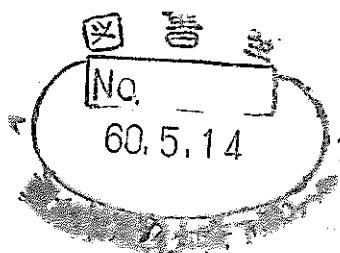


改 分 变 更	
変更機器登録番号	222
決戻年月日	平成18年7月31日

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



1985年3月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村大字村松4番地49
核燃料サイクル開発機構
技術展開部 技術協力課

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:

Technical Cooperation Section,
Technology Management Division,
Japan Nuclear Cycle Development Institute
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki, 319-1184
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)



社内一般

PNC T N 942 85-01

1985年3月

ファイバ・スコープの現状とFBR供用期間中検査への適応性

中本香一郎*，荒邦章*，片岡一*
高木剛彦*，林道寛*，亀井満*

要旨

供用期間中検査機器は軽水炉で実用化が進められているが、FBR原子炉廻り等では高温、高放射線、狭隘という厳しい環境下で検査する必要があり、センサー等には、遠隔化、耐熱性、耐放射線性、コンパクト性、装荷に伴う柔軟性等が要求される。

このため、近年進歩の著しいファイバ・スコープについて、現状技術を調査し、FBR環境への適用性を検討した。

本報告には58年度に実施したファイバ・スコープの現状技術調査と、FBR肉眼試験時の環境への適応上の課題を記載してある。なお、これらをもとに策定した耐熱、耐放射線性、高可とう性、長尺の条件を合わせ持つファイバ・スコープの開発計画に基いて、現在開発が進められている。

COMMERCIAL
PNC/N942 85-01
Mar. 1985



Review of Fiber Scopes for In-service Visual Examination of FBR

Koichiro Nakamoto*, Kuniaki Ara*, Hajime Kataoka*,
Tsuyohiko Takagi*, Hiroshi Rindo* and Mitsuru Kamei*

Abstract

In the case of fast breeder reactors, the in-service inspection of the reactor vessel must be conducted under such severe conditions as relatively high temperature, high radiation dose, and narrow space. Therefore, the heat- and radiation- resistant sensors are required, which also should be compact and flexible for remote handling and installing.

Authors reviewed the state of the fiber scopes for the visual in-service examination, and discussed some problems about applicability to FBR conditions.

This report presents the technical information obtained from the survey conducted in 1983, and the brief draft of the development plan including some remained problems about application to FBR.

* Components Development Section, FBR Systems and Components Division,
O-arai Engineering Center, PNC.

目 次

第1章 要 約	1
第2章 FBR環境条件	4
第3章 種々の遠隔目視装置の比較	5
第4章 調査方法	6
第5章 ファイバ・スコープの原理と構造	7
5.1 光ファイバ	7
5.2 光ファイバ・イメージ・ガイド	8
5.3 光ファイバ・イメージ・ガイドの製造法	9
第6章 開発状況	12
6.1 光ファイバの光学的性質	12
6.2 ファイバ・スコープの製造限界の現状	14
6.3 ファイバ・スコープの耐熱性	15
6.4 ファイバ・スコープの耐放射線性	15
第7章 開発課題	21
7.1 画素数とケーブル長の増加	22
7.2 伝送特性の改善	22
7.3 耐熱性の向上	24
7.4 耐放射線性の向上	24
7.5 その他の	24
7.6 開発スケジュール	25
第8章 謝 辞	26
参考文献	27
 付 錄	
A 原子炉内燃料棒過渡挙動可視装置	57
B 東海事業所での現状	59
C 光ファイバの各種製造方法について	60
D 着色現象について	64

表 リ ス ト

表 1 各種遠隔目視装置の比較	29
表 2 汎用光ファイバ・スコープの仕様および特性比較表	30
表 3 光ファイバ・スコープの現状一覧表(1983年5月調査)	31
表 4 石英ガラスの物理特性	32
表 5 FBRにおけるISI肉眼試験用ファイバ・スコープの開発課題	33

図　リ　ス　ト

図 1 炉容器廻り ISI 肉眼試験概念図	34
図 2 光ファイバの構造による分類	35
図 3 光ファイバの伝送損失	36
図 4 光ファイバ・イメージ・ガイドの原理と構造	37
図 5 光ファイバ・スコープの構成概念図	38
図 6 光ファイバケーブルの製造過程	39
図 7 開口数と受光角の関係	39
図 8 各種光ファイバの分光特性	40
図 9 光ファイバ・イメージ・ガイドの光透過率 ⁽¹⁾	41
図 10 画素数と分解能の関係	41
図 11 各種ライドガイドと照明距離—被写体照度の関係 （光源：300Wマルチハロゲン一水銀ランプ）	42
図 12 ライトガイド付光ファイバ・イメージ・ガイド 標準仕様と被写体照度	42
図 13 コーディングの効果	43
図 14 波長と損失増加量の関係	44
図 15 S I型ファイバの耐 γ 線, $0.85 \mu\text{m}$ (純石英コア)	44
図 16 光ファイバ・イメージ・ガイドの γ 線照射特性 （純石英コア / B_2O_3 , F ドープ石英クラッド）	44
図 17 光ファイバ・イメージ・ガイドの γ 線照射特性 （純石英コア / F ドープ石英クラッド）	45
図 18 γ 線線量率依存性	46
図 19 γ 線照射による損失増加の波長依存性 （純石英コア / F ドープ石英クラッド）	46
図 20 OH基含有量と $1.3 \mu\text{m}$ での光損失	47
図 21 γ 線照射特性に及ぼす OH基の影響	47
図 22 温度による回復効果	48
図 23 光による回復効果	48
図 24 γ 線照射と回復特性	49
図 25 回復特性の線量率依存性	49

図26 γ 線照射におけるエージング効果	49
図27 光ファイバ・イメージ・ガイドの γ 線照射による伝送損失増加量 (純石英コア / Fドープ石英クラッド, S型)	50
図28 光ファイバ・イメージ・ガイドの γ 線照射によるダメージの例	51
図29 損失増加量の積算中性子束依存性	52
図30 中性子照射による損失の波長依存性	52
図31 耐放射線ガラスの照射前後における光透過率	53
図32 接着剤接合ガラスの照射前後における光透過率	53
図33 ペリスコープの総合光透過率(未照射)	54

第1章 要 約

供用期間中検査（ISI）は軽水炉で実用化が進められているが、FBRでは炉停止時においても崩壊熱除去のため、原子炉廻りはナトリウムをドレンすることができず、高温、高放射線、狭隘という苛酷な環境下におかれるため、センサー等には、耐熱性、耐放射線性、コンパクト性、装荷に適合する柔軟性等が要求される。

従来、常温で行われる ISI には、工業用テレビ（ITV）等が用いられてきたが、これは高温ではそのまま使用できず、冷却装置を必要とする。より狭隘な炉容器本体の肉眼試験には以下の理由から、冷却のいらないコンパクトなセンサーを必要とする。

- (i) 冷却を必要とするセンサーでは、冷却装置のため検査機全体が大型化し、重量もそれだけ増える。
- (ii) 冷却用窒素ボンベの持続時間が短く（約 100 時間程度）、検査効率が悪い。
- (iii) ボンベ等交換部品が多くなる。

上記の欠点を克服して、FBR 環境に耐えうる目視センサーとして、近年進歩の著しい耐熱・耐放射線性ファイバ・スコープ（光ファイバ・イメージ・ガイド）について調査した。

学会等での報告、委託研究報告、解説書、光ファイバメーカーのカタログ、光ファイバメーカーおよび光通信関連メーカーとの討議等をもとに本報告書をまとめてある。

最初に FBR における ISI 環境条件を明らかにし（第 2 章）、ファイバ・スコープを他の検査装置と比較した上で（第 3 章）、ファイバ・スコープの原理、構造、製法を紹介する（第 5 章）。

次にメーカーにおける開発現状を、光学的特性、製造限界、耐熱性、耐放射線性の面から説明する（第 6 章）。

以上をもとに、FBR 炉容器廻り ISI 肉眼試験に必要とされる耐熱・耐放射線性ファイバ・スコープ開発のために、目標仕様（案）と開発課題を明らかにし、今後の指針とした（第 7 章）。

光ファイバおよびファイバ・スコープの概要

光ファイバは屈折率の大きいコアと、コアより屈折率の小さいクラッドから成り、光はコアとクラッドの境界で全反射されつつコア中を伝送される。

光ファイバ材質としては、プラスチック系、多成分ガラス系、石英系があるが、伝送損失が極めて小さく、長尺のファイバが製造できる純石英ガラスが主流となっている。

コアとクラッドの屈折率に差（通常 1 ~ 2 %）をつけるために、純石英のコアあるいはクラッドにドーパントを入れる。

光ファイバ自体はガラスであり、このままでは非常に柔軟で、扱いやすいので、ファイバ素線にナイロン、シリコン、ポリウレタン、エポキシ樹脂、ポリブタジエン等でコーティング（1次被覆）する。硬くて、もろいものを柔らかいもので包むと、全体として柔軟で強いものになる。コーティングにより、光ファイバの曲げや引張りに対する強度が飛躍的に向上した。

光ファイバを束ねて2次元的に規則正しく配列し、両端でその配列が正しく対応づけられているものを、種々の表記があるが、ここでは光ファイバ・イメージ・ガイドと呼び、通常その両端に対物レンズ系と接眼レンズ系をつけて使用する。これらをまとめてファイバ・スコープと称する。

ファイバ・スコープは一端に結ばれた像をファイバ径の大きさの画素に分解して他端に伝送する機能を有しており、柔軟性と長さ、伝送特性等の面でペリスコープより優れている。

炉容器廻り ISIにおける主な環境条件（想定）

雰囲気温度；約200°C

r線線量率；約 1×10^3 R/H

r線累積線量；約 1×10^6 R

ファイバ・スコープの主な目標仕様（案）

画素数；約3万以上

ケーブル長；約40m以上

耐熱性；240°C (max.)

耐放射線性；約 1×10^6 R

伝送損失 ($\text{dB} = 10 \log_{10} \frac{X}{X_0}$)；照射効果も含めて19dB以下（ファイバ部のみ）

色調再現性；可視域（0.4～0.7μm）で分光特性極力フラット

視野径；約50mm（～約100mm）

被写体までの距離；約140mm

ファイバ・スコープに関する開発課題

ファイバ・スコープをFBR炉容器廻りISIに適用する上での主な開発課題は、耐熱性、耐放射線性、可とう性、長尺化の同時満足である。

光ファイバ・イメージ・ガイドには、前述したコーティング材（1次被覆）の他に、保護と可とう性保持のため、2次被覆、緩衝材、外被等が使用されている。通常いずれも有機物故、コアやクラッドに使われる石英ガラスが1000°C以上に耐えるにもかかわらず、耐熱性を制限し、150～180°Cが限度となっている。

従って、ISIで必要とされる耐熱性を得るために被覆材やイメージ・ガイド製造法の見直しも必要となろう。

一方、光ファイバ単体の耐放射線性については⁶⁰Coによるγ線照射を中心にいくつかの報告が出始めているが、特性が確定するまでには至っていないこと、光ファイバ・イメージ・ガイドとしての照射試験例は極めて少ないとから今後の試験研究が待たれる。

特に高温での照射例はあまりなく、照射による伝送損失の増加（可視域 0.4～0.7 μmで未照射時の約2000倍）と色調の変化（短波長側の青系統の吸収増加や、反対に製造上の問題と思われるが0.6 μmの赤の吸収増加）が問題となっている。また、光ファイバ・イメージ・ガイドの長さが長くなる程青系統の吸収が多くなることや対物レンズ系の照射特性評価データがないことにも注意すべきであろう。

以上の課題は残されているものの、FBR用ファイバ・スコープとしての体系的な研究開発を数年行えば、前記の開発目標を達成できると思われる。（開発は昭和58年開始）

第2章 FBR環境条件

ISI 肉眼試験の主たる対象の1つであるFBR炉容器（および炉容器ガードベッセル）を例にとると、検査機の環境条件は次の通りである。

- (i) 温 度； 約 200°C (炉停止時)
- (ii) 雾 囲 気 ガス； 2%酸素含有窒素
- (iii) γ 線 線量率； 約 1×10^3 R/H (炉停止後 30日経過)
- (iv) γ 線 累積線量； 約 1×10^6 R (センサー耐用寿命 1000時間と想定)
- (v) 中性子線量； 数 mR/H (炉停止時)
- (vi) 插 入 長 さ； 約 40 m (内、照射雾囲気中は約 30 m と想定)
- (vii) 検 查 空 間； 約 250~300 mm 幅 (炉容器とガードベッセル間の隙間)

炉容器の ISI のために、炉容器の廻りに配置した検査孔から検査機を挿入して、炉容器とガードベッセル間の間隙部を移動させ、炉容器とガードベッセルを検査することが想定される。図1にFBR炉容器肉眼試験概念図を示す。

炉容器入口配管の場合は、検査用アクセス空間が比較的広く、且つ挿入長さも短くてすむため、当初の開発段階では冷却装置付 ITV 方式が試験されたが、炉容器用には、冷却のいらない耐熱耐放射線性のコンパクトな目視検査装置の開発が必要となる。

1次主配管系の場合の ISI 環境条件は詳細未確定であるがおおよそ次の通りと想定される。

- (i) 温 度； 常温 (検査時は当該配管系ナトリウムドレンと想定)
- (ii) γ 線 線量率； 最高 1R/H 程度 (同 上)
- (iii) γ 線 累積線量； 最高 10^3 R 程度 (耐用寿命 1000時間と想定)

第3章 種々の遠隔目視装置の比較

遠隔肉眼試験装置として、(i) ITV カメラ、(ii)ペリスコープ、(iii)ファイバ・スコープの比較を行った結果を表1に示す。

ITV カメラは画像分解能はよいが、撮像管の耐熱性に劣り（短時間でも 70°C が限度）、ペリスコープは長さ制限（10 m 程度が限度）、耐熱衝撃性、および装荷に伴う柔軟性（可とう性）の点で劣る。なお、表中の ◎○△× は FBR 炉容器廻り ISI への適否を示す「目安」である。

一方、ファイバ・スコープは耐熱性、可とう性、コンパクト性、長尺可能の点で優れている反面、画像分解能の向上が望まれる。画像分解能を良くするために画素数を増やし、その分画素群部分を太くする必要があり、それだけ可とう性の面で支障がでてくる恐れもあるが、後述するように、3万画素 × 40 m 長、曲げ半径約 150 mm 程度のものは開発可能と思われる。

以上から、第2章で示した FBR 炉容器廻り用 ISI に使用される遠隔目視装置としては、ファイバ・スコープが最適であろう。

なお、1次配管系 ISIにおいては、温度、 r 線線量率とともに、炉容器廻り ISI よりゆるい条件であることから、炉容器廻り ISI 目視装置の開発成果をそのまま適用しうると考えられるとし、既存技術（ITV やペリスコープ）の適用も十分考えられる。

従って、以下炉容器廻り ISI 肉眼試験を対象に報告する。

第4章 調査方法

ファイバ・スコープは電線メーカーを中心に開発が進められているが、耐放射線性のものは開発メーカーが限定されており、下記5社を調査対象にした。

住友電気工業株式会社

大日本電線株式会社

日立電線株式会社

古河電気工業株式会社

藤倉電線株式会社

以上に加えて、

学会等のレポート

委託研究報告書（未来工学研究所、三菱重工）

原研 NSRR での成果（付録 A）

東海事業所での現状（付録 B）

光通信に関する解説書

メーカー各社カタログ

通信関連メーカー報告会（S 57. 12）

光ファイバ・メーカー報告会（S 58. 6）

委託研究報告会（S 58. 6）

を参考にした。詳細は文献リストを参照のこと。

第5章 ファイバ・スコープの原理と構造

ファイバ・スコープとは、光ファイバーが2次元的に規則正しく配列され、両端でその配列が正しく対応づけられており、一端に結ばれた画像をファイバ径の大きさの画素に分解して他端に伝送する機能を有している。光ファイバを束ねて配列したものをお光ファイバ・イメージ・ガイドと呼ぶ。

光ファイバ・イメージ・ガイドの構成要素である光ファイバについてまず紹介し、次いで光ファイバ・イメージ・ガイドについて述べることにする。

5.1 光ファイバ

光ファイバは屈折率の大きいコアと、コアより屈折率の小さいクラッドから成る。光ファイバの一端より入射した光は屈折率の違いからコアとクラッドの境界で反射され、これを繰返して他端まで光が伝わる。

光ファイバの構造は、図2に示すように、コアの屈折率が一様なステップ・インデックス(SI)型と、コアの断面内で屈折率が変化しているグレイデッド・インデックス(GI)型の2種類ある。SI型には特にコア径を小さくし、モード分散を小さくして超広帯域化を図ったシングルモード・ステップ・インデックス型も含まれるがこれは通信専用である。

光ファイバは通信、画像伝送、計測等に用いられるが、図2の光ファイバは通信用のものである。本報告の目的とする光ファイバ・イメージ・ガイド用(画像伝送用)のものは、数千～数万本の光ファイバを束ねてコンパクトに仕上げるため、コアやクラッドの径は通信用の約1/10となっている。光ファイバ(コア+クラッド)には通常保護と補強のためコーティングや被覆が行われている。

光ファイバの伝送損失低下の歴史は図3に示すように、OH基による吸収損失の低減化と、屈折率制御用に石英ガラスに添加するドープ材(ドーパント)の使用による吸収損失の低減化の歴史である。

1970年にコーニンググラス社(米国)が20dB/kmの光ファイバを開発してから、10年を経た1980年には電電公社がVAD法により1.2～1.7μmの広い波長帯にわたり、0.2dB/km以下という極低損失光ファイバの開発に成功し現在に至っている。

使用する光の波長は、光ファイバの損失特性と発光素子(レーザ、発光ダイオード)の特性から選ばれる。光ファイバの開発に伴って、使用波長帯は短波長帯(0.7～1μm)から長波長帯(1.0～2.0μm)に移り、前者ではAlGaAs半導体レーザ(0.8μm)等が、後者ではGaInAsP半導体レーザ(1.3μm)等が用いられている。

将来的には、一層低損失の波長 $2 \sim 3 \mu\text{m}$ の領域で赤外吸収の少い石英ガラス以外のフッ化系ガラスによる光ファイバの研究が開始されている。

以上は光通信における波長帯域と損失特性についてであるが、ファイバ・スコープに使用される場合は可視領域 ($0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$) が対象となる。この領域では、石英ガラスの理論的限界値（図3の1980年公社発表値に近い）といえども損失は $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ で $30 \sim 3 \text{ dB/km}$ ある。

5.2 光ファイバ・イメージ・ガイド

光ファイバを束ねて画像（イメージ）を直接伝送するファイバ・スコープは、1957年米国で医療用内視鏡として開発され、日本では1963年に町田製作所とオリンパス光学によってほぼ同時に国産化された。

ファイバ・スコープは細くかつ可とう性に富むという2つの大きな特長を生かして、前記のように医用分野で広く用いられてきた。しかしながら光ファイバが光学ガラス（多成分ガラス）で作られ、約 5 m 長のものが限度であり、且つ光の通過性も悪かった（ 5 m 長で 20% 以下にまで減衰）。従って、観察画像が暗く、工業用には航空機エンジン内の点検や短いパイプ内の観察等単なる内視鏡の延長に限られていた。

しかし、近年石英ガラスを素材とする光ファイバが開発され、光学特性と光の透過率も著しく向上した他、長尺ものも製造可能となった。

図4に光ファイバ・イメージ・ガイドの原理と構造を示す。

前述したように、光ファイバ単体は屈折率の大きいコアと屈折率の小さいクラッドから成り光ファイバ・イメージ・ガイド用のものは、仕様により異なるが、クラッド外径が $10 \sim 20 \mu\text{m}$ 程度である（図4(a)）。

図4(c)は光ファイバを束ねた様子を概念的に示し、図4(d)は画素配列した時の断面の一例を示している。数千～数万本の光ファイバを束ねた画素群を図4(e)に例示するように、石英ジャケット、シリコン樹脂等で保護し、これに PVC などの外被をかぶせ必要に応じてフレキシブル・チューブに挿入して使用するのが一般的なようである。図中の寸法はあくまで参考値であり、メーカー、画素数、被覆の種類、製造法、型式等によって異ってくるのはいうまでもない。

参考までに、図4(b)にコーニンググラス社（米国）の光ファイバと、電々公社茨城通信研究所で開発したフッ素(F)ドープ光ファイバの比較を示す。

光ファイバは現在石英系が主流を占めているが、コーニング社のものはコアの屈折率を高めるために Ge 等をドープしているのに対して、電々公社のものは、コアに純石英を用いクラッドに F をドープすることによりクラッドの屈折率を下げている。ドーパントの効果については後でふれる。

図5にファイバ・スコープの構成例を示す。ファイバ・スコープは、先に紹介した光ファイ

バ・イメージ・ガイド、対物レンズ系、接眼レンズ系から成り、必要に応じて ITV カメラとモニタテレビを接続することもできる。

5.3 光ファイバ・イメージ・ガイドの製造法

光ファイバ・ケーブルとそれを束にした光ファイバ・イメージ・ガイドの製造法の大略を以下に紹介する。詳細は付録Cを参照のこと。

(1) 光ファイバ・ケーブルの製造法

図6に示すように、光ファイバ・ケーブルの製造工程は、プリフォームの製造、線引、心線被覆、およびケーブル集合の工程に大別できる。（光ファイバ・イメージ・ガイドの場合は紡糸の段階から下記(2)に移行するものと思われる。）

光ファイバを作るには、第1段階として、目的のファイバと相似の屈折率分布を持つ外径10～30mm、長さ20～100cmのプリフォームと呼ばれる母材を作る。

次にこの先端部を加熱、軟化させ、一端から一定速度で引張り、所要の外径の光ファイバを製造する。この工程を線引あるいは紡糸と称している。この場合の光の屈折率分布形状の制御は、プリフォーム製造時に行い、線引時には外径を制御するだけである。

光ファイバ自体はガラスであり、このままでは非常に柔軟で、こわれやすいので、素線を合成樹脂保護膜で被覆（1次被覆）して機械的強度を保つ方法がとられている。硬くてもろいものを軟らかいもので包むと、全体として柔軟で強いものになる。これをコーティングと称し、光ファイバの曲げや引張りに対する強度を飛躍的に向上させた。機械的強度に注目すると、コーティングは厚い方がよいが、逆に曲げや引張り、さらに温度伸縮時にマイクロベンディングによる損失発生の原因ともなる。

コーティング材としては、ナイロン、シリコン、ポリウレタン、エポキシ樹脂、ポリブタジエン等が用いられる。

光ファイバの製造法としてはCVD法、VAD法、RT法、2重るつぼ法がある。

CVD法には外付け法、内付け法があり、前者はコーニング社により開発され、後者は米国ベル研究所で開発された方法である。プリフォームの長さが出発石英管や出発ガラス棒の長さにより制限されるので、1本のプリフォームから製造できる光ファイバの長さは一般には10km程度どまりである。

これに対して電々公社で開発したVAD法は軸方向にプリフォームを作成するので、原理的にはプリフォーム長に関係なくファイバを製造することができる。

また、多成分系光ファイバでは2重るつぼ法により、プリフォームを作らず、るつぼで溶接したガラスを直接線引することによって、光ファイバを作っている。（以上の他にMCVD法も

あるが詳細不明なので記載はさしつかえた。)

なお、石英系ガラスには、所要の屈折率を得るために、プリフォーム製造時にドーパントを添加する。

- ・屈折率低下ドーパント …… B, F
- ・屈折率増加ドーパント …… Ge, P, Al, Ti

また、ドーパントの添加量によっては、コアとクラッド間の熱膨張係数の差が大きくなり、ひび割れが発生するため、通常は比屈折率差を2%以内としている。さらにBやPは添加によりガラスの軟化点が下がるので、熱歪みの緩和にも利用されている。

RT法はロッドインチューブといい、コア材をクラッド材中に挿入して、両者を同時に加熱溶融するかまたは中実化した後線引きする方法であり、この方法はステップ形の光ファイバが簡単に作れる方法として採用されている。

(2) 光ファイバ・イメージ・ガイドの製造法

従来のファイバ・スコープに用いられているイメージガイドは、前述したように、光学用多成分ガラスを素材とし、種々の方法（モノファイバー法、酸溶出法、マルチファイバ法等）で製造されるが、長尺の石英系イメージ・ガイドを製造する方法として、マルチファイバ法が採用されているようである。

石英系をコアとするファイバ母材を所定の線径に線引したものを、スキンパイプと呼ばれるガラス管の中に所定の本数束ね、整列・配列し、これを再度溶融線引して全長に亘って正確な画像配列を持つ溶融一体化したコンジット型のイメージ・ガイドとし、表面に機械強度維持のための樹脂を被覆する（図4(e)）。

メーカーによって区分の仕方が異なるが、光ファイバ・イメージ・ガイドの可とう性から、リジッド型（R型）、セミフレキシブル型（S型）、フレキシブル型（F型）に分類できる。

R型 …… 直線上での使用が望ましい大サイズ型で、画素数4～16万、製造可能最大長10mである。

S型 …… R型とは画素数の違い、換言すればイメージ・ガイドの外径に基く区分で、画素数3千～3万、製造可能最大長は100m程度。図5のS型のように、コアをクラッドの海に埋設した格好。

F型 …… 外径30～50μmの細いシングルファイバあるいは数10本程度のファイバをユニット化した外径100～200μmのマルチファイバを従来のワインディング法によりバンドル化し、両端のみにおいて画像配列したもの（図5のF型）で、その中間の伝送部は十分なフレキシビリティを持つ。

なお、製造可能長は、ファイバ・バンドル中間体の大きさと、線引する外径によって定まり、

製法的には 200 m を超す長さまで可能であるものの、画素間の漏光等画像品質の劣化が長さにも関係する要素もあるため、現在実用になっている長さは、100 m 程度である。

第6章 開発状況

表2に標準型ファイバ・スコープの仕様と特性を各社比較して示す。メーカーによって若干異なるが、コア材質、コア径、開口数(NA)等基本的なものは類似している。

耐熱・耐放射線性光ファイバの開発状況を表3に示す。開発メーカー各社とも光ファイバ・スコープの開発は行っているものの、耐熱性、耐放射線性のものについて開発し実用化しているのはA社、B社、C社で、他メーカーは開発段階と考えられる。

6.1 ファイバ・スコープの光学的性質

ファイバ・スコープに使われる光ファイバは高屈折率のコアの領域と、その周囲の光を反射するためのクラッドの層より成っており、その光学的特性は、開口数と光透過性によって代表される。

(1) 開口数(NA: Numerical Aperture)

光ファイバ端面に入射した光は、図4(c)に示すようにコアとクラッドの境界で全反射を繰り返しながら伝わる。このためには、入射角 θ はある角度 θ_c より小さい必要があり、この θ_c を受光角と呼んでいる(図7)。

受光角 θ_c はコアの屈折率 n_1 とクラッドの屈折率 n_2 によって次式のように決められる。

$$NA = n_1 \sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

また入射光パワー P はコア径を a 、光源の輝度を B とすると、

$$P = \left(\frac{a \cdot NA}{n_1} \right) \cdot B$$

となり、 $P \propto NA$ 故、NAが大きい程明るい画像となる。従来の内視鏡で使われた多成分ガラスのNAは約0.4、一方、石英ガラスファイバは、表3に示すように、約0.2～0.25である。

(2) 光透過性

光の透過性に関しては、光の透過率と透過率の波長依存性(分光特性)が重要である。

透過率は、光ファイバの両端面における反射損失と、光路中の伝送損失の2つの要因によって決まる。光ファイバの透過率の改善には、伝送損失の改善が効果的である。

図8に示すように、石英ガラスファイバは、従来の多成分ガラスファイバやプラスチックファイバにくらべて伝送損失は極めて小さくなっている、理論的限界に近い値が得られるよう

なっていると言われている。石英ガラスファイバはこのように光の透過率が高いと同時に、可視域 ($0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$) で波長依存性が比較的少ないので、色調の再現性も多成分ガラスファイバやプラスチックファイバより良好である。

図 9 に純石英ガラスコアを用いたイメージ・ガイドの光透過率をイメージ・ガイドの長さをパラメータにして示す。10 m 長までは分光スペクトルは可視域ではほぼ平たんであるが、50 m 以上になると短波長側（青系統）の損失が目立つ。イメージ・ガイドの伝送損失は光ファイバ単体の値よりも大きい事に注意する必要がある。

(3) 分解能

ファイバ・スコープの画質は(i)画素数、(ii)画素の大きさ、(iii)配列の良否、(iv)コア以外の部分に入射する光に起因するフレア、(v)画素欠隔、(vi)色調の再現性、(vii)レンズ系の解像力などによって決まる。

この内、(i)～(iii)は光ファイバ・スコープの分解能を決め、(iv)～(vii)はそれに加わって鮮明さ、色調、解像力を決める。

画素数(N)と分解能 (R mm) の関係はファイバ径等によっても異なると思われるが、視野の大きさ (直径 ϕ mm) をパラメータとして次式で与えられ、図示すると図 10 のようになる。

$$R = \frac{3\phi}{\sqrt{N}} \quad (\text{mm})$$

ここで、3 という値は実験的に定めた値である。肉眼試験に関する分解能の基準は定量化されていないので、ここでは便宜上暫定的に目安値を想定することにする。炉容器（肉厚 50 mm）の溶接部の溶金幅は 24 mm があるので、視野範囲を $\phi = 50 \text{ mm}$ とし、0.8 mm の線 (ASME Sec. XI, Div. 3, VTM-1 相当) を分解能の目安と仮定すれば、少なくとも 30,000 画素は必要ということがわかる。

表 3 から F 型 (フレキシブル型) イメージ・ファイバの最大画素数は各社とも 30,000 以上あるので、さらに分解能の向上を図るとしても、実現の見通しは得られたと言える。

(4) ライトガイド

ファイバスコープを炉容器 ISI のように構造物の中で使用するためには照明が必要である。照明方法には次の 3 つがある。

- (i) ライトガイド照明方式：ファイバ・スコープに内蔵したライトガイドに、別途準備する光源装置から光を入射し照明する。
- (ii) ランプ照明方式：ファイバ・スコープに内蔵したランプに給電して照明する。
- (iii) 外部照明方式：ファイバ・スコープとは別個に外部光源を準備して照明する。

ライトガイド照明方式はファイバ・スコープの外径を小さく抑えることができるので、標準的に用いられる。このライトガイドには直径 $150 \mu\text{m}$ 程度の細い石英ファイバを多数本束ねたものや、直径 $1 \sim 2 \text{ mm}$ の太い石英ファイバを少数本束ねたものが用いられる。

図 11 は各種ライトガイドと照明距離 - 被写体照度の関係を示している。光源は 300W マルチ・ハロゲン - 水銀ランプの場合である。

「もんじゅ」炉容器目視検査の場合は照明距離が約 140mm なので、例えば 10^4 ルクスの照度の場合は、ライトガイドのコア面積は約 3.4 mm^2 以上あれば良い。

ライトガイドの他社の例を図 12 に示す。光源装置には、ハロゲンランプを用いた小型・軽量・運搬可能な中輝度型（ランプ寿命 50 時間）と、特定場所で設置使用するキセノンランプを用いた高輝度長寿命型（ランプ寿命 1000 時間）とがある。距離 140mm の時、中輝度型で約 1500 ルクス、高輝度型で約 3000 ルクスの照度が得られる。

なお、ライトガイドも照射により光伝送損失増加があることに注意する必要がある。

ライトガイド方式はライトガイドへの光の入射率が悪く、広い視野を十分明るくするという時には問題がある。

このような場合の解決法の 1 つとして、ランプ照明方式がある。この方法は明るさを十分にとることはできるが、対物ヘッドが大きくなること、ランプ発熱の問題が生じる。

ライトガイド照明方式とランプ照明方式は、金属表面を観察するような場合にハレーションの問題が生じることがある。このような場合には、対物ヘッドから照明が離れている外部照明方式が有効である。また、外部照明方式はより大きな視野の照明にも有利である。

同一素材で均一な温度になっている高温物体はコントラストがつかず、高温になればなる程照明なしには観察が困難となる。

6.2 ファイバ・スコープ製造限界の現状

(1) 長さ

ファイバ・スコープの長さの上限は画素数とほぼ相反関係にあり、例えば C 社の例 (S 型) では以下の如くである。

10,000 画素	最大ケーブル長	50 m
20,000 画素	"	30 m
30,000 画素	"	20 m

ISI で必要なケーブル長 (40 m 以上) で高画素数 (30,000 以上) を得る努力が望まれる。

(2) 曲げ半径

曲げ半径を決定する要因は、ファイバ製造時に発生するガラス表面のキズおよびガラスを保

護する被覆等の物性的・機械的な性質による。従って曲げ半径を小さくすることは、ファイバ 製造工程上の品質管理および被覆材の選定が問題となる。とりわけ高温・高放射線下での使用 を考慮すれば、耐熱・耐放射線性を兼ねそなえた被覆材の開発が必要である。

(3) 引張り強度

光ファイバを構成する石英ガラスの物理特性を、銅、アルミニウムと比較して表4に示す。

引張強度は従来の金属導体ケーブルではさほど問題とならなかったが、光ファイバはガラス 特有のせい性破壊があるために、充分考慮する必要がある。

光ファイバの引張強さは本来大きく、銅の約2倍、銅やアルミニウムの約10倍以上ある。 しかし光ファイバの表面に傷があり、光ファイバに張力がかかると、その応力は傷に集中し、 傷の許容応力を越えると一気に破断する。

一般に傷は光ファイバの長手方向にランダムに分布しており、光ファイバの引張強度は、こ のうち最も深い傷によって決まるといわれる。

このため光ファイバ表面への他物の接触による傷の発生をさけるため、線引直後にプラスチック等をコーティングする。図13にコーティングの効果を示す。

また、光ファイバが長くなる程、傷の存在する確率が大きくなるので、同じ引張り荷重に対する破断確率が大きくなり、引張り強度は長さとともに低下する。

被覆等を施した後の光ファイバー・イメージ・ガイドの引張強さについての入手データは少 いが、表3のB社の値は52kg/mm²となっており、実用上引張強さは問題ないと見える。

6.3 ファイバ・スコープの耐熱性

石英ガラス自体は表4に示したように、融点が1730°Cであり、屈折率に変化が生じ始めるのは約1000°Cと言われている。

しかし、石英ガラスファイバーには機械的強度維持のために樹脂被覆等が施されており、ま た、イメージ・ガイドとして仕上げる際にも図4(e)に示したように緩衝体（例えばシリコン樹 脂）や被覆（例えばPVC）が用いられているため、一般に使用上限温度が約150°C（開発製品 で約180°C：表3）となっている。

また、光ファイバ先端部の束線固定や、対物レンズ系の固定のための樹脂も耐熱上問題とな る。

以上から、市販ファイバ・スコープをFBR炉容器廻りISIに適用するためには、その耐熱 性が大きな技術的課題の1つになることが分る。

6.4 ファイバ・スコープの耐放射線性

光ファイバが α 線、 β 線、 γ 線、X線、中性子線などの放射線を受けると、多数の正孔-電子対が発生する。これらのほとんどは 10^{-6} 秒以内に再結合するが、再結合しない正孔および電子はガラスの構造欠陥などにとらえられ、光の吸収が生じる（着色現象：付録D参照）

一般に光ファイバの照射特性は、放射線の種類、累積線量、線量率、照射時間、温度、などの照射条件やファイバの組成によって変ると言われているが、照射によって光伝送損失の増加や色調の変化、発光などが生じると言われる。ファイバ・スコープでは伝送損失の大きさもさることながら、特定波長欠収等による可視光領域（ $0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$ ）での色調変化に特に注意する必要がある。

また、光ファイバの放射線照射試験結果の報告も増え始めているが、それらの多くは光通信（5.1参照）の波長（主として $0.85 \mu\text{m}$ ）でのデータであり、可視光領域での特性とは異なること、また照射特性はデータ間で不一致もみられ、未確定なところが多いことに留意すべきである。

第2章で示したように、ISI装置の放射線条件としては γ 線を考慮すれば十分なので、以下 ^{60}Co による γ 線照射結果を重点に紹介する。

(1) γ 線累積線量依存性

コアにゲルマニウム(Ge)、リン(P)をドープしたファイバでは γ 線の線量増加につれて増失増加量のピーク波長は $0.7 \sim 0.8 \mu\text{m}$ に移動した（図14）。

純石英コアのファイバは、GeやPをドープしたものに比べると、同一線量における損失増加量は $0.85 \mu\text{m}$ で約1桁少い（図14、15）。

純石英コアとホウ酸(B_2O_3)やフッ素(F)トープクラッドの組合せでは、 $5.1 \times 10^5 \text{ R}$ での損失増加量は赤(R, $0.656 \mu\text{m}$)で約 20 dB/km 、緑(G, $0.552 \mu\text{m}$)で約 130 dB/km 、青(B, $0.486 \mu\text{m}$)で約 300 dB/km である（図16(c)）。

純石英コア/Fドープ石英クラッドのファイバの γ 線照射特性をGeドープ石英コアファイバ/純石英クラッドのファイバと比較して図17に示す。

1000 dB/km の損失増加量に達する累積線量で比較すると、Geドープ石英コアファイバでは約 $7 \times 10^3 \text{ R}$ であるのに対し、純石英コアのファイバでは $2 \times 10^6 \text{ R}$ 以上であり、2～3桁後者が良い。

(2) γ 線線量率依存性

図16(a)～(c)に示したように、 $10^4 \sim 4 \times 10^5 \text{ R/H}$ の線量率範囲では、損失増加量は線量率に依存し、照射直後の初期損失で殆んど決定されている。なお、図16は(a)と(b)、(b)と(c)の間にそれぞれ20時間、2時間の照射休止期間があり、回復効果も加わっている。

図 18 に純石英コア (MRT 法) の r 線線量率依存性の他の例を示す。測定波長は $0.88 \mu\text{m}$ (LED) 故、直接光ファイバ・イメージ・ガイドの評価には結びつかないが、損失増加量は線量率にはほぼ比例して増加している。また、いずれの線量率においても照射初期の急激な増加がみられる。

(3) r 線照射による損失増加の波長依存性

純石英コア / F ドープ石英クラッドの照射による損失増加の波長依存性を図 19 に示す。画素数 5000, r 線線量率 $2.4 \times 10^4 \text{ R/H}$, 照射時間 87 時間 40 分, 累積線量 $2.1 \times 10^6 \text{ R}$ である。

図から、 $0.45 \sim 0.65 \mu\text{m}$ における損失増加量は約 500 dB/km である。 $0.7 \mu\text{m}$ 以上の赤外域の損失増加は約 100 dB/km であり、可視域に比較して損失増加量は著しく少くなっている。

図 19 は照射後 72 時間後に測定したものであり、 $\lambda = 0.63 \mu\text{m}$ で比べると、照射直後は約 700 dB/km (図 17 の No. 3 ファイバ) あったことから、照射直後の著しい回復特性は認められない。

(4) r 線照射特性に及ぼす組成の効果

コアに Ge, P をドープした石英ファイバ (図 14) は、純石英ファイバ (図 15) に比べて、 r 線照射による損失増加 ($\lambda = 0.85 \mu\text{m}$) は約 1 衍大きい。

石英ガラス中の OH 基は図 3 に示したように約 $0.9 \mu\text{m}$ に吸収ピークを有する。また、 $1.3 \mu\text{m}$ での光損失に及ぼす OH 基含有量の影響は図 20 に示す通りである。光通信に利用される波長 ($0.85 \mu\text{m}$, $1.3 \mu\text{m}$) では OH 基が少い程、伝送損失も少いが、照射効果は逆になる。

図 21 は r 線照射特性に及ぼす $\lambda = 0.85 \mu\text{m}$ における OH 基の影響を示しており、高純度石英コアファイバ (OH $\sim 0 \text{ ppm}$) は、放射線に対して非常に敏感であり、損失増加量も大きい。

OH 基が約 1000 ppm になると照射による損失増加量は約 20 dB/km と、極めて小さくなる。

このように OH 基は照射による構造欠陥をうめるような働きがあり、着色中心体 (カラーセンター) を発生させないようにしているものと推測されている。

OH 基による耐放射線性向上は $0.85 \mu\text{m}$ で顕著であるが、光ファイバ・イメージ・ガイドで利用する可視域 ($0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$) では OH 基による損失増加が未照射においてもともと少いため、耐放射線性向上への効果も少ないと考えられるが、ドーパントを入れない純石英ガラスコアのイメージ・ファイバにも 1000 ppm 程度の OH 基を入れているメーカーもある。

(5) 回復特性

極めてデータが少く、今後豊富な試験と特性の確定が望まれる分野である。照射による損失の回復は、熱、光、放射線により起るといわれる。

(i) 热による回復 (Thermal bleaching effect)

図 22(a)に純石英コアファイバの高線量率下における照射時および照射後の損失増加特性に及ぼす温度の効果を示す。これから、120 °Cでは28 °Cの場合にくらべて約1桁損失増加量が小さい。温度効果については昇温速度の影響も考えられる。

図 22(b)は純石英コア中OH基含有量と温度回復効果との関係を示す。ファイバA (100 ppm), ファイバB (2 ppm)いずれも温度の上昇とともに損失増加量も低下している。

温度による回復現象は放射線により生成した捕獲準位にある電子が熱的に導電帯にまで励起され、ガラス中を移動し正孔と結合して欠陥が消滅するためと考えられている。

(ii) 光による回復 (Photo bleaching effect)

光ファイバに高出力、高エネルギーの光を通しながら放射線照射を行うと、そうでない場合に比べて損失増加量が小さい(図 23(a))。

また照射後、光量を変えて回復特性を調べた結果、光出力が大きい程、特性がよい(図 23(b))。

(iii) 放射線による回復 (Radiation induced hardening effect)

図 24は純石英コアファイバのγ線照射による損失増加特性を表わしているが、OH基含有量が200 ppmと多いNo.4ファイバでは 10^6 Rを少し越えたところから照射中にもかかわらず損失が減少している。これは、放射線線量が増加するに従い、回復速度定数が生成速度定数より大きくなつた時に起るものと考えられるとメーカー資料では説明している。図 25に回復特性の線量率依存性(規格化値)を示す。線量率が高い程、損失増加も大きい反面回復作用も大きいようである。但し、放射線による回復効果に関するデータは極めて少ないので、普遍性のある特性なのか否かもっと検討する必要がある。例えば文献によつては 2.4×10^4 R/Hで 2×10^6 Rまで照射しても、回復特性がみられなかつたとの報告もある。(2)

次に波長0.85 μmで測定した繰返し照射効果の例を図 26に示す。純石英コアファイバを、始め60分照射、60分回復を繰返した(図 26(a))後、連続20時間以上照射し、その後再び30分照射、30分回復を2回繰返した(図 26(b))。

図 26から、F 4は照射を繰返すにつれて、損失増加レベルが徐々に小さくなり、始め350 dB/kmあったのが150 dB/kmと約½のレベルで安定となった。これに対してF 3は、2回目の照射から安定で、急峻な初期損失増がなくなった後、レベルはほとんど一定で変化しない。 10^7 R照射で損失増加量は約20 dB/km程度である。

(6) γ線照射における特異な例

図 27に、2000画素(No.1)と5000画素(No.2)の純石英コア/Fドープ石英クラッドのγ線照射による伝送損失増加量を示す。線量率は 2.4×10^4 R/Hで、伝送損失は累積線量と

ともに増加し、画素数の大きいNo.2の方が損失が大きく、 10^6 Rの時伝送損失増加量は約900dB/km(He-Neレーザ光、 $0.63\mu m$)であった。

以上は一般的傾向に類似しているが、 10^6 R/Hにおいて回復効果が認められないこと、No.2ファイバでは 2×10^4 Rから画質の変化が始まり、 5×10^5 Rではそれが顕著になり、画像中央部の約65%がダメージを受けている(図28)。特に紫系と $0.6\mu m$ の赤の損失が極めて大きい。周辺と中央の明暗パターンが生じた原因は不明であるが、製造時に生じた熱分布がクラッドの屈折率の不均一を生じさせたのではと推測されている。

(7) 中性子照射による影響

図29に示すように、SI型とGI型に対する中性子線照射の影響は、 γ 線照射の場合と同傾向であり、純石英コアファイバ(No.1, 2)の方が、ドーパントを入れた石英ファイバ(No.3, 4)より損失増加量は小さい。

なお、図30に中性子照射による損失増加の波長依存性を示す。

(8) X線、電子線(β 線)照射による影響

X線や電子線照射の場合も、 γ 線照射の場合と同様に、純石英ガラスコアのファイバは、GeやPをドープした石英コアファイバより同一線量における損失増加量は少い。

(9) 光ファイバ・イメージ・ガイドの耐放射線性についてのまとめ

表3に示したようにメーカー各社とも $10^5 \sim 10^6$ Rに耐える光ファイバを開発しているようであるが、その特性となるとまだ試行錯誤の域を出ない。特にイメージ・ガイドの照射特性については今後の試験結果待ちといっても過言ではない。

しかしながら、Ge等を石英コアにドープしたものより、純石英コアファイバの方が耐放射線性に優れていること、純石英コア中にOH基を数100~1000ppm程度含有させると γ 線照射による損失増加が抑圧されていること等については各種データの共通的特性といえよう。

照射損失の回復特性についてはいくつか報告があるものの特性が一般化されるまでには至っていない。

ファイバ・スコープとしての照射データは極めて少く、またすべてイメージ・ガイドの途中部分の照射であり、先端のレンズ系や光ファイバ・イメージ・ガイドの端末処理部についての照射データは見当らない。

さらに耐熱性と耐放射線性が分けて扱われており、耐放射線性が良好でも耐熱性に問題があるとか、耐熱性だが被覆等の耐放射線性に劣るなど、耐熱性と耐放射線性を両立させたファイバ・スコープは現在までの調査では見当らない。

(10) ガラスの耐放射線性

ファイバ・スコープには両端に対物レンズ系と接眼レンズ系が取付けられる。ファイバ・スコープを放射線雰囲気で使用すると、対物レンズが照射されることになるが、残念ながらファイバ・スコープの対物ヘッドの照射例は見当らない故、ペリスコープ用光学ガラスの耐放射線性データを引用することにする。

通常のガラスは γ 線照射により光透過率が極端に小さくなるが、普通ガラスにセリウム(Ce)等を添加した耐放射線性ガラスは未照射時わずかに着色しているものの、図31に示すように照射による光透過率の減少は少く、特にBK-7は耐放射線性に極めて優れている。

ペリスコープでは色収差をなくするためにレンズを接着剤を用いて貼り合わせる必要がある。従って、照射による接着剤の変色や機能低下が問題になる。図32は接着剤により接合したガラスの照射結果を示しており、照射前後で透過率に大きな変化がないものの、未照射段階から短波長域での透過率の低下が目立つ。

図33は、NSRR実験に供されたペリスコープ(レンズ22枚、約2.6m長)の未照射時の光透過率を示しており、0.5~0.7 μm でほぼ30%(-5.2dB/2.6m)となっている。40m長に換算すると-80dBとなり、ファイバ・スコープの-7dB(図9)より極端に悪い(2000万分の1)。

第7章 開発課題

第6章までに紹介してきたファイバ・スコープの現状をふまえた上で、FBR炉容器廻り ISI 目視検査用ファイバ・スコープに関する課題について以下検討する。開発事項の内、とりわけ耐熱性と耐放射線性を同時に満す柔軟性のあるファイバ・スコープの実現が最大の課題となる。

既存技術では、個々の項目はクリアできているものも少ないが、FBR炉容器廻りで要求される条件をすべて同時に満すものは開発されていないのが現状である。

例えば、耐放射線性が評価されつつある光ファイバはその多くが通信用のものであり、光ファイバ・イメージ・ガイドの照射例は極めて少い上、いずれも標準仕様のものであり、耐熱型の照射特性は今後の課題である。また、耐熱性(240°C)を向上させるには、被覆等を新たに開発する必要性も出ようから、ファイバの保護としてのコーティング機能自体やイメージ・ガイド製造法からの見通しの必要性も出てくる。

光ファイバ・イメージ・ガイドを長尺にすると、特に短波長域(青)での伝送損失が急激に大きくなり、40m長もの長尺になると実用上問題になってくる。分解能を上げるため、画素数を増加させると、曲げ半径が大きくなる他、製造時の画素群断面での温度勾配が大きくなり、構造上の欠陥を誘発して、0.6μmにおける照射損失が大きくなる懸念もあるという実験値からの推測もなされている⁽²⁾。

従って、耐熱耐放射線性ファイバ・スコープの開発においては、個々の課題を別々に解決する方法よりは、開発目標を先に明らかにし、それらを同時に満たす仕様と製法を探り、試作品について耐熱性、耐放射線性等の面から試験していく方法がよいと思われる。

表5に課題と開発目標(案)を開発の難易とともに示す。

以下重点開発項目について述べる。なお、主な目標仕様は次の通りである。

画 素 数	3万以上
ケーブル長	約40m以上(運転床面下33m, 同上7m)
外 径	約20mm以下
最小曲げ半径	約150mm以下
屈 曲 回 数	max. 2000回(暫定値)
耐 热 性	max. 240°C
伝 送 損 失	
・未 照 射 時	可視域(0.4~0.7μm), ケーブル長40mで4dB以下 (目標値)。可視域で極力フラットなこと。
・照 射 に よ る 伝 送 損 失 増 加 (10 ⁶ R 照射)	可視域, 照射雾団気表30mで15dB以下(目標値) 可視域で極力フラットなこと。

視野径	照射により著しい機械的劣化のないこと。
被写体までの距離	約 50 mm (~ 約 100 mm)
ズーム機能	約 140 mm (焦点深度約 22 mm) 本案は固定焦点式とするが、観察性から広範囲の視認可能なようズーム機能付も代案として検討する。
照明	内蔵照明(ライトガイド)と外部照明について比較検討する。

7.1 画素数とケーブル長の増加

現在製品化されているものは、セミフレキシブルなもの(S型)では3万画素×20mが上限である。

0.8 mmの分解能を保って視野範囲100 mmφを実現するためには、約10万画素が必要となるが、まず実現可能な3万画素×40mを当面の目標にし、視野範囲は50 mmφ程度とする。

なお、肉眼試験ではASME VTM-2又は3相当であり、欠陥識別の必要はない。従って、表面状態や変形の有無を観察できれば良いので、分解能は必ずしも0.8 mm必要なわけではない。

長尺(40 m)にした時の製法が照射による伝送損失の増加を招くことのないよう、あらかじめ組成も含めて検討しておく必要がある。

7.2 伝送特性の改善

図8に示したように、石英コアファイバは伝送損失が最も少い優れたファイバである。可視域における分光特性は短波長域で損失が大きく、長波長域で損失が少い。

通信用光ファイバに比べて、光ファイバ・イメージ・ガイドはコア径が約1/10と小さく、製法も異なるためか図9のように伝送損失がファイバ長に比例せず長くなる程、短波長域の損失がいっそう大きくなる。従って、ファイバ長や製法により色調が異ってくる可能性が大きい事が長尺のイメージ・ファイバ開発上まず留意すべき点であろう。これに放射線照射効果(後述)が加わる。

現状におけるファイバ・スコープの伝送損失は文献(2),(29)を参考にすると、以下のように推測される。

$$[\text{損失}, \text{dB}] = 10 \log_{10} P_{\text{out}} / P_{\text{in}}$$

被検面での反射効率(幾何学的効率)	- 10 dB
被検面の表面仕上げ度と酸化による影響	- 3 dB

対物レンズの光透過率	- 0.8 dB
対物レンズ構成による回折効果（レンズ2枚の場合）	- 0.9 dB
対物レンズ系の照射による伝送損失（ $10^6 R$, 図32）	- 1 dB

光ファイバ端面における受光損失	- 10 dB
-----------------	---------

光ファイバ未照射伝送損失	- 7 dB * ($\rightarrow - 4$ dB)
$10^6 R$ 照射伝送損失増加量	- 30 dB * ($\rightarrow - 15$ dB)

温度による伝送損失変化（不明）	$\pm \alpha$ dB *
-----------------	-------------------

合計 - 61.7 dB $\pm \alpha$ dB ($\rightarrow - 43.7$ dB $\pm \alpha$ dB)

- 61.7 dB は被検面での照射 (ex. 2000 ルクス) が光ファイバ他端の撮像管位置では約 148 万分の 1 (1.35×10^{-3} ルクス) になることを意味し、接眼レンズ側に高感度の撮像管を必要とする。市販されている撮像管の感度（光電面照度）は以下の通りである。⁽²⁾

撮像管の種類	感度（光電面照度），ルクス
標準 ITV カメラ	約 1
高感度 ITV カメラ	約 $1.5 \times 10^{-2} \sim 6 \times 10^{-2}$
超高感度イメージ管	約 $5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-5}$

従って、要求を満すのは超高感度イメージ管のみとなるが、例えば超高感度イメージ管の内最高感度を有するイメージ・インテンシファイア（感度 5×10^{-5} ルクス）は分光特性が狭帯域であり、カラーバンド補償を必要とし、さらに複雑になる。

前記の伝送損失の内 *印は特に改善の余地ならびに効果の大きいものを示している。製法検討により光ファイバ・イメージ・ガイドの伝送損失を光ファイバ単体の場合の値に近づけ（7 dB \rightarrow 4 dB），照射による伝送損失増加量を 15 dB に減少化させると、全損失量は 43.7 dB (被検査面 2000 ルクスで、光電面照度 8.5×10^{-2} ルクス) となり、高感度 ITV カメラの使用が可能となって、カラーバンドの補償も不要となる。

なお、温度による伝送損失は全く不明であるが、照射時の温度回復効果も若干期待できることがから、両者は相殺し合う可能性もあるので、伝送損失量に加えなくとも大きな誤りはないと思われる。

7.3 耐熱性の向上

現状では、ファイバ・スコープの耐熱性は 150～180°C が限度であるが、一部 600°C も可能（但し、曲げられない）と思われるカタログデータもないわけではない。

耐熱性を向上させた場合、可とう性と照射特性の面で弊害が出ないか十分吟味しておく必要があり。目下、FBR 炉容器廻り ISI 目視検査の環境条件に適合するものが開発可能か、メーカーと検討を始めつつある。ポリイミド系等耐熱耐放射線性有機物についても検討する価値があろう。

ファイバ・スコープの耐熱性が炉容器 ISI の開発課題の大きな位置を占めることから、ISI 実施時の「もんじゅ」炉容器内ナトリウム温度を 180°C 以下（例えば 200°C ± 20°C）で運転することも検討の余地があろう。

7.4 耐放射線性の向上

線量率 10^3 R/H と累積線量 10^6 R はこれまでのデータから、さして苛酷とはいえない条件である。しかし、次の課題を克服する必要がある。

- (i) 照射により、可視域 ($0.4 \sim 0.7 \mu\text{m}$) の内、短波長域（青）の損失増加が非常に大きいこと、イメージ・ガイドとして成型する際の製法上の問題と思われるが、 $0.6 \mu\text{m}$ における赤系統の損失増加がきわだっていること等から、照射による色調の変化が未解決である。色調の再現性は目視装置の生命があるので、コアおよびクラッドの組成も含めて、十分検討の上対策を講ずる。
- (ii) 昇温時 ($\sim 240^\circ\text{C}$) の照射特性、回復特性、対物レンズ系の耐放射線性を含めて、 γ 線照射におけるファイバ・スコープの耐放射線性を明らかにする。

7.5 その他

照明は外部照明とし、炉容器入口配管用に開発した光源を用いるのが最も容易である。しかし、コンパクト化と冷却装置削除という観点から、ライトガイド内蔵方式も検討する。この場合、ハレーション対策と、光ブリーチング効果による照射損失回復を期待して、光ファイバ・イメージ・ガイドを 2 本装荷し、一方をライトガイドに、他方をイメージ・ガイドとし、適時これを入れかえて使用するのも一案かもしれない。

画素数と分解能から視野範囲が制限されるため、どうしても近視的観測になり、全体像をつかみ難い。従って遠隔ズーム機能も検討し、実現性があれば追加する。

7.6 開発スケジュール（案）

項 目 \ 年 度	58	59	60
調 査	○ — ○		
素材の開発 (主として耐熱・耐放 射線化と可とう性)	○ — ○	○ — ○	
システム化 (ファイバ・スコープと して長尺化の見通しと 高温照射雰囲気での画 質評価等)		○ — ○	
実 用 化 (実用モデルの試作)		○ — ○	○ — ○

(R & D 計画の詳細は別途作成する試験計画書に記述する。)

第8章 謝 辞

当調査報告をまとめるにあたり、御指導頂いた高速炉機器開発部厚母栄夫部長ならびに本社F B R 開発本部開発調整室深田富啓主任研究員、機器材料ブロック岡林邦夫主幹に感謝します。また調査に関する有意義な技術資料や情報を頂いた日本電信電話公社茨城通信研究所線路研究部の川瀬正明研究専門調査役、泰野諭示研究専門調査員、国分利直氏、原研N S R R 斎藤伸三室長、および住友電気工業株式会社、大日日本電線株式会社、日立電線株式会社、古河電気工業株式会社、藤倉電線株式会社、ファコム・ハイタック株式会社をはじめとするメーカー各位に深く感謝の意を表します。また東海事業所における光ファイバ関係情報提供を東海事業所技術部リサイクル技術開発室樋原英千世室長から頂いたことを付記します。

参考文献

- (1) 未来工学研究所，“高速増殖炉に適用する ISI 技術の調査”
PNC SJ299 83-04 (1983.2)
- (2) 木原他，“炉容器廻り ISI 関連部品開発試験（目視機器）”
PNC SJ222 83-07 (1983.4)
- (3) 副島，“光通信のはなし”，日刊工業新聞社 (S 57.8)
- (4) 中筋他，“光ファイバの耐放射線特性”，絶縁材料研究会資料，
EIM-83-25
- (5) 藤原他，“イメージ・ファイバの放射線特性”，絶縁材料研究会資料，
EIM-83-25
- (6) 井原他，“イメージ・ファイバのプロセス計装への活用方向”，
計装，Vol. 25, No. 10 (1982.10)
- (7) 中筋他，“耐熱難燃性耐放射線性ファイバの開発”，
昭和 58 年度電子通信学会総合全国大会，No. 1121
- (8) 熊丸他，“光伝送用材料”，工業材料，第 27 卷，第 6 号
- (9) 田中他，“石英コアファイバの耐放射線性”，絶縁材料研究会資料，
EIM-82-29
- (10) 伊藤他，“石英イメージガイドの耐放射線性”，絶縁材料研究会資料，
EIM-82-30
- (11) 平島他，“石英コアファイバの γ 線照射特性”，
昭和 54 年度電子通信学会総合全国大会，No. 968
- (12) 田中他，“石英コアファイバの γ 線照射特性(II)”，
昭和 55 年電気通信学会関西支部連合大会，No. G 10-8
- (13) 田中他，“石英コアファイバの γ 線照射特性(III)（温度特性）”，
昭和 56 年度電気通信学会総合全国大会，No. 963
- (14) 田中他，“石英コアファイバの γ 線照射特性(IV)（長期間照射特性）”，
昭和 56 年電気通信学会関西支部連合大会，No. G 10-10
- (15) 田中他，“石英コアファイバの中性子線照射特性(I)”，
昭和 55 年電気通信学会関西支部連合大会，No. G 10-7
- (16) 田中他，“石英コアファイバの中性子線照射特性(II)”，
昭和 57 年度電子通信学会総合全国大会，No. 956

- (17) 内海他, "100m長でも使用できる新しい工業用ファイバスコープ, ダイヤガイドスコープ", 大日本電線時報, № 68
- (18) 井原他, "スミスコープ開発", 住友電気, № 120 (S 57. 3)
- (19) 中居他, "石英系光ファイバの γ 線照特性", 絶縁材料研究会資料, EIM-82-28
- (20) 八島, "光ファイバの強度に及ぼす γ 線照射の影響", 新潟大学工学部研究報告, 第30号 (1981)
- (21) ファコムハイタック, "光ファイバ応用技術, 現状と将来", PNC 高速炉機器開発部での紹介資料 (1982. 12)
- (22) 藤倉電線, "光ファイバの耐放射線特性", 技術資料 № II-8322
- (23) 角田他, "光ファイバの耐放射線特性", 絶縁材料研究会資料 EIM-83-21
- (24) 住友電工カタログ
- (25) 大日本電線カタログ
- (26) 日立電線カタログ
- (27) 古河電工カタログ
- (28) 藤倉電線カタログ
- (29) 斎藤, "燃料棒急速加熱条件下における燃料挙動の可視的研究", JAERI-M 9756 (1981. 10)
- (29 a) 斎藤, "原子炉燃料棒急速加熱時の燃料挙動", 流れの可視化, Vol. 2, № 5 (1982. 4)
- (30) "無機化学ハンドブック", 技報堂
- (31) 飯野他, "光ファイバの耐放射線性", FAPIG, № 101, p21 (1982. 7)
- (32) 松田他, "イメージガイドシステムの開発と赤外線伝送", 計装, vol.24, № 8, (1981)
- (33) 藤倉電線, "光ファイバの耐放射線特性", 技術資料 № II-8322 (1983. 4)

表1 各種遠隔目視装置の比較

FBR 炉容器廻り ISIへの適否(目安)
 ◎優 ○良 △やや劣る ×不適

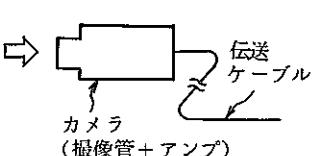
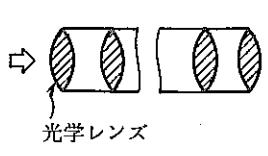
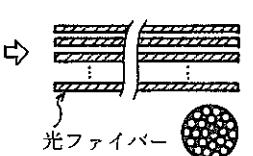
項目	ITV カメラ	ペリスコープ	ファイバ・スコープ
構 造	⇒ 	⇒ 	⇒ 
画像伝送方式	撮像管により影像を間接伝送	複数の光学レンズにより直接伝送	10 μm程度の光ファイバを束ねた直接伝送
画像分解能	◎ ITV カメラ故高分解能	◎ 光学レンズによる伝送のため高分解能	○ 分解能は光ファイバの本数(画素数)に依存
伝送損失	◎極めて小さい	×極めて大きい (長尺では不利)	○比較的小さい
サ イ ズ	△ 比較的大	○小型	◎超小型
ケーブル長	◎ 数 10 m ~ 数 100 m	× 10 m 程度	○ 100 m (1万画素) 30 ~ 40 m (3万画素)
可 と う 性	◎ 伝送ケーブル故可とう性良	× 光学レンズ使用による被覆剛性化のため曲げ半径大規定角以上に曲げると視野側方にかけりを生じる。	◎ 可とう性良 曲げ半径小 (300 mm以下)
耐 熱 性	× 撮像管の耐熱性は 70°C どまり。冷却を必要とする。	○ 光学レンズはガラス故、被覆の耐熱温度に依存	○ 光ファイバコア自体は約 1000°C に耐える。被覆をメタルにすれば耐熱性向上
機 械 的 強 度	△ カメラの耐衝撃性は劣る。	△ 光学レンズの間隔を一定に保つため衝撃荷重に弱い	○ 石英系光ファイバで約 50 kg/mm の引張強さ
耐 放 射 線 性	△ $10^4 \sim 10^5$ Rまでの耐放射線性あるも、電子回路含むためやや劣る。	○ 耐放射線性ガラスの開発できそう故、耐放射線性良と判断される。	○ 石英系光ファイバで $10^5 \sim 10^6$ Rに耐えうると期待されている。
重 量	△ やや重い	○軽量	◎ ペリスコープよりさらに軽量
備 考	撮像管は通常 40 ~ 50 °C 以下(短時間では 60 ~ 70 °C)で使用する必要がある。一方、宇宙開発分野で実用化中の CCD 素子 (Charge-Coupled Device) は 120 °C 以上に耐えるが 500 R 以上では使えない。	原研 NSRR での例 ^[29] (約 2.5 m 長で光学レンズ 22 枚使用) のように、光学レンズ多数必要なこと、基本的には rigid であることに注意。	高純度石英ガラスの場合、軟化温度は約 1584 °C ^[30]

表2 汎用光ファイバ・スコープの仕様および特性比較表

開発メーカー 項目		A 社	B 社			C 社	D 社	E 社
型 式		S 型	R 型	S 型	F 型	S 型	S 型	S 型
材質	コア	純石英ガラス	←	←	←	←	←	
	クラッド	Fドープ石英	石英ガラス	←	←	←	←	
	被覆							
寸法	画素コア径(μm)	10	7 ~ 11	7 ~ 11	15 ~ 24	10		
	画素ファイバー径(μm)	12 ~ 16	11 ~ 16	11 ~ 16	20 ~ 30			
	イメージガイド外径(mm)					13	10	
	製造可能長(m)	~ 20	2 ~ 10	25 ~ 100	1, 3, 5		~ 10	
特性他	開口数(NA)	~ 0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	
	画素数(万)	~ 3	~ 16	~ 3	~ 4	~ 3	~ 3	
	コア占有率(%)		30 ~ 50	30 ~ 50	30 ~ 50	~ 30		
	視野角(度)					60	20 ~ 55	
	観察方式	直視, 側視	←	←	←	←	←	

表3 光ファイバ・スコープの現状一覧表（1983年5月調査）

開発メーカー 項目	A 社	B 社			C 社	D 社	E 社
一般仕様	型 式	S 型	R 型	S 型	F 型	S 型	S 型
	最 大 画 素 数	30,000	80,000	30,000	40,000	30,000	30,000
	ケーブル長 (m)	20	5	30	5	20	10
	外 径 (mm)	12	20	3	12	13	10
	視 野 角 (度)		3 ~ 60			~ 60	20 ~ 55
	観 察 方 式	直 視, 側 視	同 左		同 左	同 左	
物理的・機械的性質	N A (開口数)	0.2 ~ 0.25	0.2		0.2	~ 0.25	
	引張強さ (kg/mm ²)		52				
	最小曲げ半径 (mm)		300		300		
	最高使用 温度 (°C)	標準型 150	180			80	
耐 放 射 線 性	耐 放 射 線 性 (R)	$10^5 \sim 10^6$	10^5		10^5		
	伝 送 損 失 増 加 量 (dB/km)	約 50 ($\lambda = 0.85 \mu\text{m}$, $10^5 \text{ R/hr} \times 5 \text{ hr}$)	約 50 ($\lambda = 0.85 \mu\text{m}$, $10^5 \text{ R/hr} \times 1 \text{ hr}$)		20 ~ 30 ($\lambda = 0.85 \mu\text{m}$, $5 \times 10^5 \text{ R}$)	< 1000 ($\lambda = 0.85 \mu\text{m}$, $10^6 \text{ R/hr} \times 1 \text{ hr}$)	
	コ ア 材	ふつ素ドープ石英ガラス	純石英 (MRT)		純石英ガラス	石英ガラス	

対象とする光ファイバ・スコープの資料が得られず。

表 4 石英ガラスの物理特性⁽³⁾

	石英ガラス	銅		アルミニウム	
		軟	硬	軟	硬
化 学 記 号	SiO ₂	Cu		Al	
比 重	2.20	8.89		2.70	
抵 抗 率 ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)	10×10^{24}	1,724	1,777	2,826	
導 電 率 (%)	1.7×10^{-19}	100	97	61	
引 張 強 さ (kg/mm ²)	約 300	20 ~ 27	35 ~ 47	8 ~ 11	15 ~ 20
弾 性 係 数 (kg/mm ²)	7,200	12,000		6,300	
線 膨 張 係 数 (kg/mm ²)	0.5×10^{-6}	17×10^{-5}		23×10^{-6}	
比 热 (Cal/Cg)	0.20	0.092		0.21	
熱 伝 導 率 (Cal/cmS)	0.0035	0.923		0.487	
融 点 (°C)	1,730	1,083		660	

表5 FBRにおけるISI肉眼試験用ファイバ・スコープの開発課題

仕様		現 状	開 発 目 標	開発の要否	開発の難易	備 考
特 性	画 素 数(万)	3 / 5	5 ~ 10	要	普 通	ASME VTM-1をクリアする分解能を当面目標とする。
	ケーブル長(m)	20 / 10	40	要	容 易	現状では5万画素では10mが限度だが40m長も比較的容易であろう。
	外 径(mm)	10 ~ 15	20	不 要	—	
	未照射伝送損失(dB/40m)	7 ~ 1.5 (0.4 ~ 0.7 μm)	< 4, 且つ可視域でフラット (0.4 ~ 0.7 μm)	要	普 通	ISIで使用する40m長に換算。 (図9)
	観 察 方 式	直視, 側視	(直視), 側視	不 要	—	
機 械 特 性	引張強さ(kg/mm)	~ 50	現状で可	不 要	—	
	最小曲げ半径(mm)	< 300	< 150	要	容 易	左記メーカー値は余裕があると思われる所以開発容易
耐 热 性	コア耐熱性(℃)	max. 1000	max. 240	不 要	—	
	被覆耐熱性(℃)	max. 180(メーカーによ っては600℃の例あり)	max. 240	要	難	
耐 放 射 線 性	伝送損失増加量(dB/30m)	max. 30 (0.4 ~ 0.7 μm)	< 15, 且つ可視域でフラット (0.4 ~ 0.7 μm)	要	難	10 ⁶ R 照射(飽和), 放射線霧団気 中を30mと想定。
	色調再現性	近紫外域でダメージ大。 着色現象あり。0.6μm吸収。	近紫外域での伝送損失と, 0.6μm(赤)吸収の低減化。	要	難	
	伝送損失回復特性	回復特性一部にみられる。	温度効果, 光ブリーチ効果 を明らかにし, 出来れば利用 する。	要	難	
照 明	ライドガイド照明方式(ルクス)	2000 ~ 10000	2000 ~ 5000	要	普 通	照度上は現状技術適用。 上記イメージ・ファイバへの組込み法
	ランプ内蔵方式(ルクス)			不 要	—	
	外部照明方式(ルクス)			不 要	—	
光学系	対物光学系の焦点調整法と 耐 放 射 線 性	測定データなし	損失(dB) < 6	要	難	

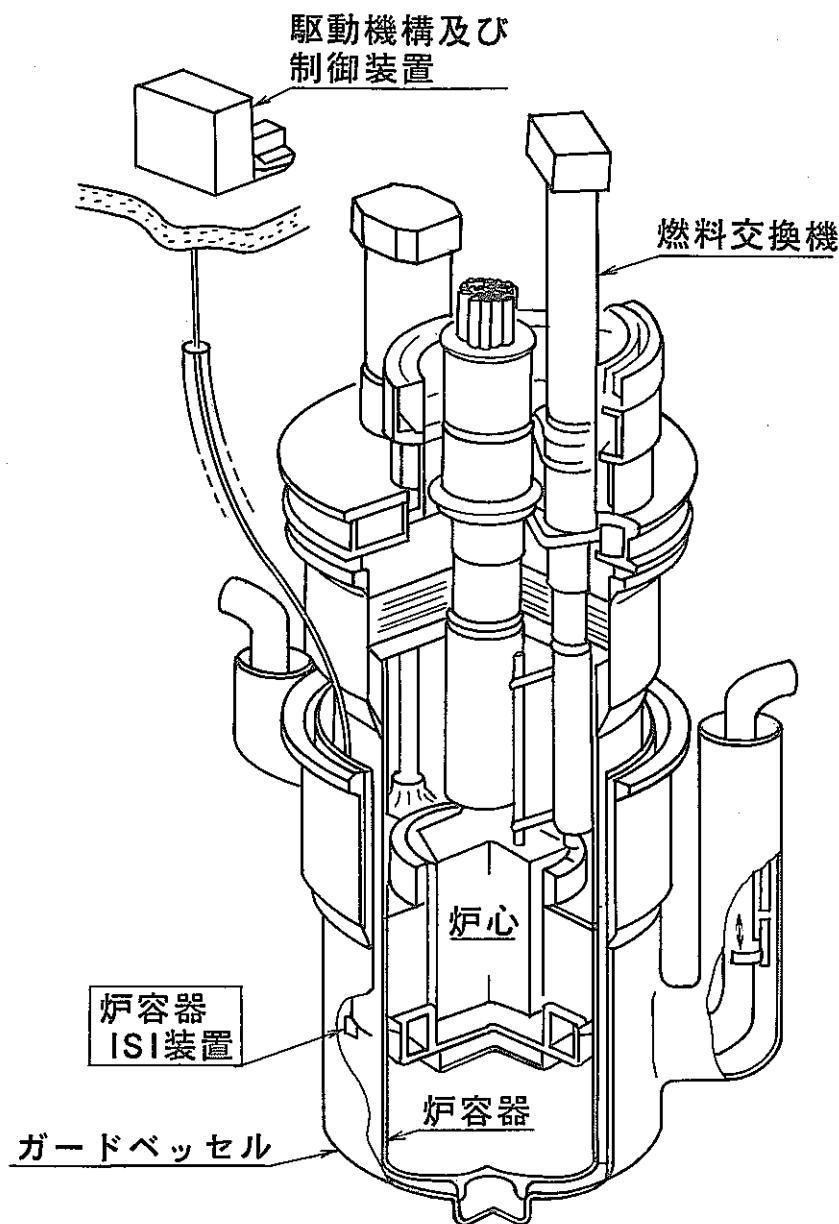


図 1 炉容器廻り ISI 肉眼試験概念図

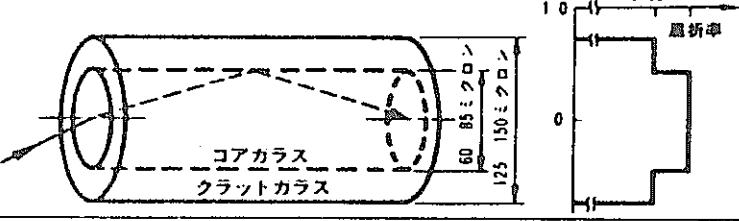
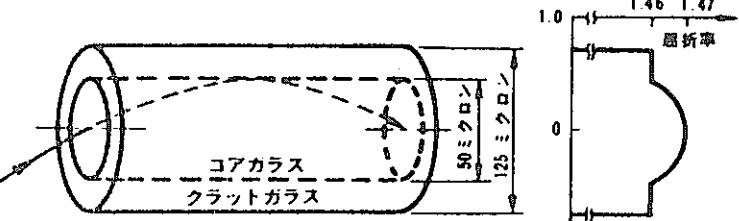
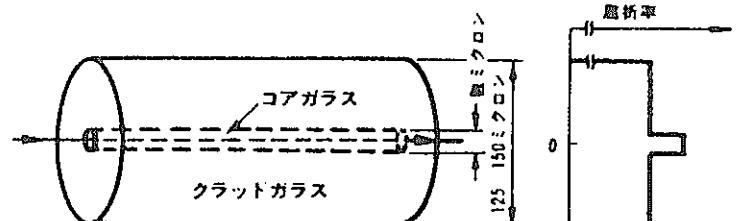
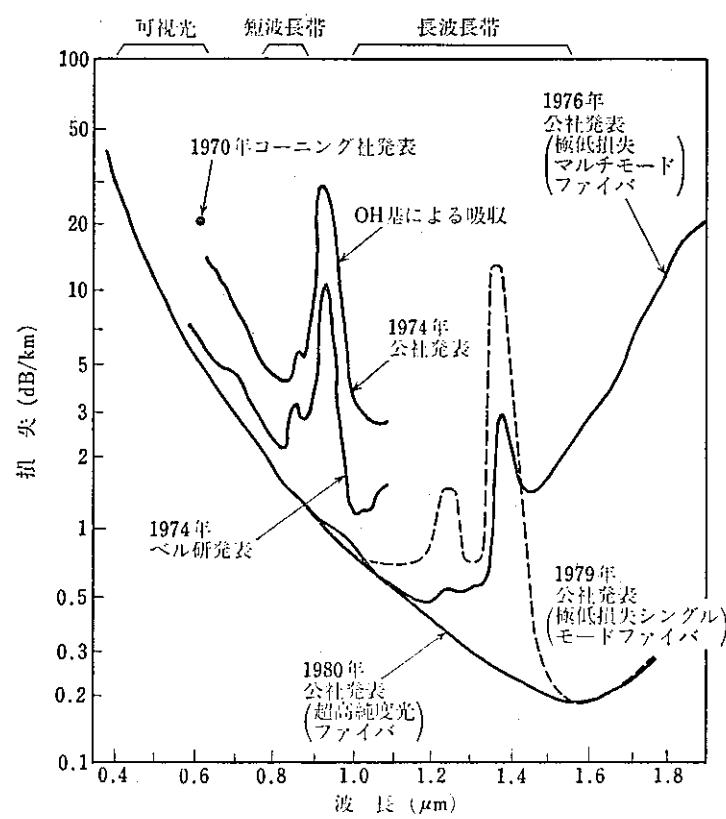
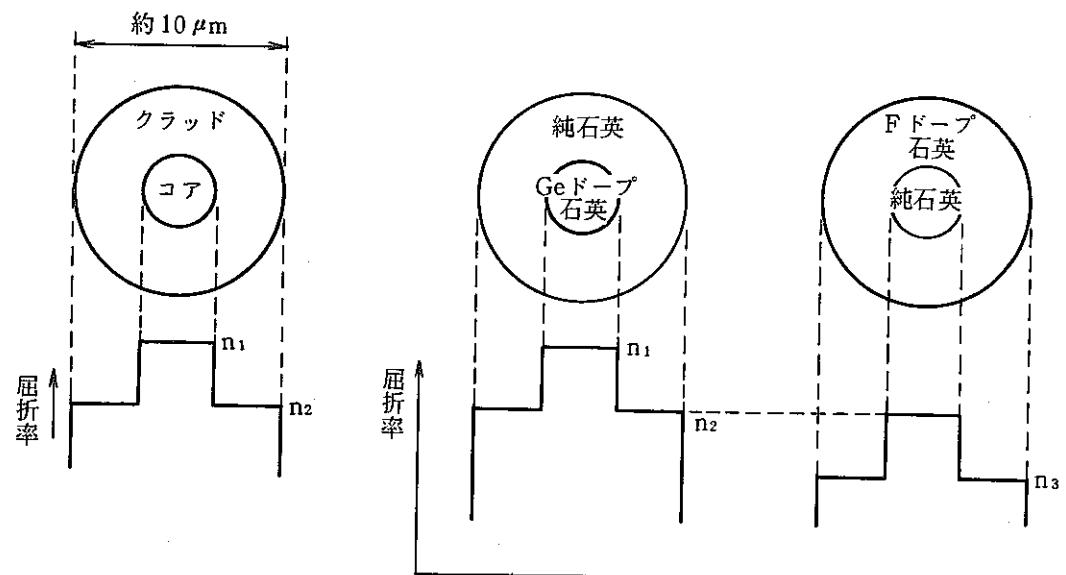
種類	構造と光の伝わり方	特長
ステップインデックス ファイバ(SI) (マルチモード)	 <p>コアガラス クラッドガラス</p> <p>1.46 1.47 屈折率</p> <p>1.0 0</p>	30MHz・km以上 結合効率…大 近距離向 モード分散…大
グレイディットインデックス ファイバ(GI) (マルチモード)	 <p>コアガラス クラッドガラス</p> <p>1.46 1.47 屈折率</p> <p>1.0 0</p>	広帯域 200/400/800MHz・km以上 モード分散…小
ステップインデックス ファイバ (シングルモード)	 <p>コアガラス クラッドガラス</p> <p>1.46 1.47 屈折率</p> <p>1.0 0</p>	超広帯域 数GHz・km以上 モード分散…無

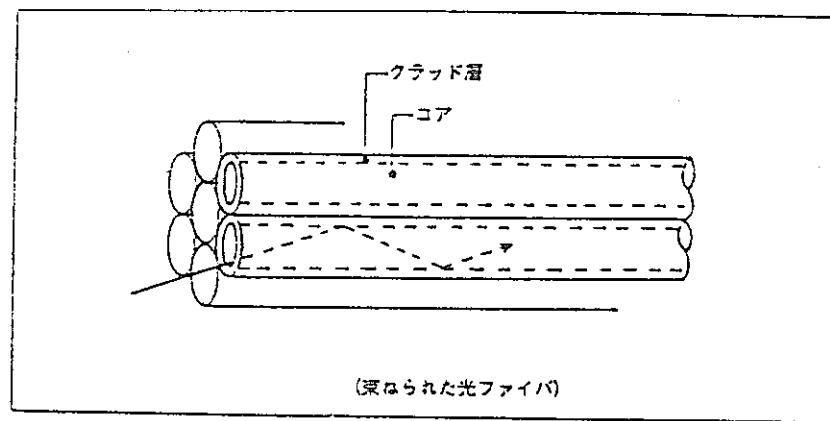
図2 光ファイバの構造による分類⁽²⁾

図3 光ファイバの伝送損失⁽³⁾

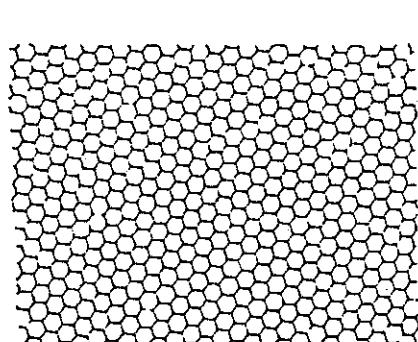


(a) 光ファイバの断面⁽⁶⁾

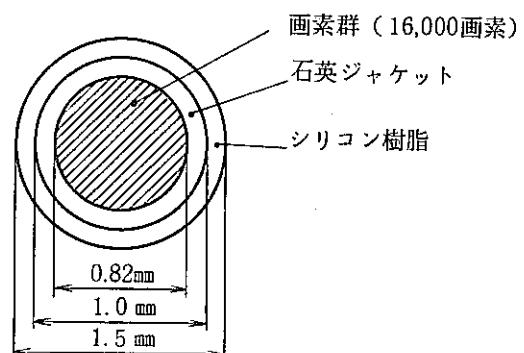
(b) コーニング社左と電々公社右の光ファイバ



(c) 光ファイバ・イメージ・ガイド⁽¹⁾



(d) 光ファイバ画素配列の例⁽⁶⁾



(e) 光ファイバ・イメージ・ガイド断面の例⁽⁶⁾

図4 光ファイバ・イメージ・ガイドの原理と構造

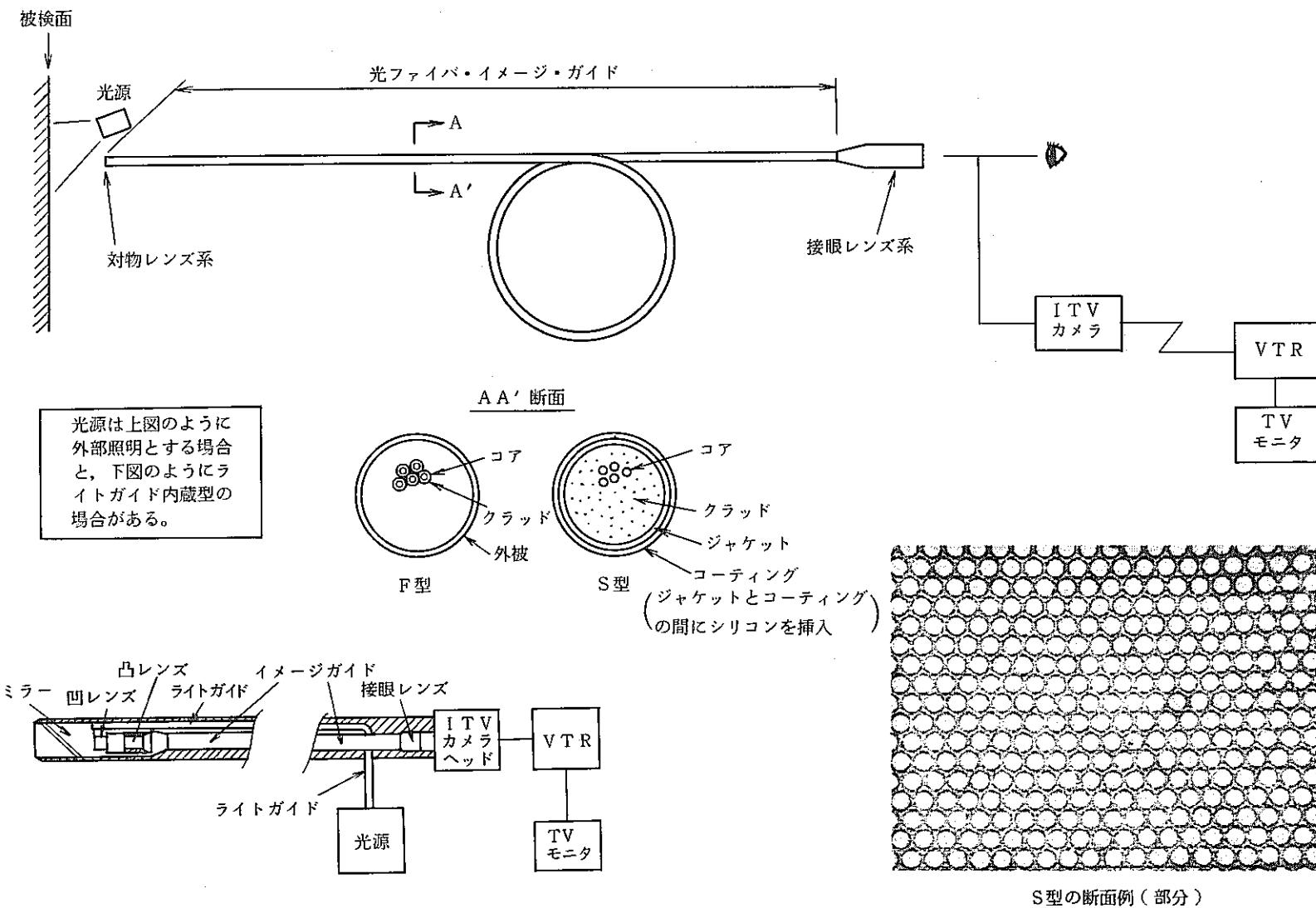
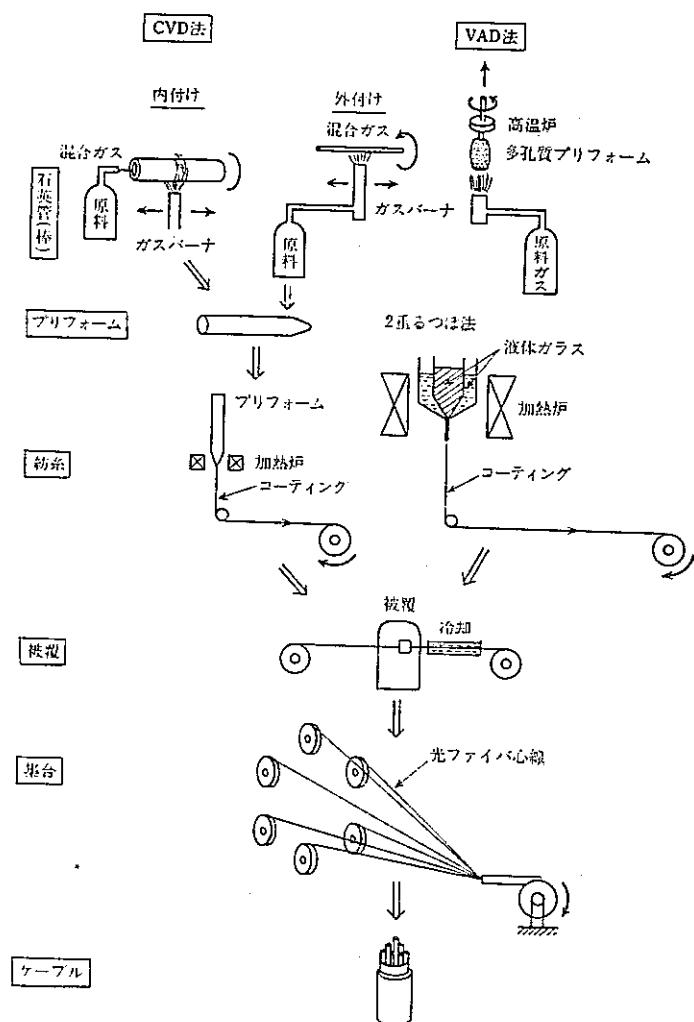
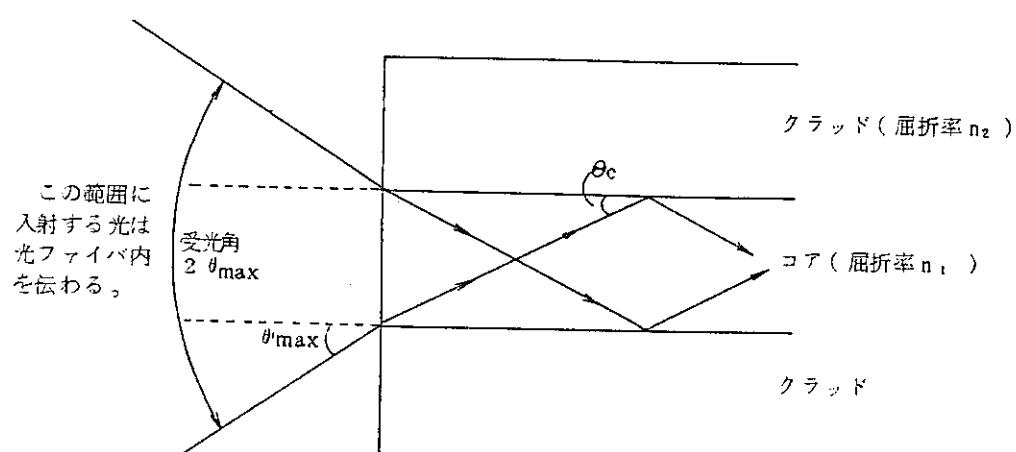


図 5 光ファイバ・スコープの構成概念図

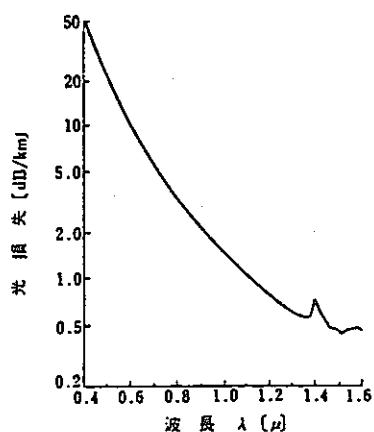
図 6 光ファイバケーブルの製造過程⁽³⁾

$$\text{開口数: } NA = n_1 \sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \approx n_1 \sqrt{2\Delta}$$

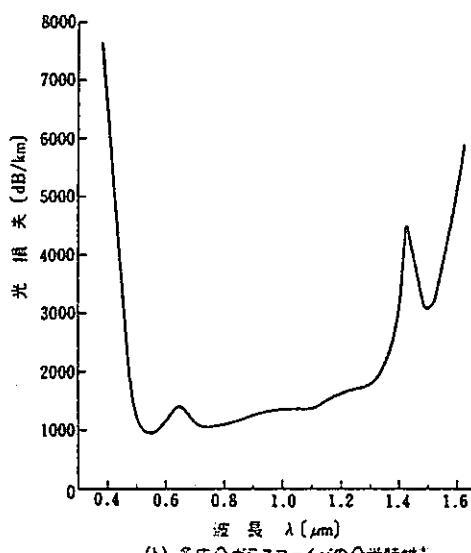
$$\text{受光角: } 2\theta_{max} \approx \sin \theta_{max} \approx 2n_1 \sqrt{2\Delta} \text{ (rad)}$$

$$\text{比屈折率差: } \Delta = (n_1 - n_2) / n_1$$

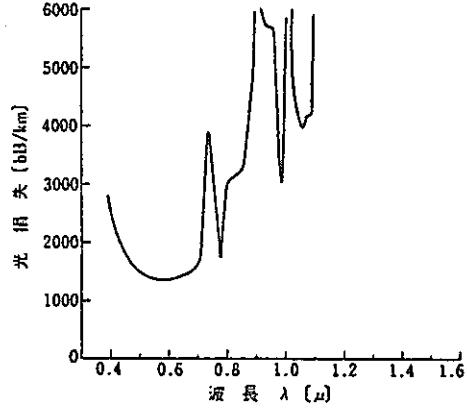
図 7 開口数と受光角の関係⁽¹⁾



(a) 石英ファイバの分光特性

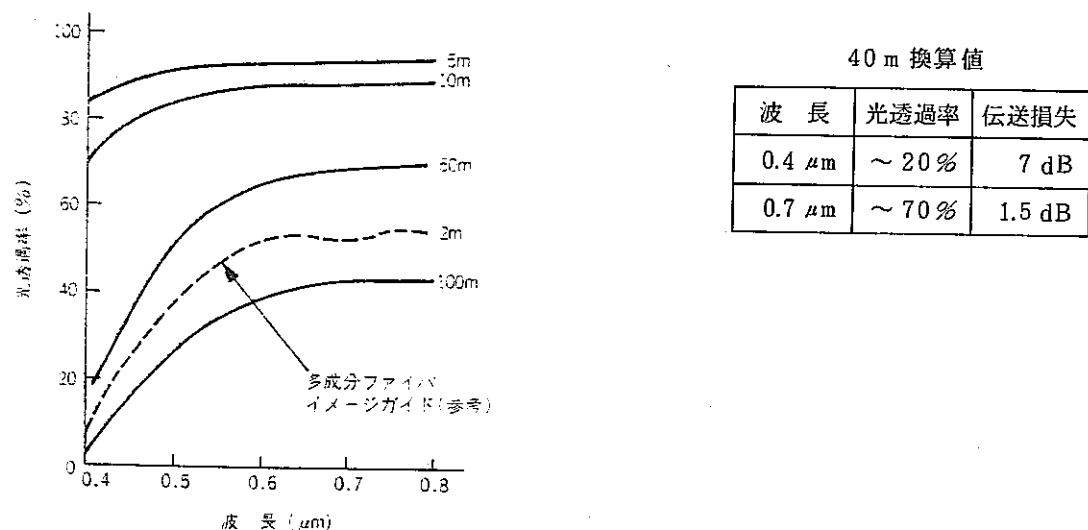
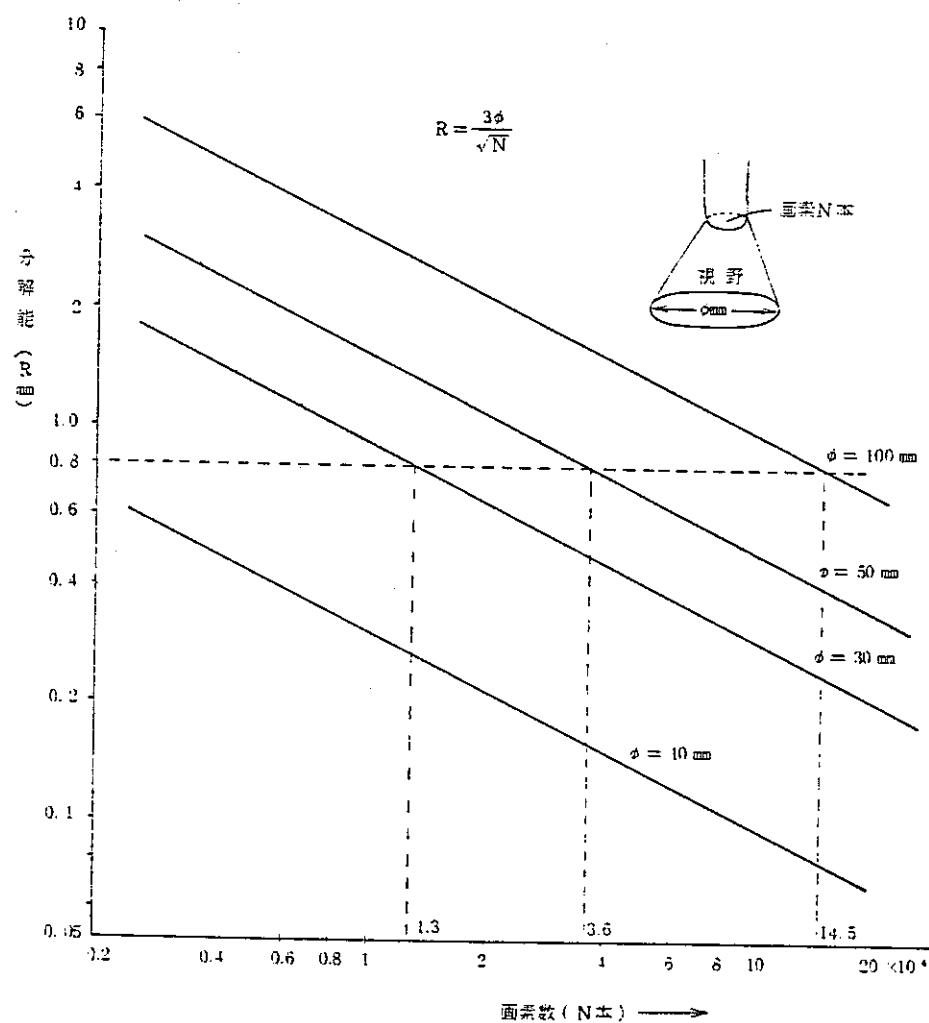


(b) 多成分ガラスファイバの分光特性⁽³²⁾



(c) プラスチックファイバの分光特性

図 8 各種光ファイバの分光特性⁽³²⁾

図9 光ファイバ・イメージ・ガイドの光透過率⁽¹⁷⁾図10 画素数と分解能の関係⁽¹⁾

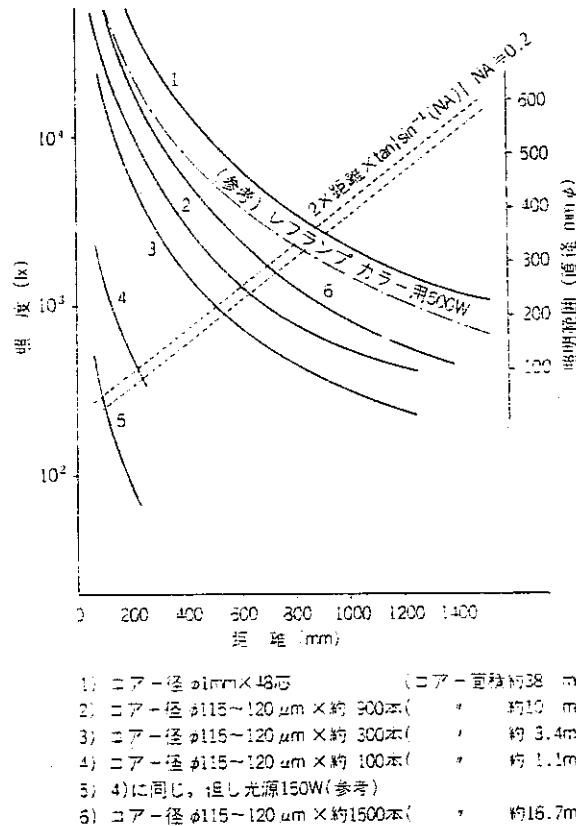


図 11 各種ライドガイドと照明距離—被写体照度の関係⁽¹⁷⁾
(光源: 300W マルチハロゲン—水銀ランプ)

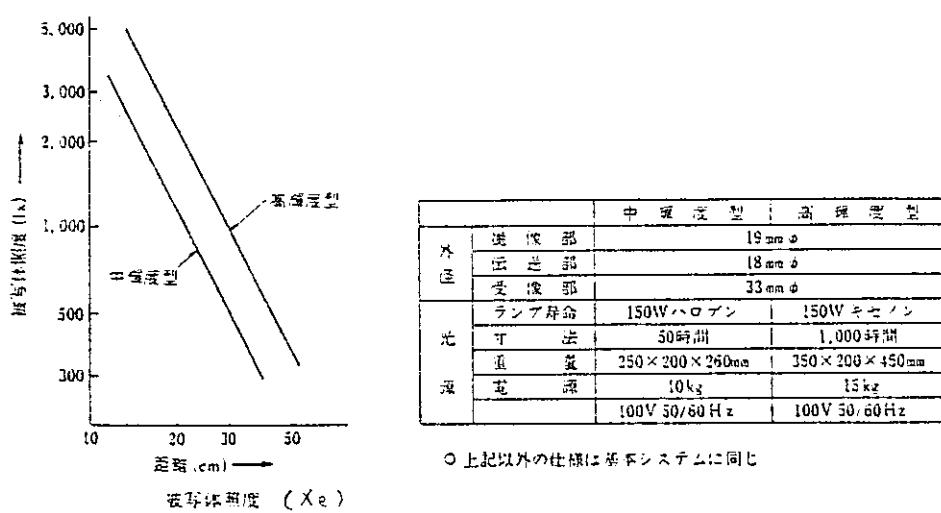


図 12 ライトガイド付光ファイバ・イメージ・ガイド⁽⁶⁾
標準仕様と被写体照度

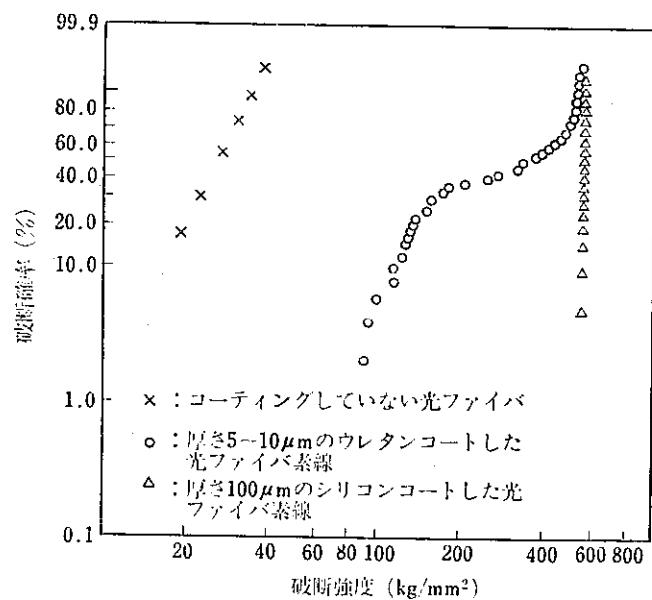


図 13 コーティングの効果⁽³⁾

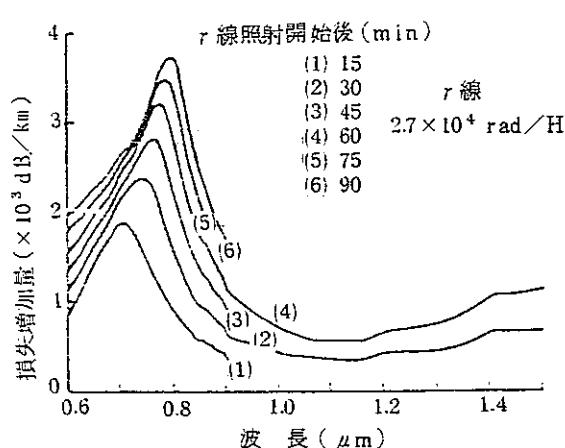


図 14 波長と損失増加量の関係⁽³¹⁾
(Ge, P ドープ石英コア)

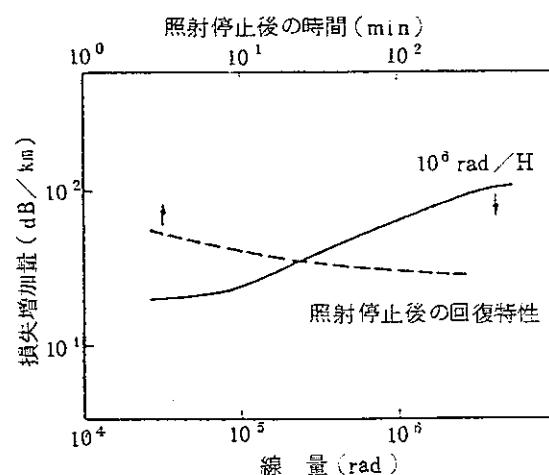
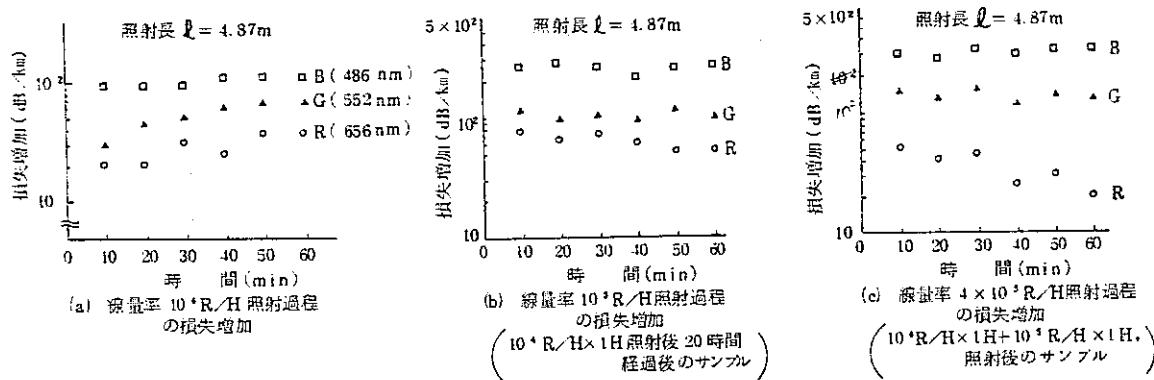


図 15 SI型ファイバの耐 γ 線性, 0.85 μm ⁽³¹⁾
(純石英コア)



(d) 照射条件

図 16 光ファイバ・イメージ・ガイドの γ 線照射特性⁽¹⁰⁾
(純石英コア/ B_2O_3 , F ドープ石英クラッド)

No.		フィイバ径	画素数	材質(コア/クラッド)	線量率
1	●---●	1.5 [mm]	3×10^4	Ge ドープ石英/石英	2.4×10^4 R/H 石英/Fドープ石英
2	□---□	0.9	0.2×		
3	○---○	1.4	0.5×		
4	□---□	0.9	0.2×		
5	○---○	1.4	0.5×		
6	●---●	1.1	0.5×	10^5	

(注) No. 2 ~ 5 の画素径は同一

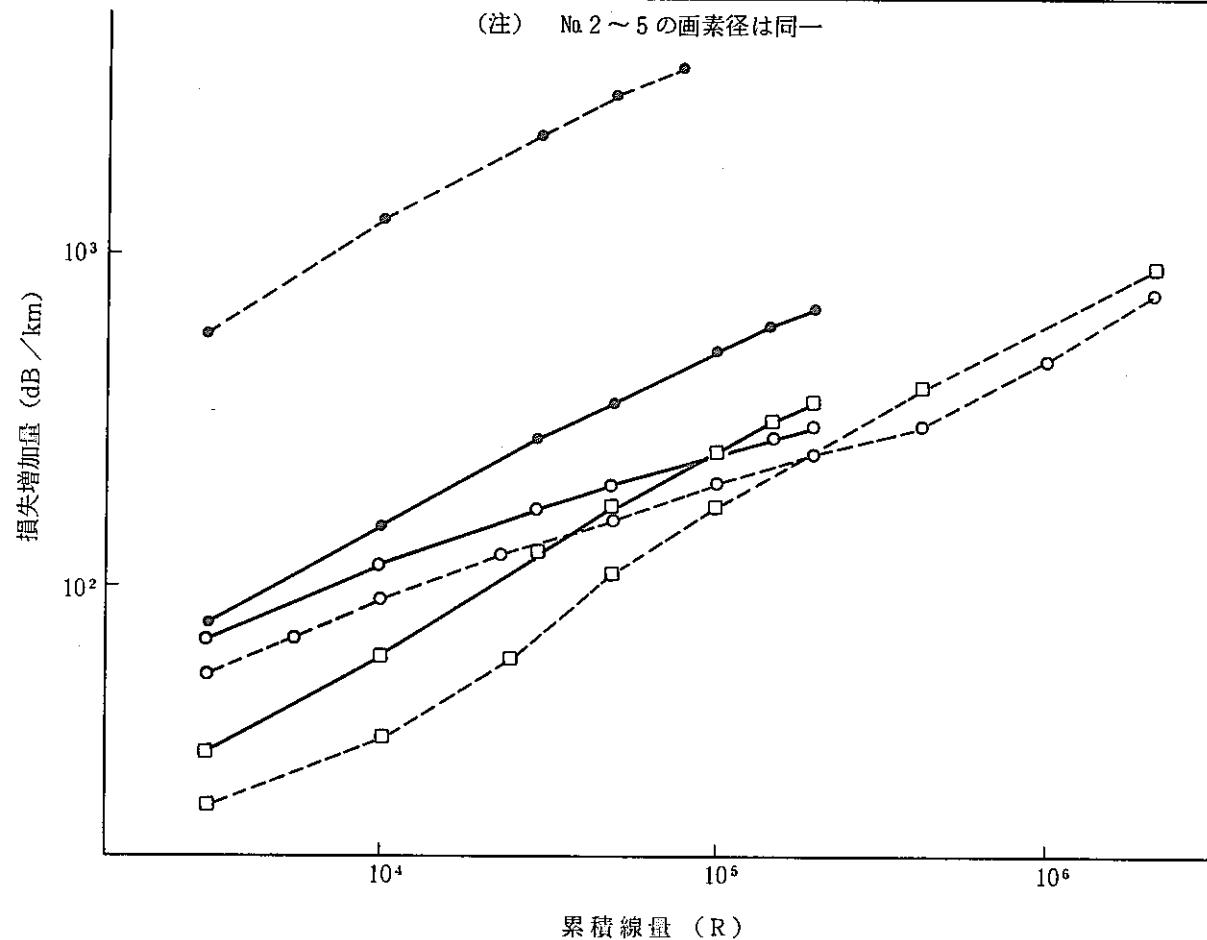


図 17 光ファイバ・イメージ・ガイドの γ 線照射特性⁽⁵⁾
(純石英コア/F ドープ石英クラッド)

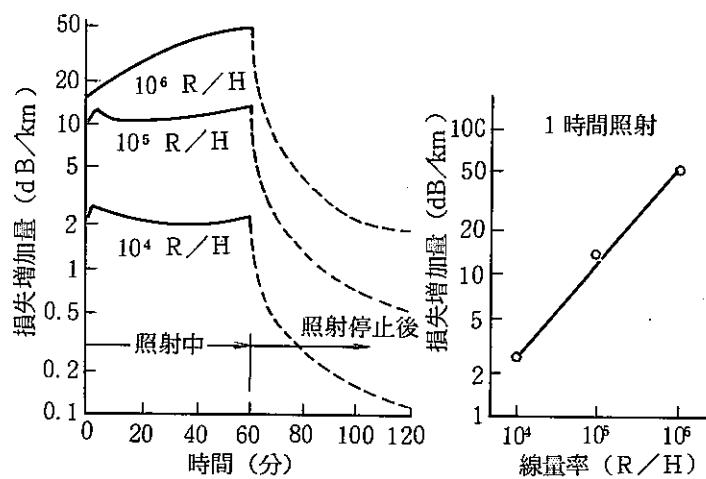


図 18 γ 線線量率依存性⁽¹²⁾

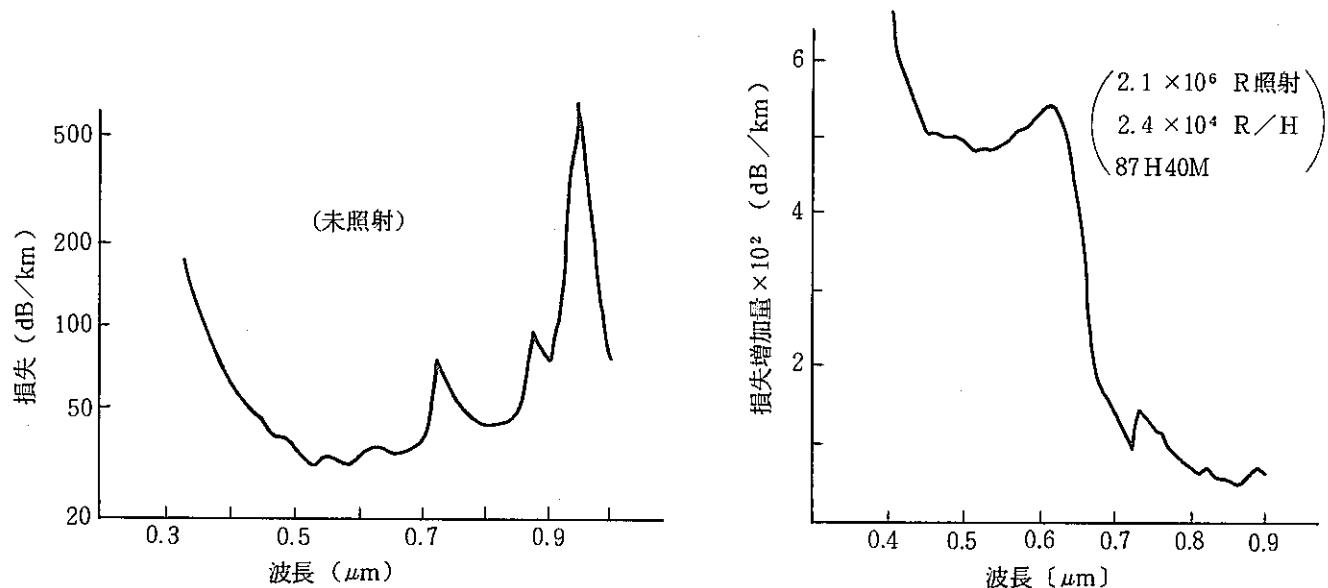


図 19 γ 線照射による損失増加の波長依存性⁽⁵⁾
(純石英コア / F ドープ石英クラッド)

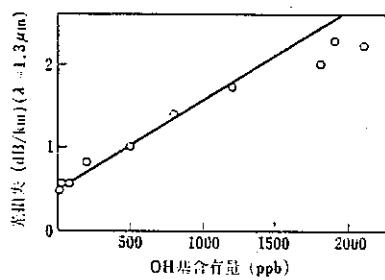


図 20 OH 基含有量と $1.3 \mu\text{m}$ での光損失⁽³⁾

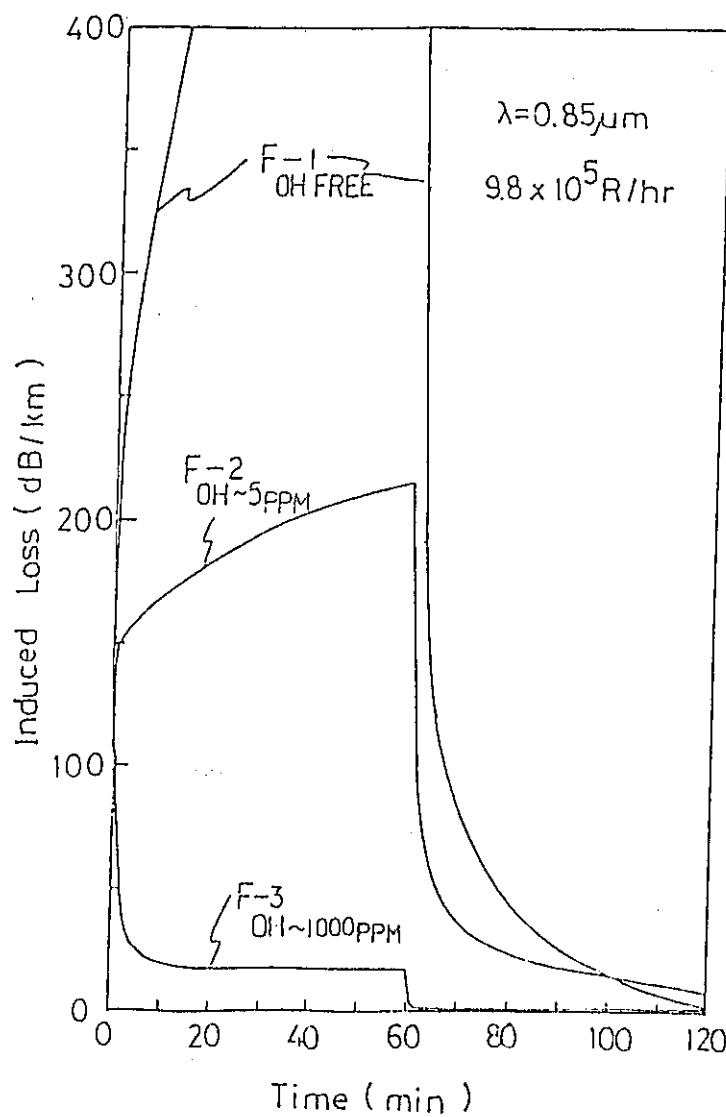
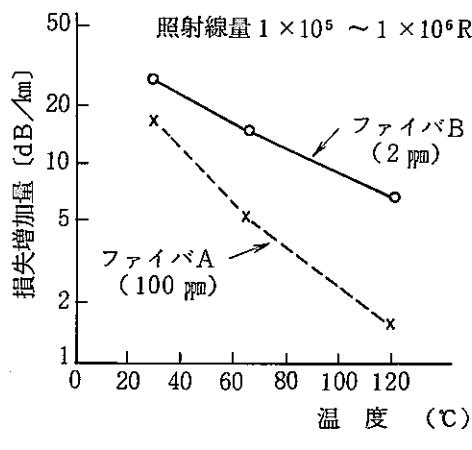
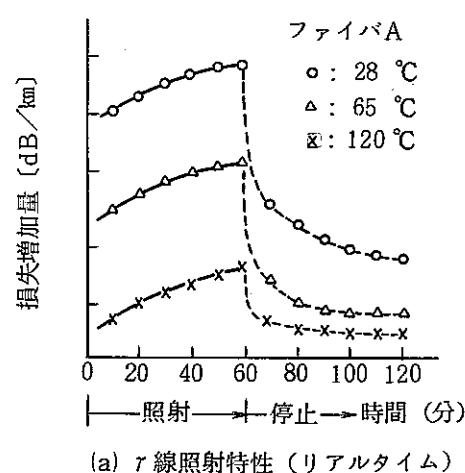
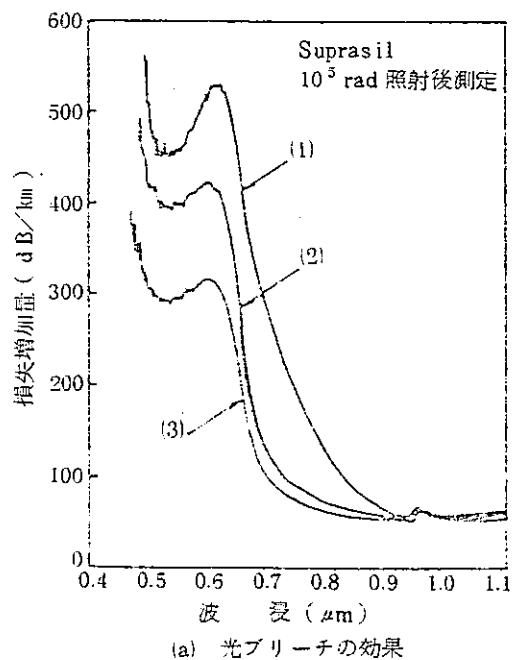
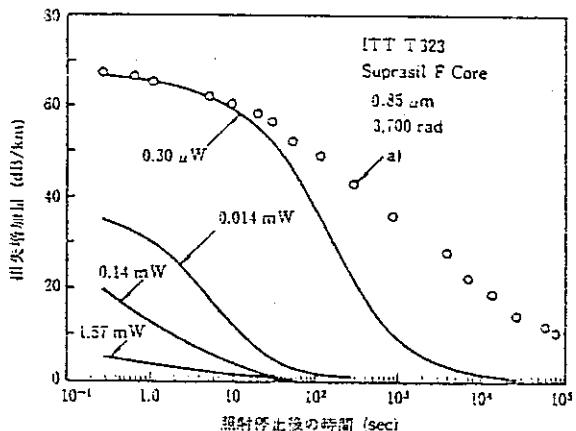


図 21 γ 線照射特性に及ぼす OH 基の影響⁽¹⁹⁾

(純石英コアファイバ)

図 22 溫度による回復効果⁽¹²⁾

- (1) γ 線照射中に光を通さない
- (2) γ 線照射中にタンゲステンランプ光を通したもの
- (3) γ 線照射中にHe-Ne レーザー光を通したもの



a) 測定時だけ光を通したもの、その他は連続測定。

図 23 光による回復効果⁽³¹⁾

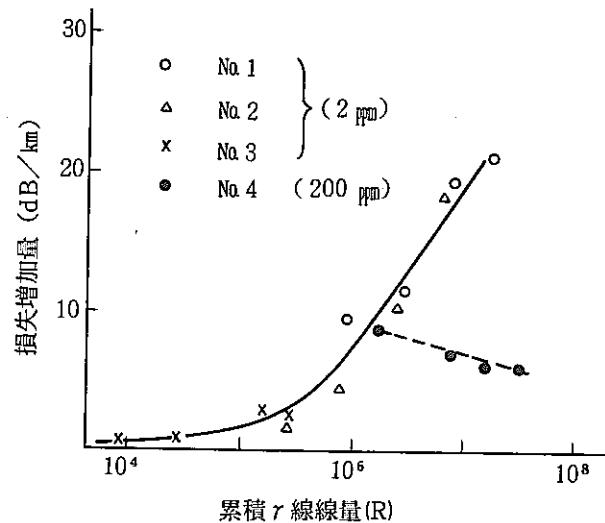


図 24 γ 線照射と回復特性⁽⁹⁾

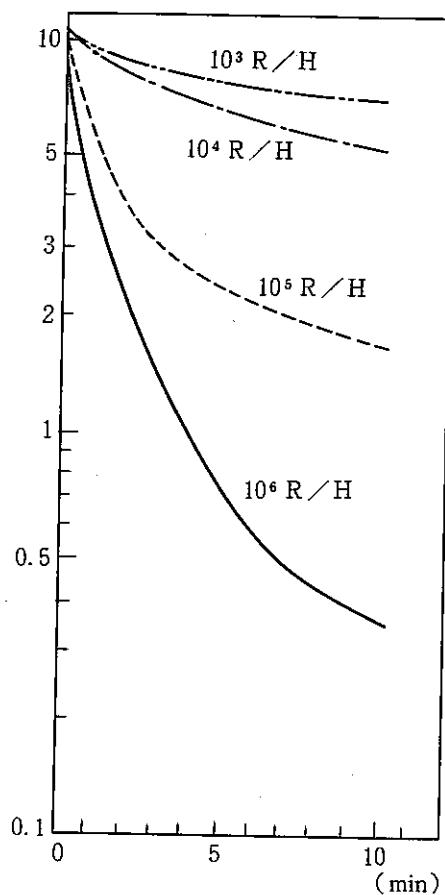
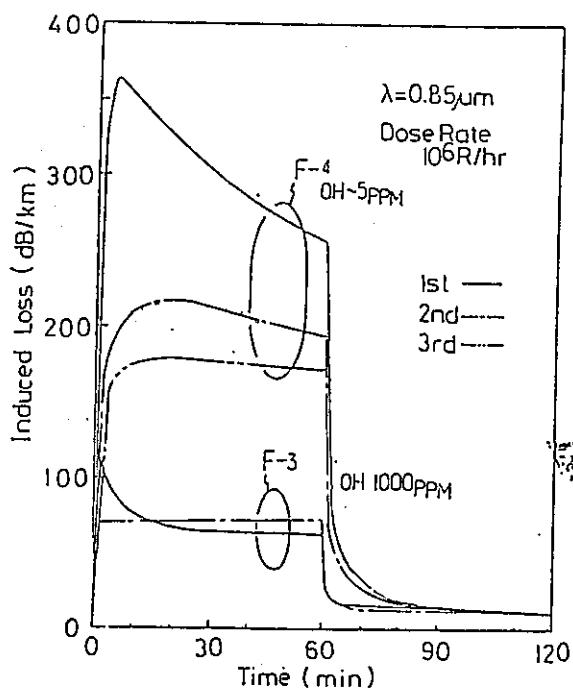
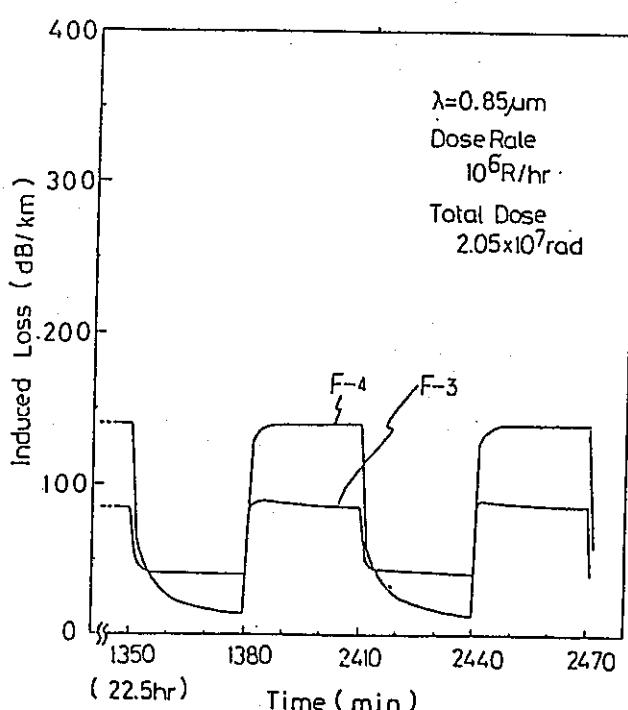


図 25 回復特性の線量率依存性⁽³³⁾



(a)



(b)

図 26 γ 線照射におけるエージング効果⁽¹⁹⁾

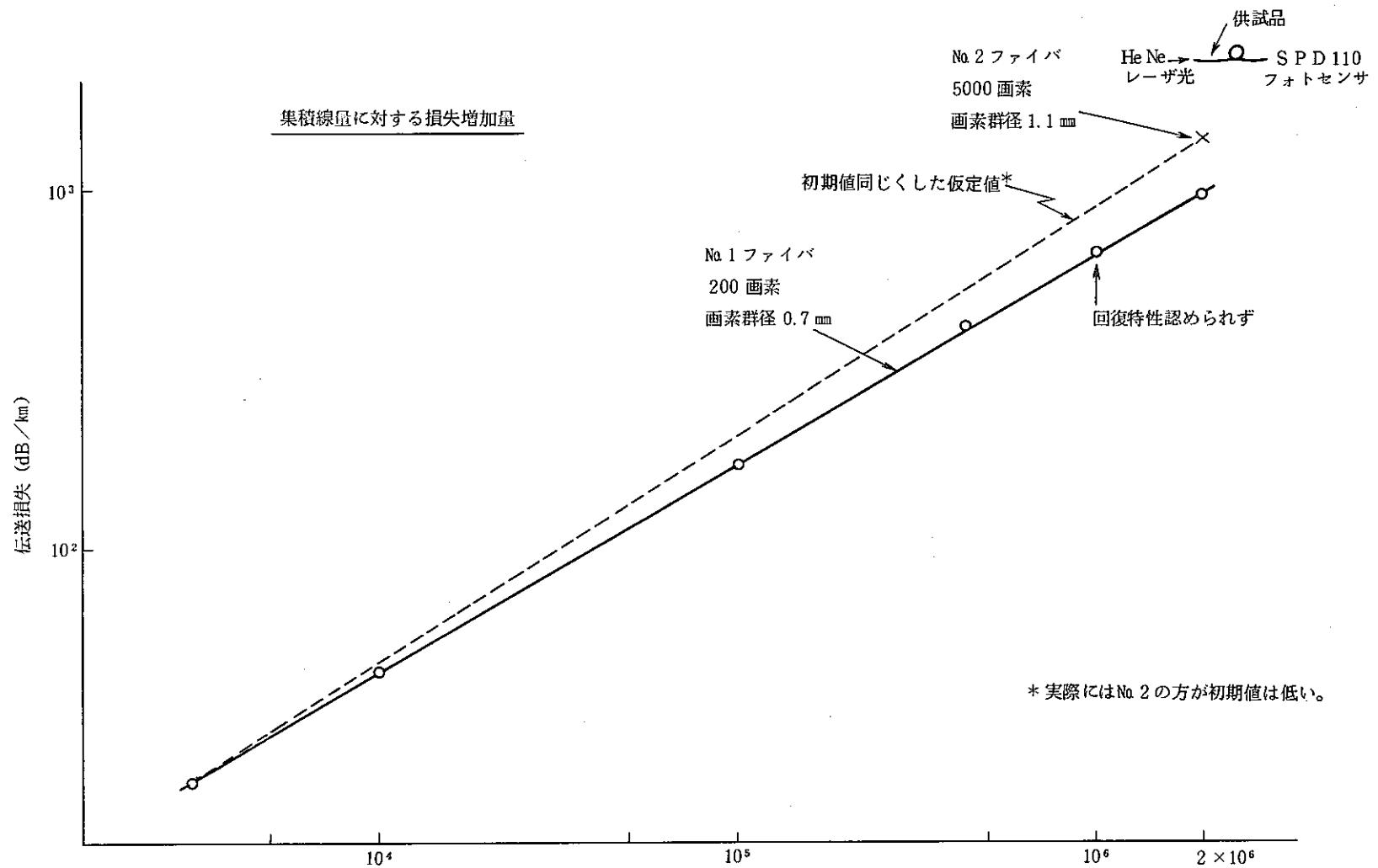
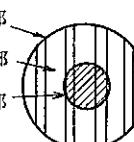
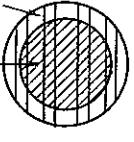
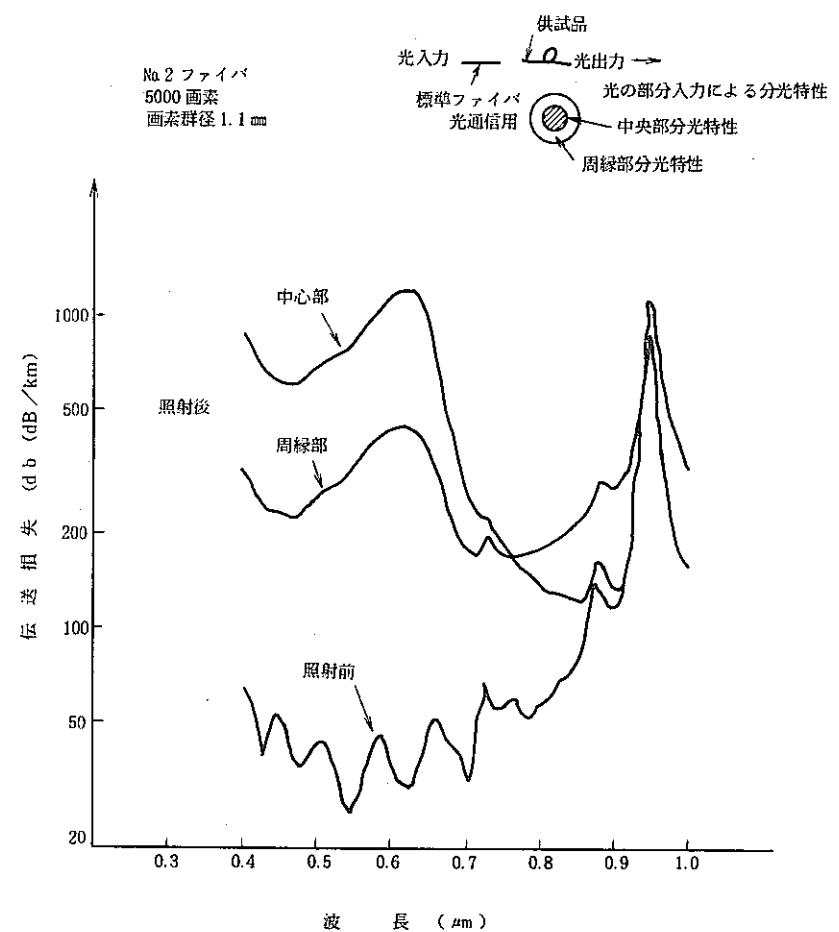


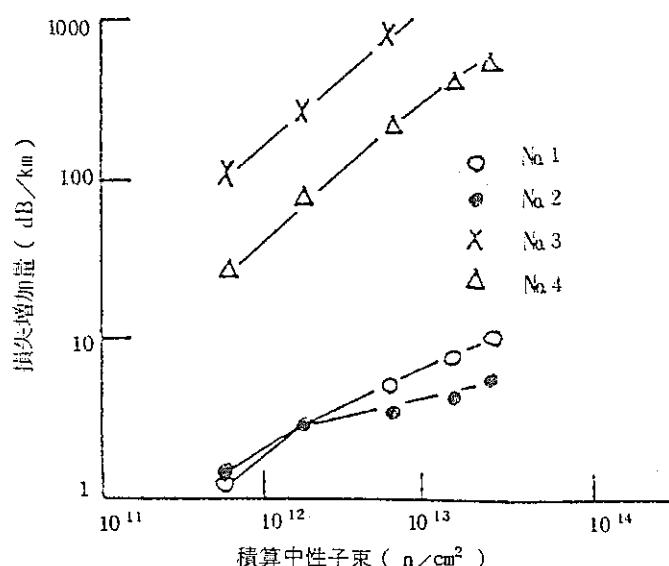
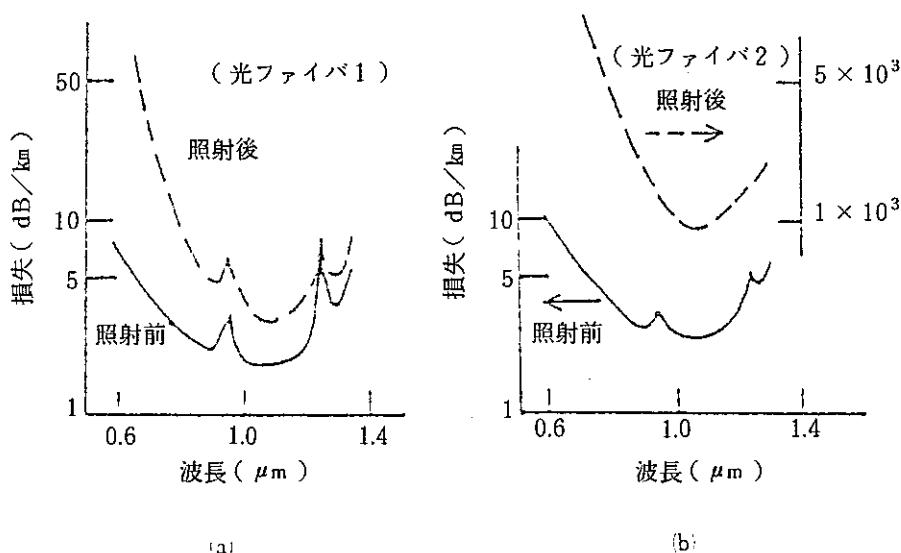
図27 光ファイバ・イメージ・ガイドの γ 線照射による伝送損失増加量⁽²⁾
(純石英コア/Fドープ石英クラッド, S型)

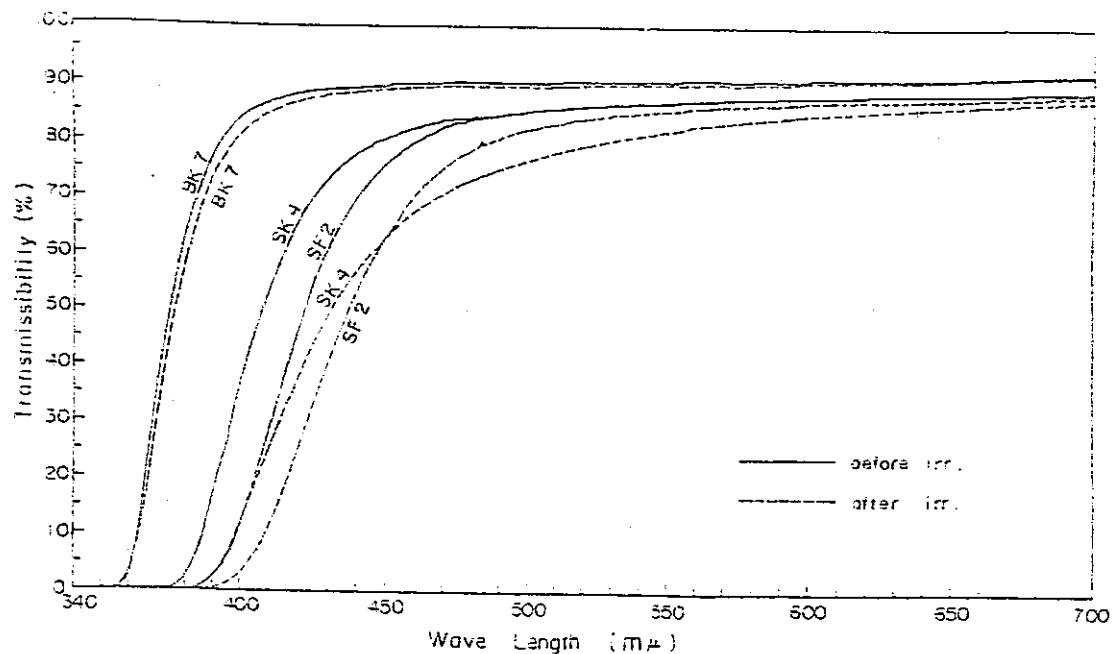
確認項目 供試 ファイバ 仕様		画像伝送特性変化
No.1 2×10^3 画素 $0.7 \text{ mm} \phi$ 径	伝送損失特性 確認用	<p>1) 照射後 $2 \times 10^6 \text{ R}$ での変化状況</p>  <p>白黒テストチャート i) 3部位(中央、中間、周縁)にパターン変化として影響が出た。 ii) 中央部の変化が顕著である。</p> <p>カラー組合せ 青赤紫 緑水色黄 G C R M Y</p> <p>2) 画像全体における中央部ダメージの面積割合は約21%である。</p>
No.2 5×10^3 画素 $1.1 \text{ mm} \phi$ 径 (画像伝送特性 確認用)		<p>1) 照射開始後 $2 \times 10^4 \text{ R}$ にて画質変化が認められる。</p> <p>2) 照射後 $2 \times 10^6 \text{ R}$ での変化状況</p>  <p>白黒テストチャート i) 中央部に大きな円形状に影響が出た。 ii) 影響部位は青色系が強く波長依存が認められる。</p> <p>カラーパーテストチャート i) 色(波長)に対してみると、赤、紫系のダメージが強い傾向が見られる。</p> <p>3) 画像全体における中央部ダメージの面積割合は約65%である。</p>

図 28 光ファイバ・イメージ・ガイドのγ線照射によるダメージの例⁽²⁾

中性子線照射光ファイバ

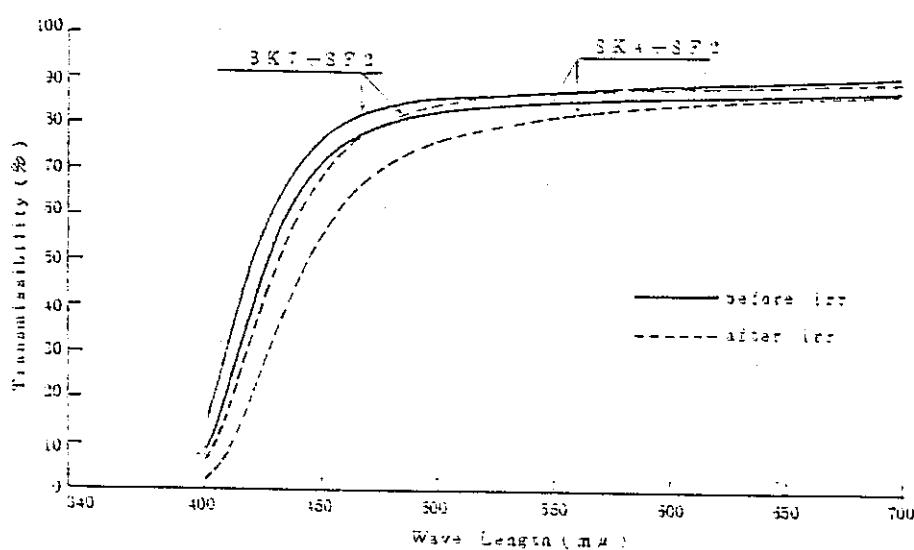
光ファイバ	コアガラスの組成	屈折率分布	
No 1	SiO_2 ($\text{OH} \sim 2 \text{ ppm}$)	ステップ型	(SI 型)
No 2	SiO_2 ($\text{OH} \sim 100 \text{ ppm}$)	ステップ型	(")
No 3	$\text{SiO}_2 + \text{B}, \text{F}, \text{P}$	グレーデッド型	(GI 型)
No 4	$\text{SiO}_2 + \text{Ge}, \text{P}$	グレーデッド型	(")

図 29 損失増加量の積算中性子束依存性⁽⁹⁾図 30 中性子照射による損失の波長依存性⁽⁹⁾



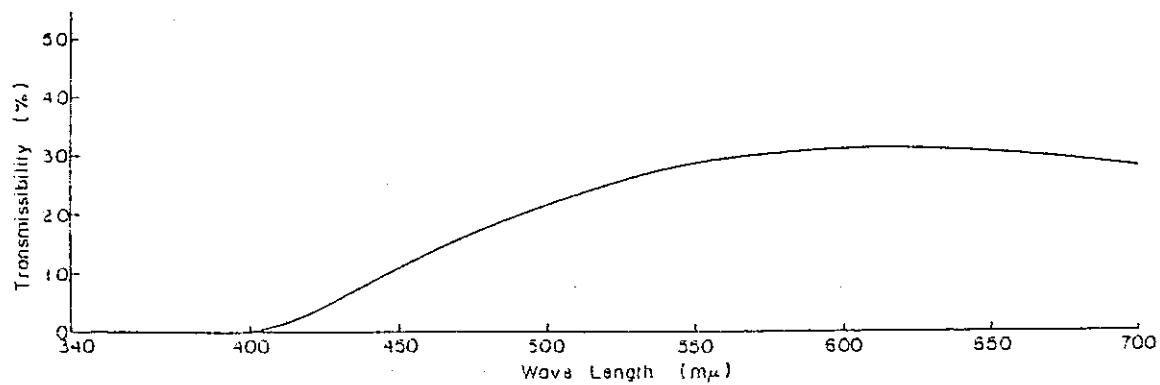
Spectral Transmissions of Non-Browning Glasses before and after Irradiation

図 31 耐放射線性ガラスの照射前後における光透過率⁽²⁹⁾



Spectral Transmissions of Combined Non-Browning Glasses
before and after Irradiation

図 32 接着剤接合ガラスの照射前後における光透過率⁽²⁹⁾



Spectral Transmissions of the Non-browning Lenses Used Periscope for In-reactor Experiment
(Total length : 2568 mm)

図 33 ペリスコープの総合光透過率(未照射)⁽²⁹⁾

P N C N 9 4 2 8 5 - 0 1

付 錄

付録A 原子炉内燃料棒過渡挙動可視装置⁽²⁹⁾ (1983. 6. 6 調査)

A 1. 試験部

図A 1 のように、約 10 m の水中にある炉心内にカプセルを挿入し、パルス運転時の燃料棒の過渡挙動をペリスコープを介して高速度カメラで撮影。

A 2. 使用条件

温 度 : ほぼ常温

r 線 : 2.4×10^6 R (パルス当り)

中性子 : max 4×10^{14} n/cm² (1 パルス当り)

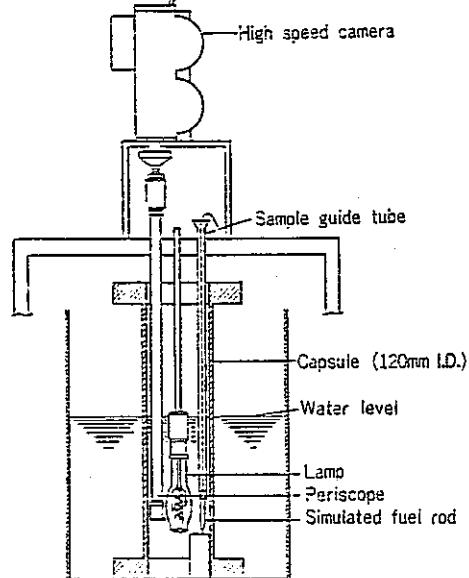
A 3. 光ファイバ

当初ライトガイドとして使用を予定したが、当時の技術では 10^4 R 程度までしか耐えられないことが分ったため、ランプを図A 1, 図A 2 のように水中に浸して使用した。

(* 現状では $10^5 \sim 10^6$ R まで耐えうる光ファイバが開発されてきている。 筆者)

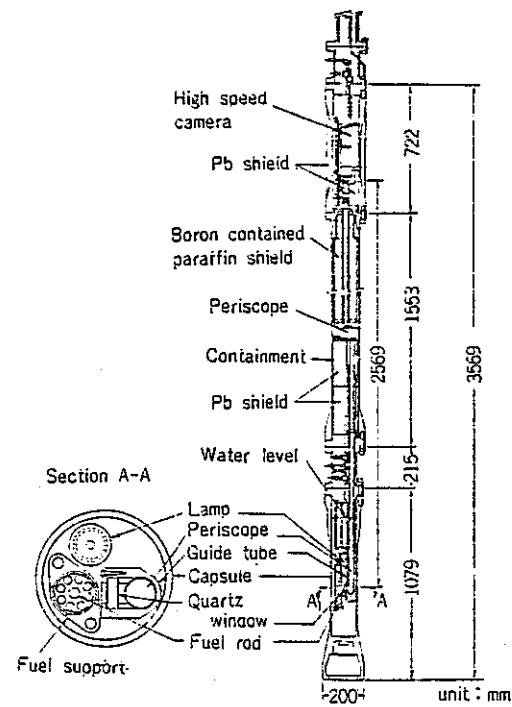
A 4. ペリスコープ

外径約 30 mm, 長さ約 2.6 m。途中にストリーミング防止用クランク構造を設けている。耐放射線性ガラス BK-7 を主体に径 14 mm 厚さ 1.5 ~ 3 mm のレンズ 22 枚とクランク部に鏡 2 枚を使用。ペリスコープは SUS 製気密カバーの中に収納されており、カバーの中は空気である。カバーの先端に石英ガラスの窓があり、これを介してペリスコープで燃料を観測した。ペリスコープの光伝送損失は未照射で -5.2 dB / 2.6 m。



Schematic View of Experimental Apparatus

図 A 1 ⁽²⁹⁾



Schematic Configuration of In-reactor Fuel Behaviour Observation System

図 A 2 ⁽²⁹⁾

付録B 東海事業所での現状（1983.5.23調査）

東海事業所においては再処理用遠隔操作技術開発プロジェクトを技術部を中心に進めており、FBRにおけるISIやプラント機器の遠隔保守点検等関連事項も多いので、担当者間で情報交換をした。

その内、本報告に直接関連の多い光ファイバ関係について東海での実情を次に紹介する。

B 1. 目的

再処理施設等での稼動率向上のため遠隔操作技術を開発する。

B 2. テーマ

- (1) 遠隔保守・補修用マニピュレータ等の開発 (*マスタ・スレーブ式、日米協力)
- (2) 遠隔継手の開発
- (3) 分析に関する信号伝送処理技術の開発

B 3. 光ファイバ関係

(1) マニピュレータ用

マニピュレータに使用する信号数が多いので、光ファイバによる信号多重伝送を計画。

(2) 光データ・ウェイ

信号伝送ネットワークとデータバンキングに光通信を用いる計画。

(3) 光ファイバ・イメージ・ガイド (ファイバ・スコープ)

化学反応に伴う分光スペクトルを光ファイバ・イメージ・ガイドで伝送する。

(4) その他

- 溶解槽等のISIは将来必要にならうが、当面は(1)～(3)に力を入れ、ISIはむしろFBRの開発成果を期待している。
- ITVに力を入れており、NHK等で開発した高品位TVを現状の70～100kgから小型化して10kg程度にしたい意向である。その場合はFBR 1次配管系肉眼試験に東海での成果を活用できそうである。

B 4. 使用環境条件

おおよそ、次の通りであり、FBR炉容器廻りISIと大きく異なるのは、雰囲気温度である。

- (i) 温 度 30～40°C (cf. FBR: 240°C)
- (ii) γ 線線量率 max. $10^2 \sim 10^3$ R/H (cf. FBR: 10^3 R/H)

付録C

光ファイバの各種製造方法について〔文献(3)より〕

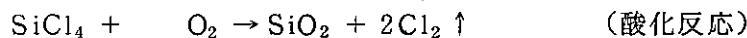
光ファイバは材料から、石英系、多成分系プラスチッククラッド、プラスチック系と分かれるため、製造方法もその系列によって異なっている（表C1）。石英系としては、ガラス材として SiO_2 を、ドープ剤として GeO_2 等を重量比で10～15%含んだものを用いる。この石英系のファイバの製造方法としてはCVD法とVAD法がある。図C1に、石英ガラスに添加されたドープ剤の濃度と屈折率の関係を示す。

多成分系では主要ガラス材としての SiO_2 にアルカリ酸化物である B_2O_3 、 Na_2O 、 CaO 等を混合して用いるもので、 SiO_2 は重量比で50～60%程度含まれる。これらの材料を用いた多成分系ガラスは溶融点が低く1000℃以下である。製造も比較的容易で、製造方法としては二重るつぼ法等があり、大量生産も可能である。しかし伝送特性の面から石英系ファイバに劣るといわれているが、さほど高品質が要求されないならば、これで充分目的にかなう用途がある。

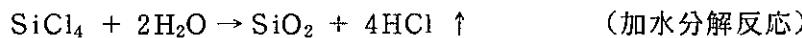
プラスチッククラッドおよびプラスチックファイバは、低コストでもあるので、短距離用の装置とか、装置内配線用として適用が期待されている。

C1. CVD法

石英系ファイバのプリフォームを作る方法として、ガラスの純度を極限まで高める必要のあること、断面方向の屈折率制御を行う必要のあること等から、化学反応を利用した、CVD法（Chemical Vapor Deposition：化学的気相蒸着法）が用いられている。これは主成分のSiやドープ剤としてのCe、P、Bなどのハロゲン化合物（ SiCl_4 、 GeCl_4 、 POCl_3 、 BCl_3 ）の気体を高温部に通過させて、 Cl_2 を遊離させる化学的気相と、これらを酸化物（ SiO_2 、 GeO_2 、 P_2O_5 、 B_2O_3 ）化して、固定化したものをガラス壁に付着させる、蒸着の二段階の反応過程を合成したものである。酸化反応としては、ハロゲン化合物に酸素が作用し酸化物ができる、かつ Cl_2 を遊離する方法か、ハロゲン化合物に水が加わり加水分解して、酸化物と塩酸ができる方法とがある。一例をあげるなら、



または



CVD法はこのように、いずれかの化学反応を利用して、酸化物をガラス壁にいく層も重ねて積層させて行く方法である。ガラス管の内壁に蒸着させる方法を内付けCVD法、ガラス棒の外側に蒸着したる方法を外付けCVD法、軸方向に蒸着させる方法をVAD法と称している。内付けCVD法は酸化反応を、外付けCVD法とVAD法は、加水分解反応を利用したものである。これらの場合の蒸着されたものはストーと呼ばれ、空気を多く含んだ不透明の多孔質ガラスで、見た目は真白で、触るとマシュロマロのようにふかふかし

たものである。これを更に加熱溶解して透明なガラスにする。内付けCVD法と外付けCVD法をそれぞれ図C2と図C3に示す。

C2. VAD法

これまで主な光ファイバの製造方法としてはCVD法とVAD法があることを述べてきたが、これらの製造方法は、コーニンググラス社による、外付けCVD法と、さらにこれをベル研究所が改良して内付けCVD法であるMCVD（Modified CVD）法として開発したものである。さらに各国ではこれらの特許を逃れるために、種々工夫を行ってきていたが、日本では電電公社を中心として製造会社もこの方面の開発に力を注ぎ、その結果VAD法が開発された。

この方法は人工ルビーの製造方法からヒントを得たといわれているが、回転しながら微動する出発棒の先端に、 SiCl_4 や GeCl_4 等の原料を高温中で吹きつけ、軸方向に空気を大量に含んだ多孔質ストートを作成するものである。

この多孔質ストートを生ずる化学反応は、火炎加水分解外付けCVD法と同じ原理であるが、屈折率分布の制御方法は全く異なる。光ファイバ構造をつくるための必要なドープ剤の径方向の分布は、ドープ剤の混入の割合が、反応温度によって異なる性質を利用して、バーナの位置と炎の状態を制御して得ているわけである。得られたストートは、電気炉に入れて、加熱しながら、引き上げられ、透明ガラス化されてプリフォームとなる。このように一連の工程を連続的に行うことができるので、原理的には連続的製造が可能である。これらの工程を図C4に示した。

C3. プラスチック系ファイバの製造

プラスチック系のファイバは、コア部分を純粋な石英ガラスとして、クラッド部に石英ガラスよりやや屈折率の小さいプラスチックなどの高分子を用いた、プラスチッククラッド光ファイバと、コア、クラッド共にアクリル樹脂などの透明プラスチック材料から成るプラスチック光ファイバの二種類がある。

表C1 光ファイバの製造法

光ファイバ種別	材料成分	屈折率分布	伝搬モード数	製造法	光損失
石英系 光ファイバ	SiO_2 ドープ剤 GeO_2 P_2O_5 B_2O_3 その他	ステップ グレーデッド	マルチモード シングルモード	CVD 法 内付け 外付け (プラズマ) VAD 法 ロッドインチュー ープ法	低損失
多成分系 光ファイバ	Na_2O B_2O_3 SiO_2 CaO その他	ステップ グレーデッド	マルチモード	二重るっぽ法 分子スタッフィ ング法	中または 高損失
プラスチック クラッド光フ アイバ	SiO_2 (コア) 高分子 (クラッド)	ステップ	マルチモード	練引した SiO_2 上に高分子を被 覆	中または 高損失
プラスチック 光ファイバ	高分子	ステップ	マルチモード	練引した高分子 繊維(コア部)に 高分子(クラッド 部)を被覆	高損失

表C2 光ファイバ100万km心1年需要時の原材料所要量

原 材 料	光ファイバ100万km 心/年間需要時の原材料 所要量 ⁽¹⁾	わが国全体の最近 推定可採 量 ⁽²⁾	主な輸入国
金属けい素 (Si)	30 ⁽⁴⁾ +110ton ⁽⁵⁾	0.2	∞
ゲルマニウム (Ge)	4ton	3.0	西ドイツ (二酸化ゲルマニウムとして) ソ連 ベルギー
りん (P)	300kg	≈0	アメリカ モロッコ オーストラリア
金属ほう素 (B)	60kg	60	西ドイツ アメリカ

(1) MCVD 法、ステップインデックス型で製造した場合

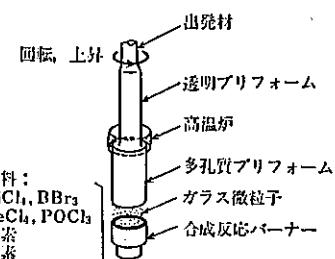
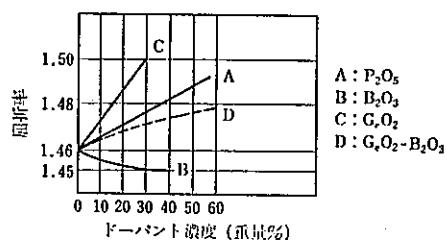
(2) 光ファイバ用普通純度品。

(3) 確認埋蔵量/世界の最近の生産量

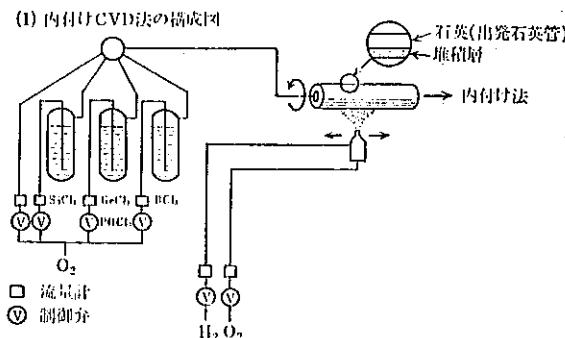
(4) 四塩化けい素として出発石英管の中へ送り込まれる分

(5) 出発石英管分(現在ほとんど天然水晶を用いているがこれをすべて合成石英とした場合の値)

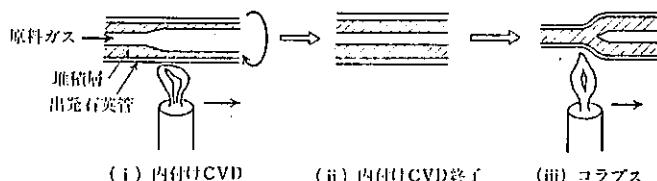
(6) 可採年数 1,000 年程度という楽観的推測もある



(1) 内付けCVD法の構成図

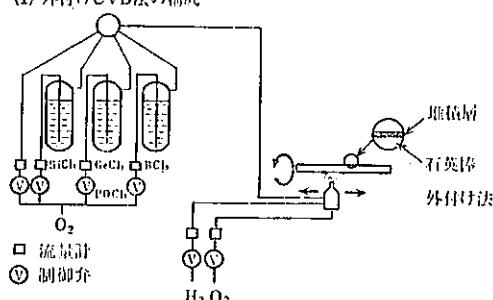


(2) 内付けCVD法によるプリフォーム製造工程

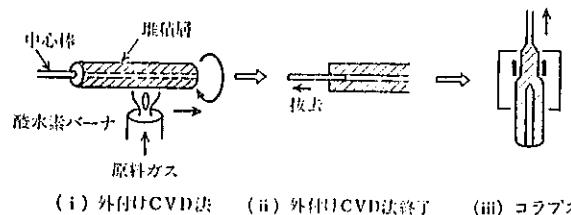


図C2 内付けCVD法

(1) 外付けCVD法の構成



(2) 外付けCVD法によるプリフォーム製造工程



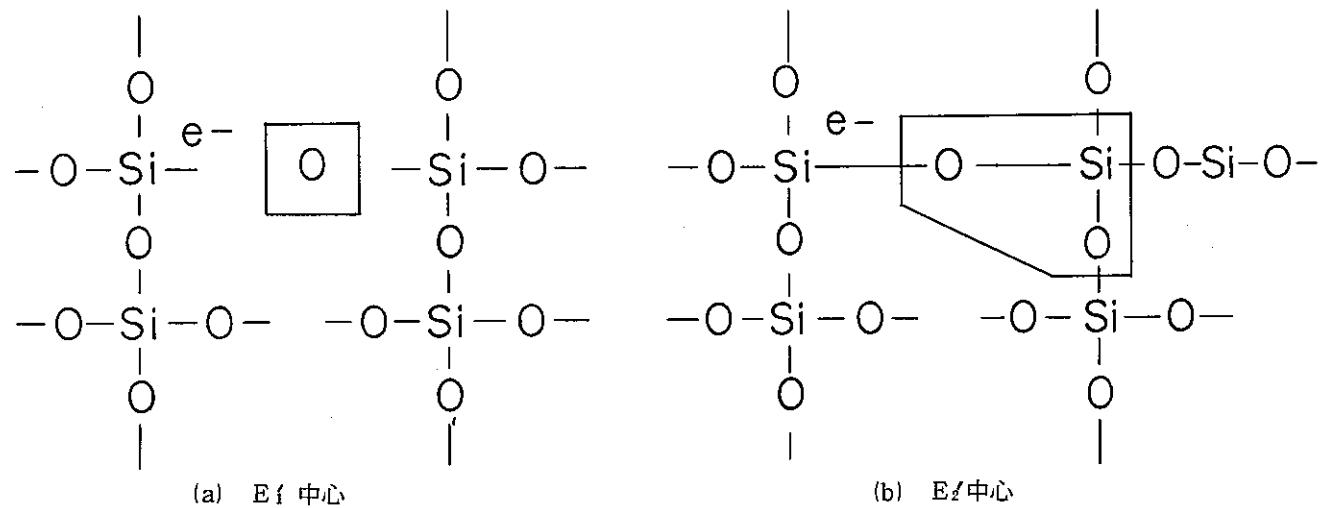
図C3 外付けCVD法

付録 D 着色現象について

着色現象とは、ガラスに放射線があたると着色する現象をいい、現在では着色のメカニズムは次のように考えられている。

石英ガラスの構造内には、ケイ素(Si)や酸素(O)が抜けた構造欠陥があり、これらが照射によって生じた電子や正孔を捕え、着色中心体(color center)となり、紫色域に吸収帯を形成し、着色現象となる。

一般に吸収帯は波長の短かい紫外域に発生するが、ゲルマニウム(Ge)等の不純物を含むと波長の長い方へシフトすることが知られている。従って光ファイバ・イメージ・ガイドの可視域での損失増加はこれら吸収帯のすその影響を受けることになる。



図D 1 石英ガラスの構造欠陥の例⁽¹⁹⁾