



レーザー加工トーチを用いた配管表面肉盛溶接技術の研究

A Study of Cladding Technology on Tube Wall Surface by a Hand-held Laser Torch

日本原子力研究開発機構	寺田 隆哉	Takaya Terada	Member
日本原子力研究開発機構	西村 昭彦	Akihiko Nishimura	Member
OK ファイバーテクノロジー	岡 潔	Kiyoshi Oka	Member
三井化学株式会社	森山 拓	Taku Moriyama	
三井化学株式会社	松田 宏康	Hiroyasu Matsuda	

New maintenance technique was proposed using a hand-held laser torch for aging chemical plants and power plants. The hand-held laser torch was specially designed to be able to access limited tubular space in various cases. A composite-type optical fiberscope was composed of a center fiber for beam delivery and surrounded fibers for visible image delivery. Laser irradiation on a work pieces with the best accuracy of filler wire was carried out. And, we found that the optimized wire-feed speed was 2 mm/s in laser cladding. We succeeded to make a line clad on the inner wall of 23 mm tube. This technique was discussed to be applied to the maintenance for cracks or corrosions of tubes in various harsh environments.

Keywords: laser processing, laser cladding, tube maintenance

1. 緒言

近年、レーザー光技術の進展は目覚ましく、プラント保守保全の分野においても多くの技術が応用されている。レーザー溶接は、エネルギー密度が高い、急熱急冷のため入熱が小さく周辺への熱影響が小さい、非接触のため狭隘な部分での施工が容易などの特長があり、既存の施設での補修工法として適している[1,2,3]。波長や作用時間、パワー密度を変化させることで対象物に様々な現象を誘起することもレーザー加工の特長であり、材料表面改質[4,5]やピーニングによる残留応力の改善[6]など、レーザー加工特有の技術応用も実用化が進んでいる。材料表面除染への適用[7]、光ファイバーセンサによる新しい計測、状態監視技術開発も進展している[8,9]。

プラントの保守保全技術には、劣化の発生を抑制する

予防技術、劣化の状態を監視する計測技術、そして初期の状態に復帰させる補修技術等に大別できる。例えば、応力腐食割れを抑制するピーニング技術[6]は代表的な予防技術である。計測技術としては、パルスレーザーによる超音波で材料内の損傷を検出する方法[8]や、材料内で発生した微視的な亀裂や剥離等の微小弾波をファイバーとレーザードップラー干渉光学系で検出する方法[9]が挙げられる。一方、補修技術として、原子力機構では、これまでレーザー光技術によるプラント保守保全の研究開発を進めてきた。そのひとつが高速炉（FBR）熱交換器伝熱管の補修技術開発である[10,11]。1インチ伝熱管内において渦電流探傷（ECT）により配管内壁のクラック損傷を発見し、画像観察下でレーザーを照射、熔融させて補修するプローブシステムを完成させた[10]。高速増殖炉研究開発センター敷地内の蒸気発生器モックアップ試験設備において、直管型伝熱管内の模擬欠陥をECTで発見し、複合型光ファイバーシステムにより目視確認、欠陥形状に沿ったレーザー照射、補修に成功した[11]。

本研究ではこの技術を発展、高度化させ、プラント現

連絡先: 寺田隆哉、〒914-8585 福井県敦賀市木崎65-20、日本原子力研究開発機構敦賀本部レーザー共同研究所、E-mail: terada.takaya@jaea.go.jp

場に持ち運び可能なレーザー加工トーチの開発およびそれを用いた予防保全への技術応用に取り組んでいる。配管系など流体作用による腐食が起こりやすい機器、設備においては、それぞれの環境に応じた損傷進展予測モデルの研究が盛んに行われている[12]。予測される腐食損傷の進展しやすい材料表面は、あらかじめその原因に対応した耐食性材料を表面に肉盛することで、予防保全となる。本研究では、配管内等狭隘空間において、同様の予防保全の実施可能性について検討した。また、高温、酸化、放射線、電磁応力等の過酷な環境に暴露されるプラントである石油化学プラント、高速増殖炉、熱核融合炉について、本技術の適用可能性を検討した。

2. レーザー加工トーチおよびシステム概要

図1に開発したシステム構成図を示す。ファイバーレーザー、カップリング装置、ワイヤ送給装置、画像確認用モニタ、複合型光ファイバー、レーザー加工トーチから構成される。複合型光ファイバーは200 μ m径のレーザー伝送用ファイバーを中心に、周囲に20000本の画像伝送用ファイバーがバンドルされた構造になっている[10]。レーザー光はカップリング装置内で複合型光ファイバーの中心に導光され、トーチ先端から対象物に照射される。また、LED照明で照らされた対象物の像はトーチ先端からのファイバー画像伝送部に導光され、カップリング装置内でCCD上に結像、モニタに表示される。カップリング装置内ではダイクロイックミラーによってレーザー光の近赤外波長と可視光を分離している。レーザー源には空冷式ファイバーレーザー（IPG Photonics、YLR-150/1500-QCW-AC）を用いている。ピークパワーは最大1.5kW、パルス幅は0.5-10ms、繰り返し周波数は1-10HzのQuasi-CWモードで発振可能である。

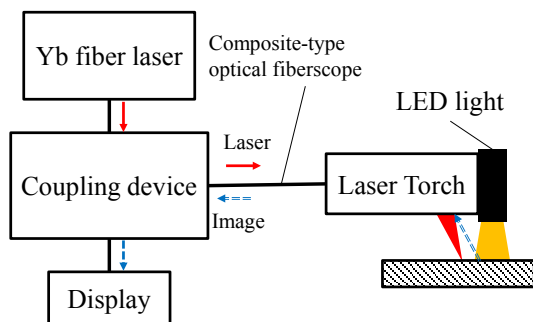


Fig.1 Schematic view of laser processing system

図2にレーザー加工トーチを示す。本体の大きさは外

径15mm、全長120mmである。2枚のレンズと先端部に耐熱ミラーを配置し、配管に挿入した際、内壁表面にレーザー光が集光される。耐熱ミラーは反射角度55°のロッドミラーである。銅基板にアルミ蒸着し、その上に誘電多層膜を蒸着することで、可視光とレーザー光を反射している。トーチ内には加工雰囲気用のガスを流入させ、先端部から対象物に対して噴射する。このガスはレンズ、ミラーを冷却し、スパッタなど付着物から光学系を保護する役割もある。図3はトーチシステムを通じて得られた観察像の一例である。中心の白丸はレーザー照射スポットを示している。対象物を画像で中心にとらえることができるため、細径ワイヤでも容易にレーザー照射スポットへの送給を調整することができる。本研究ではレーザー照射スポットサイズをおよそ1.0mmに調整した。

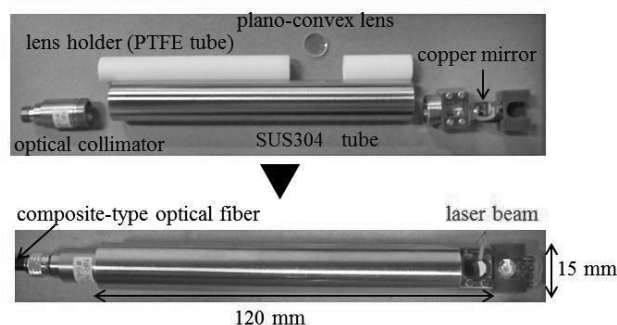


Fig.2 Photograph of laser torch

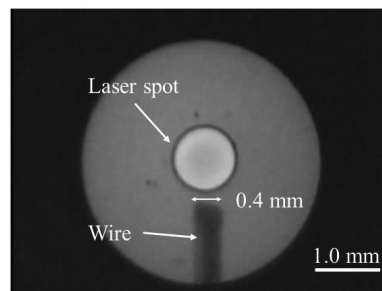


Fig.3 Observation image by laser torch system

3. レーザー加工トーチによる肉盛溶接試験

3.1 平板への肉盛溶接試験方法

レーザー加工トーチを立向き姿勢に配置し、平板鋼材への肉盛溶接試験を行った。試験体系の模式図を図4に示す。試験片は50×50×t5 mmのS45C平板、ワイヤは ϕ 0.4mmのCr-Mo系素材を用いた。表1にそれぞれの化学組成を示す。固定したレーザー加工トーチの側面に ϕ 2mm真鍮管を配置し、管を通じてレーザー照射スポットにワイヤを送給した。ワイヤ送給位置は図3に示す画像

観察によってレーザー照射スポットと一致するように調整した。真鍮管の先端には 10mm 程度のアルミ管を固定し、溶接時にワイヤと送給管が溶着することを防止した。垂直に配した直動ステージに S45C 平板を固定し、平板を一定速度で動作させた。直動ステージはラボジャキと固定し、レーザートーチと平板の距離を調整した。また、平板とワイヤ供給用真鍮管の間の電位差を計測し、ワイヤ先端と母材の接触を確認した。

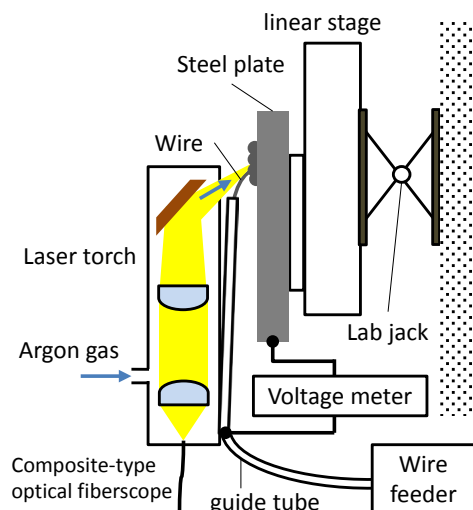


Fig.4 Schematic view of experimental setup

Table1 Chemical composition of experimental materials

Element (%)	S45C plate	Wire
C	0.44	0.089
Si	0.25	0.59
Mn	0.77	1.12
P	0.015	0.008
S	0.011	0.008
Cu	0.08	0.01
Ni	0.05	0.02
Cr	0.12	1.35
Mo	—	0.56

レーザー、ワイヤ条件を表 2 に示す。今回の試験では溶接速度とワイヤ速度の関係を明らかにするために、溶接速度を 2.0 mm/s で一定とし、供給するワイヤ速度を 1.0-4.0 mm/s に変化させた際の肉盛品質の評価を行った。雰囲気ガスにはアルゴンを用い、トーチ内部を通じて 5 L/min で供給した。試験は以下の手順で行った。(1)自動ステージにより肉盛溶接開始位置まで S45C 平板を移動させた。(2)トーチ画像において、ワイヤ先端がレーザー

照射スポットと重なる位置まで前進させた。(3)ラボジャキを作動し、平板をトーチ側に接近させ、ワイヤ母材間の電位差が 0V になる位置で停止した。(4)アルゴンガス供給、レーザー照射、ワイヤ送給、直動ステージ移動によりレーザー肉盛溶接を開始した。これらのタイミングは PC プログラムから一括制御した。今回の試験では自動ステージによって垂直に設置した平板を上方へ 8 秒間移動し、約 16 mm の直線肉盛列を形成した。平板には、あらかじめレーザー照射を行い、直線状に照射痕を形成した。これによりレーザー吸収率を向上させ、照射痕の上に肉盛溶接を行った。

Table2 Experimental conditions

Laser	Peak power	1.0 KW
	Duration time	10 ms
	Frequency	7 Hz
	Spot size	1.0 mm
Wire	Diameter	0.4 mm
	Feed rate	1.0, 2.0, 3.0, 4.0 mm/s
	Weld speed	2.0 mm/s
Gas	Rate	5L/min

肉盛結果サンプルは光学顕微鏡（キーエンス、VHX-5000）を用いて表面観察を行った。また焦点深度の浅い倍率で画像撮影し、レンズを Z 軸方向に移動させて複数枚の画像を取得した。それぞれの画像において焦点位置を算出し、レンズ位置との関係から直線肉盛ビードの三次元画像を取得した。三次元画像において肉盛方向に対して垂直断面の形状を観察し、1つの肉盛ビードにつき 2,3 か所、代表的な断面を選択した。選択した断面において、肉盛した平板サンプルをワイヤカットにより切断した。切断したサンプルは樹脂に包埋し、表面を鏡面研磨したのち 5%ナイタールに浸した。処理したサンプルは落射照明を用いて光学顕微鏡で観察した。

3.2 平板肉盛溶接試験結果

レーザー肉盛溶接中のトーチによる観察画像を図 5 に示す。レーザー肉盛前にあらかじめ作成した約 1mm 幅の照射痕上を、下方からレーザー照射スポットである中心円に向かってワイヤが送給される様子が確認できた。また中心円から上方にむかって溶接ビードが形成されている様子が確認できた。レーザー照射中は反射光と溶融部

からの輻射の影響でハレーションが起り、観察が困難であった。本試験では 10 ms のレーザー照射と 133 ms の未照射時間の繰り返しであるため、CCD による 30 フレーム/秒の観察では、およそ 4 フレーム中 1 フレーム観察困難となったが、残りの 3 フレームでは影響が軽減された。そのため、肉盛溶接中の 8 秒間を通じて、ワイヤが照射スポットに供給され、ビードが形成される様子を確認することができた。

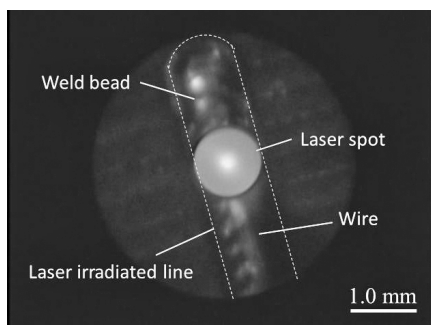


Fig.5 Optical images by laser torch during laser cladding

図 6 にワイヤ供給速度 2 mm/s のときの 1 列肉盛サンプルを光学顕微鏡で観察した結果を示す。図 6(a)の全体像より、直線上に良好なビード形成が確認できた。図 6(b)は(a)の枠で囲まれた部分を拡大図である。ビード幅はレーザー照射径 1 mm と同程度であり、1 パルスごとの肉盛が重なりあってビードを形成した。今回の試験は立向き姿勢での肉盛溶接であったが、重力による溶融池垂れ下がり等の影響は確認されなかった。図 6(c)は(b)の横線において、Z 座標をプロットした結果である。この断面においてビードは、幅 900 μm、高さ 200 μm であり、母材との接触角は左側が 25°、右側が 33° と計測された。左

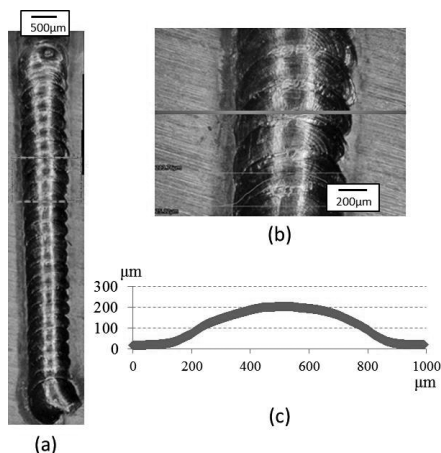


Fig.6 A line clad (a) whole image of a line clad (b)close up image (c) cross-section coordinates

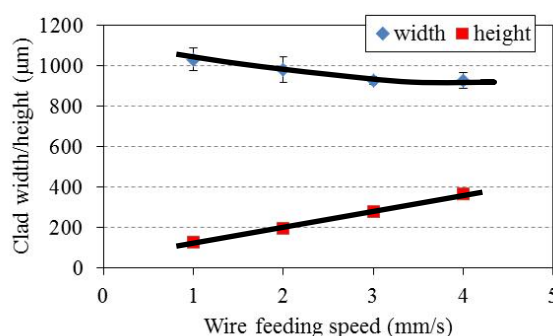
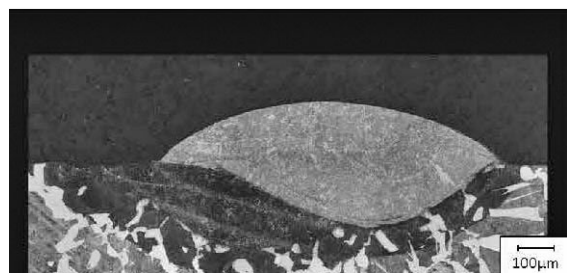


Fig.7 Width and height of line clads

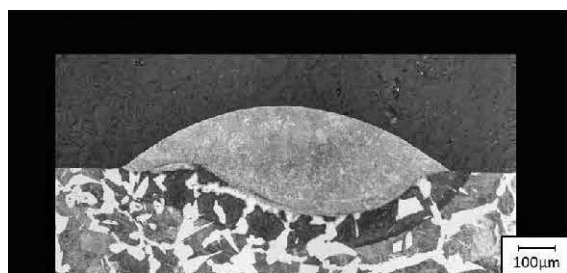
右の接触角度の違いは、レーザー照射径 1 mm に対し、0.4 mm のワイヤの供給位置が中心よりずれることで起こったと考えられる。同様の断面形状計測を 1 条件につき任意の点 10 箇所で行い、高さとの平均を算出した結果を図 7 に示す。ワイヤ供給速度の増加に伴い、ビード幅は緩やかに減少し次第に飽和の傾向を示すのに対して、ビード高さはワイヤ供給速度と比例して増加した。

顕微鏡による非接触の断面形状観察から、左右対称で良好な面を選定し、切断、表面処理を行った。処理したサンプルの光学顕微鏡による観察結果を図 8 に示す。今回の観察は落射照明による反射光を利用しているため、観察表面の形状が平滑であれば白色に、凹凸があれば黒色に観察される。母材 S45C において、白色部分の構造はフェライト、灰色部分の構造はパーライトである。母材とワイヤ金属の間には、黒色の熱影響部が認められ、レーザー照射による入熱により、マルテンサイト変態を生じている。今回の試験ではどの条件においても熱影響部近傍に割れは確認されなかった。またワイヤ金属においては溶融凝固後、母材側に溶け込んでいる部分が確認できた。熱影響部の最深部は約 250 μm であり、どの試験条件でも有意な差は認められない。一方、溶け込み深さはワイヤ供給速度 1-4 mm/s のときそれぞれで、およそ 153 μm, 133 μm, 94 μm, 51 μm となり、速度が上がるにつれて浅くなる。肉盛高さに対する深さの比を算出するとそれぞれ、1.26, 0.75, 0.4, 0.17 となり、3mm/s 以上において溶け込み深さが肉盛部分の半分以下であった。図 8(d)において、肉盛の右上部に円形のブローホールや熱影響部近傍に三日月状の空隙が確認された。三日月状の空隙は肉盛の過程で供給されるワイヤが折り重なるように堆積されたものある。肉盛の厚みが増すにつれて表面から内部に熱伝導で供給される熱量が不足する。これが空隙の原因である。欠陥の有無から考えると、ワイヤ供給速度は 3

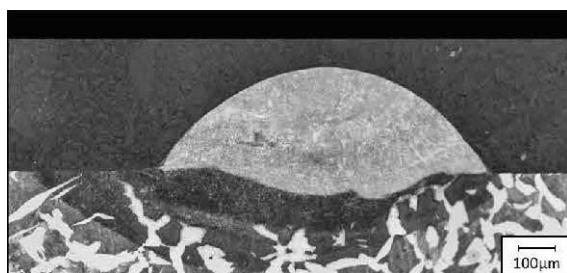
mm/s 以下である必要があり、さらに溶け込み深さから考えるとワイヤ送給速度は溶接速度と同じ 2mm/s が最適である。



(a) 1 mm/s



(b) 2 mm/s



(c) 3 mm/s



(d) 4 mm/s

Fig.8 Cross section images of clad sample

3.3 配管内壁肉盛試験

3.2 節の結果をもとに、表 2 においてワイヤ送給速度を 2 mm/s とした際の肉盛溶接条件において、立向き姿勢での配管内壁への肉盛試験を行った。内径 23 mm、管厚 4.5 mm、長さ 50 mm の S45C 配管を用い、図 4 と同様に配管を自動ステージに固定し、垂直方向に移動させた。トーチは配管の下部から挿入し、上端近傍を溶接開始位置とした。3.1 節と同様の実験手順で実施した。

図 9 に試験結果を示す。図 9(a)は肉盛した配管サンプルの配管外側からの撮影像である。内径 23 mm 配管において、内壁面への 1 列肉盛試験に成功した。肉盛ビードの幅は約 1 mm、肉盛高さは約 200 μm であった。外観形状から、図 8(b)と同程度の溶け込みだと推測される。図 9(b)はレーザー加工トーチにより撮影した 5 枚の肉盛観察画像を連結した図である。良好なビード形状が確認できた。立向き姿勢での肉盛試験であるが、重力によるビード形状の変形は見られなかった。

図 9(a)は肉盛した配管サンプルの配管外側からの撮影像である。内径 23 mm 配管において、内壁面への 1 列肉盛試験に成功した。肉盛ビードの幅は約 1 mm、肉盛高さは約 200 μm であった。外観形状から、図 8(b)と同程度の溶け込みだと推測される。図 9(b)はレーザー加工トーチにより撮影した 5 枚の肉盛観察画像を連結した図である。良好なビード形状が確認できた。立向き姿勢での肉盛試験であるが、重力によるビード形状の変形は見られなかった。

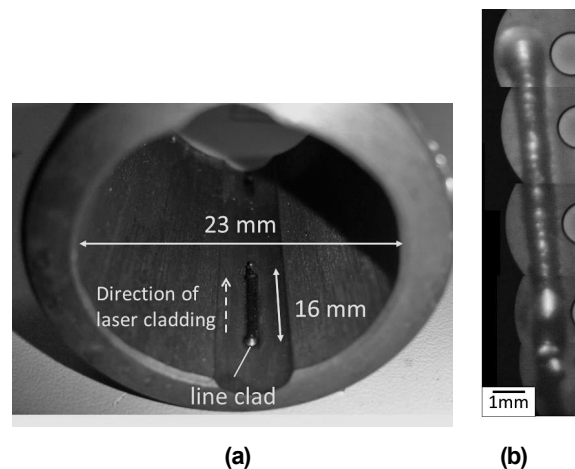


Fig.9 A line clad on inner wall of 23mm tube

(a) photograph from outside (b) image by laser torch

4. 考察

4.1 レーザー加工トーチシステムの利点

開発したシステムを用いて 23mm 配管内壁への肉盛溶接試験に成功した。我々のこれまでの経験上、アーク溶接トーチを用いて 23mm 配管内壁への肉盛溶接を行ったことがあるが、溶融池を直接目視確認することが難しく、良好なビード形成が困難であった。また、狭隘空間にて溶接することも非常に困難で、熱量過多によるトーチ端部の損傷や熱影響が配管外壁まで達している状況が見受けられた。観察技術とエネルギー密度の高い熱源であるレーザーを用いた加工を組み合わせた本技術は、このような課題を克服するのに適していると言える。

また、今回の溶接試験では QCW ファイバーレーザーによりパルス幅 10ms で行った。熱拡散長 L は熱拡散率 D と時間 t の積の平方根の 2 倍である。300 K での炭素鋼の D は $13.9 \text{ mm}^2/\text{s}$ であることから、 $t=1\text{s}$ のとき $L=7.5\text{mm}$ 、 $t=10 \text{ ms}$ のとき $L=0.75\text{mm}$ と計算される。こ

のことより、CW レーザーを用いた溶接の場合、溶接速度によっては配管外壁まで熱影響部が達し、新たな損傷要因となる恐れがある。

溶接補修において、溶接姿勢は溶融池に作用する重力の方向が異なるため、溶接条件や品質に影響を与えることが知られている[12]。今回の試験では立向き姿勢でレーザーを照射し、下方向からワイヤ送給を行った。そのため溶融地が重力により垂れ下がり、ワイヤ送給を阻害することが予想されたが、試験結果からは影響は見られなかった。QCW レーザーによる肉盛溶接では、形成される溶融池が浅く、短時間での溶融凝固を繰り返すため、重力の影響が小さかったと考えられる。

4.2 過酷環境下で作動するプラント機器への応用

狭隘空間において画像観察とその場でレーザー溶接補修を行う本技術は、過酷環境下で作動する各種プラント機器の保守保全への応用が考えられる。

石油化学工場を中心施設であるエチレンプラントでは、ナフサ、LPG などの炭化水素を分解炉において熱分解し、800°Cを超える高温の混合ガスを生成する。一般的に高温ガスは熱分解炉の出口側に設置された多管円筒形熱交換器によって迅速に冷却される。高温ガス中にはコークスが含まれており、配管機器の腐食原因となっている[14]。特に大口径配管から多管円筒形熱交換器の1インチ伝熱管へ流入する領域では、流体の乱れが激しく、コークスによる腐食を促進させる要因となっている。この対策として、あらかじめ入口付近の配管内壁表面に高温腐食耐性のある材料をコーティングし、腐食を予防する方法が考えられる。800°Cを超えるガス環境下でも、内壁に施したコーティングが強度を保つ一方で、コーティング時に母材配管の熱変形を起こさない方法が求められる。このためには、本研究で行ったワイヤ送給によるレーザー肉盛溶接が役立つであろう。

ナトリウム冷却高速炉 (FBR) の蒸気発生器 (SG) 伝熱管では、内側を高圧の水・蒸気が、外側を常圧のナトリウムが流れており、特に健全性が求められる機器である。供用期間中検査では、伝熱管の外周減肉を体積検査が求められており、渦電流探傷 (ECT) が行われている。ナトリウムを抜き取った状態で伝熱管の内側に ECT プローブを挿入し、壁厚の変化を渦電流の変化として検出するが、導電性物質であるナトリウムが伝熱管外側表面に付着した場合には渦電流に影響を与えることが実験と解析の両面で明らかにされている[15, 16]。ナトリ

ウムは融点 98°C、沸点 880°Cと配管鋼材の融点と比較して低温であるため、本技術を用いると画像確認した付着ナトリウムを、レーザーの熱作用で溶融、蒸散させることが可能である。また、SG 伝熱管の内側には、高温蒸気による腐食により他の接続機器内で生成した酸化物粒子が表面に付着し、ECT プローブを損傷させることが問題となっている。プローブ挿入前の画像観察による酸化物粒子の状態確認や局所的な除去に関して本技術が役に立つであろう。

国際熱核融合実験炉 (ITER) において最も過酷な環境下に晒される機器は、核融合反応で排出されるヘリウムガスを排気するダイバーターである。直接プラズマに晒される表面はプラズマの温度低下を避けるために低Z材料である炭素複合材が使用される。そうでない耐熱装甲部分には高融点金属であるタングステンが使用され、銅合金を主体としたロウ付けにより接合されている。濡れの優れた金ロウや銀ロウが使えないのは中性子照射による劣化が生じるためである。ダイバーター内部は水冷配管が組み込まれている。水冷配管はCuCrZr合金で出来ておりSUS316Lで作られたエルボ部分とニッケル基合金のジョイントで溶接されている。CuCrZr合金配管とジョイントは電子ビーム溶接により接合され、ジョイントとSUS316Lエルボとの間はTIG溶接で接合されている。このジョイントは内部を流れる冷却水と外部の真空を隔てる境界であり、製作時にはヘリウムリーク試験により溶接部から漏洩が無い事が確認されている。しかしながら、異種金属の溶接接合部には温度勾配に起因する熱起電力が発生する。従って、冷却水が通水されるとイオンの溶出が生じると思われる。特にエルボ部分で発生する渦は流れ加速腐食を助長するであろう。従って、プラントの保守保全においては、ファイバースコープによる溶接部の欠陥の発見とレーザー溶接によるその場補修が役立つであろう。

4.3 現場補修に向けたレーザー加工トーチシステムへの改善

4.2 節において様々なプラント施設での応用可能性について述べた。ここでは現場補修へ応用する際の本技術の改善点について考察する。

今回の溶接試験では、ワイヤと母材が溶着した状態で肉盛溶接が終了するケースが見られた。図 6(a)はその一例であり、本ケースではS45C平板サンプルをステージ等

で強制的に移動させ、観察画像のレーザー照射位置にワイヤとサンプル溶着部をあわせ、レーザーを照射することでワイヤを切断した。しかし、実際の現場では母材側は巨大構造物の一部であるため固定されており、レーザートーチ側はスペースの関係上、ワイヤが溶着したまま強制的に直動、回転させることは困難であると予想される。解決方法のひとつにレーザートーチ先端ミラーの動作によるレーザー反射角度を変化させ、溶着点をレーザー照射する方法が考えられる。小型化の必要性を考えるとロッドミラー形状ではなく、SiC等の薄型且つ軽量のミラーを使用し、小型アクチュエーターを用いた反射角度可変機構が役立つ。

また、溶接補修工程では画像からビード形状を観察することが肉盛品質評価の一工程として重要である。本技術はレーザーの光学系が同じであり、近赤外レーザー光と可視画像光の焦点位置はレンズ色収差分のずれは生じるがその差は常に一定である。レーザー肉盛溶接後、壁面から回転中心に向かって r 座標移動を行うことで、ワイヤ供給管と肉盛ビードの干渉を避け、スムーズな作業位置のための z 、 θ 移動を行うことができるが、その際、ビード表面に画像焦点が合っているとは限らない。そのため、トーチ内部のレンズを z 方向に移動することで、レーザー照射時とビード観察時の焦点位置をそれぞれの最適位置に変化させることができる。

5. 結言

可搬型で、画像観察可能なレーザー加工ハンドトーチシステムの開発に成功した。このシステムを使用し、S45C平板への肉盛溶接試験を行ったところ、レーザー条件ピークパワー1kW、パルス幅10ms、周波数7Hzでは溶接速度とワイヤ供給速度が一致する2mm/sのときが最適条件であることがわかった。また、この最適条件で内径23mmの配管への肉盛溶接を行ったところ、1列肉盛溶接に成功した。

過酷環境下で稼働するプラントの保全への応用を見据え、装置の小型化、堅牢性、可搬性を向上させたシステムを開発中である[18]。本技術を用いることで、作業時間、工程、費用等、プラント保守保全に関する負担軽減が見込まれる。

謝辞

本論文作成にあたり、試験サンプルの切断面の分析には、株式会社ベストマテリアの木原重光氏及び富澤幸雄

氏に助言を頂きました。パルスレーザーによる精密肉盛補修については、テクノコート株式会社の青嶋松寿氏に助言を頂きました。日本原子力研究開発機構敦賀本部レーザー共同研究所の大道博行所長からは終始変わらぬ激励の言葉を頂きました。

本研究で使用したワイヤ供給装置は、福井県エネルギー研究開発拠点化計画を支える日本原子力研究開発機構が実施する課題解決事業テーマとして、平成24年から25年の2年間にかけて、株式会社福伸工業が製作いたしました。関係各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] TOSHIBA Corp.: “Underwater Laser Beam Welding Technology for Reactor Vessel”, EJAM, Vol.3, No.4, NT43 (2012).
- [2] M. Yoda, M. Tamura, T. Fukuda, et al.: “Under Water Laser Beam Welding for Nuclear Reactors”, ICONE20-54836 (2012).
- [3] “Laser Seal-welding”, EJAM, Vol.1, No.1, NT3 (2009).
- [4] TOSHIBA Corp.: “LDT (Laser Desensitization Treatment) Preventive Maintenance Technique for Reactor Internal Piping”, EJAM, Vol.1, No.2, NT8 (2010).
- [5] K. Sato, M. Kobayashi, Y. Sano, S. Kimura, “Maintenance Technologies for Reactor Internals”, TOSHIBA review, Vol.55, No.10 (2000).
- [6] TOSHIBA Corp.: “Laser Peening Technology for Preventing Stress Corrosion Cracking for BWR reactor internals”, EJAM, Vol.1, No.3, NT12 (2010).
- [7] W. Lippmann, R.Littwin, A. Hurtado: “Development of a Manipulator-Supported Laser Decontamination System”, ICONE20-54836 (2012).
- [8] M. Ochiai, T. Miura, S. Yamamoto, T. Onodera: Laser-ultrasonic study of micro crack sizing and its application to nuclear reactor internals”, 保全学, Vol.4, No.4, pp.41-46 (2006).
- [9] 町島祐一, 村山英晶: “光ファイバ型 AE センサによる状態監視/スクリーニング法の研究”, 保全学, Vol.9, No.4, pp.57-62 (2011).
- [10] 岡潔, 西村昭彦, 関健史ほか: “複合型光ファイバを用いた1インチ伝熱管用観察補修レーザー加工ヘッドの開発”, 保全学, Vol.8, No.4, pp.37-42 (2010).
- [11] A. Nishimura, T. Shobu, K. Oka, et al.: “Development of Inspection and Repair Technology for the Micro Cracks on

- Heat Exchanger Tubes”, J. Jpn Laser Processing Soc., Vol.17, No.4, pp.51-56 (2010).
- [12] S. Uchida, M. Naitoh, H. Okada, et al.: “Determination of High-Risk Zones for Local Wall Thinning due to Flow-Accelerated Corrosion”, EJAM, Vol.5, No.2, pp.101-112 (2013).
- [13] H. Tanigawa, A. Aburadani, S. Shigematsu, et al.: “Comparative study of laser and TIG welding for application to ITER blanket hydraulic connection”, Fusion Eng. Des., Vol.87, pp.999-1002 (2012).
- [14] ギレセンクリストフ, シールケヘルムート, ハイスターカンブマルコほか: “耐熱性の管板ライニングを持つ多管円筒形熱交換器”, 特許公表 2008-545114 (2008.12.11).
- [15] O.Mihalache, S. Miyahara, T. Yamaguchi, T. Yamashita: “Investigations of Multi-frequency Algorithms for Detection of Defects in FBR Magnetic Steam Generators Tubes Covered with Sodium”, EJAM, Vol.1, No.2, pp.68-76 (2009).
- [16] T. Yamaguchi, O.Mihalache, M. Ueda, S. Miyahara: “Experimental measurements of eddy current signal from SG tubes of fast breeder reactor covered by a thin sodium layer using a SG mock-up”, ICONE17-75607, (2009).
- [17] S. Suzuki, K. Ezato, Y. Seki, et al.: “Development of the plasma facing components in Japan for ITER”, Fusion Eng. Des., Vol.87, pp.845-852 (2012).
- [18] 岡潔, 西村昭彦, 寺田隆哉ほか: “複合型光ファイバースコープの開発”, JAEA-Conf2014-01, pp.9-12 (2014).

(平成 26 年 7 月 1 日)