

レーザ外面照射応力改善法による残留応力低減法

Improvement of Residual Stress by Outer Surface Irradiated Laser Stress Improvement Process

三菱重工業株式会社

上田 剛史

Takeshi UEDA

Non-Member

渡邊 優

Masaru WATANABE

Non-Member

村上 平八朗

Heihachiro MURAKAMI

Non-Member

Improvement of residual stress is effective in a countermeasure for the stress corrosion cracks in pipe welds. An outer surface irradiated Laser Stress Improvement Process (L-SIP) will be introduced as a method to improve residual stress inside steel pipes. This method is to improve inner surface residual stress from tensile stress to compressive by the temperature differences between inner and outer surface, that is generated by the irradiation of laser beam around the welds of steel pipe. Recently this method is applied to PWR pressurizer surge nozzle on Tsuruga unit 2.

Keyword: Weld, Stress Corrosion Crack, Residual Stress, Laser, Nozzle, Pipe

1. 序論

原子力プラントや火力プラントの配管溶接部では、応力腐食割れ(SCC)が損傷モードとして考えられる。応力腐食割れは、材料、環境(水質、温度など)、及び引張応力が重畠する部位で発生する。運転中のプラントで使用中の配管に対しては、材料と環境を改善することが難しいので、引張残留応力を改善する方法が対策として用いられている。

引張残留応力を改善する方法として、ショットピーニングに代表される各種のピーニングがある。一方、配管溶接部へピーニングを施工するためには、内面へ直接アクセスし、施工する必要があるが、内面へのアクセスが困難な場合が多い。そこで、配管の外面からレーザ光を照射して、管内面の残留応力を改善する「レーザ外面照射応力改善法(L-SIP)」[1] [2]を開発した。尚、適用を想定している部位の例として、図1に示す加圧器管台や計装用管台、再循環入口管台、配管溶接部等がある。

2. 原理

レーザ光を配管外面に照射すると、図2に示すように外面の温度が上昇する。移動させながらレーザを照射することにより、内面の温度上昇を抑制することができるため、内外面に温度差が生じる。この時、内外面の熱膨張差により、外面には圧縮応力、内面には引

連絡先；上田剛史、〒652-8585 神戸市兵庫区和田崎町1-1-1、三菱重工業(株)神戸造船所 原子力保全技術部 技術課、電話：078-672-3541、e-mail；takeshi_ueda@mhi.co.jp

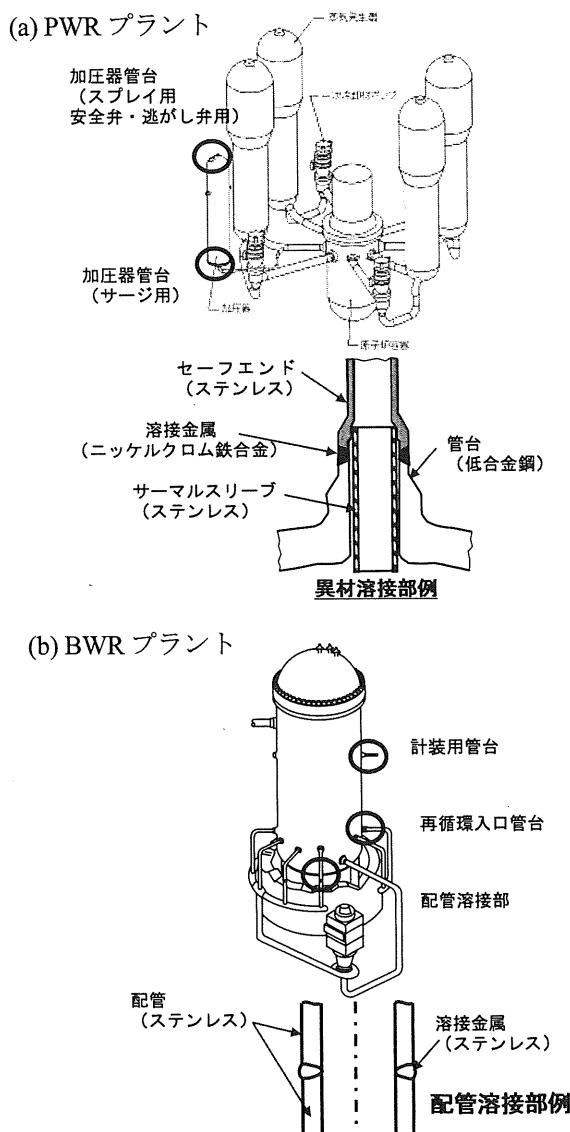


図1 L-SIP の適用対象想定部位

張応力が発生することで、材料の内外面で塑性変形が発生する。その後、レーザ照射が完了し、冷却され、内外面の温度差が無くなった時点で、加熱時に引張の塑性変形を受けた内面側には圧縮応力が生じ、残留応力を改善できる。本工法は、鋼管の周上をレーザ光照射領域することにより、全周の残留応力を改善する工法である。

尚、L-SIP 施工にあたっての外表面加熱温度は、材料健全性の影響を考慮し、表 1 の通りに制約を設けている。材料に対しては、熱影響を与えないことを前提として技術開発を実施した。また、内外面の温度差を適正に確保する観点から、外面の昇温速度にも制約が設けられている。

本技術は、出力密度の高いレーザを加熱に用いるため、原理的には管内面の水冷の有無に関わらず、残留応力の改善が可能である。

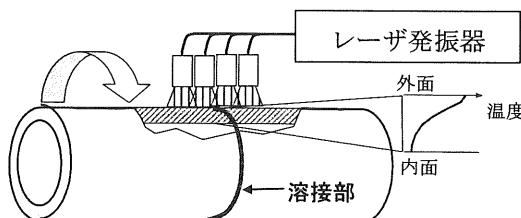


図 2(a) レーザ外面照射応力改善法の模式図

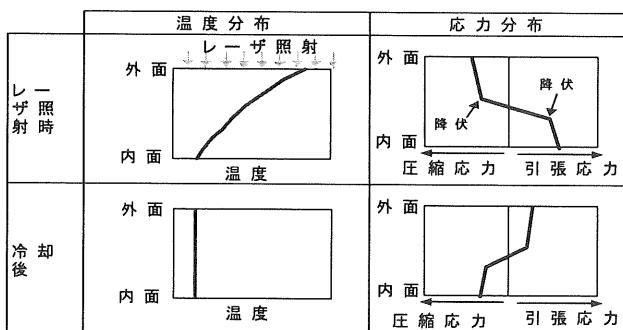


図 2(b) レーザ照射時及び冷却後の板厚内温度分布と応力分布の模式図

表 1 L-SIP 温度条件

材質	L-SIP 温度条件	備考
低合金鋼	500°C以上 595°C未満	低合金鋼の変態点温度約700°C以下
ステンレス鋼	550°C以上 650°C未満	再結晶温度(900~950°C)以下
ニッケルクロム 鉄合金鋼	550°C以上 650°C未満	再結晶温度(927~966°C)以下

3. 実機への適用

L-SIP は日本原子力発電株式会社敦賀発電所 2 号機の加圧器サージ管台（外径 390mm）の異材継手において初めて適用された[3]。異材継手は低合金鋼製の管台とステンレス鋼製のセーフエンドをニッケルクロム鉄合金（600 系合金）の溶接金属で溶接している。本施工においては、管台が比較的大きいことから、内面を水冷（溜め水）する施工法を採用した。

発電所における L-SIP 装置は以下の図 3 に示す構成となっている。屋外にレーザ発振器を搭載したコントローラーを設置し、300m のファイバで対象箇所のサージ管台までレーザを供給する。サージ管台には駆動装置を取り付け、光学ヘッドを搭載して管台周囲を回転できる構造となっており、約 40 分かけて管台を 1 周して照射を行う。

サージ管台はレーザの吸収率を良くし均一化させるため黒体を塗布し、温度監視用の熱電対を設置している。

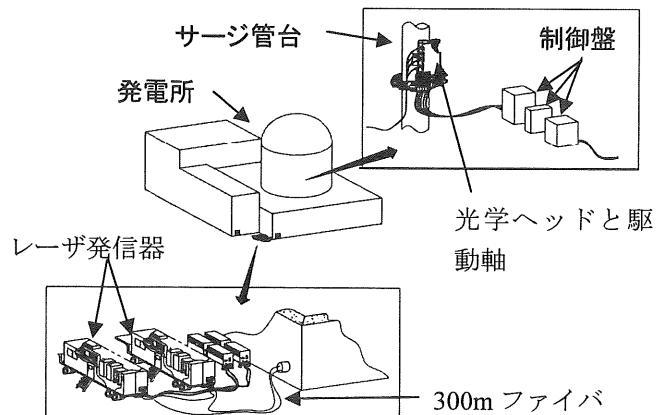


図 3 L-SIP 装置の構成

L-SIP の適用においては、以下の作業を実施した。

1) 条件出し試験

事前に工場においてサージ管台モックアップで照射試験を実施し、照射条件（出力、距離、光学ヘッド配列等）を検討した。（図 4 参照）

2) 施工前検査

サージ管台外面より、実証試験による検出性の確認されている超音波探傷試験[4]を、図 5 に示されている探傷ツールを用いて実施し、対象溶接部内面に有意な指示が無いことを確認した。

3) ハーフ加熱

実機管台に装置を設置後、レーザ出力を本加熱の約1/3～1/2としてレーザ照射を施工し、モックアップと実機管台の温度挙動が同等であることを確認した。

4) 本加熱

ハーフ加熱の結果を基に本加熱を実施した。本加熱は1周目の照射の始端部の効果を確保するため、開始位置を180度移動した2周目も施工される。両施工共に、求められる最高到達温度・昇温速度を満たしたため、施工を完了した。

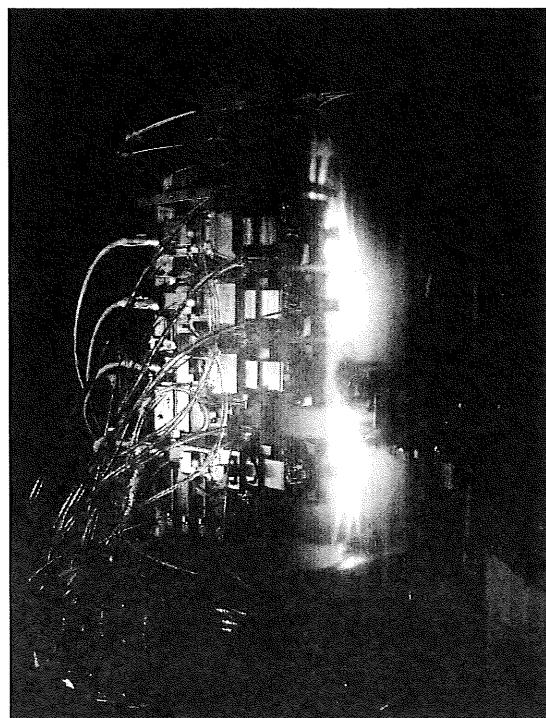
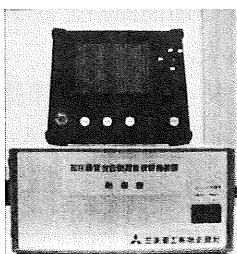
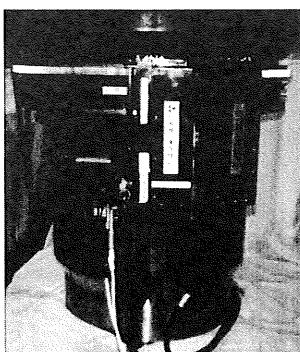


図4 モックアップ照射試験状況



(上) 制御盤
(左) 案内装置

図5 探傷ツール

4. 結言

- 1) 配管や管台内面の溶接部の引張残留応力低減方法として、レーザ外面照射応力改善法(L-SIP)を開発した。
- 2) 原子力発電所の加圧器サージ管台に適用し、求められる施工条件(最高到達温度、昇温速度)を満たして施工を完了した。

謝辞

敦賀発電所2号機での実機適用にあたり、多大なるご協力を頂いた日本原子力発電株式会社殿に感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 太田高裕ほか：レーザ照射応力緩和法の開発，第65回レーザ加工学会講演論文集(2005,12), P117
- [2] N. Sugimoto et al : Development of Outer Surface Laser Irradiated Stress Improvement Process (L-SIP), ICONE14-89375, 2006
- [3] T. Ueda et al : Application of outer surface irradiated laser stress improvement process (L-SIP) to pressurizer as residual stress improvement method for alloy 600 PWSCC mitigation, ICONE16-48379, 2008
- [4] 笹原利彦、直本保：PWR 加圧器管台異種金属溶接部 UT 検査手法の実証試験、保全学 Vol 6, No. 1 (2007), P21-P27