2-76 は図 3.2.2.2-70 – 図 3.2.2.2-72 の結果を元素毎に分けてプロットし直したものである。総コア原子数の増加に伴う各元素の原子数の変化を一次関数でフィッティングした結果もあわせて示す。高 Cu 材ほど Si についての傾きは小さくなり、Cu についての傾きは大きくなる傾向が示された。

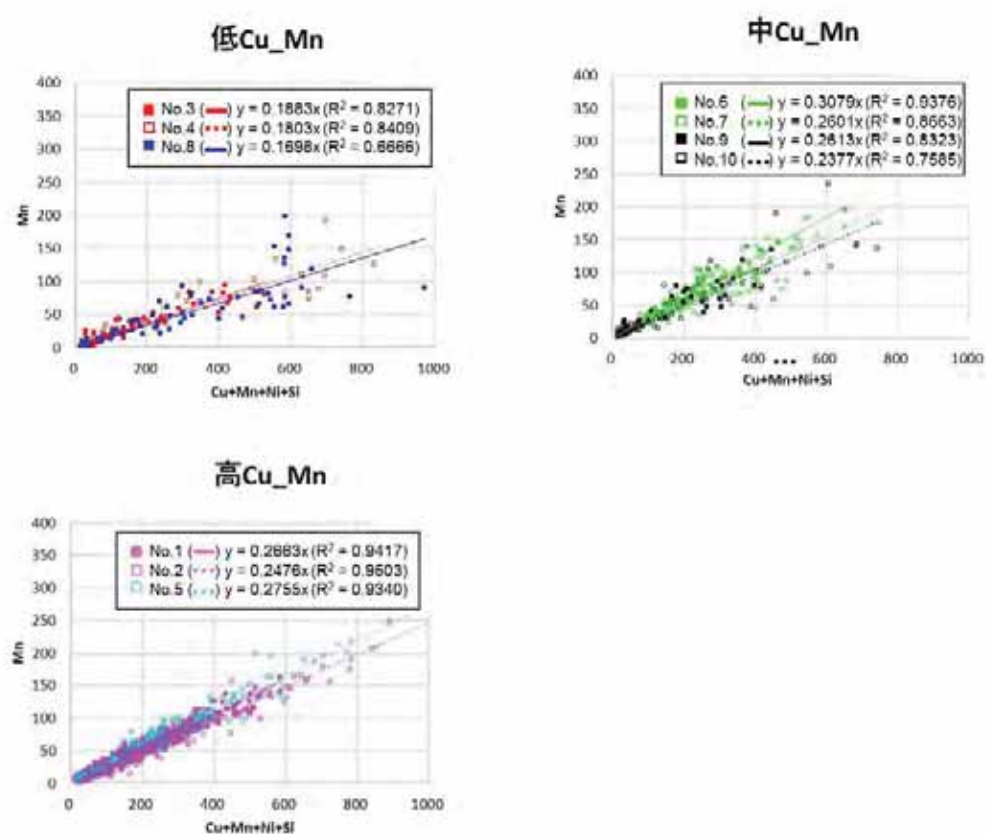


図 3.2.2.2-73 クラスタへの溶質原子の集積(Mn)

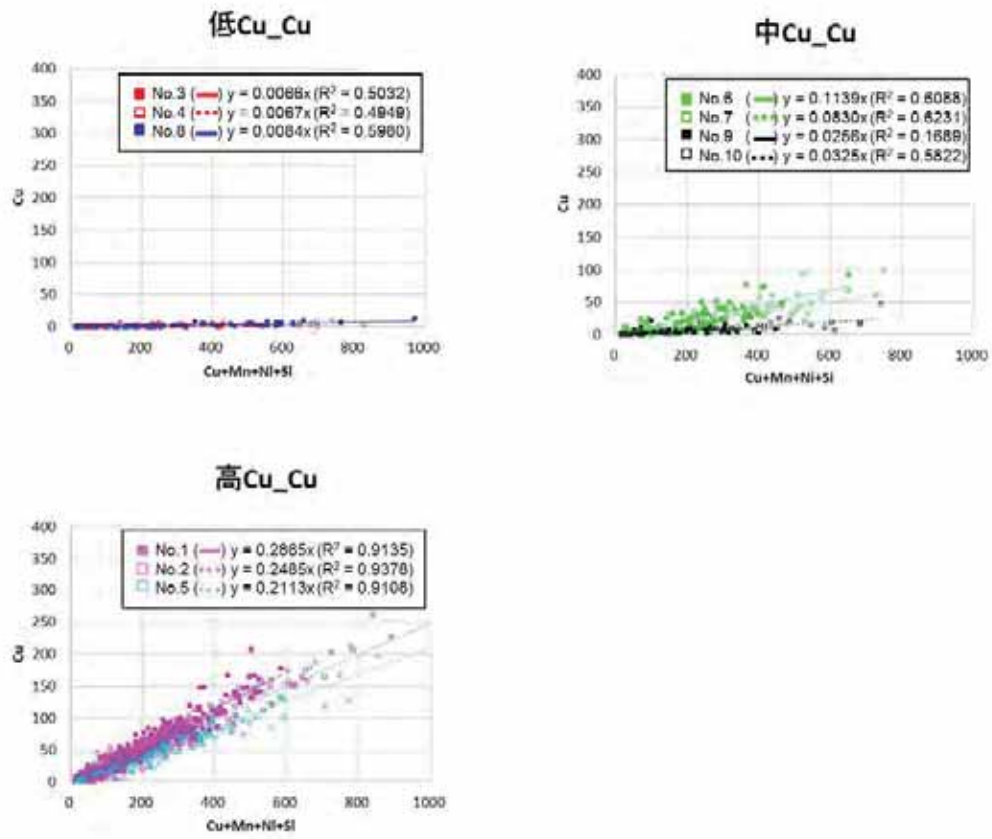


図 3.2.2.2-74 クラスターへの溶質原子の集積(Cu)

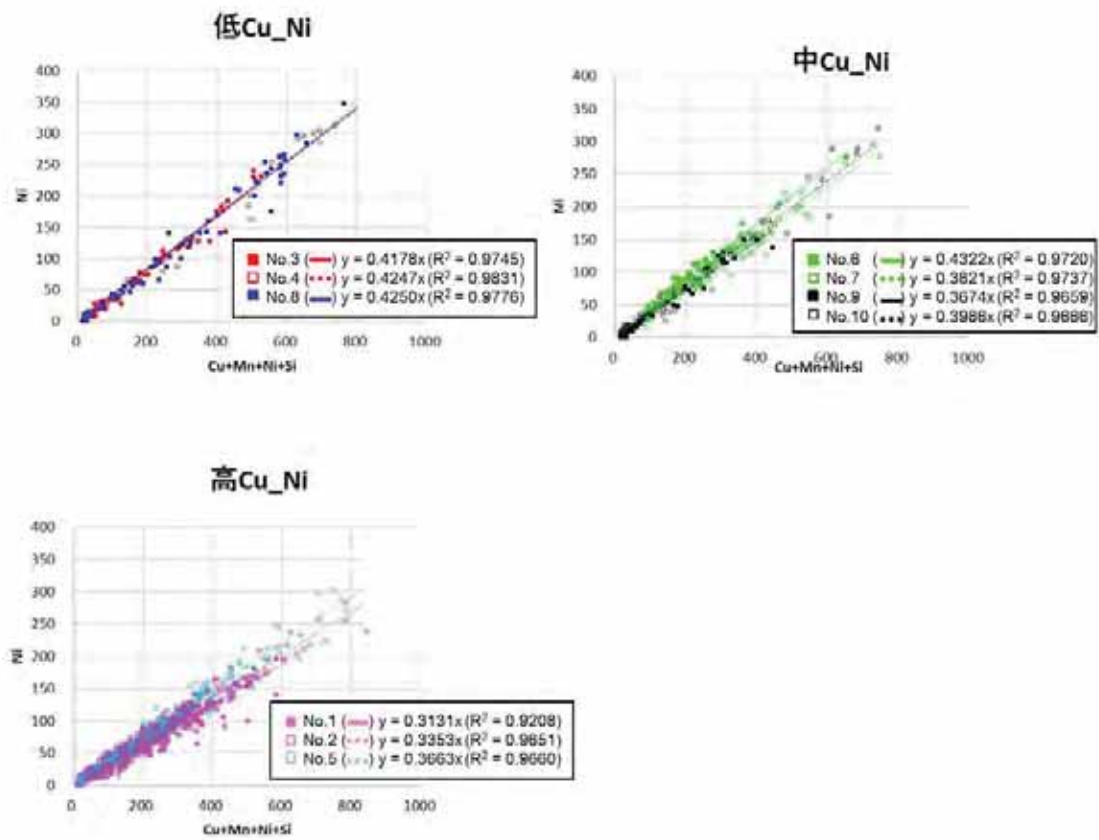


図 3.2.2.2-75 クラスタへの溶質原子の集積(Ni)

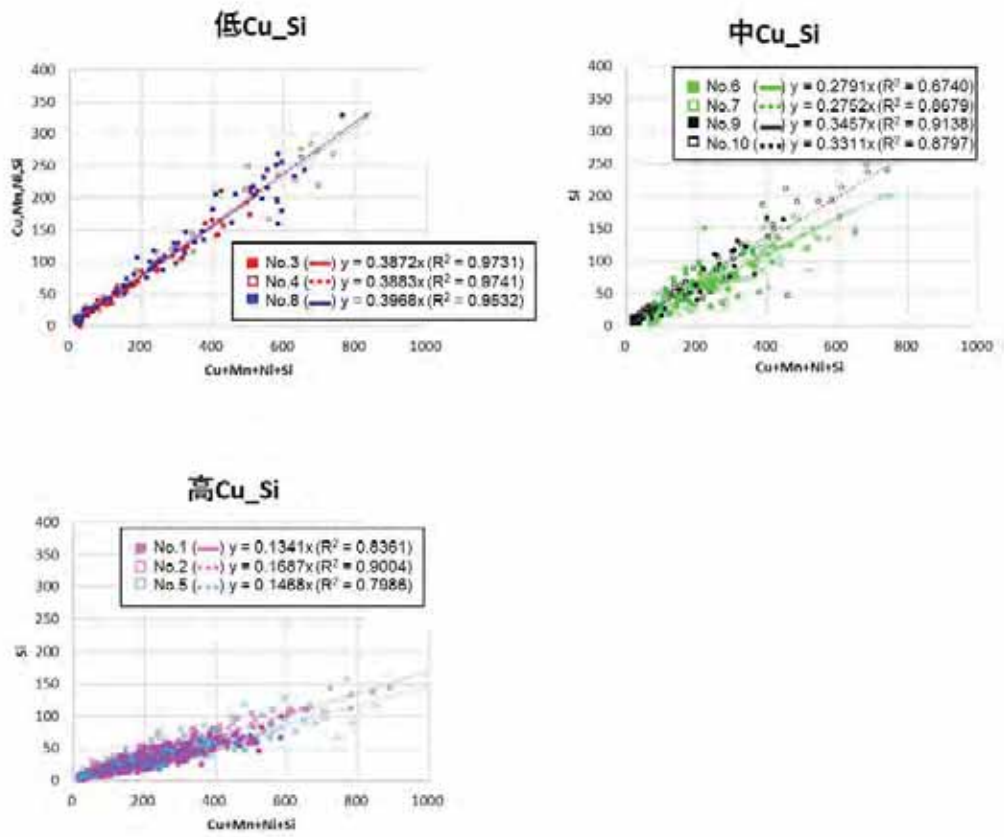


図 3.2.2.2-76 クラスタへの溶質原子の集積(Si)

(7) APT 分析のまとめ

表 3.2.2.2-16 に本研究で得られた結果を示す。本研究では中性子照射試験片を使用し、APT を用いた微細組織変化の観察を行った。溶質原子クラスターの組成、大きさ、数密度、体積率などを取得し、照射量や Cu 含有量、Si 含有量に対する相関を調べた。APT で測定した母相の Si 濃度と ΔRT_{NDT} や体積率等との間には相関が見られたものの、Cu 濃度や照射量の影響も大きいため、現状のデータだけでは Si の影響について議論するのは難しい。平成 30 年度も分析を継続し、Si 含有量がクラスター形成、成長に与える影響の有無について引き続き検討する。

参考文献

- (3.2.2.2-1) J.M. Hyde and C.A. English, MRS Fall Meeting Symp. R, pp27 (2001).
- (3.2.2.2-2) J.M. Hyde, et al., Ultramicroscopy, 111, pp440 (2011).
- (3.2.2.2-3) 西田憲二ら, 電力中央研究所 研究報告 Q09021 (2010).
- (3.2.2.2-4) 第 2 回原子炉構造材の監視試験方法の技術評価に関する検討チーム資料 2-4 P25.

表 3.2.2.2-16 測定結果まとめ

サンプル No.	Fluence (n/cm ²)	ΔR_{NDT} (°C)	Number density (m ⁻³)	ΔC_{sc}	Vf	ΔVf	\sqrt{Vf}	ion	cluster diameter (nm)	クラスター数
No.1	3.4E+19	72	2.67E+23	1.57E+22	8.82E-03	9.08E-05	9.39E-02	3.41E+07	3.4	288
No.2	5.6E+19	99	3.64E+23	2.02E+22	1.27E-02	1.20E-04	1.13E-01	2.83E+07	3.5	325
No.3	6.3E+19	32	7.31E+22	9.77E+21	4.54E-03	7.72E-05	6.74E-02	2.42E+07	3.5	56
No.4	9.0E+19	51	6.78E+22	9.78E+21	2.79E-03	6.28E-05	5.28E-02	2.24E+07	4.0	48
No.5	4.7E+19	88	2.79E+23	2.17E+22	1.19E-02	1.42E-04	1.09E-01	1.88E+07	3.7	166
No.6	5.8E+19	46	9.98E+22	1.28E+22	3.62E-03	7.71E-05	6.02E-02	1.93E+07	3.5	61
No.7	9.2E+19	61	1.56E+23	1.35E+22	5.70E-03	8.18E-05	7.55E-02	2.71E+07	3.6	134
No.8	9.5E+19	61	1.07E+23	1.27E+22	4.51E-03	8.25E-05	6.72E-02	2.10E+07	3.9	71
No.9	4.0E+19	55	5.16E+22	7.69E+21	1.41E-03	4.03E-05	3.76E-02	2.76E+07	3.4	45
No.10	7.5E+19	70	7.17E+22	9.03E+21	2.60E-03	5.45E-05	5.10E-02	2.78E+07	3.8	63

3.2.2.3 オージェ電子分光(AES)分析

(1) AES 分析の原理

元素に数 keV の電子線が照射され、内殻電子がはじき出されると、上の準位の軌道から電子が落ち込み、そのエネルギーバランスを取るために、遷移した準位間のエネルギー差に相当する特性 X 線が放出されたり、より上の準位から電子(オージェ電子)が放出されたりといった現象が起こる(図 3.2.2.3-1)。これらは元素ごとに固有のエネルギー値を持つため、検出されるエネルギースペクトルを分析することにより元素の同定等を行うことができる。

AES は、対象となる物質から放出されるオージェ電子のエネルギースペクトルを測定する手法であり、原理的には K 殻のみを持つ水素とヘリウム以外の全元素の検出が可能である。また、オージェ電子のエネルギーは数十 eV から数千 eV であるが、この範囲の電子の平均自由行程は数 nm 程度であるため、試料の表面分析に対して非常に有用な手法となっている。

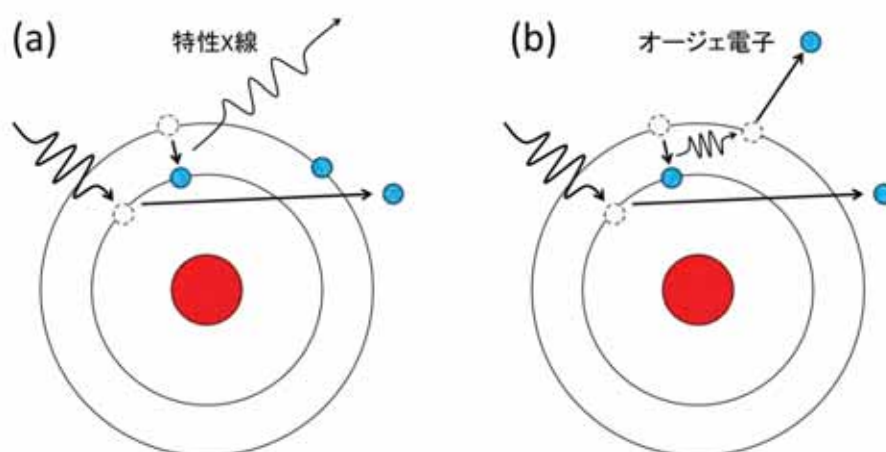


図 3.2.2.3-1 (a)特性 X 線と(b)オージェ電子放出の原理

(2) 実験装置

実験には、アルバック・ファイ社製の AES 装置である PHI710 を使用した。装置外観を図 3.2.2.3-2 に示す。本装置には、オージェ電子の検出に同軸円筒鏡型アナライザ (Cylindrical Mirror Analyzer: CMA) が用いられており、360 度全方位に放出されるオージェ電子を取り込める構造となっている。本研究で観測する粒界破面は角度を持って現れることがあるが、本装置はこうした傾斜角の影響を受けにくい仕様となっている。AES 分析における分解能は最高で直径 8 nm 程度であるが、実験室の環境や用いた電子線の条件(本研究では主に 5 keV に加速された 10 nA の電子線を使用)により変化する。実験に使用したビーム直径は 60 nm 程度であった。



図 3.2.2.3-2 AES 分析装置 PHI710 外観

(3) 試料

本実験では、まず表 3.2.2.3-1 に示す未照射サンプルを用いた分析を行った。未照射サンプルの選定にあたっては、バルク P 濃度が照射サンプルの P 濃度の範囲をカバーしていることに着目した。このうち比較標準材(S1 材)はその後に実施する中性子照射サンプルの一部(No.15~20)と同じ材料である。

分析対象の中性子照射サンプルについては平成 28 年度に選定を行った。実験に供する予定の中性子照射サンプルは表 3.2.2.1-1 に示した通りである。これらのサンプルの分析は平成 29 年度及び平成 30 年度に実施予定であり、平成 29 年度はこのうちサンプル No.16、17 の分析を実施した。

表 3.2.2.3-1 未照射サンプルの化学組成(wt%)

サンプル名	化学成分 (wt%)				
	Cu	Ni	P	Si	Mn
S1	0.09	0.62	0.007	0.26	1.38
PL	0.01	0.65	0.013	0.22	1.41
Steel A	0.16	0.67	0.015	0.29	1.31
JRQ	0.14	0.84	0.017	0.24	1.42
P3B	0.06	0.57	0.018	0.22	1.44

(4) 手順

試験片製作には放電加工機を用いた。試験片の形状を図 3.2.2.3-3 に示す。製作された試験片をサンプルホルダにセットし、PHI710 内の超高真空中($\sim 10^{-8}$ Pa)において、液体窒素での冷却後にノッチ部で破断した。破断後速やかに新しく得られた破面を走査型電子顕微鏡(SEM)で観測し、粒界破面に対する AES 分析を実施した。図 3.2.2.3-4 に破面の SEM 像の例を示す。得られた脆性破面はほぼへき開割れによるものであったが、その中に若干の粒界面が観察された。

得られたオージェ電子のエネルギースペクトルから各元素の粒界偏析量(粒界における原子割合)を見積る際には、エネルギースペクトルを微分して得られるスペクトルから各元素に対して最大ピークと最小ピークの差(peak-to-peak 値)を計算することになる。参考として、サンプル No.17 の粒界及びへき開面の AES 分析によって得られたオージェ電子スペクトル(微分後)を図 3.2.2.3-5 に示す。微弱ではあるが粒界破面に P、Mo、C 等の信号が見られる。500 eV 付近には O の信号も観測された。Fe は 600 – 700 eV 付近に顕著な 3 本のピークを示す。

個別の元素の peak-to-peak 値の Fe の peak-to-peak 値に対する比率(peak-to-height ratio: PHR)から次式によって粒界偏析量(Monolayer Coverage, C_A^{GB})が算出される(3.2.2.3-1)。

$$C_A^{GB} = mK_A \frac{I_A}{I_{Fe}} \quad (3.2.2.3-1)$$

ここで、 K_A は換算係数、 I_A は元素 A の peak-to-peak 値である。破面を観察する場合、対となる破面に存在する元素の量も考慮して、係数 m には 2 を代入する。換算係数 K_A は元素ごとに異なる値を示すが、その算出過程は参考文献(3.2.2.3-1)に詳細に示されている。本研究では、未照射サンプルについての過去の研究結果との比較から、換算係数の確認を行った。 I_{Fe} には 703 eV の peak-to-peak 値を用いた。各サンプルに対して 15 – 20 点の粒界を分析し、平均の C_A^{GB} を算出した。

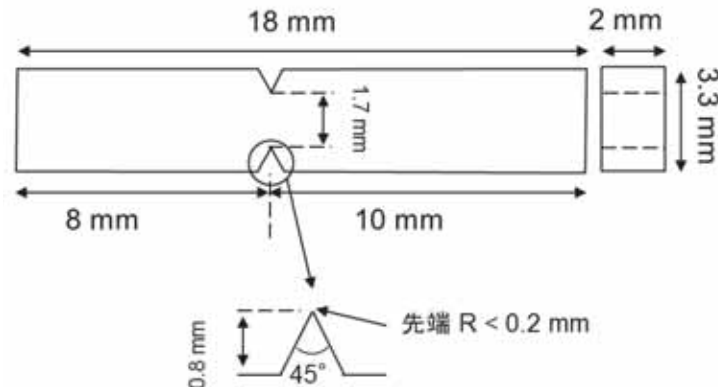


図 3.2.2.3-3 AES 用試験片の形状

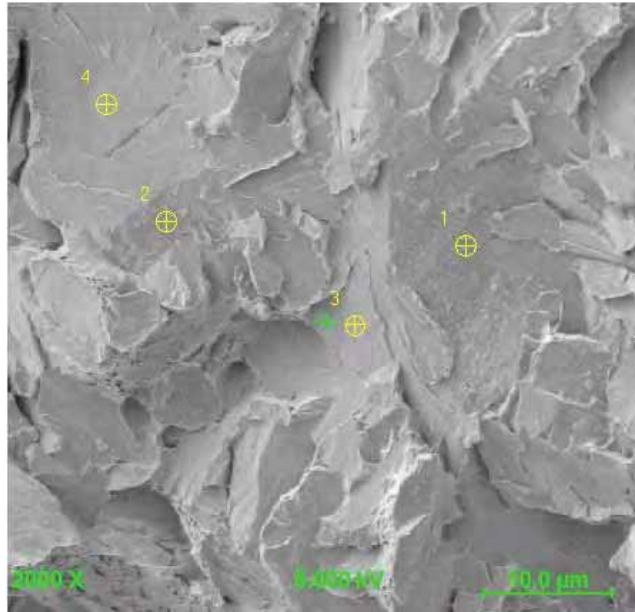


図 3.2.2.3-4 破面の SEM 像(倍率 : 2000 倍)の例。
 (⊕は AES の分析点。分析点 1、2 は粒界面、分析点 3、4 はへき開面。)

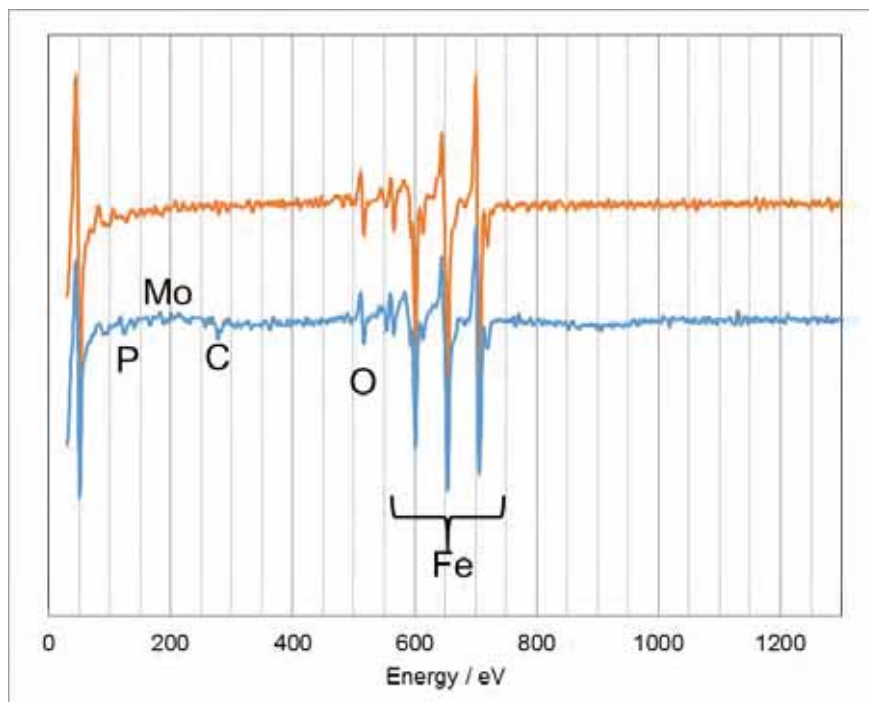


図 3.2.2.3-5 粒界及び粒内のオージェ電子スペクトル(微分後)

(5) 結果と考察

① Monolayer coverage とバルクの化学成分との関係

未照射サンプルに対して粒界破面の AES 分析を実施し、Fe に対する PHR から P の Monolayer coverage を算出した。結果を表 3.2.2.3-2 に示す。本結果を A533B 鋼等に関する既往研究結果とともにバルク P 濃度に対してプロットした(図 3.2.2.3-6)。本結果は過去の同様の材料による結果とほぼ一致することを確認した。過去の結果と同様に、P の Monolayer coverage がバルク P 濃度の増加に伴いほぼ単調に増加する傾向も得られた。バルク P 濃度が比較的高く、かつ Ni 濃度が高い JRQ 材(P: 0.017wt%、Ni: 0.84wt%)では、P の粒界偏析量が小さくなる傾向が見られた。

表 3.2.2.3-2 未照射サンプルの Monolayer coverage

サンプル名	バルク P 濃度 (wt%)	Monolayer coverage
S1	0.007	0.037 ± 0.022
PL	0.013	0.104 ± 0.049
Steel A	0.015	0.099 ± 0.023
JRQ	0.017	0.068 ± 0.029
P3B	0.018	0.146 ± 0.056

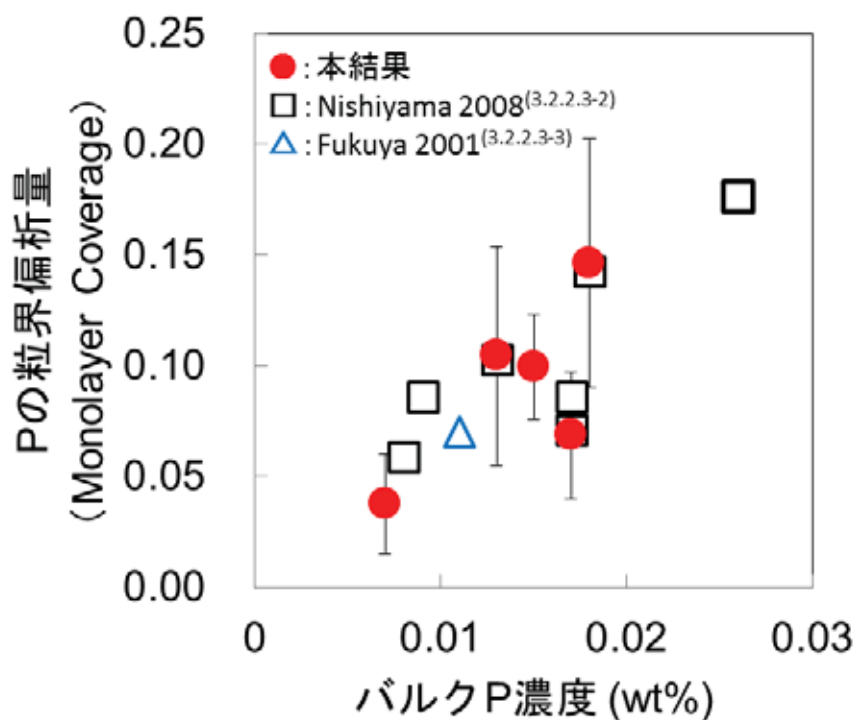


図 3.2.2.3-6 未照射サンプルにおけるバルク P 濃度と P の粒界偏析量の関係

② 照射材の結果

今回の分析によって明確な偏析が確認された P、Mo 及び C について、Monolayer coverage を計算し、照射量の増加に伴う粒界偏析量の変化を調べた。結果を図 3.2.2.3-7 に示す。未照射のデータは S1 材の結果である。中性子照射されることにより P の粒界偏析量が増加し、粒界強化元素である C の粒界偏析量が減少することがわかる。Mo については明確な変化を確認できなかった。また、サンプル No.17(照射量： $3.1 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$)とサンプル No.16(照射量： $5.8 \times 10^{19} \text{ n/cm}^2$)の結果を比較したところ、照射量の増加による P や C の粒界偏析量の変化は小さいことがわかった。

P の粒界偏析量について、粒界毎のばらつきについても調べた。図 3.2.2.3-8 は、15 から 20 個程度の粒界について AES 分析を行った結果得られた P の粒界偏析量のヒストグラムである。ヒストグラムの形状からもサンプル No.16 と No.17 との間に顕著な違いは確認できなかった。

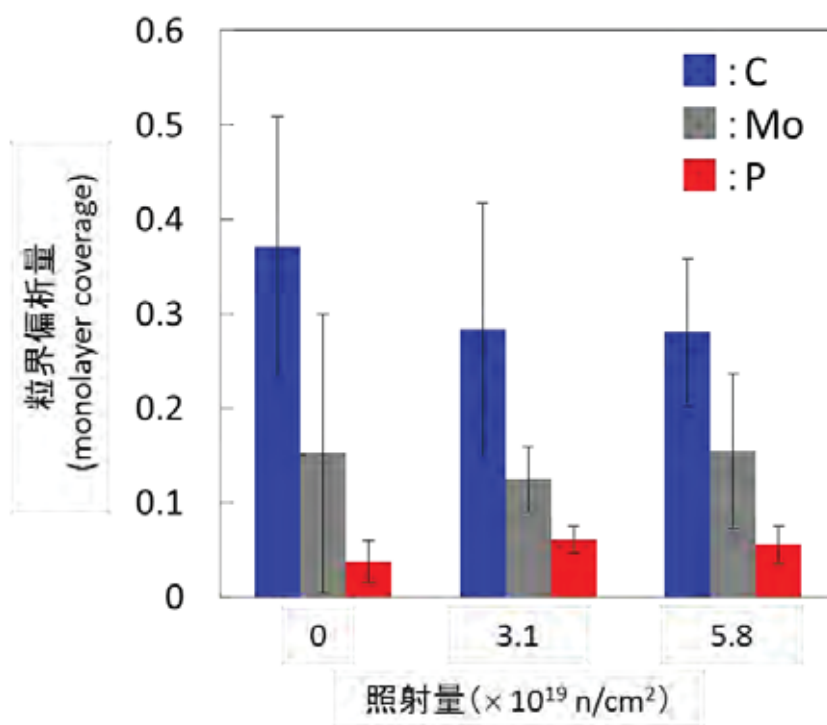


図 3.2.2.3-7 照射量の増加に伴う P、Mo、C の粒界偏析量の変化

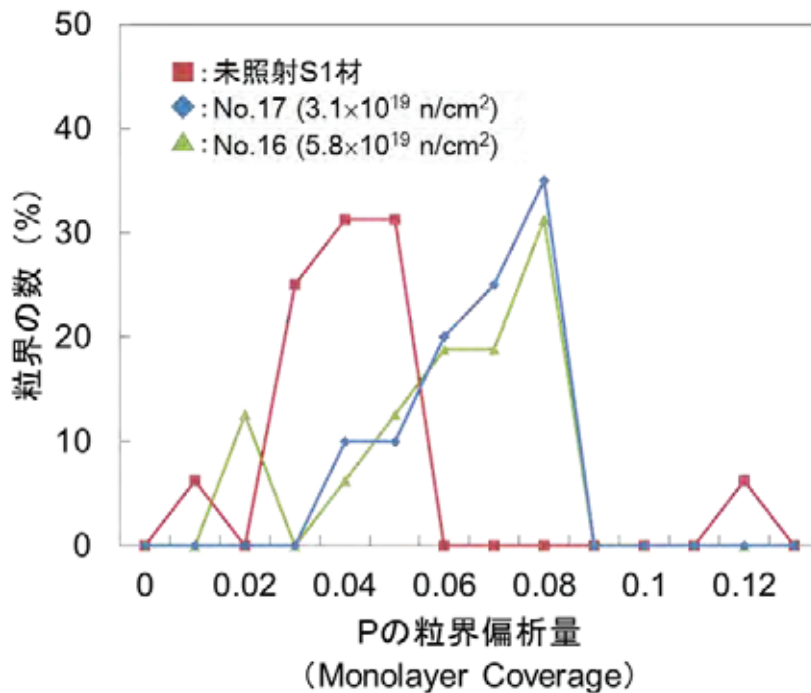


図 3.2.2.3-8 P の粒界偏析量のヒストグラムの照射量の増加に伴う変化

(6) AES 分析のまとめ

平成 29 年度は、バルク P 濃度の異なる未照射材 5 サンプルについて、粒界破面のオージェ電子分光分析を行い、バルク P 濃度の増加に伴う粒界 P 濃度の増加を確認するとともに、得られた傾向が従来の報告とも相反しないものであることを確認した。また、比較標準材(S1 材)について、中性子照射材 2 サンプル(No.16、17)のオージェ電子分光分析を実施し、中性子照射に伴う P、Mo、C の粒界偏析量の変化を調べた。照射によって P の粒界偏析量が増加し、C の粒界偏析量が減少する様子が観測された。しかし、照射量の増加に伴うこれらの元素の偏析量の変化は見られなかった。平成 30 年度は平成 29 年度に引き続き照射材の分析を進め、照射量の増加や照射速度の違いが P 等の粒界偏析量の変化に与える影響について評価する。

(7) AES 分析装置の点検作業

本研究で使用した AES 分析装置 PHI710 について、保守点検作業を実施した。点検に際して真空チャンバのベーキングを行い、その後所期の性能が維持されていることを確認した。

参考文献

(3.2.2.3-1) D. Briggs and M.P. Seah (Eds.), Practical Surface Analysis by Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy, John Wiley and Sons Ltd, Chichester, 1983.

(3.2.2.3-2) Y. Nishiyama et al., Proceedings of 16th Pasific Basin Nuclear Conference (16PBNC), Paper ID P16P1354, 2008.

(3.2.2.3-3) 福谷耕司ら, 「原子炉容器鋼の照射組織変化」, INSS Monographs No.1 2001, 原子力システム研究所, (2001).

3.2.3 監視試験片採取位置の代表性に係る試験

加圧熱衝撃(PTS)事象時の健全性評価(3.2.3-1)においては、RPV内面のクラッド下の母材表面に10mm深さの半楕円欠陥を想定するのに対し、照射脆化を把握するための監視試験片(3.2.3-2)は母材の板厚内部1/4位置から採取される。図3.2.3-1に示すように、一般には板厚内部に比して焼入れ性の高い表面近傍の破壊靱性は良好である。しかし、RPV内面の母材表面には冷却水による母材の腐食を防ぐためにステンレスオーバーレイクラッド(以下、クラッド)が溶接されており、溶接時の熱の影響により破壊靱性が変化していると考えられる。母材の表面近傍の溶接熱影響部(HAZ)の破壊靱性や健全性評価対象部位である10mm深さ位置の破壊靱性への溶接熱影響は明らかではない。

本事業では、平成28年度に製作したクラッド付きの原子炉圧力容器鋼(初期プラント模擬材)及び既往事業で使用された照射材を活用し、未照射材及び照射材について板厚1/4位置と想定欠陥位置の破壊靱性を取得し、板厚内部1/4位置の破壊靱性をもって母材の破壊靱性を代表させることの保守性を確認する。平成29年度は既存照射材の調査を実施し、破壊靱性試験片採取方法の検討を行った。また、初期プラント模擬材の破壊靱性試験に着手した。

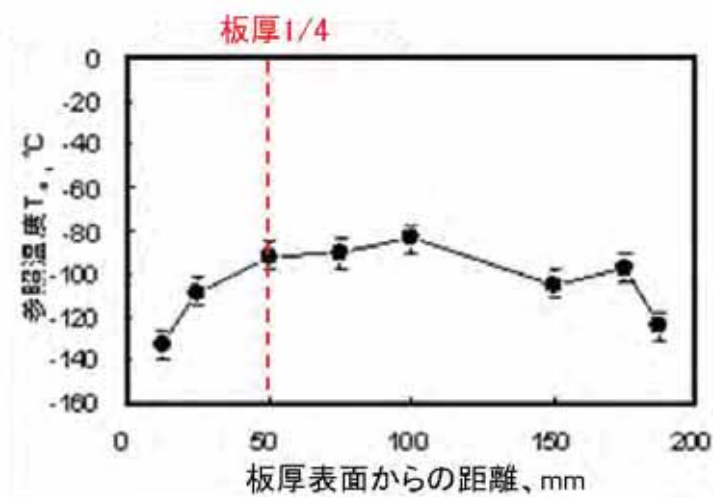


図 3.2.3-1 圧力容器鋼の破壊靱性参照温度の板厚内分布(3.2.3-3)

3.2.3.1 既存照射材の調査

ステンレスオーバーレイクラッド(以下、クラッド)溶接熱影響部を含む原子炉圧力容器鋼の中性子照射脆化に関する試験の準備として、ニュークリア・デベロップメント株式会社のホットラボで保管されている JNES 事業(3.2.3-4~3.2.3-10)で使用された照射試料(以下、WIM 事業材)について、現在の保管状況を調査し、組織観察等を行い破壊靱性試験片等の採取方法の検討を行った。

(1) 既存照射材

試験片採取用として選定した高照射量の WIM 事業材の一覧を表 3.2.3.1-1、形状の模式図を図 3.2.3.1-1 に示す。化学成分を表 3.2.3.1-2 に示す。試料 ID S2Y-1 及び S2T-1 は、継手溶接部を有する板厚 230mm の原子炉圧力容器鋼の板厚表面から採取された試料であり、表面には厚さ約 5mm のステンレスオーバーレイクラッド(クラッド)が肉盛溶接されている。試料はクラッド、溶接金属、溶接熱影響部及び母材(表面近傍)で構成されている。試料 ID 2T-1、2Y-1 及び 2Y-2 は、板厚 1/4 位置から採取された試料であり、材料は溶接金属、溶接熱影響部及び母材(板厚 1/4)で構成されている。これらの試料は材料試験炉において、約 $10 \times 10^{19} \text{n/cm}^2$ の中性子照射を受けている。

表 3.2.3.1-1 WIM 事業材の一覧

試料 ID	材料	照射量 ($\times 10^{19}\text{n/cm}^2$)	試料寸法 ^注 (mm)	備考
S2Y-1	クラッド, 母材板厚表面近傍, 溶接金属	9.8	60×65×20	タブ板付
S2T-1	クラッド, 母材板厚表面近傍, 溶接金属	9.8	60×30×20	タブ板付
2T-1	母材板厚 1/4, 溶接金属	14	60×14×20	タブ板付
2Y-1	母材板厚 1/4, 溶接金属	14	60×40×20	
2Y-2	母材板厚 1/4, 溶接金属	14	60×17×20	タブ板付

注：試料の寸法は公称値を示す。

表 3.2.3.1-2 試料の化学成分(wt%)

部位		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu	Co
クラッド	YB308	0.05	0.63	1.40	0.023	0.015	10.26	20.60	—	—	0.02
	Y309L	0.02	0.38	2.00	0.013	0.002	13.9	23.3	—	—	—
	Y308L	0.008	0.40	1.73	0.025	0.002	9.63	19.64	—	—	—
母材	SQV2A	0.22	0.21	1.44	0.019	0.021	0.60	-	0.48	0.16	0.012
溶接金属	S642-MN	0.07	0.27	1.27	0.014	0.013	0.87	0.03	0.50	0.18	0.01
	ER80S-G	0.09	0.41	1.58	0.007	0.007	0.66	0.02	0.52	—	—

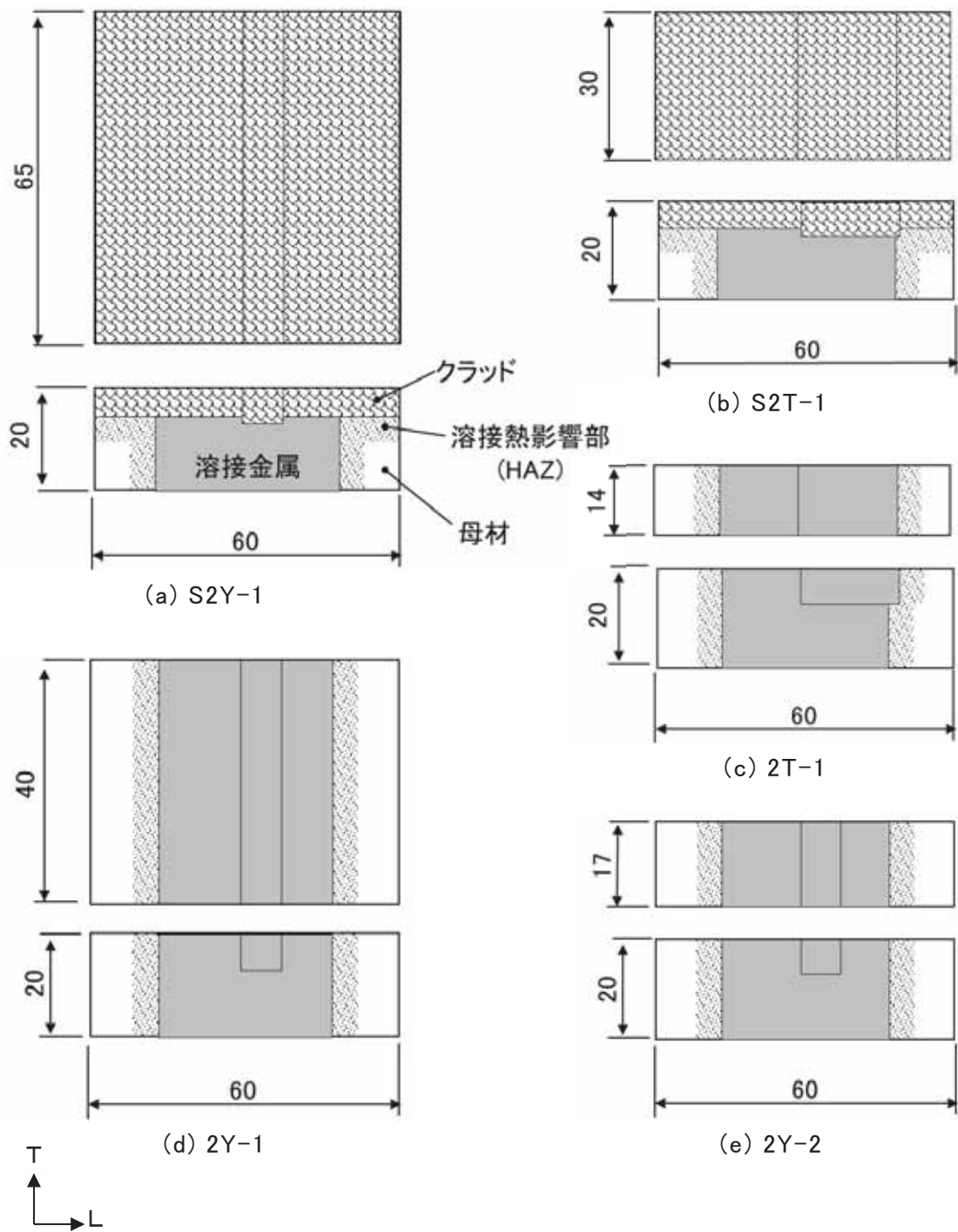


図 3.2.3.1-1 WIM 事業材の形状(公称)

(2) WIM 事業材の員数確認及び外観撮影

表 3.2.3.1-1 及び図 3.2.3.1-1 に示した 5 体の WIM 事業材について、員数確認及び外観撮影を行った。外観撮影は試料全体が写るように行った。撮影した外観写真を図 3.2.3.1-2 に示す。

員数確認の結果、5 体全ての試料が保管されていることを確認した。また、試料の外観を確認した結果、2Y-1 以外の 4 体については大きな傷などが無いことを確認した。2Y-1 については長さが約 30mm、幅が約 1mm、深さが 1mm 程度のスリットが試料の下面側に認められたため、下面側の外観撮影も行った。この写真を図 3.2.3.1-3 に示す。

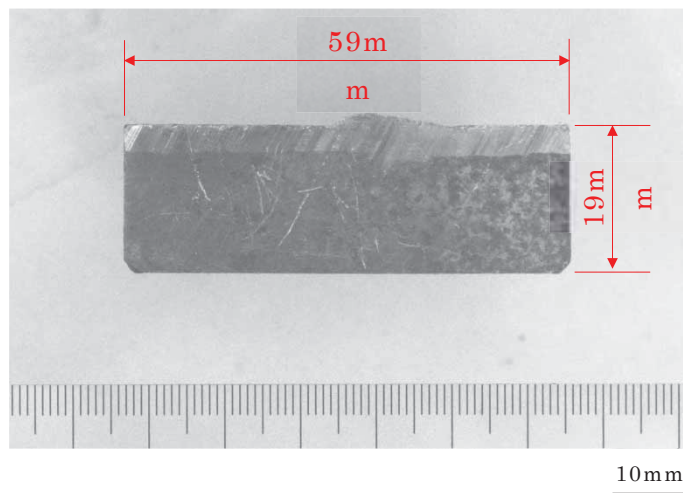
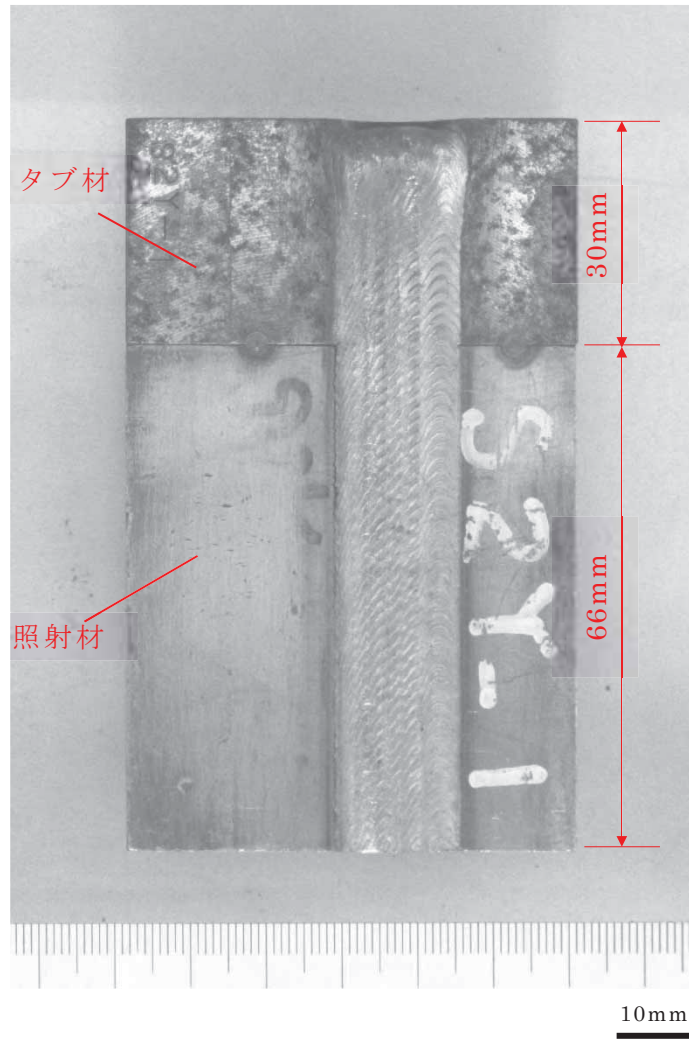


図 3.2.3.1-2(1) WIM 事業材の外観状況及び寸法測定結果 (試料 ID : S2Y-1)

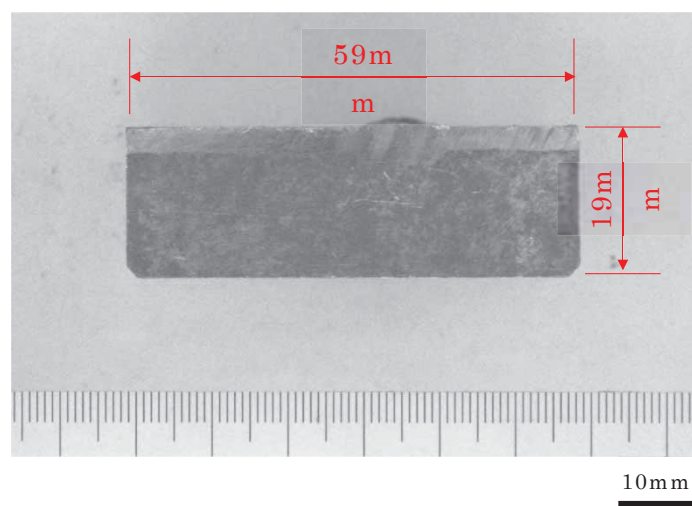
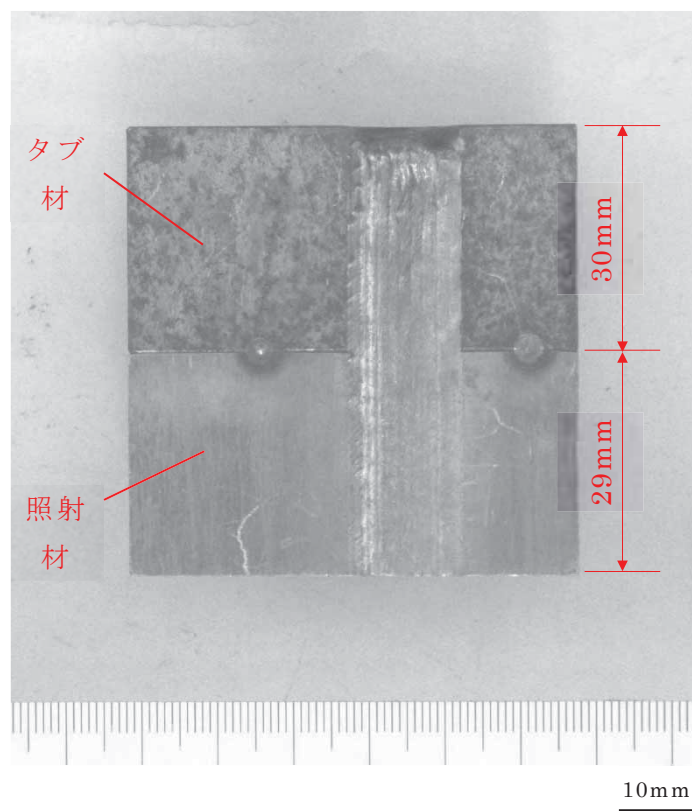


図 3.2.3.1-2(2) WIM 事業材の外観状況及び寸法測定結果 (試料 ID : S2T-1)

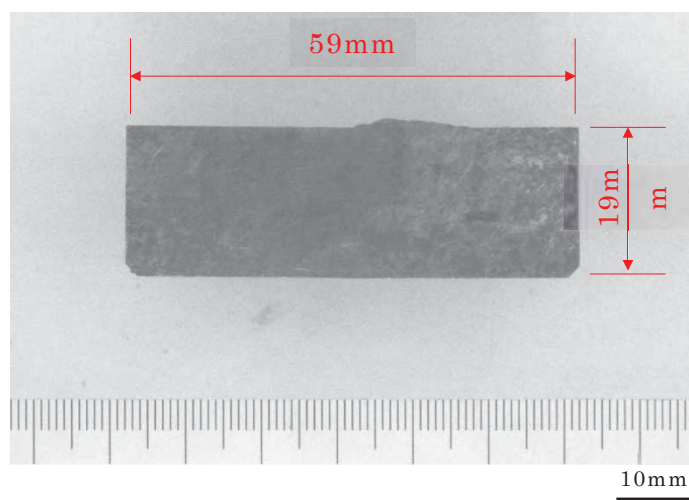
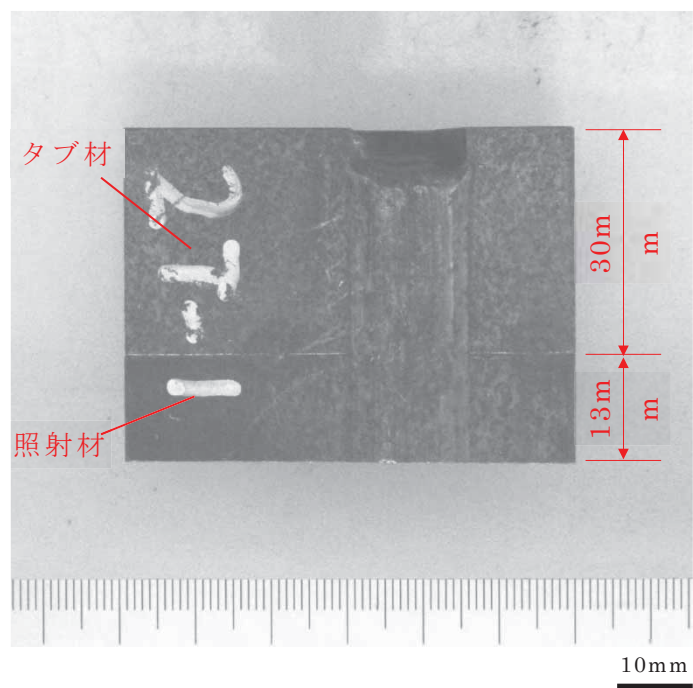


図 3.2.3.1-2(3) WIM 事業材の外観状況及び寸法測定結果 (試料 ID : 2T-1)

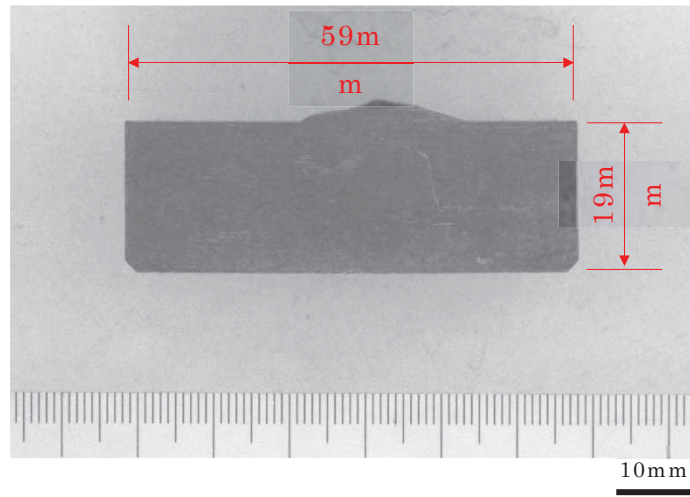
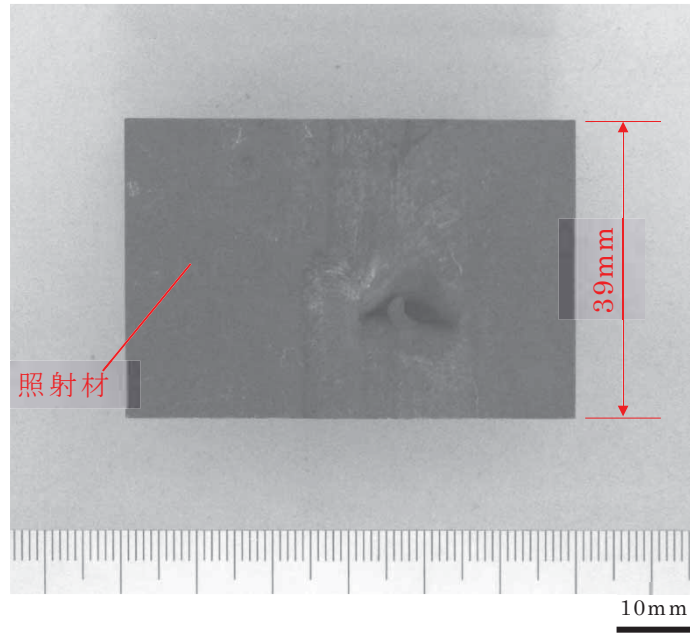


図 3.2.3.1-2(4) WIM 事業材の外観状況及び寸法測定結果 (試料 ID : 2Y-1)

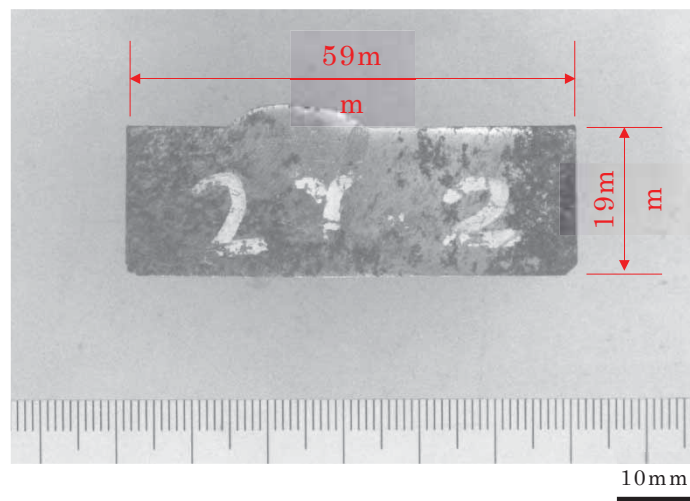
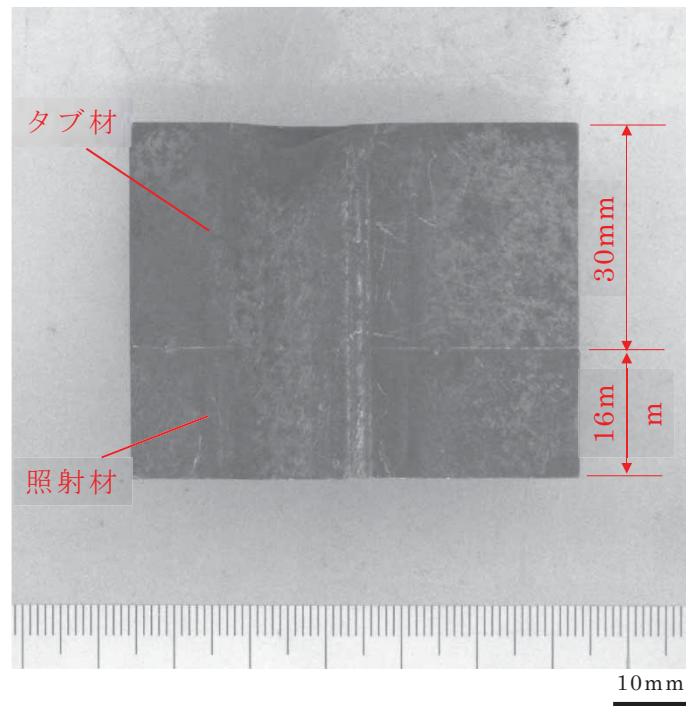


図 3.2.3.1-2(5) WIM 事業材の外観状況及び寸法測定結果 (試料 ID : 2Y-2)

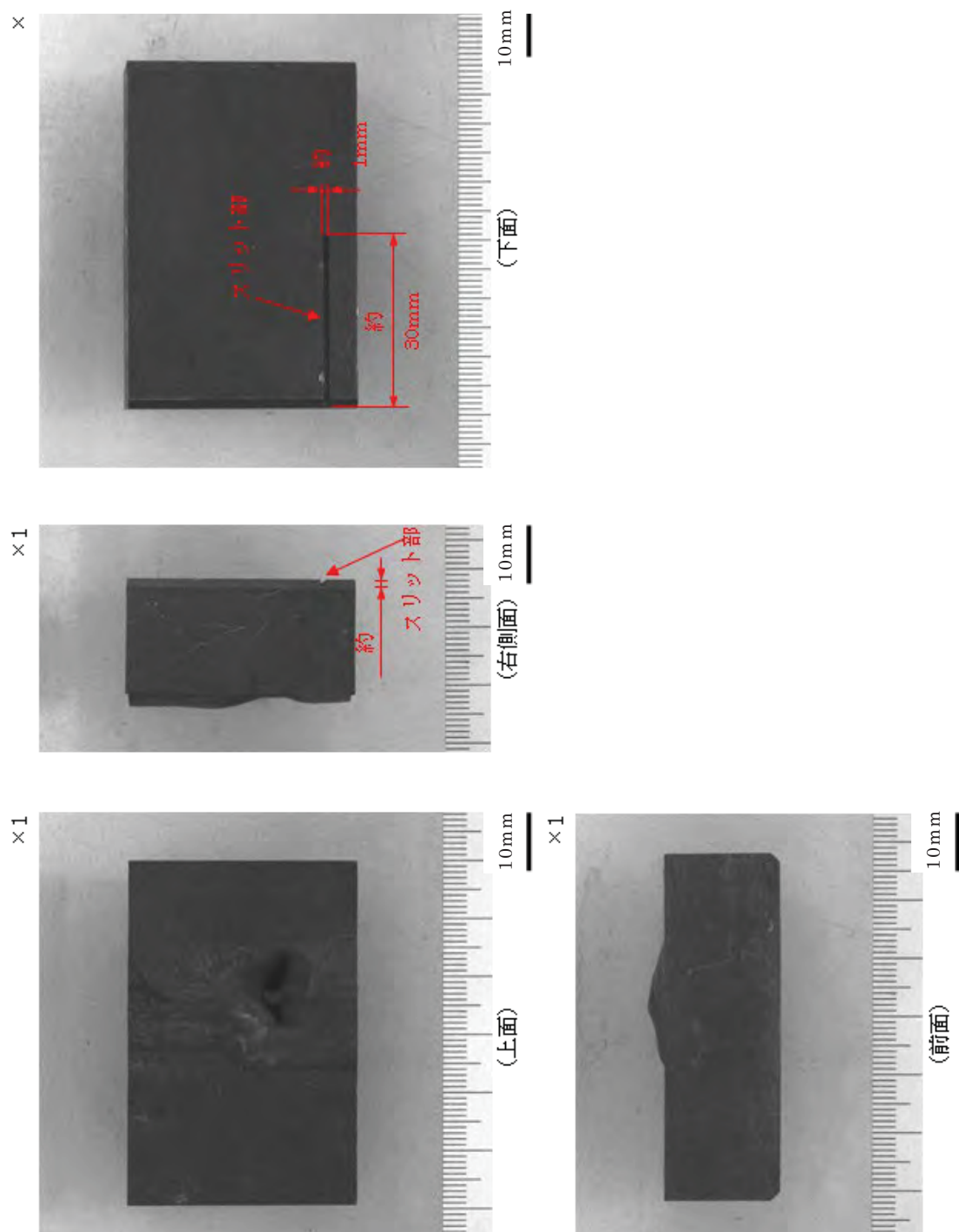


図 3.2.3.1-3 WIM 事業材の下面側の状況 (試料 ID : 2Y-1)

(3) WIM 事業材の線量測定

試料と線量測定器との距離を変化させた数点で、ドーズレートメータを用いて線量当量率を測定した。なお、クラッド付きの試料(S2Y-1 及び S2T-1)については、クラッド面とクラッド面とは反対側の母材面をそれぞれ測定面とした測定を行った。線量測定の結果を表 3.2.3.1-3 に示す。

線量測定の結果、クラッド付きの試料については、母材面に比べてクラッド面の方が高くなる傾向が認められた。この要因として、表 3.2.3.1-2 に示した通り、クラッドに含まれる Co 量が母材に比べて高いことが挙げられる。

線量当量率と測定距離との関係を図 3.2.3.1-4 に示す。得られた線量当量率は、測定距離の 2 乗の逆数とほぼ比例関係にあり、0.3~0.8m の測定距離の範囲では、試料の形状等による線量当量率への影響は認められなかった。

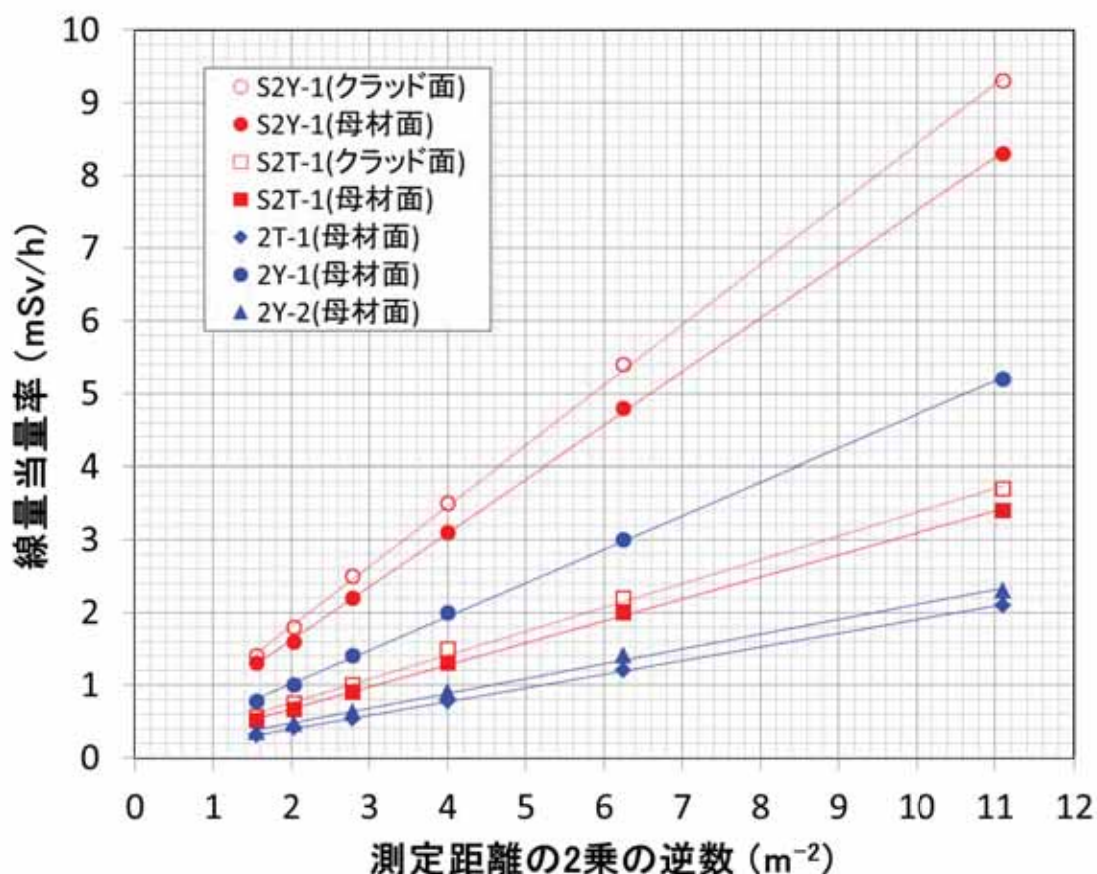


図 3.2.3.1-4 線量当量率と測定距離との関係

表 3.2.3.1-3 WIM 事業材 線量測定結果

試料 ID	クラッド 有無	測定距離*1 (m)	測定距離の 2乗の逆数 (m ⁻²)	線量当量率(mSv/h)	
				クラッド面*2	母材面
S2Y-1	有	0.3	11.1	9.3	8.3
		0.4	6.25	5.4	4.8
		0.5	4.00	3.5	3.1
		0.6	2.78	2.5	2.2
		0.7	2.04	1.8	1.6
		0.8	1.56	1.4	1.3
S2T-1	有	0.3	11.1	3.7	3.4
		0.4	6.25	2.2	2.0
		0.5	4.00	1.5	1.3
		0.6	2.78	1.0	0.91
		0.7	2.04	0.75	0.67
		0.8	1.56	0.57	0.52
2T-1	無	0.3	11.1	—	2.1
		0.4	6.25	—	1.2
		0.5	4.00	—	0.78
		0.6	2.78	—	0.54
		0.7	2.04	—	0.41
		0.8	1.56	—	0.31
2Y-1	無	0.3	11.1	—	5.2
		0.4	6.25	—	3.0
		0.5	4.00	—	2.0
		0.6	2.78	—	1.4
		0.7	2.04	—	1.0
		0.8	1.56	—	0.78
2Y-2	無	0.3	11.1	—	2.3
		0.4	6.25	—	1.4
		0.5	4.00	—	0.91
		0.6	2.78	—	0.63
		0.7	2.04	—	0.47
		0.8	1.56	—	0.35

*1：測定距離は試料と線量計の距離を表す。

*2：クラッド面の測定はクラッド付きの試料(S2Y-1及びS2T-1)のみ実施。

(4) WIM 事業材の寸法測定、マクロ組織観察及び硬さ試験

表 3.2.3.1-1 に示した試料の寸法は公称値であるため、図 3.2.3.1-2 に示したとおり試料をスケール入りで撮影することにより、試料の外形寸法(縦、横、高さ)を測定した。WIM 事業材の外形寸法の測定結果を表 3.2.3.1-4 に示す。寸法測定の結果、公称値と実測値に大きな差は認められなかった。

また、硬さ試験を行った試料(試料 ID: S2T-1)については、硬さ試験用試料の採取前に加えて採取後についても寸法測定を行った。この結果についても表 3.2.3.1-4 に示す。なお、硬さ試験用として S2T-1 を選定した理由は以下の通り。

- ・クラッド直下の HAZ について硬さを測定するためには、クラッド付きの試料である S2T-1 または S2Y-1 のいずれかとなる。
- ・S2T-1 は溶接線方向の寸法の実寸が約 29mm であり、加工代を考慮すると、Mini-C (T) 試験片を 3 個並べて採取するのは物理的に不可能であり、2 個採取とすると溶接線方向の寸法に余裕がある。
- ・S2Y-1 は溶接線方向の寸法の実寸が 66mm であり、Mini-C(T)試験片を 6 個並べて採取すること(加工代を極力小さくできれば物理的には可能)を想定した場合、溶接線方向の寸法に余裕が無い。

表 3.2.3.1-4 WIM 事業材 寸法測定結果

試料 ID	試料寸法 (mm)*1			備考
	公称値	実測値*2	実測値*2 (タブ板を含む)	
S2Y-1	60 × 65 × 20	59 × 66 × 19	59 × 96 × 19	タブ板付
S2T-1	60 × 30 × 20	59 × 29 × 19	59 × 59 × 19	タブ板付
	—	59 × 26 × 19 (硬さ試験片採取後)	59 × 56 × 19 (硬さ試験片採取後)	
2T-1	60 × 14 × 20	59 × 13 × 19	59 × 43 × 19	タブ板付
2Y-1	60 × 40 × 20	59 × 39 × 19	—	下面側にスリット痕あり
2Y-2	60 × 17 × 20	59 × 16 × 19	59 × 46 × 19	タブ板付

注)*1: 記載の寸法は、溶接線直交方向寸法 × 溶接線方向寸法 × 板厚方向寸法 を示す。

*2: 直尺スケールによる写真上での読取りとし、最小単位は 1mm で小数点以下を切り捨てた値を示す。

マクロ組織観察は、図 3.2.3.1-1 に示す 20mm×60mm の断面（溶接線に直交する断面）に対して実施した。20mm×60mm の断面を研磨した後、クラッド、溶接金属、母材及び溶接熱影響部の判別ができるように、ナイトルでエッチングを実施した。マクロ組織観察では断面全体を×2 で撮影し、さらに×4 及び×25 で溶接金属、溶接熱影響部、母材部分について組織を撮影した。マクロ組織観察の結果を図 3.2.3.1-5 に示す。

マクロ組織観察の結果、S2Y-1 及び S2T-1 についてクラッド直下部で溶接金属が母材方向に張り出している状況が認められた。

マクロ組織観察を行った面に対し、硬さ分布を測定した。硬さ試験に供する試料については、マクロ組織観察を行った試料の中から S2T-1 を選定し、図 3.2.3.1-6 に示した方法で、約 17mm×約 17mm×約 2mm の大きさとなるように、硬さ試験用の試料を採取した。図 3.2.3.1-7 に硬さ試験試料の切断採取状況を示す。

硬さ試験での押し込み荷重は 1kgf とし、図 3.2.3.1-8 に示す位置で溶接金属、溶接熱影響部及び母材部分にかけて測定した。さらに、硬さ試験前には硬さ測定ライン上の代表的な視野について図 3.2.3.1-9 に示す位置で断面ミクロ組織観察も行った。

硬さ試験の結果を図 3.2.3.1-10 に示す。さらに、図 3.2.3.1-10 には組織と硬さ測定点の位置関係を判別できるように、硬さ測定後に測定面を撮影した写真も示す。

断面ミクロ組織観察の結果を図 3.2.3.1-11 に示す。硬さ試験前に実施した断面ミクロ組織観察の結果、硬さ測定ライン上には特異な組織は認められなかった。

硬さ試験の結果、硬さ測定ライン①について、クラッド直下の熱影響部では 300HV を超える硬さの上昇が認められたが、クラッドから 4mm 以上離れると 300HV 以下の硬さとなり、ほぼ一定の硬さであった。さらにライン①ではクラッドの硬さについても測定しており、200HV 程度であった。硬さ測定ライン②では、全て 300HV 以下の硬さであり、溶接金属近傍の熱影響部においては顕著な硬さの上昇は認められなかった。

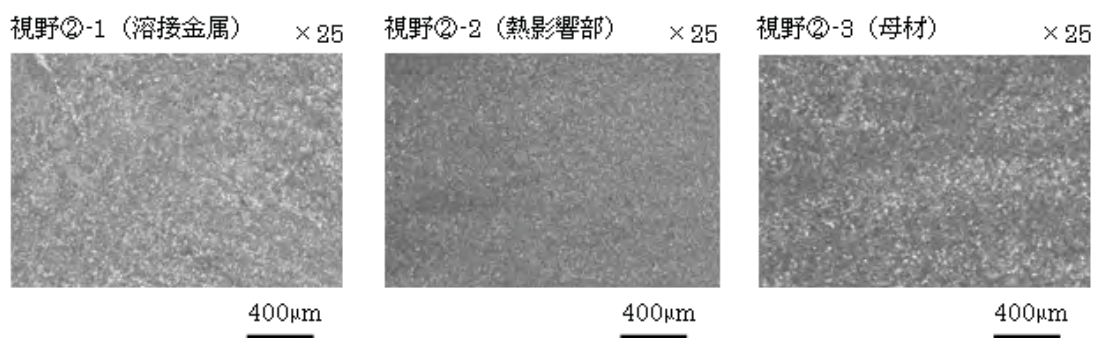
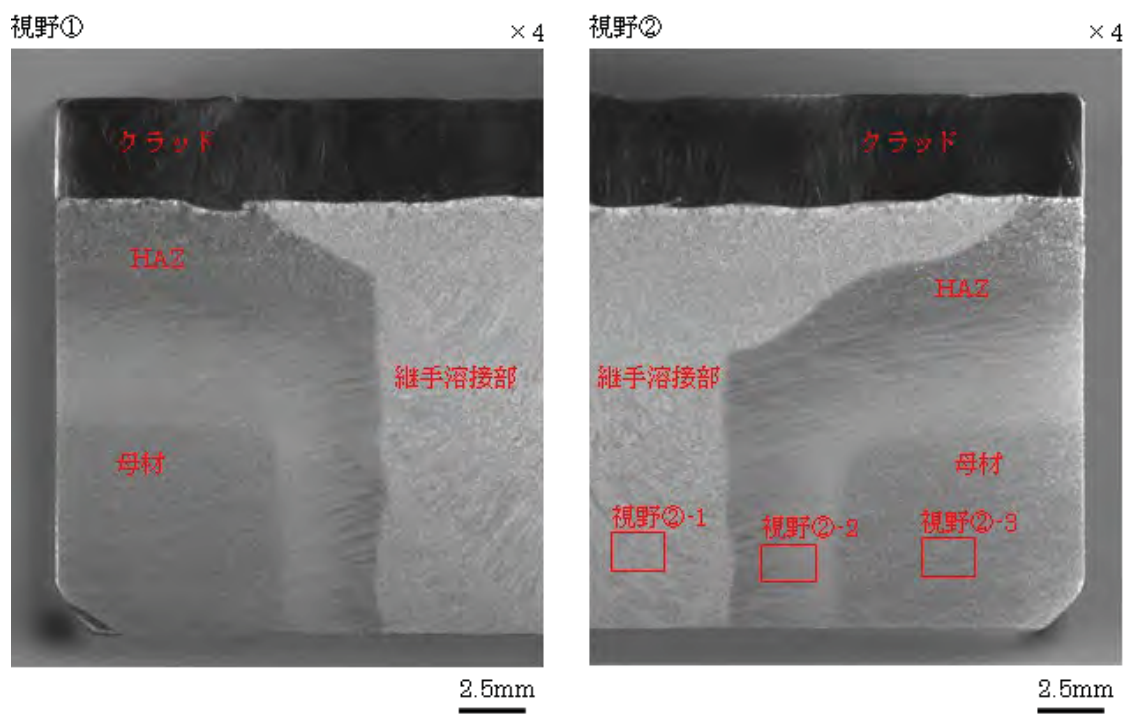
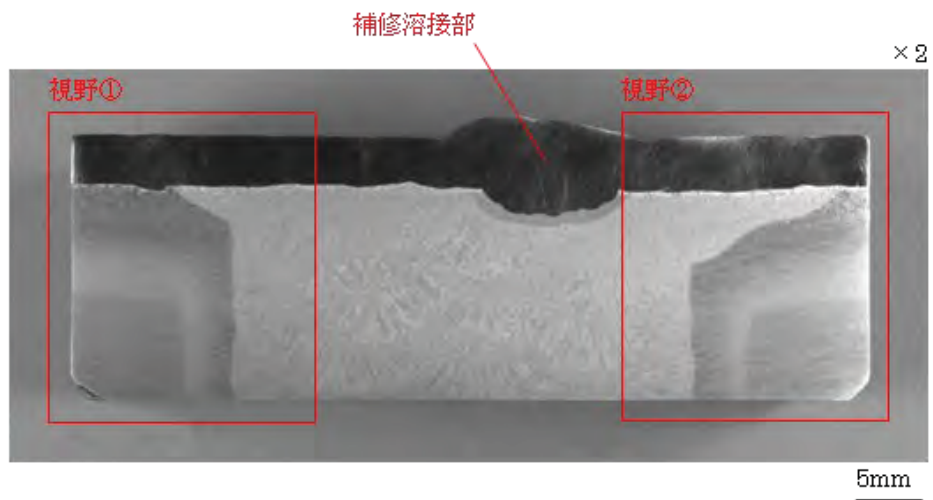


図 3.2.3.1-5(1) WIM 事業材の断面マクロ組織観察結果(試料 ID : S2Y-1)

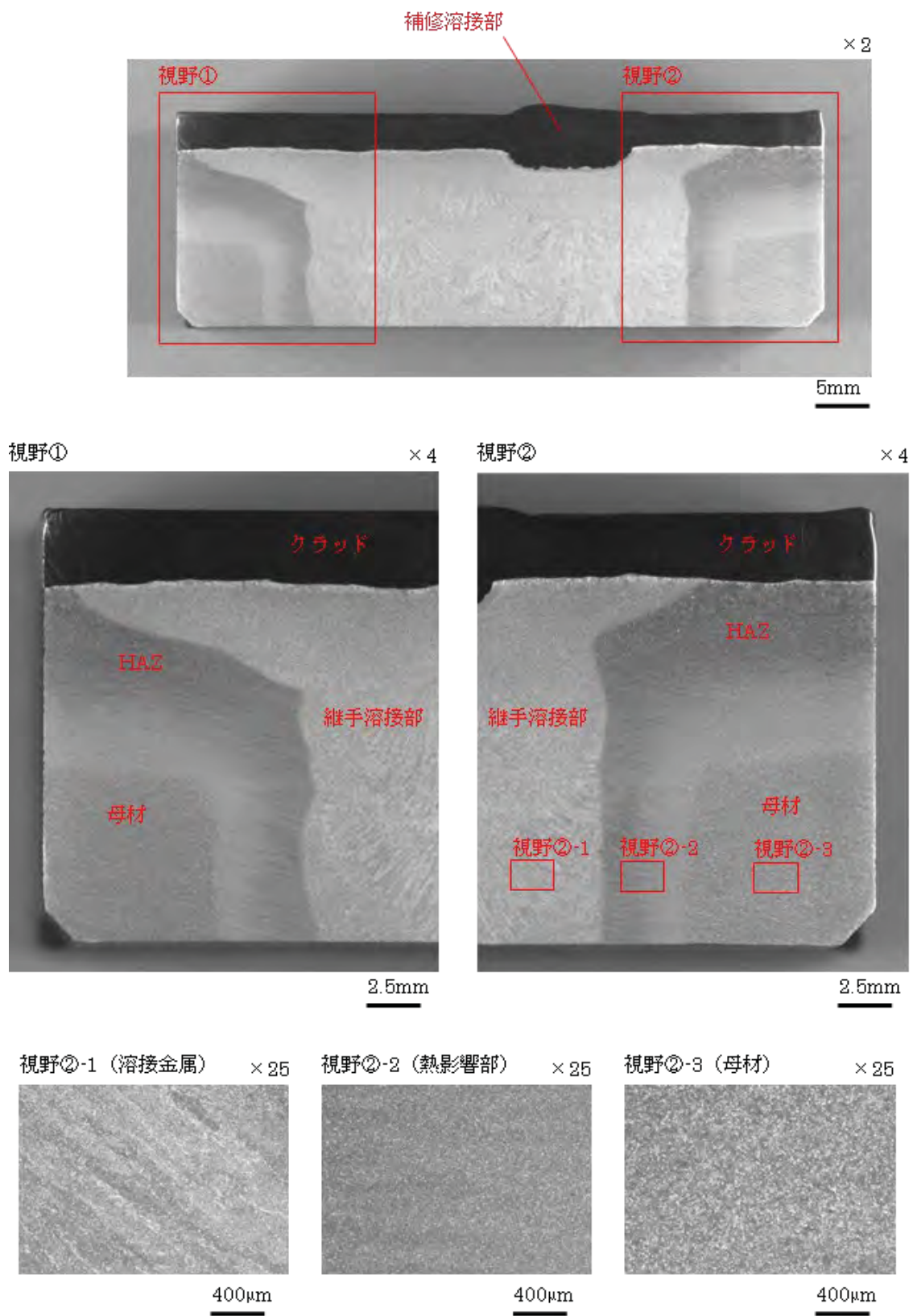


図 3.2.3.1-5(2) WIM 事業材の断面マクロ組織観察結果(試料 ID : S2T-1)

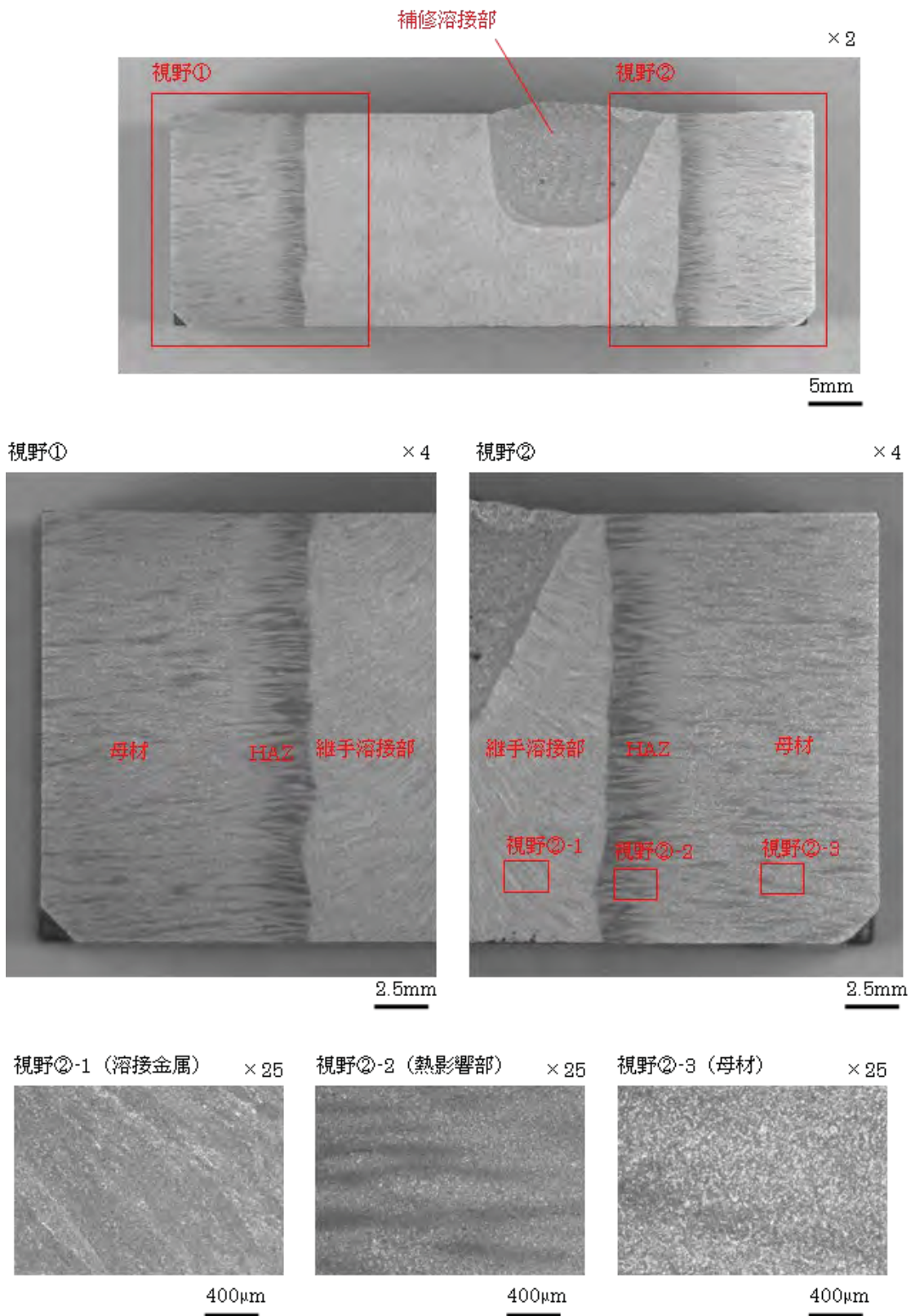


図 3.2.3.1-5(3) WIM 事業材の断面マクロ組織観察結果(試料 ID : 2T-1)

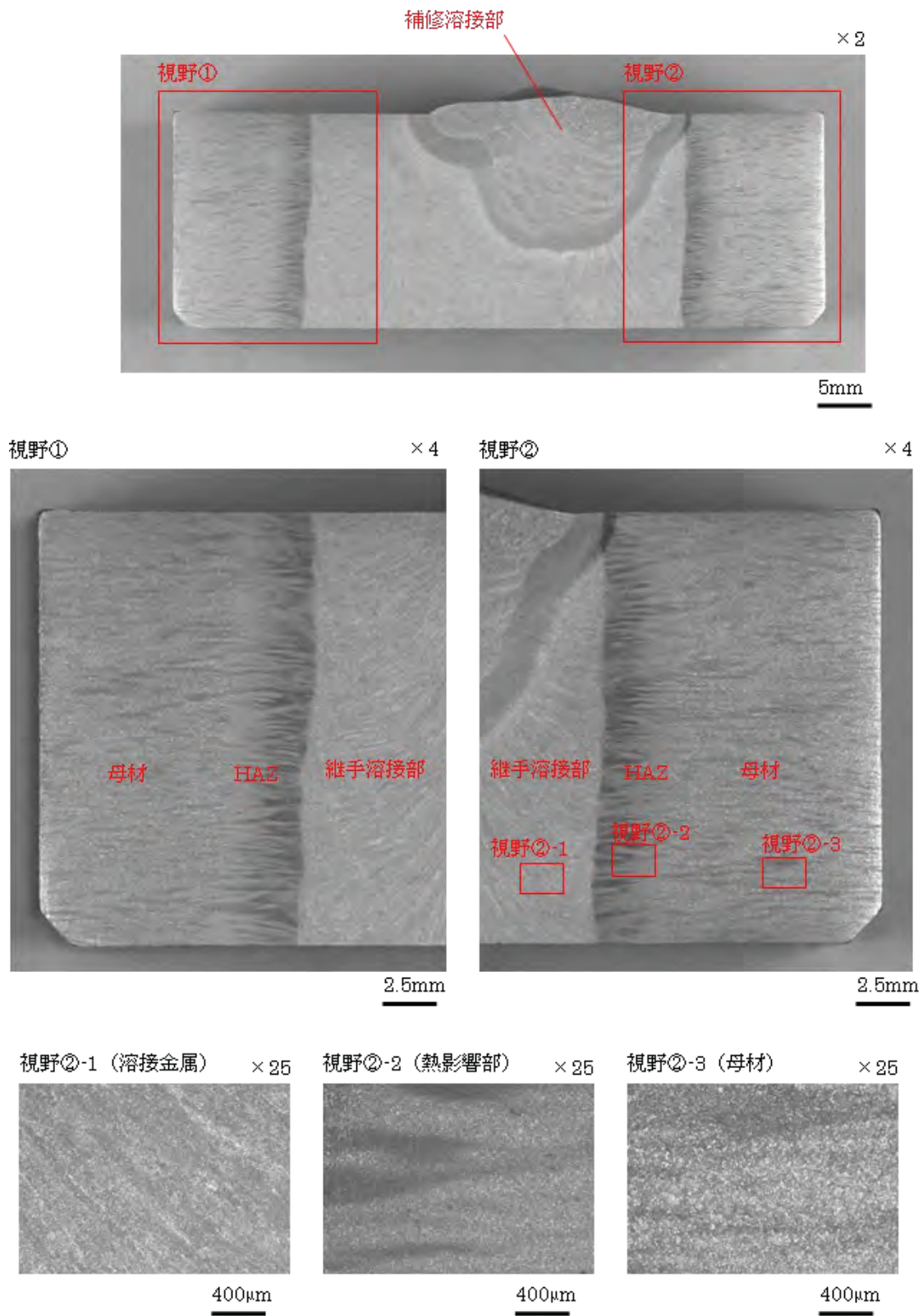
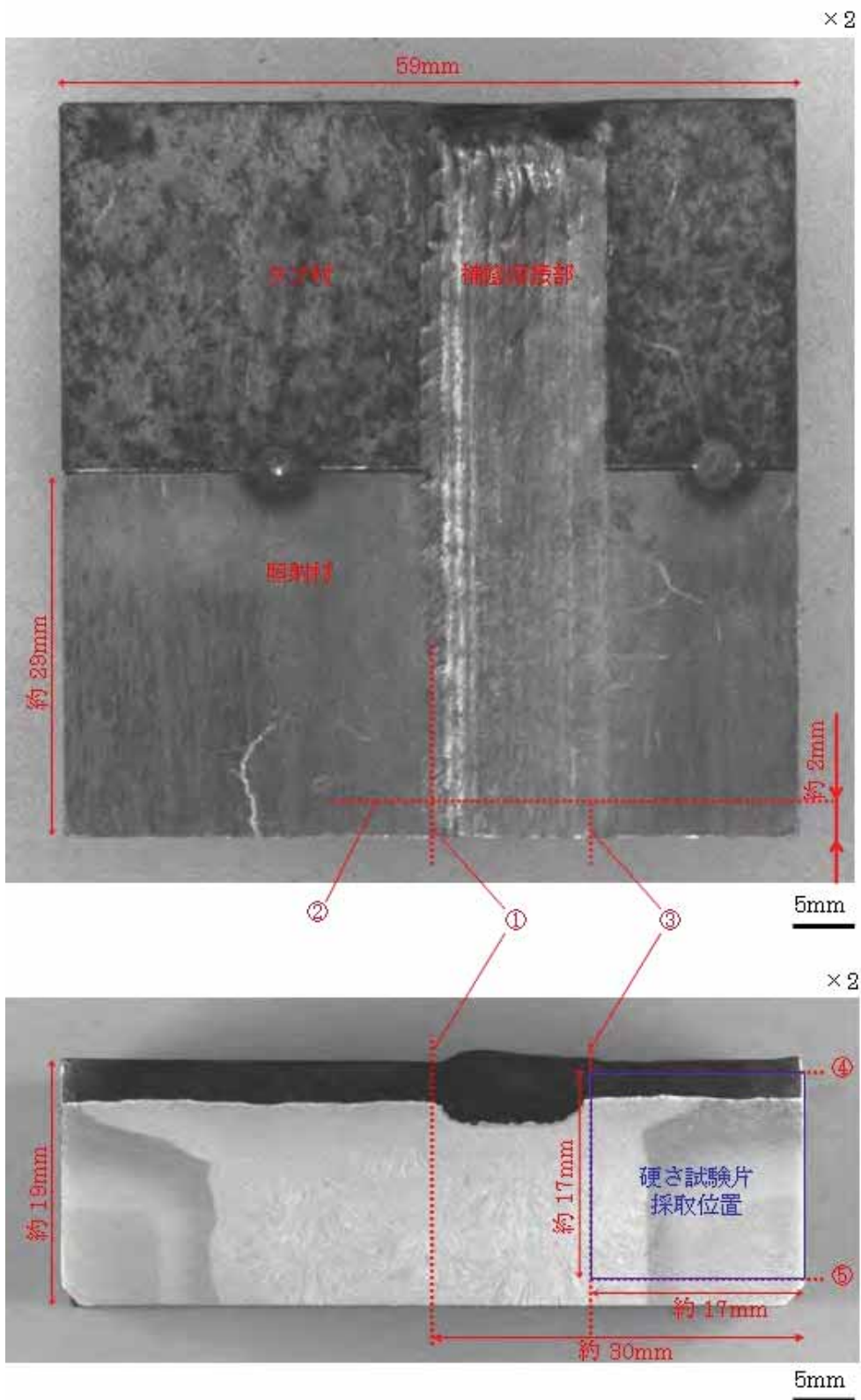


図 3.2.3.1-5(4) WIM 事業材の断面マクロ組織観察結果(試料 ID : 2Y-1)



注：図中の丸数字は切断順序を示す。

図 3.2.3.1-6 硬さ試験用試料採取イメージ（試料 ID：S2T-1）

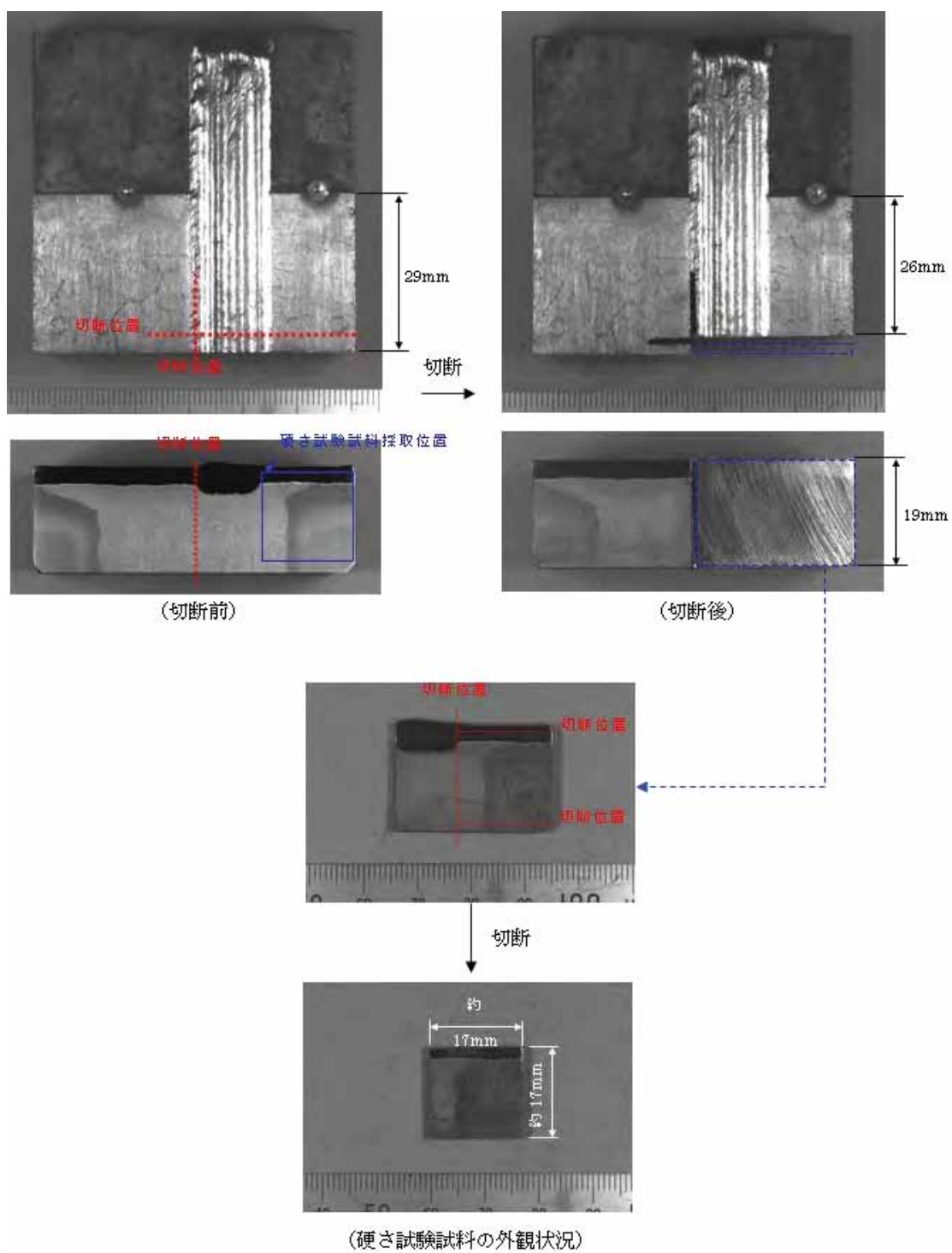


図 3.2.3.1-7 硬さ試験試料の切断採取状況 (試料 ID : S2T-1)

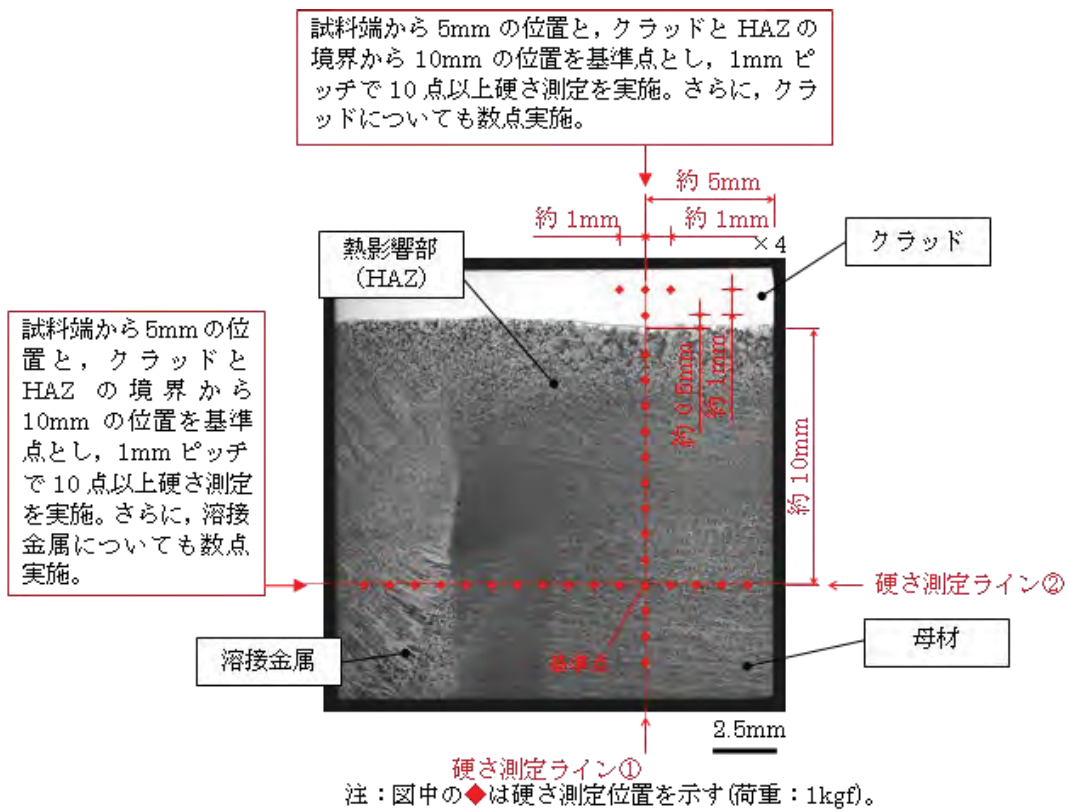


図 3.2.3.1-8 硬さ測定位置

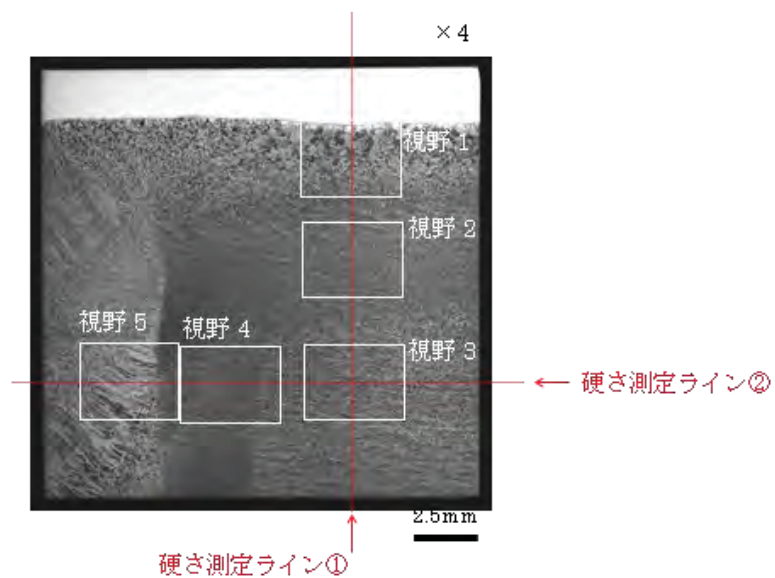
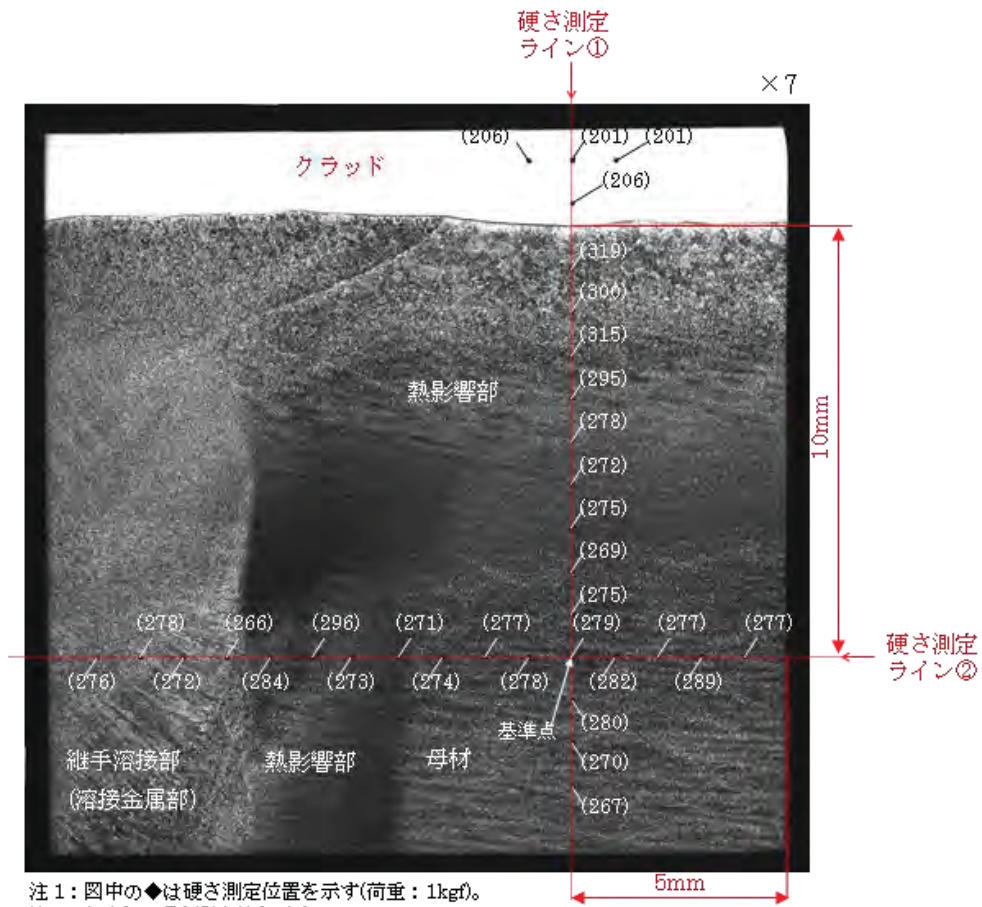
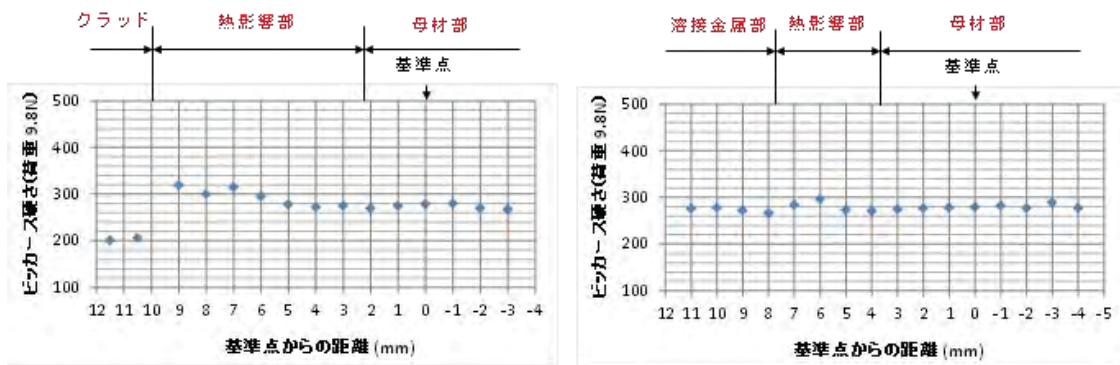


図 3.2.3.1-9 断面マイクロ組織観察位置



(硬さ測定位置と硬さ)



(硬さ測定ライン①の硬さ分布図)

(硬さ測定ライン②の硬さ分布図)

図 3.2.3.1-10 硬さ試験結果 (試料 ID : S2T-1)

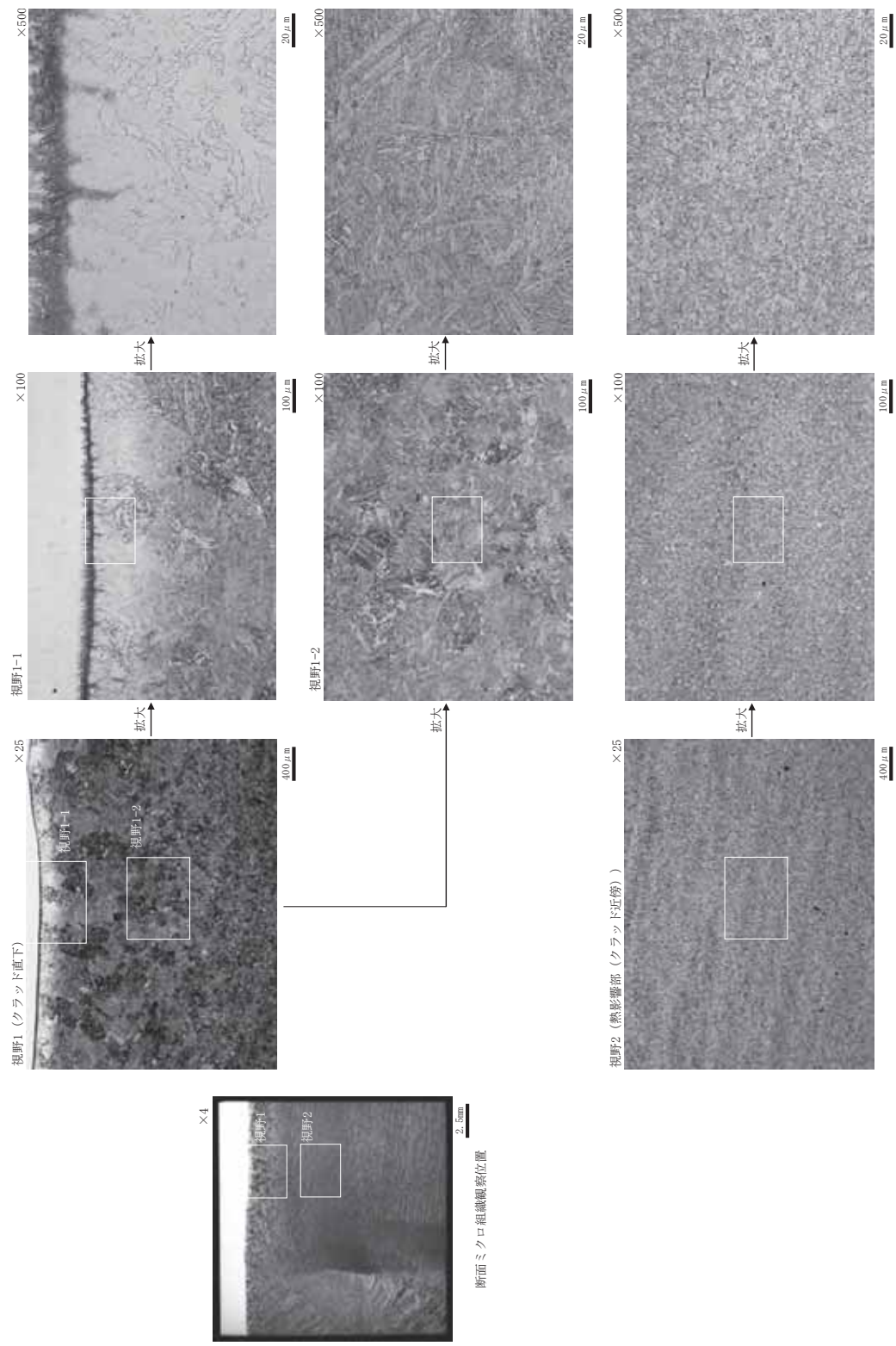


図 3.2.3.1-1(1) 断面ミクロ組織観察結果 (試料 ID : S2T-1)

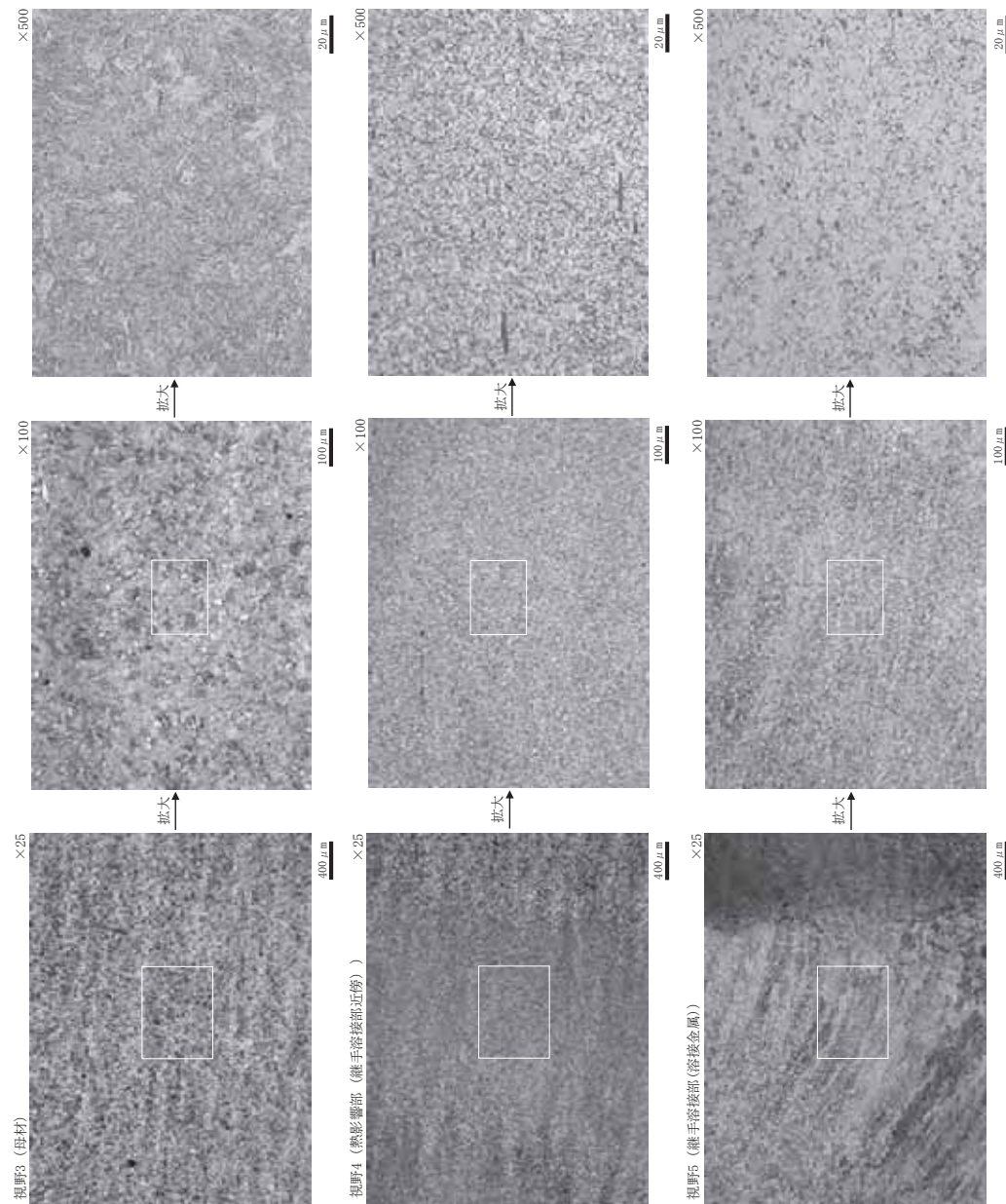


図 3.2.3.1-11(2) 断面ミクロ組織観察結果 (試料 ID : S2T-1)

(5) 試験片の採取部位及び採取本数の検討

マクロ組織観察及び硬さ試験の結果を基に、試料からの試験片の採取位置及び採取本数を検討した。採取を検討する対象試験片は、図 2-3 に示す Mini-C(T)試験片及び図 2-4 に示す SS-3 型引張試験片である。

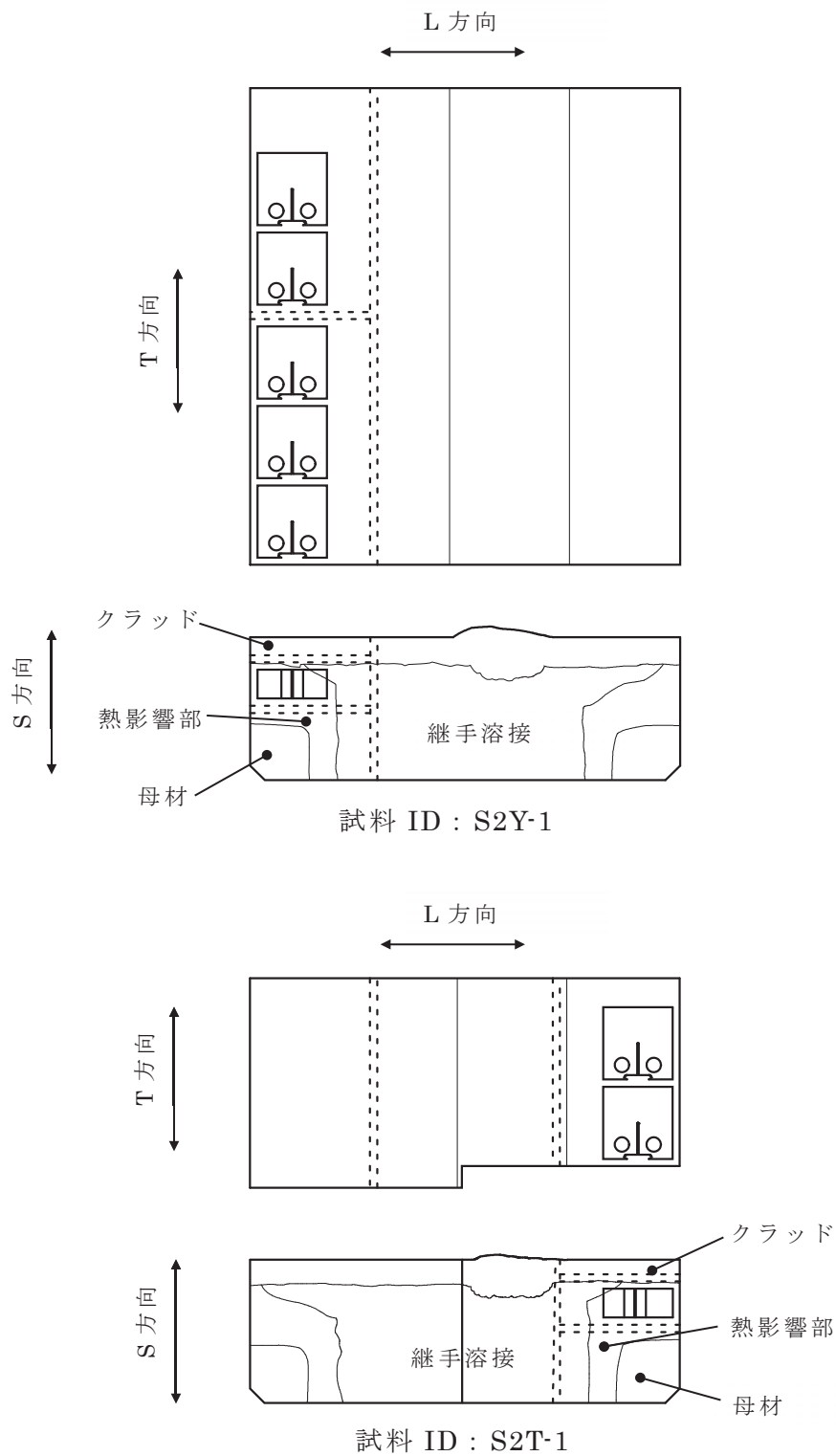
放電加工機の使用を前提に、表 3.2.3.1-5 に示すケースに分けて、破壊靱性試験片及び引張試験片の採取可能な最大の本数について検討を行った。なお、ケース 1 及びケース 3 では、Mini-C(T)試験片の亀裂先端及び SS-3 型引張試験片の平行部がクラッド下熱影響部になるように、ケース 2、ケース 4 及びケース 5 では、Mini-C(T)試験片の亀裂先端及び SS-3 型引張試験片の平行部が母材となるように、それぞれ採取方法を検討した。なお、図 3.2.3.1-5(1)及び図 3.2.3.1-5(2)に示すように、S2Y-1 の右側及び S2T-1 の左側については、クラッド直下部で溶接金属が母材方向に張り出しているため、クラッド直下からは試験片を採取しないこととした。

採取本数の検討では、シャルピー衝撃試験片の半割れ程度の大きさのブロックに切断した後、放電加工機で Mini-C(T)試験片と SS-3 型引張試験片を採取するイメージで検討した。なお、ケース 3 については、Mini-C(T)試験片の採取を優先したため、クラッド直下から SS-3 型引張試験片を採取できなかった。このため、クラッド直下に比べて母材の方が硬さは低いことから、破壊靱性試験における $K_{Jc(limit)}$ に対する Validity の評価に必要な 0.2%耐力のデータ取得を目的とした場合に母材のデータで Validity を保守側に評価できると考え、母材から SS-3 型引張試験片を採取することとした。採取本数の検討の結果、得られた採取方法の模式図を図 3.2.3.1-12 に示す。また、試験片採取検討結果の一覧を表 3.2.3.1-5 に示す。

表 3.2.3.1-5 試験片採取検討結果一覧

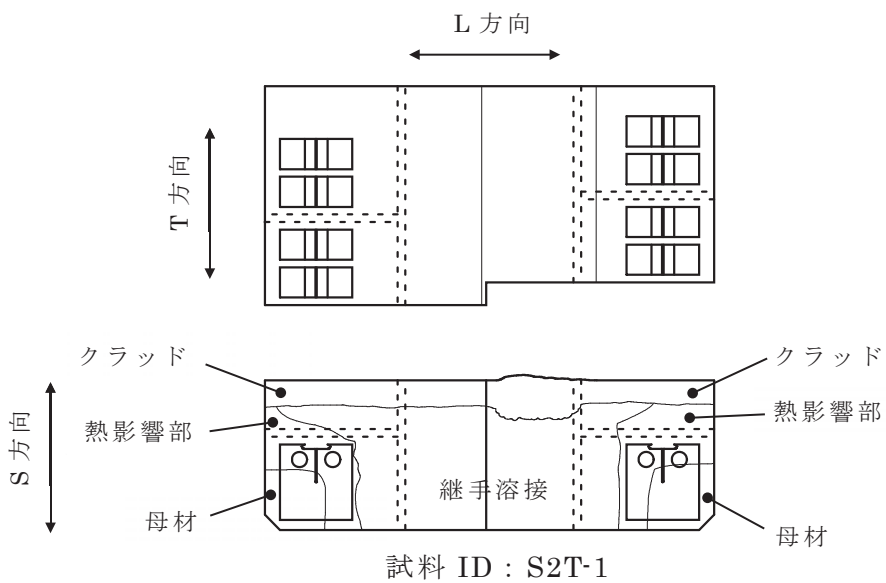
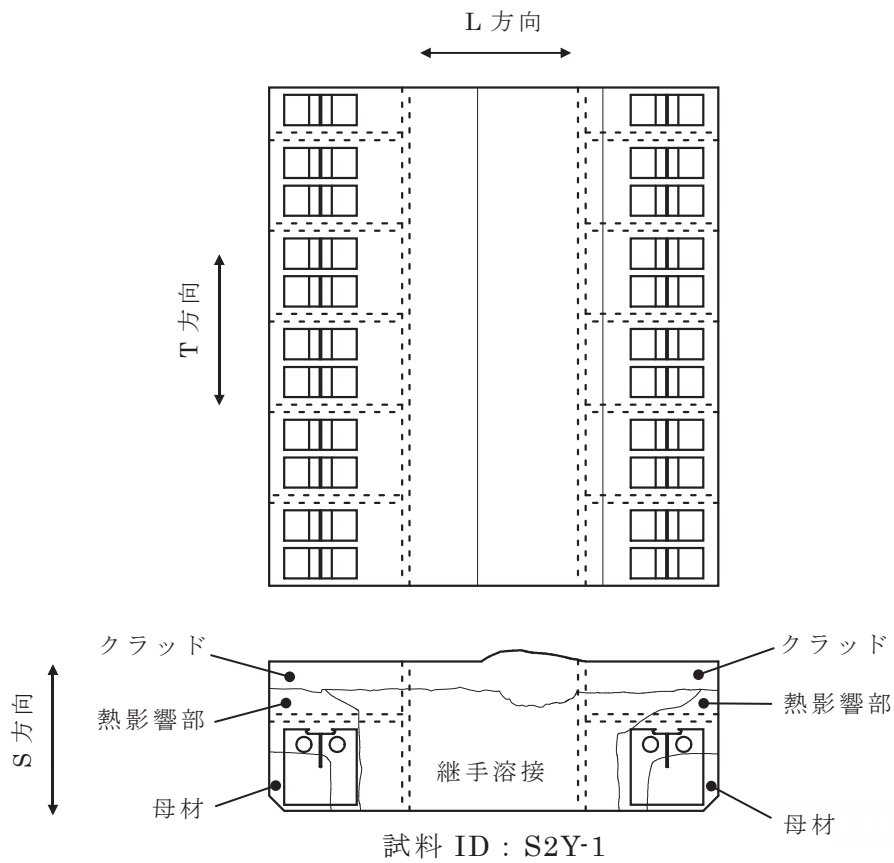
ケース	試験片採取方向 及び位置	試料 ID	採取試験片数	
			Mini-C(T)試験 片	SS-3 型 引張試験片
1	L-T (クラッド直下)	S2Y-1	7 個	—
		S2T-1		
2	L-S (クラッド下 10mm)	S2Y-1	30 個	—
		S2T-1		
3	T-L (クラッド直下)	S2Y-1	7 個	4 本 ^注
		S2T-1		
4	T-S (クラッド下 10mm)	S2Y-1	14 個	—
		S2T-1		
5	T-L (指定無し)	2T-1	24 個	8 本
		2Y-1		
		2Y-2		

注：母材から採取した試験片で代用する。



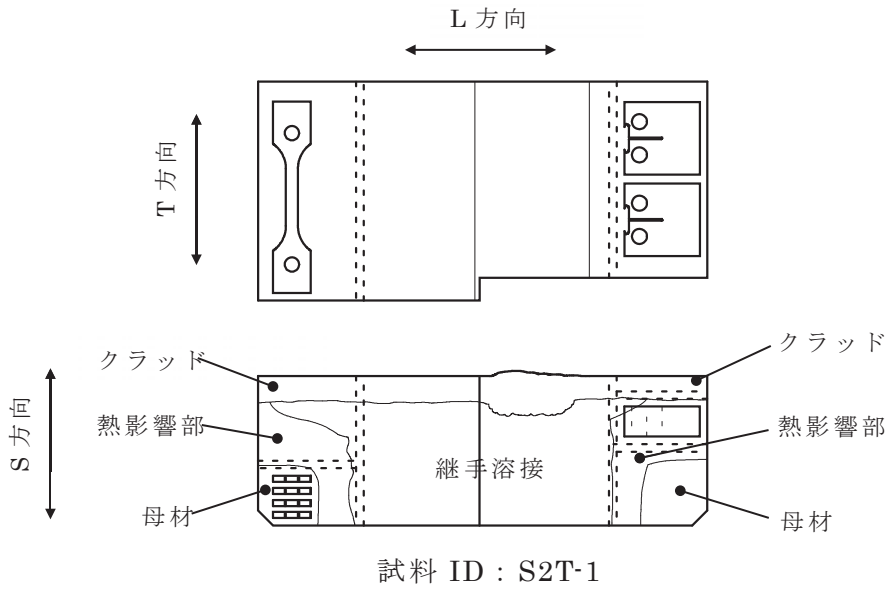
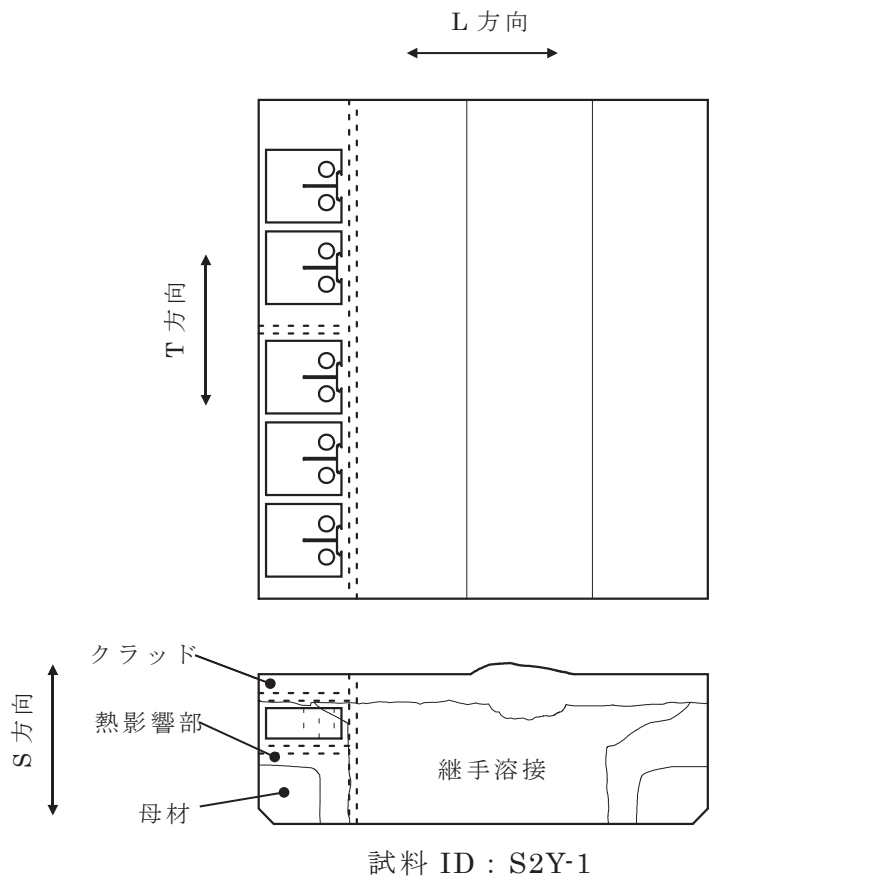
* 図中の点線は切断位置を示す。

図 3.2.3.1-12(1) WIM 事業材からの試験片採取方法 (ケース 1 : L - T 方向)



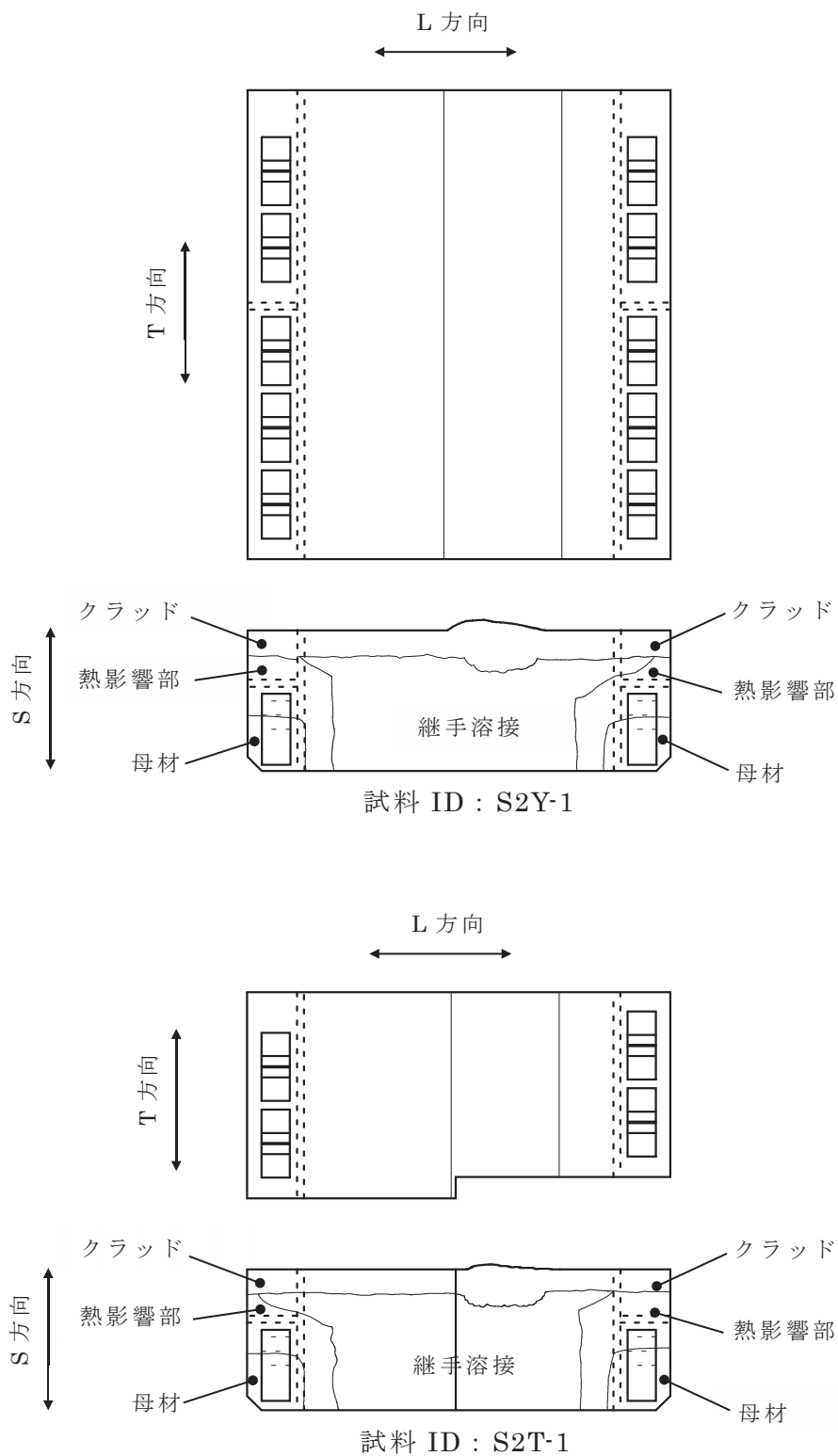
* 図中の点線は切断位置を示す。

図 3.2.3.1-12(2) WIM 事業材からの試験片採取方法(ケース 2 : L - S 方向)



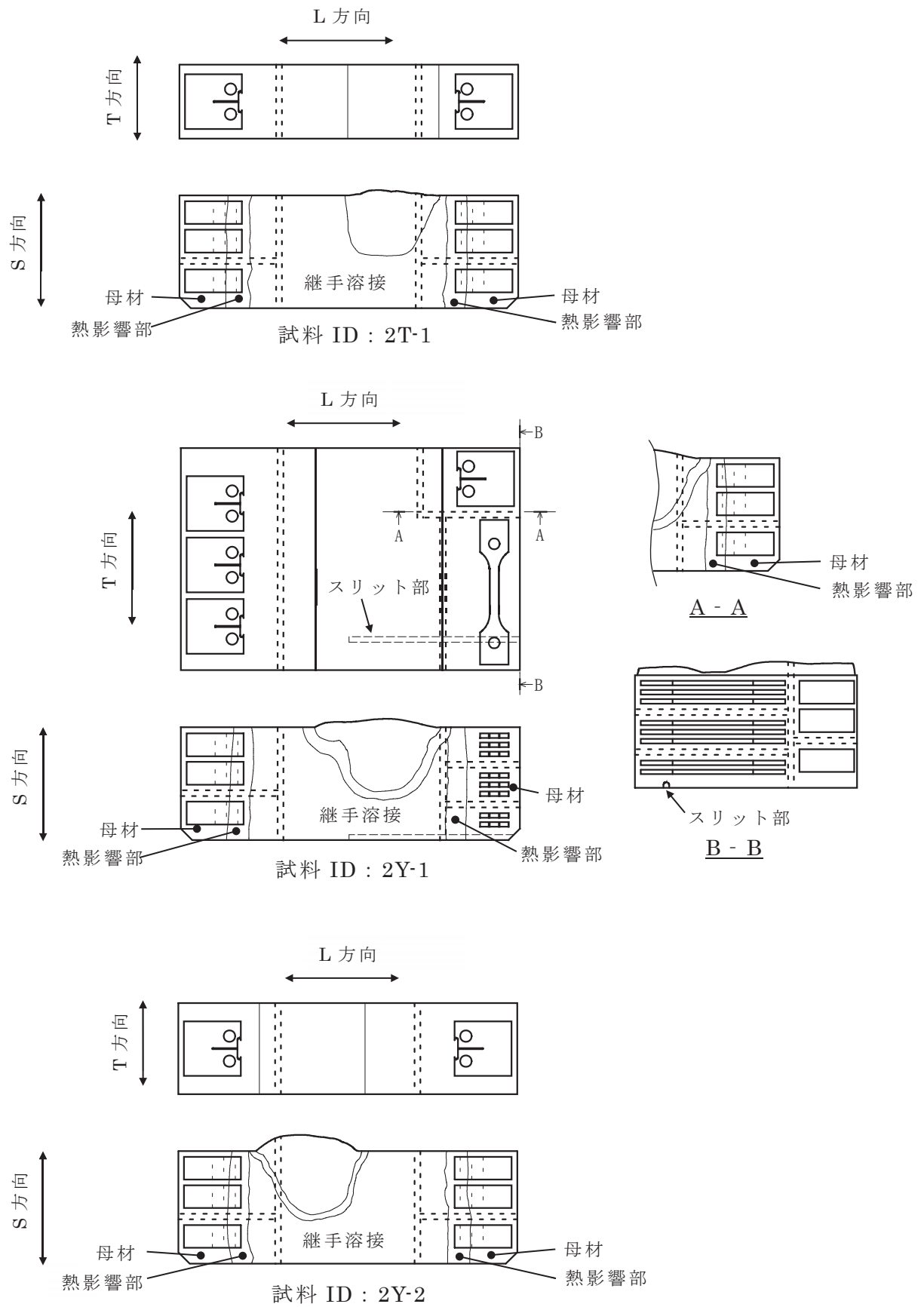
* 図中の点線は切断位置を示す。

図 3.2.3.1-12(3) WIM 事業材からの試験片採取方法(ケース 3 : T - L 方向)



* 図中の点線は切断位置(案)を示

図 3.2.3.1-12(4) WIM 事業材からの試験片採取方法(ケース 4 : T - S 方向)



* 図中の点線は切断位置を示す。

図3.2.3.1-12(5) WIM事業材からの試験片採取方法(ケース5: T-L方向)

3.2.3.2 未照射材の破壊靱性試験

平成 28 年度に製作したクラッド付き原子炉压力容器鋼(以下、初期プラント模擬材)について、板厚内部の破壊靱性分布の取得に着手した。表 3.2.3.2-1 に初期プラント模擬材の化学成分と代表的な機械的特性を示す。図 3.2.3.2-1 に初期プラント模擬材の形状を示す。また、表 3.2.3.2-2 及び図 3.2.3.2-2 に、初期プラント模擬材からの試験片採取方法を示す。クラッド下の母材部分から、監視試験片の採取方向に合わせた T-L 方向の各部と、健全性評価において想定する亀裂の方向に合わせた L-S 方向(亀裂最深点)及び L-T 方向(クラッド直下)で Mini-C(T)試験片を採取する計画である。平成 29 年度は、母材の代表値である板厚 1/4 とクラッド下 10mm 位置について、T-L 方向に Mini-C(T)試験片を採取し、破壊靱性試験を実施した。

表 3.2.3.2-1 初期プラント模擬材の化学成分と代表的な機械的特性

	化学成分(実績値), wt%									室温 σ_y , MPa	T_{41J} , °C
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu		
母材 (SQV2A)	0.19	0.25	1.43	0.013	0.014	0.58	0.10	0.48	0.13	464	-28
クラッド※ (SUS309L)	0.052	0.47	1.37	0.019	0.003	10.54	19.91	0.06	0.09		

※溶接後は SUS308 相当

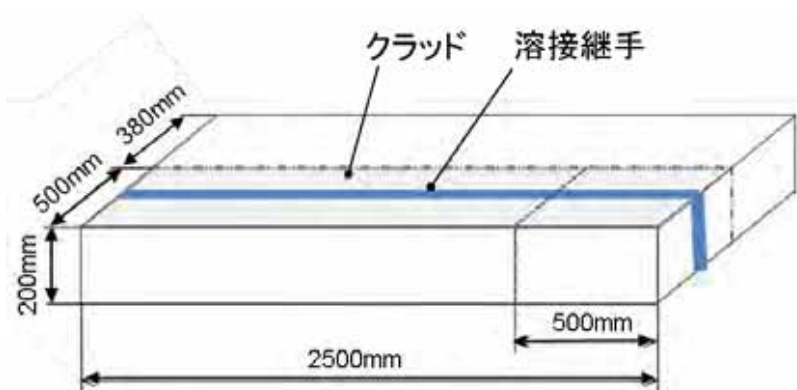


図 3.2.3.2-1 初期プラント模擬材の形状

表 3.2.3.2-2 初期プラント模擬材からの試験片採取方法

位置	方向
クラッド直下	T-L
	L-T
クラッド下 10mm※	T-L
	L-S
板厚 1/4※	T-L
母材表面	
母材表面下 10mm	

※平成 29 年度は、板厚 1/4 とクラッド下 10mm 位置の T-L 方向を採取

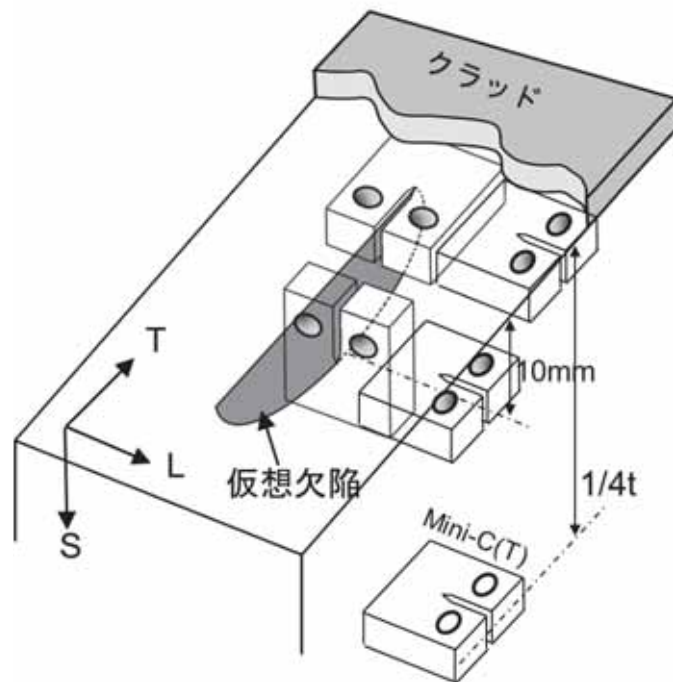


図 3.2.3.2-2 初期プラント模擬材からの試験片採取方法

(1) Mini-C(T)試験片の製作

製作した Mini-C(T)の寸法測定結果を表 3.2.3.2-3 に示す。試験片寸法は全て JEAC4216-2015^(3.2.3-10)の基準を満足した。また、疲労予亀裂導入条件は以下の通りである。

- ・応力比 : $R=0.1$
- ・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 : $K_{max} \leq 15 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

(疲労予亀裂成長量の最終 0.2mm の部分)

- ・疲労予亀裂長さ : 目標亀裂長さ $\cdots a/W=0.5$

表 3.2.3.2-3 寸法測定結果

Mini-CT試験片寸法検査記録												
鋼種	E1		検査使用機器	KEYENCE VR-3000								
記号	L	H	W	a	B	D	I	GL	F1	F2	ND	備考
	10.0±0.1	9.6±0.1	8.0±0.1	3.3±0.1	4.0±0.1	2.0±0.1	0.2	3.0±0.1	2.2±0.1	2.2±0.1	0.6	
0.25t01	10.01	9.62	7.98	3.24	4.00	2.01	0.20	2.98	2.24	2.17	0.69	
0.25t03	9.96	9.62	8.00	3.32	4.01	2.00	0.20	2.97	2.16	2.24	0.67	
0.25t04	10.03	9.62	8.01	3.23	4.01	2.01	0.20	3.00	2.25	2.16	0.64	
0.25t05	10.01	9.62	8.01	3.27	4.01	2.01	0.20	3.01	2.23	2.16	0.64	
0.25t06	10.02	9.62	8.03	3.26	4.01	2.01	0.20	3.01	2.23	2.17	0.62	
0.25t07	10.01	9.62	8.00	3.25	4.00	2.00	0.20	3.00	2.26	2.15	0.63	
0.25t08	10.01	9.62	8.00	3.26	4.01	2.00	0.20	3.01	2.23	2.16	0.63	
0.25t09	10.02	9.63	8.01	3.30	4.01	2.00	0.20	3.02	2.25	2.15	0.63	
0.25t10	10.02	9.63	8.00	3.23	4.01	2.00	0.20	2.99	2.24	2.17	0.63	
10TL01	9.98	9.61	8.00	3.24	4.02	2.00	0.21	3.04	2.19	2.22	0.58	
10TL02	9.98	9.60	8.00	3.21	4.02	2.00	0.20	3.03	2.17	2.22	0.62	
10TL03	9.99	9.61	8.00	3.23	4.02	2.00	0.20	3.02	2.18	2.23	0.60	
10TL05	9.99	9.62	8.02	3.28	4.02	2.01	0.20	3.04	2.22	2.17	0.60	
10TL06	9.98	9.60	7.99	3.21	4.03	2.01	0.20	3.03	2.18	2.21	0.62	
10TL07	9.99	9.62	8.01	3.25	4.02	2.01	0.20	3.02	2.20	2.19	0.61	
10TL08	9.98	9.61	8.01	3.23	4.01	2.01	0.22	3.02	2.21	2.20	0.60	
10TL09	10.00	9.60	8.01	3.27	4.00	1.99	0.20	3.00	2.21	2.19	0.64	
10TL10	9.98	9.60	8.00	3.24	3.96	2.01	0.20	3.02	2.18	2.22	0.62	
10TL11	10.05	9.61	8.01	3.25	3.98	2.00	0.20	2.97	2.21	2.19	0.68	

(2) 破壊靱性試験

製作した Mini-C(T) 試験片を用いて破壊靱性試験を行い、破壊靱性データを取得するとともに、マスターカーブ及び参照温度 T_0 を評価した。

板厚 1/4 位置については、JEAC4216-2015^(3.2.3-11)の推奨温度であるシャルピー遷移温度 ($T_{41J} = -28^{\circ}\text{C}$) よりも 56°C 低い温度を目安として試験を開始した。クラッド下 10mm 位置については、図 3.2.3-1 を参考に、板厚 1/4 位置よりも 35°C 程度低い温度を目安として試験を開始した。また、破壊靱性値の有効性判定のために必要となる降伏応力の温度依存性は、JEAC4216-2015^(3.2.3-11)で推奨されている日本溶接協会 WES-1108-1995^(3.2.3-12)の推定式を用いて、表 3.2.3.2-1 に示した室温の降伏応力から評価した。

$$\sigma_{ys(T)} = \sigma_{ys(RT)} \exp \left\{ \left[481.4 - 66.5 \ln \left(\sigma_{ys(RT)} \right) \right] \left[\frac{1}{T+273} - \frac{1}{293} \right] \right\} \quad (3.2.3.2-1)$$

ここで、 $\sigma_{ys(T)}$ は温度 T における降伏応力、 $\sigma_{ys(RT)}$ は室温の降伏応力である。

破壊靱性試験結果を表 3.2.3.2-4 に示す。板厚 1/4 位置については、全 9 本の試験を行い、8 本が有効な破壊靱性値となった。内 1 本が有効な破壊靱性の上限 $K_{Jc(limit)}$ を超え Invalid となった。クラッド下 10mm 位置については、全 10 本の試験を行い、8 本が有効な破壊靱性値となった。内 2 本が有効な破壊靱性の上限 $K_{Jc(limit)}$ を超え Invalid となった。

荷重-変位曲線を図 3.2.3.2-3 及び図 3.2.3.2-4 に示す。全ての試験においてポップインの発生は無かった。また、破壊は全て脆性破壊であった。

破壊靱性参照温度 (T_0) の評価結果及びマスターカーブをそれぞれ表 3.2.3.2-5 及び図 3.2.3.2-5 に示す。板厚 1/4 位置及びクラッド下 10mm 位置とも、有効な T_0 が得られた。板厚 1/4 位置に比較してクラッド下 10mm 位置の T_0 は 30°C 程度低く、良好な靱性を示した。

シャルピー遷移温度 T_{41J} と参照温度 T_0 の相関を図 3.2.3.2-6 に示す。図には Sokolov らによる米国データ^(3.2.3-13)も併せて示している。板厚 1/4 位置の材料は、米国データの相関式にほぼ一致していた。

表 3.2.3.2-4 破壊靱性試験結果

採取位置	ID	温度, °C	B=B _N , mm	W, mm	a ₀ , mm	K _{Jc} , MPa√m	K _{Jc} limit MPa√m	Validity K _{Jc} < limit
板厚1/4	0.25T01	-85	4.00	7.98	4.09	83.17	127.94	valid
	0.25T03	-65	4.01	8.00	4.07	165.77	127.66	invalid
	0.25T04	-85	4.01	8.01	4.05	101.12	129.03	valid
	0.25T05	-85	4.01	8.01	4.14	106.94	127.66	valid
	0.25T06	-85	4.01	8.03	4.10	95.22	128.64	valid
	0.25T07	-85	4.00	8.00	4.14	103.54	127.41	valid
	0.25T08	-85	4.01	8.00	4.05	80.01	128.87	valid
	0.25T09	-85	4.01	8.01	4.13	72.54	127.83	valid
	0.25T10	-85	4.01	8.00	4.11	85.18	127.86	valid
クラッド下 10mm	10TL01	-125	4.02	8.00	4.14	61.73	135.37	valid
	10TL02	-105	4.02	8.00	4.19	74.30	130.06	valid
	10TL03	-85	4.02	8.00	4.05	231.62	128.83	invalid
	10TL05	-105	4.02	8.02	3.99	128.69	133.74	valid
	10TL06	-105	4.03	7.99	4.04	108.49	132.44	valid
	10TL07	-105	4.02	8.01	4.12	111.58	131.49	valid
	10TL08	-105	4.01	8.01	4.10	139.60	131.75	invalid
	10TL09	-115	4.00	8.01	4.12	98.13	133.48	valid
	10TL10	-115	3.96	8.00	4.03	66.38	135.00	valid
	10TL11	-115	3.98	8.01	3.98	96.50	135.73	valid

表 3.2.3.2-5 参照温度 T₀ の評価結果

採取位置	dK/dt, MPa√m/ s	試験数	Valid	Invalid	棄却	T ₀ , °C	Validity of T ₀	σ, °C	ワイブル係 数 m
板厚 1/4	0.5	9	8	1	0	-47	Valid	7.8	5.8
クラッド下 10mm	0.5	10	8	2	0	-81	Valid	7.5	3.5

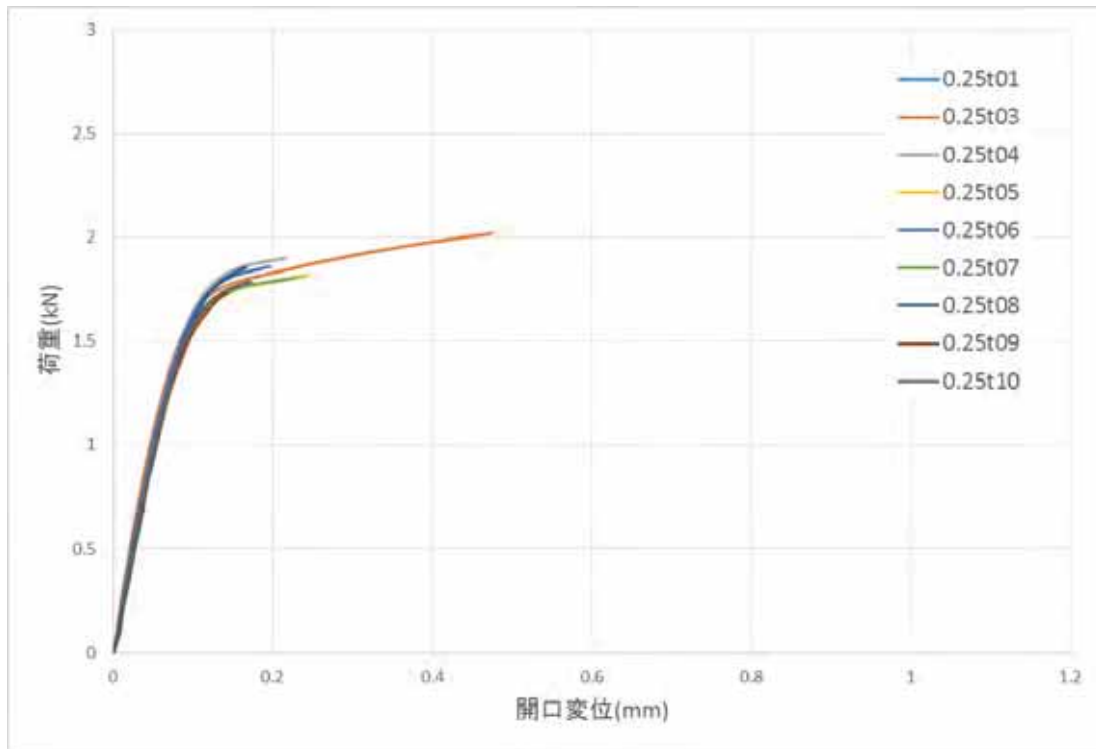


図 3.2.3.2-3 荷重-変位曲線(板厚 1/4)

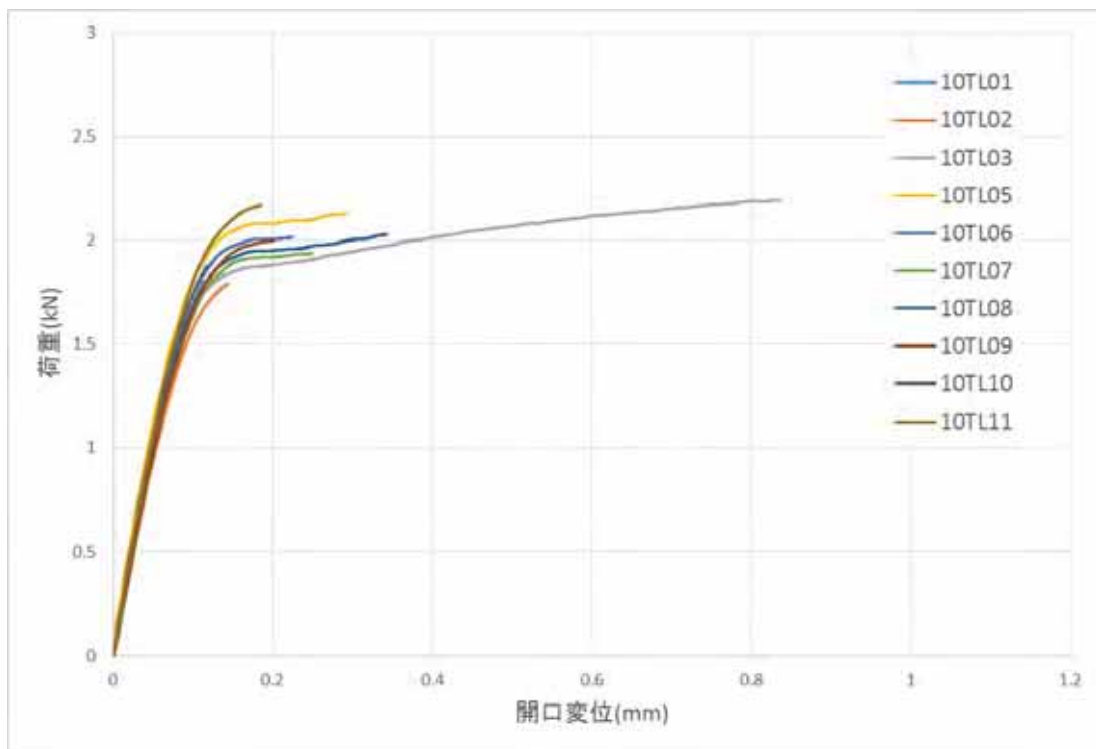


図 3.2.3.2-4 荷重-変位曲線(クラッド下 10mm)

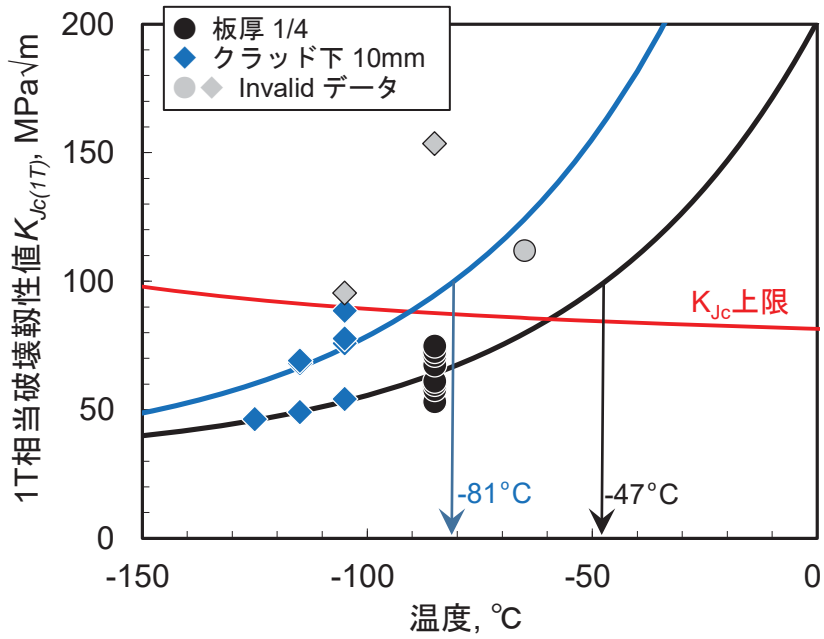


図 3.2.3.2-5 破壊靱性値及びマスターカーブ

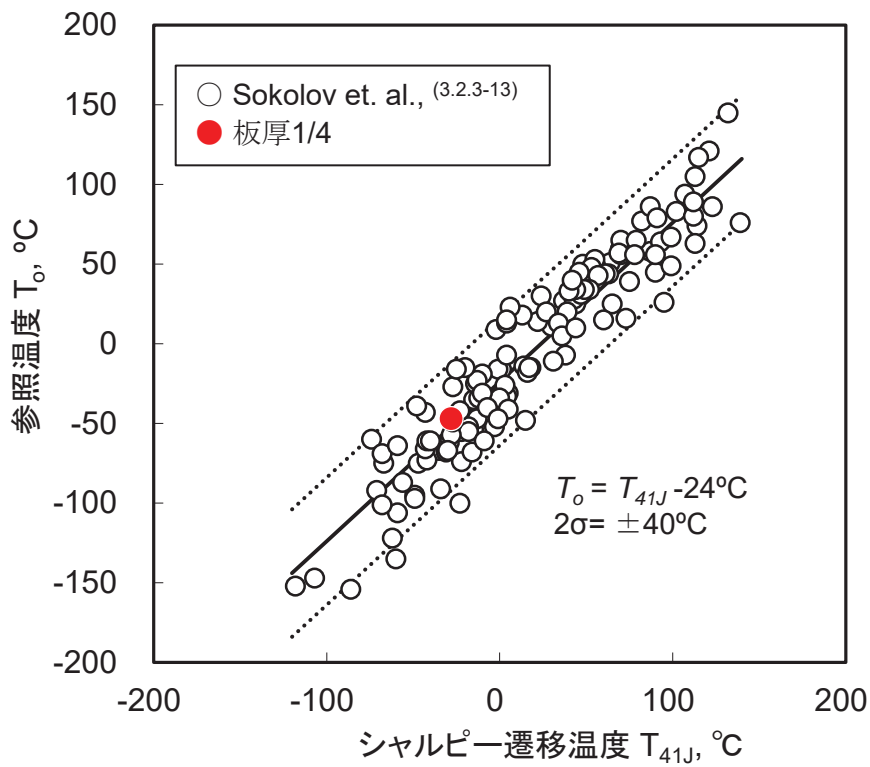


図 3.2.3.2-6 板厚 1/4 位置のシャルピー遷移温度 T_{41J} と参照温度 T_0 の相関

(3) 破壊靱性試験装置の点検及び精度検査

破壊靱性試験に先立ち、試験装置の点検を実施し、動作や精度に問題がないことを確認した。表 3.2.3.2-6 に検査結果を示す。

表 3.2.3.2-6 (1) 破壊靱性試験装置の検査結果(1/6)



ElectroPuls System
定期点検チェックリスト(1/6)

お客様名称：国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 殿

実施期間：2017年10月17日～10月20日

Model：E10000

テスト担当者：高 美喜雄

Serial No.：E10KXLL6960

JS No.：3170726

項目	処置	結果	備考
A. ElectroPuls Tower			
-1. 電源電圧の確認 200 OR 100 (VAC) 5, 24, +15, -15 (VDC) 基準電圧の±10%以内	CK	OK	207.4VAC +5.215VDC/+26.51VDC +15.138VDC/-15.135VDC
-2. ケーブル接続部 接触不良有無の確認	CK	OK	
-3. Tower内 Air Filterの交換	RP CL	OK	交換又は清掃 今回交換した。
-4. Tower冷却Fanの動作確認	CK CL	OK	異常音無。現在3年経過。 5年経過交換推奨
-5. Power Amplifier 接続部 接触不良有無の確認	CK	OK	
-6. Power Amplifier LED表示確認	CK	OK	正常表示。
-7. Power Amplifier部 冷却ファン動作 Air Filterの交換	CK RP	OK	異常音無し。3年経過。 5年経過後交換推奨 AIR FILTER 交換した。
-8. Tower内埃の除去	CK CL	OK	

CK：点検 CL：清掃 AD：調整 LB：潤滑 RP：交換 PT：塗装
OK：良好 NE：普通 NG：不良

表 3.2.3.2-6 (2) 破壊靱性試験装置の検査結果(2/6)



ElectroPuls System
定期点検チェックリスト(2/6)

項目	処置	結果	備考
B. MMI 付属の場合			
-1. 電源投入時全LED点灯確認	--	--	未装備。 対象外。
-2. 自己診断正常完了の確認	--	--	*
C. Handset			
-1. 0 と 1 と II 繰返し押してLEDの点灯・消灯が正常か確認	OK	OK	正常に点灯している。
-2. 非常停止ボタンを押す 777メニューOFF確認	OK	OK	動作正常。
-3. Jog Up と Jog Down ボタンを押す 777メニュー上下動の確認	OK	OK	E10000LT: ←→ (含む) 動作正常。 31.5mm ~ 31.5mm
-4. Thumb Wheel (微少動作) の回転 777メニューの微少動作確認	OK	OK	動作正常。
-5. Crosshead を Unclamp とし Crosshead lift up と Down の確認	OK	OK	動作正常。 LED 点灯正常。
-6. Pneumatic Grip 動作確認	--	--	未装備。 対象外。
-7. Key Switch の動作確認。	OK RP	OK	Soft Touch Key の交換。

CK:点検 CL:清掃 AD:調整 LB:潤滑 RP:交換 PT:塗装
OK:良好 NE:普通 NG:不良

表 3.2.3.2-6 (3) 破壊靱性試験装置の検査結果(3/6)



ElectroPuls System
定期点検チェックリスト(3/6)

項目	処置	結果	備考
D. Crosshead Components			
-1. Motor 用冷却ファン及び Cooler ユニットの動作確認	CK RP	OK	冷却動作正常。
-2. Cluster LED の点灯確認 White=0, Green=I OR II, Yellow=Temp Warning, Red=Motor Over Temp, Blue=Emergency Stop	CK	OK	各状態における LED の点灯正常。
-3. Actuator Brake 機能 Actuator OFF の時 1mm 以内	CK	OK	Actuator off 時-0.35mm
-4. Motor の端子間抵抗 U-V-W U-E, V-E, W-E	CK	OK	U-V:0.72, U-W:0.72, V-W:0.72 U-E, U-V, U-W:∞
-5. Power Amplifier (L, R) Air Filter の交換	CK RP	OK	交換した。 1 年毎交換推奨
E. Control Console			
-1. Load Cell の校正及び Balance	CK	OK	
-2. Load Cell 精度検査	CK	OK	契約上の精度検査。
-3. 伸び計の校正及び Balance	CK	OK	
-4. 伸び計精度検査			契約上の精度検査。
-5. Position Control において Position のノイズレベル Jitter<0.004mm	CK	OK	1000Point/sec ノイズレベル±4.4%以下
-6. Low Power Mode でリフト動作確認	CK	OK	荷重検出が低荷重動作で あること

CK:点検 CL:清掃 AD:調整 LB:潤滑 RP:交換 PT:塗装
OK:良好 NE:普通 NG:不良

表 3.2.3.2-6 (4) 破壊靱性試験装置の検査結果(4/6)



ElectroPuls System
定期点検チェックリスト(4/6)

項目	処置	結果	備考
-7. LVDTの精度確認	CK	OK	E1000, E3000 契約上の精度検査
-8. Encoderの精度確認	--	--	E1000, E3000, E10000 契約上の精度検査
-9. 各ChannelにおけるセーフティリミットMAXとMINの動作確認	CK	OK	各チャンネル動作正常。
-10. Waveform Generator Waveform: Sine Frequency: 10Hz Amplitude: 0.2mm	CK	OK	
-11. Analog Output 出力確認	CK	OK	
F. Computer			
-1. 試験条件ファイルなどのBackup			保存ファイル名は、点検日
-2. 各パラメータの保存 Save a User State			File名は、点検日

CK:点検 CL:清掃 AD:調整 LB:潤滑 RP:交換 PT:塗装

OK:良好 NE:普通 NG:不良

表 3.2.3.2-6 (5) 破壊靱性試験装置の検査結果(5/6)



ElectroPuls System
定期点検チェックリスト(5/6)

項目	処置	結果	備考
G. Heat Exchanger			
-1. フィルター交換	CK RP	OK	
-2. クーラントのチェック	CK RP	OK	クーラント交換した。
-3. クラントの量の確認	CK RP	OK	クーラント液交換。 注入口より下 70mm
-4. 流量の確認	CK	OK	3.5 l/min
-5. 冷却ファンの速度確認	CK	OK	

CK:点検 CL:清掃 AD:調整 LB:潤滑 RP:交換 PT:点検
OK:良好 NE:普通 NG:不良

表 3.2.3.2-6 (6) 破壊靱性試験装置の検査結果(6/6)



ElectroPuls System
定期点検チェックリスト(6/6)

交換部品				
	品名	部品番号	数量	備考
1.	Air Filter 8800 Card Cage	138-1-1011	1	
2.	Air Filter(Big)for Power Amp/Heat Exchanger	T1748-4177	2	
3.	Air Filter(Small)for Power Amp/Heat Exchanger	T1748-4178	3	
4.	HEAT TRANSFER FLUID SOLAR	105-1-1064	1	
5.	Power Supply	111-1-1006	1	
6.	Soft Touch Key	T1735-1044	1	
7.				
総合評価				
E10000 型試験機は機能・動作・精度いずれも良好です。				

3.2.3.3 監視試験片採取位置の代表性に係る試験のまとめ

既往事業で使用された照射材(WIM 事業材)について、材料の寸法測定や組織観察等を実施した。板厚 1/4 位置及び PTS 評価対象部位であるクラッド下 10mm 位置から十分な数量の試験片が採取可能であることを確認した。

また、平成 28 年度に製作したクラッド付きの原子炉圧力容器鋼(初期プラント模擬材)の破壊靱性試験に着手し、板厚 1/4 位置及びクラッド下 10mm 位置の破壊靱性値を取得した。板厚 1/4 位置に比較してクラッド下 10mm 位置の参照温度は 30°C 程度低く、良好な靱性を示した。

参考文献

- (3.2.3-1) 一般社団法人日本電気協会 原子力規格委員会 JEAC 4206-2016 “原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法”, (2016)
- (3.2.3-2) 一般社団法人日本電気協会 原子力規格委員会 JEAC 4201-2007[2013年追補版] “原子炉構造材の監視試験方法”, (2013)
- (3.2.3-3) 平成 25 年度 軽水炉燃材料詳細健全性調査報告書, (2014)
- (3.2.3-4) 原子力安全基盤機構「平成 10 年度 原子力プラント照射材料の補修溶接技術確証試験に関する事業報告書」、平成 11 年 3 月
- (3.2.3-5) 原子力安全基盤機構「平成 11 年度 原子力プラント照射材料の補修溶接技術確証試験に関する事業報告書」、平成 12 年 3 月
- (3.2.3-6) 原子力安全基盤機構「平成 12 年度 原子力プラント照射材料の補修溶接技術確証試験に関する事業報告書」、平成 13 年 3 月
- (3.2.3-7) 原子力安全基盤機構「平成 13 年度 原子力プラント照射材料安全補修溶接技術に関する事業報告書」、平成 14 年 3 月
- (3.2.3-8) 原子力安全基盤機構「平成 14 年度 原子力プラント照射材料安全補修溶接技術に関する事業報告書」、平成 15 年 3 月
- (3.2.3-9) 原子力安全基盤機構「平成 15 年度 原子力プラント照射材料安全補修溶接技術に関する報告書」、平成 16 年 6 月
- (3.2.3-10) 原子力安全基盤機構「平成 16 年度 原子力プラント照射材料安全補修溶接技術に関する報告書」、平成 17 年 8 月
- (3.2.3-11) 一般社団法人日本電気協会 原子力規格委員会 JEAC4216-2015 “フェライト鋼の破壊靱性参照温度 T_0 決定のための試験方法”, (2015)
- (3.2.3-12) 一般社団法人日本溶接協会 WES1108-1995 “亀裂開口変位(CTOD)試験方法,” (1995)
- (3.2.3-13) Sokolov, M. A., and Nanstad, R. K., Oak Ridge National Laboratory, Report No. NUREG/CR-6609 (2000).

3.3 最新知見の調査

原子炉圧力容器鋼の破壊力学評価に係る試験及び照射脆化予測法に関する研究の合理的な推進に当たり、同様の目的や着眼点で行われた研究成果について、既往の文献、国内学会、国際会議等の情報を調査した。

3.3.1 PTS模擬試験に関する既往知見の調査

(1) 調査内容

① 調査の概要

計画中の PTS 模擬試験の試験条件や試験方法検討の参考とするため、PTS 模擬試験、及び大型試験体を用いた類似の目的や着眼点で行われた既往の知見を調査した。その結果、11 のプロジェクトを抽出し、成果内容のレビューを行った。

表 3.3.1-1 は、抽出された成果について、用いられた試験体の形状、模擬亀裂形状、荷重負荷形態、試験温度等の観点で整理した結果を示す。このうち HSST^(3.3.1-3)、NESC-II^(3.3.1-5)、NESC-IV^(3.3.1-5)で行われた試験が、本事業で計画中の PTS 模擬試験が破壊試験条件と比較的近いことが判った。

十字型試験体を用いた破壊試験の事前検討に当たり、破壊靱性参照温度 T_0 に着目して、上記 3 プロジェクトの成果を中心に亀裂の挙動に影響する要因の分析とそれらの傾向を調査し、PTS 模擬試験の十字型試験体に付与した半楕円亀裂の破壊挙動にと T_0 評価への影響について検討した。

② 結果

a. 拘束度

図 3.3.1-1 は十字型試験体を用いたクラッド貫通亀裂モデルでの T-stress 検討結果を示す。亀裂前縁のクラッド熱影響(HAZ)部と亀裂最深部では T-Stress の挙動が異なり、亀裂最深部の方が拘束が緩くなる傾向であることが示されている。また図 3.3.1-2 に示すように、亀裂最深部であれば、単軸、2 軸の T-Stress の差は小さく、拘束の相違が小さいとされている。

b. 負荷応力の多軸効果

表 3.3.1-2 は CT 試験片と単軸、2 軸での破壊試験における T_0 の変化、また図 3.3.1-3 は多軸度に応じた K_{Ic} 値の変化を示す。この図と図 3.3.1-2 の比較より、CT 試験片(青枠)の T_0 (-48~-46°C) と比べて、十字型試験体(赤枠)の T_0 は単軸で -84°C、2 軸で -71~-60°C となることが示されている。また CT 試験片と比べて 2 軸負荷の十字型試験体では、 T_0 が約 15°C 低温側へシフトすることが判る。

図 3.3.1-4 に 1TCT 試験片や SE(B)試験片、十字型試験体における破壊靱性値の比較を示す。この結果から、十字型試験体(赤枠)の 2 軸度が大きくなるほど、CT 試験片(青枠)の T_0 に近づく傾向になることが判る。

さらに図 3.3.1-5 は単軸や 2 軸の十字型試験、及び SE(B)試験で亀裂深さに応じた破壊靱性値の比較を示すが、SE(B)の亀裂が深い条件と十字型試験(2 軸)はほぼ同じ T_0 を示すことが示されている。

c. 亀裂前縁長さ

図 3.3.1-6 に示す結果では、CT 試験片の K_{Ic} 値との比較を行うためには、亀裂前縁の K 値最大値ではなく亀裂前縁の等価 K 値($K_{I, eff}$: 1T 換算)で評価すべきであると主張されており、等価 K 値を適用するとマスターカーブの 5%~95%範囲内に収まることが示されている。なお引用したグラフには亀裂深さ 17.8mm、長さ 50.8mm での等価 K 値が示されており、換算すると K 値最大値よりも若干小さくなることに注意が必要である。

d. クラッド

模擬亀裂に対してクラッド施工した場合の T_0 に与える影響を評価した結果を調査したが、同一試験片、同一亀裂形状でクラッド有無、またクラッド部の非貫通と貫通条件で破壊挙動を比較した結果は抽出されなかった。

参考まで貫通亀裂に対してクラッドの有無が破壊靱性値へ及ぼす影響を評価した結果を表 3.3.1-3 及び図 3.3.1-7 に示す。なお、表及び図中に表記された“HAZ”は、クラッド施工によって形成した溶接熱影響(HAZ)部を切除した後に評価した結果であることを示す。破壊靱性に及ぼすクラッドの有無の影響は、負荷応力の 2 軸度が大きくなると、ほとんど差がなくなることが示されている。また 2 軸負荷の場合は、ASME の K_{Ic} 曲線上にほぼ近いことが判る。

(2) 調査結果の評価

既往知見の調査と評価の結果、以下のことが示唆された。

- ・十字型試験体を使った PTS 模擬試験では、CT 試験片に比べて拘束度が緩くなることによって破壊しにくい傾向となるが、負荷応力の多軸効果によってある程度相殺される傾向がある。
- ・負荷応力の多軸効果に係る影響評価には、拘束度の影響も含まれる。
- ・これらを勘案すると、CT 試験片の T_0 から 15°C 程度低温側にシフトさせたマスターカーブを用いて検討を進めるのが妥当である。
- ・PTS 模擬試験の事前検討として実施する小型平板曲げ試験では、CT 試験片の T_0 から 40°C 程度低温側にシフトさせたマスターカーブを用いた試験条件の設定が必要である。

今後試験の実施に当たり、上記の結果を勘案した上で供試材の材料特性に基づき、PTS
模擬試験の温度、負荷荷重等の試験条件について詳細検討を進める予定である。

表 3.3.1-1 既往知見調査結果のまとめ

既往プロジェクト	試験体形状		模擬亀裂形状		内部亀裂	熱衝撃	荷重負荷形態		試験温度 (°C)
	円筒	十字型	表面亀裂	内部亀裂			曲げ	引張	
HSST(TSE) ^(3.3.1-1)	レ	—	レ クラック有 無両方	レ	レ	レ	—	レ	100 → -200
HSST(PTSE) ^(3.3.1-2)	レ (容器)	—	レ クラック無	—	レ	レ	—	—	300 → 20
HSST(CB) ^(3.3.1-3)	—	レ	レ クラック有 無両方	—	—	—	1軸と2軸	—	-70 ~ -20
FALSIRE II ^(3.3.1-4)	—	レ	—	レ	—	—	1軸	—	-170
NESC-I ^(3.3.1-5)	レ	—	レ クラック有	レ	レ	レ	—	レ (スビ° ヲテスト)	290 → 5
NESC-II ^(3.3.1-5)	レ	—	レ クラック有	レ	レ	レ	—	レ	300 → 20
NESC-III ^(3.3.1-5)	レ (異材溶接)	—	レ クラック無	—	—	—	1軸	—	300
NESC-IV ^(3.3.1-7)	—	レ	レ クラック有	レ	レ	レ	1軸(梁)、 2軸(十字)	—	-100 ~ -40
NESC-VI ^(3.3.1-5)	—	レ	—	レ	レ	レ	1軸	—	室温
NESC-VII ^(3.3.1-6)	—	レ	レ クラック無	—	レ	レ	2軸	—	-30 → -150
NRA-JAEA	—	レ	—	レ	レ	レ	2軸	—	300 → 20

凡例 レ: 関連する知見あり ー: 関連する知見なし

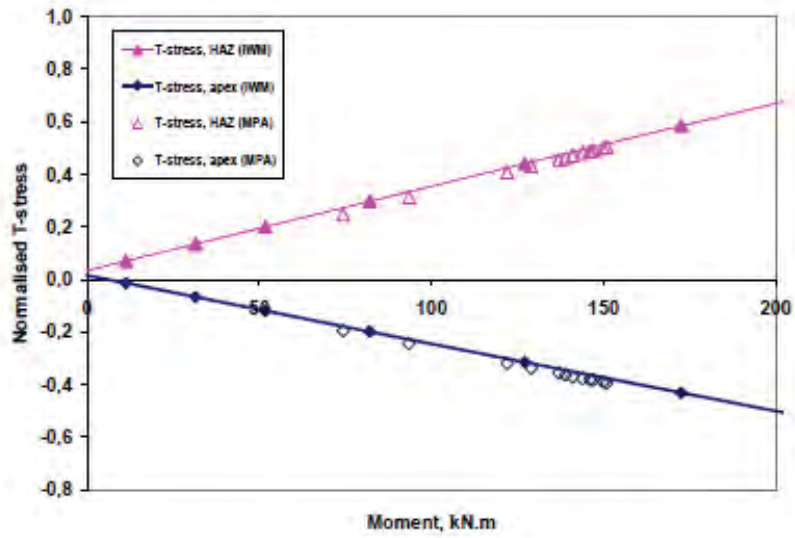


Fig. 5.12 Predicted dependence of T-stress on applied bending load at the HAZ and deepest point locations (MPA [37] & IWM [39]).

図 3.3.1-1 クラッド熱影響(HAZ)部と亀裂最深部の T-stress の比較 (3.3.1-7)

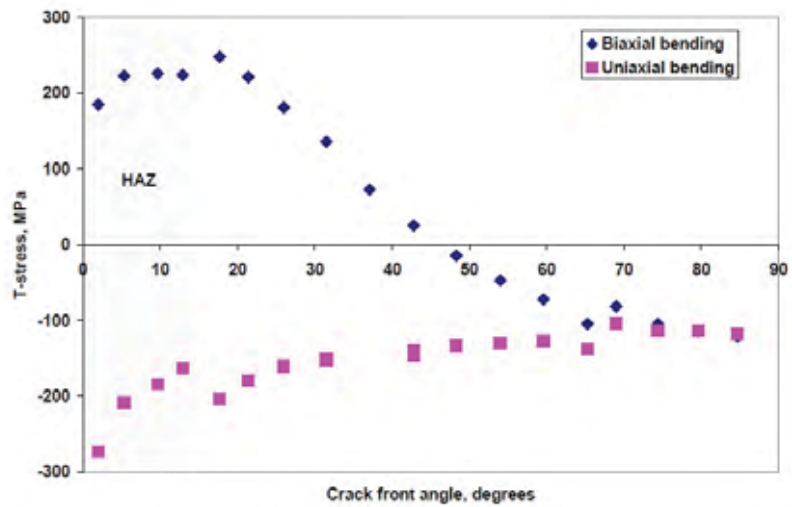


Fig. 5.13 Comparison of the T-stress values over the crack front from the MPA model under biaxial and uniaxial bending.

図 3.3.1-2 単軸及び2軸における亀裂前縁部の T-stress 分布の比較 (3.3.1-7)

表 3.3.1-2 CT 試験片と単軸、2 軸での破壊試験における参照温度 T_0 の比較^(3.3.1-8)

Table 1
Summary reference temperatures, T_0 , for HSST Plate 14

Case no.	Specimen data set	Number of specimens	Test temperature (°C)	T_0 (°C)
1	ORNL 1/2T C(T), $a/W \approx 0.5$	31	Various	-46.1
2	USNA 1/2T C(T), $a/W \approx 0.5$	18	-30	-47.5
3	ORNL 1T SE(B) deep crack $a/W \approx 0.5$	9	Various	-51
4	USNA 1T SE(B) deep crack $a/W \approx 0.5$	19	-5	-48.5
5	ORNL 1T SE(B) shallow crack $a/W \approx 0.1$	21	Various	-67.4
6	USNA/NSWC 1T SE(B) shallow crack $a/W \approx 0.1$	20	-5	-50.1
7	ORNL 4T cruciform shallow crack (0:1) $a/W \approx 0.1$	9	Various	-84.3
8	ORNL 4T/6T cruciform shallow crack (0.6:1) $a/W \approx 0.1$	8	Various	-71
9	ORNL 4T cruciform shallow crack (1:1) $a/W \approx 0.1$	13	Various	-60
10	USNA/NSWC 2T cruciform shallow crack (1.2:1) $a/W \approx 0.1$	13	-65	-91

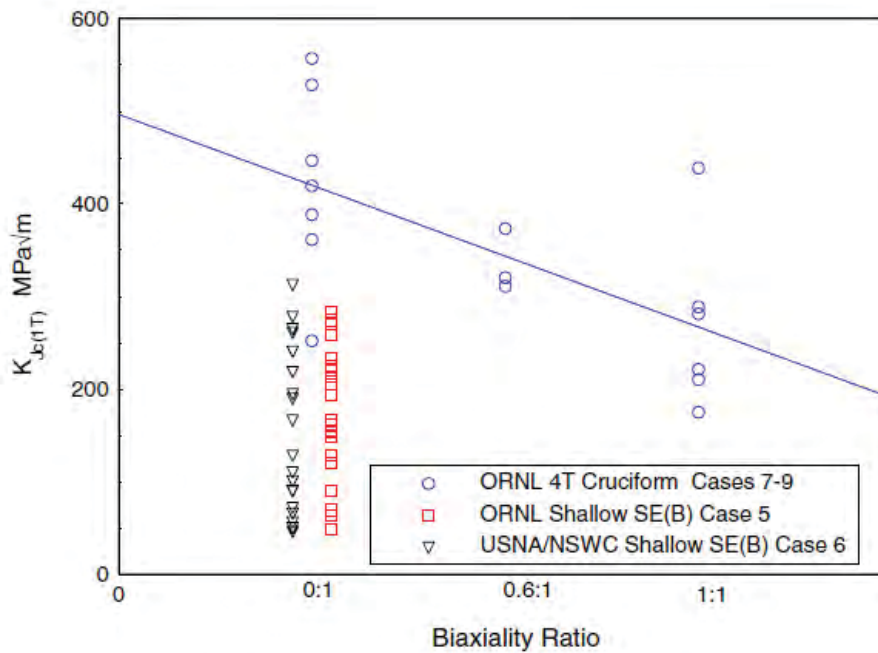


Fig. 10. Comparison of shallow crack SE(B) results and cruciform tests at -5 °C.

図 3.3.1-3 SE(B)試験と十字型試験での多軸度による破壊靱性値の比較^(3.3.1-8)

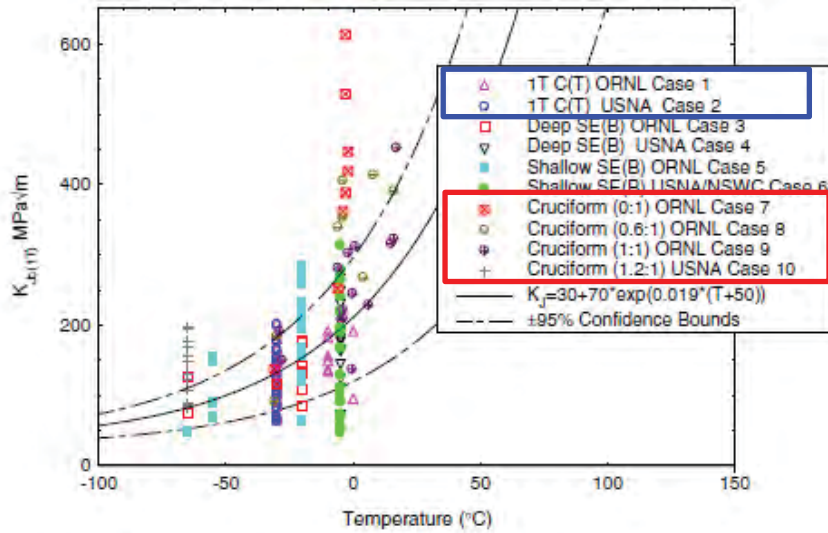


Fig. 8. Master curve plot of HSST Plate 14 specimen data including cruciform, shallow, and deep specimen data. Master curve and confidence bounds are based on deep crack data.

図 3.3.1-4 CT 試験、SE(B)試験、十字型試験における破壊靱性値の比較 (3.3.1-8)

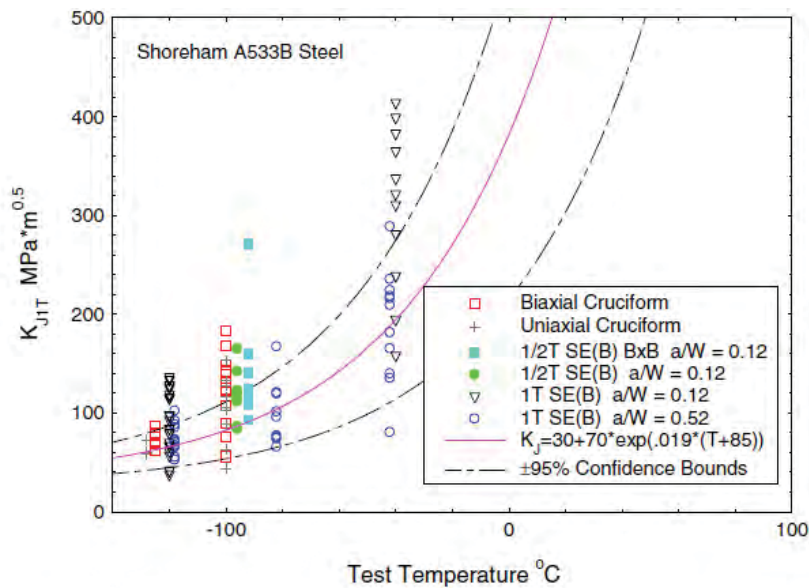


Fig. 15. Comparison of uniaxial and biaxial cruciform specimen data, shallow crack specimen data, and the deep crack master curve and confidence bounds for the Shoreham plate material.

図 3.3.1-5 十字型試験(単軸、2 軸)、SE(B)試験における破壊靱性値の比較 (3.3.1-8)

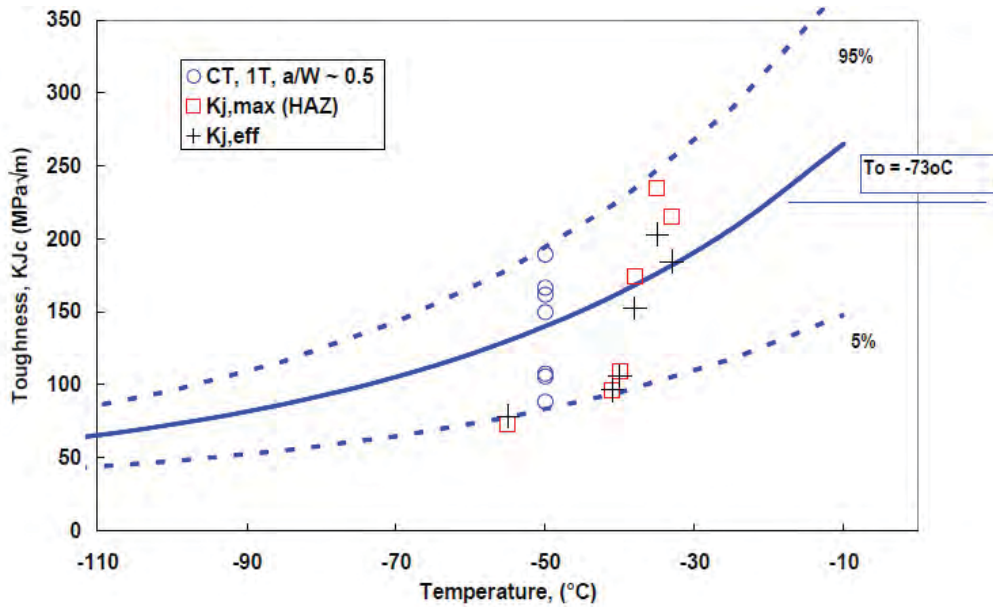


Fig. 5.11 $K_{J,max}$ and $K_{J,eff}$ values for the biaxial tests compared with the standard Master Curve

図 3.3.1-6 十字型試験における K_J 最大値と等価 K 値($K_{J, eff}$)の比較 (3.3.1-7)

表 3.3.1-3 十字型試験体のクラッド有無で破壊靱性値比較 (3.3.1-3)

Table 1. Summary of cruciform clad beam test results.

Test Specimen	Test Temp. [°C]	Biax. Ratio P_T/P_L	T - NDT [°C]	K_{Jc} [MPa√m]
CLAD-1	-56.7	0.0	2.8	162.6
HAZ-1	-57.8	0.0	1.7	108.4
CLAD-2	-20.6	1.0	38.9	328.0
CLAD-3	-25.0	1.0	34.4	143.8
CLAD-4	-37.2	1.0	22.2	148.7
HAZ-2	-40.0	1.0	19.4	150.2
CLAD-5	-56.1	1.0	3.3	67.1
HAZ-3	-61.1	1.0	-1.7	75.6

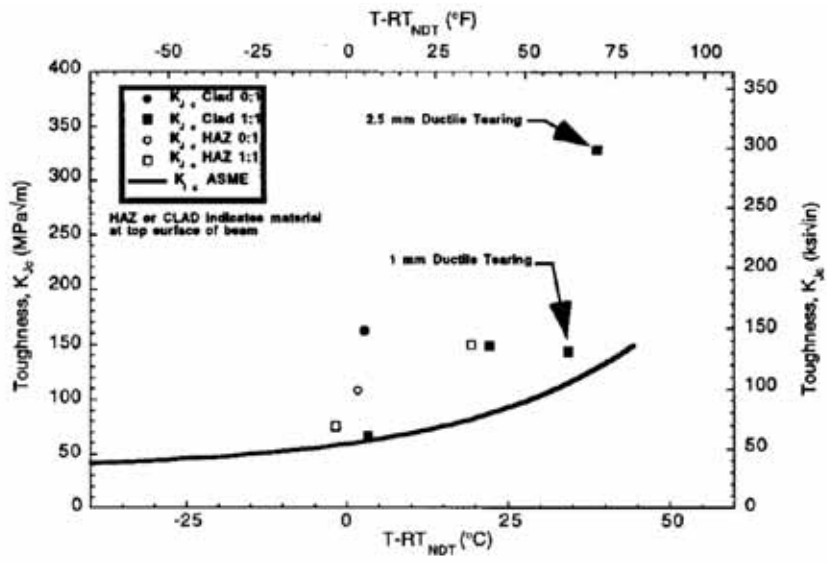


Fig. 20. Comparison of clad and HAZ cruciform beam data with ASME Section XI K_{Ic} curve.

図 3.3.1-7 十字型試験体の破壊靱性値と ASME 規格曲線との比較^(3.3.1-3)

3.3.2 学会等における最新情報調査

原子炉圧力容器鋼の照射脆化及び破壊靱性評価に関連する研究分野の最新情報について調査を行った。

以下に、主だった調査結果の概要を記す。

(1) 2017年Pressure Vessels and Piping Conference 2017(PVP2017)

2017年7月16日(日)~7月22日(土) @アメリカ、ハワイ

概要:

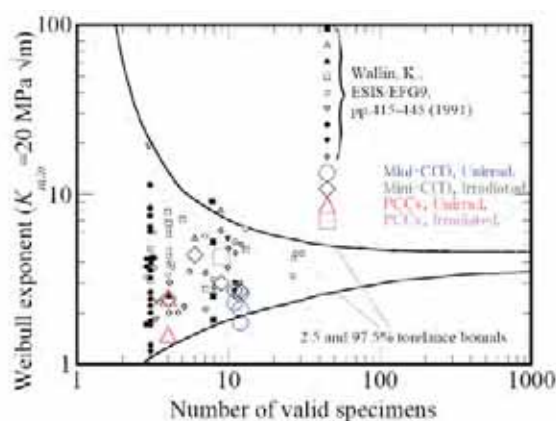
アメリカ機械学会(ASME)が主催する Pressure Vessels and Piping Conference 2017(PVP 2017)に出席し、研究発表及び関係する分野の最新情報を収集した。PVP は毎年開催され、会議は ASME の圧力容器及び配管部門の技術委員会における規格・基準、材料・製造、地震工学等の分類に従い 200 セッションに細分化され、最大 17 セッションが並行して進められた。報告者らは、主に規格・基準の分野で発表及び情報収集を行った。

関連研究分野の情報収集:

① THE MASTER CURVE FRACTURE TOUGHNESS EVALUATION OF IRRADIATED PLATE MATERIAL JRQ USING MINIATURE-C(T)SPECIMENS

○Masato Yamamoto(Japan, CRIEPI)

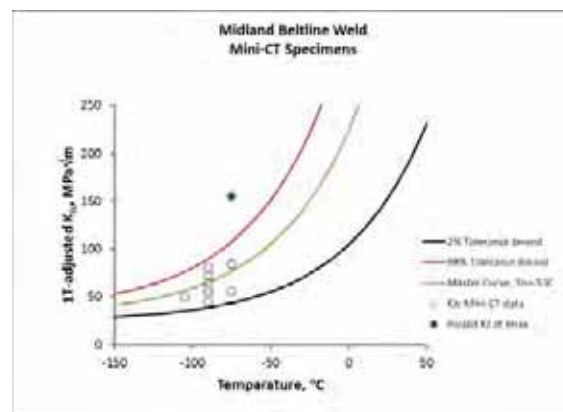
マスターカーブ法を用いた破壊靱性評価において、照射材と未照射材に対して PCCv 試験片、Mini-C(T)試験片など様々な試験片を用いた検討が進められており、Mini-C(T)試験片で得られる T_0 が PCCv 試験片の T_0 に対してほぼ一致する結果が複数の発表で示された。これらは、JEAC4216-2015 における Mini-C(T)試験片を用いた破壊靱性評価方法の妥当性を改めて示すものであった。



② USE OF MINI-CT SPECIMENS FOR FRACTURE TOUGHNESS CHARACTERIZATION OF LOW UPPER-SHELF LINDE 80 WELD

○Mikhail A. Sokolov(USA, Oak Ridge National Laboratory)

ロシア型原子炉の圧力容器鋼材について、中性子照射材の T_0 に対するトレンドカーブの設定に関する発表があった。シャルピー遷移温度 T_{41J} を用いた評価と T_0 を用いた評価を比較すると、 T_0 を用いた評価がより高い値を示すこと、またトレンドカーブの中性子照射量のべき係数の項は T_{41J} ベース、 T_0 ベースどちらの式も 0.5 よりもわずかに大きい値を示し、 $6 \times 10^{20} \text{ n/cm}^2 (>0.5\text{MeV})$ 以下の範囲においては、脆化量に飽和する傾向は見られないことが示された。



③ CURRENT STATUS OF THE CHARACTERIZATION OF RPV MATERIALS

HARVESTED FROM THE DECOMMISSIONED ZION UNIT 1 NUCLEAR POWER PLANT

○Thomas M. Rosseel, Mikhail A. Sokolov, Xiang Chen, Randy K. Nanstad(USA, Oak Ridge National Laboratory)

原子炉圧力容器鋼の照射脆化に関しては、Zion1号機の廃炉材を用いた試験計画および試験片の採取状況の進捗について報告があった。板厚方向の破壊靱性分布、不純物含有量分布、硬さ分布、中性子照射量の減衰効果等の評価を計画していること、アトムプローブ、透過型電子顕微鏡、中性子小角散乱、陽電子消滅等を用いた微細組織分析を予定していること、シャルピー試験片、引張試験片や破壊靱性試験等のサンプルを合計で1000体以上採取する計画であること等が示された。

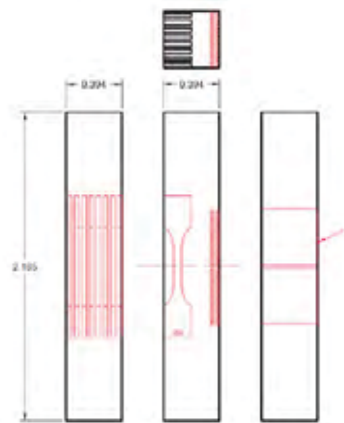
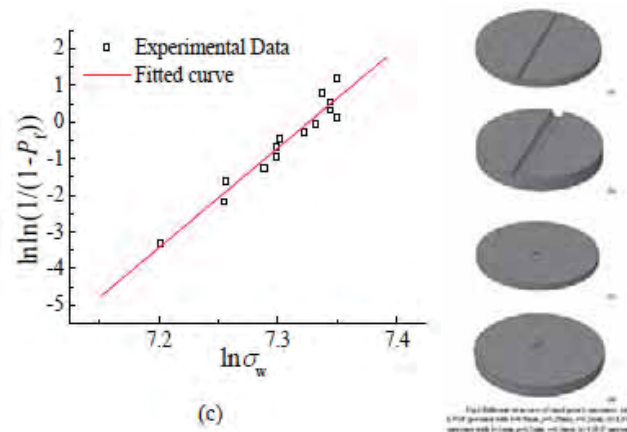


Fig. 19. Charpy-sized bar machined into 8 SS-3 tensile specimens and 4 chemical and microstructural coupons/

④ Evaluation of Weibull parameters by different small punch tests samples based on Beremin model

○Kaishu Guan, Linling Guo, Mingxue Fu(China, East China University of Science and Technology)

微小試験片を用いた破壊靱性評価法に関して、4種類の亀裂を導入したスモールパンチ試験片の破壊靱性試験を行い、ワイブル分布による信頼性を検討した結果が報告された。スモールパンチ試験については、標準試験方法の検討や破壊靱性評価への適用可能性に関する報告もあった。



(2) 第18回原子力発電システムにおける材料の環境劣化に関する国際会議

(18th International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems – Water Reactors)

2017年8月13日(日)~17日(木) @米国 ポートランド

概要:

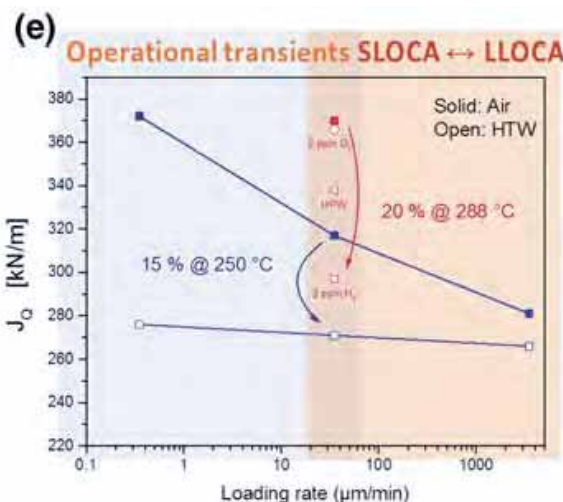
本会議は、原子力発電システム、特に軽水炉(主として加圧水型軽水炉(PWR)と沸騰水型軽水炉(BWR))環境における材料劣化の問題に着目して、各国の事業者、メーカー、大学・研究機関、規制機関等で進めている取り組み・研究内容について紹介するとともに、専門家間で意見交換を行うために実施されている国際会議であり、2年毎に開催されており今回が18回目となる。本年の会議には、欧米を中心とする200名規模の専門家が出席し、約160件の研究報告(口頭発表・質疑込みで1件約25分)がなされた。本会議では3会場に分かれて、研究対象となる材料や現象によって合計25のセッションを設けて報告・討論が行われた。また、ポスターセッションも設けられ約40件の報告がなされた。

関連研究分野の情報収集:

① Effect of high-temperature water environment on the fracture behavior of low-alloy RPV steels

Z. Que, H.P. Seifert, P. Spätig, G.S. Rao, S. Ritter(Paul Scherrer Institut, スイス)

動的ひずみ時効(DSA)及び環境助長割れ(EAC)に対して異なる感受性を持ち、微細組織も異なる原子炉圧力容器(RPV)鋼の軽水炉模擬環境中での破壊挙動について、異なるひずみ速度での弾塑性破壊力学試験及び試験後の金属組織・破面観察により評価した。その結果、高温水及び水素の破壊挙動への影響と DSA と EAC の同時影響の可能性が示された。



Condition (288 °C, 35 µm/min)	da/dt mm/h	Condition (288 °C, 3.5 µm/min)	da/dt mm/h
Air	2.30E+00	Air	1.83E-01
HTW 2 ppm H ₂	4.12E+00	HTW 2 ppm H ₂	2.17E-01
HTW 2 ppm O ₂	2.68E+00	HTW 2 ppm O ₂	3.44E-01
HPW	3.83E+00		

② Effect of specimen size on the crack growth rate behavior of irradiated Type 304 stainless steel

A. Janssen¹, P. Chou², C. Tobiasi²(1 Studsvik Nuclear AB, スウェーデン, 2 Electric Power Research Institute, 米国)

約 1 dpa の照射量の 304 ステンレス鋼炉心シュラウドから加工された 2 種類の異なるサイズ(B=8 mm、19 mm)のコンパクトテンション(CT)試験片を用いて、BWR 通常炉内水質での亀裂進展速度(CGR)試験を実施した。CGR への試験片サイズ効果を調べることに、及び CT 試験片寸法に対する応力拡大係数(K)の有効範囲上限を確認することを目的としている。その結果、ひずみ硬化能が十分残っている材料に対して、ASTM E399 に従って流動応力で評価した有効な K 値で実施した試験では CGR への試験片サイズ効果は見られなかった。一方、ひずみ硬化能がなくなったか大幅に減少した高照射材に対しては、異なる K 有効性基準が適用される可能性があることが示された。

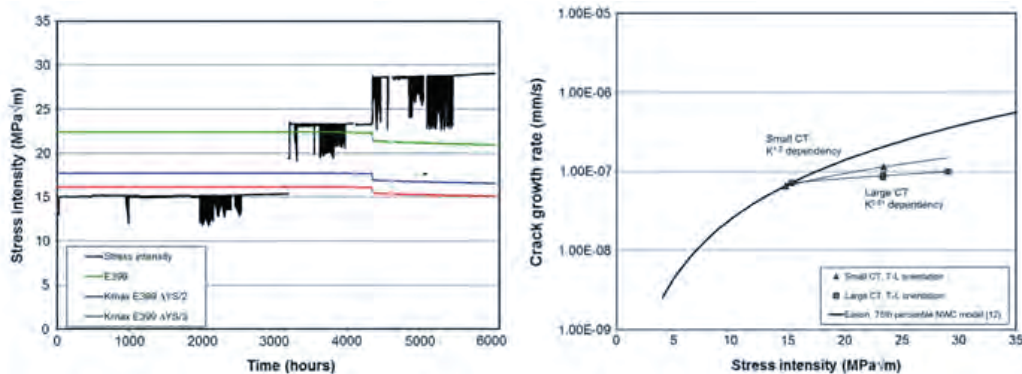


Fig. 12 Stress intensity factor during testing of Specimen L1 (left) compared to various K validity criteria, and CGRs under constant K versus stress intensity in simulated NWC for the specimens tested in this study (right), and the 75th percentile NWC model for crack growth in irradiated stainless steel [12]

③ Microstructural evolution of welded stainless steels on integrated effect of thermal aging and low flux irradiation

Martin Bjurman^{1,2}, Kristina Lindgren³, Mattias Thuvander³, Peter Ekström⁴, Pål Efsing^{1,5}(1 Royal Institute of Technology(KTH), 2 Studsvik Nuclear AB, 3 Chalmers University of Technology, 4 Swedish Radiation Safety Authority, 5 Ringhals AB, スウェーデン)

鋳造及び溶接ステンレス鋼の凝固構造への熱時効と照射の複合効果を調べるため、軽水炉運転温度において高速中性子束が非常に低い状態で長期間時効された材料の詳細分析をアトムプローブ法で実施した。供試材としては、Zorita 炉の炉心周りの様々な位置から採取した溶接金属(280~285°Cで 38 年間、 $1 \times 10^{-5} \sim 7 \times 10^{-7}$ dpa/h の範囲の 3 レベルの中性子束で 0.15~2 dpa まで照射されたもの)を用いた。フェライト相の時効により、スピノーダル分解、クラスタリング、及び G 相などの析出が見られた。これらの現象は、中性子束と熱時効の同時効果を理解するために分析され定量的に評価された。スピノーダル分解

と G 相の析出は、全ての照射材において非照射熱時効材と比較して顕著に増加し、損傷量に伴って増加する傾向が見られたが、溶接位置の違いの影響は完全には分離できていない。

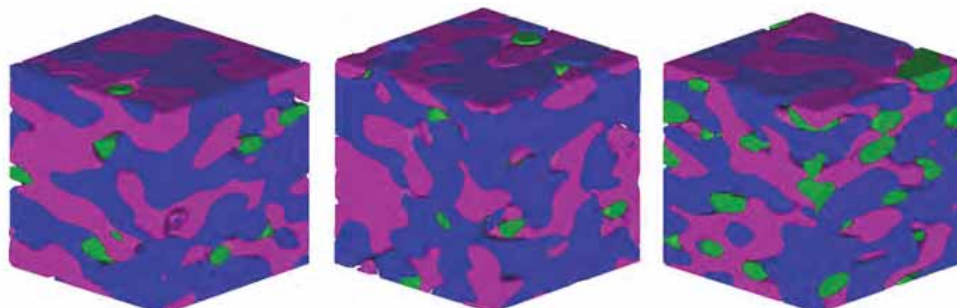


Fig. 2 Iso-concentration plots of 0.15 dpa (left), 1 dpa (center) and 2 dpa (right) respectively showing α (lilac), α' (blue) and G-phase (green). The size of the box is $20 \times 20 \times 20 \text{ nm}^3$ (Color figure online)

④ On the use of density-based algorithms for the analysis of solute clustering in atom probe tomography data

Emmanuelle A. Marquis¹, Vicente Araullo-Peters¹, Yan Dong¹, Auriane Etienne², Svetlana Fedotova³, Katsuhiko Fujii⁴, Koji Fukuya⁴, Evgenia Kuleshova³, Anabelle Lopez⁵, Andrew London⁶, Sergio Lozano-Perez⁶, Yasuyoshi Nagai⁷, Kenji Nishida⁸, Bertrand Radiguet², Daniel Schreiber⁹, Naoki Soneda⁸, Mattias Thuvander¹⁰, Takashi Toyama⁷, Faiza Sefta¹¹, Peter Chou¹²(1 University of Michigan, 米国, 2 Université de Rouen, 仏国, 3 Kurchatov Institute, ロシア, 4 INSS, 日本, 5 CEA, 仏国, 6 University of Oxford, 英国, 7 Tohoku University, 日本, 8 CRIEPI, 日本, 9 Pacific Northwest National Laboratory, 米国, 10 Chalmers University of Technology, スウェーデン, 11 EDF-R&D, 仏国, 12 Electric Power Research Institute, 米国)
 アトムプローブ法を用いた照射ステンレス鋼における溶質原子クラスタ分析に関する国際的なラウンドロビン(日本からは原子力安全システム研究所、東北大学、電力中央研究所が参加)の途中経過が報告された。データセット及び実施機関によっては解析結果がばらつくことがあったため、解析結果を報告する際には解析方法に関する情報も含めて報告することが推奨された。

⑤ NRC perspectives on primary water stress corrosion cracking of high-chromium, nickel-based alloys

Greg Oberson, Margaret Audrain, Jay Collins, Eric Reichelt(U.S. NRC, 米国)
 690 合金及び溶接金属(52/152 合金)の SCC 亀裂進展速度に関する米国原子力規制委員会(NRC)での研究活動として、産業界からの検査頻度の緩和要求や米国機械学会(ASME)規格における課題に対する規制側の知見を拡充するため、亀裂進展速度への冷間加工度や

溶接部近傍での Cr 欠乏層などの影響に関する確認データを取得している状況が報告された。

(3) 日本金属学会2017年秋期(第161回)講演大会
2017年9月7日(木)~9月8日(金) @北海道大学

概要:

公益社団法人日本金属学会が主催する 2017 年秋期講演大会(第 161 回)の原子力材料セッションに参加し、中性子照射に伴う原子炉压力容器鋼や炉内構造物の微細組織変化等に関する最新情報を収集した。

関連研究分野の情報収集:

① 分子動力学シミュレーションによる粒界リン偏析過程の考察
○海老原健一, 鈴木知明, 山口正剛(原子力機構)

粒界 P 偏析過程について分子動力学シミュレーションによる評価結果について報告があった。P と Fe の混合原子間原子対(MID)や P と空孔の複合体が粒界の方向に移動するが、粒界に達することなく、17 Å程度の領域で格子間原子および空孔等の欠陥が粒界に取り込まれ、後から来る欠陥と結合・乖離を繰り返すことで徐々に粒界に運ばれること、熱による粒界の揺らぎによって P が粒界に取り込まれること、また、粒界に達した P は粒界の領域内の隙間を経て移動することが報告された。

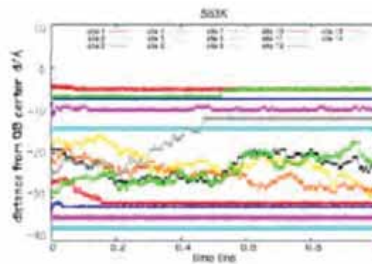


図2 MIDによるP原子の移動の様子

② オロワン機構に及ぼす析出物の結晶構造の影響について

○松川義孝¹, 大熊一平¹, 佐藤裕樹¹, 牟田浩明², 阿部弘亨³(1東北大・金研, 2阪大, 3 東大)

軽水炉の燃料被覆管に用いられる Zr-Nb 合金中の析出物に対して、透過 EBSD を用いた析出物の方位解析について報告があった。結晶方位は母相に対してランダムであり、析出物のすべり面がマトリックスのすべり面と平行でないことが析出物の障害物強度を決定する要素であることが示された。

③ 3D-AP で調べた鉄中のCu拡散に対する電子線照射効果

○Zhao Can¹, 外山健¹, 下平昌樹¹, 戸村恵子¹, 海老澤直樹¹, 吉田健太¹, 井上耕治¹, 永井康介¹, 義家敏正¹(1東北大金研)

原子炉圧力容器鋼の不純物クラスタの形成に関して、三次元アトムプローブを用いて300°C~625°Cの電子線照射下におけるCuの拡散係数の評価結果が報告された。拡散係数の評価は、Cu析出物の寸法・数密度・組成およびマトリックス中のCu濃度から求められ、その結果530°C照射では熱時効材に比べて電子線照射材で約10倍の拡散係数を示すこと、530°Cよりも低い温度では拡散係数がほとんど変わらないことが示された。

④ 熱時効した316L溶接金属フェライト相へのイオン照射影響

○藤井克彦¹, 福谷耕司¹(1原子力安全システム研究所)

フェライト相のスピノーダル分解および析出物形成の照射効果と熱時効の重畳の影響に関して発表された。熱時効材にイオン照射を実施することで、照射初期で硬さが減少し、その後に硬さが増加することが示された。これは、照射によってスピノーダル分解が緩和され、その後にクラスタが形成されたことによるものと報告があった。

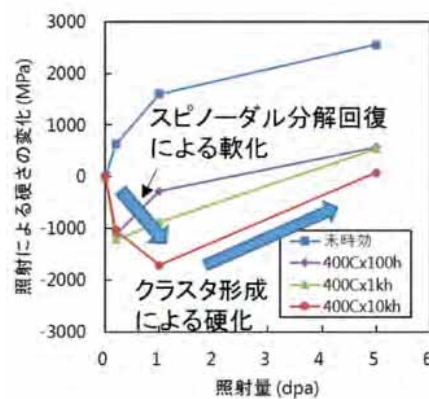


図 フェライト相の照射による硬さの変化

⑤ STEM/APT による RPV 鋼中の転位ループ-溶質原子クラスタ複合体の解析

○下平昌樹¹, 吉田健太², 外山健², 井上耕治², Milan Konstantinovic³, Robert Gerard⁴, 永井康介²(1東北大工(院生), 2東北大金研, 3SCK/CEN, 4Tractebel ENGIE)

TEM tomography の手法開発に関する発表があった。通常の TEM tomography では角度を細かく連続的に変化させて投影像を取得するが、転位が励起されない方向から観察した像を用いるとバックグラウンドノイズの増加につながることから、離散 Tomography による観察結果について報告があった。TEM で観察された転移ループの密度は APT で観察された溶質原子クラスタ密度の 1/7 程度であり、TEM で観察された転移ループの位置に溶質原子クラスタが観察されたことが報告された。

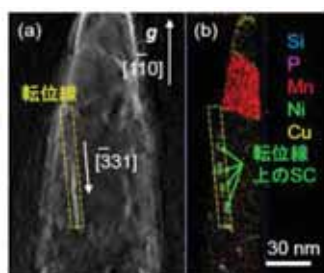


図 1: (a) RPV 鋼中の転位線の STEM 観察結果、(b) APT で調べた溶質元素分布

⑥ 低合金鋼の照射損傷に及ぼす熱負荷の影響

○後藤俊太, 橋本直幸, 磯部繁人(北大工(院生), 北大工)

シビアアクシデント時の高熱負荷が原子炉圧力容器鋼の照射損傷に及ぼす影響に関して、低合金鋼モデル合金に対して電子線照射した研究報告があった。電子線照射により転移ループが高密度に形成し、500°C熱時効で転位ループの粗大化が見られた。また、高温低損傷速度で追加照射した結果、高音での熱時効と点欠陥導入の症状効果によって転位ループの粗大化がより顕著になることが報告された。

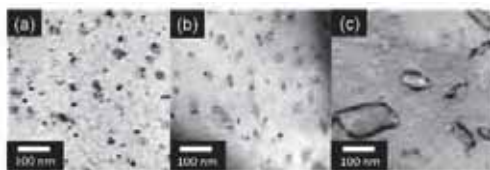


Fig. 1. TEM images of (a) as irradiated, (b) tempering, and (c) additionally-irradiated Fe-0.75Mn-0.47Mo-0.45Ni

⑦ クラッド熱影響を受けた実機圧力容器鋼の照射脆化評価(2)

○小林凌也¹, 藪内聖皓², 木村晃彦², 熊野秀樹³(1京大エネ科(院), 2京大エネ研, 3中部電力 原安技研)

原子炉圧力容器鋼のクラッド下熱影響部に関して、浜岡原発 1 号機の非照射材に対して ESW 法によるクラッド溶接を実施し、クラッド境界近傍の母材の組織観察及び硬さ分布測定を実施した結果について報告があった。クラッド近傍では組織が粗大化し、クラッド界面から 6mm 程度まで母材に比べて硬さが増加していることが示された。EPMA による面分析結果も報告があり、クラッド界面近傍で C の濃度が低下し、界面に偏析している様子が示された。

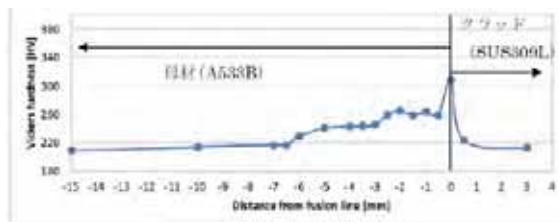


図 1: ビッカース硬さ試験の結果

⑧ 第一原理計算によるBCC Fe(001)におけるFeおよびCuの電界蒸発と表面拡散のシミュレーション

大沼敏治(電中研)

三次元アトムプローブの電界蒸発に関して、元素毎の電界蒸発値の違いにより生じる収差や針状試料表面での拡散による収差の第一原子計算によるシミュレーション結果について報告があった。計算によって得られた Fe(001)の蒸発電界は 32.6 V/nm であり、文献値の 35 V/nm と良い一致を示すことが報告された。

(4) 日本原子力学会「2017年秋の大会」

2017年9月13日(水)~9月15日(金) @北海道大学

概要:

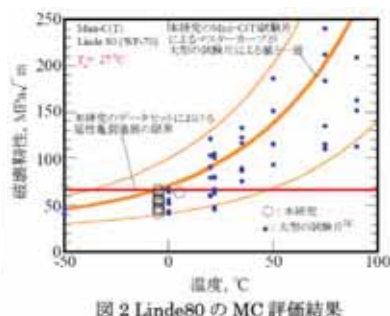
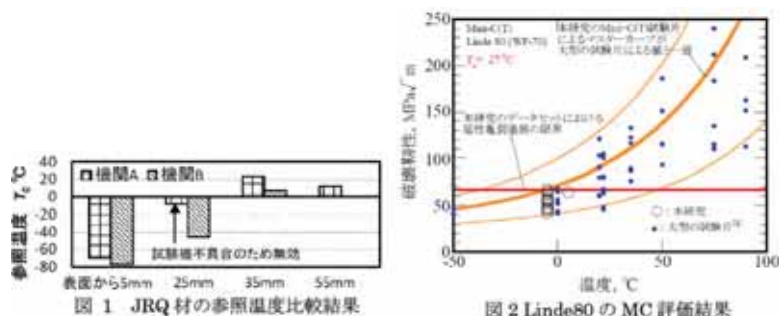
原子力学会は毎年 2 回開催され、様々な分野の最新研究内容が発表される原子力関係者に最も代表的な学会であり、原子力に関連する大学、研究機関、企業などの研究者・技術者等が参加し、幅広い研究活動内容の聴講や討論ができる。今回秋の大会に参加し、日本国内で行っている原子炉材料の照射挙動、破壊靱性特性、微細構造の変化など発表情報を収集した。

関連研究分野の情報収集:

① 平成28年度原子炉压力容器及び炉内構造物の照射影響評価手法の高度化(2)中性子照射された压力容器鋼母材および溶接金属に対するMini-C(T)試験片による破壊靱性評価

○山本真人, 橋本資教(電力中央研究所)

延性亀裂破壊可能性のある溶接金属 Linde80 と JRQ 材を比較し、MC 法の適用可能性を検討した。JRQ 材は、LABO1 の $T_0 = -70^\circ\text{C}$ 、LABO2 の $T_0 = -77^\circ\text{C}$ であり、溶接金属の LABO1 は延性破壊による無効データが多くて Invalid になり T_0 なし、LABO2 は $T_0 = 36^\circ\text{C}/35^\circ\text{C}$ との結果が得られた。大型試験体(1T-C(T))と比較した結果、まったく同じ T_0 であり、延性破壊しても valid を得られるくらい試験片の数が十分あれば T_0 評価に信頼性があると判断する、との結論であった。



② 電子ビーム溶接によるRPV監視試験片再生技術の開発

○櫻谷誠司¹, 橋内裕寿¹, 越石正人¹, 森島康雄², 豊田哲也³(¹ 日本核燃料開発, ² 東芝, ³ 日立GEニュークリア・エナジー)

監視試験片数の不足に対応するため、PCCv 試験片の両側を活用して電子ビーム溶接機による压力容器鋼のシャルピー衝撃試験片再生技術の確立を図っている。電子ビーム電流を 25、30、35mA の設定し、フォーカスが表面にちょうど合った条件で溶接部が一番狭くなるので、最適溶接条件にした。溶接部の溶け込み形態を確認し、JEAC4201 に示された条件と合うことを確認した。

③ オーステナイト系ステンレス鋼の破壊靱性に及ぼす照射影響評価

○阿部友紀¹, 田中重彰¹, 櫻谷誠司², 豊田哲也³, 神長貴幸⁴, 大木俊⁴(¹ 東芝, ² 日本核燃料開発, ³ 日立GEニュークリア・エナジー, ⁴ 東京電力ホールディングス)

オーステナイト系ステンレス鋼の破壊靱性に及ぼす照射影響評価について、亀裂の L-T 方向が高い靱性を示すことを確認し、亀裂方向性について検討を行った研究の発表があった。圧延方向の破面から亀裂進展方向に伸張されている粒子が認められた。EDS 分析結果、その粒子は MnS であると同定された。高照射量かつ L-T 方向への亀裂進展が予想される上部格子板において、材料の異方性を考慮することでより健全性評価の高精度化が見込まれる。

④ 原子炉容器鋼の照射マイクロ組織変化への個別元素の影響

○藤井克彦, 福谷耕司(原子力安全システム研究所)

高照射量領域での照射脆化予測の高精度化にはメカニズムを適切に取り込んだ予測が必要である。脆化因子(溶質原子クラスタ、マトリックス欠陥など)と溶質原子の関係解明が必要である。Cu 濃度の低い圧力容器鋼の化学組成を中心に個別の元素添加量を変化させたモデル合金のイオン照射実験を行い、硬化量と比較した。Si と Ni を含まない 3 元系合金ではマイクロ組織の大きな変化がなく、照射量によって硬化量が増加する。一方 Mn クラスタの高密度形成が確認され、Mn クラスタが転位ループ形成に直接関係することが示唆された。

⑤ 原子炉圧力容器内面溶接部の腐食に関する検討(1)材料調査

○熊野秀樹¹, 大山正孝¹, Xu Jian², Wang Zihao², 竹田陽一², 庄子哲雄²(¹ 中部電力原子力安全技術研究所, ² 東北大学 未来科学技術共同研究センター)

浜岡 2 号機の圧力容器について HAZ の腐食に関する検討を行った。溶接融合部は LAS 構造、母材は粗大粒ベイナイト、クラッド(SUS309L)は δ 相を含むオーステナイト相であることを確認した。溶融境界からの距離と硬さ評価の結果、クラッド側から融合部に近い所で硬さが増加し、母材になるほど低く、LAS の部分がオーステナイト相より硬さが大きいことが判った。EDS 分析結果、LAS 内ではカーバイドが検出された。溶接熱影響で Fe 系炭化物が消失して Fe の C が拡散、冷却時に溶融線近傍の LAS 領域で炭化物が生成し、硬さに影響を与えたと考えられる。

⑥ 圧力容器鋼の照射脆化予測高度化のためのモデリング

○中筋俊樹, 阮小勇, 森下和功(京都大学)

圧力容器鋼の照射脆化予測高度化のためのモデリングについて、照射実験と脆化監視試験片を適用したベイズの更新について検討した発表があった。JEAC4201-2013+ α にして、パラメータ α を更新する。最終的予測と実験データの標準偏差は補正なしの場合

19.8°C、ベイズ補正時には 15.6°Cとなる。ベイズ統計学によるデータ取得に従って脆化予測法の改善が有効であることを確認した。压力容器の保全最適化のためのリスク評価で、リスクとして主に照射脆化が考えられる。破壊靱性の統計誤差はゼロにならないが、脆化予測の曖昧さを小さくすることはできる。リスク減少の観点で、脆化データを予測に反映することで脆化予測の曖昧さを小さくすることでより信頼性の高い結果が得られた。

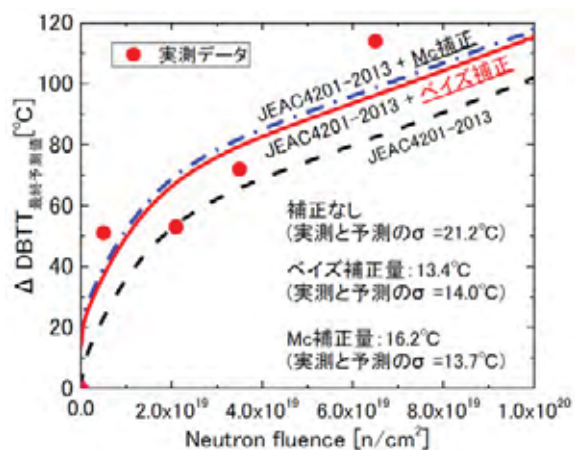


図 1 ベイズによる脆化予測法の改善

(5) 第4回原子力発電プラントライフマネジメント国際会議

2017年10月23(月)~10月26日(木) @フランス、リヨン

概要:

IAEA 主催の第4回原子力発電プラントライフマネジメント国際会議に参加し、原子力発電プラントの長期供用に係る各国の動向や材料の劣化とその評価に関する最新の情報を収集した。本会議は、約5年間隔で開催されるIAEA主催の国際会議である。会議の目的は、高経年化原子力発電プラントの安全確保や安全性と信頼性を確保した原子力発電プラントの長期供用のために必要な技術を費用対効果も含めて議論すること、また知見をプログラムとして整理し、見直しを進めながら加盟各国で共有することである。今回は39カ国から327名の参加があった。110件の口頭発表、22件のポスター、3つのサイドイベントが開催され、各国の産業界や規制当局等から原子力発電プラントの運転期間延長に関する取り組み等が報告された。

基調講演では、仏国、中国、米国、IAEA、韓国、カナダから、原子力発電プラントの稼働状況、改修計画、今後の建設計画、長期運転に係る規制等に関する報告がなされた。日本からは、東京大学関村教授から福島第一原子力発電所の事故後の日本における原子力発電プラントの寿命管理や関連する研究動向について報告がなされた。

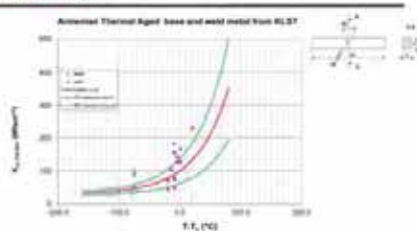
関連研究分野の情報収集:

① Investigation of long term aged VVER-440 RPV surveillance specimens by Charpy impact and master curve testing

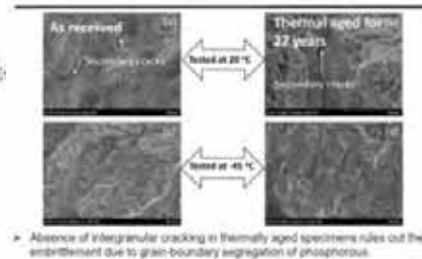
Murthy Kolluri, (オランダ:NRG)

VVER-440 型原子炉の監視試験材の27年熱時効材の評価結果が示され、熱時効による材料特性への影響がないことが報告された。

Master curve testing: base and weld KLSTs (preliminary results)



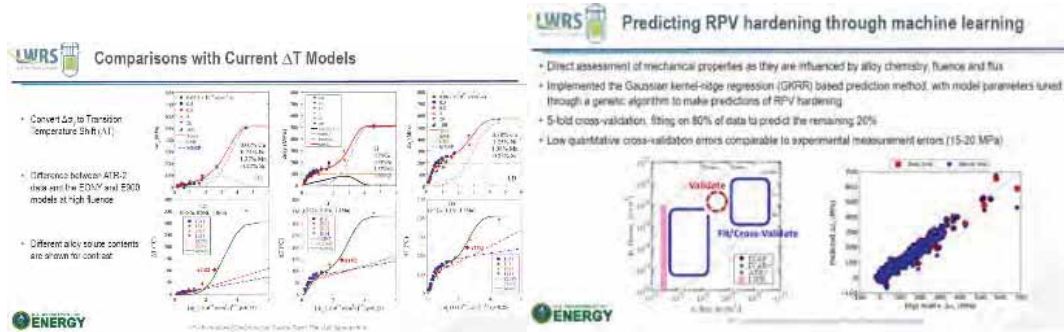
SEM microstructure: Fracture surfaces



② Embrittlement of Reactor Pressure Vessel Steels under Extended Service Conditions: The Status and Implications of the UCSB ATR-2 Experiment

G. R. Odette¹, P. Wells¹, N. Almirall¹, T. Yamamoto¹, R. K. Nanstad², M. A. Sokolov², X. Chen², J. P. Robertson² and K. J. Leonard²(アメリカ 1 University of California-Santa Barbara, 2 Oak Ridge National Laboratory)

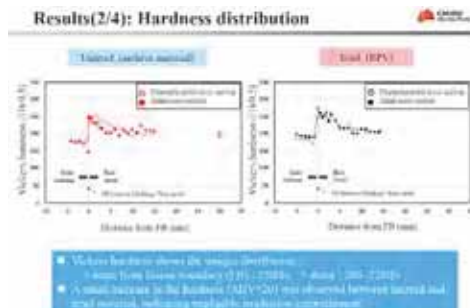
米国試験炉 ATR-2 照射材を用いた微細構造分析結果に関する発表があり、様々な組成、照射条件の鋼材において、Cu 富裕クラスタ、Mn-Ni-Si クラスタの観察結果が核形成と成長過程の速度論に基づくシミュレーションにより良く表現できていることが報告された。また、高照射量領域において形成される Mn-Ni-Si クラスタは脆化に影響するものの、米国の PWR の大多数は Cu、Ni 含有量が低いために、80 年相当の照射量においても脆化量として問題あるレベルには達しない旨が報告された。加えて機械学習を用いて原子炉圧力容器鋼の照射硬化を予測する手法に関する検討が報告された。



③ A Research Activity using Decommissioning Hamaoka Unit-1

R. Isobe, H. Yuya, H. Wada(日本 Chubu Electric Power)

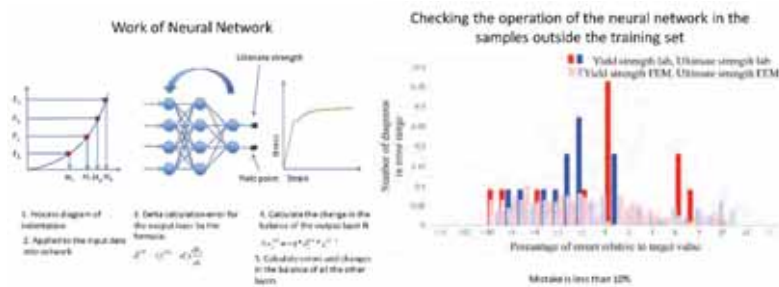
浜岡 1 号機の廃炉材を用いた試験計画及びこれまでの試験結果について報告があった。廃炉プラント圧力容器内表面からのサンプル採取方法やクラッド直下の溶接熱影響部の組織観察結果、硬さ試験結果などについて報告があり、照射によってわずかに溶接熱影響部の硬さが増加していることが示された。



④ Application Experience for Determining the Aging of In-service NPP Determining the Instrumented Indentation Hardness Test Evaluation

Bakirova G. M., Bakirov M. B., Pakhomov S. S., Frolov I. V., Krutko E. S., (ロシア Center of Material Science and Lifetime Ltd.)

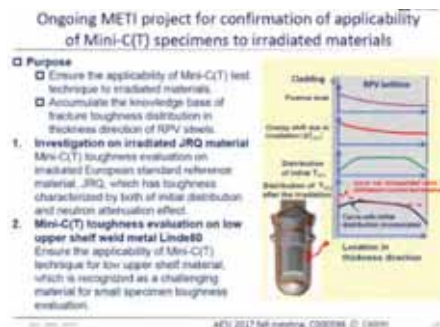
硬さ試験や引張試験の荷重変位曲線をニューラルネットワークを用いて機械学習させ材料の機械的特性を評価する手法に関する発表があり、誤差 10%内で降伏強度などを予測可能であることが報告された。

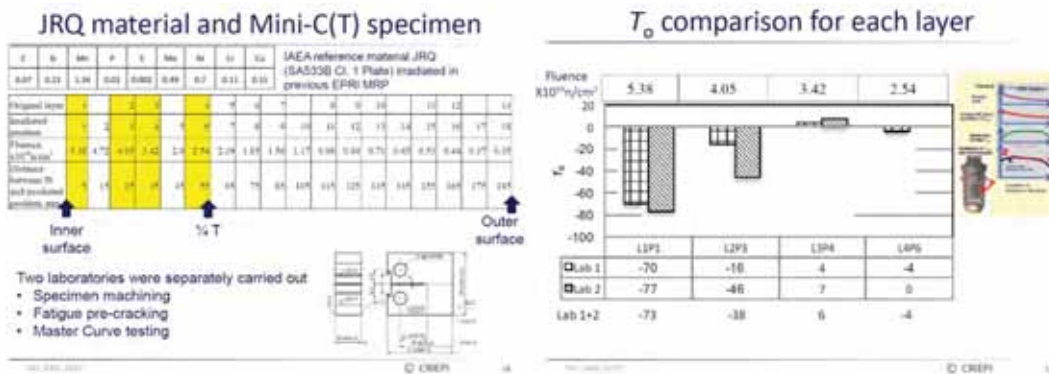


⑤ Status of the Master Curve Fracture Toughness Evaluation Method using Miniature C(T) Specimens

M. Yamamoto, N. Miura(日本 Central Research Institute of Electric Power Industry)

日本国内におけるミニチュア C(T)試験片のマスターカーブ法への適用に関する検討結果について報告があった。また、現在行っている中性子照射材への適用への検討状況に関する発表があり、RPV 鋼厚板鋼材の初期特性及び板厚方向の中性子照射の減衰による脆化への影響評価結果について報告があった。

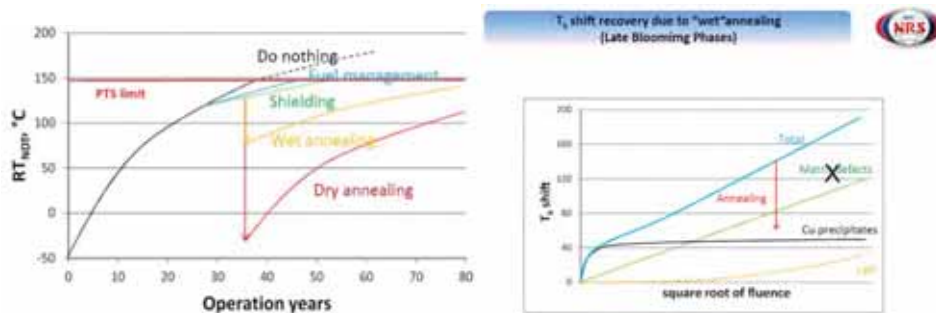




⑥ Effectiveness assessment of “wet” annealing for VVER reactor pressure vessels

Alexander KRYUKOV and Valeriy Rubtsov (ロシア Scientific and Engineering Center for Nuclear and Radiation Safety)

VVER 型原子炉の脆化を緩和することに関し、Wet annealing 手法の検討内容が報告され、脆化量の回復に対する効果、実施にかかる工程、コストなどから、低 Cu 材に対する有効性が示された。



(6) ゼロエミッションエネルギー研究拠点研究会(ZE研究会) 平成29年度材料照射研究会 副題:照射効果(II)

2018年1月10日(水)~12日(金) @京都大学

概要:

通称「材料照射研究会」は年1回の頻度で開催されており、材料照射研究者が抱いている材料の照射効果における基本的、根本的な疑問や懸念、問題点などについて、国内学会や国際会議よりもさらに突っ込んだ議論をする場を提供することを会の趣旨としている。

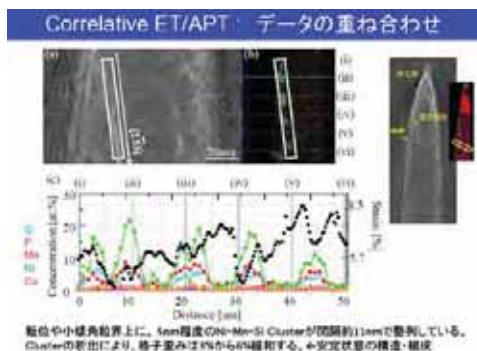
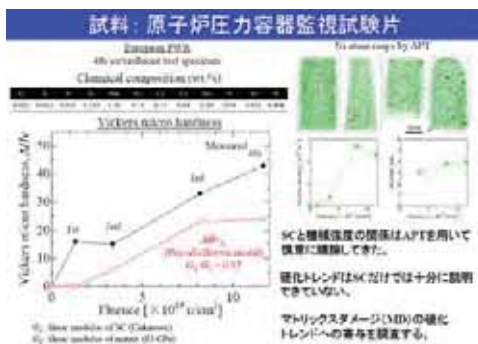
平成29年度は、軽水炉、高速炉、核融合炉それぞれの照射環境における材料照射試験データと計算科学等による基礎検討に係る口頭発表が30件、ポスター発表が18件あり、既存の照射データベースに基づいて、照射欠陥や照射損傷組織の形成の素過程、それらが材料の力学的性質や物理的・化学的性質に及ぼす影響について、より基礎的な視点に立った議論が行われた。

関連研究分野の情報収集:

① 欠陥および格子歪みの三次元定量解析法の確立とRPV鋼への応用

吉田健太¹, 下平昌樹¹, 外山健¹, 井上耕治¹, 永井康介¹, 義家敏正², 山崎順³, 佐藤和久³(¹東北大金研 ²京大原子炉 ³阪大超高压)

筆者らは、照射した原子炉压力容器鋼から作成したAPT針状試料のマイクロ組織をWB-STEM、HAADF-STEM、BF-STEMを用いて観察し、これらを三次元的に再構築して溶質原子クラスター(SC)と照射欠陥(MD)の定量解析を行っている。今回の発表では転位線上にNi、Mn、Siが粒状に濃化している様子が観察されたことが報告された。こうしたマイクロ組織評価技術の発展により、照射脆化機構における転位の運動とSC、MDの関与の解明に繋がるものと期待される。



② 中性子照射したFe中の転位ループの周囲に生成する偏析物

義家敏正¹, 井上耕治², 吉田健太², 外山健², 永井康介²(¹京大原子炉 ²東北大金研
³阪大超高压)

RTNS-II 及び JOYO で中性子照射した純 Fe を用い、前項①と同様のアプローチで転位上に偏析した溶質元素を観察した。APT の結果も踏まえ Fe の窒化物が転位線を装飾していると結論付けている。供試材は純 Fe で実用鋼と溶質元素の構成が異なるが、転位線への溶質元素の偏析(装飾)機構の理解に役立つものと考えられる。

③ Fe中のCu拡散に対する電子線照射効果

外山健, 義家敏正, 井上耕治, 永井康介(東北大金研)

温度を精度良く制御した条件で 2 MeV 電子線を Fe-Cu 拡散対試験片と Fe-1.0wt%Cu 試験片に照射し、Fe 中の Cu の拡散係数を評価した。500°C以下の照射で Fe 中の Cu の拡散が促進する傾向が認められ、この傾向は照射温度が低くなる(200~300°C)ほど顕著となった。Cu 拡散の駆動力として、照射によって過剰に導入された原子空孔のシンクへの消滅を指摘している。

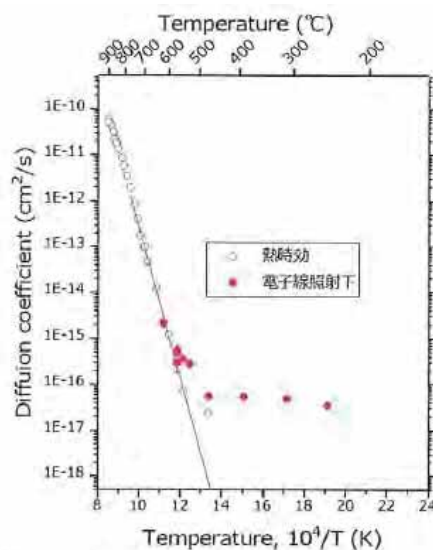


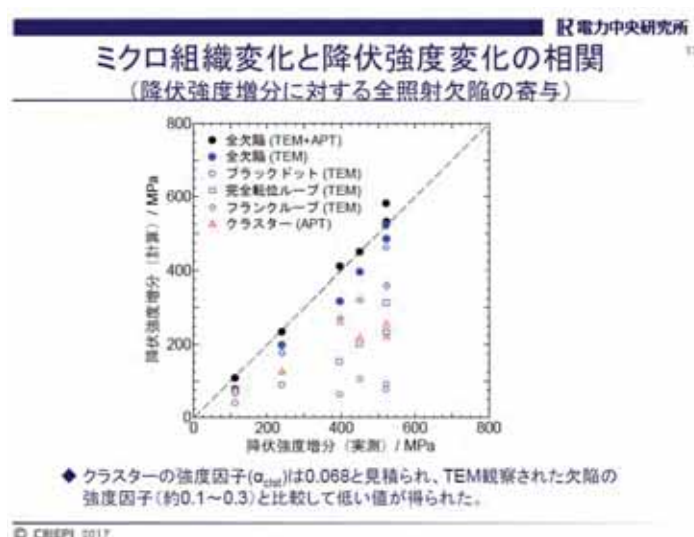
図1: Fe中のCuの拡散係数。熱時効データは、文献値 (Salje(1977), Rothman(1968), Toyama(2014)) を含む。

④ 照射ステンレス鋼のマイクロ組織の定量化-マイクロ組織と機械的特性の相関に関する検討-

宮原勇一(電力中央研究所)

JMTR で 288°C、12.4 dpa まで中性子照射したステンレス鋼の TEM 観察と APT 分析により、照射による降伏強度上昇とマイクロ組織の関係を評価した。TEM 観察ではブラックドット、フランクループ、完全転位に区分してマトリクス損傷を評価した。また APT 分

析では3~4 nm程度のNi-Siクラスターの形成を確認した。オロワン機構を仮定して降伏強度との関係性を評価した結果、Ni-Siの強度因子は0.068と見積もられるとした。低合金鋼とステンレス鋼ではマイクロ組織発達や転位との相互作用の機構は異なるが、照射脆化機構を俯瞰的に検討する上で、貴重な情報となる。



⑤ 分子動力学による材料シミュレーション —力学系シミュレーションによる展開—
鈴土知明(JAEA)

近年のスーパーコンピューターの発展によりサブミクロンオーダー領域の分子動力学シミュレーションが可能となってきた。原子レベルからの破壊プロセス評価の一環として、温度0 KでのFeにおける亀裂進展シミュレーションを行った。ここで扱っている亀裂は力学評価におけるものとは異なり、BCC金属のへき開亀裂進展に直接繋がるものではないが、マイクロ組織変化と転位の運動から亀裂進展を関連付ける上で今後の発展が期待される。

⑥ 低合金鋼の照射損傷組織に及ぼす熱負荷の影響(ポスター)

後藤俊太, 橋本直幸(北海道大学)

原子炉圧力容器鋼のモデル合金に290°Cで電子線照射した後、500°C熱時効と低い線量率で照射を続けた場合のマイクロ組織発達をその場観察した。500°C熱時効により転位ループの数密度の減少と成長が認められ、この傾向は低線量照射によってより顕著となったことを報告している。

⑦ 圧力容器鋼照射脆化予測高度化に関するモデリング(ポスター)

中筋俊樹, 阮小勇, 森下和功(京都大学)

筆者らは、原子炉圧力容器鋼の照射脆化予測法の改善の一環として、既存の $\Delta DBTT$ 評価法にベイズ統計に基づくパラメータ a を足して予測する簡易なモデルを構築した。玄海 1 号のデータに基づいて a を決定して評価した結果実測データと予測値の標準偏差は 14.0°C となり、ベイズ補正の無いときの 21.2°C に比べて低減できることが示された。

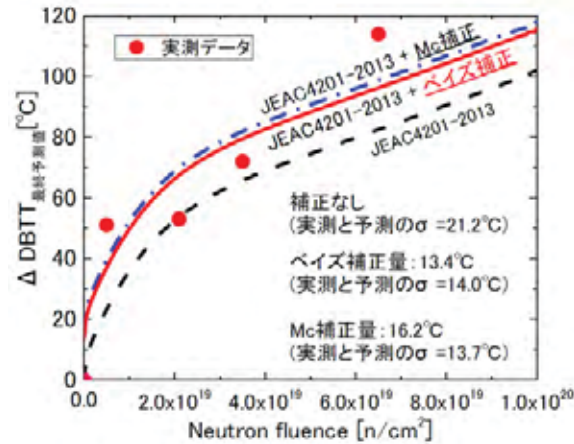


図 1 ベイズによる脆化予測法の改善

⑧ クラッド熱影響を受けた実機圧力容器鋼の鋼組織および衝撃特性評価(ポスター)

小林凌也¹, 藪内聖皓¹, 木村晃彦¹, 熊野秀樹²(京都大学 ² 中部電力原安技研)

浜岡 1 号の原子炉圧力容器アーカイブ材(ESW クラッド溶接)を用い、クラッド下熱影響部近傍の衝撃特性を、1/3 サイズのシャルピー衝撃試験片で評価した。衝撃特性を評価した溶融境界から 5 mm 以上離れた部位の金属組織はほぼ細粒で、母材と HAZ の延性脆性遷移曲線は概ね一致した。

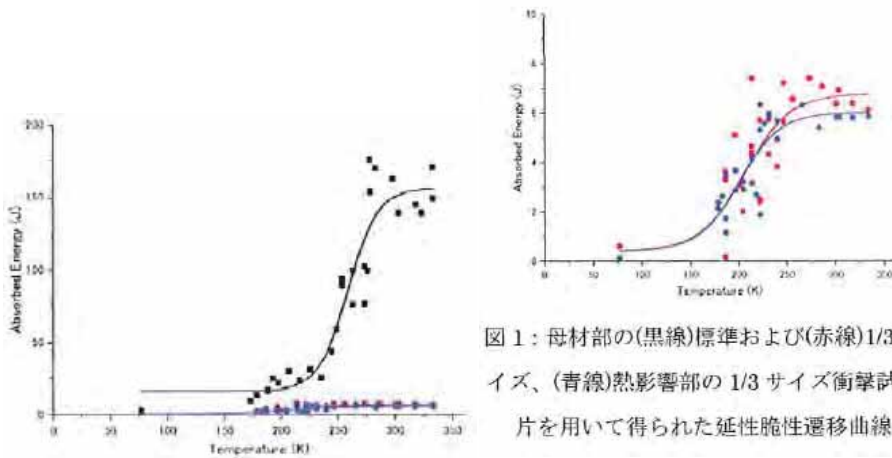


図 1: 母材部の(黒線)標準および(赤線)1/3 サイズ、(青線)熱影響部の 1/3 サイズ衝撃試験片を用いて得られた延性脆性遷移曲線

⑨ IVARモデル合金残材の照射脆化と熱処理による回復挙動

合屋佑介¹, 都留拓也¹, 渡辺英雄¹, 山本琢也²(¹ 九大総理工 ² UCSB)

カリフォルニア大サンタバーバラ校が実施した IVAR プログラムで照射した Cu と Ni 添加量の異なる 7 種の原子炉圧力容器鋼を模擬したモデル合金を、ベルギー BR2(CALLISTO)で、照射温度 290°C、照射量 $8.28 \times 10^{23} \text{ n/m}^2$ (約 0.16 dpa)照射し、硬さ及びその熱処理による回復挙動を評価した。BR2 照射の方が硬さ上昇が大きく、また Cu、Ni の添加量の相違により熱処理による硬さの回復温度域が異なることが示された。筆者らは、この相違の原因として SC の形成、回復挙動に及ぼす照射速度の相違の可能性を挙げている。

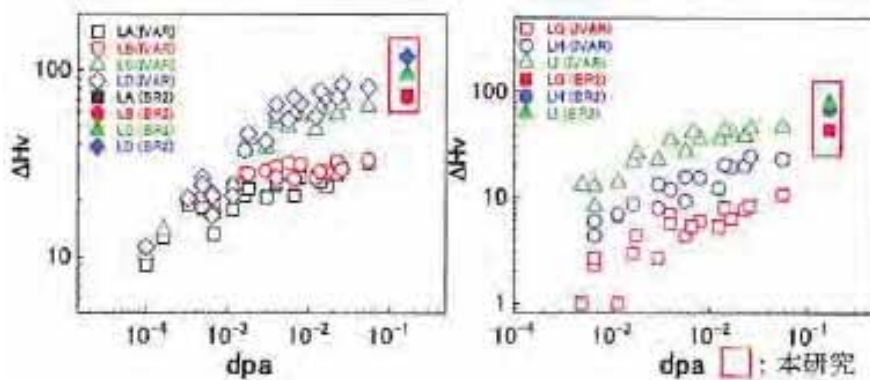


図2 IVARプログラムとBR2による照射

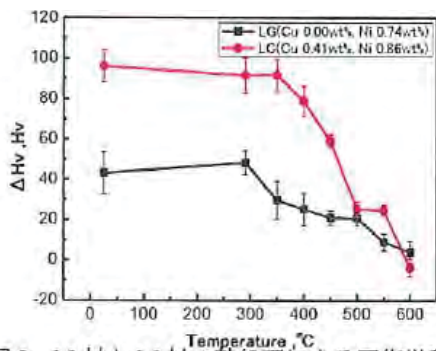


図3 LG材とLC材の熱処理による回復挙動

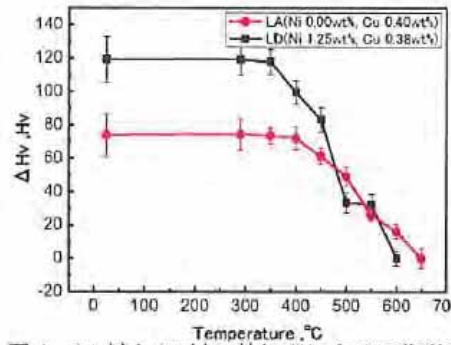


図4 LA材とLD材の熱処理による回復挙動

(7)日本金属学会2018年春期(第162回)講演大会

2018年3月19日(月)~3月21日(水) @千葉工業大学

概要:

公益社団法人日本金属学会が主催する、2018年春期講演大会(第162回)の原子力材料セッションに参加し、中性子照射に伴う原子炉圧力容器鋼等の微細組織変化に関する最新情報を中心に調査した。

関連研究分野の情報収集:

① Fe-1.5Mn合金の高照射下マイクロ組織変化へのNiおよびSi添加影響

○藤井克彦, 福谷耕司(原子力安全システム研)

原子炉圧力容器鋼モデル合金に 290°C で Fe イオンを照射し、損傷量 5 dpa の位置を対象に APT 分析を行って、Cu を含まない系での Mn-Ni-Si クラスタ等の形成機構や、転位ループのクラスタ形成核としての役割、クラスタを構成する個別元素への影響を評価した。その結果、Ni 濃度が高いほどループ状の Mn/Ni の集積が顕著になり、Mn 単独の集積は減少する傾向があること、また Si 濃度の増加に伴い Mn クラスタが認められなくなり、ループ状の Si の集積が顕著になる傾向が認められた。Si と Mn が共存する系では、Si と Mn の共偏析を考慮することの重要性が示唆された。

② クラッド熱影響を受けた実機圧力容器鋼の照射脆化評価(3)

○大友康平¹, 小林凌也¹, 藪内聖皓², 木村晃彦², 熊野秀樹³(1京大エネ科(院), 2京大エネ研, 3中部電力原安技研)

浜岡 1 号の原子炉圧力容器アーカイブ材(ESW クラッド溶接)を用い、クラッド下熱影響部近傍の衝撃特性を、1/3 サイズのシャルピー衝撃試験片で評価した。衝撃特性を評価した溶融境界から 5 mm 以上離れた部位の金属組織はほぼ細粒で、母材と HAZ の延性脆性遷移曲線は概ね一致した。主な結果は前出の(6)-(8)項と重複していたが、発表ではシャルピー衝撃試験片の寸法影響を考慮したデータの規格化方法への言及があった。

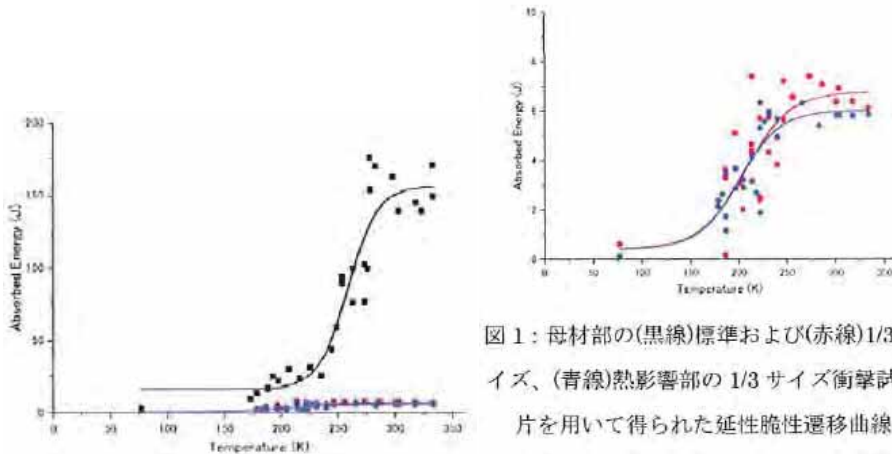


図 1: 母材部の(黒線)標準および(赤線)1/3 サイズ、(青線)熱影響部の 1/3 サイズ衝撃試験片を用いて得られた延性脆性遷移曲線

③ 原子炉用構造材料開発の現状と課題

○福谷耕司(原子力安全システム研究所)

公募テーマシンポジウム「照射欠陥形成制御機構の解明と耐照射性材料開発への新展開」の基調講演として、軽水炉で重要な構造材であるステンレス鋼と低合金鋼の照射劣化機構の解明と材料改良に関する研究について最近の動向の紹介があった。原子炉圧力容器では長期運転における脆化予測の高度化の必要性が指摘され、アトムプローブ等による脆化因子の理解の進展とそれに基づく脆化傾向式の検討状況が紹介された。炉内構造物に対しては、実機低中性子束条件下での照射誘起応力腐食割れ(IASCC)の機構理解とスエリング予測が課題として挙げられた。また研究を進める上で様々なデータに基づく照射相関やモデル化が重要であり、例えばフェライト系低合金鋼とオーステナイト系ステンレス鋼の硬化因子として溶質クラスタと転位ループが挙げられている点は共通しており、クラスタ生成機構、転位ループとクラスタの生成サイトの共通性、硬化への寄与度、変形に伴う転位の運動との相互作用など、結晶構造を超えた総合的な理解も深める必要がある、との指摘があった。さらに今後の研究テーマとして、ステンレス鋳鋼や溶接金属のフェライト相の脆化に対する熱脆化と照射影響の重畳効果の影響についても言及があった。その中で廃炉材では米国、スペイン、チェコ等で進められてきたが国内でも最近開始されていることが紹介された。

④ 原子炉材料の耐照射性発現機構研究の現状と課題

○木村 晃彦¹(¹ 京都大学エネルギー理工学研究所)

前項③と同じくシンポジウムの基調講演として、原子力材料の耐照射性発現機構研究の現状と課題について紹介があった。論点として、軽水炉材料の照射研究の主眼は照射量の増大に伴う脆化の進展を予測するところであり、照射量の増大に伴って脆化機構が重畳、変化する照射量しきい値を予測することの重要性が指摘された。また照射損傷機構解明において、照射後焼鈍実験の有効活用を図るべきとの指摘があった。照射効果機構の理解に基づいた材料の照射下挙動予測研究は重要であり、かつ耐照射性に優れた原子力材料の開発研究にも寄与するもの、との期待が示された。

⑤ Electron irradiation effect on Cu diffusion in Fe studied by atom probe tomography

○C. Zhao¹, T. Toyama², T. Yoshiie³, M. Shimodaira¹, K. Tomura², N. Ebisawa², K. Inoue², Y. Nagai²(¹ 東北大工(院生), ² 東北大金研, ³ 京大原子炉)

温度を精度良く制御した条件で 2 MeV 電子線を照射し、Fe-1.0wt%Cu モデル合金中の Cu の拡散係数の温度依存性を評価した。500°C以下の照射で Fe 中の Cu の拡散が促進する傾向が認められ、この傾向は照射温度が低くなる(200~300°C)ほど顕著となった。Cu 拡

散の駆動力として、照射によって過剰に導入された原子空孔の Cu 析出の界面や転位への消滅を指摘している。なお本件は(6)項③の内容と一部重複していた。

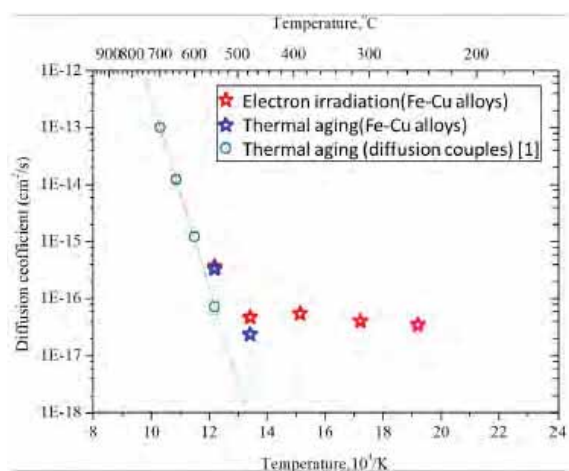


Figure 1. Arrhenius plot for diffusion coefficient of Cu in Fe

⑥ 転位組織観察のための熱電子銃型ウィークビーム走査透過電子顕微鏡の開発

○吉田健太¹, 鈴木克弥¹, 海老澤直樹¹, 外山健¹, 井上耕治¹, 下平昌樹²,

Konstantinovich Milan³, Gerard Robert⁴, 永井 康介¹(¹ 東北大金研, ² 東北大工(院生), ³ SCK/CEN, ⁴ Tractebel ENGIE)

筆者らは原子炉圧力容器鋼(RPV)内の転位や転位ループの分布を可視化と3次元定量解析を進めており、その一環として熱電子銃(LaB₆)型ウィークビーム走査透過電子顕微鏡(LaB₆-WB-STEM)を使ったより簡便な転位観察法を開発した。本発表では、同一視野から取得されたFE型と熱電子銃型のWB-STEM像を比較し、電子銃との輝度およびエネルギー幅の違いがWB-STEM像のコントラストおよび分解能に与える影響について評価した結果が示された。その中で熱電子銃型WB-STEM像がFE型の評価結果と遜色なく実験推進において効率化が図れること、またそれぞれの電子銃の特色を生かした観察法の棲み分けにより情報量の拡充が図れること等のメリットについて紹介があった。

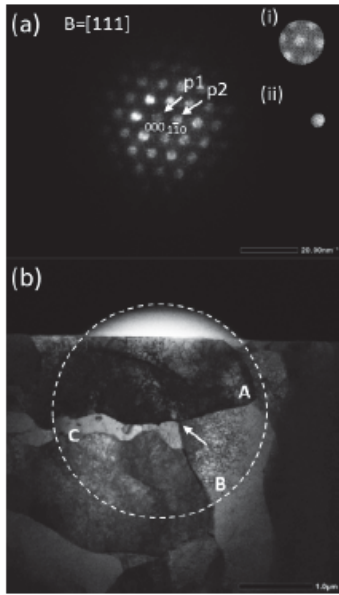


図 2: (a)検出器上のディスクパターン：1-10
回折ディスクの選択 (i)30 μ mOLA、(ii)
10 μ mOLA と(b)明視野 Lab6-WB-STEM 像

⑦ WB-STEM法および3D-AP法で調べた中性子照射Fe-Cu-X(X=Mn,Ni,P)モデル合金の照射硬化機構

○外山健¹, 吉田健太¹, 井上耕治¹, 海老澤直樹¹, 畠山賢彦², 永井康介¹(¹東北大金研, ²富山大)

RPV鋼の照射脆化の主因である不純物Cuの照射促進析出やマトリックス欠陥の形成におけるMnの寄与に着目し、3D-APおよびTEM観察の結果Mnを含む合金では他と比較してCu析出物および転位ループが微細であることも報告した。一方、Mnを含む合金での著しい照射硬化に関し、可視化したマイクロ組織のみでは説明できない可能性も残っていた。ウィークビーム走査透過電子顕微鏡(WB-STEM)法を用い、当該合金中の転位ループを観察して定量評価し、転位ループの形成と発展における添加元素の修飾、さらに変形時の転位の運動における添加元素効果として、転位の運動を阻害する可能性について言及があった。

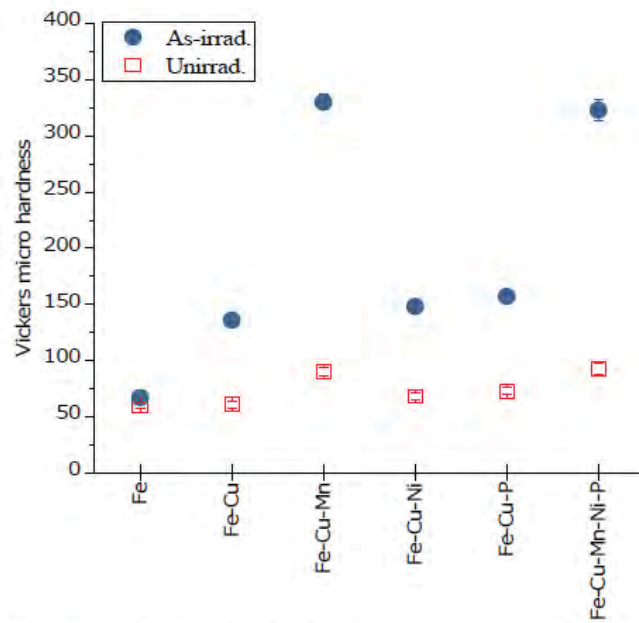


図1：中性子照射前/後のFe基モデル合金のビッカース微小硬度。

3.3.3 最新知見の調査のまとめ

(1) PTS模擬試験に関する既往知見の調査

PTS 模擬試験を合理的に推進するため、類似の目的や着眼点で行われた既往知見について調査を行った。その結果、十字型試験と小型平板曲げ試験での参照温度 T_0 は、CT 試験片で評価した参照温度 T_0 に比べてそれぞれ以下のような傾向となると思われることが判った。

- ・CT 試験片と比較し、十字型試験体は拘束度が小さくなる傾向になる。
- ・単軸よりも 2 軸の方が破壊靱性は低い傾向となり、CT 試験片の T_0 と比較して 2 軸では約 15°C 低温側へ、また単軸では約 40°C 低温側にシフトする。
- ・亀裂最深部の K 値にかえて、亀裂前縁の K 値分布を用いて等価 K 値(K_{eff} : CT 試験片の板厚相当)に置き換えることで評価が可能である。
- ・クラッド有の貫通亀裂においては、クラッド無の場合よりも破壊しにくいが負荷応力の 2 軸度が大きくなると、ほとんど差がなくなることが示されている。

(2) 学会等における最新情報調査

原子炉圧力容器鋼の照射脆化及び破壊靱性に係る評価に関連する最新情報の調査を行い、そのうち主だった知見のべ 45 件について概要をまとめ、一部の内容については本事業成果との関係の側面から評価を行った。またそれ以外の調査結果に対しても評価を行った。

以上に記載した最新情報の調査とそれらに対する評価結果は、本事業での原子炉圧力容器鋼の破壊力学評価に係る試験と照射脆化予測法に関する研究の進捗に合わせ、適宜試験要領立案や取得データの評価に反映していく。

参考文献

- (3.3.1-1) R. D. Cheverton, et al. , “Large-Scale Thermal-Shock Experiments with Clad and Unclad Steel Cylinders”, IAEA/CSNI Specialists' Meeting on Fracture Mechanics Verification by Large-Scale Testing, USNRC Report NUREG/CP-0131 (ORNL/TM-12413), pp. 289-310, 1993.
- (3.3.1-2) R. H. Bryan, et al. , “Pressurized Thermal Shock Experiments with Thick Vessels” Fracture Mechanics: Nineteenth Symposium, American Society for Testing and Materials, ASTM STP-969, pp. 767-783, 1988.
- (3.3.1-3) B. R. Bass, et al. , “Determination of Cladding Effects on Shallow-Flaw Fracture Toughness of Reactor Pressure Vessel Steel under Prototypic Biaxial Loading”, ICONE5-2017, 1997.

- (3.3.1-4) D. Moinereau, et al. , “Evaluation of Fracture mechanics analyses used in RPV integrity assessment regarding brittle fracture”, IAEA Meeting, 1997.
- (3.3.1-5) I. Sattari-Far, et al. , “Overview and Evaluation of the NESC Projects for Fracture Assessments of Nuclear Components”, 2011.
- (3.3.1-6) C. Jacquemoud, et al. , “NESC VII European Project: Demonstration of Warm Pre Stressing Effect in Biaxial Loading Conditions—Bending Tests on 18MND5 Cruciform Specimens”, Proceedings of the ASME 2011 Pressure Vessels & Piping Division Conference, PVP2011-57189.
- (3.3.1-7) NESC-IV PROJECT, “An investigation of the transferability of Master Curve technology to shallow flaws in reactor pressure vessel applications”, Final Report, 2005.
- (3.3.1-8) R. E. Link, et al. , “An experimental investigation of the effect of biaxial loading on the master curve transition temperature in RPV steels”, Engineering Fracture Mechanics, 74, pp. 2824–2843, 2007.

4. おわりに

平成29年度「軽水炉照射材料健全性評価研究」事業では、原子炉压力容器の照射脆化に関する研究を実施し、以下の成果を得た。

破壊力学に係る試験では、PTS事象に対する破壊力学による健全性評価手法の保守性を総合的に確認するためのPTS模擬試験用供試材として、原子炉压力容器鋼材(未照射材/初期プラント模擬材)と原子炉压力容器脆化材(低靱性鋼)を製作して基礎特性試験を実施し、当初仕様通り供試材調達を完了すると共に、PTS模擬試験に供するステンレスオーバーレイクラッド下半楕円欠陥を付与した十字型2軸曲げ試験体の製作を一部完了した。また低靱性鋼を用い、破壊靱性試験片と原子炉压力容器内面のステンレスオーバーレイクラッド下半楕円欠陥に対する拘束効果の差異の確認のための試験とその結果に基づいた弾塑性有限要素解析を開始し、脆性破壊発生時における亀裂先端の応力拡大係数(見かけの破壊靱性値)評価に着手した。さらに未照射材/初期プラント模擬材を用い、ステンレスオーバーレイクラッド下半楕円欠陥を考慮した健全性評価に対して現行の破壊靱性評価データを用いることへの代表性確認試験に一部着手した。加えて、PTS模擬試験設備の組み立てと据付を完了し、性能確認のための試運転を行って当初仕様通りの試験性能が得られることを確認した。

脆化予測法に係る研究では、ベイズ統計とモンテカルロ計算に基づいて確率分布を推定可能なプログラムを整備するとともに、監視試験データを用いた解析を行い、化学成分や中性子照射条件を入力パラメータとして脆化量の指標である関連温度移行量の最確値及び確信区間を評価した。データ区分ごとに信頼性の高い解析が実施でき、脆化を最もよく表す入力変数の数や組合せが異なることが明らかになった。また高照射量領域まで中性子照射された実機と同等の原子炉压力容器鋼を用いて、三次元アトムプローブ及びオージェ電子分光による微細組織分析を行うとともに、破壊靱性データを取得するための準備及び試験を実施した。微細組織分析により、CuやSiの濃度とクラスタの性状や脆化量との相関を確認するとともに、PやCの粒界偏析量の照射に伴う変化量を評価した。