

光ファイバ

(1980年ごろ～現在)

石英ガラス系光ファイバは、透明なガラスできていて屈折率が高く光が通るコアと呼ばれる中心軸とそれを覆うクラッドと呼ばれ光をコアに閉じ込める部分の二重構造になっていて図1のように同心円状をしている。クラッドよりもコアの屈折率を高くすることで図2のようにコア内に光を閉じ込めて伝搬させる原理である。光ファイバの表面をプラスチックで被覆したものを「光ファイバ素線」あるいは「光ファイバ心線」と呼び、さらに、光ファイバ心線に外皮を被覆し保護したものを「光ファイバコード」と呼ぶ。複数の光ファイバ心線に保護用のシースと呼ばれる被覆や補強材を用いて強固にしたものを「光ケーブル」と呼び、電柱などに敷設されている。光ファイバは、電気信号を流して通信するメタルケーブルと比べて信号の減衰が少なくかつ広帯域であるため、長距離で大量のデータを高速に伝送でき、現在のインターネット通信を支える重要な伝送媒体になっている。

1. 製品適用分野

光伝送システム, 光機器

2. 適用分野の背景

80年代以前は、電気通信はメタルケーブルによる伝送システムで行っており、情報通信といってもまだ一般には電話が中心であった。実用的な光ファイバが80年代初頭に登場するとともに信頼性の高い半導体レーザが通信用光源として適用できるようになると光ファイバ通信技術が飛躍的に向上した。現在は全国幹線通信網の整備が完了し、さらに図1のように電柱に張り巡らされて各家庭まで光ファイバで繋ぐFTTH^{注1)}が普及し始めている。光ファイバは、①低損失であること、②広帯域であること、③電磁誘導障害を受けないことの特徴を有すること、VAD法のような大量生産技術の進歩により安価に市場に提供できるようになって、現在のインターネットなどのデータ通信ネットワークを支えている。

3. 製品の特徴と仕様

光ファイバは、低損失な伝送媒質であることが明らかになった70年代では、まずマルチモードファイバ(MMF; Multi Mode Fiber)で0.85 μm の波長帯域で初期の光通信が行われた。ほどなく、単一モード伝送が高速で長距離を伝送する方式として開発が進み、シングルモードファイバ(SMF; Single Mode Fiber)が実用化された。光ファイバは、石英ガラス材料と基本構造がもたらす波長分散(波長によって信号速度が異なること)を有しているが、単一モード伝送である条件とあわせてSMFのゼロ分散波長が1.3 μm となるためその波長で伝送システムを設計し通信を行うようになった。しかし、石英ガラスファイバのもっとも低損失な波長が1.55 μm にあること、光のまま増幅できる光ファイバンプ(1.55 μm が増幅帯域)が80年代後半に登場したことにより、基幹系ネットワークでは伝送の波長を1.55 μm にして光中継を行う方式が開発され、光ファイバも1.55 μm にゼロ分散をシフトし

見学可能:

通信総合博物館 いば一く(JR東京駅), 現代産業科学館(千葉県市川市)など。

Key-words: 国際規格: ITU-G652, ゼロ分散波長: 1.31 μm , 単一モード伝送

注1 光ファイバによる家庭向けのデータ通信サービス。一般家庭に光ファイバを引き込み、電話、インターネット、放送などのサービスを統合して提供する通信サービスの総称。従来のメタル伝送に比べて高速伝送が可能で100Mbps程度までサービスが実現している。2001年NTTによる常時接続サービス「Bフレッツ」が開始され現在200万以上の加入者となっている。

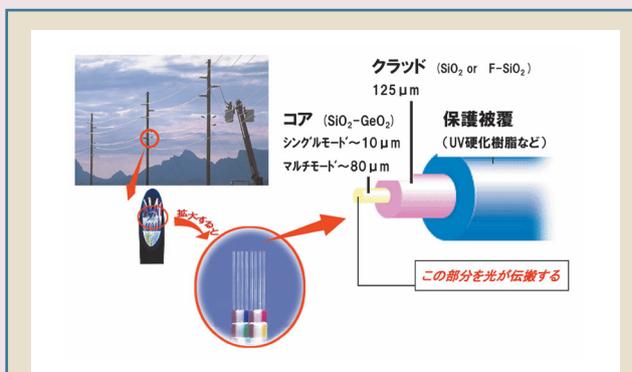


図1 敷設されている光ケーブルと光ファイバの模式的な構造図

電柱間を繋いで敷設された光ケーブル(架空ケーブル)の例と光ケーブルの断面、その被覆を除いた光ファイバ心線の写真。イラストは光ファイバ心線を拡大した模式図。

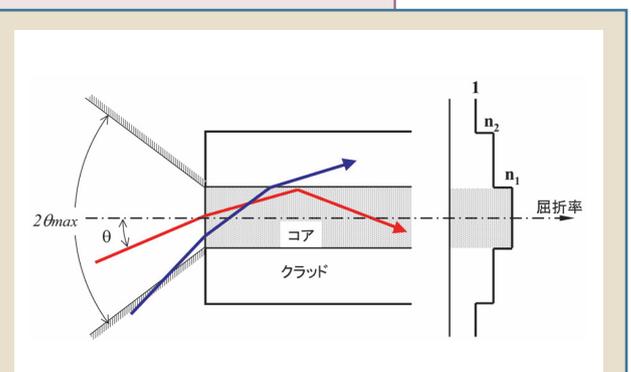


図2 光ファイバにおける光伝搬の模式図

光ファイバに入射した光は屈折率の高いコアとそれより低いクラッドとの境界で全反射して、軸方向に進行していく。入射角に制限があることに注意。

注2 0.25mmを光ファイバ素線と呼ぶこともある。

た分散シフトファイバ (DSF : Dispersion Shifted Fiber) が開発された。90年代に入るとインターネットの普及により通信需要が膨大となつて、伝送容量の一層の拡大が要求された。そこで、すでに敷設された光ファイバにも高速かつ高密度に伝送できる波長多重通信技術 (WDM : Wavelength Division Multiplexing) が開発されてきた。波長多重通信は、光ファイバアンプの増幅帯域である $1.55\mu\text{m}$ 帯に、たとえば 0.8nm 間隔 (100GHz 相当) で 8ch , 16ch というように複数のチャンネルを立てて、1本のファイバでありながらあたかも 8 本, 16 本のファイバに伝送したかのように独立した光伝送ができるようにした通信方式である。ところが単一チャンネル伝送の場合には、ゼロ分散波長で伝送を行えば、信号波形が崩れることなく高速に伝送可能であったが、複数のチャンネルを波長間隔を狭くして高密度に伝送する場合は、それぞれの信号がデータを送るために変調をかけられているためスペクトル幅を持ち、ゼロ分散波長では隣り合うチャンネルで相互に重なり合つて干渉してしまう問題が生じた。そこで、ゼロ分散波長を $1.55\mu\text{m}$ からわずかにずらした非ゼロ分散シフトファイバ (NZDSF ; Non Zero Dispersion Shifted Fiber) やさらに分散スロープを小さくした低分散スロープファイバ (ULS-DSF ; Ultra Low Slope Dispersion Shifted Fiber) が開発されてきている。

各種の光ファイバは、世界共通の仕様として、国際電気連合 ITU ; International Telecommunication Union) で規定されている。MMF は、ITU-G651, SMF 系は、ITU-G652, DSF は、G653, 海底ケーブル用として

コア径が少し大きい CSF が G654, NZDSF は、G655, ULS-DSF は G656 に制定されている。光ファイバはその製造法から OH 基の混入は避けられず、その吸収が $1.4\mu\text{m}$ 近辺にあるため通信の波長帯域としては使われていなかったが、最近、OH 基を除去し低損失化する技術が進み、 $1.3\mu\text{m}$ から $1.55\mu\text{m}$ の全波長域で光伝送可能となる SMF が開発された (図3, 表1 に一例を示す)。この SMF は、ITU-G652.C,D で新たに規格化された。

光ファイバ心線は、石英ガラスの表面を樹脂被覆したファイバであり、さらに保護するために補強材を使い過酷な環境でも使えるようにした光ケーブルが実際に使用する形態の光ファイバである。光ファイバ心線は、屋内配線や機器間、機器内の配線に使われており、外径による種別があり 0.25mm , 0.9mm 心線 (図4) がある^{注2)}。また、 0.25mm 光ファイバ心線を複数並列にならべてテープ状にしたテープ心線 (図5) がある。光ケーブルは、複数の光ファイバ心線が保護収容されており、屋外で使用できるように強固な構造をしている。光ファイバを敷設する際に曲げや引っ張りの外力が強く加えられるので、これに耐えられるようにテンションメンバと呼ばれる鋼線がケーブル中心に設置構成されている。また、光ファイバを地中に埋設したりすると、重量物が載ることもあり側圧がかかることがあるので、その対策として、シース層を巻いて外力から守る構造になっている (図6)。またテープ心線をスロットに装着したテープスロットケーブルは汎用多心ケーブルとして使われている (図7)。

光ケーブルは、用途に応じて様々な構造をしたものが製品化されており品種も多様である。

4. 製法

光ファイバの製造方法は、大別して MCVD (Modified Chemical Vapor Deposition) 法, OVD (Outside Vapor Phase Deposition) 法そして VAD (Vapor Phase Axial Deposition) 法があり、日本では、VAD 法が採用されている。MCVD 法, OVD 法は中心部に空隙があるが、VAD 法は、種棒の先端にすべて堆積していく方法で純度が高く、量産に適した製造法である。以下では本方法について述べる。VAD 法は、日本で開発された石英系光ファイバの製造方法で 1977 年電電公社 (現 NTT) から発表された。VAD 法は、円柱状のガラス母材 (スートと呼ぶ) を軸方向に連続的に合成していくもので大量生産に適した製造方法である。

酸水素パーナーに原料となる SiCl_4 と GeCl_4 を連続供給して火炎加水分解反応によりスートを合成してい

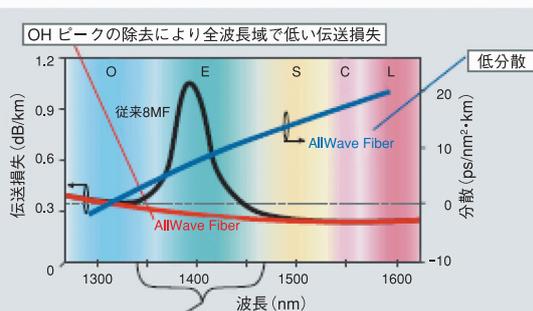


図3 OH 基を除去し低損失化した光ファイバの一例 : ALLWave Fiber

光ファイバ製造過程で水分を除去し、 1400nm 近辺の OH 基吸収損失を減少させた ALLWave Fiber の特性図。従来の SMF の伝送損失を黒色線で、赤色が ALLWave Fiber に対応。青色線は ALLWAVE Fiber の波長分散で従来の SMF より小さい分散値を有している。

表1 OH基を除去し、低損失化した光ファイバの特性例；All WAVE Fiber

ALLWAVE Fiberの光学および機械的な特性とファイバの構造的な寸法ならびに補足したデータをまとめた表。本特性については、国際標準規格であるITU-G652.Dに準拠している。

光学特性		寸法		機械特性	
伝送損失：(ケーブル化していない状態において)		クラッド径： 125.0 ± 0.7 μm		ブルーテスト： 0.7 GPa(100 kpsi)	
波長 (nm)	伝送損失 (dB/km)	クラッド非円率： ≤1.0%	コア/クラッド偏心量： ≤0.5 μm (典型値<0.2 μm)	引張強度： ≥3.8GPa(550 kpsi) (試料長0.5m、 エージング前の中央値)	被覆除去力 ≥1.3 N, <8.9 N
1310	≤0.34 (典型値 0.32)	被覆径： 245 ± 5 μm	被覆偏心量： ≤12 μm	その他の特性 以下のデータは典型値です 群屈折率： 1.467 at 1310 nm 1.468 at 1383 nm 1.468 at 1550 nm 動疲労計数 (n _d)： 20 融着接続損失： <0.02dB (ALLWave ZWP ファイバどうしの接続)	
1383	≤0.31 (典型値 0.28)	条長： ≤50.4 km			
1490	≤0.24 (典型値 0.21)				
1550	≤0.21 (典型値 0.19)				
1625	≤0.24 (典型値 0.20)				
1285 ~ 1330	≤1310 nmの伝送損失 + 0.03				
1360 ~ 1480	≤1385 nmの伝送損失 + 0.04				
1525 ~ 1575	≤1550 nmの伝送損失 + 0.02				
1460 ~ 1625	≤1550 nmの伝送損失 + 0.04				
水素エージング試験後 ^(*) のOHピーク損失					
1383 ± 3	≤0.31 (典型値 ≤0.28)				
(*) 敷設されたケーブルにおける長期水素曝露環境を模擬した試験					
曲げ特性：		環境特性			
曲げ直径 (mm)	巻数	波長 (nm)	損失増加 (dB)	伝送損失の温度依存性： ≤0.05 dB/km (at 1310 nm, 1550 nm, 1625 nm, -60°C ~ +85°Cでの損失増加)	
32	1	1550	≤0.05	温度・湿度サイクル試験： ≤0.05 dB/km (at 1310 nm, 1550 nm, 1625 nm, -10°C ~ +85°C, 95%RHでの損失増加)	
50	100	1310	≤0.05	23°Cでの水浸漬試験： ≤0.05 dB/km (at 1310 nm, 1550 nm, 1625 nm, +23°C ± 2°Cでの損失増加)	
	100	1550	≤0.05	85°Cでの加速劣化(温度)試験： ≤0.05 dB/km (at 1310 nm, 1550 nm, 1625 nm, +85°C ± 2°Cでの損失増加)	
60	100	1550	≤0.05		
	100	1625	≤0.05		
伝送損失の非連続性： ≤0.05 dB at 1310 nm, 1550 nm		モードフィールド径： 9.2 ± 0.4 μm at 1310 nm 10.2 ± 0.5 μm at 1550 nm		カットオフ波長： ケーブルカットオフ波長(λ _{oc})： ≤1260 nm	
分散特性： 零分散波長： 1302 ~ 1322 nm 零分散傾斜： ≤0.090 ps/nm ² ·km (典型値 0.087ps/nm ² ·km)					

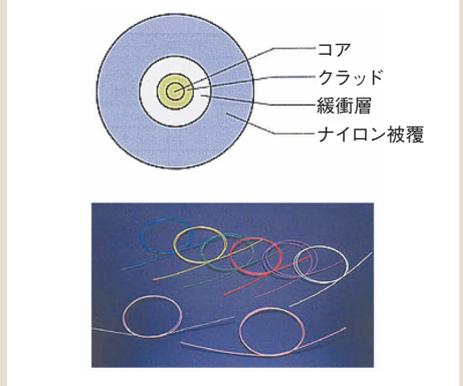


図4 光ファイバ心線の断面構造図と概観写真

線引直後の素線にナイロン被覆したもの。外径が0.9mmの光ファイバ心線が日本国内で光ケーブル用心線として最もスタンダードに使用されている。

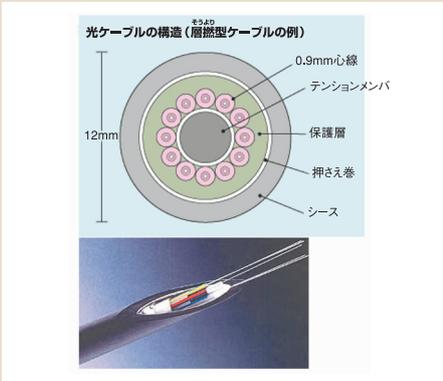


図6 層燃LAPシースケーブルの断面図と概観写真

被覆にLAPシース (Laminated Aluminum Polyethylene Sheath)を採用。中心にテンションメンバと呼ばれる鋼線を配し、その周りに光ファイバ心線を配列したケーブルである。

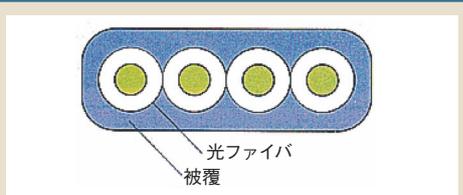


図5 テープ心線の断面図

光ファイバ心線を平行に並べて一括被覆を施したもの。2心、4心、8心タイプがある。

注3 円管状の空隙を熱処理によってつぶし、円筒状にガラス化したもの。

く(図8)。このスートを回転する出発棒材先端に半焼結状態で軸方向に堆積させていく。したがって開空間で自由表面上へ堆積するので大きなスートを合成する

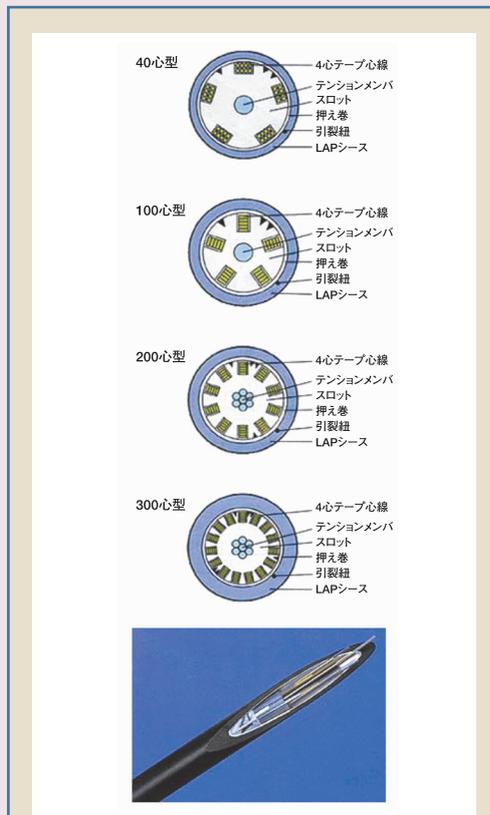


図7 多心テープスロット型ケーブルの断面図と概観写真
光ファイバをテープ状にした4心テープ心線を溝型のスロット(スペーサ)に落とし込んで集合したケーブルで、4心テープの倍数で構成される。図は汎用構成の光ケーブル。

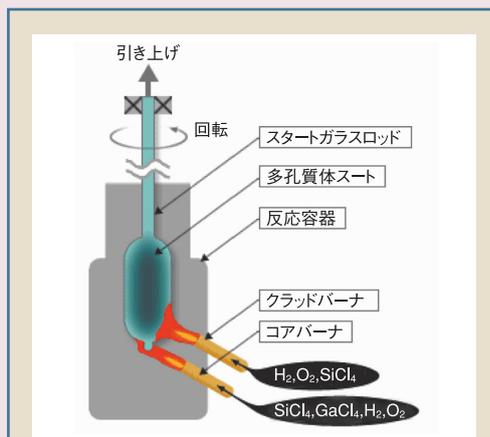


図8 VAD法の概略図

バーナからの酸水素火炎内で原料を反応させガラス微粒子を生成させる。スタートガラスロッドをターゲットとしてガラス粒子を堆積させ、ロッドを徐々に引き上げることで、スートと呼ばれる多孔質体を形成する。

ことができる。得られたスートを電気炉に挿入し、塩素などの雰囲気下で脱水、透明化させる(図9)。本方法の最大の特長は、中心部に穴がないことにあり、中心に不連続部分がないために製造工程中に不純物が入る余地がなくなり、さらにコラプス工程^{注3)}もない。優れた大量生産技術として使われている。

石英ガラス系光ファイバは、プリフォームを電気炉で加熱して熔融状態にしたところを標準外径125umにまで絞って引き下げることにより得られる。MCVD法やVAD法で得られたプリフォームは、図10のよう

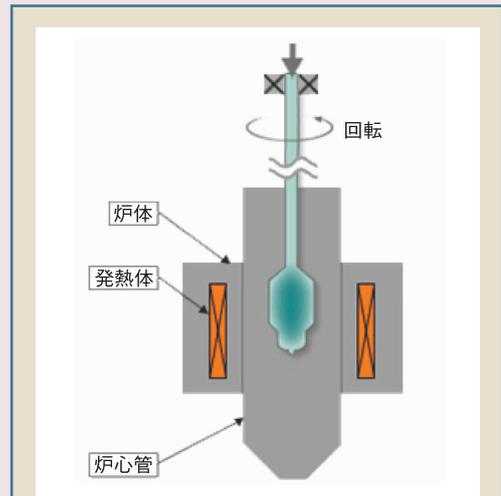


図9 ガラス化工程によるプリフォーム作製図

スートと呼ばれる多孔質体を高温脱水雰囲気下で処理した後、昇温して加熱処理を行い、そのスートを稠密化させ光ファイバプリフォームと呼ばれる透明なガラスになる。

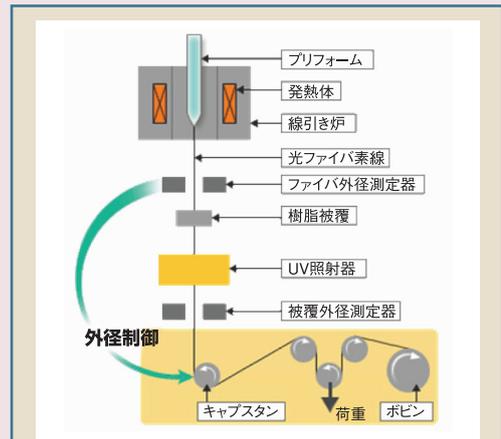


図10 線引き工程図

プリフォーム先端部を線引き炉内で2000℃以上に加熱溶解し、熔融ガラスを連続的に巻き取ることでガラスファイバとなる。また、ファイバ化と同時に樹脂被覆することにより、傷つきやすいガラスの表面が保護された光ファイバ素線となる。

な加熱炉の中に垂直に入れられる。プリフォームは炉内温度約 2000℃の加熱によってその先端から熔融して粘度が下がり自重によって落下する。この熔融したガラスがポビン^{注4)}に高速で巻き取られるが、その巻き取り速度で外径を制御することができる。

光ファイバは、石英ガラス材料そのものが持つ屈折率の波長依存性と光を閉じ込め単一モードで伝送するための構造に起因する構造分散の両方によって決まる波長分散がある。材料分散の制御はできないが、構造分散は、単一モード条件を維持しながらコアとクラッドの屈折率のプロファイルを工夫することによりある程度制御することが可能である。屈折率はドーパントによって変化し、たとえば Ge や P をドーブすると屈折率は上昇し、F をドーブすると減少する。プロファイルでは、コア系を細くしていくと構造分散の寄与度が高くなる。図 11 は、各種ドーパントやプロファイルがさまざまに工夫された光ファイバの波長分散を示したものである。光ファイバは通信用途のみならず、レーザ加工機の出力部分に使われたり、医療機器などにも応用されてきており、多様な分野の様々なニーズに対応して開発が進められて各々に適した仕様化が検討されている。

5. 将来展望

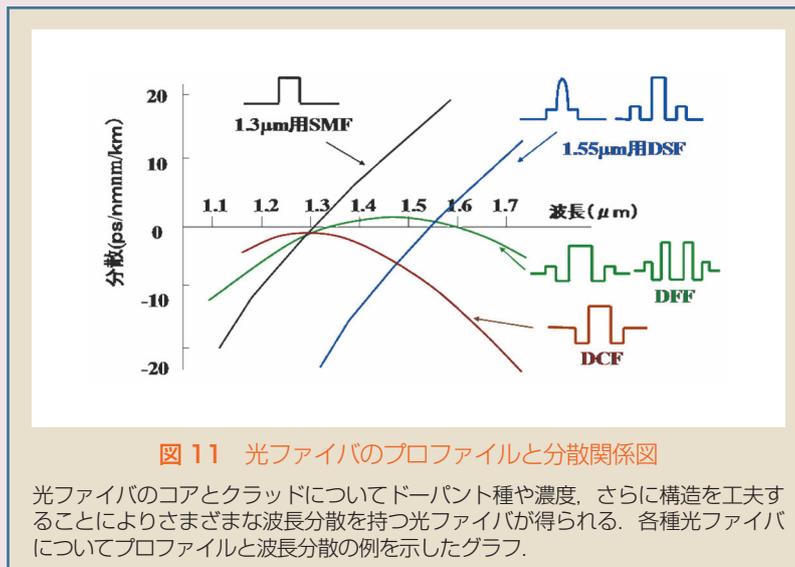
1970 年に実現した室温発振半導体レーザと低損失な光ファイバが光通信の幕開けであり、80 年代に光ファイバアンプ (EDFA)^{注5)}が登場し様々な光ファイバや光部品が開発されたことで光通信技術が革新され、

その実用化が進むことによって現在の情報化社会を支えてきている。光ファイバネットワークは、普及めざましい携帯電話もそのバックボーンを支えており、インターネット通信の進化により各家庭まで光ファイバが引き込まれるような状況に進展してきている。本編では紹介していなかったが、新しい原理による光ファイバとして屈折率を多次元的に周期構造にしたフォトリソニッククリスタルファイバも検討されてきており、一部、曲げに強いファイバが実用化されつつある。今後、放送と通信が融合し IP ネットワークを中心にあまねく情報が行き渡り、より便利かつセキュリティを確保した安全・安心な情報化社会を築いていく必要がある。光ファイバは、FTTH の普及活動を進めるとともに、さらに高速、大容量の光伝送技術と光信号処理技術の開発を担う基盤技術としてさらなる開発が期待されている。

文献

大久保勝彦著, “ISDN 時代の光ファイバ技術”, 理工学社 (1994)
古河電工ホームページ
<http://www.furukawa.co.jp/fiber/jp/index.htm>
末松 安晴監修, “光ファイバ応用技術集成”, 日経技術図書(株) (1986)
国際電気通信連合 ITU-T
(International Telecommunication Union
-Telecommunication Standardization Sector)
ホームページ <http://www.itu.int/>

[連絡先] <http://www.furukawa.co.jp/fiber/jp/products/fiber.htm#fiber02>



注4 光ファイバを巻き取るための円筒状の治具。

注5 石英系ファイバのコアに希土類として Er を添加し、半導体レーザで光エネルギーをファイバに入力すると、1.55 μm の信号光を増幅することができる。EDFA 登場前の長距離光通信では、光を電気に変換して電気増幅し再び電気を光に変えて光ファイバで伝送する形態であったが、信号光を電気に変換せずに光のまま中継伝送できるようになった。