



複合型光ファイバを用いた1インチ伝熱配管用 観察補修レーザー加工ヘッドの開発

Development of a Laser Processing Head Using a Composite-type Optical Fiberscope
to Inspect and Repair 1-inch Heat Exchanger Pipes

日本原子力研究開発機構 岡 潔 Kiyoshi OKA Member
西村 昭彦 Akihiko NISHIMURA Member
関 健史 Takeshi SEKI
赤津 朋宏 Tomohiro AKATSU
山下 卓哉 Takuya YAMASHITA Member

A composite-type optical fiberscope was combined with a laser processing head to repair heat exchange pipes of Fast Breeder Reactor (FBR). The head can rotate axially and move back and forth longitudinally in the 1-inch pipes. The property of fiberscope and the motion of the head can successfully observe the pipe's inner surface to find the cracks which should be repaired by laser welding. The project, which aims for developing the integrated system of inspection and repair, proposes an effective cost reduction for maintenance of FBRs by extension of the heat exchanger's lifetime. This report describes the outline of the laser processing head and the basic performance.

Keywords: Laser processing, Processing device, Composite-type optical fiberscope

1. 緒言

近年、ファイバレーザー性能の飛躍的な向上により、高速増殖炉(Fast Breeder Reactor: FBR)の熱交換器伝熱管の補修技術として有用な専用レーザー加工ヘッドの開発が可能となった。Fig. 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加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。これまでは渦電流深傷(Eddy Current Testing: 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った。しかしながら、施栓の割合が高くなると、有効伝熱面積が減少するため、熱交換率が低下することとなる。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ている。一方で、過去に開発された配管内検査ツールは、配管内の異物除去機能を有するもの¹⁾、異なる配管径に対応可能なもの²⁾、外部エネルギーによりワイヤレスに駆動するもの³⁾などの特徴を持つものがある。これらの共通点として自走機能やカメラ機能を備えており、点検作業が主な目的とした

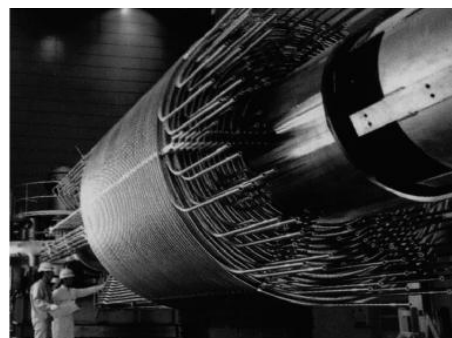


Fig. 1 Heat exchanger of Fast Breeder Reactor (Monju)

ものである。また、配管内を補修するツールとして、光ファイバにてYAGレーザーを配管内まで伝送し、反射ミラーを使ってレーザー補修するものがある⁴⁾。これには、17本のモニタリング用光ファイバがレーザー伝送用光ファイバの周辺に配置されており、特定波長の光をモニタリングしながら溶接状況を検出して不具合発生を未然に防止できる。しかしながら、これまで挙げたツールは観察あるいは補修の機能しか備えておらず、1系統で配管内の観察及び補修作業を同時に行うツールの開発は行われていない。

一方、著者らはこれまでに、内径100mm程度の配管内を自走し、目的の場所にて内径50mmの枝管内に

ヘッドを伸展させ、配管内からレーザー溶接・切断を可能とする配管内アクセス型枝管溶接・切断ロボット^{5,6)}及び非破壊検査ロボット⁷⁾を開発した。また、溶接・切断箇所が狭隘であり、監視を行うことが困難なため、 $\phi 0.7\text{mm}$ の配管溶接・切断用レーザー導光用光ファイバと1万本程度の画像伝送用光ファイバ、数百本の照明用光ファイバを同軸上に配置した外径 $\phi 2\text{mm}$ の複合型光ファイバスコープ⁸⁾を考案した。さらに、現在、胎児外科治療への応用として、焼灼用レーザー導光用光ファイバを $\phi 0.1\text{mm}$ に細径化した外径 $\phi 1.0\text{mm}$ の複合型光ファイバスコープを用いた低侵襲レーザー治療器の開発を行っている⁹⁾。本ファイバを適用することで、従来の方法よりも低侵襲で比較的容易に患部に対してレーザー照射を行うことが可能となっている。

FBRで使用する伝熱管配管の検査・補修のための統合ツール開発を目的とする本プロジェクト¹⁰⁾では、以前に開発した溶接・切断ロボットの機能を有しつつ1/4のサイズに縮小した新型プローブを開発する。これにより検査機能に補修機能を加えることでFBR熱交換器の長寿命化を図る。本報告では、複合型光ファイバスコープ及びレーザー加工ヘッドの製作を行い、基礎的な動作検証を行った結果を述べる。

2. システムの概要

開発するシステムは、全長100mのヘリカル型伝熱管を観察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た¹⁰⁾。

Fig. 2に新プローブの概要を示す。本システムは補修用レーザー伝送用光ファイバと画像伝送用光ファイバを一体化させた複合型光ファイバスコープの先端に伝熱管の撮影と加工補修のためのレーザー加工ヘッドが接続されており、ヘッド内部にはスキャン及び補修用レーザー照射の位置制御を行うための小型ステップモータが内蔵されている。複合型光ファイバスコープの反対側の端面では、画像とレーザー光を分離するためのカップリング装置を設ける。補修用レーザーには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Yb(イッテルビウム)ファイバレーザーを使用する。レーザー加工ヘッド直近に複合型光ファイバスコープを抱え込む形で中空のECT用センサユニットが取り付けられている。

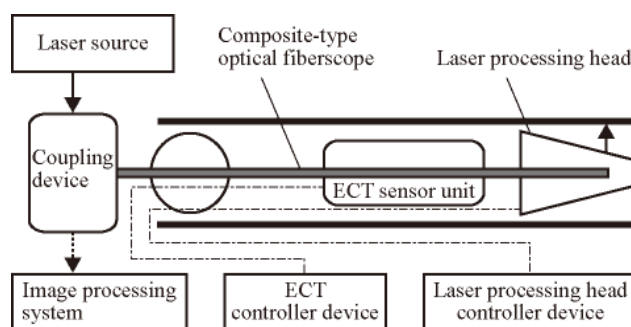


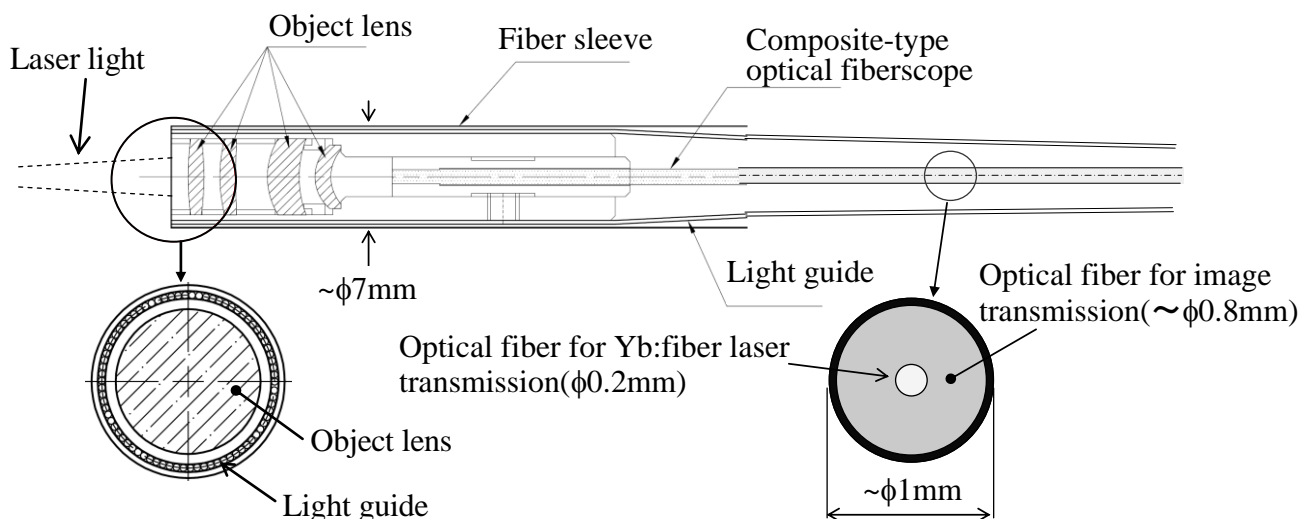
Fig. 2 Block diagram of the new probing system

3. 複合型光ファイバスコープシステム

配管内観察及び補修には、観察・補修を行うための光ファイバやレンズ光学系、配管内での正確な位置決め動作を行うための多くの駆動機構を搭載する必要がある。加えて、内径25mmという非常に狭い領域で作業が行われるため、補修前後の加工点の確認や、補修中の品質管理を行うための観察用光ファイバを別途、本体に搭載することは空間制約条件から困難である。このような背景をもとに、レーザー光の伝送と画像伝送を併用することが可能な複合型光ファイバシステムを開発した。

Fig. 3に著者らが開発した複合型光ファイバスコープの断面図及び外観を示し、Table 1に仕様を示す。補修用レーザーの光ファイバ径は0.2mmに細径化し、Fig. 3(a)に示すように補修用レーザーの光ファイバの周囲に画像伝送用光ファイバを、さらに照明光を伝送するための光ファイバ(ライトガイド)を周囲に配置して一体化し、スコープ外装部を含めた外径を7.0mmとし、レーザー加工ヘッドに組み込み可能な大きさに設計している。また、ファイバ先端にはレンズが配置されており、補修用レーザーが照射される $\phi 25\text{mm}$ 配管の内壁部分でパワー密度が向上するようにレーザー光を集光し、さらに内視鏡画像の視野を広げる役目を果たす。Fig. 3(b)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。

Fig. 4は、複合型光ファイバシステムの構成図を示す。レーザー発生装置から照射される補修用レーザー光は、カップリング装置を介して照明光を伝送する光ファイ



(a) Cross section



(b) Appearance

Fig. 3 Composite-type optical fiberscope

Table 1 Specifications of the composite-type optical fiberscope

Item	Specification
Core diameter for laser	200 μ m
Cladding surface diameter for laser	220 μ m
Core materials for laser	A quartz glass
The number of the picture element	About 20,000
Core materials for image	Ge dope quartz glass
Materials of an object lens	A quartz glass
Materials of an fiber for illumination	Quartz type optical fiber
A total external diameter of a scope (a flexible part)	ϕ 7.0mm
Full length of a scope	10m
Flexibility of a scope (a flexible part)	Smallest bending radius of 45mm

バと合成され、被照射物を観察しながらレーザー照射する。レーザー装置には 0.1~1KW 程度のレーザー光を出力することが可能な Yb ファイバレーザーを想定している。カップリング装置は、Fig. 4 中の実線のようにレーザー発生装置から出射される補修用レーザー光を入射し、集光して複合型光ファイバスコープへ伝送し、また点線のように光ファイバを通して伝送されてきた画像を分離して内視鏡映像をモニタに表示する。

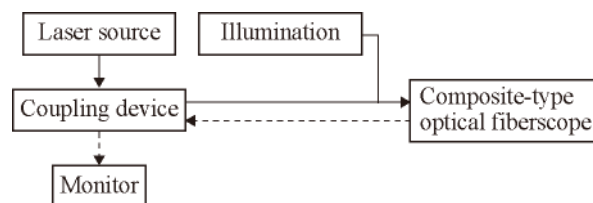
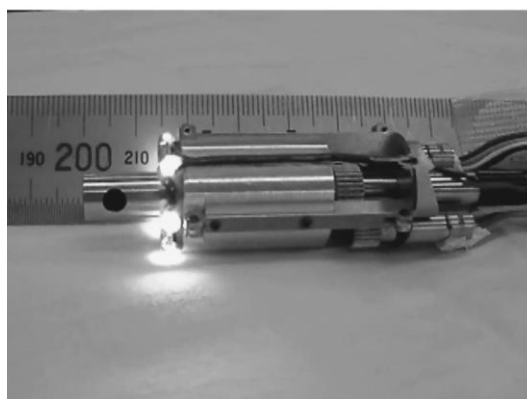


Fig. 4 Composition of optical fiberscope system

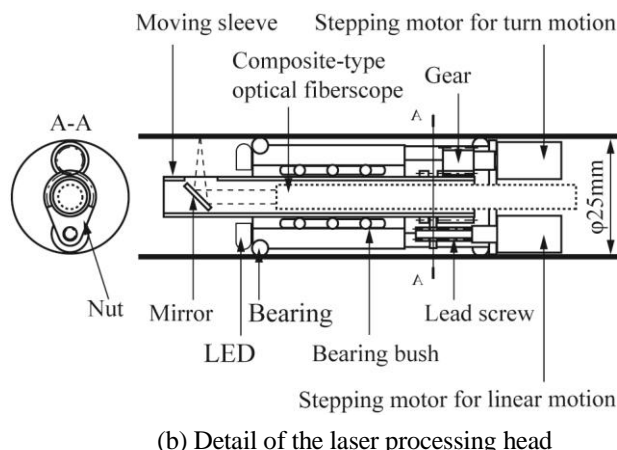
4. レーザー加工ヘッド

4.1 構成

Fig. 5 に開発したレーザー加工ヘッドを示す。Fig. 5(a)は照明用の LED を点灯した様子を示し、Fig. 5(b)



(a) Appearance



(b) Detail of the laser processing head

Fig. 5 Developed laser processing head

はレーザー加工ヘッドの構成を示す。A-A 断面として可動スリーブが 1 つのナットによって前後及び回転の 2 動作を実現していることを示す。本装置は複合型光ファイバスコープ、可動スリーブ、レーザーと映像を直角に反射させるミラー、可動スリーブの回転動作及び軸方向の往復動作を案内支持するベアリングブッシュ、レーザー加工ヘッドを配管内に保持するベアリング、駆動用に用いる 2 基のステッピングモータなどで構成している。外径は $\phi 25\text{mm}$ 、全長は 67mm である。複合型光ファイバスコープはレーザー加工ヘッド本体の中央に配置した可動スリーブに挿入し、可動スリーブ内に設置したミラーを介して配管内の映像を取り込むことができる。複合型光ファイバスコープから出射した補修用レーザー光は、ミラーで反射し配管内壁に集光しパワー密度を向上させる。ステッピングモータは、可動スリーブを周方向、軸方向にそれぞれ移動させる役目を果たしており、レーザー照射点を任意の位置に制御することが可能である。可動スリーブはベアリングブッシュにより円滑な動作が可能である。ベアリングはレーザー加工ヘッド本体外周に 120° 毎に配置し、本体の前後部に計 6 つ配置している。通常、配管内壁には 4 つのベアリングが接しており、レーザー加工ヘッドの支持とレーザー加工ヘッド本体を前後進させる際の摩擦抵抗を軽減させる役割を持っている。また、配管内壁を照らす補助照明として、LED を本体前面に 60° 毎に計 6 つ配置した。

4.2 アクチュエータ

本研究で開発したレーザー加工ヘッドは、管内壁の欠陥を発見次第、補修を行うことを目的としており、補修時に正確に欠陥を追従するために位置決めシステムが必要となる。しかし、レーザー加工ヘッドは内径

25mm の配管で作業するという仕様上、機構に余裕がなく機械的なフィードバック要素を用いずオープンループで位置決めを行わなければならない。そこで本研究では、小型ステッピングモータを可動スリーブ駆動用アクチュエータとして用いることにした。ステッピングモータの一番の特徴は、モータの回転角が入力したパルス数に比例することであり、入力したパルス数から回転角が算出できる。そのため、エンコーダなどモータ回転角を検出するためのセンサを必要とせず、フィードバック要素を用いずに位置決めが可能で、省スペース化も期待できる。

Table 2 に、本レーザー加工ヘッドで使用するステッピングモータの仕様を示す。本モータはアイカムス・ラボ社製 MUBA01-01 で、本体外径は $\phi 6\text{mm}$ 、減速機を含めた本体の全長は 14.5mm の小型ギアドステッピングモータである。最大出力トルクは 1.5mNm で、最高回転数は 2rps 以上という出力特性を持っている。約 1667pps という高い分解能を持ち、1 ステップの回転角は 0.216° である。

4.3 駆動機構

可動スリーブの周方向、軸方向の基本動作を実現させるためにステッピングモータを周方向移動用、軸方向移動用にそれぞれ 1 基ずつを可動スリーブ後方に配置し、周方向移動用モータにはギアを、軸方向移動用モータには送りネジを出力軸に取り付けている。一方、可動スリーブはギアと一体型の構造になっており、その一部分には約 1mm の溝が設けられている。周方向移動用モータに取り付けられたギアは可動スリーブのギアとかみ合っており、周方向移動用モータを駆動することにより可動スリーブを周方向に移動させることが可能となる。軸方向移動用モータの送りネジは可動ス

リーブのギアに設けられた溝にはめ込まれたナットと
かみ合っており、軸方向移動用モータを駆動すると、
送りネジを介してナットを前後に動かすことができ、
ナットは可動スリーブの溝にはめ込まれていることか
ら、可動スリーブ全体を前後に動かすことが可能とな
る。なお、このときの周方向移動用モータのギアと可
動スリーブのギアは互いに軸方向にずれることになる。
また、可動スリーブの溝部分の外径とナットの円弧部
の間には0.1mmのクリアランスを設けてあり、摩擦
による影響を抑えている。

Table 2 Stepping motor parameter

Item	Specification
Diameter	φ6mm
Length	14.5mm
Weight	1.3g
Type	2phase, 5pole
1 revolution step number	1,666.7
1step angle	0.216°
Supply voltage	5V
Supply current	0.17A/phase
Reduction ratio	1/83.3
Maximum response frequency	2,000pulse/second
Maximum torque	1.5mNm
Maximum revolution	2rps
Operating temperature	0~50°C

5. 動作試験

製作したレーザー加工ヘッドの基本性能試験及び複
合型光ファイバスコープによる映像取得試験を行った。
Fig. 6 は本システムの動作確認を行った際の実験構成
を示している。可動スリーブの基本動作は、PCからモ
ータドライバを介して2基のステッピングモータにそ
れぞれ指令信号を与えて駆動可能にした。映像取得の
際には、複合型光ファイバスコープから照明光を出射
し、取得した内視鏡映像はカップリング装置を介して
モニタに表示させたものを記録した。

Fig. 7 はレーザー加工ヘッドに複合型光ファイバ
スコープを組み込み、内径25mmの亚克力パイプ内に
挿入して動作確認を行っている様子である。レーザー
加工ヘッドの可動スリーブは、PCより指令を与え、基
準位置から軸方向に±2.5mm、周方向に±185°の動作が
可能であることを確認した。また、レーザー加工ヘッ

ドのレーザー照射と同軸で照明光を照射可能であり、
状況に応じてレーザー加工ヘッドの周辺部に配置した
LEDと切り替えて照明光を利用できる。なお、補修用
に用いるレーザー光はYbファイバレーザーで、発振
波長は1075nm±5nmである。

Fig. 8は、複合型光ファイバスコープから照明光を出
射した状態で管内壁の映像を取得している写真である。
管内壁に貼り付けた紙に印刷された1mm程度の文字
をはっきりと読み取ることができている。本レンズを
使用した場合、視野の直径は約2.5mmであり、今回撮
影した文字の太さ(約0.1~0.2mm)は、ECTによる検出
可能なピンホール状の欠陥の開口寸法と比較して同程
度であった。今回の検証では文字の線まではっきりと
確認することができたことから、光ファイバスコープ
の画素数や照明光の光量も十分である。

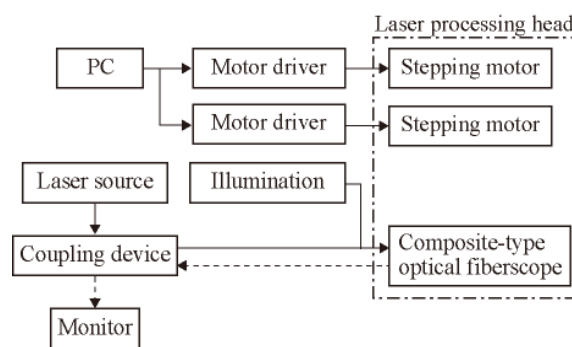


Fig. 6 Composition of experiment

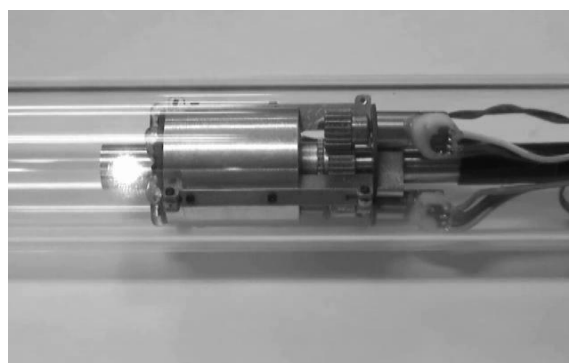
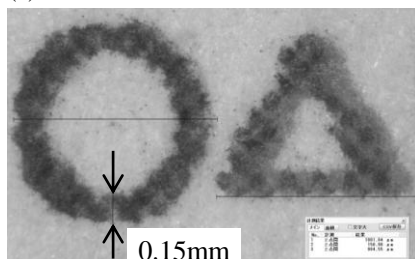


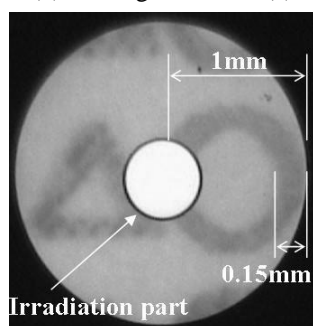
Fig. 7 Test into pipe



(a) Letters used for an observation test



(b) Enlarged view of (a)



(c) Observed image by composite-type optical fiberscope

Fig. 8 Observation test result

6. 結言

本研究では、FBR 熱交換器の 1 インチ管内壁の観察及びその場補修を目的としたレーザー加工ヘッドの開発を行い、複合型光ファイバスコープシステムと組み合わせることにより、同一装置で観察・補修作業が可能となるシステムを提言した。併せて、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。さらに、複合型光ファイバスコープとレーザー加工ヘッドの接続を行い、動作に問題がないことを確認した。今後は、複合型光ファイバスコープの更なる長尺化を行うとともに、模擬伝熱配管を用いた光ファイバスコープ映像の解像度及びレーザー照射性能の検証、補修作業を補助するためのソフトウェアの開発及び操作性の向上などを目指した開発を実施する予定である。また、Yb ファイバレーザーにかかわって、超短パルスレーザーを使用した配管内スケール除去ツールとしての応用も検討している。完成したシステムはFBR 熱交換器に限らず、軽水炉や化学プラントを含めた様々な熱交換器や反応容器の狭隘部の検査と補修に適用を進めたい。

謝辞

本研究は、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が実施した平成 19 年度「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」の成果を含みます。関係者各位に謝意を表します。

参考文献

- [1] 宮川豊美, 鈴森康一, 木村正信, 長谷川幸久: “1 インチ用配管作業ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, 17, 3, pp.389-395, 1999
- [2] 則次俊郎, 久保田充彦: “空気圧ソフトアクチュエータを用いた管内移動ロボットの開発”, 日本ロボット学会誌, 18, 6, pp.831-838, 2000
- [3] 鶴田和弘, 川原伸章: ”管内自走環境認識システム”, 日本ロボット学会誌, 19, 3, pp.9-12, 2001
- [4] 松本長, 石出孝: “各種レーザー加工の原子力分野での適用”, 溶接学会論文集, 10, 1, pp.202-207, 1992
- [5] K. Oka, A. Itou, Y. Takiguchi, Development of Bore Tools for Pipe Welding and Cutting, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 10, No. 2, pp.104-109, 1998
- [6] K. Oka, E. Tada, S. Kimura, T. Ogawa, N. Sasaki, Development of In-pipe Access Welding and Cutting Tool using YAG Laser, Advanced High-Power Lasers and Applications (AHPLA'99), Osaka, Japan, SPIE-The International Society for Optical Engineering, Volume 3888, pp.702-709, 1999
- [7] K. Oka, M. Nakahira, K. Taguchi, A. Itou, K. Obara, Development of Bore Tools for Pipe Inspection, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 10, No. 2, pp.110-115, 1998
- [8] 岡潔, リアルタイム遠隔観測機能を有するYAGレーザー溶接用複合型光ファイバシステム, レーザー研究(レーザー学会誌), Vol.31, No.9, pp.612-617, 2003
- [9] K. Oka, A. Naganawa, H. Yamashita, T. Nakamura, T. Chiba: Composite-type Optical Fiberscope for Laser Surgery for Twin-to-twin Transfusion Syndrome, 4th International Workshop on Medical Imaging and Augmented Reality, MIAR 2008 LNCS5128 pp.251-259. 2008
- [10] 西村昭彦, 岡潔, 山口智彦, 他: “伝熱管内壁検査補修技術開発の概要”, 日本保全学会第5回学術講演会要旨集, pp.139-142, 2008

(平成 21 年 4 月 6 日)

