

静岡大学

博士論文

石英ガラス光ファイバの光伝送損失及び画像直接伝送性能の高性能化とその適用に関する研究

2006年4月

千種 佳樹

目 次

第1章 序 論.....	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 石英ガラス光ファイバの特徴とその適用分野.....	3
1.2.1 通信用光ファイバ.....	3
1.2.2 画像直接伝送用光ファイバ.....	3
1.2.3 機能性光ファイバ.....	4
1.3 石英ガラス光ファイバの問題点と本研究の目的.....	7
1.4 本論文の構成.....	9
参考文献.....	11
第2章 石英ガラス光ファイバの極限的光低伝送損失の実現と 耐環境性に関する検討.....	13
2.1 はじめに.....	13
2.2 石英ガラス光ファイバの光伝送損失低減の歴史.....	14
2.3 極低損失純粋石英コア単一モード光ファイバ(PSCF)の設計と特性.....	16
2.3.1 極低損失 PSCF の構造設計.....	16
2.3.2 極低損失ファイバの光伝送損失特性.....	18
2.4 汎用単一モード光ファイバと PSCF の無中継光伝送可能距離の模擬計算比較.....	24
2.5 光伝送損失への信頼性に関する検討.....	26
2.5.1 放射線施設光システムにおける PSCF の信頼性評価に関する検討.....	26
2.5.2 光増幅用ファイバの耐 H ₂ ・ γ 線特性と長期寿命推定法の確立.....	34
2.6 まとめ.....	40
参考文献.....	42
第3章 純粋石英コア単一モード光ファイバの光低伝送損失領域の 広帯域化に関する検討.....	45
3.1 はじめに.....	45
3.2 広帯域低伝送損失規格 (ITU-T G.652.D) 準拠 PSCF の作成とその特性.....	48
3.3 耐 H ₂ 特性への影響に関する検討.....	52
3.3.1 室温条件下における耐 H ₂ 特性の優位性検証.....	52
3.3.2 高温条件下における耐 H ₂ 特性の優位性検証.....	54
3.4 広波長帯域無中継通信の検討.....	56
3.5 まとめ.....	60
参考文献.....	61
第4章 高耐曲げ性光ファイバの開発と FTTx細径・軽量光ケーブルの実現に関する検討.....	63

4.1	はじめに.....	63
4.2	耐曲げ特性に対する光ファイバ構造最適設計の検討.....	64
4.3	G.652.D 規格準拠純粋石英コア光ファイバの曲げ径と光伝送損失特性.....	65
4.4	光ケーブル外径の細径化に関する検討.....	67
4.4.1	細径化に対する最適構造の設計.....	67
4.4.2	細径光ケーブルの作成とケーブル化前後の損失変化の検討.....	70
4.4.3	PSCF を用いた光細径ケーブルの温度サイクル試験.....	74
4.5	まとめ.....	75
	参考文献.....	76
第5章	高画質画像直接伝用石英ガラス光ファイバの開発と	
	その適用に関する検討.....	78
5.1	はじめに.....	78
5.2	超高解像度（25万画素）画像光ファイバの開発.....	79
5.3	画像光ファイバの MTF 画質評価法の開発と 25万画素画像光ファイバの評価.....	83
5.4	25万画素画像光ファイバの石油精製工場へのシステム適用に関する検討.....	92
5.5	まとめ.....	94
	参考文献.....	95
第6章	高耐放射線性画像直接伝送用石英ガラス光ファイバの開発と	
	光ブリーチング効果による寿命延長に関する検討.....	97
6.1	はじめに.....	97
6.2	高耐放射線画像光ファイバの開発と γ 線照射特性に関する検討.....	98
6.3	石英ガラス画像光ファイバの光ブリーチング効果による寿命延長法の検討.....	108
6.4	まとめ.....	119
	参考文献.....	120
第7章	結 論.....	122
	謝 辞.....	125
	著者の石英ガラス光ファイバとその適用に関する論文.....	127
	著者の石英ガラス光ファイバとその適用に関する特許一覧.....	130
	論文中の略語一覧.....	132

第1章 序論

1.1 はじめに

光ファイバは低損失、広帯域、無誘導、軽量という従来の伝送媒体にはない優れた特性を有し、大容量通信、データリンク、エネルギー伝送、画像直接伝送や、光波制御応用により多岐に亘るセンサーに応用されており、発展の著しい光エレクトロニクスの今後の進歩には光ファイバ技術のさらなる発展と導入の拡大が必須であると考えられている。光は直進するという優れた物理的性質を持っていて、広く用いられているが、逆に、これが光システムの耐振動性や小型化に障害になっている。これに対して、光ファイバを用いると、どのような光路の曲がりも許容され、光システムの設計が容易になる。このような理由で、光ファイバは光エレクトロニクスの中で様々な使われ方をしている。

今日の石英ガラス光ファイバの大普及に至るまでに、壮大な開発の歴史がある。その一部を述べると、光ファイバ通信の実用化に向けての画期的提唱は1966年に Kao らの研究成果により初めて報告された¹⁾。それは石英ガラス中の不純物を除去することにより、低損失な光通信用伝送媒体が得られる可能性があることを示した「光通信」という大きな夢の実現に向けた画期的な提唱であり、世界の注目を浴びた。この可能性の提唱を受けて石英ガラス光ファイバの低損失化に向けた研究の幕開けとなり、1970年には Corning Glass Work 社の Kapron らによって Chemical Vapor Deposition (CVD)法によって 20dB/km の低伝送損失石英ガラス光ファイバの試作に成功し²⁾、このことで Kao らの提言した可能性が実証され、以降、実用化に向けた開発に火がついた。石英ガラス以外にも、さらなる低損失性の可能性や、広帯域光増幅の可能性³⁾、が示唆されている弗化物ガラス単一モードファイバをはじめとした多成分ガラスの研究もなされているが、現時点において、秘めた高機能性はあるものの耐環境性の致命的な欠点から実用

には至っていない。また、現在実用化されている光ファイバには石英ガラス光ファイバ以外にプラスチック光ファイバもある。プラスチック光ファイバは石英ガラス光ファイバと比較して伝送損失面、温度による性能変化面などの性能面で大きく劣るため光通信用途には不向きとされている。しかしながら弾力性などの性能面で優れるため伝送損失の影響の少ない極短尺応用である、導波路形態の部品や、光装飾用途などに応用分野が広がっており、石英ガラス光ファイバの得意とする適用分野との住み分けが整理されている⁴⁾。

石英ガラス光ファイバは、現時点において、インターネットの普及と容量の拡大要求から、FTTx(Fiber To The Home, Fiber To The Premise, Fiber To The Desk, 他)が注目を浴び出した。また伝送容量の拡大には波長多重(Wavelength-Division-Multiplexing (WDM))システムの開発と発展に伴い、高密度 WDM (Dense WDM: DWDM) のような大容量伝送が可能となり、海底、陸上幹線のような長距離大容量システムへの実用化が活発化する一方、最近では特にメトロネットワークや市街通信などにおいて、中、短距離システムには、低密度 WDM (Coarse WDM: CWDM) システムが 5Gb/s 以上のビットレートで単純な Add-Drop 多重システムの低コスト策を提供するとして注目を集めている。さらに、耐環境性が要求され、特に求められる放射線施設や海底光ケーブルシステムなどに適用されているが、伝送容量の拡大と環境安定性との両立が必要であり、高まる要求に対する開発技術の要求もますます高まっている。

一方、通信用途のみならず、その低損失・耐環境性の優れた特性面から、耐環境性、防爆環境では TV カメラなど電気素子の導入が不可能であるため、その場合の画像直接伝送路として「画像光ファイバ」名で石英ガラスマルチコア光ファイバが親しまれている。これら画像光ファイバも同様に、様々な新たな要求が寄せられ、適用への期待の高まりは大きく、ここにも実用化に様々な開発技術が求められ、その要求もますます高くなって来ている。

以上のように、光ファイバは成熟期に入ったが、実際、あらゆる分野の期待に応えた適用範囲の拡大のためには、まだまだ残された開発課題が多いのが現状である。

1.2 石英ガラス光ファイバの特徴とその適用分野

石英ガラス光ファイバにおいて前節でも述べたように様々な用途があるが、(1) 通信用光ファイバ、(2) 画像直接伝送用光ファイバ、(3) 機能性光ファイバ、(4) その他に分類できるが、本論文において重要な分野(1)～(3)についてその特徴と適用分野について述べる。

1.2.1 通信用光ファイバ

コアは、屈折率がクラッドに比べ相対的に大きく、伝播する光エネルギーの大部分が集中し、光の全反射で光を閉じ込めるため伝播エネルギーの極一部がクラッドに染み出す。このため、適切な厚さのクラッドが必要である。このクラッド構造を採用することによりコア表面での散乱が抑制され、低損失化が可能となる。

図 1.1 に示すように、コアの屈折率(n)の分布形状からステップ型やグレーデッド型、また光の伝播形態(モード)からマルチモード型と単一モード型に分類される。屈折率分布は、光信号パルスの歪、従って伝送帯域に関与する。パルス歪を抑制できるグレーデッド型や単一モード型では帯域が大幅に広がる⁵⁾。

通信用に、グレーデッド型マルチモード及び、単一モード型光ファイバが実用になっている。前者はコア径 $50\ \mu\text{m}$ 、比屈折率差 1%、後者はコア径 $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 、比屈折率差 0.2～0.8% であり、外径はいずれも $125\ \mu\text{m}$ である。

1.2.2 画像直接伝送用光ファイバ

個々のファイバが両端面において正しく対応するように密着配列した光ファイバを画像光ファイバと呼ぶ。両端面において個々の光ファイバの配列が対応付けられていないファイバはバンドルファイバと呼ばれ、画像光ファイバとは区別される。バンドルファイバが光パワー伝送を目的としたファイバであるのに対し、画像光ファイバの場合個々のファイバの両端面での配列の対応が保たれていることにより画像を直接に伝送する機能を有する⁶⁾。表 1.1 に画像光ファイバの代表

的な形態を示す。近年工業分野等へ適用することを目的として開発された石英ガラス画像光ファイバにおいて、通常マルチコア型が主である。マルチコア型石英ガラス画像光ファイバは全長に亘り画素が熔融一体化されており、その製造において機械的強度に優れた通信用石英ガラス光ファイバの技術が用いられている。マルチコア型画像ファイバの長所として、(1) 製法上長尺品(100m以上)の製造が可能なこと、(2) 広い波長域に亘り光伝送損失が小さいこと、(3) 耐熱性、耐放射線性に優れていること、が挙げられる。他方、バンドル型多成分ガラス画像光ファイバに比較し、一般的に可撓性において劣るという欠点がある。

1.2.3 機能性光ファイバ

光信号を伝送するだけでなく、その光信号を用いて制御・加工する機能を持たせた光ファイバが機能性光ファイバである。実用化されている代表的なものに、

(1) 光増幅用 Er 添加光ファイバ(EDF)、(2) 分散補償光ファイバ(DCF)、(3) 高非線形光ファイバ、(4) 偏波保持光ファイバなどがある。

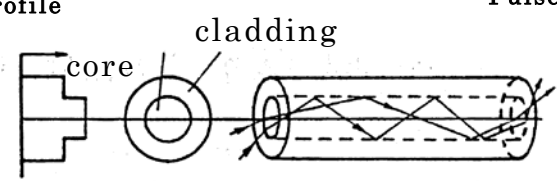
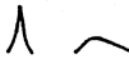
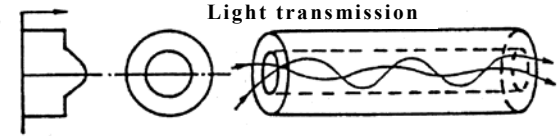
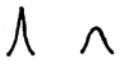
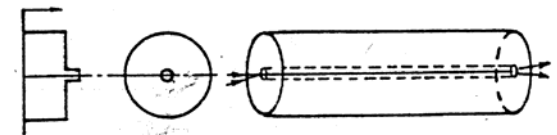
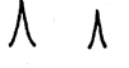
光増幅用 Er 添加光ファイバとは、光を電気に変換せずに直接増幅する(弱った光を強める)機能を持つ、コア部分に希土類元素である Er を添加した光ファイバである。図 1.2 に増幅原理を示す。0.98 μm または 1.48 μm の励起光を照射すると 1.55 μm 近傍の光を増幅できる。

次に分散補償光ファイバ(Dispersion Compensation Fiber: DCF)について説明する。光ファイバに入射した光パルスは、光源のスペクトルがある程度の波長広がりを持っているために、光ファイバの屈折率分布、光ファイバ材料の屈折率分散によって波形歪を受け、受信端でのパルス波形は広がってしまう。この波形広がりによって隣り合う信号が重なり、伝送される信号に誤りが発生する。このような光パルスに波形歪(広がり)が生じる現象を分散と呼ぶ。そしてこの伝送信号光パルスに生じた波形歪を補償するように、信号伝送用光ファイバと逆の分散を持たせるように設計した光ファイバを信号伝送路に接続することで分散を補償するようにした光ファイバを分散補償光ファイバという⁷⁾。

また、高非線形光ファイバとは石英ガラスの非線形光学効果を応用すべくその

非線形性を高めるために、コア径を汎用通信用光ファイバ対比 30%程度の小径とし、汎用通信用光ファイバのコアとクラッドの屈折率差対比、10 倍に近い高屈折率差に設計された光ファイバのことを言い、光波長変換やスーパーコンティニウム光発生などに応用される⁸⁾。

さらに偏波保持光ファイバは、光の強弱情報の他に偏波面の情報をも安定に長尺伝送可能とするように設計された光ファイバであり、光干渉や偏波を利用した計測⁹⁾、コヒーレント通信¹⁰⁾、偏波多重通信¹¹⁾などへの応用が期待されている。

Refractive Index profile		Pulse distortion	* $\Delta n(\%)$	Core diameter (μm)	Band width (MHz · km)
(a) 	core cladding		~ 1	50	~ 10
(b) 	Light transmission		~ 1	50	100~10,000
(c) 			0.2~0.8	< 10	> 10,000

* $\Delta n(\%)$: Relative refractive index difference between core and cladding



n_1 : Core refractive index, n_2 : Cladding refractive index

$$\Delta n = (n_1 - n_2) / n_1 \times 100 \quad (\%)$$

- (a) Step index multi mode type, (b) Graded index multi mode type
- (c) Single mode type

Fig. 1.1 Types of optical fiber

Table 1.1 Types of image fiber

Type	Manufacturing method	Material	Properties
 Bundle type	Layering method	Multi component glass Silica glass Plastics	Flexible Short length
 Multi core fiber type	Multi fiber method	Silica glass	Long length Small diameter Semi-flexible

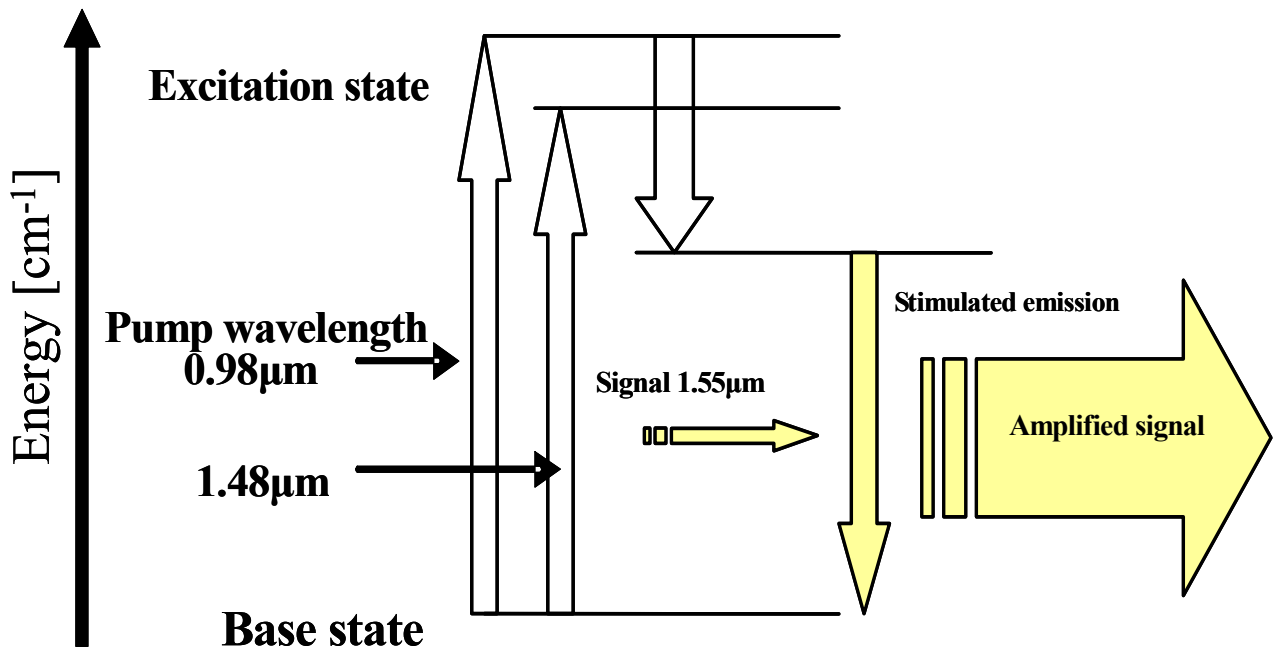


Fig.1.2 Principle of EDF

1.3 石英ガラス光ファイバの問題点と本研究の目的

1966年に Kao ら¹⁾によって石英ガラス光ファイバの実用化の可能性が示唆されて以降、1970年代に実用化開発の波が押し寄せ、そして1980年代に実用化されて以降、石英ガラスの特徴を引き出して、1.2節で説明した①通信用光ファイバ、②画像直接伝送用光ファイバ、③機能性光ファイバ、といった石英ガラス光ファイバの3大適用領域が形成されるに至った。そして、一度実用化してしまえば、その利便性は忘れ去られることは無く、次から次へと出されるさまざまな要求に合わせて性能の向上が期待されるようになり、高度な適用分野への期待は絶えることは無い。

とりわけ、石英ガラス光ファイバはその石英ガラスのもつ「低損失光伝送性」、「高耐環境性」という2大性能をさまざまな工夫と改善を凝らすことで、石英ガラス光ファイバの種々への分野適用が可能となってきた。

しかしながら、これら2大利点的性能も、それぞれ以下のような適用要求に対する高まる期待と、解決すべき技術的問題点があった。

- 1) 長距離・大容量光通信の世界においては、Er 添加ファイバ光増幅器 (EDFA) や Raman 増幅器のような光増幅技術¹²⁾が発展を遂げた段階に入ってもなお、ビットレートを増加させながら伝送距離を伸ばそうとするためには、光ファイバの伝送損失は常にシステム構成上の制限条件となるため、さらなる伝送損失の低減化が望まれており、高まる期待は留まることはない。
- 2) 一般的にガラスは不純物が混入すると耐環境性が劣る。特に放射線などの存在環境における光伝送損失の低下は著しく、多成分ガラスや、耐環境性に優れるとされる石英ガラスにおいても Ge など添加剤による放射線誘起光伝送損失への影響は大きい¹³⁻¹⁷⁾。そこで放射線施設や放射線などの存在する海底ケーブル敷設環境においては添加剤を含まない、純粋石英コア型の光ファイ

バが注目を浴びている。こういった環境にはデータ通信用単一モード光ファイバ、監視・制御システム画像直接伝送用光ファイバなどが使用されており、さらなる耐放射線性能の向上が望まれている。加えて、これら環境での γ 線 1R/h^(注)以下といった低照射線量率における25年といった長期にわたるシステム寿命を推定し保証する術は現在存在せず、これら技術・評価手法の開発が必要となっている。

(注) R：放射線の「照射線量」の単位名で「レントゲン」と呼ぶ。空気 1kg 中に 2.58×10^{-4} クーロンのイオンを作る γ 線あるいは X 線の量。
1C/kg=3876R。

1R/h は 1 時間あたりに 1R の線量を照射する照射線量率。

3) 波長多重 (Wavelength-Division-Multiplexing (WDM)) システムの開発と発展に伴い、最近では特にメトロネットワークや市街通信などの中、短距離システムに、低密度 WDM (Coarse WDM: CWDM) システムが低コスト方策を提供すると注目を集めている。近年、ITU-T 規格で分類される低 OH 吸収単一モード光ファイバの出現により、1360nm-1460nm 波長帯 (E-band) をもメトロエリアネットワーク CWDM 伝送に加えることが可能となった。しかしこの光ファイバに期待される伝送波長帯 E-band における伝送損失は H_2 との化学反応に特に敏感であり¹⁸⁻²⁰⁾、しかもこれまでに開発された光ファイバは耐 H_2 性に劣るコアに Ge を添加した形態のみであった。そこで、波長多重に必要な広帯域低損失と耐 H_2 性に優れた低 OH 吸収純粋石英コア単一モード光ファイバの開発への期待の高まりは大きい。

4) 近年のインターネットの容量拡大の要求に伴い、光ファイバによる信号伝送方式が拡大基調にある。したがって、光ファイバの耐曲げ損失性が FTTx (Fiber To The Home, Fiber To The Premise, Fiber To The Desk, 他) のようなアクセスネットワークや屋内応用設計にとって非常に重要な要素

を占めており、最近ではルースチューブケーブルの細径化や軽量化が強く求められている。値段重視のこの種の光ファイバは国際規格（ITU-T）の仕様範囲内でステップインデックス構造で実現し得る耐曲げ特性に強い光ファイバの開発が必要である。汎用 Ge 添加型光ファイバには不可能な、純粋石英の持つ屈折率分散特性の利点を生かしたステップインデックス構造での細径 MFD（Mode Field Diameter）による耐曲げ性に優れる光ファイバの実現にかかる期待は大きい。

- 5) 通信用石英光ファイバの技術を基に、石英ガラス画像直接伝送用光ファイバである画像光ファイバが開発されてきた²¹⁾。石英ガラス画像光ファイバは広い波長領域に亘って光の伝送損失が低く、また耐環境性にも優れる特徴を有している。そしてその特徴を生かして、光ファイバの全長は数 10 m のものが得られているが、画素数は 3 万から 5 万程度が一般的には最大領域であり工業用テレビジョン（Industrial Television (ITV)）の画質と比べ著しく劣るものであった。このような状況下、ITV のような電気機器では耐えられない高温、狭窄、悪条件下でも石英ガラス画像光ファイバの特徴である、耐環境性、小径寸法性に優れた特性を生かし、かつ ITV の高解像度を損なわない程度の高画質（25 万画素）を維持した監視、観察などを可能とする可撓性に優れた画像直接伝送路の開発への期待は大きい。

そこで本研究では、石英ガラス光ファイバの光伝送損失及び画像直接伝送特性に高性能化を図り、上述した問題点を解決することで、各分野への石英ガラス光ファイバの適用を可能とすべく、色々の分野への期待に貢献することを目的とする。

1.4 本論文の構成

第 1 章の序論に続き、第 2 章では、低損失、高耐環境性という石英ガラスの二

大特性に焦点をあて、通信用石英ガラス光ファイバにおいて、その極低損失記録の樹立、無中継可能伝送距離の延長、放射線施設や海底光ケーブルシステムなど方射線を中心とした環境下における寿命推定方法の確立を図り、純粋石英コア型光ファイバの優位性について述べる。第 3 章では、近年特にメトロネットワークや市街通信などで注目を集めている Coarse WDM（波長多重：wavelength-Division-Multiplexing）に必須である光低伝送損失の広帯域化に焦点を当て、ITU-T 規格 G. 652C, D に対して全適合の低 OH 吸収純粋石英コア型単一モード光ファイバの開発とシステム運用中、必須の要件となるその耐 H₂ 性能を中心に実施した検討と、広波長帯域無中継伝送を可能とする高効率 Raman 増幅の実現性について述べる。第 4 章では、従来の汎用ステップインデックス構造 Ge 添加コア石英単一モードファイバでは不可能な範囲の MFD の極細径化にて高耐曲げ性能を実現する光ファイバの開発と、それにより実現し得る FTTx 用細径・軽量光ケーブルの開発及びその特性について述べる。第 5 章では、通常のテレビ解像度に匹敵する 25 万画素という高解像度の、長尺・高可撓性石英ガラス画像光ファイバの開発、そして画質の定量評価を可能とする MTF（Modulation Transfer Function）手法の開発と 25 万画素画像光ファイバの画質定量評価、さらには開発した 25 万画素画像光ファイバを石油精製プラントの石油汚泥燃焼設備である回転炉内部の火炎燃焼状態監視への適用とその高信頼性・実用性について述べる。第 6 章では、画像光ファイバの放射線施設での使用寿命の延伸について、(1)ファイバそのものの耐放射線性能の向上、(2)外部付帯技術によるファイバ寿命延伸技術（「光ブリーチング効果」の利用）の開発の 2 面からの検討結果について述べる。第 7 章では、本研究全体について総括する。

第 1 章の参考文献

- [1] K.C.Kao and G.A.Hockham “Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies” Proc.IEE Vol.113,No.7, pp.1151-1158,July(1966).
- [2] F.P.Kapron, D.B.Keck, and R.D.Maurer “Radiation losses in glass optical waveguides” Appl. Phys. Lett., Vol.17, No.10, pp.423-425, Nov. (1970).
- [3] Y.Chigusa, K.Nakazato, S.Hirai, M.Watanabe, S.Suzuki, “ Fluorescence and amplification characteristics of Er doped fluoride fibers” Conference on optical amplifiers and their applications(IEEE),Technical digest series volume 13,Paper No.TuD4,pp.179-181,August(1990).
- [4] P.L.Chu, “Polymer optical fibers and waveguides: Technologies and applications”, Proceedings of European Conference on Optical Communication (ECOC), Th.2.3.5, (2004).
- [5] 野田健一, “光ファイバ伝送” ,電子通信学会編,pp.41-50 (1981) .
- [6] 細野 “イメージファイバの伝送特性” 電子通信学会論文誌、Vol.J66-C、No.11,pp.843-850(1983).
- [7] M.Onishi, T.Kashiwada, Y.Ishiguro, Y.Koyano, M.Nishimura and H.Kanamori, “ High-performance dispersion-compensating fibers ”, Fiber and Integrated Optics, Vol.16,No3,pp.277-286,June,(1997).
- [8] M.Onishi, T.Okuno, T.Kashiwada, S.Ishikawa, N.Akasaka and M.Nishimura, “Highnonlinear dispersion-shifted fibers and their application to broadband wavelength converter” , Optical Fiber Technology,Vol.4,pp.204-214 (1998).
- [9] 保立、日本の科学と技術、pp.40「計測の新しい分野と手法を拓く」(1981) .
- [10] 甘利省吾、“データ伝送” pp.139-148、丸善、(1971) .
- [11] 布下正宏、久間和生、“光ファイバセンサ” pp.50、情報調査社 (1985) .
- [12] V.Curri, “System advantages of Raman amplifiers ” NFOEC 2000, Technical Digest, B1.1,pp.39-45 Aug.(2000).

- [13] M. Josephine Yuen, “ Ultraviolet absorption studies of germanium silicate glasses” , Appl. Opt., Vol. 21, No. 1, pp.136-140,(1982).
- [14] H. Yamashita, H. Mitera and Y. Itoh, “ Radiation-induced loss and color-center concentration in optical fibers” , Electron. Lett., Vol. 19, No. 1, pp.11-12, (1983).
- [15] P. Dumas, J. Corset, W. Carvalho, Y. Levy and Y. Neuman, “Fluorine doped vitreous silica analysis of fiber optic preforms by vibrational spectroscopy” , J. Non-Crystalline Solids, Vol. 47, No. 2, pp.239, (1982).
- [16] Y. Tsunawaki, N. Iwamoto, T. Hattori and A. Mitsuichi, “ Analysis of CaO-SiO₂-CaF₂ glasses by Raman spectroscopy” , J. Non-Crystalline solids, Vol. 44, pp.369, (1981).
- [17] N. Shibata, M. Horiguchi and T. Eda, “ Raman spectra of binary high-silica glasses and fibers containing GeO₂, P₂O₅ and B₂O₃” , J. Non-Crystalline Solids, Vol.45, pp.115, (1981).
- [18] Jason, J., Ericsson, T. K., and Arvidsson, B. “Hydrogen ageing performance of various fiber types under different ageing conditions” , Proc. IWCS/Focus2003, pp.75-81(2003).
- [19] Chang, K. H., Kalish, K., and Pearsall, M. L. “New hydrogen ageing loss in the 1400 nm window” , Proc. OFC'99, PD22(1999).
- [20] P.J.Lemaire, “Reliability of optical fibers exposed to hydrogen prediction of long-term loss increases ” , Opt.Eng.Vol.30 No.6 pp.780-789 June (1991).
- [21] 吉村 耕三、“石英イメージファイバとその応用”、レーザー研究 Vol.11,No.10,pp.732-738、(1983).

第 2 章 石英ガラス光ファイバの極限的光低伝送損失の実現と耐環境性に関する検討

2.1 はじめに

光ファイバの伝送原理は基本的に光の全反射を利用する極めて単純なものである。しかしながら、光ファイバ伝送システムを実際の使用現場で実現するためには透明度の高いガラスを取得すること、実使用環境下に於ける安定した性能維持の実現が重要点となる。

本章では石英ガラス光ファイバの光伝送損失の低減化の歴史の中で、長く更新し得なかったその低伝送損失の記録を本研究では純粋石英コア光ファイバ (PSCF: Pure Silica Core Fiber) の設計・製造の最適化によって更新に成功し¹⁾、無中継海底光システムなどへの適用の優位性について明らかとした²⁾。

さらに、今回の低損失化の重要技術として導入した純粋石英コア光ファイバは光低伝送損失に加え、耐環境性にも優れる。この耐環境性の利点を適用する分野に原子力発電所や放射線研究施設などがある。こういった施設でデータ伝送、通信などに使われる光ファイバシステムは一般的に γ 線のような電磁放射線による低線量率放射線環境下における長期信頼性が求められるため、「低線量率放射線による長期信頼性の評価手法の開発と耐放射線性能評価」が重要となるが、これまでこういった手法の開発の報告例は無い。また放射線研究施設では γ 線のような電磁放射線に加えて、中性子線のような照射物質への影響度の強い粒子放射線も環境に存在する場合があるが、これまで中性子線と γ 線による光ファイバの伝送損失増加特性の違いについての評価報告例は無く、本研究によって初めて、その影響度のファイバの種類による違いを評価し、純粋石英コア単一モードファイバの優位性を明らかにした³⁾。一方、太平洋横断ケーブルなどケーブル敷設領域に

も海底の Mn 塊などからわずかながらも放射線を発している領域を通過させなければならぬ箇所もあり、また長期間にわたり閉じ込められたケーブル内で発生する H₂ による光損失増加への影響も考慮する必要がある。低損失光ファイバ PSCF は海底光ケーブルシステムに広く導入され、Er 添加光ファイバ光増幅器 (EDFA) と併せて長距離海底光システムとして敷設される。海底幹線用光ファイバ PSCF についてはすでにこの海底の極微量放射線や水素による影響については問題ないことが確認されている^{4,5,6)} が、PSCF 光海底ケーブルシステムに組み込まれる光増幅用 Er 添加コア光ファイバについても併せて信頼性の評価が必要となるがこれを精度良く評価できる手法の報告例はこれまでなかった。本研究ではこれらファイバの耐環境長期信頼性評価手法を確立し、純粋石英コアファイバの優位性と、光増幅用 Er 添加コア光ファイバについてもその信頼性に問題が無いことを明らかとした^{7,8)}。

本章では以上のように、石英ガラス光ファイバの極限的光低伝送損失の実現と放射線を中心とした耐環境性能評価手法の確立について述べる。

本節に続き、2.2 節では石英ガラスの光伝送損失低減の歴史について述べる。2.3 節では純粋石英コアシングルモード光ファイバ (PSCF) の構造設計と極低損失記録更新を果たしたファイバの伝送特性について述べる。2.4 節では汎用単一モード光ファイバと PSCF の無中継光伝送可能距離のシミュレーション比較を実施し、PSCF の優位性を示すと同時に PSCF とラマン増幅の組み合わせの優位性を示す。2.5 節では PSCF の放射線施設における光伝送損失への長期信頼性に関する検討と、光増幅用 Er 添加光ファイバの海底環境における長期信頼性に関する検討について述べる。2.6 節では本章の要約を行う。

2.2 石英ガラス光ファイバの光伝送損失低減の歴史

低損失光ファイバは今や情報・通信システムに無くてはならない存在になっている。特に海底ケーブルのような超長距離伝送システムには超低損失光伝送が極

めて重要な要素となる。

物質中を光の全反射を利用して伝播させる理論は古くから知られているがさまざまな問題点があり、通信への実用を提唱する研究者はなかなか現れなかった。

光ファイバ通信の実用化に向けての画期的提唱は1966年に Kao らの研究成果により初めて報告された⁹⁾。それは石英ガラス中の不純物を除去することにより低損失な光通信用伝送媒体が得られる可能性があることを示した「光通信」という大きな夢の実現に向けた画期的な提唱であり、この分野の世界の注目を浴びた。この可能性の提唱を受けて、伝搬損失低減の研究を表 2.1 にまとめるが、これは石英ガラス光ファイバの低損失化に向けた研究の幕開けとなった。

1970年には Corning Glass Work 社の Kapron らによって Chemical Vapor-phase Deposition (CVD)法によって 20dB/km の低伝送損失石英ガラス光ファイバの試作に成功した¹⁰⁾。1974年には AT&T の Bell 研究所の MacChesney らによって、Modified Chemical Vapor-phase Deposition (MCVD)法が開発され、 $1.06\mu\text{m}$ において 2~3 dB/km の低損失石英ガラス光ファイバの試作に成功した¹¹⁾。その後、NTT の Horiguchi らは MCVD 法を使用して、石英ガラス中の水酸基の低減を図ることを試み、1976年には、 $1.2\mu\text{m}$ の波長において 0.47dB/km の低損失石英光ファイバを得ることに成功した¹²⁾。さらに1979年には NTT の Miya らは光ファイバの構造不整を大幅に除去することに成功して、 $1.55\mu\text{m}$ の波長において 0.20dB/km という理論限界に近接する低損失 Ge 添加石英コア単一モードファイバ (Ge-SMF) を開発した¹³⁾。

以上のように、これまでの光ファイバの低損失化が、金属不純物や水酸基という「不純物の低減」と「光ファイバの構造上の不整の低減」を図ることにより達成されてきた。そしてさらにこれ以上の低損失化を達成するためには、コアにおける Rayleigh 散乱損失の低減化が必要な段階に入っていた。そこで住友電気(株)の Kanamori らは Rayleigh 散乱損失に寄与の大きなコア中の Ge を除去することに着目した。そして彼らはコアを全くの純粋石英とし、コア、クラッドに必要な屈折率差をクラッドに弗素を添加することでコアよりも屈折率を低下した構造の単一モード光ファイバの試作に成功した。これによりコアか

ら Rayleigh 散乱損失に影響を与える Ge を除くことで、1986年に $1.55\mu\text{m}$ の波長にて 0.154dB/km という超低損失光ファイバの試作に成功した¹⁴⁾。

以下本研究で成功する伝送損失の限界更新が達成され得るまではこの $1.55\mu\text{m}$ の波長における 0.154dB/km という記録が16年間にわたり更新されることは無かった。しかしながら、その間1990年代に入って、Er 添加ファイバ光増幅器 (EDFA) や Raman 増幅器のような光増幅技術¹⁵⁾が劇的な発展を遂げた段階に入ってもなお、ビットレートを増加させながら伝送距離を伸長するために、光ファイバの伝送損失は常にシステム構成上の制限条件となるため、さらなる伝送損失の低減化が望まれ続けている。

Table2.1 Progress of optical fiber in attenuation

Year	Loss(dB/km)(Wavelength(μm))	Ref.
1970	20	Corning[2]
1974	2~3 (1.06)	ATT, Bell Lab[3]
1976	0.47 (1.2)	NTT, Fujikura[4]
1979	0.20 (1.55)	NTT[5]
1986	0.154 (1.55)	Sumitomo[6]

2.3 極低損失純粋石英コア単一モード光ファイバ(PSCF)の設計と特性

2.3.1 極低損失 PSCF の構造設計

本研究の試作方法において、極低損失の純粋石英コア単一モード光ファイバ (PSCF) の試作に成功した。極低損失と言う利点を最大限に引き出し得る光ファイバ通信システムとして海底などの無中継光伝送システムが挙げられる。その

ため、今回、極低損失光ファイバを開発するにあたり、その構造設計をこの無中継光伝送システムの無中継距離を最大限伸張できるよう留意しながら設計した。

無中継距離の伸張のために、低損失に加え、大容量光の入射において通信に支障を来たす非線形現象を抑える方法を考慮する必要がある。そこでこの非線形現象を低減するために PSCF のコア有効断面積 A_{eff} を通常型 PSCF よりも拡大した。図 2.1 に今回設計したディプレストクラッド構造の PSCF の屈折率分布を示す。ディプレストクラッド構造はコア拡大光ファイバにおいて、コアに光を封じ込めることで曲げ特性を改良するために用いた¹⁵⁾。構造パラメータは試作において、「比屈折率差」^(注)を Δn と記述すると、弗素添加石英第一クラッドのを Δn_1 と記述し、 $\Delta n_1=0.32\%$ 、弗素添加石英第二クラッドの比屈折率差を Δn_2 と記述し、 $\Delta n_2=0.26\%$ とした。

(注) 比屈折率差の定義

コアである純粋石英の屈折率を n_0 とし、第一クラッドの屈折率を n_1 、第二クラッドの屈折率を n_2 とする。

比屈折率差 $\Delta n(\%)$

第一クラッド比屈折率差 $\Delta n_1=(n_0-n_1)/n_0 \times 100(\%)$

第二クラッド比屈折率差 $\Delta n_2=(n_0-n_2)/n_0 \times 100(\%)$

表 2.2 に PSCF の 1550nm におけるファイバ特性の概略を示す。コア有効断面積 A_{eff} は $118 \mu m^2$ と大きい。従来型の $0.154dB/km$ 光ファイバ⁴⁾は、モードフィールド径 MFD が $9.5 \mu m$ でステップインデックス型屈折率分布形状であり、今回の試作ファイバの MFD は $12.2 \mu m$ と大きいため、ディプレストクラッド構造とした。以上により今回の試作ファイバの構造は大容量長距離通信に適した構造となった。

2.3.2 極低損失ファイバの光伝送損失特性

図 2.2 に 2.3.1 節で設計し試作したファイバの光伝送損失波長特性を示す。純粋石英コア型光ファイバの設計・製造の最適化によって、波長 1310nm において 0.265dB/km、そして波長 1570nm において 0.148dB/km という 1986 年から 16 年間更新されなかった極低損失の記録を更新することに成功した。

損失波長特性は ITU-T,G.650.1(06/2004)に測定法として規定されているカットバック法を用いて測定した。測定の繰り返し再現性は光源の安定性、光強度測定器の安定性、測定におけるファイバの入出力端接続の繰り返し再現性に依存する。今回の評価測定系において、全体繰り返し再現性は±0.005dB 以内であることを確認した。測定ファイバ長が 10km 以上（実測長 11.3km）であることを考慮すれば、損失測定の繰り返し再現性は±0.0005dB/km よりも良いものと考えられる。繰り返し再現性をさらに改善するために、4 回の測定の平均値を損失測定値として採用することとした。平均値を用いることで繰り返し再現性は±0.00025dB/km 以内に改善される。損失測定精度に影響を与えるもう一つの要素にファイバ長の計尺精度がある。今回、ファイバ長は±0.05%よりも良い精度で測定されている。ファイバの伝送損失が 0.2dB/km 以下であることを考慮すれば、dB/km 単位での損失測定精度は±0.0001dB/km 以内となる。以上より、伝送損失測定の全体精度は±0.00035dB/km よりも良い精度が確保できることがわかる。これにより、本研究による測定において、0.001dB/km 階級の損失測定値差の優位性の有無を議論するに十分な精度が考慮されていることが確認できた。

極小値付近の詳細な損失波長特性を図 2.3 に示す。2nm ピッチで平均値を打点し曲線補間を行った。

1570nm 付近で 0.148dB/km の極低損失値が得られた。測定に際してはファイバはボビン巻き時の曲げに起因する損失増加を防ぐために束状態で測定した。束状態は側圧を開放するルースチューブケーブル（チューブの中に光ファイバを束縛しない解放状態で挿入し、そのチューブをより合わせてケーブル化するケーブル）の状態に匹敵する。伝送損失の構成要素を極小損失値の得られた波長において解析し、結果を表 2.3 に示す。光ファイバの損失要因を分析するために、通常、損

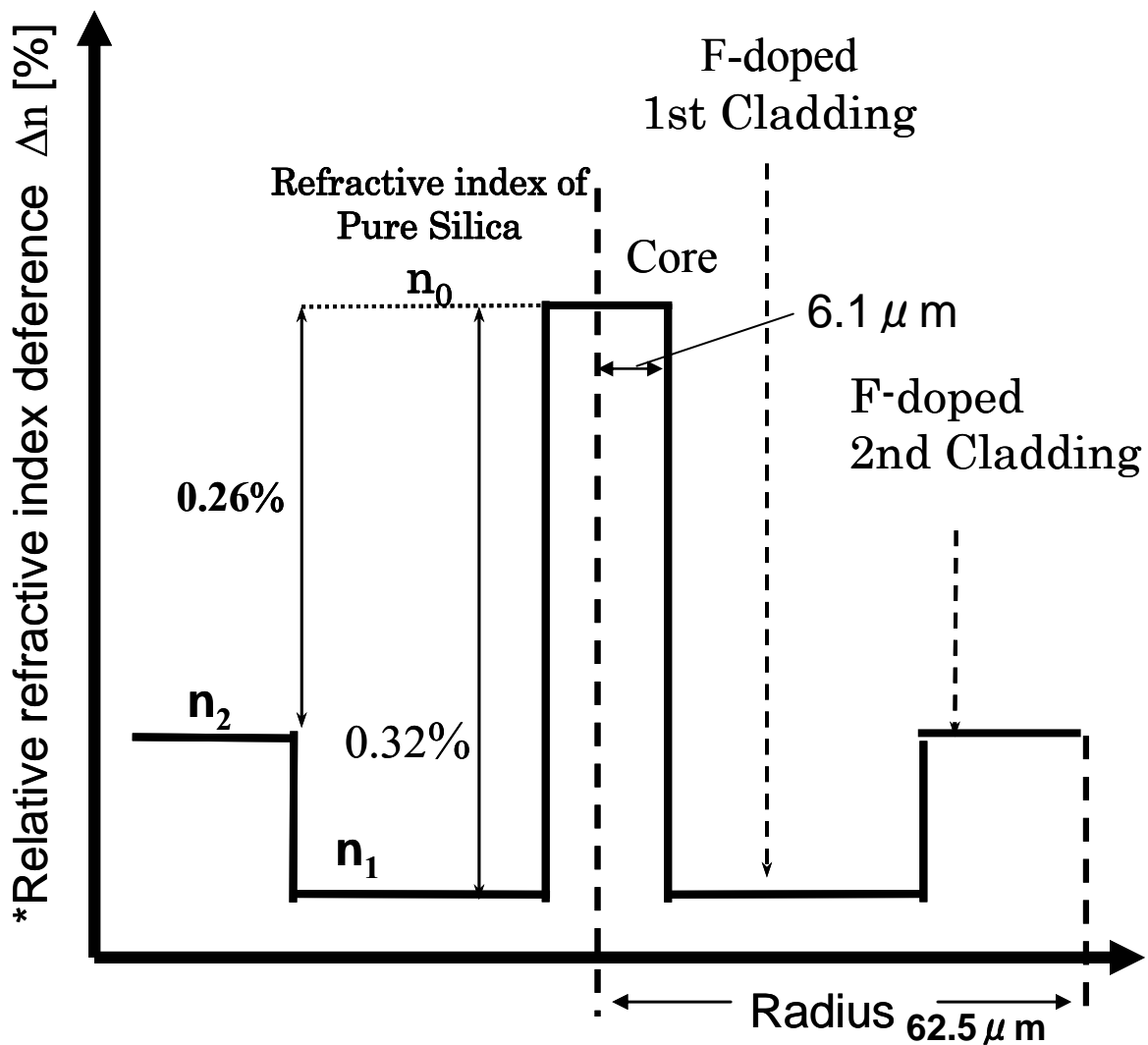
失波長特性を式（１）のモデルに当てはめることが行われる。

$$\text{伝送損失} = A / \lambda^4 + B + C(\lambda) \quad (1)$$

ここで λ : 波長、 A : Rayleigh 散乱係数、 B :定数、 $C(\lambda)$: 波長依存関数。

式（１）の第１項は Rayleigh 散乱損失値である。これはガラス中の微視的な誘電率揺らぎによる散乱損失である。第２項は構造不整損失と呼ばれ、コアとクラッドの界面の凹凸などによる散乱損失であるとされている。第３項はその他の損失を示す。その他の損失とは波長 $1.38 \mu\text{m}$ などにピークをもつ OH 吸収損失や、波長とともに増大する赤外吸収損失、マイクロバンド損失などがある。今回得られた極低損失を式（１）に当てはめた波形解析により表 2.3 の結果を得た。試作ファイバ PSCF の Rayleigh 散乱損失値は波長 1570nm において 0.123dB/km である。この値は Ge 添加コア型の汎用単一モード光ファイバ (Ge-SMF) の典型値 0.155dB/km よりも著しく小さい。Rayleigh 散乱損失における差は純粋石英コアの利点を表す。極小損失における OH 吸収の裾の影響度は 0.002dB/km と見積もれる。このことは、今回の試作ファイバから OH を取り除くことができれば 0.146dB/km の極小値を実現できる可能性を示していると言える。他の構成要素として構造不整が 0.004dB/km と低く、赤外線吸収は 0.019dB/km となっている。

今回の試作 0.148dB/km を得るに至るその直前において実施した試作においても 0.151dB/km という極低損失値を得ており¹⁶⁾、この両試作ファイバの差は主に OH 吸収損失と考えられるが、両試作ファイバとも従来の記録 0.154dB/km ¹⁶⁾を上回っており、今回の低損失記録の更新の再現性を示すものである。



***Refractive index difference $\Delta n(\%)$**
F-doped 1st cladding $\Delta n=(n_0-n_1)/n_0 \times 100(\%)$
F-doped 2nd cladding $\Delta n=(n_0-n_2)/n_0 \times 100(\%)$

Fig. 2.1 Schematic refractive index profile of PSCF

Table 2.2 Characteristics of fiber (1550nm)

Loss at 1550nm [dB/km]	0.150
Loss at 1570nm [dB/km]	0.148
Dispersion [ps/km/nm]	20
Dispersion Slope [ps/km/nm ²]	0.06
MFD [μ m]	12.2
Aeff [μ m ²]	118
Cutoff [μ m]	1.41
Bending loss [dB/m]	2.4

Table 2.3 Loss components at 1570nm [dB/km]

Total Loss	0.148
Rayleigh scattering	0.123
OH loss	0.002
Imperfection loss	0.004
Infrared loss	0.019

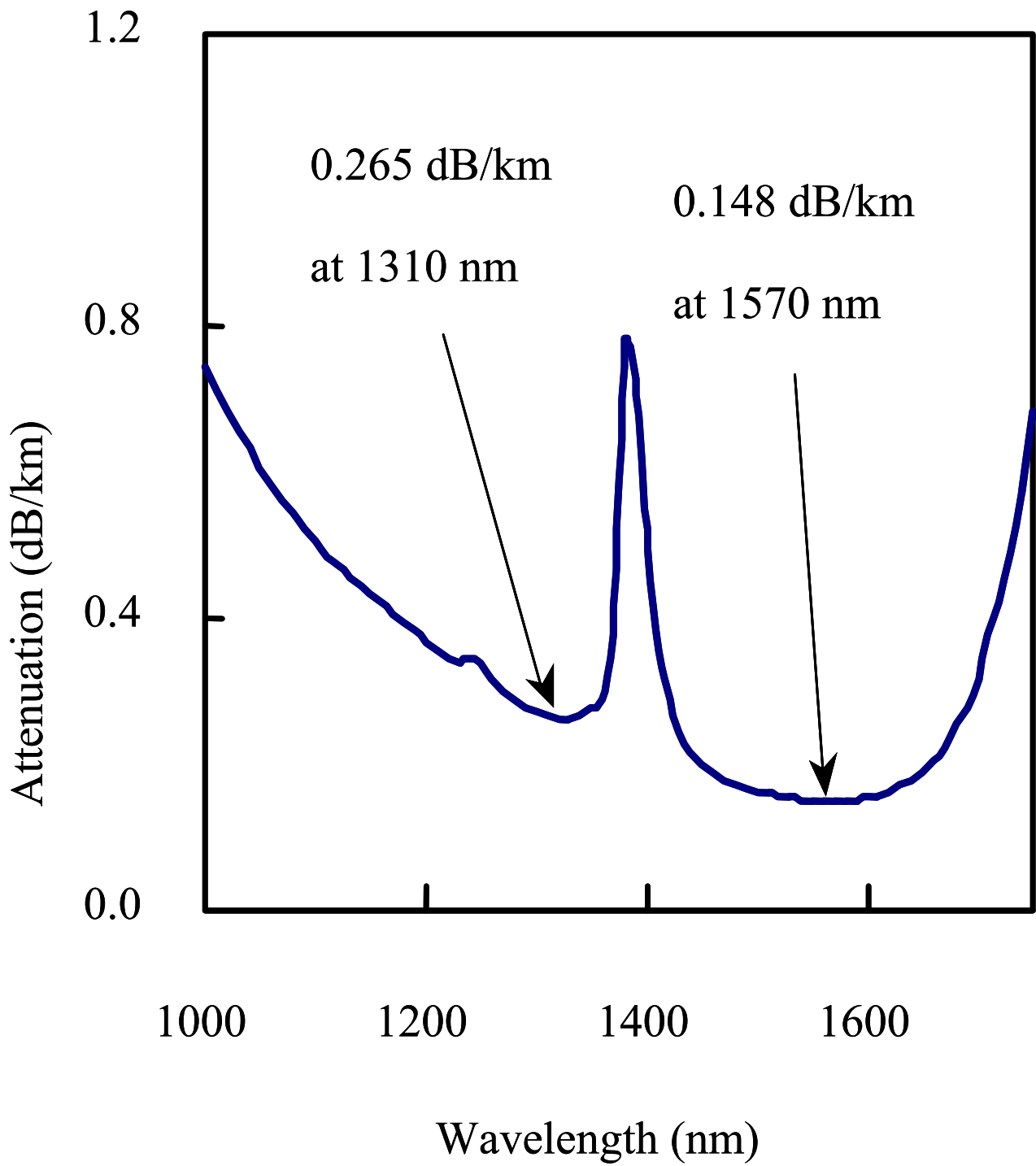


Fig. 2.2 Spectral attenuation of PSCF

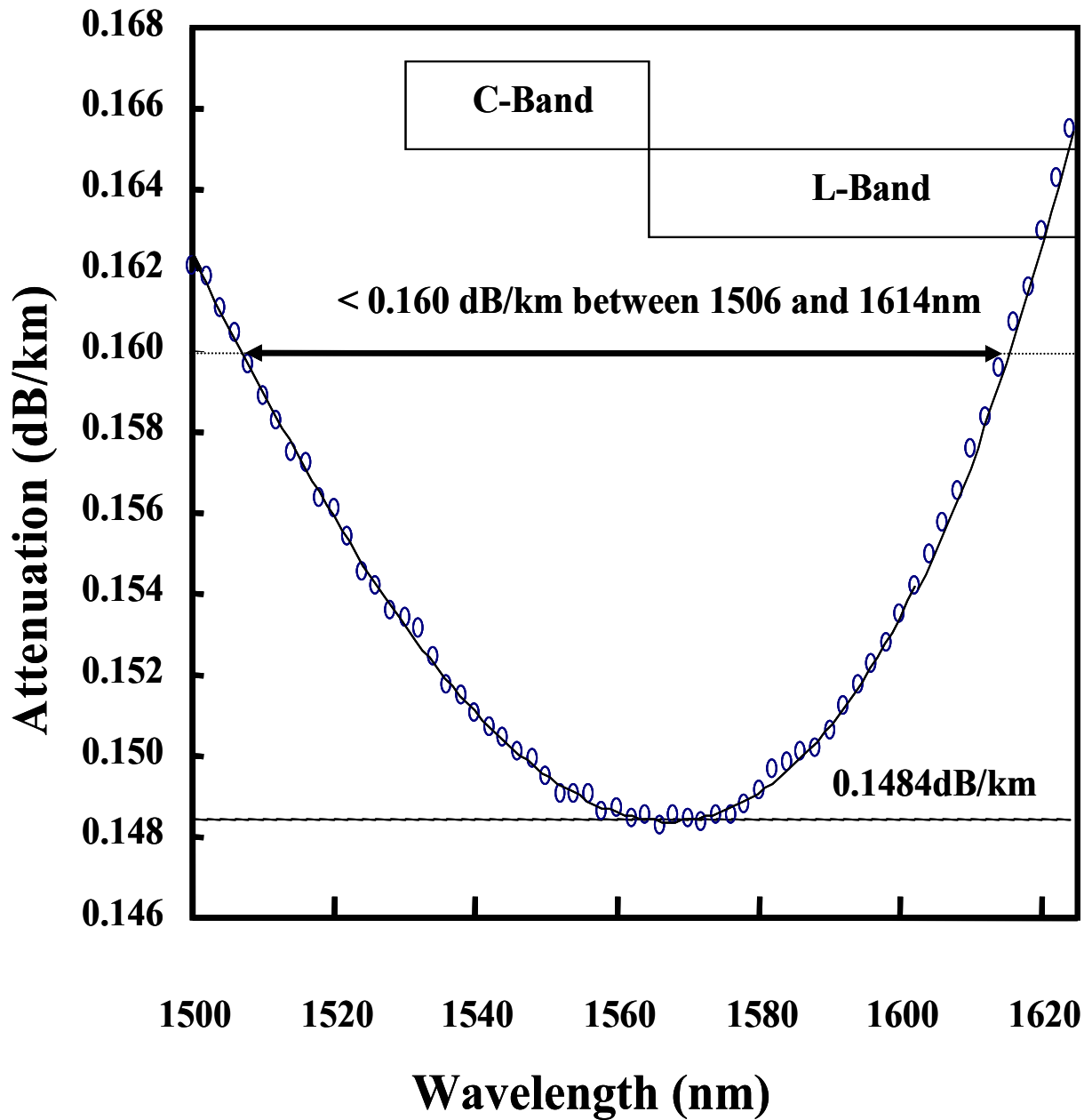


Fig. 2.3 Detailed spectral attenuation of PSCF [1500-1625nm]

2.4 汎用単一モード光ファイバと PSCF の無中継光伝送可能距離の模擬計算比較

本節では今回開発した低損失・低非線形性 PSCF の無中継光伝送システムでの適用の有用性について考察する。今回開発された低損失・低非線形性 PSCF の中心的利点は無中継最大伝送距離の伸張にある。前置増幅器として Er 添加ファイバ光増幅器 (EDFA) を使用したシステムと、後方向励起分布型 Raman 増幅器 (DRA) を使用したシステムについて最大伝送距離を比較した。最大伝送距離は許容される伝送損失値を単位長さあたりのファイバ伝送損失で除することによって定義される。許容される伝送損失値はファイバ入射最大光強度と前置増幅器前で要求される光強度との差で定義される。今回の推定評価において、ファイバ入射最大光強度はファイバの非線形性によって限定されるため、非線形重みを 1 rad になるように光強度を調整した¹⁷⁾。また、前置増幅器前の要求光強度は、前置増幅器の利得と雑音指数 (NF) に依存する。表 2.4 に低損失・低非線形性 PSCF と、比較に従来型汎用 Ge-SMF のファイバパラメータをまとめた。

前置増幅器として EDFA を使用するシステムに対しては PSCF、Ge-SMF ともに、前置増幅器の利得と NF をそれぞれ、15dB、6dB と仮定した。この評価において最大伝送距離に違いを与えるパラメータはファイバ損失とファイバ入射光強度である。今回の低損失・低非線形性 PSCF の大きな A_{eff} は非線形効果を抑え得るため、汎用 Ge-SMF 対比 0.5dB 高いファイバ入射光強度を実現できる。この高ファイバ入射光パワーと低光伝送損失により、図 2.4 に示すように EDFA を前置増幅器に使用したシステムにおいて最大無中継伝送長を 341km に伸長できることを明らかとした。一方、Ge-SMF は 256km に留まっており、PSCF の優位性を明確に示せた。

次に、DRA を前置増幅器に使用したシステムについて評価すべく、EDFA を取り除いて、DRA を前置増幅器として評価した。DRA の後方向励起光強度をファイバの Rayleigh 散乱により DRA が自己発振しない範囲で最大となるよう設定した。DRA の利得と NF は参考文献¹⁸⁾に基づく数値模擬計算にて決定した。PSCF

に対する、後方向励起光強度、作動・停止利得、有効 NF はそれぞれ、30.5dBm、29.8dB、−3.3dB となり、Ge-SMF にたいしては、それぞれ、30.0dBm、29.2dB、−3.4dB となった。EDFA よりも高い DRA の利得により、無中継最大伝送距離は PSCF に対して 404km、Ge-SMF に対して 304km と伸長できることを明らかとし、PSCF の優位性が示せた。

以上により、低損失・低非線形性 PSCF による無中継光伝送システムの最大距離の伸張への貢献を明らかにすることができた。

Table 2.4 The fiber parameters for the low loss PSCF and a conventional Ge-SMF as a reference

	PSCF	Ge-SMF
Loss at 1570 nm [dB/km]	0.148	0.196
Aeff [μm^2]	118	83

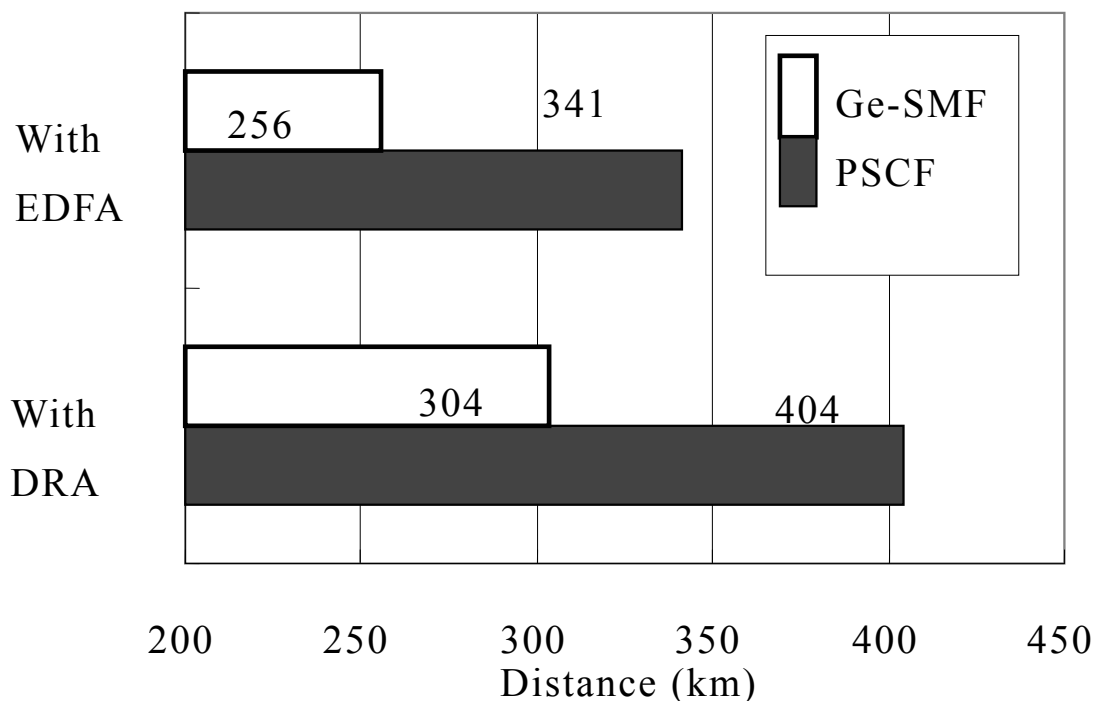


Fig. 2.4 Maximum transmission distance

2.5 光伝送損失への信頼性に関する検討

2.5.1 放射線施設光システムにおける PSCF の信頼性評価に関する検討

(a)照射実験の方法と結果

2つの型式の単一モード光ファイバが γ 線照射実験に供された。1つは純粋石英コア/弗素添加クラッドファイバ PSCF であり、もう1つは Ge 添加コア/純粋石英クラッドファイバの Ge-SMF である。表 2.5 にファイバ構造パラメータを示す(両ファイバの構造パラメータは表の値に揃えた)。これらファイバは γ 線照射室にて ^{60}Co を線源に γ 線を照射した。照射線量率(第1章 1.3節に注釈あり)を 10^2R/h から 10^6R/h とした。照射中、損失増加量は連続計測された。入射光強度は 20nW で、波長は $1.3\mu\text{m}$ とした。照射ファイバ長は線量率により増加損失にあわせて測定ダイナミックレンジを考慮し、 $30\text{--}100\text{m}$ で調整した。

さらに速中性子線(中性子線のうち、一般的に 0.5MeV 以上の大きな運動エネルギーを持つものを言う)の照射試験において 14MeV 中性子線による照射をこれら2種類のファイバに対して実施した。中性子線による伝送損失増加と γ 線によるそれを比較するために、照射エネルギーをあわせた照射試験を実施した。照射時間は速中性子線、 γ 線照射ともに 3.5h とした。速中性子束は $1.5\times 10^{14}\text{n/cm}^2$ (中性子束:単位面積を毎秒通過する中性子の数。ニュートロン/ cm^2 と呼ぶ。)で γ 線線量は $3\times 10^5\text{R}$ とした。

γ 線照射結果を図 2.5 に、中性子線照射結果を図 2.6 に示す。また表 2.7 に γ 線、速中性子線による光伝送損失増加量の比較を示す。

Table 2.5 Structural parameters of single mode fibers

Core diameter	8.5 μm
Outer diameter	125 μm
Relative refractive index difference	0.3%
LP₁₁ cut-off wavelength	1.20 μm
Mode field diameter	9.5 μm
Zero dispersion wavelength	1.30 μm

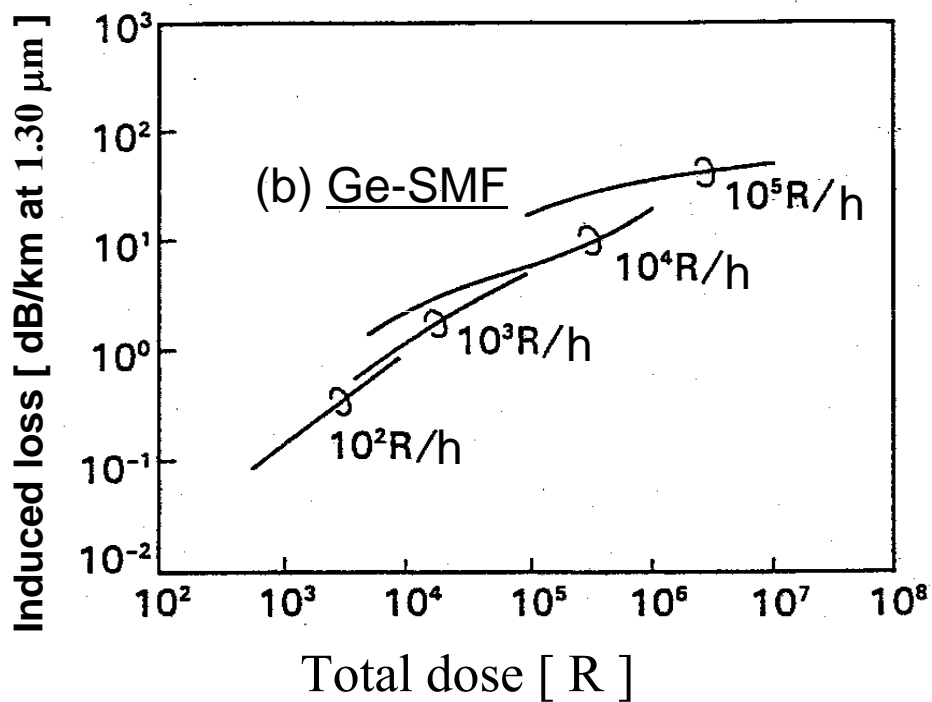
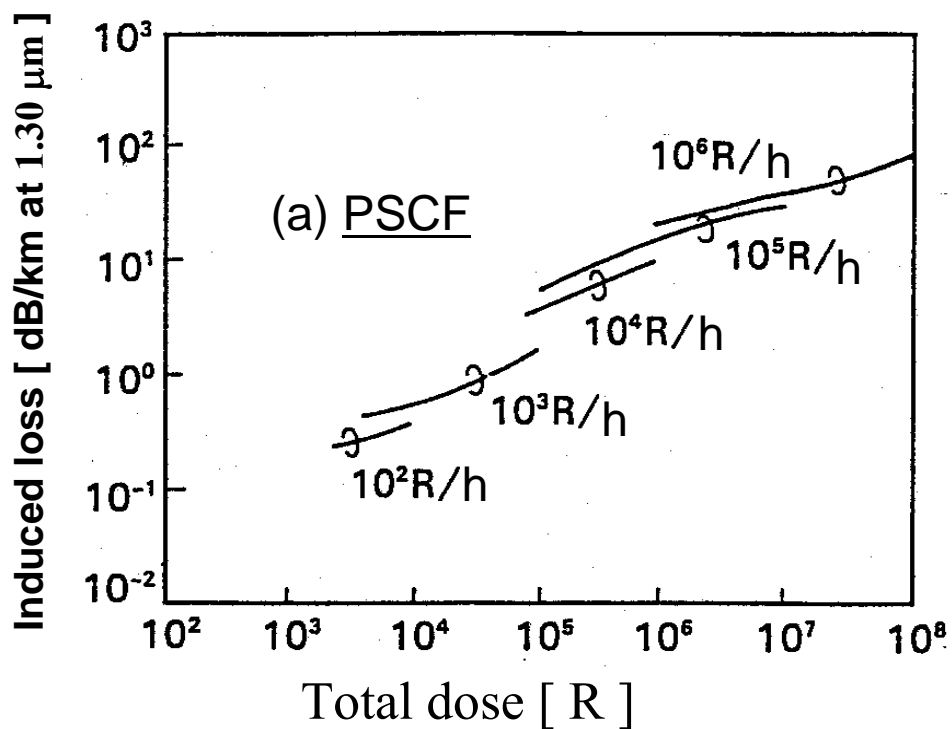


Fig. 2.5 γ -ray irradiation characteristics

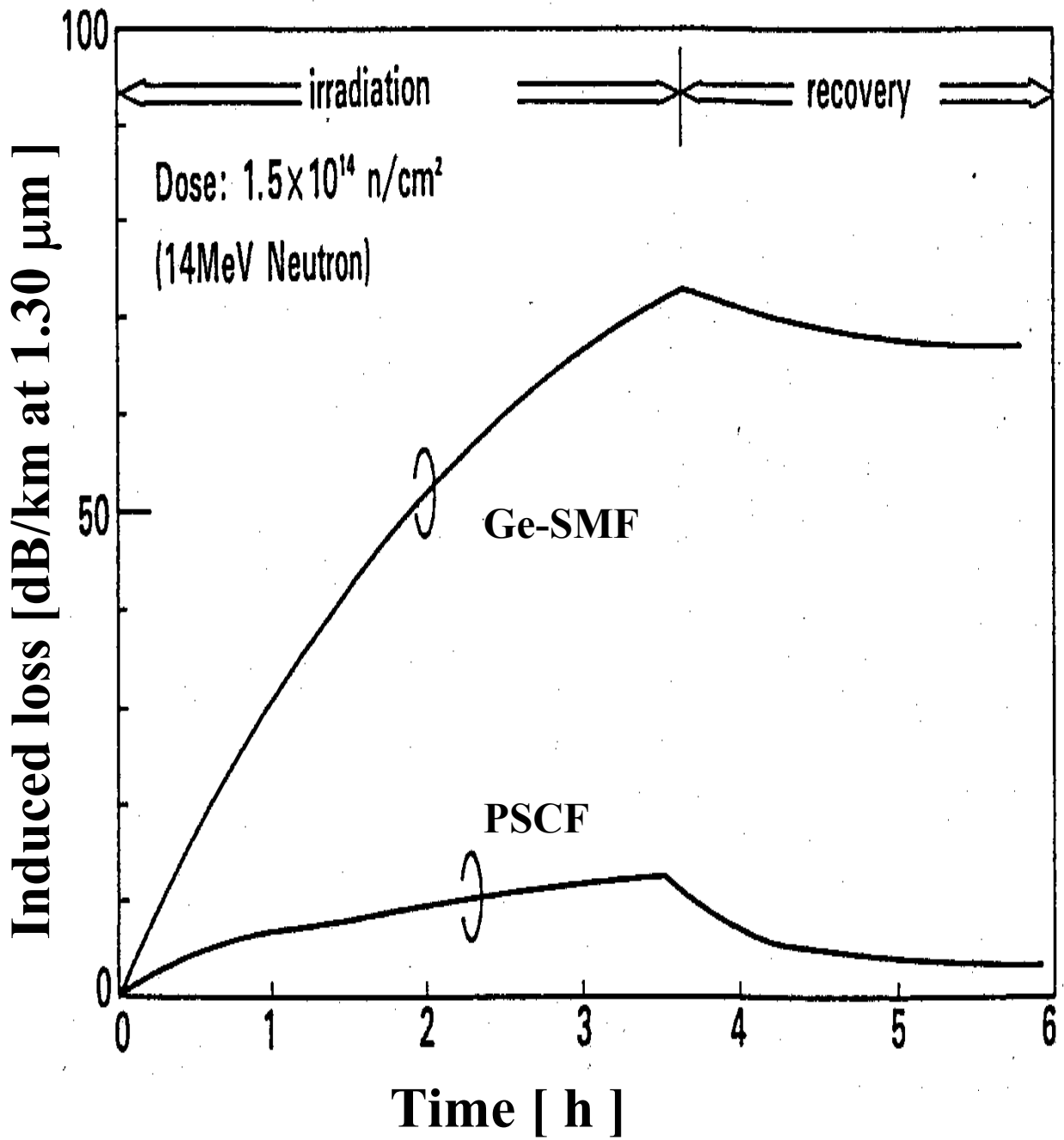


Fig.2.6 Neutron irradiation characteristics

Table 2.6 Comparison of neutron and γ -ray induced loss (at $1.30 \mu\text{m}$)

Neutron fluence: $1.5 \times 10^{14} \text{ n/cm}^2$ (3.5h irradiation)

γ -ray dose : $3 \times 10^5 \text{ R}$ (3.5h irradiation)

Fiber	Radiation	Initial loss (dB/km)	Induced loss (dB/km)	Loss after irradiation (dB/km)
PSCF	Neutron	0.47	12	12.47
	γ -ray	0.35	10	10.35
Ge-SMF	Neutron	0.40	74	74.40
	γ -ray	0.36	30	30.30

(b) γ 線、中性子線照射特性評価

図 2.5 に示す γ 線照射結果から γ 線に対する PSCF の光伝送損失信頼性に対する優位性が明確化された。

また図 2.6 に示す中性子線照射に対しても PSCF の光伝送損失信頼性に対する優位性が明確化された。

中性子線によって引き起こされる伝送損失増加機構は γ 線のそれとは異なるものと考えられるが、しかしながら同一照射エネルギー下で比較した場合、表 2.6 に示すように、Ge-SMF は中性子線誘起伝送損失増加量が γ 線のそれの 2 倍以上と明らかな大きさの違いを示したものの、PSCF についてはほぼ同じ損失増加量を示した。純粋石英コアの示すこの現象は大変興味深い結果であり、従来に報告例は無い。PSCF について γ 線のみならず中性子線についても大きな優位性が示された。今後、中性子線誘起損失増加について機構の解明に注目が集まるであろう。結果から、増加損失は回復はするものの非可逆性のものであると考えられる。

(c) γ 線低線量率・長期照射条件下での寿命推定方法の確立

低線量率下での寿命推定の信頼性は、実験で得られた高線量率、短時間照射の結果を分析し、如何に高精度に低線量率、長時間領域へ外挿するかによる。照射誘起光伝送損失は照射総線量のみならず線量率にも依存するという難問を抱える。これは図 2.5 における照射実験結果にも明らかに示されている。そこで、本研究において損失増加量を推定するために、損失増加量の照射総線量比(δ)の使用を試みた。

δ は式(1)で定義される。

$$\delta = \Delta \alpha / D \quad (1)$$

δ : 損失増加量の照射総線量比 [dB/km R]

$\Delta \alpha$: 照射誘起光伝送損失増加量 [dB/km at 1.3 μ m]

D : 照射総線量 [R]

δ の時間と線量率の依存性をそれぞれ図 2.7、図 2.8 に示す。図 2.7、図 2.8 において、 $\log \delta$ の $\log(\text{time})$ と $\log(\text{dose rate})$ に対する依存性の存在が確認できた。このことから、 δ を低線量率、長時間領域（実際のシステム使用期間を想定した年オーダーの時間領域）に実験で得た 100 時間までの明確な時間依存性結果に基づいて外挿することにより、低線量率、長時間（例：25 yr：一般的なケーブル保障寿命）の損失増加量が図 2.9 に示すように推定できる（損失増加量は $\Delta \alpha = \delta \times D$ として算出できる）。

表 2.7 に 1R/h \times 25yr の γ 線照射後の PSCF と Ge-SMF の損失増加量を示す。この結果から PSCF の放射線環境下における長期信頼性が確認できた。

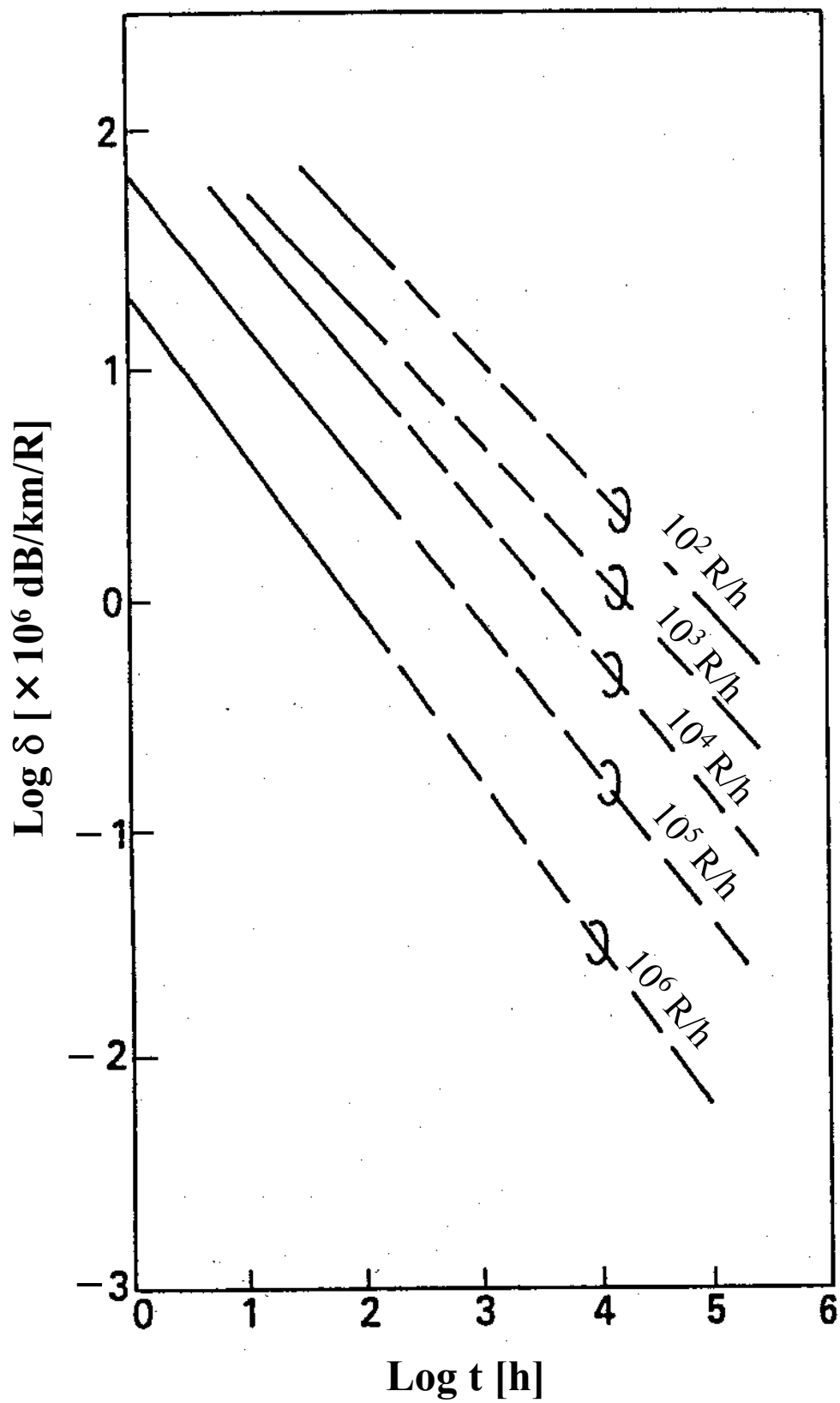


Fig.2.7 Time dependence of δ (PSCF)

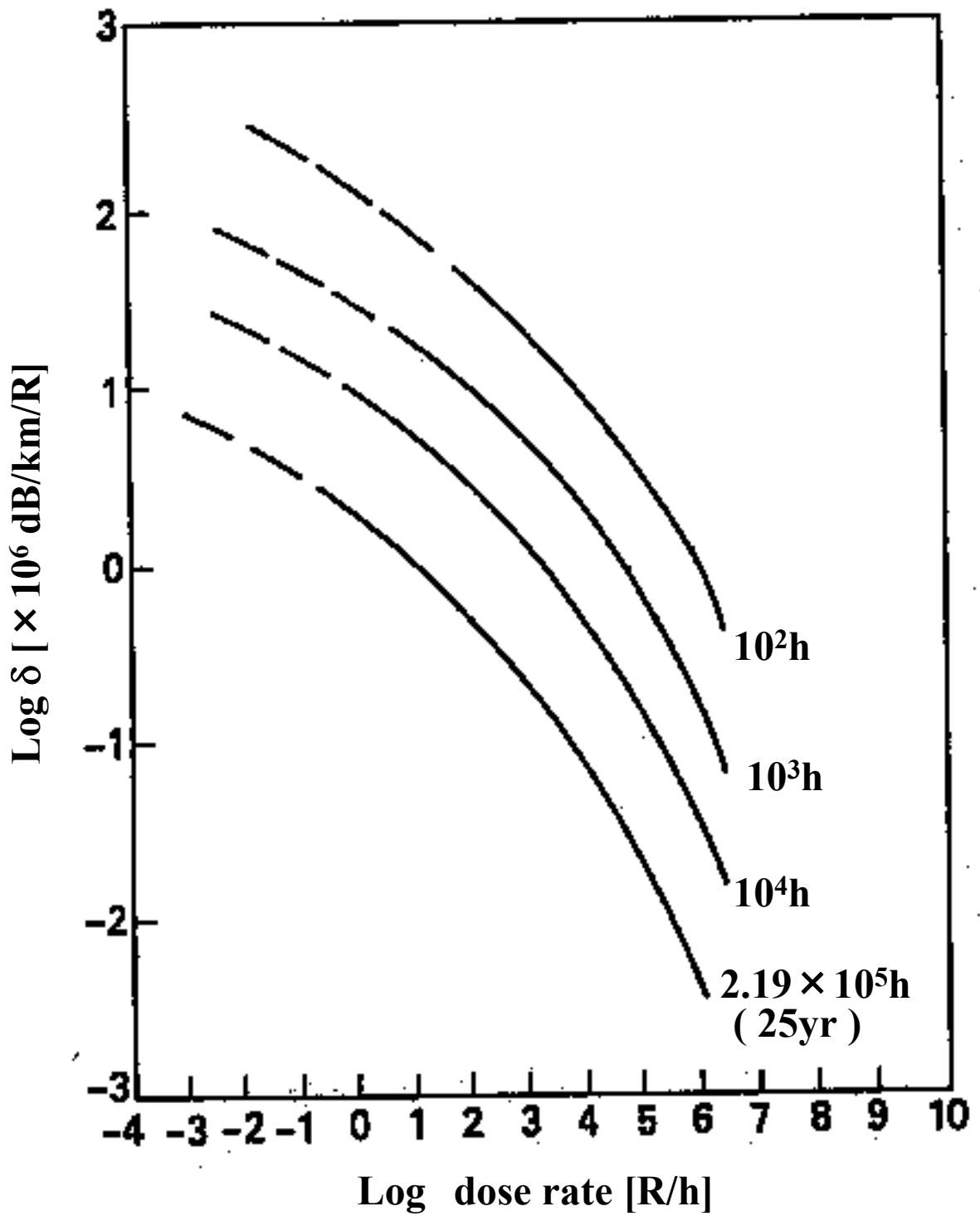


Fig.2.8 Dose rate dependence of δ (PSCF)

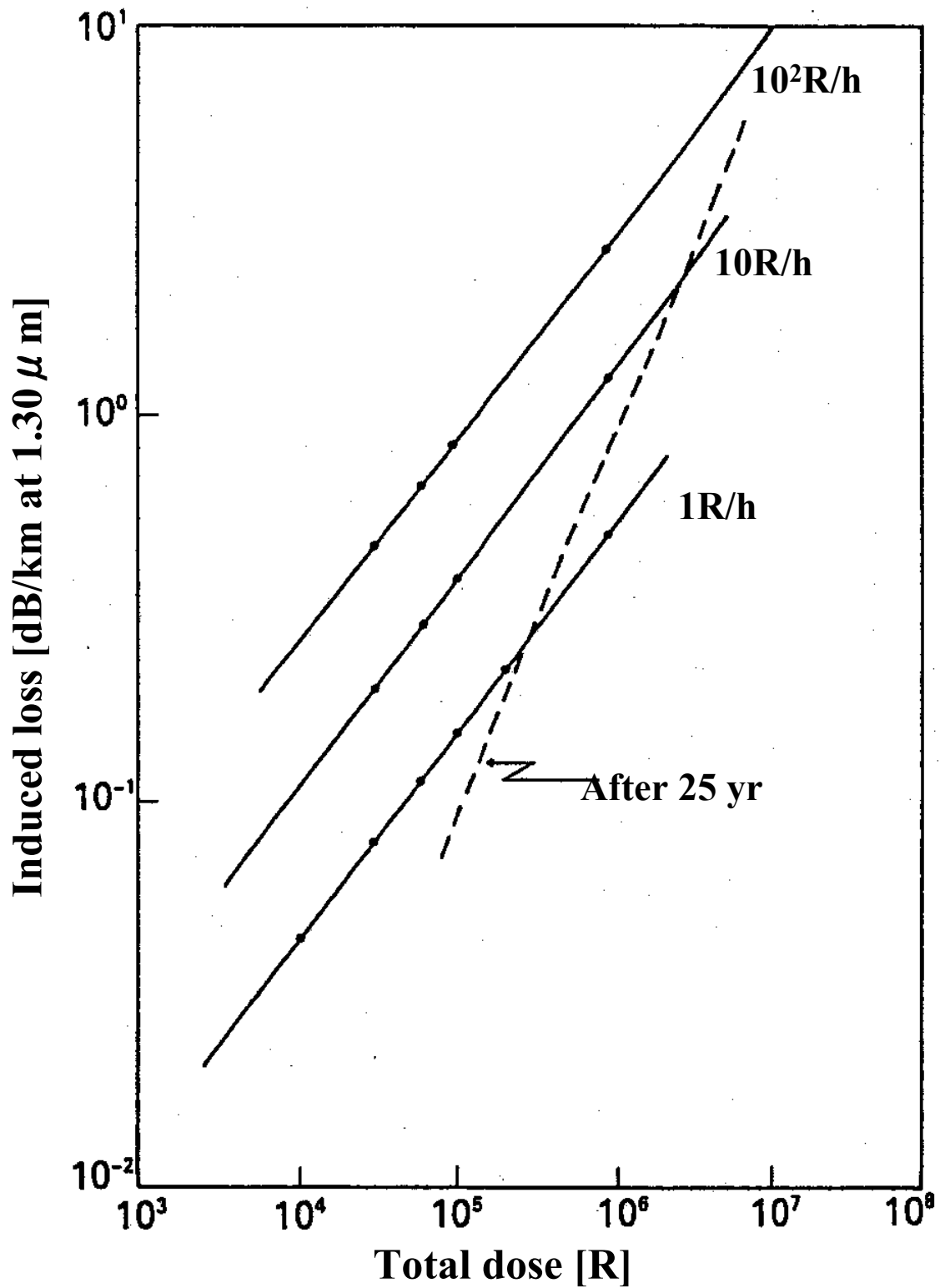


Fig.2.9 Estimation of induced loss after 25year (PSCF)

Table 2.7 Estimated loss after 1R/h × 25yr γ -ray irradiation (at 1.30 μ m)

Fiber	Initial loss (dB/km)	Induced loss (dB/km)	Loss after 1R/h × 25 yr irradiation
PSCF	0.35	0.39	0.74
Ge-SMF	0.36	18.5	18.9

2.5.2 光増幅用ファイバの耐 H₂・ γ 線特性と長期寿命推定法の確立

Er 添加ファイバ光増幅器 (EDFA) 用光ファイバ (EDF) の H₂ や放射線に対する影響評価に対する加速試験の結果はこれまでも幾つか報告されている^{20,21)}。しかしながら、これまでの報告では、寿命推定において、H₂ や放射線試験の開始直後のごく短時間の損失増加立ち上がり現象領域のデータを使用し、その後に移行する損失増加飽和現象領域のデータを考慮に入れていないものとなっているため、余りに悲観的な推定が報告されており、それは海底での実使用条件において長期間における損失の増加量は無視できないとするものであった。本項において、より高精度な推定法を見出し、加えて EDF に増幅効率を上げるために添加される Al の添加量の影響も明確化させることに成功して、結果的に海底での長期信頼性に問題のないことを明らかとした。以下にその検討結果を詳述する。

(a) 耐水素特性に関する検討

Er 添加光ファイバは H₂ 試験により、1.43 μ m に OH 吸収の成長が生じる。図 2.10 において 80℃、100℃、120℃ 中で 1 atm の H₂ に浸漬した時の 1.43 μ m の OH 吸収による光伝送損失増加量を対数スケールで浸漬時間の関数として表記した。図 2.10 でのそれぞれの損失増加量は十分な浸漬時間経過後はどれも直線で補間できる。例えば、1wt% の Al 添加 EDF に対しては、OH による損失増加量 Δα_{OH} は式 (2) で表せる。

$$\Delta\alpha_{OH} = 4.5 \times 10^4 \exp\left(-\frac{5.54[\text{kcal/mol}]}{RT}\right) t^{0.3} p^\chi [\text{dB/km}] \quad (2)$$

ここで R は気体定数 (1.987cal/(mol×deg))、T は絶対温度、t は水素浸漬時間、p は H₂ 分圧、χ は H₂ 分圧依存性を示す。式(2)に、従来より知られている水素分圧依存性 χ=0.5²²⁾を用いることにより、海底実使用条件下での損失増加量を予測することができる。式 (2) から求まる 1.43 μ m の OH 吸収損失増加量と、OH 吸収損失が 1.55 μ m へ与える影響率 (1.55 μ m 損失増加量 / 1.43 μ m 損失増加量 = 0.26 (実験値)) から 1.55 μ m における損失増加量を求めることができる。以上の結果の一例として Al1wt% の EDF について、25 yr、40℃、H₂ 分圧 0.001atm の条件下で使用した場合の波長 1.55 μ m での損失増加量はシステムでの一般的使用長 20m に対して 0.04dB とわずかであり、システムに問題を及ぼさない損失範囲内にあることが確認できた。

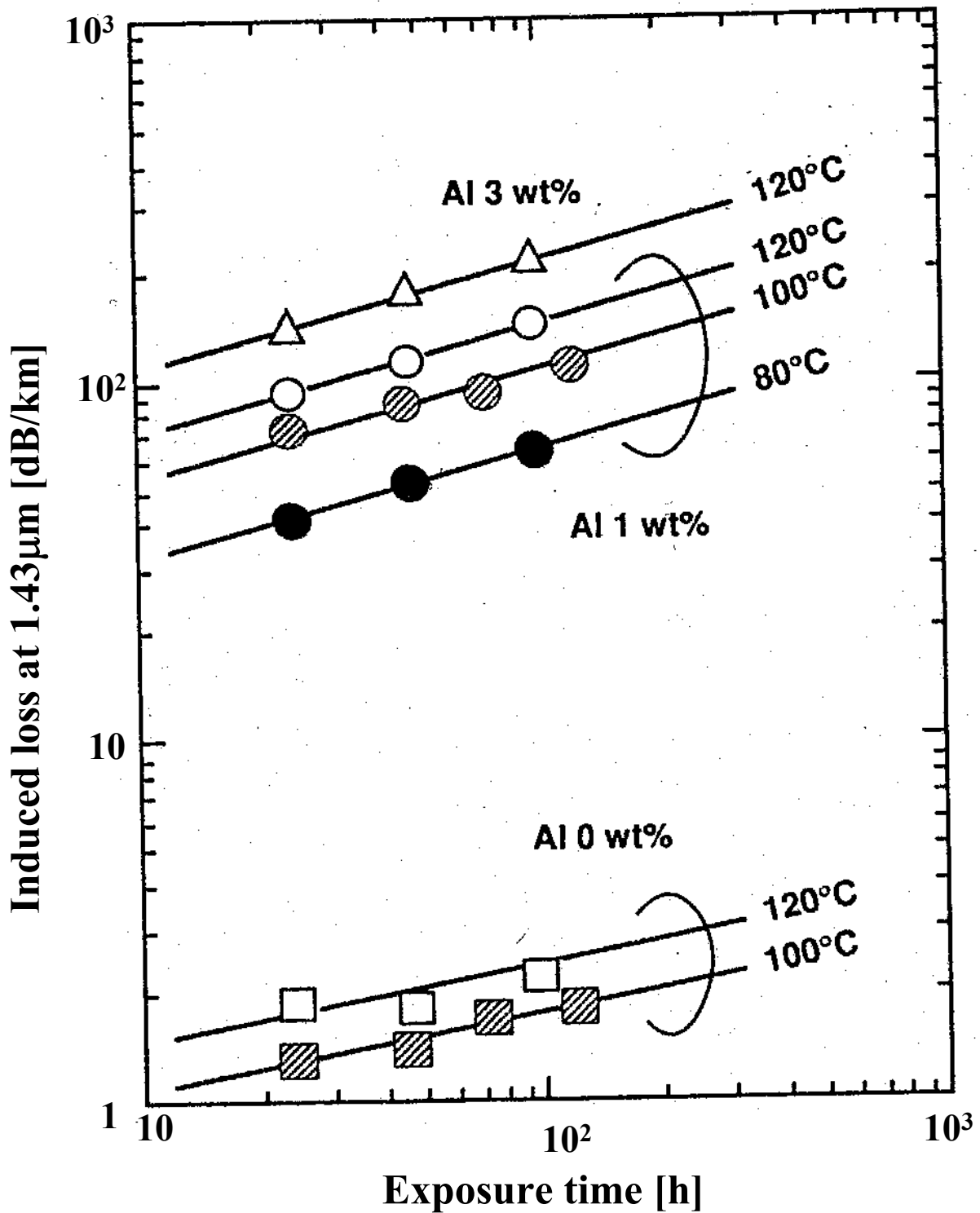


Fig.2.10 Time dependence of loss increase at 1.43 μm for Er-doped fibers with various Al-content levels exposed to 1-atm H₂ at high temperature

(b) 耐放射線特性に関する検討

検討(a)項と同じ3種類の同ファイバを19hの照射時間、15、 10^2 、 10^3 R/h、の照射線量率で γ 線を照射し、照射後の損失回復特性の評価も含め損失増加量を測定した。その結果を図2.11に示す。損失増加量測定波長は $1.3\mu\text{m}$ とした。これはErの波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯の吸収損失が大きいため $1.55\mu\text{m}$ では測定できないためである。

図2.11から明らかなように、損失増加は回復成分と非回復成分からなり、 10^2 R/h以下の照射線量率において生成される損失増加は非回復成分のみで構成されており、これは照射総線量にのみ依存して線量率には依存しないことを見出した。

図2.12にAl1wt%のEDFに対して非回復損失と照射線量の関係を示す。海底環境⁵⁾において存在するような極低放射線量率において長期間照射した場合の損失増加量が図2.12の関係から求められる。従来の報告は非回復成分のみならず、回復成分までも含めた方法で損失増加を見積もっていたため、悲観的に起こり得ない最悪の場合を想定した精度の悪さが欠点としてあったが、本研究では海底での極低線量率環境で考慮しなければならない非回復成分のみを使用して、損失増加推定をすることで精度の高い損失増加量の見積方法の確立に成功した。Alの影響に関して、図2.11に示すように(a)項で述べた耐水素特性と同傾向を示すことでわかる。

EDFの増幅特性に対する放射線の影響を評価するために、Al1wt%のEDFの照射前後の利得特性を評価した。 $1.48\mu\text{m}$ 、35mW励起条件で $1.55\mu\text{m}$ にて33dBの利得を照射前に確認した。図2.12に照射による利得劣化特性を示す。海底での最悪条件として見積もれる $0.4\text{R/yr}\times 25\text{yr}^{5)}$ の条件で、利得劣化は0.3dBと少なく、実用上の問題の無さを証明することに成功した。

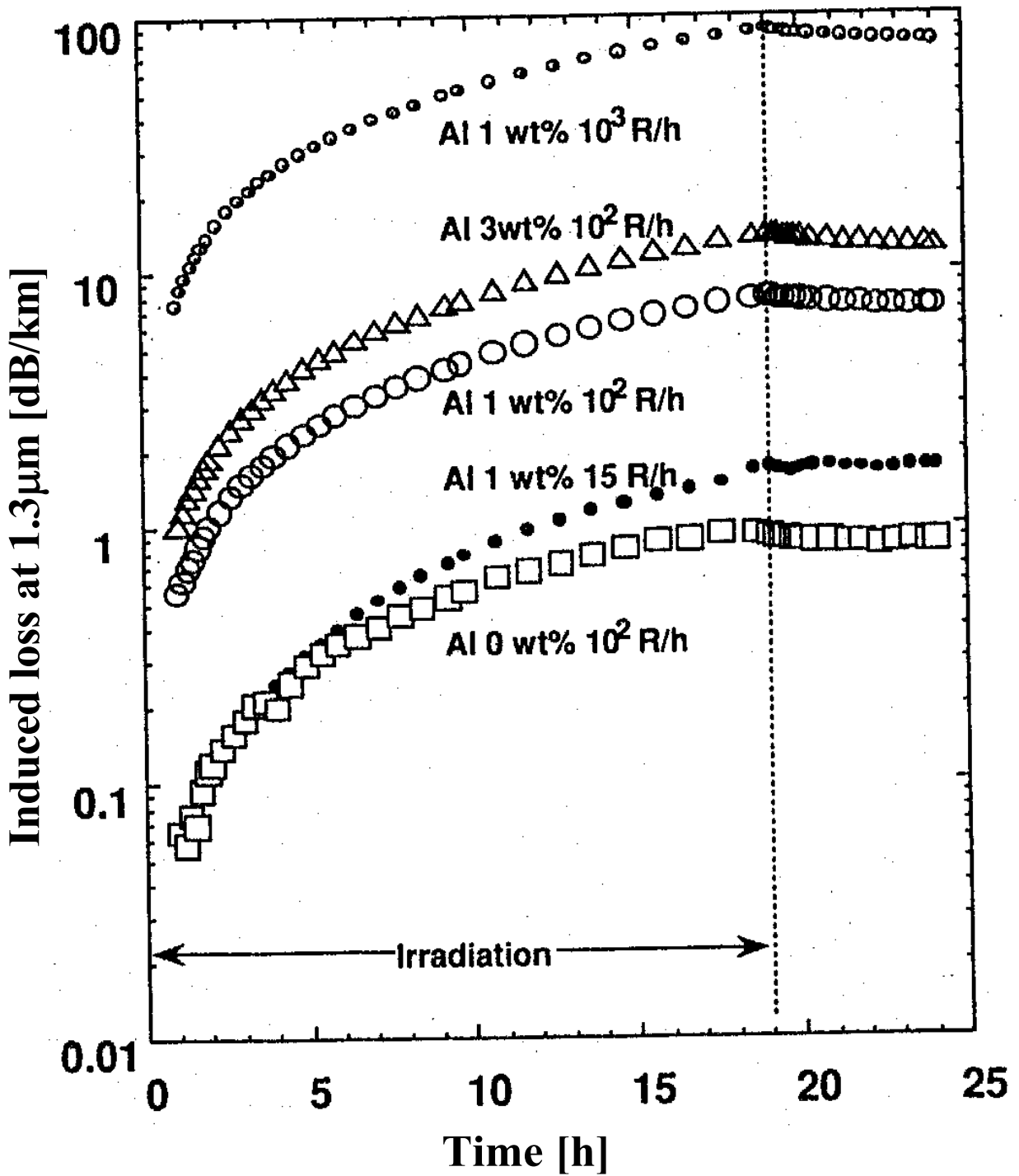


Fig.2.11 Time dependence of loss increase at 1.3 μm for Er-doped fibers with various Al-content levels exposed to γ-rays at dose rates of 15, 10², and 10³ R/h

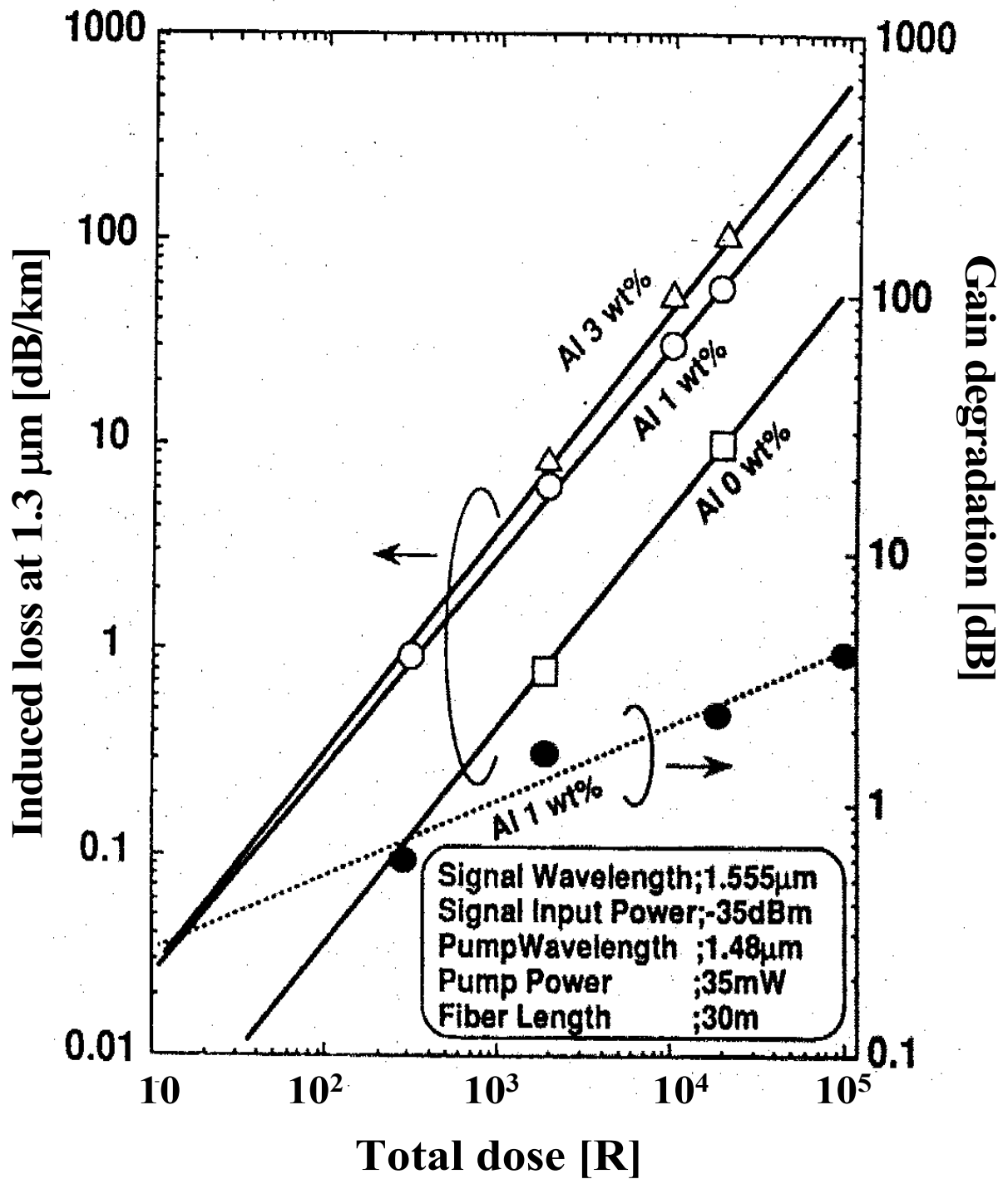


Fig.2.12 Total-dose dependence of loss increase and gain degradation of Er-doped fibers after exposed to γ -rays

2.6 まとめ

本章では低損失、高耐環境性という石英ガラスの二大特性に焦点をあて、通信用石英ガラス光ファイバの極限的光低伝送損失の実現と放射線を中心とした耐環境性能評価手法の確立について述べた。以下に本研究で明らかになった点を示す。

- 1) 純粋石英コア型光ファイバの設計・製造の最適化により、1986年から16年間更新されなかった光ファイバの極低損失値記録 0.154dB/km を更新することに成功し、 0.148dB/km という極低損失記録を樹立した。
- 2) 低損失光ファイバの利点を最大限引き出し得る適応例の一つに無中継光伝送システムが考えられる。本研究にて低損失・低非線形性純粋石英コア型光ファイバと前置増幅器に後方向励起分布型 Raman 増幅器を用いた無中継光伝送システムの無中継可能伝送距離について模擬計算を実施した結果、最大無中継距離は従来型汎用ファイバの限界距離 304km に対して、 404km まで伸張できることを明らかとし、低損失・低非線形性純粋石英コア型光ファイバの優位性を示した。
- 3) 光ファイバシステムの放射線施設などでの適用に対して、 γ 線のみならず、従来報告例の無い中性子線に対する影響をも明らかとした。また、放射線施設での通信用光ファイバの設置環境は低線量率・長期間（例： $1\text{R/h} \times 25\text{yr}$ ）であり、今回、損失増加量 $\Delta \alpha$ を照射総線量 D で除した $\delta = \Delta \alpha / D$ と線量率、照射時間の依存性を明確化し、その推定法を確立した。そしてこの方法を用いて純粋石英コア型の放射線環境での優位性を示した。
- 4) 低損失光ファイバ PSCF は海底光ケーブルシステムに広く導入され、Er 添加ファイバ光増幅器（EDFA）と併せて長距離海底光システムとして敷設され、光増幅用 Er 添加コア光ファイバについても併せて信頼性の評価が必要となるがこれを精度良く評価できる手法の報告例はこれまでなかった。本研究では光増幅用 Er 添加コア光ファイバについての耐環境長期信頼性評価手法を確立し、

その信頼性に問題が無いことを明らかとした。

第 2 章の参考文献

- [1] K.Nagayama, M.kakui, M.Matsui, T.Saitoh and Y.Chigusa,
“Ultra-low-loss(0.1484dB/km)pure silica core fiber and extension of transmission distance”, Electronics letters, Vol.38, No.20, pp.1168-1169,26th September(2002).
- [2] Y.Chigusa, Y.Yamamoto, T.Yokokawa, T.Sasaki, T.Taru, M.Hirano, M.Kakui, M.Onishi and E.Sasaoka, “Low-loss pure-silica-core fibers and their possible impact on transmission systems”, Journal of Lightwave Technology, Vol.23, Number 11, pp.3541-3550, November(2005).
- [3] Y.Chigusa, M.Watanabe, M.Kyoto, M.Ooe , T.Matsubara, S.Okamoto, T.Yamamoto, T.Iida, K.Sumita, “ γ -ray and neutron irradiation characteristics of pure silica core single mode fiber and its life time estimation”, IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol.35,No1,pp.894-897, Feb.(1988).
- [4] H. Kanamori, H. Yokota, G. Tanaka, M. Watanabe, Y. Ishiguro, I. Yoshida, T. Kakii, S. Itou, Y. Asano and S. Tanaka, ‘Transmission Characteristics and reliability of pure silica core single mode fibres’ Journal of Lightwave Technology, Vol. LT-4, No. 8,pp.1144-1150, August (1986).
- [5] H. J. Schulte, “Radiation effects on undersea lightguide cables in Conference on Optical Fiber Communication Technical Digest TuQ2, pp.62-64,(1985).
- [6] E.W.Mies and L.Soto, “Characterization of radiation sensivity of single-mode optical fibers”, in Proc. 11th ECOC, Sep.1985,pp.255-258(1985).
- [7] 千種佳樹、京藤倫久、渡辺稔、松原健夫、吉村耕三、住田健二、飯田敏行、
“純 SiO₂ コア SM ファイバの中性子線照射特性”、電子情報通信学会総合
全国大会、論文 1053、3 月(1987).
- [8] C.Fukuda, Y.Koyano, T.Kashiwada, M.Onishi, Y.Chigusa, H.Kanamori, S.Okamoto,
“Hydrogen and radiation resistance of erbium-doped fibers”, Technical Digest of
OFC1994,paper FF3,pp.304-305 (1994).
- [9] K.C.Kao and G.A.Hockham “Dielectric-fibre surface waveguides for optical frequencies” Proc.IEE Vol.113,No.7,pp.1151-1158,July(1966).

- [10] F.P.Kapron , D.B.Keck, and R.D.Maurer “Radiation losses in glass optical waveguides” Appl. Phys. Lett., Vol.17, No.10, pp.423-425, Nov. (1970).
- [11] J.B.MacChesney , P.B.O’Connor, F.V.DiMarcello, J.R.Simpson and P.D.Lazay Proceeding of 10th Int. Congr. On Glass, Kyoto Japan,Vo.6,pp.40-51(1974).
- [12] M.Horiguchi and H.Osanai, “Spectral losses of low-OH-content optical fibres ” Electronics Letters,Vol.12 No 12, pp.310-312, June (1976).
- [13] T.Miya, Y.Terunuma, T.Hosaka and T.Miyashita “Ultimate low-loss single-mode fibre at 1.55 μ m”, Electronics Letters Vol.15 No4, pp.106-108, Feb.(1979).
- [14] V.Curri, ”System advantages of Raman amplifiers “ NFOEC 2000, Technical Digest, B1.1,pp.39-45 Aug.(2000).
- [15] T.Kato,Y.Koyano, M.Nishimura, “ Temperature dependence of chromatic dispersion in various types of optical fibers” Technical Digest of OFC2000, TuG7,pp.95-97 (2000).
- [16] K.Nagayama, M.Kakui, M.Matsui, T.Saitoh and Y.Chigusa, “ Ultra-low-loss(0.151dB/km)pure silica core fiber and extension of transmission distance”, Technical Digest of OFC2002, PD,pp.FA10-1~3, (2002).
- [17] V.Curri, ”System advantages of Raman amplifiers “ NFOEC 2000, Technical Digest, B1.1,pp.39-45 Aug.(2000).
- [18] H. Kidorf, K. Rottwitt, M. Nissov, M. Ma, and E. Rabarijaona, “Pump Interactions in a 100nm Bandwidth Raman Amplifier,” IEEE Photon. Technol. Lett., vol.11, No.5 p.530 (1999).
- [19] 福田智恵、千種佳樹、柏田智徳、大西正志、金森弘雄、岡本信一、“Er添加ファイバの耐放射線特性”、電子情報通信学会春季大会、論文 C-394 (1994).
- [20] P.J.Lemaire, H.A.Watson, D.J.DiGiovanni and K.L.Walker, “Prediction of long-term hydrogen-induced loss increases in Er-doped amplifier fibers”, IEEE Photonics technology letters,Vol.5, No2,pp.214-217, Feb.(1993).

- [21] A.Wada, T.Sakai, D.Tanaka and R.Yamauchi, "Radiation Sensitivity of Erbium-Doped Fiber Amplifiers" Optical Amplifiers and Their Applications Technical Digest Series, Vol. 13 WD4, pp.294-297,(1990).
- [22] K.Noguchi, N.Shibata, N.Uesugi and Y.Negishi, "Loss Increase for Optical Fibers Exposed to Hydrogen Atmosphere", J.Lightwave Technol.Vol. **LT-3**, No.2, pp.236-243, (1985).

第3章 純粋石英コア単一モード光ファイバの光低伝送損失領域の広帯域化に関する検討

3.1 はじめに

近年、波長多重（Wavelength-Division-Multiplexing (WDM)）システムの開発と発展に伴い、高密度 WDM (Dense WDM: DWDM) のような大容量伝送が可能となり、海底、陸上幹線のような長距離大容量システムへの実用化が活発化した。一方、最近では特にメトロネットワークや市街通信などの中、短距離システムには、低密度 WDM (Coarse WDM: CWDM) システムが 5Gb/s 以上のビットレートで単純な Add-Drop 多重システムの低費用システムを提供するとして注目を集めている。

図 3.1 に ITU-T 規格で規定された光ファイバの伝送波長帯に付けられた命名と各帯域を示す。図 3.1 に示す O-band から L-band 全てを網羅したシステム運用を可能とする CWDM システムを全波長帯 CWDM システムと呼ばれている。

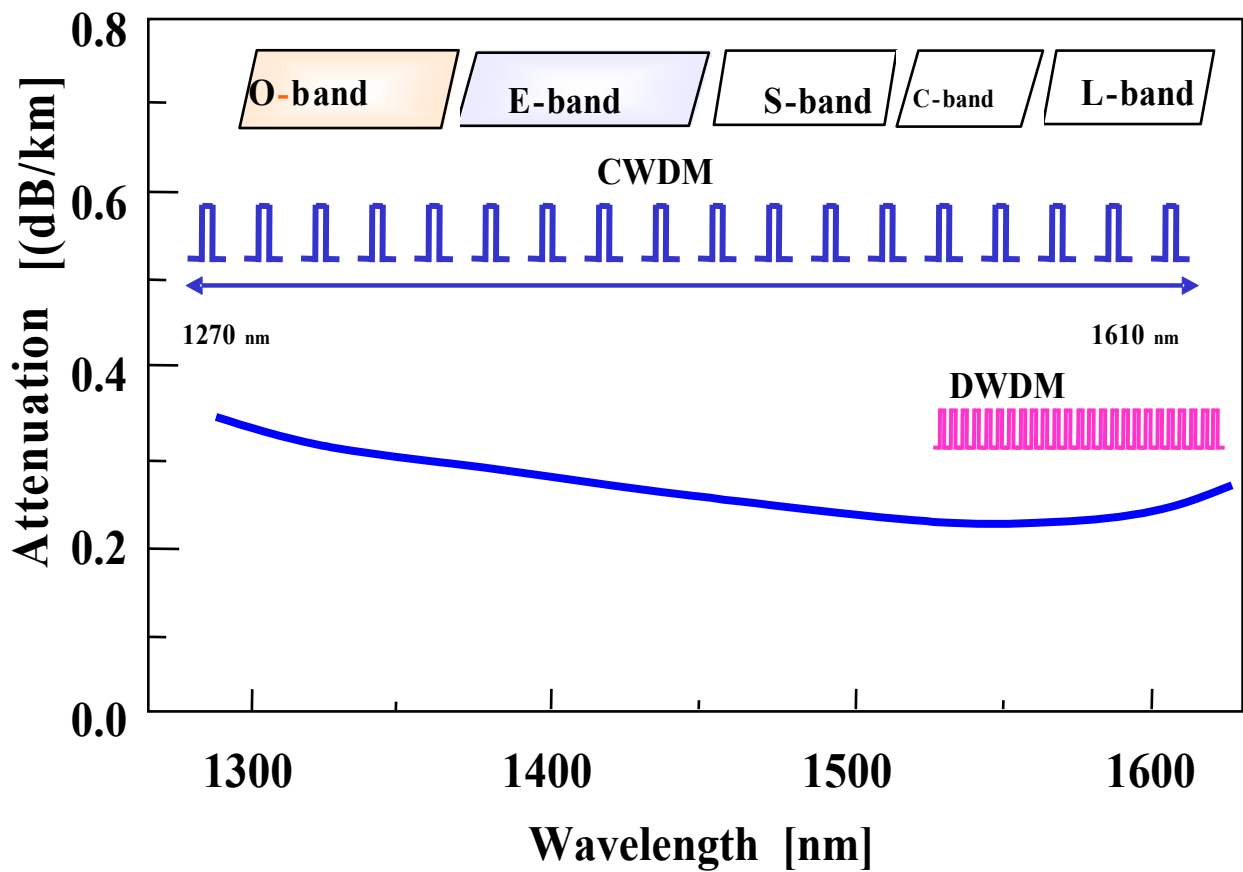
近年、ITU-T 規格、G.652C または D で分類される低 OH 吸収単一モード光ファイバの出現により、波長 1360nm–1460nm 帯 (E-band) をもメトロ領域ネットワーク CWDM 伝送に加えることが可能となった。ITU-T 規格 G.652C,D ファイバは今日では広く使用され、早くも、光通信網の広範囲において標準的光ファイバになろうとしている。しかし、ITU-T 規格 G.652.C,D ファイバに対して言うまでもなくシステム運用期間中の伝送損失の増大があってはならず、特にこの光ファイバに期待される伝送領域 E-band における伝送損失は H₂ との化学反応に特に敏感である¹⁻³⁾ ことに留意する必要がある。そしてその H₂ は光ファイバの被覆材⁴⁾ や光ファイバケーブルの構成金属材⁵⁾ から発生する。

またこれまでに開発された G.652C,D ファイバは従来型の、コアに Ge を添加

した型式のみであり、Geが添加された石英は純粋石英よりも耐H₂性に劣ることが知られている⁶⁾。そのため、低損失で、かつ耐H₂性に優れたG.652C,D 準拠PSCFの開発が期待される。しかしながら、純粋コア石英単一モード光ファイバ(PSCF)は従来型であるGe添加コア単一モードファイバ(Ge-SMF)に対して本質的に低損失性能を有することが知られている⁶⁾が、PSCFは1980年代に導入されて⁶⁾以来、長距離海底システム⁷⁻¹⁰⁾を中心に広く使われてきたものの、これまでに、PSCFのOH吸収帯を消失させてG.652CまたはDで分類される低OH吸収単一モード光ファイバの開発に成功した例は報告されていない。今回の研究において初めて、ITU-T規格G.652C,Dに対して全適合の低OH吸収型PSCFの開発に成功した¹¹⁾。

本章では、この低OH吸収を実現した広帯域光低損失性能とシステム運用中必須の高耐H₂性能の実現について詳述するとともに、Raman増幅器を用いた無中継伝送システムへのPSCFの適用の有効性について述べる。

本節(3.1)に続き、3.2節では広帯域低伝送損失規格(ITU-T.G652.D) 準拠PSCFの作成とその特性について述べ、3.3節で耐H₂特性への影響に関する検討について、3.4節で広波長帯域無中継通信の検討について述べる。3.5節にて本章を要約する。



• O-band (Original band)	: 1260 ~ 1360 nm
• E-band (Extra band)	: 1360 ~ 1460 nm
• S-band (Short band)	: 1460 ~ 1530 nm
• C-band (Conventional band)	: 1530 ~ 1565 nm
• L-band (Long band)	: 1565 ~ 1625 nm
• U-band (Ultra-long band)	: 1625 ~ 1675 nm

Fig. 3.1 Spectral transmission band

3.2 広帯域低伝送損失規格 (ITU-T G.652.D) 準拠 PSCF の作成とその特性

純粋石英コア、弗素添加石英クラッドからなるステップインデックス屈折率形状からなる低 OH 純粋石英コア単一モード光ファイバ (PSCF) を試作した。その PSCF の屈折率形状を図 3.2 に示す。

図 3.3 に従来型 Ge-SMF の G.652.D ファイバと今回試作した PSCF 型 G.652.D、そして従来の G.652.A 準拠の標準型 PSCF の損失波長特性を示す。

製造工程において脱水技術の改良検討を重ねて、今回 OH 吸収ピークを完全に除去することに成功した。波長 1383nm にて 0.247dB/km もの低損失を達成した。これは従来型 G.652.D ファイバの損失よりも 20% 低い損失を実現できたことを示した。

図 3.2 からさらには波長 1310nm で 0.289dB/km、波長 1550nm で 0.170dB/km という低損失が得られたことが確認できた。

表 3.1 にまとめるように、今回試作した PSCF の諸特性は全項目において G.652.D の規格を満たしていることがわかる。

G.652.D は G.652 シリーズ (G.652.A,B,C and D) 全てを満たすため、今回試作に成功した PSCF 型 G.652.D は G.652 シリーズ全ての規格を満たしている。

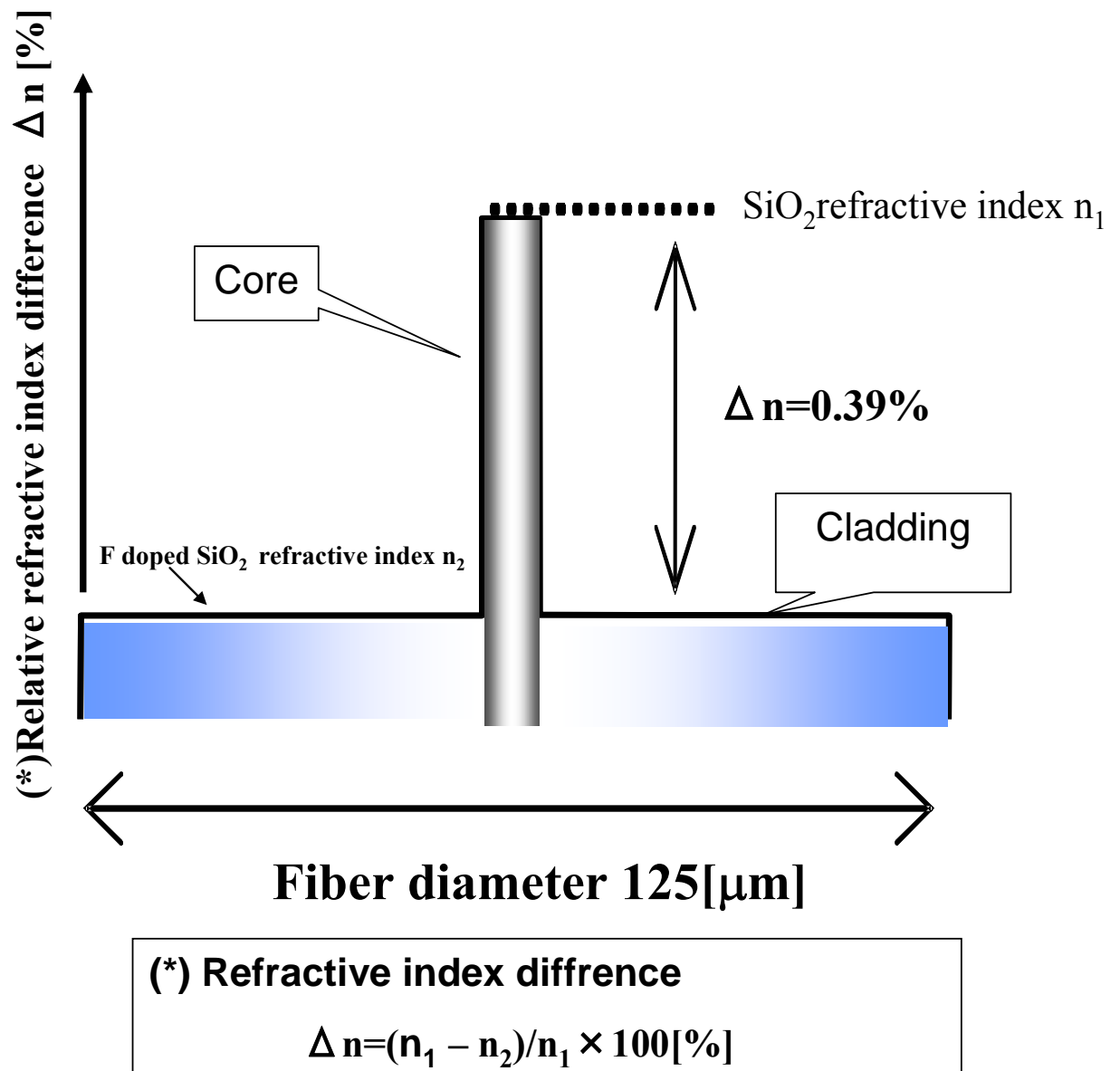


Fig.3.1 Refractive index profile of G.652.D PSCF

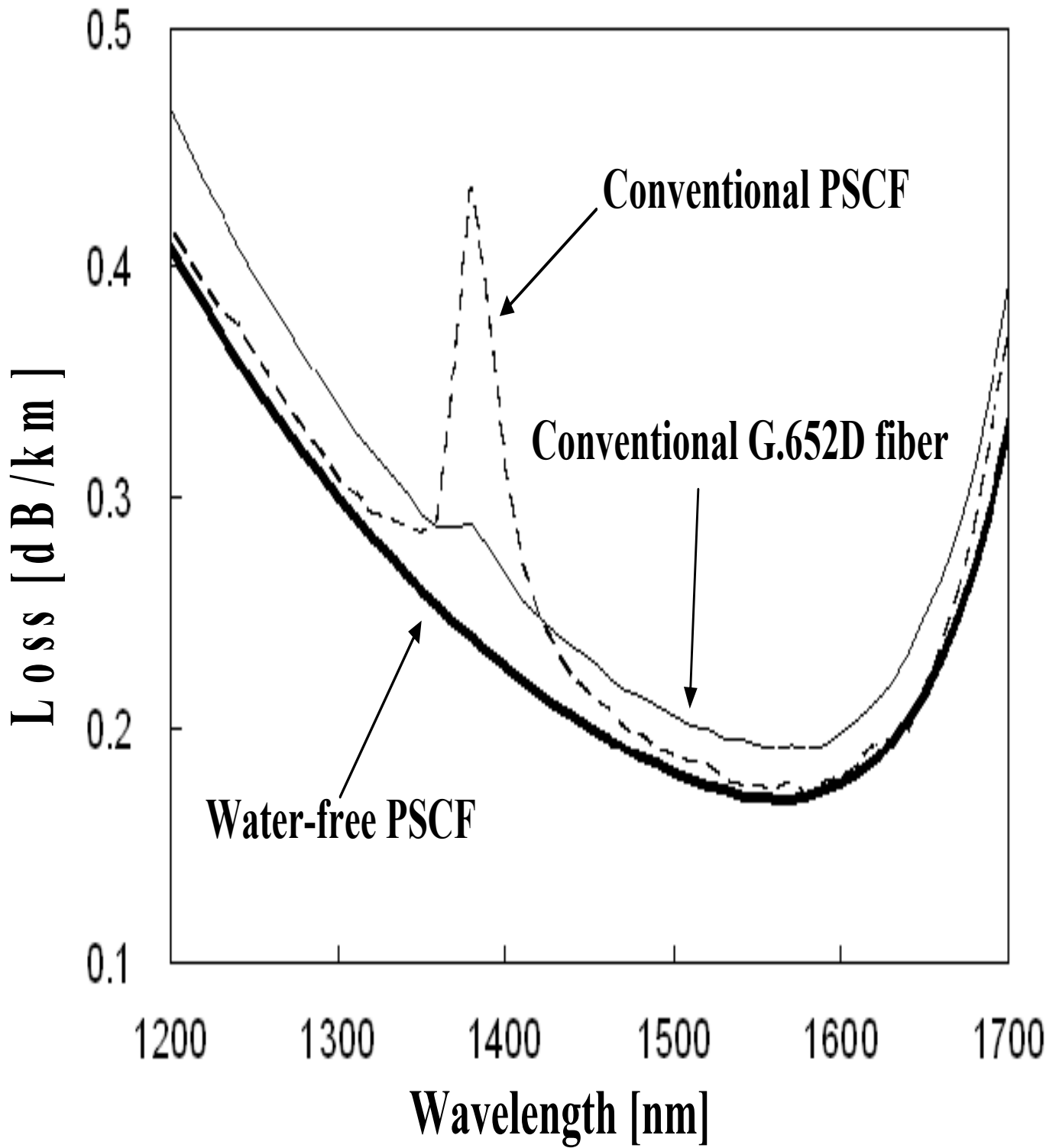


Fig. 3.2 Loss spectrum of water-free PSCF

Table 3.1. Characteristics of Water-free PSCF

Item	Water-Free PSCF	Conventional G.652.D fiber	ITU-T G.652.D
MFD at 1310nm [μm]	8.53	9.19	Nominal: 8.6-9.5, Tolerance: +/- 0.7
Cable cut-off wavelength [nm]	1170	1174	Max: 1260
Loss at 1310nm [dB/km]	0.289	0.330	Max: 0.4 ^{*1}
Loss at 1383nm [dB/km]	0.247	0.305	Under 1310nm loss value ^{*1,*2}
Loss at 1550nm [dB/km]	0.170	0.187	Max: 0.3 ^{*1}
Bending loss at 1550nm (R15mm*10turns) [dB/m]	0.03	0.16	-
Zero-dispersion wavelength [nm]	1318	1313	1300-1324
Zero-dispersion slope [ps/km/nm ²]	0.079	0.086	Max: 0.093
PMD [ps/rt·km]	0.03	0.03	Max: 0.20 ^{*1, *3}

*1: cabled *2: post-hydrogen *3: link design value

3.3 耐 H₂ 特性への影響に関する検討

3.3.1 室温条件下における耐 H₂ 特性の優位性検証

供試ファイバの屈折率形状と初期特性はそれぞれ図 3.1、表 3.1 に記載した。耐 H₂ 特性評価試験条件として、供試ファイバを室温、1 atm の H₂ 雰囲気内で 4 dy 間放置状態に置いた。この条件はフィールドにおける典型的な H₂ 条件、H₂ 分圧 0.0004atm×2.5 yr の光ファイバシステム運用期間条件に匹敵する¹²⁾。

参考文献¹²⁾には同条件に対する、さまざまな製造会社によって作成されたさまざまな G.652.A,C ファイバの損失増加特性が報告されている。G.652.A ファイバにおいては 0.1dB/km を超える大きな損失増加が生じている。そして G.652.C ファイバにおいては、最大損失増加は波長 1383nm、1440nm そして 1530nm においてそれぞれ、0.037dB/km、0.028dB/km、0.013dB/km と示されている。

本研究における H₂ 試験評価結果を図 3.3 に示す。今回の本研究における試験には比較のため従来型の Ge-SMF 型の G.652.A と最新 ITU-T G652 規格ファイバである G.652.D も H₂ 試験に加えた。G.652.D 規格は G.652.C 同様の低 OH 吸収損失仕様が盛り込まれていることに加え、低 PMD 仕様が加えられているが低 OH 吸収仕様という点では G.652.C とは変わらないため参考文献¹²⁾との比較のための供試光ファイバとしては適当と判断できる。図 3.3 から明らかなように、低 OH 吸収損失仕様に設計されている G.652.D ファイバですら Ge-SMF 型ファイバは、光ファイバシステム運用期間中、E-band に損失増加を引き起こすことがわかる。

上述のように Ge-SMF 型ファイバは G.652.A,B,C,D 全てにおいて現場での環境下において H₂ による損失増加が発生するのに対し、一方、今回開発した PSCF 型 G.652.D は H₂ 試験にて顕著な損失増加は無く、測定精度±0.003dB/km の範囲内の変動内に入る程度の高耐 H₂ 性能を維持できていることがわかる。

PSCF の安定な損失状態は Ge をコアに含まないことに起因していると推定できる。しかしながら従来 G.652.C,D ファイバは Ge-SMF 型であり、コアに Ge を含む構造をとる。Ge 添加石英の場合、化学式 (1) のように線引誘起欠陥が生成

しやすい。



H₂分子は酸素関連欠陥と反応し、波長 1380nm、1440nm、1530nm に光吸収ピークを発現させる。

一方、G.652.C,D 仕様の場合、OH 量を従来の G.652.A,B ファイバと比べて極端に低く抑える必要があるため、製造工程上で脱水工程が強化される。この脱水工程の強化により、PSCF 型においても各種欠陥が発生することが今回懸念されたが、本結果から、製造工程の最適化により SiO₂ 本来の安定さを保ちそして得ることができることを明らかにした。

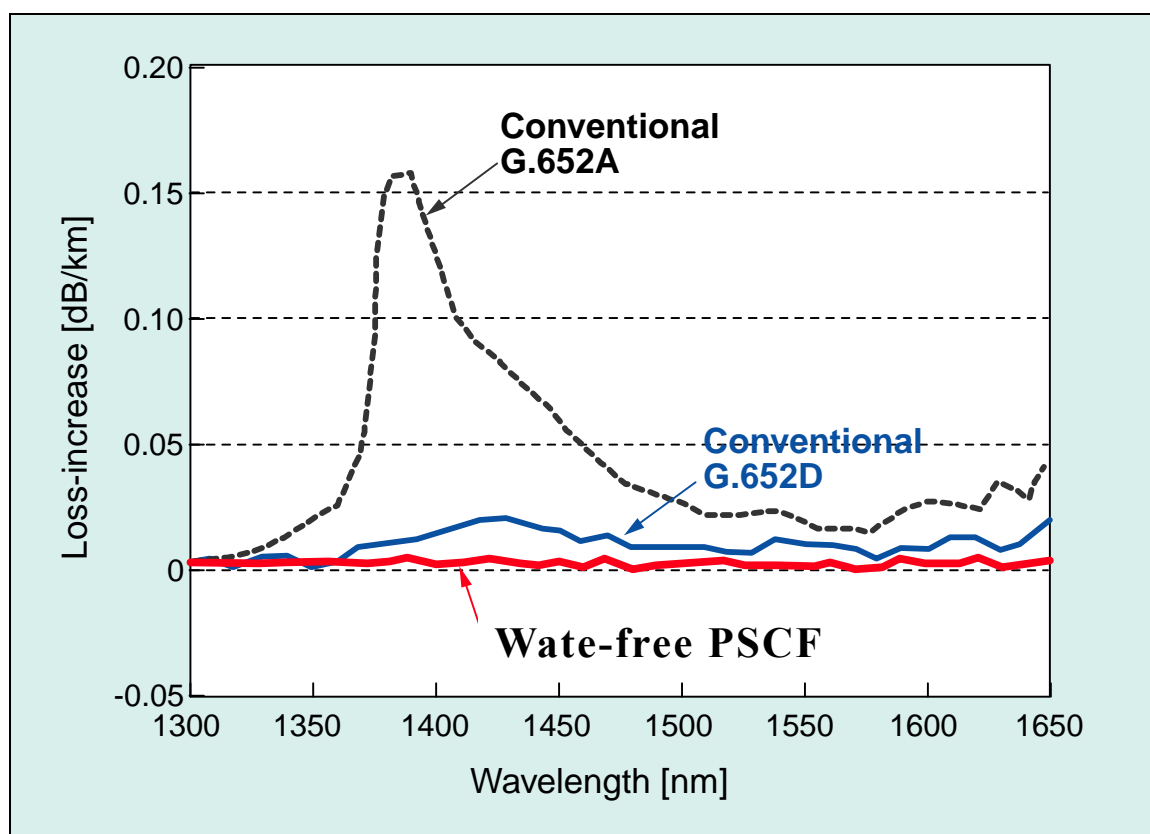


Fig.3.3 Hydrogen-induced loss-increase after 4 dy exposure

3.3.2 高温条件下における耐 H₂ 特性の優位性検証

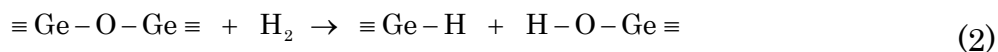
前述の室温条件では PSCF 型では損失増加が生じなかったため、耐 H₂ 性能の性能差の大きさがどこまであるものかを明らかにすべく、昇温条件下で PSCF 型 G.652.D ファイバと Ge-SMF 型 G.652.A,D ファイバの耐 H₂ 性能を評価した。

試験は H₂ 1 atm、150°C×20h の条件下でファイバを放置することで実施した。その結果を図 3.4 に示す。

図 3.4 からわかるように、Ge-SMF 型 G.652.A,D は致命的なレベルの OH 吸収の増加と紫外光領域の吸収帯の裾が観測された。Ge-SMF 型 G.652.D の波長 1380nm での損失増加は前述の室温での評価結果の 40 倍もの損失増加量となっている。

一方、PSCF 型 G.652.D は同じ厳しい条件下においても 800nm から 1800nm までの波長領域において、損失劣化は全く観察されなかった。

150°C 程度の高温における H₂ 誘起反応のメカニズムは室温におけるそれとは全く異なる。Ge 添加コア光ファイバは H₂ が Ge-O 結合を化学式 (2)、(3) ¹³⁾ のように攻撃するために耐 H₂ 性が劣るものと考えられる。



ここで、生成された GeH、SiOH、GeOH はそれぞれ、紫外光吸収 ¹⁴⁾、1383nm 光吸収そして 1410nm 光吸収と関係しているとされている。

Si-O 結合の Ge-O 結合を上回る安定性は、表 3.2 に示す標準自由エネルギー変化 (ΔG) から理解できる。表 3.2 から SiO₂ は 25kJ/mol 以上もの GeO₂ を超える安定度を有することがわかる。

先の室温評価の項でも述べたが、PSCF 型においても G.652.C,D 仕様の場合、OH 量を従来の G.652.A,B ファイバと比べて極端に低く抑える必要があるため製造工程上、脱水工程が強化される。この脱水工程の強化により、PSCF 型において

も各種欠陥が発生することが今回懸念されたが、本結果から、製造工程の最適化により 150°C 高温条件下でさえも SiO₂ 本来の安定さを保ち得ることを明らかにできた。

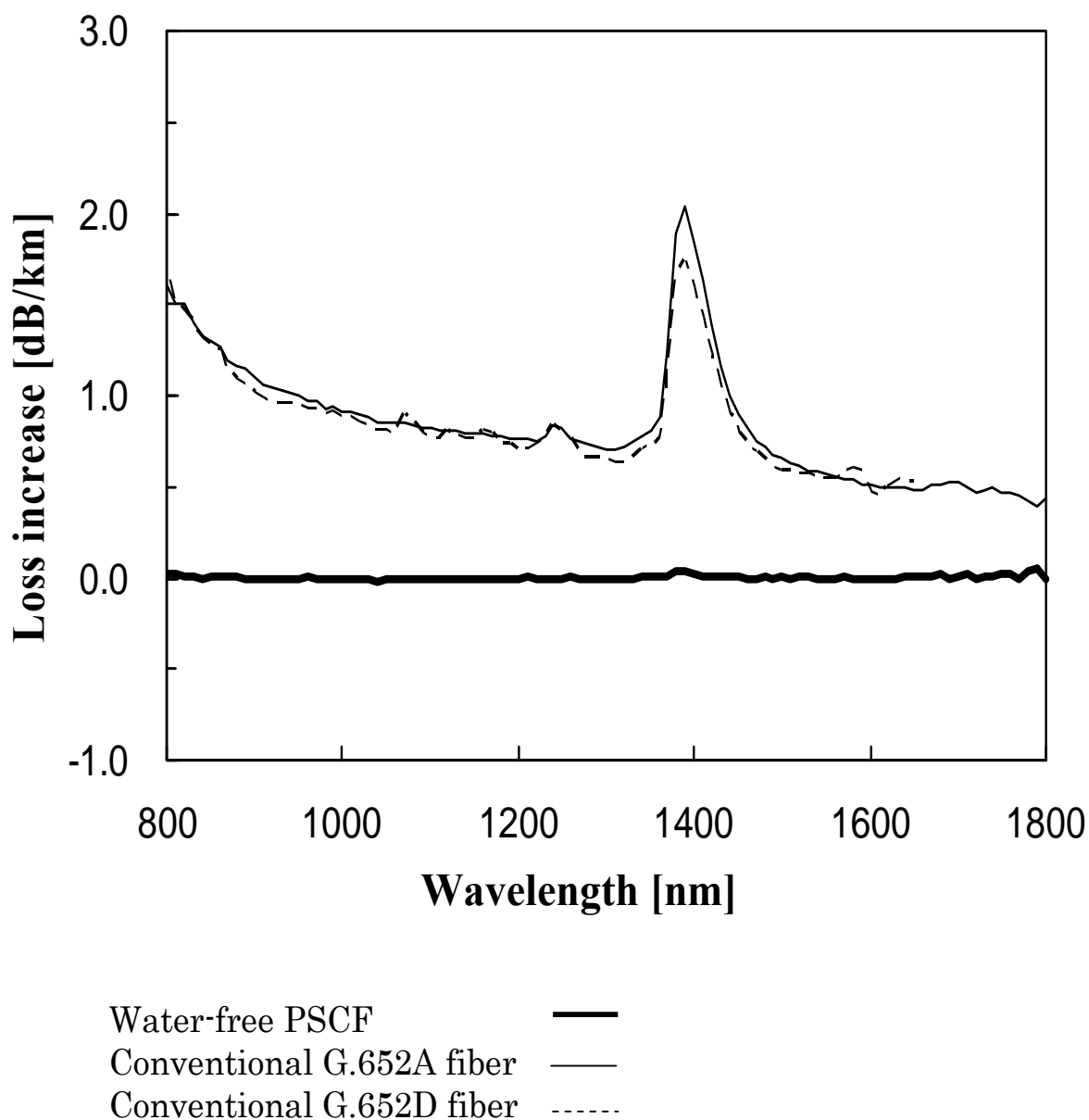


Fig3.4. Hydrogen-induced loss after 20h exposure to 1 atm of H₂ at 150°C

Table 3.2 Standard free energy change of SiO₂ and GeO₂

Temperature [°C]	ΔG [kJ/mol]	
	$\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$	$\text{Ge} + \text{O}_2 \rightarrow \text{GeO}_2$
25	-78.5	-52.1
150	-78.1	-49.7
1500	-59.6	-24.1

3.4 広波長帯域無中継通信の検討

広波長帯域無中継伝送を可能とするためには EDFA のような単一波長領域光増幅器は用いることはできず、広帯域の光増幅を実現するためには Raman 増幅の導入が必須となる。Ge-SMF 型 G.652.C,D ファイバは Ge をコアに含んでおり、Ge は Raman 増幅効果を高める働きがあるため純粋石英コアを有する PSCF 型 G.652.C,D ファイバはこの点においては不利となる。しかしながら PSCF 型 G.652.C,D には純粋石英が持ち得る、低損失性と屈折率材料分散特性の違いからくる設計の自由度が優位点として存在する。

本項では純粋石英が有する課題を純粋石英が持つ優位点を持って Ge-SMF 型 G.652.C,D よりも高効率の広帯域波長無中継伝送が可能であり、広帯域波長無中継伝送においても Ge-SMF 型よりも PSCF 型の方が優位であることを示す。

図 3.5 に 1450nm 波長で励起した PSCF 型 G.652.D ファイバと Ge-SMF 型 G.652.A,D ファイバの Raman 利得係数 g_R/A_{eff} [1/W/km]の比較を示す。ここで A_{eff} [μm^2]は励起波長でのコア効果領域を表す。 g_R は Raman 利得を表し、一般的にコアの添加剤に依存し、PSCF 型は Ge-SMF 型と比較して小さい値をとる。しかしながら、一方、純粋石英コア型光ファイバは Ge-SMF 型光ファイバとの屈折率材料分散特性の違いから小径 MFD においてもゼロ分散波長を短波長領域に設定することが可能となる優位点が存在し、G.652 の仕様範囲内で g_R の小さい分を相殺すべく A_{eff} を小さくすることが可能となる。その結果、今回試作した表 3.1 に示す設計構造にて PSCF 型の g_R/A_{eff} は図 3.5 に示すように Ge-SMF 型の G.652.A,D のそれとほぼ同等に設定することができた。そして最終的には PSCF 型は結果的に低損失という優位点が Ge-SMF 型との差となって Raman 増幅における高性能を発揮できることとなる。

図 3.6 に 1390nm、1420nm、1450nm の励起波長での Raman 増幅の性能指数 Figure-of-merit of Raman, FOM_R [1/W/dB] = $g_R/A_{eff}/\alpha_P$ ¹⁵⁾ を示す。ここで α_P [dB/km] は励起波長での光ファイバの伝送損失を示す。PSCF 型 G.652.D ファイバは Ge-SMF 型 G.652.D よりも各励起波長にて 10%以上高い FOM_R を実現することに成功した。これは Raman 増幅において 10%以上の高効率性を意味する。

さらには、本研究にて、S-band 増幅¹⁶⁾ や、2次遠隔増幅¹⁷⁾ に用いられる 1390nm 励起波長の場合においても、OH 吸収ピークの除去により PSCF 型 G.652.D の FOM_R は、G.652.A ファイバよりも 50%以上もの高効率化に初めて成功した。

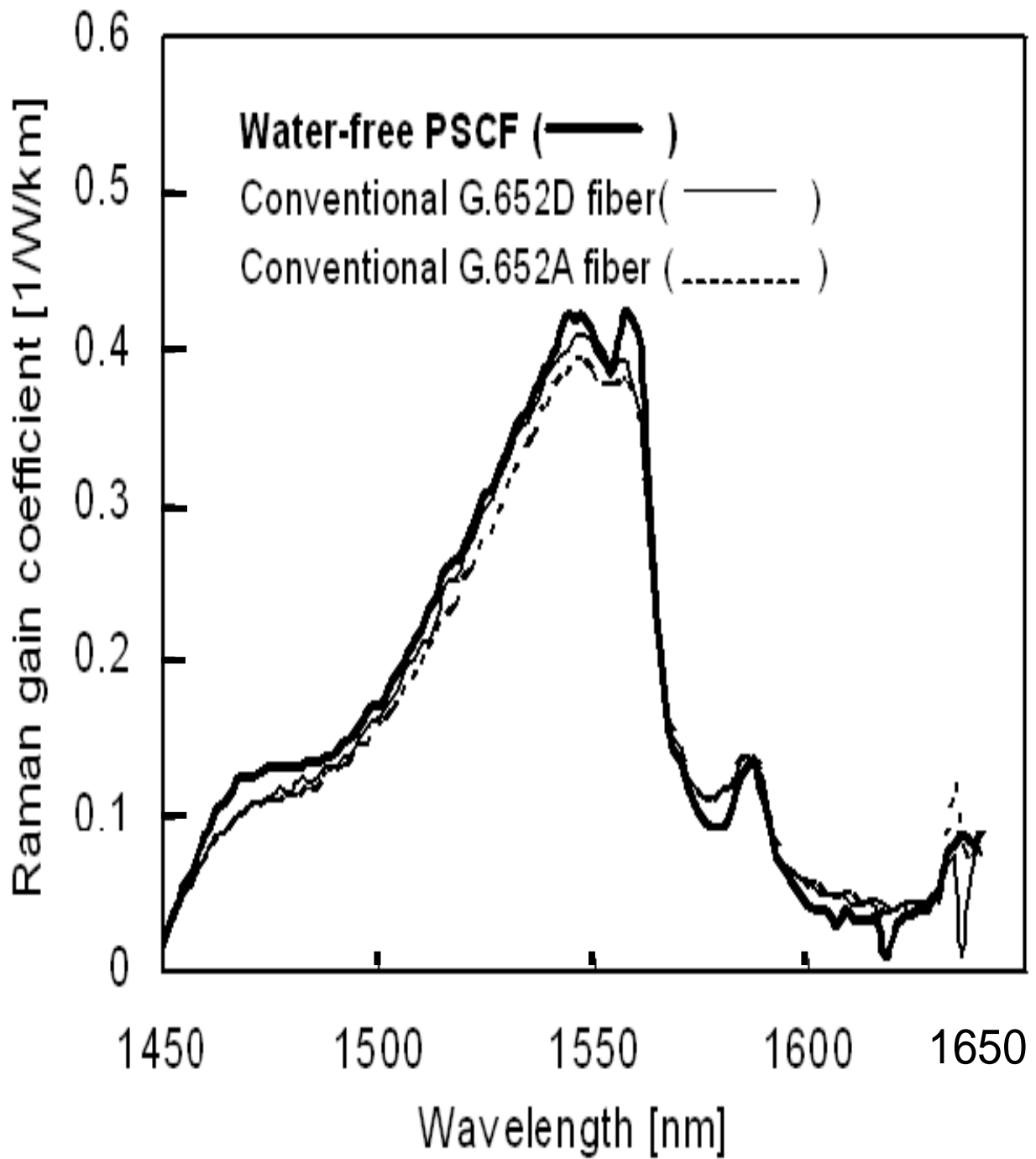


Fig.3.5 Raman gain coefficient of water-loss-free PSCF with 1450nm pumping

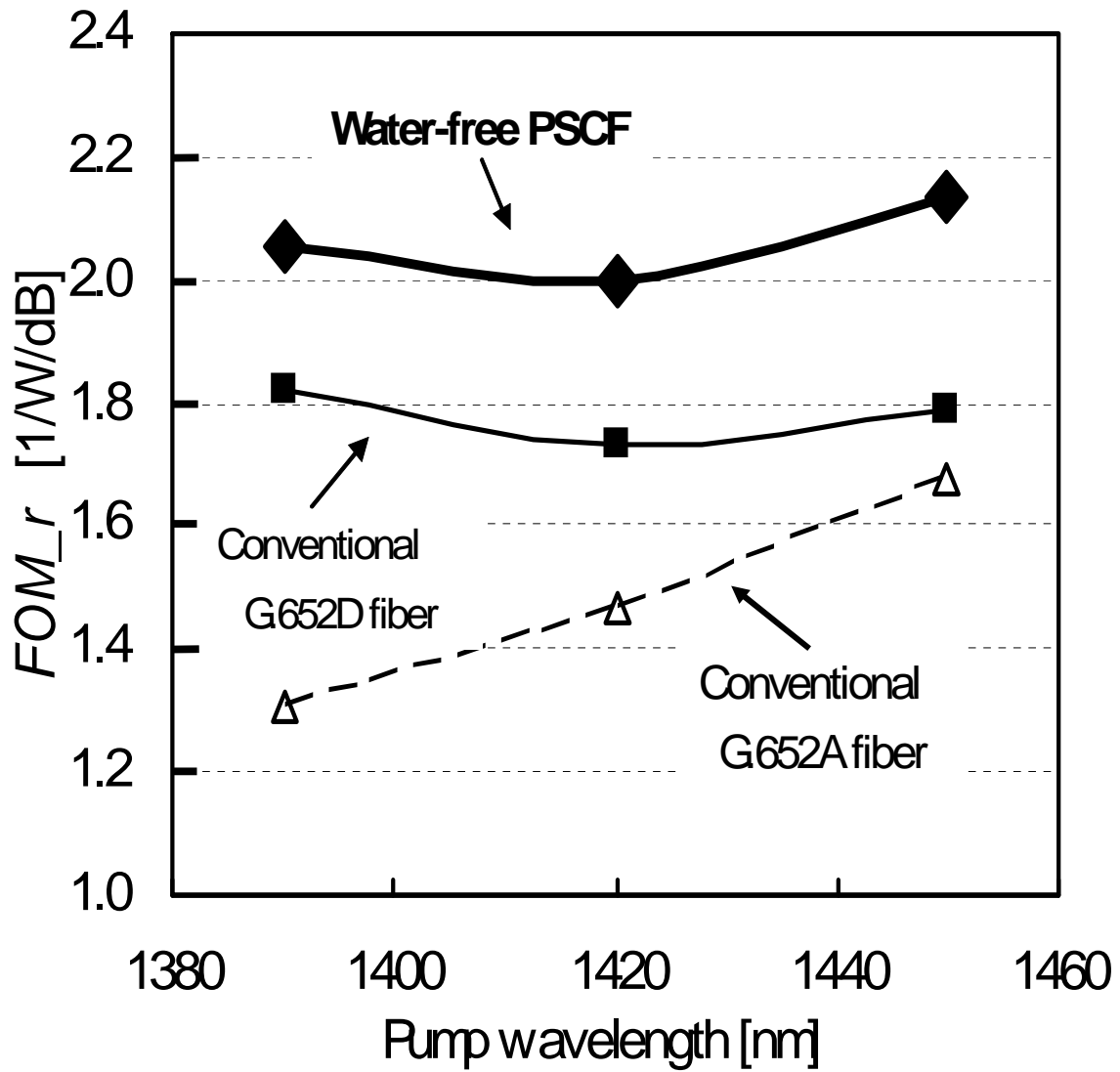


Fig.3.6. Figure-of-merit in Raman amplification of water-free PSCF

3.5 まとめ

本章では ITU-T 規格 G.652.C, D に対して全適合の低 OH 吸収純粋石英コア型単一モード光ファイバの開発とシステム運用期間中、必須の要件となるその耐 H₂ 性能を中心に述べた。以下に本研究で明らかになった点を示す。

- 1) 脱水プロセスを中心とした製造方法の最適化により、従来達成できなかった、ITU-T 規格 G.652.C, D 仕様全準拠、低 OH 吸収広帯域低損失純粋石英コア光ファイバの試作に成功し、波長 1383nm にて 0.247dB/km もの低損失を達成した。既に開発されている従来型 Ge 添加コア光ファイバの損失よりも 20% 低い損失が実現できたことを示した。
- 2) ITU-T 規格 G.652.C, D 仕様の場合、OH 量を従来の G.652.A, B ファイバと比べて極端に低く抑える必要があるため製造上、脱水工程が強化される。この脱水工程の強化により、純粋石英コア型においても各種欠陥が発生することが懸念されるため、室温、高温両面から詳細な耐水素性能を評価した。その結果、純粋石英コアガラスから OH 吸収を除去する脱水工程の強化を図っても、製造工程の最適化により SiO₂ 本来の安定さを保ち得ることを明らかにした。
- 3) 広波長帯域無中継伝送を可能とするためには EDFA のような単一波長領域光増幅器は用いることはできず、Raman 増幅の導入が必須となる。本研究において、純粋石英が持つ Ge 添加石英との屈折率材料分散特性の違いからくる設計の自由度を生かして Raman 効果を上げる設計を施し、加えて秀でた低損失性を生かすことで従来の Ge 添加コア型ファイバ対比 10% 以上の高効率 Raman 増幅の実現性と、さらには、S-band 増幅や、2 次遠隔増幅に用いられる波長 1390nm 励起の場合においても、50% 以上の高効率 Raman 増幅の実現性を示した。

第3章の参考文献

- [1] Jason, J., Ericsson, T. K., and Arvidsson, B.: ‘Hydrogen ageing performance of various fiber types under different ageing conditions’, Proc. IWCS/Focus2003, pp.75-81(2003).
- [2] Chang, K. H., Kalish, K., and Pearsall, M. L.: ‘New hydrogen ageing loss in the 1400 nm window’, Proc. OFC’99, PD22(1999).
- [3] P.J.Lemaire, “Reliability of optical fibers exposed to hydrogen : prediction of long-term loss increases “ Opt.Eng.Vol.30 No.6 pp.780-789 June (1991).
- [4] K. Noguchi, N. Uesugi, and K. Ishihara, “Hydrogen quantity generated from optical-fibre coating,” Electron. Lett., vol. 20, pp. 897-898, Oct. (1984).
- [5] Y. Mitsunaga, T. Kuwabara, T. Abe, and Y. Ishida, “Molecular hydrogen behaviour for loss increase of silica fibre in cable filled with water,” Electron. Lett., vol. 20, pp. 76-78, Jan. (1984).
- [6] H. Kanamori, H. Yokota, G. Tanaka, M. Watanabe, Y. Ishiguro, I. Yoshida, T. Kakii, S. Ito, Y. Asano and S. Tanaka, ‘Transmission Characteristics and reliability of pure silica core single mode fibres” Journal of Lightwave Technology, Vol. LT-4, No. 8,pp.1144-1150, August (1986).
- [7] E. Nazuka, Y. Ogi, K. Shimizu, T. Tanabata, A. Nagai, Y. Yamazaki, H. Yamamoto, and H. Homma, “OS-560M optical submarine cable system,” Proc. Suboptic1993, pp. 265-270, (1993).
- [8] J. -P. Blondel, E. Brandon, L. Labrunie, P. Le Roux, D. Toullier, and G. Zarris, “Error-free 32 x 10 Gbit/s unrepeated transmission over 450km,” Proc. ECOC’99, PD2-6, (1999).
- [9] H. Sugahara, M. Morisaki, T. Ito, K. Fukuchi, and T. Ono, “9,000-km transmission of 32 x 42.7 Gb/s dense-WDM signals using 195- μm^2 - A_{eff} fiber and inverse double-hybrid span configuration,” Proc. OAA2002, PD3, (2002).
- [10] E. Sasaoka, T. Yokokawa, Y. Koyano, K. Fujimoto, and M. Onishi, “Ultra low

loss dispersion flattened hybrid transmission line for transoceanic multi-terabit transmission systems,” Proc. Suboptic2004, Poster We 13.6, (2004).

- [11] Y.Chigusa, Y.Yamamoto, T.Yokokawa, T.Sasaki, T.Taru, M.Hirano, M.Onishi and E.Sasaoka, “ Low-loss Pure-Silica-Core Fibers and Their Possible Impact on Transmission Systems,” Journal of Lightwave Technology , Vol. 23, No11, pp.3541-3550, Nov.(2005).
- [12] Jason, J., Ericsson, T. K., and Arvidsson, B.: ‘Hydrogen ageing performance of various fiber types under different ageing conditions’, Proc. IWCS/Focus2003, pp.75-81(2003).
- [13] Greene, B. I., Krol, D. M., Kosinski, S. G., Lemaire, P. J., and Saeta, P. N.: ‘Thermal and photo-initiated reactions of H₂ with germanosilicate optical fibers’, J. Non-Cryst. Solids, Vol.168, pp. 195-199(1994).
- [14] Tomita, A., and Lemaire, P. J.: ‘Observation of a short wavelength loss edge caused by hydrogen in optical fibers’, Proc. ECOC’84, PD1(1984).
- [15] Y. Qian, J. H. Povlsen, S. N. Knuden, and L. G. Nielsen, “On Rayleigh backscattering and nonlinear effects evaluations and Raman amplification characterizations of single-mode fibers,” Proc. OAA2000, OMD18, pp. 91-93,(2000).
- [16] F. Boubal, E. Brandon, L. Buet, S. Chernikov, V. Havard, C. Heerdt, A. Hugbart, W. Idler, L. Labrunie, P. Le Roux, S. A. E. Lewis, A. Pham, L. Piriou, R. Uhel, and J. P. Blondel, “4.16 Tbit/s (104 x 40 Gbit/s) unrepeated transmission over 135 km in S+C+L bands with 104 nm total bandwidth,” Proc. ECOC’01, Mo.F.3.4, pp. 58-59, (2001).
- [17] L. Labrunie, F. Boubal, P. Le Roux, and E. Brandon, “500 km WDM 12 x 10 Gbit/s CRZ repeaterless transmission using second order remote amplification,” Electron. Lett., vol. 39, pp. 1394-1395, Sep.(2003).

第4章 高耐曲げ性光ファイバの開発と FTTx

細径・軽量光ケーブルの実現に関する検討

4.1 はじめに

近年のインターネットの容量拡大の要求に伴い、光ファイバによる伝送方式が拡大基調にある。そういったなかで、光ファイバの耐曲げ損失性が FTTx(Fiber To The Home, Fiber To The Premise, Fiber To The Desk, 他)のようなアクセスネットワークや屋内応用設計にとって非常に重要な要素を占めている。最近ではルースチューブケーブル（側圧による光ファイバの伝送損失を防ぐために、側圧緩衝用のチューブの中に光ファイバを配置し、それらチューブを複数撚り合わせてケーブル化する形態のケーブル）の細径化や軽量化が強く求められ重要な開発要素として要請が強い。特に空気圧送技術を使ったマイクロダクトケーブル（敷設された管路に空気ジェットの中でケーブルを圧送挿入していくために使用される形態のケーブル）や非常時緊急用ケーブルなどを含めた空気圧送応用が注目されている¹⁻⁹⁾。

さらにこれらのケーブルシステムには、言うまでも無く製造工程中やシステム運用開始後においても、長期間にわたり、低伝送損失と安定した伝送損失状態を保つ必要がある。

従来のルースチューブケーブルを細径化、軽量化するには、側圧緩衝チューブの寸法削減と強度補強ケーブル芯構成材の軽量化が必要となる。しかしながら、これらを実現するには、圧縮応力がかかったときの光ファイバ曲げ損失の増加や、低温でのケーブル収縮による光ファイバ曲げ損失などを考慮して開発する必要がある¹⁰⁾。

また、現在 FTTx に用いられる光ファイバは国際規格（ITU-T）でその仕様規格（G.652）が決められており、その仕様範囲内でルースチューブケーブルの細

径化、軽量化を実現し得る耐曲げ性に強い光ファイバを実現させる必要がある。光ファイバの屈折率構造設計には単純な構造のステップインデックス型と複雑なディプレスト型構造があり、曲げに強くかつ単一モード構造を保つためにはディプレスト型構造が有利であるが、構造の複雑さ故に、ステップインデックス型での実現が望まれていた。

今回、これら難題に対して、純粋石英コアからなる光ファイバの構造を用いて、従来の Ge をコアに添加した光ファイバでは実現し得なかった光ファイバ製造上単純さが求められる屈折率設計構造としてステップインデックス型構造での細径 MFD の実現に成功し、これを用いて、従来報告例の無い細径・軽量ルースチューブケーブルの開発に成功した¹⁾。

本章ではこのステップインデックス型極小 MFD 光ファイバの設計とファイバ特性そして開発した FTTx 用細径・軽量光ケーブルの特性について詳述する。

本節(4.1)に続き、4.2 節では耐曲げ特性に対する最適設計の検討について述べ、4.3 節では PSCF の曲げ径と光伝送損失特性について、4.4 節では光ケーブル外径の細径化に関する検討について述べる。4.5 節で本章の要約を行う。

4.2 耐曲げ特性に対する光ファイバ構造最適設計の検討

より小さい MFD はより低い光ファイバ曲げ損失を実現し得る。そして ITU-T 規格 G.652 は MFD の下限値を伝送波長 $1.31\ \mu\text{m}$ において $8.6\ \mu\text{m}$ と規定している。しかしながら、従来の Ge 添加コア型の G.652 光ファイバは G.652 仕様を全て満たしながらステップインデックス屈折率コア構造で伝送波長 $1.31\ \mu\text{m}$ において $8.6\ \mu\text{m}$ もの小さな MFD を実現することは不可能であった。これは小径 MFD を有する Ge 添加コア型光ファイバは零分散波長が長くなるため、G.652 下限の MFD $8.6\ \mu\text{m}$ とした場合に、G.652 規定の零分散波長の上限を超えてしまうためである。

一方、純粋石英コア型光ファイバは小径 MFD においても零分散波長を短波長領域に設定することが可能であり、MFD $8.6\ \mu\text{m}$ においても零分散波長 G.652 規

格値のほぼ中央領域に設定できる。これはその純粋石英の屈折率材料分散が Ge を添加した単一モード光ファイバのそれとは異なるために発生する現象であり、それがこの利点を実現させ得る。

今回の研究により、伝送波長 $1.31\ \mu\text{m}$ において $\text{MFD}8.6\ \mu\text{m}$ で、G.652 規格全てを満たす、純粋石英コア単一モード光ファイバの試作に初めて成功した。

図 3.1(第 3 章 3.2 節)に今回開発した純粋石英コア型単一モード光ファイバの屈折率構造を示す。クラッド屈折率のコア屈折率に対する比屈折率差 Δn は 0.39% と、従来型のそれよりも少し高く設計されている。コア構造は G.652 規格を全て満たしながら、曲げ損失特性を改善するために、伝送波長 $1.31\ \mu\text{m}$ で G.652 の下限 MFD 値 $8.6\ \mu\text{m}$ に設計した。

4.3 G.652.D 規格準拠純粋石英コア光ファイバの曲げ径と光伝送損失特性

低曲げ損失化最適構造設計検討から第 4.2 節において決定した最適設計仕様に基づき、今回試作した純粋石英コア単一モードファイバの曲げ損失特性を図 4.1 に示す。純粋石英コア単一モードファイバはより小さな MFD にて、従来型の Ge 添加コア単一モードファイバよりも小さな曲げ径においてさえ低い曲げ損失を実現できていることがわかる。具体的な数値で比較してみると、 15mm の曲げ半径において 1550nm 波長にて 0.03dB/m が実現できており、これにて従来型の G.652 に比べて $1/5$ の値と言う、驚異的な低曲げ損失の実現に成功を収め得た。これは純粋石英の屈折率材料分散の Ge 添加石英との違いを生かすことで、零分散波長を ITU-T.G.652 規格の零分散波長規格領域のほぼ中央領域に設定しつつ、伝搬光のコア内への閉じ込め強化を図る MFD 小径化を ITU-T.G.652 規格の MFD 規格下限の $8.6\ \mu\text{m}$ に設定実現できたことにより、従来型の Ge 添加コアでは実現不可能な範囲の伝搬光のコアへの閉じ込めの強化が図れたためである。

高耐曲げ性能は FTT x のようなアクセスネットワークや、容易な操作性、柔軟なワイヤリング、高密度収納が求められる室内応用、そして顕著な損失増加を生じさせない容易なケーブル製造工程の実現へと導く。

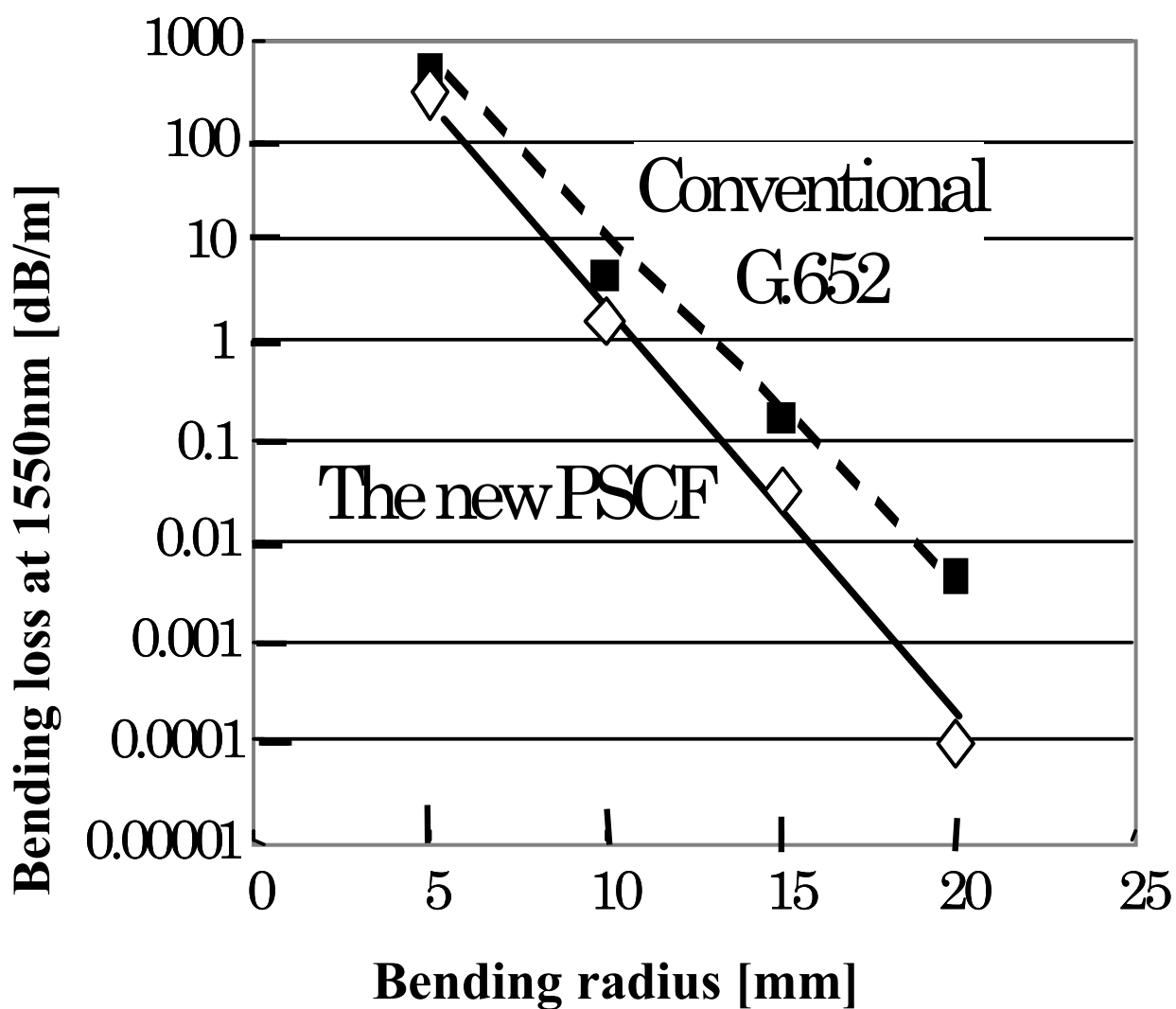


Fig.4.1 Bending loss of fabricated pure silica core single mode fiber

4.4 光ケーブル外径の細径化に関する検討

4.4.1 細径化に対する最適構造の設計

低温での損失増加は側圧緩衝チューブ内の初期ファイバ位置とケーブル収縮量の両者の関数で表される⁵⁾。ケーブル収縮に従って、側圧緩衝チューブ長対比で生じるファイバ余長がまず外側に移動することによってファイバが側圧緩衝チューブの壁に接触するまで増加し、その後続いて、側圧緩衝チューブ内で捻れが生じる。

図 4.2 に 4.3 項で述べた純粋石英コア G.652 規格準拋光ファイバと、従来型 Ge 添加コア G.652 規格準拋光ファイバにおける、ケーブル圧縮により生じる光ファイバの曲げ損失の計算結果を示す。内径/外径に対応する 1.2mm/1.5mm の側圧緩衝チューブに樹脂被覆 0.25mm 径（ガラス径：125 μ m）の光ファイバを 12 本挿入し、そしてその側圧緩衝チューブを 100mm 長ピッチで 1.5mm 径の強度補強ケーブル芯構成材の周りに撚り合わされている。

側圧緩衝チューブ内で捻れた光ファイバの位置は次式（式 1）に示すサイン曲線にて近似される。

$$y=(a/2) \times \sin(2 \pi z/p) \quad (1)$$

ここで

a : サイン曲線の振幅の 2 倍

p : ピッチ

さらに、サイン曲線の最小半径 R_{\min} は下式（2）で記述される。

$$\begin{aligned} R_{\min} &= p^2 / (2\pi^2 a) \\ &= a / (8\varepsilon) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで

ε: 次式(3)で与えられる。

$$\varepsilon = (L \cdot p) / p \quad \text{-----} \quad \text{(式 3)}$$

L: ピッチごとのサイン曲線長

上記の条件にて、一つの側圧緩衝チューブに12本の光ファイバが収容され、積み重ねられると、式2におけるパラメータ“a”は1.2mmのチューブ内径と0.25mmのファイバー芯の差である0.95mm以下に設定される。側圧緩衝チューブ内では、光ファイバは別の光ファイバの上に乗りがあっていると仮定すると、パラメータ“a”はチューブの内径1.2mmとファイバ径の2倍の差である0.70mmに設定される。

ファイバの曲率半径が長手方向に均一に **Rmin** と仮定して、おのおのの光ファイバ曲げ損失を計算するならば、εと光ファイバ曲げ損失の関係は図4.1と式2を使って表せ得る。

図4.2からわかるように、両者の光ファイバも側圧緩衝チューブ内で光ファイバが移動している間は光ファイバ曲げ損失は増加していない。

ケーブル圧縮が0.16%以上になると、側圧緩衝チューブ内で光ファイバの捻じれが始まり、従来型 G.652 ファイバの曲げ損失はケーブル圧縮率0.32%をもってして曲げ損失の増加が始まり、それはおおよそ-40℃におけるケーブル圧縮に匹敵する。

一方、純粋石英コア型の G.652 ファイバは0.35%のケーブル圧縮においても損失に変化はなく、これは概ね-50℃におけるケーブル圧縮率に相当する。故に、1550nmでおおよそ0.174dB/kmという非常に低い損失を達成している純粋石英コア型 G.652 規格準拠光ファイバは上述のように例え1.2mm径もの細い内径の側圧緩衝チューブに挿入されて小径化が図られたとしても-50℃付近の低温においてもその低損失は維持されると推定できる。

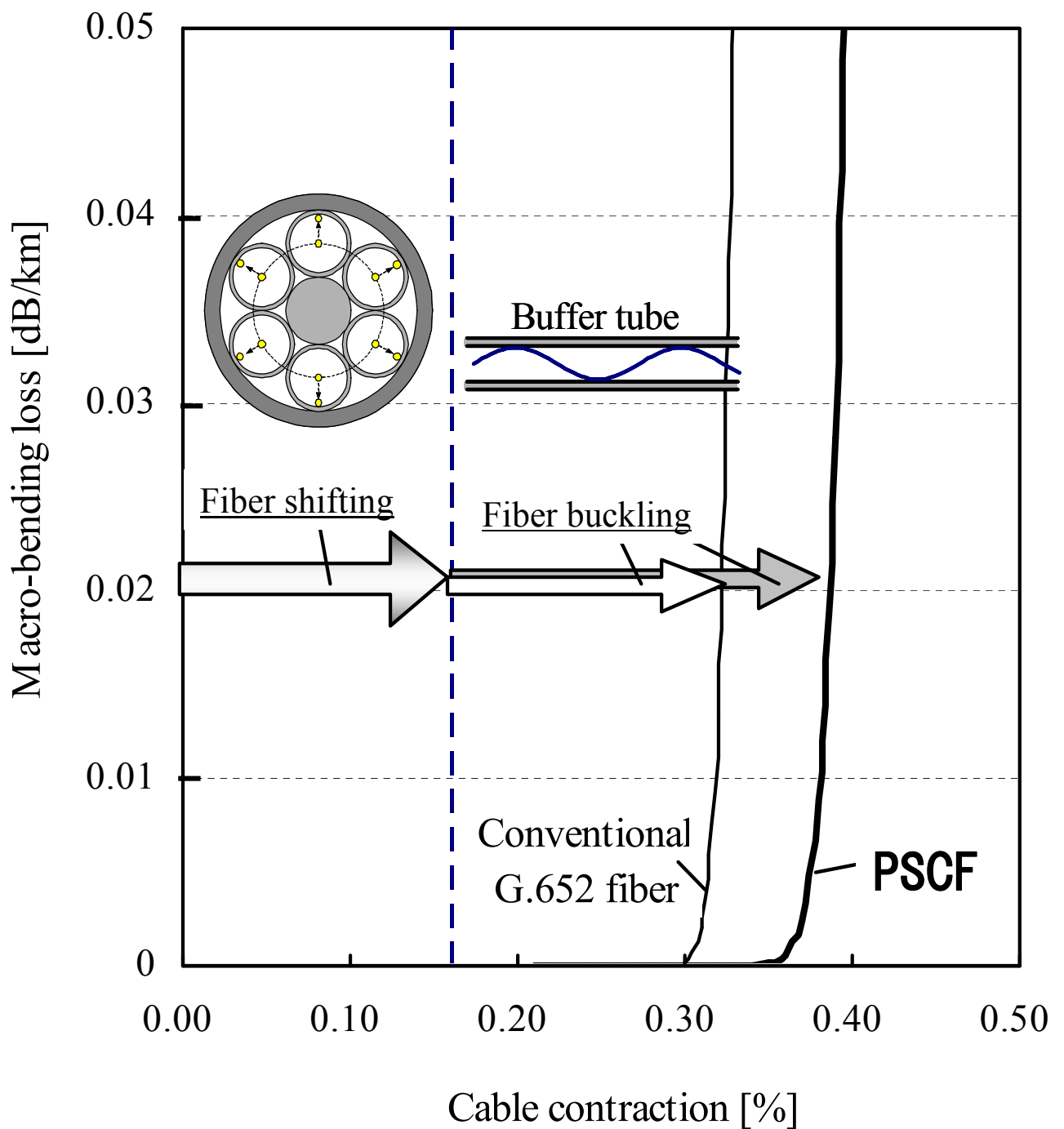


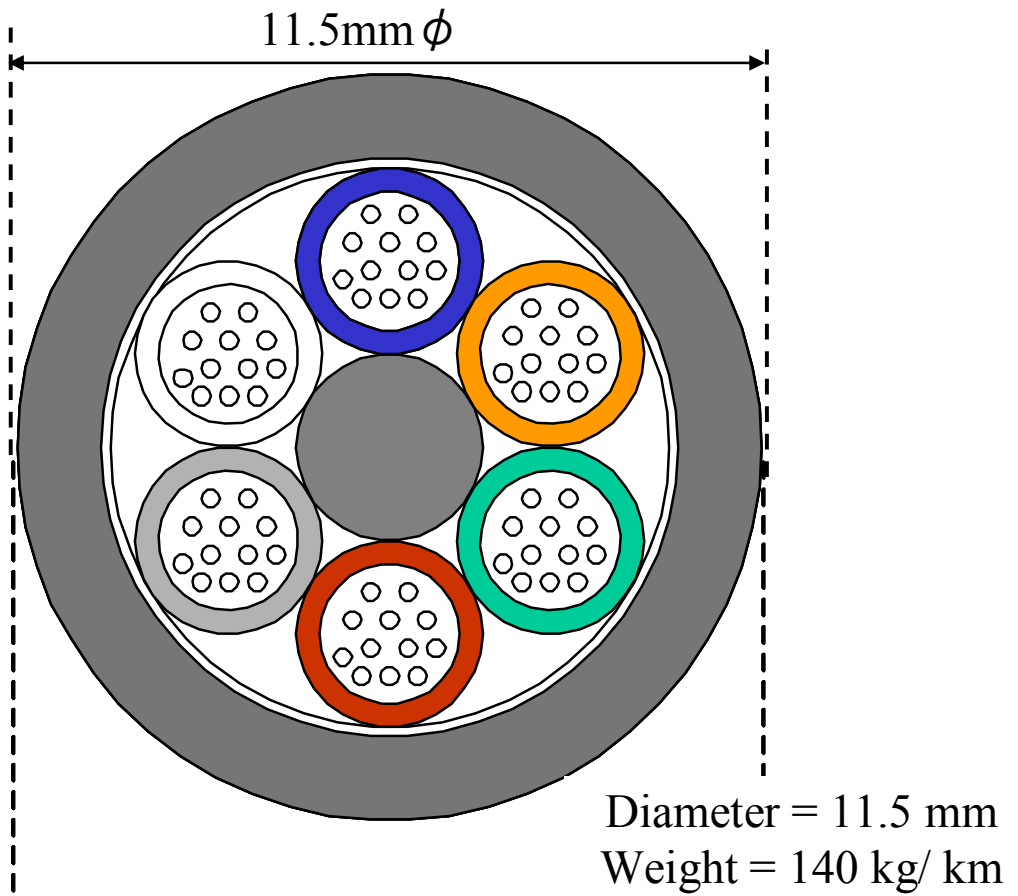
Fig.4.2 Calculation results of fiber macro-bending loss caused by cable contraction

4.4.2 細径光ケーブルの作成とケーブル化前後の損失変化の検討

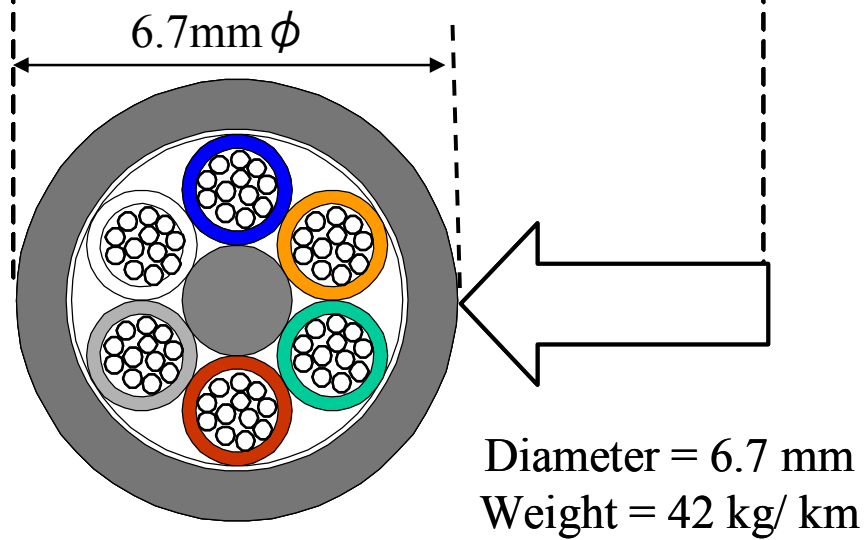
図 4.3 に従来型 G.652 ファイバを用いた 7 2 芯ファイバースチューブケーブルと純粋コア型 G.652 ファイバを用いた 7 2 芯ファイバースチューブケーブルの断面構造の比較を示す。小径化された側圧緩衝チューブが 1 芯 0.25mm 径の 1 2 芯ファイバを被せるように Jelly 充填しながら押し出された（6 芯を従来型、6 芯を純粋石英コア型にして 1 2 芯とした）。側圧緩衝チューブ材は Polybutylene terephthalate (PBT) を用い、内/外径を 1.2mm/1.5mm とした。ファイバの ϵ （式 3 に示す量）はほぼ零になるように制御した。それから、6 チューブが 1.7mm 径の強度補強ケーブル芯構成材の周りに SZ 撚りされ、続いて 6.7mm 径のケーブルになるように高密度ポリエチレン (HDPE) を被覆した。従来では 140kg/km あったケーブル重量が 42kg/km まで軽量化された。

今回試作した小径化 7 2 芯ケーブルの外観を図 4.4 に示す。また、ケーブル化前後の伝送損失を図 4.5 に示す。

波長 1310nm、1550nm、そして 1625 nm において測定された伝送損失には何の損失増加も認められず、波長 1550nm では 0.171dB/km という素晴らしい低損失値がケーブル化後においても確認できた。



(a) Conventional 72-fiber cable



(b) Downsized 72-fiber cable

Fig.4.3 Cross section of the downsized 72-fiber cable

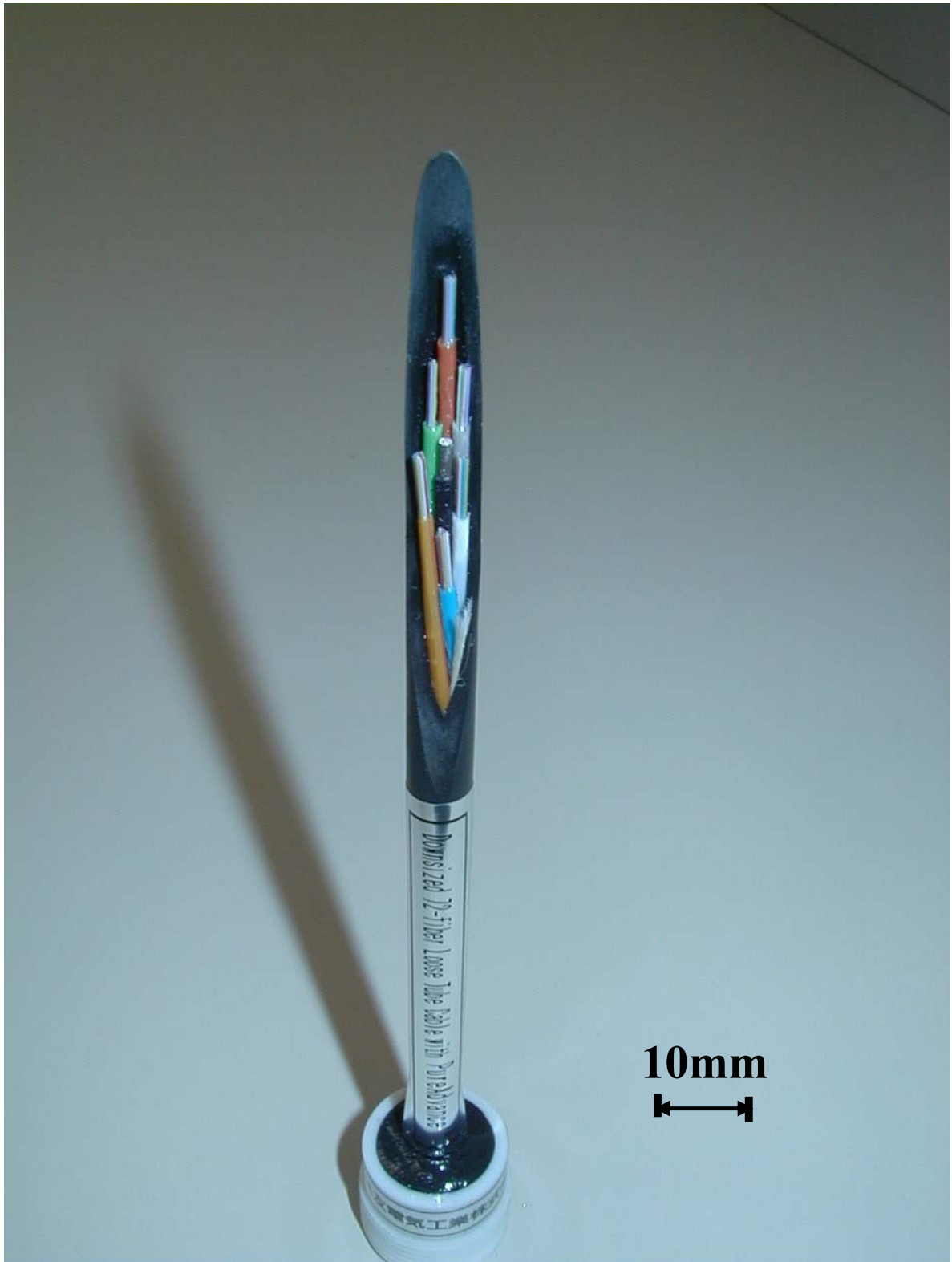


Fig.4.4 Picture of downsized 72-fiber cable

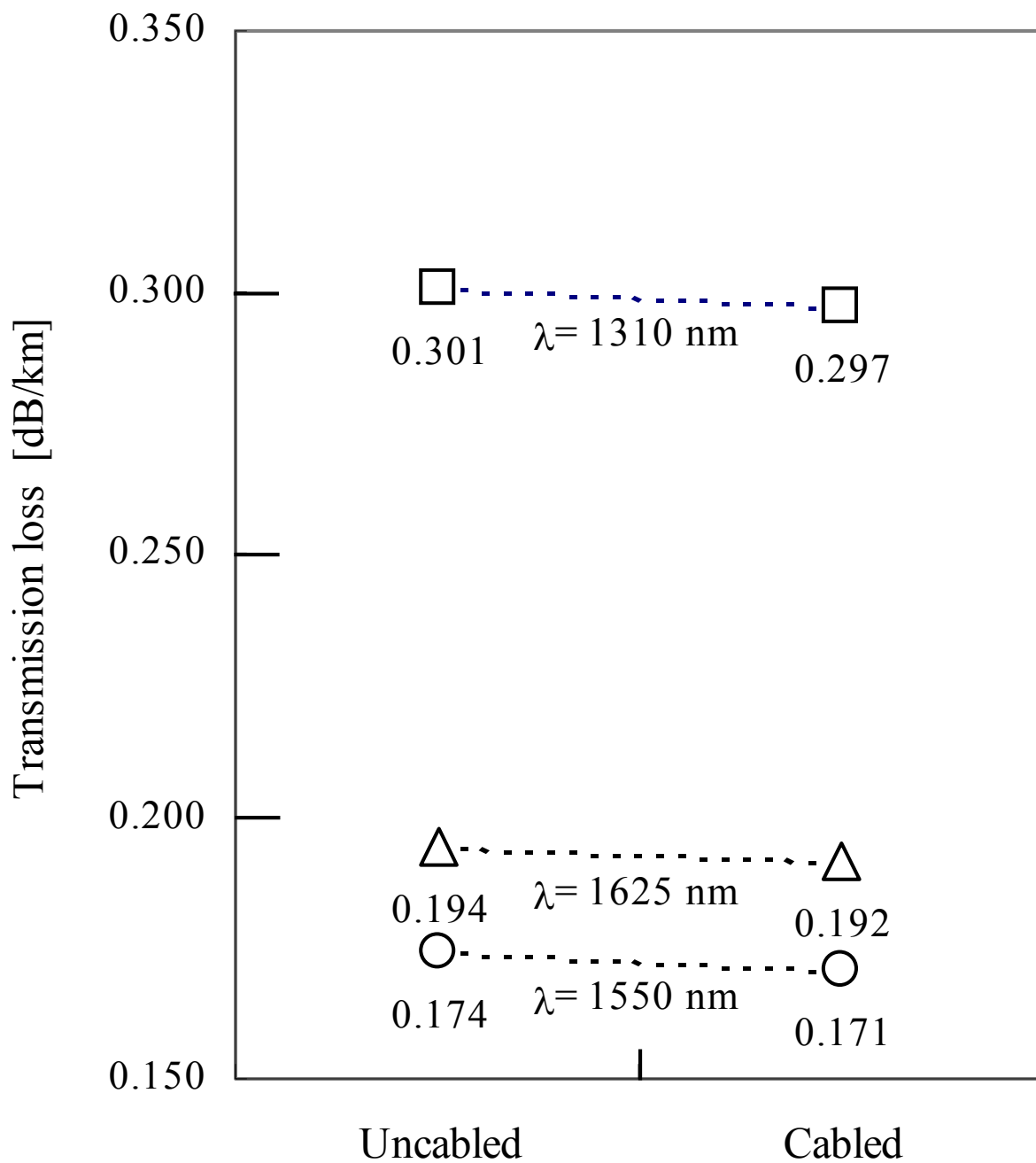


Fig.4.5 Transmission loss change of pure silica core type G.652 fiber before and after cabling

4.4.3 PSCF を用いた光細径ケーブルの温度サイクル試験

ケーブル環境試験として世界基準にされている Telecordia GR-20 に基づき、 -40°C から $+70^{\circ}\text{C}$ の範囲で温度サイクル試験を試作した小径化ケーブルについて実施した。

1 芯の側圧緩衝チューブ内に配置された 6 芯の従来型光ファイバと 6 芯の純粋石英コア型光ファイバについて各設定温度毎に伝送損失の変化を測定した。

図 4.6 に測定された 6 芯のファイバの損失増加の平均値を示す。

純粋石英コア型ファイバの波長 1550nm における最大損失増加量は 0.01dB/km で、従来型ファイバの最大損失増加量 0.02dB/km よりも小さかった。

以上の結果より、小径化されたルースチューブケーブルにおいてさえも純粋石英コア型 G.652 基準準拋光ファイバの従来ファイバ対比の高性能さが -40°C から $+70^{\circ}\text{C}$ の範囲内の繰り返し温度特性評価によって確認された。

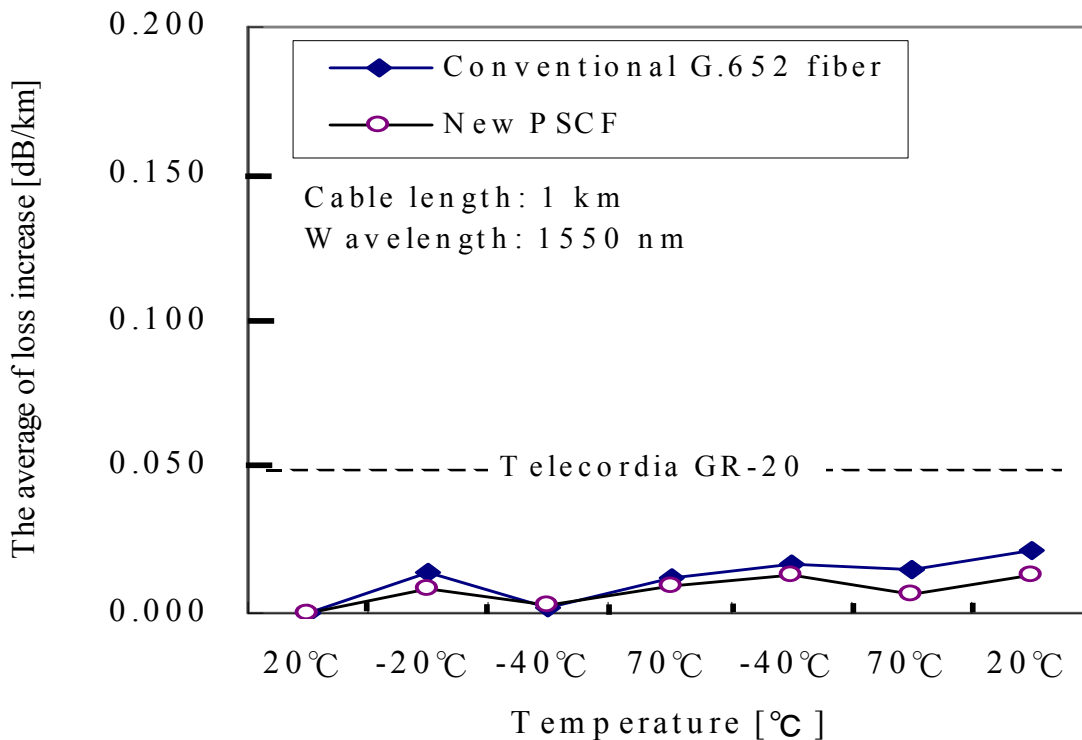


Fig.4.6 Temperature cycling test results

4.5 まとめ

近年のインターネットの容量拡大の中で光ファイバによる伝送方式が拡大基調にあり、光ファイバの耐曲げ損失性が FTTx(Fiber To The Home, Fiber To The Premise, Fiber To The Desk, 他)のようなアクセスネットワークや屋内応用設計にとって非常に重要な要素を占めている。本章ではステップインデックス型極小 MFD 光ファイバの設計とそのファイバ特性そして開発した FTTx 用細径・軽量光ケーブルの特性について述べた。

- 1) 純粋石英の、Ge 添加石英とは異なる屈折率材料分散特性を生かすことで、従来の汎用ステップインデックス構造 Ge 添加コア石英単一モード光ファイバでは不可能な範囲の MFD の極細径化を可能とし得るファイバの最適構造設計を示した。
- 2) MFD $8.6\mu\text{m}$ で、G.652 規格全てを満たす、純粋石英コア単一モード光ファイバの試作に初めて成功し、光ファイバ曲げ損失増加量の比較において、従来の Ge 添加石英型対比、1/5 (15mm の曲げ半径で、波長 1550nm での曲げ損失で比較) という高耐曲げ性能の実現に成功したことを示した。
- 3) 本研究にて開発した極細径 MFD(8.6 μm)ステップインデックス純粋石英コア型 G652 規格光ファイバにて、72 芯光ファイバルスチューブケーブルを試作し、従来型光ファイバケーブルとの重量・寸法比較を行い、従来型 140kg/km (ケーブル外径：11.5mm ϕ) に対して、42kg/km (ケーブル外径：6.7mm) という顕著なレベルのケーブル軽量・細径化について、初めての成功を示した。
- 4) 本研究において開発した軽量・細径 72 芯ファイバルスチューブケーブルの信頼性評価として最も重要懸念点として挙げられる温度サイクル試験を実施した。その結果、ケーブル環境試験基準にされる Telecordia GR-20 に基づく、 -40°C ~ $+70^{\circ}\text{C}$ の範囲の温度サイクル試験で異常なきことを確認し、高性能細径・軽量ケーブルの実現を示した。

第4章の参考文献

- [1] A.Weiss, P.Lausch, K.Nthofer, “Optimized 72 Fiber cable for Blown Installation in 10/8 mm Microducts” Proc.52th IWCS, pp.38-42, (2003).
- [2] G.Falk, “A new design family of optical fiber cables designed to cover a wide range of emerging applications” Proc.52th IWCS,pp.43-47(2003).
- [3] W.Griffioen, A.van Wingerden and C.van’tHul, “Versatile outside plant solution for optical access network”, Proc.48th IWCS,pp.152-156,(1999).
- [4] M.V.Davies, C.J.Esbester, R.Sutehall, P.Barker and D.F.Bastin,”Advances in blown cable technology: The development and life cycle analysis of a high density optical fiber cable”, Proc.50th IWCS,pp.658-665,(2001).
- [5] H.P.Debban, M.S.Rossi, P.A.Weimann,M.Kinard,C.S.Davis and J.Pedder, “Development of lightweight ribbon cables for blown installation”, Proc. 51st IWCS,pp.251-259,(2002).
- [6] W.Griffioen, H.Nijstad, A.T.M.Grooten, A.van Wingerden, G.Brown, D.F.Hawkins and G.Plummetaz, “a new extremely versatile, access network cabling concept for migration to optical fiber” ,Proc.45th IWCS,pp.485-489,(1996).
- [7] T.Jendel, J.Jason, B.Arvidsson, P.Merilainen, P.Salo and J.P.Tiesmaki,”Design and high-speed processing of new advanced blown fiber units(EPFU’s)”, Proc. 51st IWCS, pp.260-266,(2002).
- [8] H.P.Debban, L.M.Bocanegra, C.S.Davis,R.D.Small,Jr.,P.A.Weimann and M.R.Santana, “A new high-density cable core design”, Proc. 49th IWCS,pp.1-7,(2000).
- [9] M.Scneider, M.A.Nunes, and R.A.Mazza, “The influence of the optical cable surface in installation by blowing method” Proc. 50th IWCS, pp.742-746 (2001).

- [10] Matthew G. Soltis, Ray G. Lovie, Dean J. Rattazzi, "Next Generation Loose Tube Cable: Reduce the Size, Not the Performance", Proc. 49th IWCS, 2000, pp.155-163(2000).
- [11] Y.Chigusa, Y.Yamamoto, T.Yokokawa, T.Sasaki, T.Taru, M.Hirano, M.Onishi and E.Sasaoka, " Low-loss Pure-Silica-Core Fibers and Their Possible Impact on Transmision Systems," Journal of Lightwave Technology(IEEE/OSA) , Vol. 23, No11, pp.3541-3550, Nov.(2005).

第5章 高画質画像直接伝用石英ガラス光ファイバの開発とその適用に関する検討

5.1 はじめに

画像直接伝送用光ファイバは「画像光ファイバ」とよく呼ばれる。以下では、画像直接伝送用光ファイバを画像光ファイバの名称を使用して呼ぶこととする。

画像光ファイバは「多成分ガラス」を使用して1963年ごろに実用に供された¹⁾。

しかしながら、「多成分ガラス光ファイバ」では伝送損失の高さと箔積法というその製造方法から来る制限により、画像解像度を決定する「画素数」は数千から数万であり、その長さは最大3m程度であった。

その後、通信用石英光ファイバの技術を基に石英ガラス画像光ファイバが開発されてきた²⁾。石英ガラス画像光ファイバは広い波長領域に渡って光の伝送損失が低く、また耐環境性にも優れる特徴を有している。そしてその特徴を生かして、長さは数10mのものが得られているが、画素数は3万から5万程度が一般的には最大領域であり工業用テレビジョン (Industrial Television: ITV) の画質と比べ著しく劣るものであった。より多画素のものでは最大10万画素程度のものですでに開発されている³⁾が、多画素のものでは短尺かつ可撓性の乏しいものとなっている。このような状況下、ITVのような電気機器では耐えられない高温、狭窄、悪条件下でも石英ガラス画像光ファイバの特徴である、耐環境性、小径寸法性に優れた特性を生かし、かつITVの高解像度を損なわない程度の高画質を維持した監視、観察などを可能とする可撓性にすぐれた画像直接伝送路が望まれていた。

本研究において、これまでに報告例の無い、25万画素という従来にない高画質で通常のテレビに匹敵する画素数の高解像度かつ長尺で可撓性を有する石英ガ

ラス画像光ファイバの開発に成功し⁴⁾、石油精製工場の石油汚泥燃焼設備である回転炉内部の火炎燃焼状態監視への実システムに適用して、高い実用性の立証に成功した⁵⁾。

また、高画質の画像光ファイバを得るためには設計、性能評価を繰り返す必要があり、その画質評価手段が重要な評価技術として必要となる。画像光ファイバの伝送画像を評価する、汎用的・高精度な定量的評価手法の開発が必要であった。本研究においては高解像度 25 万画素画像光ファイバの開発に当たり、MTF (Modulation Transfer Function) 手法を使った汎用的・高精度画像定量評価装置を開発し、完成した 25 万画素画像光ファイバについて定量性をもたせてその高画質性能を評価証明することに成功した⁶⁾。

本章ではこの高画質 25 万画素画像光ファイバの開発とその特性、及び石油精製工場への適用とその高実用性⁷⁾ について述べる。

本節(5.1)に続き、5.2 節では超高解像度 (25 万画素) 画像光ファイバの開発について述べ、5.3 節では画像光ファイバの MTF 画質評価法の開発と 25 万画素画像光ファイバの評価について、5.4 節では 25 万画素画像光ファイバの石油精製工場へのシステム適用に関する検討について述べる。5.5 節で本章の要約を行う。

5.2 超高解像度 (25 万画素) 画像光ファイバの開発

石英ガラス画像光ファイバは図 5.1 に示すようなマルチコアファイバ構造からなる。低屈折クラッドマトリックスに互いに並行に配列された多数の高屈折率コアからなる画像光ファイバはマルチファイバ法によって作られる。このマルチファイバ法とは全長にわたって多数の画素が整列したファイバを製造する方法を言う。これは単一の高屈折率部であるコアと低屈折率部であるクラッドを有する素線を整列させて束ねて、石英管に充填して後、画像光ファイバへと線引きすることによって作られる。

可撓性と多画素化の両立を図るためには小径・多画素化が必要となる。画像光ファイバの小径化により高密度のコア充填を可能とするために、VAD (Vapor-phase Axial Deposition) 法とプラズマ外付法の組み合わせ手法⁸⁾によって作成した高 N.A. (Numerical Aperture) 素線を用いた。コア、クラッドの比屈折率差最大値 3.3%の素線を準備した。この高 N.A.素線を石英ガラス管に互いに正確に並列に配列して高温下で熔融して一体のガラス化状態の画像光ファイバ母材とした。この工程においては素線の表面を清浄に保つことが最も重要な条件であり、これは仕上げられた画像光ファイバを通して伝達される画像に欠陥を生じさせる原因となる気泡の生成を抑えるためである。

太径・長尺ファイバを作るに必要な十分な画像光ファイバ母材を作成すべく、今回、 $\sim 100\text{mm } \phi \times \sim 300\text{mm}$ 長もの大型画像光ファイバ母材の製造技術を開発した。

画像光ファイバ母材は通信用光ファイバ同様の方法で画像光ファイバに熔融線引きし、機械強度、信頼性保持のため、母材熔融線引後直ちに二層の樹脂被覆を施す。

本研究では、 $70\text{mm } \phi$ 画像光ファイバ母材から 10m 超の 25 万画素画像光ファイバを試作した。今回得られた画像光ファイバの構造データを表 5.1 に示す。

また、伝送損失波長特性を図 5.2 に示す。損失波長特性は通信用光ファイバよりも高い損失量を示しているが、画像光ファイバは、通信用光ファイバの数 10 km 単位のような km 単位の長尺で使用されるものではなく、数 m から数 10 m の m 単位での使用が基本となるため、図 5.2 に示す伝送損失波長特性は画像光ファイバとして充分低損失であることがわかる。またこの通信用光ファイバよりも高くなる損失増加の要因としては以下のように分析されている。画像光ファイバの伝送損失は構造上の問題や複雑な製造工程等によるものと考えられているが、線引温度のような製造条件の調整により低減が可能であることも知られている^{4.9)}。

さらに、画像光ファイバに重要な性能として要求される可撓性について評価した。得られた 10m の 25 万画素画像光ファイバを全長にわたって直径 600mm

φのガイドローラーを通すことで曲げ試験評価を行った。結果、画像光ファイバは破断することなく、ファイバ表面で0.5%の伸び歪に耐えうることが確認され、25万画素の多画素画像光ファイバにおいても、画像光ファイバの曲げ標準仕様に耐え得ることが確認できた。

画像直接伝送において残された重要な評価項目、画質評価については、その定量的評価方法の開発を含め、次項5.3にて述べる。

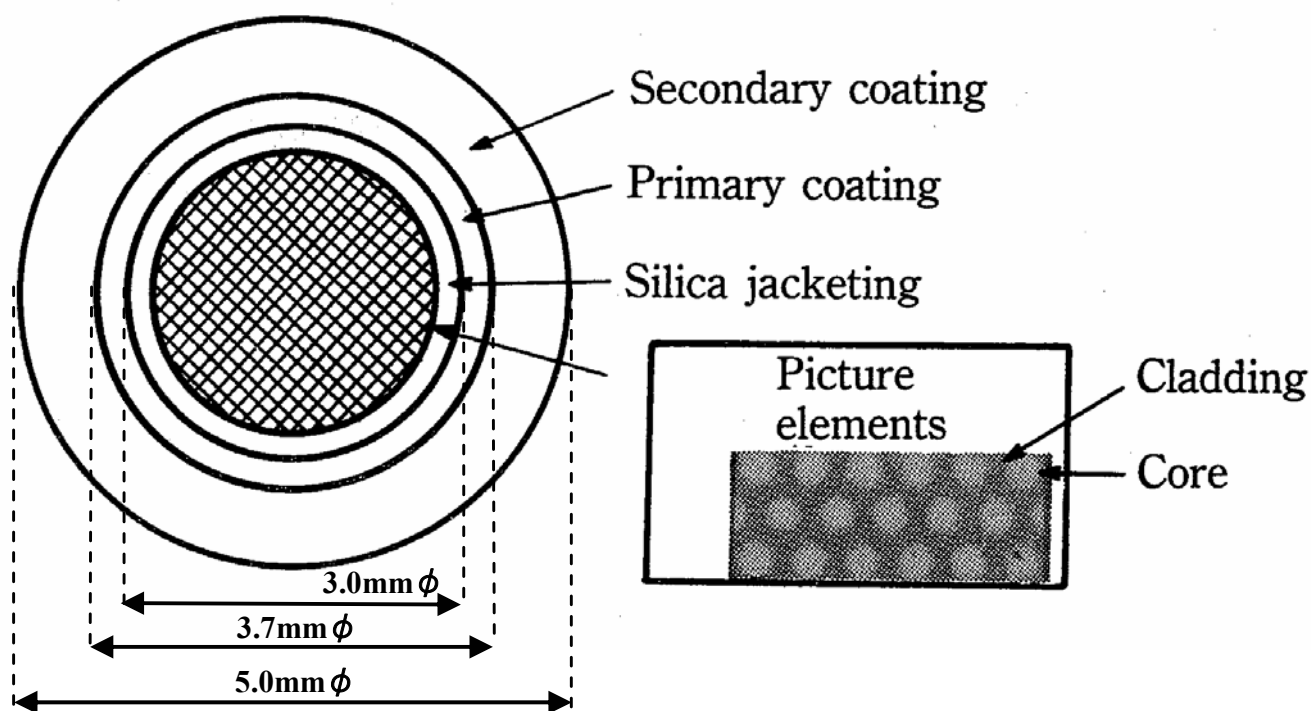


Fig.5.1 Cross-sectional structure of the silica glass image fiber

Table.5.1 Structure of Image Fiber

Number of picture	
elements	250,000
Diameter	
Core	3 μ m
Image fiber	3.0mm
Primary coating	3.7mm
Secondary coating	5.0mm
Material	
Core	GeO ₂ – SiO ₂ glass
Cladding	F-SiO ₂ glass
Primary coating	Silicone resin
Secondary coating	PVC
Refractive-index	
difference	
Between core and	
silica reference	
(Δ^+)	2.6%
Between cladding and	
silica reference	
(Δ^-)	0.7%
Between core and cladding	
($\Delta^{++} \Delta^-$)	3.3%

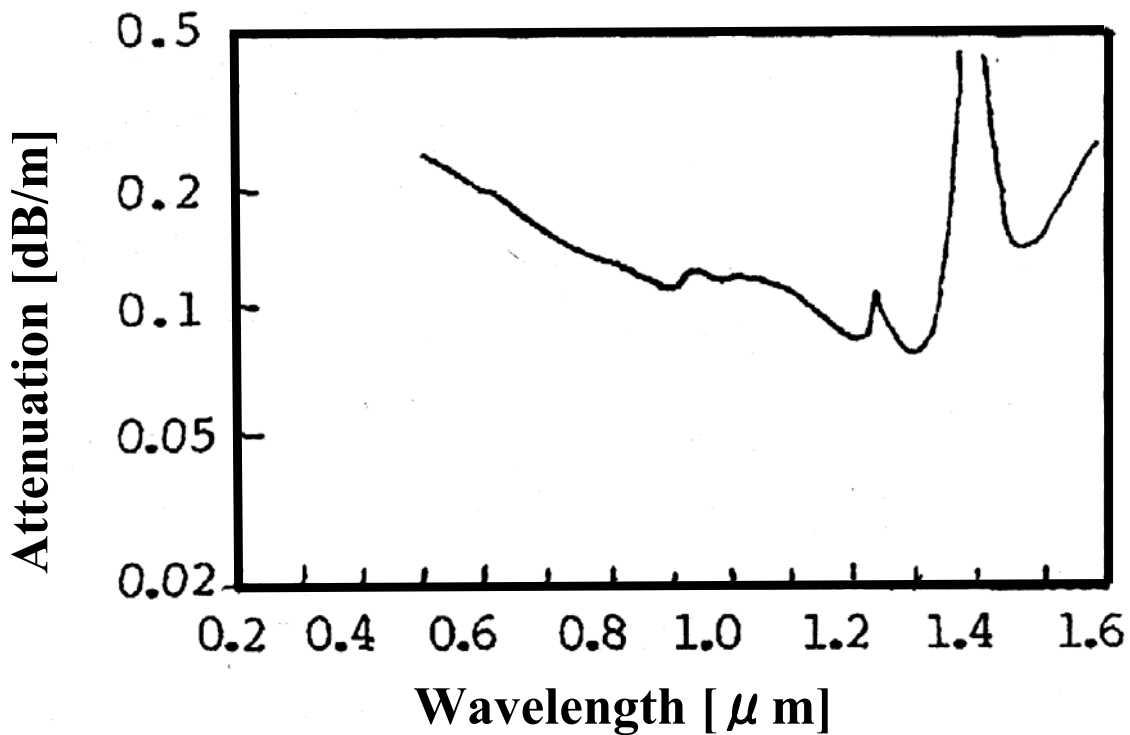


Fig.5.2 Spectral attenuation of 250,000 picture elements image fiber

5.3 画像光ファイバの MTF 画質評価法の開発と 25 万画素画像光ファイバの評価

画像光ファイバ伝送像の画質は、①画素数、②画素間の漏光、③クラッド伝播光、④画素の配列状態、⑤画素欠陥により規定される¹⁰⁻¹¹⁾。このうち①～③は構造設計上の問題であり、理論上の分解能を規定する。④と⑤は画像光ファイバの製造技術に関する問題である。

画像光ファイバの分解能は、従来簡便な方法として試験チャートを用いて視覚

的に評価されることが多く、汎用的・高精度な定量評価方法の開発が期待された。

本研究では汎用性のある定量的評価方法として、画像光ファイバ入射端面にスリット像を結像し、その伝送像をフーリエ変換することにより連続的に MTF (Modulation Transfer Function) 値を求める MTF 法の画像光ファイバ伝送像の画質評価への適用について検討を行った。MTF は光学レンズの性能評価の測定法として既に用いられているが、画像光ファイバ伝送画像の評価のためには専用の測定系の開発を必要とした。これまでに画像光ファイバの画像評価に MTF が用いられた例は存在する¹²⁾が、入射端面に試験格子を投影するのみの方法であるため離散的周波数評価となり、「汎用・高精度」の要求を満たすものではなかった。これに対し、今回は入射端面にコア径よりも十分小さな幅のスリット像を結像し、その伝送像をフーリエ変換することにより連続的に MTF 値を求める方法を取り、かつ画素配列の歪の影響を無くすべく動的走査法を取り入れた評価装置を開発することでその改善を試みた。

(a) MTF 測定系の構成

MTF は画像光ファイバを空間周波数フィルターとみなして、画像光ファイバ中を画像が伝播することによりその周波数スペクトルがどのように変化するかを示す関数である。

図 5.3 に画像光ファイバの MTF 曲線の測定のために開発されたシステムの構成を示す。

W (Tungsten) ランプからの光はスリットとレンズ (1) を通過して、画像光ファイバの入射端にスリットの縮小像を結ぶ。入射端に結像されたスリット像の幅は $2.5 \mu\text{m}$ である。画像光ファイバの出射端側におけるスリットの伝送像はレンズ (2) で拡大され、LSF (Line Spread Function) を測定するために CCD アレー上に投影される。画像光ファイバの出射端はスリットの投影像が CCD アレー方向に直角になるように顕微鏡で出射端を観察しながら回転調整する。

そして、求められた LSF をフーリエ変換することにより画像光ファイバの MTF 曲線が求まる。

画像光ファイバが無い場合の装置の MTF は、あらかじめレンズ（1）とレンズ（2）を対向させて測定し、測定値から自動的に差し引くことにより画像光ファイバ自体の MTF 値が求まる。

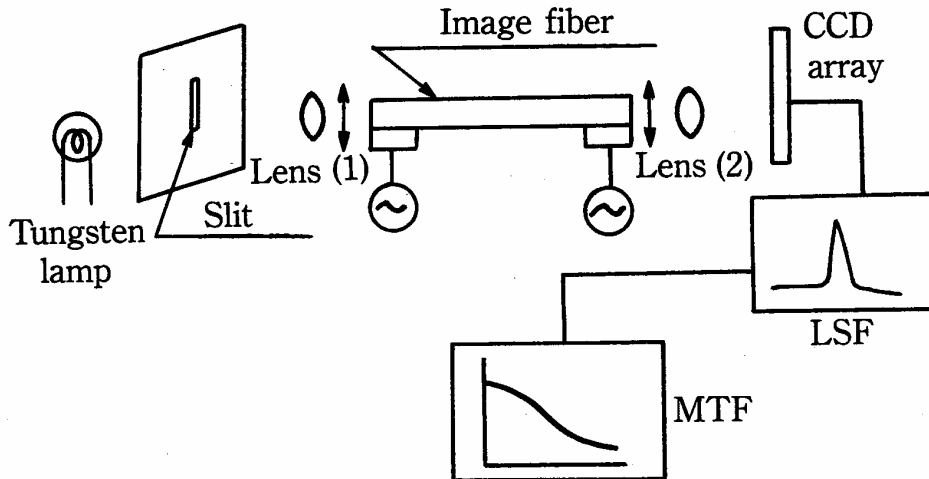


Fig.5.3 Diagram of MTF measuring system

(b)画像光ファイバの MTF 測定法

図 5.4 に示すように、画素の配列が画像光ファイバ入射端におけるスリット像と一致し、且つ隣接画素間の漏光が無視できる程度に小さい場合、画素が六方最密充填された画像光ファイバの MTF は動的走査法を用いて式（1）のように現わせる。

$$H(f_x) = \text{sinc}^2(2af_x) \quad (1)$$

ここで a : コア半径、 f_x : 空間周波数 である。

入射端に形成された像が画素光ファイバによるサンプリングの後に伝送される画像の画質を評価する場合には、動的走査法により有効な結果が得られる。動的走査法による実際の測定においては、画像光ファイバの両端をファイバ端面にそって同期をとって隣接画素間距離より大きな振幅で振動させることにより

MTF 曲線が得られる。

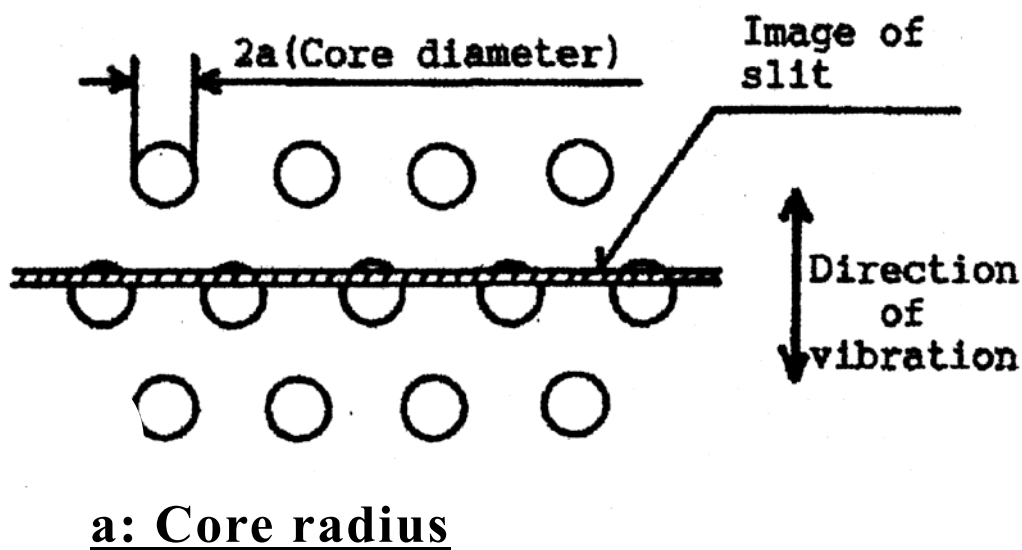


Fig.5.4 Entrance face of an image fiber during MTF measurement

(c) 評価実験とその結果

(1) MTF 特性のファイバパラメータ依存性

(a)の構成の装置を用いて表 5.2 に示すさまざまな構造を有する石英ガラス画像光ファイバの動的走査法による MTF 値の 50% 低下値を測定し、(MTF 値 50% 低下空間周波数を $f_{0.5}$ と表す) 式(1) によって求めた計算値との比較を図 5.5 に示す。

図 5.5 では計算値と実測値が良く一致し、このことよりこれらのサンプルについては画素ファイバの乱れ、隣接画素間の漏光の効果はコア径の効果に比較して實際上無視し得る程度に小さいことが示された。

図 5.6 では動的走査法で得られた供試ファイバ(6)の MTF 曲線を示す。供試ファイバ(6)は前述の 5.2 節で開発した 25 万画素画像光ファイバであり、44,000 画素/mm² の画素密度を有するものであり、150[lp/mm]^(注)の高解像度が得られていることがわかる。

(注) [lp/mm]は空間周波数の単位で 1mm の幅に白と黒の線 (Line pair) が何本並ぶかを表す。

Table.5.2 Fiber parameters

Fiber No.	Core diameter	Number of picture elements
1	10 (μm)	5 500
2	6.5	30 000
3	4.1	50 000
4	3.9	30 000
5	3.0	6 000
6	2.7	250 000

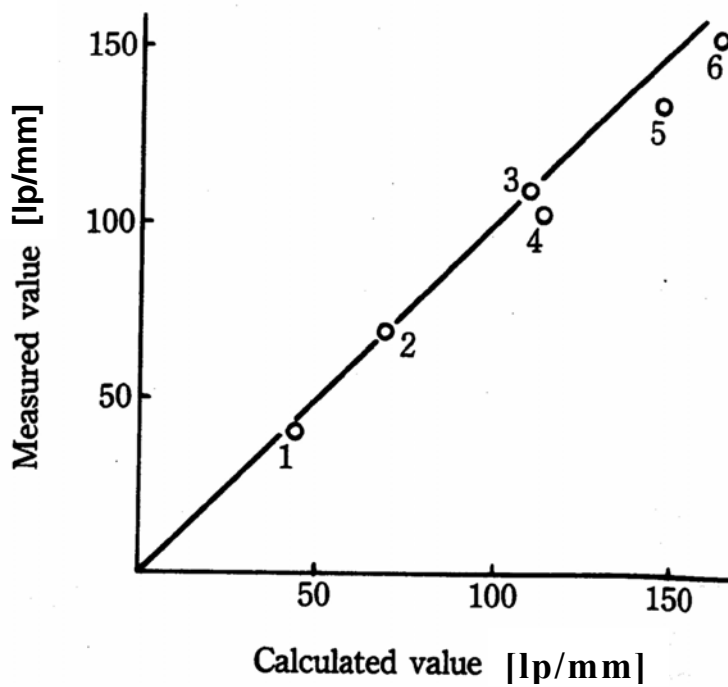


Fig.5.5 Comparison of measured values with calculated values where the MTF value decreases by 50%

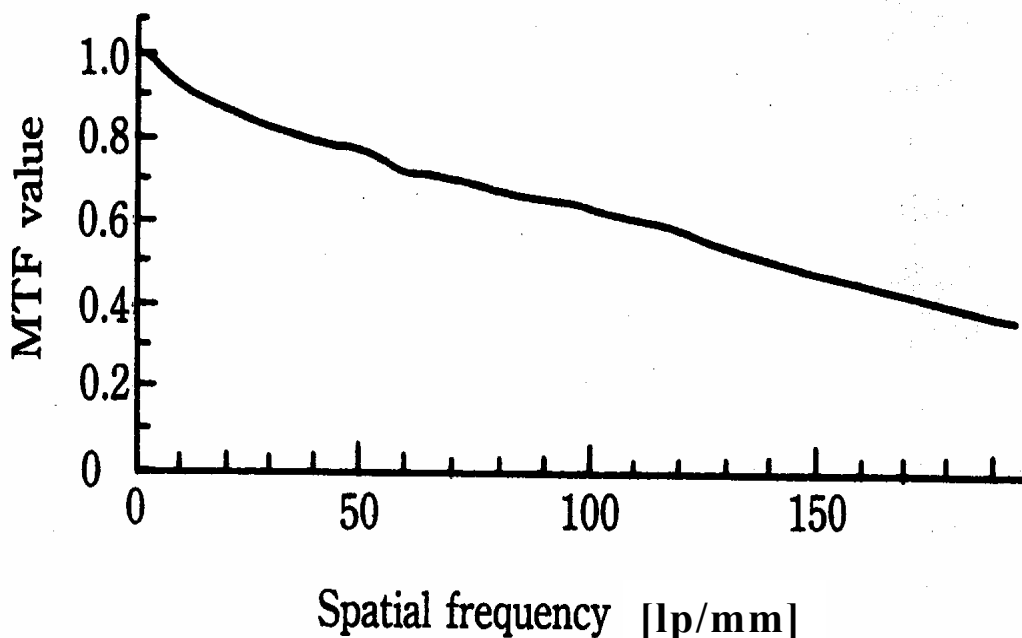


Fig.5.6 MTF of the image fiber with 250,000 picture elements

(2) MTF 特性の波長依存性

干渉フィルター（c 線、d 線、e 線、F 線、g 線）を使用して測定波長を変えて画像光ファイバの MTF 曲線を求めた。各フィルターの波長透過率を図 5.7 に示す。図 5.8 は表 5.2 のファイバ(4)と同等の構造パラメータを有するファイバの MTF 曲線を示す。 $f_{0.5}$ は 100[lp/mm]~109[lp/mm]の範囲内に入り、MTF の波長依存性は顕著には認められない。

(3)MTF 特性の入射 N.A. (Numerical Aperture) 依存性

入射 N.A.を変化させて（図 5.3 のレンズ（1）の入射開口角（F ナンバー）を変えることにより行った）画像光ファイバの MTF を測定し、結果を図 5.9 にまとめた。全ファイバはほぼ表 5.2 のファイバ(4)と同等の構造パラメータとし、N.A.値は 0.27 である。測定された MTF 値の 50%低下値 $f_{0.5}$ は入射 N.A.を 0.05 か

ら 0.25 まで変化させた場合に 115[lp/mm]~128[lp/mm]の範囲にあり、画像光ファイバの N.A.以下の入射 N.A.の範囲では MTF の入射 N.A.依存性は顕著には認められない。

(4)MTF 特性のファイバ長依存性

表 5.2 のファイバ(4)と同等の構造パラメータを有する 2 種類のファイバ長の画像光ファイバの MTF を測定し、結果を図 5.10 にまとめた。4m ファイバに対しての $f_{0.5}$ は 100[lp/mm]で、70m ファイバに対しては 109[lp/mm]となり、長尺品においても隣接画素間の漏光による画質の低下が認められない。長尺の場合、MTF の低周波特性が改善されているが、理由はクラッド伝播光の影響が長尺の場合除去されるためと考えられる。

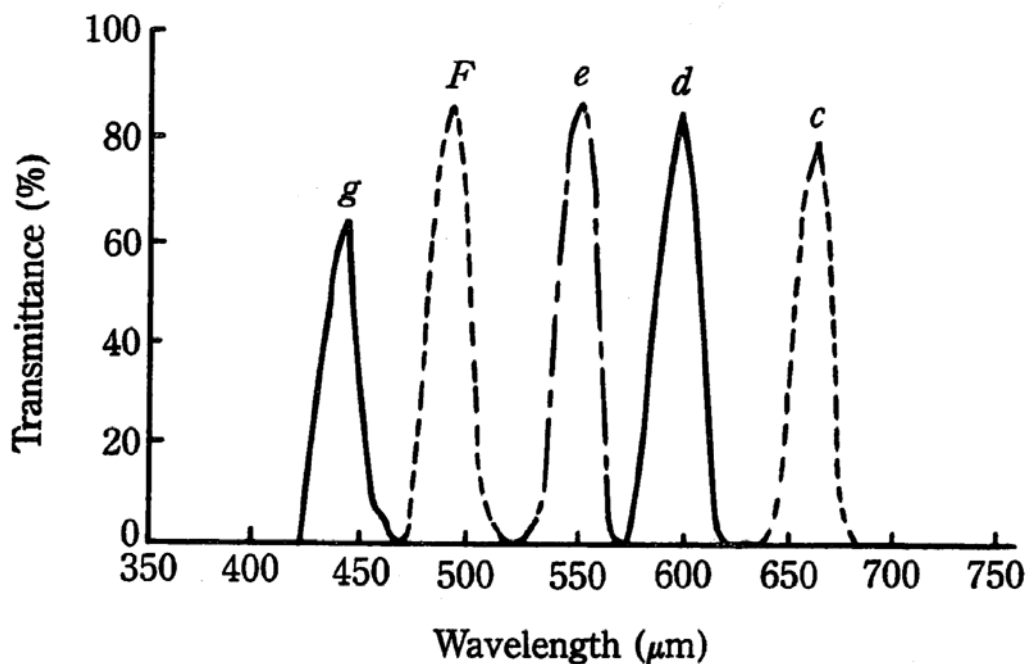


Fig.5.7 Spectral transmissions of interference filters

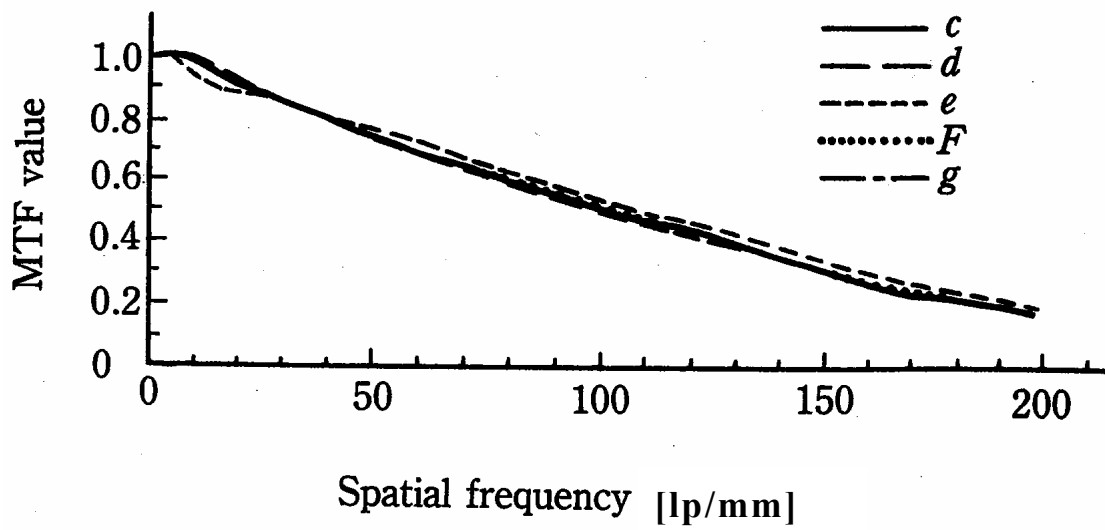


Fig.5.8 Wavelength dependence of MTF

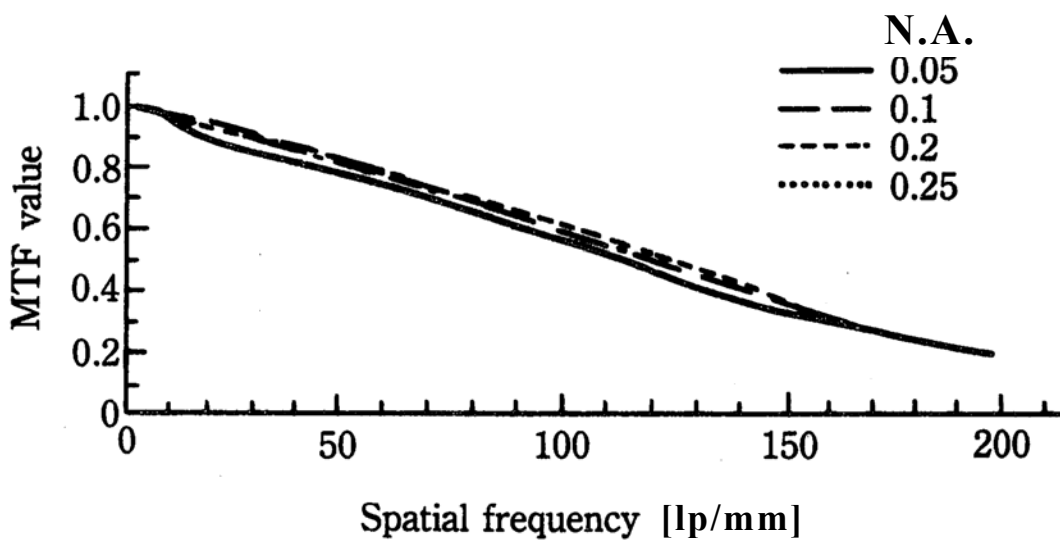


Fig.5.9 Launching N.A. dependence of MTF

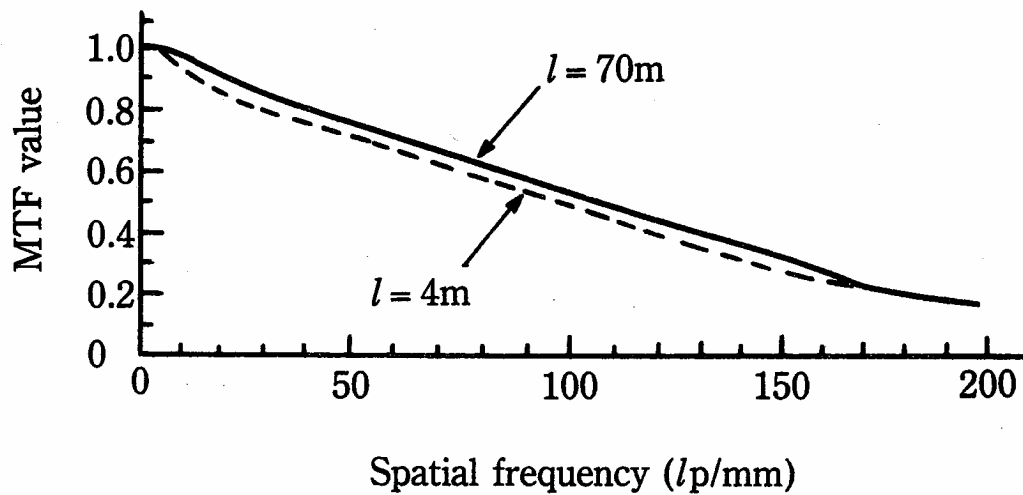


Fig.5.10 Fiber length dependence of MTF

(d) MTF 法評価まとめと結論

異なった構造パラメータを有する数種の石英ガラス画像光ファイバの MTF 特性を測定し、測定値は計算値と良く一致した。

また、画像光ファイバの MTF 特性の入射 N.A., 波長依存性の測定を行い、MTF 特性がこれらに顕著には依存しないこと、換言すれば、画像光ファイバにより、忠実な色調の像伝送が可能であることを明らかとした。また長尺品においても隣接画素間の漏光等による画質の低下は認められなかった。

今回開発した画像光ファイバ MTF 特性測定装置により、画像光ファイバ伝送像の汎用的・高精度定量評価を可能とした。

5.4 25万画素画像光ファイバの石油精製工場へのシステム適用に関する検討

25万画素画像光ファイバの実用性を検証すべく、石油精製汚泥処理回転炉内部の火炎の燃焼状態の監視システムへの適用について検討した⁶⁾。火炎監視モニターシステムの概要を図5.11に示す。システムは現場調査により適正な視野角や先端の耐熱温度など必要な仕様を決定した。

石油精製汚泥処理回転炉は石油の精製によって生じた汚泥を燃焼処理するための設備であるが、炉内温度は最高約1000℃と高温であり、また燃焼中の粉塵の発生も考えられるため、画像光ファイバの先端部はこれらの環境に耐える構造とする必要がある。このため、図5.11に示すような二層構造の冷却管によりエアパージによる粉塵の付着防止と冷却を行って50℃以下に保つことでファイバの被覆材などを安定に保った。

石油精製汚泥処理回転炉での画像光ファイバ先端取付向きは火炎の平均的な燃焼位置に合わせ、火炎を視野内にできるだけ大きく捉えられるよう、視野角は13°と比較的小さく設定した。

画像光ファイバで捉えた画像は、石油精製汚泥処理回転炉から10m以内に設置したテレビカメラに結ばれた。画像光ファイバの長さは最終的には現合により調尺し7.0mとした。画像光ファイバで捉えた炎の像は石油精製工場の広域監視網制御システムの映像情報の一つとしてテレビカメラを介して光信号に変換され、光ファイバケーブルによりセンター室へ伝送されて、モニタテレビに表示された。図5.12にモニタに表示された火炎の像を示す。図5.12(a)はシステム設置評価試験開始時のものであり、図5.12(b)は評価試験開始後約1ヶ月を経過したものである。評価試験期間中においては故障や伝送画像の劣化、汚れの付着などは皆無であり、信頼性も含め、高い実用性が立証された。

以上のような画像光ファイバを用いた炉内監視方式の特徴を、例えばテレビカメラを直接石油精製汚泥処理回転炉に装着して監視することを想定して比較すると、

- (1) 細径・軽量で設置、保守が容易である。
 - (2) 冷却空気の流量は少量で済み経済的である。
 - (3) 給電不要で本質的に防爆性能を有する。
 - (4) 電気部品を含まず信頼性が高い。
- などの優れた利点を挙げる事ができる。

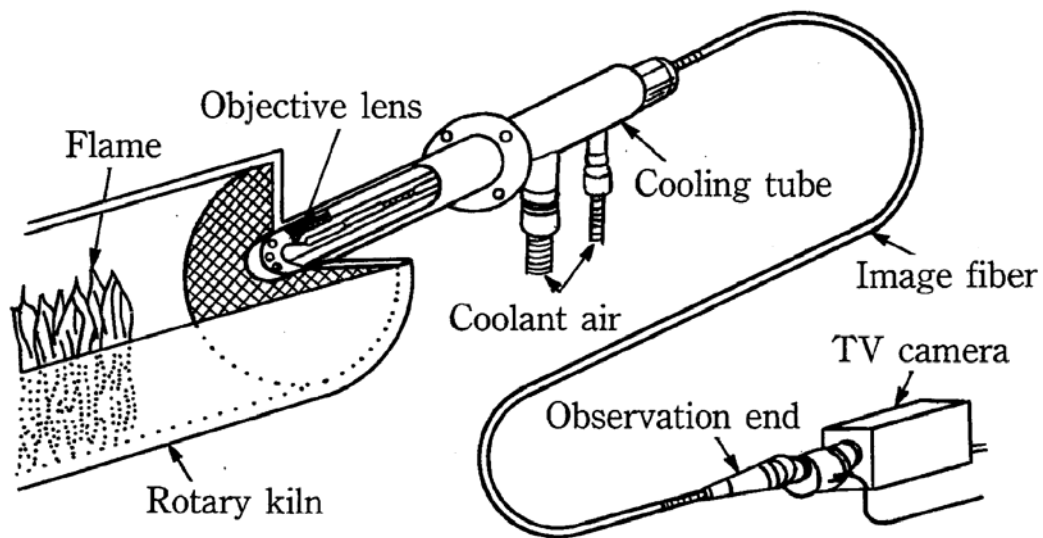
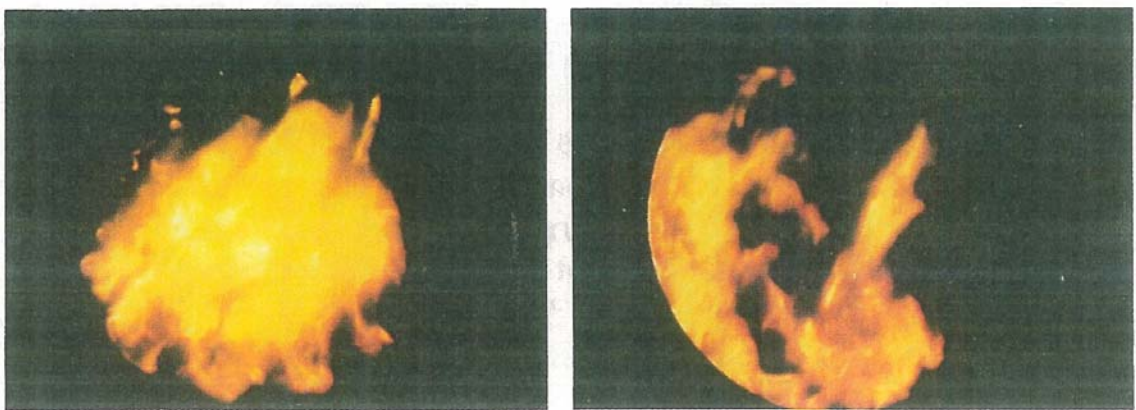


Fig.5.11 Schematic view of furnace monitoring test



(a) Initial state

(b) After 1 month

Fig.5.12 Monitored flame images

5.5 まとめ

本章では高画質 25 万画素画像光ファイバの開発とその特性、及び石油精製工場への適用とその実用性について述べた。以下に本研究で明らかになった点を示す。

- 1) 本研究において、これまでに報告例の無い、通常のテレビ解像度に匹敵する 25 万画素という高解像度の、しかも可撓性に優れた長尺石英ガラス画像光ファイバの開発に成功した。
- 2) 高画質の画像光ファイバを得るためには設計、性能評価を繰り返す必要があり、その画質評価手段が重要な技術として必要となるが、従来、画像光ファイバ伝送画像の汎用的・高精度定量評価手法は開発されていなかった。本研究において、MTF (Modulation Transfer Function) 手法を使った高精度画像定量評価装置を開発し、画像光ファイバの高精度画質定量評価を可能とした。
- 3) 今回開発した 25 万画素画像光ファイバを今回開発した画像光ファイバ画質定量評価法 MTF を用いて評価を行い、その高画質性能を定量的に示した。
- 4) 今回開発した 25 万画素画像光ファイバを石油精製工場の石油精製汚泥処理回転炉の炉内火炎燃焼状態の監視モニター用として実システムに適用し、一ヶ月の連続評価を経てその高い信頼性を確認し、実用性を示した。

第 5 章の参考文献

- [1] N.S.Kapany, “Fiber Optics, Principles and Applications” , Academic Press pp.81-109(1967).
- [2] 吉村耕三、“石英イメージファイバとその応用”、レーザー研究 Vol.11,No.10,pp.732-738、(1983).
- [3] Y.Matsuda, Y.Hattori, and Y.Chigusa, “High-resolution Silica Image Fiber” in Technical Digest, Conference on Optical Fiber Communication,(Optical Society of America,Washington,D.C.), paper TUN12, (1984).
- [4] Y.Matsuda, K.Fujiwara, Y.Hattori and Y.Chigusa,“High-resolution Silica Image Fiber”, in Technical Digest, Conference on Optical Fiber Communication, (Optical Society of America,Washington,D.C.),paper TUB5(1986).
- [5] K.Fujiwara, T.Fujimoto,K.Yoshimura, Y.Hattori, M.Kyoto, T.Kadota, Y.Matsuda and Y.Chigusa, “ Remote monitoring of furnace interiors by high-resolution silica image fiber”, in Technical Digest, 4th International Conference on Optical Fiber Sensors(Institute of Electronics and Communication Engineers of Japan) pp.147-150,(1986).
- [6] Y.Hattori, Y.Mtsuda, Y.Chigusa, “Modulation Transfer Function (MTF) measurement of Silica Glass Image Fiber”, in Technical Digest, 4th International Conference on Optical Fiber Sensors(Institute of Electronics and Communication Engineers of Japan) pp.327-330,(1986).
- [7] Y.Chigusa, K.Fujiwara, Y.Hattori and Y.Matsuda “Properties of Silica Glass Image Fiber and Its Application”, OPTOELECTRONICS-Devices and Technologies, Vol.1, No2, pp.203-216, December, (1986).
- [8] G.Tanaka, K.Fujiwara and K.Osaka, in Technical Digest, Conference on Optical Communication (Optical Society of America,Washington,D.C), paper TUG3,(1984).
- [9] 服部保次、「高解像度イメージファイバ」、「第 18 回画像工学コンファレンス」

資料、pp.215-220 (1987) .

- [10] 細野、“イメージファイバの伝送特性”、電子通信学会論文誌、Vol.J66-C,No.11,pp.843-850, (1983) .
- [11] 森、“一次元イメージファイバの伝送特性”、電子通信学会論文誌、Vol.J67-C、No.10、pp.706-713,(1984).
- [12] N.S.Kapany, “Fiber optics.IV . Image quality and optical insulation”, Journal of the optical society of America, Vol.49, Num.8, pp779-787, Aug.(1959).

第6章 高耐放射線性画像直接伝送用石英ガラス光ファイバの開発と光ブリーチング効果による寿命延長法に関する検討

6.1 はじめに

前章で述べたように光ファイバは通信用途のみならず、信号変換を伴わずに画像を直接伝送する用途にも使われている。この画像直接伝送用の光ファイバである画像光ファイバは原子力発電所、核燃料リサイクルシステム試験施設や放射性物質を扱うさまざまな研究機関といった、放射線環境においても広く利用されている。光ファイバを放射線環境で使用するには、その放射線による影響を考慮する必要がある。ガラスは放射線によって着色中心を生成するため、光の透過率が著しく減少することが知られている。この光の透過率の減少は、紫外光部から可視光部にわたり現れるため、観察、分析・計測システムなど紫外・可視光領域を中心にした波長領域を主に使用される画像光ファイバにとっては大きな問題となる。この放射線による着色中心に起因する光の透過率の減少は天然石英や多成分ガラス等のように不純物を含むガラスに著しく、従って、画像光ファイバを放射線環境に適用するためには特に耐放射線性を高めた石英ガラス系画像光ファイバの開発が重要である。一般的に、物質添加された石英ガラスコア光ファイバは純粋石英コア光ファイバよりも耐放射線性に劣るとされている¹⁻⁶⁾。そのため、放射線環境では純粋石英コア光ファイバが主に使用される。従って、本検討では純粋石英コアから成る画像光ファイバに焦点を置く。

本研究では、コアに純粋石英、クラッド部に弗素を添加した石英からなる光ファイバを素材として、そのコア、クラッド材料の耐放射線性能の違いを明らかとし、材料、構造、製造工程、条件の最適化を図ることで、従来 10^4R 程度であっ

た使用限界寿命を 10^5R/h という極めて高い放射線線量率下においても 10^8R 程度の使用を可能とする大幅な寿命の延伸に成功し⁷⁾、放射線関連環境施設における実使用において重要となる、線量率、繰り返し照射、波長特性など放射線による依存特性を明らかにした⁸⁻¹⁰⁾。

さらには、こういった画像光ファイバそのものの耐放射線性能向上化の検討に加えて、外部システムの付加による放射線環境での寿命延長策の検討も重要となる。本研究では特に「光ブリーチング効果」の積極利用について検討を行い、従来報告例の無い外部付加光源を導入した放射線環境での寿命延長策について、波長、光強度などその最適光源と効果の評価を実施し^{11,12)}、従来比5倍以上の寿命延長に成功した¹³⁾。

本節(6.1)に続き、6.2 節では高耐放射線イメージファイバの開発と γ 線照射特性に関する検討について、また6.3 節では石英ガラス画像光ファイバの光ブリーチング効果による寿命延長法の検討についてそれぞれ述べる。6.4 節で本章の要約を行う。

6.2 高耐放射線画像光ファイバの開発と γ 線照射特性に関する検討

一般的に、物質添加された石英ガラスコア光ファイバは純粋石英コア光ファイバよりも耐放射線性に劣るとされている¹⁻⁶⁾。そのため、放射線環境では純粋石英コア光ファイバが主に使用される。従って、本検討では純粋石英コアから成るイメージファイバに焦点を置く。本研究では、コアに純粋石英、クラッド部に弗素を添加した石英からなる光ファイバを素材として、クラッド材料の耐放射線性能への影響を明らかとし、材料、構造、製造工程、条件の最適化を図ることで、放射線環境下での従来寿命を大幅に上回る耐放射線画像光ファイバの試作に成功した。本節では耐放射線画像光ファイバの耐放射線性能に与えるクラッド材の影響評価、そして今回試作に成功した高性能耐放射線画像光ファイバの実使用上の重要特性となる、線量率、繰り返し照射、波長特性など放射線による依存諸特性と放射線環境化でのファイバ寿命について述べる。

(a)実 験

(a)－1、供試ファイバ

コア、クラッド材の放射線に対する直接の伝送損失変化度を評価すべく表 6.1 に示すようにコア材、クラッド材、それぞれのガラス材料をコアにした、ポリマークラッドファイバを試作した。

今回開発に成功した高耐放射線性画像光ファイバと、比較のために汎用型の Ge 添加コア画像光ファイバを準備した。その構造パラメータを表 6.2 に示す。また図 6.1 にそれら画像光ファイバの光伝送損失波長特性を示す。

(a)－2、ファイバ照射実験測定系

図 6.2 にファイバ照射実験測定系を示す。表 6.1、6.2 のそれぞれのファイバはこの同一照射実験測定系にて評価された。

Table 6.1 Parameters of test fibers (Evaluation of Core and Cladding materials)

Fiber	Core material	Cladding material	Core diameter	Cladding diameter	Fiber length
Core PCF	Pure silica	Polymer	125 μm	400 μm	100 m
Cladding PCF	Fluorine containing silica	Polymer	125 μm	400 μm	100 m

Table 6.2 Parameters of test image fibers

Fiber	Core material	Cladding material	Fiber Diameter	Number of picture elements
Fiber (1)	Pure silica	Fluorine containing silica	1.4 mm	5,000
Fiber (2)	Ge containing silica	Pure silica	1.5 mm	30,000

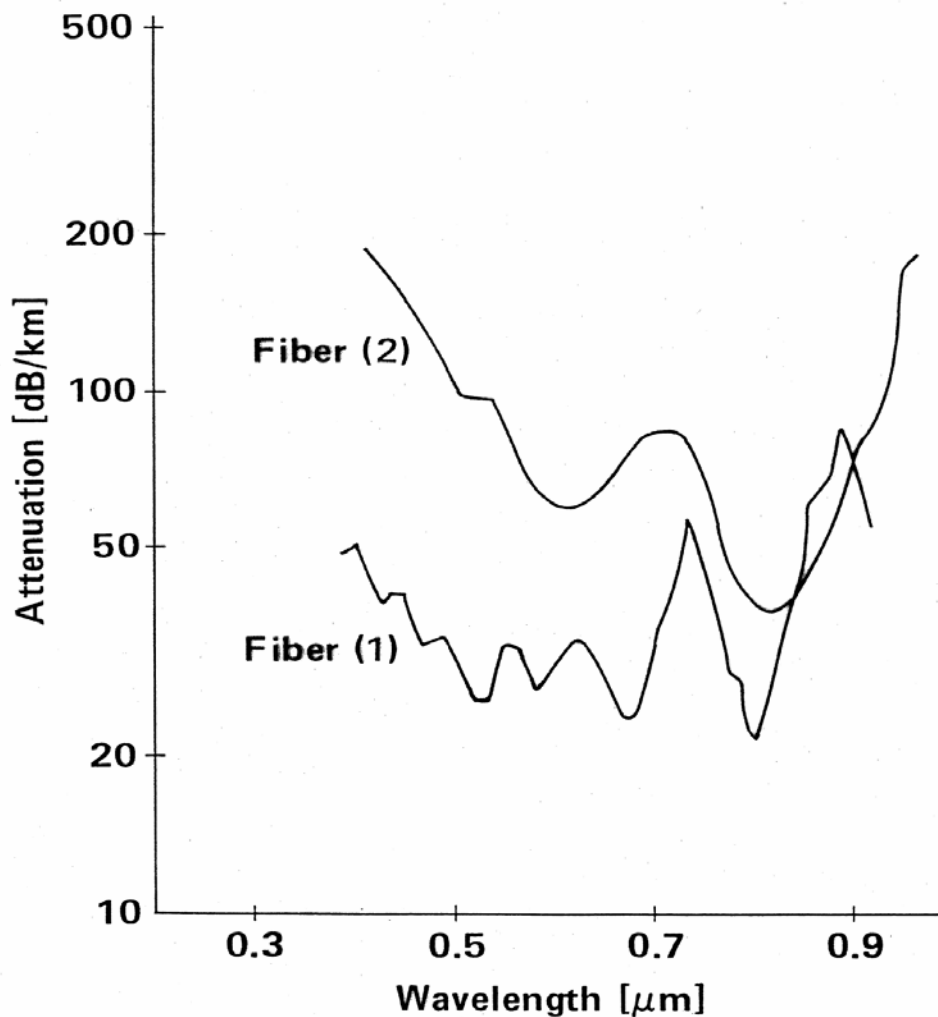


Fig. 6.1 Spectral attenuation of image fibers

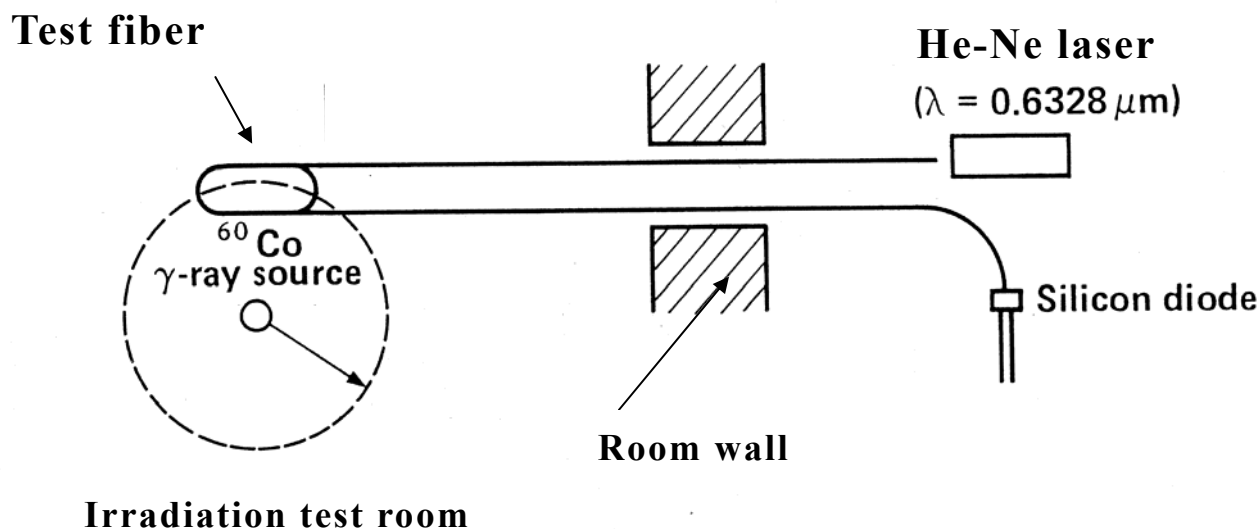


Fig.6.2 Measurement system

(c) 結果と考察

(c)–1、耐放射線性能に与えるクラッド材の影響評価

画像光ファイバのコア径は小さく、クラッドへの光強度分布の染み出しは大きく、無視できない。先にも述べたが、石英ガラスには一般的に不純物添加によって放射線による伝送損失は増加するとされており、従って、耐放射線画像光ファイバの耐放射線性向上と初期画質解像度維持の両面を考えた最適構造設計を考えた場合、コア、クラッドそれぞれの放射線に対する損失増加量の違いを把握しておく必要がある。

しかしながら添加材料に加えてガラス合成方法にも放射線特性は影響される¹⁻⁵⁾ため、耐放射線画像光ファイバのクラッド材の評価はその高濃度弗素添加石英合成法であるプラズマ外付け法で合成された弗素添加石英ガラスの評価を行う必要があるが、これまでにこのような報告例は無い。今回、本研究においては耐放射線画像光ファイバのクラッド材合成法であるプラズマ外付け法を使用して弗素添加石英を合成し、コア材とともにそれぞれポリマークラッドファイバにしてそ

の γ 線による伝送損失の増加量を評価した。図 6.3 にコア、クラッド材の γ 線照射による損失増加特性の比較を示す。

プラズマ外付け法による合成弗素添加石英クラッド材料はコア材料である純粋石英と比べて著しく γ 線誘起光伝送損失増加量が大きく、具体的な損失増加量の程度の違いとして初めての定量化データを得るに成功した。この結果から、耐放射線性能を向上させる構造設計においては、初期画質解像度を所要レベルの確保が図れるぎりぎりまで低下させながら、可能な限りコア径の拡大を図る、耐放射線性能優先の設計方針が明確化できた^{8,10)}。

(c)–2、 γ 線照射による伝送損失増加特性

上記(c)–1での検討結果に基づく設計と製造条件の最適化を図ることで今回試作した画像光ファイバの耐放射線性能を評価した。図 6.4 に画像光ファイバの γ 線照射による損失増加と照射線量依存性の評価結果を示す。

照射線量 10^5R で伝送損失増加量を比較すると、今回開発した耐放射線画像光ファイバの損失増加量は 35dB/km (波長 $0.63\mu\text{m}$)、汎用型 Ge 添加コア型画像光ファイバの $3,900\text{dB/km}$ と比較して著しい。またこの今回開発した耐放射線画像光ファイバの損失増加量 35dB/km (波長 $0.63\mu\text{m}$) はこれまでに報告例の無い低伝送損失増加量であり、図 6.4 から推定する画像光ファイバの寿命は 10^8R レベルへと延伸が可能となったことがわかる。本研究にて、従来 10^4R 程度であった使用限界寿命を 10^5R/h という極めて高い放射線線量率下においても 10^8R 程度までもその使用を可能とする大幅な寿命の延伸に成功した⁷⁾。

図 6.5 に今回開発した高耐放射線画像光ファイバの γ 線照射試験前後の伝送画像評価結果を示す。この結果から画質の変化は認められず、伝送パターンによる画質評価においてもその高い耐放射線性能が確認できた。

また、図 6.6 に今回開発した高耐放射線画像光ファイバの γ 線照射伝送損失増加量の波長依存性を示す。測定はハロゲンランプを光源に用いた回折格子型分光器を用いて $2\times 10^5\text{R}$ 照射後 40h 後に行った。測定波長は $0.4\mu\text{m}\sim 0.9\mu\text{m}$ とした。波長 $0.4\mu\text{m}$ 付近の損失増加量が大きく、波長 $0.5\mu\text{m}\sim 0.9\mu\text{m}$ についてはほぼ

均一な損失増加量と言える。 $0.4\ \mu\text{m}$ 付近は紫外光領域からの吸収帯の裾の影響を受けていることがわかる。

(c)－3、伝送損失増加量の照射線量率依存性

実際の放射線施設での使用を考えた場合、総線量のみならずさまざまな線量率条件に置かれることが考えられる。そこで伝送損失増加量の線量率依存性の評価把握が重要となる。図 6.7 に今回開発した高耐放射線画像光ファイバの伝送損失増加量の γ 線照射線量率依存性を示す。

結果から明らかなように伝送損失増加量は線量率に依存することがわかる。放射線施設においてはこの影響度の違いを把握した上でシステム設計する必要があることがわかる。

(c)－4、繰り返し照射特性

図 6－4 に示すように、画像光ファイバの γ 線照射による伝送損失増加量は連続照射条件下では照射総線量に比例して増加している。しかしながら実際の放射線施設ではさまざまなシステムの使われ方が想定され、連続照射が常態とは限らず、観察・計測が終了した後は、照射環境下から一度退避格納される場合も少なくない。そこで今回、照射と照射中断を繰り返すことによる照射損失増加量と総線量の間関係を連続照射の場合と比較してみた。繰り返し照射の結果を表 6.3 に示す。表 6.3 から明らかなように照射を中断すれば照射中に生じた伝送損失の増加は回復を示すことがわかる。したがって、放射線施設においてはシステム寿命を延ばすためにも繰り返し照射条件となる、いわゆる使用しない時の放射線環境からの退避を実施しながらの使用が総被曝線量対比の寿命を延ばすことに有効性を発揮する。これを考慮したシステム運用の設計が有効と言える。

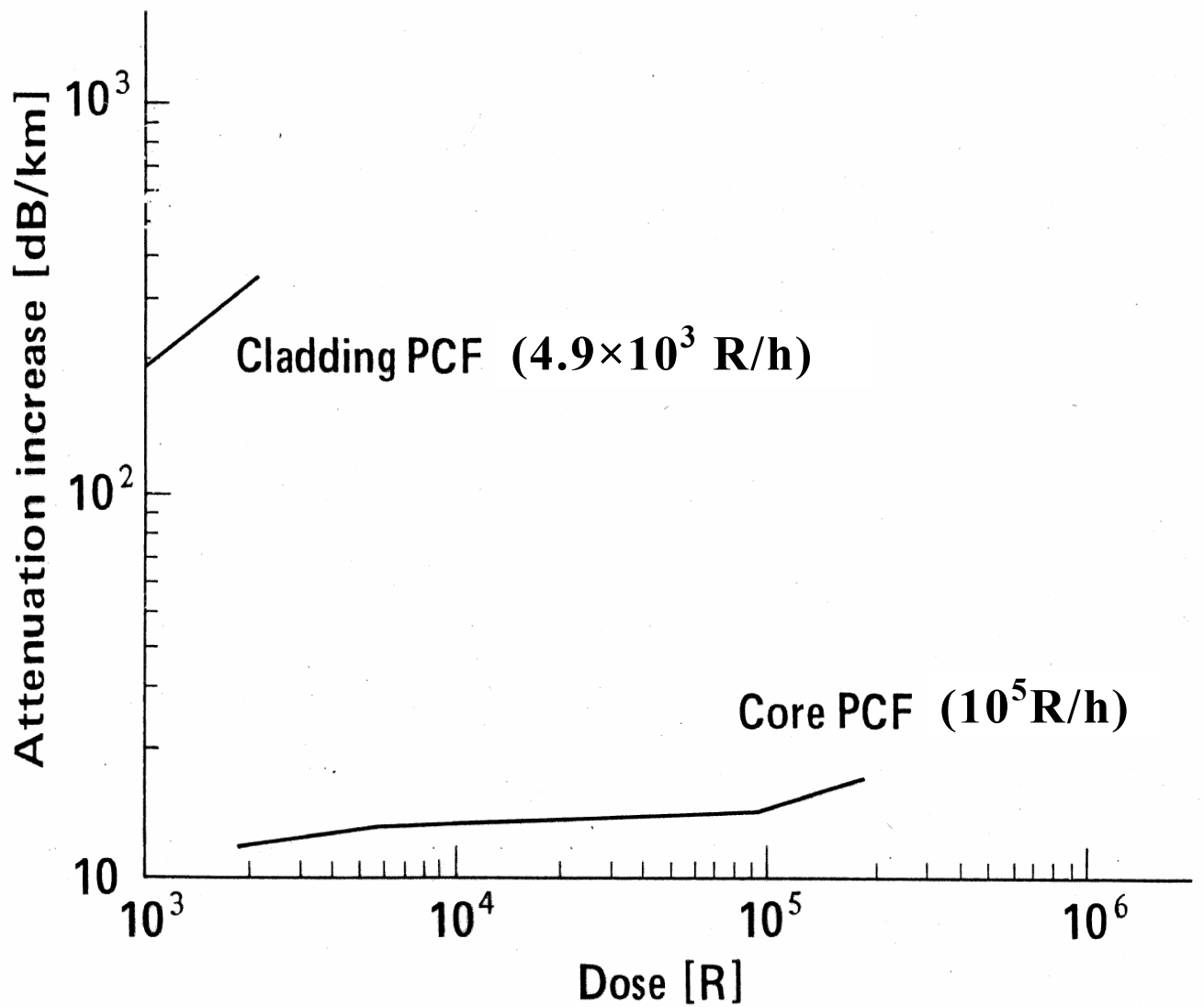


Fig.6.3 Attenuation increase of core and cladding materials

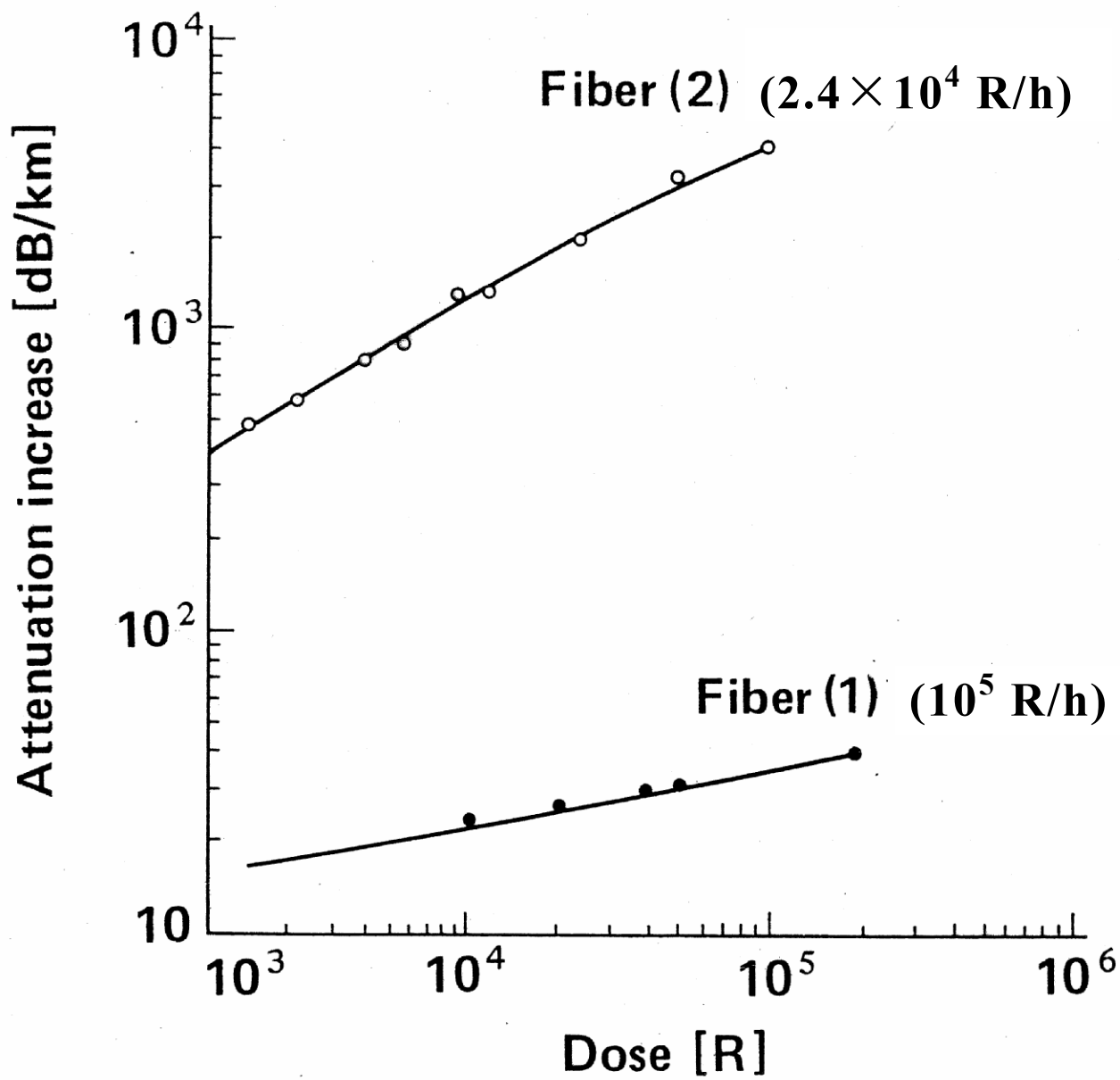
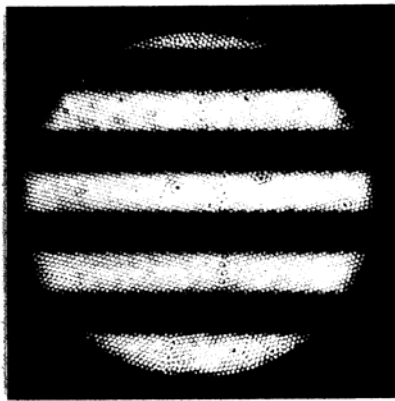
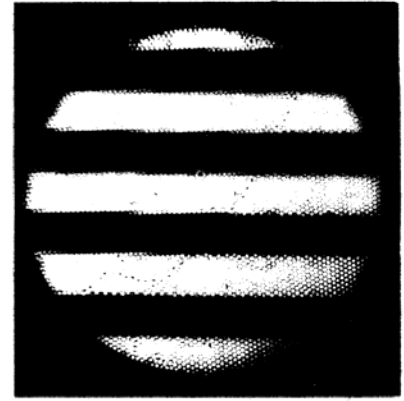


Fig.6.4 Attenuation increase by γ -ray irradiation



(a) Before irradiation



(b) After irradiation
(2×10^5 R)

Fig.6.5 Transmitted picture

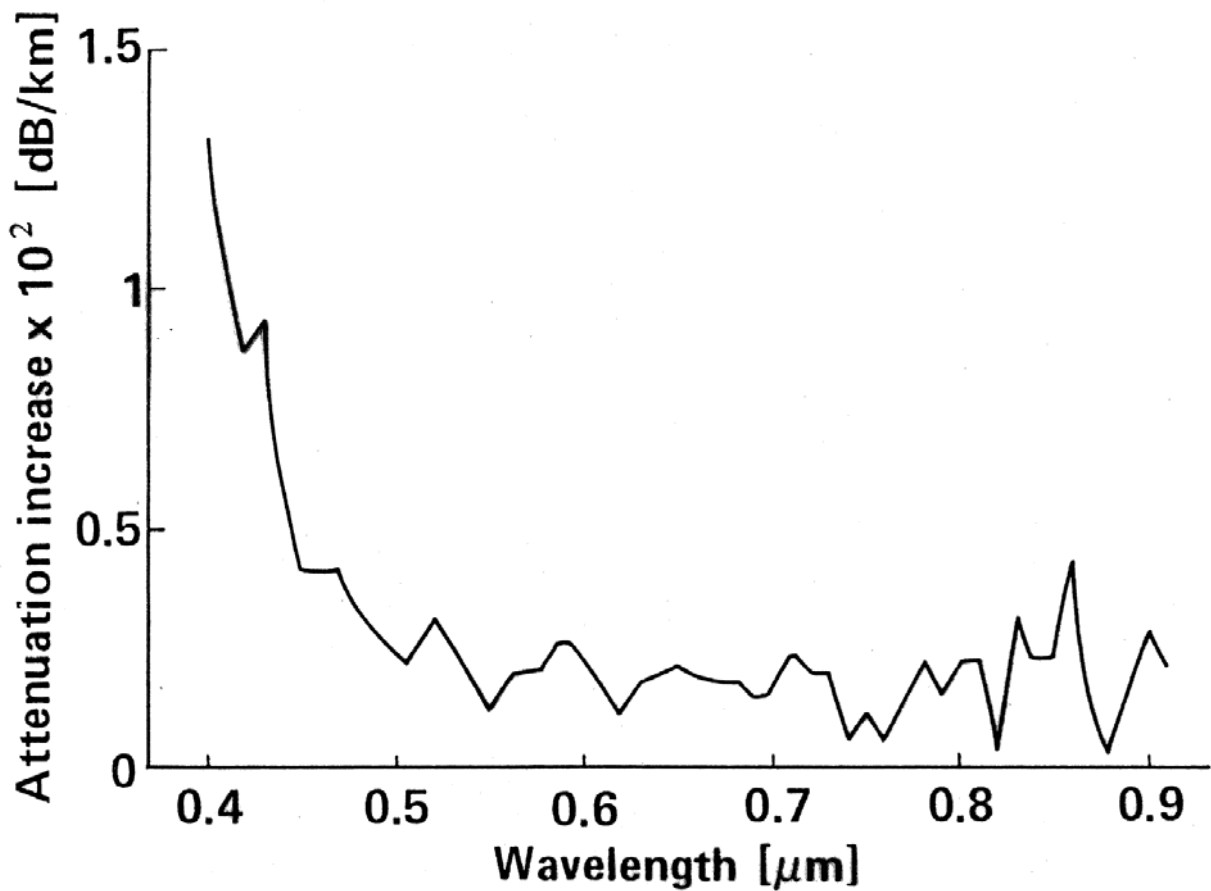


Fig.6.6 Wavelength dependence of attenuation increase

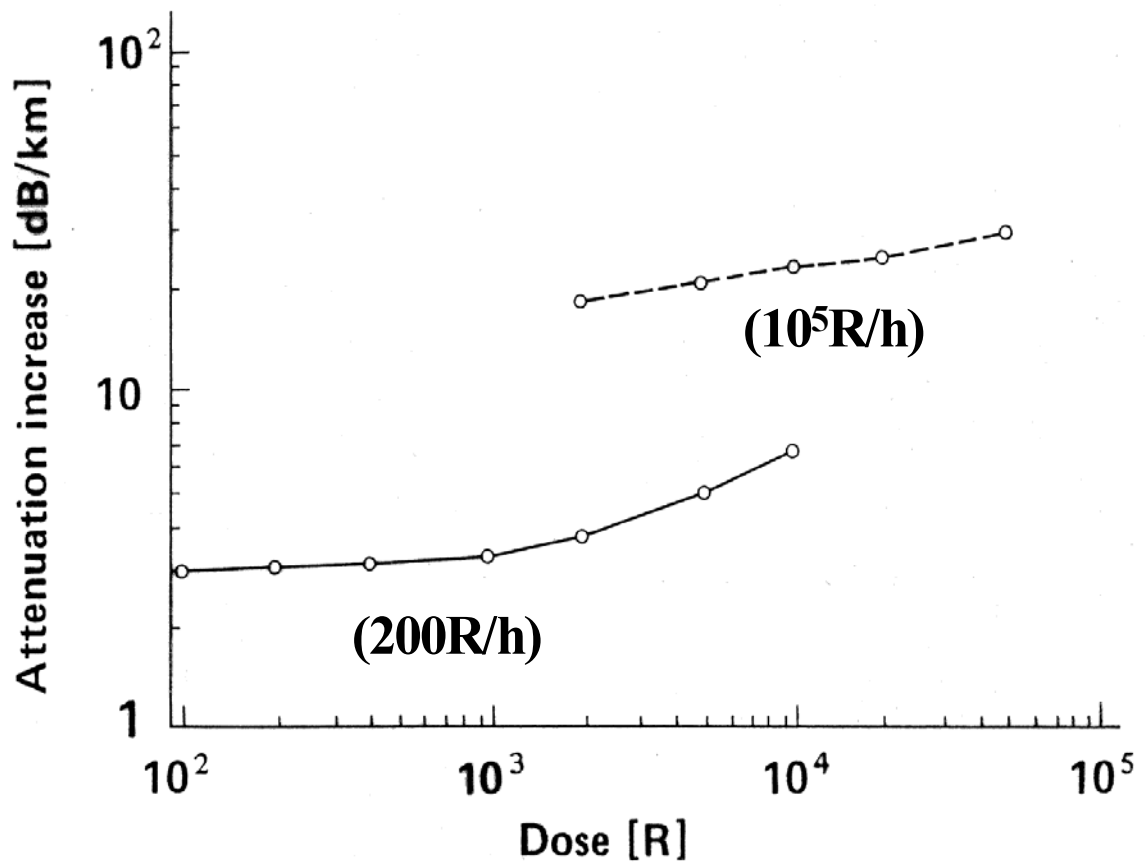


Fig.6.7 Dosage dependence

Table 6.3 Attenuation increase by repeated irradiation

	1st irradiation (2 × 10⁵ R)	After 2h pause	2nd irradiation (2 × 10⁵ R)	After 2h pause
Attenuation increase (dB/km)	39.8	14.2	55.5	20.4

6.3 石英ガラス画像光ファイバの光ブリーチング効果による寿命延長法の検討

核燃料リサイクルシステム試験施設ではさまざまな遠隔操作システムが開発されている¹¹⁾。これらのシステムには石英ガラス画像光ファイバも使用されている。前項に述べたように画像光ファイバの耐放射線性は大きく改善された⁷⁾。しかし、さまざまな放射線研究施設では尚も画像光ファイバの放射線環境における使用寿命の延長が図れないかと期待は強い。光エネルギーを利用した、放射線環境での光伝送損失増加の抑制効果を「光ブリーチング効果」と呼ばれ、この効果を使用した通信用光ファイバの寿命延長に関して幾つかの報告が既になされている^{14, 15)}。一般的に通信用途の単一コア光ファイバの場合、高強度の光が信号伝送光として用いられるため、通信用光ファイバ内には光ブリーチング効果が比較的容易に生じる。一方、画像光ファイバは主に物体の観察や化学分析などで物質から発生するかすかな蛍光の伝送路として使用されるため、かすかな強度の伝送光そのものによる光ブリーチング効果の発現を期待することは難しい。そこで、画像光ファイバの寿命延長を図るためには、より大きな光ブリーチング効果を引き出す必要があり、そのためには伝送光自身とは別に付加的な光源を導入した効果の増大に関する検討が重要となる。しかしながら放射線施設での画像光ファイバの寿命延長にこういった検討がかつて成された報告はなく、ここでは画像光ファイバの光ブリーチング効果を利用した寿命延長における、光ブリーチング光源、光強度、環境放射線線量率、環境温度の影響について述べる。

(a) 実験

(a)－1 供試ファイバ

供試ファイバとして、純粋石英コア、弗素添加石英クラッドから成る V 値（画質パラメータ）を合わせた画像光ファイバを 2 種類試作した。その諸元を表 6.4 に示す。

ファイバ 1 にて各種条件検討を行い、この結果をもとに、実際のシステムに適

用される規模に近づけたファイバ 2 にて長時間照射検討を行った。

(a)－2 γ 線照射及び光ブリーチング条件

γ 線の照射は線源として ^{60}Co を使用した。光ブリーチング効果の、光源、光量、温度、線量率の依存性を調べるため、光ブリーチング用光源として、本実験においては He-Cd レーザ、Xe ランプ、D₂ ランプを用いた。これは光ブリーチング光源として出力波長領域、出力強度、実験上の取り扱い易さに加え、実使用システムに供するための一つの重要な要素となるシステム費用面をも考慮に入れた選択。そしてその光量及び γ 線照射線量率、又、温度を変えてその効果の違いを評価した。その試験条件を表 6.5 に示す。

(a)－3 実験測定系

光ブリーチングの方法及び照射中の測定系を図 6.8 に示す。ファイバは束状(ファイバ 1 は 10 m、ファイバ 2 は 8.4m) 室内放置の状態での照射。光ブリーチングの方法として、ファイバの一端より光を連続入射させておく。測定時は図 6.8 に示すように一度光ブリーチング用光源からファイバを取り除き、ファイバの一端を受光器である光電子増倍管側にセットして出射光量の変化を測定した。測定後は分光光度計からファイバを外し、元の光ブリーチング光源にセットしておく。また照射実験後、回折格子型分光器にて紫外光領域の損失を測定した。

Table 6.4 Parameters of test fibers

Fiber	Fiber Diameter, [mm]	Number of Picture Elements	Core Material	Cladding Material	Δn	N.A.
Fiber 1	0.2	140	pure silica	fluorine doped silica	1%	0.2
Fiber 2	1.0	4000	Pure silica	fluorine doped silica	1%	0.2

Table 6.5 Experimental conditions

Sample	Light Source	Initial Light Power, mW/mm²	Dosage, [R/h]	Temperature, °C
Fiber 1	He-Cd laser	164	300, 10 ⁴	28
		72	300, 10 ⁴	28
	Xe lamp	0.80	300, 10 ⁴	28,70
		0.39	300, 10 ⁴	28
Fiber 2	D ₂ lamp	under 0.001	300	28
	Dark	none	300, 10 ⁴	28
	Xe lamp	0.77	300	28
	Dark	none	300	28

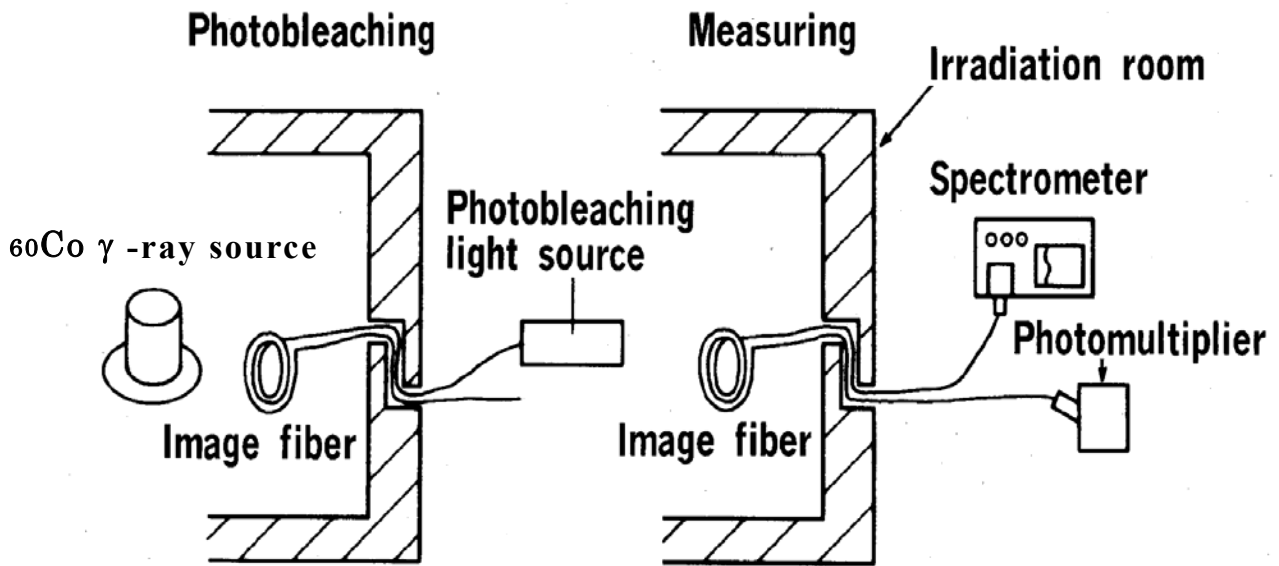


Fig. 6.8 Photobleaching and measuring systems

(b) 結果

ファイバ1についての照射条件結果を表 6.6 に示す。光ブリーチング効果の光量依存性についての結果を図 6.9(a),(b)に示す。さらにファイバ2についての照射中の紫外光領域における損失増加特性を図 6.10,6.11 に示す。

(c) 考察

光ブリーチング用光源として用いた各ランプ、レーザの出力スペクトルは、表 6.6 に示すように、① D_2 ランプ、②Xeランプ、③He-Cdレーザ、の順に短波長領域に存在する。着色中心は吸収帯の山に近い波長の光を照射することにより減少する¹⁶⁾。これは図 6.12 に示すように光エネルギーにより電子が捕獲準位から導伝帯のすぐ下の励起準位まで励起され、さらに熱的に導伝帯まで励起されてガラス中を動いて正孔と再結合するとされている¹⁶⁾。またさらに強い光エネルギーであれば直接導伝帯まで励起されてガラス中を動いて正孔と再結合することも考えられる。図 6.9 (a),(b)及び図 6.10 に示すように、この測定波長範囲には顕著

な吸収帯の山は現れておらず、損失増加の中心となる吸収帯の山は $\lambda = 0.26 \mu\text{m}$ よりもさらに短波長領域に存在する。石英ガラスの紫外光領域に光吸収を持つ γ 線誘起欠陥は幾つか存在することが知られているが¹⁷⁾、これら γ 線誘起欠陥の同定は未だ議論の決着を見ていないものが殆どであり、これら欠陥と光ブリーチングの関係も詳細な同定は今後の研究課題として注目されよう。今回の研究では測定系の難しさなどから個々の光吸収欠陥と光ブリーチングの関係を明らかにするには至らなかったが、これら $0.26 \mu\text{m}$ よりも短波長に吸収帯の山を有する欠陥に光ブリーチング光が作用したものと推定する。従って3つの光源の中では D_2 ランプがスペクトル範囲として最も有効な領域にある。ところが光ブリーチング効果は Xe ランプが γ 線線量率にかかわらず最も大きかった。この Xe ランプは3つの光源のなかで、スペクトル範囲としては中間的存在であり、このことは光量による依存性を考慮に入れる必要性を示している。

表 6.6 において Xe ランプと He-Cd レーザを比較してみると、ファイバからの出射光量は He-Cd レーザの場合、 Xe ランプの 205 倍、であるが、 Xe ランプの方が光ブリーチング効果が大きい。また図 6.9(a),(b)に示すように Xe ランプ、 He-Cd レーザの双方において線量率 10^4R/h の場合はわずかではあるが光量の依存性を示し、 300R/h の場合には光量の依存性は認められない。しかしこれは変化させた2水準の光量においてのことであり、もちろん光量0と設定光量との間では依存性を示していることになる。このことから光量は $\lambda = 0.3 \sim 1.1 \mu\text{m}$ のスペクトル範囲においてその初期出力総和 0.8mw/mm^2 程度で 300R/h の場合は着色中心に対して飽和状態となり、 10^4R/h の場合でも飽和に近い程度にあることがわかる。

図 6.13 に示すように、 Xe ランプと He-Cd レーザのファイバからの出力光分布を比較すると $\lambda = 0.30 \sim 0.36 \mu\text{m}$ には He-Cd レーザは出力スペクトルを有さない。以上より、 Xe ランプと He-Cd レーザの光ブリーチング効果の差はエネルギーの高い、 $\lambda = 0.30 \sim 0.36 \mu\text{m}$ のスペクトルの存在の有無によるものと考えられる。また He-Cd レーザのピーク波長の出力光量はピークを外れた領域 ($\lambda = 0.36 \sim 0.40 \mu\text{m}$ 付近) の 167 倍であり、さらに He-Cd レーザの $\lambda = 0.36 \sim 0.40$

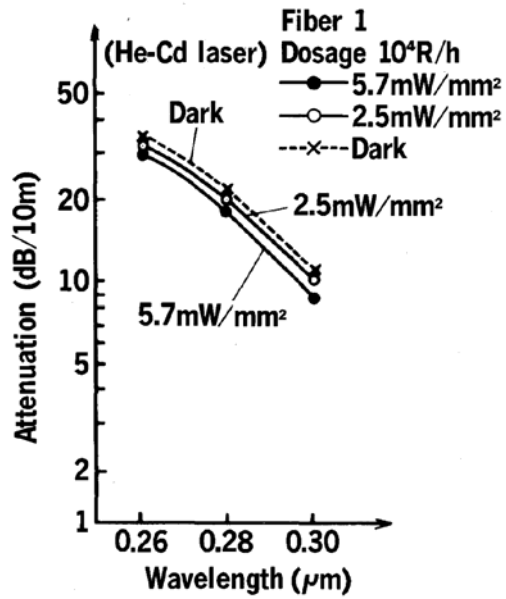
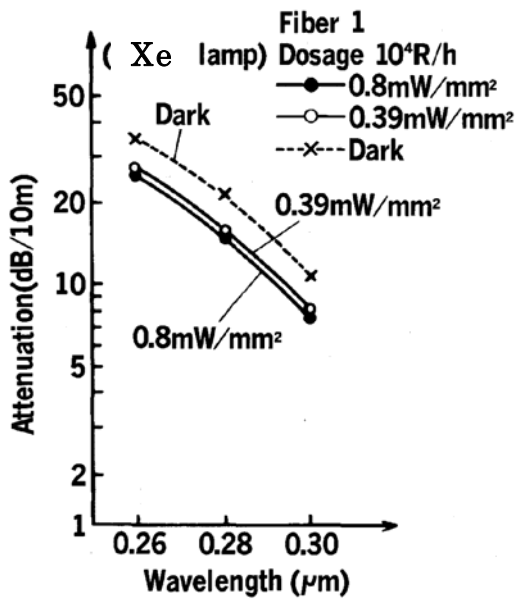
μm 付近の出力光は Xe ランプのそれよりも大きい。このことから He-Cd レーザのピーク波長の光量は着色中心に対して飽和域にあって有効に使われていないことになり、むしろピーク波長から外れた $\lambda = 0.36 \sim 0.40 \mu\text{m}$ 付近のスペクトルの広がり光ブリーチング効果に役立っているものと推定される。D₂ ランプの効果が少ないのは表 6.7 に示すように出力光量が Xe ランプの 0.13% 以下であり、着色中心濃度に対して光量が小さすぎたためであると考えられる。

また最も有効であった Xe ランプを用い、実際の放射線環境下での分光分析を想定した実験結果を図 6.10 及び、図 6.11 に示す。試料として用いた画像光ファイバは実際規模に近づけた 4,000 画素画像光ファイバ（ファイバ 2）である。被分析元素の硼素は発光スペクトルを $\lambda = 0.25 \mu\text{m}$ 付近に有し、ファイバを用いた分光分析ではこの硼素の分析可能期間を延ばすことが一つの目標となる。図 6.11 に示すように $\lambda = 0.26 \mu\text{m}$ の損失増加の時間比較を行った。Xe ランプによる光ブリーチングにより、ファイバの寿命を 5 倍以上に延ばすことに成功した。この種の、直接画像伝送、分析光直接伝送など直接、測定に使用される光以外に、光ブリーチング効果を強制的に向上させるべく光源を別途配置して効果を最大限発揮させた検討の例はこれまでに無く、今回その効果を明確化すると同時に、Xe ランプと言う実使用に性能以外にもう一つの要考慮点となるシステム費用などの面も考慮した光源を用いて 5 倍もの寿命延長に成功した成果が産業、研究施設分野にもたらす利点は大きいと考える。

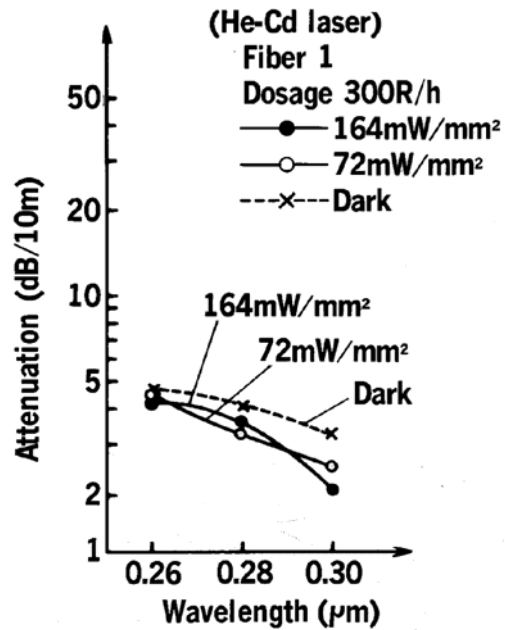
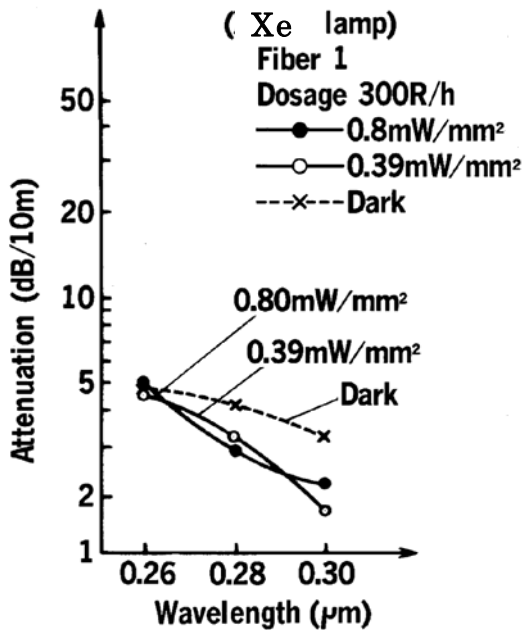
さらに、光ブリーチング用光源として 3 つの光源のなかで最も有効であった Xe ランプを用いて、室温、70℃加温の 2 水準についての効果の比較が表 6.6 に示されている。70℃加温により、室温の場合の 1/3 に損失が抑えられてことがわかる。この結果により、光エネルギーにより励起準位まで励起された電子が熱的に導伝帯まで励起される確率が高まることが確認できた。

Table 6.6 Experimental results on Fiber 1

Light source	Xe Lamap	He-Cd Laser	D ₂ Lamp	Dark
Output spectrum [μm] (through fiber)	0.3---1.1	peak 0.442 0.36---0.65	0.2---0.7	---
Initial output light power [mW/mm^2] (for 10m length fiber)	0.8	164	under 0.001	---
At 0.32 μm ($10^4\text{R}/\text{h} \times 2\text{h}$ irradiation)	8.9	9.7	---	16
Attenuation Increase [dB/10m] At 0.30 μm (300R/h \times 1h irradiation)	28 $^\circ\text{C}$ 70 $^\circ\text{C}$	1.8 0.6	2.3 ---	2.6 ---
				2.9 ---



(a) 10^4 R/h, 3h irradiation



(b) 300R/h, 3h irradiation

Fig. 6.9 Light power dependency of the spectral attenuation

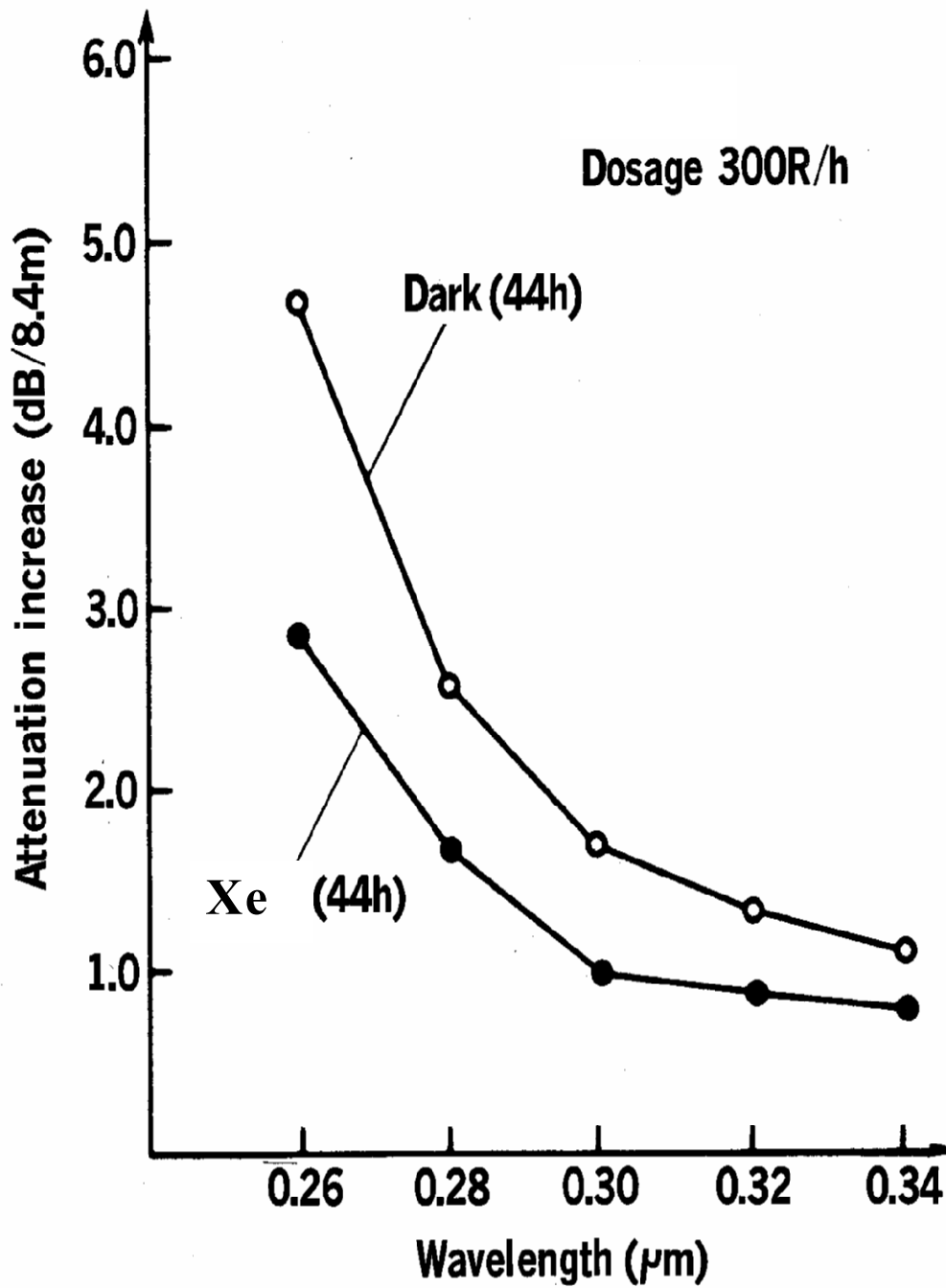


Fig.6.10 Wavelength dependency of attenuation increase

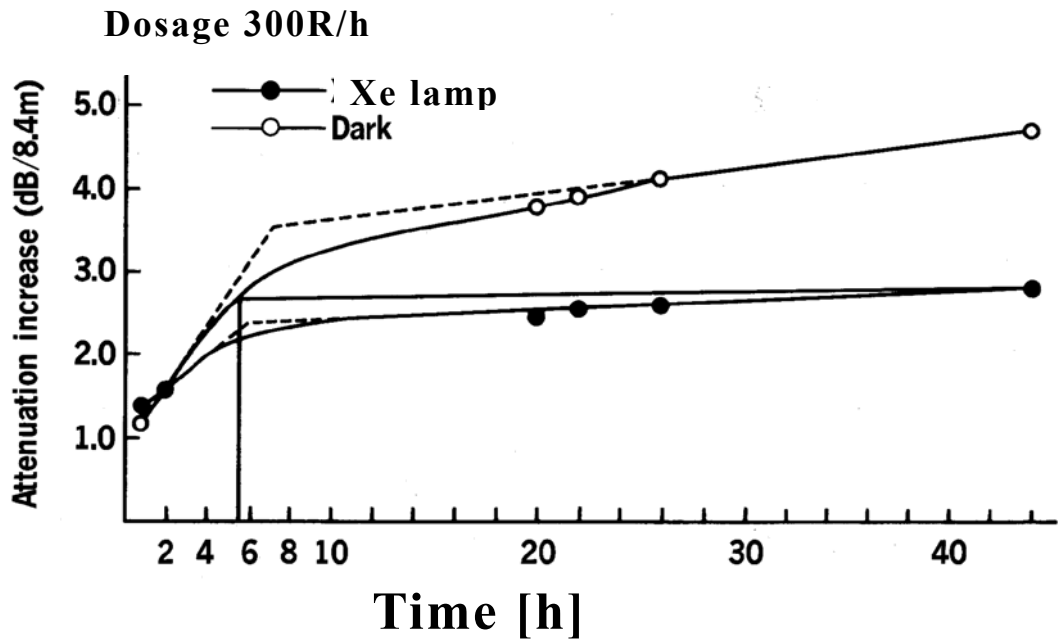


Fig. 6.11 Growth of the radiation-induced attenuation at $0.26\mu\text{m}$

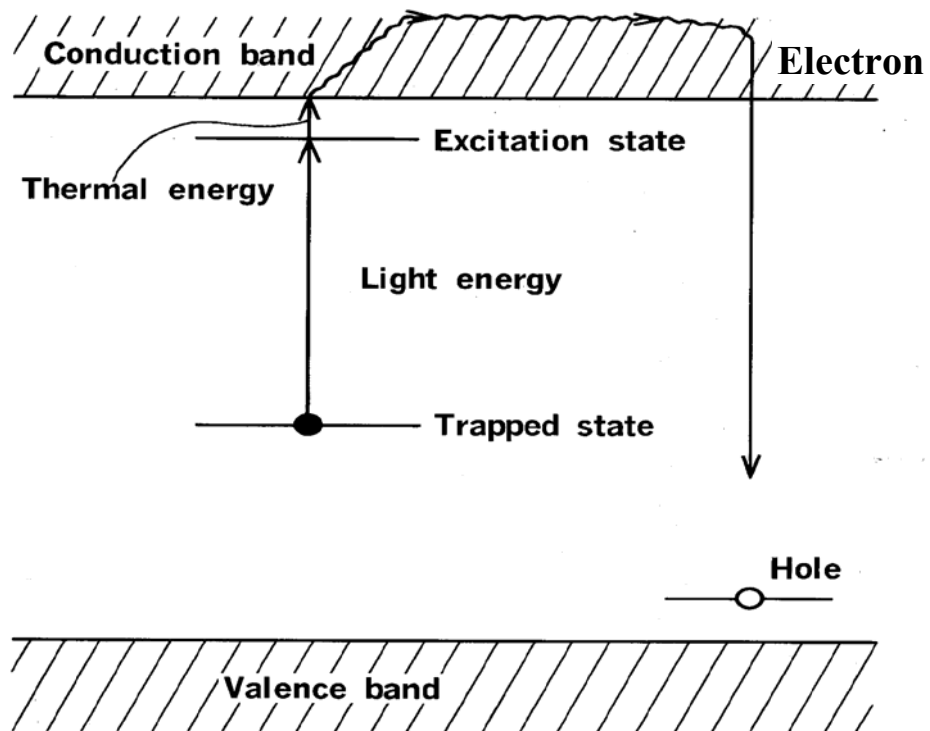


Fig. 6.12 Model for photobleaching

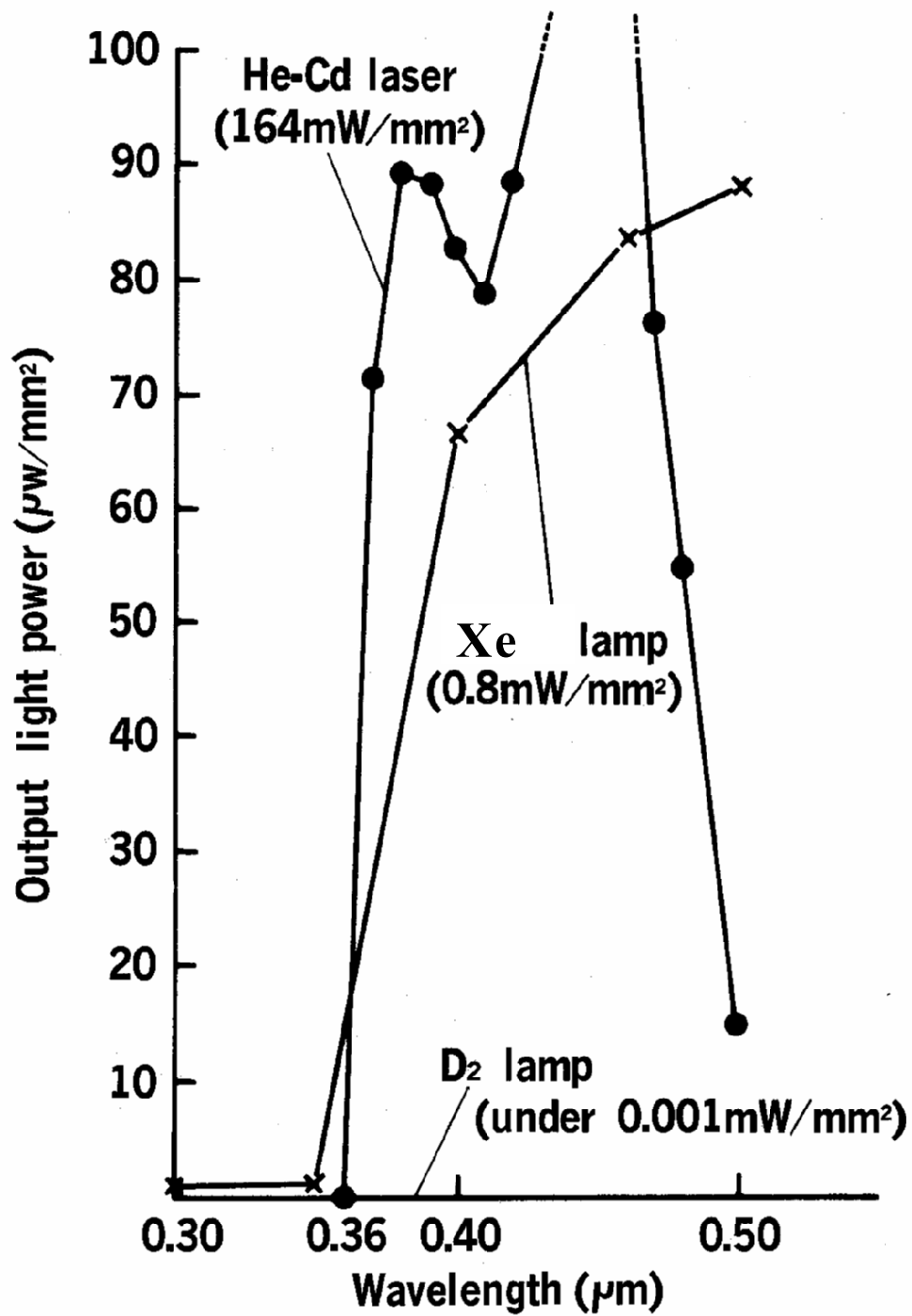


Fig. 6.13 Original output spectra

6.4 まとめ

本章では画像光ファイバの放射線施設での使用寿命の延伸について、(1)ファイバそのものの耐放射線性能の向上、(2)外部付帯技術によるファイバ寿命延伸技術の開発、の2面から検討を行い、高耐放射線画像光ファイバの開発と、光ブリーチング効果を利用したファイバ寿命延伸技術の開発について述べた。以下に本研究で明らかになった点を示す。

- 1) 高耐放射線画像光ファイバの設計指針を得るため、これまでに例のない、コア、クラッドそれぞれの材料の γ 線照射評価を実施し、耐放射線性能の違いを明らかとして、高耐放射線性画像光ファイバの最適構造設計方向を示した。
- 2) 明確化した設計方向に基づいた画像光ファイバの設計と製造工程の最適化により、従来 10^4R 程度であった使用限界寿命を 10^5R/h という極めて高い放射線線量率下においても 10^8R 程度までの使用を可能とする大幅な寿命の延伸を可能とした高耐放射線画像光ファイバの実現を示した。
- 3) 高耐放射線イメージファイバの放射線関連環境施設における実使用において重要となる、線量率、繰り返し照射、波長特性など放射線による依存特性を明らかにした。
- 4) 外部付帯技術によるファイバ寿命延伸技術について検討を行った。「光ブリーチング効果」の積極利用について検討を行い、従来報告例の無い外部付加光源を導入した放射線環境での寿命延長策について、光波長、光強度などその最適光源と効果の評価を実施し、従来比5倍以上の寿命延長に成功した。

第6章の参考文献

- [1] M. Josephine Yuen, “Ultraviolet absorption studies of germanium silicate glasses”, *Appl. Opt.*, Vol. 21, No. 1, pp.136-140, (1982).
- [2] H. Yamashita, H. Mitera and Y. Itoh, “Radiation-induced loss and color-center concentration in optical fibers”, *Electron. Lett.*, Vol. 19, No. 1, pp.11-12, (1983).
- [3] P. Dumas, J. Corset, W. Carvalho, Y. Levy and Y. Neuman, “Fluorine doped vitreous silica analysis of fiber optic preforms by vibrational spectroscopy”, *J. Non-Crystalline Solids*, Vol. 47, No. 2, pp.239, (1982).
- [4] Y. Tsunawaki, N. Iwamoto, T. Hattori and A. Mitsuichi, “Analysis of CaO-SiO₂-CaF₂ glasses by Raman spectroscopy”, *J. Non-Crystalline solids*, Vol. 44, pp.369, (1981).
- [5] N. Shibata, M. Horiguchi and T. Eda, “Raman spectra of binary high-silica glasses and fibers containing GeO₂, P₂O₅ and B₂O₃”, *J. Non-Crystalline Solids*, Vol. 45, pp.115, (1981).
- [6] Y. Chigusa, M. Watanabe, M. Kyoto, M. Ooe, T. Matsubara, S. Okamoto and T. Yamamoto, “Gamma-ray and neutron irradiation characteristics of pure silica core single mode fiber and its life time estimation”, *IEEE Trans. on Nuclear Science*, Vol. 35, No.1, pp.894-897, (1988).
- [7] Y. Chigusa, K. Fujiwara, Y. Hattori and Y. Matsuda, “Properties of silica glass image fiber and its application”, *Optoelectronics-Device and Technologies*, Vol. 1, No. 2, pp.203-216, (1986)
- [8] Y. Chigusa, K. Fujiwara, G. Tanaka, Y. Hattori and Y. Matsuda, “Radiation-resistant characteristics of image fiber”, *IEEE 1984 Annual Report, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, pp.77-84, (1984).
- [9] 千種佳樹、藤原国生、田中豪太郎、服部保次、松田裕男、“イメージファイバの放射線特性(2)”, 電気学会研究会資料、電気学会絶縁材料研究会

- EIM-84-32, pp.33-44,3月(1984) .
- [10] 千種佳樹、藤原国生、田中豪太郎、服部保次、松田裕男、“イメージファイバの放射線特性(3)”、電気学会研究会資料、電気学会絶縁材料研究会 EIM-85-36, pp.91-97,4月(1985) .
- [11] S.Hayashi, Y.Wada, Y.Chigusa, K.Fujiwara, Y.Hattori, and Y.Matsuda, “Photobleaching effects on radiation-induced loss for silica glass image fiber”, ASTM Special Technical Publication 956[13th international symposium on influence of radiation on material properties] (American Society for Testing and Materials), pp.647-653, (1987).
- [12] 林正太郎、和田幸男、千種佳樹、藤原国生、服部保次、“イメージファイバのフォトブリーチング効果”、電気学会研究会資料、電気学会絶縁材料研究会 EIM-85-145, pp.51-58,12月(1985) .
- [13] Y.Chigusa, “Image fiber reduced in irradiation-induced loss by photobleaching”, Optical Fiber Technology, Vol.12,(2005). 採録決定.
- [14] K. Matsui, H. Kanamori, H. Yokota, M. Kyoto, G. Tanaka and M. Watanabe, “Radiation characteristics of optical fibers”, Proc. Symposium on the studies of dielectric materials, JIEE , EIM-85-33, pp.67-74,(1985).
- [15] H. Yashima, H. Mitera, and H.Nakano, “Gamma-ray induced loss and its recovery property in optical fibers”, Proc. Symposium on the studies of dielectric materials, JIEE, EIM-84-30, pp.25-31,(1984)
- [16] Glass Technology Handbook, Asakura Shoten, p.141
- [17] R.A. Weeks and E. Sonder, “Electron paramagnetic resonance of color center”, Proc. Symposium on Paramagnetic resonance, Vol. 2 Academic Press, New York, pp.869, (1963).

第 7 章 結論

本論文では石英ガラス光ファイバの光伝送損失及び画像直接伝送特性についての検討を述べ、それら性能の向上を図ることで、従来の使用限界を打ち破り、石英ガラス光ファイバの新たな領域への適用拡大の実現について述べた。内容は次のようである。

第 1 章では、石英ガラス光ファイバの特徴とその適用分野について紹介し、その歴史的背景と現在の問題点及び本研究の目的を述べた。

第 2 章では、低損失、高耐環境性という石英ガラスの二大特性に焦点をあて、通信用石英ガラス光ファイバについて述べた。純粋石英コア型光ファイバの設計・製造の最適化により、極低損失記録を樹立した。そして低損失光ファイバの利点を最大限引き出し得る無中継光伝送システムについて、低損失・低非線形性純粋石英コア型光ファイバと前置増幅器に後方向励起分布型 Raman 増幅器を用いた無中継可能伝送距離について模擬計算を実施することで低損失・低非線形性純粋石英コア型光ファイバの優位性を示した。また、光ファイバシステムの放射線施設などでの γ 線、中性子線による影響を評価し、放射線施設や海底光ケーブルシステムなどでの低線量率×長期間における信頼性推定手法について述べた。

第 3 章では、ITU-T 規格 G. 652C, D に対して全適合の低 OH 吸収純粋石英コア型単一モード光ファイバの開発と光ファイバシステムの運用中、必須の要件となるその耐 H₂ 性能を中心に述べた。脱水工程を中心とした製造方法の最適化により、従来達成できなかった、ITU-T 規格 G. 652. C, D 仕様全準拠、低 OH 吸収広帯域低損失純粋石英コア型光ファイバの試作に成功し、純粋石英コアガラスから OH 吸収を除去する脱水工程の強化を図っても、製造工程の最適化により SiO₂ 本来の安定さを保ち得ることを明らかにした。そして広波長帯域無中継伝送を可能とするために必須の Raman 増幅の導入に対して検討を行い、純粋石英が持つ Ge 添加石英と

の屈折率材料分散特性の違いからくる自由度を生かした設計を施し、加えて秀でた低損失性を生かすことで高効率 Raman 増幅の実現性を示した。

第 4 章では、ステップインデックス型極小 MFD 光ファイバの設計とそのファイバ特性そして開発した FTTx 用細径・軽量光ケーブルの特性について述べた。純粋石英の、Ge 添加石英とは異なる屈折率材料分散特性を生かすことで、従来の汎用ステップインデックス構造 Ge 添加コア石英単一モードファイバでは不可能な範囲の MFD の極小径化を可能とし得るファイバの開発により、高耐曲げ性能の実現に成功した。そしてこのファイバを用いて、従来ケーブル比顕著な差の軽量・細径化光ケーブルの実現について述べた。

第 5 章では、高画質 25 万画素画像光ファイバの開発とその特性、及び石油精製工場への適用とその実用性について述べた。これまでに報告例の無い、通常のテレビ解像度に匹敵する 25 万画素という高解像度の、しかも可撓性に優れた長尺石英ガラス画像光ファイバの開発に成功した。また MTF (Modulation Transfer Function) 手法を使った高精度画像定量評価装置を開発し、画像光ファイバの汎用的・高精度画質定量評価を可能とし、25 万画素画像光ファイバの画質定量評価を通じてその高画質性能を示した。そして開発した 25 万画素画像光ファイバを石油精製工場の石油精製汚泥処理設備である石油精製汚泥処理回転炉内部の火炎燃焼状態監視への実システムに適用して、一ヶ月の連続評価を経てその高い信頼性を確認し、実用性を示した。

第 6 章では、画像光ファイバの放射線施設での使用寿命の延伸について、(1)ファイバそのものの耐放射線性能の向上、(2)外部付帯技術によるファイバ寿命延伸技術の開発、の 2 面からの検討について述べた。画像光ファイバの設計と製造工程の最適化により、従来 10^4R 程度であった使用限界寿命を 10^5R/h という極めて高い放射線線量率下においても 10^8R 程度までの使用を可能とする大幅な寿命の延伸を可能とした高耐放射線画像光ファイバの実現を示した。さらに、従来報告例の無い外部付加光源を導入した「光ブリーチング効果」の利用にて、放射線環境での寿命延長策を検討し、従来比 5 倍以上の寿命延長に成功した。

以上述べてきたように、本研究において開発された技術は石英ガラス光ファイ

バの各分野での適用拡大を図り、高まる分野への期待に貢献するものである。

謝辞

本研究をまとめるに際して、終始懇切にご指導とご鞭撻を賜りました静岡大学工学部の佐々木彰教授に心から感謝申し上げます。

本論文に関して有益なご討論とご指導を賜った静岡大学工学部の岡本尚道教授、大坪順次教授、川田善正教授、大岩孝彰教授に厚く御礼申し上げます。

本研究は住友電気株式会社光通信研究所（旧横浜研究部、旧横浜研究所）において行ったものであり、研究所長として本研究の機会を与えて下さいました倉内憲孝住友電気（株）顧問、福富秀雄元横浜研究所長、榛葉弘元横浜研究所長、星川正雄住友電気（株）顧問、矢野宏司元横浜研究所長、増田重雄元横浜研究所長、坂本光元横浜研究所長、天野嘉一日新電機（株）専務取締役、戸田祐一住電ハイプレシジョン（株）代表取締役社長、桑原透住友電気（株）執行役員、田中茂住友電気（株）常務執行役員、西村正幸住友電気（株）光通信研究所長には、ここに感謝の意を表します。木村壽秀住友電気（株）専務取締役研究開発本部長、西村昭住友電気（株）常務執行役員、田中茂住友電気（株）常務執行役員そして西村正幸住友電気（株）光通信研究所長には、本論文の執筆の機会を賜りました。この場を借りて深く感謝致します。

また入社以来、上司として多大なご指導、ご助言をいただきました故藤本登喜男元横浜研究部映像情報システム開発室長、藤原国生元横浜研究所線路研究部長、吉村耕三住電ハイプレシジョン（株）常務取締役、鈴木修三清原住電（株）代表取締役社長、渡辺稔住電知材テクノ（株）社長、田中豪太郎元横浜研究所主任研究員、京藤倫久住友電気研究開発副本部長、宮島義昭住友電気（株）研究開発本部支配人、服部保次住友電気（株）知的財産部主幹、横田弘トヨクニ電線（株）副事業部長、松田裕男住友電気（株）研究企画部長補佐、金森弘雄住友電気（株）回路製品部長に深く感謝致します。

本研究の遂行にあたり私は「製造技術」、「評価・測定技術」を主務とし、「設計

技術」、「増幅技術」などについては共同研究者諸氏（住友電工（株）光通信研究所の笹岡英資、大西正志の各グループ長、角井素貴主席、佐々木主査、横川知之主査、樽稔樹氏、山本義典氏、光通信事業部大江将元グループ長、松井雅彦主席、小谷野主査、研究企画部斎藤達彦主席、伝送デバイス研究所福田智恵主査、光機器事業部柏田智徳グループ長、永山勝也九州工業大学助教授）の有益な助言、討論とご協力に支えられ遂行することができた。ここに厚く感謝致します。

また、放射線の照射試験に際してご助言、ご協力を頂きました岡本信一元大阪府立大学教授、住田健二大阪大学名誉教授に深く感謝致します。

最後に本研究を遂行するに当たっては、住友電工（株）光通信研究所、光通信事業部、研究開発本部の諸兄をはじめ、多くの方々にご助言、ご協力を頂きました。ここに謹んで感謝致します。

著者の石英ガラス光ファイバとその適用に関する論文

- 1) K.Nagayama, M.kakui, M.Matsui, T.Saitoh and Y.Chigusa “Ultra-low-loss (0.1484dB/km) pure silica core fiber and extension of transmission distance”, Electronics letters (IEE), Vol.38, No.20, pp.1168-1169, Sep. (2002).
- 2) K.Nagayama, M.Kakui, M.Matsui, T.Saitoh and Y.Chigusa, “Ultra-low-loss (0.151dB/km) pure silica core fiber and extension of transmission distance”, Technical Digest of OFC2002, post deadline paper FA10,(2002).
- 3) Y.Chigusa, M.Watanabe, M.Kyoto, M.Ooe , T.Matsubara, S.Okamoto, T.Yamamoto, T.Iida, K.Sumita, “ γ -ray and neutron irradiation characteristics of pure silica core single mode fiber and its life time estimation”, Transaction on Nuclear Science (IEEE), Vol.35, No1, pp.894-897, Feb. (1988).
- 4) C.Fukuda, Y.Koyano, T.Kashiwada, M.Onishi, Y.Chigusa, H.Kanamori, S.Okamoto, “Hydrogen and radiation resistance of erbium-doped fibers”, Technical Digest of OFC1994, paper FF3, (1994).
- 5) Y.Chigusa, K.Nakazato, S.Hirai, M.Watanabe, S.Suzuki, “ Fluorescence and amplification characteristics of Er doped fluoride fibers” Conference on optical amplifiers and their applications(IEEE),Technical digest series volume 13,Paper TuD4, Aug.(1990).
- 6) Y.Chigusa, Y.Yamamoto, T.Yokokawa, T.Sasaki, T.Taru, M.Hirano, M.Onishi and E.Sasaoka, “Low-loss Pure-Silica-Core Fibers and Their Possible Impact on Transmission Systems,” Journal of Lightwave Technology(IEEE/OSA) , Vol. 23, No11, pp.3541-3550, Nov.(2005).
- 7) Y.Matsuda, Y.Hattori, and Y.Chigusa, “High-resolution Silica Image Fiber” in Technical Digest, Conference on Optical Fiber Communication,(Optical Society of America, Washington,D.C.), paper TUN12, (1984).
- 8) Y.Matsuda, K.Fujiwara, Y.Hattori and Y.Chigusa, “High-resolution Silica Image Fiber”, in Technical Digest, Conference on Optical Fiber Communication,

- (Optical Society of America, Washington, D.C.), paper TUB5, (1986).
- 9) K.Fujiwara, T.Fujimoto, K.Yoshimura, Y.Hattori, M.Kyoto, T.Kadota, Y.Matsuda and Y.Chigusa, “ Remote monitoring of furnace interiors by high-resolution silica image fiber”, in Technical Digest, 4th International Conference on Optical Fiber Sensors(Institute of Electronics and Communication Engineers of Japan) pp.147-150,(1986).
 - 10) Y.Hattori, Y.Matsuda, Y.Chigusa, “Modulation Transfer Function (MTF) measurement of Silica Glass Image Fiber”, in Technical Digest, 4th International Conference on Optical Fiber Sensors(Institute of Electronics and Communication Engineers of Japan) pp.327-330,(1986).
 - 11) Y.Chigusa, K.Fujiwara, Y.Hattori and Y.Matsuda “Properties of Silica Glass Image Fiber and Its Application”, OPTOELECTRONICS-Devices and Technologies, Vol.1, No2, pp.203-216, Dec., (1986).
 - 12) Y.Chigusa, K.Fujiwara, G.Tanaka, Y.Hattori and Y.Matsuda, “Radiation-resistant characteristics of image fiber”, IEEE 1984 Annual Report, Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.77-84, (1984).
 - 13) S.Hayashi, Y.Wada, Y.Chigusa, K.Fujiwara, Y.Hattori, and Y.Matsuda, “Photobleaching effects on radiation-induced loss for silica glass image fiber”, ASTM Special Technical Publication 956[13th international symposium on influence of radiation on material properties] (American Society for Testing and Materials), pp.647-653, (1987).
 - 14) Y.Chigusa, “Image fiber reduced in irradiation-induced loss by photobleaching”, Optical Fiber Technology, Vol.12, pp117-121, (2006).
 - 15) 千種佳樹、藤原国生、田中豪太郎、服部保次、松田裕男、“イメージファイバの放射線特性 (2)”、電気学会研究会資料、電気学会絶縁材料研究会 EIM-84-32, pp.33-44, 3月 (1984) .
 - 16) 千種佳樹、藤原国生、田中豪太郎、服部保次、松田裕男、“イメージファイバの放射線特性 (3)”、電気学会研究会資料、電気学会絶縁材料研究会

- EIM-85-36, pp.91-97,4月(1985) .
- 17) 林正太郎、和田幸男、千種佳樹、藤原国生、服部保次、“イメージファイバのフォトブリーチング効果”、電気学会研究会資料、電気学会絶縁材料研究会 EIM-85-145, pp.51-58,12月(1985) .
- 18) 千種佳樹、京藤倫久、渡辺稔、松原健夫、吉村耕三、住田健二、飯田敏行、“純 SiO₂ コア SM ファイバの中性子線照射特性”、電子情報通信学会総合全国大会、論文 1053、3月(1987).
- 19) 福田智恵、千種佳樹、柏田智徳、大西正志、金森弘雄、岡本信一、“Er 添加ファイバの耐放射線特性”、電子情報通信学会春季大会、論文 C-394、3月(1994).

著者の石英ガラス光ファイバとその適用に関する特許一覧

以下に本研究に関し、出願した特許の一覧を記す。発明登録有効期間中の 5)～10)については特許番号を記載し、発明登録有効期間の満了した 1)～4)については公告番号を記載した。また 11)～20)は出願後審査未請求であり、公開番号を記載した。

- 1) 特公平 2-1099、「イメージファイバの製造方法」、千種佳樹、1983年10月3日出願。
- 2) 特公平 3-10580、「イメージファイバの製造方法」、千種佳樹、1984年7月16日出願。
- 3) 特公平 7-107568、「イメージファイバの製造方法」、千種佳樹、1986年6月25日出願。
- 4) 特公平 8-12301、「石英系イメージファイバ」、千種佳樹、1987年2月2日出願。
- 5) 特許第 2542679号、「光ファイバ線引炉」、千種佳樹、1988年6月22日出願。
- 6) 特許第 2754551号、「光ファイバの製造方法」、千種佳樹、1988年2月2日出願。
- 7) 特許第 2765033号、「光ファイバの線引方法」、吉村一郎、松田裕男、千種佳樹、1989年4月14日出願。
- 8) 特許第 2985667号、「光ファイバ用ガラス母材の製造方法」、石川真二、千種佳樹、中村元宣、1994年6月16日出願。
- 9) 特許第 3098770号、「希土類元素含有ガラスの製造方法」、向後隆司、千種佳樹、1990年11月26日出願。
- 10) 特許第 3379647号、「光ファイバ製造方法」、向後隆司、千種佳樹、1990年、9月27日出願。
- 11) 特開昭 60-75801、「イメージファイバの製造方法」、千種佳樹、1983年10

月 3 日出願.

- 1 2) 特開昭 60-75803、「イメージファイバの製造方法」、千種佳樹、1983 年 10 月 3 日出願.
- 1 3) 特開昭 61-17437、「イメージファイバの製造方法」、千種佳樹、1984 年 7 月 2 日出願.
- 1 4) 特開昭 62-191786、「放射線漏洩位置検出装置」、千種佳樹、1986 年、2 月 19 日出願.
- 1 5) 特開昭 62-249111、「耐放射性イメージファイバ」、千種佳樹、1986 年 4 月 22 日出願.
- 1 6) 特開昭 64-76932、「耐放射線性光ファイバの製造方法」、大江将元、京藤倫久、千種佳樹、1987 年 9 月 17 日出願.
- 1 7) 特開平 1-107210、「耐環境性光ファイバ」、大江将元、京藤倫久、千種佳樹、1987 年 10 月 21 日出願.
- 1 8) 特開平 1-107211、「耐環境性光ファイバ」、大江将元、京藤倫久、千種佳樹、1987 年 10 月 21 日出願.
- 1 9) 特開平 1-107217、「耐環境性ステップインデックス型光ファイバ」、大江将元、京藤倫久、千種佳樹、1987 年 10 月 21 日出願.
- 2 0) 特開平 16-161545、「光ファイバの線引き方法及び線引き装置」、桑原一也、千種佳樹、2002 年 11 月 13 日出願.

論文中の略語一覧

- PSCF: Pure Silica Core Fiber (純粋石英コア単一モード光ファイバ)
- FTTx: Fiber To The Home, Fiber To The Premise, Fiber To The Desk, 他
- WDM: Wavelength-Division-Multiplexing(波長多重)
- DWDM: Dense WDM (高密度波長多重)
- CWDM: Coarse WDM (低密度波長多重)
- EDF: Er Doped Fiber (光増幅用 Er 添加光ファイバ)
- DCF: Dispersion Compensation Fiber (分散補償光ファイバ)
- ITU-T : International Telecommunication Union-Telecommunication Sector (国際電気通信連合電気通信標準化部門)
- MFD: Mode Field Diameter (シングルモード光ファイバの伝搬モードの分布)
- ITV: Industrial Television (工業用テレビジョン)
- MTF: Modulation Transfer Function (光の周波数応答)
- CVD: Chemical Vapor-phase Deposition (化学気相積層法)
- MCVD: Modified Chemical Vapor-phase Deposition (改良型化学気相積層法)
- Aeff: A effect (コア有効断面積)
- Δn : 比屈折率差
- Ge-SMF: Ge 添加コア型汎用単一モード光ファイバ
- EDFA: Er Doped Fiber Amplifier(Er 添加光ファイバ増幅器)
- DRA: Distributed Raman Amplifier(後方向励起分布型 Raman 増幅器)
- NF: Noise Figure (雑音指数)
- PMD: Polarization Mode Dispersion(偏波モード分散)
- g_R : Raman 利得
- FOM_r: Figure Of Merit of Raman(Raman 増幅の性能指数)
- PBT: Polybutylene terephthalate
- HDPE: High Density Polyethylene(高密度ポリエチレン)
- VAD: Vapor-phase Axial Deposition(気相軸付け法)

N.A: Numerical Aperture(光ファイバの開口数)

LSF: Line Spread Function(画像伝送光ファイバのスリット伝送像)

lp: line pair(白と黒の線の対)