ウォータージェットピーニング(WJP)の開発と性能予測

(1) WJP の原理と適用例

青木孝浩^{*1}, 黒澤孝一^{*1}, 吉久保富士夫^{*1}, 齋藤昇^{*2}, 石川哲也^{*3}, 新田一陽^{*4}, 酒井英明^{*5}

Development and Performance Prediction of Water Jet Peening (WJP)

(1) Principle and Application of WJP

Takahiro AOKI^{*6}, Kouichi KUROSAWA, Fujio YOSHIKUBO, Noboru SAITOU,
Tetsuya ISHIKAWA, Kazuhiro NITTA, Hideaki SAKAI,

^{*6} Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.5-2-2, Omika-cho, Hitachi-shi, Ibaraki, 319-1221 Japan

Key Words : Water Jet Peening, Residual Stress, Cavitation, Stress Corrosion Cracking, Weld, Nuclear Power Plant

1. 緒 言

ウォータージェットピーニング (Water Jet Peening, WJP) は、原子炉炉内構造物表面の残留応力を改善し、応力腐食割れ(SCC)に対して有効な予防保全技術である。WJP とは、水中でキャビテーションジェットを材料表面に噴射し、キャビテーションの崩壊圧力により、材料表面に圧縮残留応力を生成する技術である。WJP は、制約条件が少なくロバスト性が高いピーニング技術であり、施工に伴う表面硬化が小さく、熱的影響も与えない特長もある。本発表では、WJP の原理及び実機への適用状況を報告する。

2. WJP の原理と目的

図 1 に示すように WJP は水中でノズルから高圧水を噴射し、その際に生じるキャビテーション噴流を利用する技術である。この噴流に含まれる微細な気泡(キャビティ)は、周囲の水を巻き込んだ乱流中で断続的に成長と崩壊を繰り返して、衝撃力を発生する。この衝撃力により材料表面が塑性変形し、その塑性変形領域が周囲から弾性的に拘束されることにより、施工表面に圧縮残留応力を生じさせる⁽¹⁾。

原子炉炉内構造物における SCC は、図 2(a)に示すように高い引張残留応力、材料の鋭敏化、腐食環境という三つの因子が重なった場合に発生し、いずれ

か一つ以上の因子を除外することによって防止できると考えられている。WJP は、図 2(b)に示すように引張残留応力を圧縮残留応力に改善することによって原子炉炉内構造物の SCC 発生を抑制することを目的としている。

Fig. 1 WJP cavitation flow image

Fig.2 Purpose of WJP

3. WJP の効果

3.1 残留応力改善効果

原子炉炉内構造物の主要構造材料である SUS304, SUS316L 及び Ni 基合金(NCF600)に対する残留応力改善効果を説明する。

^{*1} 日立 GE ニュークリア・エナジー

(〒319-1221 茨城県日立市大みか町 5-2-2)

^{*2} 日立製作所 日立研究所

^{*3} 日立エンジニアリング・アンド・サービス

^{*4} パプ日立工業

^{*5} スギノマシン

E-mail: takahiro.aoki.mg@hitachi.com

試験片表面には、平面研削加工により引張残留応力を生じさせておく。WJP 施工は、図3に示すようにノズルをY方向に走査させながら一定時間施工した。残留応力はX線回折法により測定した。

図4はノズル走査方向に対して直交する方向(X方向)の表面残留応力分布であり、比較として、WJP施工前の表面残留応力分布の測定結果を図中に併記した。図4より、WJP施工前は300~450MPaの引張残留応力を有したノズル走査線を中心とする約±40mmの範囲が、WJP施工によって圧縮応力に改善されていることがわかる。

上述した試験片表面の残留応力改善幅は、SUS304、SUS316L および NCF600 とともに同程度であり、材料による有意差はない。また、ノズル走査線のY方向の残留応力は、X方向の残留応力と同程度であり、生成される圧縮残留応力はノズル走査方向に依存しないことが確認されている⁽²⁾。

Fig.3 Method of WJP

Effect on the surface perpendicular to scanning direction.

Fig.4 Typical stress relief profile after the WJP treatment

3.2 耐 SCC 性改善効果

WJP により圧縮残留応力に改善した材料の耐 SCC 性改善効果について説明する。

図5は、SUS304 鋼の突合せ溶接試験片の表面に WJP 施工部と未施工部を設けて、沸騰 42% 塩化マグネシウム水溶液に 24 時間浸漬後、浸透探傷試験を行った結果である。WJP 未施工部には、SCC を示す指示模様が認められるのに対して、WJP を施工した領域では指示が全く認められず、WJP 施工により耐 SCC 性が向上することが確認できる。

Fig.5 Stress corrosion cracking test results of SUS304 welded specimen in boiling water of 42% MgCl₂

3.3 WJP 施工表面の影響評価

WJP は図6に示すようにショットピーニング(SP)と比較して施工に伴う表面の硬度上昇が小さい。

図7は各種表面施工処理後の加工層深さをEBSD分析のIQマップで観察した結果である。IQマップでは塑性変形による歪の大きい領域が暗色で表示される。同図に示すように WJP は、塑性変形によって生じる表面加工層深さも SP より小さく、研磨工法と同程度となっており⁽³⁾、WJP は素材表面への影響が少ない残留応力改善技術であるといえる。

Fig.6 Comparison of Vickers hardness of SUS316L that processes surface

Fig.7 Band contrast maps of EBSD analysis for SUS316L

4. WJP の適用例

原子炉炉内構造物に WJP を適用する利点は、水中噴流を利用しているため、炉水を保ったまま施工でき、作業従事者の被ばくを改善できること、水以外

を炉内に持ち込まないため異物回収の必要がなく、放射線環境下での作業が容易に行えることにある。また、噴射距離、角度等の施工条件範囲が広く、さらにノズルから噴射された一次的な噴流だけではなく、反射噴流や廻り込み噴流も残留応力改善に利用できる特徴を有する。WJP は現在迄に国内の沸騰水型原子炉(Boiling Water Reactor,BWR)16 プラントにおいて、延べ 20 回に及ぶ定検時、工場製作時及び建設時の施工実績を有する。図 8 に BWR における施工対象と施工実績を示す。WJP は、シュラウド内外面、原子炉炉底部、ジェットポンプ周り等、BWR 型原子炉炉内構造物を網羅している。

Fig.8 Experiences in BWR

当社は、効率的なピーニングを行うためのキャビテーション利用技術の高度化及び遠隔操作可能な WJP 装置の開発を進めている。下記に例を示す。

図 9 はシュラウドサポートの全溶接部を WJP 施工する 7 軸の自由度を有するマニピュレータ型 WJP 装置である。本装置はシュラウドサポートを構成する 6 種類の溶接線 (H8~H11 およびセグメント溶接) すべてに対応可能である。

Fig.9 WJP equipment for Shroud support.

図 10 は 4 軸の自由度を有する CRD スタブチューブ/ハウジング及び ICM ハウジング用 WJP 装置である。本装置は、原子炉炉底部での作業となるため、WJP 装

置に TV カメラを搭載し、WJP 施工前後の目視検査も可能な構成としている。

図 11 は施工アームを 2 本有する CRD スタブチューブ/ハウジング及び ICM ハウジング用 WJP 装置である。2 個の噴射ノズルを用いて同時施工することで、より施工効率を向上させた装置である。

これらの装置を含むすべての WJP 装置を用いた実機施工においては、予めモックアップ試験及び解析等により、施工対象の応力改善効果や振動特性を評価し、施工条件を適正化している。

Fig.10 WJP equipment for CRD stub tube.

Fig.11 WJP equipment(Double Nozzle Type) for CRD stub tube.

5. まとめ

キャビテーション利用技術の高度化と実機施工遠隔装置の開発により、WJP 予防保全技術は原子炉炉内構造物をほぼ網羅可能な段階にある。今後も技術向上に努め、原子力プラントの更なる信頼性向上に寄与する。

6. 文献

- (1) 齋藤昇也, 原子力プラントの炉内機器に対するウォータージェットピーニング技術の開発, 噴流工学, Vol.20, No.1, 4-12, (2003).
- (2) 鈴木賢治也, オーステナイト系ステンレス鋼の高速塑性による微視的残留応力, 第 44 回 X 線材料強度に関するシンポジウム講演論文集(2010).
- (3) 金田潤也也, ステンレス鋼の表面組織, 硬さ, 残留応力に及ぼす表面処理法の影響, 材料と環境, Vol. 55, A-203, (2008).