

伝熱管内壁検査補修技術開発（その2） ソフトウェア開発と性能試験準備

Development of Inspection and Repairing Technology for FBR Heat Exchanger tubes (II) Preparation of Operation Software and Performance Check

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

In order to maintain FBR heat exchanger tubes, a new probe system was designed. A coupling unit and operational software are key components in the second year. The coupling unit to combine a high energy laser beam and optical fiberscope images was developed. The operational software successfully controlled an eddy current testing device and a laser processing head.

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

1. 背景と目的

高速増殖炉においては中性子の減速が少ない金属ナトリウムによる冷却が有効である。これまでの開発においては、1次系と2次系の両方に金属ナトリウムが使用されており、特に伝熱管内部に通水する2次系熱交換器の伝熱管の健全性の確保が重要である。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し熱交換器の寿命を延ばすことが望まれる。

このため原子力機構では、平成19年度より3年間をかけて、FBR伝熱管を従来の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の開発を進めている[1,2]。このプローブは、全長100m

のヘリカル型伝熱管を検査補修に必要な要素技術として、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る。こうして、従来のECTによる検査機能を高度化させるとともに、新たに補修・保全機能を備えている。

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新プローブ要素技術を紹介する。プロジェクト2年目の開発成果として、ECTによる欠陥計測とレーザー加工ヘッド制御のためのソフトウェア制作及びレーザー光と画像を分離・統合するためのカップリング装置の製作について報告する。さらに、このプローブを用いた模擬伝熱管の検査補修の試験準備についても述べる。

2. 開発内容

2.1 概要

Fig.1に新プローブの概要を示す。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スコープである。レーザーとし

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

では、小型高性能化の高出力ファイバレーザーを使用する。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を接続する。レーザー加工ヘッドは、伝熱管内壁を360度スキャンできる。さらに、レーザー照射位置の微調整機能を有する。レーザー加工ヘッドの直近には複合型光ファイバ스코プを抱え込む形でECT用マルチコイルセンサを取り付けた。

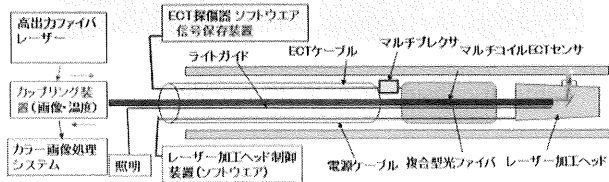


Fig. 1 Block Diagram of the New Probing System

2.2 ECT 計測ソフトウェア

平成 19 年度に製作した ECT 用探傷器に、ECT 信号を保存するための ECT センサヘッド用信号保存装置を組み込み、これと、平成 19 年度に製作した ECT 中空センサユニットを統合した。Fig. 2 に統合したシステムを用いて模擬伝熱管補修試験にて用いる模擬伝熱管内壁の欠陥を検出し、欠陥位置を表示するためのソフトウェアを開発した。

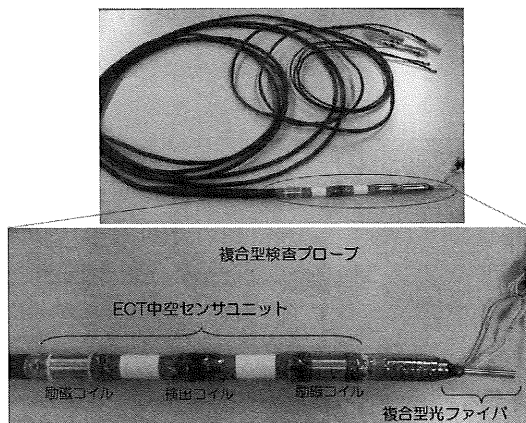


Fig. 2 Axially combined ECT sensor and a optical hybrid fiber scope

新プローブと探傷器を用いて、ECT センサのソフトウェアの開発を行った。具体的には試験で得られたアナログ信号をデジタル化し、フィルタリング処理を施すことで欠陥識別の妨げとなる雑音成分を除去した。さらに、欠陥を視覚的に理解できるように 3 次元表示

が可能なソフトウェアを開発した。

原信号をフィルタリング処理することでノイズ成分を除去できることを確認した。このノイズ成分とは、伝熱管製造時の圧延加工時にできた管内面の周期的な形状変化によるもので、欠陥との識別を困難にする。フィルタリング処理後、欠陥の C スコープ表示 (平面画像) や Fig. 3 に示す 3 次元表示 (鳥瞰図) を行うことで、欠陥のみを識別しやすくなり、位置を特定することが可能となった。

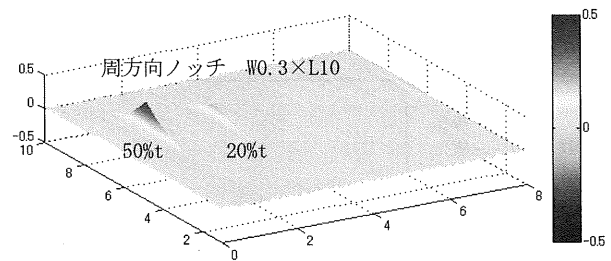


Fig. 3 Three dimensional displays for cracks on an inner surface of a heat exchanger tube

2.3 レーザー加工ヘッド用制御ソフトウェア

レーザー加工ヘッドと複合型光ファイバ스코プの統合に関して、ファイバ스코プ部分のステンレス管にレーザー加工ヘッド取り付けのための金具を取り付け、レーザー加工ヘッド側に設けた 3 箇所ネジ穴とをボルトで結合させた。また、レーザー加工ヘッドの可動スリーブ先端に内蔵したミラーからの映像をファイバ스코プで取り込むと共にファイバ스코プ外周部分に設けたライトガイドにより対象を照明できることを確認した。レーザー加工ヘッドの動作については、直線及び回転動作を独立して行い、伝熱管内壁に対して接触等による動作不良の生じないことを確認した。



Fig. 4 Laser processing head and its operational PC system with a stick controller

製作した制御用ソフトウェアを用いて、管内壁の欠陥を模したアクリル製パイプ内壁にテストパターン紙を貼付け撮影の取得を行い、ソフトウェアによりこの撮影パターン上を手動で追従させ動作履歴を記録し再現する試験を行った。Fig. 5は横軸をPort1 (直動方向)の駆動量(回転角)、縦軸をPort2 (回転方向)の駆動量(回転角)を示した。操作・復元・トレースの軌跡を重ねて表示した。復帰動作によってほぼ操作開始点に復帰しており、良好なトレース結果が得られた。

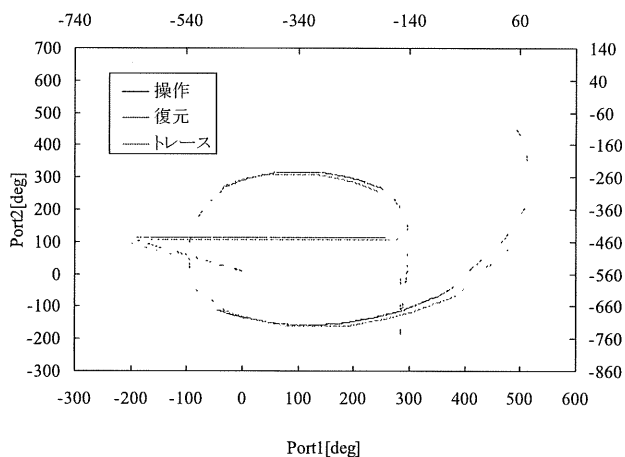


Fig. 5 Manual motions of a laser processing head displayed on an axial direction (Port1) and a rotational direction (Port2).

2.4 カップリング装置

平成19年度の詳細設計に基づきカップリング装置の製作を実施した。高出力ファイバレーザーとの接続部はQBHコネクタとした。レーザーと伝熱管内壁からの映像との統合・分離を行うためのダイクロックミラーには、温度上昇を監視できるように熱電対を取り付けた。レーザー光を製作した複合型光ファイバスコープの接続部端面に導くため、レーザー光を平行光にするためのコリメータを製作した。また、加工のための高出力レーザー光の波長と集光位置調整のための内蔵ガイド光レーザーの波長が異なる。この波長の違いによる色収差現象を補正する補正光学系を設けた。また、集光位置を外部から微調整できる機構を設けた。複合型光ファイバスコープからの映像はダイクロックミラーを通過し、CCDカメラ上に結像する配置とした。以上の基本設計を基に各光学部品配置の組み立てを行いカップリング装置を製作した。

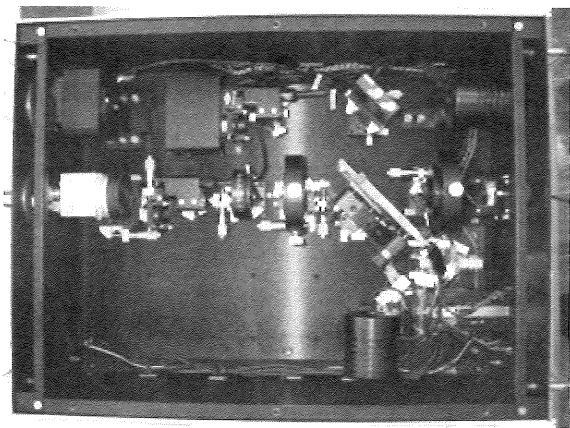


Fig. 6 Inside view of the coupling device

製作したカップリング装置に複合型光ファイバを接続し、ファイバレーザー出力値を設定最低値から順次上げながら、カップリング装置内コリメータ直後のレーザー出力とスコープ先端出口で導光されたレーザー出力をパワーメータにて計測し伝送率を算出した。また、各光学部品に設置した熱電対よりレーザー導光中の温度上昇の監視を行った。ファイバレーザー出力800Wまでは伝送率90%で一定であるが、1kWでは88%に低下した。Fig. 7にカップリング装置内部の温度測定結果を示す。顕著なエネルギー損失なくレーザー導光されていること及びカップリング装置内光学素子類の異常な温度上昇や損傷がないことを確認した。

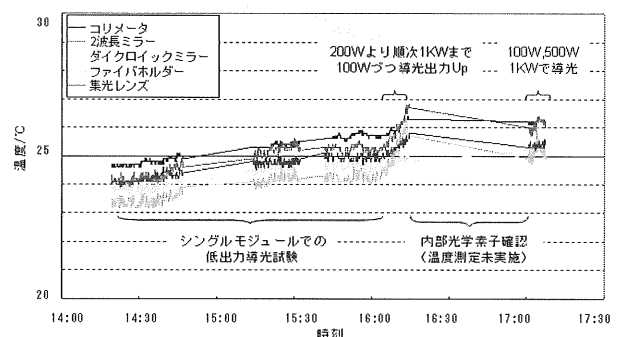


Fig. 7 Monitored temperature for inside of the coupling device

2.5 模擬伝熱管補修試験準備

本試験のため欠陥を設けた模擬伝熱管は、もんじゅ蒸発器で使用している低クロム鋼(内径1インチ直管伝熱管)である。複合型光ファイバスコープに10W

のイッテルビウムファイバレーザ光を入射させたところ、可動スリーブ内の45度に設置した金属ミラーに破損が生じるという第1の課題が明らかとなった。対策としては、金属ミラーの代替として熱伝導率に優れたサファイヤ基板にレーザ波長と可視光全域に対応する誘電多層膜を表裏から蒸着させたミラーを考案・製作することで、ミラーの耐熱性向上に関する問題を解決した。

最大1kWのイッテルビウムファイバレーザを入射させ、1インチ伝熱管を外部から照射する予備実験を行った。その結果、出力300W以上ではレーザ照射部からの蒸着物により、複合型光ファイバスコープの前面に設けた保護ガラスが汚損することが明らかとなった。Fig. 8 に伝熱管外部からのレーザ溶接の模擬試験の様子を示す。仮に、レーザ加工ヘッドを接続し伝熱管の内壁にレーザ照射を行えば、内壁からの蒸着物によりレーザ加工ヘッドの可動スリーブ及び45度に設置したミラーが汚損により使用不能になるという第2の課題も明らかとなった。対策案として、レーザ光を斜め入射させ、且つ、伝熱管内を流動する気流を効果的に利用することで、ミラー類の汚損を低減できる目途を得た。また、これらの結果から、平成21年度に使用するイッテルビウムファイバレーザの最高出力は300W以上500W以下が適切であるとの結論を得た。

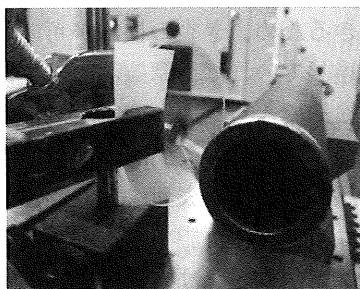


Fig.8 Metal vapor deposition on a shield glass plate by laser welding preliminary test

使用するもんじゅの蒸気発生器伝熱管モックアップ設備は、もんじゅのヘリカル伝熱管を模擬した設備であり、圧搾空気ガスによりプローブを挿入する。本試験では次世代ナトリウム冷却型FBRで設計が進められている直管型熱交換器伝熱管の試験のため、ミラー類の汚損を低減させるために、ガスの供給ラインを直接直管部に接続できるように小改造を行った。次に直管部の上部に専用の機械式挿入装置を新たに設け、こ

れを用いて全長10mのプローブを挿入出来るようにした。これより平成21年度には、直管下部には補修試験を行う伝熱管をフランジで接続できる。この小改造により既存の設備を有効に利用し、次世代ナトリウム冷却型FBRの直管型熱交換器伝熱管を想定した補修試験が可能となった。

3. 結言

新プローブ要素技術に関して、制御ソフトウェアとカップリング装置の開発成果を中心に報告した。加えて平成21年度は、各業務項目において抽出した課題を解決し、10月末を目途に各要素技術の統合を行い、もんじゅの蒸気発生器伝熱管モックアップ設備にて模擬伝熱管補修試験を実施する。補修試験では、高出力イッテルビウムファイバレーザ装置を使用する。また、今年度製作したカップリング装置には、伝熱管内壁を撮影するCCDカメラ及び主要光学部品の温度上昇監視のための記録計の組み込みを行うことで装置を完成させる。

また、各要素技術の開発を通じて抽出された課題の内、ECTとレーザ加工ヘッドに関しては、それぞれの制御ソフトウェアの高度化及びECT信号線減数化のためのマルチプレクサの導入で対処する。次世代FBR熱交換器には1/2インチ伝熱管が候補として検討されている。小径の伝熱管にはマルチチャンネルECTの信号線を通すことは困難であり、マルチプレクサの導入により信号線の数を減らすことは重要課題である。

謝辞

本報告は、特別会計に関する法律（エネルギー対策特別会計）に基づく文部科学省からの受託事業として日本原子力研究開発機構の西村昭彦が実施した平成20年度原子力システム研究開発事業「レーザ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」の成果です。

関連各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- [1]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>)
- [2]原子力システム研究開発事業、平成20年度成果報告会、平成21年1月28日、東京（コクヨホール）