

き裂を有する原子炉内機器への ウォータージェットピーニングの適用

APPLICATION OF WATER JET PEENING ON BWR REACTOR INTERNALS WITH CRACKED SURFACES

日本原子力発電株式会社
株式会社日立製作所
株式会社日立製作所
日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社
日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社
日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社
日立 GE ニュークリア・エナジー株式会社

長谷川 国広
波東 久光
齋藤 昇
菅野 明弘
吉久保 富士夫
守中 廉
稲田 崇

Kunihiro HASEGAWA
Hisamitsu HATOU
Noboru SAITOU
Akihiro KANNO
Fujio YOSHIKUBO
Ren MORINAKA
Takashi INADA

Water Jet Peening (WJP) has been widely applied to Japanese nuclear power plants since 1999, as an approved mechanical mitigation technique against stress corrosion cracking (SCC) on materials used for nuclear reactors.

Existing laboratory experience and analysis indicated that WJP had no negative impact on pre-existing cracks, such as crack propagation during its application, although there was no field experience of applying WJP on cracked surfaces. Recently, The Japan Atomic Power Company (JAPC) and Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd. (HGNE) have successfully applied WJP on cracked surfaces, where the cracks left as is with the requirement that they should be inspected for sizing by UT periodically to monitor the each crack propagation according to the regulator's direction.

Keywords: Water Jet Peening, Stress Corrosion Cracking, Existing Cracks, Crack Propagation

1. 緒言

ウォータージェットピーニング(WJP)は、原子力発電所の原子炉内部構造物の高経年化に伴う溶接線近傍の応力腐食割れ(SCC)に対する有効な予防保全工法の一つであり、1999年以降、多くの実績を積み重ねてきた^[1]。

WJPとは、水中でキャビテーションジェットを材料表面に当て、キャビテーションの崩壊圧力を利用して、材料表面に圧縮残留応力を生成する技術である^[2,3]。WJPは、制約条件が少なくロバスト性の高い施工方法であり、施工に伴う表面硬化が小さく、熱的影響も与えない施工方法でもある。

き裂を有する箇所へのWJPの適用について、事前評価の結果、WJP施工によりき裂を進展させる等の悪影響を与えることはないと評価した。

本書では、き裂を有する表面へのWJP適用評価結果及び実機に適用したWJPについて報告する。

2. WJPの概要

SCCの発生原因は、材料の鋭敏化、腐食環境、引張残留応力という3つの因子が重畳した場合に発生し、いずれか1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^[4,5]。Fig.1に示すように、WJPは、引張残留応力を圧縮残留応力に改善することによって、SCCを防止しようというものである。

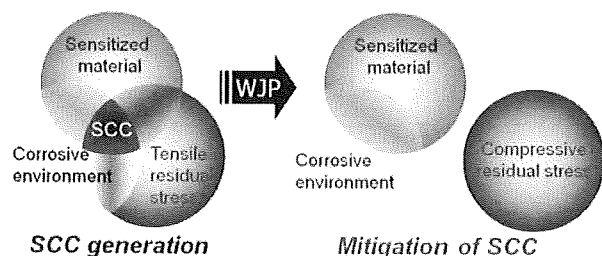


Fig.1 Effectiveness of WJP against SCC

WJPは、Fig.2に示すように、1999年の日本原子力発電(株)東海第二発電所を始めとし、2011年までに国内BWR/ABWR18プラントにおいて延べ26回に及ぶ定期検

連絡先:稲田崇、〒319-1221 茨城県日立市大みか町
5-2-2、日立GEニュークリア・エナジー(株)
E-mail:takashi.inada.gd@hitachi.com

査時及び建設時の施工実績を有する。WJP は、予防保全工法として、原子炉内機器の表面にき裂がない場合や、き裂がある場合は、き裂を除去した後に適用してきた。しかし、これまでに 1000 ヶ以上の溶接線に WJP を適用してきたが、き裂がある表面に対しての WJP の適用実績はなかった。

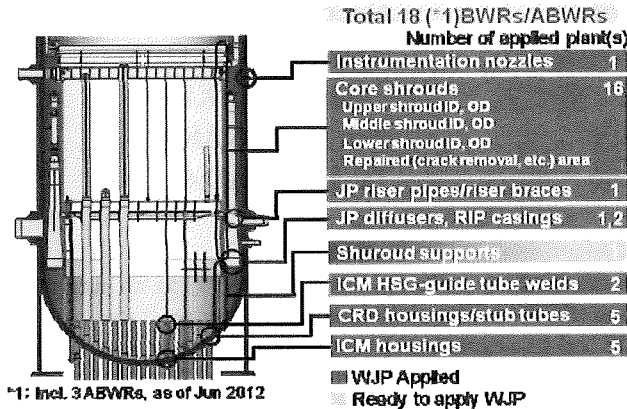


Fig.2 Field experiences of WJP for BWR reactor internals

2005 年に、東海第二発電所のシュラウドサポート V8 外面溶接線において、SCC が発見された^[6]。V8 溶接線は、Fig.3 に示す箇所であり、Ni 基合金(Alloy182)で製作されている。これらのき裂は、構造健全性に及ぼす影響はないと評価されたため、き裂は残したままとし、維持規格に従って継続的に点検を実施することとなった。また、2009 年に、シュラウドサポート V8 内面溶接線及び H7 内面溶接線において、さらに 38 ヶ所の SCC が発見されたため、超音波探傷試験(UT)による継続検査を実施していくこととなった^[7]。Fig.4 にそれぞれのき裂の表面上の長さ及び深さ、Fig.5 にき裂が発見された箇所を示す。き裂がない箇所、及びき裂間に新たな SCC の発生を防止するため、WJP の適用が検討された。WJP は、き裂がある箇所に施工しても、き裂を進展させるような悪影響を与えないことが検証されているため、き裂を残したまま施工することが可能である。よって、き裂がない箇所及びき裂に対して WJP の適用が選択された。過去に実施した確認試験や確認試験では^[8,9]、き裂がある表面に WJP を適用することにより、き裂が進展するような悪影響はないと検証されているが、今後実施する UT による継続検査や、き裂間の残留応力低減効果に対しては、検証する必要があった。よって、き裂を有する実機に WJP を適用する前に、妥当性確認試験を実施した。

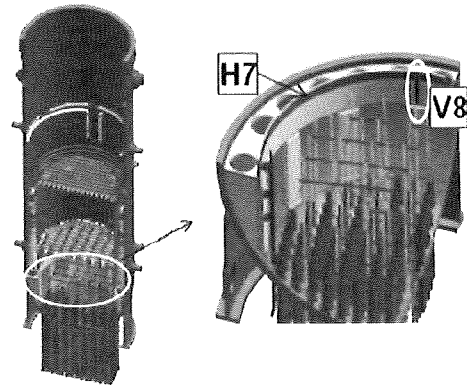


Fig.3 Locations of H7 and V8 weld lines in Tokai-2 reactor (H7/V8: Alloy 182, Shroud: 304L S.S.)

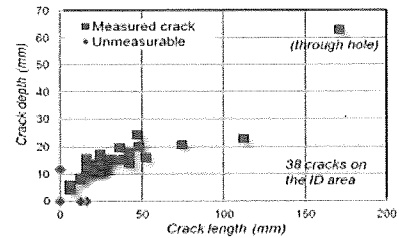


Fig.4 Sizes of cracks on H7/V8 ID (Original data from JAPC Press Release [7])

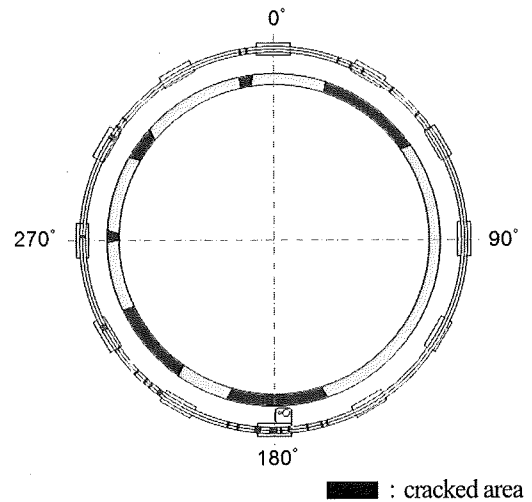


Fig.5 Map of cracked area on H7/V8 ID in Tokai-2 (Drawing rearranged from [7])

3. き裂を有する表面への WJP 施工評価

3.1 UT 性の評価

前に述べたように、過去に実施した確認試験や確認試験において、WJP の適用によりき裂が進展するような悪影響を与えないことは検証されている。

また、き裂がある箇所の UT による継続検査は、維持規格に従い実施される。き裂がある表面に、新たな SCC の発生を抑制させる工法として WJP が適用される場合、WJP 施工前後において UT による計測データに顕著な差がないようにしなければならない。よって、SCC を付与した試験体を使用して、WJP 施工前後による UT 性確認試験を実施した。

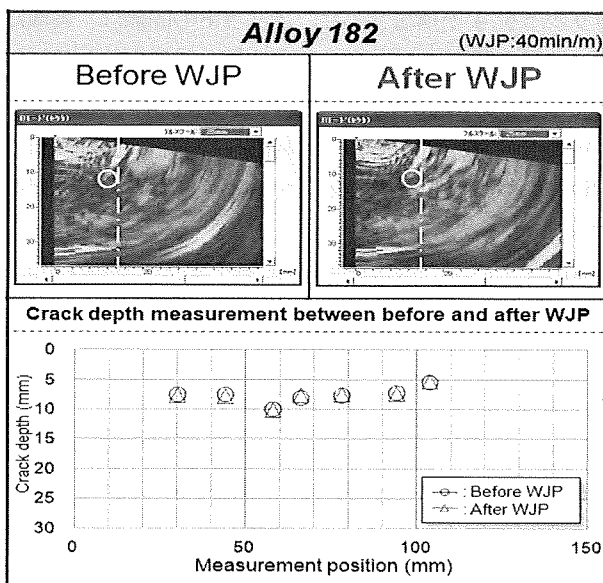
試験体は、SUS304 と Alloy182 を使用し、3 点曲げによる引張応力を加え、テトラチオン酸溶液に浸漬して SCC を付与した。

WJP 施工は、最も保守的な評価となるような条件とし、WJP 施工方向は、き裂に対して平行方向と直交方向となるように施工した。

UT による計測は、WJP 施工前後で同じ点を 7~8 点選定して計測し、計測したエコー画像、探傷波形及びき裂深さ測定結果を比較した。

試験結果は、Fig.7 に示すように、WJP 施工前後で UT 計測結果に顕著な差はなかった。さらに、WJP 施工前後のそれぞれの試験体における計測結果の平均誤差についても、Table 1 に示すように、顕著な差は見られなかった。

以上の結果から、き裂を有する表面に WJP を適用しても、UT 性へ悪影響を与えることはないことを確認した。



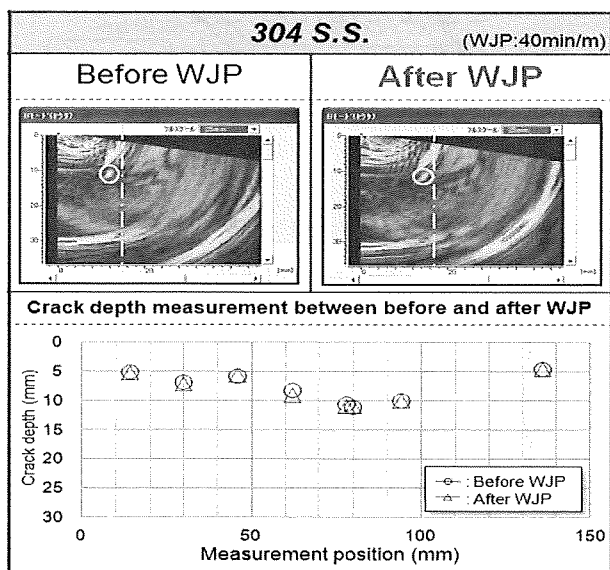
b) Alloy 182

Fig.7 Ultrasonic Test before and after WJP

Table 1 Mean Error of sizing difference^{*1} before and after WJP

Material	Mean Error(mm)	Sample size
Type 304S.S.	0.06	64
Alloy 182	-0.01	30

*1: Subtracted data after WJP from data before WJP



a) Type 304S.S.

3.2 残留応力低減効果

き裂がある表面に応力改善工法を適用することで、検査対象外とすることはできないが、新たなき裂の発生を抑制するために応力改善は望まれる。そのため、き裂表面部に WJP の適用が計画され、WJP 施工によるき裂近傍及びき裂間の残留応力低減効果を確認するために、SCC を付与した試験体に WJP を施工し、残留応力測定を実施した。

試験体は、SUS304 と Alloy182 を使用し、実機を模擬するために、熱処理、機械仕上げを実施した後、単独き裂及び複数き裂を付与した。単独き裂は、3 点曲げによる引張応力を加え、テトラチオン酸溶液に浸漬して付与した。き裂深さは、WJP 施工による応力改善深さと比べて十分深い 10mm を目標とした。一方、複数き裂は、き裂の間隔をコントロールするために、放電加工(EDM)にて

スリットを4ヶ所付与した。スリットの間隔は、実機における最小間隔である13mmと比較して保守的な評価となるように、3mm、5mm、10mmとした。

WJP施工は、最も保守的な評価となるような条件とし、WJP施工方向は、き裂に対して直交方向となるように施工した。

試験体の残留応力測定は、WJP施工前後の試験体表面、表面下100 μ m、200 μ mの応力を、X線回折法(XRD)により測定した。なお、WJP施工前には、き裂を付与した後、強研削により引張応力を付与した。

Fig.9、10、11に、き裂近傍及びき裂間の圧縮残留応力の評価結果を示す。き裂近傍で引張応力となるような悪影響はなく、狭い間隔(3mm)の箇所も含めて全ての測定点で、表面下200 μ mで圧縮応力となっていることを確認した。従って、WJPは、き裂近傍及びき裂間においても、応力低減効果があることが確認できたため、新たなSCC発生抑制に有効な工法であることを確認した。

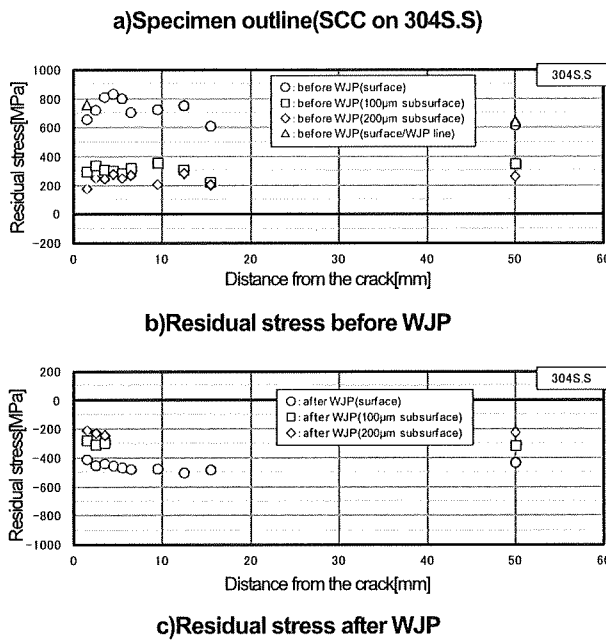
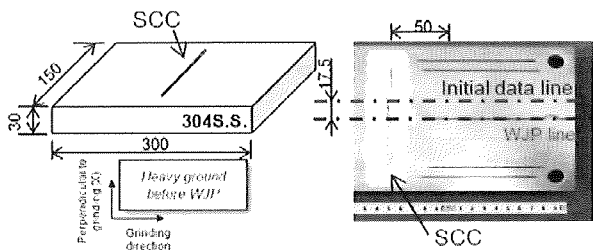


Fig.9 Residual stress near the crack(304S.S)

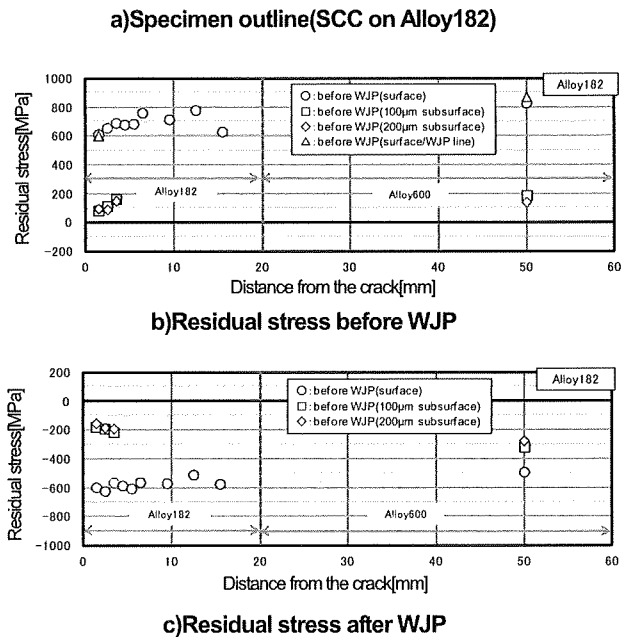
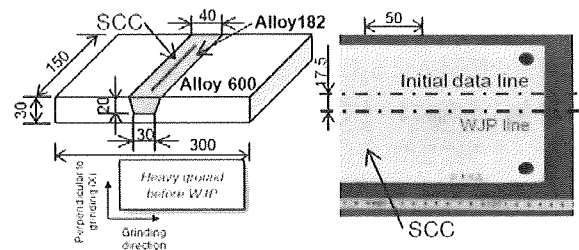


Fig.10 Residual stress near the crack(Alloy182)

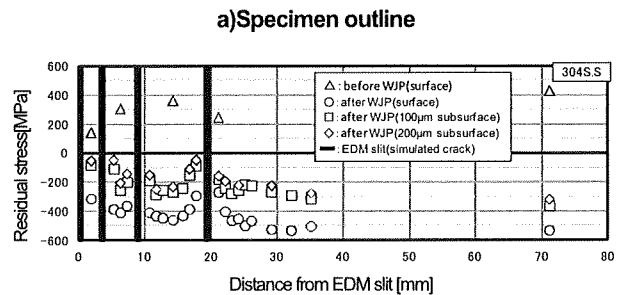
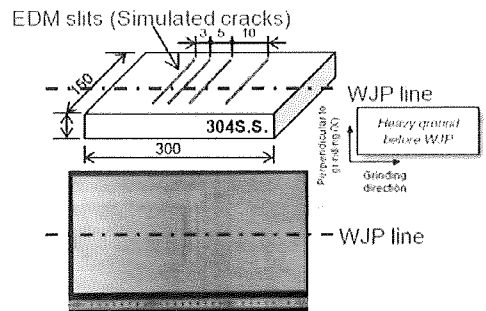


Fig.11 Residual stress between cracks

3.3 き裂を有する試験体の断面観察

WJP の適用によりき裂が進展するような悪影響を与えないことは検証されている。これは、き裂を有する試験体に WJP 施工し、実機を模擬した高温水中環境下に試験体を浸漬してき裂の進展有無を検証したものである。今回、き裂を有する表面に WJP を施工し、施工後の試験体断面観察を実施した。

試験体は、SUS304 と Alloy182 を使用し、実機を模擬するために熱処理、機械仕上げを実施した後、3点曲げによる引張応力を加え、テトラチオン酸溶液に浸漬して SCC を付与した。なお、SCC 深さは、約 2mm、約 10mm とした。

WJP 施工は、最も保守的な評価となるような条件とし、WJP 施工方向は、き裂に対して平行方向と直角方向となるように施工した。また、実機を模擬するために、試験体を治具に固定し、残留応力を加えたまま WJP を施工した。なお、曲げひずみは、0.25% を付与した。

WJP 施工後、熱処理にてき裂内面に焼色(酸化膜)を付与し、曲げ疲労試験にてき裂部分を強制破断させて、マイクロスコプを使用して断面観察を行なった。Fig.12 に SUS304 試験体、Fig.13 に Alloy182 試験体の SCC 境界部外観を示す。

Fig.12 より、SUS304 試験体において、200 倍の観察結果から、焼付け面(酸化変色部)を付与したき裂内部には、IGSCC(粒界型応力腐食割れ)の特徴であるロックキャンディー状破面が観察された。しかし、焼付け面(酸化変色部)のき裂深さ及びき裂長さ方向の端部には、疲労破面の特徴であるストライエーション状の破面は観察されなかったため、き裂は、WJP 施工前に付与した SCC であることを確認した。また、Fig.13 より、Alloy182 試験体において、200 倍の観察結果から、焼付け面(酸化変色部)を付与したき裂内部には、Ni 基合金の溶接金属にみられるデンドライト層に沿って SCC が進展している破面が観察された。しかし、焼付け面(酸化変色部)のき裂深さ及びき裂長さの端部には、疲労破面の特徴であるストライエーション状の破面は観察されなかったため、き裂は、WJP 施工前に付与した SCC であることを確認した。なお、Fig.12、Fig.13 は、SCC 深さ約 10mm の試験体における断面観察結果を示しているが、SCC 深さ約 2mm の試験体においても同様な結果であった。

以上の結果から、SUS304 及び Alloy182 共に 10mm 程度までのき裂に対して WJP を施工してもき裂形状の変化はなく、疲労に対する影響がないことを確認した。

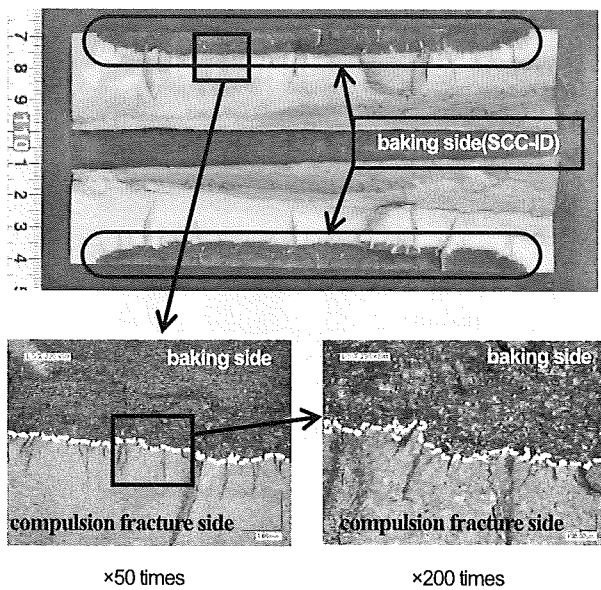


Fig.12 Fractograph of 304.S.S

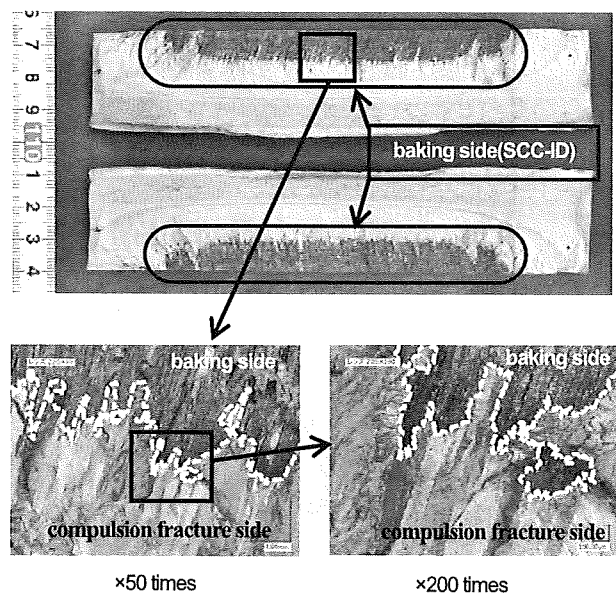


Fig.13 Fractograph of Alloy182

4. 実機への適用

き裂を有する表面に WJP を適用しても悪影響がないことを確認した結果を元に、日本原子力発電(株)東海第二発電所において、き裂を有する H7/V8 内面溶接線実機へ WJP を適用した。Fig.14 に WJP 装置例、Fig.15 に WJP 施工状況を示す。実機作業は、炉内作業(WJP 装置設定/撤去等)、WJP 施工を 5 日間で実施した。また、Fig.16 に WJP 施工前後の目視試験(VT)状況を示す。本図に示すように、き裂を有する表面に WJP を施工しても、き裂の見え方に明らかな差はないことがわかる。

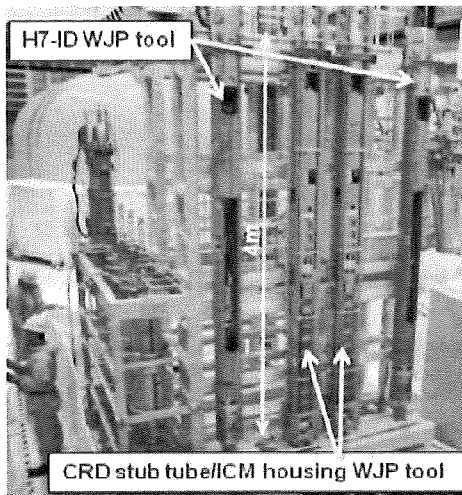


Fig.14 H7/V8-ID WJP tool on the Tokai-2 refueling floor

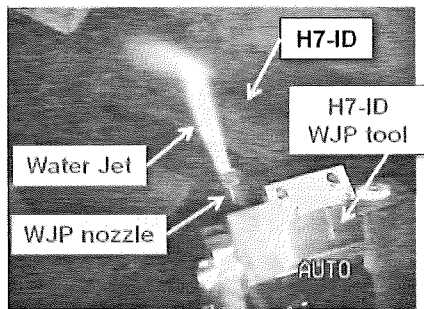


Fig.15 WJP treatment on H7-ID of Tokai-2

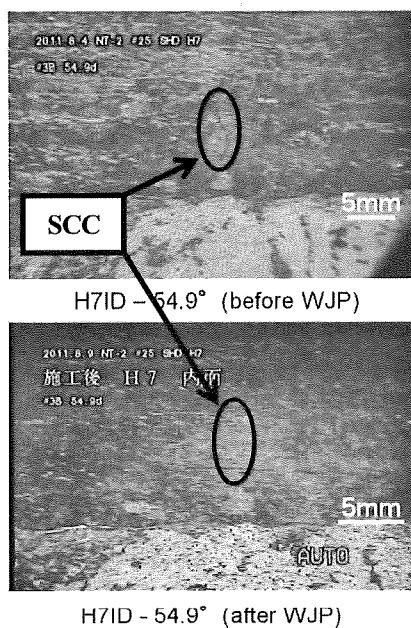


Fig.16 Cracked surface before and after WJP in Tokai-2

5. 結言

WJP は、き裂を進展させることがなく、表面き裂の UT 性に影響がないこと、き裂近傍及びき裂間の狭い箇所でも残留応力低減効果があること、疲労の影響がないことを確認し、き裂を有する原子炉内構造物に WJP を適用した。

今後とも、施工信頼性を含めた技術向上に努め、原子力発電プラントの更なる信頼性向上に寄与する。

謝辞

WJP の各種確認試験及び東海第二発電所実機適用に携わって頂いた多くの方々の多大なるご協力に対し、感謝致します。

参考文献

- [1] 古川秀康、魚住弘人、布施元正、"原子炉の炉内保全技術の開発と実機への適用"、日立評論、Vol.84、No.2、pp.29-34、2002.
- [2] 榎本邦夫、平野克彦、望月正人、黒沢孝一、斎藤英世、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.1、No.7、pp.734-739、1996.
- [3] 祖山均、山内由章、井小萩利明、大場利三郎、佐藤一教、進藤丈典、"高速水中水噴流による顕著なピーニング効果"、噴流工学、Vol.13、No.1、pp.25-32、1996.
- [4] 溶接学会編、溶接・接合便覧、丸善(株)、東京、p.132、1990.
- [5] 小若正倫著、金属の腐食損傷と防食技術、(株)アグネ承風社、p.377、1995.
- [6] プレスリリース、日本原子力発電(株)、July 13、2005.
- [7] プレスリリース、日本原子力発電(株)、March 1、2010.
- [8] 平野克彦、榎本邦夫、林英策、黒沢孝一、"SUS304 鋼の耐食性および疲労強度に及ぼすウォータージェットピーニングの影響"、材料、Vol.1、No.7、pp.740-745、1996.
- [9] 齋藤昇、榎本邦夫、黒沢幸一、守中廉、林英策、石川哲也、吉村敏彦、"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.

(平成 24 年 6 月 21 日)