水中レーザアブレーションによる小口径管内面の残留応力改善

正員 佐野 雄二 (東芝) 非会員 依田 正樹 (東芝)
非会員 向井 成彦 (東芝) 非会員 島村 光明 (東芝)
非会員 小野 芳明 (東芝) 非会員 金澤 寧 (東芝)

Residual Stress Improvement on Inside Wall of Small-Diameter Pipe by Underwater Laser Ablation

Yuji Sano, Member (Toshiba Corp.) Masaki Yoda, Non-member (Toshiba Corp.)
Naruhiko Mukai, Non-member (Toshiba Corp.) Mitsuki Shimamura, Non-member (Toshiba Corp.)
Yoshiaki Ono, Non-member (Toshiba Corp.) Yasushi Kanazawa, Non-member (Toshiba Corp.)

The authors showed that the residual stress on the inside wall of a pipe with inner diameter of 15 mm could be improved by an underwater laser ablation process, in which laser pulses with energy of 130 mJ from a Q-switched and frequency-doubled Nd:YAG laser were irradiated with diameter of 0.7 mm and with 18 or 27 impacts for every 1 mm² on material surface. A compact total-reflection mirror was invented, which reflected laser pulses in water with broad angle of incidence, and a device of 14 mm in outer diameter was assembled using the mirror in order to irradiate laser pulses to the inner surface of the pipe. The laser irradiation condition was optimized through experiments with Alloy 600 plates, and was applied to the cylindrical test piece of 15 mm in inner diameter. The results showed that a compressive residual stress was built on the inner surface of the test piece and the effect penetrated up to 1 mm from the surface. The compressive residual stress on surface is expected to prevent stress corrosion cracking (SCC) of structural materials in corrosive environments and to enhance fatigue strength of components under cyclic load.

キーワード: レーザ, アブレーション, 水中, 残留応力, 管内面

Keywords: laser, ablation, underwater, residual stress, pipe inner surface

1. はじめに

レーザアブレーションは、固体へのレーザ照射強度がある閾値以上になると、固体表面から中性原子、イオン、クラスター、電子などが急激に放出される現象であり、微細加工、薄膜形成、超微粒子の創成など、種々の分野に応用が広がっている⁽¹⁾。レーザアブレーションによって固体表面から放出された粒子は、逆制動放射によってレーザのエネルギーを吸収し、プラズマ化するが、水中では水の慣性が働いてプラズマの膨張が妨げられるため、その圧力は数 GPa に達することが知られている⁽²⁾⁽³⁾。

我々は、水を良く透過する Q スイッチ Nd:YAG レーザの第 2 高調波 (波長 532 nm, パルス幅 7~8 ns) を水中の金属材料に照射して表面に高圧のプラズマを発生させ、その衝撃作用を利用して材料表面の残留応力を改善するプロセスを開発した⁽⁴⁾⁽⁵⁾。このプロセスは水を介してレーザを照射するため、レーザアブレーションで問題となる

飛散粒子による光学系の損傷は全く発生しない。従って、被施工物との距離を保つことが難しい狭い部位に適したプロセスであり、原子炉内の狭隘な箇所にある溶接構造物の応力腐食割れ (SCC) 対策として適用が進められている⁽⁶⁾。

配管などの円筒状構造物の内面については、内径が小さくなるにつれて光学系の配置が困難となり、30 mm 以下の配管についてはこれまで装置化が難しかった。このため我々は、水中で使用できるコンパクトな反射ミラーを考案し、外径 14 mm の円筒状施工装置を試作した。さらに、内径 15 mm の Alloy 600 製円筒状試験片にレーザ照射を行い、内面の残留応力改善が可能なことを示した⁽⁷⁾。

ここでは、試作した水中反射ミラーおよび施工装置の概要を述べるとともに、水中レーザアブレーションによる残留応力改善実験とその結果について報告する。なお本報では、水中レーザアブレーションによる残留応力改善のプロセスを「レーザピーニング」と呼ぶことにする。

2. レーザピーニングの概要

<2・1> **残留応力改善の原理** 材料に強いレーザーパルスを照射すると、材料の表層がアブレーションされ、表面にプラズマが発生する。水中では水の慣性が強く働いてプラズマの膨張が妨げられるため、狭い領域にレーザーのエネルギーが集中する。その結果、プラズマの圧力は数 GPa に達し⁽²⁾⁽³⁾、この圧力によって衝撃波が発生して材料中を伝播する。衝撃波による動的な応力が材料の降伏応力を超えると塑性変形が生じ、周囲の拘束によってレーザーを照射した表面に圧縮残留応力が形成される⁽⁹⁾。

<2・2> **主要パラメータ** レーザピーニングは、水中アブレーションで発生した高圧プラズマを利用して、材料表面をわずかに塑性変形させることにより、残留応力を改善するものである。このため、材料の降伏応力を超える高い圧力のプラズマを発生させる必要がある。プラズマの圧力を決定する主なパラメータは材料表面に照射されるレーザーの出力密度であるが、レーザーパルスの時間波形はほぼ一定なため、「パルスエネルギー： E_p 」と「照射スポット径： D_p 」が実用上のパラメータとなる。

また、材料の加工履歴（塑性変形の履歴）も残留応力に影響を与えるパラメータである⁽⁹⁾。加工履歴はレーザーのスキャン方法によって決定され、通常はある面積を一定のピッチで一様に照射処理するため、単位面積あたりのレーザーの照射パルス数（本報では「照射回数： N_p 」と呼ぶ）が第3のパラメータとなる。なお、加工履歴には切断や表面研磨などの材料調製が含まれるが、標準的な条件でレーザーピーニング施工を行った場合、施工後の残留応力分布は材料調製時の加工履歴に依存しないことが示されている⁽⁹⁾。

以上より、レーザーピーニングの効果を決定するパラメータとして、パルス毎のプロセスを支配する「パルスエネルギー： E_p 」および「照射スポット径： D_p 」と、材料の加工履歴を決定する「照射回数： N_p 」の3つを考える。

<2・3> **予備実験** 円筒内面のレーザーピーニングを行う前に、Alloy 600 の平板試験片を使用してレーザーの照射条件を最適化するための実験を行った。Alloy 600 は Ni 76%, Cr 16%, Fe 8% を主成分とする Ni 基合金であり、耐食性および耐熱性に優れるため、ステンレス鋼とともに原子炉内の構造材として使用されている。

実験装置の構成を図1に、試験片の形状とレーザーの照射方法を図2に示す。レーザー発振器には Continuum 社の Powerlite 9010（波長 532 nm, 繰返し 10 Hz, パルス幅 7 ns）を使用し、リニアステージで水中の試験片を2次元的にスキャンしてレーザーを照射した。試験片の形状は 40 mm × 100 mm × 15 mm であり、表面状態を一定に揃えるため試験片の長手方向（Y 方向）にグラインダ加工を施した。

X線応力測定法⁽⁹⁾により、グラインダ加工後の試験片表面の残留応力を測定したところ、X 方向が約 100 MPa（引張）、Y 方向が約 -80 MPa（圧縮）であった。

図1 平板用レーザーピーニング装置の構成

Fig.1. Setup of laser peening equipment for plate.

図2 Alloy 600 試験片およびレーザーの照射方法

Fig.2. Alloy 600 test piece and scheme of laser irradiation.

照射回数 (N_p) を 36 パルス/mm² とし、パルスエネルギー (E_p) を 100~160 mJ, 照射スポット径 (D_p) を 0.6~1.2 mm の範囲で変化させた実験を行い、表面の残留応力を測定した。ピーク出力密度 ($4E_p/(\pi D_p^2 \cdot t_p)$, t_p : レーザのパルス幅) で整理した結果を図3に示す。ピーク出力密度 30~50 TW/m² のレーザーパルスを照射することにより、X, Y 両方向とも -200 MPa を超える十分な圧縮残留応力が表面に形成されることがわかった。なお、Y 方向は X 方向より大きな残留応力値（絶対値）が得られているが、この現象はレーザーのスキャン方向に依存するものであり、初期の表面残留応力を反映するものではないことが示されている⁽⁹⁾。

図3 Alloy 600 平板の残留応力改善結果

Fig.3. Residual stress improvement result for Alloy 600 plate.

これらの実験結果から、レーザピーニングにより十分な残留応力の改善効果が得られるパラメータ範囲として、 $E_p = 100 \sim 160 \text{ mJ}$, $D_p = 0.6 \sim 0.8 \text{ mm}$, $N_p \geq 18 \text{ パルス/mm}^2$ を得た。

3. 管内面施工装置の開発

<3・1> **施工装置の概要** 内径 15 mm の管内面にレーザを照射するため、外径 14 mm の二重円筒構造の施工装置を試作した。試作した装置の構成を図 4 に示す。先端に反射ミラーを内蔵した外径 14 mm の外筒に、集光レンズを装着した外径 10 mm の内筒を挿入し、固定する。レーザ光は装置上端から入射し、内筒の中心軸上を通って集光レンズに達する。レンズで集光されたレーザ光はミラーで径方向に反射され、管内面に照射される。

図 4 管内面用レーザピーニング施工装置
Fig.4. Laser peening device for pipe inside wall.

内筒を軸方向に移動させることにより、レンズとミラーおよび施工点との距離を変え、施工点におけるレーザ照射スポット径の調整を行う。

試作装置の施工範囲は、管の端面から内側に 500 mm であり、施工面上でのレーザ光の走査は、反射ミラーを外筒とともに回転させながら装置全体を上下に駆動することにより、管内面の施工対象部をスパイラル状にレーザ照射する方式とした。

レーザ照射中は外筒と内筒の間に純水を満たして光路に沿って流すことにより、アブレーション飛散物による反射ミラーのダメージを防止するとともに、光路から気泡や微粒子を排除してレーザ光の散乱を防いだ。

<3・2> **水中全反射ミラーの開発** 今回試作した施工装置は、外径 14 mm という寸法的な制限から、集光レンズと施工点の間に反射ミラーを配置する構造を採用した。従って、反射ミラーは集光途中の強いレーザ光に水中で晒されるため、特別な工夫が必要となる。

まず、ミラーへのレーザ入射角を大きくとって反射面積を稼ぎ、反射面でのレーザのエネルギー密度を可能な限り下げる設計とした。反射面は面積 20 mm^2 (長軸 8.7 mm × 短軸 2.9 mm) の楕円となり、集光レンズ入射面のレーザビーム面積 (28 mm^2) の約 70% となった。反射面では入射光と反射光の重畳を考慮する必要があるため、ミラー反射面のレーザエネルギー密度是集光レンズ入射面の約 3 倍となった。

また、レンズを通過した光は集光されつつ反射ミラーに入射するため、入射角はある角度範囲を持つ。一般に使用されている誘電体多層膜ミラーは各層からの反射光の干渉効果を利用しているため、広い入射角範囲に対して反射率の高いミラーを製作することは難しい。このため、水中で使用でき入射角に依存しない新しい概念の反射式ミラーを開発し、使用した。

<3・2・1> **動作原理** 光が屈折率 n_1 の媒質 1 から屈折率 n_2 の媒質 2 へ入射するとき、入射角 θ_1 と屈折角 θ_2 の間には、次式に示すスネルの法則が成立する。

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_2 / n_1 \quad (1)$$

ここで $n_1 > n_2$ であれば、臨界角 $\theta_{c1} = \sin^{-1}(n_2/n_1)$ が定義でき、入射角 θ_1 が臨界角 θ_{c1} を超えると媒質 1 と 2 の境界面で入射光は全反射される。

媒質が 3 層で構成され $n_2 > n_1 > n_3$ の関係を満たす場合、媒質 1 と 2 の境界面 1 では入射角によらず全反射は生じないが、 $\theta_2 > \theta_{c2} = \sin^{-1}(n_3/n_2)$ のとき媒質 2 と 3 の境界面 2 で光の全反射が起きる。 $\sin \theta$ は $0 \leq \theta < \pi/2$ の範囲で単調に増加するため、 $\sin \theta_2 > n_3/n_2$ のとき全反射が起きる。(1) 式より $\sin \theta_2 = (n_1/n_2) \sin \theta_1$ であるため、 $\sin \theta_1 > (n_3/n_1)$ のとき境界面 2 で全反射が生じる。すなわち、光が入射角 $\theta_1 > \sin^{-1}(n_3/n_1)$ で境界面 1 に入射すると、境界面 2 で全反射されることになる。

ミラーの素材として、可視領域のパルスレーザに対する耐力が大きく熱衝撃にも強い石英（合成フェーズドシリカ）を使用し、水/石英/空気の 3 媒質を考えると、Nd:YAG レーザの第 2 高調波（波長 532 nm）に対する屈折率は、常温でそれぞれ 1.33 (n_1)、1.46 (n_2)、1.00 (n_3) であり、上述の条件 $n_2 > n_1 > n_3$ を満足する。このとき、境界面 2 の臨界角 θ_{c2} は 43.2 度であり、光は境界面 2 に達する前に境界面 1 で屈折するため、境界面 1 への入射角は 48.8 度となる。

境界面 2 における光の全反射と屈折の様子を図 5 に示す。 $\theta_i > \sin^{-1}(n_3/n_1)$ のとき全反射が、 $\theta_i < \sin^{-1}(n_3/n_1)$ のとき屈折が生じる。

図 5 水中ミラーによる光の全反射と屈折
Fig.5. Total-reflection and refraction of light by underwater mirror.

<3・2・2> 構成と特徴 試作した全反射ミラーの概要を図 6 に示す。全反射ミラーは、金属製の円柱を斜めに切断した面に窪みを設け、厚さ 2 mm、面精度 $\lambda/10$ の石英板を接着して作成した。外筒と内筒の間から供給された純水は、外筒に設けたレーザの照射穴から噴出し、アブレーションで生じた微粒子を光路から排除する。

図 6 水中全反射ミラーの構成
Fig.6. Constitution of underwater total-reflection mirror.

レーザの光軸は 71.3 度の入射角で石英板の表面（境界面 1）に入射する。レーザはレンズで集光されつつミラーに入射するため、入射角 θ_i はある角度範囲（ $\pm \theta_L$ ）を持つ。ここで、 $\theta_L = \sin^{-1}(D/2f)$ であり、 D は集光レンズに入射するレーザのビーム径、 f は集光レンズの焦点距離である。今回の装置は、 $D = 6\text{ mm}$ 、 $f = 20.7\text{ mm}$ （片側空気、片側水雰囲気）であり、 θ_L は 8.3 度となる。従って、入射角は 63.0～79.6 度となり $\sin^{-1}(n_3/n_1) = 48.8$ 度を超えるた

め、レーザ光は石英板の裏面（境界面 2）で全反射され、外筒の照射穴を通して配管の内面に照射される。

境界面 1 では、屈折の他にレーザ光の反射が起きる。このとき、エネルギー反射率は次式によって計算される。

$$R_s = [\sin(\theta_i - \theta_2) / \sin(\theta_i + \theta_2)]^2 \tag{2}$$

$$R_p = [\tan(\theta_i - \theta_2) / \tan(\theta_i + \theta_2)]^2 \tag{3}$$

ここで、 R_s および R_p は、それぞれ s 偏光成分および p 偏光成分エネルギー反射率である。（2）および（3）式を使用して、境界面 1 におけるエネルギー反射率を求めると、 $R_s = 0.07$ 、 $R_p = 0.03$ となる。また、境界面 2 で全反射されたレーザ光は、再度境界面 1 を通過するが、その際にも同様な反射が起きる。これらの反射成分は本来のレーザ光と平行の位置関係となり、外筒によって遮られるため、伝送ロスとして考慮する必要がある。

4. 円筒内面の残留応力改善

<4・1> 実験装置および方法 実験に使用した装置の構成を図 7 に示す。レーザ発振器は Spectra Physics 社の Quanta-ray Pro（波長 532 nm、繰返し 60 Hz、パルス幅 8 ns）を使用した。レーザ光はエネルギー調整の後、アパーチャで 6 mm 径に整形され、施工装置に入射する。施工装置内では、集光レンズまでは空中を、集光レンズ以降レーザの照射点までは水中を透過する。

図 7 円筒内面用レーザピーニング装置の構成
Fig.7. Setup of laser peening equipment for pipe inside wall.

パルスエネルギーは、パワーメータで平均のレーザ出力を測定し、その値をレーザのパルス繰返し（60 Hz）で除するとともに、レーザ出力の測定点（施工装置入口）から施工点までの伝送ロス（ミラーの表面反射：約 10%）を補正することによって求めた。ここでは、パルスエネルギーを 130 mJ（平板試験片の結果の中間的な値）に調整し、実験を行った。なお、レーザの伝送ロスはミラーに入射するレーザの偏光によって 6%から 14%まで変化するが、この実験ではターンテーブルを使用して試験片

を回転させているため、光学的な位置関係は変化せず、偏光および伝送ロス是一定となる。

照射スポット径は、集光レンズ位置（高さ）とスポット径の関係をあらかじめ実験で求め、集光レンズの位置を管理することにより決定した。本実験では、0.7 mm に設定した。図4および図6に示すとおり、レーザは円筒試験片の内面に大きな入射角（ 52.5 ± 8.3 度）で照射されるため、照射スポットの形は楕円状となる。そこで、面積が等しい円を考え、その直径を照射スポット径と定義する。従って、楕円の長軸（Z軸方向）の長さを h とすると、 $h \cdot (\cos \theta)^{1/2}$ が照射スポット径となる。ここで、 θ は施工点におけるレーザ光軸の入射角（52.5 度）である。

照射回数（単位面積あたりのレーザパルスの照射回数）は、ターンテーブルの回転速度とリニアステージの上下速度を制御することにより、任意の値に設定することができる。本実験では、18 および 27 パルス/mm² とした。

<4・2> 試験片 実験に使用した試験片の形状および寸法を図8に示す。二つ割り構造の試験片をボルトナットで一体に固定し、その状態で内面を施工した。施工終了後に試験片を分解し、表面の残留応力をX線応力測定法⁹⁾により求めた。また、残留応力の深さ分布は、電解研磨と応力測定を繰り返すことにより求めた。なお、試験片には不活性ガス雰囲気中で1173K（900℃）、2時間の熱処理を施し、試験片調製などの加工履歴による残留応力を予め除去した。

図8 Alloy 600 円筒試験片の形状と寸法
Fig.8. Shape and dimension of Alloy 600 cylindrical test piece.

<4・3> 実験結果および考察 施工条件の妥当性を確認するため、Alloy 600 円筒試験片（内径 15 mm）の内面にレーザピーニング施工を行い、表面の残留応力およびその深さ分布を測定した。結果を図9に示す。上の図は周方向（回転方向）を、下の図は軸方向の残留応力を示す。応力除去熱処理によりレーザ照射前の残留応力はほぼ 0 であるが、レーザ照射後は照射回数によらず表面から約 1 mm の深さまで圧縮残留応力が形成されている。なお、平板の結果（図3）と同様に円筒内面（表面）についても、レーザのスキャン方向（周方向）と垂直な方向の圧縮応力値が高くなる傾向にあった。

図9 Alloy 600 円筒内面の残留応力改善結果
Fig.9. Residual stress improvement result for inside wall of Alloy 600 pipe.

<4・3・1> 水中プラズマの圧力 Fabbro らは、水中アブレーションで発生したプラズマの圧力について検討を行い、プラズマの圧力はレーザ出力密度の 0.5 乗に比例することを示している¹⁰⁾。今回の実験は、パルスエネルギー 130 mJ、パルス幅 8 ns、スポット径 0.7 mm であり、ピーク出力密度は 42 TW/m² である。オーステナイトステンレス鋼（SUS 304）に対して実施した同様の実験では、ピーク出力密度 45 TW/m² でプラズマの圧力は 2.5 GPa に達すると推定されている¹⁰⁾。従って、本実験においても、通常の金属材料の降伏応力を十分に超える圧力のプラズマが発生しているものと考えられる。

<4・3・2> 照射回数の影響 照射回数 18 パルス/mm²、スポット径 0.7 mm でレーザパルスを照射した場合、試験片表面の各点は平均して 6.9 回の照射を受ける。図9に示すとおり、照射回数を 27 パルス/mm²（10.4 回のパルス照射に相当）まで増やしても、表面の残留応力とその深さ分布はほとんど変化しない。従って、今回の条件（130 mJ, 0.7 mm）でレーザを照射した場合、Alloy 600 表面の塑性変形は 7 パルス（またはそれ以下）の照射で飽和すると考えられる。

<4・3・3> 施工時間 配管内面のレーザピーニング施工の場合、軸方向に施工装置を移動させながら反射ミラーを回転させることにより、内面をスパイラル状に連続施工することができる。従って、施工時間は、レーザ発振器のパルス繰返し、施工面積、および単位施工面積あたりの照射回数で決定される。

沸騰水型原子炉（BWR）の炉心シュラウドの予防保全工事に適用しているパルス繰返し 120 Hz のレーザシステム⁶⁾を使用し、18 パルス/mm² の照射回数で施工した場合、

1秒間の施工面積は 6.6mm^2 となる。内径 15mm の配管では、 1mm あたりの施工に7秒、 500mm の施工に約1時間を要することになる。

<4・3・4> **水中光学系の耐久性** 通常のアブレーションプロセスでは、飛散物によるレーザ照射光学系の汚れや損傷が問題になる場合がある。今回試作した装置は、レーザの照射位置（施工点）からミラー表面までの距離が最短で 3mm 程度であり、真空やガス雰囲気とした場合にはミラー表面の損傷が避けられない配置である。

水中のアブレーションでは、水による飛散物の遮蔽と冷却が期待できる他、水流を設けて飛散物を効果的に排除することが可能である。今回の実験においても、ミラー表面の汚れや損傷は全く認められず、水中プロセスの利点が活かされていることを確認した。

図10に、長さ 500mm の円筒試験片に対するレーザピーニング施工実験の様子を示す。

図10 Alloy 600 円筒内面のレーザピーニング
Fig.10. Laser peening of inside wall of Alloy 600 pipe.

5. 結言

Alloy 600 平板試験片を使用して、表面の残留応力改善に必要なレーザの照射条件を求めた。また、広い入射角範囲で使用できる小型の水中全反射ミラーを開発し、そのミラーを使用して外形 14mm のレーザピーニング施工装置を試作した。更に、内径 15mm の円筒試験片内面の施工を行うことにより、表面から深さ約 1mm にわたって残留応力の改善が可能なことを確認した。

レーザピーニングは、スケール除去などの前処理が一切不要であり、非接触で照射には反力が伴わないことから、遠隔での作業に適するという利点がある。このため、狭隘な部位に対する遠隔作業が必要とされる沸騰水型原

子炉（BWR）炉心シュラウドの応力腐食割れ（SCC）対策への適用が進められているが、細管内面の SCC 対策にも最適な施工法と考えられる。

また、表面の残留応力改善を行うと疲労強度や耐磨耗性の向上が期待できるため⁽¹⁰⁾、航空機、自動車、石油化学プラントなどではショットピーニングが利用されている。応力改善効果がより大きいレーザピーニングについても適用の検討が進められている⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。

（平成13年4月3日受付，平成13年7月23日再受付）

文献

- (1) 電気学会 レーザアブレーションとその産業応用調査専門委員会 編：「レーザアブレーションとその応用」，コロナ社（1999）。
- (2) R. Fabbro, et. al.: "Physical Study of Laser-Produced Plasma in Confined Geometry," J. Appl. Phys., **68**, p.775 (1990)。
- (3) Y. Sano, N. Mukai, K. Okazaki and M. Obata: "Residual Stress Improvement in Metal Surface by Underwater Laser Irradiation," Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B, **121**, p.432 (1997)。
- (4) N. Mukai, et. al.: "Laser Processing for Underwater Maintenance in Nuclear Plants," Proc. of 3rd Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-3), Kyoto, p.1489 (1995)。
- (5) 佐野雄二，他：「レーザーの水中照射による金属材料の残留応力改善メカニズム」，日本原子力学会誌，**42**，p.567 (2000)。
- (6) Y. Sano, et. al.: "Development and Application of Laser Peening System to Prevent Stress Corrosion Cracking of Reactor Core Shroud," Proc. of 8th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-8), Baltimore, ICONE-8441 (2000)。
- (7) 依田正樹，他：「レーザによる細管内面の残留応力改善技術の開発」，日本原子力学会「1999 春の年会」，J7。
- (8) 小畑稔，他：「パルス状レーザ照射による応力改善技術の開発 — SUS304 鋼に対する応力改善効果の検討 —」，材料，**49**，p.193 (2000)。
- (9) 日本材料学会 編：「X線材料強度学 — 基礎編・実験法編 —」，養賢堂（1973）。
- (10) ショットピーニング技術協会 編：「ショットピーニングの方法と効果」，日刊工業新聞社（1997）。
- (11) J. J. Ruschau, et. al.: "Fatigue Crack Growth Rate Characteristics of Laser Shock Peened Ti-6Al-4V," J. Eng. Mater. Technol., **121**, p.321 (1999)。
- (12) P. Peyre, et. al.: "Laser-Shock Processing of Aluminum-Coated 55Cr Steel in Water-Confinement Regime, Characterization and Application to High-Cycle Fatigue Behaviour," J. Mater. Sci., **33**, p.1421 (1998)。

佐野 雄二 (正員) 1952 年 5 月 18 日生まれ。1977 年東京工業大学大学院原子核工学専攻修士課程修了。同年、株式会社東芝入社。レーザ応用技術の開発に従事。現在、電力・産業システム技術開発センター主幹。日本原子力学会、レーザー学会、日本材料学会会員

依田 正樹 (非会員) 1959 年 4 月 23 日生まれ。1982 年東北大学工学部原子核工学科卒。同年日本原子力事業株式会社入社、1990 年株式会社東芝に合併。レーザを使用した保全・補修技術の開発に従事。現在、電力・産業システム技術開発センター主査。日本原子力学会会員。

向井 成彦 (非会員) 1963 年 1 月 15 日生まれ。1987 年電気通信大学大学院電気通信学研究科物理工学専攻修士課程修了。1990 年株式会社東芝入社。レーザ応用システムの開発に従事。現在、電力・産業システム技術開発センター主務。日本原子力学会会員

島村 光明 (非会員) 1963 年 12 月 1 日生まれ。1989 年早稲田大学大学院機械工学専攻修士課程修了。同年、株式会社東芝入社。原子炉の保全・補修装置の開発に従事。現在、電力・産業システム技術開発センター主務。日本原子力学会、日本ロボット学会、日本機械学会会員

小野 芳明 (非会員) 1971 年 10 月 11 日生まれ。1994 年早稲田大学理工学部機械工学科卒。同年、株式会社東芝入社。レーザを使用した原子炉の保全・補修装置の開発に従事。現在、京浜事業所原子炉機器部に所属。

金澤 寧 (非会員) 1963 年 7 月 14 日生まれ。1988 年北海道大学工学部機械工学科卒。同年、株式会社東芝入社。原子炉压力容器及び炉内構造物の設計および保全業務に従事。現在、原子力事業部原子力機器設計部主務。