

### 3.3 予防保全対策技術の保守性に係る研究

本研究では応力改善工法施工部位(ピーニング技術)に対する残留応力評価を行い、事業者が実施した予防保全対策技術施工箇所に対する亀裂の解釈の考え方の保守性を検証する。なお、予防保全対策部の残留応力評価を行う一つの方法として、施工部位を切断採取し、試験研究施設において残留応力を測定する方法が考えられるが、これを行うためには、採取により施工部の残留応力が変化しないことや試験研究施設に輸送可能であり、かつ、放射線環境下で残留応力測定が可能であることが必要となる。また、除染による金属表面に対する深さの影響も含め、実際に施工部応力測定の実施例はなく影響の確認が必要である。

令和5年度は、事業計画に基づき、以下の項目について実施した。

#### (1) 試験仕様詳細の検討

##### ■ 除染の影響確認試験の実施仕様詳細の検討

###### ➤ PWR プラント廃炉時の除染の影響確認試験計画の検討

残留応力分布に影響を与える要因の確認試験として、令和4年度に策定した沸騰水型原子力発電プラント(BWR)の廃炉段階における除染による影響確認試験計画の策定に引き続き、令和5年度は加圧水型原子力発電プラント(PWR)の廃炉段階における除染による影響確認試験計画を検討した。

###### ➤ PWR プラントの放射線環境下での応力測定の成立性検証

令和4年度に PWR 蒸気発生器管台のピーニング施工部におけるその場(原子力発電所当該機器設置場所)の直接残留応力測定の成立性を検討し、施工システムの基本的な成立性を確認した。また、課題として残留応力測定に及ぼす放射線環境の影響、並びに、残留応力測定系ケーブルの延長可否が今後の課題として挙げられた。これらの課題のうち、前者の放射線環境の影響確認については、今後の実機適用に向けた工事基本実施計画の検討に先立ち、応力測定の成立性を確認しておく必要がある。放射線の影響は、PWR 蒸気発生器管台のピーニング施工部の残留応力測定を想定した場合、周囲に放射性物質を含むクラッドが存在するため放射線環境場での測定となる。放射線は応力測定に用いる X 線に干渉するため、測定部に想定される放射線環境での応力測定可否を把握しておく必要がある。そのため、令和5年度は照射線照射施設を活用して「放射線環境下での応力測定の成立性に関する調査」を実施した。

##### ■ 要素試験体による解析手法の妥当性確認の検討

令和3年度の実機構造模擬(モックアップ)試験の試験計画と、令和4年度に検討した詳細実施要領、ピーニングによる表層部の圧縮残留応力及び部材内部の残留応力が重畳した複合的な応力状態を踏まえた解析による影響確認結果より、要素試験体解析モデルによる解析手法の妥当性確認を実施した。具体的には、要素試験(平板等溶接+ピ

ーニングの試験体製作・切断試験)及び要素試験を模擬した解析を実施し、要素試験結果との比較・検証に着手した。

- 要素試験体による切断影響確認(試験的アプローチ)
- 要素試験体を模擬した解析による切断影響確認(解析的アプローチ)

## (2) 試験の実施

残留応力分布に影響を与える要因の確認試験として、令和4年度に策定したBWRプラントの廃炉段階の除染による影響確認試験計画案を基に試験準備に着手した。本試験は令和4年度に開始した3か年計画のうち2年目となる。

- 除染試験片の製作準備
- 除染試験装置の製作準備

## (3) 事業計画案の見直し

上記(1)及び(2)の成果を総合的に検討し、令和6年度以降の事業計画案を見直した。

### 3.3.1 試験仕様詳細の検討

#### 3.3.1.1 除染の影響確認試験の実施仕様詳細の検討

##### (1) PWR プラント廃炉時の除染の影響確認試験計画の検討

予防保全技術としてのピーニングは、溶接等による引張残留応力を圧縮側にするこ  
とにより、SCC の防止効果を付与するものである。その施工直後の効果や、300°C 前  
後で長期間の運転に供された後の効果持続性について、多くの試験データで検討が行  
われてきた<sup>[3.3.1.1(1)-1]</sup>。しかし、実機のピーニング施工箇所の残留応力等の測定は困難  
であり、これまで実機当該部での実測例は存在しない。今後、廃炉材を用いて、ピー  
ニング効果を持続性も含めて直接検証することの意義は大きい。廃炉材を用いた評  
価を行う際には、廃炉時の除染によりピーニング効果への影響が生じ得るかを予め確  
認しておく必要がある。

令和4年度に策定した BWR プラントの廃炉段階における除染による影響確認試験  
計画に引き続き、令和5年度は PWR プラントの廃炉段階における除染による影響確  
認試験計画を検討した。

実施仕様詳細を検討するにあたり、実機 PWR プラントで広く適用されている  
CORD (Chemical Oxidation Reduction Decontamination)法<sup>[3.3.1.1(1)-2]</sup>による化学除  
染の実績を調査し、これらの除染実績を踏まえて、①試験片形状及び試験条件、②試  
験装置について検討した。

##### 1) PWR 廃炉プラントの除染実績等の調査

廃炉が決定した国内 PWR プラントを対象に、応力腐食割れを対象とした予防保全  
技術としてのピーニングが適用された主な箇所を調査した結果を表 3.3.1.1(1)-1 にま  
とめた。なお、令和3年度に調査した結果<sup>[3.3.1.1(1)-3]</sup>に最新状況を追記する形とし、追記  
部に【R5】として示した。

水没させた状態で施工が必要な炉内計装筒(BMI)、原子炉容器出入口管台、安全注入  
管内面の炉内部位に対してはウォータージェットピーニング(WJP)もしくはレーザーピー  
ニング(LP)が施工され、水没させた状態で開放ができない蒸気発生器出入口管台に対  
しては超音波ショットピーニング(USP)が施工されている。対象部位は全て 600 系ニ  
ッケル基合金であり、母材部を対象とした箇所と溶接金属部を対象とした箇所がある。

表 3.3.1.1(1)-2 に PWR プラントと BWR プラントのピーニング施工部位の比較を示  
す。PWR では、ピーニング施工部の材料が 600 系ニッケル基合金であるのに対し、  
BWR では、SUS304 系ステンレス鋼が主であり、除染方法も CORD 法と HOP 法<sup>[3.3.1.1(1)-4]</sup>で異なる。

CORD 法は、過マンガン酸イオンによる酸化クロムの酸化溶解とシュウ酸による酸  
化鉄等の溶解(除染)を行う化学洗浄である。酸化溶解と除染を交互に繰り返すサイクル

処理により、効率的に酸化皮膜の溶解除去を進める。

図 3.3.1.1(1)-1 に CORD 法の実施フローを示す。また、以下に各除染工程の概要を示す。

① 系統水張

除染系統に水を張りこみ、処理温度(酸性(HP)酸化: 125°C、アルカリ性(AP)酸化: 125°C)まで昇温する。

② 酸化

過マンガン酸イオン( $\text{MnO}_4^-$ )により酸化クロムを溶解する。この時、過マンガン酸を加えて酸性条件で実施する HP 法と、過マンガン酸カリウムと水酸化ナトリウムを加えてアルカリ性条件で実施する AP 法をサイクル毎に交互に実施する。HP 法はステンレスの酸化皮膜に効果的で除染効果が高く、AP 法はニッケルリッチなクラッドに効果的であることから、HP 法と AP 法をサイクルごとに交互に行う。

③ 還元/中間浄化

除染工程の準備として、シュウ酸を添加し、酸化工程にて残留した過マンガン酸イオン( $\text{MnO}_4^-$ )を分解するとともに、酸化溶解反応で生成した二酸化マンガンの沈殿を溶解する。

除染工程では除染剤(シュウ酸)とニッケルが難溶性塩を形成し、除染対象表面に再付着するリスクがあることから、これを避けるため、還元工程後、系統水のニッケル濃度が低下するまでイオン交換樹脂への通水処理を行う。

④ 除染

除染剤(シュウ酸)により酸化鉄を溶解する。溶解した鉄イオン(II)は溶液中でシュウ酸と錯体を形成する。沈殿生成防止および除染効率向上を目的として、除染工程では除染系統内に除染液を循環通水するとともに、一部をイオン交換樹脂へ通水し、除染液中の金属イオン(Fe、Ni、Mn、Co 等)を除去する。

⑤ 分解

次サイクルへ移行する準備として、除染工程にて残留したシュウ酸を過酸化水素( $\text{H}_2\text{O}_2$ )添加+紫外線(UV)照射により分解する。

⑥ 浄化

除染が完了した後、工事の後処理として系統水をカチオン樹脂、アニオン樹脂に通水し、残留成分を完全に除去する。

これらの除染実績・工程を踏まえて、以降 PWR プラントを対象とした除染影響確認試験の詳細仕様を検討した。

## 2) 試験片及び試験条件に係る検討

除染の影響確認をするため、実機の除染実績などを踏まえて、試験片形状や試験条件などの試験実施仕様詳細を検討した。

## ① 除染試験片の検討

### a) 試験片形状

除染によって酸化皮膜が除去されるとともに、残留応力が付与されている金属相部分もごくわずかに溶解する。これによる残留応力への影響を試験的に確認するため、ピーニング及び酸化皮膜付与を行った試験片に対して除染処理を実施し評価する。除染試験の評価方法は、BWRプラントを対象とした除染影響確認試験と同様に、重量測定・断面観察及び残留応力測定とする。

試験片の材質はピーニング施工部位の素材と合わせるため、母材部は600合金母材、溶接金属部は600系溶接金属(132合金)を対象とする。試験片を採取するため、図3.3.1.1(1)-2に示すような、600合金母材を600系溶接金属(132合金)でシールドメタルアーク溶接(SMAW)した溶接継手を製作するものとする。

ピーニング施工法として、PWRプラントで適用されているWJP、USP及びLPを想定する。いずれも実機施工部への施工条件と同等の条件にて施工を実施するものとする。ピーニング施工により実機と同様の圧縮応力を導入するためには、試験片が十分な剛性を有しており施工後に反りが発生しないことが重要であることから、製作した溶接継手から板厚10mmの試験片を採取し、ピーニング施工を施すものとする。図3.3.1.1(1)-3にピーニング施工時の試験片形状を示す、ピーニング施工を行うためには把持部が必要であるため、施工時は幅150mmを確保するものとする。

ピーニング施工した試験体から、試験に供する除染試験片を採取する。実機部位を模擬した酸化皮膜形成や、除染の操作を効率良く行うためには、試験片の寸法及び表面積を極力小さく設定することが望ましいことから、図3.3.1.1(1)-4に示す通り図3.3.1.1(1)-3の両端部を切断し、除染試験片形状として母材試験片は30mm×30mm×t10mm、溶接金属試験片は約20mm×100mm×t10mmとする。なお溶接金属試験片は切断による残留応力の変化を避けるため、溶接金属部から十分離れた位置で切断採取するものとした。

### b) 酸化皮膜付与条件

原子力プラントの炉内構造物は、運転時に高温環境に長時間晒されるため、除染前の炉内構造物には酸化皮膜が形成される。除染において、酸化皮膜の有無や形成の違いで除染時の素材への影響が異なる可能性があることから、実機での酸化皮膜形成を極力模擬するため、運転温度、環境を模擬して高温酸化皮膜を付与するものとする。

酸化皮膜付与条件としては、実機の最高温度345°C、実機代表環境(B、Li、水素添加、脱気)にて3,000-5,000時間を選定した。

<酸化皮膜付与条件>

B : 500 mg/L、Li : 2 mg/L、DH : 30 cc/kg-H<sub>2</sub>O、DO : < 5ppb

温度 : 345°C

試験時間 : 3,000-5,000 時間

### c) 除染処理条件

#### i) 除染試験要件整理

除染試験計画を立案するにあたり、CORD 法を対象として、以下の通り条件を整理した。

##### ● 除染方法

除染方法は、上述の通り、PWR プラントで採用される、CORD 法とした。

CORD 法は 3.3.1.1(1)1)項に示した通り、系統水張、酸化、還元、中間浄化、除染、分解、浄化の各工程を繰り返すが、各工程が材料に及ぼす影響の度合いは定性的には以下の通りである。各除染工程の試験要件を踏まえた重要度と試験条件へ反映省略可否を表 3.3.1.1(1)-3 に整理した。

##### ➤ 系統水張

純水中の環境となるため、耐食性材料であるニッケル基合金等の腐食は殆ど生じないと考えられる。材料腐食への影響の観点から、除染試験において必ずしも模擬する必要はない。

##### ➤ 酸化

過マンガン酸を用いて酸化皮膜を溶解する工程であり、模擬は必須である。

##### ➤ 還元/中間浄化

シュウ酸を用いた系統中の薬剤の分解工程であり、耐食性材料への影響は大きくないと考えられる。

##### ➤ 除染

シュウ酸による鉄系酸化物の除去工程であり、模擬は必須である。

##### ➤ 分解

残留した薬剤の除去工程であり、耐食性材料への影響は大きくないと考えられる。

##### ➤ 浄化

系統中の除染剤成分濃度が十分低くなっており、耐食性材料の腐食は殆ど生じないと考えられる。

##### ● 試験温度

実機での除染時の温度仕様は、酸化処理時は 125℃、それ以外では 95℃であるが、材料腐食への影響は温度が高いほど大きくなるため、保守的な結果を得るために試験温度は制御可能な範囲で高く設定することが望ましい。

##### ● 循環流量

除染剤の濃度が系統水中で均一となり、材料表面から溶出した金属イオン成分が十分拡散できるだけの流動を確保することが必要であるが、材料表面積に対する除染剤容量が十分大きく、溶出した金属イオンが除染剤の能力低下に与える影響が小さい場合には、必ずしも模擬する必要はない。

- 除染時間と繰り返し数

実機では除染対象物の表面積、液量及び目標 DF(Decontamination Factor : 除染係数。除染前の線量を除染後の線量で割ったもの。)や過去の実績を考慮して除染時間と繰り返しサイクル数を決定している。除染試験では、これらの影響を考慮することが重要となる。

- 除染剤濃度

酸化(HP 法、AP 法)及び除染における薬剤濃度の目安は以下の通りである。なお、系統水質には微量のホウ酸が含まれているが、ホウ酸は弱酸であり除染性能には影響しないことから、今回の試験ではホウ酸濃度は考慮しないこととした。

- ・ HP 法 :  $\text{HMnO}_4$  300 mg/L as  $\text{MnO}_4^-$
- ・ AP 法 :  $\text{KMnO}_4$  300 mg/L as  $\text{MnO}_4^-$ 、NaOH 200 mg/L
- ・ 除染 : シュウ酸 1,000 mg/L

- 比液量

実機実績に基づくと、除染対象物表面積に対する除染液量(比液量)は、概ね  $1/2(2 \text{ m}^3/100 \text{ m}^2=2 \text{ mL/cm}^2)$ 程度であったことから、 $2 \text{ mL/cm}^2$ 以上を目標とする。

## ii) 試験設備の検討

除染試験の方法として、実機を極力模擬したループ試験を前提とするケースと、実機を包括するよう工程を省略する、バッチ試験を主体とするケースの 2 ケースを検討した。ここで、i)項で検討した各工程及び試験要件について、ループ試験及びバッチ試験の各試験設備における模擬可否の整理表を表 3.3.1.1(1)-4 に示す。ループ試験を実施する場合、実機工程・要件を全て模擬することが可能であるが、一方で必要な液量が多量となること、装置設計、製作、試運転等に多大な時間とコストがかかることが懸念される。バッチ試験を主体(酸化工程のみ簡易的なループ試験装置とする)とした場合、材料に対する影響の小さな系統水張、浄化工程は省略、還元/中間浄化、分解工程は前後の工程に組み込んで保守的に評価することで、酸化及び除染工程の模擬のみで評価することが可能となる。そのため、全体的な労力を考慮し、バッチ試験を基本として試験を計画する。但し、酸化工程については、 $125^\circ\text{C}$ で実施する必要があるため、圧力容器で加圧する必要があることから、試験中のサンプリングを実施しやすくするため、簡易的なループ試験装置を作製する。

### iii) 実機除染実績に基づく除染試験条件

ii)項での検討の通りバッチ試験(酸化工程については簡易ループ試験とする)を計画する。実機除染実績に基づき、除染試験条件として、除染剤濃度、温度、試験時間を表 3.3.1.1(1)-5 に整理した。除染剤濃度、温度は i)項の整理結果に基づき設定した。

除染時間・繰り返し数については、プラントによって処理時間が異なることから、保守的に評価するため、酸化、除染工程について、実績をカバーした処理時間となるよ

う、それぞれ 30 時間/サイクル、45 時間/サイクルを基準とし、実機の最大サイクル数である 4 サイクル実施することとした。また、還元/中間浄化の工程では、前工程である酸化処理時の薬剤(過マンガン酸)が残っている間はその影響を受けると考え、薬剤分解にかかる時間として 2 時間を酸化時間に加えることで、保守的に評価することとした。分解工程についても、同様に除染工程における薬剤(シュウ酸)が残っている間はその影響を受けると考え、実機でシュウ酸が 50 mg/L 以上となっている期間から、12 時間を除染時間に加えることで、保守的に評価することとした。

#### iv) 除染試験マトリクス

除染試験の評価方法は、重量測定・断面観察及び残留応力測定とする。表 3.3.1.1(1)-6 に除染試験のフルマトリクス案を、試験マトリクスの設定の考え方を以下に示す。

- ・ ピーニング施工の影響有無を把握するため、ピーニング施工有無の条件を設定
- ・ ピーニング施工方法による影響有無を把握するため、WJP, USP, LP の条件を設定
- ・ 酸化皮膜有無による影響を把握するため、酸化皮膜付与有無の条件を設定
- ・ 素材の影響を把握するため、溶接金属を対象とした条件を設定

### 3) 試験装置に係る検討

前項で検討した通り、除染試験はバッチ試験を基本とするが、高圧となる酸化工程のみ簡易的なループ試験を行う。以下に各試験方案の詳細を記載する。

#### ① 簡易ループ試験(酸化工程)

酸化工程は、125℃となることから、試験中系統の加圧が必要となるが、過マンガン酸イオンが系統中に含まれることから、ステンレス鋼等を用いると、系統表面で薬剤が消費されてしまうことが懸念される。そこで、系統全体を耐圧可能(運転圧力 0.18 MPa)なテフロン製として検討した。系統図案を図 3.3.1.1(1)-5 に、装置概略仕様を表 3.3.1.1(1)-7 に示す。試験容器は内径 φ90 mm のテフロン製の筒を加工し、小型オートクレーブ内に設置することで加熱を行う。試験容器から流出した試験液は冷却器を通過したのち、補給水タンク(10 L)に戻り、再び補給水ポンプを通過したのち、予熱器で加熱されて試験容器へ送り込まれる構成となっている。試験温度(125℃)を維持するため、補給水タンクを含む系統全体が加圧されている。また、試験中、都度冷却器の後段に設置されたサンプリングラインから液を採取し、薬液濃度の確認を行う。

除染試験に供する重量測定・断面観察用試験片及び残留応力測定用試験片の総表面積を評価し、最低比液量を 2 mL/cm<sup>2</sup> となるように設定するものとする。なお、試験容器のサイズから、重量評価・断面観察評価用試験片と、残留応力分布評価用試験片を同時に設置することは難しい場合は、試験は 2 回に分けて実施するものとする。

#### ② バッチ試験(除染工程)

除染工程では、加圧する必要はないため、ビーカーを用いたバッチ試験にて試験を行う。試験装置イメージを図 3.3.1.1(1)-6 に、装置概略仕様を表 3.3.1.1(1)-8 に示す。



試験片はビーカー内に設置し、ビーカーはホットスターラー上に設置する。液はホットスターラーにより攪拌しながら昇温し、試験中熱電対で温度を計測するとともに、必要に応じてサンプリングし、液濃度の分析を行う。また、系統中への溶出を避けるため、吊り下げ治具等はテフロン製とする。試験液量は最低比液量を  $2 \text{ mL/cm}^2$  となるように設定するものとする。ここでは  $3\text{L}$  程度を目安とし、適宜、バッチを分けて処理を行う。

#### 4) 試験工程の検討及びまとめ

PWR プラントにおける除染実績を調査し、除染影響確認試験の試験条件(試験対象材料、除染時間、除染剤濃度、比液量等)を検討し、CORD 法における酸化・除染工程を模擬した試験装置仕様を策定した。

図 3.3.1.1(1)-7 に PWR プラントを対象とした除染影響確認試験の工程案を示す。1-2 年目で試験片・試験装置の準備・製作を実施し、3 年目で除染試験・評価を実施する 3 ヶ年での実施工程を策定した。

<参考文献>

- [3.3.1.1(1)-1] 原子力規制庁ホームページ, 「電気事業連合会との廃炉材を用いた研究に係る意見交換について」, 会議資料 “ピーニング施工部の応力緩和に関するこれまでの研究成果について”, 平成 31 年 4 月 3 日. <https://www.da.nra.go.jp/file/NR000121199/000267436.pdf>(閲覧日: 2024/2/24)
- [3.3.1.1(1)-2] 谷内敏範ら, “原子力施設の合理的な廃止措置へ向けた取組み”, 三菱重工技報, Vol.57 No.4, 2020.<https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/574/574200.pdf> (閲覧日: 2024/2/24)
- [3.3.1.1(1)-3] 令和 3 年度 原子力規制庁委託成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費(実機材料等を活用した経年劣化評価・検証(実機材料を活用した健全性評価に係る研究)), 原子力規制庁, 令和 4 年 3 月
- [3.3.1.1(1)-4] 大浦正人ら, “日立 GE ニュークリア・エナジーの原子力発電施設廃止措置技術”, デコミッションング技報, Vol. 50, 21-29, 2014.

表 3.3.1.1(1)-1 (1/3) 廃炉プラントにおけるピーニング施工部位の中性子照射量、形状、廃炉措置後の状況（化学的除染の実施状況）等についての調査

プラント名	施工時期 (年) *公開ベース	施工後 運転時間 (EFPY) (年)	施工方法 (LP/WJP/USP)	施工部位	施工部位の形状 ／概略寸法／材質 【R5】*公開ベース	廃止措置後の状態	備考(URL 等)
美浜 1 号機 (PWR)	2006	2.7	WJP	原子炉容器出入口管台	600 系ニッケル基合金	系統除染実施済 (2017 年 8 月) 除染方法：CORD 法 (Chemical Oxidation Reduction Decontamination)	美浜発電所 1 号炉 高経年化技術評価書(40 年目) 平成 21 年 11 月(平成 22 年 5 月一部変更) 関西電力株式会社 <a href="https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_power/info/knic/meeting/gaiyou/m1.pdf">https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_power/info/knic/meeting/gaiyou/m1.pdf</a> (閲覧日：2021/3/15)  谷内ら，“原子力施設の合理的な廃止措置へ向けた 取り組み”，三菱重工技報，Vol.57 No.4，2020. ( <a href="https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/574/574200.pdf">https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/574/574200.pdf</a> )(閲覧日：2022/1/28)
	2006	2.7	WJP	安全注入管台	600 系ニッケル基合金		
	2002	5.7	WJP	炉内計装筒内面	600 系ニッケル基合金		
	2006	2.7	WJP	炉内計装筒外面	600 系ニッケル基合金		
美浜 2 号機 (PWR)	2007	2.7	WJP	原子炉容器出入口管台	600 系ニッケル基合金	系統除染実施済 (2017 年 11 月下旬 ～12 月下旬 ) 除染方法：CORD 法 (Chemical Oxidation Reduction Decontamination)	美浜発電所 2 号炉 高経年化技術評価書(40 年目) 平成 23 年 7 月(平成 24 年 6 月一部変更)関西電力 株式会社 <a href="https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_power/info/knic/meeting/gaiyou/m2.pdf">https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_power/info/knic/meeting/gaiyou/m2.pdf</a> (閲覧日：2021/3/15)  谷内ら，“原子力施設の合理的な廃止措置へ向けた 取り組み”，三菱重工技報，Vol.57 No.4，2020. ( <a href="https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/574/574200.pdf">https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/574/574200.pdf</a> )(閲覧日：2022/1/28)  国内初の PWR 廃止措置系統除染工事について(保全 技術アーカイブ)
	2007	2.7	WJP	安全注入管台	600 系ニッケル基合金		
	2000	7.9	WJP	炉内計装筒内面	600 系ニッケル基合金		
	2007	2.7	WJP	炉内計装筒外面	600 系ニッケル基合金		
	2007	2.7	USP	蒸気発生器出入口管台 (入口 A 以外)	600 系ニッケル基合金		
伊方 1 号機 (PWR)	2004.9.5～2005.3.2 (第 22 回定検)	5.5	LP	炉内計装筒内面	600 系ニッケル基合金	(系統除染 未実施) 【R5】	四国電力(株)ホームページ プレスリリース>2004 年度>2005 年 03 月 02 日 伊方発電所 1 号機の定期検査の終了について <a href="https://www.yonden.co.jp/press/re0503/j0ypr001.htm">https://www.yonden.co.jp/press/re0503/j0ypr001.htm</a> (閲覧日：2021/3/15)
				冷却材入口管台内面	600 系ニッケル基合金		
				安全注入管内面	600 系ニッケル基合金		

表 3.3.1.1(1)-1 (2/3) 廃炉プラントにおけるピーニング施工部位の中性子照射量、形状、廃炉措置後の状況（化学的除染の実施状況）等についての調査

プラント名	施工時期 (年) *公開ベース	施工後 運転時間 (EFPY) (年)	施工方法 (LP/WJP/USP)	施工部位	施工部位の形状 /概略寸法/材質 【R5】*公開ベース	廃止措置後の状態	備考(URL等)
伊方2号機 (PWR)	2005.9.5～ 2006.2.2 (第18回定検)	5.0	LP	炉内計装筒内面	600系ニッケル基合金	(系統除染 未実施) 【R5】	四国電力㈱ホームページ>プレスリリース> 2005年度>2006年03月01日 伊方発電所2号機の定期検査の終了について <a href="https://www.yonden.co.jp/press/re0603/j0ypr001.htm">https://www.yonden.co.jp/press/re0603/j0ypr001.htm</a> (閲覧日:2021/3/15)
				冷却材入口管台内面	600系ニッケル基合金		
				安全注入管内面	600系ニッケル基合金		
玄海1号機 (PWR)	2003	7.0	WJP	炉内計装筒内面	600系ニッケル基合金	系統除染実施済 (2018年6～7月) 除染方法:CORD法 (Chemical Oxidation Reduction Decontamination)	玄海原子力発電所1号機 高経年化対策に関する報告書 平成15年12月(平成22年3月一部変更)九州電力株式会社 <a href="http://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0248/6764/06-">http://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0248/6764/06-</a> 谷内ら, “原子力施設の合理的な廃止措置へ向けた取り組み”, 三菱重工技報, Vol.57 No.4, 2020. ( <a href="https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/574/574200.pdf">https://www.mhi.co.jp/technology/review/pdf/574/574200.pdf</a> )(閲覧日:2022/1/28)
	2006【R5】	4.7	WJP【R5】	原子炉容器出入口管台	600系ニッケル基合金		
	2006【R5】	4.7	WJP【R5】	安全注入管台	600系ニッケル基合金		
	2006【R5】	4.7	WJP【R5】	炉内計装筒外面	600系ニッケル基合金		
	2007【R5】	3.5	USP【R5】	蒸気発生器出入口管台	600系ニッケル基合金		
玄海2号機 (PWR)	2006	3.4	WJP	原子炉容器出入口管台	600系ニッケル基合金	(系統除染 未実施) 【R5】	玄海原子力発電所2号炉 高経年化技術評価書 平成22年3月(平成22年10月一部変更)九州電力株式会社 <a href="http://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0248/6739/06-genkai02.pdf">http://www.kyuden.co.jp/var/rev0/0248/6739/06-genkai02.pdf</a> (閲覧日:2021/3/15)
	2006【R5】	3.4	WJP【R5】	安全注入管台	600系ニッケル基合金		
	2006	3.4	WJP	炉内計装筒内面	600系ニッケル基合金		
	2006	3.4	WJP	炉内計装筒外面	600系ニッケル基合金		

表 3.3.1.1(1)-1 (3/3) 廃炉プラントにおけるピーニング施工部位の中性子照射量、形状、廃炉措置後の状況（化学的除染の実施状況）等についての調査

プラント名	施工時期 (年) *公開ベース	施工後 運転時間 (EFPY) (年) 【R5】	施工方法 (LP/WJP/USP)	施工部位	施工部位の形状 /概略寸法/材質 【R5】 *公開ベース	廃止措置後の状態	備考(URL 等)
大飯 1 号機 (PWR)	2006	3.2	WJP	原子炉容器出入口管台	600 系ニッケル基合金	系統除染実施済 (2021 年 6~7 月 )  除染方法：CORD 法 (Chemical Oxidation Reduction Decontamination) 【R5】	大飯発電所 1 号炉 高経年化技術評価書 平成 20 年 3 月(平成 20 年 10 月一部変更)関西電力株式 会社 <a href="https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_power/info/knic/meeting/gaiyou/o1.pdf">https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_power/info/knic/meeting/gaiyou/o1.pdf</a> (閲覧日：2021/3/15)  福井県ホームページ >廃止措置バナー>廃止措置の状況>大飯 1、2 号 機 件名一覧 大飯発電所 1,2 号機廃止措置 系統除染工事 詳解 関西電力株式会社  <a href="https://www.pref.fukui.lg.jp/doc/atom/hairo/hai-shisochi_ooi1_2_d/fil/O-03.pdf">https://www.pref.fukui.lg.jp/doc/atom/hairo/hai-shisochi_ooi1_2_d/fil/O-03.pdf</a> (閲覧日：2024/2/16) 【R5】
	2001	7.3	WJP	炉内計装筒内面	600 系ニッケル基合金		
	2006	3.2	WJP	炉内計装筒外面	600 系ニッケル基合金		
	2006	3.2	USP	蒸気発生器出入口管台	600 系ニッケル基合金		
大飯 2 号機 (PWR)	2006	4.3	WJP	原子炉容器出入口管台	600 系ニッケル基合金	系統除染実施済 (2021 年 9~10 月 )  除染方法：CORD 法 (Chemical Oxidation Reduction Decontamination) 【R5】	大飯発電所 2 号炉 高経年化技術評価書 平成 20 年 3 月(平成 20 年 10 月一部変更)関西電力株式 会社 <a href="https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_power/info/knic/meeting/gaiyou/o2.pdf">https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nuclear_power/info/knic/meeting/gaiyou/o2.pdf</a> (閲覧日：2021/3/15)  福井県ホームページ >廃止措置バナー>廃止措置の状況>大飯 1、2 号 機 件名一覧 大飯発電所 1,2 号機廃止措置 系統除染工事 詳解 関西電力株式会社  <a href="https://www.pref.fukui.lg.jp/doc/atom/hairo/hai-shisochi_ooi1_2_d/fil/O-03.pdf">https://www.pref.fukui.lg.jp/doc/atom/hairo/hai-shisochi_ooi1_2_d/fil/O-03.pdf</a> (閲覧日：2024/2/16) 【R5】
	2002	8.5	WJP	炉内計装筒内面	600 系ニッケル基合金		
	2006	4.3	WJP	炉内計装筒外面	600 系ニッケル基合金		

表 3.3.1.1(1)-2 PWR と BWR のピーニング施工部の比較

	PWR	BWR
ピーニング施工方法	WJP USP LP	LP SP
施工部位	原子炉容器出入口管台 炉内計装筒内面 炉内計装筒外面 蒸気発生器出入口管台	シュラウド CRDハウジング等
主要な施工部の材料	600系ニッケル基合金	SUS304系ステンレス鋼
除染方法	CORD法	HOP法

表 3.3.1.1(1)-3 各除染工程の試験要件を踏まえた重要度と試験条件へ反映省略可否

No.	除染工程	重要度	試験条件への反映省略可否
1	系統水張	小	省略可
2	酸化	大	省略不可
3	還元 /中間浄化	中	省略可 (一部を酸化工程に組み込むことで保守的評価が可能)
4	除染	大	省略不可
5	分解	中	省略可 (一部を除染工程に組み込むことで保守的評価が可能)
6	浄化	小	省略可

表 3.3.1.1(1)-4 各試験設備における除染工程・条件の模擬可否

○：実機除染条件の模擬可能、－：模擬省略

方針		実機を極力模擬 ：全体をループ試験で実施				実機を包括するよう工程を省略 ：バッチ試験主体			
工程	要件 重要度	温度	除染時間、 繰り返し数	除染 液	比液 量	温度	除染時間、 繰り返し数	除染 液	比液 量
系統水張	小	○	○	○	○	－	－	－	－
酸化	大	○	○	○	○	○	○	○	○
還元/ 中間浄化	中	○	○	○	○	還元/中間浄化工程を酸化工程に統合			
除染	大	○	○	○	○	○	○	○	○
分解	中	○	○	○	○	分解工程の時間を除染工程に統合			
浄化	小	○	○	○	○	－	－	－	－



表 3.3.1.1(1)-5 除染試験条件

		酸化		除染
		HP 法	AP 法	
除染剤濃度		HMnO <sub>4</sub> 300 mg/L as MnO <sub>4</sub>	KMnO <sub>4</sub> 300 mg/L as MnO <sub>4</sub> 、 NaOH 200 mg/L	シュウ酸 1000-1200 mg/L
温度		125°C	125°C	95°C
除染 時間	1 サイクル	32 時間	—	57 時間
	2 サイクル	—	32 時間	57 時間
	3 サイクル	32 時間	—	57 時間
	4 サイクル	—	32 時間	57 時間

表 3.3.1.1(1)-6 除染試験マトリクス案

素材	材質	ピーニング	酸化皮膜の付与	除染試験	残留応力分布評価	重量測定・断面観察	備考
600系ニッケル基合金	母材	なし	—	—	○	—	
			—	—	—	○	
			—	○	○	—	
			—	○	—	○	
		なし	○	—	○	—	
			○	—	—	○	
			○	○	○	—	
			○	○	—	○	
		WJP	—	—	○	—	
			—	—	—	○	
			—	○	○	—	
			—	○	—	○	
		WJP	○	—	○	—	
			○	—	—	○	
			○	○	○	—	
			○	○	—	○	
	USP	○	—	○	—		
		○	—	—	○		
		○	○	○	—		
		○	○	—	○		
	LP	○	—	○	—		
		○	—	—	○		
		○	○	○	—		
		○	○	—	○		
	溶金	WJP	○	—	○* <sup>3</sup>	—	溶金の影響確認
			○	—	—	○	
			○	○	○* <sup>3</sup>	—	
			○	○	—	○	

表 3.3.1.1(1)-7 簡易ループ試験装置概略仕様

主要機器	概略仕様	備考
補給水タンク	ナルゲン強化ボトル 10 L	
補給水ポンプ	定量ダイヤフラムポンプ 最大吐出し量 6 L/時間 最大吐出圧 0.5 MPa	ポンプヘッド：PP ダイヤフラム、バルブシート： PTFE
試験容器	テフロン製容器 $\phi$ 90 mm 小型オートクレーブに設置	
予熱器	2.25 kW シースヒータ	外部に 4×6 mm のテフロンパイプ 9 m を巻き付けて加熱
冷却器	二重管(内管 4×6 mm テフロン、外観 $\phi$ 12.7 mm 銅管)	
配管・バルブ	PTFE チューブ(4×6 mm)	

表 3.3.1.1(1)-8 バッチ試験装置概略仕様

主要機器	概略仕様
試験容器	ガラス容器 液量 3 L 程度想定
ホットスターラー	昇温(95°Cまで)、攪拌可能なものを選定
冷却管	ガラス製 温度保持に使用
熱電対	温度制御に使用

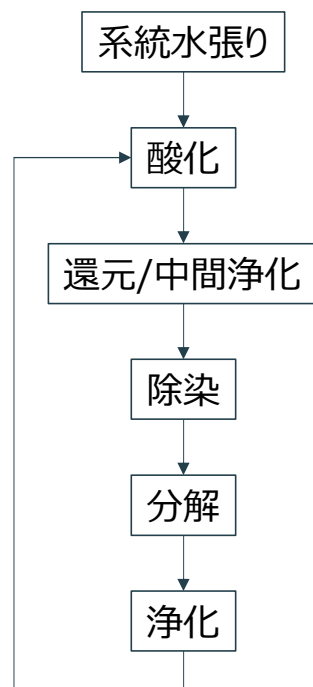
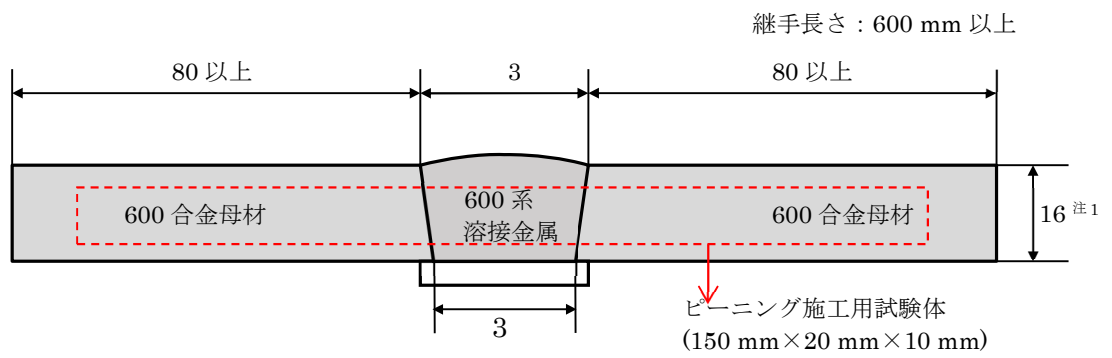


図 3.3.1.1(1)-1 CORD 法実施フロー

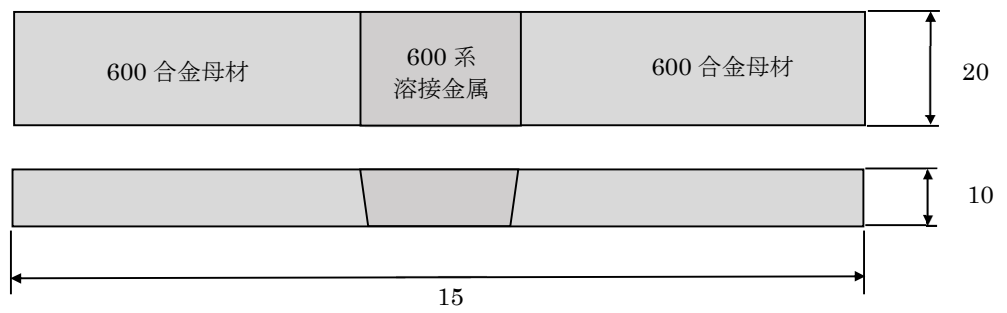


注1：市中材を用いて継手製作を行うため、着手時の素材入手性によって素材板厚は変更。

図 3.3.1.1(1)-2 溶接継手の形状案

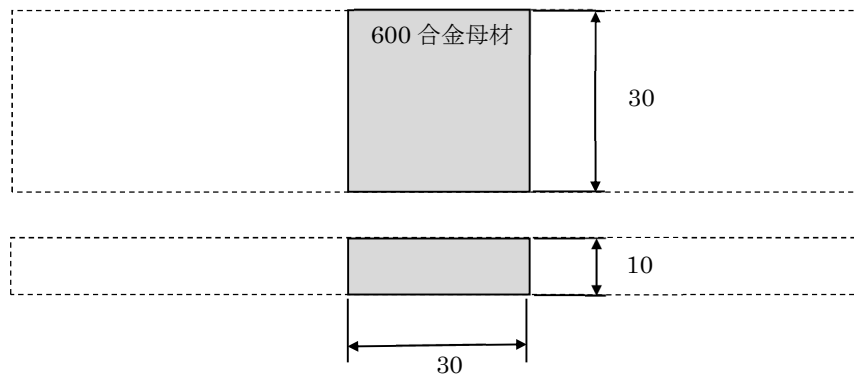


(a) 母材試験片

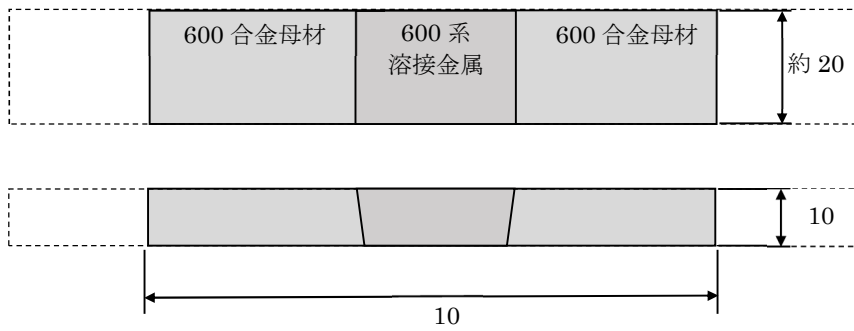


(b) 溶接金属試験片

図 3.3.1.1(1)-3 ピーニング施工用の試験体形状案



(a) 母材試験



(b) 溶接金属試験片

図 3.3.1.1(1)-4 除染試験片の形状案



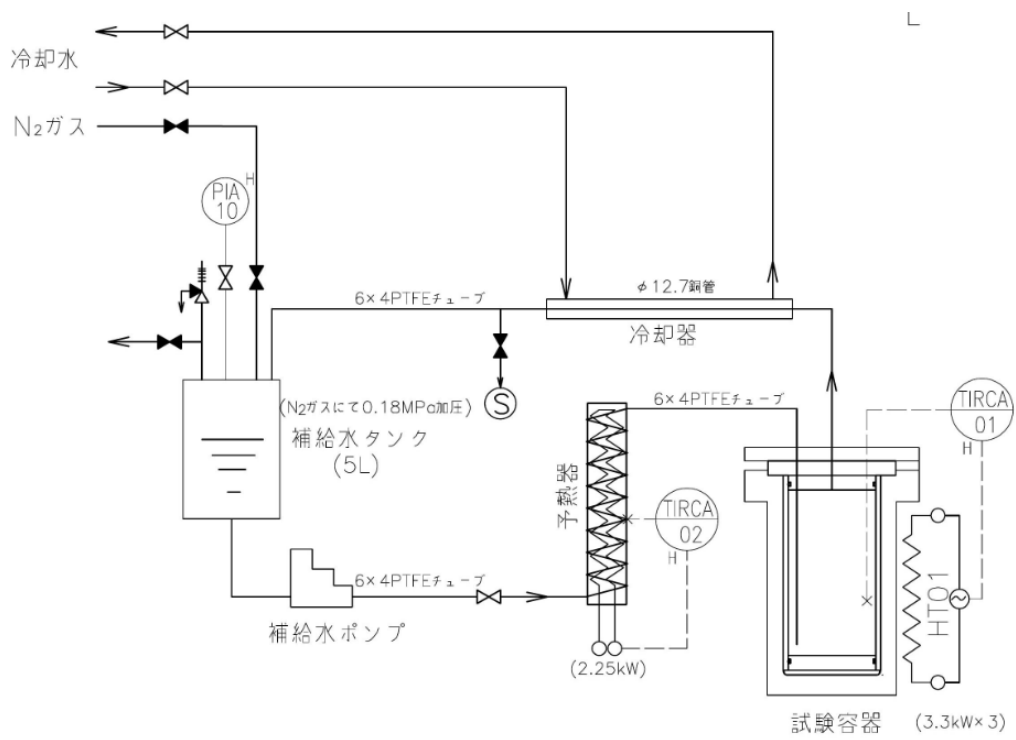


図 3.3.1.1(1)-5 簡易ループ試験装置の系統図案

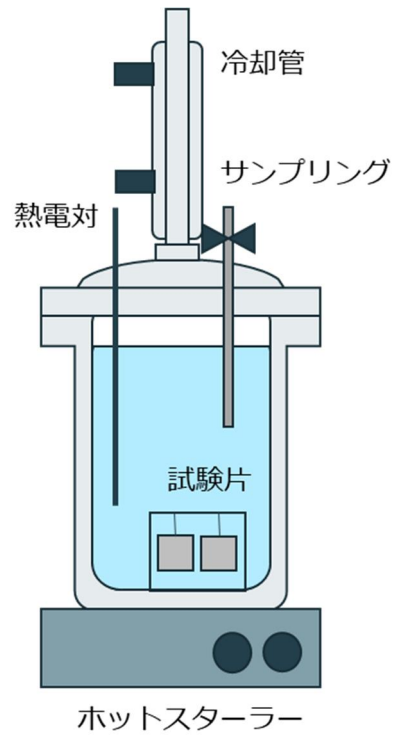


図 3.3.1.1(1)-6 バッチ試験装置のイメージ図

1年目	1M	2M	3M	4M	5M	6M	7M	8M
TP準備	← 材料調達・TP加工 →			← ピーニング処理 →				
装置準備 (1or2年目で実施)	← 簡易ループ試験装置 (酸化工程) →							
	← バッチ試験装置 (除染工程) →							
2年目	1M	2M	3M	4M	5M	6M	7M	8M
TP準備	← 酸化被膜処理 →					← TP測定 (重量・応力測定・断面観察) →		
(装置準備)								
3年目	1M	2M	3M	4M	5M	6M	7M	8M
除染試験	← 除染試験 (4サイクル) →							
まとめ						← TP測定 (重量・応力測定・断面観察) →		
						← データ整理 →		

図 3.3.1.1(1)-7 PWR プラントを対象とした除染影響確認試験の工程案

## (2) PWR プラントの放射線環境下での応力測定の実現性検証

### 1) 背景と目的

PWR 蒸気発生器管台のピーニング施工部におけるその場(原子力発電所当該機器設置場所)での残留応力測定を想定した場合、周囲に放射性物質を含むクラッドが存在するため、放射線環境下での測定となる。放射線は応力測定に用いる X 線に干渉するため、測定部に想定される放射線環境の影響を把握し、必要に応じて適切な遮蔽体を製作した上で応力測定可否を確認する必要がある。

令和 4 年度に、蒸気発生器出入口管台内面の応力改善施工部を想定してその場測定の実現性を検討した。検討にあたっては、当該部の供用期間中検査に用いるマニピュレータを活用することを前提として、機材搬入性、配置、測定部位へのアクセス性を 3D CAD によるシミュレーション等で評価した。蒸気発生器出入口管台内面の応力改善施工部を想定したその場測定の実現性検証に関するレイアウトを図 3.3.1.1(2)-1<sup>[3.3.1.1(2)-1]</sup>に示す。その結果、マニピュレータの先端に市販の応力測定装置を設置した状態で測定対象部へのアクセスが可能となる見込みを得た。

また、表 3.3.1.1(2)-1<sup>[3.3.1.1(2)-1]</sup>に、令和 4 年度に実施した蒸気発生器伝熱管における除染後の環境線量率を示す。想定している測定部である蒸気発生器出入口管台とは若干離れているが、同一の機器であることから概ね同等の線量率であるとみなし、測定対象部の環境線量率を約 0.5 mSv/h と想定した。この線量率をもとに、模擬応力測定試験における線量率の条件を保守的に 1m Sv/h とみなして試験条件を設定することとした。

この結果を受けて、令和 5 年度は放射線環境下での応力測定の実現性について放射線環境下での模擬応力測定試験により測定実現性の確認を行うこととした。

### 2) 測定手順と課題

PWR 蒸気発生器出入口管台でのその場応力測定について、想定される測定手順及び課題を図 3.3.1.1(2)-2 に示す。マニピュレータにより応力測定装置を測定対象部位に移動する。装置の移動中に回折 X 線を記録するイメージングプレート(以下、IP という)が環境放射線により感光することが想定されるため、測定に先立って IP の初期化を行う。その後に応力測定を行い、測定後にマニピュレータによる装置の取り出しを行う。

測定手順に対する課題として、

- ・ 遠隔操作となるため装置の仕様範囲を超えたケーブルを取り回し、電源や信号のやり取りをする必要があること
- ・ 環境放射線により測定装置が破損すること
- ・ 環境放射線が大きすぎて測定および準備中に生じる IP の感光を初期化できないこと
- ・ 回折 X 線に対して環境放射線が大きすぎて応力測定ができないこと
- ・ 環境放射線により IP が破損すること

が考えられる。このうち、遠隔操作となることについては、実機での測定を具体化し、どのような遠隔操作を行うことになるかが具体化しないと評価できないことから、実機での応力測定の計画が具体化した段階で検討することとした。また、環境放射線による測定装置の破損については、先立って遠隔測定方法の開発を行う必要があることと、試験の過程で装置が破損する可能性があることから、本件についても測定計画が具体化した段階で実施することとした。今年度は放射線環境下での応力測定の成立性確認を目的としてその他の項目について評価を行った。また、応力測定に対する環境放射線の影響を無視できない場合は、測定装置の周りに遮蔽体を設置することにより放射線の影響を低減する方法が考えられる。そこで、遮蔽体の設置による放射線影響の緩和効果についても把握することとした。

### 3) 試験方法及び試験マトリックス

図 3.3.1.1(2)-3 に応力測定成立性検証試験の手順を示す。実機での測定では環境放射線による感光と応力測定が同時に起こるが、現状では放射線照射中はガンマ線照射施設内に人が立ち入って測定することができず、また現状では遠隔測定もできないことから放射線の暴露と応力測定を同時に行うことができない。そのため、あらかじめ IP をガンマ線照射施設に設置して放射線の暴露を行い、その後に IP を取り出して応力測定装置に取り付けて応力測定することにより応力測定に対する放射線の影響を評価した。また、IP の放射線に対する耐久性については暴露後の初期化可否で判定した。

表 3.3.1.1(2)-2 に試験マトリックスを示す。また、本表には期待される成果と結果の概要を併せて示す。試験は表中に示した 6 項目の評価を目的として実施した。各目的に対する個別の試験マトリックスと試験の考え方を以下に示す。なお、使用した IP の番号は 5 枚ある IP を識別するために割り振られた番号である。

#### ① IP の耐久性(表 3.3.1.1(2)-3)

IP はコンピュータによる測定装置の実機への挿入から測定後の取り出しまで環境放射線を受け続ける。その間の IP の耐久性を所定の線量を受けた後も初期化できるかで評価することとした。累積線量は 30、60、140mSv の 3 条件とした。

#### ② 環境放射線によるバックグラウンドへの影響評価(表 3.3.1.1(2)-4)

応力測定には 90 秒を要する。その間、IP は回折 X 線に加えて環境放射線による感光を受ける。環境放射線による感光が回折 X 線を上回るとピーク評価に支障をきたすため、異なる線量率において 50 秒間 IP を感光させ、その後の検出感度を非照射環境で測定したピーニング試験片のピークと比較してバックグラウンド影響を評価した。線量率は 0.5、1、10、20mSv/h の 4 条件とした。

#### ③ 応力測定準備中の照射影響評価(表 3.3.1.1(2)-5)

コンピュータで応力測定装置を測定部位に搬送する間に IP は環境放射線により感光する。実際は応力測定に先立ち遠隔で初期化を行い感光のない状態で応力測定を行うので、実機測定における準備時間を 3 時間と想定し、1 mSv/h で IP を感光した後

初期化が可能かを評価した。

#### ① 応力測定が可能な環境線量率の評価(表 3.3.1.1(2)-6)

応力測定の間、IP は回折 X 線に加えて環境放射線による感光を受ける。環境放射線が応力測定に及ぼす影響を把握するために環境放射線の線量率をパラメータとして応力測定を行った。線量率は 1、2、4、6、8、10mSv/h の 6 条件とし、照射時間は 50 秒とした。照射時間の定義については後述する。

#### ② 実機測定模擬および遮蔽体効果評価(表 3.3.1.1(2)-7)

上記の評価をもとに、実機測定を模擬した応力測定を行い測定の成立性を確認する。1mSv/h で 3 時間 IP を感光し、いったん IP を取り出して初期化した後に 50 秒間放射線を照射して応力測定を行う。また、測定に悪影響を及ぼすことが試験的に確認された 10mSv/h の環境放射線において、遮蔽体により測定部の線量率を 2 mSv/h に低減した条件で同様の測定を行った。

### 4) 応力測定装置

応力測定にはパルスチック工業製の  $\mu$ -X360S を用いた。この装置は令和 4 年度に実施した机上検討において使用を想定した装置である。図 3.3.1.1(2)-4 に装置の外観を示す。実機での測定ではこの装置のセンサーユニットをコンピュータの先端に取り付けて測定対象部にアクセスすることになる。

上記装置は供試材からの回折 X 線を 2 次元検出器により検出し、得られた回折環から残留応力を算出する機構である。X 線管球には供試材である Ni 基合金の測定に適した Mn 管球を用いた。

本試験では放射線への暴露に伴い IP が劣化する可能性を考慮し、5 枚の IP を準備した。通常、本装置では IP を装置に取り付けた後にキャリブレーション操作(回折環の中心出し等)を行うが、キャリブレーションを行うためには IP を初期化する必要がある。一方で、本試験では放射線で感光した IP に直接 X 線を照射して残留応力を評価することから、IP が初期化されてしまうキャリブレーション操作を行うことができないため、全ての応力測定はキャリブレーション操作なしで実施した。

照射施設での測定試験に先立ち、供試材を用いて残留応力測定の最適条件(測定時間)を調査し、決定した最適条件において残留応力を評価した。最適測定時間は、得られる回折 X 線のピーク強度から 90 秒とした。

応力測定には  $\cos \alpha$  法を用いた。その測定原理の模式図を図 3.3.1.1(2)-5<sup>[3.3.1.1(2)-2]</sup>に示す。中央の図に示すように、測定対象に X 線を照射すると対象の結晶構造に応じて回折波(回折 X 線)が生じる。この回折 X 線を X 線に感光する IP で平面的に記録することにより回折角を評価する。回折 X 線は等方的に反射されるため、IP 面上にリング状に記録される。IP 面におけるリングの半径と回折面と IP との距離から幾何学的に回折角を評価することができる。

測定対象に応力が負荷されることにより結晶格子にひずみが生じ格子面間隔が変化

する。格子面間隔の変化に伴い回折角が変化することから、応力負荷前後で回折角の測定を行いその差から応力を評価する。

## 5) ガンマ線照射施設

放射線の照射は(株)アトックスの技術開発センターで実施した。ガンマ線照射施設の平面図を図 3.3.1.1(2)-6 に示す。中央に  $^{60}\text{Co}$  線源を配置し、遮蔽のために渦巻状の通路を有している。線源から放射されるのはガンマ線だが、実機においても測定対象機器は放射化しておらず、クラッドに含まれる  $^{60}\text{Co}$  が主な線源となるため、ガンマ線を用いることは妥当と考えられる。 $^{60}\text{Co}$  線源は遮蔽体内に収納されており、照射時には線源が上昇して遮蔽体外に露出することにより放射線の照射を行う。本来は線源周辺が照射エリアとなるが、本研究での試験条件に対してガンマ線の強度が強すぎることから、通路エリアを含めて実測により線量率の条件に適合する範囲を調べた。その結果、図中に青枠で示すように通路に相当する部分が条件に合致し、この範囲内で試験を行った。線量率はあらかじめ測定した線量率の分布に基づき試験をする位置を変えることで制御した。青枠部分の空間線量率分布を表 3.3.1.1(2)-8 に示す。

ガンマ線照射施設において、照射開始の操作により遮蔽体内より線源が上昇を開始し、遮蔽体外に線源が露出した時点で 100%出力になる。その時の時間と出力の変化を図 3.3.1.1(2)-7 に示す。線源の上昇開始から 100%出力に至るまで凡そ 40 秒間を要している。また、照射の終了時には逆に線源が遮蔽体に収納され出力が 0%となるまで同等の時間を要する。これに対して実機では常に一定の線量率で照射を受ける。そこで本研究においては線源の上昇および下降に伴う出力の変化を踏まえて測定時間が 100%出力換算したときに実機で想定される測定時間(90 秒)=100%出力での照射時間+(上昇時間(40 秒)+下降時間(40 秒))/2 となるように線源の昇降を操作した。この式より 100%出力での照射時間は 50 秒となるので、100%出力となる時間を 50 秒に設定して線源の昇降を操作した。本研究における照射時間は 100%出力で照射した時間で示す。

図 3.3.1.1(2)-8 に照射試験における IP の設置例を示す。線量率分布にから定めた設置値に所定の高さとなるように木の棒で IP を設置した。支柱に木を用いたのは、二次放射線による IP の感光を避けるためである。

図 3.3.1.1(2)-9 に遮蔽体試験の状況を示す。金属製のテーブルに木板で張り出しを設置し、その上に線量計を置いて遮蔽体有無での線量率を測定した。その後線量計を IP に置き換えて照射試験を実施した。

## 6) 試験結果

### ① 非照射環境における応力測定

ショットピーニング(以下、SP という)施工したニッケル基合金の板材を試験片として、非照射環境で応力測定を行った。応力測定試験片の外観を図 3.3.1.1(2)-10 に示す。また、SP 施工条件を表 3.3.1.1(2)-9 に示す。応力測定にはパルステック工業製の  $\mu$ -

X360S を用いた。照射試験には 5 枚の IP を用いたことから、5 枚それぞれについて応力測定を行った。測定結果を図 3.3.1.1(2)-11 及び表 3.3.1.1(2)-10 に示す。IP 面に平面的に記録された信号を方位ごとに径方向分布として取り出してバックグラウンド処理して、ピークおよび半価幅を得た。続けて実施したガンマ線照射環境での測定も同様の評価を行った。5 枚の IP により測定した応力( $\sigma_x$ )は-537~643 MPa の範囲であった。以降の試験において、この非照射で測定された応力の範囲を測定可否の判定基準とした。

## ② 実機測定を考慮した IP の耐久試験

実機 PWR において X 線残留応力測定を実施する際には、比較的長時間装置を炉内に設置する可能性があると考えられる。そこで IP の累積線量が 30 mSv、60 mSv 及び 140 mSv となるまでガンマ線を照射し、その後に IP を応力測定装置に取り付け、IP 初期化並びに供試材を用いた残留応力測定を行った。なお、累積線量 30 mSv と 60 mSv は同一の IP を使用しており、累積線量が 30 mSv となった時点で一度 IP を初期化し、その後さらに 30 mSv 照射して初期化及び測定を行ったものである。

図 3.3.1.1(2)-12 に IP 初期化に伴う飽和値に対する相対強度の変化を示す。測定装置による IP の初期化操作は 50 秒だが、一回の操作で初期化することができず、複数回の初期化を繰り返すことにより相対強度が減少することが確認できた。そこで、初期化時間×回数の累積時間で整理した。図 3.3.1.1(2)-13 に示すようにガンマ線照射施設での IP の感光挙動にはムラがあり、特に IP の外縁近傍で感光が大きくなる挙動が確認された。これは IP の外縁のほうが環境の影響を受けやすいことによるものと考えられる。また外縁においても方位によるムラが見られた。いずれの測定においても同様の挙動が見られたことから、これはガンマ線照射施設における線量率の 3 次元的な分布によるものと考えられる。相対強度は信号強度が最も高い位置で評価した。

図 3.3.1.1(2)-12 に示すように、初期化を繰り返すことにより累積線量 140 mSv まで初期化可能であることが確認された。初期化の例として、図 3.3.1.1(2)-13 に 30mSv まで照射した後初期化した時の IP の様子を示す。29 回初期化を繰り返すことにより IP が初期化されたことがわかる。

また、初期化後に供試材の残留応力を測定し、事前に測定した結果と比較した結果を図 3.3.1.1(2)-14 に示す。いずれの累積線量においても測定された応力は初期値の範囲内にあり、累積線量が 140mSv までの IP の耐久性が確認された。

## ③ 環境放射線によるバックグラウンドへの影響評価

実機 PWR 空間線量相当の空間線量率下において、100%出力で 50 秒間ガンマ線照射した IP の計数値(測定時のバックグラウンドとなる。以下、B.G.という)を定量評価した。空間線量率は、1 mSv/h および 0.5 mSv/h とした。照射した IP を装置に取り付けて計数値を読み取り、読み取り結果のうち、凡そのピーク位置である回折角が 155° の位置における IP の周方向の計数値を抽出、合計し、ガンマ線照射による B.G.ノイ



ズ(Nirrad.)とした。次に、②項で残留応力を評価したデータにおいて、データ取得範囲とする回折角が 145°~165°の範囲における計数値を抽出した。この範囲において測定時の B.G.処理を行うことから、回折角 145°の計数値と回折角 165°の計数値を通る直線を仮定し、回折角 155°における B.G.を見積もり測定時の B.G.ノイズ(Nmeas.)とした。凡そのピーク位置である回折角 155°における計数値を信号強度(S)とした。上記により求めた B.G.ノイズと信号強度から、下式によって S/N 比を求めた。

$$S/N = \frac{S}{N_{meas.} + N_{irrad.}}$$

空間線量率 1mSv/h では 1.69、0.5 mSv/h では 1.72 と評価された。このようにして求めた S/N 比をまとめて図 3.3.1.1(2)-15 に示す。S/N 値に対して測定可否のしきい値を設けることは難しいが、1mSv/h までは非照射環境での測定値と同等の値であり、測定上問題にならない S/N 比と考えられる。これに対し 10mSv/h 以上では S/N が 1 以下、つまり信号よりも B.G.が高い状態となる。このような条件では放射線による B.G.が応力測定に及ぼす影響を考慮する必要があると考えられる。

#### ④ 応力測定準備作業中の照射影響評価

IP を用いた応力測定では応力測定直前に IP を初期化するので、実機環境の空間線量率下に晒された IP の通常の測定ルーチンによる初期化可否を確認しておく必要がある。そこで、実機 PWR プラントにおいて装置の準備に要すると想定される時間及び空間線量率でガンマ線照射を受けた IP について、残留応力測定に使用できる状態とするまでに必要な初期化の回数及びそれに要する時間を評価した。空間線量率は 1mSv/h、照射時間は 3 時間とした。照射した IP を装置に取り付けて初期化操作と計数値の読み取りを交互に行い、計数値の変化と初期化操作に要する時間との関係性を評価した。計数値の最大値の時間変化を図 3.3.1.1(2)-16 に示す。5 分程度で初期化が完了した。また、図 3.3.1.1(2)-17 に照射直後及び初期化後の IP の読み取り結果を示す。初期化により照射による感光が消去されていることがわかる。これらより、実機測定において応力測定に先立つ初期化作業は問題とならないことを確認した。

#### ⑤ 応力測定が可能な環境線量率の評価

実機 PWR の空間線量率下で応力測定に対する環境放射線の影響を評価するため、1、2、4、6、8 および 10 mSv/h で 50 秒間 IP をガンマ線照射した後に初期化操作を行わずに応力を測定した。IP の読み取り結果を図 3.3.1.1(2)-18 に示す。また、これらによる応力評価結果を表 3.3.1.1(2)-11 に示す。8 mSv/h 以上の線量率で応力が低下する傾向が見られた。また、図 3.3.1.1(2)-19 に応力測定結果を非照射で測定した応力と比較して示す。照射後の応力が非照射で測定した応力の範囲内であれば測定可能と判定した。その結果、mSv/h まで応力測定可能と判定された。

続いて、ガンマ線照射による影響を S/N 比の観点で評価した。③項ではガンマ線による B.G.ノイズ(Nirrad.)と測定時のノイズ(Nmeas.)を別々に評価したが、本試験におい

ては上記のノイズが重畳している状態、すなわち  $N_{meas.}$  に  $N_{irrad.}$  が含まれている状態であることから、下式によって S/N 比を計算した。

$$S/N = \frac{S}{N_{meas.}}$$

表 3.3.1.1(2)-12 に計算した S/N 比と応力測定の可否との関係を示す。空間線量率が大きくなるに従って S/N 比が低下していることがわかる。また、図 3.3.1.1(2)-19 に測定された応力を非照射で測定された応力と比較して示す。線量率が 6Sv/h まではガンマ線照射後に測定された応力が非照射での応力範囲内となるが、8mSv/h 以上では非照射での応力範囲を下回る結果となり測定不可と判定された。これは S/N 比が 1.1 以下となる空間線量率 8mSv/h 以上での測定結果が初期値の範囲から外れたことから、IP の周方向のいずれかのラインにおいて回折 X 線のピークに対して B.G. ノイズが大きくなるのが測定不可となる一因と考えられる。

#### ⑥ 実機測定模擬および遮蔽体効果評価

実機 PWR における測定手順を想定した残留応力測定を実施した。実機での測定手順は、

- i. 装置の設置並びに測定箇所への移動と装置調整(3時間を想定)
- ii. IP 初期化
- iii. 残留応力測定

であるので、i.を模擬するために IP を 3 時間ガンマ線照射し、ii.を模擬するためにガンマ線照射した IP を装置に取り付けて初期化したのち IP を取り外す。取り外した IP は iii.の残留応力測定中の照射を模擬するため実機での応力測定時間に相当する 50 秒間ガンマ線を照射し、IP を再度装置に取り付けて初期化操作を行わずに残留応力測定を実施した。

また、実機測定部位における空間線量率が想定より高く応力測定に支障をきたす場合の対策として、装置を遮蔽して放射線影響を低減すること考えられる。そこで、遮蔽の効果や影響を調べるために、空間線量率が 10mSv/h となる場所で空間線量率が 2mSv/h となるように遮蔽を行い、同様の手順で測定を行った。本測定における遮蔽体には幅 100mm×高さ 100mm×厚さ 37mm とした鉄を用いた。本研究の成果は遮蔽率に関する物性値を用いることにより他の材質に換算することが可能である。IP の読み取り結果を図 3.3.1.1(2)-20 に示す。また、応力測定結果を表 3.3.1.1(2)-13 に示す。

図 3.3.1.1(2)-21 は 1mSv/h 及び 10mSv/h を遮蔽体により 2mSv/h に減衰した線量率で、実機での測定手順を模擬して測定された応力を非照射の応力範囲と合わせて示したものである。1mSv/h で測定された応力は非照射での応力測定値の範囲内であり、実機の線量率が想定以下であれば応力測定可能と考えられる。また、線量率 10mSv/h は e)項では測定不可と判定された線量率だが、遮蔽体を介して線量率を 2mSv/h に低減することにより、線量率 2mSv/h と同等の応力測定値となった。

遮蔽体を用いた場合、遮蔽体自体の 2 次 X 線による影響が懸念されたが、本研究の結果では、応力測定に対する影響は見られず、空間線量率を低減させることができれば仮に高空間線量率であっても測定が可能である見通しが得られた。

#### ⑦ 遮蔽体の検討

応力測定に対して遮蔽が悪影響を与えることはなく、より高い空間線量率においても測定が可能であることが示唆された。従って、遮蔽体の形状は装置を覆うことができればよく、装置の外形寸法を考慮して決定すればよい。本研究で使用した  $\mu$ -X360 を対象とするならば、内寸で幅 250mm×奥行×150mm×高さ 200mm 程度となる(測定時にセンサ部を傾けた状態で遮蔽体に収納する場合を想定した寸法)。一方で、遮蔽体の厚さは測定位置における放射線の平均エネルギーを考慮して決定することが望ましい。遮蔽の効果は、入射光子のエネルギーと遮蔽体の材質及び厚さに依存し、下式で表される。

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

ここで、 $I$  は入射光子の数、 $I_0$  は物質を通過する光子の数、 $x$  は物質の厚さである。 $\mu$  は線減弱係数であり、物質の種類と入射光子のエネルギーに依存する。上式より、厚さと材質が既知の遮蔽体を用意し、事前に測定位置における空間線量率を遮蔽あり及び遮蔽なしの状態での測定することで、線減弱係数を評価し、応力測定のために必要な遮蔽厚さを求めることが可能である。

### 7) まとめ

#### ① IP の耐久性確認

140mSv まで照射した後に IP の初期化を実施し、測定に問題ない程度まで検出感度を回復できることを確認した。これは実機で想定している線量率(1mSv/h)で約 6 週間に相当する線量であり、IP の耐久性は問題とならない。

#### ② 環境放射線によるバックグラウンドの定量評価

0.5、1、10、20mSv/h で応力測定に要する時間(50s)照射したところ、1mSv/h までには測定に影響するほどの検出感度の増加はないことを確認した。これにより、実機で想定している線量率は IP の応力測定に問題ないことを確認した。なお、今回の試験は IP のみを環境放射線に曝していることから、今後は応力測定装置本体を、その環境に曝しての影響確認が必要である。

#### ③ 応力測定準備作業中の照射影響評価

実機での応力測定に要する時間を 3h と想定し、実機で想定している線量率で 3h 照射を受けた後に IP を初期化できることを確認した。

#### ④ 応力測定が可能な環境線量率の評価

環境線量率 1、2、4、6、8、10mSv/h で 50s 照射した IP を用いて応力測定を行った。その結果、1~6mSv/h で照射を受けた IP では非照射と同程度の応力が得られた。また、8mSv/h 以上の環境線量率では線量率の増加とともに非照射での測定値との差異

が生じた。これにより、実機を想定している線量率での応力測定に問題はないが、それ以上では遮蔽等の対策が必要になる可能性が示唆された。

⑤ 実機測定を模擬

実機での測定手順を想定した照射を行った IP で問題なく応力測定できることを確認した。

⑥ 遮蔽の影響を調査

遮蔽により線量率を低減することにより、高い環境線量率でも応力測定が可能となることを確認した。

以上の結果より、 $\cos \alpha$  法より、PWR 管台溶接部の応力測定が可能であることを示唆する結果が得られた。なお、前述の通り、今回の試験は IP のみを環境放射線に曝していることから、今後は応力測定装置本体を、その環境に曝しての影響確認が必要である。

<参考文献>

- [3.3.1.1(2)-1] 令和4年度原子力規制庁委託成果報告書「原子力施設等防災対策等委託費(実機材料等を活用した経年劣化評価・検証(実機材料を活用した健全性評価に係る研究))」, 原子力規制庁, 令和5年3月
- [3.3.1.1(2)-2] <https://www.pulstec.co.jp/websystem4/webroot/attach/documentjps/0/1667375877xwCW.pdf>

表 3.3.1.1(2)-1 美浜発電所 1/2 号機 系統除染工事の除染効果<sup>[3.3.1.1(2)-1]</sup>

部位	美浜 1 号機 代表部位の線量率(参考値) [mSv/h]		美浜 2 号機 代表部位の線量率(参考値) [mSv/h]	
	除染前	除染後	除染前	除染後
蒸気発生器伝熱管	36	0.43	20	0.36
蒸気発生器胴部*	0.21	0.001	0.11	<0.001
一次冷却材系統配管他	1.7	0.025	0.7	0.015

\*：蒸気発生器胴部自体は除染していないが、蒸気発生器伝熱管の除染により胴部の線量率も低下

表 3.3.1.1(2)-2 試験マトリックスおよび結果概要

目的	目標環境線量率	照射時間	備考	期待される成果及び結果概要
IP の耐久性確認	10 mSv/h	3h+3h	累積線量：30 mSv → 60 mSv	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 所定の線量まで照射を受けた後も初期化が可能であることの確認(期待される成果)</li> <li>・ 140mSv まで IP の耐久性に影響なし結果の概要)</li> </ul>
	20 mSv/h	7h	累積線量：140 mSv	
環境放射線によるバックグラウンドへの影響評価	0.5, 1, 10, 20 mSv/h	50sec	測定中の IP の感光を想定	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ しきい値の検出感度となる線量の把握(期待される成果)</li> <li>・ 1mSv/h まで影響なし(結果の概要)</li> <li>・ 10mSv/h 以上で影響あり(結果の概要)</li> </ul>
応力測定準備作業中の照射影響評価	1 mSv/h	3h	実機測定における準備時間を想定	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 準備時間相当の照射を受けた後も初期化可能であることの確認期待される成果)</li> <li>・ 3h 照射後も IP の初期化可能(結果の概要)</li> </ul>
応力測定が可能な環境線量率の評価	1~10 mSv/h	50sec	測定中の IP の感光を想定した照射(50sec)の後に応力測定を行う	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 非放射線場での応力測定値と同等の結果が得られる線量率の把握期待される成果)</li> <li>・ 2mSv/h まで測定可能(結果の概要)</li> </ul>
実機測定を模擬	1 mSv/h	3h+50sec	照射(3h)→IP 初期化→照射(50sec)→測定	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実機測定模擬の照射履歴を受けた IP での応力測定値を非照射 IP の結果と比較し、同程度であることを確認(期待される成果)</li> <li>・ 測定への影響なし(結果の概要)</li> </ul>
遮蔽の影響を調査	(10→) 2 mSv/h	3h50sec	遮蔽により線量率を低減させた場合の影響を調査	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 高線量率環境でも遮蔽を介することにより応力測定が可能となる事の確認(期待される成果)</li> <li>・ 遮蔽の有効性を確認(結果の概要)</li> </ul>

表 3.3.1.1(2)-3 IP の耐久性試験マトリックス

試験 No.	場所	使用した IP	空間線量率	時間	遮蔽
1	L2	①	10 mSv/h	3h	無
			累積30 mSv		
2	L2		10 mSv/h	3h	無
			累積60 mSv		
3	L1	②	20 mSv/h	7h	無
		累積140 mSv			

表 3.3.1.1(2)-4 環境放射線によるバックグラウンドへの影響評価試験マトリックス

試験 No.	場所	使用した IP	空間線量率	時間	遮蔽
4	L8	④	0.5 mSv/h	50 sec	無
5	L7	③	1 mSv/h	50 sec	無

表 3.3.1.1(2)-5 応力測定準備中の照射影響評価試験マトリックス

試験 No.	場所	使用した IP	空間線量率	時間	遮蔽
6	L7	⑤	1 mSv/h	3h	無

表 3.3.1.1(2)-6 応力測定が可能な環境線量率の評価試験マトリックス

試験 No.	場所	使用した IP	空間線量率	時間	遮蔽
7	L7	④	1 mSv/h	50 sec	無
8	L6	④	2 mSv/h	50 sec	無
9	L5	③	4 mSv/h	50 sec	無
10	L4	④	6 mSv/h	50 sec	無
11	L3	③	8 mSv/h	50 sec	無
12	L2	④	10m Sv/h	50 sec	無

表 3.3.1.1(2)-7 実機測定模擬および遮蔽体効果評価試験マトリックス

試験 No.	場所	使用した IP	空間線量率	時間	遮蔽
13	L7	③	1 mSv/h	3h	無
			1 mSv/h	50sec	無
14	L2	④	2 mSv/h	3h	有
			2 mSv/h	50sec	有
			※ 遮蔽により10 mSv/h→2 mSv/hとする		

表 3.3.1.1(2)-8 空間線量率の分布

No.	空間線量率 (mSv/h)		基準点からの距離(m)		
	目標	実測	x	y	Z(高さ)
L1	20	20.7	+7.1	-1.0	+0.945
L2	10	10.1	+5.8	-1.0	
L3	8	8.5	+5.2	-1.0	
L4	6	6.3	+4.2	-1.0	
L5	4	4.4	+3.1	-1.0	
L6	2	2.18	+1.0	-1.0	
L7	1	0.98	+0.2	-2.1	
L8	0.5	0.52	+0.2	-2.4	



表 3.3.1.1(2)-9 SP 施工条件

ショット径	0.8 mm
ショット材質	SUS304
投射距離	50 mm
投射圧力	0.5 MPa
時間	30 sec
施工面	1 面(50 mm×50 mm の面)

表 3.3.1.1(2)-10 非照射環境における応力測定結果

IP 番号	BG 算出に用いた 2θ 範囲	ピーク位置決定法	$\sigma_x$ (MPa)	半価幅(deg)	$\sigma_x$ の判定基準
IP①	145° ~ 165°	半価幅 中点法	-556±14	6.02	-537 MPa ~ -643 MPa
IP②			-610±13	6.06	
IP③			-558±15	6.02	
IP④			-559±22	6.04	
IP⑤			-630±13	6.04	

表 3.3.1.1(2)-11 ガンマ線と回折環が重畳した場合の応力測定結果

空間線量率	BG 算出に用いた 2θ 範囲	ピーク位置決定法	$\sigma_x$ (MPa)	半価幅(deg)	$\sigma_x$ の判定基準※1	
					最大	最小
1 mSv/h	145-165deg	半価幅 中点法	-564 ± 22	5.92	-542 MPa	-643 MPa
2 mSv/h			-584 ± 31	5.89		
4 mSv/h			-606 ± 15	5.67		
6 mSv/h			-609 ± 22	5.67		
8 mSv/h			-521 ± 22	5.08		
10 mSv/h			-482 ± 24	5.28		

※1 事前測定によって得られた応力値と信頼区間から設定した値

表 3.3.1.1(2)-12 ガンマ線と回折環が重畳した場合の応力測定における  
S/N 比と応力測定可否との関係

空間 線量率	B.G.ノイズ (N)	応力測定時 の 信号強度 (S)	S/N 比	応力測定 の 可否
1 mSv/h	$2.04 \times 10^8$	$3.22 \times 10^8$	1.58	可
2 mSv/h	$2.32 \times 10^8$	$3.45 \times 10^8$	1.49	可
4 mSv/h	$2.94 \times 10^8$	$4.04 \times 10^8$	1.37	可
6 mSv/h	$3.11 \times 10^8$	$4.17 \times 10^8$	1.34	可
8 mSv/h	$6.21 \times 10^8$	$6.92 \times 10^8$	1.11	不可
10 mSv/h	$8.22 \times 10^8$	$8.66 \times 10^8$	1.05	不可

表 3.3.1.1(2)-13 遮蔽体の影響を考慮した残留応力測定結果

空間線量率	BG 算出 に用いた 2θ 範囲	ピーク位置 決定法	σ <sub>x</sub> (MPa)	半価幅 (deg)	σ <sub>x</sub> の 判定基準※1	
					最大	最小
1 mSv/h	145-165deg	半価幅	-577 ± 19	5.95	-542	-643
2 mSv/h※1		中点法	-594 ± 19	5.79	MPa	MPa

※1 遮蔽により 10 mSv/h を 2 mSv/h に低減

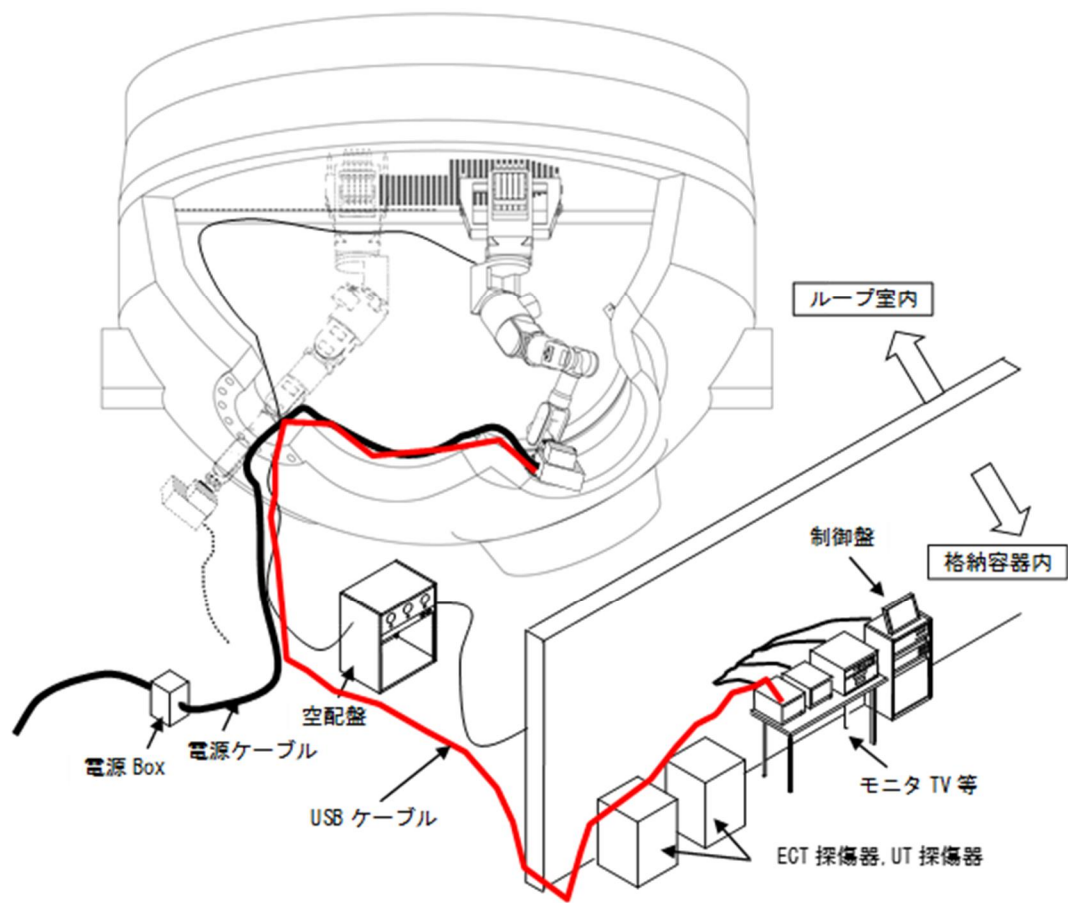


図 3.3.1.1(2)-1 蒸気発生器出入口管台内面の応力改善施工部を想定したその場測定の  
成立性検討に関するレイアウト<sup>[3.3.1.1(2)-1]</sup>

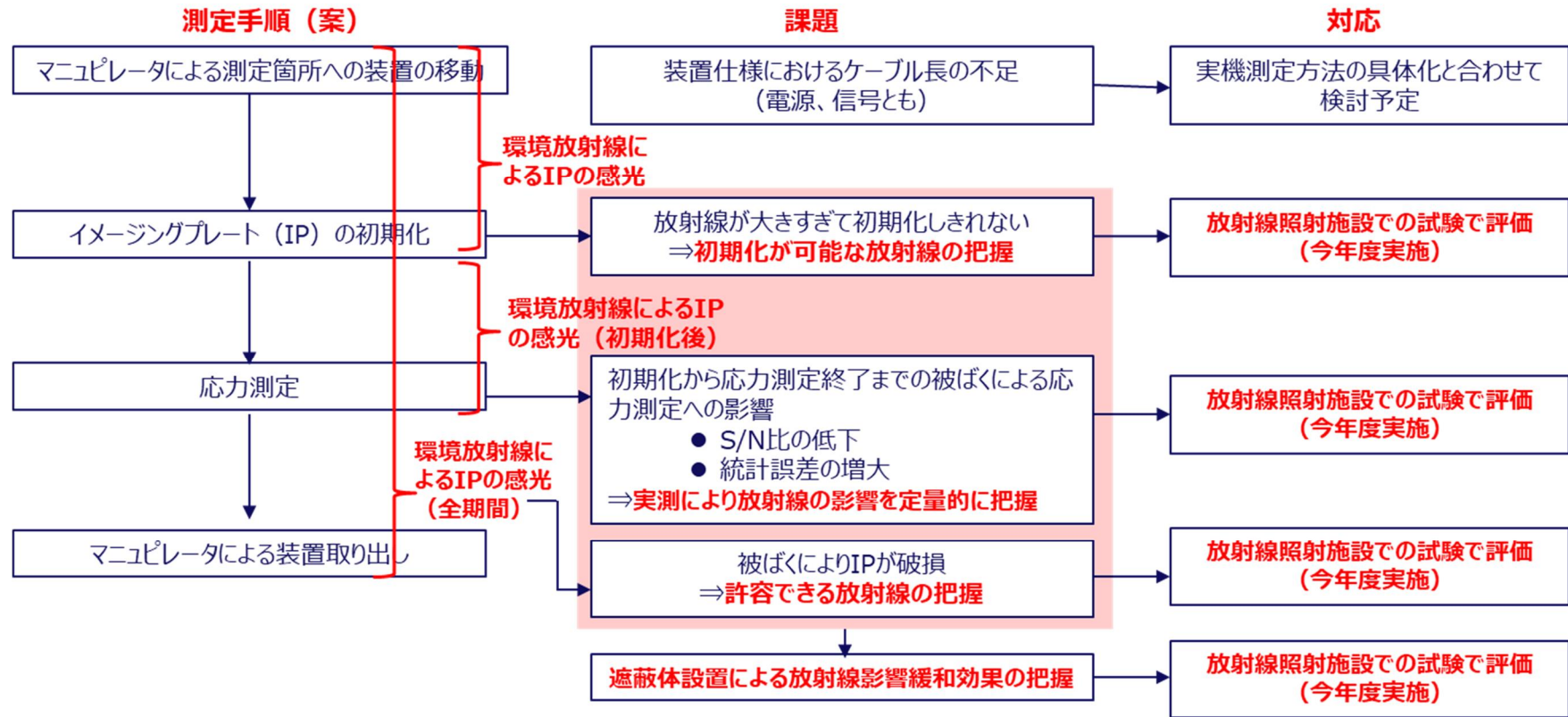


図 3.3.1.1(2)-2 想定される実機測定手順と課題

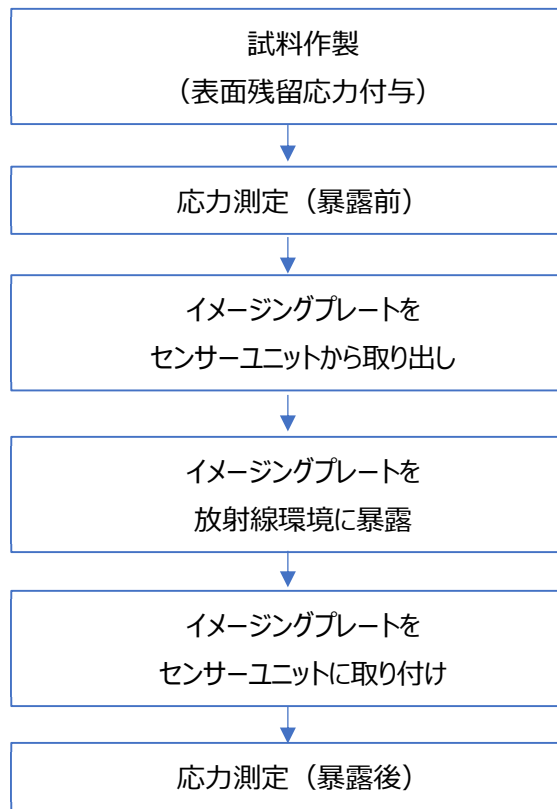


図 3.3.1.1(2)-3 応力測定成立性検証試験手順

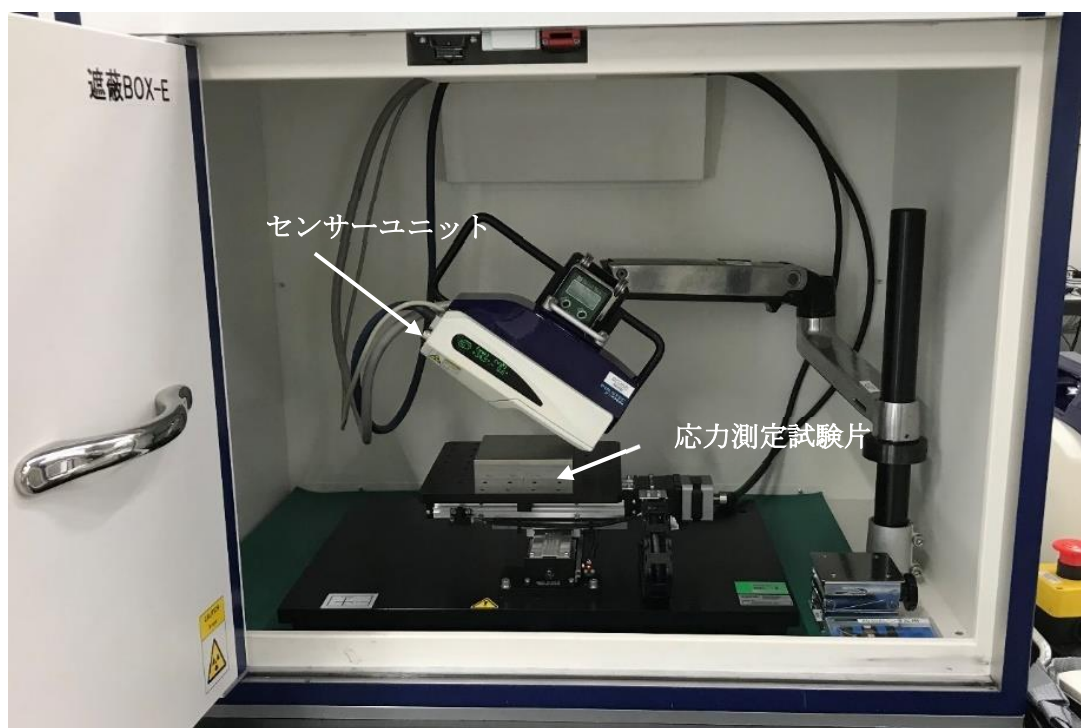


図 3.3.1.1(2)-4 X線応力回折測定装置(μ-X360s)の外観

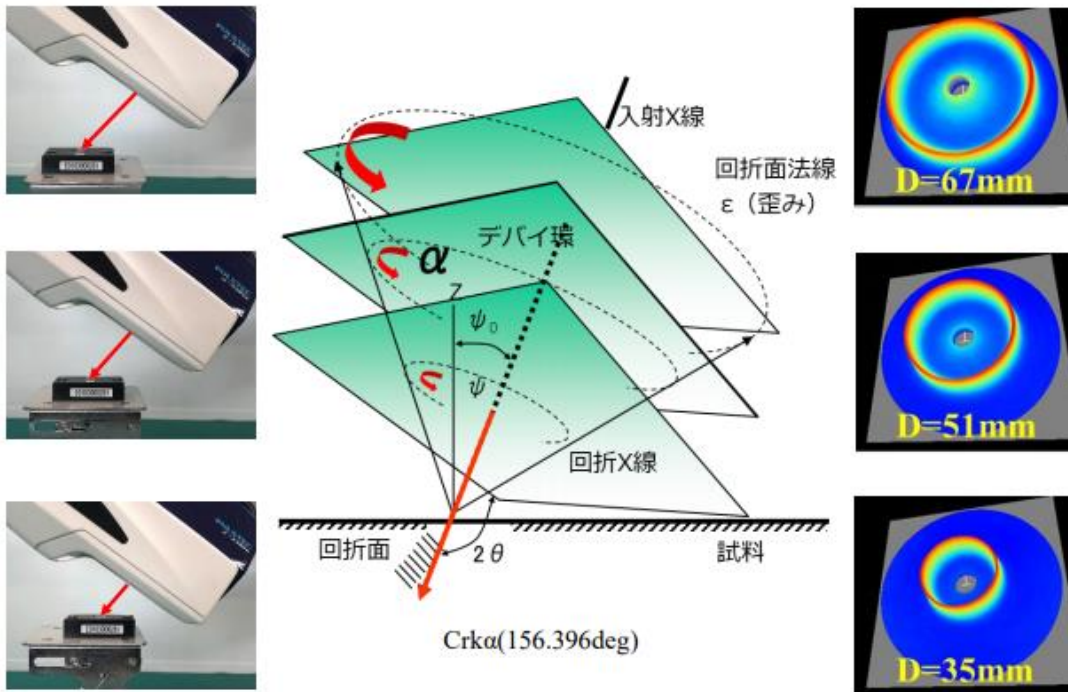


図 3.3.1.1(2)-5  $\cos \alpha$  法による応力測定の原理図<sup>[3.3.1.1(2)-2]</sup>



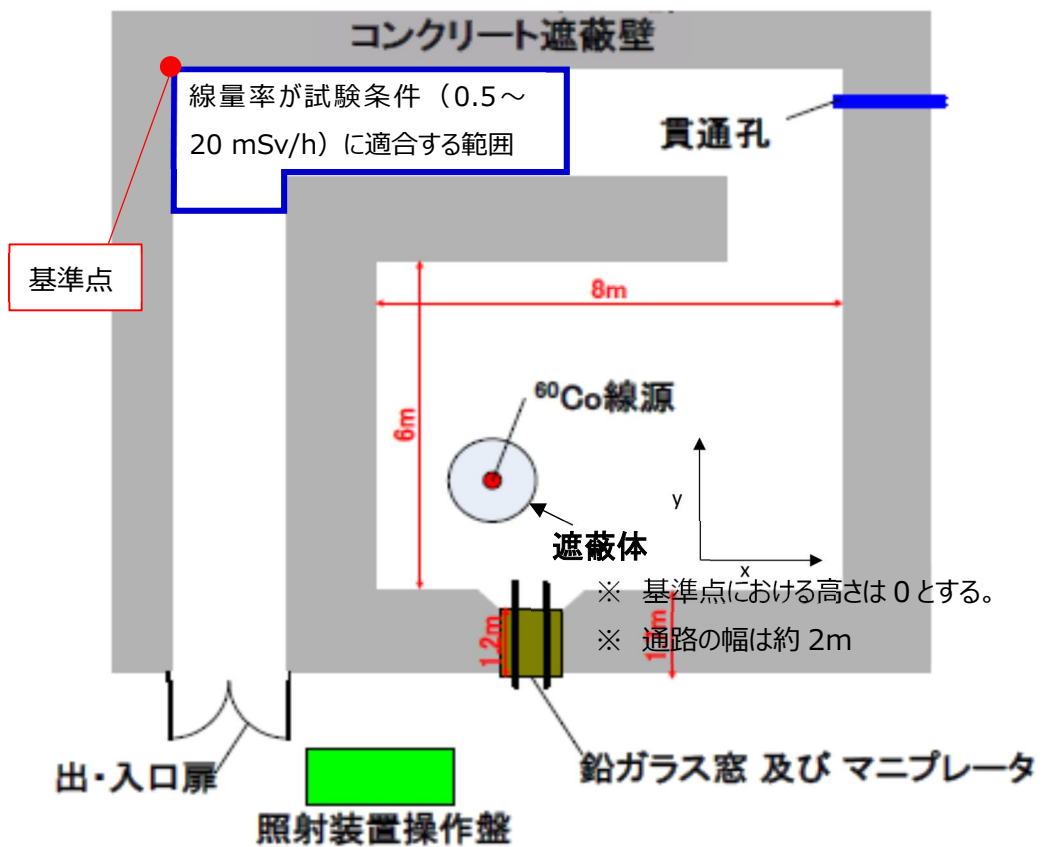


図 3.3.1.1(2)-6 ガンマ線照射施設のレイアウトと試験実施位置

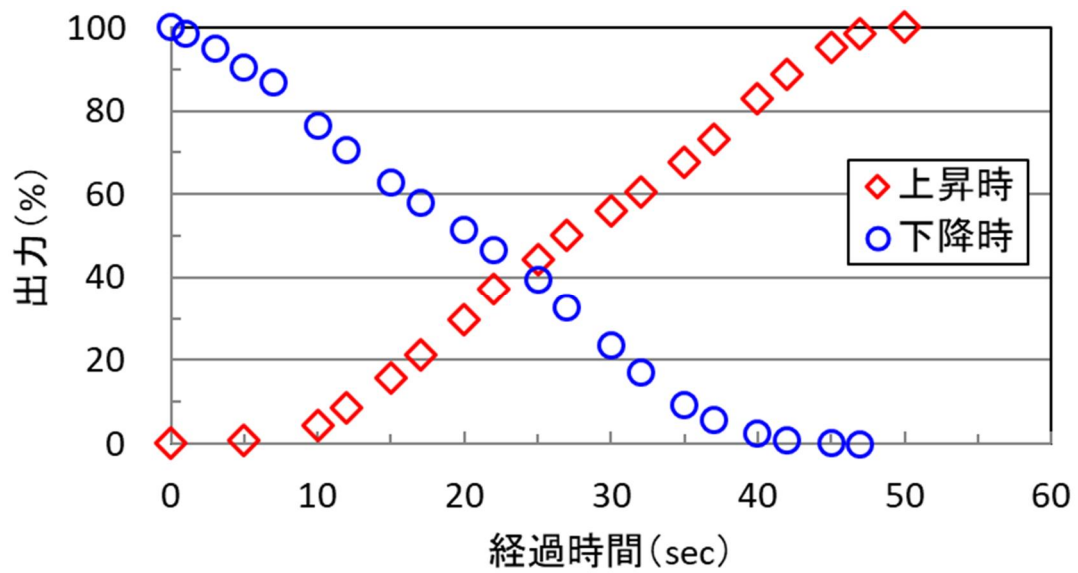


図 3.3.1.1(2)-7 線源の昇降時間と出力の関係

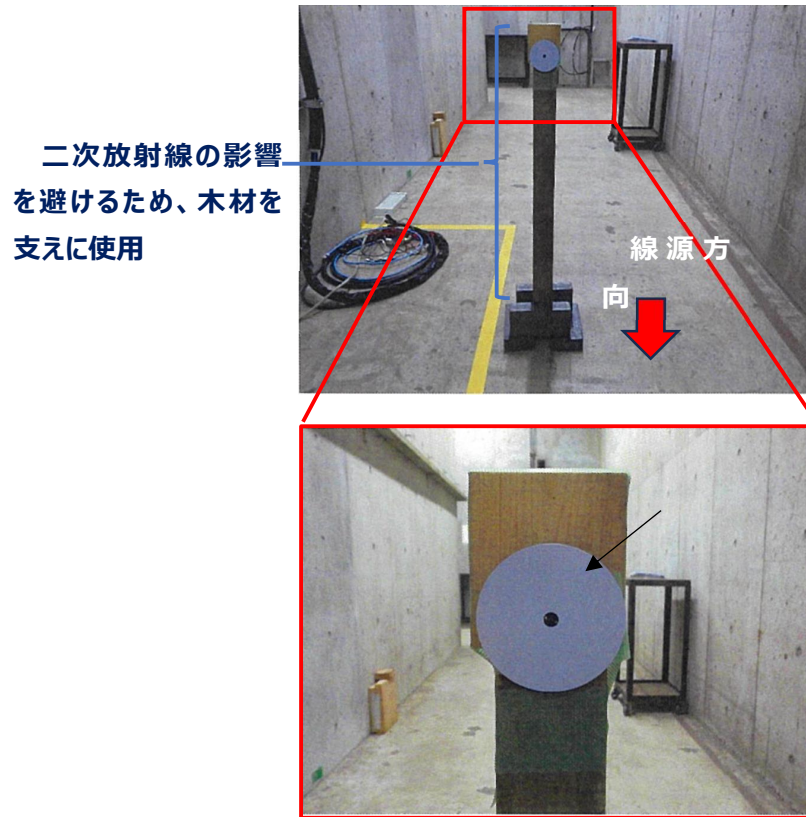


図 3.3.1.1(2)-8 照射試験におけるイメージングプレートの設置例

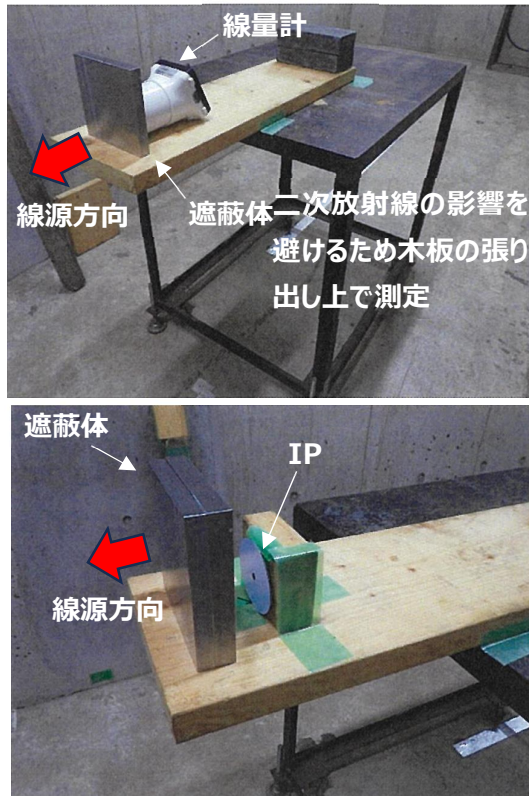


図 3.3.1.1(2)-9 遮蔽体試験の状況

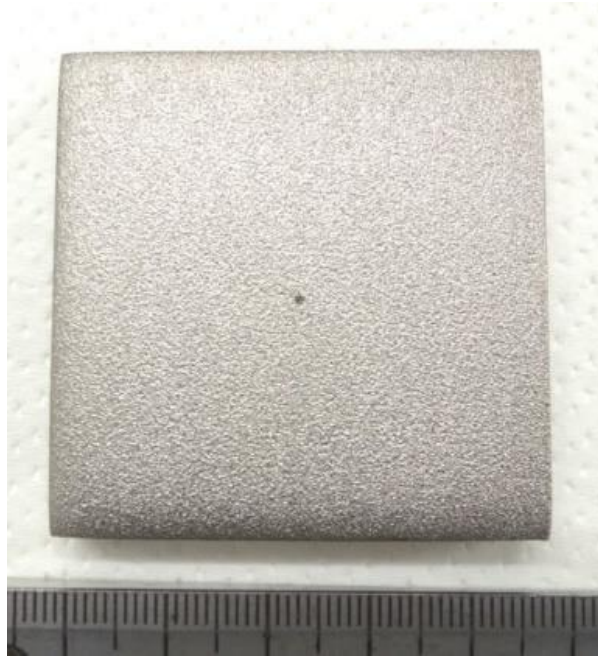
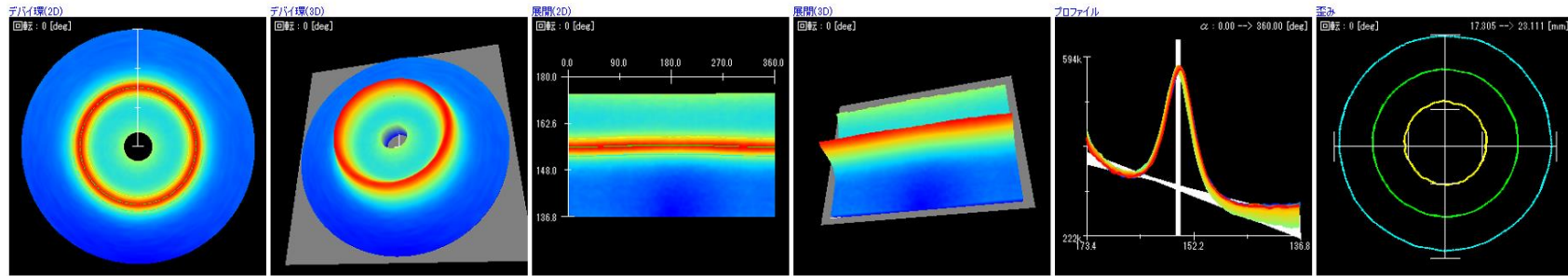
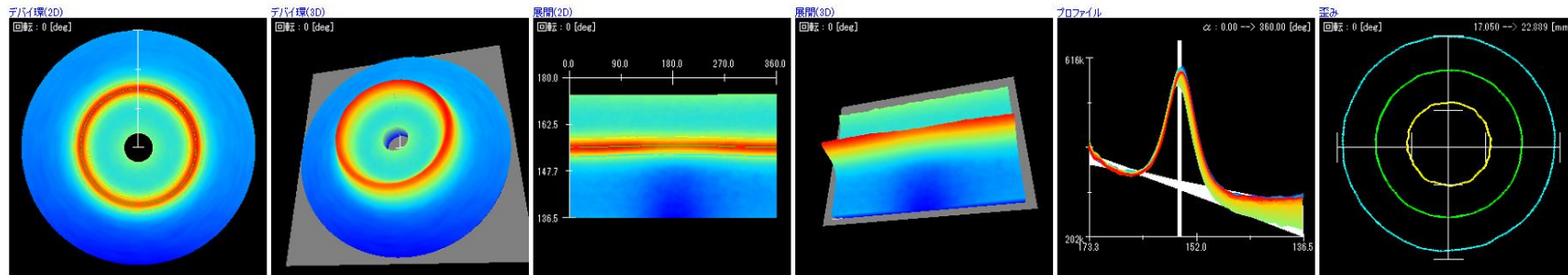


図 3.3.1.1(2)-10 ショットピーニング施工後の応力測定試験片の外観

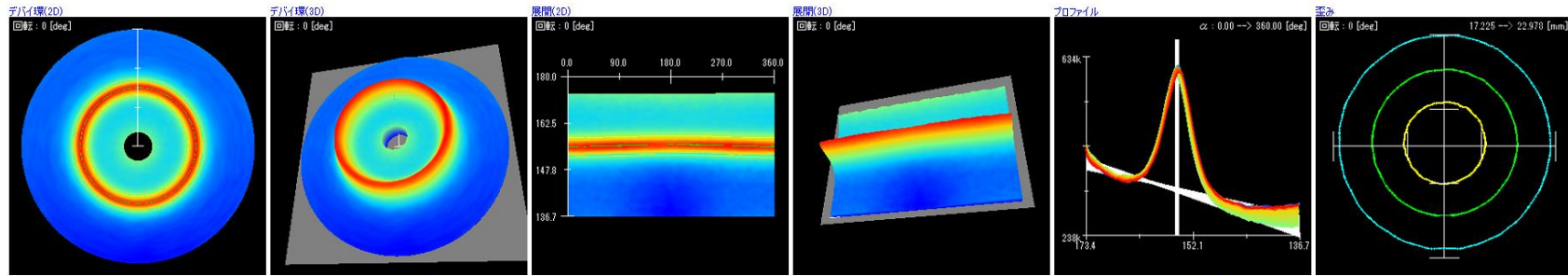


(a) IP No.1

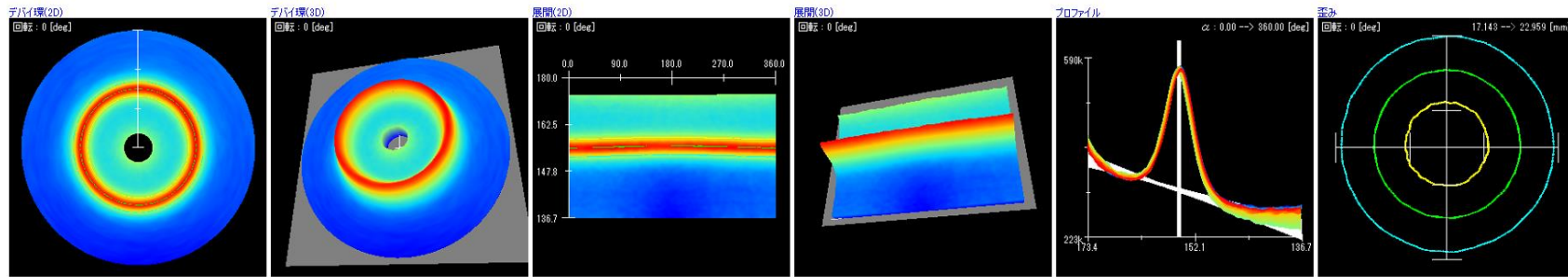


(b) IP No.2

図 3.3.1.1(2)-11 (1/3) ショットピーニング試験片の IP 読み取り結果

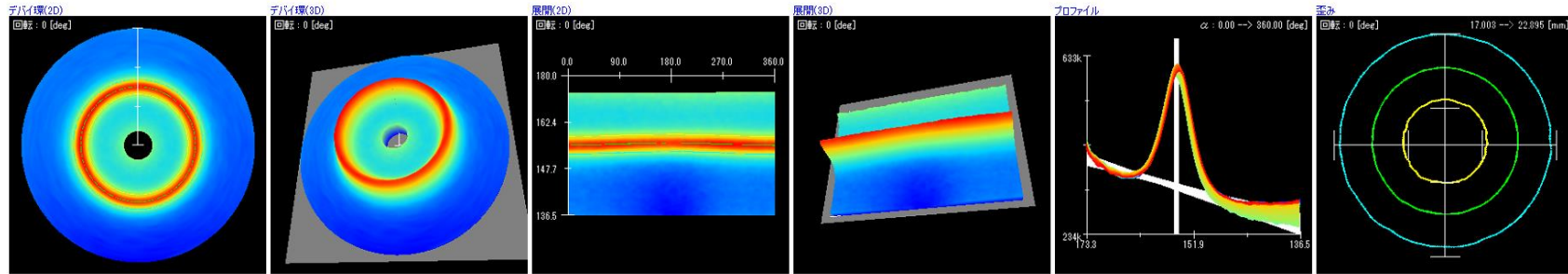


(c) IP No.3



(d) IP No.4

図 3.3.1.1(2)-11 (2/3) ショットピーニング試験片の IP 読み取り結果



(e) IP No.5

図 3.3.1.1(2)-11 (3/3) ショットピーニング試験片の IP 読み取り結果



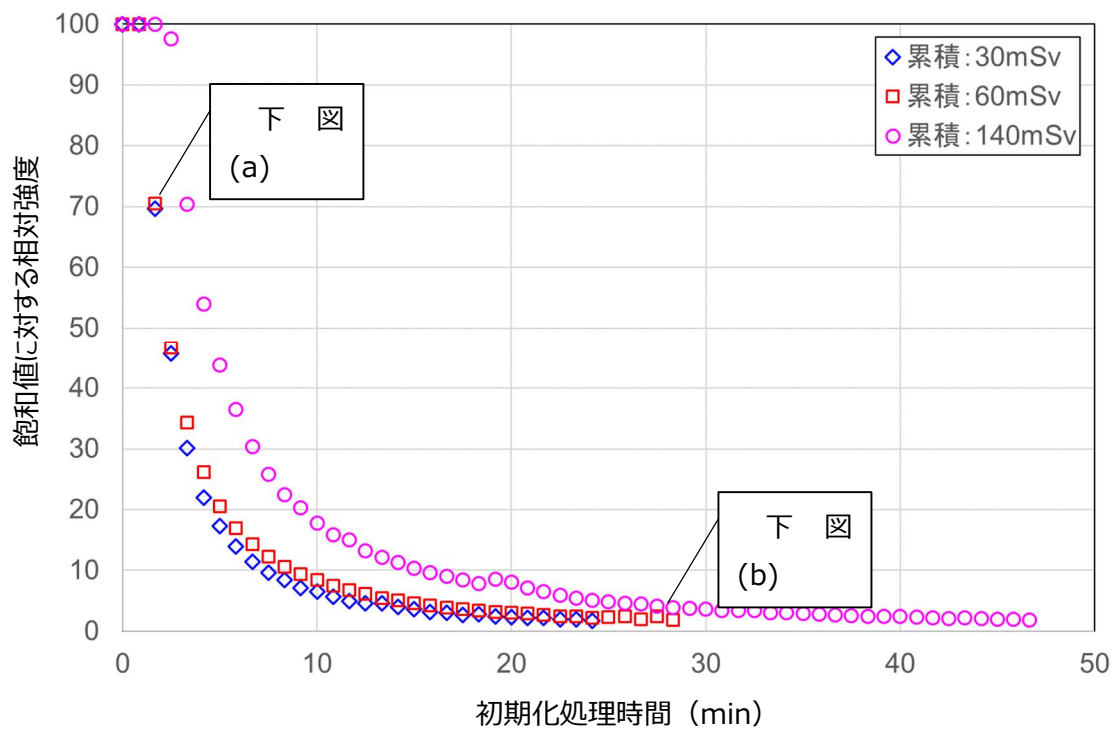
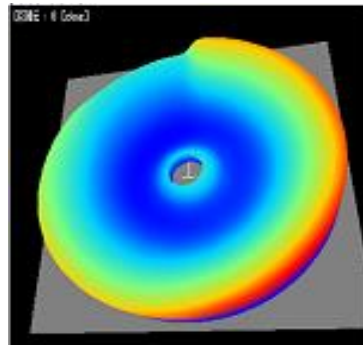
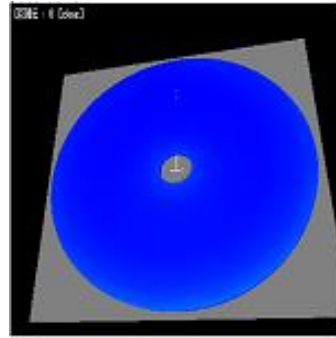


図 3.3.1.1(2)-12 初期化操作に伴う相対強度の変化



(a) 2回初期化後



(b) 29回初期化後

図 3.3.1.1(2)-13 累積線量 30 mSv の IP における初期化後の測定例

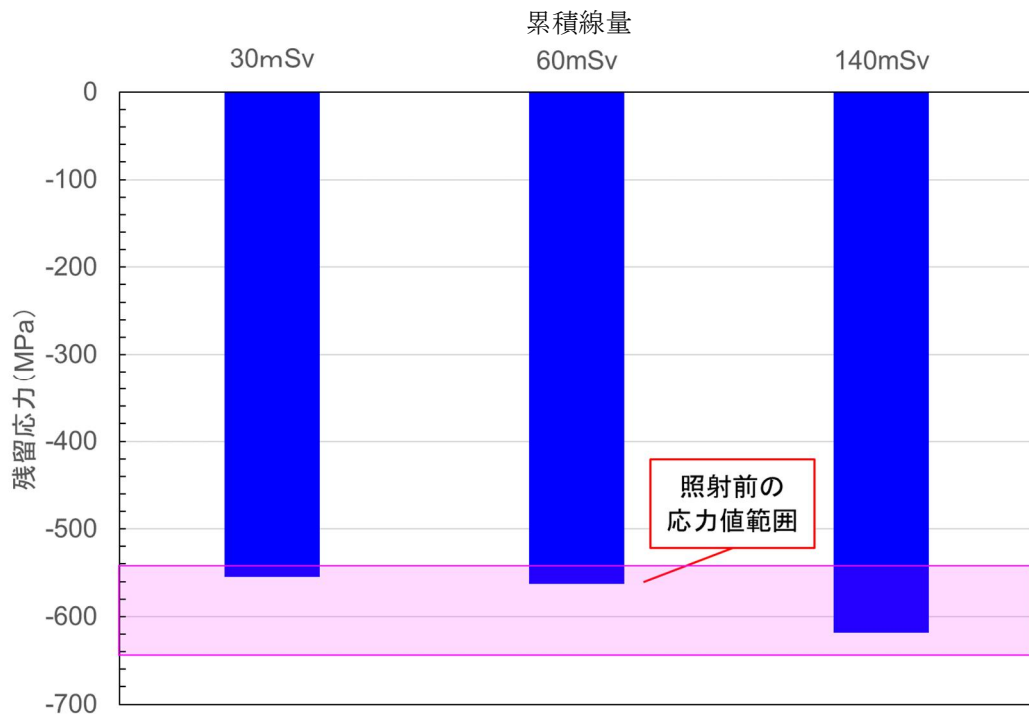


図 3.3.1.1(2)-14 IP 耐久性試験後の供試材の応力測定結果

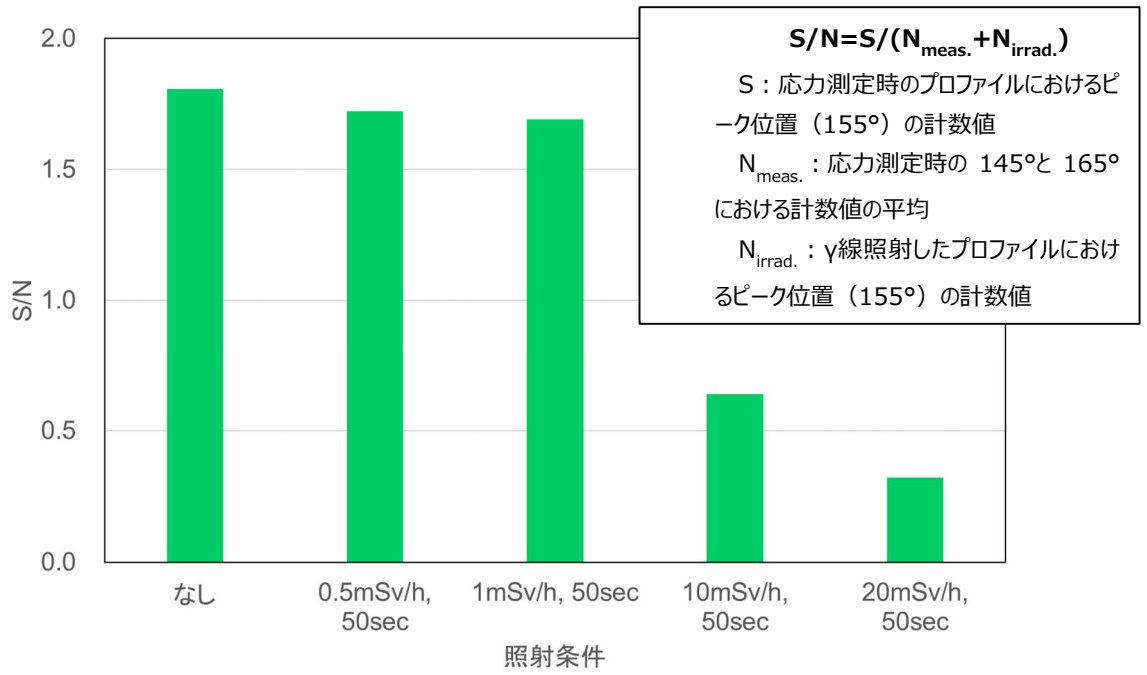


図 3.3.1.1(2)-15 線量率による S/N 比の変化

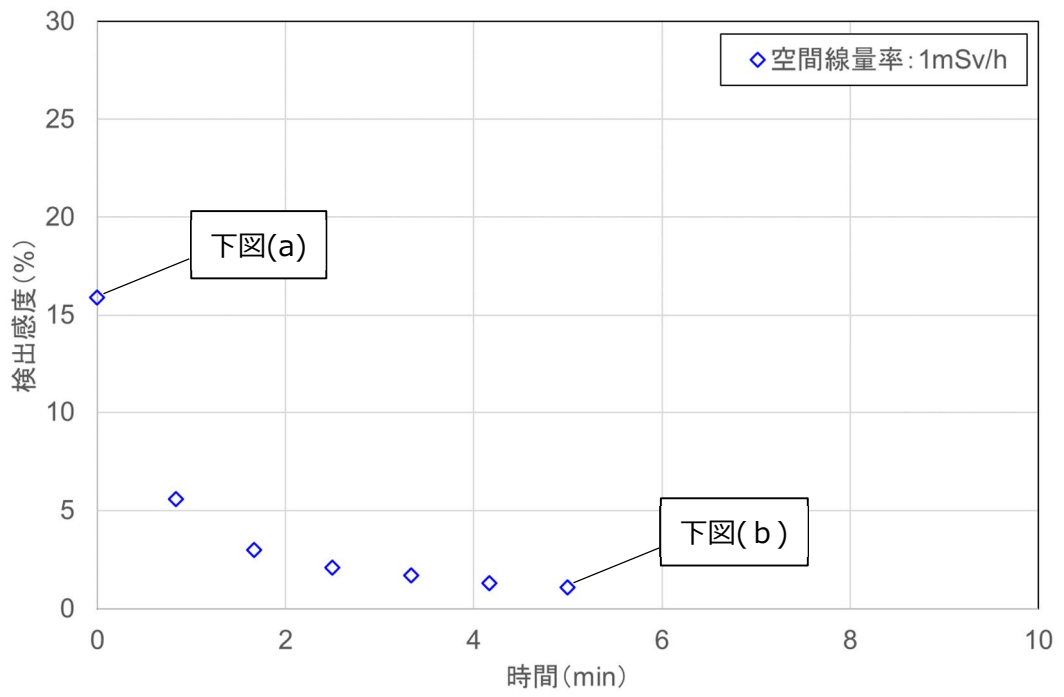
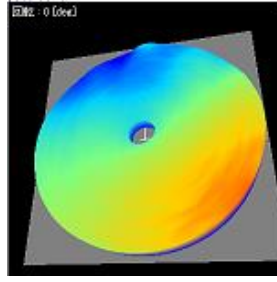
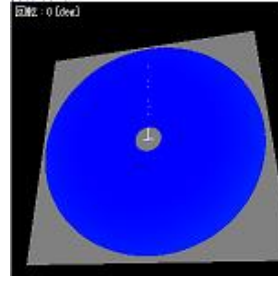


図 3.3.1.1(2)-16 初期化時間と検出感度の関係

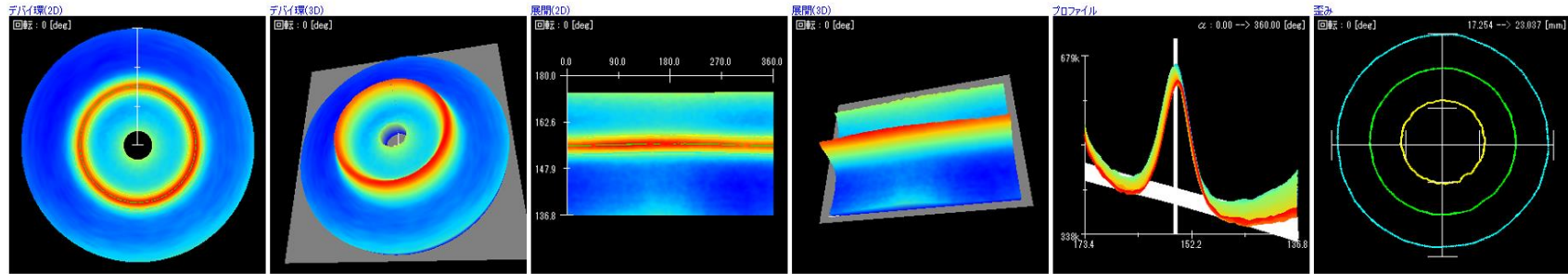


(a) 1 mSv/h、3h

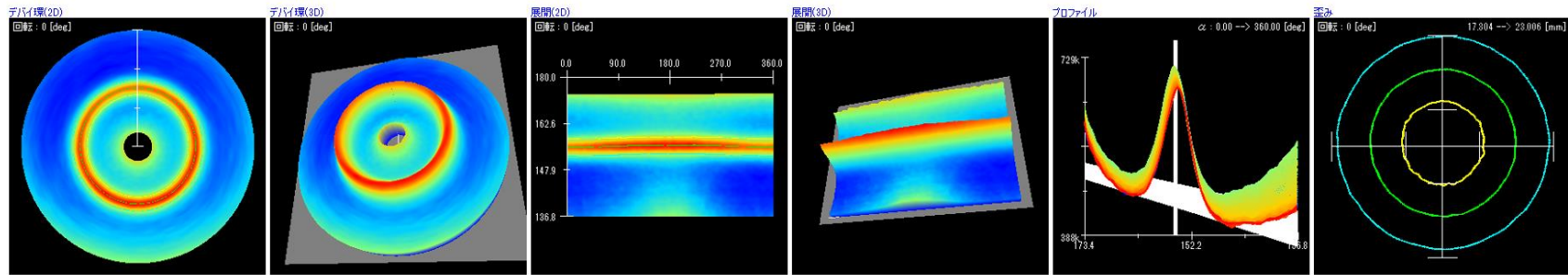


(b) 初期化後

図 3.3.1.1(2)-17 照射／初期化後の IP の読み取り結果

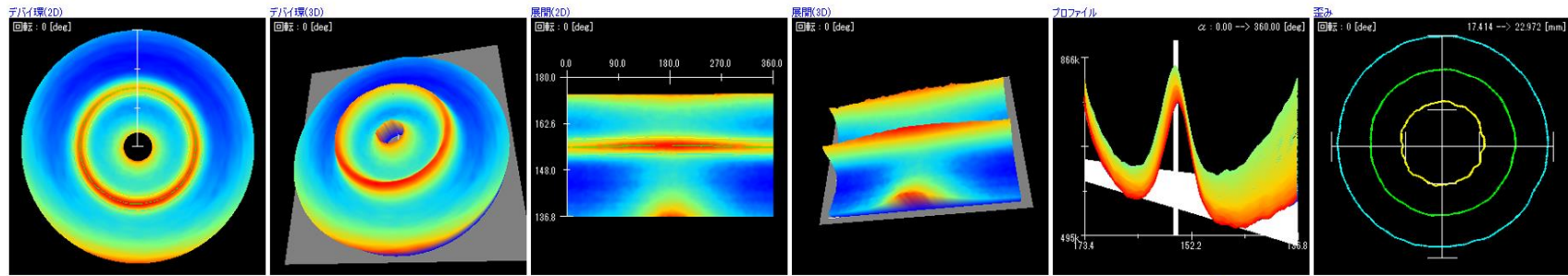


(a) 1 mSv/h

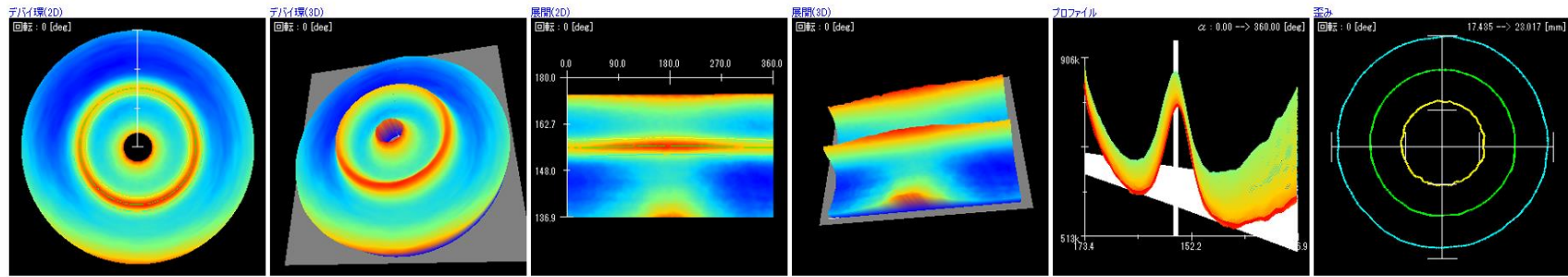


(b) 2 mSv/h

図 3.3.1.1(2)-18 (1/3) 照射後の IP の読み取り結果



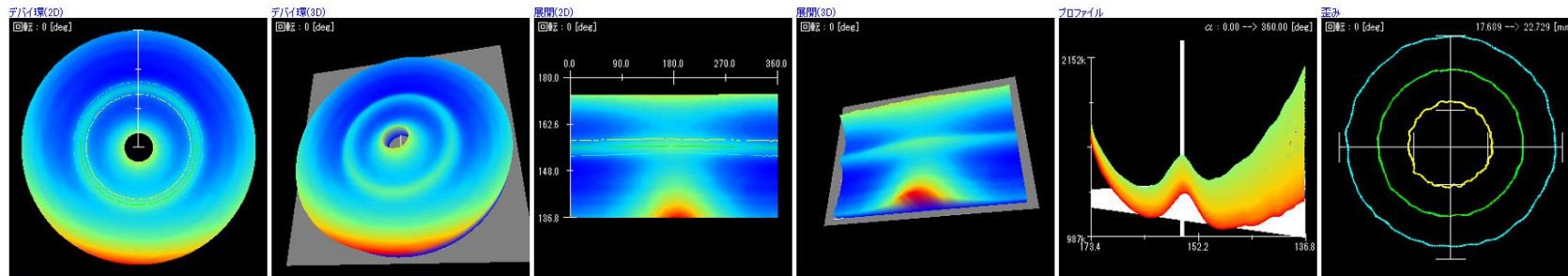
(c) 4 mSv/h



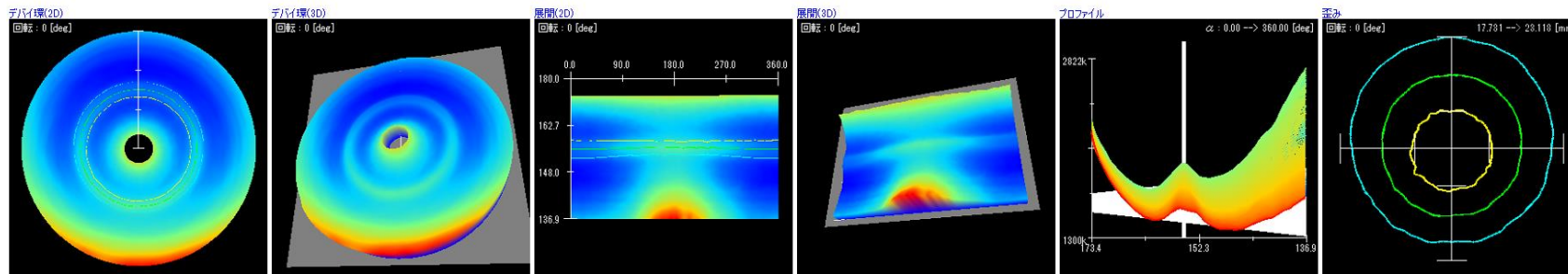
(d) 6 mSv/h

図 3.3.1.1(2)-18 (2/3) 照射後の IP の読み取り結果





(e) 8 mSv/h



(f) 10 mSv/h

図 3.3.1.1(2)-18 (3/3) 照射後の IP の読み取り結果

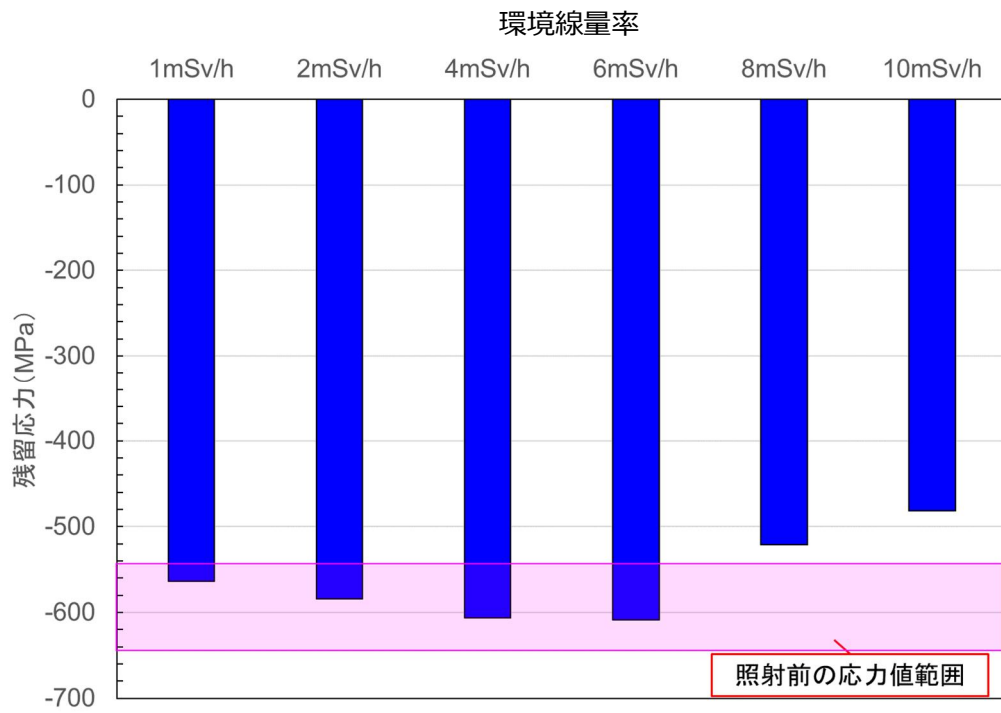
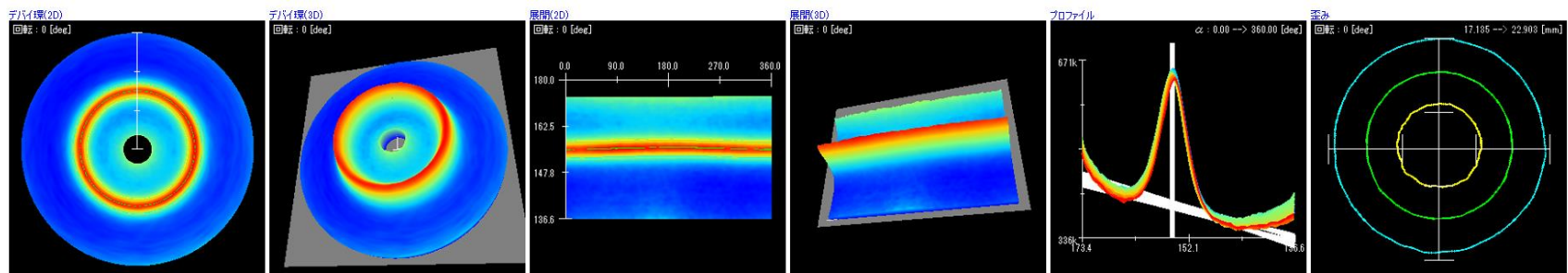
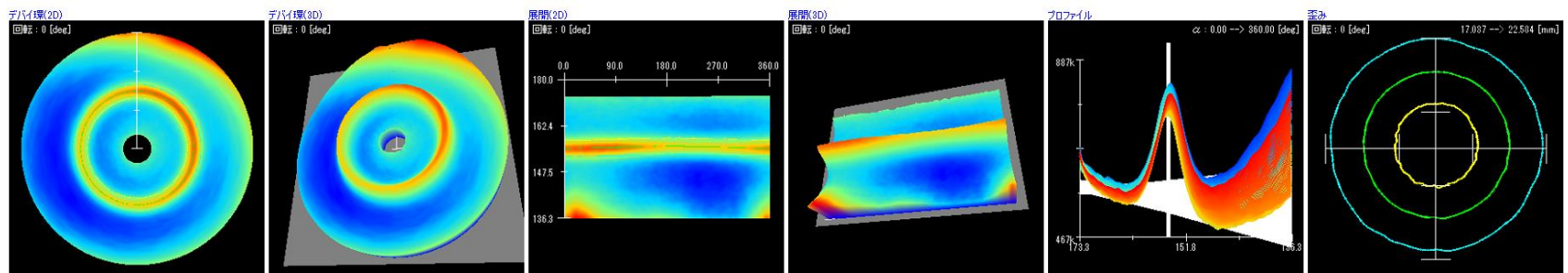


図 3.3.1.1(2)-19 環境線量率と応力測定の関係



(a) 1 mSv/h



(b) 遮蔽体により 10 mSv/h を 2 mSv/h に低減

図 3.3.1.1(2)-20 照射後の IP の読み取り結果

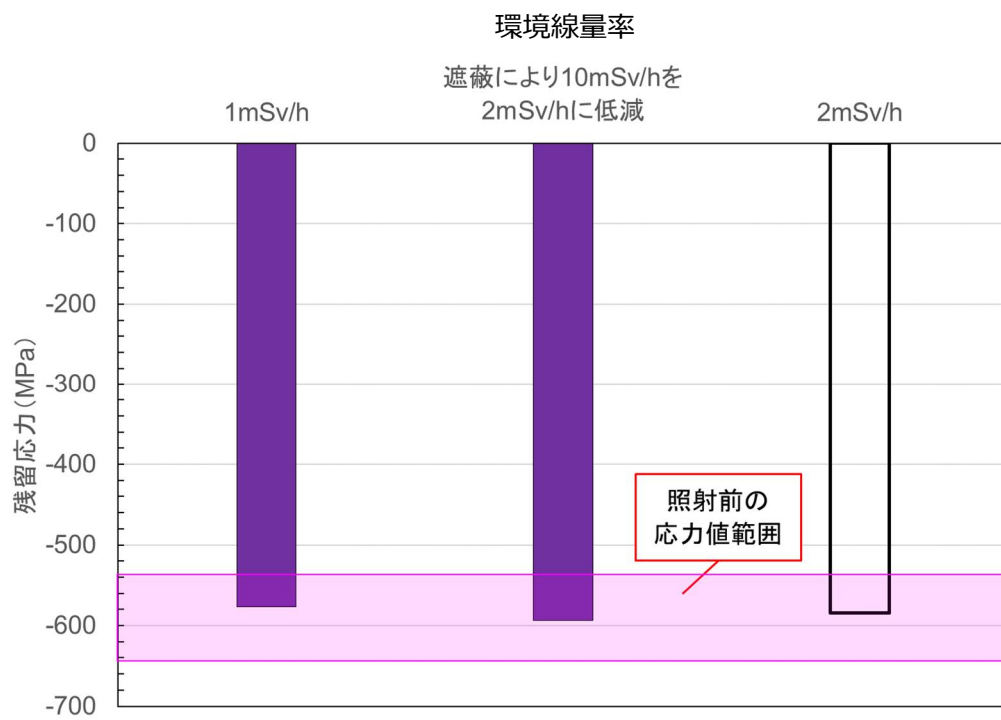


図 3.3.1.1(2)-21 実機測定模擬および遮蔽条件での応力測定結果

### 3.3.1.2 要素試験体による解析手法の妥当性確認の検討

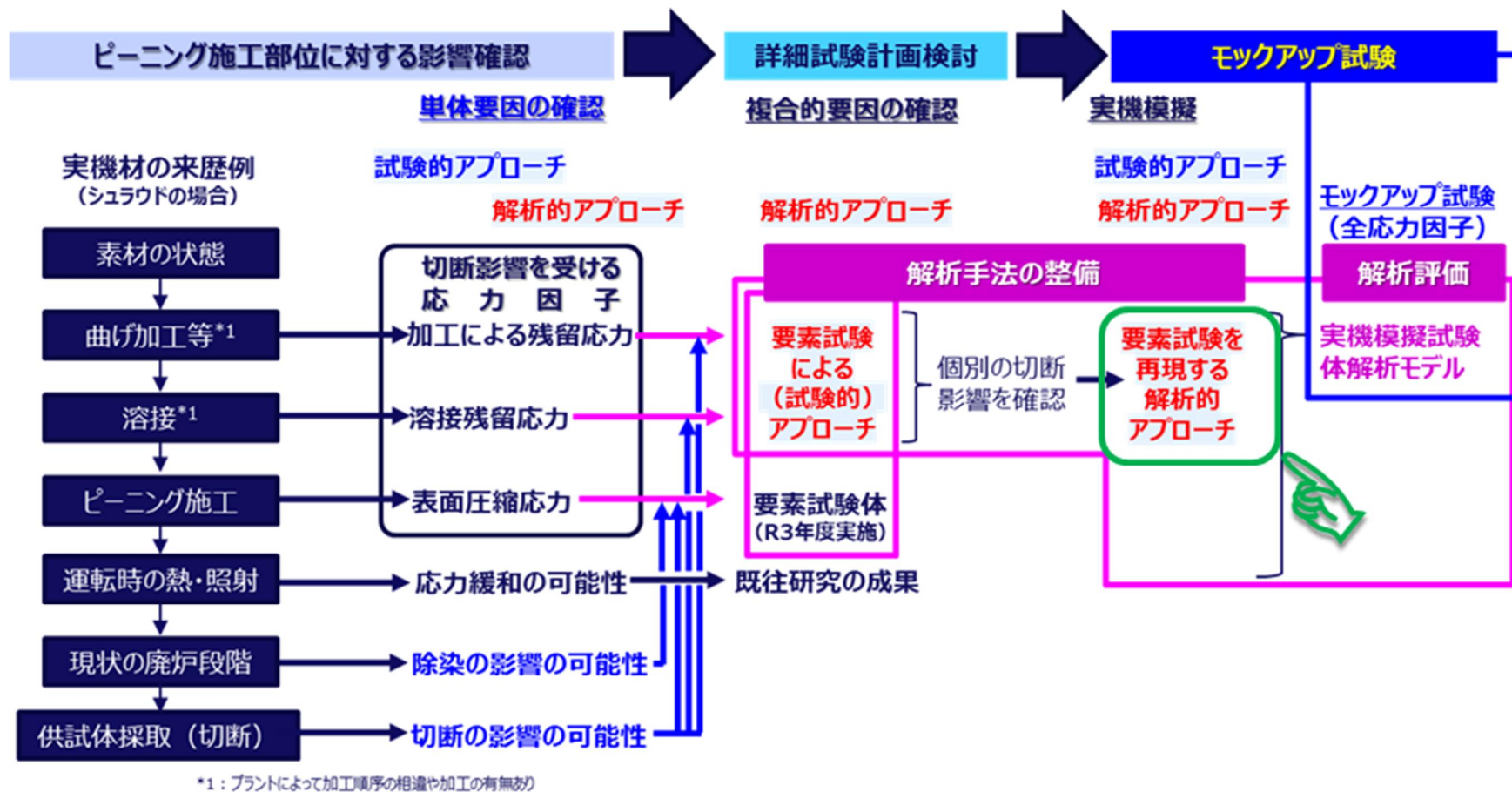
令和3年度<sup>[3.3.1.2-1]</sup>は、炉内構造物の実機応力改善対策施工部位から実機供試体を採取する際の切断影響等を確認するための実機模擬試験方法について調査し、各実機模擬試験方法におけるメリット/デメリット及び適応性の抽出・整理を実施した。本調査の結果、本研究の目的、実機模擬試験に要するコスト及び期間を考慮し、実機模擬試験方法として、部分モックアップ試験又は要素モックアップ試験を選定することが合理的であることを確認した。一方で、部分モックアップ試験又は要素モックアップ試験のみでは、実機模擬性に限界があるため、有限要素法解析(以下、「FEM 解析」という)を組み合わせた評価が必要であることを併せて確認した。また、炉内構造物の構成材料については、素材の状態から、機械加工や溶接等の製作工程を経て原子炉内に設置されており、その後、SCC に対する予防保全としてショットピーニング(以下、「SP」という)やウォータージェットピーニング等の応力改善対策が施工されていることから、実機材料の来歴には、切断の影響を受ける種々の応力因子が存在し、互いに影響を及ぼすと考えられるため、個別の応力因子に対する切断影響を確認することが必要であることを確認した。図 3.3.1.2-1 にピーニング応力に及ぼす切断影響確認のための試験的・解析的アプローチの全体検討フローを示す。

令和4年度<sup>[3.3.1.2-2]</sup>は解析的アプローチとして、個別の応力因子に対する切断影響として溶接残留応力、曲げ加工による残留応力及びピーニング施工を模擬した残留応力をそれぞれ FEM 解析で模擬し、実機からの供試体採取を念頭に解析モデル上で切断してそれぞれの応力への影響の有無について解析を実施した。これらの解析で切断の影響が顕著となった溶接残留応力と、影響を確認する対象のピーニング応力が重畳した応力場を、それぞれ個別の解析にて評価した応力場を重ね合わせることで模擬し切断に対する試験解析を実施した。その結果、重ね合わせ応力場に対して、表層部のピーニング応力が切断により変化することが確認された。ただし、溶接残留応力とピーニング応力の重畳応力の再現を解析モデル上でどのように重ね合わせることが妥当かという知見がないことから、令和5年度は溶接とピーニングを模擬した要素試験体を製作・切断し、残留応力を実測することで、要素試験体における実測値を再現するための解析手法の整備を実施し、解析の妥当性を検討する計画とし、要素試験体の形状・寸法及び取得データなど計画を具体化した。

以上を踏まえて、令和5年度は試験的アプローチとして溶接とピーニングを模擬した要素試験体を製作し、実際に切断前後の溶接とピーニングが重畳した部材表層部の残留応力分布を測定し、切断による残留応力変化を評価するとともに、解析的アプローチとして要素試験体を模擬した解析モデルを作成し、要素試験結果との比較・検証により解析手法を整備し、解析の妥当性を確認した。

<参考文献>

- [3.3.1.2-1] 令和3年度 原子力規制庁委託成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費(実機材料等を活用した経年劣化評価・検証(実機材料を活用した健全性評価に係る研究)), 原子力規制庁, 令和4年3月
- [3.3.1.2-2] 令和4年度 原子力規制庁委託成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費(実機材料等を活用した経年劣化評価・検証(実機材料を活用した健全性評価に係る研究)), 原子力規制庁, 令和5年3月



(緑矢印: R5年度実施範囲)

図 3.3.1.2-1 ピーニング応力に及ぼす切断影響確認のための試験的・解析的アプローチ

## (1) 要素試験体による切断影響確認(試験的アプローチ)

要素試験体として炉心シュラウド H4 溶接部を模擬した平板の突合せ溶接継手を製作し、溶接後に SP を施工した。製作した要素試験体に対して、実機からの試験体切り出しを想定した切断を行い、切断前後での溶接と SP が重畳した部材表層部における残留応力分布を測定することで、表層部のピーニング応力への切断影響を評価した。

### 1) 試験条件

#### ① 要素試験体形状

要素試験に用いた試験体の寸法を図 3.3.1.2(1)-1 に示す。試験体の寸法は、令和 4 年度の調査より、切断により溶接残留応力が変化すると考えられる寸法、試験体製作に用いるステンレス鋼板(平板)の調達性(調達費用及び調達期間)、SP 施工設備及び残留応力測定装置の制約等を考慮し設定した。試験片及び架構の材質は、実機シュラウドに用いられる SUS304 の熱延鋼板とした。

ここで、実機シュラウドにおける溶接及び SP は、大径の円筒構造物であるシュラウドの自己拘束条件下において施工されているため、本試験体の製作及び SP 施工においては、実機シュラウドの自己拘束を模擬するような拘束治具が必要となる。このため、図 3.3.1.2(1)-1 に示す架構を用いて試験体を拘束した。なお、架構は実機シュラウドの突合せ溶接を模擬するため、試験体の裏側からも溶接可能な構造とし、架構板厚及び試験体と架構とのすみ肉の脚長は、変形を拘束可能な値として設定した。

#### ② 溶接条件

要素試験体の突合せ溶接の条件は、500MWe 級 BWR プラントの炉心シュラウド H4 溶接部の施工実績(開先形状及び溶接施工方法)を基に設定した。

表 3.3.1.2(1)-1 に要素試験体の製作条件を示す。溶接金属は SUS304 に通常用いられる SUS308L 系の材料を用いた。試験体の突合せ溶接は、炉心シュラウド H4 溶接部の施工実績を参考に開先形状は両側開先とし、溶接を実施した、溶接時の状況を図 3.3.1.2(1)-2 に示す。

溶接後の試験体写真を図 3.3.1.2(1)-3 に示す。試験体は炉心シュラウド H4 溶接部の溶接パス順を模擬し、試験体表面が炉心シュラウド外面、試験体裏面が炉心シュラウド内面にそれぞれ対応している。

#### ③ SP 施工条件

要素試験体への SP の施工条件は、炉心シュラウド溶接部の施工実績を基に設定し、図 3.3.1.2(1)-4 に示す装置を用いて施工した。

SP の施工範囲は、維持規格<sup>[3.3.1.2(1)-1]</sup>に示される炉心シュラウドの H4 溶接部の点検範囲である、溶接止端部から 25mm の範囲をカバーする施工ラインを設定した。図 3.3.1.2(1)-5 に施工ラインを示す。

施工後の試験体写真を図 3.3.1.2(1)-6 に示す。試験体の表面、裏面ともに、実績として溶接施工ラインを中心に約 130mm の範囲に SP が施工されていることを確認した。



#### ④ 切断形状

要素試験体の切断寸法は、実機シュラウドからの段階的な切断を想定し、実機シュラウドの全周状態に相当する架構付き状態から、A型輸送が可能な100mm×100mmの実機供試体寸法まで段階的に切断することとした。各切断寸法は、溶接残留応力の切断による変化が測定可能であることを考慮して設定した。なお、切断については機械切断(鋸切断)で実施した。

各切断形状を図 3.3.1.2(1)-7 に、各切断後の試験体写真を図 3.3.1.2(1)-8～図 3.3.1.2(1)-10 に示す。

#### ⑤ 残留応力測定条件

要素試験体の残留応力測定には、X線回折法を用いた。測定に用いた装置の外観を図 3.3.1.2-11 に示す。残留応力測定は、SP施工前(溶接まま)、SP施工後、架構切断後、中間切断後及び最終切断後の計5条件において実施した。表 3.3.1.2(2)-2 に残留応力測定条件を示す。

残留応力測定は、図 3.3.1.2(1)-12 に示す測定ラインを試験体中央に設定し、各測定点に対して実施した。ここで測定点は溶接中心を原点とし、±9mm、±20mm、±33mm、±58mm に設定した。本測定点については、最終切断後の100mm×100mmにおいて切断模擬解析の結果と比較可能な測定点数として設定した。なお、±58mmの測定点については、溶接施工部から十分離れた母材部の応力値を確認することを目的に、SP施工前(溶接まま)の状態でのみ測定した。また、溶接金属部はSPによる予防保全の対象外であるため、本要素試験においては測定点を設定していない。

測定ライン上の各測定点において、溶接線直交方向及び溶接線平行方向の2方向を測定した。各測定点における測定結果は、炉心シュラウド H4 溶接線と測定方向の関係から、溶接線直交方向は軸方向、溶接線平行方向は周方向応力に相当するものである。

### 2) 残留応力測定結果

要素試験体の表面及び裏面の残留応力測定結果をそれぞれ表 3.3.1.2(1)-3 及び表 3.3.1.2(1)-4 に示す。また SP 施工前(溶接まま)の測定結果を図 3.3.1.2(1)-13 に、SP 施工後の測定結果を図 3.3.1.2(1)-14 に、架構切断後の測定結果を図 3.3.1.2(1)-15 に、中間切断後の測定結果を図 3.3.1.2(1)-16、最終切断後の測定結果を図 3.3.1.2(1)-17 にそれぞれ示す。また各切断時の応力測定結果を溶接線直交方向応力及び溶接線平行方向応力それぞれにおいてオーバープロットした結果を図 3.3.1.2(1)-18 及び図 3.3.1.2(1)-19 に示す。

SP 施工前の残留応力測定結果より、HAZ 部において 300～500MPa の溶接による引張の残留応力が確認された。また、参考として測定した母材部では、-100～-300MPa 程度の圧縮残留応力が計測されており、これは素材製造時の熱処理に伴う急冷による

残留応力と推測される。

SP 施工後の残留応力は-600~-900MPa の圧縮応力であり、SP 施工範囲の表層部は、施工前の溶接残留応力分布の影響を受けず、ほぼ均一な圧縮応力分布となることが確認された。

架構切断後、中間切断後及び最終切断(100mm×100mm)後の残留応力は、いずれも-600~-900MPa の圧縮応力が維持されていることを確認した。また、切断時の応力変化の傾向については、溶接線直交方向及び溶接線平行方向ともに残留応力は圧縮応力が増加する傾向となった。本傾向は表面・裏面において共通であった。

### 3) 要素試験体による切断影響まとめ

要素試験体からの試験体切り出しを想定した切断を行い、切断前後で SP 施工部位表層近傍の残留応力を測定した。

その結果、最終切断後(100mm×100mm)においても、SP 施工部位表層近傍の残留応力は圧縮応力となっていることを確認した。

また、架構切断後、中間切断後及び最終切断後の測定結果を比較すると、残留応力は圧縮側に大きくなる傾向が見られた。これは試験体内部の溶接残留応力が切断により開放され、表面の SP 残留応力に影響を与えたことによると考えられる。

実機から切出した試験体の場合においても、試験体内部の溶接残留応力の開放により表層近傍の SP 残留応力に影響を受けることが考えられ、今後実施する実機構造模擬試験による検証の検討課題とする。ただし、今回の要素試験の結果からは、その影響は SP の圧縮残留応力と比較して軽微と考えられる。

<参考文献>

[3.3.1.2(1)-1] 「日本機械学会発電用原子力設備規格 維持規格」. JSME S NA1-2016. 日本機械学会

表 3.3.1.2(1)-1 要素試験体の製作条件

母材	SUS304
溶接金属	SUS308L 系
溶接方法	TIG 溶接及び被覆アーク溶接
開先形状	両側開先 (表面における溶接幅は約 16mm)
溶接パス数	23 パス

表 3.3.1.2(1)-2 残留応力測定条件

	溶接後	SP 施工後
測定装置	株式会社リガク MSF-3M (図 3.3.1.2(1)-11 参照)	
測定原理	$\sin^2\psi$ 法 ( $\psi$ 角を 11 分割し測定)	
測定領域	2mm×2mm	
管球	V 管球	Cr 管球
特性 X 線	VK $\alpha$	CrK $\alpha$
回折面	(2 2 0)	(2 1 1)

表 3.3.1.2(1)-3 要素試験体の残留応力測定結果のまとめ(表面)

単位 : MPa

測定条件	測定位置*1 (mm)	溶接線直交方向 (軸方向)		溶接線平行方向 (周方向)	
		残留応力*3	標準偏差	残留応力*3	標準偏差
SP 施工前	+58*2	-131	8	-148	14
	+33	-79	13	-97	9
	+20	263	14	89	10
	+9	58	28	221	21
	-9	184	48	281	18
	-20	302	24	54	24
	-33	-78	15	-148	26
	-58*2	-110	20	-181	11
SP 施工後	+33	-839	30	-869	28
	+20	-841	43	-926	42
	+9	-674	42	-823	28
	-9	-721	48	-769	45
	-20	-854	18	-872	29
	-33	-715	39	-781	34
架構切断後	+33	-776	34	-929	30
	+20	-822	24	-966	28
	+9	-666	15	-835	25
	-9	-622	22	-855	24
	-20	-819	24	-909	26
	-33	-765	24	-827	36
中間切断後	+33	-812	26	-912	21
	+20	-848	17	-930	21
	+9	-662	11	-763	28
	-9	-628	19	-819	13
	-20	-879	21	-884	26
	-33	-795	33	-799	19
最終切断後	+33	-896	16	-1011	30
	+20	-941	27	-1057	26
	+9	-727	14	-852	24
	-9	-805	46	-869	34
	-20	-905	9	-1011	29
	-33	-762	19	-874	27

注記\*1:溶接中心からの距離を示す(図 3.3.1.2(1)-12 参照)。

\*2:参考用として、SP 施工前のみ母材部を測定。

\*3:各測定点における平均値を示す。

表 3.3.1.2(1)-4 要素試験体の残留応力測定結果のまとめ(裏面)

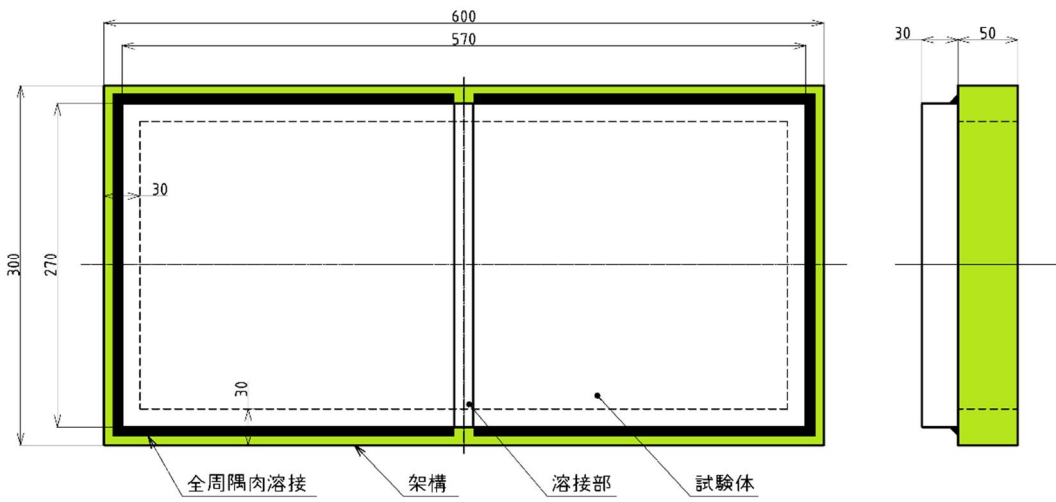
単位：MPa

測定条件	測定位置*1 (mm)	溶接線直交方向 (軸方向相当)		溶接線平行方向 (周方向相当)	
		残留応力*3	標準偏差	残留応力*3	標準偏差
SP 施工前	+58*2	-184	11	-262	13
	+33	28	15	-161	17
	+20	472	20	207	17
	+9	211	33	129	40
	-9	277	15	165	11
	-20	315	17	99	16
	-33	31	14	-130	9
	-58*2	9	18	-98	15
SP 施工後	+33	-848	30	-879	25
	+20	-913	31	-863	34
	+9	-810	36	-655	58
	-9	-656	28	-675	29
	-20	-815	21	-848	41
	-33	-784	35	-885	31
架構切断後	+33	-897	32	-878	40
	+20	-909	24	-890	25
	+9	-683	19	-723	29
	-9	-643	31	-621	27
	-20	-856	26	-852	30
	-33	-867	31	-877	16
中間切断後	+33	-892	24	-851	22
	+20	-911	15	-864	21
	+9	-639	18	-673	25
	-9	-617	16	-649	24
	-20	-834	21	-856	26
	-33	-865	26	-875	25
最終切断後	+33	-967	30	-907	35
	+20	-934	18	-974	23
	+9	-675	20	-754	30
	-9	-665	10	-769	18
	-20	-855	16	-949	27
	-33	-897	21	-895	27

注記\*1:溶接中心からの距離を示す(図 3.3.1.2(1)-12 参照)。

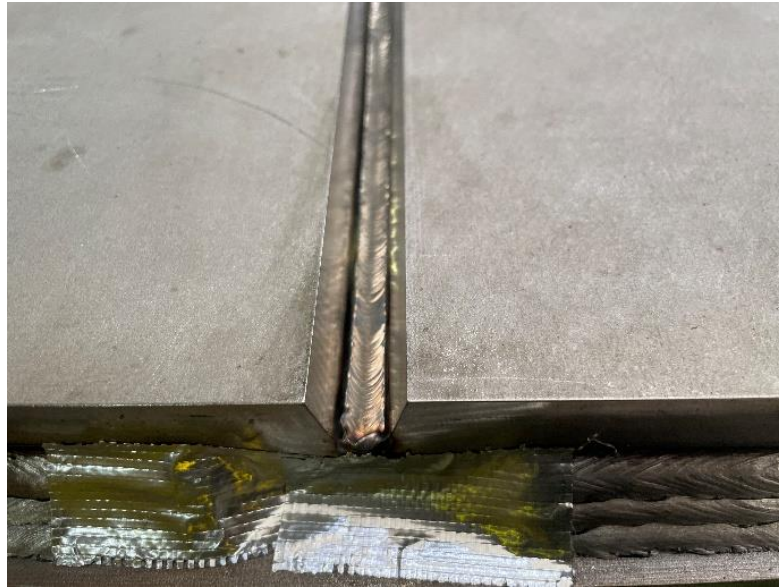
\*2:参考用として、SP 施工前のみ母材部を測定。

\*3:各測定点における平均値を示す。



(単位 : mm)

図 3.3.1.2(1)-1 要素試験体の寸法



(a) 1パス目溶接後試験体



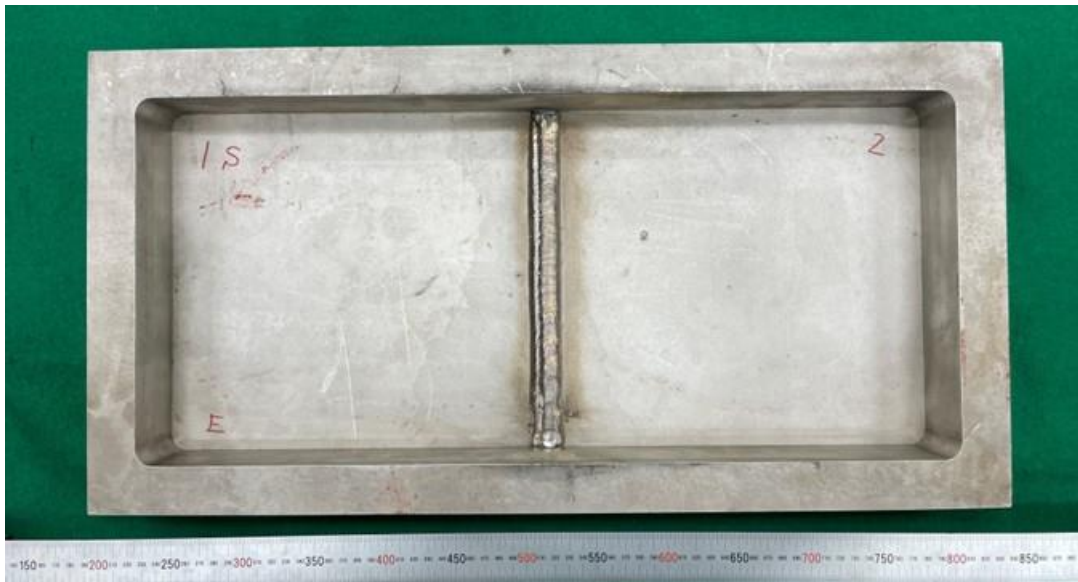
(b) 裏面溶接時

図 3.3.1.2(1)-2 要素試験体の溶接時状況



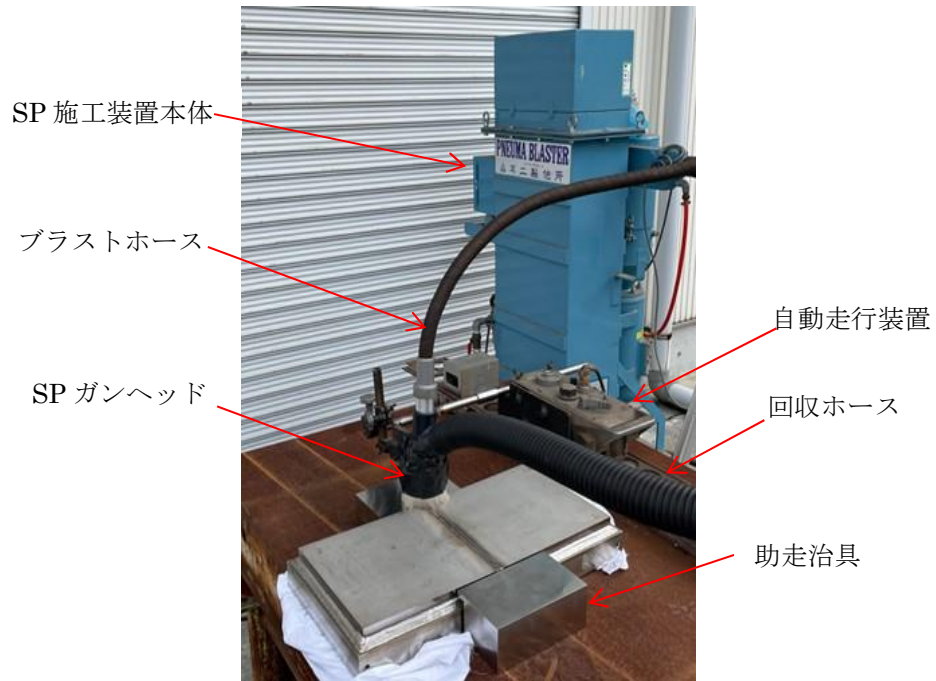


(a) 表面(炉心シュラウド外面に対応)



(b) 裏面(炉心シュラウド内面に対応)

図 3.3.1.2(1)-3 要素試験体外観



(a) 表面 SP 施工時



(b) 裏面 SP 施工時

図 3.3.1.2(1)-4 要素試験体の SP 施工状況

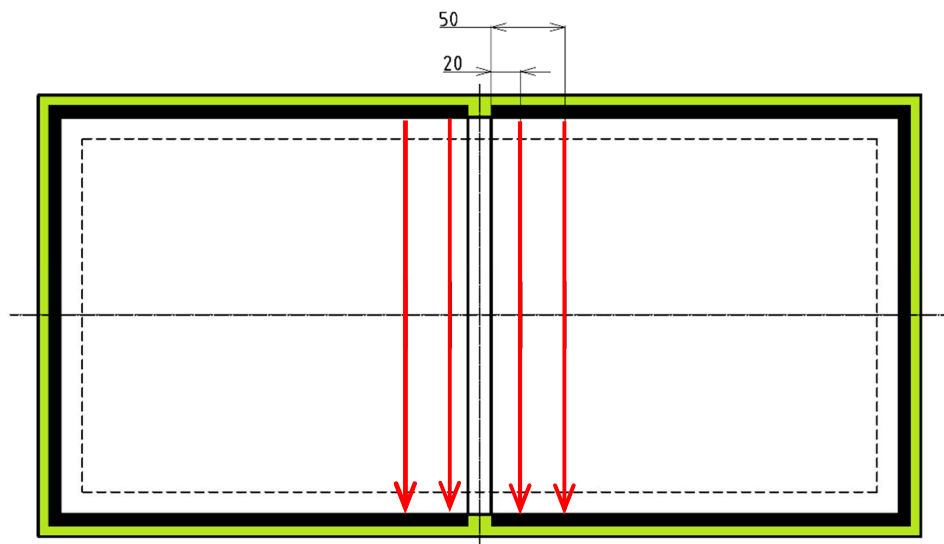
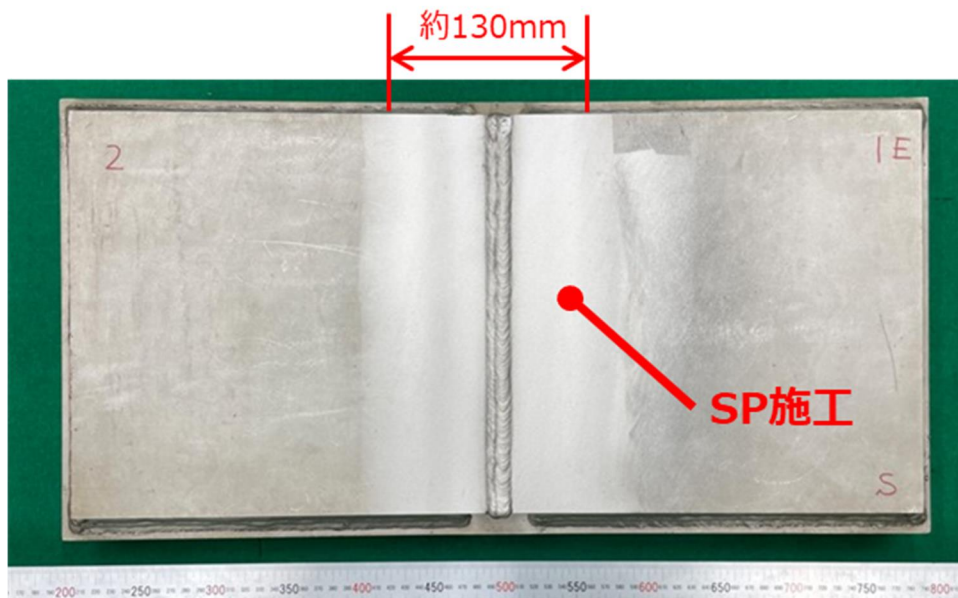
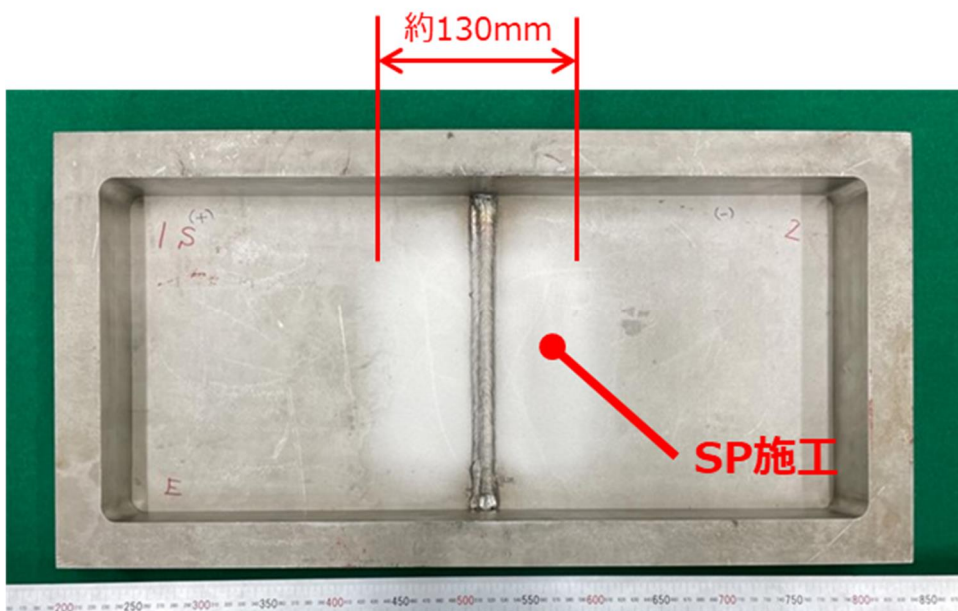


図 3.3.1.2(1)-5 SP 施エライン(表裏共通)

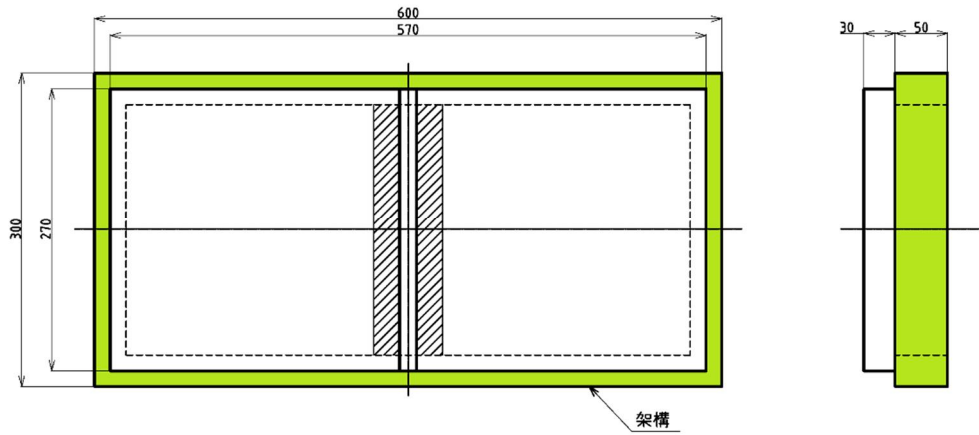


(a) 表面(炉心シュラウド外面に対応)

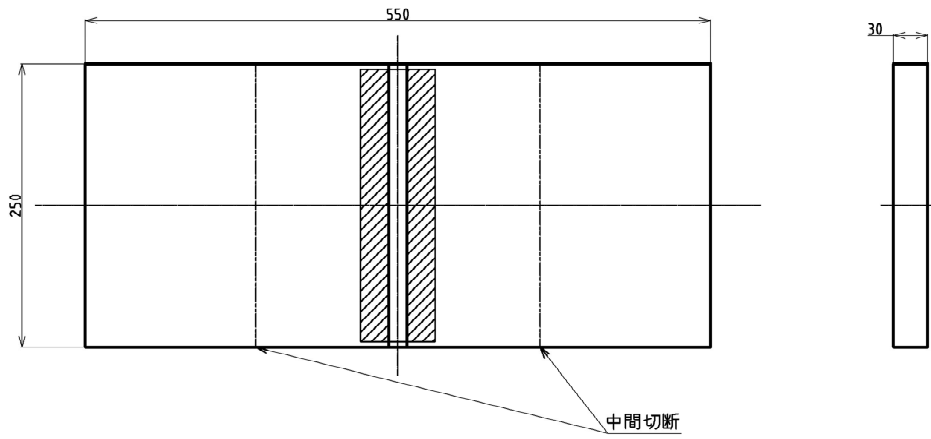


(b) 裏面(炉心シュラウド内面に対応)

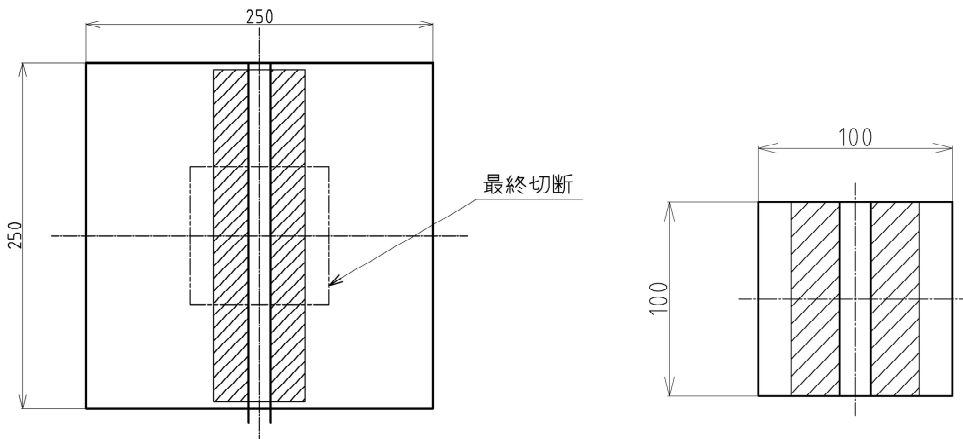
図 3.3.1.2(1)-6 SP 施工後の要素試験体外観



(a) SP 施工後(切断前)



(b) 架構切断



(c) 中間切断

(d) 最終切断

图 3.3.1.2(1)-7 切断形状



(a) 表面(炉心シュラウド外面に対応)



(b) 裏面(炉心シュラウド内面に対応)

図 3.3.1.2(1)-8 架構切断後の要素試験体外観

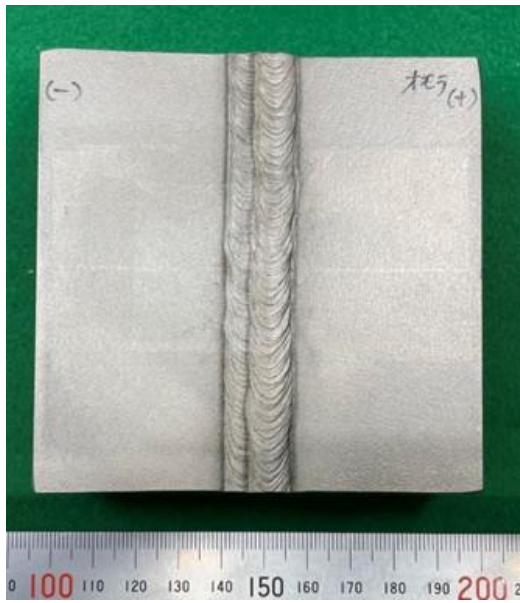


(a) 表面(炉心シュラウド外面に対応)

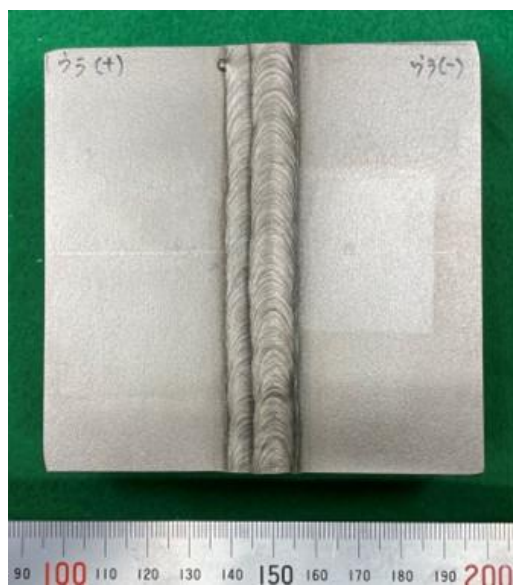


(b) 裏面(炉心シュラウド内面に対応)

図 3.3.1.2(1)-9 中間切断後の要素試験体外観



(a) 表面(炉心シュラウド外面に対応)



(b) 裏面(炉心シュラウド内面に対応)

図 3.3.1.2(1)-10 最終切断後の要素試験体外観





图 3.3.1.2(1)-11 X 線応力測定装置

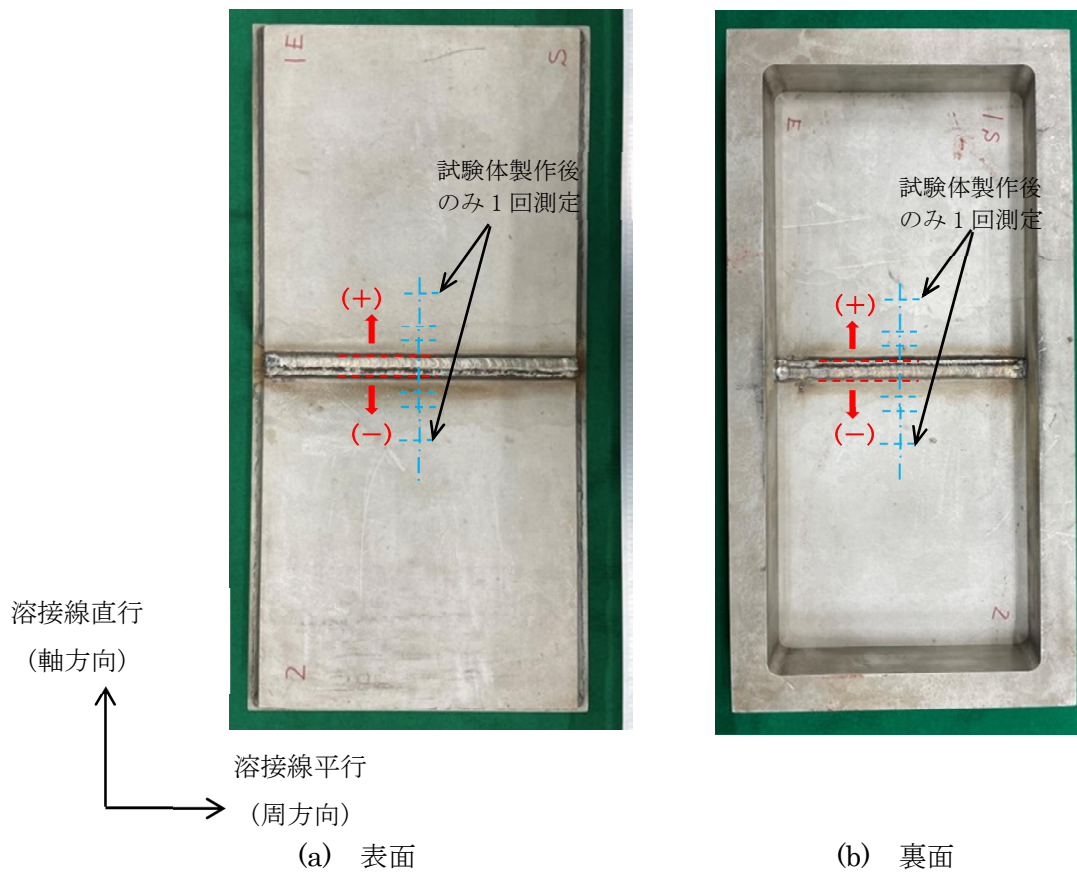
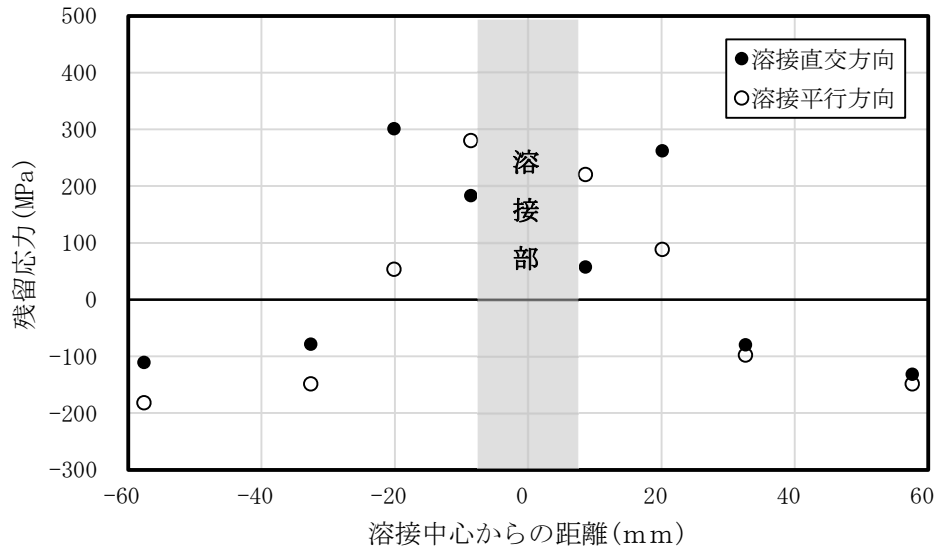
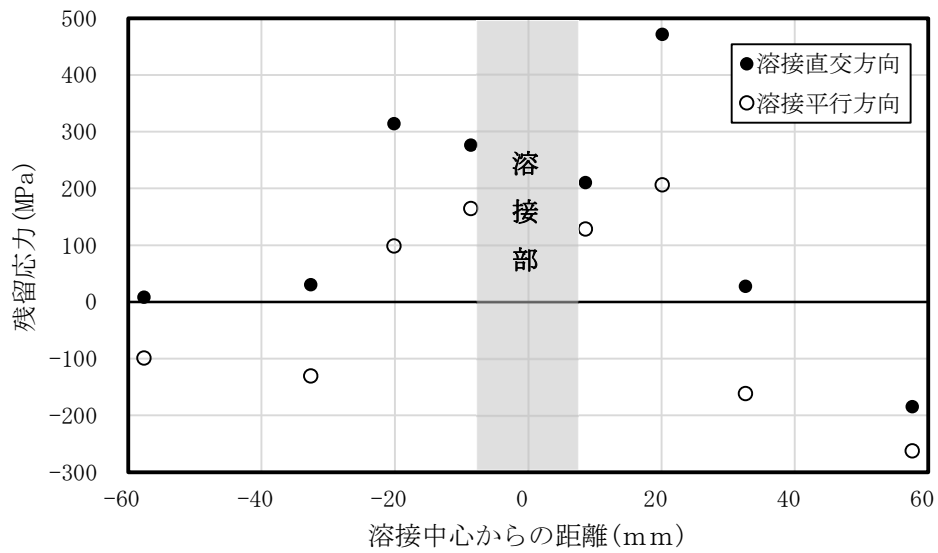


図 3. 3. 1. 2 (1)-12 残留応力測定ライン及び測定点

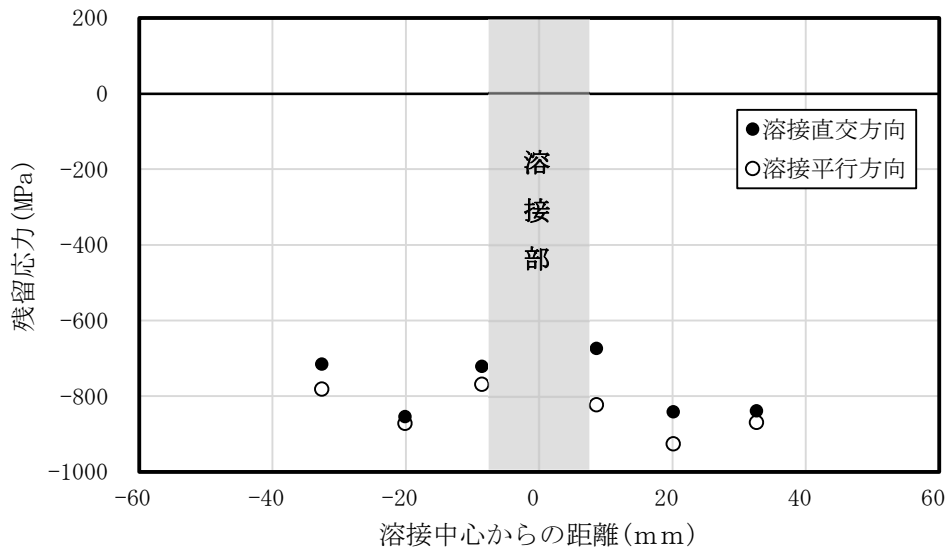


(a) 表面(炉心シュラウド外面に対応)

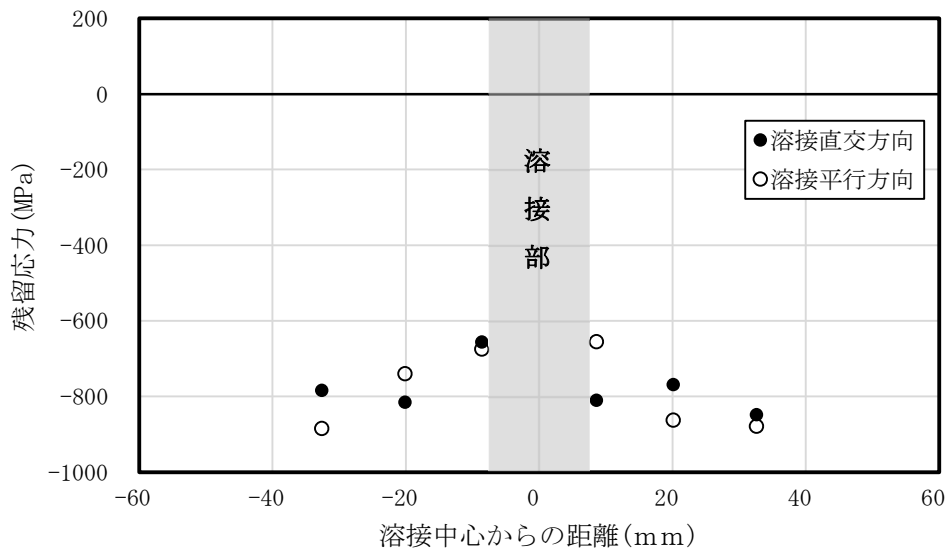


(b) 裏面(炉心シュラウド内面に対応)

図 3.3.1.2(1)-13 残留応力測定結果(SP 施工前)

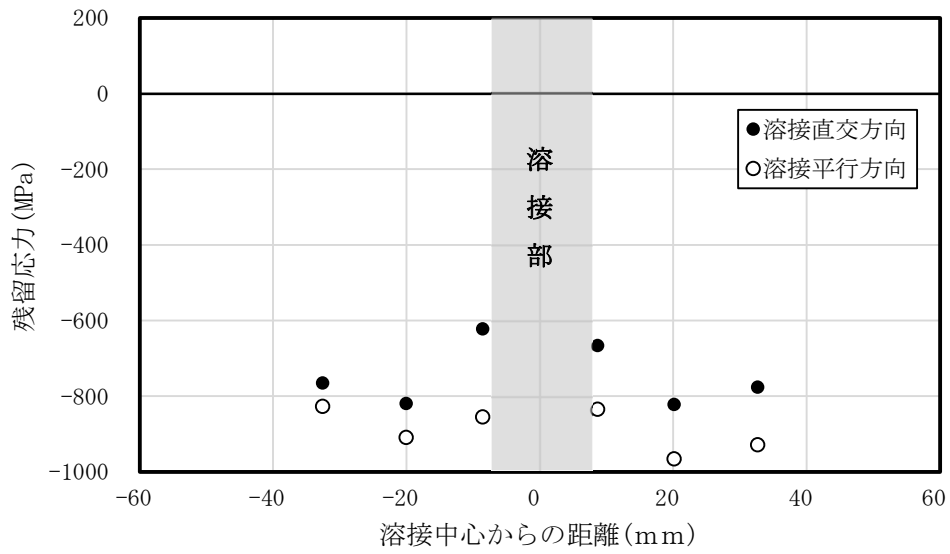


(a) 表面(炉心シュラウド外面に対応)

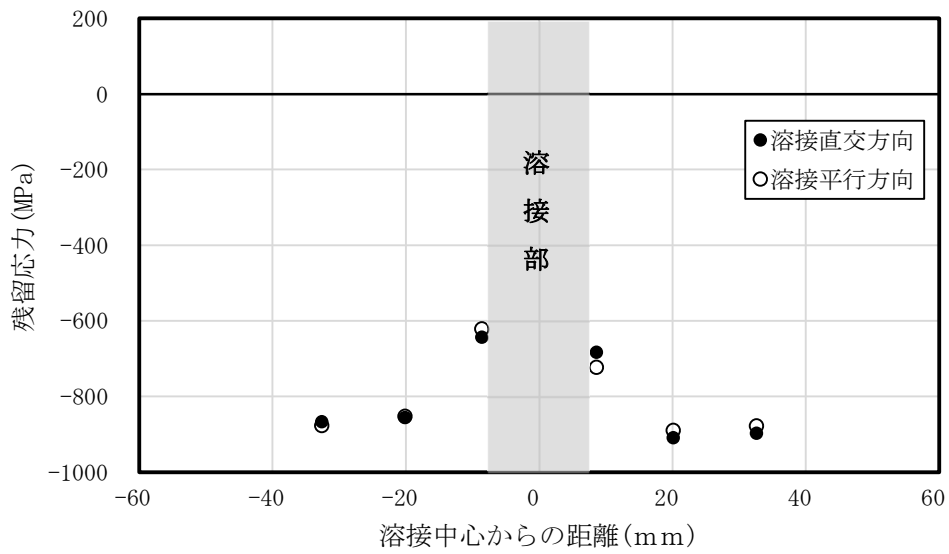


(b) 裏面(炉心シュラウド内面に対応)

図 3.3.1.2(1)-14 残留応力測定結果 (SP 施工後)

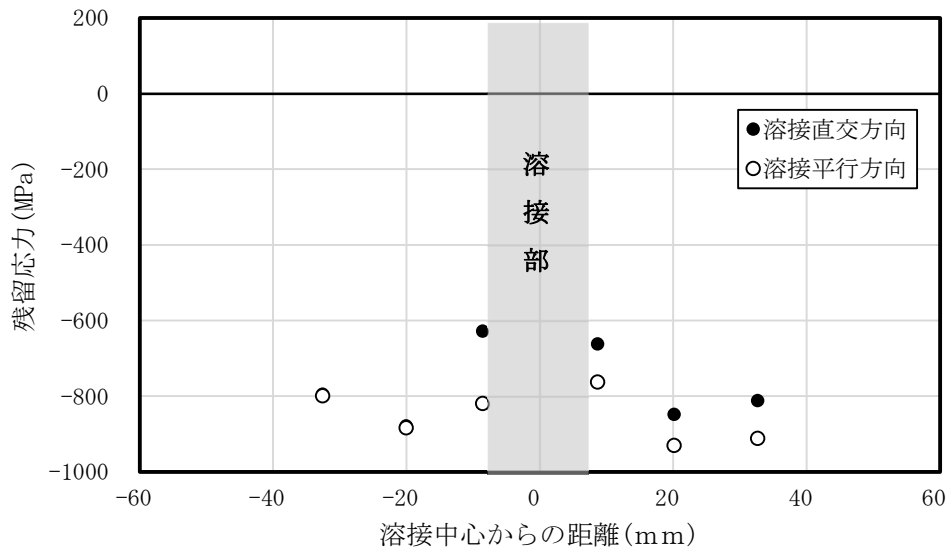


(a) 表面(炉心シュラウド外面に対応)

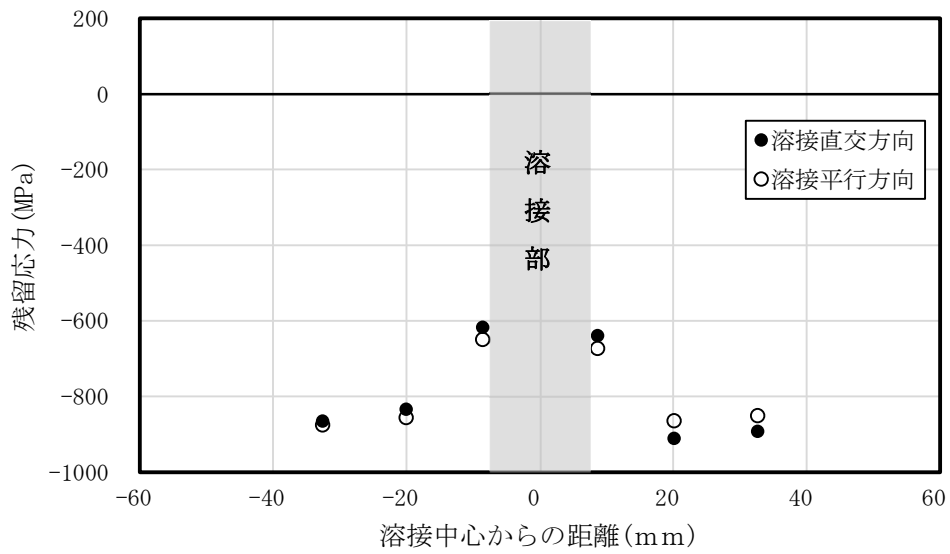


(b) 裏面(炉心シュラウド内面に対応)

図 3.3.1.2(1)-15 残留応力測定結果(架構切断後)

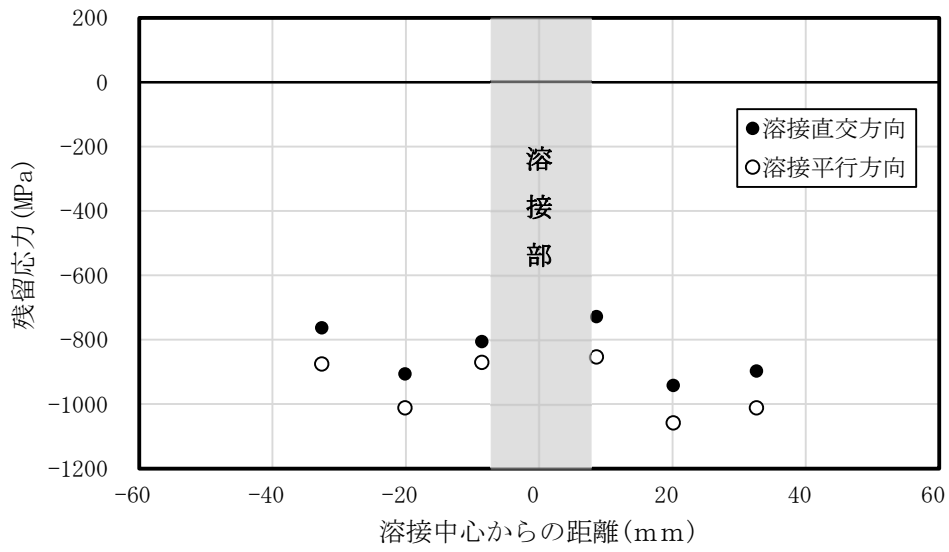


(a) 表面(炉心シュラウド外面に対応)

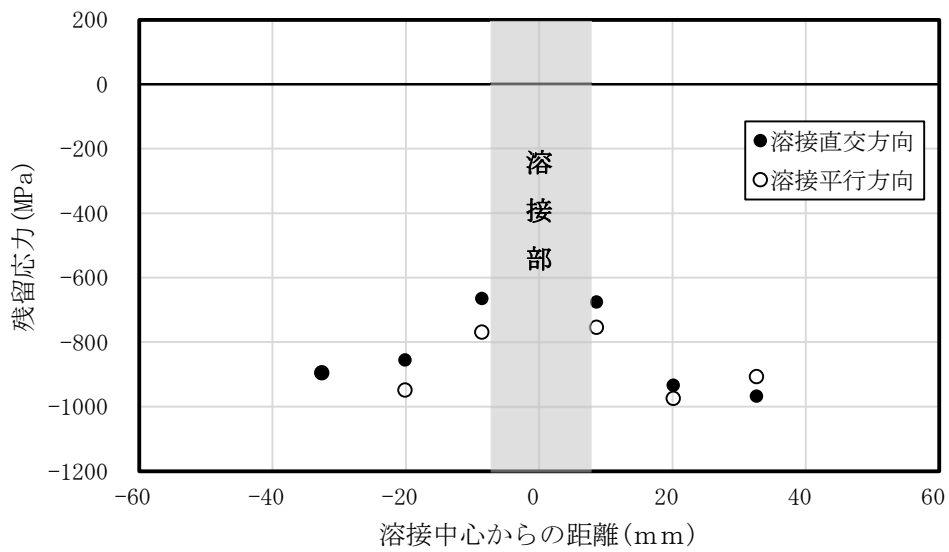


(b) 裏面(炉心シュラウド内面に対応)

図 3.3.1.2(1)-16 残留応力測定結果(中間切断後)

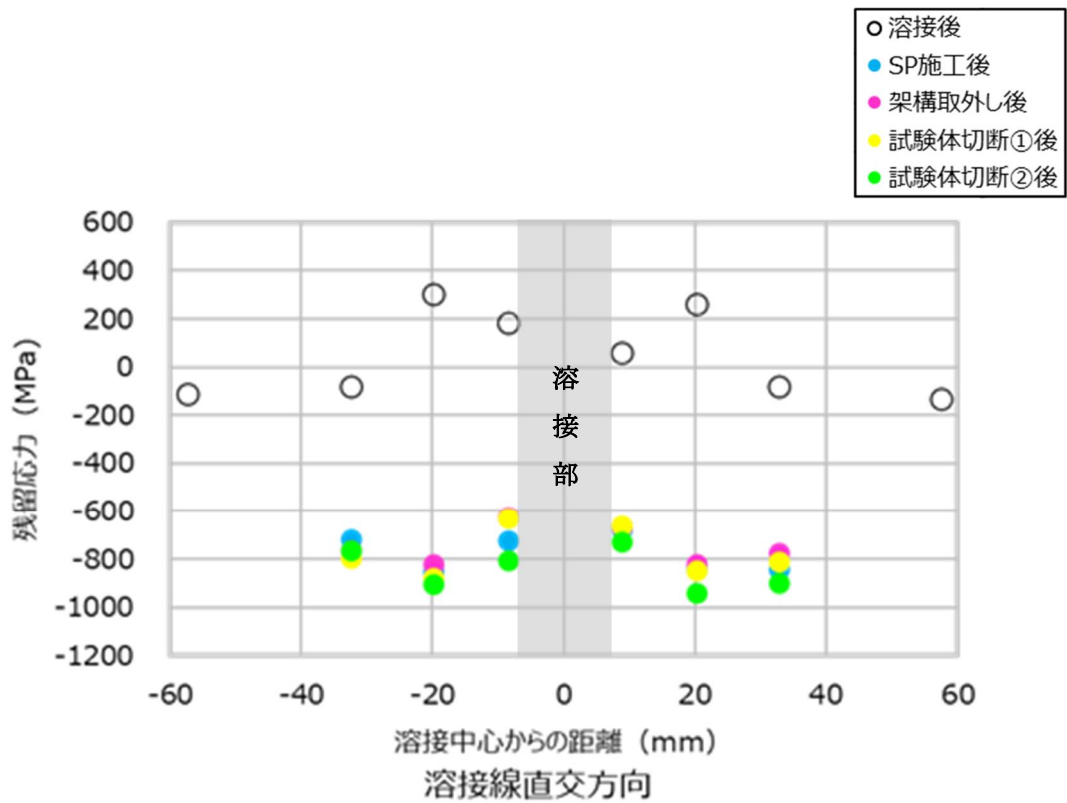


(a) 表面(炉心シュラウド外面に対応)

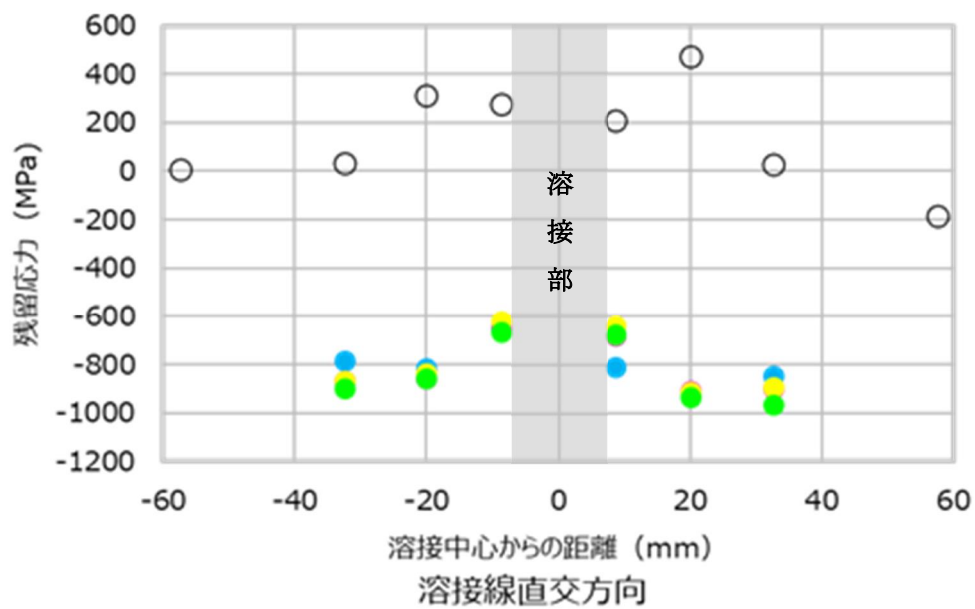


(b) 裏面(炉心シュラウド内面に対応)

図 3.3.1.2(1)-17 残留応力測定結果(最終切断後)



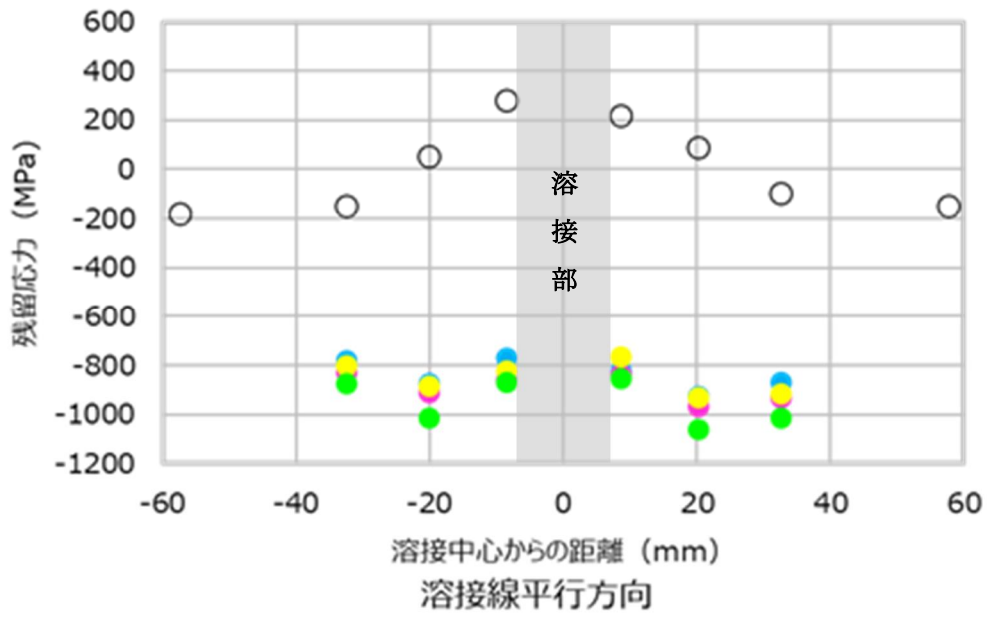
(a) 表面(炉心シュラウド外面に対応)



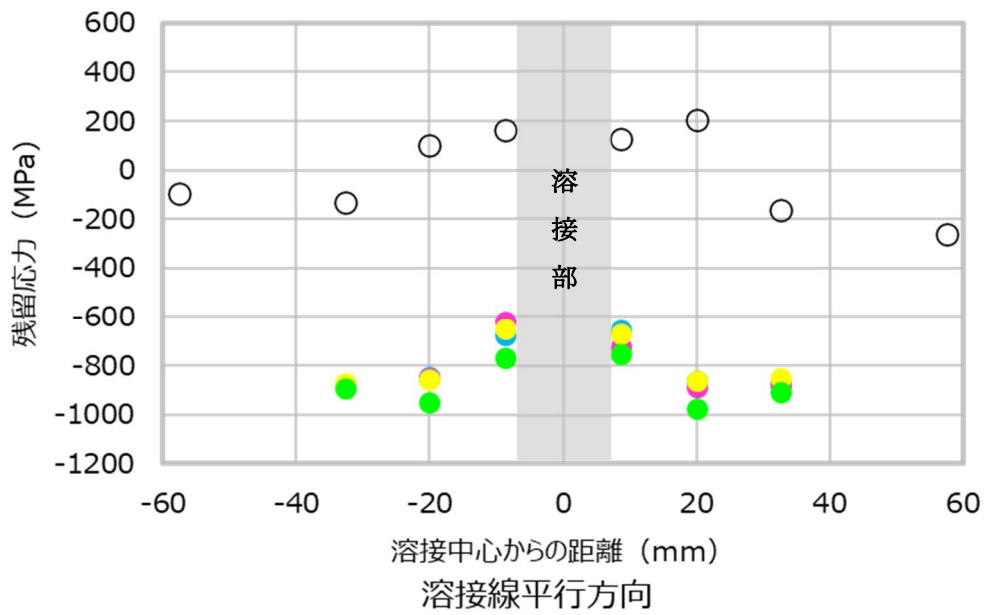
(b) 裏面(炉心シュラウド内面に対応)

図 3.3.1.2(1)-18 残留応力測定結果(各切断時の比較：溶接線直交方向)





(a) 表面(炉心シュラウド外面に対応)



(b) 裏面(炉心シュラウド内面に対応)

図 3.3.1.2(1)-19 残留応力測定結果(各切断時の比較：溶接線平行方向)

## (2) 要素試験体の模擬解析による切断影響確認(解析的アプローチ)

### 1) 要素試験体の模擬解析の概要

要素試験体の模擬解析としては、令和4年度に用いた解析手法及び解析結果の妥当性確認を目的とし、FEMによる解析を実施した。

本解析においては、3.3.1.2(1)項に示す要素試験体における切断の残留応力に及ぼす影響を評価するため、溶接残留応力解析、SPによる残留応力解析及び切断模擬解析を実施した。要素試験体表面は、溶接による残留応力及びSPによる残留応力が重畳した状態であるため、溶接残留応力解析及びSPによる残留応力解析をそれぞれ実施し、SP施工後の要素試験体の表面の残留応力分布を再現した。その後、試験体の切断に伴う残留応力の変化を再現するため、切断模擬解析を実施した。

本要素試験模擬解析で用いた解析モデルを図3.3.1.2(2)-1に示す。溶接残留応力解析及びSPによる残留応力解析については2次元解析モデルを用いて解析を行った。なお、2次元解析モデルはSPによる残留応力を模擬するための詳細なメッシュをモデル表面・裏面に設定した。切断模擬解析については、2次元解析モデルによる残留応力解析にて求めた応力を用いて、固有ひずみマッピングにより3次元モデルを作成し、切り出しに伴う残留応力の変化を求めた。

以上のFEM解析により求めた要素試験体の各切断状態における残留応力の解析結果と、要素試験体における残留応力測定結果を比較し、FEM解析の妥当性及び解析へフィードバックするチューニング事項について検討を行った。

### 2) 溶接残留応力解析

#### ① 解析条件

溶接残留応力解析は、要素試験体の溶接部を対象に、国内許認可申請や高経年化評価にて実績のある解析手法を用いて実施した。要素試験体の解析モデルを図3.3.1.2(2)-2に示す。解析モデルは2次元モデルとする。実機の溶接施工を模擬する残留応力解析を実施するため、図3.3.1.2(2)-2(b)に示すように溶接パスに対応する要素を順次成層させ解析を実施する。なお開先形状及び溶接条件については、要素試験体製作時の寸法記録及び溶接記録を基に設定した。

溶接残留応力解析のフローを図3.3.1.2(2)-3に示す。接残留応力解析条件の一覧を表3.3.1.2(2)-1に示す。図3.3.1.2(2)-4に溶接の入熱パターンを示す。

#### ② 解析結果

図3.3.1.2(2)-5に温度分布解析結果として、代表パスとして表面1パス目の溶接中、裏面1パス目の溶接中及び最終パスの溶接中における温度分布図を示す。各パスの入熱領域の温度がSUS304の融点(約1400~1450℃)を上回っており、温度分布解析結果が妥当であることを確認した。

温度分布解析の結果に基づいて実施した応力解析から、溶接線直交方向及び溶接線平行方向の溶接部近傍の残留応力分布を図3.3.1.2(2)-6に示す。

また図 3.3.1.2(2)-7 及び図 3.3.1.2(2)-8 に要素試験体表層部における本解析結果と要素試験体の測定結果との比較を示す。表面・裏面ともに、溶接線直交方向・溶接線平行方向いずれの残留応力も HAZ 部において引張の残留応力となっており、要素試験で得られた測定結果の傾向を概ね模擬できていることを確認した。

一方、応力値の大きさを比較した場合、溶接線直交方向の解析結果は測定値と良く一致するものの、溶接線平行方向は解析結果が各測定値を上回った。一般に、二次元平面ひずみ条件を適用した解析では、溶接線平行方向応力は引張側に高くなる傾向があることから、本解析結果においても、同様の傾向が現れたものと考えられる。

また、図 3.3.1.2(2)-7 及び図 3.3.1.2(2)-8 より、母材部の解析結果では、要素試験結果に見られるような圧縮の残留応力は見られなかった。これは、要素試験体の母材には製造時の熱処理(急冷)による初期の圧縮の残留応力が生じているのに対し、溶接残留応力解析では初期条件としての圧縮応力を与えていないことによる差異であると考えられる。なお、切断時の SP による圧縮残留応力の残存確認については SP 施工部において実施するため、母材部における圧縮残留応力を考慮する必要はないと判断した。

### 3) SP による残留応力解析

#### ① 解析条件

SP による残留応力解析は、要素試験体の測定結果を模擬する手法を選定し、弾塑性解析により実施した。図 3.3.1.2(1)-14 に示す SP 施工後の要素試験結果より、SP による残留応力は施工部における溶接残留応力によらず、ほぼ一定の残留応力となることが確認されたため、解析においては SP の施工範囲に対して一定の圧縮応力(約 800MPa)を生じさせる塑性ひずみを付与することとした。なお、解析における SP 施工範囲としては、要素試験体における SP 施工範囲実績(図 3.3.1.2(1)-6 参照)に基づき、溶接中心から±65 mm の範囲と設定した。

図 3.3.1.2(2)-9 に溶接及び SP による応力とひずみの履歴経路を示す。本解析では溶接残留応力解析後、要素試験体の表層部に溶接と SP が重畳した残留応力値を再現させるため、図中のピンク実線で示すように、SP 後の応力場を模擬するため、仮想的に塑性ひずみの負荷・除荷を行った。

SP による残留応力解析は、表 3.3.1.2(2)-1 に示す溶接残留応力解析と同じ解析モデルにて実施した。

#### ② 解析結果

SP による残留応力解析結果を図 3.3.1.2(2)-10 から図 3.3.1.2(2)-13 に示す。それぞれ図 3.3.1.2(2)-10 は SP による残留応力を付与した母材部における残留応力分布、図 3.3.1.2(2)-11 から図 3.3.1.2(2)-13 は SP による残留応力を付与した溶接部近傍の残留応力分布である。

図 3.3.1.2(2)-10 の母材部の残留応力については、溶接部から十分離れた位置の応力として溶接中心から 50 mm 離れた位置の解析結果を示す。板厚方向の応力分布は図

3.3.1.2(2)-10(c)及び(d)に示すとおり、表面及び裏面に詳細なメッシュを設定することにより、1 mm 深さまでの SP による圧縮残留応力の分布を再現できていることを確認した。

図 3.3.1.2(2)-12 及び図 3.3.1.2(2)-13 は溶接部近傍の表層部における残留応力解析結果と測定結果の比較を示す。要素試験体での測定結果が約-700MPa から-900MPa なのに対し、解析結果は約-800MPa となっており、要素試験の結果を概ね模擬できている。溶接部近傍の SP による残留応力については、SP による圧縮残留応力を模擬した塑性ひずみを付与する手法を用いることで、溶接線直交方向・溶接線平行方向いずれの残留応力も溶接による残留応力分布の影響を受けることなく、均一な圧縮残留応力を再現することができており、本解析手法の妥当性が確認できた。

#### 4) 切断模擬解析

##### ① 解析条件

切断模擬解析は、切り出しに伴う残留応力の変化を求めるため、3次元解析モデルを用いて実施した。

3次元解析モデルは、図 3.3.1.2(2)-14 に示す通り 3.3.1.2(2)2)項及び3)項の2次元解析モデルの平行押し出しにより生成し、固有ひずみのマッピングにより残留応力を再現した。なお、解析ケースとして、溶接と SP による残留応力を重畳させたモデル(溶接+SP)と、溶接残留応力のみを付与したモデル(溶接のみ)について、それぞれ解析を実施した。

切断模擬解析の解析モデル諸元を下記に示す。

- ・ 解析コード : Abaqus Ver.2019
- ・ 解析モデル : 3次元モデル  
(節点数:1155441、要素数:1091016)
- ・ 要素タイプ : C3D8R(8節点六面体要素)
- ・ 切断模擬方法 : 切り出す領域外の縦弾性係数を小さくすることで模擬

##### ② 解析結果

溶接と SP による残留応力を重畳させたモデルにおける切断模擬解析結果を図 3.3.1.2(2)-15 から図 3.3.1.2(2)-26 に、溶接残留応力のみを付与したモデルにおける切断模擬解析結果を図 3.3.1.2(2)-27 から図 3.3.1.2(2)-38 にそれぞれ示す。

図 3.3.1.2(2)-15 から図 3.3.1.2(2)-26 より、溶接+SP の解析結果においては、架構切断及び中間切断による残留応力の影響は軽微であり、最終切断時に残留応力が大きく変化することを確認した。試験体切断後に圧縮応力が保持される結果は、要素試験結果にも見られることから、本解析は要素試験を模擬できており、実機からの試験体採取寸法の検討に用いる解析手法として、妥当であることを確認した。

応力値の大きさについて、本解析結果と要素試験結果を比較すると、図 3.3.1.2(2)-23 及び図 3.3.1.2(2)-26 より、溶接線平行方向の解析結果は最終切断時に圧縮応力が強く

なっており、要素試験結果と傾向が一致するが、溶接線直交方向については、要素試験では圧縮応力が増加する一方で、解析では圧縮応力が緩和する結果となっており、両者に差異が見られた。これは、本解析においては二次元の残留応力解析の結果を一様に付与した三次元モデルを使用したため、応力分布について、要素試験と相違が生じたためと考えられる。

図 3.3.1.2(2)-27 から図 3.3.1.2(2)-38 より、溶接のみの解析結果においては、切断に伴い溶接による残留応力が変化することを確認した。溶接のみの結果においても、架構切断及び中間切断による残留応力の影響は軽微であり、最終切断時に残留応力が大きく変化することを確認した。溶接+SP の結果である図 3.3.1.2(2)-23 及び図 3.3.1.2(2)-26 と、溶接のみの結果である図 3.3.1.2(2)-35 及び図 3.3.1.2(2)-38 を比較すると、溶接+SP の解析結果における最終切断時に残留応力が大きく変化する傾向は、溶接による残留応力の変化によるものであることが確認できる。

また、図 3.3.1.2(2)-33 から図 3.3.1.2(2)-38 より、溶接線平行方向では溶接残留応力による引張応力が減少するが、溶接線直交方向では溶接残留応力による引張応力が増加する結果となった。これは、溶接+SP における表面圧縮応力の変化に対応しており、切断に伴う圧縮応力の変化は溶接残留応力によるものであると考えられる。

## 5) 要素試験体の模擬解析のまとめ

要素試験体を模擬した解析モデルを作成し、要素試験体の切断過程における SP 施工部位の表層部残留応力の測定結果との比較を行うことで、要素試験を再現した解析モデルを検証した。要素試験体の模擬解析として、溶接残留応力及び SP 残留応力を詳細に模擬可能な解析モデルを作成し、SP 圧縮残留応力付与した要素試験体の切断を模擬した解析手法を検討した。

溶接残留応力解析は、要素試験体の溶接部を対象に、国内許認可申請や高経年化評価にて実績のある解析手法とした。溶接残留応力解析の結果、HAZ 部で引張残留応力となり、要素試験体の溶接後の HAZ 近傍の表層部残留応力の測定結果の傾向を模擬できていることを確認した。

次に SP による残留応力解析は、溶接残留応力解析後に、解析モデルの表層部に一定の圧縮応力を生じさせる塑性ひずみを付与する解析を採用することで、SP による均一な圧縮残留応力を再現し、表層部から深さ 1mm 程度の応力分布が SP 施工後の深さ方向の残留応力分布を模擬していることを確認した。

切断模擬解析では、上記の溶接残留応力及び SP 残留応力を付与した 3 次元モデルを用いて切断を模擬した解析をすることで、切断による残留応力の変化を確認し、要素試験体の切断時 SP 施工部位表層部の残留応力測定結果と比較し、それぞれの切断ステップでその測定結果を再現していること、最終切断後(100mm×100mm)で圧縮応力が保持されることを確認した。

以上より、溶接残留応力及び SP 残留応力を重畳した複合的な応力状態を模擬して

切断の影響を評価する解析的アプローチとして検討した要素試験体解析モデルの妥当性が確認できた。

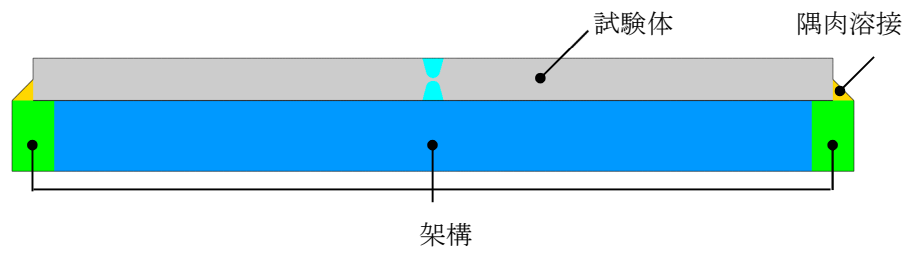
<参考文献>

- [3.3.1.2(2)-1] 発電用原子力設備規格 設計・建設規格<第Ⅱ編 高速炉規格>、日本機械学会
- [3.3.1.2(2)-2] 原子炉圧力容器の異材溶接部に関する高温材料特性データ集、独立行政法人 原子力安全基盤機構

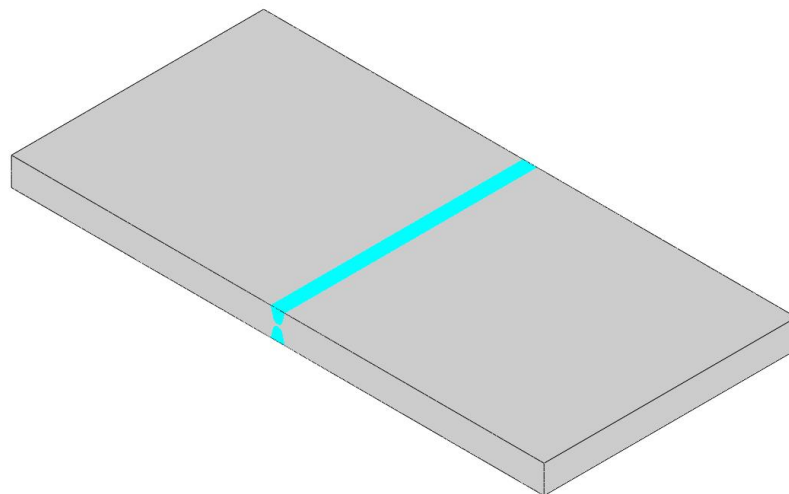
表 3.3.1.2(2)-1 溶接残留応力の解析条件

① 解析コード	Abaqus Ver.2019	
② 解析モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 2次元一般化平面ひずみ要素を用いてモデル化 (節点数：21008、要素数：20204)</li> <li>・ 溶接金属部の形状は開先形状からモデル化 (開先形状：両側開先、溶接パス数：23 パス)</li> </ul>	
③ 要素タイプ	温度解析	DC2D4 (4 節点四辺形要素)
	応力解析	CPEG4R(4 節点四辺形要素)
④ 境界条件	温度解析	表面に熱伝達境界 雰囲気温度 20℃(一定)
	応力解析	溶接時の拘束条件を模擬 架構は板厚設定機能 *1 を適用して模擬
⑤ 入熱パターン	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 入熱パターンは台形波とし、溶接金属に相当する領域に内部発熱で与える</li> <li>・ 要素試験体製作時の溶接速度、電流、電圧は溶接記録等のデータを参照して決定</li> <li>・ 入熱効率は入熱したパス全体が熔融温度に到達するよう設定</li> </ul>	
⑥ 材料データ	SUS304；設計・建設規格 <sup>[3.3.1.2(2)-1]</sup> 及び公開文献 <sup>[3.3.1.2(2)-2]</sup> 等	
⑦ 硬化則	ミーゼスの降伏条件、等方硬化則を用いる	
⑧ 溶接解析時の要素の取扱い	解析は、溶接記録等のデータに従い、溶接パスに対応する要素を成層させることで溶接を模擬	

注記\*1：板厚設定機能は、2次元の解析モデルに奥行き方向の厚さを設定するものである



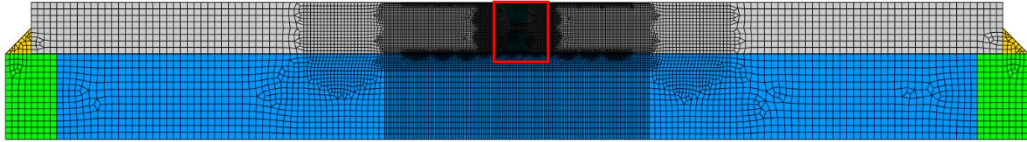
(a) 溶接残留応力解析及びSPによる残留応力解析に用いる解析モデル(2次元)



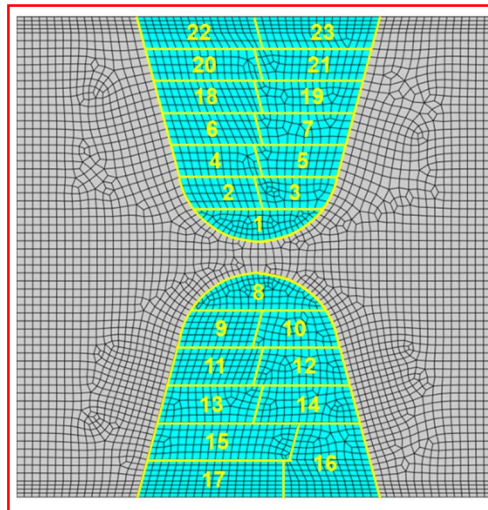
(b) 切断模擬解析モデル(3次元)

図 3.3.1.2(2)-1 要素試験体の模擬解析に用いる解析モデル





(a) 全体図



(b) 溶接部(溶接パス順含む)

図 3.3.1.2(2)-2 2次元解析モデル(メッシュ図)

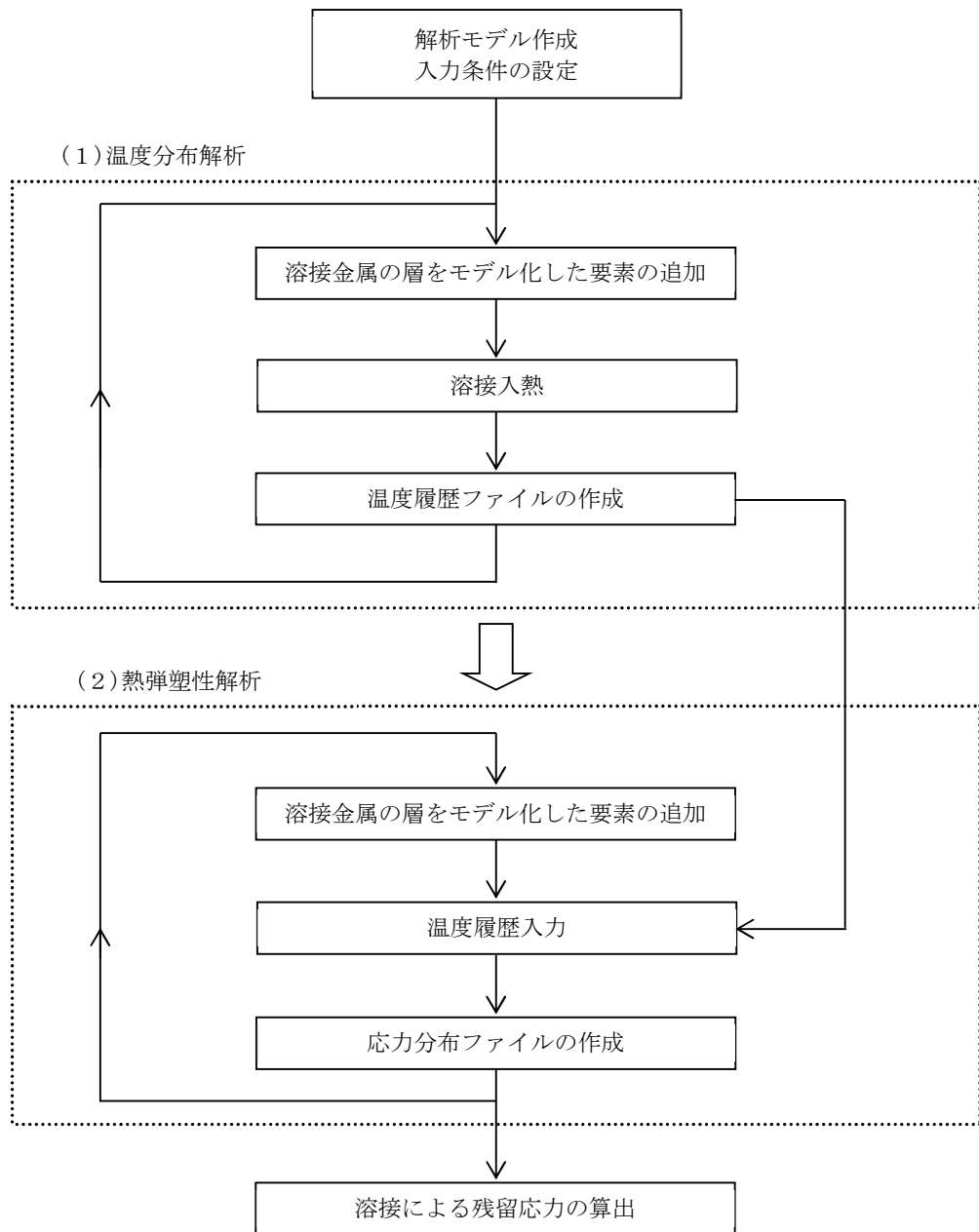
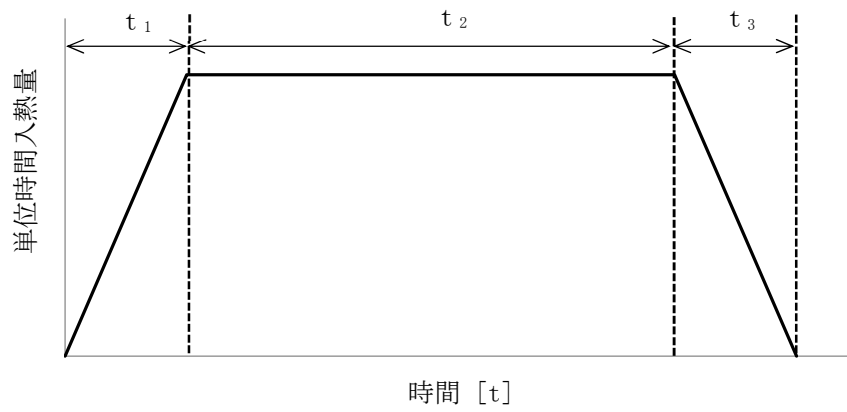
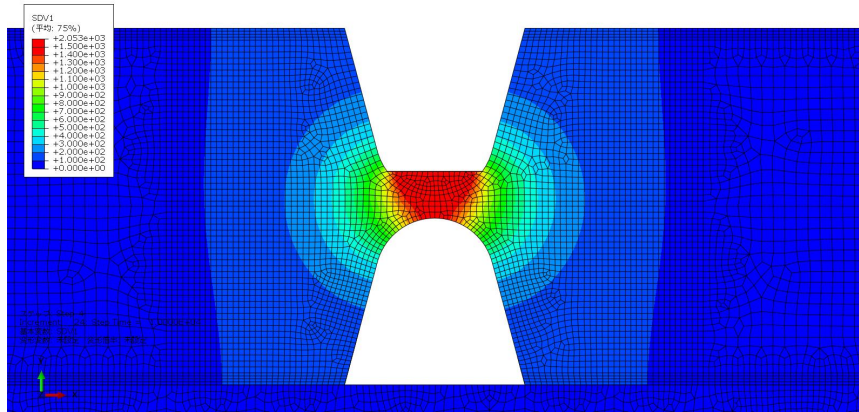


図 3.3.1.2(2)-3 溶接残留応力解析の解析手順

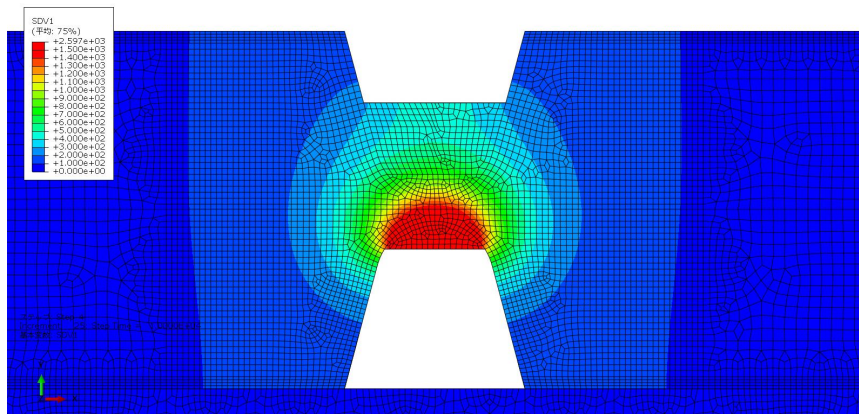


- $t_1$  : 溶接パスにトーチが近づく時間
- $t_2$  : 溶接中の時間
- $t_3$  : 溶接パスからトーチが離れる時間

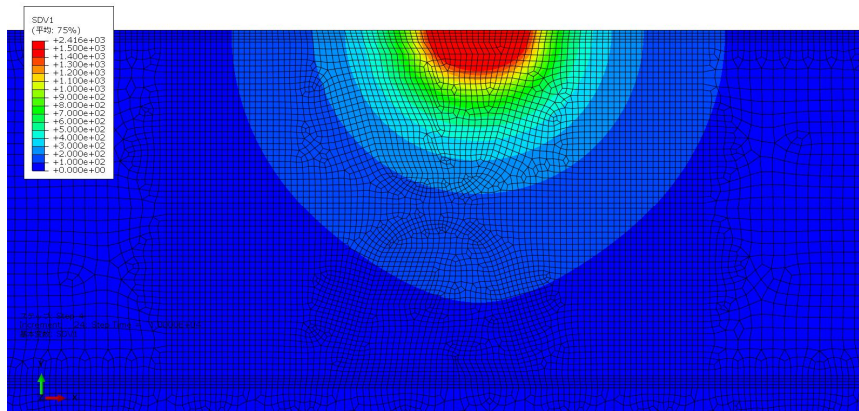
図 3.3.1.2(2)-4 溶接残留応力解析における入熱の時間変化



(a) 表面 1 パス目

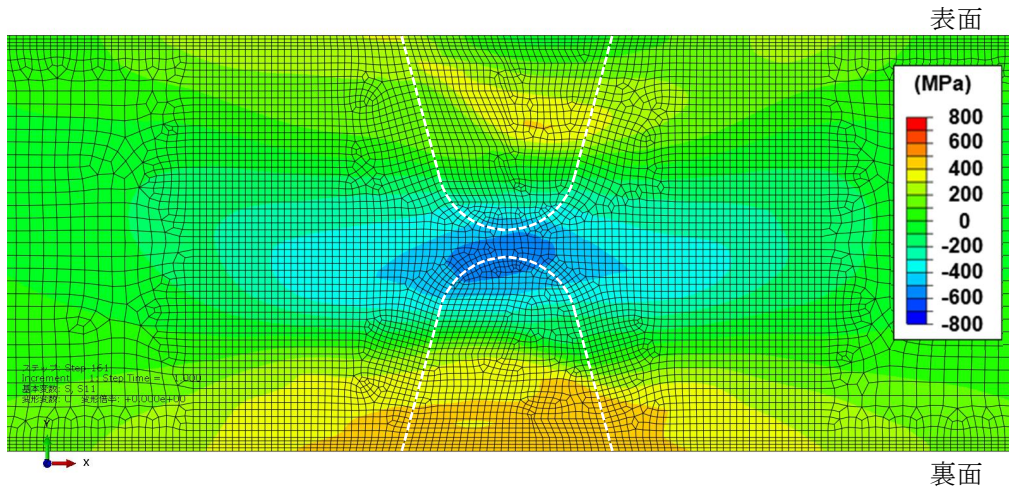


(b) 裏面 1 パス目

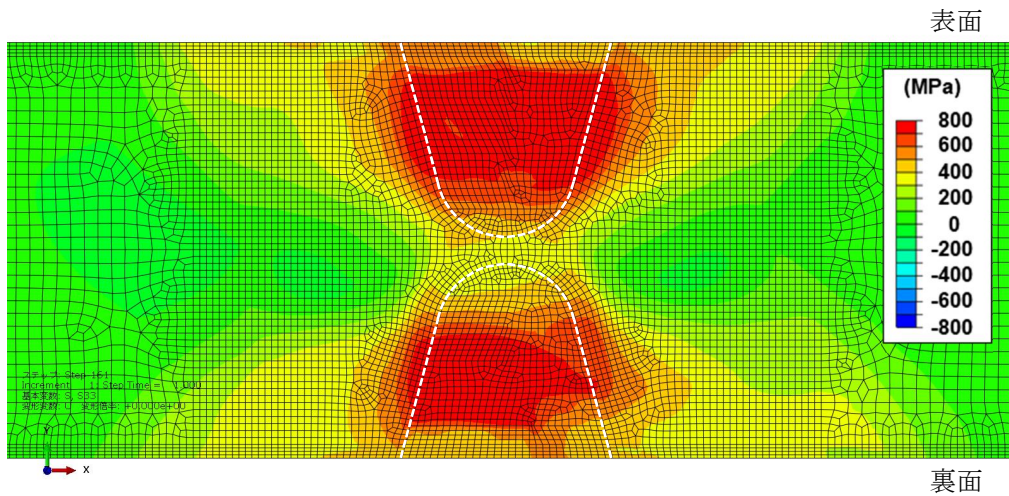


(c) 最終パス

図 3.3.1.2(2)-5 温度分布解析結果

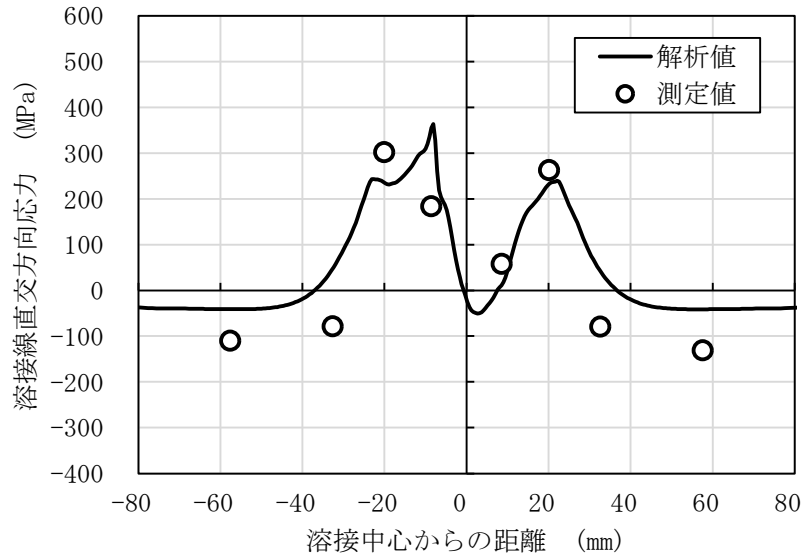


(a) 溶接線直交方向

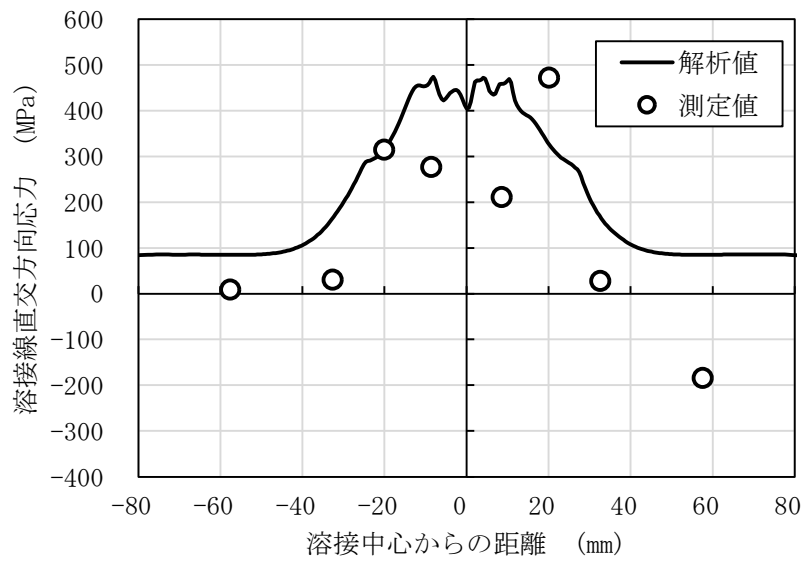


(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-6 溶接残留応力解析結果(応力分布図)

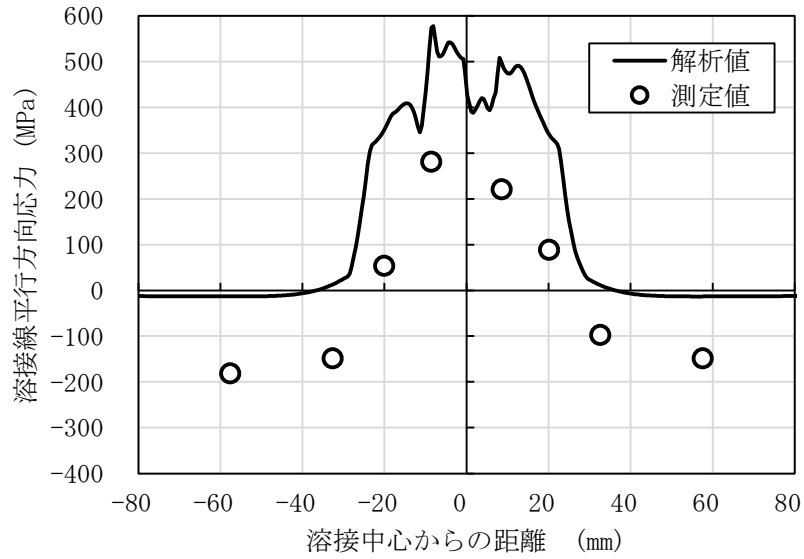


(a) 表面

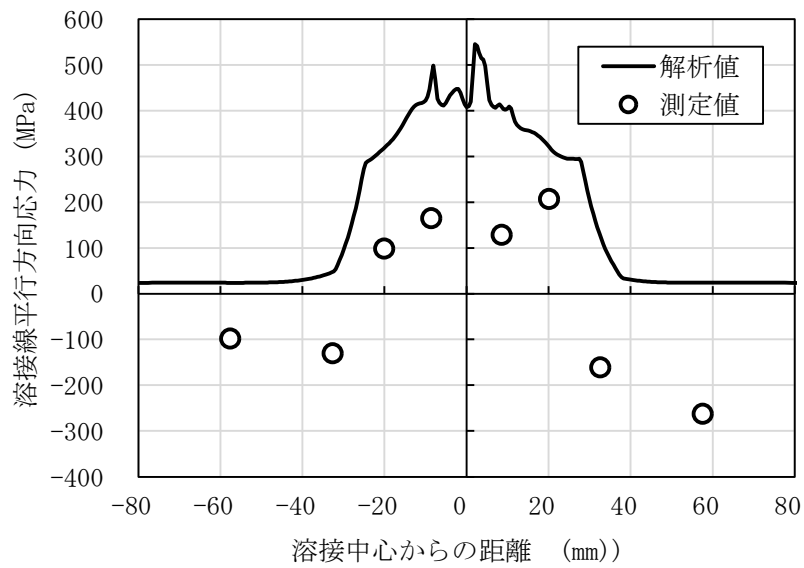


(b) 裏面

図 3.3.1.2(2)-7 溶接残留応力解析結果と要素試験結果の比較(溶接線直交方向)



(a) 表面



(b) 裏面

図 3.3.1.2(2)-8 溶接残留応力解析結果と要素試験結果の比較(溶接線平行方向)

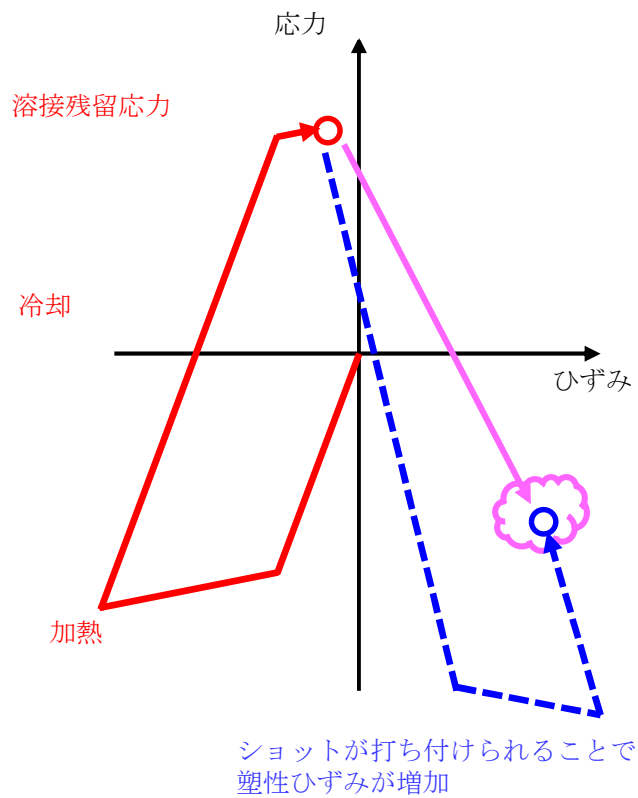
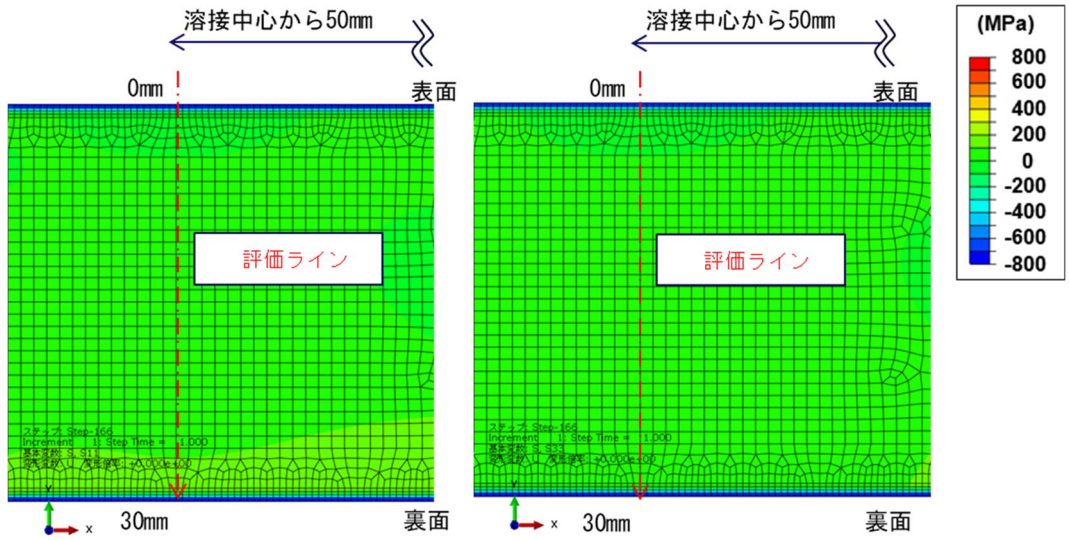


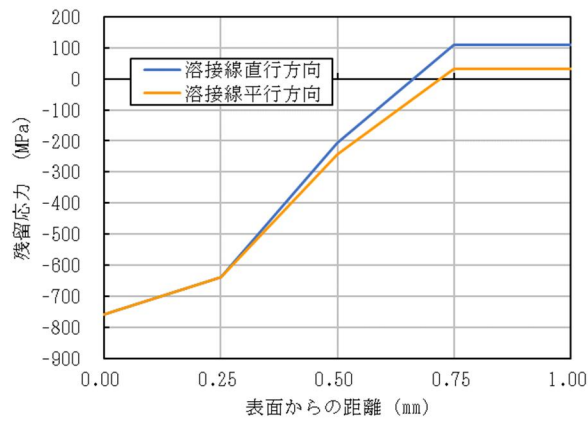
図 3.3.1.2(2)-9 溶接及び SP による応力とひずみの経路



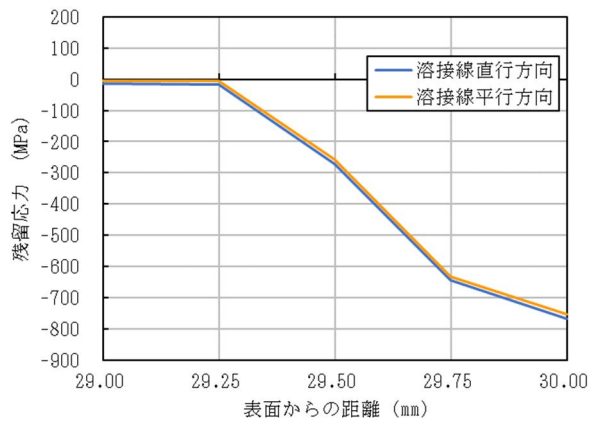


(a) 溶接線直交方向

(b) 溶接線平行方向

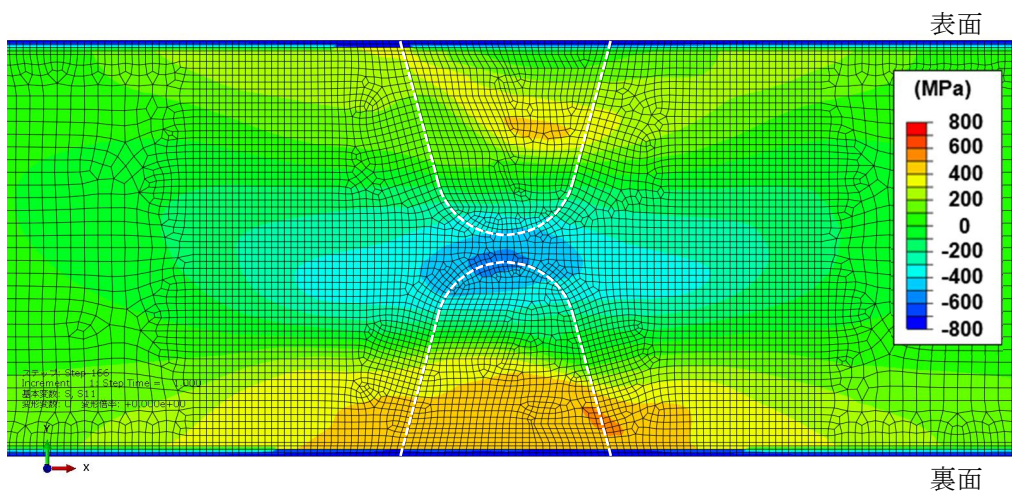


(c) 板厚方向の応力分布(表面, (a),(b)上の評価ライン)

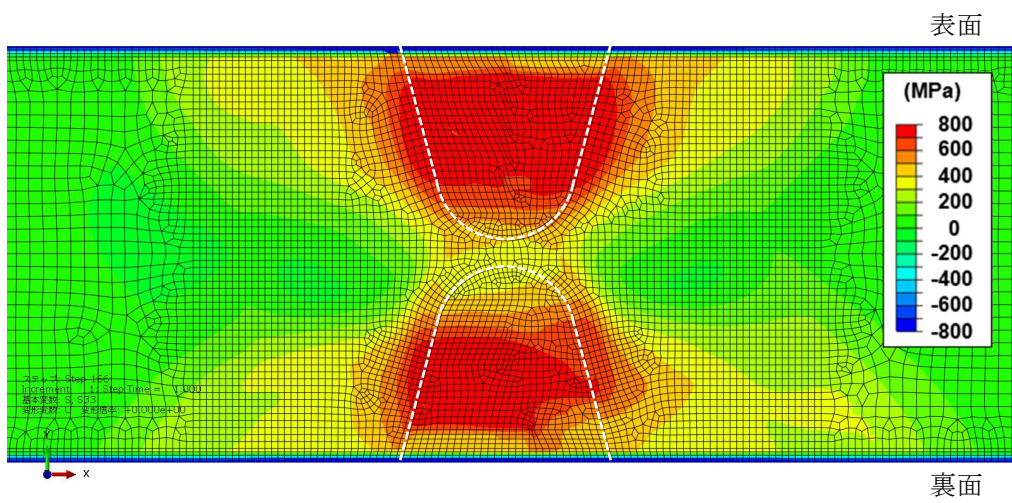


(d) 溶接線平行方向(裏面, (a),(b)上の評価ライン)

図 3.3.1.2(2)-10 SP による残留応力解析結果(母材部)

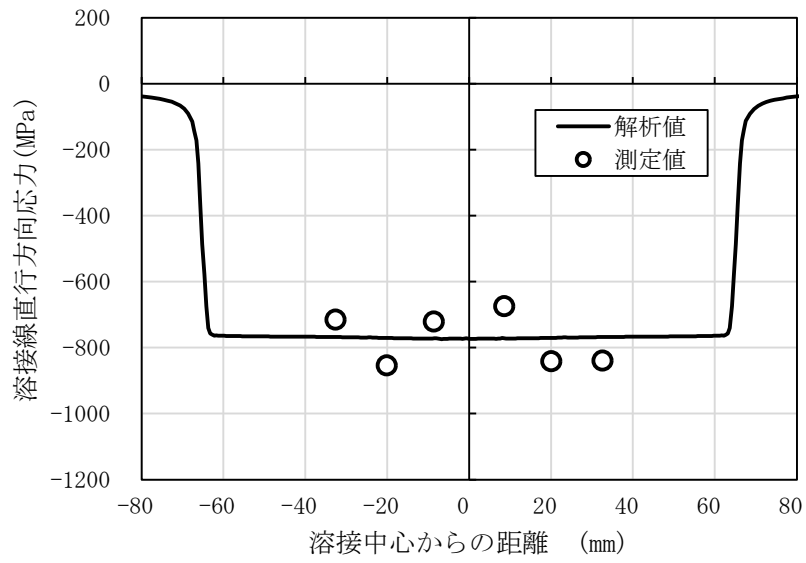


(a) 溶接線直交方向

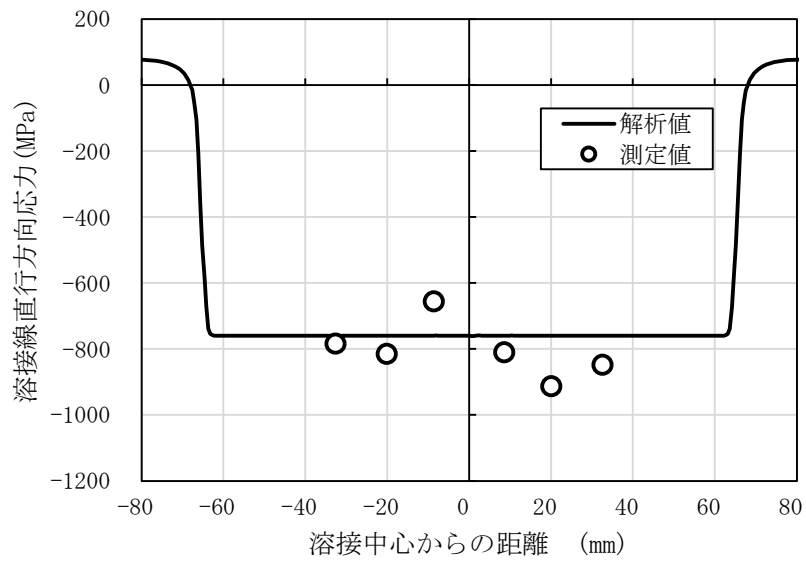


(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-11 SP による残留応力解析結果(応力分布図)

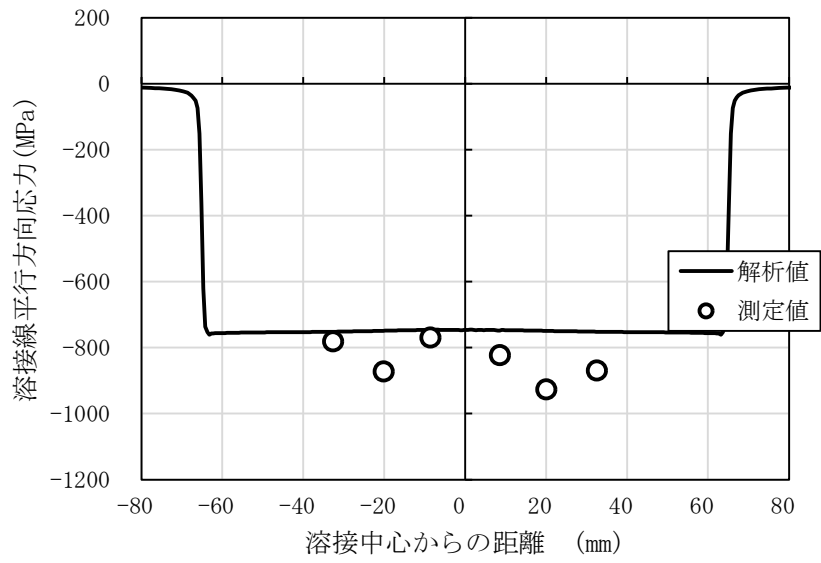


(a) 表面

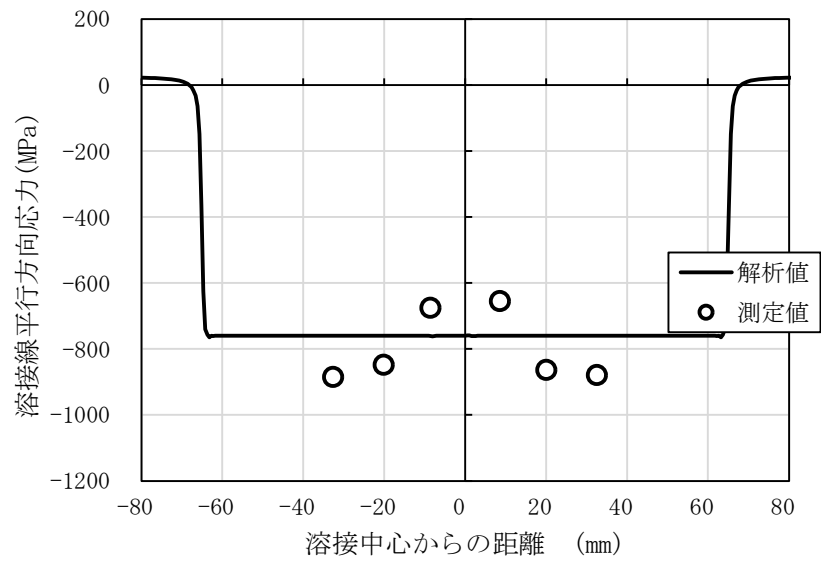


(b) 裏面

図 3.3.1.2(2)-12 SP による残留応力解析結果及び要素試験との比較  
(溶接線直交方向)



(a) 表面



(b) 裏面

図 3.3.1.2(2)-13 SP による残留応力解析結果及び要素試験との比較  
(溶接線平行方向)

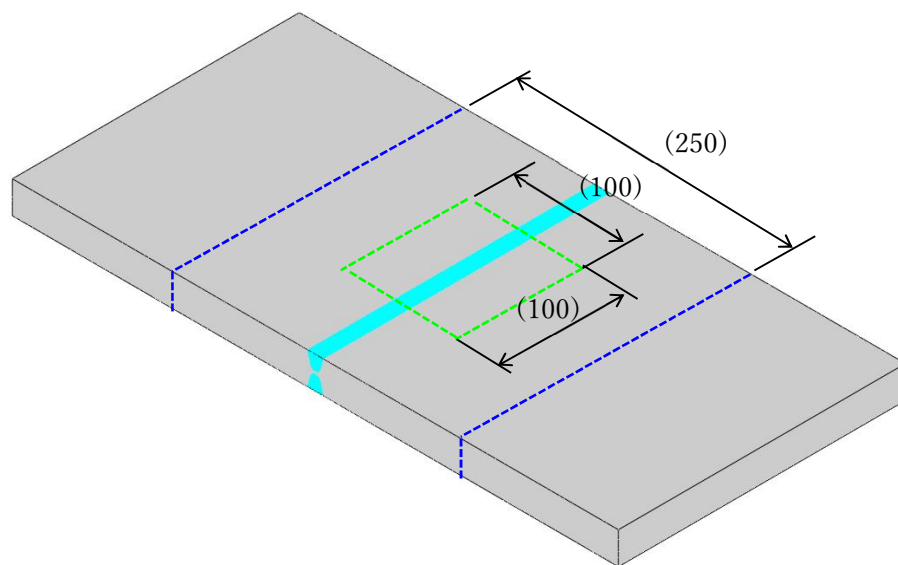
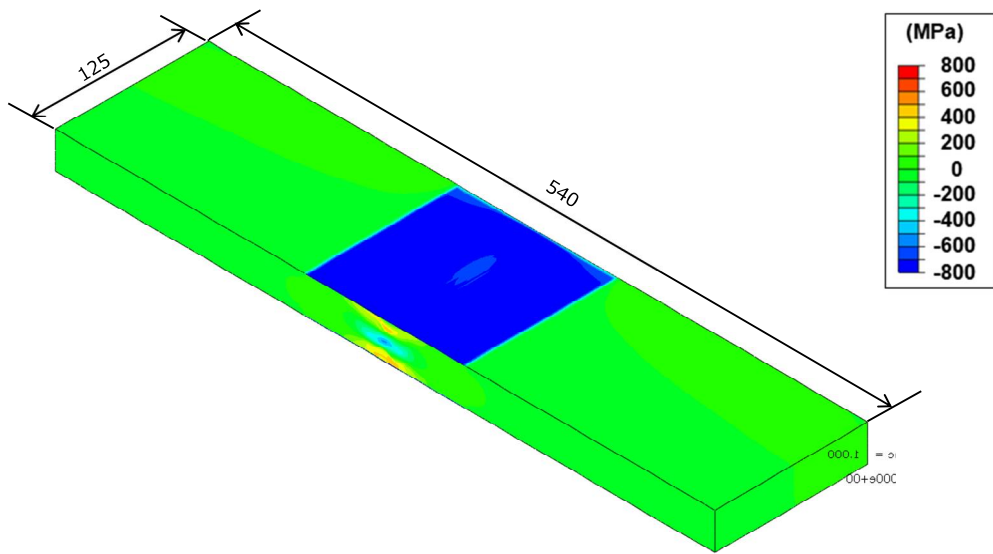
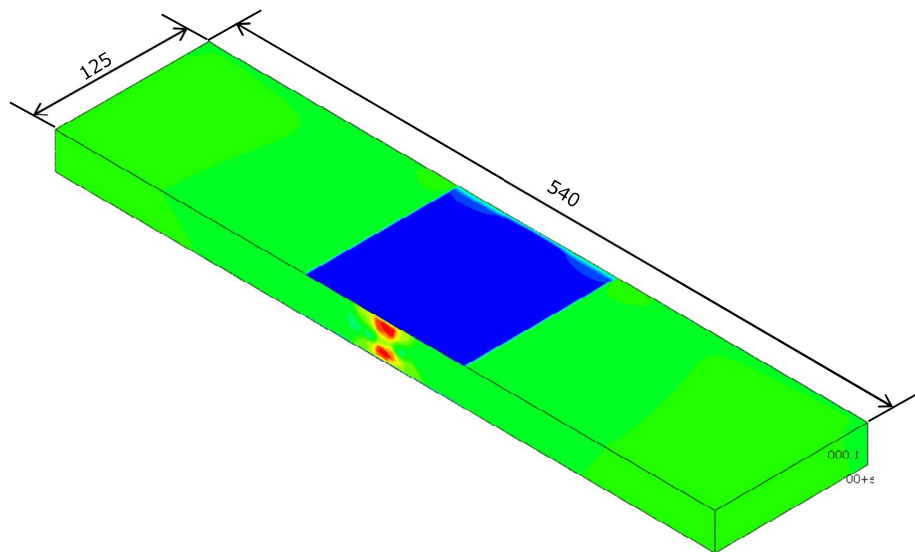


図 3.3.1.2(2)-14 3次元解析モデル



※対称面で切断した範囲を示す。

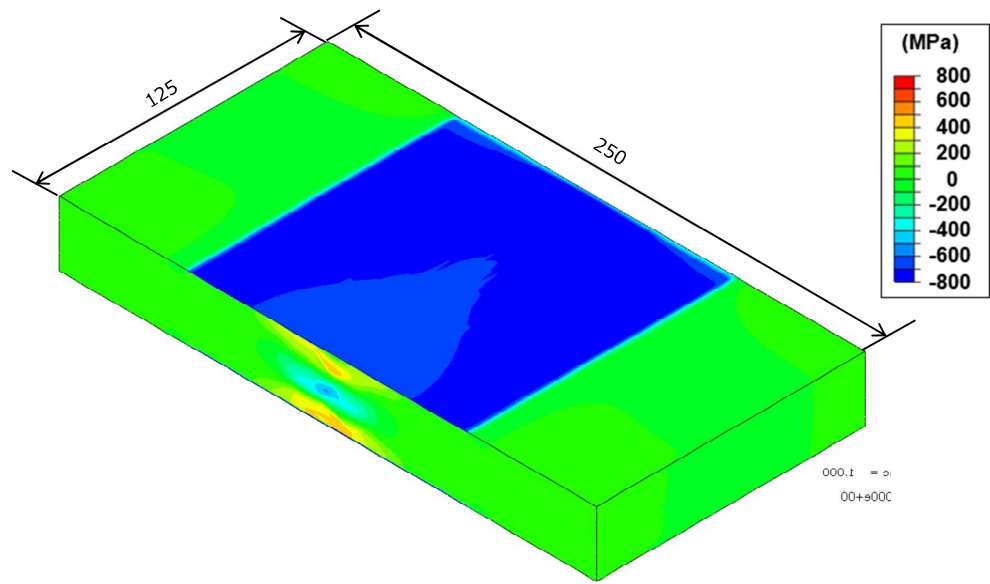
(a) 溶接線直交方向



※対称面で切断した範囲を示す。

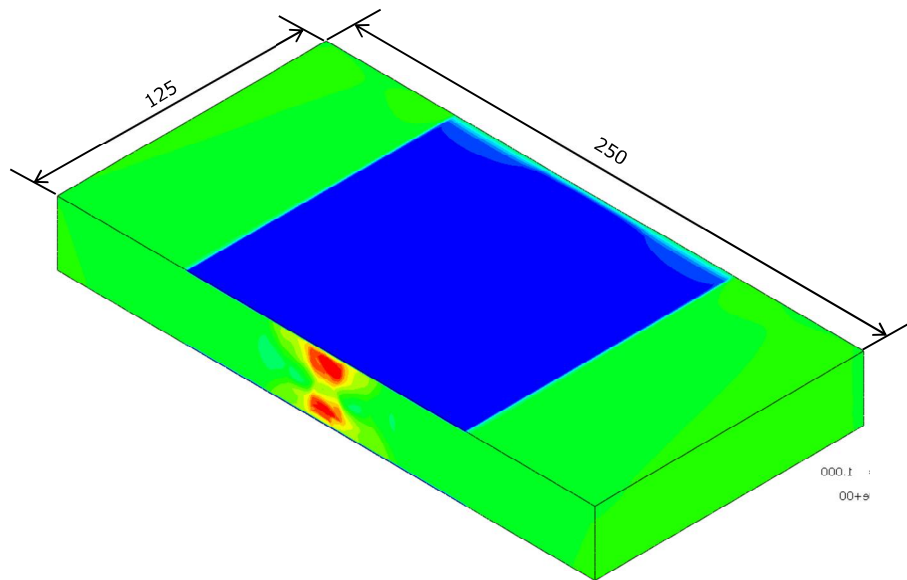
(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-15 切断模擬解析結果(溶接+SP、架構切断後、3D コンター図)



※対称面で切断した範囲を示す。

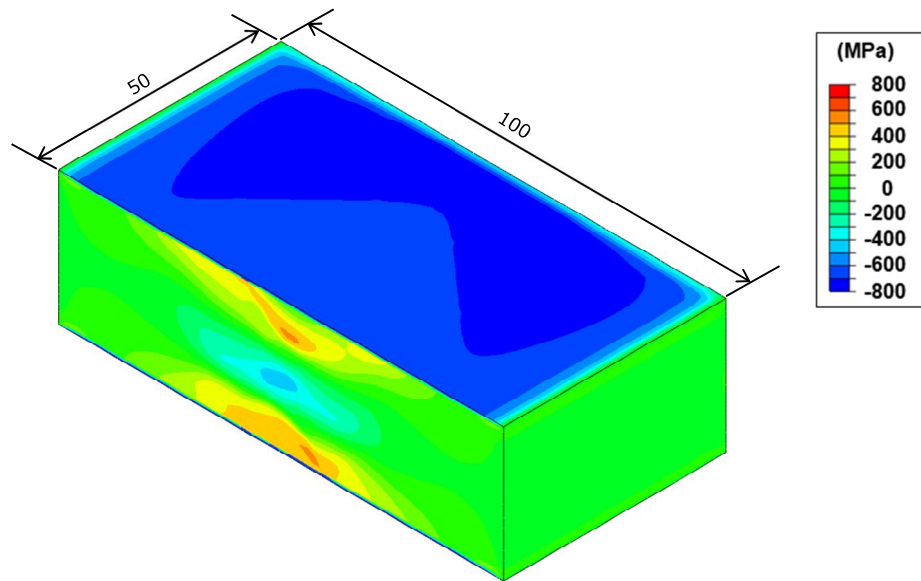
(a) 溶接線直交方向



※対称面で切断した範囲を示す。

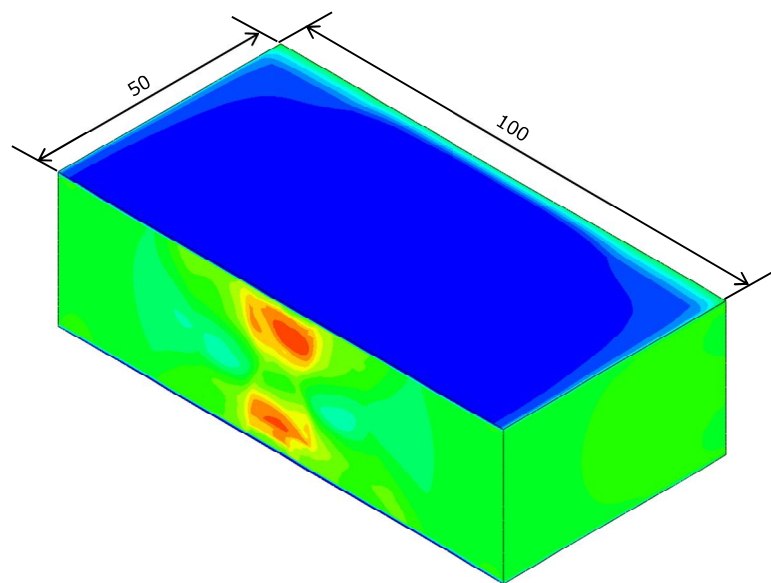
(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-16 切断模擬解析結果(溶接+SP、中間切断後、3D コンター図)



※対称面で切断した範囲を示す。

(a) 溶接線直交方向

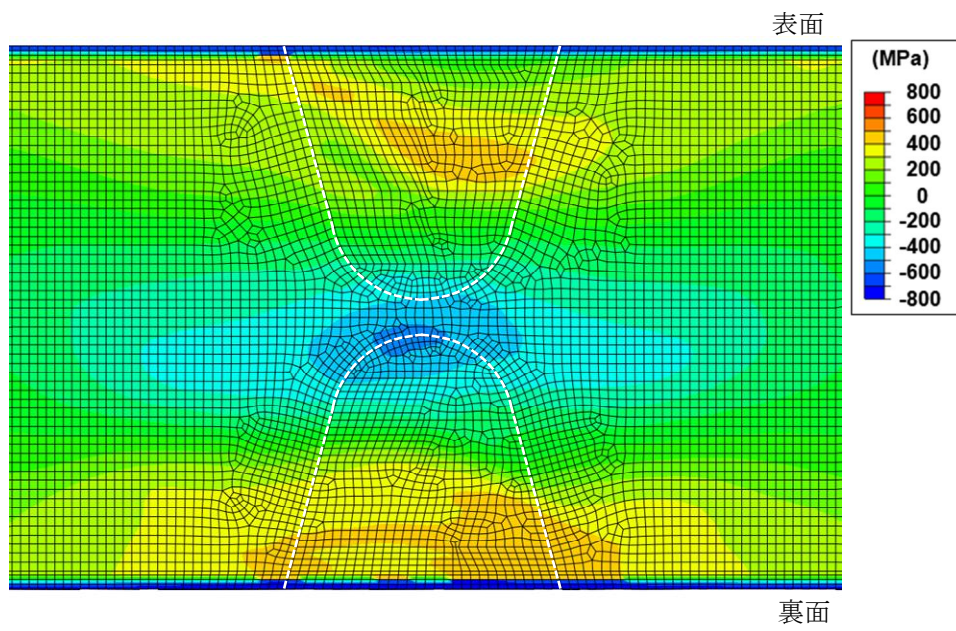


※対称面で切断した範囲を示す。

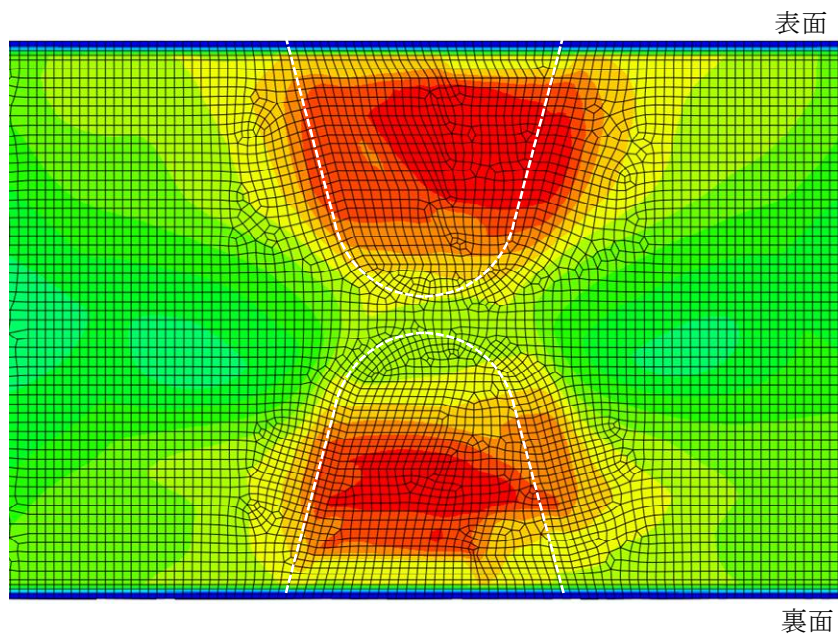
(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-17 切断模擬解析結果(溶接+SP、最終切断後、3D コンター図)



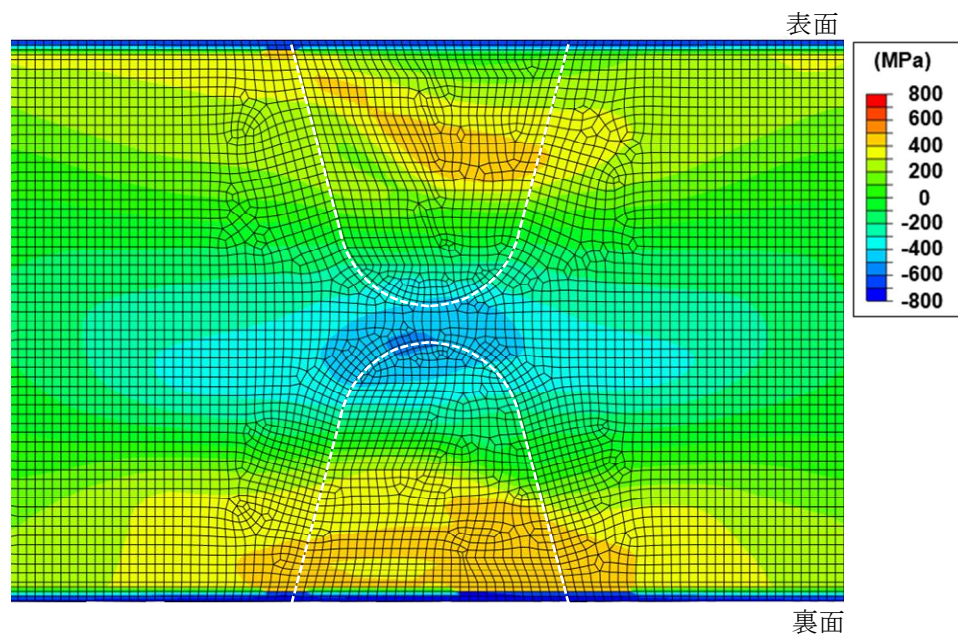


(a) 溶接線直交方向

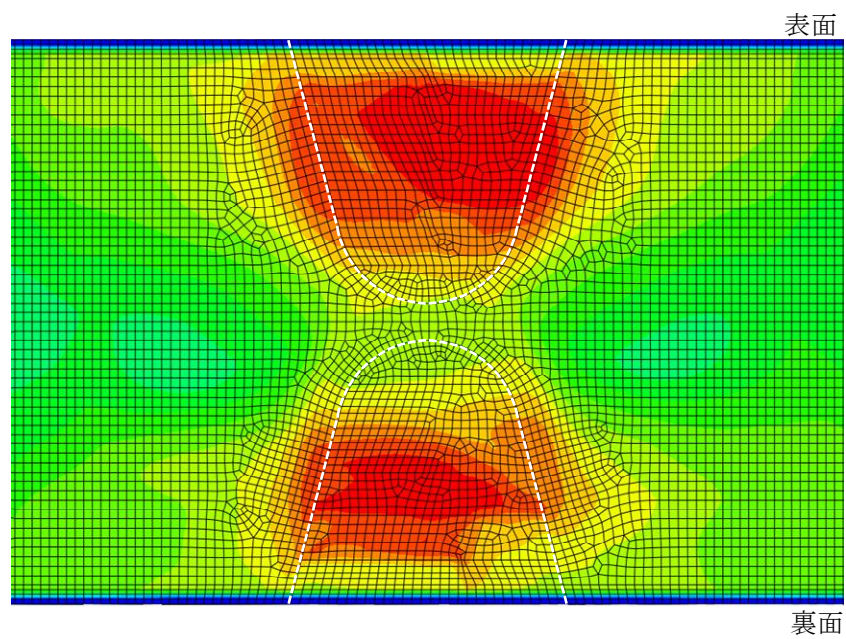


(b) 溶接線平行方向

图 3.3.1.2(2)-18 切断模擬解析結果(溶接+SP、架構切断後、溶接部拡大図)

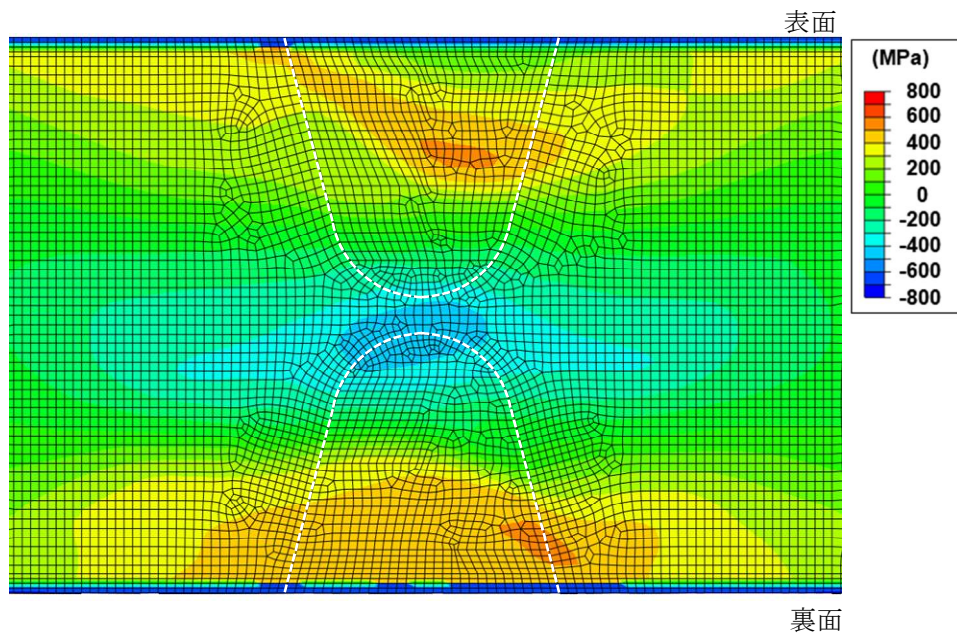


(a) 溶接線直交方向

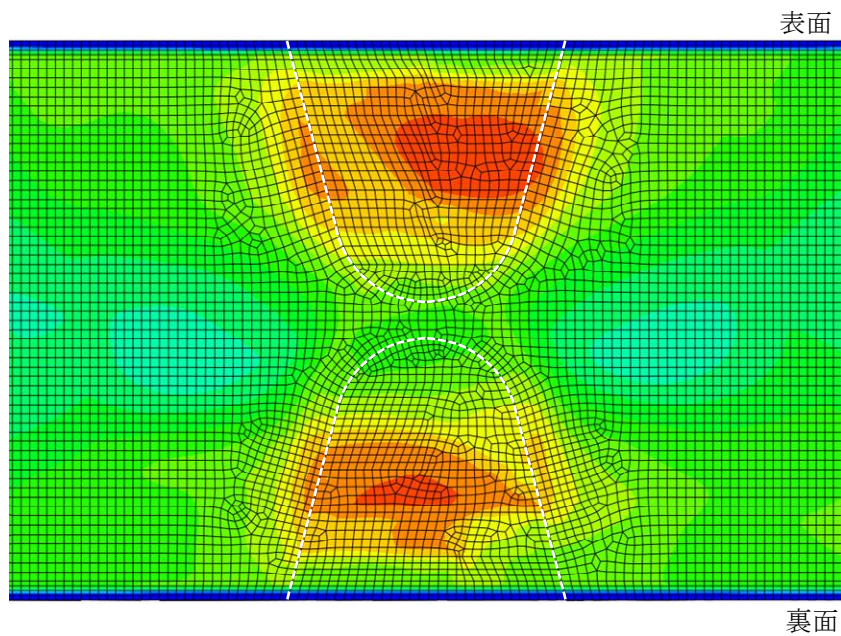


(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-19 切断模擬解析結果(溶接+SP、中間切断後、溶接部拡大図)

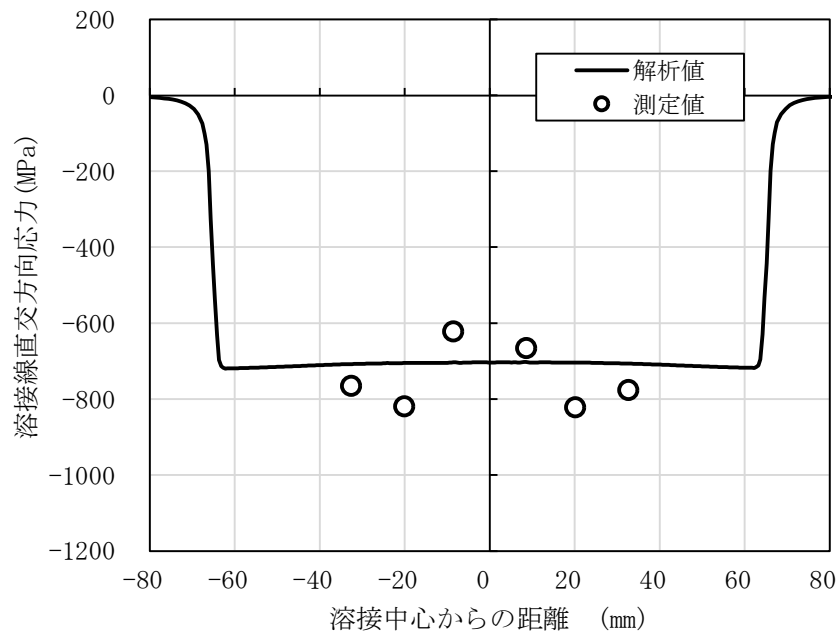


(a) 溶接線直交方向

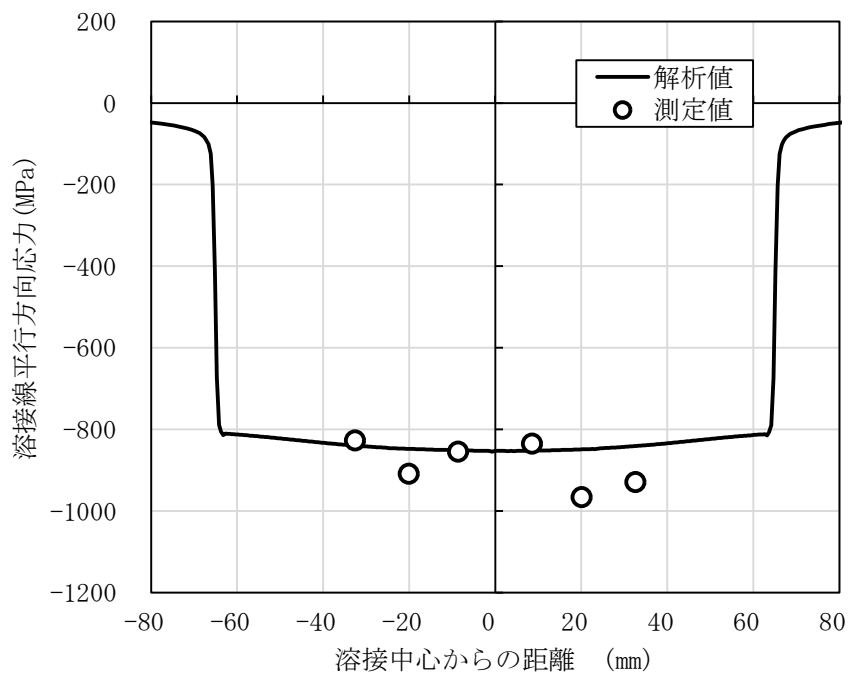


(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-20 切断模擬解析結果(溶接+SP、最終切断後、溶接部拡大図)

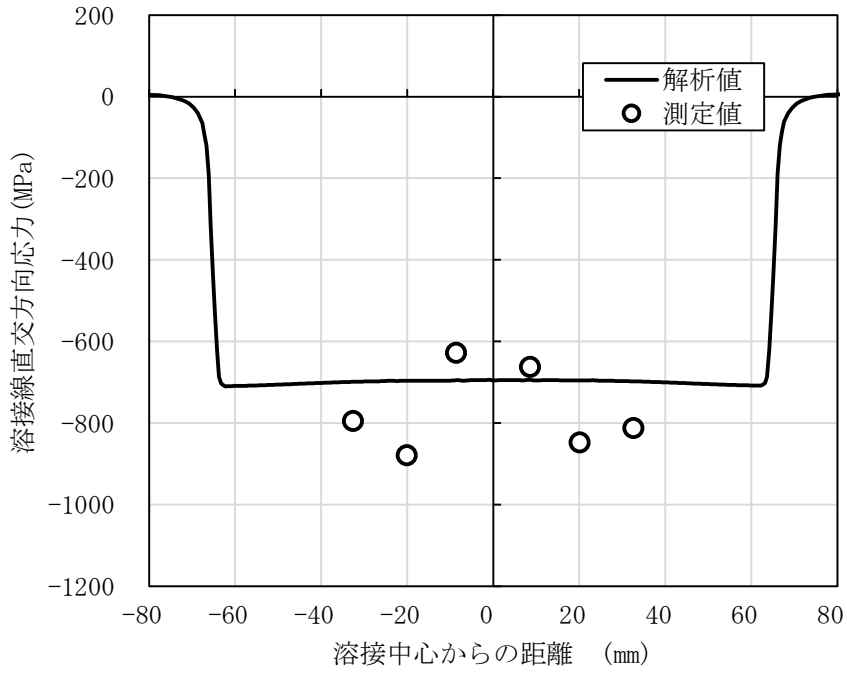


(a) 溶接線直交方向

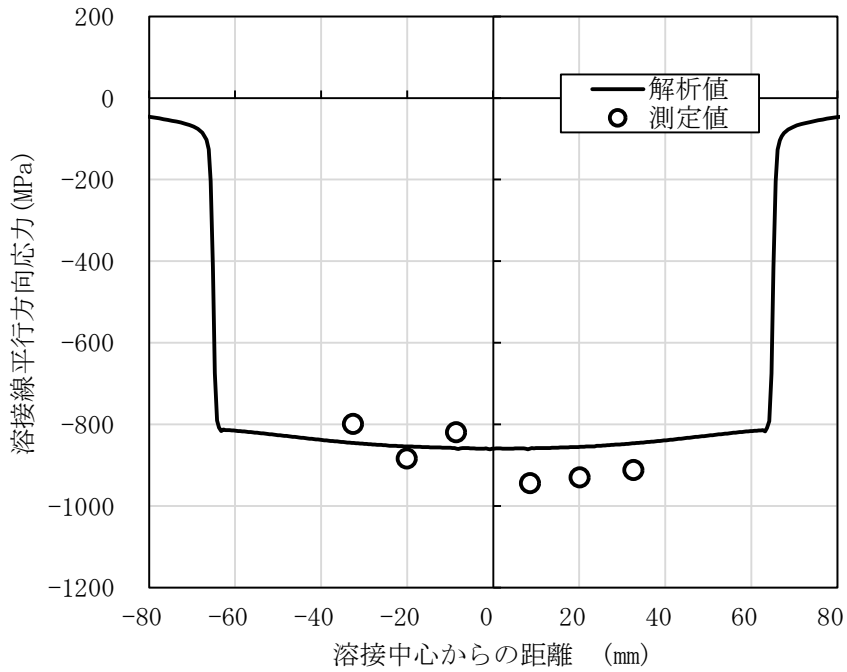


(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-21 切断模擬解析結果及び要素試験との比較  
(溶接+SP、架構切断後、表面)

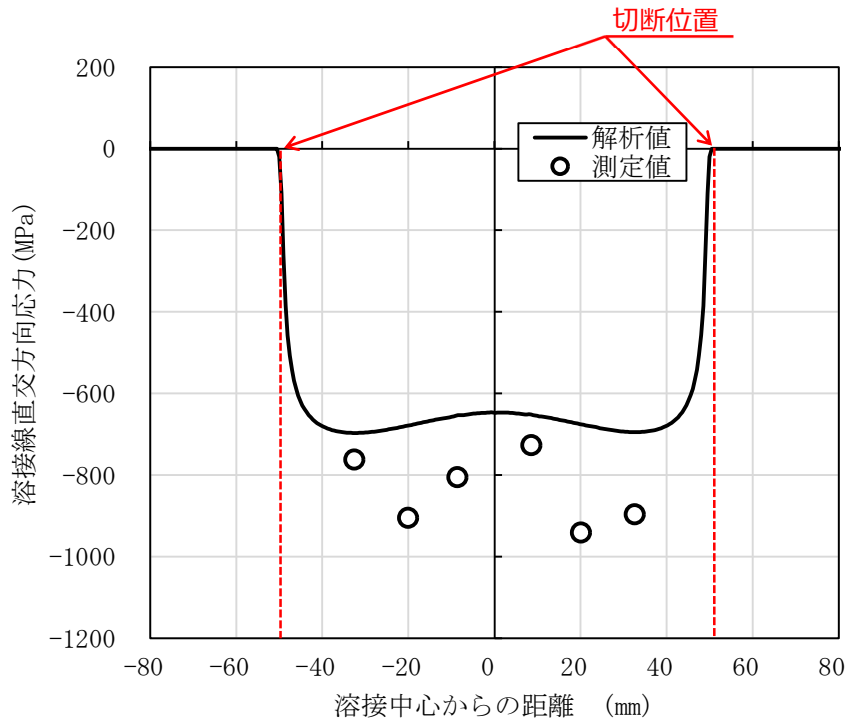


(a) 溶接線直交方向

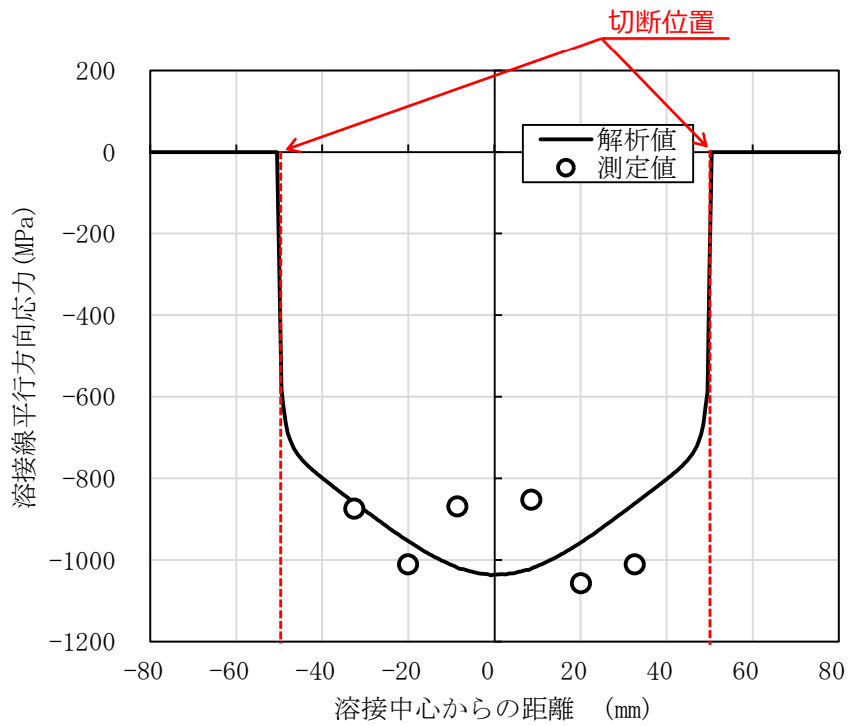


(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-22 切断模擬解析結果及び要素試験との比較  
(溶接+SP、中間切断後、表面)

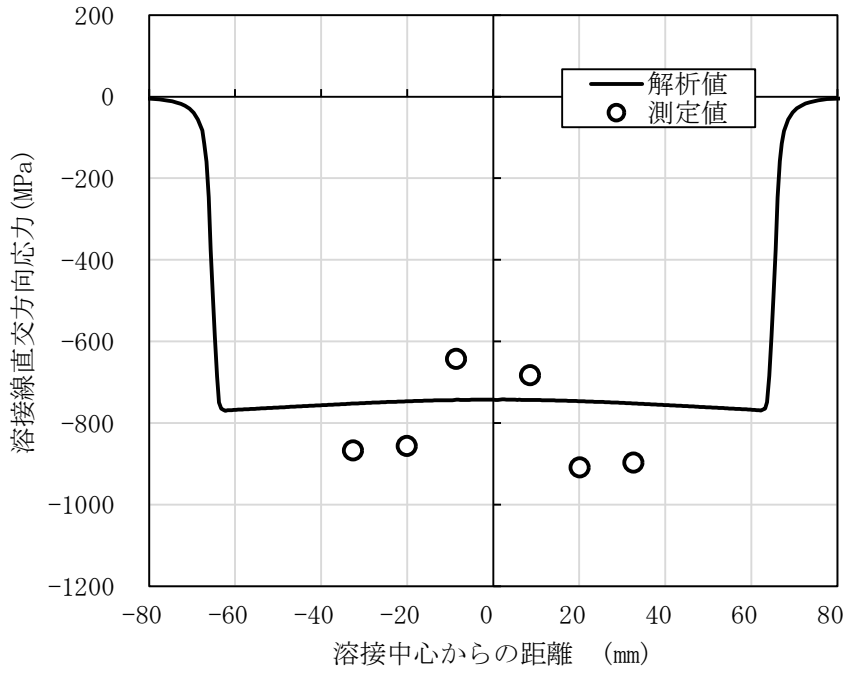


(a) 溶接線直交方向

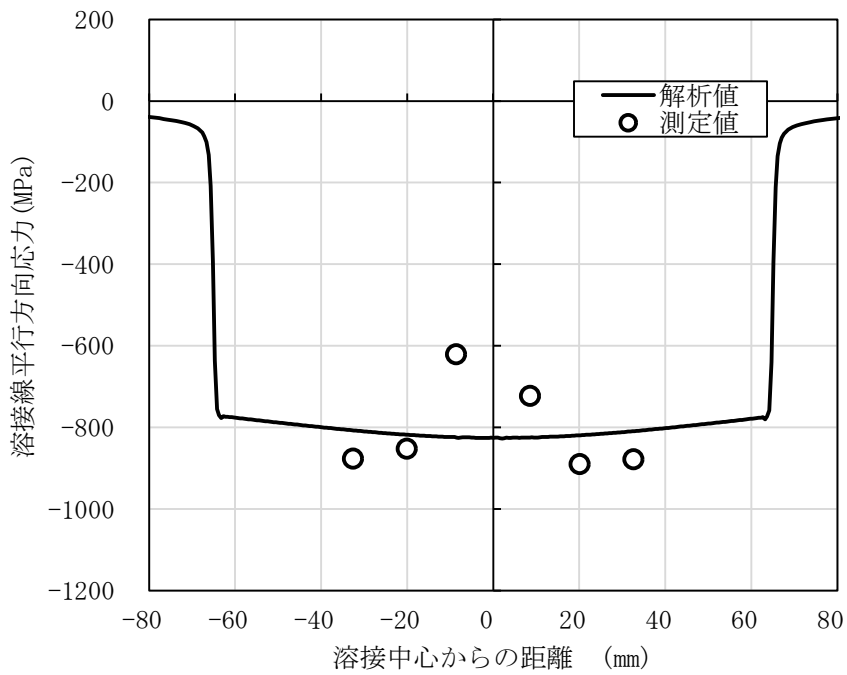


(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-23 切断模擬解析結果及び要素試験との比較  
(溶接+SP、最終切断後、表面)

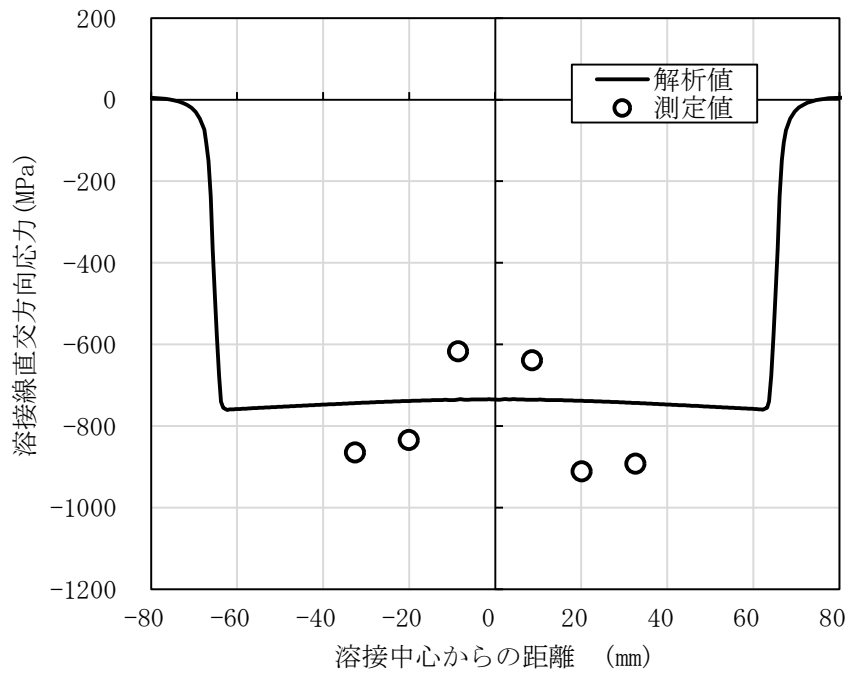


(a) 溶接線直交方向

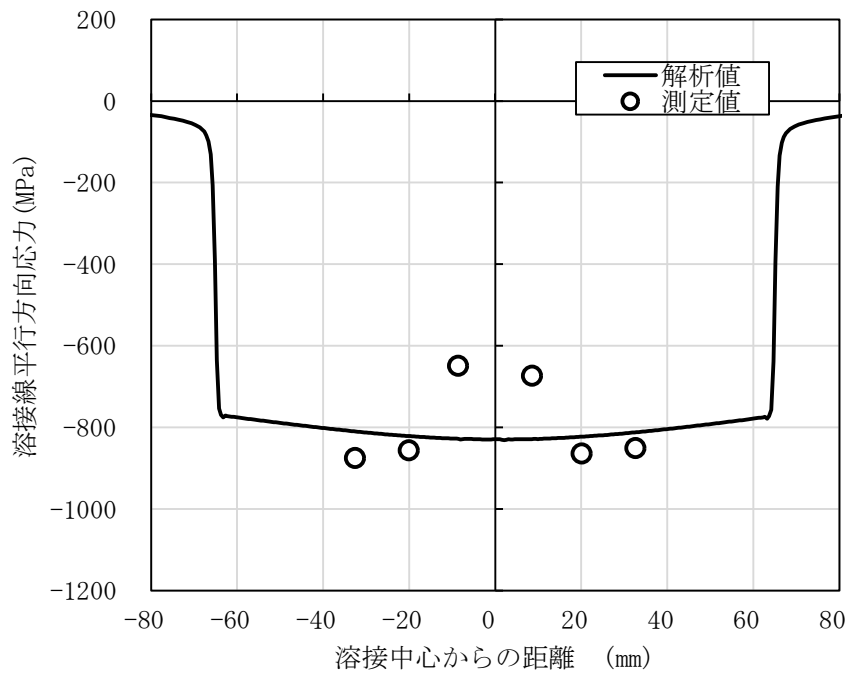


(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-24 切断模擬解析結果及び要素試験との比較  
(溶接+SP、架構切断後、裏面)



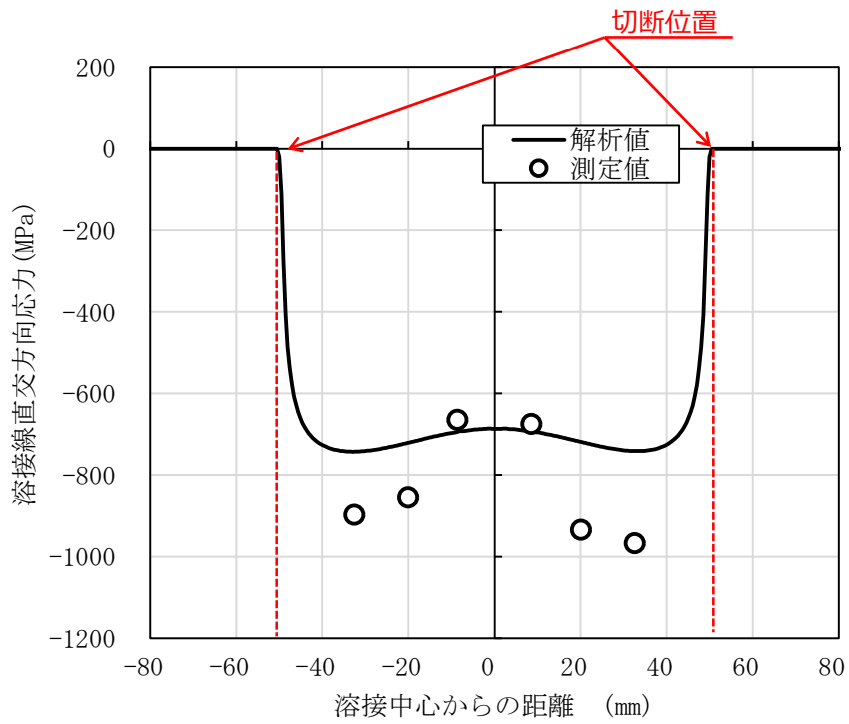
(a) 溶接線直交方向



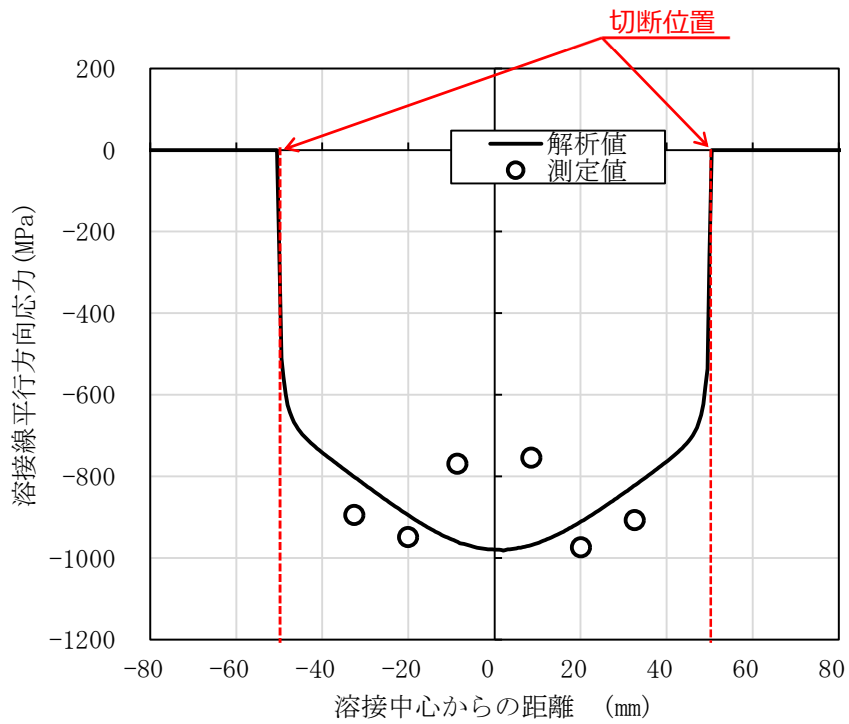
(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-25 切断模擬解析結果及び要素試験との比較  
(溶接+SP、中間切断後、裏面)



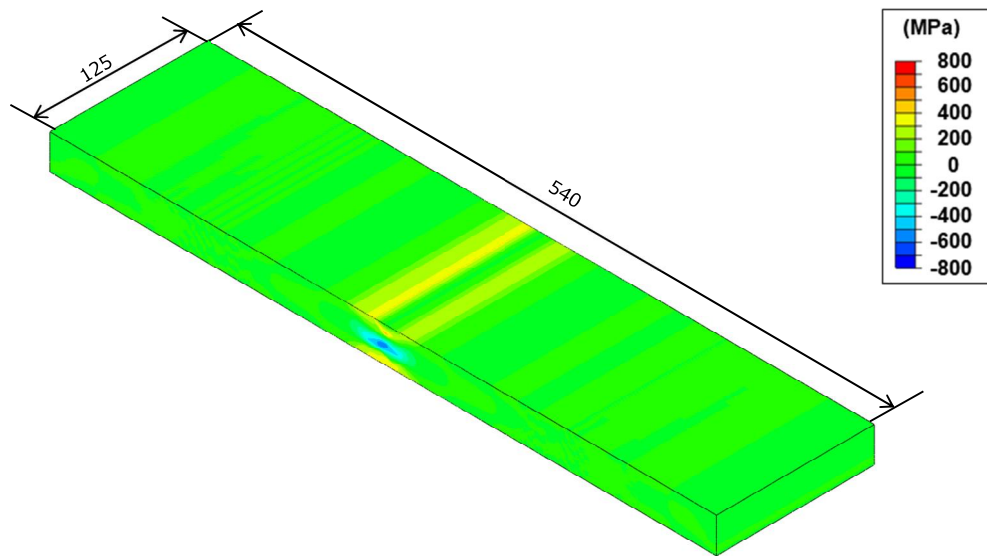


(a) 溶接線直交方向



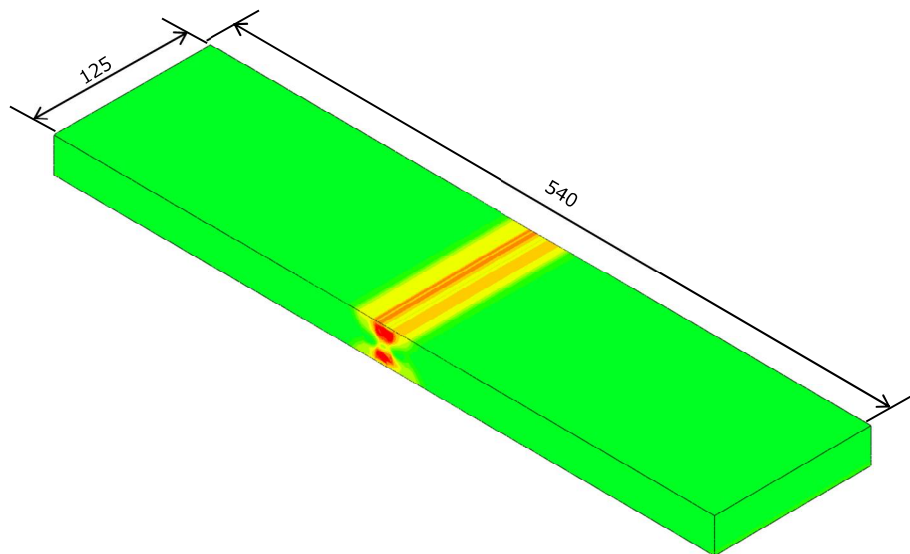
(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-26 切断模擬解析結果及び要素試験との比較  
(溶接+SP、最終切断後、裏面)



※対称面で切断した範囲を示す。

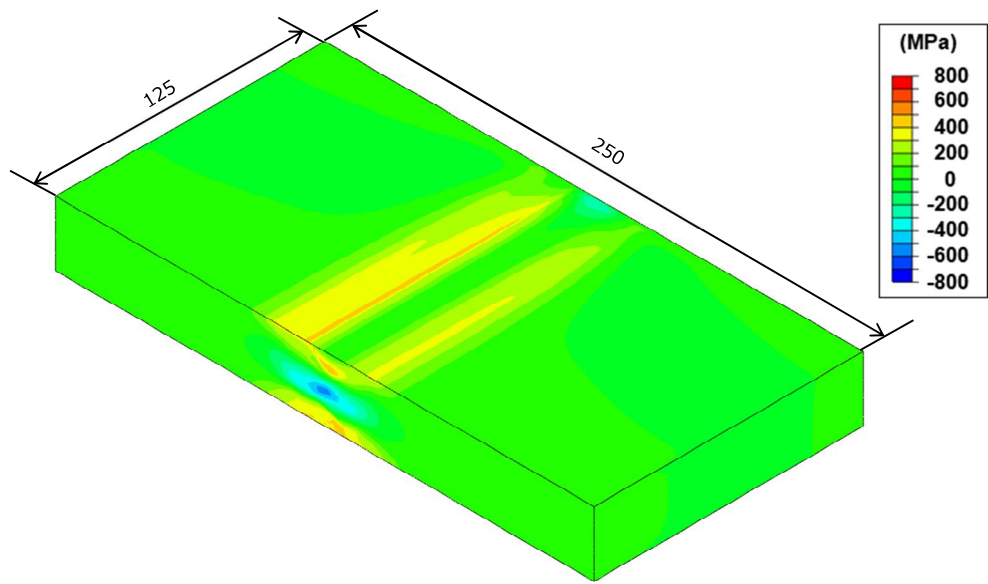
(a) 溶接線直交方向



※対称面で切断した範囲を示す。

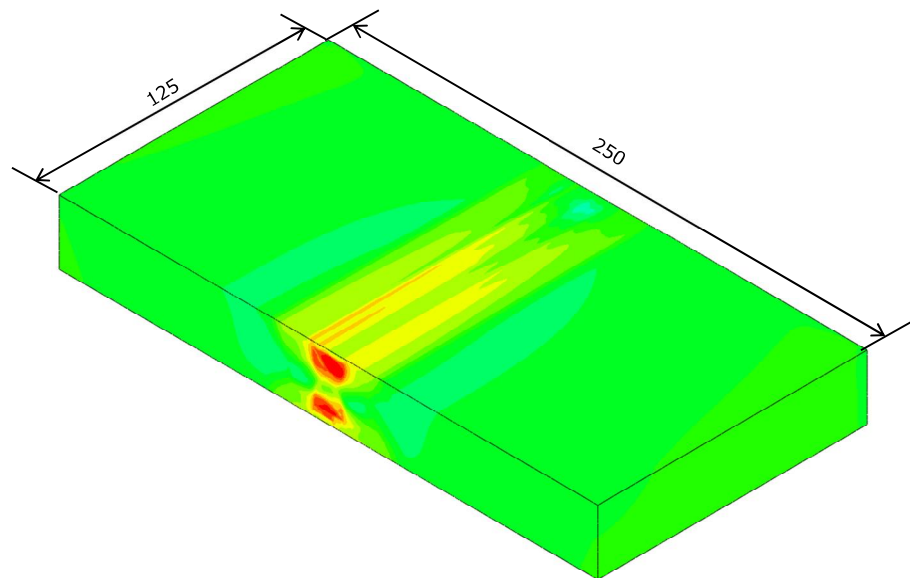
(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-27 切断模擬解析結果(溶接のみ、架構切断後、3D コンター図)



※対称面で切断した範囲を示す。

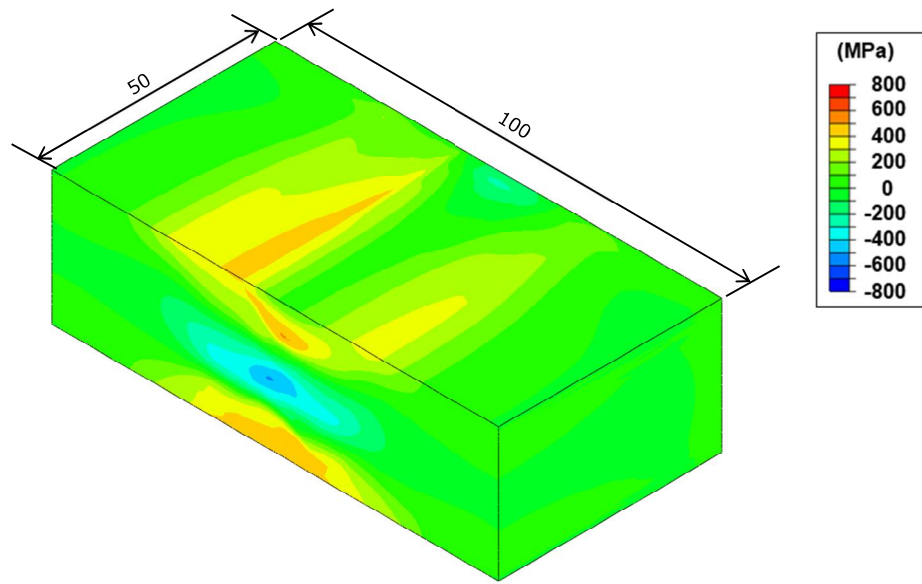
(a) 溶接線直交方向



※対称面で切断した範囲を示す。

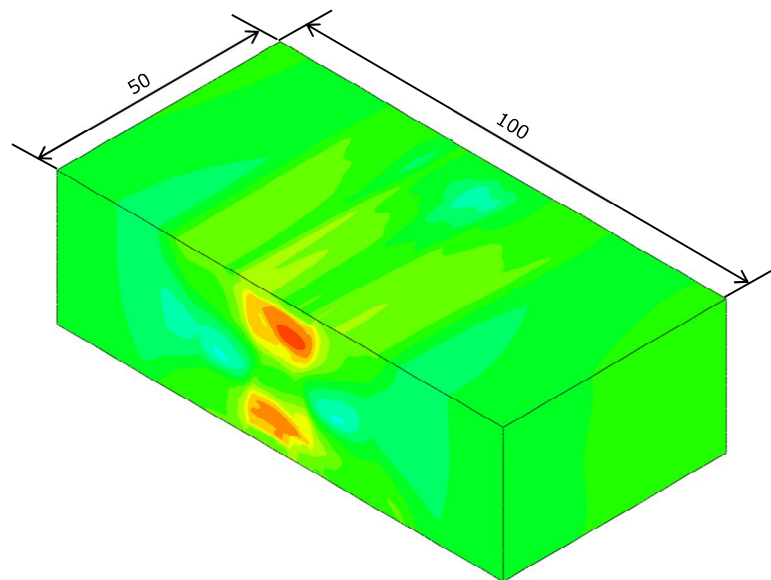
(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-28 切断模擬解析結果(溶接のみ、中間切断後、3D コンター図)



※対称面で切断した範囲を示す。

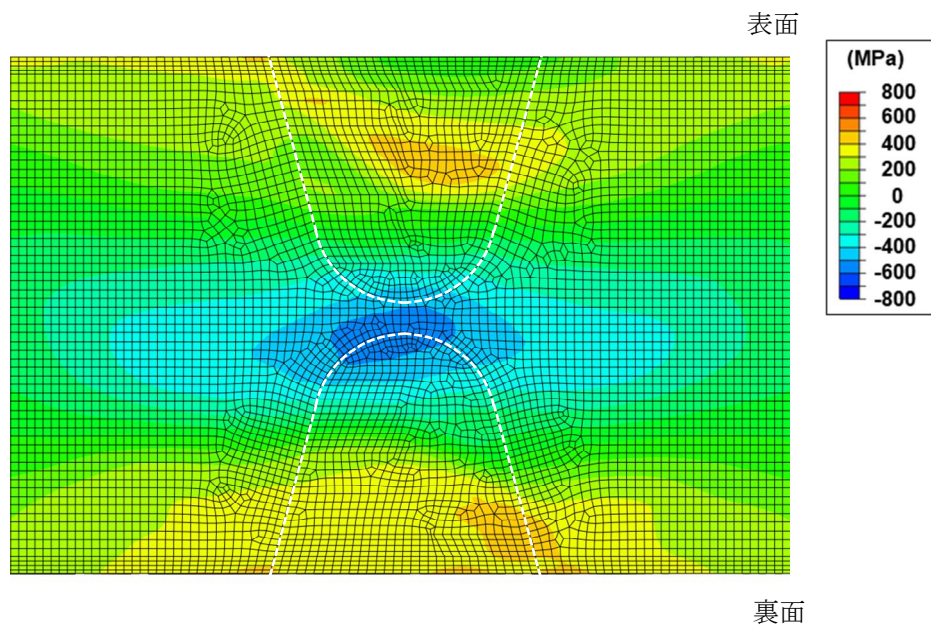
(a) 溶接線直交方向



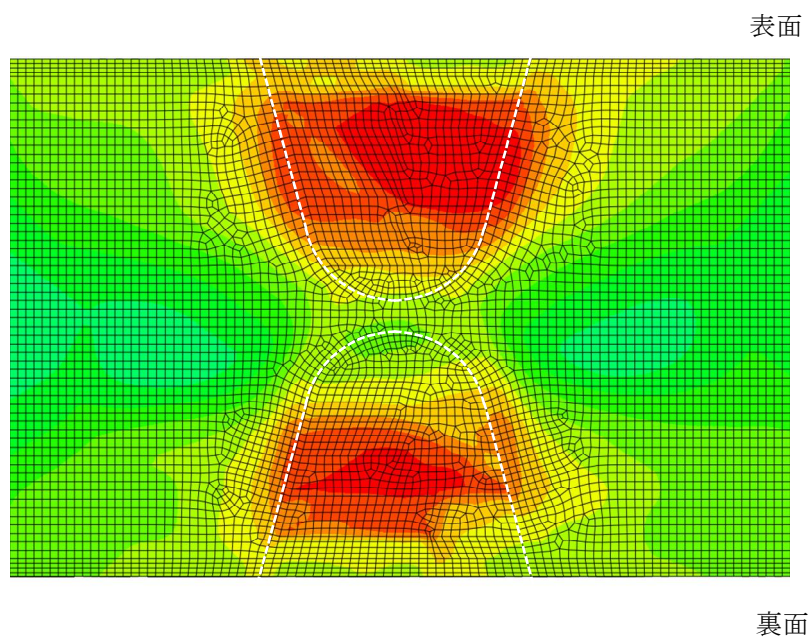
※対称面で切断した範囲を示す。

(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-29 切断模擬解析結果(溶接のみ、最終切断後、3D コンター図)

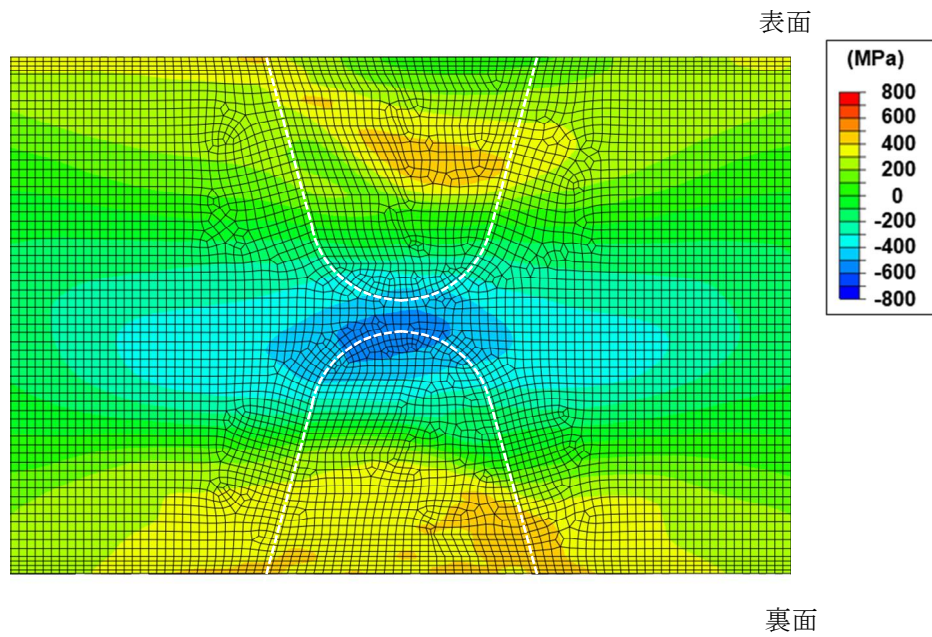


(a) 溶接線直交方向

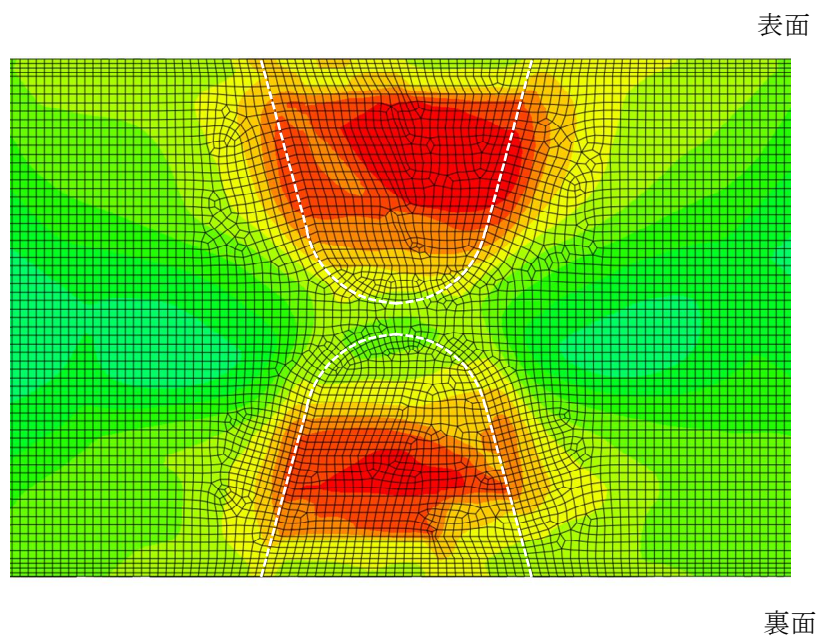


(b) 溶接線平行方向

図 3. 3. 1. 2 (2)-30 切断模擬解析結果 (溶接のみ、架構切断後、溶接部拡大図)

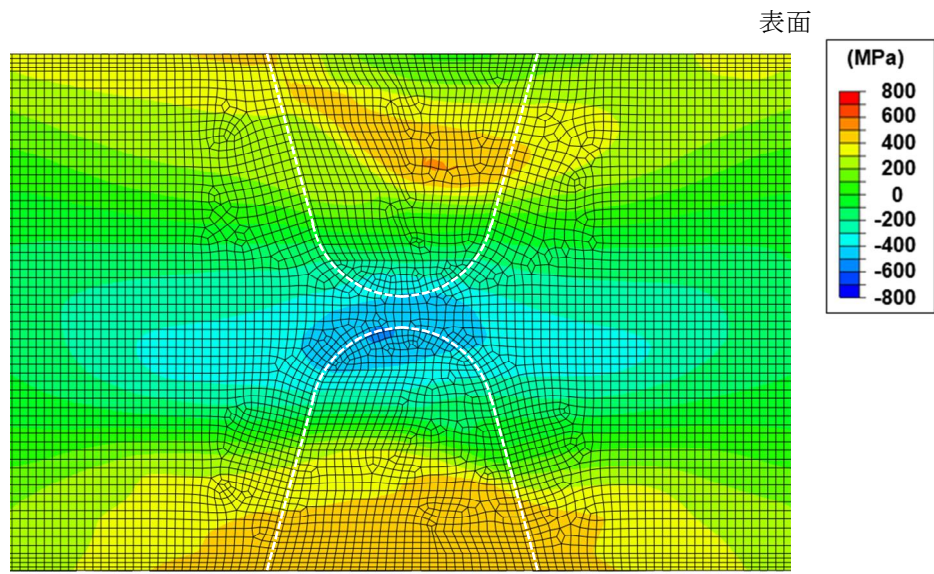


(a) 溶接線直交方向

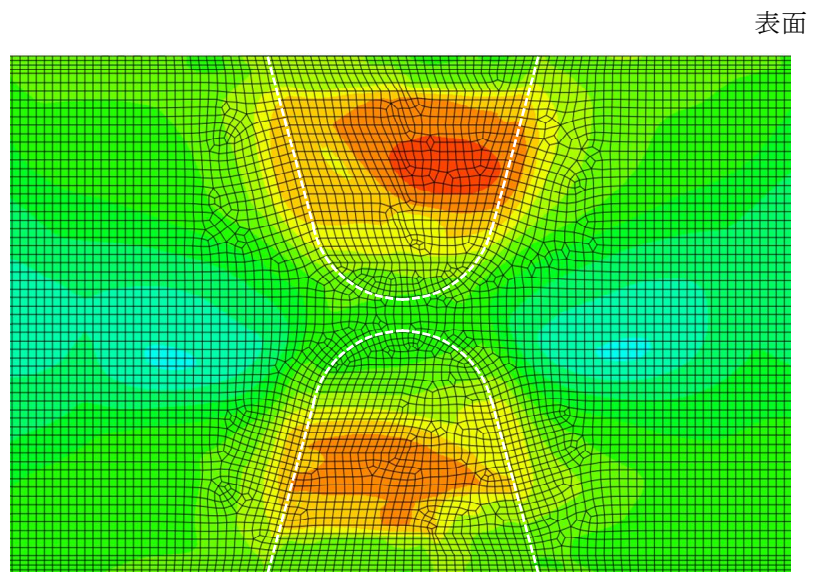


(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-31 切断模擬解析結果(溶接のみ、中間切断後、溶接部拡大図)

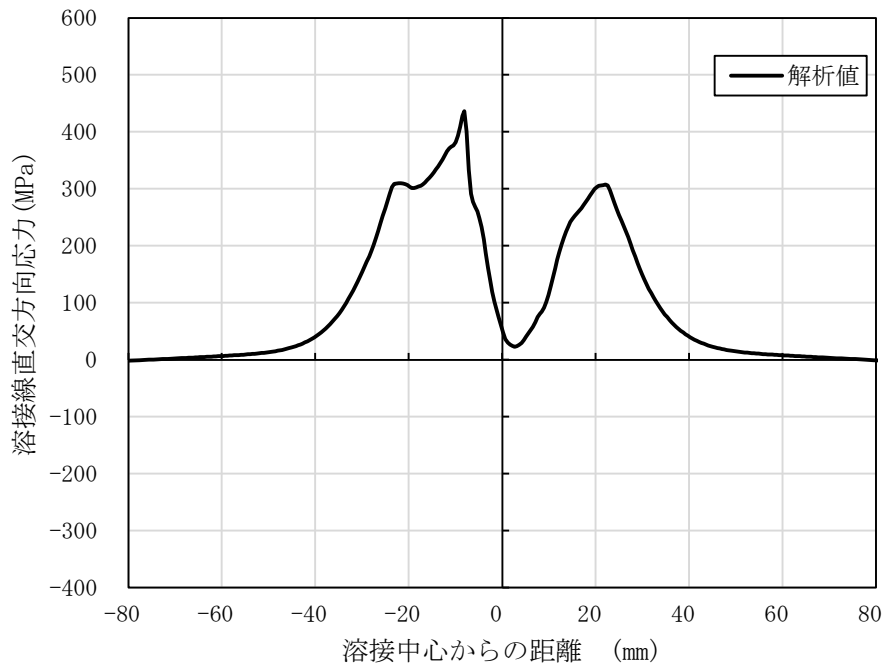


(a) 溶接線直交方向

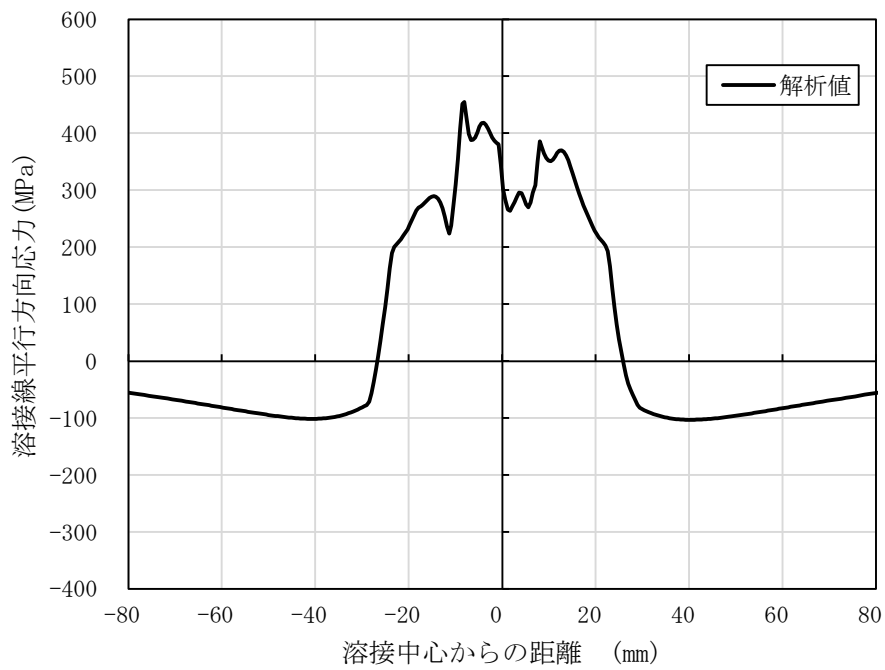


(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-32 切断模擬解析結果(溶接のみ、最終切断後、溶接部拡大図)



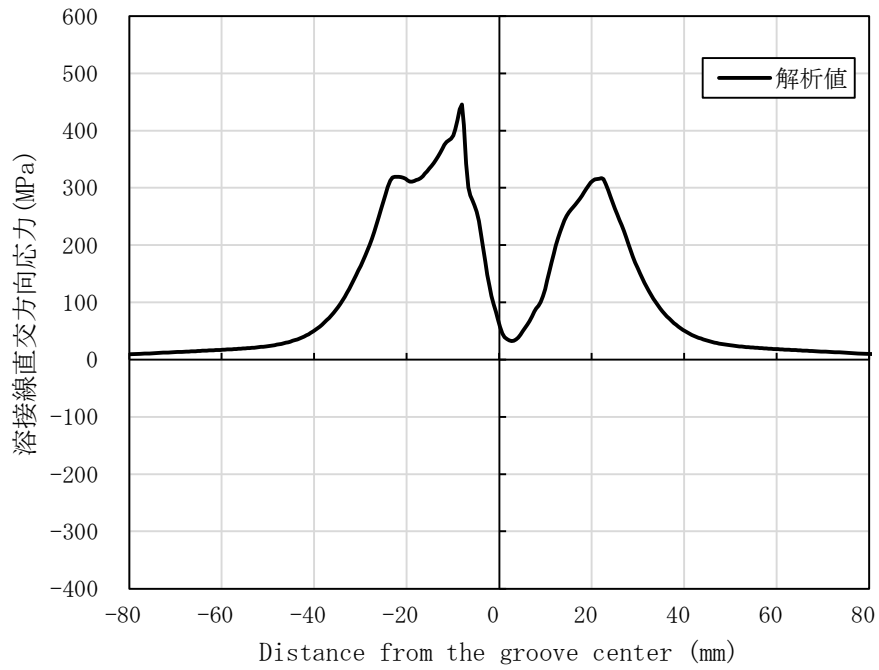
(a) 溶接線直交方向



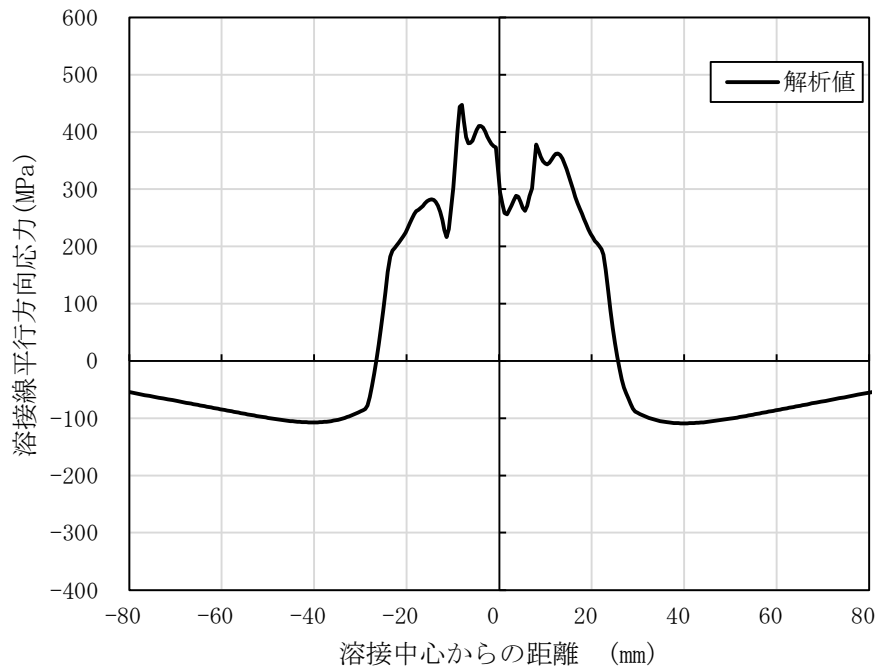
(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-33 切断模擬解析結果(溶接のみ、架構切断後、表面)



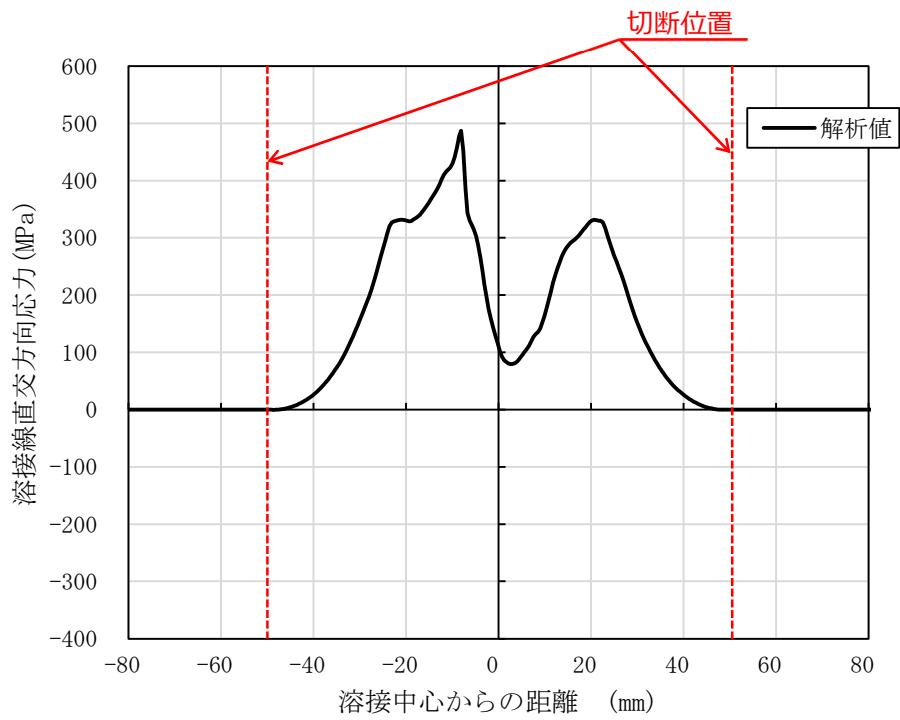


(a) 溶接線直交方向

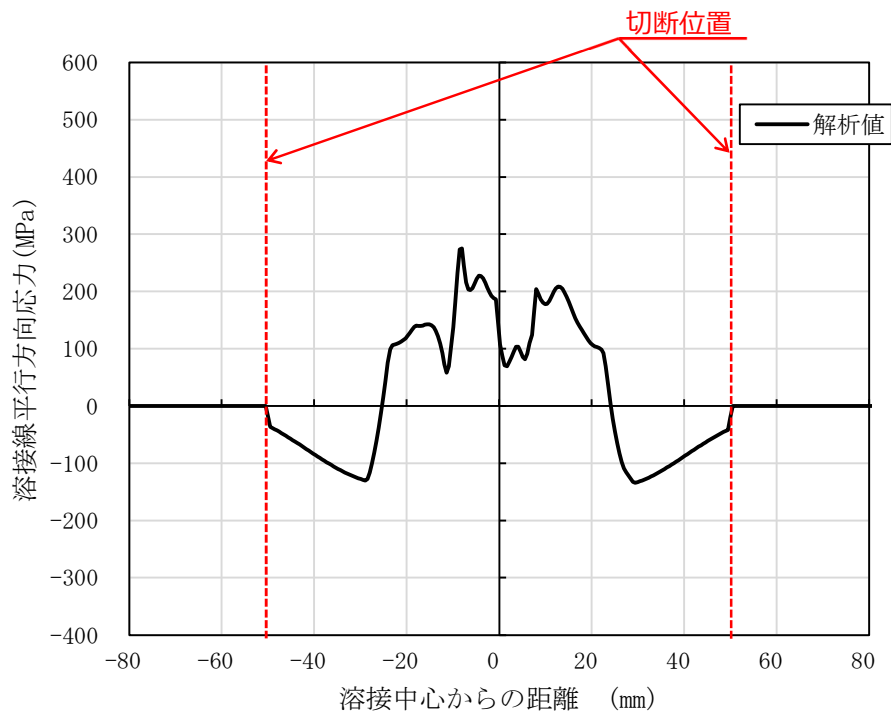


(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-34 切断模擬解析結果(溶接のみ、中間切断後、表面)

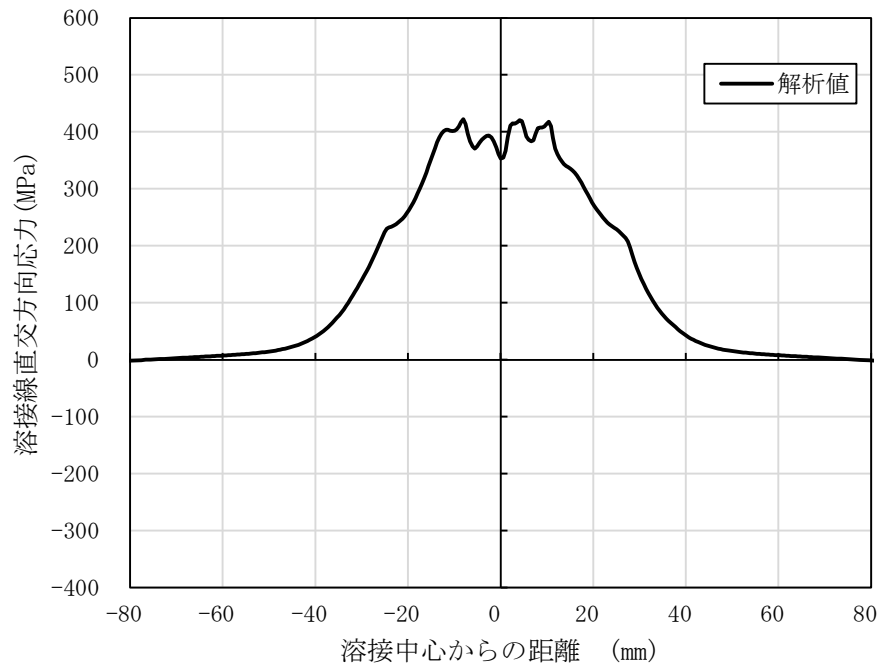


(a) 溶接線直交方向

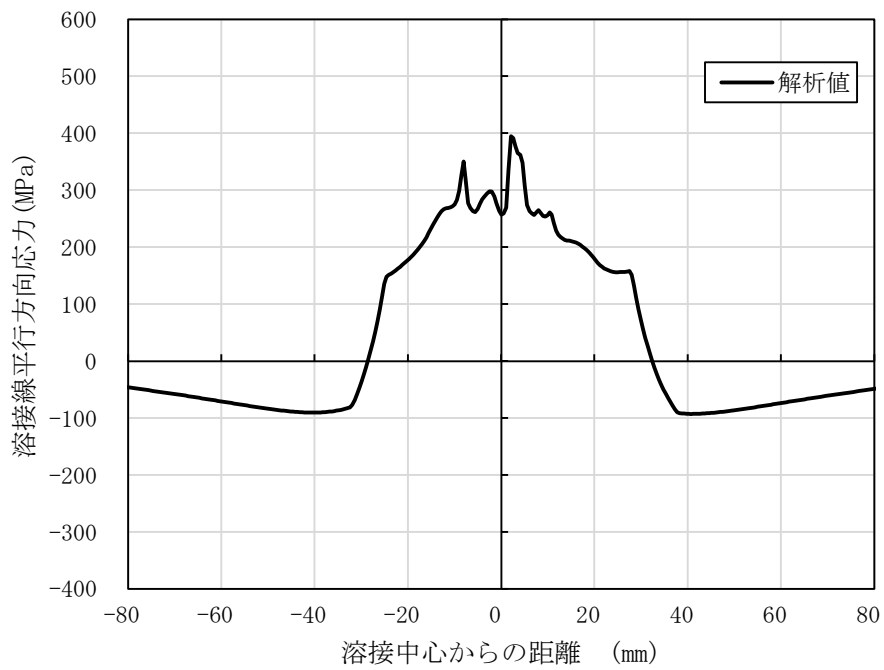


(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-35 切断模擬解析結果(溶接のみ、最終切断後、表面)

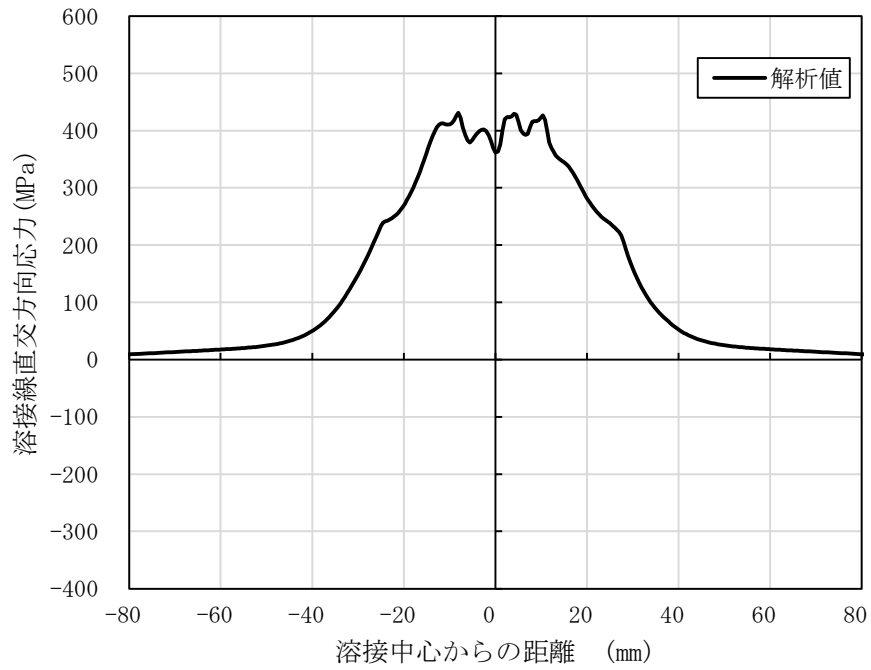


(a) 溶接線直交方向

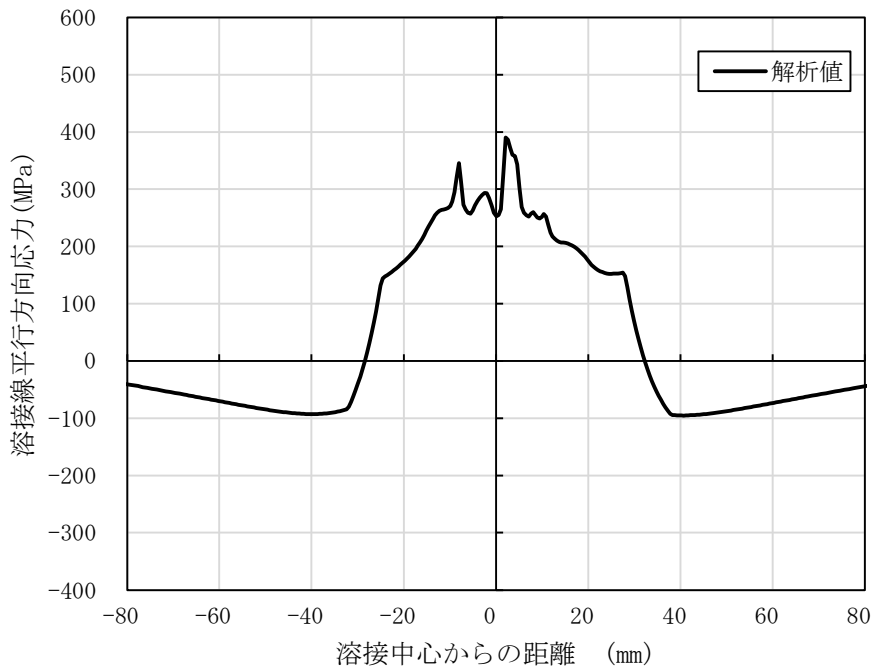


(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-36 切断模擬解析結果(溶接のみ、架構切断後、裏面)

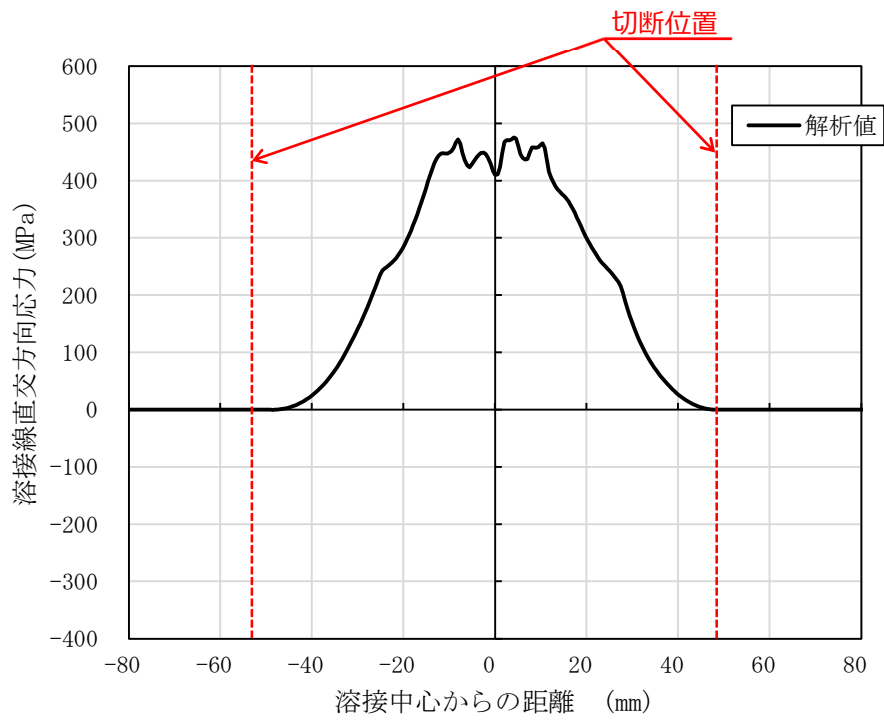


(a) 溶接線直交方向

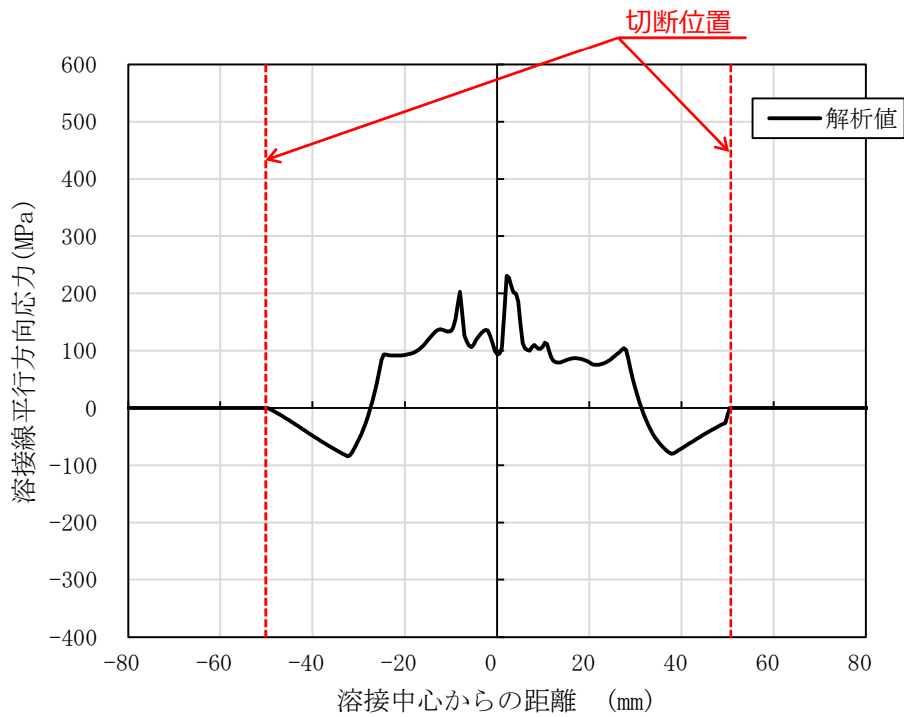


(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-37 切断模擬解析結果(溶接のみ、中間切断後、裏面)



(a) 溶接線直交方向



(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.2(2)-38 切断模擬解析結果(溶接のみ、最終切断後、裏面)

### 3.3.2 試験の実施

残留応力分布に影響を与える要因の確認試験として、令和4年度に策定したBWRプラントの廃炉段階の除染による影響確認試験計画案<sup>[3.3.2-1]</sup>に基づき試験準備に着手した。

図3.3.2-1にBWRプラントを対象とした除染影響確認試験の実施工程を示す。令和5年度は3ヵ年計画のうち2年目であり、試験片及び試験装置の準備を実施した。

#### <参考文献>

- [3.3.2-1] 令和4年度 原子力規制庁委託成果報告書 原子力施設等防災対策等委託費(実機材料等を活用した経年劣化評価・検証(実機材料を活用した健全性評価に係る研究)), 原子力規制庁, 令和5年3月

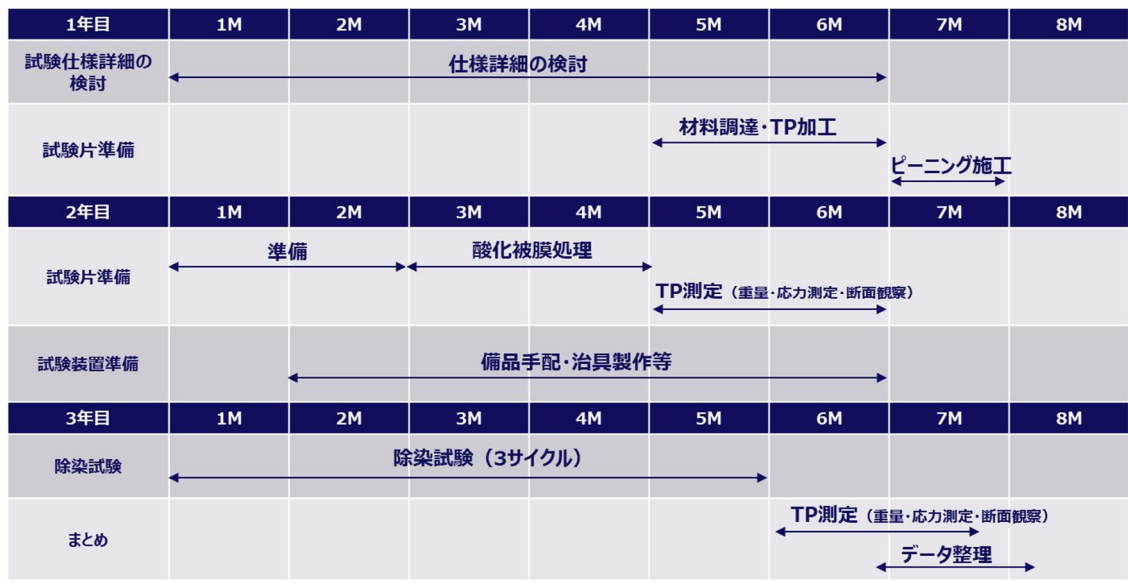


図 3.3.2-1 BWR プラントを対象とした除染影響確認試験 実施工程

### 3.3.2.1 BWR プラント廃炉時の除染の影響確認試験

#### (1) 試験計画の概要

除染試験は、重量測定・断面観察による評価と残留応力測定による評価の2種で実施する計画<sup>[3.3.2-1]</sup>である。表 3.3.2.1(1)-1 に試験マトリクス、図 3.3.2.1(1)-1 にそれぞれの試験片形状を示す。

重量測定・断面観察による評価は、除染前後の試験片の重量変化及び試験片の表面積から減肉厚さを評価し、ピーニングの深さ方向の効果範囲に対して、十分に減肉が小さいことを確認する。試験片は重量変化の評価が可能なサイズとし、20mm×10mm×t 2mm とした。

残留応力測定による評価方法は、ピーニング施工後の試験片に対し、除染前後で残留応力を実測し圧縮残留応力の残存量を確認する。試験片は適切な残留応力測定が可能なサイズとして、30mm×30mm×t 5mm とした。

図 3.3.2.1(1)-2、図 3.3.2.1(1)-3 にそれぞれの評価フローを示す。令和4年度は試験片の加工及びピーニング施工までを実施した。令和5年度は試験片の準備として、重量測定・断面観察用試験片(20mm×10mm×t 2mm)は④重量測定、⑤高温酸化皮膜付与(一部 TP)、並びに⑥外観観察・重量測定を実施した。残留応力用試験片(30mm×30mm×t 5mm)は⑤高温酸化皮膜付与、並びに⑥外観観察・残留応力測定を実施した。

除染試験は実験室系のバッチ試験にて実施する計画<sup>[3.3.2-1]</sup>である。バッチ試験装置の構成と仕様を図 3.3.2.1(1)-4、表 3.3.2.1(1)-2 に示す。令和5年度は試験装置の準備として、除染試験に用いるこれら試験装置の製作を実施した。



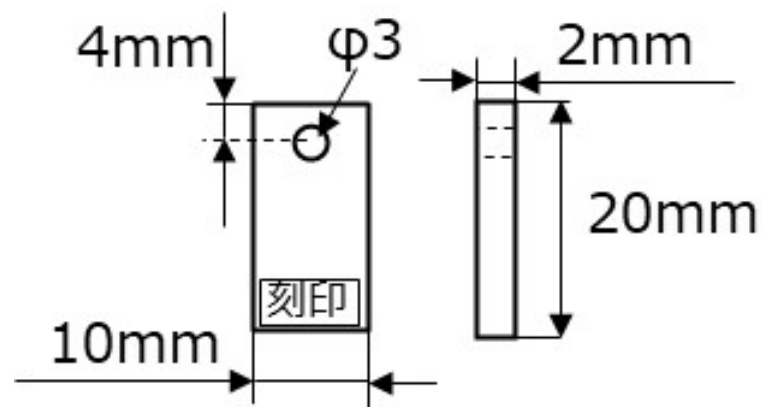
表 3.3.2.1(1)-1 除染試験マトリクス

実施項目	SP 施工	酸化皮膜 付与	員数	除染サイ クル数	測定実施頻度
重量測定 ・ 断面観察	あり (両面)	あり	1*	0	
			3	3	1 サイクル毎に測定実施
		なし	3	3	1 サイクル毎に測定実施
	なし	あり	1*	0	
			3	3	1 サイクル毎に測定実施
		なし	3	3	1 サイクル毎に測定実施
残留応力測定	あり (片面)	あり	2	1	1 サイクル毎に測定実施

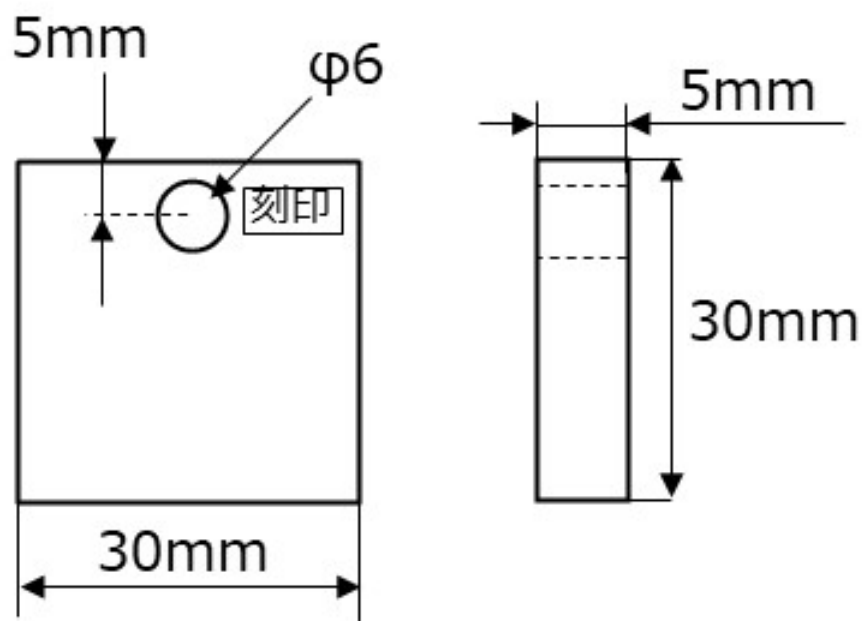
\* 比較用として除染試験前の酸化皮膜付与状況確認のため、断面観察を実施。

表 3.3.2.1(1)-2 バッチ試験装置の仕様

主要機器	概略仕様	備考
セパラブルフラスコ	容積：2L	酸化(除染)剤、還元(除染)剤用に各1セット 蒸気を凝縮させて戻す機構付
ホットスターラー	上記、フラスコの温度を95℃以上に制御可能なもの	温度制御機能付き
攪拌子	耐薬品性のあるもの	—
試験片設置用架台	耐薬品性のあるもの	試験片形状と員数により設計要
計測器	pH計	除染剤濃度や金属イオン濃度をバッチで測定するための機器は別途必要

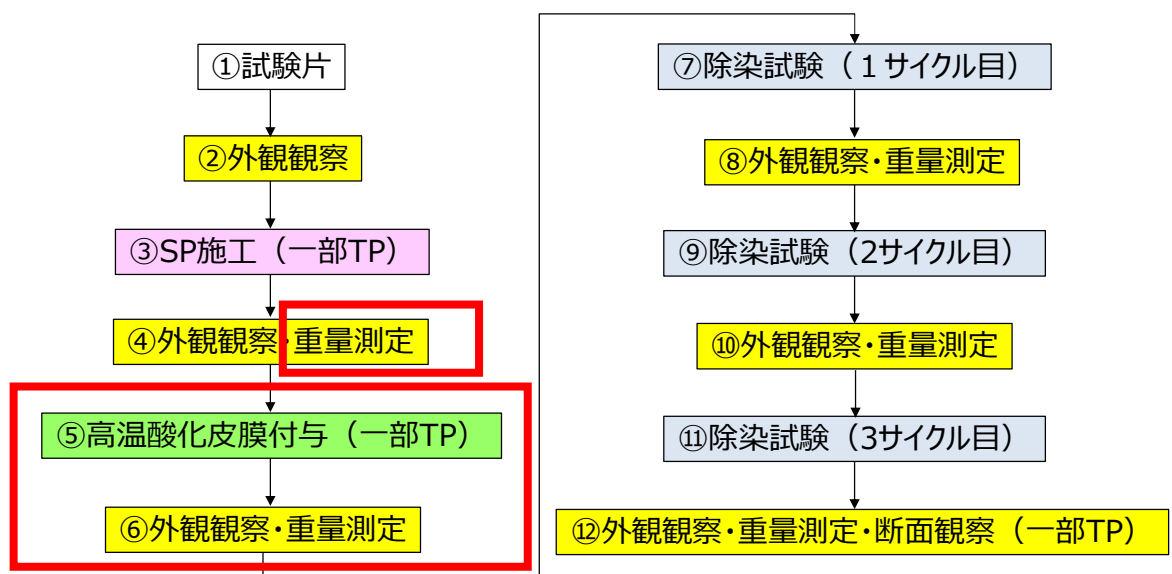


(a) 重量測定・断面観察用試験片 (20 mm × 10 mm × t 2 mm)



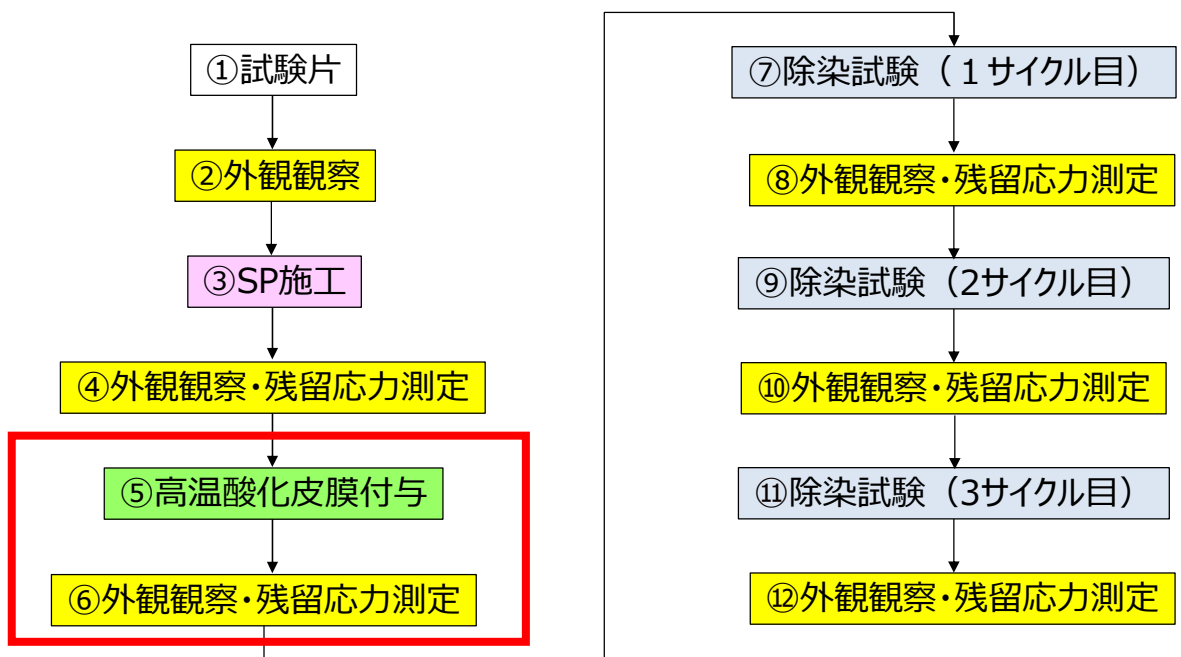
(b) 残留応力用試験片 (30 mm × 30 mm × t 5 mm)

図 3.3.2.1(1)-1 除染試験片形状



赤枠部：令和5年度実施範囲

図 3.3.2.1(1)-2 重量測定・断面観察による評価フロー  
(20 mm×10 mm×t 2 mm 試験片)



赤枠部：令和5年度実施範囲

図 3.3.2.1(1)-3 残留応力測定による評価フロー

(30 mm×30 mm×t 5 mm 試験片)

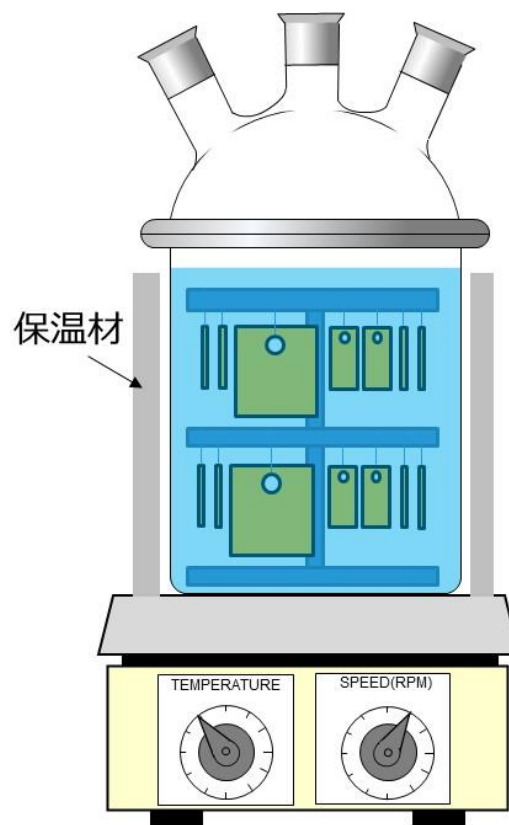


図 3.3.2.1(1)-4 バッチ試験における除染試験装置構成

## (2) 除染試験片の準備

### 1) 高温酸化皮膜付与

表 3.3.2.1(2)-1 に TP No.と各試験片の寸法、SP 施工の有無、酸化膜付与の有無を示す。

重量測定・断面観察用試験片及び残留応力測定用試験片ともに、令和 4 年度に試験片の加工及び SP 施工までを行い、施工後の外観観察及び残留応力測定をし、いずれの試験片も傷や腐食痕等はなく、外観上、問題ないことを確認している<sup>[3.3.2-1]</sup>。

令和 5 年度は、令和 4 年度に SP 施工まで実施した試験片に対し、高温酸化皮膜付与を行い、酸化皮膜付与後の外観観察・重量測定・残留応力測定を実施した。なお重量測定・断面観察用試験片については酸化皮膜付与前後で重量測定を実施し、重量変化を確認した。重量測定は電子天秤を用いて 0.1mg 単位で測定した。残留応力測定用試験片については X 線応力測定法を用いて試験片中央部で直交する 2 方向の応力を測定した。

高温酸化皮膜付与条件は令和 4 年度に策定した要領に従い、以下とした。

<酸化皮膜付与条件>

- ・溶存酸素濃度：1ppm
- ・温度：288°C
- ・時間：1000h 程度

対象試験片は表 3.3.2.1(2)-1 に示す通り重量測定・断面観察用試験片のうち TP No.11~14 と 18~21、残留応力測定用試験片は TP No.25, 26 とした。酸化皮膜付与処理は図 3.3.2.1(2)-1 に示すオートクレーブを用いて実施した。オートクレーブの使用にあたっては、事前に試運転を行い、所定の水質条件、圧力条件等を満足できるかを確認した上で使用した。

図 3.3.2.1(2)-2 に酸化皮膜付与中の水質履歴を示す。酸化皮膜付与試験は、2023 年 9 月 11 日 17 時頃に昇温を開始し、同日 20 時頃に目標温度付近に達した時点を試験開始時間とした。試験は目標条件を推移していたが、試験開始から約 873h 後の 2023 年 10 月 18 日 4:40 頃に停電が発生したため、試験を一時中断した。図 3.3.2.1(2)-3 に停電前後の水質履歴を示す。同日早朝に復旧作業を行い、水圧、水質調整を行い、昇温を開始したところ、14:22 に水質、水圧、水温が概ね目標条件に達したことから、この時間を試験再開時間とした。試験時間は、この試験中断時間(約 10 時間)を除き、計画通り 1000h 実施した。なお、停電による試験中断期間を除き、水質履歴は概ね目標条件で推移していたこと、中断時間も試験全体の期間のごくわずかであることから、酸化皮膜付与の観点からは問題なく完了したものとする。

### 2) 重量測定

表 3.3.2.1(2)-2 に重量測定・断面観察用試験片について酸化皮膜付与前後の試験片重量測定結果を示す。酸化皮膜付与後は試験片重量がわずかに増加していた。TP No.11

～14 は SP 施工ありの条件、TP No.18～21 は SP 施工なしの条件であるが、条件の違いによる明瞭な重量変化の差異は認められなかった。

### 3) 残留応力測定

図 3.3.2.1(2)-4 に酸化皮膜付与前後の残留応力測定結果を示す。酸化被膜付与前の残留応力測定は令和 4 年度に実施したものである。酸化皮膜付与後は圧縮残留応力がわずかに減少していたが、十分な圧縮残留応力が維持されていることが確認された。

### 4) 外観観察及び断面観察

図 3.3.2.1(2)-5 および図 3.3.2.1(2)-6 に酸化皮膜付与後の重量測定・断面観察用試験片及び残留応力測定用試験片の外観観察結果を示す。試験片表面全体が黒色となっており、酸化皮膜が一様に付与されている様相を呈していた。酸化皮膜が適切に付与されているか確認するため、TP No.11(SP 施工あり)および TP No.18(SP 施工なし)に対して、断面観察を実施した。試験片切断位置および断面観察箇所を図 3.3.2.1(2)-7 に示す。切断位置は、試験片長手方向中央位置とした。また、断面観察は SEM による観察とし、1 試験片あたり 3 か所、2 倍率(5,000 倍、30,000 倍)で実施した。図 3.3.2.1(2)-8 および図 3.3.2.1(2)-9 にそれぞれ TP No.11 試験片および TP No.18 試験片の断面観察結果を示す。TP No.11 には、酸化皮膜付与試験前に実施した SP 施工により試験片表面に凹みがあり、その上に酸化皮膜が形成されていた。なお、両試験片のいずれの観察箇所においても数百 nm 程度の酸化皮膜が形成されており、適切な酸化皮膜処理がされていることが確認できた。



表 3.3.2.1(2)-1 各試験片の条件

実施項目	TP No.	試験片寸法	SP 施工	酸化皮膜付与
重量測定 ・ 断面観察	11	20mm×10mm× t 2mm (穴径 φ3 mm)	あり (両面)	あり
	12			
	13			なし
	14			
	15			
	16			
	17	20mm×10mm× t 2mm (穴径 φ3 mm)	なし	あり
	18			
	19			
	20			なし
	21			
	22			
23	なし			
24				
残留応力 測定	25	30mm×30mm× t 5mm (穴径 φ6 mm)	あり (片面)	あり
	26			

(注記) TP No.11 及び 18 は除染試験前の酸化皮膜付与状況確認のための試験片。

表 3.3.2.1(2)-2 酸化皮膜付与前後の試験片重量測定結果

TP No.	酸化皮膜付与前 (mg)	酸化皮膜付与後 (mg)	重量変化 (mg)
11	3058.0	3058.2	+0.2
12	3029.4	3029.6	+0.2
13	3051.8	3052.0	+0.2
14	3064.4	3064.6	+0.2
15	3039.6	-	-
16	3052.0	-	-
17	3047.3	-	-
18	3016.2	3016.5	+0.3
19	3056.0	3056.2	+0.2
20	3069.1	3069.4	+0.3
21	3067.0	3067.2	+0.2
22	3045.1	-	-
23	3044.5	-	-
24	3033.2	-	-

(注記)TP.15-17 及び TP22-24 は酸化皮膜付与処理なし

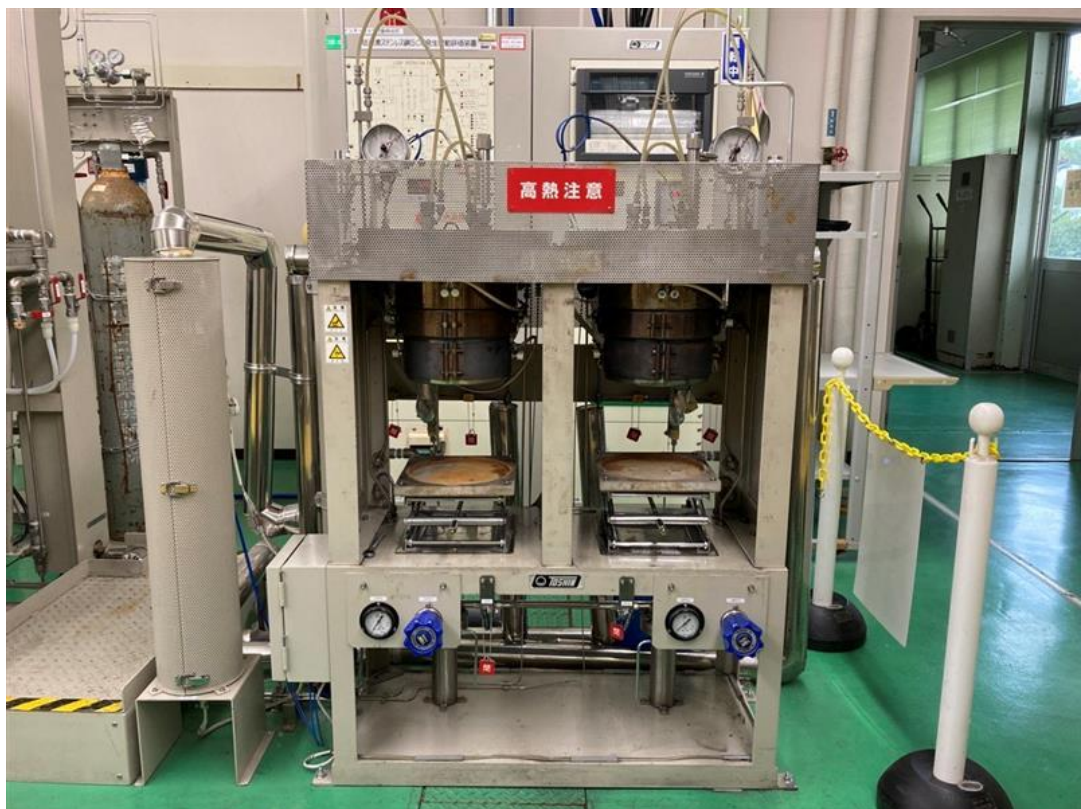
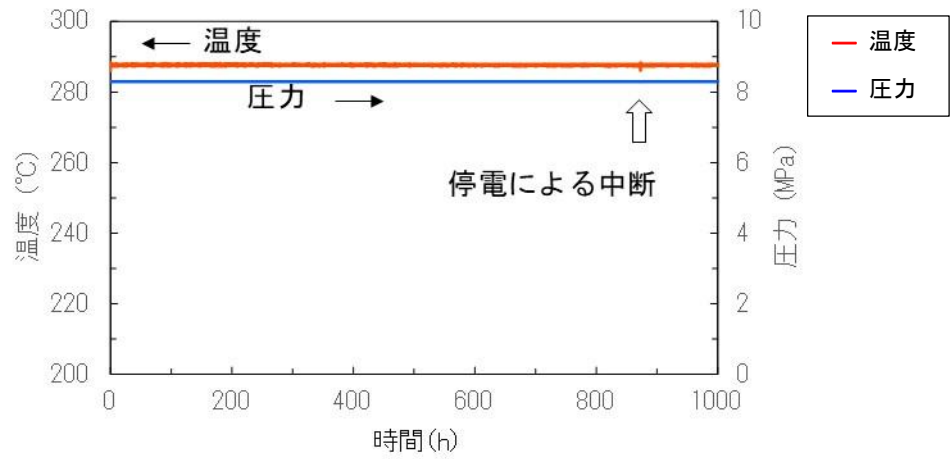
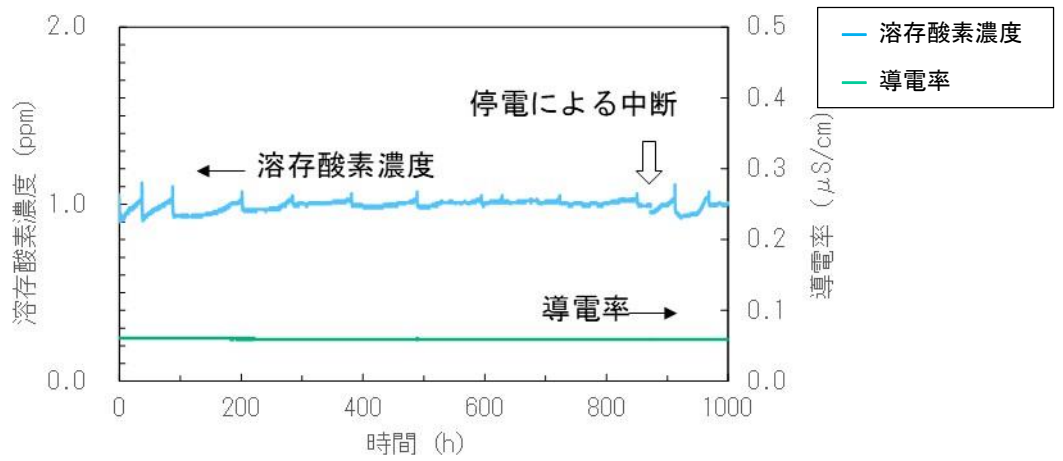


図 3.3.2.1(2)-1 酸化皮膜付与処理に使用したオートクレーブ

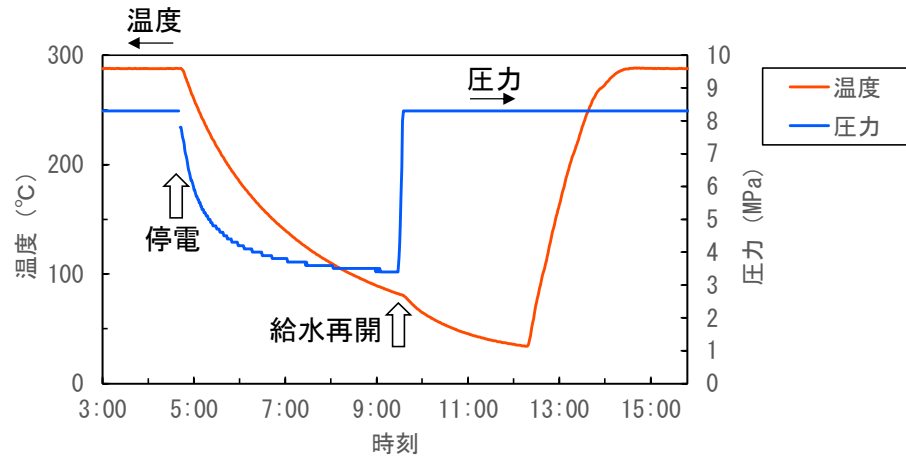


(a) 温度、圧力履歴

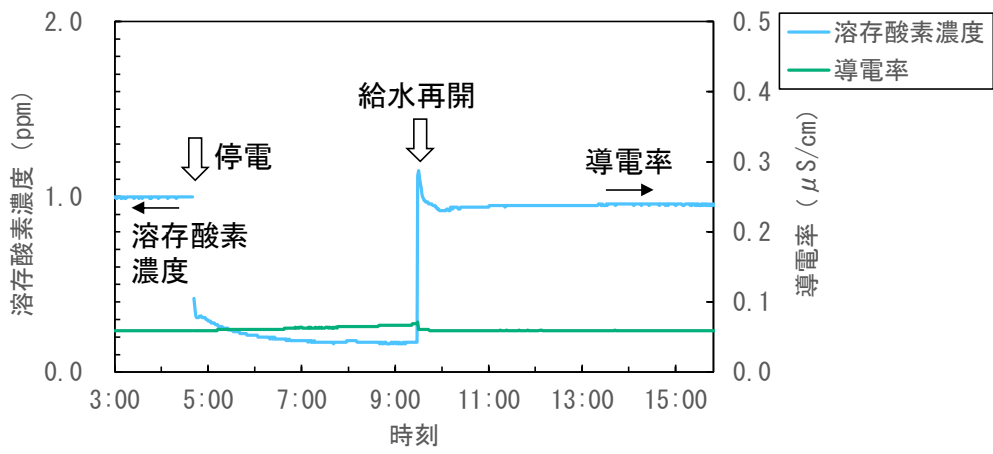


(b) 溶存酸素濃度、導電率

図 3.3.2.1(2)-2 酸化皮膜付与中の水質履歴



(a) 温度、圧力履歴



(b) 溶存酸素濃度、導電率

(2023年10月18日4:40停電により試験一時停止、14:22試験再開)

図 3.3.2.1(2)-3 停電前後の水質履歴

	刻印	X 方向		Y 方向	
		残留応力	標準偏差	残留応力	標準偏差
酸化皮膜 付与前	25	-902	29	-933	27
	26	-910	29	-913	32
酸化皮膜 付与後	25	-824	14	-807	14
	26	-810	10	-893	15

(単位 : MPa)

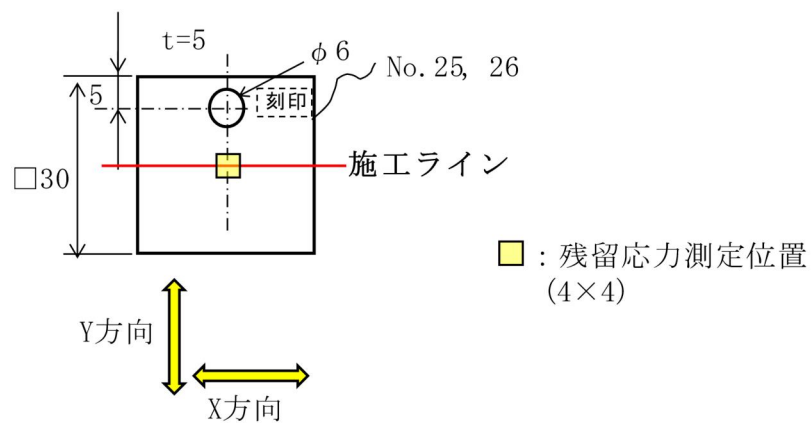


図 3.3.2.1(2)-4 酸化皮膜付与前後の表面残留応力測定結果 (TP No. 25, 26)



表面



裏面

TP No. 11



表面



裏面

TP No. 12

図 3.3.2.1(2)-5 (1/4) 重量測定・断面観察用試験片外観(酸化皮膜付与後)



表面



裏面

TP No. 13



表面



裏面

TP No. 14

図 3.3.2.1(2)-5 (2/4) 重量測定・断面観察用試験片外観(酸化皮膜付与後)





表面



裏面

TP No. 18



表面



裏面

TP No. 19

図 3.3.2.1(2)-5 (3/4) 重量測定・断面観察用試験片外観(酸化皮膜付与後)



表面



裏面

TP No. 20



表面



裏面

TP No. 21

図 3.3.2.1(2)-5 (4/4) 重量測定・断面観察用試験片外観(酸化皮膜付与後)

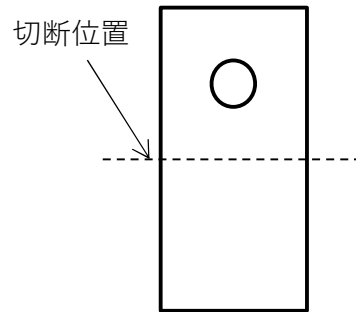


TP No. 25

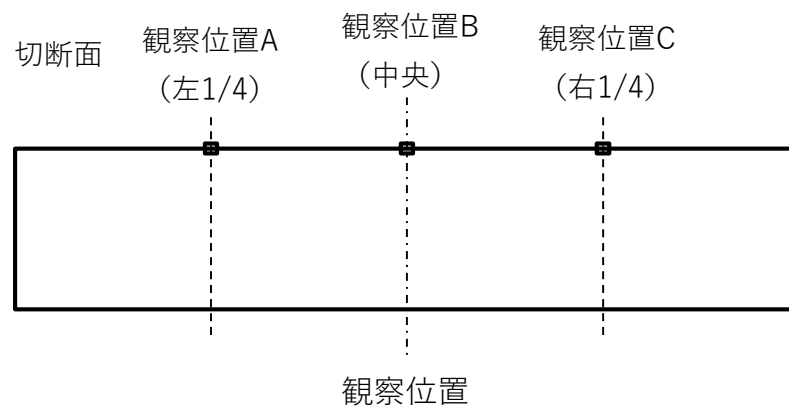


TP No. 26

図 3. 3. 2. 1 (2)-6 残留応力測定用試験片外観(酸化皮膜付与後)



(a) 試験片と切断位置



(b) 切断面と観察位置

図 3.3.2.1(2)-7 試験片切断位置と断面観察位置 (TP No. 11, 18)

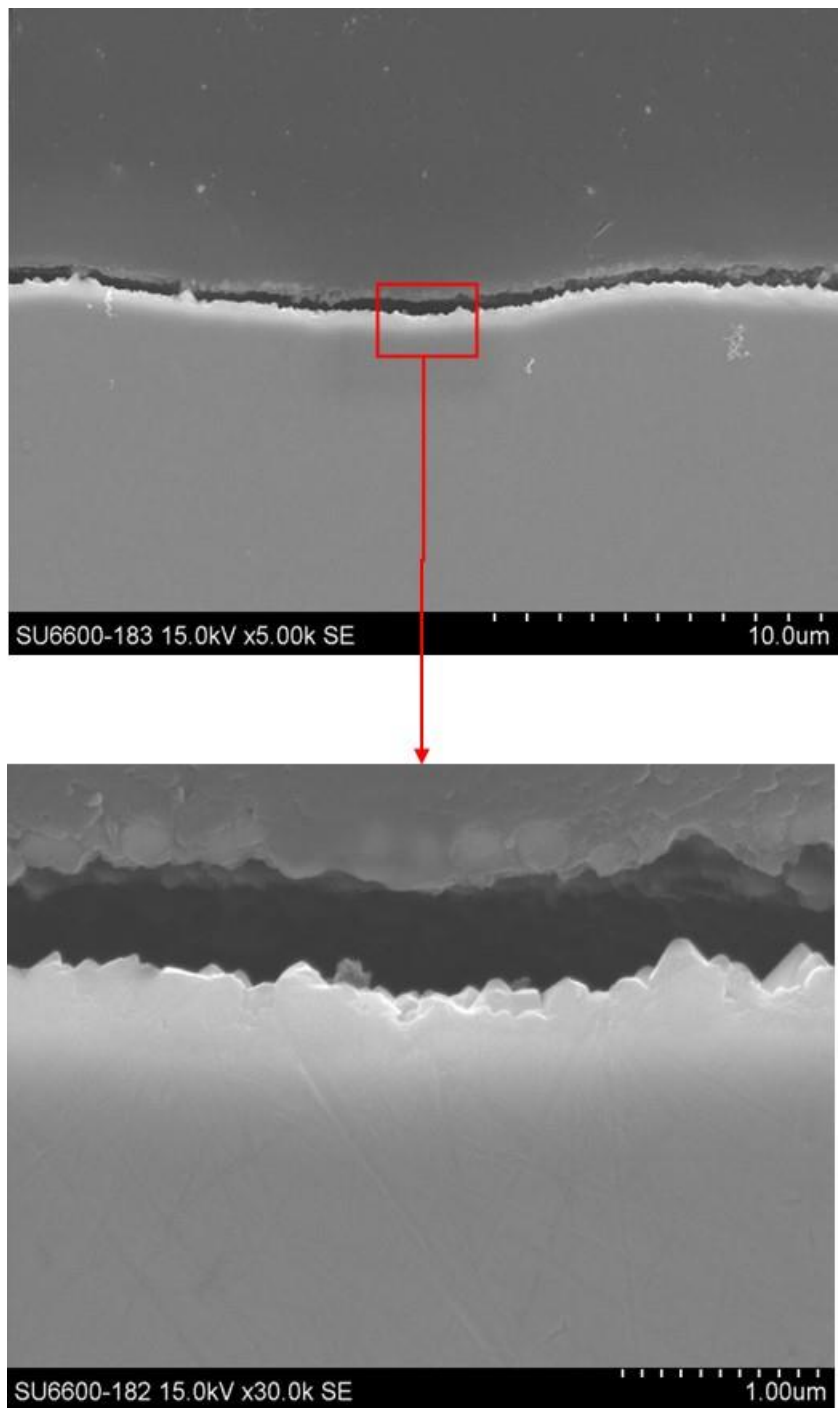


図 3.3.2.1(2)-8 (1/3) TP No.11 の断面観察結果  
(SP 施工あり、観察位置 A、上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

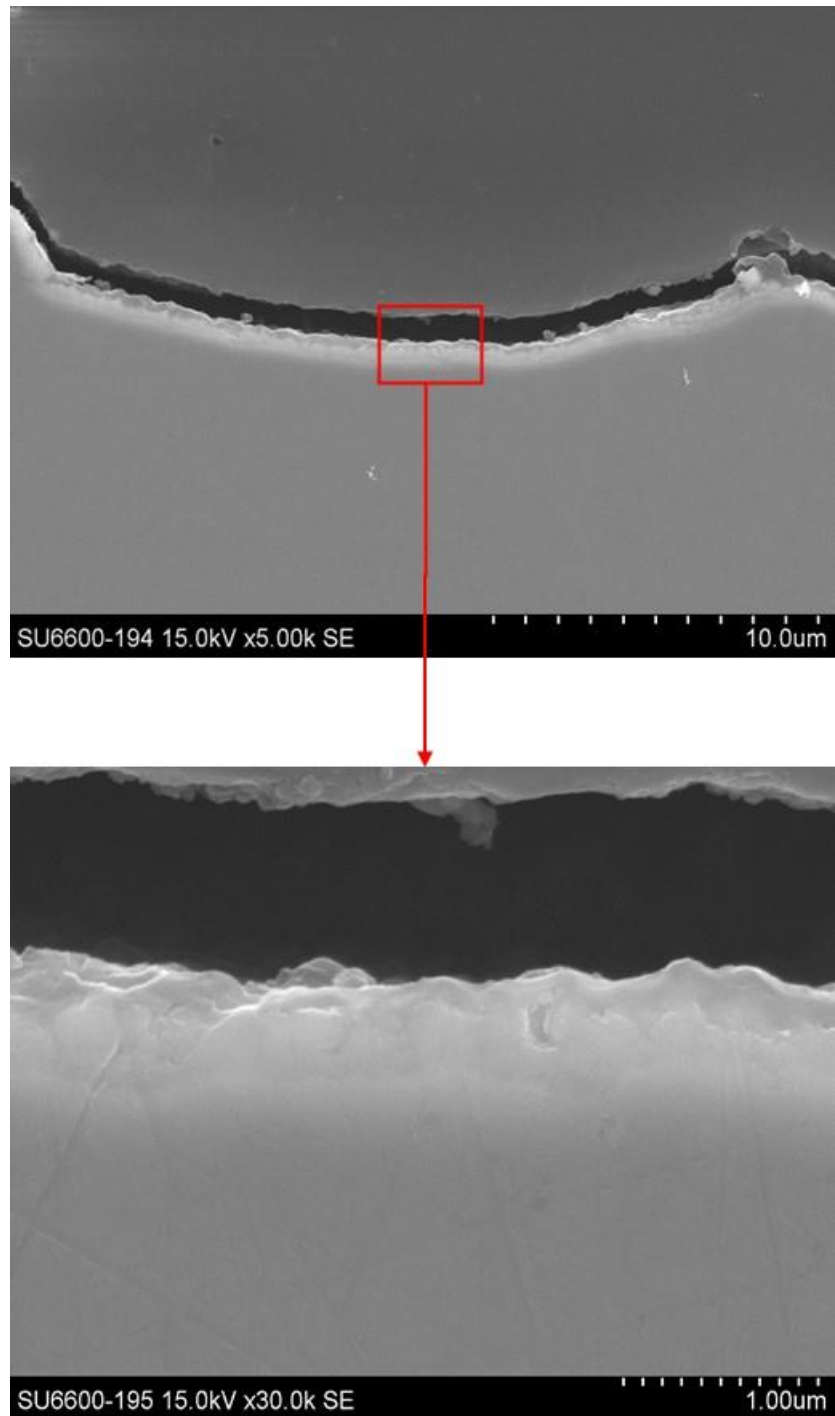


図 3.3.2.1(2)-8 (2/3) TP No.11 の断面観察結果  
(SP 施工あり、観察位置 B、上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

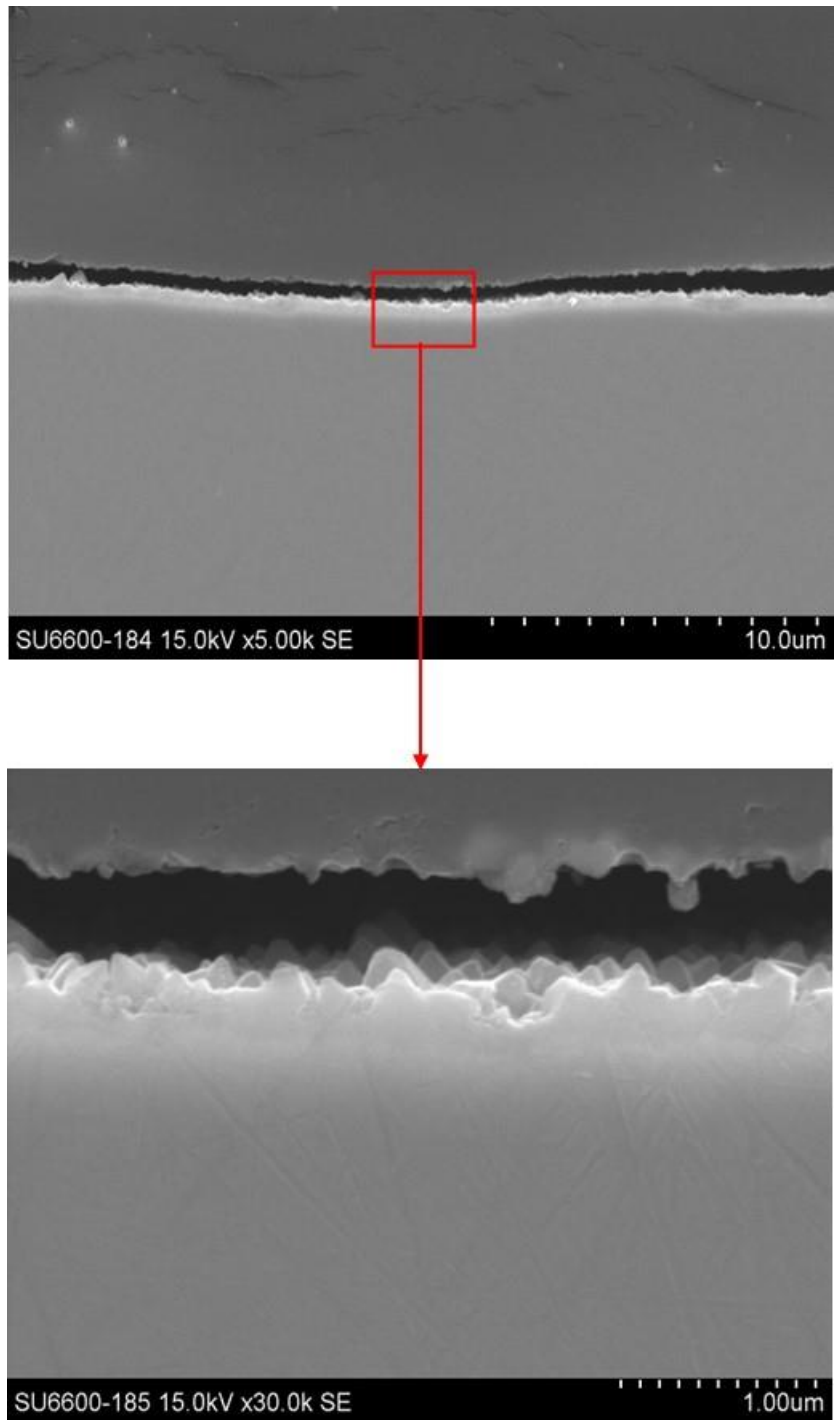


図 3.3.2.1(2)-8 (3/3) TP No.11 の断面観察結果  
(SP 施工あり、観察位置 C、上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

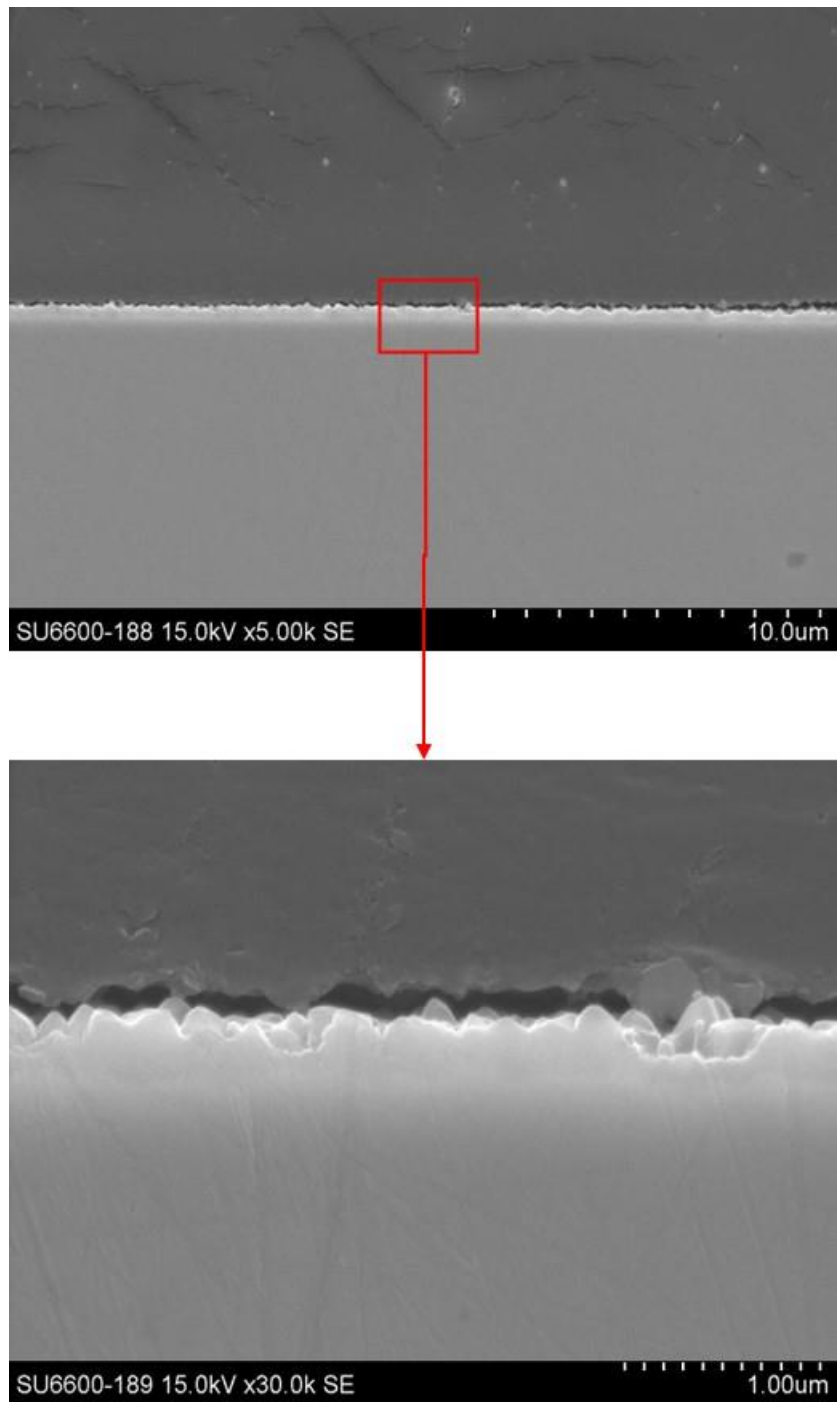


図 3.3.2.1(2)-9 (1/3) TP No. 18 の断面観察結果  
(SP 施工なし、観察位置 A、上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)



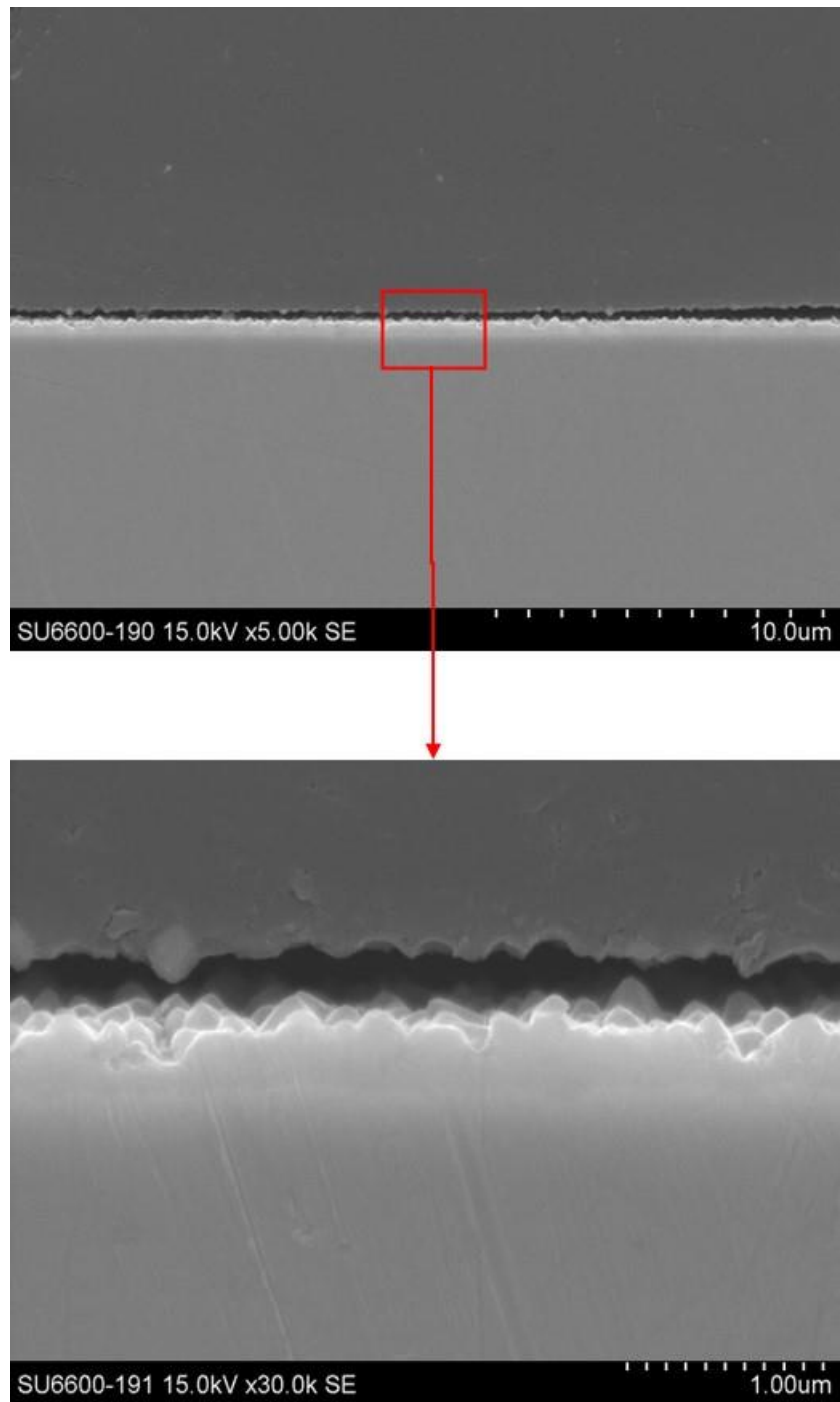


図 3.3.2.1(2)-9 (2/3) TP No. 18 の断面観察結果  
(SP 施工なし、観察位置 B、上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

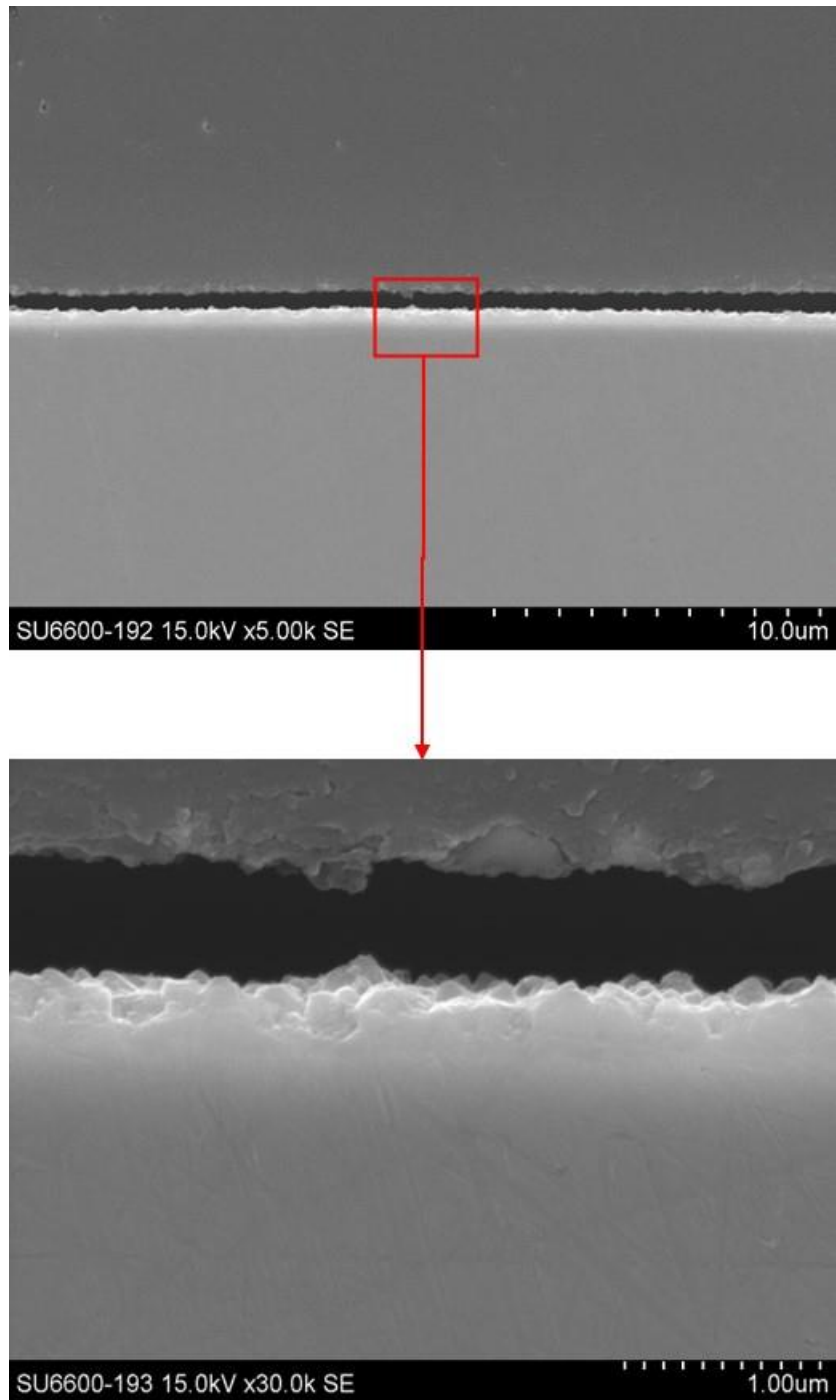


図 3.3.2.1(2)-9 (3/3) TP No. 18 の断面観察結果  
(SP 施工なし、観察位置 C、上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

### (3) 除染試験装置の準備

令和4年度に策定したバッチ試験装置の構成と仕様に基づき、試験装置の製作を実施した

図 3.3.2.1(3)-1 に製作した試験装置の外観、表 3.3.2.1(3)-1 に試験装置の仕様を示す。試験中は 100℃近くまで温度が上昇するため、冷却器を設置し試験溶液の蒸発により発生した蒸気を凝縮させて水分に戻す機構とした。これにより、試験溶液が蒸発することによる濃度変化を抑えることが可能となる。また、セパラブルフラスコ内の温度を一定に保つため、スターラーで試験溶液を攪拌するとともに試験溶液の高さ方向の温度分布を小さくするため、セパラブルフラスコ上半分にバンドヒーターを設置した。なお、試験溶液の性質を鑑み、試験片取付け用の治具はテフロン材を加工して製作した。

表 3.3.2.1(3)-1 除染試験装置の仕様

主要機器	概略仕様	備考
セパラブルフラスコ	容積：2L	酸化(除染)剤、還元(除染)剤用に各1セット 蒸気を凝縮させて戻す機構付
ホットスターラー	上記、フラスコの温度を95℃以上に制御可能なもの	温度制御機能付き
攪拌子	耐薬品性のあるもの	—
試験片設置用架台	耐薬品性のあるもの	試験片形状と員数により設計
計測器	pH計	除染剤濃度や金属イオン濃度をバッチで測定するための機器は別途必要

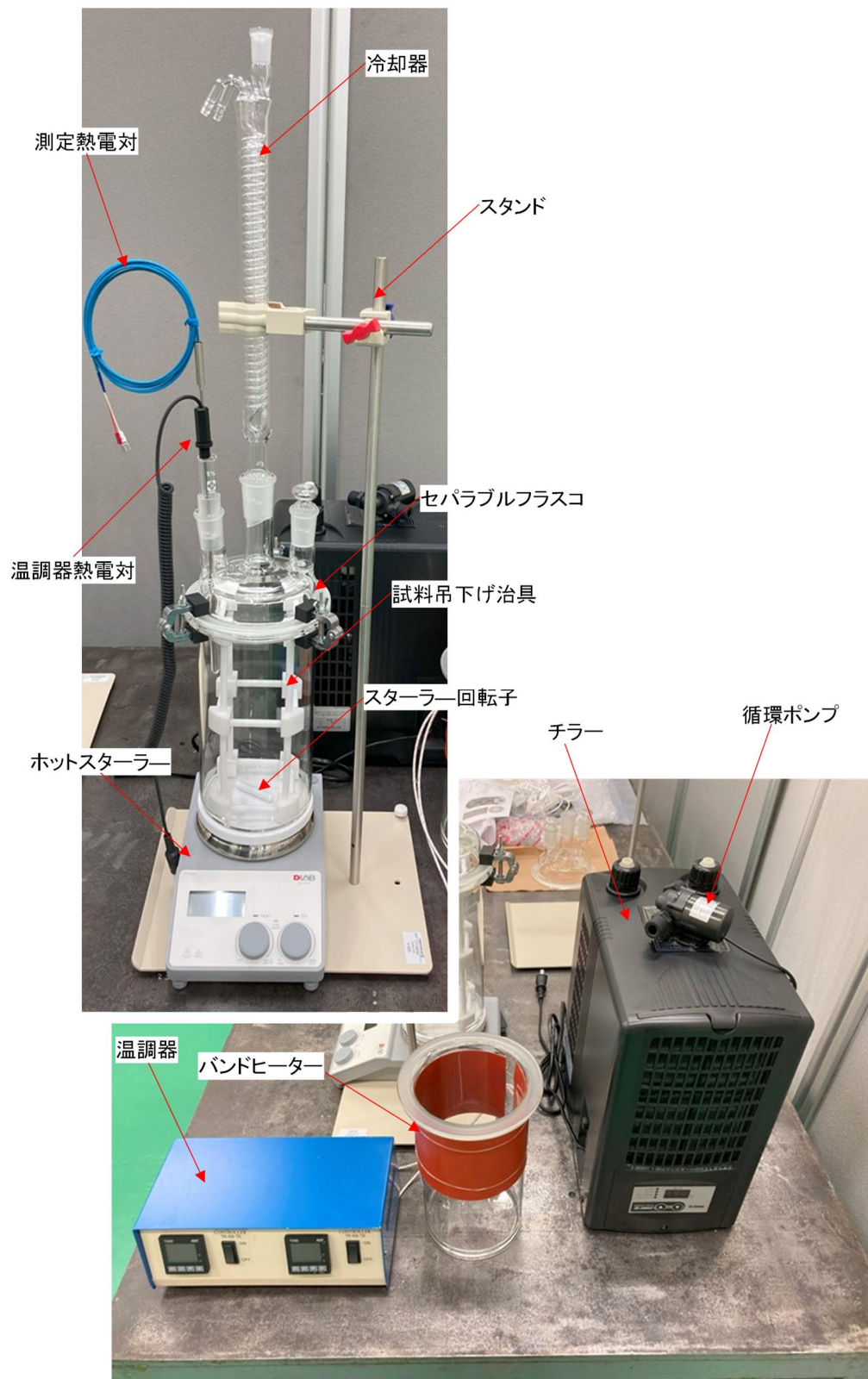


図 3.3.2.1(3)-1 除染試験装置外観

#### **(4) BWR プラント廃炉時の除染の影響確認試験まとめ**

令和5年度は BWR プラント廃炉時の除染の影響確認試験のための、除染試験片及び試験装置の製作準備を完了した。

令和6年度はこれらの試験片・試験装置を用いて除染の影響確認試験を実施し、重量測定・断面観察及び残留応力測定により除染の影響を評価する。除染試験における除染液条件及び除染サイクル数・時間は表 3.3.2.1(4)-1 及び表 3.3.2.1(4)-2 とする。

表 3.3.2.1(4)-1 除染試験条件

項 目		条 件
除染剤	酸化	過マンガン酸： 200 ppm
	還元	シュウ酸： 2000 ppm pH： 2.5±0.3(ヒドラジン添加)
温度		95 °C程度
除染工程		酸化－還元

表 3.3.2.1(4)-2 バッチ試験におけるサイクルごとの除染時間

工程	1 サイクル目		2 サイクル目		3 サイクル目	
	酸化	還元	酸化	還元	酸化	還元
時間(h)	19	42	19	42	19	42



### 3.3.3 事業計画の見直し

3.3.1 項及び 3.3.2 項に示す成果を総合的に検討し、令和 6 年度以降の予防保全対策技術の保守性に係る研究の事業計画案(実施不可も含む)について見直しの要否を検討した。令和 5 年度の実施項目は以下である。

#### ■ 試験仕様詳細の検討

- 除染の影響確認試験の実施仕様詳細の検討
  - PWR プラント廃炉時の除染の影響確認試験計画の検討
  - PWR プラントの放射線環境下での応力測定の成立性検証
- 要素試験体による解析手法の妥当性確認の検討
  - 要素試験体による切断影響確認(試験的アプローチ)
  - 要素試験体を模擬した解析による切断影響確認(解析的アプローチ)

#### ■ 試験の実施

- 試験片及び試験装置の製作準備

#### (1) 試験仕様詳細の検討

- 除染の影響確認試験の実施仕様詳細の検討
  - PWR プラント廃炉時の除染の影響確認試験計画の検討

残留応力分布に影響を与える要因の確認試験として、令和 4 年度に策定した BWR の廃炉段階における除染による影響確認試験計画の策定に引き続き、令和 5 年度は PWR の廃炉段階における除染による影響確認試験計画を検討した。

PWR と BWR は除染方法が異なること、応力測定を実施するピーニング施工部位に対するプラント運転による皮膜の形成を試験片に模擬して皮膜を付与する時間が BWR に比べて PWR は 3 倍程度必要となること等、BWR の計画と異なる仕様はあるが、準備から実施まで 3 か年程度との目途を得た。
  - PWR プラントの放射線環境下での応力測定の成立性検証

令和 5 年度は、選定した一般仕様の応力測定機器のうち、より小型な測定機材のパルステック工業製  $\mu$ -X360S : IP 検出器を使用した。この機材を放射線環境場に設置し応力測定する場合、配置の制約上、測定機材側の電源・制御用のケーブルの規格外の延長が必要となり、現状、その延長による必要電圧・ノイズ等の影響は未確認である。そのため、選定した測定機材の応力測定系のイメージングプレート(以下、IP という)が脱着可能であることを利用して、取り外した IP を放射線環境場に設置して曝した後に、再度、測定機材に取り付け応力測定する方法で放射線環境下の影響を評価した。IP は放射線を高感度に検知するため、測定に用いる X 線だけでなく、環境放射線による感光を考慮する必要がある、環境放射線に感光した場合、バックグラウンドの増加により S/N 比が低下し、精度の低下や測定

が困難となる等の可能性があった。試験の結果、1～6 mSv/h で照射を受けた IP で非照射と同程度の応力測定が可能であり、選定した測定機材(cos α 法)で PWR 管台溶接部の応力測定が可能であることを示唆する結果が得られた。

以上の成果より、除染の影響確認試験が3か年程度であること、測定対象部位である蒸気発生器水室内の廃炉措置除染後の放射線環境下で応力測定が可能との見込みを得ることができた。将来の実機測定の実施を念頭に、令和6年度は PWR 蒸気発生器管台の予防保全部位の応力測定工法の工事基本実施計画の検討をすることとした。基本的な検討内容は、実機測定時期の想定、これまでの検討を踏まえた各種課題の抽出、実機測定に向けたロードマップ検討として、事業計画に反映した。事業計画を図 3.3.3-1 に示す。

- 要素試験体による解析手法の妥当性確認の検討

- 要素試験体による切断影響確認(試験的アプローチ)

要素試験体からの試験体切り出しを想定した切断を行い、切断前後で SP 施工部位表層部の残留応力を測定した。その結果、最終切断後(100mm×100mm)においても、SP 施工部位表層部の残留応力は圧縮となっていることを確認した。

- 要素試験体を模擬した解析による切断影響確認(解析的アプローチ)

要素試験体を模擬した解析モデルを作成し、要素試験体の切断過程における SP 施工部位の表層残留応力の測定結果との比較を行うことで、要素試験を再現した解析モデルを検証した。溶接残留応力の解析の結果、HAZ 部で引張残留応力となり、要素試験体の溶接後の HAZ 近傍の表層部残留応力の測定結果の傾向を模擬できていることを確認した。次に SP による残留応力解析は、溶接残留応力解析後に、解析モデルの表層部に一定の圧縮応力を生じさせる塑性ひずみを付与する解析を採用することで、SP による均一な圧縮残留応力を再現し、表層部から深さ 1mm 程度の応力分布が SP 施工後の深さ方向の残留応力分布を模擬していることを確認した。切断模擬解析では、上記の溶接残留応力及び SP 残留応力を付与した解析モデルで切断を模擬した解析をすることで、切断による残留応力の変化を確認し、要素試験体の切断時 SP 施工部位表層部の残留応力測定結果と比較し、それぞれの切断ステップでその測定結果を再現していること、最終切断後(100 mm×100 mm)で圧縮応力が保持されることを確認した。

以上より、溶接残留応力及び SP 残留応力を重畳した複合的な応力状態を模擬して切断の影響を評価する解析的アプローチとして検討した要素試験体解析モデルの妥当性を確認できた。令和6年度は、令和4年度に計画した事業計画に基づき、実機構造模擬試験の準備として解析モデルの整備等を行う。事業計画を図 3.3.3-2 に示す。

## (2) 試験の実施

残留応力分布に影響を与える要因の確認試験として、令和4年度に策定した BWR プラントの廃炉段階の除染による影響確認試験計画案を基に試験準備に着手した。本試

験は令和4年度に開始した3か年計画のうち2年目となる。

■ 除染試験片の製作準備

■ 除染試験装置の製作準備

除染試験片は重量測定・断面観察用試験片と残留応力測定用試験片の2種類である。令和5年度は、令和4年度に加工・SP施工まで実施した試験片に対して高温酸化皮膜付与を行い、酸化皮膜付与後の外観観察・重量測定・残留応力測定を実施した。また一部の試験片について断面観察を実施し、試験片表面に適切な酸化皮膜が形成されていることを確認した。令和5年度計画範囲の除染試験片の製作準備を完了した。

除染試験装置の準備として、令和5年度に策定したバッチ試験装置の構成と仕様に基づき、セパラブルフラスコやセパラブルフラスコ内の温度を一定に保つためのバンドヒーターの準備、また試験片取付け用の治具製作等を実施し、令和5年度計画範囲の除染試験装置の製作準備を完了した。

令和6年度は、令和4年度に策定した試験の3か年計画の3年目の試験実施フェーズとなる。本項目の進捗による事業計画の見直しはない。事業計画を図3.3.3-2に示す。

### (3) 事業計画案の見直し

上記(1)及び(2)の成果を総合的に検討し、令和6年度以降の事業計画案を見直した。

# 実施計画案 (1)

## 残留応力測定方法・設備等の課題解決方法の検討

### 【1】影響確認試験計画の立案及び試験の実施

基本的な工法分類6種4工法と応力測定手法の技術課題に対する解決方法を検討し、具体的な課題を解決する研究計画案を検討

#### ● 気中施工部位 (PWR SG管台 USP施工部位 代表)

##### 【令和4年度：SG管台内面ISI装置】

開発要素は含まれるが、基本技術は既存の組み合わせによる成  
立が見込まれ、引き続き作業性や放射線等の課題詳細調査とそ  
の解決方法を検討 (継続)

##### 【令和5年度：放射線環境下での応力測定の実証】

工法の成⽴性検討で選定した応力測定機材の放射線環境下で  
の応力測定の実証として、回折X線を二次元的に記録する  
イメージングプレート (IP) を放射線環境に暴露し、実験的に影  
響を評価。測定対象部位の除染後の環境で測定可能飲み込み  
を得た。

##### 【令和6年度：実機適用に向けたロードマップの策定】

#### ● 水中環境施工部位 (RPV管台・炉底部、炉内機器)

##### 【令和3年度：検討を本事業ではHOLD】

遠隔操作システム等で測定となり、既存測定機材に対する技術  
開発要素 (耐水性・耐放性、小型化、リモート化等) が多くハ  
ードルは高く、これらの課題と具体的な解決方針をまとめ、本研究で  
は一時Hold。

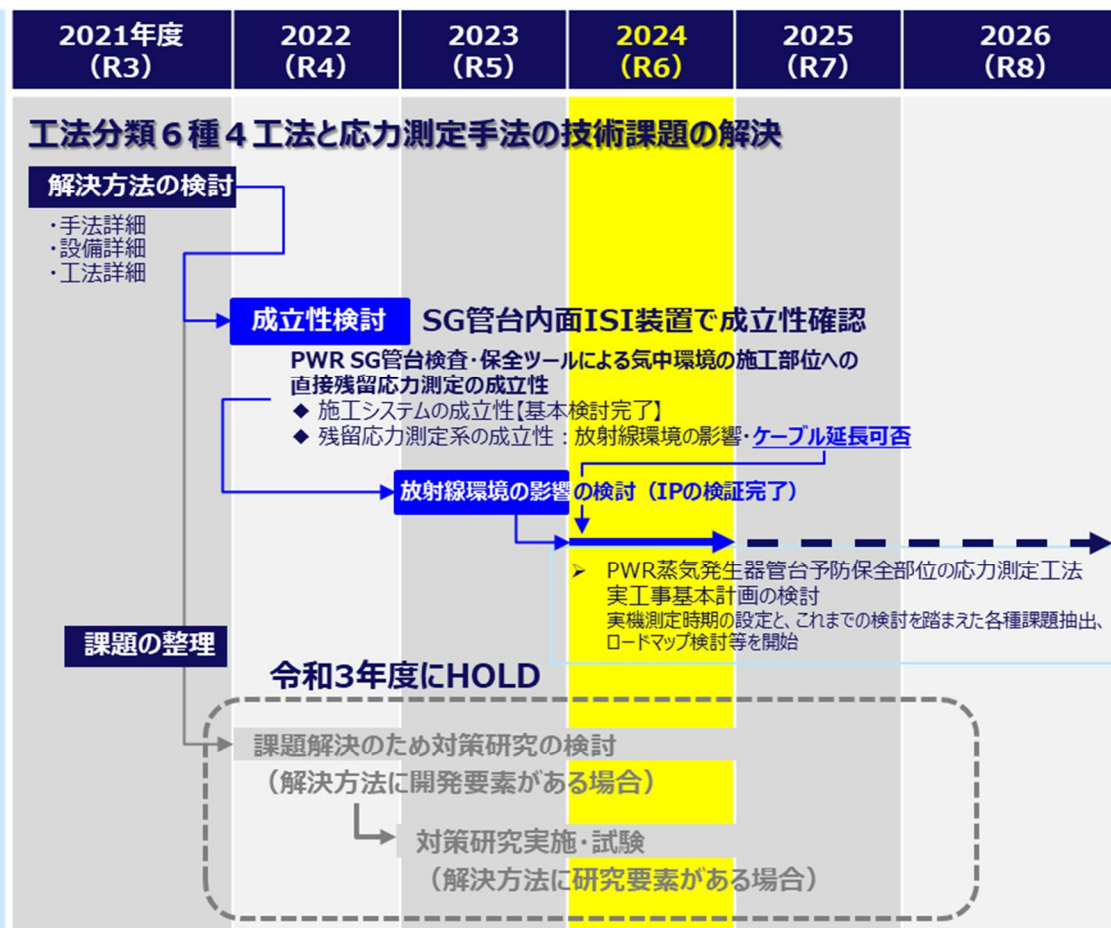


図 3.3.3-1 (1/2) 予防保全対策技術の保守性に係る研究 事業計画案(令和5年度版)

## 実施計画案 (2)

### 切断・加工仕様策定のための試験計画の検討

#### 【1】影響確認試験計画の立案及び試験の実施

残留応力分布に影響を与える要因として、

- ✓ **要素試験 1 : ピーニング応力への切断影響**  
施工面の切断に伴う供試体寸法縮小による残留応力の緩和・解放がないことの確認
- ✓ **要素試験 2 : ピーニング応力への除染影響**  
測定表面性状が応力測定に与える影響やピーニングの表面近傍応力の緩和・喪失がないことの確認

【R4】BWR条件試験開始・  
【R5】PWR条件計画及び仕様検討

- ✓ **要素試験 3 : 残留応力に対する切断影響**  
機器製造来歴を踏まえた曲げ加工、溶接による構造部材内部の残留応力分布に対する切断影響の確認

【R5】平板継手試験体による切断試験と解析的検討

- ✓ **【R6】実機構造模擬試験の試験計画詳細検討（解析的アプローチ）に着手**

#### 【2】実機構造模擬試験の試験計画案の立案

実機施工部位の自己拘束等も踏まえたモックアップ試験の試験計画案を立案

- ✓ 実機予防保全施工部位は薄肉円筒構造物、管台及び配管接続部等（実機構造部分模擬試験体等）
- ✓ 寸法の影響のみならず切断による自己拘束力解放の影響が想定

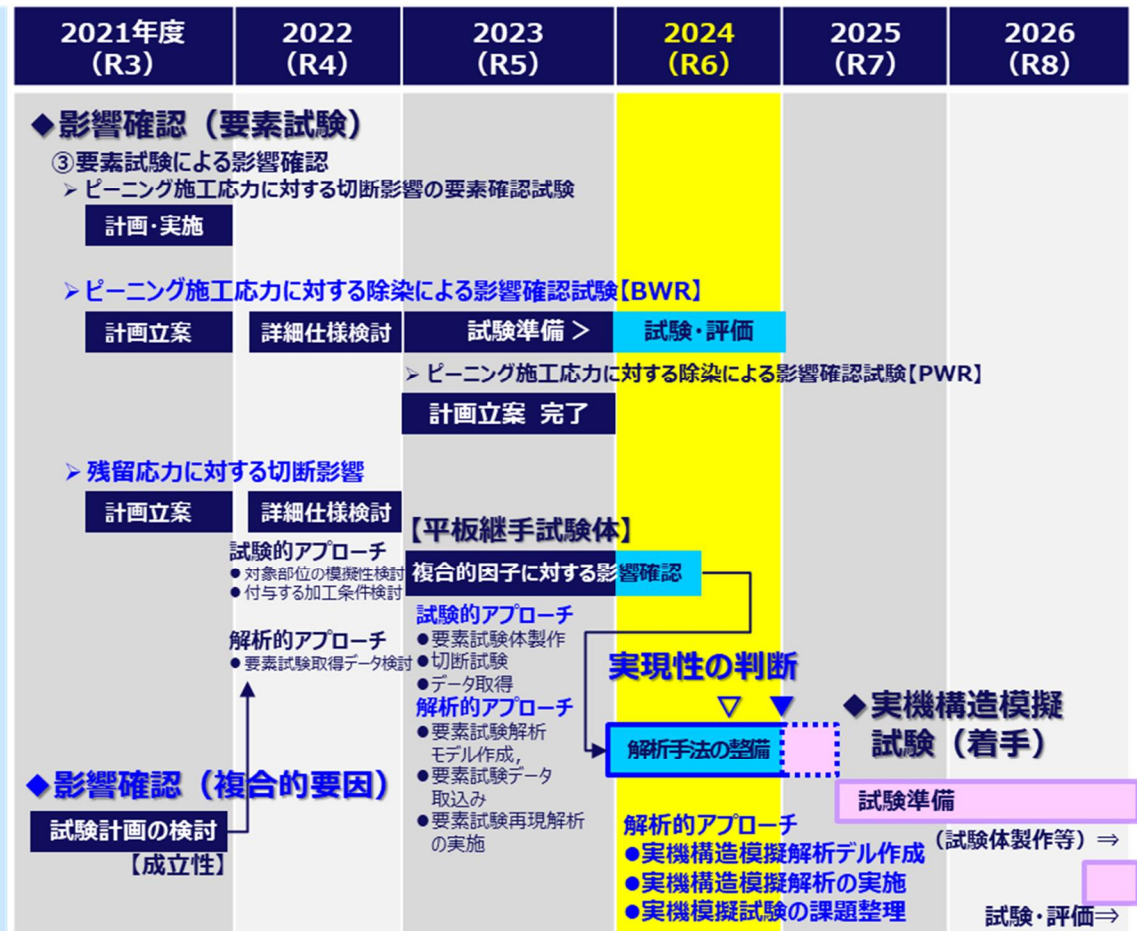


図 3.3.3-2 (2/2) 予防保全対策技術の保守性に係る研究 事業計画案(令和5年度版)

### 3.4 ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究

#### 3.4.1 試験片の製作

##### (1) 試験片の形状及び寸法

令和5年度製作した試験片を以下に示す。

- ・ 引張試験片(適用規格：JIS Z 2241(2015)14A 号)2 個
- ・ シャルピー衝撃試験片(適用規格：JIS Z 2242(2023) 標準試験片(V ノッチ試験片))12 個
- ・ 化学成分分析用試験片(適用規格：なし)2 個(1 個を約 8g と約 2g に小分けして試験に供する)

引張試験片の形状及び寸法を図 3.4.1(1)-1 に、シャルピー衝撃試験片の形状及び寸法を図 3.4.1(1)-2 に示す。なお、化学成分分析用試験片は重量のみを規定した不定形で寸法及び形状に仕様はないため、実績のみを後述して示す。

引張試験片は JIS Z 2241(2015)に準拠した 14A 号平板試験片とした。ただし、鑄造組織における不均一性を考慮して極力断面積の大きな引張試験片とすることとし、引張試験片平行部直径  $d_0$  を 5mm に設定することを優先した。JIS Z 2241 では、14A 号試験片の場合、平行部長さ  $L_c$  は  $L_c=7d_0(=35\text{mm})$  が、原標点距離  $L_0$  は  $L_0=5.65d_0(=28.25\text{mm})$  が推奨される。一方、図 3.4.1(2)-3~8 の試験片板取図に記載した通り、引張試験片長手方向平行部を 1T-C(T)試験片のノッチと合わせるとともに、1T-C(T)試験片及び引張試験片の予備を確保することとしたため、引張試験片長さは 95mm に制約される。引張試験片長さから、試験片つかみ部 20mm 及び試験片肩部 R15 の寸法を除いた長さ 28mm が  $L_c$  として最大確保できる寸法であり、 $L_c=28\text{mm}(=5.6d_0)$  と設定することとした。なお、 $L_c$  は常に  $L_0$  より長くなくてはならない、原標点距離は 15mm 以上でなければならないと JIS Z 2241 に規定されていることから、 $L_0=27.6\text{mm}$  と設定した。

シャルピー衝撃試験片は JIS Z 2242(2023)に準拠した標準試験片(V ノッチ試験片)とした。

各試験片の製作手順を以下に示す。

##### 1. 試験体の粗切断

製作する試験片を含むように試験体をブロック状に切断する。なお、令和5年度加工する試験体の粗切断は令和4年度実施済みである。

##### 2. 試験片の加工

ブロック状に切り分けた試験体から試験片を加工する。

##### 3. 試験片の測定

引張試験片及びシャルピー衝撃試験片については加工した試験片の寸法を測定し、

各寸法が所定の交差内であることを確認する。化学成分分析用試験片については重量測定を行い、概ね目標値であることを確認する。

試験体の粗切断及び試験片の加工に際しては切断に先立って罫書きを施し、罫書き線に沿って切断することにより誤りが生じないようにした。

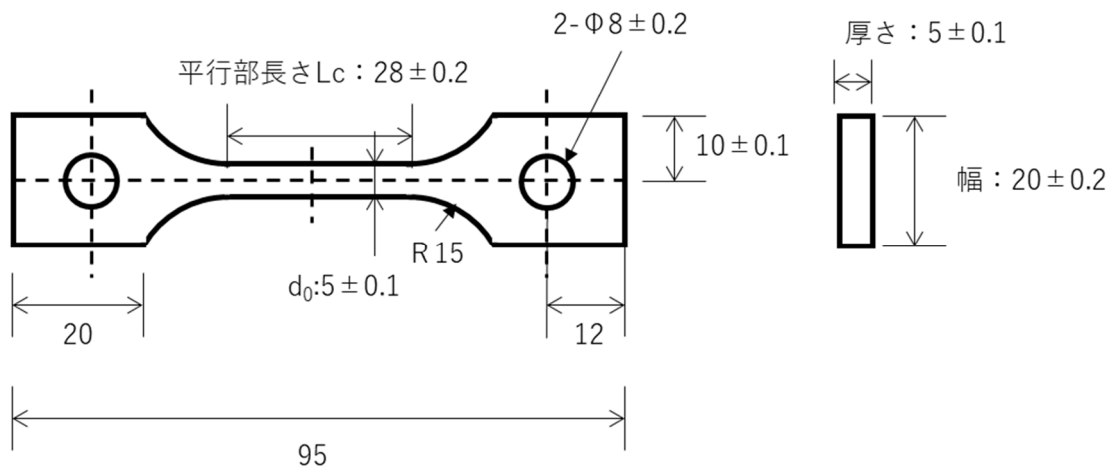


図 3.4.1(1)-1 引張試験片の形状及び寸法

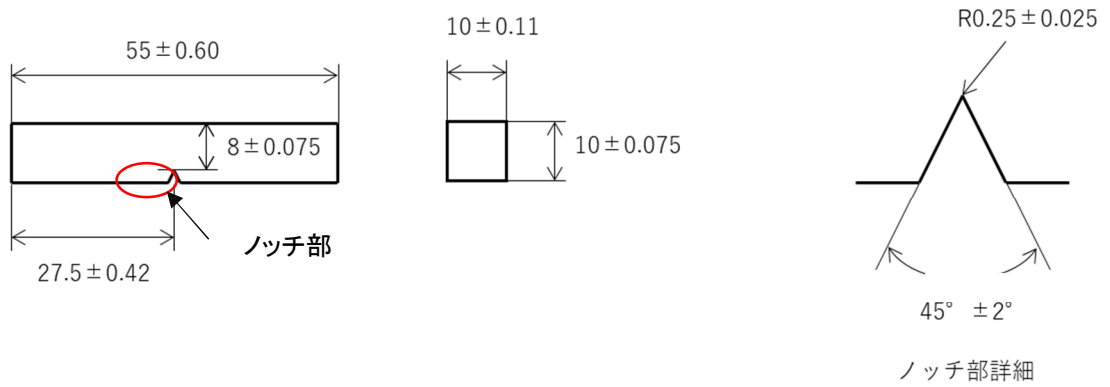


図 3.4.1(1)-2 シャルピー衝撃試験片の形状及び寸法



## (2) 試験体の粗切断

PLR ポンプにおける試験体採取位置及び試験体の配置と ID の関係を図 3.4.1(2)-1 に示す。上の写真に赤線で示すように PLR ポンプから円筒状に材料を切り出し、下の写真に示すように 8 個の試験体を切り出した。また、試験体の外観を図 3.4.1(2)-2 に示す。試験体は円筒形の構造物の概ね 2/3 周の範囲から ID-1 と 6、ID-2 と 5、ID-3 と 4、ID-7 と 8 が対面側となるように 8 体採取した。従って、試験片の方向を元の構造物を基準に示すと、ID-1、2、3、8 と ID-4、5、6、7 はそれぞれ鏡像反転した位置関係となる。このうち、試験片は ID-1～6 の試験体から採取する方針とし、ID-7 と 8 は追加試験等で不足が生じたときに使用する予備試験体とした。

令和 5 年度製作するのは引張試験片 2 個、シャルピー衝撃試験片 12 個、化学成分分析用試験片 2 個である。引張試験片は ID-1 及び 6 より 1 個ずつ、シャルピー衝撃試験片は ID-1～6 より 2 個ずつ、化学成分分析用試験片は ID-2 及び 5 より 1 個ずつ採取し、それぞれを成分分析に適したチップ状試料に加工した。分析は 2 か所の機関で実施するため、1 個の試験片から加工したチップ状試料を 2 つの塊に分け、それぞれに異なる管理番号を付して管理した。

試験体 6 個(ID-1～6)の試験片採取位置を図 3.4.1(2)-3～8 に示す。試験体毎に寸法や向きが異なるため、板取図は試験体毎に作成した。図中には粗切断及びワイヤカットによる試験体分割位置も示した。3.4.1(2)-5 でワイヤカット加工を 2 回実施しているのは、予亀裂導入に不具合があったため試験体の残部より追加で C(T)試験片を加工したためである。試験片加工のためのブロック状試験体を得るために粗切断する箇所を赤い点線で示した。粗切断にはバンドソーを用いる。ワイヤカットにより切断する箇所を赤い実線で示した。なお、バンドソーによる粗切断及び図中に示すワイヤカット加工は令和 4 年度に実施済みである。

また、令和 4 年度に粗切断面をエッチングし、試験片に有害な補修溶接や溶接欠陥がないことを確認した。

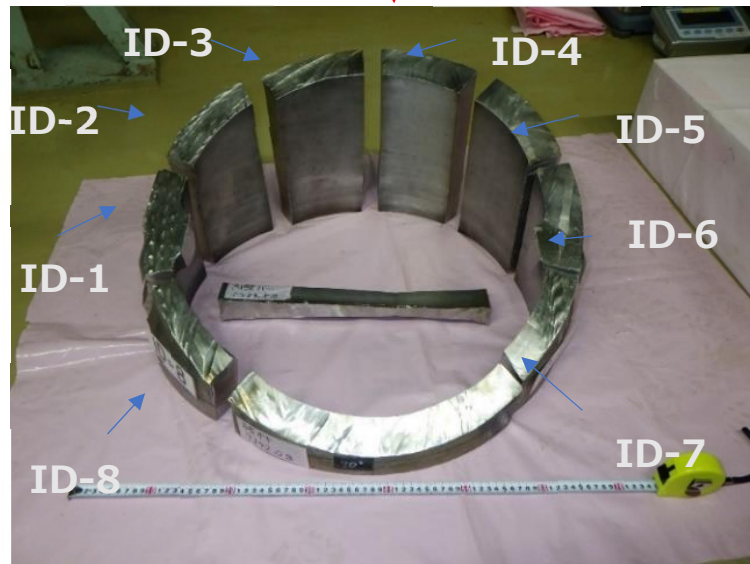


図 3.4.1(2)-1 PLR ポンプにおける試験体採取位置及び試験体の配置と ID の関係



① ID-1、2



② ID-3、4

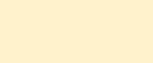


③ ID-5、6



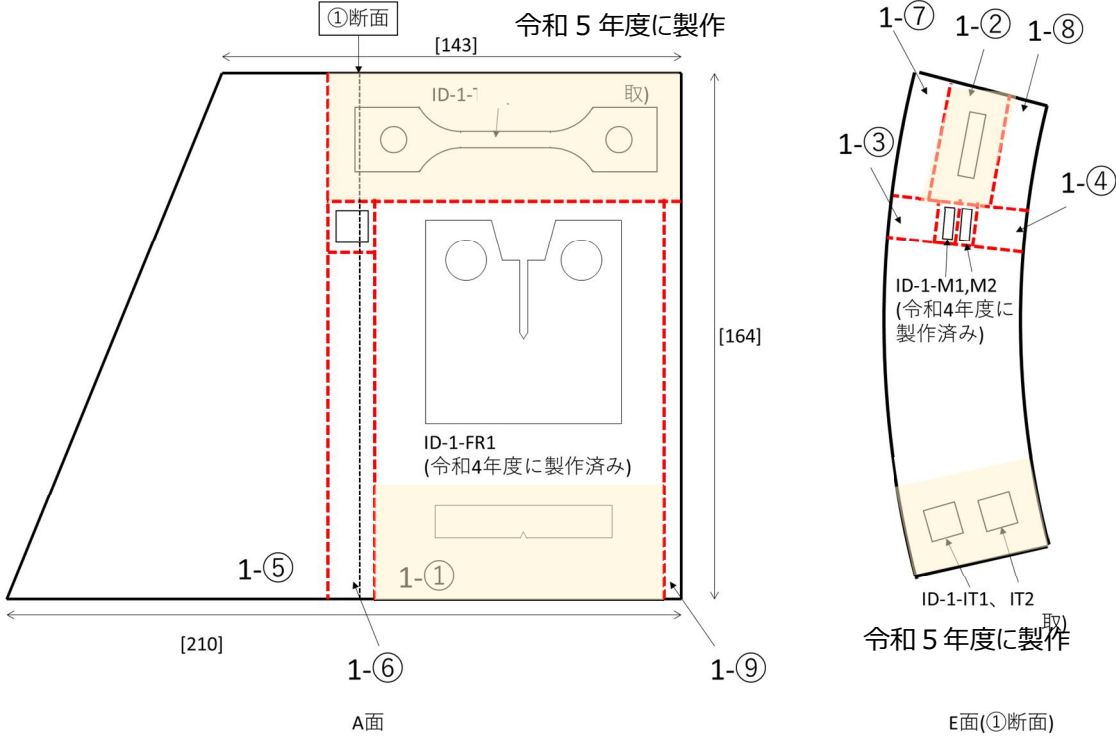
④ ID-7、8

図 3.4.1(2)-2 各試験体の外観

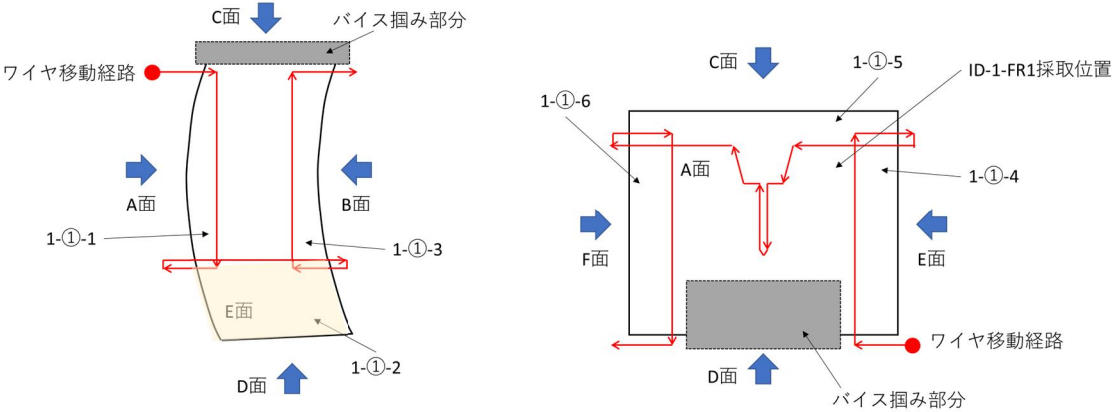


令和5年度試験片採取位置

--- バンドソーによる粗切断線  
← ワイヤカット加工線



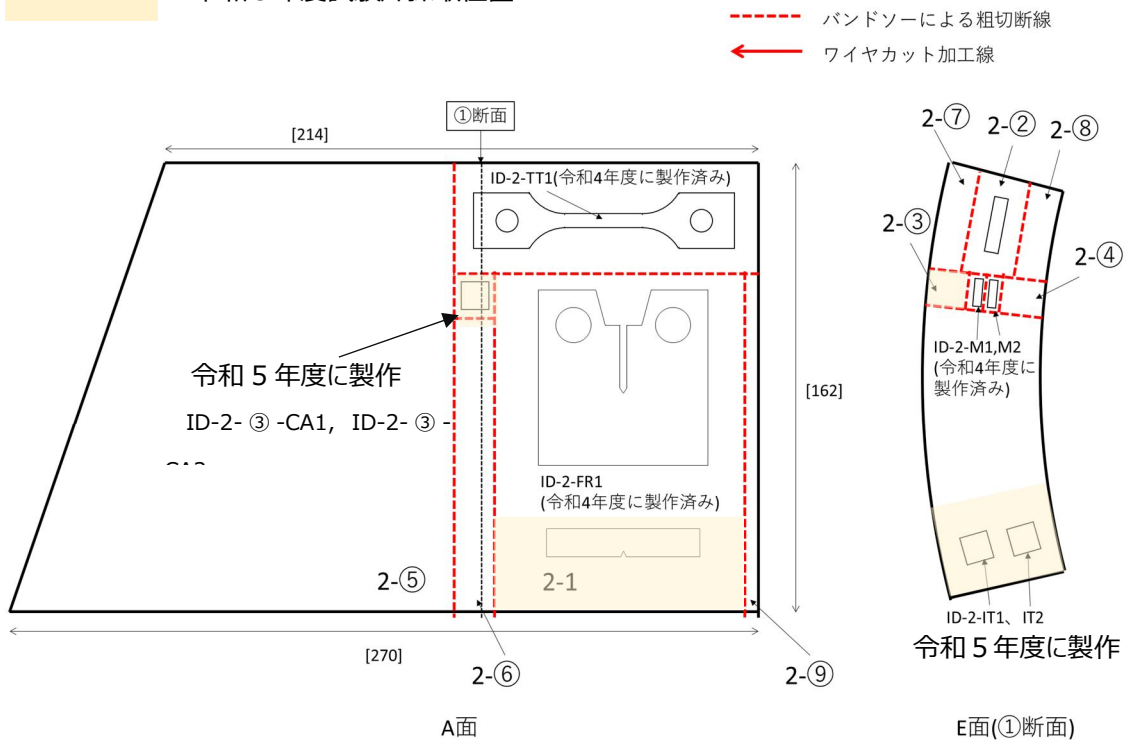
(a) バンドソーによる粗切断



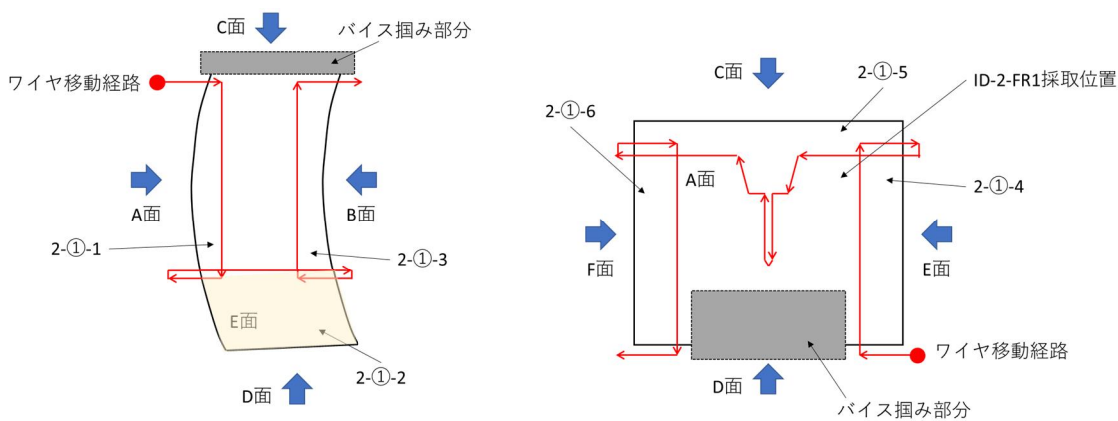
(b) 1-①に対するワイヤカット加工

図 3.4.1(2)-3 試験体からの試験片採取位置と粗切断及びワイヤカットによる試験体分割位置・試験体管理番号(ID-1)

令和5年度試験片採取位置

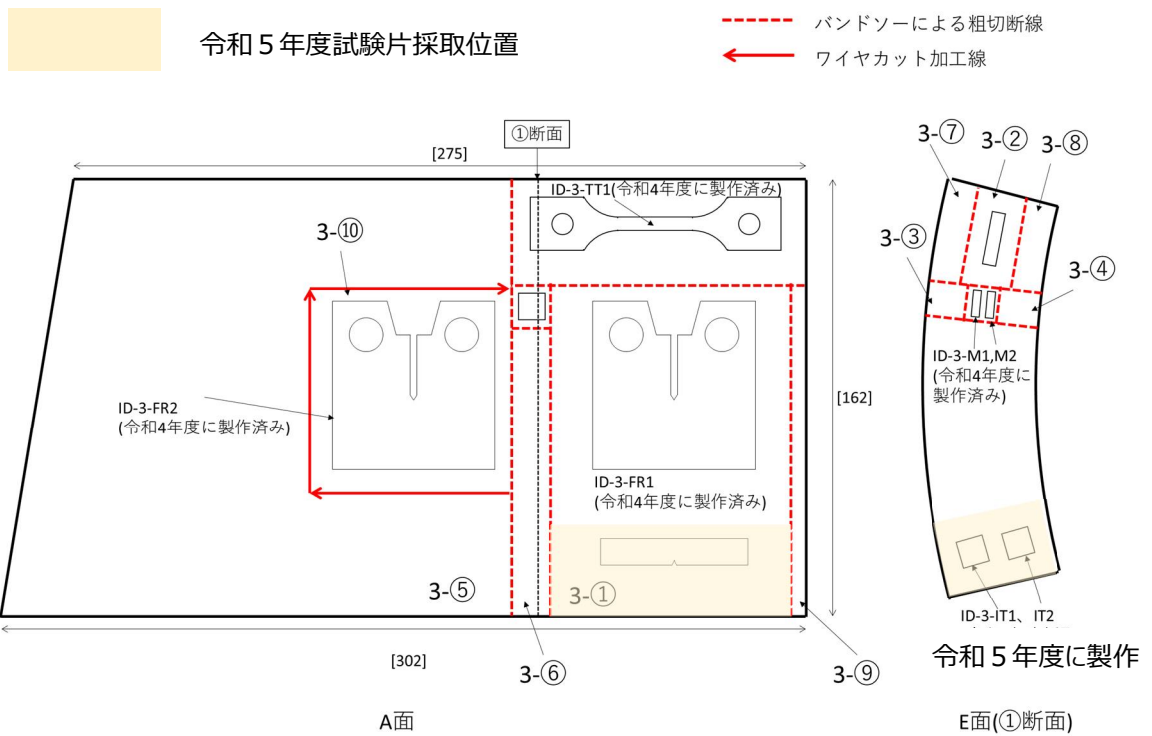


(a) バンドソーによる粗切断



(b) 2-①に対するワイヤカット加工

図 3.4.1(2)-4 試験体からの試験片採取位置と粗切断及びワイヤカットによる試験体分割位置・試験体管理番号(ID-2)



(a) バンドソーによる粗切断

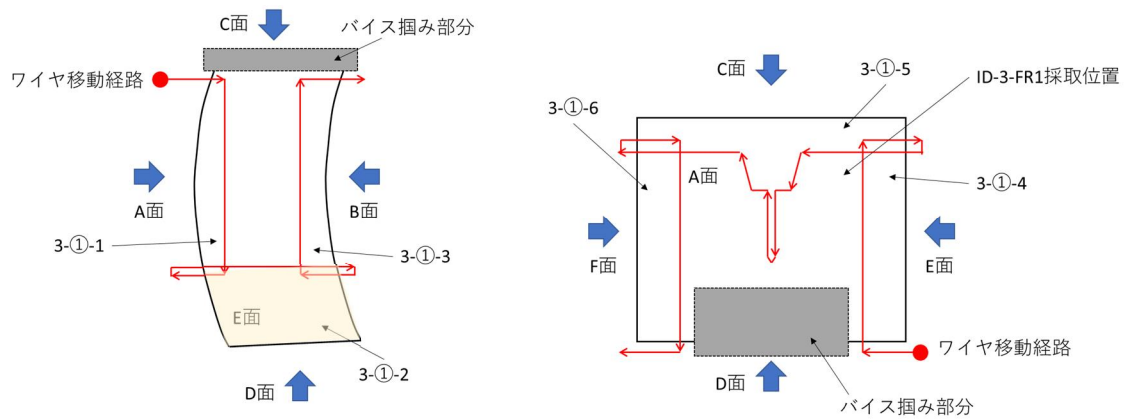
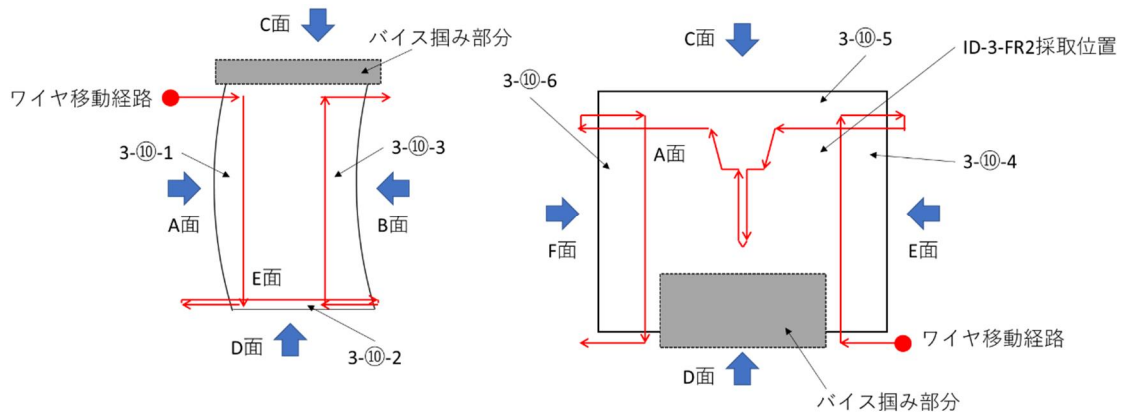


図 3.4.1(2)-5 (1/2) 試験体からの試験片採取位置と粗切断及びワイヤカットによる試験体分割位置・試験体管理番号(ID-3)



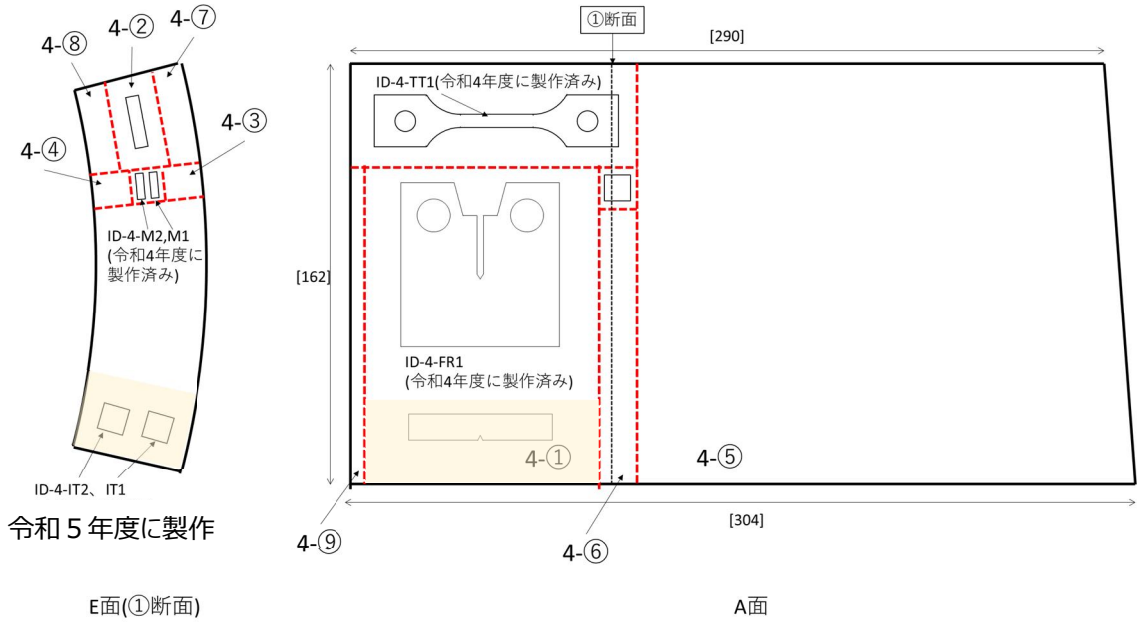
(c) 3-⑩に対するワイヤカット加工(ID-3-FR2 製作時)

図 3.4.1(2)-5 (2/2) 試験体からの試験片採取位置と粗切断及びワイヤカットによる試験体分割位置・試験体管理番号(ID-3)

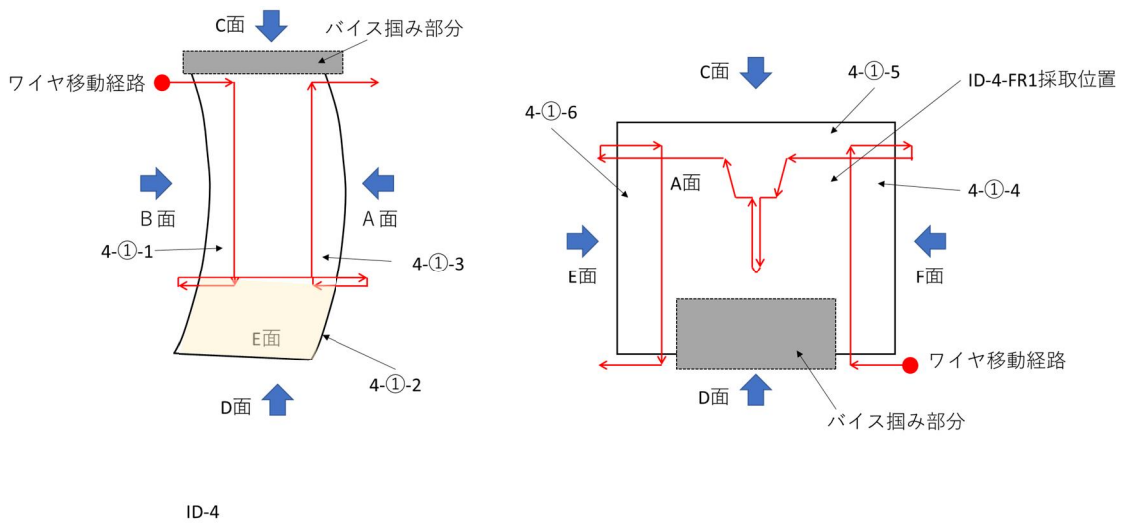


### 令和5年度試験片採取位置

--- バンドソーによる粗切断線  
← ワイヤカット加工線



(a) バンドソーによる粗切断



(b) 4-①に対するワイヤカット加工

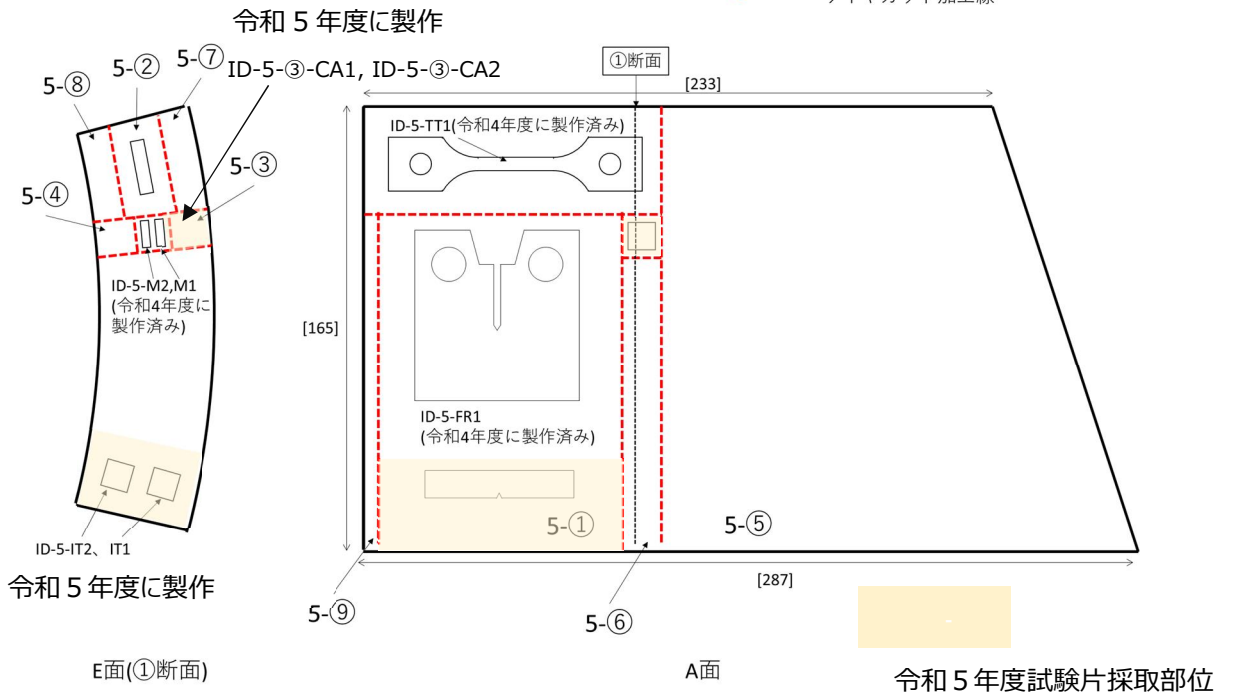
図 3.4.1(2)-6 試験体からの試験片採取位置と粗切断及びワイヤカットによる試験体分割位置・試験体管理番号(ID-4)



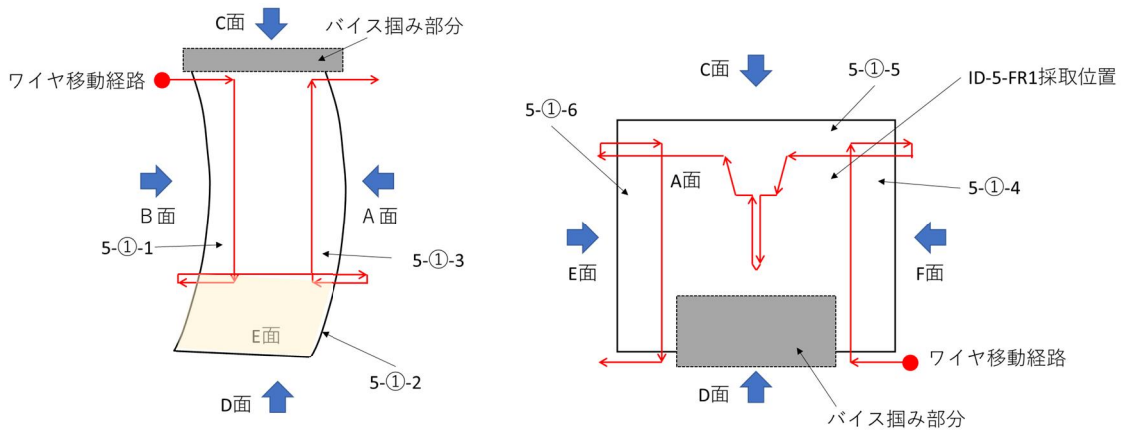


### 令和5年度試験片採取位置

--- バンドソーによる粗切断線  
 ← ワイヤカット加工線



(a) バンドソーによる粗切断

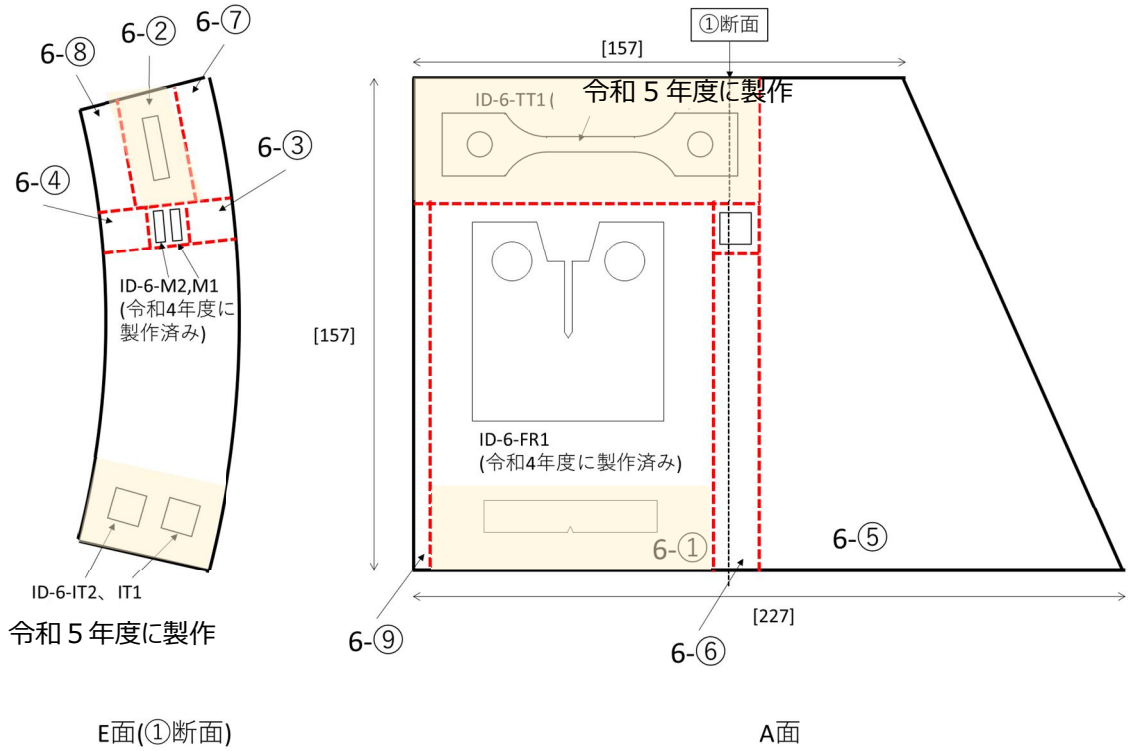


(b) 5-①に対するワイヤカット加工

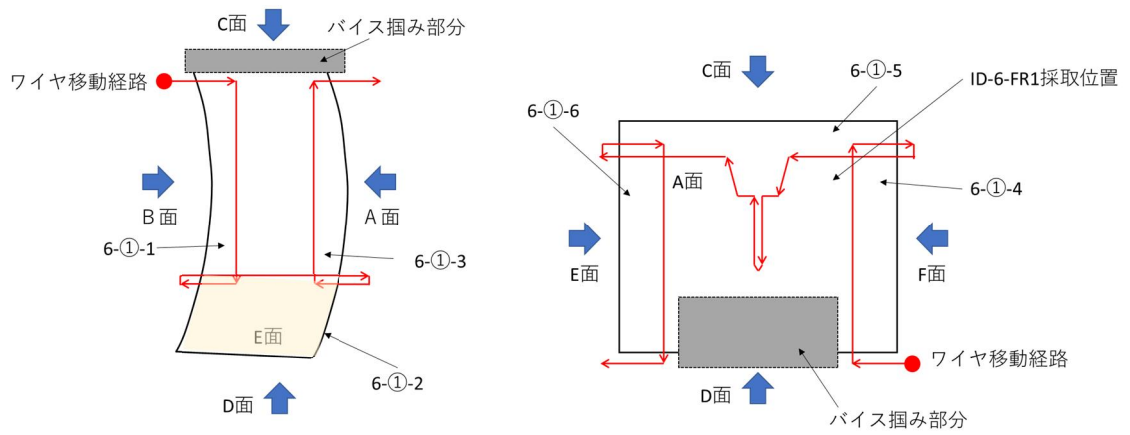
図 3.4.1(2)-7 試験体からの試験片採取位置と粗切断及びワイヤカットによる試験体分割位置・試験体管理番号(ID-5)

令和5年度試験片採取位置

--- バンドソーによる粗切断線  
 ← ワイヤカット加工線



(a) バンドソーによる粗切断



(b) 6-①に対するワイヤカット加工

図 3.4.1(2)-8 試験体からの試験片採取位置と粗切断及びワイヤカットによる試験体分割位置・試験体管理番号(ID-6)

### (3) 試験片の加工

#### 1) 試験体方位の定義

試験片の加工の際には元の構造物と試験片の方向の関係を明確にする必要がある。そのため、図 3.4.1(3)-1 に示すように各試験体の面と方位の関係を定義した。以降、試験体の面は図 3.4.1(3)-1 を基準に示す。

#### 2) 引張試験片

試験体 ID-1 及び ID-6 より 1 個ずつ引張試験片を加工した。試験体の ID 及び粗切断後のブロック管理番号と試験片番号の対応を表 3.4.1(3)-1 に示す。図 3.4.1(3)-2 に引張試験片を採取する粗切断後のブロック状試験体を示す。また、試験体より採取したブロック状試験体における引張試験片板取図位置を図 3.4.1(3)-3 に示す。

引張試験片の加工手順を図 3.4.1(3)-4 に示す。図中の手順に従って、ワイヤカットで直方体を加工した。その後、フライスで直方体を試験片の厚さまで削り込んだ。続けてドリルを用いてピン穴を、その後、フライスを使って並行部の加工を行引張試験片の形状に加工した。加工した引張試験片には試験片番号をマーキングした。マーキング要領を図 3.4.1(3)-5 に示す。試験片破断後も試験片番号により試験片を管理できるよう、両側のつかみ部に試験片番号をマーキングした。

加工後に引張試験片の寸法測定及び外観観察を行った。ゲージ部には原標点間距離を測定するための罫書を行った。寸法測定結果を表 3.4.1(3)-2 に示す。引張試験片の寸法は全て公差の範囲内であった。引張試験片の外観を図 3.4.1(3)-6 に示す。引張試験に影響を及ぼすような外観上の傷や欠陥等はなかった。

#### 3) シャルピー衝撃試験片

試験体 ID1~6 より 2 個ずつシャルピー衝撃試験片を加工した。試験体の ID と試験片番号の対応を表 3.4.1(3)-3 に示す。図 3.4.1(3)-7 にシャルピー衝撃試験片を採取する粗切断後のブロック体外観及び方位を示す。外観における罫書きは令和 4 年度目安で引いたものであり、消去後に改めて罫書きを行った。ID-1~6 の試験体より採取したブロック状試験体の罫書き位置を図 3.4.1(3)-8 に示す。まず図中(a)の罫書きを引き、そこから±5mm の位置に(a)の罫書きと並行に(b)及び(c)の罫書きを行った。また、(a)の罫書きの中点を直行するように(d)の罫書きを行った。棒状に加工した後の罫書き位置を図 3.4.1(3)-9 に示す。E 面側の端面を基準に寸法を決めて罫書きした。これらの罫書きにより、ワイヤカットにおけるワイヤの移動経路と、ブロック体が試験片に対して十分な寸法を有していることを確認した。

シャルピー衝撃試験片の加工にはワイヤ放電加工機を用いた。図 3.4.1(3)-10 にシャルピー衝撃試験片加工手順を示す。位置決めのために C 面の面だし加工をした後、図中の手順に沿って棒状の試験片を加工する。その後、図 3.4.1(3)-9 に示す罫書きによりワイヤ移動経路の確認を行った後に長さ方向の寸法出しとノッチ加工を行い、シャルピー衝撃試験片を製作した。

ワイヤ放電加工機による加工後のシャルピー衝撃試験片に試験片番号をマーキングした。マーキング要領を図 3.4.1(3)-11 に示す。試験片破断後も試験片番号により試験片を管理できるよう、試験片の両端部に同じ試験片番号をマーキングした。

ワイヤ放電加工機による加工後にシャルピー衝撃試験片の寸法測定及び外観観察を行った。寸法測定箇所及び結果を表 3.4.1(3)-4 に示す。シャルピー衝撃試験片の寸法は全て公差の範囲内であった。シャルピー衝撃試験片の外観を図 3.4.1(3)-12 に示す。破壊靱性試験に影響を及ぼすような外観上の傷や欠陥等はなかった。

#### 4) 化学成分分析試験片

試験体 ID-2、ID-5 から化学成分分析試験片を採取した。試験体(ID-2、ID-5)の粗切断後の外観写真を図 3.4.1(3)-13 及び図 3.4.1(3)-14 に示す。これは令和4年度に行った粗切断後の外観である。化学成分分析試験片は ID-2-③、ID-5-③の観察用試験片を採取した後の残材とした。

JIS G0417:1999「鉄及び鋼—化学成分定量用試料の採取及び調製」4.4 試料の調製に準拠してフライスを用いてチップ状試料を採取した。以降チップ状にした試料は、化学成分分析試験片ではなく化学成分分析用試料と記している。化学成分分析用試料と試験片管理番号の対応を表 3.4.1(3)-5 に示す。また、化学成分分析試料の外観を図 3.4.1(3)-15 に示す。化学成分分析用試料の重量測定結果を表 3.4.1(3)-6 に示す。各試料の重量は設定どおりの値であった。

表 3.4.1(3)-1 試験体と引張試験片番号の対応

試験体 ID	ブロック体管理番号	試験片番号
ID-1	1-②	ID-1-TT1
ID-6	6-②	ID-6-TT1

表 3.4.1(3)-2 引張試験片寸法測定結果

単位：mm

測定箇所 寸法 試料名	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫
ID-1-TT1	94.9	12.0	12.0	8.0	8.0	10.0	10.0	20.1	15.0	28.0	5.0	5.0
ID-6-TT1	94.9	12.0	12.0	8.0	8.0	10.0	10.0	20.0	15.0	27.9	5.0	5.0

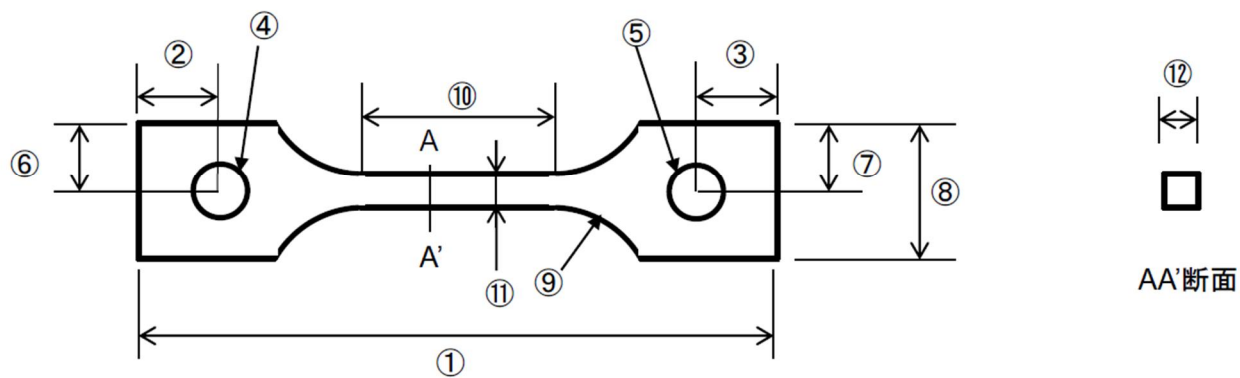


表 3.4.1(3)-3 試験体とシャルピー衝撃試験片番号の対応

試験体 ID	ブロック体管理番号	シャルピー衝撃試験片番号
ID-1	1-①-2	ID-1-IT1、ID-1-IT2
ID-2	2-①-2	ID-2-IT1、ID-2-IT2
ID-3	3-①-2	ID-3-IT1、ID-3-IT2
ID-4	4-①-2	ID-4-IT1、ID-4-IT2
ID-5	5-①-2	ID-5-IT1、ID-5-IT2
ID-6	6-①-2	ID-6-IT1、ID-6-IT2

表 3.4.1(3)-4 シャルピー衝撃試験片寸法測定結果(単位 : mm)

	単位 : mm						
測定箇所	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
寸法	55.0 ± 0.60	27.5 ± 0.42	8.0 ± 0.075	10 ± 0.11	10 ± 0.075	45° ± 2°	R0.25 ± 0.025
ID-1-IT1	55.05	27.52	8.002	10.04	10.003	44	R0.258
ID-1-IT2	55.06	27.54	8.002	10.05	9.994	44	R0.268
ID-2-IT1	55.06	27.57	8.060	10.05	10.050	45	R0.234
ID-2-IT2	55.04	27.53	7.999	10.04	9.984	44	R0.272
ID-3-IT1	55.06	27.53	8.012	10.05	10.001	45	R0.243
ID-3-IT2	55.05	27.54	7.999	10.06	9.996	45	R0.254
ID-4-IT1	55.06	27.53	8.015	10.04	10.006	45	R0.245
ID-4-IT2	55.06	27.54	7.996	10.05	9.999	44	R0.247
ID-5-IT1	55.05	27.53	8.033	10.04	10.022	45	R0.255
ID-5-IT2	55.07	27.54	8.029	10.06	9.999	45	R0.257
ID-6-IT1	55.07	27.53	8.024	10.07	9.997	44	R0.252

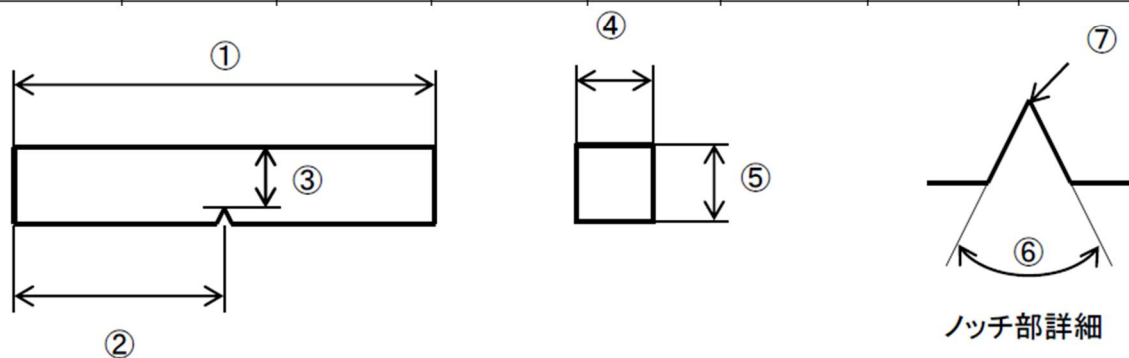


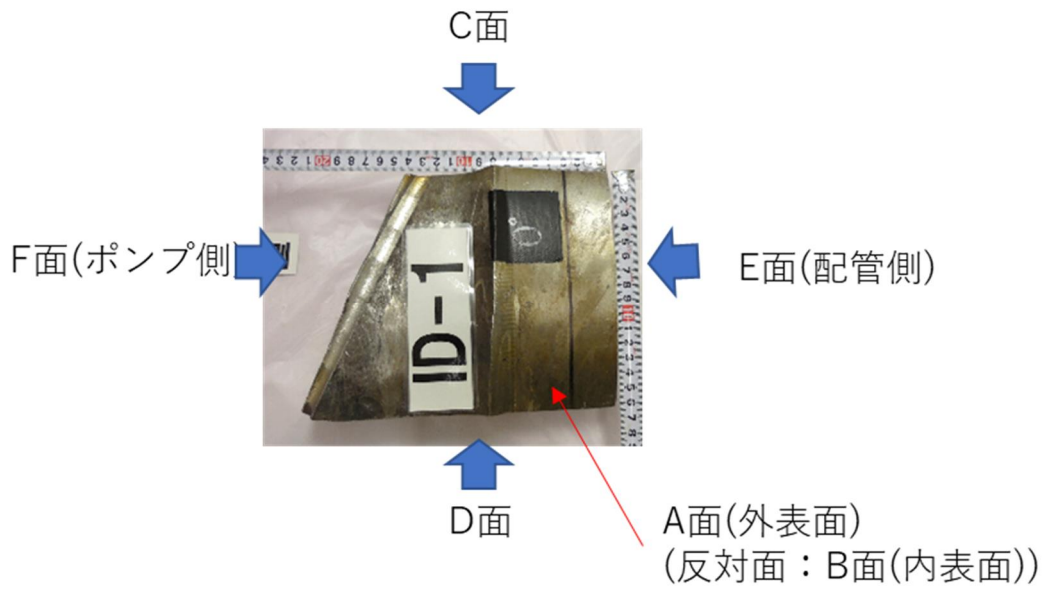


表 3.4.1(3)-5 化学成分分析用試料と試験片管理番号の対応

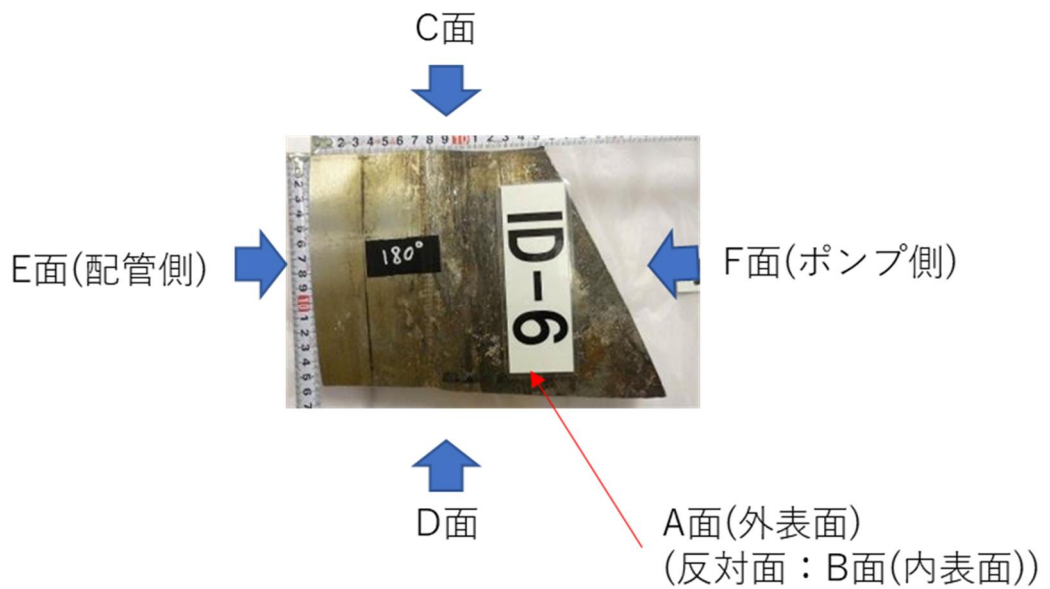
試験体	管理番号	
	C, Si, S, P, N(約6g)	Mn, Cr, Ni, Mo, Nb(約2g)
ID-2	ID-2-③-CA1	ID-2-③-CA2
ID-5	ID-5-③-CA1	ID-5-③-CA2

表 3.4.1(3)-6 化学成分分析用試料重量測定結果(単位 : g)

管理番号	1回目	2回目	3回目	平均
ID-2-③-CA1	6.0	6.0	6.0	6.0
ID-2-③-CA2	2.0	2.0	2.0	2.0
ID-5-③-CA1	6.0	6.0	6.0	6.0
ID-5-③-CA2	2.0	2.0	2.0	2.0



(a) ID-1～ID-3、ID-8(ID-1 を例に示す)



(b) ID-4～ID-7(ID-6 を例に示す)

図 3.4.1(3)-1 試験体の面の定義

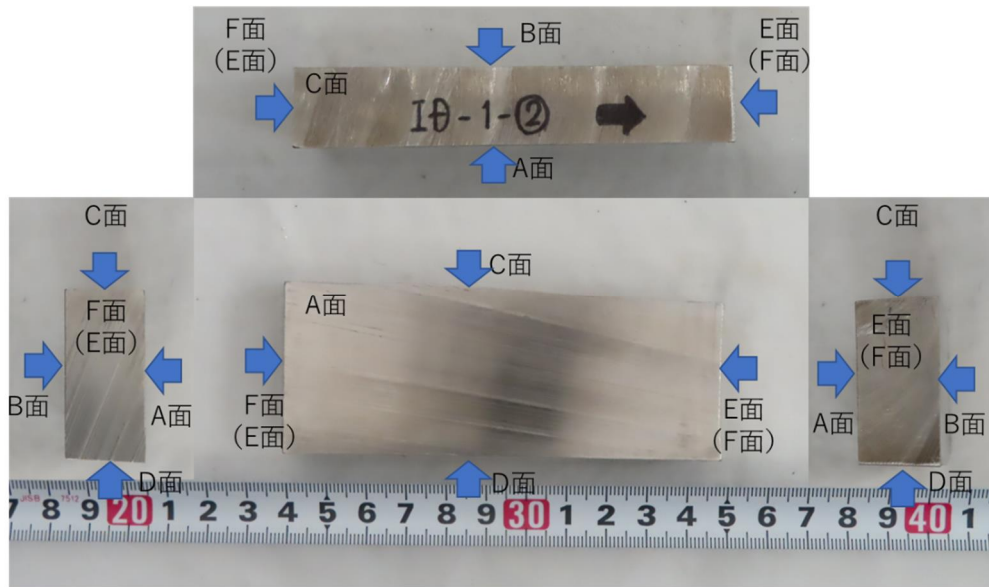
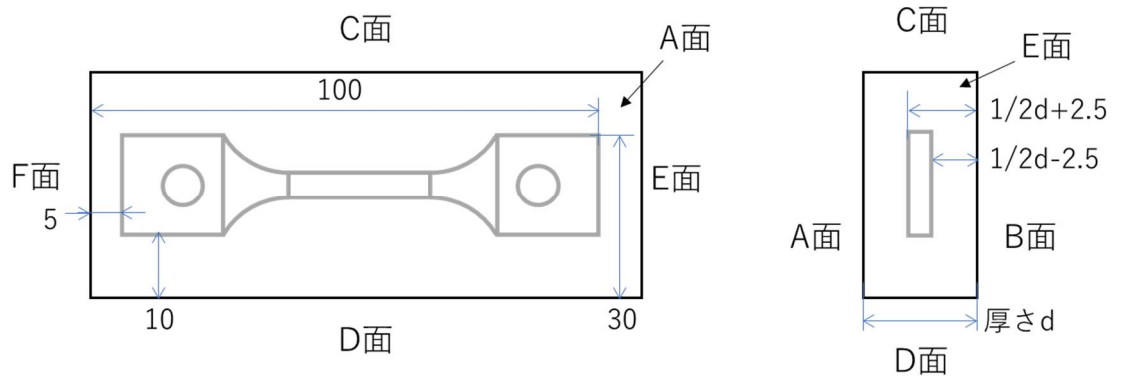
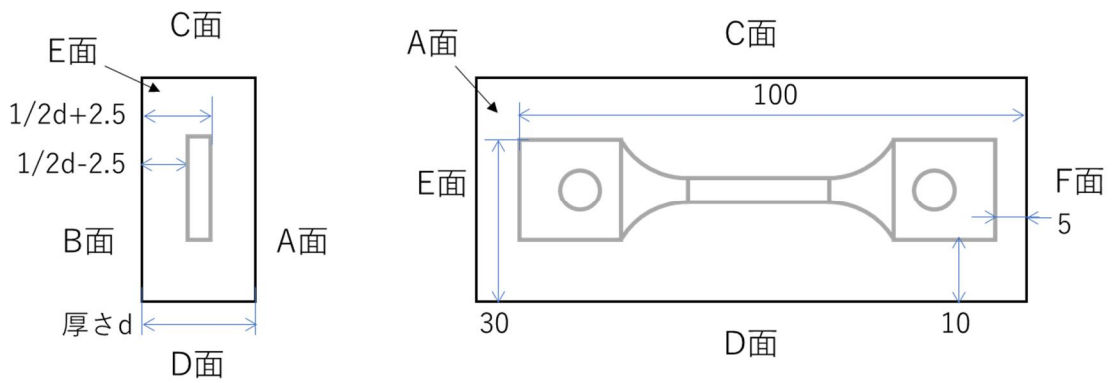


図 3.4.1(3)-2 引張試験片を採取するブロック及び方位  
(ID-1 で例示、ID-6 は方位のみをカッコ内に示す)



(a) ID-1



(b) ID-6

図 3.4.1(3)-3 ブロック材からの引張試験片採取板取図(単位 : mm)

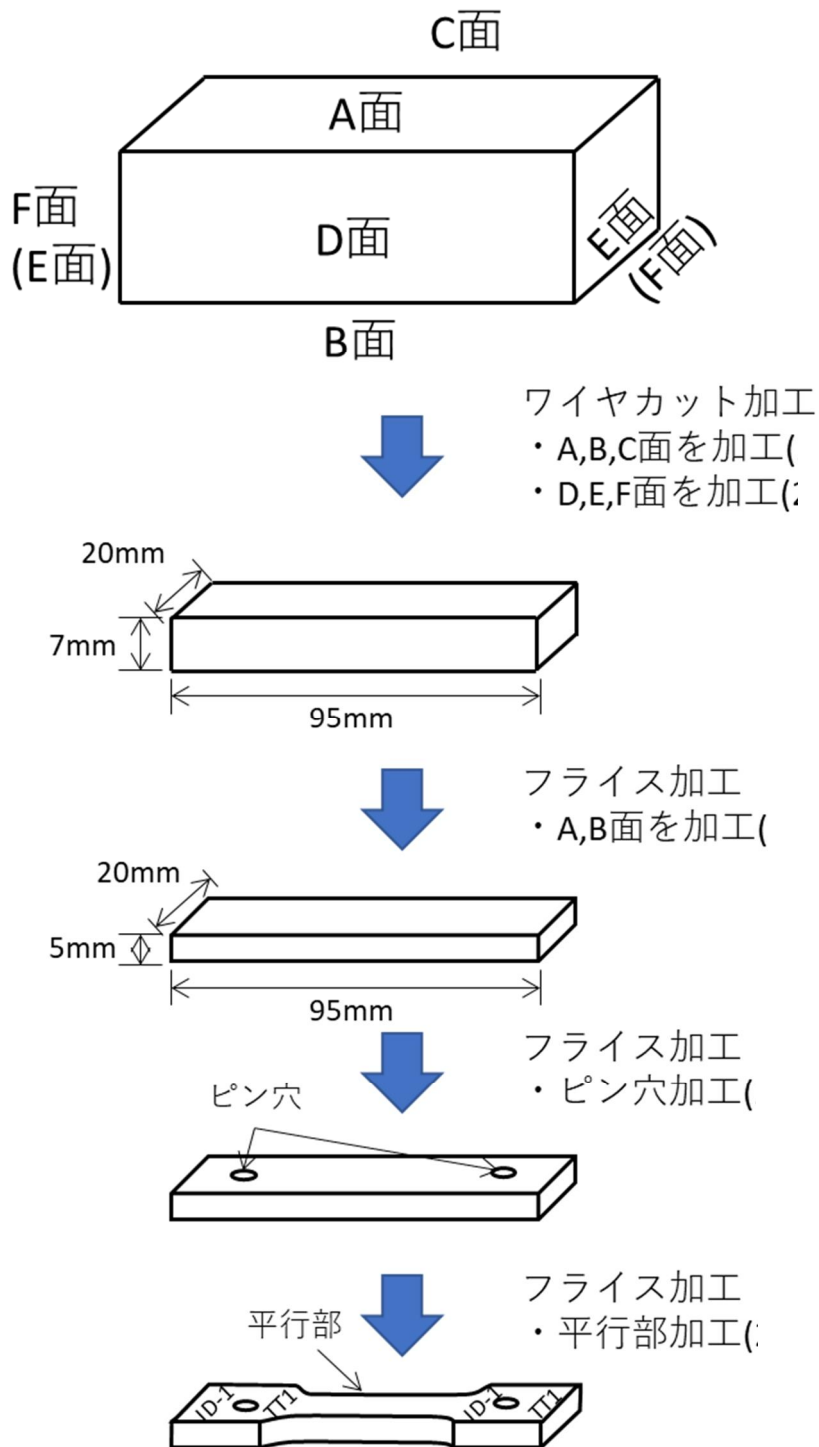
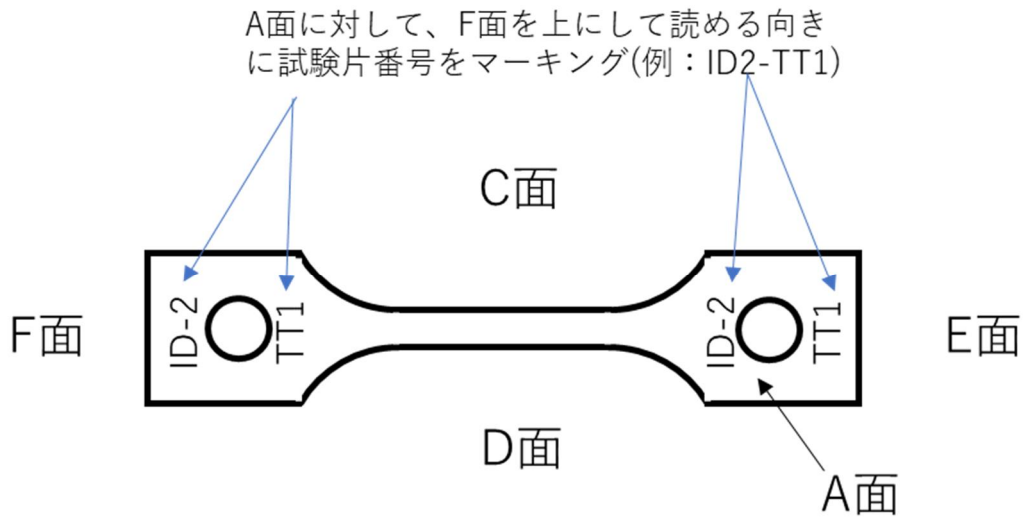
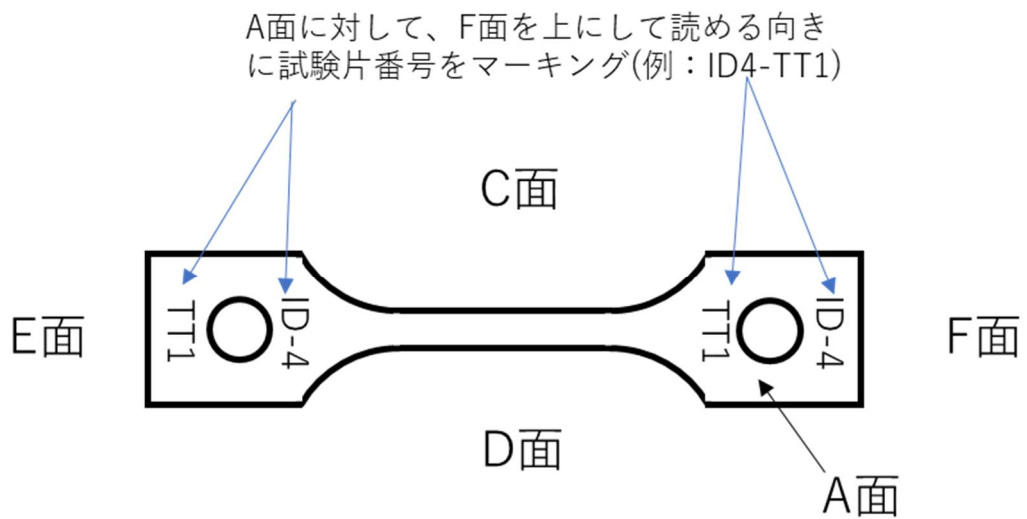


図 3. 4. 1 (3)-4 ID-1 の引張試験片製作手順  
 (カッコ内の方角は ID-6)

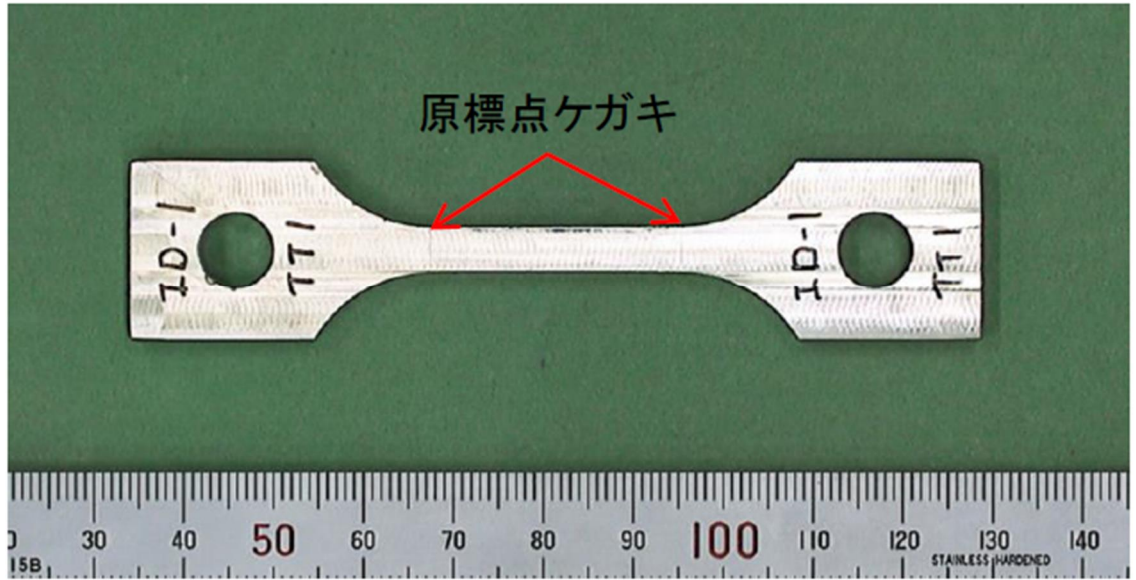


(a) ID-2~ID-3

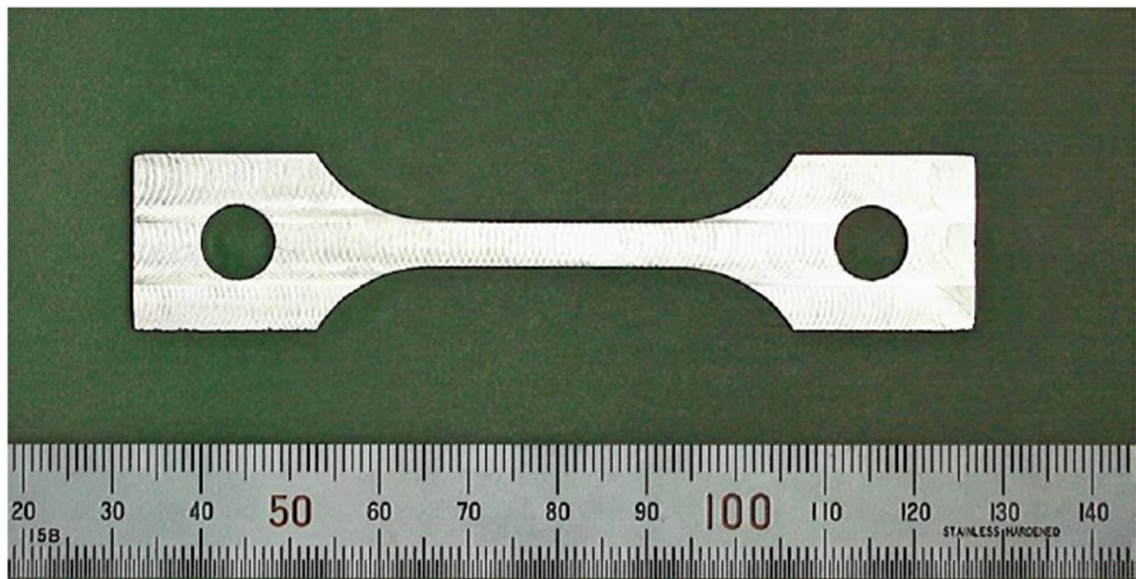


(b) ID-4~ID-5

図 3.4.1(3)-5 引張試験片マーキング要領

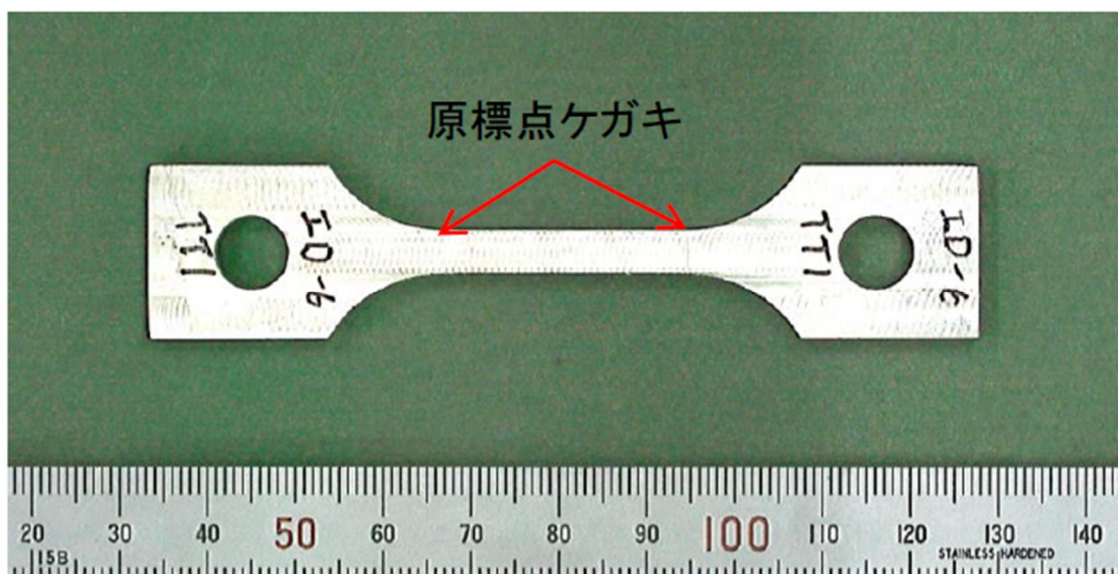


(a) ID-1-TT1 の A 面

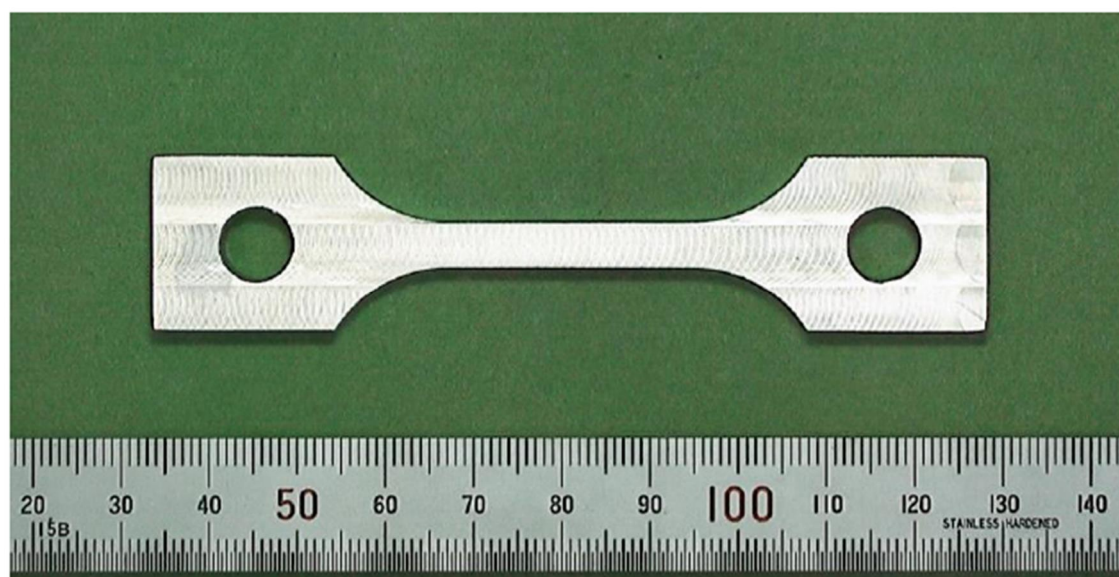


(b) ID-1-TT1 の B 面

図 3.4.1(3)-6 (1/2) 引張試験片の外観写真



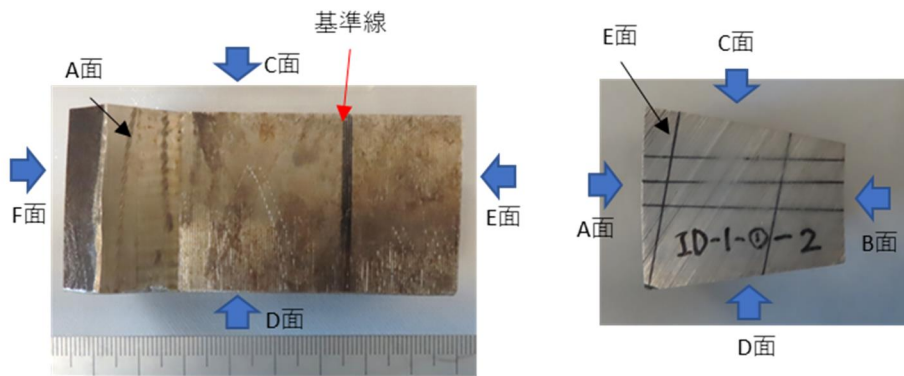
(c) ID-6-TT1 の A 面



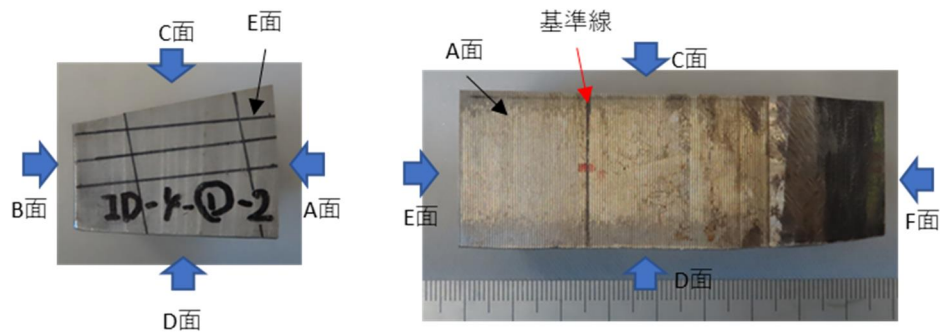
(d) ID-6-TT1 の B 面

図 3.4.1(3)-6 (2/2) 引張試験片の外観写真



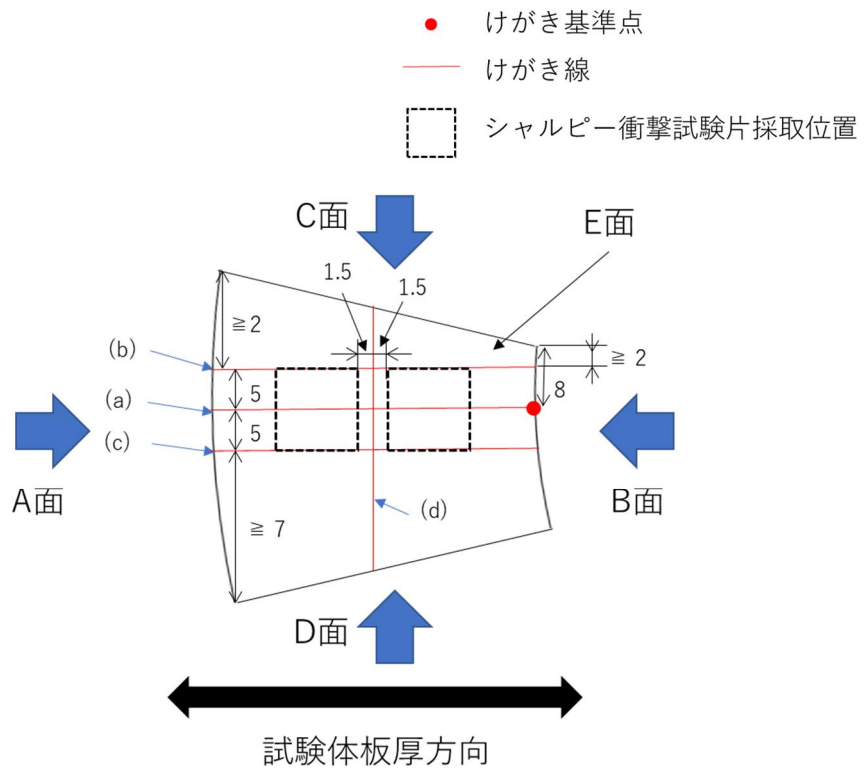


(a) ID-1~3(ID-1 を例示)

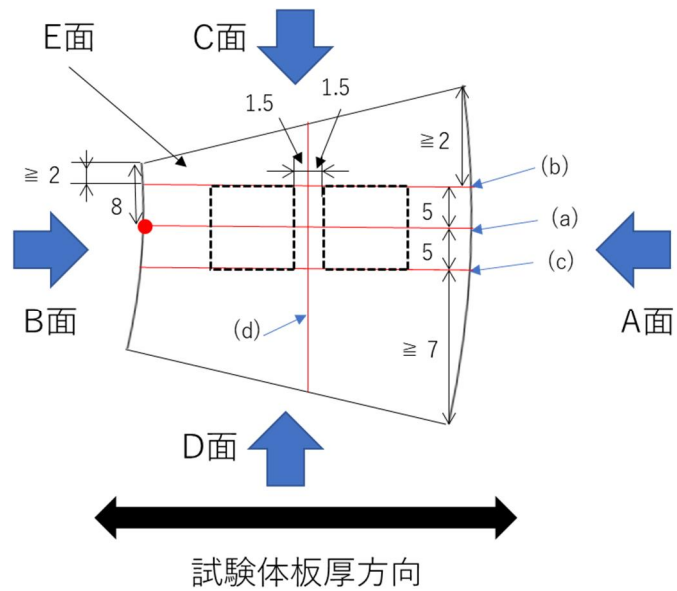


(b) ID-4~6(ID-4 を例示)

図 3.4.1(3)-7 シャルピー衝撃試験片を採取するブロック体及び方位



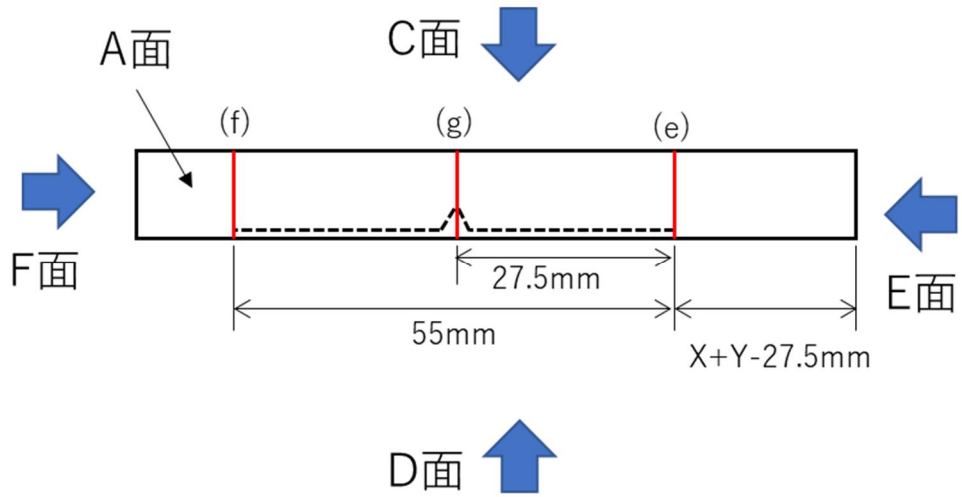
(a) ID-1、ID-2 及び ID-3



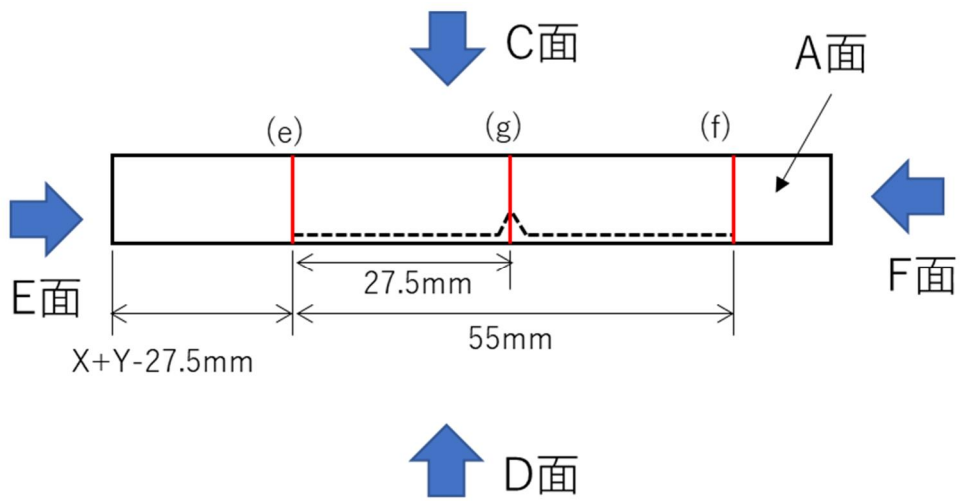
(b) ID-4、ID-5 及び ID-6

図 3.4.1(3)-8 E 面への罫書き位置(単位 : mm)

- けがき線
- シャルピー衝撃試験片採取位置

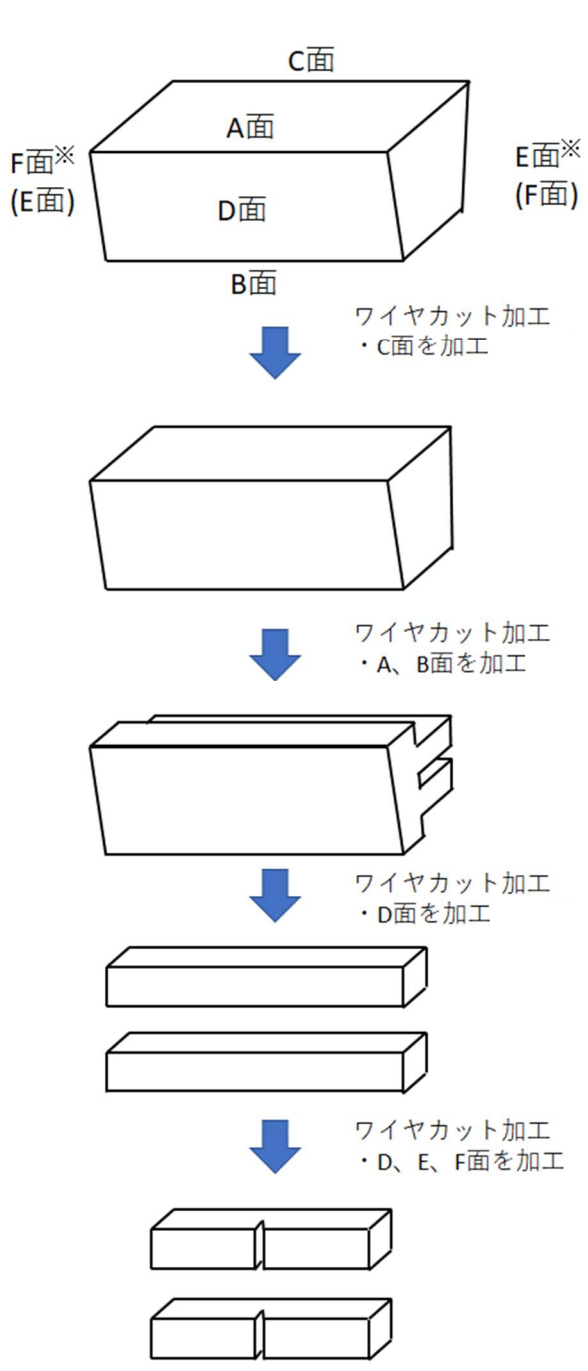


(a) ID-1、ID-2 及び ID-3



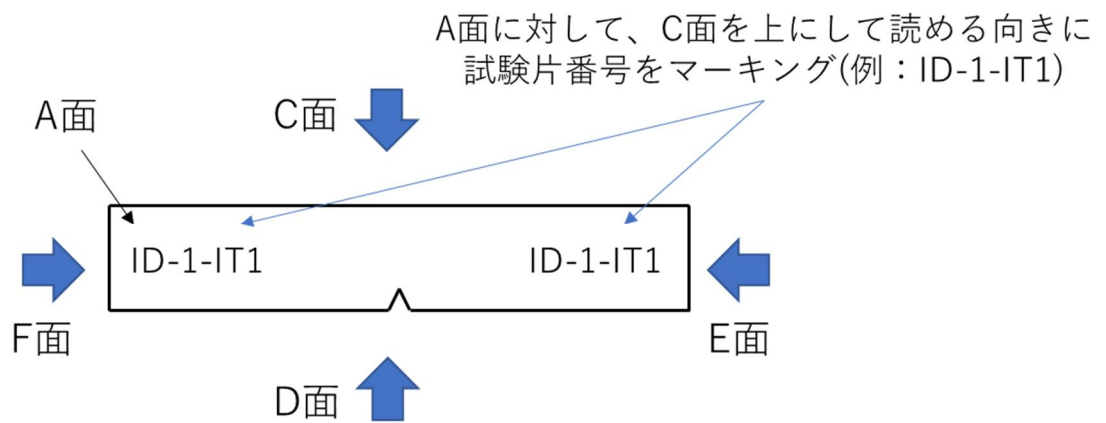
(b) ID-4、ID-5 及び ID-6

図 3.4.1(3)-9 A 面への罫書き位置 (単位 : mm)

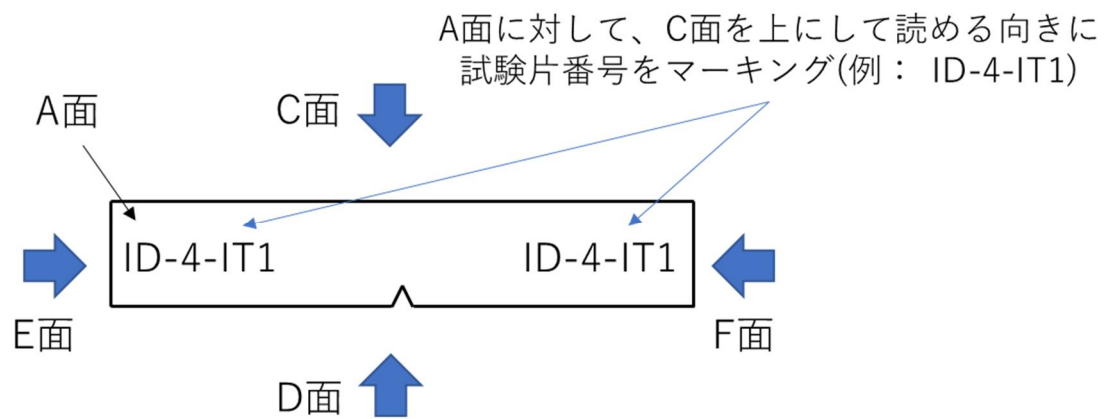


※ID-1、2、3の場合は、右がE面、左がF面  
 ID-4、5、6の場合（カッコで記載）は  
 右がF面、左がE面

図 3.4.1(3)-10 シャルピー衝撃試験片加工手順

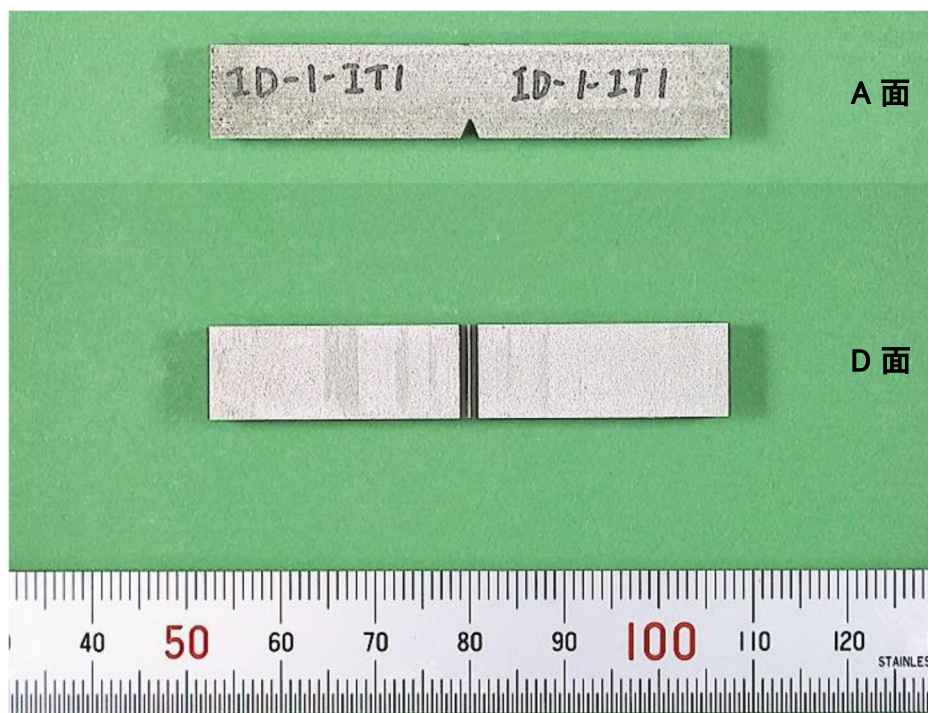


(a) ID-1、ID-2 及び ID-3(例：ID-1-IT1)

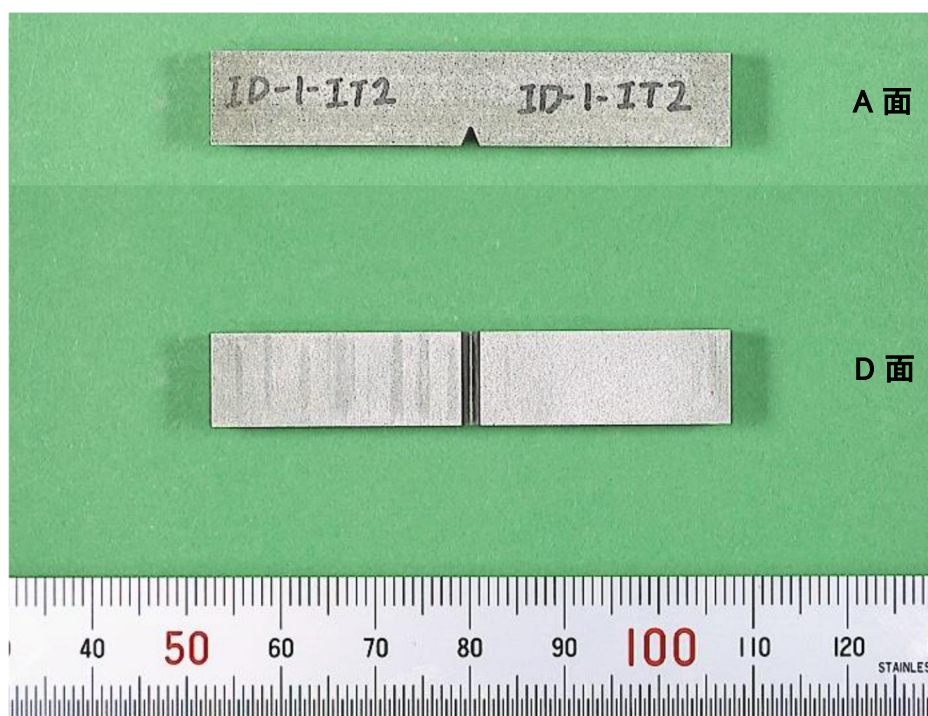


(b) ID-4、ID-5 及び ID-6(例：ID-4-IT1)

図 3.4.1(3)-11 シャルピー衝撃試験片マーキング要領

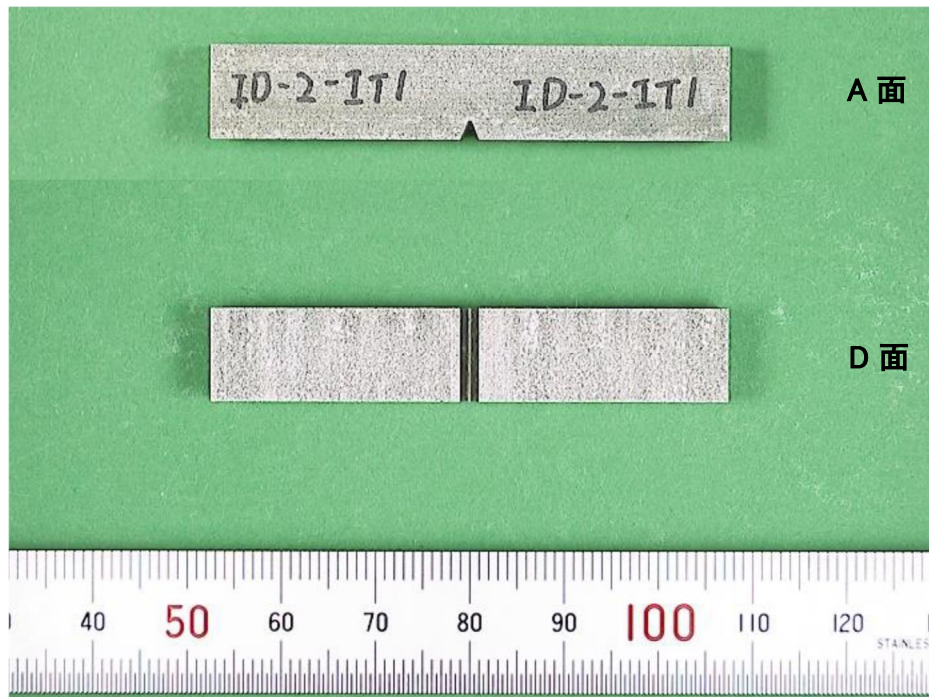


(a) ID-1-IT1

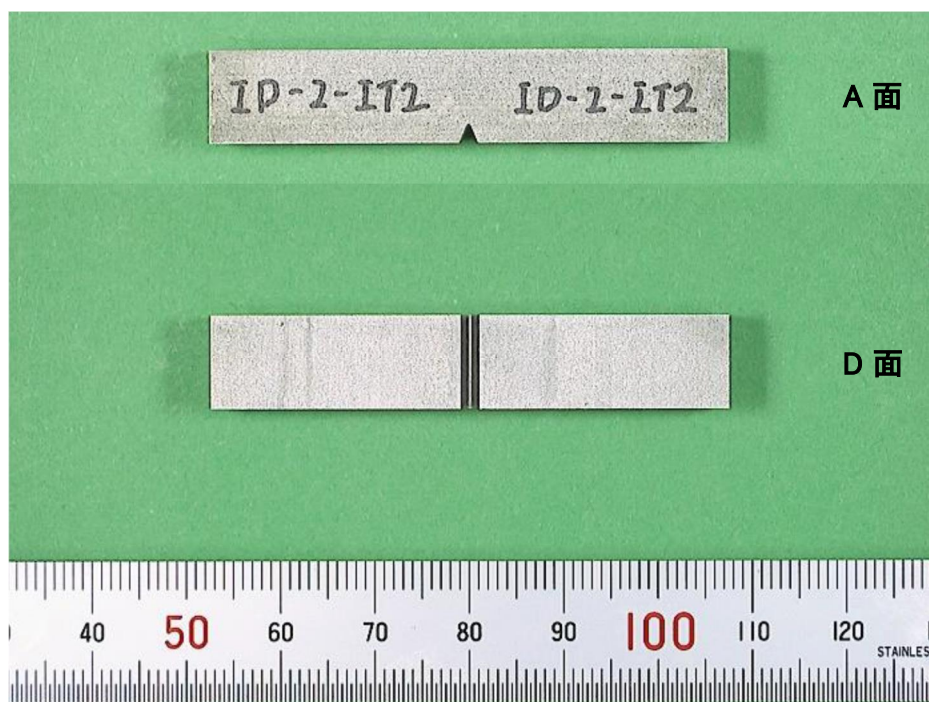


(b) ID-1-IT2

図 3.4.1(3)-12 (1/6) シャルピー衝撃試験片の外観写真

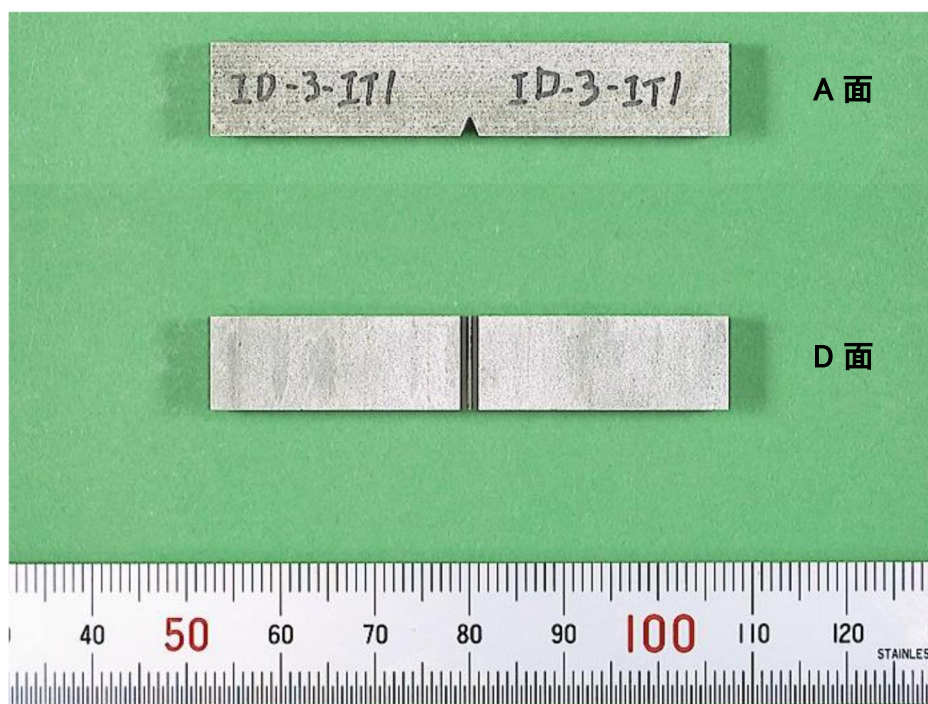


(c) ID-2-IT1

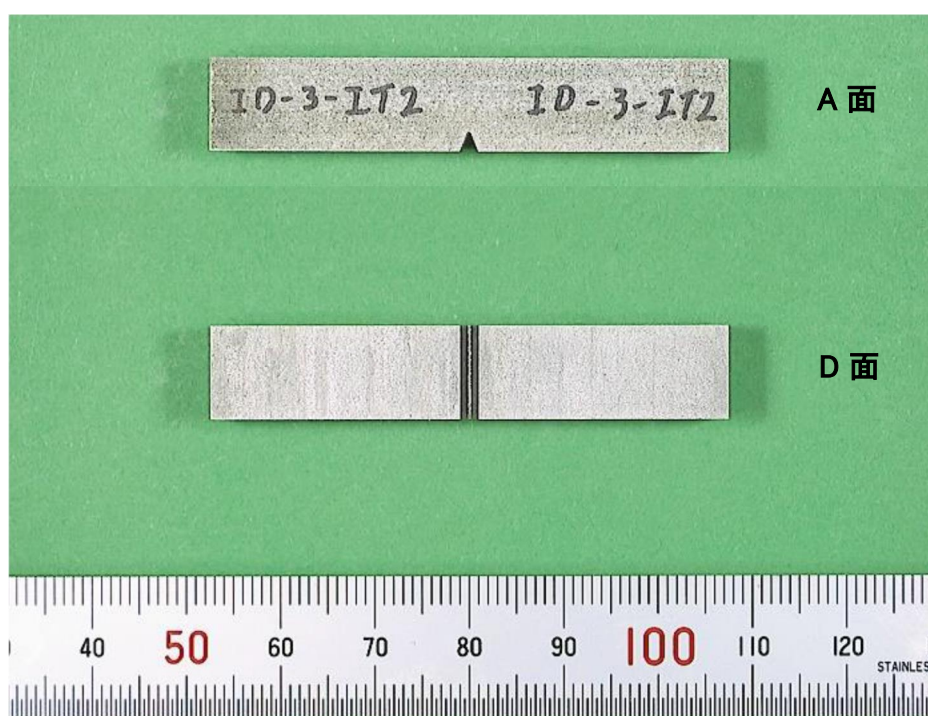


(d) ID-2-IT2

図 3.4.1(3)-12 (2/6) シャルピー衝撃試験片の外観写真



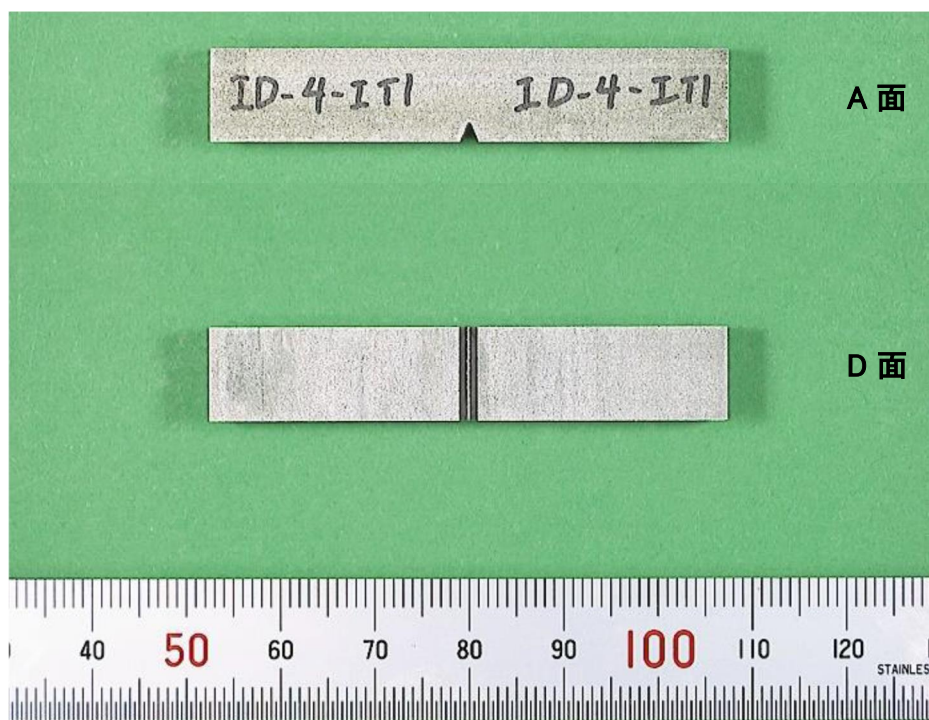
(e) ID-3-IT1



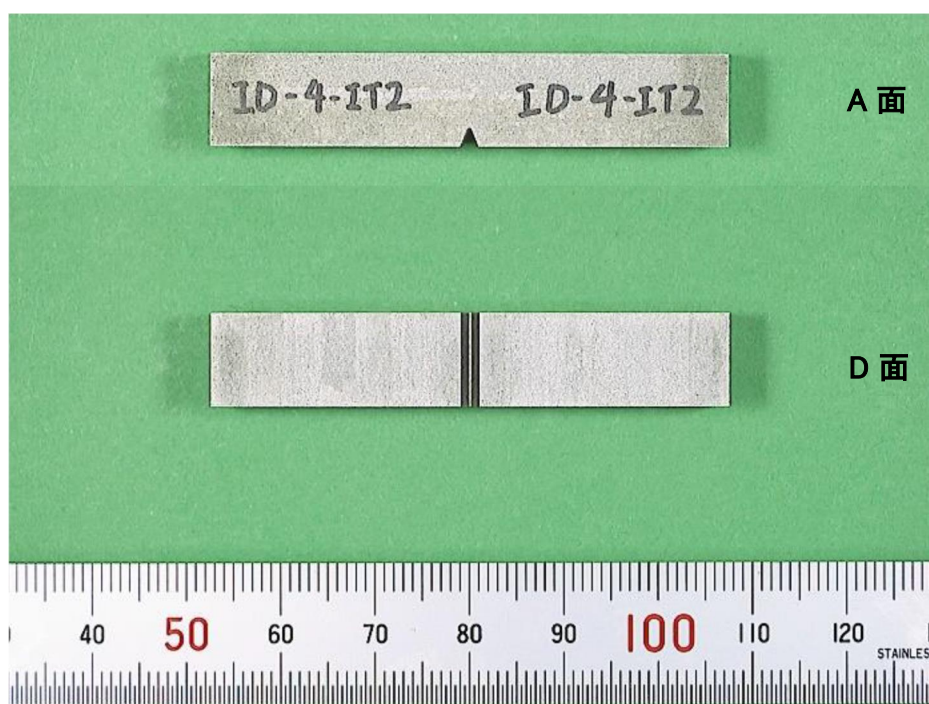
(f) ID-3-IT2

図 3.4.1(3)-12 (3/6) シャルピー衝撃試験片の外観写真



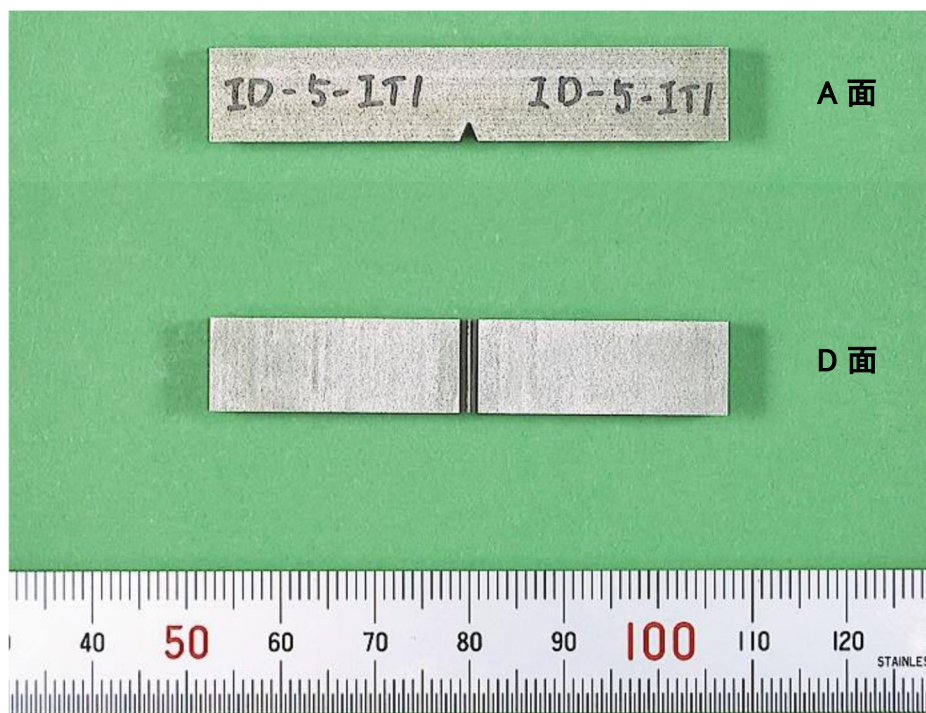


(g) ID-4-IT1

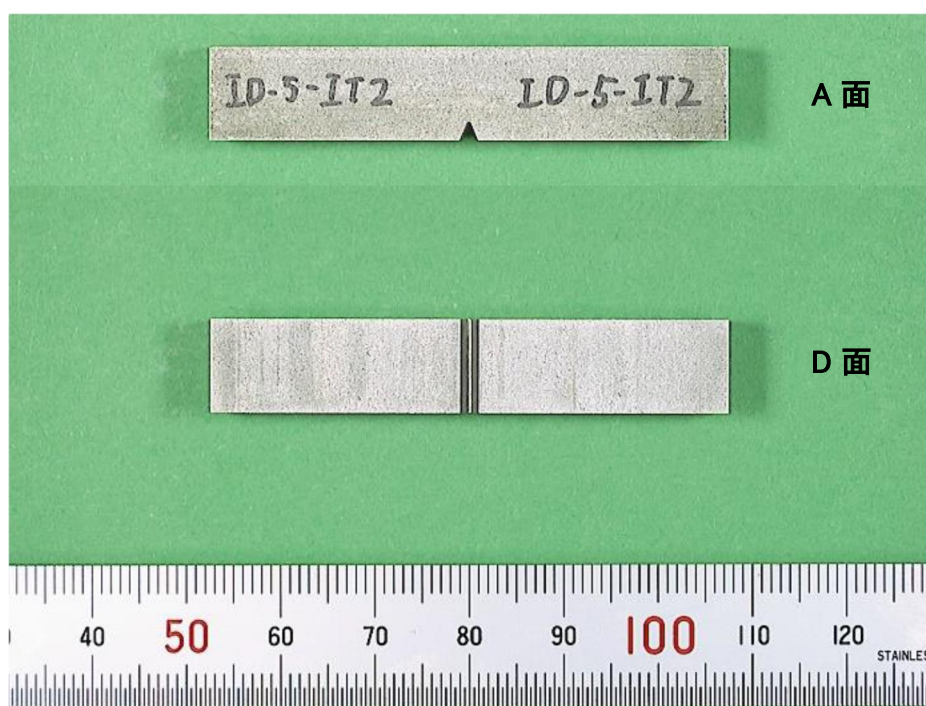


(h) ID-4-IT2

図 3.4.1(3)-12 (4/6) シャルピー衝撃試験片の外観写真

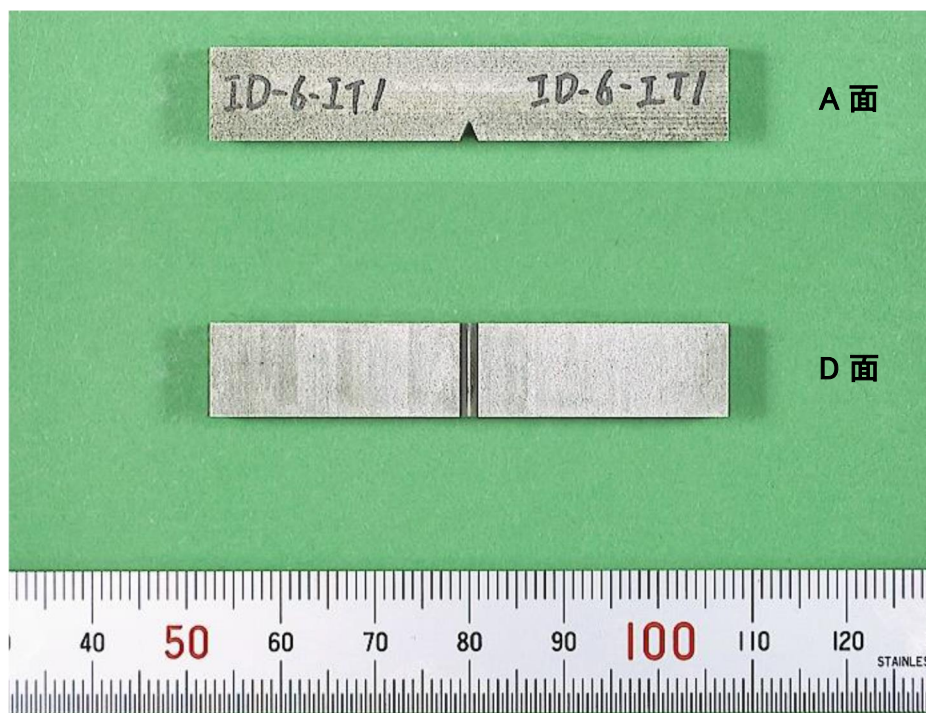


(i) ID-5-IT1

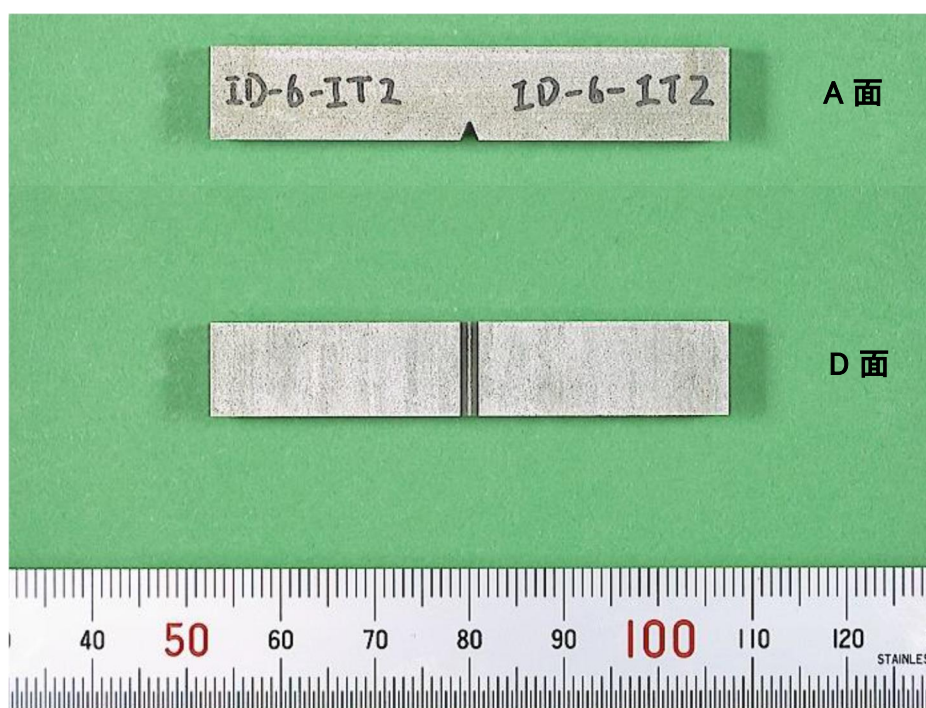


(j) ID-5-IT2

図 3.4.1(3)-12 (5/6) シャルピー衝撃試験片の外観写真



(k) ID-6-IT1



(l) ID-6-IT2

図 3.4.1(3)-12 (6/6) シャルピー衝撃試験片の外観写真

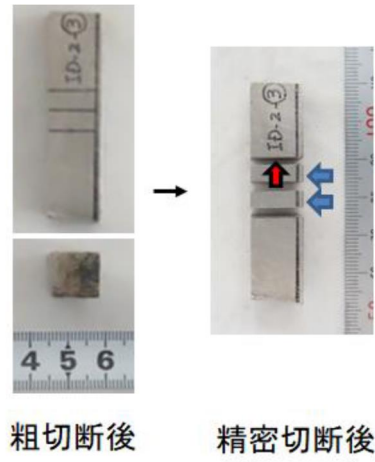


図 3.4.1(3)-13 試験体 ID-2-③からの化学成分分析試験片採取個所  
(赤矢印面をフライス加工してチップ状試料とする)

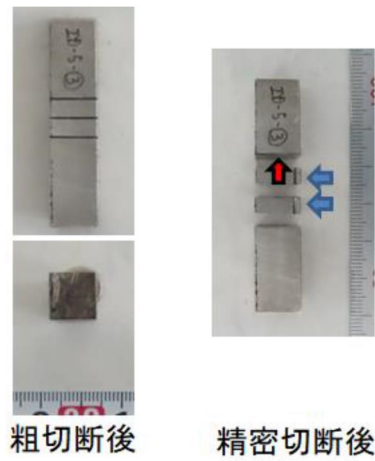
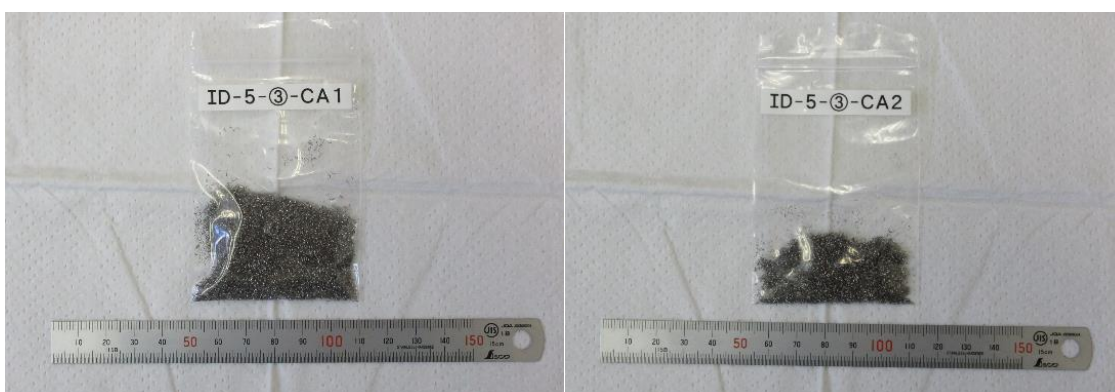


図 3.4.1(3)-14 試験体 ID-5-③からの化学成分分析試験片採取個所  
(赤矢印面をフライス加工してチップ状試料とする)



(a) ID-2-③-CA1

(b) ID-2-③-CA2



(c) ID-5-③-CA1

(d) ID-5-③-CA2

図 3.4.1(3)-15 化学成分分析試料の外観写真

### 3.4.2 試験の実施

令和5年度の試験マトリックスを表 3.4.2-1 に示す。前項の試験片製作要領に従って製作した試験片等を用いて引張試験、破壊靱性試験(J-R 試験)及び化学成分分析を実施した。

表 3.4.2-1 令和5年度の試験マトリックス

	引張試験	破壊靱性試験	化学成分分析※
試験片形状	JIS Z2241(2022) 14A 号	ASTM E1820-21 1T-C(T)	チップ状
試験数	2	2	2
試験温度	室温	288℃	—
試験片管理 番号	ID-1-TT1 ID-6-TT1	ID-1-FR1 ID-6-FR1	ID-2-③-CA1・ID-2-③-CA2・ ID-5-③-CA1・ID-5-③-CA2

※C, Si, P, S, N 分析用試料を ID-2-③-CA1、ID-5-③-CA1

Mn, Ni, Cr, Mo, Nb 分析用試料を ID-2-③-CA2、ID-5-③-CA2 とする。

## (1) 引張試験

### 1) 試験方法

JIS G 2241(2022) <sup>[3.4.2(1)-1]</sup> に準拠して、最大荷重 100kN の島津製作所製油圧サーボ式疲労試験機を用いて室温にて引張試験を行い、応力ひずみ曲線を取得した。使用する引張試験片寸法を図 3.4.2(1)-1 に示す。試験はクロスヘッドの変位制御とし、0.42 mm/min(=0.007 mm/s)の一定速度で試験片が破断するまで変位を付与した。ひずみ速度は式 3.4.2(1)-1 によって 0.00025 s<sup>-1</sup> と計算され、JIS Z 2241 図 9b に記載のひずみ速度範囲のうち範囲 2 に該当する。なお、令和 5 年度に実施した 288℃の引張試験と同じひずみ速度である。

$$\text{ひずみ速度}=\text{クロスヘッド変位速度}/\text{初期平行部長さ}\cdots\cdots(3.4.2(1)-1)$$

また、高精度な応力ひずみ関係を取得することを目的として、デジタル画像相関法(DIC)によって試験片のひずみを測定した。本試験では、試験片 B 面(マーキング面の反対面)にスペックルパターンを付与し、5M ピクセルの CCD カメラを 1 台用いて概ね 1 fps のフレームレートで試験画像を記録した。平行部内のひずみを解析し、試験荷重と合わせて公称応力公称ひずみ曲線を作成した。得られた結果を整理し、下記を報告する。

- ・ 試験片外観(試験前、試験後)
- ・ スペックルパターン付与後の試験片外観(試験前、試験後)
- ・ 応力ひずみ曲線(クロスヘッド変位ひずみ)
- ・ 応力ひずみ曲線(DIC ひずみ)
- ・ 降伏応力(0.2%耐力)
- ・ 引張強さ
- ・ 絞り
- ・ 一様伸び
- ・ 破断伸び

### 2) 試験結果

前項の試験方法に基づき、室温にて引張試験を実施した。引張試験では、荷重・クロスヘッド変位関係を取得した。また、DIC 法を用いて試験片平行部のひずみ分布を解析し、その解析結果から原標点間のひずみを評価して応力ひずみ関係を取得した。引張試験片のスペックルパターン付与後の外観写真を図 3.4.2(1)-2 に、引張試験片の試験後の外観写真を図 3.4.2(1)-3 に、引張試験片の平行部ひずみ分布(解析前及び解析後)を図 3.4.2(1)-4 に、応力ひずみ曲線を図 3.4.2(1)-5 に、引張試験(室温)結果を表 3.4.2(1)-1 にそれぞれ示す。引張試験の結果は本材料に相当する規格(ASTM A351 CF8M、JISG5121 SCS14A)の範囲内であった。0.2%耐力及び引張強さは、後述する



破壊靱性試験の評価において使用する流動応力の算出に適用する。

<参考文献>

[3.4.2(1)-1] JIS G 2241(2022) “金属材料引張試験方法”，日本産業規格，2022

表 3.4.2(1)-1 引張試験(試験温度 室温)結果

		0.2%耐力 (MPa)	引張強さ (MPa)	絞り (%)	一様伸び (%)	破断伸び (%)
規格値	ASTM A351 CF8M	205 以上	485 以上	—	30 以上	—
	JIS G5121 SCS14A	205 以上	480 以上	—	33 以上	—
実測値	ID-1-TT1	329	621	49	56	62
	ID-6-TT1	322	632	40	48	55

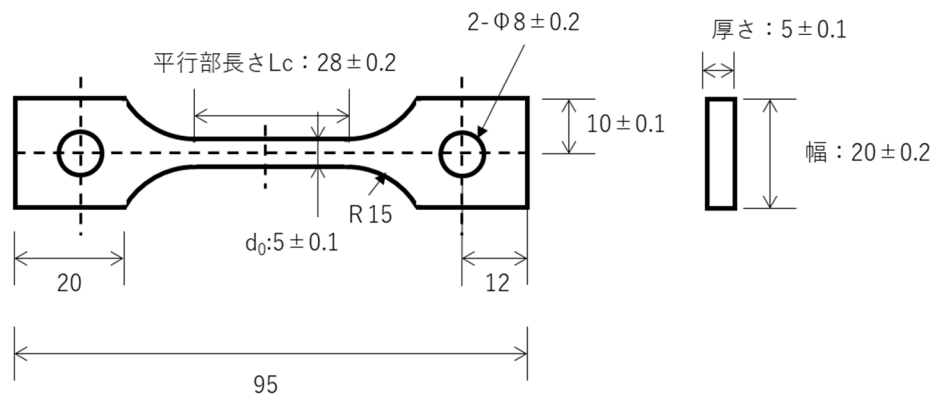
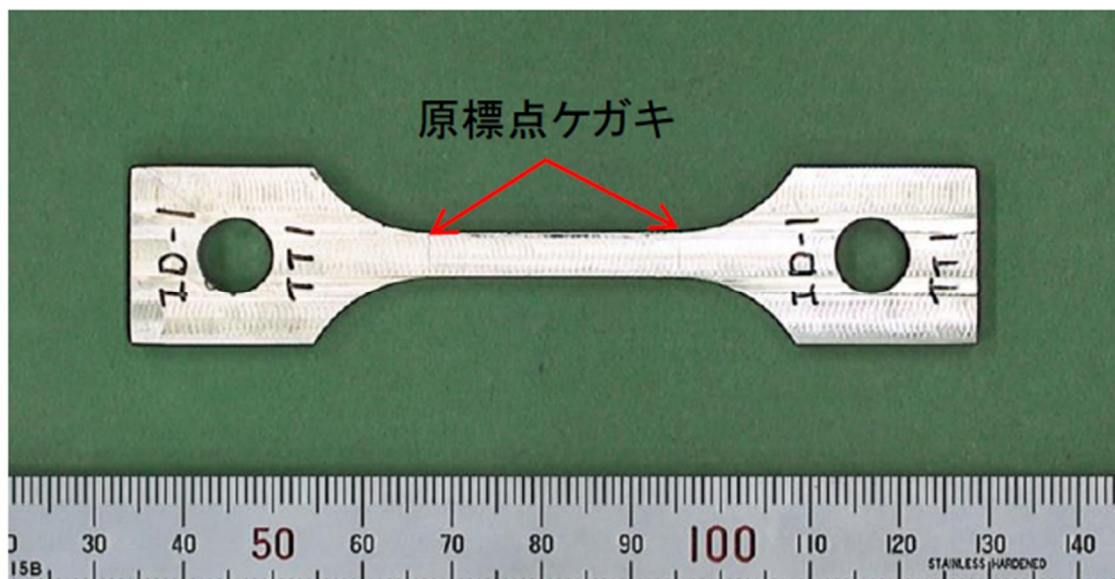
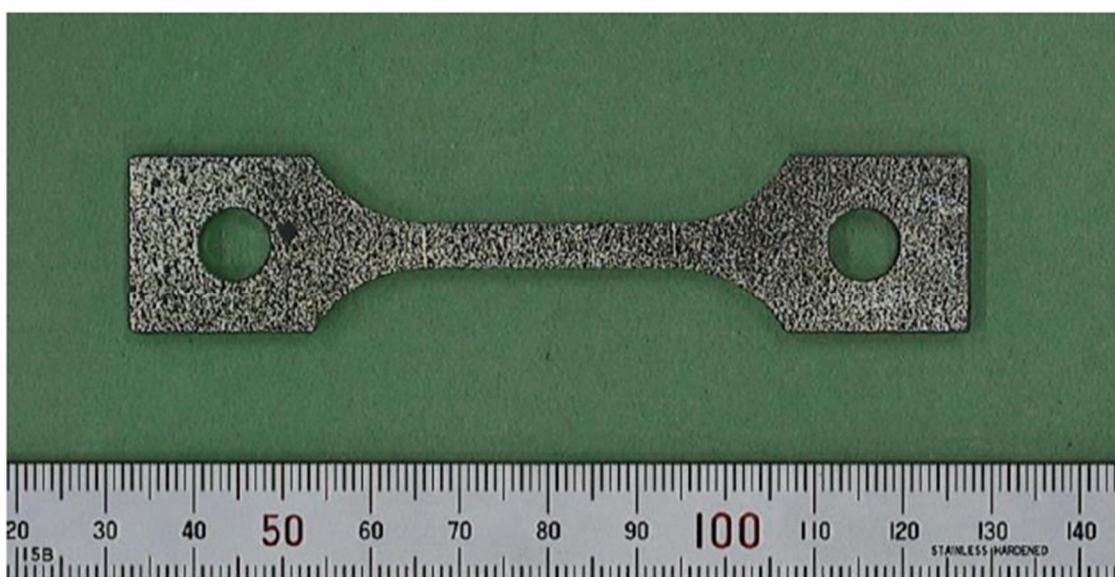


図 3.4.2(1)-1 引張試験片寸法 (単位 : mm)

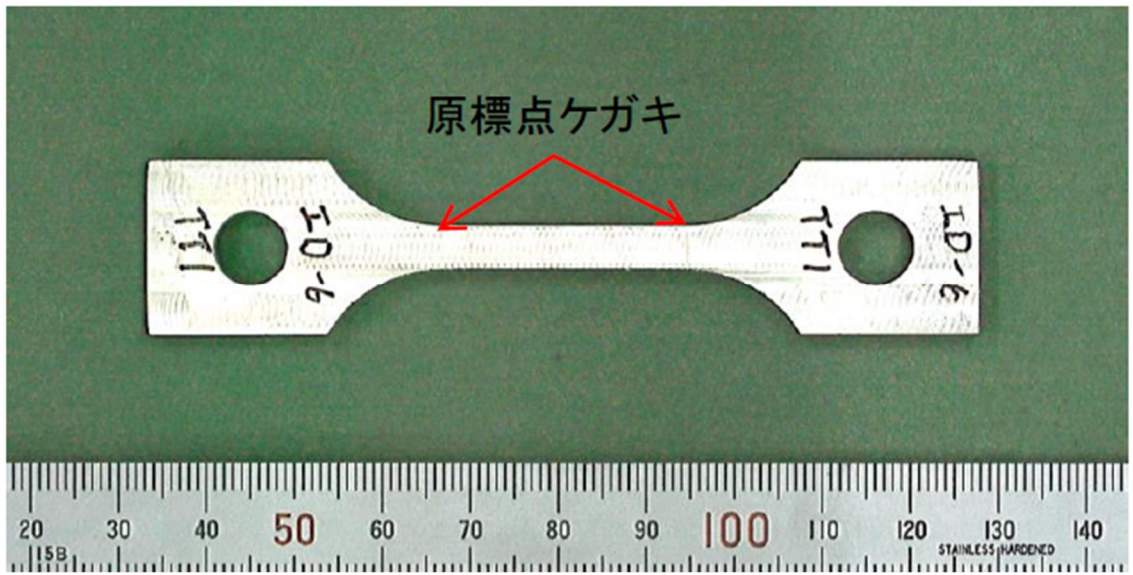


(a) ID-1-TT1 の A 面

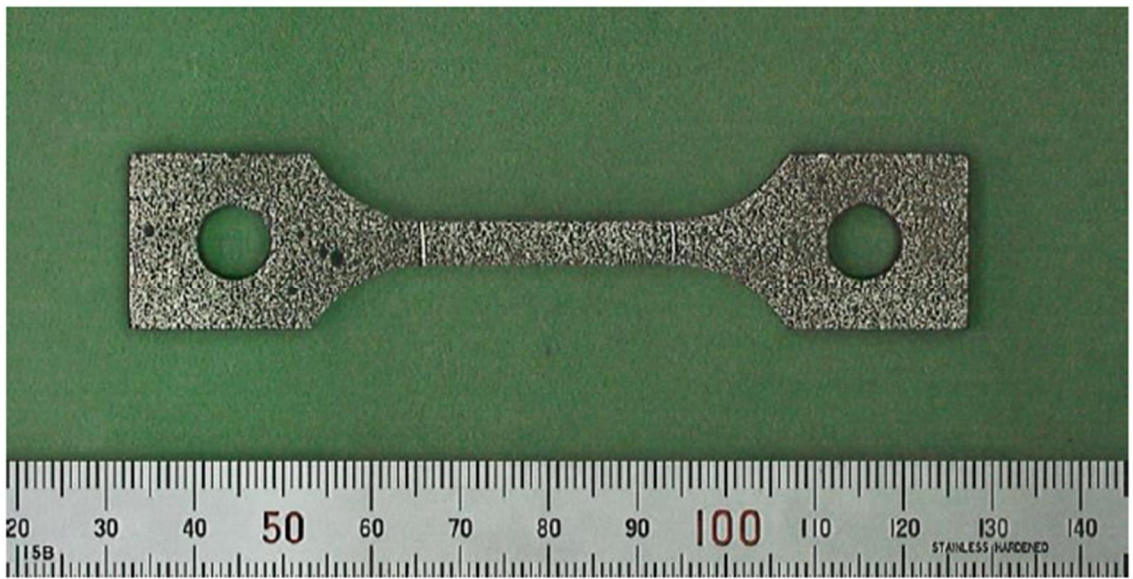


(b) ID-1-TT1 の B 面

図 3.4.2(1)-2 (1/2) 引張試験片のスペckルパターン付与後の外観写真

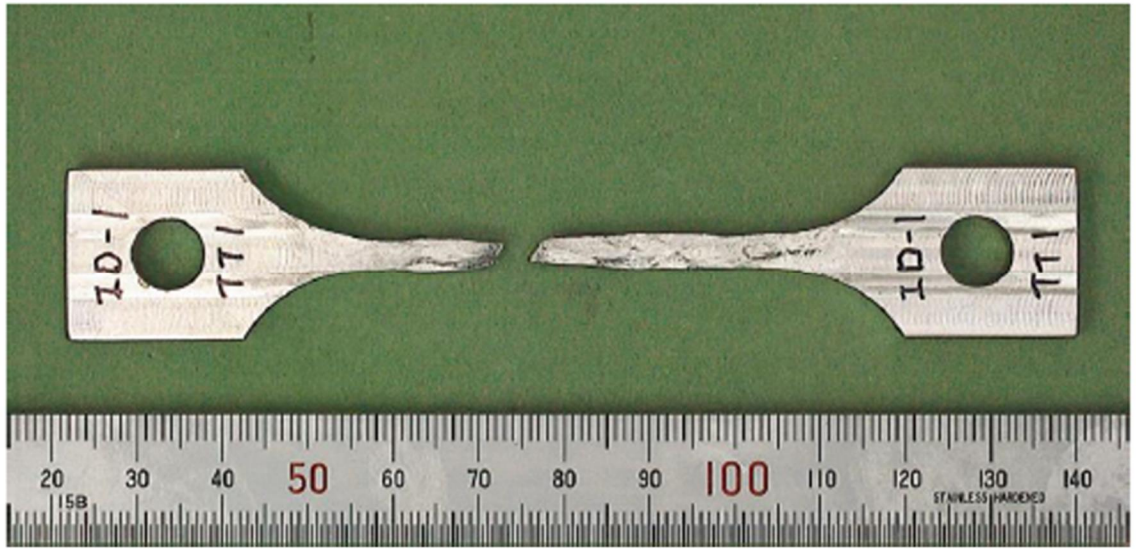


(c) ID-6-TT1 の A 面



(d) ID-6-TT1 の B 面

図 3.4.2(1)-2 (2/2) 引張試験片のスペckルパターン付与後の外観写真



(a) ID-1-TT1 の A 面

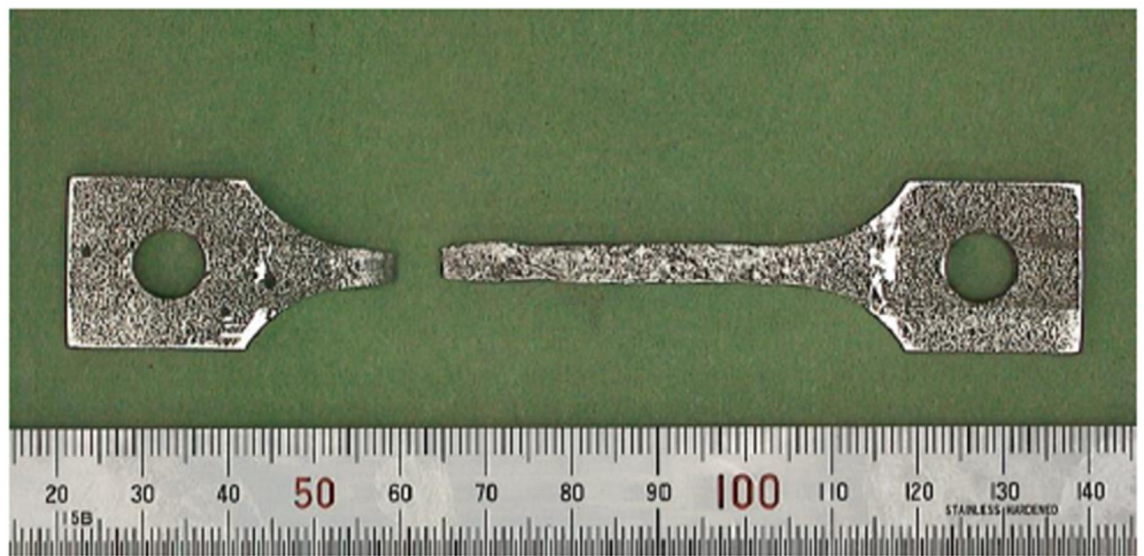


(b) ID-1-TT1 の B 面

図 3.4.2(1)-3 (1/2) 引張試験片の試験後の外観写真

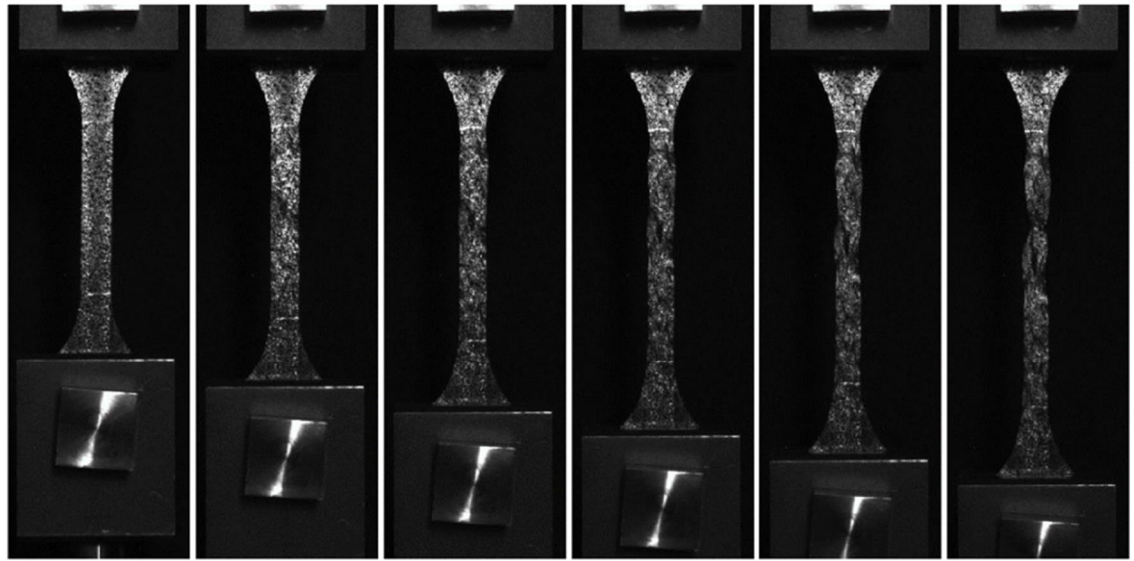


(c) ID-6-TT1 の A 面



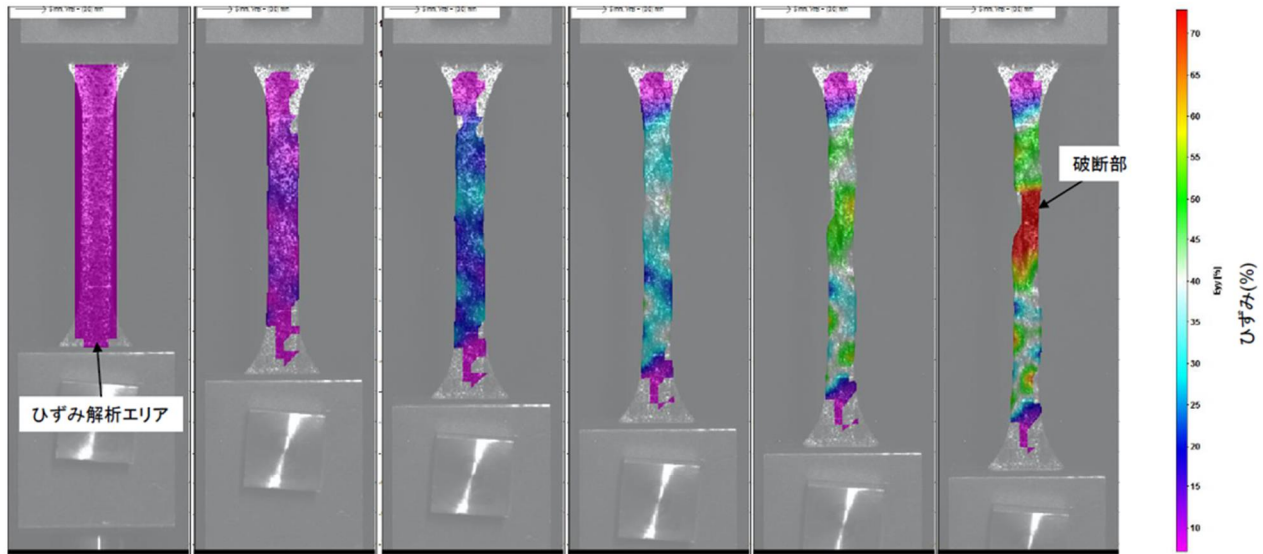
(d) ID-6-TT1 の B 面

図 3.4.2(1)-3 (2/2) 引張試験片の試験後の外観写真



平行部ひずみ 0% 11% 22% 33% 44% 56%  
 試験開始時 → 破断直前

(a) 解析前(ID-1-TT1)

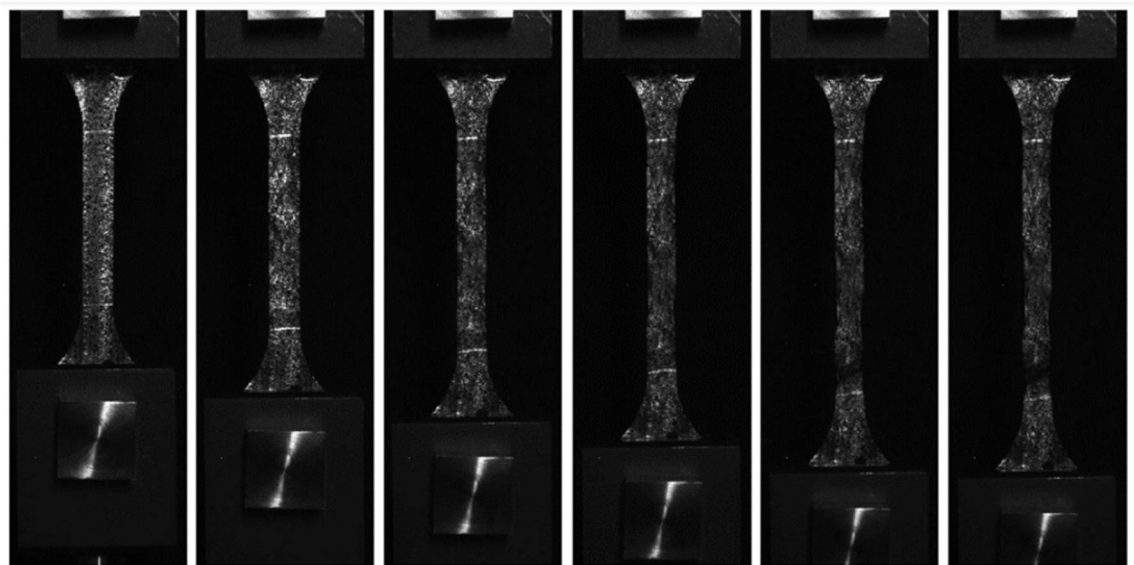


平行部ひずみ 0% 11% 22% 33% 44% 56%  
 試験開始時 → 破断直前

(b) 解析後(ID-1-TT1)

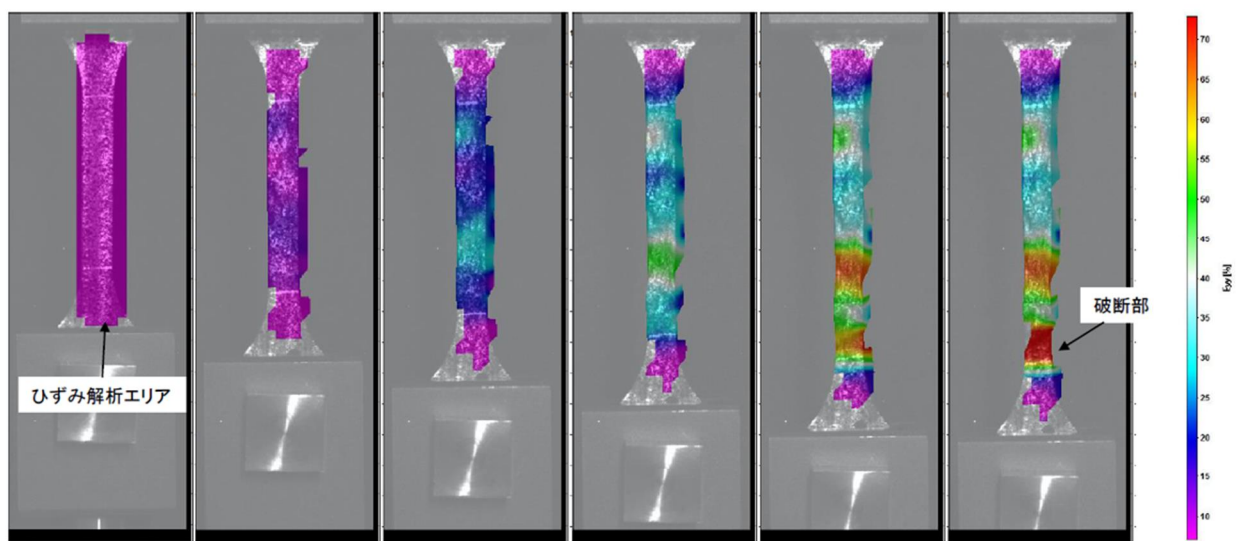
図 3.4.2(1)-4 (1/2) 引張試験片の平行部ひずみ分布





平行部ひずみ 0% 11% 22% 33% 44% 48%  
 試験開始時 → 破断直前

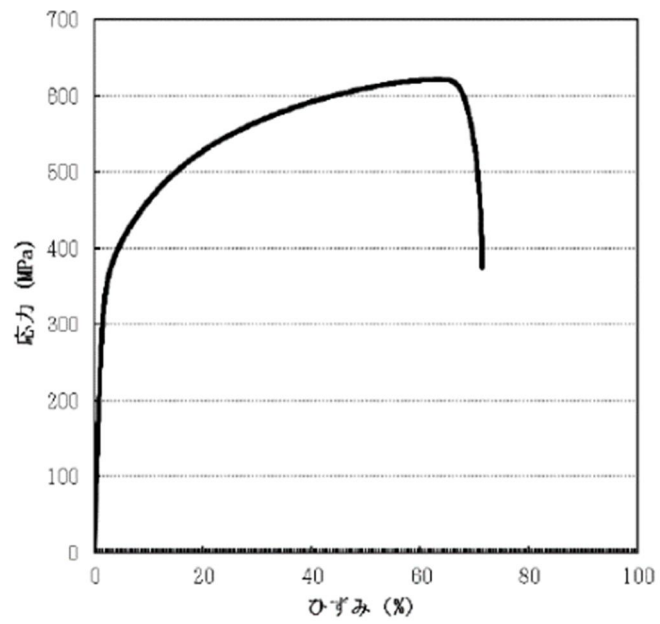
(c) 解析前(ID-6-TT1)



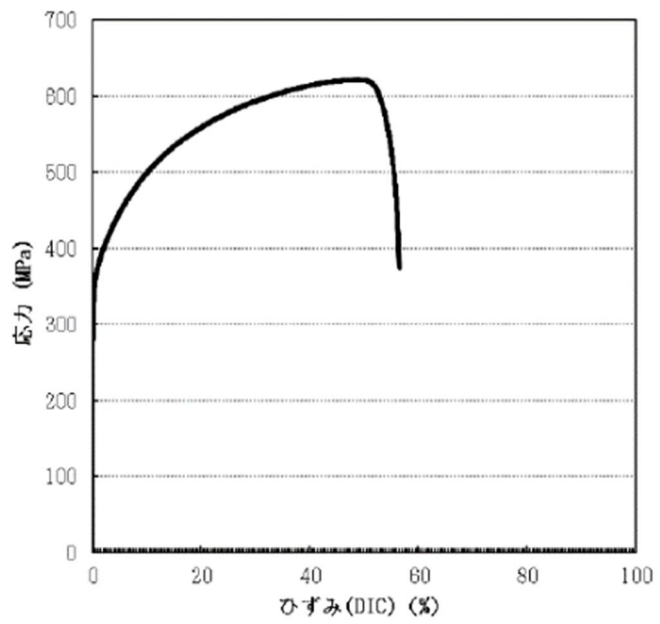
平行部ひずみ 0% 11% 22% 33% 44% 48%  
 試験開始時 → 破断直前

(d) 解析後(ID-6-TT1)

図 3.4.2(1)-4 (2/2) 引張試験片の平行部ひずみ分布

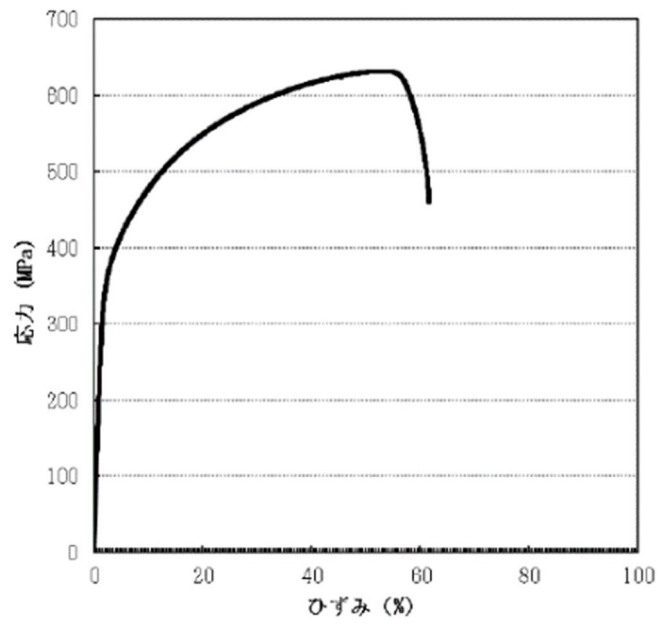


(a) ひずみを装置のクロスヘッド変位から評価(ID-1-TT1)

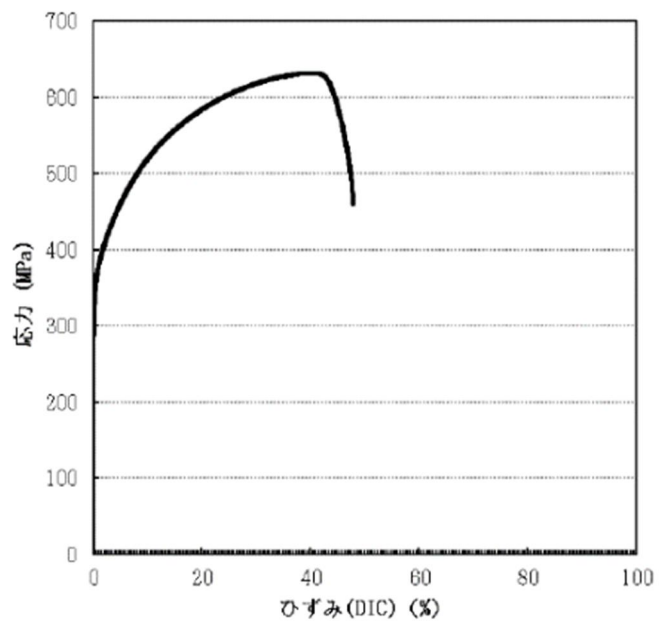


(b) ひずみを画像解析(DIC)により評価(ID-1-TT1)

図 3.4.2(1)-5 (1/2) 引張試験片の応力ひずみ曲線



(c) ひずみを装置のクロスヘッド変位から評価(ID-6-TT1)



(d) ひずみを画像解析(DIC)により評価(ID-6-TT1)

図 3.4.2(1)-5 (2/2) 引張試験片の応力ひずみ曲線

## (2) 破壊靱性試験

### 1) 試験方法

使用する 1T-C(T)試験片の寸法を図 3.4.2(2)-1 に示す。使用する試験片は令和 4 年度に製作し、室温、大気中にて目標最終  $K_{max} : 12 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$  になるように疲労予亀裂を導入した後にサイドグループ加工を実施したものである。

ASTM E1820-21<sup>[3.4.2(2)-1]</sup>に従って除荷弾性コンプライアンス法により破壊靱性試験を実施した。環境条件は大気中、試験温度 288°C とし、繰返し数は 2 (試験片番号 : ID-1-FR1、ID-6-FR1) とした。図 3.4.2(2)-2 に令和 4 年度に実施した破壊靱性試験結果の例を示す。試験中除荷弾性コンプライアンス法によって求めた試験終了時の亀裂進展量  $\Delta a$  は 5.36 mm であったのに対して、試験後の破面観察によって求めた  $\Delta a$  は 5.88 mm であり、その差は 0.52 mm であった。

ASTM E1820-21 Annex 15 NORMALIZATION DATA REDUCTION TECHNIQUE に沿って破壊靱性評価を行う際は  $\Delta a \leq 0.15b_0$  ( $b_0$  : 初期リガメント長さ) を満たす必要がある。令和 4 年度の実績では  $0.15b_0$  は 3.58~3.71 mm であったため、破面観察による  $\Delta a$  が 3.0 mm 程度となるように試験終了条件を設定した。試験中に得られる亀裂進展量  $\Delta a$  の傾向を監視することにより初期亀裂長さ ( $\Delta a = 0 \text{ mm}$ ) を予測し、初期亀裂長さから 2 mm 進展した際に試験を終了した ( $\Delta a = 2.0 \text{ mm}$ )。

また、J-R 曲線評価に用いるデータの取得数を増やすことを目的として、最大荷重到達後に 1 回の負荷時の変位増分を 0.15mm から 0.10mm に変更した。なお、J-R 曲線評価には、負荷 2 回目以降の変位制御による試験データを用いることとした。取得する試験結果イメージを図 3.4.2(2)-3 に示す。破壊靱性試験条件をまとめて表 3.4.2(2)-1 に示す。試験後に試験片を強制破断し、デジタルマイクロスコープを用いて試験片外観観察及び破面観察を実施した。ASTM E1820-21 Annex 15 NORMALIZATION DATA REDUCTION TECHNIQUE による評価として J-R 曲線及び  $J_Q$  値を求め、下記①②に示す有効性(Validity)判定を行い、条件を満足する場合  $J_Q$  値を  $J_{Ic}$  値とした。また、参考に、除荷弾性コンプライアンス法による評価として各除荷時の  $J$  と  $\Delta a$  を算出し、J-R 曲線を求め、鈍化直線と平行な 0.2 mm オフセットラインとの交点から  $J_Q$  値を求めた。下記に示す有効性(Validity)判定を行い、すべての条件を満足する場合  $J_Q$  値を  $J_{Ic}$  値とした。

①  $B > 10 J_Q / \sigma_f$

②  $b_0 > 10 J_Q / \sigma_f$

③  $|a_{i,ave} - a_i| > 0.05B$

④  $|a_{f,ave} - a_f| > 0.05B$

ここで、 $B$  : 試験片厚さ、 $\sigma_f$  : 流動応力(0.2%耐力と引張強さの平均値)、 $b_0$  : 初期リガメント長さ、 $a_i$  : 個々の測定位置の初期亀裂長さ、 $a_{i,ave}$  :  $a_i$  の平均値、 $a_f$  : 個々の測定位置の最終亀裂長さ、 $a_{f,ave}$  :  $a_f$  の平均値とした。

なお、令和4年度に実施した破壊靱性試験における開口変位は最大9 mm程度であったので、令和5年度は測定範囲が3～13 mmのクリップゲージであるUB-10SAH002を用いることとした。図3.4.2(2)-4にクリップゲージ形状及び寸法を示す。

試験後にフェライトスコープを用いて試験片表面及び破面のフェライト量測定を実施した。なお、破面のフェライト量は参考値とする。図3.4.2(2)-5にフェライト量測定箇所を示す。

得られた結果を整理し、下記を報告した。

- ・試験片外観及び破面観察結果
- ・側面及び破面上のフェライト量測定結果
- ・荷重-開口変位曲線
- ・J-R 曲線
- ・ $J_Q$  値( $J_{Ic}$  値)
- ・Validity 判定結果

## 2) 試験結果

前項の試験方法に基づき、試験片 ID-1-FR1 及び ID-6-FR1 を用いて 288°C 大気中での弾塑性破壊靱性試験を実施した。なお、本節では比較のために令和 4 年度に取得した 288°C 大気中での弾塑性破壊靱性試験結果も併せて掲載した。

弾塑性破壊靱性試験では、荷重－荷重線変位関係を取得した。各試験片の荷重－荷重線変位関係を図 3.4.2(2)-6 に、破面開放後の破面マクロ写真を図 3.4.2(2)-7 に、破面上での亀裂長さ測定結果を表 3.4.2(2)-2 に示す。

### ① Normalization Data Reduction Technique による J-R 曲線の評価

破壊抵抗曲線(J-R 曲線)の評価を実施した。J-R 曲線の評価には、ASTM E1820-21 [3.4.2(2)-1] Annex 15 に規定されている Normalization Data Reduction Technique(以下、NDR 法と記載する)を適用した。NDR 法は荷重－荷重線変位関係、初期亀裂長さ及び最終亀裂長さから延性亀裂進展量を推定し J-R 曲線を求める手法であり、高負荷速度での試験や高温での試験、過酷環境中での試験など、除荷弾性コンプライアンス法の適用が難しい場合に有用な J-R 曲線の評価法である。NDR 法による J-R 曲線の評価手順は、ASTM E1820-21 Annex 15 に準拠した。鈍化直線の傾きは流動応力の 2 倍とした。流動応力は、令和 4 年度に実施した 288°C 大気中での引張試験結果から求まる流動応力(0.2%耐力と引張強さの平均値)の平均値 344 MPa とした。NDR 法により求めた J-R 曲線を図 3.4.2(2)-8 及び表 3.4.2(2)-3 に示す。なお、令和 4 年度に取得した 288°C 大気中での弾塑性破壊靱性試験結果についても、流動応力 344 MPa を用いて J-R 曲線の再評価を実施した。ID-1-FR1 においては試験片寸法と材料強度より定まる J 積分の許容値である  $J_{max}$  よりも  $J_Q$  が大きい値であったため(弾塑性破壊靱性が高かったため)、 $J_{Ic}$  としての判定は Invalid であり、寸法依存性のある数値と判定された。その他の試験片においては Valid と判定された。

ASTM E1820-21 に基づいた Validity 判定結果を表 3.4.2(2)-4 にまとめる。

判定項目 2 及び 3 は ASTM E1820-21 A9.10 に基づく、 $J_Q$  の  $J_{Ic}$  としての判定であり、表 3.4.2(2)-3 に載せた判定と同じである。ID-1-FR1 は前述の通り  $J_Q$  は Invalid であった。

亀裂形状に関する判定は判定項目 13 及び 14 である。初期亀裂形状に関する判定項目 13 は Valid であったが、最終亀裂形状に関する判定項目 14 については Invalid であった。

判定項目 20 は NDR 法適用時に必要となる判定である。NDR 法は延性亀裂進展量が大きい試験には適用できないとされており、4 mm 及び  $0.15b_0$  の小さい方の値が延性亀裂進展量の上限となる。令和 4 年度に実施した 4 試験においてはいずれも延性亀裂進展量の上限を超えており Invalid であったが、令和 5 年度の 2 試験においては過大な延性亀裂進展を防止するために試験要領の見直しを行ったことにより、いずれの

試験も Valid であった。なお、この 2 試験片については、前述の通り NDR 法使用時に満たすべき判定項目 20 を満たした。これらの結果を、令和 4 年度取得した、判定項目 20 を満たしていない 4 試験片の結果と比較した場合、ID-1-FR1 については他よりも大きな傾きを有し、高い亀裂進展抵抗を示すことが特徴となるが、ID-6-FR1 については、同量の亀裂進展量に対する J 積分値や、J-R 曲線全体の形状等においても大きな差異は見られない。このことから、少なくとも本試験で対象としたポンプケーシング材と、試験で実施した延性亀裂進展量の範囲においては、判定項目 20 を満たすかどうかは試験結果に与える影響は限定的であると考えられる。

計 6 個の試験片 2 において、NDR 法により得られるべき乗近似 J-R 曲線の比較を行った。べき乗近似した J-R 曲線の比較結果を図 3.4.2(2)-9 に示す。ID-2-FR1～ID-6-FR1 のべき乗近似 J-R 曲線については、試験で得られた J-R 曲線同様、概ね同様の形状であった。一方、ID-1-FR1 の J-R 曲線は他の曲線よりも傾きが大きくなった。図 3.4.2(2)-6 に示す荷重-荷重線変位関係においても、ID-1-FR1 は他の試験片と比べて最大荷重及び最大荷重到達時の開口変位が大きく、J-R 曲線の大小関係と傾向が一致しており、このことから、当該試験片の延性亀裂進展抵抗が高いことがわかる。なお、引張試験結果やフェライト量測定結果において、ID-1 と他の ID との間に有意な差異は認められていないため、これは材料の局所的な差異によるものと推定される。

破面開放後の C(T)試験片を対象に、フェライトスコープを用いてフェライト量測定を実施した。フェライト量測定結果を表 3.4.2(2)-5 に示す。フェライトスコープによるフェライト量(試験片側面①～④)の平均値は 19.1%～21.9%であり、令和 2 年度に報告した Schaeffler 線図による予測値より大きな値であった。また、表中に同じ供試体から採取した観察用試験片 2 枚を対象としたフェライトスコープによるフェライト量測定結果(平均値)を比較参照値として示すが、C(T)試験片を対象とした測定値と概ね同じ値であった。

## ② 除荷弾性コンプライアンス法による J-R 曲線の評価

各除荷線のコンプライアンスより延性亀裂進展量  $\Delta a$  を算出し、荷重-荷重線変位関係から求まる J 積分との対応より J-R 曲線を求めた。除荷弾性コンプライアンス法による J-R 曲線を図 3.4.2(2)-10 に示す。鈍化直線の傾きは流動応力の 2 倍とした。流動応力は、令和 4 年度に実施した 288℃大気中での引張試験結果から求まる流動応力(0.2%耐力と引張強さの平均値)の平均値 344 MPa とした。ASTM E1820-21 に基づいた Validity 判定結果を表 3.4.2(2)-4 にまとめる。なお、令和 4 年度に取得した 288℃大気中での弾塑性破壊靱性試験結果についても、流動応力 344 MPa を用いて J-R 曲線の再評価を実施した。令和 5 年度取得した 2 データについては、令和 4 年度取得したデータに対し、比較的除荷弾性コンプライアンスから推定される亀裂進展量の変動が小さく、より精度よい亀裂長さの予測ができていますが、この理由はクリップゲージを、より本試験片の開口変位に対応する仕様のもので変更した結果によるものと考え

られる。一方で、除荷弾性コンプライアンス法から推定された最終亀裂長さはいずれも実測亀裂長さを下回っており、これは既往知見<sup>[3.4.2(2)-2]</sup>に一致する傾向である。延性亀裂進展量の過小評価は J-R 曲線の過大評価につながるため、この結果からも、288℃において今回試験対象としたポンプケーシング材の延性亀裂進展抵抗の実力を評価するには、NDR 法を採用する方がより妥当と考えられる結果を得られることが示唆される。

### ③ フェライト量の測定結果

破面開放後の C(T)試験片を対象に、フェライトスコープを用いてフェライト量測定を実施した。フェライト量測定結果を表 3.4.2(2)-5 に示す。フェライト量(試験片側面①～④)の平均値は 19.1%～21.9%であり、令和 2 年度に報告した Schaeffler 線図による予測値より、フェライトスコープによる測定値の方が大きな値であった。また、同じ供試体から採取した観察用試験片を対象としたフェライトスコープによるフェライト量測定結果とほぼ同じ値であった。

#### <参考文献>

- [3.4.2(2)-1] Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, ASTM E1820-21, ASTM international, 2021
- [3.4.2(2)-2] O. K. Chopra, A. Sather. Initial assessment of the mechanisms and Significance of low-temperature embrittlement of cast stainless steel in LWR system. NUREG/CR-5385, ANL-89/17, 1990.



表 3.4.2(2)-1 破壊靱性試験条件

予備負荷	最大荷重	6 kN
	最小荷重	3 kN
	繰返し数	3回以上
試験	初期荷重	6 kN
	荷重負荷速度	0.15 kN / sec
	変位増分 (最大荷重到達前)	0.15 mm
	変位増分 <sup>*</sup> (最大荷重到達後)	0.10 mm
	変位負荷速度	0.0025 mm / sec
	応力緩和時間	30 sec
	コンプライアンス算出範囲	20%~80%
	最小除荷荷重	3 kN
	除荷時間	20 sec
備考 <ul style="list-style-type: none"> <li>・試験時、1回目の負荷のみ荷重制御、2回目以降の負荷は変位制御で行う。<sup>*</sup></li> <li>・試験中は<math>\Delta a</math>及び<math>J</math>を監視し、最大荷重に到達しており、且つ<math>\Delta a=2.0\text{ mm}</math>を超えたデータ点が得られた時点で試験を終了する。<sup>*</sup></li> </ul>		

※令和4年度の破壊靱性試験条件から変更する条件

表 3.4.2(2)-2 破面上での亀裂長さ測定結果

試験片番号	初期亀裂長さ $a_0$ (mm)	最終亀裂長さ $a_p$ (mm)	延性亀裂進展量 $\Delta a$ (mm)	備考
ID-1-FR1	26.03	28.75	2.72	—
ID-6-FR1	25.95	28.34	2.39	—
ID-2-FR1	26.95	32.83	5.88	令和4年度 実施
ID-3-FR2	26.28	30.70	4.42	
ID-4-FR1	26.04	32.36	6.32	
ID-5-FR1	26.33	31.66	5.33	

表 3.4.2(2)-3 弾塑性破壊靱性試験結果

試験片番号	試験温度 (°C)	流動応力 $\sigma_f$ (MPa)	$J_Q$ (kJ/m <sup>2</sup> )	$J = C(\Delta a)^m$		$J_{Ic}$ としての Validity		備考
				$C$	$m$	$B > 10J_Q / \sigma_f$	$b_0 > 10J_Q / \sigma_f$	
ID-1-FR1	288	344	884	701	0.59	Invalid	Invalid	—
ID-6-FR1			456	493	0.53	Valid	Valid	—
ID-2-FR1			329	416	0.60	Valid	Valid	令和4年度 実施 ( $\sigma_f=344$ MPa で再評価)
ID-3-FR2			519	531	0.50	Valid	Valid	
ID-4-FR1			361	433	0.57	Valid	Valid	
ID-5-FR1			369	443	0.60	Valid	Valid	

表 3.4.2(2)-4 (1/2) Validity 判定結果のまとめ

	判定項目	ID-1-FR1	ID-6-FR1	ID-2-FR1	ID-3-FR2	ID-4-FR1	ID-5-FR1
1	$2 \leq W/B \leq 4$	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
2	$B > 10J_Q / \sigma_f$	Invalid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
3	$b_0 > 10J_Q / \sigma_f$	Invalid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
4	$P_{\max} < P_m$	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
5	$K_{f\max} \leq K_{\max}$	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
6	試験速度 $0.3 \text{ min} \leq P_m$ 到達時間 $\leq 3 \text{ min}$	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
7	予備負荷 $ a_{\text{ave}} - a_i  \leq 0.002W$ (i=1~3)	Invalid	Invalid	Invalid	Invalid	Invalid	Invalid
8	$0.45 \leq a_0/W \leq 0.7$	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
9	$\Delta a_0 \geq 1.3$	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
10	$\Delta a_0 \geq 0.05B$	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
11	$ \Delta a_p - \Delta a_{\text{predicted}}  < 0.15\Delta a_p$ ( $\Delta a_p < 0.02b_0$ の場合)	Invalid	Valid	—	Invalid	—	—
12	$ \Delta a_p - \Delta a_{\text{predicted}}  < 0.03b_0$ ( $\Delta a_p \geq 0.02b_0$ の場合)	—	—	Invalid	—	Invalid	Invalid
13	$ a_{0i} - a_0  \leq 0.05B$ (i=1~9)	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
14	$ a_{pi} - a_p  \leq 0.05B$ (i=1~9)	Invalid	Invalid	Valid	Valid	Valid	Valid
15	有効データ 5 点以上	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
16	最大試験力までにデータ 8 点以上	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
17	0.15 mm オフセット線と 0.5 mm オフセット線の間 有効データ 1 点以上	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
18	0.5 mm オフセット線と 1.5 mm オフセット線の間 有効データ 1 点以上	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
19	$0.4J_Q \sim J_Q$ の間にデータ 3 点以上	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid	Valid
20	$\Delta a_p \leq \text{Min}(4, 0.15b_0)$	Valid	Valid	Invalid	Invalid	Invalid	Invalid

表 3.4.2(2)-4 (2/2) Validity 判定結果のまとめ

$W$ : 試験片幅,  $B$ : 試験片厚さ,  $b_0$ : 初期リガメント長さ,  $a_0$ : 初期亀裂長さ(平均値),  
 $\sigma_f$ : 流動応力,  $P_{\max}$ : 疲労予亀裂導入時の最終荷重,  $P_m=0.4Bb_0*2\sigma_f/(2W+a_0)$ ,  
 $K_{f\max}$ : 疲労予亀裂導入時の最終  $K$  値,  $K_{\max}$ : 判定基準  $K$  値,  
 $a_{ave}$ : 予備負荷時の亀裂長さ(平均値),  $a_i$ : 予備負荷時の亀裂長さ( $i=1\sim 3$ ),  
 $\Delta a_0$ : 疲労亀裂進展量,  $\Delta a_p$ : 延性亀裂進展量(実測値),  $\Delta a_{\text{predicted}}$ : 延性亀裂進展量(計算値),  
 $a_{0i}$ : 初期亀裂長さ( $i=1\sim 9$ ),  $a_{pi}$ : 最終亀裂長さ( $i=1\sim 9$ ),  $a_p$ : 最終亀裂長さ(平均値)

表 3.4.2(2)-5 フェライト量測定結果 (%) (測定位置は図 3.4.2(2)-5 の通り)

試験片 番号	試験片側面					比較 参照値*2	破面(参考値)*1					
	①	②	③	④	平均値		⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩
ID-1-FR1	15.4	22.6	22.5	19.7	20.1	23.6	14.0	14.9	15.3	17.6	14.2	19.2
ID-6-FR1	21.9	21.6	21.1	20.1	21.2	20.2	18.4	16.4	14.6	12.4	18.1	17.1
ID-2-FR1	20.0	19.3	18.8	18.3	19.1	18.9	14.2	14.2	17.5	14.5	13.7	15.3
ID-3-FR2	19.6	19.0	20.5	20.4	19.9	19.0	16.3	13.2	15.2	12.9	13.4	15.8
ID-4-FR1	20.6	18.5	23.4	21.2	20.9	20.1	17.7	16.2	18.2	17.6	15.1	16.5
ID-5-FR1	23.1	22.4	21.4	20.5	21.9	19.3	16.7	14.9	16.0	18.1	15.8	21.1

\*1：破面の凹凸によりフェライト量が小さめに測定される可能性が考えられることから参考値とする。

\*2：同じ供試体から採取した観察用試験片 2 枚のフェライト量測定結果(平均値)を示す。

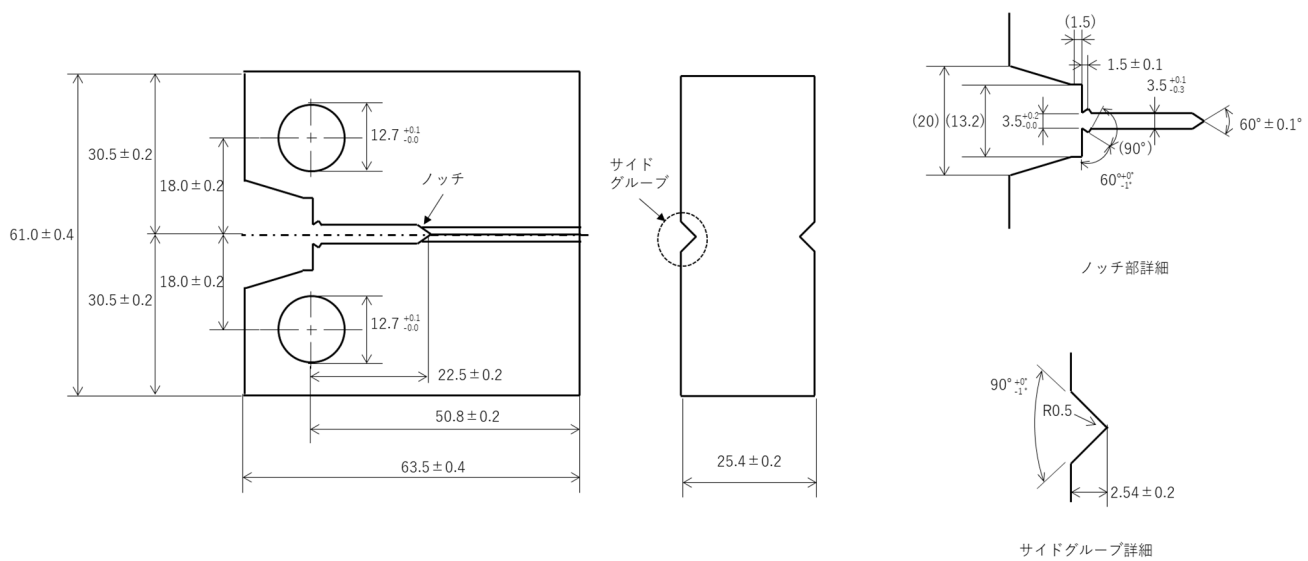
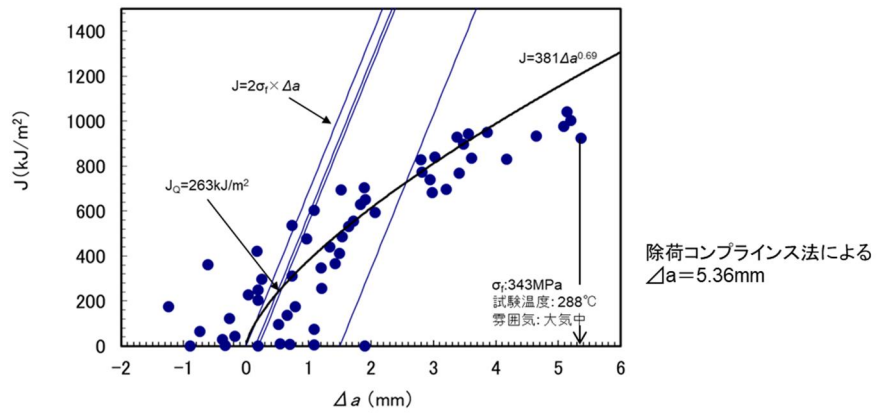
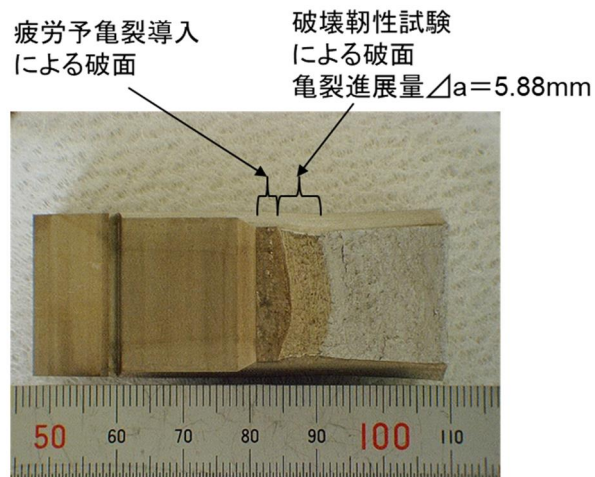


図 3.4.2(2)-1 1T-C(T)試験片の寸法 (単位 : mm)

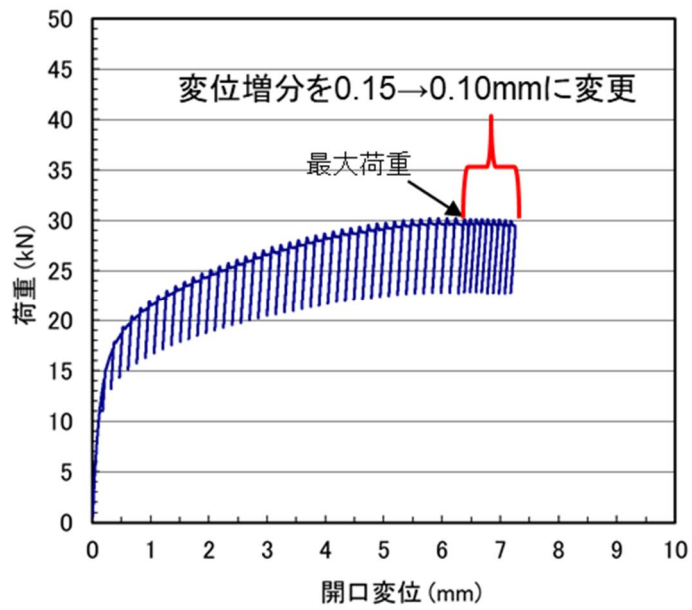


(a) J-R 曲線

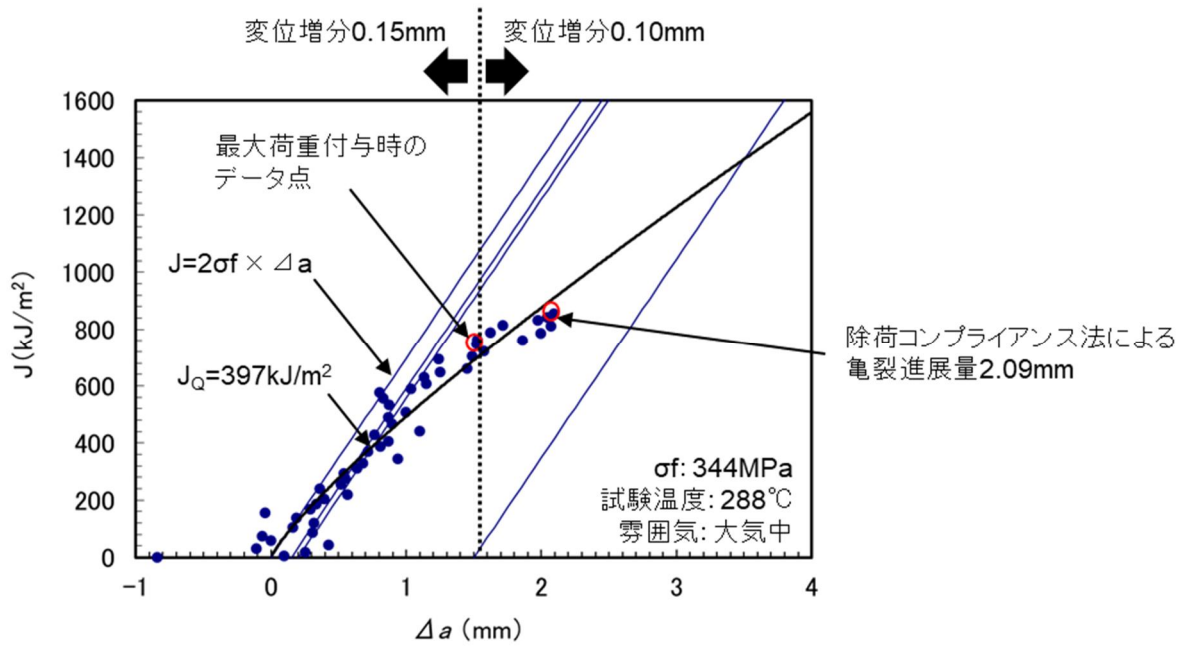


(b) 試験後の破面

図 3.4.2(2)-2 令和4年度に実施した破壊靱性試験結果の例 (ID-2-FR1)



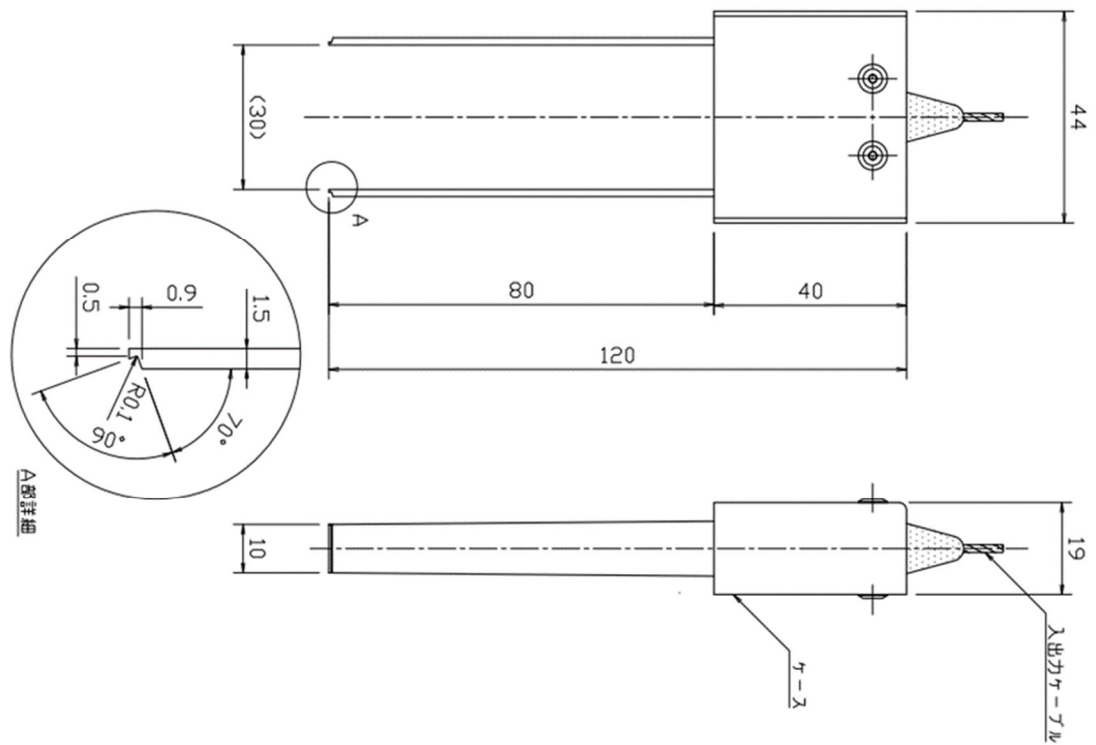
(a) 荷重-開口変位曲線



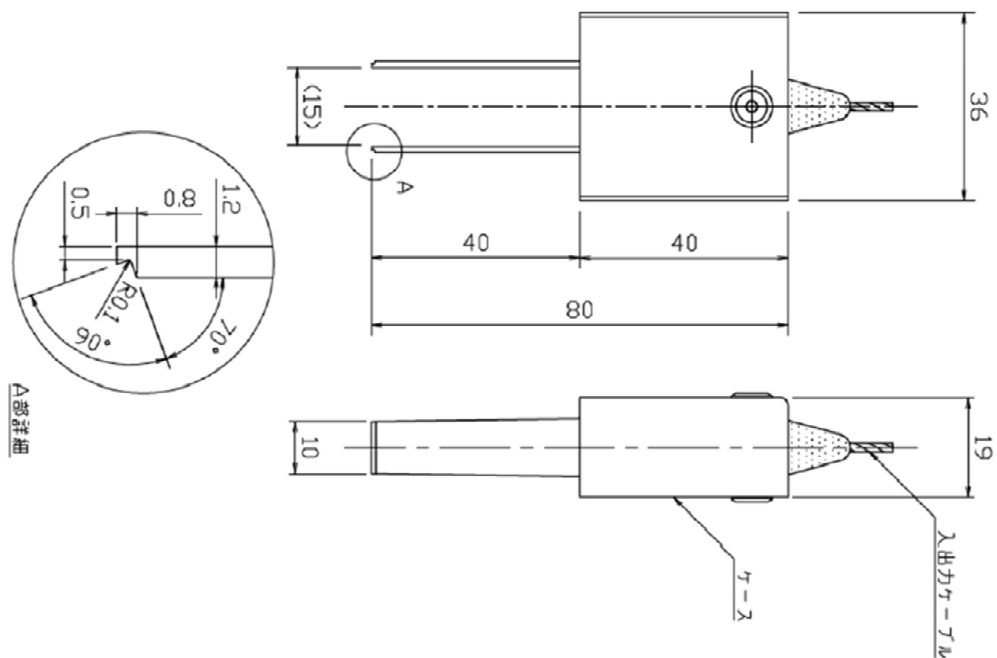
(b) J-R 曲線

図 3.4.2(2)-3 取得する試験結果イメージ



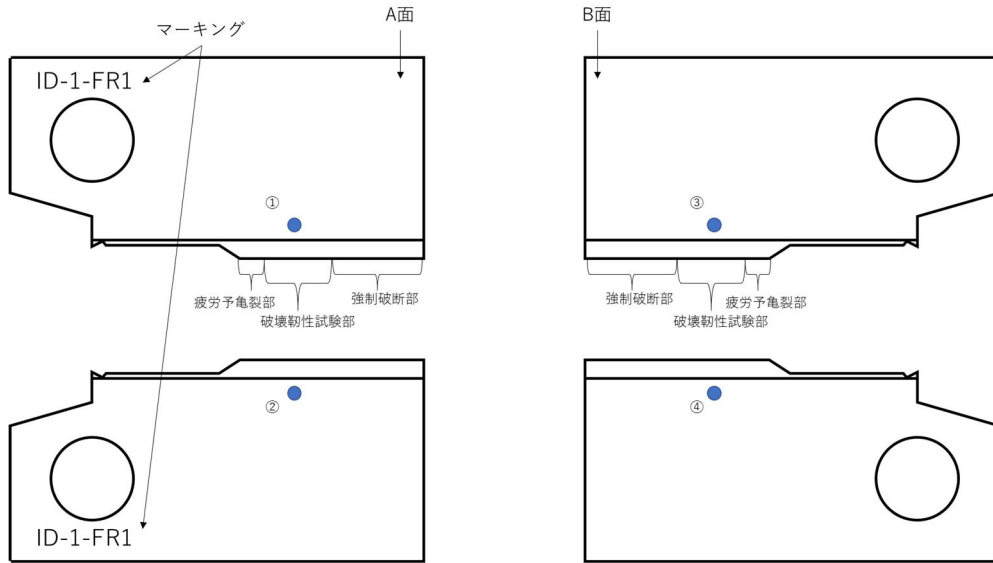


(a) 令和4年度に使用したクリップゲージ(UB-20SAH001、適用範囲：3~23 mm)

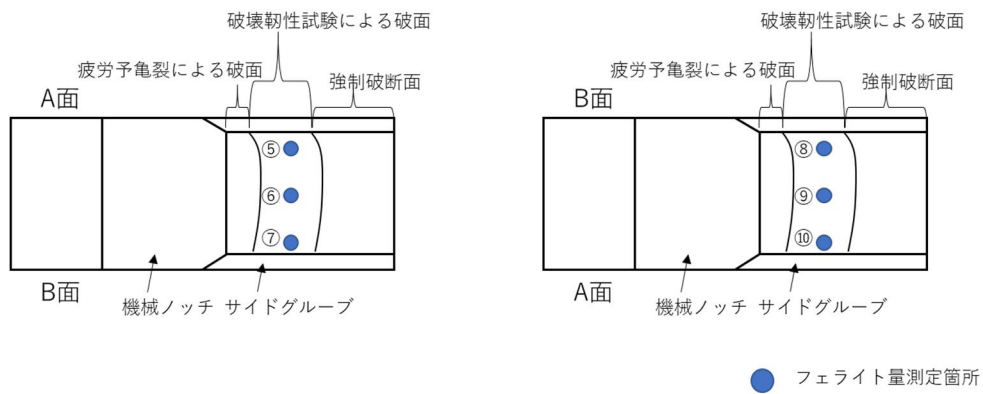


(b) 令和5年度使用するクリップゲージ(UB-10SAH002、適用範囲：3~13 mm)

図 3.4.2(2)-4 クリップゲージ形状及び寸法(単位：mm)

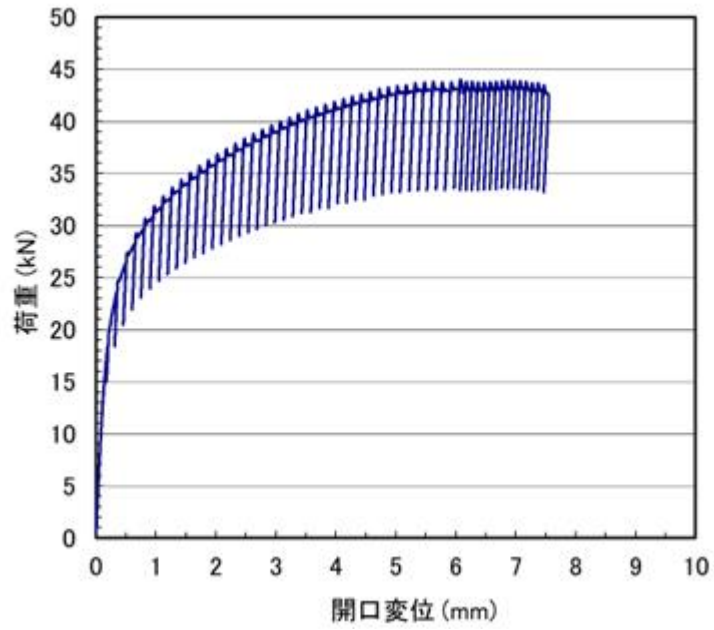


(a) 試験片表面(マーキング例：ID-1-FR1)

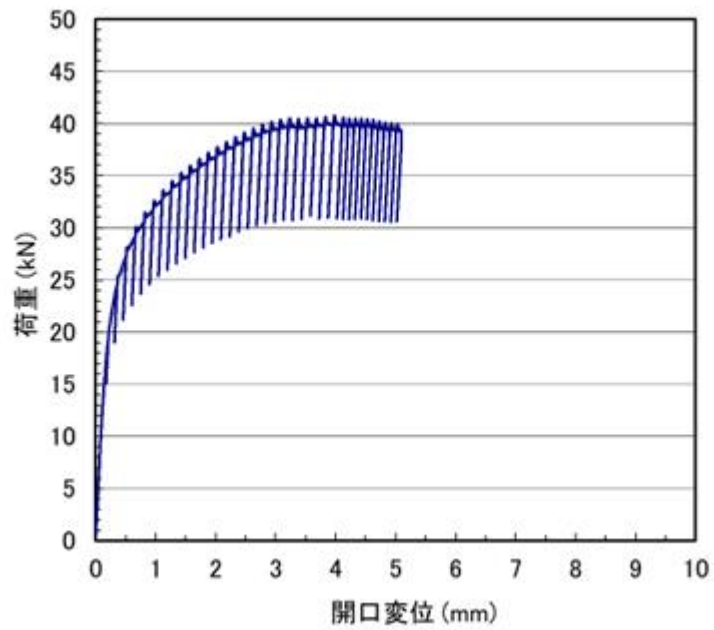


(b) 試験片破面

図 3.4.2(2)-5 フェライト量測定箇所

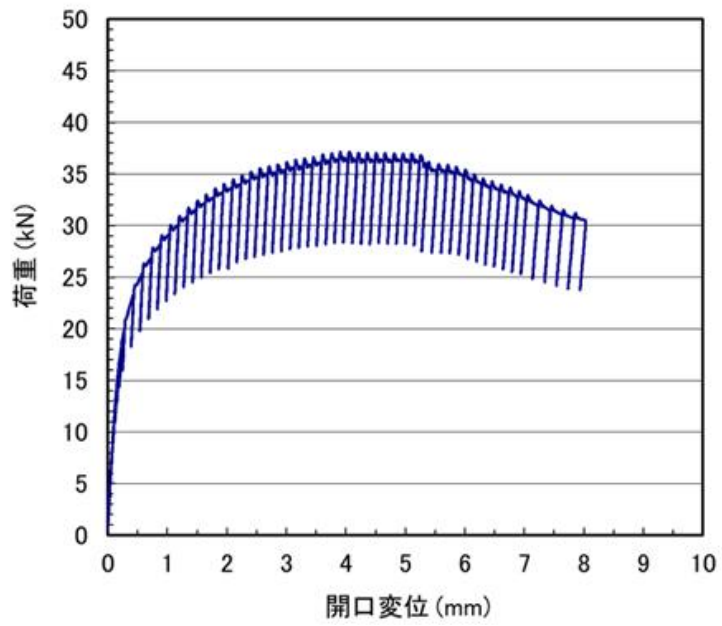


(a) ID-1-FR1

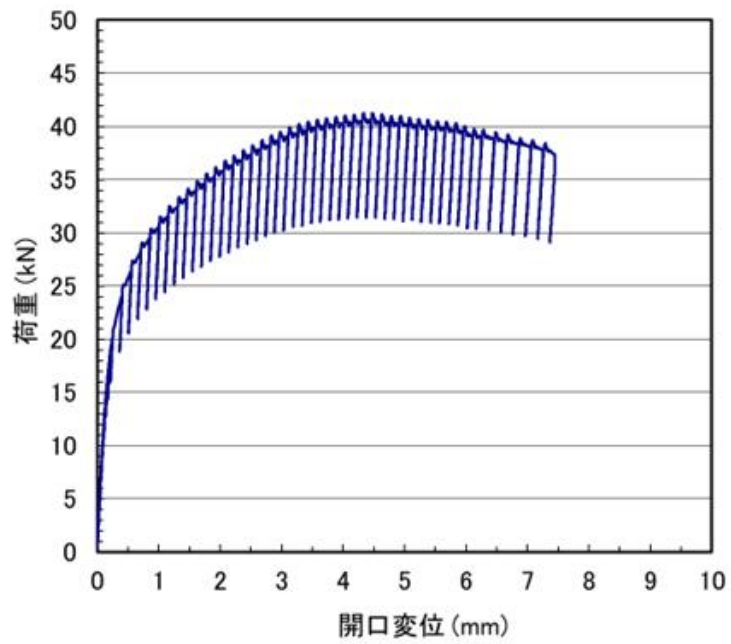


(b) ID-6-FR1

図 3.4.2(2)-6 (1/3) 弾塑性破壊靱性試験における荷重—荷重線変位関係

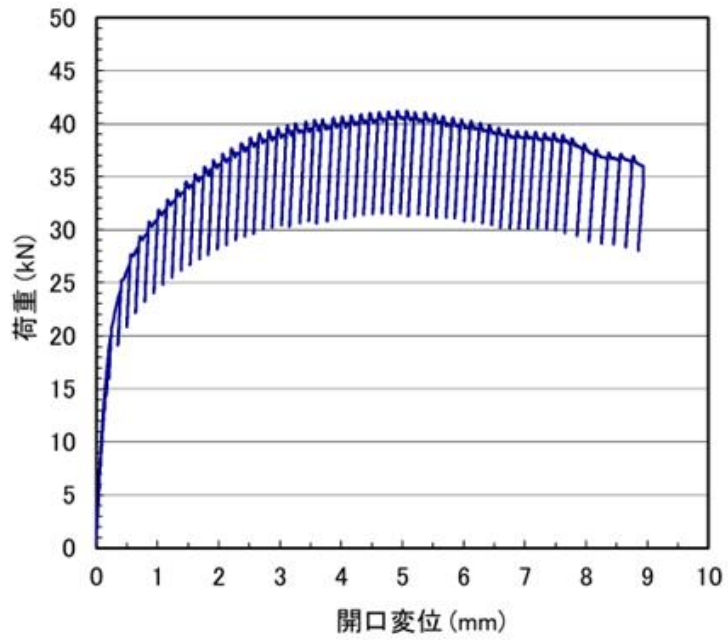


(c) ID-2-FR1(令和4年度実施)

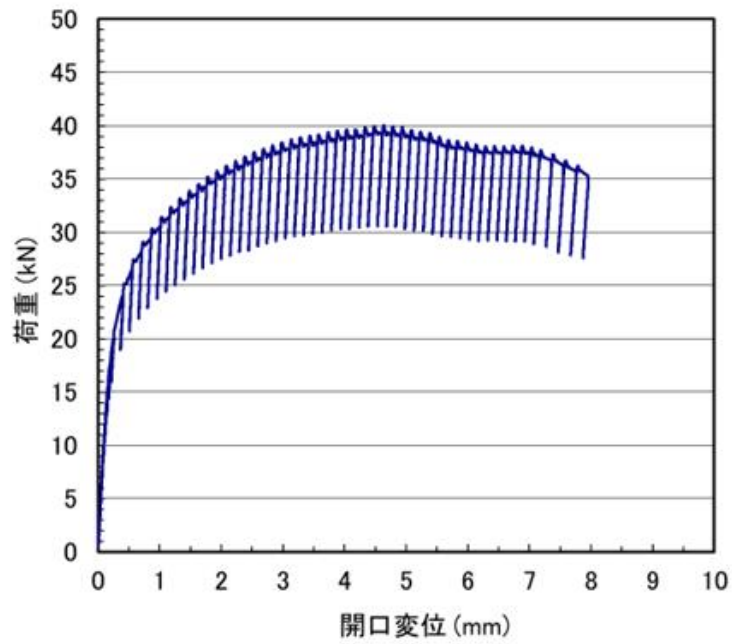


(d) ID-3-FR2(令和4年度実施)

図 3.4.2(2)-6 (2/3) 弾塑性破壊靱性試験における荷重－荷重線変位関係

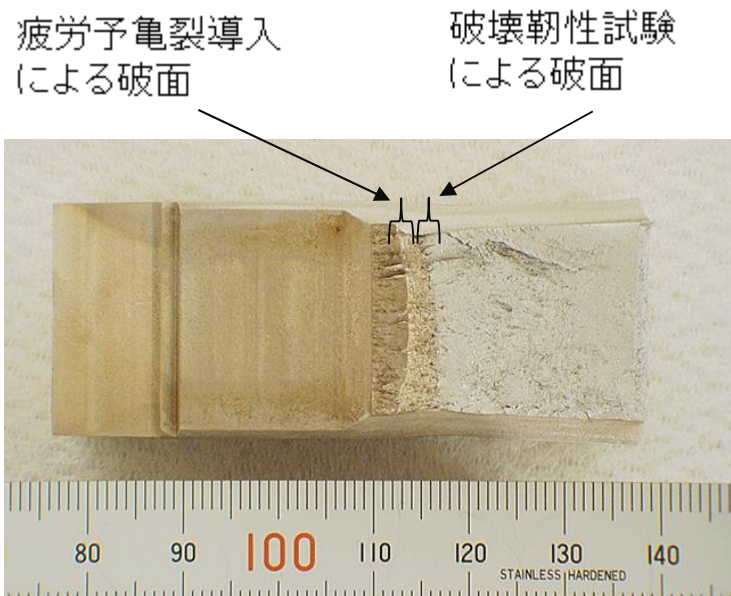


(e) ID-4-FR1(令和4年度実施)

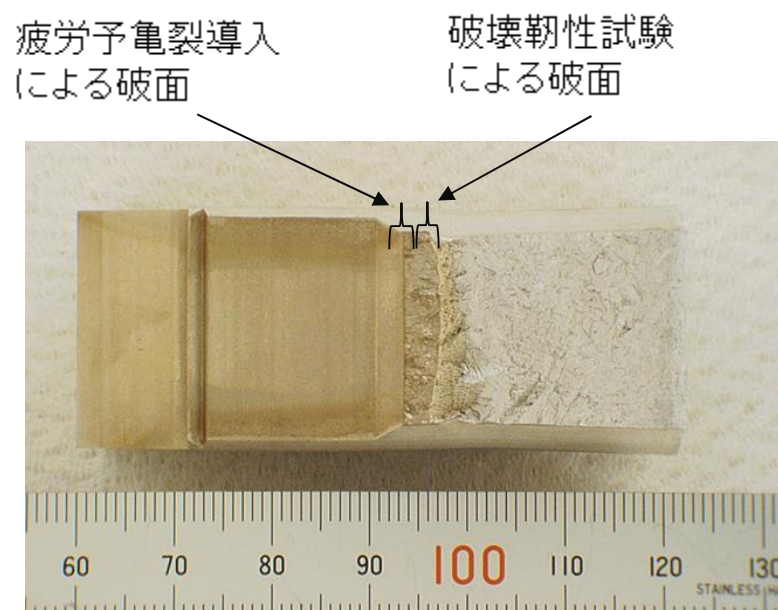


(f) ID-5-FR1(令和4年度実施)

図 3.4.2(2)-6 (3/3) 弾塑性破壊靱性試験における荷重－荷重線変位関係

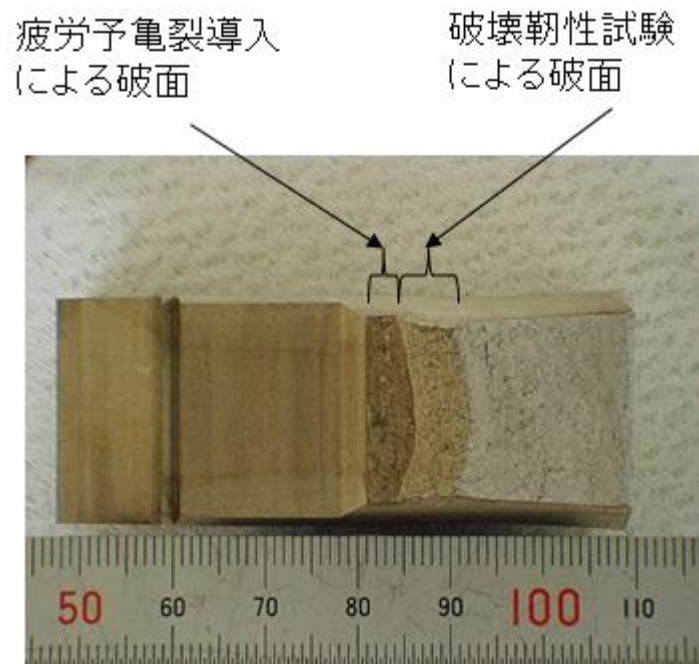


(a) ID-1-FR1

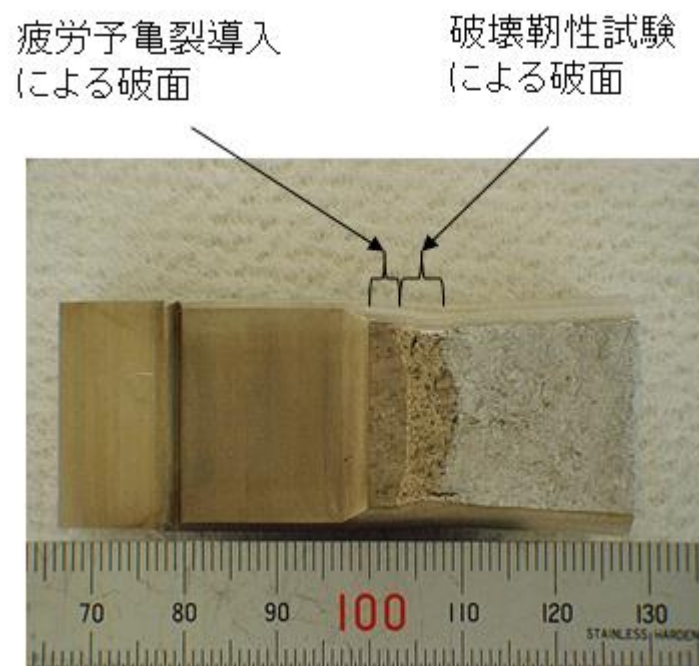


(b) ID-6-FR1

図 3.4.2(2)-7 (1/3) 弾塑性破壊靱性試験後の破面マクロ写真

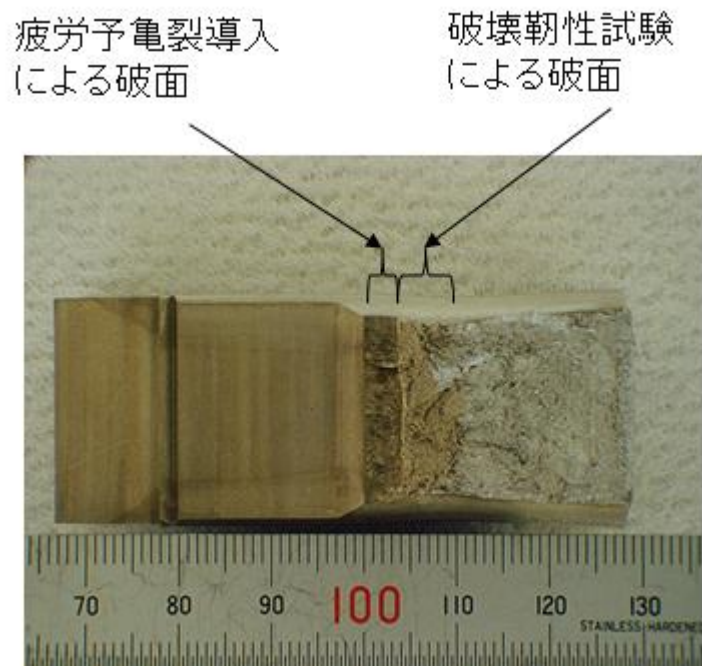


(c) ID-2-FR1(令和4年度実施)

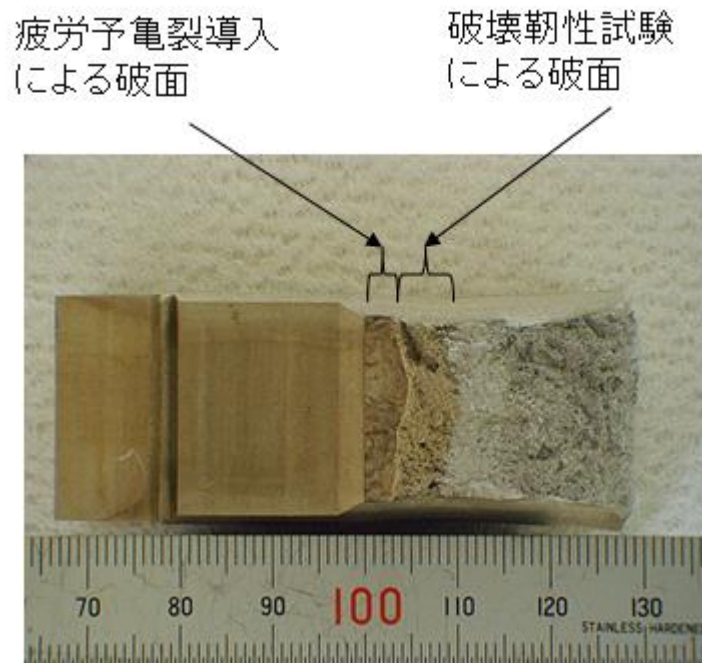


(d) ID-3-FR2(令和4年度実施)

図 3.4.2(2)-7 (2/3) 弾塑性破壊靱性試験後の破面マクロ写真



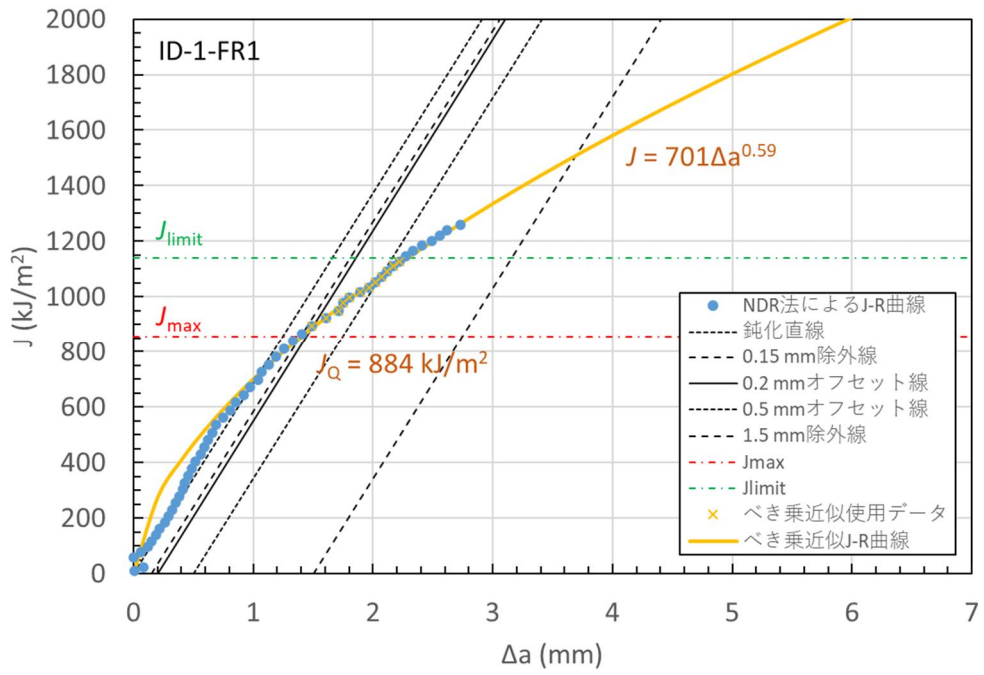
(e) ID-4-FR1(令和4年度実施)



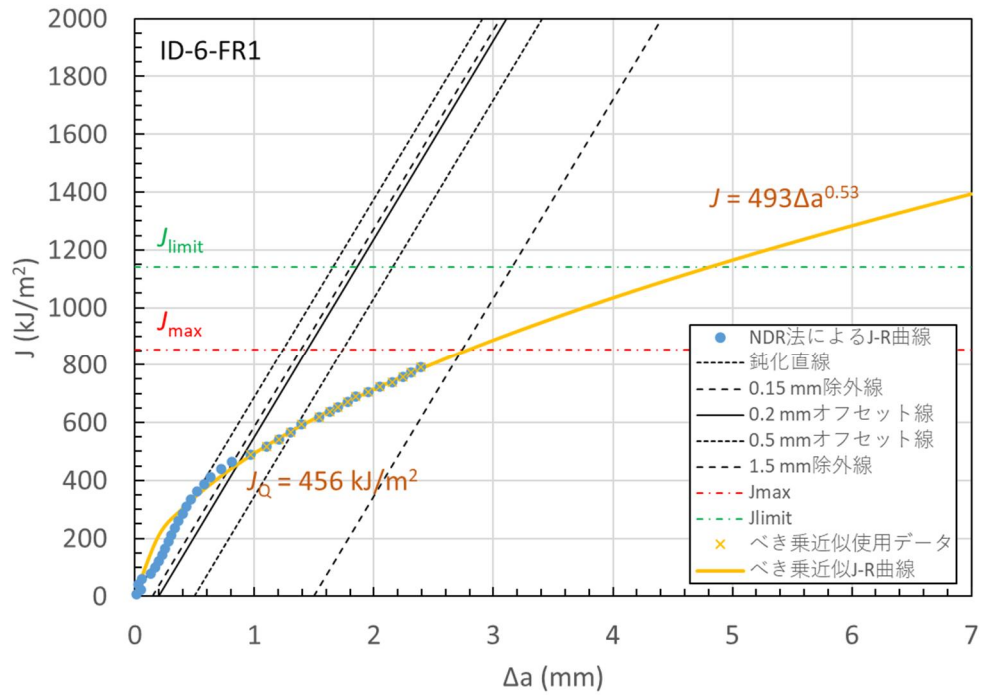
(f) ID-5-FR1(令和4年度実施)

図 3.4.2(2)-7 (3/3) 弾塑性破壊靱性試験後の破面マクロ写真



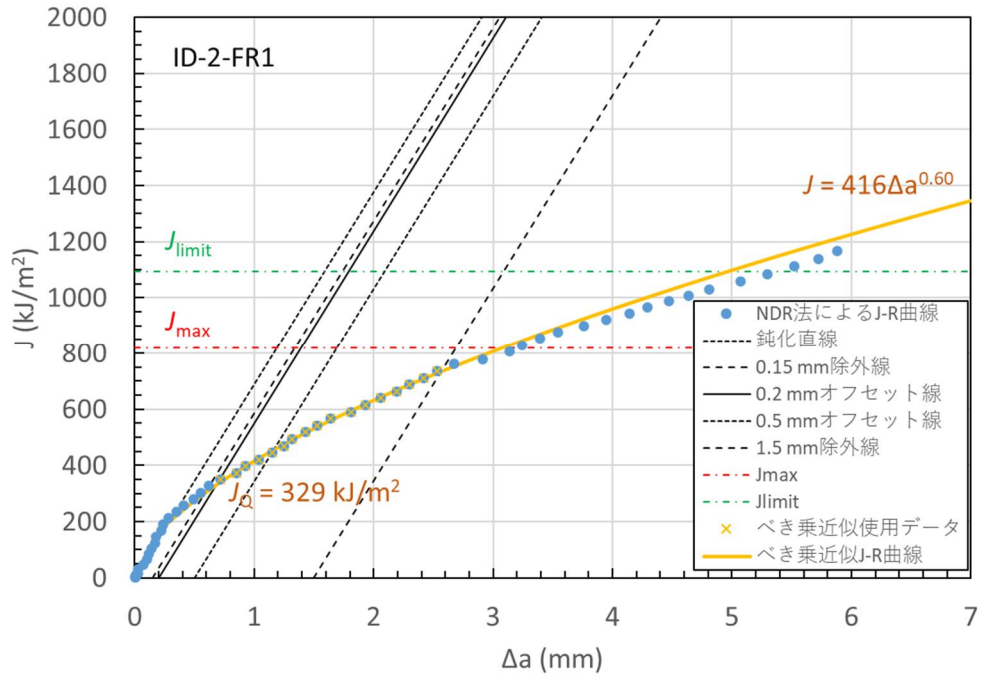


(a) ID-1-FR1

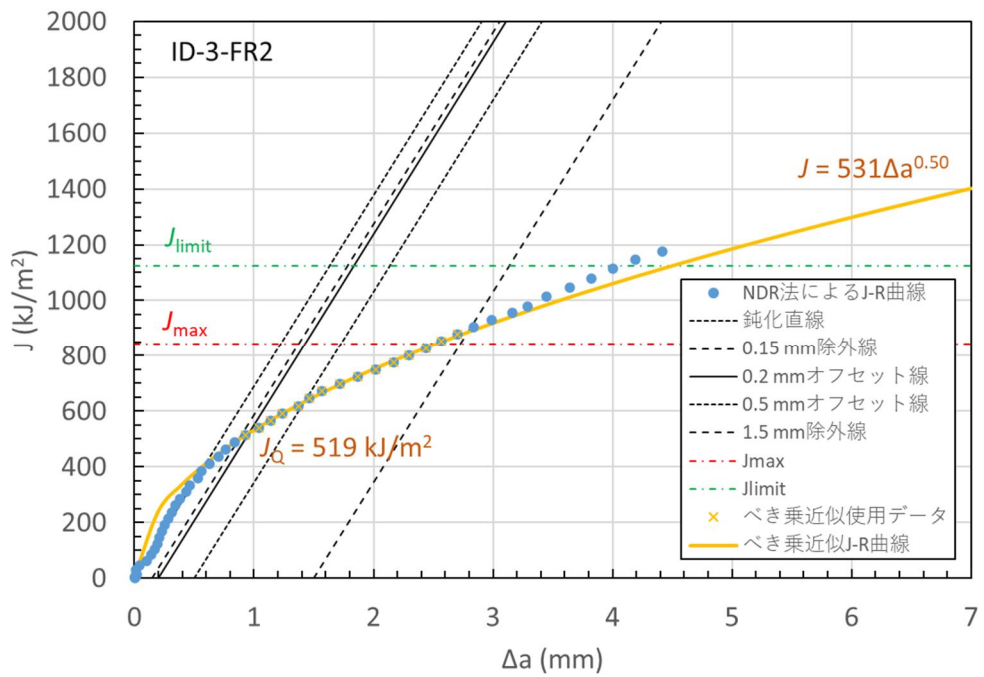


(b) ID-6-FR1

図 3.4.2(2)-8 (1/3) NDR 法による J-R 曲線

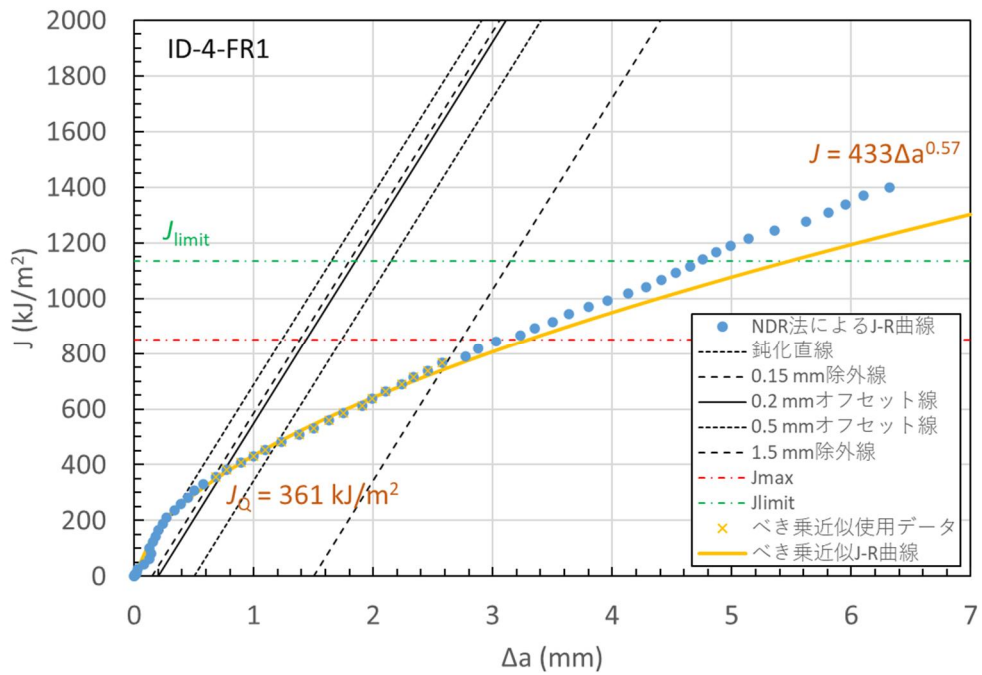


(c) ID-2-FR1(令和4年度実施、流動応力 344 MPa で再評価)

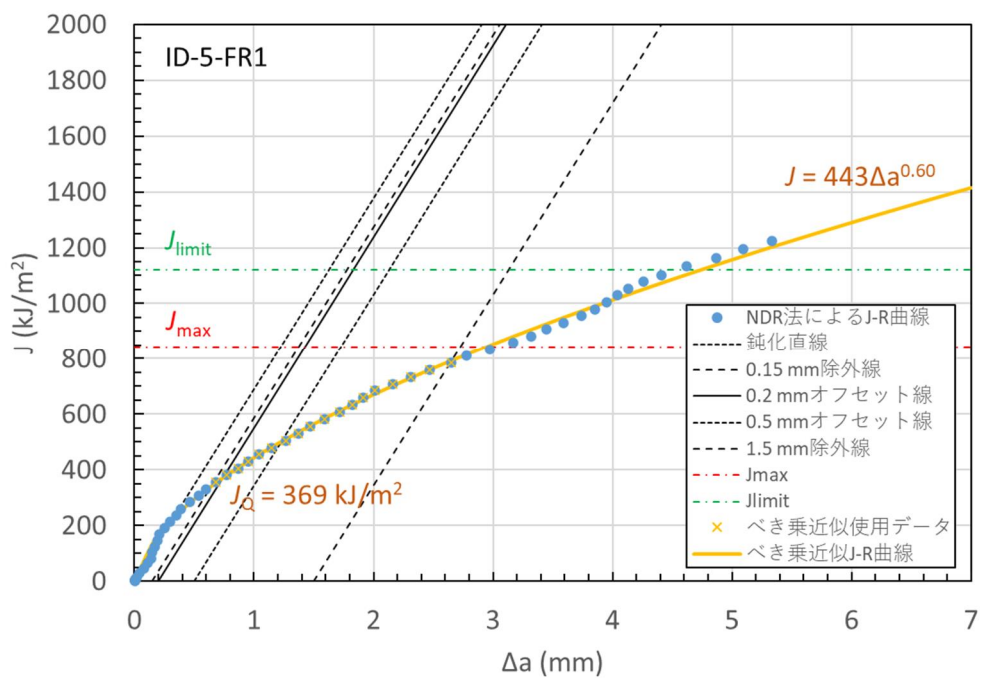


(d) ID-3-FR2(令和4年度実施、流動応力 344 MPa で再評価)

図 3.4.2(2)-8 (2/3) NDR 法による J-R 曲線



(e) ID-4-FR1(令和4年度実施、流動応力 344 MPa で再評価)



(f) ID-5-FR1(令和4年度実施、流動応力 344 MPa で再評価)

図 3.4.2(2)-8 (3/3) NDR 法による J-R 曲線

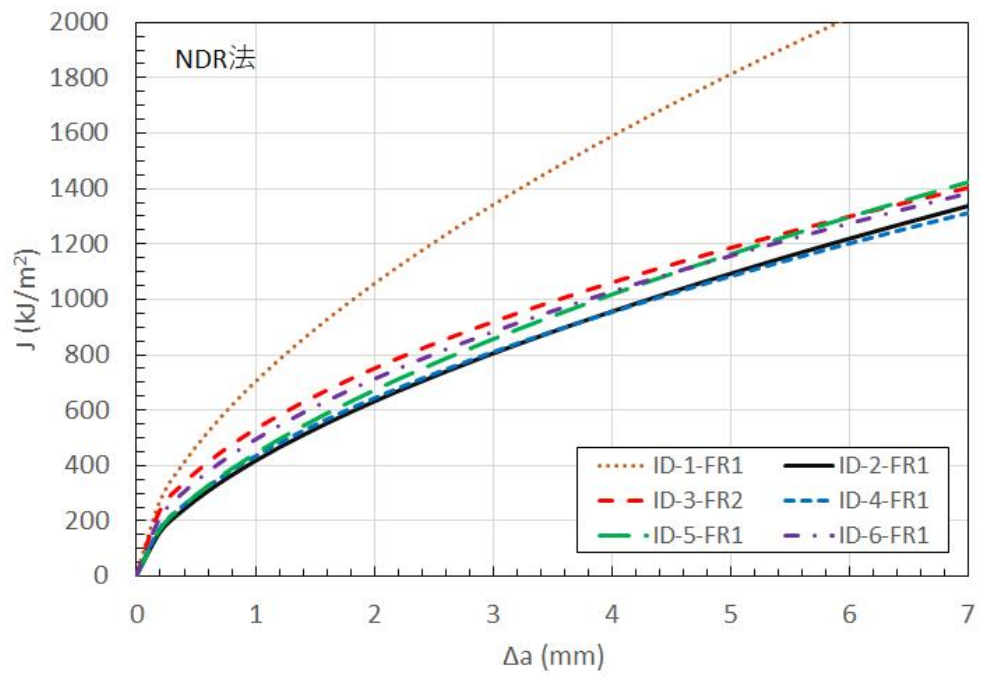
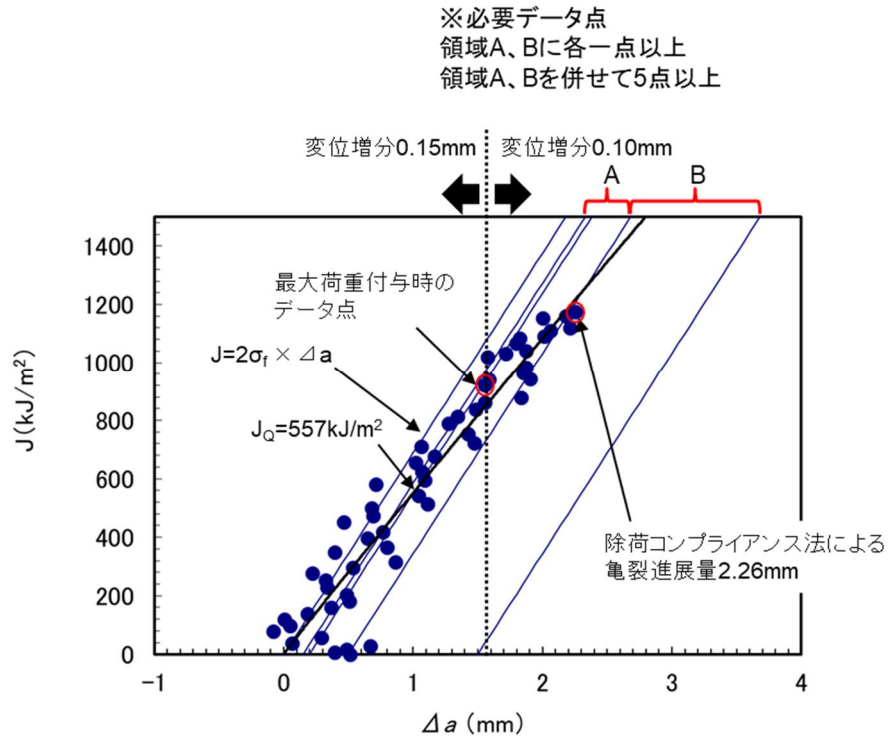
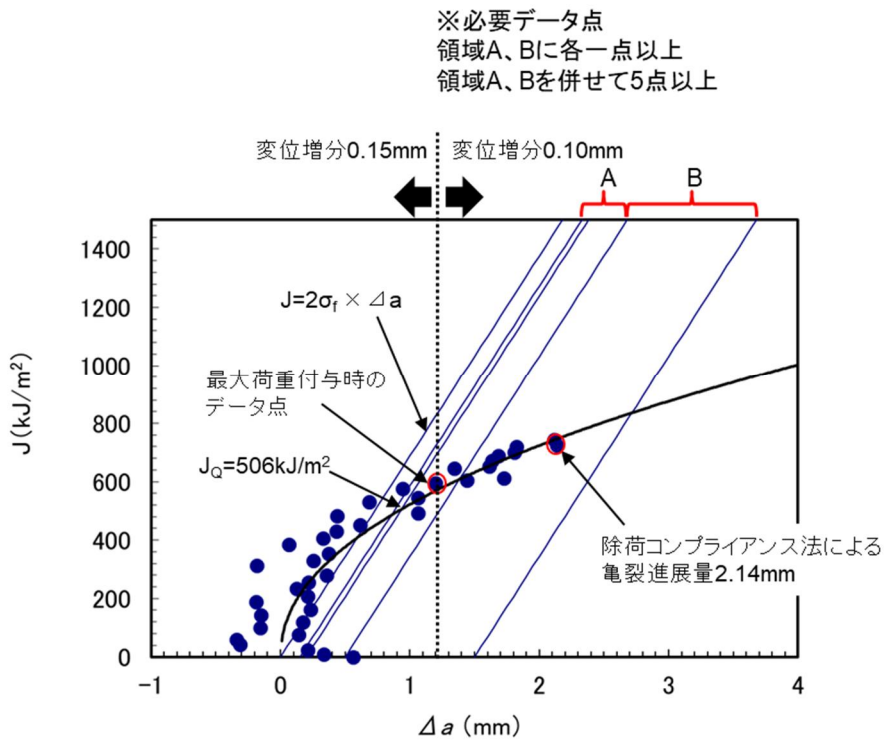


図 3.4.2(2)-9 NDR 法によるべき乗近似 J-R 曲線の比較

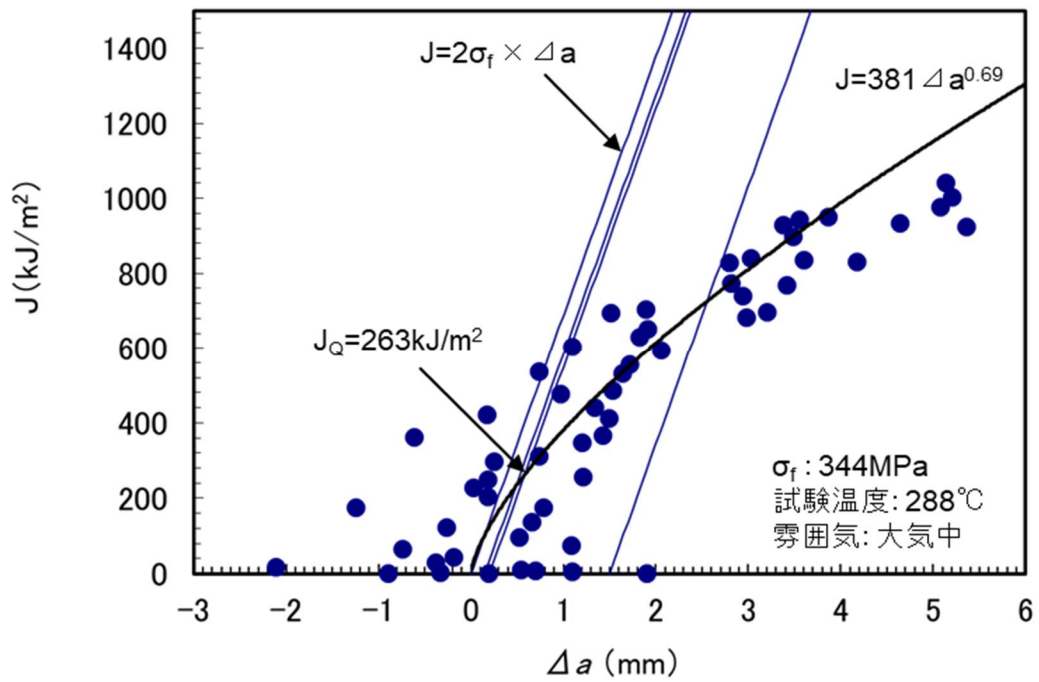


(a) ID-1-FR1

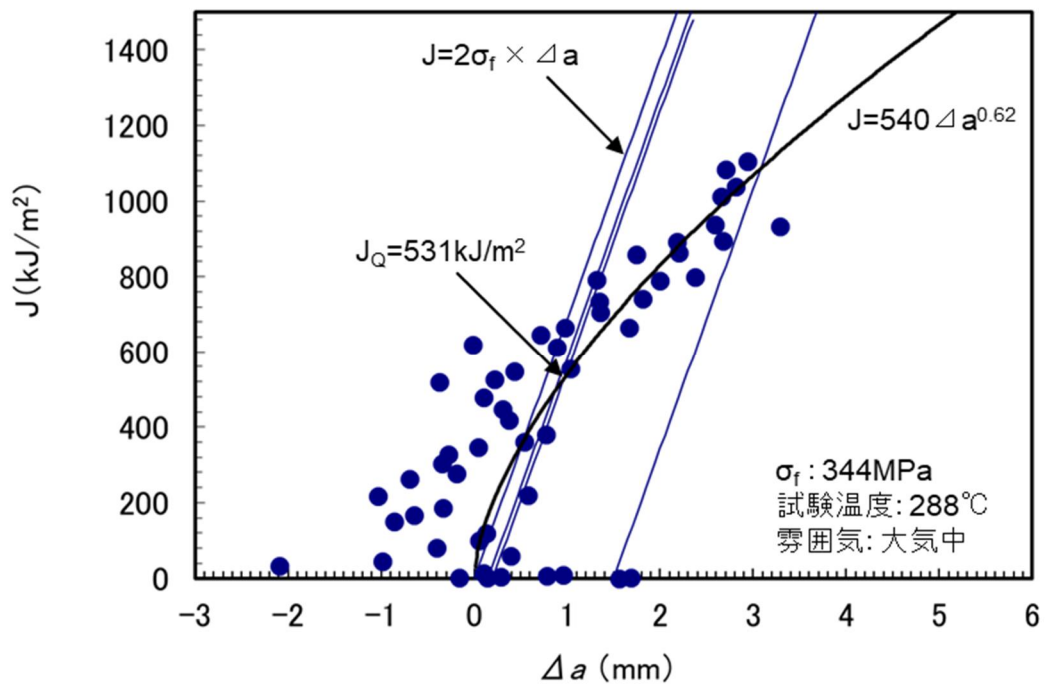


(b) ID-6-FR1

図 3.4.2(2)-10 (1/3) 除荷弾性コンプライアンス法による J-R 曲線

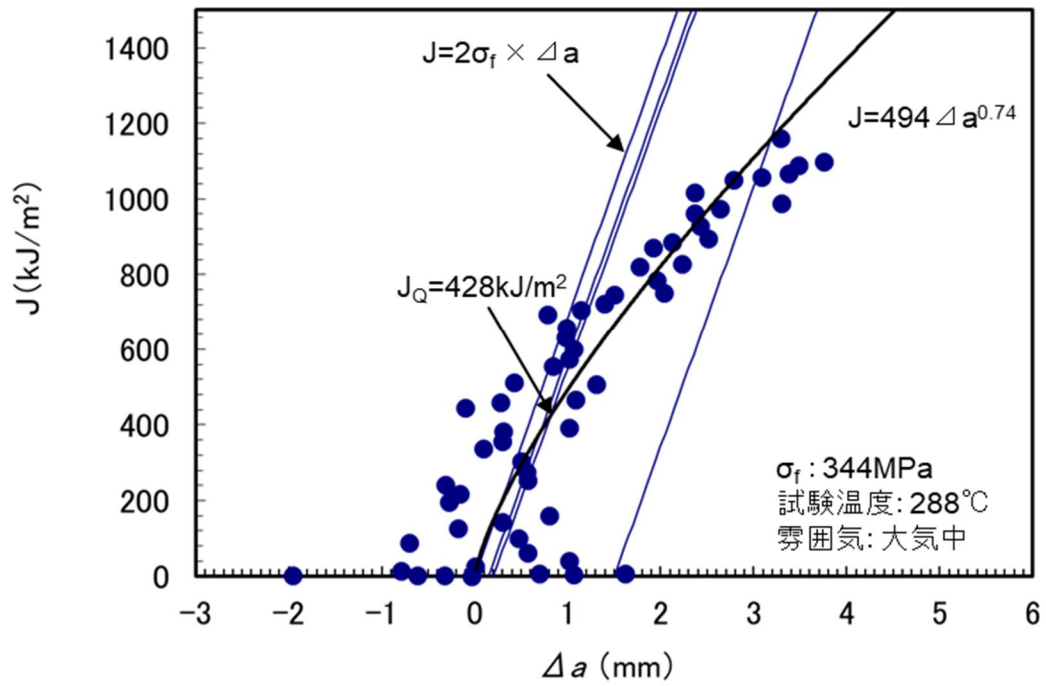


(c) ID-2-FR1(令和4年度実施、流動応力 344 MPa で再評価)

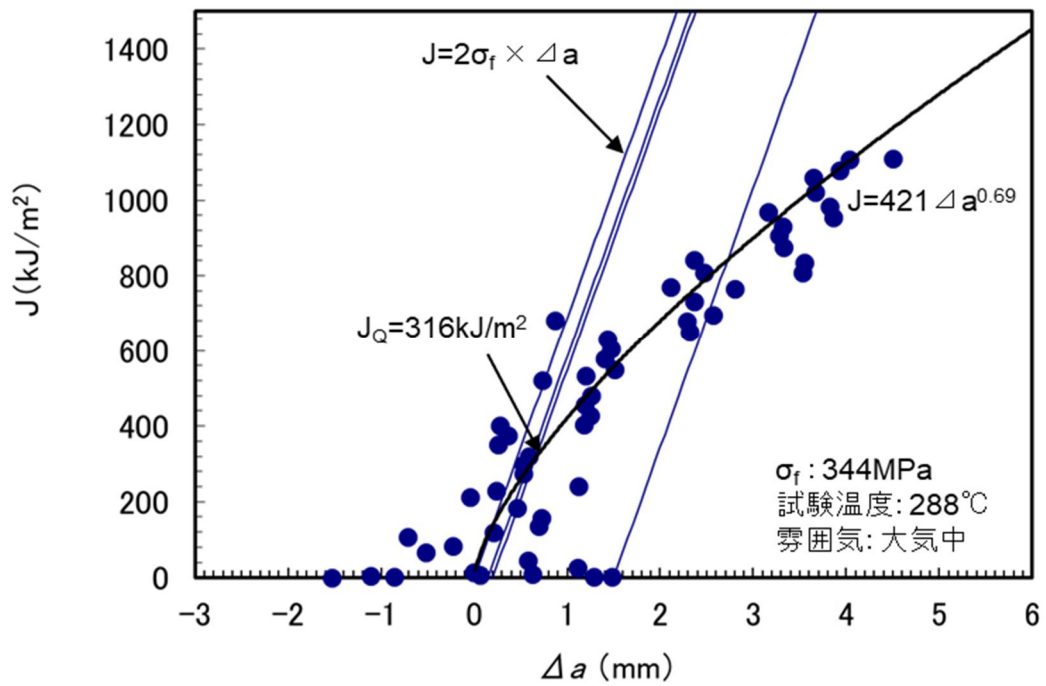


(d) ID-3-FR2(令和4年度実施、流動応力 344 MPa で再評価)

図 3.4.2(2)-10 (2/3) 除荷弾性コンプライアンス法による J-R 曲線



(e) ID-4-FR1 (令和4年度実施、流動応力 344 MPa で再評価)



(f) ID-5-FR1 (令和4年度実施、流動応力 344 MPa で再評価)

図 3.4.2(2)-10 (3/3) 除荷弾性コンプライアンス法による J-R 曲線

### (3) アトムプローブトモグラフィー(APT)

ステンレス鋼鋳鋼の熱時効による弾塑性破壊靱性の低下は、フェライト相内のマイクロ組織変化により引き起こされることが知られており、相分離(Cr の濃化領域と希薄領域への分離)及び Ni、Si、Mn を主要元素とする G 相と呼ばれる析出物がその主要因とされている<sup>[3.4.2(3)-1]</sup>。令和4年度のフェライト相を対象とした APT では、採取したポンプケーシング材 6 種(ID-1~ID-6)から作製した全ての試験片において、若干ではあるものの相分離の進行が見られた。また、文献値<sup>[3.4.2(3)-2]</sup>と比較すると数密度や大きさ(ギニエ直径)は小さいものの、後述する定義に該当する G 相析出物が認められた。これらの結果から、約 14 万時間程度の長期の運転により、観察対象とした実機ポンプケーシング材のフェライト相に熱時効によるマイクロ組織に変化が生じていることを明らかにした。

一方、オーステナイト相については加速熱時効によっても硬さの変化等は生じず、熱時効に対する感受性がないことが知られている<sup>[3.4.2(3)-2]</sup>ものの、実機材を用いて確認した例は限られている。令和4年度成果としてオーステナイト相単独のナノインデント硬度を得たが、その値は既存知見で報告されている4種の CF-3M 材の未時効材を含めたナノインデント硬度と同程度であった。この結果からも、明確な硬化の挙動は見られておらず、マイクロ組織の変化もないものと推定されるが、令和4年度は APT を実施していなかった。ここでは令和4年度にフェライト相の APT を実施した ID-1-M1~ID-6-M1 のオーステナイト相を対象として APT を実施し、マイクロ組織に特徴的な変化が生じていないかどうかについて検討する。

#### 1) 試験方法

試料作製には、令和4年度実施したフェライト相を対象とした測定と同様、集束イオンビーム(FIB)装置 NX2000(日立ハイテック製)を用い、上記の6試験片のオーステナイト相から APT 用試料を採取し、針状に加工した。APT に用いた装置についても令和4年度と同様、局所電極型アトムプローブ LEAP5000XR(CAMECA 製)を用いた。データ取得時の試料温度は 50 K とし、パルスフラクションが 15%の電圧パルスを周波数 200 kHz で試料に印加した。前述のように、一般的にオーステナイト相は熱時効に対する感受性はないことから、熱時効によるマイクロ組織の変化を特徴付けるようなパラメータは存在しないが、ここでは令和4年度のフェライト相の相分離の定量評価のために用いた Variation<sup>[3.4.2(3)-3]</sup>を同様に用いた。Variation は二項分布と実際の相対度数分布との差の絶対値の和として、次式で定義される値である。

$$\text{Variation} \equiv \sum_i |O(i) - B(i)|$$

ここで、 $i$  は Cr 濃度、 $O(i)$  は時効後の Cr 濃度の相対度数分布、 $B(i)$  は二項分布である。本研究では、三次元アトムマップを 100 個ずつの原子を有するブロックに分割し、各ブロックの局所 Cr 濃度を計算して相対度数分布を求めた。オーステナイト相の Cr



の分布が熱時効に対して変化がなければ、フェライト相の分布よりも二項分布に近い分布となり、結果として **Variation** の値も小さくなることが予想される。

オーステナイト系ステンレス鋼は加工による転位密度の上昇や、溶質原子クラスターの生成によって硬化することが知られ、特に中性子照射を受けて硬化したオーステナイト系ステンレス鋼では、Ni-Si 系の溶質原子のクラスター生成が報告されており<sup>[3.4.2(3)-4]</sup>、この挙動は APT により把握することが可能である。ここでは令和 4 年度評価した G 相と同様のクラスターの存在の有無を把握することとし、令和 4 年度定義した下記の条件でクラスターが検出されるかどうかを評価した。

- ① 互いの距離が 0.55 nm 以下である Si 原子と Mn 原子を一つの集まりとし、その合計が 4 個以上の場合をクラスター構成要素とする。
- ② これらの Si 原子と Mn 原子から 0.55 nm 以下にあるすべての元素の原子を含めてクラスター候補とする。
- ③ クラスター候補に含まれるランダムに分布した原子の集まりを除外するため、Si 原子と Mn 原子の合計が 25 個以上のものを熱時効により生じたクラスターと見なす(Si 原子と Mn 原子の合計が 25 個未満のものを除外する)。
- ④ 参考とした文献<sup>[3.4.2(3)-4]</sup>の照射材における溶質原子クラスターには Ni が 20at.%以上含まれることが報告されていることから、ここでは令和 4 年度のフェライト相の G 相の定義と同様に、Ni 濃度が 15at.%以上のものをクラスターと見なす。

以上の手順により抽出した条件により、G 相析出物が検出されるかどうかを評価した。APT は各試験片(ID-1-M1～ID-6-M1)から採取した試料の測定が 2 回以上成功するまで実施し、かつ合計の解析イオン数が 2000 万個を超えることを条件とした。令和 4 年度実施したフェライト相の測定条件に対し、ここで設定した下限の合計イオン数は半数であるが、これは予備測定において実施したオーステナイト相の測定において、フェライト相を対象とした場合よりも成功率が低かったことから設定した条件である。局所的な Cr 濃度は試験片毎及び各測定で異なることから、**Variation** については各試料の測定イオン数によって重みをつけた平均値で評価した。

## 2) 試験結果

測定によって得られた ID-1-M1～ID-6-M1 のアトムマップを図 3.4.2(3)-1 から図 3.4.2(3)-6 にそれぞれ示す。ここでは令和 4 年度のフェライト相を対象とした測定と同様に、主要元素として検出された Cr、Mn、Ni、Si、Fe、Mo に加え、C と P を併せて示す。Fe、Cr、Ni は元素の存在比が大きいことから、ここではそれぞれの元素に対して解析イオンの総数の 5 %、5 %、30 %の原子を表示した。前述した **Variation** に関連する元素は Cr、クラスター生成に関連すると考えられる元素は主として Ni、Si である。ID-1-M1～ID-6-M1 から採取された全 17 試料のアトムマップからは、いずれの元素についても中性子照射を受けたオーステナイトステンレス鋼に見られるようなクラスター形成やそれ以外の特徴的な分布を示す例はなく、ほぼ均一に分布して

いる様子が観察された。

得られた Cr のマップデータから算出された Variation の値を表 3.4.2(3)-1 に示す。

6 試料から算出された Variation の値は 0.020~0.035 程度であり、これは令和 4 年度評価したフェライト相の値に対し、一桁小さな値である。したがって、本測定で対象とした評価体積内の Cr の分布は二項分布に近いものであり、ほぼランダムに分布していることが示された。これは言い換えれば材料製造時の状態に近いものと考えられることでもあるため、この結果から、オーステナイト相は実機運転履歴を経ても、Cr の濃度変化が生じるようなマイクロ組織変化は生じていないと考えられる。

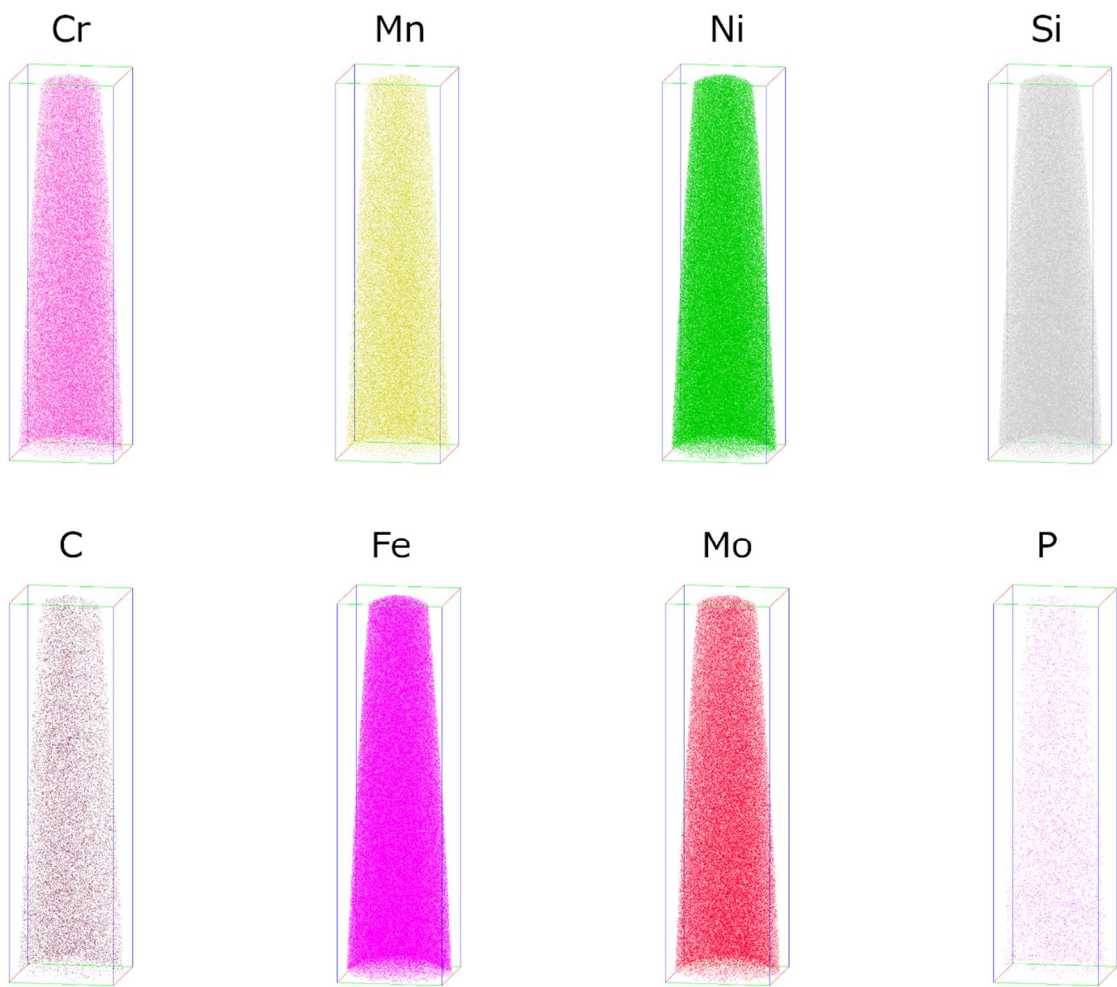
クラスターに関する検討では、測定した 17 試料に関し、①~④の条件に当てはまるようなクラスターは検出されなかった。令和 4 年度実施したフェライト相の測定では 6 試験片から作製した全試料でクラスターが観察されたことから、フェライト相では熱時効によるマイクロ組織の変化が認められた。これに対し、オーステナイト相では少なくとも本評価で定義したクラスターは確認できず、本ポンプケーシング材の初期状態は確認できないものの、明確なマイクロ組織変化は生じなかったものと推定される。以上の結果から、APT ではオーステナイト相において熱時効によるマイクロ組織変化は確認できず、既往知見の通り軽水炉運転温度程度での熱時効による影響はないものと考えられる。

#### <参考文献>

- [3.4.2(3)-1] 桑野寿. 2相ステンレス鋼の時効脆化と寿命予測. あたりあ. vol. 35, 7, p. 747 - 752, 1996.
- [3.4.2(3)-2] Y. Miura, T. Sawabe, K. Betsuyaku, and T. Arai, Thermal Aging Behavior of Grade CF3M Cast Austenitic Stainless Steels, ASME PVP2017-65959, 2017.
- [3.4.2(3)-3] F. Danoix and P. Auger, Atom Probe Studies of the Fe-Cr System and Stainless Steels Aged at Intermediate Temperature: A Review, Material Characterization, 2000, Vol. 44, Issues 1-2, p. 177-201.
- [3.4.2(3)-4] 藤井克彦, 福谷耕司, 中性子照射ステンレス鋼の硬化機構, INSS JOURNAL Vol. 26, p. 89-97, 2019.

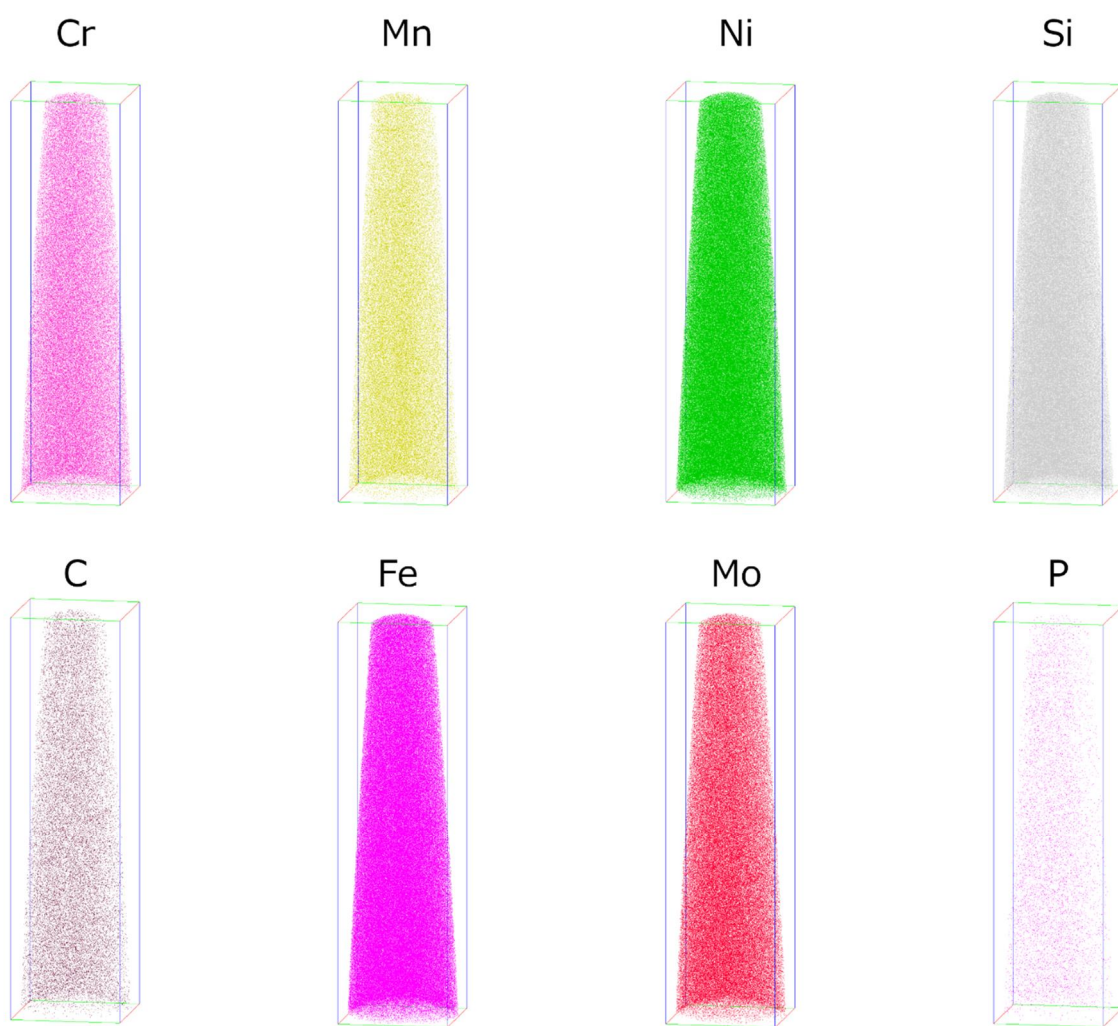
表 3.4.2(3)-1 各試験片の重み付き平均 Variation

ID	ID-1- M2	ID-2- M2	ID-3- M2	ID-4- M2	ID-5- M2	ID-6- M2
Variation	0.035	0.022	0.020	0.022	0.031	0.029



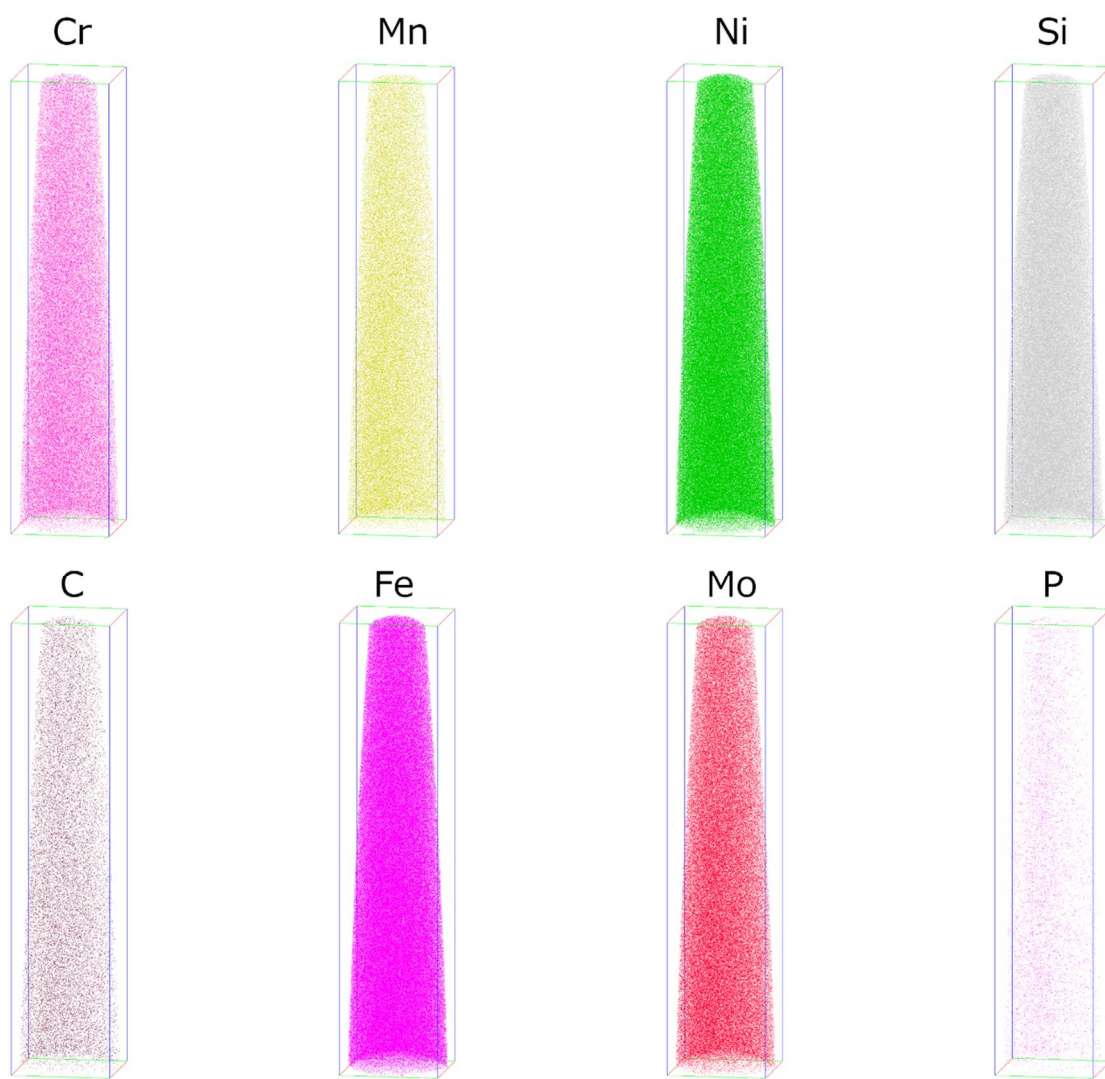
R5098\_12492 ID-1-M1(55×53×190 nm<sup>3</sup>)

図 3.4.2(3)-1 (1/2) ID-1-M1 のアトムマップ



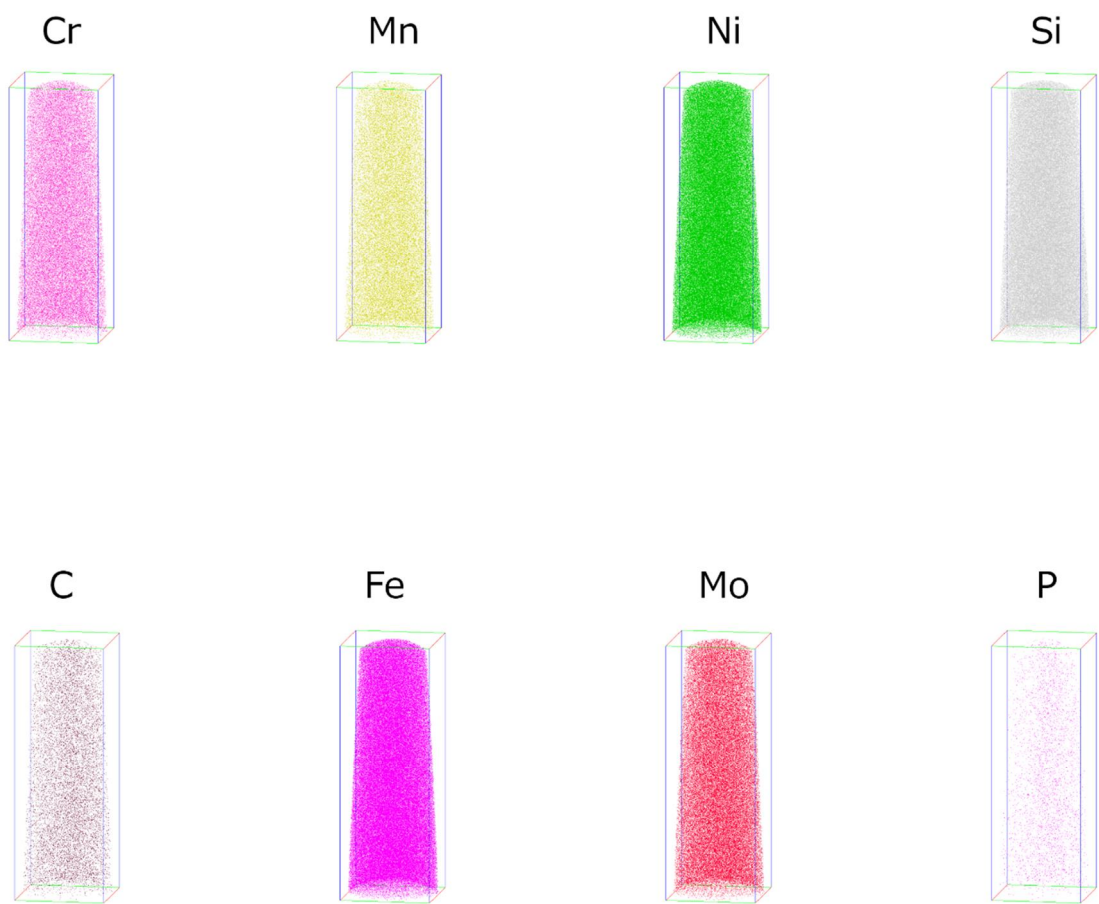
R5098\_12494 ID-1-M1(55×53×190 nm<sup>3</sup>)

図 3.4.2(3)-1 (2/2) ID-1-M1 のアトムマップ



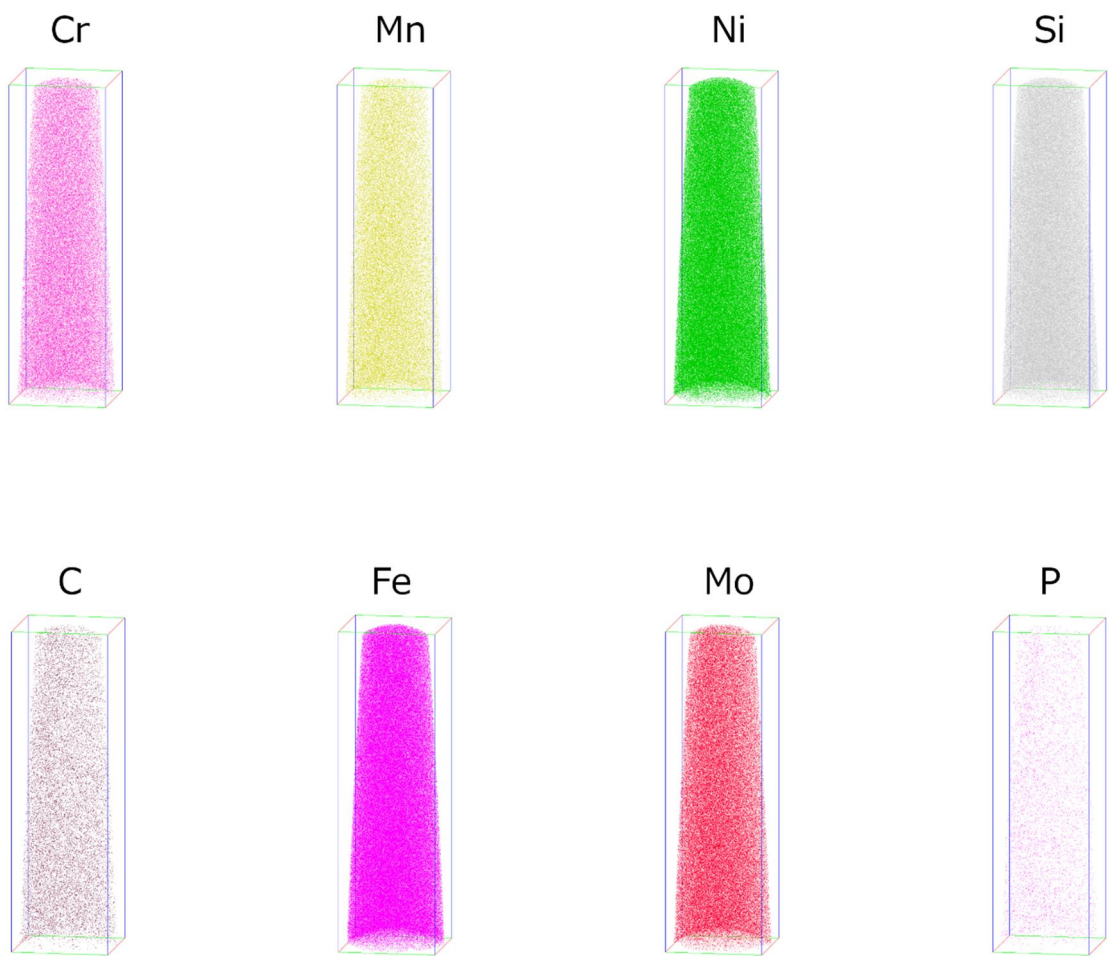
R5098\_12495 ID-2-M1(50×49×230 nm<sup>3</sup>)

図 3.4.2(3)-2 (1/3) ID-2-M1 のアトムマップ



R5098\_12499 ID-2-M1(45×45×130 nm<sup>3</sup>)

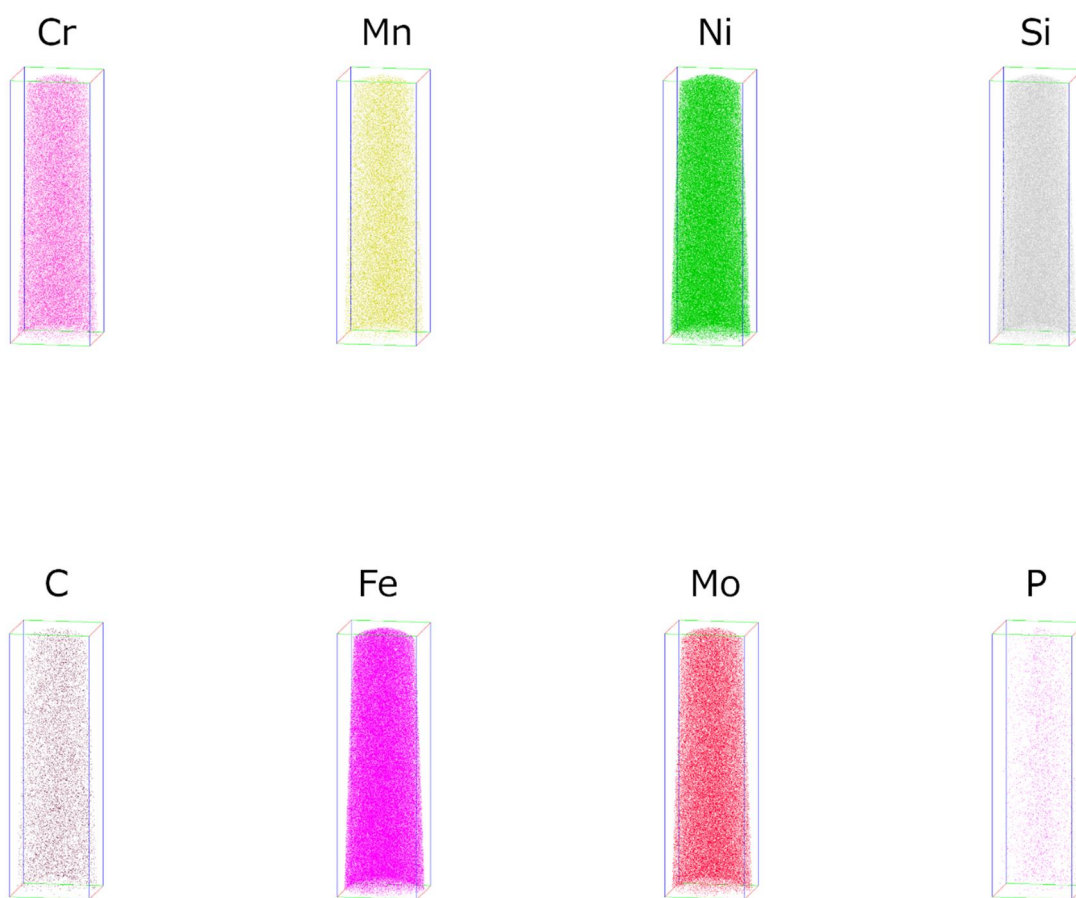
図 3.4.2(3)-2 (2/3) ID-2-M1 のアトムマップ



R5098\_12500 ID-2-M1(49×49×160 nm<sup>3</sup>)

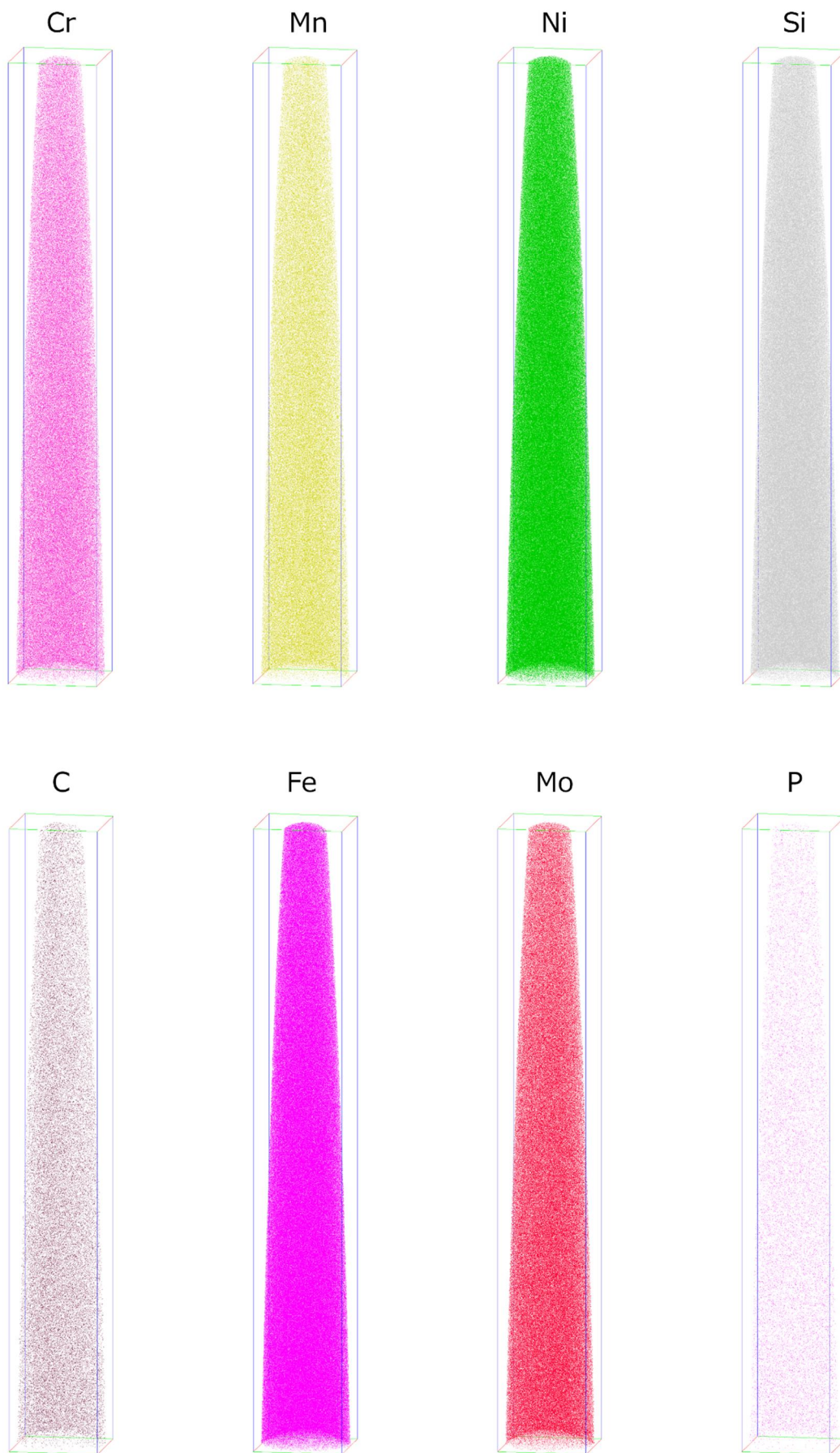
図 3.4.2(3)-2 (3/3) ID-2-M1 のアトムマップ





R5098\_12502 ID-3-M1(40×40×130 nm<sup>3</sup>)

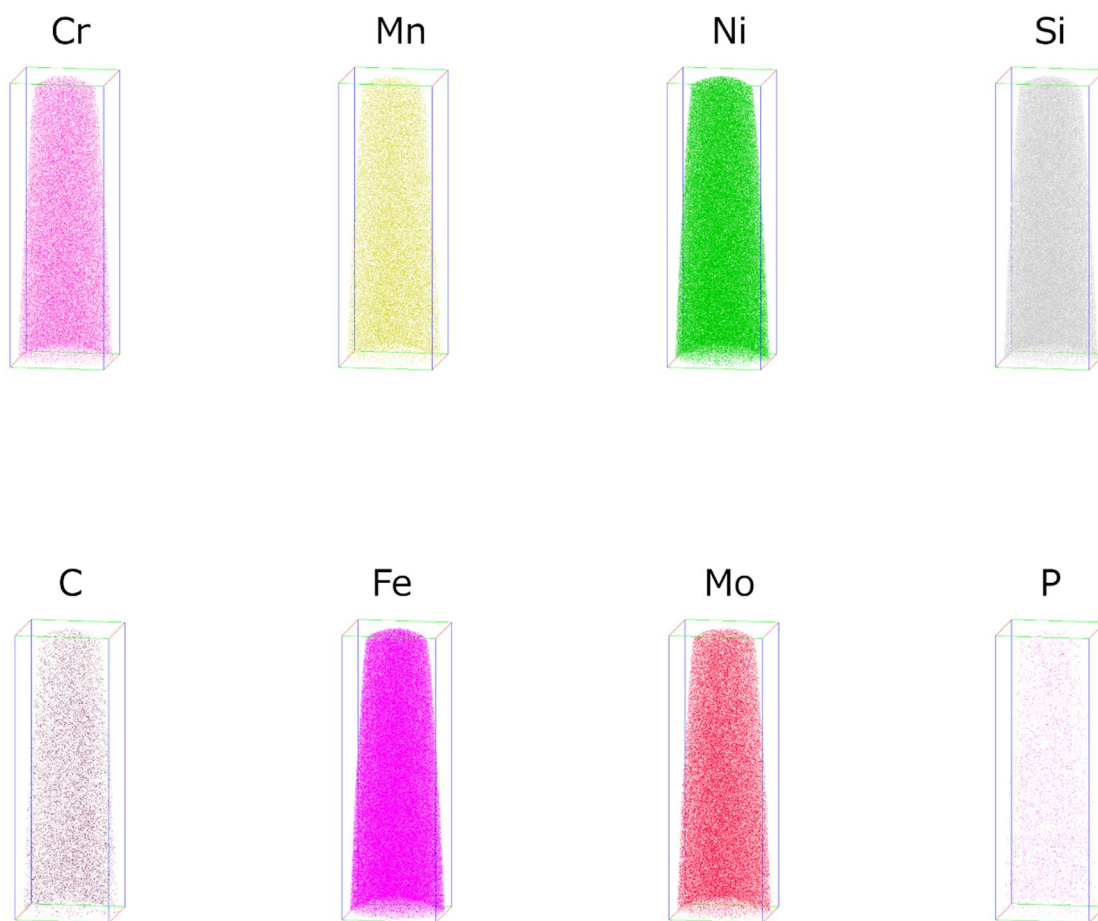
図 3.4.2(3)-3 (1/2) ID-3-M1 のアトムマップ



R5098\_12503 ID-3-M1(60×59×420 nm<sup>3</sup>)

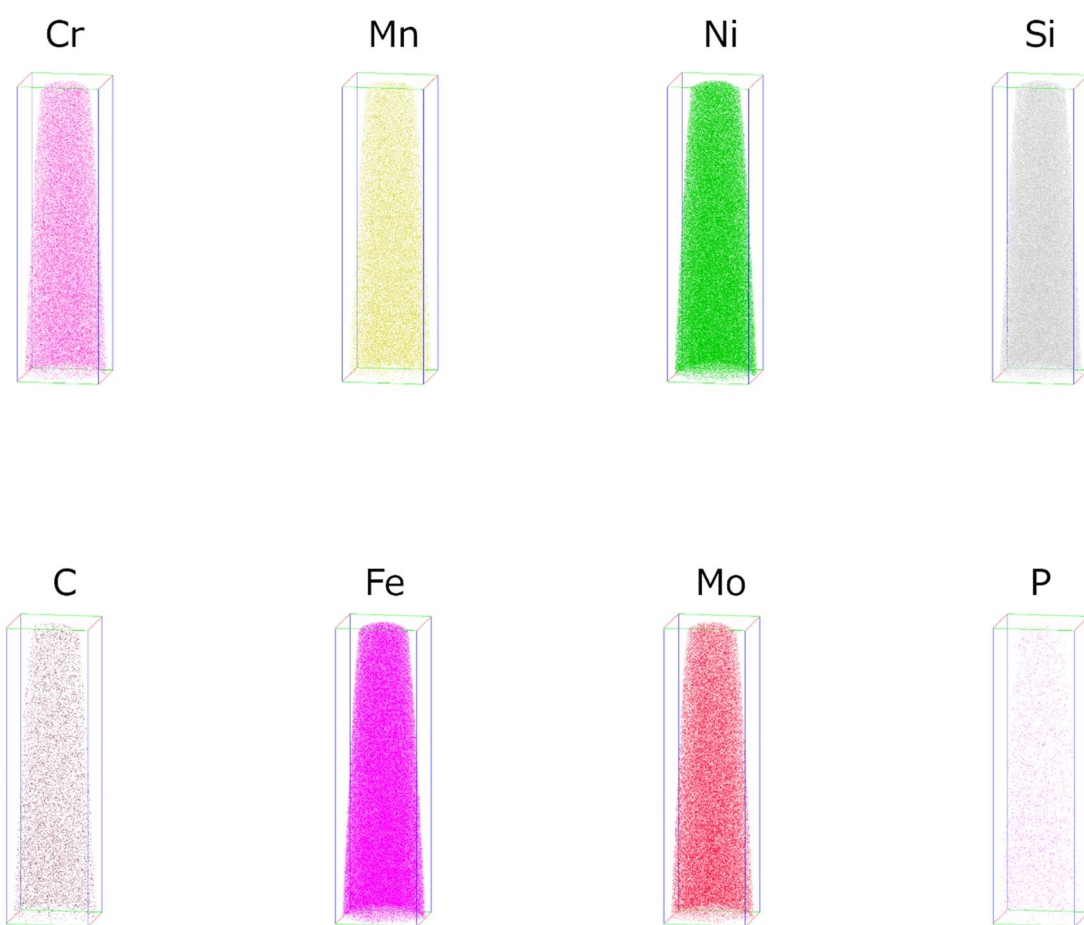
図 3.4.2(3)-3 (2/2) ID-3-M1 のアトムマップ

3.4.2(3)-11



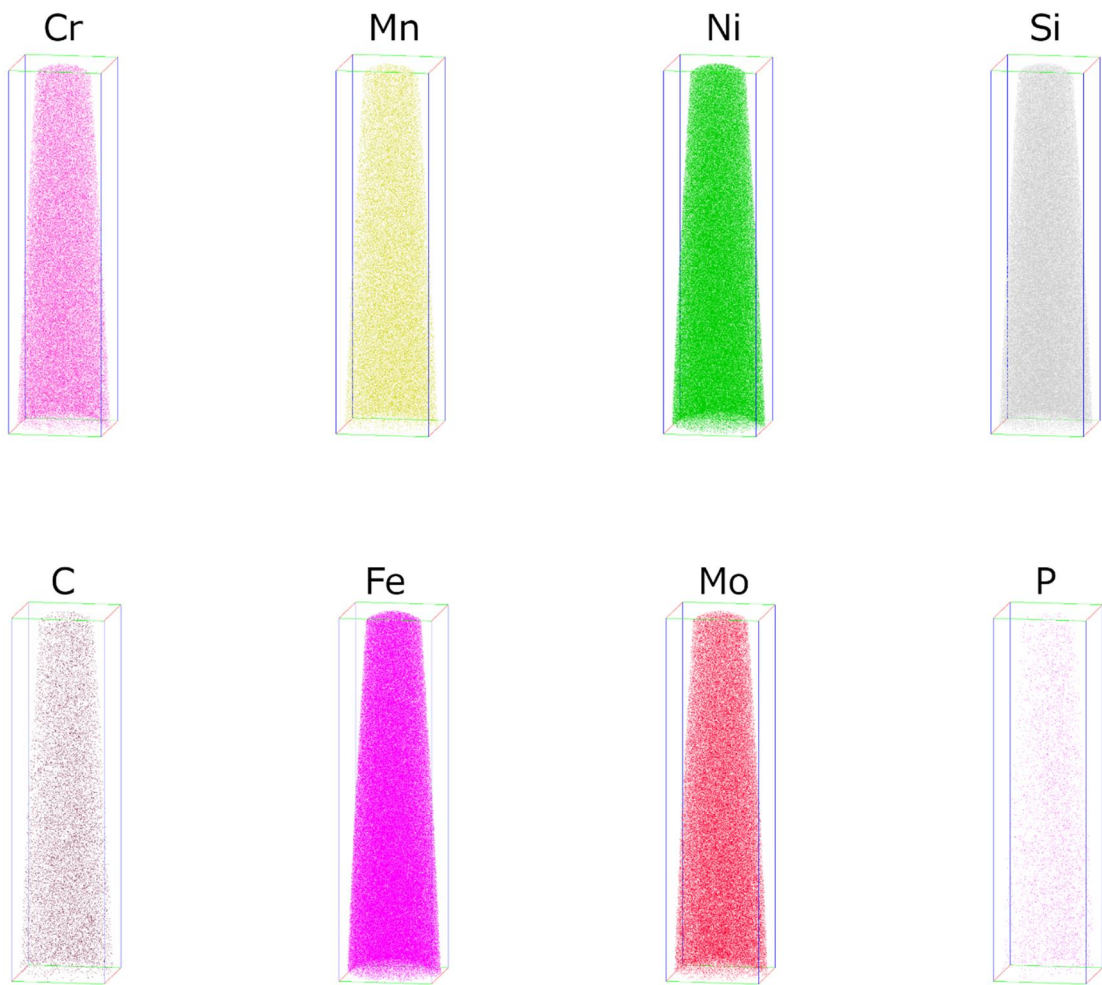
R5098\_12506 ID-4-M1(47×47×140 nm<sup>3</sup>)

図 3.4.2(3)-3 (1/4) ID-4-M1 のアトムマップ



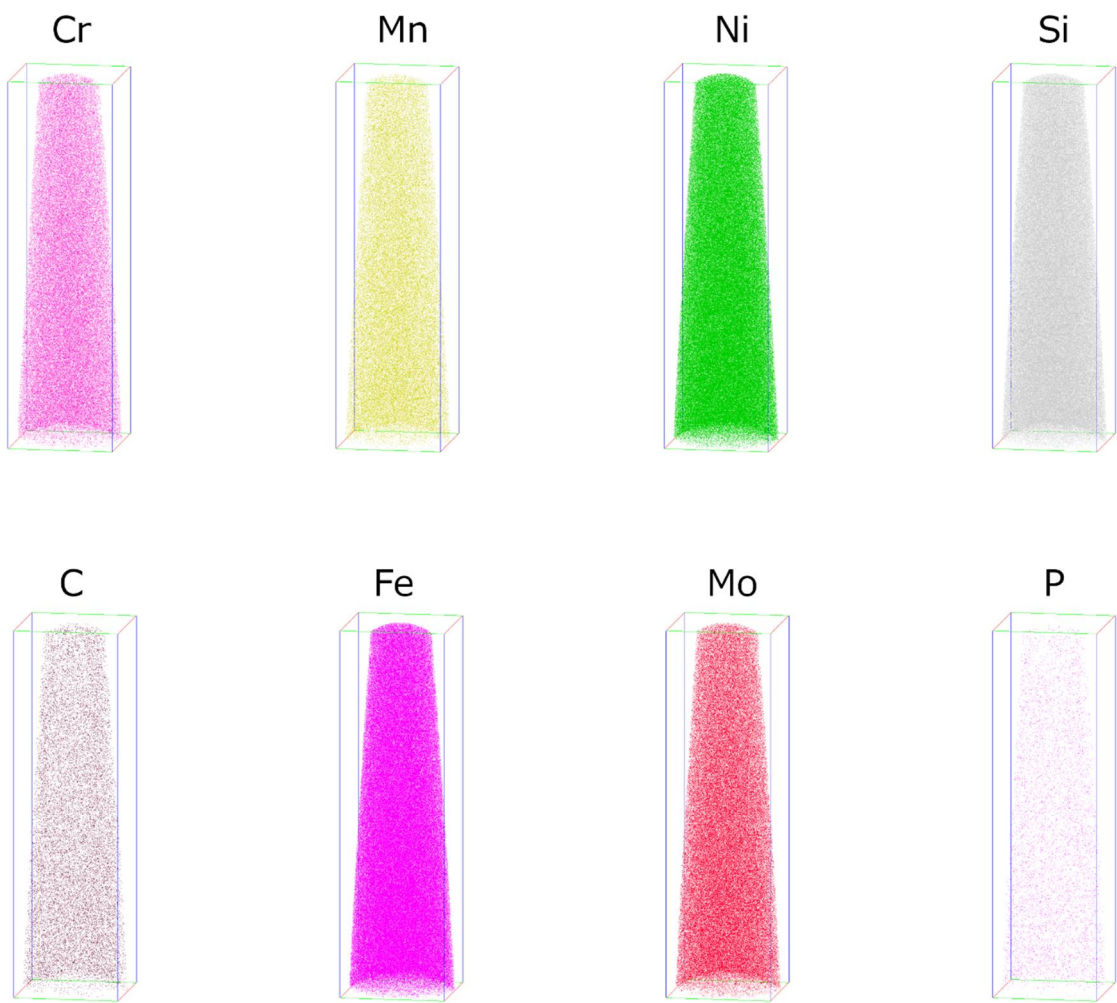
R5098\_12508 ID-4-M1(42×41×150 nm<sup>3</sup>)

図 3.4.2(3)-4 (2/4) ID-4-M1 のアトムマップ



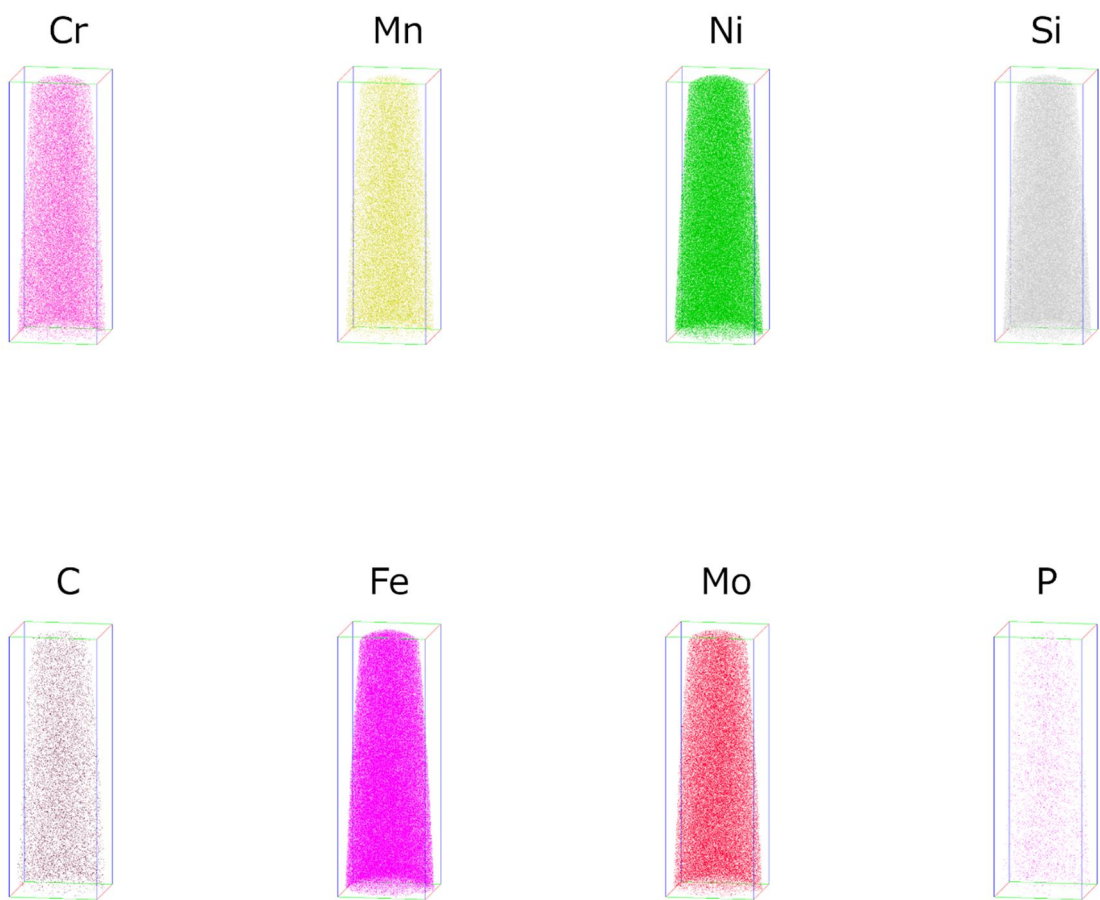
R5098\_12521 ID-4-M1(47×46×180 nm<sup>3</sup>)

図 3.4.2(3)-4 (3/4) ID-4-M1 のアトムマップ



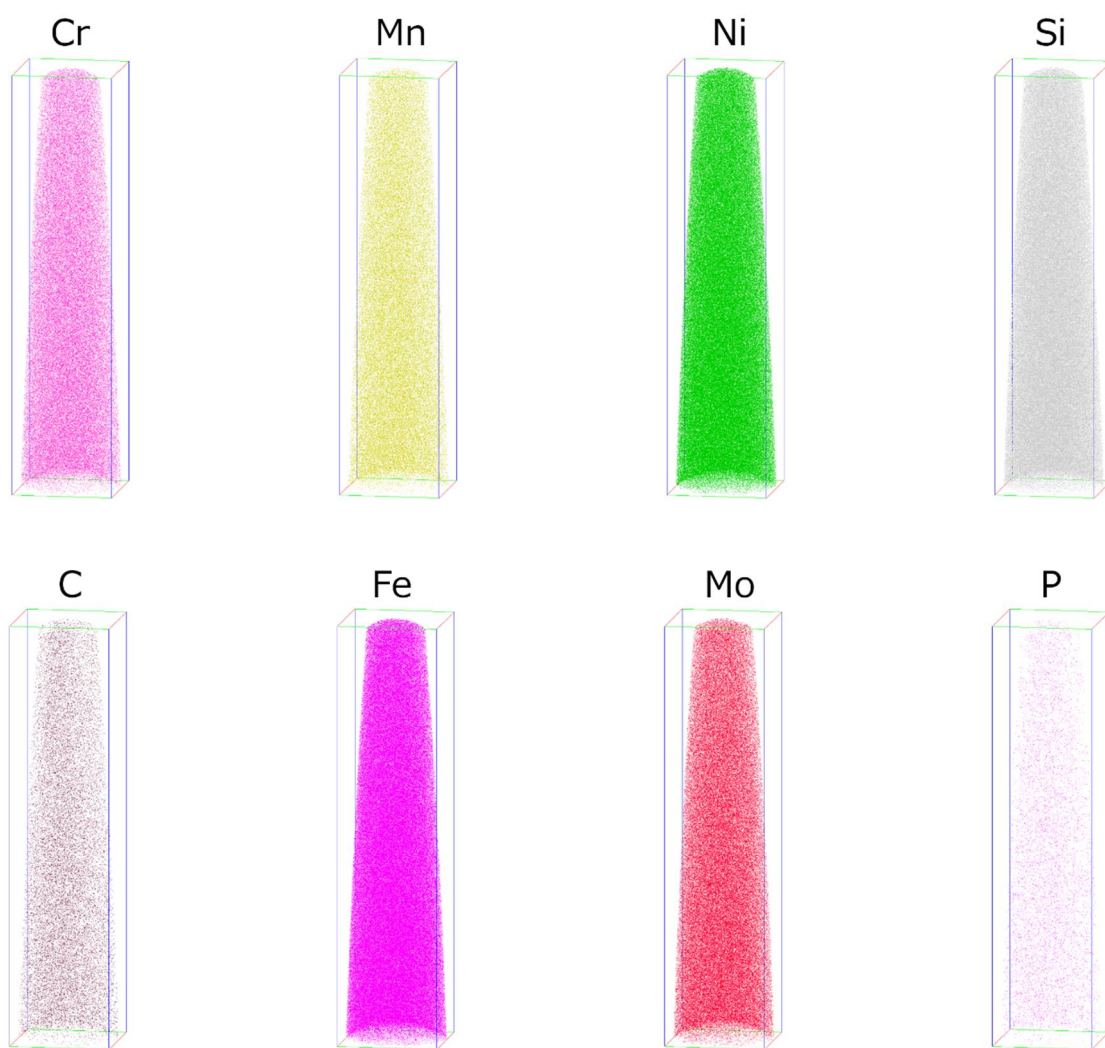
R5098\_12522 ID-4-M1(53×52×180 nm<sup>3</sup>)

図 3.4.2(3)-4 (4/4) ID-4-M1 のアトムマップ



R5098\_12511 ID-5-M1(44×44×130 nm<sup>3</sup>)

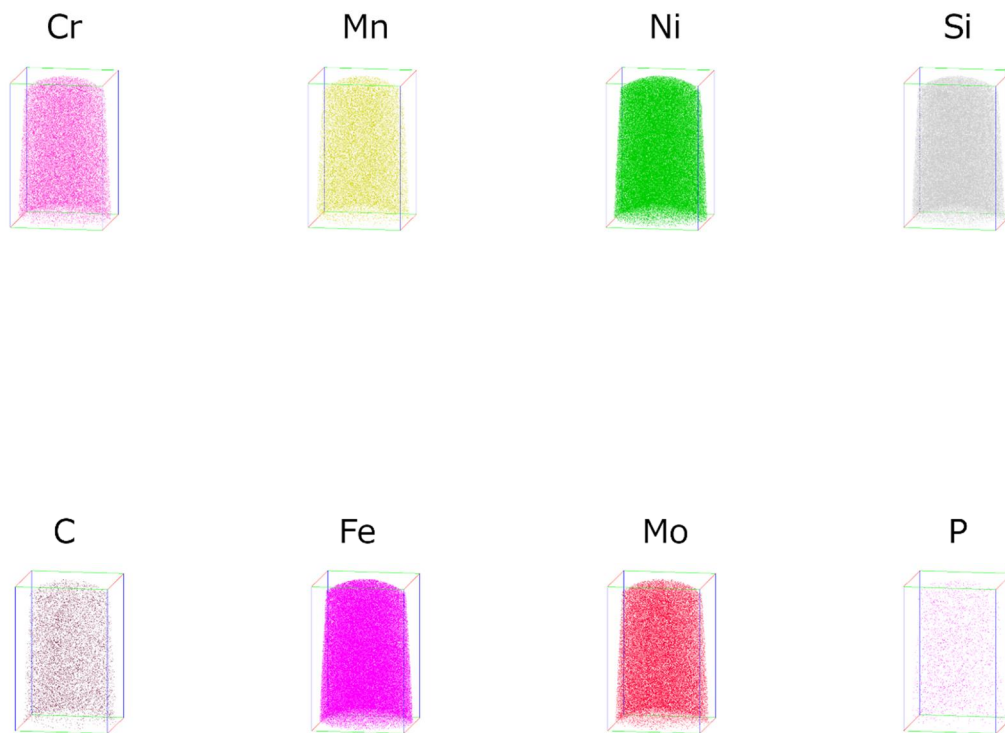
図 3.4.2(3)-5 (1/3) ID-5-M1 のアトムマップ



R5098\_12517 ID-5-M1(50×50×210 nm<sup>3</sup>)

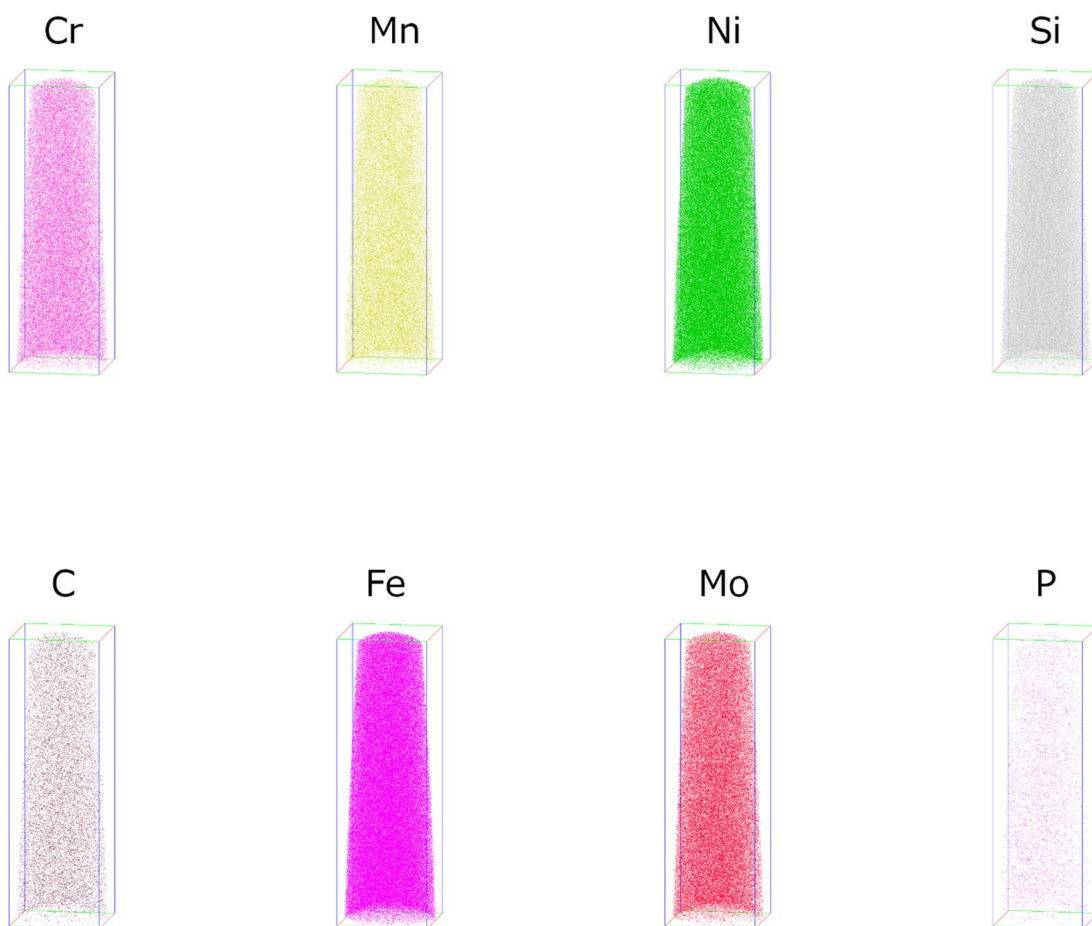
図 3.4.2(3)-5 (2/3) ID-5-M1 のアトムマップ





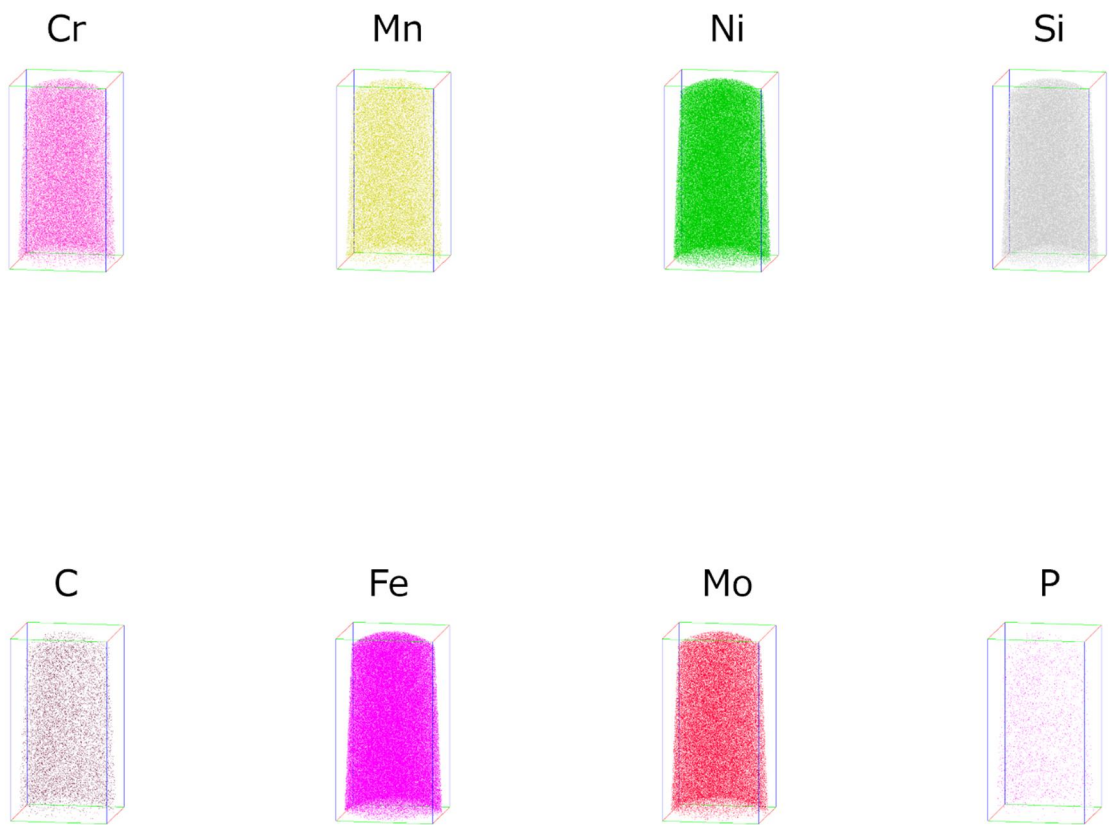
R5098\_12529 ID-5-M1(51×51×79 nm<sup>3</sup>)

図 3.4.2(3)-5 (3/3) ID-5-M1 のアトムマップ



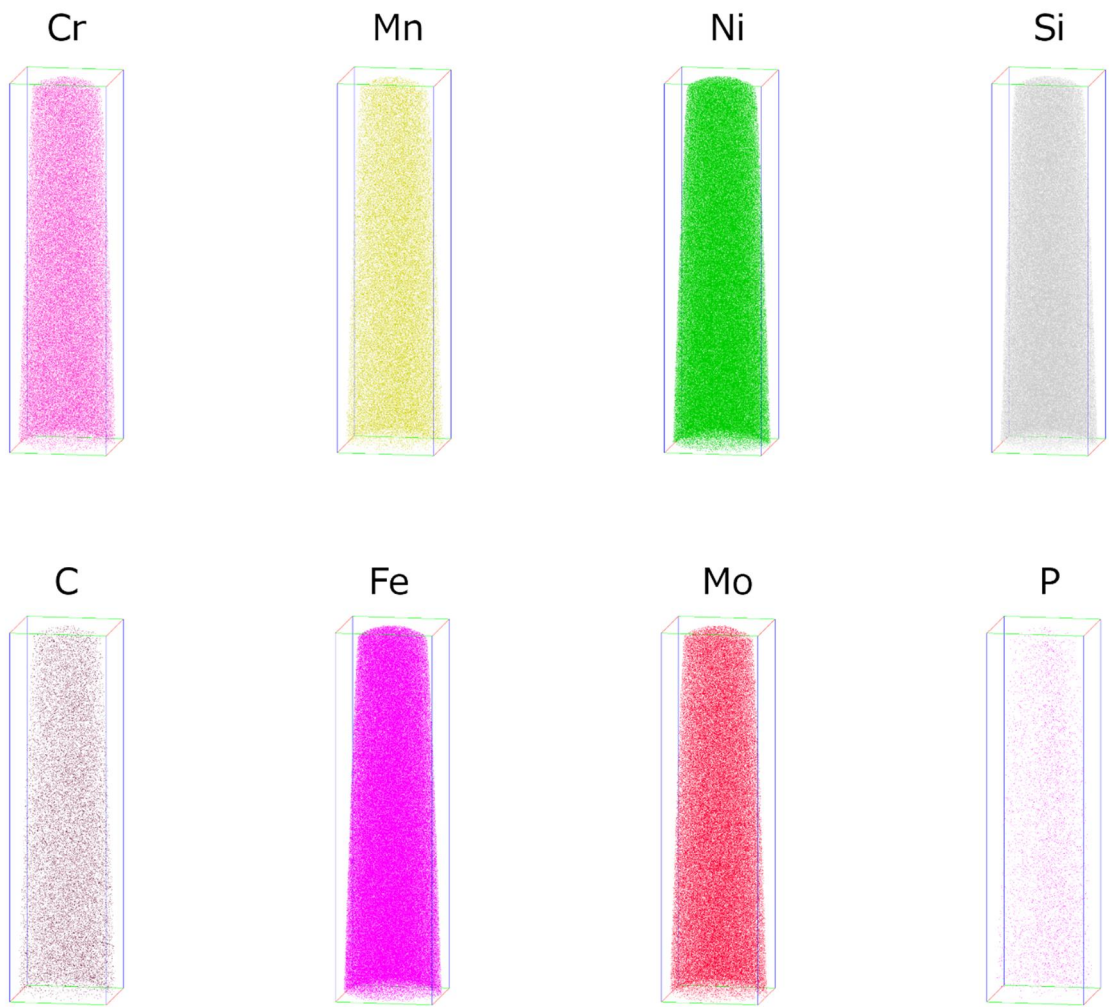
R5098\_12513 ID-6-M1(45×45×140 nm<sup>3</sup>)

図 3.4.2(3)-6 (1/3) ID-6-M1 のアトムマップ



R5098\_12514 ID-6-M1(48×48×97 nm<sup>3</sup>)

図 3.4.2(3)-6 (2/3) ID-6-M1 のアトムマップ



R5098\_12516 ID-6-M1(49×49×190 nm<sup>3</sup>)

図 3.4.2(3)-6 (3/3) ID-6-M1 のアトムマップ

#### (4) 化学成分分析

##### 1) 試験方法

規格に規定された元素として C, Mn, Si, S, P, Cr, Ni, Mo 及び N, Nb について成分定量を行った。

各元素の分析は以下の JIS に準拠して実施した。

C : JIS G 1211-3:2011 「鉄及び鋼—炭素定量方法—第 3 部：燃焼—赤外線吸収法」

Mn : JIS G1258-1:2014 「鉄及び鋼— I C P 発光分光分析方法—第 1 部：多元素定量方法—酸分解・二硫酸カリウム融解法」

Si : JIS G1258-3:2014 「鉄及び鋼— I C P 発光分光分析方法—第 3 部：多元素定量方法—酸分解・炭酸ナトリウム融解法」

JIS K0116:2014 「発光分光分析通則」

S : JIS G1215-4:2010 「鉄及び鋼—硫黄定量方法—第 4 部：高周波誘導加熱燃焼—赤外線吸収法」

P : JIS G1258-3:2014 「鉄及び鋼— I C P 発光分光分析方法—第 3 部：多元素定量方法—酸分解・炭酸ナトリウム融解法」

JIS K0116:2014 「発光分光分析通則」

JIS K 0133:2022 「誘導結合プラズマ質量分析通則」

Cr : JIS G1258-1:2014 「鉄及び鋼— I C P 発光分光分析方法—第 1 部：多元素定量方法—酸分解・二硫酸カリウム融解法」

Ni : JIS G1258-1:2014 「鉄及び鋼— I C P 発光分光分析方法—第 1 部：多元素定量方法—酸分解・二硫酸カリウム融解法」

Mo : JIS G1258-1:2014 「鉄及び鋼— I C P 発光分光分析方法—第 1 部：多元素定量方法—酸分解・二硫酸カリウム融解法」

N : JIS G1228-3:2022 「鉄及び鋼—窒素定量方法—第 3 部—不活性ガス融解—熱伝導度法」

Nb : JIS G1258-1:2014 「鉄及び鋼— I C P 発光分光分析方法—第 1 部：多元素定量方法—酸分解・二硫酸カリウム融解法」

各元素の分析結果は、以下の定量下限値まで報告するものとした(いずれも mass%)。

C : 0.01 %

Mn : 0.01%

Si : 0.01%

S : 0.001 %

P : 0.001 %

Cr : 0.01%

Ni : 0.01%

Mo : 0.01%

N : 0.01 %

Nb : 0.01 %

## 2) 試験結果

各元素の分析結果を、表 3.4.2(4)-1 に示す。管理番号 ID-5-③において P が本材料に相当する規格値より 0.001mass%高い値であったが、溶鋼分析に対する製品分析の許容変動値(P の場合 0.005mass%)の範囲内であった。他の元素はいずれも本材料に相当する規格の範囲内であった。

## 3) 輸送

分析試料を分析機関に L 型輸送物(核燃料汚染物質)として輸送した。受入検査記録として、受入時に試料の写真等を記録した。分析後の残材は分析機関から NFD に返却し、試料の写真を記録した。

表 3.4.2(4)-1 化学成分分析結果 (mass%)

	規格/管理番号	C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	N	Nb
規格値	ASTM A351-18 CF8M*	0.08	1.50	1.50	0.040	0.040	18.0-21.0	9.0-12.0	2.0-3.0	—	—
	JIS G5121:2003 SCS14A*	0.08	1.50	1.50	0.040	0.040	18.00-21.00	9.00-12.00	2.00-3.00	—	—
実測値	ID-2-③	0.05	0.65	0.93	0.007	0.037	19.64	9.42	2.23	0.02	<0.01
	ID-5-③	0.05	0.67	0.95	0.006	0.041**	19.72	9.53	2.29	0.02	<0.01

\* : 幅で示した元素以外は最大値

\*\* : 製品分析における許容変動値(P の場合 ASTM A703、JIS G 0307 とともに 0.005mass%)の範囲内

### 3.4.3 ステンレス鋼製機器の熱時効脆化予測手法（H3Tモデル）の保守性について

本実施項目の主目的は、国内の高経年化技術評価で用いられている H3T モデル<sup>[3.4.3-1]</sup>の BWR 実機に適用する際の保守性の確認であるため、本項では令和 4 年度および令和 5 年度に取得した実機ポンプケーシング材の 288℃の弾塑性破壊靱性および J-R 曲線を H3T モデルによる予測結果と比較することで、その保守性を検討した。

H3T モデルは化学組成情報と任意の熱時効条件（熱時効温度、熱時効時間）から評価時点の弾塑性破壊靱性や J-R 曲線（文献中では  $J_{mat}$  と記載）を予測することができる。ここでは実機の運転履歴を考慮し、熱時効温度を 280℃、熱時効時間を 144569 時間とした場合の J-R 曲線を H3T モデルにより予測し、実験結果と比較した。H3T モデルでの実機評価ではミルシート値を用いるのが一般的であるが、本事業で対象としたポンプケーシング材のミルシートは非公開であることから、ここでは 3.4.2(4)で取得した化学組成分析によって得られた ID-2 および ID-5 の各組成の平均値を H3T モデルの入力値とした。Nb の分析結果はいずれも 0.01 mass%未満であったが、入力値は 0.01 とした。このとき、評価上のフェライト量は約 18.8%であった。なお、H3T モデルで求めることのできる J-R 曲線には平均特性と下限特性の二種類が示されているが、ここでは実機評価で用いられる下限特性を比較対象として用いた。

令和 5 年度取得した ID-1-FR1、ID-6-FR1 の結果に加え、令和 4 年度取得した他 4 試験片から NDR 法によって求めた J-R 曲線と、H3T モデルにより求めた J-R 曲線の比較を図 3.4.3-1 に示す。図から明らかなように、いずれの実測結果も、H3T モデルによる予測結果よりも高い延性亀裂進展抵抗を示しており、この結果から H3T モデルは本研究の評価対象であるポンプケーシング材に対して大きな保守性を有していることがわかる。H3T モデルによる弾塑性破壊靱性の経時変化挙動と実機運転履歴を経たポンプケーシング材の弾塑性破壊靱性を比較するため、実測した弾塑性破壊靱性  $J_{Ic}$ （ID6-FR1 の場合は  $J_Q$ ）と H3T モデルにより求めた、280℃で熱時効を実施した場合の弾塑性破壊靱性  $J_{Ic}$  の経時変化を図 3.4.3-2 に示す。なお、H3T モデルは弾塑性破壊靱性の初期値を直接予測することはできず、また、BWR よりも運転温度の高い PWR 用に開発されたモデルであるためか、低温での短時間熱時効を想定していないと考えられ、本評価対象の化学組成における 280℃での熱時効温度の場合、およそ 14800 時間未満では、J-R 曲線の形状が異常となる。そこで本図では、数値上正常な J-R 曲線を得ることのできる最短の熱時効時間（14794h）での値が初期から維持され、その後から弾塑性破壊靱性の低下が生じるという挙動を仮定し、未時効状態から不感時間の間は一定値であるとして図示している。図より明らかなように、実測値中最も小さな値を示した ID-2-FR1 についても H3T モデルの予測値の 2 倍以上の値となっており、全体として大きな保守性を有していることが本図からも確認できた。以上の結果から、延性亀裂進展抵抗および弾塑性破壊靱性の観点から、H3T モデルは実機ポン



プケーシング材に対して大きな保守性を有していることを確認した。

<参考文献>

[3.4.3-1] Seiichi Kawaguchi, Takeharu Nagasaki, Koji Koyama. Prediction method of tensile properties and fracture toughness of thermally aged cast duplex stainless steel piping. Proceedings of ASME PVP2005-71528, July 17-21, 2005, Denver, Colorado USA.

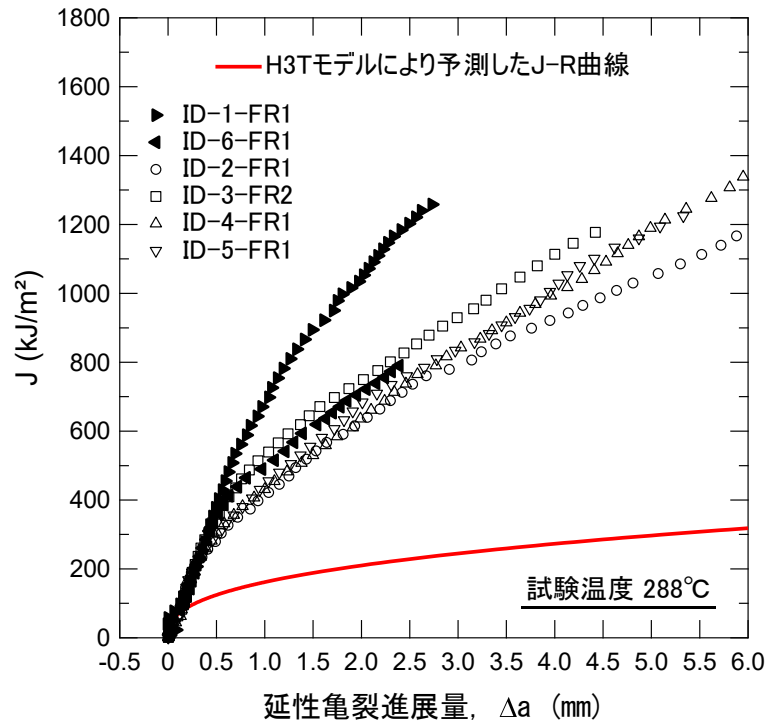


図 3.4.3-1 試験により取得した J-R 曲線と H3T モデルにより求めた J-R 曲線の比較

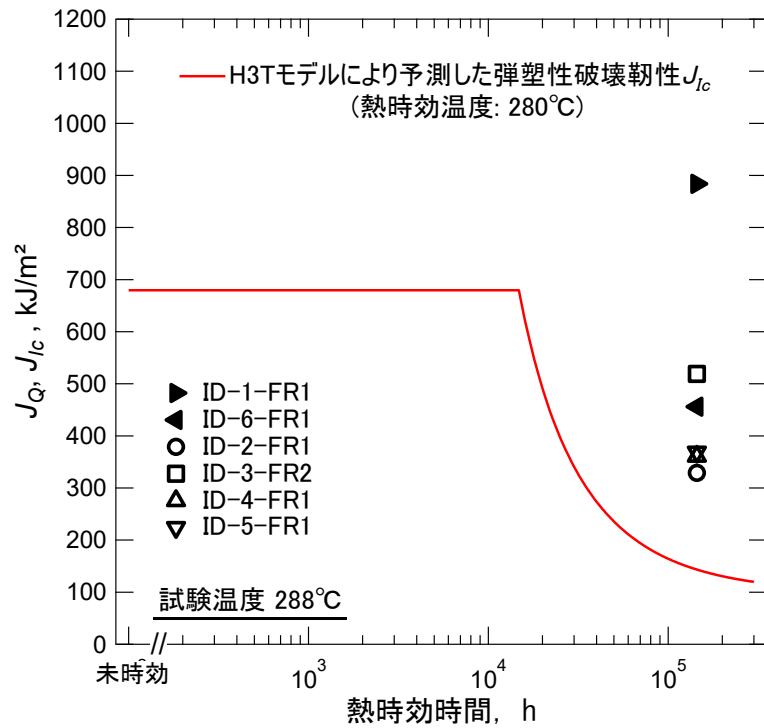


図 3.4.3-2 H3T モデルにより求めた弾塑性破壊靱性  $J_{Ic}$  の経時変化と実測値の比較

#### 3.4.4 事業計画案の見直し

令和5年度は、再循環ポンプの実機材料を用いて H3T モデルによる熱時効による靱性の低下挙動評価手法の保守性を検証した。

##### (1) 試験片の製作

令和3年度に策定した試験マトリックスに基づき、令和5年度に計画分の以下の試験片を製作した。

- ・ 引張試験片
- ・ シャルピー衝撃試験片
- ・ 化学成分分析用試験片

##### (2) 試験の実施

令和3年度に策定した令和5年度計画に基づき以下の試験を実施した。

- ・ 引張試験
- ・ 破壊靱性試験
- ・ アトムプローブトモグラフィー(APT)
- ・ 化学成分分析

##### (3) ステンレス鋼製機器の熱時効脆化予測手法(H3T モデル)の保守性について

令和5年度までに実施した実機材料を用いた組織観察、破壊靱性試験等の結果を踏まえ、実機環境での H3T モデルによる熱時効による靱性の低下挙動評価手法の保守性を検証した。今回取得した実機材料の弾塑性破壊靱性試験結果より、取得した6データを H3T モデルと比較した結果、取得した全データが H3T モデルによる予測値を大幅に上回る結果となり、H3T モデルにより保守的に評価される結果となった。

以上より、BWR 実機材(再循環ポンプケーシング材)に対し、H3T モデルによる評価が保守性を有することを確認した。

##### (4) 事業計画の見直し

上記(1)、(2)及び(3)の結果より、令和5年度までに実機材を用いた H3T の保守性の確認は終了した。事業計画の見直しはなく、令和6年度は、米国評価モデル<sup>[3.4.3-1]</sup>による評価結果との比較検討を実施し、同モデルによる評価結果と H3T モデルによる評価結果と比較することで、米国モデルの適用性について検討する。事業計画を図 3.4.3-1 に、試験マトリックスを表 3.4.3-1 に示す

《参考文献》

- [3.4.3-1] O. K. Chopra. Estimation of fracture toughness of cast stainless steel during thermal aging in LWR system. NUREG/CR-4513, ANL-15/08, Rev. 2, 2016.

表 3.4.3-1 全体マトリックス及び令和6年度実施範囲

		破壊靱性試験	引張試験	シャルピー試験	観察・硬さ・APT	化学成分分析
形状		1T-C(T)	JIS 14A 試験片	フルサイズ	10x10x2mm	任意
全体計画	加工	8	6	24	12	2
	試験	8(288℃、室温)	6(288℃、室温)	24	観察：12、硬さ：6、 APT：12( $\alpha$ 、 $\gamma$ 各6)	2
令和4年度	加工	6	4	—	12	—
	試験	4(288℃)	4(288℃)	—	観察:12、硬さ:6、 APT：6( $\alpha$ 相)	—
令和5年度	加工	—	2	12	—	2
	試験	2(288℃)	2(室温)	—	APT：6( $\gamma$ 相)	2
令和6年度	加工	2	—	12	—	—
	試験	2(室温)	—	24	—	—
備考		L-C 方向	L 方向	L-C 方向	令和6年度に照射後 試験施設に輸送	規格に規定された 元素及び N、Nb

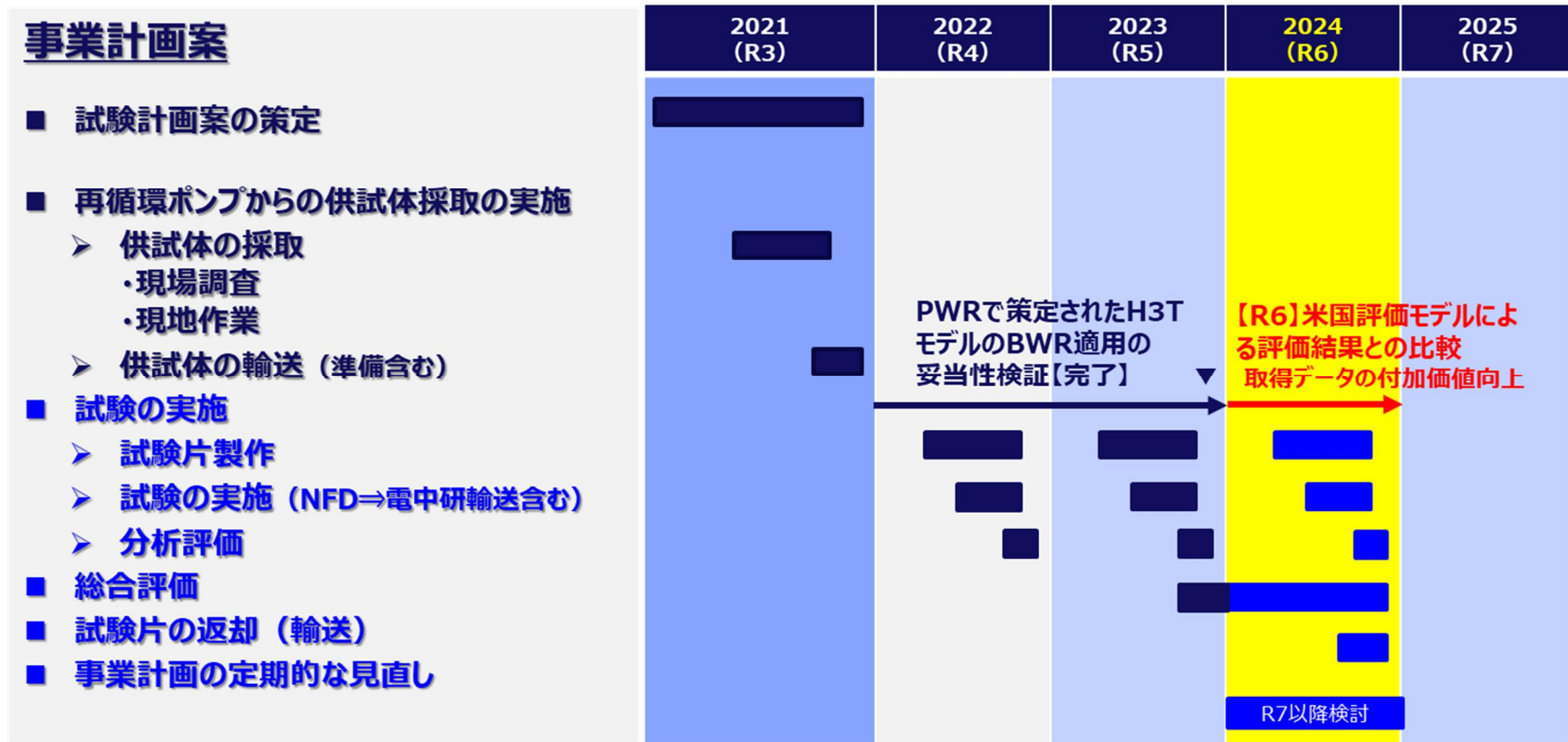


図 3.4.3-1 ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究 事業計画（令和5年度版）

## 4. 実機材料を活用した安全研究検討委員会等の開催実績

事業において収集した情報、研究計画(安全研究戦略マップ含む)、試験方法及び採取したデータの透明性及び客観性を高めるために、電中研及び電中研以外の専門家による「実機材料を活用した安全研究検討委員会」を設置・運営し、有識者からの意見を参考とするとともに技術的側面からのレビューを受けた。

また、原子力規制庁に対し定期的な進捗報告を実施した。本章ではそれぞれの開催実績をまとめた。

- 実機材料を活用した安全研究検討委員会
- 本事業に関する原子力規制庁に対する実績報告

### 4.1 実機材料を活用した安全研究検討委員会

#### 4.1.1 検討委員会の設置

本事業の成果に対し電中研及び電中研以外の専門家による「実機材料を活用した安全研究検討委員会」を設置・運営した。

##### (1) 名称

令和5年6月6日(火)の原子力規制庁と電中研との第一回打合せにて、本研究で設置する検討委員会名称を、昨年度と同様に「実機材料を活用した安全研究検討委員会」とする計画について原子力規制庁の了解を得た。

##### (2) 体制

令和5年6月6日(火)の原子力規制庁と電中研との第一回打合せにて、本検討委員会の体制は、有識者・学識経験者については、令和4年度の検討委員会を踏襲することを提案し、原子力規制庁の了解を得た。委員構成を表4.1.1-1に示す。なお、オブザーバ参画機関についても、令和4年度の検討委員会を踏襲として、第一回委員会開催前に電中研事務局より参画機関に個別に打診し確定した。

##### (3) 運営

###### 1) 事務局

令和5年6月6日(火)の原子力規制庁と電中研との第一回打合せにて、本検討委員会の事務局は令和3年度と同様に電中研とすることで了解を得た。

###### 2) 運営要項等

本事業について、有識者から技術的な側面からのレビューを受けることにより、収集した情報、研究計画(安全研究戦略マップ含む)、試験方法及び取得したデータの透明性及び客観性を高めるため、「実機材料を活用した安全研究検討委員会運営要項」を令和4年度から内容を引き継ぐこととした。また、本検討委員会で得た情報の扱いに関し、秘密保持情報の使用及び開示、その他秘密情報に係る不正行為を防止するため、秘

密情報の保持に関する必要事項を定めた「秘密保持誓約」についても令和4年度から内容を引き継ぐこととした。「秘密保持誓約」を添付資料-2に示す。これらの運営要領は、令和4年度 第一回実機材料を活用した安全研究検討委員会(令和4年7月25日)にて承認された。



表 4.1.1-1 実機材料を活用した安全研究検討委員会 委員の構成

	所属機関	所属部署
委員 (主査)	東京大学	大学院工学系研究科
委員 (副主査)	大阪大学	工学研究科
委員	福井大学	学術研究院工学系部門
委員	東北大学	大学院工学研究科
委員	株式会社 原子力安全システム研究所	技術システム研究所
委員	原子力規制庁	技術基盤 G
委員	原子力規制庁	技術基盤 G
委員	(一財)電力中央研究所	

備考:

【事務局】 電力中央研究所

【オブザーバ】

原子力規制庁

電気事業者

・電気事業連合会／原子力エネルギー協議会(ATENA)

・北海道電力株式会社 ・東北電力株式会社 ・東京電力ホールディングス株式会社

・中部電力株式会社 ・北陸電力株式会社 ・関西電力株式会社

・中国電力株式会社 ・四国電力株式会社 ・九州電力株式会社

・電源開発株式会社 ・日本原子力発電株式会社

原子力プラントメーカー

・東芝エネルギーシステムズ株式会社

・日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社

・三菱重工業株式会社

国内研究機関等

・日本核燃料開発株式会社

・株式会社 原子力安全システム研究所

・日本原子力研究開発機構

・電力中央研究所

#### 4.1.2 開催実績

実機材料を活用した安全研究検討委員会は4回実施した。実績を以下に示す。

##### (1) 令和5年度 第一回 廃炉材を活用した安全研究検討委員会

日 時：2023年7月25日(火) 13:15-16:30

場 所：Web EXによる会議

出席者：(出席委員 ○)

	所属機関	出欠
委員(主査)	東京大学	○
委員(副主査)	大阪大学	—
委員	福井大学	○
委員	東北大学	○
委員	(株)原子力安全システム研究所	○
委員	原子力規制庁	○
委員	原子力規制庁	○
委員	(一財)電力中央研究所	—

議事概要：委員会の運営に関する承認を行うとともに、実施計画を中心に説明した。

- 第一回検討委員会の実施にあたり、運営、役員を選出、本年度研究の概要に関する説明があった。
- 事務局より、運営規約、守秘義務誓約について説明し、運営規約・守秘義務誓約に従い進めることが了承された。
- 運営規約・種に義務誓約に基づき、議事録に出席者及び欠席者を記載することで守秘義務誓約とする運用が了承された。
- 運営規約に基づき、東京大学委員を主査に選出し、主査より大阪大学委員を副主査に選任した。
- 電中研より、本年度の研究計画概要について説明した。

なお、欠席の大阪大学委員には、別途個別説明を2023年8月3日(木)13:30-15:30 Web会議で実施した。

## (2) 令和5年度 第二回 廃炉材を活用した安全研究検討委員会

日 時：2023年11月6日(火) 13:15-16:30

場 所：Web EX による会議

出席者：(出席委員 ○)

	所属機関	出欠
委員(主査)	東京大学	○
委員(副主査)	大阪大学	○
委員	福井大学	○
委員	東北大学	—
委員	(株)原子力安全システム研究所	○
委員	原子力規制庁	—
委員	原子力規制庁	○
委員	(一財)電力中央研究所	—

議事概要：中間報告(その1)として、研究の進捗状況を中心に報告した。

- 靱性低下に係る研究

放射能測定による試験体照射量評価手法の検証について、これまでの検討に対する補足説明と試験実施状況について報告した。

- 予防保全対策技術の保守性に係る研究

PWR プラントの放射線環境下での応力測定の成立性検証試験経過について報告した。また、第一回委員会における Web 会議チャット機能をつかった主査からの質問に回答した。

- その他、試験や評価を実施中の個別研究の実施項目は、進捗状況を報告した。

なお、欠席の東北大学委員には、別途個別説明を2023年11月14日(火)13:00-16:00 Web 会議で実施した。

**(3) 令和5年度 第三回 廃炉材を活用した安全研究検討委員会**

日 時：2023年12月21日(木) 13:15-15:30

場 所：Web EXによる会議

出席者：(出席委員 ○)

	所属機関	出欠
委員(主査)	東京大学	○
委員(副主査)	大阪大学	○
委員	福井大学	○
委員	東北大学	—
委員	(株)原子力安全システム研究所	○
委員	原子力規制庁	○
委員	原子力規制庁	—
委員	(一財)電力中央研究所	○

議事概要：中間報告(その2)として、研究の進捗状況を中心に報告した。

- 靱性低下に係る研究  
廃炉工事開始前の事前サンプリング工法と、廃炉解体時の同調サンプリング工法の工事基本実施計画検討状況を報告した。
- 予防保全対策技術の保守性に係る研究  
要素試験体による解析手法の妥当性確認の検討状況について報告した。
- ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究  
試験の実施状況と引張試験及び破壊靱性試験結果を速報ベースで報告した。  
なお、欠席の東北大学委員は、委員都合により個別説明は省略した。

#### (4) 令和5年度 第四回 廃炉材を活用した安全研究検討委員会

日 時：2024年2月6日(火) 10:00-16:30

場 所：対面(大手町ビルディング 708 会議室)及び Web EX による会議

出席者：(出席委員 対面◎ Web○)

	所属機関	出欠
委員(主査)	東京大学	○
委員(副主査)	大阪大学	○
委員	福井大学	◎
委員	東北大学	—
委員	(株)原子力安全システム研究所	○
委員	原子力規制庁	◎
委員	原子力規制庁	◎
委員	(一財)電力中央研究所	○

議事概要：中間報告(その2)として、研究の進捗状況を中心に報告した。

- 予防保全対策技術の保守性に係る研究

PWR 廃炉時の除染の影響確認試験計画の検討結果、PWR プラントの放射線環境下での応力測定の成立性検証、試験体採取時の切断によるピーニング部位の圧縮応力への影響評価として実施した要素試験体による解析手法の妥当性確認の検討について、成果のまとめと次年度事業計画を説明した。

- 靱性低下に係る研究

放射能測定による試験体照射量評価手法の検証について、成果のまとめと今後の検討課題とその対応方針、次年度事業計画を説明した。また、試験体採取工法の材料への影響評価(切断による熱影響)について、成果のまとめを報告した。

- ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究

本年度実施した試験結果について報告するとともに、本件研究で採取した BWR 実機材(再循環ポンプケーシング材)に対し、H3T モデルによる評価が保守性を有することを報告した。

- 実機材を活用した安全研究マップの見直し

国内外の廃炉材研究、材料健全性に関する研究動向、国際会議、国内の学協会の公開文献の調査結果、安全研究マップのインプットとなる課題整理表の更新について説明があった。なお、課題管理表の更新は、産業界主体の研究動向であることから、安全研究マップの見直しはなかった。

なお、欠席の東北大学委員には、別途個別説明を 2024年2月16日(金)13:00-17:00 Web 会議で実施した。

## 4.2 原子力規制庁への進捗報告

原子力規制庁に対する定期的な進捗報告の実績を以下に示す。

### (1) 電中研－原子力規制庁 第一回打合せ

日 時：2023年6月6日 13:00～17:00

場 所：原子力規制庁会議室

参加者：原子力規制庁 4名(Web 4名)、電力中央研究所 5名

議事概要：

令和5年度 実機材料を活用した健全性評価に係る研究について、令和5年度事業仕様書に基づく個別研究の実施基本計画案(委員会運営、体制等を含む)、並びに研究マスタースケジュールについて説明し、令和5年度仕様書に対する委託報告書目次による成果のまとめの方針について説明した。また、本年度の研究の実施にあたり必要となる、過年度の研究成果の引継ぎを受けその活用に了解頂いた。更に、令和4年度委員会での質疑応答を踏まえ、複合的応力状態を踏まえた切断影響確認に関する解析の補足説明を実施した。

### (2) 試験の実施状況原子力規制庁視察 (1)

日 時：2023年9月7日(木) 13:00～15:00

視 察：予防保全の保守性に係る研究

(原子力規制庁 1名、電中研 3名、請負先メーカー主説明者 2名)

PWR プラントの放射線環境下での応力測定で選定した測定機材の応力測定系のイメージングプレート(IP)が脱着可能であることを利用し、照射線照射施設を活用して「放射線環境下での応力測定の成立性に関する調査」の実施状況について視察があった。視察にて、計画の見直しとなるようなコメントはなかった。

### (3) 電中研－原子力規制庁 第二回打合せ

日 時：2023年10月30日 10:00～12:00

場 所：Web 会議

参加者：原子力規制庁 6名、電力中央研究所 6名

議事概要：

中間成果報告(その1)として実施する第二回安全研究検討委員会の議事次第、並びに報告内容について説明し、大幅な変更を伴うコメントはなく了解頂いた。

- 靱性低下に係る研究：放射能測定による試験体照射量評価手法の検証について、これまでの検討に対する補足説明と試験実施状況について報告した。
- 予防保全対策技術の保守性に係る研究：PWR プラントの放射線環境下での応力測定の成立性検証試験悔過について報告した。また、第一回委員会で主査から Web 会議チャット機能での質問に回答した。
- その他、試験や評価を実施中の個別研究の実施項目は、進捗状況を報告し

た。

#### (4) 試験の実施状況原子力規制庁視察 (2)

日 時：2023年11月22日(水) 9:00～15:30

視察1：9:00～12:00 予防保全の保守性に係る研究

(原子力規制庁 1名、電中研 3名、請負先メーカー主説明者 2名)

要素試験体による解析手法の妥当性確認の検討で実施中のショットピーニング施工後の要素試験体の残留応力測定の実施状況について視察があった。また、BWRプラント廃炉時の除染の影響確認試験に関連し、除染影響確認試験に用いる試験片および試験装置製作状況について視察があった。視察にて、計画の見直しとなるようなコメントはなかった。

視察2：13:00～15:30 ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究

(原子力規制庁 1名、電中研 4名、請負先メーカー主説明者 4名)

ホットラボにて、放電ワイヤー加工機を用いた実機材の加工状況についての視察があった。視察にて、計画の見直しとなるようなコメントはなかった。

#### (5) 電中研－原子力規制庁 第三回打合せ

日 時：2023年12月18日 9:30～12:00

場 所：Web会議

参加者：原子力規制庁 6名、電力中央研究所 6名

議事概要：

中間成果報告(その2)として実施する第三回安全研究検討委員会の議事次第、並びに報告内容について説明し、大幅な変更を伴うコメントはなく了解頂いた。

- 靱性低下に係る研究：廃炉工事開始前の事前サンプリング工法と、廃炉解体時の同調サンプリング工法の工事基本実施計画検討状況を報告した。
- 予防保全対策技術の保守性に係る研究：要素試験体による解析手法の妥当性確認の検討状況について報告した。
- ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究：試験の実施状況と引張試験及び破壊靱性試験結果を速報ベースで報告した。

#### (6) 電中研－原子力規制庁 第四回打合せ

日 時：2024年2月2日 9:30～12:00

場 所：原子力規制庁会議室

参加者：原子力規制庁 4名(Web 3名)、電力中央研究所 3名(Web 3名)

議事概要：

令和5年度成果報告として実施する第四回安全研究検討委員会の議事次第、並びに報告内容について説明し、大幅な変更を伴うコメントはなく了解頂いた。

- 予防保全対策技術の保守性に係る研究：PWR 廃炉時の除染の影響確認試

験計画の検討結果、PWR プラントの放射線環境下での応力測定の成立性検証、試験体採取時の切断によるピーニング部位の圧縮応力への影響評価として実施した要素試験体による解析手法の妥当性確認の検討について、成果のまとめと次年度事業計画を説明した。

- 靱性低下に係る研究：放射能測定による試験体照射量評価手法の検証について、成果のまとめと今後の検討課題とその対応方針、次年度事業計画を説明した。また、試験体採取工法の材料への影響評価(切断による熱影響)について、成果のまとめを報告した。
- ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究：本年度実施した試験結果について報告するとともに、本件研究で採取した BWR 実機材(再循環ポンプケーシング材)に対し、H3T モデルによる評価が保守性を有することを報告した。
- 実機材を活用した安全研究マップの見直し：国内外の廃炉材研究、材料健全性に関する研究動向、国際会議、国内の学協会の公開文献の調査結果、安全研究マップのインプットとなる課題整理表の更新について説明があった。なお、課題管理表の更新は、産業界主体の研究動向であることから、安全研究マップの見直しはなかった。

なお、説明資料は実施の背景、目的、成果のイメージと現時点での進捗を府ありけることができるように、進捗の差分だけではなく、第一回委員会の実施計画の説明をベースに成果を追加する鋼製とするが、説明が個別研究4件と多岐にわたることから、既に説明済の計画や背景についてはポイントを押さえつつ、骨子のみを説明し、成果を中心に説明する旨を説明し、了解を得た。



## 5. まとめ

令和5年度 原子力施設等防災対策等委託費(実機材料等を活用した経年劣化評価・検証(実機材料を活用した健全性評価に係る研究))事業について、本年度実施計画範囲について研究を完了した。概要を以下にまとめた。

### 5.1 実機材料を活用した安全研究マップの定期的な見直し

令和5年度は、安全研究マップの定期的な見直しとして、そのインプットとなる「実機材料を活用した研究課題整理表」について、実機材料を活用した材料健全性研究に関する国内外の計画や実施状況(令和4年度調査結果を踏まえ、2023年1月から2023年12月末に調査可能な期間まで)を調査した。その結果に基づき「実機材料を活用した安全研究マップ」の反映の可否を検討した。

#### (1) 実機材料を活用した材料健全性研究に関する計画・実施状況の調査

原子力発電所の構造物と考慮すべき材料の経年劣化事象の関係に基づき、国内外の実機材料を活用した材料健全性研究、学協会規格動向等の最新知見について、令和4年度調査内容以降(2023年1月から12月の期間)の研究動向や国際会議発表の公開文献を調査した。

海外プロジェクト研究動向は以下を調査した。

- ・ 米国 DOE LWRs プロジェクト
- ・ フィンランド VTT BRUTE プロジェクト
- ・ スペイン Zorita プロジェクト
- ・ スウェーデン SMILE プロジェクト
- ・ フランス EDF/MAI プロジェクト

2023年度に開催された国際会議として以下を調査した。

- ・ ASME PVP 2023 Pressure Vessels & Piping Conference
- ・ 20<sup>th</sup> International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems -Water Reactors (ENVDEG 2022)
- ・ 21<sup>th</sup> International Conference on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power Systems -Water Reactors(ENVDEG 2023)

国内の研究動向は以下を調査した。

- ・ 日本原子力学会 2023年春の年会
- ・ 日本原子力学会 2023年秋の大会
- ・ 日本保全学会 第19回学術講演会
- ・ 原子力規制庁、並びに資源エネルギー省受託事業等

#### (2) 安全研究マップの見直し

令和4年度に策定した安全研究マップに対し、前項の実機材料を用いた材料健全性

研究に関する国内外の計画や実施状況の調査結果を踏まえ、以下のステップで見直した。

1. 課題整理表の更新
2. 安全研究マップへの反映
3. 安全研究マップへの定期的な見直し

課題整理表の更新で 25 件(スコーピング段階 1 件含む)の課題を追加した。安全研究マップへの反映は、課題整理表を、課題解決に対する実機材料活用の有効性、規制方が主体となるべき安全規制研究の観点で「安全研究マップ」としてスクリーニングした。その結果、「安全研究マップ」として追加すべき課題はなく見直しはなかった。

## 5.2 靱性低下に係る研究

本研究では実機から採取した材料に対する破壊靱性試験を行うことにより、実機条件における破壊靱性に関する知見を取得し、維持規格に規定されている破壊靱性低下に係る評価式の保守性の確認を目的とし、令和 5 年度は、計画に基づき以下の項目を実施した。

### (1) 試験体採取工法の工事基本実施計画(案)の策定

令和 4 年度に検討した試験体採取仕様の詳細に基づき、選定したプラント(中部電力株式会社 浜岡原子力発電所 1 号機)を対象に、本研究で使用する試験体採取のための試験体採取工法に係る以下の 2 工法の工事基本実施計画を策定した。

- 炉内機器解体開始前の試験体採取工法の工事基本実施計画(炉内機器の撤去工事開始前の事前サンプリング工法)
- 炉内機器解体時の試験体採取工法の工事基本実施計画(廃炉工事に同調したサンプリング)

工事基本計画の策定では、それぞれの工法、並びに工事に対し、試験体採取対象機器の上部格子版と炉心シュラウドを念頭とした作業ステップ、施工装置及び機材コンセプトを検討するとともに、実機工事までの設計、製作、試験・検証、作業員訓練等を含めた準備工程を検討し、ロードマップとしてまとめた。

なお、両工法とも、サンプリング対象機器(上部格子板及び炉心シュラウド)より試験体を切り出して、その試験体から破壊靱性試験片や引張試験片を採取するが、目標とした照射量相当の運転履歴を受けている部位から採取するため、試験体の照射量評価の検討が必要である。また、両工法とも、対象機器からの試験体採取に機械的切断等を検討していること、特に廃炉工事に同調したサンプリング工事では、廃止措置工事で対象機器を廃棄切断し、原子炉内から取り出して試験体を採取することとなるため、炉内外の一連の廃棄作業にて試験体の変形や切断による熱影響等で、実機材料の運転履歴を受けた材料特性の回復といった影響がないようにする必要がある。令和 5 年度は、令和 4 年度の成果を踏まえ検討すべき項目として以下を実施した。

#### ■ 放射能測定による試験体照射量評価手法の検証

令和5年度は、浜岡3号機の監視試験片を装荷した監視試験バスケットの監視試験カプセル(304L製)及びバスケット(316L製)より試験片を採取し、化学成分分析及び放射能測定を実施(実測値)し、解析値と比較した。Nb起源の $^{93m}\text{Nb}$ から評価した中性子照射量について、カプセル(304L製)では比較的よい一致が確認されたが、バスケット(316L製)で実測値と測定値の乖離が見られた。実施した評価プロセスのトレースを行い、バスケットの $^{93m}\text{Nb}$ 放射能測定で $^{93m}\text{Nb}$ に相当するピークの他に同定できないピークの存在が確認されたが、バスケットにおける乖離の原因は特定できていない。このため、試験体照射量評価手法の検証では、これまでの結果を踏まえた分析・測定過程の再確認を継続し、その再確認を踏まえた原因の推定、並びに再測定を含む測定・評価方法の見直し等を継続することと、令和6年度に実施することとした。

#### ■ 試験体採取工法の材料への影響評価(切断の影響評価)

令和5年度は、試験体採取の対象機器として選定した炉心シュラウド及び上部格子板について、両機器の実機板厚と浜岡原子力発電所1号機の供用期間を踏まえた照射による材料の硬度上昇等を模擬したステンレス鋼板を製作し、試験体採取工法で試験体切断の候補とした機械的切断(ディスクソー)による切断時の切断部近傍の温度測定を実施した。今回の切断は気中環境で切断部に冷却水を供給しながら実施した。板厚の薄い上部格子板模擬材で、切断開始直後、切断面より1mm位置にて、瞬間的に運転温度を超える320℃前後まで温度上昇があったが、その他の測定点の温度上昇は運転温度以下であった。また板厚の厚い炉心シュラウド模擬材は板厚の厚さのためディスクソーの送り速度が遅くなり、冷却水が試験体全体に行き渡ることにより、試験体の温度上昇は最大で100℃程度と運転温度以下であった。切断時の冷却水の供給量の差で温度上昇に差が生じたが、冷却水が十分供給された場合は切断時の試験体温度上昇を低く抑えられることを確認した。実機の切断は水中環境での切断になることなどを踏まえると、切断面から試験片を確保する部位の切断代は3mm程度を想定することで問題なく、現在の試験体からの試験片採取位置も加工代として5mmを想定していることから、本結果によるサンプリング工法の検討で計画している試験体寸法や、実施の試験体からの試験片採取位置の見直しはなかった。

#### (2) 事業計画案の見直し

上記(1)の成果を総合的に検討し、令和6年度の靱性低下に係る研究の事業計画の見直しはなかった。

### 5.3 予防保全対策技術の保守性に係る研究

本研究ではピーニングによる応力改善工法施工部位に対する残留応力評価を行い、事業者が実施した予防保全対策技術施工箇所に対する亀裂の解釈の考え方の保守性を検証する。なお、予防保全対策部の残留応力評価を行う一つの方法として、施工部位を

切断採取し、試験研究施設において残留応力を測定する方法が考えられるが、これを行うためには、採取により施工部の残留応力が変化しないことや試験研究施設に輸送可能であり、かつ、放射線環境下で残留応力測定が可能であることが必要となる。また、除染による金属表面に対する深さの影響も含め、実際に施工部応力測定の実施例はなく影響の確認が必要である。令和5年度は、計画に基づき、以下の項目について実施した。

## (1) 試験仕様詳細の検討

### ■ 除染の影響確認試験の実施仕様詳細の検討

#### ● PWR プラント廃炉時の除染の影響確認試験計画の検討

残留応力分布に影響を与える要因の確認試験として、令和4年度に策定したBWRプラントの廃炉段階における除染による影響確認試験計画の策定に引き続き、令和5年度はPWRプラントの廃炉段階における除染による影響確認試験計画を検討した。PWRプラントとBWRプラントは除染方法が異なること、応力測定を実施するピーニング施工部位に対するプラント運転による皮膜の形成を試験片に模擬して皮膜を付与する時間がBWRプラントに比べてPWRプラントは3倍程度必要となること等、BWRの計画と異なる仕様はあるが、準備から実施まで3か年程度との目途を得た。

#### ● PWR プラントの放射線環境下での応力測定の成立性検証

令和4年度にPWR蒸気発生器管台のピーニング施工部におけるその場(原子力発電所当該機器設置場所)の直接残留応力測定の成立性を検討し、施工システムの基本的な成立性を確認した。また、課題として残留応力測定に及ぼす放射線環境の影響、並びに、残留応力測定系ケーブルの延長可否が今後の課題として挙げられた。これらの課題のうち、前者の放射線環境の影響確認については、今後の実機適用に向けた工事基本実施計画の検討に先立ち、応力測定の成立性を確認しておく必要がある。放射線の影響は、PWR蒸気発生器管台のピーニング施工部の残留応力測定を想定した場合、周囲に放射性物質を含むクラッドが存在するため放射線環境場での測定となる。放射線は応力測定に用いるX線に干渉するため、測定部に想定される放射線環境での応力測定可否を把握しておく必要がある。そのため、令和5年度は放射線照射施設を活用して「放射線環境下での応力測定の成立性に関する調査」を実施した。選定した一般仕様の応力測定機器のうち、より小型な測定機材のパルステック工業製 $\mu$ -X360S:IP検出器を使用した。この機材を放射線環境場に設置し応力測定する場合、配置の制約上、測定機材側の電源・制御用のケーブルの規格外の延長が必要となり、現状、その延長による必要電圧・ノイズ等の影響は未確認である。そのため、選定した測定機材の応力測定系のイメージングプレート(IP)が脱着可能であることを利用して、取り外したIPを放射線環境場に設置して曝した後に、再度、測定機材に取り付け応力測定する方法で放射線環境下の影響を評価した。IPは放射線を高感度に検知するため、測定に用いるX線だけでなく、環境放射線による感光を考慮する必要があり、環境放射線に感光した

場合、バックグラウンドの増加により S/N 比が低下し、精度の低下や測定が困難となる等の可能性があった。試験の結果、1～6mSv/h で照射を受けた IP で非照射と同程度の応力測定が可能であり、選定した測定機材(cos α 法)で PWR 管台溶接部の応力測定が可能であることを示唆する結果が得られた。

#### ■ 要素試験体による解析手法の妥当性確認の検討

令和3年度の実機構造模擬(モックアップ)試験の試験計画と、令和4年度に検討した詳細実施要領、ピーニングによる表層部の圧縮残留応力及び部材内部の残留応力が重畳した複合的な応力状態を踏まえた解析による影響確認結果より、要素試験体解析モデルによる解析手法の妥当性確認を実施した。具体的には、要素試験(平板等溶接+ピーニングの試験体製作・切断試験)及び要素試験を模擬した解析を実施し、要素試験結果との比較・検証に着手した。

#### ● 要素試験体による切断影響確認(試験的アプローチ)

要素試験体からの試験体切り出しを想定した切断を行い、切断前後で SP 施工部位表層部の残留応力を測定した。その結果、最終切断後(100mm×100mm)においても、SP 施工部位表層部の残留応力は圧縮となっていることを確認した。

#### ● 要素試験体を模擬した解析による切断影響確認(解析的アプローチ)

要素試験体を模擬した解析モデルを作成し、要素試験体の切断過程における SP 施工部位の表層残留応力の測定結果との比較を行うことで、要素試験を再現した解析モデルを検証した。溶接残留応力の解析の結果、HAZ 部で引張残留応力となり、要素試験体の溶接後の HAZ 近傍の表層部残留応力の測定結果の傾向を模擬できていることを確認した。次に SP による残留応力解析は、溶接残留応力解析後に、解析モデルの表層部に一定の圧縮応力を生じさせる塑性ひずみを付与する解析を採用することで、SP による均一な圧縮残留応力を再現し、表層部から深さ 1mm 程度の応力分布が SP 施工後の深さ方向の残留応力分布を模擬していることを確認した。切断模擬解析では、上記の溶接残留応力及び SP 残留応力を付与した解析モデルで切断を模擬した解析をすることで、切断による残留応力の変化を確認し、要素試験体の切断時 SP 施工部位表層部の残留応力測定結果と比較し、それぞれの切断ステップでその測定結果を再現していること、最終切断後(100mm×100mm)で圧縮応力が保持されることを確認した。

### (2) 試験の実施

残留応力分布に影響を与える要因の確認試験として、令和4年度に策定した BWR プラントの廃炉段階の除染による影響確認試験計画案を基に試験準備に着手した。本試験は令和4年度に開始した3か年計画のうち2年目であった。

#### ■ 除染試験片の製作準備

#### ■ 除染試験装置の製作準備

令和5年度は、令和4年度に加工・SP 施工まで実施した試験片に対して高温酸化皮膜付与を行い、酸化皮膜付与後の外観観察・重量測定・残留応力測定を実施した。また

一部の試験片について断面観察を実施し、試験片表面に適切な酸化皮膜が形成されていることを確認した。令和5年度計画範囲の除染試験片の製作準備を完了した。除染試験装置の準備として、令和4年度に策定したバッチ試験装置の構成と仕様に基づき、セパラブルフラスコやセパラブルフラスコ内の温度を一定に保つためのバンドヒーターの準備、また試験片取付け用の治具製作等を実施し、令和5年度計画範囲の除染試験装置の製作準備を完了した。

### (3) 事業計画案の見直し

上記、(1)～(2)の成果を総合的に検討し、令和6年度以降の予防保全対策技術の保守性に係る事業計画案(実施不可も含む)を必要に応じて見直した。

#### ■ 除染の影響確認試験の実施仕様詳細の検討

除染の影響確認試験の実施仕様詳細の検討結果より、除染の影響確認試験が3か年程度であること、測定対象部位である蒸気発生器水室内の廃炉措置除染後の放射線環境下で応力測定が可能との見込みを得ることができた。令和6年度は、将来の実機測定の実施を念頭に、PWR蒸気発生器管台の予防保全部位の応力測定工法の工事基本実施計画の検討をすることとした。基本的な検討内容は、実機測定時期の想定、これまでの検討を踏まえた各種課題の抽出、実機測定に向けたロードマップ検討として、事業計画に反映した。

#### ■ 要素試験体による解析手法の妥当性確認の検討

要素試験体による解析手法の妥当性確認の検討結果より、溶接残留応力及びSP残留応力を重畳した複合的な応力状態を模擬して切断の影響を評価する解析的アプローチとして検討した要素試験体解析モデルの妥当性を確認できた。令和6年度は、令和4年度に計画した事業計画に基づき、実機構造模擬試験の準備として解析モデルの整備等を行う。本項目の進捗による事業計画の見直しはない。

#### ■ 試験の実施

令和6年度は、令和4年度に策定した試験の3か年計画の3年目の試験実施フェーズとなる。本項目の進捗による事業計画の見直しはなかった。

## 5.4 ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究

本研究では、実機材料(対象機器：再循環ポンプ)を用いて組織観察、破壊靱性試験等を実施し、実機環境でのH3Tモデルによる熱時効による靱性の低下挙動評価手法の保守性を検証した。対象材料は、令和3年度にH-1再循環(PLR)ポンプ(B)より採取した試験体である。令和5年度は、実施計画に基づき、試験片の製作と試験の実施として以下に示す項目を実施した。また、成果報告として、対象機器・材料、試験後の試験体及び残材の管理・保管や、試験体の輸送についてもまとめた。

### (1) 試験片の製作

熱時効による靱性の低下挙動評価手法の保守性を検証するため、令和3年度に策定

した対象プラントの再循環ポンプから採取した実機材料による試験マトリックスに基づき、令和5年度に計画した引張試験片、シャルピー衝撃試験片、並びに化学成分分析用試験片を製作した。

## (2) 試験の実施

試験マトリックスに基づき以下の試験を実施した。

### ■ 引張試験

室温にて引張試験を実施し、荷重-クロスヘッド変位関係を取得した。また、DIC法を用いて試験片平行部のひずみ分布を解析し、その解析結果から原標点間のひずみを評価して応力ひずみ関係を取得した。

### ■ 破壊靱性試験

令和5年度は、288°C大気中での弾塑性破壊靱性試験を2本実施し、荷重-荷重線変位関係を取得した。

### ■ アトムプローブトモグラフィー (APT)

令和4年度にフェライト相のAPTを実施した試験片に対し、オーステナイト相を対象としてAPTを実施し、マイクロ組織に特徴的な変化が生じていないかどうかについて検討した。フェライト相の相分離の定量評価のために用いた Variation を用いた評価に関連する元素は Cr、クラスター生成に関連すると考えられる主な元素の Ni、Si について、全17試料の原子マップからは、いずれの元素についても中性子照射を受けたオーステナイトステンレス鋼に見られるようなクラスター形成やそれ以外の特徴的な分布を示す例はなく、ほぼ均一に分布している様子が観察された。

### ■ 化学成分分析

規格に規定された元素として C, Mn, Si, S, P, Cr, Ni, Mo 及び N, Nb について、関連する JIS に準拠して成分定量を行った。管理番号 ID-5-③において P が本材料に相当する規格値より 0.001mass%高い値であったが、溶鋼分析に対する製品分析の許容変動値(Pの場合 0.005mass%)の範囲内であることを確認した。なお、他の元素はいずれも本材料に相当する規格の範囲内だった。

## (3) ステンレス鋼製機器の健全性評価 (H3T モデル) の保守性

本実施項目の主目的は、国内の高経年化技術評価で用いられている H3T モデルの BWR 実機に適用する際の保守性の確認であり、令和4年度昨年度および令和5年度に取得した実機ポンプケーシング材の 288°Cの弾塑性破壊靱性および J-R 曲線を H3T モデルによる予測結果と比較することで、その保守性を検討した。

H3T モデルによる弾塑性破壊靱性  $J_{Ic}$  の経時変化挙動と実機運転履歴を経たポンプケーシング材の弾塑性破壊靱性を比較するため、H3T モデルにより求めた弾塑性破壊靱性の経時変化と実測値を比較した。その結果、実測値中最も小さな値を示した結果に関しても、H3T モデルの予測値の2倍以上の値となっており、全体として大きな保守性を有していることを確認した。

#### **(4) 事業計画案の見直し**

上記(1)、(2)及び(3)の結果より、令和5年度までに実機材を用いた H3T の保守性の確認は終了した。事業計画の見直しはなく、令和6年度は、米国評価モデルによる評価結果との比較検討を実施し、同モデルによる評価結果と H3T モデルによる評価結果と比較することで、米国モデルの適用性について検討する。

### **5.5 研究実施体制及び実施方法(実機材料を活用した安全研究検討委員会)**

#### **(1) 実機材料を活用した安全研究検討委員会**

本事業において収集した情報、研究計画(安全研究戦略マップ含む)、試験方法及び採取したデータの透明性及び客観性を高めるとともに、専門家の意見を広く評価に反映するために、電中研及び電中研以外の専門家による「実機材料を活用した安全研究検討委員会」を設置・運営し、有識者からの意見を参考とするとともに技術的側面からのレビューを受けた。

検討委員会は、令和5年度計画のレビューとして第一回を、進捗報告及び検討結果のレビューとして中間報告会の第二回及び第三回を、最終成果報告会として第四回の、計4回の委員会を開催した。

#### **(2) 原子力規制庁への進捗報告**

原子力規制庁に対して定期的な進捗報告を実施した。上記(1)に示す委員会前の事前レビューとともに、研究進捗状況の視察として、「予防保全の保守性に係る研究」で実施したショットピーニング施工後の要素試験体の残留応力測定、BWR プラント廃炉時の除染の影響確認試験に用いる試験片及び試験装置製作状況、並びに「ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究」の試験片製作状況として、ホットラボ施設内に設置の放電ワイヤー加工機を用いた実機材の加工状況についての視察があった。

### **5.6 まとめ**

電中研は、原子力規制庁より、令和5年度原子力施設等防災対策等委託費(実機材料等を活用した経年劣化評価・検証(実機材料を活用した健全性評価に係る研究))事業を受託し、本年度実施計画範囲の研究を完了し、委託報告書としてまとめた。