

# 戦略的基盤技術高度化支援事業

「医療用ファイバレーザの低コスト高出力化に向けた  
高性能光部品実装技術の研究開発」

研究開発成果等報告書

H 2 5 年 5 月

委託者：北海道経済産業局

委託先：特定非営利活動法人

ホトニクスワールドコンソーシアム

1.	高効率パワーコンバイナの開発	1
1.1.	パワーコンバイナ設計	1
1.2.	パワーコンバイナの作製技術の開発	2
2.	GI型ダブルクラッドBi添加光ファイバの開発	2
2.1.	スート(ガラス粉末)作製技術の確立	2
2.2.	Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 添加量の最適化	4
2.3.	ガラス化技術の確立	5
2.4.	Bi添加ガラスの線引き	7
2.5.	Bi添加ガラスの利得特性評価	10
2.6.	ダブルクラッド用屈折率分布型(GI型)母材作製技術の確立	12
2.7.	GI型ダブルクラッドBi添加光ファイバの開発	15
3.	パッシブアライメントによる光結合技術の確立及びレーザ発振	18
3.1.	パワーコンバイナを用いた励起光結合	18
3.2.	パッシブアライメントによる共振器形成及びレーザ発振	21
4.	事業化の展望	27
4.1.	ビスマス添加光ファイバ	27
4.1.1.	引き合い状況	27
4.1.2.	次年度以降の予定	27
4.1.3.	本製品の市場	27
4.2.	7×1パワーコンバイナ	27
4.2.1.	引き合い状況	27
4.2.2.	次年度以降の予定	27
4.2.3.	本製品の市場	28
4.3.	黒ガラスファイバ	28
4.3.1.	特許	28
4.3.2.	ターゲット市場	28
4.4.	GIファイバ及びGIファイバ母材	28
4.4.1.	引き合い状況	28

# 1. 高効率パワーコンバイナの開発

## 1.1. パワーコンバイナ設計

本項目では、Bi 添加光ファイバへの励起光導入用の高性能光部品として、複数本の光ファイバからなる励起光を Bi 添加光ファイバへ導入することが可能なパワーコンバイナの設計に関して報告する。図 1 にパワーコンバイナの概略図を示す。励起光を導入するために使用する光ファイバは図中の入射光ファイバ束で表しており、合計 7 本から成っている。この光ファイバは図中の溶融延伸一体化部でコーン状に加工され出射光ファイバに導かれる。

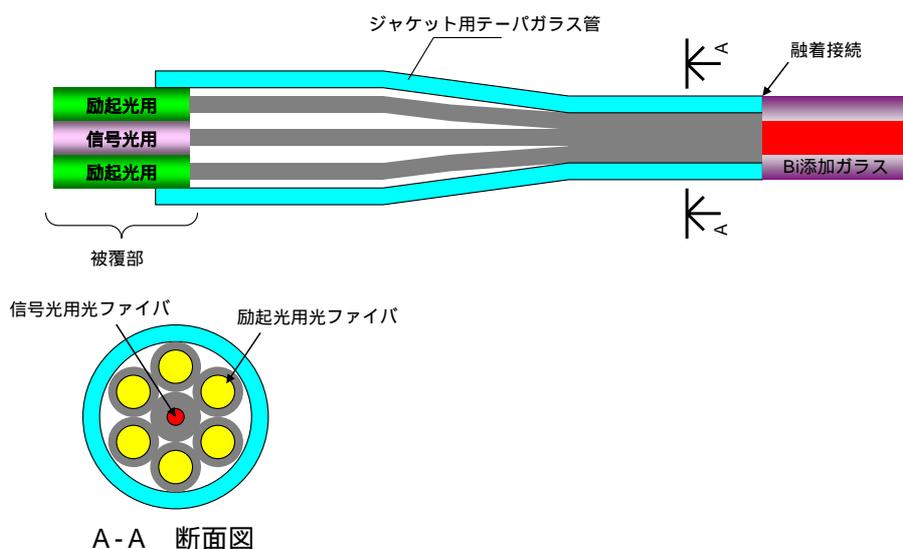


図 1 パワーコンバイナ概略図

またパワーコンバイナの作製に使用する各種部材の仕様は下記の通り選定した。

### 励起光用光ファイバ

- コア径 : 105 $\mu$ m
- クラッド径 : 125  $\mu$ m
- N . A . : 0.2

### 信号光用光ファイバ (検討用)

- M F D : 6.2  $\mu$ m@1060nm
- クラッド径 : 125  $\mu$ m
- c : 0.92  $\mu$ m

### ジャケット用ガラス管

- 材質 : 溶融石英ガラス
- テーパ部外径 :  $\phi$ 460  $\mu$ m
- テーパ部内径 :  $\phi$ 385  $\mu$ m
- 溶融加工後径 :  $\phi$ 440  $\mu$ m

## 1.2. パワーコンバイナの作製技術の開発

本研究のパワーコンバイナは、発振したレーザ光を伝搬させる 1 本の信号光用光ファイバと、励起光を伝搬させる 6 本の励起光用光ファイバおよびジャケット用ガラス管から構成されている。パワーコンバイナの断面は、信号光用光ファイバを中心に配置し、その周囲に均等に 6 本の励起光用光ファイバが三角格子状に配列されており、これら光ファイバの束がジャケット用ガラス管の中に挿入された構造となっている。作製したパワーコンバイナの断面写真を図 2 に示す。パワーコンバイナの直径は約 250 $\mu\text{m}$  である。



図 2 パワーコンバイナ断面写真

作製したパワーコンバイナのポートごとの過剰損失評価結果を図 3 に示す。評価の結果、NA0.2 のレンズを使用した際に最大で 0.7dB という結果を得た。

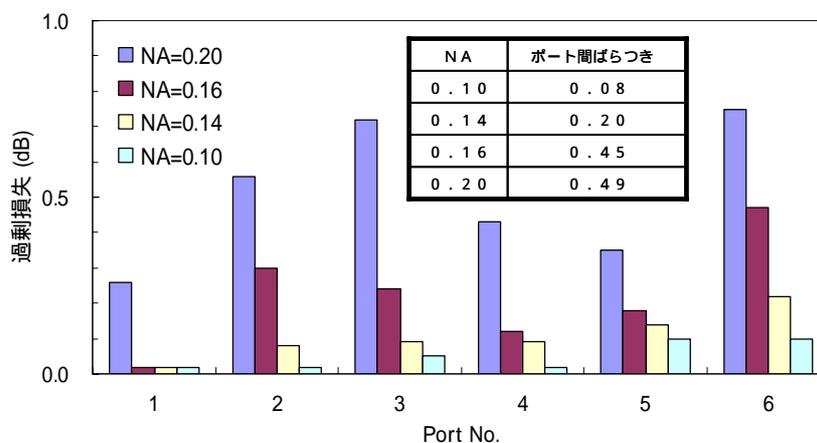


図 3 パワーコンバイナのポート別過剰損失評価結果

## 2. GI 型ダブルクラッド Bi 添加光ファイバの開発

### 2.1. スート（ガラス粉末）作製技術の確立

本研究開発では火炎加水分解反応により得られた石英の微粒子の集合体（焼結体）であるスートに、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$  及び  $\text{Al}_2\text{O}_3$  溶液を含ましにより添加するが、その際、含まし工程中にスートが溶液中で崩れてしまわないほか、スートへ均一に溶液を浸み込ませることが重要である。そのためには、スートの高嵩(かさ)密度化を図ること及びスートの中心と外側とで嵩密度の違いが小さいこと（嵩密度の均一化）が重要である（嵩密度とは、火炎加水分解反応に

より生成した石英微粒子の密度のことである)。図4に、嵩密度の高低及び嵩密度の均一化を決定する主要パラメータをまとめる。嵩密度の高低は、スートの成長面における火炎温度及び火炎の分布が重要である。即ち、成長面での火炎温度が高い場合は、付着した石英微粒子が高い火炎温度により半溶解状態となり、微粒子に隣接する別の微粒子と熔融接合された状態となることにより、焼結されながらスートが成長していくため嵩密度の高いスートが得られる。逆に火炎温度が低い場合は、石英微粒子は成長面での焼結効果が小さいため、比較的嵩密度が低い状態で成長していく。

スートの内側と外側とでの嵩密度に差が生じてしまう原因としては、成長面で付着しなかった石英微粒子(余剰微粒子)が、スート側面を立ち上り、2次的に付着してしまうことが考えられる。2次的に付着したスートは火炎による焼結効果が無いので、中心のスートに比べて嵩密度が低いこととなる。従って、余剰微粒子の2次的付着を防止するためには、排気能力を向上させ、スートに付着する前に強制的に余剰微粒子を排気することが重要となる。

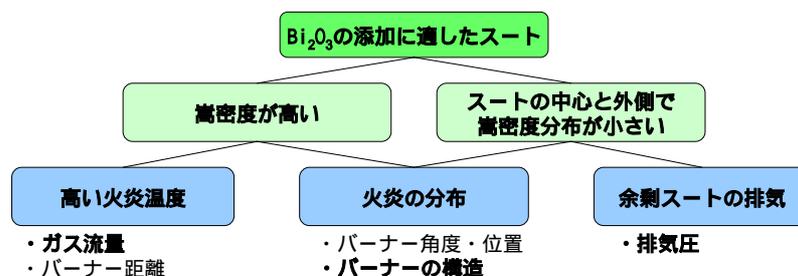


図4 スート作製時のパラメータ

図5に作製したスートの外観を示す。作製したスートは長さが200mm、直径が45mmである。スート完成後、含浸工程によってBi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>及びAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の混合溶液中に浸されるが、嵩密度が低い場合溶液中にスートが溶け出してしまふ。そこで本研究では、仮焼結を実施することで、嵩密度分布の解消及び高嵩密度化を図ることとした。

表1に仮焼結温度に対するスートの寸法変化をまとめる。仮焼結温度を高くするほどスートの焼結効果が高まるため、体積の収縮が顕著になっていることが確認できる。これらの条件で仮焼結したスートを用いて含浸及びガラス化を実施した結果、1475 から 1515 のスートでは、ガラス化後に白濁やクラックの発生といった不良が生じ、1530 で良好なBi添加ガラスが得られる結果となった。1475 から 1515 のスートで不良が発生した原因として、嵩密度が低かったことが考えられる。嵩密度が低いスートは、スートを成す石英微粒子間の隙間が大きく、含浸溶液の浸透する余地が大きくなることになる。多量の含浸溶液が浸透すると、溶剤の乾燥工程でスートにひび割れを生じさせるほか、ガラス化時の気泡の発生要因となってしまうので問題である。

この実験結果から、仮焼結前のスートに対して、長さ寸法がおよそ半分になる温度での仮焼結が最適であることを明らかにした

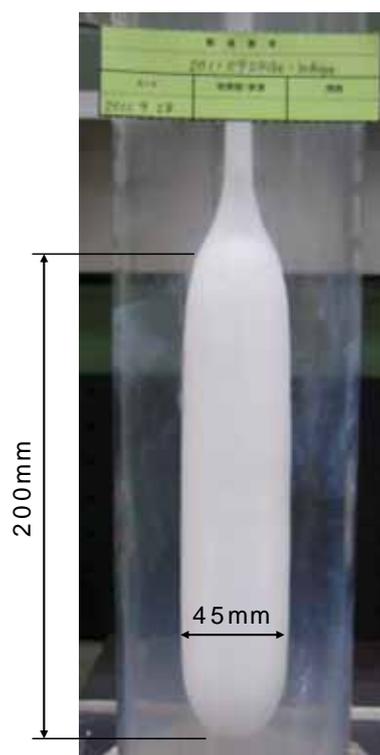


図5 作製したスート

表1 仮焼結温度によるスート寸法変化

仮焼結温度	長さ	直径
無し	190 mm	32 mm
1475	142 mm (74.7%)	20 mm (62.5%)
1500	130 mm (68.4%)	18 mm (56.3%)
1515	114 mm (60.0%)	14 mm (43.8%)
1530	101 mm (53.2%)	13 mm (40.6%)

## 2.2. $\text{Bi}_2\text{O}_3$ 添加量の最適化

図6に、Bi 添加濃度の違いによる吸収特性評価結果をまとめる。この結果、Bi 添加量が増えるほど1000nm帯における吸収の増大が確認でき、この吸収が大きいほど利得特性の向上が期待できると予想している。しかしながら添加量の増大に伴い伝搬損失も全体的に高くなる傾向が認められたため、Bi 添加量は0.5mol%程度が最適であるという見解を得た。

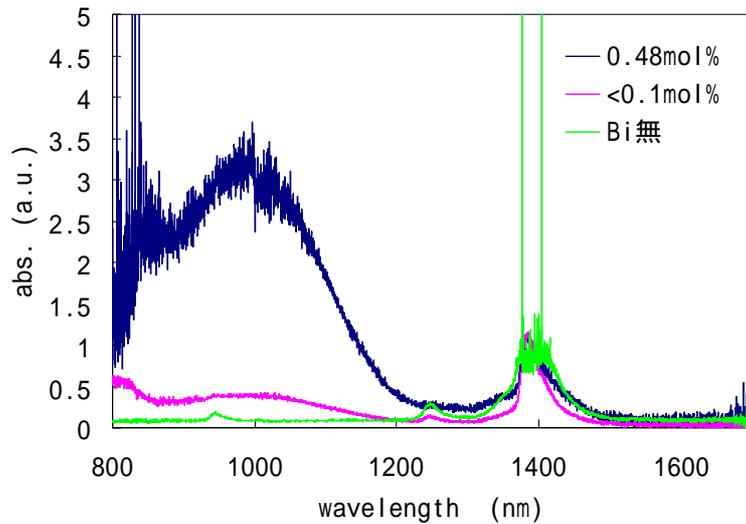


図 6 Bi 添加ガラスの吸収特性

図 7 に仮焼結温度とガラス化状態の関係を示す。この結果から、仮焼結温度が低いほどスートに浸透する溶液の量が増加し、焼結後は白濁したガラスが得られていることがわかる。これらの結果から、溶液浸透量が 5g 程度の場合に良好な Bi 添加ガラスが得られることが明らかとなった。

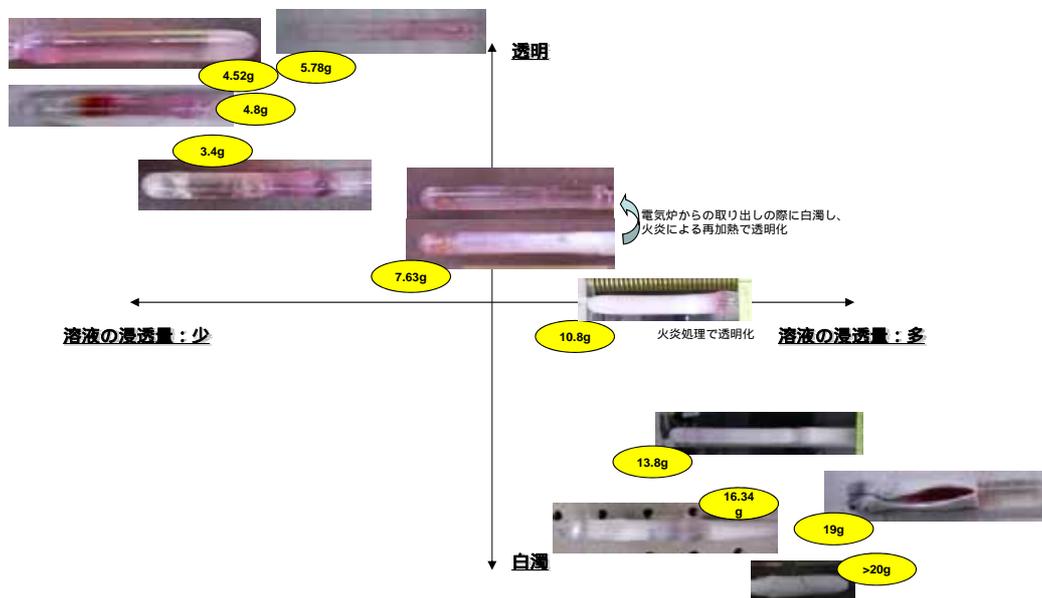


図 7 仮焼結温度とガラス化状態の関係

### 2.3. ガラス化技術の確立

作製したガラスは、図 6 にも示した通り 1380nm 近傍に大きな吸収ピークが観測されている。これは  $2.72 \mu\text{m}$  に基本吸収を持つ OH イオンの第一高調波と予想される。また 1250nm 近傍の吸収も OH イオンと Si-O の分子振動吸収と考えられる。従って 1200nm 近傍の損失を除

くためには OH イオンの除去が望まれる。そこで一定条件化で OH イオンの除去（脱水）を実施した。図 8 に脱水前後の吸収スペクトルを示す。この結果から、脱水を行うことによって 1.39  $\mu\text{m}$  に見られた吸収ピークを解消し、全体の損失を低減できたことが分かる。

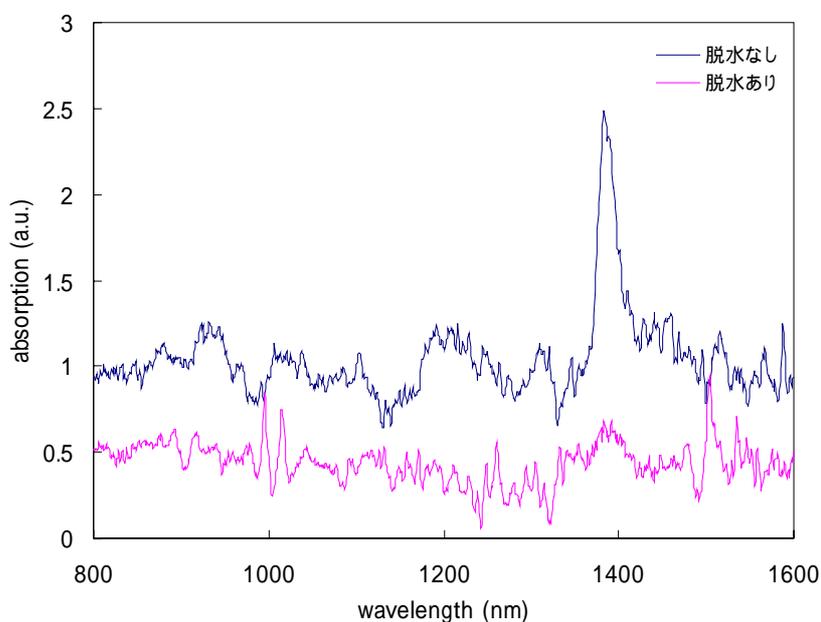


図 8 脱水前後の吸収スペクトル

含浸法による  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  の添加では、ガラスの上部と下部とで  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  添加濃度のばらつきが生じてしまう問題が発生した。この原因として、含浸時の溶液濃度分布が関係していると予想し、含浸時に溶液を攪拌するようプロセスの改良を加えた。図 9 に攪拌の有無による Bi 添加ガラスの概観を示す。この図に示すように攪拌を行わなかったものについては、Bi 添加ガラスの特徴である赤色が長手方向に不均一であるが、攪拌を行うことで、赤色が均一化していることから、含浸時の攪拌によって Bi 添加濃度のばらつきを解消することが可能となった。

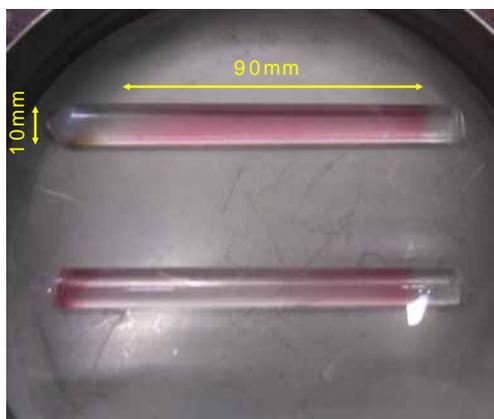


図 9 攪拌の有無による Bi 添加ガラス作製結果（上：攪拌有り、下：攪拌無し）

次に添加する溶液の混合比を変化させて作製した Bi 添加ガラスの、エネルギー分散型 X 線分析 (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy : EDX) による成分分析結果を図 10 に示す。この結果が示すように、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$  溶液の濃度が高くなるほど、Bi 添加ガラスの  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  含有量も多くなる結果となった。従って、Bi 添加濃度を高めるには、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$  と  $\text{Al}_2\text{O}_3$  の混合溶液中の  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  溶液濃度を高くすればよいことが明らかとなった。

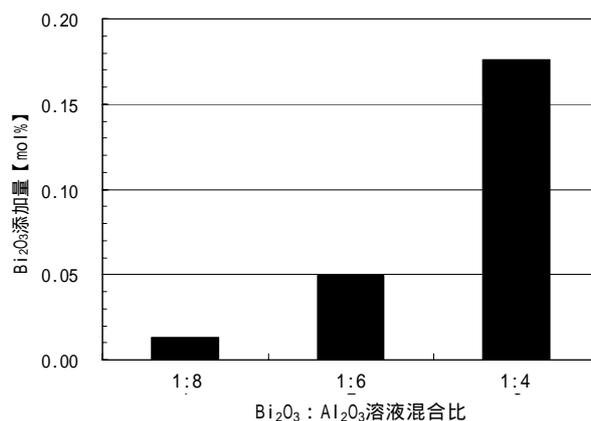


図 10 含浸溶液濃度の違いによる Bi 添加量測定結果

## 2.4. Bi 添加ガラスの線引き

### 1) ビスマス添加光ファイバ母材の作製方法について

含浸法による Bi 添加ガラスの作製では、光ファイバのコアガラスのみの作製となる。従って、後工程によるクラッド層形成が必要になる。

クラッドの形成方法については図 11 に示すように、先端を溶融して閉じた石英管の内部に Bi 添加ガラスを挿入し、ガラス管を減圧しながら線引きを行うクラッド形成・線引き同時法で検討を進めてきたが、この手法では母材状態で評価する屈折率分布評価等が不可能である。また、外径に対するコア径が大きくマルチモードとなってしまうため、コア径を小さくすることも必要であるなどの理由から、ロッドインチューブ法によるクラッド層形成技術の検討を実施した。

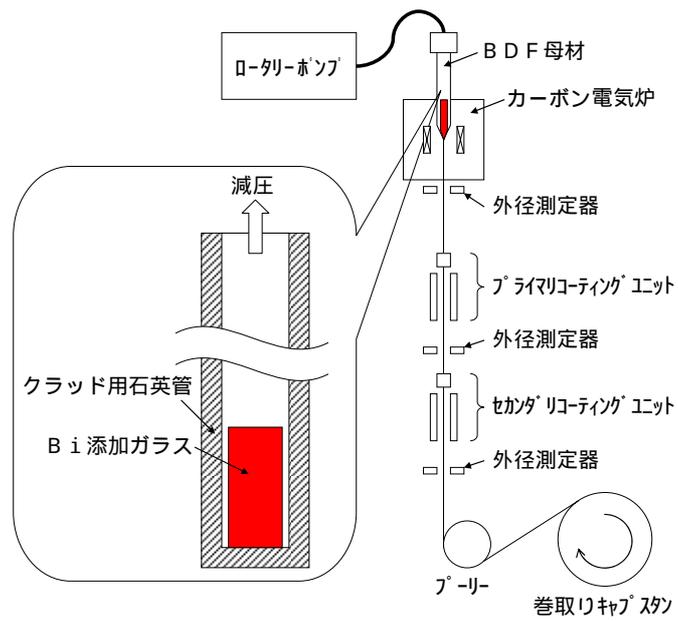


図 11 線引き方法概要図

図 12 に、作製した Bi 添加光ファイバ母材を示す。作製した母材は直径が 13mm、長さが 150mm である。また、図 13 に Bi 添加光ファイバ母材の屈折率分布測定結果を示す。

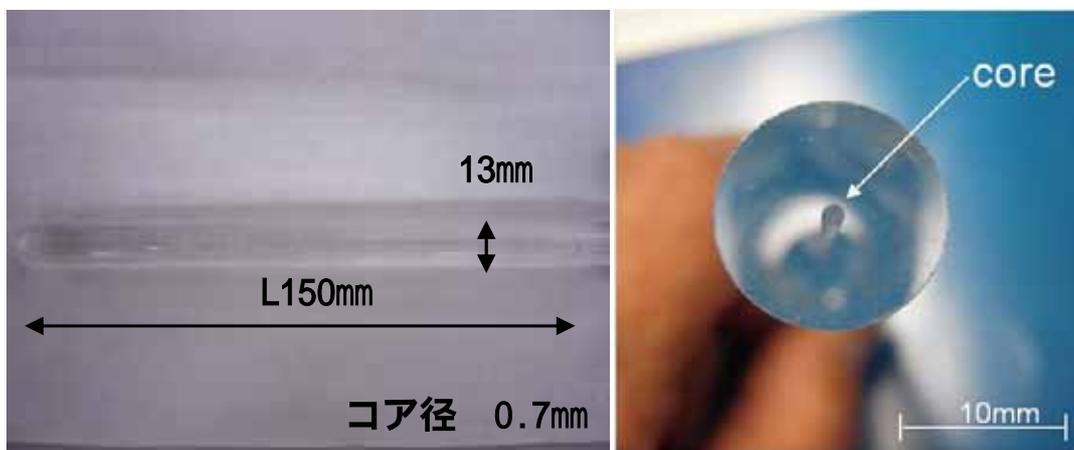


図 12 作製した Bi 添加光ファイバ母材

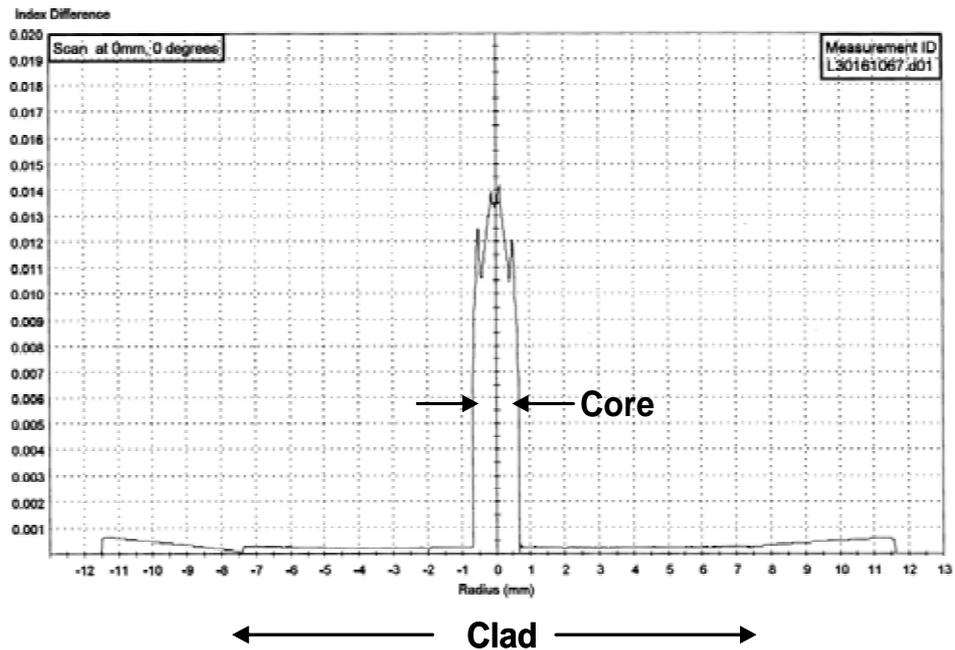


図 13 Bi 添加光ファイバ母材の屈折率分布測定結果

2) 線径の制御性について

前述の方法で作製した BDF 母材の線引きを実施した。線引き時は、プライマリコート及びセカンダリコートの 2 層のコーティングによる補強を実施した。図 14 に線引き時の電気炉温度を変化させたときの光ファイバ外径測定結果を示す。1900 での線引きでは、外径精度が  $\pm 1 \mu\text{m}$ 、1950 での線引きでは、外径精度が  $\pm 0.3 \mu\text{m}$ 、2000 の線引きでは外径精度が  $\pm 1 \mu\text{m}$  という結果を得た。また、コーティング外径精度については  $260 \pm 15 \mu\text{m}$  という結果を得た。BDF の線引きは、母材に目立った欠陥がなければ、従来の線引き技術で問題なく可能であることが明らかとなった。

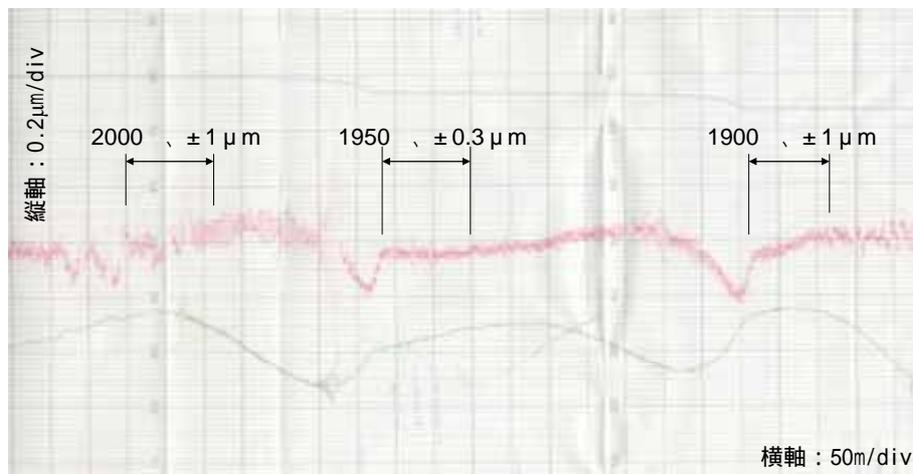


図 14 Bi 添加光ファイバの外径測定結果

## 2.5. Bi 添加ガラスの利得特性評価

### 1) BDF 作製時の線引き温度と蛍光の関係

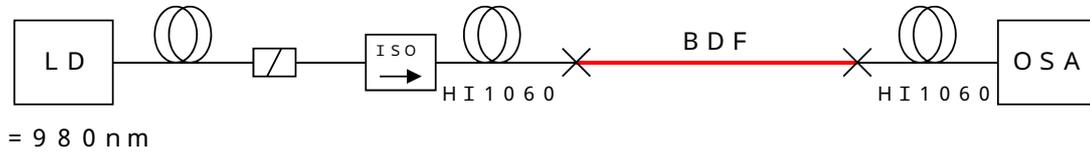


図 15 蛍光特性測定系

図 15 に蛍光特性測定系を示す。作製した BDF に波長 980nm の励起光を入射し、その蛍光特性を評価した。評価した BDF は前述の線引き温度を変化させて作製した BDF で、評価した BDF の長さは 10m であり、 $\text{Bi}_2\text{O}_3$  の添加濃度は 0.11mol% である。尚、BDF と HI1060 ファイバは融着接続している。BDF 特性値を表 2 に示した。図 16 には母材段階で測定した屈折率分布を示している。この結果よりコアとクラッドの比屈折率差は 0.8% である。図 17 に BDF の蛍光特性評価結果を示す。この結果では、1950 および 2000 において大きな差が見られなかった。蛍光波長帯域は、1000nm から 1190nm の広範囲で現れる結果となった。

表 2 BDF 特性値

NA	0.186
コア径	4 $\mu\text{m}$
外径	125 $\mu\text{m}$
$\text{Bi}_2\text{O}_3$ 濃度	0.11mol%

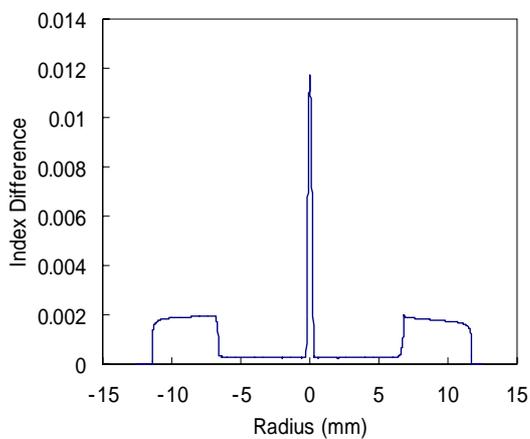


図 16 母材屈折率分布

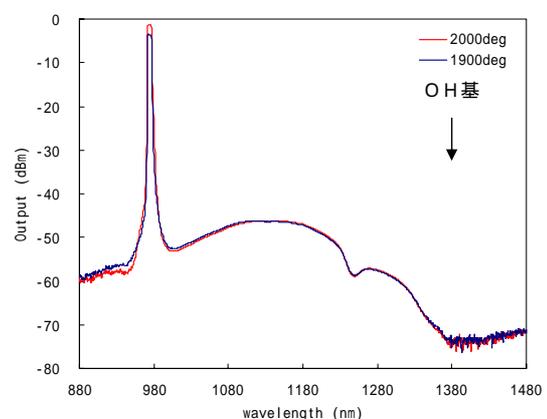


図 17 BDF 蛍光特性評価結果

## 2) 利得の長さ依存性について

BDF の励起効率を測定するために励起光パワー(980nm)に対する BDF 出力パワー(1180nm)を図 15 と同様の測定系でファイバ長をパラメータにして測定した。結果を図 18 に示す。またその時のファイバ特性値を表 3 に示す。

表 3 BDF 特性値

NA	0.184
コア径	10 μm
外径	125 μm
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 濃度	0.06mol%

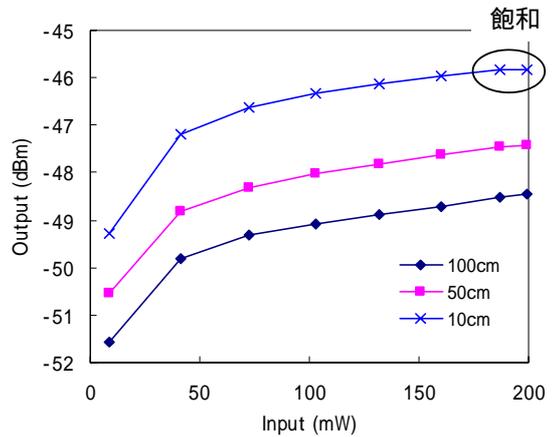


図 18 励起光強度と出力光強度の関係

図 18 の結果より、ファイバ長が短い方が出力が大きいこと、ファイバ長が短い特性には出力特性に飽和現象が見られること、単位距離当たりの実行利得がマイナスであることが分かる。これは単位距離当たりの損失が大きいため単位距離当たりの利得が十分でないためと推測できる。原因として OH イオンによる吸収損失、伝搬する光パワー分布とビスマスの添加分布のミスマッチ、ロッドインチューブ法のためコアとクラッドの境界における散乱損失等が考えられる。

## 3) アクティブファイバのハイブリッド化に関する検討

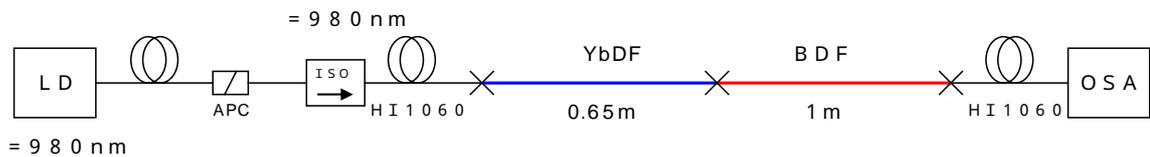


図 19 YbDF-BDF ハイブリッドファイバによる蛍光特性

BDF 単独の場合と YbDF とのハイブリッドによって利得の変化が期待できるため図 19 の測定系によって蛍光特性を測定した。図 20 に BDF 単独の場合と YDF + BDF のハイブリッドファイバの蛍光スペクトル特性を示す。BDF に比べてハイブリッドファイバの場合は YbDF の影響により蛍光パワーが増加していることがわかる。また BDF の場合は 980 nm の励起パワーが伝搬後も残っているがハイブリッドの場合は観測できず YbDF による励起光の吸収が大

きいことを示している。

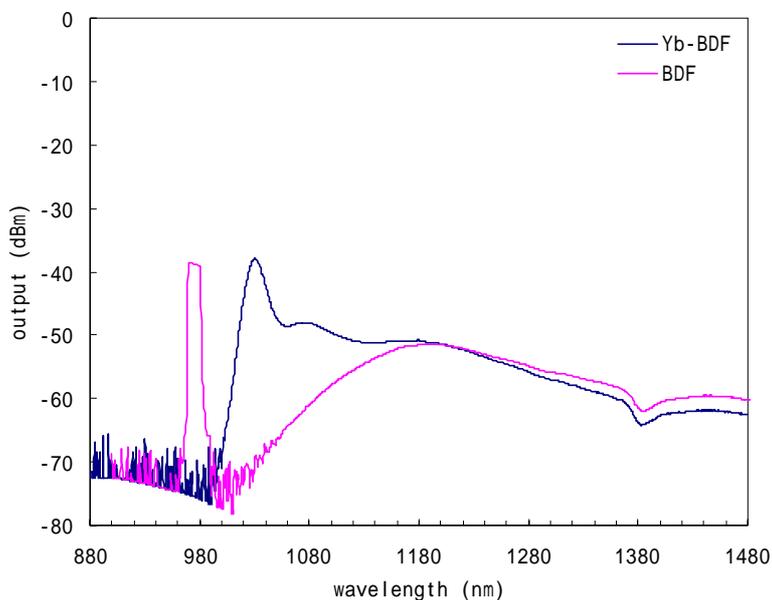


図 20 BDF, BDF-YbDF ハイブリッドファイバの蛍光特性

## 2.6. ダブルクラッド用屈折率分布型 (GI 型) 母材作製技術の確立

本項目では、 $\text{SiCl}_4$  と共に供給する  $\text{GeCl}_4$  の流量によって屈折率がどの程度変化するのかを明らかにすることと、GI 分布の具体的な形成方法の 2 点について検討を実施した。

まず、 $\text{GeCl}_4$  の流量と得られた屈折率差の関係を明らかにするために用いたスートの作製条件及びガラス化条件を表 4 にまとめる。 $\text{GeCl}_4$  の流量のみをパラメータとし、その他のスート作製パラメータ、ガラス化パラメータは変化させずにガラスを作製し、得られたガラスの屈折率差は PK 製『P104』で評価した。 $\text{GeCl}_4$  の流量に対する非屈折率差の関係を図 21 に示す。 $\text{GeCl}_4$  の流量と非屈折率差には線形関係が成り立つことを明らかとした。現在まで得られた最大の非屈折率差は 2.26% で NA に換算すると 0.31 を達成している。

表4 スート作製条件及びガラス化条件

スート作製条件			ガラス化条件		
パラメータ	値	単位	パラメータ	値	単位
O <sub>2</sub> 【支燃】	~5	/min	電気炉温度	1650	
H <sub>2</sub> 【可燃】	~5	/min	He 流量	~1	/min
Ar 【隔壁】	~5	/min	引き下げ速度	~5	mm/min
H <sub>2</sub> 【キャリア】	0	/min	排気圧	~5	Pa
SiCl <sub>4</sub>	~100	sccm			
GeCl <sub>4</sub>	0~100	sccm			
サユレタ温度	~60	deg			
排気圧	~50	Pa			

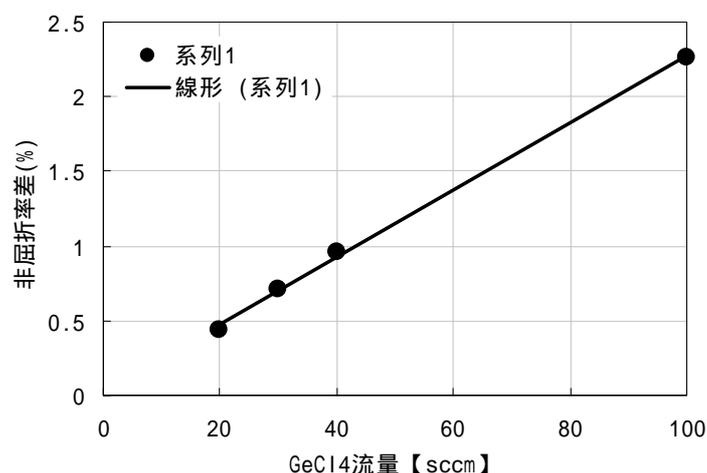


図21 スート作製時の GeCl<sub>4</sub> 流量と非屈折率差の関係

次に石英バーナーの位置やガス流量によって屈折率分布がどのように変化するか検討した。ここでは顕著な結果が得られた2例について説明する。まず図22中赤線で示すような通常のセッティングで作製したガラスの屈折率分布測定結果を図23に示す。測定の結果非常に良好な屈折率の二乗分布が形成されていることが確認できる。

次に石英バーナーの位置は変化させずに、原料を輸送するキャリアガスを通常のArに加えてH<sub>2</sub>を用いて作製したガラスの屈折率分布測定結果を図24に示す。測定の結果、ガラスの中心部分の屈折率がトップハット状であることが確認できる。VAD法では、成長面の火炎温度分布に近似してGeO<sub>2</sub>が添加される性質があり、今回のキャリアガスにH<sub>2</sub>を加える条件下では、成長面の温度分布が比較的均一になったために、トップハット状の屈折率分布が形成されたものと考えられる。

次に図 22 の青線で示すようなスート回転軸から外側に石英バーナーのセッティングをシフトさせて作製したガラスの屈折率分布測定結果を図 25 に示す。測定の結果、ガラス中心の屈折率が低く、外側に向けて一旦屈折率が高くなり、また低くなる M 型の屈折率分布が得られた。これは、石英バーナーを外側にシフトさせることで、回転軸を中心に 2 つの二乗分布が形成されこのような屈折率分布になったものと考えられる。

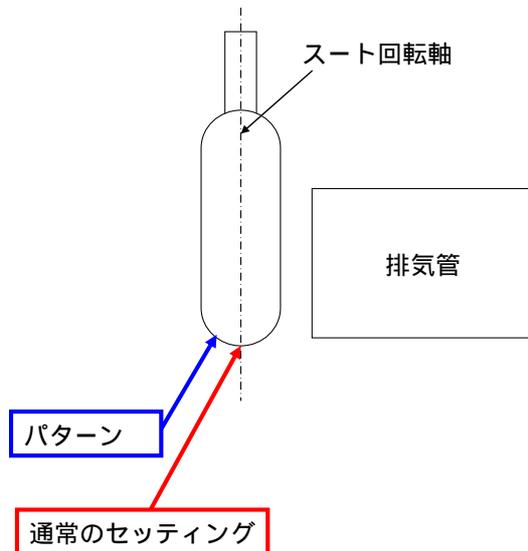


図 22 屈折率分布制御検討用のバーナーセッティング概略図

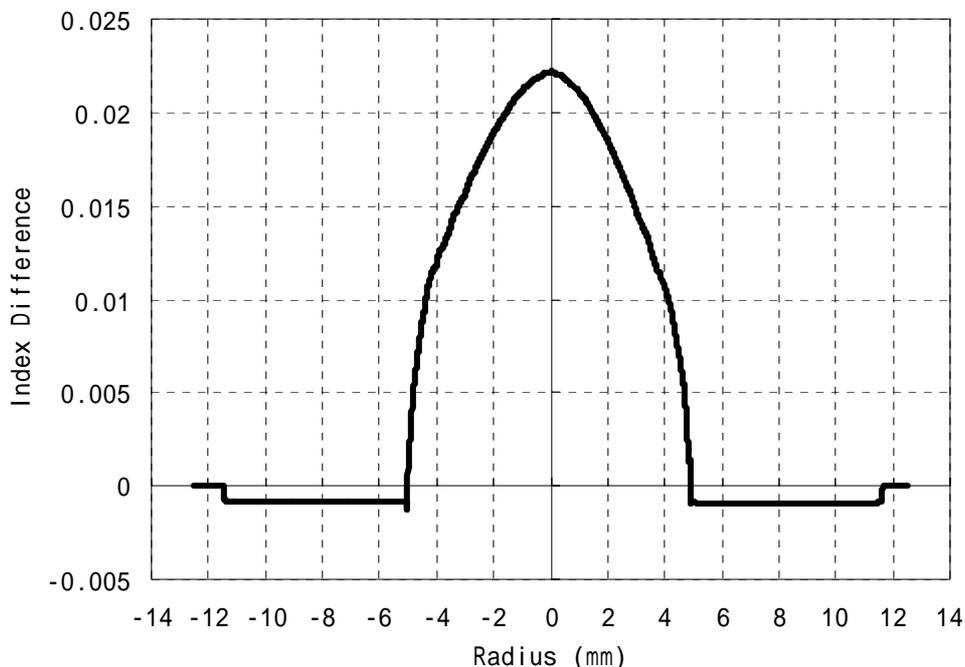


図 23 通常のセッティングで作製した GI 分布ガラス

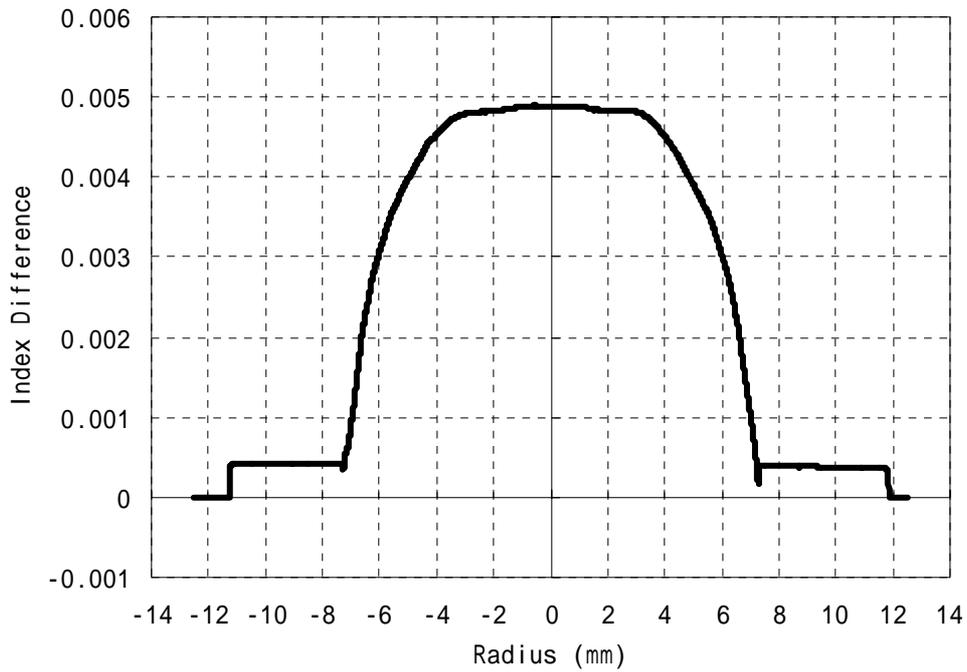


図 24 キャリアガスに H<sub>2</sub> を加えたガラスの屈折率分布測定結果

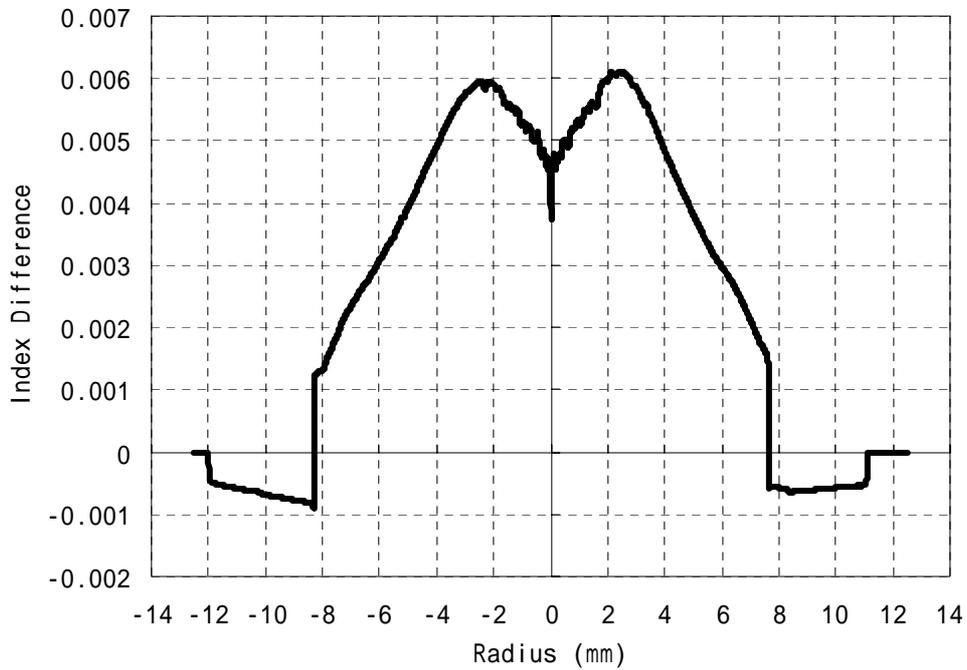


図 25 バーナー位置をシフトさせたガラスの屈折率分布測定結果

### 2.7. GI 型ダブルクラッド Bi 添加光ファイバの開発

GI 型ダブルクラッド Bi 添加光ファイバの作製は、図 26 に示すように VAD 法によって作

製した GI 分布ガラスの中心に穿孔し、そこに Bi 添加ガラスを挿入後、一体化加工を行う方法を検討してきた。この方法は、既に 2.4. で述べたロッドインチューブ法を用いることで実現可能であると判断している。本検討ではこのほかの方法として、Bi 添加ガラスへの GI ガラスの外付け法の検討を行ったので報告する。

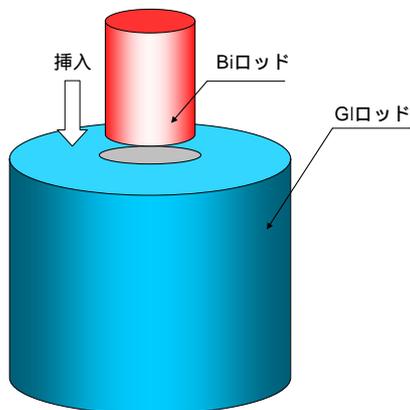


図 26 GI 分布型ダブルクラッド Bi 添加光ファイバ作製方法

図 27 に外付け用によるクラッド形成概略図及び図 28 に a) 外付け法による GI クラッド形成時の様子、b) Bi 添加ガラスにスートを外付けした結果、c) ガラス化結果をそれぞれ示す。スートを外付けする際は、コアとなる Bi 添加ガラスを種棒に融着しておき、Bi 添加ガラスにクラッド用スートを成長させていく。クラッド用スートを成長させていく際には、スートの焼結度を高くするために、火炎温度をできるだけ高く設定して行った。

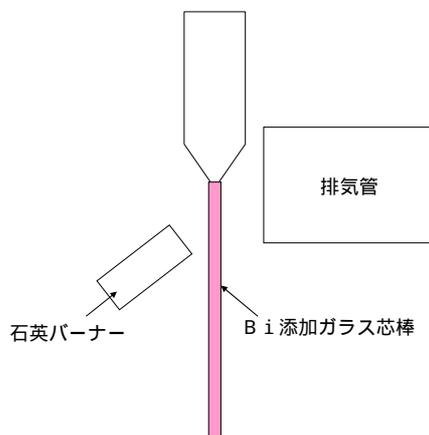


図 27 外付け法によるクラッド層形成方法概略図



a)外付け法      b) 外付けクラッドコート      c) Bi 添加ガラス母材

図 28 外付け法によるクラッド形成時の様子

及び作製した GI 型ダブルクラッド Bi 添加光ファイバ母材

### 3. パッシブアライメントによる光結合技術の確立及びレーザ発振

#### 3.1. パワーコンバイナを用いた励起光結合

作製したパワーコンバイナを用いて損失特性評価を実施した。損失特性評価の実験系を図 29 に示す。

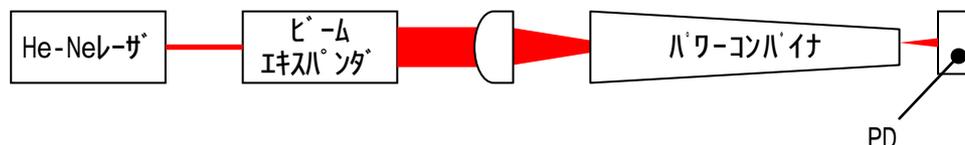


図 29 損失特性評価系

損失特性評価用の光源には波長 633nm の He-Ne レーザを用い、ビームエキスパンダでビーム径を後段の平凸レンズの有効径まで広げたのち、レンズで集光しパワーコンバイナの励起光用光ファイバに結合してパワーコンバイナの挿入損失を測定する。尚、本測定における過剰損失は、パワーコンバイナの挿入損失から未加工の励起光用光ファイバの挿入損失を差し引いた値（一体化加工により生じた損失増加）と定義する。また、使用する平凸レンズの NA を変え、損失特性に与える影響を確認した。図 30 に 1430、1470 および 1520 で加工した 3 種類のパワーコンバイナの、平凸レンズ NA 毎の過剰損失特性評価結果を示す。何れのパワーコンバイナも平凸レンズの NA が大きくなるほど損失が増大する結果となった。これは NA が大きくなるほど、光ファイバ内で高次モードが励振され、励振された高次モードがコア形状歪みにより放射モードとして光ファイバ外部へ漏れ出したためと考えられる。このため、コア形状歪みの小さい低加工温度によるパワーコンバイナほど NA の増加による損失増加が小さく現れる結果となったと推測できる。次に 1470 で加工したパワーコンバイナのポート別の過剰損失特性評価結果を図 31 に示す。この測定の結果、すべてのポートにおいて過剰損失が 0.05dB 以下と、良好な結果を得た。

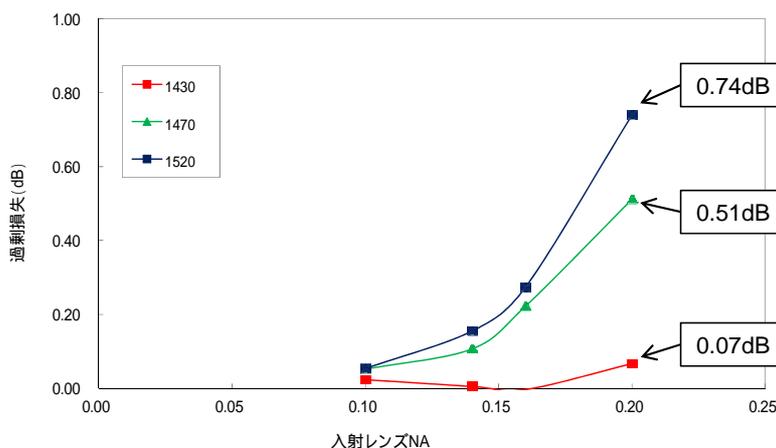


図 30 レンズ NA 別過剰損失評価結果

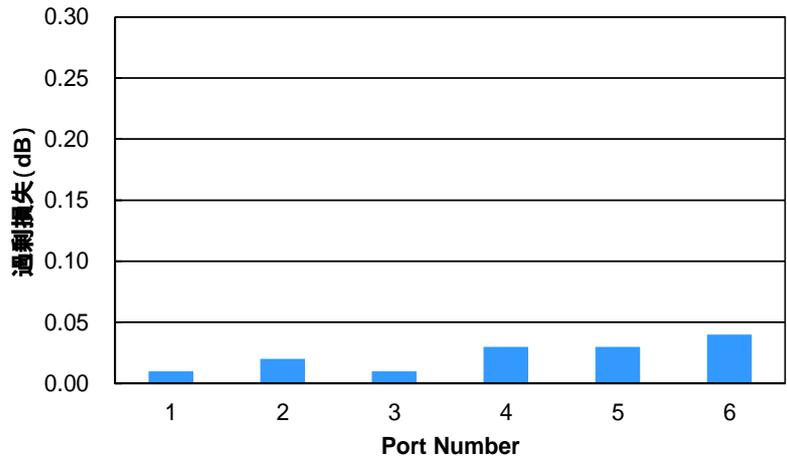


図 31 パワーコンバイナのポート別過剰損失評価結果

次に作製したパワーコンバイナの融着接続による過剰損失評価を実施した。図 32 に融着接続による過剰損失評価系を示す。光源には波長 633nm の He-Ne レーザを用い、ビームエキスパンダを介して使用するレンズの有効径までビーム径を広げ、レンズで集光しパワーコンバイナにレーザ光を結合する。パワーコンバイナは融着接続により光ファイバと接続してあり、光ファイバから出射した光の強度を測定し、パワーコンバイナの融着接続により発生する過剰損失を評価した。図 33 に測定結果を示す。パワーコンバイナの融着接続により発生する過剰損失は、0.2dB 以下という結果が得られた。

ここでパワーコンバイナを用いた励起光の結合効率は、前述のパワーコンバイナの伝送損失と融着接続により発生する過剰損失の合算であるが、今回の評価結果では、最悪のケースを想定した場合でも、結合効率 80%以上(損失 1dB 以下)を達成することに成功した。

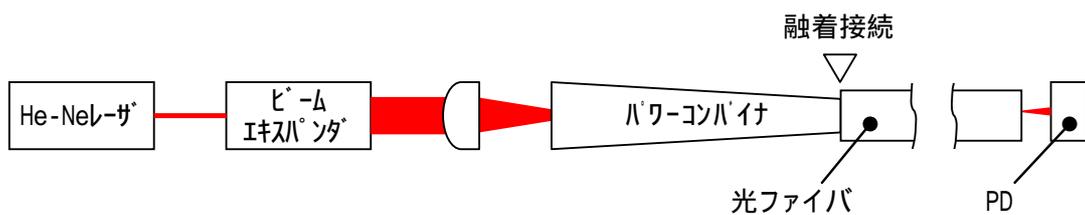


図 32 パワーコンバイナの結合効率評価系

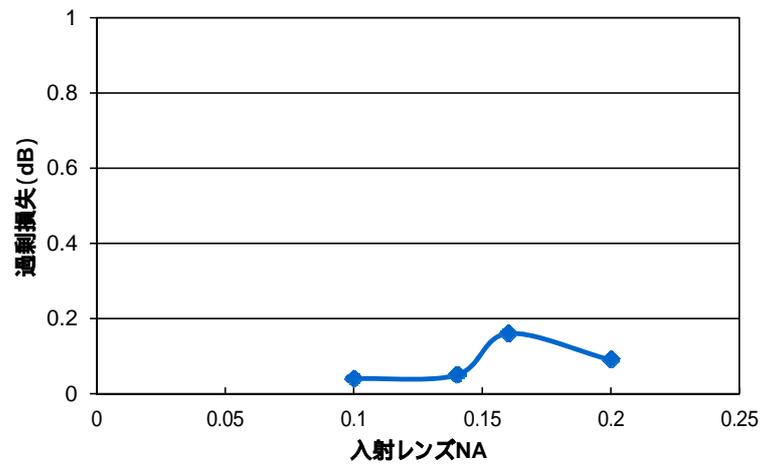


図 33 パワーコンバイナの結合効率評価結果

### 3.2. パッシブアライメントによる共振器形成及びレーザ発振

図 34 は、本研究開発で提案したファイバレーザの概略図である。この図に示すように本研究のファイバレーザは励起 LD からの光ファイバを集合するためにコンバイナを形成し、コーンファイバを通してダブルクラッドファイバ (DCF) へ接続する構造となっている。この構造を形成する方法としてまず、コンバイナとコーンファイバ及び Bi 添加光ファイバを融着接続していく方法の検討を行った。

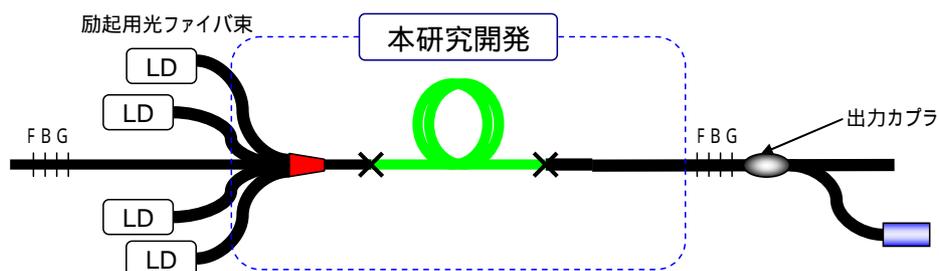
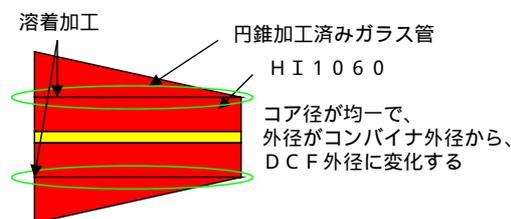


図 34 パッシブアライメントによる共振器形成

図 35 はコーンファイバの断面構造である。この構造は、円錐加工を施したガラス管の中に光ファイバ (HI1060) を挿入し、加熱によってガラス管と光ファイバとを密着させて作製する。



コーンファイバ断面図

図 35 コーンファイバの断面構造

図 36 は、パワーコンバイナ、コーンファイバ及び Bi 添加光ファイバを接続する際のイメージ図である。接続の際に中止すべき点は、パワーコンバイナの中心に配置された信号用光ファイバのコアとコーンファイバのコアの位置ずれを最小にすること、コーンファイバのコアと Bi 添加光ファイバのコアの位置ずれを最小にすることである。

実際に融着接続装置を用いてそれぞれの光ファイバ部品の接続を試みた際に、次のような問題が生じた。

パワーコンバイナの励起用ファイバがあることによって、信号光用ファイバのコアが直視できない

コーンファイバが短すぎるため融着接続装置に固定できない

コーンファイバの円錐形状によって、コアが直視できない

これらの問題によって共振器の形成が困難となった。そこで新たな手法によって共振器を形成することとした。

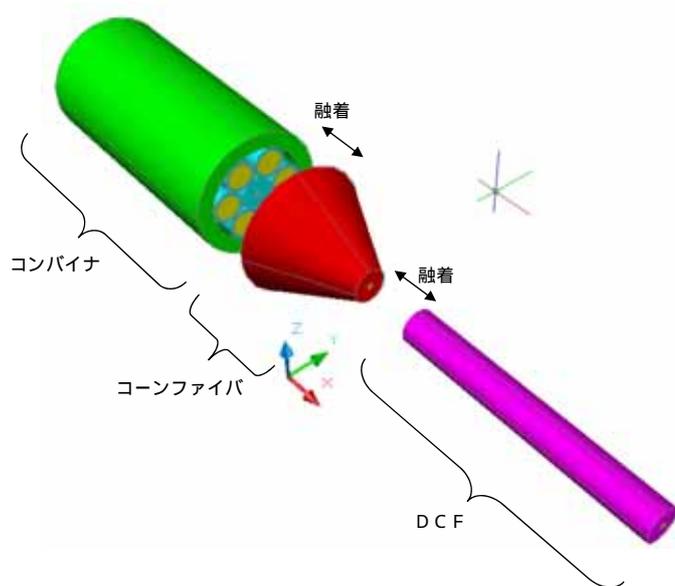


図 36 各種光ファイバ部品の接続イメージ

図 37 に新たに考案した光ファイバ接続方法を示す。まず HI1060 と Bi 添加光ファイバとを予め融着接続する。この接続は融着接続装置によるコア調芯が可能のため、コア位置ずれは生じない。次に融着接続部に円錐状ガラス管を挿入し溶着加工する。この工程でコーンファイバが形成される。次にコーンファイバの底面外周と同一の内径を有する薄肉のガラス管を挿入し、溶着加工によって固定する。そしてガラス管の中に励起用光ファイバを挿入し溶着することによってパワーコンバイナとコーンファイバ、Bi 添加光ファイバの接続が完了する。図 38 に作製した光ファイバ導入部を示す。

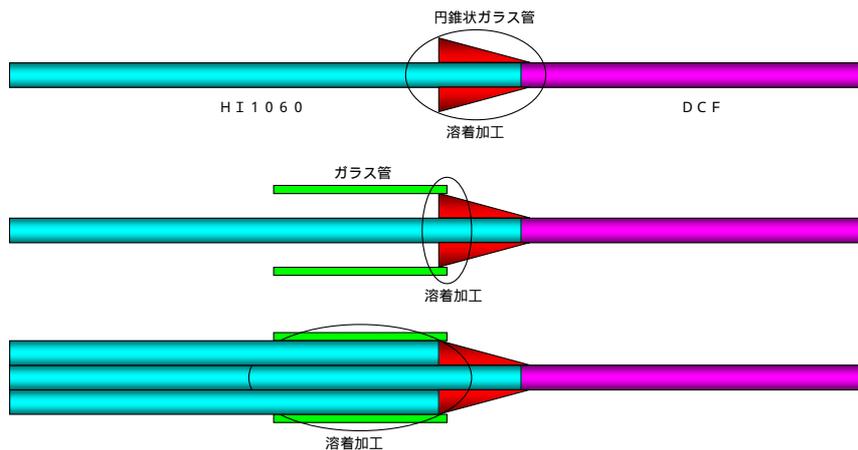


図 37 光ファイバ接続方法

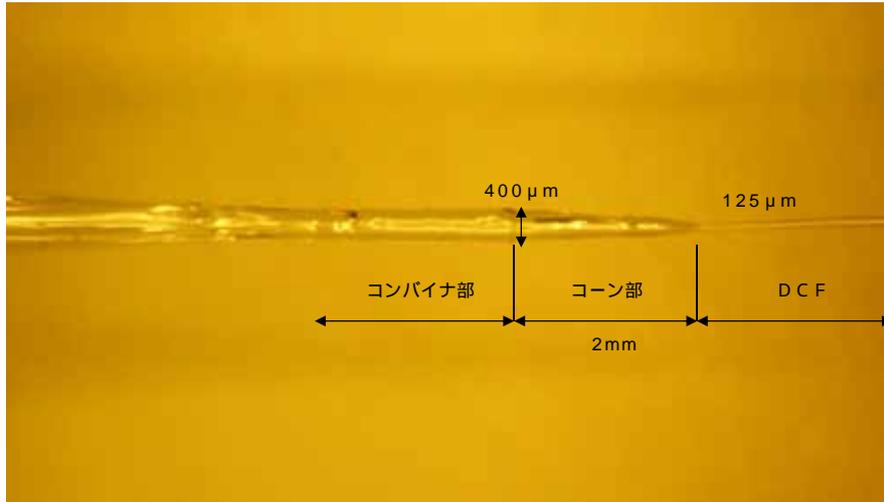


図 38 作製した励起光導入部

2) YDF (1060nm) によるレーザー発振

図 39 に 1060nm 発振用 Yb ファイバレーザ構成の光学系を示す。本構成では左より 980nm LD と右より 925nm LD の両側から励起をおこなっている。左からはシングルモードである LD からの光ファイバを HI1060 ファイバのコアに注入するため、アイソレータ通過後、融着接続している。一方右からは高出力の 925nmLD を用いて光ファイバからレンズを通して平行光を形成し、レンズによって Yb ダブルクラッドファイバへ入射した。出力光は平行系の途中に短波長通過フィルタ(SWPF)を挿入して一部を取りだして観測した。ファブリーペロ共振器系は 1060nm に回折格子ピッチを調整した 99%のファイバグレーティング(FBG)と YDF の端面で形成している。Yb ファイバ長は 6.5m であった。図 40 は励起パワーに対する出力パワーを表している。8W 入力に対して 2.1W 得られ、励起効率としては 26%であった。

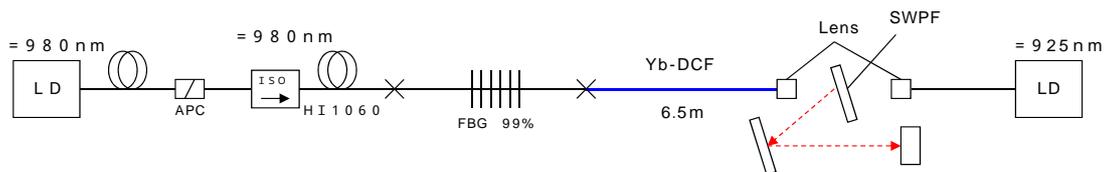


図 39 1060nm 発振 Yb 添加ファイバレーザ光学系

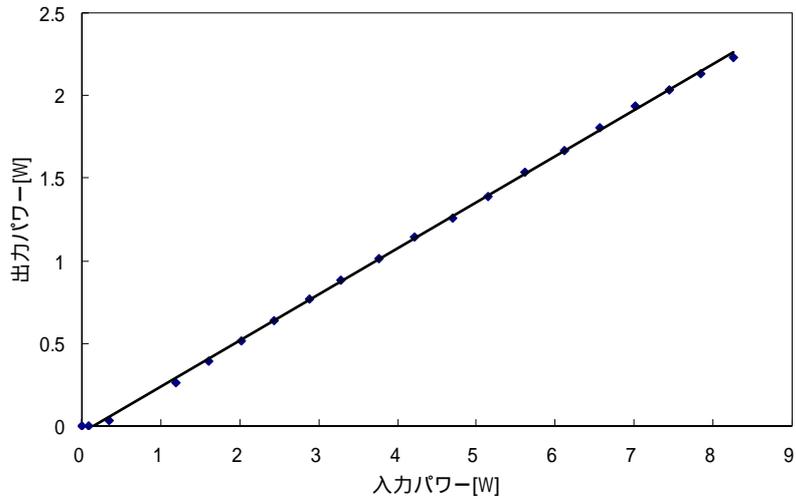


図 40 YDF レーザ(1060nm)の励起パワーに対する出力パワー

3) YDF(1180nm)によるレーザー発振

図 41 に 1180nm 発振用 Yb ファイバレーザ構成の光学系を示した。本構成は図 39 と同様の光学系で構成されている。異なるのはファブリーペロー共振器系が 1180nm に回折格子ピッチを調整した 90%のファイバグレーティング(FBG)と YDF の端面で形成されていることである。Yb ファイバ長は 6.5m であった。図 42 は励起パワーに対する出力パワーを表している。8W 入力に対して 2mW であり、励起効率はきわめて悪いことが理解できる。

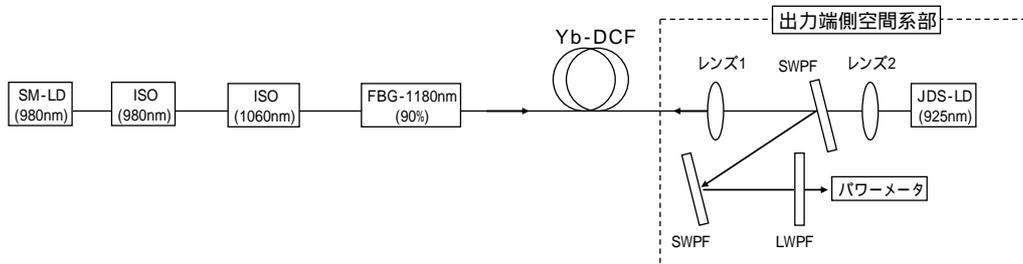


図 41 Yb ファイバレーザ 1180nm 発振光学系

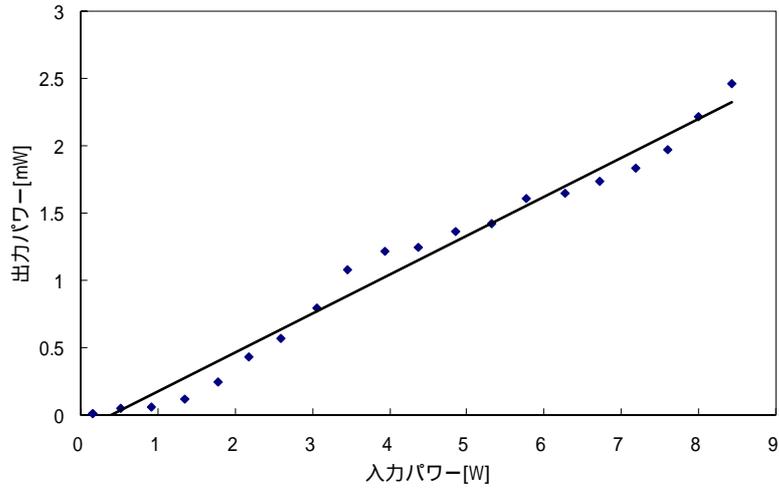


図 42 YDF レーザ(1180nm)の励起パワーに対する出力パワー

#### 4) BDF-YbDF ハイブリッドレーザ発振

図 43 は BDF と YDF を直接融着接続し、左の 980nmLD は図 39、41 と同様であるが右側からの励起光はファイバを集めたコンバイナ構成になっている。ただしアイソレータは 980nm および 1060nm の両波長に対し戻らないようになっている。回折格子(FBG)は 1180nm に指定されている。右からの励起光は 6 本の LD(960nm)をあわせたコンバイナを使用しており、レンズの出力側で 5.5W であった。BDF および YDF の長さは各々 10m、6.5m であった。出力光のスペクトルを図 44 に示した。その結果発振波長は 1179.7nm において 30dB 以上の S/N 比を得ることに成功した。

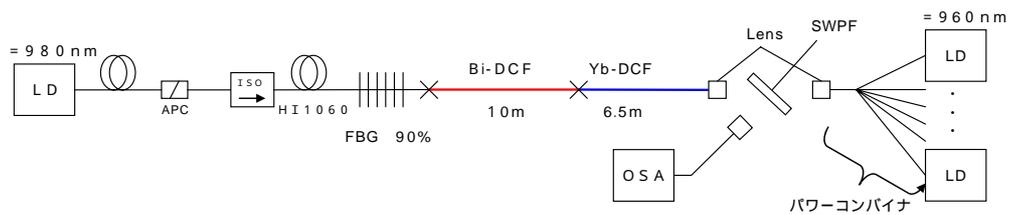


図 43 BDF-YbDF ハイブリッドレーザ発振光学系

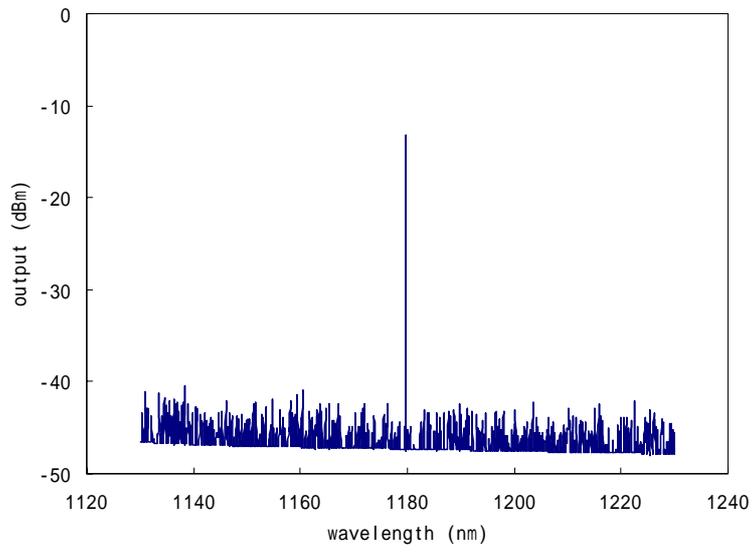


図 44 BDF-YbDF ハイブリッドレーザ発振スペクトル

## 4. 事業化の展望

本事業を通じて、ビスマス添加光ファイバ、7×1 パワーコンバイナ、黒ガラスファイバ（派生）、GI ファイバ及びGI ファイバ母材（派生）の4種の成果が得られた。以下に、これら成果の状況をまとめる。

### 4.1. ビスマス添加光ファイバ

#### 4.1.1. 引き合い状況

ビスマス添加光ファイバは川下企業からの1.2 μm 帯のファイバレーザ光源としての引き合いのほか、光通信用1.3 μm 帯ファイバアンプとして引き合いが来ている状況となっている。また、用途は不明であるが、研究期間からビスマス添加光ファイバの評価を希望する引き合いもある。

#### 4.1.2. 次年度以降の予定

これまでの研究成果を更に高度化するための補完研究として、ビスマス添加光ファイバの低損失化に向けた検討を実施する。具体的には、OH 基の除去効率向上による損失の低減、クラッド層の化学合成によるコア - クラッド境界損失低減化の実施、また、ビスマス添加を従来の含浸法から化学合成法に変更してビスマス添加の高純度化を図り、利得効率の向上を目指す。

本成果のPRについてはこれまでと同様に学会発表による技術PR及び展示会への出展を積極的に実施する予定である。

#### 4.1.3. 本製品の市場

本製品の市場は医療分野、通信分野、計測分野を想定している。

### 4.2. 7×1 パワーコンバイナ

#### 4.2.1. 引き合い状況

パワーコンバイナは、4×1、19×1、37×1、61×1またはそれ以上のチャンネル数の引き合いを多数受けている状況である。また、7×1 は高精度配列バンドルファイバとして引き合いを受けている状況である。

#### 4.2.2. 次年度以降の予定

4×1 パワーコンバイナは、本事業終了後、直ちにサンプル出荷及びエンドユーザによる特性評価を実施し、量産試作の検討、信頼性評価、実装形態の検討を進めていき、来年度中の事業化を予定している。

また、19×1、37×1、61×1の多チャンネルパワーコンバイナについては、作製方法の追加検討を実施し、社内における性能評価を実施する。その結果ユーザの求める仕様に達し

た時点で順次サンプル出荷を実施し、来年度中に事業化の目処を立てる予定である。

#### 4.2.3. 本製品の市場

本製品の市場はハイパワーレーザ市場、計測市場、通信市場を想定している。

#### 4.3. 黒ガラスファイバ

##### 4.3.1. 特許

- ・ 出願番号 : 特願 2012 - 258104
- ・ 名称 : 遮光ファイバ、バンドルファイバ、遮光ファイバ製造方法、及びバンドルファイバ製造方法

##### 4.3.2. ターゲット市場

イメージガイドファイバ用のバンドルファイバ等を想定している。

#### 4.4. GI ファイバ及びGI ファイバ母材

##### 4.4.1. 引き合い状況

ユーザ指定のNAに調整した光ファイバの引き合いに対応するため、クラッド形成技術の確立、脱水処理による低損失