



応力改善工法で付与される圧縮残留応力の持続性

Sustainability of compressive residual stress by stress improvement processes

(一財) 発電設備技術検査協会	西川 聡	Satoru NISHIKAWA	Member
(一財) 発電設備技術検査協会	大北 茂	Shigeru OKITA	Member
(一財) 発電設備技術検査協会	山口 篤憲	Atsunori YAMAGUCHI	Member

Stress improvement processes are countermeasures against stress corrosion cracking in nuclear power plant components. It is necessary to confirm whether compressive residual stress induced by stress improvement processes can be sustained under operation environment. In order to evaluate stability of the compressive residual stress in 60-year operating conditions, the 0.07% cyclic strains of 200 times at 593 K were applied to the welded specimens, then a thermal aging treatment for 1.66×10^6 s at 673 K was carried out. As the result, it was confirmed that the compressive residual stresses were sustained on both surfaces of the dissimilar welds of austenitic stainless steel (SUS316L) and nickel base alloy (NCF600 and alloy182) processed by laser peening (LP), water jet peening (WJP), ultrasonic shot peening (USP), shot peening (SP) and polishing under 60-year operating conditions.

Keywords: Stress improvement processes, Sustainability of the compressive residual stress, Austenitic stainless steel, Nickel base alloy, LP, WJP, USP, SP, Polishing

1. 緒言

原子炉炉内構造物における応力腐食割れの予防保全対策の一つに応力改善工法、すなわちレーザピーニング (LP) やウォータージェットピーニング (WJP) 等の各種ピーニング工法、および磨きによる当該部への圧縮残留応力の付与がある。しかし、定期検査等で SCC 対策として圧縮残留応力の付与を行う場合、実機の高経年化を考慮した上で圧縮残留応力の持続性を確認する必要がある。

これまでに、圧縮残留応力の持続性について種々の検討がなされており、これらは以下の①～⑥の要因に分類することができる。

- ① 熱処理による熱緩和^{[1]-[4]}
- ② 応力 (ひずみ) 付与^{[1], [5]-[8]}
- ③ 熱緩和と応力 (ひずみ) 付与との重畳^{[3], [5], [9]}
- ④ 溶接残留応力が存在する状態での熱緩和^{[3], [4], [7], [10]}
- ⑤ 溶接残留応力が存在する状態での応力 (ひずみ) 付与^{[11], [12]}
- ⑥ 溶接残留応力が存在する状態での熱緩和と応力 (ひずみ) 付与との重畳^{[3], [12]}

なお、評価対象としている材料は SUS304、SUS316L、

NCF600、132 合金、182 合金である。これら①～⑥の要因において、個々の試験で圧縮残留応力の持続が確認されているものの、その試験は工法毎に試験条件や試験片形状が異なることから、これまでに圧縮残留応力の持続に関して統一的な見解を得るには至っていない。

そこで本研究では、LP、WJP、超音波ショットピーニング (USP)、ショットピーニング (SP)、および磨きの五工法について実機環境 (温度条件、ひずみ条件) を踏まえた同じ試験条件、および試験片形状で応力緩和試験を実施し、圧縮残留応力の持続性を調査した。

2. 実験方法

2.1 評価試験片の製作

Table 1 に試験体の製作に用いた材料の化学成分を示す。また、Fig. 1 に製作した溶接継手の概略図を示す。母材が SUS316L と NCF600、溶接金属が 182 合金からなる板厚 15 mm、幅 200 mm、長さ 250 mm の異材溶接継手を製作した。溶接条件は、直流で溶接棒をプラス極として電流 110-140 A、溶接速度 2.0-4.1 mm/s で行った。また、積層数は 5 層 9 パスとして、溶接棒の棒継部が残留応力を評価する試験体中央部付近に重ならないようにした。溶接継手の余盛部を機械研削して平坦にし、その後、初層部を機械研削して板厚を 12.1 mm とした。そして、板厚 12.1 mm、幅 45 mm、長さ 180 mm の試験片を溶接金属

連絡先: 西川聡、〒230-0044 神奈川県横浜市鶴見区弁天町 14-1、一般財団法人発電設備技術検査協会、溶接・非破壊検査技術センター

E-mail: nishikawa-satoru@japeic.or.jp

Table 1 Chemical composition of the base metal and the deposited metal used (mass%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr	Fe	Mo	Nb+Ta	Ti	Others
SUS316L	0.015	0.66	1.21	0.035	0.003	12.24	-	17.41	Bal.	2.08	-	-	-
NCF600	0.08	0.23	0.25	0.008	0.001	73.54	0.07	16.77	9.05	-	-	-	-
Alloy182	0.058	0.76	7.38	0.007	0.004	68.3	0.03	14.30	7.08	-	1.52	0.37	<0.50

が中心になるよう長手方向から採取し、表面の機械加工層を除去するため、最終層側の面を電解研磨で0.1 mm以上研磨した。Fig. 2に応力改善工法を施した箇所を示す。電解研磨した最終層側の面に45 mm×40 mmの領域に応力改善工法を施した。Table 2にWJP、LP、USP、およびSPの施工条件を示す。これらの応力改善工法に磨きを加えた5工法について検討を行った。

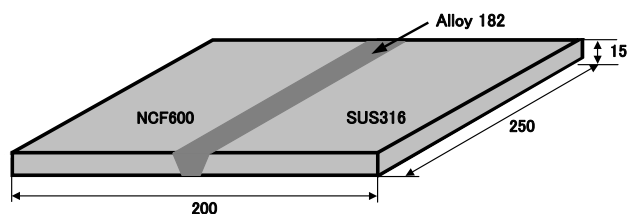


Fig. 1 Schematic of a dissimilar welded joint from which specimens for the sustainability evaluation of compressive residual stress were cut

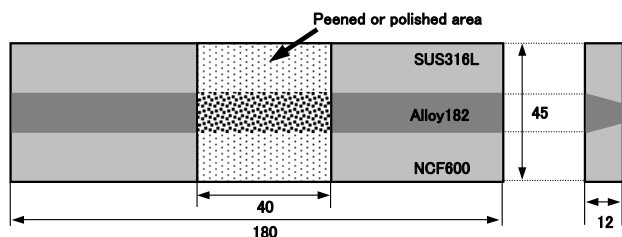


Fig. 2 Schematic of peened and polished area on the specimen

Table 2 Conditions of the LP, WJP, USP and SP

LP	Pulse energy	60 mJ
	Spot diameter	0.7 mm
	Number of pulses	7000 pulse/cm ² (SUS316L) 1800 pulse/cm ² (NCF600, alloy182)
WJP	Injection quantity	800 cm ³ /s
	Injection time	24 s/cm
	Injection distance	140 mm
	Injection angle	90°
USP	Nozzle diameter	2 mm
	Amplitude	50 μm
	Ball diameter	4 mm
SP	Projection time	150 s
	Material of cut wire	SUS304
	Cut wire contour	φ0.8 mm × 0.8 mmL
	Projection angle	90°

2.2 ひずみ負荷

実機の起動・停止に伴う応力変動の影響を評価するため、製作した試験片にひずみを複数回負荷した。SUS316L、NCF600、および182合金の降伏応力は、温度上昇に伴い

低下する^[13]。そのため、実機起動の昇温時に負荷される応力を運転温度で負荷すれば、圧縮残留応力の緩和に対してより厳しい評価になる。PWRの運転温度である593 Kでひずみ量0.07%を負荷した場合、実機起動時に負荷される応力と同等以上の応力が各々の材料に負荷されるため、593 Kで0.07%のひずみを試験片の長手方向に繰返し負荷した。ひずみの負荷速度は、JIS規格における引張試験のひずみ速度の範囲内である $6.67 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ とし、三角波でひずみを負荷した。そして、実機60年運転を想定した設計上の繰返し数以上となる200回までひずみを負荷した。なお、BWRは運転温度が563 K程度で、起動時に同等のひずみが負荷されるため、この条件で圧縮残留応力が持続すればBWR環境下においても圧縮残留応力は持続すると言える。

2.3 熱時効処理

実機条件の中でピーニングによる圧縮残留応力の持続性に影響を及ぼす因子として、応力負荷以外に運転温度に長期間曝されることに伴う熱緩和が考えられる。したがって、両方の因子を考慮した場合に圧縮残留応力が持続することを確認する必要があるため、2.2節でひずみを200回負荷した後、長期間の運転を模擬した熱時効処理を行った。PWRの60年運転、100%稼働率を想定した場合、593 Kで $1.89 \times 10^9 \text{ s}$ 相当の熱履歴を受けることになる。この熱履歴は、Tを温度(K)、tを時間(hr)とした場合のラーソンミラーパラメータ $P = T(20 + \log t)$ で加速条件を算出すると673 K、 $1.66 \times 10^6 \text{ s}$ に相当するため、この条件で熱時効処理を行った。なお、BWRは運転温度が563 K程度でありPWRより低温になるため、この条件で圧縮残留応力が持続すればBWR環境下においても圧縮残留応力は持続すると言える。

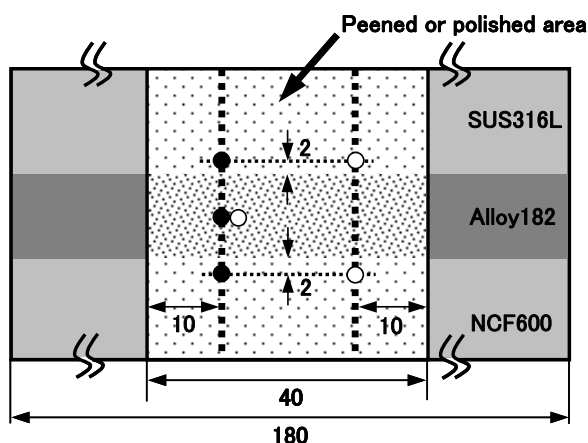
2.4 残留応力測定

ひずみ繰返し数1、2、5、10、50、200回負荷後、および熱時効処理後の残留応力をX線回折法で測定した。残留応力の測定条件をTable 3に示す。 $2\theta - \sin^2 \psi$ 法^[14]を用いて室温の残留応力を測定した。残留応力測定点はSUS316LとNCF600は1点として、182合金は測定のばらつきを考慮して同じ点を2回測定した。Fig. 3に残留応

力の測定箇所を示す。溶融線から 2 mm 離れた SUS316L と NCF600 の溶接熱影響部、および 182 合金中央部の表面残留応力を測定した。政木ら⁶⁾の結果では、応力負荷方向の垂直方向は残留応力がほとんど変化せず、応力負荷方向で残留応力の緩和が生じることから、試験片長手方向の残留応力を測定した。さらに、板厚内部における圧縮残留応力の持続性を評価するため、繰返しひずみ 200 回負荷後、および熱時効処理後において、表面を電解研磨して深さ 10~200 μm の箇所を残留応力測定した。磨き以外の工法は、SUS316L は深さ 100 μm を、NCF600 では深さ 200 μm を残留応力測定した。磨きは圧縮残留応力の付与深さが約 50 μm であるため¹⁵⁾、SUS316L、NCF600 ともに深さ 10 μm の箇所を測定した。なお、SUS316L と NCF600 は電解研磨により表面に凹部が形成されるため、熱時効処理後の残留応力測定は、Fig. 3 に示すようにひずみ 200 回負荷後の測定位置と反対側の箇所で行った。

Table 3 Measurement condition of residual stress by X-ray diffraction

Condition	SUS316L	NCF600	Alloy182
Characteristic X-ray	Cr-Kβ		
Tube voltage / tube current	40 kV/30 mA		
Electrolytic polishing area	φ 3 mm		—
Collimator area	φ 2 mm		φ 2 mm (Without WJP and LP) φ 4 mm (WJP and LP)
Diffraction plane	311		
Diffraction angle (2θ)	148.5°	153.6°	



●: Measurement point of residual stress until 200 cycles of 0.07% strain
○: Measurement point of residual stress after thermal aging treatment

Fig. 3 Schematic of measurement point of residual stress by X-ray diffraction

3. 実験結果および考察

3.1 SUS316L、および NCF600 の表面残留応力の持続性

Fig. 4 に各応力改善工法における SUS316L と NCF600 の溶融線から 2 mm 離れた位置のひずみ負荷と熱時効処理による表面残留応力の変化を示す。溶接のままでは、溶接による引張残留応力が表面に生じているが、応力改善工法を施すことで圧縮残留応力が付与される。そして、SUS316L、NCF600 ともに全ての応力改善工法において、593 K で 0.07% のひずみを繰返し 200 回負荷した場合、さらにその後 673 K で 1.66×10^6 s 熱時効処理を施した場合においても表面に圧縮残留応力が持続していた。応力改善工法や材料の種類で傾向は異なるものの、多くの場合、1 回目のひずみ負荷で圧縮残留応力が比較的大きく緩和し、その後 200 回目まで大きな変化は見られなかった。このことから、1 回目のひずみ負荷時に昇温とひずみ負荷に伴う応力再配分が生じて圧縮残留応力の緩和が生じるが、その後は同等の熱的、および力学的な負荷に対して圧縮残留応力の変化は少なくなることがわかった。

3.2 182 合金の表面残留応力の持続性

Fig. 5 に各応力改善工法における 182 合金中央部のひずみ負荷と熱時効処理による表面残留応力の変化を示す。施工のままでは、全ての応力改善工法において圧縮残留応力になっていた。そして、593 K で 0.07% のひずみを繰返し 200 回負荷した場合、さらにその後 673 K で 1.66×10^6 s 熱時効処理を施した場合においても、SUS316L、および NCF600 と同様に圧縮残留応力が表面で持続していた。(b) に示す WJP 施工材では 5 回目のひずみ負荷まで圧縮残留応力の緩和が見られたが、10 回目以降は圧縮残留応力が高くなり、-500 MPa 近くになった。このように、他の工法と比較して圧縮残留応力の変化が著しいのは、測定誤差が大きいに起因すると考えられる。182 合金は溶接のままでは母材と比べて結晶粒が粗大になり¹⁶⁾、かつ凝固過程において結晶成長方向が <100> に優先配向する。このため、X 線の照射領域に含まれる結晶粒数が減少し、かつ特定の方向に X 線のピークが出やすいため十分な測定精度が得られず、残留応力の測定が困難になることが知られている¹⁷⁾。このため、WJP のような加工度の小さい工法では¹⁸⁾、粗大な結晶粒が残存して測定誤差が大きくなるため、(b) に示すように圧縮残留応力の変化が他の工法と比較して著しくなったものと推察される。なお、USP や SP のような加工度の大きい工法では、182 合金の粗大な結晶粒が微細化されることで X 線回折

の測定領域に含まれる結晶粒数が見かけ上多くなり、WJPより測定精度が高くなるものと推察される。

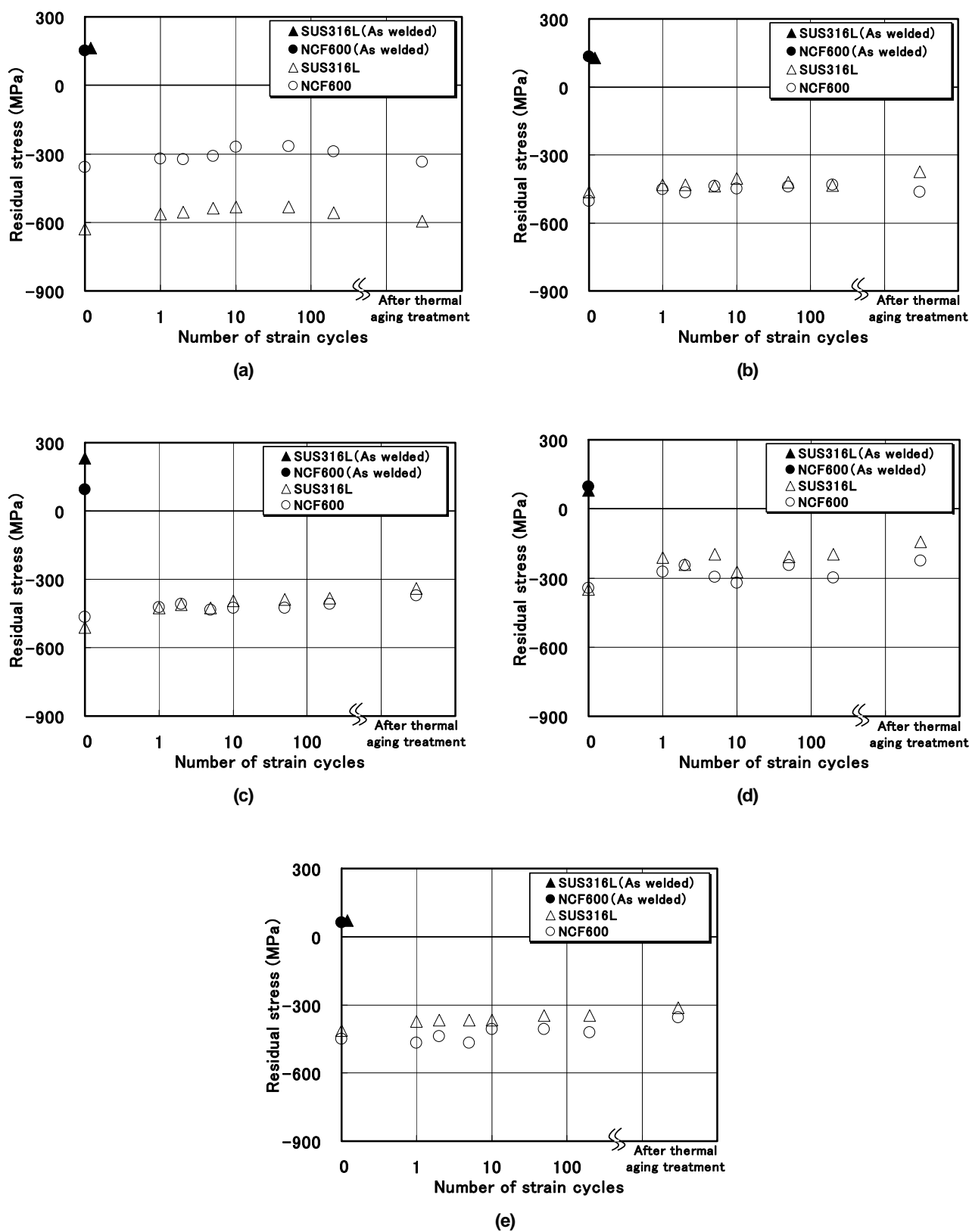


Fig. 4 Effect of 200 cycles of 0.07% strain at 593 K and subsequent thermal aging treatment for 1.66×10^6 s at 673 K on surface compressive residual stress in SUS316L and NCF600: (a) LP, (b) WJP, (c) USP, (d) SP, and (e) polishing

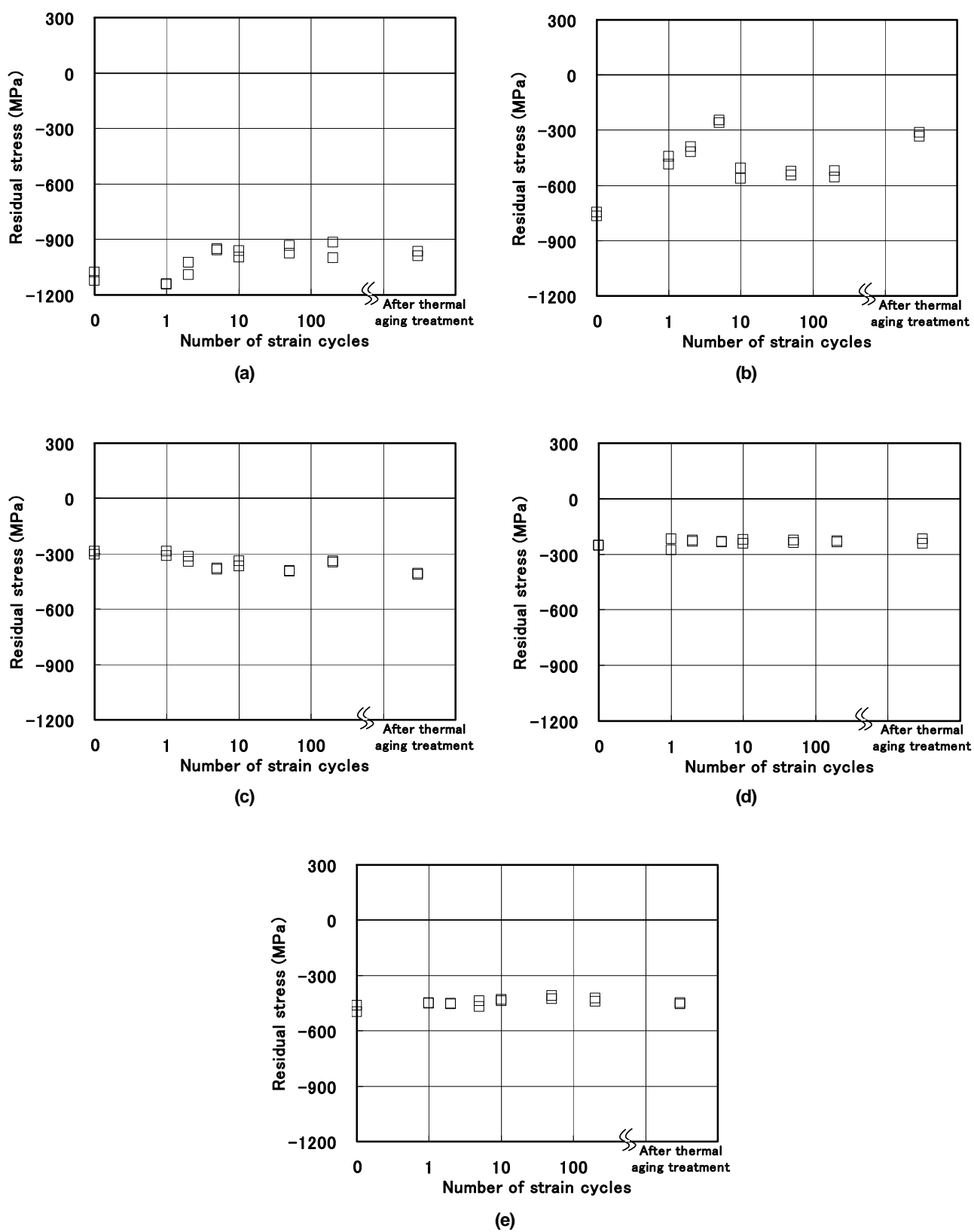


Fig. 5 Effect of 200 cycles of 0.07% strain at 593 K and subsequent thermal aging treatment for 1.66×10^6 s at 673 K on surface compressive residual stress in alloy182: (a) LP, (b) WJP, (c) USP, (d) SP, and (e) polishing

3.3 板厚内部での圧縮残留応力の持続性

Fig. 6 に溶融線から 2 mm 離れた SUS316L と NCF600 の表面から 10~200 μm の板厚内部における残留応力測定結果を示す。593 K で 0.07% のひずみを繰返し 200 回負荷した場合、さらにその後 673 K で 1.66×10^6 s 熱時効処理を施した場合においても圧縮残留応力が持続し、磨き以外の工法では、SUS316L は表面から深さ 100 μm で、NCF600 は深さ 200 μm で圧縮残留応力が持続していた。また、磨きは SUS316L、NCF600 とともに表面から深さ 10 μm で圧縮残留応力が持続していた。

以上より、LP、WJP、USP、SP、および磨きの五種類の工法について、SUS316L、NCF600、および 182 合金からなる溶接試験片に付与される圧縮残留応力は、実機の 60 年運転を想定した条件下で持続すると考えられる。

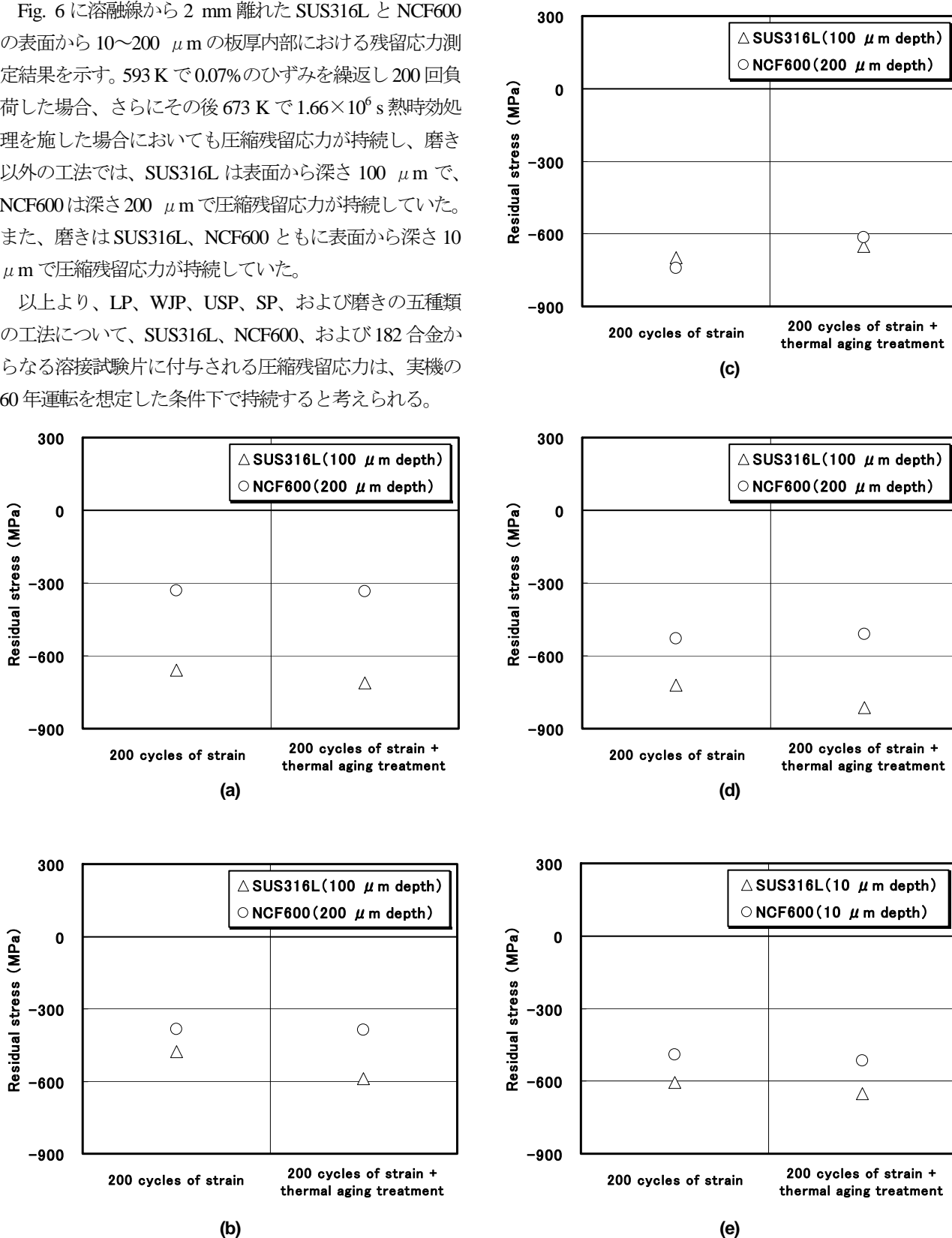


Fig. 6 Effect of 200 cycles of 0.07% strain at 593 K and subsequent thermal aging treatment for 1.66×10^6 s at 673 K on compressive residual stress in depth point: (a) LP, (b) WJP, (c) USP, (d) SP, and (e) polishing

4. 結論

本研究は、原子力発電プラントにおいて SCC を予防するために行われる応力改善工法 (LP、WJP、USP、SP、および磨き) で付与される圧縮残留応力について、実機の 60 年運転を想定した条件下の持続性を調査した。得られた結果を以下に示す。

- 1) 応力改善工法を施した SUS316L、NCF600、および 182 合金からなる溶接試験片は、593 K で 0.07% のひずみを繰返し 200 回負荷した場合、さらにその後 673 K で 1.66×10^6 s の熱時効処理を施した場合においても表面に圧縮残留応力が持続する。
- 2) LP、WJP、USP、および SP を施した溶接試験片の SUS316L と NCF600 は、593 K で 0.07% のひずみを繰返し 200 回負荷した場合、さらにその後 673 K で 1.66×10^6 s の熱時効処理を施した場合においても、SUS316L は表面から深さ 100 μ m で、NCF600 は深さ 200 μ m で圧縮残留応力が持続する。
- 3) 磨きを施した溶接試験片の SUS316L と NCF600 は、593 K で 0.07% のひずみを繰返し 200 回負荷した場合、さらにその後 673 K で 1.66×10^6 s の熱時効処理を施した場合においても、SUS316L と NCF600 は表面から深さ 10 μ m で圧縮残留応力が持続する。

なお、本研究は国内電力 10 社 (関西電力、北海道電力、東北電力、中部電力、北陸電力、中国電力、四国電力、九州電力、日本原子力発電、電源開発)、および国内プラントメーカー 3 社 (東芝、日立 GE ニュークリア・エナジー、三菱重工業) の共同研究成果の一部である。関係各位の御討論に深謝する。

参考文献

- [1] 小畑稔, 久保達也, 依田正樹, 佐伯綾一, 石川達也: “レーザーピーニングにより形成した圧縮残留応力の緩和特性評価”, M&M2009 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集, pp.343-344 (2009)
- [2] 齋藤昇, 波東久光, 吉久保富士夫, 守中康: “WJP による残留応力改善効果の持続性評価”, 日本材料学会第 59 期学術講演会講演論文集, pp.307-308 (2010)
- [3] 前口貴治, 堤一也, 豊田真彦, 太田高裕, 岡部武利, 佐藤知伸: “ピーニングによる応力腐食割れ防止効果に関する研究”, 日本保全学会第 7 回学術講演会要旨集, pp.568-571 (2010)
- [4] 西川聡, 中田志津雄, 堀井行彦, 古村一郎, 山口篤憲: “圧縮残留応力付与部の熱時効による応力緩和挙動”, 日本保全学会第 4 回学術講演会要旨集, pp.276-279 (2007)
- [5] 角谷利恵, 田澤俊幸, 檜崎千尋, 齋藤利之: “レーザーピーニング施工面の圧縮残留応力に及ぼす外部応力負荷の影響”, M&M2009 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集, pp.340-342 (2009)
- [6] 政木清孝, 若林豊, 越智保雄, 松村隆, 佐野雄二, 久保達也: “レーザーピーニング処理した SUS316L 鋼の高サイクル疲労挙動”, M&M2004 材料力学カンファレンス講演論文集 (2004)
- [7] K. Okimura, T. Ohta, T. Konno, M. Narita and M. Toyoda: “Reliability of Water Jet Peening as Residual Stress Improvement Method for Alloy 600 PWSCC Mitigation”, Proceeding of the 16th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE16, May11-15, 2008, Orlando, Florida, USA.
- [8] 佐川渉, 吉久保富士夫, 守中康, 菅野明弘, 波東久光, 齋藤昇: “ウォータージェットピーニング (WJP) 技術の BWR 炉内構造物への適用”, 保全学, Vol.7, No.4, pp.69-76 (2009)
- [9] 吉村敏彦, 大城戸忍, 榎本邦夫, 守中康, 平野克彦, 黒澤孝一, 林英策: “ウォータージェットピーニングによる原子炉内機器溶接部の残留応力低減”, 日本材料学会第 38 回 X 線材料強度に関する検討会, 2001 年 11 月 30 日, pp.38-44 (2001)
- [10] 橋本匡史, 大沢悠介, 伊藤真介, 才田一幸, 望月正人, 西本和俊: “ウォータージェットピーニングによる残留応力低減効果の全施工プロセスを考慮した長期安定性評価”, 第 204 回溶接冶金研究委員会資料 (2011)
- [11] 田澤俊幸, 角谷利恵, 檜崎千尋, 齋藤利之: “レーザーピーニング施工をした溶接部の圧縮残留応力に及ぼす外部応力負荷の影響”, M&M2010 材料力学カンファレンス CD-ROM 論文集, pp.1263-1265 (2010)
- [12] 齋藤昇, 榎本邦夫, 黒澤孝一, 守中康, 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, pp.4-12 (2003)
- [13] 小川和夫, 中田志津雄, 西川聡, 堀井行彦, 村川英一: “材料物性値および FEM 要素が溶接残留応力解析へ及ぼす影響”, 溶接構造シンポジウム 2006 講演概要集, No.2, pp.705-712 (2006)
- [14] 日本材料学会 X 線材料強度部門委員会: “X 線応力

測定法標準(2002年版)―鉄鋼編―(JSMS-SD-5-02)”
(2002)

[15] 日本原子力技術協会: “予防保全工法ガイドライン
[研磨による応力改善工法]”, pp.5 (2009)

[16] 西川聡: “ニッケル基 600 合金溶接部の高温高圧純
水中における応力腐食割れ特性と超音波探傷による
割れ検出性の向上”, 大阪大学工学博士論文 (2010)

[17] 秋田貢一, 吉岡靖夫, 佐野雄二, 小川和夫, 久保達也,
小畑稔, 田中寛大: “Ni 基合金溶接金属の X 線残留
応力測定”, 材料, Vol.54, No.7, pp.710-716 (2005)

[18] 波東久光, 大橋健也, 松井祐二, 深谷征史, 齋藤昇,
黒澤孝一, 金田潤也, 酒井英明: “ウォータージェット
ピーニング”, レーザ加工学会誌, Vol.17, pp.29-36
(2010)

(平成 24 年 6 月 19 日)