

伝熱管内壁検査補修技術開発の概要

Development of Inspection and Repairing Technology for FBR Heat Exchanger Pipes

日本原子力研究開発機構	西村 昭彦	Akihiko NISHIMURA	
	岡 潔	Kiyoshi OKA	
	山口 智彦	Toshihiko YAMAGUCHI	
	山下 卓哉	Takuya YAMASHITA	Member
	田川 明広	Akihiro TAGAWA	
	ミハラケ オビデウ	Ovidiu MIHALACHE	Member
	島田 幸洋	Yukihiro SHIMADA	

A hybrid optical fiber scope and a laser processing head were combined with an eddy current testing unit for the inspection and repairing for Fast Breeder Reactor's heat exchanger pipes. The project proposes an effective cost reduction method for maintenance of FBR by extension of the heat exchanger's lifetime. By the end of March 2010, a prototype probing system for heat exchanger pipes will be completed.

Keywords: Fast Breeder Reactor, Heat Exchanger, Laser Processing, Eddy Current Testing

1. 背景と目的

超短パルスレーザー加工は透明材料の内部加工において有効な手法である。このため、光導波路などの光電子デバイス開発への応用が積極的に展開されている。一方、原子力エネルギー分野での利用としては、2002年に国内のBWRで生じたシュラウド応力腐食割れ問題を契機として、超短パルスレーザーによる加工硬化層の蒸発除去を新たな応力腐食割れ対策技術として発案した[1]。その後も原子力材料への適用拡大に傾注した結果、超短パルスレーザー蒸発をマイクロからマクロにかけてスケールの異なる新たな応用が可能となった。

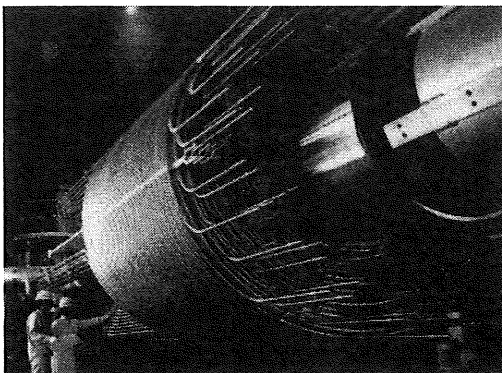


Photo. 1 Heat exchanger of Fast Breeder Reactor "Monju"

マクロ応用例としてはシュラウドを対象とした超短パルスレーザー蒸発の大面积化を実施した。2005年には 1 cm^2 の応力除去に成功、続いて2006年には $1 \times 10\text{ cm}^2$ の応力除去に成功した。これにより、新たな応用分野としてFBRの熱交換器伝熱管の補修技術の開発が可能となった。Photo.1にもんじゅ熱交換器伝熱管を示す。現在のFBR原型炉であるもんじゅの熱交換器は蒸発器と過熱器を組み合わせた構造であり、蒸発器の伝熱管内には高温水と蒸気が混相流として流れ、外側を液体ナトリウムが流れる。これまでは渦電流探傷(ECT)による検査により伝熱管に欠陥が発見された場合、伝熱管を施栓により塞ぐのが対処の基本である。

しかしながら施栓の割合が高くなると有効伝熱面積の減少となり、結局は熱交換器の寿命を縮めることとなる。現在、ECTの検出性能の向上とともに伝熱管内壁の微細な欠陥の発見が可能となりつつあり、発見した微細な欠陥を補修することで施栓を回避することが望まれる。本プロジェクトでは、伝熱管を検査だけでなく欠陥の発見に併せてその場での補修を試みる新型プローブを開発する。これに必要な経験がITER核融合ブランケットの枝管をレーザー溶接・切断するロボット装置として、1999年に複合光ファイバを用いたレーザー熱加工による補修である。ITERプロジェクトでの開発終了後、この複合光ファイバは光ファイバ内視鏡とレーザーメスの融合技術として積極的な医療応用

連絡先:西村昭彦、〒619-0215 京都府木津川市梅美台8-1、日本原子力研究開発機構 関西光科学研究所、電話: 0774-71-3322、e-mail:nishimura.akihiko@jaea.go.jp

が進められている[2]。

本報告では、平成 19 年度から 3 年間をかけて開発を開始した次世代 FBR 熱交換器伝熱管の内壁面の検査補修のための要素技術について報告する[3]。

2. システムの概要と要素技術

2.1 概要

開発するシステムは、全長 100m のヘリカル型伝熱管を検査補修する技術開発として、ECT 検査技術、複合型光ファイバ技術、レーザー熱加工および超短パルスレーザー加工技術を統合させ、従来の検査機能に補修・保全機能を備えている。

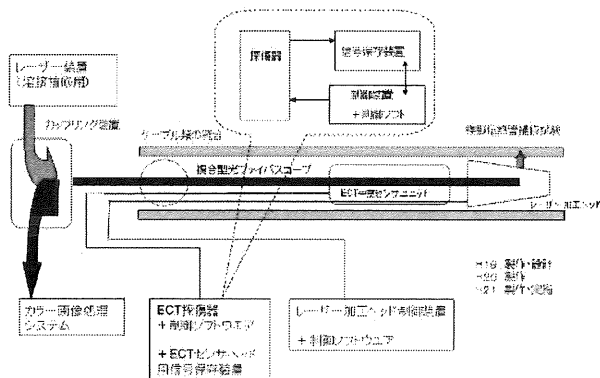


Fig. 1 Block Diagram of the New Probing System

Fig.1 に新プローブの概要を示す。昨年度、主要技術の整備は順調に進展し、実機製作に向けての問題点を明確に出来た。開発のコアとなる技術は、伝熱管内壁の映像を伝送する画像用光ファイバと欠陥部位のレーザー熱加工溶接による補修のためのエネルギー伝送用光ファイバを同軸構造に組み合わせた複合型光ファイバである。レーザーとしては CO₂ レーザーや YAG レーザーに加えて小型高性能化が著しいイッテルビウムファイバレーザーが有力である。複合型光ファイバの周りには照明用のライトガイドも設けられている。このファイバの先端には伝熱管の内壁の撮影と加工補修のためのレーザー加工ヘッドが接続する。レーザー加工ヘッド内には伝熱管内壁を 360 度スキャンし、レーザー照射位置を微調整するための小型ステッピングモーターが内蔵される。また、複合型光ファイバの反対側の端面では、画像とレーザー光の分離装置を設ける。

さらにレーザー加工ヘッド直近には複合型光ファイバを抱え込む形で ECT 用マルチコイルセンサが取り付けられる。

2.2 複合型光ファイバスコープ

複合型光ファイバスコープは、熱加工用のための 1kW レーザー光が伝送される。レーザー光を伝送する中心部分のコア直径は 200 μm、クラッド直径は 220 μm である。レーザー伝送部コア材質は純粋石英ガラスである。このレーザー光伝送部の周囲に画像伝送用ファイバが同軸上に取り囲む構造となっている。画素数は 20,000 画素とし、画像伝送部径 φ0.8mm とした。この画像伝送部コア材質は Ge ドープ石英ガラスである。複合型光ファイバスコープの一端には石英ガラス製対物レンズを設けた。レンズ表面にはレーザー光の波長である 1070nm の AR コートを施した。

先端のレンズ周囲には照明用ファイバを一層配列した結果、外径約 7mm となった。Photo.2 は複合型光ファイバスコープの先端のステンレス製スコープ部分である。スコープの先端からの光りは照明用ファイバからのものである。スコープの柔軟部分の可撓性は、最小曲げ半径 45mm であり、挿入する熱交換器の伝熱管の屈曲部分にも充分対応できる。

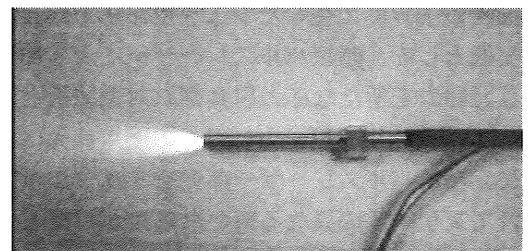


Photo. 2 Hybrid Optical Fiber Scope

2.3 ECT センサヘッド

渦電流探傷により微小な内壁欠陥を発見するのが ECT センサヘッドの役割である。マルチ型の検出コイルと 2 個の励磁コイルとを組み合わせた ECT 中空センサユニットを設計した。Fig.2 にそれぞれのコイルの配置を示す。長さ約 50mm、外径約 20mm のマルチ型検出コイルの両側に励磁コイルを配し、励磁コイルが伝熱管に誘導する渦電流により生じる磁場をマルチ型検出コイルで検出する。伝熱管内壁に欠陥がある場合、深さと形状を可視化できる。ECT センサの中心

軸には複合型光ファイバが通り、新プローブ組み立て時には複合型光ファイバと一体化させる。

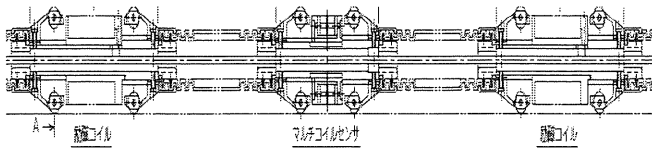


Fig. 2 Eddy Current Testing Sensor Unit

今回製作した ECT センサヘッドの基本性能を示す。伝熱管に全周にわたり 50%の減肉(-1.9mm)が生じた場合、10個の検出コイルそれぞれからの時間波形を示したものである。0.75V から 0.88V の範囲でバラツキはあるものの十分な強度の信号を得た。今後、各コイル間の抵抗値の補正とコイルと伝熱管壁との距離の偏差を校正することで精度の良い画像化が可能となる。

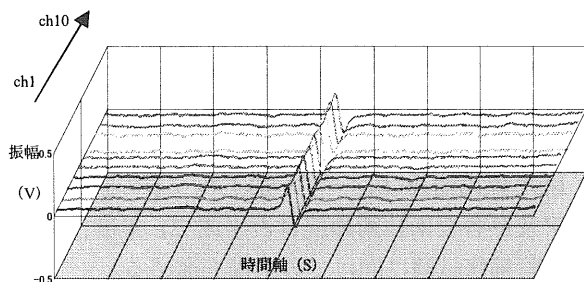


Fig. 3 Test Signals from Multi-Coil Sensor

これまでの試験により検出部にマルチ型コイルを用いることで内面局部減肉 5%t (L5mm、W10mm) 及び内面周方向ノッチ 20%t (L10mm、W0.3mm) を検出できる見通しを得ている。今後、ECT 制御用ソフトウェアの開発を行い伝熱管内壁の微小欠陥を迅速且つ高精度で立体表示を行うこと、また、複合型光ファイバスコープと中空センサユニットとの組み合わせ及びケーブル類の複合化が重要となること等、開発課題を抽出した。

2.4 レーザー加工ヘッド

複合型光ファイバスコープと組み合わせが可能なレーザー加工ヘッドを製作し、基本性能を確認した。レーザー加工ヘッドは、複合型光ファイバスコープの先端に接続し、1インチ程度の伝熱管内に挿入された状態で、周方向回転と軸方向移動への基本動作を行え

るものとし、伝熱管内壁をレーザー光で集光照射できる構造とした。Photo.3 にレーザー加工ヘッドを示す。内径1インチの透明アクリルパイプにレーザー加工ヘッドを挿入し、動作確認を行った。レーザー加工ヘッドの可動スリーブ部分は軸方向に 5mm、周方向に左右 185度の動作が可能である。

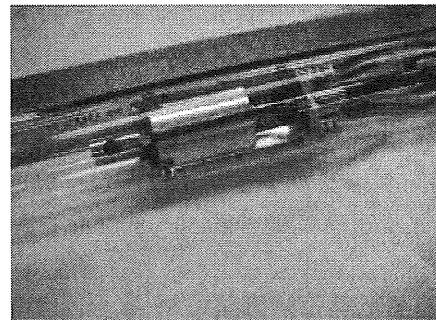


Photo. 3 Laser Processing Head in 1-inch Acryl Pipe

伝熱管内壁の撮影映像の評価準備のため、複合型光ファイバスコープをレーザー加工ヘッドに挿入し、複合型光ファイバスコープのカップリング装置接続側にビデオカメラを接続し連続画像の撮影を試みた。アクリルパイプ内の文字撮影の結果、製作したレーザー加工ヘッドは動作状態において、複合型光ファイバスコープに連続画像を伝送できることを確認した。

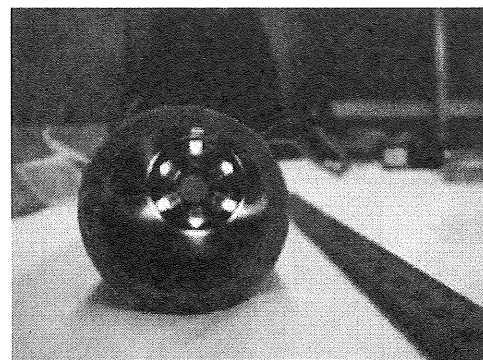


Photo.4 Laser Processing Head (LED Illumination)

Photo.4 はパイプ内に挿入したレーザー加工ヘッドの LED 照明を点灯させた状態である。この LED は複合型光ファイバスコープの外周に設けたライトガイドの補助として用いる。今後、レーザー加工ヘッドの専用制御用ソフトウェアの開発、溶接熟練者による手動

制御とその記録動作の実施、また、高トルクな超音波モータの搭載等、開発課題を抽出した。

2.5 カップリング装置設計

レーザー光と画像の分離・統合を行うためのカップリング装置の詳細設計を行い、その妥当性を確認した。カップリング装置は、最大出力 1kW のレーザー光の使用を設計条件とし、内蔵するダイクロイックミラーにより、複合型光ファイバスコープからの映像と伝送するレーザー光の統合・分離が行える構造とした。レーザーは市販のイッテルビウムファイバレーザーを想定した。ダイクロイックミラーは反射率 99% @ 1075nm、平均透過率 90% @ 450~800nm である。

2.6 模擬伝熱管補修試験準備

新プローブシステムを完成させる平成 21 年度には模擬伝熱管の補修試験を実施する。本年度は既設のレーザー装置を使用して、カップリング装置にレーザー光を安全に導入するための予備試験を実施した。Fig.4 にレーザー加工の応用分野の分類を示す。既設のレーザーは Fig.4 の右下部分である熱加工領域に属するフラッシュランプ励起によるフリーランニングレーザーであり、半導体レーザーの大規模スタックドアレイを模擬することが出来る[4]。集光部分の直径はファイバコア径と同じ 200 μ m とした。このレーザー照射条件は 2.3×10^7 W/cm² であり、クロム鋼等の伝熱管材料に照射した場合、その表面は容易に熔融・蒸発する。実験の結果、合成石英窓板には損傷が見られないことを顕微鏡観察により確認した。

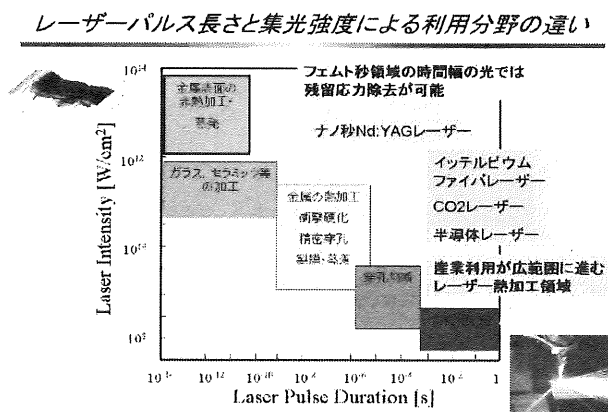


Fig.4 Laser Processing Application Map

平成 21 年度の模擬伝熱管補修試験において、仮に最

大出力 1kW の市販イッテルビウムファイバレーザーを 0.2mm 直径に集光すると、集光強度は 0.32×10^7 W/cm² となる。試験では 2.3×10^7 W/cm² まで集光強度を上げてても合成石英窓板には損傷が発生しなかったことから、十分な安全尤度が得られている。従って、ダスト等が抑制された環境下において、予定とするレーザー出力では複合型光ファイバスコープの端面やカップリング装置に損傷は発生しない。

3. 結言

Fig.1 に示した新プローブ完成に必要な各要素技術および模擬伝熱管補修試験についての概要について述べた。複合型光ファイバスコープは、10m の長尺と 20,000 画素数の試作に成功した。複合型光ファイバスコープとレーザー加工ヘッドは仮接続を行い、以降の実施内容の準備を開始した。ECT 探傷については、実機であるもんじゅの 3 系統の熱交換器伝熱管検査の知見を反映し、従来型よりも高性能なマルチコイルセンサを採用した。平成 20 年度は、カップリング装置の製作、ECT 探傷器及びレーザー加工ヘッドの制御ソフトウェア及び各要素技術の統合と平成 21 年度に行う模擬伝熱管補修試験に向けての準備を進める。

謝辞

本報告は、平成 19 年度に文部科学省から委託された原子力システム研究開発事業「基盤研究開発分野」の革新技術創出型研究開発（革新的原子炉技術）における「レーザー加工技術の組み合わせによる FBR 熱交換器伝熱管検査補修技術の高度化に関する技術開発」の概要である。関連各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 西村昭彦、峰原英介、塚田隆、“ステンレス鋼表面の超短パルスレーザー光を用いた応力除去法”、特開 2005-131704.
- [2] 岡潔、エネルギーレビュー、7月号、2007、pp.7-10.
- [3] 科学技術振興機構報第 394 号、平成 19 年 4 月 19 日、(<http://www.jst.go.jp/pr/info/info394/index.html>)
- [4] A. Nishimura, et. al, “High energy flashlamp pumped Ti-sapphire laser for Yb:glass CPA”, SPIE - Proceedings, Vol.3265, 1998, pp. 234-241