

炉内保全用レーザーピーニングシステムの高度化

Next Generation LP System for Maintenance in Nuclear Power Reactors

株式会社 東芝	向井 成彦	Naruhiko MUKAI	Non Member
	上原 拓也	Takuya UEHARA	Non Member
	末園 暢一	Nobuichi SUEZONO	Non Member
	佐伯 綾一	Ryoichi SAEKI	Non Member
	佐野 雄二	Yuji SANO	Member

Abstract: Laser peening (LP) is a process to introduce residual compressive stress on metal surface by irradiating laser pulses underwater without any surface preparations. Toshiba has developed and applied LP system to preventive maintenance against stress corrosion cracking (SCC) in nuclear power reactors since 1999. The system is composed of laser oscillators, a beam delivery system, a laser irradiation head, remote handling equipment and a monitor/control system. In the early applications, a rigidly laser beam delivery system with many mirrors and beam guide pipes was accomplished. A flexible fiber-delivery system has been developed for accessing to the narrow place, and presently it is adopted mainly. As these beam-delivery systems require a wide installation space and difficult operation, a simple and small system is desired. In order to meet this demand, we are developing the small-sized next generation LP system that builds in the laser oscillator inside the remote handling equipment. In the next generation system new irradiating method is adopted, stress improvement speed is faster than the present system.

Keywords: BWR, PWR, Preventive maintenance, Stress corrosion cracking (SCC), Laser peening

1. 緒言

レーザーは、その非接触性と高いエネルギー密度を利用することにより、従来は不可能と考えられていた様々な加工に適用されている。レーザーピーニング (Laser Peening) は、水中の構造物に短パルスのレーザーを照射することによって表面に残留応力を形成する技術である。前処理を必要とせずレーザーを照射だけのシンプルなプロセスを開発し、その結果として発生する表面の圧縮残留応力は応力腐食割れ (SCC; Stress Corrosion Cracking) の発生と進展を抑制するため、原子炉 (圧力) 容器内機器の SCC 予防保全対策として 1999 年より実用化され、これまでに BWR、PWR プラントを対象に合計 13 回工事がおこなわれてきた。この間、レーザービーム伝送方式の変更など施工システムの改良が続けられ、ファイバレーザーピーニング (FLP) 方式が現在の主流となっている。本稿ではこれまでのシステムの概要に触れた後、最新のピーニングプロセス、および小型の発振器内蔵型レーザーピーニング装置の開発状況について紹介する。

連絡先：向井成彦，〒235-8523 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8, 株式会社 東芝 電力・社会システム技術開発センター 機器・システム開発部 電話:045-770-2380, E-mail:naruhiko.mukai@toshiba.co.jp

2. レーザーピーニングの基本原則

レーザーのパルス時間幅を数 ns まで短パルス化し、ピーク出力密度を数 GW/cm^2 まで高めて照射すると、材料の表面に高圧のプラズマが発生する (Fig. 1)。水中では水の慣性でプラズマの膨張が妨げられて狭い領域にレーザーのエネルギーが集中するため、プラズマの圧力は瞬間的に数 GPa に達する。この圧力により材料のごく表面がわずかに塑性変形して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実際には変形できないため、材料表面に高い圧縮残留応力が形成される [1][2][3][4]。

レーザーピーニングの光源には、Q スイッチ Nd:YAG レーザの第 2 高調波 (波長 532nm、パルスエネルギー約

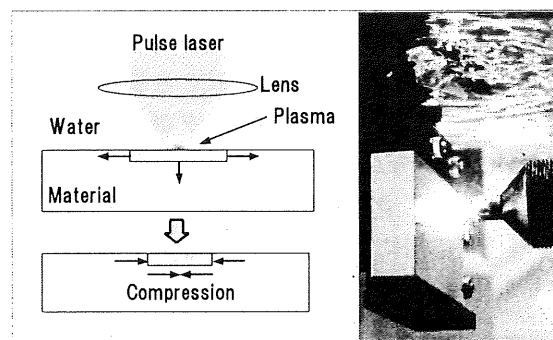


Fig.1 Basic process of laser peening.

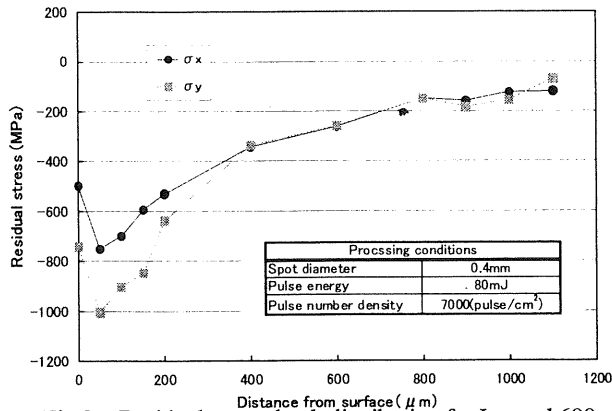


Fig.2 Residual stress depth distribution for Inconel 600.

60~250mJ、パルス幅6~10ns)のパルスレーザを用いる。典型的な条件下ではステンレス鋼、ニッケル基合金などの材料によらず深さ1mm程度まで圧縮応力を形成することができる。600系ニッケル基合金に対する応力改善の結果の例をFig.2に示す^[5]。

また、これまでに、発電設備技術検査協会による確性委員会において、レーザピーニング施工により、材料に対して悪影響がないこと、炉内構造物表面に微小な亀裂がある部位へ施工しても、亀裂の進展させるような影響はないことが確認されている。

3. レーザピーニングシステム^[6]

レーザピーニングでは前述のようにパルスあたりのレーザエネルギーは60mJ~250mJ程度と非常に小さく、繰り返し周波数も現状で300パルス/秒が最高であり、照射中の平均パワーとしても30Wに満たない。しかしながらひとつのパルスの時間幅は10ns以下であり、ピークパワーとしては10~20MW程度となる。ビームの伝送を簡便に行うには光ファイバの利用が考えられるが、炉内への展開を開始した当時最も太い光ファイバがコア直径1.5mmのものしかなく、また通常のファイバ入射方式ではファイバ内部にレーザ光が集光するため、光ファイバの損傷を避けることが困難であった。このため最初のレーザピーニング工事では空間伝送方式が採用された。

3.1 空間伝送型レーザピーニングシステム

空間伝送型システムで沸騰水型原子炉(BWR; Boiling Water Reactor)シュラウド(Shroud)のレーザピーニング施工を行ったときの装置概念をFig.3に示す。シュラウドの溶接熱影響部にレーザを照射して表面を圧縮応力状態とすることにより、応力腐食割れを防ぐものである。原子炉建屋のオペレーションフロアにレーザシステムを取

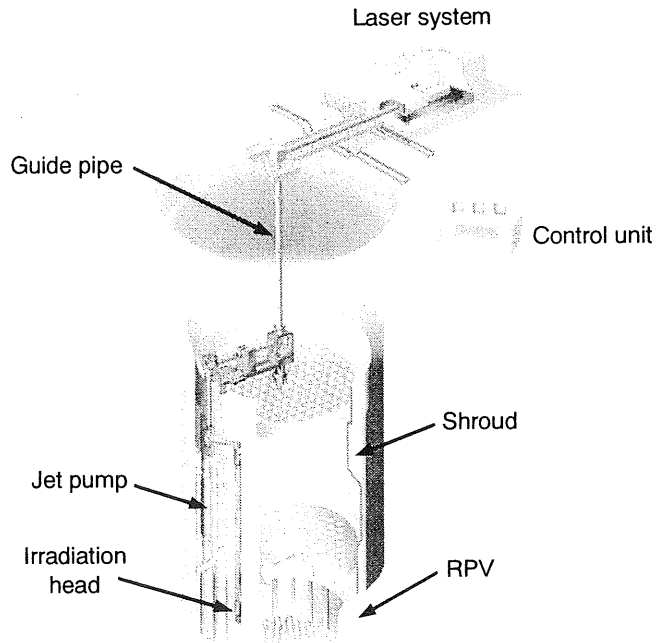


Fig.3 Laser peening system concept with mirror delivery for a BWR core shroud.

納した可搬式クリーンルームと制御装置を設置し、ミラーを内蔵した気密パイプを組み立ててレーザ伝送路として使用する。レーザ発振器から施工ヘッドまでレーザビームを約40m伝送する必要があるため、機械的振動による影響を排除するビームトラッキングシステム、施工装置の位置変更に追従して各部ミラーを調整する自動アライメントシステムを搭載している。施工ヘッド部にはビームを集光し2次元操作できる機構が備えられており、ある一定の範囲をレーザピーニング処理できるようになっている。

空間伝送型レーザピーニングシステムは伝送可能なレーザパワーに制限が少ないため、比較的高いパルスエネルギー条件(200~250mJ/パルス)で施工するのに適しており、またレーザビームの空間モードが良いため焦点裕度が広いという特長がある。

3.2 ファイバ伝送型レーザピーニングシステム

空間伝送型システムによる適用開始の後炉内狭隙部への施工要求があり、ファイバ伝送型レーザピーニングシステムが開発された。レーザ発振器から照射レンズまでに必要な光学素子やガイドパイプなどが不用になり、空間伝送型システムと比較すると非常にシンプルな構成となっている。これを実現するために、レーザビームによるファイバの損傷を避ける目的でホモジナイザを利用し

た入射光学系を開発し、コア直径 2.0mm または 2.4mm の大口径ファイバでビーム伝送している。また同様の理由から、照射条件として低エネルギー条件 (60mJ~100mJ) を採用している。低エネルギー条件では照射数密度を多くとる必要があり、処理速度を確保するためにレーザ照射繰返し周波数を空間伝送方式の 2.5 倍速である 300Hz としている。さらに 2 系統のファイバへ同時供給できるようにしたことから、実質的に空間伝送型の 2 倍以上の処理速度が得られている。施工ヘッド部に導かれた光ファイバは照射レンズに接続され、このレンズを施工ヘッド内にある駆動機構で走査することで一定の範囲の応力改善を行う。

4. 次世代型レーザピーニング

現状のシステムに対し、施工システム/工事体制の小型化や工期短縮のための処理速度向上と複数箇所の同時施工を目標に、次世代に向けたレーザピーニングプロセス、システムを開発中である。

4.1 レーザピーニングプロセスの改良

これまでのレーザピーニングプロセスでは基本的に円形のスポットを重ねていく方式であり、処理速度を確保するために速い走査が必要であった。現在開発中の方式を従来方式と比較して Fig.4 に示す。ラインフォーカス走査プロセスは照射面でのレーザビームのエネルギー密度を従来方式と同等としたまま、直線状にビームを照射する方式であり、ラインを横に走査するだけで一定の幅に対して応力改善することが可能であり、施工装置への要求を緩和することができる。Fig.5 にラインフォーカス条件での応力改善結果の例を示す。縦軸は処理後の表面残留応力値であり、横軸は単位面積あたりの照射パルス数である。照射条件はパルスあたりのエネルギーを 200mJ とした。照射スポットをライン状にすることで重ね打ちに無駄がなくなることなどの効果があり、同じレーザ出力で照射する場合に、出力あたりの処理速度が従来比の 3~5 倍速くできることが確認されている。

4.2 次世代型レーザピーニングシステムの試作

現在開発を進めている次世代型レーザピーニングシステムの概念図と写真を Fig.6 に示す。施工装置本体上部に小型の水密レーザ発振器が搭載されており、その下部にビーム調整部、焦点調整ユニット付き導光管部、ビーム走査機構が備えられている。このようにファイバ伝送型

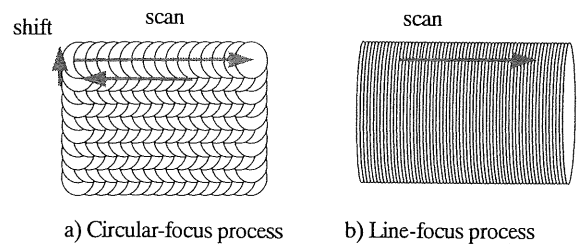


Fig.4 Conceptual drawing of improved irradiation method.

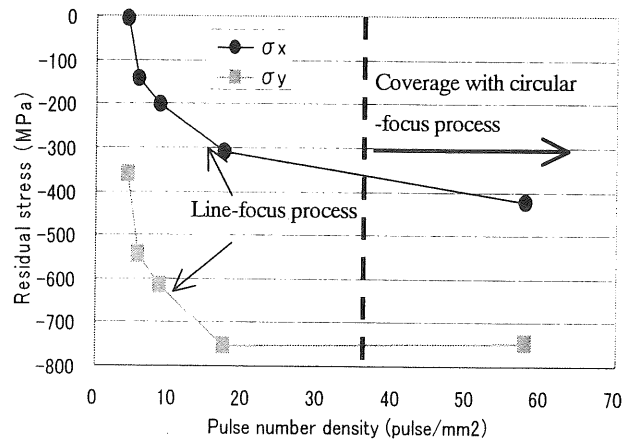


Fig.5 Relation between surface residual stress and pulse number density in line focusing process. (Pulse energy =200mJ, Line width=0.23mm, Line length=5.6mm)

レーザシステムと比較してもさらにシンプルな構成となっている。また使用するレーザ発振器は高繰返し型の水密小型 YAG レーザであり、平均出力は 10W 程度である。施工プロセスにラインフォーカス方式を採用しており、一台の施工装置あたりの処理速度は従来比で 2.5 倍程度の高速化が見込まれている。

このような次世代型のレーザピーニングシステムでは以下のような特長を有する。

- ① 発振器から施工部までの空間伝送方式とすることにより焦点裕度を広く取れる。
- 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できる。
- ③ 小規模の工事から多点同時施工による大規模工事まで、柔軟に対応できる。
- ④ オペレーションフロア上に設置する各種設備の小型化が可能となる。

このような特長は特に複雑な面形状をした部位を施工対象としたとき、例えば BWR 炉底部近傍の溶接熱影響部を施工対象とする場合などに有利である。また、ラインフォーカスプロセスを採用するため、従来のファイバ

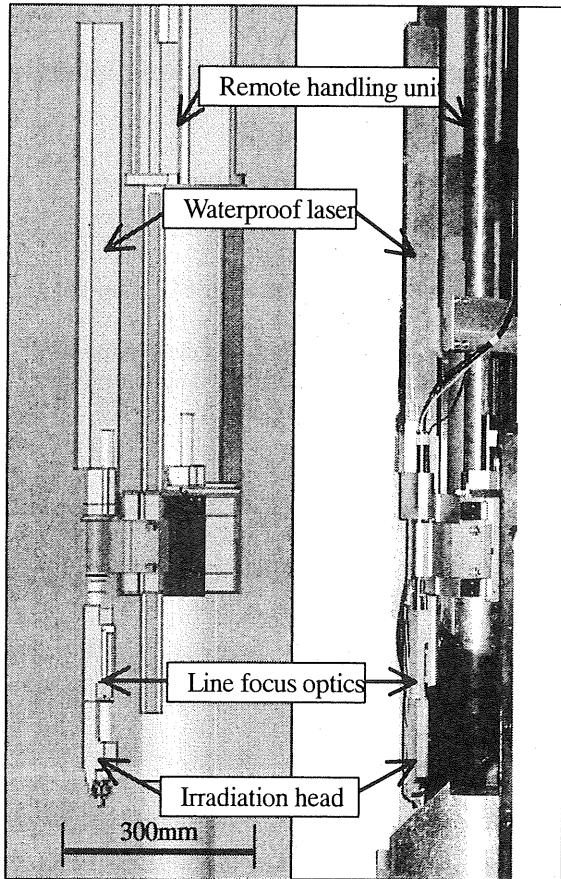


Fig.6 Working prototype model of the next generation laser peening system for bottom of BWR vessel.

伝送型の施工装置と比較して施工中の制御が簡便になることや、レンズから照射点までの距離が長く取れるため炉内構造物との干渉を回避しやすいなど、施工時の裕度が大きく向上する。

また、実際の工事を考慮すると、従来 2 系統までしか同時施工できなかったのに対し、レーザービーム供給の制限がなくなったことから 4 箇所同時施工も十分可能である。これらの結果トータル的には従来と比較して 5 倍程度の処理速度が得られるため、大幅に工事期間の短縮が可能になる。現在装置のハードウェアとしての試作はほぼ完了し、各種機能の確認試験を進めている。

5. 結言

1999 年に世界ではじめてレーザーピーニングによる原子炉内構造物の応力改善工事が行われて合計 13 回の保全工事が実施された。その間、空間伝送方式からファイバ伝送方式にレーザービームの供給方式は改良されてきたが、

照射方式は初期の頃からほとんど変化していない。システム的には現在 2 系統同時施工できるファイバレーザーピーニング方式が主流となっている。

本報で紹介した次世代型レーザーピーニングシステムは、照射プロセス自体の改良とレーザービーム供給方式の変更を行っており、小型でシンプルであるにもかかわらず、施工速度を従来以上に向上できる。今後、施工対象部位に応じて、この次世代型レーザーピーニングシステムを有力な工法として適用していく計画である。

参考文献

- [1] 山本哲夫, 他, 保全学,38,Vol.3 (ISSN 1348-7795,2004)
- [2] Y. Sano et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 121, 432 (1997).
- [3] 佐野雄二, 他, 日本原子力学会誌, 42, 567 (2000).
- [4] 佐野雄二, 他, 溶接技術,平成 17 年 5 月号
- [5] 小畑稔, 他, 日本材料学会第 53 期学術講演会論文集, 51,(2004)
- [6] 向井成彦, 他, レーザー研究,444,Vol.33,No7, (2005) .