

多機能レーザ溶接ヘッドの開発（第2報） —レーザピーニングによる応力改善性評価—

Development of Multifunction Laser Welding Head (2)
- Stress Improvement by Laser Peening Technology -

株式会社 東芝	千田 格	Itaru CHIDA	Non Member
	河野 渉	Wataru KONO	Non Member
	三浦 崇広	Takahiro MIURA	Non Member
	向井 成彦	Naruhiko MUKAI	Member
	依田 正樹	Masaki YODA	Non Member

Multifunction laser welding head has been developed. The head is able to perform not only underwater laser welding as repair, but also laser peening as preventive maintenance and laser ultrasonic testing as inspection. By using the effect of color aberration with optics, laser beam was focused to the ideal spot size on each process. Laser peening was performed on the material surface with the developed head, and stress improvement ability was confirmed.

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

1. 緒言

国内の原子力運転プラントは、運転開始後 30 年に達するものが増えてきており、高稼働率での安全で安定な運転を行うためには炉内構造物の応力腐食割れ (SCC: Stress Corrosion Cracking)への対策が重要となってくる。東芝は、SCC に対する補修工法として水中レーザ溶接技術、予防保全工法としてレーザピーニング、並びに検査工法としてレーザ超音波探傷技術をそれぞれ開発し、実用化を進めてきた。水中レーザ溶接を炉内構造物に対して適用する場合、溶接面の前処理、溶接、溶接後検査、応力改善処理の一連のプロセスが必要となるが、これらは基本的にすべて別々の装置とならざるを得ない。そこで、開発したプロセスがすべてレーザ光を用いていることに着目し、一つの施工ヘッドで検査・溶接補修・予防保全を可能とする多機能レーザ溶接ヘッドを開発した。本稿では、予防保全技術として開発したレーザピーニング技術について、基本的なプロセスの原理と特徴、ならびに開発したレーザ溶接ヘッドを用いた応力改善結果について紹介する。

連絡先:千田 格、〒235-8523 神奈川県横浜市磯子区新杉田町 8、株式会社 東芝、電話: 045-770-2380、e-mail:itaru.chida@toshiba.co.jp

2. レーザピーニングの原理と特徴

SCCは、材料感受性、腐食水質環境及び引張残留応力の 3 要因が重畠したときに発生する。レーザピーニングは、材料表面層の応力改善を行って SCC の要因となる応力因子を取り除く技術である。レーザピーニングの原理を Fig.1 に示す。レーザのパルス時間幅を数nsまで短パルス化し、数GW/cm²という高い出力で材料に照射すると、材料の表層がプラズマ化して表面に高圧のプラズマが発生する。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のエネルギーが集中するため、プラズマの圧力は空気中の 10~100 倍となり瞬間に数GPaに達する。この圧力により衝撃波が発生し、材料表面で衝撃波による動的な応力によって塑性変形が生じ、周囲の未

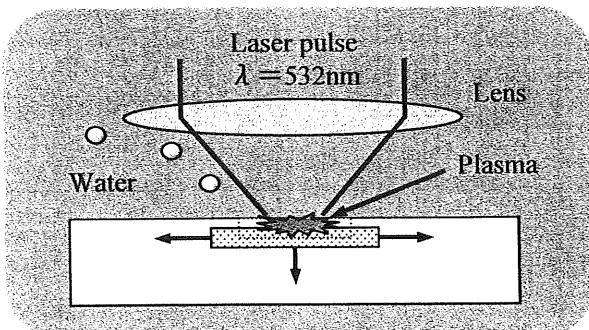


Fig.1 Schematic of laser peening process

変形部から拘束を受けることによって材料の表層に高い圧縮残留応力が形成される。レーザピーニングの光源には、水に吸収されにくいNd:YAGレーザの第2高調波(波長 532nm)のパルスレーザを用いることで、水中の構造物への適用も可能とした。典型的な施工条件では、ステンレス鋼、Ni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可能である。

レーザピーニングは、ショットピーニングやウォータージェットピーニング等の他のピーニング技術に比べ、高圧の気体や液体の噴流を伴わないために、装置先端の小型化が容易で光ファイバによるレーザ伝送と組み合わせることで狭隘部への施工性に優れている。また、レーザ光は時間的、空間的な制御性に優れるため、施工範囲すべての応力改善を確実に行うことが可能であり、施工対象部以外の周囲の構造物に対して影響を与えることがない。これまでに、SCC予防保全のためにレーザピーニング技術を 1999 年から国内の 8 プラントの BWR に適用し、また 2004 年からは国内の PWR に対しても適用を開始し、これまでに 2 プラントで 3 回の応力改善工事を実施した^{[1][2][3][4]}。

3. 多機能レーザ溶接ヘッドの開発

3.1 概念

東芝が開発した水中レーザ溶接法は、Fig.2 に示すようにシールドガスを溶接施工部に供給することで局所的な空洞を形成し、その空洞中でレーザ光を照射しながらワイヤ状の溶加材を供給することでクラッド層を形成する溶接技術である^[5]。水中レーザ溶接とレーザピーニングの施工条件をTable 1 に示す。いずれも水中で施工を行うことが可能なプロセスであるが、水中レーザ溶接は溶接ヘッド内にシールドガスが充満した状態で施工するため、レーザ光はレンズ先端から材料表面まで水中ではなく気中（シールガス中）を伝搬して照射される。そのため、水中においても気中施工の場合と同等のビード形成が可能である。

多機能レーザ溶接ヘッドでは、同じ光路からそれぞれのプロセスで異なる波長のレーザ光を照射する必要がある。そこで、レーザ光を集光するレンズについて、同じ照射距離において各プロセスで異なるスポット径のビームが得られるようにレンズ設計を行った。

水中レーザ溶接では、Table 1 に示すように溶接ワイヤ供給に必要な溶融池の大きさを確保する必要があるため、Fig.3(a)に示すように波長 1060nm のレーザ光が

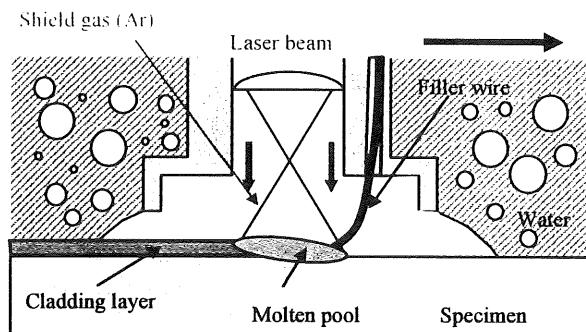


Fig.2 Schematic of underwater laser welding

Table 1 Conditions of underwater laser welding and laser peening

	Underwater Laser welding	Laser peening
Laser source	Fiber laser	Nd: YAG laser
Wave length	1060nm	532nm
Beam mode	Continuous wave	Pulse
Laser power	0.9~3.0kW	60~100mJ/pulse
Spot size	Φ 2.0~6.0mm	<Φ 1.0mm
Pulse width	-	<10ns
Shielding gas	Ar	-
Optical path condition	Air	Water

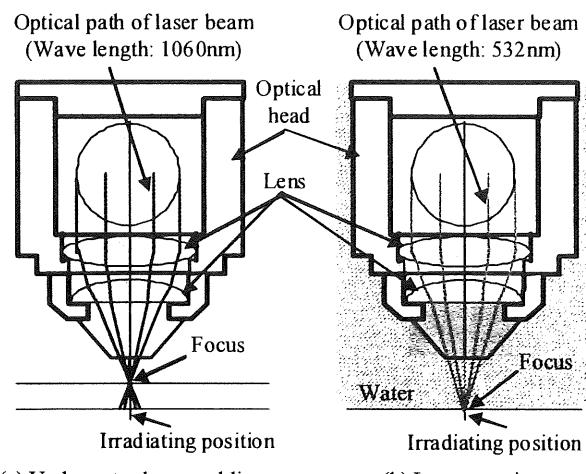


Fig.3 Schematics of optical path on multifunction laser welding head

大気中で照射された場合にデフォーカスビームの状態で試験片に照射されるようにした。一方レーザピーニングの場合は、Table 1 に示すように高いエネルギー密度で照射するため、できるだけスポット径が小さくなるような設計が必要となる。そこで、波長 532nm のレーザ光が水中で照射された場合に屈折率 $n=1.33$ で焦点距離が変わることを利用して、Fig.3(b)に示すようにレーザ溶接と同じ照射距離で焦点位置となるようにした。

以上のようなコンセプトをもとに、設計した多機能レーザ溶接ヘッドの概念図を Fig.4 に示す。水中レーザ溶接用に時には、シールドガスを注入口からレーザ照射部に供給することにより局所的な空洞を形成し、レーザピーニング施工時には Fig.4 に示すように水を供給することでレーザ照射部を水中に保つことができる。また、レーザ溶接ヘッドでのレーザ光の伝送ロスを最小限にするために、使用するレンズには波長 1060nm と 532nm のレーザ光の端面でのロスを少なくするコーティングを施した。さらに、このレーザ溶接ヘッドには検査装置としてレーザ超音波探傷用のヘッドを具備しており、1 つのヘッドで 3 つの異なるプロセスでの施工が可能である。

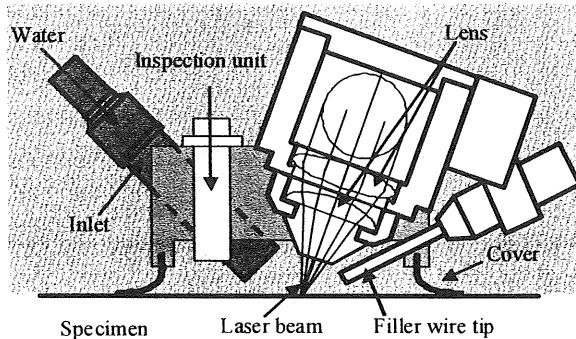


Fig.4 Schematic of laser peening with multifunction laser welding head

3.2 機能検証試験

開発した多機能レーザ溶接ヘッドを用いて、レーザピーニングによる応力改善試験を実施した。レーザピーニング施工条件を Table 2 に示す。供試材としてステンレス鋼 (Type304 stainless steel, 20%冷間加工材) とニッケル基合金 (Alloy600) を選定し、機械加工により平板形状 ($30 \times 60 \times t10\text{mm}$) とした試験片を使用した。試験装置概念図と試験状況を Fig.5,6 にそれぞれ示す。レーザ発振器から照射されたレーザ光は、光ファイバを介して多機能レー

Table 2 Conditions of laser peening

Material	Type 304 Stainless steel	Alloy 600
Spot diameter	0.7mm	0.7mm
Pulse energy	70mJ	70mJ
Pulse number density	7000 pulse/cm ²	4500 pulse/cm ²

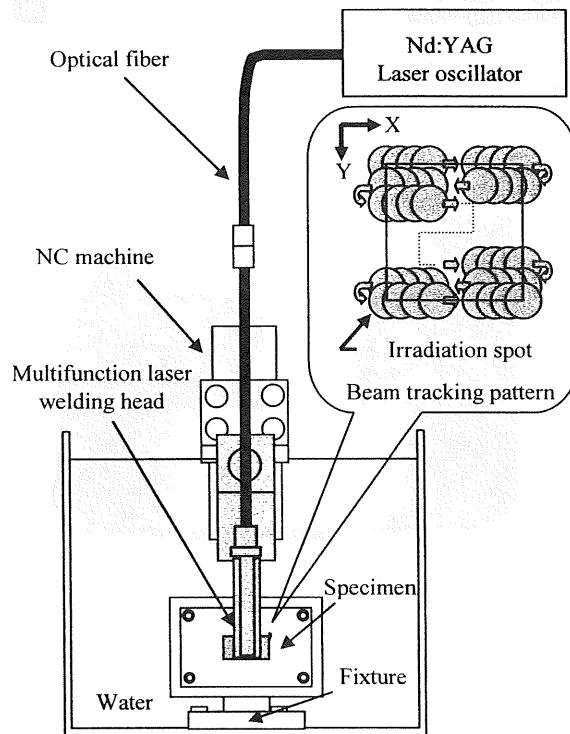


Fig.5 Experimental setup for laser peening

ザ溶接ヘッドまで伝送される。レーザピーニングは、Fig.5 に示すように NC 加工機を用いて多機能レーザ溶接ヘッドを移動させながらパルスレーザを照射した。

レーザピーニング施工を行った試験片の外観観察結果の一例を Fig.7 に示す。施工部表面は、レーザ照射により厚さ $1\mu\text{m}$ 程度の酸化皮膜が形成され、プラズマ生成によるわずかな減肉が発生する。しかし、金属組織に熱影響が認められないことが確認されている^{[3][4]}。レーザピーニング施工部表面について、X線回折による残留応力測定結果を Fig.8 に示す。いずれの試験片についても、レーザピーニング施工により高い応力改善効果が得られていることが確認された。

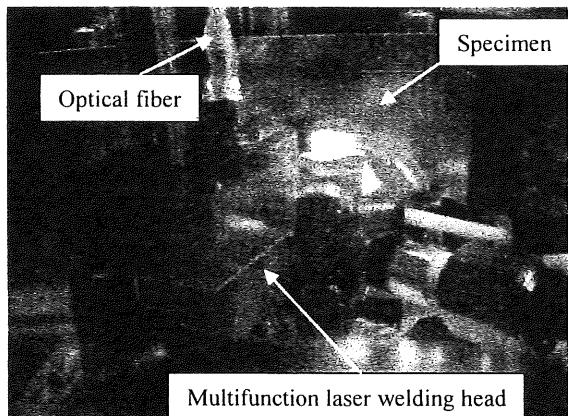


Fig.6 Laser peening with multifunction laser welding head

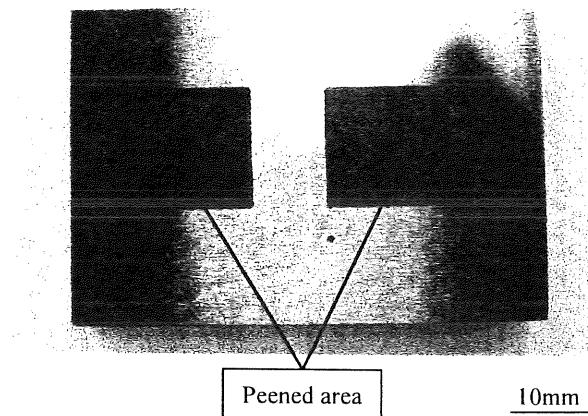


Fig.7 Appearance of laser peened specimen
(Type304 stainless steel)

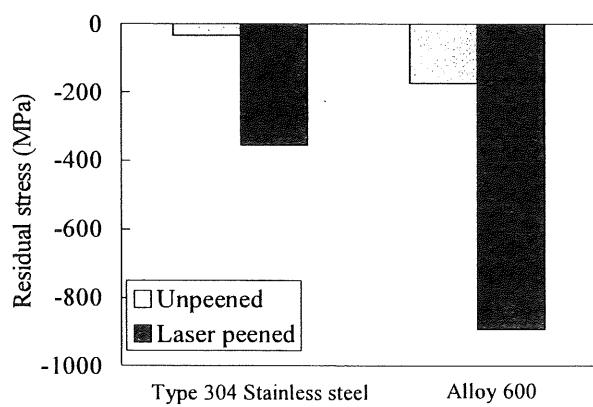


Fig.8 Results of residual stress measurement

4. 結言

原子炉内構造物向けの SCC 対策の一環として、1つのヘッドで検査・補修及び予防保全を実現する多機能溶接ヘッドを開発し、予防保全の工法としてレーザピーニングによる応力改善について試験結果の一例を紹介した。今後は、遠隔作業ロボットなどとの融合を進め、様々な形状で構成されている炉内構造物などを対象として、検査から補修・保全までの対応が可能な高度化システムの開発を進めていく。

参考文献

- [1]上原拓也 他, 「炉内保全用レーザピーニングシステムの高度化(第2報)」, 日本保全学会 第4回学術講演会要旨集, S10-04(2007)
- [2]Y. Sano et al, "Residual Stress Improvement in Metal Surface by Underwater Laser Irradiation", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 121, 432(1997)
- [3]佐野雄二 他, 「レーザの水中照射による金属材料の応力改善メカニズム」, 日本原子力学会誌, 42, 567(2000)
- [4] 佐野雄二 他, 「レーザを使用した原子炉の水中メンテナンス技術」, 溶接技術, Vol.53, No.5(2005)
- [5] 金澤寧 他, 「水中レーザ溶接技術」, 東芝レビュー, Vol.60, No.10(2005)