

平成25年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「新世代高速通信向け波長選択スイッチ用
マトリクス型コリメータ実装技術の研究開発」

成果報告書

平成28年 3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

目次

第1章 研究開発の概要	4
1-1 中小企業の特定期間のづくり基盤技術の高度化に関する指針	4
1-2 研究開発の背景	4
1-3 研究目的	5
1-4 高度化指針に記載の高度化目標	5
1-5 本研究開発の実施内容及び数値目標	5
1-5-1 長距離光コリメータの設計】	
1-5-1-1 長距離光コリメータの構造設計	
1-5-2 GI ファイバレンズ作製装置設計】	
1-5-2-1 GI ファイバレンズ用スート作製装置設計	
1-5-2-2 排気設備設計	
1-5-3 GI ファイバレンズ作製プロセス開発】	
1-5-3-1 スート製造技術開発	
1-5-3-2 透明ガラス化技術開発	
1-5-3-3 線引き技術開発	
1-5-4 長距離光コリメータ実装技術開発】	
1-5-4-1 長距離コリメートビーム形成及び評価	
1-6 研究体制	8
1-7 成果概要	10
1-8 当該研究開発の連絡窓口	10
第2章 本論	11
2-1 長距離光コリメータの設計	11
2-1-1 長距離光コリメータの構造設計	
2-2 GI ファイバレンズ作製装置設計	11
2-2-1 GI ファイバレンズ用スート作製装置設計	
2-2-2 排気設備設計	
2-3 GI ファイバレンズ作製プロセス開発	16
2-3-1 スート製造技術開発	
2-3-1-1 SiCl_4 及び GeCl_4 流量と屈折率差の関係について	
2-3-1-2 スート成長面温度と屈折率分布の関係性	
2-3-1-3 石英バーナ取付け位置と屈折率分布の関係性	
2-3-1-4 余剰スートの影響について	
2-3-1-5 長軸方向の屈折率分布について	
2-3-1-6 クラッド形成について	
2-3-2 透明ガラス化技術開発	
2-3-2-1 焼結温度の最適化について	
2-3-2-2 脱水工程の検討	
2-3-2-3 脱水条件による屈折率分布変化について	
2-3-2-4 焼結条件最適化により作製した GI ファイバレンズプリフォーム	

2-3-3	線引き技術開発	
2-3-3-1	線引き温度とレンズ外径精度の関係性について	
2-3-3-2	コーティングの検討について	
2-4	長距離光コリメータ実装技術開発	33
2-4-1	レンズ切断技術検討	
2-4-2	融着技術検討	
2-4-3	ビーム偏角に関する検討	
2-4-4	コリメータ特性について	
2-4-5	マトリクス実装技術について	
第3章	特許について	40
最終章	全体総括	41

第1章 研究開発の概要

本研究開発では、新世代波長選択スイッチ用のマトリクス型コリメータを実現するため、平成 25 年度で、コリメータ用レンズの光学設計および、光学設計に基づくコリメータ用レンズを作製可能とする装置の設計・導入を行い、平成 26、27 年度は、導入した装置を用いてコリメータ用レンズの試作および、コリメータマトリクス実装技術の検討を実施する。

1-1 中小企業の特定期間づくり基盤技術の高度化に関する指針

(四) 電子部品・デバイスの実装に係る技術に関する事項

1 電子部品・デバイスの実装に係る技術において達成すべき高度化目標

(1) 川下分野横断的な共通事項

① 川下製造業者等の共通の課題及びニーズ

ア. 高効率化：情報通信機器、自動車、ロボット、医療・ヘルスケア、さらにはエネルギー分野において、省エネルギー化、製造プロセスの省工程化、省スペース化が求められている。

② 高度化目標

イ. 小型・高密度集積化：複数 LSI チップのワンパッケージ化に伴う半導体パッケージ基板の高機能化（3次元実装技術、部品内蔵基板技術）等、小型・高密度集積化に対応した技術の向上

(2) 川下分野特有の事項

① 川下製造業者の抱える課題及び要請（ニーズ）

1) 情報通信機器に関する事項 ア. 高機能化・多機能化・大容量高速情報処理

② 高度化目標

ア. 光インターコネクション等の高速大容量情報通信機器実装技術の向上

1-2 研究開発の背景

クラウドコンピューティングやソーシャルネットワーク、動画サイト利用者の増加やスマートフォンなどの移動通信端末の普及により、近年の光通信ネットワーク容量は爆発的に増大しており、総務省統計によると、2010年から2011年の1年間で総トラフィックは24.4%の伸びとなっており、この伸び率で推計すると2021年までの間に約8.9倍に増加することとなる。このようなインターネットトラフィックの増大に対応するため、光通信ネットワークの大容量化が求められており、主要大都市間を結ぶコアネットワークにおいては、1波長当りの伝送速度が100Gbit/s以上の高速・多波長化の検討が進められている。現在、県内リング網（メトロネットワーク）では、加入者網とメトロネットワーク網の伝送経路（ノード）数の増加と波長数の増加に対応するため、伝送信号を高速処理する波長選択スイッチ（WSS）が開発されている。しかし、現在のWSSは、1台当りのチャンネル数が少ないため、大容量のデータを処理するには、複数台のWSSが必要となることから、装置が大型化しコスト増となるという問題がある。このため、小型で多チャンネルなWSSの開発が急務となっている。

WSSは、WDMの光信号を分波、波長毎のスイッチング、個別波長を合波、の3機能を備えた装置で、光経路の自由な選択を可能とする光スイッチである。WSSの実装は、光信号の切換えに微小電気機械素子(MEMS)を用いるMEMS型と、石英基板又はシリコン基板に回路を形成し、熱光学効果等を利用してスイッチングする導波路型が提案されている。

WSS の国内外の研究開発動向としては、NTT や NEC がシリコンフォトニクスを利用した小型スイッチを試作しており、フジクラや古河電工などでミラー型スイッチの開発を明らかにしているが、いずれも試作段階に止まっている。また、技術研究組合光電子融合基盤技術研究所(PETRA)では、平成 24 年度からの 10 年計画で、超低消費電力型光エレクトロニクス実装システム技術開発プロジェクトの中で、WSS 開発の取組みが報告されている。事業化では、米国 JDSU 社が 1×4 の MEMS 型スイッチの製品化している。その装置実装は、光信号を入力する光ファイバ、入力された光を平行光(コリメート光)にする非球面レンズ、コリメート光の波長を分割する回折格子、光信号を集光する集光レンズ、分散された波長ごとに光路を切り替える MEMS ミラーで構成されている。しかし、光ファイバと非球面レンズが分離して実装され、また、非球面レンズの外径は、約 1mm~2mm と大きいことから、①光ファイバと非球面レンズの位置合わせが困難、②振動に弱い、③マトリクス化など高集積化が困難、④成形品である非球面レンズは小型化が困難、などの課題を抱えている。

1-3 研究目的

インターネットの普及に伴う通信容量の爆発的な増大に対して、川下企業では大容量の伝送信号を高速処理可能な波長選択スイッチ(WSS)の開発を進めているが、小型化、低損失化、高集積化が課題となっている。この課題を解決するため、本研究開発では、従来品サイズの 1/4 となるマトリクス型コリメータ実装技術を開発する。

1-4 高度化指針に記載の高度化目標

ア. 光インターコネクション等の高速大容量情報通信機器実装技術の向上

本研究開発では、WSS の実装のキーデバイスとなっている小型で高集積なコリメータ実現のため、原材料となる高精度光ファイバ母材の開発を行い、これまでにないコリメート性能を有する GI 型ファイバレンズを作製し、これをシングルモード光ファイバの先端に接続して一体化させ、多層マトリクス型コリメータの実装技術を開発する。

1-5 本研究開発の実施内容及び数値目標

1-5-1 長距離光コリメータの設計

1-5-1-1 長距離光コリメータの構造設計

ビーム伝搬法に基づく光学解析によって、50mm 以上のコリメート長を実現し、そのときの GI ファイバレンズの構造を明らかにする。また、屈折率分布係数 α が 2.00 ± 0.1 となった際にコリメート光に及ぼす影響を解析的に明らかにする。

1-5-2 GI ファイバレンズ作製装置設計

1-5-2-1 GI ファイバレンズ用スート作製装置設計

スート作製の再現性を得るために、石英バーナ等の機器取り付け精度 $\pm 1\text{mm}$ 以下を実現し、スートの引き上げ速度精度及び回転速度精度が設定値に対して $\pm 10\%$ 以下、引き上げ駆動長 1m における垂直性を $90 \pm 1^\circ$ 以下とする。

1-5-2-2 排気設備設計

スート合成容器内の排気流の安定化を図り屈折率分布の制御性を高めるために、スート合成容器内における差圧で 30Pa 以上を確保する。

1-5-3 GI ファイバレンズ作製プロセス開発

1-5-3-1 スト製造技術開発

スト作製時のガス流量及び原料供給量の最適化を図ることにより、従来の 2 倍（※当社比）である 400mm 以上の長さ寸法を実現する。

1-5-3-2 透明ガラス化技術開発

透明ガラス化温度条件の最適化を図り、従来の 2 倍（※当社比）である 200mm 以上で白濁等欠陥の無い GI ファイバレンズ母材を得る。

1-5-3-3 線引き技術開発

長距離光コリメータ用レンズの線引き加工に適した温度を明らかにすることによって、外径ばらつきを $\pm 0.5\%$ 以下を実現する。また、線引き加工時において $25\mu\text{m}$ 以上の補強用コーティングの形成技術を確立する。

1-5-4 長距離光コリメータ実装技術開発】

1-5-4-1 長距離コリメートビーム形成及び評価

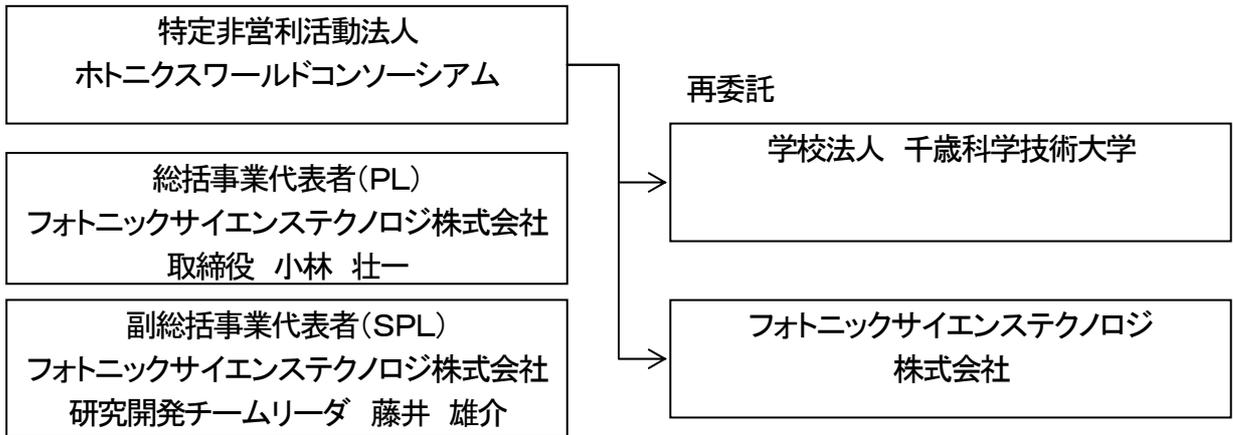
長距離光コリメータに取り付ける GI ファイバレンズ長さ調整工程において、 $\pm 10\mu\text{m}$ のレンズ長精度を実現し、レンズ端面からの焦点距離が 50mm 以上、ビーム偏角 $90\pm 0.1^\circ$ を実現する。

以下に、本事業の最終目標値をまとめる。

実施内容	目標とする項目	最終目標値
【1-1】長距離光コリメータの構造設計	コリメート長	≥50mm
【2-1】GIファイバレンズ用スート作製装置設計	装置設計及び導入	完了
【2-2】排気設備設計	装置設計及び導入	完了
【3-1】スート製造技術開発	スート長 直径 NA	≥400mm ≥45mm ≥0.16
【3-2】透明ガラス化技術開発	ガラス長 直径 NA	≥200mm ≥20mm ≥0.16
【3-3】線引き技術開発	線引きレンズ長 レンズ外径 レンズ外径ばらつき (外径精度)	100m 200,300,400,500μm 200±1.0μm 300±1.5μm 400±2.0μm 500±2.5μm (±0.5%)
【4-1】長距離光コリメータ実装技術開発及び光学評価	異径融着技術 レンズ長精度 焦点距離 ビーム偏角 アレイch数 積層総数	光ファイバ外径 125μm と 500μm 以上との融着技術 確立 ±10μm 50mm 以上 90±0.1° 8ch 以上 2層以上

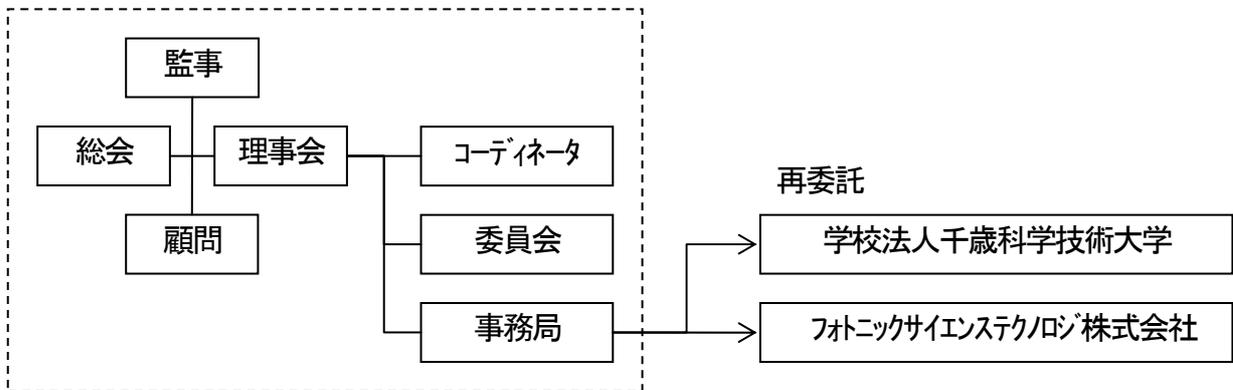
1-6 研究体制

1) 研究組織（全体）



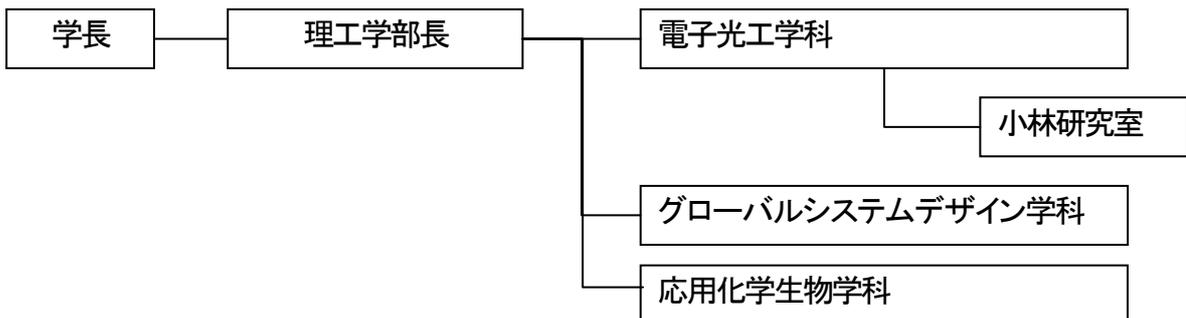
2) 管理体制

① 事業管理者（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）

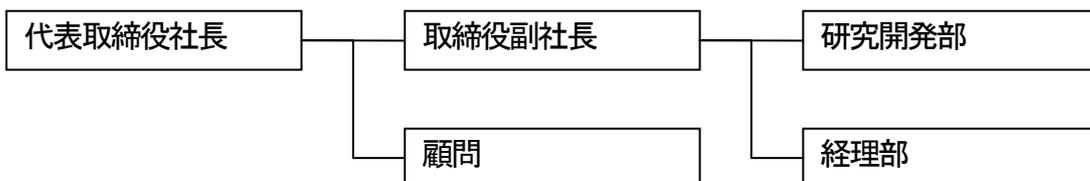


② 再委託先

- 学校法人千歳科学技術大学



- フォトニックサイエンステクノロジー株式会社



(2) 管理員及び研究員

【事業管理者】 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管理員

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
磯崎 徹	事務局長	5
林 博樹	事務局次長	5
中川 靖	事務局書記	5

【再委託先】 ※研究員のみ

フォトリックサイエンステクノロジー株式会社

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
小林 壮一	取締役	1-1 2-1, 2 3-1, 2, 3 4-1
坂本 捷男	代表取締役社長	1-1 2-1, 2 3-1, 2, 3 4-1
梶川 泰典	技術主任	1-1 2-1, 2 3-1, 2, 3 4-1
須田 俊央	戦略 プロダクトチームリーダー	1-1 2-1, 2 3-1, 2, 3 4-1
藤井 雄介	研究開発チームリーダー	1-1 2-1, 2 3-1, 2, 3 4-1

学校法人千歳科学技術大学

氏名	所属・役職	実施内容(番号)
小林 壮一	電子光工学科・教授	1-1 4-1

1-7 成果概要

本研究開発事業の数値目標達成状況を、実施計画書に記載の検討項目毎にまとめる。

実施内容	目標とする項目	27年度目標	進捗
【1-1】長距離光コリメータの構造設計	コリメート長	H25年度完了済み	
【2-1】GIファイバレンズ用スト作製装置設計	装置設計及び導入	H25年度完了済み	
【2-2】排気設備設計	装置設計及び導入	H25年度完了済み	
【3-1】スト製造技術開発	スト長 直径 NA	≥400mm ≥45mm ≥0.16	420mm【100%】 54mm【100%】 0.15再現可【100%】
【3-2】透明ガラス化技術開発	ガラス長 直径 NA	≥200mm ≥20mm ≥0.16	200mm【100%】 20mm【100%】 0.12-0.30実現【100%】
【3-3】線引き技術開発	レンズ長 レンズ外径 レンズ外径ばらつき (外径精度)	100m 200, 300, 400, 500 μm 200±1.00 μm (±0.5%) 300±1.50 μm (±0.5%) 400±2.00 μm (±0.5%) 500±2.50 μm (±0.5%)	100m 200, 300, 400, 625 μm 200±0.5 μm (±0.25%) 300±1.0 μm (±0.33%) 400±1.0 μm (±0.25%) 625±3.0 μm (±0.48%) 【100%】
【4-1】長距離光コリメータ実装技術開発 及び光学評価	異径融着接続技術 レンズ長精度 焦点距離 ビーム偏角 アレイch数 積層総数	125 μmと500 μm以上との融着技術確立 ±10 μm 50mm以上 90±1° 8ch以上 2層以上	125 μmの光ファイバと800 μmのGIレンズ 融着技術確立 クランプにより±10 μm【100%】 ≥50mm【100%】 0.17(単芯)、0.064°(多芯)【100%】 8ch【100%】 2層【100%】

1-8 当該研究開発の連絡窓口

所属 フォトニックサイエンステクノロジー株式会社
 氏名 坂本 捷男
 電話番号 0123-42-0575
 FAX 番号 0123-42-0576
 E-Mail jimu@psti7.com

第2章 本論

2-1 長距離光コリメータの設計

2-1-1 長距離光コリメータの構造設計

50mm 以上のコリメート長を実現可能とする GI ファイバレンズの構造を解析的に明らかにする。解析には、BeamPROP を用いた。解析モデルは直列に接続した $NA=0.16$ 、レンズ外径 $\phi 800\mu\text{m}$ 、レンズコア径 $\phi 740\mu\text{m}$ のレンズとシングルモード光ファイバ内に基本モードを伝搬させ、伝搬光がレンズ端面から空間に出射ときの光の軌跡を計算するものである。

図 1 にレンズの長さを変化させたときの出射光の軌跡を解析した結果を示す。図中の $X=0$ の位置がレンズ端面を示しており、 X 軸の $0\sim 100000$ が空間における位置を示している。解析の結果、レンズ長が 5.24mm の時には焦点のない発散光となり、レンズ長が 5.30mm のときに $f=30\text{mm}$ 、レンズ長が 5.38mm のときに $f=50\text{mm}$ 、レンズ長が 5.50mm のときに $f=30\text{mm}$ という結果が得られた。

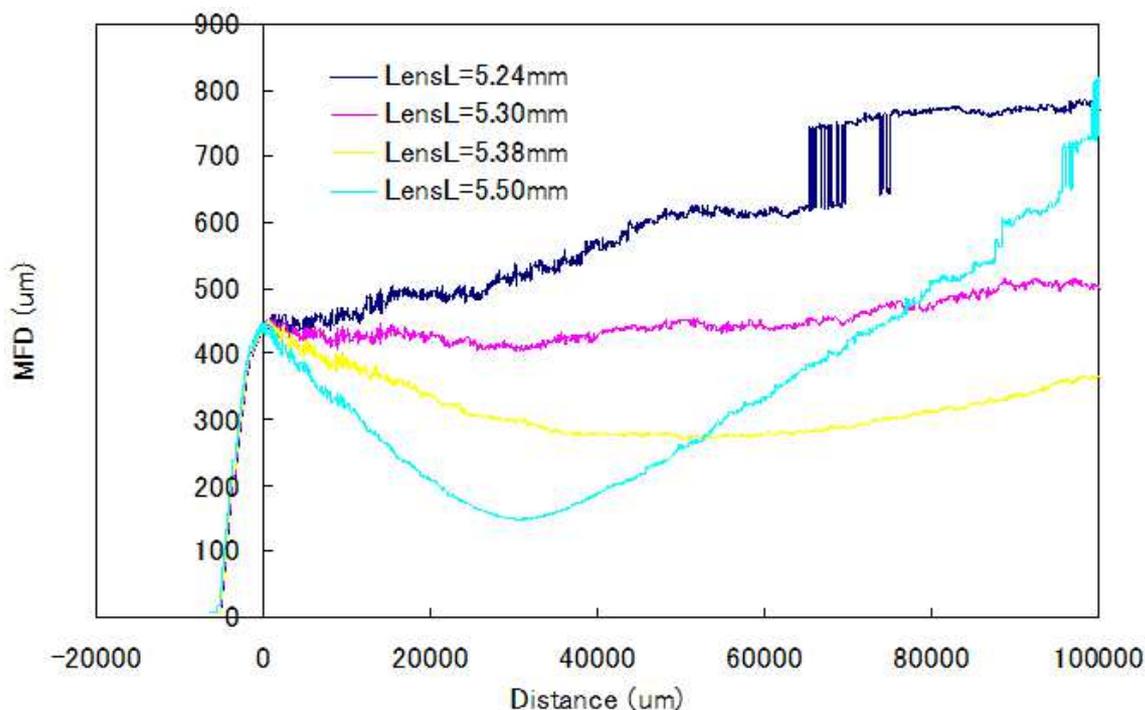


図1 レンズ特性解析結果

2-2 GI ファイバレンズ作製装置設計

2-2-1 GI ファイバレンズ用スート作製装置設計

屈折率分布が長手方向に均一な GI ファイバレンズ母材を製造可能とする装置を導入する。長手方向に均一な屈折率分布を得るためには、スートの引き上げ駆動軸が石英バーナの焦点位置から真上に、ぶれることなく引上げられることが必要であるほか、石英バーナから出る酸水素火炎の揺らぎを小さくすることが重要である。

本事業では、長手方向に均一な屈折率分布を有する GI ファイバレンズ母材の製造を実現するために、図 2 に示すスート製造装置を提案した。提案したスート製造

装置は、出発材を取り付けるための回転駆動付き 3 点レバーチャックを、2 本のリニアブッシュガイドに連結された引上げステージに取り付けることによって高精度垂直引き上げを可能としているほか、スートを生成する合成容器の空間容積を大きくすることによって、スート生成雰囲気内の気流の乱れを安定化し、酸水素火炎の揺らぎを抑制できることが特徴である。

また、清掃のために取り外したスート合成容器や石英バーナの取り付け位置を再現するために、石英バーナの XYZθ 軸調整機能付き石英バーナ取り付け治具、強制排気した合成容器内を漂う余剰スートの高効率除去が可能なスートトラップの開発を行った。

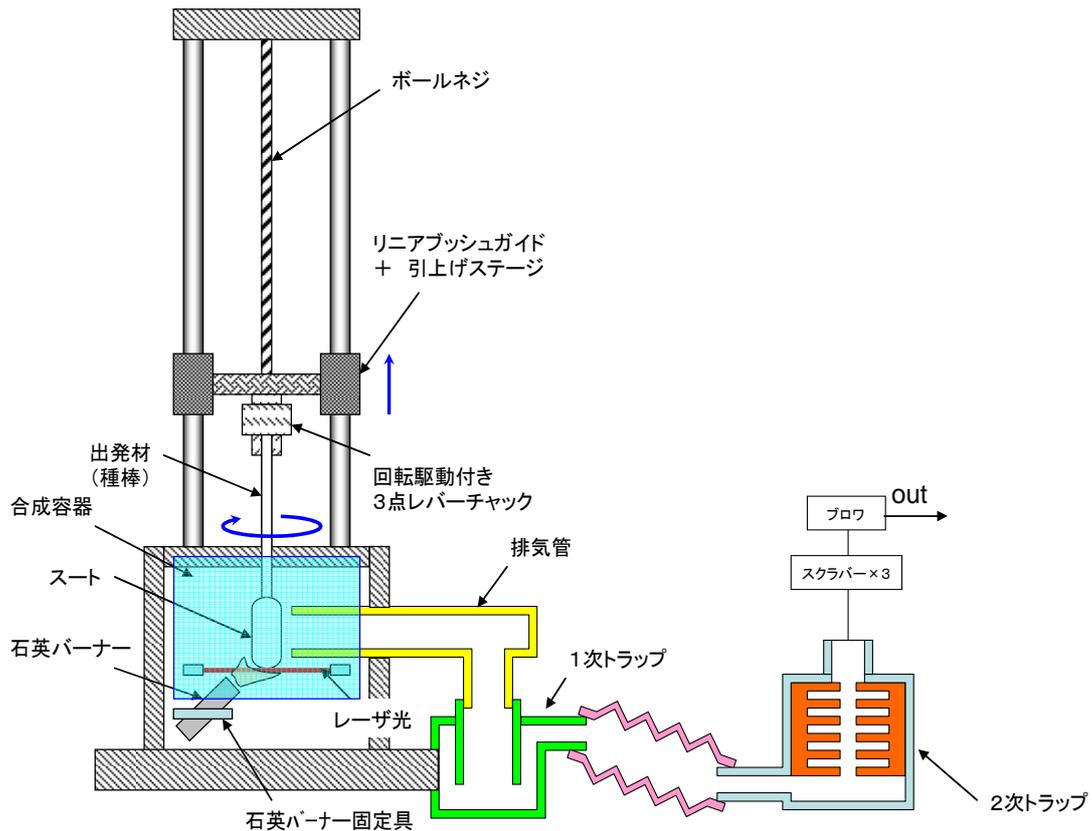


図2 GIファイバレンズ用スート作製装置概略図

図 3 に導入した GI ファイバレンズ用スート作製装置の外観を示す。本装置の操作は、装置右側に取り付けられたタッチパネル式の操作パネルによって行う。本装置で可能な動作は、引上げステージの昇降、出発材の回転、レーザ光を参照した引上げ駆動 ON/OFF 制御による出発材先端一定位置化である。また、本装置は引上げステージの一定時間間隔での位置情報のサンプリングが可能であり、屈折率分布の長手方向均一化を実現する上で重要な、単位時間におけるスート成長速度を自動的に収集することができる。

また、安全面に配慮して、装置の上部にシグナルタワーを設置し、以下の状態で各種ランプが点灯するようにした。

- ・ 赤ランプ点灯・・・インターロックエラー，リミットスイッチオン
- ・ 黄ランプ点灯・・・ON/OFF 制御オフ状態
 これによって、自動制御 OFF のままスート製造を開始してしまうヒューマンエラーを回避
- ・ 緑ランプ点灯・・・ON/OFF 制御オン状態+引上げステージ駆動中
 スートの安定製造時は、引上げステージが駆動/停止を繰り返しているの、緑ランプが消灯/点灯を繰り返しているのが正常動作
 シグナルタワーを見るだけで動作状態の確認が可能
- ・ 全消灯　　・・・ON/OFF 制御オン状態，ステージ停止中

本装置のインターロックは、各種モータ過負荷による動作異常のほか、スートの不安定製造状態（引上げステージがオンのままラッチ、或いはオフのままラッチ）でも働くようになっている。

更に、本装置の制御回路は、架台裏にある空間を利用することによって省スペース化、制御盤にかかるコストの削減を図っている。

表 1 に、導入した GI ファイバレンズ用スート作製装置の基本仕様をまとめる。

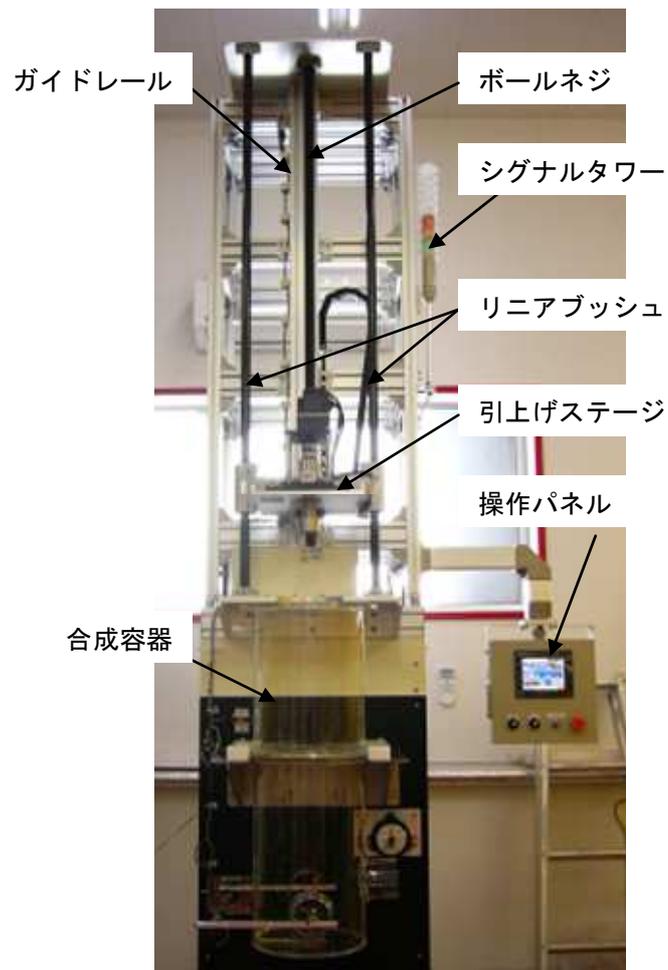


図3 GIファイバレンズ用スート作製装置外観

表1 GIファイバレンズ用スート作製装置基本仕様

スート長	600 mm 対応
引上げストローク	1200 mm
回転速度	1-50 rpm
引上げ軸垂直性	$\pm 100 \mu\text{m}$
回転軸ゆがみ	$\pm 100 \mu\text{m}$
引上げ駆動	ON/OFF 制御
位置情報サンプリング	可能

2-2-2 排気設備設計

図4に導入したスートトラップの外観を示す。導入したスートトラップは筐体が透明塩化ビニル製であり、合成容器から排気される塩化水素ガスによって腐食しないようにした。また、スートの吸着部は、エレメントファイバーと呼ばれるマグネットと同様の性質を有する物質で、これを用いたエレメントが余剰スートを吸着するものである。

また、スートトラップに導入された余剰スートと塩化水素ガスのうち、塩化水素ガスはスートトラップ内で凝結して塩酸となり、エレメント下部のドレインから排出される構造となっている。

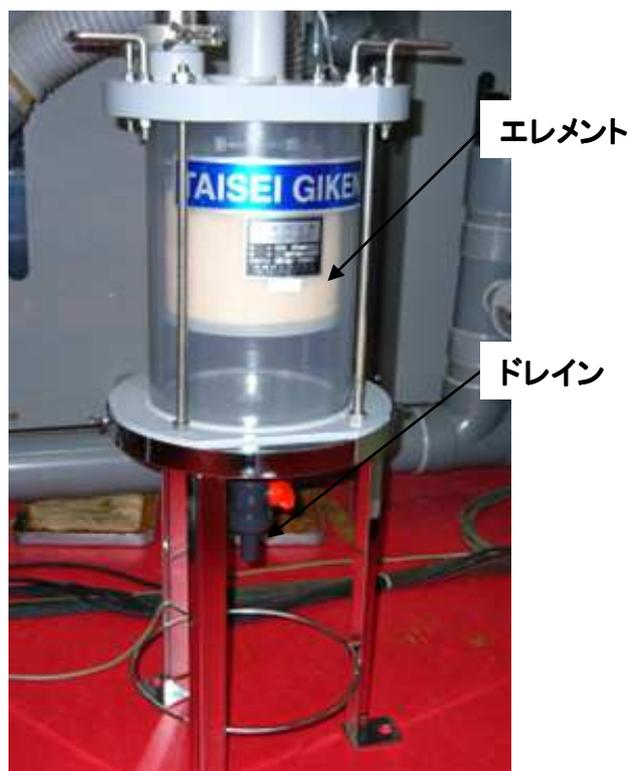


図4 スートトラップ外観

2-3 GI ファイバレンズ作製プロセス開発

2-3-1 スート製造技術開発

2-3-1-1 SiCl₄ 及び GeCl₄ 流量と屈折率差の関係について

石英バーナ中に導入する GeCl₄ 供給比率と得られる NA の関係について検討を実施した。図 5 に GeCl₄ 供給比率と得られる NA の関係について示す。尚、GeCl₄ 供給比率とは、ガラスの主原料である SiCl₄ に対する GeCl₄ の割合である。検討の結果、GeCl₄ 供給比率が 17.7% のときに NA は 0.104、GeCl₄ 供給比率が 32.4% のときに NA は 0.181 という結果となった。また、GeCl₄ 供給比率と NA の関係は、図 5 に示すとおり線形関係が成り立っていることが明らかとなった。以上のことから、GeCl₄ 供給比率が 1% 変化することによって、約 0.0052 の NA 変化が得られると推測することができる。

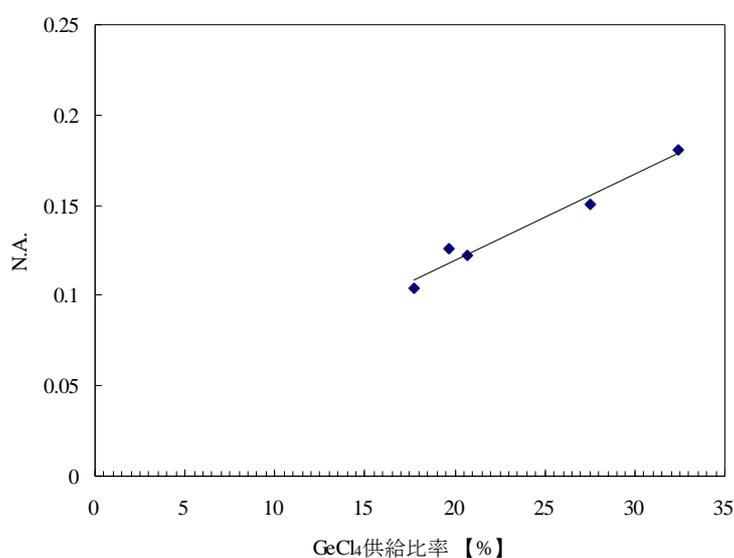


図 5 スート製造時の GeCl₄ 供給比率と NA の関係

2-3-1-2 スート成長面温度と屈折率分布の関係性

スート作製時における成長面温度と得られる屈折率分布の関係について検討を行った。図 6 に石英バーナ先端から成長面までの距離を変化させたときの成長面温度の関係を示す。尚、成長面温度は、FLUKE 社製のサーモグラフィ『Ti400』で測定した。測定の結果、成長面までの距離が 21mm 以下の場合には、成長面温度は 750℃程度であり、更に距離が広がると、徐々に成長面温度が低下し、27mm の場合に表面温度が 520℃となった。

成長面までの距離が 25mm (成長面温度 580℃) と 27mm (成長面温度 520℃) とで作製したスートを焼結して得られた GI ファイバレンズ用母材の屈折率分布の測定結果を図 7 に示す。尚、屈折率分布は Photon Kinetics 社製の屈折率分布測定装置『P104』で測定した。測定の結果、成長面までの距離が 25mm の場合には母材中央部の屈折率が局所的に減少する異常 (凹み) が認められ、成長面までの距離が 27mm の場合には、母材中央部の屈折率の凹みが解消された。この結果から、成長

面の温度が高い場合には母材中央部において屈折率の異常が現れ，成長面の温度が低い場合には，二乗分布の屈折率分布が得られる傾向にあることが明らかとなった。

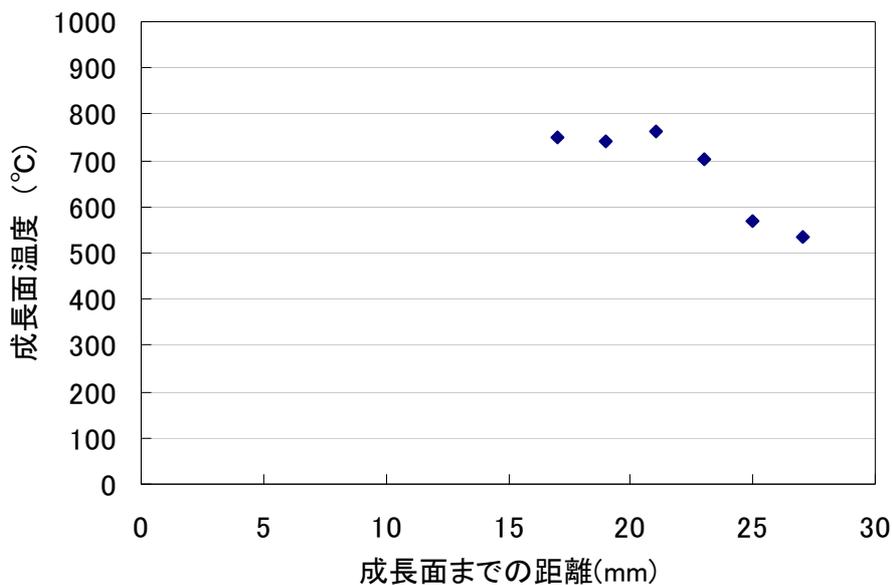


図6 成長面までの距離と成長面温度の関係

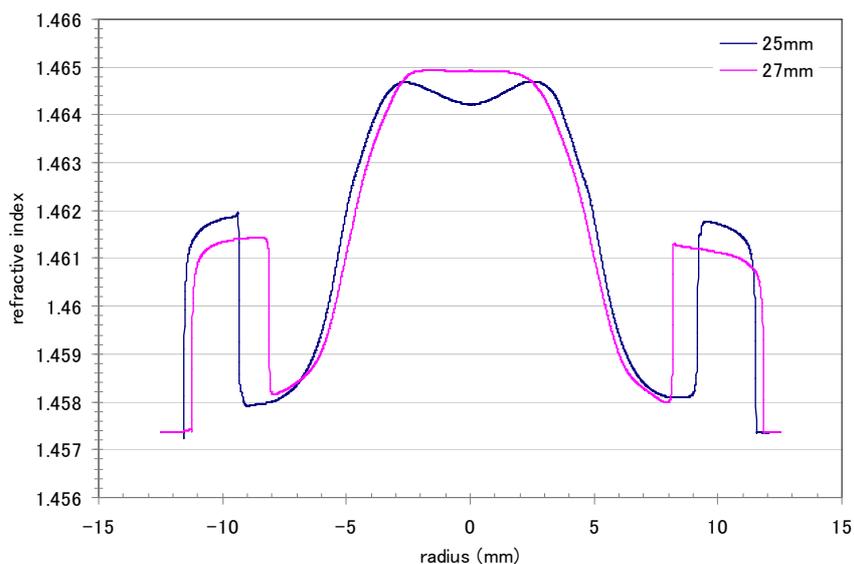


図7 屈折率分布測定結果

2-3-1-3 石英バーナ取付け位置と屈折率分布の関係性

石英バーナ取り付け位置と屈折率分布の関係について検討を実施した。図8に検討の概略図を示す。石英バーナの焦点位置と種棒の回転軸とが重なる位置を±0mmとして，そこから排気管側（正面から見て右方向）を+方向，排気管とは逆方向（正面から見て左方向）を-方向とした場合に，石英バーナ位置を-2mm，0mm，

+2mmとしてスートを製造し、得られたGIファイバレンズ用母材の屈折率分布を評価した。屈折率分布の評価結果を図9に示す。評価の結果、屈折率分布が急に変化する偏曲点が認められたが、その位置は、石英バーナの焦点位置が排気管側へ移動するほど、母材の外側にシフトすることが明らかとなった。

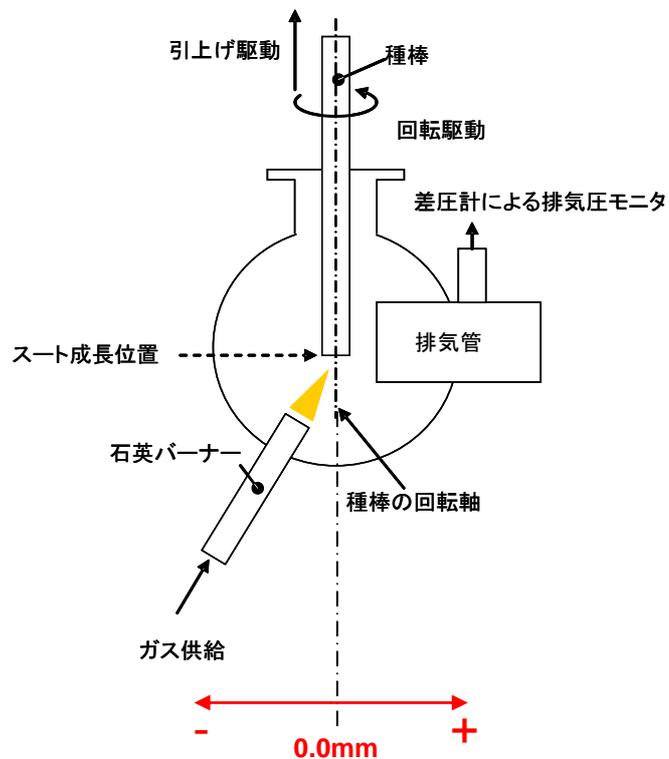


図8 スート製造装置内部構造図

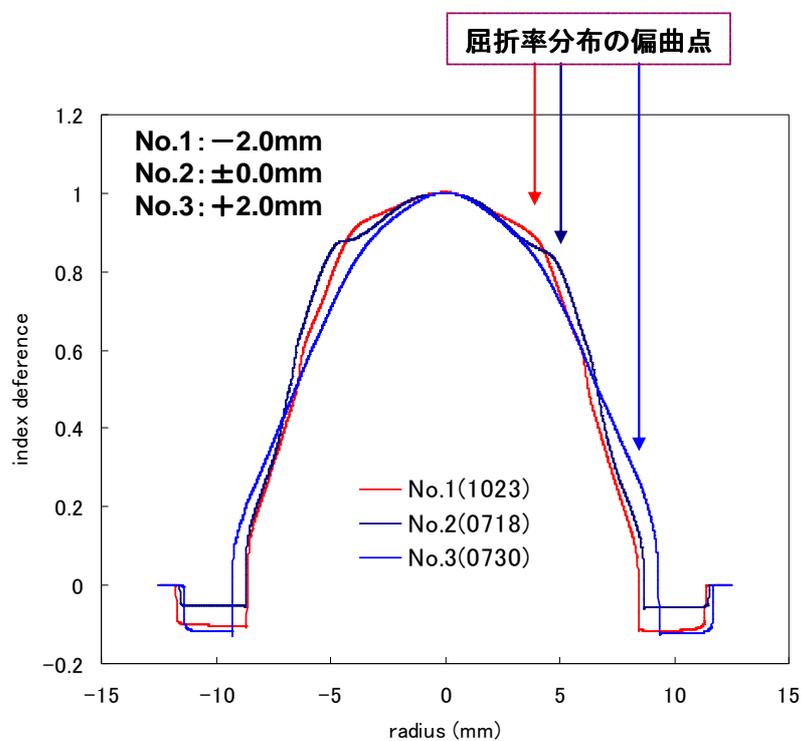


図9 石英バーナ位置と屈折率分布の関係

2-3-1-4 余剰スートの影響について

スート作製において、種棒に付着しなかった石英微粒子は合成容器内を舞い、最終的に排気管から排出される。この合成容器内を舞う石英微粒子（余剰スート）は2次的にスートに付着することがある。2次的に付着したスートは、屈折率分布の不均一性を生じる原因となるため、強制的に排気する必要がある。図10にスート作製時の成長面付近の様子を示す。写真中央部にある白い固まりがスートであり、石英微粒子を生成する酸水素火炎はスートの右下である。また、スートの右側には排気管が配置されている。この写真中のスートと排気管との間に見える白い領域が強制的に排気されている余剰スートの流れである（図中赤円内）。排気圧を高く設定した場合、余剰スートを効率よく排気することができるが酸水素火炎の揺らぎが生じ、長手方向に対する屈折率分布の不均一性を生む原因となる。逆に排気圧を低く設定すると2次的に付着する余剰スートが増加し、ガラス周囲の屈折率分布の不均一や外径不均一を生じさせる。

ここではスート作製時の排気圧と得られる屈折率分布の関係について検討を行った。図11にスート作製時の排気圧を20Pa及び35Paとしたときに得られた屈折率分布を示す。排気圧が20Paの結果では、母材中心から5mm程度の部位に屈折率分布の屈曲点が存在するが、35Paの場合には良好な屈折率分布を形成することができた。以上の結果から、排気圧が低い場合には、屈折率分布の不良を生じる可能性が高いため好ましくない。良好な屈折率分布を得るためには排気圧をある程度強く設定することが必要である。しかしながら長手方向に均一な屈折率分布を得るためには、酸水素火炎の揺らぎをできるだけ小さくする必要がある。

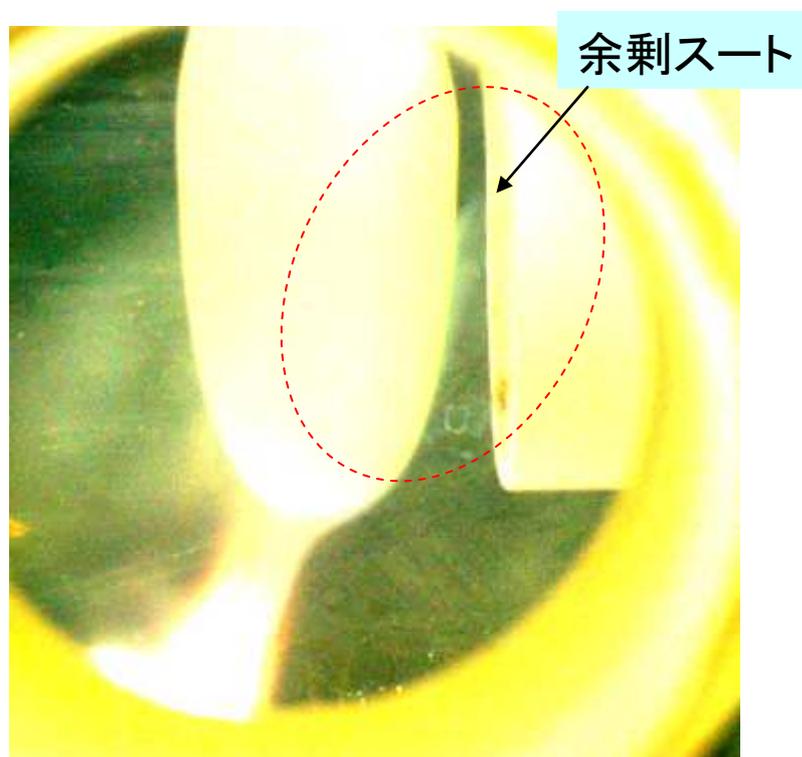


図10 スート成長面付近像

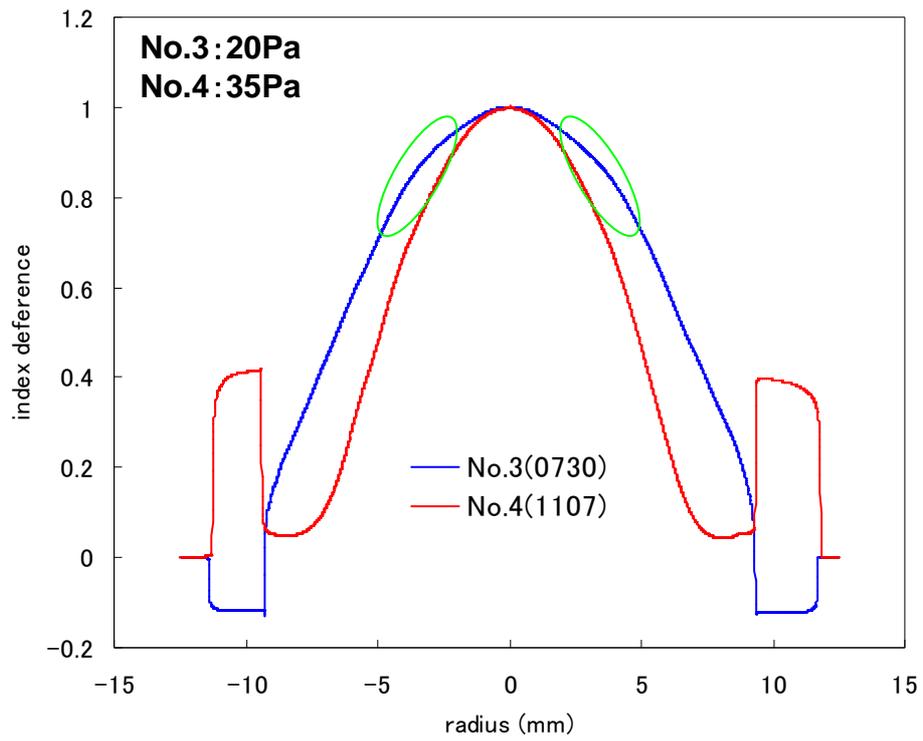


図 11 排気圧と屈折率分布の関係

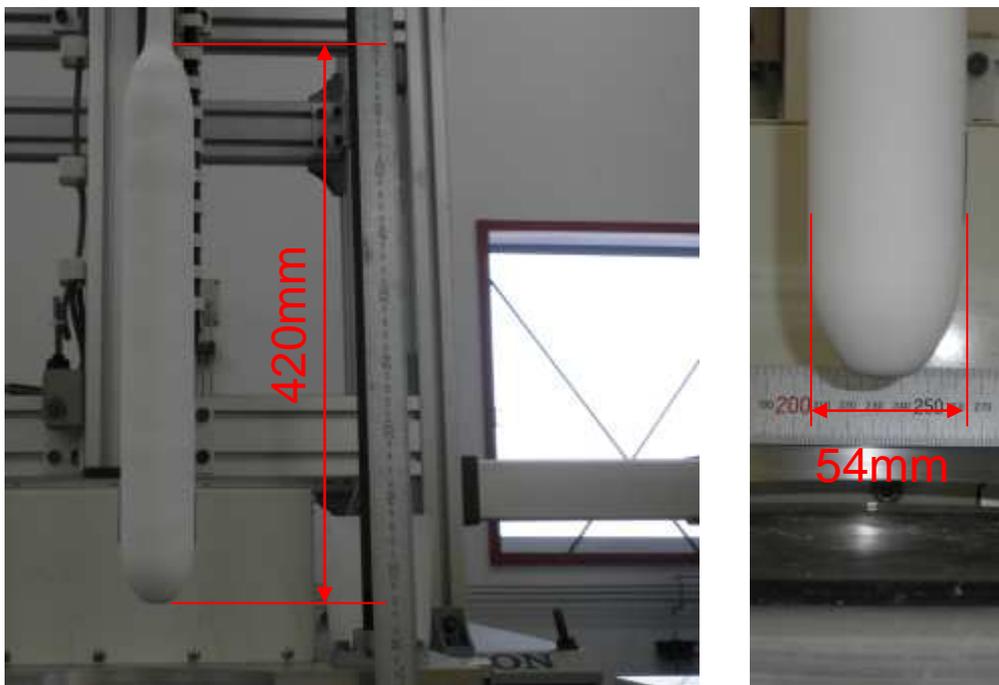


図 12 作製したスート

2-3-1-5 長軸方向の屈折率分布について

次に、GI レンズ母材の長手方向の屈折率分布の均一性向上に関する検討について示す。

GI レンズ母材の製造を行う中で、母材の先端と終端とで屈折率に差異が認められることが明らかとなった。図 13 に NA の異なる 3 種類の GI レンズ母材を作製し、長手方向にどのように屈折率が変化しているか評価した結果を示す。この結果、GI レンズ母材の先端ほど NA が大きくなる傾向が認められ、その傾向は、NA の高い GI レンズ母材ほど顕著に現れることが明らかとなった。

これは、スート製造の開始時と終了時とで、原料供給装置内に残存する SiCl_4 と GeCl_4 の残量割合が変化することが原因であると考えた。即ち、スート製造開始時には、例えば SiCl_4 と GeCl_4 がそれぞれ 500ml 充填されていたとして、スート製造では GeCl_4 よりも SiCl_4 のほうが石英バーナへの供給量が多いため、時間経過とともに SiCl_4 残量が相対的に少なくなり、石英バーナへ供給される SiCl_4 及び GeCl_4 の割合に変化が現れるため、前述のような GI レンズ母材の長手方向に対する屈折率の変化が現れるものと推測した。

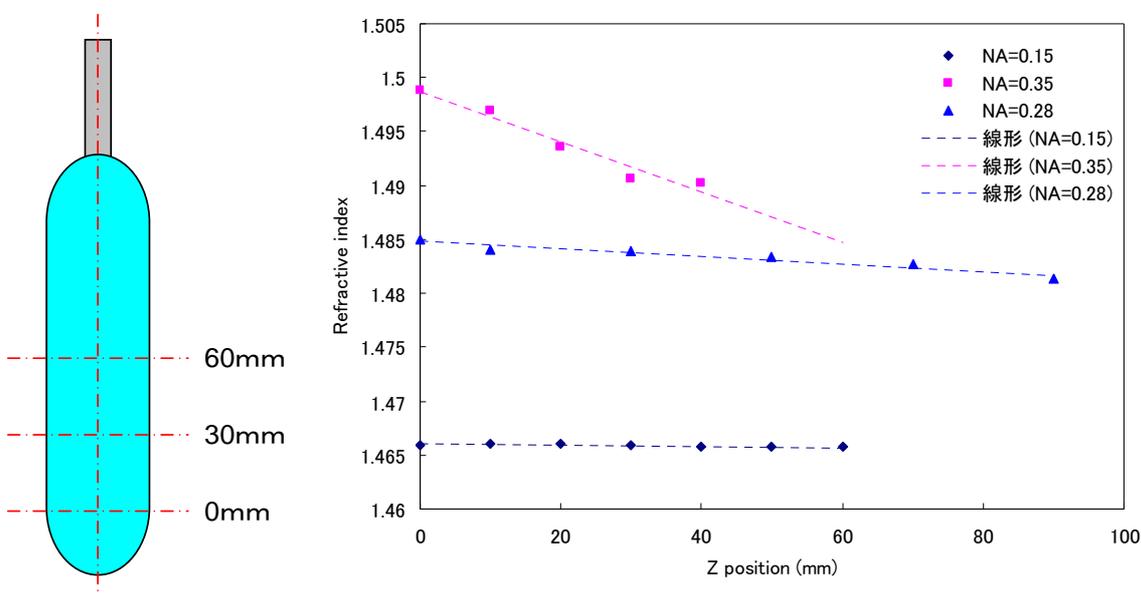


図 13 GI レンズ母材の屈折率評価結果
左) 屈折率評価位置、右) 屈折率評価結果

この解決策の一つとして、原料の供給方式の改良を提案した。図 14 に新たに提案する原料供給方式を示す。従来はバブリング方式と呼ばれる液体原料を充填する容器を過熱することによって蒸気化し、アルゴン等の希ガスで石英バーナに輸送する方法を用いている。この方法では前述のような原料充填容器内の残量によって屈折率に変化が現れてしまう。本事業ではベーキング方式という新たな方法を提案した。この方法は、原料を加熱せず液体のままマスフローコントローラで流量を厳密に制御した状態で、気化室と呼ばれる液体原料を蒸気化するユニットに供給する。気化室で一定の割合で蒸気化した原料を石英バーナに輸送することで、 SiCl_4 及び GeCl_4 の残量に拠らず、常に一定の量を石英バーナに供給することが可能となり、前述の問題の解決が可能であると考えられる。

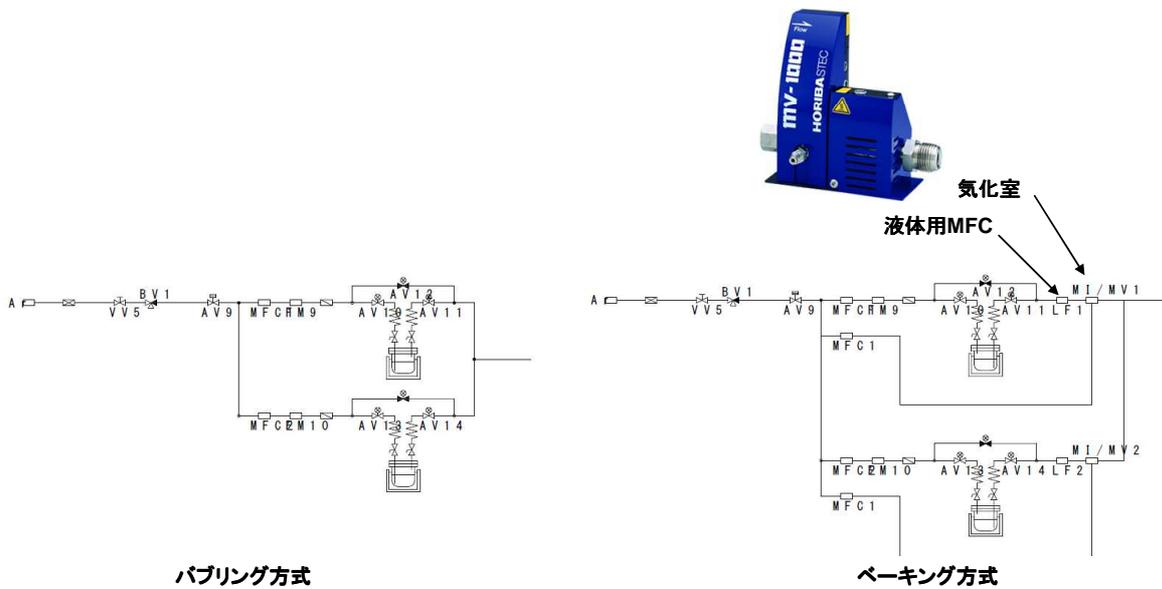


図14 原料供給方式
右) 従来技術、左) 新技術

もう一つの方法として、原料供給方式はバブリング方式とし、減量充填容器に一定量以上の原料を備蓄しておくことで、 SiCl_4 及び GeCl_4 の相対量変化を小さくする方法を提案した。本研究開発事業では、この方法について検証を実施した。

図15に上記方法によって改善したGIレンズ母材の屈折率分布評価結果を示す。この結果、GIレンズ母材の先端と終端とでの屈折率の変化量は約0.4%であり、NAに換算すると0.005以下という良好な結果が得られた。

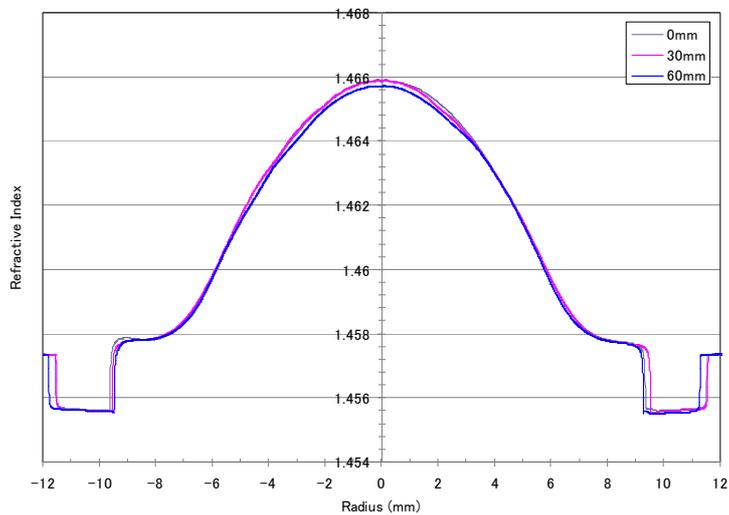
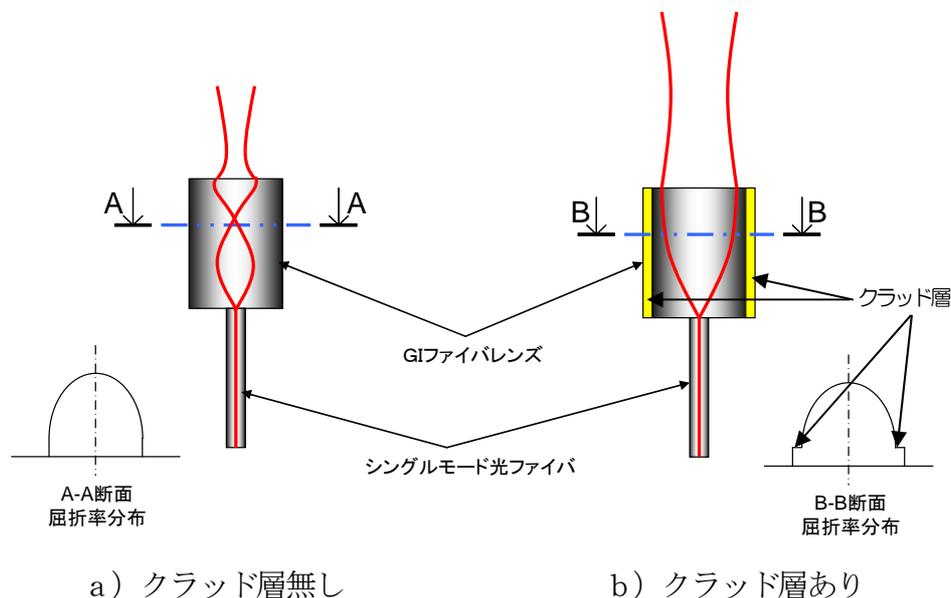


図15 屈折率分布評価結果

2-3-1-6 クラッド形成について

本研究開発のGIファイバレンズは、当初フルコア（クラッド層を持たない）構造を想定していたが、解析結果と大きく乖離する光学特性が得られていた。この原因としてクラッド層の有無が関係していると推測した。



a) クラッド層無し

b) クラッド層あり

図16 クラッド層の有無によるGI レンズ特性の変化

図16にクラッド層の有無によるGIファイバレンズ中の光の振舞いに関する考察を示す。クラッド層がない場合はコアの中心部のみでしかレンズとして機能しないため、周期長が短くなりコリメート長が短くなってしまうと推測した（図5 a)）。一方でクラッド層を形成した場合にはコアとクラッドの境界が明確となり、導波光がGIファイバレンズの有効径内で機能するため周期長が伸び、その結果コリメート長が伸びると推測した。

図17にコア-クラッド一括精製時のトーチの配置を示す。フルコアスートの精製時と同様に配置したコアスート用トーチと、コアスート精製用酸水素火炎に干渉しない位置に配置したクラッドスート用トーチの2本を用い、それぞれのトーチは種棒に対してXYZθの4軸調整が可能な機能を具備した。このように配置した2本のトーチにより従来のコアスート精製プロセスを適用して作製したコア-クラッド一括精製スートは、外径の不均一性が認められた。この現象は、単位時間当たりのコアスート成長速度が不均一であることが原因であった。

ここでコアスートの成長速度を一定に保つための検討を実施した。図18にコアスート製直速度を一定化する対策の実施有無による単位時間当たりのコアスート成長速度を示す。

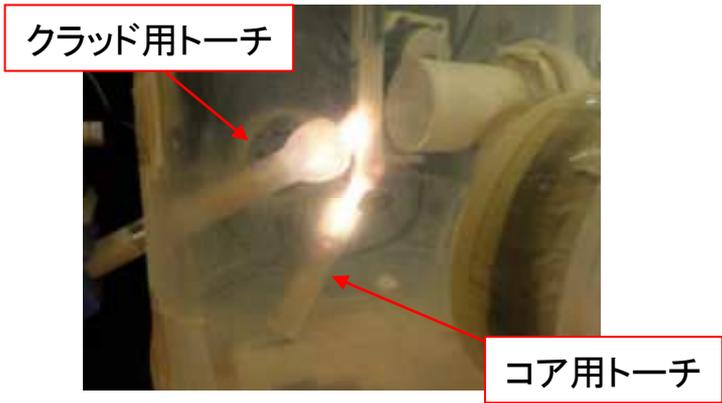


図 17 コアークラッドスート一括精製

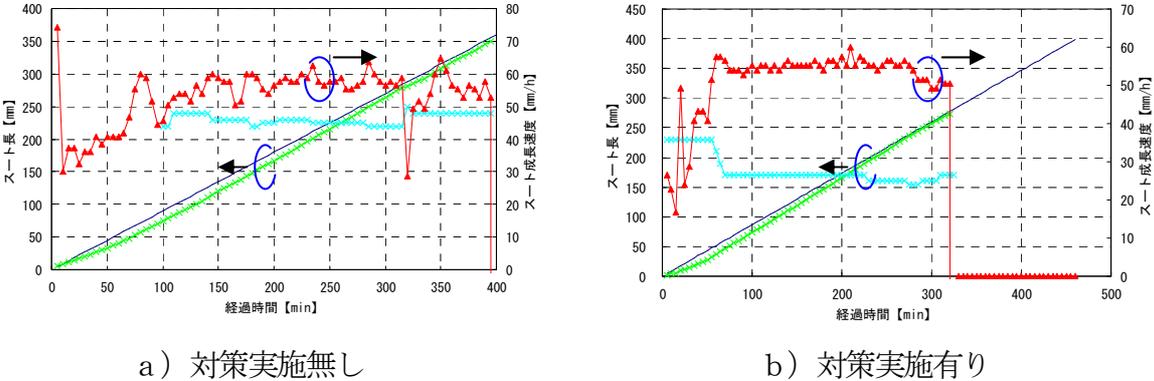


図 18 単位時間当たりのコアスート成長速度

図 18 中の赤線で示すグラフが単位時間におけるコアスート成長速度を示している。図中 a) のグラフは時間毎の成長速度が 50mm/h から 60mm/h の範囲で大きくばらついていることが認められる。この製造パラメータから、コア及びクラッドトーチの位置調整、酸素及び水素火炎流量の調整を行い、スート製造時に 5 分毎のスート成長量を監視しながらコアトーチへの原料供給量を制御することによって、スート成長速度変動が $\pm 2\text{mm/h}$ の安定したスート成長速度精度を実現した。

2-3-2 透明ガラス化技術開発

2-3-2-1 焼結温度の最適化について

作製したスートの透明ガラス化温度は、 SiO_2 中に添加した GeO_2 の割合で変化すると予想し、 GeO_2 添加濃度に対する最適なガラス化温度を明らかにする。図 19 に、 1600°C 及び 1650°C で透明ガラス化した GI ファイバレンズ用母材を示す。 1600°C では、母材が若干白濁しているのに対して、 1650°C では白濁が解消された。更に焼結温度を 1680°C まで上げて焼結を実施したところ、 1650°C と同様に透明なガラスが得られる結果となった。また、NA が 0.12 と 0.18 のスートにおいては、透明ガラス化温度に大きな変化は認められないことが明らかとなった。本検討の結果、ガラス化温度は 1650°C が最適であることを明らかとした。

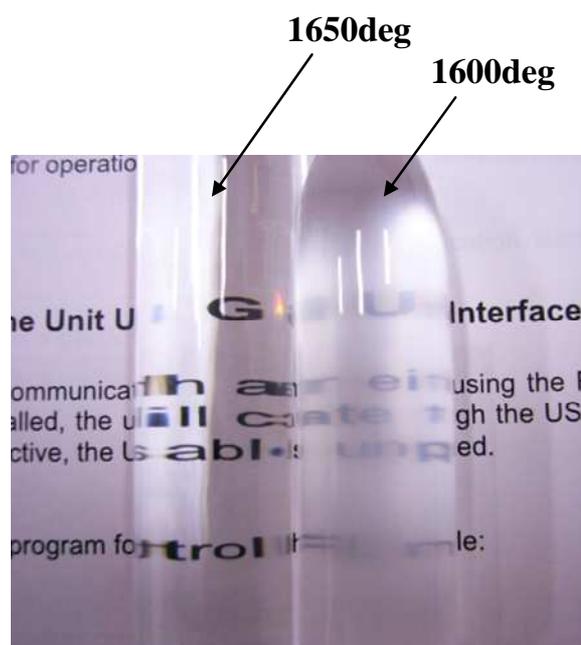


図 19 GI ファイバレンズ用母材像

2-3-2-2 脱水工程の検討

スートを塩素雰囲気中で加熱することによって、スートに含有された OH -イオンを除去することができる。スートの脱水工程概略図を図 20 に示す。リングヒータに挿入された石英炉心管の中にスートを挿入し、石英炉心管上部は別途ガラス製の蓋で閉じる。ガラス製の蓋には排気口が取り付けられており、炉心管下部から導入されたガスを当該排気口から排気する構成となっている。

脱水条件の検討に用いた試料の作製条件を表 2 に示す。

表2 脱水条件

	改善前	改善後
脱水温度	1050℃	1050℃
塩素流量	従来どおり	従来 ³ 倍
酸素流量	無し	有り
ヘリウム流量	従来どおり	1ℓ/min
ヒータ通過速度	従来どおり	3mm/min
ヒータ通過回数	1往復	2往復
焼結温度	1500℃以上	1500℃以上
塩素流量	無し	有り
酸素流量	無し	有り
ヘリウム流量	従来どおり	従来 ¹ / ₃
ヒータ通過速度	2mm/min	2mm/min
ヒータ通過回数	引き下げのみ	引き下げのみ

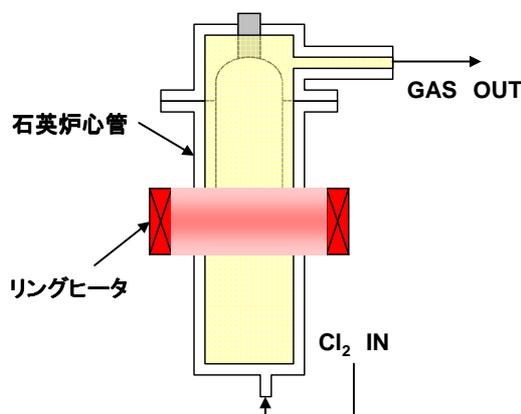


図20 脱水工程概略図

表2の条件で作製した石英ガラスを厚さ30mmの円盤状に加工し、紫外可視赤外分光光度計（日本分光製『V-670』，@千歳科学技術大学）で測定を行った。図21に吸収特性評価結果を示す。図中のオレンジ色のグラフは市販されている無水合成石英ガラスの吸収を示している。当該ガラスにおける2.7μm帯における吸収は0.1程度である。一方で同メーカーの熔融石英ガラスの吸収は1.0以上と大きな値を示している。

次に本研究開発におけるGIファイバレンズ母材のうち、脱水条件最適化前の吸収特性を水色のグラフで示す。この結果から吸光度は0.8程度と、熔融石英ガラスに比べて低い値を示したことから脱水の効果は認められたと考えられるが、合成石英に比べるとおよそ8倍の数値を示すことから脱水は不十分であると判断できる。

脱水条件の最適化を図った GI ファイバレンズ母材の吸収特性を黄色、灰色のグラフで示す。黄色のグラフは母材の中央部分、灰色のグラフは母材の縁部分の測定結果を示している。この結果から、母材の吸光度は合成石英と同等の0.1程度まで低下していることが確認できた。以上の結果から、最適化を図った脱水条件によって市販の無水合成石英ガラスと同等のOH基除去工程が確立された。

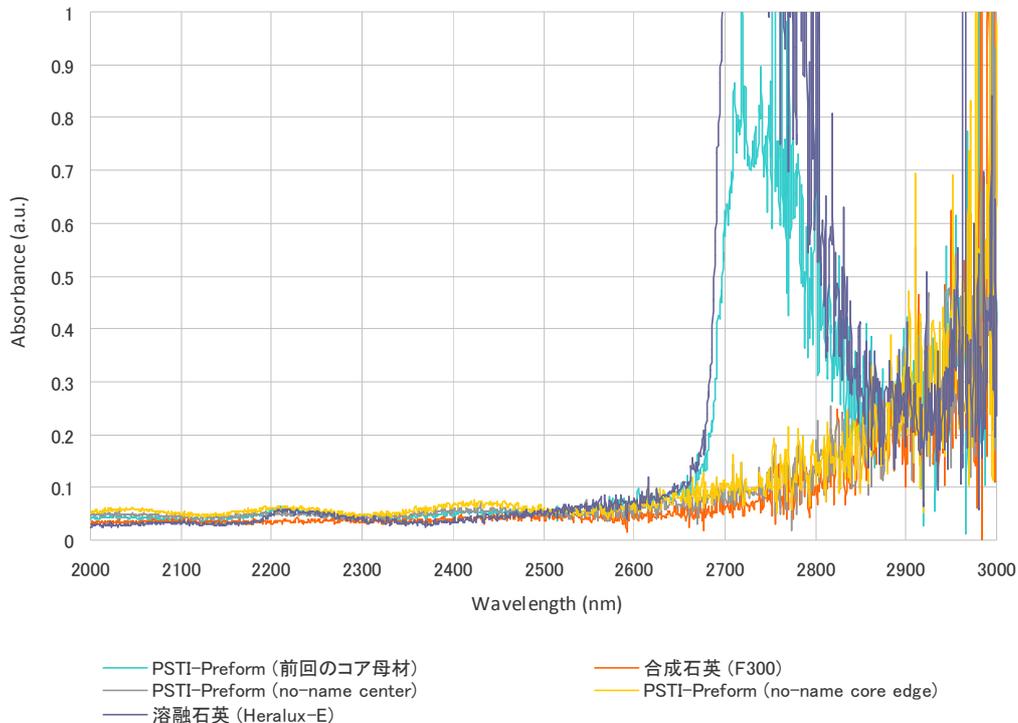


図 21 吸収スペクトル測定結果

2-3-2-3 脱水条件による屈折率分布変化について

脱水工程におけるスートの加熱温度の違いによって、屈折率分布にどのような変化が生じるか検討を行った。表 3 に検討条件及び図 22 に各条件で作製した GI ファイバレンズ用母材の屈折率分布測定結果を示す。

検討の結果、脱水工程によって GeO_2 の拡散が生じ、脱水工程無しの条件と比較して屈折率が低下し、屈折率分布にも変化が認められた。屈折率の低下は脱水温度が高いほど顕著に現れており、 1050°C の条件においては GI ファイバレンズ母材の外周付近は屈折率が平坦化するほど GeO_2 が拡散したと推測される。また、脱水工程無しの屈折率分布は、屈折率の屈曲点が存在していたが、脱水によって屈曲点が平滑化され屈折率分布が改善される傾向が認められた。

図 23 に脱水温度と NA の関係についてまとめる。脱水無しの状態での NA は 0.19 程度であったのに対して、 900°C の脱水工程で約 0.17、 1050°C の脱水工程で約 0.15 という結果が得られた。

表3 検討条件

スー ト 製 造 条 件	SiCl ₄ 流量	100sccm		
	GeCl ₄ 流量	37sccm		
	H ₂ 流量	3ℓ/min		
	O ₂ 流量	4ℓ/min		
	Ar流量	1ℓ/min		
脱 水 条 件	脱水温度	無し	900deg	1050deg
	Cl ₂ 流量	0.2ℓ/min		
	スー ト 駆 動 速 度	2.0mm/min		
焼 結 条 件	焼結温度	1650deg		
	He流量	2.0ℓ/min		
	スー ト 駆 動 速 度	2.0mm/min		

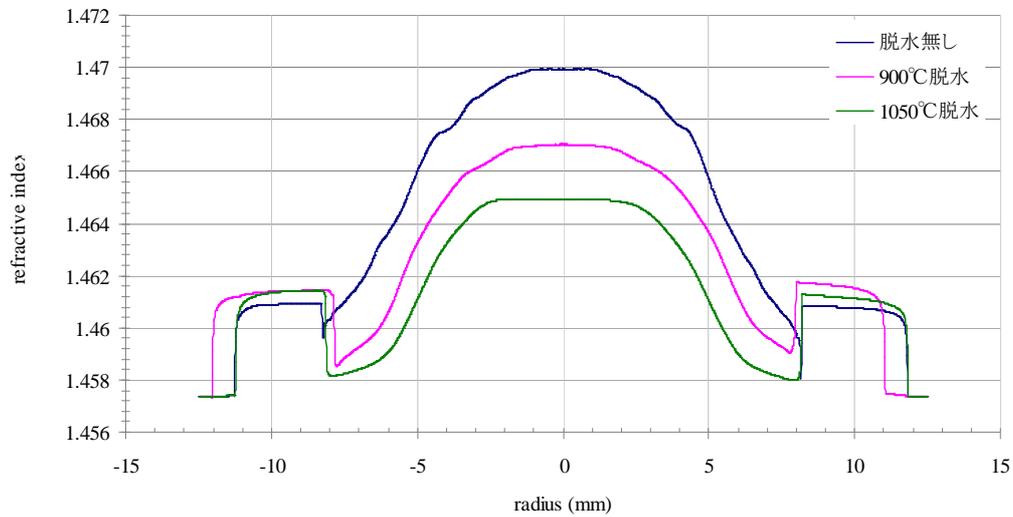


図22 屈折率分布測定結果

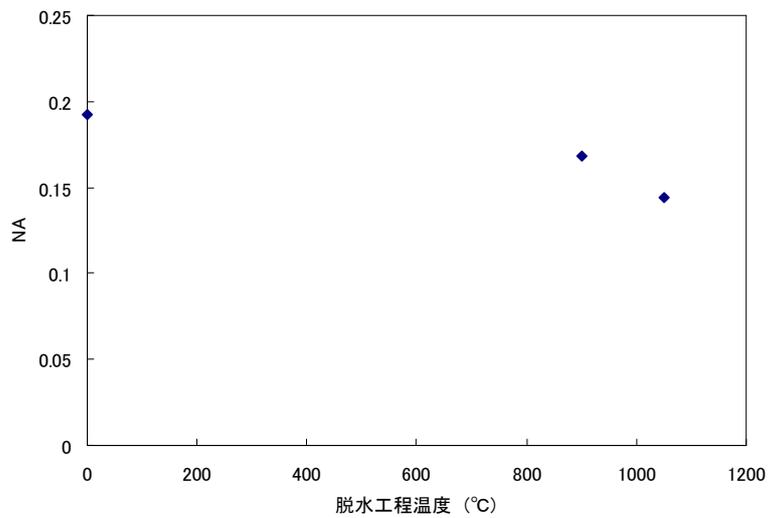


図23 脱水温度とNAの関係

2-3-2-4 焼結条件最適化により作製した GI ファイバレンズプリフォーム

図 24 に、作製した GI ファイバレンズ用母材の外観を示す。作製した母材の寸法は、長さが約 210mm、直径が $\phi 205\text{mm}$ であり、本研究開発事業の寸法目標を達成した。



図 24 作製した GI ファイバレンズ用母材

図 25 に前記問題を解決し、条件の最適化を図って作製した GI レンズ母材の屈折率分布及び表 4 にその光学特性評価結果を示す。尚、GI レンズ母材の屈折率分布は直交するように 2 方向から測定することで偏芯の評価を実施した。

評価の結果、NA は 0.155、外径が $\phi 19.15\text{mm}$ 、コア径が $\phi 15.25\text{mm}$ 、偏芯が 0.1% という非常に良好な光学特性を有する GI レンズ母材を得ることに成功した。

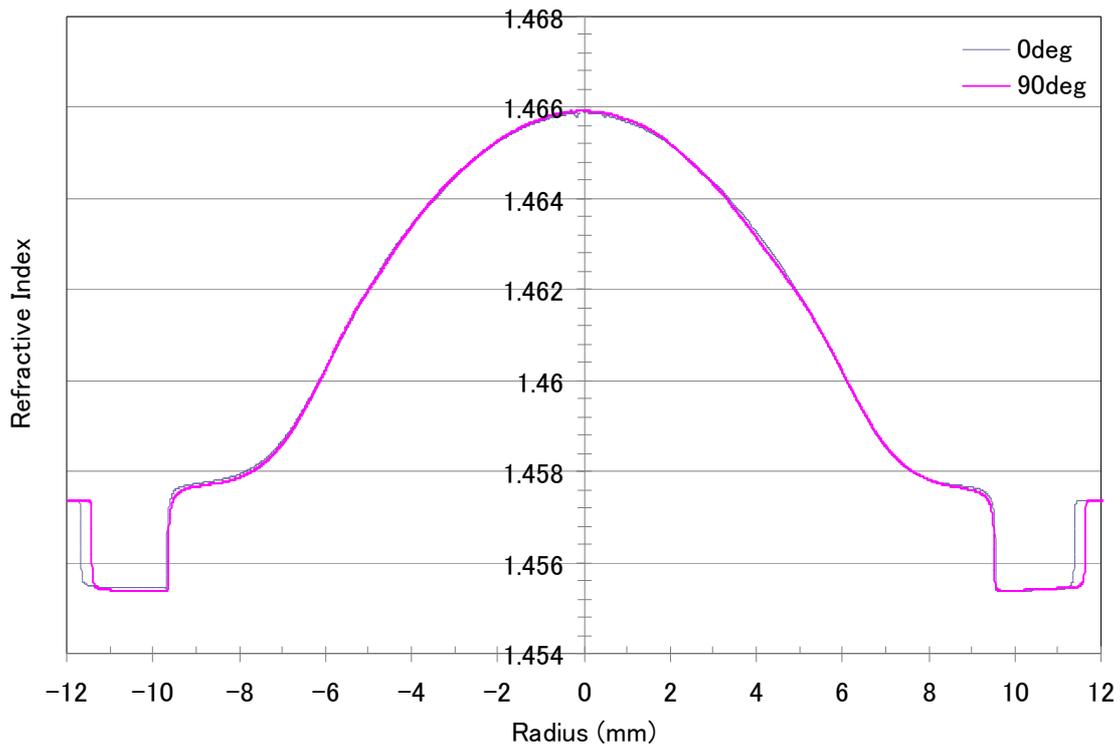


図25 作製したGI レンズ母材の屈折率分布

表4 作製したGI レンズ母材の光学特性

	0deg	90deg
NA	0.156	0.156
Δn (%)	0.57	0.57
Core dia. (μm)	15.25	15.24
Clad dia. (μm)	19.15	19.14
d/D	0.796	0.796
コア偏芯 (μm)	60	
Non circularity (Core) (%)	0.1	
Non circularity (Clad) (%)	0.0	
α	1.85	

2-3-3 線引き技術開発

2-3-3-1 線引き温度とレンズ外径精度の関係性について

GI ファイバレンズの線引き条件の検討では、母材の加熱温度、母材挿入速度、引き取り速度の最適化を図り、GI ファイバレンズの外径ばらつきを±2%以下に抑えることを目標とした。

まず、母材の加熱温度は、1900℃では母材の溶融が不十分でGI ファイバレンズの引き取りに100g以上の引っ張り力が必要であり、外径ばらつきが発生した。1950℃では、母材の溶融は十分で10～100g程度の引っ張り力で延伸が可能であったが、局所的に外径が大きく変動することがあった。2000℃では、10～100g程度の引っ張り力で延伸が可能であり、局所的な外径変動のない線引きが可能となった。尚このときの母材挿入速度は2.0mm/min、引き取り速度は20m/min以上であった。

引き取り速度が20m/min以下であると、外径制御のための引き取り速度調整にディレイが生じ、外径が目標公差域から外れてしまうことがあるので、20m/min以上の引き取り速度を維持できるように母材の挿入速度を調整すればよいことがわかった。

表5に各光ファイバ直径における外径ばらつき目標及び外径ばらつき結果をまとめる。上記条件において線引きを行った結果、外径φ200μmでばらつき±0.25%、外径φ300μmでばらつき±0.33%、φ400μmで外径ばらつき±0.25%、φ625μmで外径ばらつき±0.48%と非常に良好な結果が得られた。

表5 GI ファイバレンズ線引き結果

外径目標	線引き結果	外径ばらつき
200±1.0 μm	200±0.5 μm	±0.25%
300±1.5 μm	300±1.0 μm	±0.33%
400±2.0 μm	400±1.0 μm	±0.25%
500±2.5 μm	625±3.0 μm	±0.48%

2-3-3-2 コーティングの検討について

次にコーティングの検討結果を示す。本研究開発のGI ファイバレンズは、実装の際にはコーティングを除去して使用する。従って、実装までの期間GI ファイバレンズに断線が発生しないようなコーティングを施せば十分と考えられる。

これまでの実績から、ある一定期間光ファイバの強度を維持するためには、およそ25μmの厚さのコーティングを施せば十分であるという知見を得ていることから、本研究開発においてもこれを適用することとした。

図26にコーティング検討結果を示す。この結果に示すとおり、GI ファイバレンズ直径がφ200μmからφ300μmの範囲において、コーティング厚さ25μm以上を確保する条件を確立した。

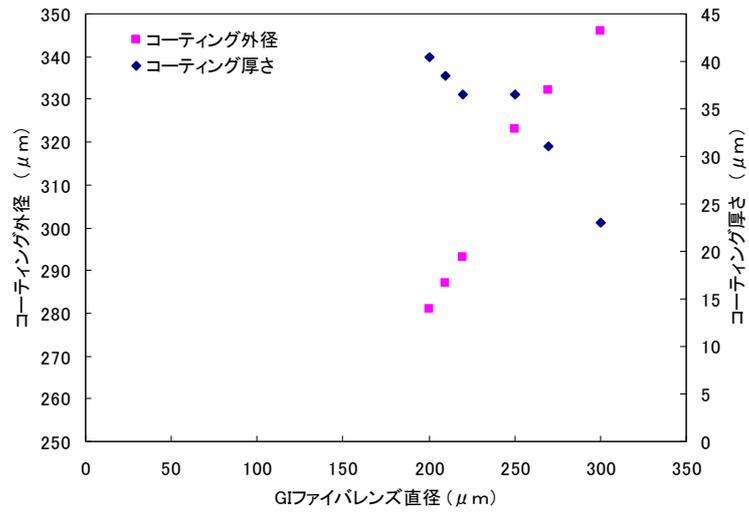


図26 コーティング検討結果

2-4 長距離光コリメータ実装技術開発

2-4-1 レンズ切断技術検討

図 27 に GI ファイバレンズの切断に使用した切断装置の外観を示す。GI ファイバレンズ切断装置は、NYFORCE 社製の『AutoCleaver LDF』である。本装置は、切断する GI ファイバレンズを把持しながら一定張力で GI ファイバレンズを張り、そこに超音波振動するブレードを押し当てることでガラスを劈開させるものである。切断の条件は GI ファイバレンズに掛ける張力、超音波ブレード押し込み量である。

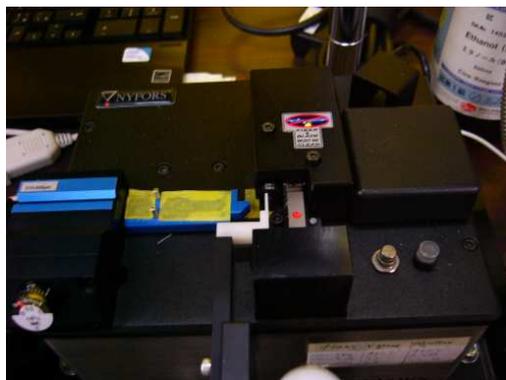


図 27 GI ファイバレンズ切断装置

図 28 に GI ファイバレンズの張力を変化させたときの切断面像をまとめる。尚、本検討で用いた GI ファイバレンズの外径は $\phi 430\mu\text{m}$ である。張力が 8.8N の時には端面に微小クラックが生じる結果となった。張力が 8.5N の場合には、端面の一部に欠けが生じたのに対して、張力が 8.0N の場合には欠け、クラックのない良好な端面を得ることができた。

以上の結果から、GI ファイバレンズの切断面は張力に大きく依存することが明らかとなった。また、GI ファイバレンズ直径が大きくなるほど張力を強くしなければならないことも明らかにしている。

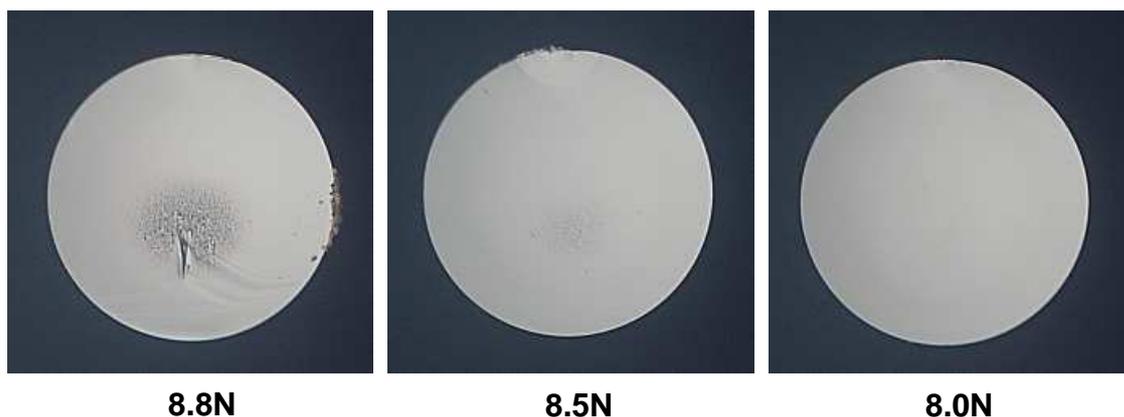


図 28 GI ファイバレンズ切断試験結果

2-4-2 融着技術検討

次に切断した GI ファイバレンズと光ファイバとの融着接続試験を実施した。図 29 に使用した融着接続装置を示す。使用した装置はフジクラ社製融着接続装置『FSM-100P』である。本装置は光ファイバを溶融する熱源に放電を採用している。

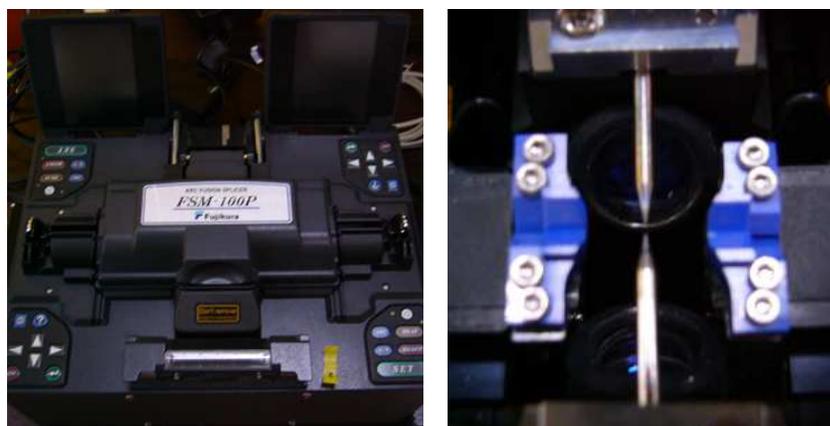


図 29 融着接続装置

図 30 に融着試験結果を示す。今回試験に使用した光ファイバ及び GI ファイバレンズの直径はそれぞれ $\phi 125\mu\text{m}$ 、 $\phi 240\mu\text{m}$ である。放電強度、光ファイバ及び GI ファイバレンズの押し込み量の最適化を図り、図 30 に示すような、変形等のない良好な融着接続条件を確立した。



図 30 融着試験結果

2-4-3 ビーム偏角に関する検討

次に単芯光ファイバコリメータのビーム偏角に関する評価を実施した。図 31 にビーム偏角評価前の基準の取り方について説明する。本事業におけるビーム偏角の定義は、レンズの端面に垂直な軸をビーム偏角 0 度の光軸とした場合に、実際の出射ビームがその光軸に対してどの程度ずれているかを示す値である。従って、まず端面の基準を決定する必要があるが、その方法を図 31 を引用して説明する。

単芯光ファイバコリメータは可視の半導体レーザと予め接続し、光ファイバコリメータは XYZ0 軸の調整が可能な専用の微動台に設置しておく。次にファイバコリメータの端面に向けて He-Ne レーザ光を照射する。このとき He-Ne レーザ光はクロ

スラインの描かれた台紙の交差点から出射する。次に GI ファイバレンズの端面で反射した He-Ne レーザ光がクロスラインの中心に戻ってくるように光ファイバコリメータの角度を微動台によって調整する。これによって、光ファイバコリメータの理想的な光軸は、クロスラインの中心に向かっていることとなる。

次に光ファイバコリメータと接続している可視半導体レーザを点灯し、光ファイバコリメータの出射ビームを台紙に投影する。そして投影した出射ビームのクロスライン中心からのズレ量から三角関数でビーム偏角を算出する。

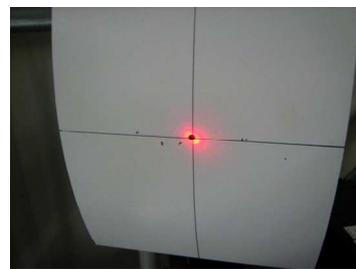
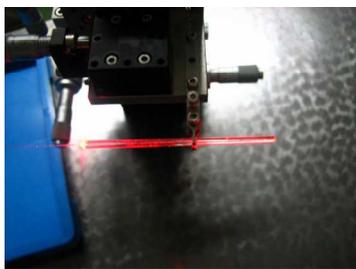
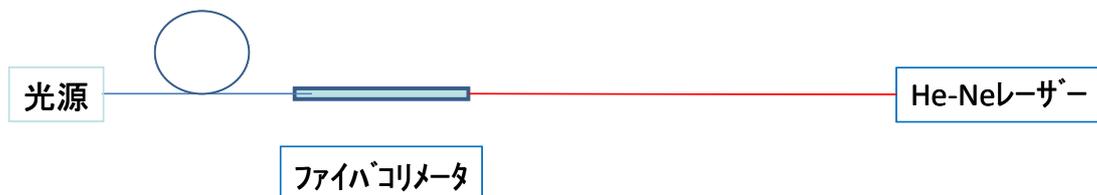


図 31 ビーム偏角測定基準決定方法

図 32 に光ファイバコリメータの出射光を台紙に投影した際の様子を示す。投影した出射光は、クロスラインの中心から約 5mm ずれた位置にあった。この結果から、ビーム偏角を算出した結果、約 0.17 度という良好な結果が得られた。

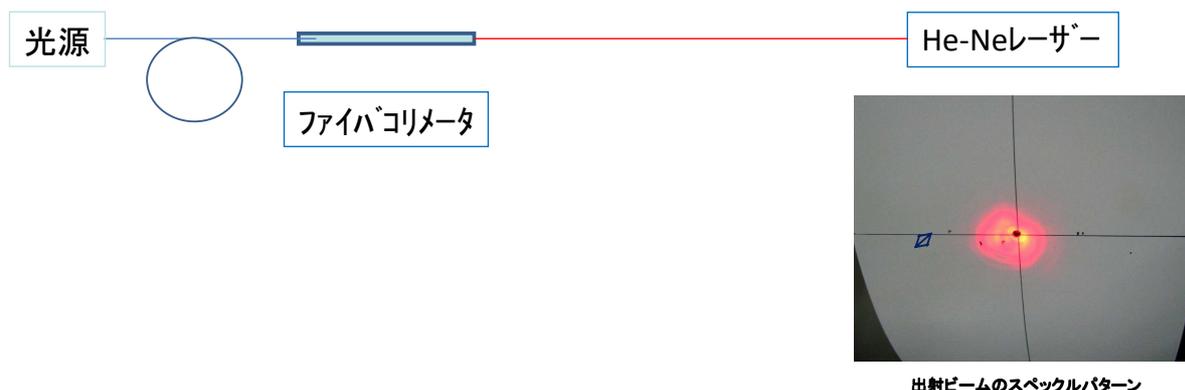


図 32 ビーム偏角評価結果

次に作製した光ファイバコリメータアレイのビーム偏角の評価を実施した。

ビーム偏角の測定方法を図 33 に示す。光源は波長 1550nm の半導体レーザを用い、サーキュレータを介してコネクタによりコリメータアレイと接続する。コリメータから出射したビームは金コートミラーで反射させ、サーキュレータでパワーメータ側の光路に導かれる。ミラーの角度は、コリメータアレイの 1ch をリファレンスと

して最も光量が得られる角度に調整する。この状態で他のチャンネルの光強度を測定し、得られた値を次式に代入してリファレンスチャンネルに対してどの程度偏芯があるか算出する方法でコリメータアレイのビーム偏角の評価を実施した。

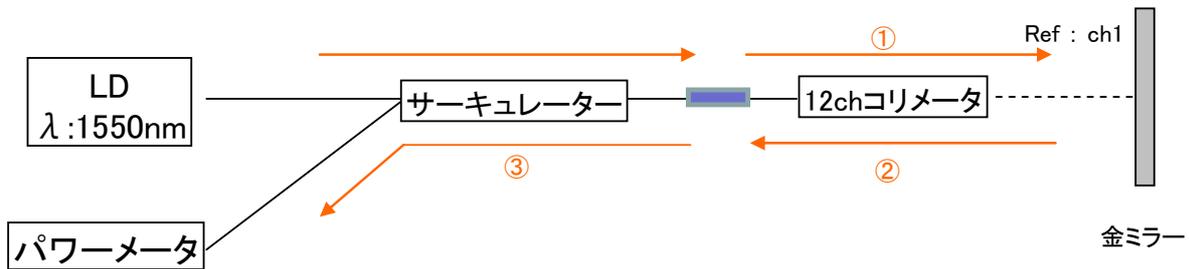


図33 コリメータアレイのビーム偏角評価方法

評価の結果を表6にまとめる。この結果11chのコリメータのうち、最もビーム偏角の大きいもので0.093度、小さいもので0.039度という非常に良好な結果が得られた。またこの値は単芯光ファイバコリメータよりも良い結果となった。この原因として、単芯光ファイバコリメータの端面角は光ファイバ切断装置によるものであるため、完全な垂直面ではなかったほか、融着接続によりレンズの特性劣化、融着時の僅かな芯ずれ等が考えられる。

一方でコリメータアレイのレンズは、両面を研磨加工によって理想的な垂直面としているほか、光ファイバとG Iファイバレンズとの位置合わせは、光学的に位置合わせを行っているため良好な結果が得られたものと考えられる。

表6 ビーム偏角評価結果

ch	損失= τ	偏角[deg]
1	-	-
2	0.984	0.042
3	0.942	0.081
4	0.984	0.042
5	0.977	0.050
6	0.984	0.042
7	0.982	0.045
8	0.933	0.087
9	0.986	0.039
10	0.927	0.092
11	0.925	0.093
12	0.935	0.086
ave.		0.064

2.4.4 コリメート特性について

次に作製した光ファイバコリメータの、コリメート特性について報告する。図 34 にコリメート特性評価系を示す。コリメート特性評価には、波長 1310nm の半導体レーザを用い、まずレーザ光はシングルモード光ファイバに入射し、コネクタにより光ファイバコリメータと接続する。光ファイバコリメータから出射した光は、光軸方向の駆動機構を有するビームプロファイラを用いて、コリメータ出射端面からのある距離におけるビーム径を測定する。ビームプロファイラのコリメータ出射端面からの距離を徐々に離しながら繰り返しビーム径を測定することによって、光コリメータのコリメート特性を評価した。

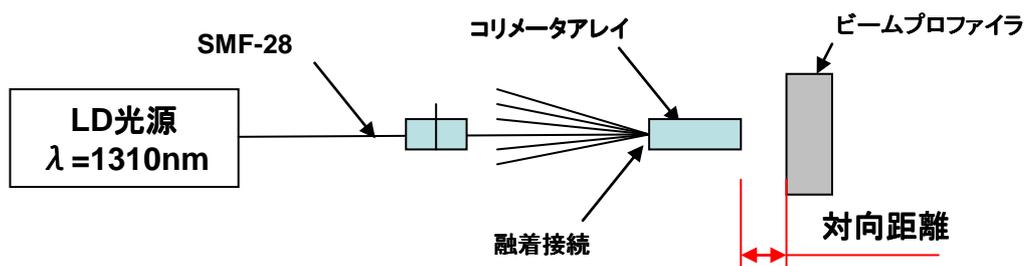


図 34 コリメート特性評価系

図 35 にコリメート特性評価結果を示す。この結果、コリメータの出射端面から 50mm の距離範囲において平行光を得ることに成功した。

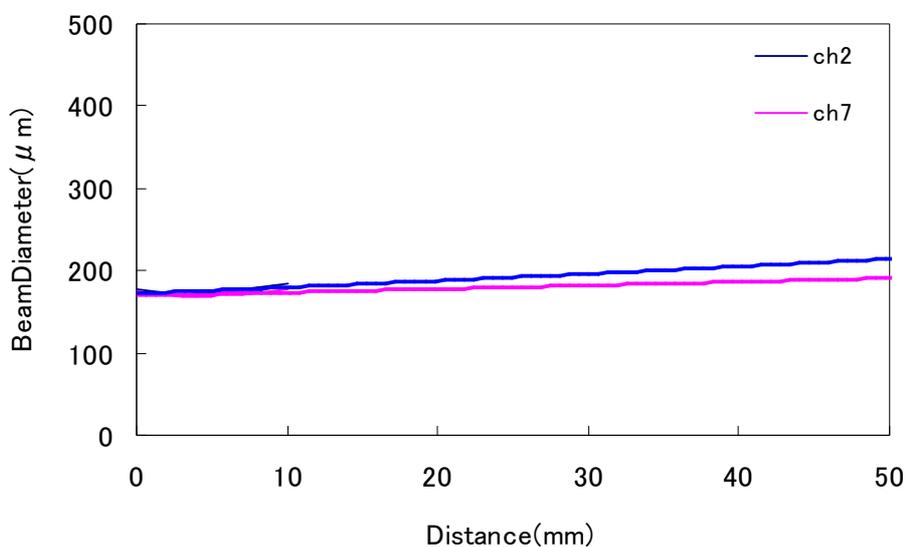


図 35 コリメート特性評価結果

2-4-5 マトリクス実装技術について

次に光ファイバコリメータマトリクス実装技術に関する検討について報告する。今年度の光ファイバコリメータマトリクス実装では、2通りの方法で検討を実施した。図36及び図37に2種類の光ファイバコリメータマトリクス実装案を示す。図36の案は、レンズを実装するための8本のV溝と、その両端に上下のV溝アレイを位置合わせしながら重ね合わせるためのガイドピン用V溝を備えた2枚のV溝ブロックを用意し、レンズマトリクスを組み立てるものである。この実装方法は、レンズの縦方向及び横方向のピッチを同一且つ狭ピッチにできることが利点である。欠点としては、組立が難しい、3層以上のマトリクス化が困難なことが挙げられる。

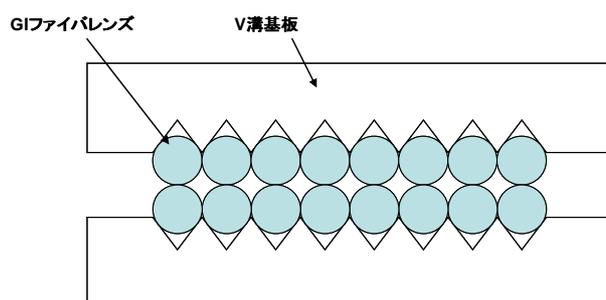


図36 光ファイバコリメータマトリクス実装案1

図37は1枚のガラス基板の両面にレンズ配置用のV溝アレイを形成し、V溝にレンズ配置後、平板ガラスでレンズアレイを押さえる方法でレンズマトリクスを組み立てるものである。この実装方法は、3層以上のマトリクス化が容易な点、V溝の加工精度によりレンズの配列精度を高くすることが出来る点が利点であり、縦方向のピッチが広がってしまうことが欠点である。

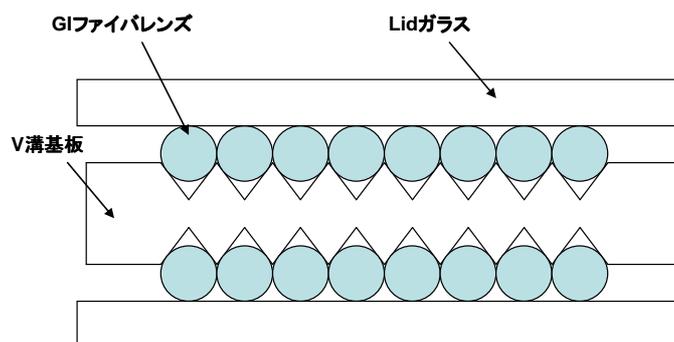


図37 光ファイバコリメータマトリクス実装案2

図38は実装案1に従って組み立てたレンズマトリクスの端面像である。案1の実装方法は、レンズの外径精度等の外乱影響によって縦方向及び横方向に同一ピッチにレンズを配列させることが非常に困難であることが明らかとなった。この方法でレンズマトリクスを安定的に組み立てるためには、同図に示すように上下のレンズアレイを千鳥状に配列させる必要があった。



図38 レンズマトリクス端面像 (案1)

図39は、実装案2に従って組み立てたレンズマトリクスの端面像である。案2の実装方法は、想定通りV溝の加工精度によって高精度のレンズの配置が可能であり、本研究開発のレンズマトリクスを実装する上で、非常に有用な手段であることが明らかとなった。

またこの実装方法では、当初上下のV溝の先端部から亀裂が生じることが可能性として考えられていたが、V溝の加工角度を従来の60度から90度へ浅くすることによって、想定されていた問題を回避することが可能となった。



図39 レンズマトリクス端面像 (案2)

第3章 特許について

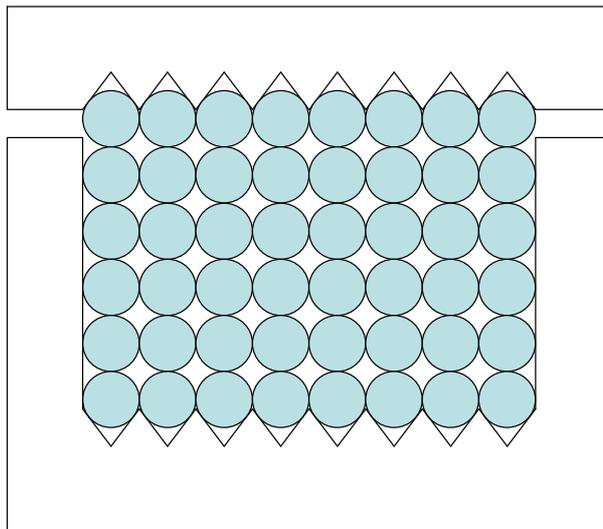
本研究開発では、レンズマトリクス実装方法に関して1件の特許申請を行った。申請を行った特許については以下の通りである。

- 発明の名称 : 光ファイバアレイの製造方法
- 出願番号 : 特願 2016-021405
- 発明者 : 小林 壮一 (フットニックサイエンステクノロジー(株))
藤井 雄介 (フットニックサイエンステクノロジー(株))
- 出願人 : フットニックサイエンステクノロジー(株)

- 概要

本特許は、V溝基板を用いて縦方向及び横方向のレンズピッチを狭ピッチ且つ同一ピッチにすることが可能で、縦方向のレンズアレイの積層工程を容易にすることが可能な発明である。

- 代表図※



※ 詳細については公開後特許文献を参照

最終章 全体総括

本研究開発事業は、新世代波長選択スイッチに必要とされる長距離空間伝搬長を有する光コリメータの高密度実装を可能とするマトリクス型コリメータを実現するため、高性能 GI ファイバレンズ及びそれを用いたマトリクス実装技術を開発するものである。本研究開発事業では、高性能 GI ファイバレンズを実現するために以下の開発を実施した。

- ① GI ファイバレンズ製造装置の開発
- ② GI ファイバレンズ製造技術の開発
- ③ GI ファイバレンズを用いたマトリクス型コリメータ実装技術の開発

この研究開発事業によって、直径 20mm、長さ 200mm の GI ファイバレンズ母材製造技術及び GI ファイバレンズの高精度線引き加工技術、単芯光ファイバコリメータ、光ファイバコリメータアレイ、光ファイバコリメータマトリクス実装技術等の要素技術を確立した。

また派生技術として、光ファイバ母材へのクラッド形成技術、大口径石英ロッドと光ファイバとの異種融着接続技術、高 NA-GI ファイバレンズ母材製造技術の開発を行うことが出来た。

更に、本研究開発事業において開発したレンズマトリクス実装技術に関する特許を 1 件出願した。

本研究開発における今後の課題は、以下の通りである。

- ① GI ファイバレンズ母材の長軸方向の特性安定化
- ② 信頼性、長期安定性の評価・確立

また、本研究開発事業の成果を事業化するために、研究実施者から製造担当者へのノウハウを含む作業手順の引継ぎ及び作業手順書、チェックシート等の書類整備を順次進めていく予定である。

本研究開発事業の成果は、平成 28 年度に開催予定の技術展で PR 予定である。現在出展を予定している技術展は、光通信技術展（4 月 6 日～8 日、東京ビッグサイト）、インターオプト 2016（10 月 14 日～16 日、パシフィコ横浜）、第 30 回ビジネス EXPO（11 月 10 日～11 日、アクセス札幌）となっている。

また、本研究開発の成果である GI ファイバレンズに関して、平成 28 年度の上期に量産試作を実施し、下期から量産を開始するスケジュールで調整を行っている引合案件が 1 件あるほか、数社からコリメータアレイ試作の引合を受けている状況である。