

12 kWマルチモードファイバレーザ

先端技術総合研究所 石川 正博¹・北林 和 大²・阪本 真 一³・監物 巨人⁴
下平 幸輝⁵・船津 友希⁵・葛西洋 平¹・細川 幸⁶

12 kW Multi-Mode Fiber Lasers

M. Ishikawa, T. Kitabayashi, S. Sakamoto, M. Kemmotsu, K. Shimohira,
T. Funatsu, Y. Kasai, and T. Hosokawa

近年、金属加工用途における高出力ファイバレーザの需要が拡大している。金属加工にはキロワットを超える高い出力が必要である。一般的には出力が高いほどより高速な加工ができることから、レーザ加工機メーカーから高出力化の要求が強い。当社グループではファイバレーザに必要な主要技術をすべて保有しており、これまで出力 8 kW までのファイバレーザを開発、製品販売してきた。今回、高出力励起光源、光回路、伝送ケーブルなどの主要な光学部品を新たに開発、設計し、12 kW マルチモードファイバレーザの開発に成功した。

In recent years, the demand for high power fiber lasers for metal processing applications is expanding. A high output exceeding a kilowatt is required for metal working. Generally speaking, the higher the output is, the faster processing is possible. Therefore there is a strong demand for higher output from laser processing equipment makers. Our group possesses all the major technologies necessary for fiber lasers, and has developed and sold fiber lasers up to 8 kW in power. This time, we newly developed and designed major optical components such as high power pumping light source, fiberoptic circuit, delivery fiber cable, and so on. These new technologies led us to success in developing a 12 kW multimode fiber laser.

1. ま え が き

近年、レーザ加工分野において鉄鋼厚板の切断や溶接、リモート高速溶接、異材接合、炭素繊維強化プラスチック (CFRP) の切断など用途開発が活発に行われている。その中でキロワット級ファイバレーザの需要は堅調に高まっており、今後も堅調に伸びていく事が予測されている。

高出力ファイバレーザに必要な主要部品技術としてレーザ発振の媒体となる希土類添加ファイバ、励起用半導体レーザ、高出力用伝送ケーブルがあり、高出力ファイバレーザを開発していく中で特に非線形現象の抑制やクラッドモードの処理技術は 12 kW 出力達成に大きく寄与している。光共振器技術や反射光耐性技術の向上により、産業用途にも十分に耐えうる信頼性を維持しつつ 12 kW ファイバレーザの開発に成功した。

2. ファイバレーザ高出力化技術

マルチモードファイバレーザは希土類ファイバを励起することで連続波のレーザ出力を行うファイバレーザユニット (FLU)、複数の FLU から出力されるレーザ光を 1 つの光ファイバに結合して出力するコンバイナユニット (CMBU)、レーザ光を加工点まで導光する伝送ケーブルで構成される¹⁾。出力 12 kW の実現に向けた主な課題としては、部品損失等から発熱する部品の冷却とファイバ内を伝搬するレーザ出力増加による非線形現象抑制の 2 つに大きく分けられる。

各構成部品でこれらの課題を解決し、12 kW 出力を達成している。その中でも代表的な課題に対する取り組みをユニットごとに紹介をする。

2. 1 ファイバレーザユニット (FLU)

FLU の基本構成を図 1 に示す。FLU 内の共振器は主に励起用 LD と励起コンバイナ、コアに Yb イオンを添加した光増幅用ファイバ (YbDF)、共振器ミラーの役割を果たす Fiber Bragg Grating (FBG) から構成される。励起用 LD から出力された励起光は励起コンバイナを介して YbDF に入射される。YbDF に添加された Yb イオンは励

1 ファイバレーザ研究部

2 ファイバレーザ研究部 次長兼グループ長

3 ファイバレーザ研究部 グループ長

4 光部品研究部 グループ長

5 光部品研究部

6 光通信研究部

略語・専門用語リスト		
略語・専門用語	正式表記	説明
FBG	Fiber Bragg Grating	光ファイバのコアに回折格子を作製することで特定波長の光を反射させるようにしたファイバ型光部品。ファイバレーザにおいて共振器を構成するために用いられる。
SRS	Stimulated Raman Scattering	物質に光が入射すると物質の格子振動により光が変調を受けることで、光子振動の周波数成分だけ周波数がシフトした光の成分であるストークス光（ラマン散乱）が生じる。さらに強い光を入射するとストークス光が光の強度に比例して増幅される現象。
ASE (自然放出増幅光)	Amplified Spontaneous Emission	希土類ファイバで励起光を吸収し自然放出された光が、利得媒質中され誘導放出されることで光増幅された光。
BPP (ビームパラメータ積)	Beam Parameter Products	ビームウエストの半径とビームの発散角の半値半幅の積として定義され、単位は[mm・mrad]で表される。ビーム品質を評価する際に用いられる。

起光を吸収してレーザ光の種となる ASE (Amplified Spontaneous Emission) 光を発生する。ASE 光は FBG によって特定波長のみが反射され、繰返し YbDF で増幅を受けることでレーザ発振にいたる。

12 kW 出力達成に向けては FLU の高出力化が必須となり、レーザ発振原理から励起用 LD モジュール (LDM) の高出力化と励起光の吸収効率の向上が必要となる。その際に発熱や非線形現象の発生は高出力化に向けた阻害要因となる。

・LDM の高出力化

LDM の高出力化を行うとレーザ出力端面のパワー密度の増加や Laser Diode (LD) からの発熱で損傷等の発生が懸念される。端面損傷に対して LD チップの構造に Asymmetric Decoupled Confinement Heterostructure (ADCH) 構造を導入し、さらにエミッタのストライプ幅を従来から広くすることで端面のパワー密度を低減して対策を行っている。ストライプ幅の拡大はビームパラメータ積 (BPP) の悪化につながるが、光学系の最適化を行うことでファイバへの結合効率に対する影響をなくしている。また、高出力化に伴う CoS の発熱量増加に対しては冷却構造を従来の間接冷却から LDM 筐体に直接水路を構成した直接冷却構造に変更して冷却効率を向上させている。その結果、従来モデルより発熱量が増加しているにも関

わらず、ジャンクション温度は同程度にとどめることができ、信頼性を向上させることに成功している。

・投入電力からレーザ光へのエネルギー変換効率の向上

エネルギー変換効率の向上には励起光からレーザ光に変換する際の量子効率を上げることが有効である。量子効率は励起光とレーザ光の波長が近いほど高くなる。YbDF の吸収スペクトルは 915 nm と 976 nm にピークがあり、従来モデルでは 915 nm 励起を採用していたが、今回の開発では励起波長を 976 nm に変更した。レーザ光の波長が 1070 nm であるので、量子効率は 85% から 91% となり、この効率向上がそのまま、エネルギー変換効率の向上につながる。また、976 nm における Yb イオンの吸収係数は、915 nm に対して 3 倍ほど大きい。励起波長を変更することで励起光を吸収するために必要な YbDF 長を 3 分の 1 に短くすることができ、その分 YbDF の伝播損失の影響が少なくなり効率を向上させることができる。

・非線形現象の抑制

レーザの高出力化を阻害する要因として非線形現象の一つである誘導ラマン散乱 (SRS) がある。SRS はコア内を伝搬するレーザ光強度が高くなると発生し、ストークス光と呼ばれる光成分がレーザ光の長波長側に発生する。SRS の発生によりレーザパワーがストークス光に移りレーザ出力が不安定になるなど問題が生じる。SRS 発生を抑制

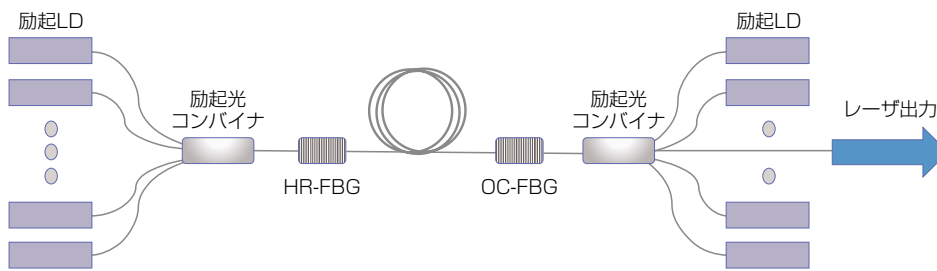


図1 ファイバレーザユニット基本構成
Fig. 1. Basic configuration of fiber laser unit.

値パワー P_{th} は出力光とストークス光のパワーが等しくなる時のファイバへの入力パワーと定義され式 (1) の関係が知られている^{3),4)}.

$$P_{th}(SRS) \propto A_{eff}/g_R L_{eff} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 A_{eff} はファイバ中を伝播する光の実効断面積、 g_R はファイバのラマン利得係数、 L はファイバ長である。上記関係式より SRS はパワー密度が高く、共振器長が長いほど発生しやすくなる。パワー密度を低減するにはコア径を大きくする必要がありビーム品質の観点からは好ましい解決法ではない。そのため、励起波長を 976 nm にすることで 915 nm に比べてファイバ長を 3 分の 1 にし、さらに Yb 添加濃度をできるだけ高くすることで単位長さあたりの励起光の吸収効率を上げ、さらなる短尺化を行っている。

12 kW 達成に向けた FLU の主な改善と合わせて光共振器の FBG 反射率などを最適化することで FLU の DC 効率 45% を達成し、従来機から出力を 30% 向上している。

2.2 コンバイナユニット (CMBU)

高出力化に伴う CMBU の課題として、クラッドモードの処理があげられる。クラッドモードは融着接続の不整合や曲げなどの外圧によりコアからクラッド領域に漏出して伝搬する光である。クラッドモードの増加はビーム品質の悪化、光学部品や融着部の発熱原因となり故障などの悪影響を与えることが分かっている。クラッドモード増加に対する解決手段として出力コンバイナの結合効率改善があるが、改善には限界がありクラッドモードを完全に無くすことはできない。そのため、クラッドモードをファイバから除去し熱に変換して処理するクラッドモードストリッパー (CMS) の高性能化を行っている。従来設計から耐パワー性能を考慮した新規設計を行いその性能を 20% 以上向上させた。これにより 12 kW 出力で増加するクラッドモードに対して信頼性を確保できると共に、レーザ加工時の反射光増加対しても耐反射性能を向上させ、安

定した出力特性を維持できる設計となっている。そして、レーザ品質についても結合部の構造を最適にすることで、レーザ品質を示すビームの拡がりや集光径で集光性能を示すビーム積 (BPP) の値をレーザ加工性能の確保できるとされる $\leq 4 \text{ mm.mrad}$ を実現している。

2.3 レーザ伝送ケーブル

レーザを加工対象物まで伝送する伝送ケーブルでは高出力化に伴い、レーザ光出射端面の損傷やレーザ加工時の反射光による損傷が懸念される。レーザ出射端面における損傷原因は主にフルエンス増大と端面の傷やゴミなどがある。高出力下ではコアから出射されるパワー密度が高くなるため、エンドキャップ構造を採用し端面サイズの拡大を行ってフルエンスを低くしている。合わせて端面の品質管理を行うことで出射端面における損傷リスクを無くしている。レーザ加工時の反射光に対してはコネクタ内のファイバ境界面に再結合することが損傷要因となることがわかっている。内製化によりコネクタ内部構造を設計し、反射光が境界面で結合されないようにすることで、耐反射性能向上を実現している。また、融着技術を改善により、図 3 に示すように対称的な強度分布にすることで、加工品質の向上を行っている。図 4 に 12 kW 出力に対応したレーザ伝送ケーブルの外観を示す。

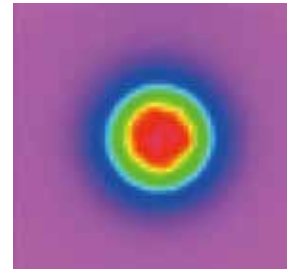


図3 ビームプロファイル
Fig. 3. Beam profile at far field.

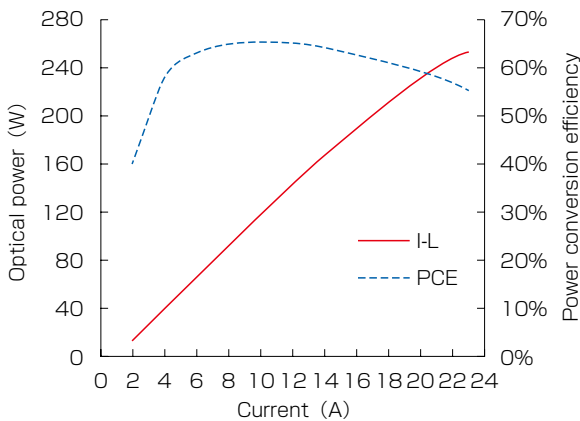


図2 励起LD出力特性

Fig. 2 Optical output power and electrical-optical power conversion efficiency characteristics of the developed module.



図4 12 kW 出力向けレーザ伝送ケーブル
Fig. 4. delivery cable for 12 kW fiber laser.

3. 12 kW ファイバレーザ基本性能

図 5 に 12 kW 高出力ファイバレーザの概略構成を示す。基本構成としてはFLUを複数台出力コンバイナで結合することで高出力化し 12 kW 出力を実現している。その時の出力特性を図 6 に示す。励起LDに投入した電力に対するレーザ出力変換効率は従来製品に対して省電力

性能に優れている。また、定格出力に対しても冗長性があり、励起用LDを駆動させることで定格出力を安定して得られるようになっている。12 kW 出力により懸念される非線形現象に対しては、図 7 に示す 12 kW 出力時のスペクトル分布にラマン利得が最大となる 1120 nm 付近にピークは見られていないため、SRSの非線形現象を抑制できていることが確認できる。このように光学特性を悪化

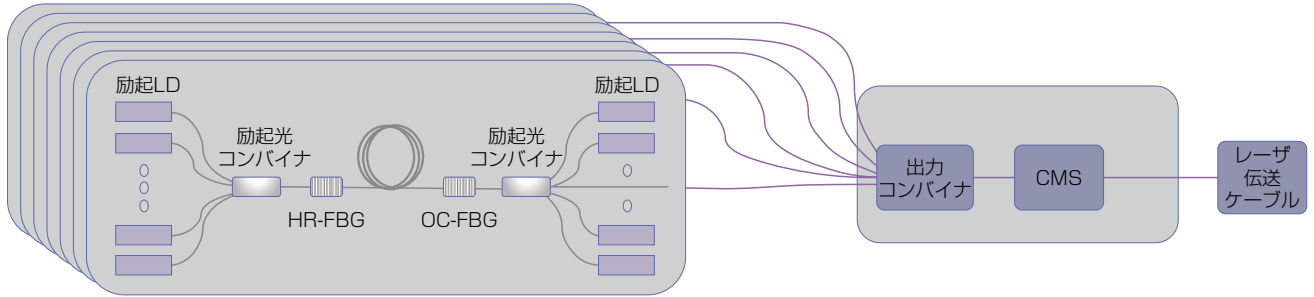


図5 12 kW ファイバレーザ基本構成
Fig. 5. Basic configuration of 12 kW fiber laser.

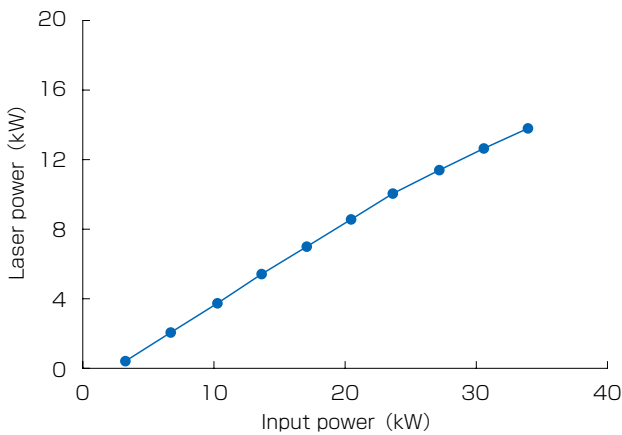


図6 12 kW 出力連続波ファイバレーザ出力特性
Fig. 5. Output characteristics of 12 kW CW fiber laser.

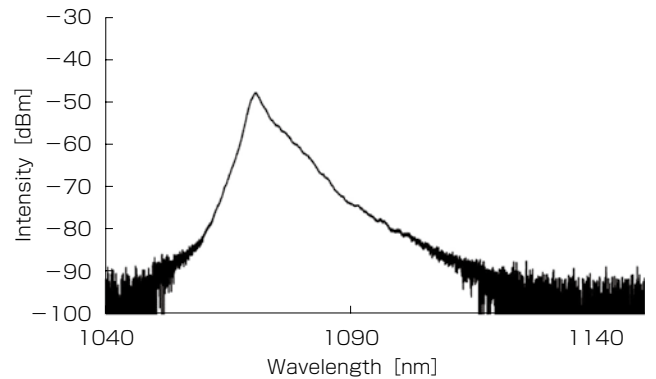


図7 12 kW 出力連続波ファイバレーザ スペクトル分布
Fig. 7. Wavelength characteristics of 12 kW CW fiber laser.

表1 仕様一覧

Table 1. Specification of 12 kW CW fiber laser product.

項目	仕様
中心波長	1070 (Typ.)
定格出力	12 kW
BPP	< 4 mm · mrad
コア径	100 μm
出力安定度	± 2%
最大変調周波数	10 kHz
電源	三相 200 V
冷却方式	水冷
寸法 (mm)	W 567 × L 519 × H 560

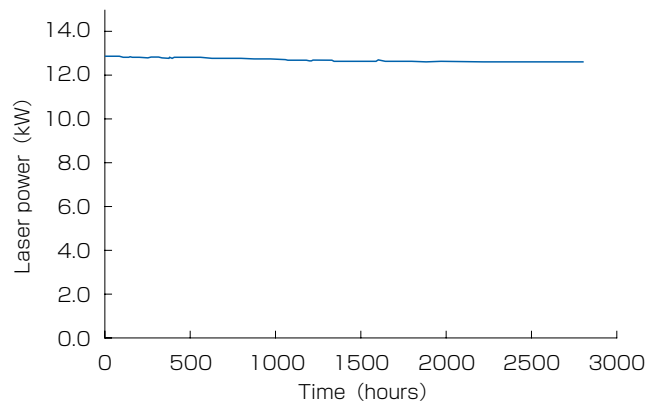


図8 12.6 kW 出力長期信頼性試験
Fig. 8. long-term reliability of 12 kW CW fiber laser.

させることなく、12 kW出力を達成することが出来ている。表 1 に 12 kW出力ファイバレーザの仕様を示す。また、長期信頼性実証のための連続通電試験も実施しており、図 8 に示すように約 2800 時間経過時したところでも大きな出力低下は確認されていない。

4. む す び

本報告によりファイバレーザのレーザ加工用途に対して必要な信頼性に対して各種主要部品の性能向上により、非線形現象を抑制や当社の特徴とする耐反射性能も向上することで 12 kW出力のファイバレーザの開発に成功している。今後、開発した 12 kWファイバレーザを用いてレーザ加工検証を行いその性能の実証を行っていく。

参 考 文 献

- 1) 杉本亮ほか：「4 kW出力連続波ファイバレーザ」, フジクラ技報, 第126号, pp.7-10, 2014
- 2) T. Kasai, et. al.: “High-brightness and high-efficiency fiber-coupled module for fiber laser pump with a advanced laser diode” Proc. SPIR 10086 1008606 (2017)
- 3) 益子泰裕ほか：「2 kW出力シングルモードファイバレーザ」, フジクラ技報, 第129号, pp.38-41, 2016
- 4) G. P. Agrawal : Nonlinear Fiber Optics, Fourth Edition, Academic Press, Cambridge, Massachusetts pp.274-279, 2006