

3.3 予防保全対策技術の保守性に係る研究

これまでに国内外の多数のプラントにおいて配管や炉内構造物の SCC による損傷が認められている。SCC 等の破壊を引き起こす亀裂については、「亀裂の解釈」において、維持規格の規定に基づく検査を実施することが要求されている。事業者は SCC 発生を低減するための予防保全対策を施工しており、維持規格の検査においては、予防保全対策を施工した場合には、「予防保全対策施工時期を供用開始時期」とすることができ、その結果として、予防保全対策施工部位は検査頻度が緩和されることになる。

事業者が実施している予防保全対策の一つにピーニング等による応力改善工法がある。本研究では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、予防保全対策施工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。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 6 年度は、事業計画に基づき以下の項目を実施した。

(1) 実機構造模擬試験の試験計画詳細の検討

● 切断の影響確認（複合的因子に対する影響確認）

令和 5 年度^[3.3-1]に、実機構造模擬試験の試験計画の詳細検討の事前ステップの切断の影響確認（複合的因子に対する影響確認）として、ピーニング施工した溶接継手試験体を製作し、ショットピーニング(以下、「SP」という)施工部位表層部の残留応力分布に影響を及ぼさない最小切断寸法を検討した。試験では、溶接継手試験体からピーニング施工部位の採取を模擬して切断し、切断前後で施工部位表層部の残留応力分布の測定と、解析モデルによる切断模擬解析を実施した。前者の切断試験では、最小切断寸法の目標とした A 型輸送可能な 100mm×100mm×板厚まで切断し、施工部位表層部の圧縮残留応力の消失、著しい緩和がないことを確認した。また、FEM 解析により、施工部位表層部の圧縮残留応力のプロファイルを再現した。

令和 6 年度は、最小切断寸法の 100mm×100mm×板厚（計画値）の妥当性をさらに補強する観点で、50mm×50mm×板厚、並びに 30mm×30mm×板厚まで切断し、応力測定を実施するとともに、解析による再現を実施した。本実施項目は、令和 5 年度の成果を踏まえ検討すべき項目として実施したが、実機構造模擬試験の試験計画詳細の検討に関連することから本項で報告する。

● 実機構造模擬試験計画の検討

令和3年度^[3.3-2]の実機構造模擬（モックアップ）試験の試験計画と、令和5年度に検討した要素試験を再現する有限要素法による解析手法により、実機構造模擬試験体と同一な解析モデルでの FEM 解析を実施し、実機供試体の採取位置及び寸法の検討に資するとともに、実機構造模擬試験の試験計画詳細の検討を実施した。

(2) BWR プラント廃炉時の除染の影響確認試験（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^[3.3-3]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に基づき除染試験を完了し、試験片の各種測定を実施した。図 3.3-1 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6年度は3ヵ年計画のうち3年目である。

(3) PWR プラント実機応力測定の成立性検討

原子力発電所等の対象機器の予防保全対策施工部位のその場での応力測定（実機測定）手法の検討として、令和4年度より、PWR 蒸気発生器管台の超音波ショットピーニング施工部位の残留応力測定工法の成立性検討を行っている。令和5年度に実施した「PWR プラントの放射線環境下での応力測定の成立性検証」の成果より、PWR 廃止措置中プラントでの実機測定の実施時期を念頭に、工事基本計画（ロードマップ）を策定した。

(4) 事業計画案の見直し

上記(1)の成果を総合的に検討し、靱性低下に係る研究の今後の事業計画案を策定した。

<参考文献>

- [3.3-1] 令和5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））、令和6年3月
- [3.3-2] 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））、令和4年3月
- [3.3-3] 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））、令和5年3月

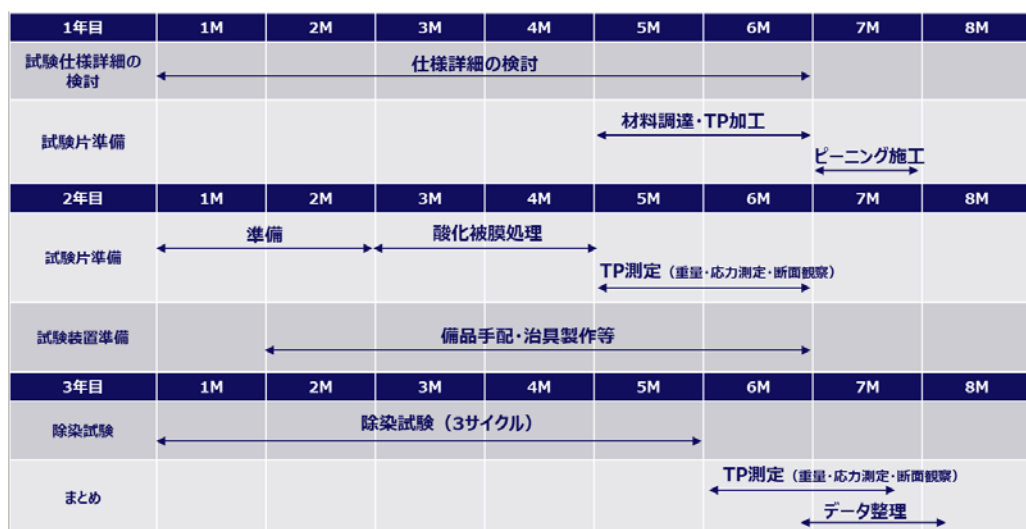


図 3.3-1 BWR プラントを対象とした除染影響確認試験 実施工程

3.3.1 実機構造模擬試験の試験計画詳細の検討

3.3.1.1 切断影響の確認（複合的因子に対する影響確認）

令和5年度に実施した研究^[3.3.1.1-1]では、解析手法の妥当性確認に係る調査として、要素試験及び要素試験模擬解析を実施した。

要素試験では、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近傍における残留応力分布を測定した。測定の結果、SP 施工後の残留応力は施工前の溶接残留応力によらず、ほぼ均一な圧縮残留応力となっていることを確認した。また、最終切断後の計画値（100mm×100mm）においても、SP による施工付表面の圧縮残留応力は残存しており測定が可能であることを確認し、計画値で A 型輸送が可能な見通しを得た。

要素試験模擬解析では、要素試験体を模擬した解析モデルを作成し、要素試験との比較を行い、解析モデルの検証を実施した。解析モデルは、溶接残留応力及び SP による残留応力を模擬可能なモデルとし、実際の SP の圧縮残留応力を詳細に模擬した残留応力解析の手法についても検討した。検証の結果、溶接残留応力解析及び SP による残留応力解析は要素試験の傾向を模擬できていることを確認した。

以上の実施内容を踏まえ、令和6年度は、実機シュラウドからのサンプリングを想定し、計画値（100mm×100mm）よりもさらに小サイズに切断した試験片に対する応力測定および解析による最小切断寸法の妥当性の検討、800MWe 級プラントを対象とした実機構造模擬解析、実機予防保全施工部位の形状・寸法や切断による自己拘束解放等の影響も踏まえた実機構造模擬（モックアップ）試験の計画を立案した。

1) 切断影響の確認の概要

要素試験体による切断影響確認は、令和5年度に製作した要素試験体に対して、SP 施工部位表層部の残留応力分布に影響を及ぼさない最小切断寸法（100mm×100mm）を検討するため、さらに小サイズに切断し切断前後での部材表層部の残留応力分布の測定と、解析モデルによる切断模擬解析を実施した。

2) 切断影響確認試験

① 令和5年度の試験条件

要素試験は図 3.3.1.1-1 に示す試験体（100mm×100mm）は、令和5年度に製作した炉心シュラウド H4 溶接部を模擬した平板の突合せ溶接継手より最小切断寸法に切断した試験体であり、図 3.3.1.1-1 に示す斜線部が SP 施工部位であり、溶接止端部から 25mm の範囲を最小施工範囲とし施工した。令和5年度の要素試験の詳細については、令和5年度の研究報告書^[3.3.1.1-1]に示す。

② 切断条件

要素試験における切断形状を図 3.3.1.1-2 に示す。今年度は、令和5年度の試験体を

使用し、100mm×100mm の試験体を 50mm×50mm 及び 30mm×30mm に切断した。試験体の切断形状は、炉心シュラウド H4 溶接部からのボートサンプル取出しを参考に、HAZ 部 SP 施工部位を中心とした 50mm×50mm 及び 30mm×30mm の形状とした。各切断後の試験体写真を図 3.3.1.1-3 及び図 3.3.1.1-4 に示す。

なお、令和 5 年度は機械切断（鋸切断）を用いて切断を実施したが、試験体の寸法が比較的小さいことから、ワイヤー放電加工を用いて切断を行った。

③ 残留応力測定条件

試験体の残留応力測定は X 線回折法を用いた。測定に用いた装置の外観を図 3.3.1.1-5 に示す。残留応力測定は、50mm×50mm 及び 30mm×30mm において行った。

残留応力は、図 3.3.1.1-2 に示す試験体の中心 1 点に対して測定した。測定は、溶接線直交方向及び溶接線平行方向の 2 方向とした。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。残留応力測定条件の概要を以下に示す。

- ・ 測定装置 : 株式会社リガク MSF-3M(図 3.3.1.1-5 参照)
- ・ 測定原理 : $\sin 2\psi$ 法 (ψ 角を 11 分割し測定)
- ・ 測定領域 : 2mm×2mm
- ・ 管球 : Cr 管球
- ・ 特性 X 線 : CrK α
 - ・ 回折面 : (2 1 1)

④ 残留応力測定結果

各測定結果の測定値及び標準偏差を表 3.3.1.1-1 及び表 3.3.1.1-2 に示す。また、要素試験体の令和 5 年度の測定結果も含めた、残留応力測定結果のまとめを図 3.3.1.1-6 及び図 3.3.1.1-7 に示す。なお、50mm×50mm 及び 30mm×30mm 以外の測定の詳細については、令和 5 年度報告書^[3.3.1.1-1]に示す。

表 3.3.1.1-1 及び表 3.3.1.1-2 に示すように、50mm×50mm 及び 30mm×30mm に切断した場合でも SP による圧縮残留応力が測定可能であることを確認した。なお、いずれの場合においても、切断による残留応力の変化は軽微であった。

3) 切断影響模擬解析

① 解析条件

切断影響模擬解析として、要素試験と同様に、50mm×50mm 及び 30mm×30mm の試験体の切断を模擬する解析を実施した。

使用した解析モデルを図 3.3.1.1-8 に示す。本解析モデルは、令和 5 年度に使用した解析モデルと同じモデルである。令和 5 年度においては、2 次元の解析モデルを用いて、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、固有ひずみマッピングにより 3 次元モデルを作成し、3 次元の解析モデルを用いて試験体の切断に伴う残留応力の変化

を再現する切断模擬解析を 100mm×100mm の形状まで実施した。各解析条件及び解析結果の詳細については令和 5 年度報告書^[3.3.1.1-1]に示す。

今年度においては、上記の解析モデルを用いて、50mm×50mm 及び 30mm×30mm の切断を模擬した解析を行った。3 次元モデルの切断形状を図 3.3.1.1-9 に示す。切断は要素試験の切断位置に合わせ、令和 5 年度の解析と同様に、切り出す領域外の縦弾性係数を小さくすることで切断を模擬した。

② 解析結果

切断模擬解析結果のコンター図を図 3.3.1.1-10 から図 3.3.1.1-13 に、切断影響試験結果と解析結果との比較を図 3.3.1.1-15 から図 3.3.1.1-18 に示す。なお、解析結果は要素試験の結果との比較のため、図 3.3.1.1-9 に示す対称面で切断したコンター図及び対称面上の残留応力分布を示す。また、令和 5 年度に実施した 100mm×100mm コンター図を図 3.3.1.1-14 に示した。

図 3.3.1.1-15 から図 3.3.1.1-18 に示した 50mm×50mm 切断および 30mm×30mm 切断解析結果と要素試験の測定結果との比較より、SP による残留応力は切断模擬解析でも残っており、試験体中央部においては要素試験の残留応力の変化の傾向を解析可能であることを確認した。また、50mm×50mm 切断および 30mm×30mm 切断における表面及び裏面の溶接線平行方向応力、溶接線直交方向応力ともに、溶接線側端部で圧縮応力が増加する結果が得られた。図 3.3.1.1-14 の 100mm×100mm コンター図と図 3.3.1.1-12 のコンター図の比較から、板厚内部においては切断に伴い引張応力が解放されることが確認できることから、表面及び裏面において、板厚内部の引張応力の減少に伴い、残留応力が圧縮側に推移し、圧縮応力が増大したものと考えられる。

なお、図 3.3.1.1-15 から図 3.3.1.1-18 に示されるように溶接線平行方向応力に比べ、溶接線直交応力は端部での圧縮応力の変化が小さいが、これは、溶接線直交応力のコンター図（図 3.3.1.1-12、図 3.3.1.1-13）に示されるように、板厚内部に圧縮残留応力の領域があることから、残留応力のバランスにより、圧縮応力の増加が少なくなったものと考えられる。

以上の解析結果より、要素試験において、内部の残留応力が大きい箇所を切断した場合は、表面の残留応力が影響を受ける可能性があるため、実機の測定時には、切断端部から離れた試験体の中央付近の測定を行う、または A 型輸送可能な寸法である 100mm×100mm で取出しを行う必要があると考えられる。

なお、切断模擬解析では、溶接線側端部において材料の引張強さを超える約 1300～1400MPa 程度の圧縮応力が発生している。これは、溶接線側端部において圧縮応力が増大した原因としては、内部の溶接残留応力の切断による変化が大きく、表面及び裏面の SP による残留応力に影響を与えたためと考えられる。本解析は固有ひずみに基づいた弾性解析を採用しており、切断端部での塑性挙動を考慮していないが、実際

の要素試験では、塑性変形が生じるため、発生する残留応力は、材料の引張強さ程度になると思われる。

4) 切断影響の確認のまとめ

切断影響の確認として、炉心シュラウド H4 溶接部を模擬した要素試験体に対して、残留応力分布に影響を及ぼさない切断寸法を検討するため、切断影響試験と切断影響模擬解析を実施した。

要素試験の結果、A 型輸送可能な寸法である 100mm×100mm より小さい 50mm×50mm 及び 30mm×30mm の形状でも SP による圧縮の残留応力は残存し、測定可能であることを確認した。

要素試験模擬解析の結果、SP による残留応力は切断模擬解析でも残っており、試験体中央部においては要素試験の結果を模擬可能であることを確認した。

以上より、実機からの取出しの際に 50mm×50mm 及び 30mm×30mm の形状で取り出した場合においても、SP による施工付表面の圧縮残留応力は残存しており、A 型輸送可能な寸法である計画値 100mm×100mm であれば確実にその測定が可能と考えられる。

<参考文献>

- [3.3.1.1-1] 令和 5 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））、令和 6 年 3 月
- [3.3.1.1-2] 公益社団法人日本材料学会、JSMS-SD-5-02 X 線応力測定法標準（2002 年版）－鉄鋼編－

表 3.3.1.1-1 各試験体の残留応力測定結果のまとめ(表面)

単位：MPa

試験体	溶接線直交方向 (軸方向)		溶接線平行方向 (周方向)	
	残留応力*1	標準偏差	残留応力*1	標準偏差
100mm×100mm*2	-941	27	-1057	26
50 mm×50 mm	-952	6	-1028	34
30mm×30 mm	-883	21	-1002	44

注記*1: 各測定点における平均値を示す。

*2: +20mm 位置の値（令和 5 年度報告書^[3.3.1.1-1]参照）。

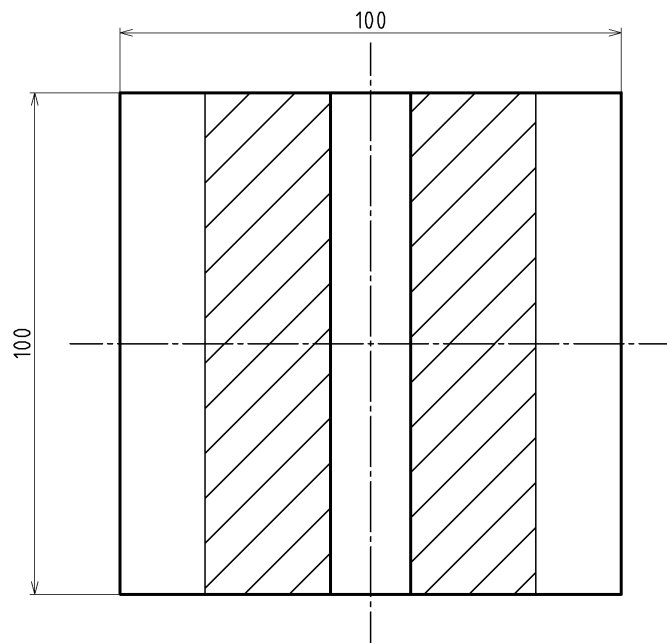
表 3.3.1.1-2 各試験体の残留応力測定結果のまとめ(裏面)

単位：MPa

試験体	溶接線直交方向 (軸方向)		溶接線平行方向 (周方向)	
	残留応力*1	標準偏差	残留応力*1	標準偏差
100mm×100mm*2	-934	18	-974	23
50 mm×50 mm	-883	21	-1002	44
30mm×30 mm	-913	18	-927	22

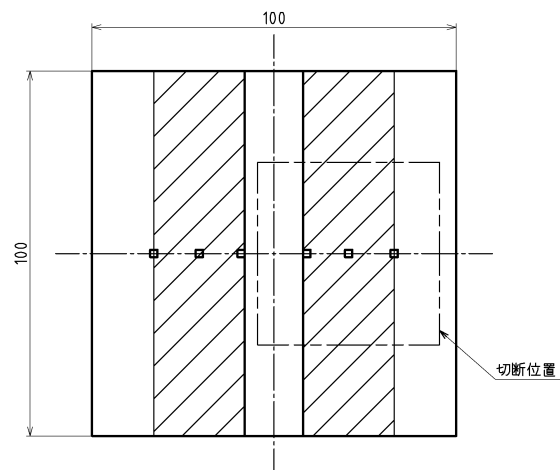
注記*1: 各測定点における平均値を示す。

*2: +20mm 位置の値（令和 5 年度報告書^[3.3.1.1-1]参照）。

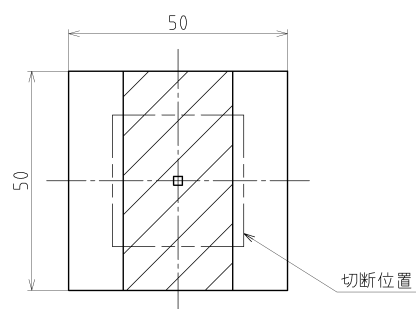


 : 溶接止端部から 25mm の範囲

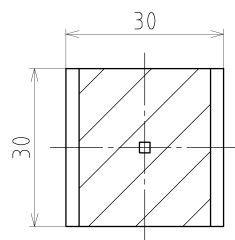
図 3.3.1.1-1 要素試験体寸法



(a) 100mm × 100mm



(b) 50mm × 50mm

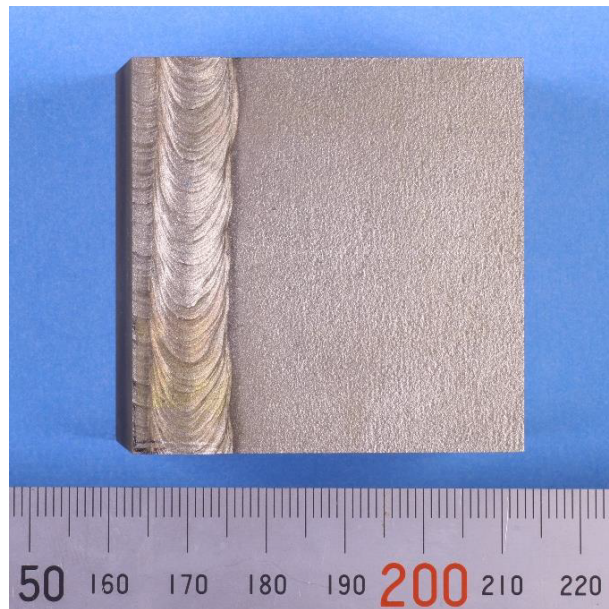


(c) 30mm × 30mm

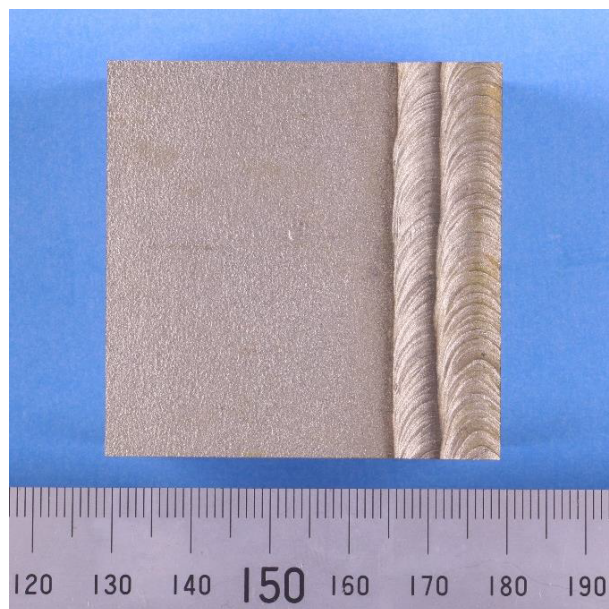
 : 溶接止端部から 25mm の範囲

 : 残留応力測定点

図 3.3.1.1-2 切断形状

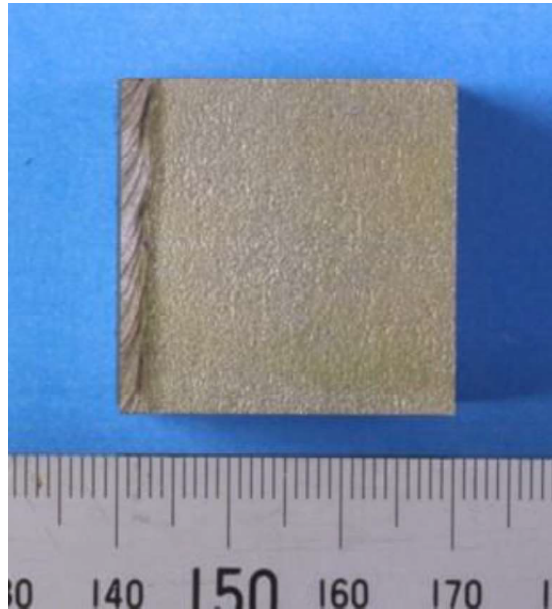


(a) 表面（炉心シュラウド外面に対応）

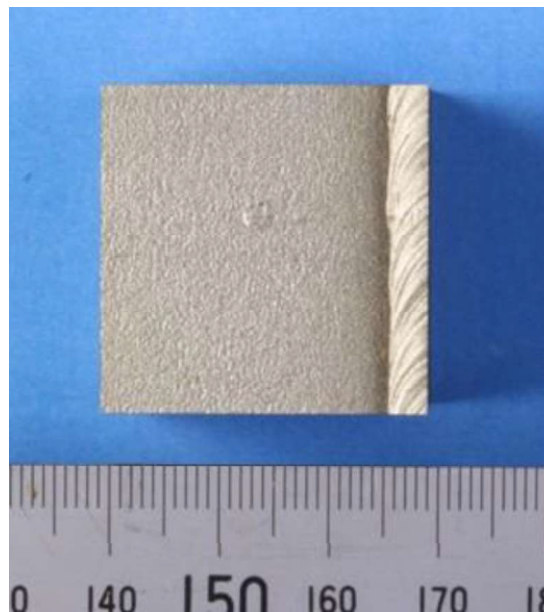


(b) 裏面（炉心シュラウド内面に対応）

図 3.3.1.1-3 50mm×50mm 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 3.3.1.1-4 30mm×30mm 切断後の要素試験体外観

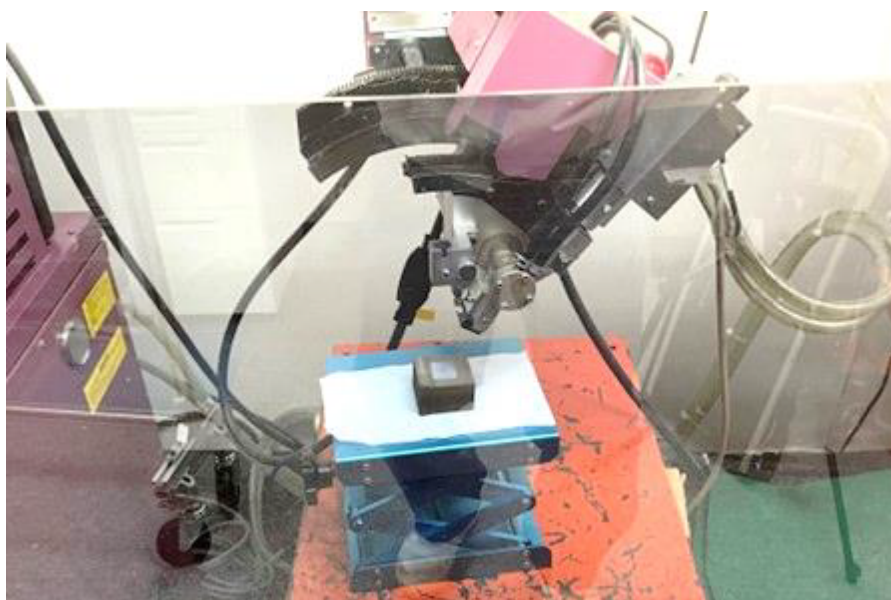


图 3.3.1.1-5 X 線応力測定装置

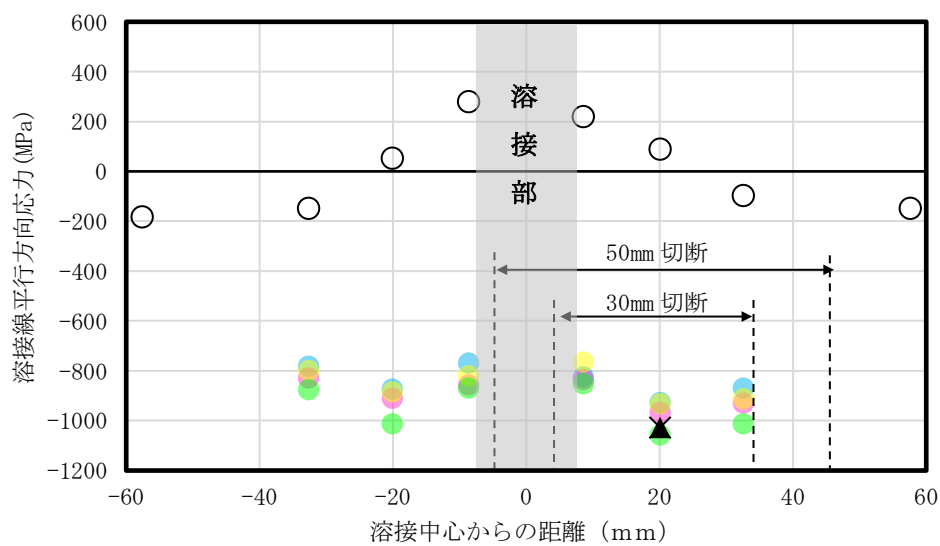
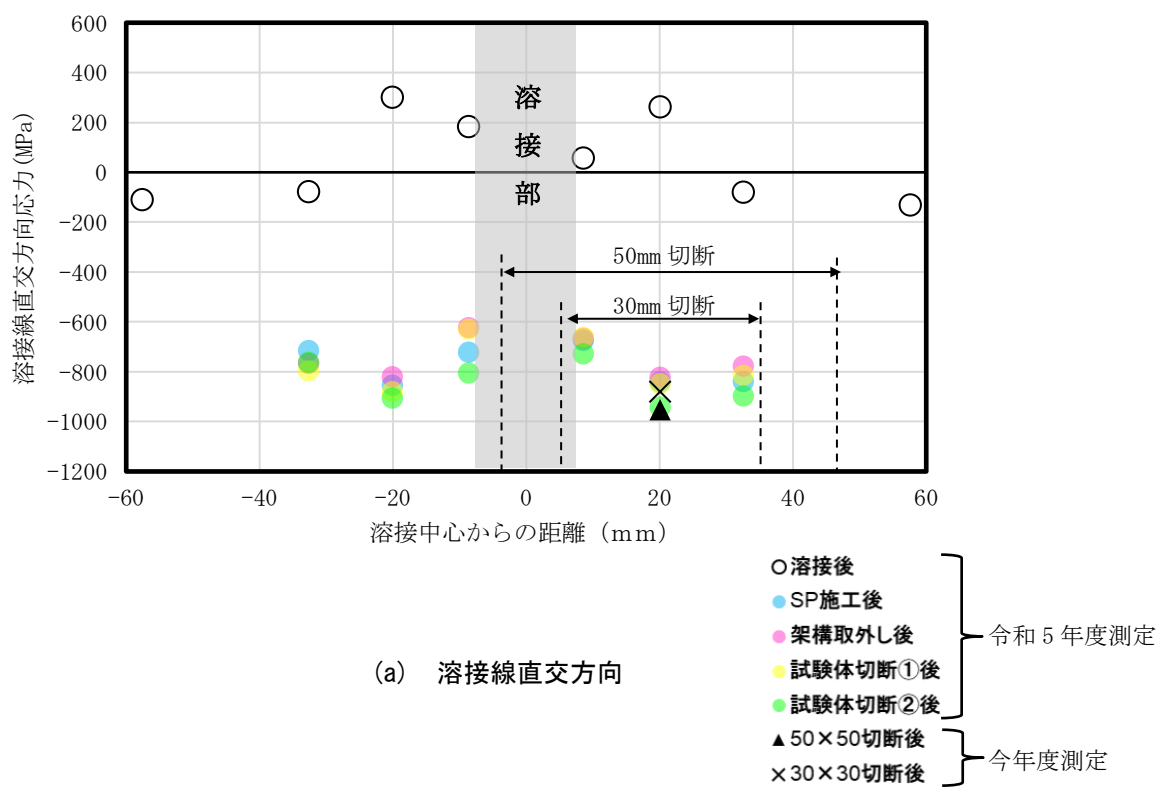
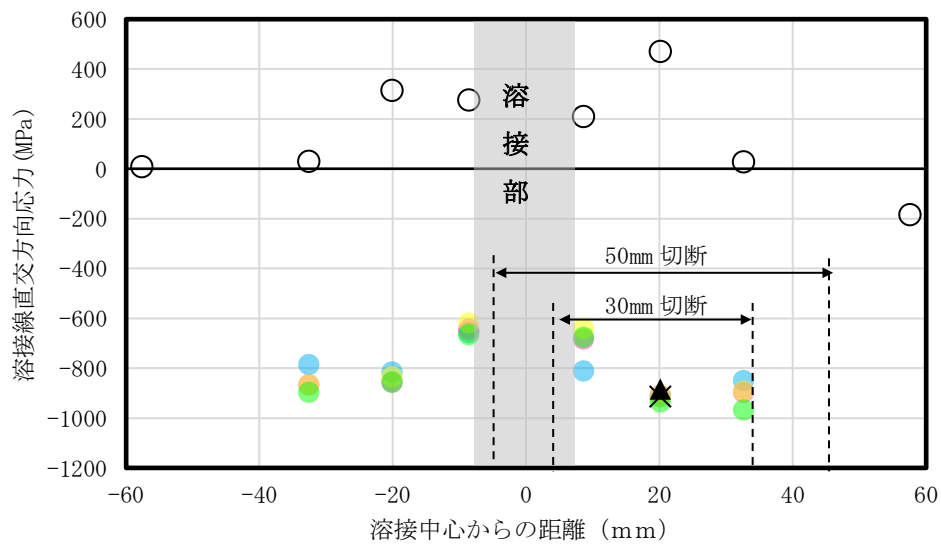
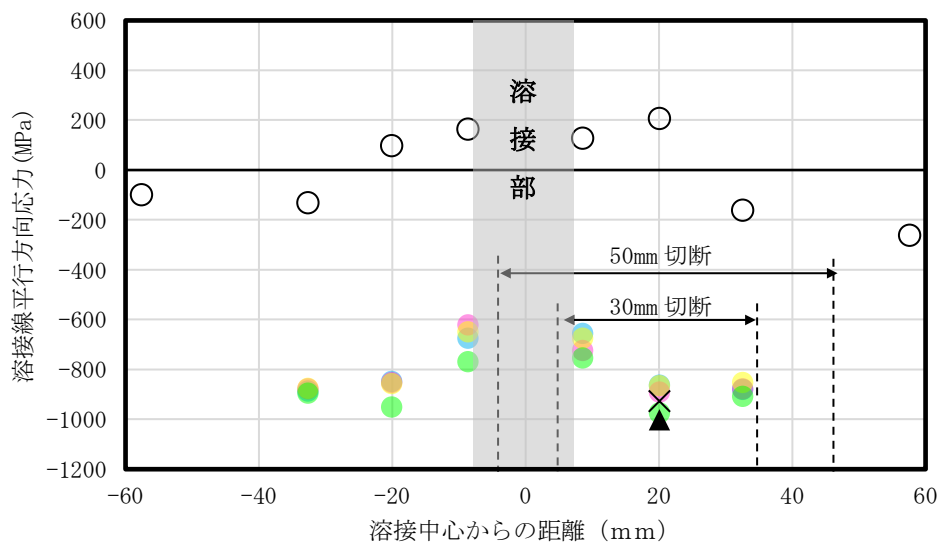


図 3.3.1.1-6 残留応力測定結果（表面、炉心シュラウド外面に対応）



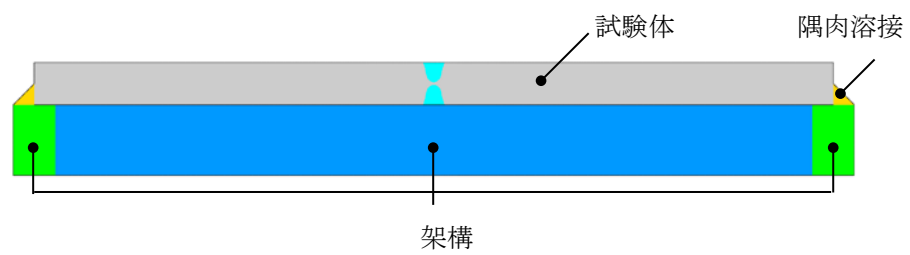
(a) 溶接線直交方向

- 溶接後
 - SP施工後
 - 架構取外し後
 - 試験体切断①後
 - 試験体切断②後
 - ▲ 50×50切断後
 - × 30×30切断後
- } 令和5年度測定
 } 今年度測定

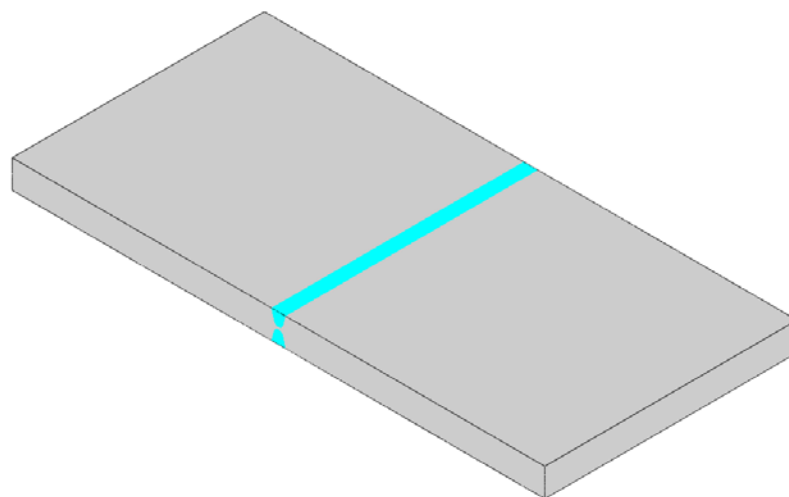


(b) 溶接線平行方向

図 3.3.1.1-7 残留応力測定結果（裏面、炉心シュラウド内面に対応）

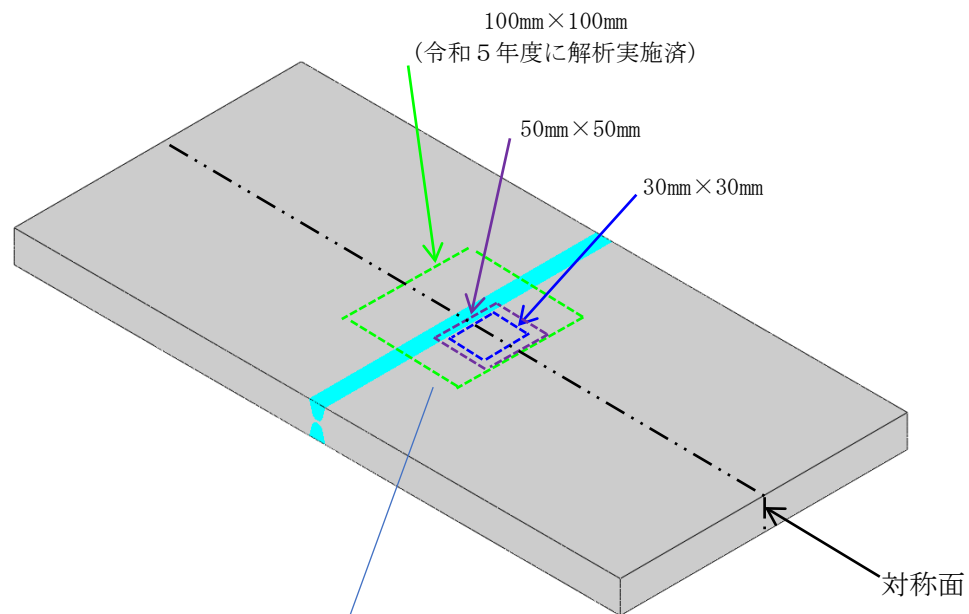


(a) 溶接残留応力解析及び SP による残留応力解析に用いる解析モデル(2 次元)



(b) 切断模擬解析モデル(3 次元)

図 3.3.1.1-8 要素試験模擬解析に用いる解析モデル



■ 解析モデルにおける切断形状
(板厚30mm)

■ コンター図(測定部位の応力を確認するため対称面にて表示)

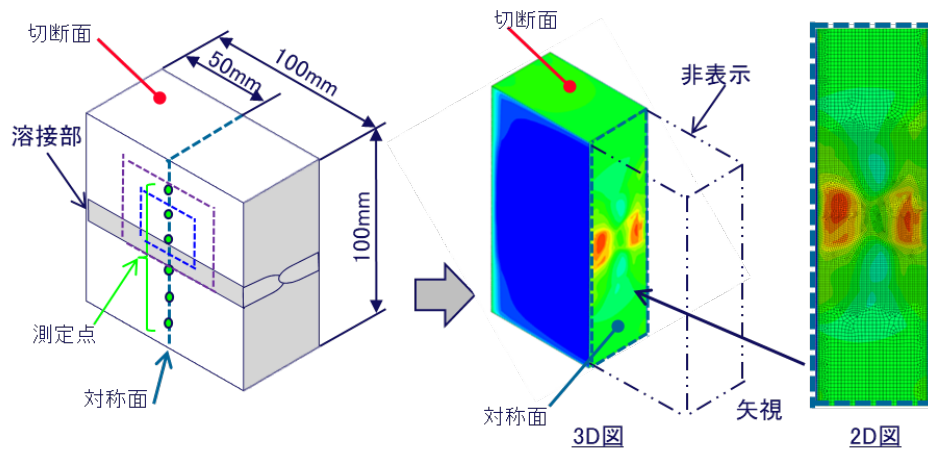


図 3.3.1.1-9 3次元モデルの切断形状と解析モデルの対応

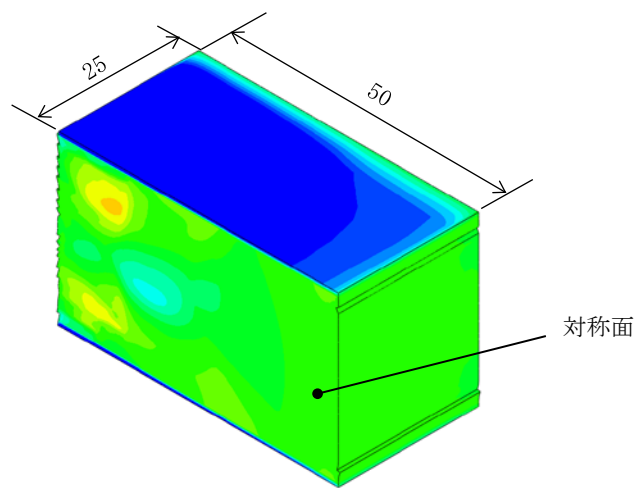
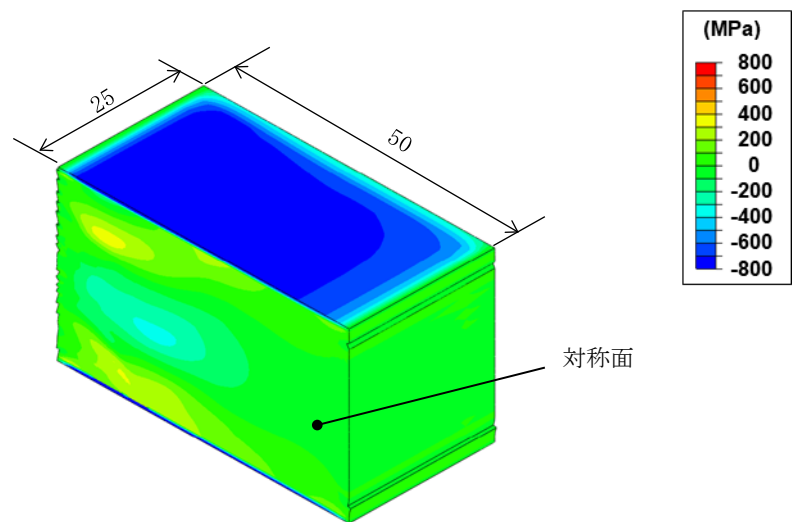


図 3.3.1.1-10 切断模擬解析結果 (50mm×50mm、3D コンター図)

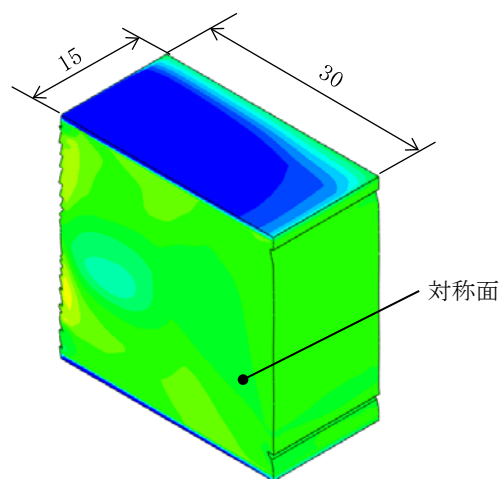
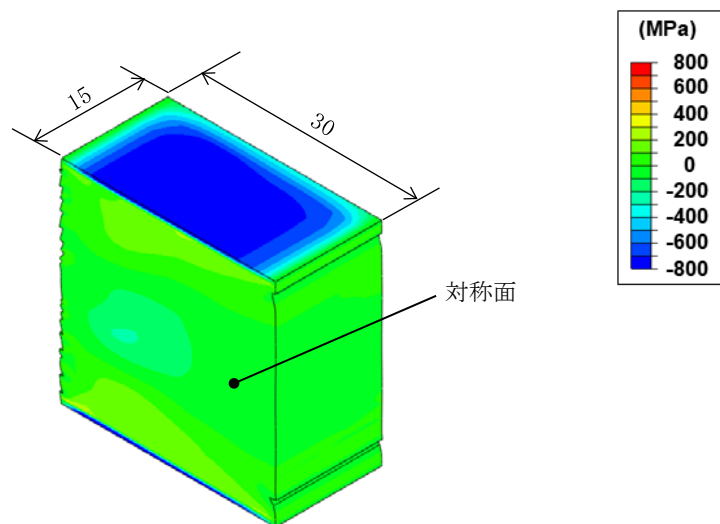
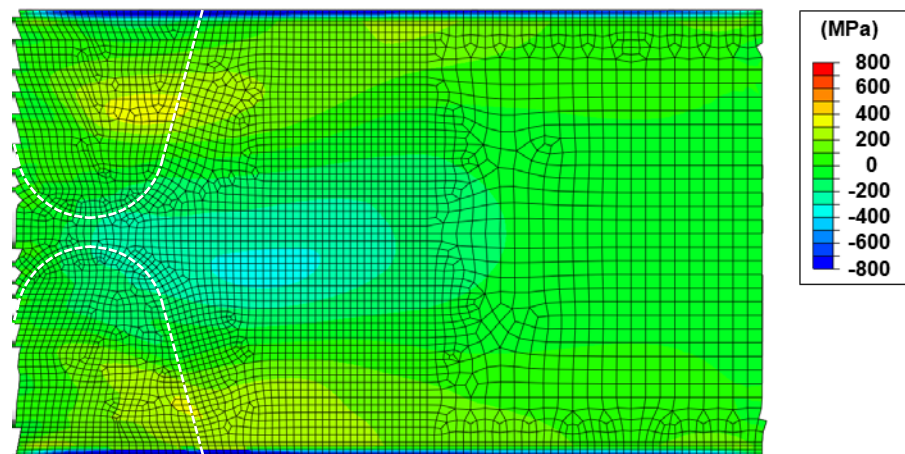
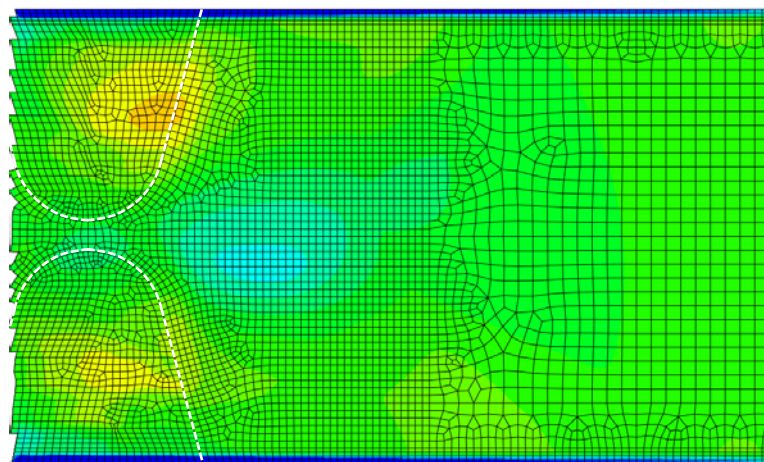


図 3.3.1.1-11 切断模擬解析結果 (30mm×30mm、3D コンター図)

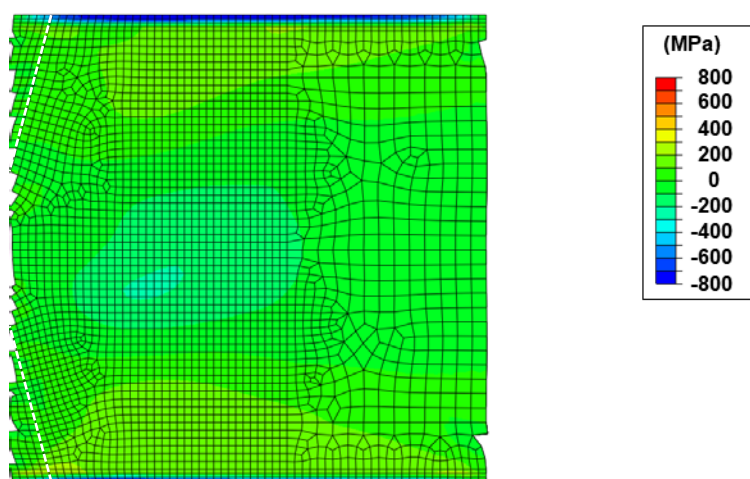


(a) 溶接線直交方向応力

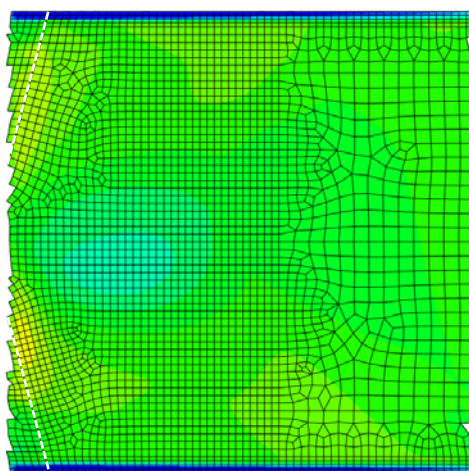


(b) 溶接線平行方向応力

図 3.3.1.1-12 切断模擬解析結果 (50mm×50mm、対称面拡大図)

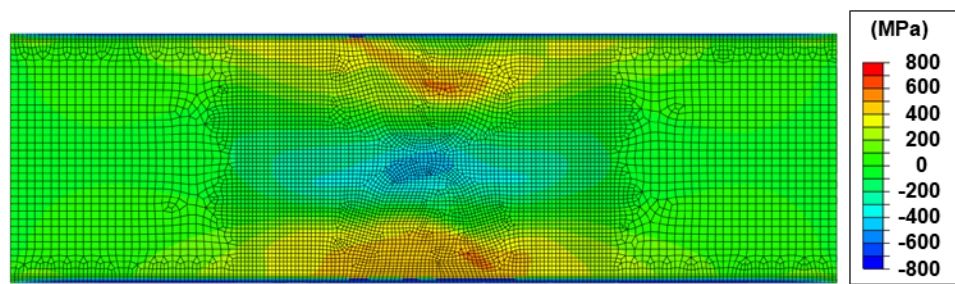


(a) 溶接線直交方向応力

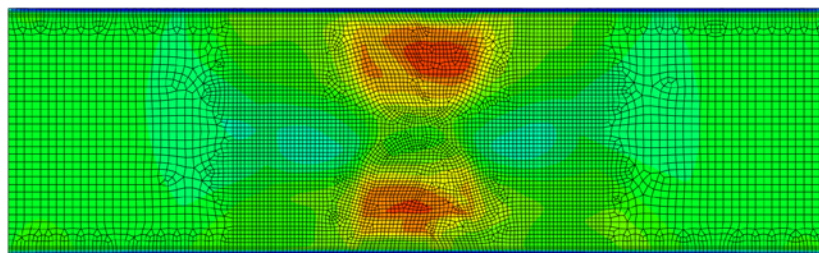


(b) 溶接線平行方向応力

図 3.3.1.1-13 切断模擬解析結果 (30mm×30mm、対称面拡大図)

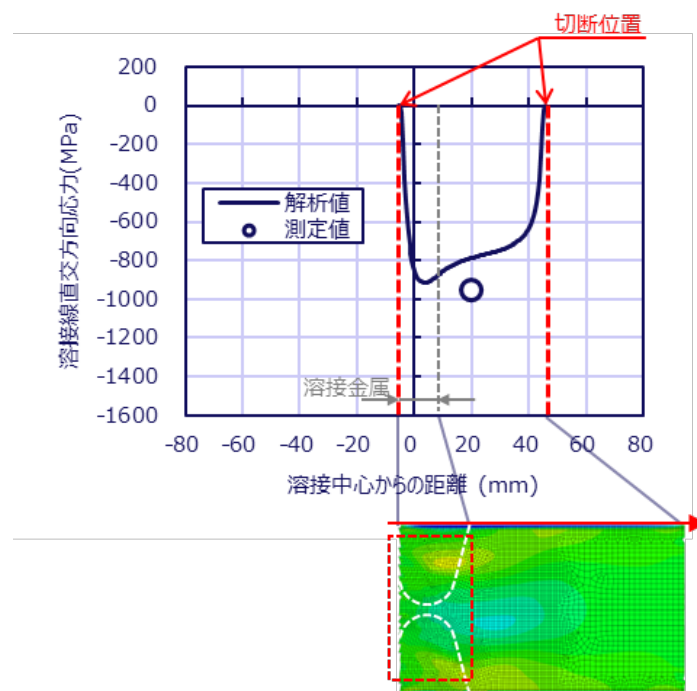


(a) 溶接線直交方向応力

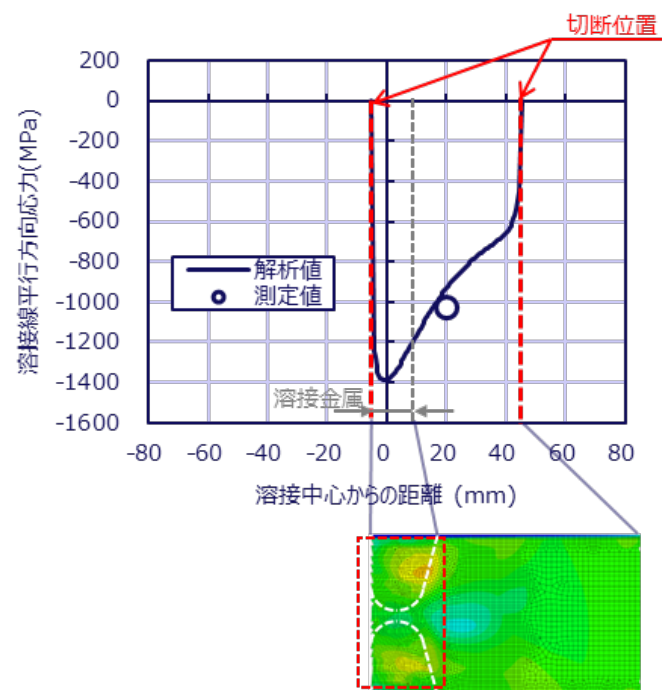


(b) 溶接線平行方向応力

図 3.3.1.1-14 切断模擬解析結果 (100mm×100mm、令和5年度実施)

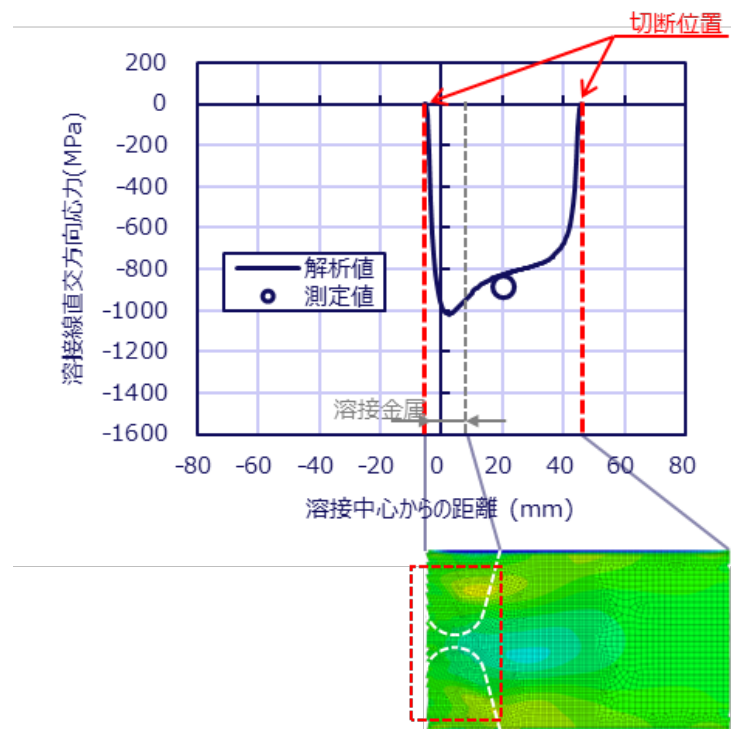


(a) 溶接線直交方向応力

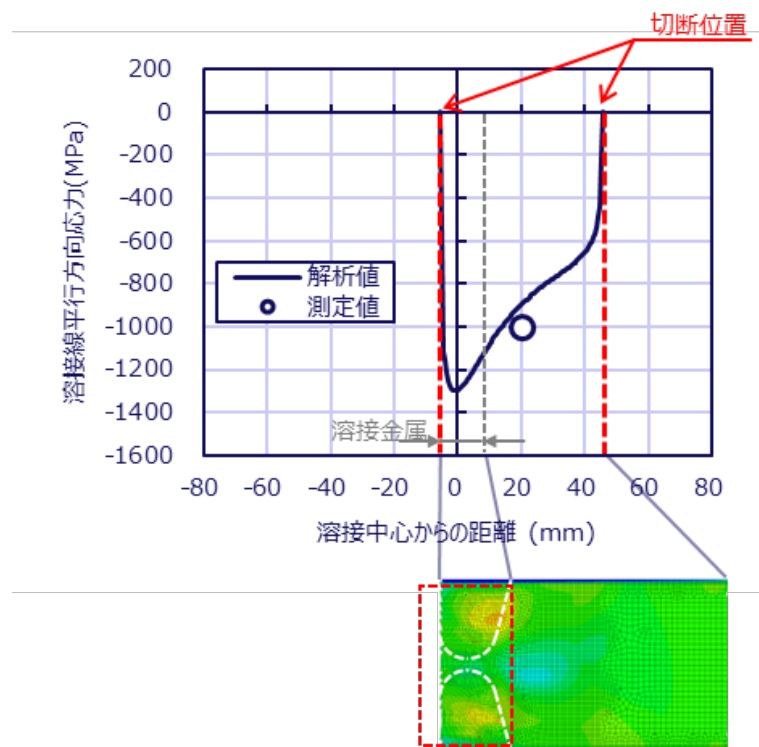


(b) 溶接線平行方向応力

図 3.3.1.1-15 切断模擬解析結果と要素試験との比較 (50mm×50mm、表面)

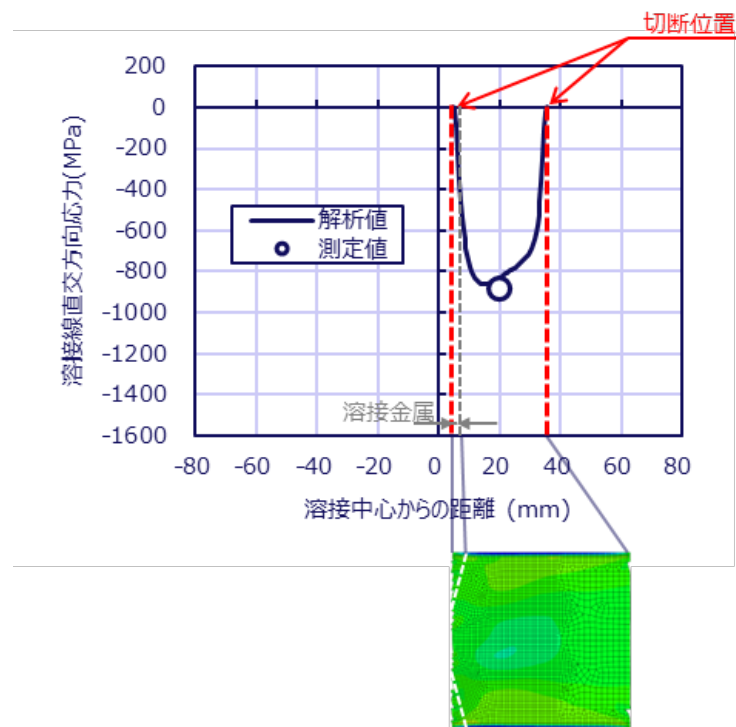


(a) 溶接線直交方向応力

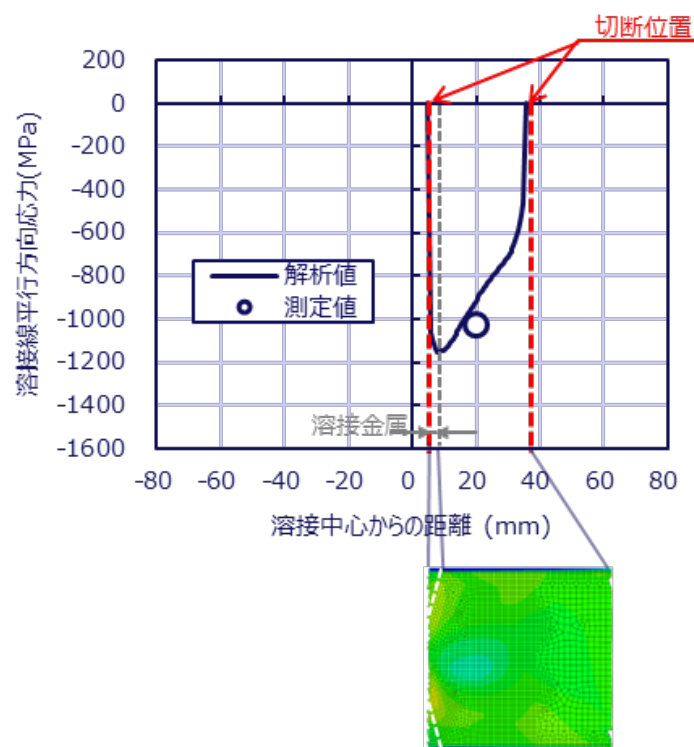


(b) 溶接線平行方向応力

図 3.3.1.1-16 切断模擬解析結果と要素試験との比較 (50mm×50mm、裏面)

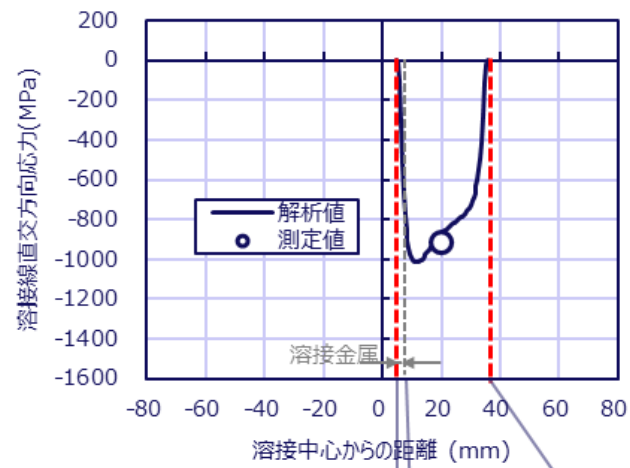


(a) 溶接線直交方向応力

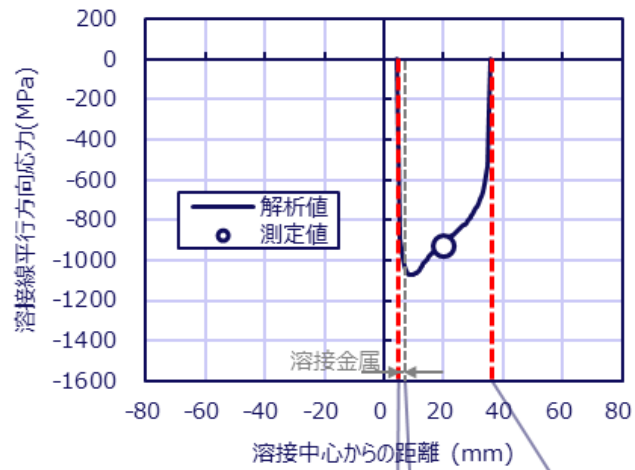


(b) 溶接線平行方向応力

図 3.3.1.1-17 切断模擬解析結果と要素試験との比較 (30mm×30mm、表面)



(a) 溶接線直交方向応力



(b) 溶接線平行方向応力

図 3.3.1.1-18 切断模擬解析結果と要素試験との比較 (30mm×30mm、裏面)

3.3.1.2 実機構造模擬試験計画の検討

(1) 実機構造模擬した解析（切断影響）

1) 実機構造模擬解析の概要

令和5年度の調査結果^[3.3.1.2(1)-1]にて妥当性を検証した解析手法を用いて、800MWe級プラントの炉心シュラウドを対象に切断による試験体採取を模擬した解析を実施した。

本解析は、実機からの試験体取出しが想定される800MWe級プラントの炉心シュラウドの溶接残留応力とSPによる残留応力が重畳した状態に対し、SP施工部位表層部の残留応力への切断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並びに切断模擬解析を実施した。なお、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については、令和5年度と同じ手法を用いた。

実機構造模擬解析で用いた解析モデルを図3.3.1.2(1)-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。本モデルには、図3.3.1.2(1)-2に示すように、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の表面・裏面に設定した。切断模擬解析は、2次元解析モデルによる残留応力解析にて求めた残留応力を用いて、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。

2) 溶接残留応力解析

① 解析条件

溶接残留応力解析は、800MWe級プラントの炉心シュラウドのH4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。H4溶接部の開先形状及び溶接条件は、国内800MWe級プラントの炉心シュラウドH4溶接部の施工実績を基に設定した。

溶接残留応力解析の解析条件を下記に示す。

- ・ 解析コード : Abaqus Ver.2019
- ・ 解析モデル : 2次元モデル（図3.3.1.2(1)-1及び図3.3.1.2(1)-2参照）
（節点数：27807、要素数：26683）
 - ＞開先形状 : 両側開先
 - ＞溶接パス数 : 全32パス（外面6層、内面5層）
 - ＞入熱条件 : 国内800MWe級プラントにおける実績より設定
 - ＞入熱パターン : 台形パターン（図3.3.1.2(1)-3参照）
- ・ 解析手順 : 図3.3.1.2(1)-4参照
- ・ 材質 : SUS304
- ・ 物性値出典 : 設計・建設規格^[3.3.1.2(1)-3]及び公開文献^{[3.3.1.2(1)-4][3.3.1.2(1)-5]}等

② 解析結果

溶接残留応力解析のうち、溶接施工時の代表パスにおける入熱時の温度分布を図 3.3.1.2-5 に、残留応力分布のコンター図を図 3.3.1.2(1)-6 に、残留応力評価ライン上の応力分布のグラフを図 3.3.1.2(1)-7 及び図 3.3.1.2(1)-8 に示す。

図 3.3.1.2(1)-5 に示す代表パスの温度分布解析の結果、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、設定した入熱条件が適切であることを確認した。なお、外面初層の解析時には、ひずみ集中による解析発散を避けるため、逆側パス（内面初層）を生成し、入熱する解析条件とした。

図 3.3.1.2(1)-6 より、残留応力分布のうち、軸方向応力は、溶接部の内外表面付近で引張応力が、その内部に圧縮応力が発生する結果となった。残留応力分布のうち、周方向応力は、溶接部の内外表面付近で引張応力が発生する結果となった。

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、令和 5 年度に実施した要素試験における試験体の残留応力測定結果を模擬する手法と同様に、弾塑性解析により実施し、要素試験の SP 施工範囲に対して一定の圧縮応力（約 800MPa）を塑性ひずみとして付与する解析条件とした。

SP による残留応力解析の解析条件を下記に示す。

- ・ 解析コード : Abaqus Ver.2019
- ・ 解析モデル : 2 次元モデル（図 3.3.1.2(1)-1 及び図 3.3.1.2(1)-2 参照）
（節点数：27807、要素数:26683）
- ・ 材質 : SUS304
- ・ 物性値出典 : 設計・建設規格^[3.3.1.2(1)-3]及び公開文献^{[3.3.1.2(1)-4][3.3.1.2(1)-5]}等

② 解析結果

SP による残留応力解析結果のうち、残留応力のコンター図を図 3.3.1.2(1)-9 に、図 3.3.1.2(1)-9 に示す残留応力評価ライン上（内面及び外面）の応力分布を図 3.3.1.2(1)-10 及び図 3.3.1.2(1)-11 に示す。

図 3.3.1.2(1)-10 及び図 3.3.1.2(1)-11 より、SP による残留応力解析の結果は、SP 施工範囲で約 800MPa となっている。応力分布は、溶接による残留応力分布の影響を受けることなく、均一な圧縮応力となっている。これは、本解析において、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、溶接による残留応力分布の影響を受けることなく、均一に圧縮残留応力を付加したためである。

4) 切断模擬解析

① 解析条件

切断模擬解析は、試験体の切断に伴う残留応力の変化を求めるため、3 次元解析モデ

ルを用いた。3次元解析モデルは、2次元解析モデルにより求めた残留応力の解析結果より固有ひずみマッピングにより作成した。切断模擬解析の解析条件を下記に示す。

- ・ 解析コード : Abaqus Ver.2019
- ・ 解析モデル : 3次元モデル (図 3.3.1.2(1)-1 参照)
(節点数:1974297、要素数:1867810)
- ・ 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
- ・ 切断条件 : 図 3.3.1.2(1)-12 参照

② 解析結果

切断模擬解析結果のうち、残留応力のコンター図の結果を図 3.3.1.2(1)-13 から図 3.3.1.2(1)-19 に、残留応力評価ライン上の応力分布のグラフを図 3.3.1.2(1)-20 から図 3.3.1.2(1)-33 にそれぞれ示す。図 3.3.1.2(1)-32 と 3.3.1.2(1)-34 を比較すると、3.3.1.2(1)-34 では切断位置が SP 施工範囲内となることから、切断により残留応力は変化していることがわかるが、残存する SP 施工範囲の圧縮残留応力が消失するような大きな変化はなく、全ての切断形状において SP による残留応力が残存している。

最終切断形状である 100mm×100mm の解析結果のうち、3次元のコンター図を対称面で表示した図を図 3.3.1.2(1)-34 に、溶接部拡大図を図 3.3.1.2(1)-35 に示す。100mm×100mm に切断した場合においても、内面及び外面においては SP による残留応力が、板厚内部には溶接による残留応力がそれぞれ残存する結果となっている。

切断前の炉心シュラウド全周の状態と、最終切断後の 100mm×100mm の解析結果の比較を図 3.3.1.2(1)-36 から図 3.3.1.2(1)-39 に示す。炉心シュラウド外面においては、軸方向応力は切断により残留応力が引張側に変化する一方で、周方向応力は残留応力が圧縮側に変化する結果となった。炉心シュラウド内面においては、軸方向応力はほぼ変化がみられず、溶金部近傍の HAZ 部においてわずかに圧縮側に変化する結果となった。周方向応力においては炉心シュラウド外面と同様に、圧縮側に変化する結果となった。

上記の結果のうち、軸方向応力については、図 3.3.1.2(1)-40 に示すように、溶接による径方向の収縮が切断により解放されることで、炉心シュラウドが切断前後にて変形することにより、外面においては軸方向応力が引張側に変化し、内面においてはわずかに圧縮側に変化したものと考えられる。なお、内面及び外面の残留応力の変化量の差異は、外面と内面における溶接形状および溶接条件の相違によるものと考えられる。また、周方向応力については、切断により溶接により生じた内部の引張残留応力が緩和されていることが、コンター図より確認できることから、要素試験結果と同様に、内部の引張残留応力が切断により開放されることにより、表面の圧縮残留応力が増加する傾向になったものと考えられる。

5) 実機構造模擬解析のまとめ

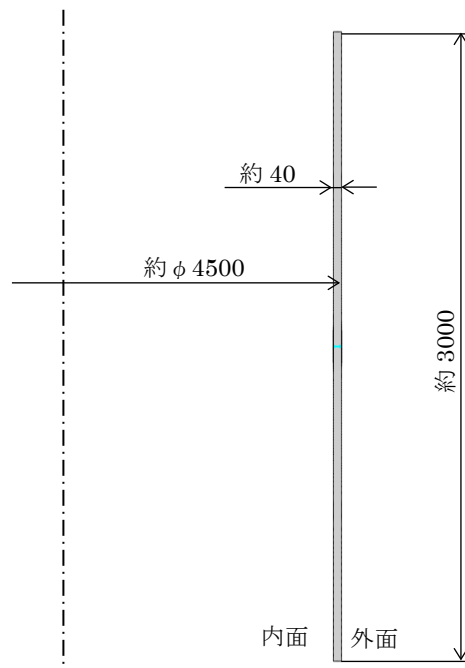
実機構造模擬解析としては、800MWe 級プラントの炉心シュラウドを対象に溶接残

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、切断による残留応力の変化を求めた。最終切断後の形状である 100mm×100mm に切断した場合でも、SP 施工範囲の表層部の圧縮残留応力が残存していることを確認した。

以上より、実機からの取出しでも計画値 100mm×100mm の形状で試験体を採取し、SP 施工部位の表層部圧縮残留応力の測定は可能であると考えられる。

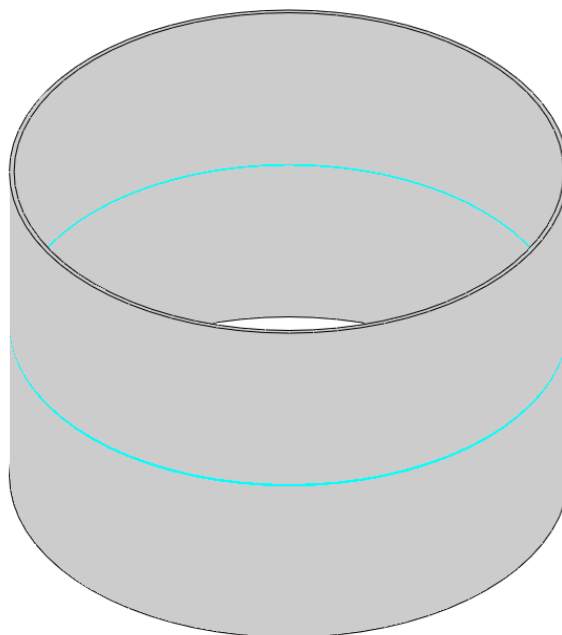
<参考文献>

- [3.3.1.2(1)-1] 令和 5 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（実機材料を活用いた健全性評価に係る研究））、令和 6 年 3 月
- [3.3.1.2(1)-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（実機材料を活用いた健全性評価に係る研究））、令和 5 年 3 月
- [3.3.1.2(1)-3] 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（JSME SNC2-2022）
- [3.3.1.2(1)-4] 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（JNES-RE-report series ; JNES-RE-2012-24）
- [3.3.1.2(1)-5] 望月正人、溶接構造物の残留応力解析手法の開発とその強度評価への応用に関する研究、京都大学提出学位論文(1997)



単位【mm】

(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) 切断模擬解析に用いる解析モデル(3次元)

図 3.3.1.2(1)-1 実機構造模擬解析に用いる解析モデル

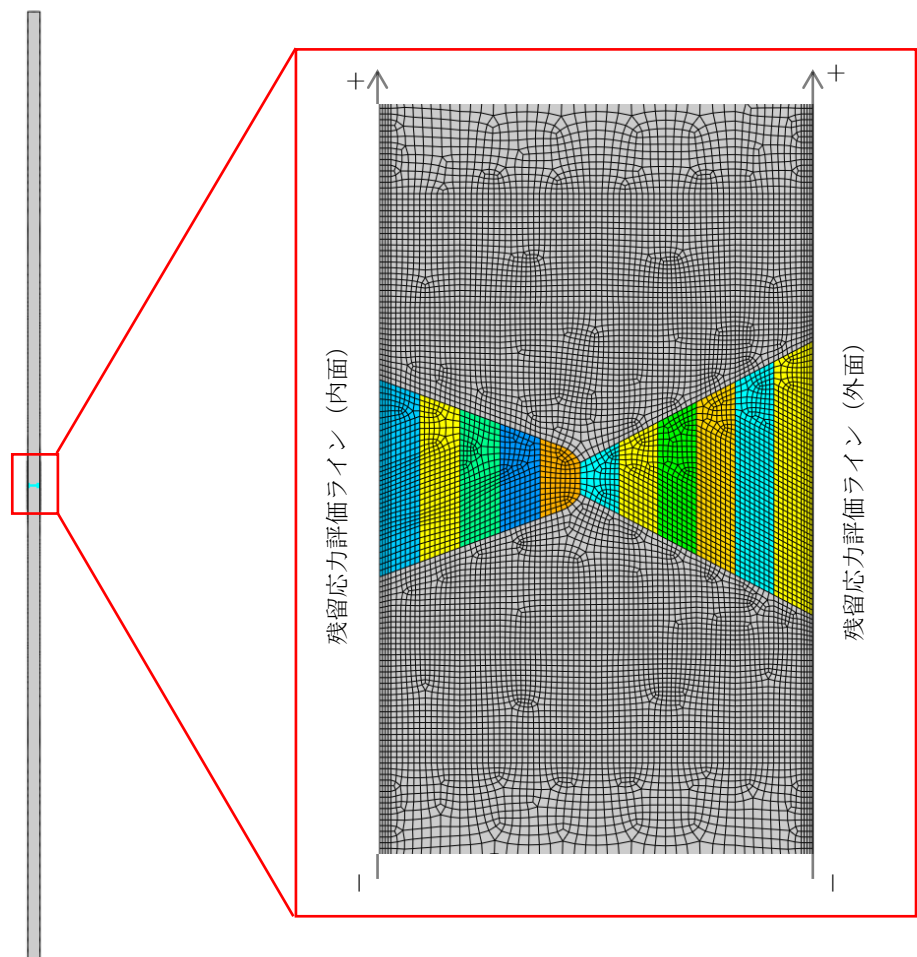
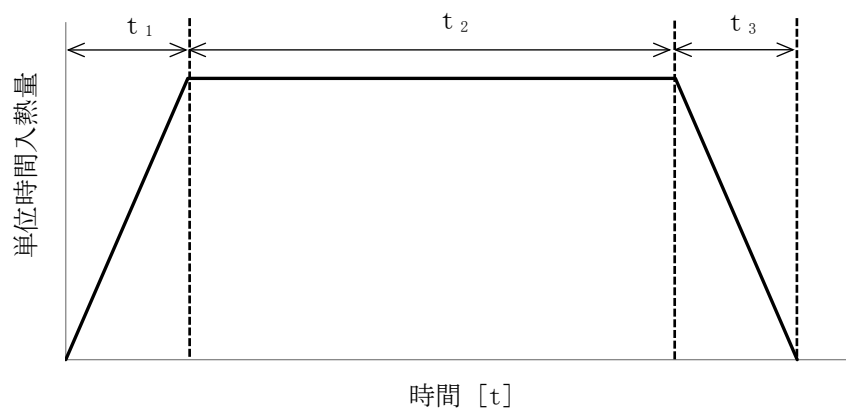
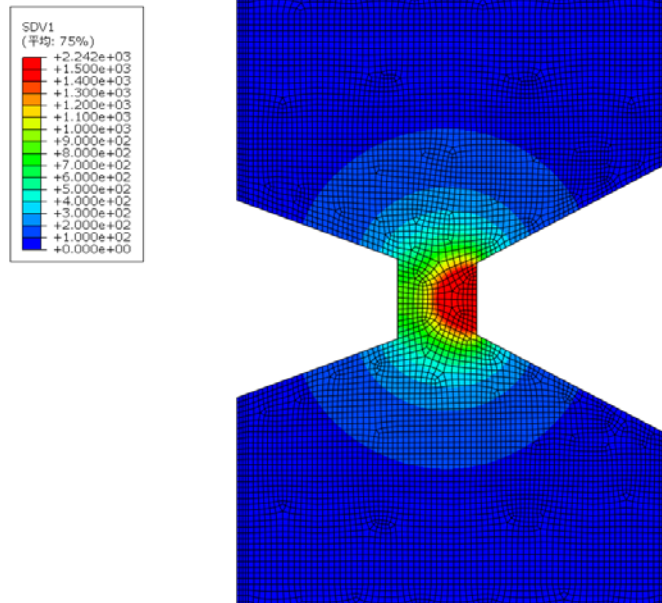


図 3.3.1.2(1)-2 2次元解析モデル（メッシュ図及び積層図）

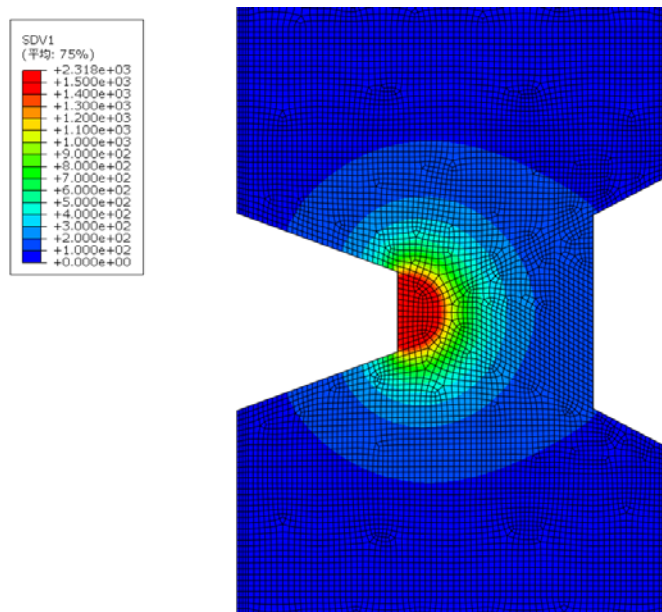


t_1 : 溶接パスにトーチが近づく時間
 t_2 : 溶接中の時間
 t_3 : 溶接パスからトーチが離れる時間

図 3.3.1.2(1)-3 溶接残留応力解析における入熱の時間変化

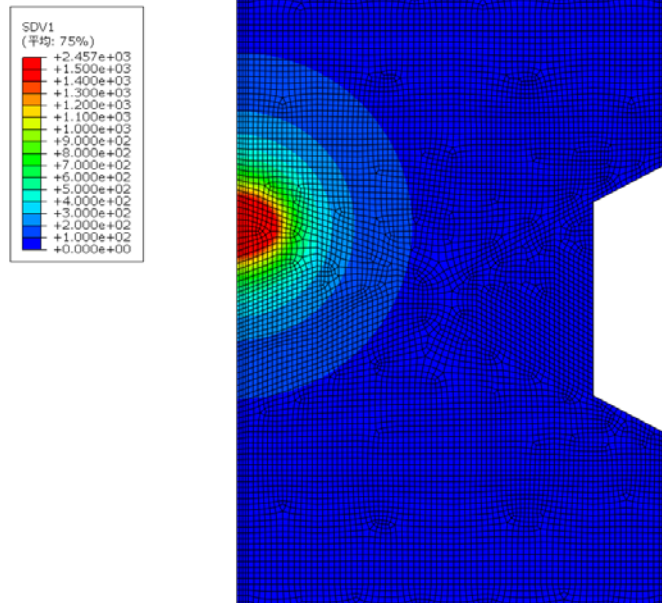


(a) 外面 1 パス目入熱時の温度分布

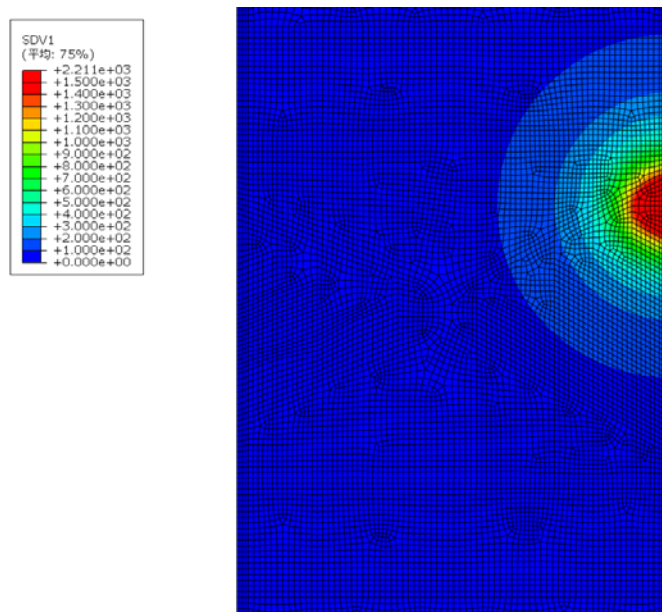


(b) 内面 1 パス目入熱時の温度分布

図 3.3.1.2(1)-5 (1/2) 温度分布解析結果

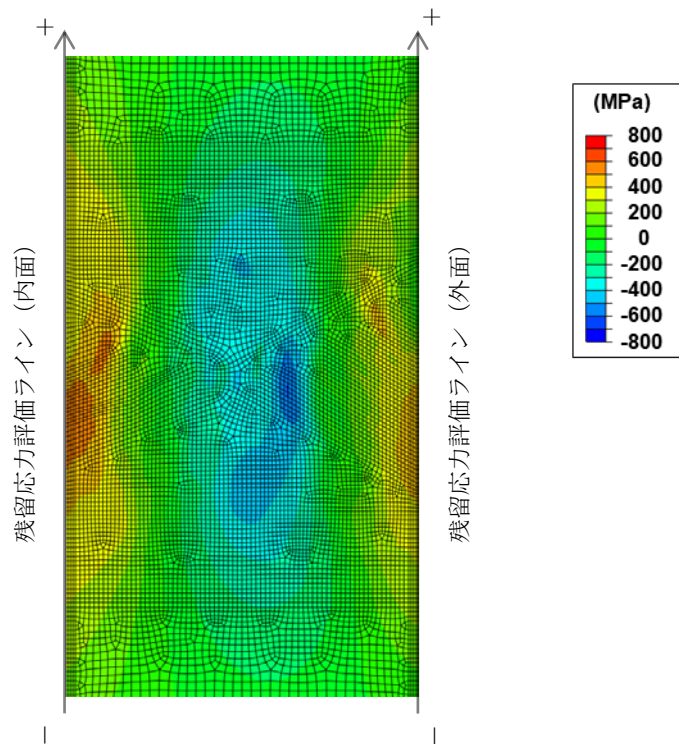


(c) 内面最終パス入熱時の温度分布

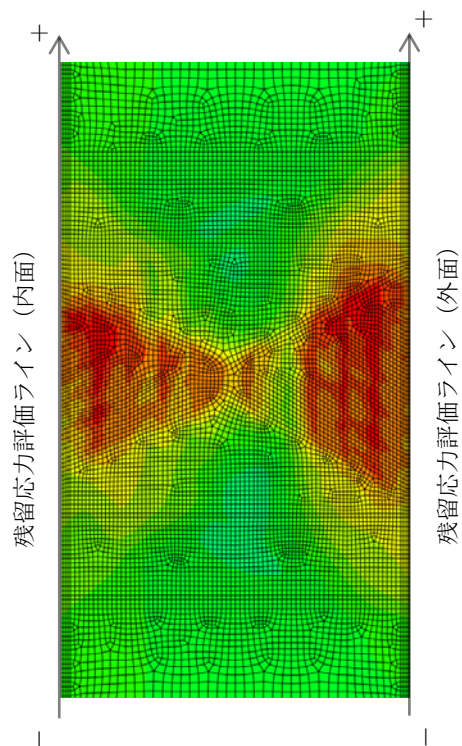


(d) 外面最終パス入熱時の温度分布

図 3.3.1.2(1)-5 (2/2) 温度分布解析結果

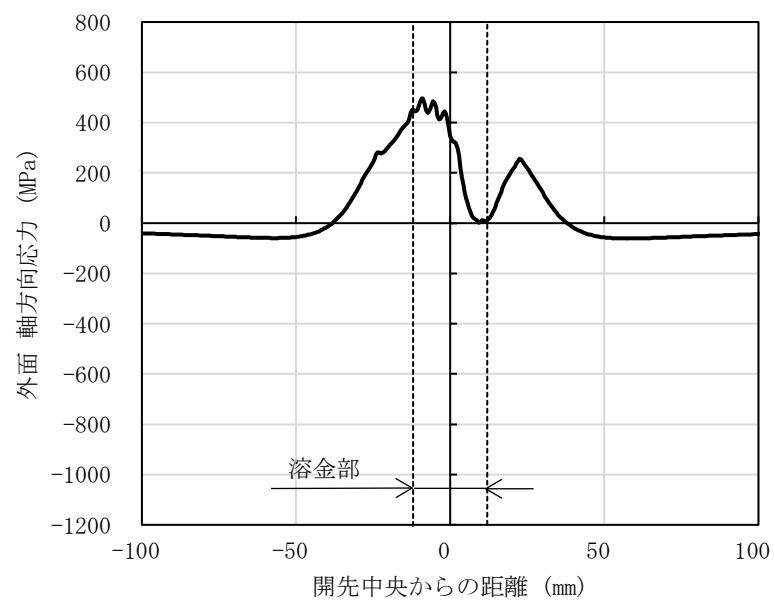


(a) 軸方向応力

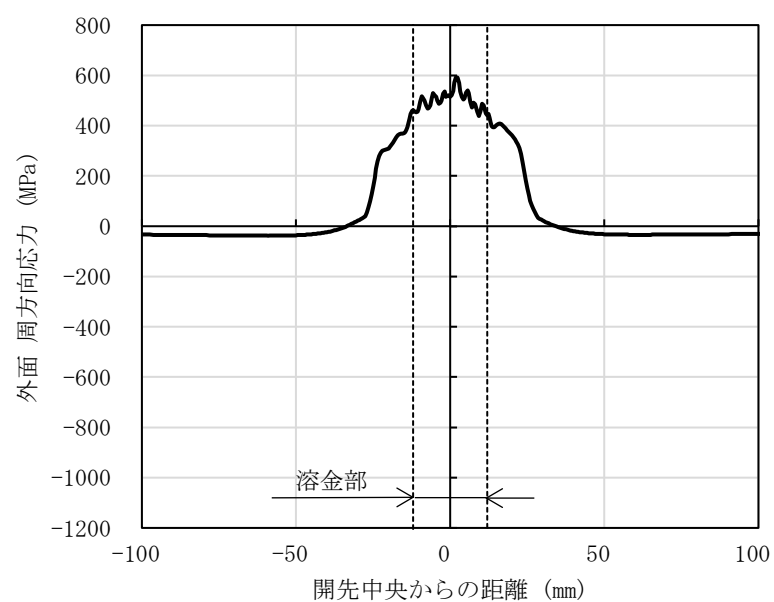


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-6 溶接残留応力解析結果 (残留応力コンター図)

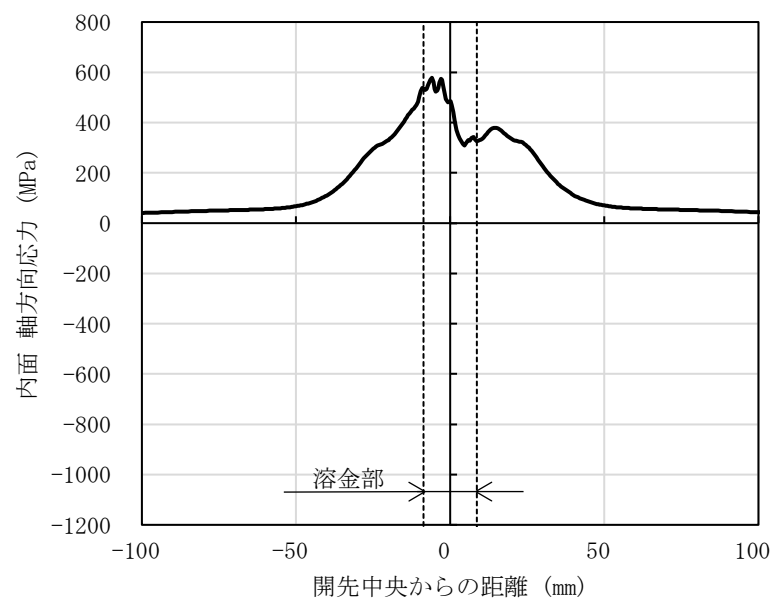


(a) 軸方向応力

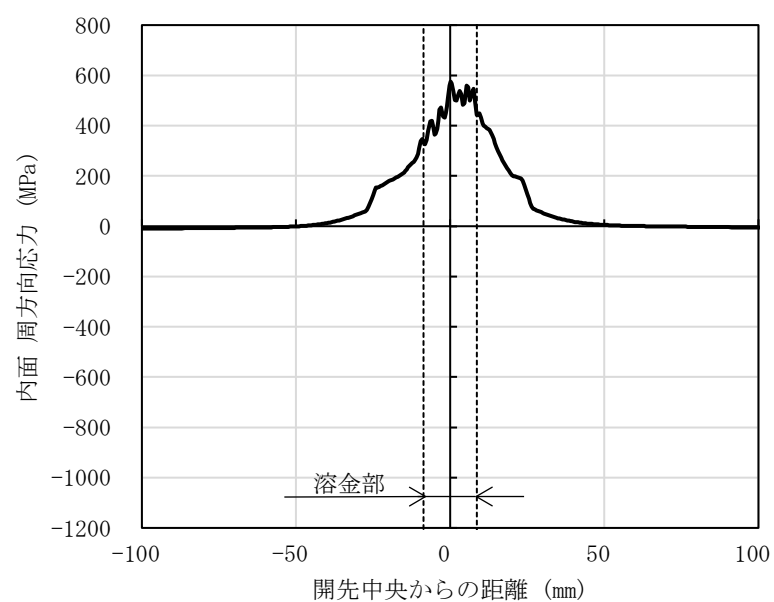


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-7 溶接残留応力解析結果（外面、応力分布）



(a) 軸方向応力



(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-8 溶接残留応力解析結果 (内面、応力分布)

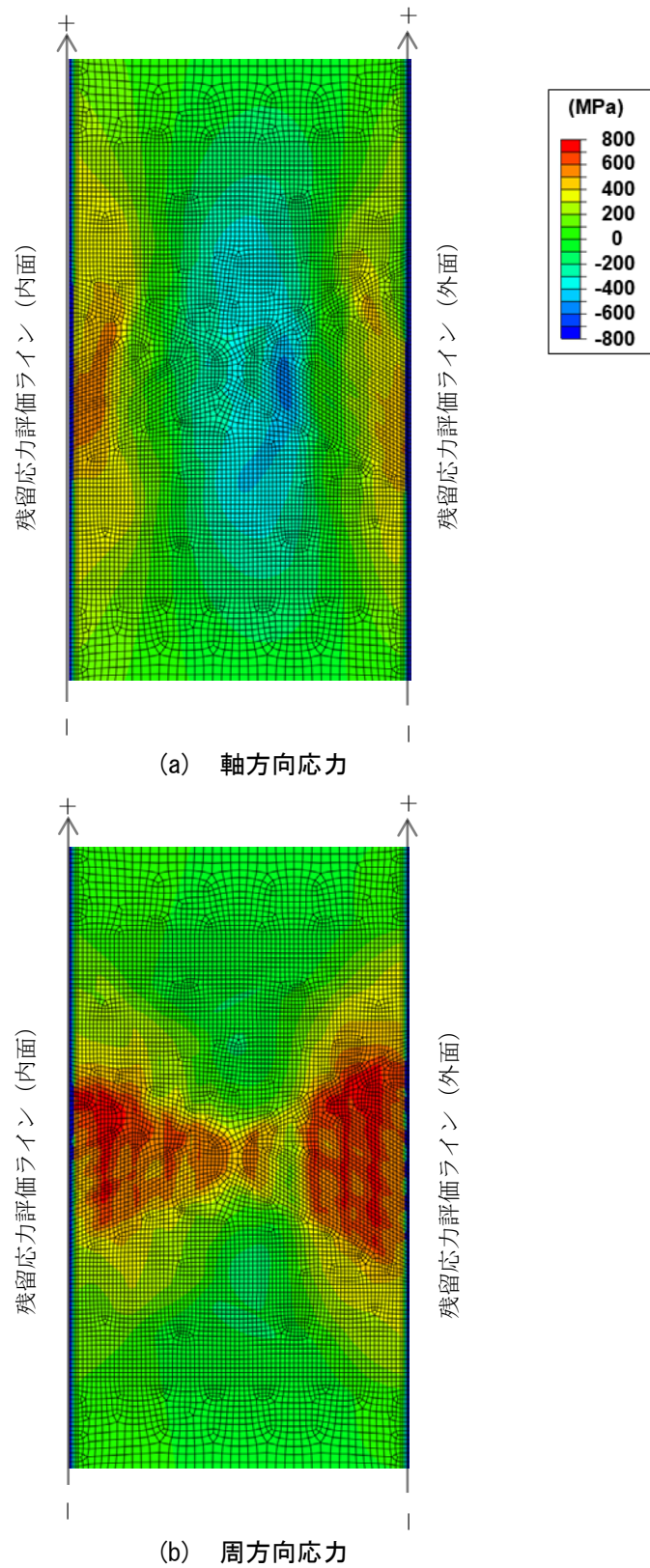
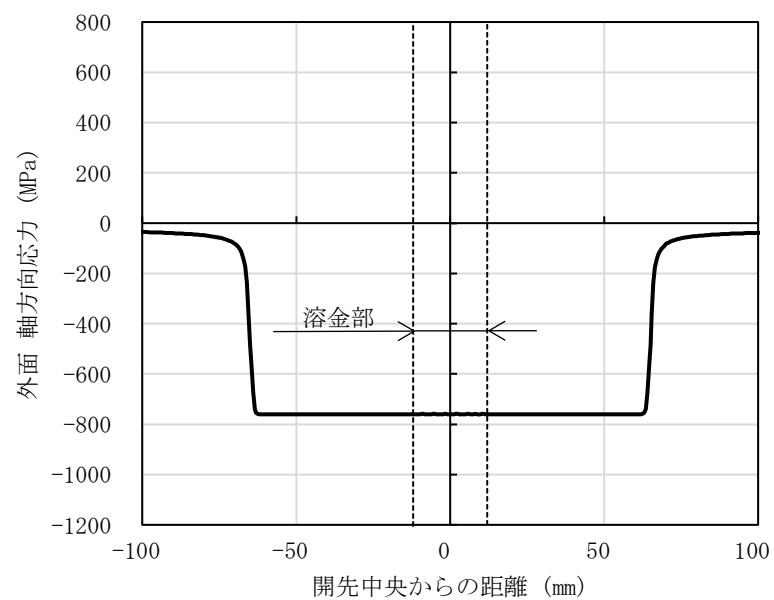
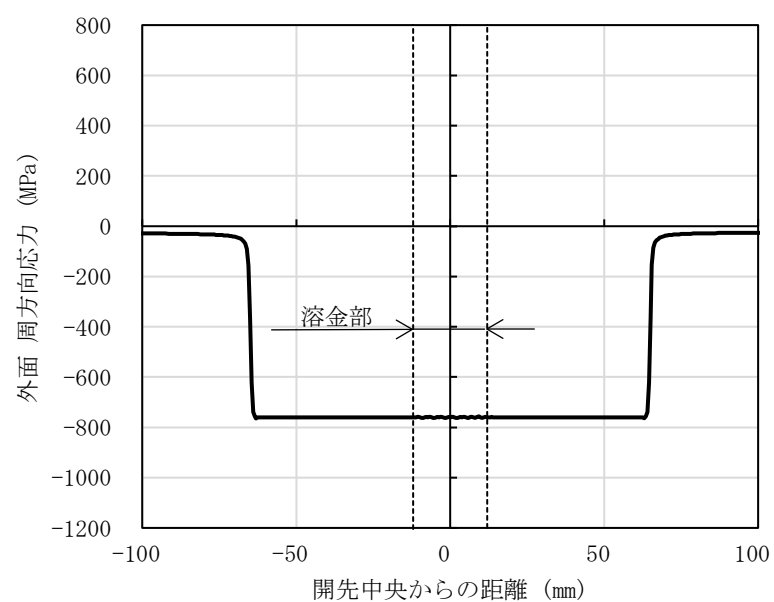


図 3.3.1.2(1)-9 SP による残留応力解析結果 (残留応力コンター図)

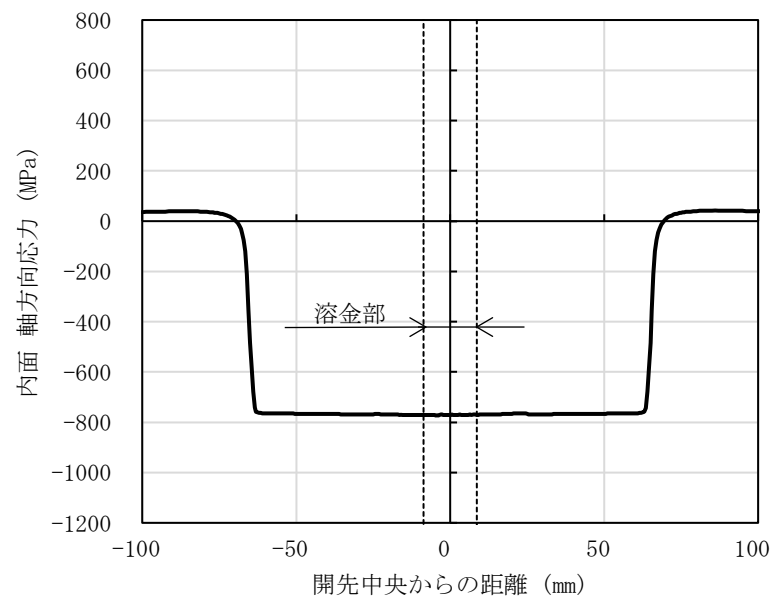


(a) 軸方向応力

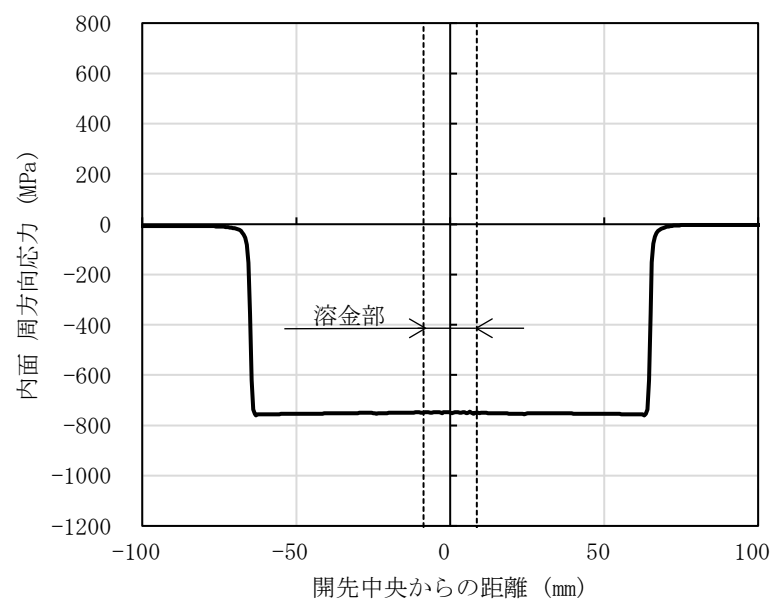


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-10 SP による残留応力解析結果 (外面、応力分布)

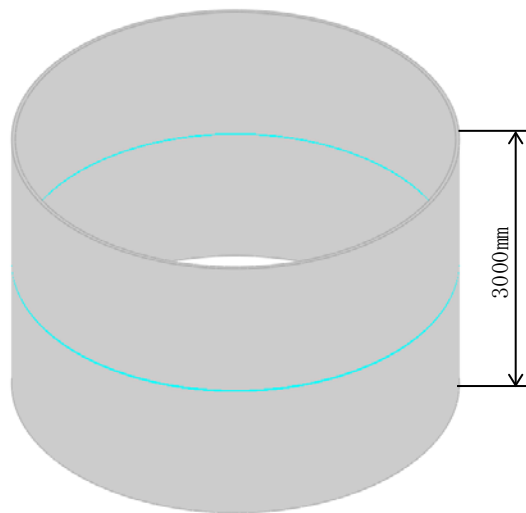


(a) 軸方向応力

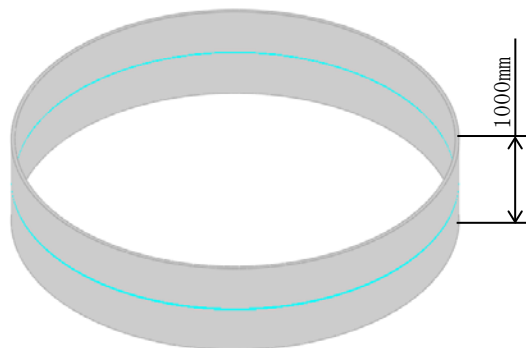


(b) 周方向応力

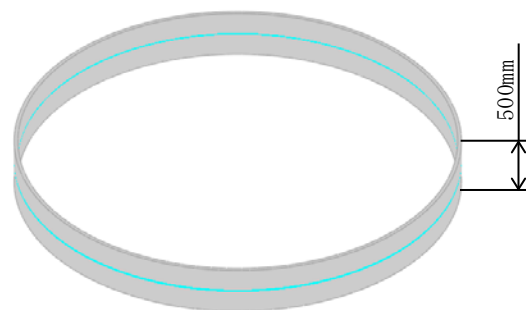
図 3.3.1.2(1)-11 SP による残留応力解析結果 (内面、応力分布)



(a) 炉心シュラウド全周

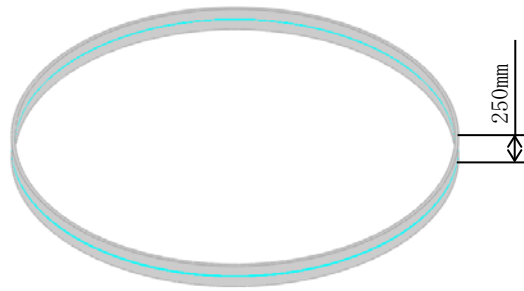


(b) 1000mm リング切出し

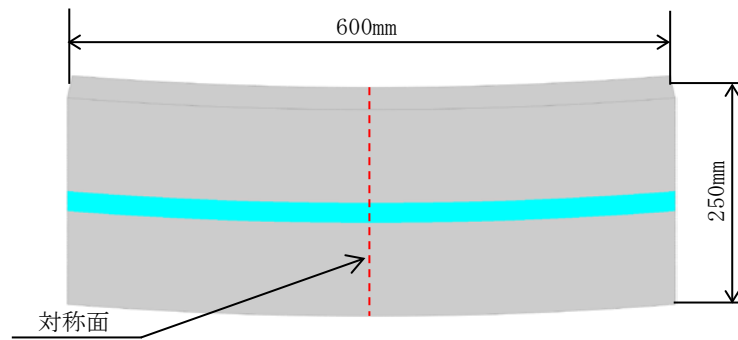


(c) 500mm リング切出し

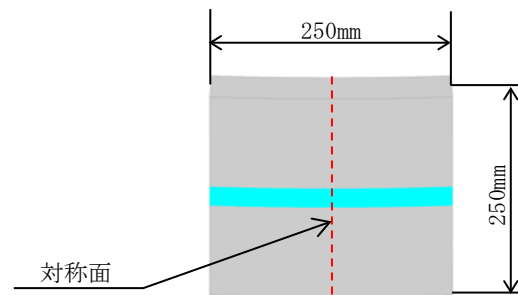
図 3.3.1.2(1)-12 (1/2) 切断模擬解析 切断条件



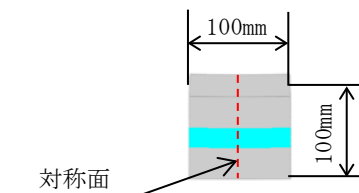
(d) 250mm リング切出し



(e) 600mm × 250mm 切出し



(f) 250mm × 250mm 切出し



(g) 100mm × 100mm 切出し

図 3.3.1.2(1)-12 (2/2) 切断模擬解析 切断条件

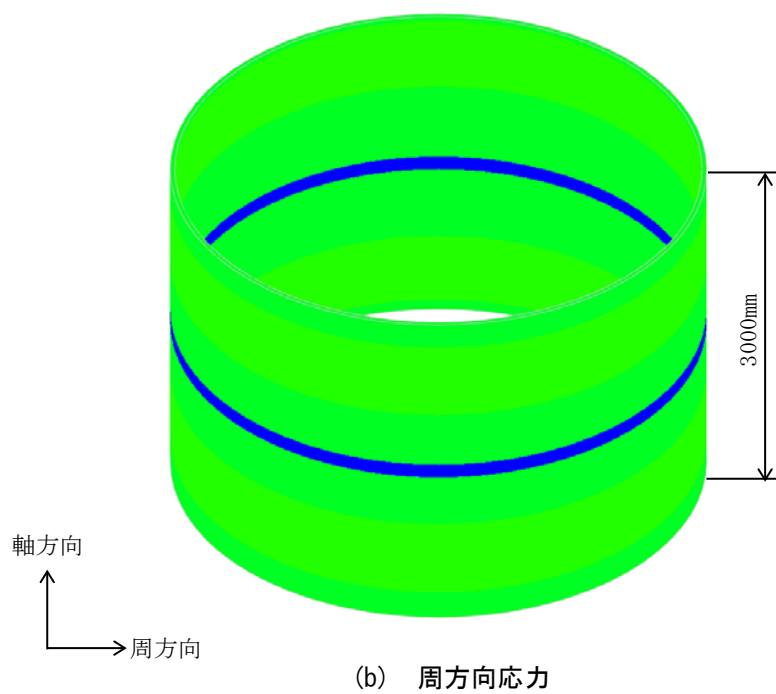
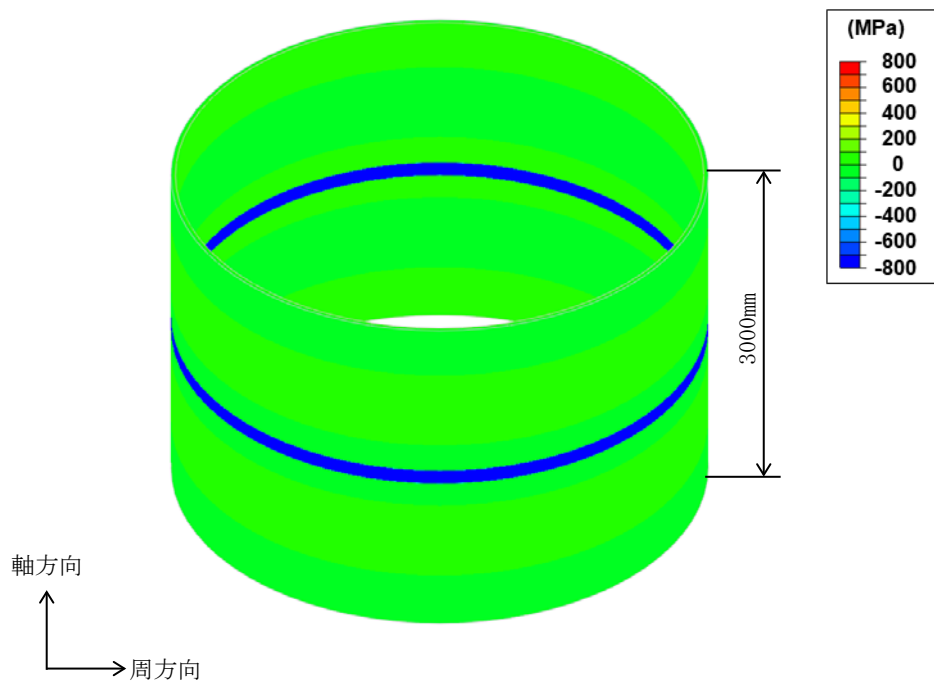


図 3.3.1.2(1)-13 切断模擬解析結果（炉心シュラウド全周、残留応力コンター図）

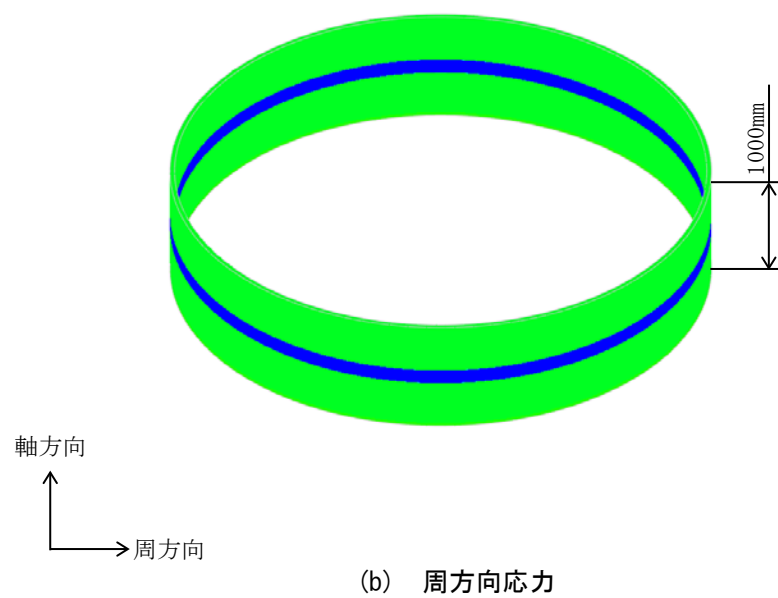
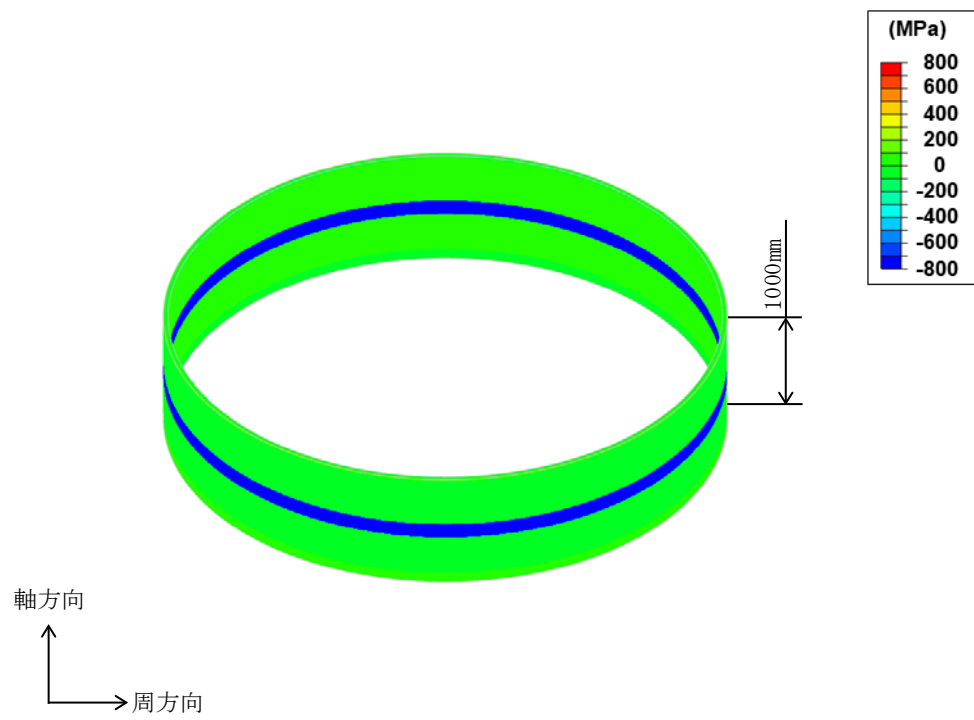


図 3.3.1.2(1)-14 切断模擬解析結果 (1000mm リング切出し、残留応力コンター図)

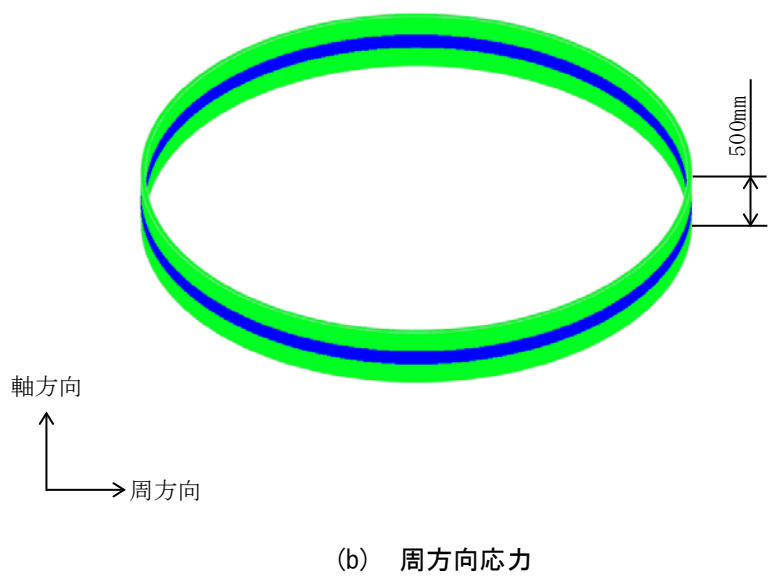
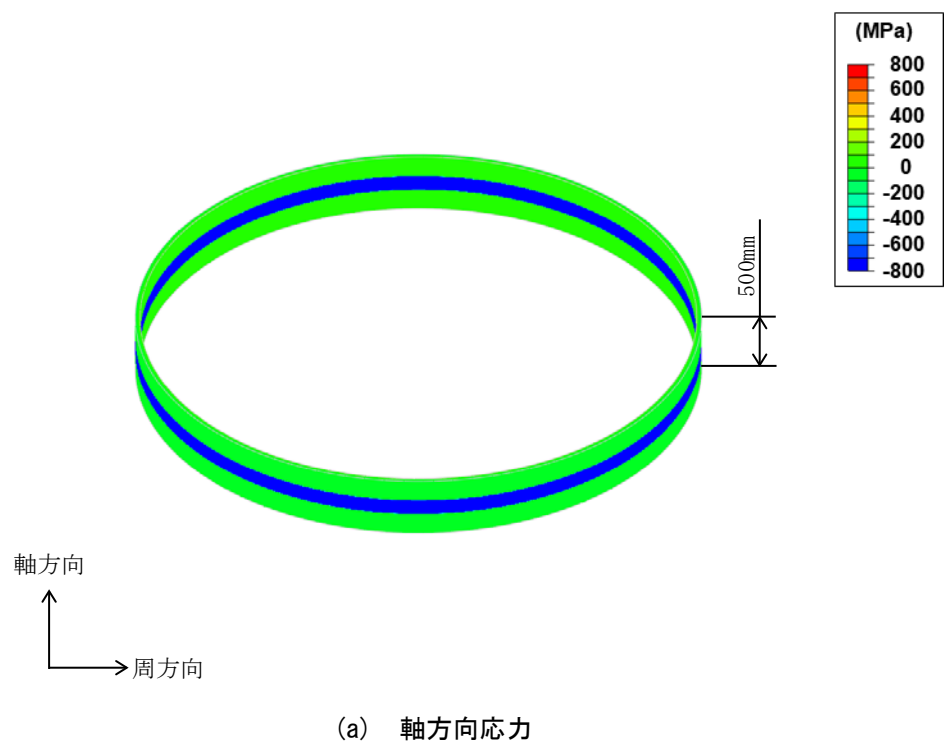
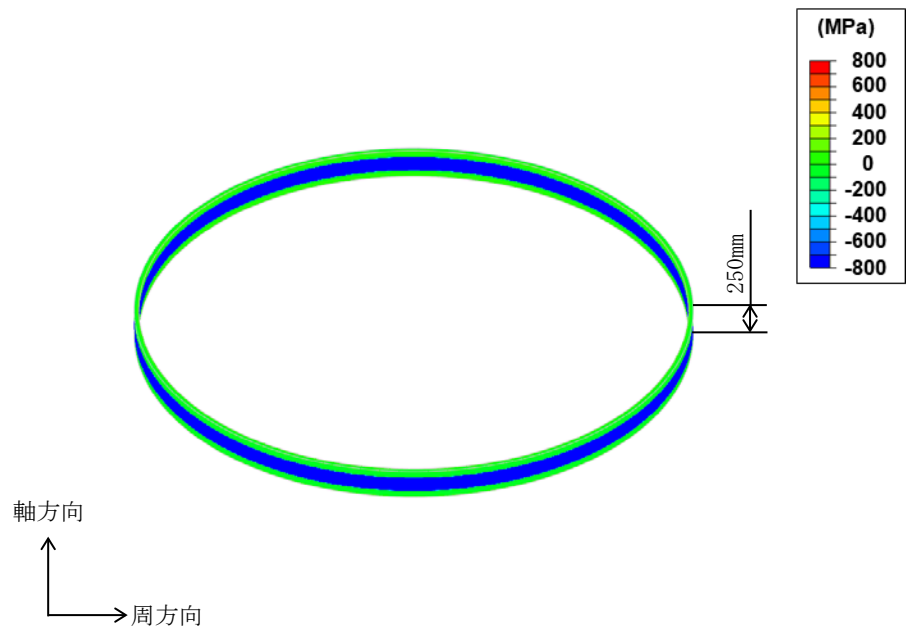
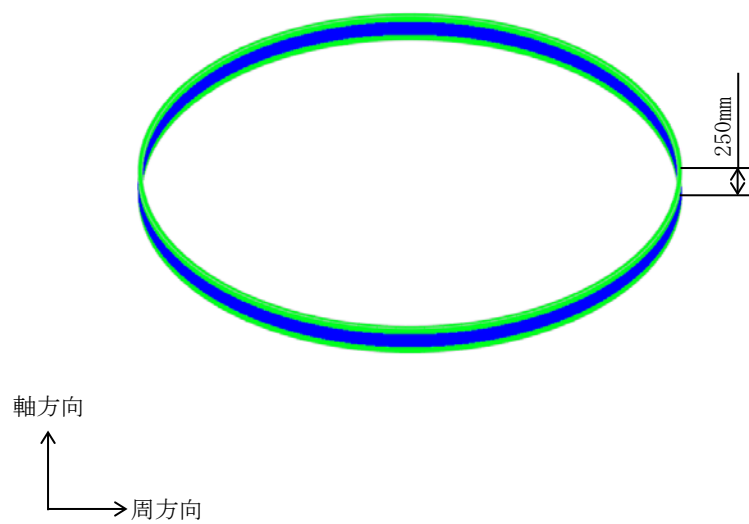


図 3.3.1.2(1)-15 切断模擬解析結果 (500mm リング切出し、残留応力コンター図)



(a) 軸方向応力



(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-16 切断模擬解析結果 (250mm リング切出し、残留応力コンター図)

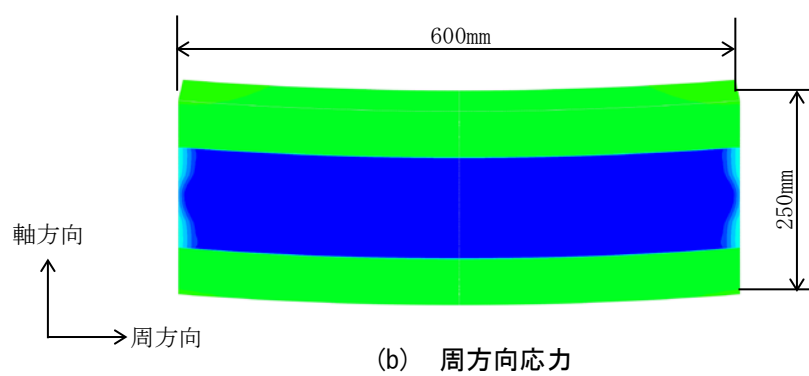
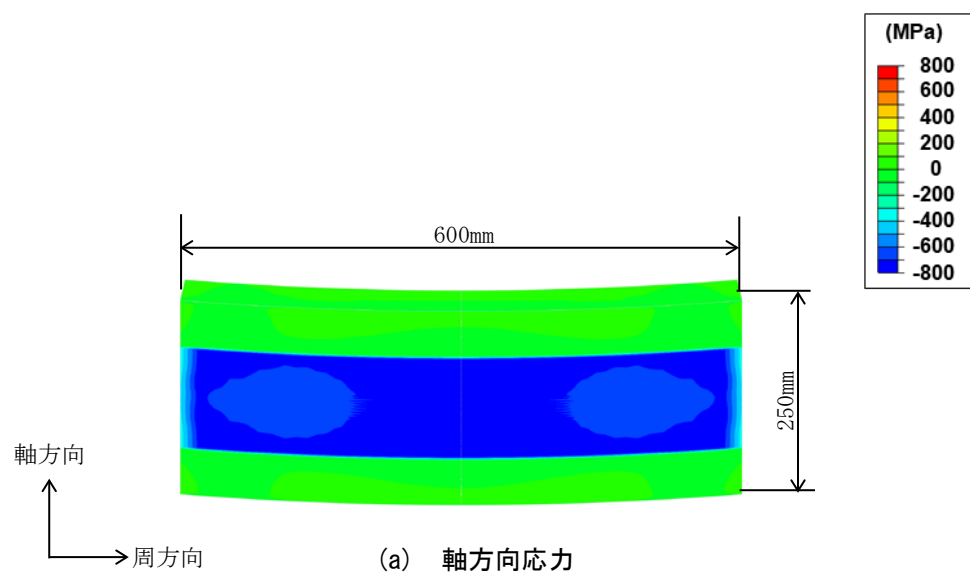


図 3.3.1.2(1)-17 切断模擬解析結果 (600mm×250mm 切出し、残留応力コンター図)

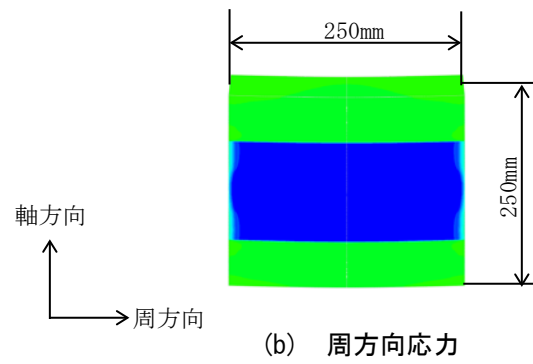
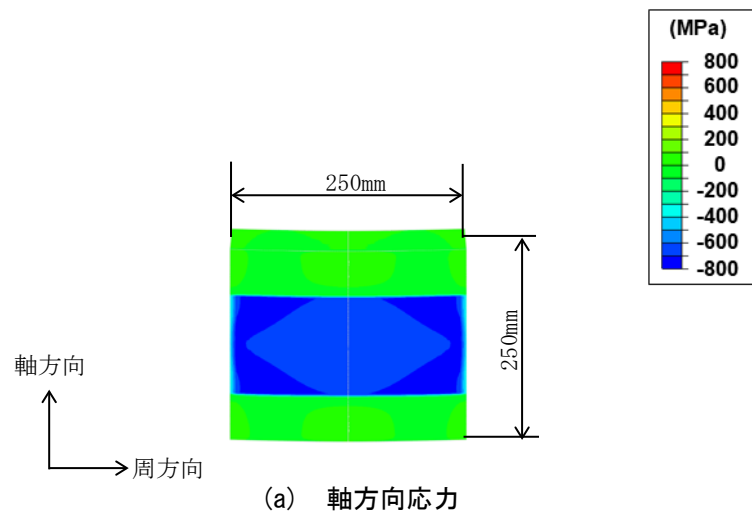
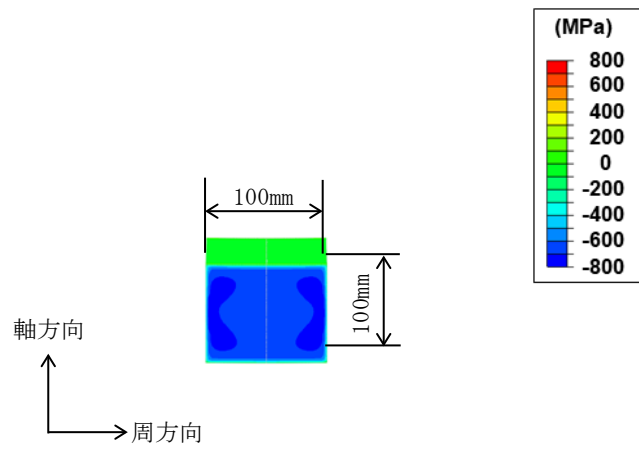
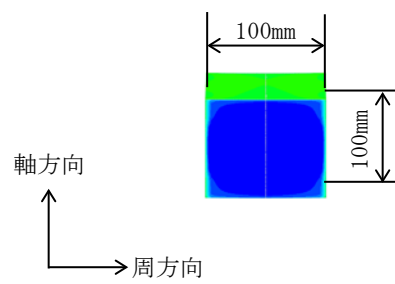


図 3.3.1.2(1)-18 切断模擬解析結果 (250mm×250mm 切出し、残留応力コンター図)

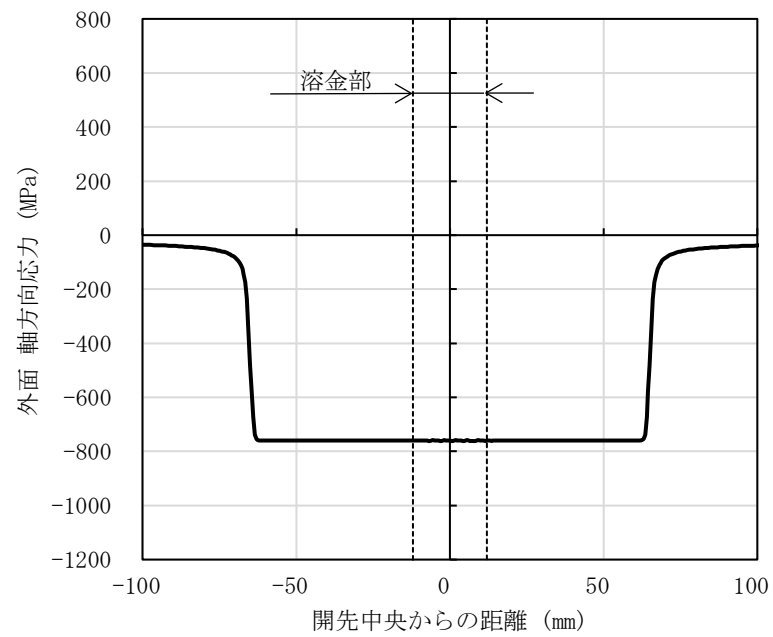


(a) 軸方向応力

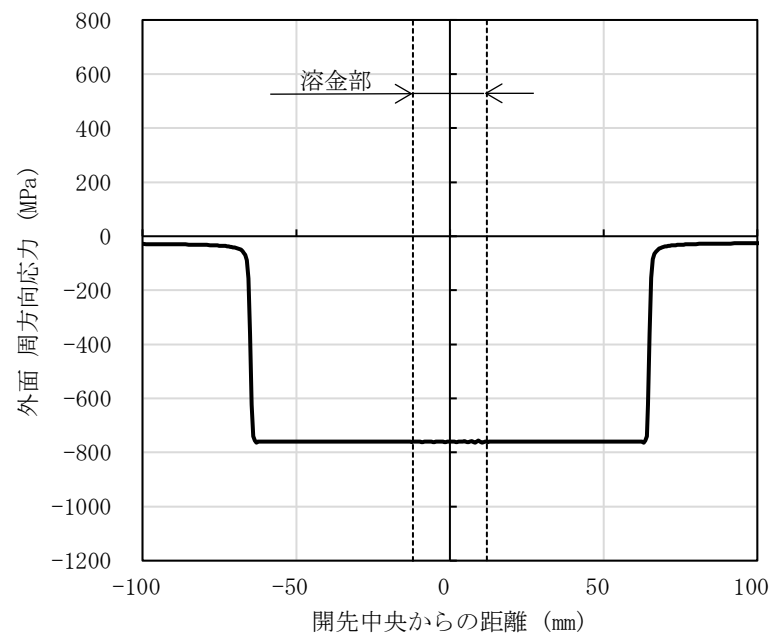


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-19 切断模擬解析結果 (100mm×100mm 切出し、残留応力コンター図)

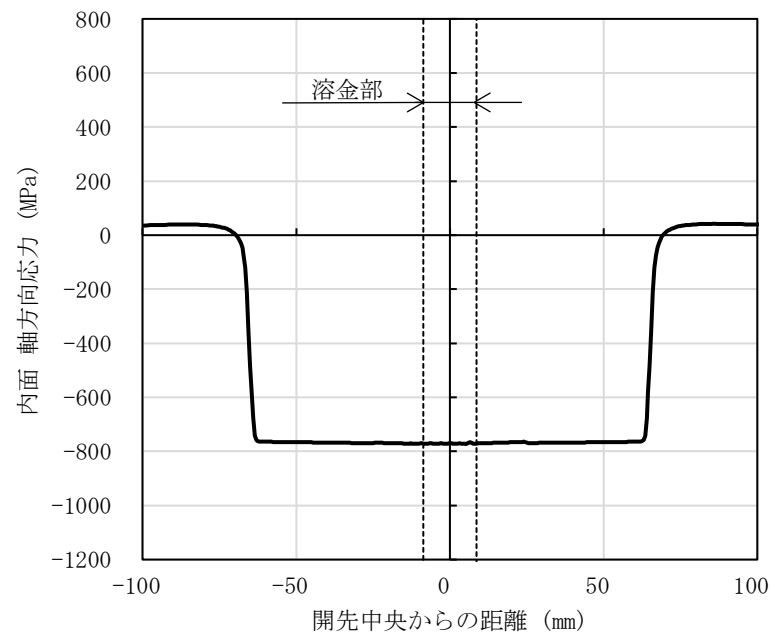


(a) 軸方向応力

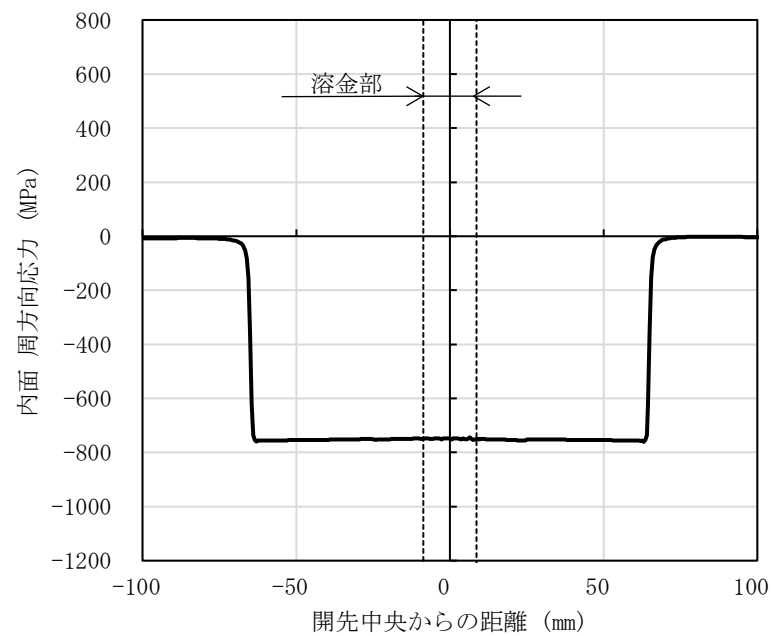


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-20 切断模擬解析結果（炉心シュラウド全周、外面、応力分布）

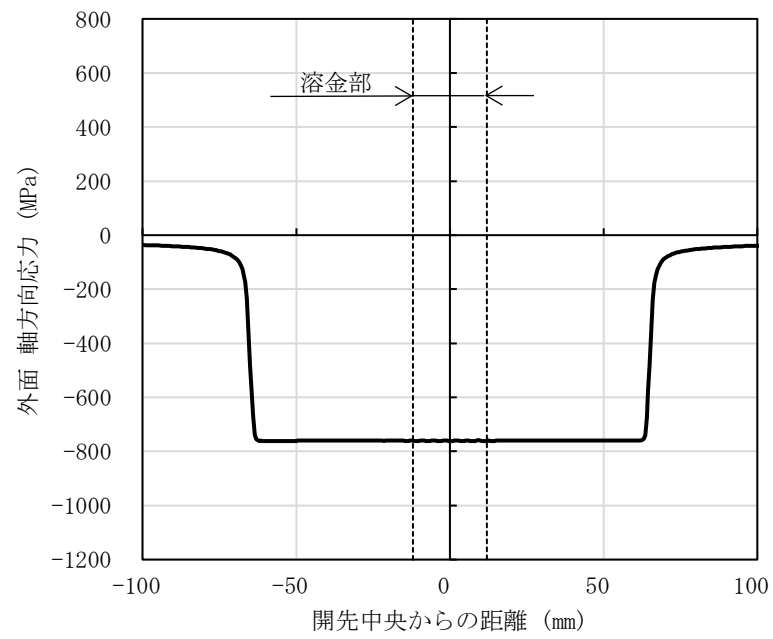


(a) 軸方向応力

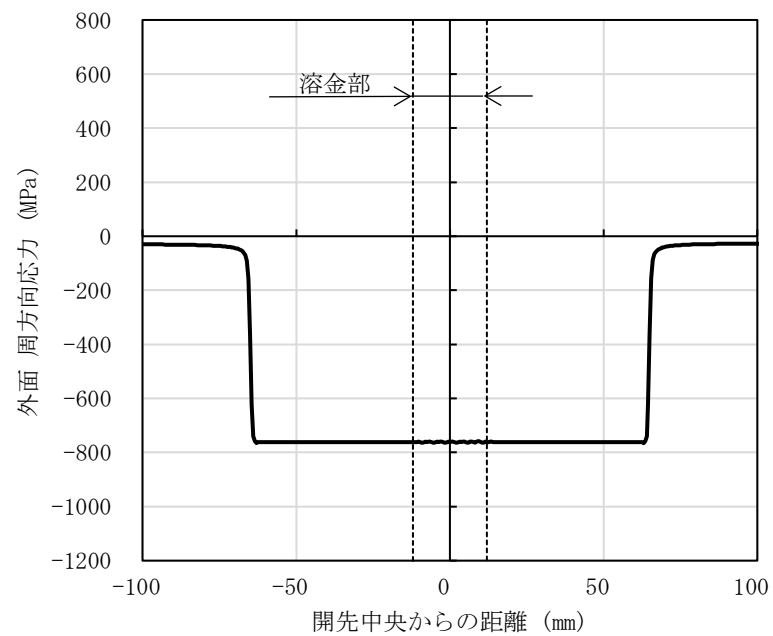


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-21 切断模擬解析結果（炉心シュラウド全周、内面、応力分布）

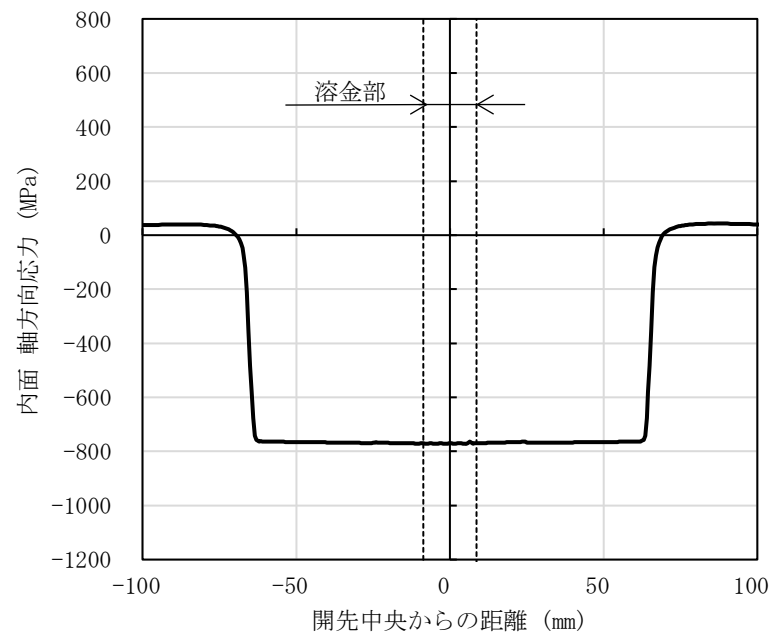


(a) 軸方向応力

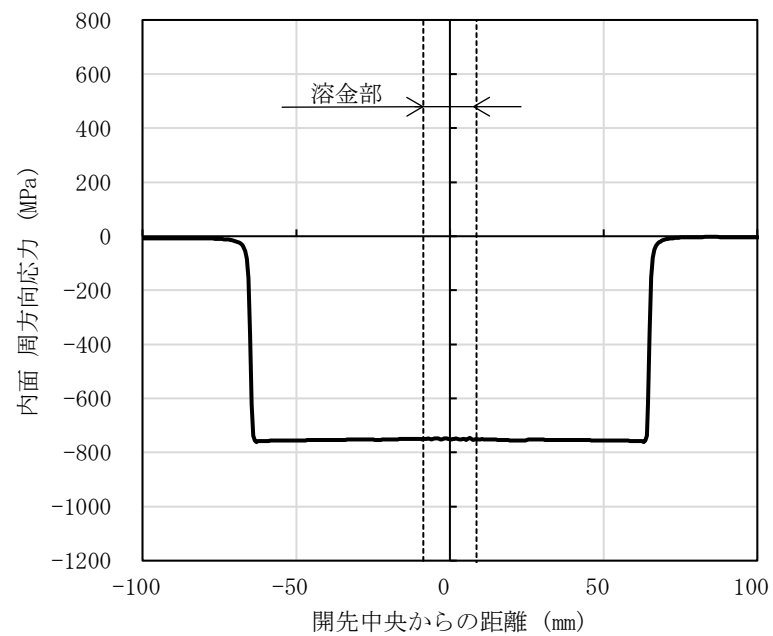


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-22 切断模擬解析結果 (1000mm リング切出し、外面、応力分布)

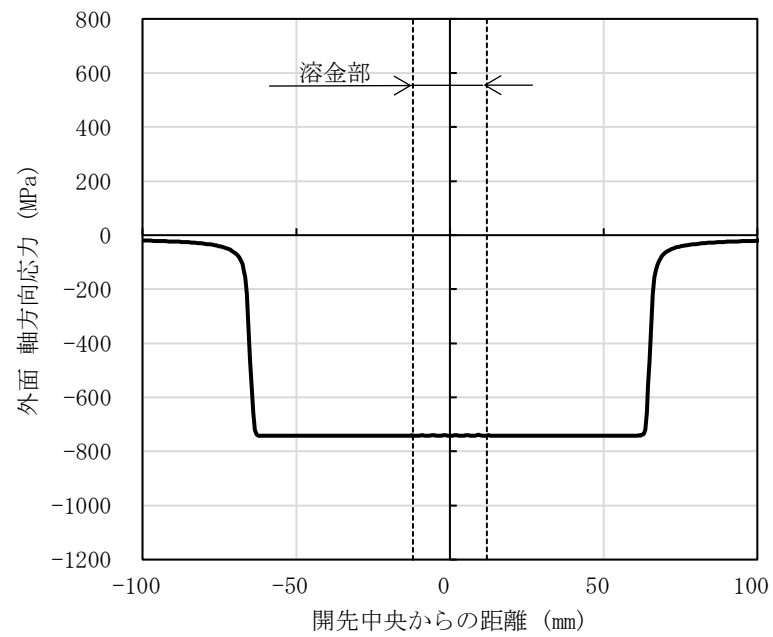


(a) 軸方向応力

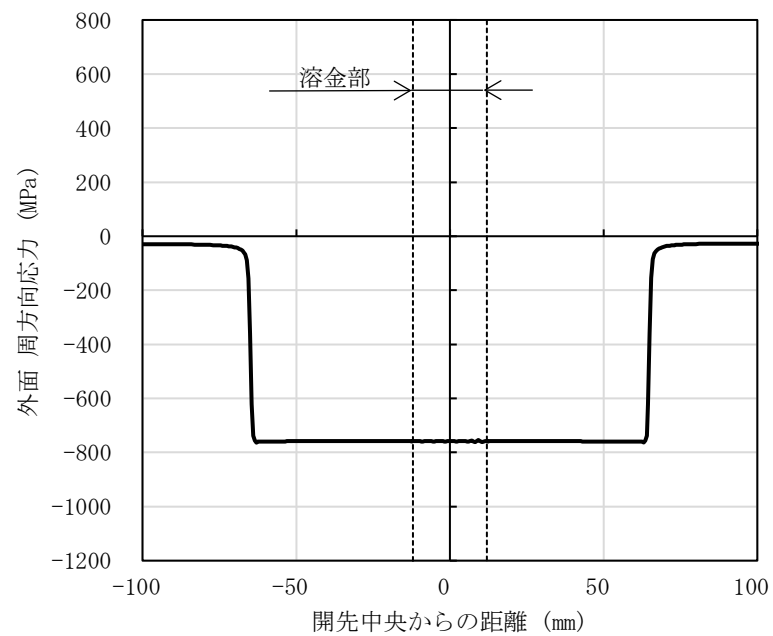


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-23 切断模擬解析結果 (1000mm リング切出し、内面、応力分布)

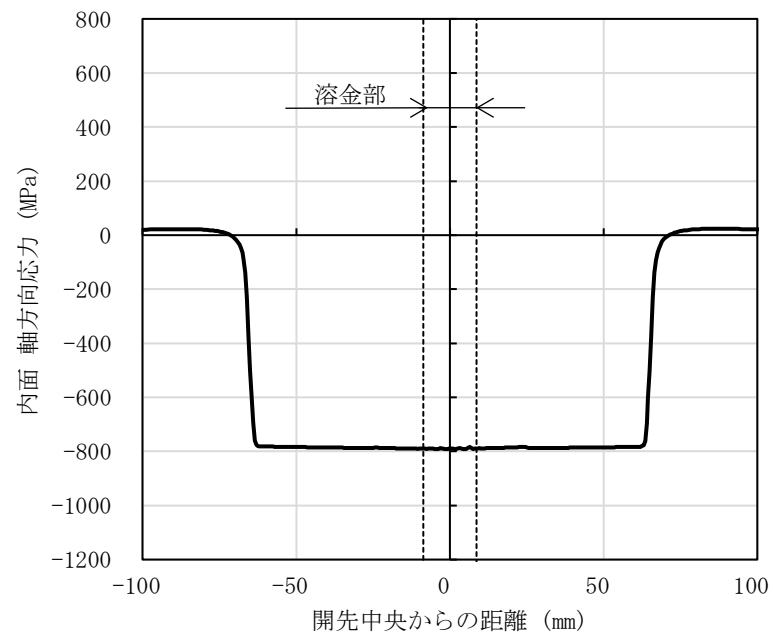


(a) 軸方向応力

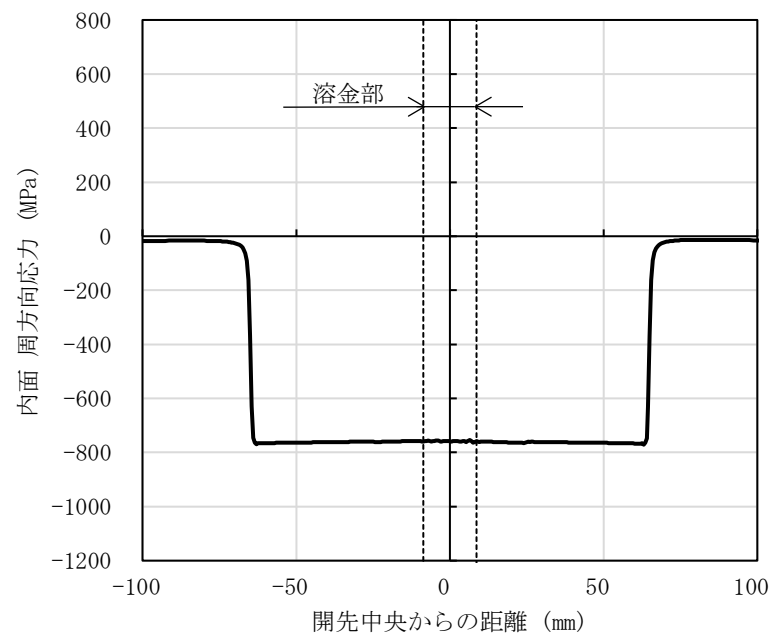


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-24 切断模擬解析結果 (500mm リング切出し、外面、応力分布)

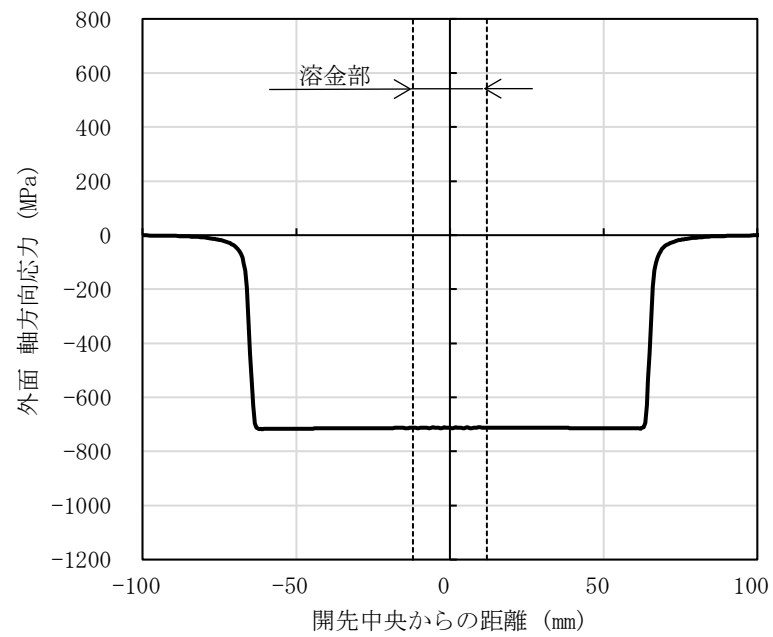


(a) 軸方向応力

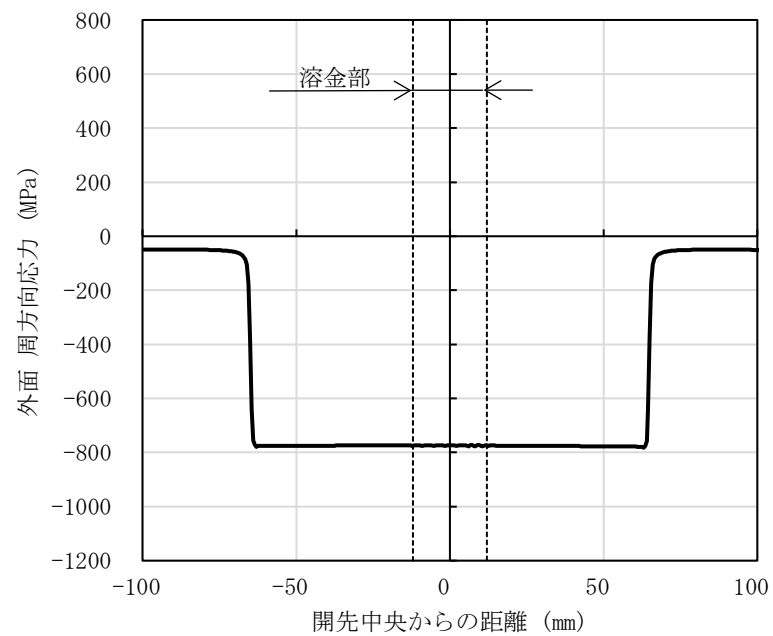


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-25 切断模擬解析結果 (500mm リング切出し、内面、応力分布)

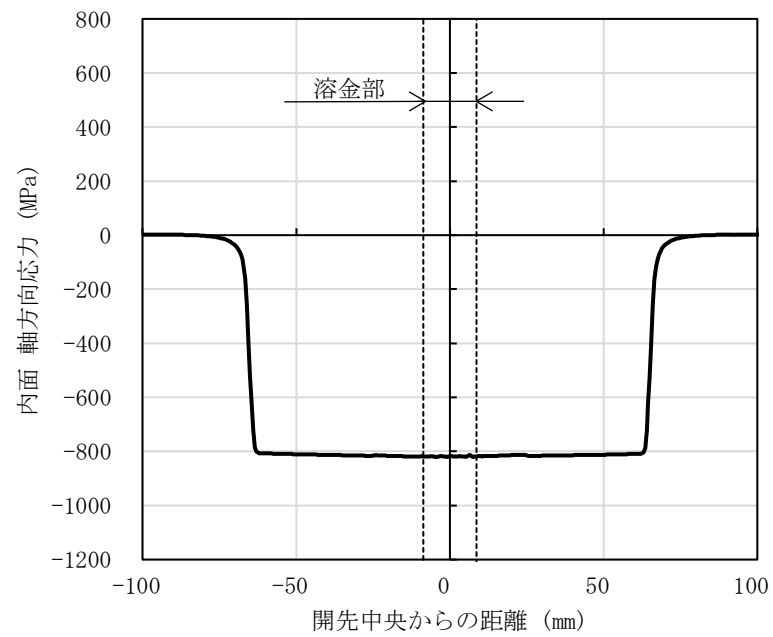


(a) 軸方向応力

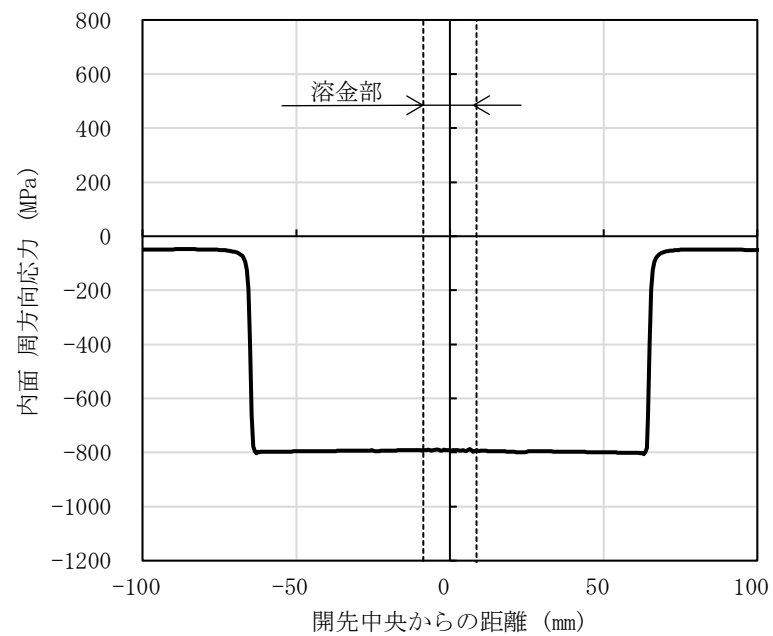


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-26 切断模擬解析結果 (250mm リング切出し、外面、応力分布)

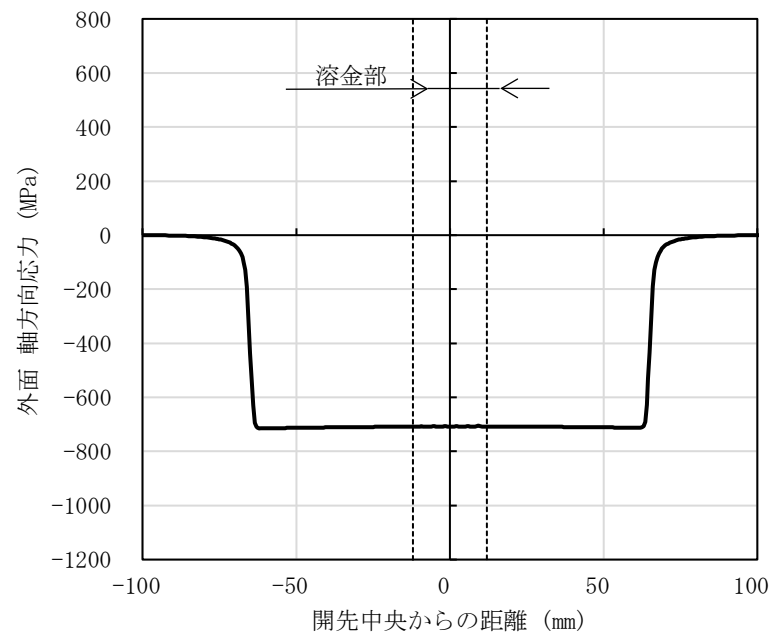


(a) 軸方向応力

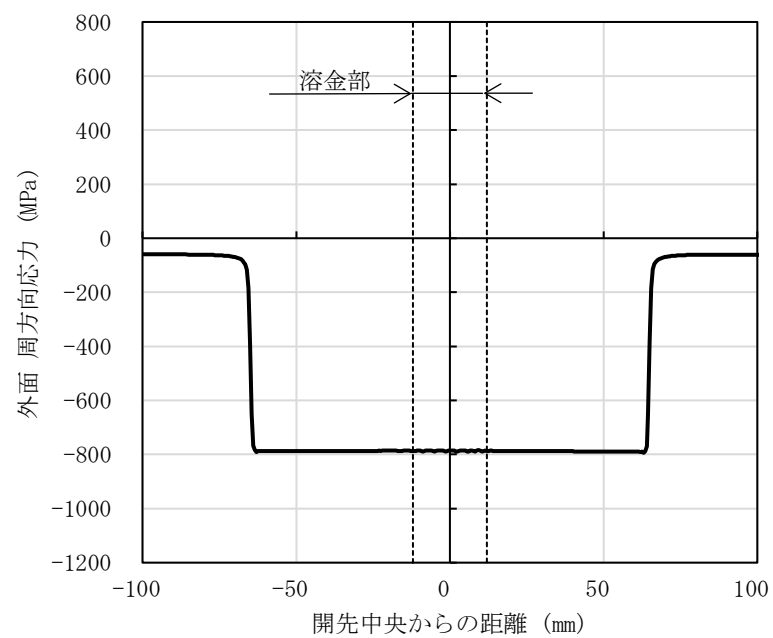


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-27 切断模擬解析結果 (250mm リング切出し、内面、応力分布)

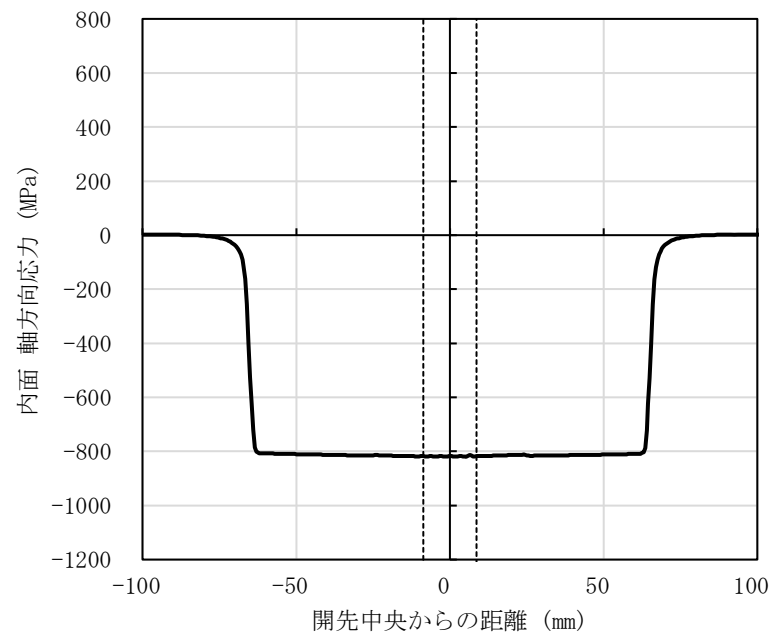


(a) 軸方向応力

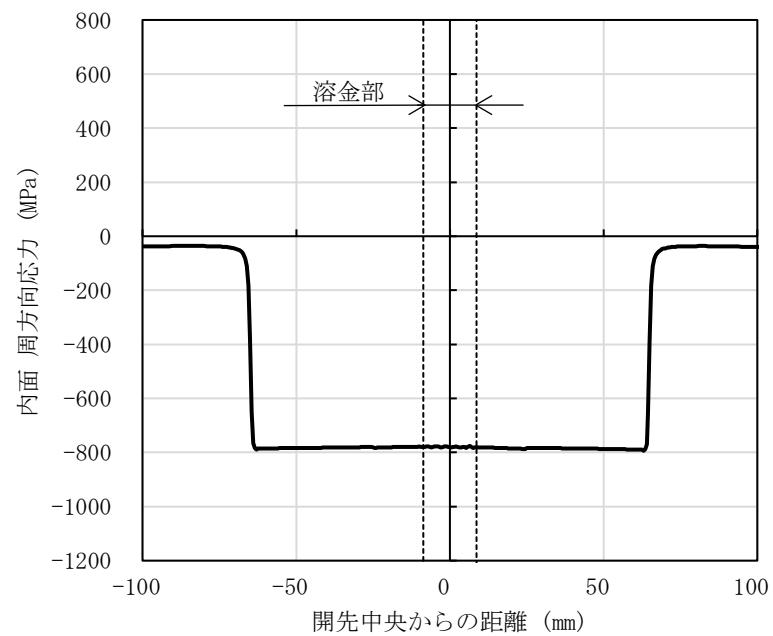


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-28 切断模擬解析結果 (600mm×250mm 切出し、外面、応力分布)

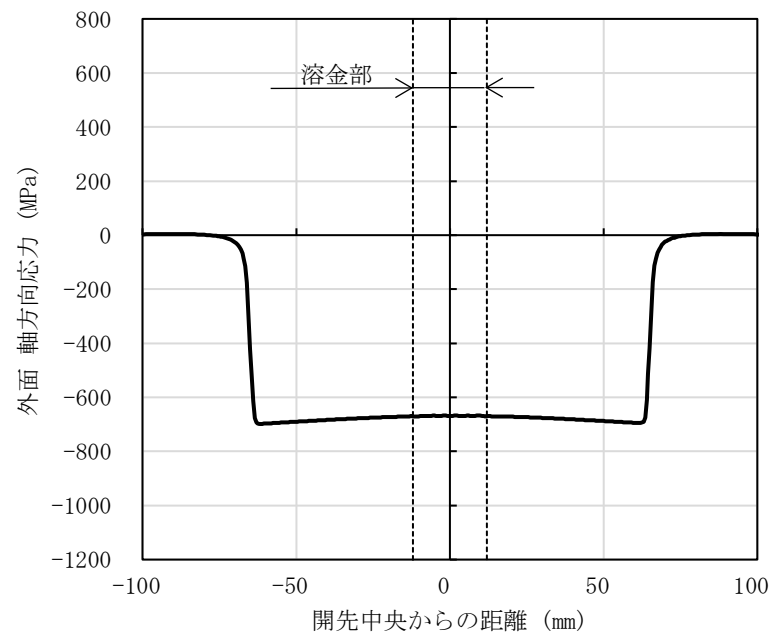


(a) 軸方向応力

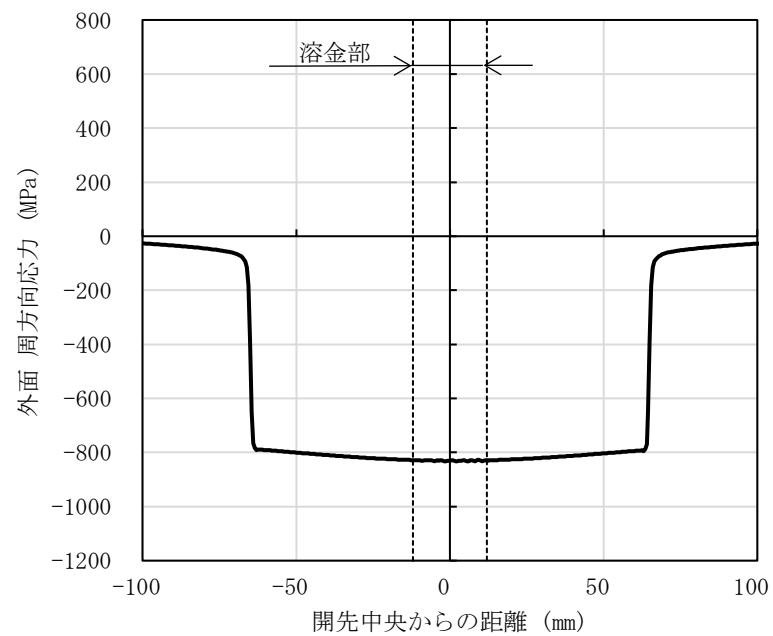


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-29 切断模擬解析結果 (600mm×250mm 切出し、内面、応力分布)

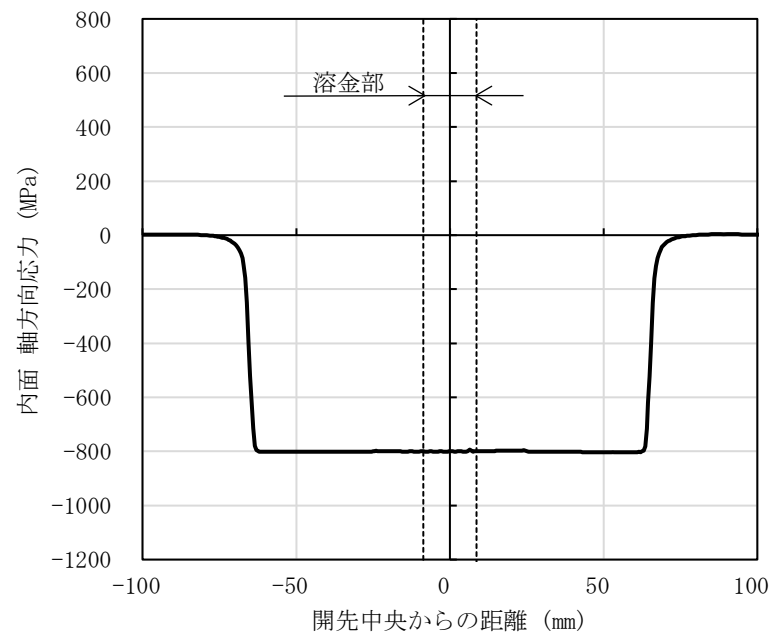


(a) 軸方向応力

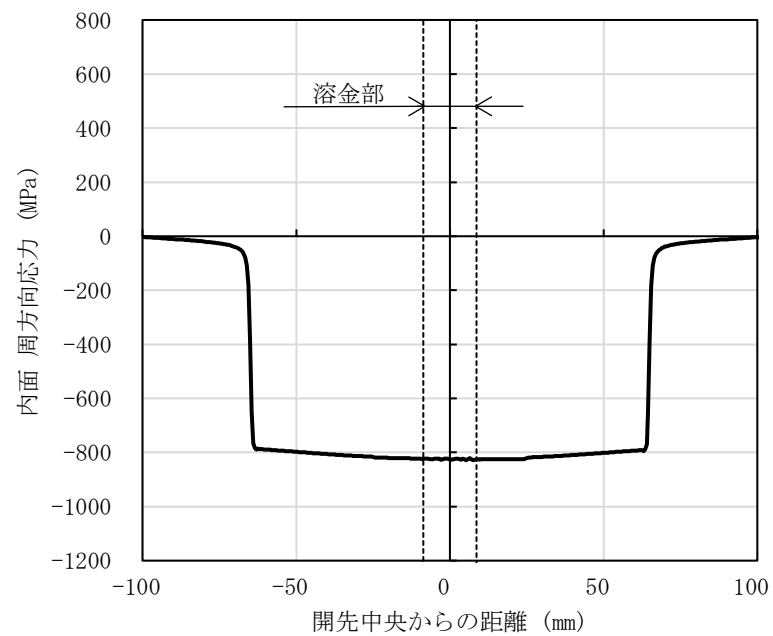


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-30 切断模擬解析結果 (250mm×250mm 切出し、外面、応力分布)

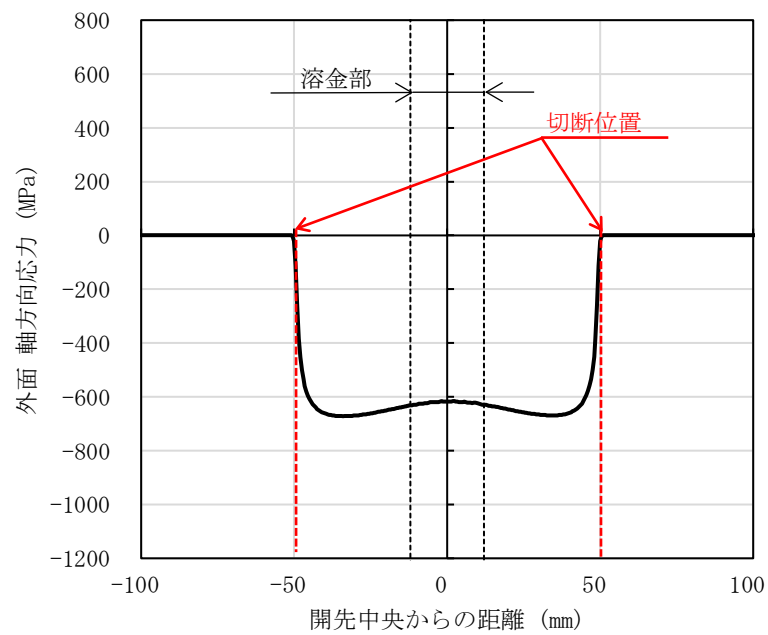


(a) 軸方向応力

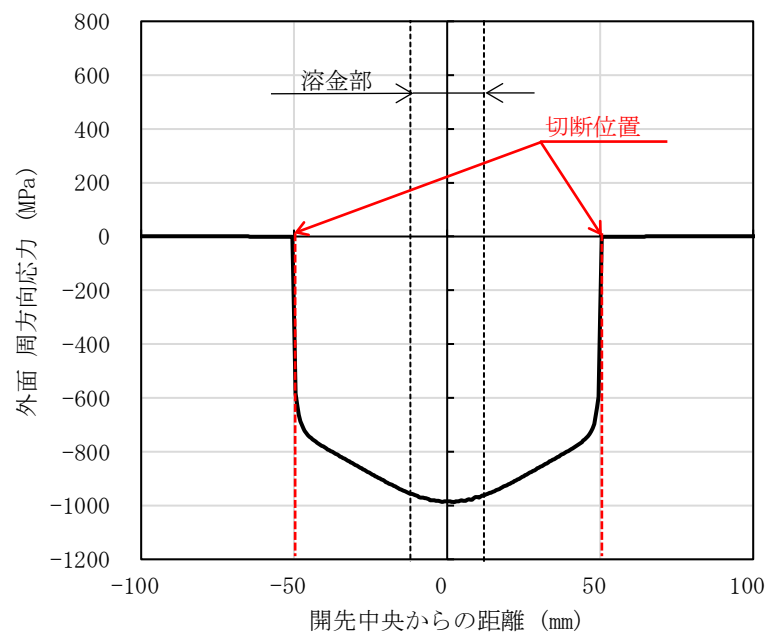


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-31 切断模擬解析結果 (250mm×250mm 切出し、内面、応力分布)

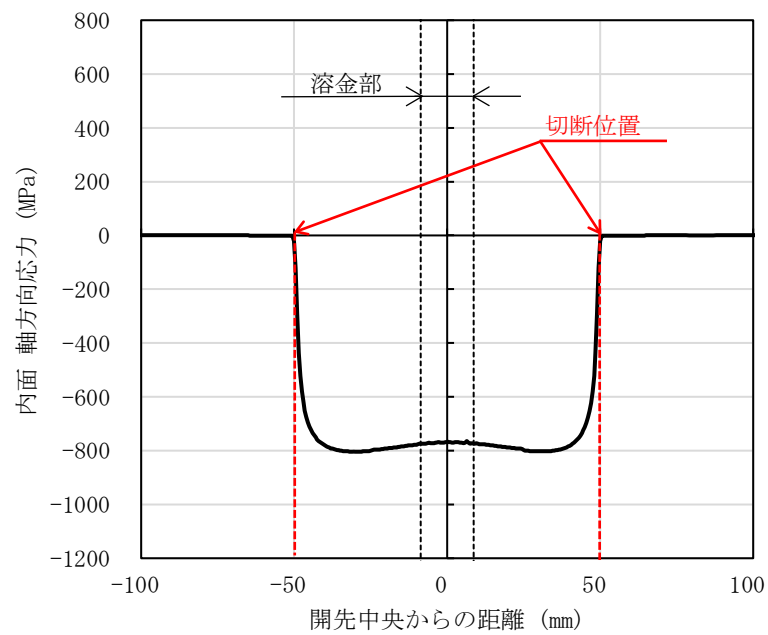


(a) 軸方向応力

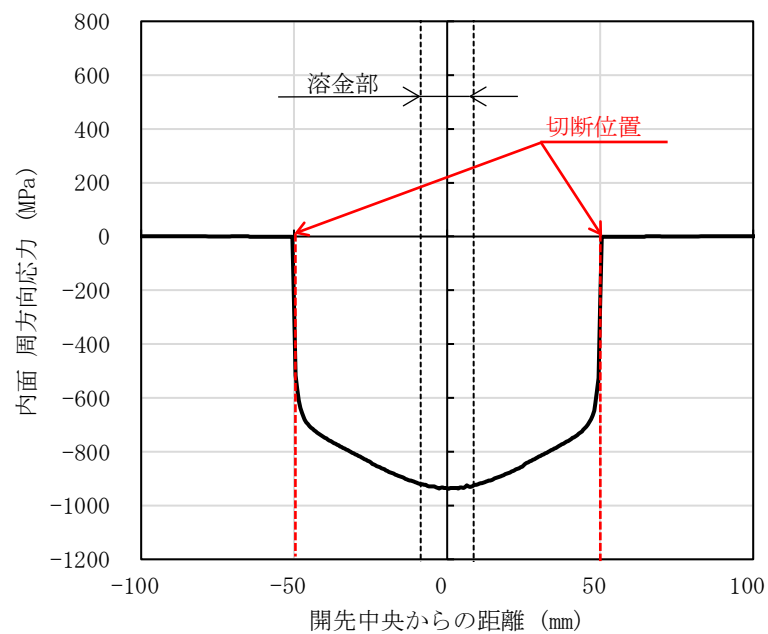


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-32 切断模擬解析結果 (100mm×100mm、外面、応力分布)

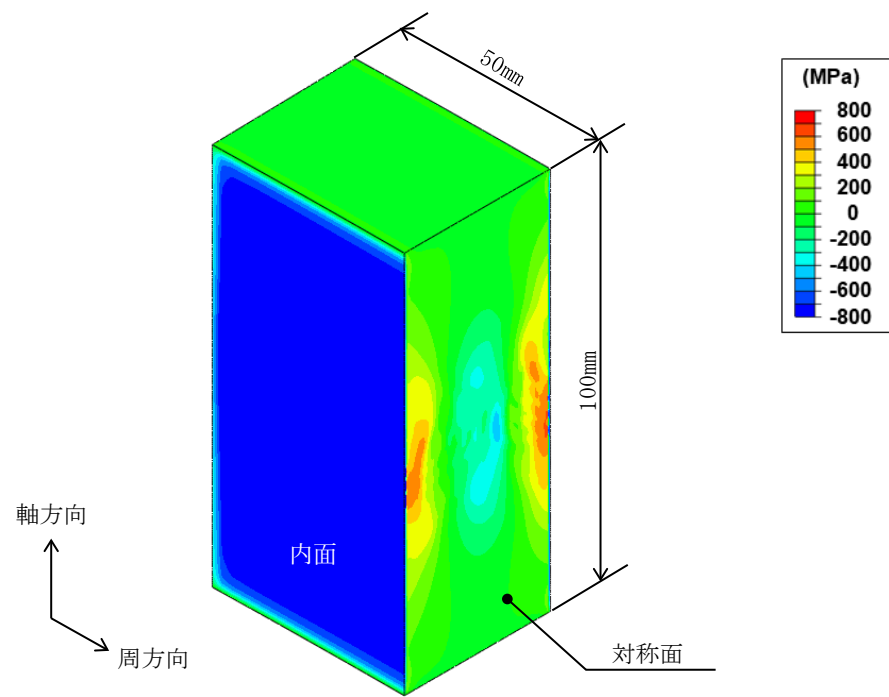


(a) 軸方向応力

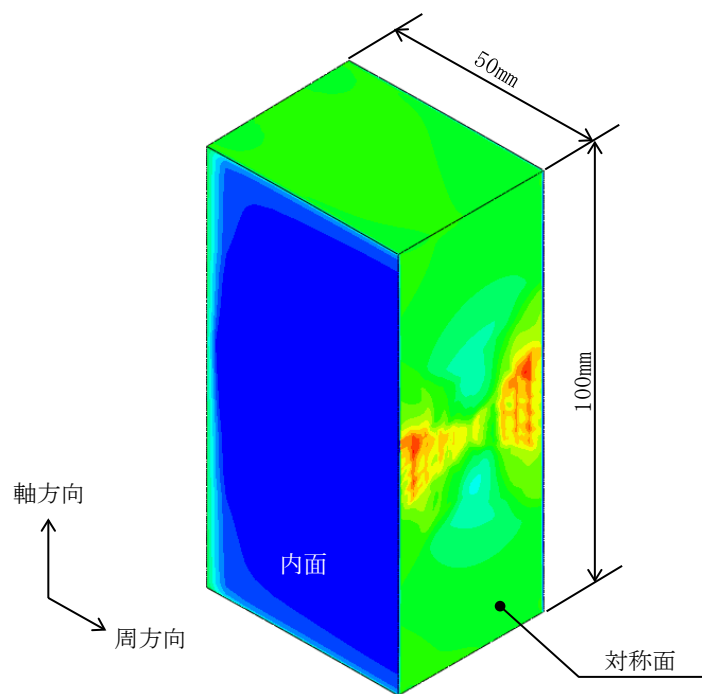


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-33 切断模擬解析結果 (100mm×100mm、内面、応力分布)

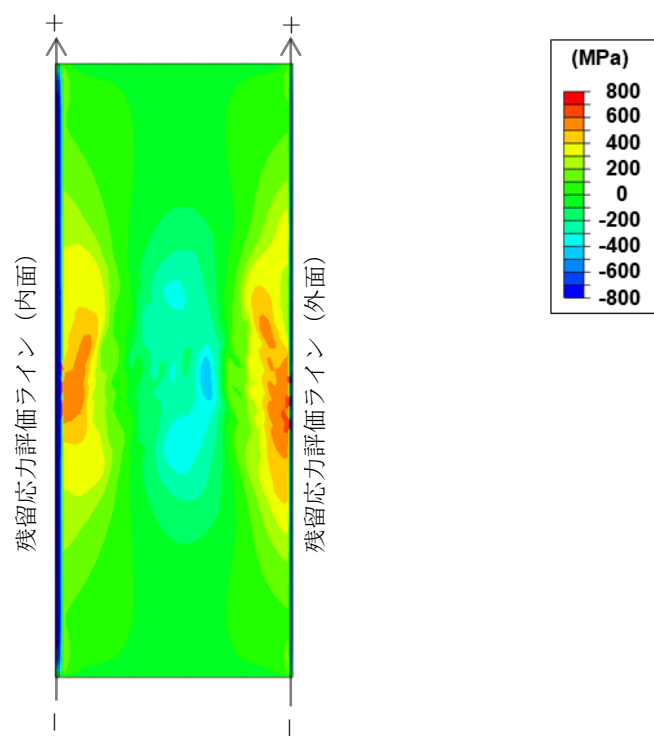


(a) 軸方向応力

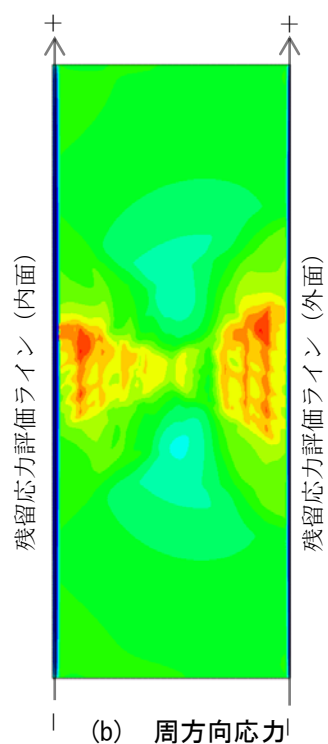


(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-34 切断模擬解析結果 (100mm×100mm、残留応力コンター図、対称面表示)



(a) 軸方向応力



(b) 周方向応力

図 3.3.1.2(1)-35 切断模擬解析結果 (100mm×100mm、残留応力コンター図 (溶接部拡大))

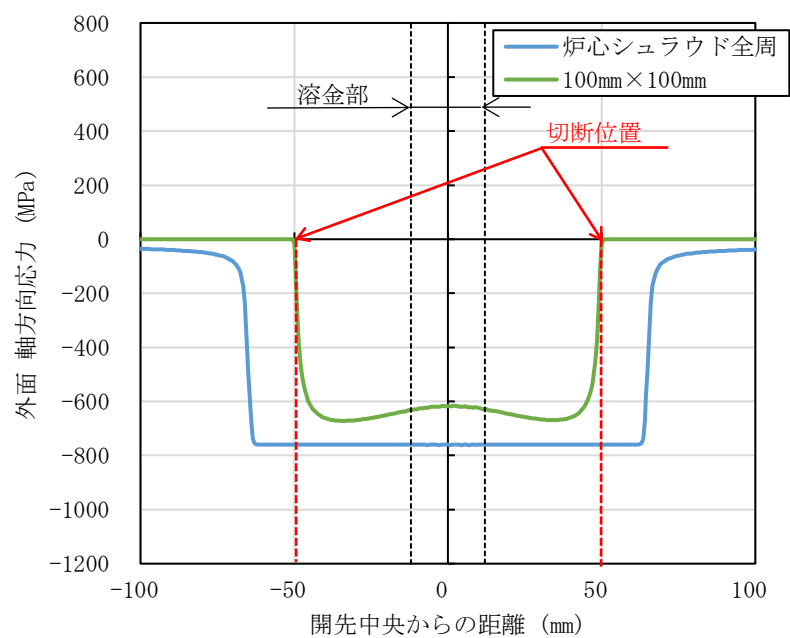
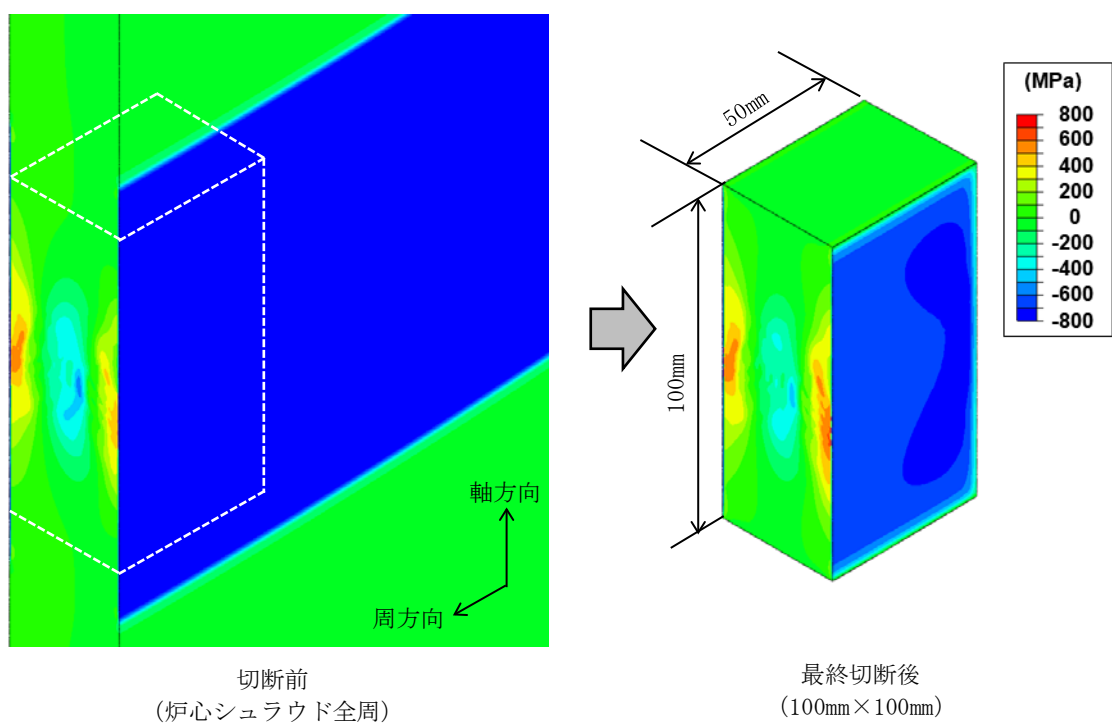


図 3.3.1.2(1)-36 残留応力変化の比較（外面、軸方向応力）

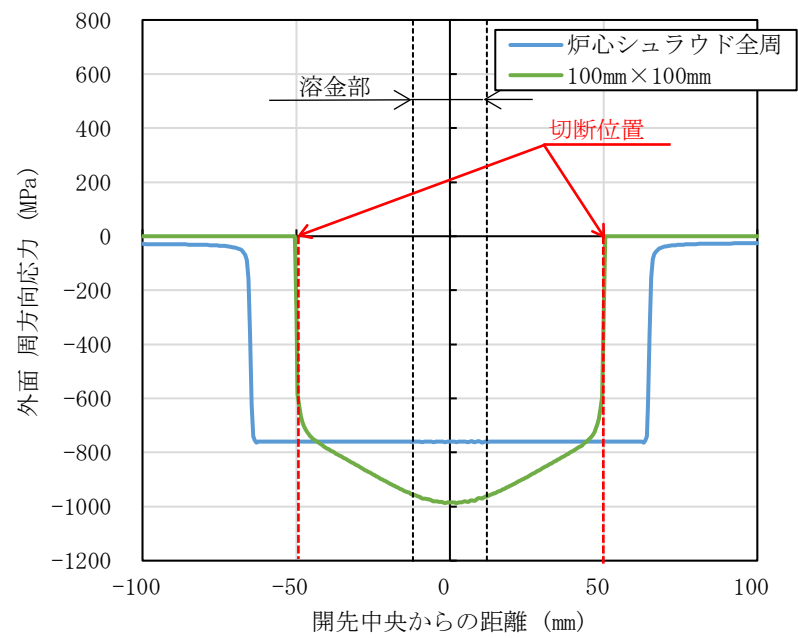
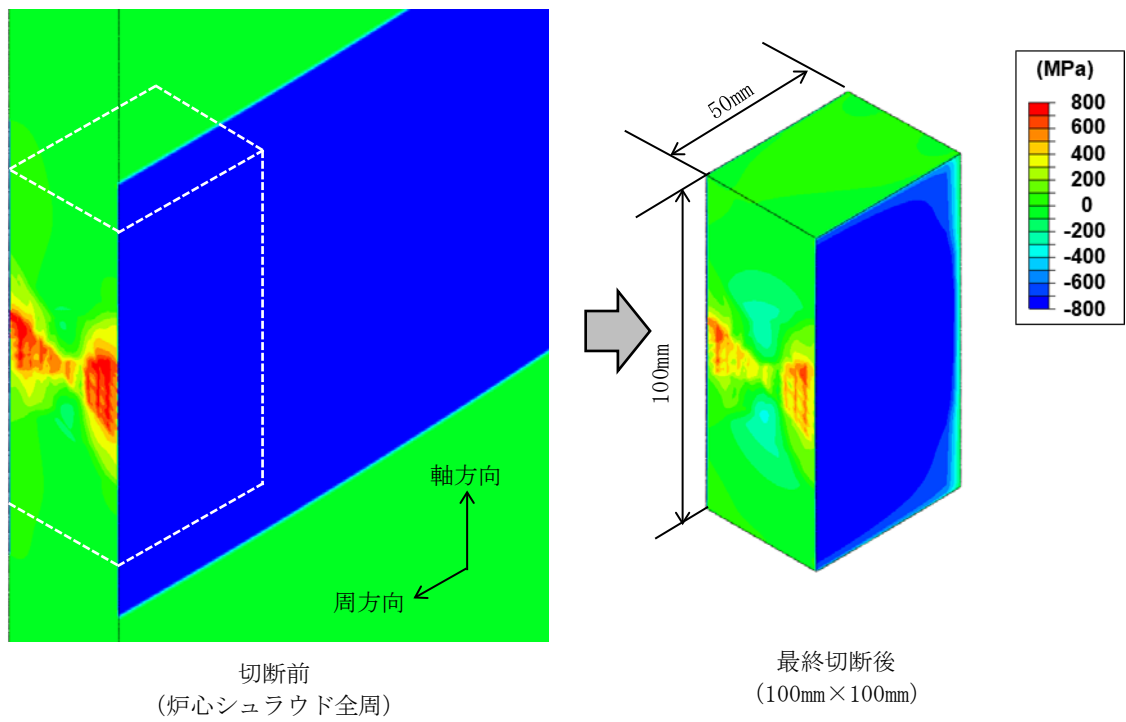


図 3.3.1.2(1)-37 残留応力変化の比較（外面、周方向応力）

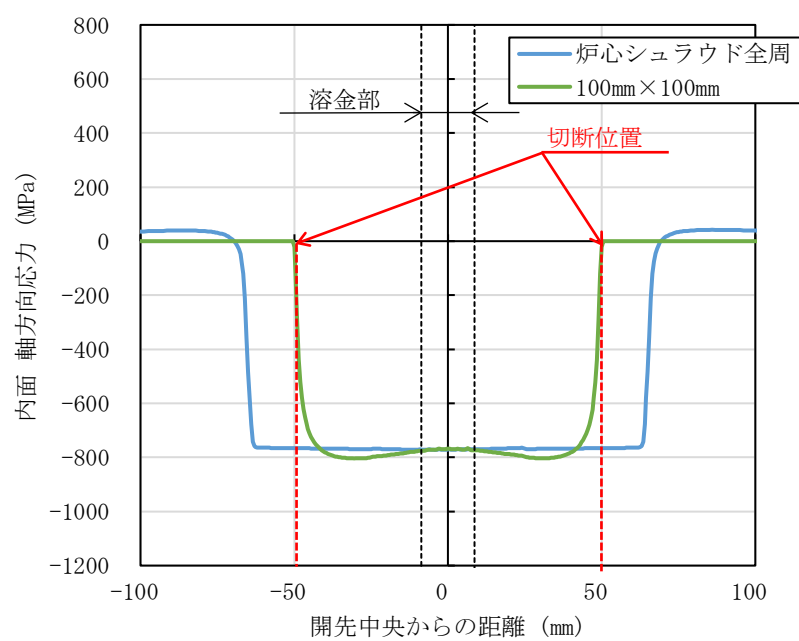
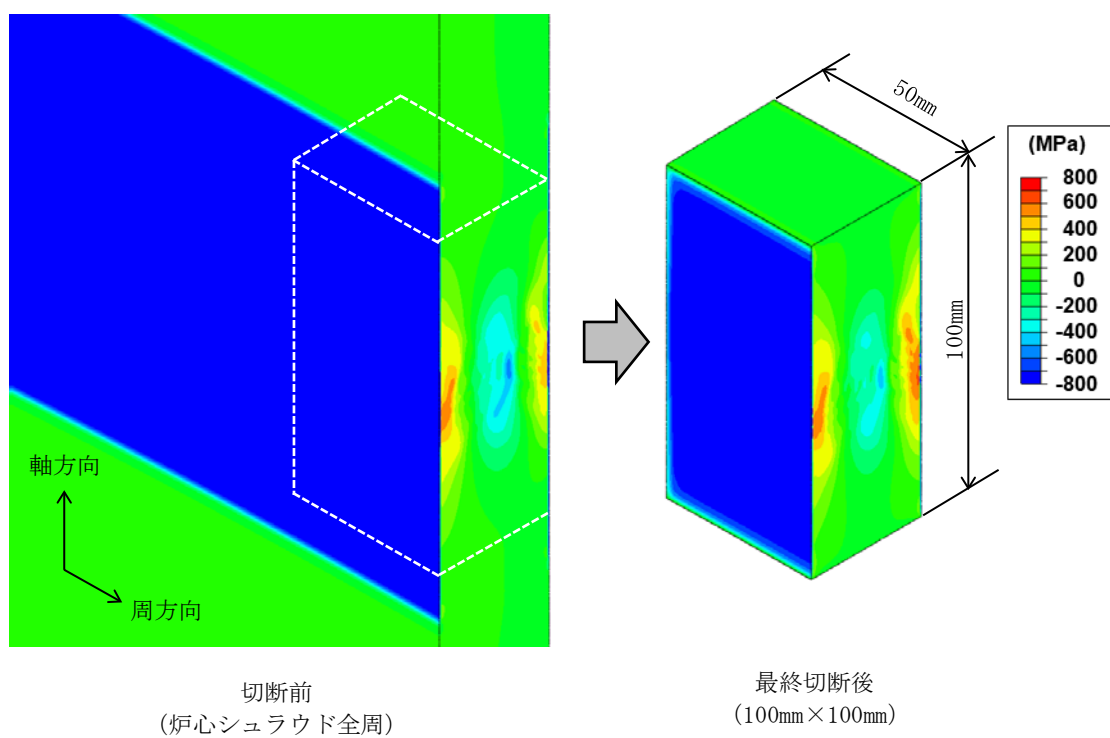


図 3.3.1.2(1)-38 残留応力変化の比較（内面、軸方向応力）

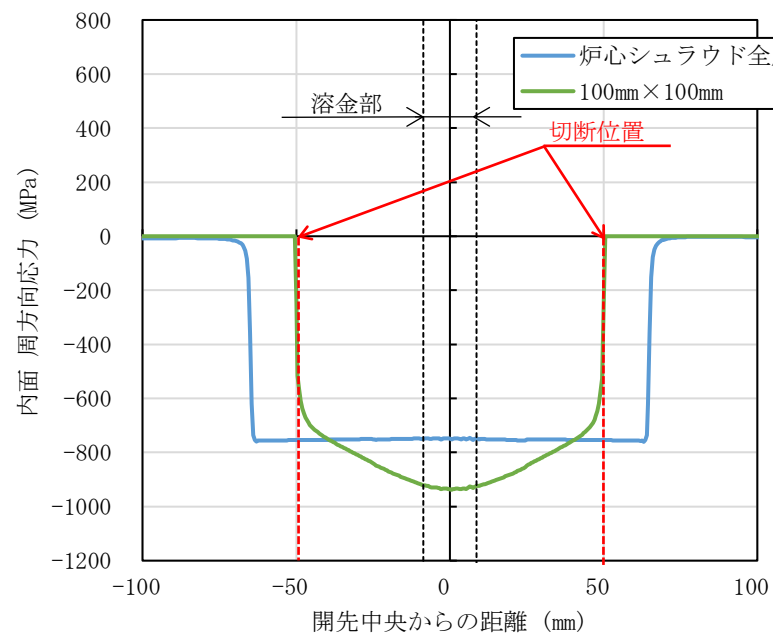
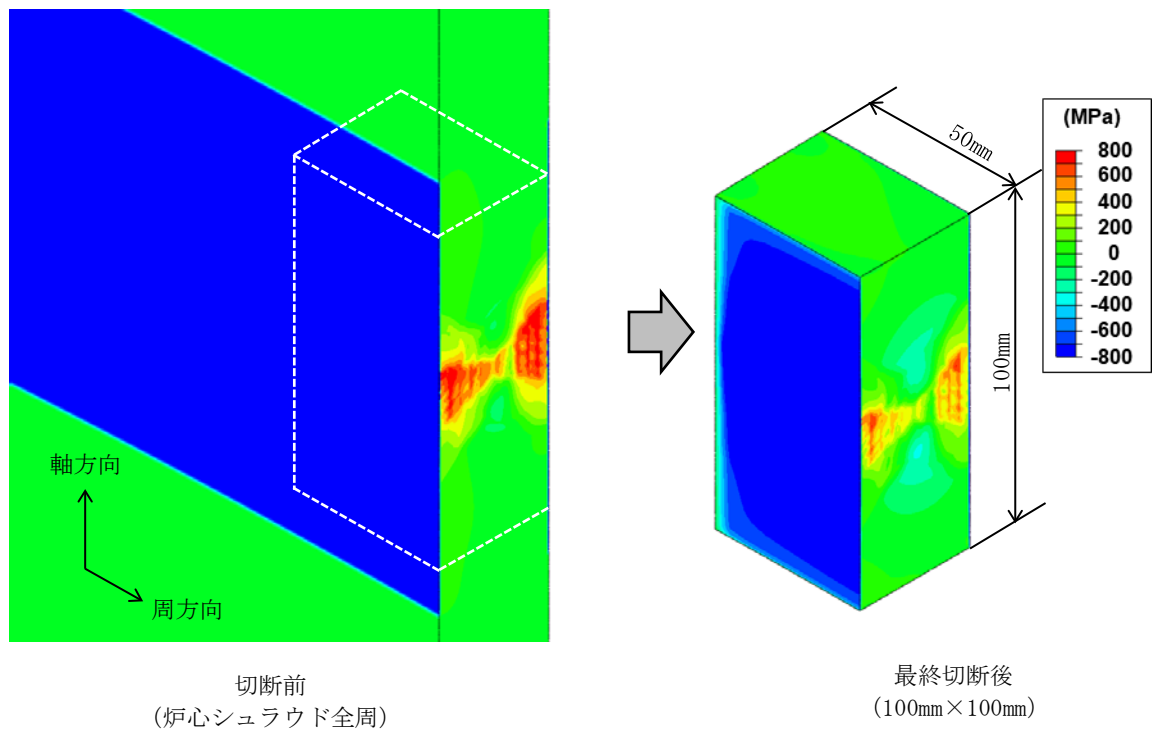


図 3.3.1.2(1)-39 残留応力変化の比較（内面、周方向応力）

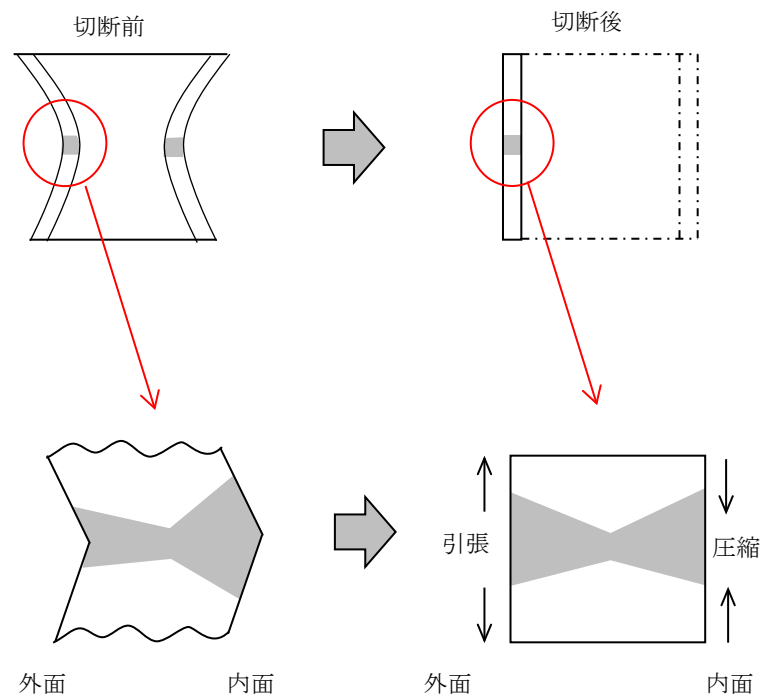


図 3.3.1.2(1)-40 炉心シュラウドの切断に伴う変形の概略

(2) 実機構造模擬試験計画の検討

実機構造模擬試験計画の検討として、800MWe 級プラントの炉心シュラウドの残留応力解析の検証を目的とした実機構造模擬試験の試験計画を検討した。実機の炉心シュラウドは、図 3.3.1.2(2)-1 の炉心シュラウド製作手順に示すように、製作過程で溶接及び SP 以外の残留応力因子が含まれる可能性が考えられる。そこで、800MWe 級プラントの炉心シュラウドの残留応力解析及び切断模擬解析の検証を目的とした、実機構造模擬（モックアップ）試験計画を検討した。

1) 候補となるモックアップ試験方法の種類と特徴

令和 3 年度の調査結果^[3.3.1.2(2)-1]で、候補となるモックアップ試験方法として、フルスケールモックアップ試験（実機大模擬）、スケールモックアップ試験（実機を縮尺で小さくした試験体）、部分モックアップ試験（実機大模擬であるが 1/2 セクターなど部分的に試験体を模擬）及び要素モックアップ試験（薄肉円筒を平板等で模擬）を調査した。実機プラントの炉心シュラウドは、製造過程における残留応力因子、実機の拘束による溶接残留応力の分布やピーニング方法の種類や施工条件等の影響を受けることが考えられる。今回のモックアップの場合、溶接残留応力の再現と、ピーニング施工による施工部位表層部の圧縮残留応力を模擬する必要がある。前者は実機と同じ板厚として、溶接部は開先の実設計を再現し、溶接のパス数や層数は実機溶接を模擬する必要があること、ピーニングも 1mm 程度ではあるが深さ方向の圧縮応力を付与する工法であることから、板厚が実機に対し縮小相似形となるスケールモックアップ試験は適さない。今回、切断による予防保全施工部位の残留応力測定を検討している部位は、実機炉心シュラウドで、照射の影響も受ける中間胴を対象としており、中間胴は薄肉円筒構造物である。薄肉円筒構造物を、例えば実機大ではあるが 1/2 セクターの半円筒で部分的に模擬する（スケール）試験を採用した場合、試験体を製作する材料コスト等の面ではメリットがある。ただし、1/2 セクターの円筒（半円筒）で実機円筒部材の全周部材拘束等を模擬するには架構等で拘束する必要もあり、その模擬性や妥当性といった検証や理論武装を踏まえると、薄肉円筒のフルスケールモックアップ試験とする方が、模擬に対する説明性もあり、最終的にはコストミニマムとなると考えられる。

ここでは、候補となるモックアップ試験方法はフルスケールモックアップ試験とすることで検討した。

2) 試験条件

実機構造模擬試験の試験条件について以下に示す。なお、モックアップの対象は、実機からの試験体取出しが想定されている 800MWe 級プラントの炉心シュラウド H4 溶接部とする。

① 試験体形状

試験体形状を図 3.3.1.2(2)-2 に示す。試験体は円筒形状とし、試験体の外径及び板厚については、実機と同等の値とする。試験体の軸方向の高さは、端部境界条件の影響が

出ない十分な寸法として、H4 溶接線を中心として片側 $2.5\sqrt{Rt}$ 以上となる高さとする。

試験体の材質は試験体の切断による採取を想定した 800MWe 級プラントの炉心シュラウドと同じ SUS304L とする。なお、材料費の低減のため、部材は残留応力測定部位近傍のみを実機と同じ材料とし、他部位については境界条件の影響が出ない十分な寸法を確保した上で、安価な炭素鋼等とすることも可能である。

また、試験体製作時には、図 3.3.1.2(2)-3 に示すように、熱電対により H4 溶接部の温度測定を行うことにより、温度分布解析の妥当性を検証することが可能であり、溶接残留応力解析に資するデータを取得可能である。なお、熱電対による温度測定は、開先内部についても測定することにより、詳細なデータが取得可能であるが、本研究の目的である予防保全として施工されたピーニングによる残留応力の測定のため、表面の温度分布のみを測定することとする。

② 考慮する残留応力因子

図 3.3.1.2(2)-2 に示す試験体を用いることにより、以下の残留応力を含んだ試験体を得ることができる。

- ・ 素材製造時の残留応力
- ・ 曲げ加工による残留応力
- ・ 開先加工による残留応力
- ・ 溶接による残留応力（溶接後の表面仕上げを含む）
- ・ ピーニングによる残留応力

③ 切断条件及び切断方法

図 3.3.1.2(2)-2 に示す試験体から A 型輸送可能な $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ の試験体を切出すことを想定する。なお、切断位置は、炉心シュラウド縦溶接線の影響を排除するため、縦溶接線から離れた位置にて試験体の切出しを行う。切断順序は、今年度の切断模擬解析にて実施した切断条件と同様に、炉心シュラウドを輪切りした円筒胴を周方向に分割し、最終切断形状の $100\text{mm} \times 100\text{mm}$ の試験体を切出す。また、試験体の切断方法は、実機炉心シュラウドからのサンプリング作業に合わせることにする。

④ 残留応力測定条件及び測定箇所

残留応力の測定は、図 3.3.1.2(2)-4 に示すように、試験体製作後、ピーニング施工後、試験体切断後の計 3 回の残留応力測定を実施し、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の検証に用いる。残留応力の測定は、ピーニングを対象とするため、極表層部の応力測定が可能な X 線回折法とする。測定箇所のうち、H4 溶接線に対する位置は、溶接止端部からピーニングが施工されている範囲を対象として測定を行う。その施工範囲内については、令和 5 年度及び今年度の試験体と同様に、溶接止端部から 3 点程度を溶接線の両側に測定点として設定することにより、解析結果と比較する。

3) 実機構造模擬試験計画の検討のまとめ

実機構造模擬試験計画の検討として、800MWe 級プラントの炉心シュラウドの残留応力解析の検証を目的とした実機構造模擬試験の試験計画の検討を行った。

実機構造模擬試験計画は、炉心シュラウドの各製造過程における残留応力因子を考慮するため、フルスケールモックアップ試験を行うこととし、試験体形状、切断条件、残留応力測定条件について検討した。

フルスケールモックアップ試験を行う場合においては、概ね 2 年程度の期間が必要であると考えられるが、材料の調達リードタイムが多くを占めるため、材料の先行手配等により、実施期間は短くできる可能性がある。また、ピーニング施工は 3 か月と想定しているが、ピーニング施工方法や施工条件によって変動するものと考えられ、今後試験計画の詳細な検討が必要である。

<参考文献>

- [3.3.1.2(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（実機材料を活用いた健全性評価に係る研究））、令和 4 年 3 月
- [3.3.1.2(2)-2] 令和 5 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（実機材料を活用いた健全性評価に係る研究））、令和 6 年 3 月

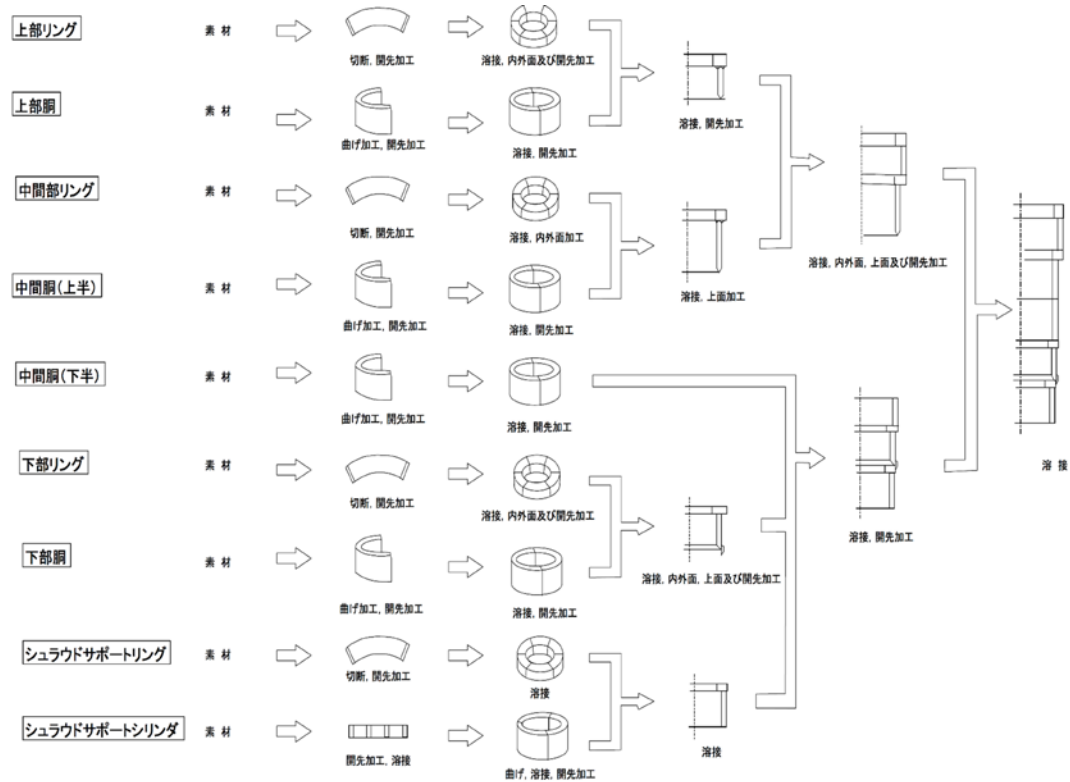
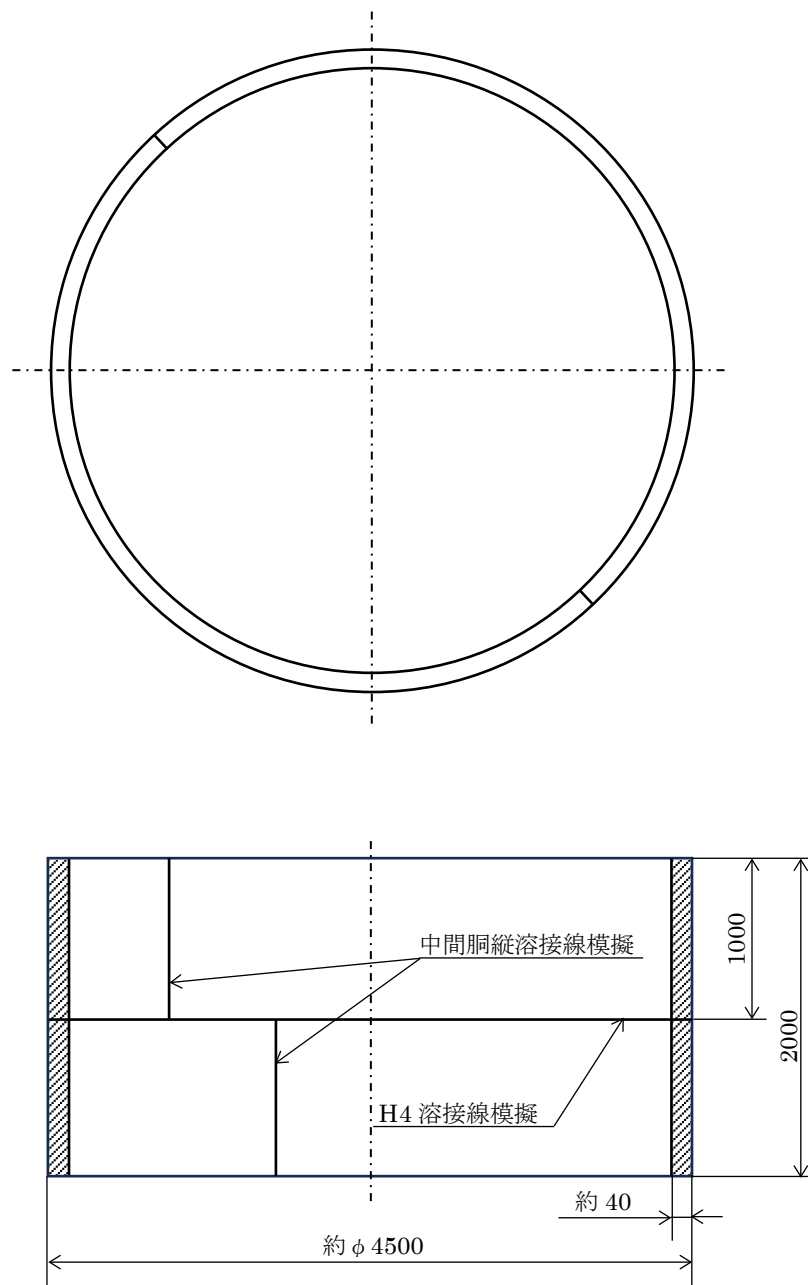
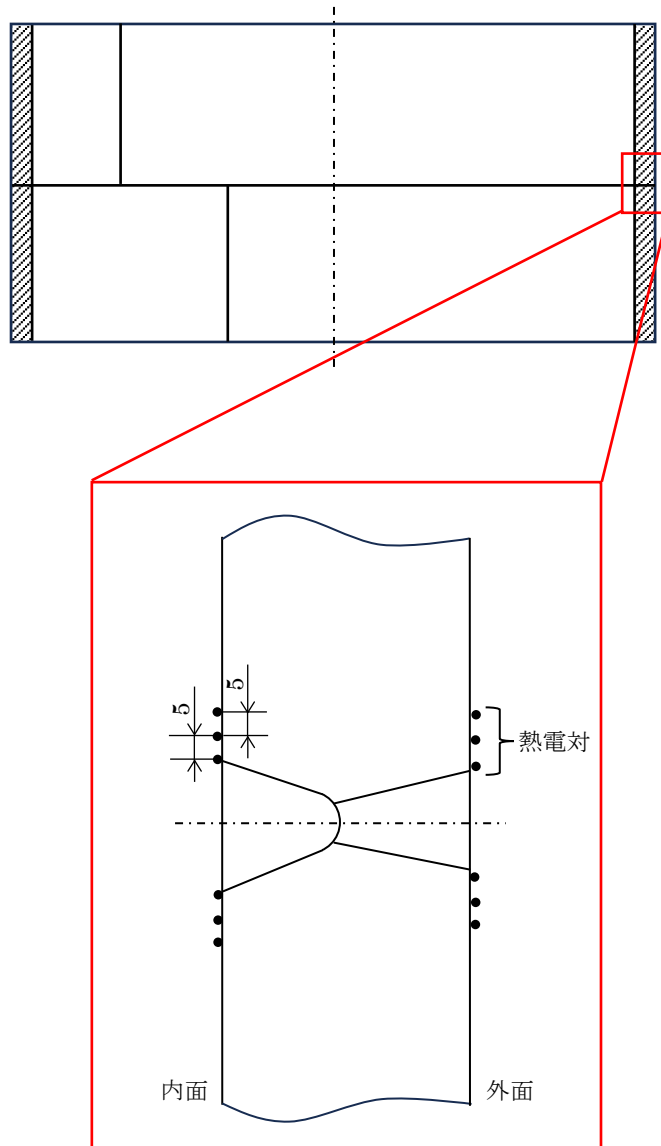


図 3.3.1.2(2)-1 炉心シュラウド製作手順



単位【mm】

図 3.3.1.2(2)-2 試験体形状



単位【mm】

図 3.3.1.2(2)-3 溶接温度測定条件

【モックアップ試験】

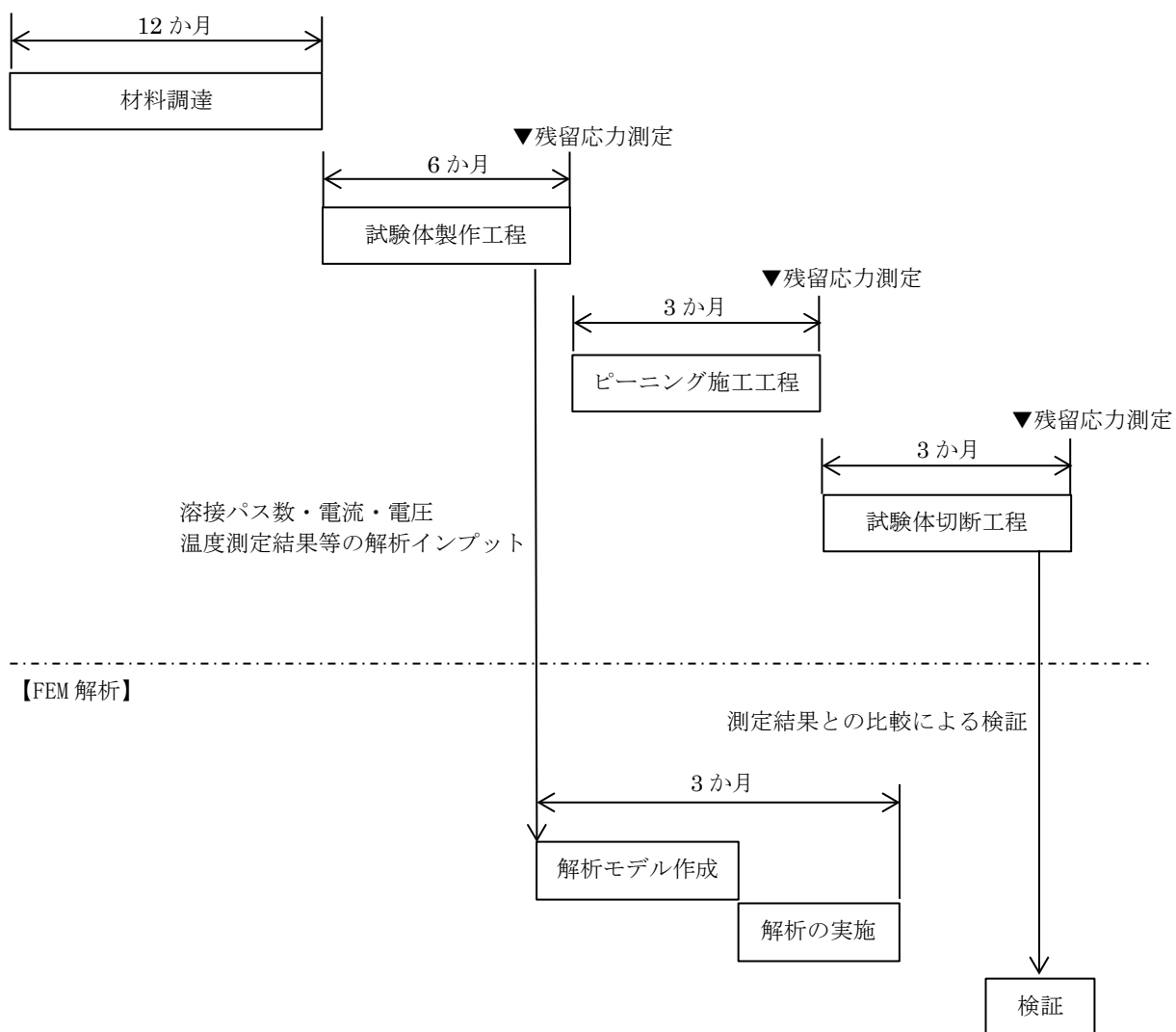


図 3.3.1.2(2)-4 モックアップ試験工程案

3.3.1.3 まとめ

令和6年度は、実機予防保全施工部位の形状・寸法や切断による自己拘束解放等の影響も踏まえた実機構造模擬（モックアップ）試験の計画立案に資するため、実機構造模擬試験の試験計画詳細の検討として、切断影響確認（複合的因子に対する影響確認）及び実機構造を模擬した解析を実施した。

切断影響確認は、炉心シュラウド H4 溶接部を模擬した要素試験体に対して、残留応力分布に影響を及ぼさない切断寸法を検討するため、要素試験と要素試験模擬解析を実施した。要素試験の結果、A 型輸送可能な寸法である 100mm×100mm より小さい 50mm×50mm 及び 30mm×30mm の形状においても SP 施工範囲の表面圧縮残留応力の測定が可能であることを確認した。また、その切断影響確認は解析で SP 施工範囲の表面圧縮残留応力の傾向を再現することができた。

実機構造を模擬した解析は、800MWe 級プラントの炉心シュラウドを対象に、溶接残留応力解析、SP による残留応力解析、並びに切断模擬解析を実施した。解析の結果、最終切断後の形状である 100mm×100mm に切断した場合においても、SP による残留応力解析は残存していることを確認した。

以上の結果を踏まえ、実機構造を模擬した解析の妥当性を検証するため、実機構造模擬（モックアップ）試験の計画立案を行った。モックアップ試験は、炉心シュラウドを模擬したフルスケールモックアップ試験を適用することにより、炉心シュラウドの各製造過程における残留応力因子を考慮することとし、試験体仕様を策定した。

3.3.2 BWR プラント廃炉時の除染影響確認試験（試験の実施）

(1) 試験方法

令和4年度に策定した除染試験要領^[3.3.2(1)-1]に従い、令和5年度に試験片および試験装置の準備を行った。図 3.3.2(1)-1 に除染試験に供する試験片形状を示す。試験片は 20×10×2t mm 試験片、30×30×5t mm 試験片の2種類あり、それぞれ重量測定・断面観察による評価、残留応力測定による評価に用いる。図 3.3.2(1)-2、図 3.3.2(1)-3 にそれぞれの試験片の評価フローを示す。

本年度は、20×10×2t mm 試験片について、⑦除染試験（1 サイクル目）、⑧外観観察・重量測定、⑨除染試験（2 サイクル目）、⑩外観観察・重量測定、⑪除染試験（3 サイクル目）、⑫外観観察・重量測定・断面観察（一部 TP）を実施する。30×30×5t mm 試験片について、⑦除染試験（1 サイクル目）、⑧外観観察・残留応力測定、⑨除染試験（2 サイクル目）、⑩外観観察・残留応力測定、⑪除染試験（3 サイクル目）、⑫外観観察・残留応力測定を実施する。除染試験のバッチ式試験装置と仕様を図 3.3.2(1)-4、表 3.3.2(1)-1 に示す。なお、試験片総面積に対する比液量は 10ml/cm²以上とする。

表 3.3.2(1)-2 に除染試験液条件を示す。除染試験液は酸化剤として過マンガン酸：200ppm、還元剤としてシュウ酸：2000ppm とし、還元剤はヒドラジン添加により pH2.5 ±0.3 で管理する。

表 3.3.2(1)-3 に各サイクルの除染試験時間を示す。

図 3.3.2(1)-5 に除染液調整、濃度測定フローを示す。除染液調整は、時間経過に伴う濃度変化を極力避けるため、各サイクル開始前に調整し、酸化液、還元液の濃度測定を実施する。また、各サイクル試験終了後にも酸化液、還元液の濃度測定を実施する。

表 3.3.2(1)-4 に試験マトリクスを示す。

図 3.3.2(1)-6 に試験に供する試験片の外観観察結果を示す。

除染試験装置外観を図 3.3.2(1)-7 に、試験片吊り下げ状態、試験液および試験中の様子を図 3.3.2(1)-8 に示す。試験容器内上下の温度差をなくすため、容器上部にバンドヒータを設置した。さらに容器外側に保温材を取り付け、容器内温を一定に保つために留意した。

<参考文献>

- [3.3.2(1)-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））、令和5年3月。

表 3.3.2(1)-1 バッチ式試験装置の仕様

主要機器	概略仕様	備考
セパابل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	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 器を準備

表 3.3.2(1)-2 除染試験液条件

項目		条件
除染剤	酸化	過マンガン酸：200ppm
	還元	シュウ酸：2000ppm pH：2.5±0.3（ヒドラジン添加）
温度		95℃程度
除染工程		酸化-還元

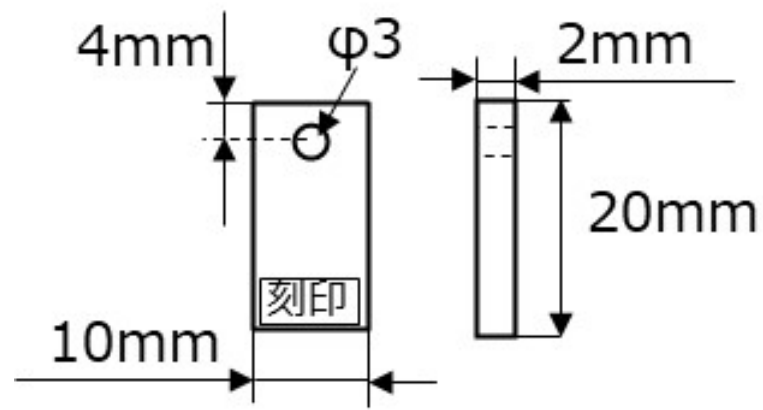
表 3.3.2(1)-3 各サイクルの除染時間

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

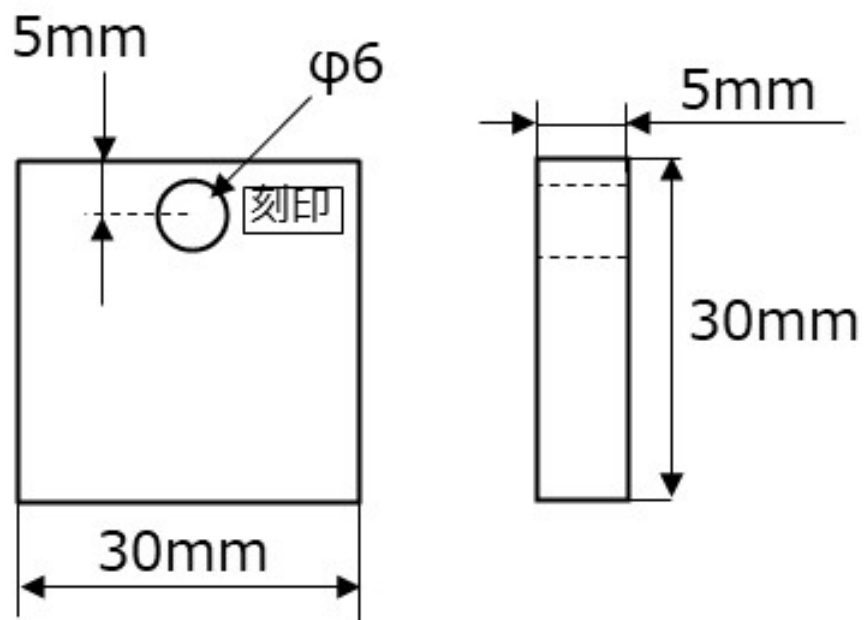
表 3.3.2(1)-4 試験マトリクス

TP No.	試験片寸法	SP施工	酸化皮膜	1サイクル 終了後	2サイクル 終了後	3サイクル 終了後
11*	20×10×2 t mm (穴径φ3 mm)	あり (両面)	あり	—	—	—
12				外観観察、 重量測定	外観観察、 重量測定	外観観察、重量測定、 断面観察 (代表1TP)
13						
14			なし	外観観察、 重量測定	外観観察、 重量測定	外観観察、重量測定、 断面観察 (代表1TP)
15						
16				外観観察、 重量測定	外観観察、 重量測定	外観観察、重量測定、 断面観察 (代表1TP)
17						
18*	20×10×2 t mm (穴径φ3 mm)	なし	あり	—	—	—
19				外観観察、 重量測定	外観観察、 重量測定	外観観察、重量測定、 断面観察 (代表1TP)
20						
21			なし	外観観察、 重量測定	外観観察、 重量測定	外観観察、重量測定、 断面観察 (代表1TP)
22						
23				外観観察、 重量測定	外観観察、 重量測定	外観観察、重量測定、 断面観察 (代表1TP)
24						
25	30×30×5 t mm	あり	あり	外観観察、	外観観察、	外観観察、
26	(穴径φ6 mm)	(片面)		残留応力測定	残留応力測定	残留応力測定

*TP No.11,18は、除染試験を実施せず、断面観察のみ実施 (R5年度実施済)



(a) $20 \times 10 \times 2t$ mm 試験片



(b) $30 \times 30 \times 5t$ mm 試験片

图 3.3.2(1)-1 除染試験片形状

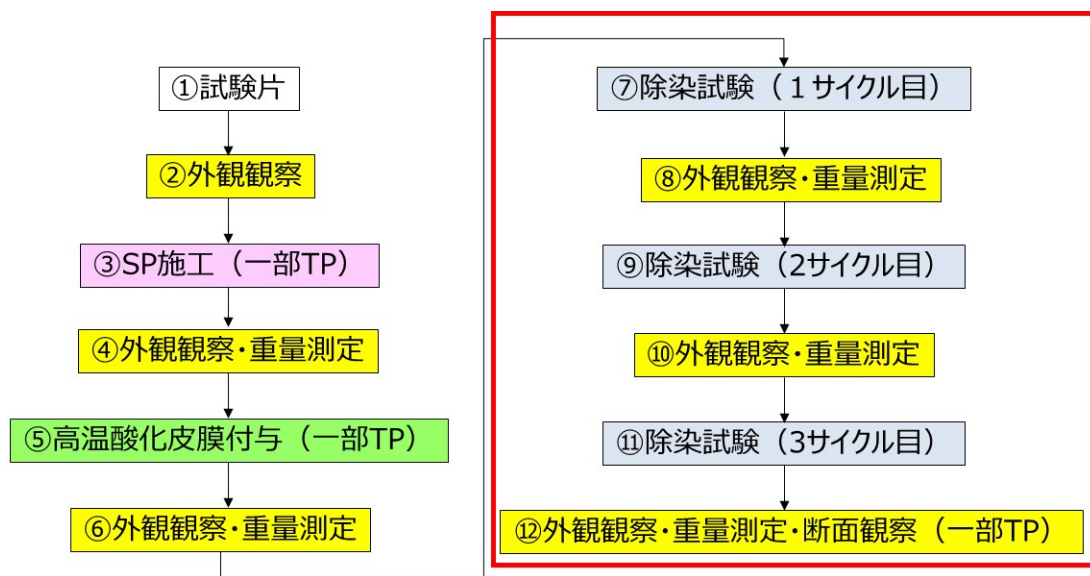


図 3.3.2(1)-2 重量測定・断面観察による評価フロー (20×10×2t mm 試験片)

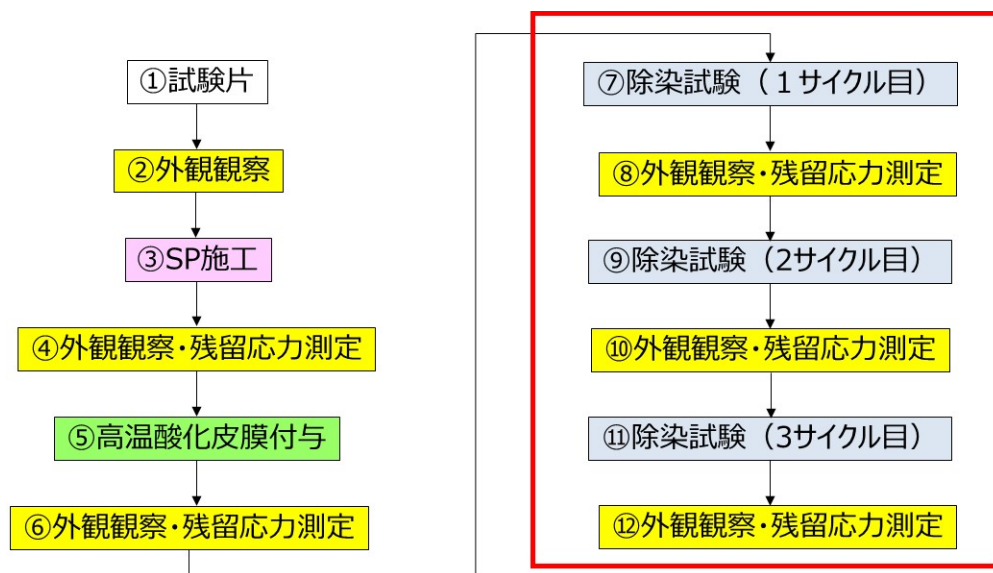


図 3.3.2(1)-3 残留応力測定による評価フロー (30×30×5t mm 試験片)

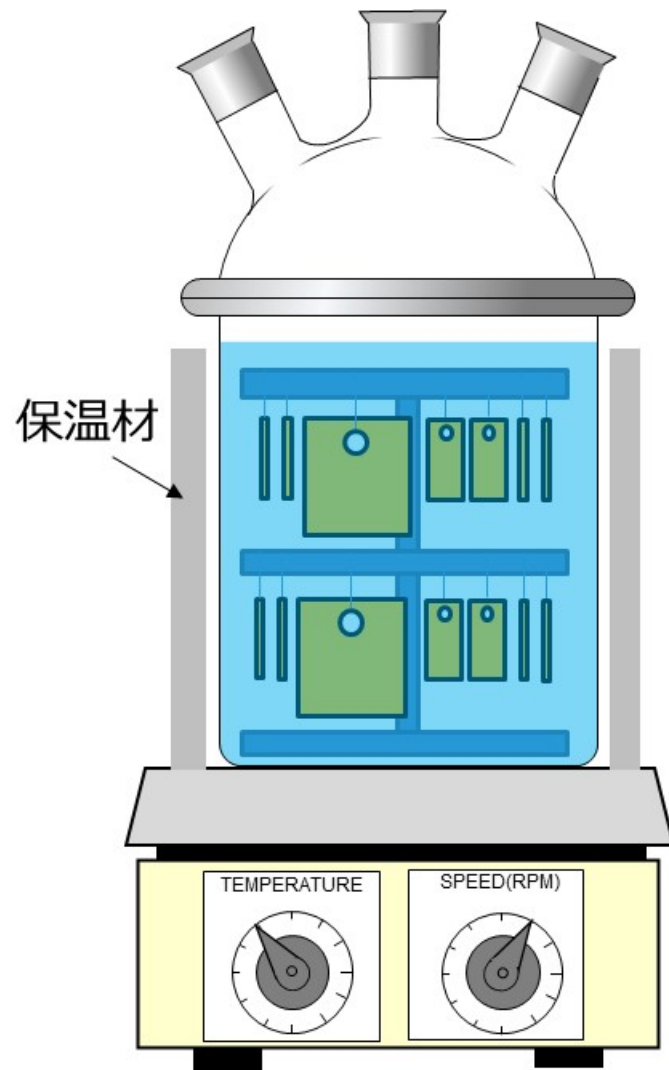


図 3.3.2(1)-4 バッチ式試験における除染試験装置構成

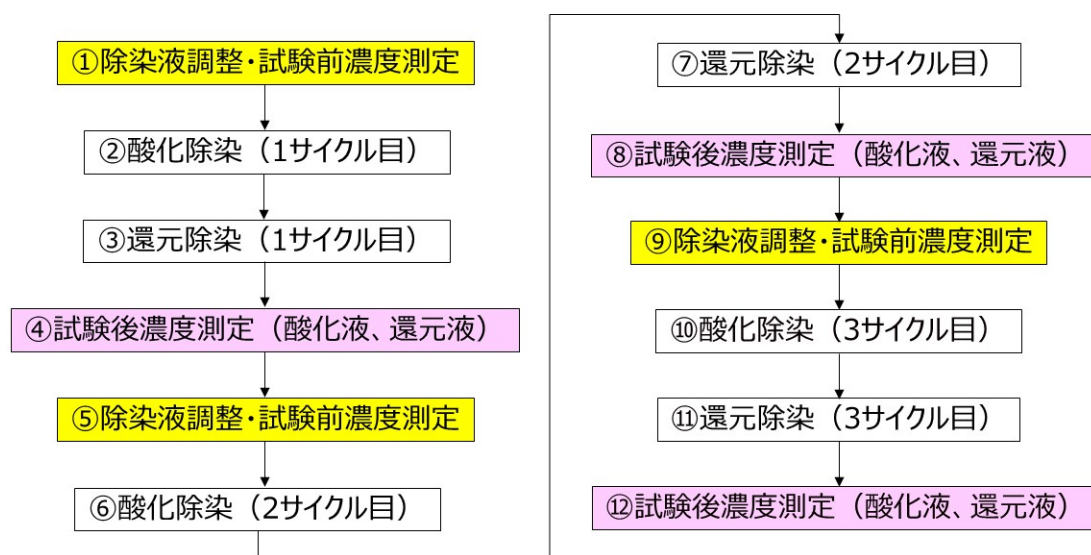


図 3. 3. 2 (1) -5 除染液調整、濃度測定フロー



表面



裏面

図 3.3.2(1)-6 (1/14) 試験片外観 (TP No. 12 : SP 施工あり、酸化皮膜あり)



表面



裏面

図 3.3.2(1)-6 (2/14) 試験片外観 (TP No. 13 : SP 施工あり、酸化皮膜あり)

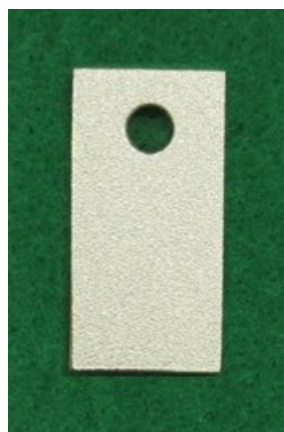


表面

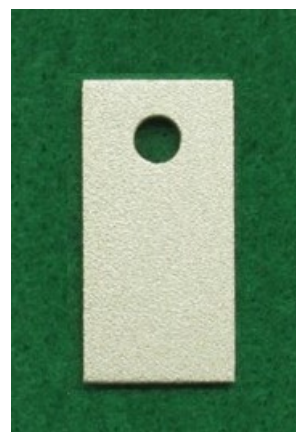


裏面

図 3.3.2(1)-6 (3/14) 試験片外観 (TP No. 14 : SP 施工あり、酸化皮膜あり)

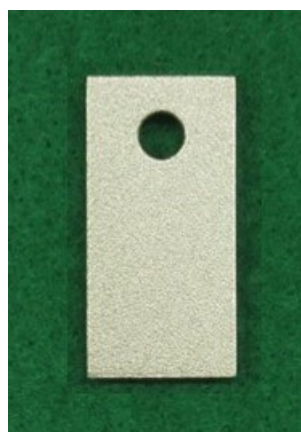


表面



裏面

図 3.3.2(1)-6 (4/14) 試験片外観 (TP No. 15 : SP 施工あり、酸化皮膜なし)

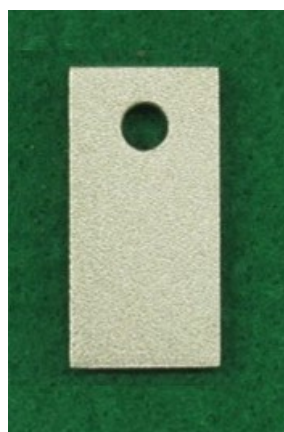


表面



裏面

図 3.3.2(1)-6 (5/14) 試験片外観 (TP No. 16 : SP 施工あり、酸化皮膜なし)



表面



裏面

図 3.3.2(1)-6 (6/14) 試験片外観 (TP No. 17 : SP 施工あり、酸化皮膜なし)



表面



裏面

図 3.3.2(1)-6 (7/14) 試験片外観 (TP No. 19 : SP 施工なし、酸化皮膜あり)



表面



裏面

図 3.3.2(1)-6 (8/14) 試験片外観 (TP No. 20 : SP 施工なし、酸化皮膜あり)



表面



裏面

図 3.3.2(1)-6 (9/14) 試験片外観 (TP No. 21 : SP 施工なし、酸化皮膜あり)



表面



裏面

図 3.3.2(1)-6 (10/14) 試験片外観 (TP No. 22 : SP 施工なし、酸化皮膜なし)



表面



裏面

図 3.3.2(1)-6 (11/14) 試験片外観 (TP No. 23 : SP 施工なし、酸化皮膜なし)



表面



裏面

図 3.3.2(1)-6 (12/14) 試験片外観 (TP No. 24 : SP 施工なし、酸化皮膜なし)



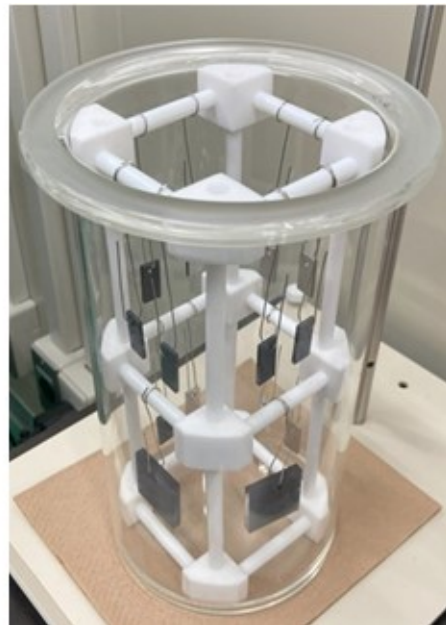
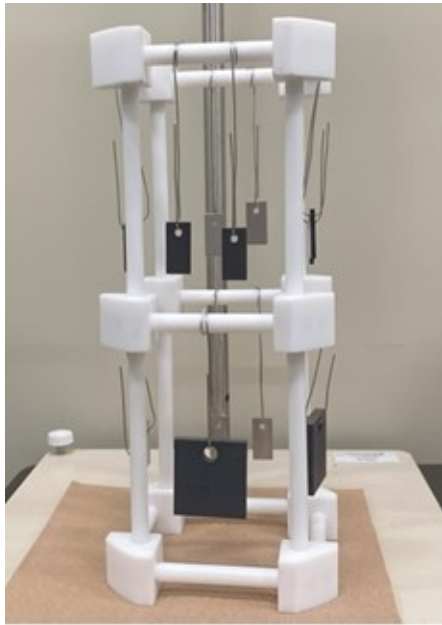
図 3.3.2(1)-6 (13/14) 試験片外観 (TP No. 25 : SP 施工あり、酸化皮膜あり)



図 3.3.2(1)-6 (14/14) 試験片外観 (TP No. 26 : SP 施工あり、酸化皮膜あり)



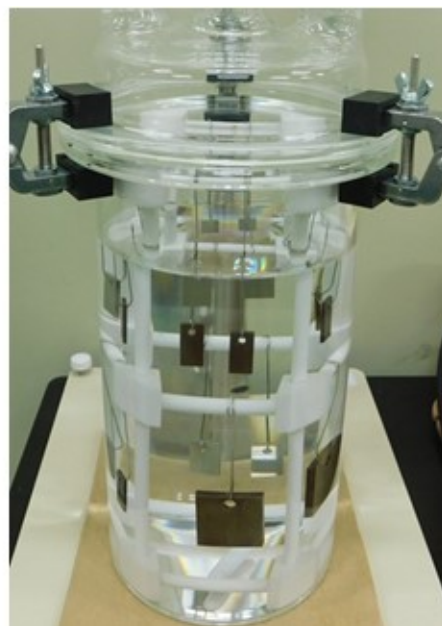
図 3.3.2(1)-7 除染試験装置外観



(a) 試験片吊り下げ状態



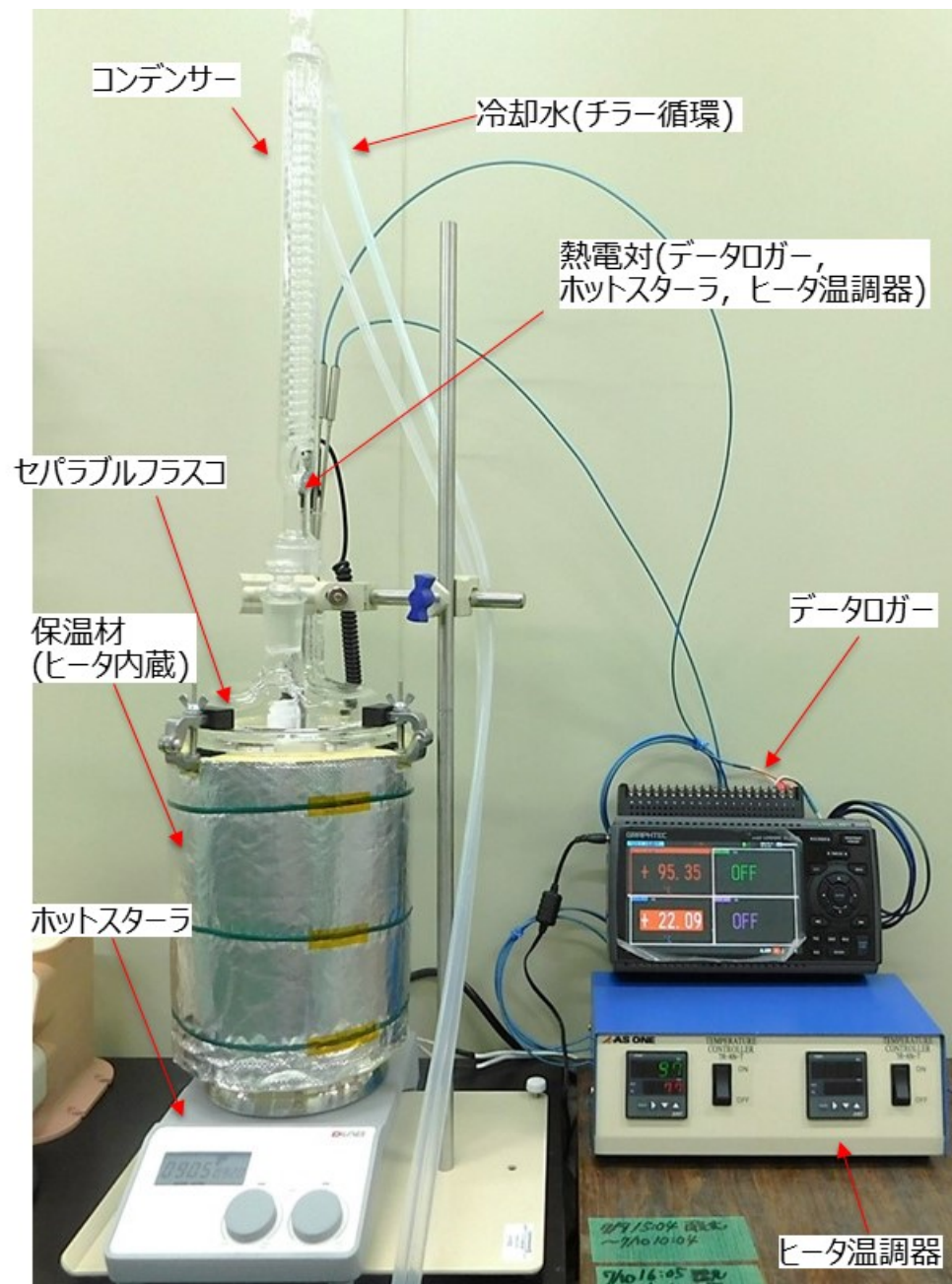
過マンガン酸 (200ppm)



シュウ酸 (2000ppm)

(b) 試験液

図 3.3.2(1)-8 (1/2) 試験片吊り下げ状態、試験液および試験中の様子



(a) 試験中の様子

図 3.3.2(1)-8 (2/2) 試験片吊り下げ状態、試験液および試験中の様子

(2) 試験結果および評価

1) 重量測定および断面観察による評価

除染試験前後の試験片外観観察を図 3.3.2(2)-1 に示す。試験前は黒色であった酸化皮膜付与試験片は、サイクル数が増えるにつれ徐々に色が薄くなり、2 サイクル後には黒色はほとんど残っていなかった。酸化皮膜が除染液により溶解したものと考えられる。一方、酸化皮膜を付与していない試験片は、試験前後で大きな変化はなかった。特に SP 施工なしの試験片は試験後も研磨痕も残っており、金属光沢を有していた。

試験前後の試験片重量測定結果を表 3.3.2(2)-1 に、試験前後の重量減量および重量減量から算出した減肉厚さを表 3.3.2(2)-2 に示す。なお、減肉厚さは、試験片表面が一樣に減肉したものとして算出した。最も減肉量が大きかった試験片でも $0.32\mu\text{m}$ であり、十分小さい値であった。これは既存知見^[3.3.2(2)-1]と概ね同程度の値であった。

各サイクル終了時の重量減量の変化を図 3.3.2(2)-2 に示す。重量減量は同一条件の 3 試験片の平均値とした。いずれの条件でもサイクル数の増加に伴い、重量減量が増加する傾向が見られた。条件毎の比較をすると、酸化皮膜有無により重量減量が大きく異なり、酸化皮膜ありの方が重量減量は大きかった。これは、形成された酸化皮膜が除染により溶解し、その分が重量減量として計測されたものと考えられる。また、酸化皮膜ありの試験片の重量減量はサイクル数が増えるにつれ重量減量の変化が小さくなっていき、2 サイクル後から 3 サイクル後の変化量は、酸化皮膜なしの試験片と同程度であった。酸化皮膜なしの試験片はサイクル数増加による重量減量の変化はほとんどなく、母材そのものが溶出しているものと考えられる。このことから、酸化皮膜ありの試験片の酸化皮膜は 2 サイクル終了時点でほとんど残っていないものと推定される。この結果は、上述した試験片外観の様相から推定した内容とも合致している。一方、SP 施工有無による重量減量の違いは小さかったが、SP 施工ありの試験片の方が重量減量はやや大きい傾向であった。これは、SP 施工により表面が荒らくなり、母材が若干溶解しやすい状態にあったためと推定される。

除染試験後の試験片表面状態を確認するため、一部試験片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(2)-3 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（位置 A、B、C）、2 倍率（5,000 倍、30,000 倍）で実施した。断面観察を実施した試験後試験片は、各条件代表 1 試験片ずつ（No.12、15、19、22）とした。

各試験片の断面観察結果を図 3.3.2(2)-4 から図 3.3.2(2)-7 に示す。各試験片の各位置で明瞭な違いは認められなかったことから試験前の表面状態によらず、3 サイクルの除染試験終了後には母材の溶出に至っているものと考えられる。参考として、除染試験に供していない酸化皮膜ありの 2 試験片（No.11 および No.18）と同条件で処理をした 3 サイクル後の試験片（No.12 および No.19）の断面観察結果との比較例を図 3.3.2(2)-8 および図 3.3.2(2)-9 に示す。いずれも酸化皮膜を付与した試験片であるが、

試験前に試験片表層で確認された数 10nm 程度の粒状のものが 3 サイクル後の試験片表層ではほとんど確認されなかった。この粒状のものは酸化皮膜の一部と考えられるが、これが 3 サイクルの除染試験後にはほとんど残っていないことから、除染により溶解したものと考えられる。この結果は、上述の試験片外観観察結果や重量減量の変化の傾向から推定した内容と合致するものであった。なお、酸化皮膜有無による 3 サイクル終了後の断面観察上の明瞭な違いは認められなかったため、除染による溶解の大部分は酸化皮膜であり、母材の溶解は小さいものと考えられる。

以上より、重量測定および断面観察による評価結果からは、除染による予防保全効果への影響はないものと考えられる。

2) 残留応力測定による評価

除染試験前後の試験片外観観察を図 3.3.2(2)-10 に示す。試験前は黒色であった酸化皮膜付与試験片は、サイクル数が増えるにつれ徐々に色が薄くなり、2 サイクル後には黒色はほとんど残っていなかった。酸化皮膜が除染液により溶解したものと考えられる。

試験前後の残留応力測定結果および測定位置を図 3.3.2(2)-11 に示す。残留応力測定は試験片中央位置 4×4 mm の範囲で実施した。参考として酸化皮膜付与前（SP 施工後）の残留応力測定結果も記載した。

皮膜付与前（SP 施工後）から 3 サイクル終了後の各状態における残留応力値の変化を図 3.3.2(2)-12 に示す。いずれの試験片のいずれの方向の残留応力も各状態で 900～800MPa 程度を推移しており、3 サイクル終了後も十分な圧縮残留応力が維持していた。このことから、除染による母材の溶解は非常に軽微であると考えられる。

以上より、残留応力測定による評価結果からは、除染による予防保全効果への影響はないものと考えられる。

3) 水質分析結果および温度履歴

除染試験前後の水質分析結果を表 3.3.2(2)-3 に示す。酸化除染試験で用いた過マンガン酸は、試験後に濃度がやや低下していた。これは過マンガン酸が時間経過とともに分解するため、試験後に濃度がやや低下していた、酸化除染中に試験片の酸化皮膜が過マンガン酸により溶解される際、過マンガン酸が分解反応して試験後に濃度がやや低下していたと考えられる。酸化皮膜が試験片に残っていた 1 サイクル、2 サイクル目と比べて、3 サイクル目の濃度低下程度が小さいのは、これが理由であると考えられる。これらは、実機でも同様のため、実験上の問題は特にない。還元除染試験で用いたシュウ酸は、試験前後で大きな変化はなかった。なお、ヒドラジンにより調整した pH は試験中に試験片との反応により変化する可能性もあったことから、試験開始初期は高い頻度で試験液をサンプリングし pH 測定した。結果としてはほとんど変化がなかった。いずれのサイクルも同様の結果であった。

除染試験中の温度履歴を図 3.3.2(2)-13 に示す。目標試験温度（95℃）に到達した時

点を試験開始時間とし、所定の試験時間経過後に試験終了とした。試験液温度は試験中、目標試験温度に対して±5℃以内の範囲であり、ほぼ一定であった。

以上より、除染試験は適切に実施したことを確認した。

<参考文献>

- [3.3.2(2)-1] M. Nagase et. al., Material Compatibility Test Results of HOP Chemical Decontamination Method, Water Chemistry and Corrosion in Nuclear Power Plants in Asia, Oct. 14-17, 2013, Taichung, Taiwan (2013).

表 3.3.2(2)-1 試験前後の試験片重量測定結果 (mg)

TP No.	試験前	1サイクル後	2サイクル後	3サイクル後	備考
12	3029.6	3028.8	3028.4	3028.3	SP施工あり、 酸化皮膜あり
13	3052.0	3051.2	3050.8	3050.7	
14	3064.6	3063.7	3063.3	3063.3	
15	3039.6	3039.4	3039.2	3039.2	SP施工あり、 酸化皮膜なし
16	3052.0	3052.0	3051.8	3051.7	
17	3047.3	3047.1	3047.0	3047.0	
19	3056.2	3055.6	3055.1	3055.1	SP施工なし、 酸化皮膜あり
20	3069.4	3068.8	3068.4	3068.3	
21	3067.2	3066.4	3066.0	3065.9	
22	3045.1	3045.1	3044.9	3044.9	SP施工なし、 酸化皮膜なし
23	3044.5	3044.4	3044.3	3044.2	
24	3033.2	3033.1	3033.0	3032.9	

表 3.3.2(2)-2 試験前後の重量減量および重量減量から算出した減肉厚さ

TP No.	試験前後の重量減量 (試験前-試験後, mg)			重量減量から算出した 減肉厚さ, μm			備考
	1サイクル 後	2サイクル 後	3サイクル 後	1サイクル 後	2サイクル 後	3サイクル 後	
12	0.8	1.2	1.3	0.20	0.29	0.32	SP施工あり、 酸化皮膜あり
13	0.8	1.2	1.3	0.20	0.29	0.32	
14	0.9	1.3	1.3	0.22	0.32	0.32	
15	0.2	0.4	0.4	0.05	0.10	0.10	SP施工あり、 酸化皮膜なし
16	0.0	0.2	0.3	0	0.05	0.07	
17	0.2	0.3	0.3	0.05	0.07	0.07	
19	0.6	1.1	1.1	0.15	0.27	0.27	SP施工なし、 酸化皮膜あり
20	0.6	1.0	1.1	0.15	0.24	0.27	
21	0.8	1.2	1.3	0.20	0.29	0.32	
22	0.0	0.2	0.2	0	0.05	0.05	SP施工なし、 酸化皮膜なし
23	0.1	0.2	0.3	0.02	0.05	0.07	
24	0.1	0.2	0.3	0.02	0.05	0.07	

表 3.3.2(2)-3 試験前後の水質分析結果

除染 モード	サンプル 採取時	1サイクル			2サイクル			3サイクル		
		過マンガン酸 (ppm)	シュウ酸 (ppm)	pH	過マンガン酸 (ppm)	シュウ酸 (ppm)	pH	過マンガン酸 (ppm)	シュウ酸 (ppm)	pH
酸化 除染	開始時	203	—	—	201	—	—	197	—	—
	終了時	188	—	—	192	—	—	191	—	—
還元 除染	開始時	—	2030	2.54	—	2080	2.56	—	2150	2.57
	2h後	—	—	2.55	—	—	2.57	—	—	2.56
	4h後	—	—	2.55	—	—	2.56	—	—	2.57
	17h後	—	—	2.56	—	—	2.55	—	—	2.55
	21h後	—	—	2.55	—	—	2.55	—	—	2.54
	終了時	—	2010	2.54	—	2130	2.55	—	2190	2.53

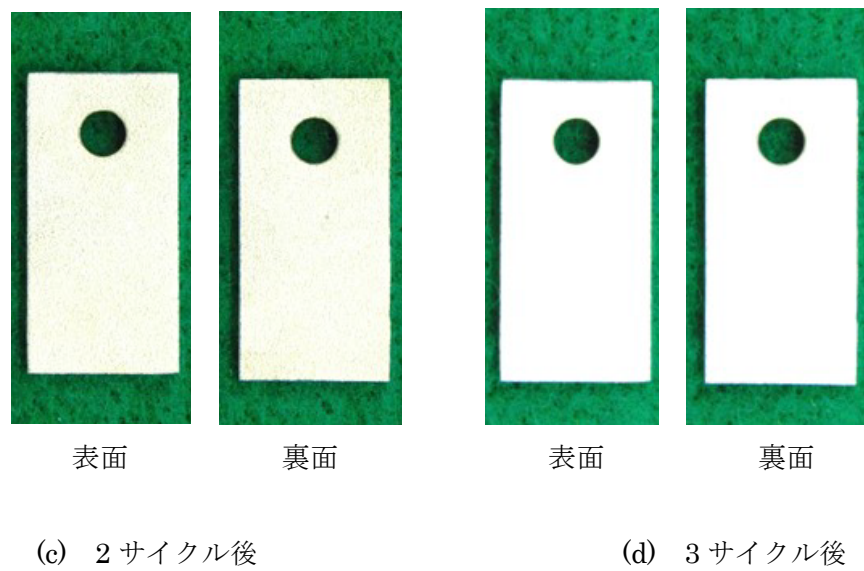
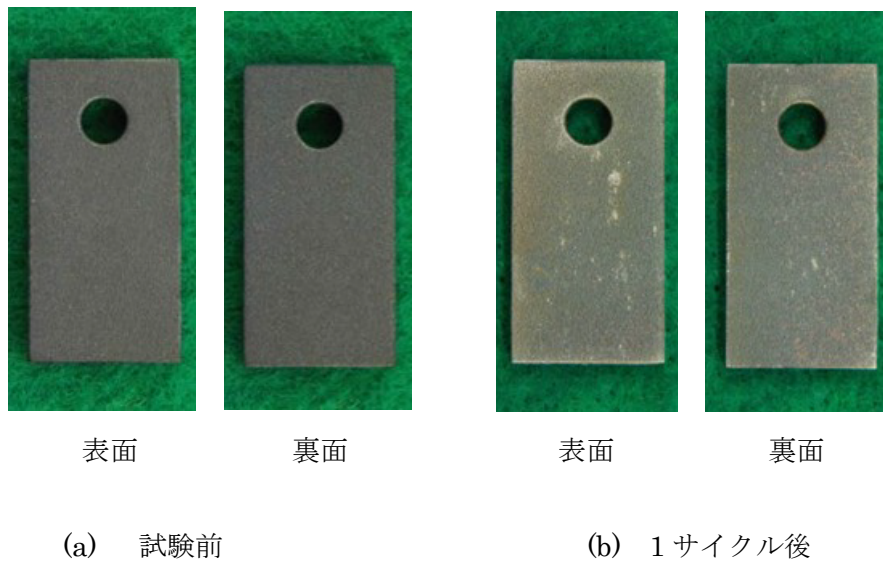


図 3.3.2(2)-1 (1/12) 試験前後の試験片外観
(TP No. 12 : SP 施工あり、酸化皮膜あり)

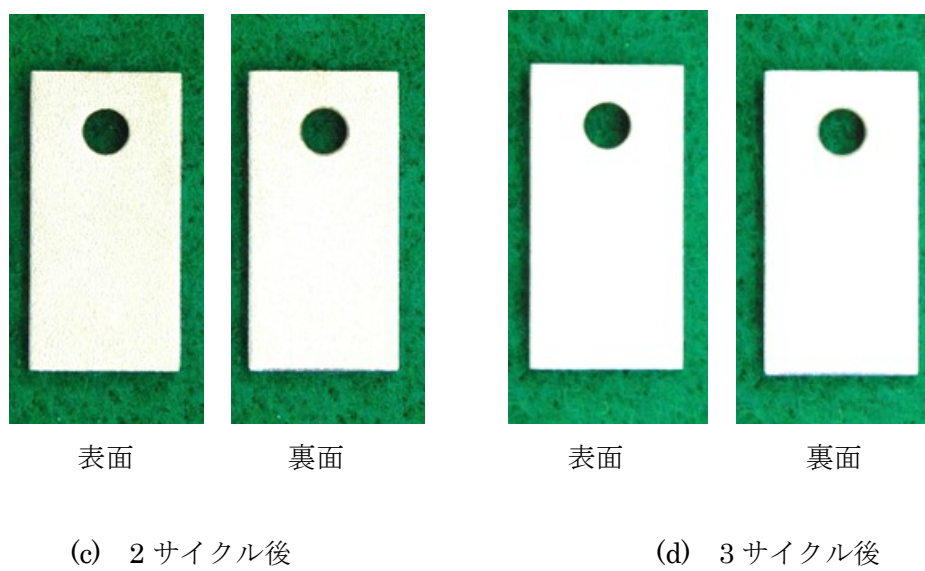
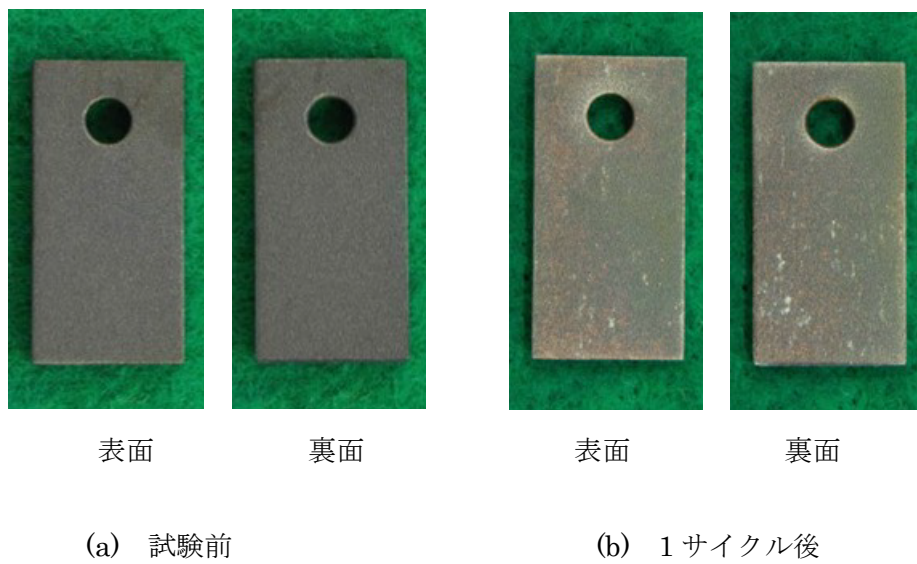


図 3.3.2(2)-1 (2/12) 試験前後の試験片外観
(TP No. 13 : SP 施工あり、酸化皮膜あり)

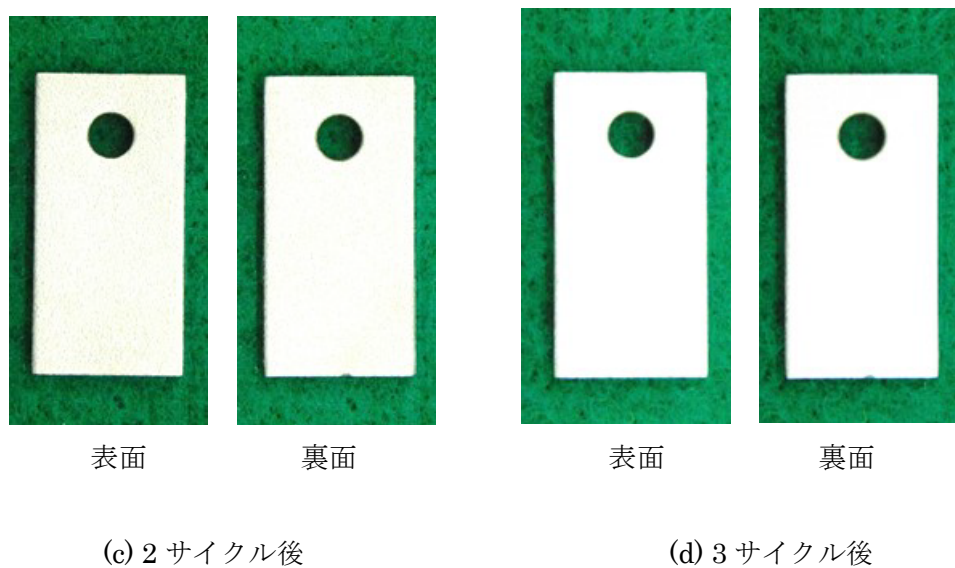
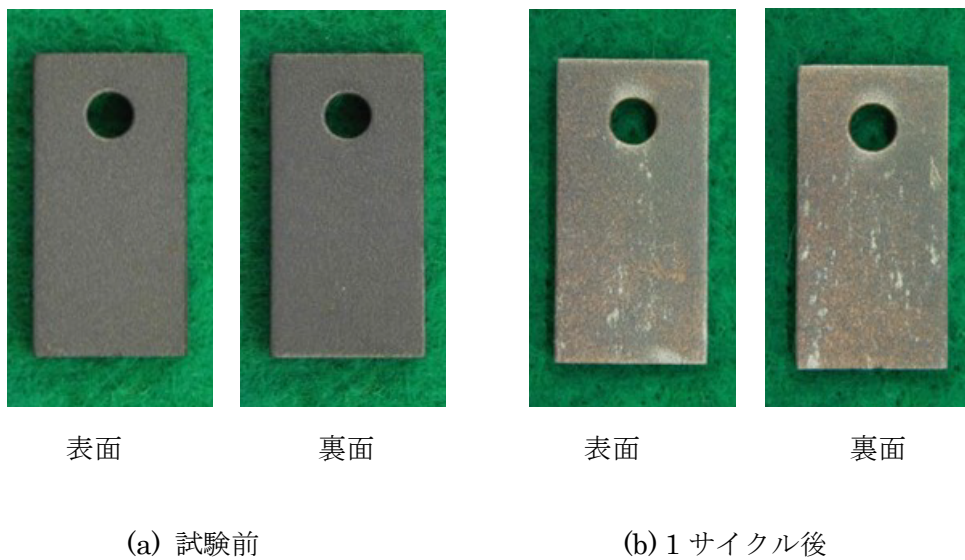


図 3.3.2(2)-1 (3/12) 試験前後の試験片外観
(TP No. 14 : SP 施工あり、酸化皮膜あり)

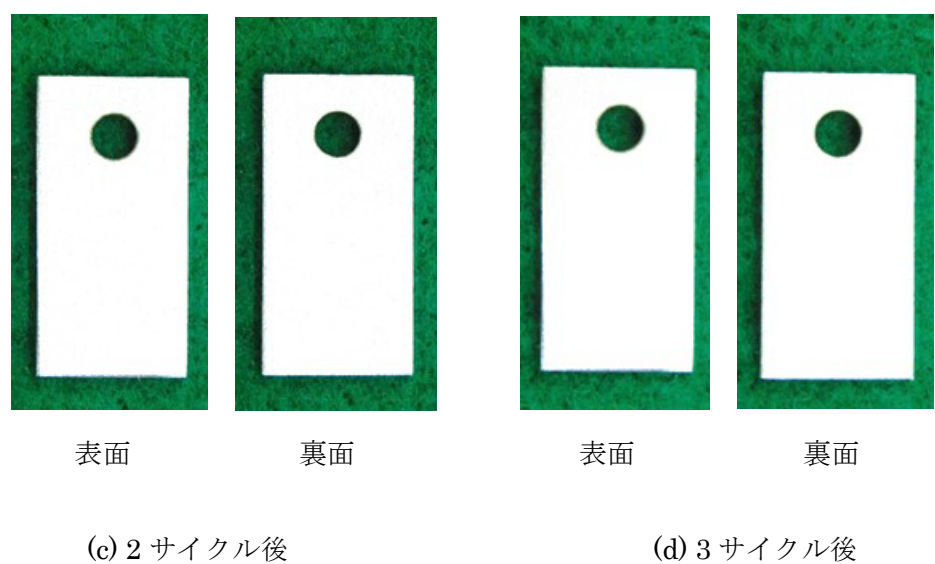
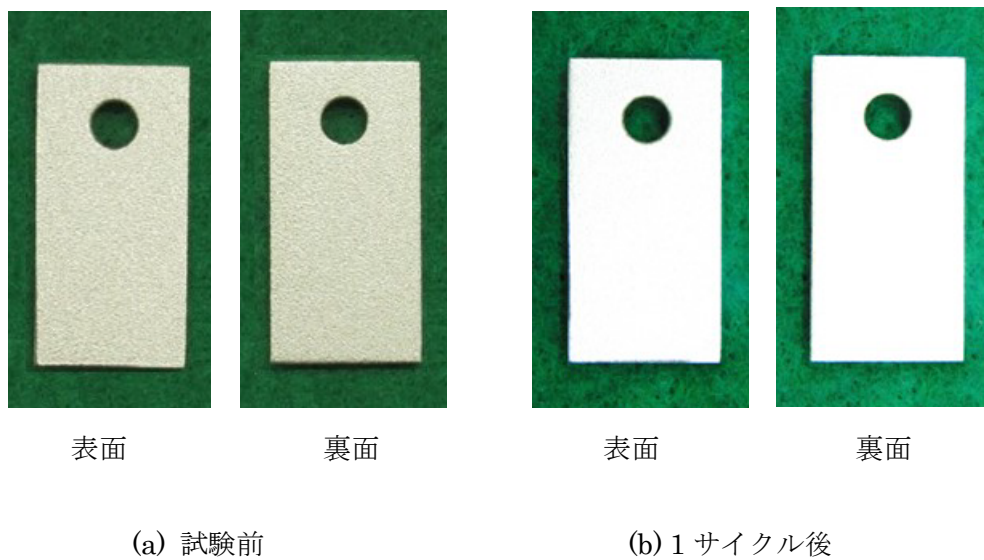
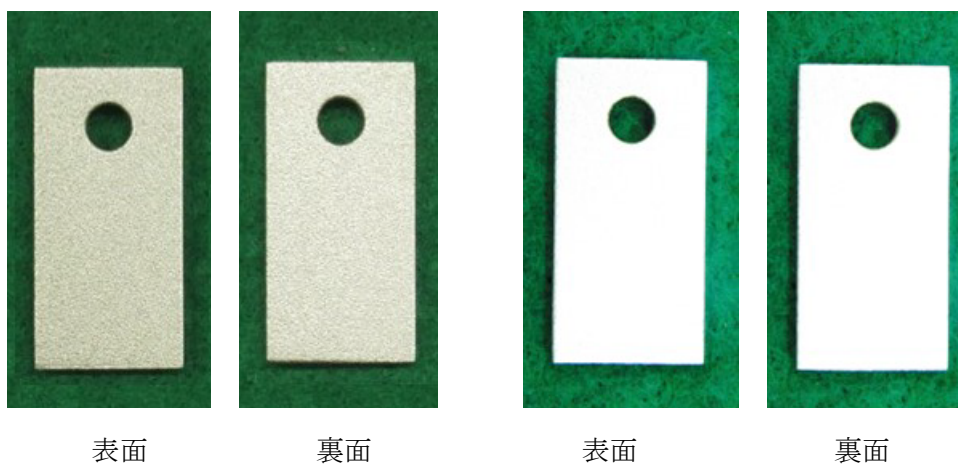
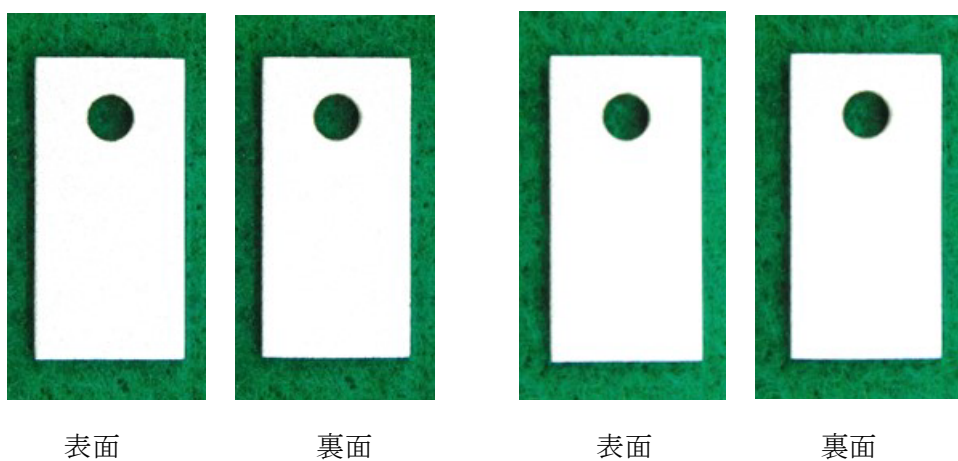


図 3.3.2(2)-1 (4/12) 試験前後の試験片外観
(TP No. 15 : SP 施工あり、酸化皮膜なし)



(a) 試験前

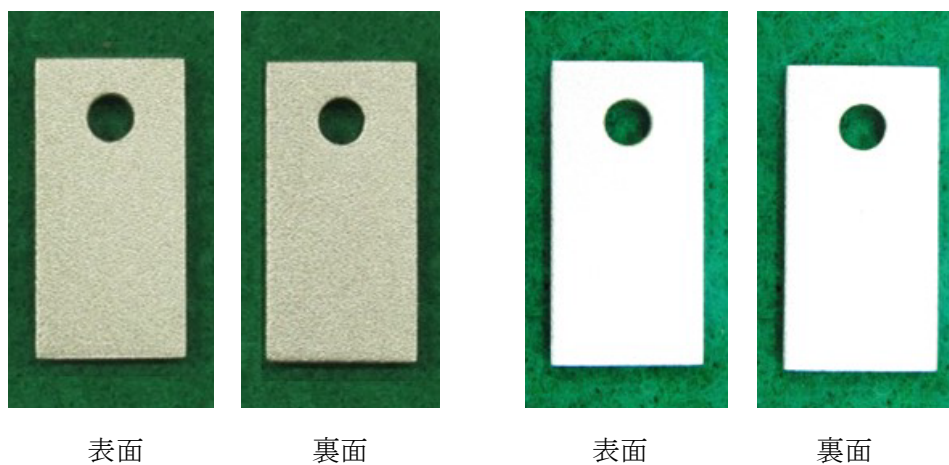
(b) 1 サイクル後



(c) 2 サイクル後

(d) 3 サイクル後

図 3.3.2(2)-1 (5/12) 試験前後の試験片外観
(TP No. 16 : SP 施工あり、酸化皮膜なし)



表面

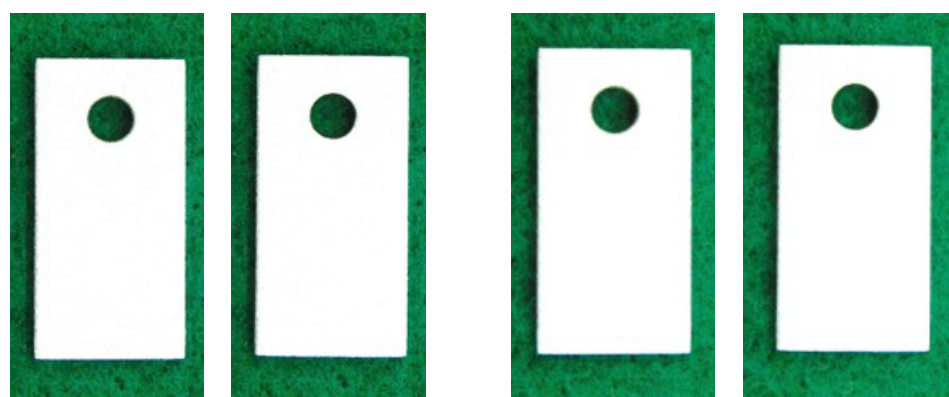
裏面

表面

裏面

(a) 試験前

(b) 1 サイクル後



表面

裏面

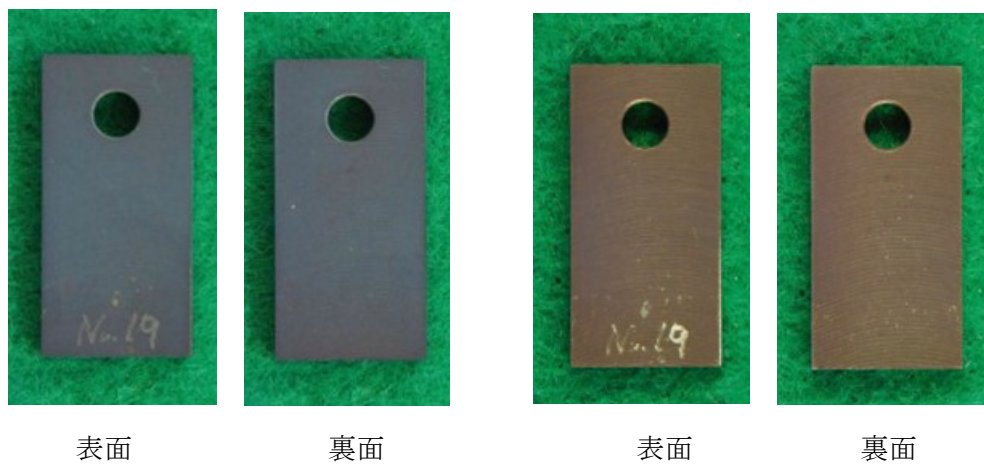
表面

裏面

(c) 2 サイクル後

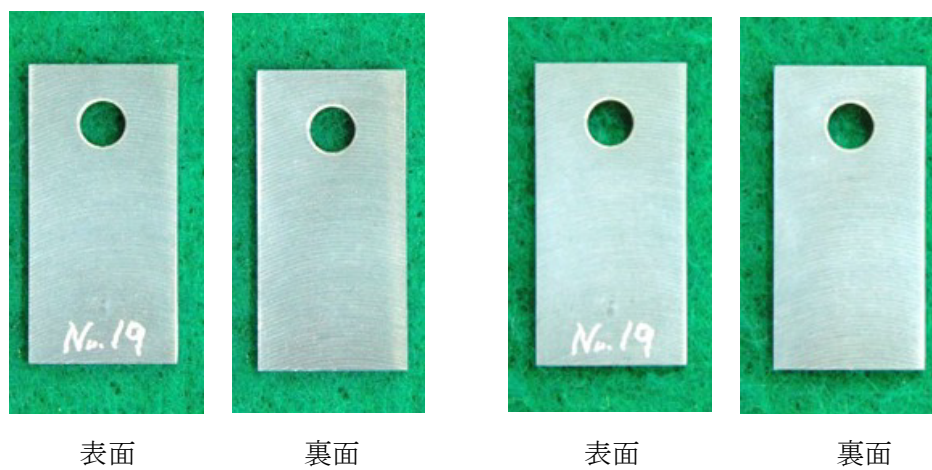
(d) 3 サイクル後

図 3.3.2(2)-1 (6/12) 試験前後の試験片外観
(TP No. 17 : SP 施工あり、酸化皮膜なし)



(a) 試験前

(b) 1 サイクル後



(c) 2 サイクル後

(d) 3 サイクル後

図 3.3.2(2)-1 (7/12) 試験前後の試験片外観
(TP No. 19 : SP 施工なし、酸化皮膜あり)

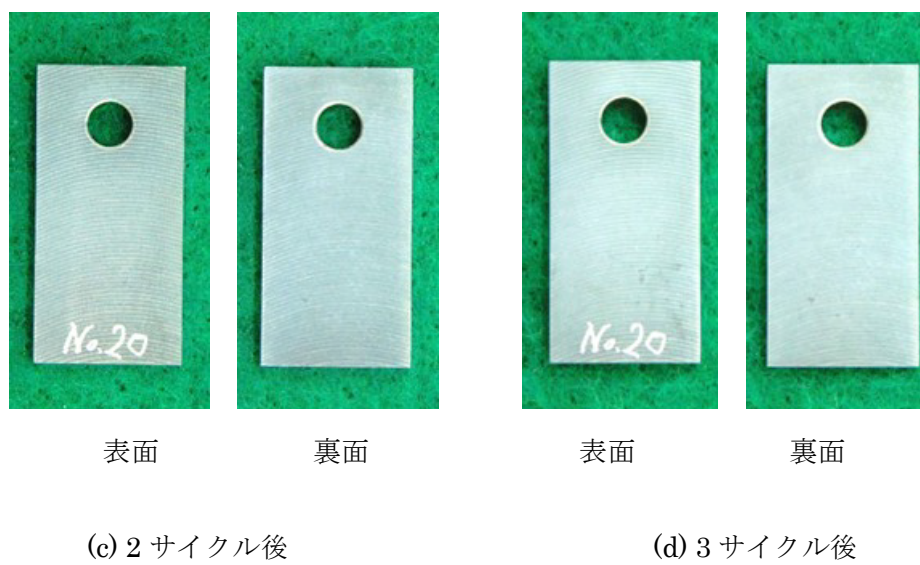
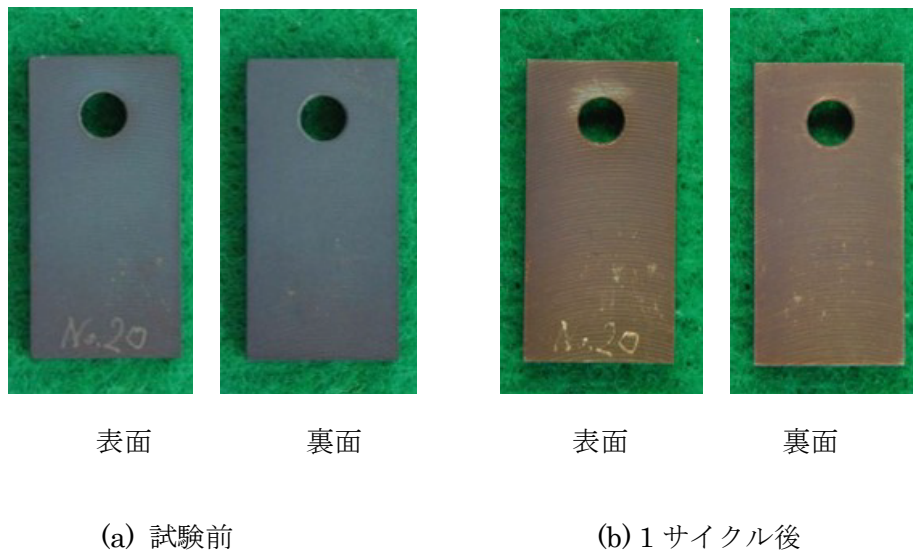


図 3.3.2(2)-1 (8/12) 試験前後の試験片外観
(TP No. 20 : SP 施工なし、酸化皮膜あり)

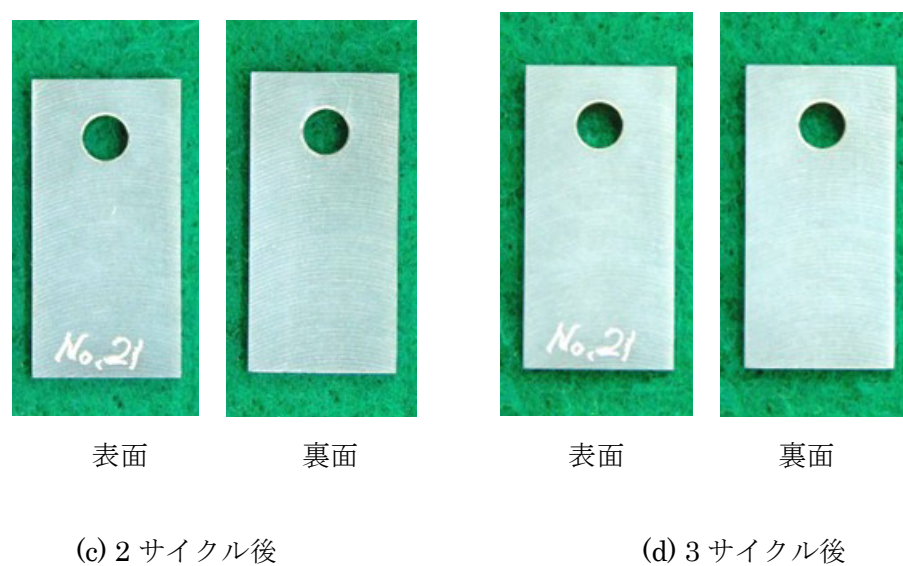
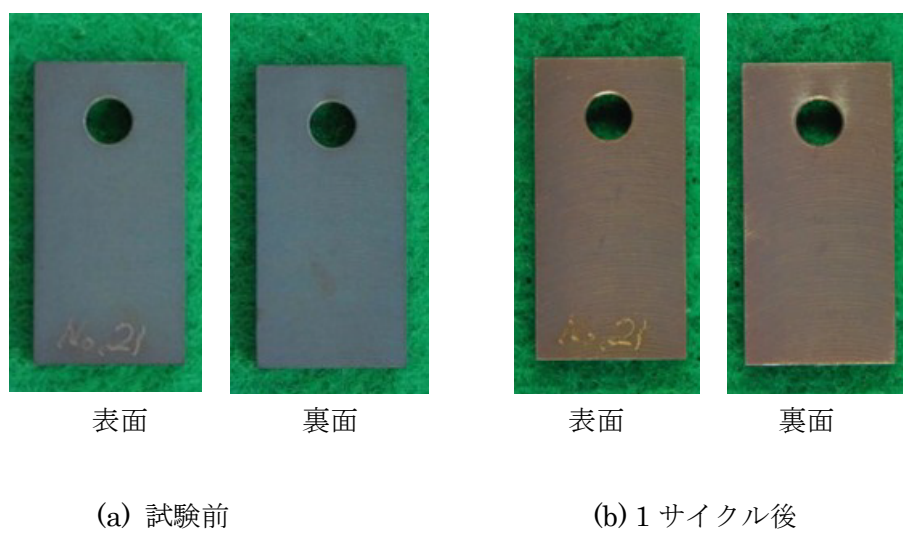


図 3.3.2(2)-1 (9/12) 試験前後の試験片外観
(TP No. 21 : SP 施工なし、酸化皮膜あり)

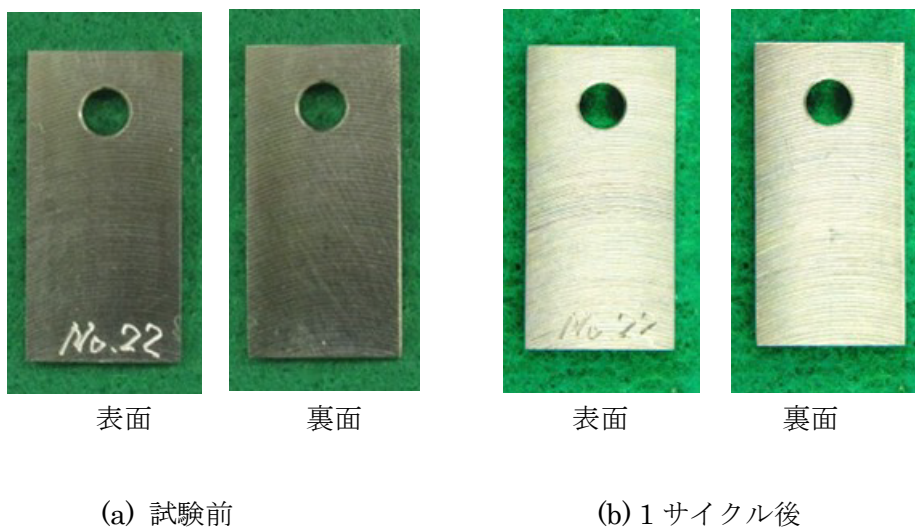
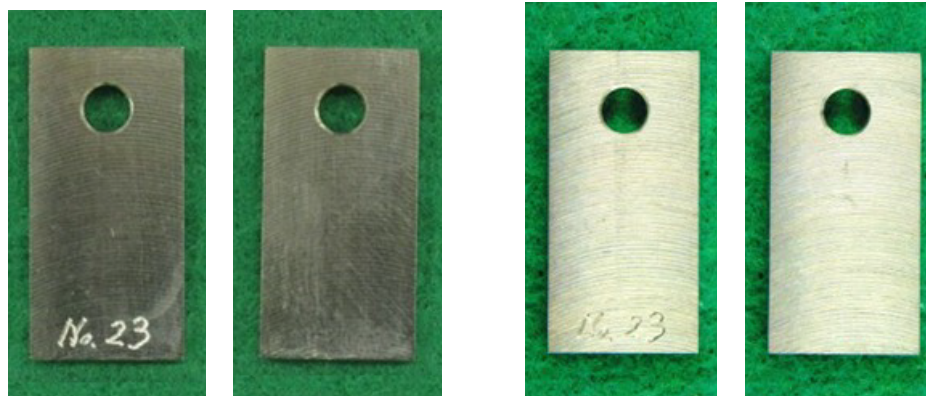


図 3.3.2(2)-1 (10/12) 試験前後の試験片外観
(TP No. 22 : SP 施工なし、酸化皮膜なし)



表面

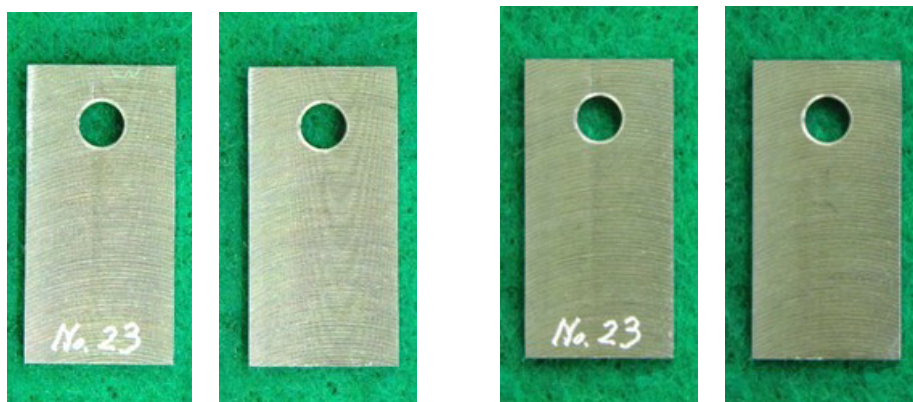
裏面

表面

裏面

(a) 試験前

(b) 1 サイクル後



表面

裏面

表面

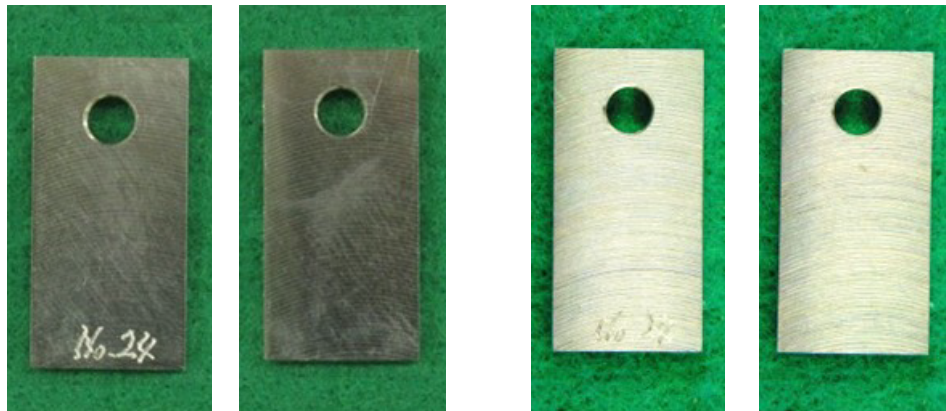
裏面

(c) 2 サイクル後

(d) 3 サイクル後

図 3.3.2(2)-1 (11/12) 試験前後の試験片外観

(TP No. 23 : SP 施工なし、酸化皮膜なし)



表面

裏面

表面

裏面

(a) 試験前

(b) 1 サイクル後



表面

裏面

表面

裏面

(c) 2 サイクル後

(d) 3 サイクル後

図 3.3.2(2)-1 (12/12) 試験前後の試験片外観

(TP No. 24 : SP 施工なし、酸化皮膜なし)

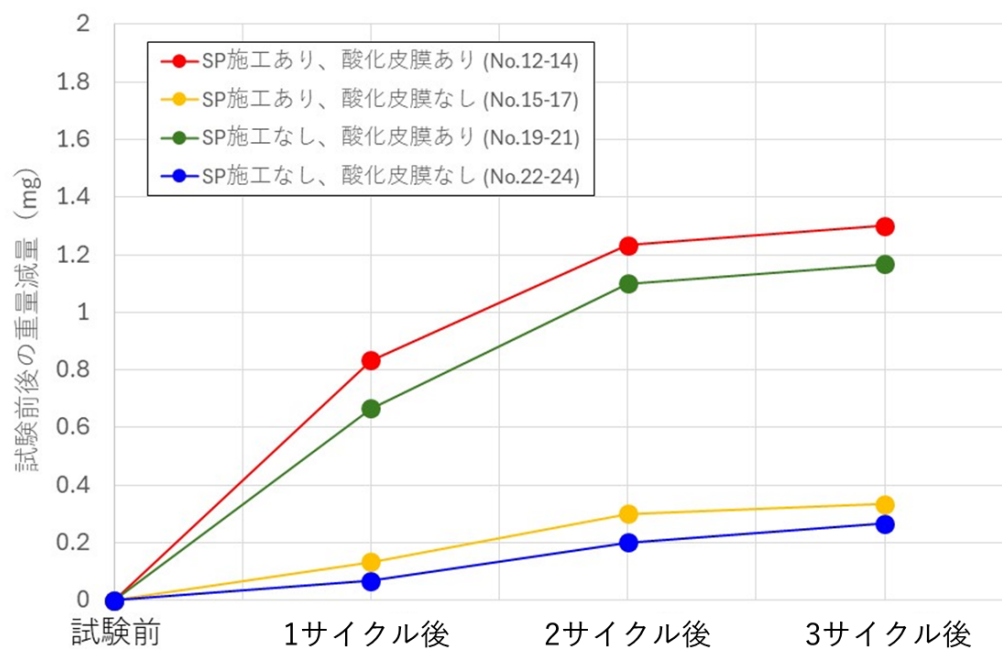
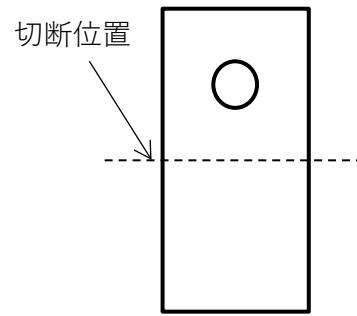
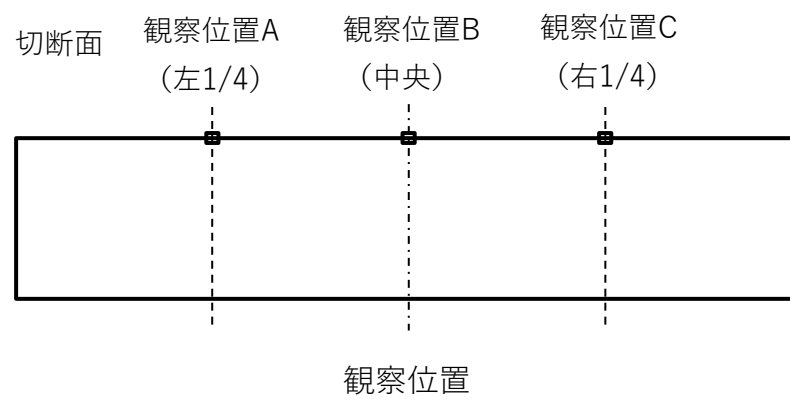


図 3.3.2(2)-2 各サイクル終了時の重量減量の変化



(a) 試験片と切断位置



(b) 切断面と観察位置

図 3.3.2(2)-3 試験片切断位置と断面観察位置

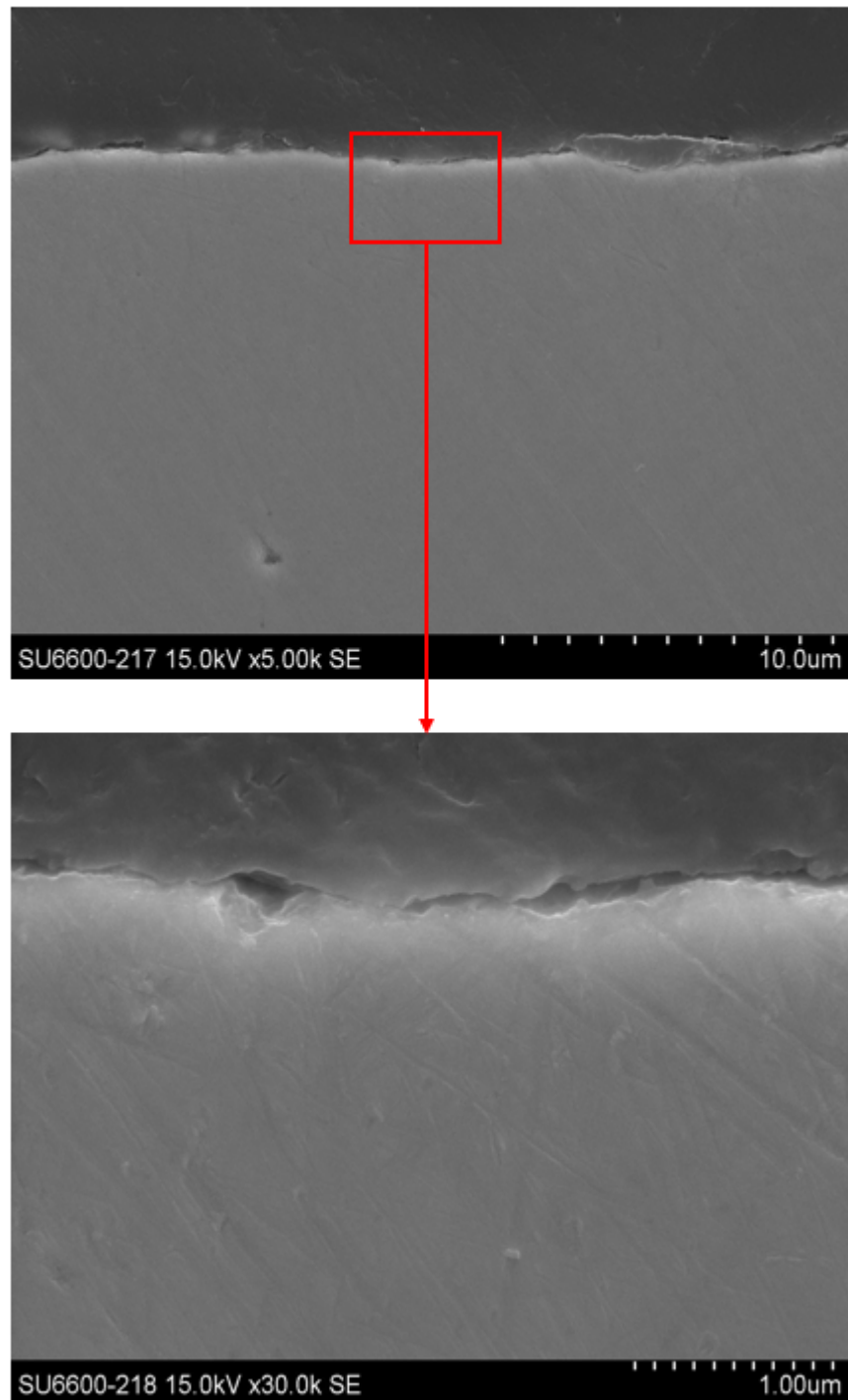


図 3.3.2(2)-4 (1/3) TP No. 12 の断面観察結果
(SP 施工あり、酸化皮膜あり、3 サイクル試験後、観察位置 A、
上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

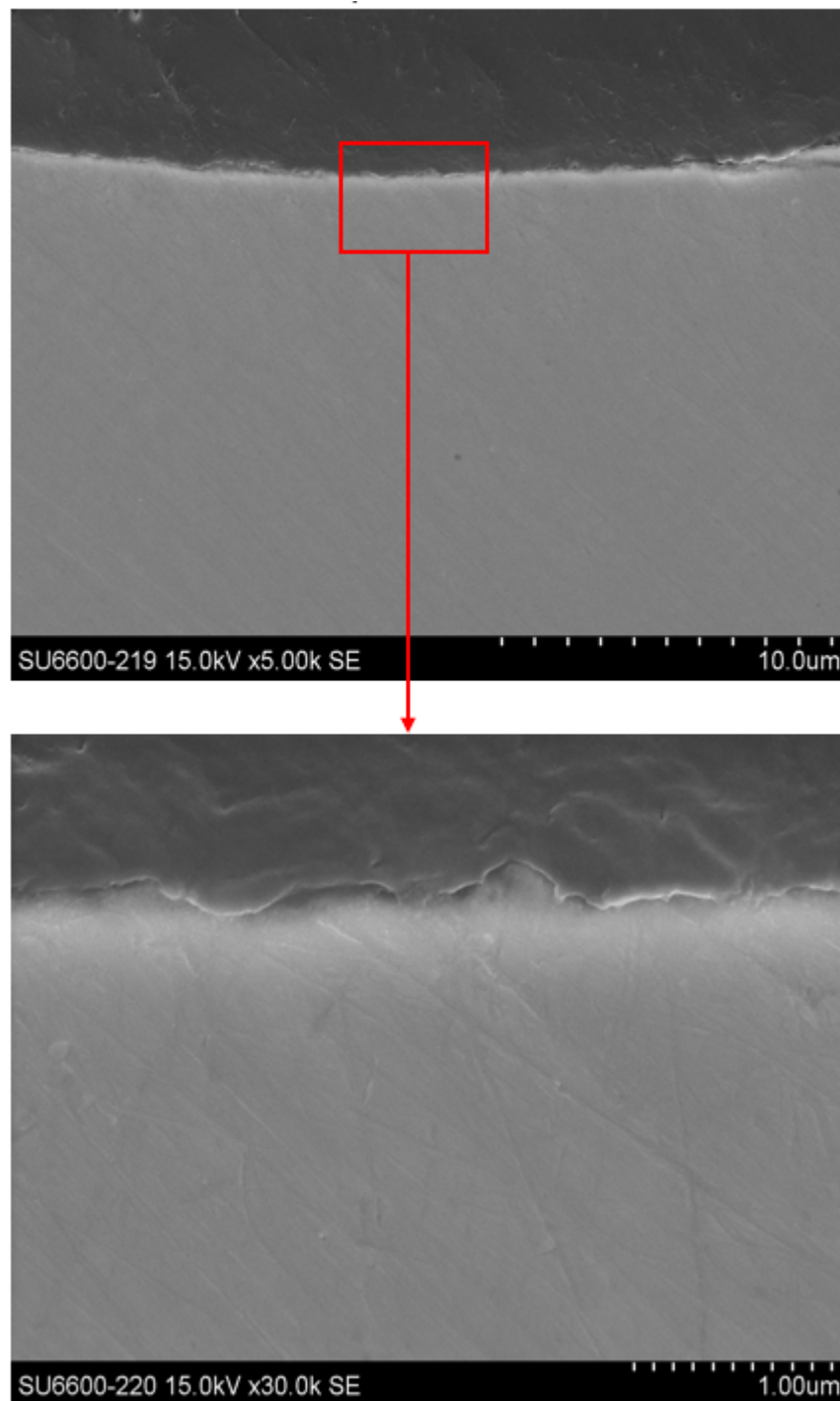


図 3.3.2(2)-4 (2/3) TP No. 12 の断面観察結果
(SP 施工あり、酸化皮膜あり、3 サイクル試験後、観察位置 B、
上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

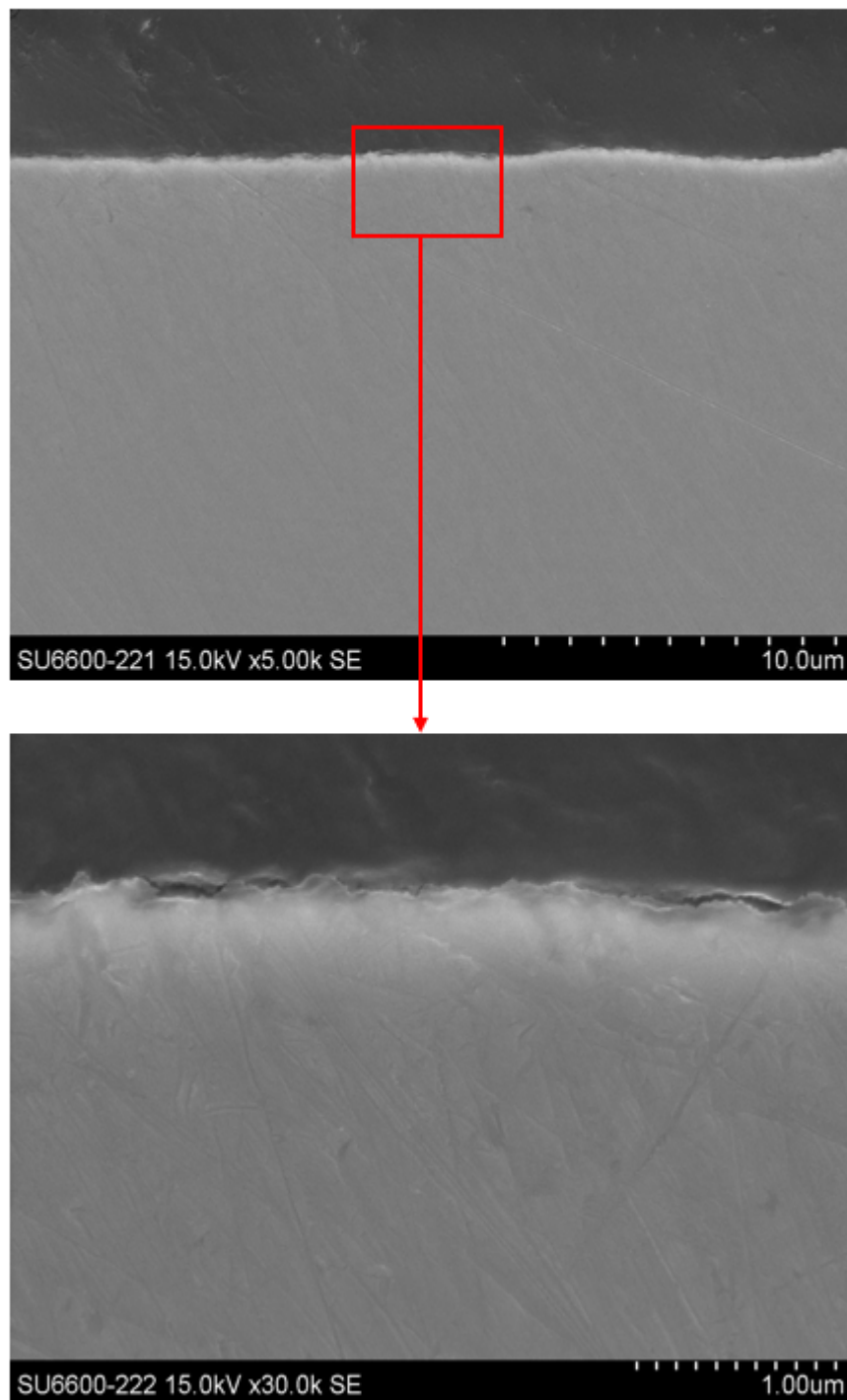


図 3.3.2(2)-4 (3/3) TP No. 12 の断面観察結果
(SP 施工あり、酸化皮膜あり、3 サイクル試験後、観察位置 C、
上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

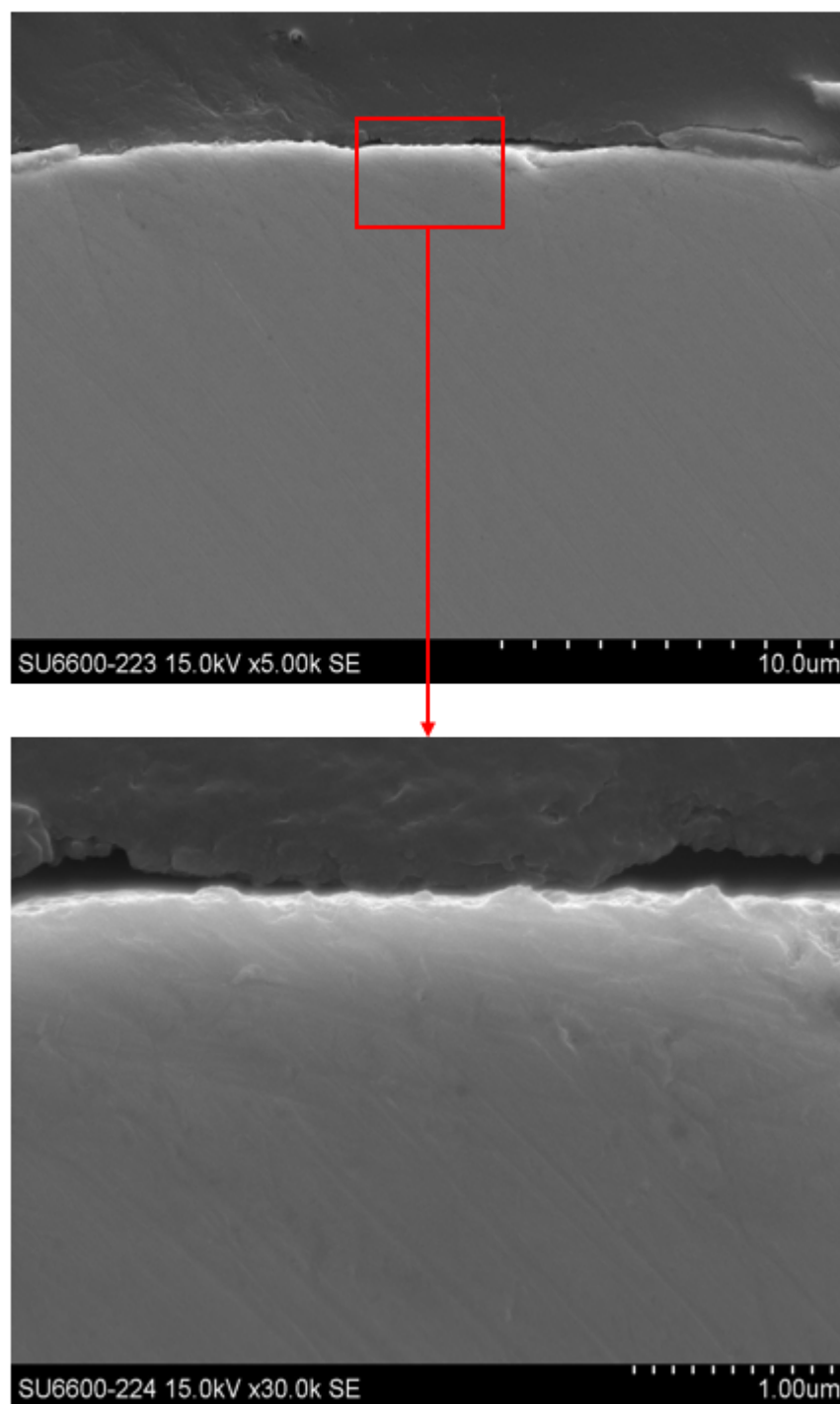


図 3.3.2(2)-5 (1/3) TP No. 15 の断面観察結果
(SP 施工あり、酸化皮膜なし、3 サイクル試験後、観察位置 A、
上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

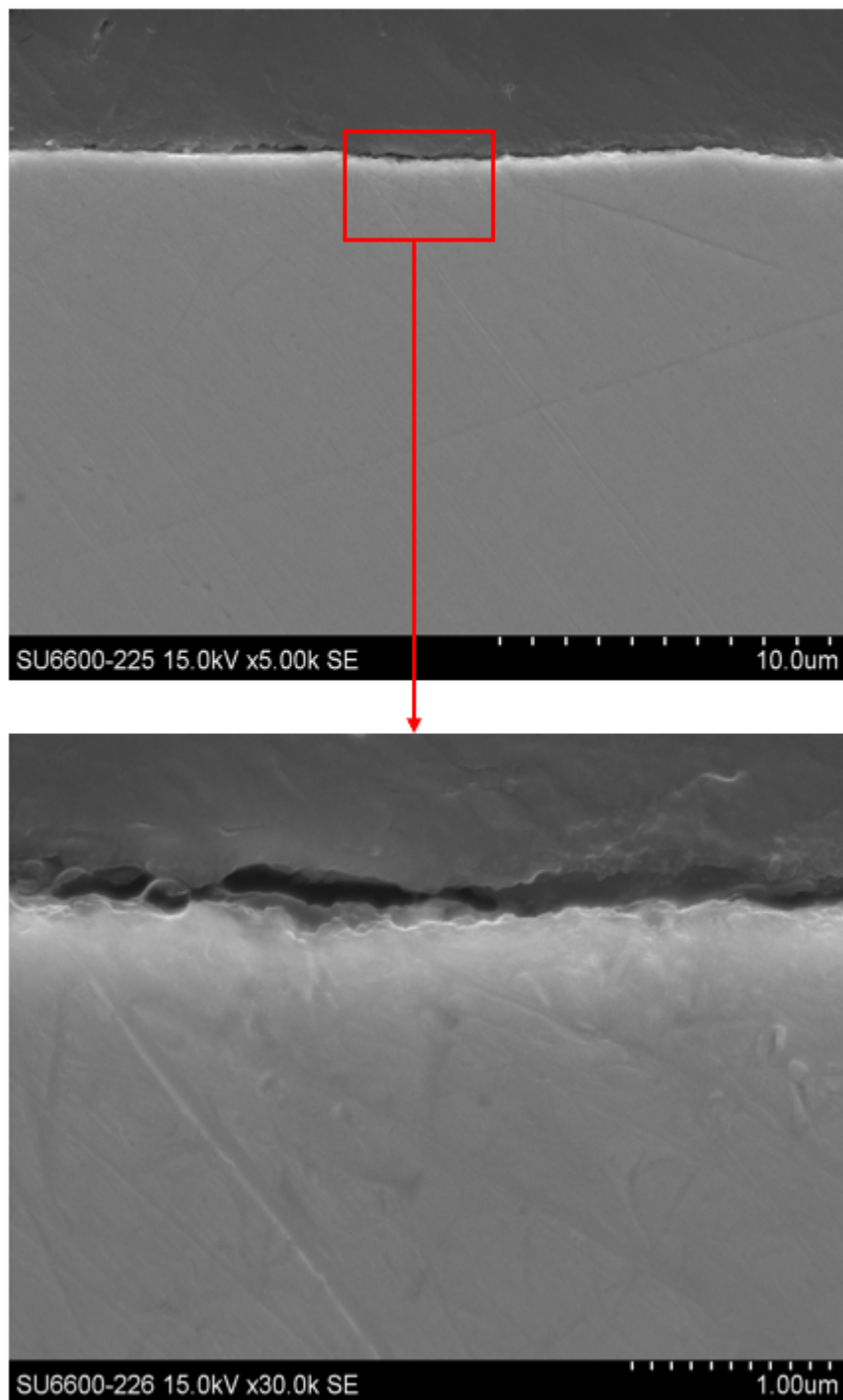


図 3.3.2(2)-5 (2/3) TP No. 15 の断面観察結果
(SP 施工あり、酸化皮膜なし、3 サイクル試験後、観察位置 B、
上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

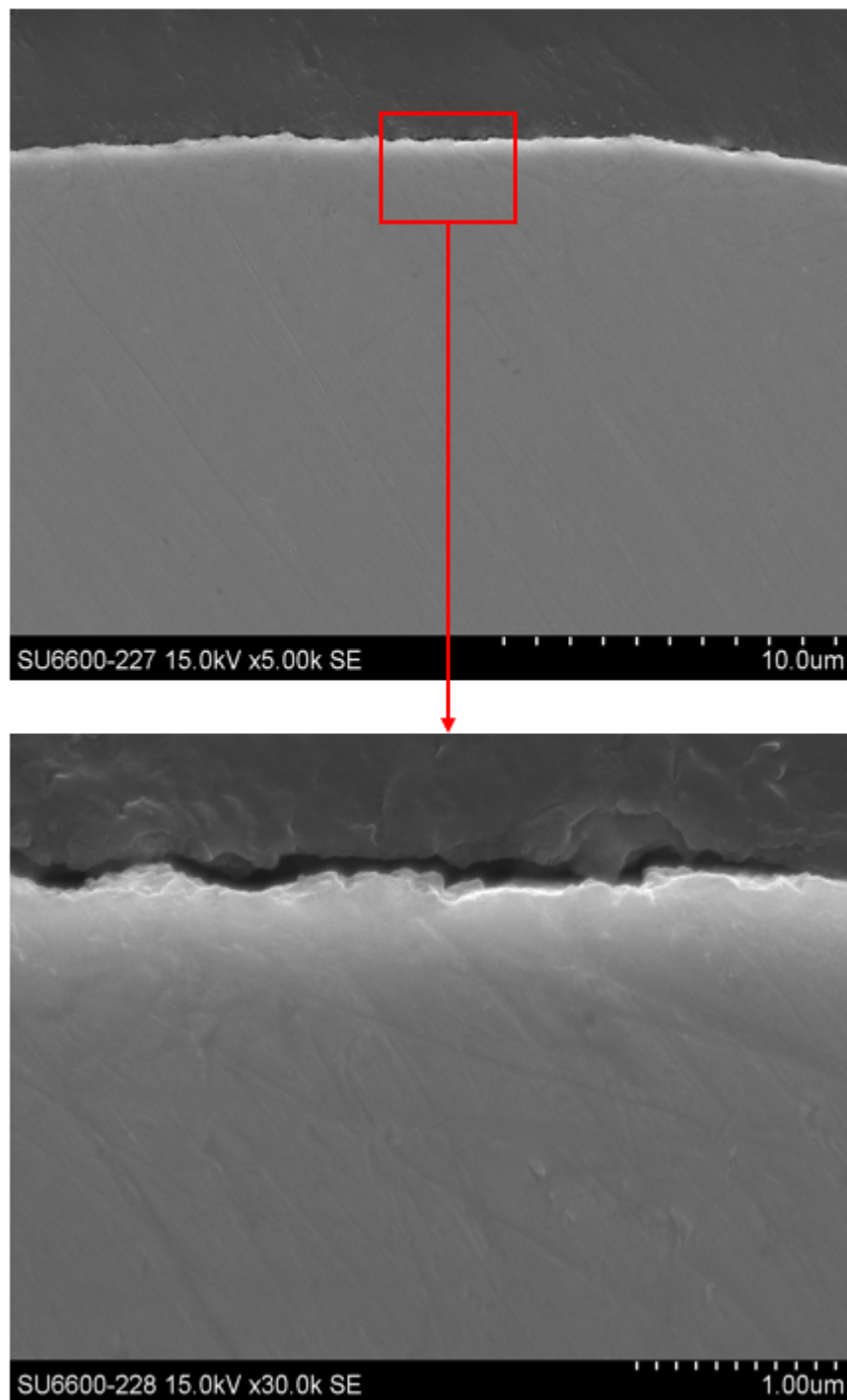


図 3.3.2(2)-5 (3/3) TP No. 15 の断面観察結果
(SP 施工あり、酸化皮膜なし、3 サイクル試験後、観察位置 C、
上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

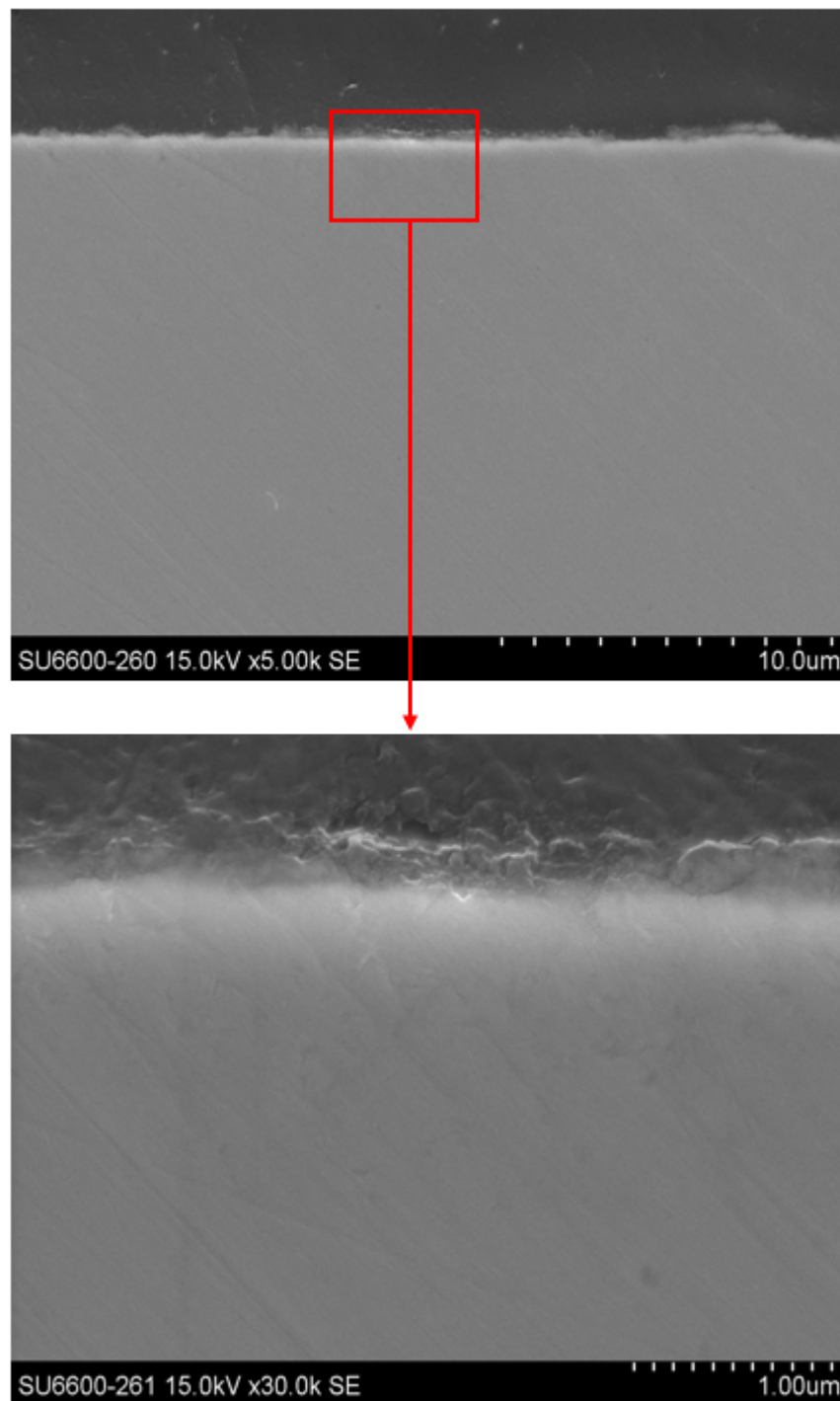


図 3.3.2(2)-6 (1/3) TP No. 19 の断面観察結果
(SP 施工なし、酸化皮膜あり、3 サイクル試験後、観察位置 A、
上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

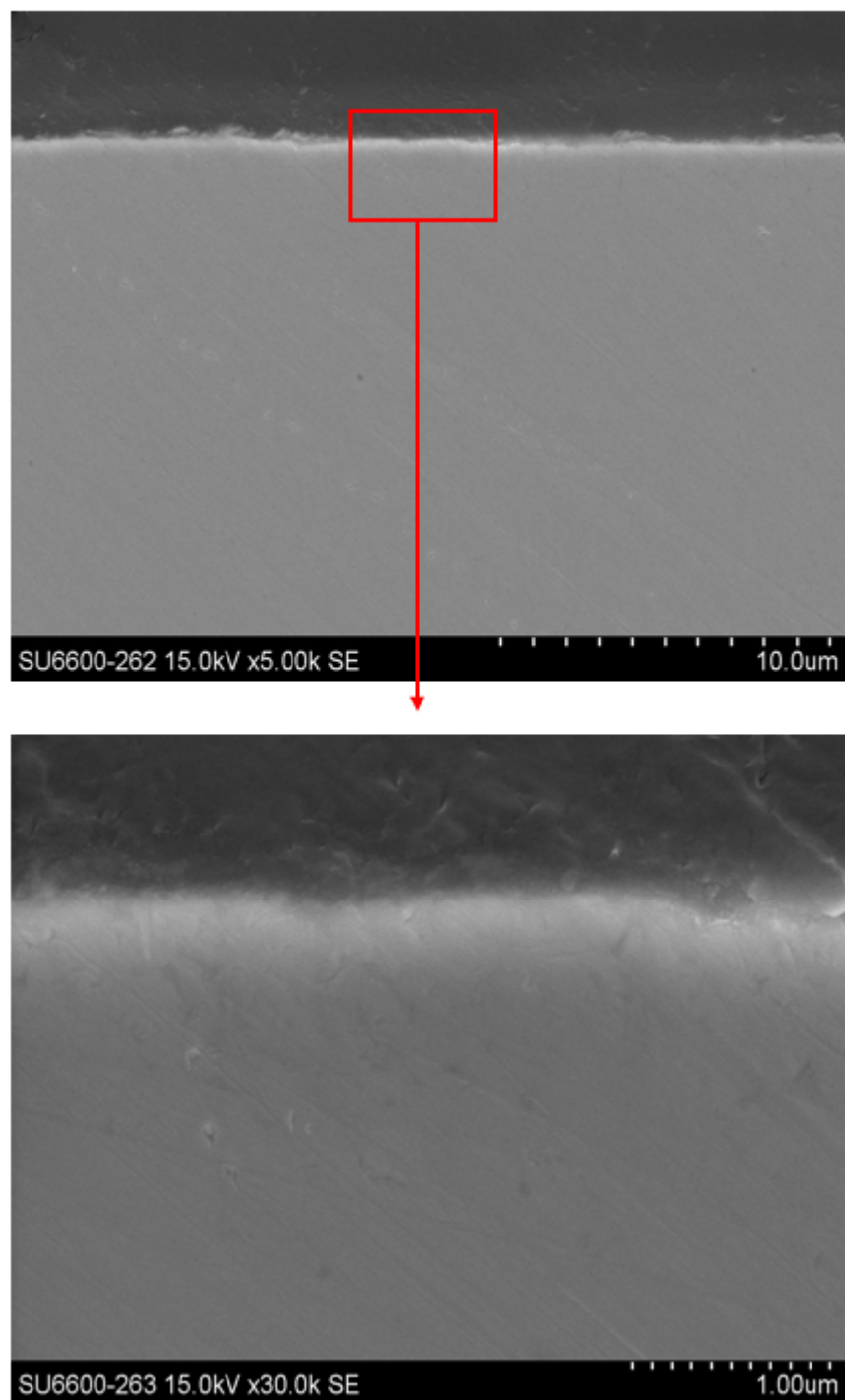


図 3.3.2(2)-6 (2/3) TP No. 19 の断面観察結果
(SP 施工なし、酸化皮膜あり、3 サイクル試験後、観察位置 B、
上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

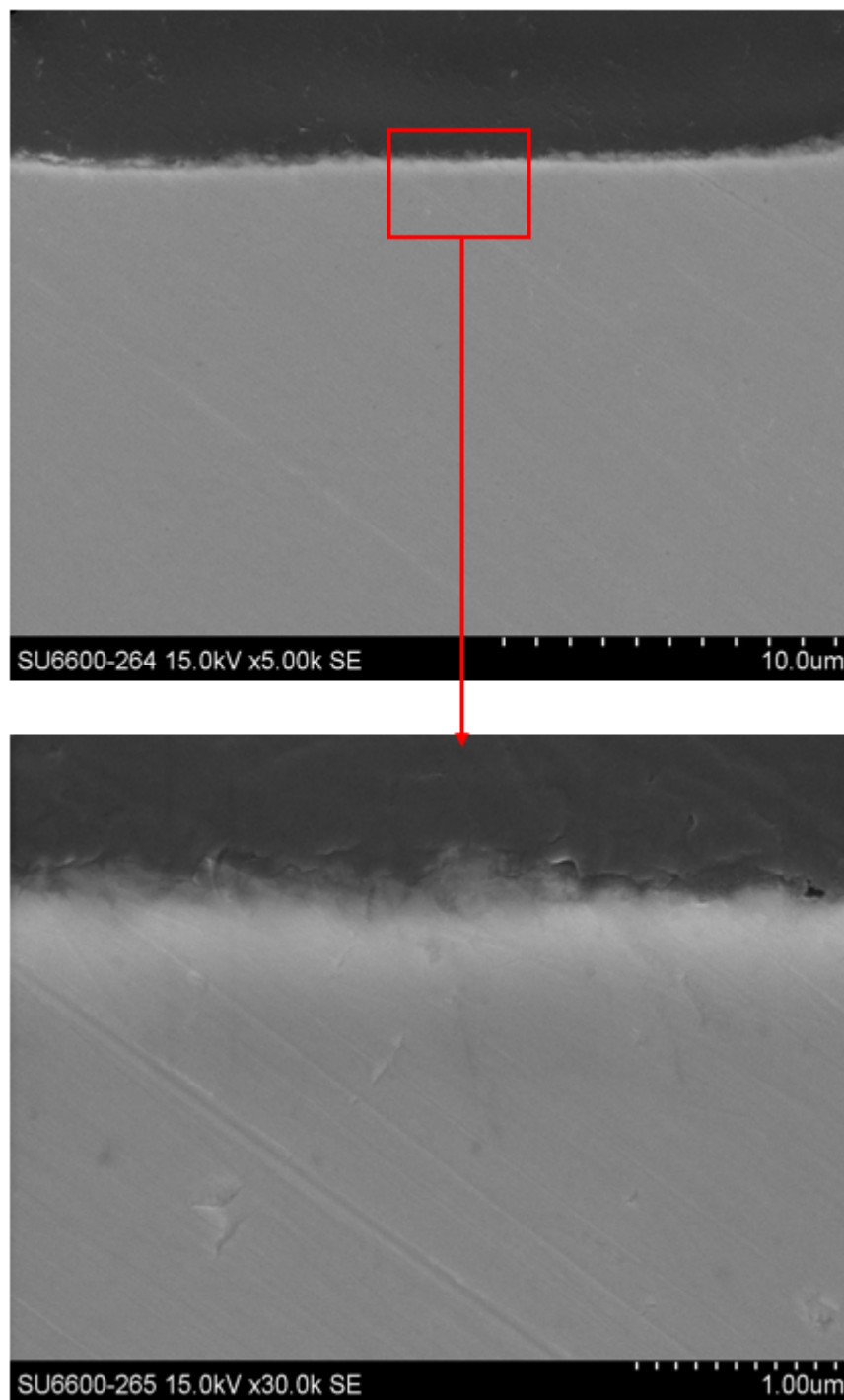


図 3.3.2(2)-6 (3/3) TP No. 19 の断面観察結果
(SP 施工なし、酸化皮膜あり、3 サイクル試験後、観察位置 C、
上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

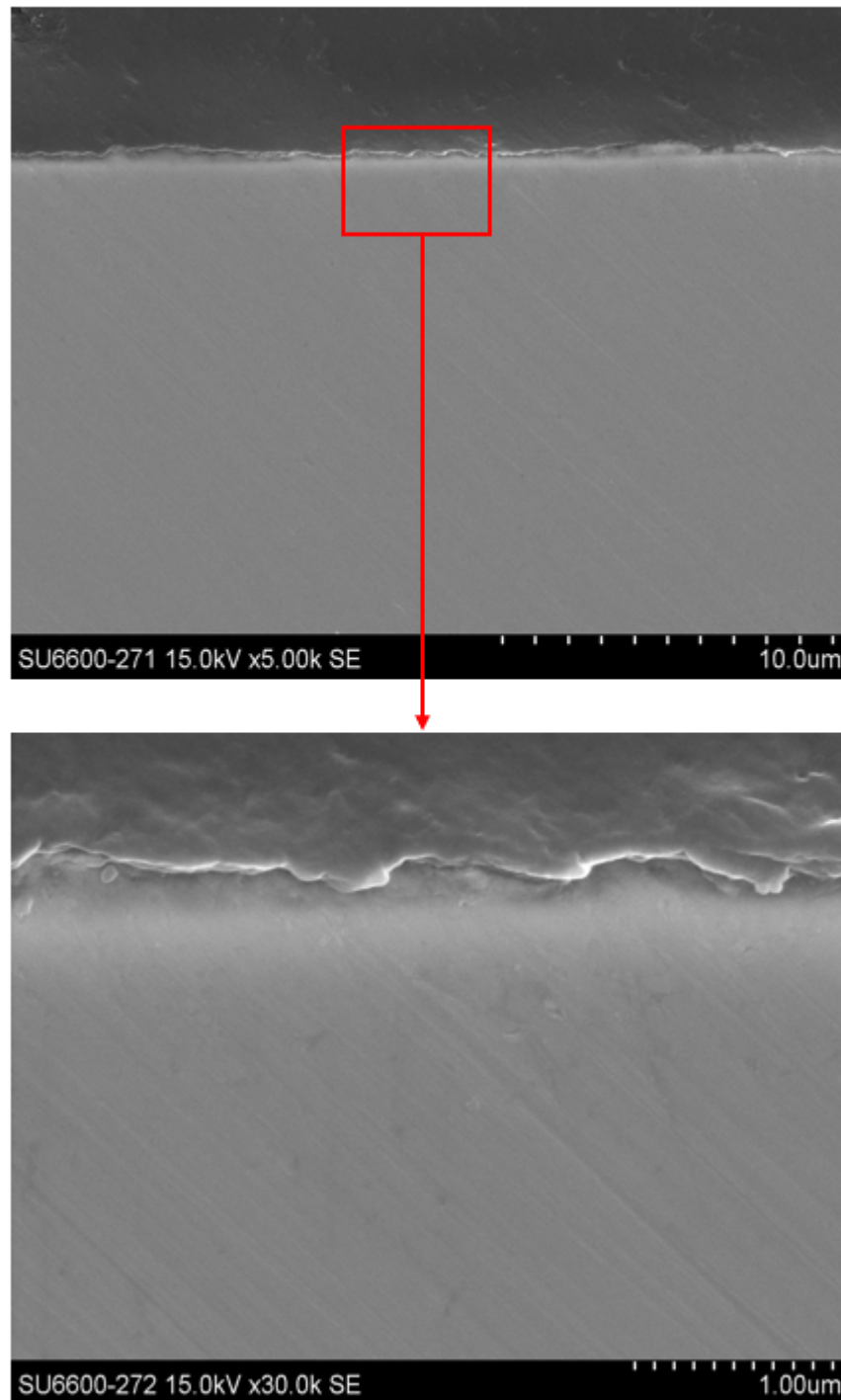


図 3.3.2(2)-7 (1/3) TP No. 22 の断面観察結果
(SP 施工なし、酸化皮膜なし、3 サイクル試験後、観察位置 A、
上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

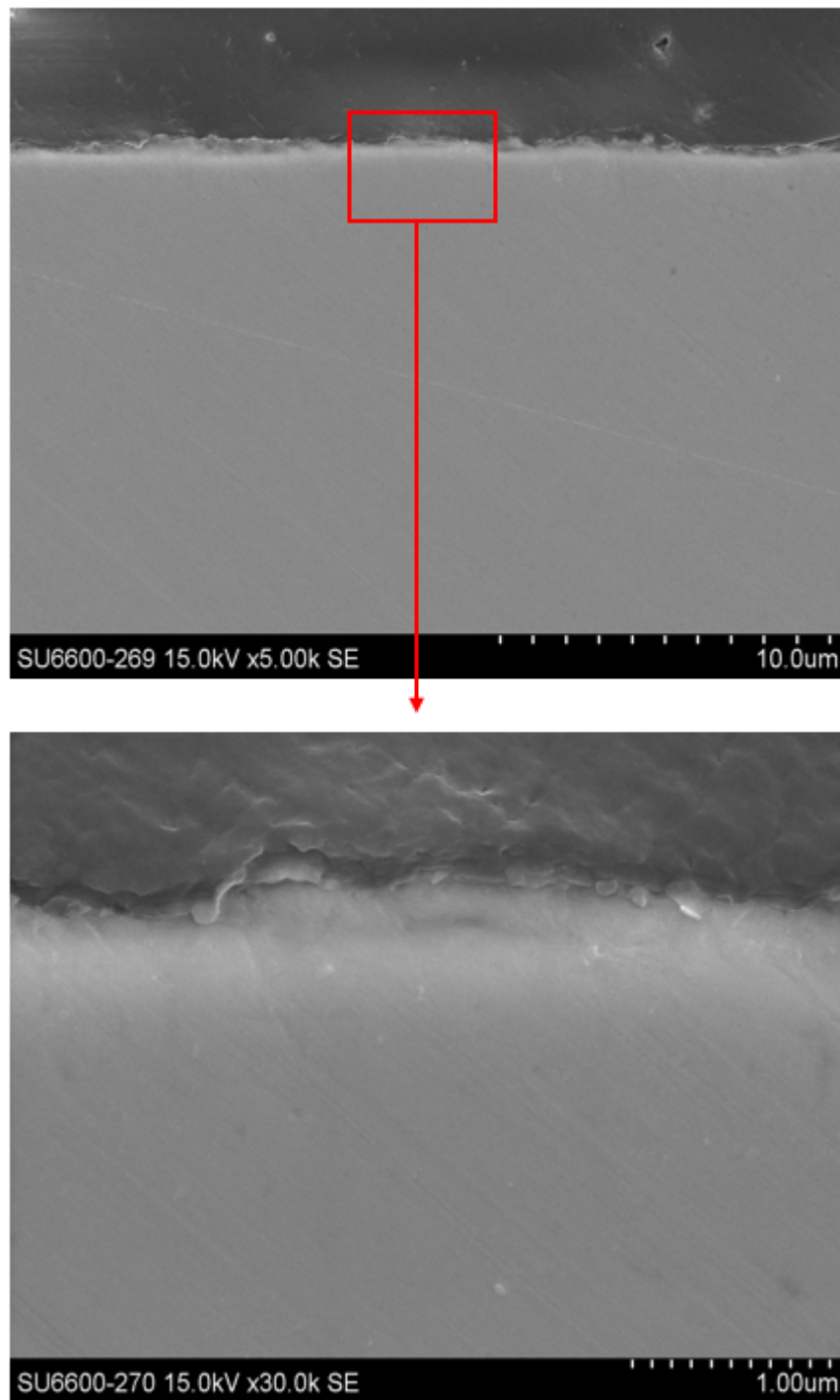


図 3.3.2(2)-7 (2/3) TP No. 22 の断面観察結果
(SP 施工なし、酸化皮膜なし、3 サイクル試験後、観察位置 B、
上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

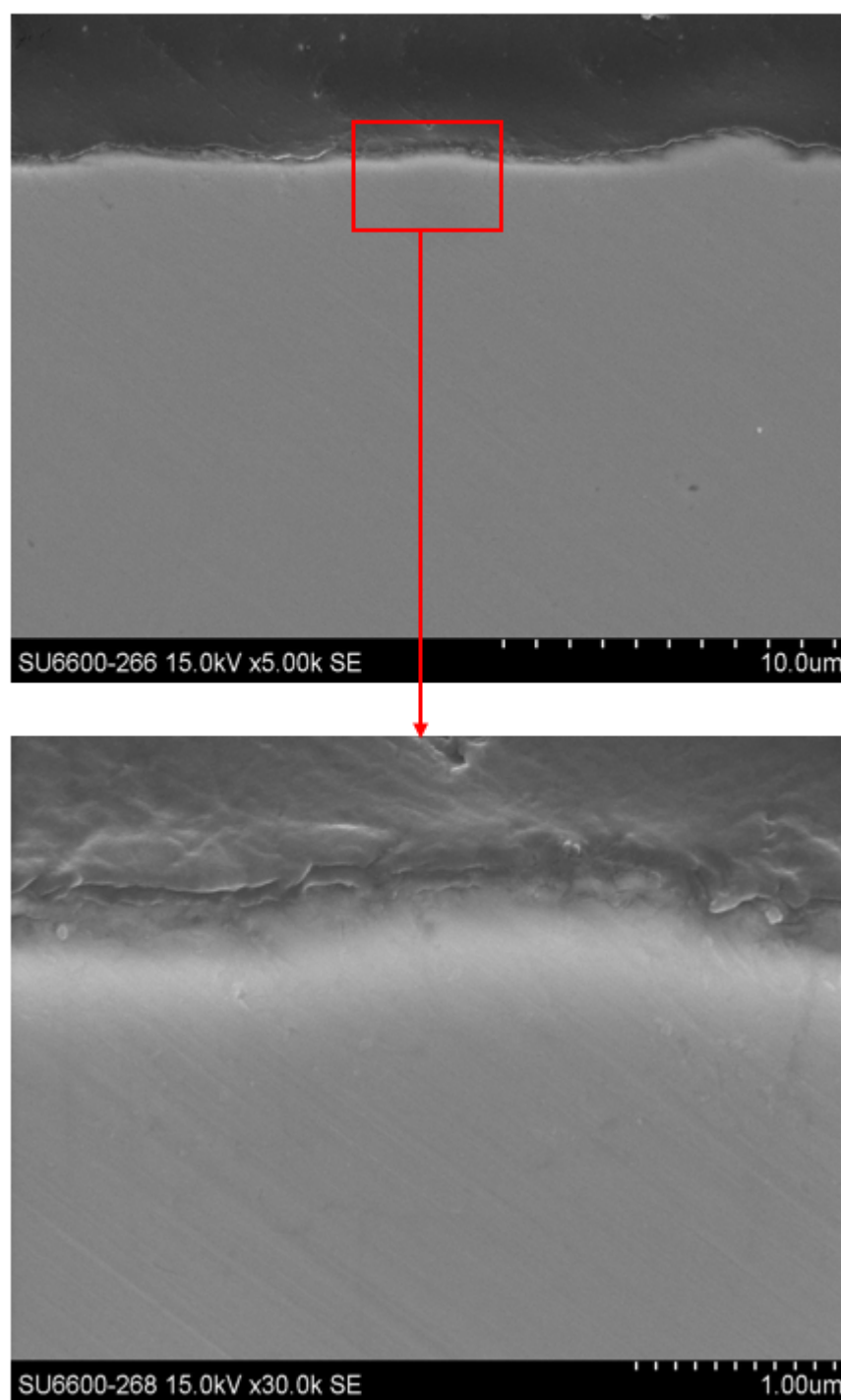
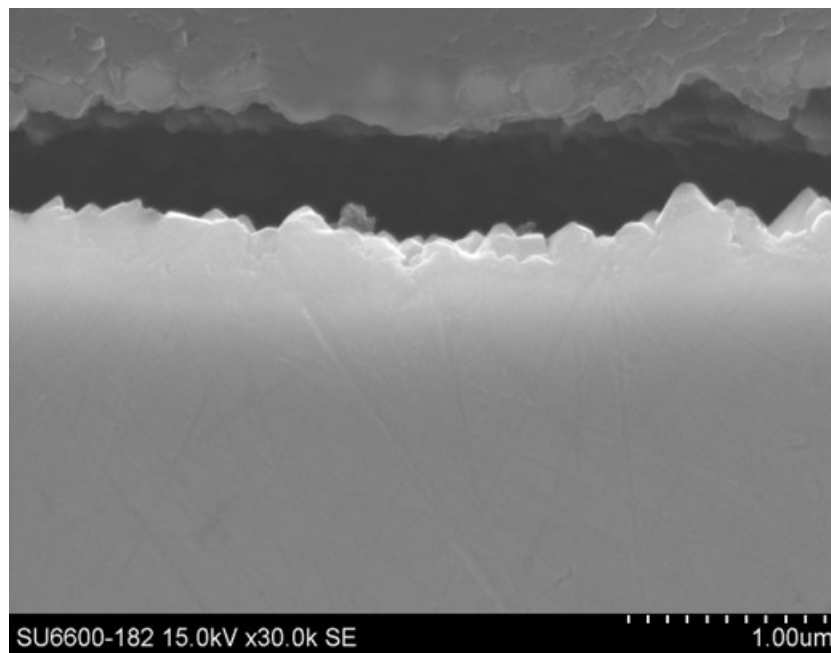
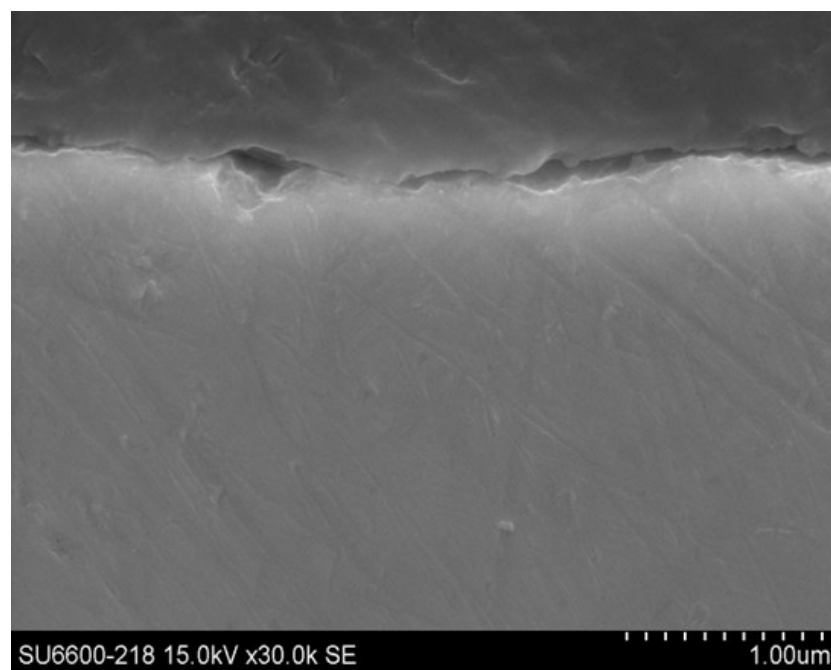


図 3.3.2(2)-7 (3/3) TP No. 22 の断面観察結果
(SP 施工なし、酸化皮膜なし、3 サイクル試験後、観察位置 C、
上図 : 5,000 倍、下図 : 30,000 倍)

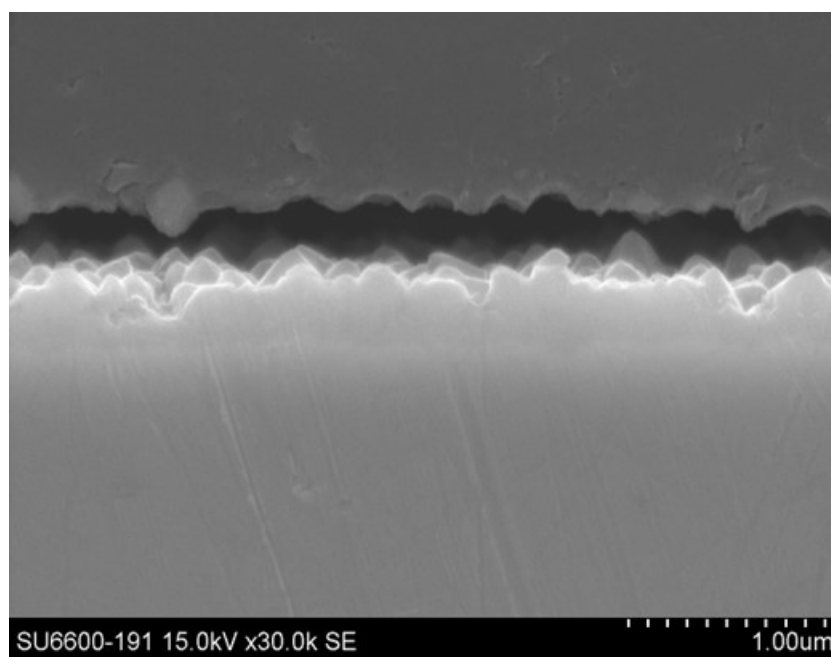


(a) TP No.11 (除染試験なし)

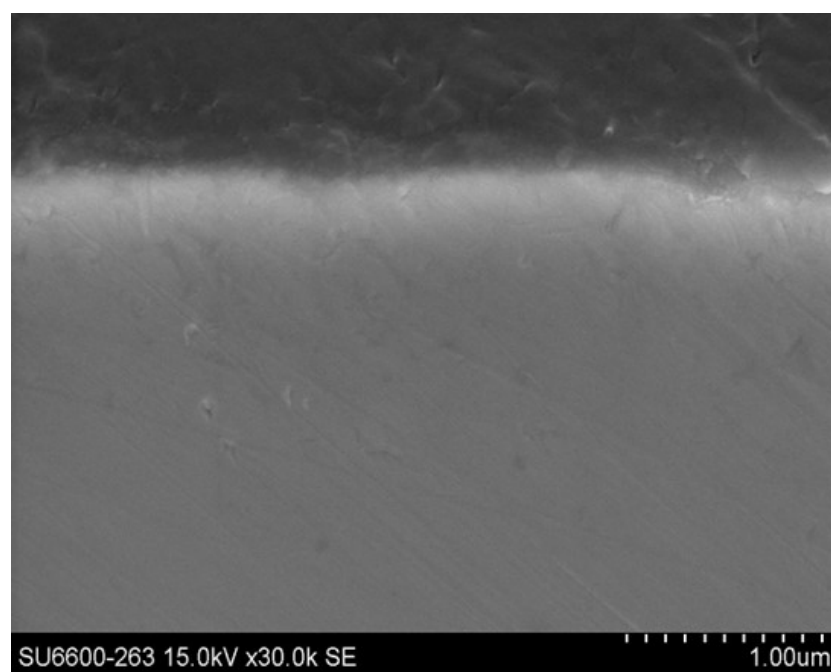


(a) TP No.12 (3 サイクル試験後)

図 3.3.2(2)-8 TP No. 11 および No. 12 の断面観察結果の比較例
(SP 施工あり、酸化皮膜あり、観察位置 A、30,000 倍)



(a) TP No.18 (除染試験なし)



(a) TP No.19 (3 サイクル試験後)

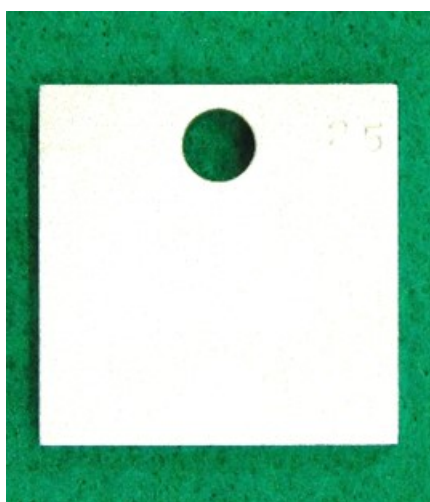
図 3.3.2(2)-9 TP No. 18 および No. 19 の断面観察結果の比較例
(SP 施工なし、酸化皮膜あり、観察位置 B、30,000 倍)



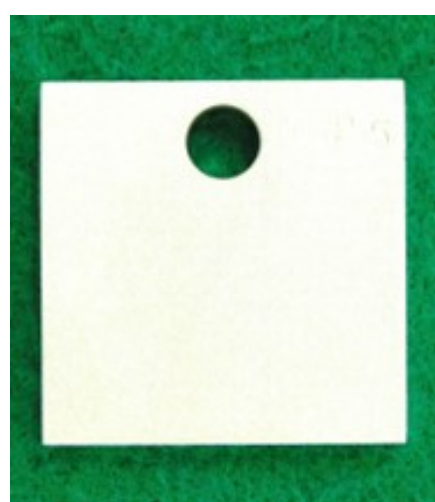
(a) 試験前



(b) 1 サイクル後



(c) 2 サイクル後

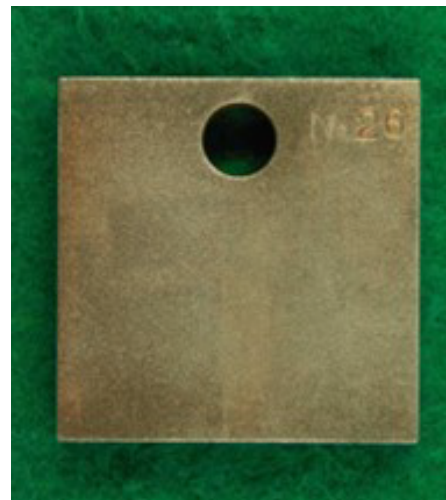


(d) 3 サイクル後

図 3.3.2(2)-10 (1/2) 試験前後の試験片外観
(TP No.25 : SP 施工あり、酸化皮膜あり)



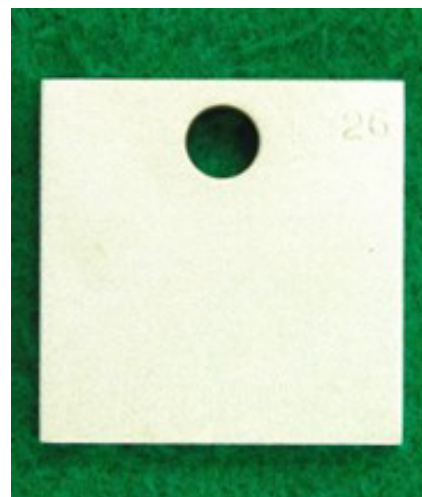
(a) 試験前



(b) 1 サイクル後



(c) 2 サイクル後



(d) 3 サイクル後

図 3.3.2(2)-10 (2/2) 試験前後の試験片外観
(TP No.26 : SP 施工あり、酸化皮膜あり)

TP No.	皮膜付与前		試験前		1サイクル後		2サイクル後		3サイクル後		備考
	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	
25	-902 (29)	-933 (27)	-824 (14)	-807 (14)	-835 (13)	-838 (15)	-837 (14)	-853 (26)	-866 (24)	-834 (32)	SP施工あり、 酸化皮膜あり
26	-910 (29)	-913 (32)	-810 (10)	-893 (15)	-872 (17)	-855 (17)	-880 (15)	-865 (15)	-866 (15)	-858 (26)	

() 内数値は標準偏差

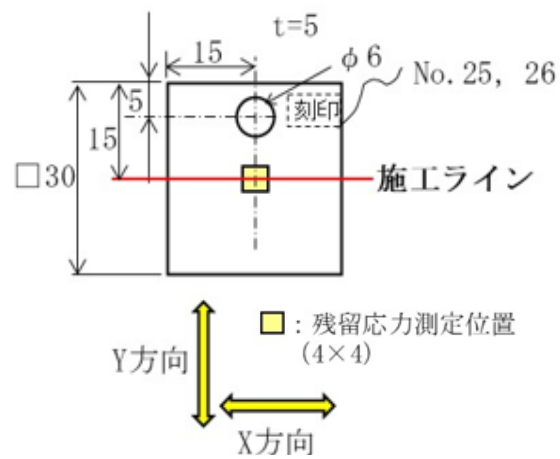


図 3. 3. 2 (2) -11 試験前後の残留応力測定結果および測定位置

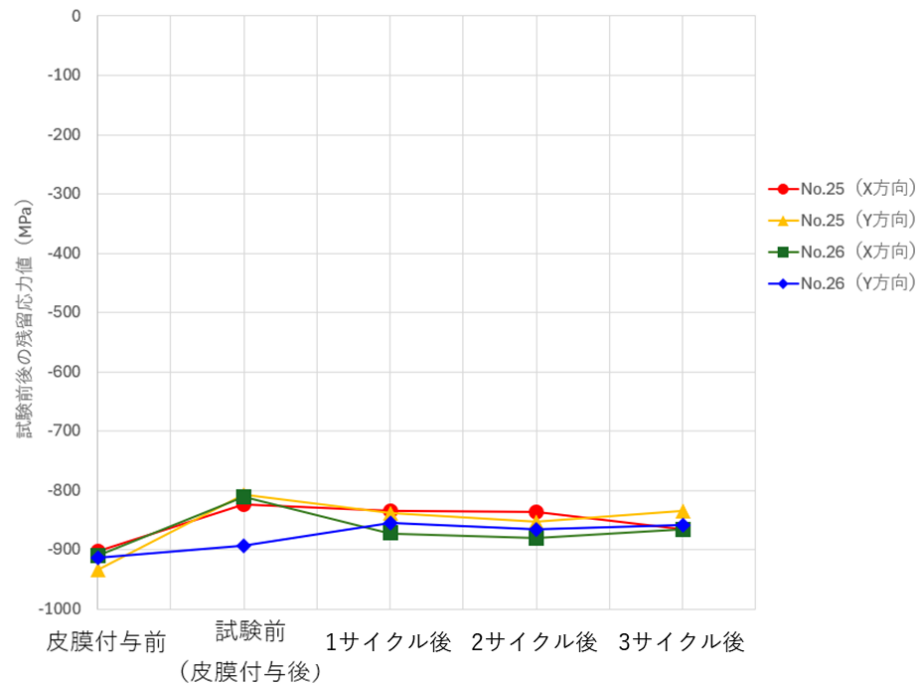


図 3. 3. 2 (2)-12 各状態における残留応力値の変化

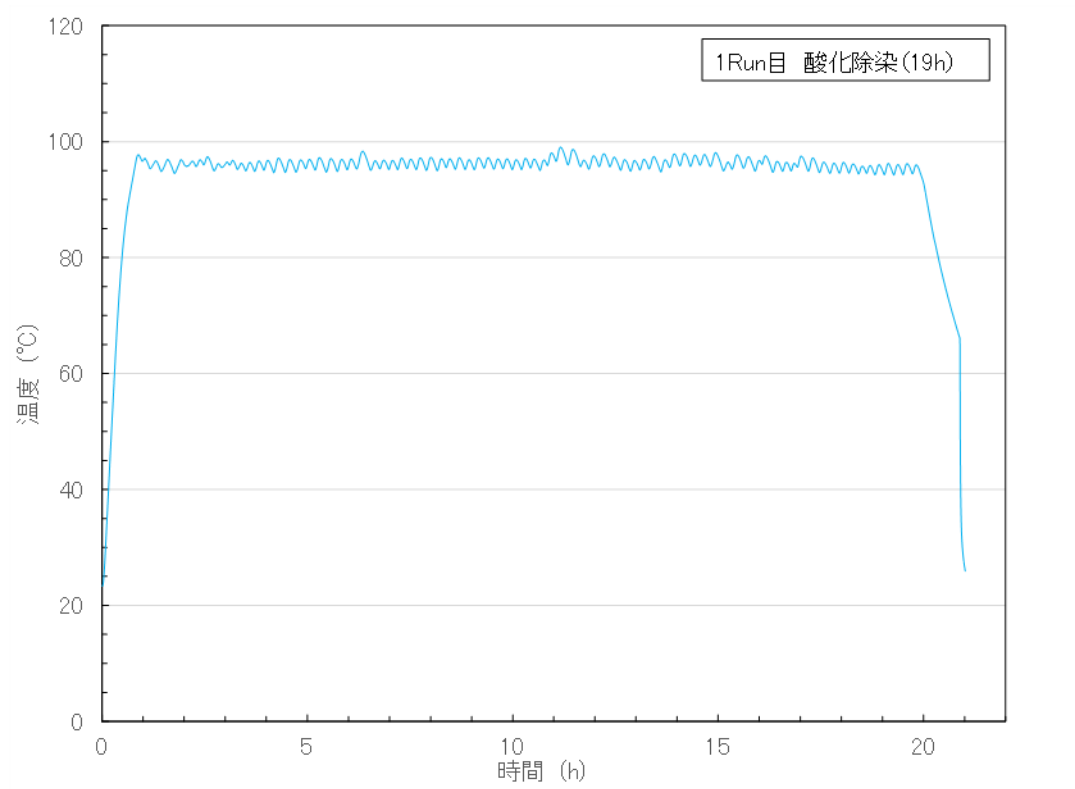


図 3.3.2(2)-13 (1/6) 試験中の温度履歴
(1 サイクル目 酸化除染)

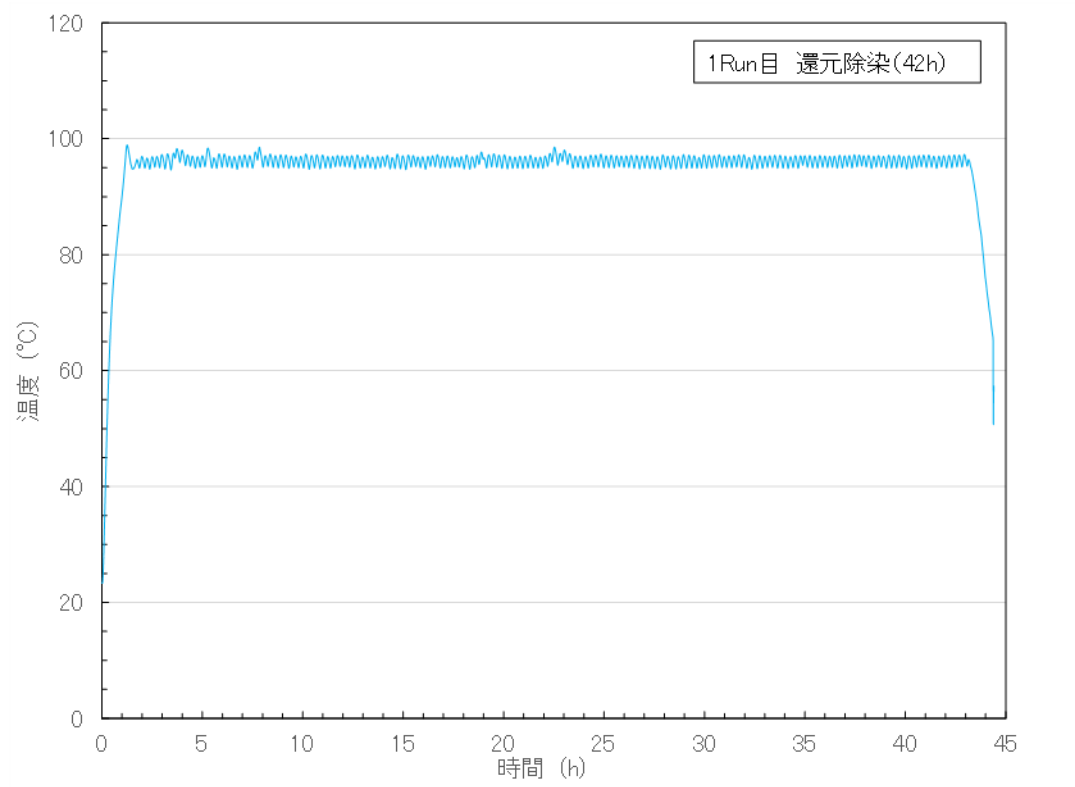


図 3.3.2(2)-13 (2/6) 試験中の温度履歴
(1 サイクル目 還元除染)

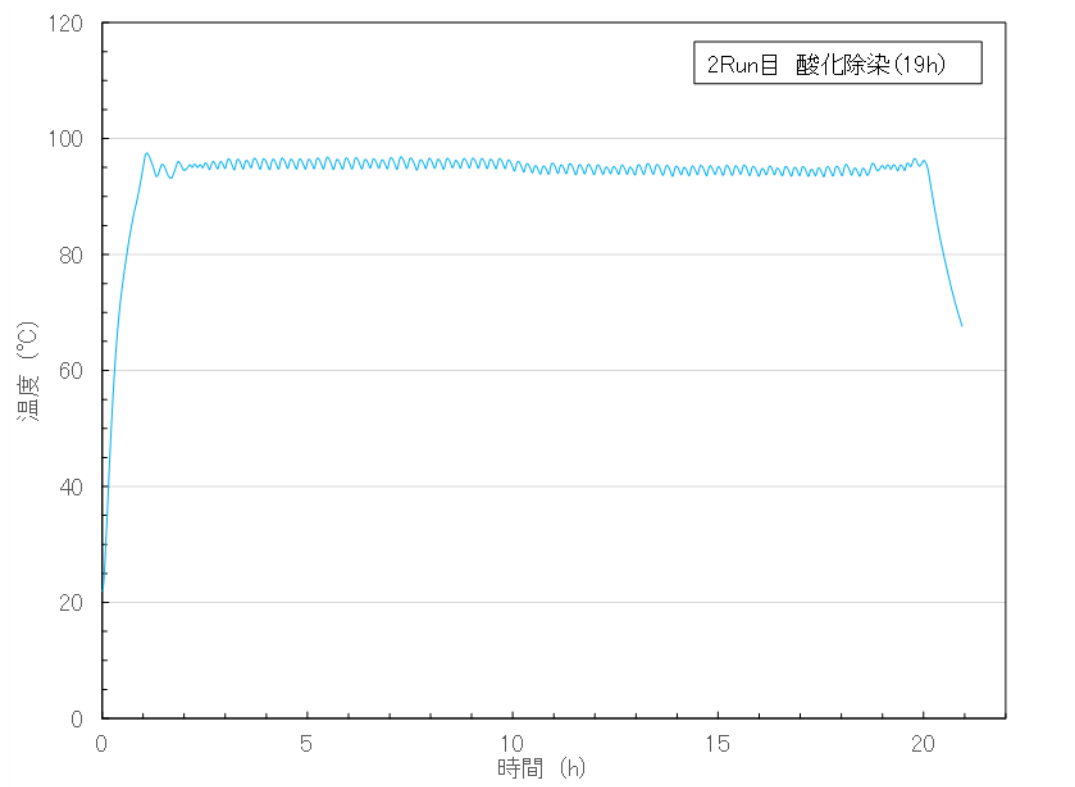


図 3. 3. 2(2)-13 (3/6) 試験中の温度履歴
(2 サイクル目 酸化除染)

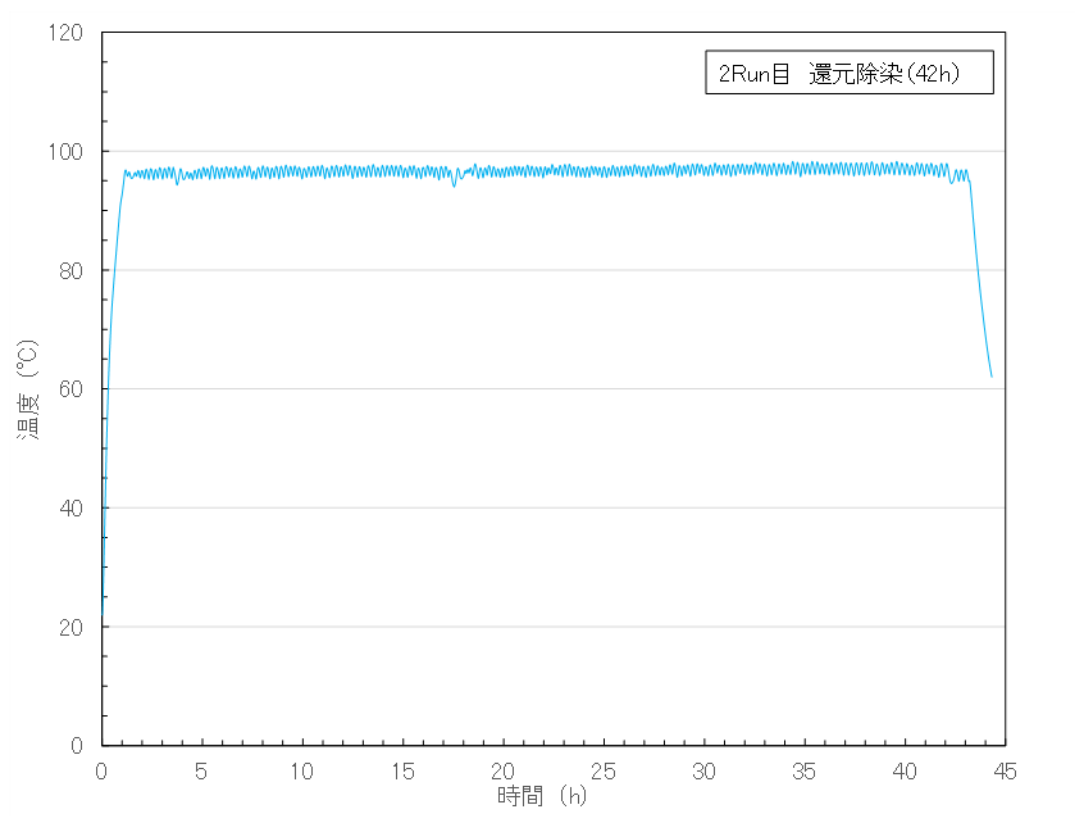


図 3.3.2(2)-13 (4/6) 試験中の温度履歴
(2 サイクル目 還元除染)

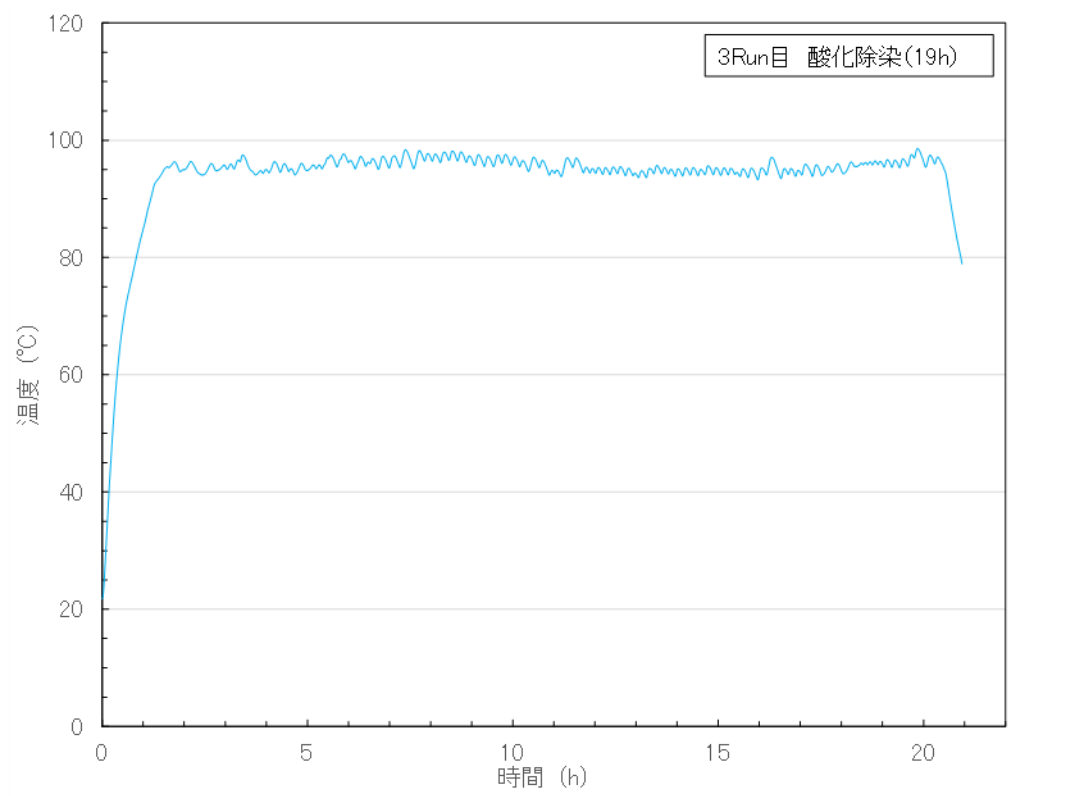


図 3.3.2(2)-13 (5/6) 試験中の温度履歴
(3 サイクル目 酸化除染)

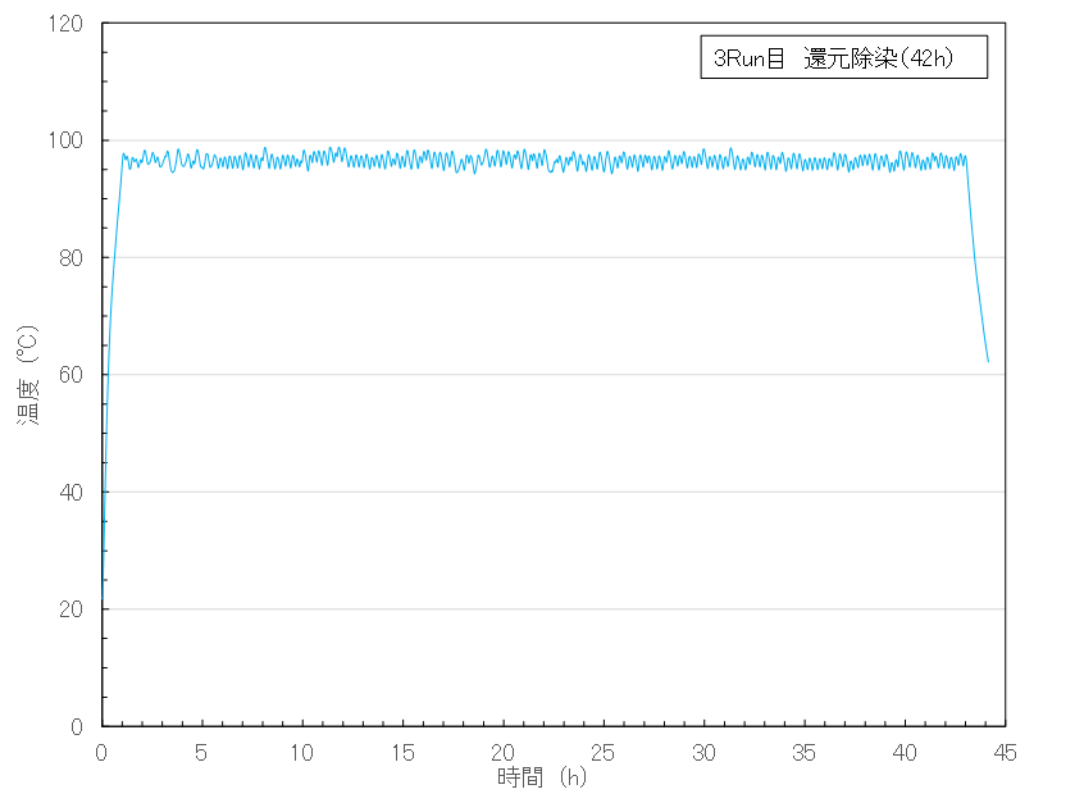


図 3.3.2(2)-13 (6/6) 試験中の温度履歴
(3 サイクル目 還元除染)

(3) まとめ

令和5年度に策定した除染試験要領に従い、除染試験を実施した。重量測定および断面観察による評価結果から、除染による重量変化は軽微であり、そこから算出した減肉量は非常に小さかった。

また、残留応力測定による評価結果から、除染試験終了後も十分な圧縮残留応力を維持していることを確認した。

以上のことから、除染による予防保全効果への影響はないと判断する。

3.3.3 PWR プラント実機応力測定の実機成立性検討

3.3.3.1 実機応力測定方法の検討

令和4年度に実施した「PWR 蒸気発生器管台への超音波ショットピーニングの施工システムを対象とした残留応力測定工法の成立性検討」の成果に基づき、工事基本計画（ロードマップ）を策定するため、廃炉プラントでの実機測定の実施時期を念頭に計画に反映すべき事項を整理した。

(1) 応力測定方法の詳細検討

パルスステック製 X 線応力装置にて、実際に実機 SG 管台の残留応力測定を行う上で検討が必要な項目を抽出した結果（フロー）を図 3.3.3.1-1 に示す。本項では 1)～3) の検討項目について纏めた。

1) 測定位置及び測定方向

測定位置はいずれも SG 管台セーフエンド部の超音波ショットピーニング（以下、「USP」という）施工部であり、周方向位置 0° 、 90° 、 180° 、 270° において、図 3.3.3.1-2 に示すように、それぞれ管台側オーバーレイ部、溶接金属部、セーフエンド側母材部の 3 か所を測定する（合計 12 か所）。測定する応力の方向は、周方向（溶接線方向）及び軸方向（溶接線直交方向）とする。

2) 揺動法の適用要否

X 線応力測定は、被測定物が等方性多結晶材料であることを前提として残留応力を測定する手法であるが、Ni 基合金溶接金属のような粗大結晶粒材料の場合には X 線照射面内で X 線回折に寄与する結晶粒が少なくなるため、図 3.3.3.1-3 に示すように、回折環が連続的ではなくスポット状となり測定精度が低下する。

このような場合には「揺動法」の適用による測定精度向上が有効である。通常の測定では X 線を所定の角度（例： 35° ）で単一入射させるのに対し、揺動法は、X 線の入射角以外の光学的条件を一定に保ちながら、露光中に入射角を変化（揺動）させることで X 線回折に寄与する結晶粒の数を増加させ、図 3.3.3.1-4 に示すように、回折環の全周において強度をより均一化させる方法である。

次フェーズでのモックアップ検証にて当該溶接部の回折環を確認し、実機測定時の揺動法適用要否を判断する。なお、揺動法を適用する場合は、後述するように X 線装置のセンサ部が測定中に動作するため、シミュレータにてこの動作範囲を考慮した成立性評価を行う。

3) 実測定での装置セッティング方法

実際に SG 管台溶接部の残留応力を測定する際の装置セッティング方法を図 3.3.3.1-5、図 3.3.3.1-6 に示す。そ（以下、「当 X 線装置」という）による残留応力測定では、被測定物の測定位置に対してセンサ部を所定の距離及び角度でセッティングする必要がある。その際、センサ部の長手方向を測定方向に一致させた状態で所定角度（ 35° ）傾けるため、周方向と軸方向の測定ではセッティングが異なる。このため、実機施工シ

システムの設計検討では、これらの装置セッティングの成立性を 3D-CAD にて評価する必要がある。次に、前述した揺動法に関し、当 X 線装置での揺動法適用時のセンサ部動作範囲を図 3.3.3.1-7 に示す。当 X 線装置での揺動法は、センサ部を測定方向に 35° 傾けたセッティング状態から、測定位置を回転中心として測定中に 25° までの往復運動を行う。そのため、揺動法適用時は、①揺動範囲を考慮した成立性検討、②マニピュレータによるセンサ部の揺動方法の検討を行う必要がある。なお、当 X 線装置にはオプション品として簡易揺動ユニットがあり、これを用いることでも上記揺動は可能である。当ユニットを使用する場合は、センサ部に当ユニットを装着した状態でマニピュレータに搭載するため、その寸法・重量等を考慮して成立性を確認する必要がある。

なお、当 X 線装置は 2024 年 5 月に次世代機 (μ-X360J) がリリースされており、装置および簡易揺動ユニットの寸法や重量、セッティング時の測定位置までの距離等が変更になっている。今後、実機測定に向けて装置導入する際には、最新モデルの仕様を確認した上で実機測定の成立性を確認する必要がある。

参考文献

- [3.3.3.1-1] 令和 4 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、原子力規制庁、
https://www.nra.go.jp/activity/anzen/seika/itaku_R4.html：閲覧
日 2025 年 3 月 5 日

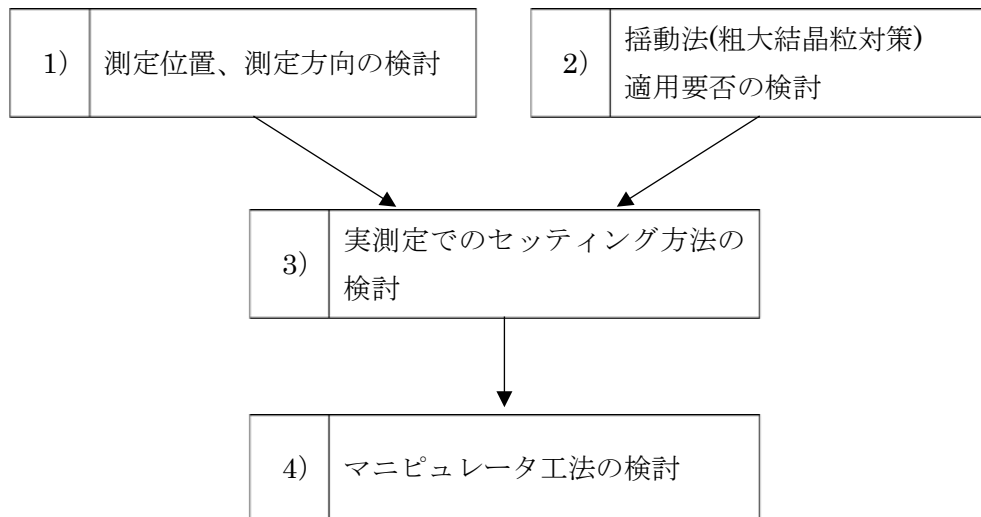


図 3.3.3.1-1 実機管台の残留応力測定のための詳細検討フロー

美浜2号機 蒸気発生器
出入口管台セーフエンド溶接部

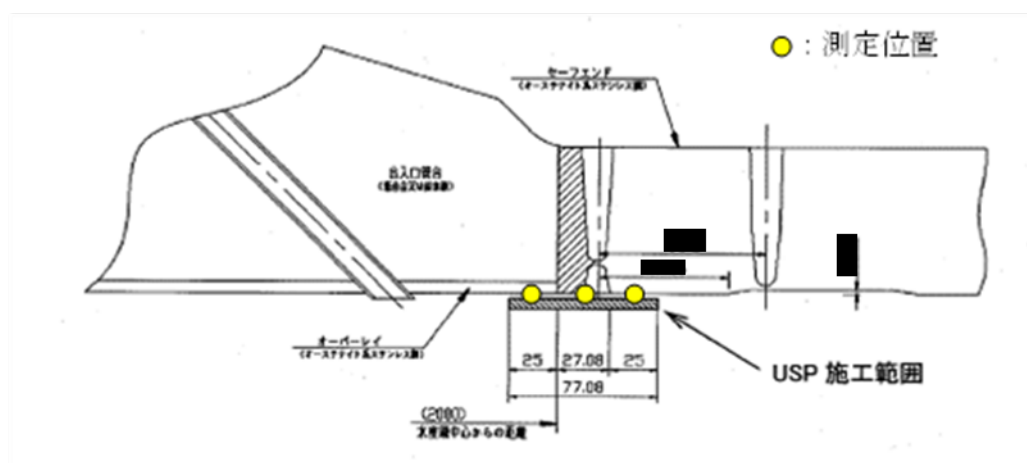


図 3.3.3.1-2 残留応力測定位置（軸方向位置）

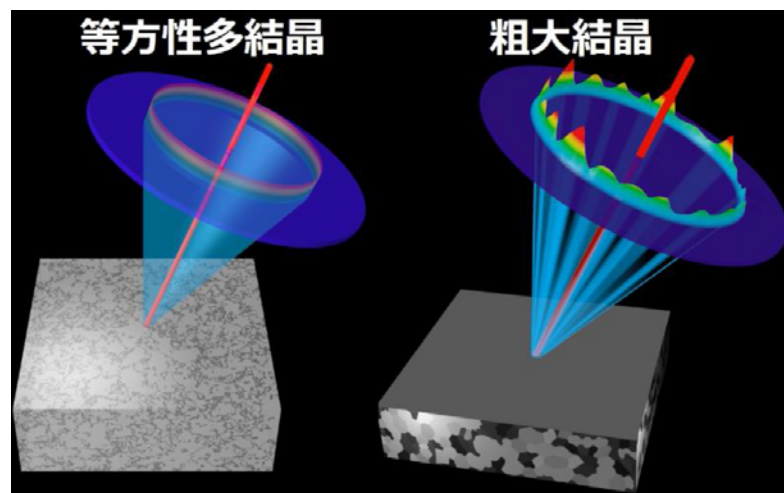


図 3.3.3.1-3 粗大結晶粒材料の回折環のイメージ

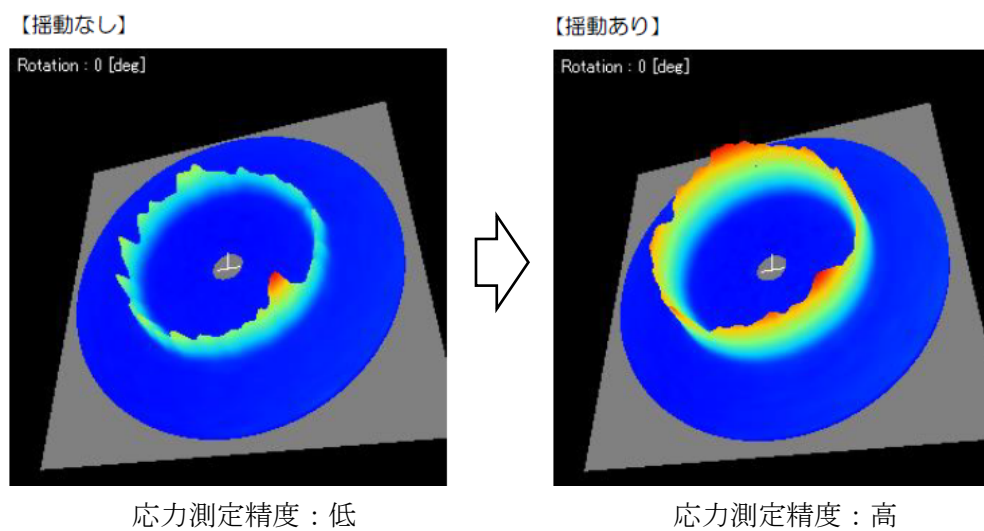
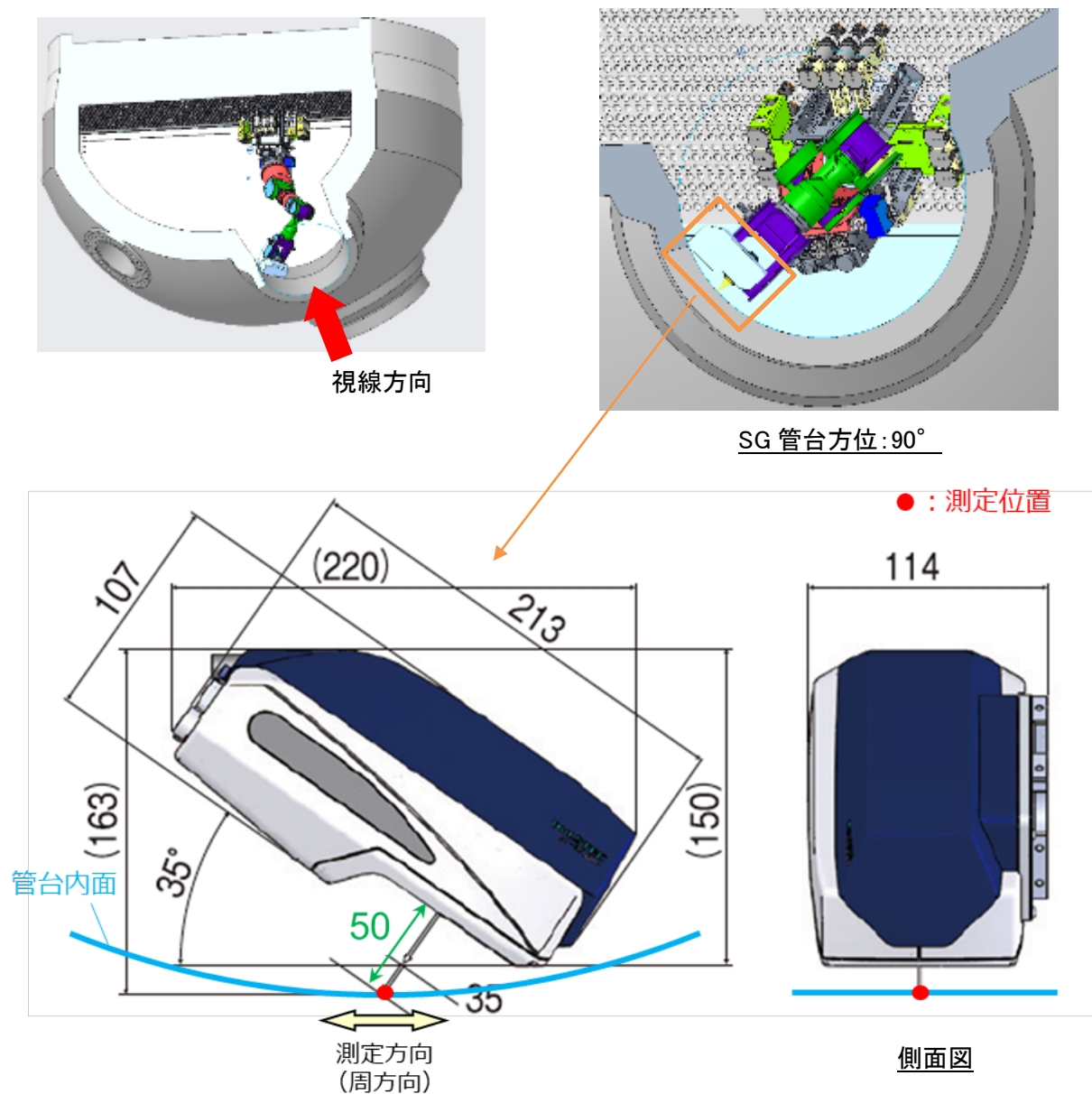
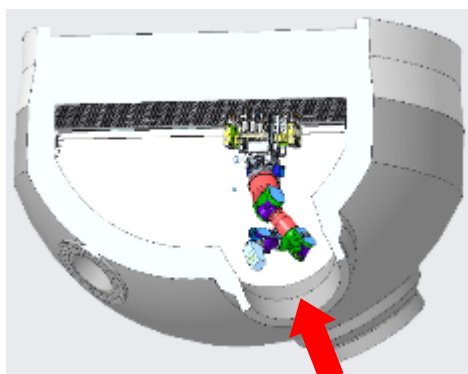


図 3.3.3.1-4 揺動法による回折環の改善効果のイメージ

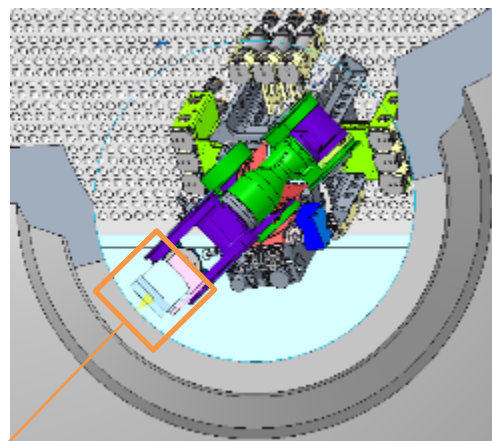


備考：装置寸法は令和 4 年度^[3.3.3.1-1]の調査結果より引用

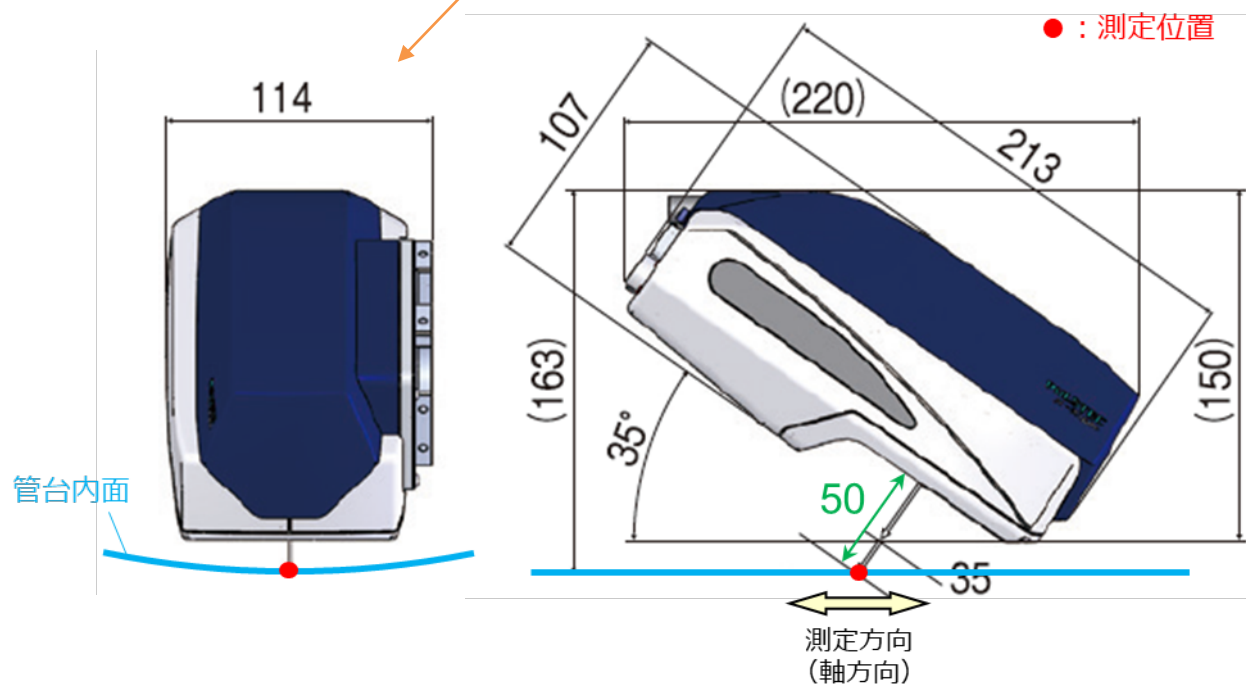
図 3.3.3.1-5 実機残留応力測定のための装置セッティング（周方向測定）



視線方向



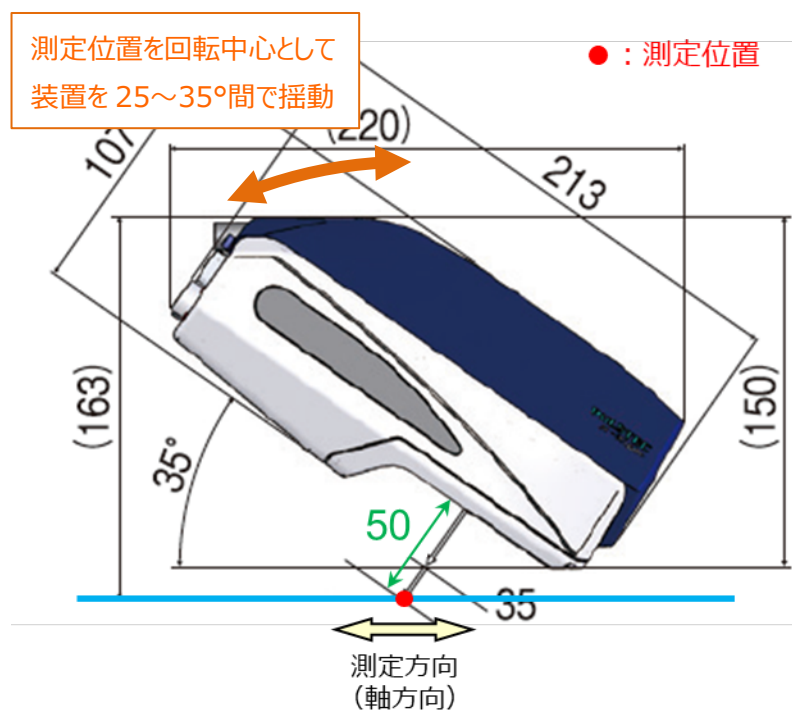
SG 管台方位: 90°



側面図

備考：装置寸法は令和4年度^[3.3.3.1-1]の調査結果より引用

図 3.3.3.1-6 実機残留応力測定のための装置セッティング（軸方向測定）



備考：装置寸法は令和 4 年度^[3.3.3.1-1]の調査結果より引用

図 3. 3. 3. 1-7 揺動法適用時の装置動作範囲

(2) 工法検討に係る検証内容の検討

本項では、応力測定検証工事の「要求」に対する「応力測定器 (μ-X360J)」および「SG-ISI 工法/装置」に関する「適用課題」および「検証内容 (今後のアクション)」を明確化し、表 3.3.3.1-1 にまとめた。

表 3.3.3.1-1 の評価の「○」「△」「▼」の考え方は

○：後続検証がなくても成立すると判断

△：次フェーズ以降で検証が必要な項目

▼：懸案事項であり、次フェーズ以降で優先的に検証が必要な項目

である。整理した検証内容を以下に示す。

- ・ 応力測定器に対する耐放性試験
- ・ 応力測定器の各種ケーブルの延長検討
- ・ マニピュレータに搭載した応力測定器を用いた応力測定可否の要素検証
⇒ 応力測定器に対するノイズ、振動の影響確認
⇒ 「揺動」に対する「マニピュレータでの揺動」の成立性確認
- ・ シミュレーションによる成立性確認
⇒ 応力測定器のモデル変更及び応力測定方法が明確化（揺動等）されたため、改めてマニピュレータによる要求動作可否の確認を実施する。
- ・ マニピュレータへの応力測定器、ECT センサの搭載検討
- ・ 工事レイアウト、工事ステップ、汚染対策の検討
- ・ 応力測定器のケーブルルート、ハンドリング機構の検討
- ・ マニピュレータの動作ソフトウェア作成
- ・ モックアップでの総合機能試験
⇒ 上段で実施した複数の検証に対し、実機工事を模擬したモックアップにて総合的な成立性を確認する。

表 3.3.3.1-1 (1/4) 応力測定検証工事の要求、課題、検証項目の整理表

No.	応力測定検証に関する要求項目		要求内容	「応力測定器」、「SG-ISI 工法/装置」の適用性		評価を「○」にするための検証内容 (ロードマップは次頁に示す)
				課題	評価※	
1	対象サイト		美浜 2 号機 (想定)			
2	応力測定の対象		蒸気発生器入口管台とセーフエンドとの溶接部付近			
3	応力測定位置/点数		以下の 12 点×2 パターンを計測する。 ・周方向位置 : 0、90、180、270° (天側を 0° とする) ・軸方向位置 : 3 点 (USP 施工範囲) ・測定方向 : 周方向と軸方向の 2 パターン (図 3.3.3.1-2 参照)	左記 12 点×2 パターンに対し、SG-ISI 装置 (マニピュレータ) が ・測定位置および蒸気発生器に干渉なくアクセスできるか ・マニピュレータの許容角度内で達成可能か をシミュレーション等で検討する必要がある。	△	・シミュレーションによる成立性確認 ・マニピュレータ動作ソフトウェア作成 ・モックアップでの総合機能試験
4	応力測定器の仕様	メーカー/型式	パルステック工業株式会社/μ-X360J			
5		外形寸法	<u>センサユニット (マニピュレータに搭載)</u> 115×142×216mm <u>電源部 (水室外に設置)</u> 234×295×169mm	マニピュレータ先端にセンサユニットを搭載した状態において、 ・水室内へ干渉なく搬入できるか ・測定位置へ干渉なくアクセスできるか ・マニピュレータの許容角度内で達成可能か をシミュレーション等で検討する必要がある。	△	・シミュレーションによる成立性確認 ・マニピュレータ動作ソフトウェア作成 ・モックアップでの総合機能試験
6		質量	<u>センサユニット (マニピュレータに搭載)</u> 3kg <u>電源ユニット (水室外に設置)</u> 5.1kg	SG-ISI のマニピュレータは 15kg 可搬仕様のマニピュレータをベースに開発されたものであり、センサユニットの質量 3kg は問題なし。最終的にはモックアップでの検証試験にて成立を確認する。	○	・モックアップでの総合機能試験

※評価の「○」「△」「▼」の考え方 ○ : 後続検証がなくても成立すると判断 △ : 次フェーズ以降で検証が必要な項目 ▼ : 懸案事項であり、次フェーズ以降で優先的に検証が必要な項目

表 3.3.3.1-1 (2/4) 応力測定検証工事の要求、課題、検証項目の整理表

No.	応力測定検証に関する要求項目		要求内容	「応力測定器」、「SG-ISI 工法/装置」の適用性		評価を「○」にするための検証内容 (ロードマップは次頁に示す)
				課題	評価※	
7		ケーブル長/径	応力測定器の標準仕様は以下のとおり。 ・高電圧ケーブル：長さ 2900mm、約φ11mm ・コントロールケーブル：長さ 2900mm、約φ7mm ・USB ケーブル：長さ 2900mm、約φ5mm 	多軸マニピュレータの動作に対する応力測定器ケーブルのルートおよびハンドリング機構の検討が必要。電源部を SG 水室外へ設置するためには、「高電圧ケーブル」、「コントロールケーブル」、「USB ケーブル」は 10m 以上の長さが必要であり、延長検討が必要となる。また、その延長可能長さに応じた工事レイアウト(操作本部の設営場所等)を決定する必要がある。	▼	・応力測定器の各種ケーブルの延長検討・ケーブルルート/ハンドリング機構の検討/製作 ・工事レイアウトの検討 ・モックアップでの総合機能試験
8		取合部寸法	応力測定器の取合部は下図のとおり M4×8 か所が設けられている(詳細なボルトピッチについては、今後整理を予定)。	センサユニットを取り付けるブラケットの検討が必要。 また、No.5 の成立を考慮したブラケット構造とする必要がある。	△	・マニピュレータへのセンサユニット搭載検討 (ブラケットの検討)
9		測定方法	・測定面に対し測定距離(70±0.5mm)および角度(35° ±1°)で応力測定器を設置し、X 線を照射して測定する。 ・角度は測定位置を中心に 25~35° で揺動させ、応力測定を行う。目安として 1~2 分で 25~35° を 1~2 往復する。 ・入口管台の奥行方向の測定位置把握のために、溶接と母材の境界を検出する。	・アクセス/測定に係る一連の工事ステップ(コマ送り図等)について今後検討が必要。 ・「揺動」については、「マニピュレータでの揺動」にて応力測定が可能かを組合試験、「簡易揺動ユニットでの揺動」は測定位置へのアクセスおよび測定が干渉なく成立するのかシミュレーション、により 2 案検討し最適手法を決定する。 ・溶接/母材の境界検出としては、実績のある ECT を想定しており、マニピュレータ先端への ECT センサの搭載検討を行う。	△	・工事ステップの検討 ・マニピュレータに搭載した応力測定器を用いた応力測定可否の要素検証(揺動手法の検討) <u>マニピュレータでの揺動の場合</u> マニピュレータにセンサユニットを搭載し マニュアル揺動での要素検証 <u>簡易揺動ユニットでの揺動の場合</u> シミュレーションによる成立性確認 ・ECT センサの搭載検討 ・モックアップでの総合機能試験
10		耐環境温度/湿度	SG-ISI 装置開発時に想定した環境条件は以下。 ・想定温度：50℃以下 ・想定湿度：最大 85%(結露無き事)	・応力測定器(μ-X360J)については、使用可能温度が 5~40℃であり、要求内容外となるが、廃止措置後のプラント(熱源がない状態)を考慮すると、対応可能と判断する。 ・SG-ISI 装置については工事実績があり問題なし。当該工事により追設が必要な機材は取合ブラケット、ECT センサ等であり、温度/湿度に懸念がある物はない。	○	

※評価の「○」「△」「▼」の考え方 ○：後続検証がなくても成立すると判断 △：次フェーズ以降で検証が必要な項目 ▼：懸案事項であり、次フェーズ以降で優先的に検証が必要な項目

表 3.3.3.1-1 (3/4) 応力測定検証工事の要求、課題、検証項目の整理表

No.	応力測定検証に関する要求項目		要求内容	「応力測定器」、「SG-ISI 工法/装置」の適用性		評価を「○」にするための検証内容 (ロードマップは次頁に示す)
				課題	評価※	
11		耐放射線性 (線量率、集積線量)	旧 2LOOP の系統除染後の環境線量は以下。 ・水室内 ： 約 0.7mSv/h ・マンホール周辺 ： 約 0.2mSv/h ・ループ室外 ： <0.001mSv/h	・旧型式の応力測定器 (μ-X360s) については、1mSv で問題ないことを確認済。一方で現行モデルである μ-X360J については、耐放射線性を確認する必要があると考える。No.9 の検討において「簡易揺動ユニット」を使うことになれば、当該機器も耐放射線性試験が必要である。 ・SG-ISI 装置については工事実績があり問題なし。当該工事により追設が必要な機材は取合ブラケット、ECT センサ等であり、耐放射線性に懸念がある物はない。	▼	・応力測定器に対する耐放射線性試験
12		耐振動性	マニピュレータの微振動に対し、応力測定データが健全であること。	・影響有無を確認するために、マニピュレータに実際に搭載し、測定が成立することを確認する必要がある。	▼	・マニピュレータに搭載した応力測定器を用いた応力測定可否の要素検証
13		耐ノイズ性	マニピュレータ搭載のサーボモータからのノイズに対し、測定データが健全であること。	・影響有無を確認するために、マニピュレータに実際に搭載し、測定が成立することを確認する必要がある。	▼	・マニピュレータに搭載した応力測定器を用いた応力測定可否の要素検証
14		キャリブレーションおよび 検定方法	「キャリブレーション」およびその良し悪しを判定する「検定」を実測定前に行う必要がある。	・当該作業の要領/タイミングを検討し、工事ステップに反映する必要がある。 ・当該作業は、応力測定器にて独立作業可能であることから、SG-ISI 装置への要求はない。キャリブレーションスタンドについてはメーカー購入品。	△	・キャリブレーションおよび検定の要領/タイミングに関する工事ステップへの反映
15		必要なユーティリティ	<u>電源</u> AC100～240V または DC24V (バッテリー)	・標準的な電源仕様であり問題なし。サイトの電源盤の位置/取口に応じたケーブル延長/取合を検討する。	△	・電源ケーブルの延長/取合検討
16		X 線の被ばくに対する 管理方法について	遮蔽ボックス外で使用する場合は、X 線装置の取り扱い有資格者が指示/管理下で使用する必要あり。管理区域設定も必要。	・「モックアップでの検証」、「KMN-2 での測定工事」に対し、X 線装置の取り扱い有資格者の配備、管理区域設定等が必要か否か、方針を整理する。	△	・X 線防護に関する方針整理

※評価の「○」「△」「▼」の考え方 ○：後続検証がなくても成立すると判断 △：次フェーズ以降で検証が必要な項目 ▼：懸案事項であり、次フェーズ以降で優先的に検証が必要な項目

表 3.3.3.1-1 (4/4) 応力測定検証工事の要求、課題、検証項目の整理表

No.	応力測定検証に関する要求項目		要求内容	「応力測定器」、「SG-ISI 工法/装置」の適用性		評価を「○」にするための検証内容 (ロードマップは次頁に示す)
				課題	評価※	
17	制御 IF	応力測定データの プロフィール 方法	マニピュレータとのデータやり取り（例えばマニピュレータの各軸角度から算出した位置情報等）は不要。各計測箇所のデータは記録/メモにより判別できればよい。	課題なし	○	
18	工法/工事からの 要求	異物対策	異物対策を要求として設定するか未定。	・まずは対象サイト所有電力殿と異物対策が必要か否かの調整が必要。もし必要であれば応力測定器の異物対策がパルステック工業で可能な範囲を検討し、不可範囲についてはカバー追設/養生敷設等の検討が必要。 SG-ISI 装置については工事実績があり問題なし。	△	・対象サイト所有電力殿と対策要否の調整 ・（要となれば）異物対策の検討および実装
19		汚染対策	応力測定器が汚染し持ち出し不可とならないようにする。	・応力測定器が汚染しないよう、養生等の汚染対策を検討する必要がある。	△	汚染対策の検討
20		応力測定中における 外部監視	応力測定器については、測定中に外部監視する必要はなく、異常は PC で判別可能。必要な外部監視のみでよい。	課題なし	○	
21		工事実施時期	調査対象サイト以外の SG-ISI の実工事時期と輻輳しないこと。	・調査対象サイト以外の SG-ISI の検査工事時期を考慮し、当該工事時期を検討する。	△	・全 PWR サイトの SG-ISI の検査工事時期を踏まえた電力殿との調整

※評価の「○」「△」「▼」の考え方 ○：後続検証がなくても成立すると判断 △：次フェーズ以降で検証が必要な項目 ▼：懸案事項であり、次フェーズ以降で優先的に検証が必要な項目

3.3.3.2 実機応力測定に向けたロードマップの検討

前項（3.3.3.1(2)項）で抽出した表 3.3.3.1-1 中の「懸案事項（評価：▼の項目）」に対しては早期に検証する方針として、図 3.3.3.2-1 のとおり、実機での応力測定検証工事に向けたロードマップを策定した。当該ロードマップは応力測定検証工事を実施する年度を N 年度とし、当該工事前の検証期間を 3 年として策定した。工程線のうち、緑線については、SG-ISI 機材（主にマニピュレータ）が必要なタスクであり、当該項目については、機材の空き状況との調整が必要となることから、全 PWR サイトの SG-ISI 検査工事時期を踏まえた詳細時期の調整が別途必要となる。

また、令和 5 年度（2023 年度）「PWR プラント廃炉時の除染の影響確認試験の実施仕様詳細の検討に係る調査」にて検討を行った予防保全技術（ピーニング）への除染影響確認試験については、工法検討に係る検証と並行して実施できるものとした。

備考：実機測定工事の年度を“N”とし、実機測定工事前の検証期間を3年とした。

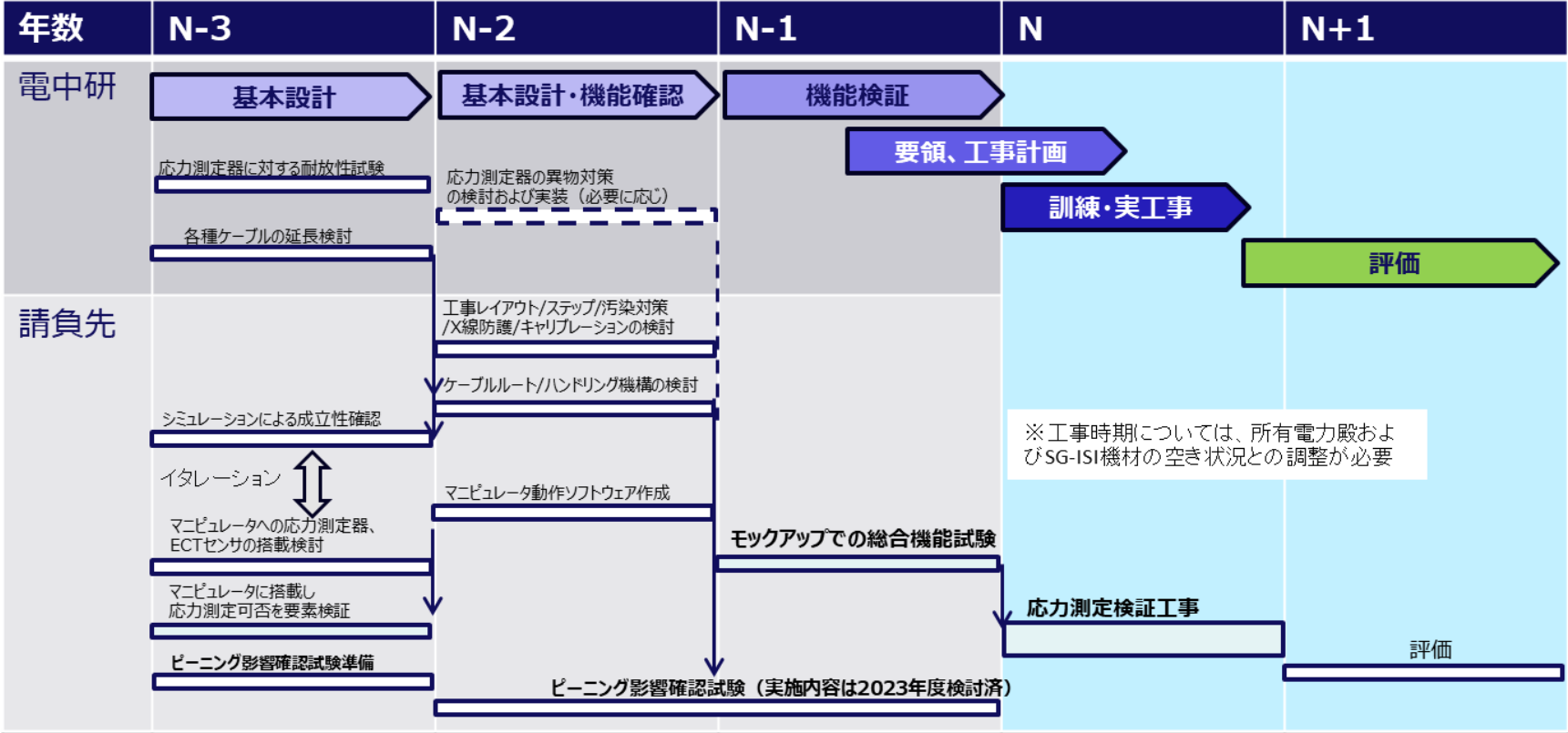


図 3.3.3.2-1 実機応力測定に向けたロードマップ

3.3.4 今後の事業計画について

3.3.1 項、3.3.2 項及び 3.3.3 項に示す成果を総合的に検討し、予防保全対策技術の保守性に係る研究の今後の事業計画について検討した。

事業計画の主要実施項目は以下である。

(1) 気中環境施工部位：既設機器のその場での残留応力測定（PWR SG 管台）

本検討は、予防保全としてピーニング施工を気中環境で実施した部位を対象に、発電所内の当該機器の既設据え付け現場（その場）で表面残留応力を測定することを検討している。本研究のターゲットプラントは、ピーニング施工部位で、かつ、廃炉時の除染効果等の公開情報が得られた美浜 1 号及び 2 号 SG の管台を想定した。

令和 6 年度は、これまでの工法成立性を踏まえ準備ロードマップを策定した。今後は事業者に対し、その場測定実施への協力を要請し、具体的な測定目標時期を想定する必要がある。準備ロードマップでは、その場測定を N 年とすると、N-3（3 年前）から準備を開始することとしている。令和 6 年度末時点では具体的な測定時期を想定していないため、令和 7 年度を準備ロードマップの N-3 年とすることは尚早で、準備ロードマップ移行前のフェーズ（N-3 年より前のプレ準備）である。

事業計画の上では、令和 7 年度を、ロードマップへ移行する基本設計と位置づけ、実機応力測定方法の検討、並びに実機応力測定方法の詳細検討を継続し、具体的測定プラントの選定と事業者との調整フェーズとして位置づけた。なお、事業計画の大幅な見直しはない。本実施項目の事業計画を図 3.3.4-1 に示す。

(2) 水中環境施工部位：切断採取した試験体の残留応力測定（BWR 炉心シュラウド）

本検討は、予防保全としてピーニング施工を水中環境で実施した部位を対象に、施工対象部位を実機より切断採取した試験体で応力測定することを検討している。本研究のターゲットプラントは、ピーニング施工部位で、実機材採取の観点で廃炉措置が先行しているプラントという観点から、浜岡原子力発電所の 1 号あるいは 2 号とした。対象機器は中性子照射と熱時効の重畳する炉心領域機器の炉心シュラウド中間胴として検討を進めた。応力測定用の切断試験体のターゲット寸法は 100mm×100mm×板厚（□100mm×板厚）とし、靱性低下研究で検討している A 型輸送試験体と同じとした。

本研究では、令和 6 年度までに、施工部位の採取のための切断時に、ピーニング残留応力に影響をあたえる因子（切断、除染等）に対する要素試験を実施し、その結果を踏まえ、複合的要因に対する影響確認として、炉心シュラウド中間胴を模擬した平板溶接継手試験体を用いた切断試験を実施した。その結果、ターゲット寸法の□100mm×板厚を更に、小さく□50mm×板厚、□30mm×板厚まで切断してもピーニングの圧縮応力が残存し、消失や著しい緩和がないことを確認した（試験的アプローチ）。また、

それぞれの切断試験を FEM 解析で再現し、残留応力の実測値を再現する解析手法を構築した。更に、その解析手法をベースに、実機構造を模擬した FEM 解析として製造履歴を模擬した炉心シュラウド中間胴の FEM 解析モデルを切断し、A 型輸送試験体採取する切断模擬解析でピーニングの圧縮応力が残存し、消失や著しい緩和がないことを確認した（解析的アプローチ）。また、解析的アプローチの解析体系の妥当性の検証として、実機構造を模擬した試験体を製作して切断影響確認する試験（モックアップ試験）の詳細計画を立案し、令和 6 年度は、その実施の可否を判断するホールドポイントであった。この可否は、溶接継手試験体の切断試験結果（□50mm×板厚、□30mm×板厚で切断影響がないこと）より、モックアップ試験は不要と判断し合理化を提案した。なお、令和 6 年度のホールドポイントは後ろ倒し可能である。応力測定試験片の採取対象は炉心シュラウド中間胴で、靱性低下に係る研究と同じであり。したがって、その採取は靱性低下に係る研究の試験体採取と同時とすることが合理的である。靱性低下研究では本年度の事業計画の見直しにより、試験体採取する炉心シュラウドのサンプル材（1m×1m×板厚）の確保は H-2 廃炉工事と同調して、最速 2027 年度を想定しているものの、そのサンプル材の切断による試験体確保は 2029 年以降とした。このことから、令和 6 年度期初の事業計画では、2027 年までにモックアップ試験を実施し、試験体採取仕様を決定する必要があったが、上記の通り、これまでの成果で判断可能であること、本研究の応力測定用試験体の採取も 2029 年度以降となったことから、モックアップ試験準備の着手も後ろ倒しとなった。

今後は、実機材採取に向けて、高線量材料に対する残留応力測定方法の検討（NRA 研究成果の活用等）、実機採取に向けた NRA と産業界との意見交換（事業者、プラントメーカー）、本事業の有識者レビューを踏まえた説明性の向上に取り組み、実機材採取による応力測定に向けたコンセンサスを構築するとともに、意見交換を踏まえて、モックアップ試験の実施ニーズがある場合は検討を再開することとして、事業計画を見直した。本実施項目の事業計画を図 3.3.4-2 に示す。

実機予防保全施工部位の採取による残留応力測定 (BWR炉心シュラウドピーニング施工部位 代表)

【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】…【R6】試験と評価
【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
- ✓ **複合的因子に対する影響確認**
(ピーニング施工した溶接継手試験体)
機器製造来歴を踏まえた平板継手試験体を製作し、ピーニング施工後に切断し、ピーニング施工部の表層部残留応力を測定（圧縮応力の残存を確認）し、その試験を解析的アプローチとしてFEMで再現

【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であり、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される。

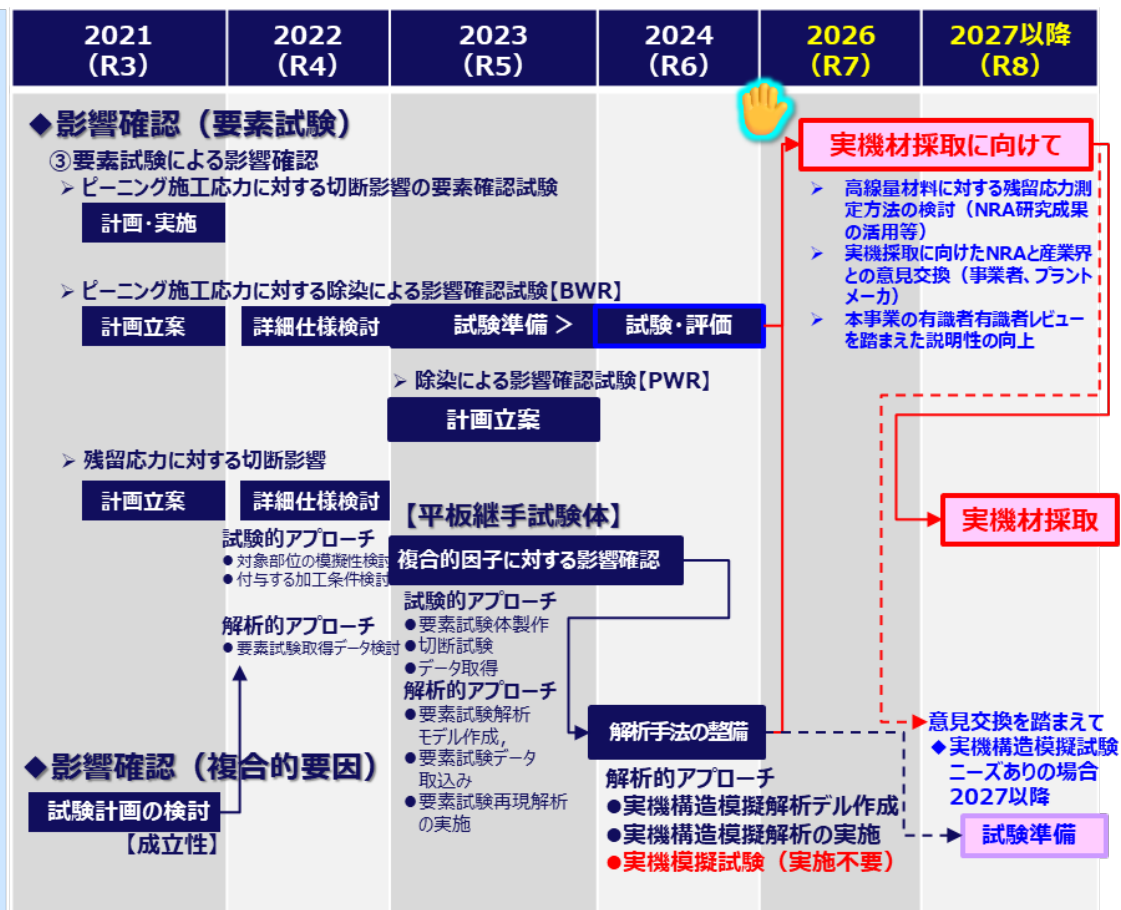


図 3.3.4-2 既設機器のその場での残留応力測定（PWR SG 管台 USP 施工部位 代表）の事業計画案（令和 6 年度）