

レーザを応用した炉内保全技術とそのPWRへの適用

Laser-based maintenance technologies for PWR power plants

株式会社 東芝	佐伯 綾一	Ryoichi SAEKI	Non Member
	佐野 雄二	Yuji SANO	Member
	黒田 英彦	Hidehiko KURODA	Non Member
	落合 誠	Makoto OCHIAI	Non Member
	田村 雅貴	Masataka TAMURA	Non Member
	河野 渉	Wataru KONO	Non Member

Toshiba has developed laser-based maintenance, inspection and repair technologies as countermeasures against stress corrosion cracking (SCC) in nuclear power reactors. Laser peening (LP) is a novel process for preventive maintenance, which improves residual stress from tensile to compressive on material surface by irradiation laser pulses in water. Laser-ultrasonic testing (LUT) is capable of detecting and sizing SCC having a depth of about 0.5 mm. Underwater laser welding can be fulfilled by making local dry environment with shielding gas around welding point. Laser cladding is realized with the laser welding technology, which forms a corrosion resistant layer of sufficient chromium (Cr) content to cover the surface susceptible to SCC. Laser seal welding (LSW) is expected to isolate the crack tip from corrosive water environment and to impede the propagation of the crack. The outline of the laser-based technologies and their applications in BWR and PWR power plants are described.

Keywords: Stress corrosion cracking (SCC), Laser based maintenance technology, laser peening, Laser ultrasonic testing, underwater welding, Laser cladding, Laser seal welding, PWR

1. 緒言

レーザはエネルギー密度が高く、時間的及び空間的な制御性に優れ、施工反力がないことから、施工システムの小型化が可能であり遠隔自動機を使用した施工、狭隘部への施工に適している^[1]。また、レーザは低入熱で変形が少なく、熱処理や仕上加工などが省略できる。そのため、被ばくの観点から作業員が容易にアクセスできない原子炉（圧力）容器内機器（炉内機器）の保全技術として最適な手法のひとつと考えている。本稿では東芝の炉内保全技術のうち、水中環境下におけるレーザ応用技術として、予防保全、検査及び補修技術を開発したので紹介する。また、これらの技術の一部は、沸騰水型原子炉（BWR）だけではなく、加圧水型原子炉（PWR）の保全として実機に適用しており、その適用例を紹介する。

2. レーザ応用技術

2.1 レーザピーニング

レーザ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/cm² 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のエネルギーが集中するため、プラズマの圧力は瞬間に数 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]}。

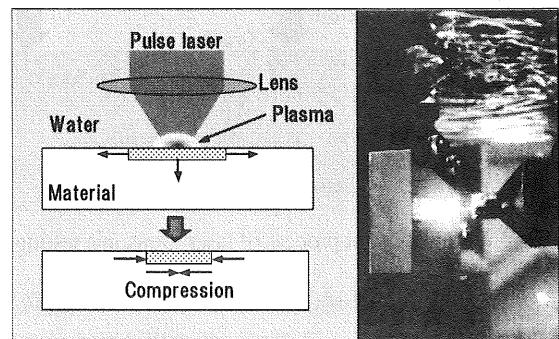


Fig.1 Basic process of laser peening.

レーザ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 100mJ、パルス幅 6~10ns）のパルスレーザを用いる。

このパルスレーザをステンレス鋼、ニッケル基合金などの構造材料に照射した場合、材料によらず表面から約

1mmの深さまで圧縮残留応力が形成されることを確認した。Fig.2に600系ニッケル基合金の残留応力の測定結果を示す^[5]。

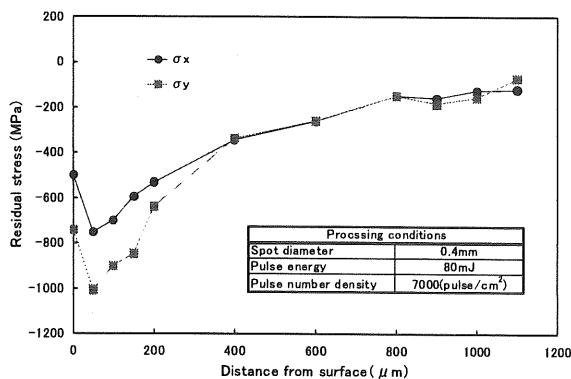


Fig.2 Residual stress depth distribution for Inconel 600.

2.2 レーザ超音波法

金属材料などの検査対象にレーザ光をパルス照射すると、レーザ照射による熱歪みやアブレーションの反力により超音波が発生する^[6]。この超音波には、検査対象の内部を伝播する成分と、検査対象の表面を伝播する成分(表面波：SAW)がある。特に表面波成分に着目すると、表面波の伝播経路上にき裂が存在する場合、Fig.3に示すように、き裂の深さより短い波長の周波数成分はき裂によって反射されるが、長い波長の周波数成分はき裂を透過する。

Generation Laser

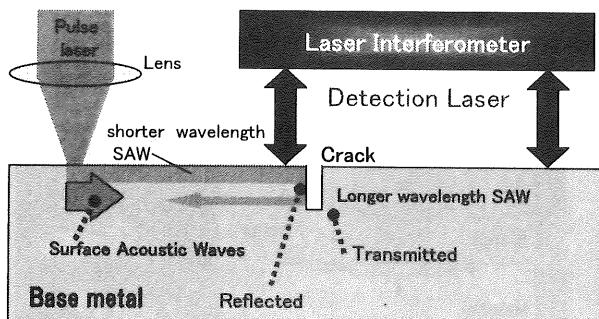


Fig.3 Fundamental process of laser ultrasonic testing

このため、き裂の透過前後では、表面波の周波数成分が変化することになる。そこで、この周波数成分の変化に関する情報を利用することによって、微小き裂の検知(反射法：反射した成分による検知)およびその深さの計測(透過法：透過した成分による測定)が可能になる^[7]。

超音波励起用レーザ光源には、2.1項で述べたレーザピーニングと同一のQスイッチNd:YAGレーザを用いることが出来る。透過法を使用してき裂深さを測定した例を

Fig.4に示す。縦軸はレーザ超音波法によるき裂深さの測定値であり、横軸は試験片を切断して求めた実際のき裂深さである。深さ約0.5~1.5mmのき裂に対して±0.2mm程度の精度でサイジング可能である事を確認した。なお、Fig.4には、放電加工(EDM)で作成したスリットの測定結果も記載した^{[4][8]}。

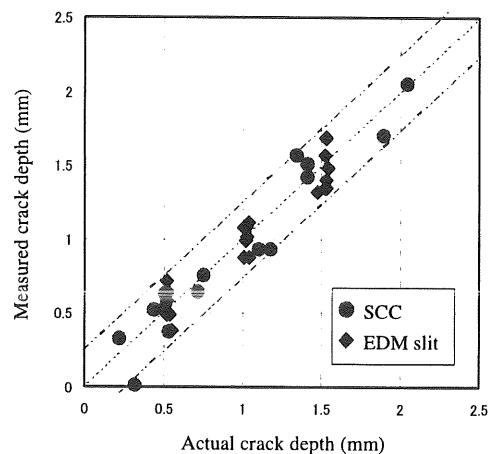


Fig.4 Crack depth measurement by laser-ultrasonics

2.3 水中レーザ溶接

レーザ溶接は「高精度」「低ひずみ」「低入熱」といった特徴を有する。東芝ではNd:YAGレーザを応用し、溶接ヘッドの周辺を部分的に気中とした水中レーザ溶接装置(Fig.5)を開発した^[9]。水中レーザ溶接技術は、予防保全のためのクラッド溶接(水中レーザクラッド溶接)だけでなく、溶接金属により割れを塞ぎ、環境隔離と漏洩防止を行なうことができる封止溶接(水中レーザ封止溶接)に適用が可能である。

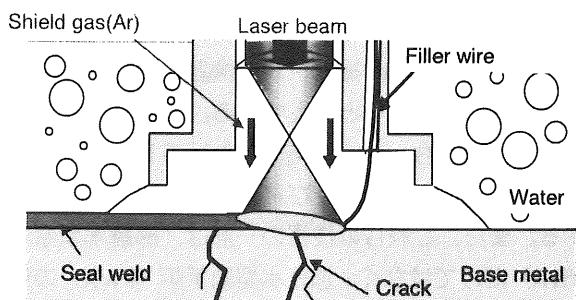
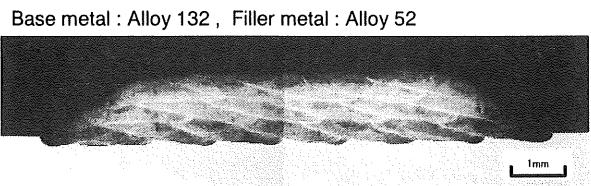


Fig.5 Concept of underwater laser seal welding

1) 水中レーザクラッド溶接

水中レーザクラッド溶接の光源には、連続発振のNd:YAGレーザ(波長1.06μm)を用いる。このレーザを用いて水中に設置した600系ニッケル基合金肉盛材の表面にクラッド溶接を行った結果をFig.6に示す。



Cross-sectional micrograph

Fig.6 Application to cladding on Alloy 132

溶加材には Cr 濃度が高く耐食性に優れたインコネル 690 系を使用し、入熱 1.2kJ/cm, ワイヤ供給速度 0.9m/min に設定した。この条件で 3 層の多層溶接を行い、Fig.6 に示すように健全なクラッド層が形成されている事を確認した^[3]。また、クラッド層の Cr 濃度を分析した結果、表層で約 28% の Cr 濃度を有していることを確認した (Fig.7) ^[4]。

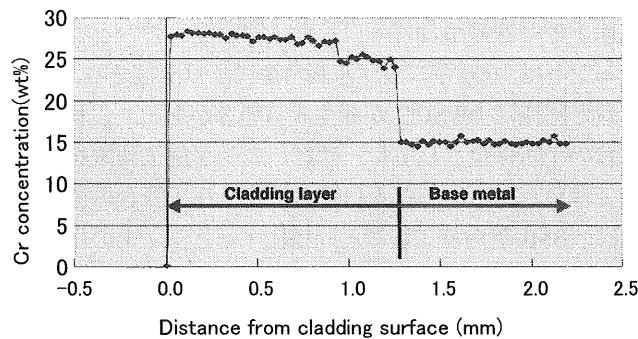


Fig.7 Chromium concentration of laser cladding

2) 水中レーザ封止溶接

水中レーザクラッド溶接と同じ光源を用い、水中に設置した 316L 系オーステナイト系ステンレス鋼の模擬欠陥に対して実施した水中レーザ封止溶接の結果を Fig.8 に示す。

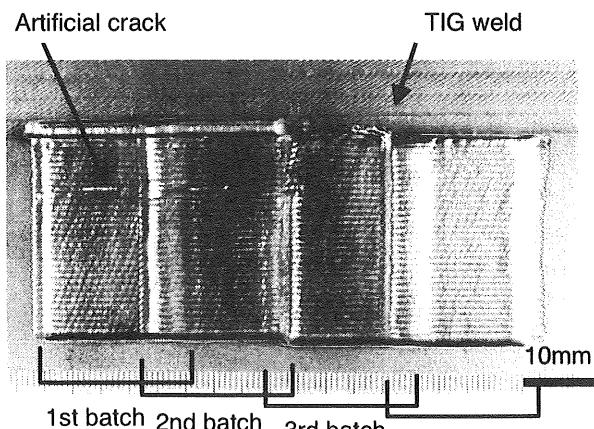


Fig.8 Result of mock-up test by underwater laser seal welding

模擬欠陥は、開口幅 0.3mm、深さ 5mm、長さ 30mm である。溶接ワイヤには Y308L ($\phi 0.6\text{mm}$) を使用し、入熱 0.75kJ/cm、ワイヤ供給速度 0.8m/min に設定した。広範囲の封止溶接を想定し、30mm×40mm のバッチ施工を部分的にオーバーラップさせ 4 回繰返した。Fig.8 に示すように、良好な溶接ビードが得られており、模擬き裂開口部を肉盛溶接により封止できることを確認した^[4]。

3. 炉内予防保全への適用

東芝は、BWR プラント炉内機器の応力腐食割れ (SCC) 予防保全として、炉心シラウド（オーステナイト系ステンレス鋼製）や原子炉圧力容器底部の制御棒駆動機構貫通部スタブチューブ（600 系ニッケル基合金）にレーザピーニングを適用してきた。さらに、PWR プラントの原子炉容器管台の応力腐食割れ (PWSCC) 予防保全として、四国電力株式会社伊方発電所第 1 号機の原子炉容器管台にレーザピーニングを適用した。

3.1 レーザピーニング・レーザ超音波法の適用

東芝は、PWR プラントの応力腐食割れ (PWSCC) 予防保全工事として、四国電力株式会社伊方発電所第 1 号機にレーザピーニングを適用した。また、炉内計装筒管台にはレーザピーニングの施工前検査として世界で初めてレーザ超音波法 (LUT) を適用した。

施工システムは原子炉格納容器内フロアに配置し、施工装置は原子炉容器キャビティ上に設置した作業台車により吊り下げて施工対象管台に設置した。伊方発電所第 1 号機のレーザピーニング全体工事工程は、平成 16 年 12 月に炉内計装筒管台から施工を始め、安全注入管台、冷却材入口管台までの作業を約 20 日間で計画通り実施し、平成 17 年 1 月に作業を全て完了した^[10]。それぞれの管台の施工システムについて紹介する。

1) 炉内計装筒管台への適用

PWR プラントの原子炉容器底部には、Fig.9 に示すように炉内計装を挿入するための炉内計装筒管台 (BMI) が溶接されている。この管台内面には、溶接による引張残留応力が残留しており、応力腐食割れ (PWSCC) が発生する懸念がある。その予防保全としてレーザピーニングとレーザ超音波法を兼ねる施工システムを開発して適用した。伊方発電所第 1 号機の予防保全システムは Fig.10 に示すようにレーザシステム、モニタ・制御システム、レーザ伝送用光ファイバ、遠隔施工装置から構成され、レーザピーニングとレーザ超音波法が可能である。

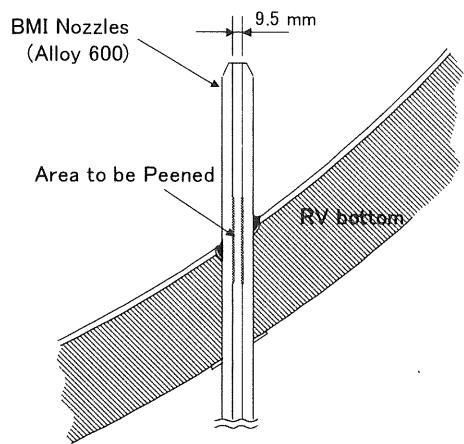


Fig.9 Bottom-mounted instrumentation nozzles (BMI)

BMI 管台は内径が約 9.5mm の細径であることから、外径が 9mm 以下のレーザピーニング (LP) 用照射ヘッドを開発した。レーザは光ファイバで照射ヘッドまで伝送され、照射ヘッド内部の非球面ミラーで反射・集光して BMI 内面に照射した (Fig.10) [11]。また、レーザピーニングの施工前検査として、世界で初めてレーザ超音波法 (LUT) を適用した。LUT は送信・受信用レーザの検出が必要なため、照射ヘッド内部の反射ミラーを 2 重構造とした専用のヘッドを開発した。LUT はレーザピーニング施工装置の先端に LUT ヘッドを装着することにより実施し、LUT と LP の施工装置を各 1 台づつ炉内投入して 2 台施工とした (Fig.11) [11]。

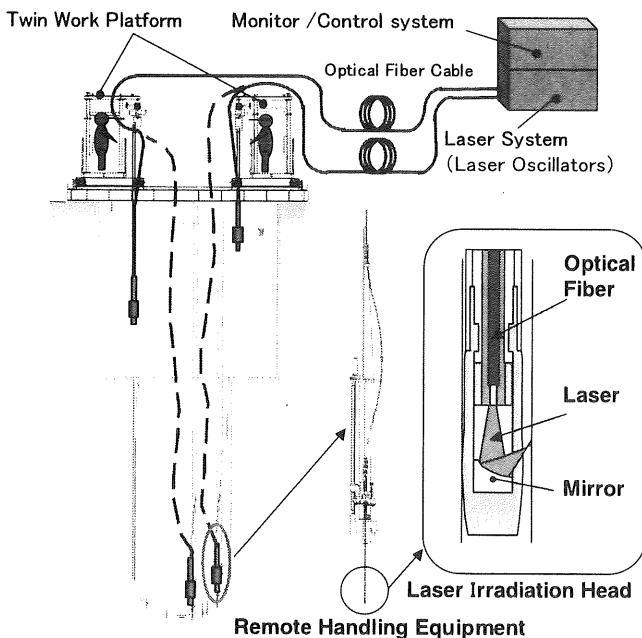


Fig.10 Laser maintenance system concept for reactor vessel

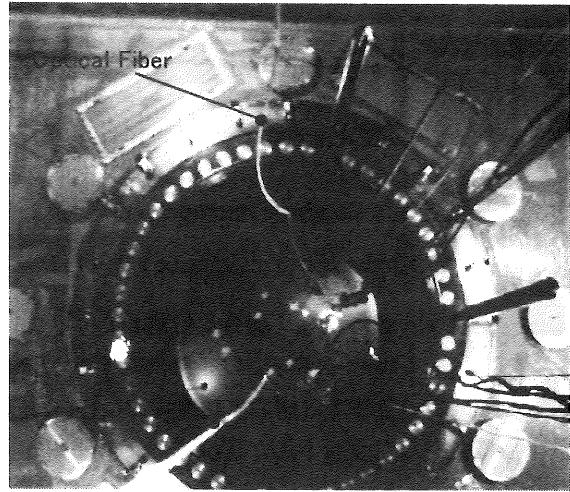


Fig.11 Laser maintenance system for BMIs at IKATA Unit-1

2) 原子炉容器管台への適用

原子炉容器の冷却材入口管台、安全注入管台と各セーフエンドは、600 系ニッケル基合金により溶接され、BMI 管台と同様に PWSCC が発生する懸念がある。これらの管台の予防保全としてレーザピーニング施工装置を開発して適用した。冷却材入口管台、安全注入管台の施工装置は、BMI 管台施工装置と同様にキャビティ上の作業台車より吊り下げ、管台に設置した。レーザシステムは BMI 管台施工システムと兼用され、管台毎に施工装置を入れ替えて施工した。冷却材入口管台施工装置は、管台が大口径 (約 ϕ 700mm) であることから、レーザピーニング用ヘッドを 2 式とし、レーザをダブルで照射することにより施工時間を短縮した。安全注入管台は小口径管台 (約 ϕ 90mm) であることから、レーザピーニング用ヘッドは 1 式とした^[12]。それぞれの施工装置概要を Fig.12 に示す。

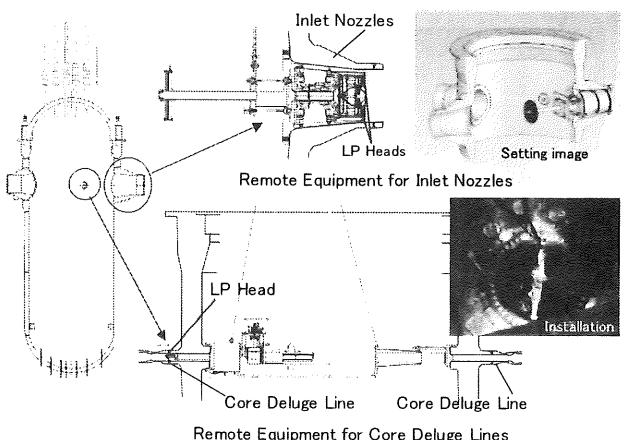


Fig.12 Remote equipments for reactor vessel nozzles

3.2 水中レーザ溶接の適用

水中レーザ溶接は実機に適用していないが、水中レーザ溶接技術を応用した水中レーザクラッド溶接、水中レーザ封止溶接も高経年化プラントのSCC発生防止に有効な手段であり、また補修技術として、万が一の不具合発生時のき裂補修対応を迅速にすることが可能である。これらのレーザ技術はレーザピーニング、レーザ超音波とレーザの発振形態が異なるが、工法や施工装置コンセプトは同様であり、それぞれの施工ヘッドを1つの施工装置に組替えるといった運用も可能と考えている。

4. 結言

- 1) 東芝はレーザ応用技術として、予防保全としてのレーザピーニング技術、検査としてのレーザ超音波法、予防保全に加えて補修技術を兼ねる水中レーザ溶接技術を開発した。
- 2) 高経年化プラントの適切な保全・補修作業における被ばく低減の観点から、遠隔・非接触という特徴を備えたレーザ応用技術への期待は大きい。
- 3) 東芝は、プラントメーカーとして、BWRプラントの保全工事実績を生かし、国内PWRプラント、国外プラントへのレーザ応用技術の適用範囲拡大を念頭に、今後も技術開発を行っていく。

謝 辞

本稿は、四国電力株式会社殿 伊方発電所第1号機炉内計装筒管台等レーザピーニング工事完遂実績の一部を含むものである。

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] 小畠稔 他, 日本材料学会第53期学術講演会論文集, 51, (2004)
- [6] 黒田英彦, 他, 日本鉄鋼協会 計測・制御・システム工学部会シンポジウム, 25, (9644, 2002.6)
- [7] 黒田英彦, 他, 日本機械学会誌, 24, Vol.104(No.991, 2001.6)
- [8] 落合誠他, 日本保全学会第2回学術講演会 (本会)
- [9] M.Tamura et al., 13th International Conference of Nuclear

Engineering (ICONE13-50141) (2005).

- [10] 浅井敬久他, 日本原子力学会「2006年秋の大会」(予稿: 発表予定)
- [11] 依田正樹、他, 日本原子力学会「2006年秋の大会」(予稿: 発表予定)
- [12] 小茂鳥岳ら、他, 日本原子力学会「2006年秋の大会」(予稿: 発表予定)

