JAEA-Technology
2012-009

高速実験炉「常陽」における原子炉容器内保守・補修技術開発

ー高耐放射線ファイバスコープの開発ー
（共同研究）

Inspection and Repair Techniques in the Reactor Vessel of the Experimental Fast Reactor Joyo
- Development of a High Radiation Resistant Fiberscope -
(Joint Research)

内藤 裕之　板垣 亘　岡崎 義広　今泉 和幸
伊藤 主税　長井 秋則　北村 了一　社本 尚樹
竹島 由将

Hiroyuki NAITO, Wataru ITAGAKI, Yoshihiro OKAZAKI, Kazuyuki IMAIZUMI
Chikara ITO, Akinori NAGAI, Ryoichi KITAMURA, Naoki SHAMOTO
and Yoshiyuki TAKESHIMA

大洗研究開発センター
高速実験炉部

Experimental Fast Reactor Department
Oarai Research and Development Center

May 2012
Japan Atomic Energy Agency
日本原子力研究開発機構

JAEA-Technology

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ（http://www.jaea.go.jp）
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構　研究技術情報部　研究技術情報課
〒319-1195　茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2012

JAEA-Technology　2012-009

高速実験炉「常陽」における原子炉容器内保守・補修技術開発
－高耐放射線ファイバスコープの開発－
（共同研究）

日本原子力研究開発機構 大洗研究開発センター
高速実験炉部
内藤 裕之、板垣 亘、岡崎 義広※1、今泉 和幸、伊藤 主税、長井 秋則、北村 了一、
社本 尚樹*1、竹島 由将*1

(2012 年 2 月 21 日　受理)

本研究では、高速炉の原子炉容器内観察に使用するための耐熱性・耐放射線性に優れたファイバスコープを開発することを目的として、ファイバスコープの構成要素であるイメージファイバとライトガイドファイバの高温環境における耐放射線性向上策の検討と、照射試験によるファイバスコープの構成要素の照射特性の評価を実施した。

ファイバの耐放射線性については純粋石英コアのファイバが優れており、不純物によって耐放射線性が左右されることがわかっている。また、光の一部はクラッドを通過するため、クラッドについても耐放射線に優れた材料にする必要がある。そこで、コアを OH 基 1,000ppm 含有の純粋石英、クラッドをフッ素ドープ石英とすることで耐放射線性の向上を目指した。

コバルト 60γ線源を用いた照射試験の結果、コアの OH 基含有量を 1,000ppm に増加したことで、伝送損失の増加につながる照射による新たなプレカーサ生成を抑制できていることが確認できた。クラッドについても、フッ素ドープ石英クラッドは樹脂クラッドより伝送損失増加量や増加速度を大きく改善することができた。また、アクリレート樹脂で被覆したファイバの 5×10^5Gy での強度は良好であることが確認できた。

本研究の結果、イメージファイバ及びライトガイドファイバのコア材については OH 基を 1,000ppm 含有する純粋石英、クラッド材についてはフッ素ドープ石英とし、これらでファイバスコープを構成することより、温度 200ºC、γ線線量 5×10^5Gy 照射後でも観察できる見通しを得た。

本研究は、日本原子力研究開発機構と株式会社フジクラとの共同研究に基づいて実施したものである。
大洗研究開発センター：〒311-1393　茨城県東茨城郡大洗町成田町 4002
※1　技術開発協力員
＊1　株式会社フジクラ

JAEA-Technology 2012-009

Inspection and Repair Techniques in the Reactor Vessel of the Experimental Fast Reactor Joyo - Development of a High Radiation Resistant Fiberscope -

(Joint Research)

Hiroyuki NAITO, Wataru ITAGAKI, Yoshihiro OKAZAKI※1, Kazuyuki IMAIZUMI, Chikara ITO, Akinori NAGAI, Ryoichi KITAMURA, Naoki SHAMOTO＊1 and Yoshiyuki TAKESHIMA＊1

Experimental Fast Reactor Department
Oarai Research and Development Center
Japan Atomic Energy Agency
Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki-ken

(Received February 21, 2012)

The radiation characteristics of image fiber and light guide fiber were evaluated to develop a high radiation resistant fiberscope for the fast reactor in-vessel observation.

It is known that a pure silica core fiber has a high radiation resistance and radiation resistance is influenced with impurities in silica. Moreover it is necessary to change the clad material of the light guide fiber because that of the current light guide fiber is acrylate, which is weak against radiation. Hence the improved fibers consist of a pure silica core with 1,000 ppm OH and fluorine-doped silica clad.

As a result of a gamma irradiation test, we confirmed that OH inhibited the generation of the precursor by gamma irradiation. About the clad material, we confirmed that the transmission loss of the fluorine-doped silica clad fiber was smaller than that of the acrylate clad fiber. About the mechanical strength of a fiber, we confirmed that there was no weakening the strength of the fiber and no exfoliation of the coating from the glass.

In this study, we discovered the fiber which consistsed of a pure silica core with 1,000 ppm OH and fluorine-doped silica clad had a high radiation resistance and it is possible to observe using this fiber under 200 degrees C after 5 x 10^5 Gy irradiation.

Keywords: Fast Reactor, In-vessel Observation, Fiberscope, Radiation Resistance, Pure Silica, OH Groups

---

This work has been performed in the joint research of JAEA and Fujikura Ltd.

※1 Collaborating Engineer

＊1 Fujikura Ltd.

目　次

1　緒言 1
2　耐放射線性向上策の検討 2
2.1　ファイバスコープの概要 2
2.1.1　構造 2
2.1.2　耐放射線性ファイバスコープ 2
2.2　現状技術の課題と本研究の目標 3
2.2.1　透過光量 3
2.2.2　解像力 4
2.2.3　色調 4
2.2.4　機械的強度 4
2.3　改良方策 5
2.3.1　透過光量 5
2.3.2　解像力 7
2.3.3　色調 7
3　γ線照射試験 8
3.1　試験方法 8
3.1.1　照射試料 8
3.1.2　測定項目 10
3.1.3　試験体系 11
3.2　照射試験結果 12
3.2.1　イメージファイバ 12
3.2.2　ライトガイドファイバ 13
3.2.3　対物レンズ用硝材 14
3.2.4　強度評価用ファイバ 14
3.2.5　接着試料片 14
3.2.6　シリコンチューブ 14
3.3　評価 15
3.3.1　透過光量 15
3.3.2　解像力 18
3.3.3　色調 19
3.3.4　機械的強度 20
3.3.5　まとめ 23
4　結言 24
謝辞 25
参考文献 26

Contents

1 Introduction 1
2 Examination 2
2.1 Fiberscope 2
2.1.1 Structure 2
2.1.2 Radiation resistance 2
2.2 Problems of the present fiberscope 3
2.2.1 Transmission light power 3
2.2.2 Resolution 4
2.2.3 Color hue 4
2.2.4 Mechanical strength 4
2.3 Improvement 5
2.3.1 Transmission light power 5
2.3.2 Resolution 7
2.3.3 Color hue 7
3 Gamma-ray irradiation test 8
3.1 Methods 8
3.1.1 Materials 8
3.1.2 Measurement items 10
3.1.3 Geometry 11
3.2 Results 12
3.2.1 Image fibers 12
3.2.2 Light guide fibers 13
3.2.3 Glass samples for lens 14
3.2.4 Fatigue test fibers 14
3.2.5 Resin adhesives 14
3.2.6 Silicon tubes 14
3.3 Discussion 15
3.3.1 Transission light power 15
3.3.2 Resolution 18
3.3.3 Color hue 19
3.3.4 Mechanical strength 20
3.3.5 Summary 23
4 Conclusion 24
Acknowledgements 25
References 26

表リスト

表 1　照射パターン 27
表 2　線量率 0.5kGy/h、温度 200ºC 条件下でのコントラスト値変化 28
表 3　線量率 1kGy/h、温度 200ºC 条件下でのコントラスト値変化 28
表 4　線量率 5kGy/h、温度 30ºC 条件下でのコントラスト値変化 28
表 5　線量率 5kGy/h、温度 120ºC 条件下でのコントラスト値変化 28
表 6　線量率 5kGy/h、温度 200ºC 条件下でのコントラスト値変化 28
表 7　積算 1×10^6Gy 照射時のコントラスト値変化 29
表 8　線量率 0.5kGy/h、温度 200ºC 条件下での RGB 値変化 29
表 9　線量率 1kGy/h、温度 200ºC 条件下での RGB 値変化 29
表 10　線量率 5kGy/h、温度 30ºC 条件下での RGB 値変化 30
表 11　線量率 5kGy/h、温度 120ºC 条件下での RGB 値変化 30
表 12　線量率 5kGy/h、温度 200ºC 条件下での RGB 値変化 30
表 13　積算 1×10^6Gy 照射時の RGB 値変化 31
表 14　強度評価用ファイバの破断試験結果 31
表 15　接着試料片の破断強度試験結果 31
表 16　シリコンチューブの破断強度測定結果 32
表 17　線量率・温度をパラメータとした短時間照射のフィッティング結果 32
表 18　各照射量での CCD 強度の最大値 33
表 19　CCD 分光特性とファイバ波長依存性から求めた 5.3×10^5Gy 照射後の RGB 値の変化 33
表 20　素線ファイバの n 値と log ks 33
表 21　各評価項目に対する評価結果 34

図リスト

図 1　ファイバスコープ 35
図 2　イメージファイバの構成 35
図 3　ガラスの放射線による損傷の原理 35
図 4　添加物の欠陥構造への作用（カラーセンターの抑制） 36
図 5　照射によるコントラスト変化 36
図 6　シリコン樹脂被覆ファイバと二重被覆ファイバの強度比較 36
図 7　OH 基による損失増低減効果 37
図 8　試作イメージファイバ（OH 基 800ppm）による 5×10^5Gy までの予想曲線 37
図 9　対物レンズ用硝材の照射による透過効率変化 38
図 10　試験用ファイバの初期特性 38
図 11　接着試料片の概要 39
図 12　チャート 39
図 13　試験に使用した CCD カメラの分光特性 39
図 14　照射試験体系 40
図 15　照射試験時の写真 40
図 16　伝送画像測定系の概要 41
図 17　ファイバ引張試験機 41
図 18　接着試料片引張試験機 42
図 19　シリコンチューブ引張試験機 42
図 20　0.5kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバの波長スペクトル 43
図 21　0.5kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバの波長スペクトル 43
図 22　1kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバの波長スペクトル 44
図 23　1kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバの波長スペクトル 44
図 24　5kGy/h、30ºC 条件下での現用型イメージファイバの波長スペクトル 45
図 25　5kGy/h、30ºC 条件下での改良型イメージファイバの波長スペクトル 45
図 26　5kGy/h、120ºC 条件下での現用型イメージファイバの波長スペクトル 46
図 27　5kGy/h、120ºC 条件下での改良型イメージファイバの波長スペクトル 46
図 28　5kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバの波長スペクトル 47
図 29　5kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバの波長スペクトル 47
図 30　積算 1×10^6Gy 照射時の現用型イメージファイバの波長スペクトル 48
図 31　積算 1×10^6Gy 照射時の改良型イメージファイバの波長スペクトル 48
図 32　マルチメータによる 850nm 単一波長の測定結果（イメージファイバ） 49
図 33　0.5kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバの白黒チャート観察画像 50
図 34　0.5kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバの白黒チャート観察画像 51
図 35　1kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバの白黒チャート観察画像 52
図 36　1kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバの白黒チャート観察画像 53

図 37　5kGy/h、30ºC 条件下での現用型イメージファイバの白黒チャート観察画像.....54
図 38　5kGy/h、30ºC 条件下での改良型イメージファイバの白黒チャート観察画像.....55
図 39　5kGy/h、120ºC 条件下での現用型イメージファイバの白黒チャート観察画像.....56
図 40　5kGy/h、120ºC 条件下での改良型イメージファイバの白黒チャート観察画像.....57
図 41　5kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバの白黒チャート観察画像.....58
図 42　5kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバの白黒チャート観察画像.....59
図 43　積算 1×10^6Gy 照射時の現用型イメージファイバの白黒チャート観察画像.....60
図 44　積算 1×10^6Gy 照射時の改良型イメージファイバの白黒チャート観察画像.....62
図 45　RGB 値の変化（現用型イメージファイバ）.....64
図 46　RGB 値の変化（改良型イメージファイバ）.....64
図 47　0.5kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバのカラーチャート観察画像.....65
図 48　0.5kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバのカラーチャート観察画像.....66
図 49　1kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバのカラーチャート観察画像.....67
図 50　1kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバのカラーチャート観察画像.....68
図 51　5kGy/h、30ºC 条件下での現用型イメージファイバのカラーチャート観察画像.....69
図 52　5kGy/h、30ºC 条件下での改良型イメージファイバのカラーチャート観察画像.....70
図 53　5kGy/h、120ºC 条件下での現用型イメージファイバのカラーチャート観察画像.....71
図 54　5kGy/h、120ºC 条件下での改良型イメージファイバのカラーチャート観察画像.....72
図 55　5kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバのカラーチャート観察画像.....73
図 56　5kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバのカラーチャート観察画像.....74
図 57　積算 1×10^6Gy 照射時の現用型イメージファイバのカラーチャート観察画像.....75
図 58　積算 1×10^6Gy 照射時の改良型イメージファイバのカラーチャート観察画像.....77
図 59　0.5kGy/h、200ºC 条件下での現用型ライトガイドファイバの波長スペクトル.....79
図 60　0.5kGy/h、200ºC 条件下での改良型ライトガイドファイバの波長スペクトル.....79
図 61　1kGy/h、200ºC 条件下での現用型ライトガイドファイバの波長スペクトル.....80
図 62　1kGy/h、200ºC 条件下での改良型ライトガイドファイバの波長スペクトル.....80
図 63　5kGy/h、30ºC 条件下での現用型ライトガイドファイバの波長スペクトル.....81
図 64　5kGy/h、30ºC 条件下での改良型ライトガイドファイバの波長スペクトル.....81
図 65　5kGy/h、120ºC 条件下での現用型ライトガイドファイバの波長スペクトル.....82
図 66　5kGy/h、120ºC 条件下での改良型ライトガイドファイバの波長スペクトル.....82
図 67　積算 1×10^6Gy 照射時の現用型ライトガイドファイバの波長スペクトル.....83
図 68　積算 1×10^6Gy 照射時の改良型ライトガイドファイバの波長スペクトル.....83
図 69　マルチメータによる 850nm 単一波長の測定結果（ライトガイドファイバ）.....84
図 70　積算 1×10^6Gy 照射時の対物レンズ用硝材の波長スペクトル (水素処理なし No.1).....84
図 71　積算 1×10^6Gy 照射時の対物レンズ用硝材の波長スペクトル (水素処理あり No.1).....85
図 72　積算 1×10^6Gy 照射時の対物レンズ用硝材の波長スペクトル (水素処理なし No.2).....85
図 73　積算 1×10^6Gy 照射時の対物レンズ用硝材の波長スペクトル (水素処理あり No.2).....86
図 74　積算 1×10^6Gy 照射時の対物レンズ用硝材の波長スペクトル (水素処理なし No.3).....86

図 75　積算 1×10^6Gy 照射時の対物レンズ用硝材の波長スペクトル (水素処理あり No.3) 87
図 76　強度評価用ファイバの破断試験結果 87
図 77　接着試料片の破断強度 88
図 78　シリコンチューブの破断引張強度 88
図 79　1×10^3Gy での現用型イメージファイバの損失増（線量率パラメータ） 89
図 80　1×10^3Gy での改良型イメージファイバの損失増（線量率パラメータ） 89
図 81　1×10^3Gy での現用型ライトガイドファイバの損失増（線量率パラメータ） 90
図 82　1×10^3Gy での改良型ライトガイドファイバの損失増（線量率パラメータ） 90
図 83　線量と損失増の関係（現用型イメージファイバ、0.5kGy/h、200ºC） 91
図 84　線量と損失増の関係（現用型イメージファイバ、1kGy/h、200ºC） 91
図 85　線量と損失増の関係（現用型イメージファイバ、5kGy/h、200ºC） 92
図 86　現用型イメージファイバの損失増（温度パラメータ） 92
図 87　改良型イメージファイバの損失増（温度パラメータ） 93
図 88　現用型ライトガイドファイバの損失増（温度パラメータ） 93
図 89　改良型ライトガイドファイバの損失増（温度パラメータ） 94
図 90　現用型イメージファイバの 2×10^5Gy までの損失増のトレンドグラフ（波長 630nm） 94
図 91　改良型イメージファイバの 2×10^5Gy までの損失増のトレンドグラフ（波長 630nm） 95
図 92　波長 680nm における損失増のトレンドグラフ 95
図 93　現用型ライトガイドファイバの 2×10^4Gy までの損失増のトレンドグラフ 96
図 94　改良型ライトガイドファイバの 3×10^5Gy までの損失増のトレンドグラフ 96
図 95　CCD カメラの量子効率 97
図 96　CCD で検出される電荷量の損失増（イメージファイバ） 97
図 97　CCD で検出される電荷量の損失増（ライトガイドファイバ） 98
図 98　現用型イメージファイバによる白黒チャートの強度変化 98
図 99　改良型イメージファイバによる白黒チャートの強度変化 99
図 100　各照射量における CCD で検出した最大強度 99
図 101　log ks と照射温度・線量率 100

1　緒言

光ファイバは屈折率の異なるガラスを材料として、コア部分の屈折率をクラッド部分の屈折率より高くすることで、ファイバ端面に入射した光をコアとクラッドの境界面で全反射させることで他端に伝送するものである [1)]。ファイバにより伝送できる光の波長帯は広く、多数のファイバの配列を両端で正確に対応させることで画像を直接伝送するイメージガイドとして利用されている [2)]。ファイバスコープは、対物レンズにより端面に結んだ画像をイメージファイバにより他端に伝送する。ファイバスコープは径が細く、可とう性に優れた特徴を持っており、狭隘な場所等での観察方法としてこれまで利用されてきた。

高速炉の原子炉容器内を観察するにあたっては、原子炉容器内が高温高放射線環境下で、アルゴンガス雰囲気のバウンダリ構造のためアクセスルートが制限されるという課題がある。「常陽」では、これまで原子炉容器内の観察はファイバスコープにより実施してきたが、今後、原子炉容器内保守・補修作業として実施する炉心上部機構の交換作業、計測線付実験装置試料部の回収作業は 1 カ月以上の長期間にわたる連続監視が要求され、使用期間は 1,000 時間以上、ファイバスコープの照射量は最大 5×10^5Gy に達する。

これまで実施してきた炉心上部機構の下面観察では、ファイバスコープにより得られる画像が暗くなることや鮮明度の低下が確認されている [3)]。「常陽」の原子炉容器内はステンレス製構造物の放射化により、停止中においても最大数百 Gy/h と高線量下にあり、約 16 時間の観察で照射量は先端部で約 5×10^3Gy であった。現在の耐放射線性ファイバスコープでは 1×10^4Gy で 0.5dB/m の損失増 [4)]であり、5×10^5Gy もの高線量での照射データはないものの、1,000 時間の使用期間では数十本ものファイバスコープを交換しながら観察する必要があることが想定される。ファイバスコープ交換作業の低減と経済性の観点からもファイバスコープの使用可能時間を延ばすことは重要であり、ファイバスコープを構成するイメージファイバ等の各要素の耐放射線性の向上を図り、5×10^5Gy の照射を受けても観察できるファイバスコープの開発を目指した。

通信に用いられる単心の光ファイバではこれまで多くの照射試験が実施され、耐放射線性向上に係る研究開発が多数実施されてきた。これらの研究から、耐放射線ファイバとして石英コアファイバが用いられ、ファイバへの添加物の種類や量により耐放射線性が変化することが知られている [1)]。イメージファイバについても、単心の光ファイバと同様に石英コアファイバへの添加物の種類や量により耐放射線性を向上させることは可能である [2)]が、単心ファイバでは 1×10^6Gy を超える照射データがある [5)]のに対し、イメージファイバではこれまで 1×10^4Gy までしか照射試験が実施されておらず [2)]、5×10^5Gy に達する高線量での照射特性を調べた例はない。そのため、本研究では高温且つ高放射線環境下におけるイメージファイバ等の照射特性を把握し、耐放射線性向上に必要な実験的知見を得るとともに、200ºC、5×10^5Gy の環境で使用できるようファイバスコープの耐放射線性を向上させることを目的とした。

本報告書は、ファイバスコープの耐放射線性向上策の検討及びγ線照射施設で実施したファイバスコープ要素の照射試験の成果をまとめたものである。

2　耐放射線性向上策の検討

2.1　ファイバスコープの概要

2.1.1　構造

高速炉の原子炉容器内で使用するファイバスコープは外部からの光源が必要であり、画像を伝送するイメージファイバ、光源からの光を導くライトガイドファイバ、像を結ぶレンズ系等で構成され、これらを保護管であるステンレス管に収めて原子炉容器内に挿入する（図 1)。対物系が炉容器の中に挿入され、接眼系は炉容器の外に設置される。「常陽」の原子炉容器内観察に用いる場合、ファイバスコープの全長は約 10m であり、約 3m が高い放射線場に曝されることになる。

光ファイバは屈折率が異なる二種類のガラスで構成され、コア部分の屈折率をクラッド部分の屈折率より高くすることで、ファイバ端面に入射した光をコアとクラッドの境界面で全反射させることで他端に伝送する [1)]。イメージファイバは図 2 に示すように、石英ジャケットに 1 次線引きした光ファイバを所定の本数束ねて、溶融一体化したものである。像を光ファイバ 1 本 1 本に分割し、色情報を他端に伝達する [6)]。画素数が増えるとファイバ径が太くなり、許容曲げ半径が大きくなる。「常陽」の原子炉容器内観察では 30,000 画素のファイバを用いている。

また、光ファイバはガラス表面に傷が発生すると強度が著しく低下する。そのため、ファイバを保護するためにガラス表面（単心ファイバではクラッドイメージファイバでは石英ジャケットの表面）をシリコン樹脂などで被覆して傷の発生を防止している（図 2 参照)。150ºC を超えるような高温環境下では、熱により被覆材が劣化し、ガラス表面に傷がつくことでファイバの機械的強度が低下するため、高温環境で用いられるファイバの場合、ポリイミド系樹脂などの熱に強い材料を被覆材として用いるか、あるいは二重被覆としている [2)]。

2.1.2　耐放射線性ファイバスコープ

(1) 放射線による損傷の原理

ガラスに放射線が照射されると、図 3 に示すように構造が不安定な部分の原子構造が開き、プレカーサと呼ばれる欠陥構造が生じる [2)]。このプレカーサが電子や正孔を捕捉してカラーセンターとなり、欠陥構造に特有の波長の光を吸収する。特定の波長の光が吸収されることで、透過光量が下がるとともに色相が変化する。

また、通常光はコアの部分で伝送されるが、光の一部はクラッドへ漏光しており、隣接する画素から入光した光とのモードの結合が起こる。この漏光の割合が変わることで、コントラストが変化すると考えられている。

(2) 石英系ファイバの耐放射線性

石英系ファイバには、塩素、ゲルマニウム、リン、水酸基（OH 基)、フッ素、水素などが製造過程で混入あるいは添加される。これらの不純物の種類及び量によって、光ファイバの耐放射線性が変化する。

塩素については、少ないファイバの方が耐放射線性に優れている [2)]。また、屈折率の調整のために添加されるゲルマニウムやリンについては、コアにゲルマニウムやリンを添加し、クラッド

を純粋石英としたファイバより、コアを純粋石英、クラッドにフッ素を添加したファイバの方が耐放射線性が良好である[7)]。

OH 基やフッ素、水素については、図 4 に示すようにガラス中に生成された欠陥構造を埋めるように働き、カラーセンターの生成が抑制される[1,5)]。

フッ素をコアに添加する場合は、フッ素には屈折率を下げる効果があるため、コアとクラッドの屈折率差を保持するためにクラッド材の屈折率を下げなければならない。そのため、クラッド材への添加量なども検討しなければならず、コア、クラッドともに材質が現状のイメージファイバと異なるため、イメージファイバ化のための製造条件の検討が必要となる。通信用ファイバではコア､クラッドともにフッ素を添加したファイバの製造技術があるが､イメージファイバでは、ファイバ母線を 1 次線引きした後、それを束ねてさらに線引きするため、通信用ファイバと製造工程が異なる。イメージファイバではコアにもフッ素を添加したファイバは製造されておらず、フッ素を添加したイメージファイバの開発には長期の開発期間が必要となる。

コアの OH 基含有量を変える場合は、クラッド材については変える必要がなく、現在耐放射線性を高めたイメージファイバでは OH 基量を多く含んだものが用いられている。

2.2 現状技術の課題と本研究の目標

本研究では、原子炉停止中の「常陽」炉容器内で 1 カ月を超える作業（約 40 日）を連続監視できるよう、目標線量を 5×10^5Gy に設定する。この目標に対しての現状技術の課題について項目ごとにまとめる。

2.2.1 透過光量

ファイバスコープにより観察される光の明るさは、光源から出力される光量、ライトガイドファイバ及びイメージファイバの透過光量、レンズの透過光量、画像観察系（CCD カメラ等）での受光量が影響する。「常陽」の場合、強い放射線場に曝されるのは約 3m である。また、初期の透過光量の約半分（伝送損失で 3dB）であれば光源の光量調節等により観察可能であることから、5×10^5Gy 照射後の伝送損失は 1dB/m 以下を目標とする。

2.1.2 (1)で述べたように、放射線環境下では、ガラス中にプレカーサと呼ばれる欠陥構造が生成し、電子や正孔を捕捉して特有の波長の光を吸収するようになる。可視光域の波長の光を吸収するものもあるため、可視光域においても損失が増加し、可視光全体の透過光量が低下する。イメージファイバでは、コア材が OH 基 200ppm を含有する純粋石英のもので、照射による損失増が 1×10^4Gy で 0.5dB/m 以下という例はあるが、常温でも高温環境でも 5×10^5Gy まで照射した例がない。したがって、本研究では、200ºC 環境下での 5×10^5Gy の高線量領域までの照射特性を明らかにする。また、炉心上部機構の下面観察の実施経験[3)]より、これまで「常陽」の原子炉容器内観察に使用してきたファイバ（イメージファイバはコアに OH 基 200ppm を含有する純粋石英、クラッドに 4%wt のフッ素ドープ石英。ライトガイドファイバはコアに OH 基 1,000ppm を含有する純粋石英、クラッドにエポキシアクリレート）では、5×10^3Gy の使用で初期光量では観察できなくなるほど損失が大きくなっており、5×10^5Gy 照射後ではさらに損失が大きくなり観察が困難になることが予想されるので、改良を実施しその照射特性を評価する。

2.2.2　解像力

原子炉容器内構造物の観察のためには、構造物（ステンレス板等）や作業に用いる装置の各部を識別できる性能が求められ、解像力の低下も原子炉容器内観察では問題となる。解像力は、「識別可能な線の最小幅」と定義される。「常陽」の原子炉容器内観察においては、画素数 30,000 画素、イメージサークル径 1.85mm のイメージファイバを用いており、1m 先で 5mm の解像力を有している。

解像力は、原理的にはファイバの画素数とイメージサークル径（視野径）に依存する。しかし、コントラストの低下やレンズ焦点のずれによっても解像力が低下する。照射によるコントラストの低下についての報告はあまりないが、総線量 1×10^{4}Gy（5×10^{1}Gy/h）の照射前後にコントラスト値を測定した例があり、その結果を図 5 に示す。この例では照射後にコントラスト値は 7.5% 低下した [2)]。このように、照射によるコントラスト値の変化があることを報告している例があるため、本研究では照射によるコントラスト値を測定し、解像力への影響の有無を調べる。

2.2.3　色調

色調の要素である色相や彩度が変化すると、観察画像の色の様相や鮮やかさが変化する。高速炉の原子炉容器内観察では、観察対象はステンレス構造物などの金属となる。よって、色相の変化は原子炉容器内観察においては画像識別に影響はなく、彩度も同様である。

放射線環境下では、ガラス中の欠陥構造に特有の波長の光が吸収されるため、色相が変化する [2,8)]。過去の知見では、色相が変化するほど照射を受けた場合、伝送損失が大きく観察できないほど透過光量が低下するため、色相変化の影響はないという報告がある [2)]。

しかし、金属は可視光域においてはどの波長に対しても反射率が高いものの、吸収される波長によっては構造物の識別が困難になることも考えられる。したがって、5×10^{5}Gy までの色調変化を把握する。

2.2.4　機械的強度

「常陽」の原子炉容器内保守・補修作業の監視用にファイバスコープを使用する場合、炉上部からファイバスコープを挿入して側視あるいは斜視で観察することになる。これまでの「常陽」における原子炉容器内観察では、炉心上部機構の下面観察において、ファイバを 90º に屈曲させて使用した経験がある [3)]ものの、複雑な屈曲はない。よって、複雑に屈曲した狭隘部に挿入するファイバスコープのような可とう性は要求されず、引張強度が最も重要となる。実際に高速炉の原子炉容器内で使用する場合、ファイバスコープはステンレス管に組み込まれて原子炉容器内に挿入され、対物レンズ等はステンレス管に取り付けられる。そのため、ファイバ自体に対物レンズ等の重力が加わることはない。したがって、ファイバの自重等を考慮して、仮にイメージファイバ全体に 1kg の力が加わった場合を想定して、5×10^{5}Gy の使用（500Gy/h、1,000 時間）で破断しないことを確認する。

前節（2.1.1）で述べたように、ファイバはガラス表面に傷がつくと機械的強度が著しく低下するため、ガラス表面を被覆している被覆材の性能が重要である。製作目標とする 200ºC 環境で 5

×10^5Gy の照射に対してファイバが使用可能であることを調べた例はない。シリコン樹脂で被覆したファイバとシリコン樹脂に耐熱性を有するポリエーテルエーテルケトン樹脂（PEEK）で二重に被覆したファイバの 2 つに対して、総線量 1×10^5Gy の線量を照射後、100 時間加熱処理をしたサンプルの引張強度を比較した例があり、結果を図 6 に示す [2)]。この結果から、250ºC 環境で総線量 1×10^5Gy までの照射に対して使用可能なファイバがあることは分かる。現在原子炉容器内観察に用いているアクリレート系樹脂で被覆したファイバについては、耐熱温度が 200ºC であり、200ºC 環境での使用には問題ないことが分かるが、200ºC 環境で 5×10^5Gy の照射をした場合に使用可能かどうかは調べられていないため、使用の可否については確認する必要がある。

また、接着剤やファイバを保護するチューブについて、炉心上部機構下面観察においてはこれまで使用している材料で問題は生じていないが、高温高線量下における使用の可否については確認する必要がある。

2.3 改良方策

前節（2.2）での課題に対する改良方策について、前節の各項ごとに記す。

2.3.1 透過光量

(1) イメージファイバコアへの OH 基量増加

単心の光ファイバでは、OH 基の含有量に対し、図 7 のような照射データがある [9)]。上記データでは、単心ファイバで波長は 850nm であるが、イメージファイバについても OH 基量を増加させることで同様の傾向が期待される。

OH 基の効果については、コア中の OH 基量を数百～1,000ppm に増加させることにより、初期では OH 基の吸収ピークによる損失が大きいものの、高線量下においては可視光域全体で照射による伝送損失増加を低減することができる。よって、コア中の OH 基を約 1,000ppm に増加させることで高線量下での損失増低減を目指す。

照射によるファイバの損失増については、以下に示すカラーセンター形成モデル [1,10,11)]により推定する。

このモデルでは i 種のカラーセンターについて、

- 照射前に濃度 P_{0i} のプレカーサ（チャージトラップ）が既に存在している。
- 照射中にγ線によって新たに一定速度 K_i でプレカーサが形成される。
- 照射中にキャリアが空プレカーサの数に比例した速度（速度定数 F_i）でプレカーサにトラップされる。
- トラップされたチャージの濃度に比例してプレカーサから熱的及び再結合によってチャージが解放される（それぞれの速度定数を U_i, R_i）。

と仮定する。これより、カラーセンターの濃度 N_i は

$$\frac{dN_i}{dt} = F_i(P_{0i} + K_i t - N_i) - (R_i + U_i)N_i \qquad (1)$$

で表される。i 種の成分がそれぞれ独立であると仮定して、t=0 における N_i=0 の場合の解は、

$$N_i = \frac{F_i}{F_i+R_i+U_i}\left\{\left(P_{0i}\frac{K_i}{F_i+R_i+U_i}\right)\left(1-e^{-(F_i+R_i+U_i)t}\right)+K_i t\right\} \quad (2)$$

となる。K_i, F_i, R_i は照射線量率φに比例するため、

$$K_i = k_i\varphi \quad (3)$$

$$F_i = f_i\varphi \quad (4)$$

$$R_i = r_i\varphi \quad (5)$$

である。

時間 t における伝送損失増加の総量Δαは

$$\Delta\alpha = \sum_i N_i \quad (6)$$

一方、実験式は損失増をΔαとして

$$\Delta\alpha \cong 10\log\frac{I_{(0)}}{I_{(t)}} = \alpha_L{}'t + \sum_i \alpha_i\left(1-e^{-\lambda_i{}'t}\right) \quad (7)$$

と表される。ここで、$I_{(0)}$は照射前の光出力、$I_{(t)}$は時間 t における光出力である。

よって、

$$\alpha_L{}' = \sum_i \frac{f_i k_i \varphi^2}{(f_i+r_i)\varphi+U_i} \quad (8)$$

$$\alpha_i = \frac{f_i}{(f_i+r_i)+\frac{U_i}{\varphi}}\left[P_{0i}-\frac{k_i}{(f_i+r_i)+\frac{U_i}{\varphi}}\right] \quad (9)$$

$$\lambda_i{}' = (f_i+r_i)\varphi+U_i \quad (10)$$

となる。これより、線量 D に対しては

$$\alpha_L = \sum_i \frac{f_i k_i}{(f_i+r_i)+\frac{U_i}{\varphi}} \quad (11)$$

$$\lambda_i = (f_i+r_i)+\frac{U_i}{\varphi} \quad (12)$$

となる。純粋石英コアの試作イメージファイバ（OH 基 800ppm）の、可視光である 470nm での 5×10^2Gy までの照射試験のデータを

$$\Delta\alpha = 0.178\times\left\{1-e^{-2.25\times10^{-2}\times D}\right\} \quad (13)$$

とフィッティングして、フィッティング結果から 5×10^5Gy での損失増を予測すると、約 0.2dB/m の損失増となる。試作イメージファイバの試験データとフィッティング結果を図 8 に示す。

OH 基量が多いほど損失抑制効果が高いため、OH 基 1,000ppm を含有させる場合、800ppm 含有したファイバより損失が小さいと考えられる。これより、コア中の OH 基量を 1,000ppm とすることで、波長 470nm においては、5×10^5Gy 照射後でも照射による損失増が 1dB/m 以下に抑制できると予想される。純粋石英コアファイバの場合、可視光域では 630nm の NBOHC と呼ばれるピークと、紫外域の E'センターと呼ばれるピークの裾により光が吸収されるが、図 4 に示すように石英ファイバでは NBOHC の吸収ピークより長波長側の可視光領域には特定の吸収ピークがなく、損失増が非常に小さくなる。そのため、可視光全体の照射による損失増も 1dB/m 以下になることが期待される。

(2) ライトガイドファイバのクラッド材変更

これまで「常陽」で原子炉容器内の観察に用いたライトガイドファイバでは、クラッド材にアクリレート系樹脂を用いている。一般的に有機化合物は石英ガラスに比べ、原子間の結合エネルギーが小さいので壊裂しやすく、欠陥構造ができやすいため、クラッド材のアクリレート系樹脂の部分での光の吸収が大きくなる。クラッド材をイメージファイバと同じフッ素ドープ石英に変更すれば、一般的に、イメージファイバより単心ファイバのほうが耐放射線性は良好である [2)]ため、イメージファイバ以上の耐放射線性が期待できる。

(3) 対物レンズの水素含浸処理

対物レンズはファイバに比べて薄いため光の伝送距離が短く、総線量約 1×10^5Gy の線量では可視光域で光学特性（透過率低下、着色）の変化は認められていない（図 9 参照）[2)]。高温高圧水素ガス雰囲気でガラス中に水素分子を含浸させると、照射によってラジカルとなった水素がガラス中のプレカーサと結合し、カラーセンターの生成が抑制される [12)]ことがわかっている。そこで、放射線環境下で使用されるイメージファイバでは通常実施されている水素処理を実施する。

2.3.2　解像力

解像力へ影響を与えるコントラスト変化については、これまでの知見から室温及び 250ºC において、コントラストに有意な変化がない場合であっても波長ごとの光量には明らかな変化が確認されており [2)]、200ºC においても伝送損失の変化よりも小さいと推定されることから、前項の改良策（2.3.1）で伝送損失の増加を抑制できれば観察に問題ないと考えられる。

2.3.3　色調

色調変化についても、これまでの知見から色度座標は伝送損失の変化よりも小さいと推定される [2)]ことから、前項の解像力と同様、伝送損失の増加を抑制できれば観察に問題ないと考えられる。

3　γ線照射試験

3.1　試験方法

ファイバや対物レンズ用硝材について、照射による伝送損失や色調等の特性を調べるため、目標線量率と照射時間を考慮して線量率を 5×10^2Gy/h、1×10^3Gy/h、5×10^3Gy/h の 3 種類、温度を目標温度である 200ºC から室温までの範囲を考慮して 30ºC、120ºC、200ºC と 3 種類に変えて照射し、波長ごとの透過光量の測定及び画像の取得を実施した。また、ファイバや接着剤等の強度変化を調べるため、各種試料を 5×10^5Gy まで照射して、引張試験機により破断強度を測定した。

3.1.1　照射試料

ファイバスコープ要素であるイメージファイバ、ライトガイドファイバ、対物レンズ等について、照射試験に用いる試料を用意した。以下に各試料の詳細について述べる。なお、各試料について、これまで「常陽」の原子炉容器内観察に用いた仕様のものを「現用型」、前章 2.3 の検討により変更した仕様のものを「改良型」としている。

(1) イメージファイバ

コア材質　　：純粋石英 OH 基 200ppm 含有 Cl 基 30ppm 以下（現用型）、純粋石英 OH 基 1,000ppm 含有 Cl 基 30ppm 以下（改良型）
クラッド材質　：フッ素ドープ石英（4wt%）
被覆材　　：エポキシアクリレート
全長　　：60m（照射部 30m）
コア径　　：6.7±0.3μm
クラッド径　　：10.0±0.3μm
ファイバ径　　：540±100μm
画素数　　：2,000 画素

「常陽」の原子炉容器内観察では、全長約 10m、画素数 30,000 のファイバを用いている。

その中で強い放射線に曝されるのは先端の約 3m である。伝送損失の大きさは照射部が長いほど大きい（単位長さ当たりの損失が一定）ため、伝送損失の変化が測定しやすいように照射部は 30m と長く設定した。

画素数については、画素数が大きいとファイバ径が太くなり、許容曲げ半径が大きくなることで試験体系が制約される。そのため、画像が観察可能な範囲でファイバ径が太過ぎないような画素数を設定した（コア径、クラッド径は 30,000 画素のファイバと同じ）。なお、画素間隔は 30,000 画素のイメージファイバと同一であるため、識別可能な最小線幅である解像力は変わらない。

照射前の伝送損失特性を図 10 に示す。

(2) ライトガイドファイバ

コア材質　　：純粋石英 OH 基 1,000ppm 含有 Cl 基 30ppm 以下
クラッド材質　：アクリレート系樹脂（現用型）、フッ素ドープ石英（4wt%）（改良型）

被覆材　　：エポキシアクリレート
全長　　：60m（照射部 30m）
コア径　　：200μm
ファイバ径　　：230±20μm（現用型）、220±20μm（改良型）
照射前の伝送損失特性を図 10 に示す。

(3) 対物レンズ用硝材
材質　　：合成石英ガラス
水素処理　　：なし（現用型）、30MPa・60ºC・406 時間（改良型）
形状　　：φ10mm×10mm

(4) 強度評価用ファイバ
被覆材　　：エポキシアクリレート
ファイバ径　　：125±20μm
破断強度の測定は破壊試験であるので､他の測定をするサンプルを用いて行うことはできない。また、破断強度はファイバ断面積にほぼ比例するので、太径のファイバを用いて測定するためには、相応の評価装置を新設する必要がある。よって、本検討では、耐放射線イメージファイバ、ライトガイドファイバと同じ被覆材料で、強度評価用に、通信用ファイバと同じ、ファイバ径 125μm の評価用ファイバを作成した。耐熱性 200ºC のファイバでアクリレート樹脂が使われており、試料として選定した。

(5) 接着試料片
・イメージファイバ用
構成要素　　：エポキシ接着剤（フィラー（粘度調整剤）あり）、ステンレス丸棒、ステンレスパイプ
・ライトガイドファイバ用
構成要素　　：エポキシ接着剤（フィラーなし）、ステンレス丸棒、ステンレスパイプ
接着剤はファイバとステンレス管との接着に用いるものである。しかし。ステンレス丸棒に変えて石英棒を使用すると石英棒の場合、サンプルへの傷等の問題が生じやすく、石英棒が破断してしまう可能性があるため、ステンレス丸棒を使用した。また、イメージファイバはファイバ素線を束ねて 2 次線引きした太いファイバであるのに対し、ライトガイドファイバは細いファイバを多数本束ねたものとなっている。そのため、イメージファイバのほうが強い力が加わり、イメージファイバ用の接着剤はより強力なエポキシ接着剤（フィラーあり）を用いている。試料片の概要を図 11 に示す。

(6) ファイバ保護用チューブ
・イメージファイバ用
材質：カーボン入りメチルビニルシリコンゴム、フェニル基 12 モル%含有

・ライトガイドファイバ用

材質：カーボンなしメチルビニルシリコンゴム、フェニル基 12 モル%含有

ファイバ保護用のシリコンチューブは、イメージファイバ用では外部からの光の混入を避けるため、カーボン入りの黒色チューブを用いている。

シリコンゴムは耐熱性が 200～300ºC と優れており、高温環境での使用に適したゴムであるが、放射線環境下では硬化し強度が低下する。ファイバ保護用チューブとしては高い強度は求められず、チューブとしての使用ができればよい。耐放射線性を高めたシリコンゴムとしてはフェニル基を多く含んだものがあり、5×10^5Gy 照射した場合であっても引張強度が初期の約 70%あるため、試料に選定した。

3.1.2 測定項目

(1) 透過光強度

ファイバの両端を白色光源とスペクトルアナライザに接続し、透過光量を測定した。光ファイバの伝送損失変化については、原因となるガラス中のカラーセンターの生成が線量率に依存する[2)]ため、線量率をパラメータとした試験が必要である。また、カラーセンターの回復挙動は熱により一層速い速度で回復する[2)]ため、温度をパラメータとした試験が必要である。よって、線量率及び温度をパラメータとし、照射と照射停止を繰り返して照射による損失増加と回復効果の両方を調べた。

線量率については、線量率効果の傾向を調べるため、3 種類のパラメータを用意した。照射施設で実施できる最大線量が約 5×10^3Gy であることを考慮し、5×10^2Gy/h、1×10^3Gy/h、5×10^3Gy/h の 3 種類とした。温度についても傾向を調べるため、200ºC を最高温度として 3 種類のパラメータを用意した（30ºC、120ºC、200ºC）。この 2 つのパラメータの組み合わせにより合計 5 回の照射を実施した。またこれらに加えて、実際に目標とする 5×10^5Gy を超える線量までの損失変化を測定するため、積算で 1×10^6Gy までの照射を実施し、積算線量（照射時間）に対する特性を評価した。照射による損失増加と回復効果の両方を調べるため、照射中に数回照射を停止した。

対物レンズ用硝材は恒温槽内に試料をセットし、照射前と一定時間後に照射を停止してレンズ用硝材を恒温槽から取り出した。白色光源とスペクトルアナライザに導光用ファイバを接続し、その間にレンズ用硝材をセットして透過光量を測定した。実際に目標とする 5×10^5Gy を超える線量までの特性を調べるため、5×10^3Gy/h で積算 1×10^6Gy までの照射を実施した。

ファイバ及びレンズ用硝材は、可視光及び大きな吸収ピークがなく照射による損失の増加が小さい近赤外域のデータも取得するため、測定範囲は 400～1,100nm とした。

(2) コントラスト値

照射によるコントラスト値の変化を調べるため、ファイバ両端に対物レンズと CCD カメラを設置し、図 12 に示す白黒チャートを撮影してその輝度を測定した。輝度は白黒チャートの白部及び黒部を縦に幅で平均値を測定した。コントラスト値は、照射中及び照射停止中に数回測定し、照射による効果及び停止による効果を調べた。

(3) RGB 値

照射による色調変化を調べるため、ファイバ両端に対物レンズと CCD カメラを設置し、図 12 に示すカラーチャートを撮影してその輝度を測定した。今回使用した CCD カメラには 1 画素に CYMG の 4 枚のカラーフィルタが組み込まれており、それぞれの素子の感度（カラーフィルタの透過率を考慮した CCD 感度）は図 13 の通りである。シアンフィルタによる信号量を c、イエローフィルタによる信号量を y、マゼンタフィルタによる信号量を m、グリーンフィルタによる信号量を g とすると、次に示す 3 つの信号量が計算できる。

全信号量 $Y = c + y + m + g$ (14)

色差信号量 $Cr = (y + m) - (c + g)$ (15)

色差信号量 $Cb = (m + c) - (g + y)$ (16)

この 3 つの信号量より、

$R = 0.1 \times (Y + 4Cr - Cb)$ (17)

$G = 0.1 \times (2Y - 2Cr - 2Cb)$ (18)

$B = 0.1 \times (Y - Cr + 4Cb)$ (19)

で R 値、G 値、B 値が算出される。RGB 値は、白色で RGB 全てが最大値 1 となるようにしている。カラーチャートの各色の輝度を平均し、赤色部の R 値、緑色部の G 値、青色部の B 値を測定した。RGB 値もコントラスト値と同様、照射中及び照射停止中に数回測定し、照射による効果及び停止による効果を調べた。

(4) 破断強度

積算線量をパラメータとしてファイバ・接着剤・保護用チューブの強度変化を調べるため、強度評価用ファイバ、接着試料片、シリコンチューブの各試料を恒温槽内にセットして一定の線量（5×10^3Gy、1×10^5Gy、2×10^5Gy、5.3×10^5Gy、1×10^6Gy）まで照射した後に取り出し、引張試験機により破断強度を測定した。照射前と一定時間照射後の試料に対して実施した。

3.1.3 試験体系

γ 線照射試験は高崎量子応用研究所のコバルト 60 照射施設第 7 照射室 [13]で実施した。試験体系を図 14 に、照射パターンを表 1 に示す。透過光強度を測定するための、白色光源・単一波長光源・スペクトルアナライザ・光マルチメータと、コントラスト・色調を測定するための CCD カメラ・対物レンズ等で構成される伝送画像観察系はファイバの接続を切り替えて使用した。測定装置は照射室外に設置し、照射中にオンラインで測定した。

γ 線照射試験に用いた測定装置を以下に示す。

白色光源 ：横河電気製 AQ4305、AQ4303B

白色光源用ランプ ：フジランプ製 JC 12V 50W

スペクトルアナライザ ：横河電気製 AQ6315A

伝送画像確認用 CCD カメラ ：ELMO 製 CN43H

単一波長光源(850nm) ：三喜製 OP750-LED-04-85SC

光マルチメータ ：横河電気製 AQ2140

恒温槽　　：ケイエスオート製

試験時の写真を図 15 に、伝送画像系のシステムについて図 16 に示す。コバルト 60 線源は高さ 45cm、長さ 120cm の板状線源であり、線源との距離を変えることで、照射線量率を変えた。照射温度は恒温槽の設定温度により変え、恒温槽内に各試料をセットした後、照射温度まで恒温槽内温度を上昇させた。恒温槽内温度が照射温度まで上昇後、照射を開始した。

また、照射後の強度評価試験に用いた測定装置を以下に示す。

・強度評価用ファイバ：フジクラ製小型引張試験機

・接着試料片、シリコンチューブ：東洋ボールドウィン製テンシロン RTM-500

測定装置の写真を図 17～図 19 に示す。

3.2　照射試験結果

3.2.1　イメージファイバ

イメージファイバの試験結果について記す。

(1) 伝送損失

白色光源とスペクトルアナライザにより得られたイメージファイバ透過光の波長スペクトルを図 20～図 31 に示す。

波長スペクトルでは 470nm と 600nm で測定値に大きな段差がみられる（例えば、図 21）。これはモノクロメータ及び光学フィルタの切り替えのためである。使用したスペクトルアナライザでは 600nm で 2 次回折光と 1 次回折光を切り替えている。また光学フィルタにより測定する次数以外の高次光及び低次光をカットしているが、このフィルタの切り替え波長が 470nm、600nm、1,050nm にある。

線量率の違いについては、波長ごとによりばらつきはあるものの、5kGy/h のとき照射による損失増はもっとも大きくなった（図 28、図 29）。温度の違いについては、30ºC のときもっとも損失増が大きく（図 24、図 25）、120ºC で一番損失増が小さかった（図 26、図 27）。

積算 1×10^6Gy までの照射では、NBOHC の吸収ピークの中心と考えられる 630nm 付近や短波長では一定時間後は測定値に変化が見られず、検出限界を超えていると考えられる。特に波長 630nm の損失増が大きく、現用型、改良型とも透過光量が低下し、スペクトルアナライザの正確な測定が不可能となった（図 30、図 31）。現用型イメージファイバでは 500nm 以下の短波長領域でスペクトルアナライザの検出限界に達していないのに一定時間後は測定値に変化が見られなくなっている。これは光学フィルタで除去しきれない高次光及び低次光の影響と考えられ、400～500nm ではλ/2 の光（実際の波長が 800～1,000nm の光）が約 30dB 低いレベルで現れる。波長 800～1,000nm は現用型、改良型のどちらも損失増加は大きくなく、透過光量がほとんど変わっていないため、800～1,000nm の光を検出することで測定値に変化が見られないと考えられる。よって、検出限界に達する前に正しく測定できなくなっている。

また、積算 1×10^6Gy までの照射で実施した 850nm の単一波長光源と光マルチメータによる測定結果を図 32 に示す。

(2) コントラスト

白黒チャートの画像観察で得られたコントラスト値を表 2～表 7 に、観察画像を図 33～図 44 に示す。なお、積算で 1×10^6Gy までの照射では、画像が暗くなったため途中で照明の出力を上げ、被写体表面の照度を 3,900lx から 99,500lx に変更している。輝度は白黒ともに照射により低下が見られた。現用型ファイバでは照射による輝度低下が大きく、照射中はコントラスト値が測定不能となった（図 33、図 35、図 37、図 39、図 41、図 43）。改良型でのコントラスト値は、0.5kGy/h や 1kGy/h では照射、照射停止による変化は小さい（図 34、図 36）が、5kGy/h では照射中は低くなり照射を停止すると大きくなる傾向が見られた（図 42）。積算 1×10^6Gy までの照射では、コントラスト値は、照射中は低くなるものの、照射を停止した時の値を見ると、照射量が増加しても回復する値に大きな差は見られなかった。

(3) RGB 値

カラーチャートの画像観察で得られた RGB 値を表 8～表 13 及び図 45～図 46 に、観察画像を図 47～図 58 に示す。RGB 値は、最大値を 1、最低値を 0 として表示している。なお、積算で 1×10^6Gy までの照射では、画像が暗くなったため途中で照明の出力を上げ、被写体表面の照度を 3,900lx から 99,500lx に変更している。照射により伝送画像は暗くなり、現用型では、5kGy/h では照射 1 時間後でも画像の識別は困難となった（図 55）。RGB 値はいずれも低下した（図 45）。改良型では、積算 1×10^6Gy までの照射において、光源の追加により照度を上げての観察であるものの画像を識別でき（図 58）、図 46 を見ても照射量が増えるにつれ RGB 値で特定の値だけが低くなるということは見られなかった。

3.2.2　ライトガイドファイバ

白色光源とスペクトルアナライザにより得られたライトガイドファイバ透過光の波長スペクトルを図 59～図 68 に示す。

イメージファイバと同様に 470nm と 600nm で測定値に大きな段差がみられるが、これもモノクロメータ及び光学フィルタの切り替えのためである。

線量率の違いについては、0.5kGy/h と 1kGy/h では大きな差はなく、温度の違いについては 120ºC のときもっとも損失増が小さかった（図 65、図 66）。

積算 1×10^6Gy までの照射では、イメージファイバと同様に特に波長 630nm の損失増が大きく、現用型、改良型とも透過光量が低下し、スペクトルアナライザの正確な測定が不可能となった（図 67、図 68）。改良型では、波長 700nm 以上の長波長領域では損失増が小さく、透過光量の低下はほとんど見られなかった（図 68）が、現用型では、200 時間照射後はほとんどの波長域で測定不能となり、長波長領域でも損失増が非常に大きくなっている（図 67）。

また、積算 1×10^6Gy までの照射で実施した 850nm の単一波長光源と光マルチメータによる測定結果を図 69 に示す。

3.2.3　対物レンズ用硝材

白色光源とスペクトルアナライザにより得られた対物レンズ用硝材の透過光の波長スペクトルを図 70～図 75 に示す。イメージファイバ、ライトガイドファイバと同様に 470nm と 600nm で測定値に大きな段差がみられるが、これもモノクロメータ及び光学フィルタの切り替えのためである。

試料は、水素処理なし、ありをそれぞれ 3 試料用意したが、いずれの試料も 5kGy/h で 200 時間（積算 1.0×10^6Gy）照射しても透過光量に大きな差は見られなかった。硝材は水素処理の有無にかかわらず、透過光量の変化は確認できない。これは硝材が薄いためであり、水素処理前の硝材も試験による損失増が非常に小さかったため、水素処理の効果の有無は確認できなかったが、いずれのサンプルも照射前後で変化が見られず、透過性能は良好であった。水素処理なし、ありのどちらでもレンズ用硝材として使用可能であることが確認できた。

3.2.4　強度評価用ファイバ

強度評価用ファイバの破断強度測定結果を表 14 及び図 76 に示す。5kGy/h で 200 時間（積算 1.0×10^6Gy）照射しても、破断強度に明確な差は見られなかった。

3.2.5　接着試料片

接着試料片の破断強度測定結果を表 15 に、強度変化を図 77 に示す。接着試料片は、ライトガイド用、イメージファイバ用のどちらも、5kGy/h で 200 時間照射しても破断強度に差は見られなかった。

エポキシ樹脂接着剤とステンレス鋼及び石英との接着原理については明確ではないが、化学的な接着（共有結合による接着）及びファンデルワールス力による接着と考えられ、また、エポキシ樹脂の OH 基の水素結合による接着との説もある [14)]。エポキシ樹脂接着剤は接着強度（凝集力）が高いが、熱及び放射線によってシロキサン結合の主鎖が開裂することで樹脂の分解が進む。ただし、「常陽」で実施した炉心上部機構の下面観察 [3)]ではファイバ部での基材破壊が起きており、ファイバ部の基材破壊が劣化を考える上で問題と考えられる。

エポキシ樹脂の接着強度（表 15）は石英ファイバの破壊強度（表 14）に対して十分に高い。接着箇所の詳細な強度評価としては、石英ファイバとの接着界面の放射線劣化についても検証の必要があるが、照射試験において、エポキシ樹脂、石英ファイバともに放射線による劣化は認められなかったことから、現在用いている接着剤について接着箇所は十分な耐久性を有していると考えられる。

3.2.6　シリコンチューブ

シリコンチューブの破断強度測定結果を表 16 に、強度変化を図 78 に示す。破断強度は照射量が多いほど低下傾向にあり、5×10^5Gy を超えた試料ではライトガイド用、イメージファイバ用とも試験機にセットすることができず、測定できなくなるほど強度が低下した。

3.3 評価

3.3.1 透過光量

線量率をパラメータとした照射について、照射前との伝送パワーの差分をとった結果を図 79～図 82 に示す。これからいくつかの波長について、現用型イメージファイバの線量と損失増の関係を図 83～図 85 に示す。

線量率に関しては、伝送損失は線量率が大きくなるにしたがって大きくなっていると考えられる。よって、積算線量評価では 5kGy/h で加速照射を実施している（「常陽」の原子炉容器内の線量率は～数百 Gy/h[3)]）が、0.5kGy/h に比べ α_1 の値（i=1 の吸収ピークによる影響）が大きく、損失増を過大側（安全側）に評価していると考えられる。

温度をパラメータとした照射について、照射前との伝送パワーの差分をとった結果を図 86～図 89 に示す。

温度に関しては、高いほど熱による回復が促進されるため伝送損失は小さくなるはずであるが、120ºC のほうが 200ºC より低い値となった。これについては、耐放射線性を高めるためファイバは水素処理を実施しており、この溶存水素の拡散による消失が影響した可能性が考えられる。水素は欠陥構造を埋めるように働くため、水素が消失すると、伝送損失増加の原因となるプレカーサの生成速度が大きくなると考えられるものの、今回の試験で溶存水素量とその拡散を評価することはできず、温度依存性を明らかにすることはできなかった。

原子炉容器内では Na 液面近傍では 200ºC と高くても、それより上部のカバーガス空間では数十 ºC 低い温度となる。積算線量評価では 200ºC で評価しているが、200ºC より数十 ºC 低い温度でも k_i が小さくなることで α_L の値があまり大きくならず、200ºC で評価した損失増の値と大きな違いがないと予想される。

線量率と温度の 2 つをパラメータとした数時間の短時間照射の試験結果から、損失増の波長依存性には 500nm 以下と 600-650nm の 2 つの大きな吸収ピークがあることがわかり、0.7kGy より低線量側とそれよりも高線量側で損失増の増加傾向が異なっている。図 83～図 85 をみると、0.7kGy より低線量側では急激に損失が増加した後一定になり、1kGy より高線量側では直線的に損失が増加している。波長ごとに損失増曲線を比較すると、照射初期は短波長側（500nm 以下）で損失増が顕著であり、0.7kGy を超えると波長 630nm 付近の損失増が顕著である。これから、短波長側の E'センターに起因すると考えられる吸収ピークを i=1、波長 630nm 付近の NBOHC に起因すると考えられるピークを i=2 とすると、0.7kGy より低線量側に強く影響が表れている損失増加傾向が i=1 の吸収ピークによるもので、0.7kGy より高線量側に強く影響が表れている損失増加傾向が i=2 の吸収ピークによるものと考えられる。よって、高線量領域の評価に当たっては、波長 630nm 付近の NBOHC に起因すると考えられる i=2 の吸収が支配的になる。

ここで、線量率と温度をパラメータとした照射試験の結果に関して、i=1, 2 の 2 種類のカラーセンターによる吸収を考慮してフィッティングすることを試みた。まず、低線量側の i=1 の影響が強いと考えられる部分を

$$\Delta\alpha_1 = \alpha_{L1}D + \alpha_1\left(1 - e^{-\lambda_1 D}\right) \tag{20}$$

でフィッティングし、実験値との差分を

$$\Delta\alpha_2 = \alpha_{L2}(D - D_2) + \alpha_2\left(1 - e^{-\lambda_2 (D - D_2)}\right) \tag{21}$$

でフィッティングした。なお、照射結果からは i=2 の NBOHC に起因するとみられるピークが 0.7kGy を超える高線量域で顕著になることから、ここでは NBOHC による光吸収が現れる閾値 D_2 を仮定している。その結果、表 17 に示す結果が得られた。

表 17 にまとめられた式からは、λ 等の係数の値は異なるものの線量率及び温度に依存した傾向が見られない。モデル式からは、線量率が高くなると、λ は小さくなり、α_L、α_i は大きくなることが予想される。また、温度が高くなると、λ が大きくなり、α_L、α_i は小さくなることが予想される。各係数の線量率及び温度による依存性が見られない理由としては、i=1 のフィッティングの誤差が大きいことが考えられる。E'センターに起因すると考えられる i=1 の吸収は、0.7kGy 以下の低線量領域で支配的であるが、低線量領域は測定点数が少ない。また、測定は 1 分間隔で実施しているが、測定時間が 40 秒ほどあるため、測定開始からの時間が短いほど測定時刻の誤差が大きい。つまり、線量率が低いほど照射量の誤差が大きくなっている。よって、線量率及び温度をパラメータにした短時間照射の試験結果については、カラーセンター形成モデルによる評価は困難である。

現用型イメージファイバ及び改良型イメージファイバについて 2.0×10^5Gy までの時間変化を示したのが図 90～図 91 である。長時間照射では、NBOHC に起因すると考えられる i=2 の吸収が支配的と考えられるため、これらの曲線を

$$\Delta\alpha = \alpha_L D + \alpha_2\left(1 - e^{-\lambda_2 D}\right) \tag{22}$$

でフィッティングした。その結果、

$$\text{現用型：}\Delta\alpha = 9.33\times10^{-6}\times D + 5.77\times10^{-2}\times\left(1 - e^{-4.55\times10^{-4}\times D}\right) \tag{23}$$

$$\text{改良型：}\Delta\alpha = 1.44\times\left(1 - e^{-2.93\times10^{-5}\times D}\right) \tag{24}$$

となった。

現用型についてフィッティング式と試験結果を比較すると図 90 のようになる。改良型のフィッティング結果を図 91 に示す。

よってこのフィッティング式から、波長 629.6nm のピーク部では 5×10^5Gy 照射すると、現用型イメージファイバでは損失増は約 4.72dB、改良型イメージファイバでは、約 1.44dB になると予想できる。

現用型イメージファイバではα_Lが大きくα_2が小さい。一方、改良型イメージファイバではα_2が大きく、α_Lが非常に小さい。α_L、及びα_2は

$$\alpha_L = \sum_i \frac{f_i k_i}{(f_i + r_i) + \frac{U_i}{\varphi}} \tag{25}$$

$$\alpha_2 = \frac{f_2}{(f_2 + r_2) + \frac{U_2}{\varphi}}\left\{P_{02} - \frac{k_2}{(f_2 + r_2) + \frac{U_2}{\varphi}}\right\} \tag{26}$$

で表される。単心ファイバにおいては OH 基によりα_Lが小さくなるとの報告[10]があり、今回 OH 基増加によってα_Lを非常に小さくすることができた。改良型では OH 基の効果により、プレカーサ生成割合（k_2）が非常に小さくなったと考えられる。しかし、その一方で、NBOHC のピーク部においては目標とする 5×10^5Gy における 1dB/m の目標には到達しなかった。これは、α_2が 1.44 と大きいためである。α_2が大きい要因としては OH 基が SiO_2 結晶構造中の不純物として屈折率の揺らぎを増大させると推測され、入射光子の散乱が増加することで、照射によるトラップ割合（f_2）

や解放割合（r_2）が減少し、α_2が大きくなり、またλが小さくなったと考えられる。

ピーク部でのフィッティング結果の妥当性を確認するため、1×10^6Gy までスペクトルアナライザで測定できている吸収ピークの裾部（680nm）の損失増を調べた。図 92 にピーク近傍の 680nm における損失増曲線を示す。これから OH 基 200ppm では高線量領域でも伝送損失は増加傾向にあり、OH 基 1,000ppm では低線量領域では損失増が大きいものの高線量領域では飽和傾向にあることがわかる。これらの曲線を

$$\Delta\alpha = \alpha_L D + \alpha_2\left(1 - e^{-\lambda_2 D}\right) \tag{27}$$

でフィッティングすると、

$$\text{現用型：}\Delta\alpha = 4.00\times10^{-7}\times D + 0.58\times\left(1 - e^{-4.91\times10^{-6}\times D}\right) \tag{28}$$

$$\text{改良型：}\Delta\alpha = 6.46\times10^{-8}\times D + 0.42\times\left(1 - e^{-2.00\times10^{-5}\times D}\right) \tag{29}$$

となる。吸収のピーク部と裾部では損失増の大きさは異なるものの、損失の増加傾向は変わらないと考えられる。そこでλを比較すると、現用型ではピーク部に比べて小さく（ピーク部で 4.55×10^{-4}、裾部で 4.91×10^{-6}）なっている。現用型で一致しないのは、ピーク部の測定が短時間しかできておらず、ピーク部のフィッティングが指数項（λ の項）の効果が現れてこない領域であったためと考えられる。一方、改良型ではほぼ同じ値（ピーク部で 2.93×10^{-5}、裾部で 2.00×10^{-5}）となっており、ピーク部のフィッティング結果は妥当なものであると考えられる。

次にライトガイドファイバについて同様にフィッティングを実施する。

ライトガイドファイバの時間変化を示したのが図 93～図 94 である。これらの曲線を

$$\Delta\alpha = \alpha_L D + \alpha_2\left(1 - e^{-\lambda_2 D}\right) \tag{30}$$

でフィッティングすると、

$$\text{現用型：}\Delta\alpha = 1.76\times\left(1 - e^{-7.74\times10^{-5}\times D}\right) \tag{31}$$

$$\text{改良型：}\Delta\alpha = 1.71\times\left(1 - e^{-5.71\times10^{-6}\times D}\right) \tag{32}$$

となった。よってこのフィッティング式から、波長 629.6nm のピーク部の損失増は 5×10^5Gy 照射すると、現用型ライトガイドファイバでは損失増は約 1.76dB、改良型ライトガイドファイバでは、約 1.61dB になると予想できる。照射結果では、現用型、改良型とも 629.6nm はスペクトルアナライザの測定限界を超えている。例えば、現用型では照射量が 5×10^4Gy で損失増が約 1.4dB となり、その後はそれ以上測定できていない。一方、ピークの裾と考えられる 850nm の波長では、損失増は 5×10^4Gy を超えても増加傾向である。このことから 629.6nm での損失増は 1.76dB 以上であることが推察される。これと計算式による損失増が一致しないのは、現用型ライトガイドファイバの損失にはクラッド部分の吸収が大きいためで、コア部分の光による吸収は抑制されていても、クラッド部分での吸収がある。フィッティングでは NBOHC による吸収ピークのみを考慮したが、それ以外の成分が大きいと考えられる。

波長スペクトルについては、例えば改良型イメージファイバでは、500nm 付近の透過光量が多い（図 31）。よって、NBOHC のピークは大きくても十分観察できる可能性がある。そこで CCD カメラで観察した場合を考え、スペクトルアナライザの検出限界を超えている部分は NBOHC の損失増のピーク値を仮定し、図 95 に示すような CCD カメラの量子効率を参考として可視光透過光の全体の損失量を計算した（図 96～図 97）。その結果 5×10^5Gy では、可視光全体の損失増はイメージファイバでは約 0.90dB/m、ライトガイドファイバでは約 0.79dB/m の損失増となる。こ

れは、照射長各 3m では 5.1dB の損失増であり、光量は 31%に低下する。図 96 の結果から、1×10^5Gy までの低線量では OH 基 200ppm の現用型の方が OH 基 1,000ppm の改良型よりも NBOHC の吸収ピークの損失増は小さいが、可視光全体の損失増は大きい。これは図 57 及び図 58 の結果と一致し、短波長の損失増のためと考えられる。現用型では照射開始直後から E'センター吸収ピークの裾と考えられる短波長の損失増が大きく、スペクトルアナライザで検出できなくなっている。なお今回の評価では、可視光より短波長側の E'センターの吸収ピークの裾によりスペクトルアナライザの検出限界を超えている部分は透過光量をゼロと仮定している。

また、スペクトルアナライザの出力（図 20～図 31 及び図 59～図 68）から、波長 700nm より長波長側では透過光量に大きな低下がないことがわかる。850nm の単一光源での測定では、5×10^5Gy でも改良型のイメージファイバで 0.03dB/m、ライトガイドファイバで 0.01dB/m、現用型のイメージファイバでも 0.2dB/m しか損失が増加していない（図 32、図 69）。よって近赤外域を利用した観察であれば、照射による損失増加がほとんどないため、OH 基 200ppm の現用型イメージファイバを使用しても OH 基 1,000ppm の改良型イメージファイバを使用しても、5×10^5Gy 照射後で観察可能であると考えられる。

3.3.2 解像力

(1) コントラスト

照射を受けるとコントラスト値は低下、照射を停止するとコントラスト値は上昇した。図 98～図 99 に白黒チャートの画像観察で得られた強度分布の例を示す。これは、白黒チャートのほぼ中央を通る断面での分布である。強度が高いピーク部分が白色部であり、その間が黒色部である。両端の強度がほぼ一定となっている部分はイメージサークル外の領域である。

コントラストは最大強度を I_{max}、最低強度を I_{min} としたときに、

$$C = (I_{max} - I_{min}) / (I_{max} + I_{min}) \quad (33)$$

で表される。コントラスト値が低下する要因としては、①I_{min} が測定限界値となってそれ以上変化しない一方で I_{max} が照射によって強度が低下する、②照射により隣接する画素から入光する漏光の割合が増加する、ことが考えられる。

ここで、各照射量に対する CCD で検出した強度の最大値を表 18 及び図 100 に示す。現用型では照射量が増えると最大値の強度はほぼ一定になっているため、この強度の信号値は検出限界値に近いと考えられる。また、強度が低い黒色部は照射初期でもこれに同等の値であり（図 98 及び図 99）、照射初期で検出限界値に近い。照射後は照射前よりコントラスト値が低下しているが、I_{min} は照射初期より検出限界値近傍であるため、CCD の感度に線形性がない領域での検出値である可能性がある。

先行研究では、照射によってコントラストが低下するとの報告（前章 2.2.2 参照）もあり、ファイバが照射されると、コア部とクラッド部の吸収光の違いによる隣接画素への漏光量が増加し、その結果コントラスト値が低下することが考えられる。今回の試験では、I_{min} の測定値が検出限界値の近傍であり、強度低下によるコントラスト値の低下が大きかったことから、コントラスト変化の有無を検出できなかった。今回の I_{max} でも初期の 1/10 の強度は測定可能で、白黒チャートの反射率（白：反射率 90%、黒：反射率 18%）からファイバ全体での可視光域の光量低下が約 1/2

であれば照射によるコントラスト変化の有無を検出できたと考えられる。可視光域の損失増が 5×10^5Gy で約 0.9dB/m あったことを考えると、今回の試験条件下では照射長を 3m 以下にする必要があったと考えられる。

(2) 観察可能な白黒対線の線幅

白黒チャートの観察結果より、観察可能な白黒対線の線幅から決まる解像力を求めることができる（前章 2.2.2 参照）。しかし、今回は試験に用いたイメージファイバの照射長が伝送損失を測定するため 30m と長く、光量の低下が大きかった。そのため画像の観察が困難となり、5×10^5Gy 照射後の解像力を求めることはできなかった。コントラストでも述べたように、今回の試験条件下ではファイバ照射長を 3m 以下にする必要があったと考えられる。

観察可能な白黒対線の線幅の変化は、コントラスト値が低下すると悪くなると考えられる。今回の照射結果では、コントラスト値の低下は伝送損失の増大による透過光量の低下が支配的であると考えられるため、実際は透過光量の問題となる。観察においては、観察できるような光量が確保されていれば、解像力に影響しないと考えられる。

なお、原子炉容器内観察に用いられている 30,000 画素のファイバであれば、初期は約 60.9[本/イメージサークル径]の解像力があり、原子炉容器内観察で用いているファイバの 1,000mm 先の視野径が約 250mm であることから、1,000mm 先でも厚さ 5mm のステンレス板は観察できることになる。

3.3.3　色調

照射により伝送画像は暗くなり、現用型の場合、5kGy/h では照射 1 時間後でも画像の識別は困難となっており、RGB 値はいずれも低下した。5×10^5Gy 照射後では、画像のチャート各色は識別できない。一方改良型の場合、積算 1×10^6Gy までの 5kGy/h での 200 時間の照射では、光源の追加により照度を上げての観察であるが、RGB 値の変化から画像の暗化は止まっており、5×10^5Gy 照射後でも画像の色チャートの識別が可能で、特定の色が認識できなくなることはない。

試験では RGB のいずれも輝度の低下が確認できたが、改良型イメージファイバは、99,500lx の観察で、特に 2×10^5Gy 照射後では画像全体に青みがかっており、R、G と比べれば、B の透過光量が大きい。

スペクトルアナライザで得られた損失増の波長依存性（図 31）では、照射開始後急激に短波長域（E'センター）の損失増が大きくなり、その後 5×10^3Gy を超えて、波長 630nm の NBOHC の損失増が大きくなっている。R 値が照射初期に特に小さくなり、5×10^3Gy を超えて G 値、B 値が低下している。2×10^5Gy からは R、G、B いずれも値は大きく変化せず低下はほぼ一定である。

ここで CCD 分光特性（図 13）とスペクトルアナライザによる波長特性の試験結果（図 31）を用いて、各フィルタの透過光強度を計算し、5.3×10^5Gy での RGB 値の低下率を評価すると、表 19 のようになった。ここで、入射光（ファイバ及びフィルタの透過率を考慮する前）が白色光源（R 値、G 値、B 値がいずれも最大値 1）と仮定している。表 19 から、R 値の低下が一番大きく B 値の低下が一番小さい。今回の試験では、途中で照度を変更している（3,900lx→99,500lx）が、表 13 から R 値の低下が一番大きく（0.31→0.18、初期の 58%）、B 値の低下が一番小さい（0.20

→0.20、初期の 100%）ことと一致している。照射初期はスペクトルから短波長側の損失が大きく、マゼンタフィルタの透過光量が小さくなったため R 値が初期に小さくなり、またグリーンフィルタは波長 630nm 付近の NBOHC による吸収ピークの裾により透過率が低下していると考えられ、初期に G 値の低下が少ない。また、高線量照射後にはシアンフィルタが 500nm 付近の光を比較的多く透過するため、B や G の値が大きく、青みがかった画像が得られた。

以上のように今回の試験で色調変化は確認されたが、図 58 に示すように画像に青みがかっているもののチャートの各色の識別は可能であり、ステンレスの 500nm の光に対する反射率は高いため、原子炉容器内では色調変化が起きても構造物の識別は可能と考えられる。このことを考慮すれば、5×10^5Gy での使用では特定の波長の光が見えなくなることに起因する色調変化が観察に与える影響はないといえる。

3.3.4 機械的強度

(1) ファイバ

今回の強度試験では、引張試験機で測定できるように通信用ファイバと同じ細径のファイバを用いて、定速負荷の動疲労試験を実施した。ファイバの破断強度はファイバの径断面積に比例するため、太径イメージファイバの場合もファイバ径により結果を外挿できる。ファイバの判定基準はファイバ試験規格 Telcordia GR-20-CORE[15)]に準じ、破断強度初期値で、3.0kg 以上、照射後で 2.4kg 以上を満たすこととした。その結果、照射前後において強度のばらつきも小さく安定していることから、本試験条件では、ファイバには劣化がないことを示している。これより、今回試験に使用したファイバは 200ºC、5×10^5Gy 照射後でも強度は低下しない。

次に、今回試験に使用したファイバの定負荷による静疲労破断の影響を評価するため、今回実施した定速負荷の動疲労破断の試験結果を用いて、高温高放射線下中の定負荷での破断時間を予測した。

予測には、破壊力学のき裂成長のべき乗則モデル[16)]を用いた。光ファイバのき裂を例えば半円板状微小表面き裂と仮定し、き裂の挙動が応力拡大係数 K_I によって支配されると考える。き裂深さを a、外応力を σ とすると

$$K_I=Y\sigma\sqrt{a} \qquad (34)$$

で、Y はき裂形状に依存した係数である。K_I 値が、材料固有値である破壊靭性値 K_{IC} よりも小さければ、環境条件や K_I 値に依存した速度でき裂は安定に成長する（き裂成長則）。不活性な環境であれば、き裂は停留する。また $K_I=K_{IC}$ が成立した時、き裂は不安定に高速進展し、ファイバの即時破断となる（最終破断条件）。

き裂の成長則としてべき乗則を仮定すると、き裂深さの成長速度は以下の式で表される。

$$da/dt=AK_I^n \qquad (35)$$

da/dt はき裂成長速度で、A 及び n は環境条件に依存する係数である。上の 2 式から、定負荷条件 $\sigma=\sigma_s$ を用いて積分し、静疲労（定負荷）による強度の経時低下を予測すると

$$\sigma_s^n t=B(S_i^{n-2}-S^{n-2}) \qquad (36)$$

で、S_i 及び S は初期及び時間 t 経過後の即時破断する場合の強度である。B は、A、n、K_{IC} に依存する係数である。破断時間 t_s は $S=\sigma_s$ を代入したときの t 値であり、$S_i^{n-2}>>\sigma_s^{n-2}$ となる場合におい

ては

$$\log t_s=-n\log \sigma_s+\log (BS^{n-2}) \quad (37)$$

$$\log t_s=-n\log \sigma_s+\log k_s \quad (38)$$

となる。

動疲労（定速負荷）においても同様に

$$\log t_d=-n\log \sigma_d+\log k_d \quad (39)$$

で、

$$\log \sigma_d=-(1+n)^{-1}\log \sigma+(1+n)^{-1}\log k_d \quad (40)$$

と表され、σ は歪速度、n、k_d は動疲労破壊の定数（温度などの試験環境に依る）となる。

また、静疲労と動疲労については

$$\log k_d=\log k_s+\log (n+1) \quad (41)$$

の関係が成り立つことがわかっている [2)]。

今回の試験では、引張速度は 20mm/min、歪速度は σ=15%/min であり、106 時間照射した結果を当てはめると

$$\log 6.4[kg]=-(1+n)^{-1}\log 0.15[/min]+(1+n)^{-1}\log k_d \quad (42)$$

ファイバ素線で 250ºC、約 1×10^5Gy 照射で n=9.5、$\log k_s$=1.1、150ºC、約 1×10^5Gy 照射で n=14.3、$\log k_s$=9.8、室温、約 1×10^5Gy 照射で n=21.0、$\log k_s$=18.8 という結果（表 20）から、温度及び線量率以外の条件が変わらないとして、200ºC、5×10^5Gy での k_s（材料、形状、環境等で決まる定数）を、線量率効果がなく温度により k_s が小さくなると仮定して、図 101 より線形補間で $\log k_s$=5.3 と推定すると、

$$\log k_d=\log k_s+\log (n+1)=1.1+\log(n+1) \quad (43)$$

よって

$$\log 6.4=-(1+n)^{-1}\times(-1.9)+(1+n)^{-1}\times(5.3+\log (n+1)) \quad (44)$$

これから n=3.7 となる。

今回の試験では、強度評価に用いたファイバの径は 0.125mm であるが、30,000 画素のイメージファイバではファイバ径は 2mm である。よって、30,000 画素のイメージファイバで 1kg の力が加わったとき断面積当たりの応力は 0.32kg/mm^2 で、強度評価用ファイバでは 3.9×10^{-3}kg の力が加わることとなる。

よって 30,000 画素イメージファイバで σ_s=1kg のとき破断時間 t_s[min]は

$$\log t_s=-n\log\sigma_s+\log k_s=-3.7\times\log (3.9\times10^{-3})+5.3 \quad (45)$$

より、$t_s=1.6\times10^{11}$[min]となる。これから 1kg の定負荷がファイバに加わったとする場合、ファイバが破断するまでの時間は 1.6×10^{11} 分、つまり 2.7×10^9 時間となる。原子炉容器内で想定されるファイバの使用方法からはファイバに高い負荷が加わることは考えられず、原子炉容器内に 1,000 時間挿入していてもファイバは破断しないと考えられる。

今回加速試験に当たる動疲労試験結果から高温高放射線下に置かれたファイバの疲労破壊による寿命を予測した。実際に高温高放射線下の寿命を確認するには長期間にわたる疲労破壊試験等によるさらなる検討が必要と考えられるが、今回の評価結果から、試験に用いたファイバは実用に供することができるものであると考えられる。

(2) シリコンチューブ

シリコンは熱により酸化分解する。酸素ラジカルがケイ素に結合しているメチル基を酸化し、発生したラジカルが架橋点を形成し、架橋密度が上昇することにより硬化する。また、ラジカルによって鎖が切断され、ポリマーが分解される [17,18]。その結果、ゴムとしての弾性がなくなり、脆くなる。一方、シリコンにγ線が照射されるとγ線により結合が開裂する。また、照射によりラジカルが生成され、放射線誘起の酸化劣化が起こる。これにより有機基の架橋と酸化分解が同時に起こる。

試験では、ライトガイド用メチルビニルフェニルシリコンチューブ（カーボンなし）、イメージファイバ用メチルビニルフェニルシリコンチューブ（カーボン入り）とも照射時間の長いものは硬化が進み、100 時間後には試験不能になった。（図 78）

耐熱性については 200ºC を超える環境で引張強さが低下する傾向にあるが、225ºC、168 時間で引張強さが約 20%の低下に抑えられる耐熱性シリコンゴムも開発されている [19]。実際に試験に使用したのは、参考文献 19)に記されたフロロシリコンではなくメチルビニルシリコンであるが、一般シリコンゴムの 200ºC での寿命（破断延びが 1/2 になるまでの時間）は 10^3h 以上と長く [17]、試験に使用したシリコンチューブに含まれるフェニル基は酸化反応を受けにくいため耐熱性が向上することから、100 時間後における引張強さの低下はおよそ数十%と推測できる。100 時間後に試験不能になったのは、熱に加えて放射線の影響も大きいと考えられる。

一方、シリコンゴムの仕様 [17]より、約 5×10^5Gy（50Mrad）照射されると引張り強さは 50～65%に低下する。今回の試験で使用したシリコンゴムは、フェニル基を多く含んだ（12%モル含有）耐放射線性に優れたメチルビニルフェニルシリコンであり、カタログ仕様では 2×10^5Gy では約 70%に引張強さが低下する [17]。実際の試験では照射 40 時間（2×10^5Gy）でどちらも 50～55%に低下しており、熱による低下と併せてこのような結果が得られた。

熱及び放射線による影響により、照射 40 時間（2×10^5Gy）それぞれ引張強さが 20～30%低下し、併せて 50～55%に低下したと考えられ、熱、放射線のどちらに対しても同程度の損傷があったと考えられる。熱による劣化は 1,000 時間ではさらに劣化が進むと予想されるが、過去の知見から、初期は時間に比例し、分解が進むと飽和する [20]と考えられる。

ファイバ保護用チューブとしては、強度が低下しても使用できると考えられるが、今回のように試験機にセットできず崩れるほどになると使用できない。原子炉容器内での使用を想定すると、線量率が試験条件（5kGy/h）の約 1/10 であることから、放射線による劣化の影響は緩和すると考えられる。しかし、放射線による劣化が約 1/10 になったと仮定しても、今回の試験と同等の劣化に至る時間は約 400 時間となり、熱による劣化が今回の試験と同等でも 400 時間で使用できなくなる。よって今回の試験結果から、500Gy/h、200ºC、1,000 時間の環境下では使用は難しいと考えられる。ファイバ保護用チューブはファイバスコープ自体の性能に関わる部分ではないが、ステンレス管との接触等でファイバが傷まないようにするため代替案が必要である。高温高線量下で使用できる代替案としては PEEK[21]、テフロン樹脂があるが、ファイバ保護用チューブとして使用した実績がない。そのため、実際にファイバ保護用チューブとして使用できることの確認が必要である。

3.3.5　まとめ

各評価項目に対する評価結果を表 21 にまとめる。ファイバの伝送損失や強度の評価結果は良好であり、保護チューブの材料は代替案が必要であるものの、200ºC、5×10^5Gy 照射後でも観察できる見通しである。

4　結言

高速炉の原子炉容器内保守・補修作業において長時間にわたって観察できるようにするため、耐放射線性に優れたファイバスコープの開発を目指して、ファイバスコープを構成するイメージファイバ等の各要素の耐放射線性の向上を図った。その向上性能を確認するため、γ線照射試験を実施し、照射特性を評価した。

その結果、高温高線量下における貴重な照射データを取得し、イメージファイバではコアに含有するOH基量の増加により、ライトガイドファイバではクラッド材をアクリレート樹脂からフッ素ドープ石英に変更することにより損失増を低減し、耐放射線性能の向上を図ることができた。照射試験により、イメージファイバのコアに含有させるOH基量の増加は照射中にできる新たなプレカーサの抑制に効果があることがわかり、OH基含有量は1,000ppmで十分であることが確認できた。また、近赤外域は損失増が小さく、OH基含有量が200ppmの現用型イメージファイバでも近赤外域を利用することができれば容易に 5×10^5Gy の高線量下で観察が可能であることがわかった。強度については、今回の実験で使用したファイバは 5×10^5Gy での強度は良好であることが確認された。

以上より、200ºC、5×10^5Gyの環境で使用するには、純粋石英コアに含有するOH基量を増加し、クラッド材をフッ素ドープ石英とすることが有効であることが確認された。ファイバスコープの使用可能時間を延ばすことができ、200ºC、数百Gy/hの高速炉の原子炉容器内で1カ月以上にわたるような長時間観察に使用できる見通しが得られた。

本研究では、石英コアイメージファイバに対し、5×10^5Gyの照射を受けても可視光域全体の損失増を1dB/m以下に抑制できる技術を開発することができた。これにより、高速炉以外の原子炉においても、原子力発電所における原子炉容器内点検ロボットに導入される観察装置[1)]や、核融合炉における真空容器の内壁監視用装置[1)]、ミキサセトラの液境界面観察[1)]のような再処理施設でのセルやは槽内などの観察、荷電変換デバイスの監視[22)]のような加速器施設でのビーム面などの監視、RI施設での線源の監視等の高放射線環境下での観察への展開が期待できる。また、人の立ち入りができない狭隘部や高放射線場での観察が可能という特徴を生かして、福島第一原子力発電所の事故対応にも有効であり、格納容器内等の観察手段として考えられる。

謝辞

本研究の実施に当たっては以下に述べる方々に協力していただいた。

高崎量子応用研究所放射線高度利用施設部照射施設管理課管理課の方々には、コバルト 60 γ 線源による照射試験の実施に協力していただいた。

高速実験炉部炉内観察ワーキンググループ関係者の方々には、原子炉容器内の観察作業を通じたファイバスコープ使用経験からの要求事項や問題点等を提示していただいた。

炉内干渉物に係るアドバイザリー会合の委員の方々には、研究の計画、実施、評価について有益な助言をいただいた。

高速実験炉部第 21 部会委員の方々には、第 21 部会での議論を通じて研究全般について有益な助言をいただいた。

これら本研究の遂行に協力していただいた方々に、心から感謝いたします。

参考文献

1) 矢作吉之助 : “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, 27, No.9, 1985.
2) 荒邦章 : “石英系イメージファイバのγ線照射環境下における伝送特性および機械的強度特性に関する研究”, 博士論文, 2000,43p.
3) W.Itagaki, et al.: “In-vessel Visual Inspection of Experimental Fast Reactor Joyo”, ANIMMA2009, p.7, 2009.
4) 株式会社フジクラ : ファイバスコープカタログ.
5) T.Kakuta, et al.:“Behavior of optical fibers under heavy irradiation”, Fusion Eng. Design, 41, p.201, 1998.
6) 中本他 :“ファイバ・スコープの現状と FBR 供用期間中検査への適用性”, 動力炉・核燃料開発事業団, 1994.
7) 角田他 :“光ファイバの耐放射線特性”, フジクラ技報, 1990.
8) 荒他 :“高速増殖炉用イメージファイバ複合ケーブル”, フジクラ技報, 1993.
9) 中居久典他 :“石英系光ファイバーのγ線照射特性”, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM82-28, p.45, 1982.
10) K.Shibuya, et al.: “Gamma irradiation characteristics of optical fibers”, International Wire & Cable Symposium Proceedings, p.51, 1982.
11) 児島健他 : “光ファイバケーブルの放射線特性”, 電気学会絶縁材料研究会資料, EIM-82-31, p.71, 1982.
12) S.P.Faile, et al.: “Mechanism of Color Center Destruction in Hyrdogen Impregnated Radiation Resistant Glasses”, Mat. Res. Bull., 5, p.385, 1970.
13) 清藤一他 :“電子線・ガンマ線照射施設データ”, JAEA-Technology, 2008-071, 2008, 29p.
14) J.Glazer : “Monolayer Studies of Some Ethoxylin Resin Adhesives and Related Compound”, J.Polymer Sci., 13, p.355, (1954).
15) Telecodia : GR-20-CORE available from <http://www.telecordia.com/> (accessed 2011-11-01).
16) 村岡幹夫他 : “石英ガラスファイバの強度評価”, 秋田大学工学資源学部素材資源システム研究施設報告, 第 63 号, p.113, 1998.
17) 信越化学工業株式会社 : “シリコーンゴムの特性、信越シリコーンカタログ”, available from <http://www.silicone.jp/j/catalog/pdf/rubber_j.pdf> (accessed 2011-11-01).
18) 渡辺聡志他 :“シリコーンゴムの耐熱性向上にかかわるカーボンブラックの品質特性の検証”, 日本化学会誌, 2000(3), p.221, 2000.
19) 宇野貴雄他 :“高耐熱シリコーンゴム材料の技術開発”, JETI, 58(7), p.43, 2010.
20) 井上凱夫 :“シリコーンゴムの劣化”, 日本ゴム協会誌, 62(12), p.803, 1989.
21) 三尾圭吾他 :“耐放射線 PEEK ケーブルの開発”, JAEA-Technology, 2009-018, 2009.
22) Y. Takeda, et al.: “Optical design of observation system for charge stripping foil”, Proc. the 3rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, p.478, 2006.

表 1　照射パターン

0:00
9:00
12:00
15:00
18:00
24:00
短時間照射
200時間長時間照射
照射対象：ファイバ
照射対象：ファイバ・対物レンズ用硝材・強度評価材料
準備、セッティングの確認
恒温槽昇温
照射(1 h)
(1 kGy/h、200℃)
回復確認(1 h)
準備、恒温槽昇温
照射(2 h)
(500 Gy/h、200℃)
(5 kGy/h、200℃)
(5 kGy/h、120℃)
(5 kGy/h、30℃)
対物レンズ用硝材の伝送測定
冷却、試料取出し、恒温槽昇温
冷却、試料取出し、恒温槽昇温
冷却、試料取出し
5×10^3 Gy
1×10^5 Gy
2×10^5 Gy
5.3×10^5 Gy
6.5×10^5 Gy
7.65×10^5 Gy
8.8×10^5 Gy
1×10^6 Gy
照射(19 h)
照射(20 h)
照射(66 h)
照射(24 h)
照射(23 h)

表 2　線量率 0.5kGy/h、温度 200ºC 条件下でのコントラスト値変化

	照射前常温	照射前 200ºC	照射 2h	回復 1h	照射積算 4h	回復積算 2h
現用型	0.76	0.74	0	0	0	0
改良型	0.62	0.65	0.65	0.64	0.63	0.64

表 3　線量率 1kGy/h、温度 200ºC 条件下でのコントラスト値変化

	照射前常温	照射前 200ºC	照射 1h	回復 1h	照射積算 2h	回復積算 2h
現用型	0.84	0.84	0	0.89	0	0
改良型	0.75	0.73	0.71	0.72	0.68	0.73

表 4　線量率 5kGy/h、温度 30ºC 条件下でのコントラスト値変化

	照射前常温	照射前 30ºC	照射 1h	回復 1h	照射積算 2h	回復積算 2h
現用型	0.79	0.78	0	0.91	0	0.97
改良型	0.67	0.66	0	0.71	0	0.74

表 5　線量率 5kGy/h、温度 120ºC 条件下でのコントラスト値変化

	照射前常温	照射前 120ºC	照射 1h	回復 1h	照射積算 2h	回復積算 2h
現用型	0.80	0.76	0	0.86	0	0
改良型	0.63	0.60	0.45	0.62	0.43	0.61

表 6　線量率 5kGy/h、温度 200ºC 条件下でのコントラスト値変化

	照射前常温	照射前 200ºC	照射 24min	照射 1h	回復 1h	照射積算 2h	回復積算 2h
現用型	0.81	0.80	0	0	0	0	0
改良型	0.73	0.74	0.52	0.57	0.79	0	0

表 7　積算 1×10^6Gy 照射時のコントラスト値変化

照射時間・線量	現用型	改良型
照射前常温	0.74	0.71
照射前 200ºC	0.72	0.72
照射積算 1h, 5×10^3Gy	—	0.53
回復確認 1h	—	0.71
照射積算 20h, 1×10^5Gy	—	—
回復確認 1h	—	—
照度変更（3,900lx→99,500lx）		
照射積算 40h, 2×10^5Gy	—	—
回復確認 1h	—	0.64
照射積算 106h, 5.3×10^5Gy	—	—
回復確認 1h	—	0.70
照射積算 153h, 7.65×10^5Gy	—	—
回復確認 1h	—	0.82
照射積算 200h, 1×10^6Gy	—	—
回復確認 1h	—	0.84

表 8　線量率 0.5kGy/h、温度 200ºC 条件下での RGB 値変化

		照射前常温	照射前 200ºC	照射 2h	回復 1h	照射積算 4h	回復積算 2h
現用型	R	0.28	0.28	0.22	0.27	0.18	0.25
	G	0.24	0.24	0.17	0.21	0.16	0.19
	B	0.19	0.19	0.13	0.15	0.13	0.14
改良型	R	0.31	0.30	0.30	0.30	0.27	0.28
	G	0.26	0.26	0.25	0.26	0.24	0.25
	B	0.20	0.22	0.20	0.21	0.20	0.20

表 9　線量率 1kGy/h、温度 200ºC 条件下での RGB 値変化

		照射前常温	照射前 200ºC	照射 1h	回復 1h	照射積算 2h	回復積算 2h
現用型	R	0.26	0.27	0.22	0.25	0.17	0.22
	G	0.24	0.24	0.17	0.21	0.16	0.19
	B	0.25	0.26	0.20	0.22	0.21	0.20
改良型	R	0.28	0.28	0.29	0.29	0.29	0.29
	G	0.27	0.27	0.27	0.26	0.27	0.26
	B	0.27	0.27	0.27	0.26	0.27	0.27

表 10　線量率 5kGy/h、温度 30ºC 条件下での RGB 値変化

		照射前常温	照射前 30ºC	照射 1h	回復 1h	照射積算 2h	回復積算 2h
現用型	R	0.29	0.30	0.25	0.25	0.15	0.24
	G	0.24	0.25	0.24	0.22	0.15	0.20
	B	0.20	0.20	0.25	0.19	0.16	0.20
改良型	R	0.29	0.29	0.15	0.27	0.22	0.24
	G	0.26	0.26	0.15	0.25	0.22	0.24
	B	0.21	0.21	0.16	0.23	0.23	0.24

表 11　線量率 5kGy/h、温度 120ºC 条件下での RGB 値変化

		照射前常温	照射前 120ºC	照射 1h	回復 1h	照射積算 2h	回復積算 2h
現用型	R	0.30	0.30	0.20	0.26	0.18	0.22
	G	0.24	0.24	0.15	0.21	0.15	0.19
	B	0.20	0.20	0.13	0.15	0.12	0.14
改良型	R	0.29	0.30	0.30	0.29	0.29	0.27
	G	0.25	0.26	0.27	0.25	0.26	0.25
	B	0.21	0.22	0.26	0.20	0.27	0.20

表 12　線量率 5kGy/h、温度 200ºC 条件下での RGB 値変化

		照射前常温	照射前 200ºC	照射 24min	照射 1h	回復 1h	照射積算 2h	回復積算 2h
現用型	R	0.20	0.29	0.17	0.15	0.18	0.15	0.16
	G	0.26	0.26	0.17	0.15	0.17	0.15	0.16
	B	0	0.26	0.21	0.20	0.21	0.20	0.20
改良型	R	0.29	0.29	0.29	0.25	0.24	0.18	0.17
	G	0.26	0.26	0.27	0.26	0.24	0.20	0.20
	B	0.25	0.26	0.30	0.28	0.24	0.25	0.23

表 13　積算 1×10^6Gy 照射時の RGB 値変化

照射時間・線量	現用型			改良型		
	R	G	B	R	G	B
照射前常温	0.30	0.25	0.21	0.31	0.27	0.20
照射前 200ºC	0.30	0.25	0.21	0.31	0.27	0.21
照射積算 1h, 5×10^3Gy	0.20	0.17	0.13	0.25	0.26	0.22
回復確認 1h	0.25	0.20	0.15	0.25	0.24	0.19
照射積算 20h, 1×10^5Gy	0.16	0.15	0.13	0.17	0.17	0.18
回復確認 1h	0.16	0.16	0.13	0.16	0.15	0.14
照度変更（3,900lx→99,500lx）						
照射積算 40h, 2×10^5Gy	0.16	0.15	0.13	0.18	0.19	0.24
回復確認 1h	0.18	0.19	0.13	0.19	0.22	0.24
照射積算 106h, 5.3×10^5Gy	0.16	0.15	0.13	0.18	0.17	0.20
回復確認 1h	0.16	0.15	0.13	—	—	—
照射積算 153h, 7.65×10^5Gy	0.14	0.11	0.07	0.20	0.18	0.20
回復確認 1h	0.15	0.11	0.07	0.21	0.20	0.27
照射積算 200h, 1×10^6Gy	0.13	0.11	0.07	0.20	0.17	0.18
回復確認 1h	0.15	0.11	0.07	0.21	0.19	0.24

表 14　強度評価用ファイバの破断試験結果

照射時間・線量	0h, 0Gy	1h, 5×10^3Gy	20h, 1×10^5Gy	40h, 2×10^5Gy	106h, 5.3×10^5Gy	200h, 1×10^6Gy
破断強度（kg）	6.2	6.5	6.4	6.4	6.4	6.5

表 15　接着試料片の破断強度試験結果

照射時間・線量	接着強度（kg）	
	ライトガイド用	イメージファイバ用
0h, 0Gy	43	118
1h, 5×10^3Gy	53	107
20h, 1×10^5Gy	49	119
40h, 2×10^5Gy	52	118
106h, 5.3×10^5Gy	51	130
200h, 1×10^6Gy	60	109

表 16　シリコンチューブの破断強度測定結果

照射時間・線量	引張強度（kg）	
	ライトガイド用	イメージファイバ用
0h, 0Gy	4.7	6.3
1h, 5×10^{3}Gy	4.5	5.9
20h, 1×10^{5}Gy	3.7	4.0
40h, 2×10^{5}Gy	2.6	2.3
106h, 5.3×10^{5}Gy	—	—
200h, 1×10^{6}Gy	—	—

表 17　線量率・温度をパラメータとした短時間照射のフィッティング結果

種別	照射条件	i=1			i=2			
		α_{L1}	α_1	λ_1	α_{L2}	α_2	λ_2	D_2
現用型イメージ	0.5kGy/h、200ºC	5.68×10^{-6}	2.80×10^{-2}	5.89×10^{-2}	0.00	1.68×10^{-1}	2.72×10^{-5}	900
	1kGy/h、200ºC	6.52×10^{-6}	3.25×10^{-2}	2.02×10^{-2}	4.35×10^{-5}	3.80×10^{-3}	7.32×10^{-2}	1250
	5kGy/h、30ºC	7.03×10^{-5}	1.03×10^{-1}	1.43×10^{-2}	1.41×10^{-5}	2.45×10^{-1}	8.34×10^{-4}	3000
	5kGy/h、120ºC	1.19×10^{-5}	2.74×10^{-2}	7.24×10^{-1}	7.80×10^{-6}	3.23×10^{-2}	6.42×10^{-4}	1500
	5kGy/h、200ºC	—	—	—	3.84×10^{-5}	1.64×10^{-1}	6.26×10^{-4}	200
改良型イメージ	0.5kGy/h、200ºC	—	—	—	0.00	1.05×10^{-1}	7.60×10^{-4}	1500
	1kGy/h、200ºC	1.37×10^{-6}	3.42×10^{-4}	5.82×10^{-2}	1.23×10^{-6}	6.30×10^{-3}	4.76×10^{-3}	400
	5kGy/h、30ºC	5.19×10^{-6}	3.17×10^{-2}	3.17×10^{1}	0.00	1.57×10^{-2}	1.56×10^{-3}	5000
	5kGy/h、120ºC	1.78×10^{-6}	5.04×10^{-3}	1.72×10^{10}	0.00	1.64×10^{-2}	9.44×10^{-4}	4500
	5kGy/h、200ºC	9.67×10^{-6}	0.00	0.00	2.38×10^{-5}	1.09×10^{-1}	7.88×10^{-4}	5000
現用型ライトガイド	0.5kGy/h、200ºC	1.23×10^{-4}	5.04×10^{-3}	8.60×10^{-2}	1.47×10^{-5}	7.47×10^{-2}	1.42×10^{-3}	400
	1kGy/h、200ºC	1.13×10^{-4}	5.63×10^{-3}	4.72×10^{-2}	0.00	1.55×10^{-1}	8.78×10^{-4}	400
	5kGy/h、30ºC	—	—	—	6.31×10^{-5}	1.93×10^{-1}	3.71×10^{-3}	0
	5kGy/h、120ºC	—	—	—	3.71×10^{-5}	2.28×10^{-1}	3.35×10^{-4}	0
改良型ライトガイド	0.5kGy/h、200ºC	—	—	—	9.78×10^{-6}	0.00	0.00	1200
	1kGy/h、200ºC	—	—	—	8.71×10^{-6}	0.00	0.00	1400
	5kGy/h、30ºC	—	—	—	2.48×10^{-6}	3.11×10^{-2}	3.11×10^{-3}	0
	5kGy/h、120ºC	—	—	—	—	—	—	—

表 18　各照射量での CCD 強度の最大値

照射量 [Gy]	強度 [相対値]			
	現用型, 3,900lx	現用型, 99,500lx	改良型, 3,900lx	改良型, 99,500lx
0	159	−	152	−
5.0×10^{3}	51	−	125	−
1.0×10^{5}	26	−	26	−
2.0×10^{5}	−	26	−	49
5.3×10^{5}	−	26	−	29
1.0×10^{6}	−	36	−	70

表 19　CCD 分光特性とファイバ波長依存性から求めた 5.3×10^{5}Gy 照射後の RGB 値の変化

	R	G	B
5.3×10^{5}Gy 照射後の 1m 当たりの低下割合	0.80	0.83	0.90

表 20　素線ファイバの n 値と log ks

ファイバ No.	n	log ks	照射線量	温度
1	31.3	19.8	10^{3}Gy	室温
2	19.8	18.3	10^{4}Gy	室温
3	21.0	18.8	10^{5}Gy	室温
4	24.3	17.7	10^{3}Gy	150ºC
5	18.6	13.1	10^{4}Gy	150ºC
6	14.3	9.8	10^{5}Gy	150ºC
7	5.0	0.1	10^{3}Gy	250ºC
8	6.4	0.1	10^{4}Gy	250ºC
9	9.5	1.1	10^{5}Gy	250ºC

表 21　各評価項目に対する評価結果

<table>
<tr><th colspan="3" rowspan="2">評価項目</th><th rowspan="2">開発目標</th><th colspan="2">評価結果</th><th rowspan="2">備考</th></tr>
<tr><th>現用型</th><th>改良型</th></tr>
<tr><td rowspan="2">透過光量</td><td colspan="2">イメージファイバの伝送損失増</td><td>1dB/m</td><td>3.82dB/m</td><td>0.90dB/m</td><td rowspan="6">200ºC、5×10^{5}Gy 照射後も、高速炉の原子炉容器内を観察できる見通し</td></tr>
<tr><td colspan="2">ライトガイドファイバの伝送損失増</td><td>1dB/m</td><td>1.76dB/m</td><td>0.79dB/m</td></tr>
<tr><td colspan="3">解像力</td><td>200ºC、5×10^{5}Gy 照射後も解像力が低下しないこと。</td><td colspan="2">観察可能な光量が確保されていれば、解像力は低下しない。</td></tr>
<tr><td colspan="3">色調</td><td>200ºC、5×10^{5}Gy 照射後も原子炉容器内の構造物を識別可能であること。</td><td colspan="2">構造物の識別が不可能になるような色調変化はない。</td></tr>
<tr><td rowspan="3">機械強度</td><td colspan="2">ファイバの破断時間</td><td>1000 時間</td><td colspan="2">2.7×10^9 時間</td></tr>
<tr><td rowspan="2">シリコンチューブの破断時間</td><td>イメージファイバ用</td><td>1000 時間</td><td colspan="2">40 時間</td><td rowspan="2">代替案が必要</td></tr>
<tr><td>ライトガイドファイバ用</td><td>1000 時間</td><td colspan="2">40 時間</td></tr>
</table>

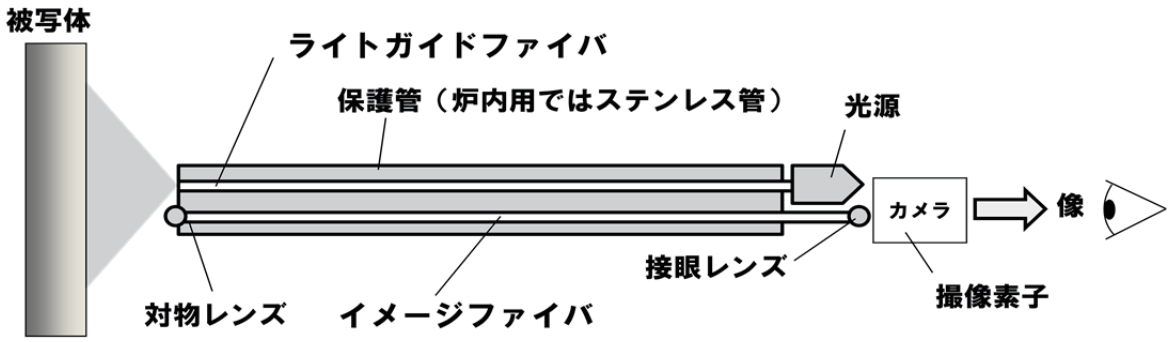


図 1　ファイバスコープ

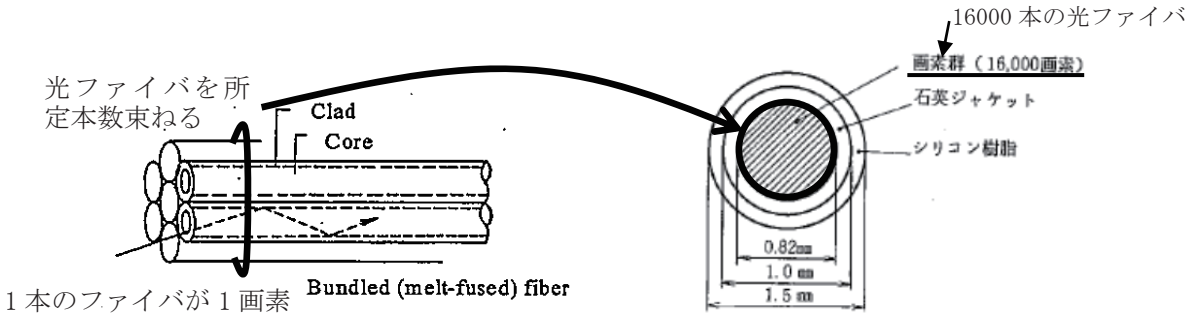


図 2　イメージファイバの構成 [2)]

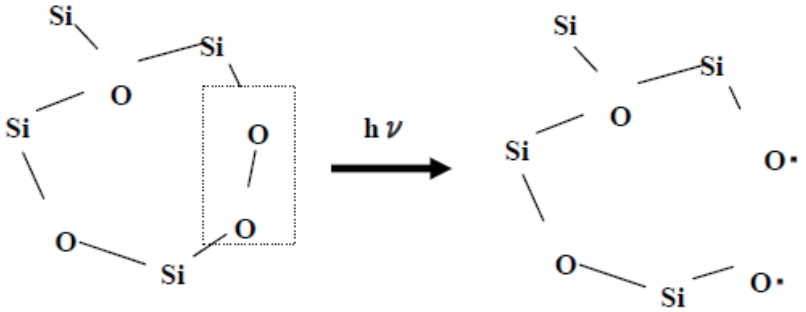


図 3　ガラスの放射線による損傷の原理

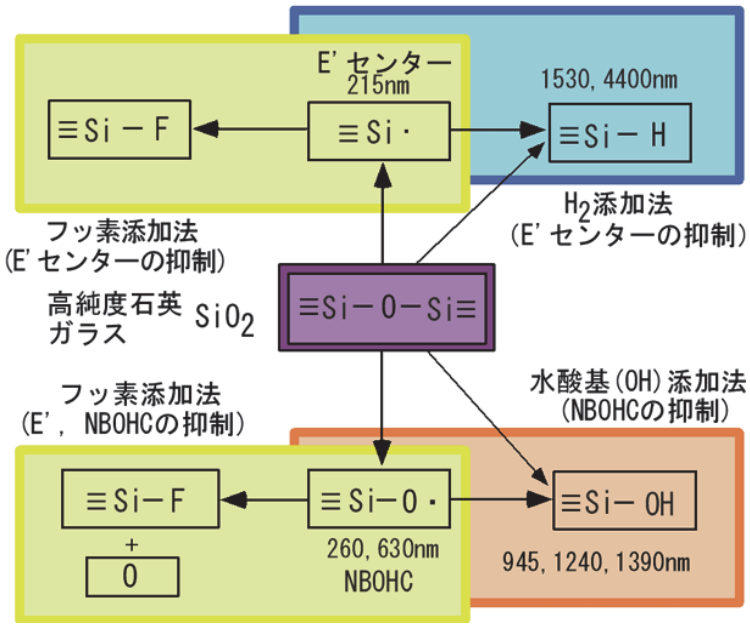


図 4　添加物の欠陥構造への作用（カラーセンターの抑制）

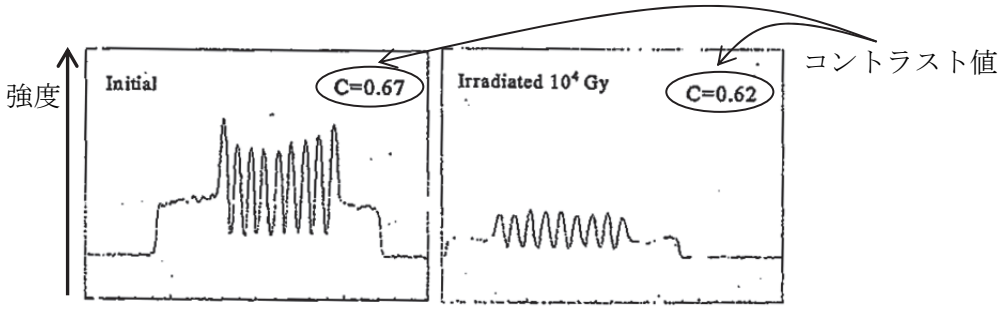
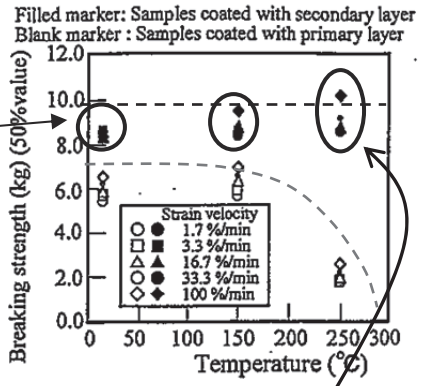


図 5　照射によるコントラスト変化 [2)]

Fiber		Bare fiber	Jacket fiber
Diameter (μm)		125	125
Primary coating	Material	Silicone	Silicone
	Outer dia. (μm)	400	400
Secondary coating	Material	—	PEEK*
	Outer dia. (μm)	—	1100

* Poly Ether Ether Ketone



250ºC、10^5Gy でも変化なし

図 6　シリコン樹脂被覆ファイバと二重被覆ファイバの強度比較 [2)]

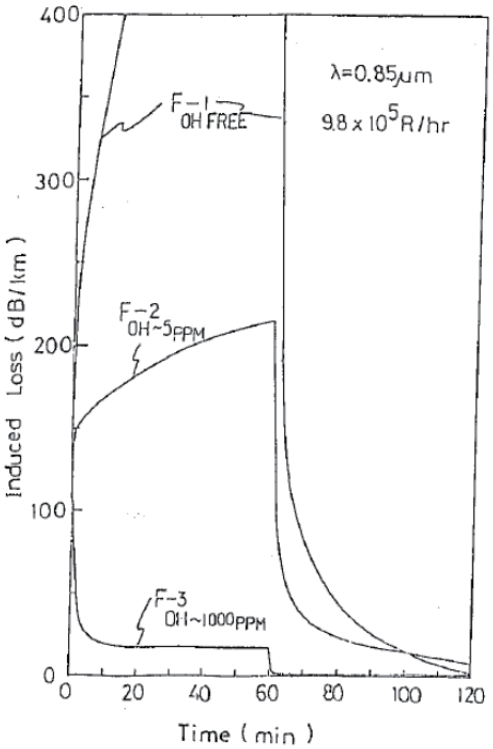


図 7　OH 基による損失増低減効果 [9)]

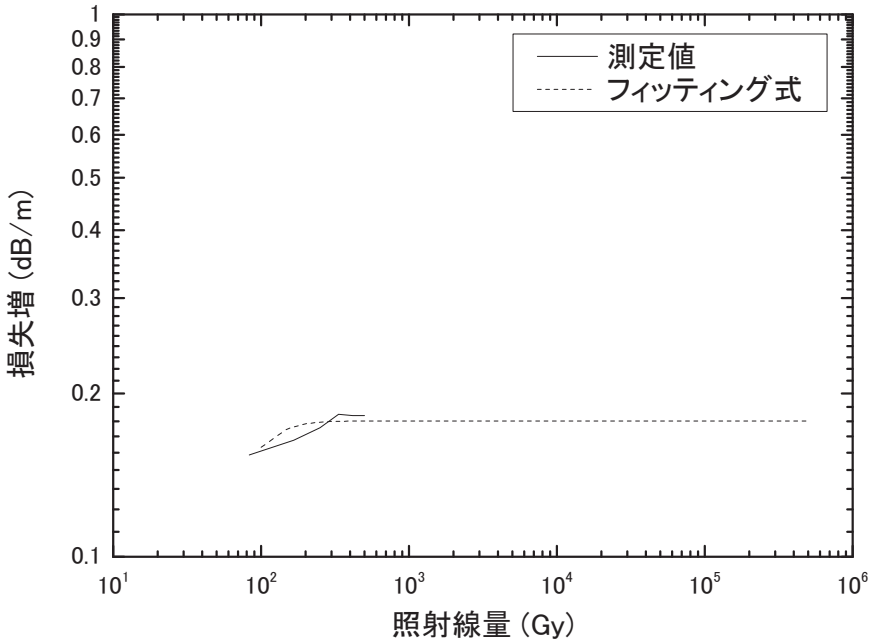


図 8　試作イメージファイバ（OH 基 800ppm）による 5×10^5Gy までの予想曲線

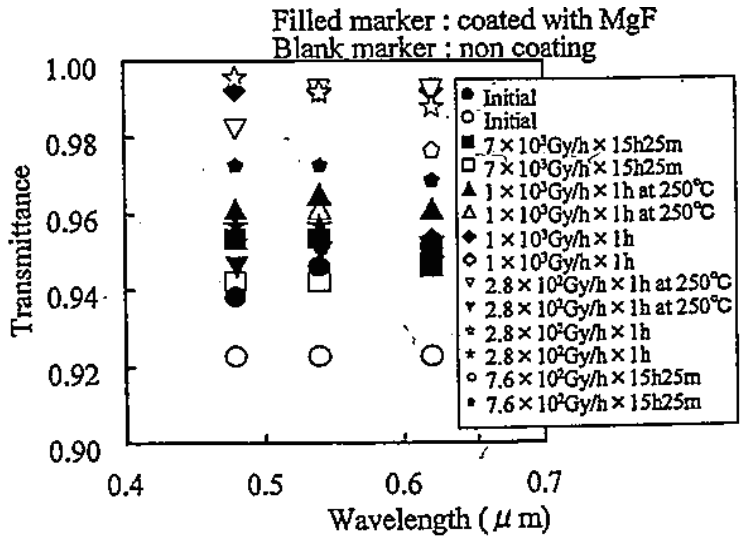


図 9　対物レンズ用硝材の照射による透過効率変化 [2)]

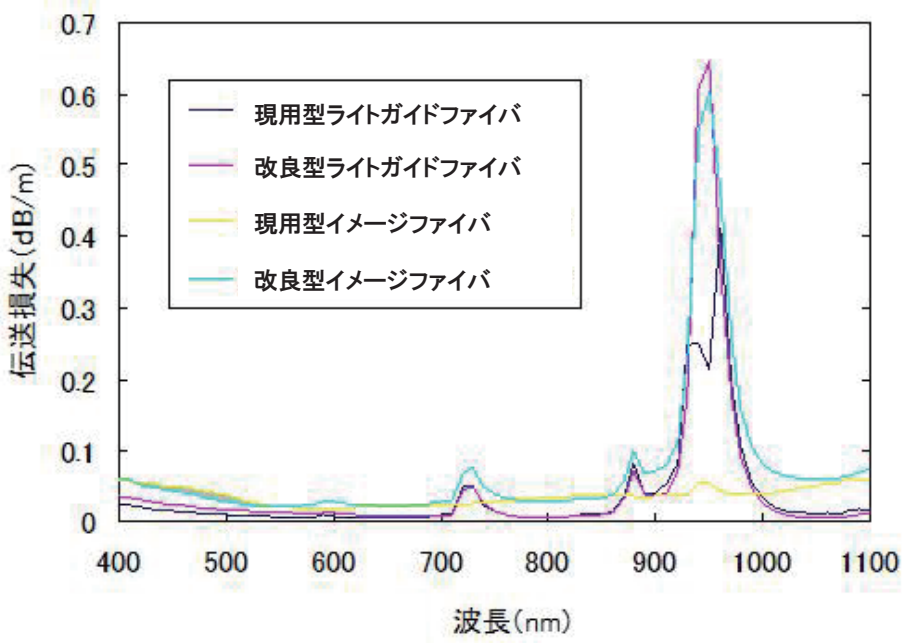


図 10　試験用ファイバの初期特性

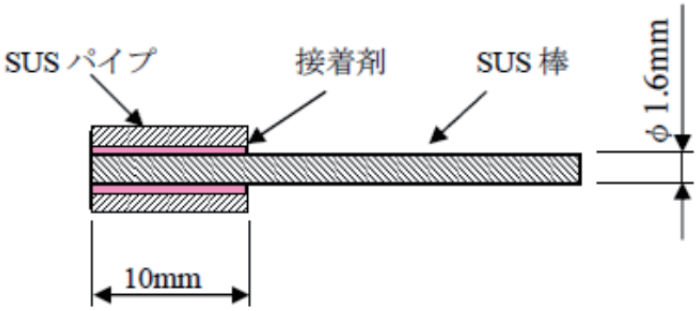
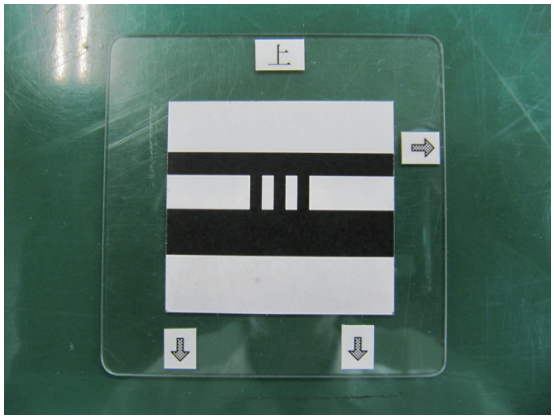
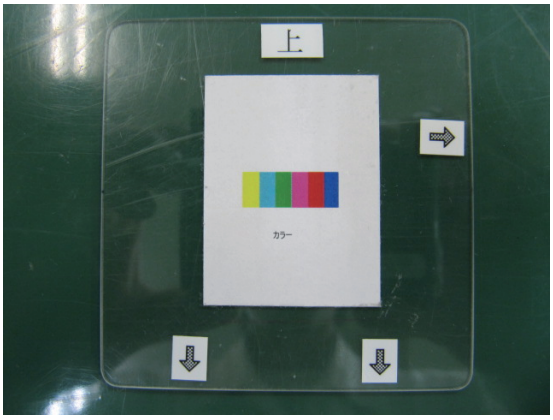


図 11　接着試料片の概要



(1)　白黒チャート



(2)　カラーチャート

図 12　チャート

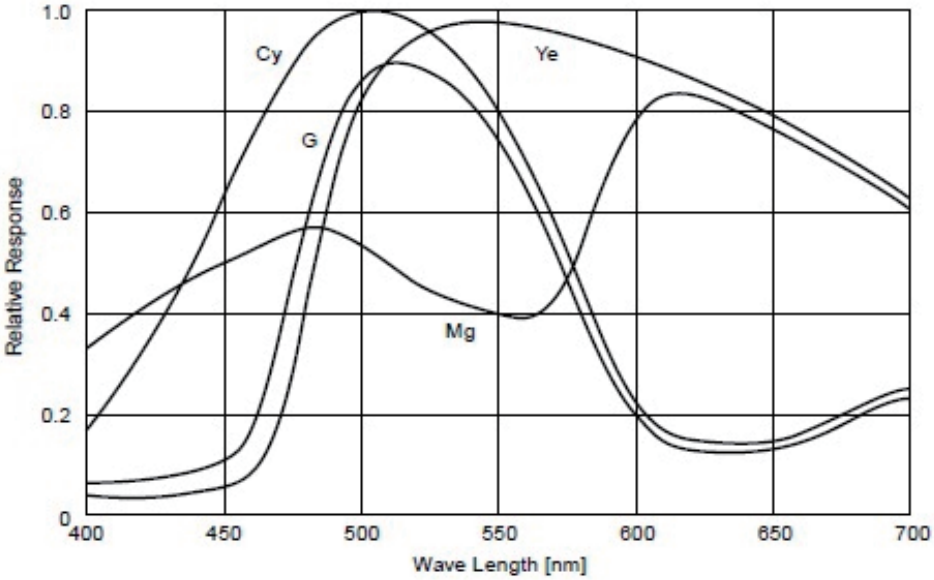


図 13　試験に使用した CCD カメラの分光特性

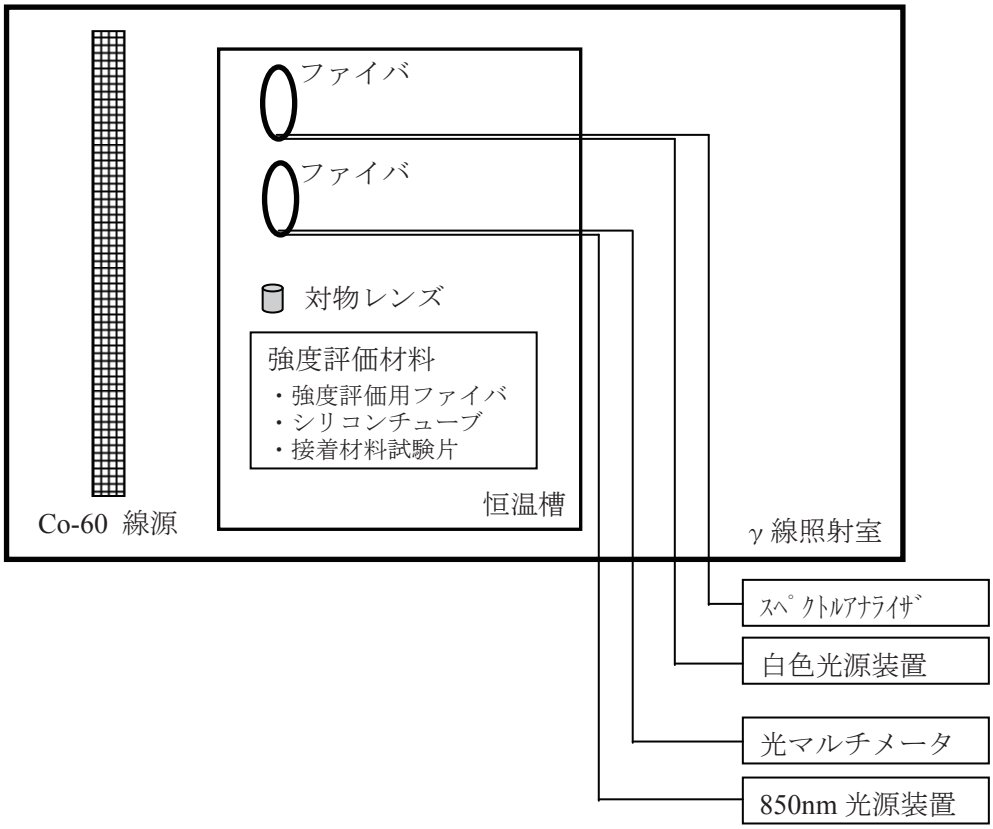


図 14　照射試験体系

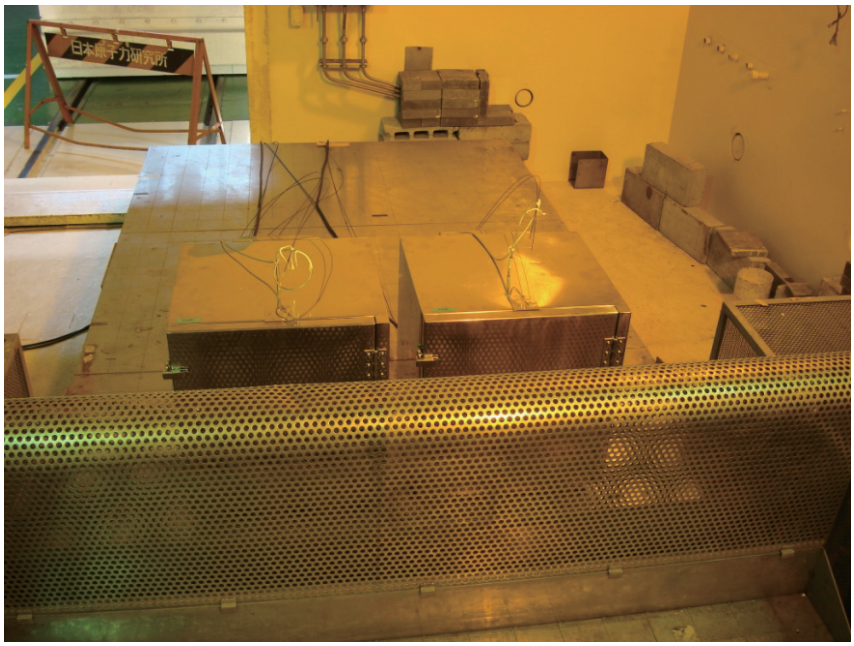


図 15　照射試験時の写真

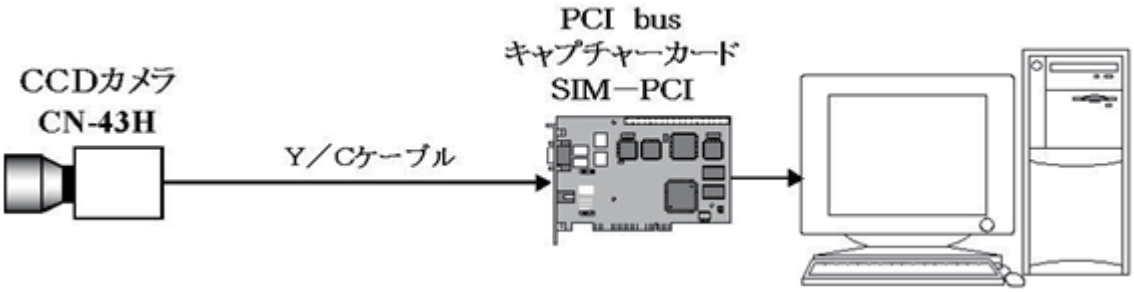


図 16　伝送画像測定系の概要

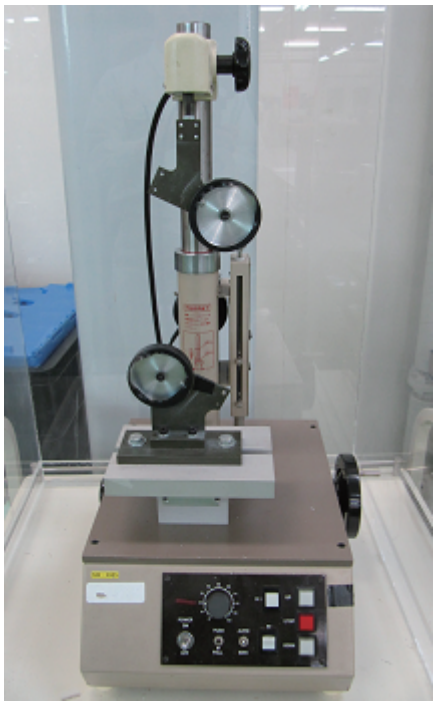


図 17　ファイバ引張試験機

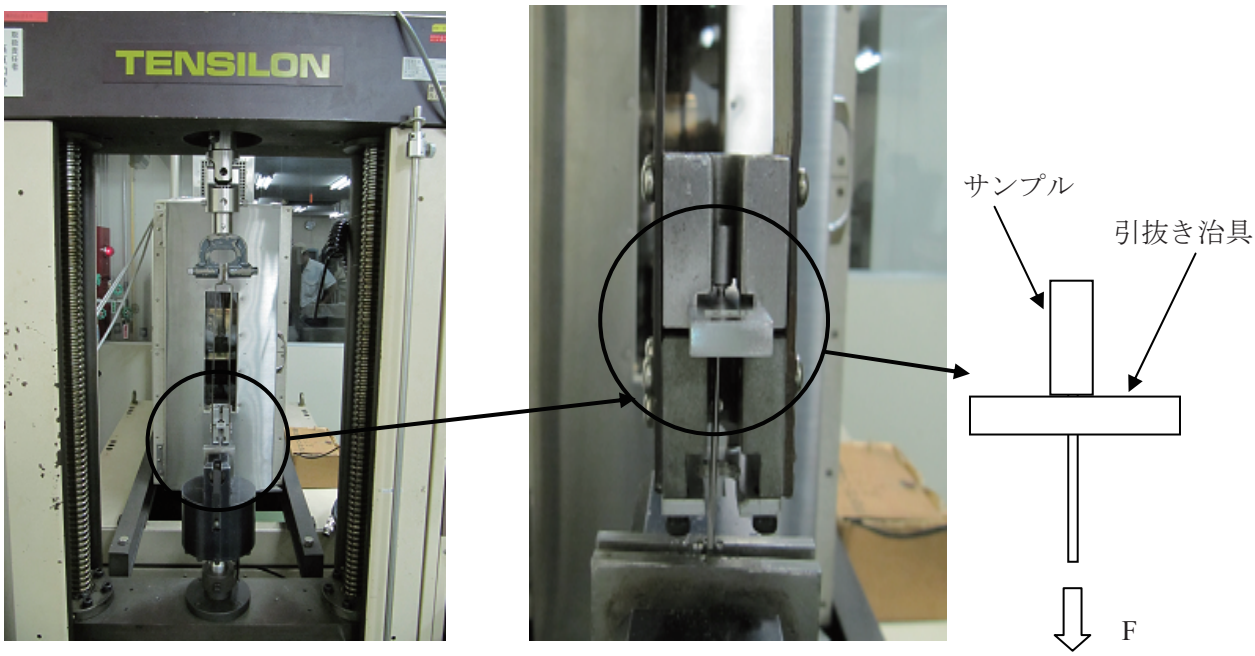


図 18　接着試料片引張試験機

全体　　試験部

図 19　シリコンチューブ引張試験機

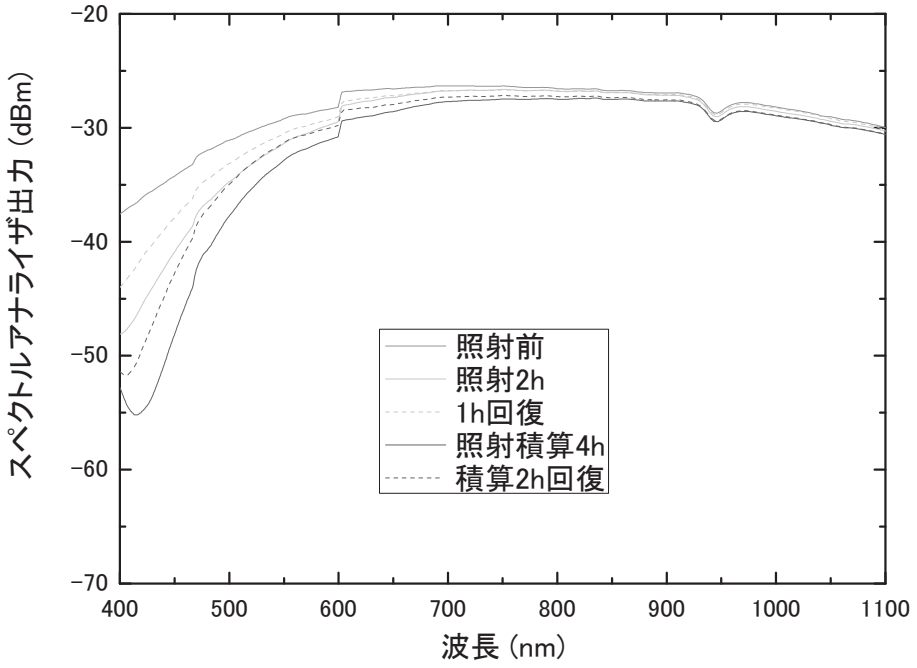


図 20　0.5kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバの波長スペクトル

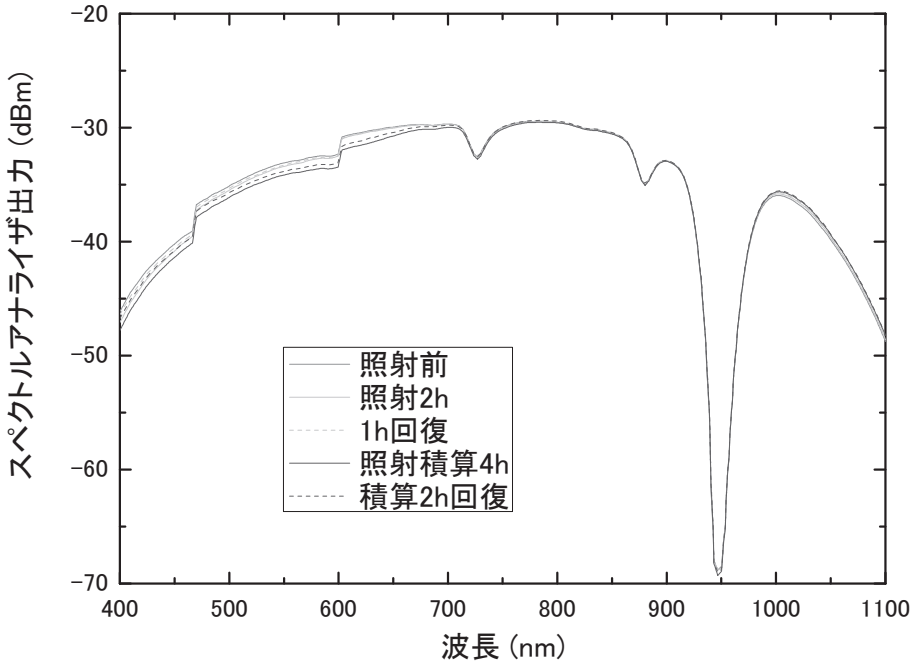


図 21　0.5kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバの波長スペクトル

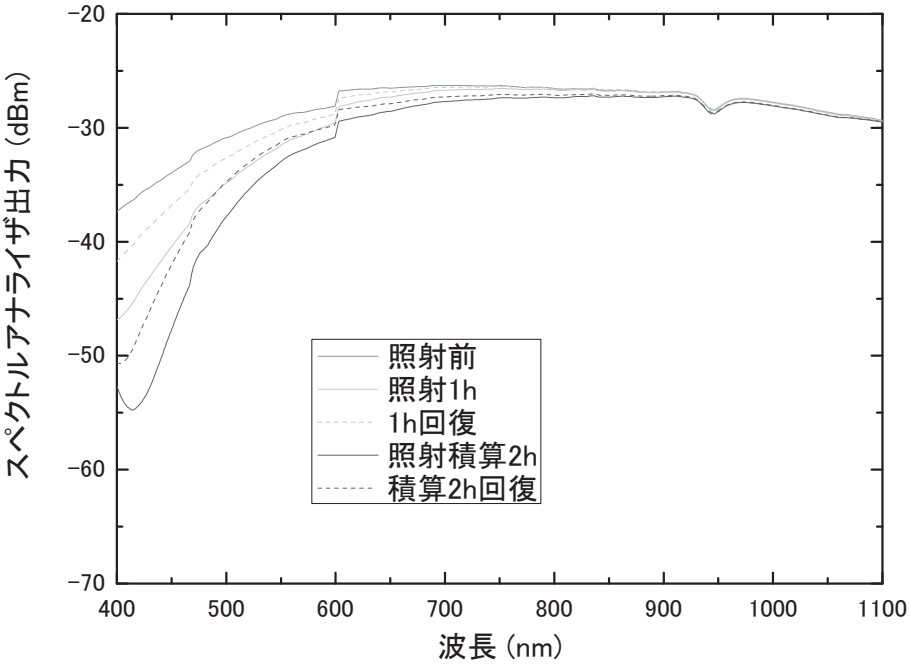


図 22　1kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバの波長スペクトル

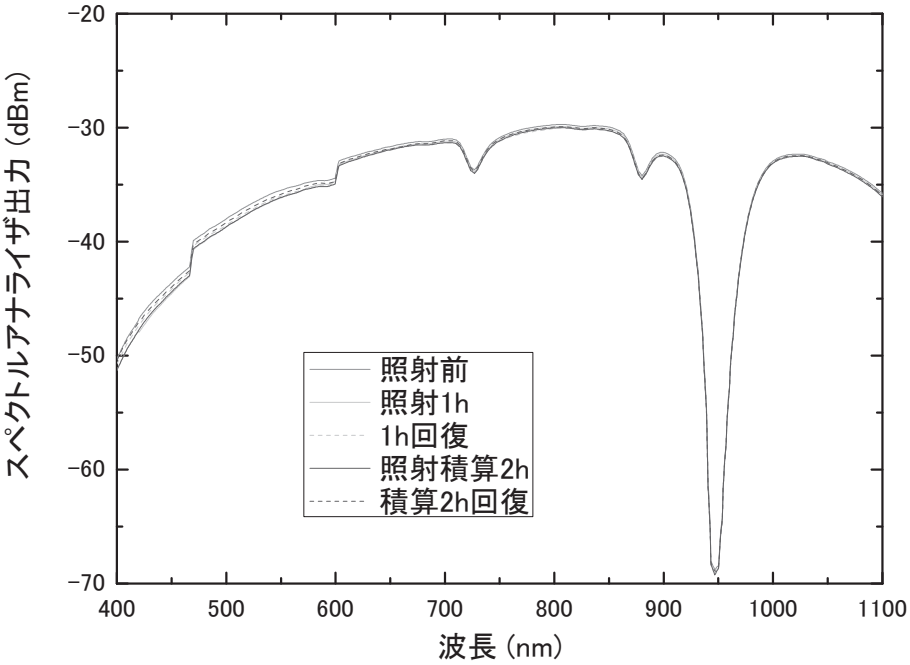


図 23　1kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバの波長スペクトル

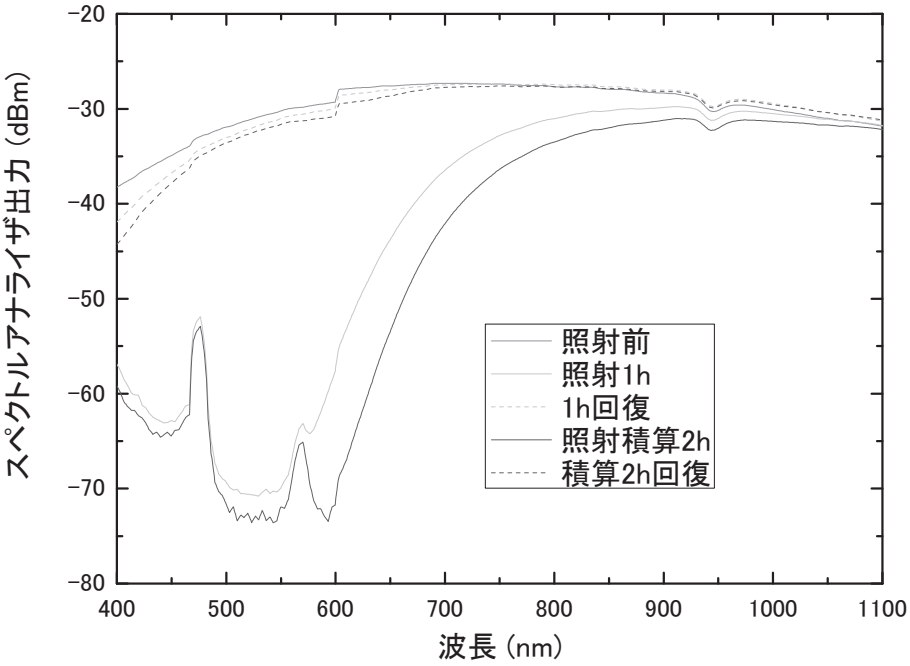


図 24　5kGy/h、30ºC 条件下での現用型イメージファイバの波長スペクトル

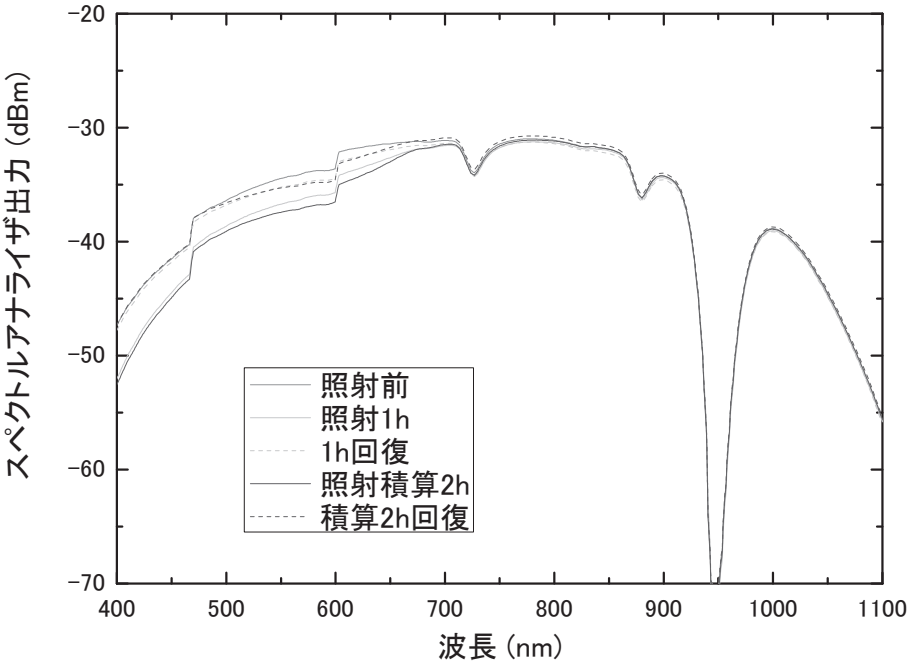


図 25　5kGy/h、30ºC 条件下での改良型イメージファイバの波長スペクトル

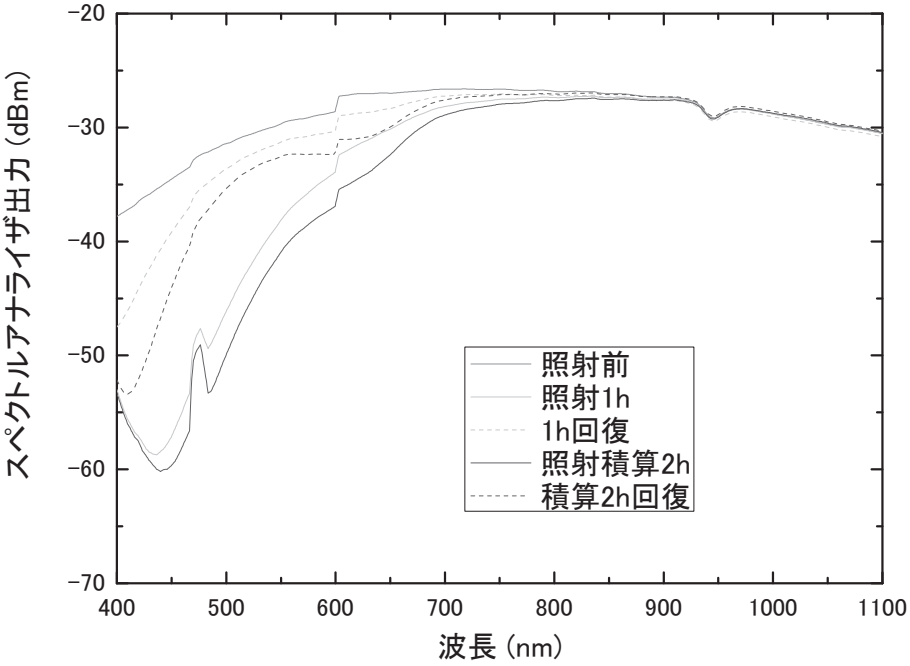


図 26　5kGy/h、120ºC 条件下での現用型イメージファイバの波長スペクトル

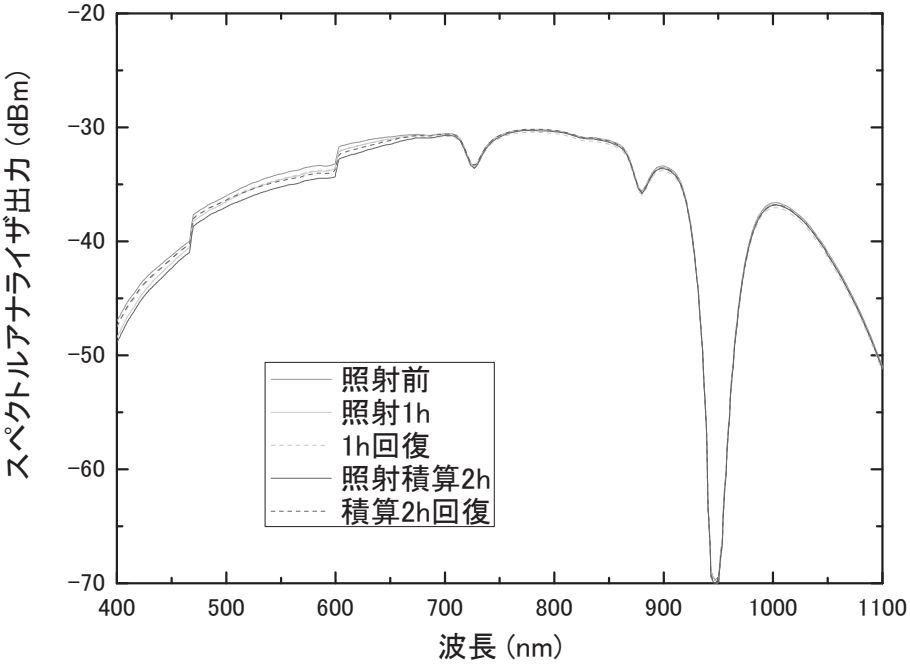


図 27　5kGy/h、120ºC 条件下での改良型イメージファイバの波長スペクトル

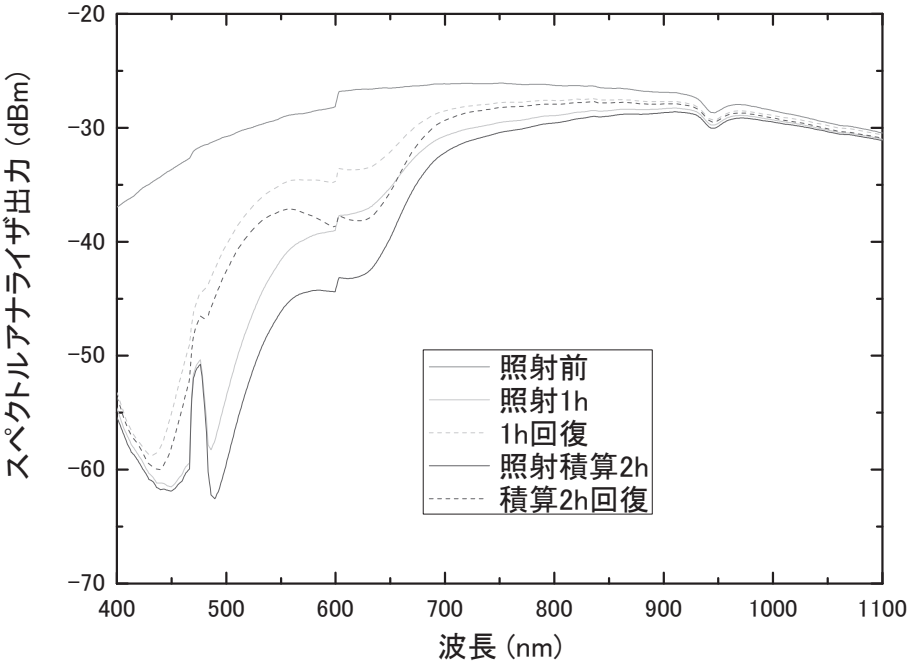


図 28　5kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバの波長スペクトル

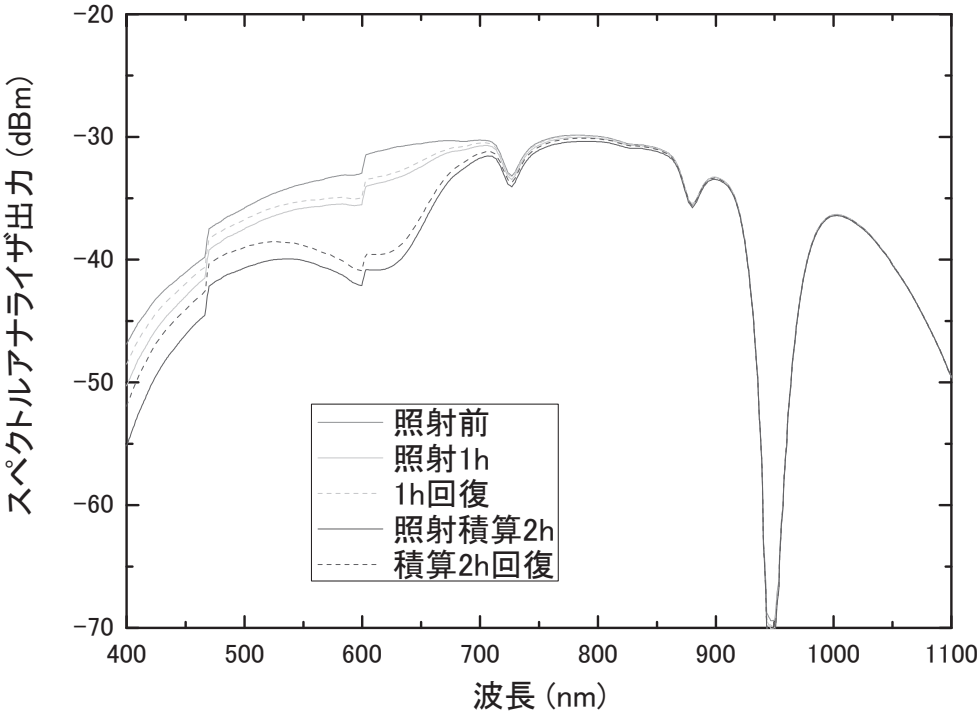


図 29　5kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバの波長スペクトル

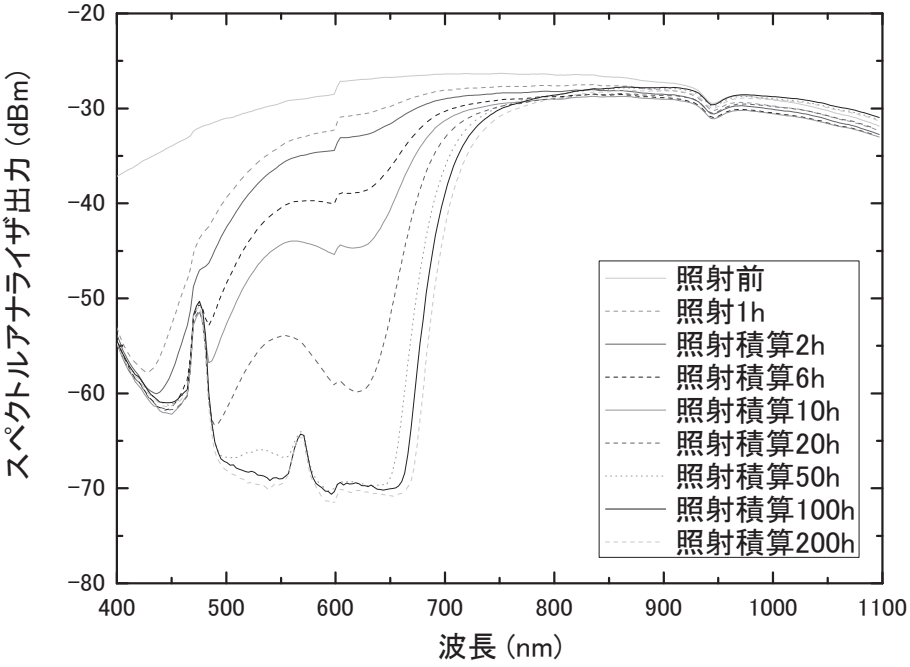


図 30　積算 1×10^{6}Gy 照射時の現用型イメージファイバの波長スペクトル

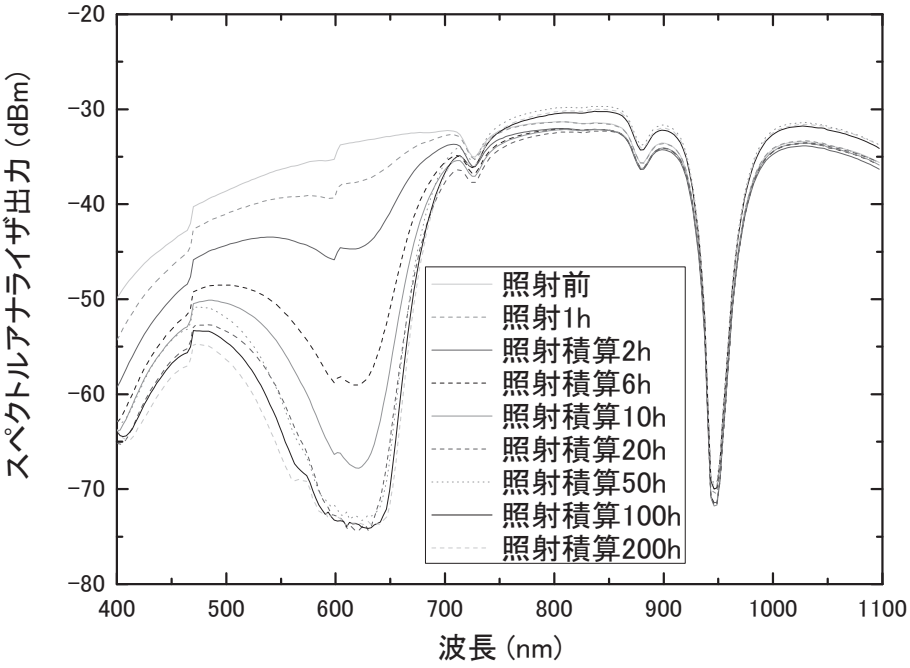


図 31　積算 1×10^{6}Gy 照射時の改良型イメージファイバの波長スペクトル

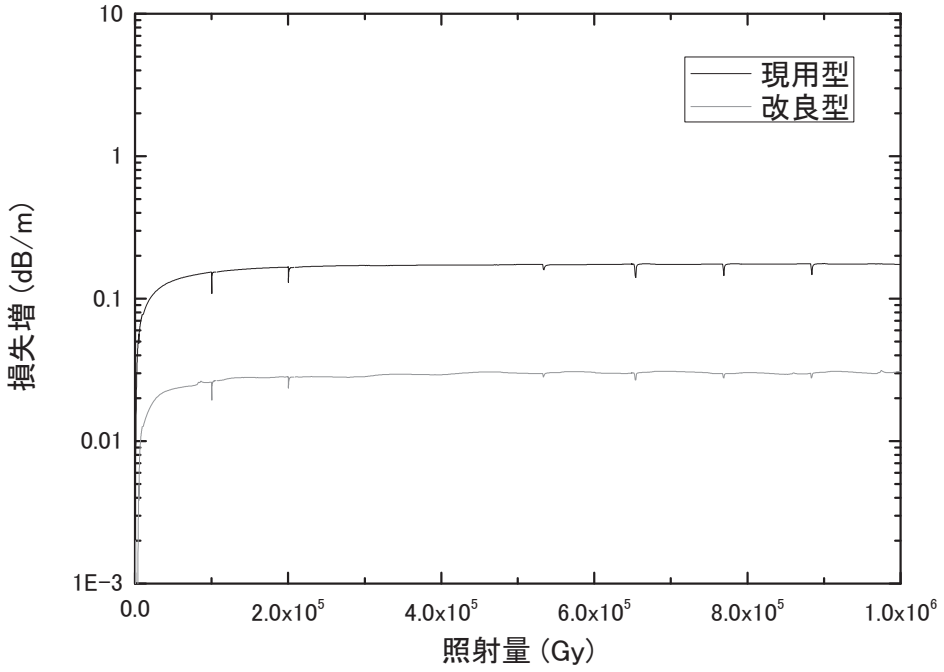


図 32　マルチメータによる 850nm 単一波長の測定結果（イメージファイバ）

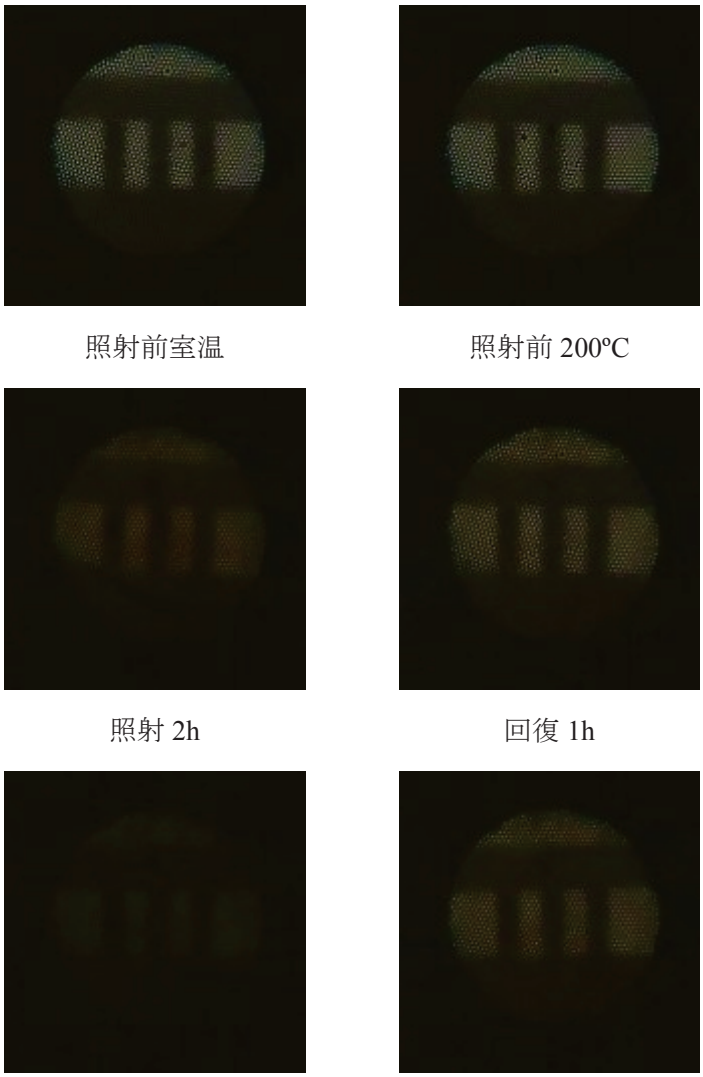


図 33　0.5kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバの白黒チャート観察画像

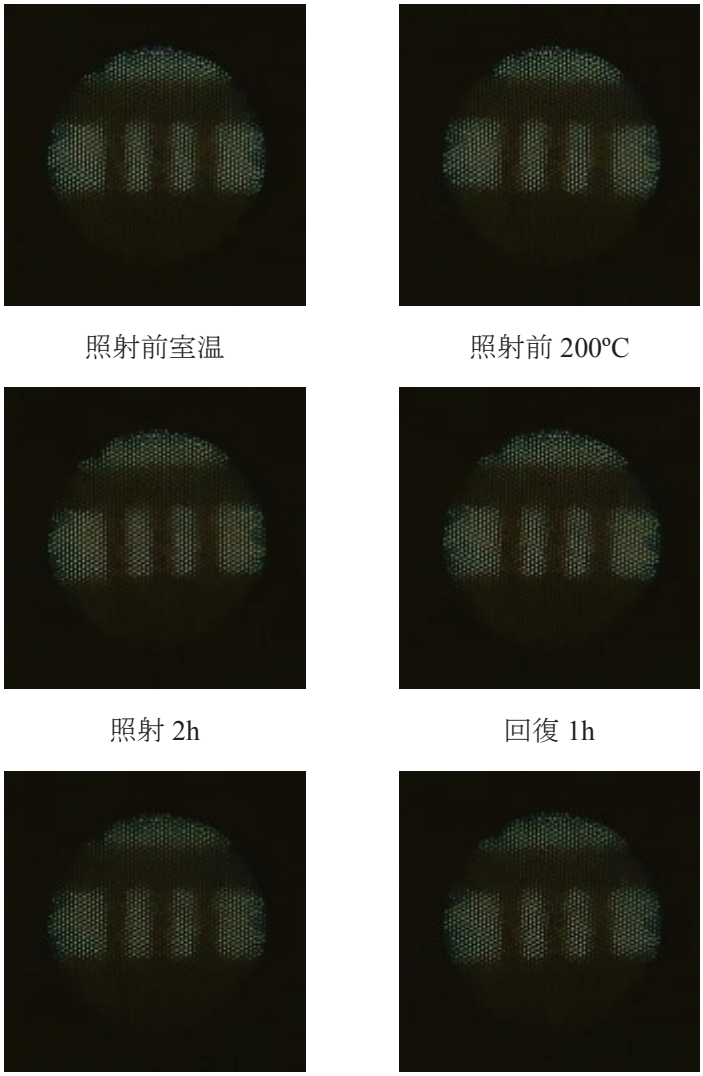


図 34　0.5kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバの白黒チャート観察画像

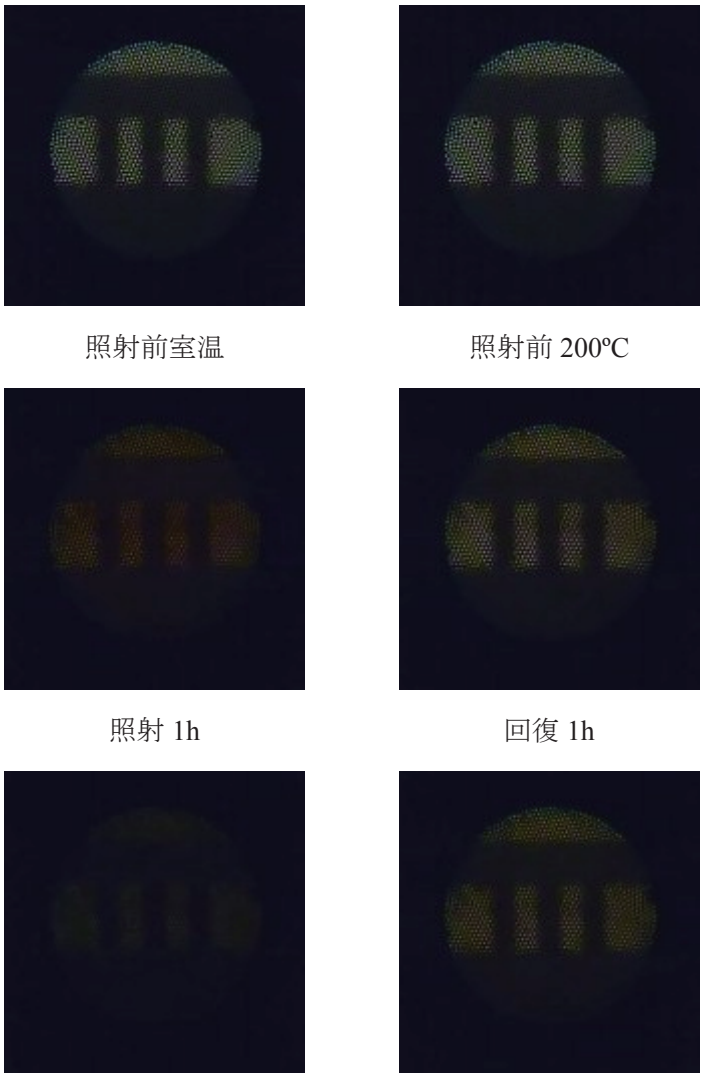


図 35　1kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバの白黒チャート観察画像

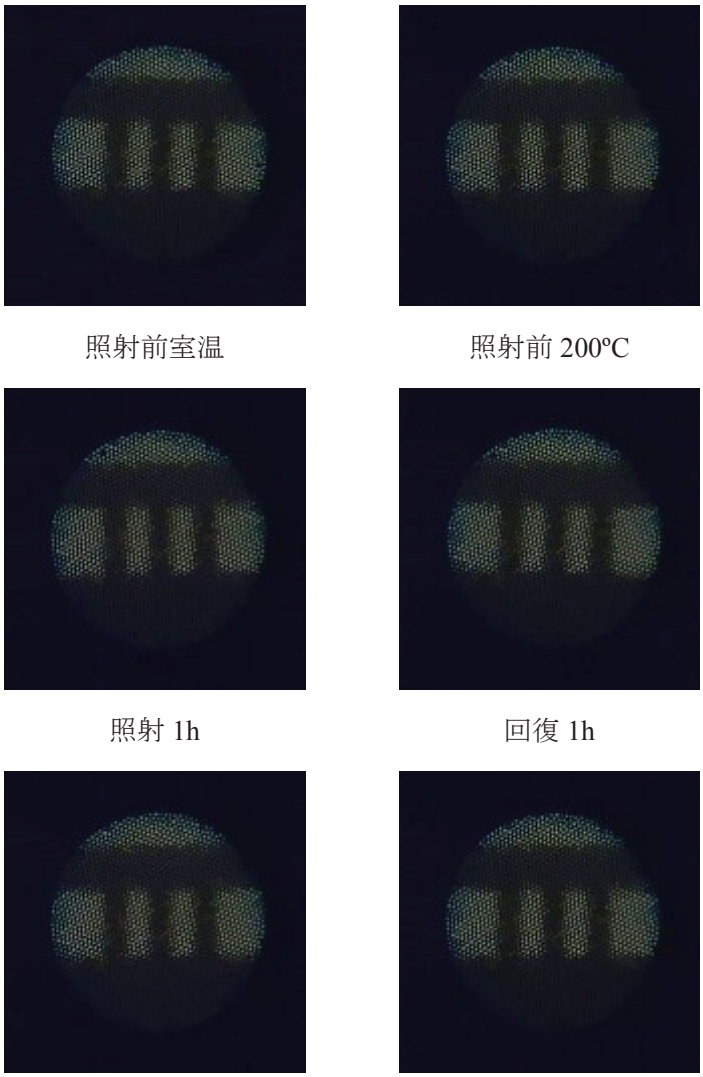


図 36　1kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバの白黒チャート観察画像

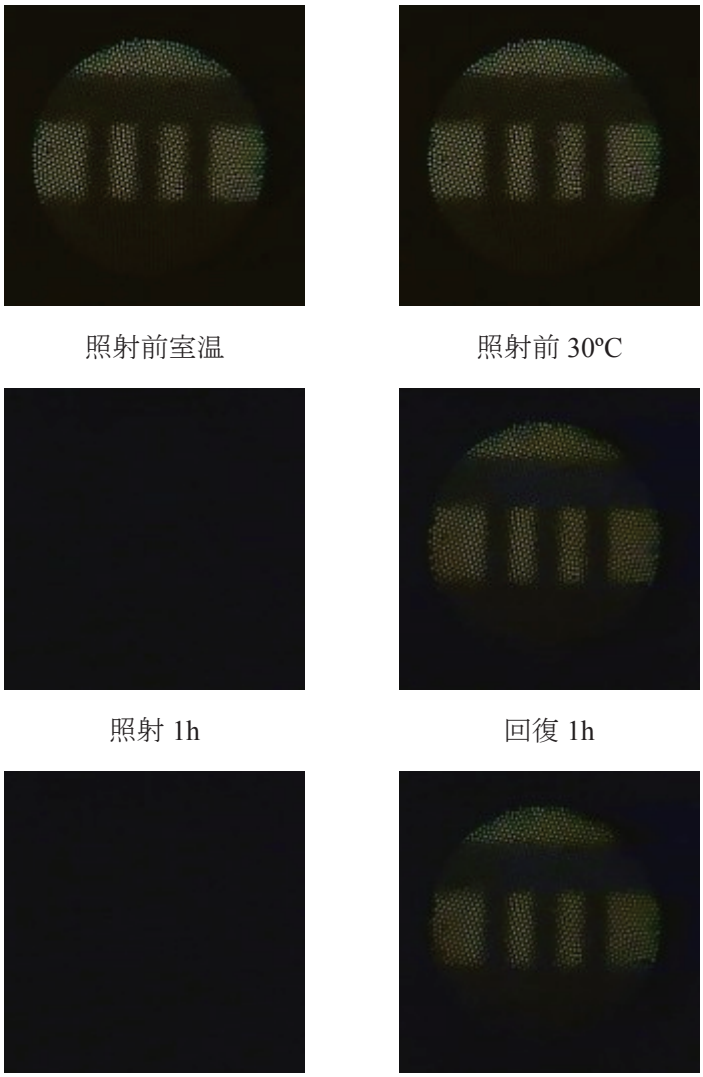


図 37　5kGy/h、30ºC 条件下での現用型イメージファイバの白黒チャート観察画像

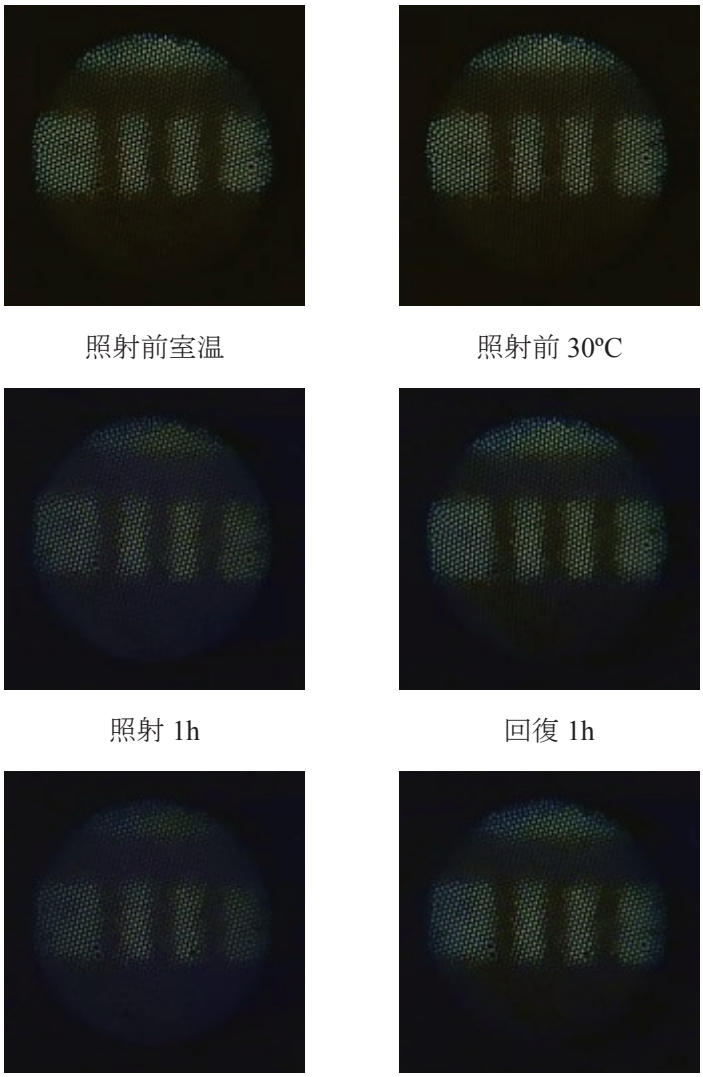


図 38　5kGy/h、30ºC 条件下での改良型イメージファイバの白黒チャート観察画像

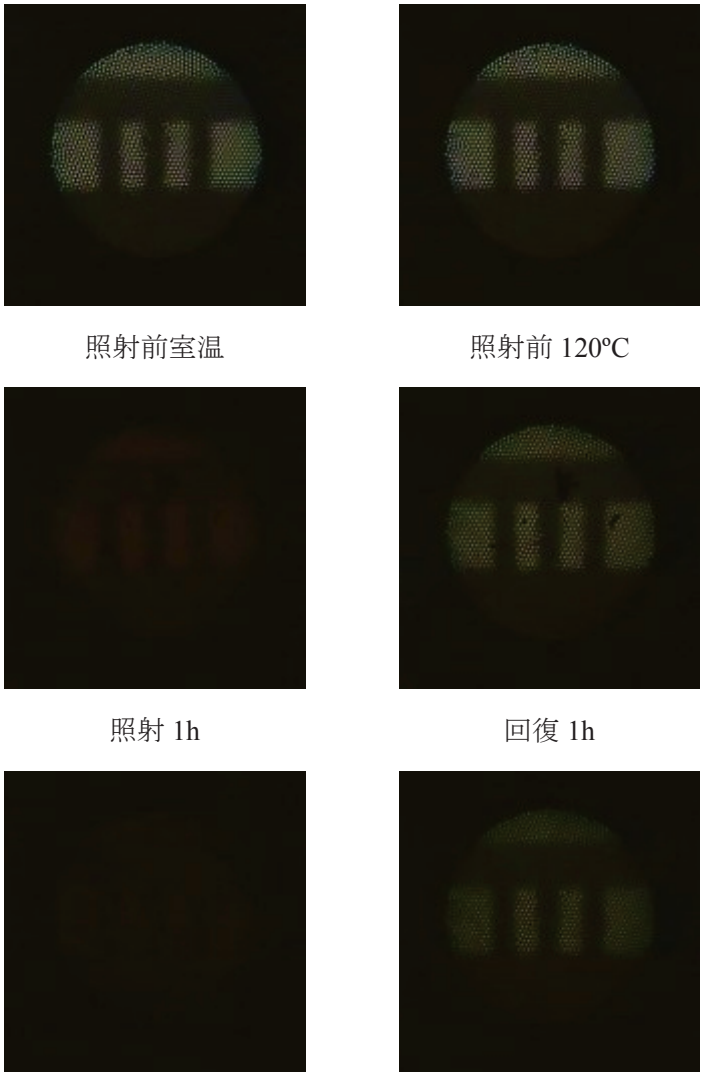


図 39　5kGy/h、120ºC 条件下での現用型イメージファイバの白黒チャート観察画像

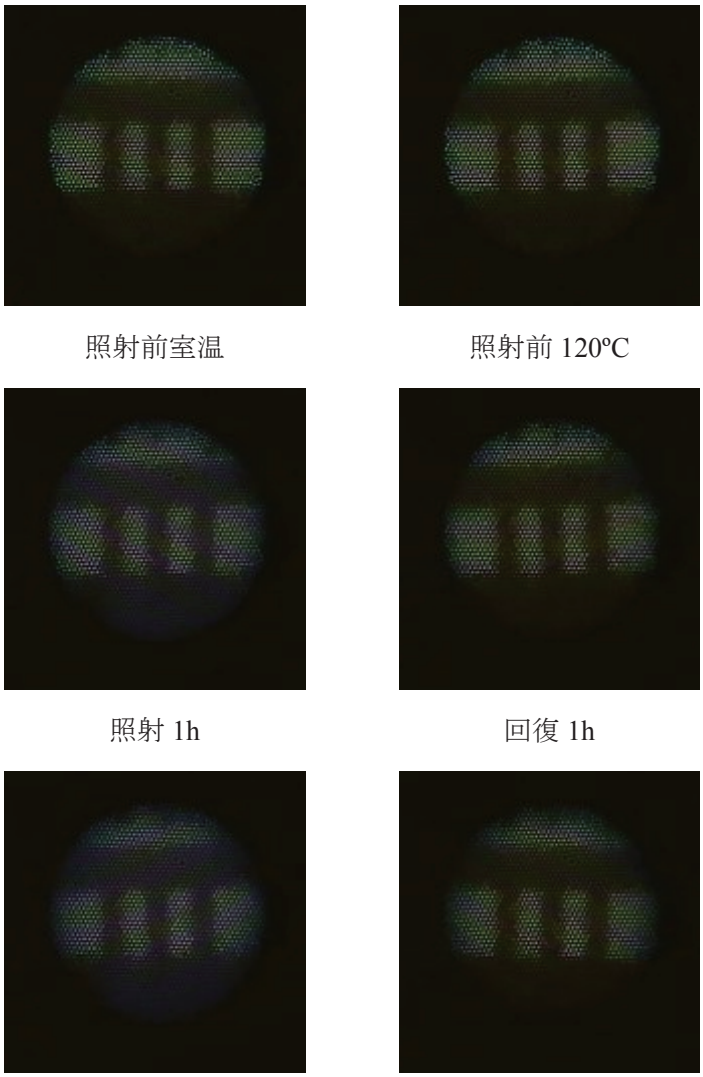
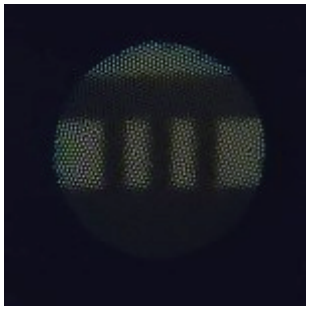
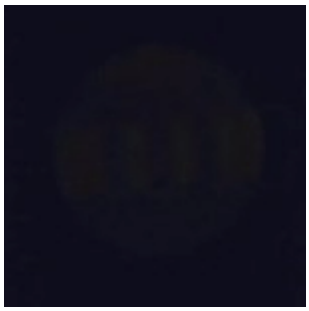


図 40　5kGy/h、120ºC 条件下での改良型イメージファイバの白黒チャート観察画像



照射前室温

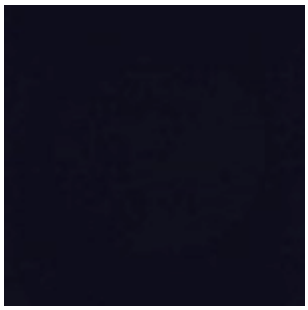
照射前 200ºC



照射 24min

照射 1h

回復 1h



照射積算 2h

回復積算 2h

図 41　5kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバの白黒チャート観察画像

照射前室温

照射前 200ºC

照射 24min

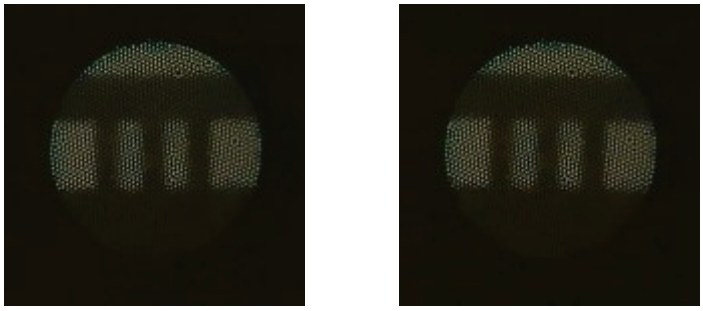
照射 1h

回復 1h

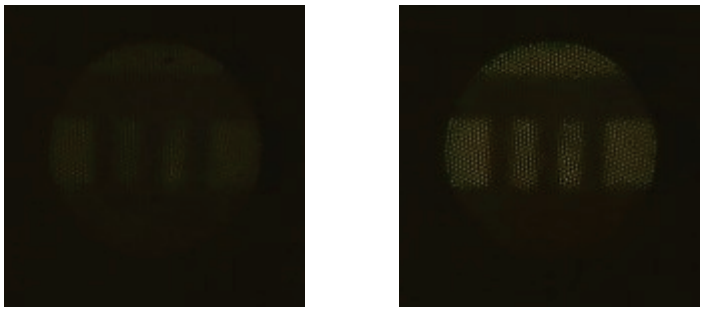
照射積算 2h

回復積算 2h

図 42　5kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバの白黒チャート観察画像



照射前室温　　照射前 200ºC



照射 1h　　回復確認 1h

照射積算 20h　　回復確認 1h

照度変更

照射積算 40h　　回復確認 1h

図 43　積算 1×10^{6}Gy 照射時の現用型イメージファイバの白黒チャート観察画像(1/2)

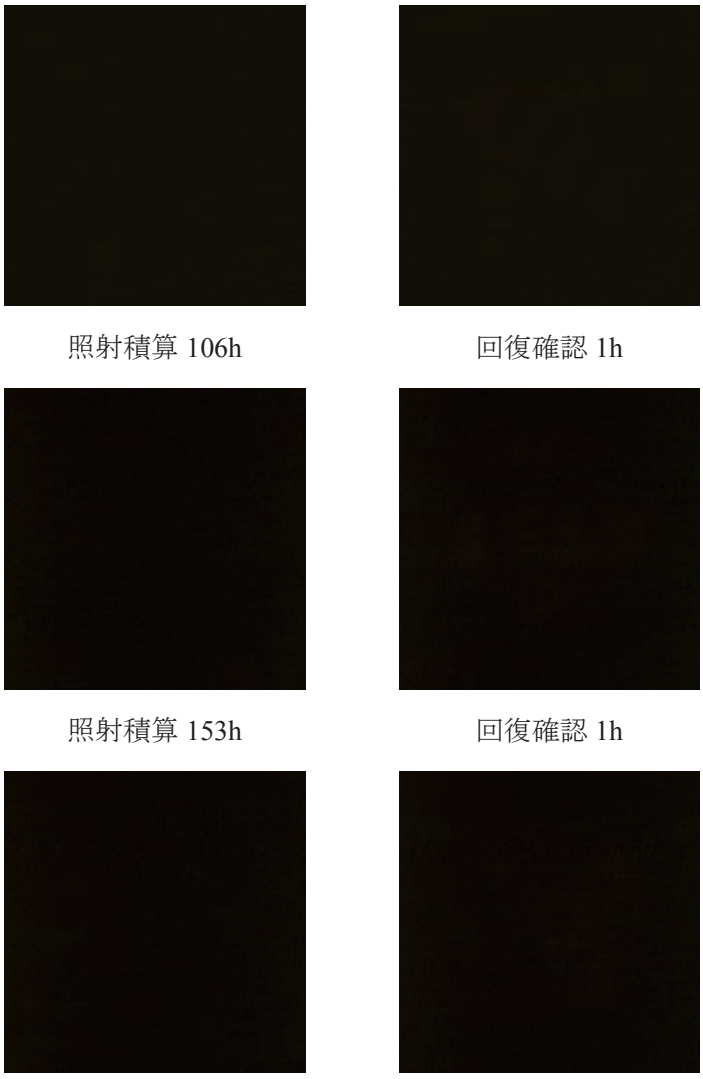


図 43　積算 1×10^{6}Gy 照射時の現用型イメージファイバの白黒チャート観察画像(2/2)

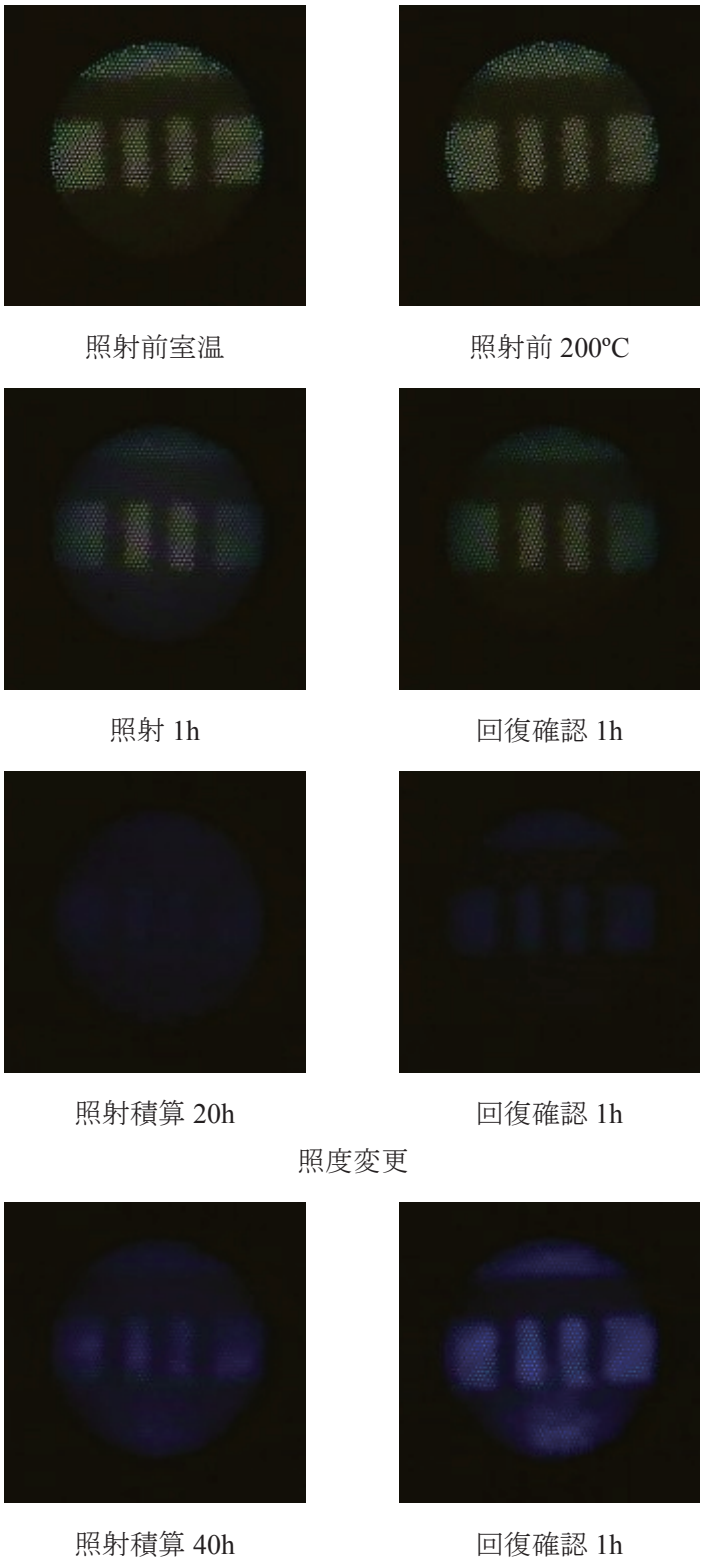


図 44　積算 1×10^{6}Gy 照射時の改良型イメージファイバの白黒チャート観察画像(1/2)

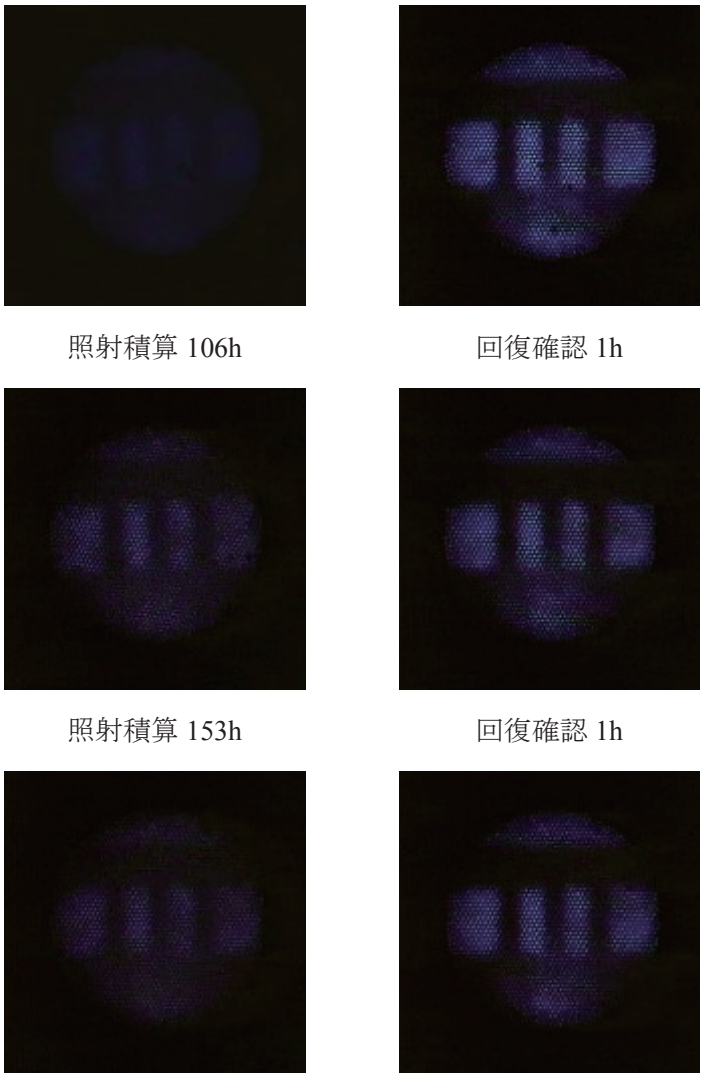


図 44　積算 1×10^{6}Gy 照射時の改良型イメージファイバの白黒チャート観察画像(2/2)

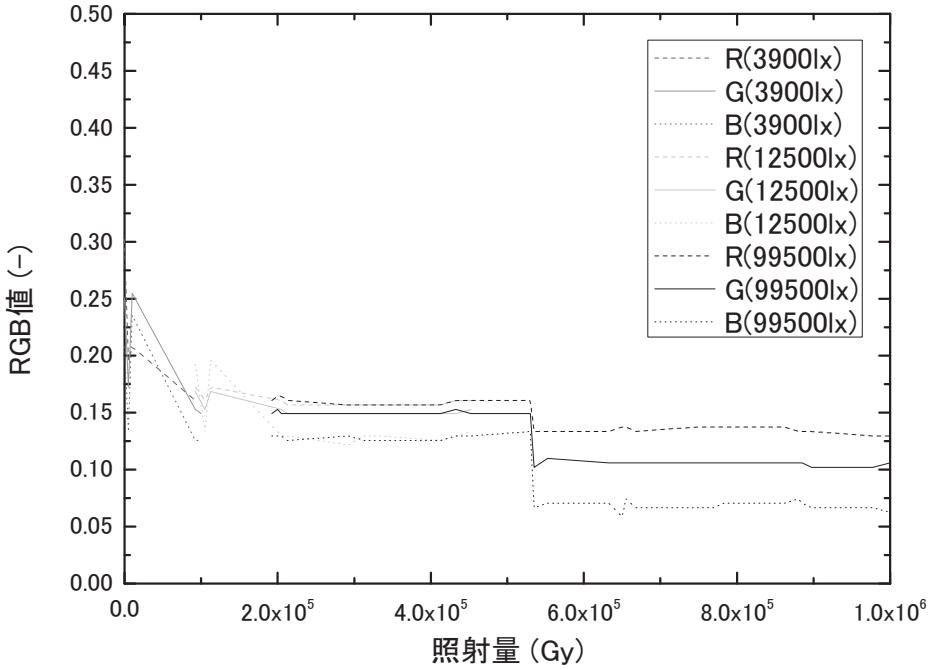


図 45　RGB 値の変化（現用型イメージファイバ）

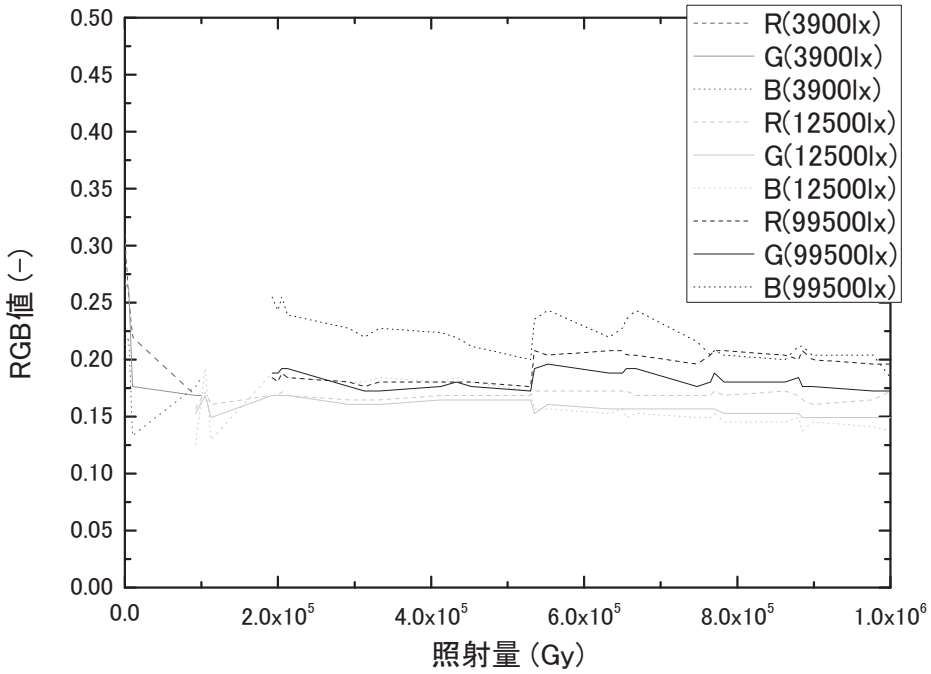


図 46　RGB 値の変化（改良型イメージファイバ）

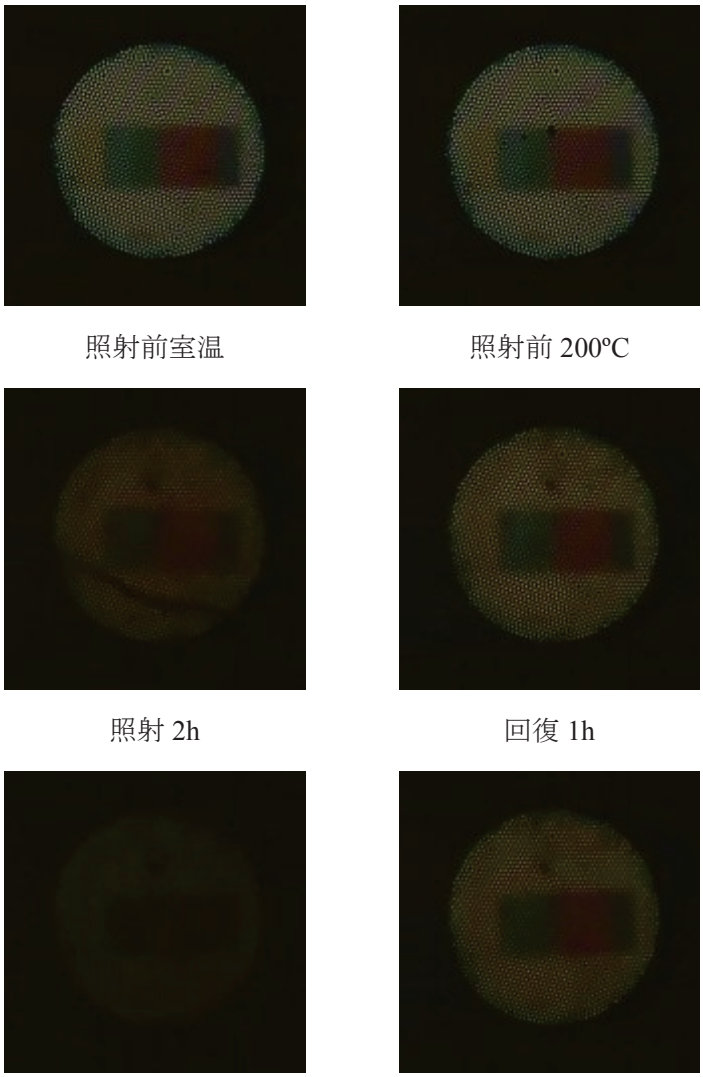


図 47　0.5kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバのカラーチャート観察画像

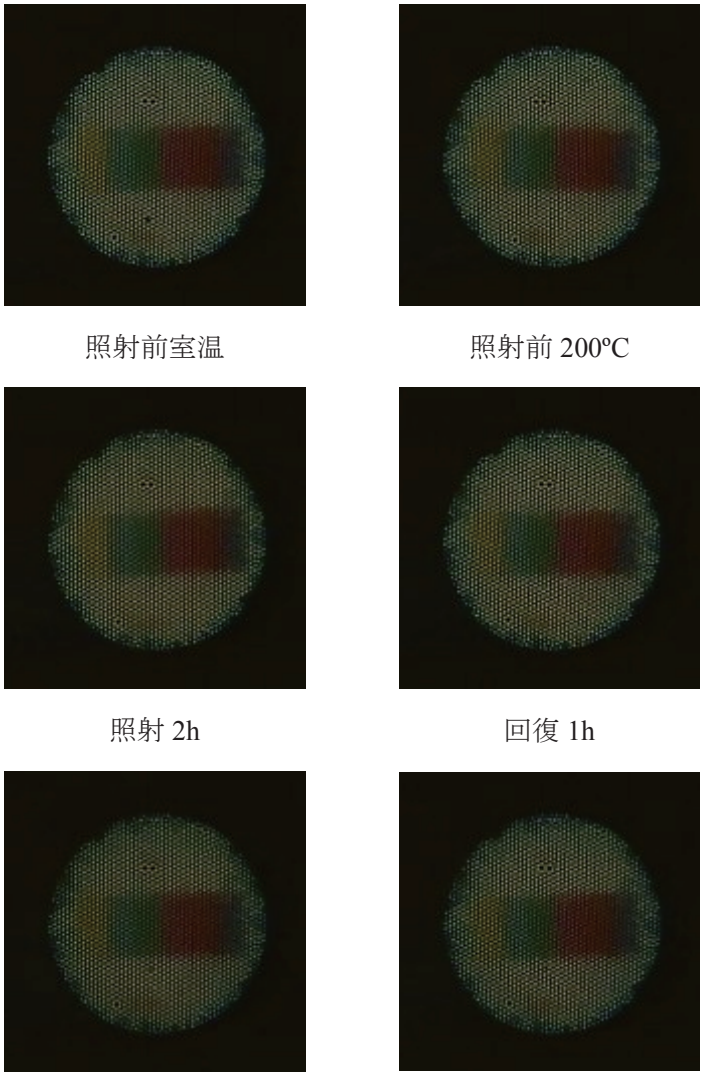


図 48　0.5kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバのカラーチャート観察画像

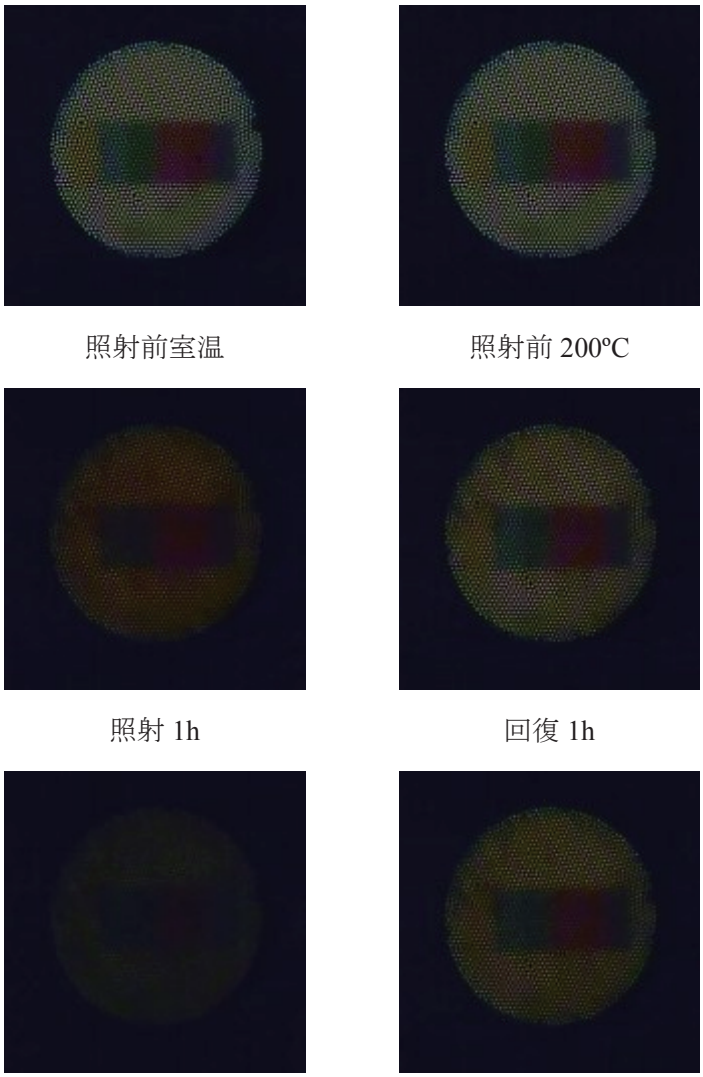


図 49　1kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバのカラーチャート観察画像

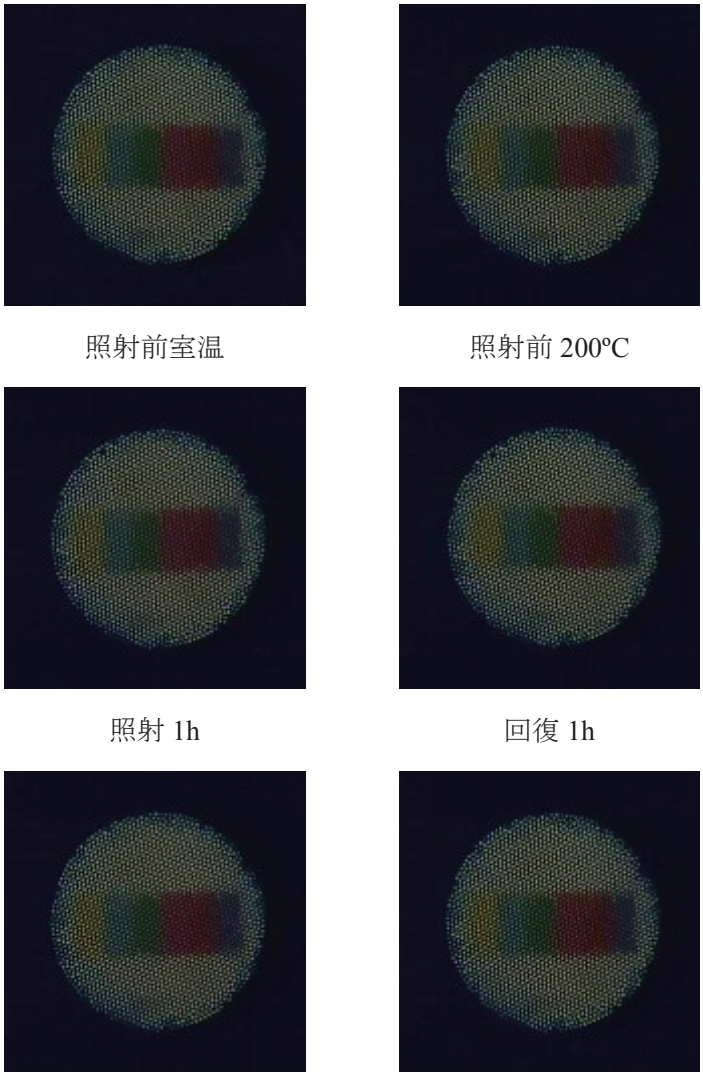


図 50　1kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバのカラーチャート観察画像

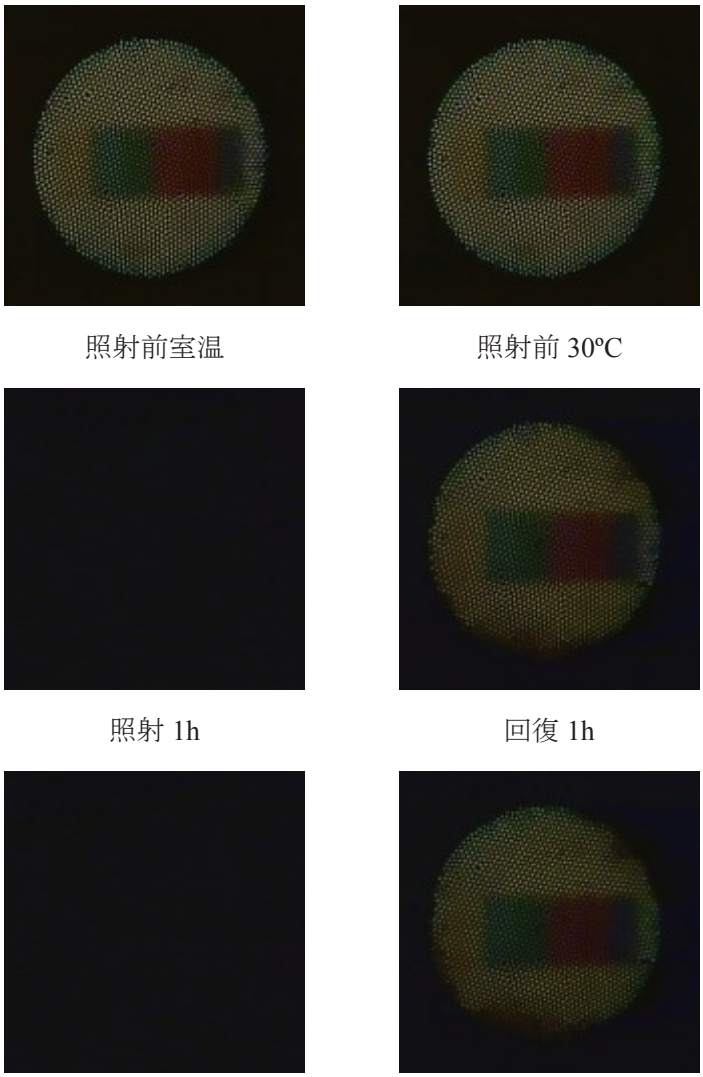


図 51　5kGy/h、30ºC 条件下での現用型イメージファイバのカラーチャート観察画像

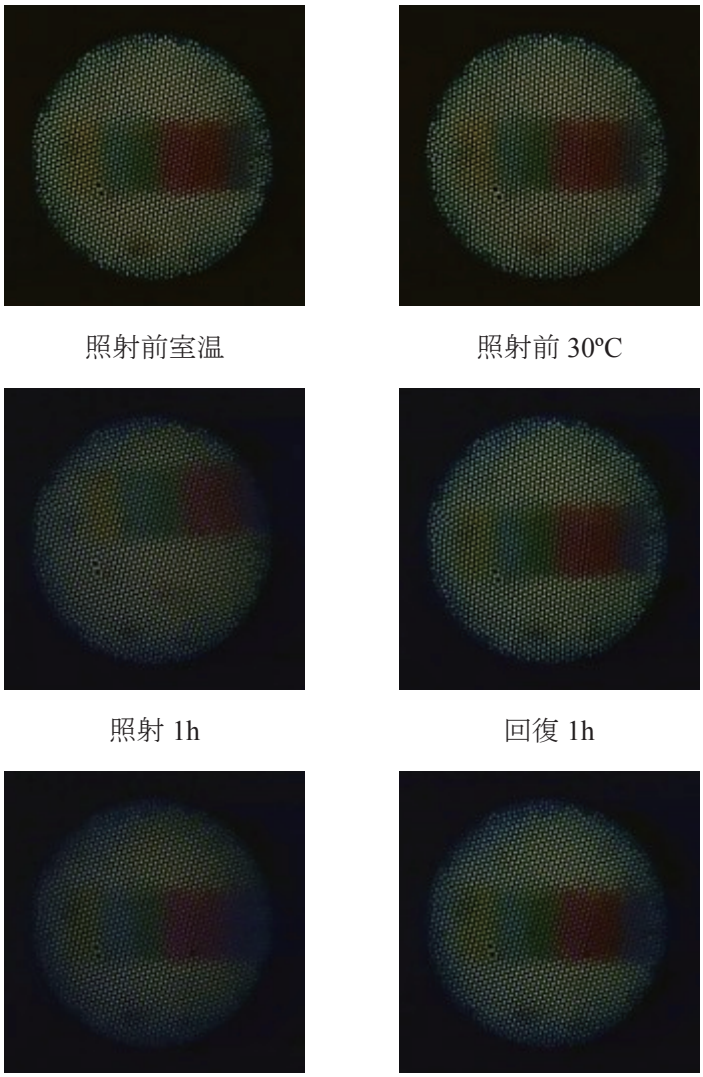


図 52　5kGy/h、30ºC 条件下での改良型イメージファイバのカラーチャート観察画像

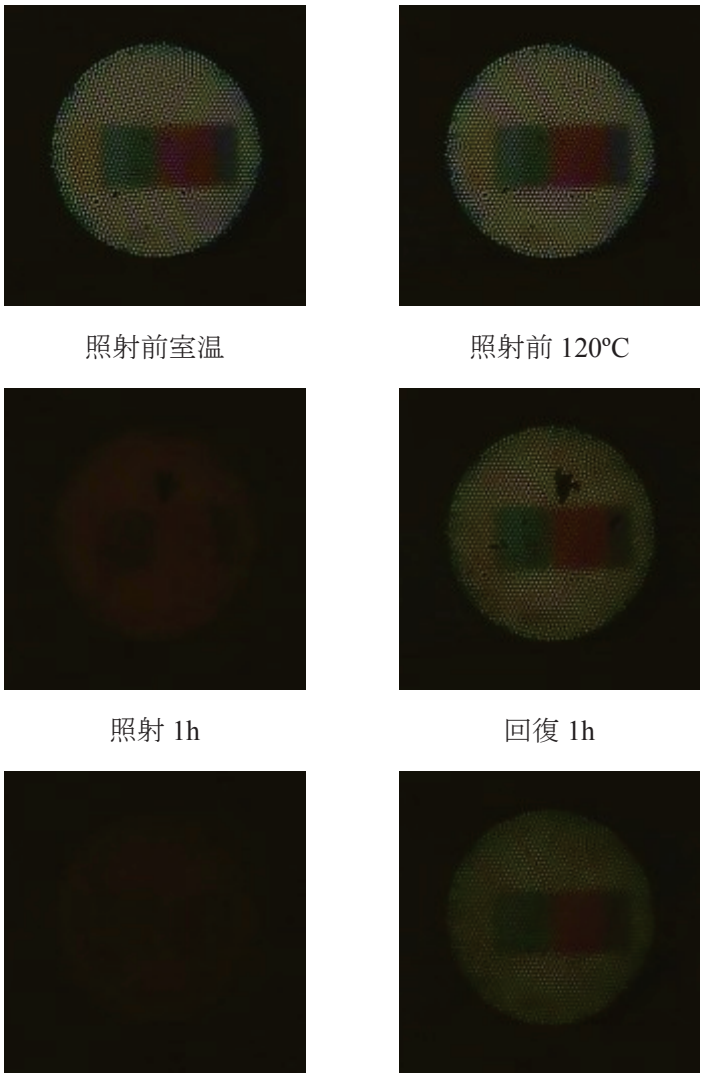


図 53　5kGy/h、120ºC 条件下での現用型イメージファイバのカラーチャート観察画像

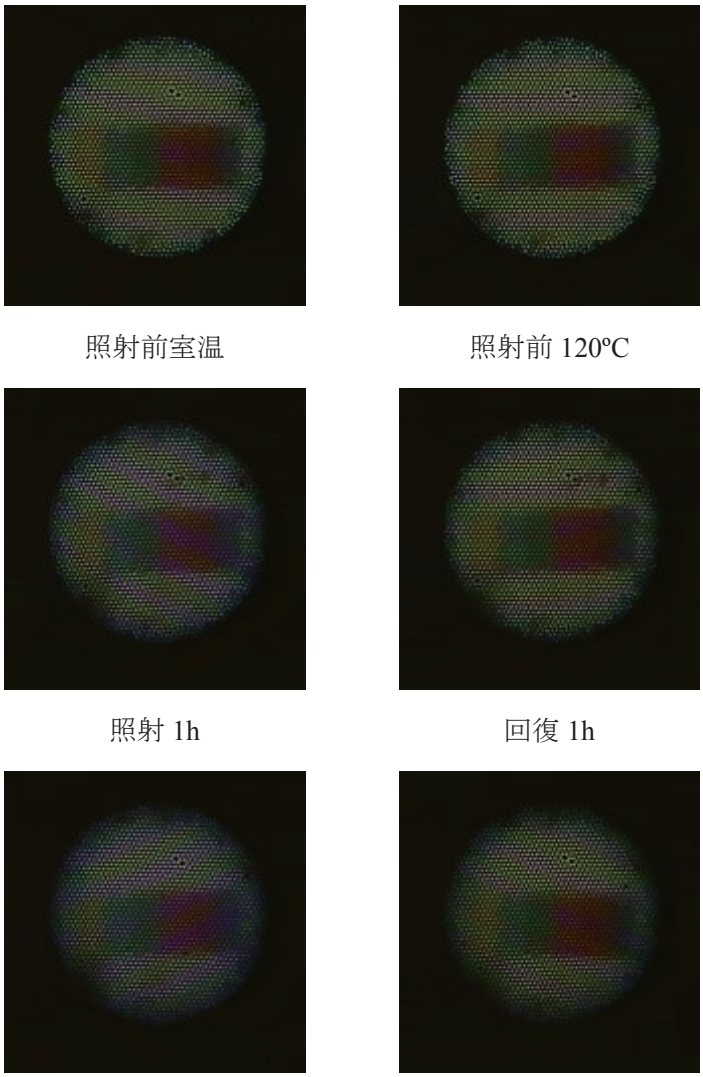


図 54　5kGy/h、120ºC 条件下での改良型イメージファイバのカラーチャート観察画像

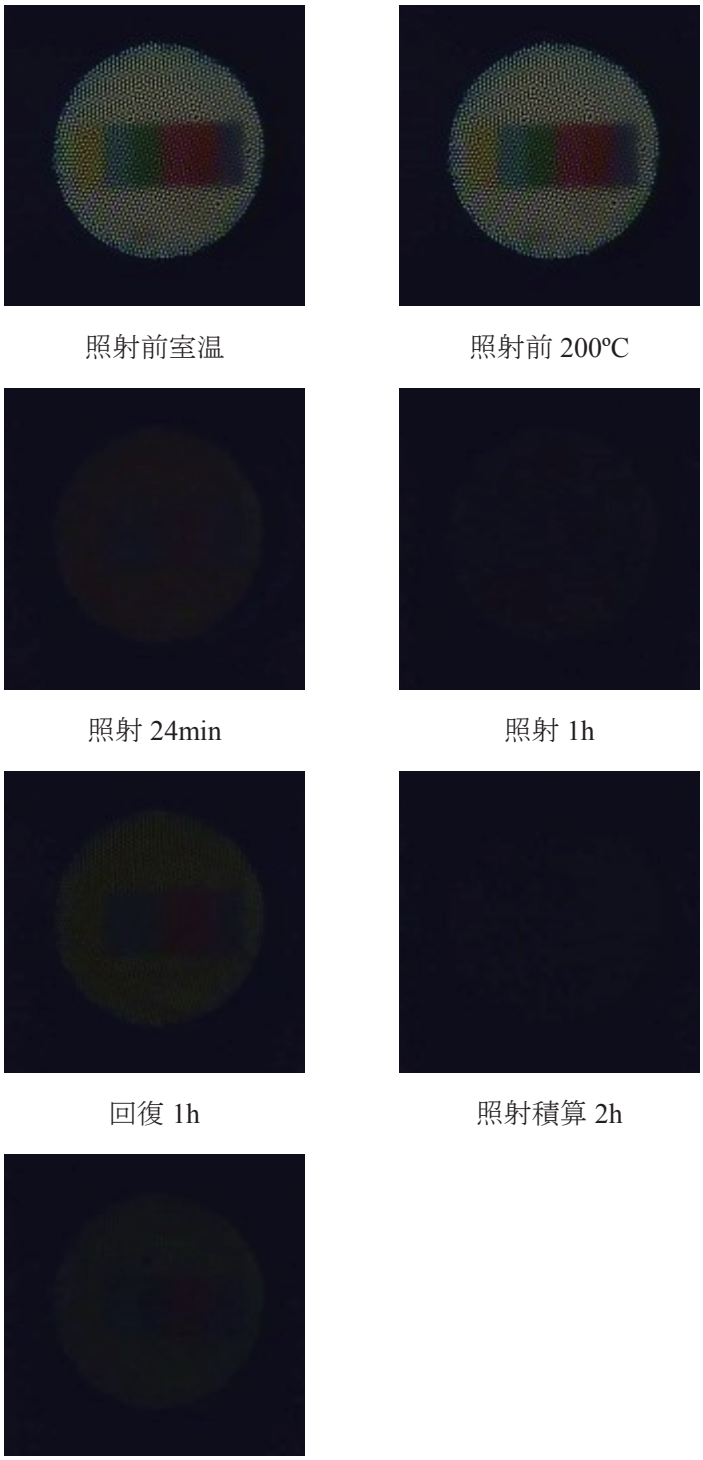


図 55　5kGy/h、200ºC 条件下での現用型イメージファイバのカラーチャート観察画像

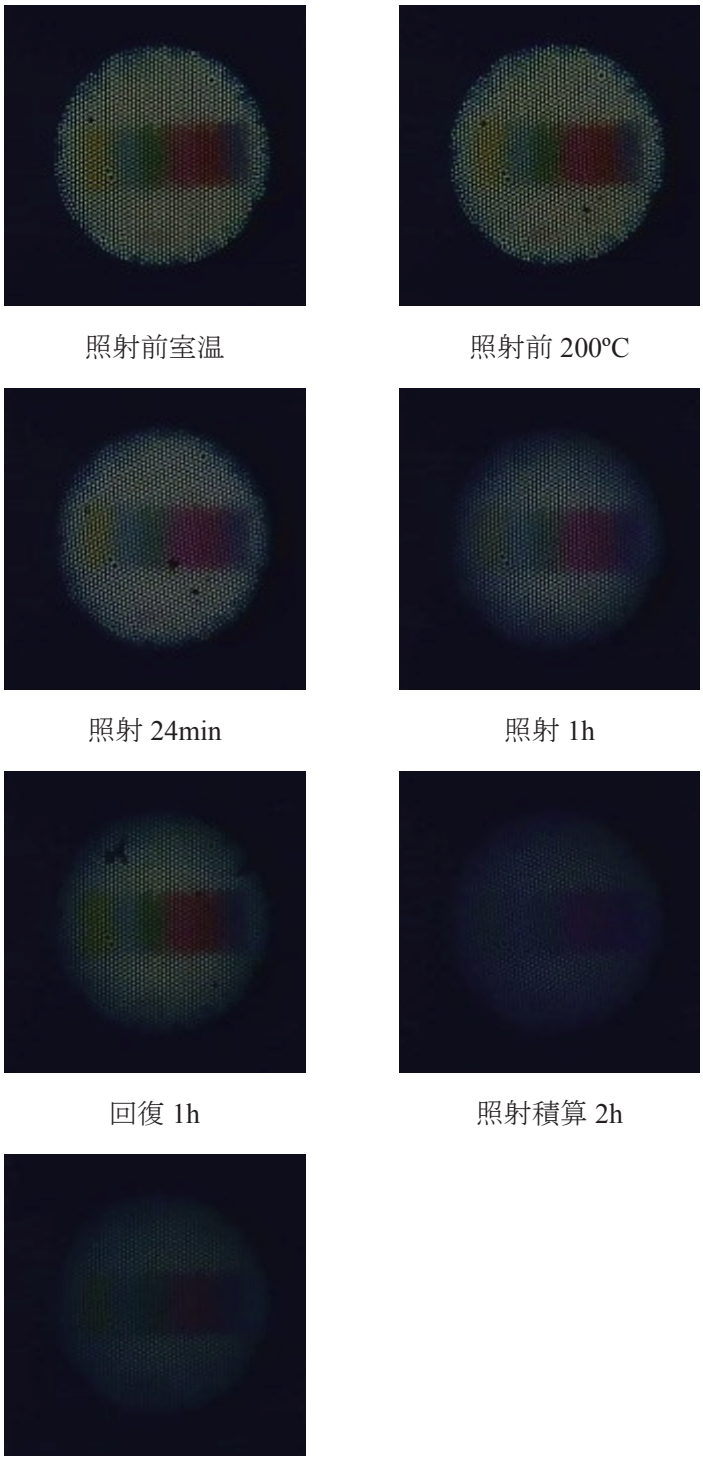
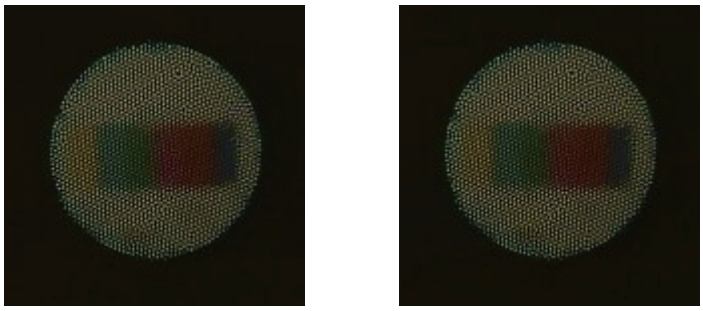
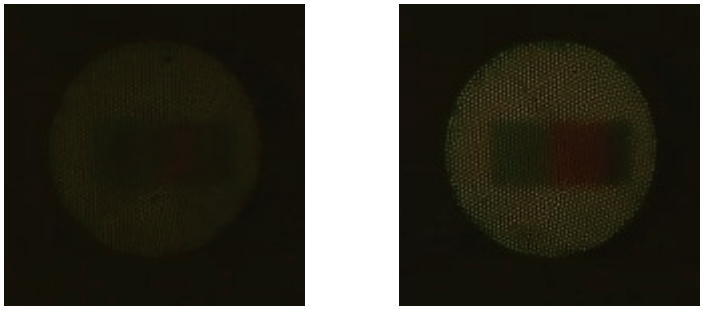


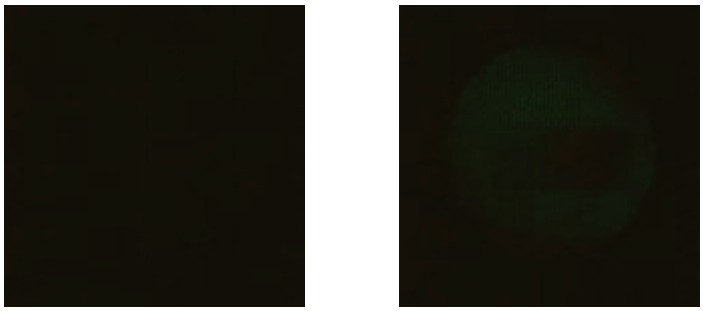
図 56　5kGy/h、200ºC 条件下での改良型イメージファイバのカラーチャート観察画像



照射前室温　　照射前 200ºC

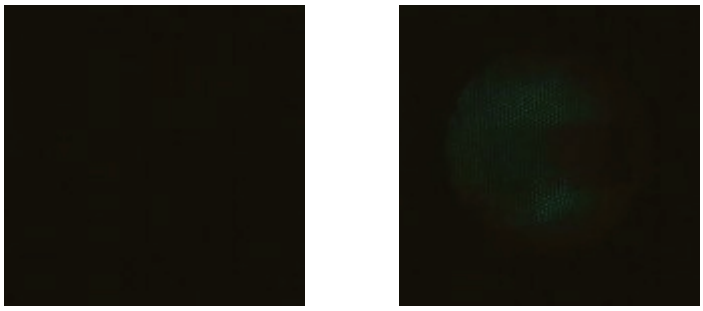


照射 1h　　回復確認 1h



照射積算 20h　　回復確認 1h

照度変更



照射積算 40h　　回復確認 1h

図 57　積算 1×10^6Gy 照射時の現用型イメージファイバのカラーチャート観察画像(1/2)

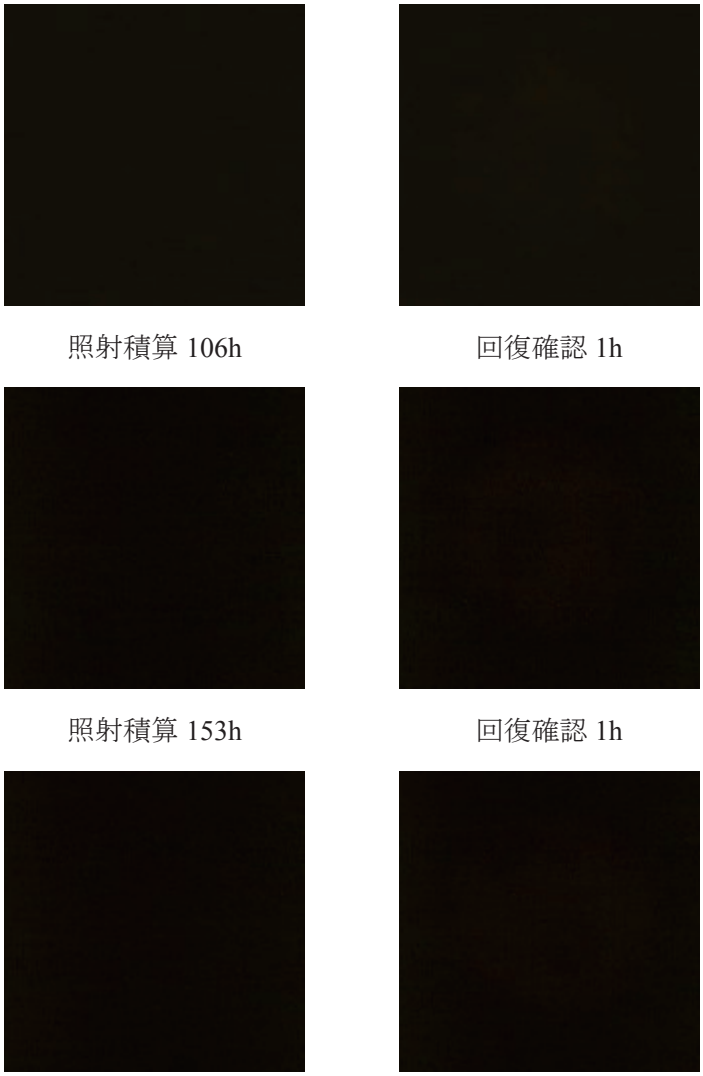
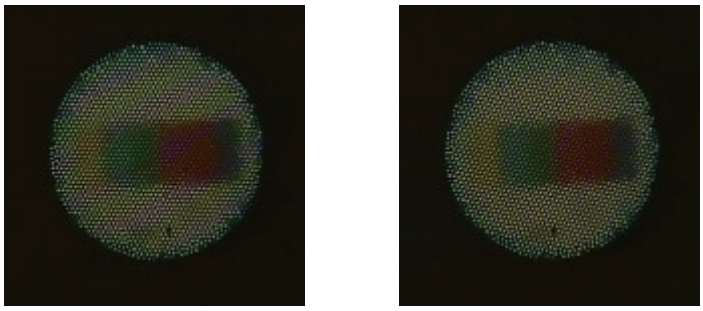
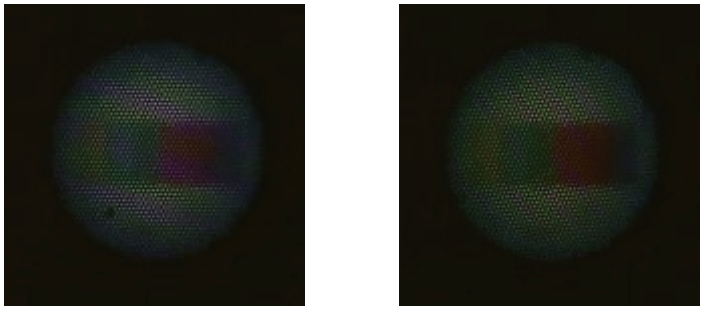


図 57　積算 1×10^{6}Gy 照射時の現用型イメージファイバのカラーチャート観察画像(2/2)



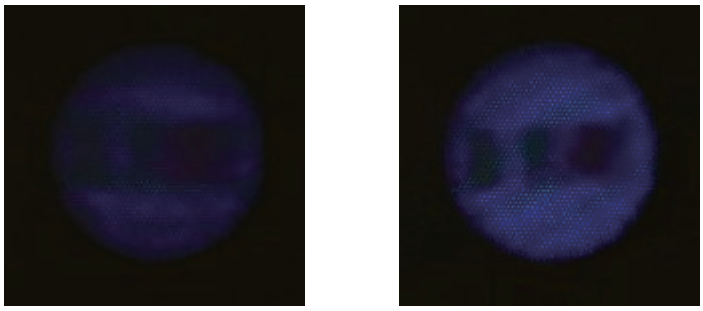
照射前室温　　照射前 200ºC



照射 1h　　回復確認 1h

照射積算 20h　　回復確認 1h

照度変更



照射積算 40h　　回復確認 1h

図 58　積算 1×10^{6}Gy 照射時の改良型イメージファイバのカラーチャート観察画像(1/2)

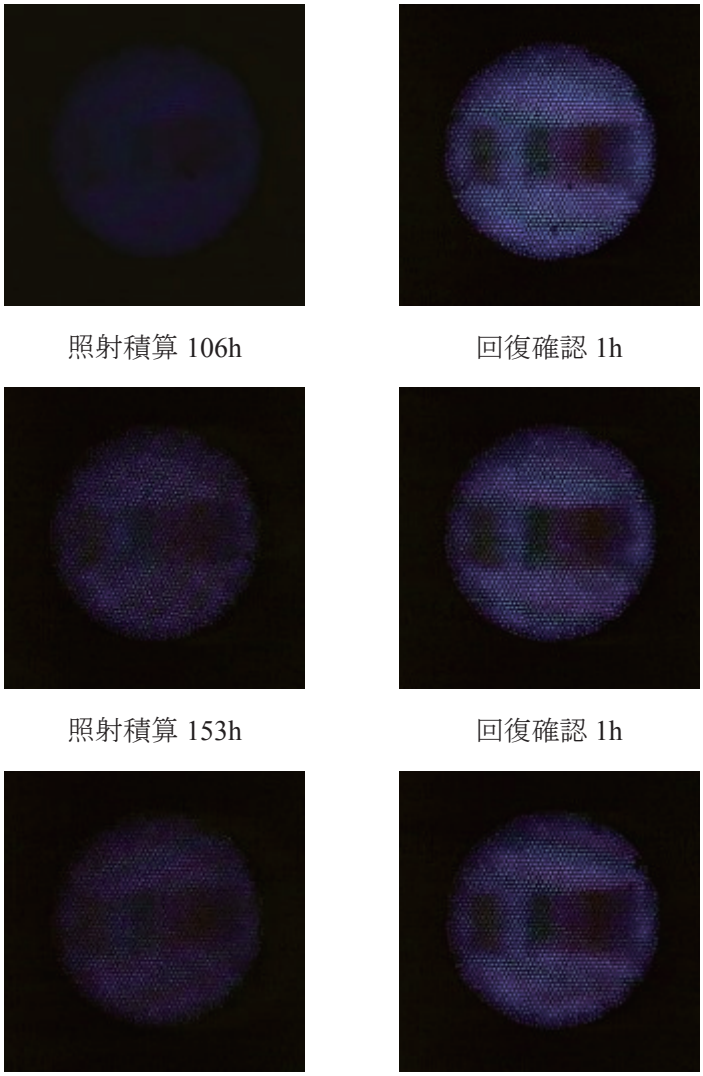


図 58　積算 1×10^{6}Gy 照射時の改良型イメージファイバのカラーチャート観察画像(2/2)

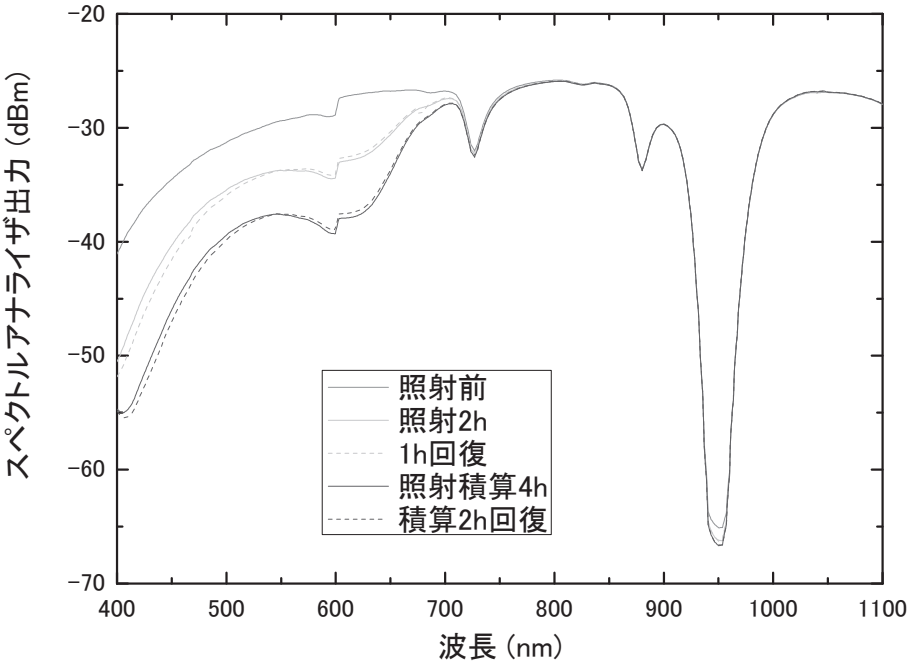


図 59　0.5kGy/h、200ºC 条件下での現用型ライトガイドファイバの波長スペクトル

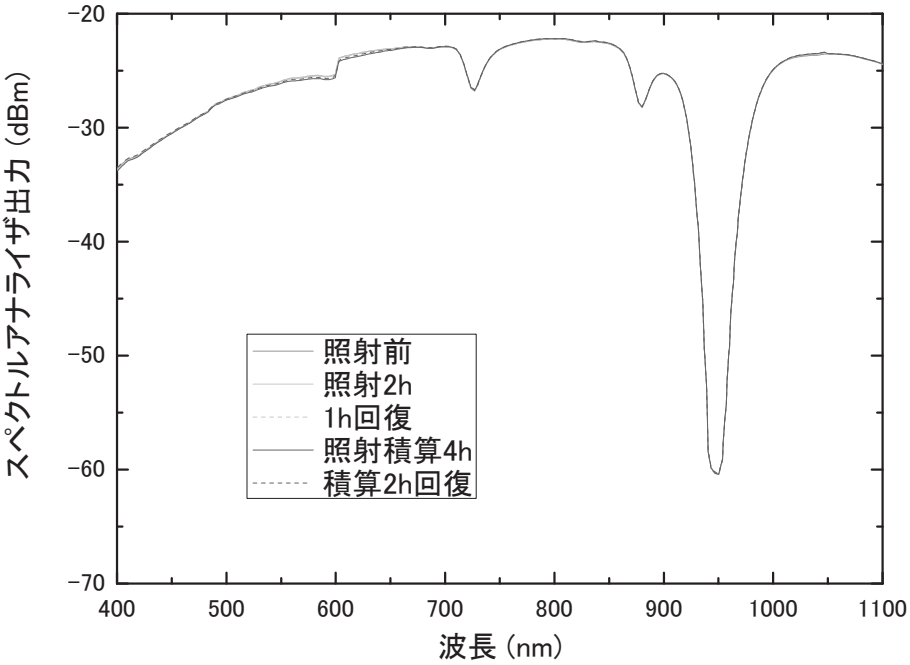


図 60　0.5kGy/h、200ºC 条件下での改良型ライトガイドファイバの波長スペクトル

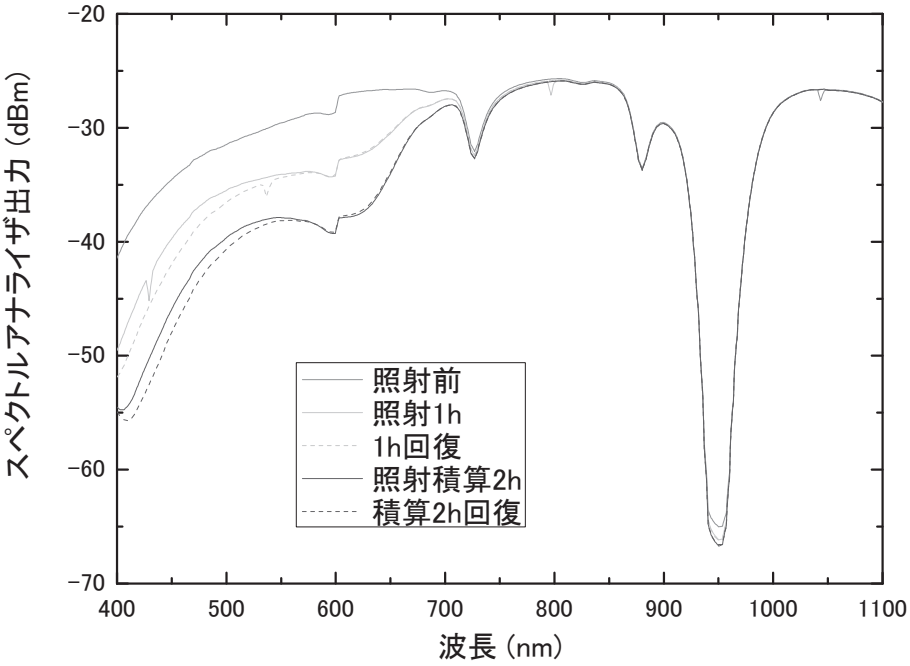


図 61　1kGy/h、200ºC 条件下での現用型ライトガイドファイバの波長スペクトル

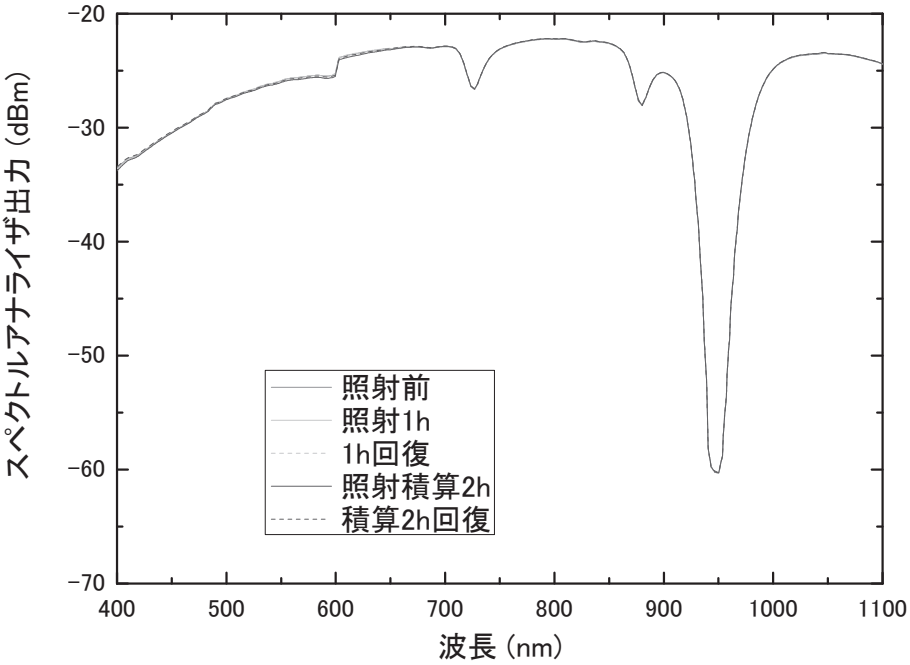


図 62　1kGy/h、200ºC 条件下での改良型ライトガイドファイバの波長スペクトル

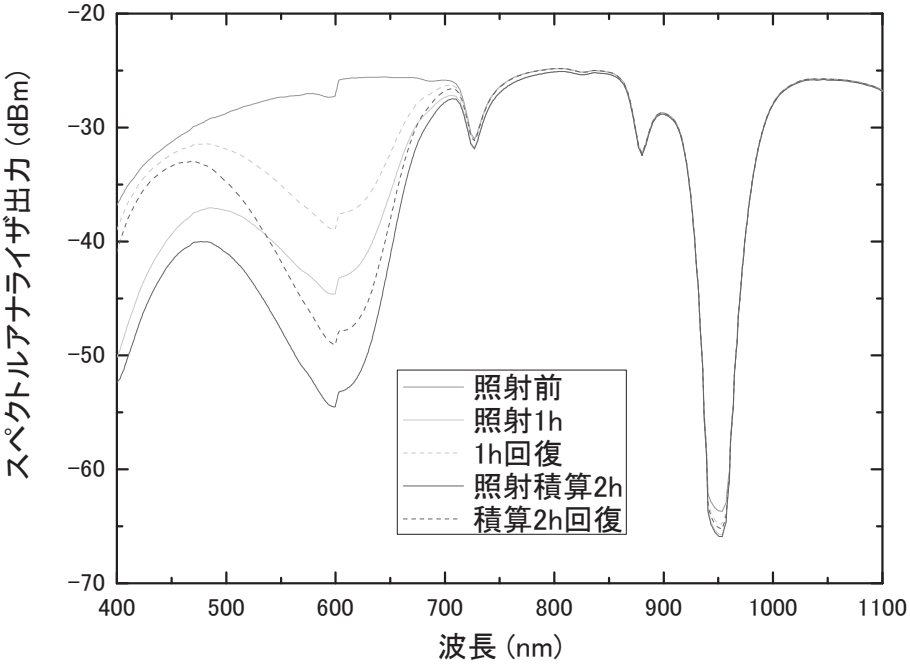


図 63　5kGy/h、30ºC 条件下での現用型ライトガイドファイバの波長スペクトル

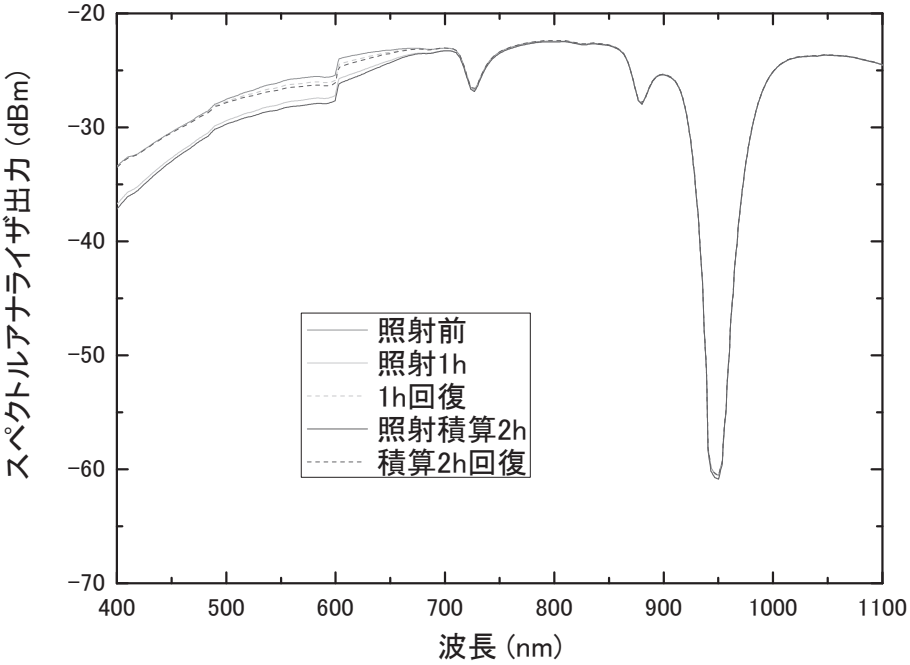


図 64　5kGy/h、30ºC 条件下での改良型ライトガイドファイバの波長スペクトル

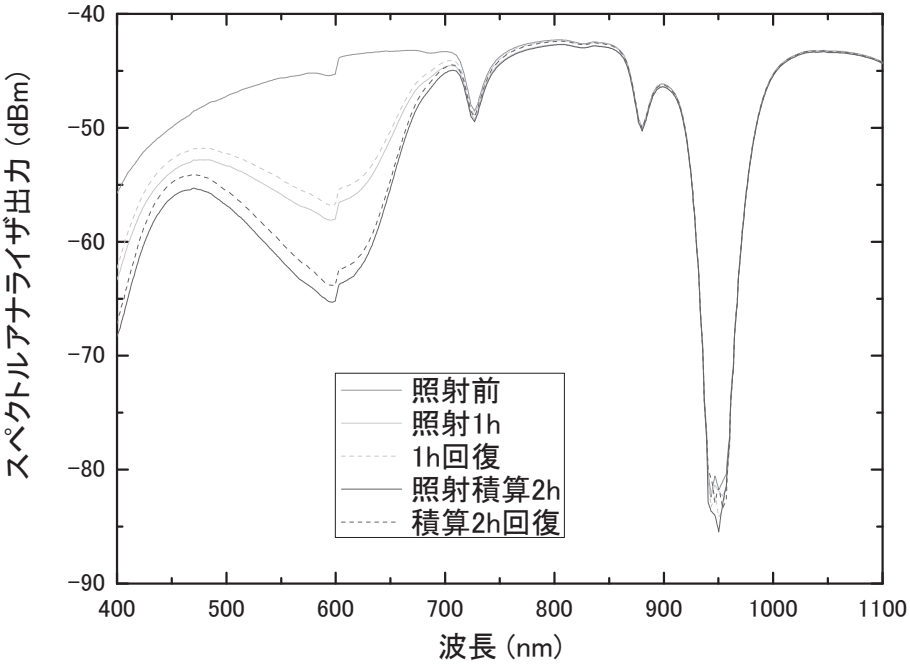


図 65　5kGy/h、120ºC 条件下での現用型ライトガイドファイバの波長スペクトル

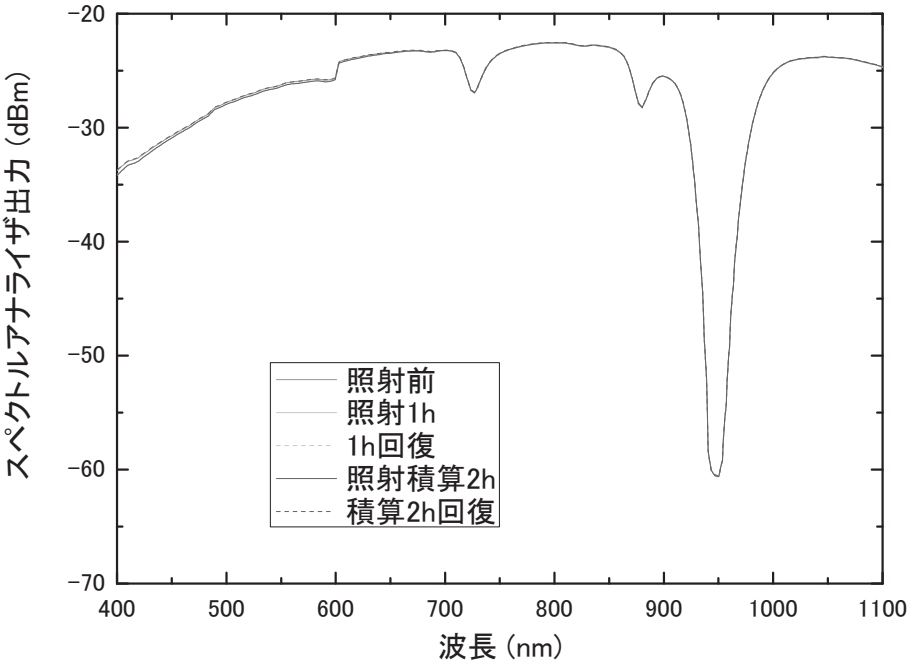


図 66　5kGy/h、120ºC 条件下での改良型ライトガイドファイバの波長スペクトル

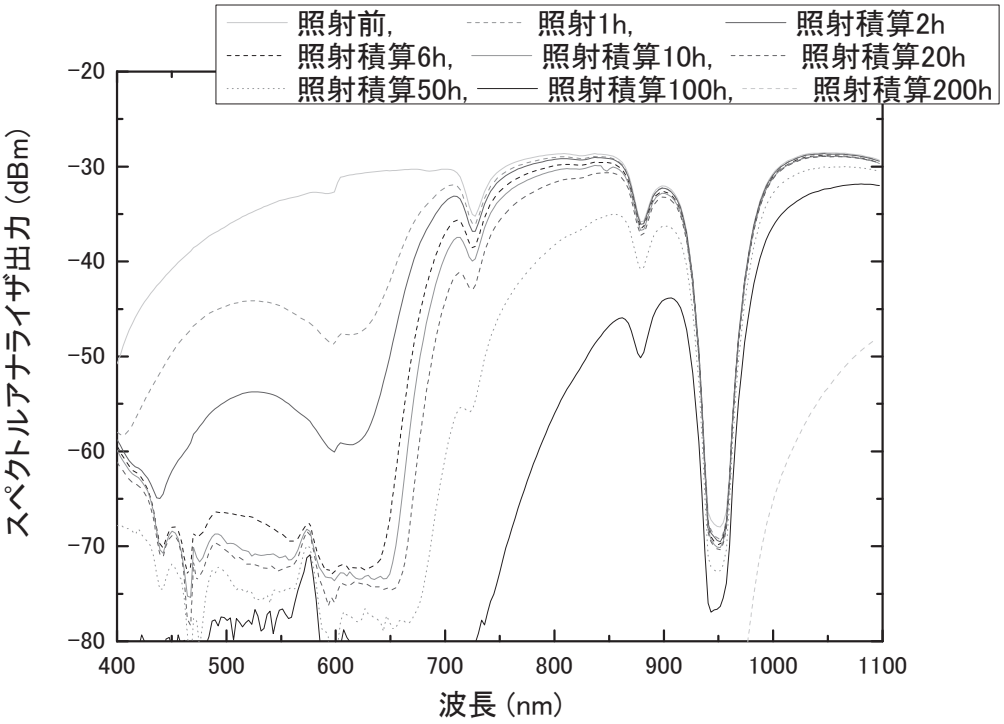


図 67　積算 1×10^{6}Gy 照射時の現用型ライトガイドファイバの波長スペクトル

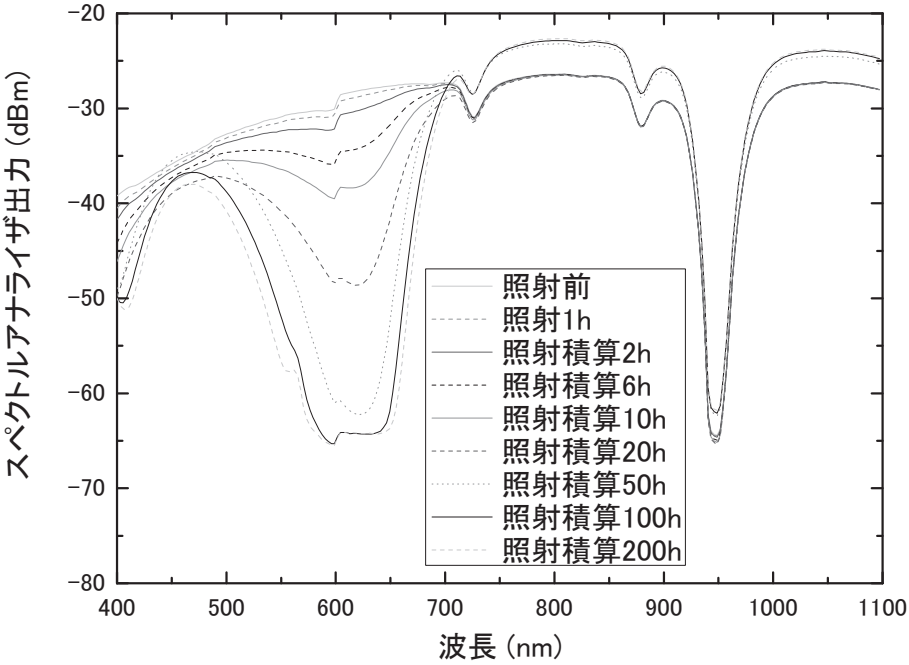


図 68　積算 1×10^{6}Gy 照射時の改良型ライトガイドファイバの波長スペクトル

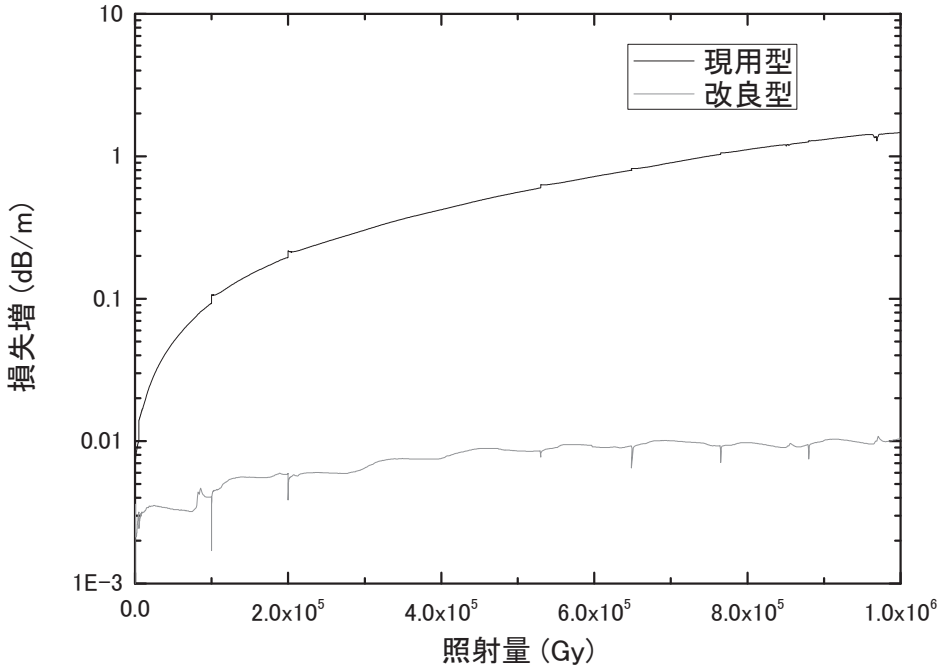


図 69　マルチメータによる 850nm 単一波長の測定結果（ライトガイドファイバ）

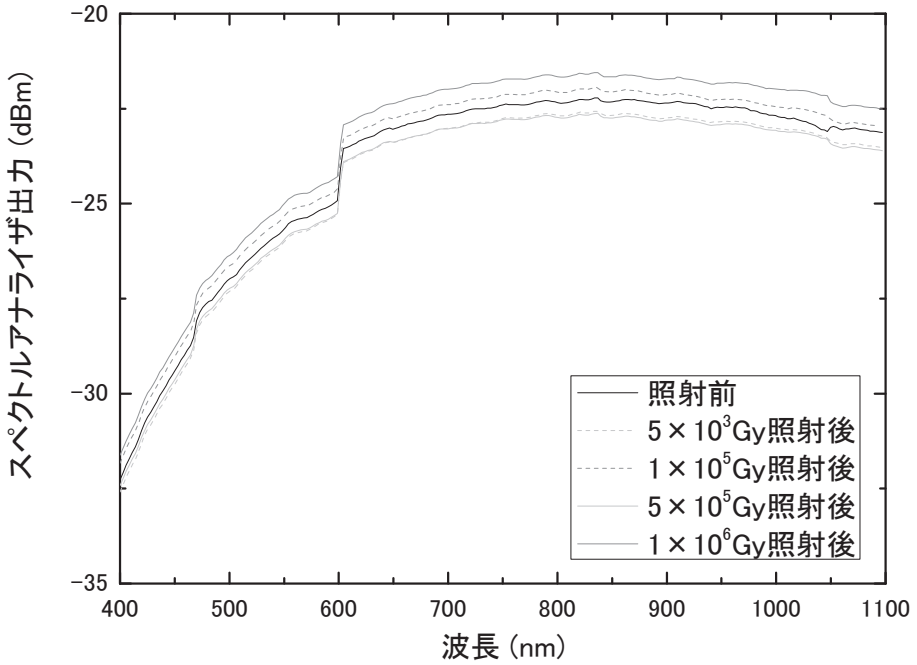


図 70　積算 1×10^6Gy 照射時の対物レンズ用硝材の波長スペクトル (水素処理なし No.1)

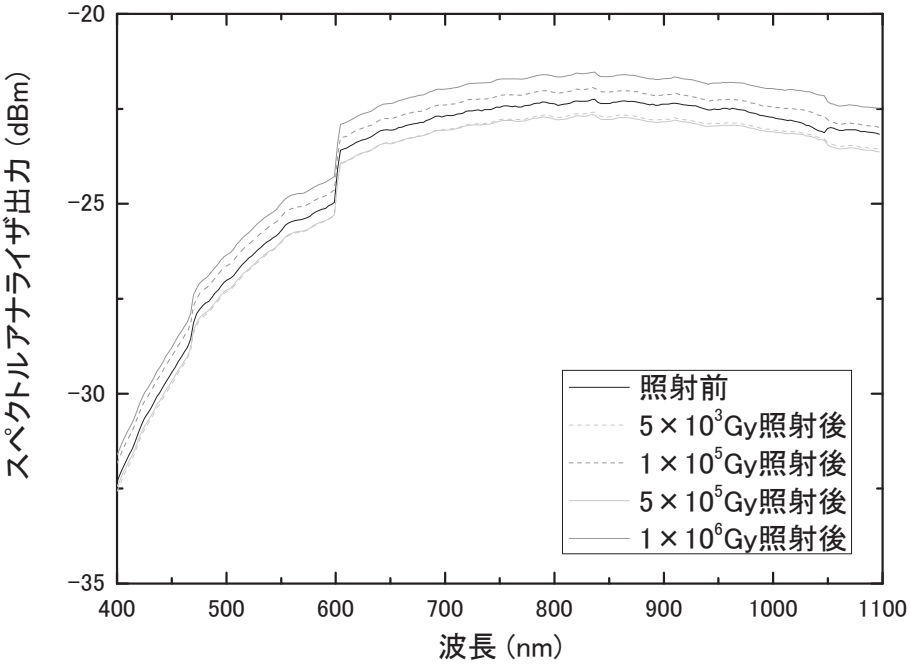


図 71　積算 1×10^{6}Gy 照射時の対物レンズ用硝材の波長スペクトル (水素処理あり No.1)

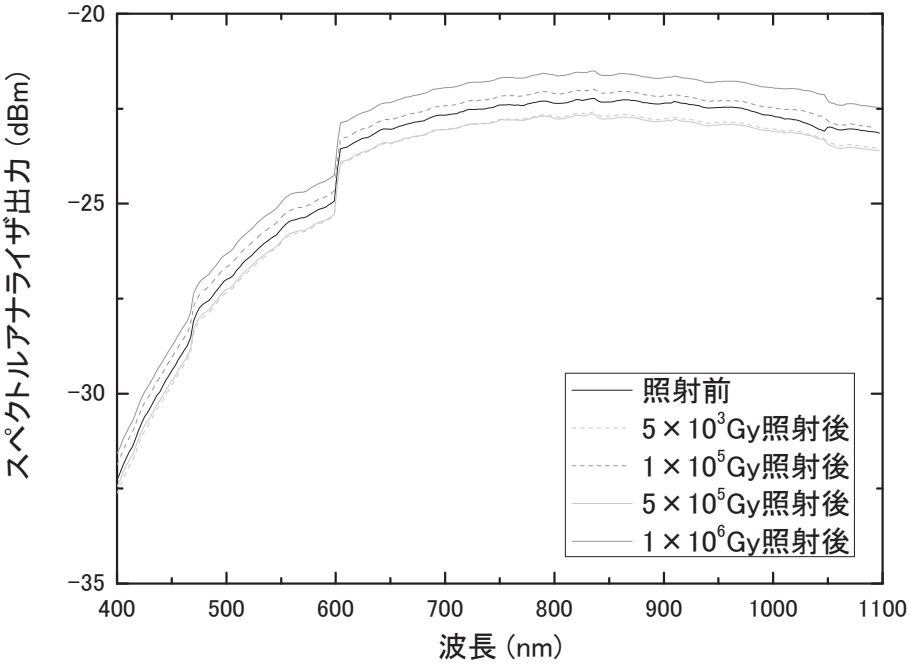


図 72　積算 1×10^{6}Gy 照射時の対物レンズ用硝材の波長スペクトル (水素処理なし No.2)

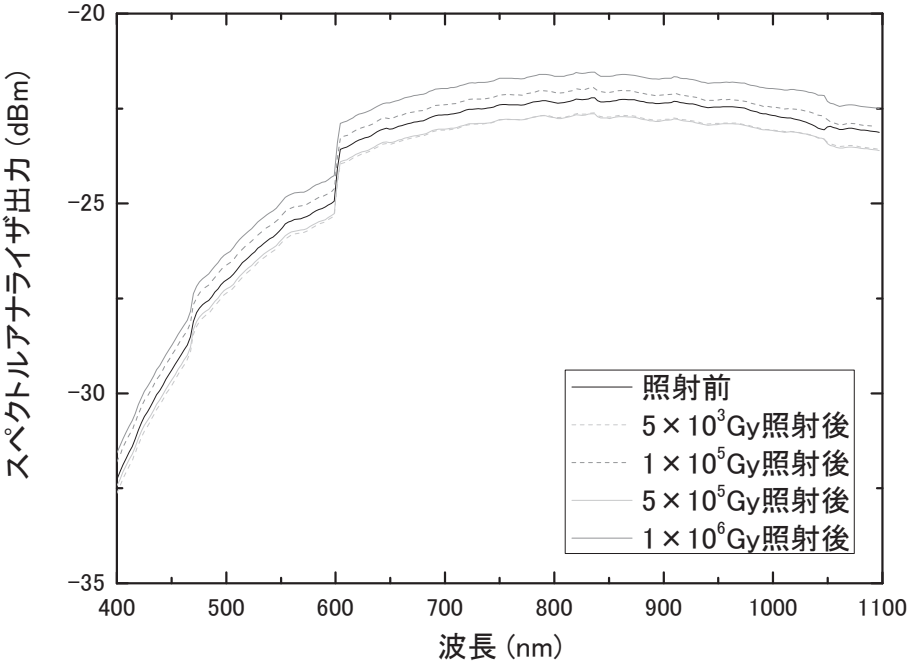


図 73　積算 1×10^6Gy 照射時の対物レンズ用硝材の波長スペクトル (水素処理あり No.2)

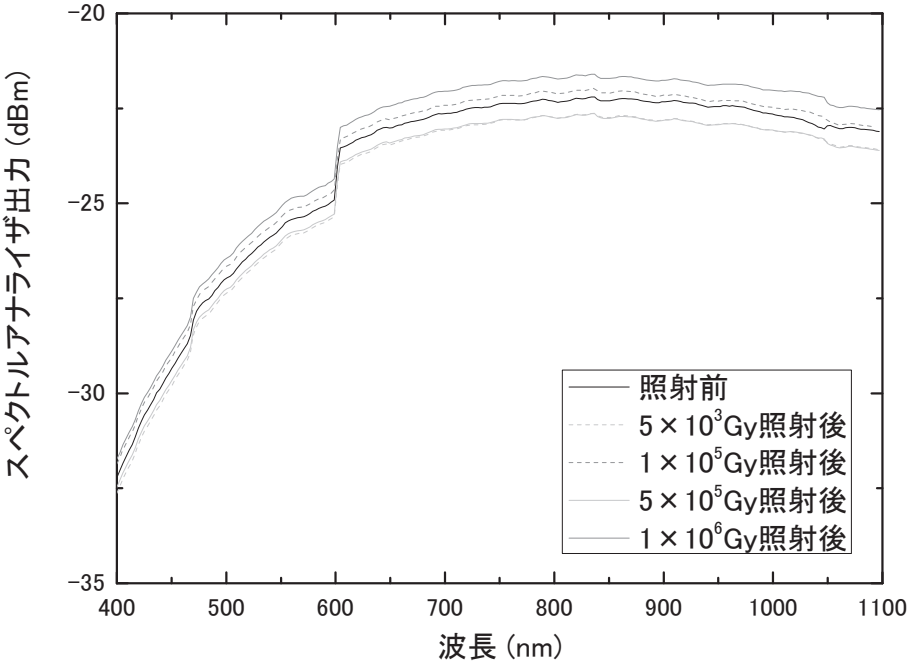


図 74　積算 1×10^6Gy 照射時の対物レンズ用硝材の波長スペクトル (水素処理なし No.3)

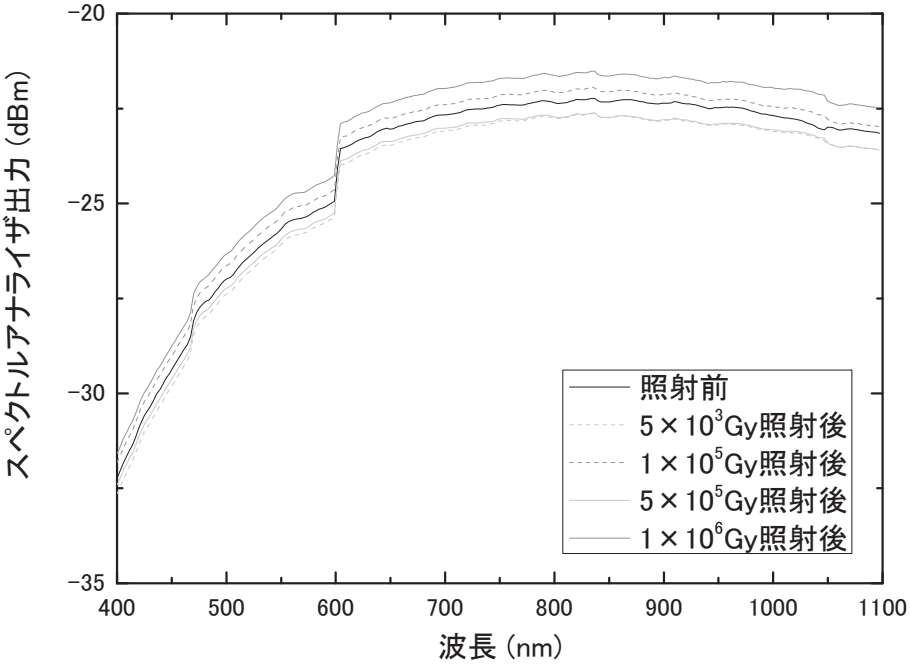


図 75　積算 1×10^{6}Gy 照射時の対物レンズ用硝材の波長スペクトル (水素処理あり No.3)

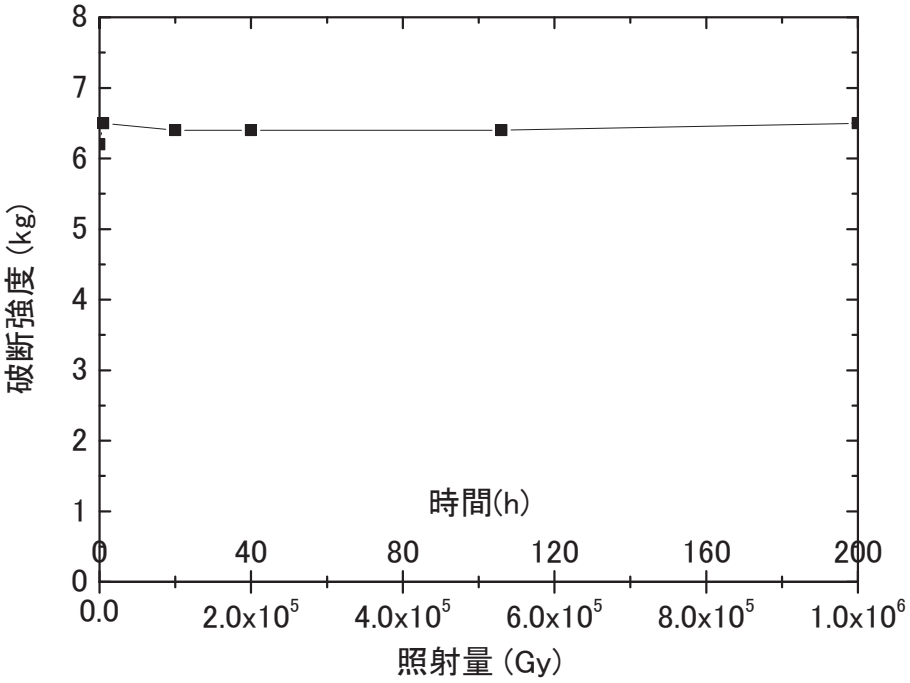


図 76　強度評価用ファイバの破断試験結果

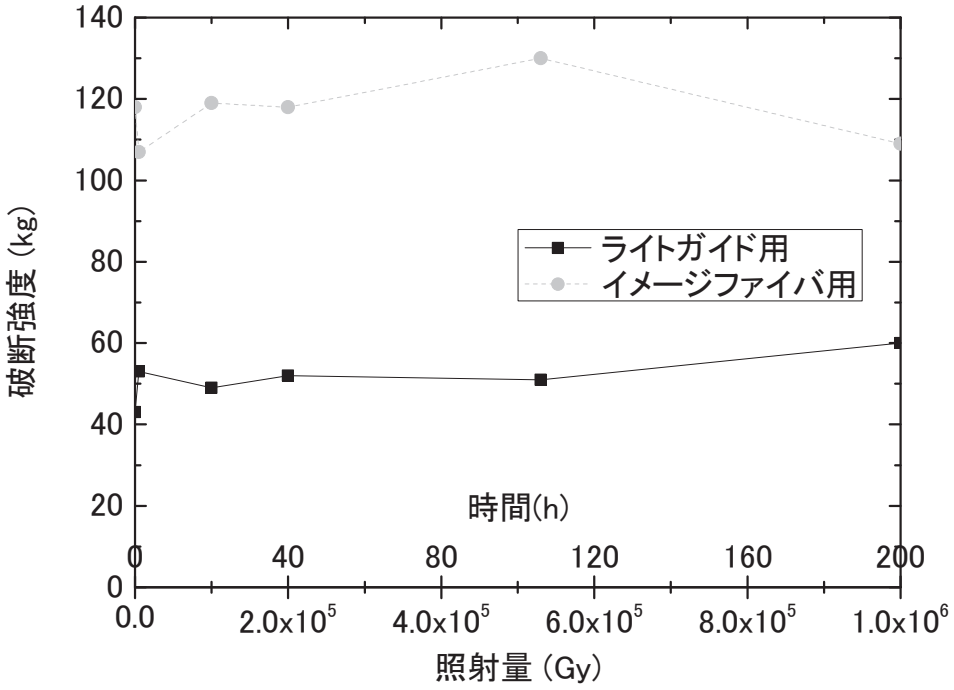


図 77　接着試料片の破断強度

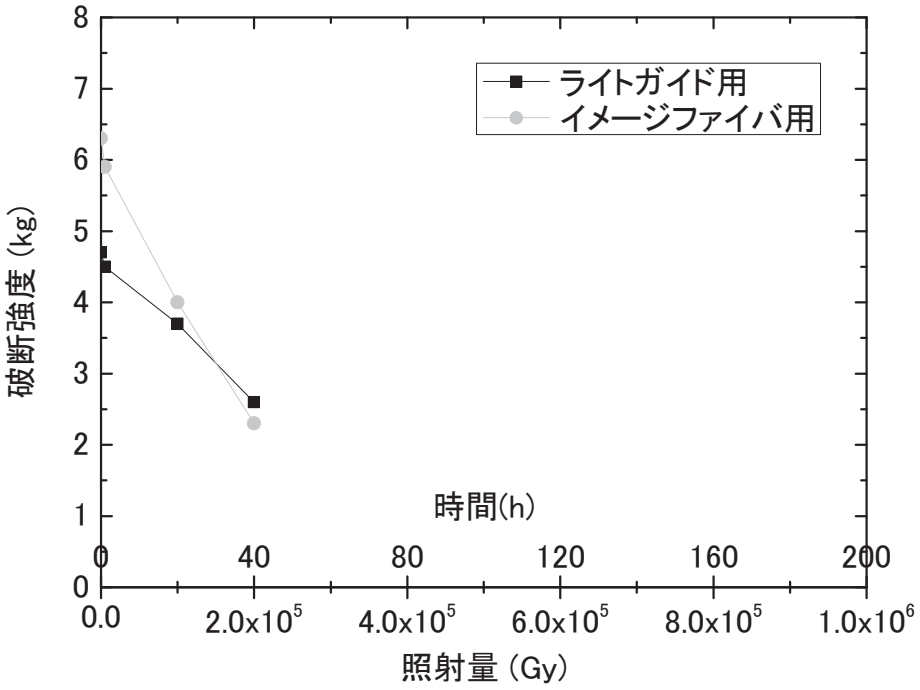


図 78　シリコンチューブの破断引張強度

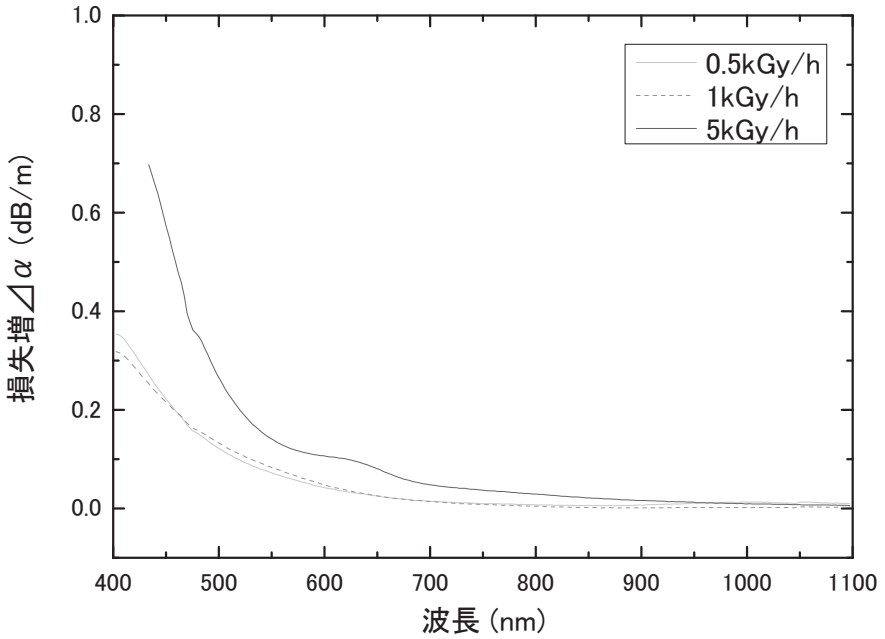


図 79　1×10^{3}Gy での現用型イメージファイバの損失増（線量率パラメータ）

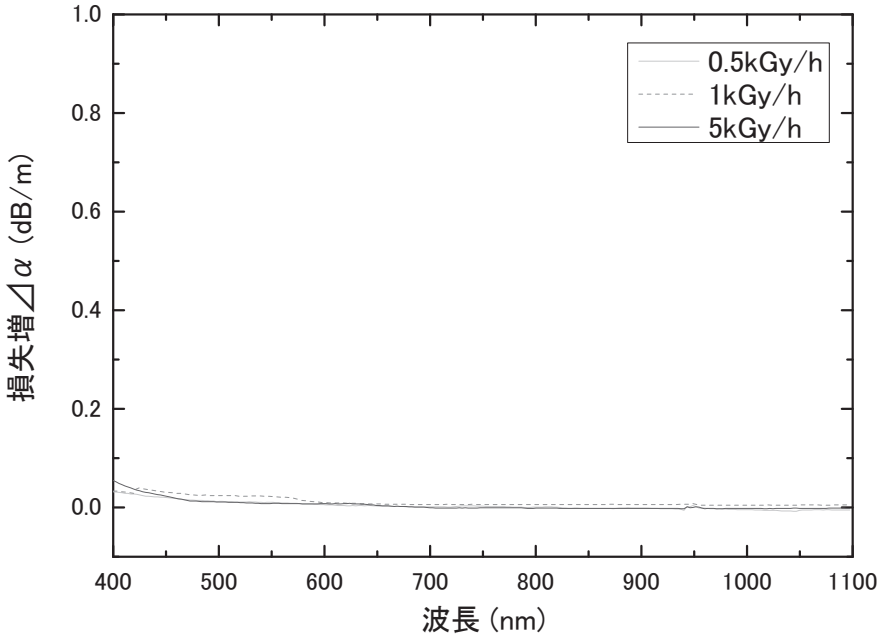


図 80　1×10^{3}Gy での改良型イメージファイバの損失増（線量率パラメータ）

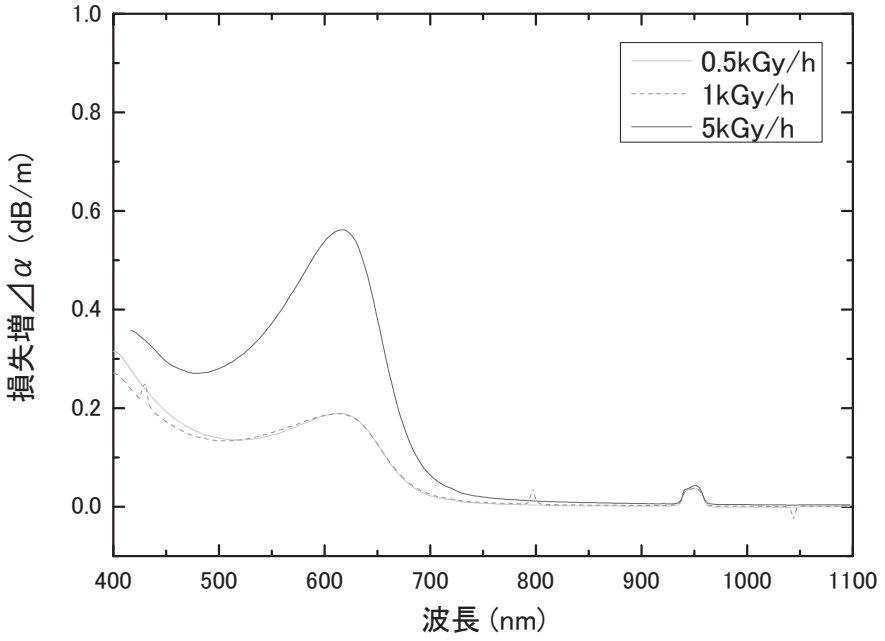


図 81　1×10^{3}Gy での現用型ライトガイドファイバの損失増（線量率パラメータ）

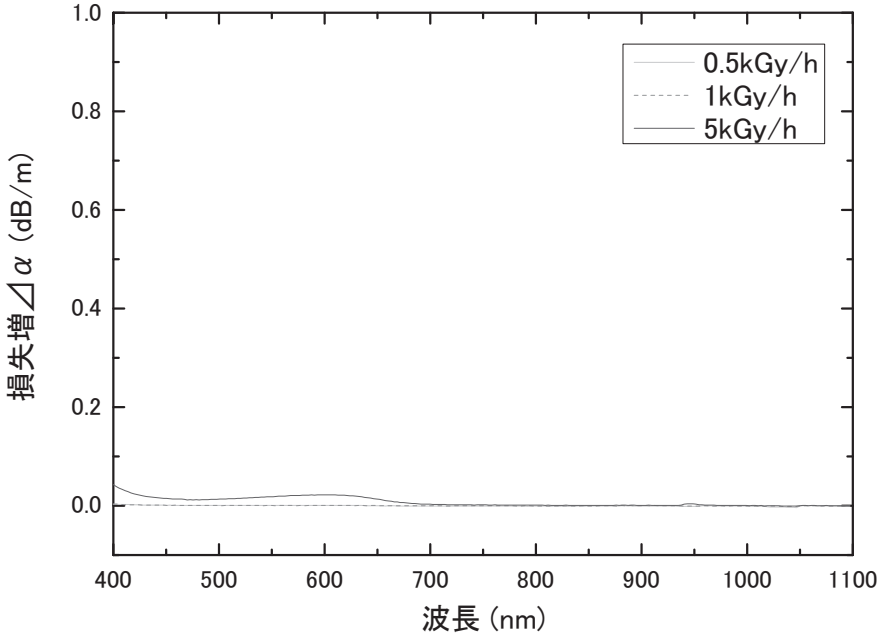


図 82　1×10^{3}Gy での改良型ライトガイドファイバの損失増（線量率パラメータ）

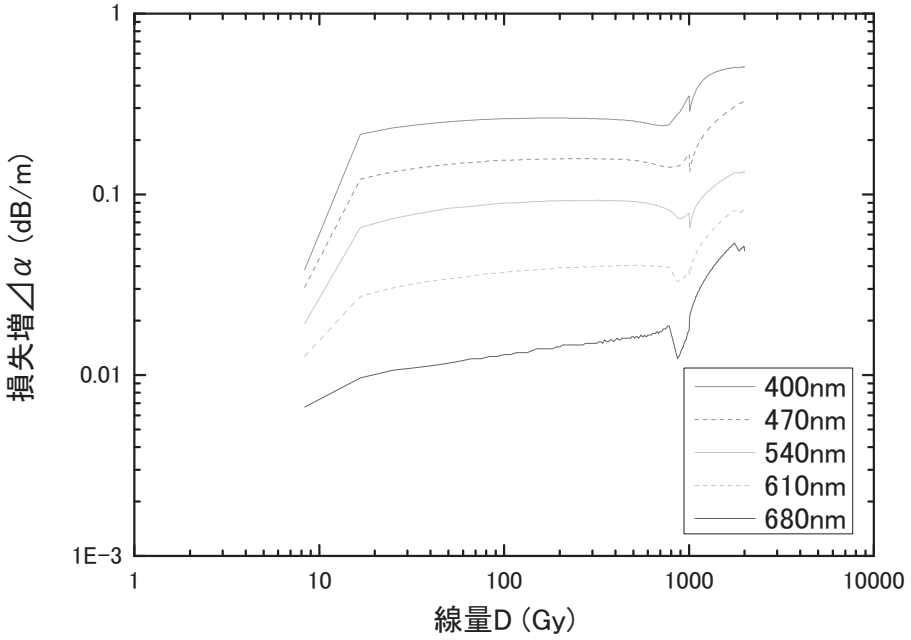


図 83　線量と損失増の関係（現用型イメージファイバ、0.5kGy/h、200ºC）

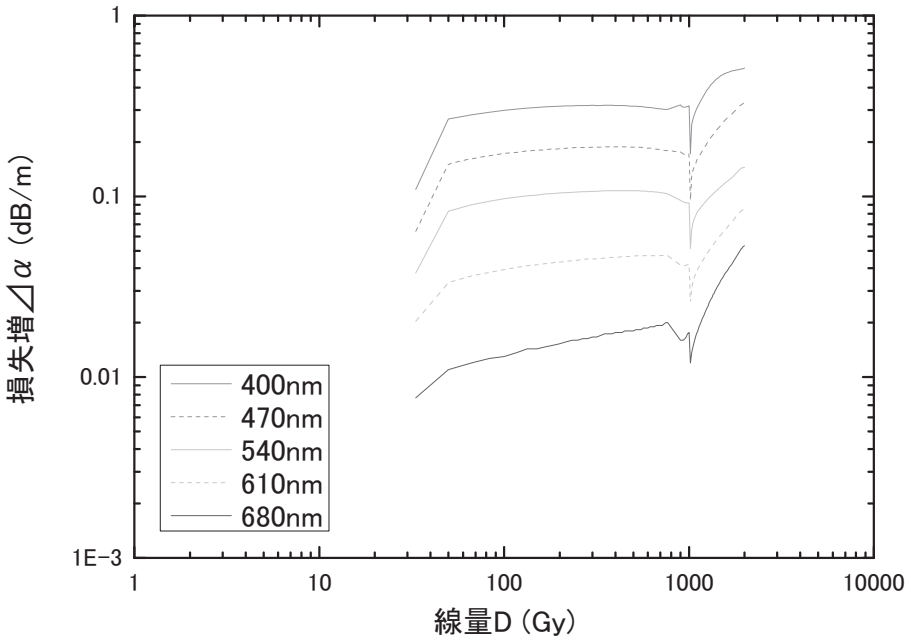


図 84　線量と損失増の関係（現用型イメージファイバ、1kGy/h、200ºC）

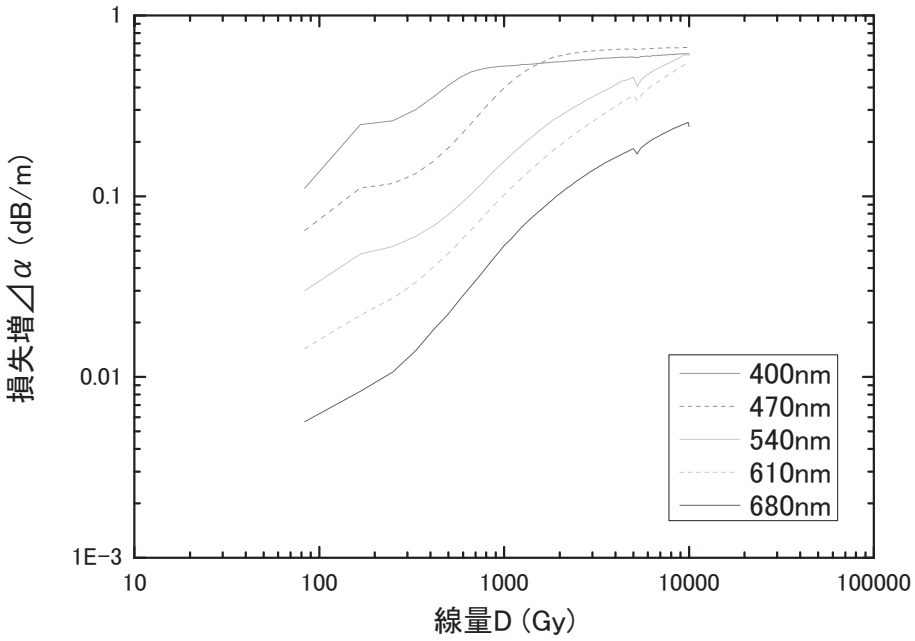


図 85　線量と損失増の関係（現用型イメージファイバ、5kGy/h、200ºC）

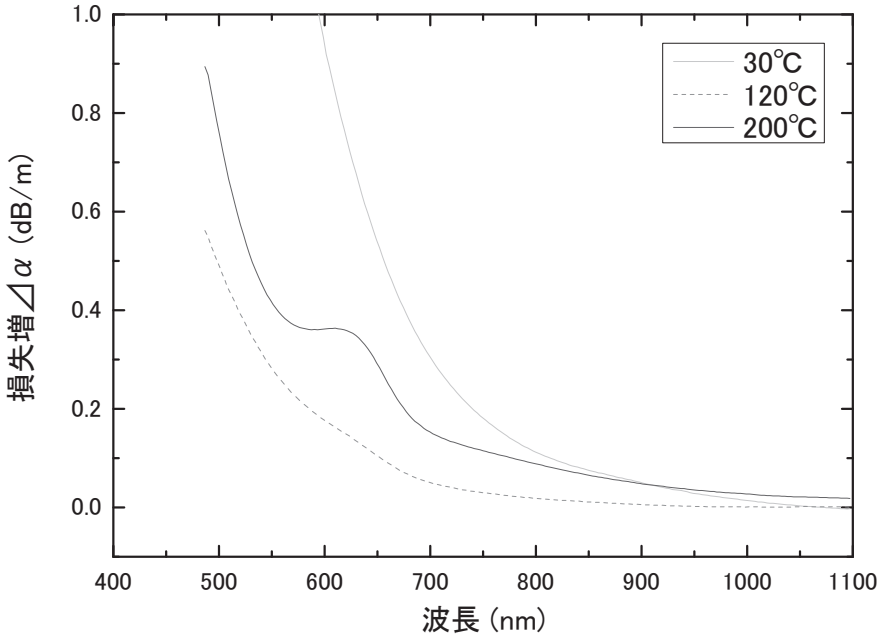


図 86　現用型イメージファイバの損失増（温度パラメータ）

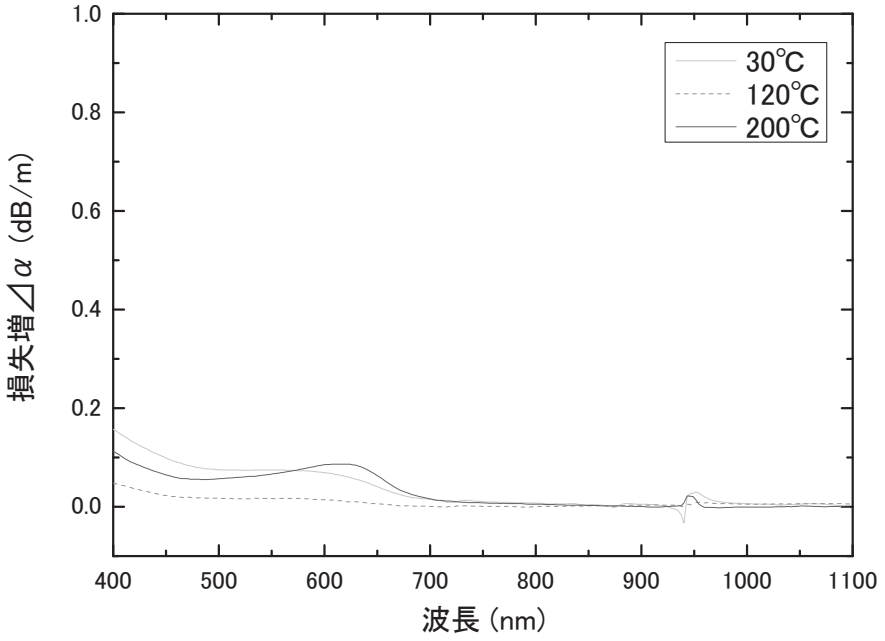


図 87　改良型イメージファイバの損失増（温度パラメータ）

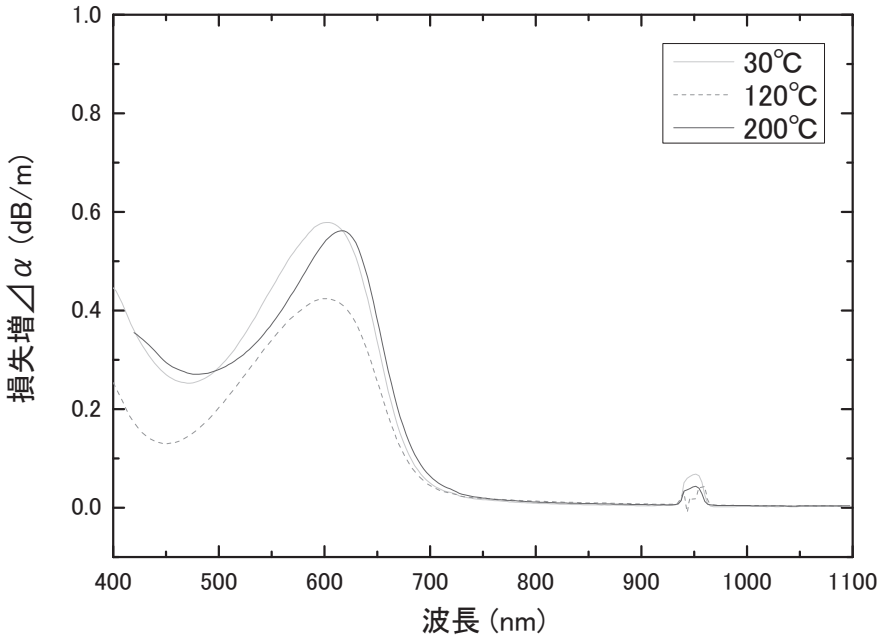


図 88　現用型ライトガイドファイバの損失増（温度パラメータ）

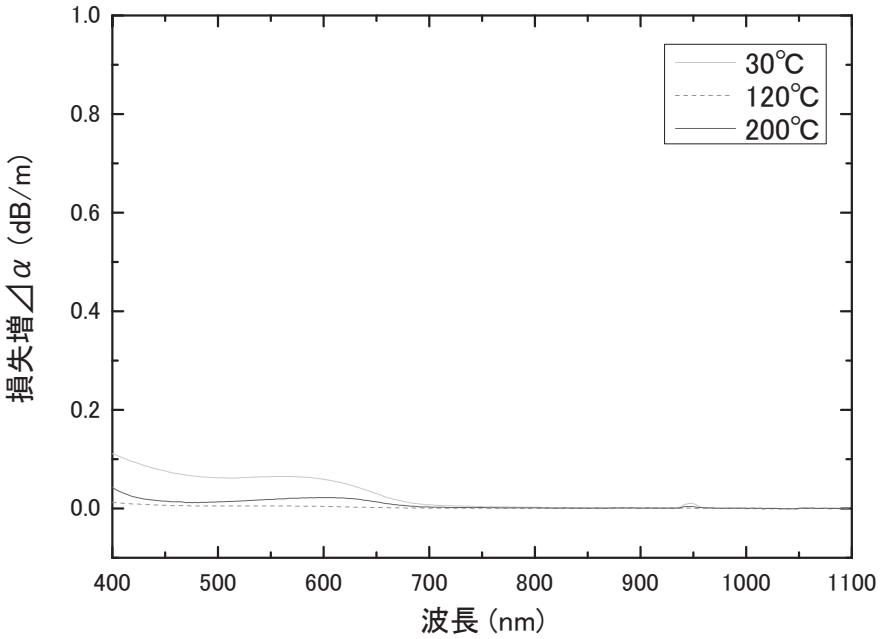


図 89　改良型ライトガイドファイバの損失増（温度パラメータ）

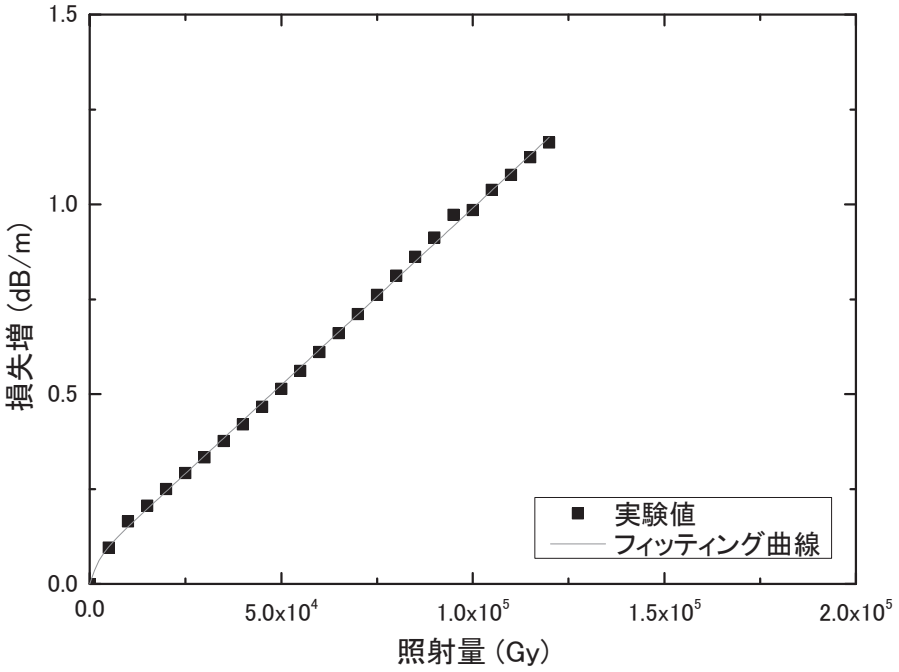


図 90　現用型イメージファイバの 2×10^5Gy までの損失増のトレンドグラフ（波長 630nm）

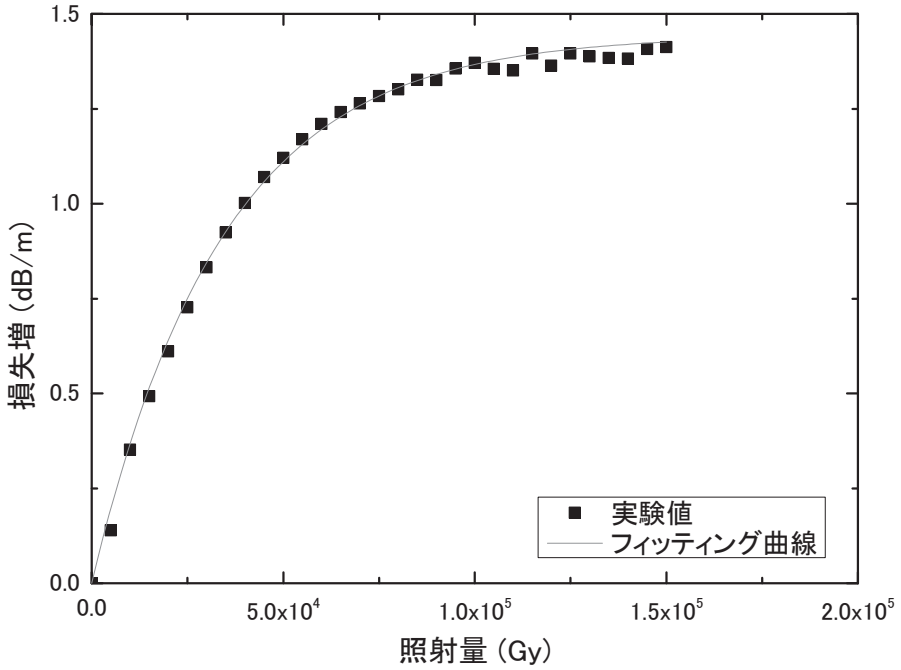


図 91　改良型イメージファイバの 2×10^5Gy までの損失増のトレンドグラフ（波長 630nm）

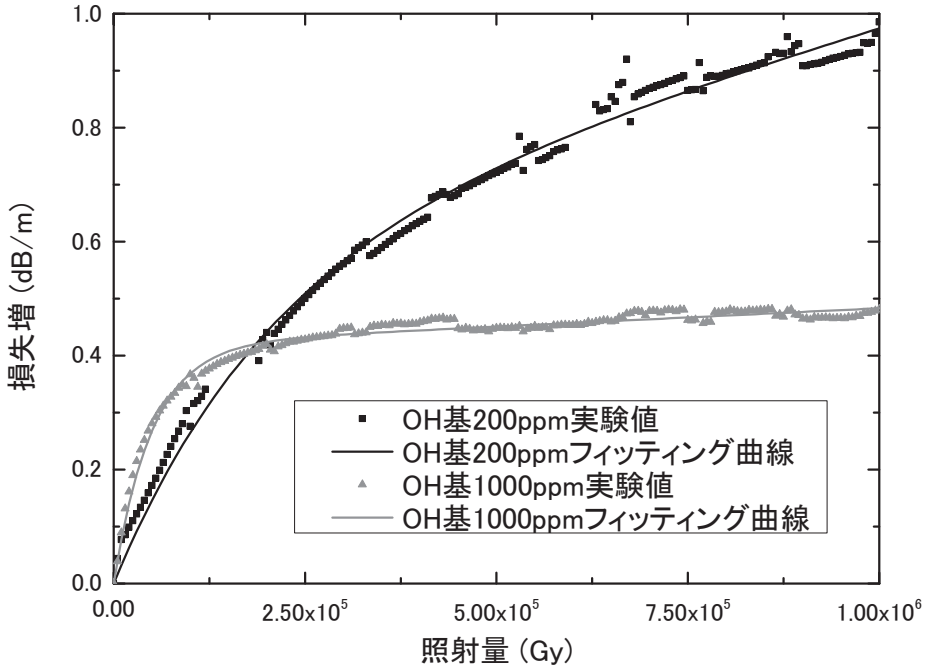


図 92　波長 680nm における損失増のトレンドグラフ

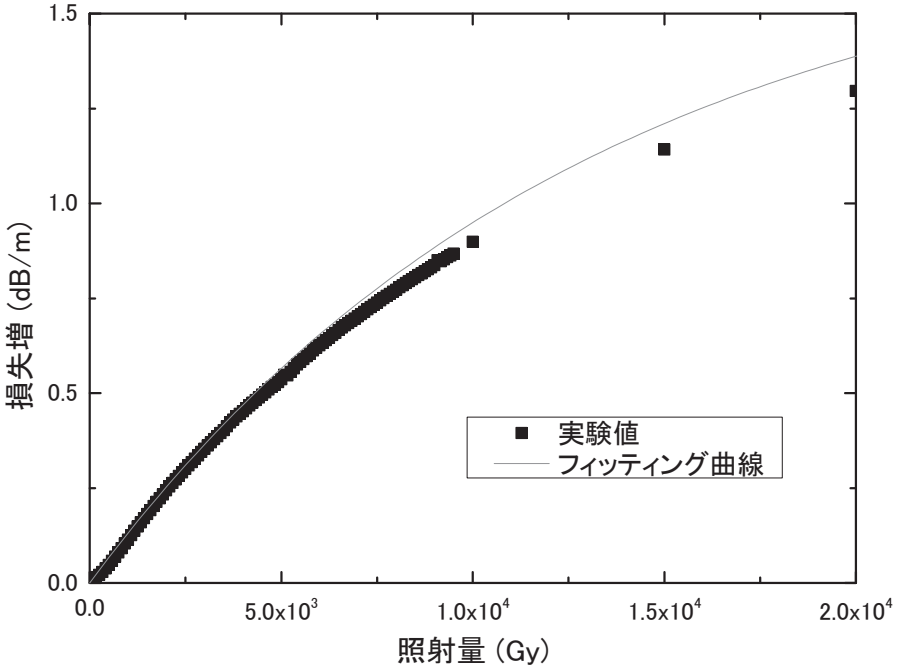


図 93　現用型ライトガイドファイバの 2×10^4Gy までの損失増のトレンドグラフ

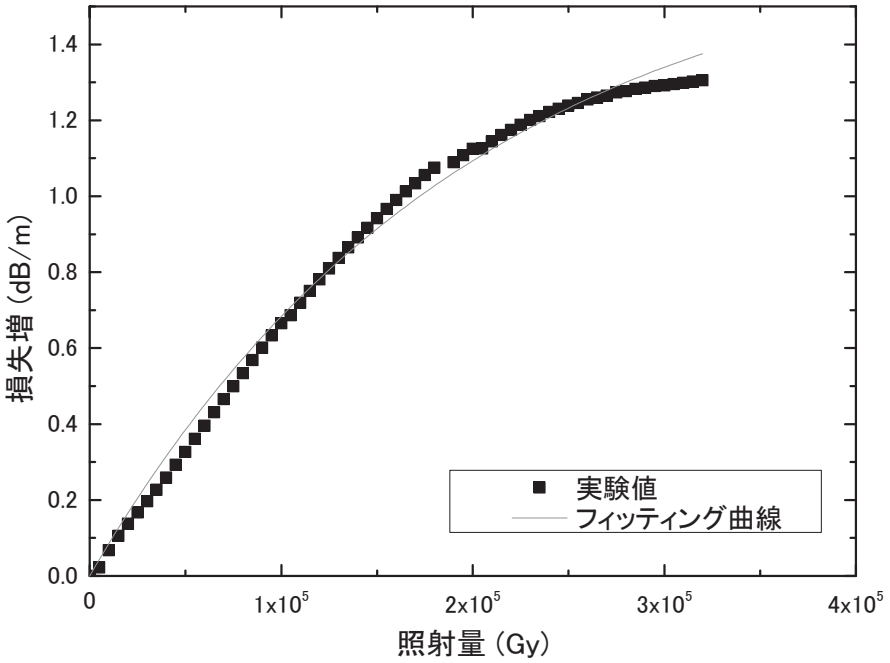


図 94　改良型ライトガイドファイバの 3×10^5Gy までの損失増のトレンドグラフ

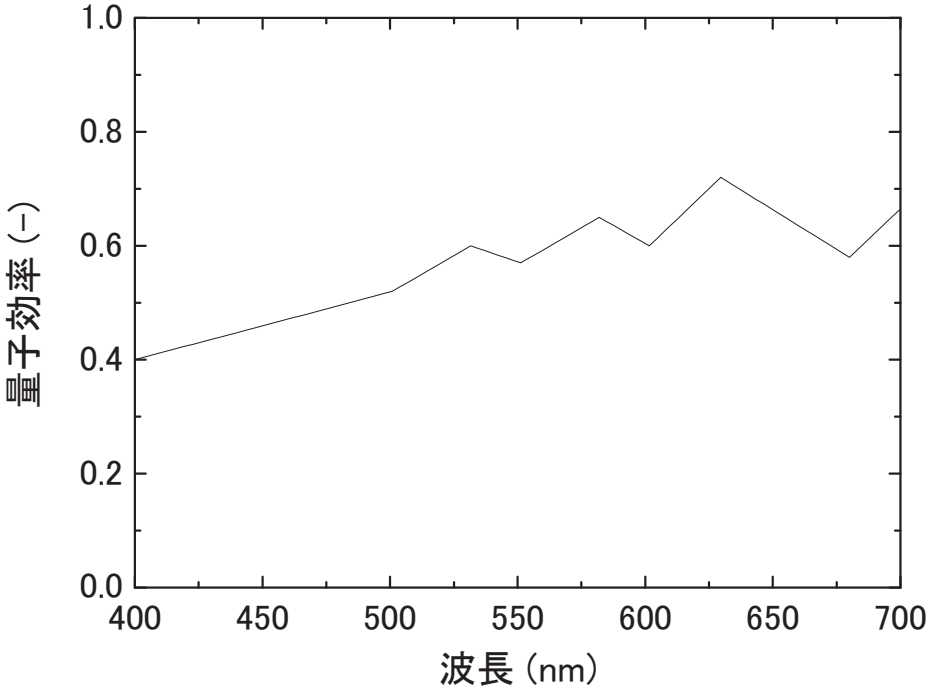


図 95　CCD カメラの量子効率

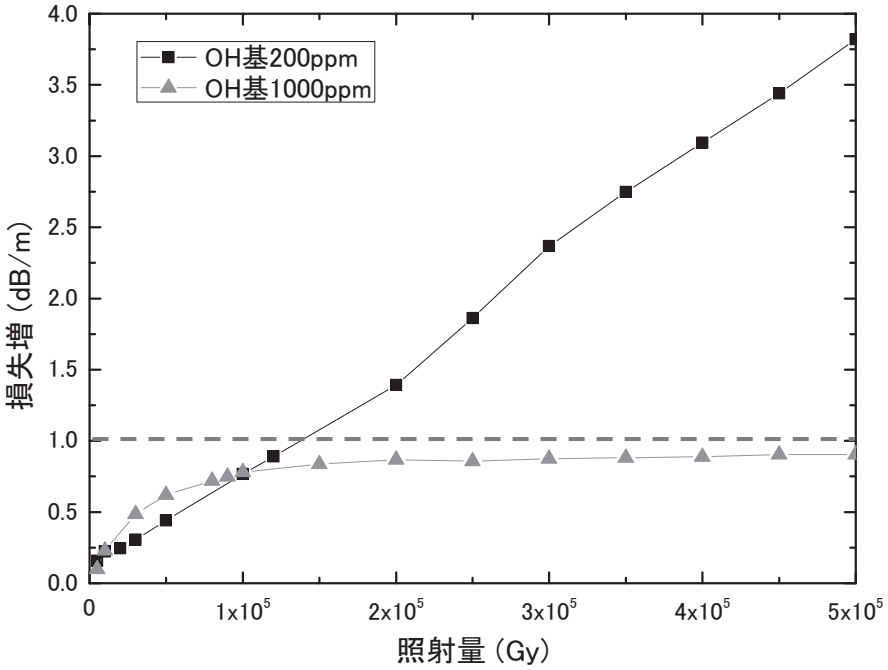


図 96　CCD で検出される電荷量の損失増（イメージファイバ）

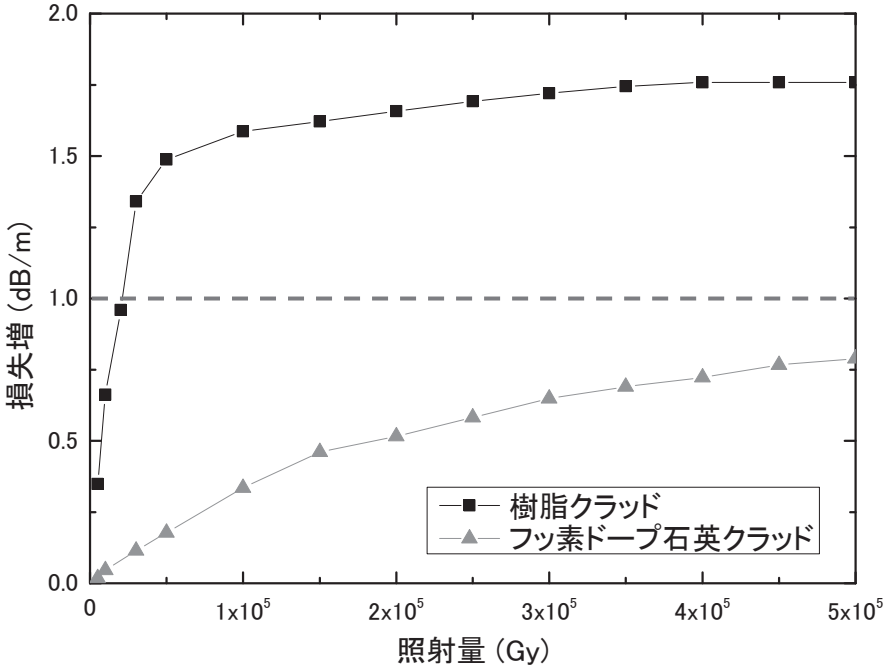


図 97　CCD で検出される電荷量の損失増（ライトガイドファイバ）

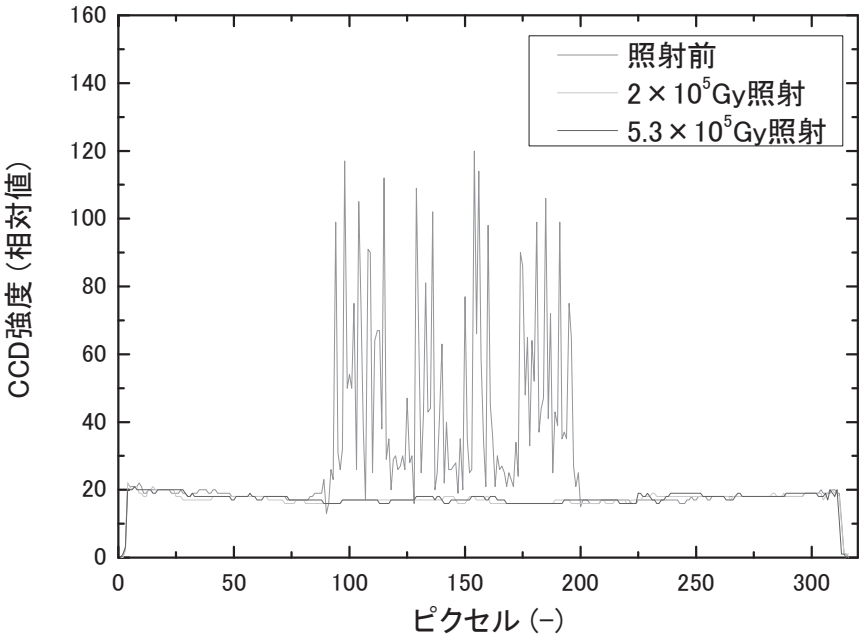


図 98　現用型イメージファイバによる白黒チャートの強度変化

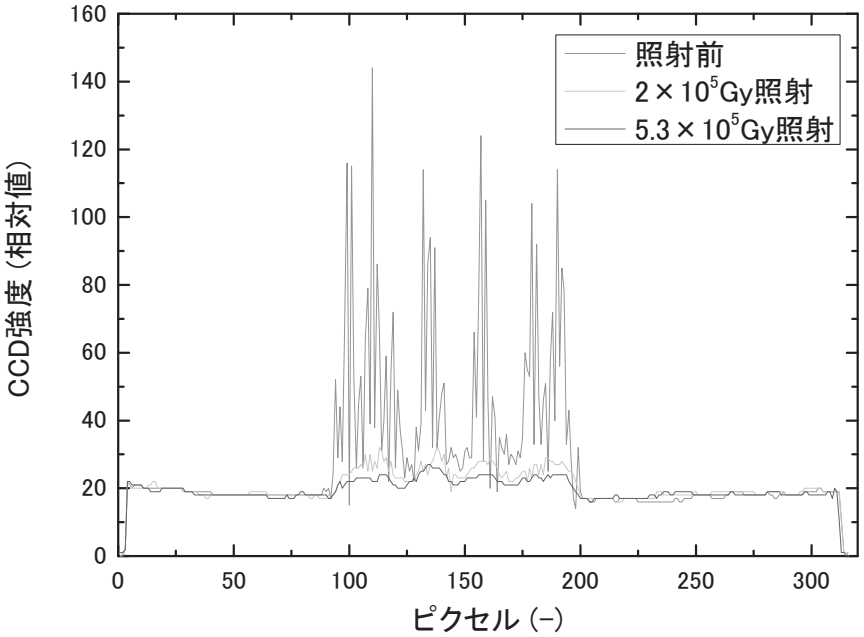


図 99　改良型イメージファイバによる白黒チャートの強度変化

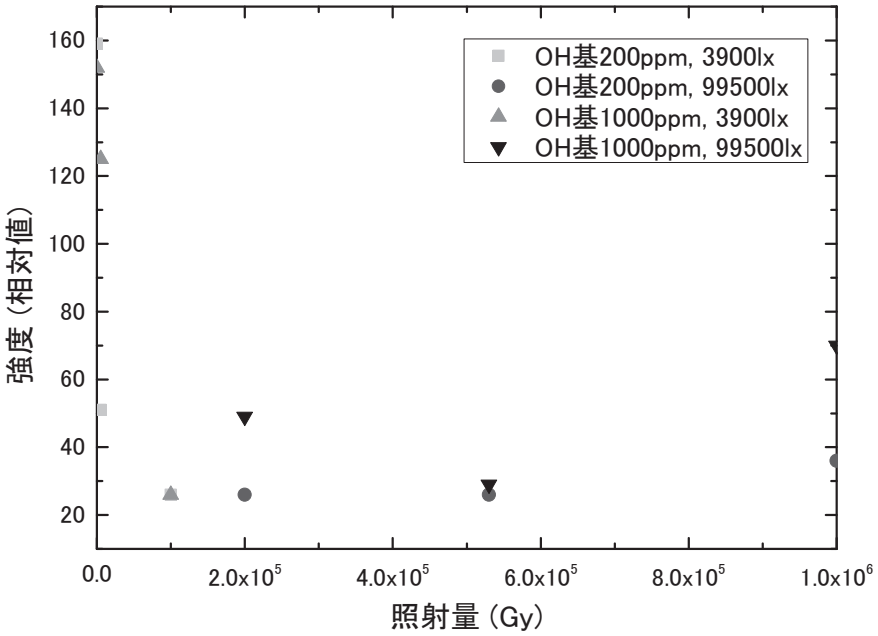


図 100　各照射量における CCD で検出した最大強度

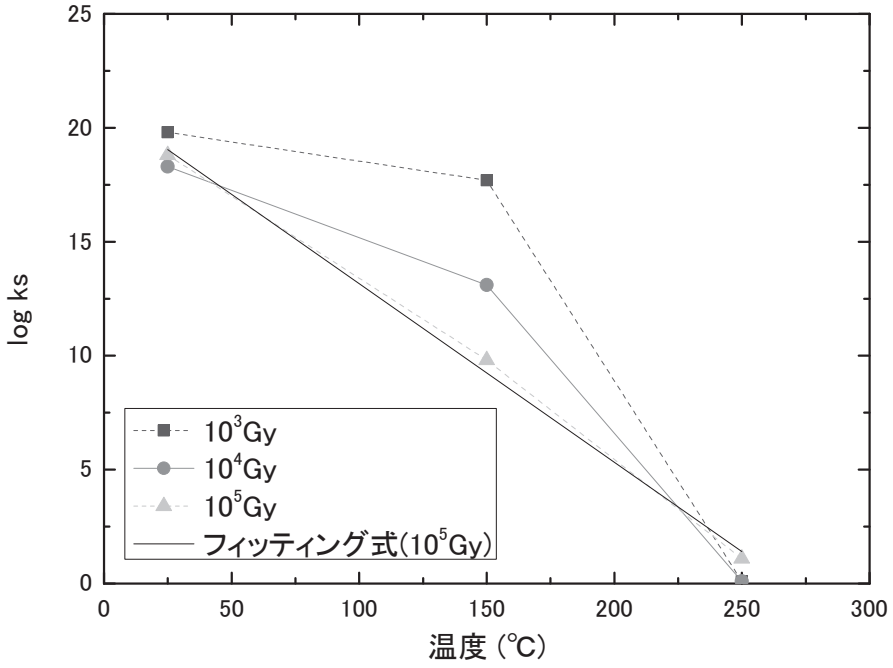


図 101　log ks と照射温度・線量率

国際単位系（SI）

表１．SI 基本単位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表２．基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m^2
体積	立法メートル	m^3
速さ，速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s^2
波数	毎メートル	m^{-1}
密度，質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m^3
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m^2
比体積	立方メートル毎キログラム	m^3/kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m^2
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度[a]，濃度	モル毎立方メートル	mol/m^3
質量濃度	キログラム毎立法メートル	kg/m^3
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m^2
屈折率[b]	（数字の） 1	1
比透磁率[b]	（数字の） 1	1

(a) 量濃度（amount concentration）は臨床化学の分野では物質濃度（substance concentration）ともよばれる。
(b) これらは無次元量あるいは次元１をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の１は通常は表記しない。

表３．固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI 組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン[b]	rad	1 [b]	m/m
立体角	ステラジアン[b]	sr[c]	1 [b]	m^2/m^2
周波数	ヘルツ[d]	Hz		s^{-1}
力	ニュートン	N		$m\ kg\ s^{-2}$
圧力，応力	パスカル	Pa	N/m^2	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
エネルギー，仕事，熱量	ジュール	J	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
仕事率，工率，放射束	ワット	W	J/s	$m^2\ kg\ s^{-3}$
電荷，電気量	クーロン	C		s A
電位差（電圧），起電力	ボルト	V	W/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
静電容量	ファラド	F	C/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	$m^2\ kg\ s^{-3}\ A^{-2}$
コンダクタンス	ジーメンス	S	A/V	$m^{-2}\ kg^{-1}\ s^3\ A^2$
磁束	ウエーバ	Wb	Vs	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
磁束密度	テスラ	T	Wb/m^2	$kg\ s^{-2}\ A^{-1}$
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	$m^2\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
セルシウス温度	セルシウス度[e]	℃		K
光束	ルーメン	lm	cd sr[c]	cd
照度	ルクス	lx	lm/m^2	$m^{-2}\ cd$
放射性核種の放射能[f]	ベクレル[d]	Bq		s^{-1}
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト[g]	Sv	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
酸素活性	カタール	kat		$s^{-1}\ mol$

(a)SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
(b)ラジアンとステラジアンは数字の１に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の１は明示されない。
(c)測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
(d)ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
(e)セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
(f)放射性核種の放射能（activity referred to a radionuclide）は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
(g)単位シーベルト（PV,2002,70,205）についてはCIPM勧告2（CI-2002）を参照。

表４．単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位		
	名称	記号	SI 基本単位による表し方
粘度	パスカル秒	Pa s	$m^{-1}\ kg\ s^{-1}$
力のモーメント	ニュートンメートル	N m	$m^2\ kg\ s^{-2}$
表面張力	ニュートン毎メートル	N/m	$kg\ s^{-2}$
角速度	ラジアン毎秒	rad/s	$m\ m^{-1}\ s^{-1}=s^{-1}$
角加速度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s^2	$m\ m^{-1}\ s^{-2}=s^{-2}$
熱流密度，放射照度	ワット毎平方メートル	W/m^2	$kg\ s^{-3}$
熱容量，エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}$
比熱容量，比エントロピー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	$m^2\ s^{-2}\ K^{-1}$
比エネルギー	ジュール毎キログラム	J/kg	$m^2\ s^{-2}$
熱伝導率	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	$m\ kg\ s^{-3}\ K^{-1}$
体積エネルギー	ジュール毎立方メートル	J/m^3	$m^{-1}\ kg\ s^{-2}$
電界の強さ	ボルト毎メートル	V/m	$m\ kg\ s^{-3}\ A^{-1}$
電荷密度	クーロン毎立方メートル	C/m^3	$m^{-3}\ sA$
表面電荷	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
電束密度，電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m^2	$m^{-2}\ sA$
誘電率	ファラド毎メートル	F/m	$m^{-3}\ kg^{-1}\ s^4\ A^2$
透磁率	ヘンリー毎メートル	H/m	$m\ kg\ s^{-2}\ A^{-2}$
モルエネルギー	ジュール毎モル	J/mol	$m^2\ kg\ s^{-2}\ mol^{-1}$
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	$m^2\ kg\ s^{-2}\ K^{-1}\ mol^{-1}$
照射線量（X線及びγ線）	クーロン毎キログラム	C/kg	$kg^{-1}\ sA$
吸収線量率	グレイ毎秒	Gy/s	$m^2\ s^{-3}$
放射強度	ワット毎ステラジアン	W/sr	$m^4\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=m^2\ kg\ s^{-3}$
放射輝度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$W/(m^2\ sr)$	$m^2\ m^{-2}\ kg\ s^{-3}=kg\ s^{-3}$
酵素活性濃度	カタール毎立方メートル	kat/m^3	$m^{-3}\ s^{-1}\ mol$

表５．SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10^{24}	ヨタ	Y	10^{-1}	デシ	d
10^{21}	ゼタ	Z	10^{-2}	センチ	c
10^{18}	エクサ	E	10^{-3}	ミリ	m
10^{15}	ペタ	P	10^{-6}	マイクロ	μ
10^{12}	テラ	T	10^{-9}	ナノ	n
10^{9}	ギガ	G	10^{-12}	ピコ	p
10^{6}	メガ	M	10^{-15}	フェムト	f
10^{3}	キロ	k	10^{-18}	アト	a
10^{2}	ヘクト	h	10^{-21}	ゼプト	z
10^{1}	デカ	da	10^{-24}	ヨクト	y

表６．SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h =60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	’	1’=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	”	1”=(1/60)’=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	$1ha=1hm^2=10^4m^2$
リットル	L，l	$1L=1=1dm^3=10^3cm^3=10^{-3}m^3$
トン	t	$1t=10^3\ kg$

表７．SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位で表される数値
電子ボルト	eV	$1eV=1.602\ 176\ 53(14)\times10^{-19}J$
ダルトン	Da	$1Da=1.660\ 538\ 86(28)\times10^{-27}kg$
統一原子質量単位	u	1u=1 Da
天文単位	ua	$1ua=1.495\ 978\ 706\ 91(6)\times10^{11}m$

表８．SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
バール	bar	$1\ bar=0.1MPa=100kPa=10^5Pa$
水銀柱ミリメートル	mmHg	1mmHg=133.322Pa
オングストローム	Å	$1\ Å=0.1nm=100pm=10^{-10}m$
海里	M	1 M=1852m
バーン	b	$1\ b=100fm^2=(10^{-12}cm)2=10^{-28}m^2$
ノット	kn	1 kn=(1852/3600)m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的な関係は、対数量の定義に依存。
ベル	B	
デジベル	dB	

表９．固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI 単位で表される数値
エルグ	erg	$1\ erg=10^{-7}\ J$
ダイン	dyn	$1\ dyn=10^{-5}N$
ポアズ	P	$1\ P=1\ dyn\ s\ cm^{-2}=0.1Pa\ s$
ストークス	St	$1\ St=1cm^2\ s^{-1}=10^{-4}m^2\ s^{-1}$
スチルブ	sb	$1\ sb=1cd\ cm^{-2}=10^4cd\ m^{-2}$
フォト	ph	$1\ ph=1cd\ sr\ cm^{-2}\ 10^4lx$
ガル	Gal	$1\ Gal=1cm\ s^{-2}=10^{-2}ms^{-2}$
マクスウェル	Mx	$1\ Mx = 1G\ cm^2=10^{-8}Wb$
ガウス	G	$1\ G =1Mx\ cm^{-2} =10^{-4}T$
エルステッド[c]	Oe	$1\ Oe \triangleq (10^3/4\pi)A\ m^{-1}$

(c) ３元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「 ≙ 」は対応関係を示すものである。

表10．SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位で表される数値
キュリー	Ci	$1\ Ci=3.7\times10^{10}Bq$
レントゲン	R	$1\ R = 2.58\times10^{-4}C/kg$
ラド	rad	$1\ rad=1cGy=10^{-2}Gy$
レム	rem	$1\ rem=1\ cSv=10^{-2}Sv$
ガンマ	γ	1 γ =1 nT=10-9T
フェルミ		1フェルミ=1 fm=10-15m
メートル系カラット		1メートル系カラット = 200 mg = 2×10-4kg
トル	Torr	1 Torr = (101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm = 101 325 Pa
カロリー	cal	1cal=4.1858J（「15℃」カロリー），4.1868J（「IT」カロリー）4.184J（「熱化学」カロリー）
ミクロン	μ	$1\ \mu =1\mu m=10^{-6}m$

（第8版，2006年改訂）

この印刷物は再生紙を使用しています