

PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れ 知見拡充に関する2024年度の検討結果について (亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価)

原子力エネルギー協議会
(ATENA)

2026年1月22日

本資料には、経済産業省「令和6年度原子力の安全性向上に資する技術開発事業（原子力発電所の長期運転に向けた高経年化対策に関する研究開発）」の成果が含まれています。

目次

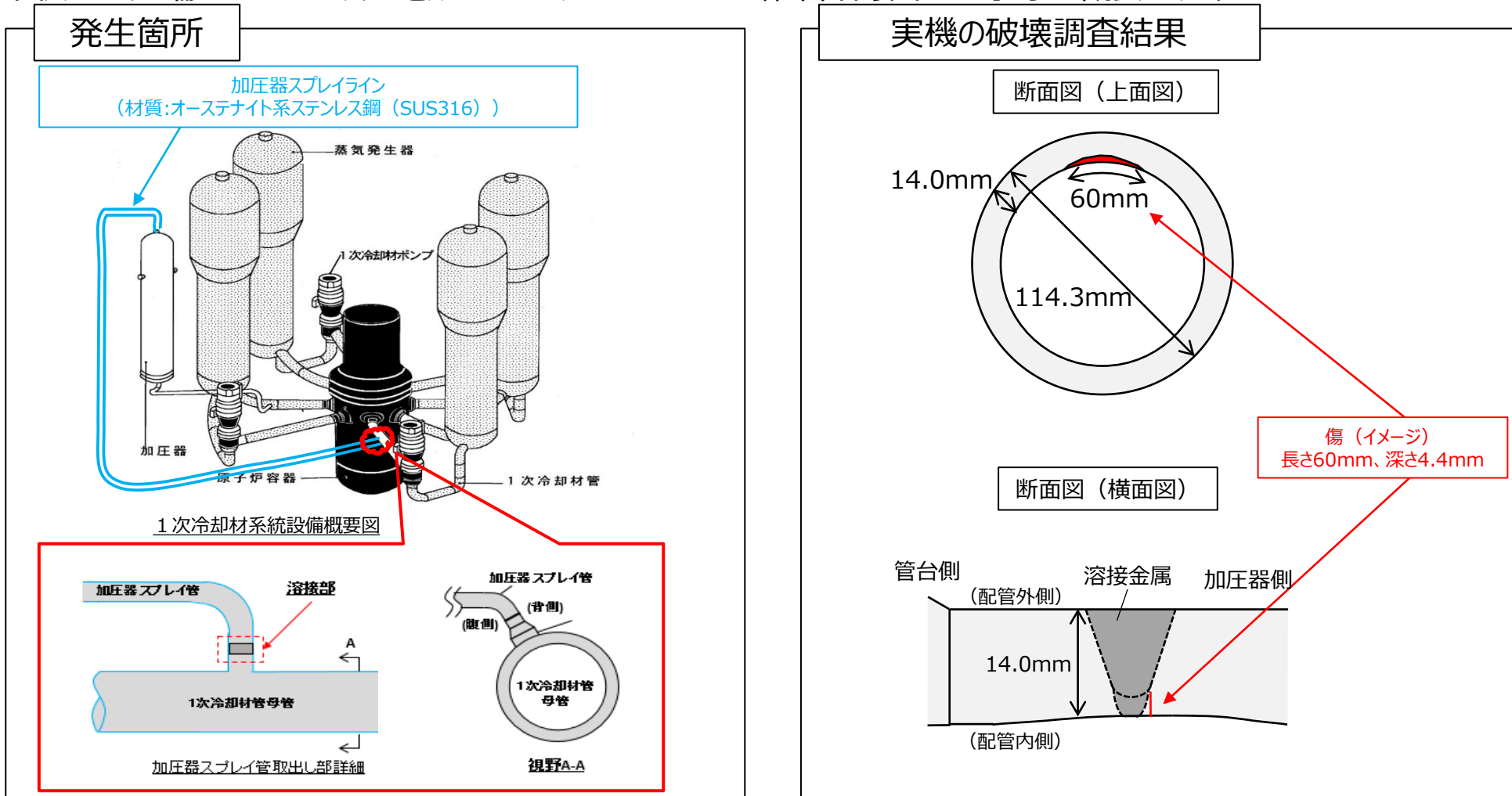
1. 振り返り
2. 2024年度検討内容
 - 2.1 最新知見の調査
 - 2.2 亀裂発生・進展メカニズム究明
 - 2.2.1 実機詳細調査
 - 2.2.2 溶接残留応力評価
3. 2025年度検討方針
4. まとめ

目次

1. 振り返り
2. 2024年度検討内容
 - 2.1 最新知見の調査
 - 2.2 亀裂発生・進展メカニズム究明
 - 2.2.1 実機詳細調査
 - 2.2.2 溶接残留応力評価
3. 2025年度検討方針
4. まとめ

PWR1次系ステンレス鋼配管粒界割れの概要

本検討の発端となった大飯発電所3号機加圧器スプレイ配管溶接部での事象の概要を以下に示す。



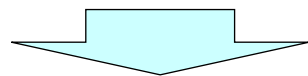
- 供用期間中検査 (ISI) にて、加圧器スプレイラインの1次冷却材管台と管継手 (エルボ部) の配管溶接部に有意な指示が認められた。その後の破壊調査により、**溶接熱影響部にて長さ60mm、深さ4.4mmの亀裂**があることが明らかとなった。

配管溶接部の割れの概要

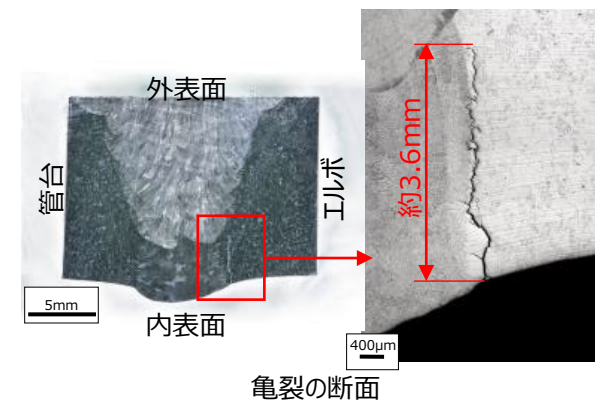
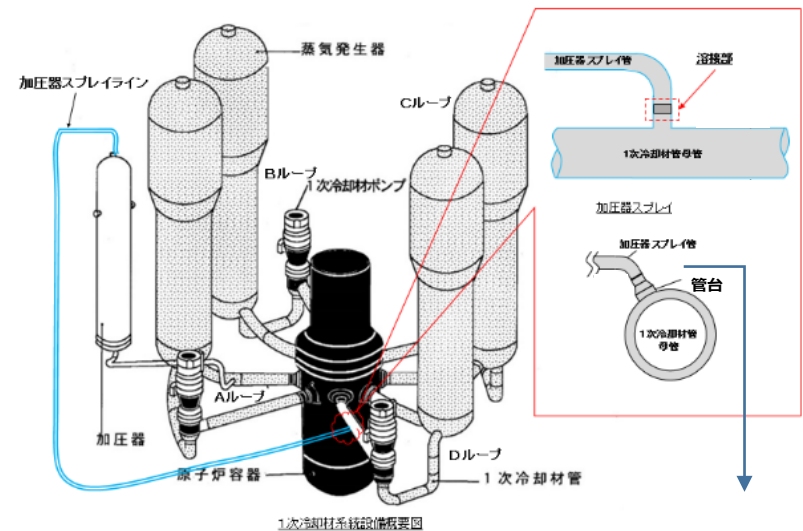
<亀裂発生及び亀裂進展の状況整理>

(公開会合における関西電力説明)

- 過大な溶接入熱と、管台-エルボ部の剛性の影響が重畳し、表層近傍において特異な硬化と応力が影響したことにより割れが発生と推定。
(現時点で、初期欠陥が認められていないが、溶接により微細な割れが発生していた可能性が否定できていない)
- また、**亀裂進展**に対しては、硬化したオーステナイト系ステンレス鋼の割れが進展する既存知見と合致しており、**粒界型SCC**と推定。

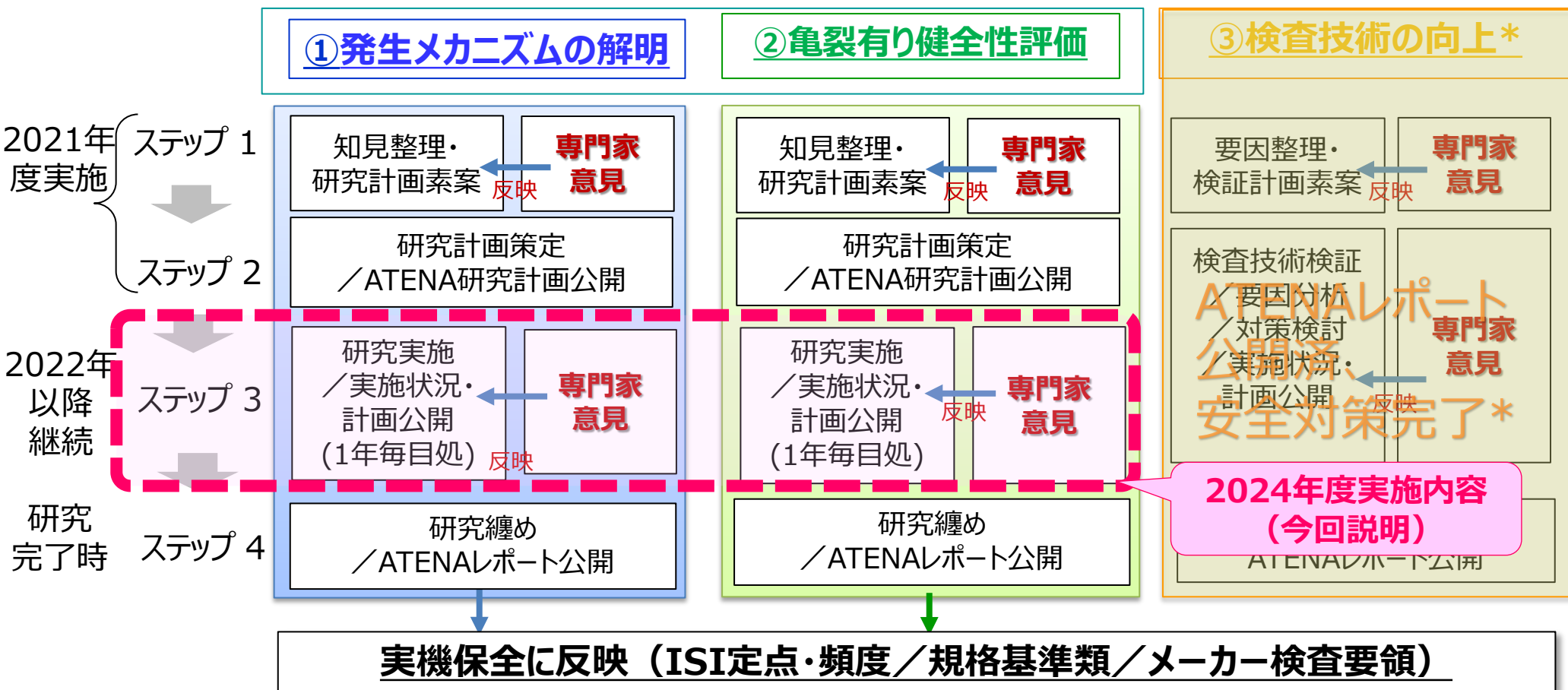


- ATENAとして、PWR1次系ステンレス鋼配管における割れについては特異な事象であり、発生メカニズムなど知見がほとんどなく、原因の特定および知見拡充の観点から、研究・調査が必要であると認識。



検討のアプローチ

- 規制当局と関西電力(株)の公開会合を踏まえ、技術課題は「①発生メカニズムの解明」、「②亀裂がある場合の健全性評価」、「③検査技術の向上」の3分類あると整理し、研究計画を元に推進。①及び②について研究継続中。③はレポート公開、安全対策完了済。



* ③検査技術の向上については、検討結果を纏めたATENAレポート公開 (2023/4/28)、各社安全対策完了を公表 (2024/7/29)

亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する研究計画 ～実施工程～

目標	実施項目	2022年度	2023年度	2024年度	2025年度
全般	1. 最新知見の調査	[Blue bar spanning 2022-2025]			
亀裂発生メカニズム解明	2. 実機詳細調査（損傷部位、比較部位）	実機損傷/健全部位	実機/モックアップ		
	(1)-①局所ひずみ測定（SEM/EBSD）	[Blue bar]	[Blue bar]		
	(1)-②断面マクロ硬さ測定	[Blue bar]	[Blue bar]		
亀裂発生メカニズム解明	(2)-①溶接欠陥の調査(SEM/EDS)	[Blue bar]	[Blue bar]		
	(2)-②潜在き裂の調査(SEM/EDS)	[Blue bar]	[Blue bar]		
亀裂発生メカニズム解明	(3)被膜分析、亀裂先端マイクロ組織分析（TEM）	[Blue bar spanning 2023-2024]			
	3. 発生特性に関する調査		[Blue bar spanning 2023-2025]		
構造健全性評価の確立	4. (1) SCC進展特性知見の調査	[Blue bar spanning 2022-2023]			
	4.(2)SCC進展特性データの取得		[Blue bar spanning 2023-2025]		
	4.(3)SCC進展速度線図案の策定		[Blue bar spanning 2023-2025]		
	5.溶接残留応力評価		[Blue bar spanning 2023-2024]		
	6.(1) 構造健全性評価		[Blue bar spanning 2024-2025]		
	6.(2) LBB成立性の検討		[Blue bar spanning 2024-2025]		
技術基盤の整備	7. 技術基盤の整備		[Blue bar spanning 2024-2025]		

2024年度実施内容

1. 最新知見の調査

- ✓ フランスのPWRプラントで認められた安全注入系配管溶接部のSCCと推測される欠陥などの最新情報を収集し、本検討の計画に反映する必要があるか否かについて調査する。

2. 実機詳細調査（亀裂発生メカニズム解明）

- ✓ 主亀裂先端マイクロ組織分析（TEM）

3. 溶接残留応力評価（亀裂発生・進展メカニズム解明）

- ✓ 当該主亀裂の残留応力へ寄与する因子を感度解析にて確認

目次

1. 振り返り
2. 2024年度検討内容
 - 2.1 最新知見の調査
 - 2.2 亀裂発生・進展メカニズム究明
 - 2.2.1 実機詳細調査
 - 2.2.2 溶接残留応力評価
3. 2025年度検討方針
4. まとめ

仏国PWRと大飯3号機の粒界割れ事象の比較

- 仏国PWRでは、主な発生要因として熱成層もしくは補修溶接の影響を指摘。
- 最新知見*を調査した結果、新しい見解等は無いことを確認。
- **大飯3号機とは異なる発生要因を想定。**

		仏国PWRプラント	大飯3号機 (本事業の調査結果)
発生部位		安全注入系配管HAZ 余熱除去系配管HAZ	加圧器スプレイライン配管HAZ
割れ形態		IGSCC	IGSCC
亀裂検出箇所		100箇所以上	1箇所
材料要因	材料	316L、304Lステンレス鋼	316ステンレス鋼
	鋭敏化	無	無
	硬化	亀裂発生部位での硬化を確認	亀裂発生部位での硬化を確認
	結晶粒粗大化	明確な記載無し	亀裂発生部位で結晶粒粗大化を確認
環境要因	環境	通常のPWR一次系環境	通常のPWR一次系環境
	温度	例えば、Civaux 1号機の 発生箇所では300℃	約290℃
	溶存酸素	無 (調査は実施中)	無
	不純物元素(Cl ⁻ 等)	無	無
応力要因	溶接残留応力	有	有
	補修溶接	一部、補修溶接有り	無
	変動荷重	熱成層による変動荷重有り	振動や変動応力の影響は小さい

*EDFやASNRのHPでの更新情報、国際学会での報告、NRCの“ADAMS Public Document”での公開資料を調査

仏国PWRプラントの損傷事例に関する動向調査 まとめ

- EDFは900箇所以上の溶接部（補修溶接も200箇所以上含む）に対して検査を実施した。ECCSおよびRHRのステンレス鋼製配管の溶接部において、これまで100箇所以上でSCCが確認されている。同検査プログラムは継続中であり、引き続き仏国の動向調査を継続する。
- 仏国PWRプラントのSCC事例の亀裂発生要因として、主に熱成層の影響が考えられており、一部では補修溶接の影響が2023年度の報告で挙げられていたが、これらの見解については、2024年度においても変わりはない。
- 米国NRCは、仏国のIGSCC事象に対し規制措置が必要であるか検討するため、xLPRを用いた確率論的破壊力学に基づいたリスク評価を実施し、継続して業界の動向を監視すると評価していた。2024年度はこれをレポートとして発刊*し評価根拠も明確化している。また、国際会議**での発表を行っており、リスク情報に基づく意思決定をサポートするものとしてxLPRの役割を強調している。なお、NRCのポジションに変更は無い。
- 米国においては、仏国及び日本でIGSCCが報告されている系統のエルボ部の検査に際して、IGSCCに対応した検査を行っているが、これまで割れは確認されていない。

*U.S.NRC. ADAMS Public Document. ML24162A131. 2024.8.

** D. Rudland et al. PVP2024. PVP2024-121559. 2024.

目次

1. 振り返り
2. 2024年度検討内容
 - 2.1 最新知見の調査
 - 2.2 亀裂発生・進展メカニズム究明
 - 2.2.1 実機詳細調査
 - 2.2.2 溶接残留応力評価
3. 2025年度検討方針
4. まとめ

確認されている事実に基づく粒界割れの発生・進展要因（仮説）

- 確認された粒界割れ（主亀裂）事象を踏まえて、実機のステンレス鋼配管の保全を検討していくため、粒界割れの発生・進展要因の調査を進めている。
- 確認された事実に基づく、当初（2022年度）の発生・進展要因に対する仮説は以下の通り。

項目	粒界割れ（主亀裂）事象
確認された事実	<ul style="list-style-type: none"> ● 1カ所のみ発生（複数プラント検査結果） ● HAZ部に発生 ● 高硬度部位（300HV0.01～）に発生 ● 深さ4.4mmまで進展 <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block; margin-left: 20px;"> : 想定要因 </div>
発生・進展に対する仮説	<ul style="list-style-type: none"> ● 溶接大入熱によりHAZ部（特に溶接境界部）に高ひずみ（硬さ・残留応力）が付与 ● 溶接時の微細な表面欠陥が起点となった可能性 ● 結合力が弱い粒界に、特異な硬さ、残留応力が重畳することで亀裂が成長

- 本仮説を検証する目的で、追加調査内容を計画・立案し実施した。

要因	調査内容
硬さ	主亀裂周辺の硬さの確認（特異性の確認）⇒2022年度
ひずみ	局所結晶方位差（KAM）の評価【断面EBSD】⇒2023年度
残留応力	主亀裂発生部の溶接残留応力に関する特異性の確認【FEM解析】⇒2024年度
粒界酸化 ／ 粒界結合力	酸化物分布状況及び酸化物被膜厚さの確認【破面・断面SEM/TEM】⇒2022～2024年度
	酸化物内の詳細分析による水質影響の確認【ラマン分光分析等】⇒2023年度
	粒界強さの観点で、粒界性格の評価【断面SEM/TEM/EBSD】⇒2023年度
微細な表面欠陥 (溶接時)	モックアップによる溶接直後からの微細な欠陥の調査【モックアップ調査】⇒2023年度

目次

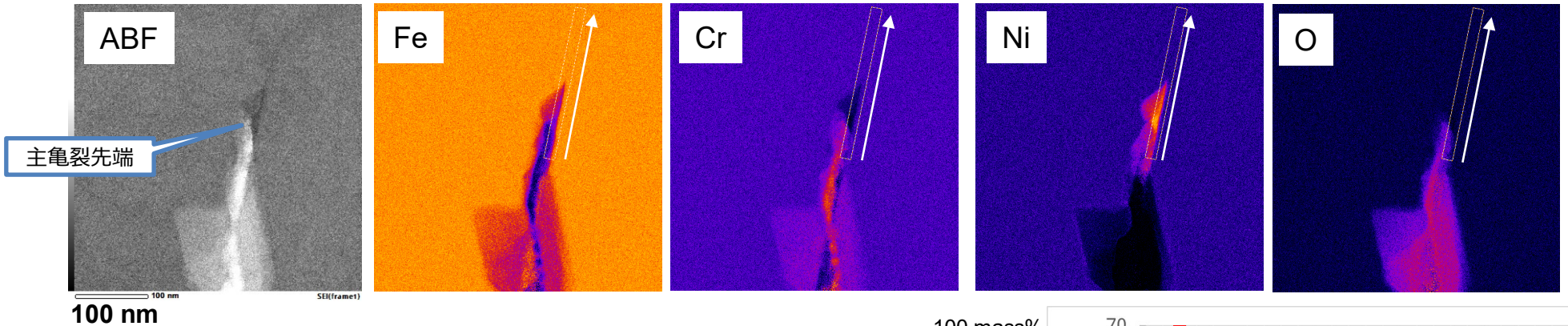
1. 振り返り
2. 2024年度検討内容
 - 2.1 最新知見の調査
 - 2.2 亀裂発生・進展メカニズム究明
 - 2.2.1 実機詳細調査**
 - 2.2.2 溶接残留応力評価
3. 2025年度検討方針
4. まとめ

背景・目的

- 2023年度は、TEMを用いて主亀裂および微小な割れの詳細観察を実施し、主亀裂先端前方の粒界に局所的なNi濃化域が認められた（亀裂の進展性を示唆）。
- 微小な割れの先端近傍では、主亀裂で観察されたNi濃化は認められていない（微小な割れの進展性なし）。
- 上記の観察結果は、化学組成の強度マップで視覚的に観察された状況であったため、2024年度では主亀裂と微小な割れ先端のNi濃化等の特徴を、より定量的に把握するため線分析を実施する。

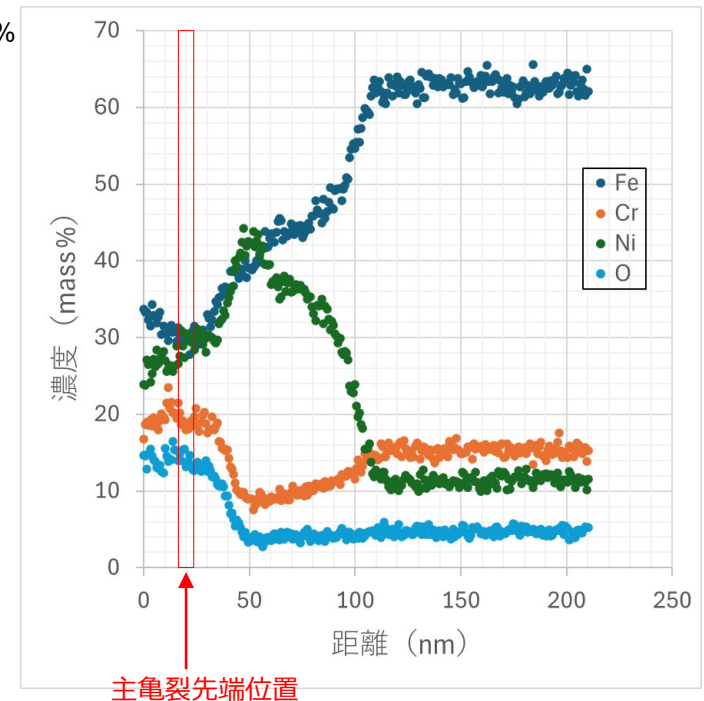
2024年度成果（主亀裂先端のSTEM/EDS分析）

主亀裂先端の線分析結果（50万倍）



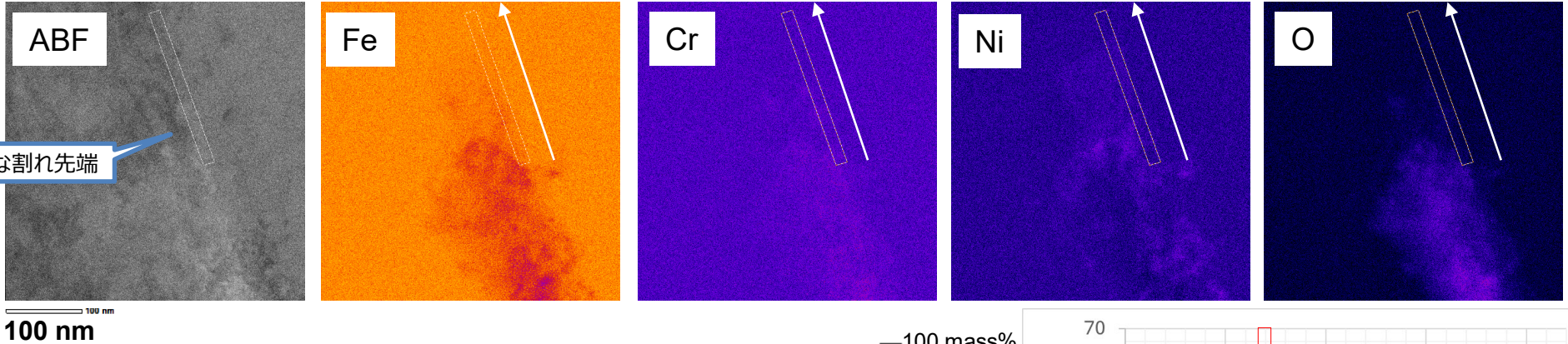
- 当該管0°の断面試料（2023年度観察試料）の強度マップから、主亀裂先端近傍においてデータを抽出し、線分析を実施。
- 本観察範囲からは、Fe、Cr、Ni、Oに関し、Ni濃化部等、特徴的な濃度分布が認められる。

➤ 2023年度の強度マップにおける定性的な評価から、2024年度では線分析を用いた定量的な評価を実施した結果、2023年度と同様にNi濃化が確認されており、**主亀裂は進展性を有するものであったことを示唆。**



2024年度成果（微小な割れ先端のSTEM/EDS分析）

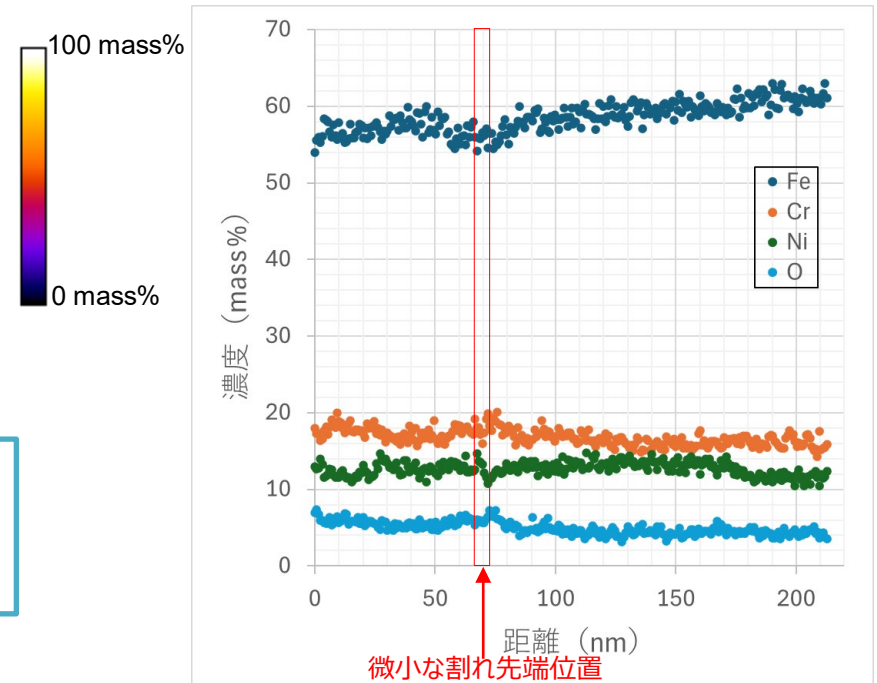
微小な割れ先端の線分析結果（50万倍）



- 当該管0°の断面試料（2023年度観察試料）の強度マップから、微小な割れ先端近傍においてデータを抽出し、線分析を実施。
- 微小な割れ先端部において、若干のNiの濃度上昇およびFeの濃度低下が見られたが、主亀裂と比較すると限定的。

➤ 微小な割れ先端において線分析を実施した結果、2023年度の強度マップの分析結果と同様にNiの濃化は確認されなかった。

➤ 主亀裂と微小な割れ先端の化学組成の線分析を実施し両者を比較した結果、NiやFe濃度の観点から、定量的にも明確な差異が認められた。



目次

1. 振り返り
2. 2024年度検討内容
 - 2.1 最新知見の調査
 - 2.2 亀裂発生・進展メカニズム究明
 - 2.2.1 実機詳細調査
 - 2.2.2 溶接残留応力評価
3. 2025年度検討方針
4. まとめ

背景・目的

- 溶接残留応力は主亀裂の発生、進展に大きく影響する因子であるものの、実機を用いた測定が困難であるため、解析による検討が必要となる。
- 割れ発生当該部は、溶接ビードの終端部であり、裏波幅が広く、非対称の形状が特徴的であることから、これら溶接部に関する形状の特徴が、応力面にどのような影響を及ぼすか、これらをパラメータとして感度解析を行い、応力への影響を確認する。
- また当該部に対しては、補修溶接の履歴はないが、入熱がプラスされる点を考慮し、補修の影響についても確認を行う。
- 各パラメータの影響のみを把握するため、継手形状としては直管-直管モデルを対象として行うが、当該部は管台-エルボの溶接部であり、継手形状の影響も確認するため、管台-エルボのモデルについても検討を行う。

溶接残留応力の感度解析の方針

- 解析対象は、大飯3号の当該管（溶接法：初層TIG+SMAW）と同じ4B（Sch160）、材料はSUS316とする。
- 溶接端部を溶接ビード端の重なりで模擬する。
- 解析対象の対称性を考慮し、解析モデルは、1/2対称の3次元モデル。
- 汎用FEAコードのAbaqus 2019を使用する。
- 解析パラメータと感度解析Caseの対応：
 - ①裏波垂れ下がり（小/大） : Case1とCase2
 - ②裏波形状（対称/非対称） : Case1とCase5
 - ③溶接端部（溶接ビード端の重なり（有））と定常部 : Case1とCase3
 - ④補修溶接有無（有/無） : Case1とCase4
 - ⑤継手形状（拘束状態の模擬はなし） : Case1とCase6

赤字：影響確認のために変化させるパラメータ

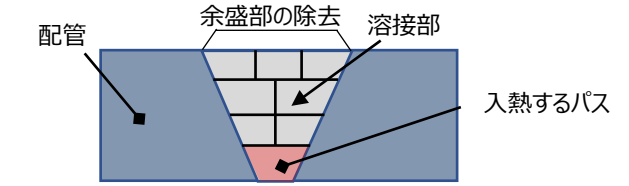
継手形状	Case	①裏波垂れ下がり※ (大/小)	②裏波形状の対称性※ (対称/非対称)	③溶接ビード端の重なり (有)	④補修溶接 (有/無)
直管-直管	1	小	対称	無	無
	2	大	対称	無	無
	3	小	対称	有	無
	4	小	対称	無	有
	5	小	非対称	無	無
管台-エルボ	6	小	対称	無	無

※：初層形状のみ変化させるパラメータとし、2層目以降は同一形状とする。

溶接残留応力の感度解析手法

(1) 解析ソフト、モデル、解析手法（熱源モデル）

- ✓ 汎用FEAコード：Abaqus 2019
- ✓ 3次元瞬間熱源（パス断面×周長＝体積に直接入熱する手法）



$$Q = \text{電流} \times \text{電圧} \times \text{溶接時間} \times \text{入熱効率} \quad (J)$$

(2) 応力ひずみ、硬化則

- ✓ 応力ひずみ：JNES国プロIAF※で取得したSUS316のデータを使用（母材・溶接金属で区別なし）
- ✓ 硬化則：JNES国プロIAF※と同様に線形移動硬化則を使用

※ JNES国プロIAF(Integrity Assessment of Flawed Components with Structural Discontinuity；複雑形状部機器配管健全性実証に関する事業)

(3) 入熱の与え方

- ✓ 溶接ビード端の重なりを考慮しないCase3以外は、パス毎に入熱（180°）
- ✓ 溶接端部の溶接ビード端の重なりを考慮するCase 3は、パス毎に90° + α°に入熱（αは溶接ビード端の重なり角度15°）

(4) 余盛部の除去の解析処理

- ✓ 最外層まで解析し、冷却後に余盛部の要素を削除（Abaqusの“deactivate”機能を使用）

解析条件

(溶接条件)

- 各ケースのパラメータの違いが結果に与える影響を分かりやすくするため、全ケースで初層入熱大（TIG） + 2層目以降入熱小（SMAW）の溶接条件（大飯3号実機配管想定）に統一。
- Case4のみは、補修溶接条件を追加設定。

(a) 溶接条件
(Case4は(b)を追加)

層数	溶接入熱量 (J/mm)
1※ (初層) パス: ①	Case1,3,4,5,6 : 1.9×10^3 Case2 : 2.4×10^3
2 パス: ②③	6.3×10^2
3 パス: ④⑤	9.6×10^2
4 パス: ⑥⑦⑧	1.1×10^3
5 パス: ⑨⑩⑪	1.1×10^3

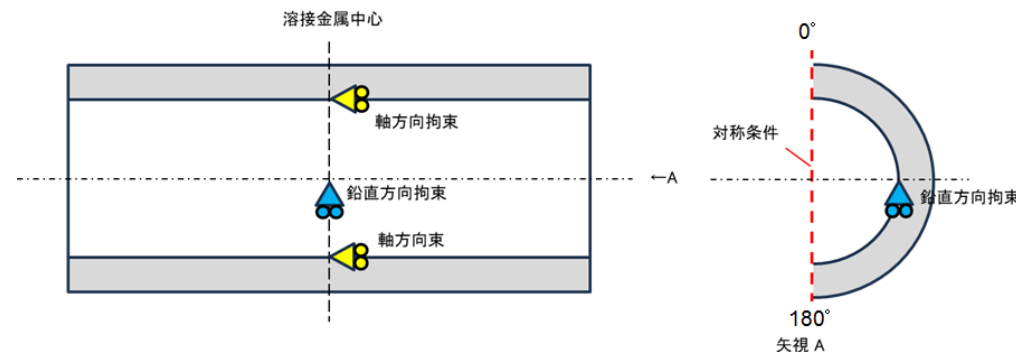
(b) 補修溶接
(Case4の溶接条件)

層数	溶接入熱量 (J/mm)
1	1.6×10^3
2	1.7×10^3
3	9.4×10^2
4	1.1×10^3
5	9.8×10^2
6	1.1×10^3

※：全ケースに対して初層入熱大（TIG） + 2層目以降入熱小（SMAW）による入熱密度を適用。
Case2の溶接入熱量が大きいのは初層面積の違いによるもの。

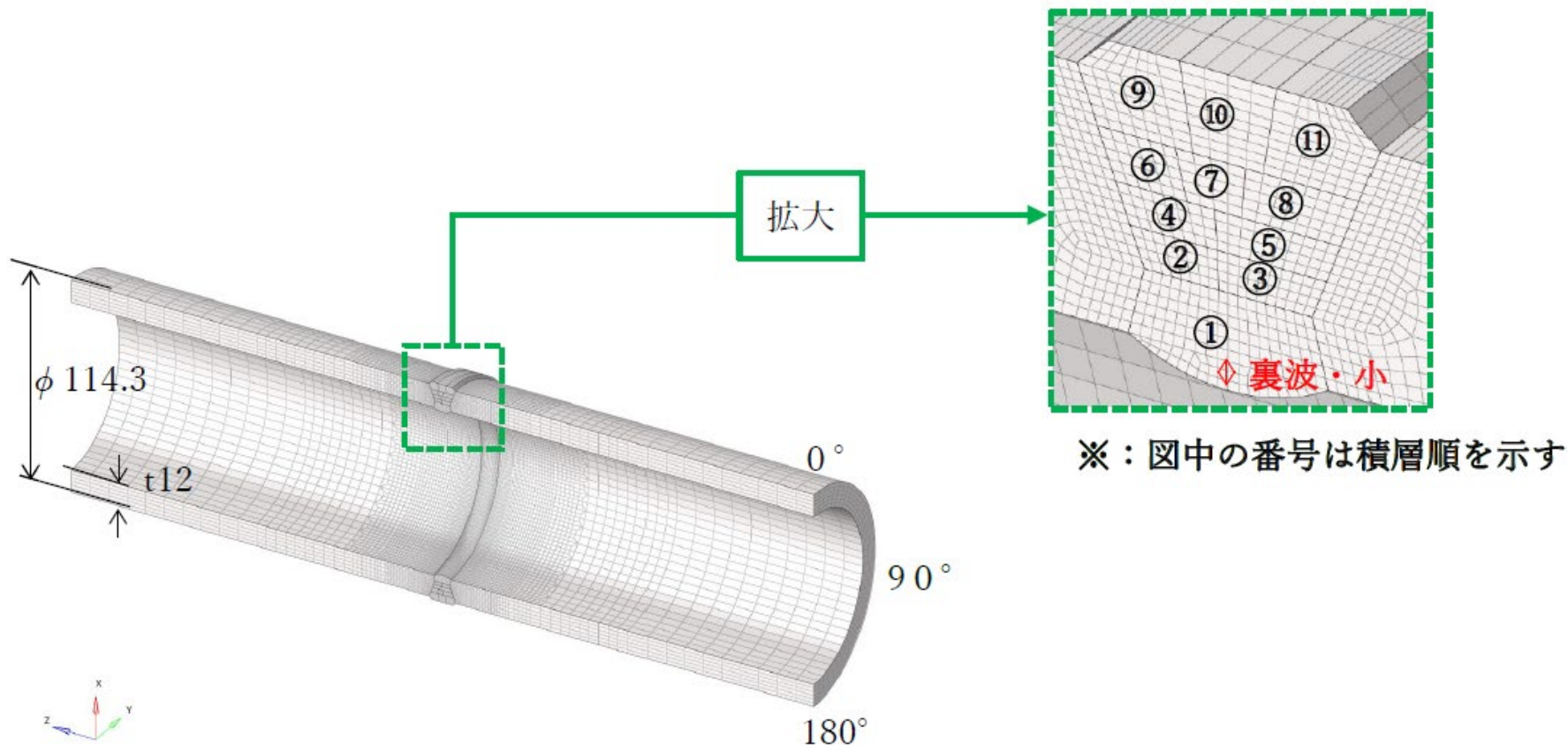
(拘束条件)

- 剛体移動の拘束及び対称面の保持のため拘束条件を設定。
- 溶接時に配管が周囲の構造物から受ける拘束力は考慮していない。



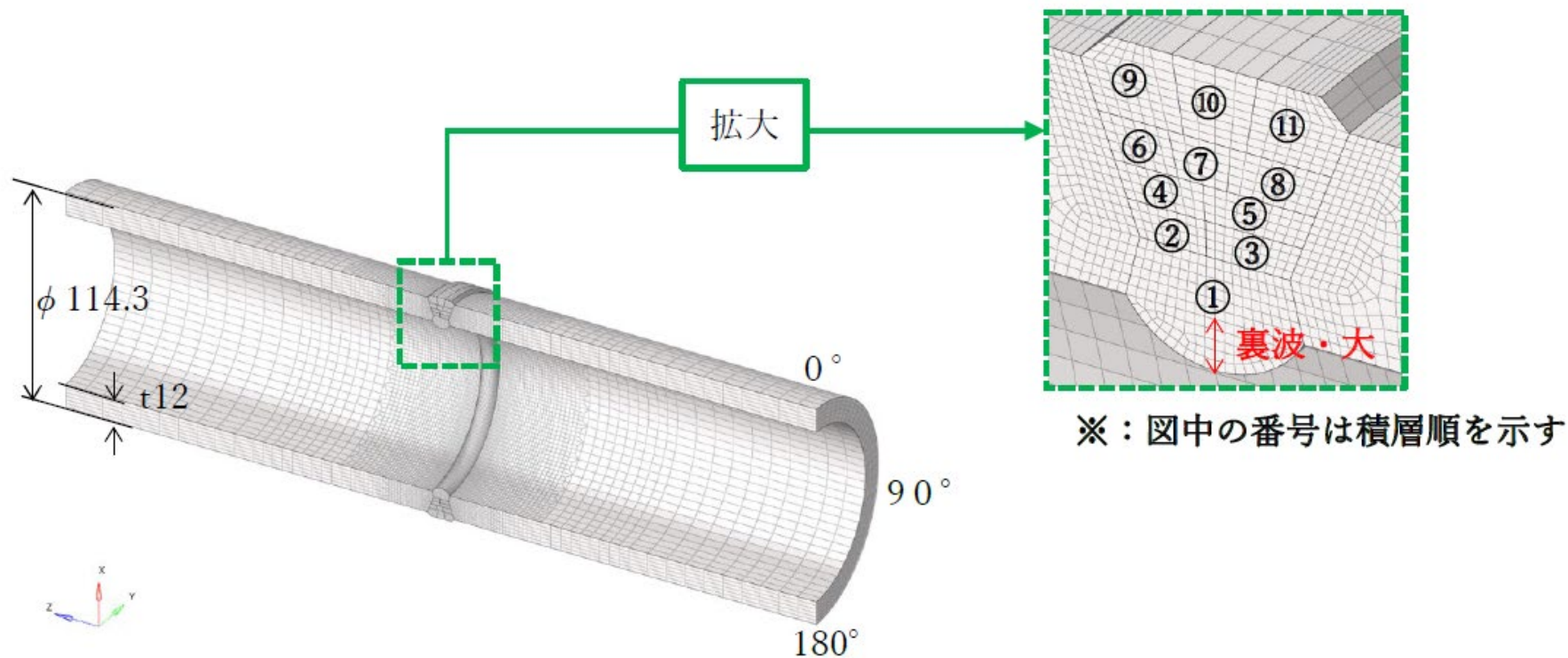
残留応力感度解析モデル (Case1)

継手形状	Case	①裏波垂れ下がり (大/小)	②裏波形状の対称性 (対称/非対称)	③溶接ビード端の重なり (有)	④補修溶接 (有/無)
直管-直管	1	小	対称	無	無



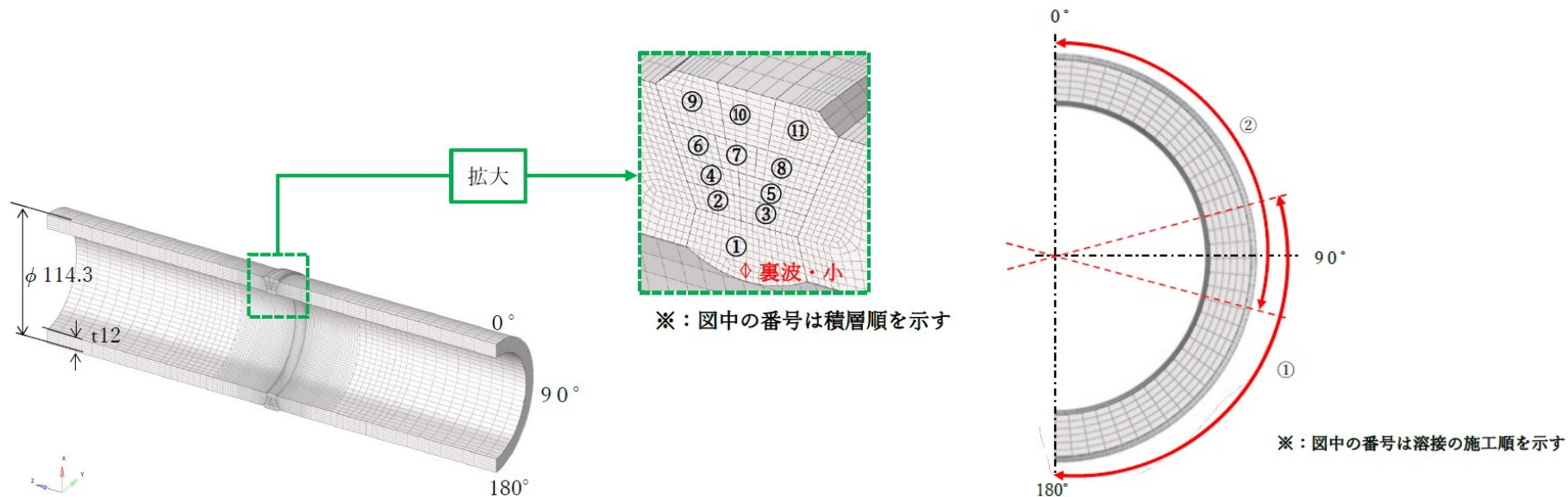
残留応力感度解析モデル (Case2)

継手形状	Case	①裏波垂れ下がり (大/小)	②裏波形状の対称性 (対称/非対称)	③溶接ビード端の重なり (有)	④補修溶接 (有/無)
直管-直管	2	大	対称	無	無



残留応力感度解析モデル (Case3)

継手形状	Case	①裏波垂れ下がり (大/小)	②裏波形状の対称性 (対称/非対称)	③溶接ビード端の重なり (有)	④補修溶接 (有/無)
直管-直管	3	小	対称	有	無



溶接ビード端の重なり範囲： $90^\circ \pm 15^\circ$

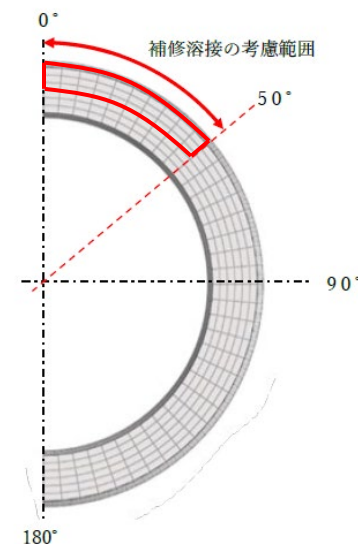
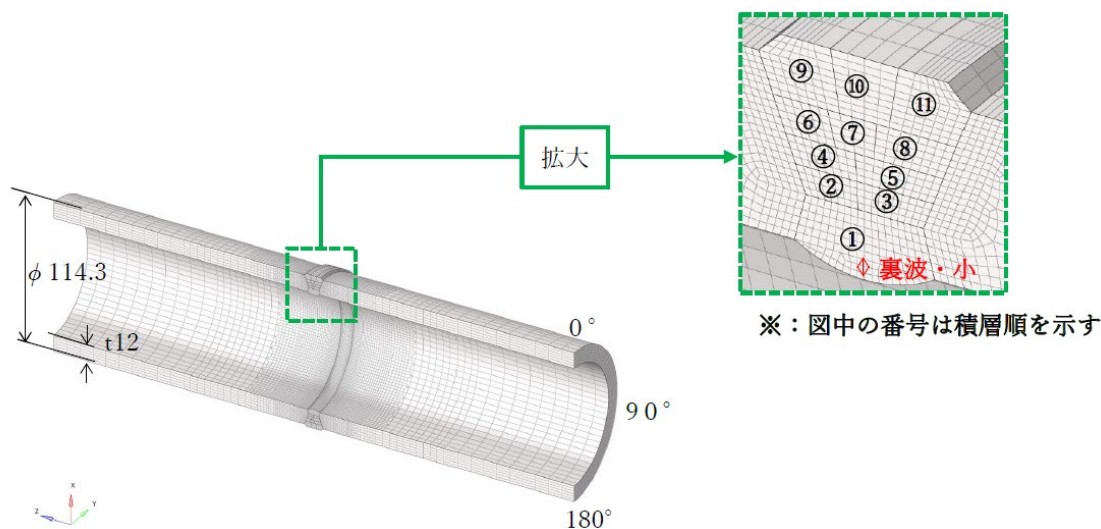
※Case3 (溶接ビード端の重なり考慮) は当該管0°近傍の溶接終端部の模擬を意図した条件

- ✓ 入熱ステップを2つに分け、それぞれの入熱範囲を $90^\circ + \alpha$ として与えることで、溶接ビード端の重なりを模擬する (α は 15°)。
- ✓ 溶接ビード端の重なりは、全パス (5層11パス) に対して考慮する。

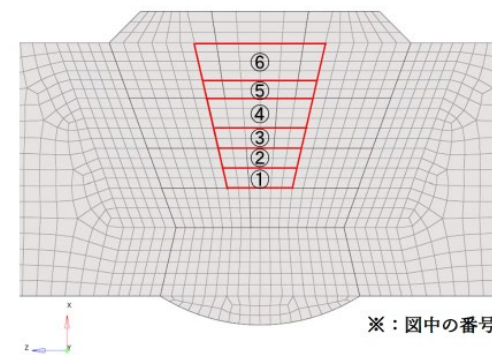
残留応力感度解析モデル (Case4)

継手形状	Case	①裏波垂れ下がり (大/小)	②裏波形状の対称性 (対称/非対称)	③溶接ビード端の重なり (有)	④補修溶接 (有/無)
直管-直管	4	小	対称	無	有

補修溶接範囲：0～50°



(a) 補修溶接の考慮範囲

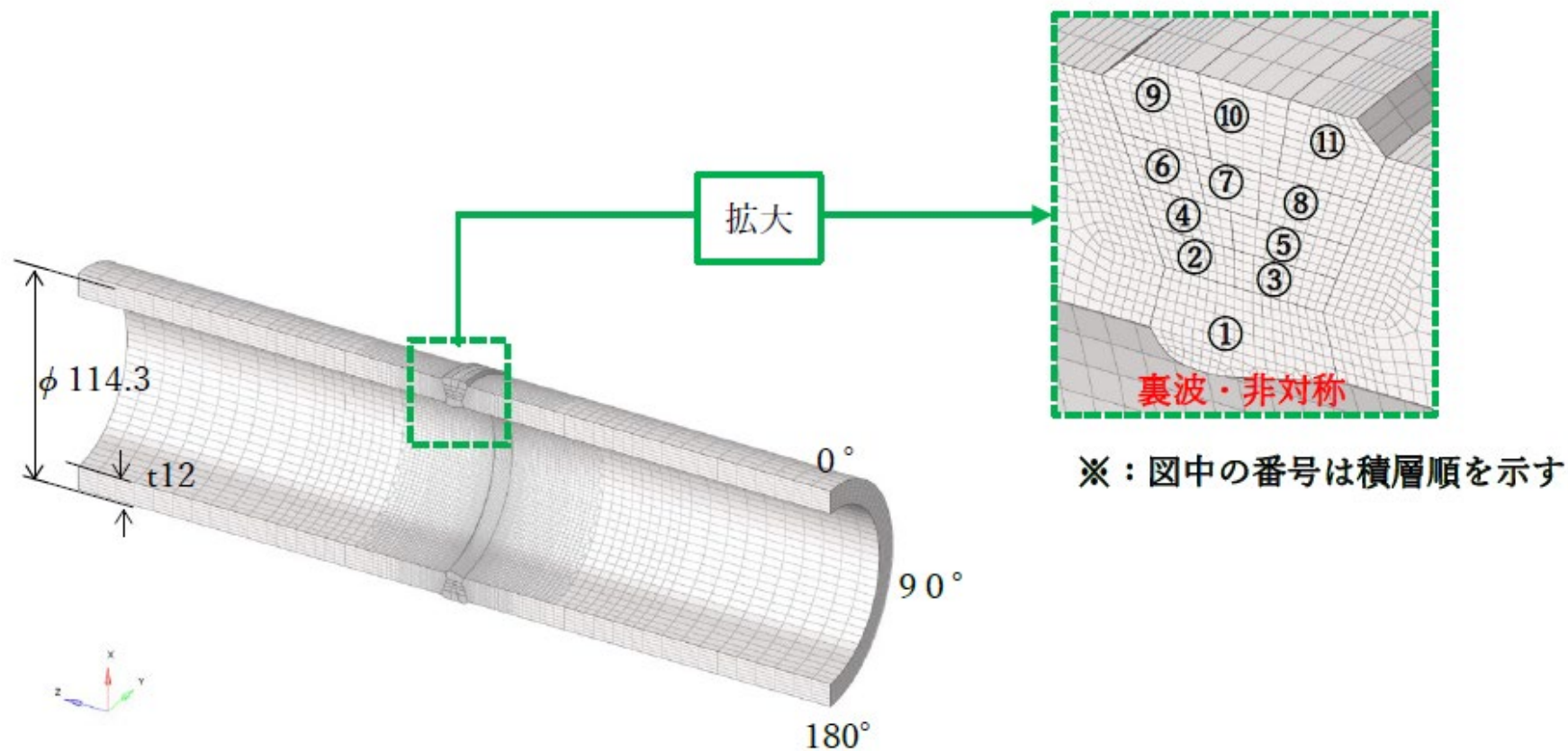


(b) 補修溶接の積層

- ✓ 仏国で発生した深い応力腐食割れが生じた事例の主要因の一つとされている補修溶接の板厚方向の残留応力分布への影響を評価するために、補修溶接を模擬した解析を行う。
- ✓ 解析モデルの0～50°が補修溶接の考慮範囲。

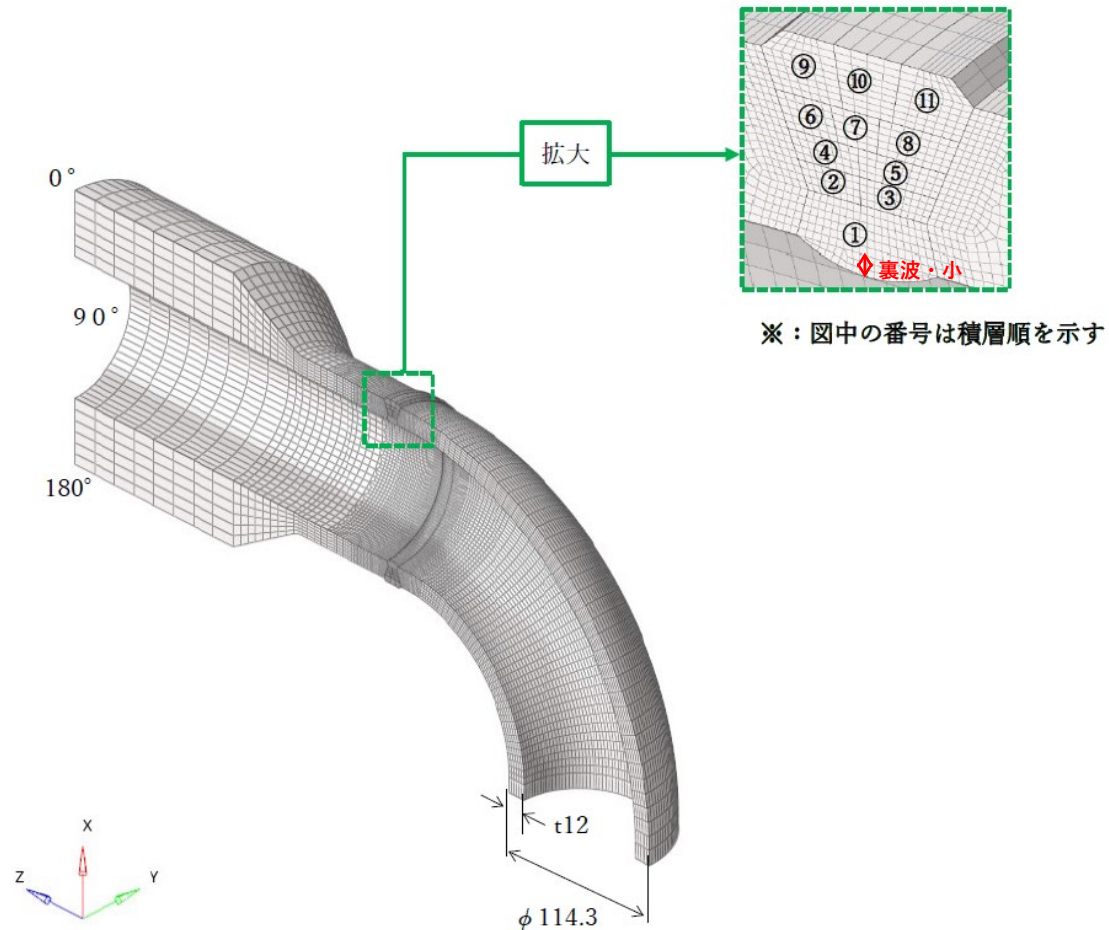
残留応力感度解析モデル (Case5)

継手形状	Case	①裏波垂れ下がり (大/小)	②裏波形状の対称性 (対称/非対称)	③溶接ビード端の重なり (有)	④補修溶接 (有/無)
直管-直管	5	小	非対称	無	無



残留応力感度解析モデル (Case6)

継手形状	Case	①裏波垂れ下がり (大/小)	②裏波形状の対称性 (対称/非対称)	③溶接ビード端の重なり (有)	④補修溶接 (有/無)
管台-エルボ	6	小	対称	無	無



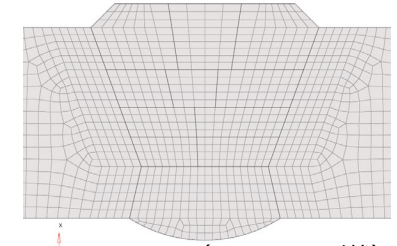
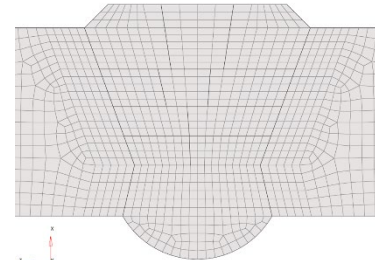
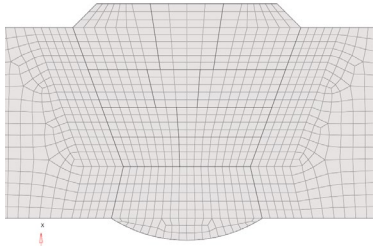
感度解析結果 (90° (標準) 軸方向断面での板厚に対する解析コンタ (その1))

Case1 (裏波・小,標準ケース)

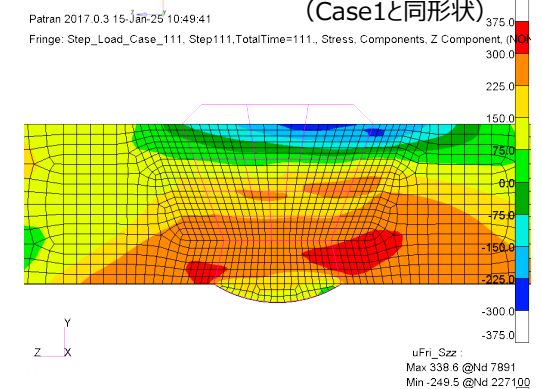
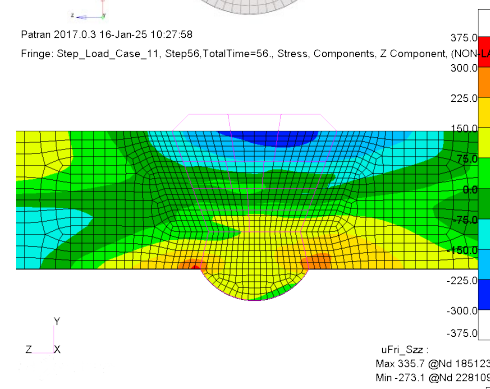
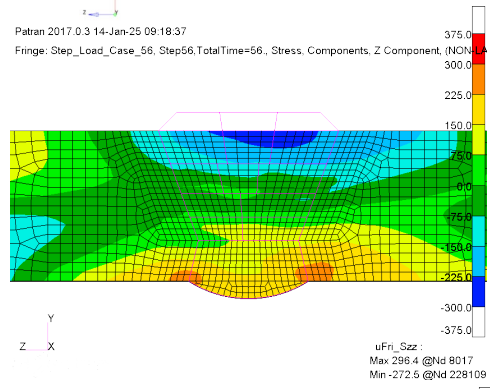
Case2 (裏波・大)

Case3 (溶接ビード端の重なり)

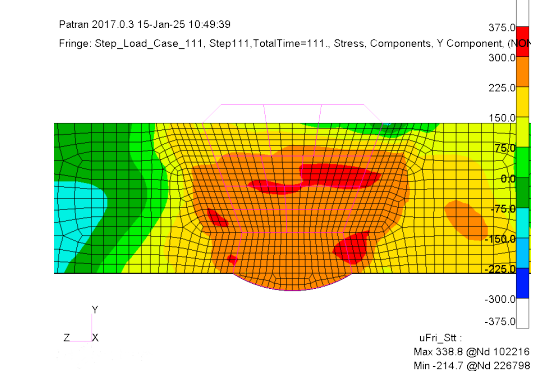
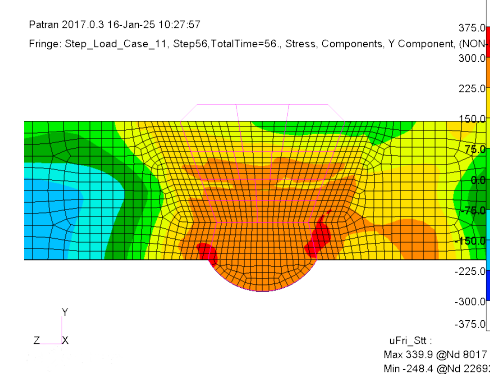
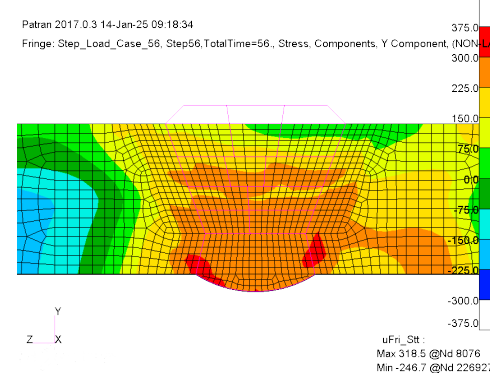
解析モデル
(積層図)



軸方向
応力



周方向
応力

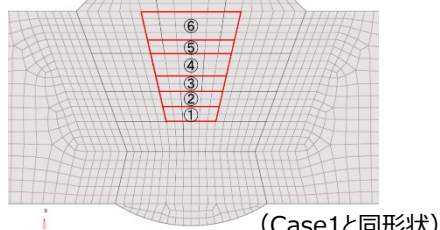


配管内表面側の溶接境界部で軸及び周方向の高い引張応力が集中 (Case3は溶接ビード端の重なりにより更なる高い引張応力の分布が増加)。

感度解析結果 (90° (標準) 軸方向断面での板厚に対する解析コンタ (その2))

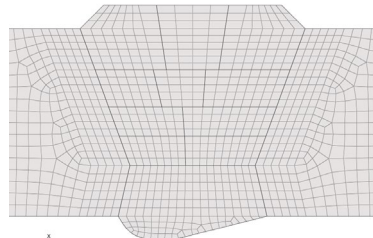
解析モデル
(積層図)

Case4 (補修溶接)

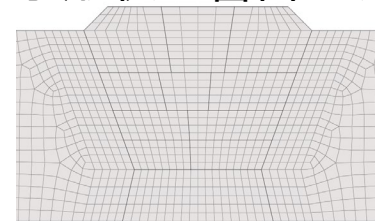


(図中の番号は補修溶接の積層順)

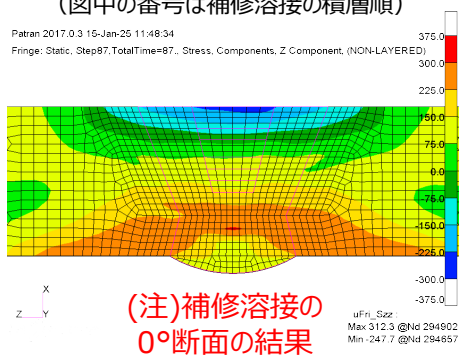
Case5 (裏波・非対称)



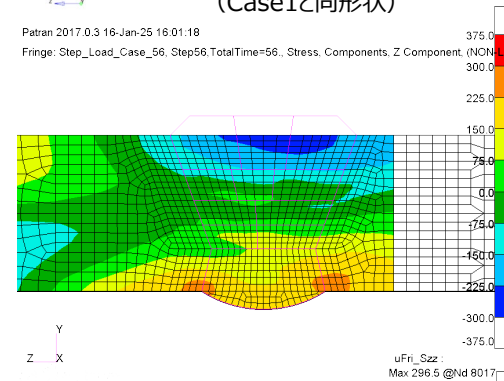
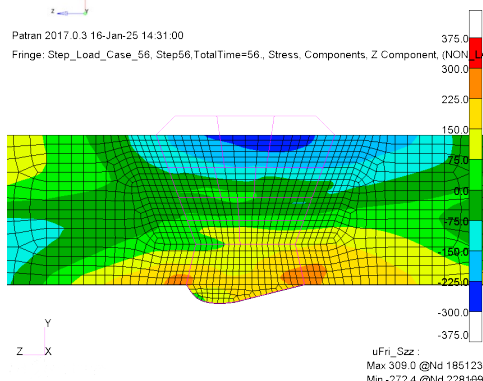
Case6 (継手形状：管台-エルボ)



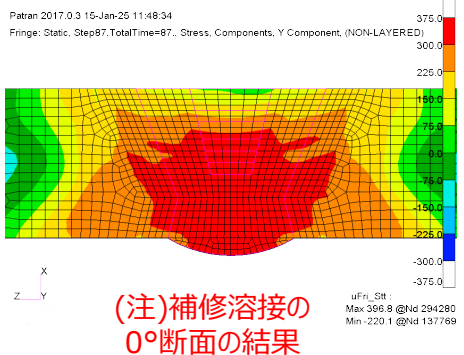
軸方向
応力



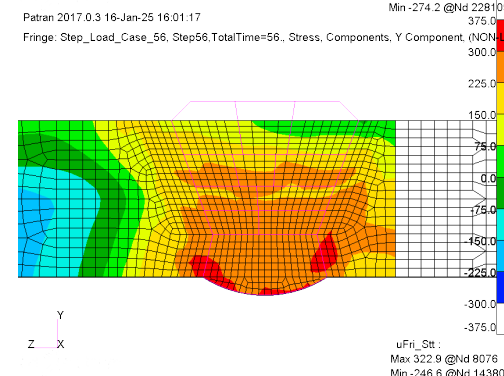
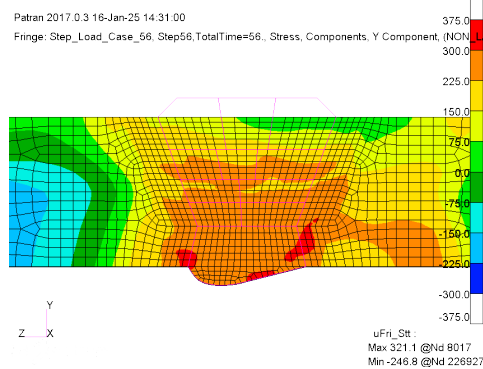
(注)補修溶接の
0°断面の結果



周方向
応力

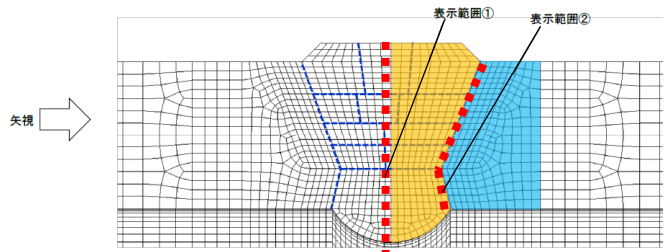


(注)補修溶接の
0°断面の結果

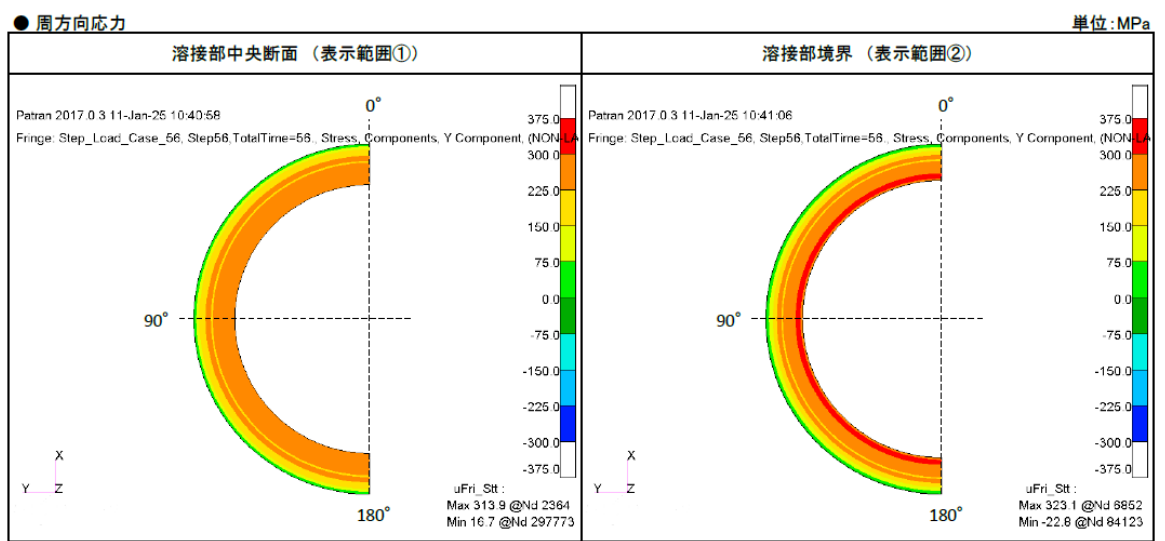
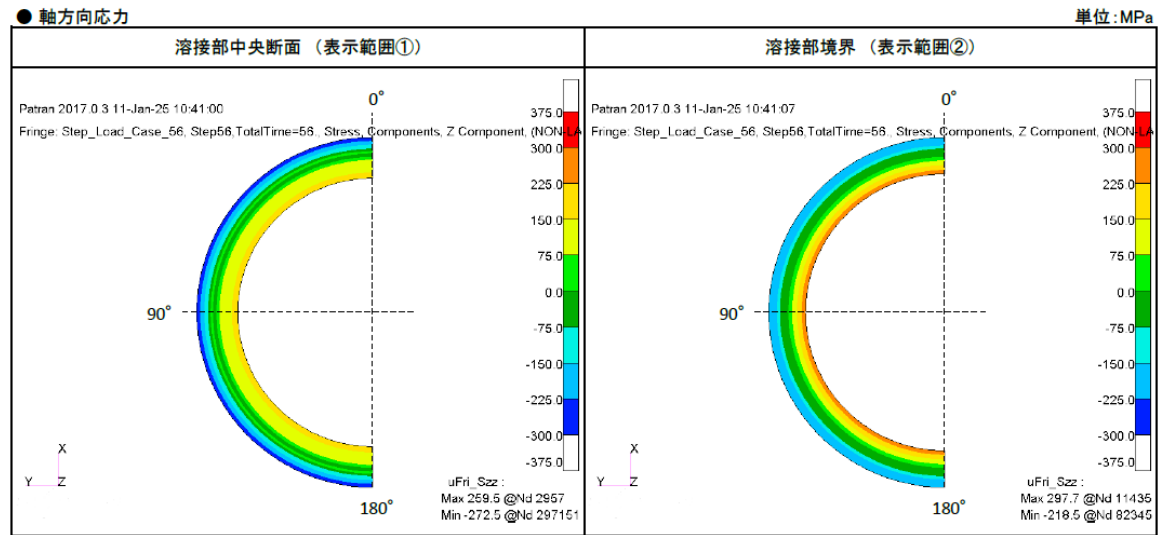


配管内表面側の溶接境界部で軸及び周方向の高い引張応力が集中 (Case4は除く)。

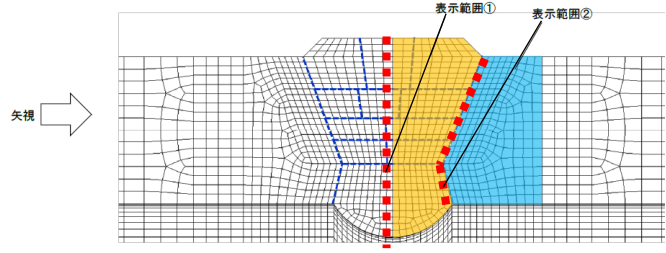
感度解析結果（周方向断面での板厚に対する解析コンタ（Case1））



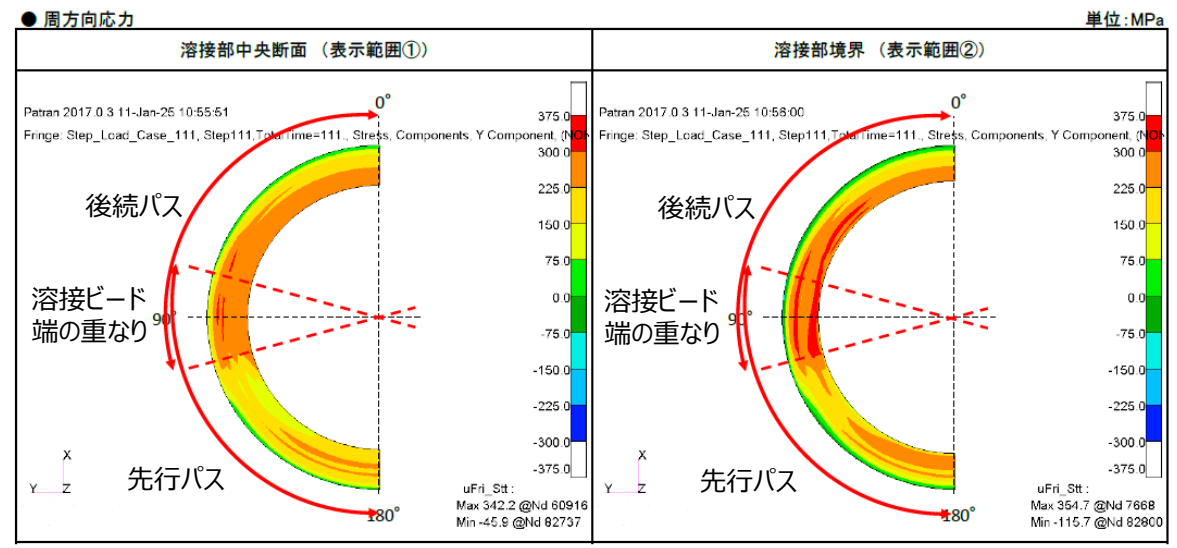
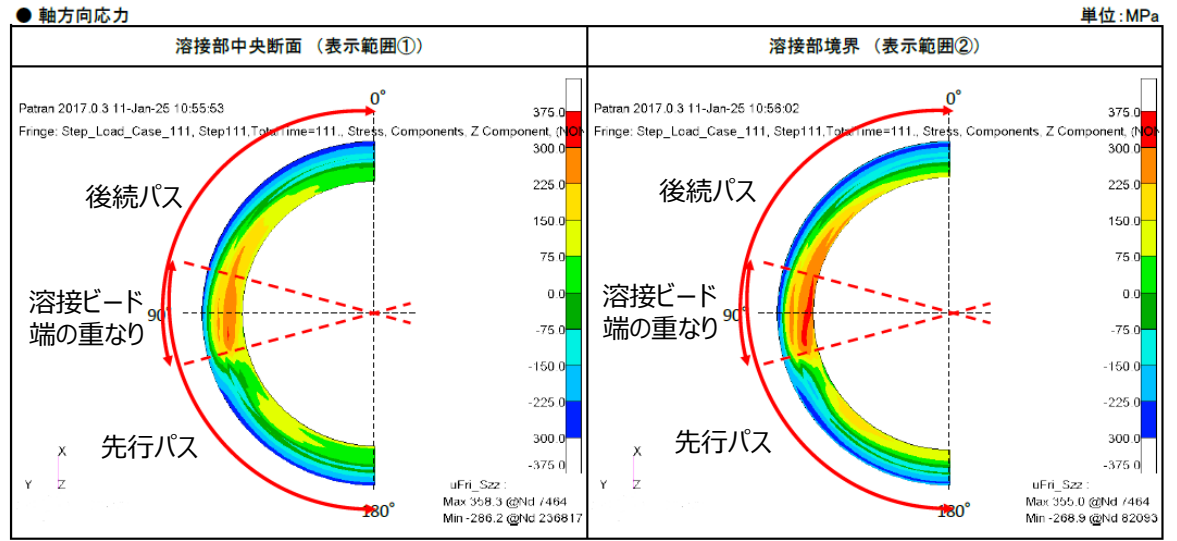
- Case1では、配管内面側の溶接境界部では、軸及び周方向と共に高い引張応力が集中。
- 配管外面側では圧縮応力が存在。



感度解析結果（周方向断面での板厚に対する解析コンタ（Case3））

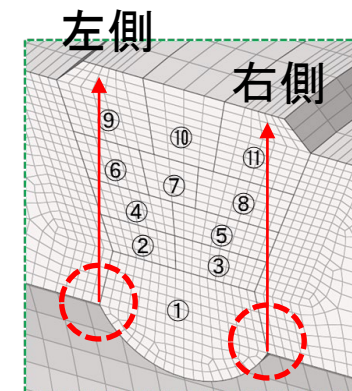
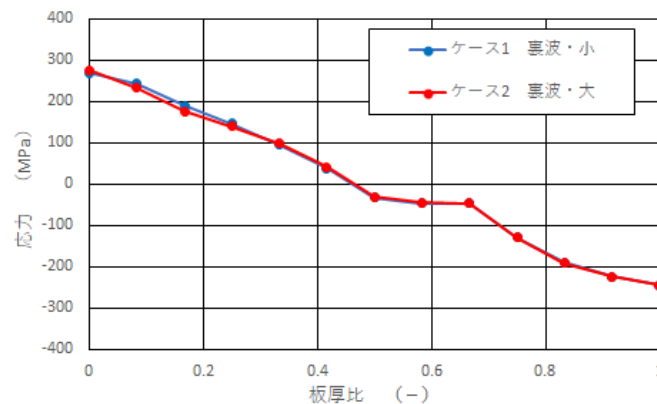
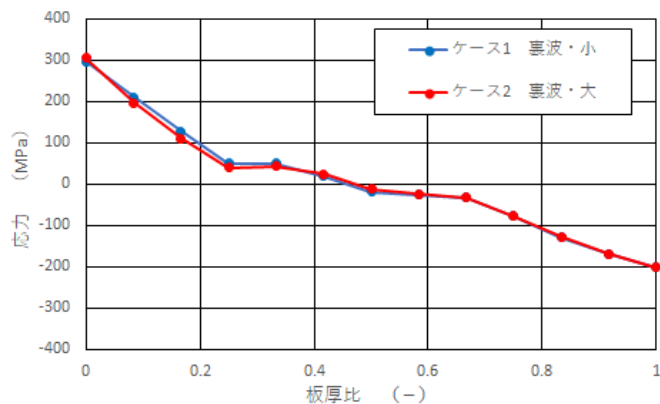


- Case3では、溶接ビード端の重なりの範囲（ $90 \pm 15^\circ$ ）に対して、配管内表面側の溶接境界部で軸及び周方向の高い引張応力が認められた。
- 溶接ビード端の重なりの2回目（図中の後続パス）の入熱範囲の終端の先部分には圧縮応力が認められた。

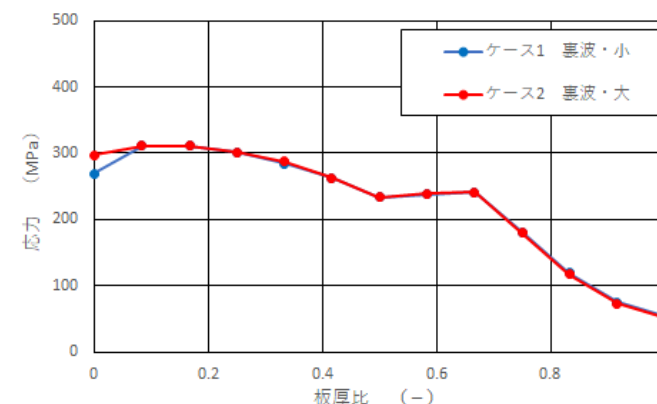
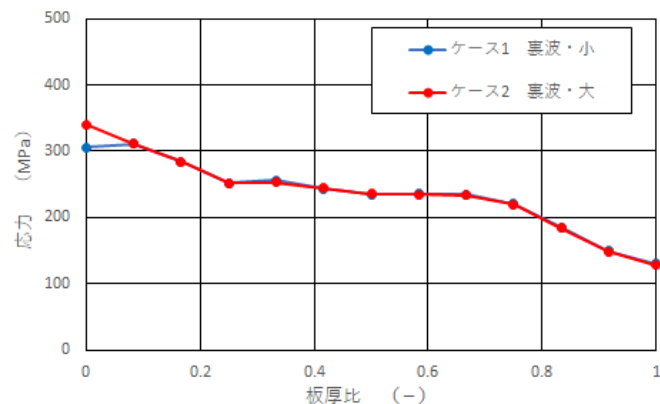


感度解析結果 (Case1とCase2の比較)

軸方向
応力



周方向
応力



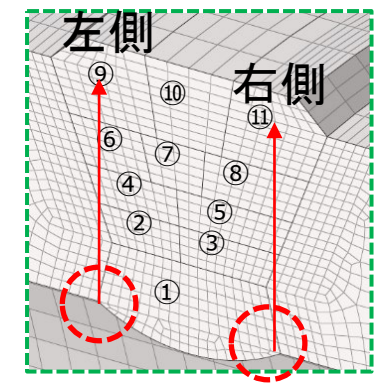
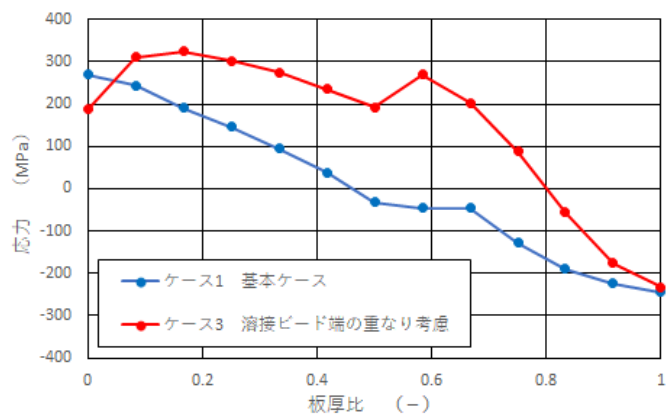
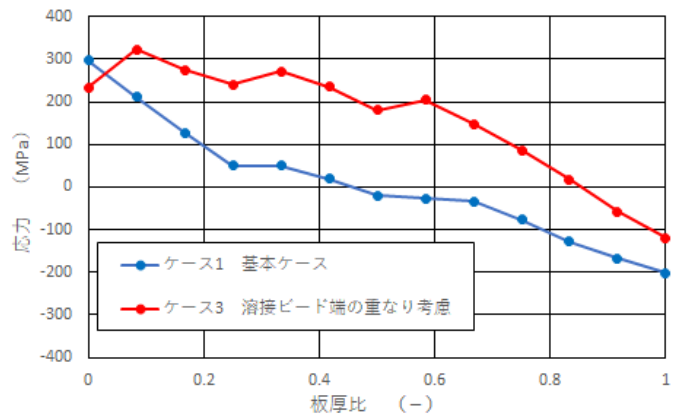
左側溶接境界の応力比較

右側溶接境界の応力比較

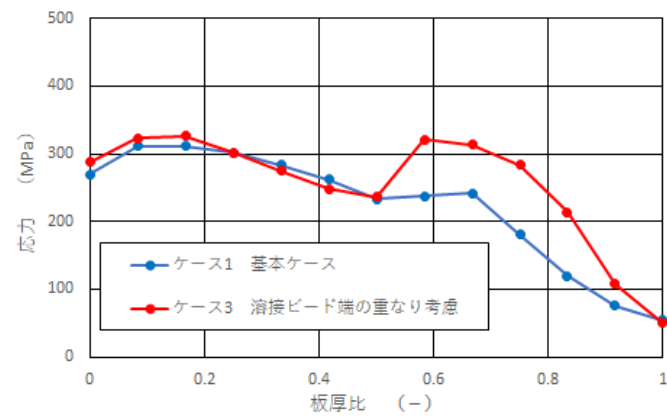
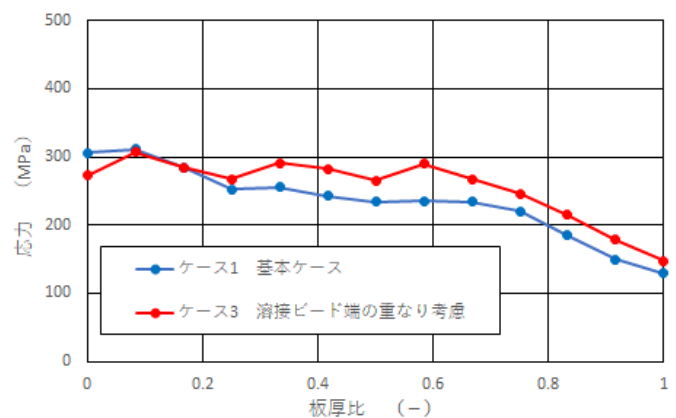
Case1とCase2で初層溶接部の裏波垂れ下がり大小の影響を比較した※。
配管内表面について、軸方向応力の差は小さかった。また、周方向応力はCase2の裏波形状大の条件で僅かに大きくなる傾向が認められた。

感度解析結果 (Case1とCase3の比較)

軸方向
応力



周方向
応力



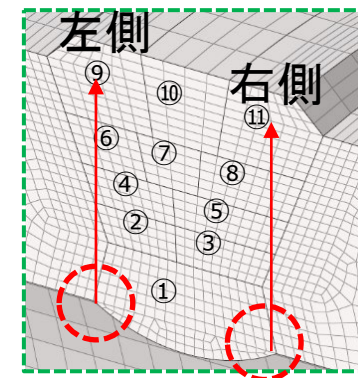
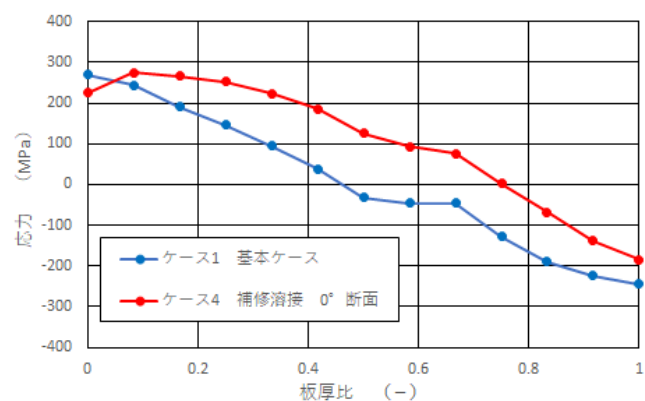
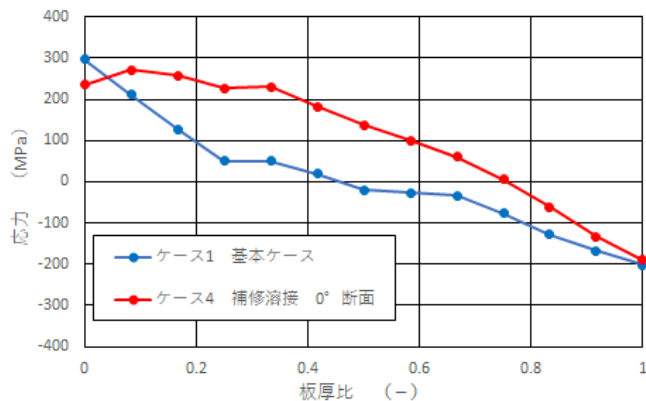
左側溶接境界の応力比較

右側溶接境界の応力比較

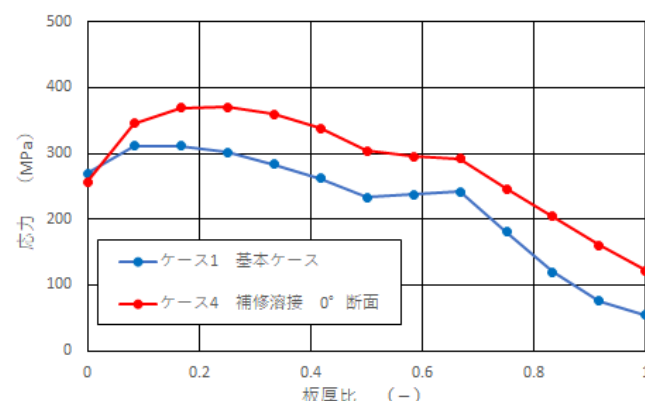
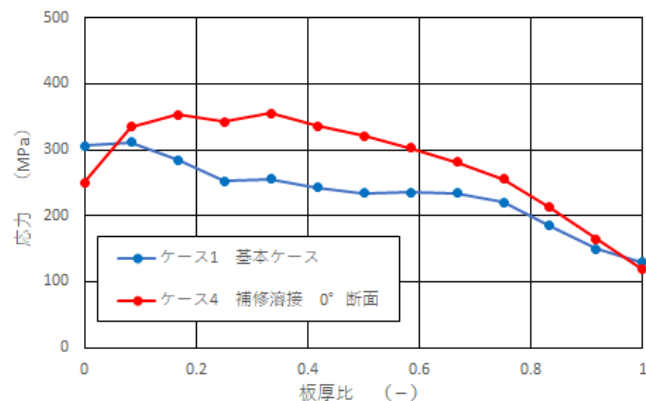
Case1とCase3では、Case3 (溶接ビード端の重なり考慮) に伴い全体的に板厚内部で軸方向応力の増加傾向、周方向応力の僅かな増加傾向が認められた。

感度解析結果 (Case1とCase4の比較)

軸方向
応力



周方向
応力



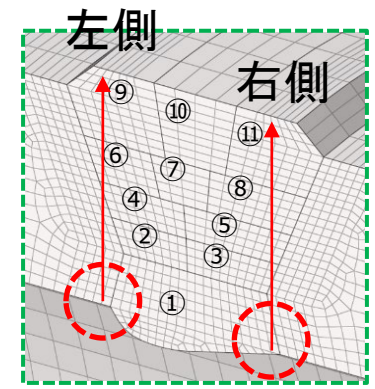
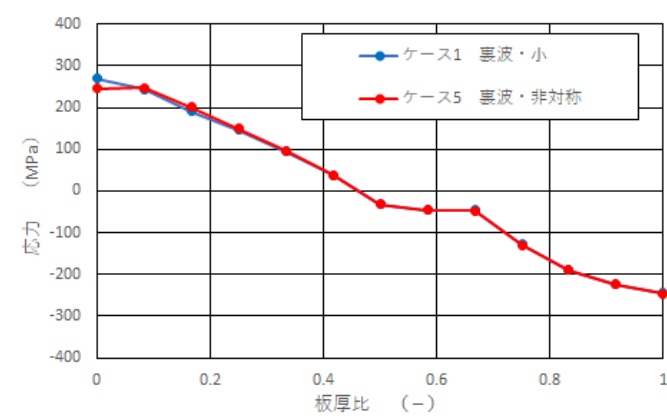
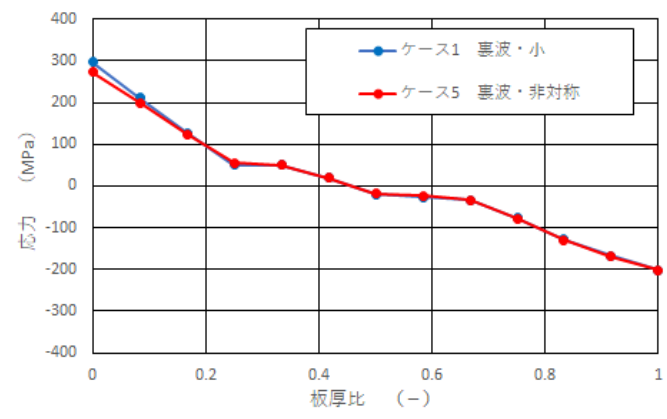
左側溶接境界の応力比較

右側溶接境界の応力比較

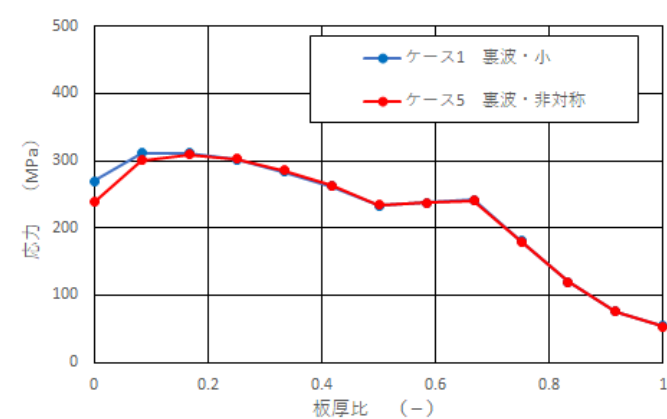
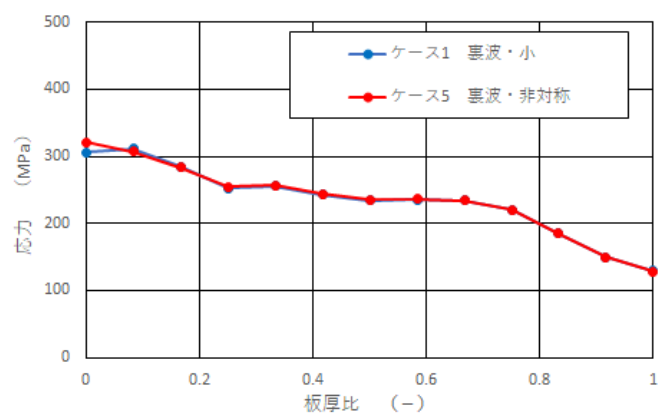
Case1とCase4では、Case4 (補修溶接有り) で軸及び周方向応力が板厚内部で大きくなる傾向が認められた。

感度解析結果 (Case1とCase5の比較)

軸方向
応力



周方向
応力



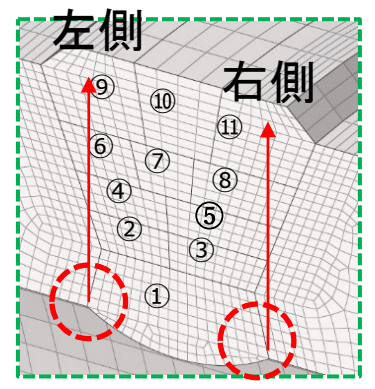
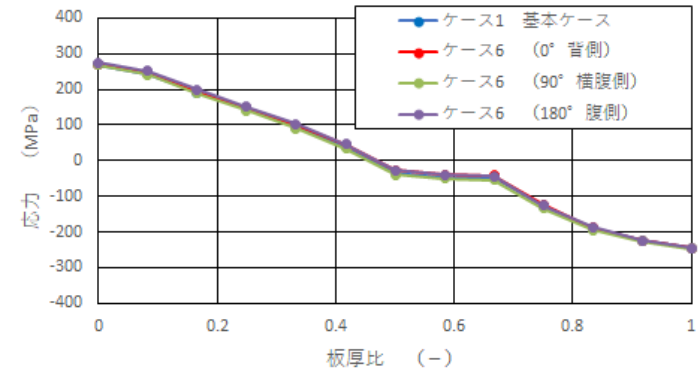
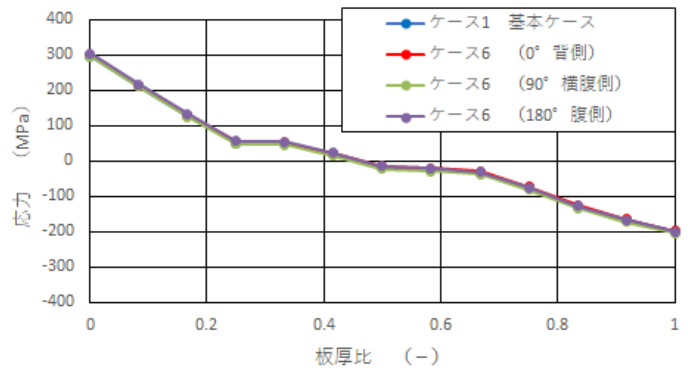
左側溶接境界の応力比較

右側溶接境界の応力比較

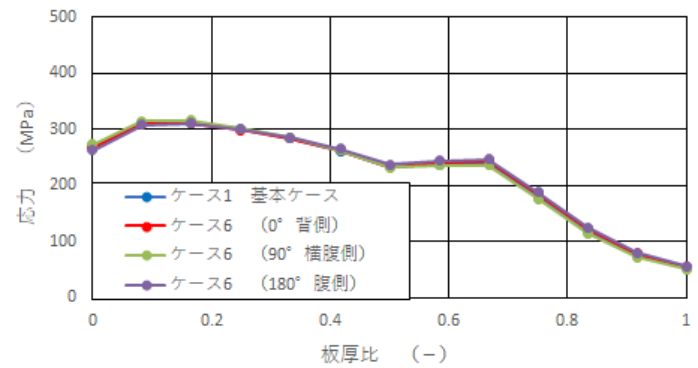
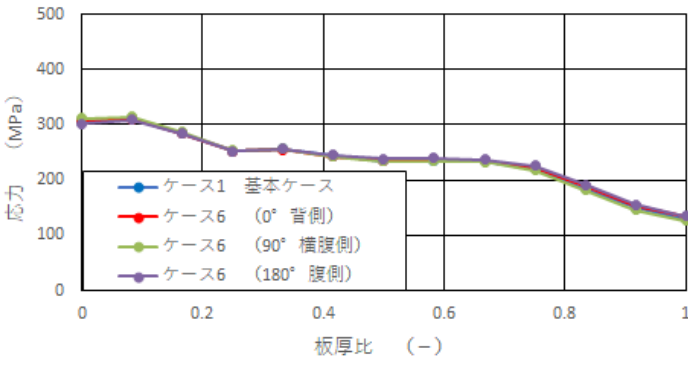
Case1とCase5では、軸方向及び周方向応力に大きな差異は認められない。
Case5 (裏波形状小) の右側では、表面近傍の応力が小さくなる傾向が認められた。

感度解析結果 (Case1とCase6の比較)

軸方向
応力



周方向
応力



左側溶接境界の応力比較

右側溶接境界の応力比較

Case1とCase6では、軸及び周方向応力に顕著な差異は認められなかった。

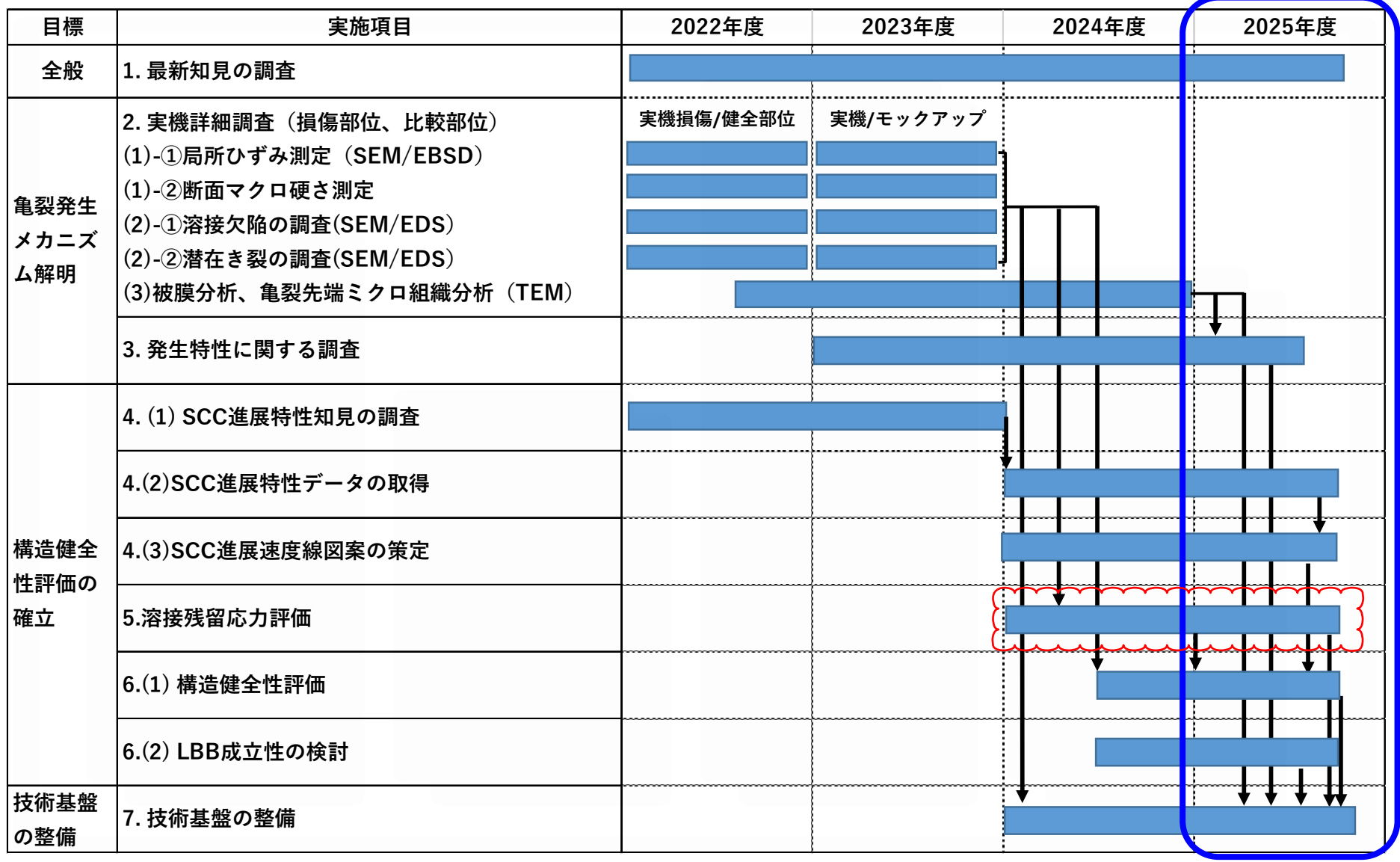
溶接残留応力の感度解析結果まとめ

- 溶接残留応力に関する感度解析結果（Case1～6）に基づき、溶接境界部の板厚方向の軸方向応力分布に対して比較検討を実施した。
 - ✓ 初層入熱大+2層目以降小入熱（Case1） ⇒内表面で降伏応力相当の軸方向応力が発生
 - ✓ 裏波垂れ下がりの大小（Case1とCase2） ⇒軸方向応力への影響無し
 - ✓ 溶接ビード端の重なりの有無（Case1とCase3） ⇒軸方向応力が板厚内部で増加、内表面では増加なし
 - ✓ 補修溶接の有無（Case1とCase4） ⇒軸方向応力が板厚内部で増加、内表面では増加なし
 - ✓ 裏波垂れ下がりの非対称（Case1とCase5） ⇒裏波形状が小さくなる方で応力低下傾向
 - ✓ 継手形状（Case1とCase6） ⇒応力への影響無し
- 感度解析結果から、内表面においては有意な増加傾向は認められず、溶接ビード端の重なり、補修溶接が溶接境界部の板厚内部で応力増加の要因となる可能性が示された。

目次

1. 振り返り
2. 2024年度検討内容
 - 2.1 最新知見の調査
 - 2.2 亀裂発生・進展メカニズム究明
 - 2.2.1 実機詳細調査
 - 2.2.2 溶接残留応力評価
3. 2025年度検討方針
4. まとめ

亀裂発生メカニズム・亀裂有り健全性評価に関する研究計画 ～更新後実施工程～



実施項目		実施内容
1.	最新知見の調査	<ul style="list-style-type: none"> 仏国のSCC事例に関する続報について引き続き調査する。
3.	発生特性に関する調査	<ul style="list-style-type: none"> 過年度に引き続き、溶接、機械加工、それらの重畳が結晶粒界の酸化や強度に及ぼす影響に関する最新知見の調査を行う。
4. (2)	SCC進展特性データの取得	<ul style="list-style-type: none"> HAZのSCC進展速度データを取得する。 結晶粒径の異なる試験片によりSCC挙動に及ぼす粗大粒の影響を評価する。
4. (3)	SCC進展速度線図案の策定	<ul style="list-style-type: none"> 4.(2)において得られた進展データをJSME事例規格線図と比較することで、HAZへの適用性を確認する。
5.	溶接残留応力評価	<ul style="list-style-type: none"> 残留応力分布に及ぼす溶接ビード端の重なりの影響評価の精緻化、移動熱源の影響評価を行う。
6. (1)	構造健全性評価	<ul style="list-style-type: none"> JSME事例規格「オーステナイト系ステンレス鋼のPWR一次系水質環境中のSCC亀裂進展速度(NA-CC-017)」を用いたPWR1次系環境中のステンレス鋼のSCCについての健全性評価手法(案)を整理し、大飯3号事例を例としたケーススタディを実施する。
6. (2)	LBB成立性の検討	<ul style="list-style-type: none"> 2024年度までの研究成果から当該事象は特異であったことから、これまでのLBBの知見に影響がないと結論づけたが、当該事象がプラント安全へ与える影響を評価する手法として、大飯3号粒界割れ部を想定した確率論的破壊力学(PFM)評価を実施し、破断に至る確率を定量的に評価するとともに、得られた結果を用いたPRA評価により、炉心損傷頻度への影響を評価する。
7	技術基盤の整備	<ul style="list-style-type: none"> 本事業(5か年)で得られた成果を文書として取りまとめる。

目次

1. 振り返り
2. 2024年度検討内容
 - 2.1 最新知見の調査
 - 2.2 亀裂発生・進展メカニズム究明
 - 2.2.1 実機詳細調査
 - 2.2.2 溶接残留応力評価
3. 2025年度検討方針
4. まとめ

まとめ

- 外部専門家の意見も交え2021年度に策定した計画に基づき、2024年度も研究を継続し、知見の拡充を進めた。
 - 最新知見の調査として、仏国のSCC状況を継続的に調査し、大飯3号機の粒界割れと異なる状況が判りつつあるが、仏国でも明確な結論は得られておらず、引き続き2025年度も調査を継続する。
 - 実機詳細調査・発生特性に関する調査においては、主亀裂の特異性に関する有益な情報が得られ、主亀裂の発生・進展に至るメカニズムの目途を付けた。
- なお、2025年度は最終年度であることから、これまでの知見で得られた成果の取り纏めを行う。
- 以上の進捗については、従前同様、規制当局と定例面談等で適宜情報共有し、必要に応じ会合にて説明させて頂く。

参考資料

参考1：SCC進展特性データ取得に向けた準備状況

参考2：略語集

参考1 SCC進展特性データ取得に向けた準備状況

- 大飯3号加圧器スプレイライン配管溶接部に認められた粒界割れは、溶接熱影響部を進展するSCCであると考えられる。
- 亀裂進展評価対象部位は、溶接熱影響部（HAZ）となるため、JSME事例規格NA-CC-017（冷間圧延材がデータベース）による実機評価へのさらなる妥当性示すためにも、HAZの進展速度が冷間圧延材と同様であることを示すデータを拡充することが望ましい。
- 粒界割れが認められた実機配管HAZでは顕著な粗大粒が認められている。板厚方向への進展への影響は限定的ながら、進展初期は粗大粒域を進展しており、結晶粒径がSCC挙動に与える影響を実験的に把握しておくことが望ましい。
 - 上記の影響を実験的に評価するため、課題に対する対策案を考慮したSCC進展試験の準備として、試験に用いるHAZ供試体の準備および粗大粒材料の作製と同供試体からのCT試験片作製を行う。
 - 2024年度はCT試験片形状の採取までとし、2025年度に亀裂進展試験を行う。

参考1 亀裂進展試験データ取得に際する課題と対応

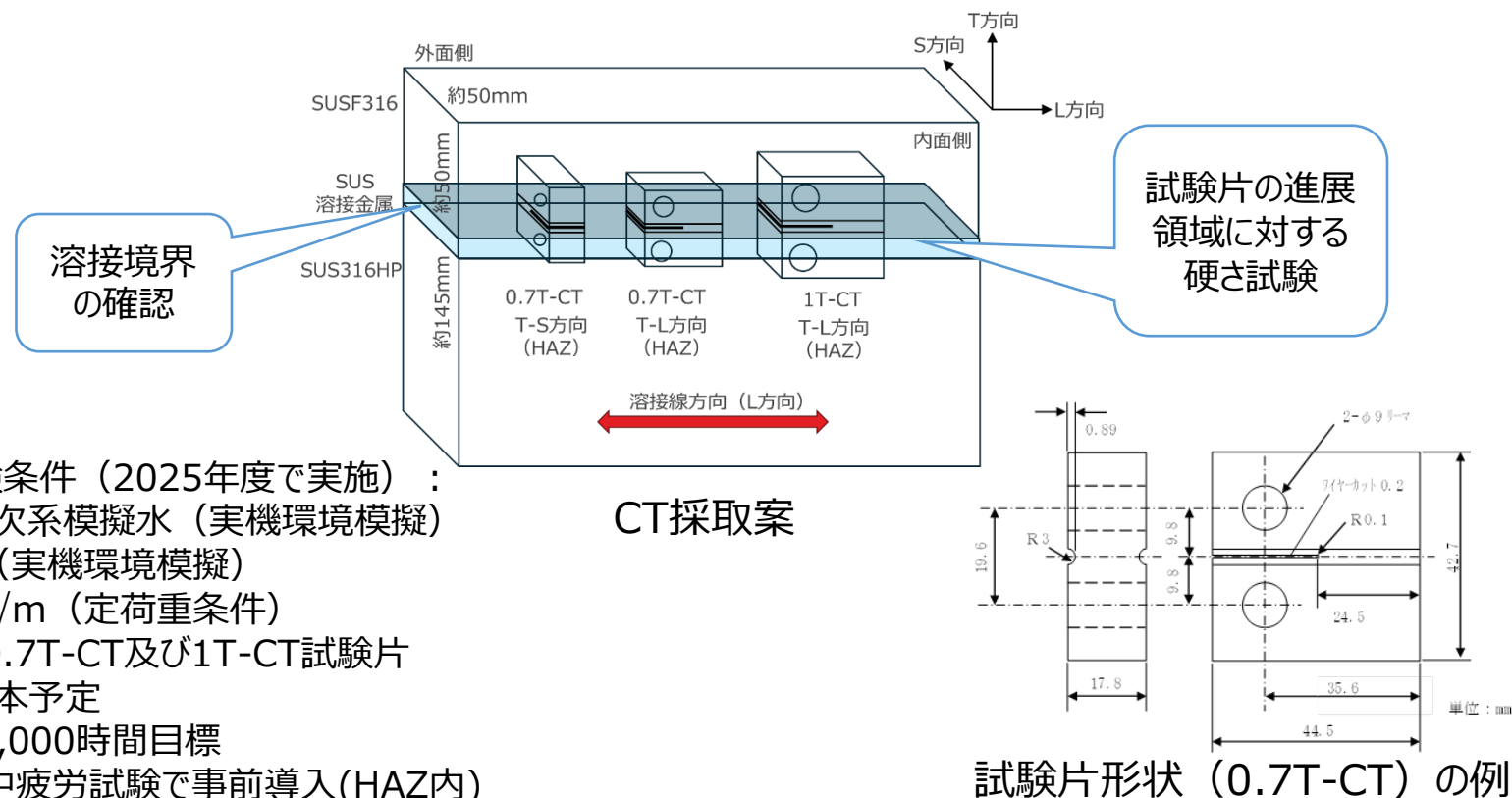
亀裂進展試験項目	懸念事項	課題	本事業での対応
HAZ進展速度検証	実機（大飯3号）の当該管4B配管サイズに対しては、CT試験片の採取が難しい。	<ul style="list-style-type: none"> • 実機と同等レベルとしてHAZの硬さを模擬することで良いか？ • 硬さを正確に模擬できない可能性もある。 • あくまでもHAZに対する基礎的な亀裂進展試験とせざるを得ない。 	<ul style="list-style-type: none"> • 溶接部を模擬した大型の溶接継手のHAZ部近傍からCT試験片を採取する。 • 実機亀裂進展方向を踏まえた2方向（亀裂深さ方向・長さ方向）に着目した試験とする。
粗大粒影響検討	実機（大飯3号）の当該管4B配管のHAZで認められている結晶粒の粗大化を模擬した供試体の作製が難しい。	<ul style="list-style-type: none"> • HAZの結晶粒を熱処理で模擬することの妥当性。 • HAZの硬化を冷間加工で模擬することの妥当性。 • あくまでも結晶粒の粗大化の影響を踏まえた基礎的な亀裂進展試験とせざるを得ない。 • 結晶粒の粗大化に伴い粒界でSCC亀裂が入るかの懸念有り。 	<ul style="list-style-type: none"> • 溶体化処理で結晶粒を粗大化させる。 • その後、冷間加工で硬さを増加させる。

参考1 SCC進展試験計画（HAZ進展速度検証）

【目的】

実機評価部がHAZとなることを想定し、冷間圧延材で取得された進展速度をデータベースとする進展式が、HAZにも適用可能であることを検証するデータを取得する。

パラメータ	期待成果（仮定）
HAZでのSCC進展速度	HAZのCGRは、従来データ（冷間圧延材）と同等



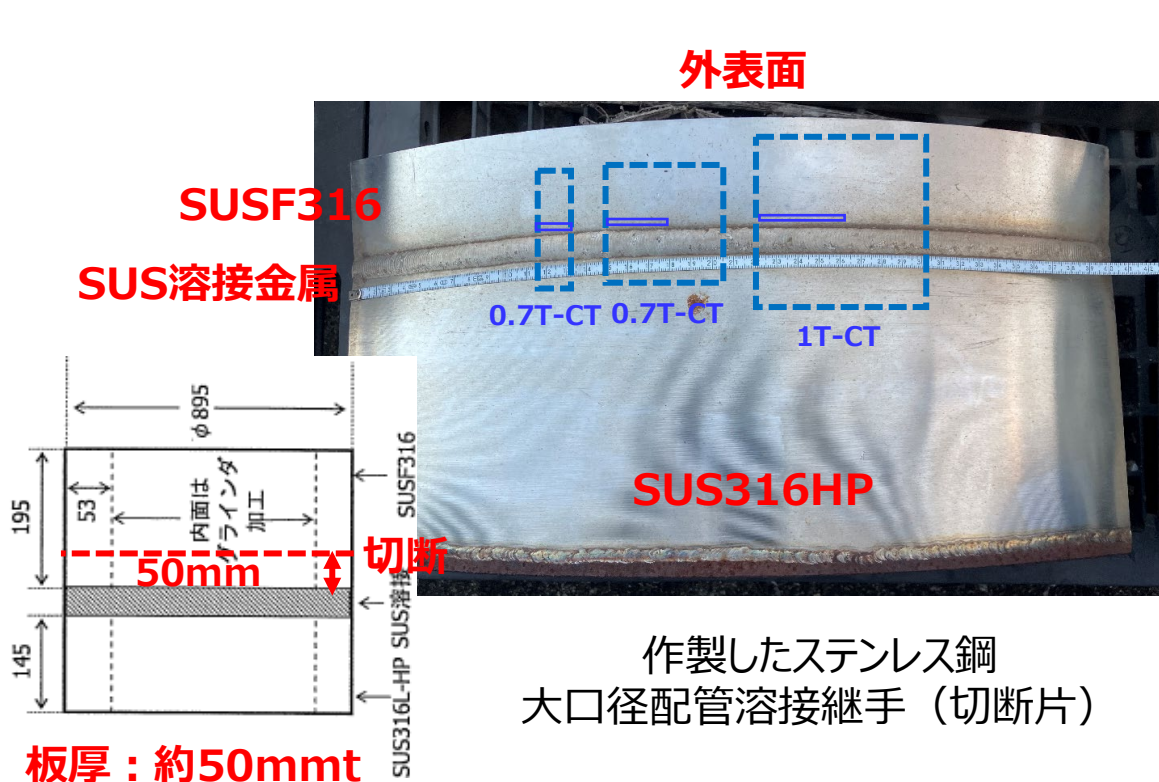
高温水中CGR試験条件（2025年度で実施）：

- 環境：PWR一次系模擬水（実機環境模擬）
- 温度：290℃（実機環境模擬）
- K値：30 MPa \sqrt{m} （定荷重条件）
- 試験片形状：0.7T-CT及び1T-CT試験片
- 繰返し数：各2本予定
- 試験時間：～3,000時間目標
- 予亀裂：大気中疲労試験で事前導入（HAZ内）

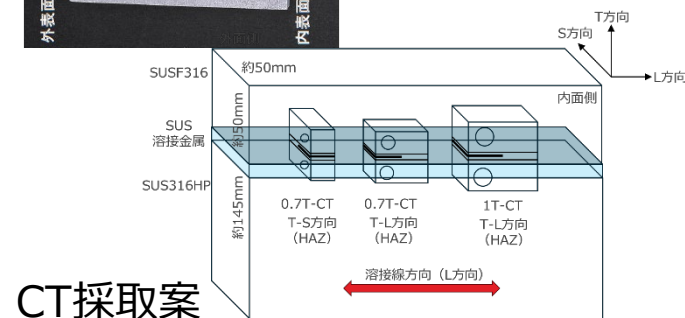
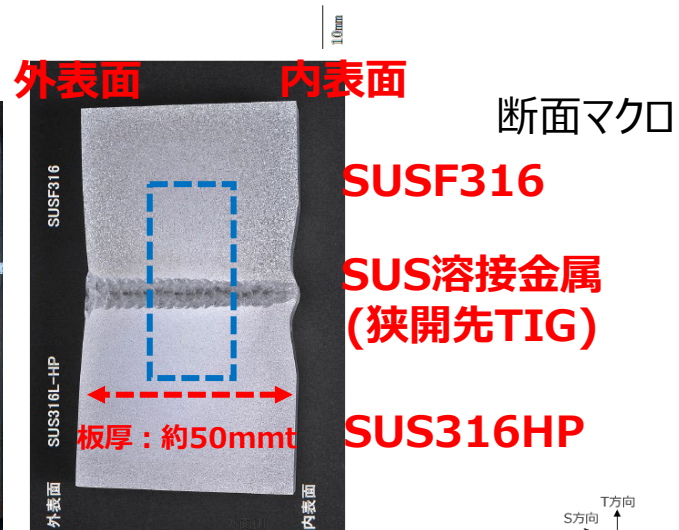
参考1 SCC進展試験準備 (HAZ供試体)

供試体 (鍛造材) の化学成分値 (製品値 : SUSF316母材)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
SUSF316	0.05	0.51	1.81	0.023	<0.001	16.08	13.11	2.11	0.04
規格(JIS G3214)	≦0.08	≦1.00	≦2.00	≦0.030	≦0.030	16.00-18.00	10.00-14.00	2.00-3.00	-
SUS316L溶金(1)	0.006	0.37	1.8	0.02	<0.01	19.0	12.2	2.1	0.033
SUS316L溶金(2)	0.010	0.36	1.5	<0.01	<0.01	18.2	11.5	2.3	0.074
規格(JIS Z3321)	≦0.03	≦0.65	1.0-2.5	≦0.03	≦0.03	18.0-20.0	11.0-14.0	2.0-3.0	-



作製したステンレス鋼
大口径配管溶接継手 (切断片)



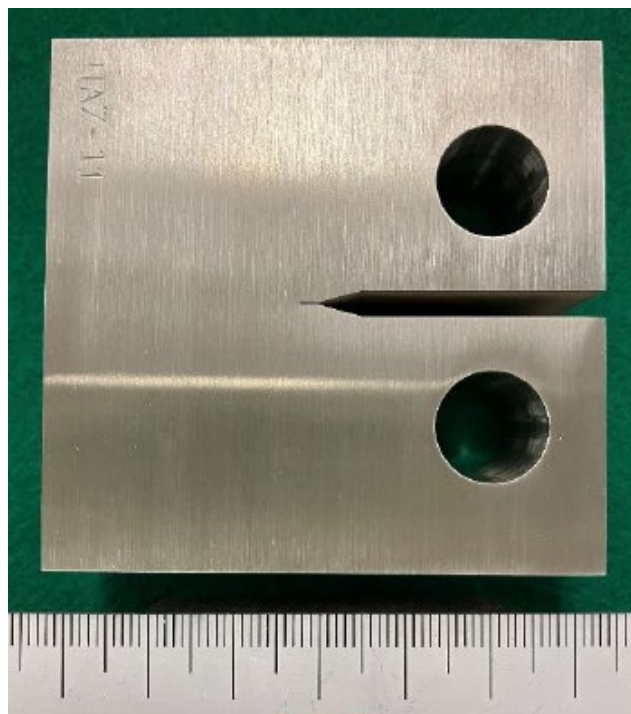
CT採取案

参考1 SCC進展試験準備 (HAZ供試体)

SCC亀裂進展試験用CT試験片の作製状況 (0.7T-CT及び1T-CTの2種類)



0.7T-CT試験片 (代表例)



1T-CT試験片 (代表例)

0.7T-CT 試験片	符号 : HAZ-01 (方向 : T-S方向)
	符号 : HAZ-02 (方向 : T-S方向)
	符号 : HAZ-03 (方向 : T-L方向)
	符号 : HAZ-04 (方向 : T-L方向)
1T-CT 試験片	符号 : HAZ-11 (方向 : T-L方向)
	符号 : HAZ-12 (方向 : T-L方向)
	符号 : HAZ-13 (方向 : T-L方向)
	符号 : HAZ-14 (方向 : T-L方向)

(備考) 2024年度は、CT試験片の形状仕上げまで、2025年度の試験開始前に予亀裂及びサイドグループ加工を実施予定

参考1 SCC進展試験計画（粗大粒影響検討）

【目的】

- 大飯3事象でのHAZ粗大化に対して、結晶粒径影響の有無を亀裂進展試験にて検証する。

Case	パラメータ	期待成果（仮定）
1	結晶粒径大（500 μm 狙い*）+CW	CGRへの結晶粒径に対する影響の明確化
2	結晶粒径小（50 μm 狙い**）+CW	同上

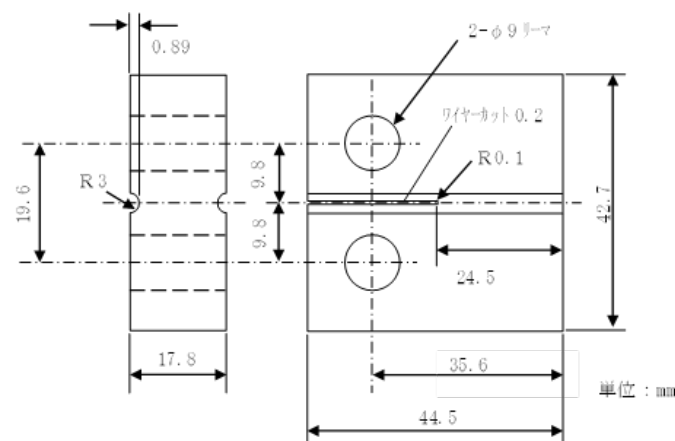
*：SUSF316の高温での溶体化処理で結晶粒径の粗大化（500 μm 狙い）を模擬

**：SUSF316入手ままで通常の結晶粒径（50 μm 狙い）を模擬

（備考）結晶粒径粗大化模擬は熱処理条件を事前検証する。
Case1及びCase2は硬さを揃えることを前提とした供試体とする。

高温水中CGR試験条件（2025年度で実施）：

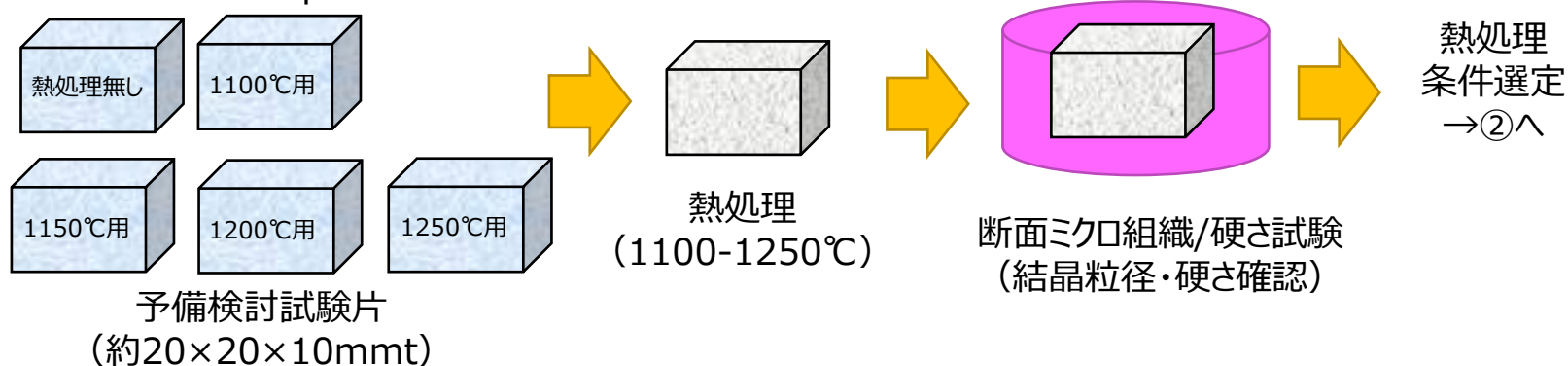
- 環境：PWR一次系模擬水（実機環境模擬）
- 温度：290 $^{\circ}\text{C}$ （実機環境模擬）
- K値：30MPa $\sqrt{\text{m}}$ （定荷重条件）
- 試験片形状：0.7T/1T-CT試験片
- 繰返し数：Case1及びCase2の各2本予定
- 試験時間：～3,000時間目標
- 予亀裂：大気中疲労試験で事前導入



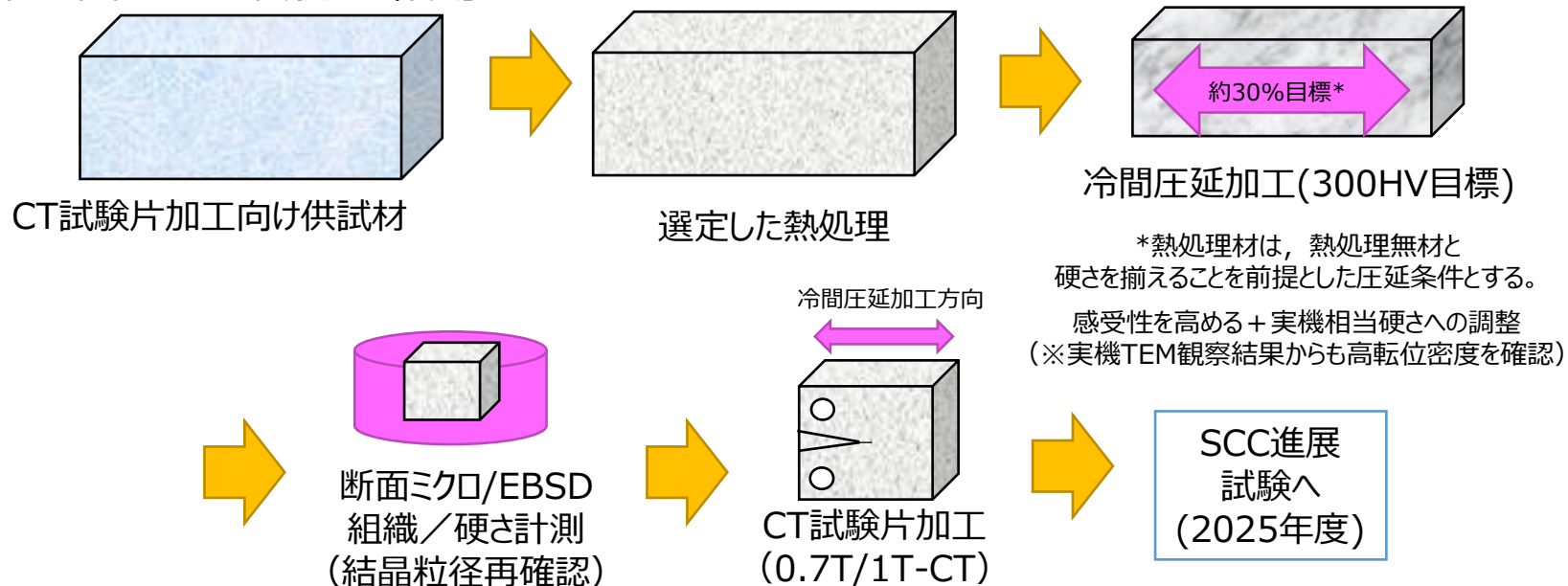
試験片形状（0.7T-CT）の例

参考1 SCC進展試験準備（粗大粒影響検討）

【①結晶粒径大（500μm程度）のための予備検討】

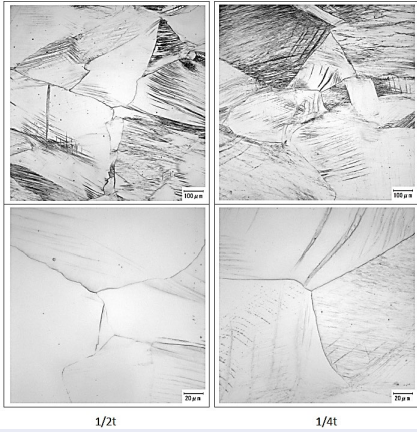
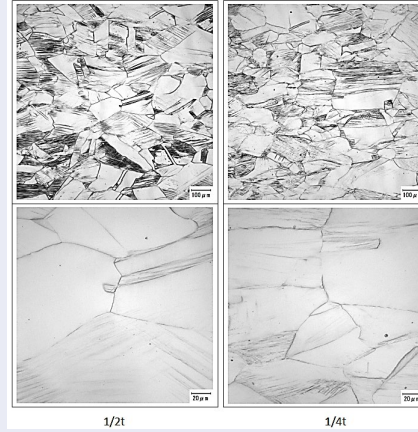


【②結晶粒径大のCT試験片の作製】



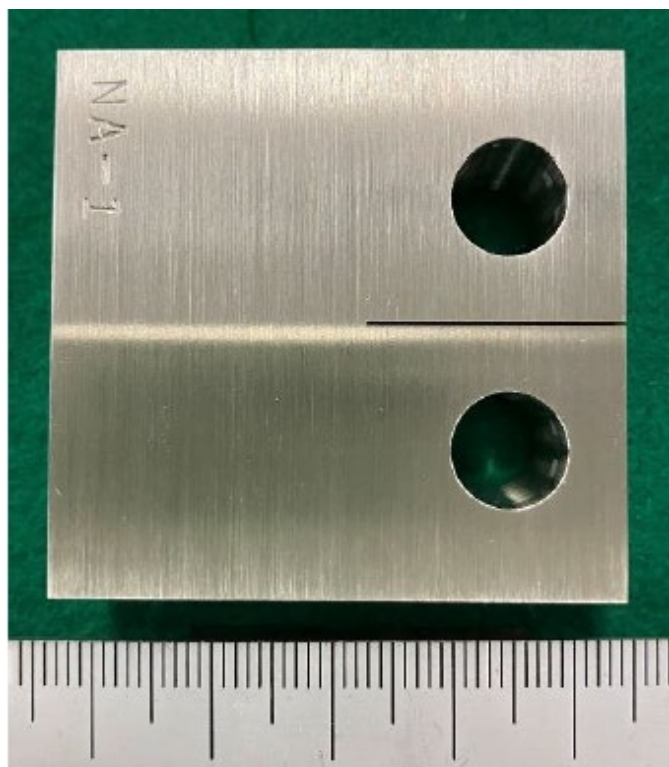
参考1 SCC進展試験準備（粗大粒影響検討）

粗大粒模擬した供試体に関する材料情報

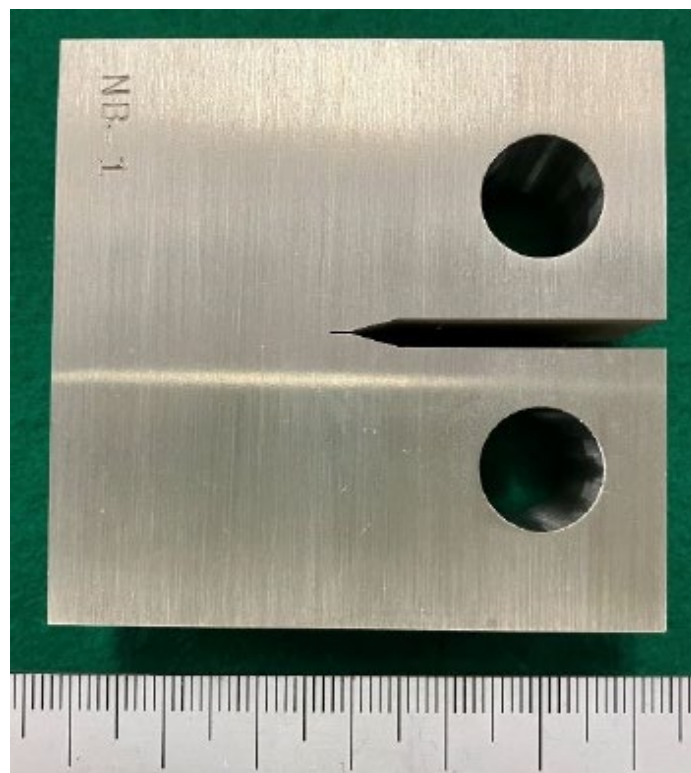
項目	1200℃熱処理材 (粗大粒模擬)	追加熱処理無し材 (通常粒：比較用)	備考
トータル 冷間圧延率	35%	32%	断面縮小率 から算出
断面ミクロ 組織 ：冷間圧延後			光学顕微鏡 観察結果
断面硬さ (HV1) ：冷間圧延後	280HV1 (5点の平均値)	278HV1 (5点の平均値)	ビッカース硬さ 計測結果
結晶粒径 ：冷間圧延後	平均粒径：472μm	平均粒径：92μm	EBSD計測値

参考1 SCC進展試験準備（粗大粒影響検討）

SCC亀裂進展試験用CT試験片の作製状況（0.7T-CT及び1T-CTの2種類）



0.7T-CT試験片（代表例）



1T-CT試験片（代表例）

0.7T-CT 試験片	符号：NA-1 (追加熱処理無し)
	符号：HA-1 (1200℃熱処理)
	符号：NA-2 (追加熱処理無し)
	符号：HA-2 (1200℃熱処理)
1T-CT 試験片	符号：NB-1 (追加熱処理無し)
	符号：HB-1 (1200℃熱処理)
	符号：NB-2 (追加熱処理無し)
	符号：HB-2 (1200℃熱処理)

(備考) 2024年度は、CT試験片の形状仕上げまで、2025年度の試験開始前に予亀裂及びサイドグループ加工を実施予定

参考2 略語集

略語	和名	名称
ABF	環状明視野	Annular Bright Field
ASNRR	原子力安全・放射線防護機関	Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection
EBSD	電子線後方散乱回折	Electron Back Scattered Diffraction
ECCS	非常用炉心冷却系	Emergency Core Cooling System
EDF	フランス電力公社	Électricité de France
EDS	エネルギー分散型X線分光法	Energy dispersive X-ray spectroscopy
EPRI	米国の電力研究所	Electric Power Research Institute
FEM	有限要素法	Finite Element Method
HAZ	溶接熱影響部	Heat-Affected Zone
IGSCC	粒界型応力腐食割れ	Intergranular Stress Corrosion Cracking
ISI	供用期間中検査	In Service Inspection
JSME	日本機械学会	The Japan Society of Mechanical Engineers
KAM	局所方位差	Kernel Average Misorientation
LBB	破断前漏洩	Leak-Before-Break
NRC	米国原子力規制委員会	Nuclear Regulatory Commission
PFM	確率論的破壊力学	Probabilistic Fracture Mechanics
SCC	応力腐食割れ	Stress Corrosion Cracking
SEM	走査型電子顕微鏡	Scanning Electron Microscope
SMAW	被覆アーク溶接	Shielded Metal Arc Welding
STEM	走査透過型電子顕微鏡	Scanning Transmission Electron Microscope
TEM	透過型電子顕微鏡	Transmission Electron Microscopy
TIG	タングステン不活性ガス	Tungsten Inert Gas

