

加圧水型原子力発電プラントに対する保全（応力腐食割れ対策）

Maintenance Technologies for Degradation of Pressurized Water Reactor Power Plants

三菱重工業株式会社 神戸造船所 佐藤 知伸 Tomonobu Sato
岡部 武利 Taketoshi Okabe
沖村 浩司 Koji Okimura
高砂研究所 豊田 真彦 Masahiko Toyoda
前口 貴治 Takaharu Maeguchi

As a countermeasure against SCC (stress corrosion cracking), MHI (Mitsubishi Heavy Industries, Ltd.) have developed some residual stress improvement methods, as Water Jet Peening (WJP) for components under water condition, and Shot Peening by Ultrasonic-wave vibration (USP) for components under air condition. The SCC occurred in high nickel based metal and welding material in pressurized water reactor (PWR) plants has become to be conspicuous issue in both Japan and abroad. In this paper, validity of stress improvement by WJP/USP for SCC mitigation has been verified for area with small cracks.

Keyword : water jet peening, shot peening, WJP, USP, PWSCC, PWR, RV, SG

1. はじめに

加圧水型原子炉発電プラント（以下、PWR）600系ニッケルクロム鉄合金（以下、600系合金）使用部では応力腐食割れ（以下、SCC）の懸念があり、SCCによる損傷・漏えいを防止し原子力プラントの信頼性向上を達成するため、検査技術、劣化緩和技術、材料改善技術及び取替・補修技術の開発・検証に対して総合的に取り組んでいる。

このうち応力改善による予防保全策として図1に示すウォータージェットピーニング[1]（以下、WJP）、超音波ショットピーニング[2]（以下、USP）を開発・検証し、原子炉容器（以下、RV）や蒸気発生器（以下、SG）へ適用してきた。

昨今、国内外PWRプラントでSCCが顕在化している状況を踏まえ、微小な欠陥が存在する箇所にピーニングを施工した場合の欠陥に対する悪影響の有無、残留応力改善効果の有効性を確認することは、ピーニングを施工した機器・配管の保全を検討する上で重要である。

そこで、本研究では平板試験体を製作し、試験体に欠陥を導入した後にピーニングを施工し、欠陥に対するピーニングの影響、及び欠陥近傍での応力改善効果の有効性を評価した。

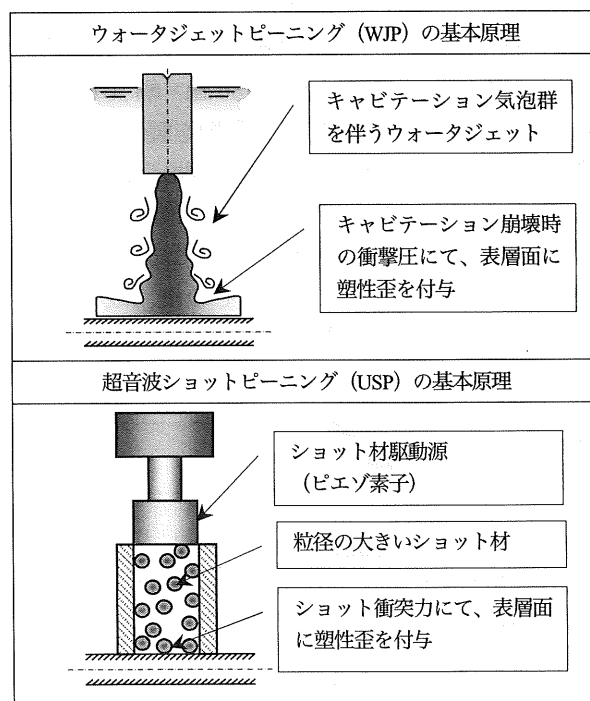


図1 応力改善技術の概要

2. 応力改善技術の適用条件と試験計画

国内PWRプラントにWJP/USPを適用するにあたっては、施工面に有害な欠陥がないことを施工前に目視試験又は渦流探傷試験（以下、ECT）等で確認し、有意な指示が確認された場合は施工しない運用としている。

本研究では、施工前のECTによる確認で検出されない

連絡先：佐藤知伸、〒652-8585 兵庫県神戸市兵庫区和田岬町1-1-1、三菱重工業株式会社 神戸造船所 原子力機器設計部 機器設計課、電話：078-672-3244、e-mail：tomonobu_sato@mhi.co.jp

欠陥（以下、潜在欠陥）として、『WJP 又は USP により圧縮応力が付与できる深さ以下の微小な SCC』を想定し、表1に示す代表的な WJP/USP 施工条件を用いて潜在欠陥に対するピーニングの影響、潜在欠陥近傍での応力改善効果の有効性を実験で確認した。

表1 本研究で用いたピーニング施工条件

適用技術	想定する適用箇所	健全な施工面に施工した場合の残留応力低減効果
WJP	RV 出入口管台セーフエンド溶接部	表面から深さ 1.0 mm の位置で残留応力が 0MPa 以下
USP	SG 出入口管台セーフエンド溶接部	表面から深さ 1.0 mm の位置で残留応力が 0MPa 以下

3. 潜在欠陥へのピーニングの影響の確認 (延性き裂進展確認試験)

3.1 試験の目的

WJP/USP 施工により、潜在欠陥から延性き裂が生じないことを実験で確認する。

3.1 試験片の製作及び試験手順

製作した平板試験片を図2に示す。試験片は SUS316 と NCF600 を 600 系合金相当の溶材で溶接した平板から長さ 150 mm × 幅 30 mm × 厚さ 10 mm に切り出した平板継手試験片と、SUS316 平板から長さ 150 mm × 幅 30 mm × 厚さ 10 mm に切り出した平板試験片の2種類を製作した。

試験片はポリチオン酸溶液中で4点曲げにより応力付加し、600系溶接金属又はSUS316母材に欠陥を導入した。

試験体に欠陥導入後、30 mm幅の中央で切断し、一方のみ WJP 又は USP を施工した。その後、破壊調査で WJP/USP 施工による延性き裂の進展の有無を確認した。

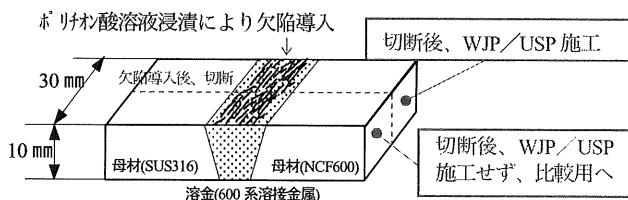


図2 平板試験片形状 (600系溶接金属に欠陥導入した例)

3.2 試験結果

試験条件毎に3体(各2断面)の拡大観察を行い、観察された全ての欠陥の深さを測定し、ワイブルプロットで整理した結果を図3及び図4に示す。「WJP/USP 施工有り」と「施工無し」の両者の欠陥深さの分布はほぼ同一で、欠陥深さに有意差は認められなかった。

WJP/USP 施工後に欠陥破面に酸化皮膜による着色後、破面開放した結果を図5及び図6に示す。破面観察で着色された範囲は全てデンドライト破面(600系溶接金属)

又は粒界破面(SUS316母材)で延性破面は認められず、WJP/USP 施工による延性き裂の進展は確認されなかった。

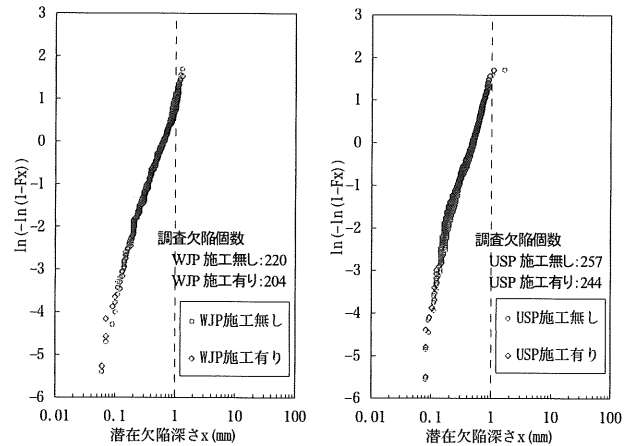


図3 欠陥深さのワイブルプロット結果 (600系溶接金属)

※縦軸の F_x は深さが横軸の値までである欠陥の累積頻度を示す。
※ピーニング施工有り/施工無しの比較を行った欠陥は同一ではない。

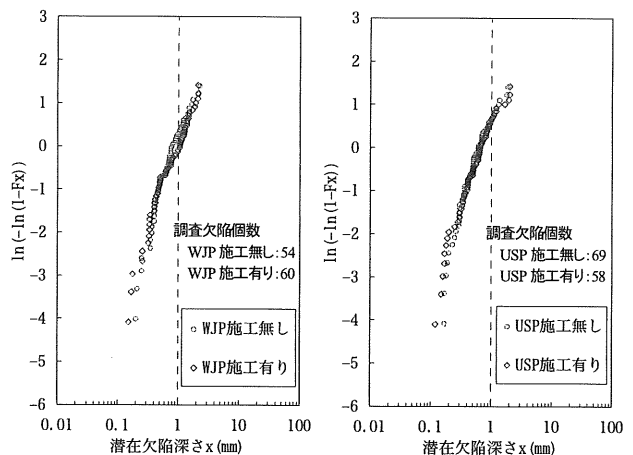


図4 欠陥深さのワイブルプロット結果 (SUS316母材)

※縦軸の F_x は深さが横軸の値までである欠陥の累積頻度を示す。
※ピーニング施工有り/施工無しの比較を行った欠陥は同一ではない。

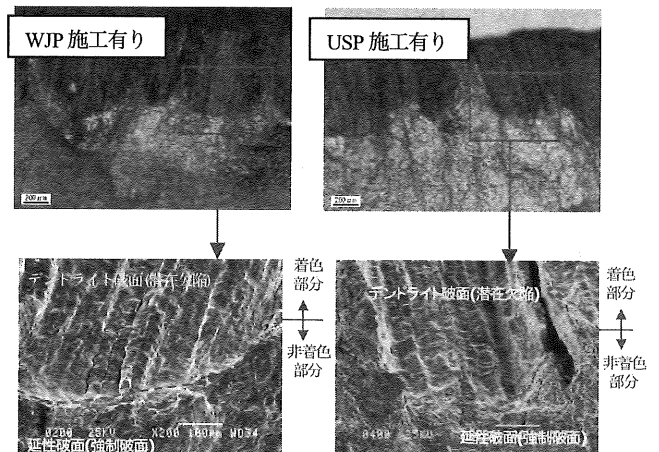


図5 ピーニング施工後の欠陥の破面観察結果
(600系溶接金属)

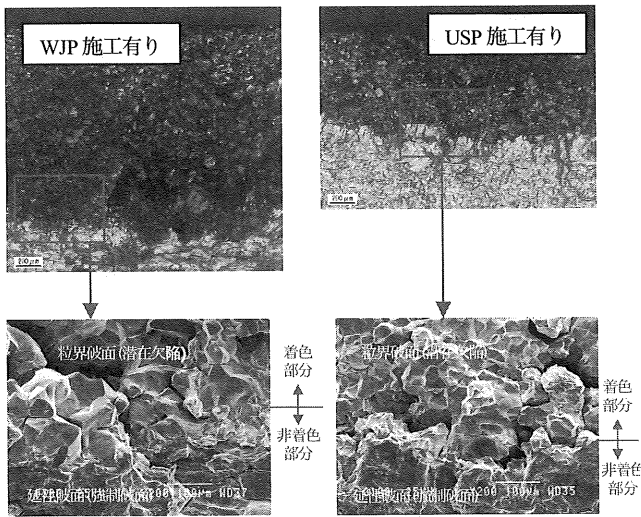


図6 ピーニング施工後の欠陥の破面観察結果 (SUS316 母材)

4. 潜在欠陥へのピーニングの効果の確認 (残留応力確認試験)

4.1 試験の目的

潜在欠陥の有無に係わらず、WJP 又は USP を施工すれば潜在欠陥近傍の残留応力が改善されることを実験で確認する。

4.1 試験片の製作及び試験手順

製作した平板試験片を図7に示す。試験片は3項と同様、長さ150mm×幅30mm×厚さ10mmのNCF600/SUS316 平板継手試験片と、同寸のSUS316 平板試験片の2種類を製作した。

試験片はポリチオン酸溶液中で4点曲げにより応力付加し、600系溶接金属又はSUS316母材に欠陥を導入した。

試験体に欠陥導入後、WJP 又は USP を施工し、X線回折法による残留応力測定を実施した。

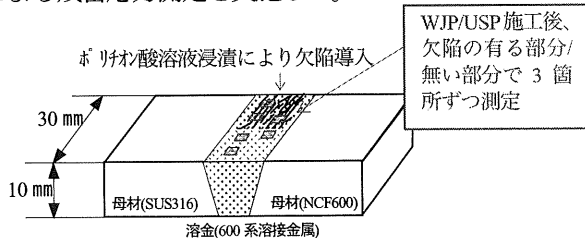


図7 平板試験片形状 (600系溶接金属に欠陥導入した例)

4.2 試験結果

600系溶接金属部の欠陥の有る部分と無い部分で、WJP/USP 施工後の試験片表面の残留応力を測定した結果を図8に示す。欠陥の有無に係わらず、残留応力は同等の圧縮応力であった。

SUS316 母材部の欠陥の有る部分と無い部分で、WJP/USP 施工後の試験片表面及び深さ方向の残留応力を測定した結果を図9に示す。欠陥の有無に係わらず、残留応力は同等で、表面から1mmまで圧縮残留応力であった。又、表面残留応力はSUS316母材と600系溶接金属の違いによる有意差は無く、600系溶接金属部の深さ方向残留応力分布もSUS316母材部と同傾向と考えられる。

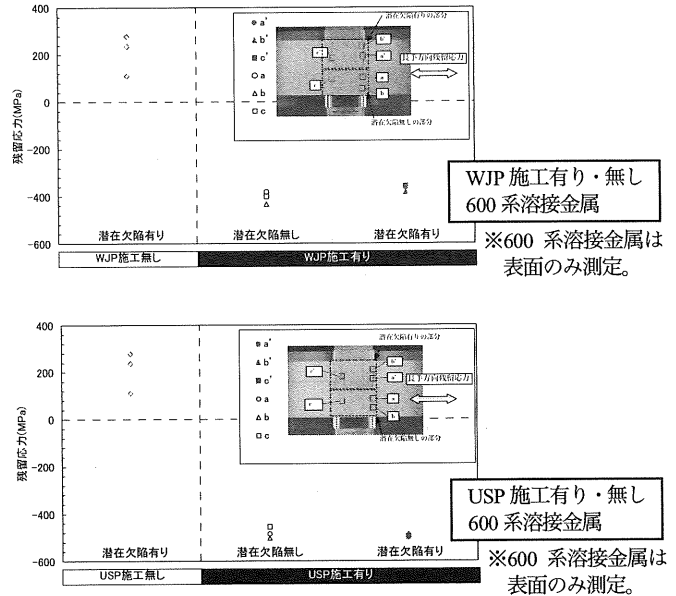


図8 残留応力測定結果 (600系溶接金属、試験片表面残留応力測定結果)

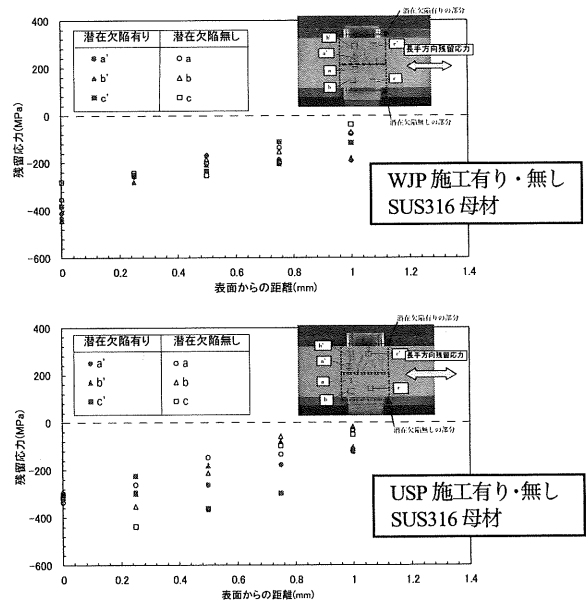


図9 残留応力測定結果 (SUS316母材、試験片深さ方向残留応力分布測定結果)

5. 潜在欠陥へのピーニングの効果の確認 (SCC試験)

5.1 試験の目的

WJP/USP 施工で潜在欠陥が供用中に SCC 進展しない (ピーニングが有効である) ことを実験的に確認する。

5.2 試験片の製作及び試験手順

製作した平板試験片を図 10 に示す。試験片は長さ 150 mm×幅 40 mm×厚さ 10 mm の NCF600/SUS316 平板継手試験片と、同寸の SUS316 平板試験片を製作した。

試験片はポリチオン酸溶液中で 4 点曲げにより応力付加し、600 系溶接金属又は SUS316 母材に欠陥を導入した。

欠陥導入後、40 mm 幅の中央で切断し、一方のみ WJP 又は USP を施工した。その後、ポリチオン酸溶液中で 4 点曲げにより運転時相当応力を付加して SCC 試験を行い、試験後の破壊調査で SCC 進展の有無を確認した。

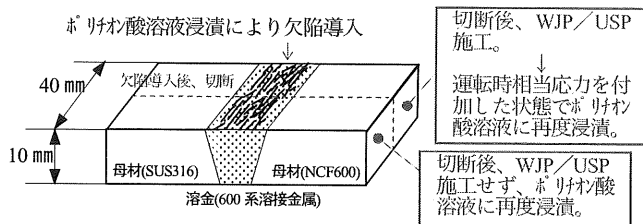


図 10 平板試験片形状 (600 系溶接金属に欠陥導入した例)

5.3 試験結果

「ピーニング施工有り/無し・SCC 試験有り」(試験条件毎に 2 体 (各 2 断面)) の拡大観察を行い、観察された全ての欠陥の深さを測定し、「ピーニング施工有り・SCC 試験無し (3 項の試験結果)」と合わせてワイブルプロットで整理した結果を図 11 及び図 12 に示す。

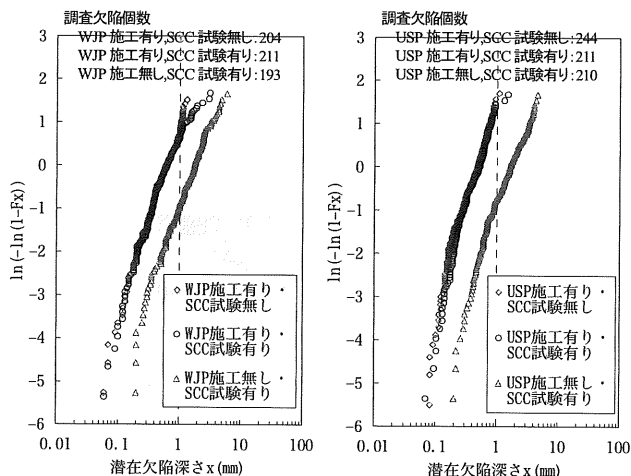


図 11 欠陥深さのワイブルプロット結果 (600 系溶接金属)

※縦軸の F_x は深さが横軸の値までである欠陥の累積頻度を示す。
※ピーニング施工有り/施工無し、SCC 試験有り/無しの比較を行った欠陥は同一ではない。

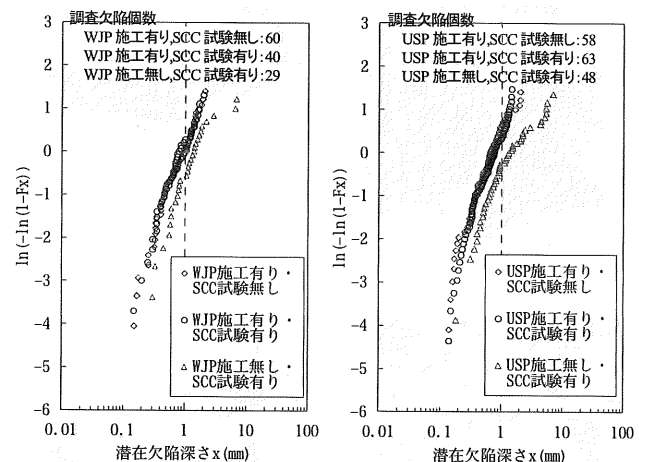


図 12 欠陥深さのワイブルプロット結果 (SUS316 母材)

※縦軸の F_x は深さが横軸の値までである欠陥の累積頻度を示す。
※ピーニング施工有り/施工無し、SCC 試験有り/無しの比較を行った欠陥は同一ではない。

ピーニング施工有りでは SCC 試験有り/無しの両者で欠陥深さに有意差はなく、SCC 進展は認められなかった。WJP/USP 施工有り/無しの比較では施工無しで進展しており、SCC 試験は適切な条件であることが確認できた。

6. 試験結果のまとめ

WJP/USP 施工による潜在欠陥への影響及び効果を実験で確認した結果は以下の通りである。

- ①WJP/USP 施工による潜在欠陥の進展は認められない。
- ②潜在欠陥周辺であっても、WJP/USP 施工後には表面に圧縮応力が得られる。
- ③潜在欠陥が存在しても、WJP/USP 施工後は SCC による潜在欠陥の進展が防止 (抑制) される。

従って、WJP/USP の施工前確認の ECT で検出されない可能性のある潜在欠陥があっても、WJP/USP 技術は有効であると判断される。

7. おわりに

原子力発電プラントの安全性と信頼性を向上させ、長期間の運転にわたって経済的に運転を継続するには、各種保全技術が重要であると考え、今後とも各種技術の開発・検証を積極的に推進して行く。

参考文献

- [1]Koji Okimura etc, Reliability of WJP as Residual Stress Improvement Method for Alloy600 PWSSC Mitigation, ICONE16-48375 (2008)
- [2]Koji Okimura etc, PWSSC Preventive maintenance Program for Alloy600, ICONE16-48378 (2008)