

レーザ熱加工による保全ロボットの開発と展開

Development and Deployment of Maintenance Robot with Laser Thermal Processing

日本原子力研究開発機構 エーテック	西村 昭彦 竹仲 佑介	Akihiko NISHIMURA Yusuke TAKENAKA	Member
OK ファイバーテクノロジー サンリツオートメーション	岡 潔 外山 亮治	Kiyoshi OKA Ryoji TOYAMA	Member
名古屋市立大 若狭湾エネルギー研究センター	寺田 隆哉 峰原 英介	Takaya TERADA Eisuke MINEHARA	Member

Laser thermal processing was applied to robotic systems. For the narrow limited space like a 1-inch diameter tube, a compact laser processing head successfully observed the heat exchanger tube inner wall and welded a crack gap. A compact air cooled fiber laser was able to heat an inner wall through a delivery optical fiber. A filler wire feeder for laser cladding was also tested. A compact maintenance robot for petrochemical industrial plants was demonstrated.

Keywords: laser thermal processing, robot, nuclear power plant, fiber laser, optical fiber

1. 緒言

平成 23 年 3 月 11 日の東日本地震と福島原発事故を境にして、今後は再稼動する高経年化原子力発電プラントにとって保守保全技術の一層の高度化が必要である。一方、再稼動に必要な規制基準に対応するために必要な費用対効果の観点から、廃止措置となる原子炉も多く現れる。対策すべき項目の最上位にあるものが配管内部の減肉現象である[1]。

冷却水中で高温となる伝熱管の内壁は酸化被膜に覆われている。運転に伴う伝熱管内の高温水の流動と伝熱管の振動により、内壁の酸化膜の剥離が生じる。プラントの起動と停止の際の大きな温度変化は伝熱管に膨張と収縮を引き起こし、伝熱管接合部に溶接割れを生じさせる。次世代高速炉の伝熱管の内壁の検査補修を行う新たな方法として、渦電流探傷 (ECT) 検査と光ファイバ観察及びレーザ溶接の 3 つの技術を組み合わせたプローブ開発に成功した。本技術は軽水炉の熱交換器伝熱管にも有効である。さらにパルスレーザによる加熱溶融とワイヤ供給機構を付加することで、流れ加速腐食により減肉するエチレンプラント熱交換器伝熱管の内壁の肉盛補修にも役立つ[2]。レーザ熱加工技術を大面積への適用を行うにはロボット技術との本格的な組み合わせが必要となる。

本報では、レーザ熱加工を活用したこれらの保守保全のためのロボット技術との融合について述べる。

連絡先: 西村昭彦、〒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事業本部レーザ一共同研究所、E-mail nishimura.akihiko@jaea.go.jp

2. レーザを搭載した保全装置の開発

2.1 伝熱管内壁検査

平成 19~21 年にかけて原子力システム研究開発事業にて研究開発テーマとして採用された。観察用光ファイバースコープと溶接用レーザ光の両方の中心を合わせることで同軸伝送を可能とした複合型光ファイバを採用した。これは ITER ブランケット交換のための特殊光ファイバであり、今回、この光ファイバを用いた観察用スコープを高速炉保全に初めて適用した。1 インチ伝熱管内壁の欠陥の発見には ECT を使用した。ECT による割れの発見と併せて、ファイバースコープにより割れの程度を目視で確認できる。この割れに対してレーザ溶接を用いて溶融する。溶接用レーザには連続出力 300W の空冷 Yb ファイバレーザを採用した。複合型光ファイバースコープを軸として、ECT 用の検知コイルを複数配置した中空構造の ECT 部分がある。これはマルチプレクサにより切り替え接続とすることで接続のための信号線数を減じる工夫をした。

以上のように、1 インチ伝熱管の内壁に発生する割れを ECT で発見し、ファイバースコープにより目視で確認後、その場で溶接補修するというコンセプトをひとつの保守保全ツールとして製作した。完成した装置は直ちに、原子力機構白木地区にある ISI 棟において実証試験を行った。ISI 棟はもんじゅの保守保全のためのロボット機器を開発するために建設された施設であり、もんじゅのヘリカル型伝熱管の熱交換機を模擬した既設の試験設備を転用し、直管型の次世代 FBR 熱交換器の試験を成功させた。

2.2 伝熱管内壁肉盛補修

平成 23~25 年の 3 年間は、開発成果の新たな応用例としてエチレンプラントの熱交換器伝熱管の補修装置とし

での開発に注力した。高温のエチレンガス流にはエチレンが分解して生成する炭素微粒子が含まれる。多管型熱交換器の場合、大直径の胴部から小直径の伝熱管にガスが流入する際に、伝熱管の入り口付近（～10cm）の内壁に渦が発生し渦中の炭素粒子と内壁表面の衝突によって腐食が生じる。腐食を放置すれば内壁に穴が空き高温のエチレンガスが冷却水側に噴出し水蒸気爆発を起こす。発生した圧力波は周囲の伝熱管にも損傷を与える。

減肉部分を充填する材料の供給方法として、ワイヤ法と微粒子法の2種類を検討した。伝熱管が垂直に設置されていること及び1インチ径と狭隘なことから、微粒子供給ではなくワイヤ法を採用した。試作機では回転ローラによりワイヤを挟み、パルスモータ駆動により一定速度で送り出した。ワイヤはガイドパイプを通じてレーザー加工ヘッド先端に導いた。

肉盛り補修すべき内壁箇所へ供給したワイヤが接触し、且つ、レーザー照射により内壁とワイヤの両方が熔融状態となれば、熔融部分は一体化する。肉盛り箇所とワイヤ先端が接触した状態を確保してレーザーで加熱する。この際に重要なのは、配管内壁は大きな熱容量を持つものに対してワイヤの熱容量が僅かである点である。ワイヤは容易に融点に達し表面張力で熔融し熔融滴となる。配管内壁が融点に達していないと熔融滴は表面と一体化しない。

また、熔融したスポットから発生するヒュームは光学部品表面を汚染する主要因である。内壁をレーザー照射するためにはレーザー光の方向をレーザー加工ヘッドの中心軸から90度変える必要がある。このためレーザー加工ヘッド先端にはミラーを設けることになる。このミラーがヒュームで汚染し反射率が低下する問題がある。ミラーは熱伝導に優れた銅製のベースに誘電多層膜を蒸着することで製作した。ヒュームが誘電多層膜に付着すると、反射率が低下し発熱する。ヒュームと誘電多層膜が固着しミラーの温度が上がり、熱膨張により設計された誘電多層膜の膜厚は変化して反射率は更に下がる。このような負のスパイラルにより最終的にミラーの破壊となった。

2.3 実機対応補修装置

前述した幾つかの問題点を克服し実稼働のプラント現場で使用できるレーザー補修装置を目的として、中小企業庁の支援を受けて開発を進めた[4,5]。Fig.1 にレーザー加工ヘッドの改良型を示す。これは1インチ伝熱管内部に挿入した様子である。ヘッドの昇降と回転の駆動機構について、ロボット工学の観点から設計を刷新した。

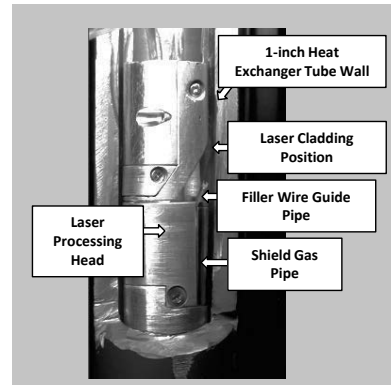


Fig.1 Laser processing head in a cut view of 1-inch heat exchanger tube.

プラントの熱交換器の保守には幅 60cm 程度の保守点検用階段を通過して機器を熱交換器の下部ヘッダまで搬入する必要がある。このため、先ずシステムをレーザー本体、制御装置、レーザー加工ヘッド駆動機構のそれぞれを分割して小型化した。

3. まとめと展開

レーザー熱加工技術をプラントの保守保全に役立てるため、現在、ロボット技術との融合を進めている。また、廃止措置に関する技術開発においては、融合は更に一歩進んでいる。ファイバレーザ、距離計測、吸引集塵及びクローラ機構の組み合わせにより、ホットで汚染した鋼材表面の線量を検出限界程度に低下させる段階にある[6]。

講演ではこれまでの開発経緯と今後の福島原子力発電所廃止措置に有用な技術課題について報告する。

参考文献

- [1]原子力規制委員会 HP より、高経年化対策概要、https://www.nsr.go.jp/activity/regulation/reactor/unten/untent3_1.html.
- [2]寺田隆哉ほか、保全学 13(4), 87-94, 2015-01.
- [3]原子力システム研究開発事業平成 22 年度成果報告会、西村昭彦、レーザー加工技術の組み合わせによる FBR 熱交換器伝熱管内壁検査技術の高度化に関する技術開発、<http://www.jst.go.jp/nrd/result/h22/p10.html>.
- [4]平成 25 年度 中小企業・小規模事業者ものづくり・商業・サービス革新事業「プラント設備における配管補修ロボットの試作開発」.
- [5]西條慎吾ほか、日本原子力学会春の年会、3D03.
- [6]E. J. Minehara and R. Yamagishi, “Technologies of Laser Decontamination and Robotics for Nuclear Reactor Decommissioning”, OPIC-LSSE2016, 9-5.