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

岡 潔

日本原子力研究所(〒319-1195茨城県那珂郡東海村白方白根2-4)

A New Optical Fiber System with Hybrid Functions of Power Delivery and Real-Time Remote Observation for YAG Laser Welding

Kiyoshi OKA

Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1195

(Received May 13, 2003)

In the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), pipe welding/cutting has to be carried out under severe gamma-ray conditions in a limited space inside the pipe. A laser and image transmitting system using a composite-type optical fiber was proposed and tested so as to weld, cut and observe inside a pipe. The composite fiber system consists of one fiber for laser transmission, a number of small fibers for image information transmission located around the laser transmission fiber, and a coupling/distributing device for laser energy and images. As a result, high-power laser transmission for welding/cutting and observation tests using the composite fiber system were successfully carried out. Based on the test results, the proposed laser and image transmission system was determined to be applicable not only in a limited space such as inside the pipe, but also in a human body for medical treatment.

Key Words: YAG laser, Welding and cutting, Image information, Composite fiber, Medical treatment

1. はじめに

核融合炉の科学・技術の実証を目的として、日本・ロシア・欧州の3極で進められている国際熱核融合実験炉(ITER)¹⁾では、D-T燃焼時に発生する14 MeV中性子により、真空容器内に設置された炉内機器は放射化される。このため、これらの機器の保守・修理は全て遠隔機器による作業が前提になる²⁾。

各炉内機器は、熱負荷除熱のため、いずれも強制冷却(水冷却)構造となり、その交換・保守³⁾に際しては、付属している冷却配管をあらかじめ切断しておく必要があり、撤去後、新たに機器を設置し、その冷却配管を再溶接する作業も必要である。さらに、中性子ストリーミング回避のため、非常に狭小なギャップでそれぞれ設置し、遮蔽領域を確保している。このため、配管保守時は、作業空間の確保が困難となり、従来行われている配管外部からの作業ではなく、配管内からのアクセスによる溶接・切断作業が要求されている。

このような背景の下、炉内の主な構造物に付属している冷却配管を対象として、各冷却配管の内側からアクセスし、曲がり部を通して任意の枝管・母管を溶接・切断・検査するシステムの開発が進められてきた^{4,5)}。この

配管内アクセスによる溶接・切断ツールが任意の場所で配管の加工を行うためには、目的の場所まで配管加工用のパワーを伝送する必要がある。また、溶接・切断前後や加工中の確認作業も必要である。

この溶接時のインプロセスモニタリングに関して、YAGレーザー溶接時の異常時モニタリングを行う研究がなされている⁶⁾。また、原子炉の蒸気発生器の補修時には、レーザー溶接用ファイバの外周上にモニタリング用光ファイバを17本配置し、溶接部の温度計測や特定波長の光のセンシング情報をもとに良好な溶接を保証するシステムが検討されている^{7,8)}。しかしながら、配管内での溶接・切断作業のため、その作業状況を目視で監視することは極めて困難である。このため、原研では、配管内という狭隘な空間において、溶接・切断加工の状況や加工前後の観察を行うことを目的に、1系統の光ファイバとレンズ光学系で溶接・切断・観察作業を可能とする複合型光ファイバシステムの開発を行った。本報告では、開発した複合型光ファイバシステムの概要と性能を述べるとともに、他分野への応用について示す。

Table 1 Specifications of the cooling pipe.

Items	Specifications
Main pipe (manifold)	SS316L, 100A (inner dia. of $\phi 102.3$ mm), thickness of 6 mm
Branch pipe	SS316L, 50A (inner dia. of $\phi 54.5$ mm), thickness of 3 mm
Minimum radius of curvature	400 mm

2. 冷却配管保守ツール

ITERの主な炉内機器に付属する冷却配管の仕様をTable 1に示す。炉内機器には、それぞれ2系統の冷却配管が付属しており、母管の内径は102.3 mm、最小曲率は400 mmで、母管から炉内機器へは、内径54.5 mmの枝管で接続する。目的の場所にて加工を行うこと及び溶接・切断のためのエネルギー伝送を確実に行うために、本システムでは、光ファイバによるエネルギー伝送が可能なYAGレーザー加工法を適用した。

溶接・切断ツールには、炉内機器の外部配管から挿入後、曲率を持つ母管内を走行し、任意の枝管まで到達して、溶接・切断を行う機能が要求される。冷却配管の仕様から、溶接・切断ツールを構成する台車の大きさは、配管曲がり部において幾何学的に決定され、長さ約20 cm程度、配管の扁平率を考慮し、直径が98 mm程度以内に制限される。この大きさの台車の内部に、管内移動、位置決め・固定及び溶接・切断に必要な全ての機構を搭載することは困難であるため、複数の台車に機能を分散し、それぞれを数珠繋ぎにする構成とした。

Figure 1に製作した枝管用溶接・切断ツールを示す⁴⁾。本ツールは、曲率400 mm、内径102.3 mmの配管内を0.5 m/minの速度で自走し、任意の場所にある内径54.5 mmの枝管を溶接・切断することが可能である。ツールは全部で4つの俵形状のトラックから構成されており、配管内での摩擦及び引っかかり防止を考慮している。それぞれの台車は、直径約30 mmのSUS材のケーブル保護管を抱え込むように互いに連結されている。保護管内部には動力線及び信号線・ガス供給チューブ・光ファイバが一緒に挿入

Fig. 1 The welding/cutting tool for branch pipes.

されている。また、この保護管は溶接・切断ツールの駆動機構に不具合が生じた際に、外部からの引張力でツールを回収するためのレスキュー用としても使用される。本ツールは目的の枝管部まで到達すると、芯だし機構によって母管内でツールの固定を行い、伸縮型ノズルが枝管内にアクセスし、枝管の溶接・切断加工を行う機構になっている。

配管保守ツールの開発と並行して、YAGレーザー光を使用した溶接・切断試験を行い、溶接・切断性能の評価を行った。試験では、SUS316材の50 A配管(肉厚3 mm)を使用して、最適なレーザー出力、溶接速度、焦点位置等の条件を取得するための試験を行った。さらに、実際に炉内での溶接条件を模擬するために、ギャップ溶接、再溶接試験を実施し、各試験結果から最適な加工条件を得た^{9,10)}。

3. 複合型光ファイバ

配管内アクセス型枝管溶接・切断ツールには、溶接・切断を行うための光ファイバやレンズ光学系、アシストガスを伝送する配管、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及び配管内移動機構を搭載している。加えて、配管溶接・切断作業は高ガンマ線環境下で、かつ、配管内という限られた空間内で行われるため、溶接・切断前後の加工点の確認や、溶接中の品質管理を行うための観察用光ファイバを、別途、ツール本体に搭載することは空間的制約条件から困難である。このような背景を下に、溶接・切断用光ファイバ及びレンズ光学系を、観察光学系としても使用することに着目し、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¹⁰⁾。

これまでに行ってきたYAGレーザー光による溶接・切断試験結果から、厚さ3~4 mmのSUS材を溶接・切断するために使用するレーザー出力は、PWで1,000 W程度必要である。このため、既存のYAGレーザー発振器からレーザー伝送用ファイバにレーザーを集光する際、ファイバコアの直径は0.6~0.7 mm程度必要となる。また、画像観察を行うためには、視野範囲を確保するための映像伝送用ファイバが数千~2万画素程度必要である。これらの条件を鑑み、コア間隔10 μ mで15,000画素を有する溶融一体

Fig. 2 Cross section of the composite fiber.

Table 2 Specifications of the composite fiber.

Items	Specifications
Material	pure silica
Length	17.8 m, 1m
Outer dia. of composite fiber	about 2.0 mm
Max. allowable bending dia.	250 mm
Laser transmission	
- core diameter	0.7 mm
- clad diameter	0.75 mm
Image transmission	
- core spacing	10 mm
- number of pixels	15,000 pixels

Fig. 3 Fabricated coupling device and system construction.

型のイメージファイバの中心に、コア径0.7 mmクラッド径0.75 mmのレーザー伝送用ファイバを設置した石英系光ファイバを製作した。Fig. 2とTable 2に製作した複合型光ファイバの断面図と仕様をそれぞれ示す。ファイバの長さは約18 mと1 m, 最大外径を2 mm程度とし、耐放射線性を考慮して石英を主材料として製作した。また、YAGレーザー光と映像を1本のファイバに導光するために、レーザー光と映像を分離・統合する必要がある。そこで、Fig. 3に示すようなカップリング装置を設計・製作した。この装置は、レーザー光と映像を分離するダイクロイックビームスプリッタ、映像を取得するCCDカメラ、各レンズ及びミラーを冷却する冷却系(水冷式)から構成される。これによって、高出力なYAGレーザー光と映像の分離・統合を行うこととした。

4. 高出力レーザー伝送試験

4.1 カップリング装置の集光特性

製作したカップリング装置の複合型光ファイバを接続する位置にビームプロファイラを設置し、YAGレーザー光を伝送してレーザービームのスポット径を直接測定した。測定は、光軸方向に、ファイバ入射光学系の焦点に対して ± 10 mmの範囲で行った。カップリング装置入口のレーザー出力はCW800 W, 1,000 W, 2,000 Wの3種類で測定した。

集光特性の測定結果をFig. 4に示す。ここで、光軸方向位

Fig. 4 Beam waist curve for various laser power.

置の0を設計焦点位置とし、+(プラス)方向をレーザービームの進行方向とする。ビームプロファイラで計測した86%ビーム直径は、レーザービームの空間強度分布がガウシアン分布である場合の、強度 $1/e^2$ ビーム直径に相当する。測定結果から、レーザービームの焦点位置はファイバ入射光学系の設計焦点位置に一致し、そのスポット直径は、空間強度分布の裾野まで考慮しても、0.34 mm以下に絞られていることがわかった。これは、コア径0.7 mmのファイバに対して十分なクリアランスを持ってレーザー伝送可能なことを示している。また、冷却水の流量を約0.5 l/minとして、レーザー入射時のレーザー入射コリメータレンズホルダ、ダイクロイックビームスプリッタホルダ、複合型光ファイバ入射レンズホルダ、ビームダンパのそれぞれの温度変化を測定した結果、10分間での温度上昇が 2°C 以下に抑えられており、十分な冷却効果を確認した。

4.2 パワー伝送効率

複合型光ファイバのパワー伝送効率を測定するため、カップリング装置にレーザー光を導光してファイバ出射端から出力されるレーザー出力をレーザーパワーメータにて測定した。試験条件として、カップリング装置入口でのレーザー出力をCW800 W, 1,000 W, PW1,000 W(繰返周波数40 Hz, デューティ50%でその平均出力を1,000 Wとする)の3種類とした。パワー伝送効率の測定結果をTable 3に示す。この測定結果から、複合型光ファイバの伝送ロス、約7~8%となった。これは、ファイバ入射端面でのフレネル反射の理論値(入射端合計で約6.8%)を考慮すると、ファイバを破壊するような大きなロスが存在しないことを意味している。次に、CW1,000 Wの場合のファイバ伝送効率安定性について測定した結果をFig. 5に示す。但し、ファイバ出力端の計測に使用したパワーメータはレーザー出力を熱的に測定しているため、応答に時間がかかっている。一方、ファイバ入力端に設置したパワーモニタはメインビームの1%程度をビームスプリッターにて切り分け、減光して半導体検出素子で測定しているため、応答速度が速くなっている。このた

Table 3 Transmission loss for the coupling system and the composite fiber (1m length)① and ② in the table correspond to ① and ② in Fig. 3, respectively.

Incident laser characteristics		CW800W	CW1000W	PW1000W
Laser power (W)	Incident power (Measuring point①)	835	1027	1067
	Incident power (Measuring point②)	827	1015	1053
	Output power	769	940	969
Transmission loss (%)	Coupling System (Incident power①- Incident power②) / Incident power①×100	1.0	1.2	1.3
	Composite Fiber (Output power - Incident power②) / Incident power②×100	6.9	7.3	7.9
	Total loss (Coupling System + Composite Fiber)	7.9	8.5	9.2

Fig. 5 Result of transmission efficiency through the composite fiber.

め、本測定はパワーメータの応答性を考慮して、ファイバ導光開始約90秒後からの60秒間を測定期間とした。この結果から、ファイバのレーザー伝送効率の変動幅は±1%以下であり、十分安定した導光状態が保たれている事がわかる。ここで、ファイバ入射レーザー光はファイバコア径に対して十分に絞られた状態で導光しており、ファイバ導光効率が安定しているということから、複合型光ファイバ自身に劣化が起きていないことを示していると考えられる。また、レーザー伝送時の各冷却部位の温度変化には特に異常が見られないことを確認しており、これからもレーザー伝送が正常に行えていると判断でき、高出力レーザー光を伝送するファイバとして十分な伝送性能を示している。

4.3 画像観察

複合型光ファイバとカップリング装置を接続した状態でYAGレーザー光を伝送し、伝送前後で得られる画像の

Fig.6 Imitated objective lens of the welding/cutting tool for branch pipes .

変化を観察した。試験条件として、カップリング装置入口でのレーザー出力をCW800 W, CW1,000 W, PW1,000 Wの3種類、ファイバへのレーザー伝送時間を30秒とした。なお、画像を結像する対物レンズ系としてレーザー光の出力後に、Fig. 6に示すような枝管用溶接・切断ツール⁴⁾の加工ヘッド部分を模擬した観察用光学ヘッドを設置して画像を観察した。枝管用溶接・切断ツールの加工ヘッドにおいては、ファイバからのレーザー光をレンズ系により一旦平行光にし、途中、銅ミラーを使用してレーザー光を屈折させ、さらに、ミラーにより集光したレーザー光をノズル先端から出射して対象物の加工を行っている。このため、実機を模擬した本画像観察用ヘッドにおいても、レーザー伝送と画像伝送を同一の光路として設計・製作した。故に、画像の結像比が1対1となり、観察可能な視野範囲は画像伝送用のファイバ外径と同程度のφ2 mmとなった。

画像の解像度を確認するため、テストターゲット(USAF1951クロームタイプ)を観察した。レーザー伝送後の画像観察結果をFig. 7に示す。今回のレーザー伝送試験において使用したCW1,000 W及びPW1,000 W(ピーク出力2,000 W)までのレーザー出力では、レーザー伝送前後に観察した画像に変化はなかった。従って、懸念されるような、コア部を伝送するレーザー光が周囲の画像伝送用イメージファイバへ漏れ出し、同ファイバを劣化させるような現象はなく、画像観察用ファイバとして十分な性能であることを示している。

5. 医療用レーザー治療システムへの適用

配管内という狭隘な空間での溶接・切断・観察を、1本のファイバ光学システムで実現するために、複合型光ファイバと、レーザーパワーと映像を分離・統合することが可能なカップリング装置の開発を行った。これらのシステムは配管内だけでなく、様々な用途に適用可能であると考える。例えば、胃や大腸などへの内科用レーザー治療である。レーザー光を使用した内科治療を行う場合、光ファイバによる観察装置(内視鏡)を別途用意し、医師が外部から患者体内の患部を観察すると共に、レーザー治療用のファイバを患者の体内へ挿入する必要があった。これは2種類のファイバを患者の体内へ挿入することであり、その形状は患者に対する負担を非常に高く

Fiber for laser transmission

Fig. 7 Observation result after laser transmission.

Fig. 8 External view of the objective lens.

している。このような背景の下、開発した複合型光ファイバとカップリング装置を、人体用レーザー治療器具として適用することで、患者への負担を軽減することが可能であると考えられる。

5.1 小型対物レンズ

複合型光ファイバの構造が医療用として適用可能かどうかを判断するため、既存の複合型光ファイバに装着可能な小型の対物レンズを製作した。製作したレンズの外観をFig. 8に示す。外径3.5 mm、長さ約20 mmである。このレンズはYAGレーザー光の出力が可能であると同時に、同対物レンズ出口の対象物を実画像として取得可能な構成とした。なお、同対物レンズの設計は、小径の石英球面レンズ群にて構成している。

5.2 パワー伝送効率

製作した対物レンズを装着した複合型光ファイバにレーザー光を導入し、その伝送ロス进行を測定した。レーザー発振器のランプ電流値と複合型光ファイバカップリング装置へのレーザー入力及びファイバ導光後のレーザー出力の関係をFig. 9に示す。ここでは比較のため、対物レンズを装着した長さ1 mの複合型光ファイバからのレーザー出力と、コア径0.6 mm、ファイバ長2 mのステッ

Fig. 9 Laser transmission characteristics.

ブインデックスファイバからのレーザー出力値を示す。測定結果から、対物レンズを装着した複合型光ファイバの伝送ロス率は約30 %となった。このうち対物レンズ単体におけるロスは約25 %程度となっていると考えられる。複合型光ファイバのレーザー伝送部のコア径は約0.7 mmであり、それぞれのファイバに性能差はなく、伝送ロスの差は、おおよそ対物レンズに起因すると考えられる。しかし、レンズ材質が合成石英であるため、レンズ材料内部での吸収は考えにくく、レンズ表面での反射によるものと考えられる。今回試作したレンズは、波長1.06 μm に対する反射が1面当たり2 %あり、対物レンズ全体で24 %の反射が生じることから、対物レンズでの伝送効率の低下はレンズの端面反射によるものである。また、レーザー伝送時の各冷却部位及び対物レンズのハウジングの温度変化を測定した結果、レーザー伝送時のカップリング装置の各冷却部位では、温度変化はほとんど計測されていない。一方、対物レンズのハウジングの温度は、急激な温度上昇を示していた。このことから、現段階では、CW100 Wクラスで導光時間30秒以上のレーザー伝送に際しては、別途冷却等の手段が必要になると想定されるが、反射防止コーティングの改善で対物レンズ部の温度上昇は抑制することが可能であると考えられる。また、現段階では、高出力レーザー光を伝送するファイバ径が太いため、医療用として使用するには可撓性が劣るという問題点がある。これに関して、ファイバを細径化するには、画素からの漏光を抑えるためにコア/クラッドの屈折率差を高くすれば良く、この場合、コアに GeO_2 をドープしたGI型ファイバとなる。複合型光ファイバの場合、レーザー伝送部となる大口径ファイバ部も、画像伝送部と同様のGI型とする必要がある。GI型ファイバは、SI型ファイバに比べて耐レーザー強度は若干低下するが、医療用の低エネルギーでの使用では、実用上問題ないと考えられる。

5.3 画像観察

製作した対物レンズを装着した複合型光ファイバに対してレーザー導光を行い、レーザー導光前後の画像を観察した。画像観察の結果をFig. 10に示す。画像は対物レンズ先端から10mm先の視野である。今回製作した小型の対物レンズを装着した複合型光ファイバへの導光において、CW100 Wまでのレーザー導光前後で伝送される画像に変化はなく、画像伝送可能であると判断される。但し、伝送ロスの測定結果が示すように、対物レンズでの

Fig. 10 Observation result with objective lens after laser transmission.

ロスが大きいため、CW100 Wで30秒以上の導光をした場合、画像伝送用イメージファイバへの損傷の可能性がないとは言えない。

6. まとめ

狭隘な空間で溶接・切断・観察を可能とする複合型光ファイバとカップリング装置を開発し、高出力YAGレーザー光を導光する試験を行い、安定したレーザー伝送性能及び画像伝送性能が得られることを確認した。これは、カップリング装置に対して、高出力レーザー光を複合型光ファイバに入射する際に問題となるレーザー光の吸収による熱の発生を考慮し、熱が拡散しやすい構造の適用や、水冷により発生した熱を強制的に除去する等の対策を講じた結果、達成可能になったものと考えられる。なお、今回の試験では、CW1,000 W及びPW1,000 Wまでのレーザー出力の透過を確認したが、同ファイバ及びカップリング装置においては、さらに高出力のレーザーパワーを伝送できる可能性を秘めていると考えられる。また、今回の条件においても、レーザー伝送部のコア径をさらに細くし、観察する画像を見やすくすることは可能と考えている。

応用事例として、本ファイバシステムを医療用レーザー治療に適用するための検討を行った。現段階では、可撓性が劣るという問題点があるが、ファイバ全体の細径化の際に、ファイバのコアにGeO₂をドープしたGI型を適用すれば良い。GI型ファイバは、SI型ファイバに比べて耐レーザー強度は若干低下するが、医療用の低エネルギーでの使用では、実用上問題ないとする。一方、小型対物レンズ使用時の表面反射に起因する伝送ロスの問題に関しては、小型対物レンズに反射防止コーティング等を行うことで改善が可能である。以上の問題点を克服し、低侵襲を目的とした低出力医療用レーザー治療へ十

分適用可能であると考ええる。

7. おわりに

将来、ファイバの極細化によって、溶接・切断等の工業利用だけでなく、心筋治療、乳管内検査、血管吻合、気管支鏡治療等あらゆる医療用レーザー治療において利用可能であると考えており、今後も引き続き開発を進めていく予定である。

謝 辞

本研究を行うに際し、複合型光ファイバ及びカップリング装置の製作時に、多大なる貢献をしていただいた(株)フジクラの鳥谷 智晶氏、(株)川崎重工業の早川 明良氏ならびに大崎 敏雄氏に深甚の謝意を表す。

参考文献

- 1) ITER工学設計活動報告，日本原子力学会誌 **44** (2002) 16.
- 2) K. Shibamura and T. Honda: Fusion Eng. and Design **55** (2001) 249.
- 3) S. Kakudate, M. Nakahira, K. Oka, and K. Taguchi: J. Robotics and Mech. **10** (1998) 78.
- 4) K. Oka, A. Itou, and Y. Takiguchi: J. Robotics and Mech. **10** (1998) 104.
- 5) K. Oka, M. Nakahira, K. Taguchi, and A. Itou: J. Robotics and Mech. **10** (1998) 110.
- 6) 上向 賢一，井上 尚志，安田 耕三，宮 幹雄，中林 督博，松縄 朗：溶接学会論文集 **20** (2002) 369.
- 7) 石出 孝，名倉 保身，穂坂 重孝，赤羽 崇，長島 是：第27回レーザー熱加工研究会論文集 (1992) 123.
- 8) 石出 孝，名倉 保身，松本 長，赤羽 崇：第31回レーザー熱加工研究会論文集 (1994) 177.
- 9) K. Oka, A. Itou, K. Taguchi, Y. Takiguchi, H. Takahashi, and E. Tada: JAERI-Tech **99-048** (1999).
- 10) K. Oka, E. Tada, S. Kimura, T. Ogawa, and N. Sasaki: SPIE **3888** (1999).