



実機プラントの炉心シュラウドへの ウォータージェットピーニング(WJP)適用と WJP 施工後の残留応力測定

Application of Water Jet Peening to the Shroud Components in BWR Power Plant
and Residual Stress Measurement after WJP.

日立製作所日立研究所	大城戸 忍	Shinobu OKIDO
日立 GE ニュークリアエネルギー	椿 正昭	Masaaki TSUBAKI
	千葉 篤志	Atsushi CHIBA
	佐川 渉	Wataru SAGAWA Member
北陸電力原子力本部	松田 徹	Toru MATSUDA

Residual stress improvement technologies have been developed and applied to Boiling Water Reactor (BWR) plant components in order to prevent from stress corrosion cracking (SCC) of stainless steel and Ni-based alloy materials. Water Jet Peening (WJP) is one of the effective procedures for residual stress improvement, and has the various advantages for the application to the reactor internal components of the operating nuclear power plants because WJP uses only water for residual stress improvement. As the results, WJP has been applied to 14 BWR plants so far. WJP was applied to the shroud components for the newly constructed plant, and the effects of WJP on the residual stresses of the actual power plant components were measured and evaluated directly and non-destructively by x-ray diffraction method. All of the residual stresses of the WJP-treated surface were compressive, and those values were almost the same as the mock-up test results executed before application to the actual components. These results demonstrate the effectiveness of WJP as one of the preventive maintenance technologies for SCC by producing the compressive residual stresses on the material surface.

Keywords: Water Jet Peening(WJP), Residual Stress, X-ray Stress Measurement, Weld, Nuclear Power Plant, Reactor Internal Components, Shroud

1. 緒言

沸騰水型原子力プラントでは、1980年代より応力腐食割れが問題になるような機器、配管には炭素含有量を低減した低炭素ステンレス鋼が使用されている。しかし、経年プラントにおいて、低炭素ステンレス鋼製のシュラウド、原子炉再循環系配管で相次いで応力腐食割れが発生した^[1]。このような背景から、応力腐食割れの主要因である材料、環境、応力のうち、材料以外の要因も改善し、原子力プラント構造物の応力腐食割れ発生を抑制する対策が講じられている。

低炭素ステンレス鋼の SCC 対策としては、加工や溶接で生じた引張の残留応力を圧縮応力に変える応力面からの対策と、一部のプラントでは水素注入などの環境面の対策が採られている。残留応力改善方法としては、炉内機器等に対してはピーニングにより表面付近を圧縮応力に変える方法^[2]や、配管の場合には高周波加熱により内面に圧縮残留応力を付与する方法^[3]が用いられている。合成繊維に高分子接着剤で砥石を付着

させたブラシで金属表面を研磨することにより表面層に微少な塑性変形を与える磨き加工 (Nストリップ) 方法も SCC 対策として有効な方法であることが示されている^[4]。

ウォータージェットピーニング (WJP) は、1999年の初適用からこれまでに国内の BWR/ABWR の 14 プラントにおいて延べ 17 回に及ぶ定検時および建設時の予防保全として施工実績がある。施工対象は、炉心シュラウド内外面、炉底部の制御棒駆動機構ハウジングと中性子束計測ハウジング、ジェットポンプライザ管やディフューザ等である^[5]。WJP による残留応力改善効果は今までは実験室において施工対象構造物の要素試験体 (モックアップ試験体) を用いて残留応力改善効果を確認してきており^[6]、実機条件下で WJP の効果を測定した事例はない。今回、新規建設プラントの炉内構造物のうち、構造上重要なシュラウドの主溶接線 (周および長手溶接線) に対して、工場における製作時および現地建設中に WJP を施工した。

本報告では、新規プラントのシュラウド溶接線に対

連絡先: 大城戸 忍、〒317-8511 茨城県日立市幸町 3-1-1、
日立製作所 日立研究所 エネルギー材料研究部、
e-mail: shinobu.okido.hz@hitachi.com

して WJP 施工した後の残留応力を直接工場、実機で測定し、その予防保全効果を残留応力低減効果から検討した結果について述べる。

2. WJP による残留応力改善技術

Fig.1 に WJP による残留応力発生メカニズムを示す。水中環境で水を高流速で噴射すると、静止水とのせん断力により気泡（キャビテーション）が発生する。このキャビテーションは噴射された水の流れによって移動し、最終的には約 1 GPa の衝撃圧と急速な流れ（マイクロジェット）を発生させて崩壊する。キャビテーションが金属表面で崩壊する場合、この衝撃圧とマイクロジェットにより金属表面は塑性変形させられる。対象物寸法に対して WJP の塑性変形領域が十分小さい場合、塑性変形領域の周りからの拘束により当該部の残留応力は圧縮になる。実際は無数のキャビテーションが生成、衝突するため、金属表面におけるキャビテーションの崩壊は連続的に発生する。その結果、金属表面は一様に塑性変形し、材料表面に圧縮の残留応力場を形成する。

WJP の特徴は施工に水しか使用しないことである。また、高流速で噴射された水により二次的に発生した水の流れについてもキャビテーションは移動するため、応力改善する領域は実際に噴射した領域よりも大きくなる。この特徴は、大型の構造物や大量の製品を同時に WJP 処理する際に非常に大きな利点であるため、原子力プラントで利用実績が多いのもこの特徴に依るものである。

3. 実機プラントへの WJP 適用

低炭素 SUS316 系ステンレス鋼で製造された炉内構造物のうち、Fig.2 に示す部位に対して建設中に WJP を施工した。WJP 施工対象部は、炉心支持機能を有するシュラウドおよび上部格子板の主溶接線（周および長手溶接線）、原子炉底部の制御棒駆動機構ハウジングおよび中性子束計測ハウジング溶接部等である。本報では、これらの WJP 対象部位のうち、工場で溶接および WJP を施工したシュラウド内面の H3 溶接線、現地で溶接および WJP を施工したシュラウド外面の H7 溶接線を評価対象とした。

Fig.3 には、出荷前に工場内に仮設したプールで溶接線に対して WJP している状況を示す。また、Fig.4 に

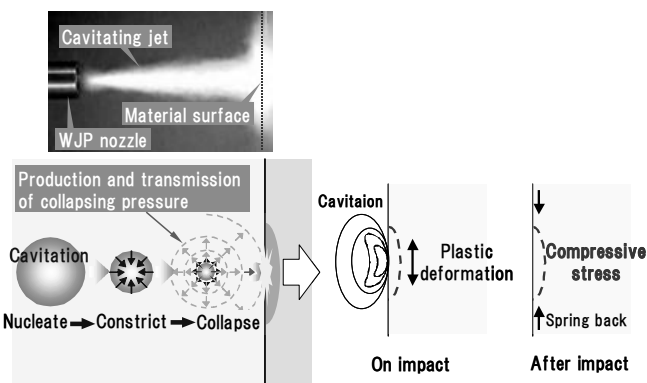


Fig. 1. Mechanism of residual stress production by WJP.

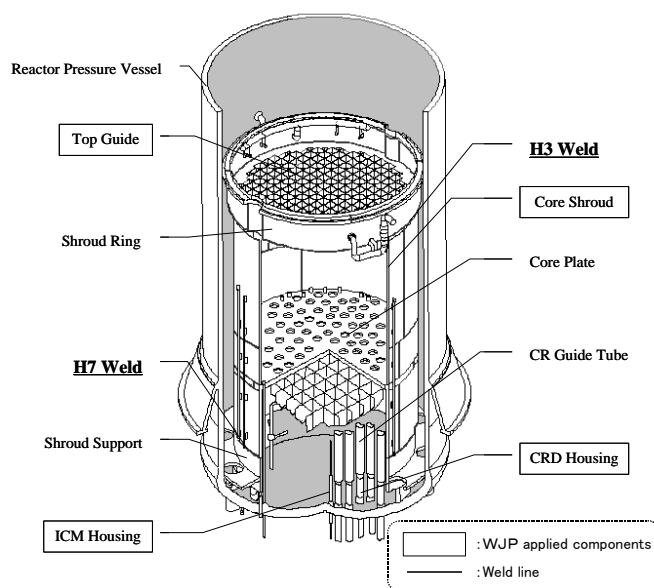


Fig. 2. Positions in each component of residual stress improvement by WJP.

は現地溶接後に当該部周りに水張りして WJP している状況を示す。

シュラウド溶接部への WJP は、「JANTI-VIP-03 予防保全工法ガイドライン[ピーニング工法]」^[7]に従って実機施工条件を決定した。さらに代表条件について、実機で使用している SUS316L 平板でモックアップ試験を実施し、残留応力改善効果に材質の影響がないことを確認した。その他の対象機器溶接部への WJP は、機器形状の特殊性を考慮し、前記予防保全工法ガイドライン条件に加えて残留応力改善効果を確認するためのモックアップ試験を追加で実施し、実機施工条件を決定した。シュラウド溶接部への WJP は、円筒胴の縦溶接線および円筒胴同士の周溶接線については、溶接



Fig. 3. WJP work situation in manufacturing factory before shipment to power plant site.

熱影響範囲に圧縮残留応力を付与するように、溶接中心に垂直にノズル位置を設定し、溶接線に沿ってノズルを一定速度で走行させて施工した。Fig.5 および Fig.6 には、SUS316L 製の板材に WJP 施工したモックアップ試験の結果を示す。Fig.5 は、WJP 施工中心からの幅方向の表面残留応力分布である。残留応力の改善幅は WJP 施工中心から±40 mm、その範囲における WJP 施工後の残留応力は凡そ 250~550 MPa の圧縮である。Fig.6 は、WJP 施工中心および 40 mm 離れた位置における深さ方向残留応力分布を示す。±40 mm の範囲であれば WJP により 100 μm よりも深い位置にも圧縮残留応力場を形成する。これらのモックアップ試験の結果は、先に公開されている予防保全工法ガイドライン⁷⁾と同等な結果である。

4. WJP 適用後のシュラウド溶接部の残留応力改善効果の実測

4.1 残留応力測定

残留応力測定は、モックアップ試験同様、日本材料学会標準 JSMS-SD-5-02 「X 線応力測定標準」^[8]に準じて実施した。残留応力測定位置は、シュラウドリングと胴の溶接部である H3 溶接線、シュラウドサポートとシュラウドの溶接部である H7 溶接線である。H3 溶接線は出荷前に工場において、H7 溶接線は建設プラント内で WJP を施工した後に残留応力測定した。

Table.1 には、出荷前工場試験および現地測定の X 線応力測定条件を示す。工場出荷前試験では、測定スペースが十分あること、時間的な制限が比較的少ないこ



Fig. 4. WJP work situation in power plant site.

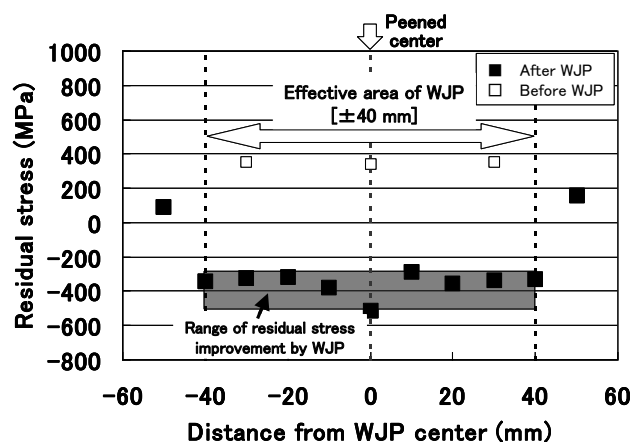


Fig. 5. Residual stress distributions to width direction on mock up samples before and after WJP.

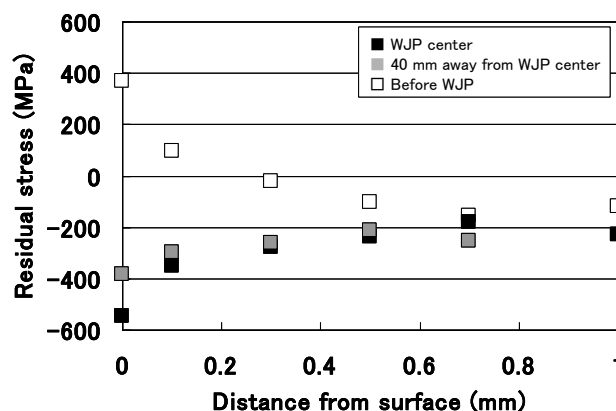


Fig. 6. Residual stress distributions to depth direction on mock up samples before and after WJP.

とから検出器がシンチレーション式の X 線装置を用いた。シンチレーション式の X 線装置の特徴は、位置敏感型の検出器を有する X 線装置と比較して測定時間は長くなるが、厳密な位置決め精度が必要ないため時間

Table 1. Measured conditions of residual stress by x-ray.

	Factory measurement	Plant site measurements
X-ray equipment	MSF-3M (Rigaku Corp.) (Fig.10)	XRD25 Combo (PROTO Corp.) (Fig.11)
Characteristic x-ray	CrK _β (λ = 0.20849 nm)	MnK _α (λ = 0.21018 nm)
X-ray elastic constants K	-366 MPa/deg (E=193.3 GPa, ν = 0.3)	-321 MPa/deg (E=193.3 GPa, ν = 0.3)
Irradiation area	4 x 12 mm ²	φ 2 mm ²
Measurement time for each position	1.5 h	1 h

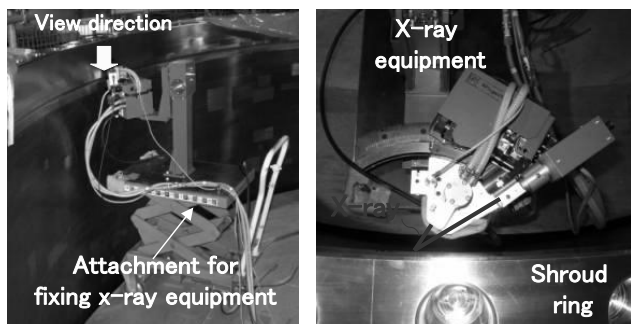


Fig. 7. Situations of residual stress measurement by x-ray in manufacturing factory.

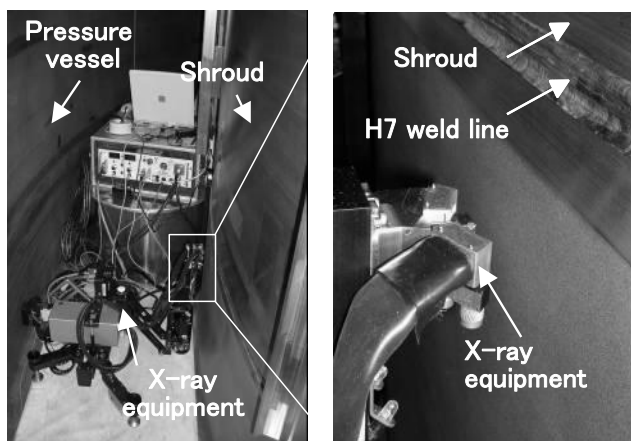


Fig. 8. Situations of residual stress measurement by x-ray at construction site.

に余裕がある場合の現場測定に適している。Fig.7には、工場出荷前試験の状況を示す。X線回折装置はRIGAKU社製のMSF3Mをベースに、任意の方向、位置を測定できるような台車にX線発生部分を固定した。

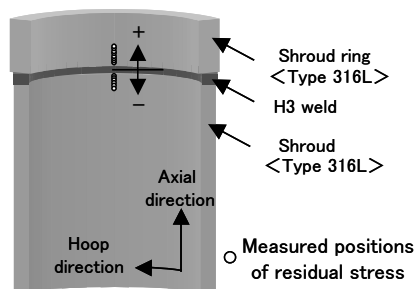


Fig. 9. Positions of residual stress measurement on shroud component (H3 weld line) after WJP in manufacturing factory.

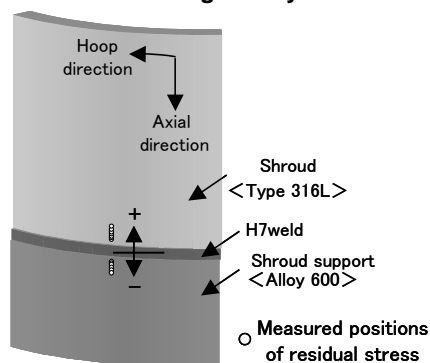


Fig. 10. Positions of residual stress measurement on shroud component (H7 weld line) after WJP at construction site.

上下方向の位置調整が可能な台車に装置を固定することにより、シュラウド内面の任意位置の残留応力測定を可能にした。

一方、現地測定では、測定スペースが限られていること、測定時間が制限されていることから位置敏感型検出器のX線装置を用いた。このX線装置の特徴は、回折角度範囲(2θ)を一度に測定できるため測定時間は短い、測定対象物との距離を厳密に調整する必要がある。Fig.8に、現地における応力測定状況を示す。X線回折装置はProto社製のXRD25 Comboである。本装置は手動でシュラウドサポートプレート上に設置し、対象物との位置を決めた後、自動測定した。

Fig.9には、H3溶接線における測定位置を示す。測定対象は母材部である。測定位置は、施工中心から8mmまでは4mm間隔で、48mmまでは20mm間隔で、それ以上は100mm間隔で1ライン測定した。

Fig.10には、H7溶接線における測定位置を示す。H7溶接線を中心にシュラウド側、シュラウドサポート側の母材部が測定対象である。測定位置は、溶接境界から5mmまでは2mm間隔で、10mmまでは5mm間隔で、それ以降は10mm間隔で1ライン測定した。

4.2 残留応力測定結果

(1) 工場溶接部 H3 溶接線の WJP 施工後の残留応力

Fig.11 には、H3 溶接線内面の WJP 施工後の表面残留応力測定結果を示す。図中の塗潰し領域は、Fig.5 のモックアップ試験で得られた WJP 応力改善結果である。WJP はシュラウドリング側、シュラウド側の両方に施工した。シュラウドリング側では、WJP 有効範囲である WJP 施工中心から ±40 mm 範囲の表面残留応力は、周/軸方向応力ともに約 400 MPa の圧縮である。その圧縮残留応力は WJP 有効範囲を超えると漸減し、H3 溶接線中心から 130 mm 離れた溶接熱影響を受けない母材の測定位置では、周/軸方向応力とも殆ど 0MPa である。シュラウド側側では、WJP 有効範囲の表面残留応力は周/軸方向応力ともに約 700 MPa の圧縮である。その圧縮残留応力は WJP 施工中心位置から離れるに従い漸減するが、H3 溶接線中心から 160 mm 離れた測定位置でも 200 ~ 400 MPa の圧縮残留応力がみられる。

(2) 現地溶接部 H7 溶接線の WJP 施工後の残留応力

Fig.12 には、現地溶接部 H7 溶接線外面の WJP 施工後の表面残留応力測定結果を示す。WJP はシュラウド側に施工した。ピーニング処理面では、表面の応力状態は等二軸状態である。今回の測定では、サイトにおける測定時間の制約から、シュラウド周方向の表面残留応力に限定して行った。

シュラウド側の表面残留応力は、WJP 有効範囲では全て圧縮である。分布形態は WJP 施工中心が 600 MPa と最も圧縮が大きく、H7 溶接線中心から 50 mm の範囲では約 400 MPa の圧縮、また、60 mm 離れた位置においても 300 MPa の圧縮である。シュラウドサポート

側の表面残留応力も、WJP 有効範囲では全て圧縮である。分布の形態は H7 溶接線中心から 15 mm 以内では 600 MPa の圧縮、20 mm 位置では 400 MPa になり、30 mm、40 mm では 100 MPa まで小さくなる。

4.3 WJP による残留応力改善効果評価

(1) 工場溶接部 H3 溶接線

シュラウドリング、シュラウド共に WJP 有効範囲では、周/軸方向応力ともに 400 MPa 以上の圧縮であり、溶接時に発生した残留応力が改善されていることを確認した。実機で測定された表面残留応力値は、モックアップ試験と同等、またはそれ以上の結果であることから、予防保全工法である WJP の有効性を実証することできた。

一方、WJP 施工範囲外のシュラウドリングおよび胴側の表面残留応力も周/軸方向ともに 0 MPa または圧縮残留応力であった。これは WJP 流れに起因する残留応力改善効果と、シュラウド加工時の適切な施工管理によるものと考えられる。

(2) 現地溶接部 H7 溶接線

H7 溶接線近傍における表面残留応力は、WJP 有効範囲でシュラウド側、シュラウドサポート側共に 400 MPa 以下の圧縮残留応力であった。この結果は、Fig.5 の事前に工場で実施した当該部のモックアップ試験と一致する結果である。従って、H7 溶接線のシュラウド側には、計画通りの WJP 施工が実施されたと結論できる。

一方、シュラウドサポート側でも H7 溶接線近傍では 600 MPa の圧縮残留応力であった。これは、シュラウドサポートが WJP 噴流の下流側に位置するため

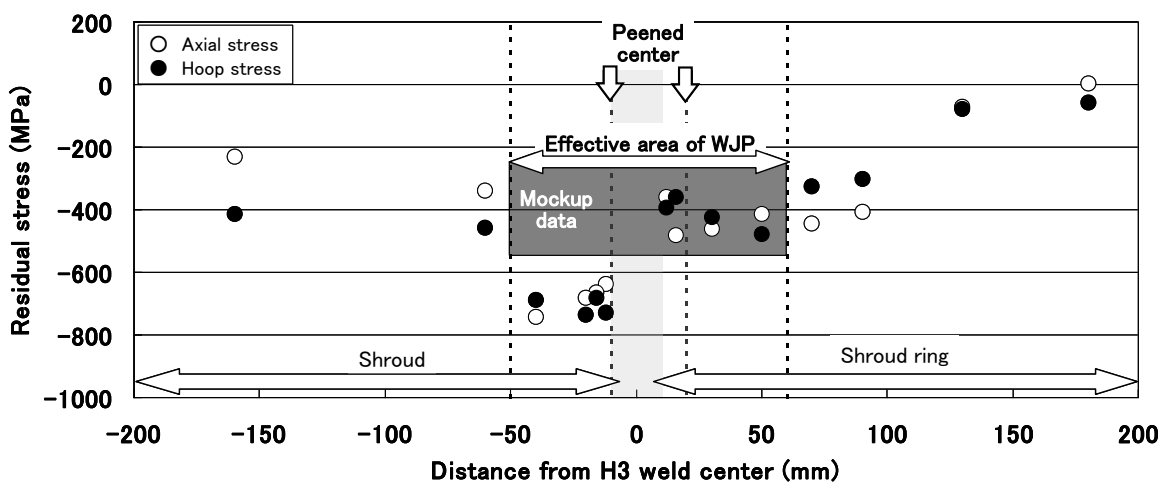


Fig. 11. Residual stress distributions near H3 weld line obtained by x-ray measurement.

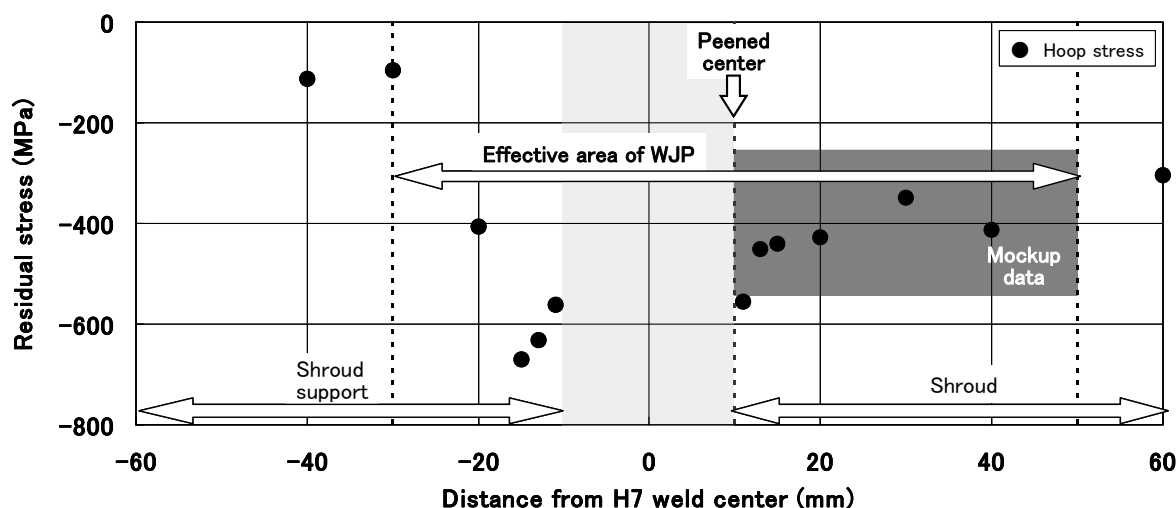


Fig.12. Residual stress distributions near H7 weld line obtained by x-ray measurement.

シュラウドと同様なピーニング効果が得られたと考えられる。これらの結果より、H7 溶接時に発生した残留応力も H3 溶接線同様に、WJP 施工により表面は全て圧縮に改善され、予防保全工法である WJP の有効性を実証することできた。

5. 結言

低炭素 SUS316 ステンレス鋼製の炉内構造物のうち、シュラウドの主溶接線（周および長手溶接線）に対して WJP による残留応力改善工法を適用した。本工法による残留応力改善効果を確認することを目的に、シュラウドの工場および現地溶接部について、X 線回折法による表面残留応力測定を工場内および建設サイトで実施し、以下の結論を得た。

- (1) WJP 施工された SUS316L 材(シュラウドリング、シュラウド) は、WJP 施工中心から 40 mm の範囲が全て圧縮の残留応力であることを確認した。この圧縮残留応力は、事前に実施した当該部の WJP モックアップ試験と同等もしくはそれ以上の圧縮の残留応力である。実機におけるこれら測定結果から、当該部へ計画通りの WJP 施工が実施されたことを実証した。
- (2) H3 溶接線において、溶接部から大きく離れたシュラウド内面の周/軸方向応力も圧縮またはほぼ 0 MPa であった。これは WJP 流れに起因する残留応力改善効果と、シュラウドリング加工時の適切な施工管理によるものと考えられる。

- (3) H7 溶接線のシュラウドリング側でも、溶接止端部近傍で高い圧縮残留応力であった。これは、当該部が WJP 噴流の下流側に位置するため、シュラウド側と同様なピーニング効果により発生したと考えられる。
- (4) 一連の残留応力測定の結果、H3、H7 溶接線近傍の測定領域全域で圧縮応力であることから、溶接時の残留応力は WJP により改善されたことが確認できた。

参考文献

- [1] 電気事業連合会，“原子力発電情報公開ライブラリー「ニューシア」”， <http://www.nucia.jp>.
- [2] 榎本邦夫，平野克彦，望月正人，黒沢孝一，斉藤英世，林英策，“ウォータージェットピーニングによる材料表面の残留応力改善効果の検討”，材料，Vol.45，No.7，1996，pp.734.
- [3] 清水翼，榎本邦夫，“原子力プラントにおけるステンレス鋼配管溶接部の局所高周波加熱による健全性向上に関する研究”，溶接学会論文集，Vol.5，No.3，1987，pp.335.
- [4] 原子力安全・保安院，“炉心シュラウドおよび原子炉再循環系配管の健全性評価について”，2004.
- [5] 佐川渉，吉久保富士夫，守中廉，菅野明宏，波東久光，斎藤昇，“ウォータージェットピーニング技術の BWR 炉内構造物への適用”，保全学，Vol.7，No.4，2009，pp.69.
- [6] K.Hirano，K.Enomoto and M.Hayashi，J.Soc.Mat.Sci.，Japan，Vol.1，1996，pp.740.
- [7] 日本原子力技術協会“予防保全工法ガイドライン[ピーニング工法]”，JANTI-VIP-03-第 2 版，2008，pp.2-16.
- [8] X 線応力測定法標準(JSMS-SD-5-02)，材料学会，2002.

(平成 21 年 3 月 31 日)