

JNC TJ6430 2001-001

レーザーによる切断可能性評価試験

核燃料サイクル開発機構 契約業務報告書

2001年3月

株式会社 東芝

レーザーによる切断可能性評価試験

木村 博信*、岡崎 幸基*
佐藤 一**、内藤 英樹**、阿部 素久**

要 旨

転換施設等の解体・廃棄処理に対して、現在、機械切断、プラズマ切断等が使用されているが、本試験では、レーザーによる切断方式の適用性を評価するため、転換施設を構成する代表的な設備部材の模擬試験片についてレーザー切断試験を実施した。

出力4kWのNd:YAGレーザー(波長:1064nm)を用いて切断試験を行った結果、SUS材及びSS400材については、特に、問題なく切断が出来た。また、硬質ゴムライニング(母材:SS400)については、加工中に悪臭・煤(すす)が発生したものの、SS400側からの切断は可能であることを確認した。しかし、FRP及びFRPライニング材(母材:SS400)については、レーザーによる材料内部の過熱現象で煤及びび炎が発生し、十分な切断が出来なかった。この原因は、加工中に発生した煤等による加工トーチの損傷、レーザー光遮蔽と考えられたため、煤発生を極力抑えることを目的として、アシストガスの流量増大、ガスの種類を変えた追加実験を行った。この試験では、将来、現地での切断等に使用する可能性の高い小型コンパクト、長寿命の半導体レーザー励起YAGレーザー(出力:1.5kW、弊社製)を用いて行った。

その結果、FRPについては、窒素ガスを使用することによって、煤の発生、発火を最小限にすることによって、切断が可能であることを確認した。また、FRPライニング材についても、窒素と酸素の混合ガスを使用することによって、切断が可能であることを確認した。

本試験により、転換施設の代表的な部材(模擬試験片)を、レーザーで切断可能なことを示した。実用化のためには、レーザー条件の最適化とともに、転換施設の解体・廃棄処理に適したレーザー切断システムを構築する必要がある。

本報告者は、株式会社東芝が核燃料サイクル開発機構との契約により実施した業務の成果である。

核燃料サイクル開発機構担当部課室及び担当者：人形峠環境技術センター

施設管理部 転換施設運転課長 天本 一平

*：株式会社東芝 電力・産業システム技術開発センター

**：株式会社東芝 原子力開発設計部

目 次

1. 目的及び概要
2. 試験内容
 2. 1 模擬試験片
 2. 2 試験装置及び方法
 2. 3 試験結果
 2. 4 考察
3. レーザ一切断の適用可能性検討
 3. 1 適用可能性検討
 3. 2 今後の課題
4. まとめ
5. 参考文献
6. 添付資料

表 目 次

- 表 2. 1. 1 レーザー切断試験片
- 表 2. 2. 1 レーザー切断試験における共通条件
- 表 2. 3. 1 レーザー切断試験結果一覧
- 表 3. 2. 1 追加実験によるFRP関係切断試験結果一覧

目 次

- 図 2. 2. 2 切断試験装置
- 図 2. 3. 1 切断試験後の試験片外観 (①)
- 図 2. 3. 2 切断試験後の試験片外観 (②のゴム側)
- 図 2. 3. 3 切断試験後の試験片外観 (③)
- 図 2. 3. 4 切断試験後の試験片外観 (③)
- 図 2. 3. 5 切断試験後の試験片外観 (④)
- 図 2. 3. 4 切断試験後の試験片外観 (④)
- 図 3. 1. 1 小型半導体レーザー励起 YAG レーザーの特徴
- 図 3. 1. 2 小型半導体レーザー励起 YAG レーザー外観写真
- 図 3. 1. 3 小型半導体レーザー励起 YAG レーザーの加工ヘッド部写真
- 図 3. 2. 1 (a) FRP 厚板切断状況 (窒素ガス 60 L/min)
- 図 3. 2. 1 (b) FRP 厚板切断状況 (窒素ガス 60 L/min)
- 図 3. 2. 2 (a) FRP 厚板切断状況 (酸素ガス 60 L/min)
- 図 3. 2. 2 (b) FRP 厚板切断状況 (酸素ガス 60 L/min)
- 図 3. 2. 3 (a) FRP と SS400 の複合材切断状況
(窒素 : 酸素 = 50 : 50、80 L/min)
- 図 3. 2. 3 (b) FRP と SS400 の複合材切断状況
(窒素 : 酸素 = 50 : 50、80 L/min)
- 図 3. 3. 1 転換施設解体用レーザー切断システム概念

添付資料 目次

- 添付資料—1 レーザー切断用試験片の概略形状
- 添付資料—2 LD励起YAGレーザ装置 LAL-180A/215A
- 添付資料—3 CO₂ and Excimer Laser Cutting for Fiber
Reinforced Plastics

1. 目的及び概要

転換施設処理課殿では、転換施設の解体・廃棄処置作業を実施中であり、現在、機械的切断、プラズマ切断等を用いて解体が行われている。しかしながら、解体部材によっては切断に多大の時間を要し、また、騒音の発生等により作業環境が好ましくない。従って、より効率的な方式が望まれている。

そこで、上記以外の切断方式としてレーザーによる切断方式について、転換施設を構成する設備部材の模擬試験片に対してレーザー切断試験を行い、本方式の適用可能性を検討する。

2. 試験内容

サイクル機構殿より支給頂いた転換施設槽類の模擬試験片に対して、Nd:YAGレーザー切断試験を行い切断可否の評価を行った。また、切断中の状況、切断結果を踏まえて問題点等を抽出し、Nd:YAGレーザー切断の適用可能性を検討した。

2.1 模擬試験片

切断対象部材として、SS材+硬質ゴム、SUS材、FRP材、FRPコーティング部材等をサイクル機構殿より支給頂いた。

支給頂いた試験片を、表2.1.1に示すと共に、概略形状を添付資料-1に示す。

表2.1.1 レーザー切断用試験片

試験片番号	形状	材質	備考
①	・200mm□、厚さ6mm ・4mm厚さの硬質ゴムライニング	SS400 硬質ゴム	
①	・200mm□、厚さ6mmにL型鋼溶接 ・4mm厚さの硬質ゴムライニング	SS400 硬質ゴム	
②	・200mm□、厚さ9mm ・4mm厚さの硬質ゴムライニング	SS400 硬質ゴム	
③	・180mm□、厚さ8mm ・200mm□、厚さ8mmの溶接構造	SUS304 SUS316	
③	・200mm□、厚さ8mmにL型鋼溶接	SUS316	
④	・200mm×300mm、厚さ8~28mm	FRP	
④	・200mm□、厚さ25mmにコ型鋼溶接 ・FRPライニング(1~2mm厚さ)	SS400 FRP	

2. 2 試験装置及び方法

レーザー切断試験に用いた試験体系を図 2.2.2 に示し、装置写真を図 2.2.3 に示す。切断用レーザーは、Nd : YAG レーザー（出力 4 kW）を用い、管理区域内での切断を考慮して、自動ステージ（平行移動：3 軸、回転：2 軸）に固定した加工トーチに光ファイバーで導光した。試験片は別のステージに固定し、加工トーチを所定速度で走査して試験片を切断する体系とした。更に、切断姿勢として、水平切断、下向き切断できる構成とした。また、加工トーチノズル部には切断時に発生する熔融物、煤（すす）等を除去することを目的にアシストガス（空気）を吹き付けた。

切断試験における共通の条件を表 2.2.1 に示す。

2. 3 レーザー切断試験結果

(1) SUS304, SUS316（試験片番号：③, ③'）

平板重なり部からレーザー照射し、カーフ幅約 1mm で特に問題なく切断できた。ドロスは高さ 2mm 程度と少量であった。

(2) SS400 と硬質ゴムライニングの複合材（試験片番号：①', ②）

SS400 側からレーザーを照射すれば、高速・狭カーフで切断可能。ただし、硬質ゴムから悪臭・煤（すす）を伴う大量の有害性ガスが発生し、本試験で用いた小型の局所排気装置（処理能力：16リットル/min）では十分に排除できなかった。実際の加工においてはガス発生量に見合った局所排気装置とフィルタによる吸引・除去が必要と考えられる。

硬質ゴム側からレーザーを照射した場合は、ゴムから発生した煤（すす）がレーザー光路を遮ったため切断できなかった。

(3) FRP（試験片番号：④）

材料内部に過熱現象が見られ、炎が発生した（切断断面の形状は樽状となった）。また、加工中ノズルが破損した。原因として、発生プラズマによるレーザー光の反射、あるいは発生プラズマの直接的な影響等が考えられる。従って、FRP の厚材に対する YAG レーザー切断については、過熱現象を抑える方策が必要と考えられる。また、硬質ゴムの場合と同様、加工中に悪臭・煤（すす）を伴う大量の有害性ガスが発生し、ガス発生量に見合った局所排気装置とフィルタによる吸引・除去が必要と考えられる。

(4) FRPとSS400の複合材（試験片番号：④'）

SS400 単体では特に問題なく切断可能と推定できるが、複合材では0.5m/minの切断速度では切断不可であり、0.1m/minの切断速度で何とか切断可能であった。なお、加工中にノズルが破損した。これも（3）項と同様に、レーザー照射によるFRPの過熱現象で発生した炎、煤が原因と推定できる。

切断結果の一覧を表2.3.1に示し、切断試験後の試験片の外観写真を図2.3.1～2.3.6に示す。

2.4 考察

(1) SUS材、SS400材

今回切断した試験片の範囲では、特に問題なく切断可能と考える。

(2) 硬化ゴムライニング、FRP材

ゴム、FRP材（特に厚板）の切断については、加工中に悪臭・煤（すす）を伴う大量の有害性ガスが発生し、加工トーチの損傷、レーザー光遮蔽等の影響で十分な切断ができなかった。

FRPについての予察試験結果から、数ミリ程度の板では特に問題なく切断できていることから、照射条件及び発生ガス、煤（すす）の除去方法を検討することにより十分対応可能と考える。

3. レーザー切断の適用可能性検討

3. 1 FRP関係切断追加実験

出力4 kWのYAGレーザーによる切断試験では、FRP材関係の切断でFRP材（特に厚板）の切断については、加工中に悪臭・煤（すす）を伴う大量の有害性ガスが発生し、加工トーチの損傷、レーザー光遮蔽等の影響で十分な切断ができなかった。特に、加工トーチの破損に関しては、目視検査の結果、煤（すす）がノズル部につまって、その部分にレーザー光が吸収されトーチ部が溶けてしまったことがわかった。そこで、課題となっていた発生ガス、煤（すす）の発生を押さえるため、ガスの流量を大幅に増加させて再実験を実施した。また、煤（すす）の発生を少なくする目的で、ガスの種類を窒素100%、酸素100%、窒素：酸素=50%：50%で実験した。

切断実験に用いたレーザー装置は、小型コンパクトな東芝製の社内品である、（添付資料一2を参照）半導体レーザー励起固体YAGレーザーを用いた。このレーザーの外観および性能を、図3. 1. 1～図3. 1. 3に示す。今回は、このレーザーを300 μ m径の光ファイバーに入射させ、レーザーパワーを1. 5 kWとしてFRP関連サンプルの切断を試みた。また、厚板の切断であることを考慮して、レーザービームの集光は2倍拡大（従来は、等倍でスポット径600 μ m、ビーム広がりNA=0. 1）とし、スポット径600 μ m、ビーム広がりNA=0. 1で実験した。ここで、ビーム広がりに関しては、NA=0. 1であると、1 cmビームが進行すると、ビーム径は、0. 1 cmに広がることを示す。

3. 2 追加実験結果

(1) FRP（試験片番号：④）

実験は、発火を押さえ煤（すす）の発生を最小限にするため、窒素ガスを60 L/minで流し切断実験を試みた。その結果、0. 06 m/minの切断速度では表面、裏面ともカーフ幅1 mm程度で十分切断することができた。図3. 2. 1参照

また、同様の条件でガスを酸素100%としてところ、切断は可能であったが、FRPが燃えだし煤（すす）が発生した。図3. 2. 2参照

(2) FRPとSS400の複合材（試験片番号：④'）

実験は、鉄の切断速度をかせぐため、窒素：酸素=50%：50%とし、ガス流量を80 L/minとし実験した。その結果、0. 1 m/minの速度で裏面、表面ともカーフ幅1 mmできれいに切断することができた。酸素が50%添加されていたので、FRPの発火が懸念されたが、ガス流量が80 L/minと大きかったため、炎が吹き消されているような感触で発火現象は見られなかった。図3. 2. 3参照

以上の切断結果を纏めたものを表3. 2. 1に示す。

3. 3 適用可能性検討

今回行った一連の追加実験では、レーザー出力が1. 5 kWと小さかったものの、従来苦戦していた、FRP並びにFRP複合材の切断が可能となったことで、展開施設の解体・廃棄処理作業にレーザー切断が十分に使えることが分かった。また、煤（すす）や、煙に関しても、ガスの種類や流量を調整することにより減少できる可能性が見えてきた。

これまでの実験結果をもとに、レーザー切断法を転換施設の解体・廃棄処置に適用した場合の概念について以下に検討する。

今回の実験結果から、YAGレーザー出力は、～4 kW程度で良いと思われる。（切断時間とのかねあい、レーザー出力を低減することは可能）このレーザー装置ヘッド部は小型（0. 05 m²）ではあるが、ほこり等を嫌うことと、電気・水等のユーティリティが必要なため、切断現場とは離れた位置に設置し、レーザー光自体は光ファイバーで遠距離伝送することを考える。すなわち、レーザー装置本体は非管理区域に設置し、管理区域内の転換施設設備の切断場所へは光ファイバーでレーザー伝送するものとする。4 kW程度のYAGレーザー光（連続波）は、口径600 μm程度の光ファイバーに入射させることは十分実績があり、レーザー装置から30 m程度離れた位置への伝送は可能で、伝送効率は70～80%を確保できる。

一方、切断装置自体は、光ファイバーに接続された加工ヘッドを駆動する遠隔操作のアームを主体としたものとなる。切断装置は、煙、煤（すす）や放射性の汚染が飛散しないように減圧された管理区域内に封じ込める。また、遠隔操作がしやすいように監視カメラ等で監視する。システムの概念図を図3. 3. 1に示す。

このようなシステムで、転換施設の廃止処置の作業効率は向上し、さらに安全性に関しても、環境負荷に関しても十分な配慮がなされる。ただし、定量的な効率向上性やコストインパクトに関しては、今回の実験が切断可能性のみのデータであるので十分な算出が出来ていない。今後、3. 2に述べるような設計データをとることにより、より定量的な評価と精度の高いコストダウン比率等が算出できるものと思われる。

3. 2 今後の課題

本追加実験で、当初試験でレーザー切断が困難と考えられたFRP並びにFRP複合材の切断が可能であることが分かった。今後、①ガス流量、ガスの種類、レーザーパワー、等のパラメータを最適化し、②転換施設の解体・廃棄作業処理に合わせたレーザー切断システムの概念設計を実施し、さらに③煤（すす）等の煙を吸引する処理装置を検討する、必要がある。

4. まとめ

転換施設等の解体・廃棄処理に対して、現在、機械切断、プラズマ切断等が使用されているが、本試験では、レーザーによる切断方式の適用性を評価するため、転換施設を構成する代表的な設備部材の模擬試験片についてレーザー切断試験を実施した。

出力4kWのNd:YAGレーザー（波長：1064nm）を用いて切断試験を行った結果、SUS材及びSS400材については、特に、問題なく切断が出来た。また、硬質ゴムライニング材（母材：SS400）については、加工中に悪臭・煤（すす）が発生したものの、SS400側からの切断は可能であることを確認した。しかし、FRP及びFRPコーティング材（母材：SS400）については、レーザーによる材料内部の過熱現象で煤及び炎が発生し、十分な切断が出来なかった。この原因は、加工中に発生した煤等による加工トーチの損傷、レーザー光遮蔽と考えられたため、煤発生を極力抑えることを目的として、アシストガスの流量増大、ガスの種類を変えた追加実験を行った。この試験では、将来、現地での切断等に使用する可能性の高い小型コンパクト、長寿命の半導体レーザー励起YAGレーザー（出力：1.5kW、弊社製）を用いて行った。

その結果、FRPについては、窒素ガスを使用することによって、煤の発生、発火を最小限にすることによって、切断が可能であることを確認した。また、FRPコーティング材についても、窒素と酸素の混合ガスを使用することによって、切断が可能であることを確認した。

以上のとおり、1.5～4kWのYAGレーザーを用い、転換施設にて切断が想定されるSS材+硬質ゴム、SUS材、FRP材、FRPコーティング部材等のサンプルのレーザー切断を試み、どの部材も切断できることを示した。

特に、FRP材については、添付資料-3に示したように、特殊でかつ複雑な方式での切断が検討されているが、今回の試験でガス流量、種類等の条件を適正に選択すれば、レーザー切断が可能であることを示すことが出来た。

これらの試験結果から判断し、転換施設の解体・廃棄物処理作業にレーザーが十分適用可能である。

ただし、今後の試験において、ガス流量、ガスの種類、レーザーパワー、等のパラメータを最適化し、転換施設に適したレーザー切断システム構築する必要がある。また、煤（すす）や煙等の排出を防止する吸引装置等も今後の検討課題となる。

表 2. 2. 1 切断試験における共通条件

レーザー種類	Nd:YAGレーザー(波長：1064nm)
出力	CW:4kW(@加工点)
光ファイバコア径	φ0.6mm
集光スポット径	φ0.6mm
集光NA	0.1
アシストガス	Air, 1MPa
切断姿勢	下向き, 又は, 水平
走査方法	トーチを5軸ステージに搭載し, トーチ側を走査して切断

表2. 3. 1 切断結果一覧 (着色部は代表的な結果)

加工番号(*)	試験片番号	切断位置/レーザー照射方向等	姿勢	レーザー出力	切断速度	切断可否	備考
1	③	・ 平板重なり部 ・ SUS316(200mm × 200mm) 側からレーザーを照射	下向き	4kW	0.4m/min	可	
2	同上	同上	同上	同上	0.5m/min	不可	
3	同上	同上 (切離し切断)	同上	同上	0.4m/min	可	
4	②	・ SS400 側からレーザーを照射	同上	同上	0.8m/min	可	・ ゴムから悪臭・煤 (すす) を伴う大量のガスが発生
5	同上	同上	同上	同上	0.9m/min	可	同上
6	同上	同上	同上	同上	1.0m/min	不可	同上
7	同上	同上 (切離し切断)	同上	同上	0.9m/min	可	同上
8	同上	・ ゴム側からレーザーを照射	同上	同上	0.7m/min	不可	同上
9	①	・ L材と板材の重なり部 ・ SS400 側からレーザーを照射	同上	同上	0.5m/min	可	同上
10	同上	同上 (切離し切断)	同上	同上	0.5m/min	可	同上
11	④	・ 平板重なり部 ・ 300mm × 200mm 板材側からレーザーを照射	同上	同上	0.1m/min	不可	・ FRP 内部に過熱現象発生 (炎が発生) ・ 悪臭・煤 (すす) を伴う大量のガスが発生 ・ ノズル破損
12	③	・ L材の突出部 ・ L材の内側からレーザーを照射	水平 (20° 傾斜)	同上	1.7m/min	不可	
13	同上	同上	同上	同上	1.0m/min	可	
14	同上	同上	同上	同上	1.2m/min	不可	
15	同上	同上 (切離し切断)	同上	同上	1.0m/min	可	
16	④	・ コ字材の突出部 ・ コ字材の外側からレーザーを照射	水平	同上	0.5m/min	不可	・ 悪臭・煤 (すす) を伴う大量の有害ガスが発生 ・ ノズル破損
17	同上	同上	同上	同上	0.1m/min	可	同上

(*)切断順序にしたがって採番

表3. 2. 1 追加実験によるFRP関係切断結果一覧

加工番号(*)	試験片番号	切断位置/レーザー照射方向等	姿勢	レーザー出力	切断速度	ガス種類	ガス流量	切断可否	備考
1	④	<ul style="list-style-type: none"> 平板重なり部 300mm × 200mm 板材側からレーザーを照射 	水平	1.5kW	0.06m/min	窒素ガス	60L/min	可	<ul style="list-style-type: none"> 悪臭・煤(すす)を伴う少量のガスが発生
2	④	<ul style="list-style-type: none"> 平板重なり部 300mm × 200mm 板材側からレーザーを照射 	同上	同上	同上	酸素ガス	同上	可	<ul style="list-style-type: none"> FRP内部に過熱現象発生(炎が発生) 悪臭・煤(すす)を伴う大量のガスが発生
3	④	<ul style="list-style-type: none"> コ字材の突出部 コ字材の外側からレーザーを照射 	水平	同上	0.1 m/min	窒素・酸素混合ガス 酸素50% 窒素50%	80L/min	可	<ul style="list-style-type: none"> 悪臭・煤(すす)を伴う少量の有害ガスが発生

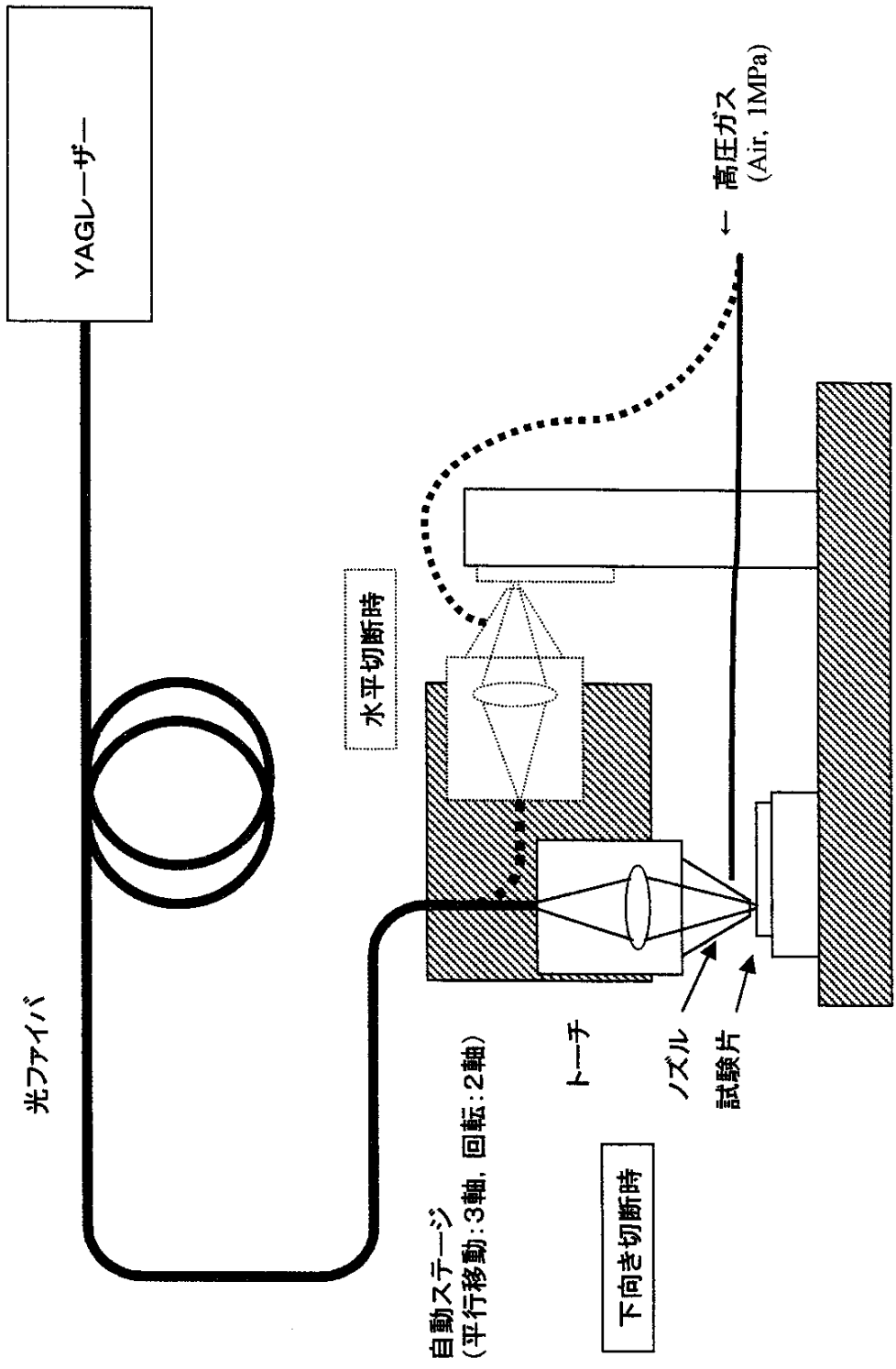


図2.2.2 試験体系図

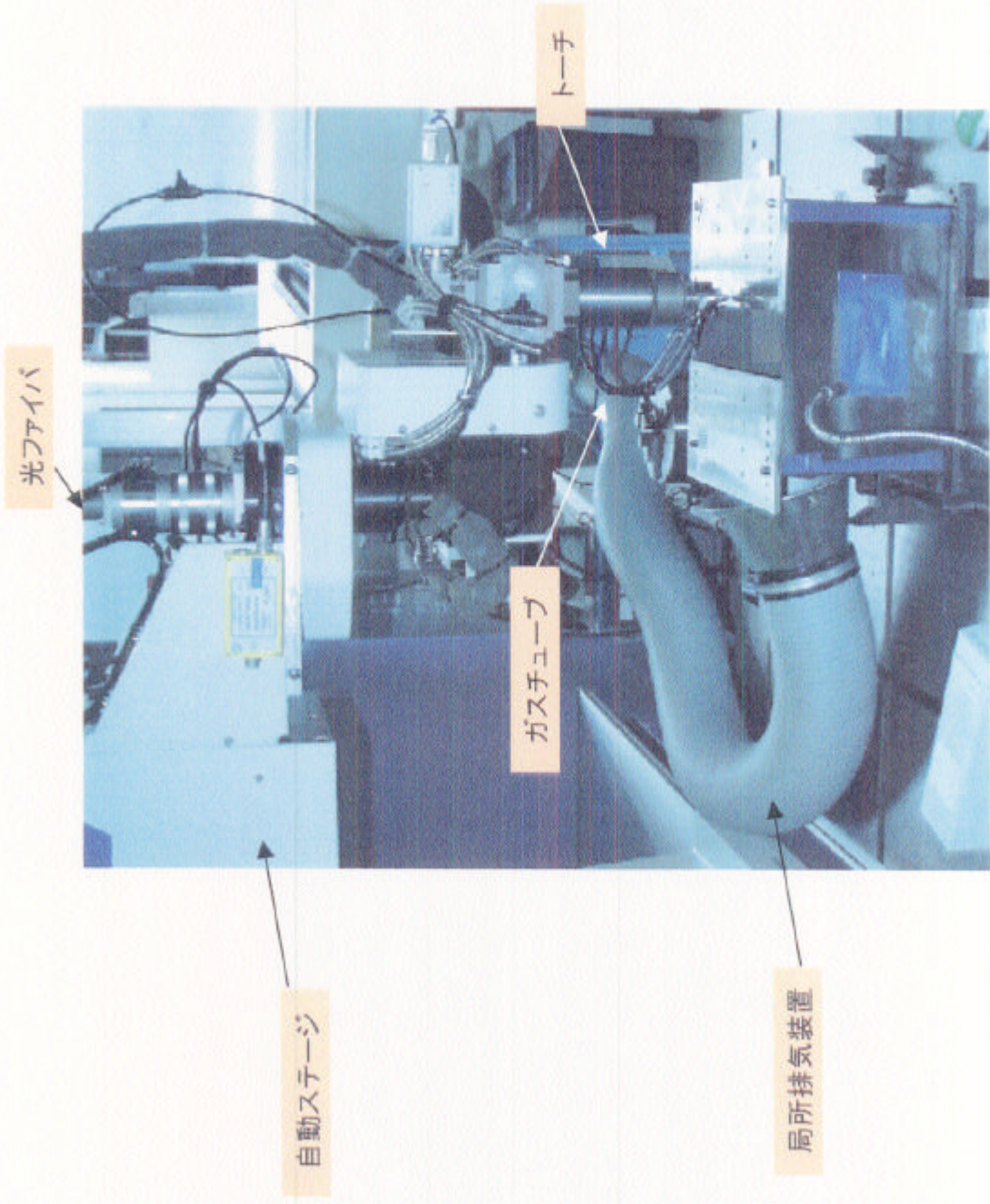


図2.2.3 切断試験装置

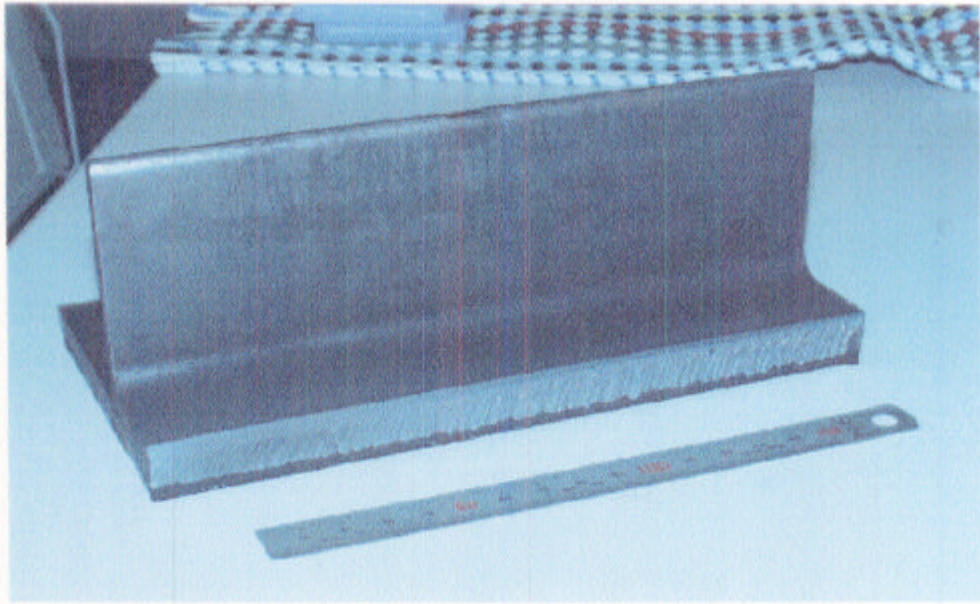


図2. 3. 1 切断試験後の試験片外観(①)

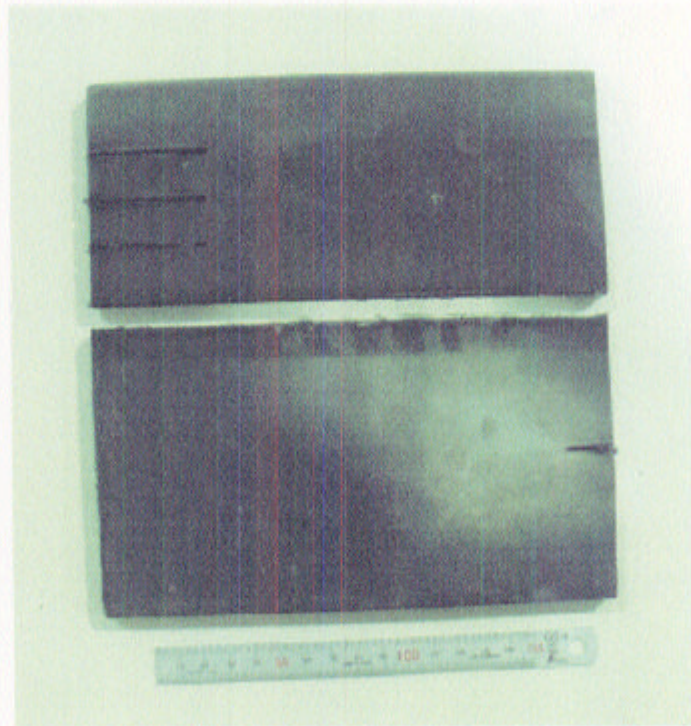


図2. 3. 2 切断試験後の試験片外観(②のゴム側)

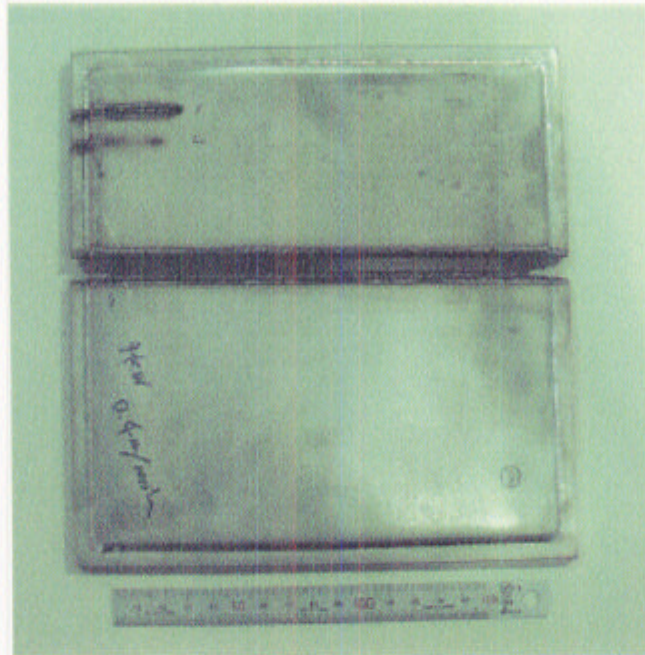


図2. 3. 3 切断試験後の試験片外観(③)

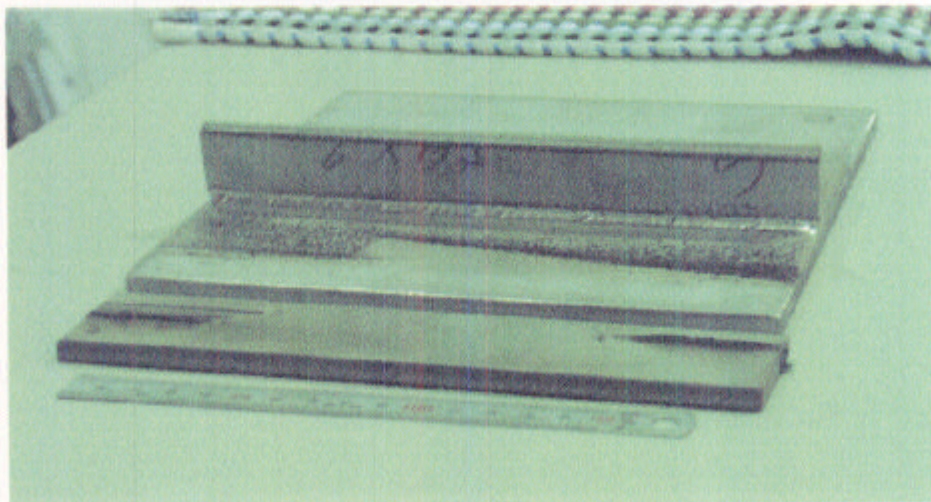


図2. 3. 4 切断試験後の試験片外観(③')

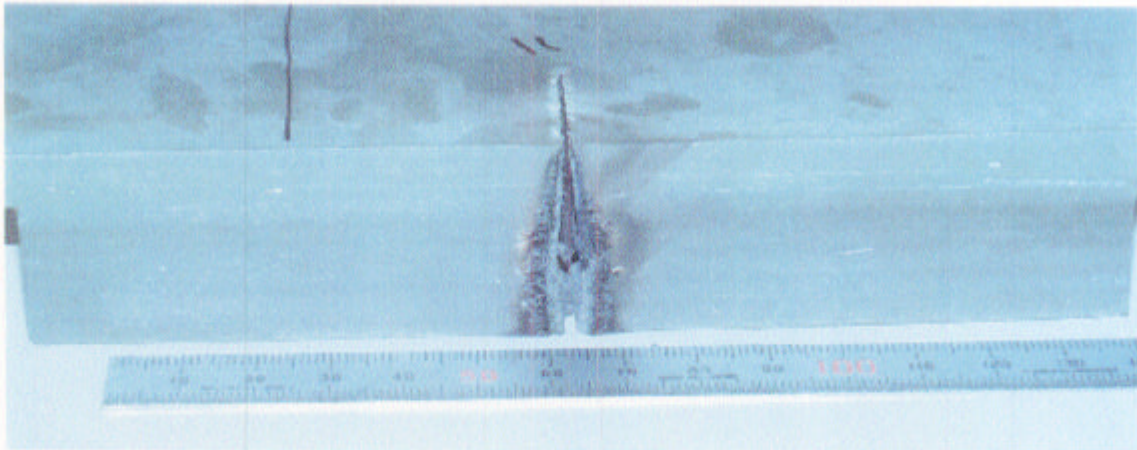


図2. 3. 5 切断試験後の試験片外観(④)



図2. 3. 6 切断試験後の試験片外観(④')

ランプ励起 と LD励起の比較

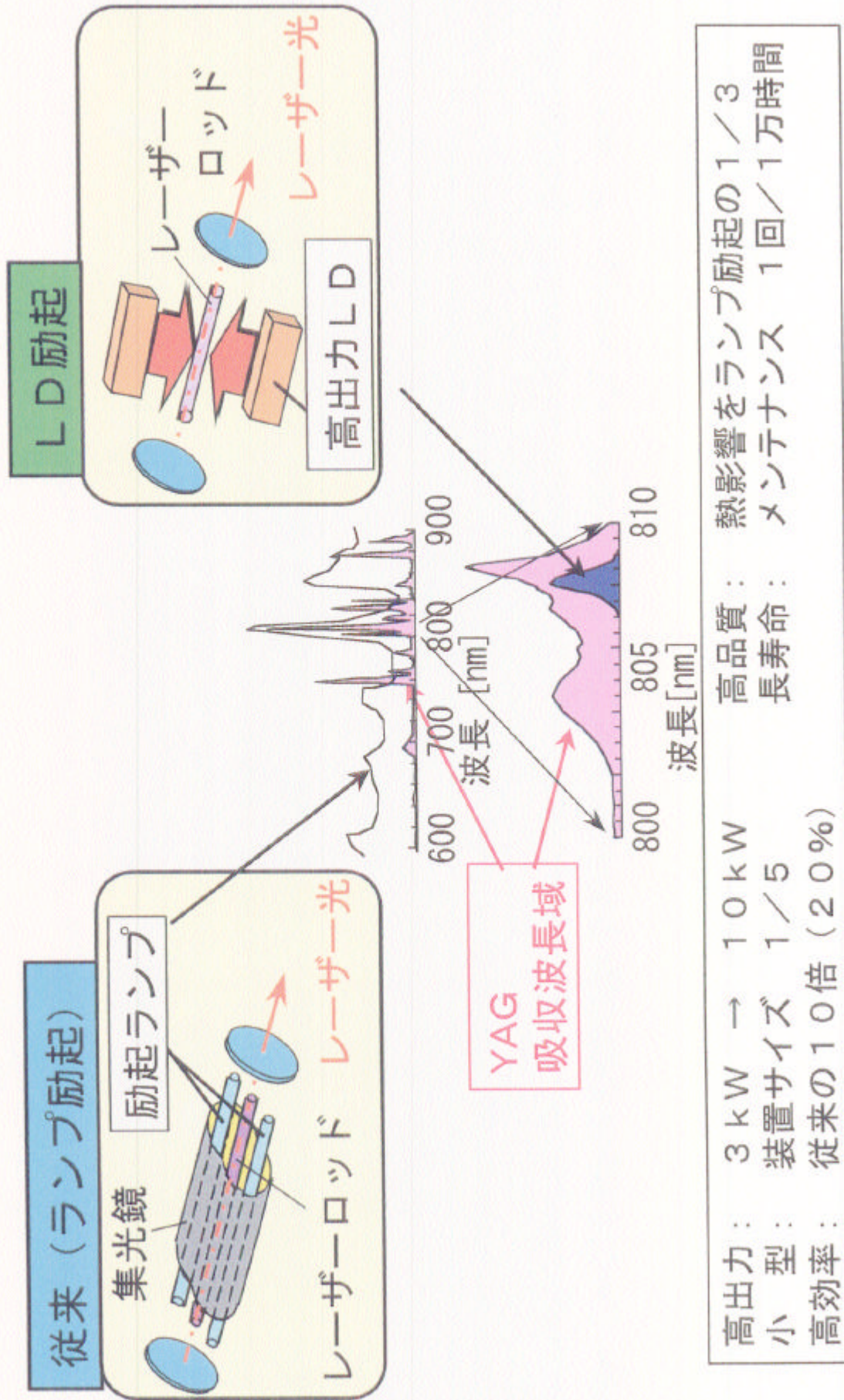
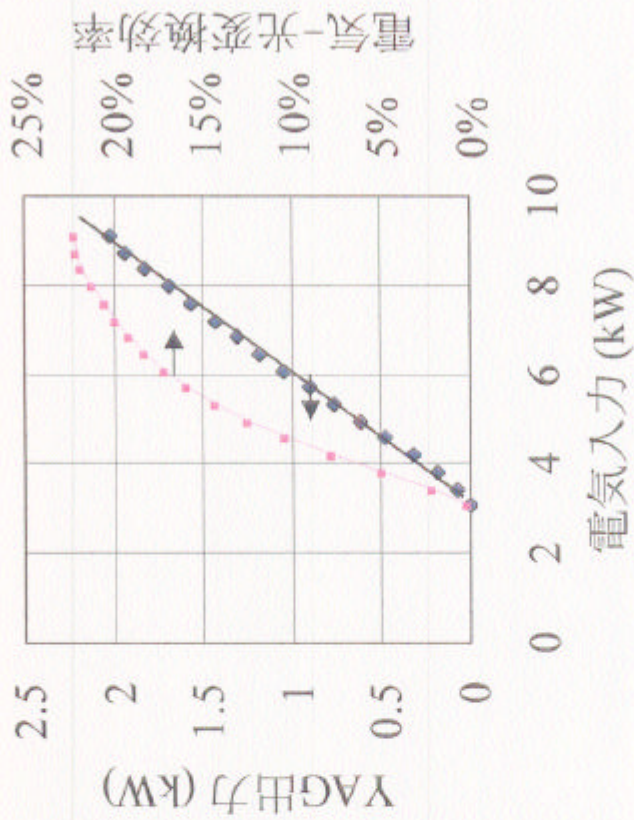
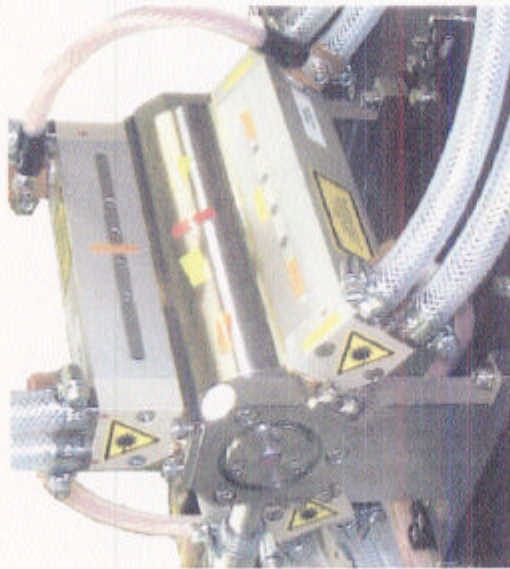


図3. 1. 1 小型半導体レーザー励起YAGレーザーの特徴

2kW LD励起モジュール



平均出力:	$\geq 2 \text{ kW}$
電気-光変換効率:	22%
光-光変換効率:	47%

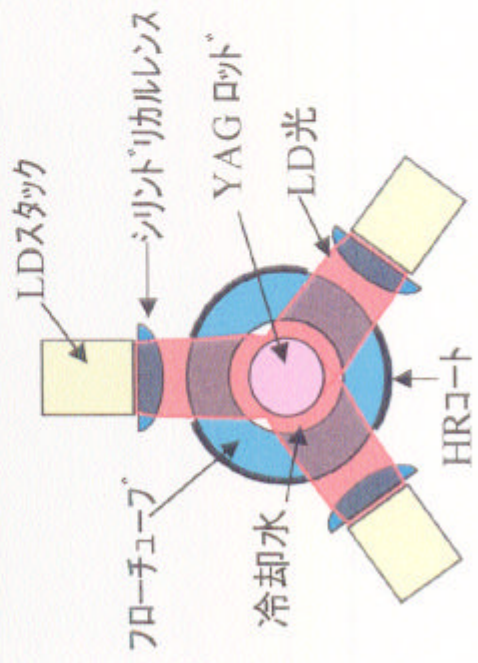


図3. 1. 2 小型半導体レーザー励起YAGレーザー外観写真

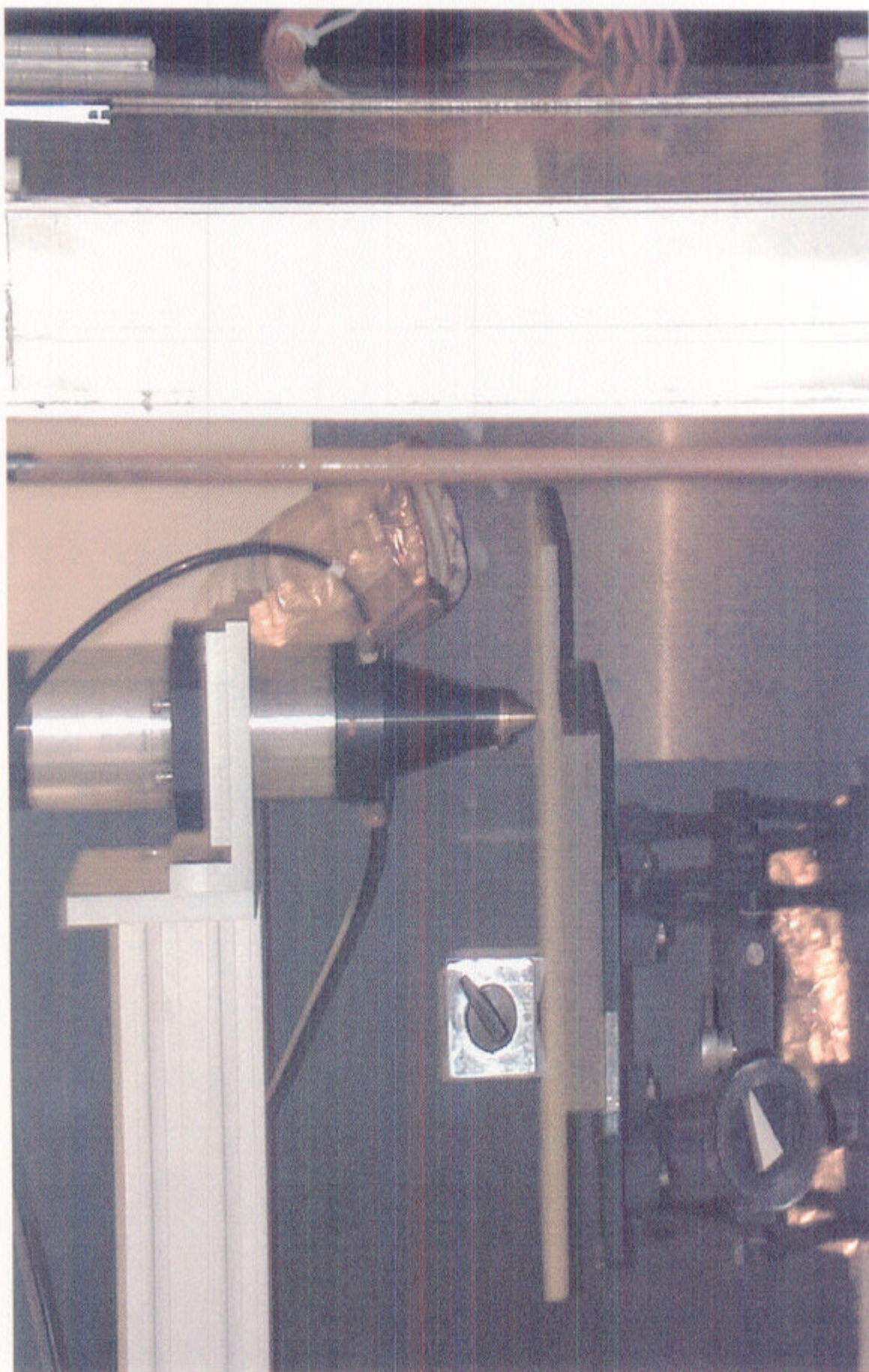


図3. 1. 3 小型半導体レーザー励起YAGレーザーの加工ヘッド部写真



図3. 2. 1(a) FRP厚板切断状況(窒素ガス60L/min)



レーザー入射側面
から観察



レーザー透過側面
から観察



側面から観察

図3. 2. 1(b) FRP厚板切断状況(窒素ガス60L/min)

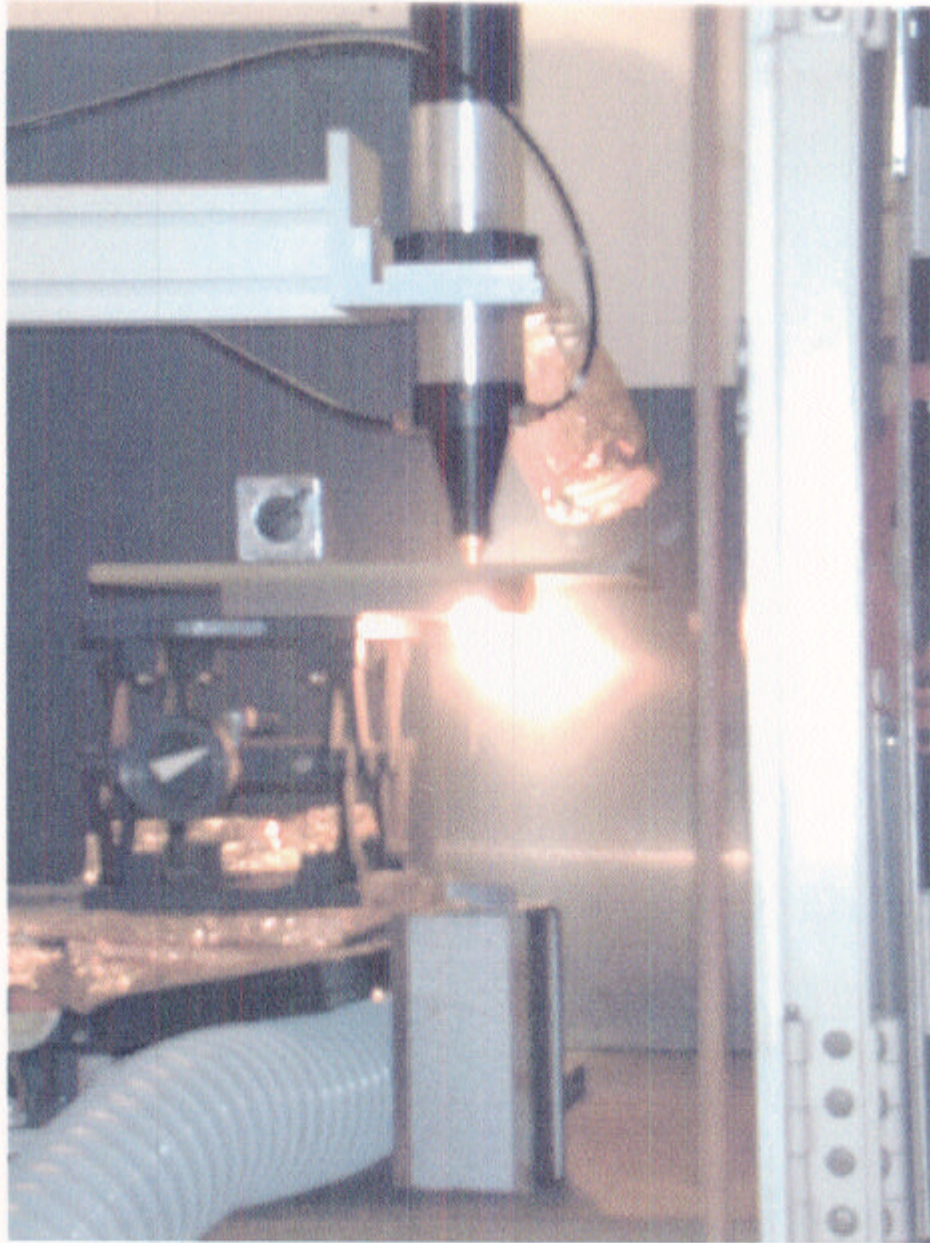
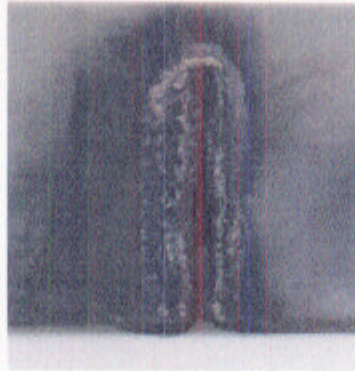


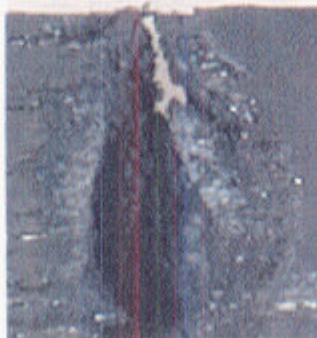
図3. 2. 2(a) FRP厚板切断状況(酸素ガス60L/min)



レーザー入射側面
から観察



レーザー透過側面
から観察



側面から観察

図3. 2. 2(b) FRP厚板切断状況(酸素ガス60L/min)

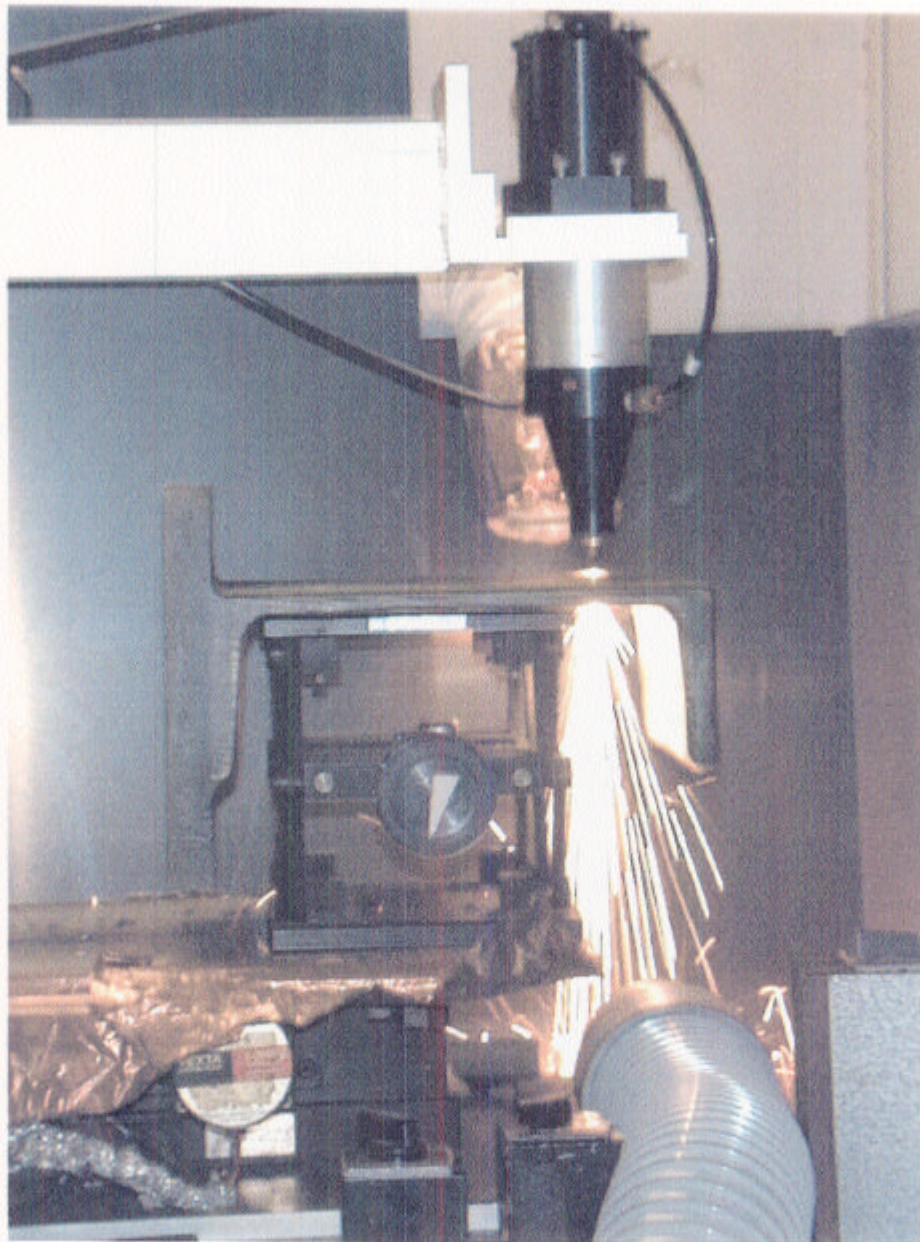


図3. 2. 3(a) FRPとSS400の複合材切断状況
(窒素:酸素=50%:50%、80L/min)



レーザー入射側面
から観察



レーザー透過側面
から観察



側面から観察

図3. 2. 3(b) FRPとSS400の複合材切断状況
(窒素:酸素=50%:50%、80L/min)

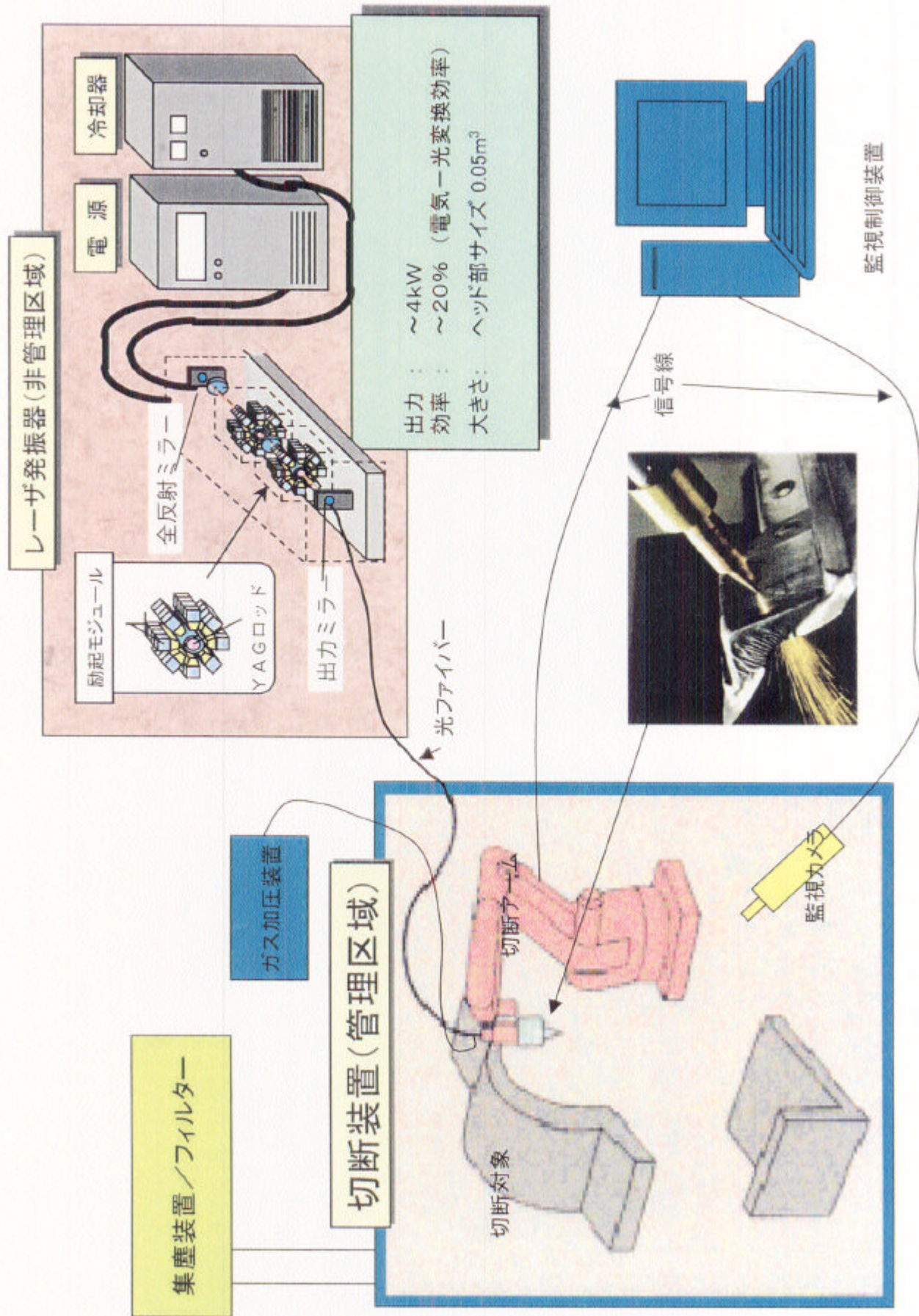
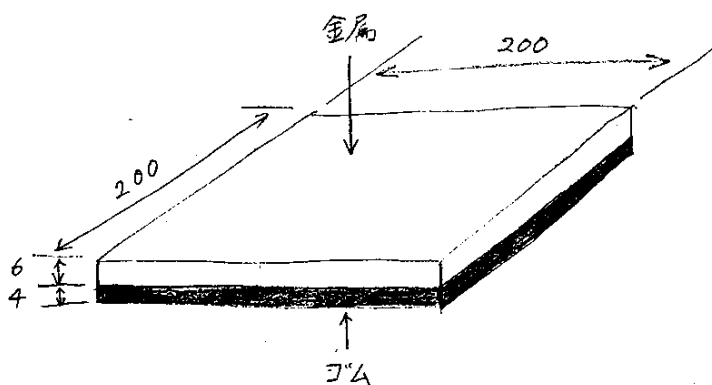
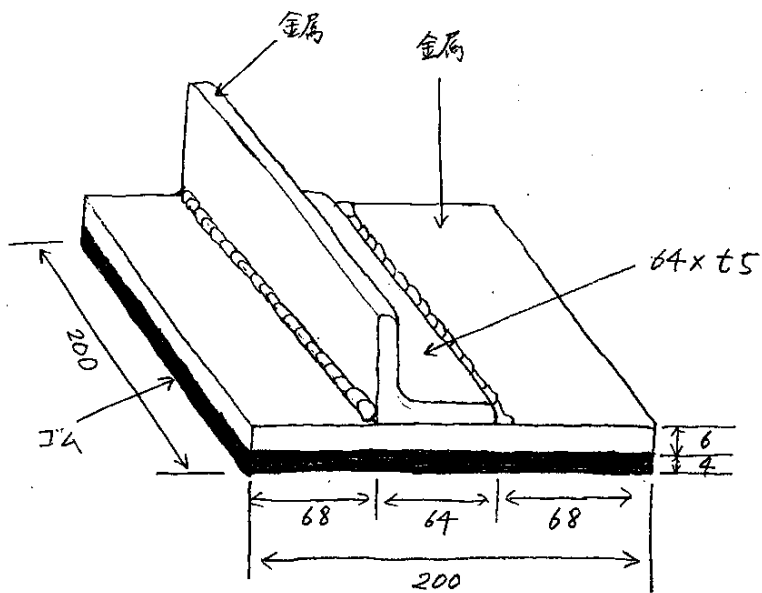


図3.3.1 転換施設解体用レーザー切断システム概念

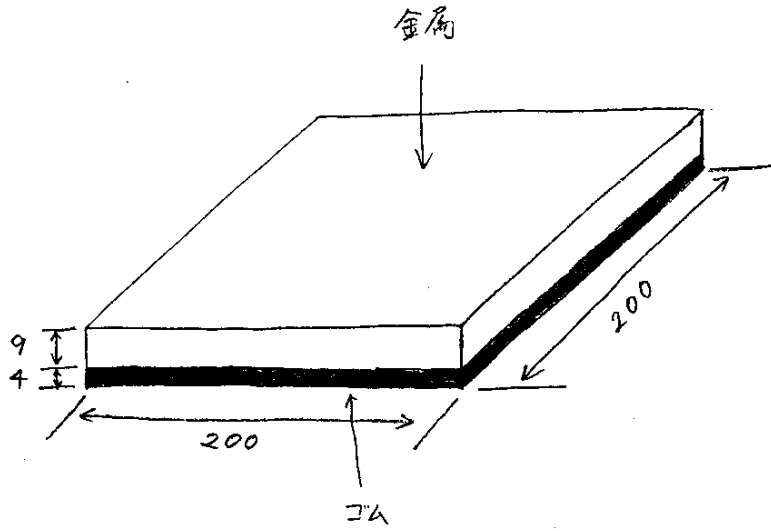
①



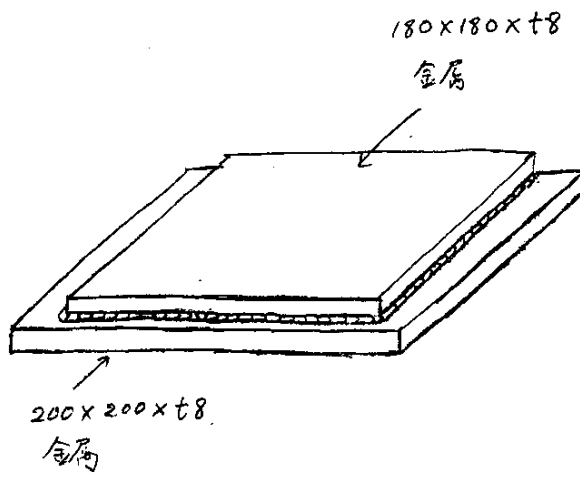
①'



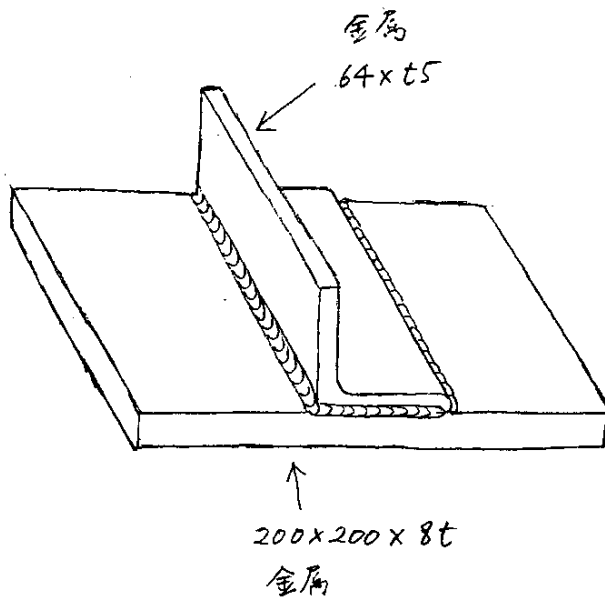
②



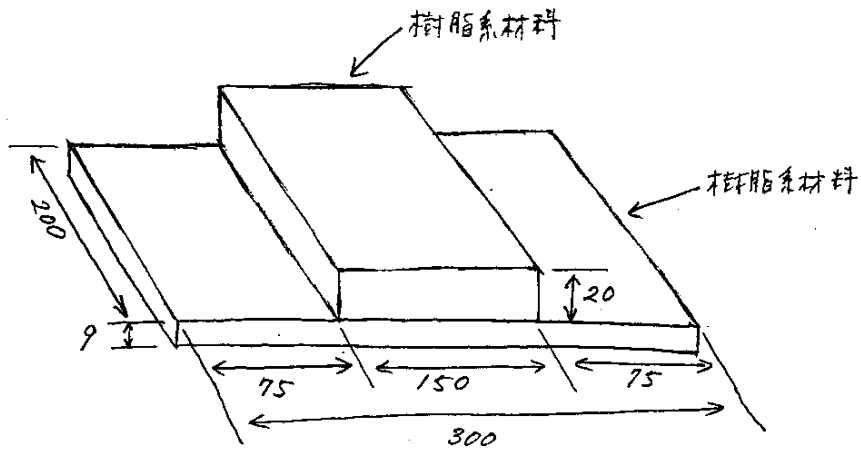
③



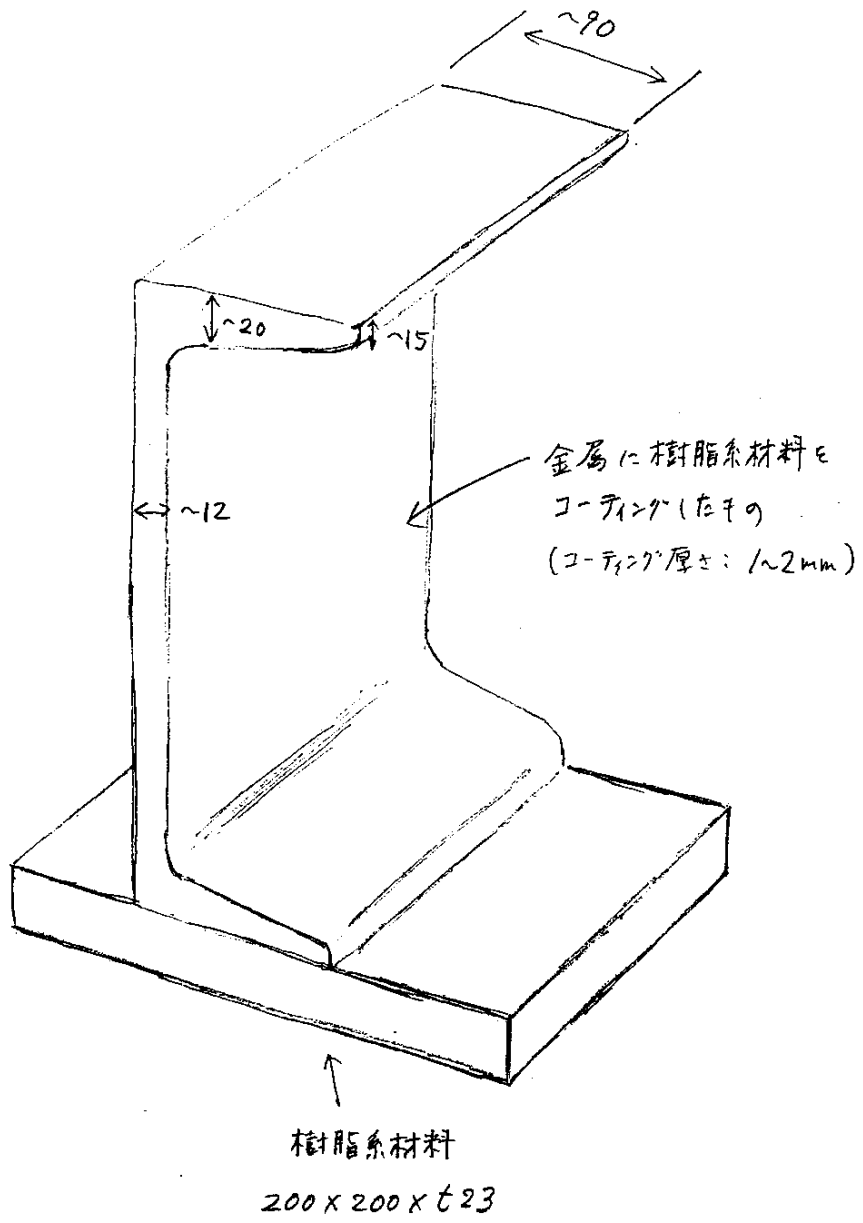
③



④



④

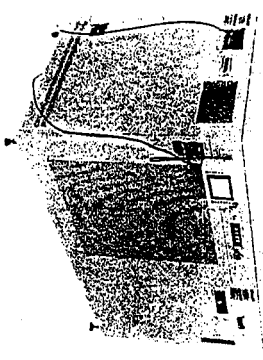


添付資料-2 LD励起YAGレーザー装置 LAL-180A/215A

LD励起YAGレーザー装置 LAL-180A/215A

当社LD励起YAGレーザーの特徴

- 高出力・高効率発振器
業界最高の1head出力800Wを達成(効率15%)しました。

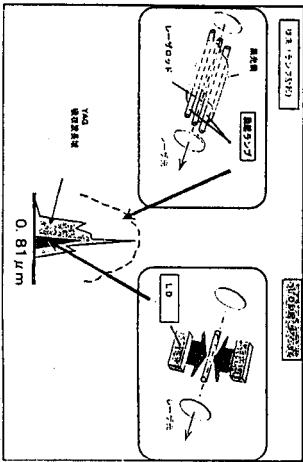


- ライン検対応設計
パワーロック機能により常にレーザー出力を監視、固定化しています。
- 独自のLDモジュール構造により交換が容易です
- PCを情報センタとした自己診断機能を有しています。
E-mail診断も可能です。

LD励起は環境に優しい1世紀を見据えた新励起方式です。

ランプ励起方式とLD励起方式

- 省スペース
ランプ励起方式に比べ装置がコンパクトになります。
従来比30%の省スペースが見込めます。
- 省電力
高い変換効率(15%)により消費電力が激減します。
従来比1/4程度の電気料金が期待できます。
- 省メンテナンス
励起源であるLDはランプに比べて大雑にライフが向上します。
メンテナンス周期が従来比1/10以下となります。



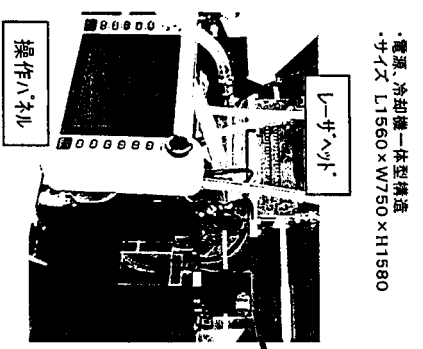
本資料に掲載してある技術情報は、製品の代表的動作・応用を説明するもので、その使用に際して当社及び第三者の工業所有権その他の権利に対する保証、または実装等の保証を行うものではありません。
本図表事項はことわりなく変更することがあります。ご使用にあたっては左欄メーカーホームページをご覧ください。

仕様

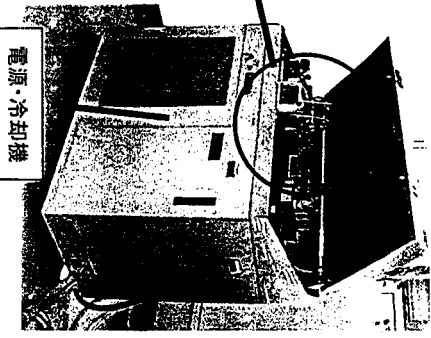
項目	型名	LAL-180A	LAL-215A	備考
共振波長		1.06 μm	1.06 μm	近赤外光
最大定格出力		800 W	1.5kW	
出力安定度		< ± 2 %	< ± 2 %	定格出力時
発振モード		パルスモード	パルスモード	
励起源		LD	LD	
外部制御		デジタルI/O	デジタルI/O	
外形寸法		377x747x727mm (377x747x727mm)	377x747x727mm (377x747x727mm)	
光ファイバ		1.560(W) x 750(D) x 1.580(H)	1.560(W) x 750(D) x 1.580(H)	
冷却水		AC 200V 50/60 Hz 50A	AC 200V 50/60 Hz 100A	
冷却水		冷水または市水流量 17l/min	冷水または市水流量 34l/min	供給水温25℃時(水冷式タイプ内蔵)

装置外観

LAL-180A



- ・電源・冷却機一体型構造
- ・サイズ L1560 x W750 x H1580



- 保証
本装置が搬入届付受後1年以内に発生した事故のうち、設計、製造上の原因によるものは、速やかに弊社の責任において修理致します。ただし、この修理は日本国内に限るとし、弊社発行の取扱説明書に於いて使用によるもの、弊社の承認なしに改造したものの、御契約と違う御使用によるものおよびクライアント部品消耗品は除きます。

- レーザーの安全について
●本製品は下記の安全基準に準拠し、レーザーの安全について十分な配慮がなされています。
(1) 労働省基準第3号 レーザの安全について十分な配慮がなされています。
(2) JIS C6802 レーザの安全基準
●本製品はクラス4レーザー装置です。

芝浦メカトロニクス株式会社
 さがみ野事業所 自動研・レーザーシステム事業部
 〒243-0401 神奈川県厚木市東台4-5-14-1
 TEL:046-231-9171 FAX:046-231-0811 8067
 西部支店 TEL:06-6535-1777
 九州支店 TEL:092-434-7188
 E-MAIL: info@shibaura.co.jp



レーザーを使用になる場合は、次の点に充分注意して安全を確保してください。
 ●近赤外光は近赤外線に気づかずに目を傷めます。
 ●レーザー光線は直射や反射光を自ら皮膚に絶対に照射しないてください。
 ●レーザー光の透過には、金属などの反射物を置かないでください。
 ●動作中にレーザー光の向きを戻さないでください。
 ●誤って人にあたるとは、電気的防護も含めて取扱説明書に記載の注意事項を参照願います。

CO₂ and Excimer Laser Cutting for Fiber Reinforced Plastics (Development of CO₂ cored Excimer Laser Cutting)

T. Ishide, O. Matsumoto, Takasago R&D Center, Mitsubishi Heavy Industries,
Ltd., Takasago, Japan
S. Hamada, Kobe Shipyard & Machinery Works, Mitsubishi Heavy Industries,
Ltd., Kobe, Japan

Summary

The ordinary method of KFRP (Kevlar Fiber Reinforced Plastics) trimming in which a cutter was used by a worker needed much time and labor. The working environment was not good due to cutting dust. So we tried to use laser processing in trimming instead of a hand cutter. First we investigated the interaction between three kinds of lasers (CO₂, YAG, and Excimer lasers) and KFRP. Finally we have proposed a new cutting method using CO₂ and Excimer lasers. We have manufactured the optical system and cutting head and carried out high-speed and high-quality cutting.

1. Introduction

The FRP trimming method (the work of cutting-off unnecessary portions from the periphery of members) used on members for airplanes and other structures is done by hand with a hand cutter using rotary blades. This method has a number of drawbacks. The cut surface is mechanically torn, fibers become fluffy, and the resin in the matrix also becomes rough resulting in the need for manual polishing work as part of the finishing work. Such manual tasks are one reason why a larger number of man-hours are required to complete the trimming process. Further, trimming work is carried out by persons wearing dust-proof masks in an environment saturated with fine raising chips generated by the cutting work. This strongly highlights the need for improvements to be made in the working environment.

Thus, the application of various KFRP laser cutting processes to trimming work is examined in which Kevlar fiber is woven into an Epoxy matrix. A new laser cutting process is also examined in which cutting and polishing work can be automated, thereby saving labor and making high-speed and high-quality trimming possible.

2. Cutting characteristics of KFRP by various lasers

Lasers capable of obtaining a relatively high power as cutting lasers include CO₂ lasers, YAG lasers and Excimer lasers. The cutting characteristics of each type of laser are compared using a 3kW CO₂ laser, a 400W pulse YAG laser, and a 200W Excimer laser (KrF oscillation). The material used consists of KFRP having a thickness of 1 mm. In each case, Ar gas is used as the cutting gas. The target cutting speed for this process is 16.7mm/s, which is as fast as that of typical hand cutters used in the trimming conventional process.

A high-speed cutting rate of about 16.7mm/s is possible using a CO₂ laser through pulse-shaped oscillation with a mean power of about 160W (the pulse width is 0.5ms, and the pulse frequency is 150Hz). However, the cut surface becomes blackened in practically every case, which is not preferable in terms of quality. On the other hand, cutting at a cutting speed of more than 5mm/s is difficult using a YAG laser with the same mean power, and the surface of the cut portion becomes scorched. The cut surface also becomes rough. Attempts were made to cut the material with the peak power being increased up

to 20kW, but there was no improvement in the roughness of the cut surface. On the other hand, the pulse width of Excimer laser is short, that is, in the ns range, and the penetration depth of the beam into the material is small. Although it is possible to cut material with less heat effect, cutting speed is also low with a focusing beam, being less than 0.167mm/s at a laser power of 100W.

Typical examples of the above-mentioned types of cut surfaces are shown in Fig.1. From the results of measurements using infrared spectroscopy on these cut surfaces, it is clear that the surfaces cut using the CO₂ laser and YAG laser are turned into a soot-like substance. It may be noted, however, that the benzene nucleus and hydrocarbon radicals, etc. can be perceived from the cut surface by the Excimer laser, and the epoxy and polyamide resin which are components of KFRP are confirmed.

The difference in the reflection and transmittance characteristics of each laser with regard to the material is considered to be one of the factors contributing to cutting quality varying according to different wavelengths. Thus, the measurement of the spectral reflectance is done using an integrating sphere in the cases of the Excimer laser and YAG laser, while measurements of reflectance are performed using an infrared spectrometer for the CO₂ laser as regards this KFRP. As a result, the reflectance with the YAG laser is highest at about 40%, while it is 30% for the CO₂ laser and 5% for the Excimer laser, respectively. Because transmittance ranks in order from the YAG laser and CO₂ laser to the Excimer laser, it was found that coupling of the beam energy to the material is most excellent with the Excimer laser, and smaller with the YAG laser. However, the results of these measurement differ from those measured for cutting conditions, and it is expected that the results will be further complicated in the practical cutting.

3. Increase in cutting speed with Excimer laser

From the results of the above examination, high-quality cutting can be realized if the cutting speed is improved with the Excimer laser. The ablation characteristic of the KFRP in the case of the Excimer laser was then examined. As shown in Fig.2(a), the removal depth of the material is saturated when the laser fluence (the laser energy density) reaches $10 \times 10^{-4} \text{J/m}^2$ more. This is derived from the fact that the laser beam is absorbed^[1] by the laser induced plasma generated in the beam irradiated portion. It was demonstrated that cutting using a laser beam adjusted to a laser fluence of about $10 \times 10^{-4} \text{J/m}^2$ is more suitable than using a high fluence laser beam such as a focusing beam in order to make effective

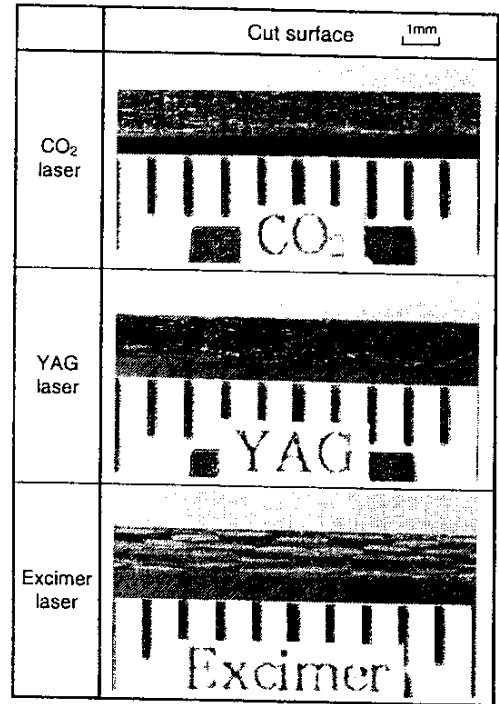
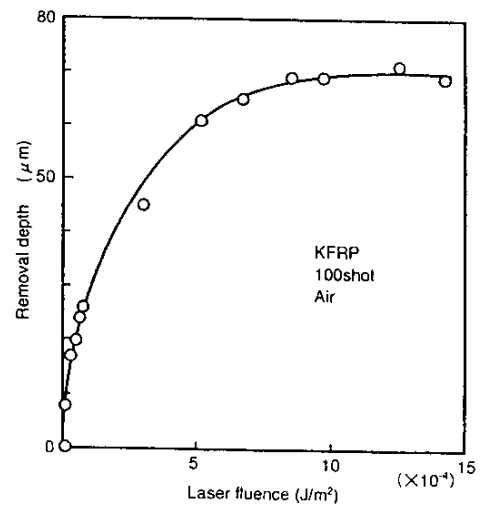


Fig.1 Comparison between CO₂ YAG and Excimer laser cutting quality



(a) Removal characteristic of KFRP by Excimer laser

use of the beam energy. Thus, an examination was made of the method in which cutting is carried out by making the focusing beam into a line beam.

The line beam is formed using optics consisting of a total of seven lenses, i.e., two cylindrical lenses together with other imaging lenses. The beam length can be freely changed by adjusting the distance between the cylindrical lenses. Fig.2(b) shows the results of the focusing beam characteristics of this optics system obtained by a ray trace taking into consideration beam intensity^{[2],[3]}. Fig.2(c) shows the cutting speed when cutting is executed with this optics system using a beam length of 3mm. The cutting speed is 0.5mm/s or less with material of 1mm in thickness. It can be clearly seen that it is difficult to obtain the target cutting speed using only the Excimer laser even though a higher cutting speed can be realized compared with cases in which cutting is done using a focusing beam.

4. Cutting technology by CO₂ and Excimer laser

The results of KFRP cutting with various lasers show that use of the CO₂ laser resulted in the cut surface being carbonized while cutting quality became deteriorated, though high-speed cutting could be obtained. In the case of the Excimer laser, cutting speed is extremely low, although thermal effects are suppressed as much as possible, and a cut surface of high quality is obtained. To make up the defects of these various methods and realize high-speed and high-quality cutting, an examination was made of CO₂ and Excimer laser cutting technology.

4.1 Principle of Cutting by CO₂ and Excimer laser

Fig.3 shows the principle of the CO₂ and Excimer laser cutting method. In this method, the KFRP is cut at high-speed with a preceding focused CO₂ laser beam, and at the same time, the carbonized layer generated by the CO₂ laser is evaporated so that it can be removed by a succeeding modified line beam. Because the carbon-

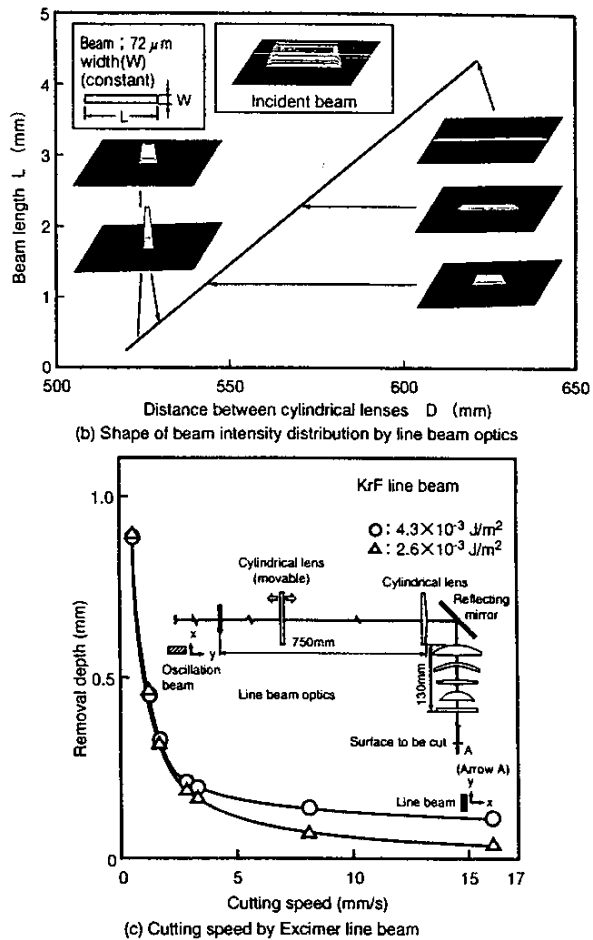


Fig.2 High-speed cutting method by Eximer laser

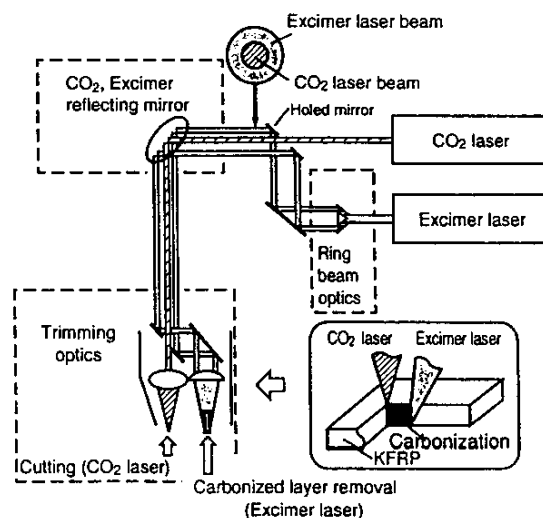


Fig.3 CO₂ and Excimer laser trimming system

ized layer is several μm to several tens of μm in thickness, it can be fully removed using the Excimer laser, and high-speed cutting can thus be accommodated. In the total system, taking into consideration the applicability of the three-dimensional shape to the members, it is desirable that the relative position of two kinds of beam be constant in any kind of beam transmission. Thus, the system is developed where the optical axis of the two lasers is aligned with each other in the beam transmission. The Excimer laser is made using a ring beam, and the CO₂ laser is transmitted to the center of this beam. We have named it CO₂ cored Excimer laser beam. The CO₂ laser is not made into a ring-shape as this avoids the deterioration of the beam quality of the CO₂ laser thereby making it possible for this system to function sufficiently as a CO₂ laser machine, as well. The respective beams are integrated by a holed mirror, reflected by a 2-wavelength reflecting mirror to reflect the CO₂ and Excimer laser beams, and guided to the cutting optics. The beams of the CO₂ and Excimer lasers are re-branched here, and the CO₂ laser is focused while the Excimer laser is modified into a line beam and used for cutting.

4.2 Examination of Optics

4.2.1 Optics of Ring Beam

Fig.4 shows the configuration of the optics used to modify the Excimer oscillated beam to the ring beam, and the measurement of the intensity distribution of the incident beam and exit beam. The oscillated beam is provided as a rectangular beam of 7×26mm. This beam is modified into a square beam using a cylindrical lens, after which the center part of the beam is then made hollow by combination with a conical lens. In addition, the periphery of the beam is cut by the aperture on the way to being collimated so as to modify the beam into a ring beam having an inner diameter of 13mm, and an outer diameter of 40mm or less. The inner diameter is determined from the beam diameter of the CO₂ laser, while the outer diameter is set so that the dimensions of the cutting head will not be excessive. The inner and outer diameters of the beam can be changed by adjusting the lens-to-lens distance D_1 , D_2 as indicated in Fig.4. It is confirmed from the intensity distribution of the beam that the rectangular oscillated beam is modified into a ring shape. The transmission loss of this optical system is about 20%.

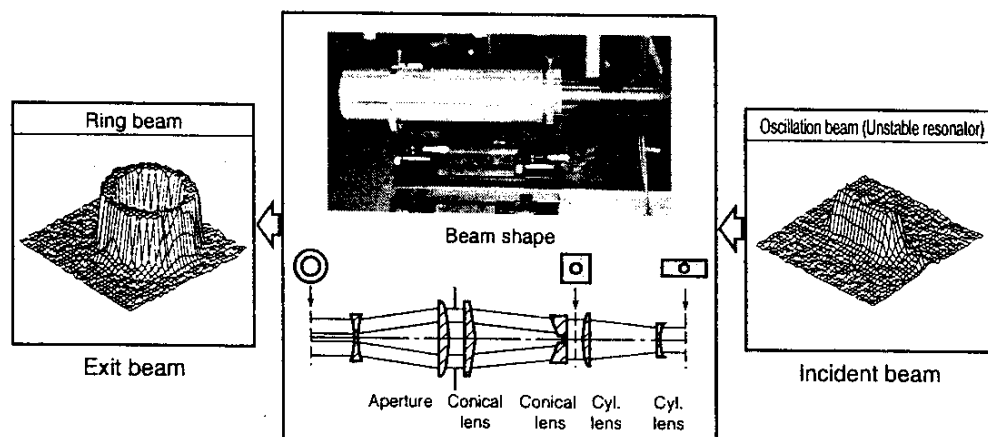


Fig.4 Ring beam optics

4.2.2 Cutting Optics

It is necessary to clarify the laser fluence required to remove the carbonized layer when

setting the specifications of the optics for the Excimer laser in order to modify the beam into a line beam among the cutting optics. Thus, the laser fluence required to remove the carbonized layer is obtained by using the carbonized cut surface when the KFRP is cut using the CO₂ laser. The cutting conditions of the CO₂ laser are a mean power of 160W, and a cutting speed of 16.7mm/s. As a result, it is found that the laser fluence required to remove the carbonized layer is 1 to 2×10⁻⁵J/m². In addition, taking into consideration that the KFRP in question is 1 to 2mm in thickness, and further that the carbonized layer is removed at a speed of 16.7mm/s, a laser fluence capable of sufficiently removing the carbonized layer can be obtained with a tip power having a mean power of about 30W under conditions where the pulse frequency of the laser is 100Hz (a pulse frequency of up to 300Hz is possible with the oscillator) and the beam dimension is 0.5 × 3mm. Then, the cutting optics is manufactured where the beam dimension of the Excimer is 0.5×3mm. The structure is shown in Fig.5. The CO₂ laser beam in the center of the beams reflected by the 2-wavelength reflection mirror is focused using a ZnSe lens with a focal distance of 254mm. On the other hand, the ring Excimer laser beam is re-reflected by the holed mirror to make a line beam whose beam dimension is varied by two cylindrical lenses, and the line beam is diagonally incident to the cut surface at an angle of incidence 20°. The line beam is 0.5mm in width, and its length (the beam dimension in the direction parallel to the thickness of the KFRP) is variable from 1mm to 3mm, and irradiated on a position that is 10mm rearward of the focal point of the CO₂ laser. The transmission loss of the Excimer laser beam is 8% with this cutting optics, which is approximately same as the expected by the optical design value.

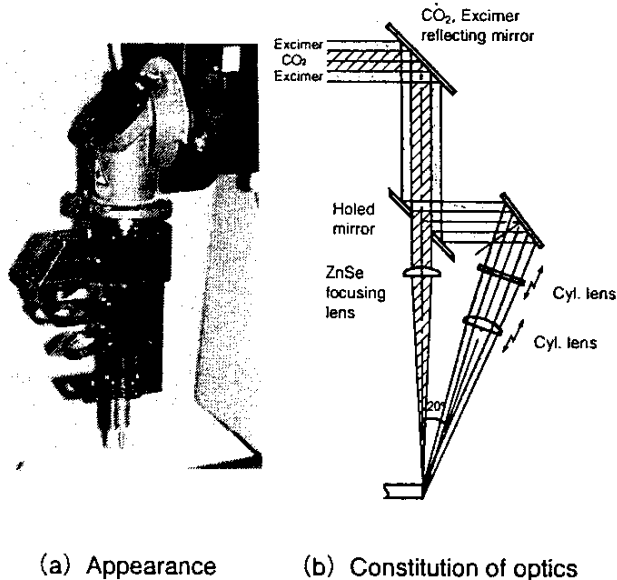


Fig.5 Cutting optics with CO₂ and Excimer laser

4.3 Results of cutting test

The cutting of the 1mm thick KFRP is done by each single beam using the above-mentioned optics. The CO₂ laser is capable of cutting at a cutting speed of 16.7mm/s with a tip power of about 160W. As shown in Fig.6, the Excimer laser is capable of removing the carbonized layer generated by the CO₂ laser cutting to this cut surface with a laser power of about 20W. Fig.7 shows the condition where the CO₂ laser focusing beam and the Excimer laser line beam are simultaneously irradiated on the cut surface of the KFRP. It is confirmed that a high quality cut surface free from any carbonized layer on the cut surface can be obtained at a cutting speed of 16.7mm/s when the cutting is performed while the respective beams are simultaneously irradiated.

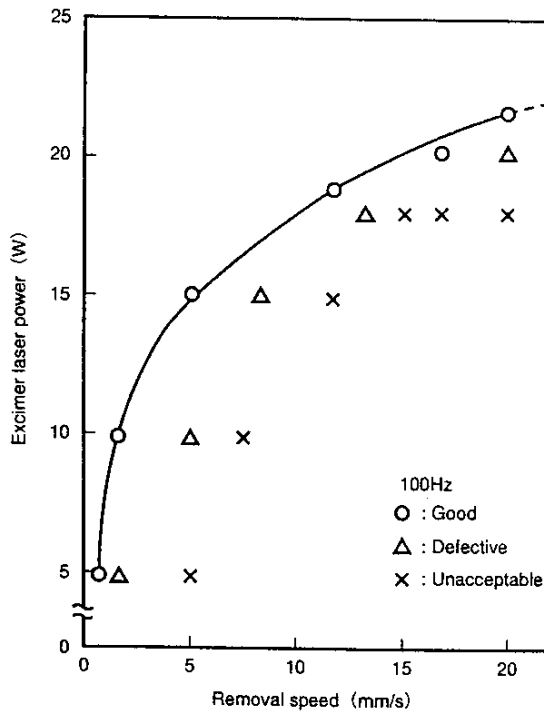


Fig.6 Removal speed of carbonized layer with trimming optics

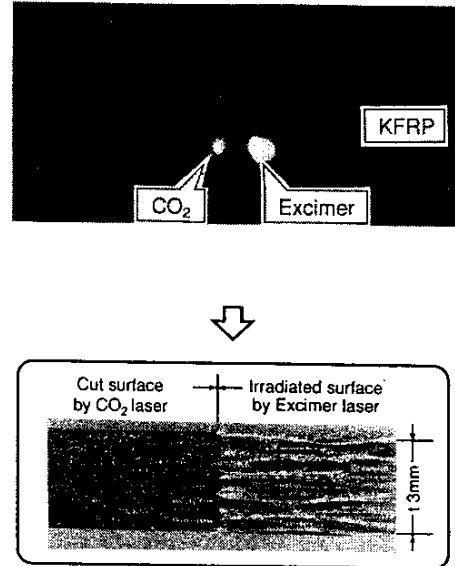


Fig.7 CO₂, and Excimer laser cutting in KFRP

5. Conclusion

The applicability of cutting by various lasers in performing trimming work on KFRP material was examined. An CO₂ and Excimer laser cutting method has been proposed as a new laser cutting method, with the optics having been manufactured to demonstrate cutting performance using this system. The results obtained are summarized below.

- (1) Examination of cutting of 1mm thick KFRP material using various types of lasers shows that excellent cutting results are difficult to achieve with a YAG laser. The cut surface is unfavorably carbonized, though a high-speed cutting of 16.7mm/s or more is possible at a power of about 160W using a CO₂ laser. On the other hand, the cutting speed is slow with an Excimer laser due to beam absorption by the laser induced plasma even when the laser power is increased. Although a high quality cut surface is obtained, this method is not practicable.
- (2) A new cutting method using a combination of CO₂ and Excimer lasers has been proposed as a cutting method in order to make the best use of the advantages of each type of laser and compensate for the disadvantages of each. In this method, the Excimer laser is modified into a ring beam, taking into consideration the application to the members of three-dimensional shape, and beam transmission is realized by passing a CO₂ laser beam through the center. A mirror to reflect 2-wavelength is used in the beam transmission, and cutting is done by the focused CO₂ laser. The carbonized layer thus generated is simultaneously evaporated and removed by the Excimer Laser which is modified into a line beam.
- (3) Ring beam optics were manufactured as the CO₂ and Excimer laser cutting optics, together with a cutting head in order to demonstrate that cutting at a cutting speed of 16.7mm/s is possible with a CO₂ laser power of 160W and an Excimer laser power of 20W.

References

- [1] Miyamoto et al., Processing Mechanism of Ceramics with High Poser Density Lasers, LAMP '92 Proceedings p.293-298
- [2] Ishide et al., Beam energy transmission mechanism in high power YAG laser welding, ICALEO '93 Proceedings p.305-311
- [3] Ishide et al., Laser beam valuation method, Journal of Japan Laser Processing Society, 1992 July, p.31-41