

レーザ除染技術の開発 (5)

(実廃棄物除染試験)

(技術報告書)

1999年8月

核燃料サイクル開発機構
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。

〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松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 319-1194,
Japan.

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)
1999

レーザー除染技術の開発（５）

（実廃棄物除染試験）

（技術報告書）

福井 康太*、小川 竜一郎*
石島 昇*、谷本 健一*

要 旨

物質の表面にレーザー光線を照射することにより、表面を急速に加熱し、熔融、蒸散させることができる。このプロセスを放射性核種で汚染された物質の表面層の除去に適用するレーザー除染技術の開発を実施している。

本報告では、レーザー除染技術を核燃料サイクル施設のデコミッショニングや放射性廃棄物の処理に適用することを目的に、光ファイバによるレーザービーム伝送試験、旧常陽廃棄物処理建家の配管を用いた実廃棄物除染試験を実施した。得られた成果を以下に要約する。

（１）レーザービーム伝送試験

長さ3mの石英ファイバを19本束ねた伝送系を用いて、最大出力450mJのQスイッチパルスNd:YAGレーザーのビーム伝送試験を実施した結果、入射エネルギーと伝送エネルギーは比例し、入射エネルギー406mJにおいて、168mJ（ファイバ1本当たり8.8mJ）のエネルギーを伝送した。しかし、入射エネルギー425mJにおいてファイバが損傷し、伝送エネルギーが低下した。

（２）実廃棄物除染試験

旧常陽廃棄物処理建家から切出した配管試験片（ホットサンプル）に対して、QスイッチパルスNd:YAGレーザーによる除染試験を実施した結果、1回の照射で試験片の計数率は90%以上減少したが、2回目以降は約4%ずつしか減少しないことが分った。

また、除染効率を向上させるには、①試験片移動速度を遅くすること、②照射エネルギー密度を高くすること、③シールドガスをヘリウムにすることが有効であることが分った。

*大洗工学センター 照射施設運転管理センター 環境保全課

Development of Laser Decontamination (5)

(Decontamination test of the hot samples)

Yasutaka Fukui*, Ryuichirou Ogawa*
Noboru Ishijima*, Kenichi Tanimoto*

Abstract

Process of laser decontamination system is as follows. As the material is irradiated by laser beam, its surface is instantaneously heated and ablated.

Laser decontamination system is able to decontaminate thoroughly.

In this work, the characteristics of laser beam transmission by optical fibers, and decontamination effect of laser beam irradiation to test pieces which are cut down of pipe in the hot facility, are experimented for apply laser decontamination technique to radioactive wastes treatment and decommissioning of nuclear fuel facilities.

The results are as follows.

(1) Beam transmission

Transmission of Q switch pulse YAG laser's beam by optical fibers are examined. Transmission energy is in proportion to incident energy to fiber. Transmission energy of bundled fiber is 168mJ to 406mJ of incident energy.

In the case of incident energy was 425mJ, transmission energy was decrease, because some fibers of bundled fiber were damaged by laser beam.

(2) Decontamination test of the hot samples

Counting rate of pipe test piece were decreased more than 90% by first irradiation of Q switch pulse YAG laser. Counting rate of pipe test piece were decreased no more than 4% by on and after second irradiation of Q switch pulse YAG laser.

To move the test piece slowly, and to raise the density of irradiation energy, and to use the helium gas for auxiliary gas are effective to increase decontamination effect.

* Waste Management Section

目 次

1. はじめに	1
2. 試験装置及び測定装置	3
2.1 バンドルファイバによるレーザービーム伝送試験	3
2.2 実廃棄物除染性能試験	4
3. 試験方法	6
3.1 バンドルファイバ伝送試験	6
3.2 実廃棄物除染性能試験	7
4. 試験結果	9
4.1 バンドルファイバによるレーザービーム伝送試験	9
4.2 実廃棄物除染性能試験	12
5. 考察	15
5.1 バンドルファイバによるレーザービーム伝送試験	15
5.2 実廃棄物除染性能試験	15
6. まとめ	17
7. 謝辞	18
8. 参考文献	19
図 表	20

図 表 目 次

表 2.1.1	パルスYAGレーザ発振器の仕様	20
図 2.1.1	レーザ発振器外観写真	21
図 2.1.2	バンドルファイバ入射端面外観写真	21
図 2.1.3	入射光学系真空セル概念図	23
図 2.1.4	入射光学系真空セル外観写真	25
図 2.2.1	シールドガス供給ノズル概念図	25
図 2.2.2	配管試験片切出し場所	27
図 3.1.1	バンドルファイバ伝送試験概念図	29
図 3.1.2	入射光学系外観写真	31
図 3.1.3	伝送試験外観写真(ファイバ長 3 m)	31
図 3.1.4	伝送試験外観写真(ファイバ長 5 m)	33
図 3.1.5	伝送エネルギー測定外観写真(ファイバ長 3 m)	33
図 3.1.6	入射レーザ光のビームパターン測定概念図	35
図 3.1.7	入射レーザ光のビームパターン測定試験外観写真	35
図 3.2.1	実廃棄物除染試験実施場所(旧 J W T F 1 F)	37
図 3.2.2	実廃棄物除染試験概念図	38
図 3.2.3	実廃棄物除染試験外観写真	39
図 3.2.4	集光レンズ及び同軸ノズル概念図	41
図 3.2.5	集光レンズ及び同軸ノズル外観写真	43
図 4.1.1(1)	入射ビームパターン(ビームプロファイラ, 発振器: Surelite- I -10)	45
図 4.1.1(2)	ホットスポット部の入射ビームパターン(ビームプロファイラ, 発振器: Surelite- I -10)	45
図 4.1.1(3)	入射ビームパターン(レーザアライメントペーパー, 発振器: Surelite- I -10)	47
図 4.1.1(4)	入射ビームパターン(レーザアライメントペーパー, 発振器: GCR-150-10)	47
図 4.1.2(1)	伝送エネルギーの入射エネルギー依存性(ファイバ長 3 m)	49
図 4.1.2(2)	大きく損傷したファイバ端面の写真(ファイバ長 3 m)	51
図 4.1.2(3)	大きく損傷したファイバ 1 本の外観写真(ファイバ長 3 m)	51

図 4.1.2(4)	小さく損傷したファイバ端面の写真(ファイバ長 3 m)	53
図 4.1.2(5)	小さく損傷したファイバ 1 本の外観写真(ファイバ長 3 m)	53
図 4.1.2(6)	バンドルファイバの伝送効率(ファイバ長 3 m)	55
図 4.1.2(7)	伝送エネルギーの入射エネルギー依存性(ファイバ長 5 m)	55
図 4.1.2(8)	バンドルファイバの伝送効率(ファイバ長 5 m)	56
図 4.1.2(9)	大きく損傷したファイバ 1 本の外観写真(ファイバ長 5 m)	57
図 4.1.2(10)	大きく損傷したファイバ端面の写真(ファイバ長 5 m)	57
図 4.1.2(11)	小さく損傷したファイバ端面の写真(ファイバ長 5 m)	59
図 4.1.2(12)	小さく損傷したファイバ 1 本の側面拡大写真(ファイバ長 5 m)	59
図 4.1.2(13)	小さく損傷したファイバ 1 本の正面拡大写真(ファイバ長 5 m)	61
図 4.1.2(14)	伝送エネルギーの入射エネルギー依存性の比較(ファイバ長 1, 3, 5 m)	61
図 4.1.2(15)	伝送効率の比較 (ファイバ長 1, 3, 5 m)	63
図 4.1.2(16)	バンドルファイバの模式図	63
図 4.1.2(17)	コア面積割合とビーム径の関係	65
図 4.2.1(1)	計数率及び放射能の照射回数依存性	65
図 4.2.1(2)	除染係数の照射回数依存性	66
図 4.2.2(1)	除染係数の試験片移動速度依存性	66
図 4.2.2(2)	除染係数のレーザショット数依存性	67
図 4.2.3(1)	除染係数のエネルギー密度依存性	67
図 4.2.3(2)	除染係数のエネルギー密度依存性(2)	68
図 4.2.4	除染係数のディフォーカス長依存性	68
図 4.2.5	除染係数へのガス種類の影響	69
図 4.2.6(1)	替え刃の除染係数	69
図 4.2.6(2)	バットの除染係数	70

1. はじめに

物質表面にある程度以上のレーザ光線を照射すると、表面物質を急速加熱し、溶融蒸散させることができ、セラミックやポリマーの微細加工、各種薄膜の生成、電子回路の修正（リペアリング）等に応用されている。この現象は、放射性廃棄物の表面汚染層の除去、つまり除染技術への適応が可能である。レーザ光を用いた除染は、①化学溶剤等を必要としない気中（乾式）プロセスであるため、二次廃棄物の低減が図れること、②非接触のプロセスで多関節ミラーやファイバ等による伝送が可能であるため遠隔操作に適していること、③金属以外の有機物やペイント等にも適用が可能で汎用性が高いこと、④局所的除染が可能であること等の特徴を有している。

これらの特徴を有することから、核燃料サイクル施設等のデコミッショニングに適用する除染技術として利用することを目的に、レーザ光と光ファイバを組合せた、レーザ除染技術の開発を実施している^{1)~5)}。

レーザ除染技術の開発に関し、これまでに以下の試験を実施した。

- ①各種レーザによる模擬汚染物質を用いた除染試験を実施し、ステンレス等の金属表面の除染にはYAGレーザが適していることを確認した¹⁾。
- ②二次生成物飛散状況確認試験を実施し、二次生成物の50%以上は粒径1 μm 以下であることを確認した²⁾。
- ③ビーム伝送試験を実施し、レーザ光のビーム伝送系として石英バンドルファイバが適用できることを確認した³⁾。
- ④QスイッチパルスNd:YAGレーザにおいて、フルエンスを一定とした場合、シリンドリカルレンズを使用してビーム径を線状に拡大しても除染性能には影響がないことを確認した⁵⁾。

これらの成果を踏まえ、今後レーザ除染システムを構築する上で必要となる基礎データの取得を目的に以下の試験を実施した。

① バンドルファイバによるレーザビーム伝送試験

QスイッチパルスNd:YAGレーザの石英バンドルファイバによるビーム伝送において、ファイバ長が伝送エネルギー特性に与える影響について確認した。

② 実廃棄物除染性能試験

QスイッチパルスNd:YAGレーザを用いたホットサンプル(実廃棄物)の除染試験を実施し、照射エネルギー及び照射回数が除染係数(DF)に与える影響について確認した。

2. 試験装置及び測定装置

2.1 バンドルファイバによるレーザービーム伝送試験

(1) レーザ発振器

レーザー光伝送距離の影響確認試験には、表2.1.1及び図2.1.1に示す2種類のQスイッチパルスNd:YAGレーザー(GCR-150-10型及びSurelite-I-10型)を使用した。本QスイッチパルスNd:YAGレーザーは、以下に示す特徴を有する。

①平均パワーは4W程度だがピークパワーは40MW以上に達し、周囲に熱影響を与えることなく照射部のみを瞬時に熔融蒸発することが可能である。

②二次生成物が少なく、徹底除染への適用が可能である³⁾。

(2) 伝送光学系(ファイバ)

試験に使用した伝送光学系(ファイバ)の仕様を以下に示す。

・形式：S I (ステップインデックス)型
(Fiberguide Industries社製)

・コア径：1.0mm
・長さ：3.0m、5.0m

伝送光学系の選定にあたっては、ファイバ長の違いによる伝送特性を確認するため、2種類の長さのものを使用した。また、S I型を選定したのは、高いパワーを伝送できるためである(S I型：コアの屈折率が一定でクラッドとコアの境界で屈折率がステップ状に変化しているもので、比較的高いパワーを伝送するのに用いられる)。

バンドルファイバは図2.1.2の写真に示すように、レーザー光の照射により飛散した被覆によるファイバ端面の損傷を防ぐため、端面付近の被覆を取り除き、19本のファイバの端をそろえて束ねた。

入射光学系真空セル

試験には、図2.1.3及び図2.1.4に示すような入射光学系真空セルを使用した。真空セルを使用したのは、空気の絶縁破壊を防止するためである。

空気中で球面レンズによりレーザー光を集光すると、空気が絶

縁破壊を起こしプラズマ化する。それによりレーザ光が吸収され、ファイバへの入射エネルギーが低下する。そこで、集光レンズとファイバ入射端の間に、数torr以下に真空排気したアクリル製真空セルを置き、空気の絶縁破壊を防止した。

(4)その他の試験機器

①レーザエネルギーメータ

形 式：GDX-RP(OPHIR社製)

用 途：伝送前後のレーザエネルギーの測定

②反射型バリアブルアッテネータ

形 式：VA1064(Laser Optics社製)

用 途：入射レーザエネルギーの調整

2.2実廃棄物除染性能試験

(1)レーザ発振器

実廃棄物除染性能試験には、表2.1.1及び図2.1.1に示すQスイッチパルスNd:YAGレーザのうち、小型で可搬型のSurelite-I-10型を使用した。

(2)集光光学系

集光光学系には、シリンドリカルレンズ(焦点距離：150mm)を使用した。

(3)シールドガス供給ノズル

試験に使用したシールドガス供給ノズルの概念図を図2.2.1に示す。

(4)放射線測定装置

①GMサーベイメータ

形 式：TGS-136(アロカ製)

用 途：試験片の計数率測定

②Ge検出器

形 式：S-100/PC GAMMAシステム(CANBERRA製)

用 途：試験片の放射能測定

(5)シールドガス

①Heガス(20、30Nl/min)

②N₂ガス(20、3.8Nl/min)

③空気(20、3.8Nl/min)

(6)試験片

旧常陽廃棄物処理建家から切出した配管ならびに配管の加工に使用した鋸刃等を試験片とした。配管の汚染形態は、 ^{60}Co を主要核種とするCPが中心であり、GMサーベイメータによる計数率は140～48,700cpmであった。試験片の種類及び数量は以下のとおりである。また、配管試験片の切出しポイントは図2.2.2に示すとおりである。

①高レベル廃液タンクA配管(19個)

②廃液供給A系統配管(4個)

③廃液供給B系統配管(6個)

④濃縮廃液系配管(4個)

⑤バット(4個)

⑥替え刃(3個)

(7)ドラフトチャンバ

飛散物の回収が容易に行えるよう、本除染性能確認試験は、ドラフトチャンバ内で実施した。本ドラフトチャンバの仕様は以下に示すとおりである。

寸 法：1500mm×800mm×2000(H)mm

風 量：10m³/min

3. 試験方法

3.1 バンドルファイバ伝送試験

本伝送試験のシステムは、図3.1.1に示すようにレーザ発振器、バリアブルアッテネータ、入射真空セル、バンドルファイバ、エネルギーメータから構成される。バンドルファイバによるレーザビームの伝送において、ビームエネルギーを効率よく伝送するため、出射されるレーザビーム径(8mm)をバンドルファイバ径(5mm)以下に集光する必要がある。しかし、①エネルギーの大きいビームを球面レンズで集光すると空気の絶縁破壊が生じること、②集光レンズの焦点距離が短いとファイバへのビーム入射角が小さくなりファイバの損傷が起こりやすくなること¹⁾等の理由から、焦点距離の長い集光レンズを使用するとともに、焦点付近に真空セルを設置して空気の絶縁破壊を防止した。

ファイバ入射エネルギーの増減は、発振器内のフラッシュランプ電圧の増減で行うと、レーザ光のパルス幅が変化するため、発振器から出射されるレーザ光のエネルギーは最大出力エネルギーに固定し、外付の反射型バリアブルアッテネータによって、入射エネルギーを調整した。

本伝送試験は長さ3m及び5mの素線ファイバをそれぞれ19本束ねたバンドルファイバに対して行った。長さ3mのファイバ伝送には、レーザ発振器に、表2.2.1に示すSurelite-I-10を使用した。長さ5mのファイバ伝送には、レーザ発振器に、最大出力エネルギー(650mJ)が大きいGCR-150-10を使用した。図3.1.2に入射光学系外観写真を示す。

長さ3mのファイバ伝送試験では図3.1.3に示すように、ファイバを曲げずに、直線状態で試験を行った。また、長さ5mのファイバ伝送試験では、実験スペースの都合により、図3.1.4に示すように緩やかに曲げた状態(曲げ半径=約5m)で試験を行った。

ファイバ伝送試験のエネルギー測定において、3mのファイバは曲げずに試験することから、長さにはばらつきがあるファイバの出射端面を同一平面に揃えることが困難であり、図3.1.5に示すように長さの近いファイバを数本ずつ束にし、別々にエネルギー

を測定し、それぞれを合計した。5mのファイバは緩やかに曲げて試験することから、ファイバの出射端面を揃えることが容易であり、一つに束ねて伝送エネルギーを測定した。

ファイバの損傷は図3.1.1に示すように、ファイバ入射端近傍のCCDカメラで常時観測した。

ファイバ入射端におけるレーザ光の強度分布は、ビームプロファイラを用いて測定した。入射レーザ光のビーム特性の測定概念図を図3.1.6に、試験概観写真を図3.1.7に示す。

3.2 実廃棄物除染性能試験

実廃棄物除染性能試験は、図3.2.1に示すように旧常陽廃棄物処理建家1階にあるドラフトチャンバ内で行った。

本除染性能試験では、図3.2.2及び図3.2.3に示すように、レーザ発振器から出力されたレーザ光を、2枚の全反射ミラーで折り返し、ドラフトチャンバ内に設置した集光レンズ(焦点距離150mm)に入射し集光した。集光したレーザ光は、図3.2.4及び図3.2.5に示すように無反射コーティングされた入射窓が付いた同軸ノズルを通して試験片に照射される。本ノズルにはシールドガスが供給され、試験片に吹き付けられる。

レーザ光の照射方法は、発振器から出射されたレーザ光の中心を試験片の上端に合わせ、試験片を一定速度で水平に移動させながら行った。1行の照射が終了した後、試験片を3mm上方に移動し、同様に2行目以降に照射を繰返した。このような照射を繰返し行うことで試験片全面を照射した。1試験片あたりの照射は7～8行であった。

放射能の測定は、レーザ照射前及び1回の全面照射後、さらに全ての照射の終了後にGMサーベイメータで行った。また、レーザ照射前と全照射後にはGe測定器で核種分析を行った。

実廃棄物除染性能試験のレーザ照射条件は以下のとおりである。

- ① 全面照射の回数：1回～31回
- ② 試験片移動速度：0.25mm/s、1.25mm/s、2.5mm/s
- ③ エネルギー密度：1.2J/cm²、3.5J/cm²、4.1J/cm²、5.3J/cm²
- ④ デイフォーカス長：10mm、20mm、30mm

⑤シールドガス種類：H e、N₂、空気

⑥模擬廃棄物の形状：圧縮配管、替え刃、バット

4. 試験結果

4.1 バンドルファイバによるレーザビーム伝送試験

4.1.1 入射レーザビームパターン

(1) Surelite-I-10のビームパターン

長さ3mのバンドルファイバの伝送試験に使用した、Surelite-I-10のビームパターンのビームプロファイラによる測定結果は図4.1.1(1)に示すように、同心円状の強度分布になっており、外側ほど強度が高いことが分った(最大フルエンス $141\text{J}/\text{cm}^2$)。

また、ビームパターンの右側部分に強度の高い部分(ホットスポット)があり、ビーム全面を同時に測定できなかったため、ホットスポットを約1/20に減光し、別途測定した。ホットスポットの強度は、図4.1.1(2)に示すように、ホットスポット周辺部の約100倍(1/20の減光でフルエンス $604\text{J}/\text{cm}^2$)であった。

レーザアライメントペーパーで測定したレーザ光のビームパターンには、図4.1.1(3)に示すように同心円状の強度分布及びホットスポット(各パターン右側にある複数の白い点)が観測された。ファイバに入射する全エネルギーが低くても、ホットスポットの存在により、ファイバが損傷する可能性があることから、ビームの均一化が必要である。ただし、本試験ではこのホットスポットによるファイバの損傷は発生しなかった。

(2) GCR-150-10のビームパターン

長さ5mのバンドルファイバの伝送試験に使用した、GCR-150-10のビームパターンのレーザアライメントペーパーによる観測結果は図4.1.1(4)に示すように、上部の強度が弱い、Sureliteと同様に同心円状の強度分布になった。また、ホットスポットは観測されなかった。

4.1.2 伝送特性

(1) ファイバ長さ3m

長さ3mのファイバにおける伝送エネルギーの入射エネルギー依存性は図4.1.2(1)に示すように、伝送エネルギーが入射エネルギーの増加に伴い直線的に増加している。入射エネルギー

406mJの時に、最大伝送エネルギー168mJ(ファイバ1本あたり8.8mJ)が得られた。また、入射エネルギー425mJにおいて、1本のファイバに大きな損傷が発生したため伝送エネルギーが低下した。

レーザ照射中にファイバ内部で大きな損傷が起こると損傷部でプラズマが発生する。そのプラズマによる発光がファイバ内部を伝わり、図4.1.2(2)のファイバ端面(レーザ入射側)の写真に示すようにファイバ端面(図中左下)に発光が観測された。この発光は、レーザ照射終了時まで継続して観測された。発光されたファイバ1本の外観写真を図4.1.2(3)に示す。ファイバの損傷位置は入射端から65mmの白い部分である。

また、ファイバ内部に発生した損傷が小さい場合、断片的に発光が観測されることがあった。試験終了後に、各ファイバを観察した結果、19本のファイバ中5本のファイバにおいて、入射端面から数mm内側の部分に小さな損傷があった。小さく損傷したファイバ端面(レーザ入射側)の写真を図4.1.2(4)に、ファイバ1本の外観写真を図4.1.2(5)にそれぞれ示す。

以前実施した単線ファイバによる伝送試験⁵⁾では、ファイバに損傷を与えることなく約50～60mJのエネルギーを伝送できた。しかし、本試験では、ファイバ1本あたり約8.8mJの伝送エネルギーでファイバが損傷した。これは、①入射ビームの強度分布が不均一で損傷閾値を超えるファイバがあったこと、②各ファイバの軸とレーザ光の軸のずれにより局所的にエネルギーが集中したこと、クラッドへ入射したレーザの影響、④クラッド外側から入射したレーザの影響によると考えられる。

バンドルファイバにおけるエネルギーの伝送効率(=伝送エネルギー/入射エネルギー)は図4.1.2(6)に示すように、入射エネルギー200mJ以下では約45%であり、200mJを超えると約40%に低下している。これは、入射エネルギー200mJを境にファイバに損傷が発生したと考えられる。また、入射エネルギー425mJにおいて伝送効率が下がっているのは、入射エネルギー425mJにおいて1本のファイバに大きな損傷が発生したためである。

(2) ファイバ長さ 5m

長さ 5m のファイバにおける伝送エネルギーは、図 4.1.2(7)に示すように、入射エネルギーの増加に伴い直線的に増加し、入射エネルギー 650mJ の時に、最大伝送エネルギー 300mJ (ファイバ一本あたり 15.8mJ) が得られた。また、入射エネルギー 300mJ 付近において伝送エネルギーが大きく変動し、入射エネルギー 454mJ で伝送効率が大きく低下したため、試験を中断した。伝送エネルギーの変動は、出射窓内面の汚れによるものであり、この汚れによりファイバ入射直前のエネルギーが大きく変動した。そこで、真空セルの窓の洗浄を行い、真空ポンプと真空セルの間にオイルミストトラップを取り付け、窓の汚れ防止対策を施し、ファイバ入射直前のエネルギーの大きな変動を抑制した。

洗浄後の伝送エネルギーは、直線的に増加した。

長さ 5m のファイバにおける伝送効率は図 4.1.2(8)に示すように、伝送効率はファイバ長さ 3m の時よりも 5% 程度高い値が得られた。しかし、入射エネルギー 447mJ 以上において、伝送効率が低下した。これは、CCD 観察によって発光を確認した時期と一致することから、3m 同様に小さな損傷がファイバ内部に発生したと考える。

継続的に入射エネルギー 650mJ のレーザをファイバに照射した際に、数分で大きな損傷が発生した。ファイバの損傷は図 4.1.2(9)の外観写真に示すように、入射端から 24mm の位置に発生した。図 4.1.2(10)の大きな損傷の発生時におけるファイバ入射端の CCD 観察画像に示すように、損傷したファイバは、左下の端面が明るいファイバである。

また、伝送試験中に、図 4.1.2(11)に示すような発光が観測された。この発光は、大きな損傷が発生した際に起こる発光とは異なり、断片的に発生した。試験終了後、各ファイバを観察し、入射端面から数 mm 内側の部分に小さな損傷が発生しているファイバが 5 本 (19 本中) あることを確認した。

ファイバ側面は図 4.1.2(12)の顕微鏡写真に示すように、軸方向に沿って破損が起こっていた。また、同じ損傷を入射端面か

ら観察した図4.1.2(13)にも示すように、損傷はファイバのコアで起こっていることが分った。

(3) 前回の伝送試験の結果との比較

前回実施した長さ1 mのバンドルファイバの伝送試験及び本試験で実施した長さ3m、5mのバンドルファイバ伝送試験における入出力エネルギー特性を図4.1.2(14)に、伝送効率特性を図4.1.2(15)に示す。図4.1.2(14)及び図4.1.2(15)中の破線は、後述する理論伝送効率である。ファイバ長5mの場合、理論伝送効率に近い値が得られているが、3m及び1mのファイバでは低くなっている。1mのファイバで伝送効率が低い原因は、バンドルファイバ径よりもレーザービーム径の方が大きかったためである。3mのファイバで伝送効率が低い原因は、ビームの強度分布に差があることやバンドルの束ね方が緩かったことが考えられる。

バンドルファイバは、コア、クラッド及び被覆で構成されるファイバを束ねたものである。伝送試験では、図4.1.2(16)に示すように、バンドルファイバ径未満のビームを照射しており、幾何学的伝送効率は、図4.1.2(17)のコア面積割合(ビーム径内のコア面積/ビーム面積)に示すように、ビーム径によらず約55%である。

また、石英ファイバにおけるフレネル表面反射損失を考慮した伝送効率 T (93.4%)は以下の式で求められる。

$$T = \{4n / (n+1)^2\}^2$$

T : 伝送効率

n : 屈折率(合成石英1.449)

したがって、幾何学的伝送効率と表面反射損失効率を考慮した、理論伝送効率は約51%である。

4.2 実廃棄物除染性能試験

4.2.1 照射回数依存性

試験片の計数率及び放射能(^{60}Co)は図4.2.1(1)に示すように、1回目の照射で約90%減少し、2回目以降は約4%ずつ減少した。1回目と2回目以降の照射で除去率が大きく異なる原因としては、①最表面の汚染とその下の汚染の性状が異なる(最表面汚染物質

の付着力が弱い)こと、②表面付近に汚染が集中していること、③1回目の照射により、表面が除去しづらい性状(非晶質化)に変化したこと、④熔融層への巻き込みや再付着が発生したこと等が考えられる。

ただし、ステンレス鋼の除去深さは照射回数に比例することから⁴⁾、表面性状は変化していないと考える。また、熔融層への巻き込みや再付着については、1回の照射あたり4%程度しか汚染除去していないことから、主な原因ではないと考えられる。したがって、1回目と2回目以降の照射で除去率が大きく異なるのは、表面と内部における性状の違いや傷などにより汚染が内部に入り込んでいるためと考える。

図4.2.1(1)の計数率及び放射能を除染係数(DF)に換算したものを図4.2.1(2)に示す。1回の照射によって計数率はDF10、30回の照射によって計数率はDF30、放射能はDF60が得られた。

4.2.2 試験片移動速度依存性

除染係数に対する試験片移動速度依存性は、図4.2.2(1)に示すように、試験片移動速度の増加に伴い、除染係数は低くなる傾向にある。しかし、図4.2.2(1)中の試験片No.9及びNo.10のように、同じ速度(1.25mm/s)で試験片を移動しても除染係数が大きく異なる場合がある。これは、レーザ照射前における試験片No.9の計数率が350cpmであり、試験片No.10の計数率が27000cpmと照射前の計数率が70倍以上大きいことが原因であると考えられる。

1ポイント当たりのレーザショット数と除染係数(放射能)の関係は図4.2.2(2)に示すように、照射前の放射能が低かった試験片No.9を除き、ショット数と除染係数が比例することが分った。

4.2.3 エネルギー密度依存性

計数率の除染係数に対する照射エネルギー依存性は、図4.2.3(1)に示すように、照射エネルギーの増加に伴い、除染係数が高くなることが分った。しかし、試験片No.15(エネルギー密度4.1J/cm²)の計数率における除染係数は低かった。これは、GM管による計数率測定時のBGの影響が考えられる。

また、照射エネルギーに対する放射能の除染係数は、図4.2.3(2)

に示すように、照射エネルギーによらず、レーザ照射前の放射能量が大きい試験片の方が高いことが分った。

この結果から、レーザ照射前の放射能が低い試験片は、汚染が母材の傷の隙間に入り込むなど、除去しづらい汚染形態であると考ええる。

4.2.4 ディフォーカス長依存性

試験片の除染係数は図4.2.4に示すように、ディフォーカス長に大きく依存しないことが分った。ディフォーカス長の増加に伴い、除染性能向上に有利なビーム幅が大きくなる半面、エネルギー密度が低下する。このことから、他の条件が一定の場合、ディフォーカス長は除染性能に大きな影響を与えないことが分った。

4.2.5 ガス種類依存性

各種ガスをシールドガスとして使用した場合の除染係数は、図4.2.5に示すように、空気、窒素ガスに比べてヘリウムガスの方が高いことが分った。これは、ヘリウムが最も分子量が小さく、再付着量が少ないためであると考ええる。

4.2.6 廃棄物形状の影響(替え刃及びバット)

本試験における配管試験片の加工で使用した弓ノコの替え刃を試験片として照射試験を実施した。レーザ除染前の試験片の計数率及び放射能が低かったため、図4.2.6(1)に示すように、除染係数は10以下であった。

また、バットを試験片として照射試験を実施したが、替え刃を使用した場合と同様にレーザ照射前の試験片の計数率及び放射能が低かったため、図4.2.6(2)に示すように、除染係数は低かった。

5. 考察

5.1 バンドルファイバによるレーザビーム伝送試験

レーザ発振器(Surelite-I-10)から照射されたレーザビームの強度分布は同心円状の強度分布になっており、外側ほど強度が強いことが分った。また、局所的に周辺部の約100倍にもなるホットスポットがあることが分った。今回の試験では、このホットスポットに起因するファイバの損傷は発生しなかったが、今後の課題として、ビームの均一化を図る必要がある。

バンドルファイバによる伝送試験において、伝送エネルギーは入射エネルギーに比例するが、ファイバに損傷を与えることなく伝送できる1本当たりのエネルギーは約8.8mJであり、単線ファイバによる伝送エネルギー(約50~60mJ)の1/5以下であることが分った。今後は、ファイバに損傷を与えることなく伝送できるエネルギーを増加させる方法を確認する必要がある。

バンドルファイバに対する入射ビームの幾何学的効率(約55%)であることから、入射ビームをファイバのバンドル数に分割し、別々にファイバに入射させ、出射時に全ファイバをバンドル化する方法が考えられる。しかし、複雑な入射光学系の詳細な検討を行う必要がある。

5.2 実廃棄物除染性能試験

各試験片に対し、レーザを1回照射することで、計数率を約90%減少させることができたが、2回目以降の照射では、約4%ずつしか除去できなかった。除染性能を向上させる方法として、試験片の移動速度を遅くすること、照射エネルギー密度を高くすること、シールドガスをヘリウムガスにすることが有効であることが分った。また、ディフォーカス長の長短は、除染性能に大きな影響を与えないことが分った。

しかし、レーザ照射前の汚染レベルが低い試験片に対しては、試験片移動速度や照射エネルギー密度を変化させても、大きな影響がなく、除染効果が低いことが分った。

また、本試験中に発生した飛散物によるドラフトチャンバ内

の汚染は無かったことから、レーザ除染における汚染拡大防止には、ドラフトチャンバ($10\text{m}^3/\text{min}$)等の換気機能を有するボックスが適していることが分った。

6. まとめ

レーザ除染技術を核燃料実際のデコミッショニングに適用するため、システムを構築する上で必要となる基礎データの取得を目的に実施した今回の試験において、得られた成果を以下に要約する。

- ① 試験で使用したQスイッチパルスNd:YAGレーザの発振器から出射されるビームは同心円状の強度分布を示し、外側ほど強度が高い。また、周辺部の約100倍の強度を示すホットスポットが観測され、ビーム伝送時にファイバを損傷させる可能性があることを確認した。
- ② QスイッチパルスNd:YAGレーザのビーム伝送試験において、伝送系のバンドル石英ファイバへの入射エネルギーと伝送エネルギーは比例し、入射エネルギー406mJにおいて、168mJ(ファイバ1本当たり8.8mJ)のエネルギーを伝送した。しかし、入射エネルギー425mJにおいてファイバが損傷し、伝送エネルギーが低下した。
- ③ QスイッチパルスNd:YAGレーザの1回の照射によって配管試験片(ホットサンプル)の計数率を90%以上減少することができた。しかし、2回目以降の照射では、約4%ずつしか減少しなかった。
- ④ 試験片移動速度を遅くすること、照射エネルギー密度を高くすること、シールドガスをヘリウムにすること等が除染効率の向上に有効である。しかし、ディフォーカス長は除染効率に大きな影響を与えなかった。
- ⑤ レーザ照射前の計数率が低い試験片に対しては除染効率が低く、計数率が高い試験片に対しては除染効率が高かったことから、レーザ除染は徹底除染に有効である。
- ⑥ レーザ除染における汚染拡大防止には、ドラフトチャンバ等の換気機能を有するボックスが有効である。

7. 謝 辞

レーザ除染性能試験作業を実施するにあたり、ご協力を頂いた(財)産業創造研究所の清水幸喜主任研究員、谷脇学研究員、野崎真之介研究員に感謝の意を表します。

8. 参考文献

- 1). 福井康太、根本正信、谷本健一、照沼誠一：レーザー除染技術の開発(1)(レーザー除染に関する調査と基礎試験) PNC ZN9410 95-041 (1994.12)
- 2). 福井康太、根本正信、谷本健一：レーザー除染技術の開発(2)(レーザー除染に関する適用性試験) PNC ZN9410 96-058 (1996.2)
- 3). 清水幸喜、谷脇学、佐藤俊一、須賀芳睿：レーザー除染システム概念検討 PNC ZJ1564 96-003 (1996.2)
- 4). 福井康太、小川竜一郎、石島昇、谷本健一：レーザー除染技術の開発(3)(レーザー伝送系の特性試験) JNC TN9410 99-008 (1999.4)
- 5). 福井康太、小川竜一郎、石島昇、谷本健一：レーザー除染技術の開発(4)(レーザービーム伝送試験と照射条件の最適化) JNC TN9410 99-014 (1999.7)

表 2.1.1 パルスYAGレーザー発振器の仕様

種 類	仕 様
Qスイッチパ ルス	Spectra-Physics社製 GCR-150-10型
	最大出力エネルギー 650mJ/pulse (パルス幅 8nsec)
	繰返し周波数 10Hz
	HOYAコンティニウム製 Surelite-I-10型
	最大出力エネルギー 450mJ/pulse (パルス幅 6nsec)
	繰返し周波数 10Hz以下

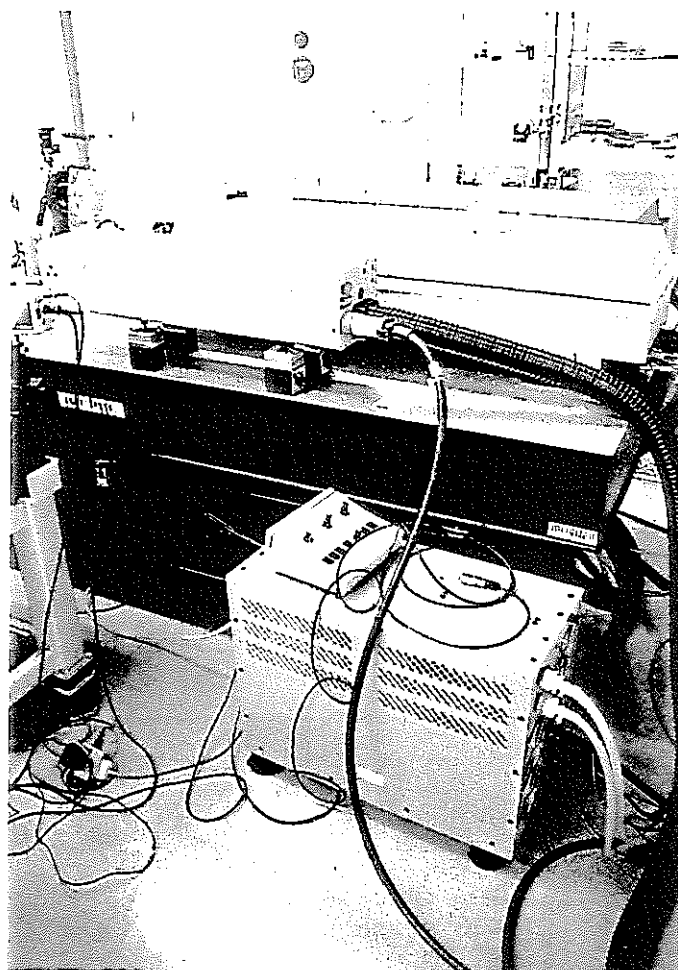


図 2.1.1 レーザ発振器外観写真

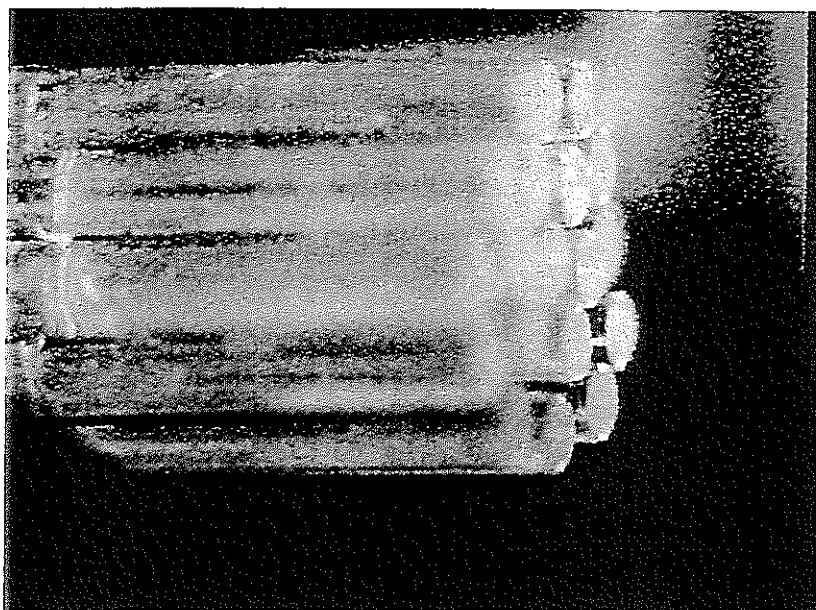


図 2.1.2 バンドルファイバ入射端面外観写真

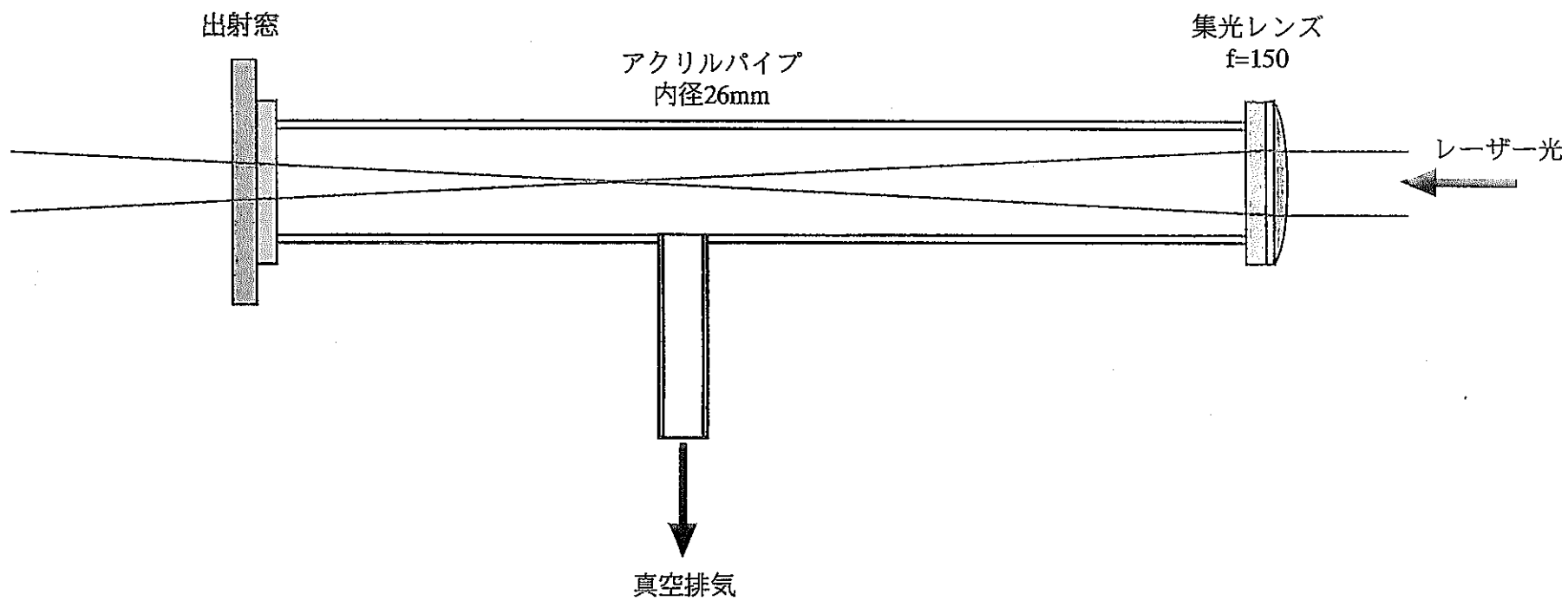


図 2.1.3 入射光学系真空セル概念図

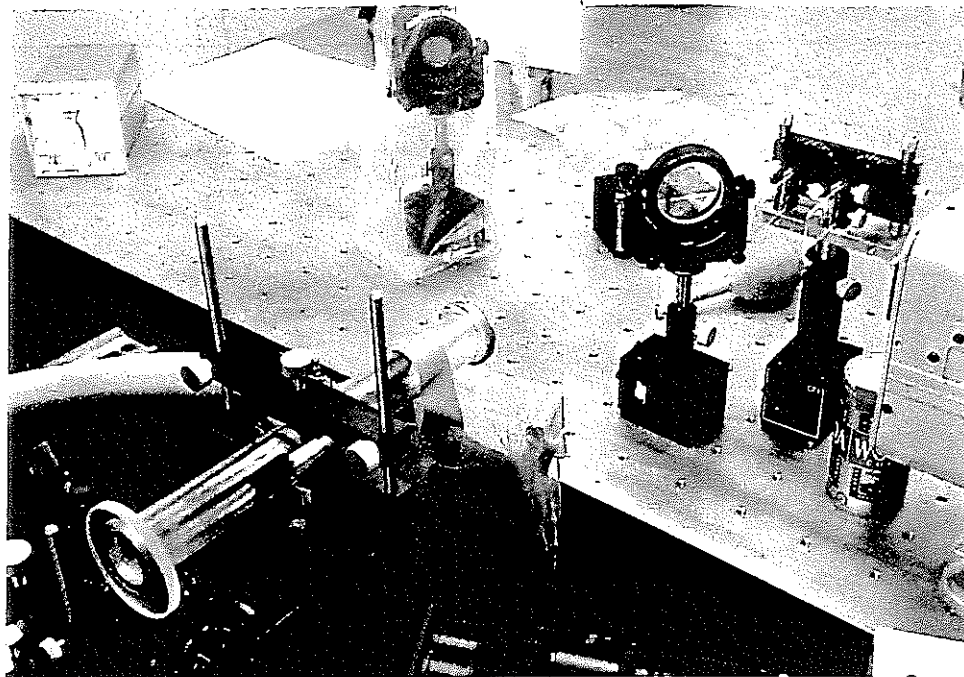


図 2.1.4 入射光学系真空セル外観写真

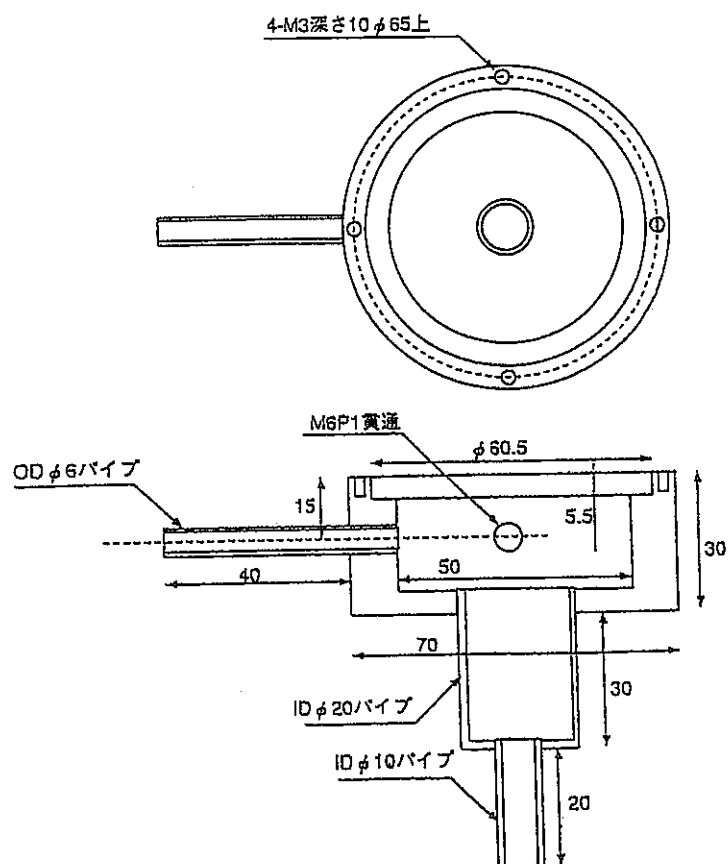


図 2.2.1 シールドガス供給ノズル概念図

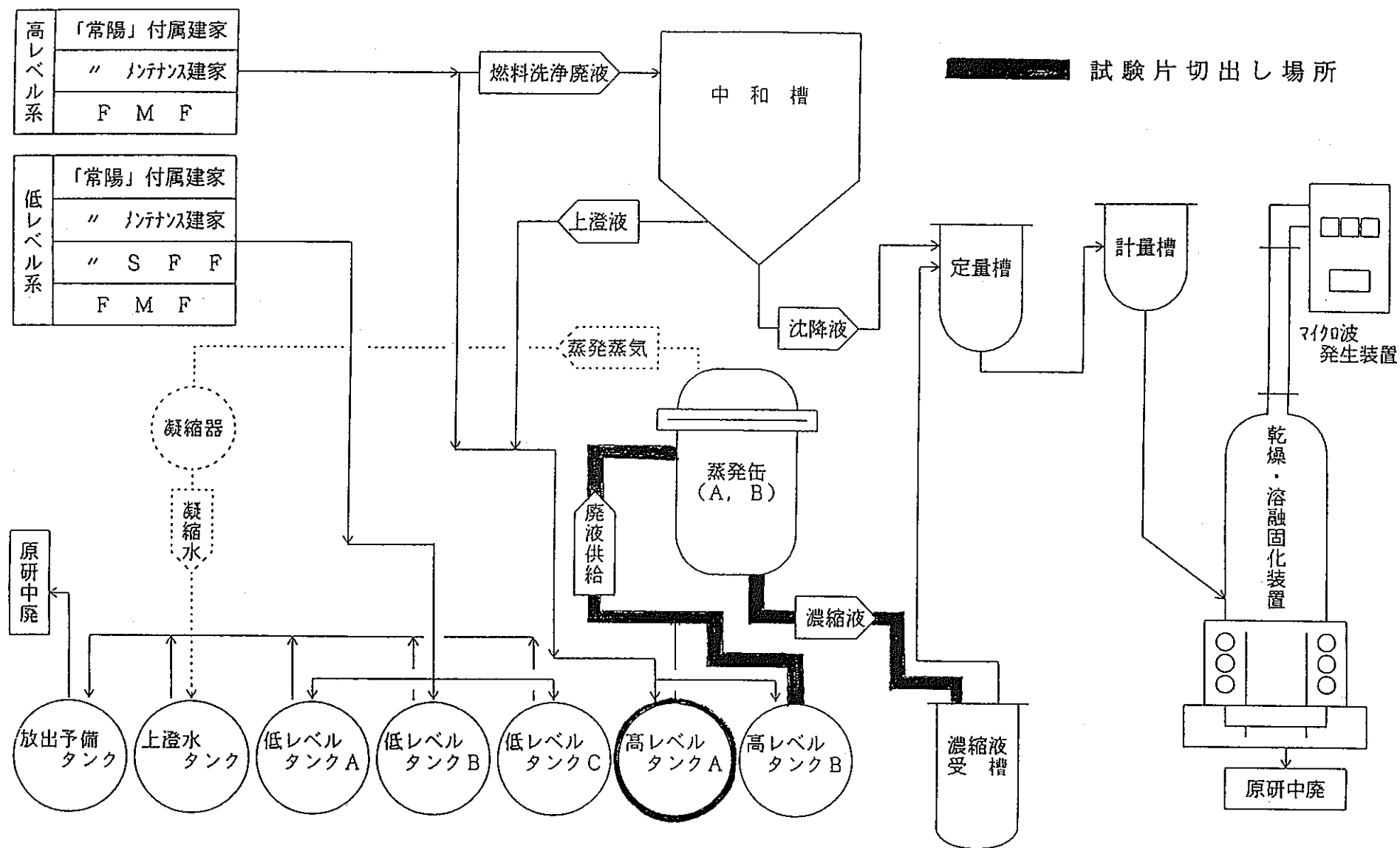


図 2.2.2 配管試験片切出し場所

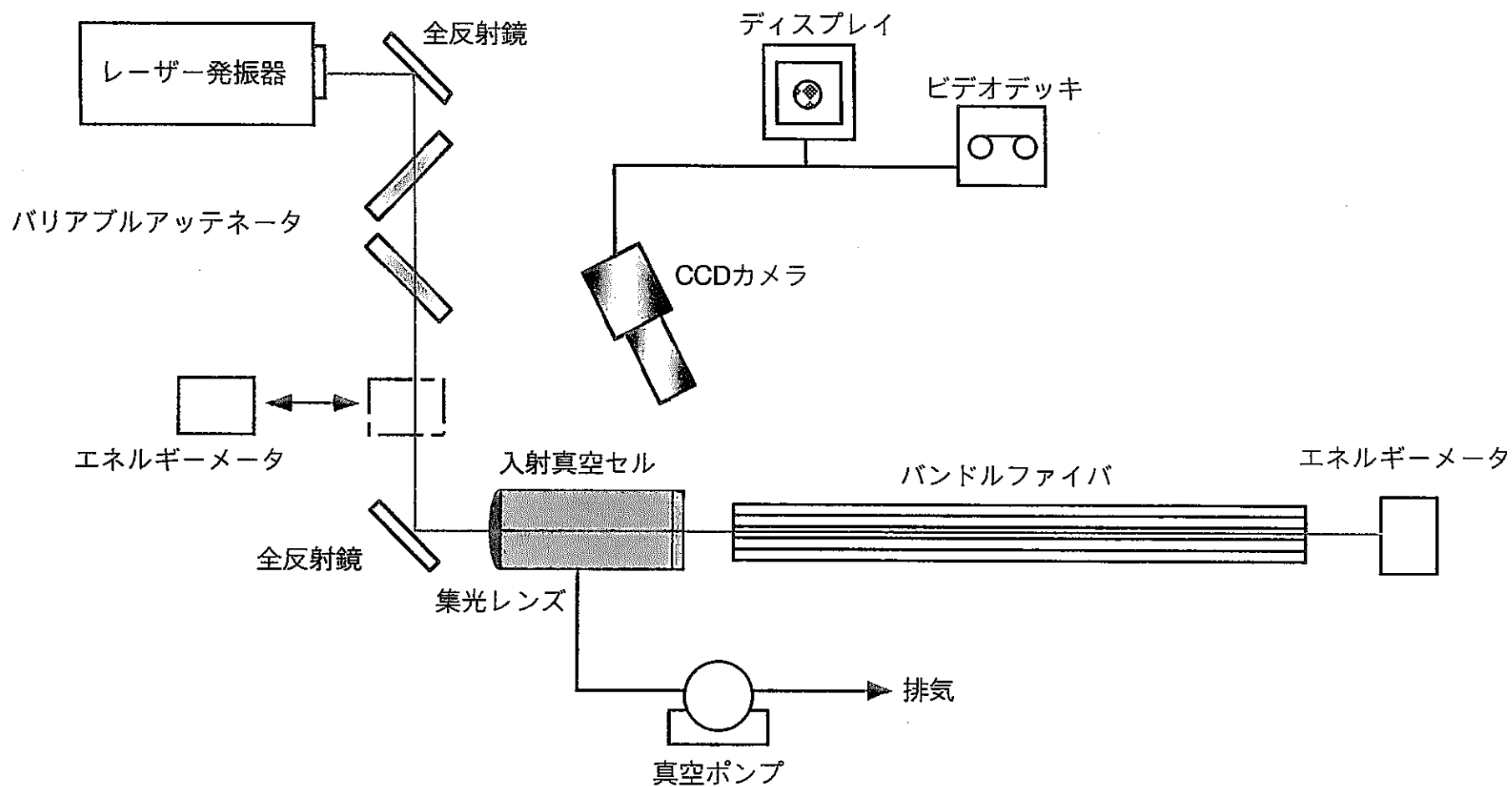


図 3. 1. 1 バンドルファイバ伝送試験概念図

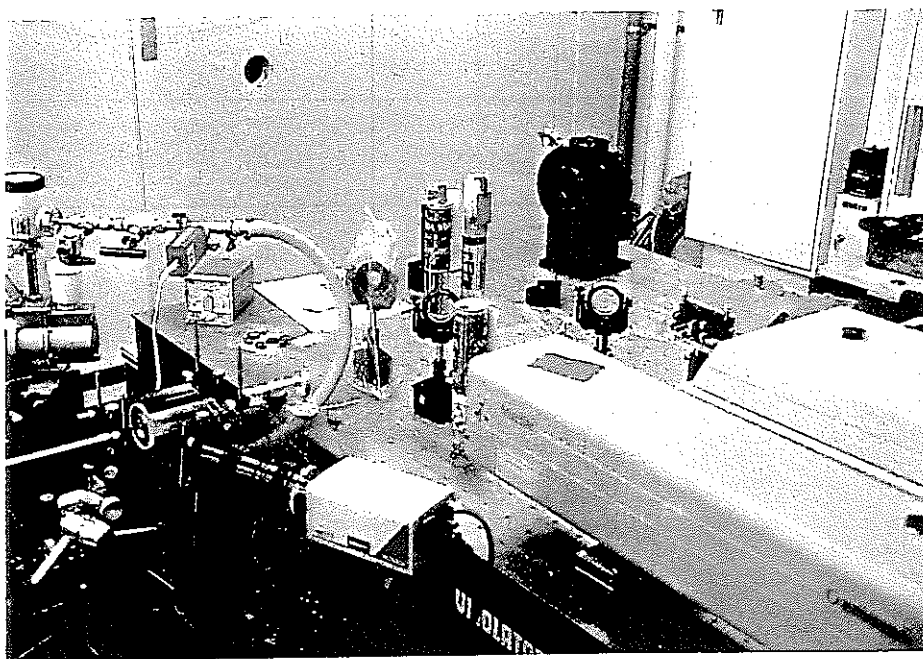


図 3.1.2 入射光学系外観写真

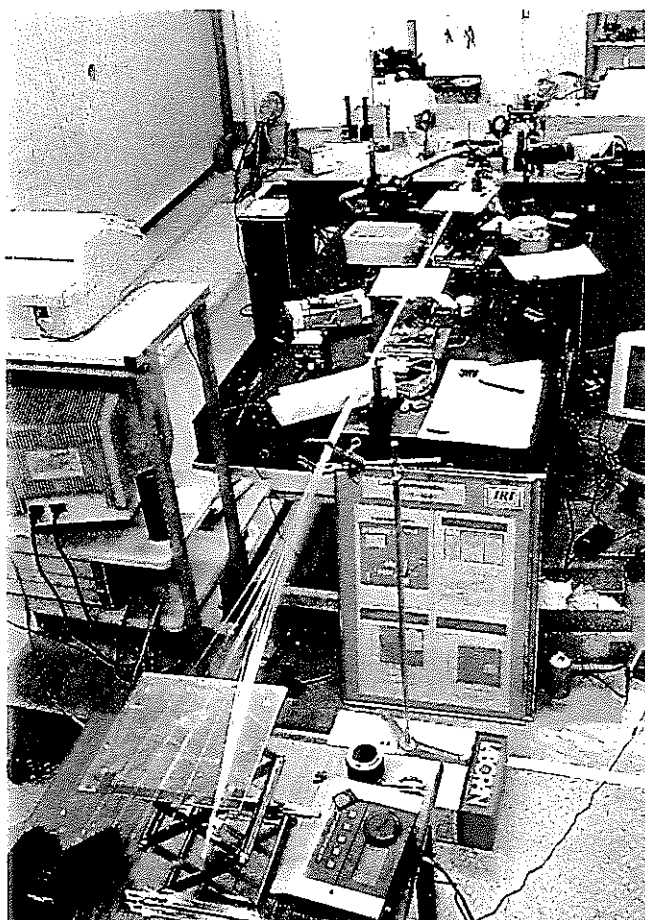


図 3.1.3 伝送試験外観写真(ファイバ長 3 m)

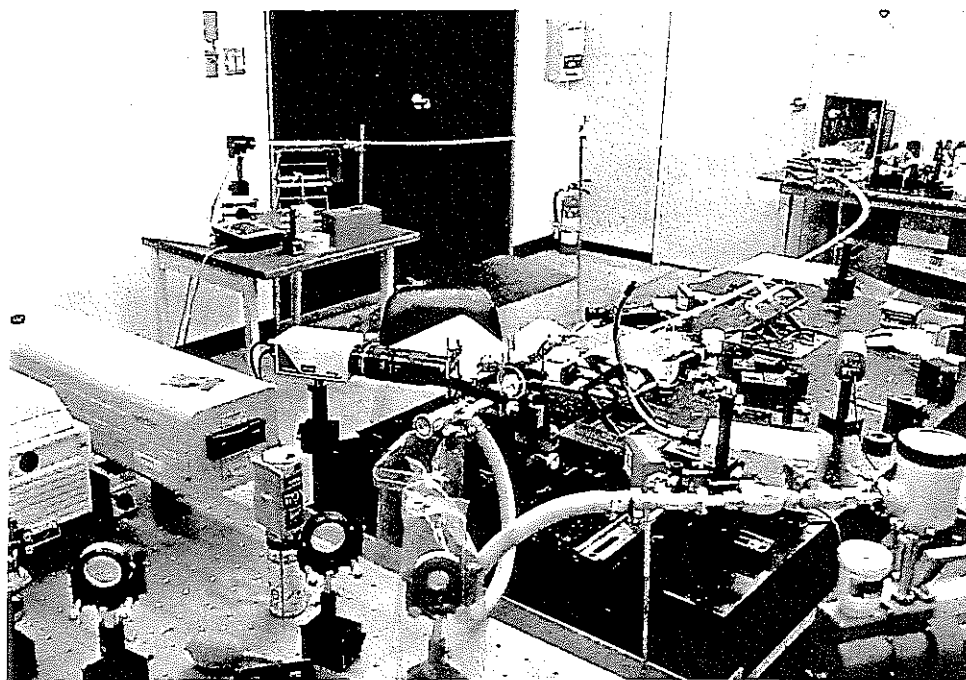


図 3.1.4 伝送試験外観写真(ファイバ長 5 m)

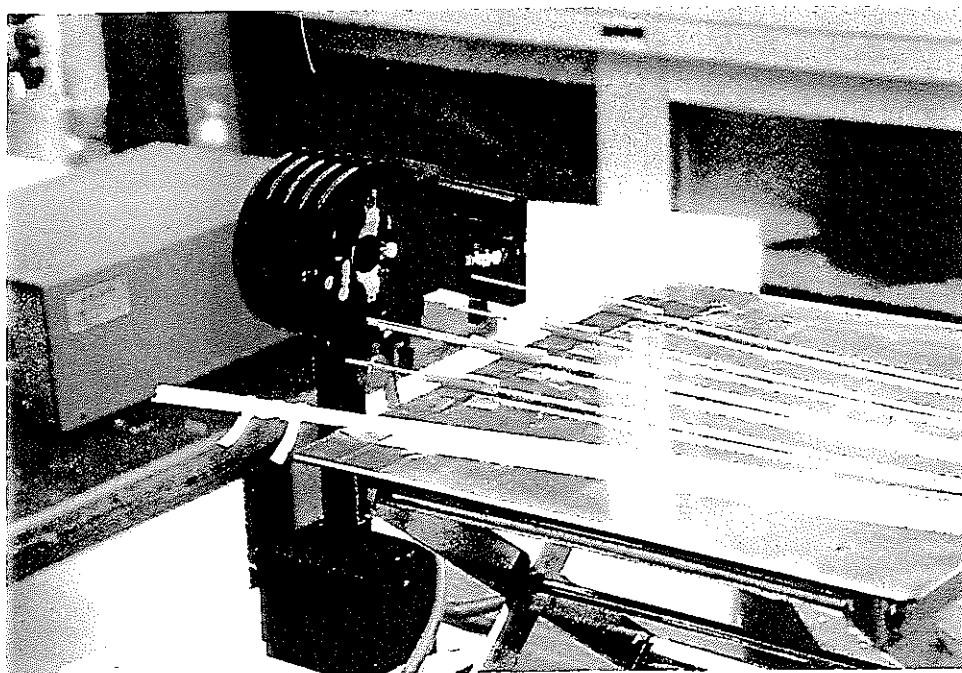


図 3.1.5 伝送エネルギー測定外観写真(ファイバ長 3 m)

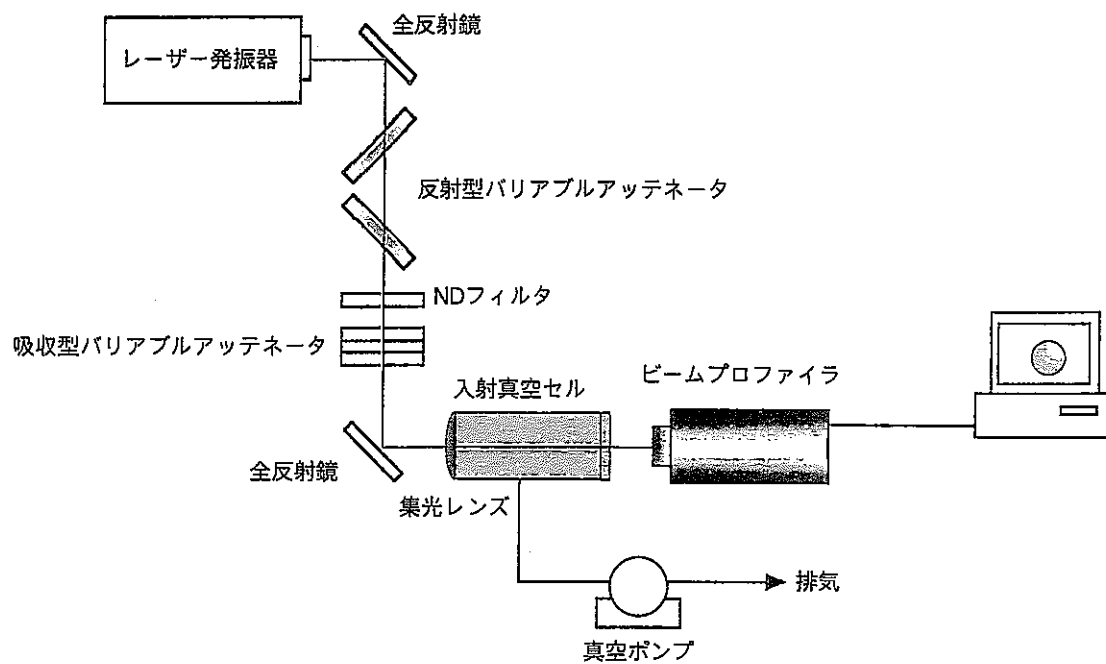


図 3.1.6 入射レーザー光のビームパターン測定概念図

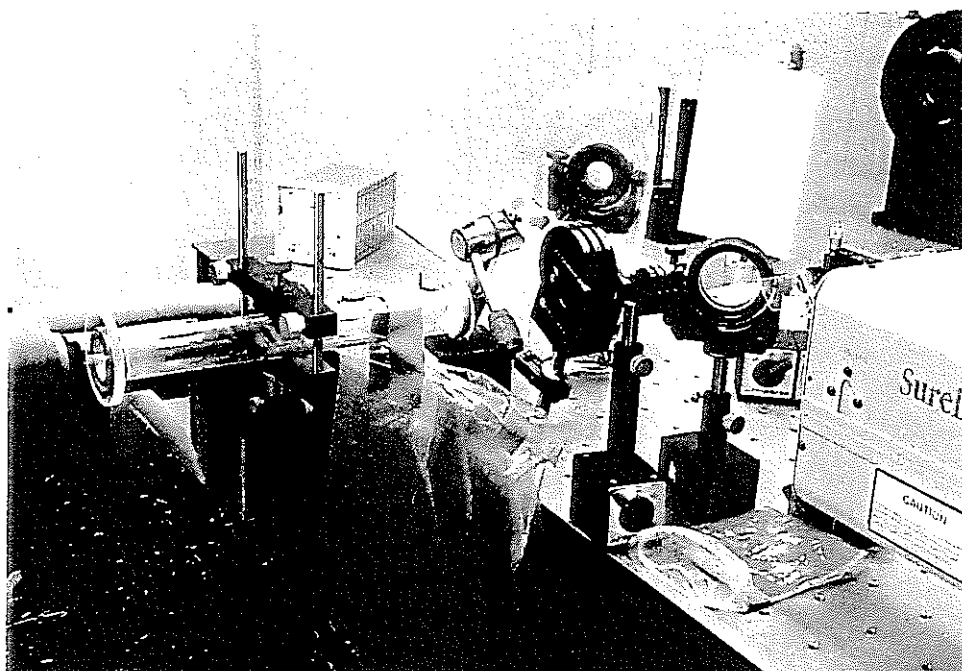


図 3.1.7 入射レーザー光のビームパターン測定試験外観写真

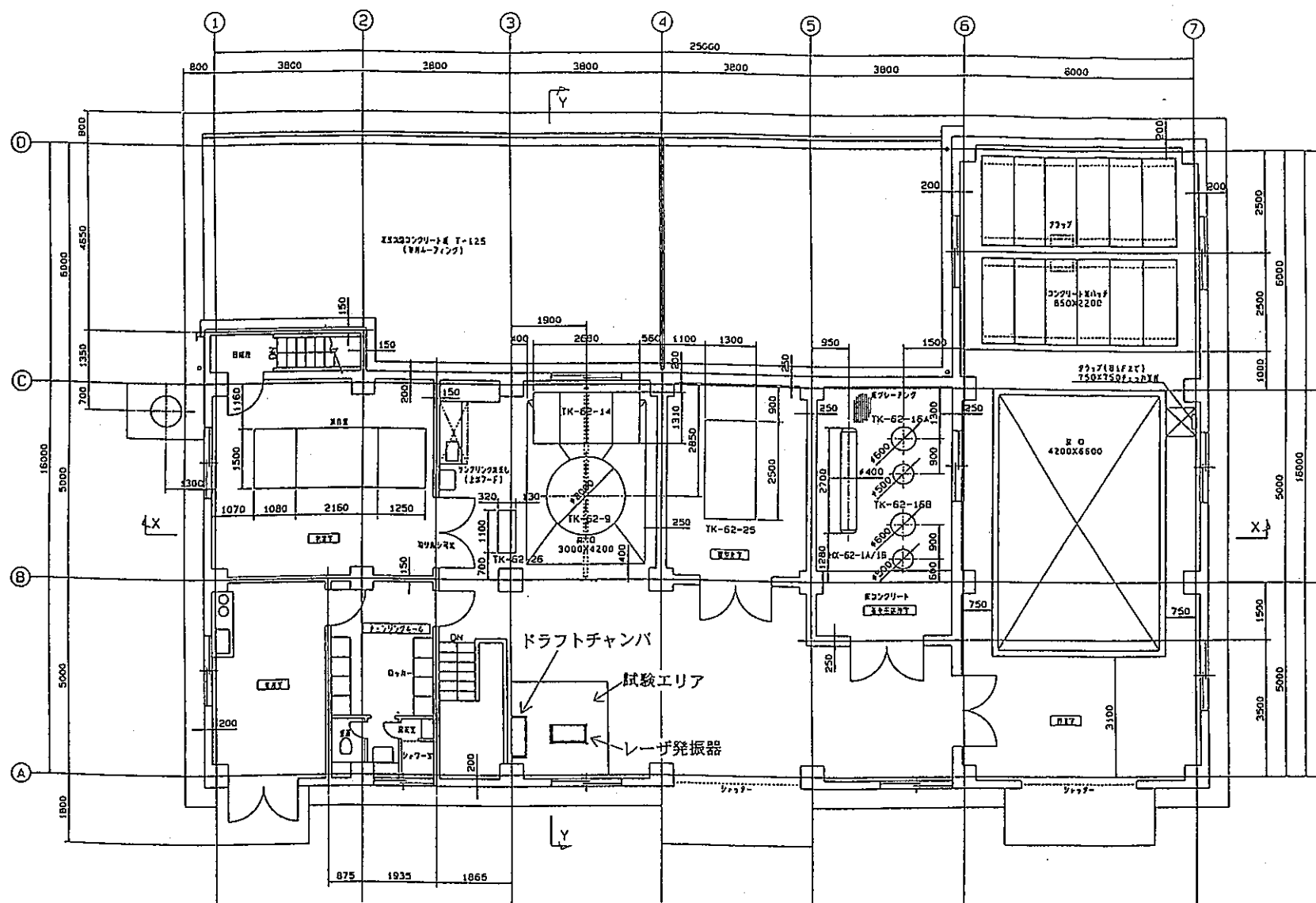


図 3.2.1 実廃棄物除染試験実施場所(旧 J W T F 1 F)

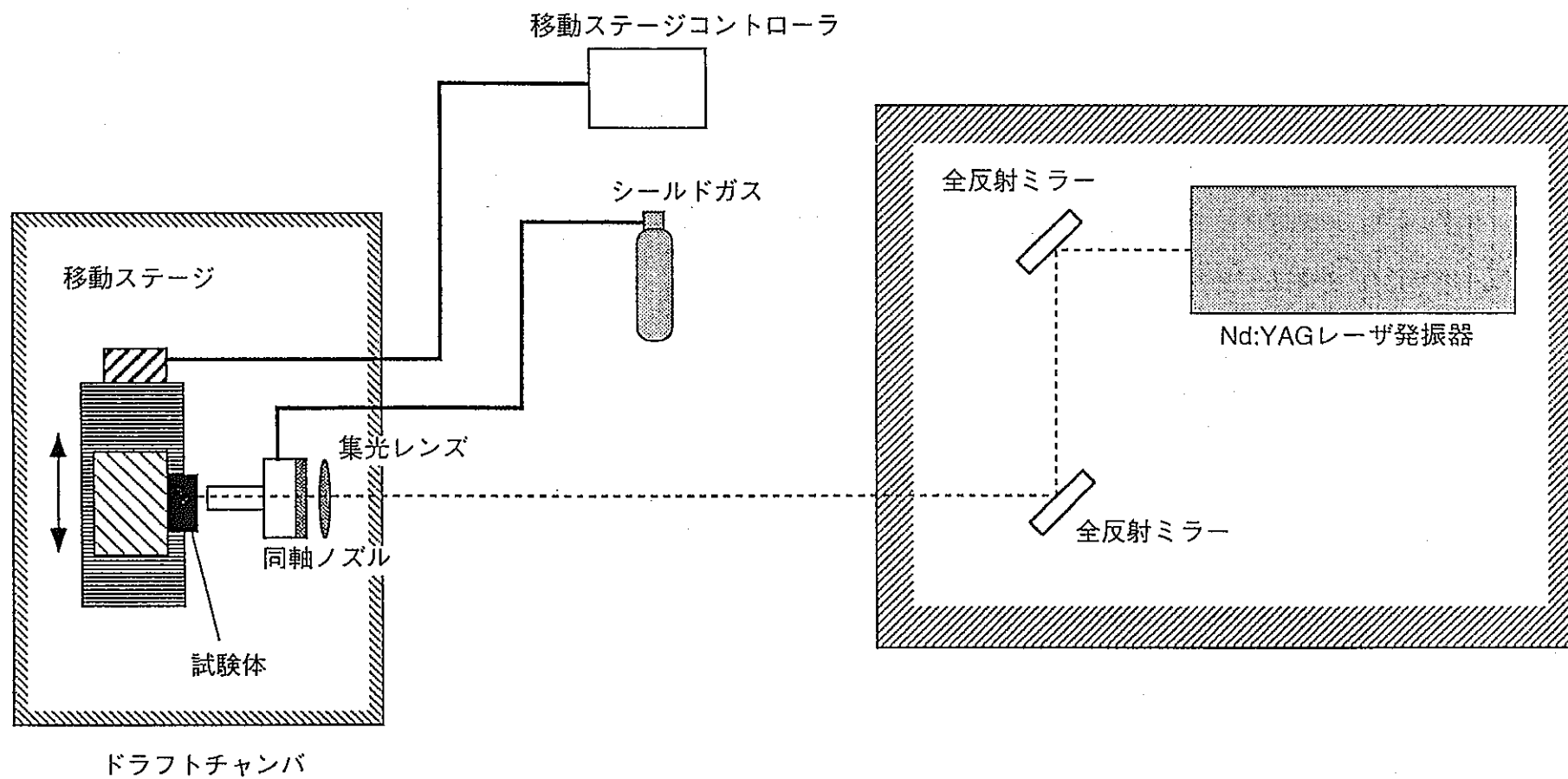


図 3.2.2 実廃棄物除染試験概念図

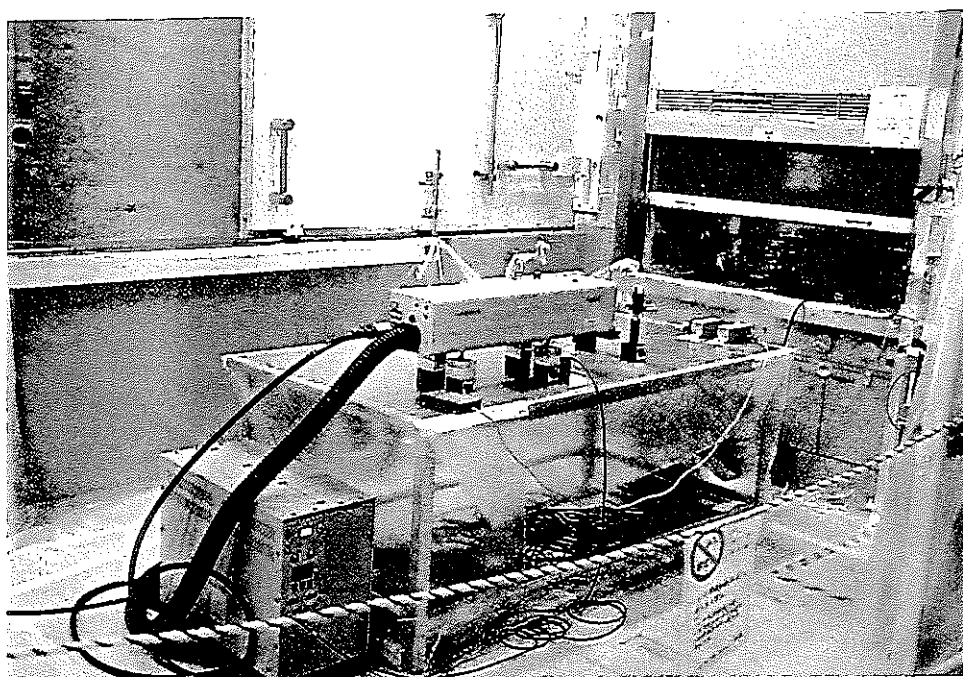


図 3. 2. 3 実廃棄物除染試験外観写真

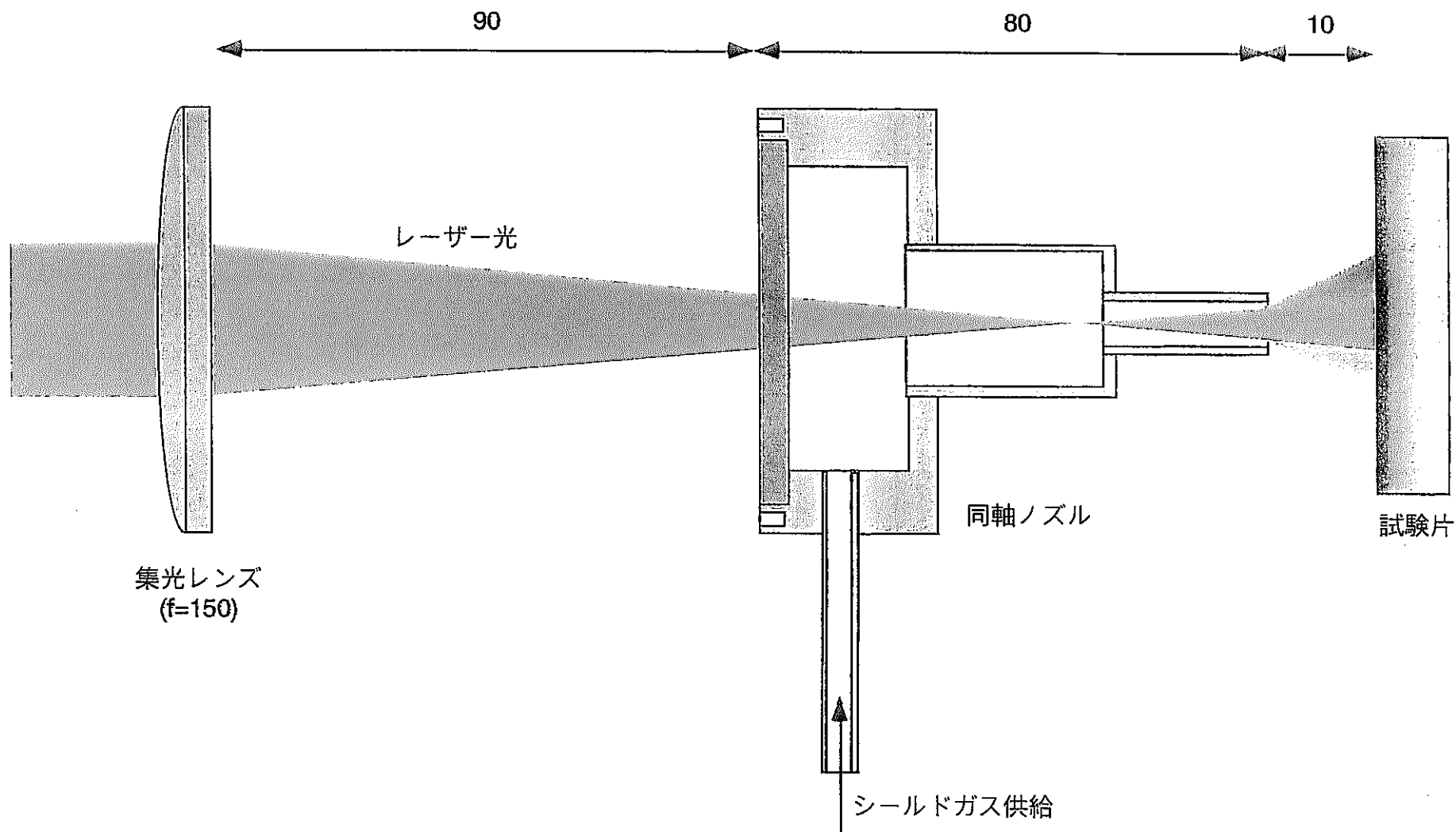


図 3. 2. 4 集光レンズ及び同軸ノズル概念図

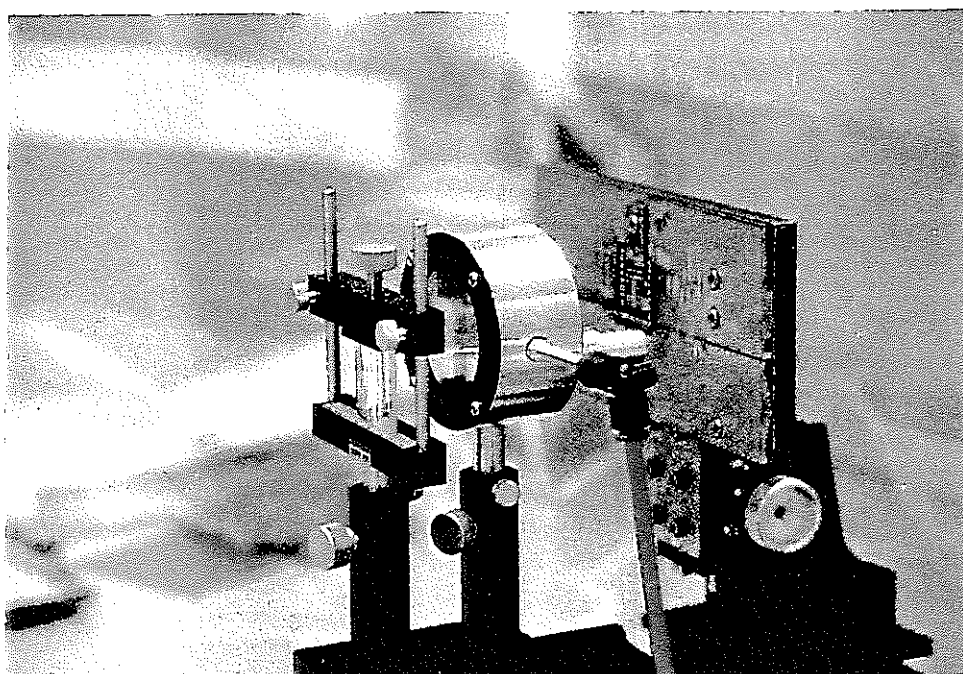


図 3. 2. 5 集光レンズ及び同軸ノズル外観写真

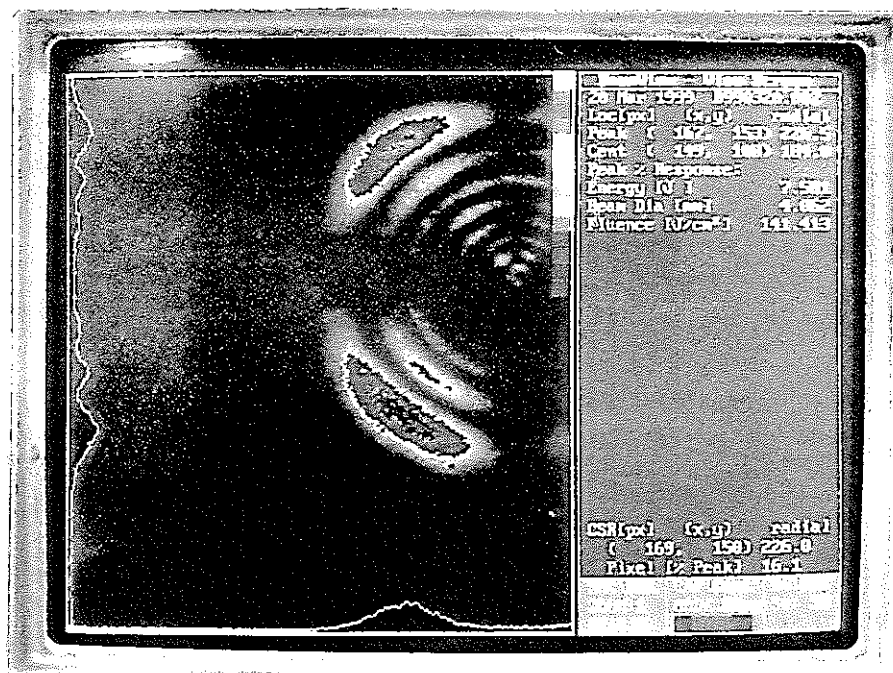


図 4.1.1(1) 入射ビームパターン
(ビームプロファイラ, 発振器: Surelite-I-10)

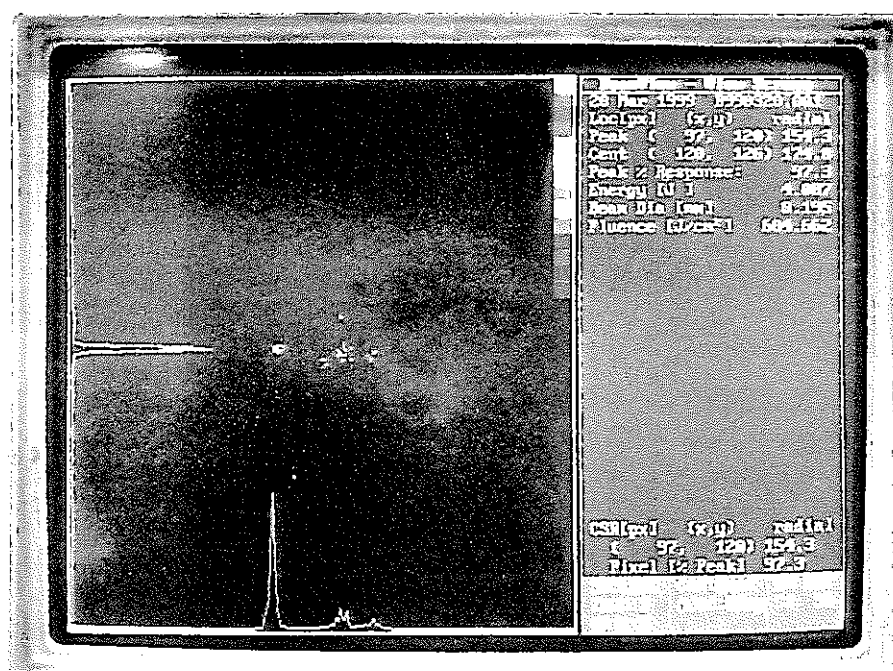


図 4.1.1(2) ホットスポット部の入射ビームパターン
(ビームプロファイラ, 発振器: Surelite-I-10)

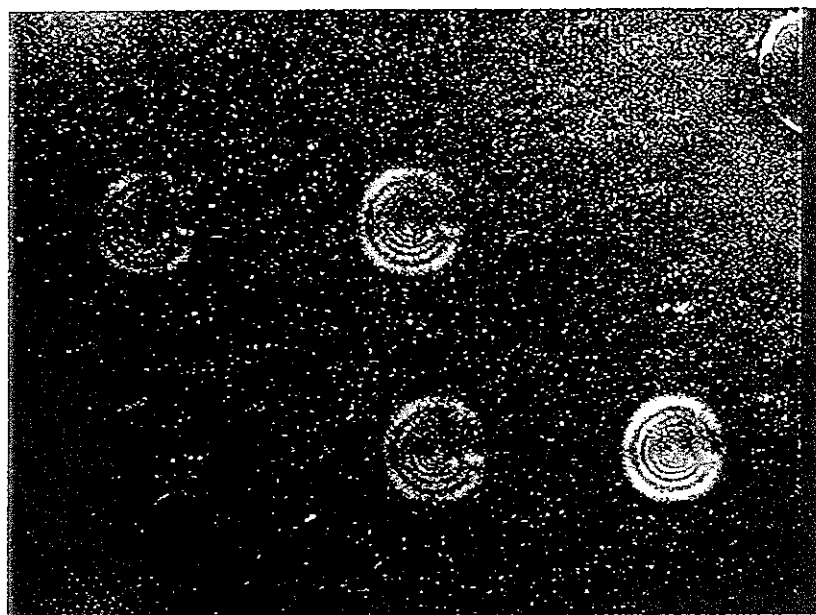


図 4.1.1(3) 入射ビームパターン
(レーザアライメントペーパー, 発振器: Surelite-I-10)

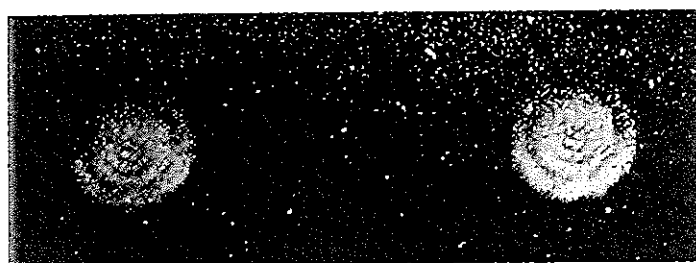


図 4.1.1(4) 入射ビームパターン
(レーザアライメントペーパー, 発振器: GCR-150-10)

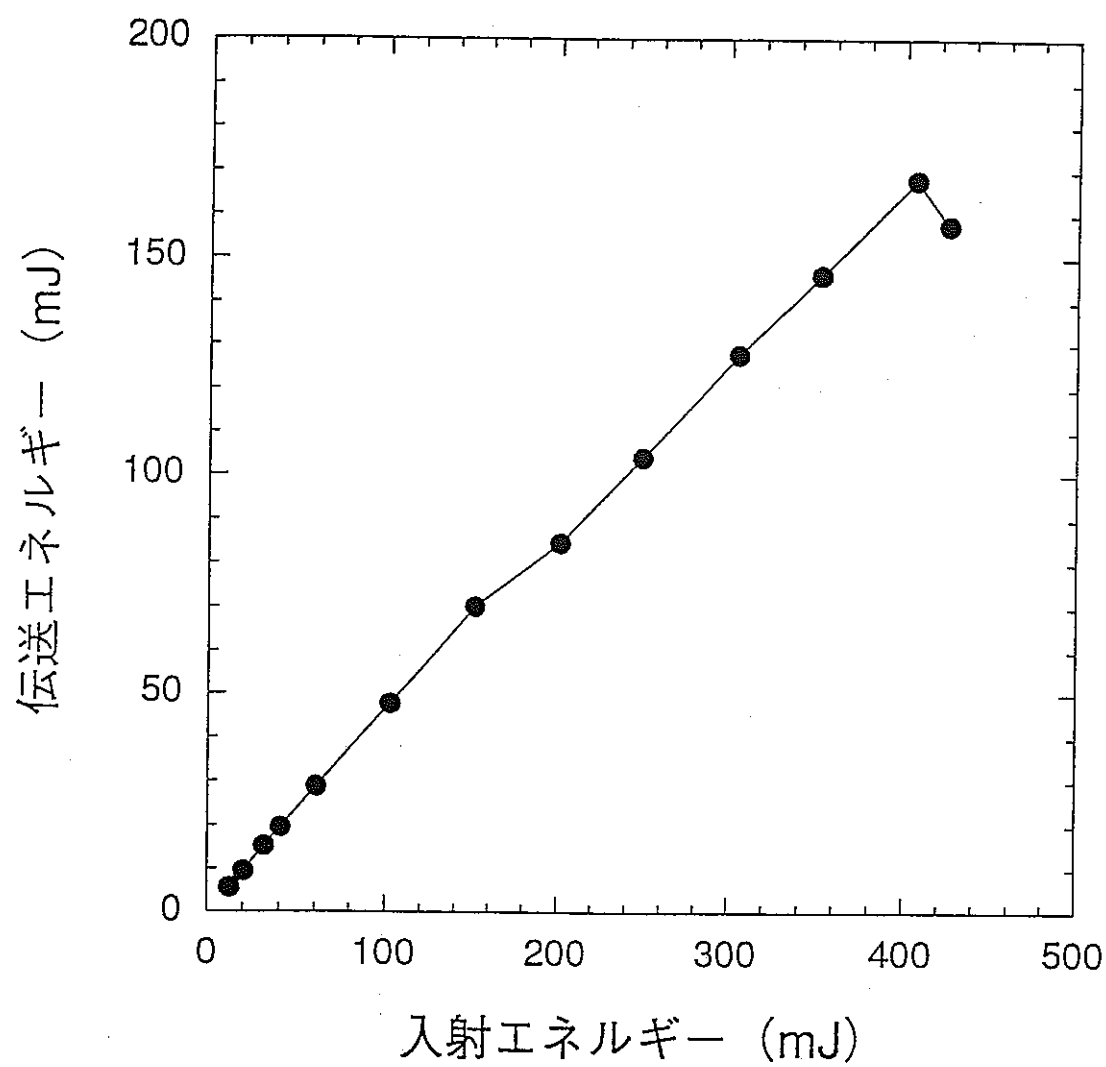


図 4. 1. 2 (1) 伝送エネルギーの入射エネルギー依存性
(ファイバ長 3 m)

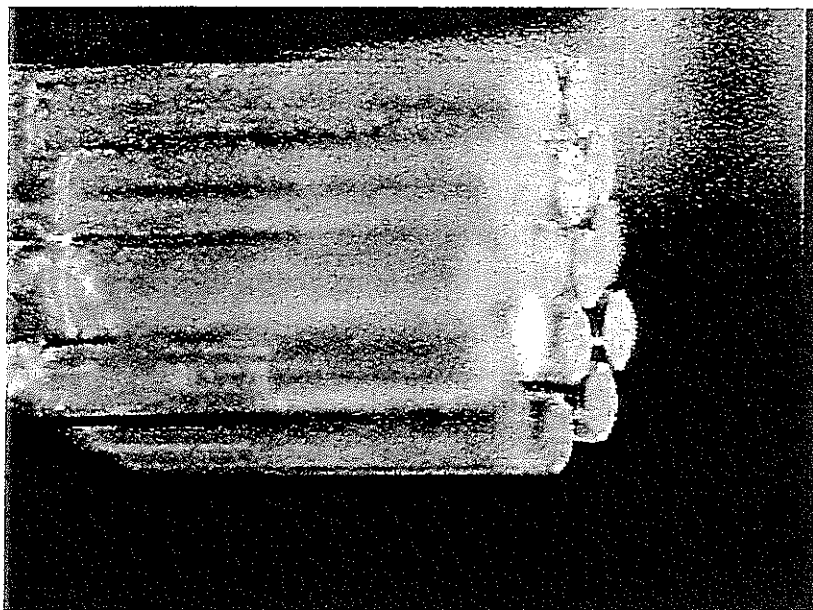


図 4. 1. 2 (2) 大きく損傷したファイバ端面の写真(ファイバ長 3 m)

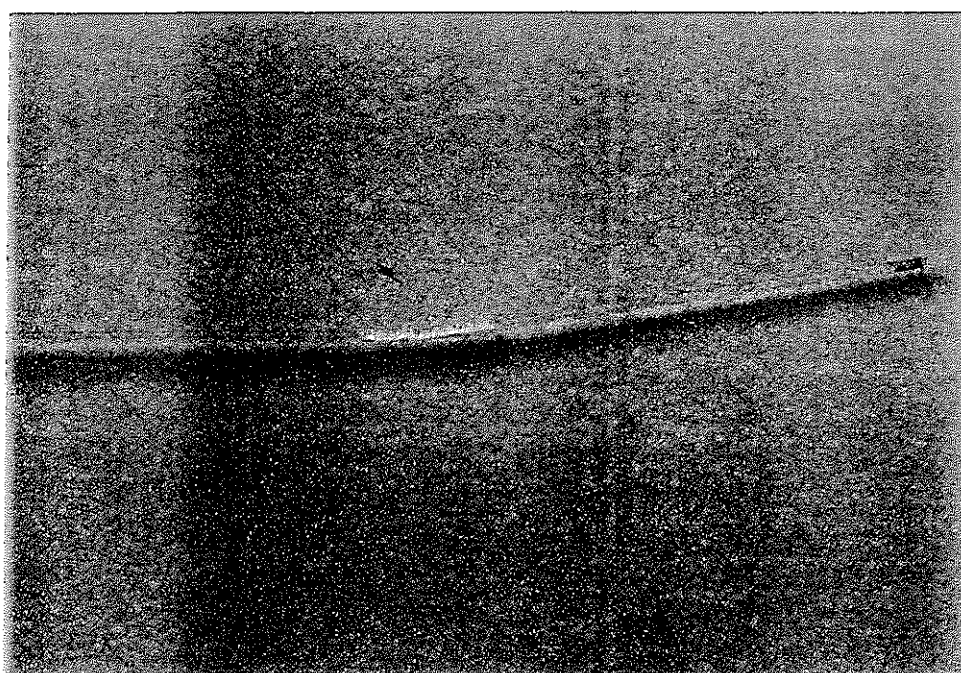


図 4. 1. 2 (3) 大きく損傷したファイバ1本の外観写真(ファイバ長 3 m)

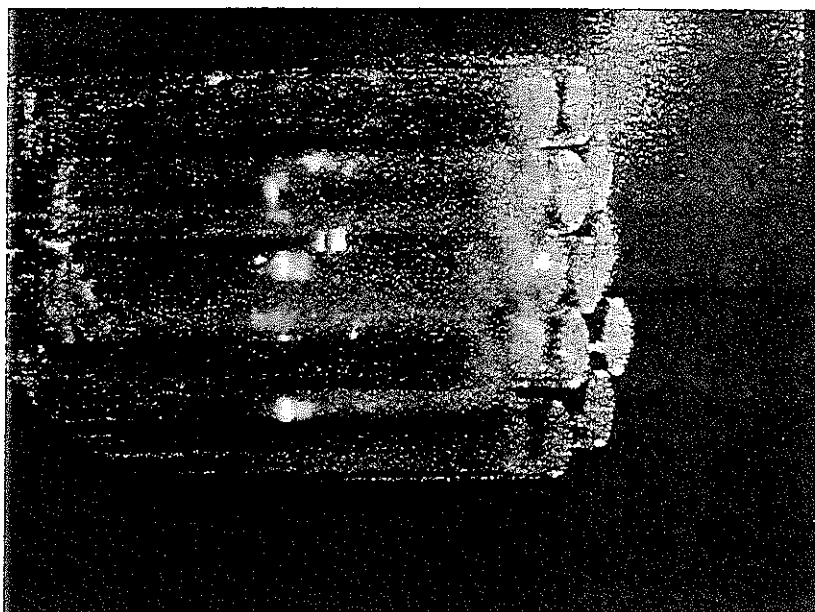


図 4. 1. 2 (4) 小さく損傷したファイバ端面の写真(ファイバ長 3 m)

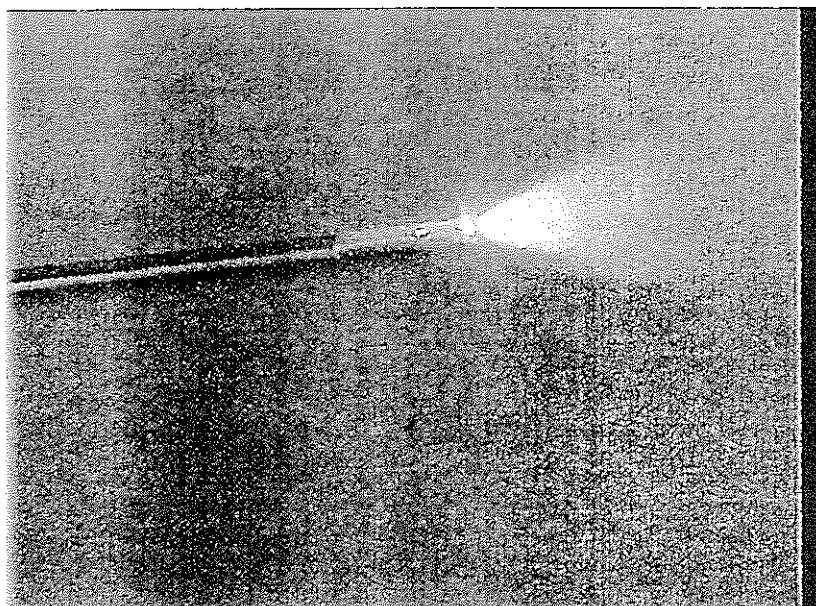


図 4. 1. 2 (5) 小さく損傷したファイバ 1 本の外観写真(ファイバ長 3 m)

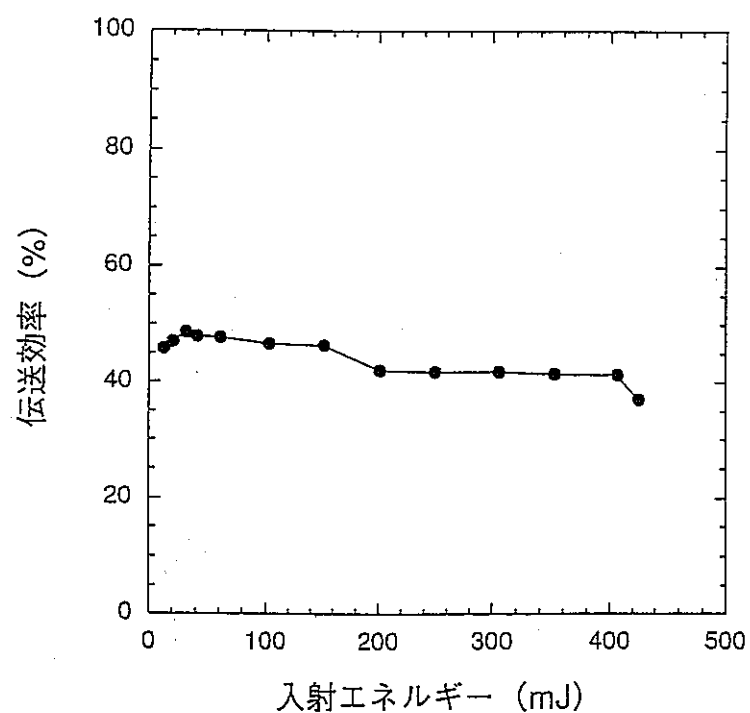


図 4. 1. 2 (6) バンドルファイバの伝送効率(ファイバ長 3 m)

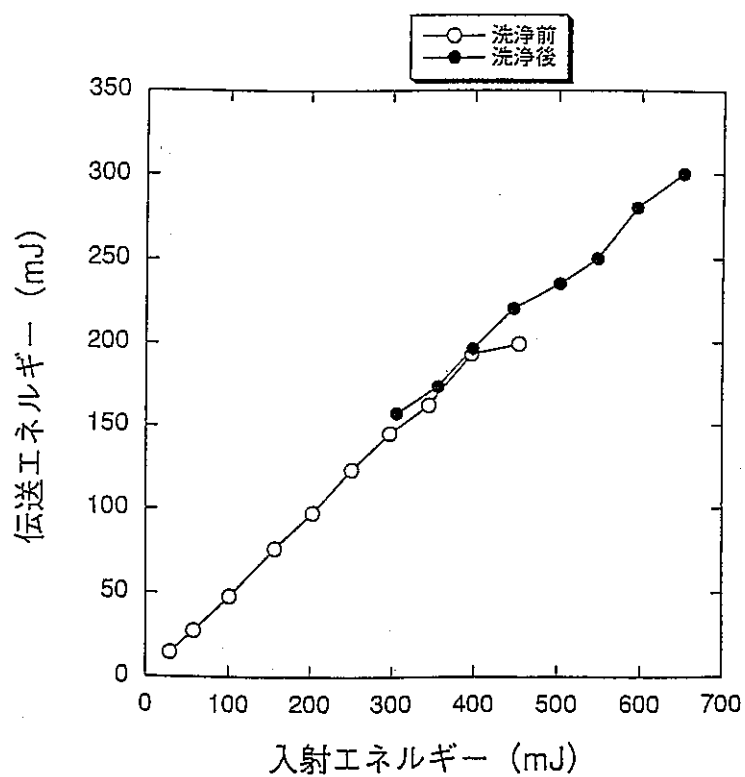


図 4. 1. 2 (7) 伝送エネルギーの入射エネルギー依存性
(ファイバ長 5 m)

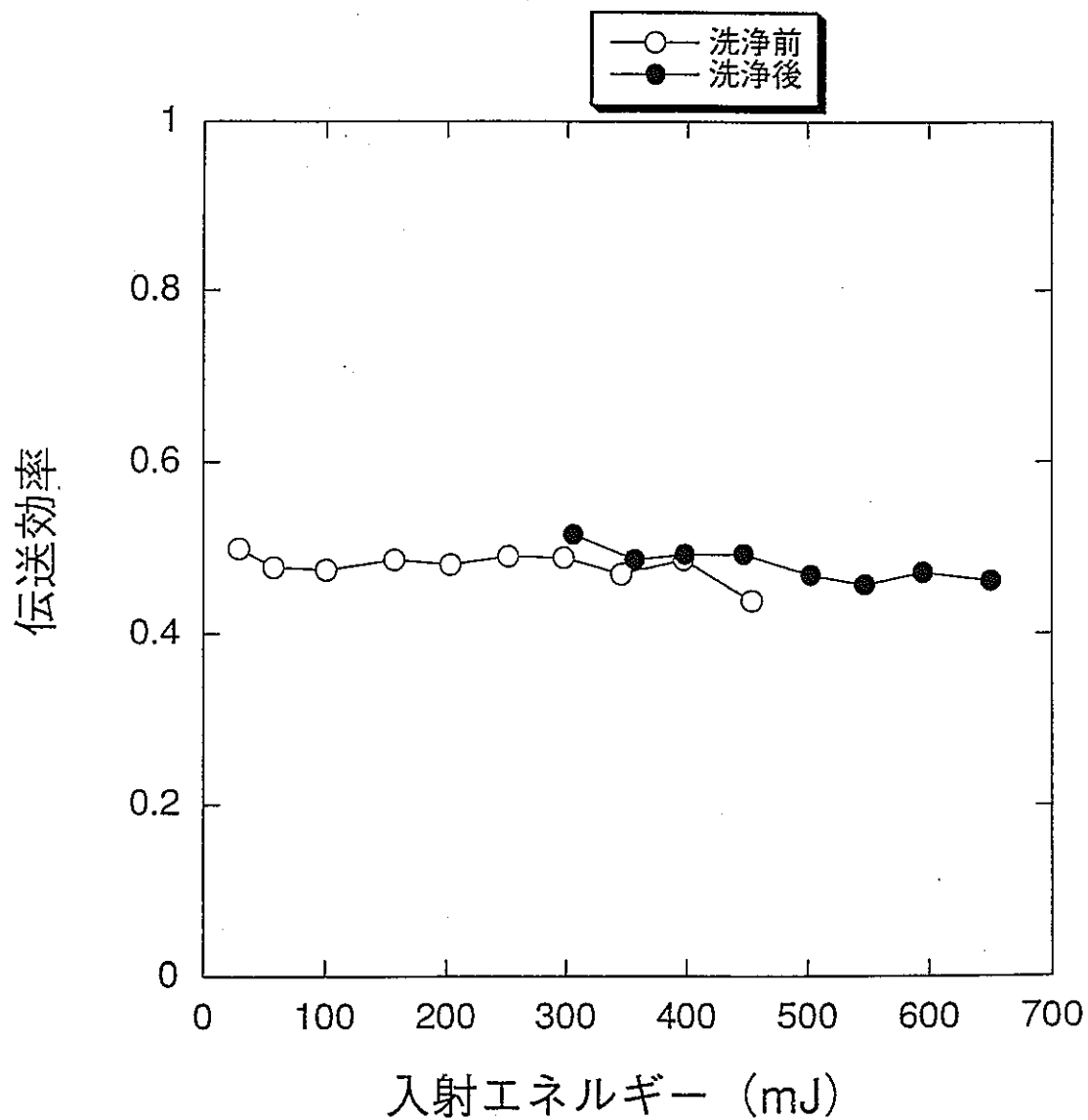


図 4. 1. 2 (8) バンドルファイバの伝送効率 (ファイバ長 5 m)

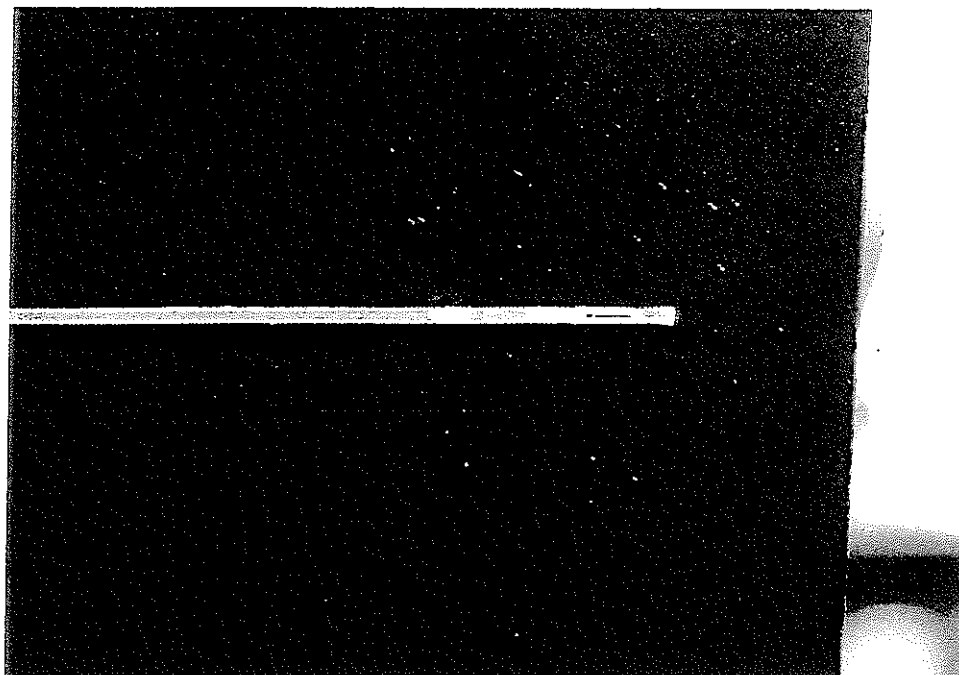


図 4. 1. 2 (9) 大きく損傷したファイバ 1 本の外観写真(ファイバ長 5 m)



図 4. 1. 2 (10) 大きく損傷したファイバ端面の写真(ファイバ長 5 m)



図 4. 1. 2 (11) 小さく損傷したファイバ端面の写真(ファイバ長 5 m)

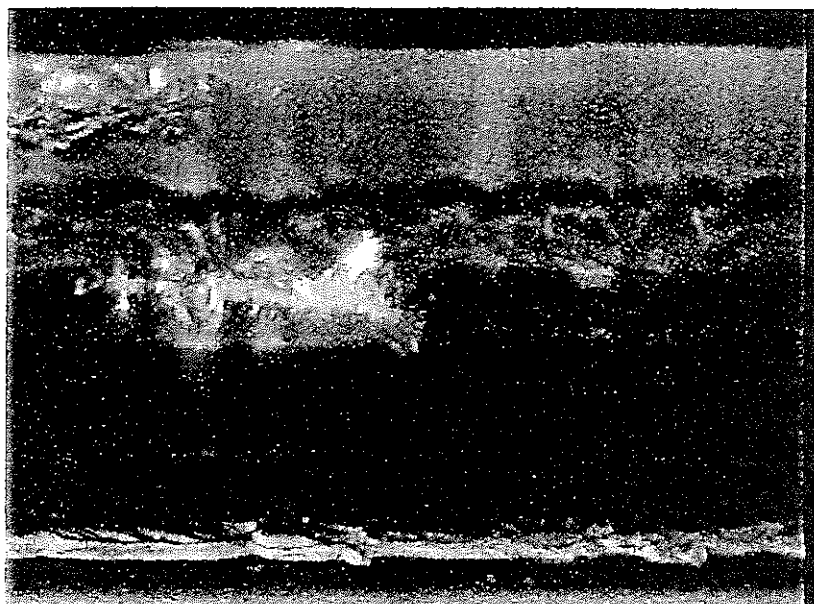


図 4. 1. 2 (12) 小さく損傷したファイバ 1 本の側面拡大写真(ファイバ長 5 m)

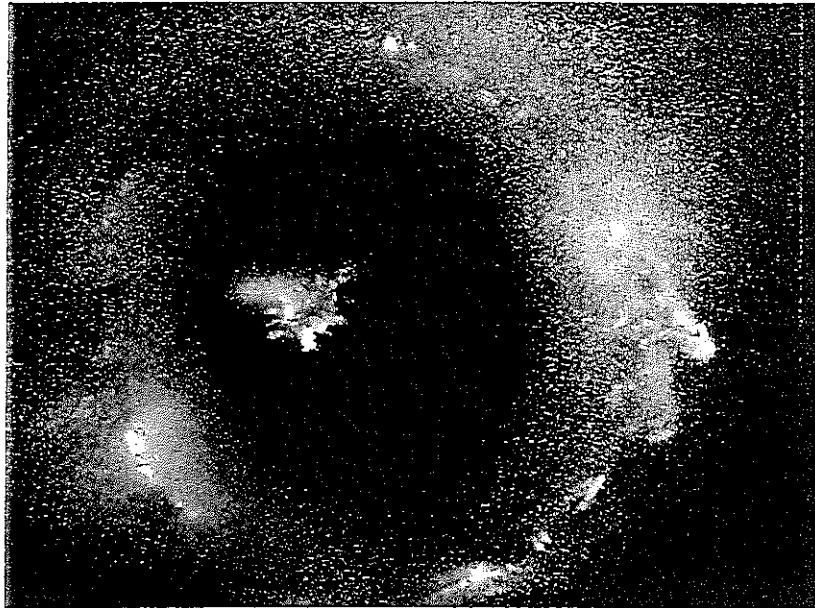


図 4. 1. 2 (13) 小さく損傷したファイバ 1 本の正面拡大写真(ファイバ長 5 m)

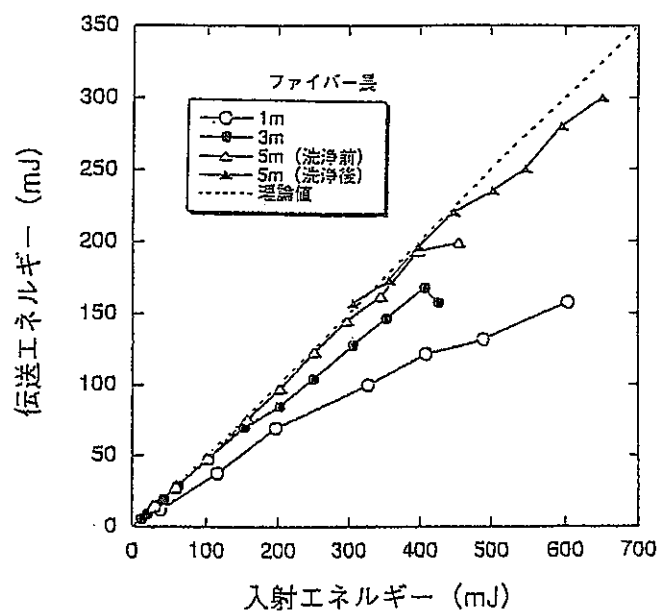


図 4. 1. 2 (14) 伝送エネルギーの入射エネルギー依存性の比較
(ファイバ長 1, 3, 5 m)

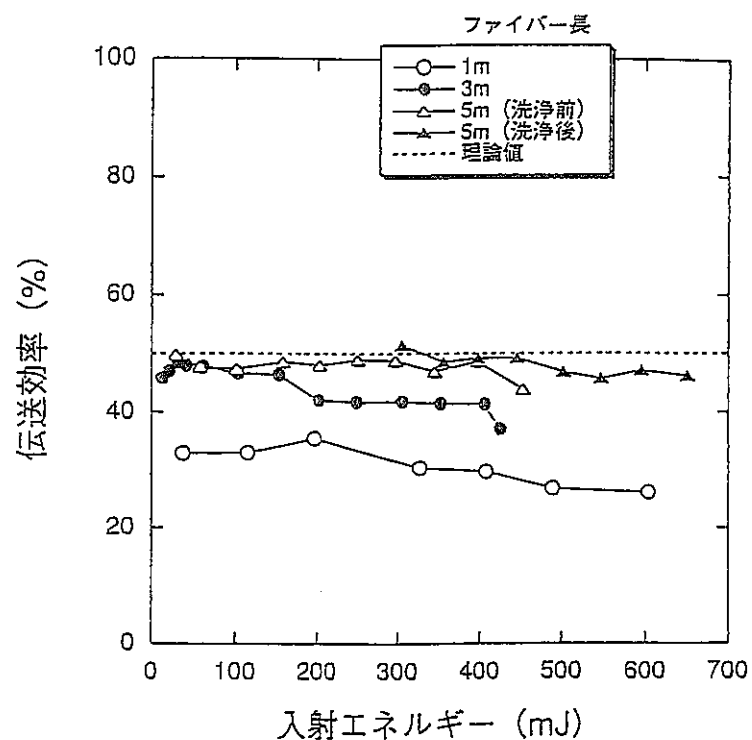


図 4.1.2(15) 伝送効率の比較(ファイバ長 1, 3, 5 m)

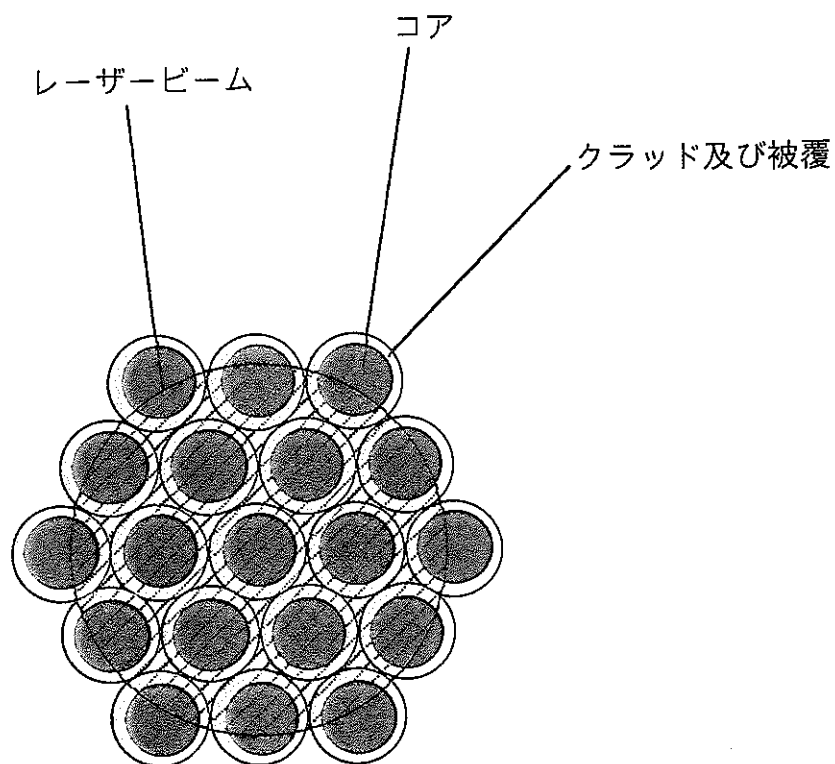


図 4.1.2(16) バンドルファイバの模式図

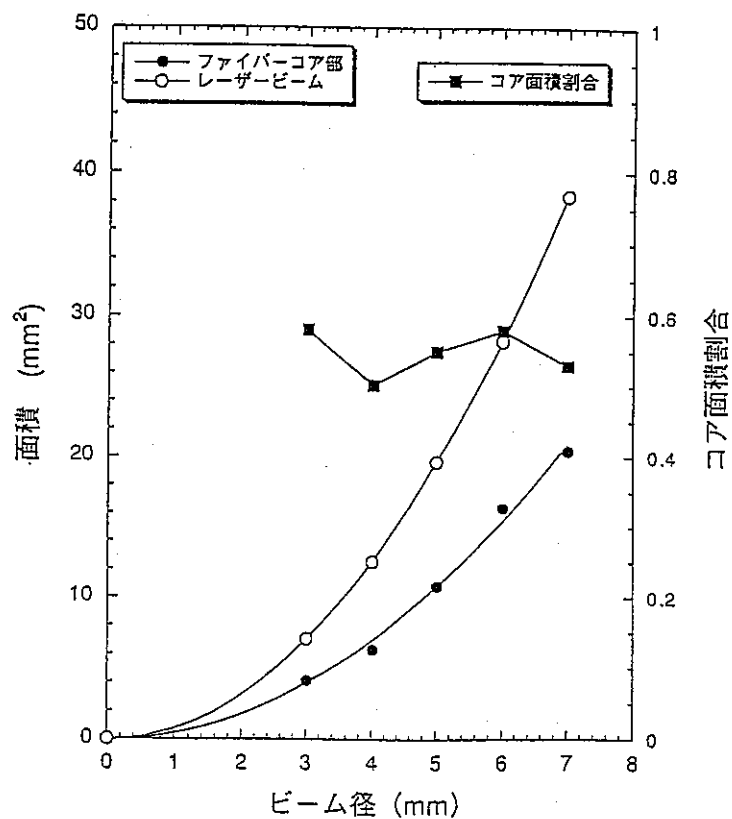


図 4. 1. 2 (17) コア面積割合とビーム径の関係

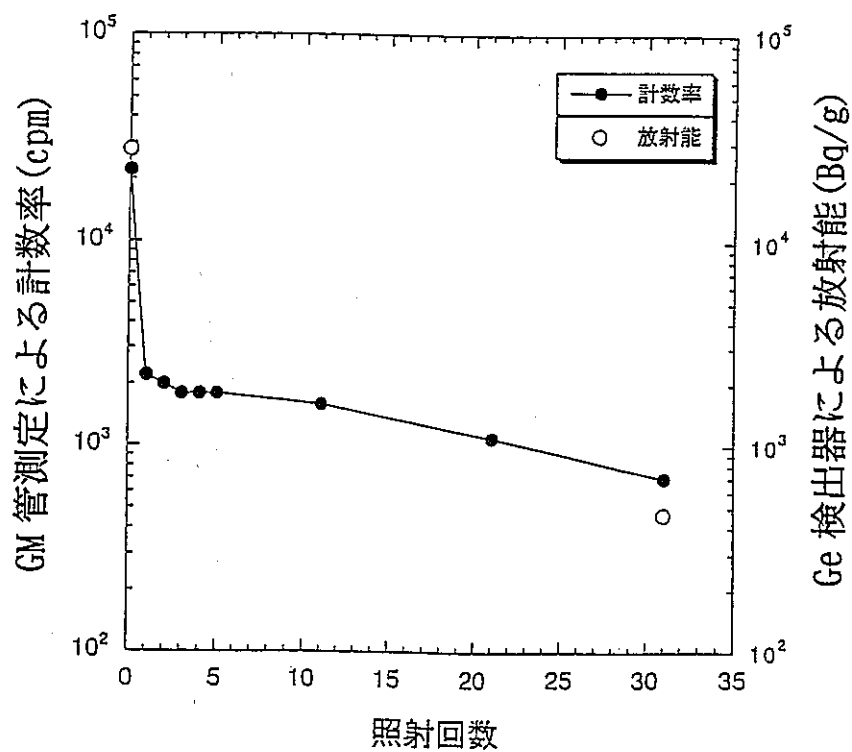


図 4. 2. 1 (1) 計数率及び放射能の照射回数依存性

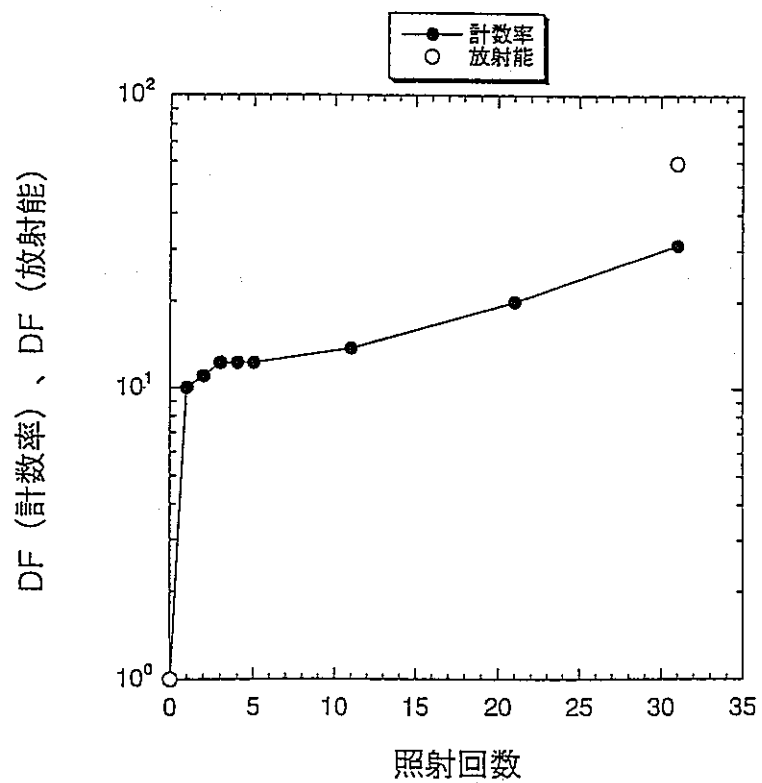


図 4. 2. 1 (2) 除染係数の照射回数依存性

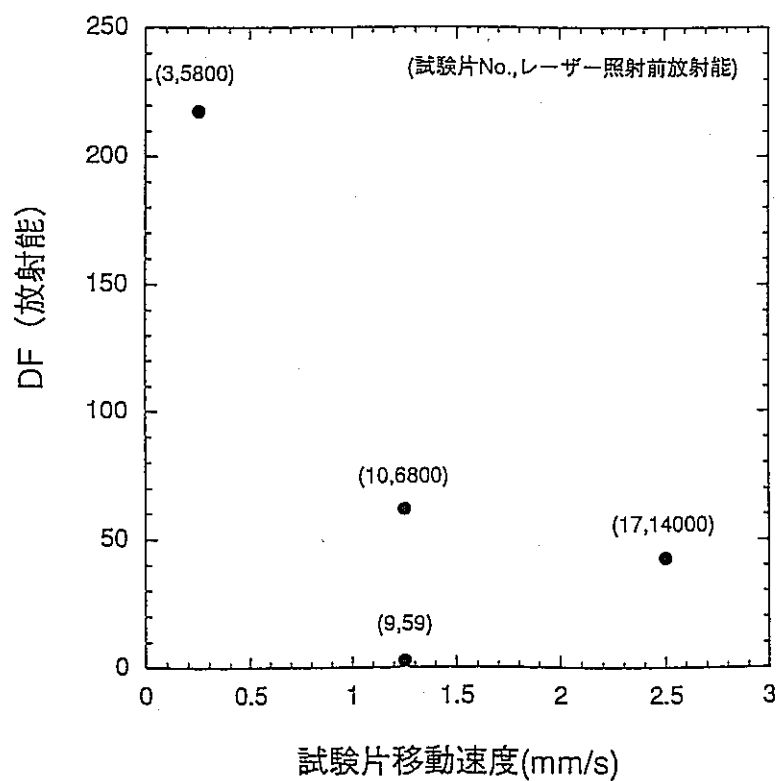


図 4. 2. 2 (1) 除染係数の試験片移動速度依存性

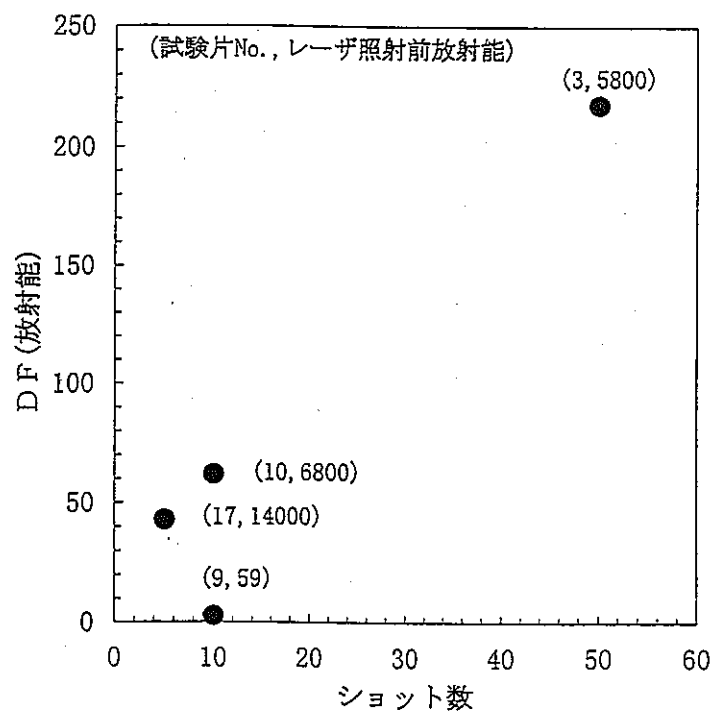


図 4. 2. 2 (2) 除染係数のレーザショット数依存性

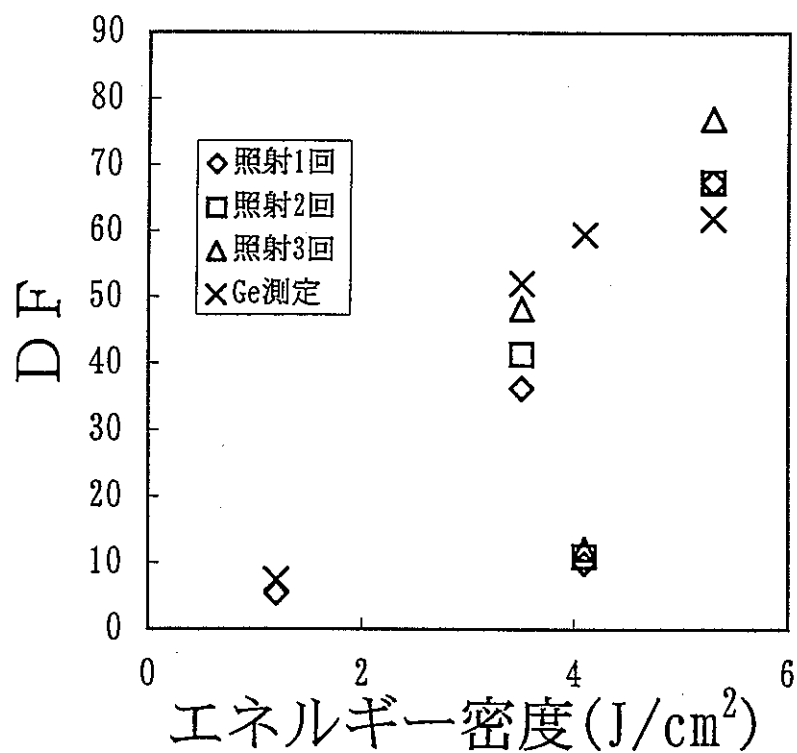


図 4. 2. 3 (1) 除染係数のエネルギー密度依存性

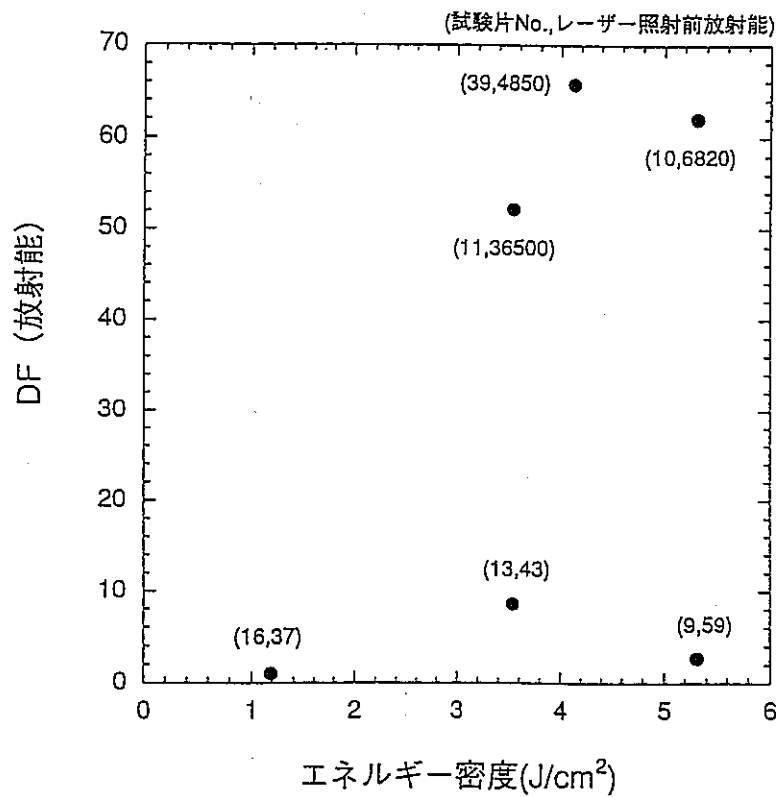


図 4. 2. 3 (2) 除染係数のエネルギー密度依存性 (2)

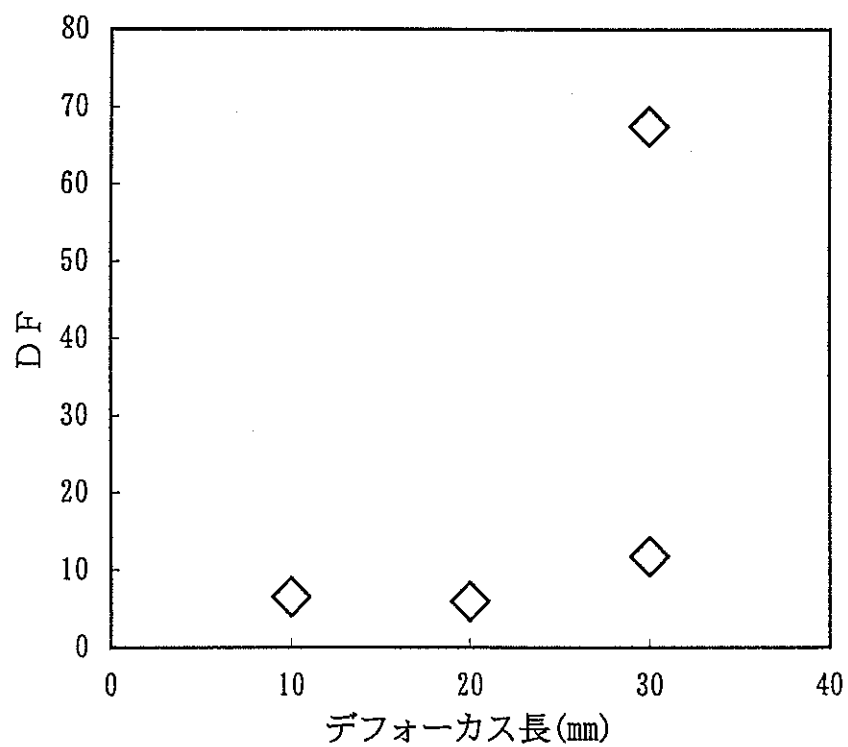


図 4. 2. 4 除染係数のデフォーカス長依存性

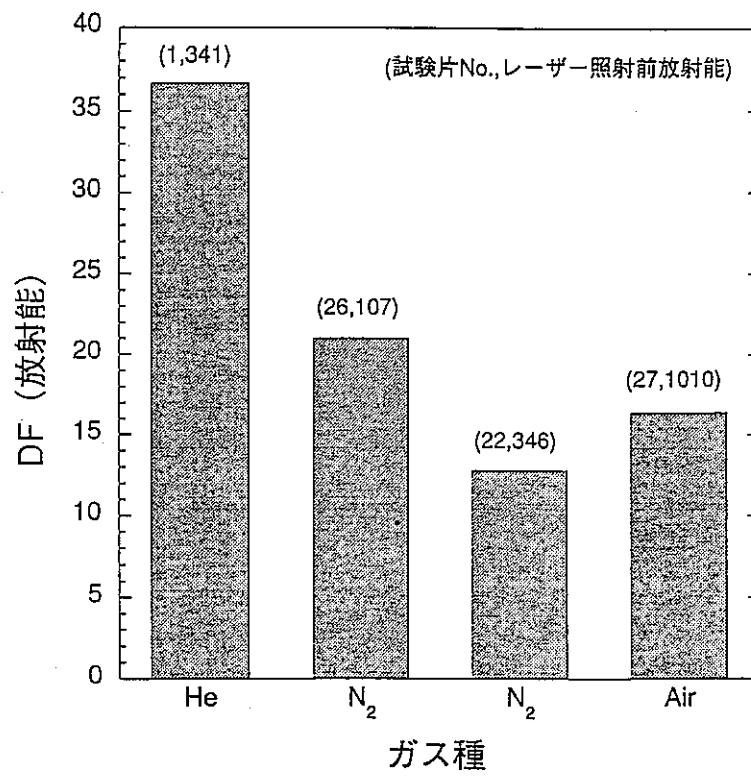


図 4. 2. 5 除染係数へのガス種類の影響

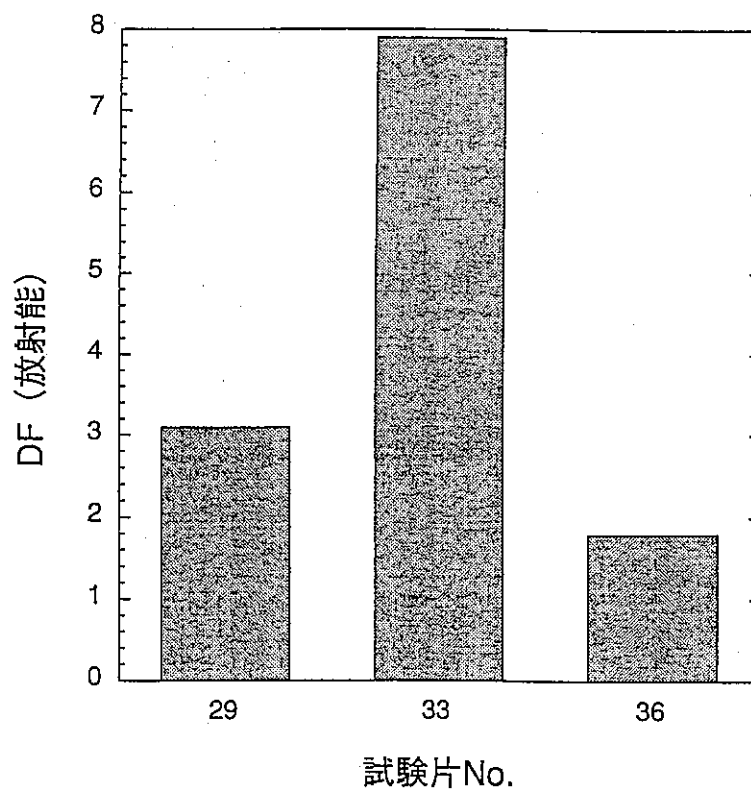


図 4. 2. 6 (1) 替え刃の除染係数

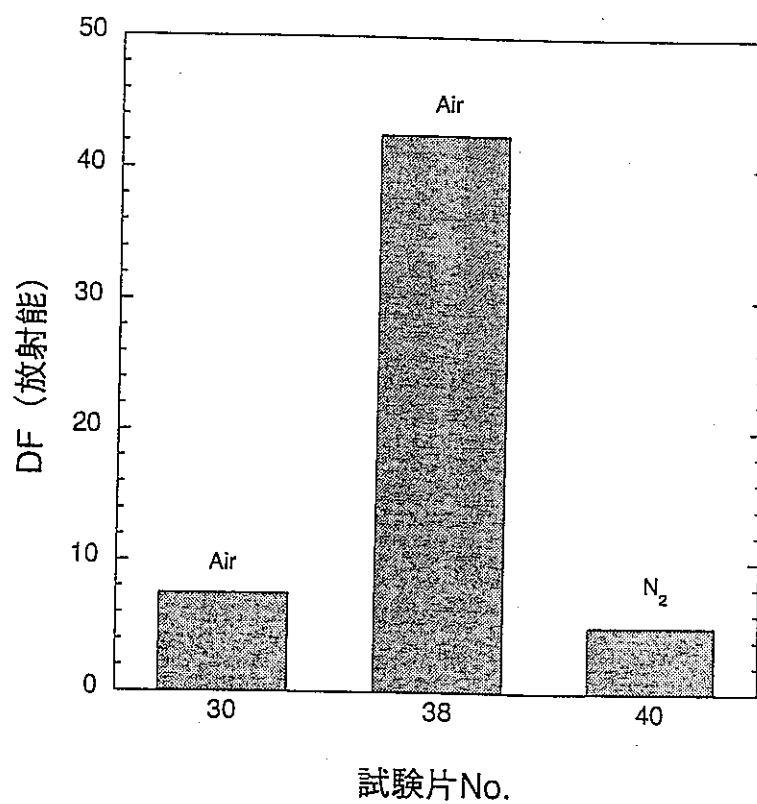


図 4. 2. 6 (2) バットの除染係数