

平成 11 年度日本材料学会技術賞受賞

レーザーピーニング技術の開発と原子炉炉心シュラウドへの適用

(株) 東芝 佐野 雄二 小畑 稔 濱本 良男 嶋 誠之

1 はじめに

材料の表面に圧縮応力を形成すると疲労強度の改善や応力腐食割れ (SCC) の予防に効果が期待できるため、ショットピーニングによる残留応力改善が広く適用されている。

我々は、応力改善効果のより大きなプロセスとしてレーザーピーニング技術を開発するとともに、遠隔施工システムの開発および実証試験を行い、原子炉内構造物の SCC 予防保全対策として炉心シュラウドに適用した。

2 レーザーピーニングとは

パルス状のレーザーを集光して材料に照射すると、表面にプラズマが発生する。水中では水の慣性によってプラズマの膨張が抑制されるため、その圧力は急激に上昇する。レーザーピーニングは、プラズマが生成される際に発生する衝撃波を利用して材料の表層部を塑性加工することにより、圧縮残留応力を形成する技術である。

レーザーピーニングは応力改善効果が大いという特長の他、①遠隔伝送が容易、②装置が小型で狭い空間へのアクセスが容易、③非接触で照射反力がないため遠隔制御が容易など、優れた施工上の利点を有している。

図 1 にレーザー照射の様子を示す。ここでは水に吸収されにくい可視域のレーザーを使用して水中で施工を行っているが、必ずしも水中とする必要はなく、施工面に水を流して水膜を形成しながらレーザーを照射しても同様の効果を得ることができる。

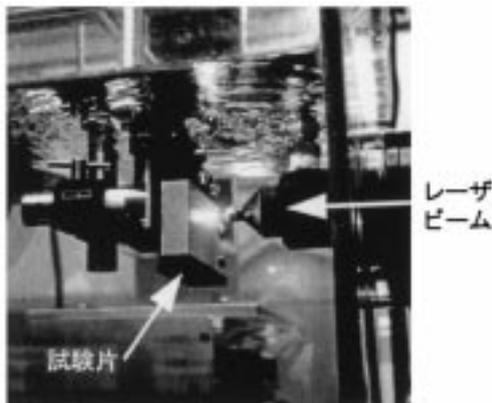


図 1 試験片のレーザーピーニング

3 レーザーピーニングの効果

Nd:YAG レーザ (波長: 532 nm, パルス幅: 8 ns) を使用して、20%の冷間加工を施した SUS304 鋼製試験片のレーザーピーニング施工を行った。レーザーの照射条件は、パルスエネルギー: 200 mJ, 照射スポット径: 0.8 mm, 照射回数: 36 パルス/mm²であり、図 1 に示すとおり簡易水槽中で試験片の表面に直接レーザーを照射した。

施工前後の残留応力分布を図 2 に示す。施工面には高い圧縮応力が形成され、また、圧縮応力層は表面から約 1 mm の深さまで達しており、大きな応力改善効果を示している。¹⁾

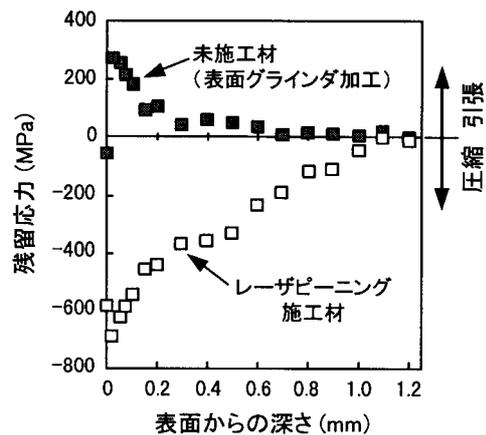


図 2 SUS304 (20%冷間加工材) の残留応力改善

残留応力の改善によって SCC の発生が防止できることを示すため、レーザーピーニング施工を行った試験片と未施工の試験片について SCC 試験を行い、レーザーピーニング施工を行うことによって SCC が抑制できることを確認した。^{2),3)}

4 原子炉炉心シュラウドへの適用

レーザーピーニングは遠隔での施工に適し、空間的に余裕の少ない箇所へのアクセスも比較的容易である。このため、他の方法では施工が難しい沸騰水型原子炉 (BWR) の炉心シュラウドと呼ばれる SUS304 鋼製の円筒状構造物を対象とした施工概念を検討し、装置の試作開発および機能試験を行った。

施工概念を図3示す。シュラウドとジェットポンプの間に施工ヘッドを挿入し、シュラウド外側溶接線の熱影響部にアクセスする。レーザー光は水密パイプとミラーで構成される伝送路内を通り、レーザー装置から施工ヘッドまで最長約40m伝送される。

施工ヘッド内にはレーザー光を高精度で二次元的に走査する機構があり、ヘッドの位置を固定した状態で一定の領域を施工する。次に、旋回装置を使用してヘッドを溶接線に沿って移動し、隣接した領域の施工を繰り返す。ここで、レーザーの照射位置は、特別に開発された自動アライメント機構によって±0.1mmという高い精度で制御される。

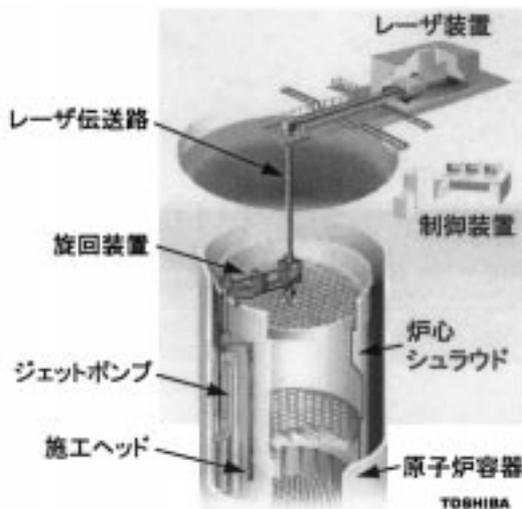


図3 BWR炉心シュラウドの施工概念

レーザーピーニング技術および施工装置の実プラントへの適用性を評価するため、原子炉を模擬した実規模の構造物を大型の水タンク内に設置し、遠隔施工試験を行った。図4に試験のようすを示す。

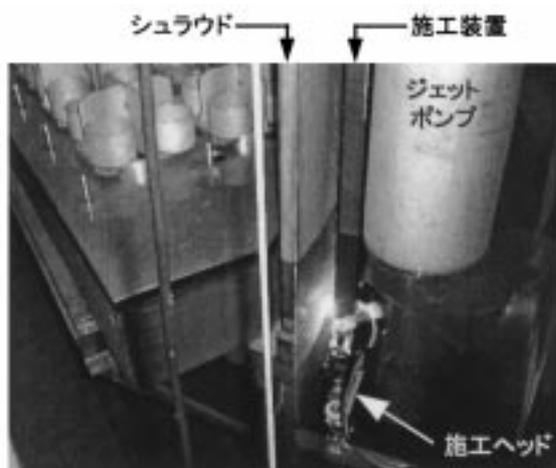


図4 炉心シュラウドの遠隔施工試験

模擬シュラウドとジェットポンプのすき間に施工装置を挿入し、シュラウド溶接線熱影響部に埋め込んだ試

験片にレーザーを照射した。施工終了後、水中から試験片を回収して応力測定を行い、遠隔施工による残留応力の改善効果を確認した。

実機炉内構造物の施工を模擬した実規模の遠隔施工試験で良好な結果が得られたことから、施工員に対する教育および訓練を行った後、1999年より実機への適用を開始した。³⁾

5 むすび

レーザーを直接水中でSUS304鋼に照射することにより、表面から深さ約1mmにわたって残留応力の改善が可能なことを確認した。また、BWR炉心シュラウドの施工を想定した実規模の組合せ試験を行い、遠隔施工により残留応力の改善が可能なことを実証した。本技術はすでに原子炉内構造物のSCC予防保全工事に適用され、原子力発電プラントの信頼性向上に大きく貢献している。

レーザーピーニングの適用範囲を拡大するため、光ファイバによる高出力レーザーパルスの伝送技術を開発した。⁴⁾ これにより、施工装置のアクセス性が大幅に改善された。また、施工ヘッドの更なる小型化開発も実施している。²⁾

金属材料表面の残留応力の改善は、SCCの予防の他、疲労強度の向上にも効果が高いことが知られている。我々は、レーザーピーニングがSUS304鋼の他、低合金鋼、ニッケル基合金(Alloy 600)、チタン合金、アルミニウム合金など、種々の金属材料に対して効果があることを確認している。また、解析的アプローチ^{2), 5)}により応力改善効果の定量的な予測も可能になりつつあり、部品の寿命延長や機器・構造物の信頼性向上の手段として活用されていくものと考えている。

参考文献

- 1) 小畑稔, 他, “パルス状レーザー照射による応力改善技術の開発 - SUS304鋼に対する応力改善効果の検討 -”, 材料, 49, 193 (2000).
- 2) Y. Sano, et. al., “Process and Application of Shock Compression by Nano-Second Pulses of Frequency-Doubled Nd:YAG Laser,” Proc. Int. Forum on Advanced High-Power Lasers and Applications (AHPLA'99), Osaka, November 1999.
- 3) Y. Sano, et. al., “Development and Application of Laser Peening System to Prevent Stress Corrosion Cracking of Reactor Core Shroud,” Proc. 8th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONE-8), Baltimore, April 2000.
- 4) 依田正樹, 他, “光ファイバによる20MWレーザーパルスの伝送とその応用”, レーザー研究, 28, 309 (2000).
- 5) 佐野雄二, 他, “レーザーの水中照射による金属材料の残留応力改善メカニズム”, 日本原子力学会誌, 42, 567 (2000).