

耐放射線シングルモード光ファイバ

光応用製品事業推進室 愛川 和彦¹・井添 克昭¹・社本 尚樹²・工藤 学³・妻沼 孝司⁴

Radiation-Resistant Single-Mode Optical Fibers

K. Aikawa, K. Izoe, N. Shamoto, M. Kudoh, and T. Tsumanuma

石英系光ファイバは、放射線環境下で使用されると、放射線に起因する透過光量の減少が生じる。今回われわれは、コアに最適な濃度のフッ素を添加することにより、国際標準規格ITU-T G.652.Bに準拠し、かつ従来の純粋石英コアタイプの光ファイバに比べて優れた耐放射線特性が得られることを確認した。この耐放射線光ファイバは、従来の純粋石英コアシングルモード光ファイバが線照射 1.0×10^6 R/h, 60分において約 25 dB/km の損失劣化を生じるのに対して、約 5 dB/km まで低減され、さらにその回復特性もきわめて優れていることが確認された。

Loss of silica-based optical fibers increases when they are exposed to radiation.

We have developed a fluorine-doped core single-mode optical fiber, which complies with ITU-T G.652.B and has excellent radiation-resistant characteristics compared with pure silica core single-mode fiber.

Although the increase in radiation-induced loss of the conventional pure silica core single-mode fibers with the condition 1.0×10^6 R/h and 60 min is approximately 25 dB/km at 1,310 nm wavelength, the loss of the fluorine-doped core single-mode fibers with the same condition is approximately 5 dB/km at 1,310 nm wavelength. In addition to the excellent radiation-resistant characteristic, we have confirmed that the fiber has an excellent loss recovery characteristic after irradiation.

1. ま え が き

光ファイバを用いた情報伝達は、光ファイバが広帯域・低損失であり、電磁誘導の影響もなく、また軽量でサイズも小さくできることから現在の情報通信媒体の主流となっている。そして、放射線雰囲気という特殊な環境下においてもデータ伝送の必要性は高く、光ファイバに対する耐放射線特性の研究は多くの研究機関によって行われてきた¹⁾。光ファイバが放射線にさらされると、放射線によって分離された電子と正孔により、ファイバ中に存在している欠陥と結びついたときにできるカラーセンターが生じ、これが吸収損失となり伝送特性を劣化させる。特に屈折率を制御する目的で一般的に使用されているゲルマニウムなどのドーパントや、光ファイバ製造工程中に発生した欠陥や残存した不純物により、紫外線および可視光領域で光学吸収が生じることが知られている²⁾。

石英系光ファイバに対する耐放射線特性の研究は、当初は純粋石英をコアとしたSI(ステップインデックス)

型大口径ファイバが主流であった³⁾⁵⁾。この大口径の純粋石英コアファイバにおいては、コアのOH基含有量、塩素含有量、および製造方法に耐放射線特性が依存し、OH基を含有した石英系光ファイバの耐放射線特性が優れていることが報告されている⁶⁾。また、原子力発電所や再処理施設などの放射線環境下で使用する場合、さらなる伝送容量の向上が必要となり、グレーデッドインデックス型光ファイバ(GI型ファイバ)や、より広帯域なシングルモード光ファイバの要求も高く、ボロン・フッ素ドーブ、フッ素単独ドーブ、ゲルマニウムドーブのGI型ファイバについての報告も行われてきた⁷⁾。また、伝送容量が大きく、耐放射線特性も優れている純粋石英コアタイプのシングルモード光ファイバについても報告がなされてきている⁸⁾。

しかし、近年では、高エネルギー物理実験を目的とした加速器などの研究施設で、さらに伝送容量が大きく、かつ耐放射線特性の優れた光ファイバの要求が高まってきた。国際標準規格ITU-T G.652.Bに準拠し、耐放射線特性の優れた 1.3 μm 帯光ファイバである。耐放射線特性改善のために効果のあるOH基は 1.38 μm 帯に非常に大きな吸収損失を有するため、1.3 μm 帯で使用される耐放射線光ファイバはOH基の少ない、いわゆるLow-OHタイプのコアガラスを用いる必要がある。しかし、耐放射線特性

1 ファイバグループ

2 ファイバグループ主席部長

3 ファイバグループグループ長

4 理事

の面ではOH基の多い (High-OHタイプ) ファイバに特性面で劣る。以前からコアにフッ素を添加することにより耐放射線特性が改善されることは大口径ファイバを用いた評価で報告されていた⁹⁾。本稿では、シングルモードファイバの構造で、コアに添加するフッ素濃度を最適化することにより耐放射線特性が大幅に改善されることを確認したので報告する。

2. 設計および特性

2.1 ファイバ設計

試作したファイバの屈折率分布を図1に示す。図1aは純粋石英コアタイプのファイバA、図1bはコアにフッ素を添加したタイプのファイバBおよびCである。また、ファイバの諸元を表1に示す。

ファイバAのコアはプラズマ法で作製したOH基含有量1ppm以下のガラスであり、フッ素は添加していない。ファイバB、CはVAD法にてフッ素添加量を変えて作製した

同じくOH基含有量1ppm以下のガラスであり、それぞれフッ素添加量はファイバBが0.2 wt%、ファイバCが0.8 wt%である。それぞれ、このコアガラスに対して外付け法を用いてフッ素添加クラッドガラスを作製し光ファイバ母材とした。なお、表1に示すように、ファイバA、BおよびCのコア・クラッド間の比屈折率差をあわせるために、ファイバB、CのクラッドにはファイバAよりも高濃度のフッ素を添加している。

2.2 ファイバ特性

試作したファイバの特性を表2に、ファイバの損失波長特性を図2に示す。伝送損失以外は、すべて同様の特性を示している。ファイバB、Cは、ファイバAに比べてわずかに伝送損失が高くなっている。特にファイバBはOH吸収損失が高いため、1.3 μm帯では、その吸収損失のテールによる損失増もみられるが、ファイバB、Cともに波長依存性がほとんど無い損失増が支配的であることから、損失増の原因は主に構造不整損失によると考えられる。これは、コアにフッ素を添加した影響と考えている。

表1 試作ファイバの諸元
Table 1. Parameters of sample fibers.

ファイバNo.	ファイバ組成		コアガラスOH含有量 (ppm)	コアガラス製造方法	フッ素含有量 (wt%)		n* (%)	コア径 (μm)	クラッド外径 (μm)
	コア	クラッド			コア	クラッド			
A	SiO ₂	F-SiO ₂	<1	プラズマ法	0	1.4	0.35	8.3	125
B	F-SiO ₂	F-SiO ₂	<1	VAD法	0.2	1.6	0.35	8.3	125
C	F-SiO ₂	F-SiO ₂	<1	VAD法	0.8	2.2	0.35	8.3	125

* 比屈折率差

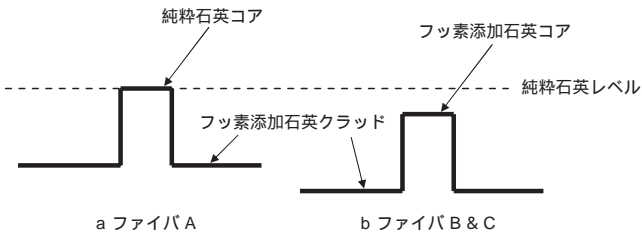


図1 耐放射線光ファイバの屈折率分布
Fig. 1. Refractive index profiles of sample fibers.

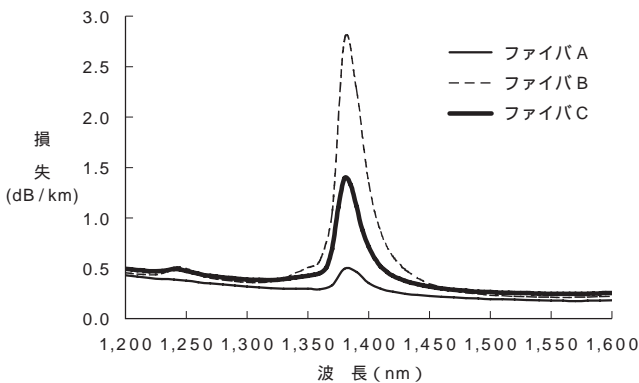


図2 損失波長特性
Fig. 2. Loss spectra of sample fibers.

表2 試作ファイバの特性
Table 2. Characteristics of sample fibers.

特性	ITU-T G.652.Bの値	ファイバA	ファイバB	ファイバC
損失 (dB/km) @1,310 nm	0.4	0.33	0.35	0.38
損失 (dB/km) @1,550 nm	0.35	0.18	0.21	0.25
PMD (ps/km)	0.2	0.1	0.1	0.1
MFD (μm) @1,310 nm	8.6 - 9.5 ± 0.7	8.6	8.6	8.7
クラッド径 (μm)	125.0 ± 1.0	125.0	125.0	125.0
偏心率 (μm)	0.8	0.2	0.3	0.2
クラッド非円率 (%)	2.0	0.5	0.4	0.4
カットオフ波長 (μm)	1.26	1.24	1.24	1.22
零分散波長 (nm)	1,300 - 1,324	1,308	1,308	1,309
分散スロープ (ps/nm ² /km)	0.093	0.081	0.081	0.079

また、この耐放射線光ファイバは、通信用光ファイバとして使用することから、標準的なシングルモード光ファイバの規格に準拠していることが重要である。表2から、今回試作したファイバはすべてITU-T G.652.Bに準拠した特性となっており、通常シングルモード光ファイバと同様に使用することが可能であるといえる。

3. 耐放射線特性

3.1 測定方法

測定は線照射中における伝送損失の連続測定、および光スペクトラムアナライザによる線照射中の損失波長特性の2通りを行った。測定系の概略を図3に示す。測定用ファイバ長はそれぞれ100mとした。放射線源にはCo-60線源を用い、照射中および照射後の伝送損失の変化を連続測定した。線照射中における伝送損失の連続測定においては光源として1.31μmのLED光源を用いた。照射線量は 1×10^5 , 5×10^5 , 1×10^6 R/hの3水準とし、照射中および線源を取り除いたあとの損失回復特性を測定した。これらの測定により、光ファイバの放射線による損失増加の線量依存性、回復特性などを調査した。

3.2 損失増加と回復特性

線照射中から照射後までの1.31μmにおける伝送損失の変化を図4に示す。照射条件は線量率 1×10^6 R/h、照射時間60分である。純粋石英コアタイプのファイバA、およびフッ素を0.2wt%添加したファイバBでは照射時間に応じて損失が増加している。0.8wt%のフッ素を添加したコア材を用いたファイバCでは線照射後一旦大きな損失増を示すが、線照射中にもかかわらず徐々に損失増は小さくなっていく。これはフッ素の存在により線のエネルギーによる欠陥回復が加速される現象、いわゆるRadiation-Hardening効果が生じているためと考えられる。

また、フッ素を添加したファイバBでは添加していないファイバAよりも損失増の高い結果となっているが、これはコア材の製造方法による影響と考えられる。この結果から、フッ素濃度0.2wt%では放射線による損失増の抑制効果はほとんど無いといえる。

放射線による損失劣化は純粋石英タイプのファイバAが線照射 1.0×10^6 R/h 60分において約25 dB/km (2.5 dB/100m)の損失劣化を生じ、さらに増加し続ける傾向があるのに対して、ファイバCでは約5 dB/km (0.5 dB/100m)まで低減され、さらにその損失も、短時間で回復するという点で非常に優れていることが確認された。OH基にはファイバ内のダングリングボンドタイプの欠陥を埋める働きがあることが報告されているが、フッ素も同様の効果があると考えられる。

この損失劣化の低いファイバCについての線量依存性を測定した結果を図5に示す。測定波長は1.31μm、照射時間は60分、線量率は 1.0×10^5 R/h, 1×10^6 R/hの

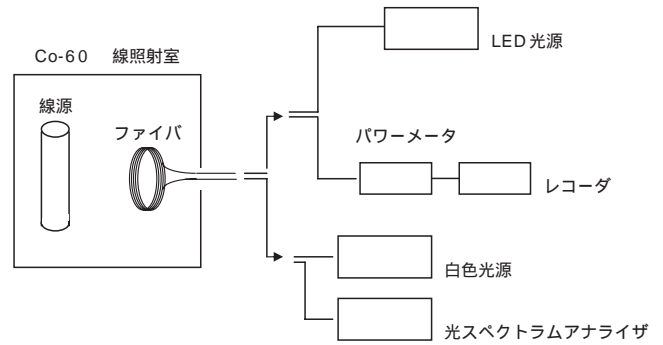


図3 測定系の概略図

Fig. 3. Schematic diagram of experimental apparatus.

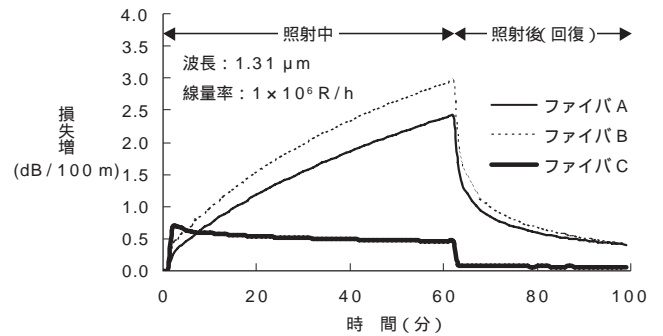


図4 線照射中から照射後までの伝送損失変化

Fig. 4. Time response curves of radiation-induced loss.

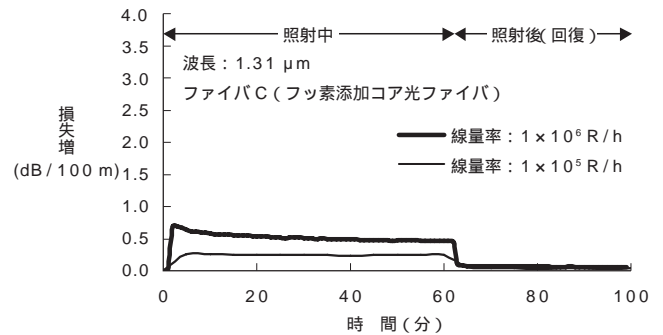


図5 伝送損失増加の線量率依存性

Fig. 5. Dose-rate dependency of radiation-induced loss.

2水準である。この範囲の線量率では線量の増加に伴って損失増も大きくなっていることが分かる。損失回復特性については、線量率にかかわらず同レベルの回復特性を有することが確認された。

3.3 損失増加スペクトル

ファイバB, Cに対し、線量 1×10^5 R/hを30分照射したときの600 ~ 1,300 nmまでの線照射損失増加スペクトルを測定した結果を図6に示す。ファイバBについては650 nm以下の波長では損失増が大きく、正確なスペクトルが得られなかった。この図から、ファイバCに比べてファイバBでは700 nm以下の損失増が大きいことがわかる。これは215 nmに吸収を持つE センタ等の欠陥

による影響と考えられる。ファイバCでは、フッ素濃度を上げることでガラス中の欠陥がブロックされ、放射線による損失増が抑制されたと推定される。また、ファイバCでは、わずかではあるが630 nm付近に吸収ピークがみられる。石英ガラス中のカラーセンタのひとつであるNon-Bridging-Oxygen-Hole-Center (NBOHC)の影響と考えられる。

3.4 高線量照射特性

図7にファイバAとCについて、高線量まで照射を行った際の損失増加を示す。測定波長は1.31 μm である。純粋石英コアタイプのファイバAは照射量に比例して単調増加する傾向を示し、総線量10,000 Gyにおいて約13 dB/kmの損失増が確認された。一方、フッ素を0.8 wt%添加したファイバCは、低線量領域ですぐに飽和傾向を示し、その後、大きな損失増はみられなかった。ファイバCでは、総線量10,000 Gyにおいて約2 dB/kmの損失増であった。この結果からもコアへのフッ素添加の効果が高いことが確認された。

4. 信頼性

耐放射線特性向上のために水素をファイバ内に添加する方法が知られているが、水素は拡散しやすいため、長期の特性安定性に問題が生じることがある。今回試作したファイバに対しては水素処理を行っていないため、水

素濃度の変化による特性変化はない。しかしながら、フッ素添加コア光ファイバについては、長期的な伝送損失の変動や屈折率分布の変化による光学特性の変化について議論されたことがある。そこで、確認のために、ファイバAおよびCの伝送損失、MFDについてファイバ化後、および1か月後から半年後までにわたって測定を行った。結果を図8に示す。伝送損失は長期にわたって変化がなく安定していることを確認した。また、MFDについても初期値から0.1 μm 以上変化することはなく測定誤差範囲内であることを確認した。

コアにフッ素を添加することによる水素特性の影響を確認するため、ファイバA、C、および標準的なゲルマニウム添加コアシングルモード光ファイバの3種類について水素処理前後の伝送損失変化を測定した。結果を図9に示す。水素処理条件は70 μm , 300 atm, 72時間とした。コアにフッ素を添加したファイバCの損失変動がわずかに低い傾向を示したが、3種類ともほぼ同等の結果が得られ、特にフッ素添加による水素特性には大きな差が無いことが確認された。

次に、ファイバ強度、および被覆に関する試験結果を表3に示す。引抜き力、被覆除去力は、おもに被覆樹脂および線引き条件に依存するが、通常の伝送用ファイバと同等の値であった。また、クラッドにフッ素添加ガラスを用いているが、動疲労n値についても同等であることを確認した。

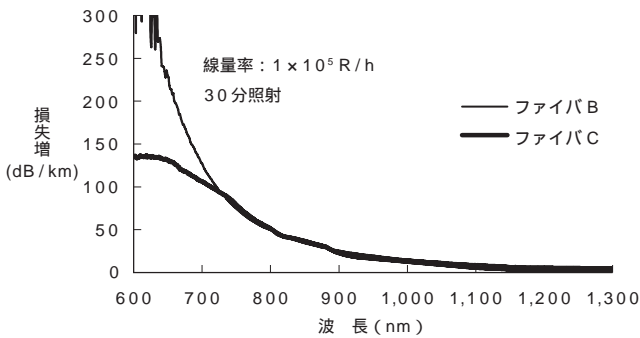


図6 損失増加スペクトル
Fig. 6. Radiation-induced loss spectra.

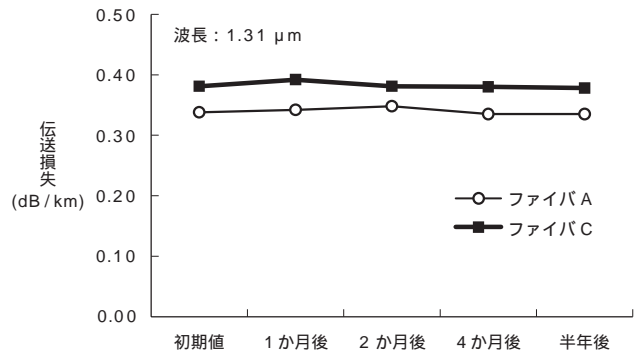


図8 ファイバAおよびファイバCの伝送損失変化
Fig. 8. Long-term stability of loss on fiber A and C.

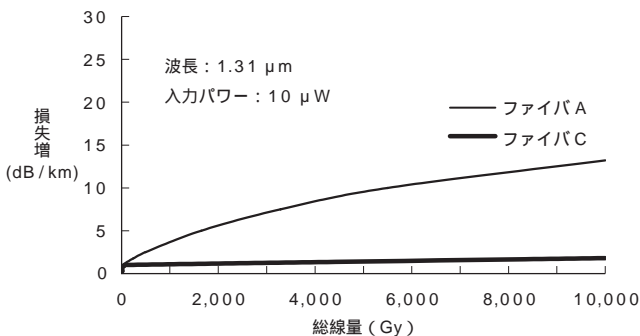


図7 高線量照射特性
Fig. 7. Large dose radiation characteristics.

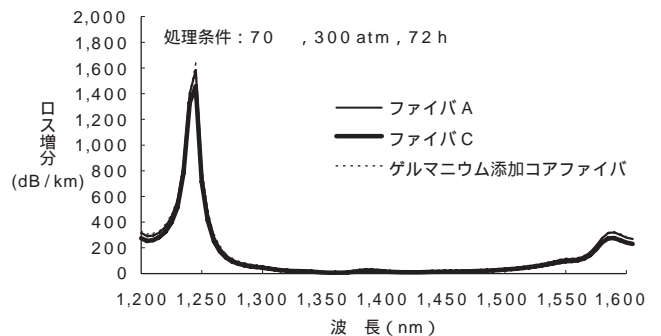


図9 水素処理前後のロス変動
Fig. 9. Loss changes of sample fibers after hydrogen treatment.

表3 ファイバ強度および被覆に関する試験結果
Table 3. Test result of mechanical properties.

評価項目	測定条件	規格・単位	ファイバA	ファイバC
引抜き力*1	-	0.7 - 2.0 N/m	1.0	0.8
被覆除去力*2	最大 / 平均 常温	1 - 8.9 / 1 - 5 N	4.0 / 2.1	4.4 / 2.2
動疲労n値*3	2点曲げ法	> 18	19	19

* 1 参考規格
* 2 IEC60793-1-32, GR-20
* 3 IEC60793-1-33, GR-20

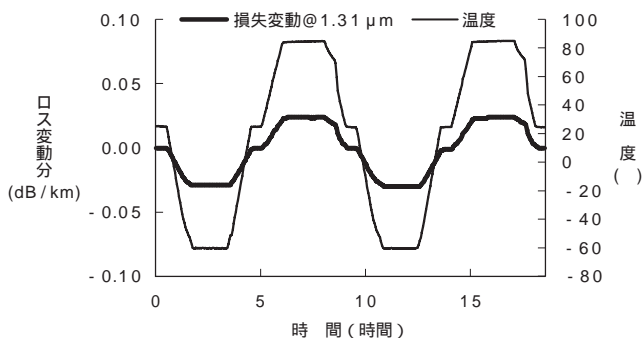


図10 ファイバCの損失の温度依存性
Fig. 10. Loss variation during heat cycles on fiber C.

ファイバCについての損失の温度特性を図10に示す。-60において0.02 dB/kmの損失減，+85において0.01 dB/kmの損失増である。変動幅は0.03 dB/kmであり，標準的なゲルマニウム添加コアファイバの変動幅が0.01 dB/kmであるのに対し，やや大きい変動幅が確認されたが，全く問題ないレベルと考えられる。この損失の温度依存性は，このファイバの初期の伝送損失（吸収，レイリー散乱，構造不整などの損失）がわずかに高い影響によると考えられる。

以上の結果からフッ素添加による信頼性の差は無いといえる。

5.むすび

放射線環境下で用いられる1.3 μm帯シングルモード光ファイバとして，コアに0.8 wt%のフッ素を添加することで，従来の純粋石英コアタイプの光ファイバに比べて，優れた耐放射線特性が得られることを確認した。この耐放射線光ファイバは，国際標準規格ITU-T G.652.Bに準拠しつつ，従来の純粋石英コア光ファイバが線照射1.0 × 10⁶ R/h，60分において約25 dB/kmの損失劣化を生じるのに対して，約5 dB/kmまで低減され，さらにその損失回復特性も非常に優れていることが確認された。今後は，さらに最適なフッ素添加量について検討するとともに，製造方法についても構造不整損失を低減することにより初期損失の低い耐放射線光ファイバを開発する予定である。

参考文献

- 1) 矢作吉乃助：原子力施設における光ファイバ利用の現状と今後の展望，日本原子力学会誌，Vol.27, No.9, pp.768-803, 1985
- 2) 作花澄夫：ガラスハンドブック，朝倉書店，1975
- 3) 荒川ほか：石英系光ファイバの耐放射線特性と光伝送システム，EIM-82-2, 1982
- 4) 角田ほか：光ファイバの耐放射線特性，EIM-83-21, 1983
- 5) T. Kakuta, et al. : Radiation Effect in Pure Silica Core and Ge-doped Silica Core Fibers, Fujikura Technical Review, No.14, pp.9-20, 1985
- 6) 角田ほか：光ファイバへの放射線の影響，応用物理学会誌，第55巻，第3号，pp.248-252, 1986
- 7) 角田ほか：光ファイバの耐放射線特性，フジクラ技報，第79号，pp.1-7, 1990
- 8) 大江ほか：光ファイバの耐放射線特性，EIM-87-127, 1987
- 9) 角田ほか：光ファイバの耐放射線特性，フジクラ技報，第86号，pp.50-54, 1994