

炉内計装筒管台溶接部およびその補修溶接時を 想定した残留応力解析

Numerical Analysis of Residual Stress by J-weld and Repair Weld of Bottom Mounted Instrument Nozzles in Reactor Vessel Penetration

大阪大学大学院	望月 正人	Masahito MOCHIZUKI	Member
大阪大学大学院	岡野 成威	Shigetaka OKANO	Member
大阪大学大学院	柏山 忠義	Tadayoshi KASHIYAMA	
(株)関西電力	丹羽 悠介	Yusuke NIWA	Member
(株)関西電力	亀山 雅司	Masashi KAMEYAMA	Member
(株)関西電力	中野 守人	Morihito NAKANO	Member

In this study, a fast simulation technique of Iterative Substructure Method (ISM) was applied for numerical analysis of the distribution of residual stress by J-weld and repair weld of Bottom Mounted Instrument (BMI) nozzle in reactor vessel penetration. The calculated results were compared with the measured values to validate the constructed residual stress analysis model. The effect of BMI mounting angles on distribution of residual stress at J-welds was investigated. Based on the results, similarity and difference in residual stress distribution among different BMI mounting angles were discussed. Additionally, repair welding having straight weld bead around BMI was simulated to estimate the distribution of residual stress at repair welds. As the results, the distribution of residual stress at repair welds was not sensitive to welding heat input and pass sequence conditions. It was concluded that the residual stress analysis models constructed for BMI nozzles was useful to investigate the effect of several factors on the distribution of residual stress around the BMI nozzles.

Keywords: Residual stress analysis, J-welds, Bottom Mounted Instrument nozzles, Repair welding, Mounting angle, Welding conditions

1. 緒言

近年、運転開始からの期間が長い原子力発電プラントが増えてきており、これらのプラントに対する補修、保全の対策が施工されつつある。原子炉や炉内構造物への保全技術を考えると、応力腐食割れ (Stress Corrosion Cracking, SCC) への対策に関するものは重要であり、これを目的とする取替技術や予防保全のための技術、ひびに対する補修技術が種々に開発されてきている^[1]。

原子炉容器炉内計装筒においては、同様の構造である原子炉容器蓋用管台において損傷が国内外で報告されており、今後の損傷の発生が否定できない状況にある。したがって、点検時期の制約が大きい炉内構造物の健全性を技術的合理性に基づいて確認・評価する手法や損傷が

認められた場合の迅速かつ高い信頼性を有する補修技術の確立が望まれる。

原子炉容器炉内計装筒における経年変化事象の1つとして、同様の構造を有する原子炉容器蓋用管台での国内外のプラントにおける損傷事例を参考に、加圧水型原子炉 (Pressurized Water Reactor, PWR) の一次環境下の応力腐食割れ (Primary Water SCC, PWSCC) が想定される。PWSCCによるき裂発生は、材料・環境 (温度)・応力に影響されることが知られており、「応力」に関しては、プラント運転中の内圧および熱による応力のみならず、取付けの際の溶接残留応力も考慮する必要がある。原子炉容器炉内計装筒はその設置位置に応じて下部鏡との取付角度が異なり、部分差込溶接部 (J溶接部) にはその複雑な形状に起因した残留応力分布が生じることも想定されるため、原子炉容器炉内計装筒J溶接部における残留応力分布特性を詳細に把握しておくことが望ましい。加えて、今後の適用の可能性も考えられるテンパービード補

連絡先: 岡野成威、〒565-0871 大阪府吹田市山田丘
2-1、大阪大学大学院工学研究科、
E-mail: okano@mapse.eng.osaka-u.ac.jp

修溶接²⁾を想定した部分補修溶接時の残留応力分布特性も把握しておくことで、実際に適用する際の施工条件の選定に際して1つの有用な知見となることが期待される。最近では、コンピュータを援用した数値シミュレーションによる溶接残留応力解析の精度・信頼性も向上してきており、原子炉や炉内構造物における溶接残留応力分布の詳細な評価に向けた有用なツールとなりつつある。

本検討では、反復サブストラクチャー法を導入した大規模高速シミュレーション技術を活用して、原子炉容器炉内計装筒 J 溶接部ならびにテンパービード溶接による部分補修溶接を想定した残留応力解析を実施する。複雑形状機器配管健全性実証事業³⁾において既に実施されている実測値との比較を通して、本残留応力解析の有用性を評価するとともに、原子炉容器炉内計装筒と下部鏡との取付角度の違いによる J 溶接部残留応力分布特性への影響やテンパービード補修溶接部残留応力分布特性に及ぼす溶接施工条件の影響に関して検討する。

2. 原子炉容器炉内計装筒 J 溶接部の残留応力解析

2.1 数値解析モデル

数値解析の対象の一例を Fig. 1 に示す。内面（上面）に 5.5mm 厚のステンレスクラッドを施した低合金鋼 SQV2A 製の原子炉容器下部鏡と 600 系ニッケル基合金 Alloy600 製の炉内計装筒を 600 系ニッケル基合金用溶接材料を用いたバターリング溶接・本溶接によって接合した異材継手である。モデルには剛体回転・移動を生じないような拘束条件を与えている。原子炉容器炉内計装筒と下部鏡の取付角度は、Fig. 2 に示すように、0、15、30、45°の 4 種類とし、取付角度 0°のものは原子力安全基盤機構が作製したモックアップを参考に、その他は開先寸法が変化しないように取付角度（開先形状）を変化させた。

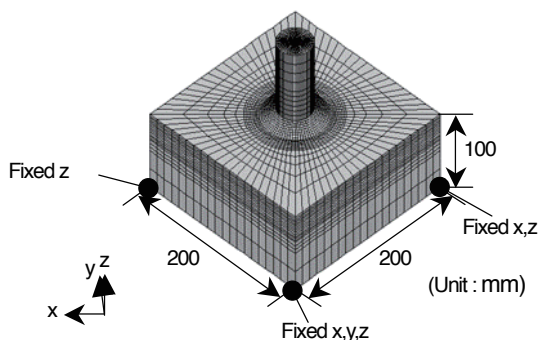
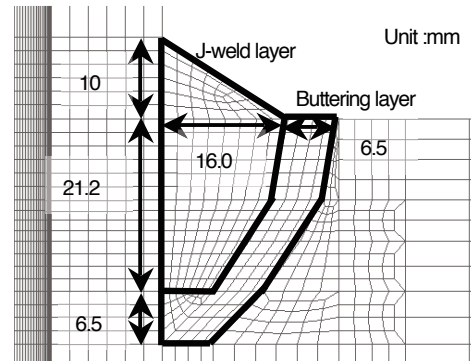
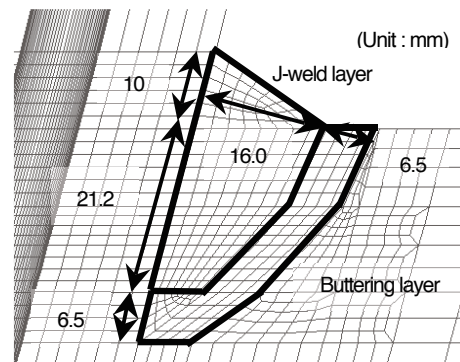


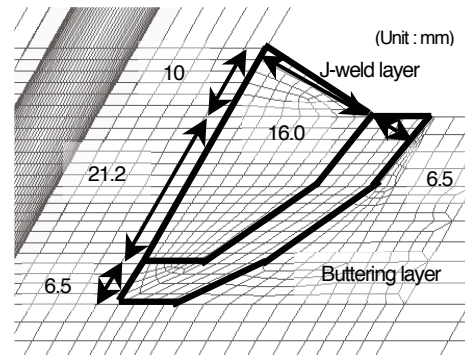
Fig.1 Finite element model of BMI nozzle



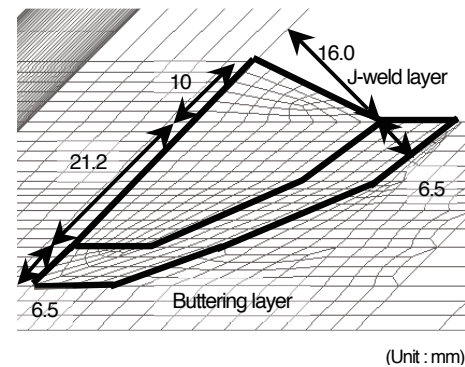
(a) BMI mounting angle is 0°



(b) BMI mounting angle is 15°



(c) BMI mounting angle is 30°



(d) BMI mounting angle is 45°

Fig. 2 Configuration of J-groove welds

本解析対象を構成する各材料の熱伝導解析に用いる物性値（比熱・密度・熱伝導率）および熱弾塑性解析に用いる物性値（ヤング率・ポアソン比・降伏応力・加工硬化特性）は全て温度依存性を考慮して設定した^[4]。また、取付角度に関わらず積層順序は Fig. 3 に示すように設定しており、各層の肉盛溶接は Fig. 4 に示すように半周ずつ2パスで行うものとした。なお、各パスにおける溶接入熱条件は、単位溶接長当りの入熱量が 700J/mm、溶接速度が 2mm/s となるように設定し、これらはいずれのパスでも同一として解析を行った。

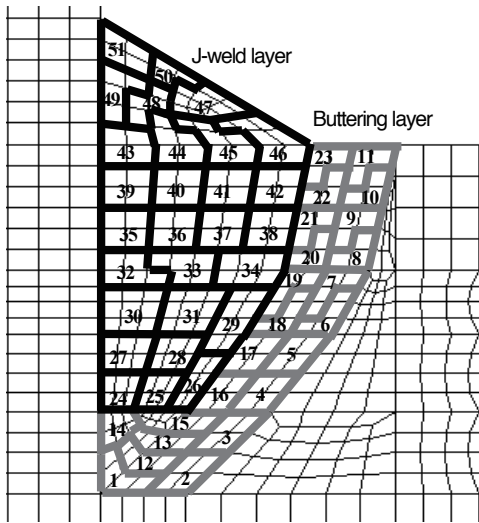


Fig. 3 Built-up sequence

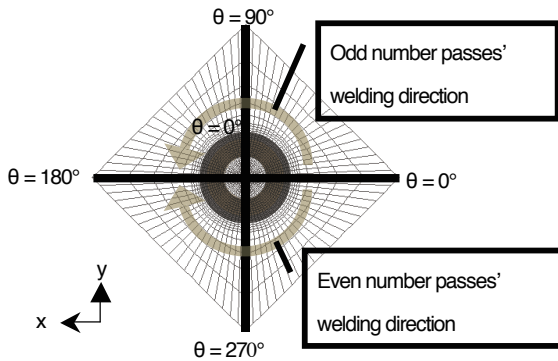


Fig. 4 Welding direction

2.2 J 溶接部における残留応力分布特性

まず、取付角度 0° を対象として実測値との比較を行い、残留応力解析の精度を確認する。残留応力の実測位置は Fig. 5 に示す通りである。7つの評価線上の周方向・軸方向応力の分布を比較した結果を Fig. 6 に示す。これらの図より、実測値（プロット）とシミュレーション結果（ライン）は良好に一致した傾向を示しており、本残留応力

解析の精度が良好であることがうかがえる。

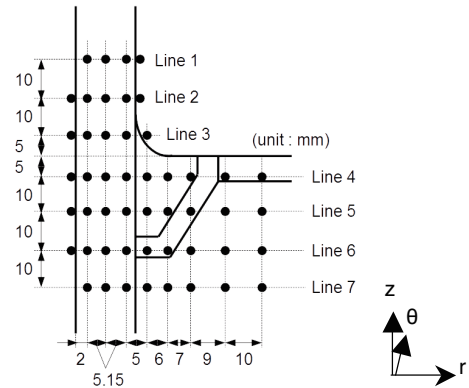
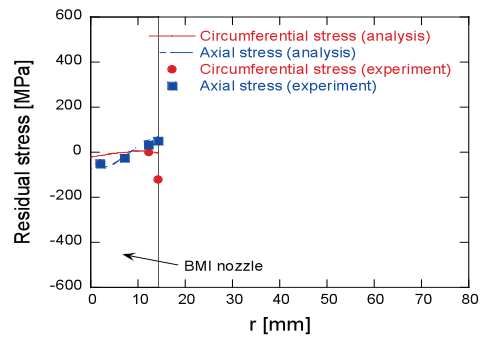
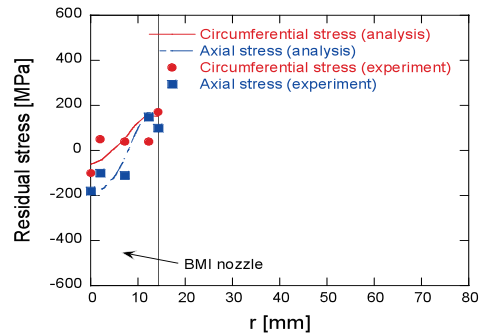


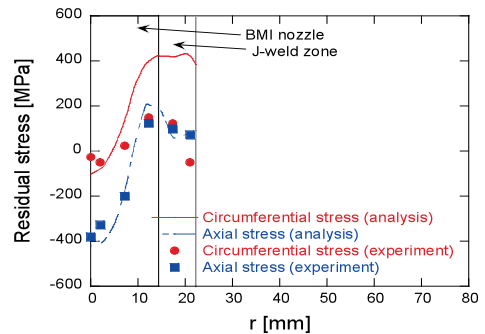
Fig. 5 Stress measurement points of mock-up test by JNES



(a) Line 1

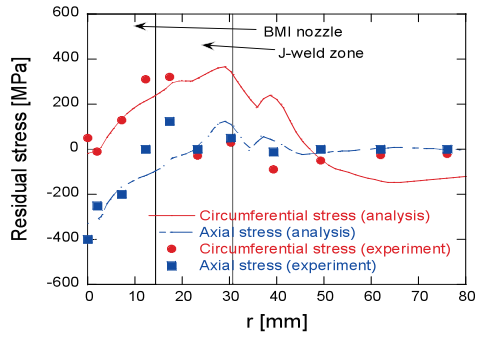


(b) Line 2

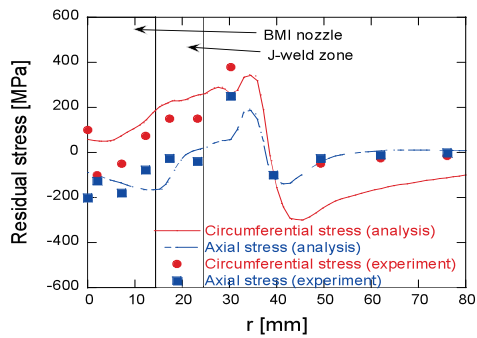


(c) Line 3

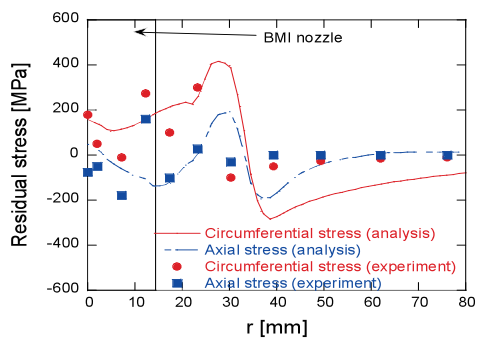
Fig. 6 Comparison of residual stress distribution in J-welds



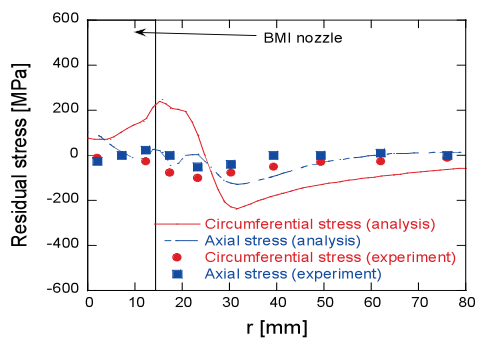
(d) Line 4



(e) Line 5



(f) Line 6

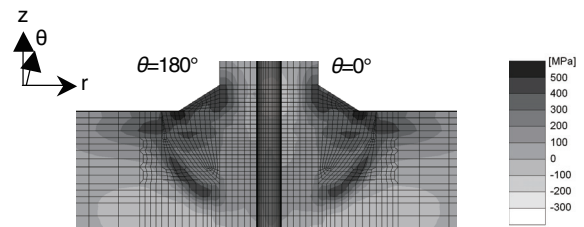


(g) Line 7

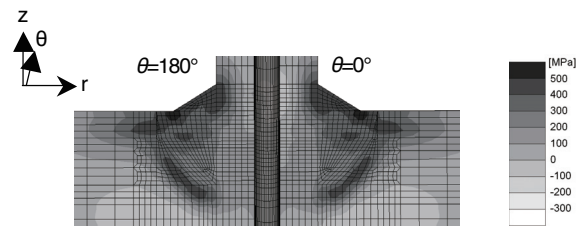
Fig. 6 Continued

各取付角度における J 溶接部残留応力分布特性を詳細に比較した結果、取付角度が大きくなるにつれて、周方向残留応力は全体的にやや小さくなり、溶接金属部と炉内計装筒の境界近傍で軸方向残留応力が大きくなるなどの傾向が見られたが、全体として取付角度が J 溶接部残

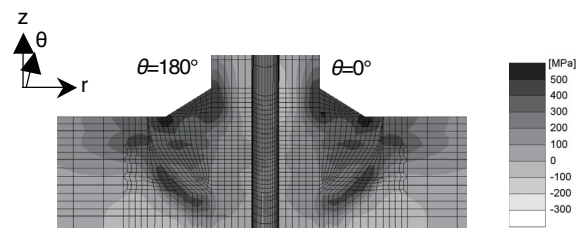
留応力分布に及ぼす影響はそれほど顕著ではなかった。また、ここで見られた違いは円周多層溶接パスに伴う炉内計装筒の倒れ変形に関連して生じていることが示唆された。取付角度の影響に関する検討結果の代表例として、最大主応力分布を比較したものを Fig. 7 および Fig. 8 に示す。Fig. 7 は溶接線方向中央部を含む断面、Fig. 8 は溶接始終端を含む断面、でそれぞれ比較したものである。これら最大主応力分布は取付角度によらずほぼ似通った分布となっており、原子炉容器炉内計装筒と下部鏡の取付角度が J 溶接部残留応力分布に及ぼす影響はそれほど顕著でないことが示された。



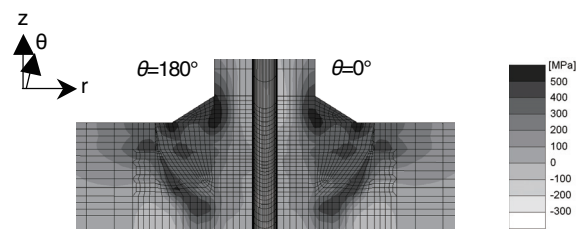
(a) BMI mounting angle is 0°



(b) BMI mounting angle is 15°



(c) BMI mounting angle is 30°



(d) BMI mounting angle is 45°

Fig. 7 Effect of BMI mounting angle on distribution of maximum principal stress in J-welds (weld center part)

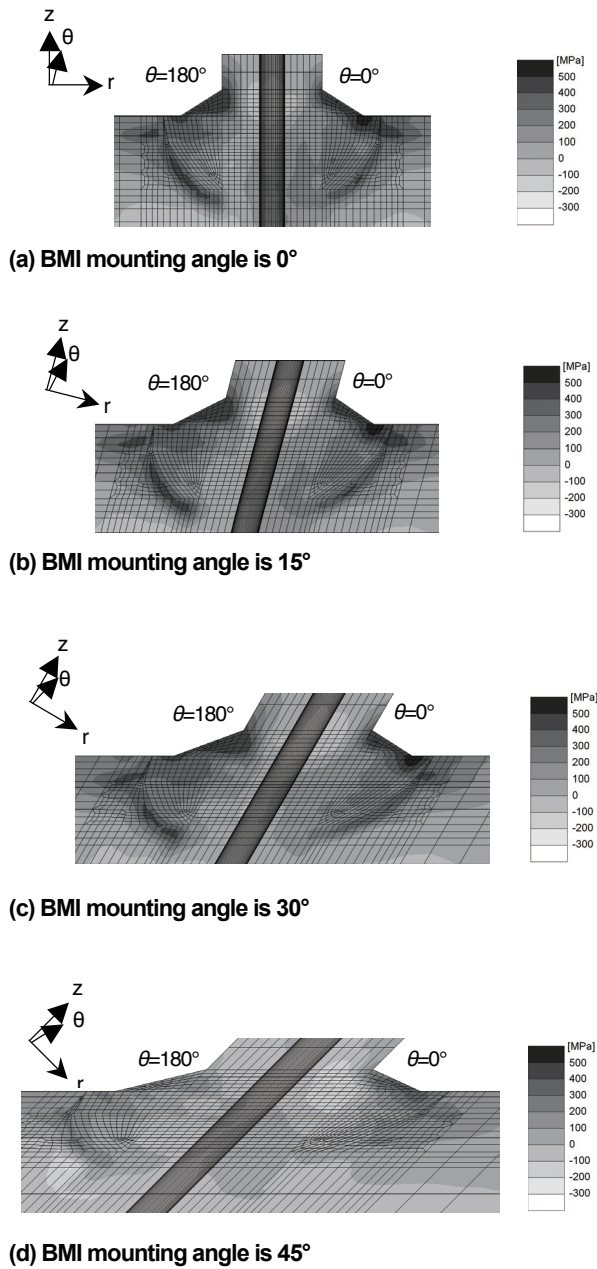


Fig. 8 Effect of BMI mounting angle on distribution of maximum principal stress in J-welds (weld start/end part)

3. 原子炉容器炉内計装筒補修溶接部の残留応力解析

3.1 数値解析モデル

基本的には先と同様のモデルに対して、炉内計装筒の周辺の一部を直線状の溶接ビードによって部分補修を行う場合を想定する (Fig. 9)。なお、補修溶接時の肉盛溶接はニッケル基合金用溶接材料を用いて行う。比較のため、低合金鋼側に先にバタリングした後で肉盛溶接を行うテ

ンパービード溶接を想定した条件 (Fig. 10(a)) と下側から順次肉盛溶接を行う条件 (Fig. 10(b)) の2条件を設定した。どちらも各パスでの溶接入熱条件は等しく溶接電流 140A、溶接速度 2mm/s としている。

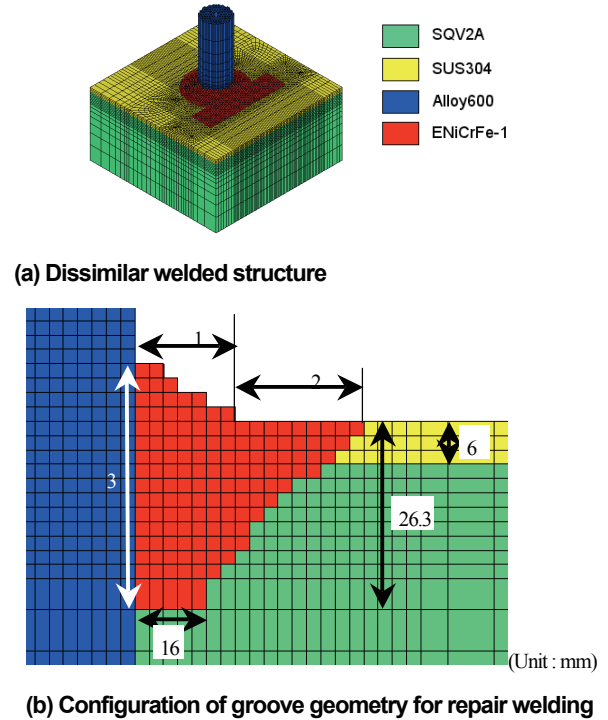


Fig. 9 Finite element model of repair welding

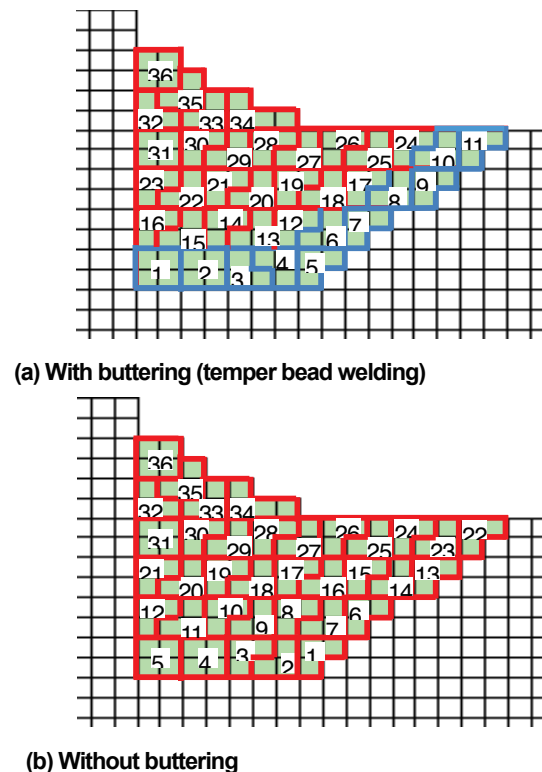
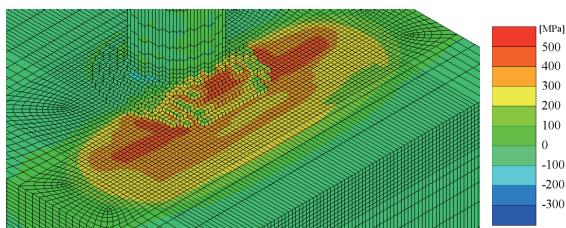


Fig. 10 Weld pass sequence conditions

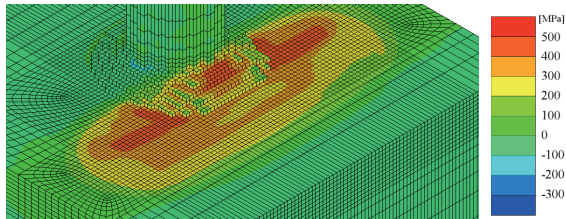
3.2 部分補修溶接部の残留応力分布特性

これら2つの積層条件で最終パスまで肉盛溶接を行った後の残留応力分布を Fig. 11 および Fig. 12 に比較して示す。Fig. 11 には溶接線方向残留応力を、Fig. 12 には板幅方向残留応力を示しており、いずれも(a)テンパービード溶接を想定した場合、(b)テンパービード溶接を想定していない場合、である。これらの結果を見ると、最終パスまで積層した後の残留応力分布は積層順序によって大きな違いは見られない。これは、溶接による残留応力は最終パスの影響をより顕著に受けるためであると考えられる。実際、積層過程での残留応力分布を比較した結果、残留応力分布の発生過程は異なっていた。しかしながら、最終層近傍の積層順序がおおよそ等しいために、最終的な残留応力分布に積層順序の影響が顕著に現れなかったと考えられる。

以上のように、テンパービード溶接を想定した場合とそうでない場合で残留応力分布に関しては大きな違いは見られなかった。テンパービード溶接法では熱影響部の組織改善、硬さ軽減の観点から適正な積層順序を選定すると考えられるため、その結果として材料の降伏応力に起因した高い引張応力の軽減には有効となっていると考えられるが、積層順序の変化によってさらに効果的な残留応力の軽減は期待できないことが示唆された。すなわち、テンパービード補修溶接工法を適用する際には、組織改善・硬さ軽減の観点から適正な施工条件を選定することが重要であるといえる。

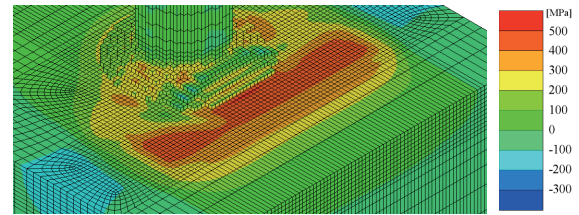


(a) With buttering (temper bead welding)

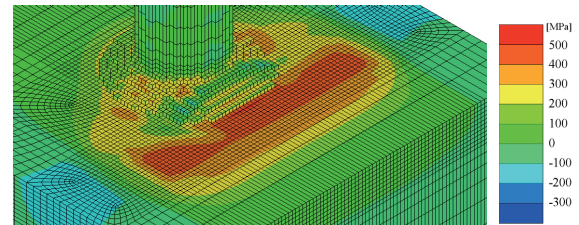


(b) Without buttering

Fig. 11 Distribution of residual longitudinal stress



(a) With buttering (temper bead welding)



(b) Without buttering

Fig. 12 Distribution of residual transverse stress

4. 結言

本検討では、原子炉容器炉内計装筒と下部鏡との部分差込溶接 (J 溶接) 部の残留応力分布に及ぼす炉内計装筒の取付角度の影響や今後の発生が懸念される応力腐食割れに対する補修時のテンパービード溶接部の残留応力分布について数値解析によって検討した。本残留応力解析の精度は実測値との比較によって十分に検証されており、本検討で得られた知見は高い信頼性を有していると考えられる。コンピュータを援用した数値シミュレーション技術の今後のますますの活用が期待される。

参考文献

- [1] 日本原子力技術協会；“PWR 炉内構造物点検評価ガイドライン[原子炉容器炉内計装筒]”、JANTI-VIP-09 (2009) .
- [2] 水野亮二、B. Peter、L. Mirosław、松田福久；“原子炉圧力容器鋼 (SQV2A) のテンパービード溶接法に関する研究”、溶接・非破壊検査技術センター技術レビュー、Vol. 1 (2005)、pp. 3-7.
- [3] 原子力安全基盤機構；“複雑形状機器配管健全性実証 (IAF) 事業溶接残留応力解析評価データ集容器貫通部溶接部 (差込み継手)”、JNES-RE-2012-0008、(2012).
- [4] 岡野成威、川口明敬、伊藤真介、望月正人、“テンパービード工法による異材管継手内面補修溶接部の残留応力解析”、圧力技術、Vol. 53 (2015)、pp. 179-186.