ウォータージェットピーニングを受けた オーステナイト系ステンレス鋼の残留応力[†]

鈴木 賢治* 菖蒲 敬久** 城 鮎美***

Residual Stresses of Water-Jet Peened Austenitic Stainless Steel

by

Kenji SUZUKI*, Takahisa SHOBU** and Ayumi SHIRO***

The specimen material was austenitic stainless steel, SUS316L. The residual stress was induced by water-jet peening. The residual stress was measured using the 311 diffraction with conventional X-rays. The measured residual stress showed the equi-biaxial stress state. To investigate thermal stability of the residual stress, the specimen was aged thermally at 773K in air to 1000h. The residual stress kept the equi-biaxial stress state against the thermal aging. Lattice plane dependency of the residual stress induced by water-jet peening was evaluated using hard synchrotron X-rays. The residual stress measured by the soft lattice plane showed the equi-biaxial stress state, but the residual stress measured by the hard lattice plane did not. In addition, the distributions of the residual stress in the depth direction were measured using a strain scanning method with hard synchrotron X-rays and neutrons.

Key words: Water-jet peening, X-Ray stress measurement, Synchrotron, Stainless steel, Residual stress

1 緒 言

オーステナイト系ステンレス鋼の機械加工や溶接による引張り残留応力は応力腐食割れの原因となり、強度や機器の保全に係わる問題として軽視することはできない。その残留応力の改善法として、ショットピーニング（以下、SP）¹⁾、レーザーピーニング（以下、LP）²⁾、ウォータージェットピーニング（以下、WJP）³⁾などが利用されている。SPは簡便な応力改善法としては有用であるが、原子炉内の水中の構造部材への適用は難しい。LPおよびWJPは水中でも適用できることから原子炉内の溶接や機械加工による引張残留応力の改善に利用されている。LPはレーザによるプラズマによる衝撃波を利用し、形成される残留応力はレーザーパルスの施工方法に依存する。他方、WJPではノズルからのキャビテーションによるバブルの崩壊衝撃波を利用している。両者ではメカニズムが異なるために、その残留応力は施工方法により異なることが予想される。特に、WJPは炉内構造物への広い適用実績があり、⁴⁾その残留応力の特性を明らかにすることは発電設備の安全と保全にとって重要である。

一方、オーステナイト系ステンレス鋼は、結晶弾性異方性の大きい材料特性を持ち、残留応力にも回折面依存性がある。^{5), 6)}弾性異方性の大きい材料が熱時効を受けたとき、ピーニングによる圧縮残留応力が、どのような挙動をするのかについて不明な点が多く、その残留応力の特性を明らかにする必要がある。

本研究ではオーステナイト系ステンレス鋼を対象に、

WJPによる残留応力の特性を明らかにするために、高エネルギー放射光および中性子を用いて深さ方向の残留応力分布を測定した。また、773Kの大気中にて熱時効した試験片に対して、表面の残留応力状態の熱時効時間依存性を明らかにした。さらに、WJP処理したままの残留応力と1000h熱時効した残留応力の回折面依存性についても評価、検討したので報告する。

2 実験方法

2・1 試験片

試験片の材料は、平均粒径55 μ mのオーステナイト系ステンレス鋼SUS316Lである。試験片の寸法を長さ110mm、幅20mm、厚さ15mmに機械加工により仕上げ、さらに#400のエメリーで研磨した後、WJP処理を施した。

WJPの施工条件は、噴流速度48 ℓ /min、施工時間40min/m、施工角度90degとし、ノズルを試験片幅(20mm)の中心に位置して長手方向に移動した。試験片の両端10mmはそれぞれ固定に使用しており、実際の施工範囲は長手方向中心に約80mmとなる。なお、WJP処理は1パスである。試験片の外観をFig. 1に示す。WJPによりややピーニング面に粗さが見られる。

WJPにより形成された圧縮残留応力の熱的安定性を評価するために、試験片の長手方向に長さ20mmで切断して試験片のブロックとした。次に、それらの試験片を大気中にて温度773Kで1, 10, 100および1000hの時間で保持し、熱時効した試験片を用意した。

残留応力の深さ方向分布を測定した試験片については、

[†] 原稿受理 平成24年11月12日 Received Nov. 12, 2012 ©2013 The Society of Materials Science, Japan

* 正会員 新潟大学教育学部技術科 〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町, Dept. of Tech. Fac. of Education, Niigata Univ., Nishi-ku, Niigata, 950-2181

** 正会員 日本原子力研究開発機構 量子ビーム応用研究部門 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都, Japan Atomic Energy Agency, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148

*** 学生会員 徳島大学大学院 〒770-8506 徳島市南常三島町, The Univ. of Tokushima, Minamijosanjima-cho, Tokushima, 770-8506

Fig. 1 Water jet peened specimen.

熱時効と同様に試験片の長手方向に長さ 20mm で切断して、放射光および中性子の透過性を考慮して放電加工にて厚さを WJP 後に 8mm にした。

2・2 実験室系 X 線応力測定

実験室系 X 線（以下、ラボ X 線）により WJP 試験片の表面の残留応力を測定した。測定条件の詳細を Table 1 に示す。特性 X 線は Mn- $K\alpha$ を使用し、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の γ -Fe の 311 回折を利用した。本条件は、回折角 2θ が高回折角かつ回折強度も高く、応力測定の精度および効率がよい。応力測定は並傾法で、 $\sin^2\psi$ の値は 0 ~ 0.6、ステップ 0.1 の 7 点から 2θ - $\sin^2\psi$ 線図を作成した。

平面応力状態を調べるために、応力の測定方向は、0deg (α_x), 45deg (α_{45}), 90deg (α_y) の 3 方向について測定した (Fig. 1 を参照)。

X 線応力測定の領域を制限するために、測定部に塩化ビニルテープにより $4 \times 4 \text{ mm}^2$ のマスキングを施した。これにより同一照射領域の応力を測定できる。

2・3 放射光および中性子応力測定

残留応力の回折面依存性を明らかにするには、多数の回折面を用いて残留応力を測定する必要がある。ラボ X 線では多数の回折面を測定することは困難なので、高エネルギー X 線を利用できる大型放射光施設 SPring-8 で応力測定を実施した。なお、放射光による応力測定で利用したビームラインは BL02B1 である。

無ひずみの格子面間隔 d_0 によらない測定法として $\sin^2\psi$ 法がある。しかし、WJP を施した面は、表面から深さ方向に急激な応力勾配を持つので、高エネルギー X 線

Table 1 Conditions for X-ray stress measurement.

Measuring method	$\sin^2\psi$ method
Optics	Parallel beam
Divergent angle of slits	0.64 deg
Irradiation area	$4 \times 4 \text{ mm}^2$
Target	Mn- $K\alpha$
Tube voltage	30 kV
Tube current	10 mA
Diffraction	γ -Fe, 311
Diffraction angle $2\theta_0$	152.32 deg
Scanning angle 2θ	144.0 ~ 160.0 deg
Scanning step	0.1 deg/step
$\sin^2\psi$	0.0 ~ 0.6 (0.1 step)
Preset time	1 sec
Stress constant K	-300 MPa/deg

Table 2 Conditions for constant penetration depth method with hard synchrotron X-rays.

Beamline	BL02B1 (SPring-8)
Wavelength	17.191 pm
Divergent slit	$0.2 \times 2 \text{ mm}^2$
Receiving slit	$0.2 \times 5 \text{ mm}^2$
Effective depth T	30 μm
Linear absorption factor μ	5.84 /cm

は侵入深さが大きく、 ψ 角により侵入深さが変化するために応力勾配の影響を受け $\sin^2\psi$ 線図は非線形となる。⁷⁾ 加えて、多数の回折面を用いる場合、それぞれの回折角 2θ により侵入深さが異なり、応力値をそのまま比較することができない。

その解決策として、本研究では侵入深さ一定法による応力測定を採用した。⁸⁾ ゴニオメータの軸を制御することで、応力測定方向の χ 軸が変化しても X 線侵入深さを一定に保つように回折測定方向の ω 軸を設定する。X 線侵入深さ T を 30 μm に設定した後、 ω に対して次式により χ の値を決定する。

$$\cos \chi = \frac{\sin \omega + \sin (2\theta - \omega)}{\sin \omega \sin (2\theta - \omega)} \mu T \quad (1)$$

ただし、 μ は線吸収係数である。 χ および ω 軸と ψ 角との関係は、

$$\cos \psi = \cos \chi \cos (\theta - \omega) \quad (2)$$

となる。具体的には、 $\sin^2\psi$ の値の範囲と点数に対応する適当な ω と χ の組み合わせを用意する。

放射光は、粗大粒を持つ材料では回折プロファイルの乱れにより測定精度が低下する。それに対して中性子は、高エネルギー X 線よりも深い侵入深さを持ち、ビームの発散があるために粗大粒の影響も少ない利点がある。残留応力の深さ方向の分布については、ひずみスキャンニング法を用いて非破壊的に測定することができる。⁹⁾ 中性子ひずみスキャンニングは、日本原子力研究開発機構研究炉 JRR-3 の残留応力測定装置 RESA-II を利用した。Table 3 に中性子測定条件をまとめた。大凡の目安として、回折ピークを Gauss 関数で近似したときの回折ピーク高さが 150 カウントになるように測定時間を決定した。ピーニング面から裏側まで透過型ひずみスキャンニング法により残留応力を測定した。測定位置は、0.5, 1, 1.5, 2, 3, 4, 5, 6 および 7mm の計 9 点で測定した。

Table 3 Neutron diffraction conditions for stress measurement of WJP specimen.

Nuclear reactor	JRR-3 (JAEA)
Apparatus	RESA-II
Neutron wavelength	183.524 pm
Linear detector	256 ch, 0.053614 deg/ch
Slit sizes	$1 \times 10 \text{ mm}^2$
Diffraction	γ -Fe, 311
Diffraction angle $2\theta_0$	115.7614 deg
Lattice constant a_0	3.593387 Å
Diffraction elastic constants	$E_{311} = 182.47 \text{ GPa}$ $\nu_{311} = 0.3067$

この中性子によるひずみスキャンニング法とは別に、放射光によるひずみスキャンニング法による残留応力の深さ方向分布も同一材で測定した。利用したビームラインは、SPRING-8 の日本原子力研究開発機構専用ビームライン BL22XU である。測定条件を Table 4 に示す。表面効果および粗大粒対策として、回転ひずみスキャンニング法¹⁰⁾を用いて測定した。

以上の応力測定に使用した回折面 ($h k l$) の回折弾性定数については、SUS316 の単結晶のスティフネス c_{ij} ¹¹⁾ から Kröner モデル¹²⁾を用いて計算した。なお、Kröner モデルによる回折弾性定数を web から入手できるようになっている。¹³⁾ また、WJP 試験片の残留応力は約 1.5mm 厚さの表面層の塑性変形による残留応力であり、厚さ方向に大きな残留応力が生じる要因がないことから、本研究における応力の計算は、すべて平面応力状態として求めた。

3 実験結果および考察

3・1 WJP による残留応力の分布

試験片を切断して熱時効する前に、WJP 試験片のピーニング面の残留応力分布を測定した。試験片中央から長手方向に $\pm 30\text{mm}$ の範囲で試験片長手方向の残留応力 σ_x を測定した。その結果を Fig. 2 (a) に示す。Fig. 2 (a) からわかるように、測定した中心から $\pm 30\text{mm}$ の範囲では、約 $-500 \pm 50\text{MPa}$ の残留応力が形成されている。ピーニング面は塑性変形により微細化され粗大粒の影響もなく、精度よく残留応力が測定できた。

一方、試験片の幅方向の残留応力 σ_x の分布を測定した結果が Fig. 2 (b) である。噴流ノズル直下を頂点として、圧縮残留応力が試験片幅方向に行くに従い低下する。Fig. 2 (b) からわかるように、ノズル中心から進行方向垂直に $\pm 4\text{mm}$ の範囲では中心部の圧縮残留応力の 9 割程度となる。

以上のことから、WJP による圧縮残留応力の領域がノズル進行方向に形成され、その幅は 8mm 程度であることを確認した。ただし、この結果は幅 20mm の試験片の場合であり、試験片の幅がより大きくなれば、WJP による有効幅は 8mm よりも広がる可能性もある。³⁾

放射光によるひずみスキャンニング法で測定した WJP 試験片の深さ方向への残留応力分布を Fig. 3 (a) に示す。WJP 面には圧縮残留応力が導入され、その残留応力は内部に向かい急激に増加し、深さ 1mm から引張り側に変化し、さらに背面に向かい減少する。放射光による測定では、ゲージ体積が小さく高い空間分解能を持つために、表面近傍の大きい応力勾配にもかかわらず応力を測定でき、Fig. 2 のラボ X 線の測定値と同程度の残留応力が得られている。特に、表面付近は塑性変形により結晶が微

(a) Axial position

(b) Width position

Fig. 2 Distributions of residual stresses in SUS316L with WJP.

細化しており、粗大粒の影響がなく放射光においては有利な領域である。

しかし、WJP による塑性変形の影響を受けない深さになると、放射光による半価幅 (FWHM) は大きくなればつきが現れ、粗大粒の影響で正確なピーク決定ができなかった。Fig. 3 (a) の放射光による半価幅から、表面から深さ 1mm 程度が WJP による影響層と判断できる。深さ 1.5mm 以降においては、粗大粒の影響から回折プロファイルの乱れがあり、放射光による半価幅は大きく変動する。

一方、中性子回折によりひずみスキャンニング法で測定した WJP 試料の深さ方向の残留応力分布を Fig. 3 (b) に示す。残留応力の分布を見ると、表面に約 -150MPa の圧縮残留応力が形成され、残留応力が圧縮から引張りになる付近を目安に考えると、WJP による影響層は応力分布から深さ約 1.0mm と思われる。中性子法による表面付近の圧縮残留応力が、放射光の残留応力分布と比較して小さな値になったのは、中性子法のゲージ体積が大きく表面付近の大きな応力勾配の平均値が測定されたためである。また、中性子回折曲線の半価幅の変化では、

Table 4 Conditions for strain scanning method with hard synchrotron X-rays.

Beamline	BL22XU (SPRING-8)
Wavelength	18.660 pm
Divergent slit	1.0×0.2 mm ²
Receiving slit 1, 2	1.0×0.2 mm ²
Rotation speed	0.2 Hz
Diffraction	$\gamma\text{-Fe}$, 331

Fig. 3 Distribution of residual stress and FWHM in the direction of depth.

WJPによる塑性変形層を明瞭に判断することができない。この原因は、中性子ビームの発散が大きいために結晶子の乱れによる回折線の拡がりの変化を捉えにくいと考えられる。WJP表面下2.0mmより深い所の内部応力については急激な応力勾配はないので、中性子ひずみスキャンニングでは、粗大粒に影響されず十分に安定して残留応力の分布を測定できる。

中性子および放射光による測定結果を総合すると、WJPの残留応力は、表面で約-500MPaの圧縮であり、圧縮残留応力層は表面から約1.0mmの深さとなる。内部には150MPa程度の引張りが生じ、背面に向かい残留応力が減少する。また、311回折面（機械的応力に近い）による測定では、ピーニング方向による残留応力の差は小さく等2軸応力状態に近い。

3・2 残留応力の熱的安定性

WJPの目的は、表面に圧縮残留応力を導入して応力腐食割れを防止することである。しかし、WJPによる圧縮残留応力が設備使用（熱時効）により緩和されてしまえば、圧縮残留応力による応力腐食割れの防止効果が失われてしまう。ゆえに、WJPによる圧縮残留応力の熱的安定性について調べる必要がある。

大気中773Kにて0, 1, 10, 100, 1000hの熱時効を施した各WJP試験片の残留応力を測定した。WJP方向

を x として、0deg(x)から45deg方向および90deg(y)についてラボX線により応力測定を行い、WJPによる残留応力の平面応力状態を解析した。WJPの方向と応力方向の定義はFig. 1と同じである。なお、測定場所による応力値のバラツキも心配されるので、4箇所の残留応力を測定し平均を求めた。

Fig. 4に圧縮残留応力の熱時効による変化を応力だ円で示している。773Kの熱時効によっても残留応力の応力楕円にあまり変化はなく、ほぼ等2軸応力状態が保たれている。なお、本実験に用いた311回折は機械的応力を与える回折面である。また、実際の原子力発電設備では、773Kよりも低い使用温度になるので、この結果を越える残留応力の緩和は考えられない。ゆえに、WJPによる残留応力は、熱時効を受けても全方位に対して圧縮残留応力が保たれており、全方位ピーニングの効果を発揮できる優れた残留応力改善方法である。

3・3 残留応力の回折面依存性

オーステナイト系ステンレス鋼においては、 γ -Feの311回折は粒間ひずみの影響が小さく、機械的応力に近い応力測定ができる利点を持っている¹⁴⁾。しかし、弾性異方性の大きいオーステナイト系ステンレス鋼では、回折面によっては残留応力に差が生じることが指摘されている^{5), 6)}。WJPによる残留応力の回折面依存性については研究されていないので、WJPによる残留応力およびその熱時効後の回折面依存性について実験することは意義がある。

前述のことを考察するために、まず、WJPを施したままの試験片および1000hの熱時効後の試験片に対して各回折面を利用して放射光による侵入深さ一定法で測定した残留応力をFig. 5に示す。残留応力の回折面依存性を検討するために、Krönerモデルで計算した回折弾性定数 E で各回折格子面の残留応力を整理した。Fig. 5の各回折面による残留応力の値は、いずれもX線侵入深さ30 μ mの値であり、回折面による差はない。

Fig. 5(a)に示すWJPをしたままの試験片の結果を見ると、400回折や620回折のように回折弾性定数 E の小さい回折面では、残留応力はピーニング方向およびそれに垂直方向で差がない。この傾向は、機械的弾性定数に

Fig. 4 Change in stress ellipse with thermal aging.

等しい311, 420回折および531回折まで保たれる。しかし、回折弾性定数 E の大きい220, 422回折からは、測定誤差も大きくなり、等2軸応力状態から離れる傾向が伺える。回折弾性定数 E の最も大きい222回折では、ノズル進行方向垂直の方が圧縮残留応力が大きい。これらの応力値はすべて同一の試験片から各回折面の残留応力を測定しているので、試験片による差はない。これまでの研究では、圧縮残留応力については回折弾性定数の大きい回折面を用いて測定した残留応力は、回折弾性定数の小さい回折面による残留応力よりも圧縮が小さい傾向を示しているが、⁹⁾本実験の結果では回折弾性定数の大きい回折面では残留応力の大小の分散が大きくなる。

一方、773Kで1000hの時効を行ったWJP試験片の残留応力をFig. 5 (b)に示す。回折弾性定数 E が機械的値よりも小さい回折格子面の残留応力はほぼ等2軸応力状態を保ち、回折弾性定数 E の大きい回折格子面の残留応力ではノズル垂直方向の圧縮残留応力に緩和が生じ、等2軸応力状態から外れる。回折格子面ごとの残留応力の傾向はピーニングしたままの試験片の結果とほぼ同じである。ただし、222回折ではノズル進行方向の圧縮残留応力が垂直方向の残留応力よりも大きくなっており、大

小関係が0hの測定値と逆転している。この原因については、試験片による差なのか、時効によるものかについては不明である。

WJP処理面の残留応力の挙動については、ヤング率の小さい回折面では等2軸圧縮残留応力の状態となり、機械的ヤング率よりも大きい回折面ではややノズル進行方向垂直の圧縮応力が小さくなる。また、やや回折弾性定数 E の高い方の圧縮残留応力が低い傾向を示す。また、熱時効によりヤング率の高い回折面はやや緩和傾向が見られるが、ヤング率の低い回折面では緩和はあまり見られない。WJPによる残留応力には回折面依存性がみられたが、熱時効による残留応力の変化には回折面依存性はみられない。回折面依存性は次に述べるすべりの機構に起因するので、熱時効には回折面依存性が現れない。

さて、前述のようにFig. 5の横軸に整理した回折弾性定数 E に対して、残留応力の回折面依存性がどのような原因で起きるのかについて検討する。塑性変形により残留応力が発生する。その塑性変形は、個々の結晶のすべり機構により生じる。結晶粒の中においては、すべり面とすべり方位により塑性変形が異なる。残留応力の回折面依存性を考察するために、Fig. 6のように各回折面 hkl を基礎面としてすべり方向 $[110]$ とすべり面 (111) のシュミット因子 $\cos\phi \cos\lambda$ を等価なベクトルについてすべて計算し、その平均値を求め、回折弾性定数 E で整理した。シュミット因子が大きい回折面は、その面に垂直な応力が負荷されたときに、回折面外のすべりが生じやすい回折面に相当する。ゆえに、シュミット因子が大きい回折面は塑性変形しやすい回折面である。それとは逆に、シュミット因子が小さい回折面は回折弾性定数も大きく、回折面外の滑りが少ない。また、弾性ひずみにより変形が戻る。Fig. 6に示すように、回折弾性定数 E が小さい面ほど、回折面に作用するひずみをすべり機構で解放し、Fig. 5に示すように方向による残留応力の差が少ない。これに対して、回折弾性定数の大きい回折面は回折面に作用するひずみをすべり機構で解放できないので、結晶粒ごとの残留応力（微視的残留応力）の差が大きくなる。このように残留応力の回折面依存性は、シュミット因子の回折面依存性に起因して現れると考えられる。

(a) As WJP

(b) After 1000 h

Fig. 5 Residual stresses measured by each diffraction.

Fig. 6 Relation between diffraction elastic constant and Schmid factor.

シュミット因子が大きい回折面は、その面に垂直な応力が負荷されたときに、すべりの影響を大きく受ける回折面に相当するので、塑性変形が生じやすい。それとは逆に、シュミット因子が小さい回折面は塑性変形の影響が小さいので、塑性変形後が生じにくい面に相当する。Fig. 6 に示すように、回折弾性定数 E が小さい面ほど、その回折面外のすべりが働きやすく、塑性変形しやすい。このようにシュミット因子が回折面の挙動に影響している。

4 結 言

本研究では、オーステナイト系ステンレス鋼の WJP による残留応力の特性を明らかにするために、残留応力の分布、熱時効による変化挙動および回折面依存性について検討した。

(1) WJP による残留応力は、ノズル進行方向にほぼ一様な圧縮が形成され、残留応力領域の幅は約 8mm である。また、残留応力はほぼ等 2 軸応力状態を示す。大気中で 773K で保持して残留応力の緩和と応力状態の変化を調べた。311 回折においては、明確な圧縮残留応力の減少は見られず、等 2 軸応力状態を維持していた。

(2) 放射光および中性子を用いて WJP 試験片の残留応力分布をひずみスキャンニング法で測定した。表面の応力勾配の大きい領域では、放射光による測定が適しており、内部の粗大粒部では中性子による方法が適していた。ピーニング領域は表面から 1.0mm 程度、表面で -500MPa、深さ 1.5mm で 200MPa の最大応力を示す。内部においてもほぼ等 2 軸応力状態である。

(3) 773K で 1000h までの残留応力の応力状態を調べた結果、残留応力の大きな変化は見られず、この熱時効による応力緩和は認められなかった。

(4) 高エネルギー放射光を利用して多数の回折面により残留応力を測定した。測定された残留応力を Kröner モデルによる回折弾性定数 E で整理すると、回折弾性定数 E が機械的値よりも大きい回折面では圧縮残留応力の分散が大きく、等 2 軸応力状態から外れる特徴がみられる。また、大気中で 773K に 1000h の熱時効材では、回折弾性定数 E が機械的値よりも小さい回折面では、残留応力の緩和はほとんどみられない。WJP による残留応力には回折面依存性がみられたが、熱時効による残留応力の変化には回折面依存性はみられない。WJP による残留応力の回折面依存性を説明するために、各回折面についてすべり方向 [110] とすべり面 (111) に関するシュミット因子の平均値を求め、回折弾性定数で整理した。回折弾性定数が小さい回折面はシュミット因子が大きく、回折面外すべりにより塑性変形を吸収し易い。回折弾性定数が大きい回折面はシュミット因子が小さく、回折面外のすべりが少なく、面外方向の残留応力の分散が大きくなる。

本研究の中性子応力測定は平成 22 年度原子力機構総合共同研究一般共同研究 (No. 10176) の援助によるものであり、中性子回折実験に際して原子力機構施設利用共同研究大学開放研究室の支援をいただいた。また、放射光実験は平成 20 年度原子力機構施設共用利用課題 (No. 2008A-E12) および高輝度光科学研究センターの一般利用課題 (No. 2011A1048) の援助を得た。本研究を遂行するにあたり、文部科学省科学研究費補助金基盤研究 (C)

No. 21560081 の支援をいただいた。以上、記して心より感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) S. Nishikawa, S. Nakata, Y. Horii, I. Komura and A. Yamaguchi, "Stress relaxation behavior during thermal aging of compressive residual stress by shot peening", Technical Review of Japan Power Engineering and Inspection Corporation, Vol.4, pp.28-32 (2008).
- 2) Y. Sano, N. Mukai, M. Yoda, K. Ogawa and N. Suezono, "Underwater laser shock processing to introduce residual compressive stress on metals", Materials Science Research International, STP, No.2, pp.453-458 (2001).
- 3) S. Okido, M. Tsubaki, A. Chiba, W. Sagawa and T. Matsuda, "Application of jet peening to the shroud components in BWR power plant and residual stress measurement after WJP", Maintenance, Vol.9, No.1, pp.26-31 (2010).
- 4) M. Sakashita, H. Hanaki, Y. Ogawa, S. Sato and A. Kanno, "Highly-reliable maintenance technologies for aged nuclear power plants", Hitachi Hyoron, Vol.91, No.2, pp.204-205 (2009).
- 5) K. Suzuki and T. Shobu, "Residual microstress of austenitic stainless steel due to tensile deformation", Materials Science Forum, Vol.652, pp.7-12 (2010).
- 6) K. Suzuki and T. Shobu, "Residual stresses in austenitic stainless steel due to high strain rate", Materials Science Forum, Vol.681, pp.287-283 (2011).
- 7) K. Tanaka, K. Suzuki and Y. Akiniwa, "Evaluation of residual stresses by X-ray diffractions - Fundamentals and applications", p.125 (2006) Yokendo Ltd, Tokyo.
- 8) Y. Akiniwa, K. Tanaka, K. Suzuki, E. Yanase, K. Nishio, Y. Kusumi and H. Okado, "Evaluation of residual stress distribution in shot-peened steel by synchrotron radiation", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.52, No.7, pp.764-769 (2003).
- 9) M. T. Hutchings, P. J. Withers, T. M. Holden and T. Lorentzen, "Introduction to the characterization of residual stress by neutron diffraction", p.78 (2005) Taylor & Francis.
- 10) K. Suzuki, T. Shobu, J. Shibano and K. Uesugi, "Stress measurement of coarse grain using hard synchrotron X-rays", Bulletin of the Faculty of Education, Niigata University, Series Natural Sciences, Vol.1, No.2, pp.157-163 (2009).
- 11) H. M. Ledbetter, "Predicted single-crystal elastic constants of stainless-steel 316", British Journal of NDT, Vol.23, pp.286-287 (1981).
- 12) E. Kröner, "Berechnung der elastischen Konstanten des Vierkristalls aus den Konstanten des Einkristalls", Zeitschrift Physik, Vol.151, pp.504-518 (1958).
- 13) http://x-ray.ed.niigata-u.ac.jp/xdatabase/Kroner_model/kroner_c.html
- 14) SO/TTA 3, "Polycrystalline materials determinations of residual stresses by neutron diffraction", ISO, Geneva, Switzerland (2001).