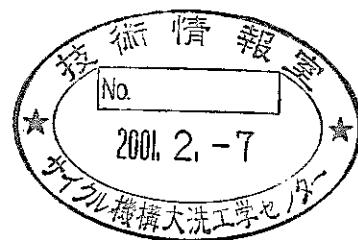


レーザ除染技術の開発(6)

一ノーマルパルスYAGレーザを用いた除染試験— (技術報告書)

2000年9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。

〒319-1184 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 319-1184,
Japan.

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

2000

レーザ除染技術の開発(6)

-ノーマルパルスYAGレーザを用いた除染試験-

(技術報告書)

福井 康太*、小川 竜一郎*、近藤 等士*、谷本健一*

要旨

物質表面にレーザ光線を照射することにより、表面を急速に加熱して、溶融、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除染技術の開発を実施している。

本報告では、ノーマルパルスYAGレーザを用いたレーザ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、旧常陽廃棄物処理建家の配管を用いて実廃棄物レーザ除染試験とノーマルパルスYAGレーザの二次生成物飛散防止試験を実施した。主な結果は以下の通りである。

(1) 実廃棄物除染試験

ノーマルパルスYAGレーザを用いて汚染配管を除染する際にB.G.レベルまで除染効果を得るには0.15 mmの除去深さを目標に除染する必要がある。2回の照射で効率よく0.15mmの除去深さが得られる条件は、照射エネルギー密度 1.3kJ/cm^2 である。この条件を満たすには、レーザ平均パワーで364Wの発振器を用いた場合、繰返し速度30Hz、デューティ比50%、試験片移動速度30mm/sが最適である。

(2) 二次生成物飛散防止試験

2次生成物の飛散防止を目的に除染ノズルに取り付ける飛散防止用小型フードを作成した。試験の結果、2次生成物は水平方向には広角度で飛散するが高い位置にはほとんど飛散しないこと、二次生成物の一部はフード内で反射してフード外に飛散することが確認された。

飛散防止対策として、幅が広く内部で飛散物が反射しない構造を持ち、フードから飛び出さないようなクサビ型構造と吸引機構を持ったフードが有効である。

*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 technique (VI)

- Normal pulse laser decontamination test -

(Technical report)

Y.Fukui*, R.Ogawa*, H.Kondou*, K.Tanimoto*

Abstract

By irradiating the material surface with the laser beam, it is possible that the surface is rapidly heated, melted and transpired. Laser decontamination technique which applies this process to the removal of the material surface layer contaminated in the radionuclide has been developed.

In this report, factual waste laser decontamination experiment using the piping of the old Joyo Waste Treatment Facility was carried out for the purpose of applying laser decontamination technique to decommissioning of nuclear fuel cycle facility. And, secondary product splash prevention test of a normal pulse YAG laser was carried out. Main results are as follows.

(1) Factual waste decontamination test

It is necessary to decontaminate with the aim of 0.15mm removal depth in order to obtain the decontamination effect to B.G. level, when the pollution piping is decontaminated using a normal pulse YAG laser. Conditions for efficiently obtaining 0.15mm removal depth and $1.3\text{kJ}/\text{cm}^2$ irradiation energy density in the irradiation of 2 times with 364W oscillator are 30Hz frequency, duty ratio 50 % in irradiation energy density $1.3\text{kJ}/\text{cm}^2$, and test piece mobile speed 30mm/s .

(2) The splash prevention of the secondary product test

For the purpose of the splash prevention of the secondary product, the small hood for splash prevention installed in the decontamination nozzle was made. As a result of the test, the following were confirmed : That it does not scatter for the high position almost, though it horizontally scatters in the wide angle, and that the part of the secondary product scatters in the hood outside by reflecting in the hood. It is necessary to make the hood with wedged structure and attraction mechanism for the purpose of shatter-resistant of secondary products.

*Oarai Engineering Center Waste Management Section

目 次

| | |
|---------------------------|----|
| 1. はじめに | 1 |
| 2. 除染性能確認試験 | 4 |
| 2.1 試験場所、試験装置 | 4 |
| 2.2 試験片 | 6 |
| 2.3 試験方法 | 6 |
| 2.4 装置の特性 | 7 |
| 2.5 試験結果 | 8 |
| 2.6 電解研磨比較試験 | 14 |
| 2.7 試験のまとめと考察 | 15 |
| 3. 飛散防止試験 | 18 |
| 3.1 試験装置 | 18 |
| 3.2 試験概要 | 18 |
| 3.3 試験結果 | 20 |
| 3.4 考察 | 21 |
| 4. レーザ除染システムの検討 | 23 |
| 4.1 最適除染条件 | 23 |
| 4.2 飛散防止フードの設計 | 23 |
| 5. まとめ | 25 |
| 6. 参考文献 | 26 |

図表目次

| | |
|--|----|
| 表 2.1 配管試験片の線量データ | 27 |
| 表 2.2 行送り試験データ | 28 |
| 表 2.3 パルス間隔/レーザ幅 試験データ | 29 |
| 表 2.4 Dt比 試験データ | 30 |
| 表 2.5 全除染データ（アシストガス分類） | 31 |
| 表 2.6 ガス流量 試験データ | 32 |
| 表 2.7 照射エネルギー 試験データ | 33 |
| 表 2.8 電解研磨試験データ1 | 34 |
| 表 2.9 電解研磨試験データ2 | 35 |
| 図 2.1 レーザ除染試験 実施場所 | 36 |
| 図 2.2 レーザ除染試験 装置概略 | 37 |
| 図 2.3 ノズル部分概略 | 38 |
| 図 2.4 集光レンズ組合せ | 39 |
| 図 2.5 配管試験片の切り出し点 | 40 |
| 図 2.6 印加電圧-平均出力 | 40 |
| 図 2.7 パルスと出力の関係概念図 | 41 |
| 図 2.8 デューティ比-平均出力 | 41 |
| 図 2.9 周波数-平均出力 | 42 |
| 図 2.10 行送り - 計数率 | 43 |
| 図 2.11 パルス間隔-計数率 | 43 |
| 図 2.12 パルス間隔-研磨厚 | 44 |
| 図 2.13 パルス間隔観察 | 44 |
| 図 2.14 計数率 Dt比依存性 | 45 |
| 図 2.15 研磨厚 Dt比依存性 | 45 |
| 図 2.16 照射エネルギー - 研磨厚（アシストガス種類系列） | 46 |
| 図 2.17 研磨厚 - 汚染密度 | 46 |
| 図 2.18 除染後表面写真（アシストガス Air） | 47 |

| | |
|---------------------------|----|
| 図 2.19 除染後表面写真（アシストガス Ar） | 47 |
| 図 2.20 ガス流量-計数率 | 49 |
| 図 2.21 ガス流量-計数率 | 49 |
| 図 2.22 照射エネルギー密度 - 研磨厚 | 50 |
| 図 2.23 照射エネルギー密度 - 計数率 | 50 |
| 図 2.24 研磨厚 - 計数率 | 51 |
| 図 2.25 1パルス当りの除染深さ | 51 |
| 図 2.26 パルス密度-除去深さ | 52 |
| 図 2.27 パルスエネルギー密度-パルス密度 | 52 |
| 図 2.28 パルスエネルギー密度-面積処理速度 | 53 |
| 図 2.29 電解除染前試験片写真 | 53 |
| 図 2.30 電解除染後試験片写真 | 55 |
| 図 3.1 2次生成物飛散防止フード概略図 | 57 |
| 図 3.2 2次生成物飛散防止フード外観 | 57 |
| 図 3.3 2次生成物飛散防止試験概略図 | 59 |
| 図 3.4 2次生成物飛散防止回収用シート配置図 | 59 |
| 図 3.5 フードとノズルの関係(case 1) | 61 |
| 図 3.6 フードとノズルの関係(case 2) | 61 |
| 図 3.7 フードとノズルの関係(case 3) | 62 |
| 図 3.8 試験状況外観写真 | 63 |
| 図 3.9 ノズル付近外観写真(フードなし) | 65 |
| 図 3.10 ノズル付近外観写真(ケース1) | 67 |
| 図 3.11 ノズル付近外観写真(ケース2) | 69 |
| 図 3.12 ノズル付近外観写真(ケース3) | 71 |
| 図 3.13 飛散物重量分布 | 73 |
| 図 3.14 飛散物分布割合 | 73 |
| 図 3.15 飛散物フード内回収率 | 74 |
| 図 4.1 飛散防止フード | 75 |
| 図 4.2 システムイメージ図(1) | 76 |
| 図 4.3 システムイメージ図(2) | 76 |

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。この急激な加熱による溶融・蒸散現象は、放射性物質の表面汚染層の除去、即ち金属表面の除染技術への適用が可能である。レーザ除染の特徴として以下の点が挙げられる。

- 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、放射性廃液等の二次廃棄物の低減が図れる。
溶融・蒸散した汚染物はフィルタで回収することができる。
- ② 非接触のプロセスで除染を行うことが可能で、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。
- 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。
- ④ 局所的汚染の除去に適している。

これらの特徴を有することから、レーザ除染は放射性物質を取り扱う核燃料サイクル施設等のデコミッショニングに適した技術である。このために、YAGレーザと光ファイバを組合せたレーザ除染技術の開発を進めており、これまでに以下の結果を得た^{1)～6)}。

- 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た結果、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¹⁾。
- ② 二次生成物飛散状況確認試験の結果、QスイッチパルスYAGレーザによる除染では、粒径は0.43μm以下の粒子である²⁾。
- ③ レーザ除染とプラスト除染の特性比較を行い、レーザ除染は2次廃棄物の発生量の少なく、徹底除染への適用の可能性があることを確認した³⁾。
- ④ ビーム伝送試験を実施した結果、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^{4)～5)}。
- ⑤ QスイッチパルスYAGレーザ*を用いてフルエンスを一定とした場合、シリ

*平均出力は数W程度であるが、ピークパワーが数10MWに達するピーク特徴を持つ。除染対象に熱影響を与えることなく除染を行うことが期待される。

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影響がない⁵⁾。

- ⑥ ホットサンプルに対して、QスイッチパルスYAGレーザ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⁶⁾。1回目の照射で汚染物質が金属内部に取り込まれるため、その後の除染効果が低減する。

ノーマルパルスYAGレーザの除染プロセスは以下のとおりである。

- ① レーザ発振器から出力されたレーザ光を石英ファイバーで照射部近傍まで伝送する。
- ② 伝送後のビームを、平凸、両凸及び平凹球面レンズの3枚で構成する集光光学系で点状ビームに集光する。
- ③ ノズルはレーザ光と同軸上にアシストガスを照射部に供給する。レーザ光とノズルの軸を僅かにずらすことにより、2次生成物を一定方向に飛散させる構造を持つ。
- ④ ノズルから出力されたレーザビームは試験片に照射され、表面層が溶融する。
- ⑤ 汚染物質を含む溶融金属が、アシストガスの圧力によって飛散除去される。溶融金属の飛散する方向とノズルの進行方向を一致させることにより、試験片への汚染の再付着を防止する。

Qスイッチレーザがピークパワーが大きい半面、平均出力は小さく除染対象物表層を蒸散させ極薄い範囲(数μm)を研磨するに留まるのに比べ、ノーマルパルスYAGレーザは平均出力が大きく、除染の主なプロセスが除染対象物表層を溶融し溶融物をアシストガスで除去するものであるため研磨厚が大きく、10μm以上の研磨厚を得ることができ、汚染をバックグラウンドの線量まで除染することができると期待される。

本報告書では、ノーマルパルスYAGレーザを用いた除染データの取得を目的に以下の試験と評価を行った。

(1) 除染性能確認試験

ノーマルパルス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、照射条件(周波数、制御電圧、デューティ比(以下、Dt比と呼

ぶ)、照射速度等)が除染効果に与える影響を確認した。

また、試験後の試験片を希硫酸により電解研磨を行い、汚染物質の金属への取り込みについて確認した。

(2) 飛散防止対策試験

ノーマルパルスYAGレーザ照射時に試験片から発生する除去物質の飛散拡大防止と回収方法の確認を目的に、飛散防止試験を実施し、飛散防止フード設計の条件を決定した。また、レーザ除染技術を実際の施設の除染に適用するための検討を行った。

(3) システム検討

本試験で用いたレーザ発振装置は、試験用に古くから用いてきたものであり、出力は現在の最新の機器とは大きな隔たりがある。このために今後、レーザ除染システムを開発するにあたり、最適な除染条件を用いた際に得られる除染性能について検討した。

2. 除染性能確認試験

2.1 試験場所、試験装置

除染性能確認試験は、常陽廃棄物処理施設（以下、旧JWTFと言う）地下二階にある除染フード内で行った。用いた装置類は、レーザ発振装置、伝送光学系（ファイバ）、集光光学系（集光レンズ）、移動ステージ、飛散防止フード、アシストガス供給部からなる。試験実施場所を図2.1に装置類の構成の概略を図2.2に示す。試験環境におけるバッググラウンド計数率は50～100cpmであった。使用した装置類は以下のとおりである。

(1) レーザ発振器

名称 : SL117-2C型 (NEC製)
 出力(定格) : 400W
 出力(ピーク) : >800W

ノーマルパルスYAGレーザは、以下の特徴を有する。

- (a) 金属に対して10 μm 以上の研磨深さを容易に得られる¹⁾。
- (b) 平均出力がQスイッチパルスYSGレーザより大きいため、処理速度がQスイッチパルスYAGレーザよりも速い。

(2) 伝送光学系(ファイバ)

名称 : 石英ファイバ SGLH-600F (三菱電線工業製)
 形式 : GI型(Graded Index)
 コア径 : 600 μm
 長さ : 2.0m

(3) レーザ照射ノズル

ファイバにより伝送されたビームを点状に集光するための集光光学系レンズは、平凸球面レンズ、両凸球面レンズ・平凹球面レンズを組合せて作成した。レーザ照射ノズルを図2.3に、集光光学系を図2.4に示す。この集光系を用いた集光後の照射ビーム径は、スタンドオフ4mm時には1mmである。アシストガスの噴出し方向は、レーザ照射位置からずらした構造としており、溶融金属を一定方向に除去するように制御することができる。ドロスの飛散方向と移動進行方向と一致させることにより、除染後の面への汚染物の再付着を防止することができる。

(4) アシストガス

アシストガスには以下の3種類を使用した。

アルゴン : 高い除去能力を有している⁴⁾。

窒素 : 上記アルゴンガスより安価な不活性ガスである。

空気 : コンプレッサにより供給可能である。

ArとN₂は不活性ガスであるのに対して、アシストガスに空気を使用した場合は、空気中の酸素による酸化反応で研磨量が増加する。その反面、除染後の表面状態は2次生成物が付着した状態となる。

(5) 移動ステージ

除染試験装置は、レーザとアシストガスノズルを固定して試験片を動かして試験片全面にレーザ光を照射する。試験片を一定速度で二軸方向に移動させる移動ステージは、以下の装置を組合わせて使用した。移動速度の精度は0.1mm/sである。

x軸方向用 : SGAM26-100(x) (シグマ光機製)

z軸方向用 : SGAM26-100(z) (シグマ光機製)

(6) 飛散防止フード

レーザ照射時の二次生成物・汚染等の拡大防止のために、以下のフードを作成し除染フード内に設置し、その中で試験を実施した。

サイズ : 1300mm×740mm×1900mm(h)

排気風量 : 260m³/h

材質 : アクリル板

(7) 放射線測定装置

除染前後の放射線量放の測定は、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の放射能量の測定はGe測定器を用いた。

GM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

Ge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

2.2 試験片

除染確認試験を実施するにあたり、「旧」JWTFの不要配管をプレスして平板の試験片を製作した。試験片切出し位置と番号の対応を図2.5に、各試験片の放射線測定データを表2.1に示す。試験片の仕様は以下のとおりである。

材質 : SUS304

形状 : 平板(輪切り配管を縦に二分割し、プレスした)

サイズ : 40mm(H) × 50mm(W) × 3mm(t)

汚染放射能 : ^{60}Co

本配管の使用頻度等の履歴は明らかではないが、高レベルタンクから蒸発缶に廃液を輸送する配管であり、放射性物質は深層部まで侵食していると推定される。旧JWTFの廃液の特徴から、汚染核種は主に ^{60}Co である。

また、過去に硝酸による除染を実施しているSUS表面に薄い酸化皮膜を形成している。この酸化皮膜中にも汚染核種を内包している可能性がある。

2.3 試験方法

2.3.1 試験手順

除染試験は以下の手順で実施した。

- ① 試験前にGMサーベイメータにより計数率を、Ge測定器により放射能量を測定する。
- ② レーザの照射は、発振器から照射されたレーザ光の中心をXZ移動ステージに取付けた試験片の左上端に合わせ、試験片を一定速度で水平方向に移動させながら行う。
- ③ 一行の照射が終了した後、XZ移動ステージは自動的に改行され次行へと移る。
- ④ 試験片の面積の約半分が照射されるまでこの工程を自動で実施する。
- ⑤ 半分まで終了後、試験片の上下を反転させて残りを照射する。

試験片を移動ステージに留める金具の関係上、半分まで照射後反転させなくてはならない。

- ⑥ 全面照射後、GMサーベイメータで線量測定を行う。
- ⑦ 上記②～⑥までを2回～3回行う。

⑧ 全照射終了後にはGe測定器で核種分析を行う。

2.3.2 パラメータ確認手順

本試験で用いる装置のパラメータ及び制御範囲は以下のとおりである。

| | |
|-----------|-------------------------|
| レーザ出力制御電圧 | : 6.5、7、8、9、10V |
| 試験片移動速度 | : 10、20、30、40、50、60mm/s |
| 周波数 | : 30、40、50、60Hz |
| 試験片行送り量 | : 0.5、0.75、1.0mm |
| Dt比 | : 30、40、50、60 % |
| アシストガス種 | : Ar、Air、N ₂ |
| アシストガス流量 | : 40、60、80 ℥/min |
| スタンドオフ | : 4mm (固定、この時のレーザ径1mm) |

試験に先立ち、制御電圧、周波数、Dt比を変化させた場合の装置の出力特性を確認した。(2.4節)

周波数、移動速度、行送り量といったレーザ光の照射条件を最適化し(2.5.1節、2.5.2節)、アシストガスの種類と流量について調査した(2.5.4節、2.5.5節)。次に、得られた最適な照射条件を用いて、照射エネルギー密度と除染性能の関係を調査した(2.5.6節)。また、レーザ照射後の試験片の表面状態を確認するため、照射後の試験片に電解研磨を行い、汚染核種の表面への取り込み状況を確認した(2.6節)。

除染性能の評価は、研磨厚(mm)と除染前後の計数率(cpm)と汚染密度(Bq/cm²)により行った。ここでの研磨厚は、直接厚みを測定することはできないことから、照射前後の重量測定から得た研磨重量と材質の比重から平均研磨厚として求めた。

2.4 装置の特性

レーザ発振装置の周波数、印加電圧、Dt比の特性を確認した。印加電圧の特性確認時には2mのファイバーを通した前後のエネルギー減少割合を確認した。

2.4.1 電圧 - 出力の関係

図2.6に制御電圧に対するレーザ出力の変化を示す。制御電圧は最大10Vであり、この際に最大出力351Wが得られた。制御電圧が変動してもパルス幅及び周波数は一定のままであり、制御電圧を制御することは、レーザ出力とピーク出

力を制御することである。

2.4.2 Dt比 - 出力の関係

図 2.7にDt比概念図を示す。図に示すように制御電圧を上げるとピークパワーが上がるがDt比を上げるとパルス幅の割合が上がり1パルスのエネルギーが上がりピークパワーは変化しない。

図 2.8にDt比に対するレーザ出力の変化を示す。Dt比の増加にともないレーザ出力は線形に増大した。Dt比を変えてもピークパワーに変化はなく、パルス幅がDt比に応じて変化しこれに伴いレーザ出力が変化する。

2.4.3 周波数 - 出力の関係

図 2.9にレーザ出力と周波数の関係を示す。周波数の増加にともないレーザ出力は若干低下する。しかし、他のDt比や印加電圧程大きな変化はない。試験において、周波数による出力依存性は無いと見なすことができる。

2.5 試験結果

2.3.2節のパラメータの順番で試験を実施した。以下に試験結果を示す。

2.5.1 行送り量

本試験において、照射されるレーザ光の幅は1mmであることから、行送りが1mm以上になるとレーザが照射されない箇所が生じる。従って、行送りは1mm以下とする必要がある。

図 2.10、表 2.2に、周波数30Hz、移動速度30mm/s、Dt比50% アシストガスAr, 40 l/minの条件下で行送りを1mmまで変化させたときの行送り - 計数率の関係を示す。除染係数(Decontamination Factor, 以後DF)は、行送り1の場合56、行送り0.75の場合166、行送り0.5の場合133であった。

試験片ずらし量を大きくするに伴い除染効果は低下し計数率は増加した。これは、レーザ照射面は一様の深さで削られるのではなく、中央の部分とふちの部分では研磨厚が異なるため、行送り1mmでは淵の部分が十分削ることが出来ず、放射性物質を除去できなかったためである。一方で、行送り0.75mmと0.5mmでは、1回目の照射では行送り0.5mmのほうが研磨厚は大きいが、2回目の照射後では単位面積あたりに与えられるエネルギー量が異なるにも係らず、行送り0.75mmの方が除染性能が高い結果となった。これは、この試験を行った際には、

試験片に与えられる熱の影響で試験片が変形するため2回目の除染時に照射距離を一定に保つことが出来なかった為と推測される。

行送り0.5mmの場合に0.75mmより除染性能が低い結果は、どの試験片を用いても同様の結果となるわけではない。1回目の照射後の試験データからわかるように、照射条件が良い場合には単位面積あたりに照射されるエネルギー量の大きい行送り0.5mmの方が良く除染できる。しかし、一方で熱による変形等により、試験片の変形が大きくなるという作業性を損なう結果となることは無視できない。また、行送りを考慮した処理速度は行送り0.75mmは0.5mmの1.5倍の速度になる利点がある。そこで、以降の本試験では、行送りは0.75 mmで行うこととした。

2.5.2 周波数と移動速度

次に、周波数と試験片の移動速度について試験を行った。ここで、試験片の移動速度をレーザの発振パルス数で除した下記の量は照射されるパルスの間隔である。

$$\frac{\text{移動速度} [\text{mm s}^{-1}]}{\text{周波数} [\text{回 s}^{-1}]} = \text{照射されるパルスの間隔} [\text{mm/回}] \quad (2.1)$$

パルス間隔が、レーザ幅より十分大きい場合には、パルスとパルスの間に照射されない箇所が生じることになる。このようにパルス間隔とレーザ幅の比は、除染効果を評価する指標となる。

試験片が被るレーザ光のエネルギーは、パルス間隔とレーザ幅の比と、そのパルス1つ1つの持つエネルギー密度によって決定される。周波数と移動速度というレーザ発振機側のパラメータは、パルス間隔と1パルス当たりのエネルギーというパラメータに置き換えることができる。

移動速度30, 40mm/s、印加電圧10V、Dt比50 %、ずらし幅0.75mm、アシストガスにAr、流量40 l/minを用いて試験を実施した。

単位時間当たりに照射するレーザエネルギーを試験片の移動速度と行送りで除した下記の値は、単位面積に照射されるエネルギー量である。

$$\frac{\text{平均パワー} [\text{J/s}]}{\text{移動速度} [\text{mm/s}] \times \text{行送り} [\text{mm}]} = \text{照射エネルギー量} [\text{J/mm}^2] \quad (2.2)$$

単位面積に照射されるエネルギー量は、移動速度40mm/s時1.2 kJ/cm²、30mm/s時1.6kJ/cm²で周波数によらず一定である。移動速度を一定に保ち周波数を変数

に取った。この試験は、単位面積あたりに照射されるエネルギー量を一定に保ち、パルス間隔と1パルス当りのエネルギーを変化させた際の除染効果を試験することに相当する。図2.11にパルス間隔/レーザ幅-計数率を、図2.12にパルス間隔/レーザ幅-研磨厚の関係を、これらの試験データを表2.3に示す。

パルス間隔/照射幅が1以下の場合は、パルス間隔/照射幅が増加するに伴い、研磨厚は増加し、除染後の計数率は低くなり除染効果が高くなる。これは、同じエネルギーを照射する場合でも、小さなエネルギーのパルスを数多く照射するより、1度に大きなエネルギーのパルスを照射する方が除染効率が良いことを示している。

また、パルス間隔/照射幅が1より大きくなると、除染後の計数率が上がり除染効果が悪くなる。これは、パルス間隔が照射幅より大きくなると、レーザ光が照射されない箇所が生じるためである。

図2.13は、周波数を30Hz、速度を20~40mm/sで照射した際の表面観察写真である。周波数30Hz、移動速度40mm/sの場合（パルス間隔/レーザ幅=1.3）は、レーザ幅によりパルス間隔が大きいため、パルス間に照射されない箇所があることが観察される。パルス幅/レーザ幅が1以下の場合は全面を照射することが可能である。ただし、パルス幅/レーザ幅が1より小さく取ると、パルス間隔が小さくなり除染対象物に与える熱的影響が大きくなり、同時に除染速度も小さくなる。このことから、パルス幅/レーザ幅は1が最適値である。

2.5.3 Dt比

図2.14にDt比と照射後の計数率の関係を、図2.15にDt比と研磨厚の関係を、また、試験データを表2.4に示す。レーザ照射条件は、制御電圧10V、移動速度30mm/s、周波数30Hz、行送り0.75mmであり、アシストガスにはArを40ℓ/min用いた。

除染係数(DF)を比較すると、Dt比の増加にともない大きく増大し、Dt比50%の時に2回の照射で、計数率の場合DF=2077、放射能の場合DF=166が得られた。デューティ比40%と50%で重量変化に大差はないのに、DFでは50%の方が遙かに高い値が得られているのは、レーザ照射前の計数率が40%で2.14kcpm、50%で8.36kcpmと差があることが原因である。DFは初期条件への依存性が強いため、初期条件が揃った試験片の組でなくては試験パラメータを評価する指標に用い

ることはできない。今回の試験では、実廃棄物を用いた試験であるため、初期条件を揃えた試験片の組を作ることは出来なかった。

次に照射後の計数率で除染効果を評価する。Dt比と照射後計数率の関係（図2.14）より、Dt比の増加に伴い計数率は大きく低下し、Dt比50%の時に2回の照射でバックグランド近くまで低下している。

Dt比と研磨厚の関係（図2.15）には1回目及び2回目のそれぞれの照射による除去深さと、2回の照射を合わせた総除去深さを示した。Dt比の増加にともない除去深さは大きくなるが、40%と50%ではそれほど大きな差はない。Dt比60%でやや研磨厚は下がる傾向となっている。この傾向は、アシストガスをN₂に変えたデータでも同様の傾向が見られる（2.5.4節の表2.5参照）。

Dt比は照射するパルスの時間間隔の内実際にパルスが照射される実時間の割合である（図2.7）。パルスを照射する時間が長くなるので、Dt比を上げると照射エネルギーと1パルス当たりのエネルギーも上がっているが、一方でピークパワーは、Dt比を上げるとレーザの発振特性からやや低くなる傾向にある。

Dt比40%と50%を比較すると、ピークパワーはDt比50%の方が低いが照射エネルギーは高いため、Dt比50%の方が研磨厚が深く除染結果が良い（除染後計数率が小さい）結果となった。次に、Dt比50%とDt比60%の比較では、Dt比60%の方が照射エネルギーは高いがピークパワーはやや低く（700W（Dt比50%）に対して683W（Dt比60%））、研磨厚、除染効果共にDt比50%の方が60%よりやや良い結果となった。

試験片の状態を観察して比較したところ、Dt比60%の試験片が50%の試験片より熱影響による変形等の差異は見受けられず、変形によるレーザの照射状態の違いが原因では無い。

Dt比60%で除染効果が低くなる原因是ピークパワーの低下が1要因と考えられるが、原因を特定することは出来なかった。

2.5.4 アシストガス種類

図2.16に、アシストガス種類を系列に取った、照射エネルギーと研磨厚の関係を、表2.5にデータを示す。アシストガスにAirを用いた場合は、ArやN₂を用いた場合よりも、同じエネルギー密度での研磨量が多い。

また、図2.17には研磨厚と除染後の表面汚染密度の関係を示す。同じ研磨厚

で、アシストガスによる違いを見ると、Airは同じ研磨量においても除染効果が低いことが判る。これは、平成8年度の模擬試験片を用いた除染(コールド)試験において、やはり空気よりも Arの方が高い除染係数が得られたことと一致する³⁾。

図 2.18、図 2.19に、それぞれアシストガスに Airを使用した場合と Arを使用した場合の表面写真を示す。

Airの場合、レーザエネルギーの他に酸化熱が加わり溶融面積が拡大し、同時に酸化物がスラッジとして生成されるため汚染核種をスラッジ内に取り込み、突起部に汚染物質が残存しやすくなり、除染効果が低くなった。

ArとN₂では、アシストガスの影響は見られなかった。試験前には、N₂を用いた場合には、金属表面に窒化物が生成し除染効果を低くするのではないかと予想されたが、試験結果では差異は無かった。

ArとN₂のコストを比較すると、N₂の方がArより安価である。従って実作業でレーザ除染を行う際には、アシストガスには N₂を使用することが望ましい。

2.5.5 アシストガス流量

図 2.20にガス流量と研磨厚の関係を、図 2.21にガス流量と計数率の関係を示す。また、これらのデータを表 2.6に示す。

試験条件は、周波数30Hz、移動速度30mm/s、Dt比50%、試験片ずらし量は0.5mm、ガス種類は Arを用いた。ガス流量の増加に伴い研磨厚は減少し、計数率は増加している。

アシストガス流量の増加は溶融金属の除去効果を促進する一方、試験片を冷却する効果もある。コールド試験において、ガス流量40N l/min以上では除去幅が低下することが示されている³⁾。ガス流量の増加にともなう計数率の増加は、試験片冷却効果の増加による除去量の低下によるものである。

本試験条件（パルス当たりのエネルギー密度, 数kJ/cm²まで）においては、ガス流量は40l/minが最も良い結果となった。以降の試験では、ガス流量は40l/minを使用する。

ただし、ガス流量の最適値は、単位時間当たりに溶融される金属の量とガスにより単位面積にかかる力（圧力）、冷却性能という3つの量のバランスで決定される量である。今回の試験で得られたこの数値は、スタンドオフ4mmで照射さ

れるレーザ光の直径は1mmの場合の最適値であり、レーザ光の照射面積を広くするなど、照射条件が変わった場合には、再度流量条件を求め直す必要がある。

2.5.6 照射エネルギー

アシストガス流量 $40\ell/\text{min}$ 、パルス間隔/レーザ幅=1、行送り 0.75mm の条件下で、エネルギー密度と除染効果の関係について試験を行った。

図2.22に照射エネルギーと研磨厚の関係を、図2.23に照射エネルギーと計数率の関係を、図2.24に研磨厚と計数率の関係を示す。また、表2.7にこれらのデータを示す。

図2.22を外挿すると、照射エネルギー $0.6\text{kJ}/\text{cm}^2$ から研磨が始まり、レーザ出力の増大とともに研磨厚は増加している。

図2.23から、照射エネルギーの増大に伴い除染後の計数率は減少し $1.3\text{kJ}/\text{cm}^2$ 以降で1回の照射で除染後係数率 $100\text{cpm}/\text{試験片}$ 以下、2回の照射後で $50\text{cpm}/\text{試験片}$ 以下となり、汚染密度にして $10\text{Bq}/\text{cm}^2$ 以下の除染結果となった。除染結果をDFに換算すると、最大で $DF=615$ が得られた。

レーザ出力を増大させると、1パルス当たりの照射エネルギーの増大により除去量が増加し、除染効果は向上した。一方で、照射エネルギーが増加すると熱的影響が大きくなる。凡そバックグラウンドレベルまで除染が可能となる最小エネルギーを最適照射エネルギーとすると、 $1.3\text{kJ}/\text{cm}^2$ である。研磨に必要な試験片に与える最小エネルギーと、最適なエネルギー量を下記に示す。

研磨に必要な最小エネルギー： $0.6\text{ kJ}/\text{cm}^2$

最適エネルギー： $1.3\text{ kJ}/\text{cm}^2$

2.5.7 必要研磨厚

試験片に表面に汚染物が付着しているだけでなく、表面の亀裂等に汚染核種が入り汚染が内部まであることが考えられる。また、除染の過程において、汚染核種が溶融した金属内部に取り込まれる可能性がある。2.5.6節で得た照射エネルギーにより、除染に必要となる研磨厚を確認した。

図2.24から、2回照射後の計数率をバックグラウンドまで落とすためには、平均研磨厚にして約 0.15mm の研磨厚が必要である。

必要研磨厚： 0.15mm

2.5.8 レーザ照射前計数率の影響

表 2.7 の 20A029、20A004、20A030 を比較すると、照射前の計数率は 2k、8k、2k (cpm) であるが、除染後は 43、4、22 と初期値の大小とは関係なく除染されている。また表 2.3 でも初期の計数率は数 k (cpm) ~ 20k (cpm) までの差があるが、2 回の除染後には一定レベルまで除染されていることが判る。

レーザ除染は、除染前の汚染レベルにある程度の差があっても、母材ごと汚染を除去する除染方法であるため、除染回数を 2 回行えば、除染前の汚染レベルに係らず一定のレベルまでの除染が可能であることが判った。

2.6 電解研磨比較試験

2.6.1 試験装置

電解槽

- ・材質：アクリル
- ・寸法：360 × 260 × 150mm(H) (容量 9ℓ)

直流電源

- ・形式：EX - 375L2、高砂製作所製
- ・出力電圧：0 ~ 60V
- ・出力電流：0 ~ 25A
- ・最大出力：375W

2.6.2 試験方法

電解研磨除染試験は除染性能確認試験同様、常陽廃棄物処理施設地下二階にあるドラフトチャンバ内に電解槽を設置し、この中に試験片を浸漬して行った。

電解研磨時間と研磨量の関係を確認するため、一定時間毎に電解を中断し、試験片の計数率と放射能を測定した。電解研磨除染試験の条件は以下のとおりである。

- ・電解液：5v% 硫酸水溶液
- ・電流密度：0.2A/cm²
- ・電解液温度：常温
- ・電極間距離：100mm
- ・陰極：SUS304 100×100×t2 mm 1枚
- ・通電方法：陽極電解法クリップ方式
- ・電解時間：1 ~ 60 min

2.6.3 試験結果

(1) 研磨時間依存性

電解研磨厚は図2.31に示すように電解時間に比例している。試験片の放射能は表2.8に示すように、電解時間1分で100Bq以下まで除染された。しかし、その後はほとんど変化しなかった。

(2) レーザ照射後の電解研磨除染

前項で行ったレーザ除染試験において、完全に除染しきれなかった試験片(図2.29)に対して、電解研磨除染試験を実施した。電解研磨実施後の試験片を図2.30に示す。電解研磨の結果、表2.9に示すように研磨時間が増加する毎に若干の除染効果があるが、60分経過し15μm研磨しても、それ以上大きな除染効果が得られない。

2.6.4 電解研磨考察

以上の結果より、ノーマルパルスYAGレーザによる除染では、レーザ照射時の金属表面の溶融により、表面にある放射性核種を内部に取り込んでしまうことがわかった。このことは、除染対象物を非汚染物まで除染することは極めて難しいことを意味する。

しかし、本電解研磨試験では、5vol%のH₂SO₄電解液 9ℓを中和処理するのに、中和用のNaOHを660g、中和後のコンクリート固化を行うと2.1kgの廃棄物は発生した。レーザ除染にはこのような除染後の2次廃棄物が発生しないというメリットがある。

また、除染後の物質を溶融固化する等の廃棄方法が決まっている場合には、溶融部に汚染核種を取り込んでいることは問題にならない。むしろ、余分な化学物質を使用していない分、廃液処理等の後処理の工程が不要となり、処理・処分を視野に入れ総合的に判断するとレーザ除染は電解研磨など2次廃棄物が生じる他の除染方法に比べて有効な除染方法であると考えられる。

2.7 試験のまとめと考察

試験結果から、照射の最適条件は、パルス幅/照射幅=1であり、平均研磨厚にして約150μm表面を除去すると、バックグラウンドレベルまで除染が可能であることが判った。次に、得られた試験結果を元にレーザ除染の最適条件について考察した。

レーザ照射のプロセスにおいて、除染時の除去深さは1パルス当たりの除去深さと照射パルス密度(回数/cm²)で決まり、さらに1パルス当たりの除去深さはパルスエネルギー密度でほぼ決まる。

図2.25に1パルス当たりの除去深さ(=平均除去深さ／照射パルス数)のパルスエネルギー密度依存性を示す。この図から、除去閾値は約0.6 kJ/cm²であり、またパルスエネルギー密度の増加にともない1パルス当たりの除去深さは大きくなるが、約1.5 kJ/cm²付近でやや飽和する傾向がみられ、また試験の再現性も低下している。

図2.26には平均除去深さの照射パルス密度依存性をパルスエネルギー密度をパラメータとして示す。この図から、平均除去深さはパルスエネルギー密度の増加に対してほぼ線形に増加することがわかる。バックグラウンドレベルまで除染することを目標とすると、図2.24より除去深さとしては約0.15mm以上が要求される。ビーム径が1 mmであることと、図2.25と図2.26から、0.15mmを研磨するのに必要な照射パルス密度(パルス数/cm²)をパルスエネルギー密度の関数に表したのが図2.27である。パルスエネルギー密度の増加に伴い、0.15mmの除去深さを得るために必要な照射パルス数は減少する関係にある。

図2.28に、図2.27より求めた照射パルス密度と1パルスのエネルギー密度の関係から、平均出力を固定した場合の面積処理速度とパルスエネルギー密度の関係を示す。

ここで、単位時間に除染できる面積(面積処理速度)は周波数を照射パルス密度で除することで求まる。

$$\text{面積処理速度 (cm}^2/\text{s}) = \frac{\text{周波数 (Hz)}}{\text{照射パルス密度 (パルス数/cm}^2)} \quad (2.3)$$

また、平均出力と周波数の関係式から、周波数は与えられた平均出力(J/s)をパルスエネルギー密度(J/cm²)とビーム面積(cm²)で除した値と見なすことができる。

$$\text{周波数 (Hz)} = \frac{\text{平均出力 (W = J/s)}}{\text{ビーム面積 (cm}^2) \cdot \text{パルスエネルギー密度 (J/cm}^2)} \quad (2.4)$$

パルスエネルギー密度一定の条件で平均出力を増大させることができれば(高出力装置が導入できれば)、周波数を増加させることができるとなり処理速度を向上させることができる。また、平均出力一定でパルスエネルギー密度を制御す

るには、周波数を制御する必要がある。なお、図2.28の中では、平成11年度時点での市販YAGレーザ発振器における最大出力が10kW（必要電力量約450kW）であることから、図中の平均パワーの最大値10kWとした。

面積処理速度はパルスエネルギー密度の増大にともない大きくなるが、約1.5 kJ/cm²で最大値を持つ。これは図2.25に示されるように1パルス当たりの除去深さが約1.5 kJ/cm²以上で飽和傾向を示すとともに、先に述べたように平均パワー一定でパルスエネルギー密度を増大すると繰り返し速度が低下するためである。

一方、パルスエネルギー密度を一定に取ると、図2.28から、平均出力の増大分を周波数の増加に取ることができるために、平均出力の増大にともない面積処理速度は大きく増加する。パルスエネルギー密度約1.5 kJ/cm²と平均パワー10kWの条件では、繰り返し速度910Hz (=10kW / (1.5kJ/cm² × π / 4 × 0.1cm²)) で除染することができる。

以上より、レーザ装置の出力を市販最大級の10kWに増大させると、現状の約30倍（約60min/m²）に向上させることができる。

本試験で得られた結果を以下に記す。

- ① バックグラウンドまで除染するのに必要な研磨厚は、約0.15mmである。
- ② 除染回数を多く取るほど研磨厚は大きくなるが、除染対象物の熱影響を考慮すると、2回が適当である。
- ③ 最も効率よく除染を行うには、パルス間隔（移動速度/周波数）/レーザ幅が1程度である必要がある。本試験装置を用いた場合は、周波数30Hz、移動速度30mm/sである。
- ④ アシストガスには、不活性ガスであるArまたはN₂が適しており、その流量は、本試験においては40ℓ/minが適していた。
- ⑤ 現在市販されている最大の発振装置を用いれば、周波数を910Hzまで上げるか、照射面積を上げる集光系を作成することにより、処理速度は現試験装置の約30倍まで向上させることができる。その処理能力は約60min/m²である

3. 飛散防止試験

レーザ除染時に発生する2次生成物の飛散防止試験作業では、ノーマルパルスレーザ除染時に発生する除去物質の飛散防止カバーを製作し、コールドサンプルを用いて飛散防止の確認試験を行った。

3.1 試験装置

レーザ発振装置、除染ノズル、集光レンズは、前章で用いた装置を使用した。その他飛散防止試験用に作成した試験用機材を以下に示す。

(1) 飛散防止フード

試験片を照射した際に発生する二次生成物の飛散を防止し、飛散物を回収するフードは以下のとおりである。フードの概念図を図3.1に、概観写真を図3.2に示す。

- ・材質 : アルミニウム合金
- ・サイズ : 90mm×55mm×150mm(H)

(2) 移動ステージ

試験片を一定速度で二軸方向に移動させるため、使用した移動ステージは、以下のとおりである。

- ・X軸方向用 : CTS-100X(1)、シグマ光機製
- ・Z軸方向用 : CTS-100Z(1)、シグマ光機製

(3) 試験片

- ・材質 : SUS304
- ・サイズ : 10mm(H)×20mm(W)×70mm(L)

3.2 試験概要

飛散防止試験のシステムは、図3.3に示すようにレーザ照射系、アシストガス供給系、試験片及び移動ステージ、飛散防止フード、落下ドロス回収用アルミシート、囲いで構成される。飛散防止フードの設計には、以下の2点を考慮し、検討に反映した。

- ① 二次生成物の飛散は、水平方向には広がらず、高さ方向へは比較的上方（最大約45度）まで飛散すると想定

- ② 構造の簡素化及びフードからの飛散物回収を容易にするため、吸引排気及び粘着物による飛散物の固定はしない

飛散防止フード内を6段に仕切り、回収した飛散物が再び外へ分散しない構造にした。

発振器から出力されたレーザ光を石英ファイバで伝送し、同軸ノズルからアシストガスと共に射出させ、XY自動ステージにより2次元的に移動させた試験片に照射した。ノズルの横に飛散防止フードを固定し、レーザにより除去された飛散物を回収した。飛散防止フードの下部及び後部には、フードで捕集しきれなかった飛散物を回収するためのアルミシートを配置した。

図3.4にアルミシートの配置図を示す。アルミシートは6枚で、ノズルから1240mm離れた位置まで設置した。照射試験は透明塩ビ製の箱の中で行った。またアシストガスにはArを用いた。レーザ照射後、飛散防止フード及びアルミシートに捕集された飛散物をそれぞれ回収し、電子天秤により重量を測定した。試験は以下に示す4つの条件について実施した。

- ① ケース1：ノズルから飛散防止フード前面までの距離を35mmとし、フード最下部の仕切り板と試験片表面の高さが同一（図3.5）。
- ② ケース2：ノズルから飛散防止フード前面までの距離を35mmとし、フード最下部の仕切り板が試験片表面より5mm高い（図3.6）。
- ③ ケース3：ノズルから飛散防止フード前面までの距離が70mmとし、フード最下部の仕切り板と試験片表面の高さが同一（図3.7）。
- ④ ケース4：飛散防止フード無し

ケース1がもっとも回収効率が高いと考えられる方式である。しかし最下部の仕切り板が試験片表面よりも下にあるため、試験片の移動によりフードと試験片が接触する可能性があることから、大きな試験片には適用できない。ケース2は、ケース1の最下部の仕切り板を試験片表面よりも高くすることで、試験片を大きく移動させても試験片とフードが接触することなく、比較的実用的な方式である。ケース3はフードが試験片上部に入り込めない場合に、遠くから回収することを想定した方式である。ケース4については、二次生成物飛散状況の観察及びケース1～3との比較のため実施した。

レーザ照射条件は以下に示すように各ケース同一条件とした。

- ・レーザ出力 : 305W (制御電圧10V)
- ・繰返し周波数 : 30Hz
- ・Dt比 : 50 %
- ・スタンドオフ : 4mm
- ・アシストガス : アルゴン
- ・ガス流量 : 40 Nℓ/min
- ・試験片移動速度 : 10mm/s

3.3 試験結果

3.3.1 飛散状況及び捕集位置

(1) 飛散防止フード無し

飛散防止フードを使用せずにレーザを照射した状況の全体外観図を図3.8に示す。また、この時のノズル周辺の状況写真を図3.9に示す。図中で、二次生成物は試験片面に対して水平方向に、試験片の移動方向と反対方向のみに飛散している。

(2) 飛散防止フード1

ケース1(ノズルーフード間35mm、同一高さ)のフードを設置した条件でレーザを照射した結果は図3.10に示すように、飛散物の多くがフード内に捕集された。さらに、そのうちのほとんどが、ノズルと水平位置である最下段に捕集された。

(3) 飛散防止フード2

ケース2(ノズルーフード間35mm、フードが5mm上方)のフードを設置した条件でレーザを照射した結果を図3.11に示す。一部の飛散物はフード外へ飛散し、また、フード下部の仕切り板に跳ね返されて落下するが、多くの飛散物がフード内最下段に捕集された。

(4) 飛散防止フード3

ケース3(ノズルーフード間70mm、同一高さ)のフードを設置した条件でレーザを照射した結果は図3.12に示すように、一部の飛散物がフード外へ飛散するが、多くの飛散物がフード内最下段に捕集されることが分った。また、2段目にも若干量の飛散物が捕集された。

3.3.2 飛散物の形状

捕集された飛散物は長さ2mmほどの細長い形状のものと、更に小さい球状のものから構成されている。細長い形状のものは試験片が溶融された状態でシールドガスに吹き飛ばされたもの、球状のものはレーザ照射によって蒸発した試験片が再凝固したものと考えられる。

3.3.3 飛散物捕集量

二次生成物飛散防止試験における飛散物は図3.13の飛散重量分布及び図3.14の飛散割合分布に示すように、フードがないケースを除いて250mm付近で多く捕集されている。これは、フード内で反射した飛散物が試験片を固定している台などによって跳ね返ったためと考える。

ノズルと回収フードの距離が短いフード1とフード2における不産物分布は図3.13～図3.14に示すように同じような分布となっている。しかし、最もノズルに近い位置での回収量はフード2の方が多く回収されている。これは、ほぼ水平に飛散された二次生成物が最下段の遮へい板にぶつかって落下したためと考える。

飛散物のフード内での捕集率は図3.15に示すように、全飛散量の30～40%程度しか得られなかった。捕集量はフードが近いほど、また、フードの設置位置が試験片と水平な位置に近いほど捕集率が向上する。このことは、試験時の写真(図3.9～図3.12)が視覚から示したのと同様に、二次生成物が水平で広角度に飛散していることをデータから示した。

3.4 考察

石英ファイバによって伝送されたレーザ光を、XY自動ステージにより二次元的に移動させた試験片に照射した結果、二次生成物は水平方向に飛散することが分った。

発生した二次生成物の回収方法を検討するため、3種類の飛散防止フードを作成し、二次生成物飛散防止試験を実施した結果、二次生成物は水平方向には広角度で飛散するが、高い位置にはほとんど飛散しない。本試験は、飛散する2次生成物を100%回収することを目的に機器を製作したが、試験結果では、二次生成物の一部はフード内で反射して飛散し、100%の回収は出来ない結果となった。この原因は、フード内で飛散物が反射することが主原因である。そこで、反

射した飛散物がフード外へ出ないようにフード内部をクサビ型の構造にすると共に、吸引排気を行い飛散物を回収する構造とする必要がある。

しかし、本試験は試験片を地面に水平にし、ノズルを垂直に立てた状態で行っているが、機器類を対象に除染を行った場合は、様々な角度を取るため、さらに回収率は低くなることが予想される。このため、仮に上記の方法で100%近い回収率を得たとしても、除染環境の周辺にフードを設け飛散防止対策を講じる必要がある。

4. レーザ除染システムの検討

4.1 最適除染条件

本試験装置を用いてレーザ照射後の計数率をバックグラウンド（除去深さ0.15 mm以上）にする場合、面積処理速度が最大となるのは下記の条件時である。

- ・レーザ平均パワー : 364 W (ファイバー伝送後)
: 509 W (ファイバー伝送前)
- ・繰り返し速度 : 30 Hz
- ・Dt比 : 50 %
- ・試験片移動速度／照射回数 : 30 mm/s／2回 (試験片ずらし量: 1 mm)

現在市販されている出力最大の装置(10kW級)を用いた場合には、処理速度は現状の30倍程度に向上する。

しかし、既存の施設の電気容量では10kWクラスの除染装置を導入するには容量が足りない場合が多い。新規施設に備え付ける場合を除き、施設のデコミッショニング時のように除染時のみ除染装置を入れる用途では、上記の10kWクラスの除染装置を使用するよりは、現状の400Wクラスの装置を用いるほうが適当である。

また、今回用いた試験片の主要汚染核種は⁶⁰Coであった。⁶⁰Coはその性状が母材金属と似ているため、除染時に母材内に取り込まれたことが考えられる。汚染核種が¹³⁷Cs等の場合、除染性能は向上することが期待できる。

4.2 飛散防止フードの設計

飛散防止試験の結果、レーザ照射による二次生成物は試験片移動方向の逆方向へ水平で広角度に飛散することが明らかになった。これにより、飛散防止フードは以下の点を考慮し設計する必要があると考える。

- ノズルに近い位置に設置する。
- 最下部を試験片と水平か低い位置にする。
- 高さは比較的低くて良いが幅を広くする。
- 内部で飛散物が反射しない構造にする。

これらを反映した飛散防止フードの設計例を図 4.1 に、回収システム概念図を図 4.2、図 4.3 に示す。飛散防止フード最下部は大きな除染対象物でも適用可能にするため、対象物表面より若干高くしてあるが、回収効率を落とさないため、クサビ状とする。また、フード上面に傾斜をつけ、飛散物がフード奥へ集まるようにするとともに、吸引排気する方法が望ましい。

5. まとめ

本試験では、レーザ除染技術を実際の除染作業に適用するための基礎データの取得を目的に、各種の試験を実施し、以下の結論を得た。

- ① ノーマルパルスYAGレーザを使用するレーザ除染では、レーザ出力を大きくした場合に、移動速度と周波数の比を1になるように調整すること、且つ1パルス当たりのエネルギーを $1.5\text{kJ}/\text{cm}^2$ になるように調整すること、アシストガスに不活性ガスを使用すること、等がより除染効率の向上を図ることができる。
- ② ノーマルパルスYAGレーザを用いて汚染配管を除染する際に、B.G.程度までの除染効果を得るには 0.15mm の除去深さが必要である。 0.15mm の除去深さが得られるには、レーザ平均パワー364Wの発振器を用いると、スタンドオフ 4mm 、繰返し速度 30Hz 、Dt比50%、試験片移動速度 $30\text{mm}/\text{s}$ が最適である。
- ③ 処理速度は、現在市販されている最大級の発振器を用いると、約 $60\text{min}/\text{m}^2$ を得ることが可能である。
- ④ 二次生成物は水平方向には広角度で飛散するが高い位置にはほとんど飛散しないことが分った。また、二次生成物の一部はフード内で反射してフード外に飛散する。これはQスイッチYAGレーザに比べ飛散物の重量が大きいことが原因である。
このことから、飛散防止には幅が広く内部で飛散物が反射しない構造のフードをノズルの近くで低い位置に設置する必要がある。
- ⑤ 電源確保等の問題から、不特定の施設でレーザ除染を実施するには、平均出力400W程度のレーザ発振器が適当である。

6. 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)
- (2) 福井康太、根本正信、谷本健一：レーザ除染技術の開発(2)(レーザ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：レーザ除染技術の開発(3) (レーザ伝送系の特性試験) JNC TN9410 99-008 (1999.4)
- (5) 福井康太、小川竜一郎、石島昇、谷本健一：レーザ除染技術の開発(4) (レーザビーム伝送試験と照射条件の最適化) JNC TN9410 99-014 (1999.7)
- (6) 福井康太、小川竜一郎、石島昇、谷本健一：レーザ除染技術の開発(5) (実廃棄物除染試験) JNC TN9410 99-016 (1999.8)
- (7) 日本物理学会編：レーザー その科学技術にもたらしたもの
丸善株式会社 (1978)
- (8) 小林昭：レーザ加工 基礎と実験 開発社 (1976)
- (9) レーザ学会編：レーザプロセシング、日経技術図書株式会社 (1990)

- 以上 -

表 2.1 配管試験片の線量データ

| 試験片 No. | 計数率 (kcpm) | 寸法 (mm) | | 放射能 (Bq) | 試験片 No. | 計数率 (kcpm) | 寸法 (mm) | | 放射能 (Bq) |
|------------|---------------|------------|----|-------------|------------|---------------|------------|----|-------------|
| 20A001 | 10.09 | 50 | 38 | 1.03E+04 | 20A024 | 10.12 | 50 | 39 | 1.64E+04 |
| 20A002 | 7.95 | 51 | 43 | 1.22E+04 | 20A025 | 1.5 | 50 | 37 | 2.68E+03 |
| 20A003 | 2.01 | 51 | 34 | 2.76E+03 | 20A026 | 26.7 | 50 | 39 | 3.30E+04 |
| 20A004 | 8.36 | 50 | 37 | 6.56E+03 | 20A027 | 0.84 | 51 | 38 | 8.06E+02 |
| 20A005 | 4.81 | 50 | 40 | 9.97E+03 | 20A028 | 3.7 | 50 | 38 | 4.28E+03 |
| 20A006 | 5.97 | 50 | 35 | 1.31E+04 | 20A029 | 2.14 | 53 | 37 | 2.25E+03 |
| 20A007 | 19.62 | 51 | 40 | 1.72E+04 | 20A030 | 2 | 54 | 39 | 2.71E+03 |
| 20A008 | 9.25 | 51 | 35 | 9.63E+03 | 20A031 | 15.45 | 50 | 40 | 1.67E+04 |
| 20A009 | 11.13 | 50 | 39 | 1.52E+04 | 20A032 | 2.62 | 50 | 36 | 4.66E+03 |
| 20A010 | 7.81 | 50 | 36 | 7.25E+03 | 20A033 | 4.14 | 52 | 37 | 4.98E+03 |
| 20A011 | 4.1 | 51 | 37 | 6.84E+03 | 20A034 | 14.15 | 51 | 38 | 1.75E+04 |
| 20A012 | 5.52 | 51 | 39 | 3.93E+03 | 20A035 | 3.87 | 50 | 40 | 4.27E+03 |
| 20A013 | 11.67 | 51 | 37 | 1.05E+04 | 20A036 | 10.34 | 50 | 35 | 1.77E+04 |
| 20A014 | 2.28 | 51 | 39 | 2.85E+03 | 20A037 | 2.74 | 51 | 36 | 5.39E+03 |
| 20A015 | 1.04 | 51 | 36 | 1.53E+03 | 20A038 | 13.93 | 50 | 40 | 1.81E+04 |
| 20A016 | 5.49 | 51 | 40 | 9.04E+03 | 20A039 | 1.79 | 50 | 39 | 3.04E+03 |
| 20A017 | 0.93 | 50 | 37 | 8.32E+02 | 20A043 | 6.93 | 50 | 36 | 8.55E+03 |
| 20A018 | 12.13 | 50 | 38 | 1.70E+04 | 20A047 | 5.12 | 50 | 35 | 5.67E+03 |
| 20A019 | 2.43 | 50 | 40 | 4.98E+03 | 20A048 | 30 | 50 | 40 | 2.80E+03 |
| 20A020 | 0.94 | 50 | 35 | 1.23E+03 | 25A003 | 0.21 | 48 | 46 | 1.41E+02 |
| 20A021 | 7.12 | 50 | 39 | 1.38E+04 | 25A008 | 0.17 | 49 | 50 | 1.02E+02 |
| 20A022 | 4.81 | 50 | 36 | 3.85E+03 | 25A011 | 0.2 | 49 | 49 | 1.07E+02 |
| 20A023 | 1.46 | 51 | 36 | 1.69E+03 | 25A018 | 0.44 | 50 | 49 | 3.63E+02 |

表 2.2 行送り試験データ

| 試験片 No. | ガス種類 | 除染条件 | | | | | | | 寸法 (mm) | | 面積 cm ² |
|------------|-------------|------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|--------------------------|--|-------------|-------------|----|-----------------------|
| | | 周波数 (Hz) | 移動速度 (mm/s) | デューティ 比 (%) | 印可電圧 (V) | 装置の出力 (W) | ファイバー伝 送後出力 (W) | 送幅 (mm) | | | |
| 20A035 | Ar | 30 | 30 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.5 | 50 | 40 | 20 |
| 20A004 | Ar | 30 | 30 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 50 | 37 | 18.5 |
| 20A025 | Ar | 30 | 30 | 50 | 10 | 440 | 350 | 1 | 50 | 37 | 18.5 |
| 試験片 No. | DF | 研磨厚 | | | Ge測定300sec | | | | | | |
| | Ge測定 | 1回 照射 (mm) | 2回 照射 (mm) | 合計 (mm) | 照射前 (Bq) | 照射後 (Bq) | 照射後汚染密度 ^{Co} ⁶⁰ (Bq/g) | | | | |
| 20A035 | 133.0 | 0.12 | 0.16 | 0.28 | 4.27E+03 | 3.21E+01 | 8.42E-01 | 1.61E+00 | | | |
| 20A004 | 166.4 | 0.11 | 0.06 | 0.18 | 6.56E+03 | 3.94E+01 | 1.07E+00 | 2.13E+00 | | | |
| 20A025 | 55.9 | 0.08 | 0.05 | 0.13 | 2.68E+03 | 4.79E+01 | 1.26E+00 | 2.59E+00 | | | |
| 試験片 No. | 計数率 | | | | | | 重量 | | | | |
| | BG (cpm) | 照射前 (cpm) | 1回照射 (cpm) (net) | 1回照射 (cpm) (Gross) | 2回照射 (cpm) (net) | 2回照射 (cpm) (Gross) | 照射前 (g) | 1回照射 (g) | 2回照射 (g) | | |
| 20A035 | 45 | 3870.00 | 80 | 35 | 59 | 14 | 42.53 | 40.65 | 38.14 | | |
| 20A004 | 54 | 8360.00 | 117 | 63 | 58 | 4 | 39.51 | 37.89 | 36.98 | | |
| 20A025 | 55 | 1500.00 | 250 | 195 | 72 | 17 | 39.91 | 38.79 | 38.02 | | |

表 2.3 パルス間隔/レーザ幅 試験データ

| 試験片 | | 除染条件 | | | | | | |
|---------|----------|----------|---------------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------|------------------|--------|
| No. | ガス種類 | パルス間隔 | 1パルス当たりのE密度 | 試験片単位面積に当たるE密度 すらしを考慮 | 1パルス当たりのE | ピークパワー | 周波数 | 移動速度 |
| | | (mm) | (J/cm ²)/ 1pulse | | J/cm ² | J/1pulse | (W) | (mm/s) |
| 20A008 | Ar | 0.67 | 743 | 1167 | 5.8 | 700 | 60 | 40 |
| 20A007 | Ar | 0.80 | 892 | 1167 | 7.0 | 700 | 50 | 40 |
| 20A006 | Ar | 1.00 | 1115 | 1167 | 8.8 | 700 | 40 | 40 |
| 20A005 | Ar | 1.33 | 1486 | 1167 | 11.7 | 700 | 30 | 40 |
| 20A004 | Ar | 1.00 | 1486 | 1556 | 11.7 | 700 | 30 | 30 |
| 20A009 | Ar | 0.75 | 1115 | 1556 | 8.8 | 700 | 40 | 30 |
| 20A010B | Ar | 0.60 | 892 | 1556 | 7.0 | 700 | 50 | 30 |
| 20A033 | Ar | 0.50 | 743 | 1556 | 5.8 | 700 | 60 | 30 |
| 試験片 | 研磨厚 | | | Ge測定300sec | | | | |
| No. | 1回照射 | 2回照射 | 合計 | 照射前 | 照射後 | 照射後汚染密度 | | |
| | (mm) | (mm) | (mm) | (Bq) | (Bq) | Co^{60} 換算 | | |
| 20A008 | 6.82E-02 | 3.38E-02 | 1.02E-01 | 9.63E+03 | 1.52E+02 | 4.04E+00 | 8.49E+00 | |
| 20A007 | 7.04E-02 | 3.52E-02 | 1.06E-01 | 1.72E+04 | 2.26E+02 | 4.99E+00 | 1.11E+01 | |
| 20A006 | 6.89E-02 | 4.25E-02 | 1.11E-01 | 1.31E+04 | 2.17E+02 | 5.77E+00 | 1.24E+01 | |
| 20A005 | 7.18E-02 | 1.67E-02 | 8.85E-02 | 9.97E+03 | 2.66E+02 | 6.04E+00 | 1.33E+01 | |
| 20A004 | 1.12E-01 | 6.31E-02 | 1.75E-01 | 6.56E+03 | 3.94E+01 | 1.07E+00 | 2.13E+00 | |
| 20A009 | 9.14E-02 | 5.98E-02 | 1.51E-01 | 1.52E+04 | 4.27E+01 | 1.05E+00 | 2.19E+00 | |
| 20A010B | 8.76E-02 | 5.34E-02 | 1.41E-01 | 7.25E+03 | 1.17E+02 | 2.88E+00 | 6.50E+00 | |
| 20A033 | 6.33E-02 | 5.93E-02 | 1.23E-01 | 4.98E+03 | 2.57E+02 | 6.32E+00 | 1.34E+01 | |
| 試験片 | DF | 計数率 | | | | | | |
| No. | | BG | 照射 | 1回 | 1回 | 2回 | 2回 | |
| | | (cpm) | (cpm) | (cpm) (net) | (cpm) (Gross) | (cpm) (net) | (cpm) (Gross) | |
| 20A008 | 63.5 | 54 | 9250 | 209 | 155 | 112 | 58 | |
| 20A007 | 76.2 | 54 | 19620 | 205 | 151 | 154 | 100 | |
| 20A006 | 60.2 | 54 | 5970 | 235 | 181 | 98 | 44 | |
| 20A005 | 37.5 | 54 | 4810 | 423 | 369 | 319 | 265 | |
| 20A004 | 166.4 | 54 | 8360 | 117 | 63 | 58 | 4 | |
| 20A009 | 356.7 | 54 | 11130 | 96 | 42 | 72 | 18 | |
| 20A010B | 62.0 | 54 | 7810 | 150 | 96 | 92 | 38 | |
| 20A033 | 19.4 | 45 | 4140 | 267 | 222 | 153 | 108 | |

表 2.4 Dt 比 試験データ

| 試験片 | ガス種類 | 除染条件 | | | | | | | |
|--------|-------------|---------------|--|--------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------|
| | | パルス間隔 (mm) | 1パルス当たりのE密度 (J/cm ²)/ 1pulse | J/cm ² | 照射回数を考慮 J/cm ² | 1パルス当たりのE J/1pulse | ピークパワー (W) | 周波数 (Hz) | 移動速度 (mm/s) |
| 20A039 | Ar | 1.00 | 955 | 1000 | 2000 | 7.5 | 750 | 30 | 30 |
| 20A029 | Ar | 1.00 | 1274 | 1333 | 2667 | 10.0 | 750 | 30 | 30 |
| 20A004 | Ar | 1.00 | 1486 | 1556 | 3111 | 11.7 | 700 | 30 | 30 |
| 20A030 | Ar | 1.00 | 1741 | 1822 | 3644 | 13.7 | 683 | 30 | 30 |
| 試験片 | 除染条件 | | | | | 寸法 | | 面積 | |
| No. | Dt比 (%) | 印可電圧 (V) | 装置出力 (W) | ファイバー伝送後出力 (W) | 送幅 (mm) | ガス流量 (l/min) | (mm) | | (cm ²) |
| 20A039 | 30 | 10 | 230 | 225 | 0.75 | 40 | 50 | 39 | 19.5 |
| 20A029 | 40 | 10 | 350 | 300 | 0.75 | 40 | 53 | 37 | 19.6 |
| 20A004 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 40 | 50 | 37 | 18.5 |
| 20A030 | 60 | 10 | 510 | 410 | 0.75 | 40 | 54 | 39 | 21.1 |
| 試験片 | DF | 研磨厚 | | | Ge測定300sec | | | | |
| No. | Ge測定 | 1回照射 (mm) | 2回照射 (mm) | 合計 (mm) | 照射前 (Bq) | 照射後 (Bq) | 照射後汚染密度 Co ⁶⁰ 換算 | | |
| 20A039 | 8.7 | 5.79E-02 | 4.93E-02 | 1.07E-01 | 3.04E+03 | 3.49E+02 | 8.06E+00 | 1.79E+01 | |
| 20A029 | 19.6 | 1.03E-01 | 6.54E-02 | 1.69E-01 | 2.25E+03 | 1.15E+02 | 2.74E+00 | 5.86E+00 | |
| 20A004 | 166.4 | 1.12E-01 | 6.31E-02 | 1.75E-01 | 6.56E+03 | 3.94E+01 | 1.07E+00 | 2.13E+00 | |
| 20A030 | 45.7 | 7.55E-02 | 7.00E-02 | 1.45E-01 | 2.71E+03 | 5.93E+01 | 1.39E+00 | 2.82E+00 | |
| 試験片 | 計数率 | | | | | 重量 | | | |
| No. | BG (cpm) | 照射前 (cpm) | 1回照射 (cpm) (net) | 1回照射 (cpm) (Gross) | 2回照射 (cpm) (net) | 2回照射 (cpm) (Gross) | 照射前 (g) | 1回照射 (g) | 2回照射 (g) |
| 20A039 | 55 | 1790 | 373 | 318 | 176 | 121 | 44.9 | 44.1 | 43.3 |
| 20A029 | 55 | 2140 | 126 | 71 | 98 | 43 | 44.5 | 42.9 | 41.9 |
| 20A004 | 54 | 8360 | 117 | 63 | 58 | 4 | 39.5 | 37.9 | 37.0 |
| 20A030 | 55 | 2000 | 142 | 87 | 77 | 22 | 45.2 | 44.0 | 42.8 |

表 2.5 全除染データ（アシストガス分類）

| 試験片 No. | ガス種類 | 除染条件 | | | | | | | | | | | | 研磨厚 | | | |
|------------|----------------|---------------|---|--|--|---------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------------|------------|------------------|------------------|------------|
| | | バルス間隔 (ms) | レペルス数 (J/cm ²) /pulse | 試験片単位面積 に当たるエネルギー を考慮 | 照射回数 1ペルス当たりのE J/cm ² | 1ペルス当 たりのE J/cm ² | ビーグ パワー (W) | 周波 数 (Hz) | 移動 速度 (mm/s) | デュー ティ比 (%) | 印可 電圧 (V) | 装置 出力 (W) | 伝送 出力 (W) | 送幅 (mm) | 1回 照射 (mm) | 2回 照射 (mm) | 合計 (mm) |
| | | (ms) | (J/cm ²) /pulse | J/cm ² | J/cm ² | J/cm ² | (W) | (Hz) | (mm/s) | (%) | (V) | (W) | (W) | (mm) | (mm) | (mm) | |
| 20A012 | Air | 1.00 | 743 | 778 | 1556 | 5.8 | 700 | 60 | 60 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.10 | 0.03 | 0.13 |
| 20A014 | Air | 1.00 | 743 | 778 | 1556 | 5.8 | 700 | 60 | 60 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.09 | 0.04 | 0.13 |
| 20A011 | Air | 0.67 | 743 | 1167 | 2333 | 5.8 | 700 | 60 | 40 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.16 | 0.05 | 0.21 |
| 20A027 | Ar | 1.00 | 1486 | 2333 | 4667 | 11.7 | 700 | 30 | 30 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.5 | 0.17 | 0.10 | 0.28 |
| 20A026 | Ar | 1.00 | 1486 | 2333 | 4667 | 11.7 | 700 | 30 | 30 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.5 | 0.13 | 0.09 | 0.23 |
| 20A034 | Ar | 1.00 | 1486 | 2333 | 4667 | 11.7 | 700 | 30 | 30 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.5 | 0.07 | 0.10 | 0.17 |
| 20A001 | Ar | 0.33 | 1486 | 4667 | 9333 | 11.7 | 700 | 30 | 10 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.41 | 0.33 | 0.74 |
| 20A033 | Ar | 0.50 | 743 | 1556 | 3111 | 5.8 | 700 | 60 | 30 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.06 | 0.06 | 0.12 |
| 20A010B | Ar | 0.60 | 892 | 1556 | 3111 | 7.0 | 700 | 50 | 30 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.09 | 0.05 | 0.14 |
| 20A008 | Ar | 0.67 | 743 | 1167 | 2333 | 5.8 | 700 | 60 | 40 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.07 | 0.03 | 0.10 |
| 20A002 | Ar | 0.67 | 1486 | 2333 | 4667 | 11.7 | 700 | 30 | 20 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.19 | 0.13 | 0.32 |
| 20A017 | Ar | 0.75 | 573 | 800 | 1600 | 4.5 | 360 | 40 | 30 | 50 | 6.5 | 200 | 180 | 0.75 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| 20A022 | Ar | 0.75 | 726 | 1013 | 2027 | 5.7 | 456 | 40 | 30 | 50 | 7 | 240 | 228 | 0.75 | 0.03 | 0.01 | 0.04 |
| 20A023 | Ar | 0.75 | 892 | 1244 | 2489 | 7.0 | 560 | 40 | 30 | 50 | 8 | 320 | 280 | 0.75 | 0.04 | 0.03 | 0.07 |
| 20A013 | Ar | 0.75 | 1019 | 1422 | 2844 | 8.0 | 640 | 40 | 30 | 50 | 9 | 380 | 320 | 0.75 | 0.06 | 0.04 | 0.10 |
| 20A037 | Ar | 0.75 | 1019 | 1422 | 2844 | 8.0 | 640 | 40 | 30 | 50 | 9 | 380 | 320 | 0.75 | 0.06 | 0.05 | 0.11 |
| 20A009 | Ar | 0.75 | 1115 | 1556 | 3111 | 8.8 | 700 | 40 | 30 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.09 | 0.06 | 0.15 |
| 20A007 | Ar | 0.80 | 892 | 1167 | 2333 | 7.0 | 700 | 50 | 40 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.07 | 0.04 | 0.11 |
| 20A032 | Ar | 1.00 | 743 | 778 | 1556 | 5.8 | 700 | 60 | 60 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.02 | 0.01 | 0.03 |
| 20A039 | Ar | 1.00 | 955 | 1000 | 2000 | 7.5 | 750 | 30 | 30 | 30 | 10 | 230 | 225 | 0.75 | 0.06 | 0.05 | 0.11 |
| 20A028 | Ar | 1.00 | 892 | 933 | 1867 | 7.0 | 700 | 50 | 50 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.04 | 0.03 | 0.07 |
| 20A006 | Ar | 1.00 | 1115 | 1167 | 2333 | 8.8 | 700 | 40 | 40 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.07 | 0.04 | 0.11 |
| 20A029 | Ar | 1.00 | 1274 | 1333 | 2667 | 10.0 | 750 | 30 | 30 | 40 | 10 | 350 | 300 | 0.75 | 0.10 | 0.07 | 0.17 |
| 20A004 | Ar | 1.00 | 1486 | 1556 | 3111 | 11.7 | 700 | 30 | 30 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.11 | 0.06 | 0.18 |
| 20A025 | Ar | 1.00 | 1486 | 1167 | 2333 | 11.7 | 700 | 30 | 30 | 50 | 10 | 440 | 350 | 1 | 0.08 | 0.05 | 0.13 |
| 20A030 | Ar | 1.00 | 1741 | 1822 | 3644 | 13.7 | 683 | 30 | 30 | 60 | 10 | 510 | 410 | 0.75 | 0.08 | 0.07 | 0.15 |
| 20A015 | N ₂ | 1.00 | 1486 | 1556 | 3111 | 11.7 | 700 | 30 | 30 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.08 | 0.07 | 0.15 |
| 20A003 | N ₂ | 0.80 | 1274 | 1676 | 3353 | 10.0 | 750 | 30 | 23.86 | 40 | 10 | 350 | 300 | 0.75 | 0.10 | 0.10 | 0.19 |
| 20A019 | N ₂ | 0.67 | 1189 | 1867 | 3733 | 9.3 | 560 | 30 | 20 | 50 | 8 | 320 | 280 | 0.75 | 0.08 | 0.08 | 0.16 |
| 20A021 | N ₂ | 1.00 | 1741 | 1822 | 3644 | 13.7 | 683 | 30 | 30 | 60 | 10 | 510 | 410 | 0.75 | 0.07 | 0.05 | 0.12 |
| 20A016 | N ₂ | 0.33 | 1486 | 4667 | 9333 | 11.7 | 700 | 30 | 10 | 50 | 10 | 440 | 350 | 0.75 | 0.40 | 0.28 | 0.68 |
| 試験片 No. | Ge測定300sec | 計数率 | 照射前 BG Co ⁶⁰ (Bq) | 照射後 BG (cps) (cps) (×1000) | 照射 前 1回 照射 (cps) (cps) (not) | 1回 照射 (cps) (cps) (gross) | 2回 照射 (cps) (cps) (net) | 2回 照射 (cps) (cps) (gross) | 照射 前 1回 照射 (g) (g) | 1回 照射 (g) | 2回 照射 (g) | 寸法 (mm) | 面積 cm ² | DF | Ge測定 | | |
| 20A012 | 3.93E+03 | 2.54E+02 | 54 | 5.52 | 264 | 210 | 174 | 120 | 41.05 | 39.5 | 39.1 | 51 | 39 | 19.9 | 15.5 | | |
| 20A014 | 2.85E+03 | 2.95E+02 | 54 | 2.28 | 273 | 219 | 197 | 143 | 42.56 | 41.2 | 40.6 | 51 | 39 | 19.9 | 9.7 | | |
| 20A011 | 6.84E+03 | 6.71E+02 | 54 | 4.10 | 268 | 214 | 206 | 152 | 45.09 | 42.7 | 42.0 | 51 | 37 | 18.9 | 10.2 | | |
| 20A027 | 8.06E+02 | 7.15E+01 | 53 | 0.84 | 94 | 41 | 72 | 19 | 43.19 | 40.6 | 39.0 | 51 | 38 | 19.4 | 11.3 | | |
| 20A026 | 3.30E+04 | 1.82E+02 | 55 | 26.70 | 168 | 113 | 112 | 57 | 44.83 | 42.8 | 41.4 | 50 | 39 | 19.5 | 181.3 | | |
| 20A034 | 1.75E+04 | 1.05E+03 | 53 | 14.15 | 696 | 643 | 393 | 340 | 44.29 | 43.2 | 41.7 | 51 | 38 | 19.4 | 16.8 | | |
| 20A001 | 1.03E+04 | 5.40E+01 | 54 | 10.09 | 109 | 55 | 68 | 14 | 45.11 | 39.0 | 34.1 | 50 | 38 | 19.0 | 191.3 | | |
| 20A033 | 4.98E+03 | 2.57E+02 | 45 | 4.14 | 267 | 222 | 153 | 108 | 42.52 | 41.6 | 40.7 | 52 | 37 | 19.2 | 19.4 | | |
| 20A010B | 7.25E+03 | 1.17E+02 | 54 | 7.81 | 150 | 96 | 92 | 38 | 42.56 | 41.3 | 40.6 | 50 | 36 | 18.0 | 62.0 | | |
| 20A008 | 9.63E+03 | 1.52E+02 | 54 | 9.25 | 209 | 155 | 112 | 58 | 38.96 | 38.0 | 37.5 | 51 | 35 | 17.9 | 63.5 | | |
| 20A002 | 1.22E+04 | 6.39E+01 | 54 | 7.95 | 162 | 108 | 65 | 11 | 49.87 | 46.7 | 44.4 | 51 | 43 | 21.9 | 190.3 | | |
| 20A017 | 8.32E+02 | 4.74E+02 | 54 | 0.93 | 505 | 451 | 482 | 428 | 38.64 | 38.6 | 38.6 | 50 | 38 | 19.0 | 1.8 | | |
| 20A022 | 3.85E+03 | 2.95E+02 | 54 | 4.81 | 232 | 178 | 197 | 143 | 39.44 | 39.1 | 38.9 | 50 | 36 | 18.0 | 13.1 | | |
| 20A023 | 1.69E+03 | 1.38E+02 | 52 | 1.46 | 161 | 109 | 112 | 60 | 39.08 | 38.5 | 38.1 | 51 | 36 | 18.4 | 12.2 | | |
| 20A013 | 1.05E+04 | 6.90E+02 | 52 | 11.67 | 733 | 681 | 365 | 313 | 43.68 | 42.8 | 42.2 | 51 | 37 | 18.9 | 15.2 | | |
| 20A037 | 5.39E+03 | 2.29E+02 | 45 | 2.74 | 222 | 177 | 134 | 89 | 39.33 | 38.5 | 37.7 | 51 | 36 | 18.4 | 23.5 | | |
| 20A009 | 1.52E+04 | 4.27E+01 | 54 | 11.13 | 96 | 42 | 72 | 18 | 42.88 | 41.5 | 40.6 | 50 | 39 | 19.5 | 356.7 | | |
| 20A007 | 1.72E+04 | 2.26E+02 | 54 | 19.62 | 205 | 151 | 154 | 100 | 46.97 | 45.9 | 45.3 | 51 | 40 | 20.4 | 76.2 | | |
| 20A032 | 4.66E+03 | 5.96E+02 | 52 | 2.62 | 493 | 441 | 321 | 269 | 38.46 | 38.2 | 38.0 | 50 | 36 | 18.0 | 7.8 | | |
| 20A039 | 3.04E+03 | 3.49E+02 | 55 | 1.79 | 373 | 318 | 176 | 121 | 44.94 | 44.1 | 43.3 | 50 | 39 | 19.5 | 8.7 | | |
| 20A028 | 4.28E+03 | 5.25E+02 | 52 | 3.70 | 619 | 567 | 382 | 330 | 42.06 | 41.5 | 41.1 | 50 | 38 | 19.0 | 8.2 | | |
| 20A006 | 1.31E+04 | 2.17E+02 | 54 | 5.97 | 235 | 181 | 98 | 44 | 39.06 | 38.1 | 37.5 | 50 | 35 | 17.5 | 60.2 | | |
| 20A029 | 2.25E+03 | 1.15E+02 | 55 | 2.14 | 126 | 71 | 98 | 43 | 44.51 | 42.9 | 41.9 | 53 | 37 | 19.6 | 19.6 | | |
| 20A004 | 6.56E+03 | 3.94E+01 | 54 | 8.36 | 117 | 63 | 58 | 4 | 39.51 | 37.9 | 37.0 | 50 | 37 | 18.5 | 166.4 | | |
| 20A025 | 2.68E+03 | 4.79E+01 | 55 | 1.50 | 250 | 195 | 72 | 17 | 39.91 | 38.8 | 38.0 | 50 | 37 | 18.5 | 55.9 | | |
| 20A030 | 2.71E+03 | 5.93E+01 | 55 | 2.00 | 142 | 87 | 77 | 22 | 45.2 | 44.0 | 42.8 | 54 | 39 | 21.1 | 45.7 | | |
| 20A015 | 1.53E+03 | 6.86E+01 | 54 | 1.04 | 173 | 119 | 82 | 28 | 40.49 | 39.4 | 38.3 | 51 | 36 | 18.4 | 22.2 | | |
| 20A003 | 2.76E+03 | 6.81E+01 | 54 | 2.01 | 190 | 136 | 71 | 17 | 36.07 | 34.8 | 33.5 | 51 | 34 | 17.3 | 40.5 | | |
| 20A019 | 4.98E+03 | 6.09E+01 | 54 | 2.43 | 141 | 87 | 79 | 25 | 47.16 | 45.9 | 44.7 | 50 | 40 | 20.0 | 81.7 | | |
| 20A021 | 1.38E+04 | 4.48E+02 | 54 | 7.12 | 312 | 258 | 251 | 197 | 45.25 | 44.2 | 43.5 | 50 | 39 | 19.5 | 30.7 | | |
| 20A016 | 9.04E+03 | 2.98E+01 | 54 | 5.49 | 124 | 70 | 60 | 6 | 46.83 | 40.4 | 36.1 | 51 | 40 | 20.4 | 303.2 | | |

表 2.6 ガス流量 試験データ

| 試験片 | ガス種類 | 除染条件 | | | | 重量 | | | 寸法 | |
|--------|--------------------|---------------|--|--|--------------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------------|-----------------------|------|
| | | パルス間隔 (mm) | 1パルス当たりのE密度 (J/cm ²)/ 1pulse | 試験片単位面積に当たるE密度 行ずらしを含む J/cm ² | ピークパワー (W) | ガス流量 (リットル/min) | 照射前 (g) | 1回照射 (g) | 2回照射 (g) | (mm) |
| 20A035 | Ar | 1.00 | 1486 | 2333 | 700 | 40 | 42.5 | 40.7 | 38.1 | 50 |
| 20A027 | Ar | 1.00 | 1486 | 2333 | 700 | 60 | 43.2 | 40.6 | 39.0 | 40 |
| 20A026 | Ar | 1.00 | 1486 | 2333 | 700 | 80 | 44.8 | 42.8 | 41.4 | 51 |
| 20A034 | Ar | 1.00 | 1486 | 2333 | 700 | 80 | 44.3 | 43.2 | 41.7 | 38 |
| 試験片 | 面積 | DF | 研磨厚 | | | | Ge測定300sec | | | |
| No. | (cm ²) | Ge測定 | 1回照射 (mm) | 2回照射 (mm) | 合計 (mm) | 照射前 (Bq) | 照射後 (Bq) | 照射後汚染密度 Co ⁶⁰ 換算 | | |
| | | | (mm) | (mm) | (mm) | (Bq) | (Bq) | (Bq/g) | (Bq/cm ²) | |
| 20A035 | 20.0 | 133.0 | 1.21E-01 | 1.61E-01 | 2.81E-01 | 4.27E+03 | 3.21E+01 | 8.42E-01 | 1.61E+00 | |
| 20A027 | 19.4 | 11.3 | 1.75E-01 | 1.03E-01 | 2.77E-01 | 8.06E+02 | 7.15E+01 | 1.83E+00 | 3.69E+00 | |
| 20A026 | 19.5 | 181.3 | 1.33E-01 | 9.40E-02 | 2.27E-01 | 3.30E+04 | 1.82E+02 | 4.40E+00 | 9.33E+00 | |
| 20A034 | 19.4 | 16.8 | 7.41E-02 | 9.72E-02 | 1.71E-01 | 1.75E+04 | 1.05E+03 | 2.51E+01 | 5.40E+01 | |
| 試験片 | 計数率 | | | | | | | | | |
| No. | (cpm) | BG (cpm) | 照射前 (cpm) | 1回照射 (cpm) (net) | 1回照射 (cpm) (Gross) | 2回照射 (cpm) (net) | 2回照射 (cpm) (Gross) | | | |
| | | | (cpm) | (cpm) | (cpm) | (cpm) | (cpm) | | | |
| 20A035 | 45 | 3870 | 80 | 35 | 59 | 14 | | | | |
| 20A027 | 53 | 840 | 94 | 41 | 72 | 19 | | | | |
| 20A026 | 55 | 26700 | 168 | 113 | 112 | 57 | | | | |
| 20A034 | 53 | 14150 | 696 | 643 | 393 | 340 | | | | |

表 2.7 照射エネルギー 試験データ

| 試験片 | 除染条件 | | | | | | | | | | |
|--------|--------------|--------------------|--|--|------------------------------|---------------|----------------|------------------|----------------|------------------|-------------|
| | パルス間隔 No. | (mm) | 1パルス当たりのE密度 (J/cm ²)/ 1pulse | 試験片単位面積に当たるE密度行ずらしを含む J/cm ² | 照射回数を考慮 J/cm ² | ピークパワー (W) | 周波数 (Hz) | 移動速度 (mm/s) | Dt比 (%) | 印可電圧 (V) | 装置出力 (W) |
| 20A032 | 1.00 | 743 | 778 | 1556 | 700 | 60 | 60 | 50 | 10 | 440 | 350 |
| 20A028 | 1.00 | 892 | 933 | 1867 | 700 | 50 | 50 | 50 | 10 | 440 | 350 |
| 20A039 | 1.00 | 955 | 1000 | 2000 | 750 | 30 | 30 | 30 | 10 | 230 | 225 |
| 20A006 | 1.00 | 1115 | 1167 | 2333 | 700 | 40 | 40 | 50 | 10 | 440 | 350 |
| 20A029 | 1.00 | 1274 | 1333 | 2667 | 750 | 30 | 30 | 40 | 10 | 350 | 300 |
| 20A004 | 1.00 | 1486 | 1556 | 3111 | 700 | 30 | 30 | 50 | 10 | 440 | 350 |
| 20A030 | 1.00 | 1741 | 1822 | 3644 | 683 | 30 | 30 | 60 | 10 | 510 | 410 |
| 試験片 | 寸法 | 面積 | DF | 重量 | | | | | | 研磨厚 | |
| No. | (mm) | (cm ²) | Ge測定 | 照射前 | 1回照射 | 2回照射 | 1回照射 | 2回照射 | 合計 | | |
| No. | (mm) | (cm ²) | (g) | (g) | (g) | (g) | (mm) | (mm) | (mm) | | |
| 20A032 | 50 | 36 | 18.0 | 7.8 | 38.5 | 38.2 | 38.0 | 1.85E-02 | 1.14E-02 | 2.99E-02 | |
| 20A028 | 50 | 38 | 19.0 | 8.2 | 42.1 | 41.5 | 41.1 | 4.12E-02 | 2.70E-02 | 6.82E-02 | |
| 20A039 | 50 | 39 | 19.5 | 8.7 | 44.9 | 44.1 | 43.3 | 5.79E-02 | 4.93E-02 | 1.07E-01 | |
| 20A006 | 50 | 35 | 17.5 | 60.2 | 39.1 | 38.1 | 37.5 | 6.89E-02 | 4.25E-02 | 1.11E-01 | |
| 20A029 | 53 | 37 | 19.6 | 19.6 | 44.5 | 42.9 | 41.9 | 1.03E-01 | 6.54E-02 | 1.69E-01 | |
| 20A004 | 50 | 37 | 18.5 | 166.4 | 39.5 | 37.9 | 37.0 | 1.12E-01 | 6.31E-02 | 1.75E-01 | |
| 20A030 | 54 | 39 | 21.1 | 45.7 | 45.2 | 44.0 | 42.8 | 7.55E-02 | 7.00E-02 | 1.45E-01 | |
| 試験片 | Ge測定300sec | | | | | | 計数率 | | | | |
| No. | 照射前 | 照射後 | 照射後汚染密度 | BG | 照射前 | 1回照射 | 1回照射 | 2回照射 | 2回照射 | | |
| | (Bq) | (Bq) | (Bq/g) | (Bq/cm ²) | (cpm) | (cpm) | (cpm) (net) | (cpm) (Gross) | (cpm) (net) | (cpm) (Gross) | |
| 20A032 | 4.66E+03 | 5.96E+02 | 1.57E+01 | 3.31E+01 | 52 | 2620 | 493 | 441 | 321 | 269 | |
| 20A028 | 4.28E+03 | 5.25E+02 | 1.28E+01 | 2.76E+01 | 52 | 3700 | 619 | 567 | 382 | 330 | |
| 20A039 | 3.04E+03 | 3.49E+02 | 8.06E+00 | 1.79E+01 | 55 | 1790 | 373 | 318 | 176 | 121 | |
| 20A006 | 1.31E+04 | 2.17E+02 | 5.77E+00 | 1.24E+01 | 54 | 5970 | 235 | 181 | 98 | 44 | |
| 20A029 | 2.25E+03 | 1.15E+02 | 2.74E+00 | 5.86E+00 | 55 | 2140 | 126 | 71 | 98 | 43 | |
| 20A004 | 6.56E+03 | 3.94E+01 | 1.07E+00 | 2.13E+00 | 54 | 8360 | 117 | 63 | 58 | 4 | |
| 20A030 | 2.71E+03 | 5.93E+01 | 1.39E+00 | 2.82E+00 | 55 | 2000 | 142 | 87 | 77 | 22 | |

表 2.8 電解研磨試験データ1

| 試験片No. | 20A046 | 試験日 | 000124 | 試験片縦 | 51 mm | 試験片横 | 36 mm |
|--------|--------------------|-------|---------|--------|---------|--------|---------|
| 電流(A) | 10 | 電解時間 | | | | | |
| GM測定 | (cpm) | B G | 開始前 | 1分 | 2分 | 3分 | 5分 |
| | | net | 51 | 51 | | | |
| | | gross | 6870 | 67 | | | |
| | | DF | 6819 | 16 | | | |
| Ge測定 | (Bq) | | | 426.19 | | | |
| | | DF | 14500 | 73 | 67 | 58 | 25 |
| 試験片面積 | (cm ²) | | | | 199 | 216 | 250 |
| 試験片重量 | (g) | | 18.36 | 18.36 | 18.36 | 18.36 | 18.36 |
| 研磨重量 | (g) | | 40.3919 | 40 | 40.3794 | 40.367 | 40.3297 |
| 平均研磨厚さ | (μm) | | | 0.0031 | 0.0094 | 0.0124 | 0.0373 |
| | | | | 0.22 | 0.66 | 0.87 | 2.60 |
| | | | | | | | 2.88 |
| | | | | | | | 4.55 |

表 2.9 電解研磨試験データ2

| 試験片No. | 20A017 | 試験日 | 000120 | 試験片縦 | 50 mm | 試験片横 | 37 mm | 電流(A) | 10 | | |
|--------|--------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | | 電解時間 | | | | | | | | |
| | | | 開始前 | 5分 | 10分 | 15分 | 20分 | 30分 | 35分 | 40分 | 60分 |
| GM測定 | (cpm) | B G | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 | 54 |
| | | net | 408 | 310 | 232 | 269 | 220 | 158 | 172 | 118 | 140 |
| | | gross | 354 | 256 | 178 | 215 | 166 | 104 | 118 | 64 | 86 |
| | | DF | | 1.38 | 1.99 | 1.65 | 2.13 | 3.40 | 3.00 | 5.53 | 4.12 |
| Ge測定 | (Bq) | | 474 | | | | | | | | 123.3 |
| | | DF | | | | | | | | | 4 |
| 試験片面積 | (cm ²) | | 18.5 | 18.5 | 18.5 | 18.5 | 18.5 | 18.5 | 18.5 | 18.5 | 18.5 |
| 試験片重量 | (g) | | 38.574 | 38.521 | 38.451 | 38.391 | 38.312 | 38.100 | 38.034 | 37.912 | 37.683 |
| 研磨重量 | (g) | | | 0.053 | 0.07 | 0.06 | 0.079 | 0.212 | 0.066 | 0.122 | 0.229 |
| 平均研磨厚さ | (μm) | | | 3.67 | 4.85 | 4.16 | 5.47 | 14.69 | 4.57 | 8.45 | 15.87 |

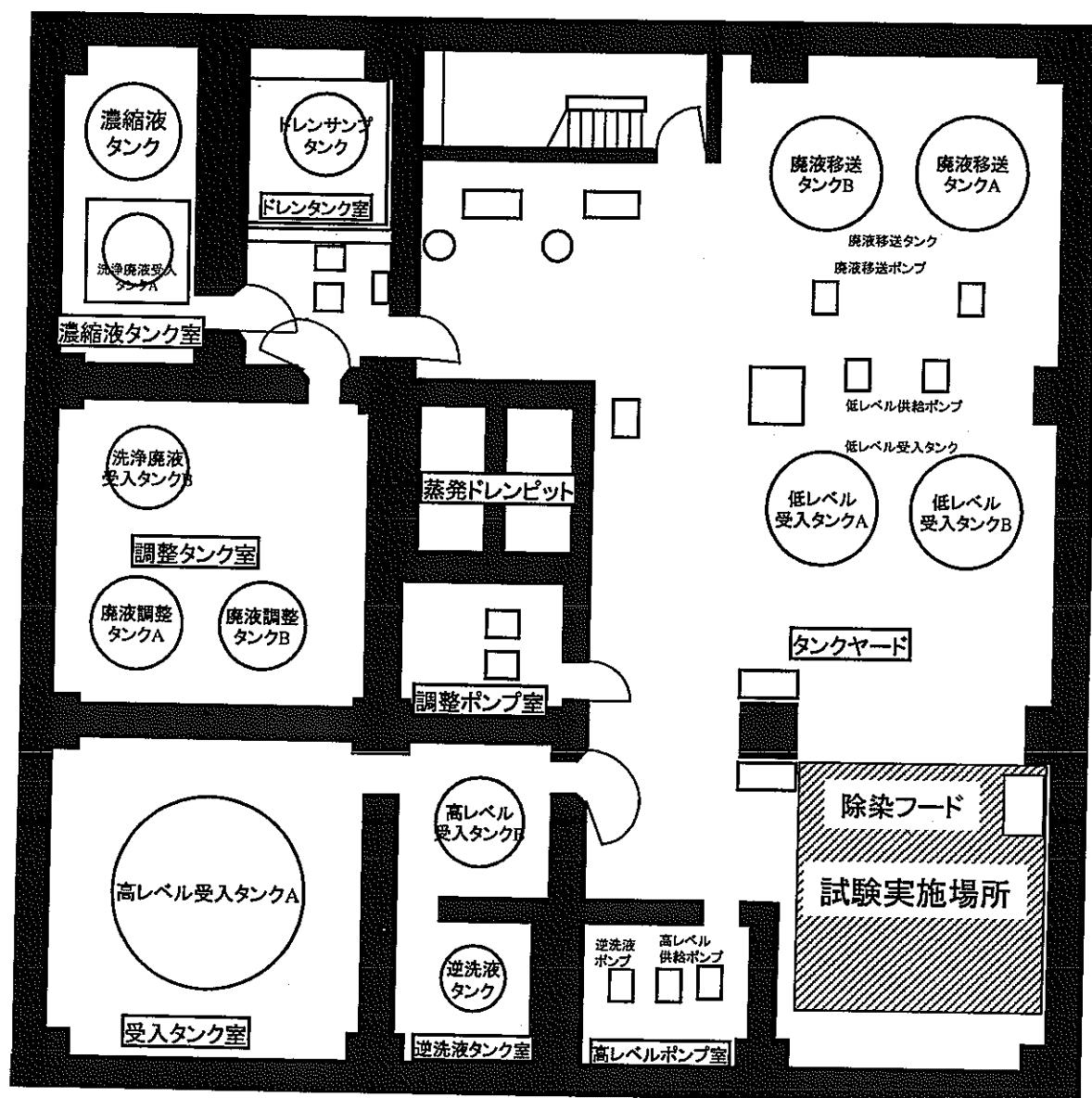


図 2.1 レーザ除染試験 実施場所

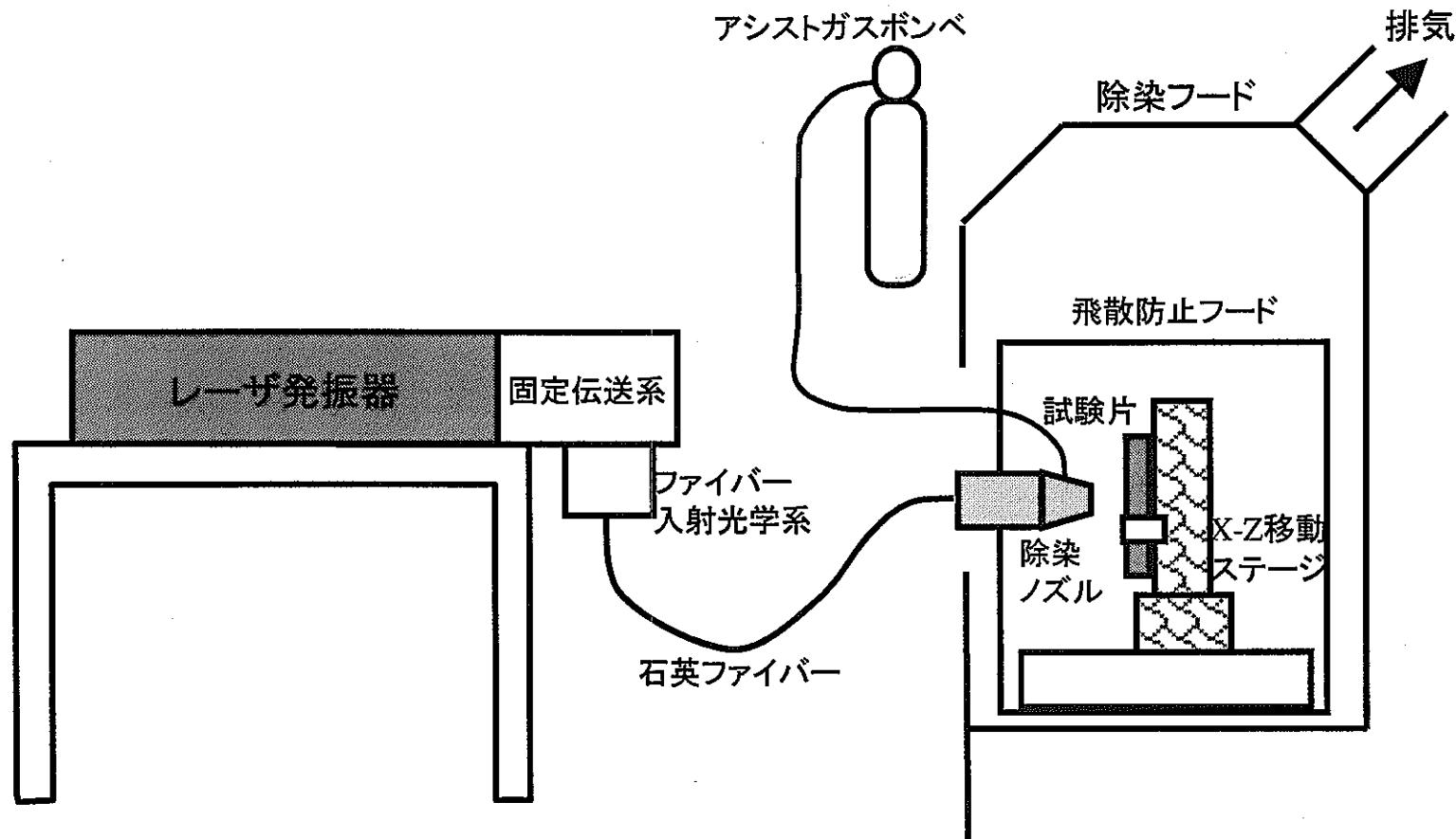


図 2.2 レーザ除染試験 装置概略

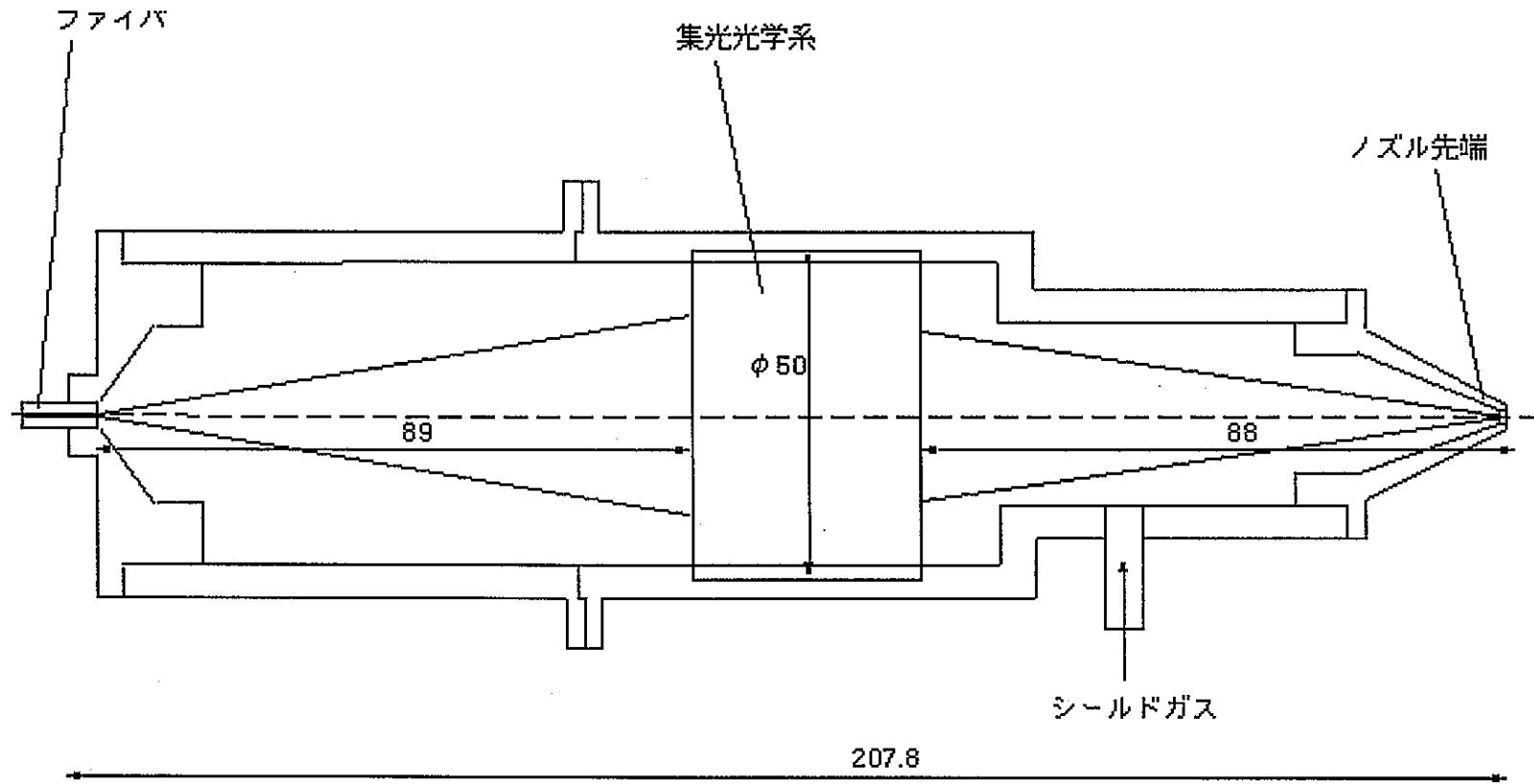
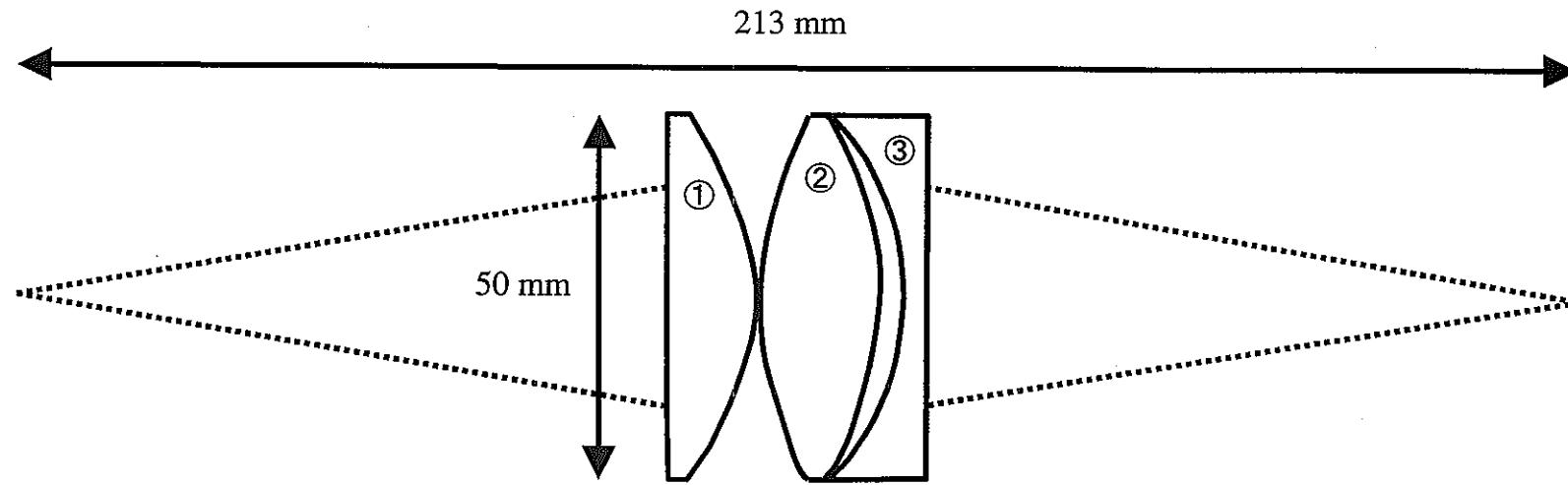


図 2.3 ノズル部分概略



| No. | 種類 | 焦点距離 | 曲率半径 | 中心厚さ | エッジ厚さ | 直径 |
|-----|----|-------|---------|--------|-------|------|
| ① | 平凸 | 80mm | 41.52mm | 11.4mm | 3mm | 50mm |
| ② | 両凸 | 50mm | 51.9mm | 15.8mm | 3mm | 50mm |
| ③ | 平凸 | -70mm | 36.33mm | 3mm | 13mm | 50mm |

図 2.4 集光レンズ組合せ

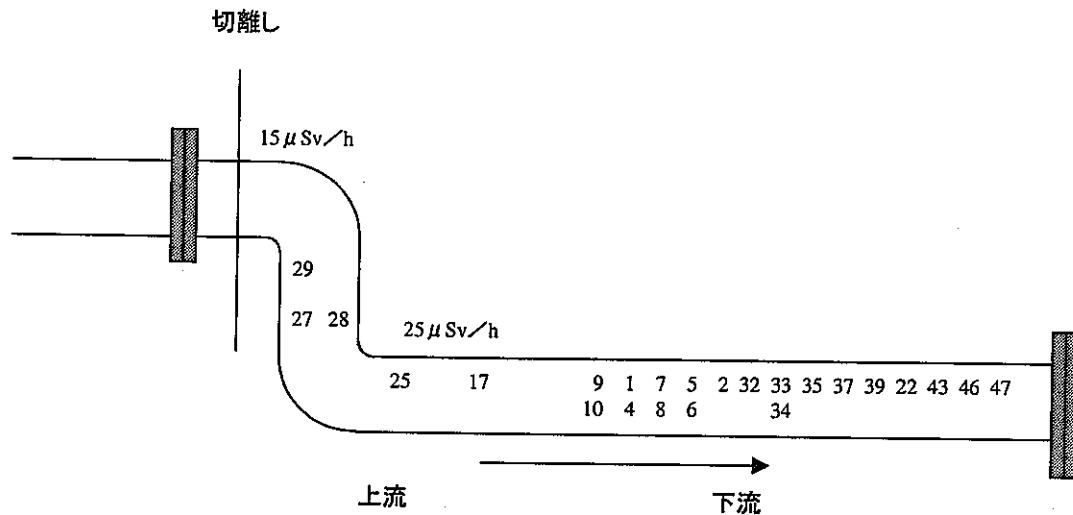


図 2.5 配管試験片の切り出し点

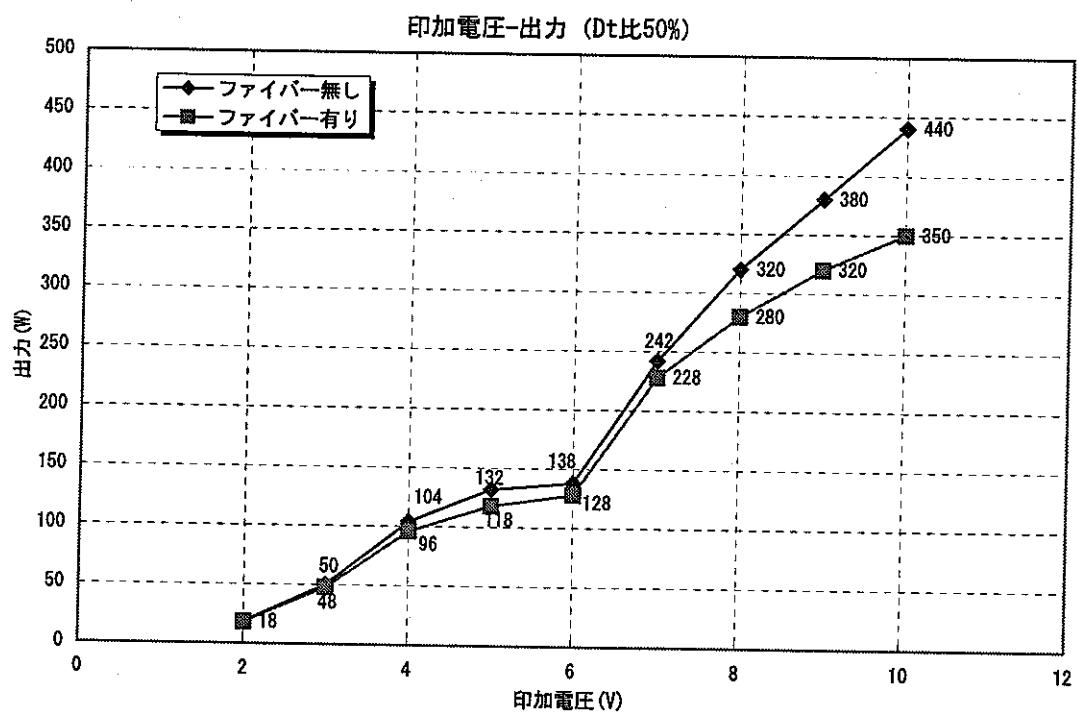


図 2.6 印加電圧-平均出力

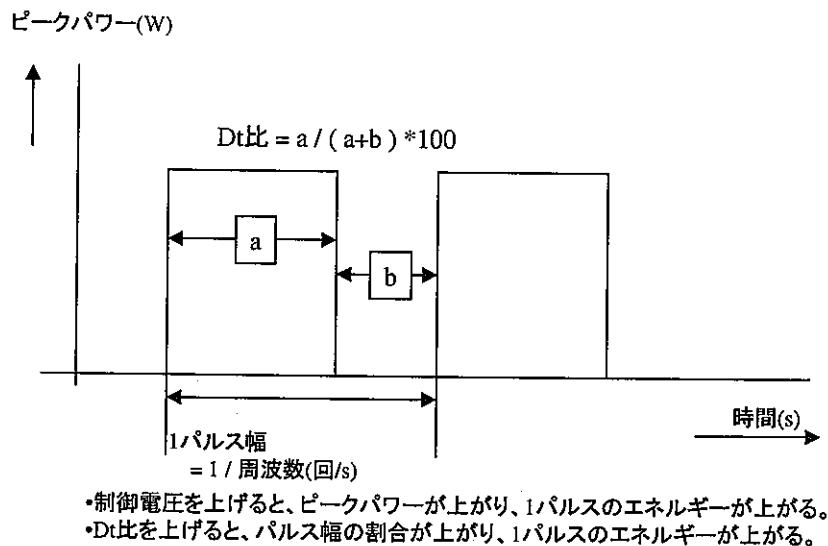


図 2.7 パルスと出力の関係概念図

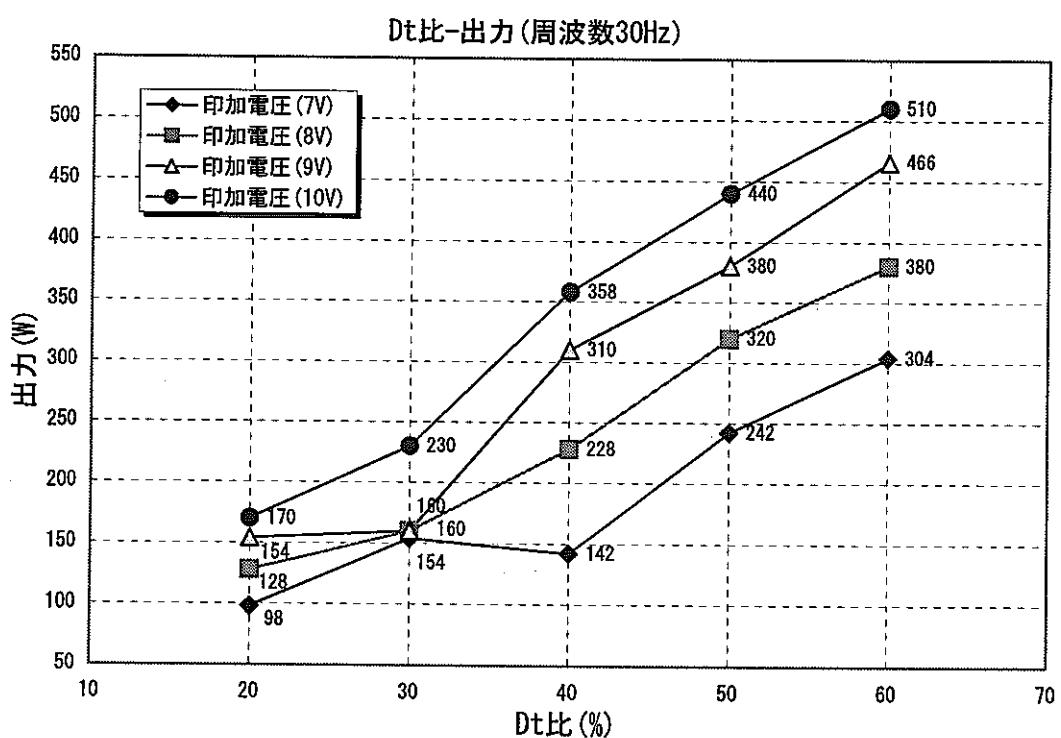


図 2.8 デューティ比-平均出力

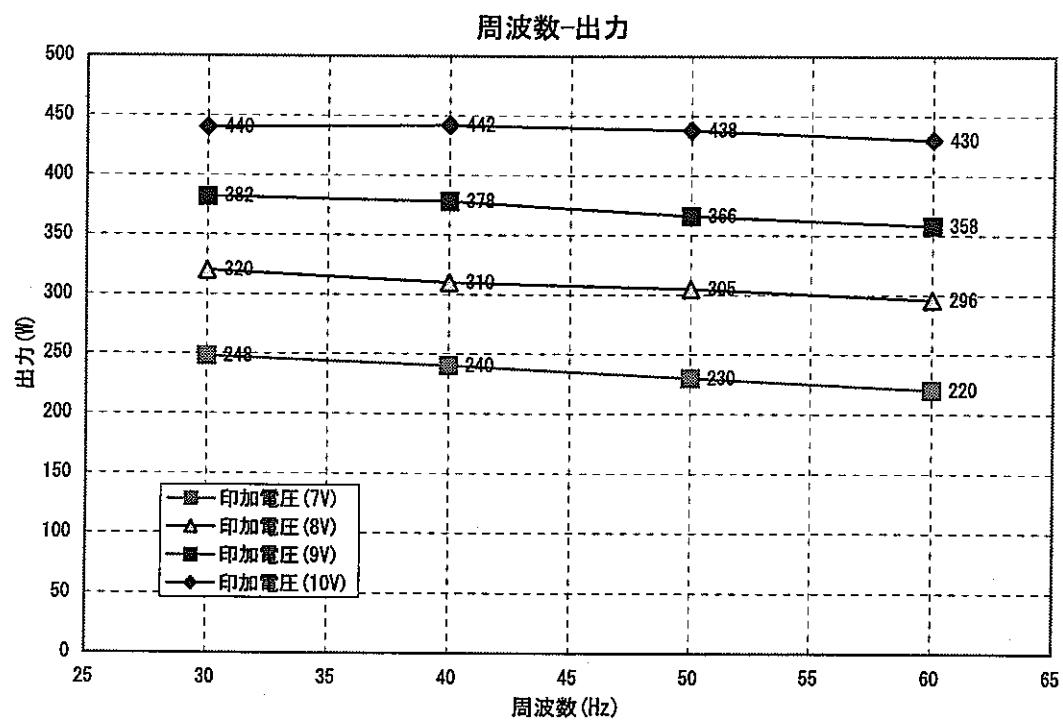


図 2.9 周波数-平均出力

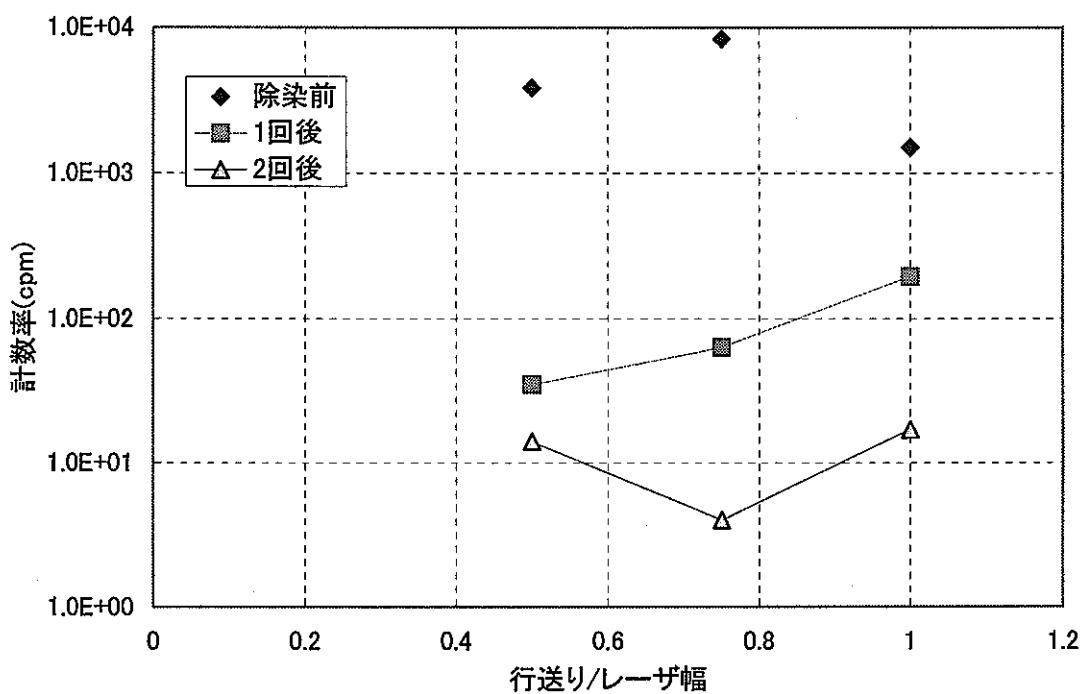


図 2.10 行送り - 計数率

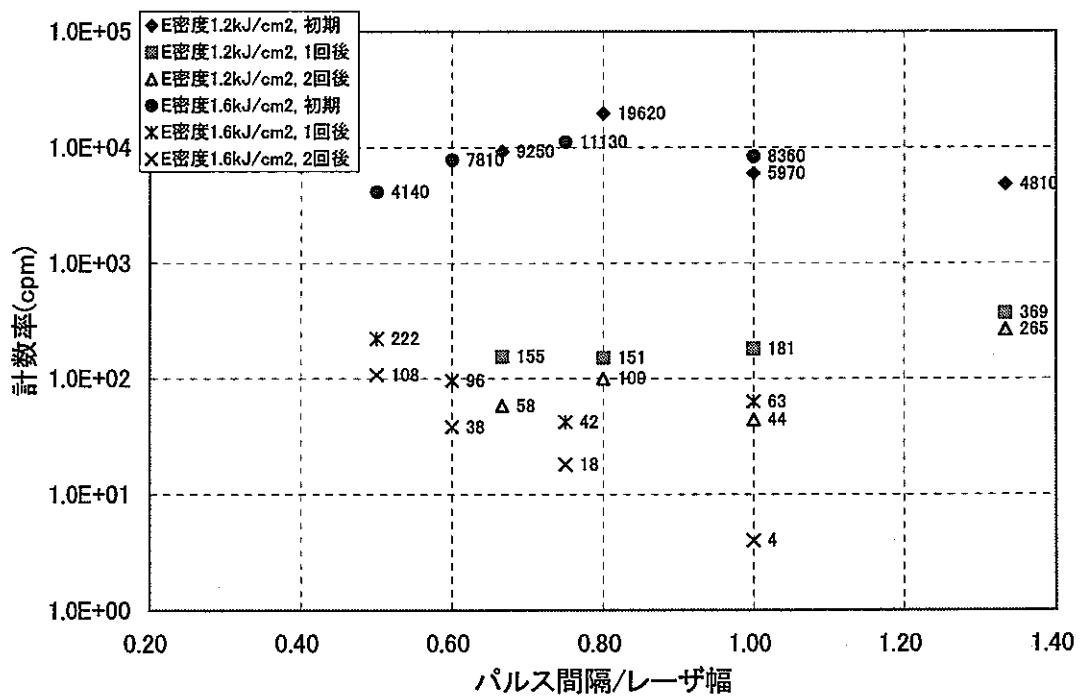


図 2.11 パルス間隔-計数率

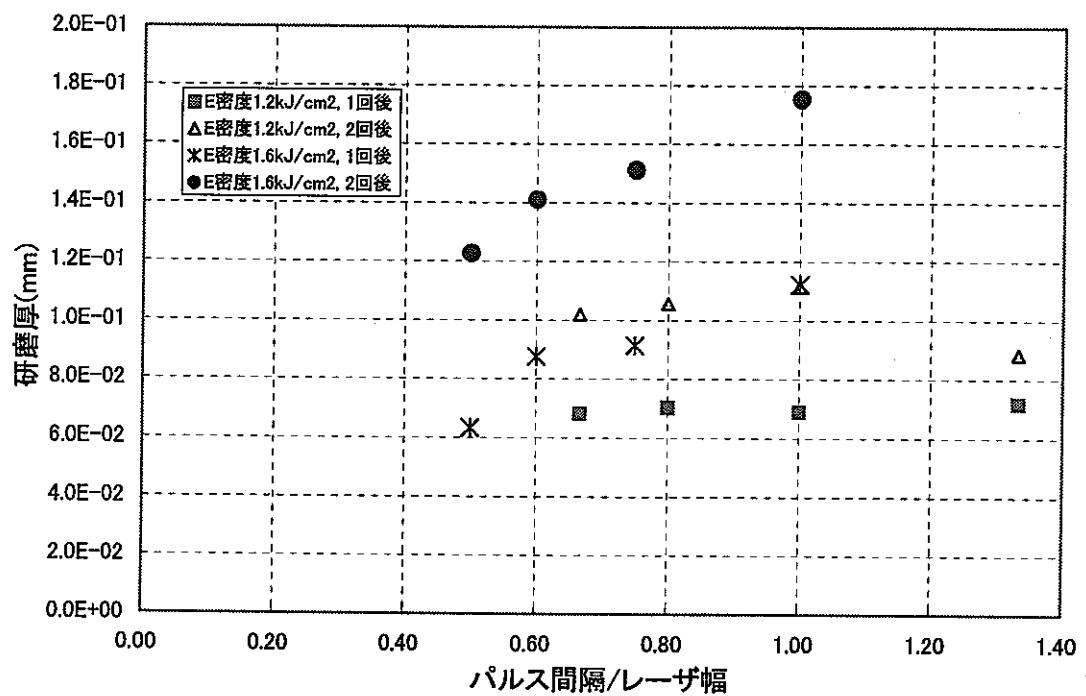


図 2.12 パルス間隔-研磨厚

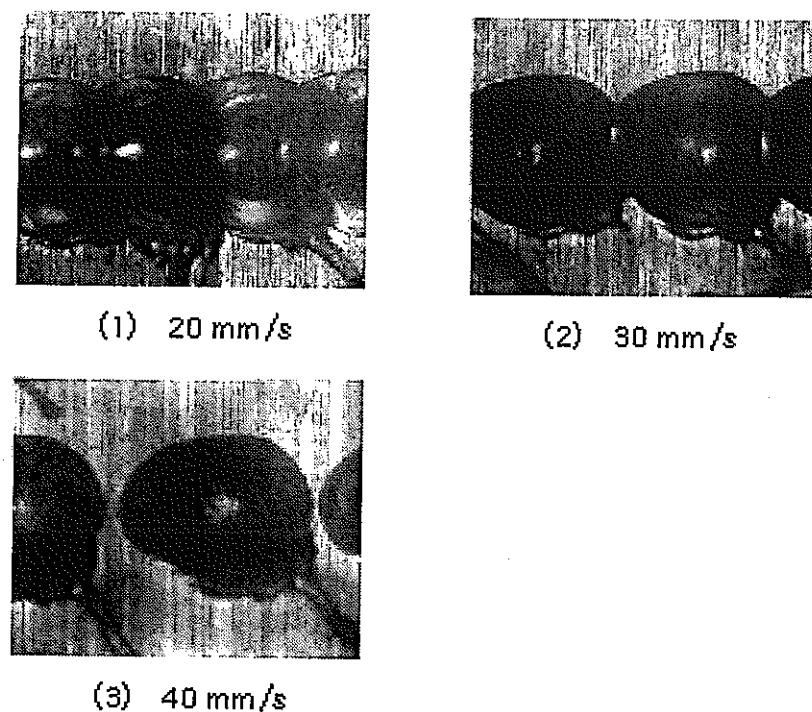


図 2.13 パルス間隔観察

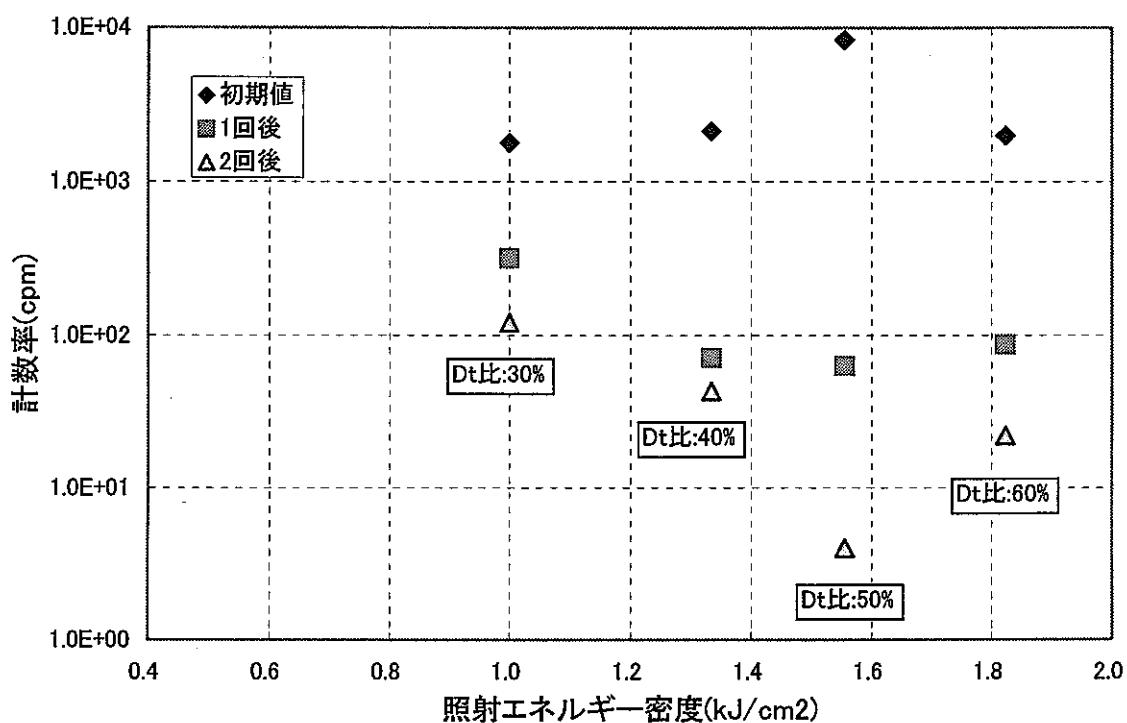


図 2.14 計数率 Dt 比依存性

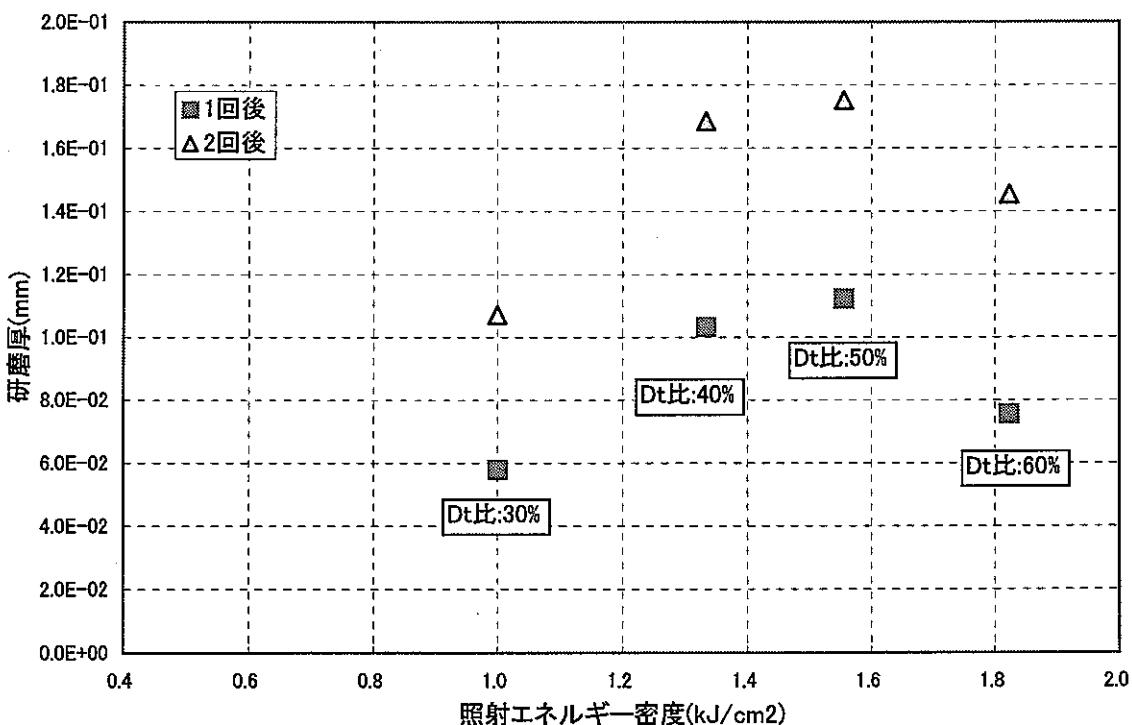


図 2.15 研磨厚 Dt 比依存性

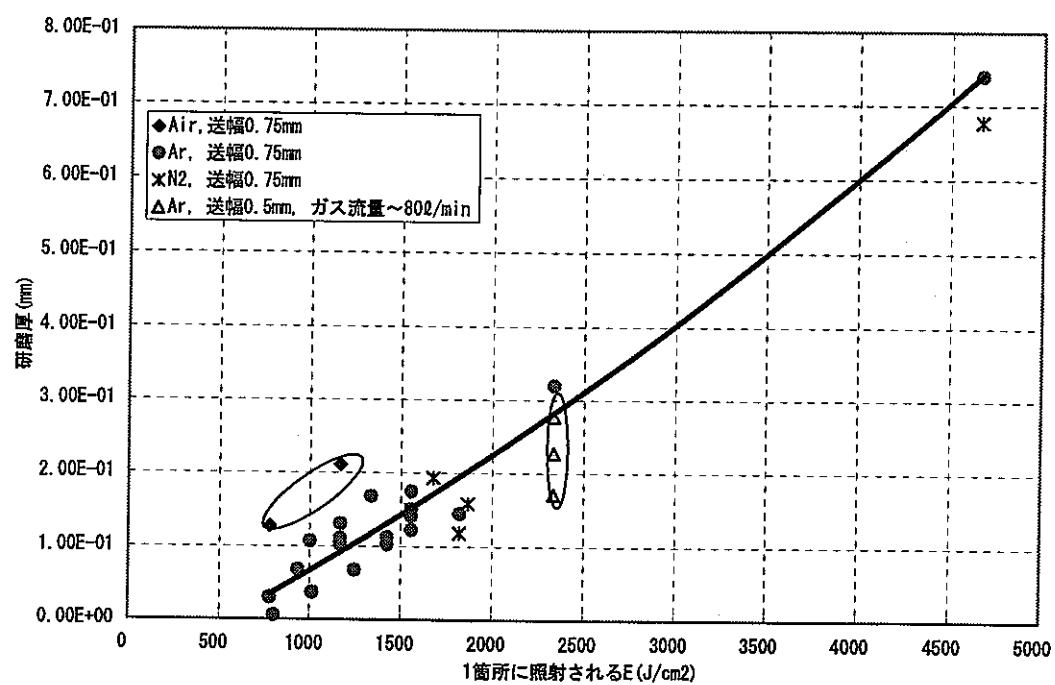


図 2.16 照射エネルギー - 研磨厚 (アシストガス種類系列)

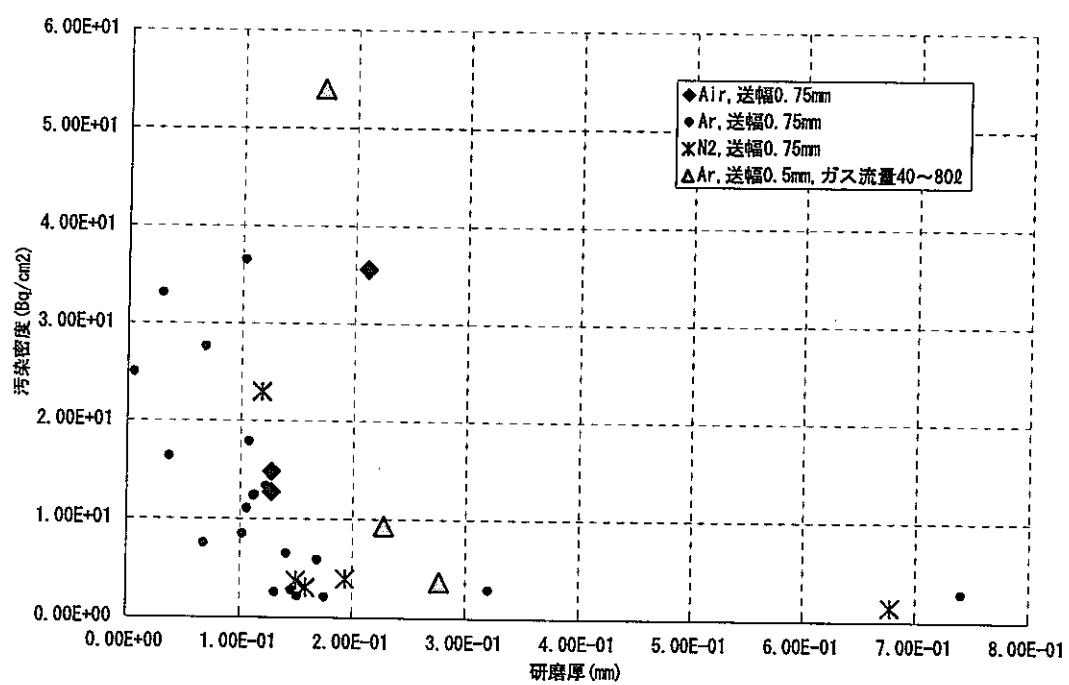


図 2.17 研磨厚 - 汚染密度

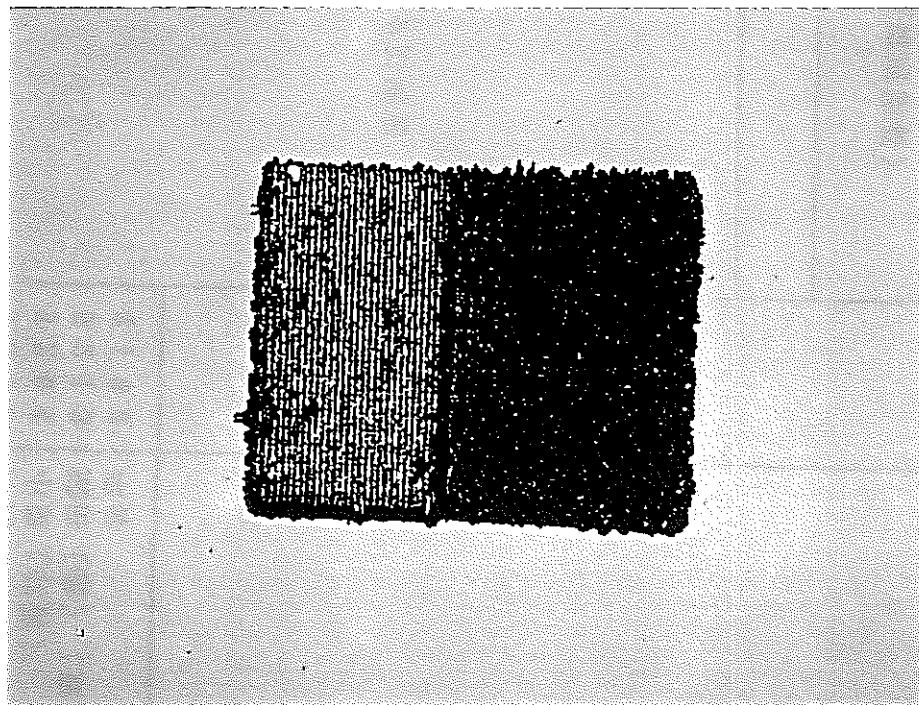


図 2.18 除染後表面写真（アシストガス Air）

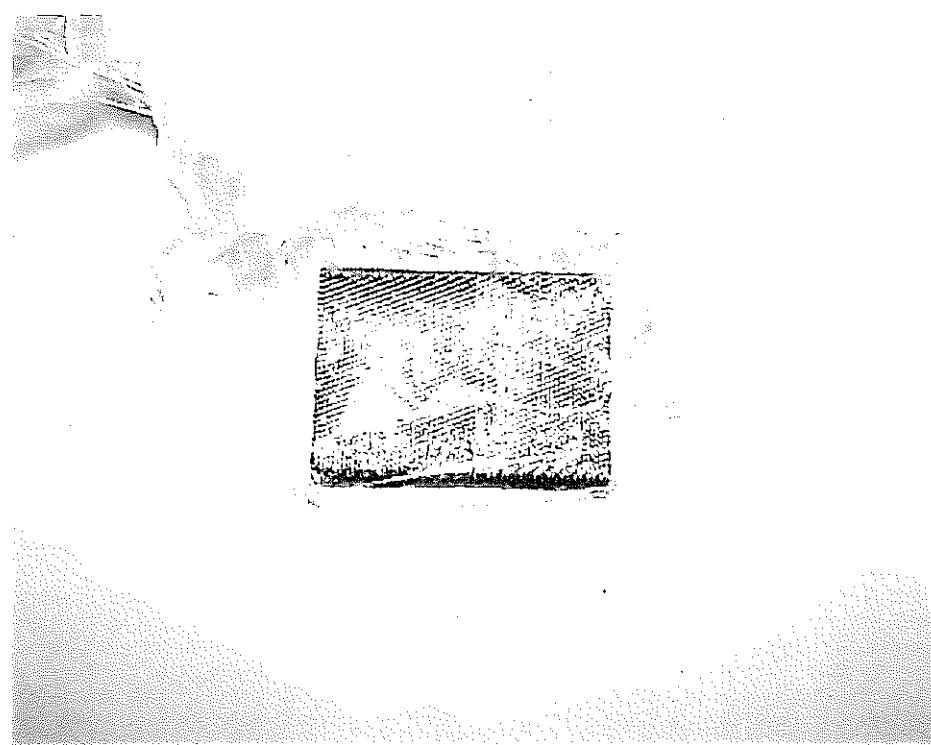


図 2.19 除染後表面写真（アシストガス Ar）

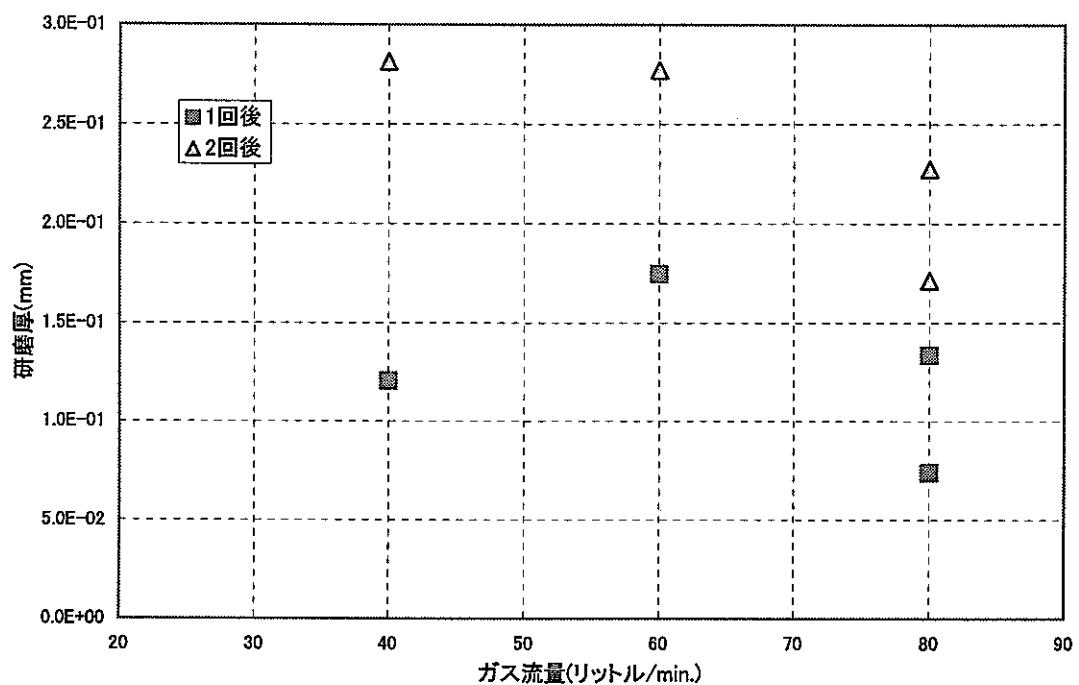


図 2.20 ガス流量-計数率

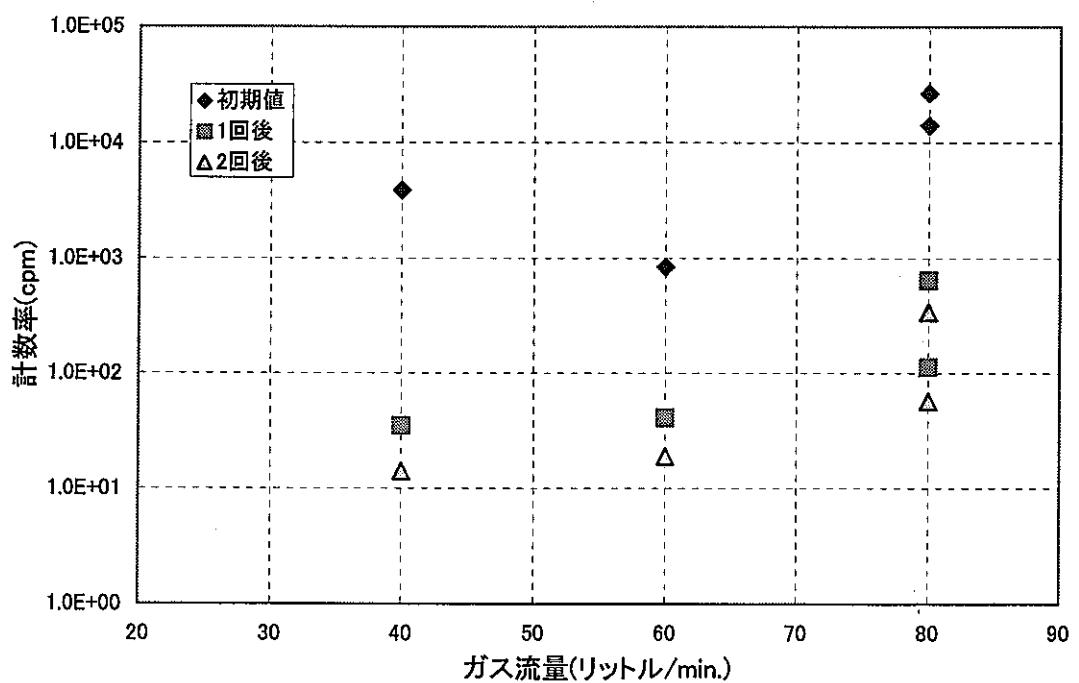


図 2.21 ガス流量-計数率

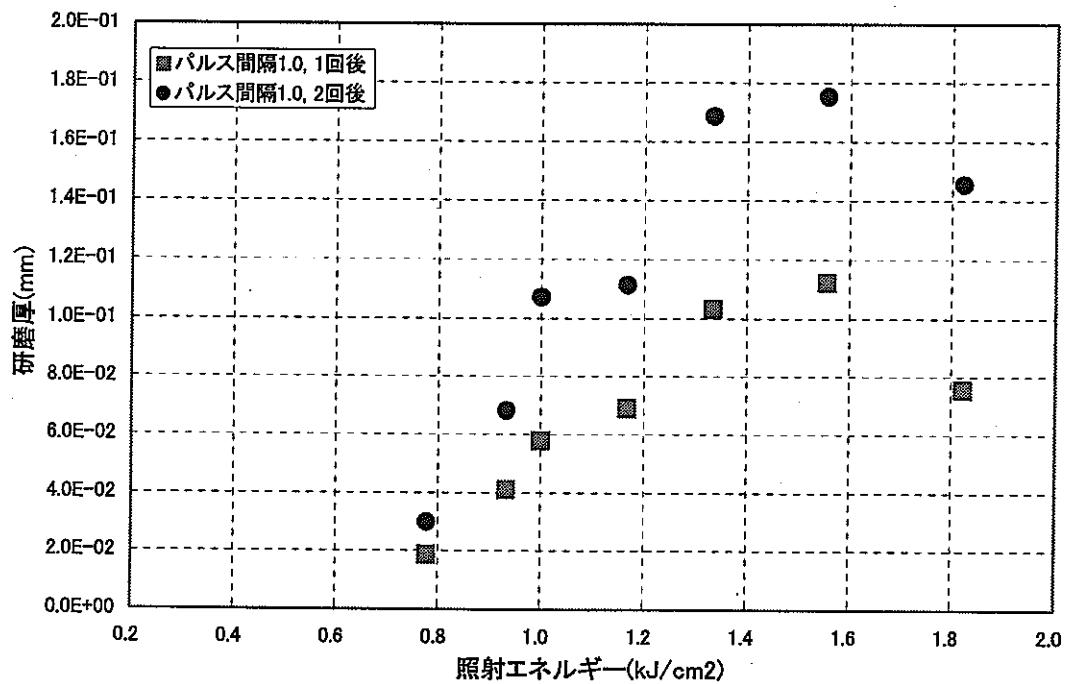


図 2.22 照射エネルギー - 研磨厚

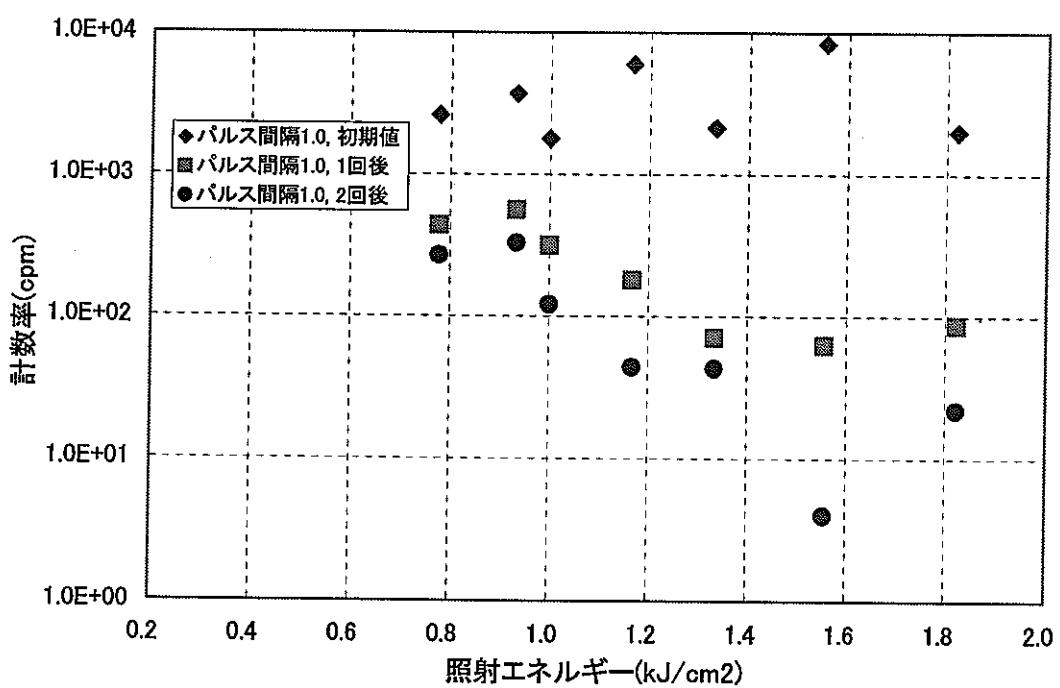


図 2.23 照射エネルギー - 計数率

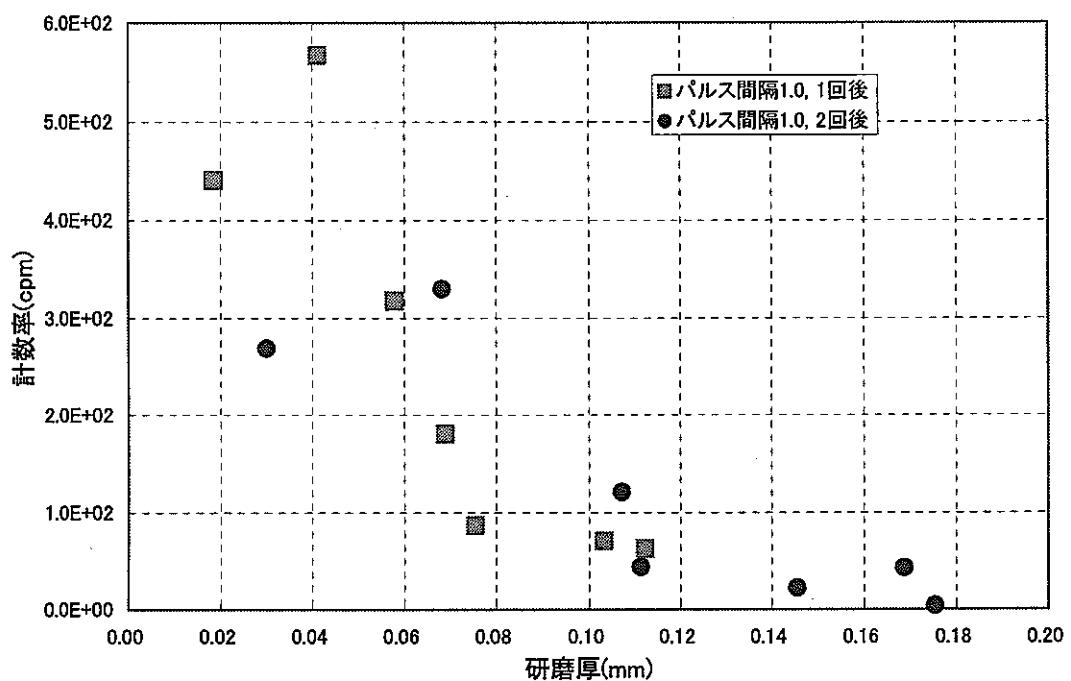


図 2.24 研磨厚 - 計数率

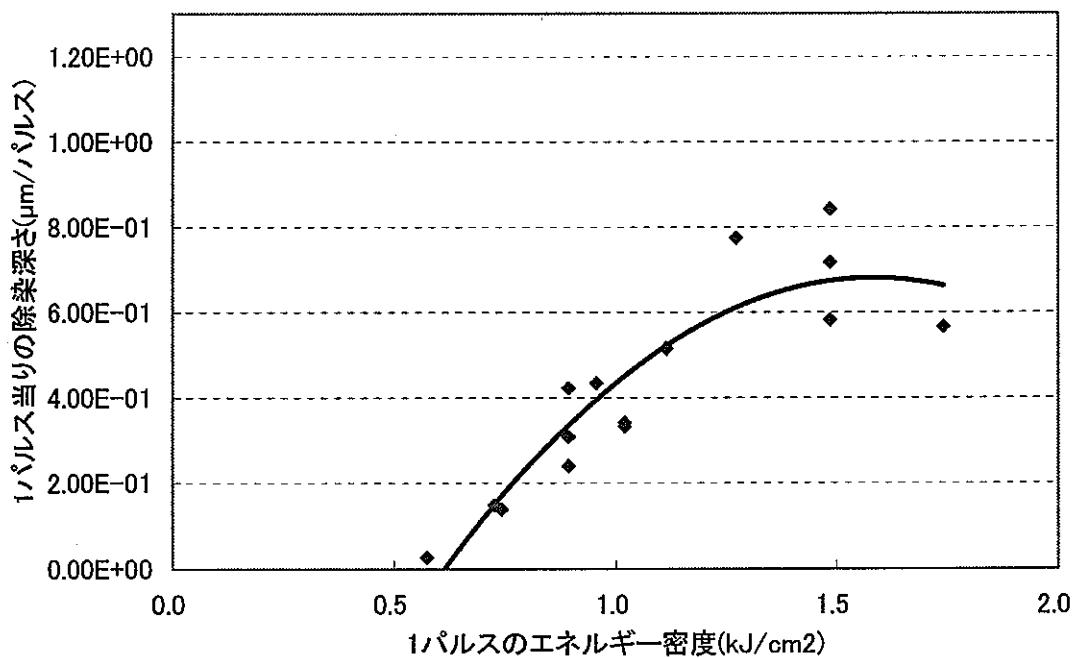


図 2.25 1パルス当たりの除染深さ

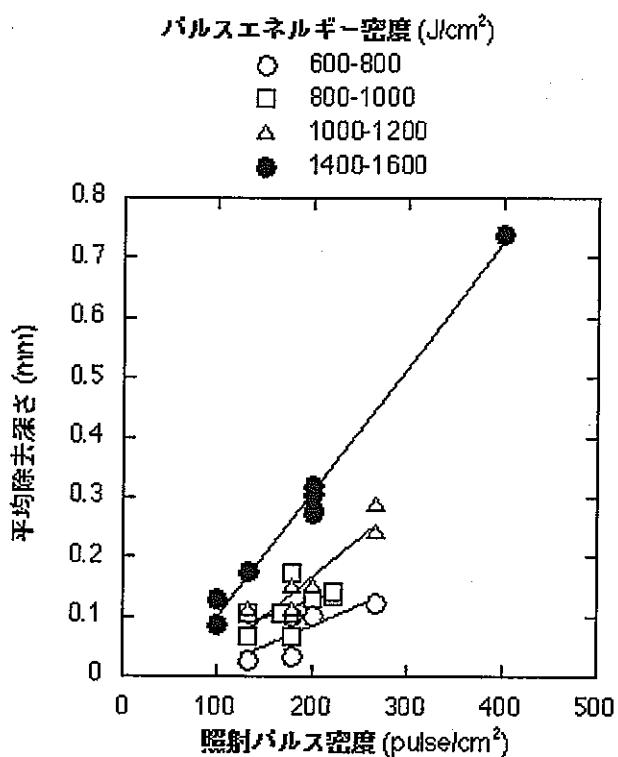


図 2.26 パルス密度-除去深さ

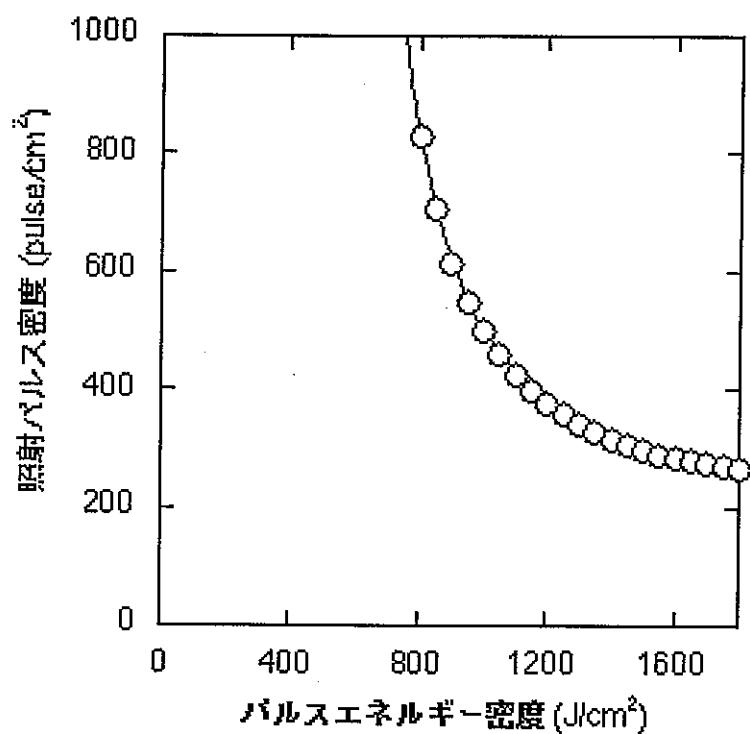


図 2.27 パルスエネルギー密度-パルス密度

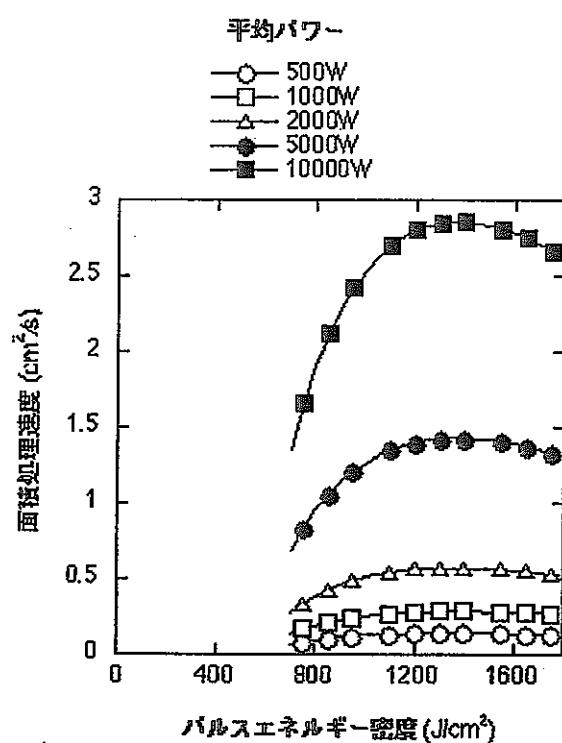


図 2.28 パルスエネルギー密度-面積処理速度

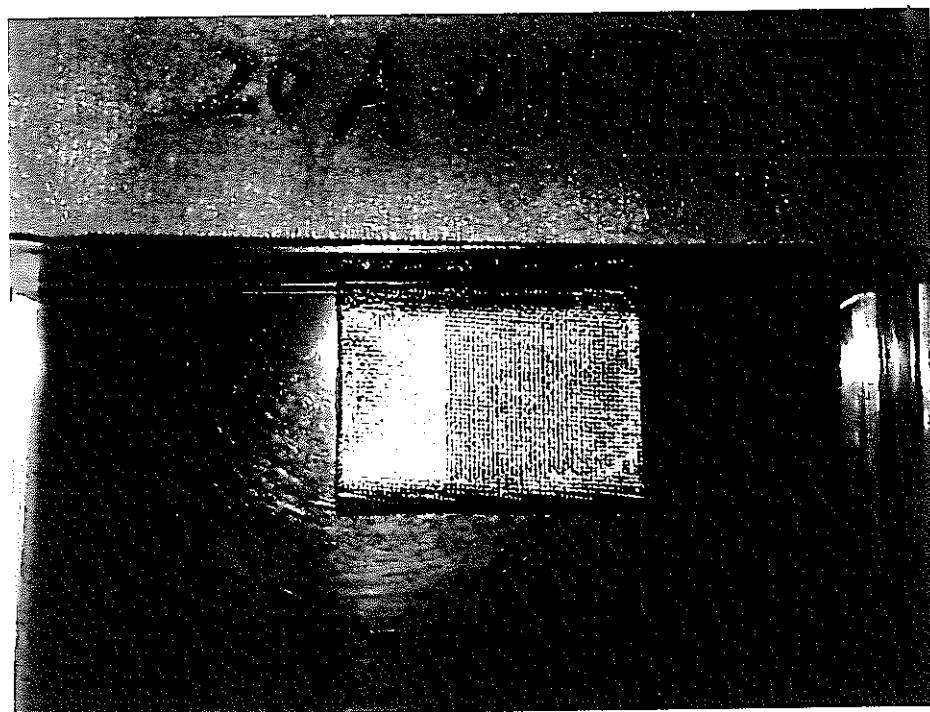


図 2.29 電解除染前試験片写真

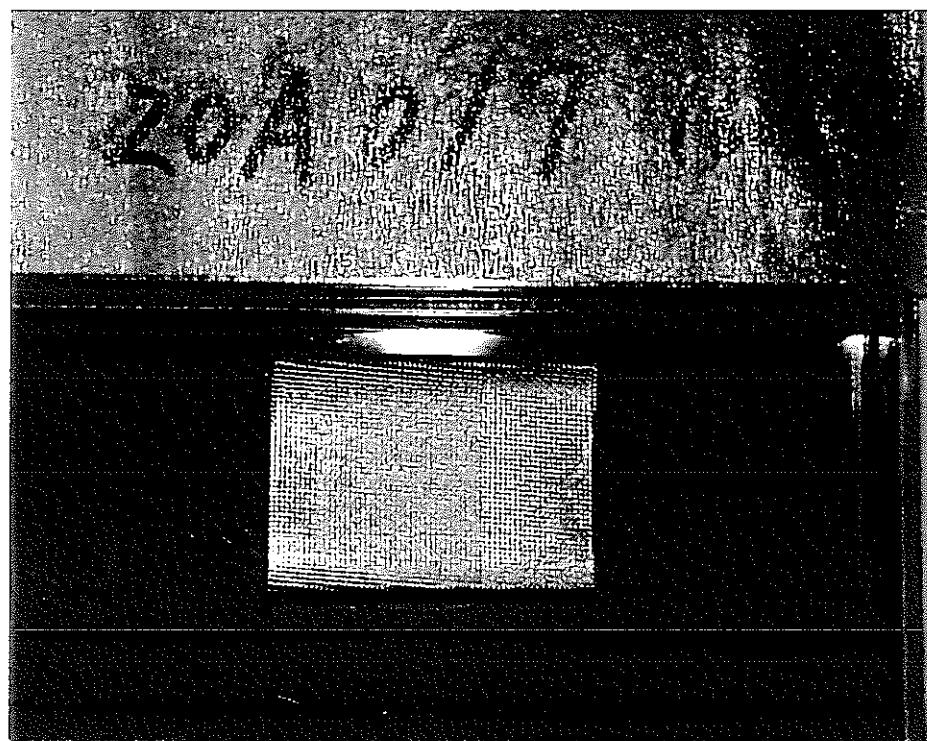


図 2.30 電解除染後試験片写真

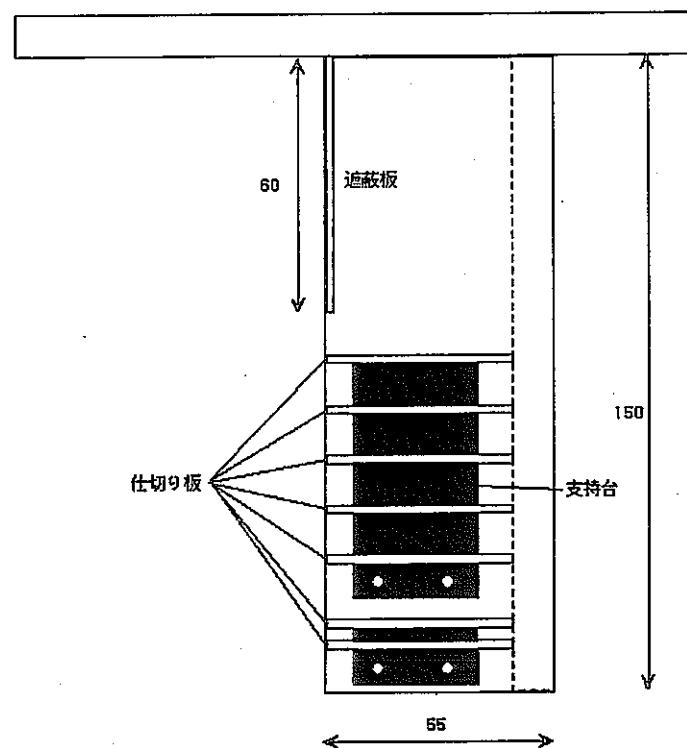


図 3.1 2次生成物飛散防止フード 概略図

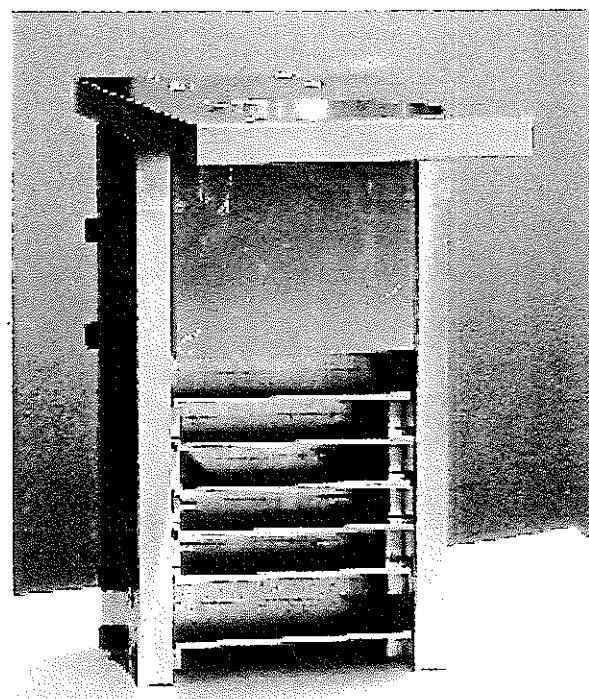


図 3.2 2次生成物飛散防止フード 外観

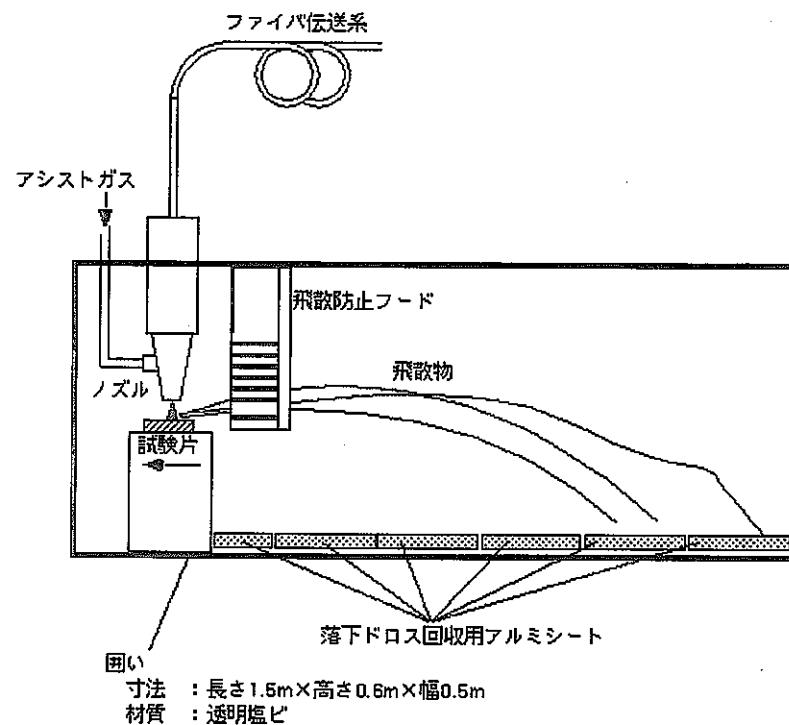


図 3.3 2次生成物飛散防止試験概略図

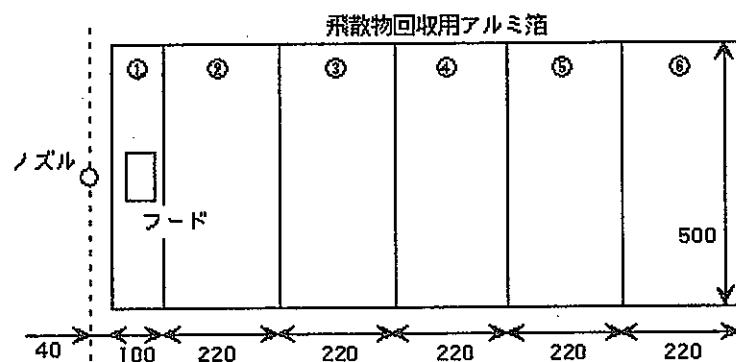


図 3.4 2次生成物飛散防止回収用シート配置図

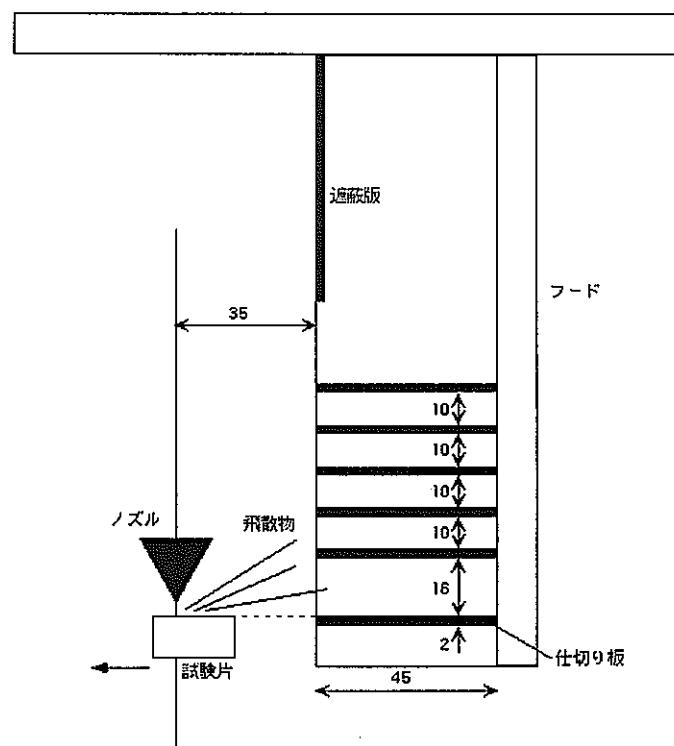


図 3.5 フードとノズルの関係(case 1)

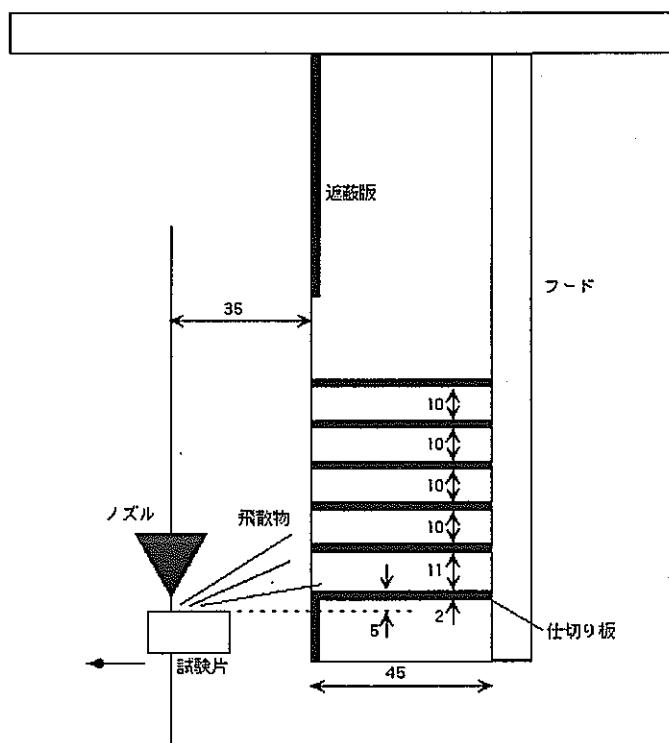


図 3.6 フードとノズルの関係(case 2)

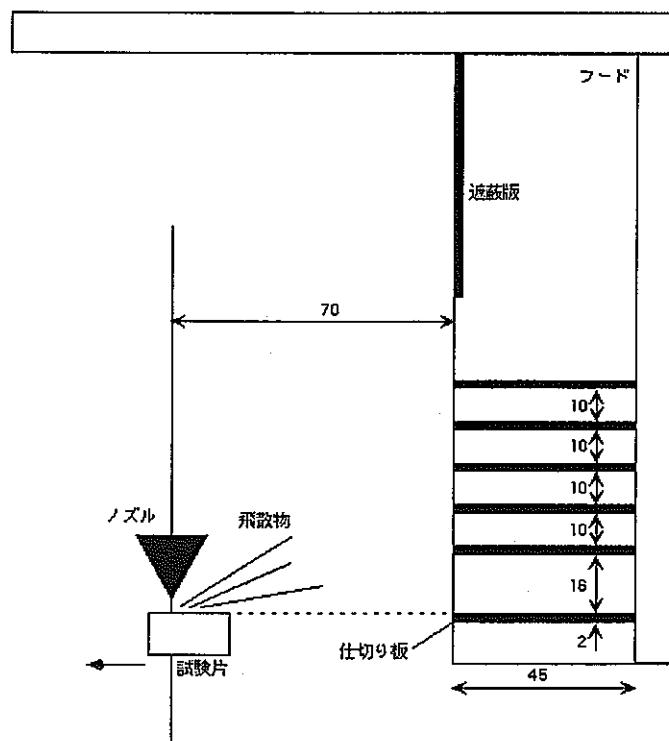


図 3.7 フードとノズルの関係(case 3)

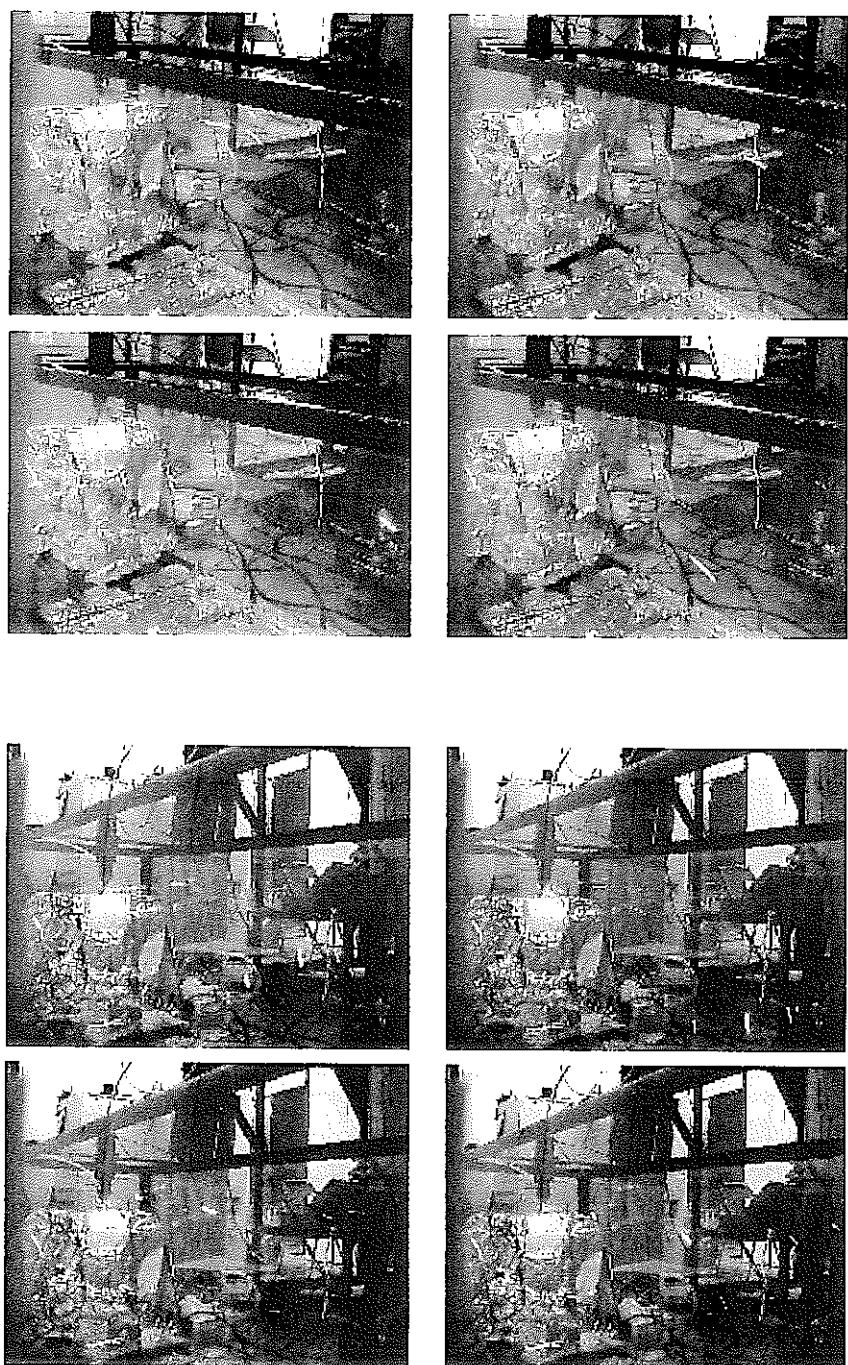


図 3.8 試験状況外観写真

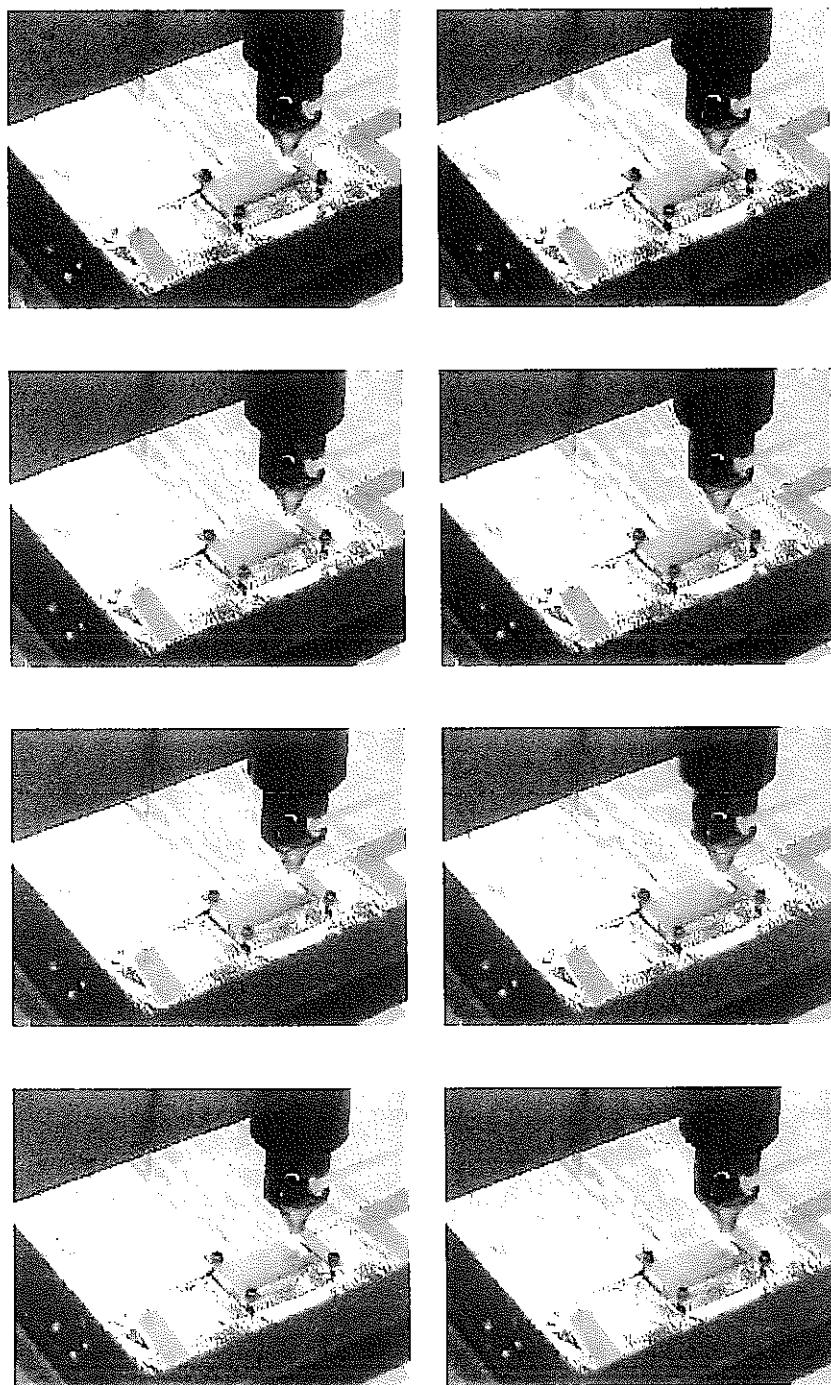


図 3.9 ノズル付近外観写真(フードなし)

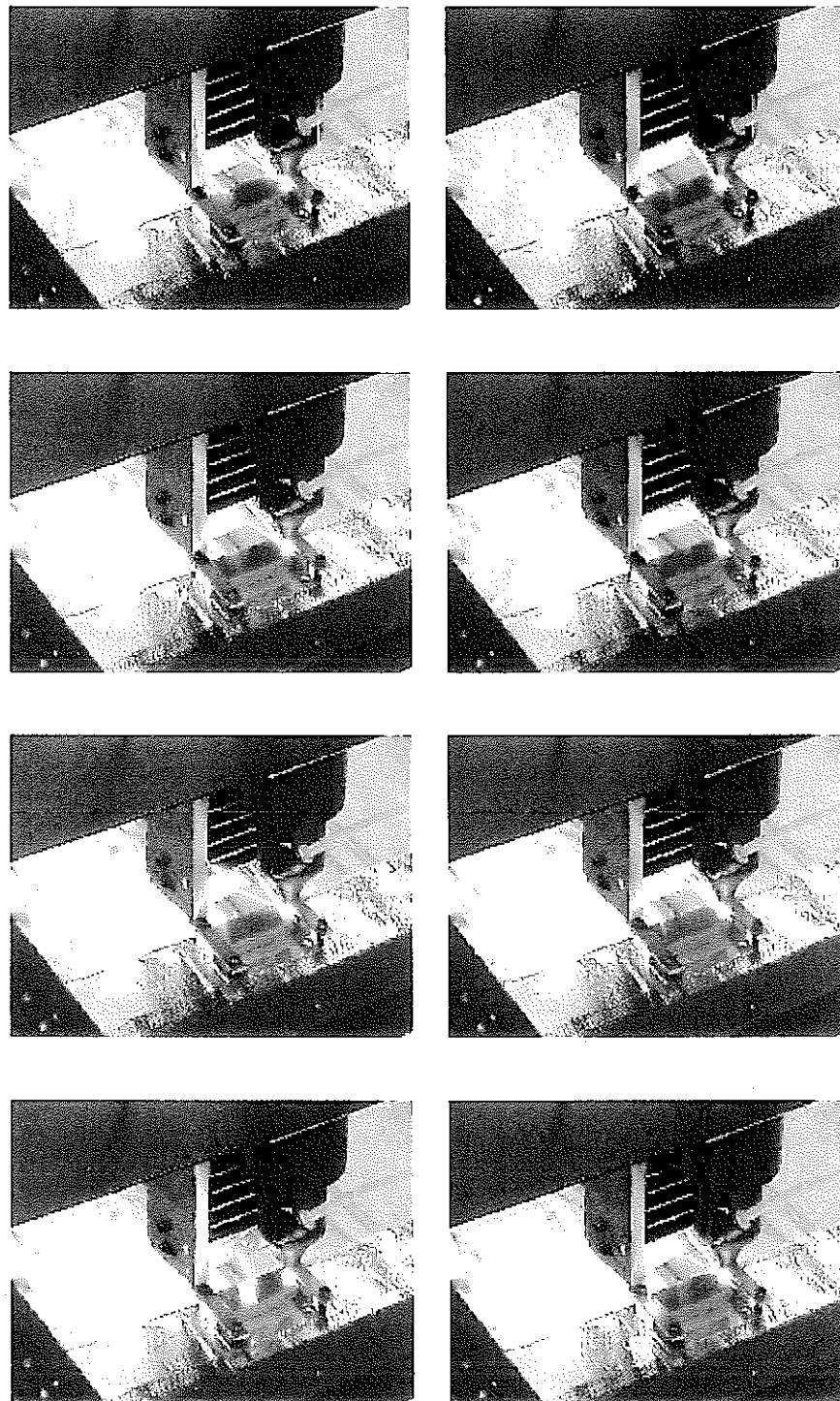


図 3.10 ノズル付近外観写真(ケース1)

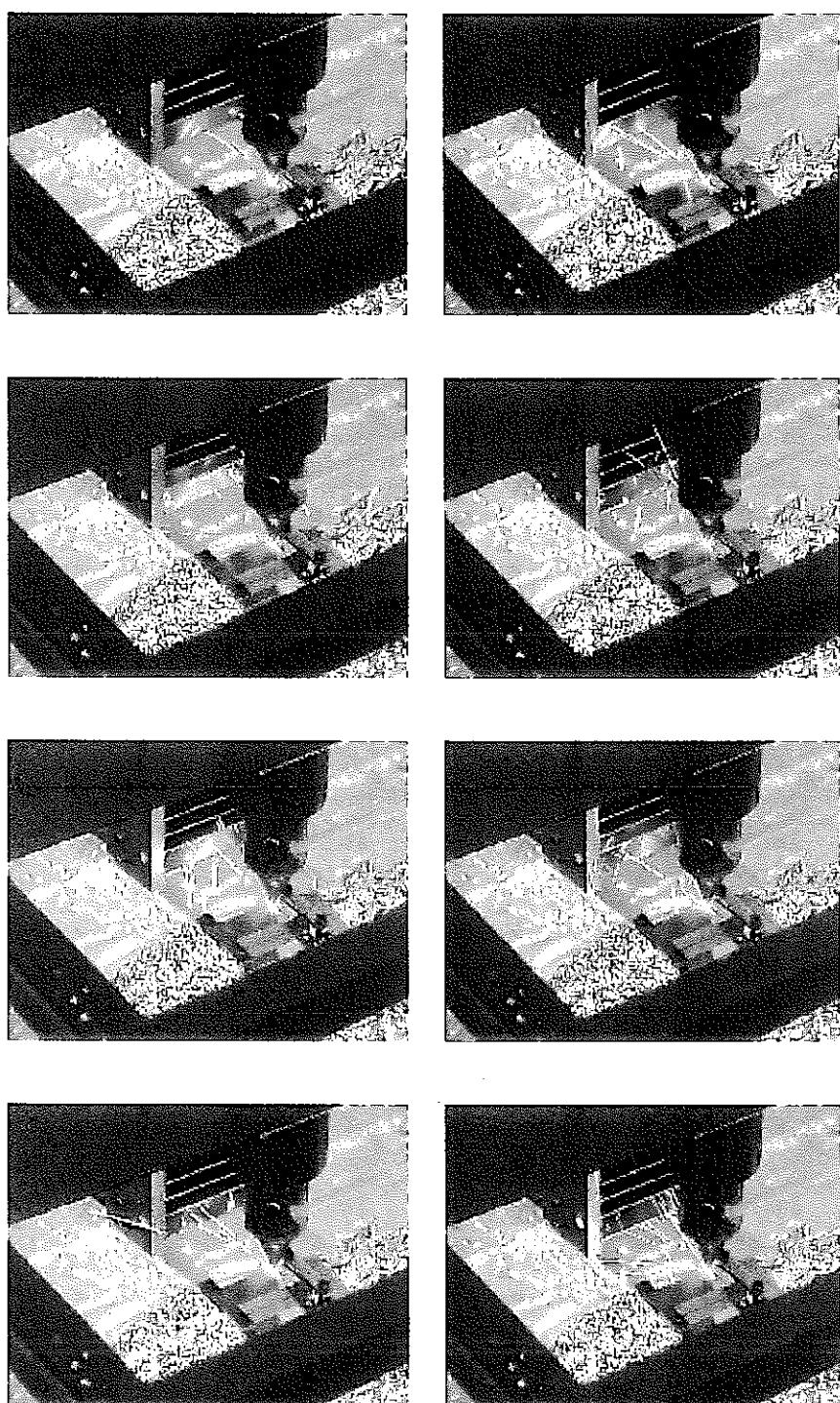


図 3.11 ノズル付近外観写真(ケース2)

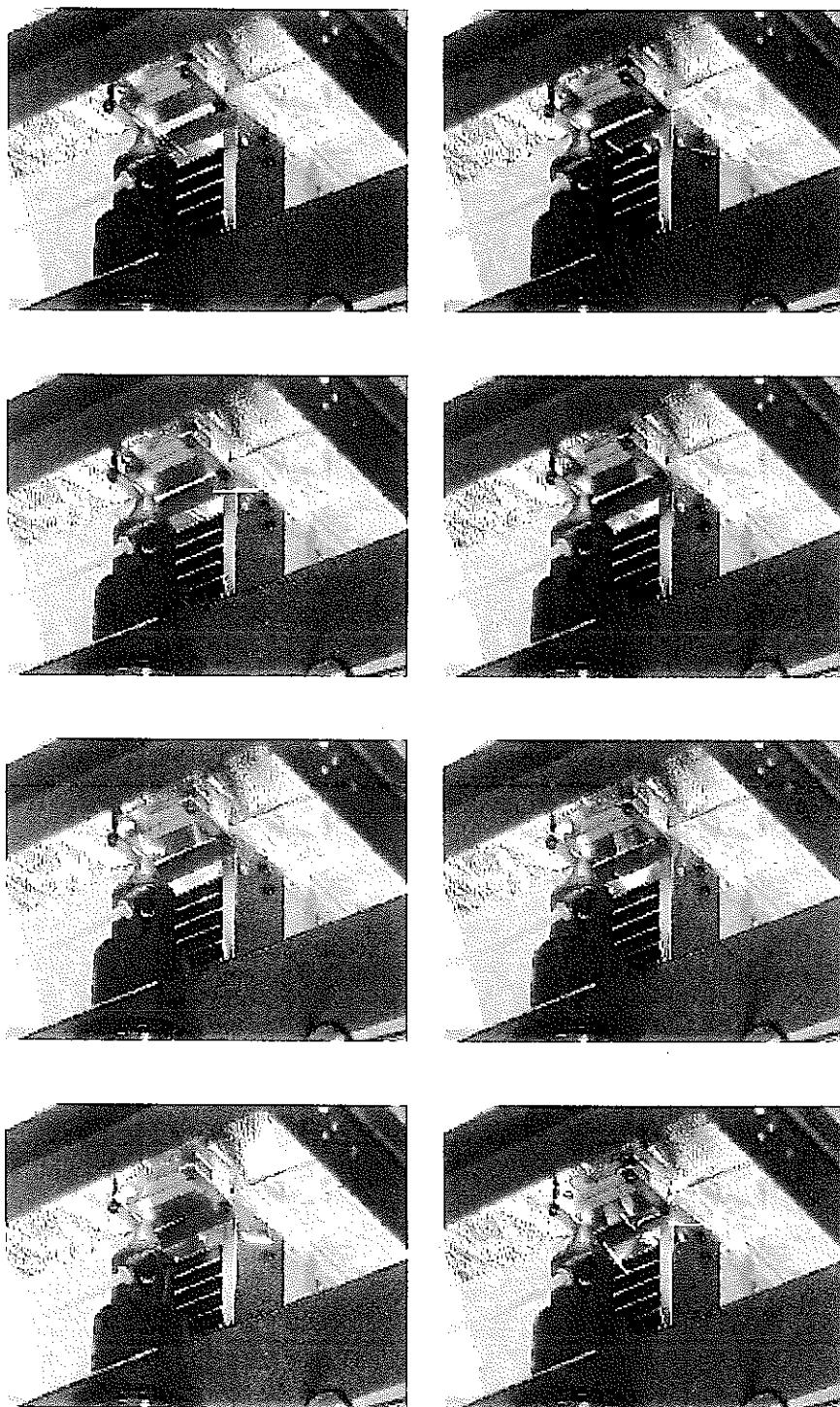


図 3.12 ノズル付近外観写真(ケース3)

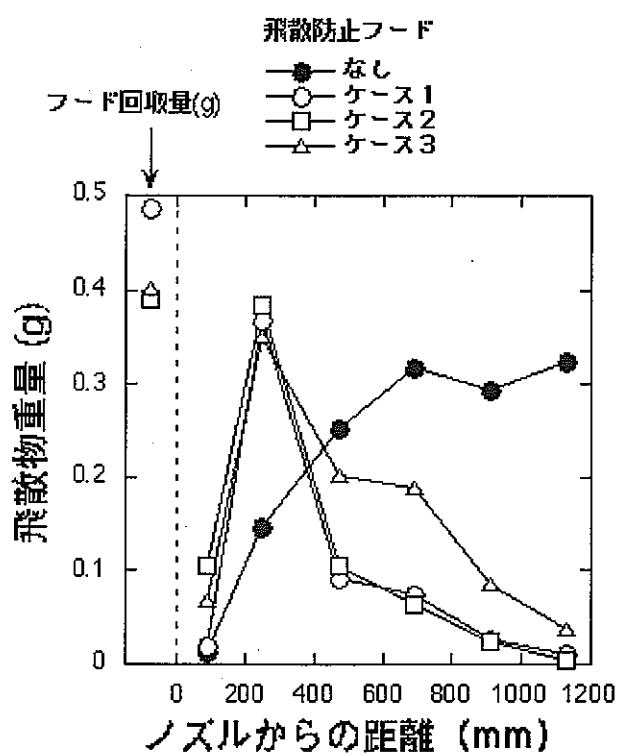


図 3.13 飛散物重量分布

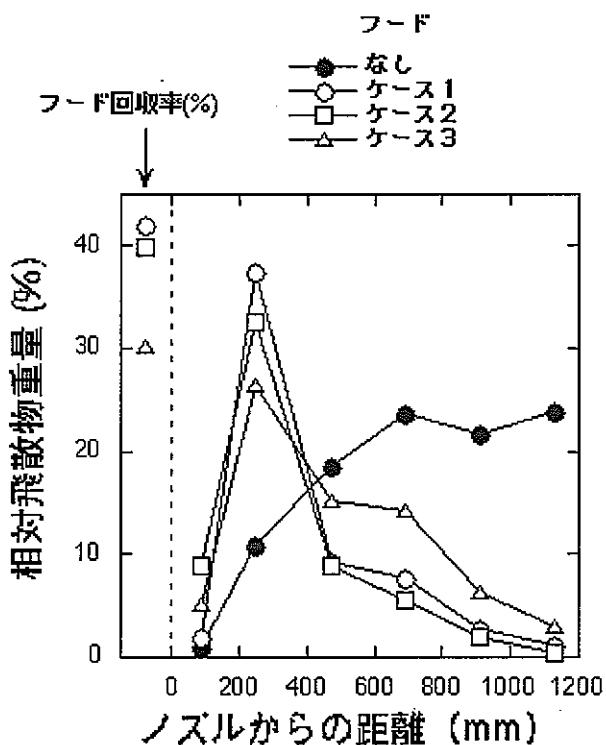


図 3.14 飛散物分布割合

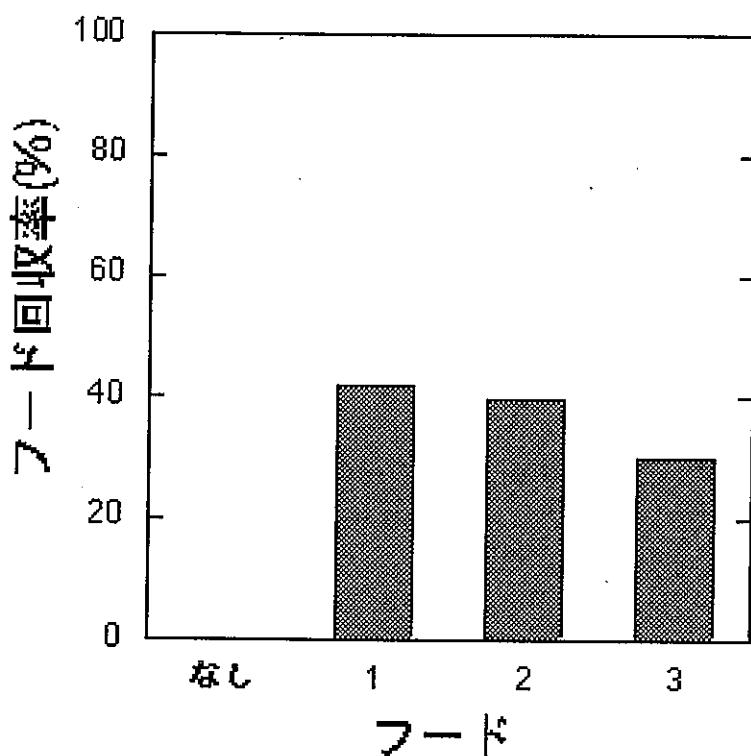


図 3.15 飛散物フード内回収率

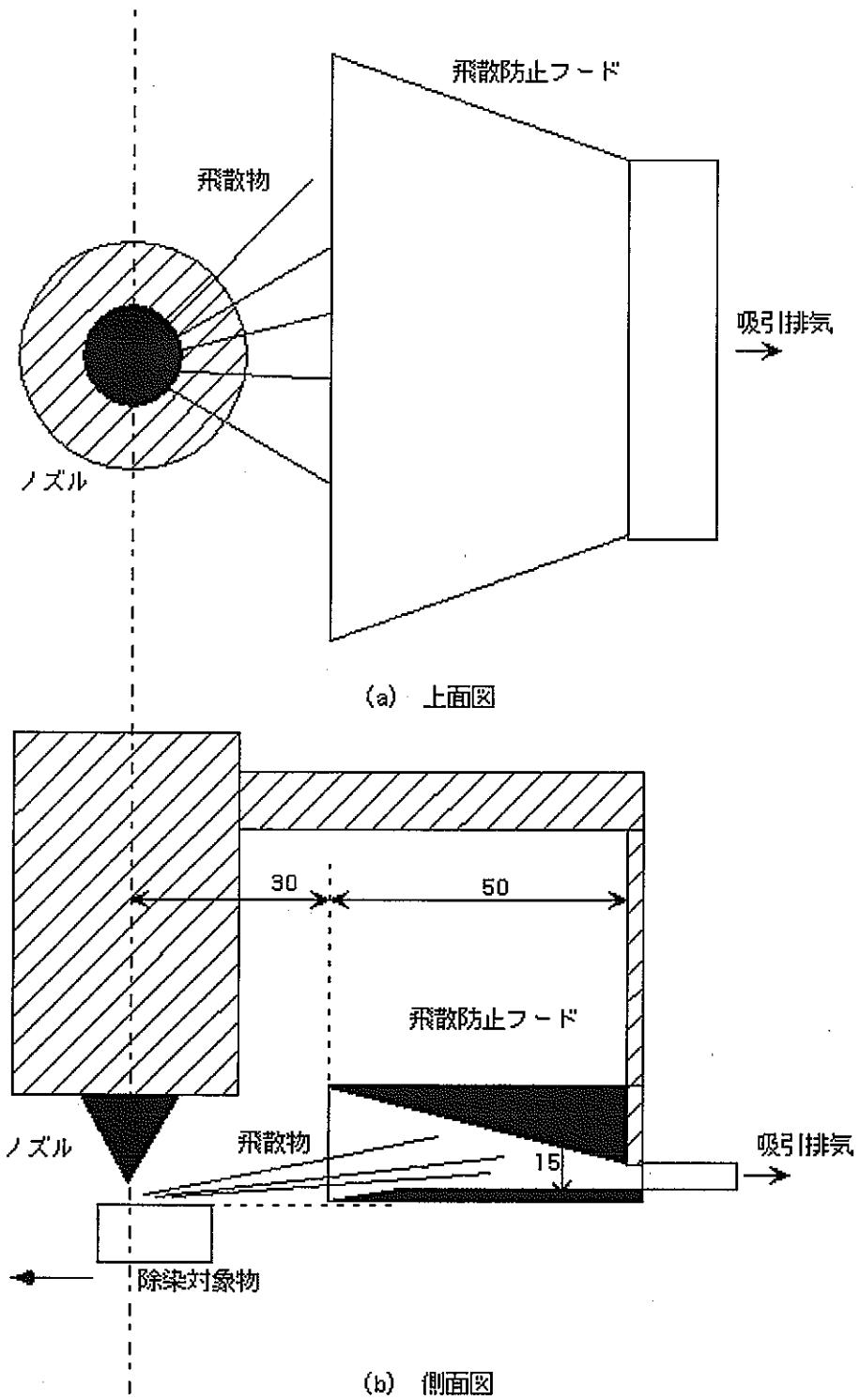


図 4.1 飛散防止フード

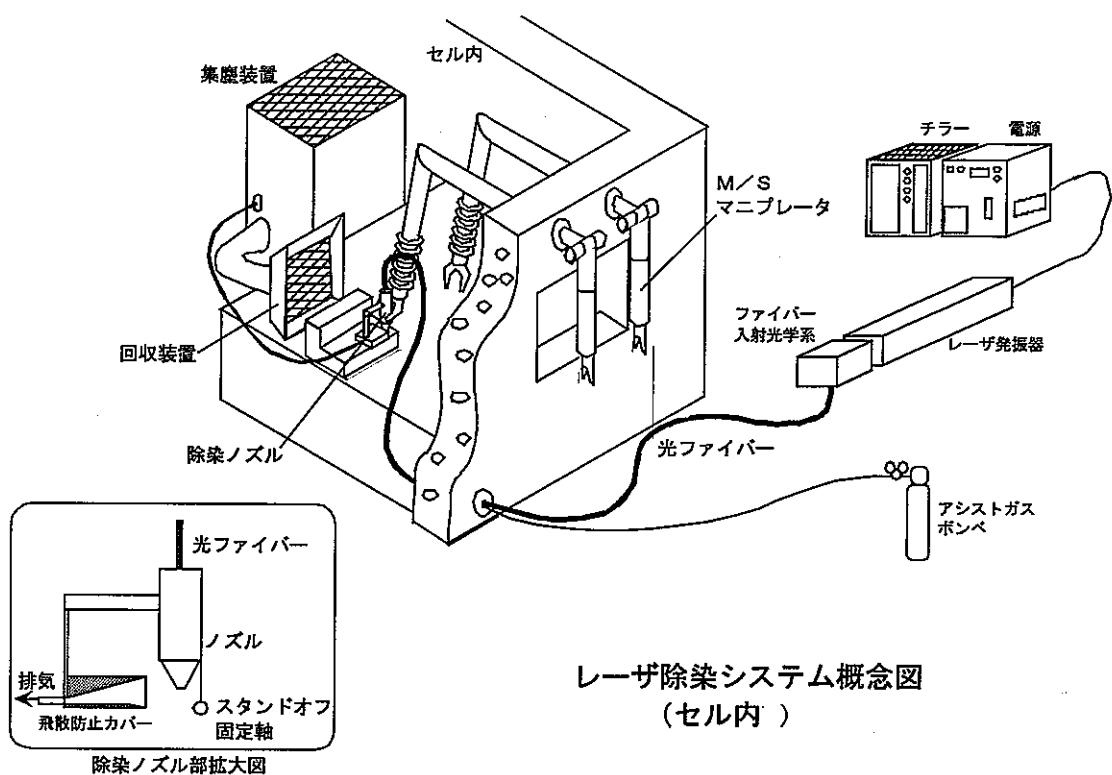
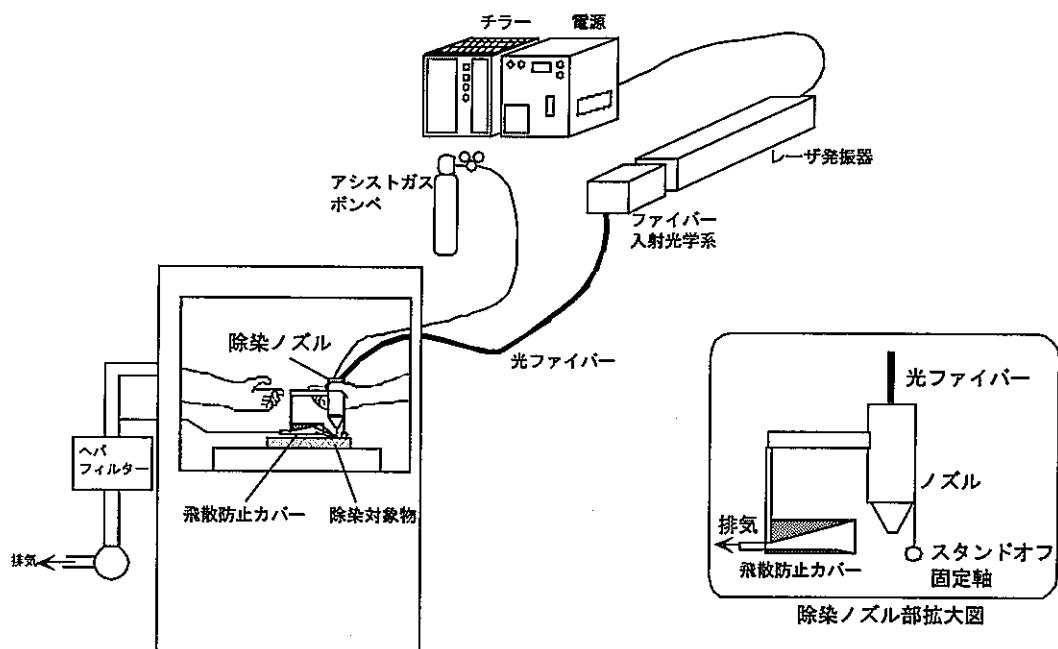


図 4.2 システムイメージ図(1)



レーザ除染システム概念図
(グローブボックス内)

図 4.3 システムイメージ図(2)