

レーザピーニング法による原子炉内構造物の残留応力改善

Improvement of Residual Stress in Reactor Components by Laser Peening Method

佐野 雄二
SANO Yuji

須藤 亮
SUDO Akira

宮野 廣
MIYANO Hiroshi

原子炉内構造物の予防保全技術として、当社は応力腐食割れ(SCC)の発生を防止するレーザピーニング法を開発した。この方法は、パルスレーザを水中で照射したときの衝撃作用によって材料表面の残留応力を改善するもので、施工面の前処理が不要で狭い箇所の施工に適しているという特長がある。当社は、レーザピーニング法がステンレス鋼表面の残留応力の改善およびSCCの抑制に効果があることを示すとともに、沸騰水型原子炉炉内構造物への適用を目的としたレーザ伝送技術、施工装置、監視システムなどを開発し、実規模の水中組合せ試験を行って遠隔での施工性を確認した。

We have developed a laser peening method to prevent stress corrosion cracking (SCC) as a process for preventive maintenance of core components in nuclear reactors. This method, which utilizes the impulsive effect of underwater irradiation by intense laser pulses to improve residual stress on the material surface, requires no preconditioning of the material surface and is suitable for maintenance work in narrow spaces. Through experiments, we confirmed the effect of the laser peening method in improving the residual stress of stainless steel and suppressing SCC. A laser delivery system, remote maintenance equipment, and an on-line monitoring system were developed and the feasibility of the laser peening method was confirmed through full-scale mockup tests simulating maintenance work on the core shroud of a boiling water reactor (BWR).

1 まえがき

原子力発電は、現在わが国の電力需要の30%を賄う重要な位置を占めている。稼働中の原子力発電所も50基を超え、安全かつ安定に運転を継続することは社会的にも重要な責務となっている。また、一方では運転開始後20年を超える発電所が増加し、経年化の対策が重要性を増している。このため、従来から実施している点検、検査、および不具合の生じた機器の補修、交換に加え、不具合を未然に防止するための予防保全が特に重要視されており、種々の技術開発が進められている。当社は、溶接熱影響部のSCCの防止を目的としたレーザピーニング法による残留応力の改善技術を世界で初めて開発した。この方法は、水中透過性の高い可視領域のパルスレーザを直接水中で材料に照射し、そのときの衝撃作用を利用して表面の応力状態を引張りから圧縮側に改善する技術である。

ここでは、レーザピーニング法の原理、効果、特長を述べた後、沸騰水型原子炉(BWR)のシュラウドを想定した施工装置の開発状況、および実規模モックアップを使用した水中での組合せ施工試験の結果について述べる。

2 レーザピーニング法の原理と効果

2.1 応力改善の原理

レーザピーニング法による残留応力改善の原理を図1に

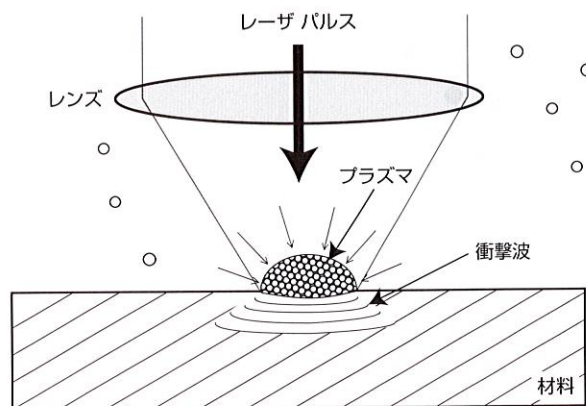


図1. レーザピーニング法による残留応力改善の原理 レーザ照射の衝撃力で金属の表面を塑性変形させ、残留応力を改善する。
Principle of residual stress improvement by laser peening method

示す。パルス幅10ns(10^{-8} 秒)程度の強いレーザ光を材料に照射すると、表面に高圧のプラズマが発生する。空気中と比較して水中では水の慣性によるプラズマの閉じ込め効果が強く働き、プラズマの圧力は数GPaに達する。この圧力によって衝撃波が発生し、材料中を伝播(ば)する。衝撃波による動的な応力が材料の降伏応力を超えると塑性変形が生じ、表面に圧縮応力が形成される。

2.2 レーザピーニング法の効果

原子炉内構造物の構成材料として使用されているオーステナイト系ステンレス鋼(SUS304)に対して、レーザピーニ

ング法による施工を行い、残留応力の改善効果を確認した。レーザー光源には、パルス発振のYAGレーザー（赤外光、波長 $1.06\mu\text{m}$ ）を水中透過性の高い可視光（緑色、波長 532nm ）に変換して使用した。試験片には、中性子の照射による硬度上昇を模擬するため20%の冷間加工を施し、さらに表面に引張り残留応力を付与するためグラインダ加工を行った。残留応力値はX線応力測定法によって測定し、電解研磨を繰り返して深さ方向の残留応力のプロファイルを求めた。

レーザーピーニング施工材および未施工材の残留応力プロファイルの一例を図2に示す。表面から約1mmの深さにわたって圧縮応力が形成されており、レーザーピーニング法は十分な応力改善効果をもつことを確認した。

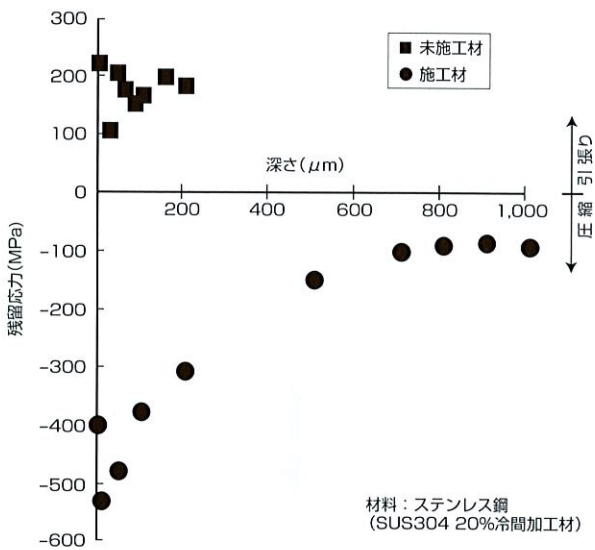


図2. レーザーピーニング法による残留応力の改善効果 約1mmの深さまで応力改善の効果がある。
Residual stress improvement effect of laser peening method

次に、残留応力の改善により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後および未施工の試験片各5体についてSCCを加速する条件で試験を行い、試験片の表面および断面を観察した。断面観察結果の例を図3に示す。未施工材では図3と同様なSCCが5体の試験片すべてに発生していたが、施工材には発生せず、レーザーピーニング施工によってSCCが抑制できることを確認した。

2.3 レーザーピーニング法の特長

レーザーピーニング法について、施工の特長を整理すると、次のようになる。

- (1) 施工面の前処理が不要である。
- (2) 水中での直接施工ができる（パージガス不要）。
- (3) 非接触で施工の反力がないため、遠隔制御性に優れる。
- (4) 施工ヘッドの小型・軽量化が可能で、狭い場所での

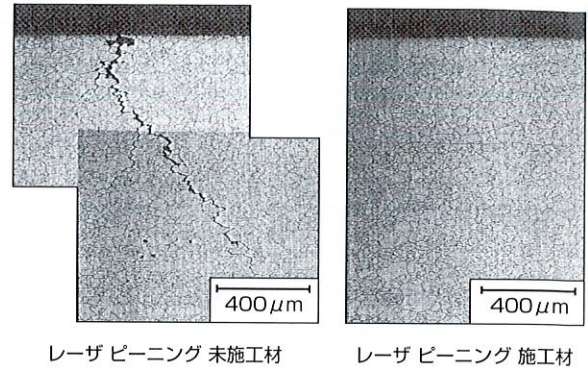


図3. ステンレス鋼に対するSCC試験の結果 レーザーピーニング施工を行うことで、未施工材で発生したようなSCCを防ぐことができる。
Result of SCC test on type 304 stainless steel

施工が容易である。

(5) 残留応力の改善効果が高い。

また、レーザーピーニング法は使用するレーザー装置の平均出力が数十Wと小さく、さらにレーザーのパルス幅が10ns程度と極端に短い。このため、レーザー溶接法などと比較すると材料に入る熱の量がけた違いに低く、材料に対する熱的な影響が極めて小さいという特長をもっている。実際に、施工後の表面および断面を詳細に観察しても、材料が溶融した痕（こん）跡は皆無である。

3 BWR シュラウド施工装置の試作開発

レーザーピーニング法は遠隔での施工に適し、また空間的に余裕の少ない個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、BWRシュラウド外面の溶接熱影響部の残留応力改善を目的とした施工概念を検討し、必要な技術開発と装置の試作開発を行った。

3.1 施工概念の検討

図4にシュラウド外面の施工概念を示す。アニュラス部（原子炉容器とシュラウドのすき間）に施工ヘッドを挿入し、シュラウド溶接線にアクセスする。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約40m伝送される。施工ヘッドにはレーザー光を二次元的に走査するスキャン機構があり、ヘッドの位置を固定した状態で一定の領域（例えば $30\text{mm} \times 30\text{mm}$ ）を施工する。次に、回転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。

3.2 レーザの遠隔伝送技術の開発

一般に、可視域の光は光ファイバによる伝送が可能であるが、レーザーピーニングに必要なレーザーの出力は瞬間的に数万kWにも達するため、光ファイバの損傷の可能性が避けられず、信頼性の確保が難しい。このため、複数の伝送

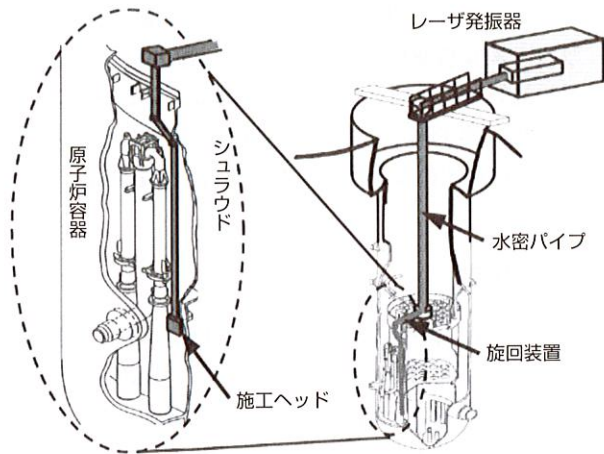
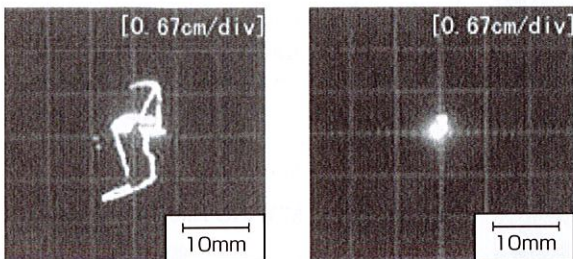


図4. BWR炉内シュラウド外面の施工概念 レーザ光を約40m伝送し、原子炉容器とシュラウドに挟まれた狭い空間へアクセスする。
Concept of application to outer weld line of BWR core shroud

ミラーによる関節型の伝送方式を開発した。

関節型の伝送方式の場合、装置の振動や温度変化が大きな問題となる。レーザー装置や伝送ミラーにわずかでも角度変位が生ずると、伝送によりその変位が拡大されるため、施工点での位置精度の確保が難しくなる。このため、施工ヘッド内に特殊な反射鏡(レトロリフレクタ)を設置してレーザービームの変位を測定し、その変位量をフィードバックして伝送ミラーの傾きを調整することにより、施工ヘッドに入射するビーム位置をリアルタイムで制御できる自動アライメント装置を開発した。

レーザーを40m伝送したときのビーム位置測定結果を図5に示す。自動アライメント機能を使用しない場合にはビーム位置(図5の輝点)が大きく揺らいでいるが、アライメント機能を使用することによりビーム位置を一点に制御することができるようになった。レーザービームは施工ヘッド内の集光レンズでさらに絞り込まれるため、0.1mmの精度で



アライメント機能を使用しない場合 アライメント機能を使用した場合

図5. レーザ光の40m伝送試験結果 自動アライメントによりレーザービームの揺らぎを防ぎ、施工位置を正確に制御することができる。

Result of 40m laser delivery test

施工点を制御することができる。

3.3 遠隔施工装置の開発

遠隔施工装置には、レーザーの光路を確保し、レーザー装置から施工ヘッドまでの光学的な直線性を保障しつつ施工対象の溶接線に沿ってヘッドを移動する機能が要求される。また、施工ヘッドは、レーザーの二次元スキャン機能や監視機能をはじめとする種々の機能を限られたスペース内で実現する必要がある。

試作した施工ヘッドの外観を図6に示す。アニュラス部へ挿入するため、ヘッドの寸法は幅100mm、厚み50mmとした。シュラウド面は図6では平行手前となり、レーザービームは白矢印のようにヘッド上方から入射し、スキャンミラーで手前方向に照射される。施工範囲は30mm×30mmで、0.1mmの施工位置精度を確保している。また、最大水深30mを考慮した耐水圧性と耐放射線性を考慮している。

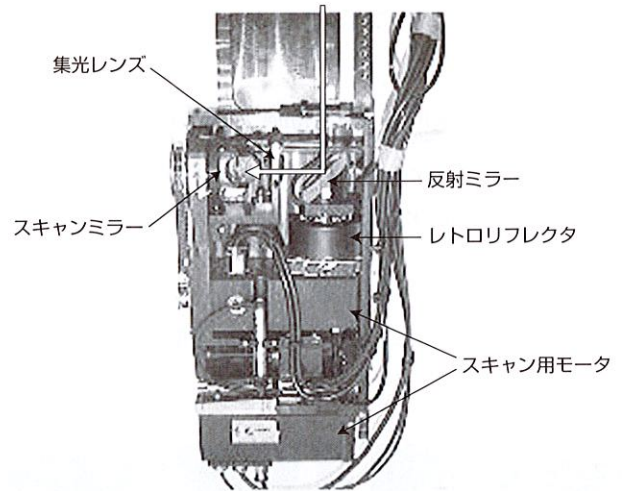


図6. シュラウド外面用施工ヘッド レーザのスキャン機能や監視機能を、幅100mm、厚み50mmのヘッドで実現している。
Irradiation head for outer weld line of BWR core shroud

3.4 施工監視システムの開発

原子炉構造物を対象とした作業では水中カメラによる監視ができる場合もあるが、複雑で狭い個所では寸法的な制約やアクセス性の問題から使用できないことが多い。また、レーザーを使用する施工ではハレーションを回避する必要がある。

当社は、レーザーピーニング施工に伴う超音響信号を利用したオンライン施工監視システムを開発した。図7に開発したシステムの構成を示す。このシステムは、施工ヘッドに設置した3個の小型超音波マイクでレーザーピーニング施工音を収集し、その伝達時間の差から音源、すなわち施工点の三次元的な位置を同定、表示するものである。

このシステムを使用すると、実時間で施工点(レーザーの照

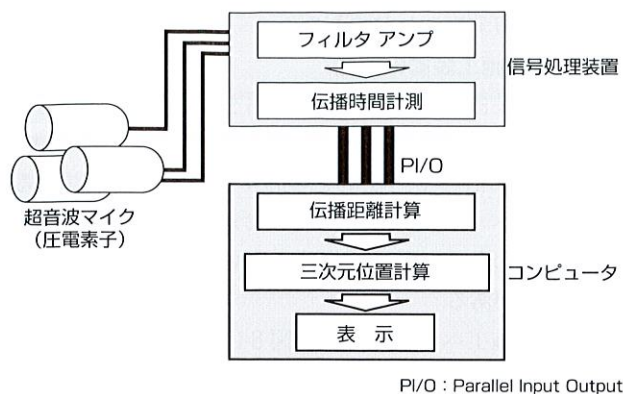


図7. 施工監視システムの構成 施工音を3個のマイクで収集し、伝播時間の差から施工位置を計算、表示する。

Functional scheme of on-line monitoring system

射位置)を監視できるうえに、施工面の起伏を0.1mm程度の精度で測定できるため、溶接線の肉盛位置を確認しながら熱影響部を施工することができる。

4 実規模試験による遠隔施工性の確認

レーザーピーニング法の実プラントへの適用性を評価するため、炉内構造物の実規模モックアップを使用した水中組合せ試験を行った。

図8に試験のようすを示す。大型の水タンク内に設置した50万kW級BWRセクターモデルを使用し、原子炉容器

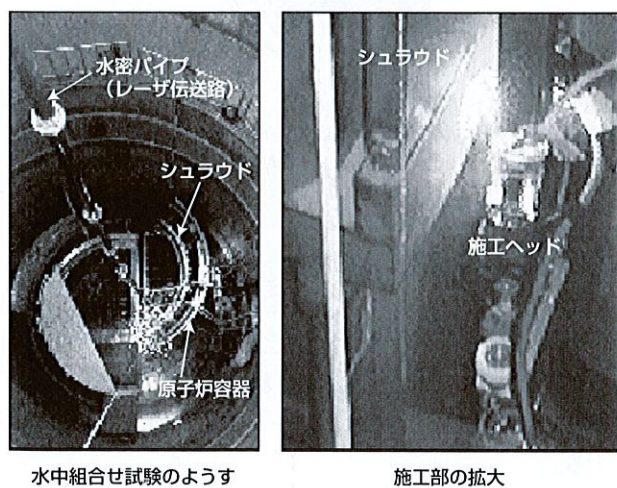


図8. レーザーピーニング法実規模モックアップ試験 実規模の炉内構造物に対する水中施工試験を行い、遠隔で残留応力が改善できることを実証した。

Full-scale mockup test of laser peening method

とシュラウドのすき間に長さ約4mの施工装置を挿入した。シュラウド溶接線熱影響部に設置した試験片の表面を、施工装置先端の施工ヘッド(図6参照)でレーザーピーニング施工した。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。

5 あとがき

レーザーを直接水中でステンレス鋼(SUS304)に照射することで、表面から深さ約1mmにわたって残留応力の改善ができ、SCCの発生を防止できることを確認した。また、BWR炉内構造物の施工を想定した実規模の水中組合せ試験を行い、遠隔施工による残留応力の改善ができることを実証した。今後、この技術を原子炉内構造物の予防保全工事に適用していく計画である。

金属材料表面の残留応力の改善は、SCC対策のほか、疲労強度の向上にも効果が高いことが知られている。当社は、レーザーピーニング法がステンレス鋼(SUS304)のほか、ニッケル基合金(Alloy 600)に対しても同様の効果があることをすでに確認しており、鉄鋼材料やアルミニウム合金などへの適用もできると考えている。

文献

- (1) 木村元比古, 他. 原子炉内リフレッシュ技術の開発. 日本原子力学会誌. 39, 1997, p.575-581.
- (2) Sano, Y., et al. "Laser Peening: A Novel Tool to Improve Residual Surface Stress on Reactor Internals." Proc. of 6th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE-6), San Diego, California, May 1998.
- (3) Sano, Y., et al. "Residual Stress Improvement in Metal Surface by Underwater Laser Irradiation." Nucl. Instrum. & Methods Phys. Res. B 121, 1997, p.432-436.



佐野 雄二 SANO Yuji

電力・産業システム技術開発センター 原子力技術研究所 主査。レーザーによる原子炉保全・補修システムの開発に従事。日本原子力学会，レーザー学会，電気学会会員。

Nuclear Engineering Lab.



須藤 亮 SUDO Akira, D.Eng.

電力・産業システム技術開発センター 原子力技術研究所 グループ長，工博。原子炉用材料・機器システムの開発に従事。日本原子力学会，日本機械学会，腐食防食協会会員。

Nuclear Engineering Lab.



宮野 廣 MIYANO Hiroshi

磯子エンジニアリングセンター 原子力第一システム設計 部長。原子力システム，機器，保全技術の開発・設計に従事。日本原子力学会，日本機械学会会員。

Isogo Nuclear Engineering Center