レーザーピーニングによる原子炉構造物の応力腐食割れ対策*

佐野 雄二^{**}，向井 成彦^{**}，小畑 稔^{**}，加藤 裕美^{**}，山本 哲夫^{**}

佐野 雄二

向井 成彦

小畑 稔

加藤 裕美

山本 哲夫

Prevention of Stress Corrosion Cracking in Nuclear Power Reactor Components
by Laser Peening*

by SANO Yuji^{**}，MUKAI Naruhiko^{**}，OBATA Minoru^{**}，KATO Hiromi^{**}
and YAMAMOTO Tetsuo^{**}

キーワード

レーザー，ピーニング，残留応力，応力腐食割れ，原子炉

1. はじめに

国内外の原子力発電プラントでは，溶接部に応力腐食割れ（SCC; stress corrosion cracking）の発生が認められており，その対策として各種の予防保全・補修技術の開発および適用が進められている^{1, 2)}。

レーザーピーニング（LP; laser peening）は，短パルスのレーザーを照射したときの局所的な衝撃作用を利用して表面に圧縮の残留応力を付与する技術である。遠隔での非接触作業に適することから，原子炉構造物の応力腐食割れを未然に防止するための予防保全対策として，1999年から実機適用されている³⁾。

本稿では，レーザーピーニングの原理，特徴，効果を概説した後，原子炉構造物に適用するための施工システムと最新の技術開発成果をまとめる。

2. レーザーピーニングの原理と特徴

レーザーピーニングの原理を，図1を用いて説明する。

パルス時間幅が数 ns，ピーク出力密度が数十 MW/mm² の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，表面に高圧のプラズマが発生する。材料の表面に水膜がある状態でレーザーを照射すると，水の慣性でプラズマの膨張が妨げられるため，狭い空間にレーザーのエネルギーが集中する。その結果，プラズマのピーク圧力は数 GPa に達する^{4, 5)}。この圧力で材料の表層部は局所

図1 レーザーピーニングの原理

的な塑性変形を受け周囲に伸展しようとするが、材料内部の未変形部分の拘束により伸展できず、表面に高い圧縮残留応力が形成される⁹⁾。

プラズマを高圧化するためには、厚さ 0.1 mm 程度の水膜が必要である。原子炉構造物に適用する場合には炉水中の作業となるため、この条件は自動的に満たされる。また、1 パルスで照射できる面積は 1 mm² 程度であるため、レーザの照射位置をずらしながら多数のレーザパルスを順次照射し、必要な範囲をピーニング処理する。

ショットピーニングを始めとする他のピーニング技術は、多数のショットによる積算効果を利用しており、統計的なプロセスである。一方、レーザピーニングは、決められた手順でレーザパルスを照射するため、効果が確実に再現性が高いという特徴がある。また、レーザパルスのエネルギー等の諸条件を細かく制御することが可能であり、処理対象の材質や形状に応じて最適な条件で施工を行うことができる。

3. レーザピーニングの効果

残留応力の深さ分布に及ぼすレーザピーニングの効果を図 2 に示す⁷⁾。試験片には板厚 38 mm の SUS304 とインコネル 600 (NCF600) をインコネル 182 で被覆アーク溶接した X 開先突合せ溶接継手を使用した。レーザピーニングは溶接熱影響部に対して行い、エネルギー 70 mJ のレーザパルスを 0.65 mm 径に絞り、1 mm² あたり 100 パルス照射した。残留応力は X 線回折 ($\sin^2\psi$ 法) により、溶接止端から 5 mm の位置で測定した。

レーザピーニングにより 1 mm 以上の深さまで圧縮の残留応力が形成されており、溶接継手のように大きな引張残留応力を有する構造物についても、確実に圧縮残留応力を導入できることがわかる。

レーザピーニングにより応力腐食割れが防止できることを示すため、応力腐食割れの加速試験を実施した⁷⁾。

SUS304 に 893 K (620℃) で 8.64×10^4 s (24 時間) の熱鋭敏化処理を施し、20% の冷間圧延を行った後 50 mm × 10 mm、厚さ 2 mm の短冊状試験片を作成した。次に、特殊治具を使用して試験片の表面に 1% の引張ひずみを与え、レーザピーニングを行った。応力腐食割れの発生

を加速するため、グラファイトワールで試験片表面に隙間を付与して高温純水中 (温度: 561 K (288℃), 溶存酸素: 8 ppm) に 1.8×10^6 s (500 時間) 浸漬した。浸漬後、試験片を長手方向に切断して断面の金属組織観察を行い、応力腐食割れ発生の有無を判定した。

試験片断面の金属組織を図 3 に示す。未施工材には結晶粒界に沿った典型的な応力腐食割れが発生しているが、レーザピーニング施工材には応力腐食割れの発生は一切観察されず、レーザピーニングにより応力腐食割れの発生が防止できることを確認した⁸⁾。

次に、応力腐食割れの進展抑制効果を確認した。前項と同様に熱鋭敏化処理および冷間圧延の後、厚さ 3 mm の SUS304 試験片 (TP1~TP4, 4 体) を作成し、42% MgCl₂ 溶液に浸漬して表面に微細な予き裂を多数導入した。TP1 および TP2 は切断し、予き裂の長さを測定した。TP3 および TP4 は治具に固定して表面に 1% の引張ひずみを与えた後、TP3 にレーザピーニングを行って TP4 とともに高温純水中で応力腐食割れの加速試験に供した。

各試験片のき裂分布を図 4 に示す。横軸はき裂の長さを表し、縦軸はそれ以下のき裂が全体に占める割合を示している。応力腐食割れ加速試験により TP4 の予き裂は明らかに進展しているが、レーザピーニング処理した TP3 のき裂分布は予き裂 (TP1, TP2) の分布と同等である。深さ 1 mm 程度までの浅いき裂は、応力腐食割れを加速する環境においても、レーザピーニングによりその進展が抑制されることがわかった⁸⁾。

図 3 応力腐食割れ試験結果

図 2 残留応力深さ分布に対する効果

図 4 応力腐食割れの進展抑制効果

4. レーザピーニング施工システム

レーザピーニングは、原子炉の定期検査中に炉内構造物等の溶接部や溶接熱影響部にレーザを照射し、圧縮残留応力を付与することによって応力腐食割れの発生を防止するものである。沸騰水型原子炉（BWR; boiling water reactor）では、シュラウドや原子炉压力容器下鏡の制御棒駆動機構貫通部周りの溶接部にレーザピーニングを適用している⁹⁾。一方、加圧水型原子炉（PWR; pressurized water reactor）では、原子炉容器下鏡を貫通する中性子計装用管台の内外面や原子炉容器冷却材入口管台内面に適用している^{9), 10)}。

沸騰水型原子炉炉心シュラウド外面のレーザピーニング施工概念を図5に示す。レーザ装置を原子炉建屋の最上階（オペレーションフロア）に設置し、レーザを光ファイバで約50m伝送してシュラウド外面の溶接熱影響部に照射する。

レーザピーニングは、数MWを優に超えるピーク出力

図5 光ファイバ伝送式施工システム

図6 光ファイバ入射光学系

のレーザパルスを使用するため、伝送路への光ファイバの適用は不可能と考えられていた。我々は、光ファイバへの入射光学系としてレンズアレイによるホモジナイザを使用することによりレーザ強度の空間的な分布を平坦化し、ファイバ入射端面の損傷回避を試みた。その結果、20MWのレーザパルスを安定に伝送できることを確認した^{11), 12)}。また、光ファイバの使用により焦点裕度が短くなり、高い位置決め精度が要求されるため、自動的に焦点を検出してレーザ照射ヘッドの位置決めを行うシステムを開発することにより、ファイバ伝送式の施工システムを実現した¹³⁾。

処理速度向上の要求に対しては、図6に示すような構成の入射光学系を開発することにより、5台のレーザ発振器の出力ビームを空間的に合成し、繰返し300Hzのレーザパルスを光ファイバで伝送することに成功した¹³⁾。

5. 次世代型レーザピーニング

レーザピーニングの適用を更に推進するため、処理速度の向上と施工装置の小型化・簡素化を目指した新しい施工プロセスおよびシステムを開発している¹⁴⁾。

5.1 ラインフォーカスプロセス

従来の施工プロセスは、図7左に示すとおり円形の照射スポットを順次重ねていく方式である。処理速度を高めるためには速い走査が必要となり、施工装置に対する負荷も高くなる。ラインフォーカスプロセスはレーザのエネルギー密度を従来とほぼ同程度としたまま、レーザパルスをライン状に整形して照射する方式である。図7右に示すように、ラインと直交する方向に走査するだけで一定の領域を処理することができるため、施工装置の負荷を大幅に緩和することができる。

ラインフォーカスプロセスで処理したSUS304（20%冷間加工材）表面の残留応力値の例を図8に示す。横軸

図7 施工プロセスの比較

図8 ラインフォーカス施工による残留応力

は試験片表面に照射した 1 mm^2 あたりのレーザパルス数であり、縦軸は照射後の表面残留応力値である。レーザパルスのエネルギーは 200 mJ とし、予め試験片表面にはグラインダ加工を施し、引張の初期残留応力を与えた。

従来の施工プロセスでは 1 mm^2 あたり36パルス以上照射しているが、ラインフォーカスプロセスを採用することにより 1 mm^2 あたり数パルスの照射でも圧縮の表面残留応力値が得られており、レーザ出力あたりの処理速度にして3～5倍程度の高速度が可能である¹⁰⁾。

5.2 次世代型施工システム

ラインフォーカスプロセスの導入に加え、更に施工装置を小型化・簡素化するため、システムの改良を進めている。小型のレーザ発振器を自動機のアームに搭載する方式と同等のシステム概念とすることにより、従来比でレーザの伝送距離と装置重量を一桁減とし、物量の大幅な削減とシステムの信頼性向上を図っている¹⁰⁾。

現在開発中の次世代型施工システムは、ファイバ伝送型システムより更にシンプルな装置構成である。レーザ発振器には高繰り返しの水密小型 YAG レーザを使用する。平均出力は 10 W 程度であるが、伝送ロスが極小化されラインフォーカスプロセスを採用することにより、施工装置あたりの処理速度は従来と比較して2.5倍程度の高速度が見込まれる。

次世代型施工システムには、以下のような特長がある。

- ① 発振器から施工部までを空間伝送方式とすることにより、広い焦点裕度を確保する。
- ② 照射スポットの形状設定に自由度が高く、ラインフォーカスプロセスの採用が可能である。
- ③ 小規模の工事から複数箇所の同時施工による大規模工事まで、柔軟に対応できる。
- ④ 施工装置本体およびオペレーションフロア上に設置する各種設備の大幅な縮小が可能である。

このような特長により、次世代型施工システムは複雑な表面形状をもつ部位を施工対象としたとき、例えば原子炉压力容器下鏡のスタブチューブ取付溶接部等の3次元的な構造物を施工対象とする場合に有利である。また、ラインフォーカスプロセスを採用することにより、装置の動作とその制御が簡便になり、照射ヘッドから施工点までの距離（ワークディスタンス）を長く取ることが可能となる。従って、施工対象物との干渉を回避しやすい等、施工時の裕度が大きく改善される。

また、従来は2系統の同時施工を行っていたが、レーザビーム供給の制限がなくなることから、例えば4箇所の同時施工も十分に可能と考えている。これらの結果から、従来と比較して5倍程度の処理速度の向上が見込めるため、工事期間の大幅な短縮が可能になると考えている。

現在、装置ハードウェアの試作がほぼ完了し、各種機能の検証試験を進めている。

6. おわりに

レーザピーニングの原理、残留応力の改善効果、応力腐食割れの発生および進展の抑制効果について概説するとともに、現在開発を進めている次世代型のレーザピーニングシステムを紹介した。

1999年春、世界で初めてレーザピーニングによる原子炉内構造物の応力改善工事を行って以来、合計13回の工事を実施した。その間、レーザビームの供給方式は空間伝送方式からファイバ伝送方式に改良されてきたが、施工プロセスはほとんど変化していない。本報で紹介した次世代型レーザピーニングシステムは、施工プロセス自体の改良（ラインフォーカス）とレーザビーム供給方式の更なる改良により、小型・シンプルであるにもかかわらず、従来以上の施工速度を実現するものである。今後、施工対象部位に応じて、次世代型レーザピーニングシステムを順次適用していく計画である。

参考文献

- 1) 佐野雄二：溶接学会論文集，19 (2001)，207-212.
- 2) 佐野雄二，牧野吉延，落合 誠，山本哲夫：溶接技術，53-5 (2005年5月)，78-82.
- 3) Y. Sano, M. Kimura, K. Sato, M. Obata, A. Sudo, Y. Hamamoto, S. Shima, Y. Ichikawa, H. Yamazaki, M. Naruse, S. Hida, T. Watanabe, Y. Oono: Proc. 8th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-8), Baltimore, April, 2000.
- 4) R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, D. Devaux, J. Virmont: J. Appl. Phys., 68 (1990), 775-784.
- 5) Y. Sano, N. Mukai, K. Okazaki, M. Obata: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 121 (1997), 432-436.
- 6) 佐野雄二，依田正樹，向井成彦，小畑 稔，菅野眞紀，嶋誠之：日本原子力学会誌，42 (2000)，567-573.
- 7) 佐野雄二，畑 稔，山本哲夫：溶接学会誌，74 (2005)，525-528.
- 8) Y. Sano, M. Obata, T. Kubo, N. Mukai, M. Yoda, K. Masaki, Y. Ochi: Mater. Sci. Eng. A, 417 (2006), 334-340.
- 9) 佐伯綾一，佐野雄二，黒田英彦，落合 誠，田村雅貴，河野 渉：日本保全学会第2回学術講演会要旨集（2005年7月），pp.191-195.
- 10) M. Yoda, I. Chida, S. Okada, M. Ochiai, Y. Sano, N. Mukai, G. Komotori, R. Saeki, T. Takagi, M. Sugihara, H. Yoriki: Proc. 14th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-14), Miami, July, 2006.
- 11) 依田正樹，佐野雄二，向井成彦，T. Schmidt-Uhlig, G. Marowsky：レーザー研究，28 (2000)，309-313.
- 12) T. Schmidt-Uhlig, P. Karlitschek, G. Marowsky and Y. Sano: Appl. Phys. B, 72 (2001), 183-186.
- 13) 向井成彦，佐野雄二，依田正樹，千田 格，上原拓也，山本哲夫：レーザー研究，33 (2005)，444-451.
- 14) 向井成彦，上原拓也，末園暢一，佐伯綾一，佐野雄二：日本保全学会第3回学術講演会要旨集（2006年7月），pp.112-115.