

平成20年度戦略的基盤技術高度化支援事業
「高品質固体レーザーによる遠隔切断技術の開発」

研究開発成果等報告書

平成21年11月

委託者 独立行政法人中小企業基盤整備機構

委託先 財団法人若狭湾エネルギー研究センター

研究開発成果等報告書目次

第1章 研究開発の概要	- 1 -
1. 研究開発の背景・研究目的及び目標.....	- 1 -
(1) 研究開発の背景.....	- 1 -
(2) 研究の目的及び目標.....	- 2 -
2. 研究体制.....	- 5 -
(1) 管理体制.....	- 5 -
(2) 研究体制.....	- 5 -
(3) 委員会等.....	- 6 -
(4) 研究開発スケジュール.....	- 7 -
3. 成果概要.....	- 8 -
(1) 薄板切断用加工ヘッドの開発.....	- 8 -
(2) 厚板切断用加工ヘッドの開発(6 + 4kW 及び 10kW)	- 8 -
(3) 厚板水中切断用加工ヘッドの開発(6 + 4kW 及び 10kW).....	- 8 -
4. 当該研究開発の連絡窓口.....	- 9 -
第2章 本論	- 10 -
1. 薄板切断技術の開発.....	- 10 -
(1) 薄板切断用加工ヘッドの開発.....	- 11 -
(2) 切断試験.....	- 14 -
(3) 実用化のための耐久試験.....	- 15 -
(4) まとめ.....	- 15 -
2. 厚板切断技術の開発.....	- 16 -
(1) 厚板切断用加工ヘッドの開発(6 + 4kW 及び 10kW)	- 16 -
(2) 切断試験.....	- 17 -
(3) まとめ.....	- 19 -
3. 厚板水中切断技術の開発.....	- 19 -
(1) 厚板水中切断試験用加工ヘッドの開発(6 + 4kW 及び 10kW).....	- 19 -
(2) 水中試験装置の開発.....	- 20 -
(3) 水中切断試験.....	- 20 -
(4) まとめ.....	- 21 -
4. 本技術の優位性のまとめ.....	- 21 -
(1) ファイバーレーザー切断の従来法に対する優位性.....	- 21 -
第3章 全体総括	- 22 -
1. 研究開発成果.....	- 22 -
(1) 薄板切断用加工ヘッドの開発.....	- 22 -
(2) 厚板切断用加工ヘッドの開発(6 + 4kW 及び 10kW)	- 22 -
(3) 厚板水中切断用加工ヘッドの開発(6 + 4kW 及び 10kW).....	- 22 -

研究開発成果等報告書目次

2 . 今後の課題及び事業化展開.....	- 23 -
(1) 今後の課題.....	- 23 -
(2) 事業化計画.....	- 23 -
付録	- 28 -
1 . 参考文献・引用文献.....	- 28 -
2 . 専門用語の解説.....	- 28 -

第1章 研究開発の概要

1. 研究開発の背景・研究目的及び目標

(1) 研究開発の背景

中小ものづくり高度化指針(十三)切削加工に係る技術に関する事項の1 切削加工に係る技術における達成すべき高度化目標(1 自動車に関する事項 川下製造業者等の抱える課題及びニーズの力・高機能化、 高度化目標ウ・研削・手仕上げ工程の削減、エ・高速・高能率化(ドライ化を含む)の指針に基づき、最近市場投入が進む高品質固体レーザー(ファイバーレーザー)を用いた自動車部品の最終加工用を始めとする各種加工ヘッドを開発する。

現在、自動車のボディ(車体パネル類)やユニットの部品の多くは、金属のプレス成形・曲げ加工、樹脂の射出成形加工で製作後、主にプレス加工による二次加工として、トリミング加工や穴加工が施されている。

しかしながら、オプションに併せた高価な金型を多数必要とするプレス加工は多品種少量生産には適さず、多種多様な素材の採用、軽量化及び高機能化を目的とした複雑構造部品への適用も困難である。

これら課題解決には、半完成部材へのフレキシブルかつ高効率(高速化やサイクルタイム短縮化、高精度化)な切削加工(切断・穴あけなど)の技術開発が不可欠である。

また、韓国や中国などアジア諸国との熾烈な国際競争が進む厚板シヤリング業界や造船業界等は、「コスト低減」や「納期短縮」の課題解決に向けた厚板切断技術開発が不可欠である。

さらに、今後原子力発電所の廃止措置が本格化した原子力産業では、水中での極厚金属の高効率切断技術開発が不可欠である。

生産効率の向上のため、自動車産業はボディ部品の切断・溶接などに比較的早くからレーザー切断技術を導入・利用してきた。

しかしながら、従前のCO₂レーザーは、大型発振器からの高出力レーザーを光ファイバー導光できないデメリットゆえ、ミラーを組み合わせた大規模な空間光伝送系の構築が求められ、多様化する消費者ニーズへの迅速な対応が難しかった。

他方YAGレーザーは、光ファイバー伝送は可能だが、冷却困難となるYAGロッドの大型化は大出力化に不向き(工業製品は5~6kW級が最大規模)であり、集光エネルギー密度の低さやエネルギー変換効率の低さ(6~15%;ファイバーレーザーは20~25%)は遠隔切断において大きなデメリットであった。

さらに、アシストガスが不可欠の従来のレーザー切断技術は、切断面から数ミリで近接するレーザー光照射であり、遠隔切断には利用できなかった。

そこで、この問題解決に向け、近年、実用化されているコンパクトで高効率な高

品質固体レーザーの能力を最大限活用し、被切断物から遠隔位置でアシストガス不使用の切断技術を開発し、薄板部材の高精度な遠隔切断・穴あけ技術の高度化を図る。

遠隔切断での切断箇所間移動は、ミラーの高速走査により大幅に時間短縮されるため、サイクルタイムの短縮が可能である。これにより、ユーザーニーズに即応した経済的・効率的な個別オプション加工が実現し、自動車産業の低コスト化・短納期化への貢献が可能となる。

また、本研究開発で確立される高出力レーザーでの遠隔切断技術を応用し、さらなる高出力化を図ることで、シャリング業界や造船業界など厚板金属を扱う川下製造業者のニーズが強い、厚板金属の高品質切断が可能となる。さらに、加工ヘッド部の構造を工夫して、水中での厚板金属の切断機能を確認することで、将来的に原子炉や海洋構造物の解体など、他産業へのレーザー切断技術の新しい展開が可能となる。

(2) 研究の目的及び目標

本研究開発で使用する高品質固体レーザーは、従来産業界で使われる CO₂ レーザや YAG レーザなどと比べてエネルギー効率に優れ、さらにレーザービーム自体が細い(エネルギー密度が高い)ので切断幅の極小化が可能である。このため、最小限のエネルギーで鋼板等を切断でき、消費電力などのエネルギー消費の極小化が可能である。

また、従来から厚板切断に用いられるプラズマ溶断やガス切断よりもエネルギー消費が少なく、さらに、切断時のヒューム発生も少ないなど、環境負荷低減にも優れている。

この高品質固体レーザーを用いて、切断技術の研究開発を実施した。その目的及び目標は以下の通りである。

薄板切断用加工ヘッドの開発

薄板部材を、アシストガス不使用で遠隔切断できる薄板用加工ヘッドを開発する。これにより切断対象物から離れた位置での遠隔切断が可能となり、レーザー切断の適用範囲が飛躍的に拡大する。具体的には、加工ヘッドを被切断物近傍に移動させ、近接位置を保持したまま切断方向に移動させるシステムが不要となり、切断に至るまでの段取りや準備時間の大幅削減に加えて、複雑形状をした部材への適用性も大幅に増大する。具体的には、以下の開発を実施する。

- i. 高効率・高出力の高品質固体レーザー(5kW級)で、遠隔位置からの切断を可能とする高エネルギー密度で焦点距離の長いレーザービームを実現するための光学系技術の確立。
- ii. 現状技術では困難とされるアシストガス不使用で、確実な切断技術の開発。
- iii. 切断中の異常の高速モニタリング、サンプリング、フィードバック機能をヘッドに付加。

そのため、以下の開発目標を設定した。

材質:亜鉛メッキ鋼板、炭素鋼

切断板厚:1~3 mm

切断速度:5m/min

切断精度:仕上げ加工不要レベル

*アシストガスなしで500 mm程度離れた位置から切断可能なこと

(目標値の設定理由)

主に自動車の最終プレス加工と置換する新技術開発を想定し、材質は自動車に通常使用される亜鉛メッキ鋼板と炭素鋼を、切断板厚は同じく1~3 mmを対象とした。また、切断速度はプレス加工製造と同程度以上の5m/minを、切断精度は、プレス加工後のバリ取り不要の優位性保持のため、仕上げ加工不要レベルを目標とした。なお、レーザーでの高速切断には、アシストガス不使用で500 mm程度の遠隔位置からレーザーの熱エネルギーのみの切断が重要である。

厚板切断用加工ヘッドの開発

効率的な厚板切断を可能とするため、以下の機能をもつ厚板用加工ヘッドを開発する。

- i. 厚板切断を可能とするレーザービームの操作(ビームの回転、多重焦点・焦点の振動など)機能の開発。
- ii. 高出力(10kW)レーザーに対応した光学系・高効率の光学素子冷却構造の開発。
- iii. 厚板切断に最適化したアシストガス系の開発。

厚板に対する高精度のレーザー切断技術を確立することで、従来の仕上げ加工や溶接前の別工程(開先加工工程)が削減可能となる。また、現在主流の酸素溶断やプラズマ溶断と異なり火気や切断時の部品交換が不要なことから、夜間無人運転化が容易であり、コスト低減や納期短縮に向けた高度化が行える。

そのため、以下の開発目標を設定した。

材質:高張力鋼(SM520、SM590)、炭素鋼(SS400)

切断板厚:40 mm以上

切断速度:450 mm/min 以上

切断幅 :5 mm以下

(目標値の設定理由)

大型造船での溶接前素材の切断を想定し、材質は高張力鋼と炭素鋼を、切断板厚は、厚板シャリング業界の切断ニーズに対応する40 mm以上を対象とした。

また、切断速度は、造船業界で現状使用されるプラズマ溶断に対抗できる速度を、切断幅はプラズマ溶断より優位性を持つために5 mm以下を目標とした。

厚板水中切断用加工ヘッドの開発

厚板の水中での効率的切断を可能とするため、以下の機能をもつ厚板水中切断用加工ヘッドを開発する。

- i. 高出力(10kW)レーザに対応した光学系・高効率の光学素子冷却構造の開発。
- ii. 厚板水中切断に最適化したアシストガス系の開発。
- iii. 水中切断も可能とするために、加工ヘッドの気密構造化を実施。

厚板の水中切断技術の確立により、将来の原子力発電所の廃止措置での原子炉容器の解体、現状の原子炉容器内構造物の取り換え工事における水中切断が可能となり、高品質レーザを用いることで狭い切断幅の切断が出来、発生する二次廃棄物量の低減につながる技術が確立出来る。

そのため、以下の開発目標を設定した。

材質：炭素鋼、ステンレス鋼

切断板厚：50 mm以上

切断速度：50 mm/min 程度

切断幅：5 mm程度

* 水中での切断が可能なこと

(目標値の設定理由)

将来の原子力発電所の廃止措置(特に放射能レベルの高い原子炉压力容器等の切断)及び現状の原子炉容器内構造物の取換え工事を想定し、10kW 級レーザで板厚 50 mmの炭素鋼とステンレス鋼(ともに原子炉压力容器等の使用材質)の切断速度と切断幅の基礎データ取得を目的とした。

作業員の被ばく防止を想定し、放射線遮蔽環境となる水中切断とした。現在研究中の水中プラズマ溶断、アブレイシブウォータージェット切断に対抗するため、切断速度 50 mm/min、切断幅 5 mm程度を目標とした。

2. 研究体制

(1) 管理体制

事業管理者 財団法人若狭湾エネルギー研究センター

〒914-0192 福井県敦賀市長谷 64 号 52 番地 1

氏名	所属・役職	備考
祝 一裕	エネルギー研究開発拠点化推進組織技術活用コーディネーター	
西岡 務	エネルギー研究開発拠点化推進組織次長補佐	~09.3
古谷 章	エネルギー研究開発拠点化推進組織産学官連携チームマネージャー	~07.7
松丸 隆	エネルギー研究開発拠点化推進組織産学官連携チームマネージャー	07.7~09.9
塚本 宏生	エネルギー研究開発拠点化推進組織産学官連携チームマネージャー	~08.3
中川 祐司	エネルギー研究開発拠点化推進組織産学官連携チームマネージャー	09.9~1
吉畑 安信	エネルギー研究開発拠点化推進組織産学官連携チームマネージャー	~09.3
山口 健志	エネルギー研究開発拠点化推進組織産学官連携チームマネージャー	09.3~
中村 暁	エネルギー研究開発拠点化推進組織産学官連携チームマネージャー	~08.3
若栗 史明	企画管理部管理グループグループリーダー	~07.3
石原 政和	企画管理部管理グループグループリーダー	07.4~

総括研究代表者(PL)

早川 順	ファインデバイス株式会社 取締役相談役	~07.11
坪井 昭彦	株式会社レーザックス 常務取締役	07.12~

副総括研究代表者(SL)

坪井 昭彦	株式会社レーザックス 第1事業部長	~07.11
池田 剛司	株式会社レーザックス 第3事業部 専任課長	07.12~

(2) 研究体制(再委託先)

株式会社レーザックス 〒472-0017 愛知県知立市新林町小深田 7 番地

氏名	所属・役職	備考
坪井 昭彦	常務取締役	
池田 剛司	第3事業部 専任課長	
社本 英泰	開発センター 部長	08.12~
小澤 健治	開発センター 専任課長	08.12~
小川 剛充	開発センター	
田添 健一	システム事業部 専任課長	09.4~
中山 晶行	システム事業部 主任	09.5~
平野 詔治	システム事業部	08.12~
西原 雄二	システム事業部	08.12~
岩田 義和	開発部 技師	08.12~
山本 伸一	開発部 技師	~08.11
松澤 正治		07.1~08.11

株式会社共和製作所 〒914-0061 福井県敦賀市蓬萊町 3-22

氏名	所属・役職	備考
出所 敏美	代表取締役社長	
木村 幸一	営業技術部長	
池田 倫史	営業技術部	
南 光治	取締役製造部長	
山本 一男	取締役製造副部長	

株式会社ファインデバイス 〒918-8237 福井県福井市和田東一丁目 1701

氏名	所属・役職	備考
早川 順	取締役相談役	~07.11
藤田 幸雄	福井本社工場工場長	

福伸工業株式会社 〒919-0615 福井県あわら市池口 5-46

氏名	所属・役職	備考
上田 紹央	常務取締役	
中田 欽也	製造部部长	
松原 樹男	製造部	
川合 正人	製造部	08.12 ~
田村 友二	設計部	~08.11

有限会社松本鉄工所 〒914-0072 福井県敦賀市金ヶ崎町 19-1

氏名	所属・役職	備考
松本 嘉玉	代表取締役	
柴野 政男	生産設計二課責任者	

国立大学法人大阪大学 〒567-0047 大阪府茨木市美穂ヶ丘 11 番 1 号

氏名	所属・役職	備考
片山 聖二	接合科学研究所 教授	
川人 洋介	接合科学研究所 准教授	
水谷 正海	接合科学研究所 技術専門職員	

国立大学法人福井大学 〒910-8507 福井県福井市文京 3 丁目 9 番 1 号

氏名	所属・役職	備考
岩井 善郎	工学部機械工学科 教授	

福井県工業技術センター 〒910-0102 福井県福井市川合鷺塚町 61 字北稲田 10

氏名	所属・役職	備考
松井 多志	創造研究部高度加工技術研究グループ 主任研究員	07.12 ~
嶋田 浩文	機械・金属部金属加工研究グループ 主任研究員	08.12 ~
強力 真一	創造研究部 基盤技術加工研究グループ主任研究員	~08.11

(3) 委員会等

アドバイザー

氏名	所属・役職	備考
佐藤 彰生	トヨタ自動車株式会社 生技開発部 レーザグループマネージャー	08.12 ~
三瓶 和久	トヨタ自動車株式会社 生技開発部 接合グループ	~08.11
天谷 浩一	株式会社松浦機械製作所 取締役 技術本部長	
奥野 信男	丸文通商株式会社 営業支援部 担当部長	
小室 敏也	三菱重工業株式会社 神戸造船所 バックエンド設計課 主席チーム統括	
大家 利彦	独立行政法人産業技術総合研究所 健康工学研究センター バイオデバイスチーム 研究チーム長	
森下 喜嗣	独立行政法人日本原子力研究開発機構 敦賀本部 原子炉廃止措置研究開発センター 技術開発部 次長	
早川 順	早川技術士事務所 所長	07.12 ~

(4) 研究開発スケジュール
平成 18 年度

実施内容	H18 12月	H19 1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
薄板用加工ヘッド開発及び切断時センシング装置開発 ア. 光学系の開発 イ. 光学素子の高効率冷却系の開発 ウ. アシストガスでの切断技術の確立 エ. 切断時センシング装置の開発 オ. 加工ヘッド内駆動系の改良 カ. 切断性能試験 キ. 切断性能評価		検討			設計			製作	組立			
		検討			設計			製作	組立	評価		
		検討			設計			製作	組立	条件選定・考察		
					検討			製作	組立	評価		
										切断試験 性能評価		
厚板用加工ヘッド開発 ア. 光学系の開発 イ. 光学素子の高効率冷却								設計	製作	評価		
								設計		製作		

平成 19 年度

実施内容	H19 12月	H20 1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
薄板用加工ヘッド開発 ア. エネルギー密度向上対策 イ. 切断性能評価	検討									切断試験	性能評価	
厚板用加工ヘッド開発 ア. 6kW厚板加工ヘッド切断試験 イ. 6kW厚板加工ヘッド切断性能評価 ウ. 光学素子の駆動・制御系の開発 エ. 光学素子の高効率冷却及び気密構造の検討 オ. アシストガス系の開発 カ. 切断性能試験 キ. 切断性能評価			切断試験準備					切断試験			性能評価	
	検討				設計				製作			
	検討				設計				製作			
			調査・検討						製作			切断試験 性能評価

平成 20 年度

実施内容	H20 12月	H21 1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月
薄板切断技術の開発 ア. 切断メカニズムの検討 イ. 薄板用加工ヘッドの実用化のための耐久試験		追加試験		評価	検討							
		計画	耐久試験									
厚板切断技術の開発 ア. アシストガス系の改良 イ. ビーム回転加工ヘッドでの加工能力確認 ウ. 限界加工能力確認		ノズル仕様検討・評価			試験							
		試験片再評価・計画			試験							
	検討				試験							
厚板水中切断技術の開発 ア. 水中切断試験用加工ヘッドの開発 イ. 水中試験装置の開発 ウ. 水中切断性能試験及び評価				設計		製作						
				設計		製作		切断試験				
									性能評価			
本技術の優位性と適用分野の明確化のまとめ ア. ファイバーレーザー切断の従来法に対する優位性 イ. 本事業成果の適用のシナリオ検討				調査・検討								
						検討						
報告書の作成 メンバーズミーティング			☆		☆			☆				作成 ☆

3. 成果概要

(1) 薄板切断用加工ヘッドの開発

目標

材質：亜鉛メッキ鋼板、炭素鋼

切断板厚：1～3 mm

切断速度：5m/min

切断精度：仕上げ加工不要レベル

* アシストガスなしで 500 mm 程度離れた位置から切断可能なこと

成果

6kW ファイバーレーザーで長焦点光学系を開発、500 mm 程度離れた位置からアシストガス不使用で切断板厚 1～2 mm の炭素鋼と同 1 mm の亜鉛メッキ鋼板の切断に成功、上記目標を全て達成した。自動車用パネル部品のブランキング、トリミング等プレス工程への一部置換えが可能である。

また、切断板厚 3.2 mm の炭素鋼と同 2～3 mm の亜鉛メッキ鋼板の切断は、10kW ファイバーレーザーを用いて上記目標を全て達成した。

(2) 厚板切断用加工ヘッドの開発(6 + 4kW 及び 10kW)

目標

材質：高張力鋼(SM520、SM590)、炭素鋼(SS400)

切断板厚：40 mm 以上

切断速度：450 mm/min 以上

切断幅：5 mm 以下

成果

6kW + 4kW ファイバーレーザー及び 10kW ファイバーレーザーで長焦点光学系を開発、アシストガス使用で切断板厚 40 mm の高張力鋼と炭素鋼の切断に成功、上記目標を全て達成した。素材の切断等には適用可能であるが、溶接前の開先加工を不要とするには、切断面の品質向上が必要である。

(3) 厚板水中切断用加工ヘッドの開発(6 + 4kW 及び 10kW)

目標

材質：炭素鋼、ステンレス鋼

切断板厚：50 mm 以上

切断速度：50 mm/min 程度

切断幅：5 mm 程度

* 水中での切断が可能なこと

成果

6kW + 4kW ファイバーレーザー及び 10kW ファイバーレーザーで長焦点光学系を開発、アシストガス使用さらに四重ノズル構造とした加工ヘッドにて、切断板厚 50 mm、切断幅 1 ~ 2 mm 程度の炭素鋼とステンレス鋼の水中切断に成功、上記目標を全て達成するとともに、レーザー発振機の出カ上昇を前提に実機の切断が見通せるデータを取得した。特に、水中プラズマ溶断、アブレイシブウォータージェット切断と比べて切断幅は非常に狭く、廃棄物発生量の低減の観点から優位な技術と考える。

4. 当該研究開発の連絡窓口

財団法人若狭湾エネルギー研究センター エネルギー研究開発拠点化推進組織

技術活用コーディネーター 祝 一裕

TEL:0770-24-7271 FAX:0770-24-7275 E-mail kiwai@werc.or.jp

産学官連携チームマネージャ 山口 健志

TEL:0770-24-7272 FAX:0770-24-7275 E-mail tayamaguchi@werc.or.jp

第2章 本論

薄板切断技術及び厚板切断技術の開発に用いたレーザ発振器、冷却装置、加工装置部分(加工ヘッド、加工ヘッドの駆動装置)及び加工室、加工状況を図1に示す。



図1 . レーザ発振器、冷却装置、加工装置部分及び加工室、加工状況

1. 薄板切断技術の開発

近年市場投入が進む、高効率でビ - ム品質が良く、小型で可搬型の数 kW 級のファイバーレーザを用いて、主に自動車の最終プレス加工と置換する新切断技術を開発する。具体的には、通常の自動車用パネル部品のブランキング、トリミング等プレス工程への一部置換えを念頭に、6kW のファイバーレーザで、500 mm程度の遠隔位置からレーザの熱エネルギーのみ(アシストガス不使用)で板厚 1~3 mmの亜鉛メッキ鋼板と炭素鋼を切断する加工ヘッドを開発する。

加工ヘッドの開発には、切断対象部でレーザ光と焦点を結ぶレンズやミラーを用いる光学系、冷却系及び駆動系の開発が必要である。また、確実な切断を確認するセン

シング装置の開発が必要である。

以下に、加工ヘッドの開発とそれを用いた薄板切断試験結果等について示す。

(1) 薄板切断用加工ヘッドの開発

図2にレーザー発振器、伝送用ファイバー及び開発対象である加工(光学)ヘッドの構成図を示す。

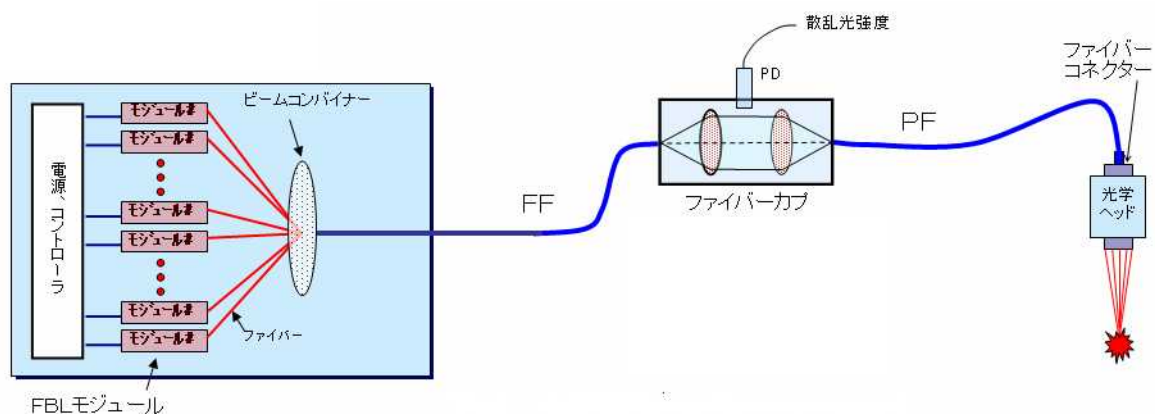


図2 . レーザー発振器、伝送用ファイバー及び開発対象である光学ヘッドの構成図

加工ヘッドの開発には、離れた切断対象部でレーザー光と焦点を結ぶレンズやミラーから構成される長焦点光学系、レンズやミラーの発熱を除熱する冷却系、高速切断のための光学系の駆動系の開発が必要である。また、確実な切断を確認するセンシング装置の開発が必要である。

光学系の開発

結像倍率3倍、ファイバーコア径を0.2mmで集光スポット径として0.6mmと最適化した。また、レンズ収差補正光学素子の採用の検討を行い、コリメートレンズ径50mm、集光レンズ径60mmを採用して最適化を図りコンパクト化に配慮した設計とした。図3に薄板用加工ヘッド(光学系)の構想図を、図4に薄板用加工ヘッドの外観を示す。

これらを薄板用加工ヘッドの仕様に盛り込んだ結果、焦点距離600mm(設計値)、加工ヘッドとワーク距離483mm(実測値)となり、目標を達成した。

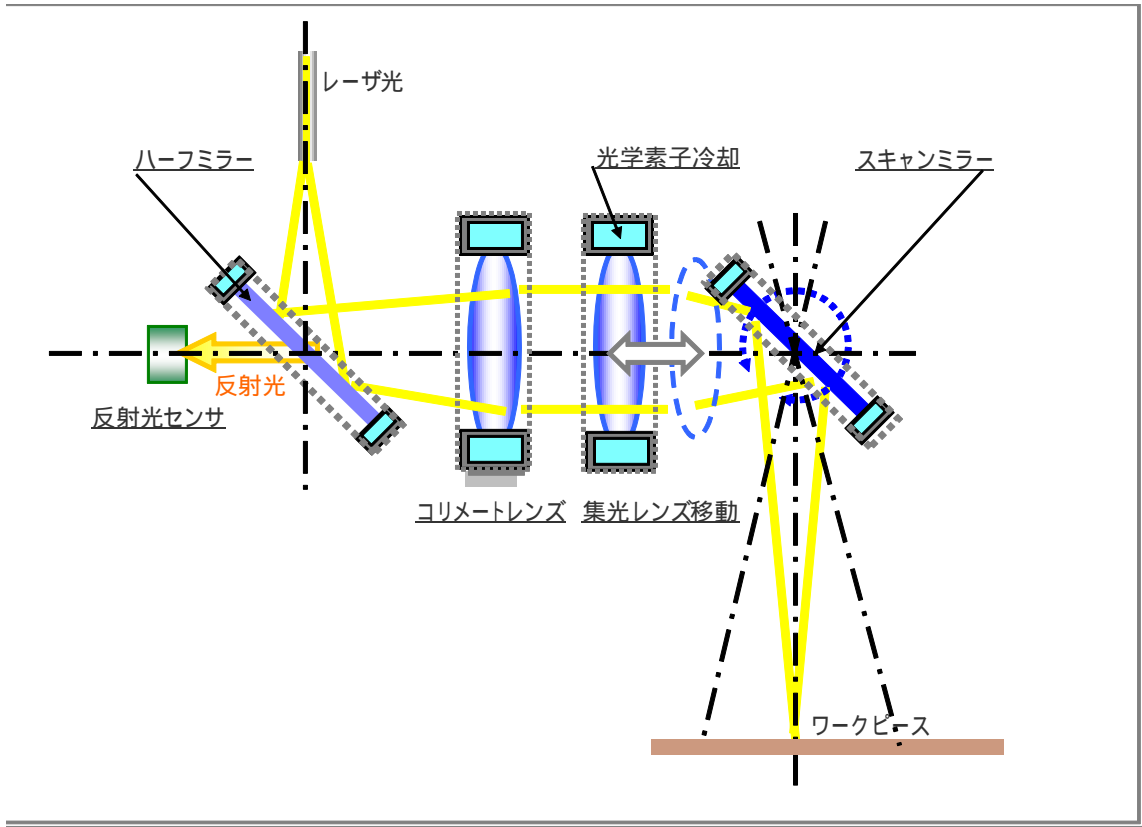


図3 . 薄板用 加工ヘッド(光学系)構想図



図4 . 薄板用加工ヘッド

光学素子の冷却系の開発

耐久性向上や熱レンズ効果による焦点位置の変化対策として、レーザによる発熱量を評価し、温度上昇に余裕を持って60℃以下に抑制するように6kW級レーザは約600W、10kW級レーザは1200Wの冷却容量を設定し、チラーを開発した。6kW級レーザは図5 . に示すとおり温度上昇は15℃であった。

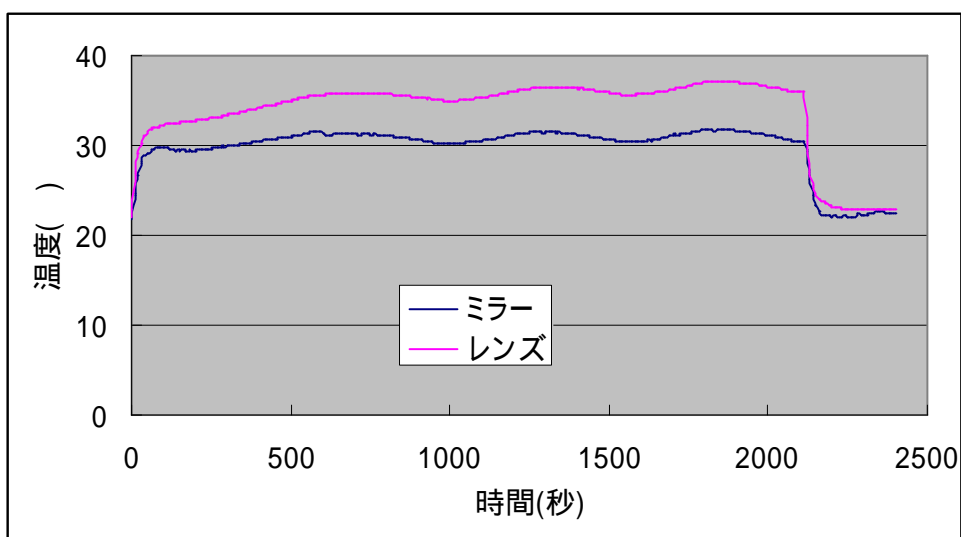


図5 . 光学素子の温度測定結果(レーザ出力 6kW)

高速切断のための光学系の駆動系の開発

集光レンズの移動にリニアモータを採用して、焦点位置移動応答速度と耐久性の向上を図り、レーザ光移動速度は0.13 sec、繰返し位置決め精度は±0.015 mmとした。

切断時センシング装置の開発

図3 . 薄板用加工ヘッド(光学系)構想図の反射光センサーの手前にレーザ反射光(波長1075 nm)のみを通す干渉フィルタを設置して、他の波長の信号と分離を行い反射光を検出するセンシング装置を開発、目標を達成した。図6に試験状況を示すが、反射光の検出(ピークの部分)が出来ている。

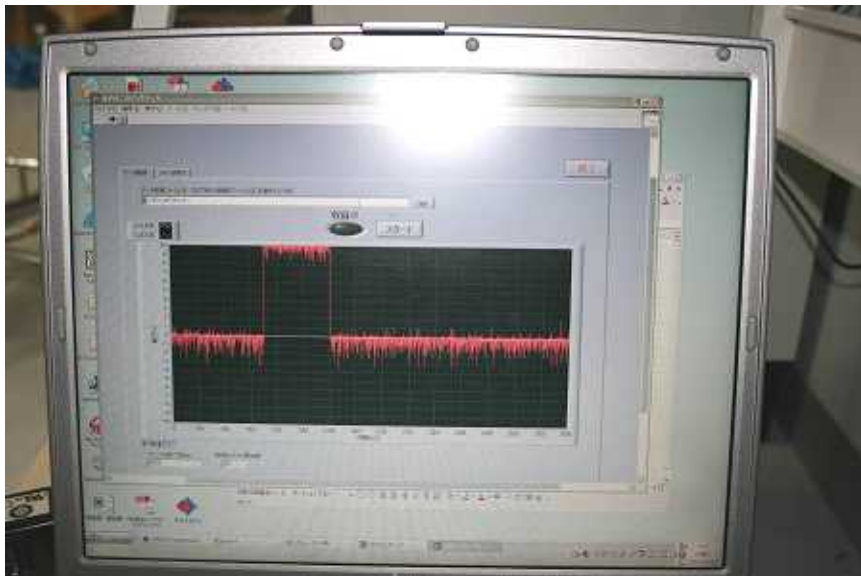


図 6 . レーザ反射光測定結果

(2) 切断試験

6kW のファイバーレーザーによる切断試験

6kW のファイバーレーザーで、開発した加工ヘッドをアシストガス無しで切断試験を実施した。試験状況を図 7 に、試験結果を表 1 に示す。



図 7 . 薄板切断試験状況

表 1 . 評価結果一覧

材料	切断条件		平均カーブ幅(mm)		
	板厚 (mm)	送り速度 (m/min)	表面	裏面	比 (表面/裏面)
SS400	1.2	6	0.65	0.72	0.89
SS400	2.3	4	0.48	0.75	0.64
SS400	3.2	2	0.55	0.95	0.56
メッキ鋼板	1.2	5	0.84	0.83	1.01
メッキ鋼板 (吸引あり)	1.2	5	1.01	0.93	1.09
メッキ鋼板	2.3	2	0.73	0.96	0.76
メッキ鋼板	2.3	3	0.70	0.89	0.78

炭素鋼は板厚 1 ~ 3 mm が切断可能であり、板厚 1 ~ 2 mm では 4 ~ 6m/min の高

速切断を実現した。また、亜鉛メッキ鋼板は板厚 1~2 mmが切断可能であり、板厚 1 mmでは 5m/min の高速切断を実現した。また、切断面の品質は仕上げ加工不要レベルであり、目標を達成した。

なお、切断部の垂直度と面荒さは CO² レーザ切断と同等以上であり、6kW ファイバーレーザは通常自動車に用いる 1 mm程度の板厚加工への適用が見込まれる。

10kW ファイバーレーザによる切断試験

素鋼は 3.2 mmの高速切断、亜鉛メッキ鋼板は 2~3 mmの高速切断を達成するため、プロセスファイバーをフィードファイバーに付け替えスポット径を 600μm から 300μm としてエネルギー密度を 4 倍とした。さらに、レーザ出力を 6kW から 10kW に増加(阪大設置レーザを使用)し、エネルギー密度を 6.7 倍とすることで 5m/min の切断が可能となった。カーフ幅は、2 mm以下であり、製品は仕上げ不要レベルである。ファイバーレーザでの開発した加工ヘッドによる高速切断の結果、切断部の垂直度と面荒さは CO² レーザ切断と同等以上である。

切断メカニズムの検討

切断メカニズムは、良好な切断部を得るには、レーザ誘起ブルームで吹き飛ばされる融液がある程度まとまった細長い形状で吹き飛ばされることが重要であることを、高速度カメラ観察で見出した。つまり、吹き飛ばされる融液が暴れると、吹き飛ばされず溶融池として残存する場合や、吹き飛ばされても切断面に融液が付着し粗い切断面が形成される場合が発生していると推測できる。また、切断の可否を、カーフ幅と単位面積当りの投入エネルギーの関係で結果を整理し、切断可能なパラメータ領域があることを明らかにした。

(3) 実用化のための耐久試験

機械の可動部は、開発した加工ヘッドでの加速試験で 6 ヶ月以上の耐久性を確認した。9.2 ヶ月相当の機械的耐久試験を実施、十分な耐久性を確認した。また、5kW のレーザ光を 1 時間連続投入した熱的耐久性試験を実施した。異常発熱や精度に影響を与える温度上昇は認められなかった。

(4) まとめ

6kW のファイバーレーザ(アシストガス不使用)で、500 mm程度離れた位置からレ

ーザの熱エネルギーのみで自動車に通常使用される板厚 1~2 mmの亜鉛メッキ鋼板、炭素鋼を切断する加工ヘッドを開発した。これにより 1~2 mmの板厚切断が実現し、通常の自動車用パネル部品のブランクング、トリミング等プレス工程への一部置換えが可能である。切断出力と切断板厚等の関係把握のため切断メカニズムを検討した。10kW のファイバーレーザを用いて、切断板厚 3.2 mmの炭素鋼と同 2~3 mmの亜鉛メッキ鋼板及びステンレス鋼が切断可能であることを確認した。

2. 厚板切断技術の開発

大型造船での溶接前素材の切断や厚板シャリング業界での厚板切断を想定し、40 mmの高張力鋼及び炭素鋼の切断のための加工ヘッドを開発する。

厚板切断のために、焦点深度の深い薄板切断技術で開発した長焦点光学系をベースとした光学系、その冷却系及びアシストガス系を開発し、6kW ファイバーレーザ用の加工ヘッド、6+4kW 及び 10kW の加工ヘッドを製作した。

(1) 厚板切断用加工ヘッドの開発(6+4kW 及び 10kW)

光学系の開発

薄板切断技術で開発した長焦点光学系を採用して、6kW 用のビーム回転が可能な機構及び焦点移動が可能な機構を付加した加工ヘッド、6+4kW の加工ヘッド及び 10kW の加工ヘッドを開発した。

6+4kW の加工ヘッドの開発では、6kW 及び 4kW のレーザビームの相対位置として照射角度を変化させる機能を持たせて、厚板切断に有効な照射角度を実験検証できるものを開発完了した。

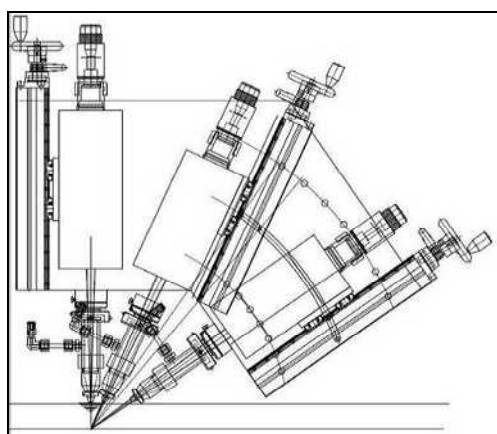


図8 . 6+4kW 厚板切断用加工ヘッド

光学素子の冷却系の開発

6+4Kw 及び 10k wの厚板切断用加工ヘッドの光学系は、放物面鏡を用い

ており、裏側から放物面鏡全体を冷却できる冷却系を開発した。冷却効率が上がり、薄板切断技術の開発で開発した冷却容量 1200W の冷却チラーでの冷却で温度上昇は 10 程度に収まることを確認した。

アシストガス系の開発

当初ノズル耐圧：0.9MPa テーパーノズルから噴き出し部の流速を上げるために種々のノズル形状に対して可視化実験を行い、ノズル仕様の見直し、スロート(喉)部及び拡管部を有する二重ノズルに変更した。

(2) 切断試験

ビーム回転加工ヘッドでの切断試験

レーザ出力 6kW、アシストガスを酸素(0.5MPa)、ビーム振幅を 0~0.2, 0.3, 0.4 mmにて試験を実施した。

SS400 は、焦点の振動振幅を大きくすることで、切断可能速度が速くなる傾向が認められた。板厚 40 mmは、ビーム振幅 0.2 mm・550 mm/min 及びビーム振幅 0.4 mm・640 mm/min で切断可能であった。これは振幅が大きくなることで、切断カーブ幅を広げられるためと考えられる。SUS304 及び HT590 は、今回の実験では、ビーム振動の効果を確認できなかった。(ビーム通過後に再ブリッジして切断できなかった)

6+4kW 及び 10kW の加工ヘッドでの切断試験

6kW+4kW ビーム出力による切断性能試験を実施した。板厚 40 mmの炭素鋼、ステンレス鋼、高張力鋼に対して、アシストガス圧力 0.6MPa では切断速度 640 mm/min まで切断可能であった。切断幅は 3.6 mm~6.3 mm程度であるが、面粗さと垂直度は測定不能であった。10kW の試験でも同様の結果であった。素材の切断には適用可能であるが、切断後溶接前の開先加工不要とするには、切断面の品質向上が必要である。

アシストガス系を改良し、スロート(喉)部及び拡管部を有する二重ノズルを用いた 10kW の加工ヘッドでの切断試験

アシストガスを酸素及び空気とした切断試験を実施した。アシストガスが酸素の場合、SS400、HT、SUS304 の全てが速度目標 450 mm/min 以上で切断可能であり、カーブ幅も 5 mm以下程度を満足した。(但し、SUS304 を 200 mm/min で切断した試験片は、下部にバーニングが発生し、カーブ幅が大きくなった。)




いずれの材料も、バーニング気味の切断結果となり、切断面の垂直度、面粗さは測定できなかった。

アシストガスが空気の場合、各材料とも酸素をアシストガスとした時と比較して切断可能速度が低下し、燃烧反応による加速効果が殆ど無くなったものと考えられる。

主な試験片のカーフ幅、垂直度、面粗さ、切断面外観を表2に示す。

各材料とも燃烧によるバーニングは発生しなかったが、特に板厚 40 mmの切断時、切断面下部に切断面の乱れが認められた。これはノズル可視化実験で確認されたアシストガス流の乱れ(カルマン渦)の影響と推察され、改善が課題と考える。

表2 . アシストガス系の改良による切断試験結果一例

試験片No.	材質	板厚 (mm)	レーザー出力 (kW)	切断速度 (mm/min)	カーフ幅 (mm)		垂直度 (mm) ISO等級	面粗さ Rz (μm) ISO等級	切断面写真
					入射側	出射側			
SS16	SS400	25	10	400	1.03	0.57	0.46 3級	上部 29.4 2級 中央部 34.5 2級 下部 36.0 2級	
SUS2	SUS304	25	10	400	1.02	0.59	0.43 2級	上部 62.2 3級 中央部 66.7 3級 下部 測定不可 級外	
HT1	HT590	25	10	400	1.02	0.56	0.46 3級	上部 66.6 3級 中央部 測定不可 級外 下部 測定不可 級外	

限界加工能力の確認

10kW ファイバーレーザーを用いて、厚板の限界加工能力確認実験を行った。ガス種は酸素、ガス圧 0.8MPa である。炭素鋼、高張力鋼及びステンレス鋼とも切断速度を 100 mm/min 以下まで遅くすれば、板厚 75 mm,100 mmについても切断可能であることを確認した。

(3) まとめ

40 mmの高張力鋼及び炭素鋼を切断する加工ヘッドを開発した。ノズルやアシストガスを工夫して切断速度 450 mm/min、切断幅 5 mm以下の目標を達成した。素材の切断等には適用可能であるが、溶接前の開先加工を不要とするには、切断面の品質向上が必要である。

3. 厚板水中切断技術の開発

将来の原子力発電所の廃止措置(特に放射能レベルの高い原子炉压力容器等の切断)を想定し、10kW級のレーザーで板厚 50 mmの炭素鋼とステンレス鋼(ともに原子炉压力容器等の使用材質)の切断速度と切断幅の基礎データ取得を目的とした。放射線遮蔽環境下での作業を想定し、水中切断とした。現在研究中の水中プラズマ溶断、アブレイシブウォータージェット切断に対抗できる切断速度として 50 mm/min、切断幅 5 mm程度と設定した。

(1) 厚板水中切断試験用加工ヘッドの開発(6 + 4kW 及び 10kW)

水中での厚板切断技術に関する先行技術を調査・検討した結果、図9に示すように、気中切断用二重ノズルの外側に空洞形成を目的とした空気用ノズル、更にその外側に空洞・水遮断用の加圧水カーテンを形成する水ノズルを設けた四重ノズル構造を採用し、6kW + 4kW 水中切断用加工ヘッド及び 10kW 水中切断用加工ヘッドを開発した。

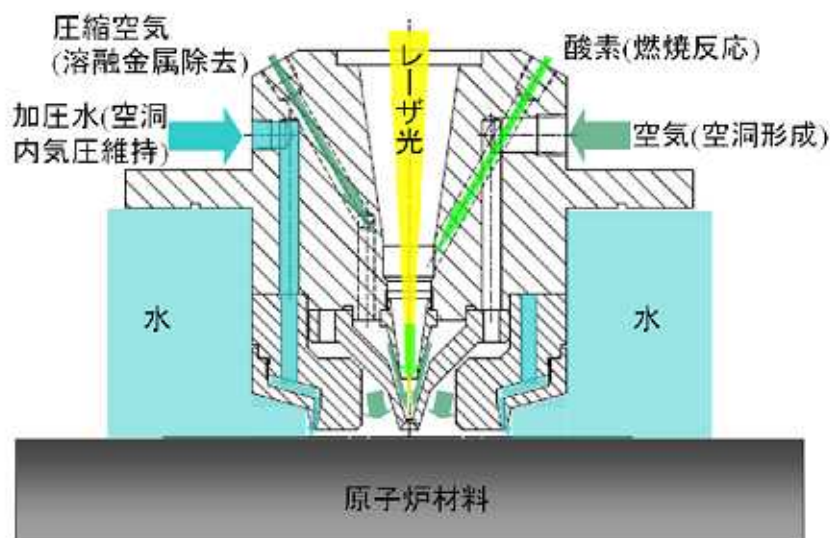


図9 . 水中での厚板切断用四重ノズルの構想

(2) 水中試験装置の開発

水中試験用に、図 1 0 に示す水中試験装置を開発した。試験時にレーザーのノズル部は水槽内に固定して、試験材が水槽内を移動する設計とした。

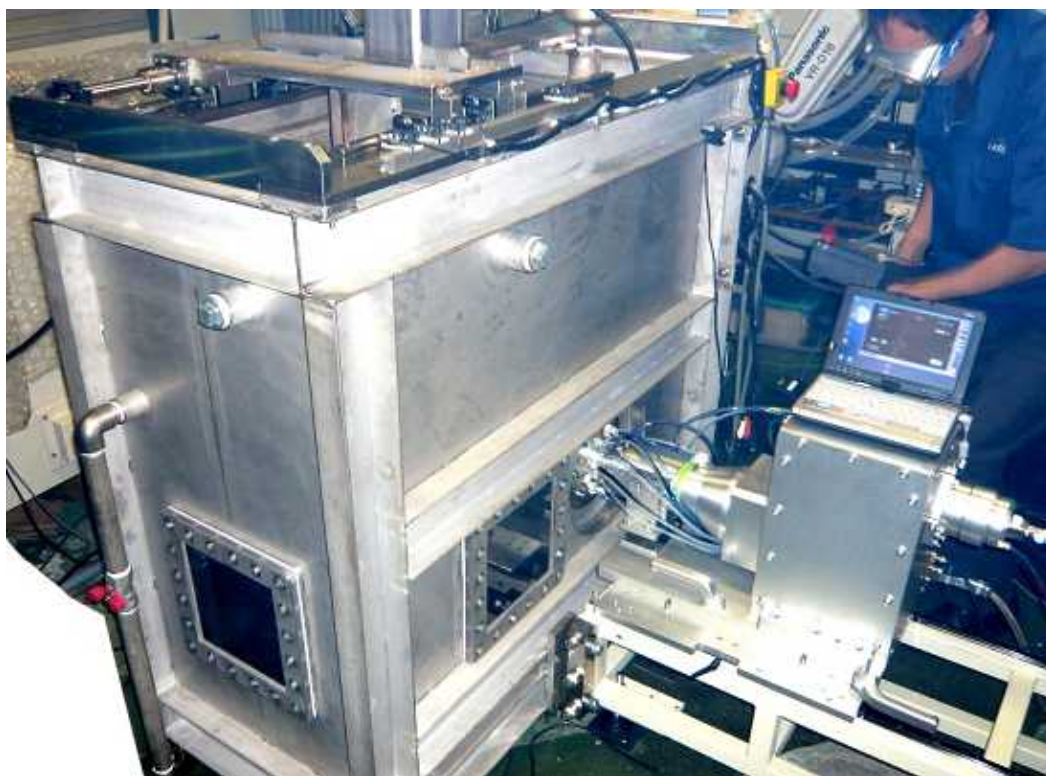


図 1 0 . 水中試験装

(3) 水中切断試験

6kW + 4kW 水中切断用加工ヘッド及び 10kW 水中切断用加工ヘッドを用いて水中切断試験を実施した。図 1 1 に炭素鋼とステンレス鋼の水中切断試験結果の一例を示す。

ともに板厚：50 mm以上、切断速度：50 mm/min 程度、切断幅：5 mm程度の切断が出来ることを確認した。

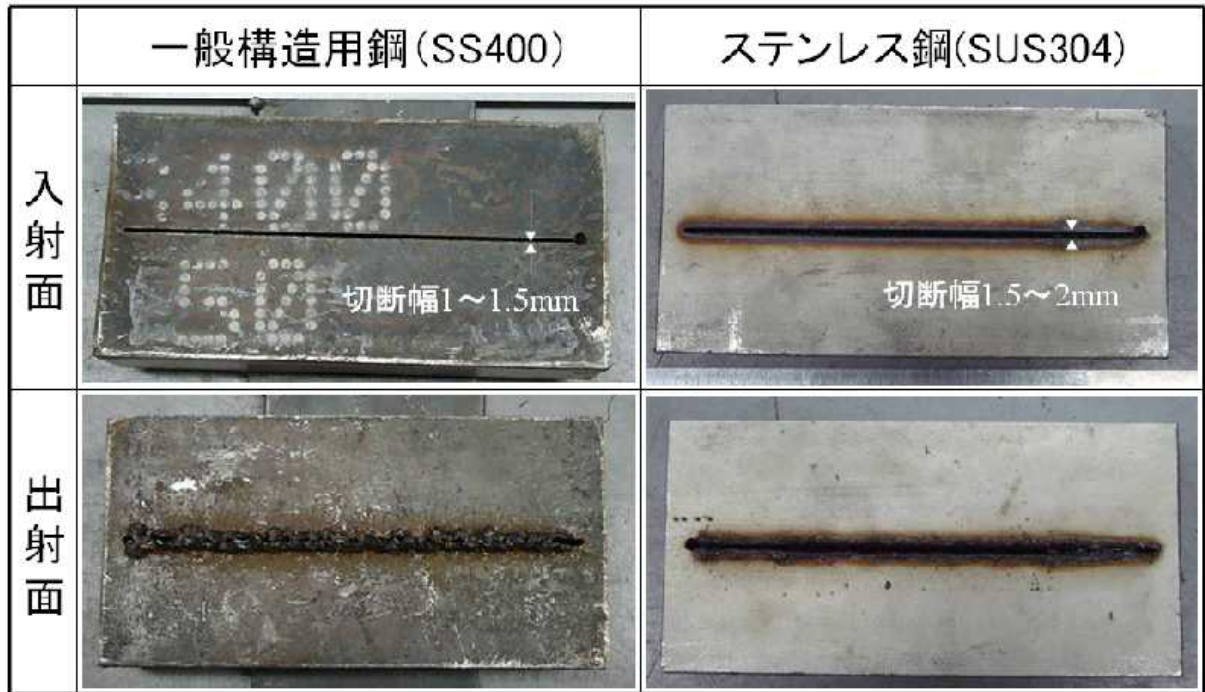


図 1 1 . 厚板水中切断試験結果(板厚 50 mm , 切断速度 50 mm/min)

(4) まとめ

10kW 級のレーザーで、50 mmの炭素鋼・ステンレス鋼を切断速度 50 mm/min、切断幅 1~2 mm程度で切断出来、レーザー出力上昇により実機の切断が見通せるデータを取得した。特に水中プラズマ溶断、アブレイシブオータジェット切断に比べて、切断幅は非常に狭く、廃棄物発生量の低減の観点から優位の技術と考える。

4 . 本技術の優位性のまとめ

(1) ファイバーレーザー切断の従来法に対する優位性

垂直度は CO₂ レーザと同等以上であり、酸素切断やプラズマ切断を超える品質を達成した。面粗さは、切断面の上部及び中心部では CO₂ レーザと同等以上であるが、下部では触針式面粗さ計での測定不能範囲となった。

SS400 と SUS304(各板厚 40 mm)のプラズマ切断と気中でのファイバーレーザー切断(アシストにエア使用)の試験片カーフ幅を比較して下表に示す。

	プラズマ切断	ファイバーレーザー切断
SS400(40 mm)	5.03	0.78~1.41
SUS304(40 mm)	7.90	0.56~1.03

アシストガスにエアを使用したファイバーレーザー切断とプラズマ切断の最大の違いはカーフ幅の狭さである。このことから、ファイバーレーザー切断は発生する二次生成物が極めて少なく、環境への影響が小さい切断工法であるといえる。

第3章 全体総括

1. 研究開発成果

(1) 薄板切断用加工ヘッドの開発

目標

材質：亜鉛メッキ鋼板、炭素鋼

切断板厚：1～3 mm

切断速度：5m/min

切断精度：仕上げ加工不要レベル

*アシストガスなしで500 mm程度離れた位置から切断可能なこと

成果

6kW のファイバーレーザを用いて長焦点光学系を開発し、アシストガス不使用・500 mm程度離れた位置から、炭素鋼は切断板厚1～2 mmで、亜鉛メッキ鋼板は同1 mmで上記目標を全て達成した。通常の自動車用パネル部品のブラッキング、トリミング等プレス工程にて一部置換可能と考える。

また、10kW のファイバーレーザでも、炭素鋼は切断板厚3.2 mm、亜鉛メッキ鋼板は同2～3 mmに対して上記目標を全て達成した。

(2) 厚板切断用加工ヘッドの開発(6 + 4kW 及び 10kW)

目標

材質：高張力鋼(SM520、SM590)、炭素鋼(SS400)

切断板厚：40 mm以上 切断速度：450 mm/min 以上 切断幅：5 mm以下

成果

6kW + 4kW のファイバーレーザ及び 10kW のファイバーレーザを用いて長焦点光学系を開発し、アシストガス使用で上記目標を全て達成した。素材の切断等には適用が可能と考える。溶接前の開先加工不要とするには、切断面の品質向上が必要である。

(3) 厚板水中切断用加工ヘッドの開発(6 + 4kW 及び 10kW)

目標

材質：炭素鋼、ステンレス鋼

切断板厚：50 mm以上 切断速度：50 mm/min 程度 切断幅：5 mm程度

*水中での切断が可能なこと

結果

6kW + 4kW ファイバーレーザ及び 10kW ファイバーレーザで長焦点光学系を開発、アシストガス使用さらに四重ノズル構造とした加工ヘッドにて、水中での上記目標を全て達成した。

10kW 級のレーザーで板厚 50 mmの炭素鋼とステンレス鋼が、切断速度 50 mm/min、切断幅 1~2 mm程度で切断出来ており、レーザー発振機の出力上昇を前提に実機の切断が見通せるデータを取得した。特に、水中プラズマ溶断、アブレイシブウォータージェット切断と比べて切断幅は非常に狭く、廃棄物発生量の低減の観点から優位な技術と考える。

2. 今後の課題及び事業化展開

(1) 今後の課題

薄板切断ヘッド

実用化に向けて解決すべき技術課題は、

- i. 3次元曲面の切断能力(能力の検証と駆動ソフトの充実)
- ii. 垂直以外の姿勢での切断(能力の検証と傾斜限界の把握)
- iii. 切断速度の高速化(極薄板の積層切断等も含む)

である。本課題は、(株)レーザーックスの自己資金及び国の競争的資金(平成21年度ものづくり中小企業製品開発等支援補助金事業「高効率化製法によりコストダウンを可能とする電機自動車用モータの試作開発」等)を活用して開発する。

厚板切断ヘッド

実用化に向けて解決すべき技術課題は、

- i. ラバルノズルの仕様最適化
- ii. アシストガス条件の最適化

である。本課題は、(株)レーザーックスを主開発者とし、本事業の研究メンバーの協力を得て今後の国の競争的資金等を活用して開発を継続する。

水中厚板切断用ヘッド

本事業で計画した基礎的データの取得については達成出来た。実用化までに解決すべき課題は、原子力発電所の廃炉時の原子炉容器や炉内構造物等の放射能レベルが高い構造物の切断を想定したデータ(板厚 150 mm以上)の取得やヘッドの小型軽量化等である。今後は日本原子力研究開発機構等が行う「ふげん」の廃止措置研究に協力し、本技術の実用化・事業化を検討する。

(2) 事業化計画

本事業で開発した加工ヘッドは、自動車分野以外にも広く適用することが考えら

れる。図 1 2 に事業化に向けた適用事例を示す。

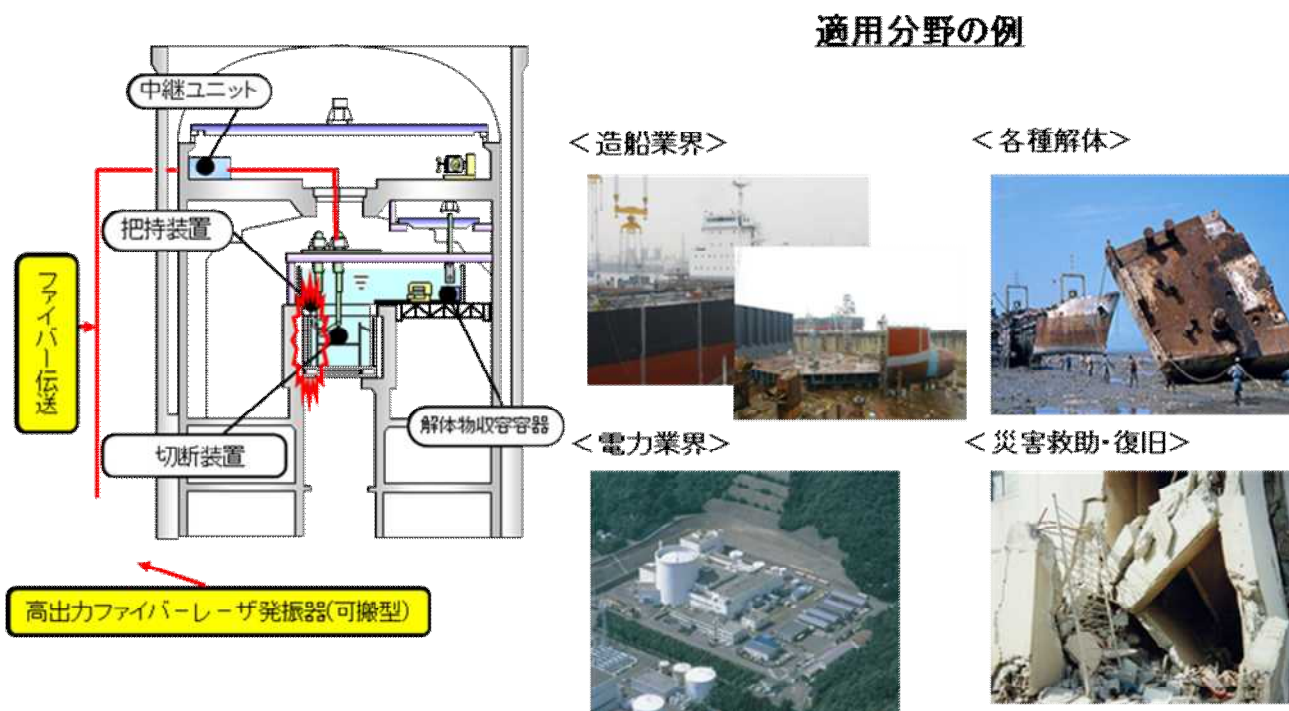


図 1 2 . 事業化に向けての適用分野の例

薄板切断ヘッド

本成果は、(株)レーザックス単独で事業化予定である。

本事業で開発した長焦点光学系とアシストガス不使用の加工ヘッドは、溶接産業への適用を念頭にカタログを作成し、2009 年度に納入実績がある。

これを引き続き販売しつつ切断用ヘッドは、アドバイザーでもあるトヨタ自動車(株)に今後ともレビューをお願いし、自動車製造設備メーカーへの納入を当面の目標とする。

実用化構想として、図 1 3 にハイブリッド自動車や電気自動車に搭載されるモータ回転子の切断・溶接加工への適用、図 1 4 に自動車用パネル部品のブランキング、トリミング等プレス工程への一部置換えへの適用を示す。

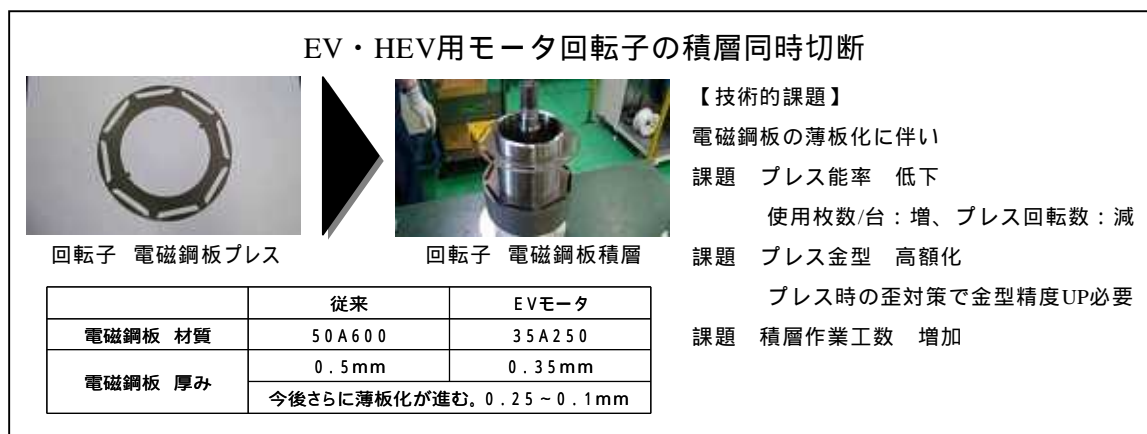


図13．ハイブリッド自動車や電気自動車に搭載されるモータ回転子の切断・溶接加工への適用の構想

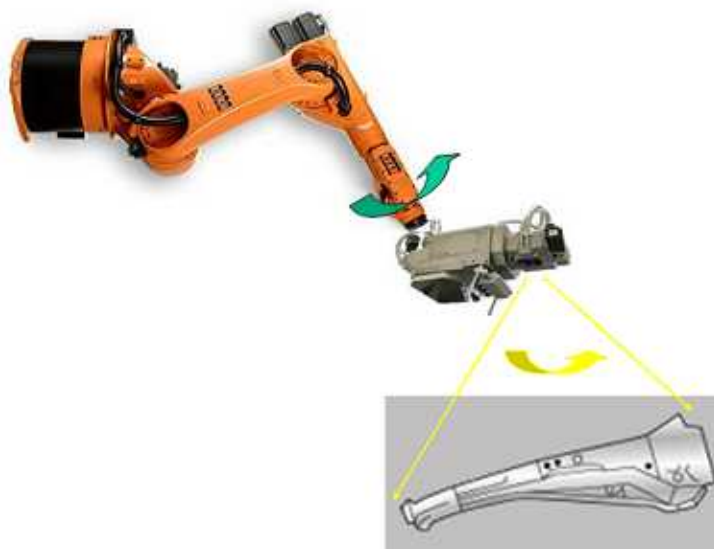


図14．自動車用パネル部品のブランキング、トリミング等プレス工程への一部置換えへの適用の構想

厚板切断ヘッド

本事業で開発した放物面鏡を用い長焦点光学系の加工ヘッドは、溶接産業への適用を念頭にカタログを作成し、2009年度に納入実績がある。これを引き続き販売しつつ切断用ヘッドは、アドバイザーでもある三菱重工業(株)に今後ともレビューをお願いし、本事業のメンバーを中心に、新たに国の競争的資金へ提案し、製品化を行う。

実用化構想として、図15に大出力レーザを長時間使用可能な厚板切断・溶接加工ヘッドの構想図を示す。

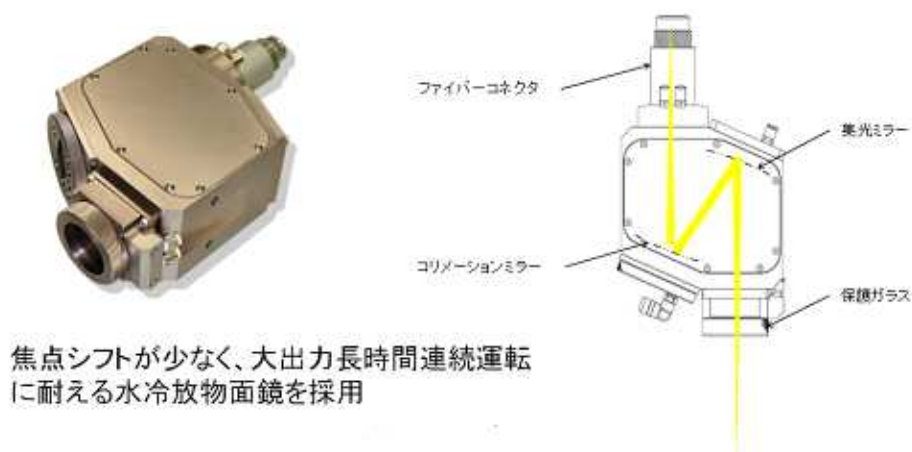


図15 . 大出力レーザを長時間使用可能な厚板切断・溶接加工ヘッドの構想図

水中厚板切断用ヘッド

今回のプロジェクトで水中でのレーザ切断技術の有用性と基礎的なデータが取得できた。しかし、将来のふげん等の原子炉解体等への適用を想定した場合、更に厚板(150 mm)までの切断能力向上とヘッドの小型軽量化が課題である。今後は日本原子力研究開発機構等が行う「ふげん」の廃止措置研究に協力し、本技術の実用化・事業化を検討する。

また、本技術は稼働中の原子力発電所でも利用可能であり、定期検査やシュラウド交換工事等への適用に向けた技術的課題も検討する。

今後5年間の中期計画(想定)を下表に示す。

	2010	2011	2012	2013	2014
1.薄板切断用ヘッド					
・事業化立上	自動車向け溶接用ヘッド カタログ作成・販売 (2009年度より)		自動車向け切断用ヘッド カタログ作成・販売		
・技術課題克服	制御ソフト改良		→		
3次元曲面の切断	→		↑		
垂直姿勢以外の切断	横向き姿勢		→		
高速化	極薄板の積層切断および同時2方向積層溶接				
・実用化	EV,HEV用モータ(極薄板)(開発出来次第、市場に投入)				
2.厚板切断用ヘッド					
・事業化立上	カタログ作成・販売 溶接用ヘッド 切断用ヘッド (2009年度より)				
・技術課題克服	→				
ラバルノズル仕様最適化	→				
アシストガス条件最適化	→				
・実用化	25mm厚対応		超40mm厚対応		
3.水中切断用ヘッド					
・技術課題克服	ヘッドの小型軽量化、切断能力向上				
・実用化	→				
	原子炉シュラウド交換時の切断および溶接				
・関係機関への実験協力	日本原子力開発機構殿への試験協力(若狭湾エネ研設備使用支援)				

付録

1. 参考文献・引用文献

無し

2. 専門用語の解説

専門用語	解説
固体レーザー	レーザー媒質が固体であるレーザー発振器。その媒質材料により、YAGレーザーやYLFレーザー等がある。従来はレーザー媒質形態がロッド(円柱)状であったが、近年は、皿型のディスクレーザーやファイバーレーザーが実用化され、光品質が優れていることから高品位固体レーザーと呼ばれる。
コリメートレンズ	レーザー発振器及び光ファイバー端面から出射されるレーザー光は拡がりを持っているため、これを平行光にするためのレンズ
レーザー誘起ブルーム	レーザー光が被加工物表面に当たった際に生じる金属蒸気。
フィードファイバー	ファイバーレーザーで発振器本体に一体となっており、レーザー光を外部に出力、伝送する光ファイバー。
プロセスファイバー	フィードファイバーから出力されたレーザー光を加工ヘッドまで伝送する為の光ファイバー
カーフ幅	切断溝幅
ラバルノズル	超音速ノズルの代表的な形態。ノズル先端部に喉部とそれに引き続いて拡管部を有し、衝撃波の発生を抑え超音速を達成する。