原子炉の保守保全に役立つレーザー技術

西村 昭彦

日本原子力研究開発機構 (〒619-0215 京都府木津川梅美台8-1-7 関西光科学研究所)

Laser Technologies for The Nuclear Power Plant Maintenance

Akihiko NISHIMURA

Japan Atomic Energy Agency, 8-1-7 Umebidai, Kizugawa-shi, Kyoto 619-0215

(Received November 2, 2011)

The recent improvement of laser technologies will contribute to the maintenance of nuclear power plants. The Japan Atomic Energy Agency developed a specially designed probing system was developed to inspect and repair the cracks of the welded beads of the heat exchanger tubes of nuclear power plants. Eddy current testing detected inner wall cracks in heat exchanger tubes. The tube thickness was 4.5 mm and the inner diameter was 23 mm. The minimum detectable depth of the cracks was 10% of the tube thickness. Endoscope observation confirmed the cracks along the welded beads. Laser welding by a 300 W compact fiber laser successfully repaired them. The probing system will operate in new nuclear power plants with various laser monitoring technologies for coolant pipes.

Key Words: Laser welding, Fiber laser, Heat exchanger, Maintenance, Nuclear power plant

1. はじめに

レーザー技術は原子炉や使用済み燃料の再処理工場の保守保全に応用可能である。Fig. 1にレーザー応用分野の分類を示す。この図では、レーザー集光強度とレーザーパルス幅の関係と、これらに含まれる各種の応用分野を表している。集光強度が 10^{13} W/cm²を超える領域は超高出力レーザーによる高強度物理の領域である¹⁾。フェムト秒からピコ秒にかけての超短パルスレーザー加

工は、超精密加工手段として技術開発が進められている²⁾。 10^{13} W/cm²以下では、材料に与える熱影響の範囲を限定できるため、照射領域周囲の熱影響を最小限度に抑えることができる。これに続くナノ秒パルスレーザーの領域では、多くの技術開発が進んでいる。特にレーザーピーニングは、高経年化軽水炉の応力腐食割れ対策やタービンブレードの疲労破壊対策として実用化が進んでいる³⁾。また、波長変換されたレーザーは、原子炉のモニタリング装置の光源として活用が進められている。レーザー光の熱作用と非線形効果及び産業用に小型高効率化されたレーザー装置の利便性を考えると、ナノ秒パルスレーザーはこれまで最も実用化が進んでいる。一方、レーザーパルス幅がマイクロ秒から連続発振の領域では、溶接部分の応力改善方法として既に実用化されている⁴⁾。今後は、表面汚染の除去や使用済み燃料集合体の切断がなされる。この分野の発展は、特に高出力ファイバレーザーの開発とロボットアーム及び切断する構造物の形状と距離の遠隔測定技術らのシステム化が重要である。

原子力以外であれば速やかに導入が施行される新技術も、原子力の分野とりわけ高速増殖炉の分野では、慎重に着実に進められている。例えば、微量分析技術の高速増殖炉への応用例として、漏洩したナトリウムの分光分析が検討されている^{5),†1)}。ここでは、大気圧プラズマ中

Fig. 1 Laser application field map.

^{†1} URL: <http://www.jsm.or.jp/ejam/OT/jp2/C2.html>

で励起準位に励起したナトリウム原子をレーザーイオン化させ検出している。また、大気中のエアロゾルを高度に濃縮するエアロダイナミックレンズと紫外線パルスレーザー及び電界イオン化を組み合わせた極微量ナトリウム漏洩検出装置が開発された^{6),12)}。

レーザー加工技術はロボット技術に組み込まれて、実用に供することが出来る新技術に生まれ変わる。特に水中でのレーザー加工として、高経年化する軽水炉の保守保全のため、レーザーピーニングやレーザー溶接及びレーザー超音波探傷が可能な多機能レーザー加工ヘッドが開発されている⁷⁾。水中でのレーザー加工は、炉心より水抜きを必要としないことから保守保全時間の短縮が可能である。また、水による放射線遮蔽の効果が期待されることから、作業員や精密機器の被曝量低減に効果的である。

しかしながら、レーザー技術の原子炉保守保全分野に関しては依然として未開拓の分野が数多くある。本報告では、ファイバレーザーの特性を活かして開発した熱交換器の保守保全のための検査補修用プローブについて述べる。加えて、熱交換器配管の溶接部分の監視技術として有用な冷却配管のモニタリング技術について述べる。

2. 伝熱管レーザー溶接補修

原子炉における熱交換器は保守保全の上で重要な機器である。特に伝熱管の溶接部分は、冷却水による腐食と流れにより繰り返される振動による疲労破壊に曝されている。原子炉鋼材にはクロム鋼が多用される。一般にクロム濃度を上げれば耐食性が向上するが、割れ感受性が増大する。溶接部分は組織の変性が起こり残留応力により割れ感受性も高まっている場合も多い。とりわけ炭素含有量が高いクロム鋼の場合、熔融凝固により結晶粒界に沿ってクロム炭化物が生成すると、この生成部分に沿ってクロムの欠乏層が生じるため、腐食割れが進展することが知られている。また、熱交換器の内部の冷却水の流れは、伝熱管のサポート部分などで渦を発生し、繰り返しの振動を溶接部分に加えることになる。軽水炉の熱交換器においては、伝熱管の内外は水であるが高速炉の場合、伝熱管の外側は金属ナトリウムであり内側は水である。このため、水側からナトリウムへの漏洩は高温の腐食性反応生成物の噴流となり、周囲の伝熱管にも被害が拡大する。このため、伝熱管においては割れの初期

Fig. 2 Schematic view of the probing system.

段階での発見がきわめて重要である。

2.1 伝熱管内壁検査補修用プローブの概要

新型プローブは内径の熱交換器伝熱管の内部に挿入し、伝熱管内壁の欠陥を検査補修することが出来る機能をもつ。現在の原子炉の保守保全の考え方は検査に重点が置かれ、欠陥が発見された伝熱管は施栓を行い使用中止とするのが基本方針である。この新型プローブは検査機能を強化するために、ファイバスコープと渦電流探傷機能を一体化し、渦電流探傷による高速検査とファイバスコープによる目視確認を両方についてプローブを入れ替えることなく実施できる。

目視観察により確認された伝熱管内壁の割れはレーザー照射により溶接補修を行う。使用された伝熱管の内壁は高温水中で酸化され黒色のマグネタイトにより覆われた状態となる。Fig. 2に新型プローブの概要を表す。プローブの中心軸に複合型光ファイバを配した。この複合型光ファイバスコープは、溶接のための高出力レーザー光とレーザー照射部分の映像を双方向に伝送できる。この複合型光ファイバが最初に使用されたのは、国際熱核融合実験炉(International Thermonuclear Experimental Reactor)のトリチウム増殖ブランケットの保守保全装置である⁸⁾。当時開発された装置は、1 kWのYAGレーザー光を伝送し、ブランケットに敷設された冷却配管を内部より切断することを目標とした。

2.2 レーザー溶接補修のためのファイバスコープ

現在では複合型光ファイバは、内視鏡外科手術における施術失敗のリスクをできるだけ低減するために、その特性を活かして臨床応用機器として開発も進められている。消化器系、脳外科、痔臓、胎児外科などの医療応用について臨床応用を進めている⁹⁾。この複合型光ファイバの特性は、常に観察している視野の中心にレーザーが照射されるという点にある。操作する際には、観察像の円周部分に照射部分を捉え、その照射部分と中心のコアファイバ部分を重ねることで、対象に確実にレーザーの照射が可能である。複合型光ファイバの構造とレーザー加工ヘッドについての詳細は別報を参照されたい¹⁰⁾。

Fig. 3 (a)は複合型光ファイバの鏡筒部分の正面をす。コアファイバはレーザー溶接のための1070 nmの波長のレーザー光とアライメントのための630 nmの波長

Fig. 3 Composite-type optical fiber scope.
(a) Telescope section, (b) side view.

¹²⁾ URL: http://jolisfukyu.tokai-sc.jaea.go.jp/fukyu/mirai-en/2009/index_set.html

の半導体レーザー光が透過する。このため望遠鏡の鏡筒内部には集光レンズが組み込まれている。集光レンズは、4枚構成の石英レンズであり、光ファイバの端部の像を伝熱管内壁の表面に転送する。開発した複合型光ファイバの全長は10 mであり、3層の構造から構成される。中心となるコアファイバは0.2 mm直径であり、溶接補修のための高エネルギーレーザー光を伝送する。レーザー光の波長は1070 nmである。映像伝送用の光ファイバはレーザー伝送用のコアファイバを同心円状に取り巻いている。伝送される映像は20000本の画素より構成され、複合型光ファイバの端面から鏡筒内の4枚構成の石英レンズによりCCDカメラに像転送される。3層目は照明のためのライトガイドである。Fig. 3 (b)は鏡筒部分の側面部分を表す。Fig. 3 (a), (b)はライトガイドにキセノンランプを接続し、鏡筒部分から照らした様子を示す。

Fig. 4は複合型光ファイバを使用した新型プローブシステムの外観である。全長が70 cmのプローブは渦電流探傷Eddy Current Testing (ECT) 部分が中空構造となっており、この中空部分に複合型光ファイバを通し、その端部にレーザー加工ヘッドが接続される。ECT部分は中空コイルとマルチプレクサの回路基板より構成される。

近年、ファイバレーザーは高出力化、小型化、高安定性、価格低下が進んでいる。レーザー溶接においては、ファイバレーザーを用いて以前の電子ビーム溶接に匹敵する溶け込み深さが得られている。これはイッテルビウムドープ光ファイバと半導体レーザー励起技術の結合により得られた。特に、シングルモードファイバレーザーにより集光スポット径を小さく保つことで、溶接ビード幅を狭く保ちつつ、熱伝導率の良い銅やアルミニウムの切断や穿孔や溶接が高速で可能となっている。本システムでは空冷300 Wのシングルモードのイッテルビウムファイバレーザー (IPG Photonics社製) を熱源として使用した。

レーザー加工ヘッドは、ヘッド内部に可動スリーブを持ち、複合型光ファイバスコープからのレーザー光を伝熱管内壁に導く。レーザー加工ヘッドの主要部品はチタン合金を使用した。伝熱管内壁へのレーザー照射位置は、360°全周と軸方向に5 mmの範囲でスキャンすることができる。軸方向に5 mm以上移動させる場合は釣り下げている複合型光ファイバ自体を移動させる。操作者は2個の独立したパルスモーターを内壁の映像を観察しながら、マニュアルでスキャン制御する。可動スリーブ内部には、レーザー波長と可視波長の双方で反射率をもつ耐熱ミラーを設けた。この耐熱ミラーは、銅製のミラーベースにベースコートをし、その上にレーザー波

Fig. 4 New probing system.

長に対する誘電体多層膜をコートした。レーザー入射角は55°とした。これによりレーザー光は伝熱管に対して20°の角度をもって照射される。

3. 熱交換器伝熱管の欠陥検出

高速炉は軽水炉よりも高温で運転される。もんじゅの熱交換器は蒸発器と過熱器が直列した構造となっている。過熱器内は蒸気が流れるが、蒸発器は水と蒸気の2相流が流れる。蒸発器は応力腐食割れを避けるためステンレス鋼を用いず、2.25%クロム含有の低クロム鋼が使用されている。当然、腐食減肉が進行するため管の肉厚は十分にとられている。かつて短期間であるが40%出力運転に到達したもんじゅの熱交換器伝熱管は入念なECT検査が為された。その結果、伝熱管内壁には問題となる欠陥は発見されず、黒色のマグネタイトの付着が観察されたとの報告が為された¹¹⁾。

今後、40%を超える出力運転が開始されると、再び伝熱管内壁の酸化が進行する。熱交換器はヘリカル構造となっており、伝熱管に対して垂直にナトリウムの流れがぶつかることになる。このヘリカル構造はナトリウムの流れに伝熱管が並行して置かれる直管構造と異なり、全体として熱膨張による伸びと流れによる振動を吸収できる優れた構造である。その一方で、伝熱管の振動を抑制するサポートと伝熱管の接触による損傷が予想される。また、特に構造的に弱い部分は直管とエルボ部分の溶接

Fig. 5 ECT test for the heat exchanger tube.

接合部分と考えられる。現在、もんじゅの4倍以上の出力の第4世代ナトリウム冷却炉JSFRの要素技術開発がFaCTプロジェクトとして推進されている。この大型熱交換器は直管式が候補である¹²⁾。

Fig. 5に渦電流探傷結果の一例を示す。もんじゅの熱交換器を模擬した試験設備に直管の模擬伝熱管を接続した後、Fig. 4に示したプローブを上部から挿入し、ECT測定試験を実施した。模擬伝熱管の長さは1 m、内径23 mm、厚み4.5 mmである。Fig. 5の図中の左は配管と模擬伝熱管の接続をイラストで表し、中央部にはECTの探傷コイル10チャンネル分の信号を表している。図の右には一例としてチャンネル7からのECT信号の振幅を表した。フランジ部分では全チャンネルから強い信号が検出されている。枝管部分は分岐している方向に強い信号が現れる。次に強い信号は直管同士の突き合わせ溶接部分である。これらの信号に比べて、模擬伝熱管の内壁に周方向に放電加工で設けたノッチからの信号は微弱である。ノッチの幅は0.3 mm、長さは10 mmである。ノッチの深さは管の厚み4.5 mmに対して、その50%、20%、10%、5%の4種類である。ECT信号をロックインアンプにより検波増幅し、数値フィルタによりノイズ除去を施すことで、ノッチ深さ10%の欠陥ならば検出することが可能である。

4. レーザー溶接による欠陥補修

酸化膜で覆われた伝熱管内壁の反射率は低い。このため、レーザー光が伝熱管内壁に照射されると、有効に吸収される。Fig. 6 (a)は熱交換器伝熱管内壁の欠陥の形状の様子である。映像中心部のコアファイバを欠陥の形状に沿ってトレースさせる。欠陥の平均幅は約1.2 mmであり、コアファイバの直径は0.2 mmと同程度である。倍率は6倍であり、Fig. 6 (a)に示す視野は伝熱管内壁上で4.8 mmである。この実験では、光ファイバからのパワー密度は約1/36となって欠陥部分に照射される。Fig. 6 (b)は、レーザー出力50 Wの際のレーザー照射面の映像である。照射面は融点に達している。伝熱管内にはレーザー照射部から多量のヒュームが発生する。このヒューム抑制のために、管内をアルゴンガスで満たすとともに、レーザー加工ヘッドなどの光学系を保護のためアルゴンガスの流れを設ける。

Fig. 6 Fiberscope views of the heat exchanger tube (a) the crack on the inner wall, (b) laser welding to the crack.

Fig. 7 (a)～(d)にレーザー溶接補修試験結果の一例を示す。レーザー出力は330 W、スキャン速度は1.43 mm/sで実施した。溶接補修は突き合わせ部分の内壁に対して、円周方向に70°の角度にわたり行った。レーザー照射時間は10秒である。Fig. 7 (a)では、コアファイバを中心として左斜め上方向に突き合わせ部分が観察される。コアファイバから左斜め下方向は溶接ビードである。Fig. 7 (b)及びFig. 7 (c)では1.5 mm幅の溶接ビードが明瞭に観察できる。Fig. 7 (d)ではレーザー溶接の終端部分であり、2 mm直径の溶融池が形成されている。レーザー溶接の深さ方向の知見は試料切断面の観察により得られる。さらに、溶融池の深さ方向の進展は、放射光を用いたX線吸収コントラスト撮影により解明を進めている¹³⁾。

5. レーザー利用による配管モニタリング技術

前章で述べたレーザー溶接技術は原子炉の補修技術である。補修に先立って必要となる技術は原子炉のモニタリング技術である。現在、超短パルスレーザー加工¹⁴⁾を活用したFiber Bragg Grating (FBG)の作製技術の開発を進めている。これはフェムト秒領域の超短パルスレーザー光を顕微鏡に導き、通信用光ファイバのコア部分に集光し、高屈折率のドットを形成する技術である。コア部分に沿って規則的に並んだドット列は回折格子として機能し、特定の波長の光を反射する¹⁵⁾。波長1530～1580 nm範囲内に複数の反射ピークをもつFBGセンサの試作に成功した¹⁶⁾。反射波長の異なる多数のセンサを一本の光ファイバに設けることに成功した。紫外線干渉露光により作製されている汎用FBGセンサは原子炉のような高温では使用できないが、フェムト秒レーザー加工により作成したFBG構造は十分な耐性を有する。従ってこのセンサを複雑な配管に沿わせて設置することで原子炉のようなプラントの状態監視が可能となる¹⁷⁾。

Fig. 7 Endoscope view of laser welding bead.

原子炉の状態監視の必要性は地震のような予測できない大きな外力が加わる時だけではない。通常の運転においても重要である。特に起動時や停止時など、原子炉の冷却配管は立ち上げや緊急停止の際の温度変化による膨張や収縮が繰り返されると、溶接部分の強度が低下する。さらに地震により大きな外力が加わると破断の危険性が増す。とりわけ高速炉のような低圧且つ高温で運転される原子炉は、冷却配管の厚みが軽水炉よりも薄いため、振動や変形の状態監視は一層念入りに行う必要がある。

レーザー技術の有用性は対象との距離が確保できる点にある。特に原子力分野では、高温、放射線、機器設計の上での狭隘な構造などの要因から、遠隔且つ非接触の計測が必要となる場合が多い。これについては実際の事故例が良い教訓となろう。1995年12月8日、もんじゅの2次系冷却配管Cループにおいて、熱伝対鞘管の振動疲労破損箇所よりナトリウム漏れが生じた。もんじゅには液体金属ナトリウムに対して通電検知で反応する漏洩センサが多数設けられていたが、実際に動作したのは煙感知器であり、金属ナトリウムが酸化しエアロゾルとなり室内に充満した。現在の原型炉もんじゅで使用されている漏洩ナトリウム検出法は、依然として通電検知による漏洩センサとエアロゾル吸引法である。エアロゾル吸引法は、濾紙の上に吸引されたエアロゾルに対してpH指示薬を滴下し塩基性を示すことでナトリウム漏洩の有無を判定するため、迅速性に問題がある。通電検知の漏洩センサは、設置不良の問題もあり多くの誤動作に悩まされた。迅速性と再現性から考えて、レーザー技術によるナトリウム漏洩モニタリングが望まれる。

6. おわりに

高速炉の熱交換器伝熱管を対象に、レーザー溶接による検査補修用プローブシステムの開発とその性能について述べた。短パルスレーザーの特性を活かした種々のセンサ製作や構造モニタリング技術などを併用すること

で、原子炉の安全性の向上を行うことが出来る。現在、3月11日の東日本大震災と福島原発事故により、原子力発電の信頼性が失われている。各種のレーザー技術により原子炉の安全性向上を計ることが喫緊の課題である。

謝 辞

新型プローブの開発については、日本原子力研究開発機構の岡 潔氏が複合型光ファイバとレーザー加工ヘッドの開発を担当し、山口 智彦氏はECT関連機器の開発を担当した。また、エーテックの赤津 朋宏氏及び竹仲 佑介氏は技術スタッフとして協力した。各位に深く感謝いたします。この開発においては平成19年から21年にかけて文部科学省原子力システム研究開発事業からの支援を受けた。関係者に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) J. Nees, *et al.*: IEEE J. Sel. Top. Quantum. Electron. **4** (1998) 376.
- 2) S. Nolte, *et al.*: J. Opt. Am. B **14** (1997) 2716.
- 3) Y. Sano, *et al.*: Nucl. Instr. Meth. B **121** (1997) 432.
- 4) 浅妻 祐亮: 保全学 **10** (2011) 98.
- 5) S. Ogura, *et al.*: JSM 7th Annual Conference at Omaezaki, Shizuoka (2010) Aug. 17, C-2-8.
- 6) T. Aoyama, *et al.*: 2008, JAEA R&D Review, 14-7.
- 7) 河野 渉, 他: 日本保全学会第5回学術講演会 (2007年7月) 要旨集
- 8) K. Oka, M. Nakahira, K. Taguchi, A. Itoh, and K. Obara: J. Robotics and Mechatronics **10** (1998) 110.
- 9) 岡 潔, 関 健史, 西村 昭彦: 応用物理 **80** (2011) No.12.
- 10) 岡 潔, 西村 昭彦, 関 健史, 赤津 朋宏, 山下 卓哉: 保全学 **8** (2010) 37.
- 11) K. Takahashi, *et al.*: 2008 Fall Meeting of the Atomic Energy Society of Japan, Kouchi (2008) B42.
- 12) 日本原子力研究開発機構: 第1回FaCT評価委員会, 資料1-2, Nov. 2010.
- 13) T. Yamada, *et al.*: Digest of the 12th International Symposium on Laser Precision Microfabrication (2011) p.83.
- 14) 杉岡 幸次: レーザー加工学会誌 **16** (2009) 124.
- 15) Y. Kondo, *et al.*: Opt. Lett. **24** (1999) 646.
- 16) Y. Shimada, A. Nishimura, *et al.*: JLMN **5** (2010) 99.
- 17) T. Kobayashi, *et al.*: 18th Int. Conf. on Optical Fiber Sensors OFS-18, Cancun, Mexico (2006) TuE-12.