

「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト」

事業原簿【公開】

担当部	独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 技術開発推進部
-----	------------------------------------

—目次—

概要	i-1
I. 事業の位置付け・必要性について	
1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性	
1.1 NEDOが関与することの意義	I-1-1
1.2 実施の効果(費用対効果)	I-1-1
2. 事業の背景・目的・位置づけ	I-2-1
II. 研究開発マネジメントについて	
1. 事業の目標	II-1-1
2. 事業の計画内容	
2.1 研究開発項目	II-2-1
2.2 研究開発計画	II-3-1
2.3 研究開発の実施体制	II-4-1
2.4 研究の運営管理	II-5-1
III. 研究開発成果について	
1. 事業全体の成果	III-1-1
2. 研究開発項目毎の成果	
2.1 研究開発項目① 半導体レーザーの高出力化技術の開発	
「(1) 半導体レーザーの高出力化技術・高信頼化技術の開発」の成果	III-2-1
2.2 研究開発項目① 半導体レーザーの高出力化技術の開発	
「(2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発」の成果	III-3-1
2.3 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」	
「1) ファイバーレーザーのパルス制御技術の開発」の成果	III-4-1
2.4 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」	
「2) ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発」の成果	III-5-1
2.5 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」	
「3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発」の成果	III-6-1
2.6 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」	
「4) 励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発」の成果	III-7-1
2.7 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(2) パルスレーザー増幅(ブースター)技術の開発」	
「1) kW級ブースター増幅器の開発」の成果	III-8-1
2.8 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(2) パルスレーザー増幅(ブースター)技術の開発」	
「2) アニールリング用ブースター増幅技術の開発」の成果	III-9-1
2.9 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(3) 高出力波長変換技術の開発」	

「1) 波長変換モジュール化技術の開発」	
「アニーリング用レーザーの波長変換モジュール」の成果	Ⅲ-10-1
2.10 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(3) 高出力波長変換技術の開発」	
「1) 波長変換モジュール化技術の開発」	
「ファイバーレーザーの波長変換モジュール」の成果	Ⅲ-11-1
2.11 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(3) 高出力波長変換技術の開発」	
「2) 波長変換の高効率化技術の開発」の成果	Ⅲ-12-1
2.12 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(3) 高出力波長変換技術の開発」	
「3) 加工試験のための整備」の成果	Ⅲ-13-1
2.13 研究開発項目③ 多波長複合加工技術の開発	
「(1) 切断接合技術の開発」	
「1) 複合材料高速切断接合システム技術の開発」の成果	Ⅲ-14-1
2.14 研究開発項目③ 多波長複合加工技術の開発	
「(1) 切断接合技術の開発」	
「2) 複合材料加工プロセス・評価技術の開発」の成果	Ⅲ-15-1
2.15 研究開発項目③ 多波長複合加工技術の開発	
「(2) 表面処理技術の開発」	
「1) 高度ホモジナイズワイドビーム成形の開発」の成果	Ⅲ-16-1
2.16 研究開発項目③ 多波長複合加工技術の開発	
「(2) 表面処理技術の開発」	
「2) 大型光学部品研磨技術の開発」の成果	Ⅲ-17-1
2.17 研究開発項目③ 多波長複合加工技術の開発	
「(2) 表面処理技術の開発、	
「3) 高精度ビーム評価技術の開発」の成果	Ⅲ-18-1
2.18 研究開発項目③ 多波長複合加工技術の開発	
「(3) 粉末成形技術の開発」の成果	Ⅲ-19-1
2.19 研究開発項目④ 技術開発推進にかかる調査(先端技術、環境等)・評価・普及促進の成果	Ⅲ-20-1

IV. 実用化、事業化の見通しについて

1. 事業全体の実用化、事業化の見通しについて	Ⅳ-1-1
2. 研究開発項目毎の実用化、事業化の見通しについて	
2.1 研究開発項目① 半導体レーザーの高出力化技術の開発	
「(1) 半導体レーザーの高出力化技術・高信頼化技術の開発」の実用化、事業化の見通し	Ⅳ-2-1
2.2 研究開発項目① 半導体レーザーの高出力化技術の開発	
「(2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発の実用化、事業化の見通し	Ⅳ-3-1
2.3 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」	
「1) ファイバーレーザーのパルス制御技術の開発」の実用化の見通し	Ⅳ-4-1
2.4 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」	
「2) ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発」の実用化の見通し	Ⅳ-5-1
2.5 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発、	
「3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発」の実用化の見通し	Ⅳ-6-1
2.6 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」	

「4) 励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発」の実用化、事業化の見通し	IV-7-1
2.7 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(2) パルスレーザー増幅(ブースター)技術の開発」	
「1) kW級ブースター増幅器の開発」の実用化の見通し	IV-8-1
2.8 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(2) パルスレーザー増幅(ブースター)技術の開発」	
「2) アニール用ブースター増幅技術の開発」の実用化の見通し	IV-9-1
2.9 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(3) 高出力波長変換技術の開発」	
「1) 波長変換モジュール化技術の開発」	
「アニール用レーザーの波長変換モジュール」の実用化の見通し	IV-10-1
2.10 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(3) 高出力波長変換技術の開発」	
「1) 波長変換モジュール化技術」の開発	
「ファイバーレーザーの波長変換モジュール」の実用化の見通し	IV-11-1
2.11 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(3) 高出力波長変換技術の開発」	
「2) 波長変換の高効率化技術の開発」の実用化の見通し	IV-12-1
2.12 研究開発項目② レーザー高品位化技術の研究開発	
「(3) 高出力波長変換技術の開発」	
「3) 加工試験のための整備」の実用化の見通し	IV-13-1
2.13 研究開発項目③ 多波長複合加工技術の開発	
「(1) 切断接合技術の開発」	
「1) 複合材料高速切断接合システム技術の開発」の実用化の見通し	IV-14-1
2.14 研究開発項目③ 多波長複合加工技術の開発	
「(1) 切断接合技術の開発」	
「2) 複合材料加工プロセス・評価技術の開発」の実用化の見通し	IV-15-1
2.15 研究開発項目③ 多波長複合加工技術の開発	
「(2) 表面処理技術の開発」、	
「1) 高度ホモジナイズワイドビーム成形の開発」の実用化、事業化の見通し	IV-16-1
2.16 研究開発項目③ 多波長複合加工技術の開発	
「(2) 表面処理技術の開発」	
「2) 大型光学部品研磨技術の開発」の実用化、事業化の見通し	IV-17-1
2.17 研究開発項目③ 多波長複合加工技術の開発	
「(2) 表面処理技術の開発」	
「3) 高精度ビーム評価技術の開発」の実用化、事業化の見通し	IV-18-1
2.18 研究開発項目③ 多波長複合加工技術の開発	
「(3) 粉末成形技術の開発」の実用化の見通し	IV-19-1

(添付資料)

- ・添付資料1 「次世代素材等レーザー加工技術開発プロジェクト基本計画
- ・添付資料2 特許論文リスト
- ・添付資料3 事前評価関連資料(事前評価書)

概要

		最終更新日	平成24年8月3日
プログラム（又は 施策）名			
プロジェクト名	次世代素材等レーザー加工技術開発 プロジェクト	プロジェクト番号	P10006
担当推進部 /担当者	技術開発推進部 齋藤 弘一（平成24年5月～） 佐々木 健一（平成22年8月～平成24年4月）		
0. 事業の概要	<p>我が国における低炭素社会の実現に向けた次世代製品の軽量化・高強度化、高機能化に対応した加工技術の確立が求められている。次世代レーザー加工技術は、従来加工技術のブレークスルーとして、先進材料の非接触、高品位、高速加工を実現する技術として期待されている。また、我が国の製造業における国際競争力の維持・強化、技術安全保障などの観点からも次世代レーザーの技術開発を国として取り組む必要性に迫られている。本事業では、「ユーザーニーズに適応した」かつ「国際競争力のある」半導体ファイバーレーザー発振技術及びそれを利用した加工技術の研究開発を下記の開発項目により実施する。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① レーザー高出力化技術の開発 ② レーザー高品位化技術の開発 ③ 多波長複合加工技術の開発 		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>2001年度以降、我が国においてレーザー技術に関する国家プロジェクトが実施されてこなかった一方で、欧米では莫大な開発予算による国家支援が継続されており、こうした背景を受けて、レーザー技術の最先端領域であり市場拡大が著しい半導体ファイバーレーザーの分野を欧米に席巻されているのが現状である。低炭素社会に資する次世代製品の実現に先進的な我が国ユーザー企業は、レーザー加工装置を海外から調達して、先進材料の新しい加工技術の開発に着手しているものの、メンテナンスサービスの遅延やコスト高、ブラックボックス化等により、安心して開発が進められないだけでなく、その導入競争においても海外ライバル企業から遅れをとる懸念が生じている。</p>		
II. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	<p>本事業では、「ユーザーニーズに適応した」かつ「国際競争力のある」をコンセプトに、高出力・高品位の半導体ファイバーレーザー発振技術及びそれを利用した加工技術を開発するとともに、次世代製品に向けたレーザー加工の基盤技術を確立するため、以下の各研究開発項目の確立を目指す。</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 高出力化技術開発 (半導体レーザー高出力化技術・高信頼化技術、ファイバーカップル技術) ② 高品位化技術開発 (ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術、パルスレーザー増幅技術、高出力波長変換技術) ③ 多波長複合加工技術開発 (炭素繊維複合材料の切断接合技術、有機EL・太陽電池デバイス等の表面処理技術、チタン合金の粉末成形技術) <p>炭素繊維複合材料の切断接合では自動車の製造ラインに適用可能な加工速度と品質、有機EL・太陽電池デバイス・有機ELの表面処理では大面積化と品質、生体材料の粉末成形ではチタン合金を対象とした医療機器に適用可能な加工速度と品質を実現する国産の次世代レーザー加工システムを平成26年度までに開発することを目標とする。これらにより、省エネ・軽量化が要求される自動車・航空機、低コスト生産・高効率化が要求されるエネルギー・情報家電、高品位化・新医療機器開発が望まれている医療・介護等に幅広く寄与するものづくり基盤技術の強化が期待される。</p>		

事業の計画内容	主な実施事項	H21fy	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy		
	レーザーの高出力化技術の開発	→						
	レーザーの高品位化技術の開発	→						
	多波長複合加工技術の開発	→						
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位:百万円) 契約種類: ○をつける (委託(○)助成()共同研究(負担率 2/3)(○))	会計・勘定	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	H26fy	総額	
	一般会計	673	1,089	0	—	—	1,762	
	特別会計 (電源・需給の別)	0	0	1,169	—	—	1,169	
	加速予算 (成果普及費を含む)	0	584	0	—	—	584	
	総予算額	673	1,673	1,169	—	—	3,515	
開発体制	経産省担当原課	製造産業局産業機械課						
	プロジェクトリーダー	技術研究組合次世代レーザー加工技術研究所 研究総括理事 尾形仁士						
	委託先(*委託先が管理法人の場合は参加企業数および参加企業名も記載)	<p>○技術研究組合次世代レーザー加工技術研究所(参加 11 団体) (浜松ホトニクス(株)、古河電気工業(株)、(株)アルバック、ミヤチテクノス(株)、新日本工機(株)、(株)アспект、三菱化学(株)、(株)片岡製作所、公益財団法人レーザー技術総合研究所、独立行政法人産業技術総合研究所(加工システム技術開発センター)、一般財団法人製造科学技術センター)</p> <p>○大阪大学(レーザーエネルギー学研究所、接合科学研究所)</p> <p>○浜松ホトニクス(株)</p> <p>○(株)アルバック</p> <p>○古河電気工業(株)</p>						

<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p>(1) 研究開発の概要</p> <p>今後需要が伸びることが予想される新素材や次世代製品において、高出力で高品位な半導体ファイバーレーザーを用いて短時間でかつ高品質に加工ができる発振・加工技術の開発を、民間企業、大学、研究機関、経済産業省等が連携して実施し、早期実用化を目指す。以下の各研究開発項目の確立を目指す。</p> <p>① 高出力化技術開発（半導体レーザー高出力化技術・高信頼化技術、ファイバーカップル技術） ② 高品位化技術開発（ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術、パルスレーザー増幅技術、高出力波長変換技術） ③ 波長複合加工技術開発（炭素繊維複合材料の切断接合技術、有機 EL・太陽電池デバイス等の表面処理技術、チタン合金の粉末成形技術）</p> <p>上記の各研究開発項目が連携することによってそれぞれの加工技術を確立する。炭素繊維複合材料の切断接合では自動車の製造ラインに適用可能な加工速度と品質、有機EL・太陽電池デバイス・有機ELの表面処理では大面積化と品質、生体材料の粉末成形ではチタン合金を対象とした医療機器に適用可能な加工速度と品質を実現する国産の次世代レーザー加工システムを平成 26 年度までに開発することを目指す。</p> <p>(2) 研究開発目標と成果</p> <table border="1" data-bbox="416 750 1326 1245"> <thead> <tr> <th></th> <th>目標</th> <th>達成状況</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>切断接合技術の開発</td> <td>CFRP 等の次世代素材をレーザーにより、高品位に加工できる技術を開発する。</td> <td>各種レーザーを用いて CFRP 素材の加工実験と評価を行い、高品位の CFRP 加工の見通しがついた。</td> </tr> <tr> <td>表面処理技術の開発</td> <td>フラットパネルディスプレイや太陽電池製造に適用できるレーザーSi アニール技術を開発する。</td> <td>アニール用レーザーを光源とし、均一なワイドビームを実現する光学系の構築が、順調に進んでいる。</td> </tr> <tr> <td>粉末成形技術の開発</td> <td>従来の粉末成形ではできなかったチタン等の材料を用いて、医療などに貢献できる粉末成形技術を開発する。</td> <td>小型プラットフォームを製作し、真空中でのチタン合金の成形技術を開発した。展示会に出品し、ユーザーにアピールすることができた。</td> </tr> <tr> <td>調査・普及促進</td> <td>プロジェクトの出口を幅広く外部に求めるため、有識者を含めてプロジェクトのテーマについて議論する。</td> <td>調査委員からの幅広い意見を聞き、国際的な技術動向などの調査を行った。分科会（WG）では今後のプロジェクトの展開につながる議論ができた。</td> </tr> </tbody> </table>			目標	達成状況	切断接合技術の開発	CFRP 等の次世代素材をレーザーにより、高品位に加工できる技術を開発する。	各種レーザーを用いて CFRP 素材の加工実験と評価を行い、高品位の CFRP 加工の見通しがついた。	表面処理技術の開発	フラットパネルディスプレイや太陽電池製造に適用できるレーザーSi アニール技術を開発する。	アニール用レーザーを光源とし、均一なワイドビームを実現する光学系の構築が、順調に進んでいる。	粉末成形技術の開発	従来の粉末成形ではできなかったチタン等の材料を用いて、医療などに貢献できる粉末成形技術を開発する。	小型プラットフォームを製作し、真空中でのチタン合金の成形技術を開発した。展示会に出品し、ユーザーにアピールすることができた。	調査・普及促進	プロジェクトの出口を幅広く外部に求めるため、有識者を含めてプロジェクトのテーマについて議論する。	調査委員からの幅広い意見を聞き、国際的な技術動向などの調査を行った。分科会（WG）では今後のプロジェクトの展開につながる議論ができた。
	目標	達成状況															
切断接合技術の開発	CFRP 等の次世代素材をレーザーにより、高品位に加工できる技術を開発する。	各種レーザーを用いて CFRP 素材の加工実験と評価を行い、高品位の CFRP 加工の見通しがついた。															
表面処理技術の開発	フラットパネルディスプレイや太陽電池製造に適用できるレーザーSi アニール技術を開発する。	アニール用レーザーを光源とし、均一なワイドビームを実現する光学系の構築が、順調に進んでいる。															
粉末成形技術の開発	従来の粉末成形ではできなかったチタン等の材料を用いて、医療などに貢献できる粉末成形技術を開発する。	小型プラットフォームを製作し、真空中でのチタン合金の成形技術を開発した。展示会に出品し、ユーザーにアピールすることができた。															
調査・普及促進	プロジェクトの出口を幅広く外部に求めるため、有識者を含めてプロジェクトのテーマについて議論する。	調査委員からの幅広い意見を聞き、国際的な技術動向などの調査を行った。分科会（WG）では今後のプロジェクトの展開につながる議論ができた。															
	<p>投稿論文</p>	<p>「査読付き」12 件、「その他」4 件</p>															
	<p>特 許</p>	<p>「出願済」19 件（うち国際出願 1 件）</p>															
	<p>その他の外部発表 （プレス発表等）</p>	<p>「研究発表・講演」71 件、「展示会出展」2 件</p>															
<p>Ⅳ. 実用化、事業化の見通しについて</p>	<p>これまでの開発より、3つの出口のCFRP切断接合、表面処理、粉末成形のどのテーマにおいても最終目標達成の見通しを得ている。最終目標を達成し、実用化と事業化への必要な基盤技術を確立し、事業化に向けた検討を進めていく方針である。実用化、事業化の詳細は各実施者の報告による。</p>																
<p>Ⅴ. 基本計画に関する事項</p>	<p>作成時期</p>	<p>平成 24 年 3 月 作成</p>															
	<p>変更履歴</p>	<p>(1) 平成 22 年 3 月制定。 (2) 平成 23 年 3 月、研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」の中間目標の変更により改訂。 (3) 平成 24 年 3 月、平成 24 年度の勘定が一般会計から特別会計への変更に伴い、プロジェクト名称改訂。</p>															

I. 事業の位置づけ・必要性について

1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDO が関与することの意義

日本のレーザー開発は、経済産業省の大型開発プロジェクトだけでも、1977 年～2001 年にかけて CO₂ レーザー等の継続的な開発を行ってきた。

国家プロジェクトの取り組みにより、わが国のレーザー加工技術は、かろうじて先行集団の一角に位置し、わが国製造業の技術競争力を下支えしてきた。一方、欧米では産業技術および軍事技術として盛んに研究開発および産業応用が進められた。

わが国では 2001 年度以降レーザー技術に関する国家プロジェクトが実施されてこなかった一方で、欧米では国家支援が継続されてきており、レーザー技術の最先端領域である市場拡大が著しい半導体・ファイバーレーザーの分野において欧米に席卷されているのが現状である。

近年、産業用レーザー市場は海外で拡大し続けているものの、我が国は、メンテナンスコスト、レーザー加工技術等の開発で大きく遅れをとっている。

そのため、我が国に導入されている有望なレーザー装置は、ほぼ海外製であり完全にブラックボックス化されていることから、導入してもメンテナンス等を海外企業に頼らざるを得ない。

このままでは我が国のレーザー技術の空洞化が懸念され、革新的な部材の製造ができて自力で次世代製品を製造できないという事態に陥る可能性があり、我が国の製造業における国際競争力の維持・強化、技術力強化などの観点からも次世代レーザーの技術開発を国として取り組む必要性に迫られている。

1.2 実施の効果(費用対効果)

高出力半導体ファイバーレーザー及びそれを搭載したレーザー加工機の普及が見込まれ、2030 年にレーザー加工機の国内市場を獲得したと想定した場合、約 2,200 億円の市場が期待される。

2. 事業の背景・目的・位置づけ

2.1 事業の背景

2001年度以降、我が国においてレーザー技術に関する国家プロジェクトが実施されてこなかった一方で、欧米では大規模な国家支援が継続されており、こうした背景を受けて、レーザー技術の最先端領域であり市場拡大が著しい半導体ファイバーレーザーの分野を欧米に席卷されているのが現状である。低炭素社会に資する次世代製品の実現に先進的な我が国ユーザー企業は、レーザー加工装置を海外から調達して、先進材料の新しい加工技術の開発に着手しているものの、装置のメンテナンスサービスの遅延やブラックボックス化等により、安心して開発が進められないだけでなく、その導入競争においても海外ライバル企業から遅れをとる懸念が生じている。

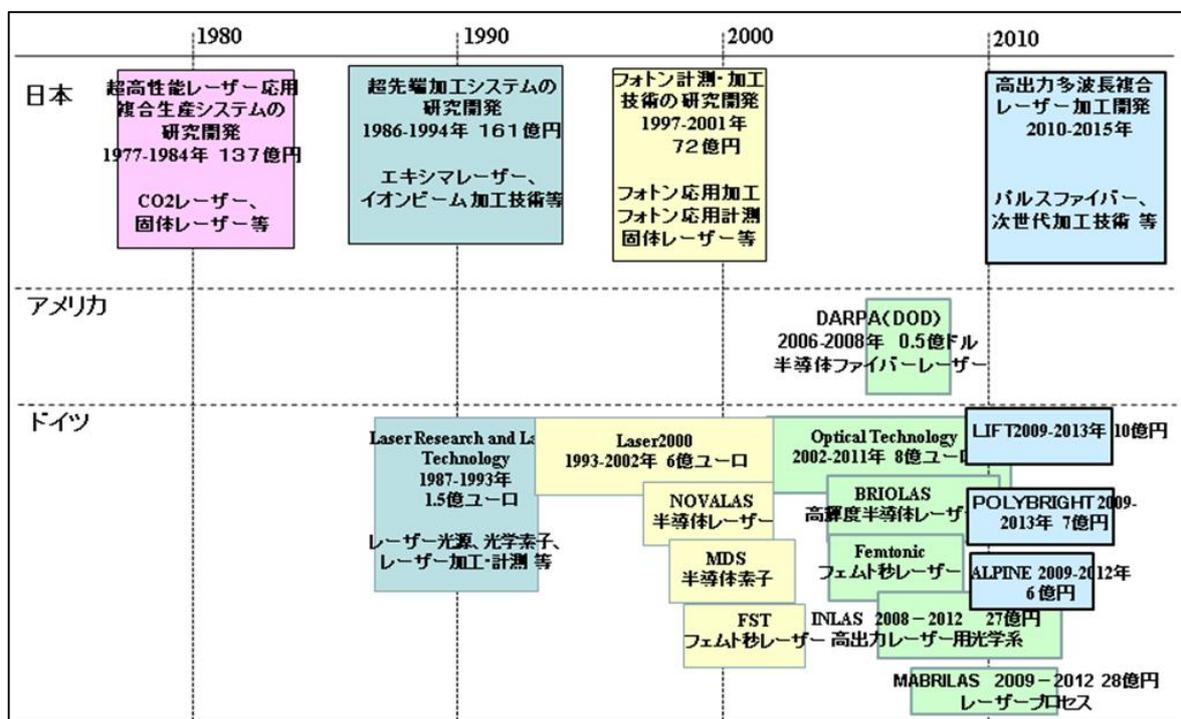


図 I - 1. 2. 1 レーザー開発状況

2.2 政策的重要性

本プロジェクトは、2009年12月に行われた総合科学技術会議（第87回）「優先度判定(SABC)及び改善・見直し指摘の結果」において、「S」※¹ 評価を受け積極的に実施すべきプロジェクトであると評価を受けて開始している。

コメント

- 今回開発しようとしているレーザーは長波長と短波長を組み合わせ、加工の精度、速度を高めたレーザーであり、難加工である炭素繊維複合材料や太陽電池などの機能性材料を高品位・高品質で加工することができるものであり、非常に重要である。
- レーザーの光源に近い企業とその応用に強い企業との連携として集中研究拠点体制で取り組む予定であり、効果の期待できる優れた施策である。
- 我が国製造業の国際競争力の維持・強化、技術安全保障の観点からも国産の次世

代レーザー技術を国として取り組む意味は大きく、海外の動向を踏まえつつ、コストパフォーマンスに留意しつつ明確な商品化イメージを持って、積極的に実施すべきである。

※1：特に重要で、府省連携等、効果的な実施体制が整備されるなど内容的にも極めて優れ、グリーンイノベーションなど、イノベーション創出・社会への展開の観点等から、特に重点的に資源を配分することで、積極的に実施すべきもの。

2.3 NEDO が関与する意義

我が国では、このようなレーザー発振器開発に必要な要素技術が大企業、中小企業、大学、研究機関に分散しており、製品化を見据えたレーザー技術の集約・システム化が進んでいなかったため、国が主導して、コンソーシアムによる技術開発プロジェクトを実施することで、技術の集約やシステム化を進めることが有効である。

また、本事業により企業が培ったレーザーの発振器、加工システム開発に必要な要素技術がレーザー光源技術、レーザー加工用デバイス、レーザー加工システム等として実用化がされることで、各産業における次世代製品の製造がレーザー加工によって促進される期待が高い。

2.4 研究開発の目的

本事業では、我が国におけるレーザー技術を集積することによって高出力・高品位半導体ファイバーレーザー技術の開発を推進し、他国に先駆けて革新的なものづくり基盤技術として、軽くて強いが加工難易度が極めて高い炭素繊維複合材料等の先進材料の加工や、次世代製品の短時間で高品質を実現する加工技術の確立を目指す。

Ⅱ 研究開発マネジメント

1. 事業の目標

高出力・高品位の半導体ファイバーレーザー発振技術及びそれを利用した加工技術を開発し、先進材料の利活用促進に貢献するため、レーザー加工システムの技術開発を行う。特に、先進材料の高加工品質と高生産性を実現することによって、従来手法では困難であった精密加工のブレイクスルー技術として実用に耐えるレーザー加工技術を確立する。先進材料の加工技術として、①切断接合技術、②表面処理技術、③粉末成形技術の研究開発を行う。

本事業では、我が国の企業・大学・研究機関が有するレーザー加工技術を集積することによって、高加工品質と高生産性を両立する加工システムの技術開発を平成 26 年度までに開発することを目標とする。

開発を行う加工技術：

- ① 切断接合技術開発：自動車の製造ラインに適用可能な炭素繊維複合材料(CFRP)の切断接合技術(加工速度と品質)を実現
- ② 表面処理技術開発：有機EL・太陽電池デバイスの表面処理技術では大面積化と表面改質を実現
- ③ 粉末成形技術開発：生体材料の粉末成形ではチタン合金を対象とした医療機器に適用可能な加工速度と品質を実現

1.1 加工用レーザーの性能

図Ⅱ-1.1.1は、既存レーザーの性能と本プロジェクトで開発するレーザー装置の性能をプロットしている。開発ターゲットである3つの加工技術に必要なレーザーの性能は、切断接合技術開発では高パワーレーザー装置、表面処理技術開発ではパルスエネルギーが高い、粉末成形では繰り返し周波数が高い性能が必要であり、各々市販レーザーには無い特徴を有したレーザー装置開発を目標とした。

一方、高出力化技術では、先行している海外メーカーの2010年までのシングルエミッタ性能のトレンドを調査した結果(図Ⅱ-1.1.2)、高出力化する目標設定とした。プロジェクト開始後、中間目標値と同じ光出力15Wの製品がリリースされたが、2012年にスペックダウンされ、目標値は世界的に最高位である。さらに、アレイ化においては、開発したシングルエミッタを用い、高出力化のみならず、長寿命化の両立を目指す。

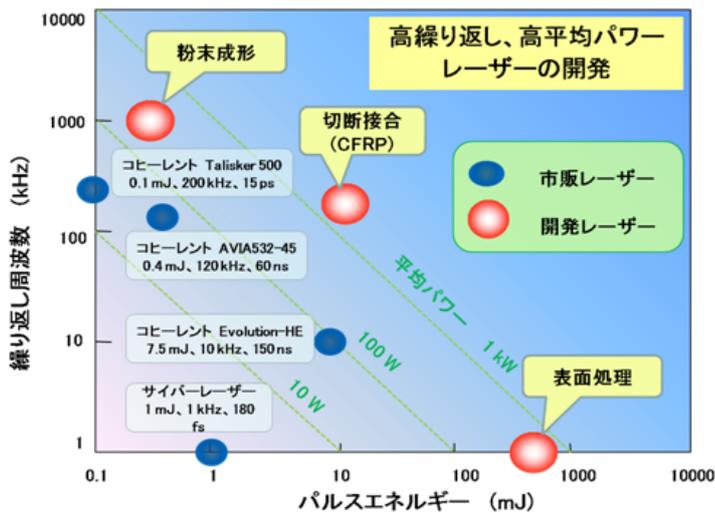


図 II - 1. 1. 1 開発レーザー性能

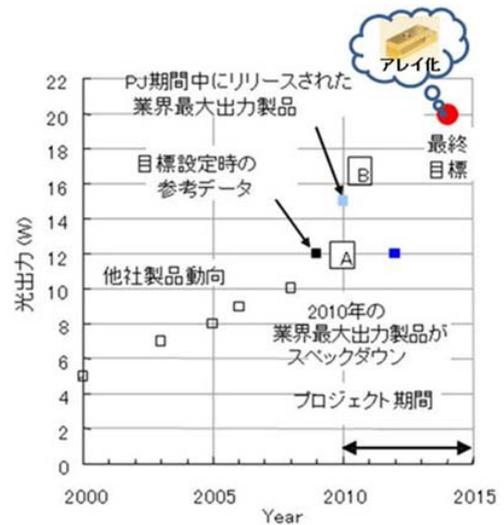


図 II - 1. 1. 2 シングルエミッタのトレンド

1.2 レーザー加工に求められる性能又は加工品質

現状の切断接合技術、表面処理技術、粉末成形技術及び、レーザーの性能などから、開発を目指すレーザー加工システムに求められる性能を検討した結果を表 II - 1. 2. 1 に示す。

表 II - 1. 2. 1 開発加工システムに求められる性能(品質)

項目		現行性能	開発ターゲット	備考	
切断接合技術	レーザー照射	-	高出力と二波長重畳等の多波長複合照射	-	
	加工速度	切削加工0.1m/分、W/J加工1m/分	6m/分:	自動車の部材加工のタクトタイム	
	切断	反応層の厚み	機械加工、W/Jは熱損傷を発生しない	反応層の厚み: 100 μm以下	ユーザー企業からのリクエスト
		引張り強度	-	機械加工による引張り強度をゼロとして10%未満の低減に抑制	ユーザー企業からのリクエスト
接合	せん断強度	接着剤30MPa	100MPa	当該部材の実用的に求められる接合強度の最高値を設定	
表面処理技術	レーザーレーザー照射	エキシマレーザー	グリーンレーザー	-	
	ビーム幅	400mm	500mm以上	40inchTVクラスの基板加工が可能なサイズ以上	
粉末成形技術	レーザー照射	CW	CWとパルスの複合レーザー照射	-	
	成形精度	±0.2mm	±0.1mm	欧州製焼結積層成形装置の能力の50%向上。	
	成形時間	20時間 (高さ100mmサイズの基準パーツ)	16時間以内	欧州製焼結積層成形装置の能力の20%アップ。	
	引張り強度	-	Ti 840Mpa以上	Ti-6Al-4Vの機械強度に関するASTM-F136とISC5832-3のいずれの規定値も満足する値を設定。	

2.1 研究開発項目

2.1.1 レーザー加工装置の開発に必要な開発技術項目

1.2 及び 1.3 より、切断接合技術、表面処理技術、粉末成形技術に要求されるレーザー加工システムの性能を表Ⅱ-2.1.1 にまとめ、開発が必要な技術を以下のように分類した。

- ① レーザー高出力化技術の開発
- ② レーザー高品位化技術の開発
- ③ 多波長複合加工技術の開発

表Ⅱ-2.1.1 加工技術に対する要求と技術課題

	要求性能		研究開発分類
	項目	仕様	
切断接合技術	光源: シングル エミッタ	波長: 近赤外帯(900nm帯)、出力: 20 W、効率: 65%、寿命: 50,000時間	①レーザー高出力化技術 励起用半導体レーザーの高出力化・高信頼化 ファイバー導入におけるレーザー出力の損失低減
	光源: アレイ	波長: 近赤外帯(900nm帯)、出力: 300 W、効率: 60%、寿命: 50,000時間 自動組立が可能であること	
	レーザー	繰り返し: 75-150kHz、出力パワー: 1.5kW、波長: 1064.1-1064.8nm パルス幅: 3-10ns	②レーザーの高品位化技術 レーザー出力増幅及びビーム品質の保持
	切断性能	切断加工速度 6m/min、反応層厚み 100μm、引張強度 10%未満の低減、高出力レーザーと二波長重畳等の多波長複合照射	③多波長複合加工技術 加工システム、プロセスの構築
	接合性能	切断加工速度 6m/min、引張せん断強度 100MPa	
表面処理技術	レーザー	Green Laser、波長: 1μm帯、平均出力: 200~700W、 繰り返し周波数: 1~150 kHz、パルス幅: 0.5~200ns	②レーザーの高品位化技術 レーザー出力増幅及びビーム品質の保持
	ビーム 性能	ワイドビーム: 幅500mm以上、	③多波長複合加工技術 ワイドビーム整形光学系技術の確立
粉末成形技術	レーザー	波長1μm帯、平均出力: 200~700W、繰り返し周波数: 1~150 kHz パルス幅100ns	②レーザーの高品位化技術 レーザー出力増幅及びビーム品質の保持
	成形	材料: チタン(酸化防止技術)、成形精度: ±0.1mm、成形時間16時間 以内、CWとパルスの複合レーザー照射	③多波長複合加工技術 真空チャンバー型焼結積層造形技術

2.2 研究開発計画

レーザー加工システム単位技術課題に対する開発計画及び、開発予算を以下に示す。

2.2.1 切断接合技術開発計画

図 II - 2.2.1 切断接合技術開発計画

2.2.2 表面処理技術開発計画

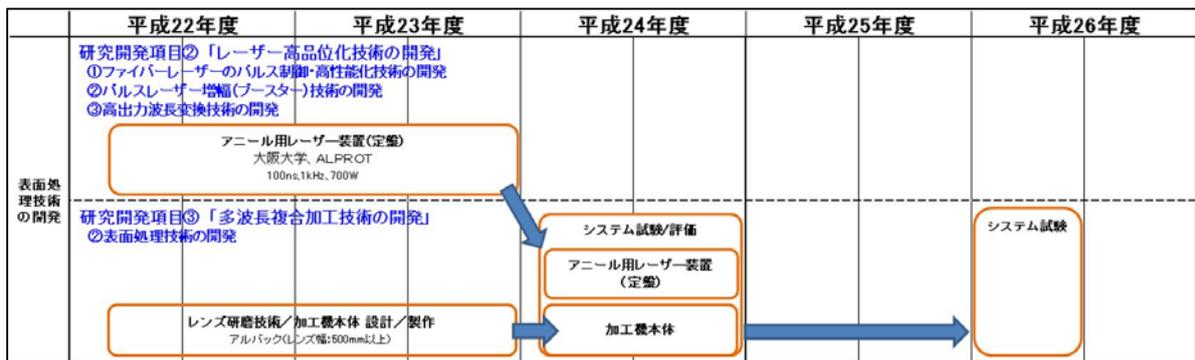


図 II - 2.2.2 表面処理技術開発計画

2.2.3 表面処理技術開発計画

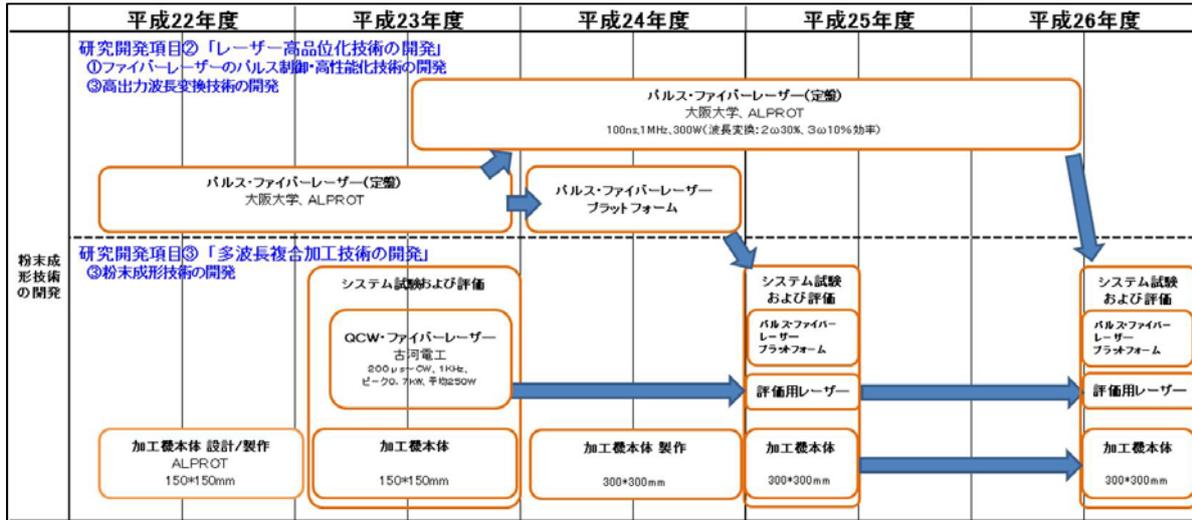


図 II - 2.2.3 粉末成形技術開発計画

2.2.4 開発予算計画

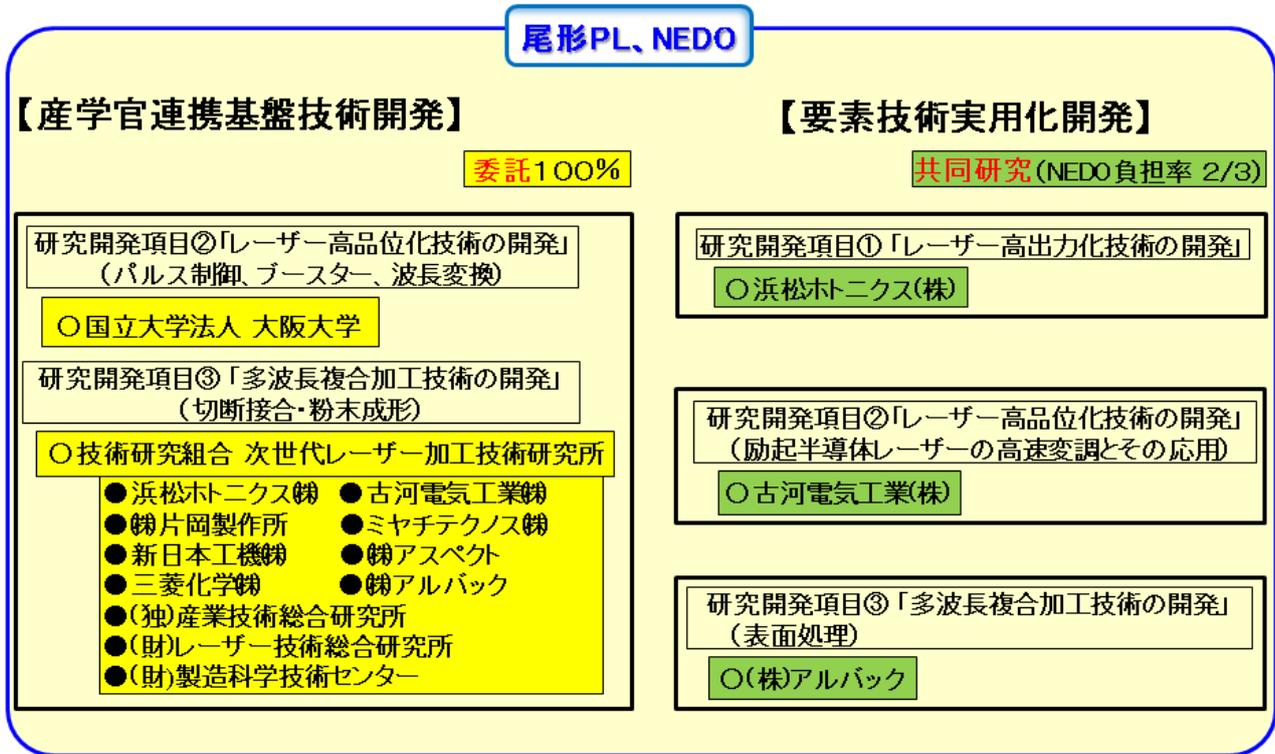
表 II - 2.2.1 プロジェクト予算

単位：百万円

		平成22年度	平成23年度	平成24年度 (予算)	総額
開発実績 (事業費合計)	総額	673	1,673	1,169	3,515
	(委託)	449	547	634	1,630
	(共同研究: 負担率2/3)	224	542	535	1,301
	(加速)	0	584	0	584

2.3 研究開発の実施体制

我が国では、このようなレーザー発振器開発に必要な要素技術が大企業、中小企業、大学、研究機関に分散しており、製品化を見据えたレーザー技術の集約・システム化が進んでいなかったため、コンソーシアムによる技術開発プロジェクトを実施することで、技術の集約やシステム化を進めることとした。



図Ⅱ-2.3.1 プロジェクト実施体制

2.4 研究開発の運営管理

プロジェクトリーダーとNEDOの研究開発の進捗管理、プロジェクト内の連携を図る組織体、及び実用化に向けてユーザーとの連携を図っている。

2.4.1 プロジェクトリーダーとNEDOの研究開発の進捗管理

① レーザー推進連絡会議

実施者が一堂に会プロジェクト全体のスケジュール及び課題の確認。

② 進捗確認シート

4半期に一度、研究進捗の報告、課題と今後のスケジュールを確認。

2.4.2 プロジェクトメンバーによる進捗管理

① 光源開発センター

大阪大学(レーザー研、接合研)に高品位化技術の開発及び評価を集約。

② 加工技術開発センター

産総研に加工システム(多波長複合技術)の構築を集約して開発を推進。

③ プロジェクト技術開発会議

プロジェクトメンバーが光源とシステム関連を交互に開催する連絡会議。

2.4.3 実用化に向けたユーザーとの連携

技術的な方向性や最新技術の動向把握、技術情報等の収集。

プロジェクト成果活用が見込めるユーザー企業のメンバーからなる外部有識者やエンドユーザー、レーザー加工機メーカーとワーキンググループを構築し、成果の評価・普及促進を図り、実用化への検討を行う。

① 技術調査委員会

実用化促進のため、レーザー及びレーザー加工の国際的な技術動向、標準化、新素材・加工、表面改質、粉末成形のユーザーからのニーズ等の把握。

② 国際・戦略ワーキンググループ

現状のレーザー及びレーザー加工技術の動向と、今後どのようなレーザーとレーザー加工技術等の情報収集。

③ 切断接合ワーキンググループ

CFRP素材の各種仕様とその加工や評価等に関するニーズ等の把握。

④ 表面改質ワーキンググループ

フラットパネルメーカーの技術ニーズ、太陽電池領域におけるレーザー応用に関するニーズ等の把握。

⑤ 粉末成形ワーキンググループ

粉末成形の医療関連活用に関する技術情報、レーザーを活用した造形技術に関するニーズ等の把握。

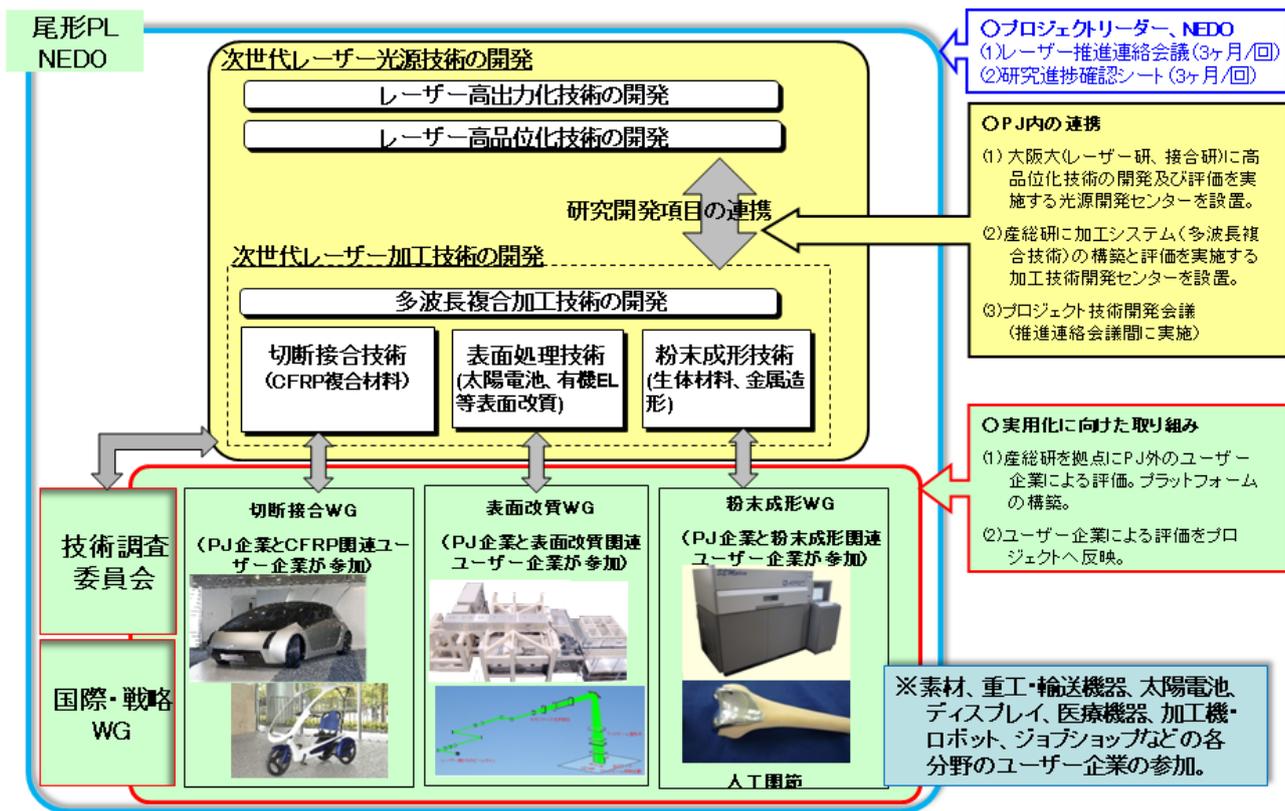


図 II - 2.4.1 プロジェクトの運営

2.4.2 情勢変化等への対応等

2.4.2.1 加速制度の活用

「多波長複合加工技術の開発の前倒し及び、レーザー高品位化技術の開発の目標値向上」及び、「レーザー高品位化技術の開発の事業化推進」の2テーマで活用した。

① 「多波長複合加工技術の開発」の前倒し及び「レーザー高品位化技術の開発」の目標値向上

2010年12月の”74st Laser Materials Processing Conference(Tokyo)”において、ドイツの研究機関であるLZH (Laser Zentrum Hannover e.V.) は、航空分野や自動車分野への応用を目指し、数kW級レーザーを利用したCFRP切断に関する研究成果を発表し、更なる研究開発の実施を示唆した。このため、現行の開発計画ペースでは、ドイツに先行される可能性が発生したことから、平成24年度以降に計画していた切断接合技術開発（研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」）及び、研究開発項目②「レーザー高品位化技術の開発」について以下の加速を行った。

○ 平成24年度以降に計画していた切断接合技術開発（研究開発項目③「多波長複合加工技術の開発」）において、30W級パルス光源システムを平成23年度中に導入し、平成24年度以降に予定していたCFRPの切断接合実験を平成23年度から実施した。

○ 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の開発」において、励起用半導体レーザー及び複合ビーム集光用光学系ユニットを導入し、半導体レーザー特性評価及びレーザー安定性評価をそれぞれ実施し、ファイバーレーザー出力の開発目標を200Wから300Wにし、更に、高出力波長変換技術について、波長変換素子のコート

及び均一冷却に関する最適化を実施し、2倍高調波への変換効率を30%から40%に、3倍高調波への変換効率を10%から13%にした。

これにより、平成 24 年度に計画していた CFRP 切断に関する開発を平成 23 年度に前倒しすることができ、また、開発目標をより高く設定することができる。そして、他国に先駆けて CFRP 等の先進材料の加工技術の確立を目指すとともに、レーザー高品位化技術を強化することにより、本技術分野における日本の国際競争優位を確保することができる。

② 「レーザー高品位化技術の開発」の事業化推進

2010 年 5 月の ” AKL 10-8th International Laser Technology Congress (Aachen, Germany) ” において、IPG PHOTONICSは、励起用レーザーの消費電力の低減が実現可能なQCWファイバーレーザーに関する研究成果を発表し、更なる研究開発の実施を示唆していたため、現行の開発計画ペースでは、励起用レーザーにおいて、世界をリードする欧米に先行される可能性が発生した。

このため、現行の開発計画ペースでは、励起用レーザーにおいて、世界をリードする欧米に先行される可能性が発生したことから、以下の加速を行った。

- 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の開発(1)ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術」について、ファイバー増幅部分に高速変調半導体レーザーを適用し、ファイバー増幅部分の消費電力を現行の連続駆動の場合と比較して50%以上の効率向上を目標にした。
- 高速変調半導体レーザーを連続駆動用ファイバーレーザーキャビティの励起に適用し、ピーク出力の目標値を300Wから700Wに変更した。

上記の目標を設定し、(株)古河電気工業との2/3共同研究契約によって実施し、研究開発成果によるファイバーレーザー発振器をQCWファイバーレーザーとしてパッケージ化し、早期に実用化を図る。

2.4.2.2 開発方針の修正

① 表面処理技術開発(株)アルバック)

平成 23 年 10 月：当初計画のレンズ幅を 500mm と想定していたが、55inch wide を製品化するマーケット情報入手し、計画していたレンズ幅より、さらに幅広のビームの形成を早期に実現する必要性が発生した。そのため、ビーム幅を 500mm から 700mm に変更した。

② レーザー高出力化技術(浜松ホトニクス(株))

「開発項目① レーザー高出力化技術」で開発している光源については、既存のレーザー装置の光源に適用することによって、市場への早期展開を目指すことにした。

2.4.2.3 開発方針の修正

基本計画、開発計画及び体制の見直しを検討。

- これまでの研究開発結果や成果を受け、より出口を意識して目標を具体化する。
- 中間評価結果および今後の情勢変化（研究進捗、計画の成立性および予算など）を総合的に鑑み、柔軟に対応する。
- ユーザーとのさらなる連携強化を図り、加工システム仕様へ反映する。

Ⅲ. 研究開発成果について

1. 事業全体の成果

本プロジェクトにおいて、成果の出口から見て次の3テーマの開発を行う。

CFRP切断接合技術の開発

表面処理（Siアニール）技術の開発

粉末成形技術の開発

それぞれの開発はレーザーの開発とそのレーザーを搭載した加工システムの開発から成っている。本プロジェクトではCFRP加工、表面処理、粉末成形の3つの加工システムの実用化、または事業化が求められているが、その3つの出口とは別に研究開発項目は3テーマから構成されている。

① 半導体レーザー開発

② レーザー開発（ファイバーレーザー、固体ブースタレーザー、波長変換技術）

③ 加工システム開発（CFRP切断接合、表面処理、粉末成形）

研究開発項目の詳細は、表Ⅲ-1.1の項目から構成されている。

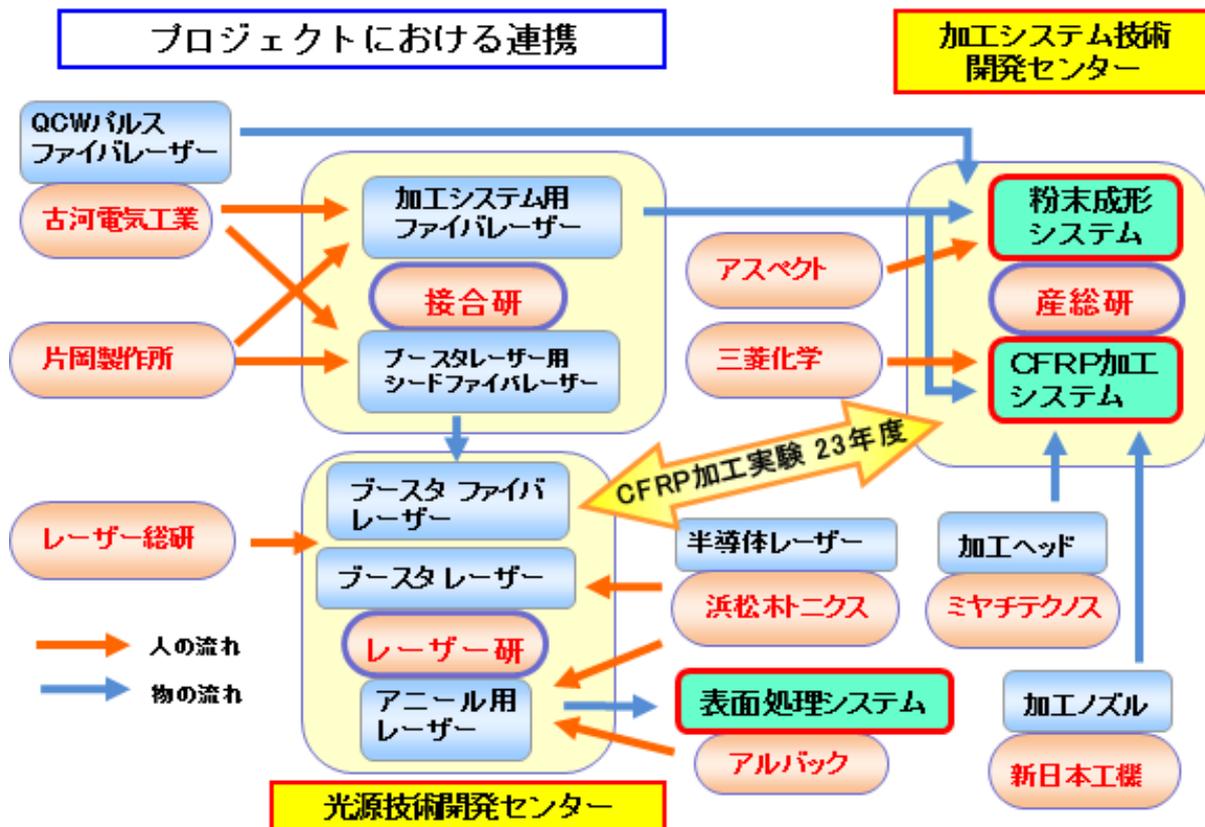
表Ⅲ-1.1 研究開発項目の詳細

① レーザー高出力化技術の開発 <2/3 共同研究> (浜松ホトニクス株式会社) (1) 半導体レーザーの高出力化・高信頼化技術の開発 (2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発
② レーザー高品位化技術の開発 (1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発 1) ファイバーレーザーのパルス制御技術の開発 <委託> (ALPROT、大阪大学) 2) ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発 <委託> (ALPROT、大阪大学) 3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発 <委託> (大阪大学) 4) 励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発 <2/3 共同研究> (古河電気工業株式会社) (2) パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発 <委託> (ALPROT、大阪大学) 1) kW級ブースター増幅技術の開発 2) アニール用ブースター増幅技術の開発 (3) 高出力波長変換技術の開発 <委託> (ALPROT、大阪大学) 1) 波長変換モジュール化技術の開発 2) 波長変換の高効率化技術の開発 3) 加工試験のための整備

③ 多波長複合加工技術の開発		
(1) 切断接合技術の開発	< 委託 >	(ALPROT)
1) 複合材料高速切断接合システム技術の開発		
2) 複合材料加工プロセス・評価技術の開発		
(2) 表面処理技術の開発	< 2/3 共同研究 >	(株式会社アルバック)
1) 高度ホモジナイズワイドビーム成形の開発		
2) 大型光学部品研磨技術の開発		
3) 高精度ビーム評価技術の開発		
(3) 粉末成形技術の開発	< 委託 >	(ALPROT)
1) 基本プラットフォームの開発及び成形精度の向上と高速化		
④ 技術開発推進にかかる調査（先端技術、標準化等）・評価・普及促進		
	< 委託 >	(ALPROT)

(ALPROT：研究組合次世代レーザー加工技術研究所)

以上の研究開発を効率よく進めるために、本プロジェクトでは大阪大学内に光源技術開発センター、産業技術総合研究所（産総研）内に加工システム開発センターを設置している。図Ⅲ-1.1に示すように大阪大学の接合科学研究所（接合研）とレーザーエネルギー学研究センター（レーザー研）でレーザー光源開発、産総研で加工システム開発を集中的、かつ効率的に行う体制となっている。光源技術開発センターと加工システム開発センターには連携体制が構築され、平成23年度には大阪大学レーザー研においてCFRP加工実験を共同で行っている。



図Ⅲ-1.1 プロジェクトにおける連携体制

大きな流れとして「② レーザー高品位化技術の開発」で開発したレーザーを用いて、「③ 多波長複合加工技術の開発」を行う計画である。

1.1. 研究開発項目別の中間目標達成度

研究開発項目別の中間目標達成度について、表Ⅲ-1.1の順で簡単に説明する。平成24年7月31日時点で大幅に達成しているものは「◎」、平成24年7月31日時点で達成しているものは「○」、計画通り平成24年度中に達成見込みのものは「△」、平成24年度に目標に達しないものは「×」で、達成度を表わした。

① レーザー高出力化技術の開発（浜松ホトニクス）

①-(1) 半導体レーザーの高出力化・高信頼化技術の開発

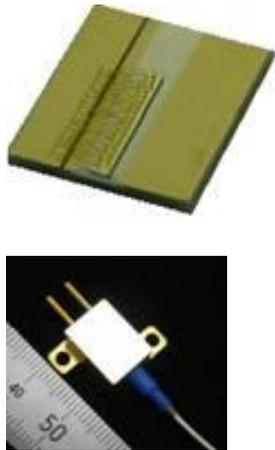
①-(2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発

表Ⅲ-1.2に「①レーザー高出力化技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。また図Ⅲ-1.2には「① レーザー高出力化技術の開発」の概要を示した。半導体レーザーの開発において、主な課題は発熱の低減と発生した熱の除去である。これらを解決するため素子構造の最適化、ヒートシンクの改良を行い、出力特性の改善に結びつけた（図Ⅲ-1.2）。また高出力化と高信頼性を両立させるため、端面劣化抑制構造の開発も行った。これらの課題を解決することで、中間目標値の出力を達成した。寿命については現在測定中であるが、計画通り今年度中に達成の見込みである。半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発においては、シングルエミッタのファイバー結合効率の中間目標値80%を達成し、アレイについても目標達成の見込みである。①の開発における中間目標に関してはすべて問題なく達成、もしくは今年度中に達成の見込みである。

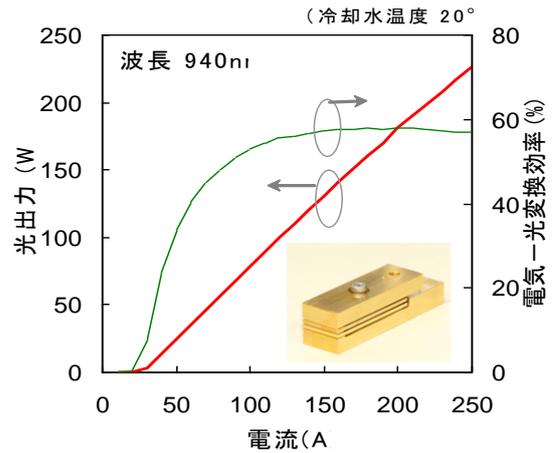
表Ⅲ-1.2 「①レーザー高出力化技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	中間目標（基本計画）	中間目標		
①-(1) 半導体レーザーの高出力化技術・高信頼化技術の開発	シングルエミッタ	波長：近赤外帯 出力：15 W、効率：60% 寿命：20,000 時間以上	波長：近赤外帯 出力：15 W、効率：60% 寿命：20,000 時間	900nm 帯 15 W、60% 確認中	△
	アレイ	波長：近赤外帯 出力：200 W 電気-光変換効率：55% 寿命：20,000 時間以上	波長：近赤外帯 出力：200 W、効率：55% 寿命：20,000 時間 自動組立が可能である事	900nm 帯 200 W、55% 確認中 自動組立可能	△
①-(2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発	シングルエミッタ	ファイバー結合効率 (コア径 105 μm、NA0.15 相当)：80%以上	ファイバー結合効率：80%	80%以上	○
	アレイ	ファイバー結合効率： 60%以上	ファイバー結合効率：60%	仮組み時 60%以上	△

課題	解決策
発熱の低減と熱の除去 高出力と高信頼性の両立 ファイバ結合効率向上 (シングルエミッタ) (アレイ)	素子構造の最適化、ヒートシンク改良 端面劣化抑制構造の開発 素子特性・レンズ特性の最適化、 スマイル抑制、耐パワー性を有するコネクタ 開発



シングルエミッタ素子とファイバーモジュール



アレイの出力特性

図Ⅲ-1.2 「① レーザー高出力化技術の開発」の概要

② レーザー高品位化技術の開発

②-(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発

(ALPROT、大阪大学)

②-(1)-1) ファイバーレーザーのパルス制御技術の開発

②-(1)-2) ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発

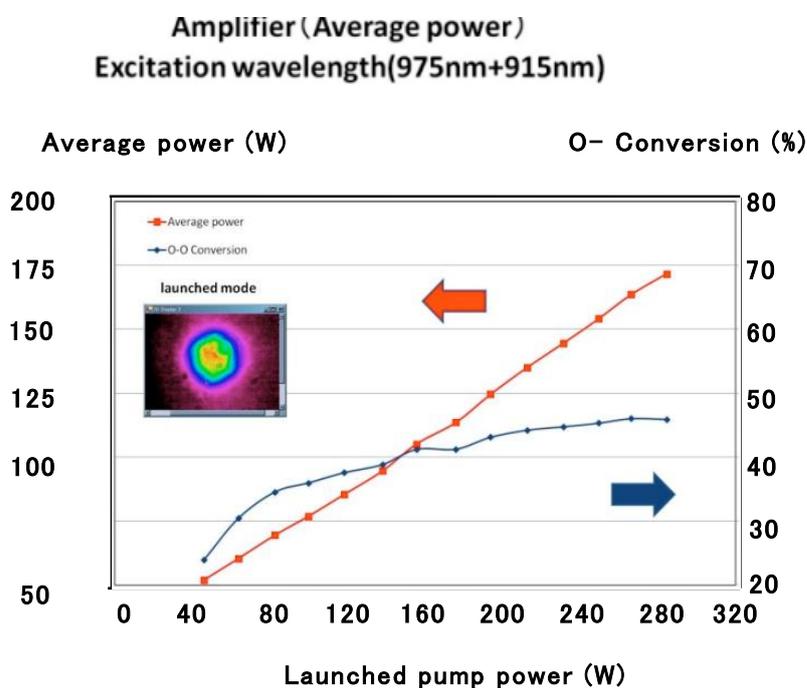
表Ⅲ-1.3 に「②-(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。

パルスファイバーレーザーの開発において、主な課題は非線形効果（ラマン散乱）の抑制であり、増幅率、コア径、ファイバー長の最適化により解決を図った。また、最適なバンドパスフィルターを設計し除去することで、レーザー出力の高品質化を行った。またフォトニック・クリスタル・ファイバー（PCF）の吸収波長と励起波長の整合性をとり、効率よく増幅を行うことができた。

図Ⅲ-1.3 には半導体レーザーの励起パワーに対する平均出力と変換効率を示した。本開発においては中間目標出力を達成し、他項目も今年度中に目標達成の見込みである。

表Ⅲ-1.3 「②-(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」の
成果、達成度

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	中間目標 (基本計画)	中間目標		
②-(1)-1 ファイバーレーザーのパルス制御技術の開発	粉末成形シーダ 平均出力 繰り返し周波数 ブースタシーダ 平均出力 繰り返し周波数		70W@パルス幅 100ns 1MHz 5W@パルス幅 3-10ns 75kHz	70W@パルス幅 100ns 1MHz 5W@パルス幅 3-10ns 75kHz	○
②-(1)-2 ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発	平均出力 繰り返し周波数 基本波長 パルス幅 ビーム品質	5-100 W 1-1000 kHz 1 μm 帯 0.5-200 ns シングルモード M2 < 1.5	150W@100 ns 1 MHz 1064 nm パルス幅可変： 10-200 ns 偏光：保持	171W@100 ns 1 MHz 1064 nm 100 ns 偏光：保持	△



図Ⅲ-1.3 ファイバーレーザーの平均出力と変換効率

② レーザー高品位化技術の開発

②-(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発

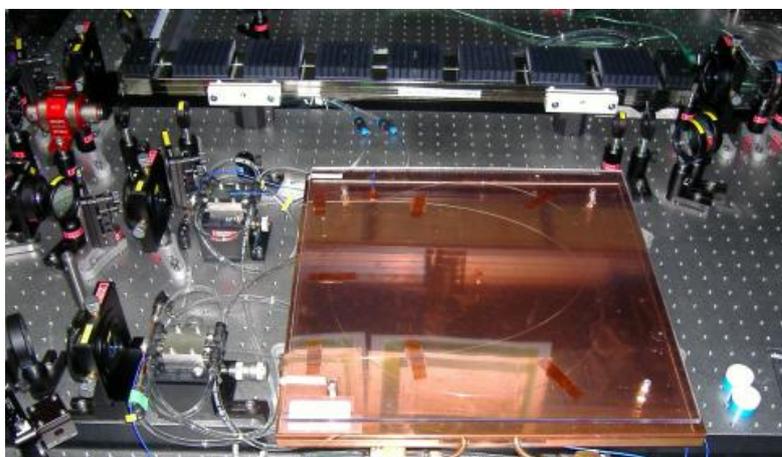
②-(1)-3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発 <委託> (大阪大学)

表Ⅲ-1.4 に「ファイバーレーザーの高出力化技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。また図Ⅲ-1.4 にファイバー増幅器の写真を示した。本開発における主な課題は発生した熱の除去である。この課題を解決するため PCF ロッドの固定方法と冷却方法を改善し、中間目標を達成した。出力パワーに関しては $M^2=2\sim3$ で 200W を達成している。中間目標に関してはすべて問題なく達成、もしくは今年度中に達成の見込みである。

表Ⅲ-1.4 「②-(1)-3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標		成果	達成度
	中間目標 (基本計画)	中間目標		
②-(1)-3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発 ブースター注入用		繰り返し：75kHz パワー：150W (1ビーム) 波長：1064.1-1064.8nm パルス幅：3-10ns M^2 : <1.5	77kHz 170W * 1064.1-1064.8nm 3-10ns 可変 1.5	○

* $M^2=2\sim3$ で 200W を達成



図Ⅲ-1.4 ファイバー増幅器

② レーザー高品位化技術の開発

②-(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発

②-(1)-4) 励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発

<2/3 共同研究> (古河電気工業)

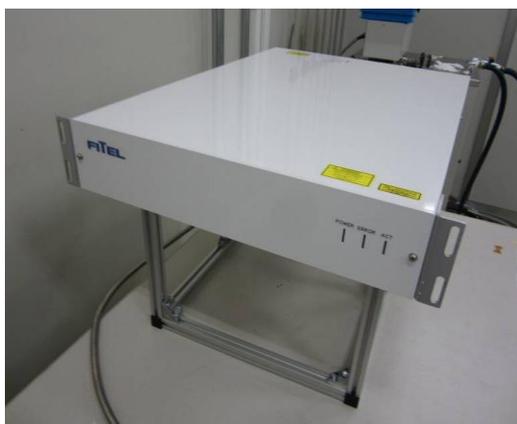
表Ⅲ-1.5 に「②-(1)-4) 励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。また図Ⅲ-1.5に開発品のQCWファイバーレーザー装置の外観を示した。この開発における課題は半導体レーザーの輝

度向上である。冷却構造を見直すことで、高輝度半導体レーザーを実現した。またQCWレーザー開発におけるファイバー非線形の低減という課題に対しては、ファイバーのモードフィールド径を最適化することで解決することができた。

開発したQCWレーザー2セットをそれぞれCFRP加工と粉末成形の技術開発の連携のため産総研に納入し、試験運用を開始した。

表Ⅲ-1.5「②-(1)-4) 励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	中間目標 (基本計画)	中間目標		
②-1)-4) QCW ファイバー レーザーの作製	ピーク出力 平均出力 M ²		700W 250W 1.1 以下	800W 500W 1.1 以下	○



図Ⅲ-1.5 QCW ファイバーレーザー装置の外観

②-(2) パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発

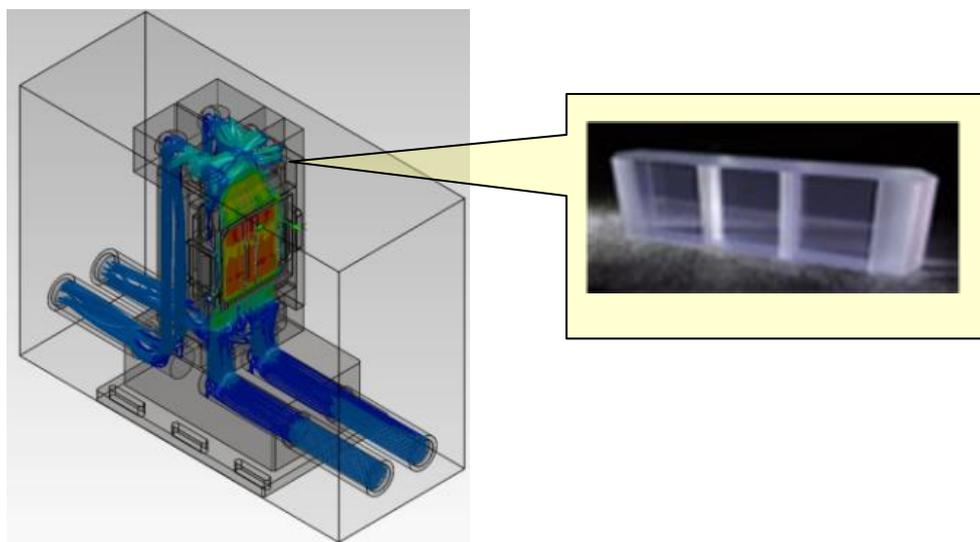
②-(2)-1) kW 級ブースター増幅技術の開発

< 委託 > (ALPROT、大阪大学)

表Ⅲ-1.6 に「②-(2) パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。本開発項目では、いかに効率よくレーザー増幅を行うかが課題である。励起半導体レーザーによって発生した熱の除去と効率的な増幅のため、Nd:YAGセラミック薄板のレーザー媒質をYAGブロックに接合するコンポジット構造を採用した。図Ⅲ-1.6にブースター増幅器とコンポジットYAGセラミック素子を示す。コンポジットYAGセラミック素子における発熱と冷却のシミュレーションコードを開発し、素子構造と冷却パラメータの最適化を図った。その結果、本テーマの開発における中間目標に関してはすべて達成、もしくは今年度中に達成の見込みである。

表Ⅲ-1.6 「②-(2)-1) kW級ブースター増幅技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	中間目標 (基本計画)	中間目標		
②-(2)-1) kW級ブースター増幅器の開発	繰り返し周波数 平均出力 波長(可変) パルス幅	1-150 kHz 200-700 W 1 μm帯 0.5-100 ns	75kHz 500-700W 1064.1-1064.8nm(最適化) 3-10ns	75kHz 実測利得と計算予測で700W達成見込み 最適化中 3-10ns	△



図Ⅲ-1.6 ブースター増幅器とコンポジット YAG セラミック

②-(2) パルスレーザー増幅(ブースター)技術の開発

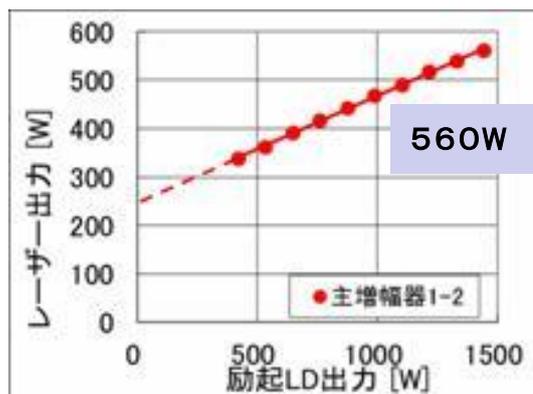
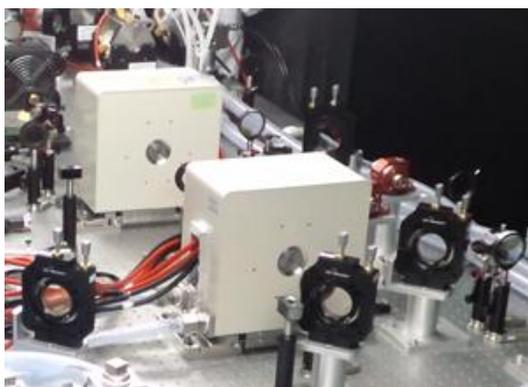
②-(2)-2) アニール用ブースター増幅技術の開発

<委託> (ALPROT、大阪大学)

表Ⅲ-1.7 に「②-(2)-2) アニール用ブースター増幅技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。プリアンプとメインアンプ2台で増幅し、560Wの高平均パワー出力を得ることに成功している。1 μm帯における基本波の開発においてはすべて中間目標を達成し、アニールシステムでの評価のめどが立った。

表Ⅲ-1.7 「②-(2)-2) アニール用ブースター増幅技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標		成果	達成度
	中間目標 (基本計画)	中間目標		
②-(2)-2) アニール用 ブースター増幅 技術の開発		波長： 1 μ m 帯 (基本波) 平均出力： 200~700W 繰り返し周波数： 1~150 kHz のうち、 最適値 パルス幅： 0.5~200ns のうち、最適値	1.064 μ m 560W 1kHz 105ns	○



図Ⅲ-1.7 「アニール用レーザーシステム」の写真と平均出力

②-(3) 高出力波長変換技術の開発

<委託> (ALPROT、大阪大学)

②-(3)-1) 波長変換モジュール化技術の開発

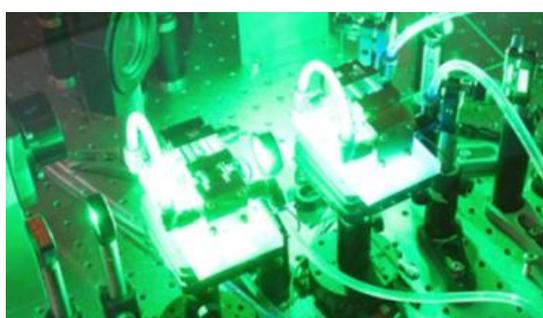
②-(3)-2) 波長変換の高効率化技術の開発

表Ⅲ-1.8 に「②-(3)高出力波長変換技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。「②-(3)-1) 波長変換モジュール化技術の開発」において、アニール用レーザーはパルス幅が長くピーク出力が低いため、波長変換の効率も低くなるという課題がある。レーザービームの集光強度を上げて波長変換の高効率化を図り、かつ光損傷を考慮した設計により課題を解決した。

また「②-(3)-2) 波長変換の高効率化技術の開発」においては、非常に高平均出力のレーザービームの波長変換を行うため、②-(3)-1)の開発以上に冷却と光損傷に対する対策が必要となる。これらを解決するため、ジグザグスラブ方式の波長変換という独創的なコンセプトを考案した。この結果、非常に高効率の波長変換を実現することができた。表Ⅲ-1.8記載の成果は低パワーで達成されているため、さらに高パワーでは高い効率が見込まれる。本テーマの開発における中間目標に関しては問題なく今年度中に達成の見込みである。図Ⅲ-1.8はジグザグスラブ方式の波長変換実験の装置写真である。

表Ⅲ-1.8 「②-(3)高出力波長変換技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	中間目標 (基本計画)	中間目標		
②-(3)-1) アニーリング用 レーザーの波長 変換モジュール			変換効率 20% (700W 基本波から)	20% (360W 基本波から)	△
②-(3)-2) 波長 変換の高効率化 技術の開発	第2高調波 変換効率 第3高調波 変換効率	≥ 20% ≥ 6%	≥ 20% (基本波 500W) ≥ 6% (基本波 500W)	≥ 60% (基本波 300W) ≥ 40% (基本波 160W)	△



図Ⅲ-1.8 ジグザグスラブ方式の波長変換実験

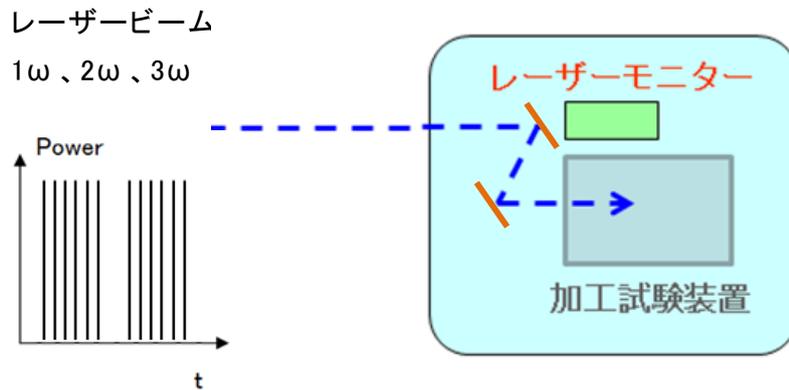
②-(3) 高出力波長変換技術の開発 <委託> (ALPROT、大阪大学)
②-(3)-3) 加工試験のための整備

表Ⅲ-1.9に「②-(3)-3) 加工試験のための整備」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。大阪大学レーザー研の現有YAGレーザーを改造し、3回のCFRP加工実験を産総研と共同で行った。1 ω (1064 nm)、2 ω (532 nm)、3 ω (355 nm) の波長でのレーザービーム照射におけるCFRPの加工特性を評価した。その結果、2 ω 、3 ω 、あるいは2波長照射の有意性を実証できた

図Ⅲ-1.9に測定系の概略を示す。

表Ⅲ-1.9 「②-(3)-3) 加工試験のための整備」の成果、達成度

研究項目	評価目標		成果	達成度
	中間目標 (基本計画)	中間目標		
②-(3)-3) 加工試験のた めの整備		現有パルス YAG レーザーの 改造 実験エリアの整備 加工システム技術開発セン ターと連携して CFRP 加工試 験を実施	現有パルス YAG レーザーの 改造した。 実験エリアの整備を行った。 加工システム技術開発セン ターと連携して、3回の CFRP 加工試験を実施した。	○



図Ⅲ-1. 9 測定系の概略

③ 多波長複合加工技術の開発

③-(1) 切断接合技術の開発 <委託>

(ALPROT)

③-(1)-1) 複合材料高速切断接合システム技術の開発

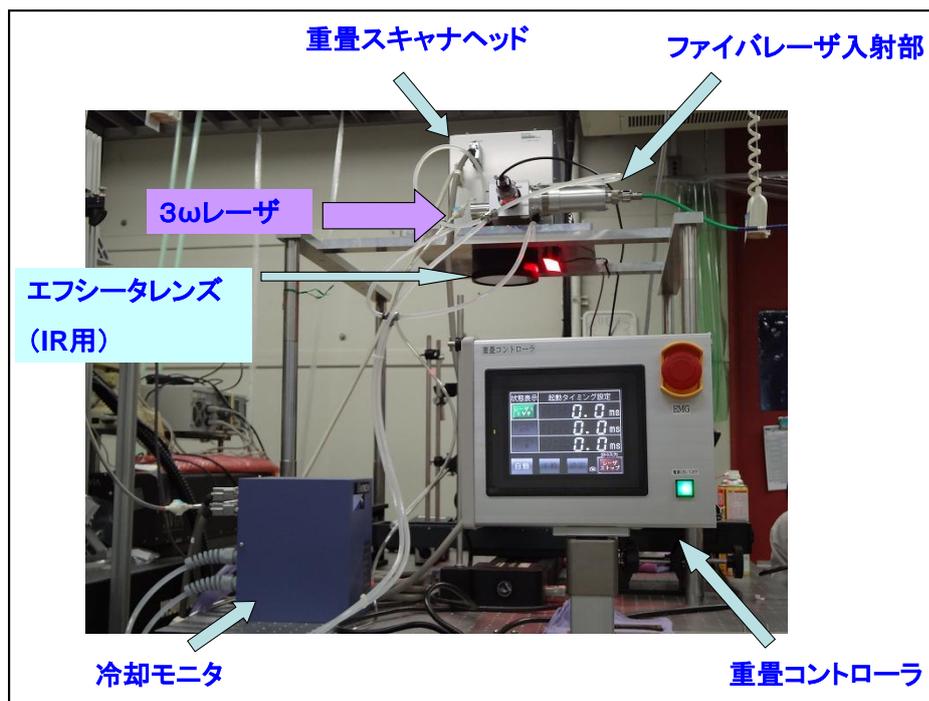
③-(1)-2) 複合材料加工プロセス・評価技術の開発

表Ⅲ-1.10 に「③-(1) 切断接合技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。複合レーザー照射を可能とする光学系、及びリモート加工が可能な加工ヘッドを開発し、高品位、高速度のCFRPレーザー加工を可能とするシステムの開発を行った。また、様々なレーザーを用いて切断とその評価を行い、切断パラメータの検討を行った。その結果、切断加工速度や反応層厚み、引張強度ではほぼ中間目標を達成できた。図Ⅲ-1.10はCFRPレーザー加工システムである。CFRPの接合については現在実験中であるが、CFRP素材の表面改質後に接合を行うことで計画通り今年度中に達成できる見込みである。

本テーマの開発に関しては、現在一部の中間目標を達成し未達成項目も達成の見通しを得ているため、今年度中に達成の見込みである。

表Ⅲ-1.10 「③-(1) 切断接合技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標		成果	達成度
	中間目標（基本計画）	中間目標		
③-(1)-1) 複合材料高速切断接合システム技術の開発 ③-(1)-2) 複合材料加工プロセス・評価技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> 複合レーザー照射方法を確立すること。 加工メカニズムを明確にしつつ、加工プロセスを最適化。 複合レーザー照射を可能とする光学系、及びリモート加工が可能な加工ヘッドを設計する。 レーザー加工試料の評価技術を構築すること。 	切断加工速度 2m/min 以上 反応層厚み 500 μm 引張強度 15%未満の低減 (参照強度に対して)	1.5m/min (CFRP) 2m/min (CFRTP) 350 μm (CFRP) 300 μm (CFRTP) 10%未満 (CFRP) 20%未満 (CFRTP)	△
		接合加工速度 2m/min 以上 引張せん断強度 50MPa	要素技術見極め 中 今年度中に達成 予定	△



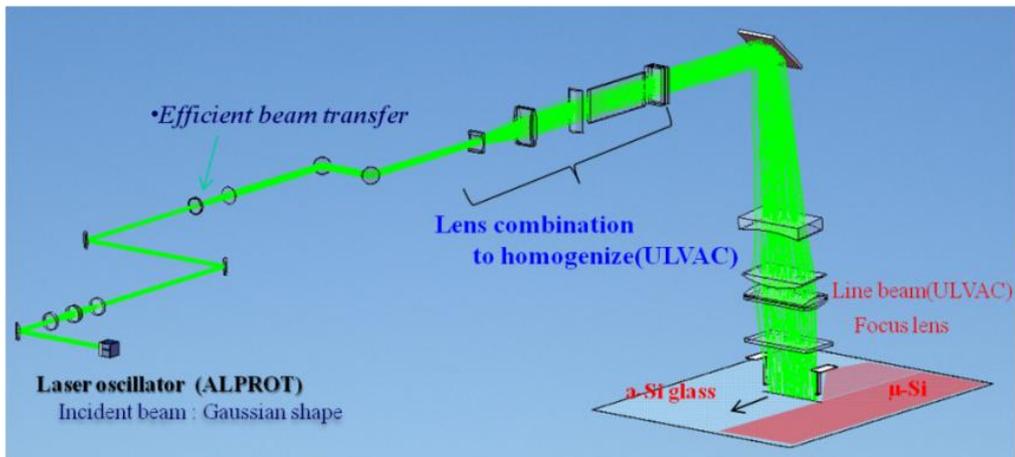
図Ⅲ-1.10 CFRP レーザー加工システム

- ③-(2) 表面処理技術の開発 <2/3 共同研究> (株式会社アルバック)
 - ③-(2)-1) 高度ホモジナイズワイドビーム成形の開発
 - ③-(2)-2) 大型光学部品研磨技術の開発
 - ③-(2)-3) 高精度ビーム評価技術の開発

表Ⅲ-1.11 に「③-(2) 表面処理技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。「大型レンズ研磨装置の開発」では大型異形光学部品の研磨加工技術の開発に成功している。ワイドビーム光学系のシミュレーション技術の確立においても、シミュレーション技術を開発し、ビーム評価ができた。図Ⅲ-1.11にはそのレーザー光線追跡シミュレーション結果の一例を示す。高度ホモジナイズ技術とワイドビーム整形光学系技術の開発、およびビームプロファイラの開発では、アニール用レーザーを搭載し評価を行う予定であり、中間目標に関して今年度中に達成の見込みである。

表Ⅲ-1.11 「③-(2) 表面処理技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	中間目標（基本計画）	中間目標		
③-(2) 表面処理技術の開発	大型レンズ研磨装置	・大型異形光学部品の研磨加工技術を開発すること。	研磨幅：500mm	700mm	△
	ワイドビーム光学系のシミュレーション	・光学シミュレーション技術を確立すること。	ビーム幅：500mm 集光幅：20 μm 照射均一性：±7%	700mm 20 μm ±2.5%	
	ワイドビームの形成	・高精度加工された異形レンズ類を用いた高度ホモジナイズ技術とワイドビーム整形光学系技術を開発する	ビーム幅：500mm 集光幅：20 μm 照射均一性：±7%	未評価	
	ビームモニタリング	・ワイドビームの形状及び照射均一性を評価するためのビームプロファイラを開発する。	測定精度：±2%以内 測定分解能：5 μm以下	未評価	



図Ⅲ-1.11 レーザー光線追跡シミュレーション結果の一例

③-(3) 粉末成形技術の開発 <委託> (ALPROT)

③-(3)-1) 基本プラットフォームの開発及び成形精度の向上と高速化

表Ⅲ-1.12 に「③-(3) 粉末成形技術の開発」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。本テーマにおいて、真空下で動作可能な粉末焼結造形装置の開発に成功した。製作・実験開始を開始したが、かなり高速の成形に成功した。図Ⅲ-1.12 に小型プラットフォーム試作機および成形例を示す。また複合レーザー照射による粉末成形システムは大阪大学接合研と共同開発中であり、計画通りに開発が進んでいる。

加工プロセス（照射条件、予備加熱条件）の最適化、試料の評価技術の確立においても現在開発中であり、本テーマの開発における中間目標に関しては、すべて問題なく達成、もしくは今年度中に達成の見込みである。

表Ⅲ-1.12 「③-(3) 粉末成形技術の開発」の成果、達成度

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	中間目標（基本計画）	中間目標		
③-(3) 基本プラットフォームの開発及び成形精度の向上と高速化	<ul style="list-style-type: none"> ① 粉末焼結積層成形機構開発 ② 複合レーザー照射方法 ③ 加エプロセス ④ 評価技術構築 	<ul style="list-style-type: none"> ・真空下においても動作可能な粉末焼結積層造形機構を開発すること。 ・異なる発振形式のレーザーを用いた複合レーザー照射方法を確立すること。 ・複合レーザー照射による粉末積層造形メカニズムを明確化 ・加工プロセス（照射条件、予備加熱条件）を最適化すること。 ・レーザー加工試料の評価技術を構築すること。 	<ul style="list-style-type: none"> ・真空下においても動作可能 ・照射方法の確立 ・造形メカニズムの明確化 ・最適条件の確立 ・試料の評価技術を構築 	<ul style="list-style-type: none"> 製作・実験開始 6時間（外挿）程度達成、+0.2mm 検討終了・装置作成中（阪大） プロセス条件確立 強度評価開始 190MPa 	△



図Ⅲ-1.12 小型プラットフォーム試作機および成形例（チェスの駒）

④ 技術開発推進にかかる調査（先端技術、標準化等）・評価・普及促進

<委託>（ALPROT）

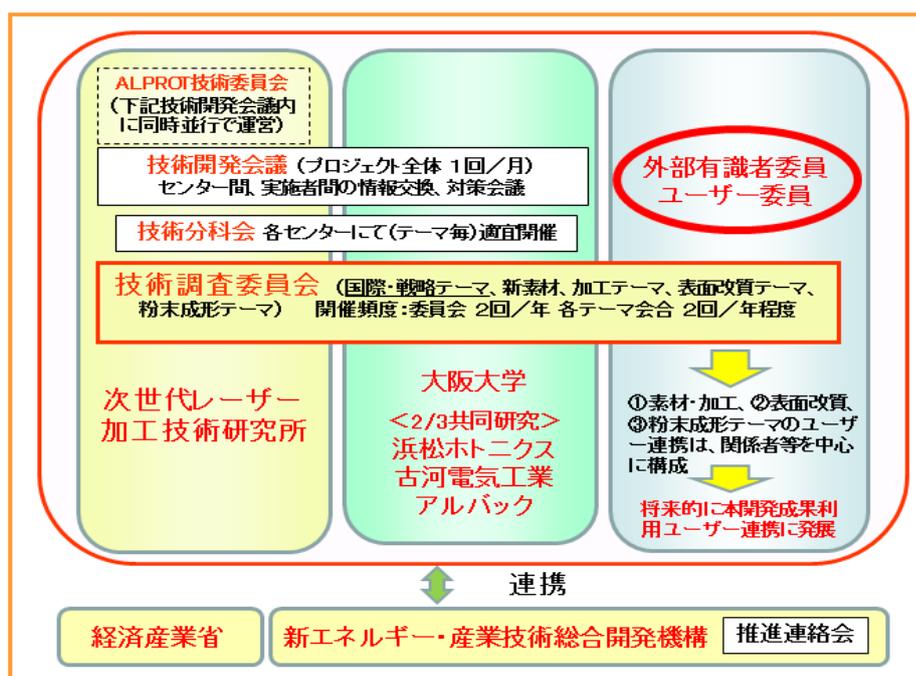
表Ⅲ-1.13に「④ 技術開発推進にかかる調査（先端技術、標準化等）・評価・普及促進」における中間目標値と現状の成果、および達成度を示す。

表Ⅲ-1.13 「④ 技術開発推進にかかる調査・評価・普及促進」の成果、達成度

研究項目	評価目標		成果	達成度
	中間目標 (基本計画)	中間目標		
④技術開発推進にかかる調査(先端技術、標準化等)・評価・普及促進		<ul style="list-style-type: none"> ・レーザー光源の開発状況や使用状況の調査 ・エンドユーザーニーズを取り入れた光源開発の必要性の把握、および本開発製品の実用化の可能性を明確にする ・製品実用化可能性を広げるため、開発中間時点での成果報告会を行う 	技術調査委員会 (2回) 国際・戦略 WG (4回) 素材・加工 WG (4回) 表面改質 WG (4回) 粉末成形 WG (4回) を開催し、レーザー光源等の調査を行った。またユーザーニーズについて議論した。 成果報告会 7/30開催	○

本テーマの目標はレーザー光源とレーザー加工について有識者を交えた議論を行うことで、本プロジェクトのエンドユーザーニーズを調査することである。そのため、技術調査委員会と4ワーキンググループ(WG)の委員会を開催した。技術調査委員会を含めたプロジェクトの委員会や会議の連携図を図Ⅲ-1.13に示す。技術調査委員会とWGにおいては有識者の貴重な意見を聞くことができ、プロジェクトを超えてレーザー産業全般に対する活発な議論ができた。表Ⅲ-1.14は技術調査委員会とWGの議事内容である。詳細な議事内容については「④ 技術開発推進にかかる調査(先端技術、標準化等)・評価・普及促進」の項目で説明する。また図Ⅲ-1.14は第2回技術調査委員会の風景である。

ユーザー連携と開発成果物の普及促進のため、平成24年7月30日に成果報告会を開催した。中間目標に関してはすべて問題なく達成した。



図Ⅲ-1.13 委員会の連携図

表Ⅲ-1.14 技術調査委員会とWGの議事内容

委員会、WG	委員数	回数	議事内容
技術調査委員会	25名	2回	実用化促進のため、ユーザーからのニーズの検討を行なった。レーザー及びレーザー加工の国際的な技術動向、標準化、新素材・加工、表面改質、粉末成形の各WGテーマのニーズについての報告、検討を行なった。
国際・戦略テーマWG	10名	4回	現状のレーザー及びレーザー加工技術の動向と、今後どのようなレーザーとレーザー加工技術が必要とされるかの検討を行なった。ドイツの自動車産業におけるレーザー加工や世界的技術動向の現状を把握した。 アジア地区の動向や Photonics West2012（国際会議と展示）の報告から日本の標準化戦略やニーズにマッチしたレーザー及びレーザー加工のあるべき姿を検討した。
新素材・加工テーマWG	6名	4回	開発内容を確認し、ニーズ面からどのようなレーザーが必要か検討を行なった。CFRP素材の各種仕様とその加工や評価等についての報告が行なわれた。BMWや東レの取り組み等が紹介された。ユーザー側のニーズや加工スペック等が提示され、それらの加工が可能なレーザーや加工法についての検討を行なった。
表面改質テーマWG	7名	4回	本WGでは、ディスプレイや太陽電池の製作に最適なレーザー加工のあり方を検討することになった。ディスプレイ用途のレーザーアニールの開発目標値とその背景が報告された。 ディスプレイ領域の市場動向報告、フラットパネルメーカーの技術ニーズ、太陽電池領域におけるレーザー応用に関するニーズ検討を行なった。
粉末成形テーマWG	2名	4回	本研究開発の目標を報告し、粉末成形の医療関連活用に関する技術情報を検討した。レーザーを活用した造形技術の現状を報告した。ニーズとしてチタン粉末を活用した医療用部品の仕様等についての検討を行なった。 ICALEO2011（国際会議と展示）の粉末成形技術の状況の報告と、開発施策の小型プラットフォームの見学を行ない、ニーズに対しての目標の確認を行なった。Photonics2012の粉末成形、Additive Manufacturing シンポジウムの状況が報告された。



図Ⅲ-1.14 第2回技術調査委員会

以上、研究開発項目の概要をまとめた。今年度末の達成予定の中間目標に対して、すでに前倒しでかなりの項目が達成されている。それ以外の項目についても、これまでの開発研究と検討結果から今年度末には達成見通しが得られ、プロジェクトは順調に遂行されている。

1.2. 成果要約

1.1節では開発項目の概要を説明したが、3つの出口イメージと調査研究に対しての現在の達成状況の概略は表Ⅲ-1.15のようになっている。計画通り順調に開発は進み、中間目標も今年度末には計画通りすべて達成される見込みである。

表Ⅲ-1.15 現在の達成状況の概略

	目標	達成状況
切断接合技術の開発	CFRP等の次世代素材をレーザーにより、高品位に加工できる技術を開発する。	各種レーザーを用いてCFRP素材の加工実験と評価を行い、高品位のCFRP加工の見通しがついた。
表面処理技術の開発	フラットパネルディスプレイや太陽電池製造に適用できるレーザーSiアニール技術を開発する。	アニール用レーザーを光源とし、均一なワイドビームを実現する光学系の構築が、順調に進んでいる。
粉末成形技術の開発	チタン等の材料を用いて、医療などに貢献できる粉末成形技術を開発する。	小型プラットフォームを製作し、真空中でのチタン合金の成形技術を開発した。展示会に出品し、ユーザーにアピールすることができた。
調査・普及促進	プロジェクトの出口を幅広く外部に求めるため、有識者を含めてプロジェクトのテーマについて議論する。	調査委員からの幅広い意見を聞き、国際的な技術動向などの調査を行った。分科会(WG)では今後のプロジェクトの展開につながる議論ができた。

1.3 知的財産の取得および成果の普及

下記表Ⅲ-1.16に知的財産、論文などに関する件数を下記の表に示す。

表Ⅲ-1.16 特許・論文等発表件数一覧 平成24年7月31日現在

	平成22年度	平成23年度	平成24年度	計
特許出願 (うち外国出願)	1 (0)	10 (0)	8 (1)	19 (1) 件
研究発表・講演	2	53	15	70 件
論文 (うち査読付き)	0 (0)	9 (7)	6 (4)	15 (11) 件
展示会への出展	0	1	1	2 件

1.3.1 知的財産の管理について

最先端技術の開発に関わる本プロジェクトでは、知的財産管理が重要である。ALPROTでは知的財産規程を定めて、組合員の出願特許を有効に活用している。



図 III-1.15 研究組合における知財マネジメント

1.3.2 成果の普及

外部発表や展示会への出品を行い、ユーザーニーズを直接把握し、成果の普及に努めた。

・産総研オープンラボ

産総研オープンラボにおいて、研究組合の展示ブースを設営し、研究組合とプロジェクトの紹介パネルを展示した。来場者にプロジェクトの目的、内容、成果等について説明を行った。

日時： 平成 23 年 10 月 13～14 日

場所： 産業技術総合研究所 本部情報棟 1 階ロビー

・展示会への出展

平成 24 年 6 月 20 日 (水)～22 日 (金)、東京ビックサイトにて「第 23 回設計・製造ソリューション展 (DMS)」が開催された。アспект社ブースにおいて、本プロジェクトで開発した粉末成形装置の展示とデモを行った。ユーザーニーズを直接調査できる良い機会であった。



・成果報告会の開催

本プロジェクト開発の関連技術の普及・促進を図るため、プロジェクト中間時点での成果報告会を開催した。本プロジェクトの成果をレーザー加工技術関係のユーザーに幅広く利用してもらうため、これまでのプロジェクト成果について報告した。またユーザー企業側からの視点も重要と考え、ユーザー連携の技術調査委員の講演を行った。

日時： 平成 24 年 7 月 30 日

場所： 品川フロントビル会議室

1.4. 最終目標達成への見通し

1.1 項と1.2 項で示した現時点での成果と目標達成に向けて検討した内容を基に、最終目標に向けての見通し（課題とその対応を含む）について以下の表にまとめた。

研究項目	評価目標と成果			最終目標の達成見通し (課題とその対応)
	評価項目	最終目標	成果(現時点)	
①高出力半導体レーザー開発 ①-(1) 半導体レーザーの 高出力化技術・ 高信頼化技術の 開発	シングルエミッタ アレイ	波長：近赤外帯 出力：20 W、効率 65% 寿命 50,000 時間 出力 300 W 効率 60% 寿命 50,000 時間 自動組立が可能であること	900nm 帯 15 W、60%以上 確認中 200 W 55%以上 確認中 自動組立可能	最終目標達成に向けての確認点である中間目標については、順調に開発が完了する見込みである。 最終目標は、素子の熱負荷が大きい状態で高出力化を実現し、かつ寿命を延ばすといった厳しい目標値となっている。 結晶構造、素子構造等について試作、検討を進め、課題の抽出とその解決策を見出すことで、最終目標を達成させる。
①-(2) 半導体レーザーの ファイバーカップル 技術の開発	シングルエミッタ アレイ	ファイバ結合効率 90% ファイバ結合効率 70%	80%以上 仮組 60%以上	最終目標達成に向けての確認点である中間目標については、順調に開発が完了する見込みである。 最終目標を達成に向けては、よりエネルギー伝送効率の高い結合技術、光学系および調心技術の開発が必要である。それらの技術課題の抽出とその解決策を見出すことで、最終目標を達成させる。

研究項目	評価目標と成果			最終目標の達成見通し (課題とその対応)
	評価項目	最終目標	成果 (現時点)	
②-(1)-1) ファイバーレーザーの パルス制御技術の開発	粉末成形シーダ 平均出力 繰り返し周波数 ブースタシーダ 平均出力 繰り返し周波数	中間目標と同じ 70W @パルス幅 100ns, 1MHz 5W @パルス幅 3-10ns 75kHz	70W @パルス幅 100ns 1MHz 5W @パルス幅 3-10ns 75kHz	最終目標は中間目標と同じで、達成済み
②-(1)-2) レーザー高品位化技術の研究開発・ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発	平均出力 繰り返し周波数 波長 パルス幅 偏光：保持	150W@100 ns 1 MHz 1064 nm 100 ns 偏光：保持	171 W @100 ns 1 MHz 1064 nm 100 ns 偏光：保持	順調に開発は進んでいる。フィルターの最適化と吸収長と励起波長の最適化に成功したので、最終目標は十分達成可能。

研究項目	評価目標			最終目標の達成見通し (課題とその対応)	
	評価項目	最終目標	成果(現時点)		
②-(1)-3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発	ブースター注入用	繰り返し周波数 平均出力 波長 (可変) パルス幅 M ²	75-150kHz 300W (2ビーム) 1064.1-1064.8nm 3-10ns <1.5	77kHz 170 W 1064.1-1064.8 nm 3-10ns 可変 1.5	1ビーム出力 150W は達成済み。 2ビーム偏光合成で 300W は確実に達成。
	ビーム波長合成	平均出力 波長	300W 1064, 1070nm	300W 1064, 1070, 1075nm	パワー、2波長ともに達成。 効率>90%の波長合成にめど
②-(1)-4) QCW ファイバーレーザーの開発	ピーク出力 平均出力 ビーム品質	1.6kW 250W M ² <1.1	800 W 500W M ² <1.1	順調に開発は進んでいる。励起半導体の輝度向上とファイバーの非線形効果を低減し、ピーク出力を確保する。 最終目標は十分達成可能。	

研究項目	評価目標			最終目標の達成見通し (課題とその対応)
	評価項目	最終目標	成果(現時点)	
②-(2)-1) kW級ブースター増幅器の開発	繰り返し周波数 平均出力 波長(可変) パルス幅	75-150kHz 1.5kW 1064.1-1064.8nm (最適化) 3-10ns	75kHz 700W 達成見込 最適化中 3-10ns	4kW LD 励起で>750W@75kHzを達成見込み。 よって、縦偏光 750W、横偏光 750W の 2 ビーム合成で 1.5kW 達成は確実。 出力 1 ビーム又は 2 ビームの選択は、波長変換の最適化と併せて決定。
②-(2)-2) アニリング用ブースター増幅技術の開発	波長 平均出力 繰り返し周波数 パルス幅	1μm帯(基本波) 200~700W 1~150 kHz のうち、最適周波数 0.5~200ns のうち、最適パルス幅	1.064μm 560W 1kHz 105ns	最終目標は中間目標と同じで、今年度中に全項目達成の予定
②-(3)-1) アニリング用レーザーの波長変換モジュール	変換効率	20% (700W 基本波から)	20% (360W 基本波)	順調に開発は進んでいる。波長変換結晶の光損傷を考慮した設計になっているため、最終目標は十分達成可能。
②-(3)-2) 波長変換の高効率化技術の開発	第2高調波変換効率 第3高調波変換効率	≥ 30% (基本波 1.5kW) ≥ 10% (基本波 1.5kW)	≥ 60% (基本波 300W) ≥ 40% (基本波 160W)	冷却構造の改良と偏光合成(ビーム当たり 750W 入力)によって熱負荷を半減することで、目標達成は可能。

研究項目	評価目標と成果			最終目標の達成見通し (課題とその対応)
	評価項目	最終目標	成果(現時点)	
③-(1) 1) 複合材料高速切断接合システム技術の開発 2) 複合材料加工プロセス・評価技術の開発	切断加工速度 反応層厚み 引張強度 接合加工速度 引張せん断強度	6m/min 100μm 10%未満の低減 (参照強度に対して) 6m/min 100MPa	1.5m/min(CFRP) 2m/min(CF RTP) 350μm(CFRP) 300μm(CF RTP) 10%未満(CFRP) 20%未満(CF RTP) 要素技術見極め 中 接着剤 20MPa	順調に開発は進んでいる。波長、パルス幅と熱損傷の関係が明確になりつつあり、最終目標は十分達成可能 CFRP の表面改質により見通しあり、最終目標は十分達成可能。
③-(2) 表面処理技術の開発	大型レンズ研磨装置 ワイドビーム光学系の	研磨幅: 500mm ビーム幅: 500mm 集光幅: 20μm	700mm 700mm 20μm	大型レンズ研磨機が完成したため、光学シミュレーションから導かれるサイズの大型レンズの製造が可能になった。

	シミュレーション ワイドビームの形成 ビームモニタリング	照射均一性： ±7% ビーム幅： 500mm 集光幅： 20 μ m 照射均一性： ±7% 測定精度：±2%以内 測定分解能：5 μ m 以下	±2.5% 未評価 未評価	これらとアニーリング用レーザーと組み合わせ、実際のビームの整形評価を実施し、最終目標を達成できる見込み
③-(3) 粉末成形システム開発	成形精度 成形速度 強度	±0.1mm(100mm 基準パーツ) 16 時間以内 860MPa(チタン合金)	+0.2mm 6 時間 (外挿) 190MPa	精度は補正で対応可能。加工速度は問題なし。強度は積層ピッチを縮めて密度を向上することにより実現可能と予測している。

研究項目	評価目標と成果		最終目標の達成見通し (課題とその対応)
	最終目標	成果(現時点)	
④ 技術開発推進にかかわる調査 (先端技術、標準化等)・評価・普及促進	<ul style="list-style-type: none"> 開発光源および開発された光源を利用した加工システムのユーザーとの連携 広範囲なものづくりに活用されるレーザー加工技術の実用化の可能性を明確にする 本開発の成果報告会の開催 レーザー加工実証試験の開催 	<p>技術調査委員会(2回)と各WG(それぞれ4回)を開催した。</p> <p>成果報告会を開催した。</p>	<p>技術調査委員会と各WGを中心としてユーザー連携を進める予定。</p> <p>成果報告会、加工実証試験を行い、成果の普及を図るが、最終目標達成は十分可能である。</p>

以上の表で見ると、いずれの研究開発項目においても課題の見極めができています。またこれまでの開発研究により、その課題に対しては解決策の知見が得られています。その対応策に従い計画的に研究開発を遂行し、技術開発会議や調査委員会の議論を研究にフィードバックすることで、最終目標達成の見通しを得ています。同時に、今後はより応用面に目を向け、成果物の普及のためのユーザー連携の活動や調査にも視野を広げていくことが重要であると考えています。

2. 研究開発項目毎の成果

2.1 研究開発項目①「半導体レーザーの高出力化技術の開発」

「(1) 半導体レーザーの高出力化技術・高信頼化技術の開発」

(浜松ホトニクス株式会社)

2.1.1 事業の目的・意義（目的・概要）

溶接、熱処理、焼き入れ等様々な用途に半導体レーザー（LD）が導入され、省電力化（低炭素排出）に寄与し、自動車産業をはじめとする産業競争力の向上に貢献している。LDに対する産業界からのニーズとして、LDのさらなる小型化、高効率化、また低コスト化の要求が高い。

このような背景を受けて、省資源化・小型化・低コスト化に貢献すべく、半導体レーザーの高出力化・高効率化を図った。

2.1.2 研究開発目標と達成状況

中間目標に対する達成度として、初期特性に関しては現時点で全てクリアした。また寿命に関しては、平成24年度内には寿命20,000時間をクリア出来ると考えられることから、総じて中間目標を達成出来たといえる。

表Ⅲ-2.1.1 研究開発目標と達成状況

研究項目	評価目標		
	評価項目	中間目標	最終目標
①-(1) 半導体レーザーの 高出力化技術・ 高信頼化技術の開発	シングル エミッタ	波長:近赤外帯 出力:15W、効率:60% 寿命:20,000時間	波長:近赤外帯 20W、65% 50,000時間
	アレイ	波長:近赤外帯 出力:200W、効率:55% 寿命:20,000時間 自動組立が可能であること	波長:近赤外帯 300W、60% 50,000時間 自動組立が可能であること

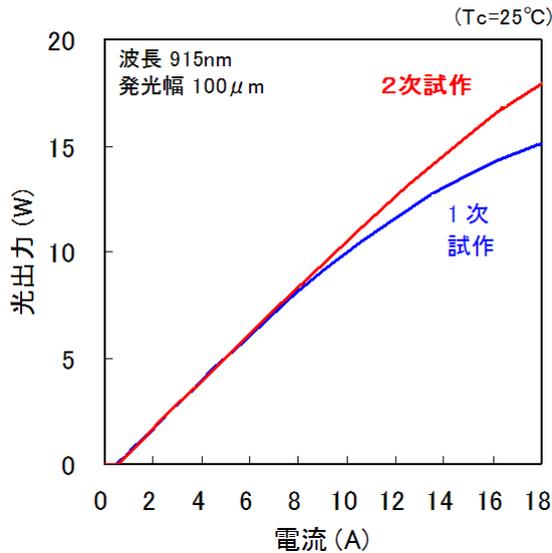
2.1.3 成果の詳細

2.1.3.1 シングルエミッタ

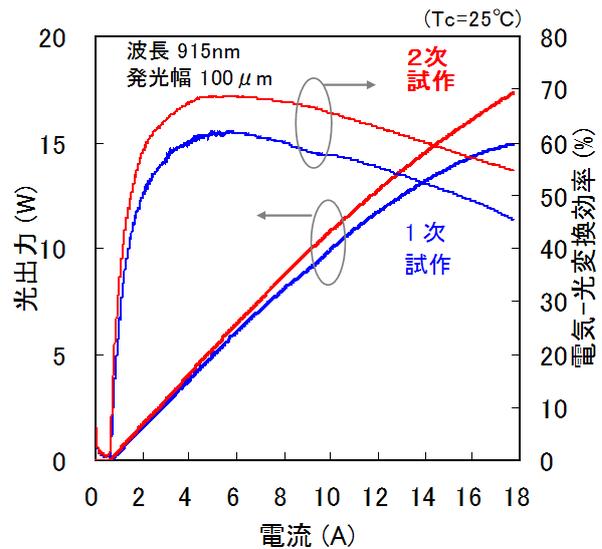
高出力時の発熱低減という課題に対して、素子構造の最適化により解決を図った。そのために高出力と高信頼性の両立シミュレーション技術を駆使し、計算で求められた最適パラメータを使用して、高出力時に出力飽和を起こさないLD素子を開発した。

計算および試作結果を図Ⅲ-2.1.1～図Ⅲ-2.1.2に示す。2次試作において、高出力時の熱負荷による光出力飽和が大きく改善され、中間目標の達成が確認された。

また高出力と高信頼性の両立といった課題に対しては、端面劣化抑制構造を開発した。現在、連続駆動試験による寿命時間の確認を行っており、平成24年度内に寿命20,000時間を確認する。



図Ⅲ-2.1.1 計算結果



図Ⅲ-2.1.2 試作した素子の光出力特性

2.1.3.2 アレイ

高出力時の発熱の低減と熱の除去といった課題に対して、素子構造の最適化、ヒートシンク改良といった手法で解決した。また社有技術を利用することで、今回開発したアレイのスマイルを $1\mu\text{m}$ 以下に低減させ、自動組立に対応出来るようにした。

試作したアレイ LD の光出力特性を図Ⅲ-2.1.3 に示す。同図より中間目標である光出力 200W、電気光変換効率 55%の達成が確認される。寿命については現在確認作業を行っており、光出力の急速な低下は認められず、数千時間にわたり安定に動作している。平成 24 年度内に信頼性 20,000 時間を確認する。

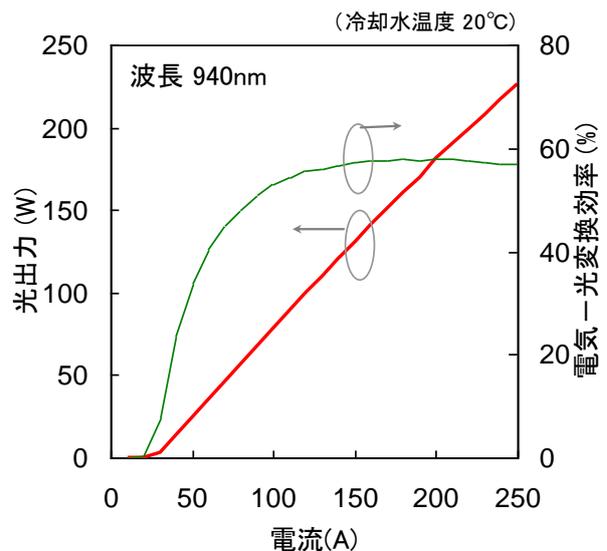


図-2.1.3 アレイ LD の光出力特性

2.1.4 最終目標の達成見通し

前述したように最終目標達成に向けての確認点である中間目標については、順調に開発が完了する見込みである。

しかし最終目標達成には、素子の熱負荷が大きい状態で高出力化を実現し、かつ寿命を延ばすといった非常に厳しい目標値となっている。最終目標達成に向け、平成 25 年度は結晶構造、素子構造等について試作、検討を進め、課題の抽出とその解決策を見出す。

2.1.5 知的財産権および成果の普及

知的財産権および外部発表に関しては、2.2 研究開発項目①「半導体レーザーの高出力化技術の開発」、「(2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発」と密接に関係しており、切り離すことが難しいことから、次項でまとめて報告する。

2.2 研究開発項目①「半導体レーザーの高出力化技術の開発」

「(2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発」

(浜松ホトニクス株式会社)

2.2.1 事業の目的・意義（目的・概要）

溶接、熱処理、焼き入れ等様々な用途に半導体レーザー（LD）が導入され、省電力化（低炭素排出）に寄与し、自動車産業をはじめとする産業競争力の向上に貢献している。LDに対する産業界からのニーズとして、LDのさらなる小型化、高効率化、また低コスト化の要求が高く、またロボットで使用する場合には、レーザー光出射部の軽量化、小型化が必須となる。

このような背景を受けて、ユーザーフレンドリーな光源とすべく、高輝度ファイバー結合技術の開発を行なった。

2.2.2 研究開発目標と達成状況

シングルエミッタに関しては現時点で中間目標をクリアした。アレイに関しては仮組状態で中間目標をクリアしており、平成 24 年度中にモジュール状態で目標を達成する。

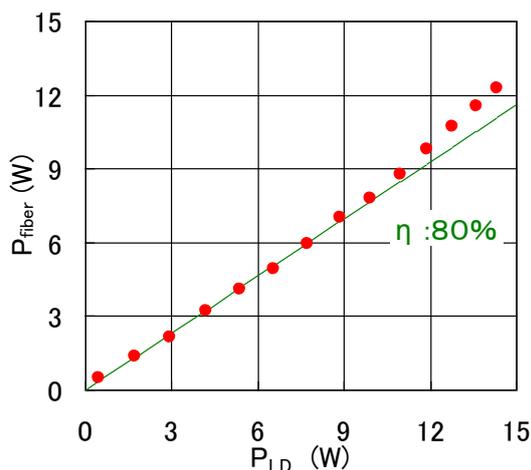
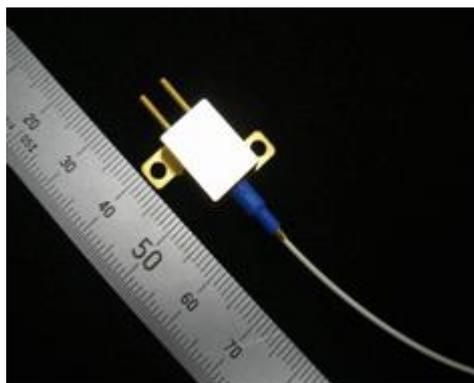
表Ⅲ-2.2.1 研究開発目標と達成状況

研究項目	評価目標		
	評価項目	中間目標	最終目標
①-(2) 半導体レーザーの ファイバーカップル 技術の開発	シングル エミッタ	ファイバー結合効率: 80%	ファイバー結合効率: 90%
	アレイ	ファイバー結合効率: 60%	ファイバー結合効率: 70%

2.2.3 成果の詳細

2.2.3.1 シングルエミッタ

ファイバー結合効率向上のために、素子特性・レンズ特性の最適化を行った。ファイバーモジュール化した試作品の外観と、素子出力とファイバー出力の関係を図Ⅲ-2.2.1 に示す。目標としてきた結合効率 80%（ファイバー出射面でのフレネル反射を除く）を達成することを確認した。



図Ⅲ-2.2.1 シングルエミッタファイバーモジュール外観とそのファイバー結合特性

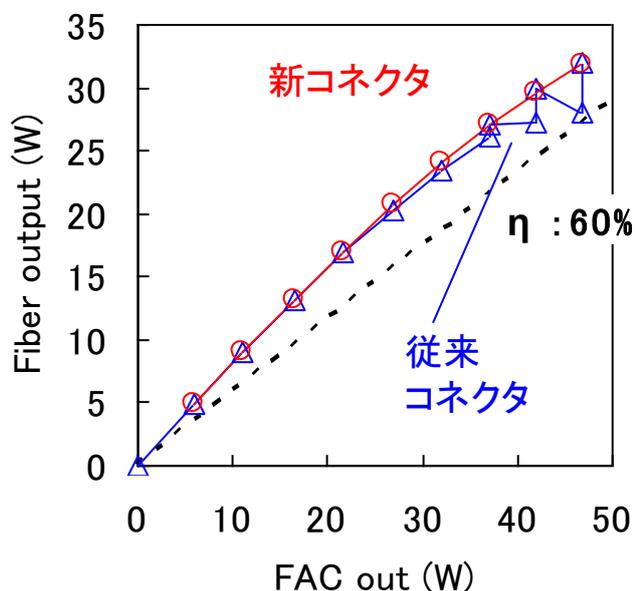
2.2.3.2 アレイ

ファイバー結合効率を向上させるために、スマイル抑制、耐パワー性を有するコネクタ開発を行った。

図Ⅲ-2.2.2 はアレイのファースト軸コリメート光出力（FAC out）に対するファイバー出力の関係を示す。

スマイルを抑制したアレイを使用することで高効率結合が実現されている。

また従来のコネクタでは高出力光導入時調芯ずれを起こし、再調芯を行う必要があったが、新規コネクタを使用することにより、安定的に高結合効率が得られることを確認した。



図Ⅲ-2.2.2 アレイのファイバー出力特性

2.2.4 最終目標の達成見通し

最終目標達成に向けての確認点である中間目標については、順調に開発が完了する見込みである。最終目標を達成に向けては、よりエネルギー伝送効率の高い結合技術、光学系および調心技術の開発が必要であり、それら技術課題の抽出とその解決策を見出だす。

2.2.5 知的財産権および成果の普及

「(1) 半導体レーザーの高出力化技術・高信頼化技術の開発」および「(2) 半導体レーザーのファイバーカップル技術の開発」に関して知的財産権及び外部発表の件数

をまとめたものを表Ⅲ-2.2.2に示す。素子開発とファイバー結合技術開発を密接に連携して開発することにより、多くの知的財産を生み出し、またその成果を社会に還元することができた。

表Ⅲ-2.2.2 知的財産権および外部発表件数

年度	平成 22 年	平成 23 年	平成 24 年	計
特許出願 (うち外国出願)	1 (0)	2 (0)	5 (0)	8件 (0件)
論文(うち査読付き)	0(0)	2(2)	3(3)	5件(5件)
研究発表・講演	1	4	4	9件

2.3 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

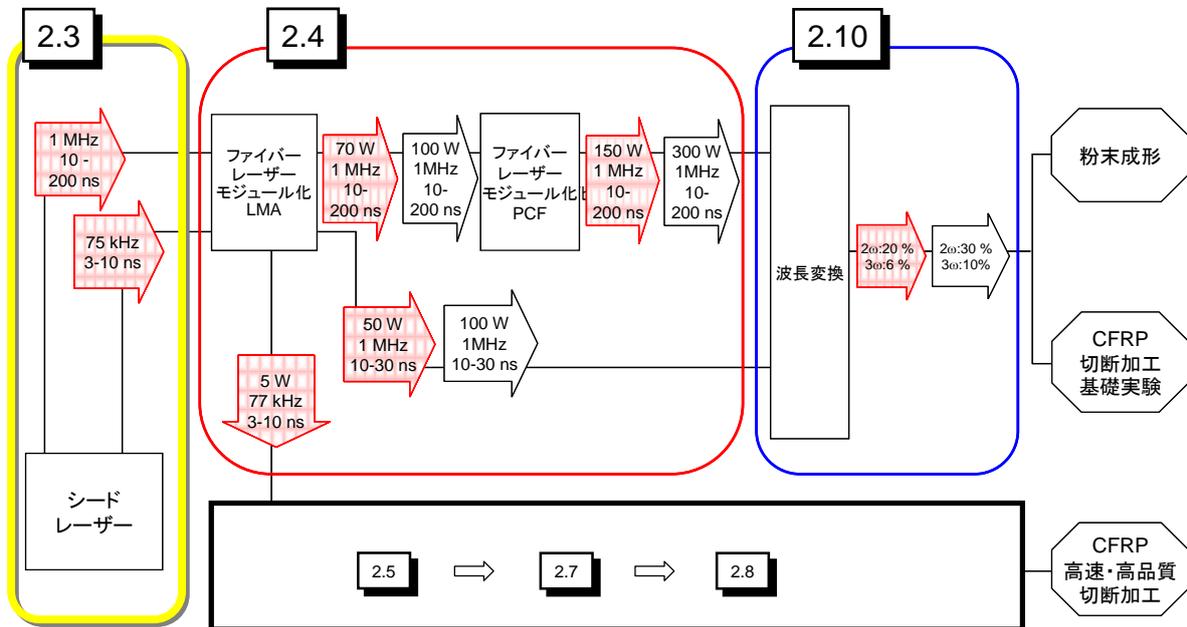
「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」

「1) ファイバーレーザーのパルス制御技術の開発」

(阪大接合研、古河電工)

2.3.1 事業の背景・意義（目的・概要）

本研究開発では、図Ⅲ-2.3.1 に示したように粉末成形、CFRP 切断加工基礎実験、およびCFRP高速・高品位切断加工用パルスファイバーレーザーを開発することを目的としている。粉末成形用レーザーには、②-(1)-1)にてシードレーザーを開発する。粉末成形用には、パルス幅 100 ns および 10 ns を中間目標とする。CFRP 用には、パルス幅 3-10 ns、繰り返し周波数 77kHz を中間目標とする。両中間目標については、平成 24 年度末までに達成するとともに、本開発項目の最終目標とする。本項では、図Ⅲ-2.3.1 中の枠（黄色）で示した部分②-(1)-1)について記述する。



図Ⅲ-2.3.1 目的別に開発されるパルスファイバーレーザー開発目標：中間目標（矢印赤）と最終目標（矢印白）

2.3.2 研究開発目標と根拠

粉末成形において成形体の構造制御の高度化に必要なレーザーには、100 ns 程度のパルス幅が要求される。成形速度から繰り返し周波数には 1MHz 程度必要となる。CFRP 切断加工基礎実験用には、パルス幅 10ns が必要となる。②-(1)-1)で開発するパルスファイバーレーザー（シード光）光源は、10ns～ 200 ns の範囲でパルス幅 10ns と 100ns を選択可能で、～1MHz の高速繰り返し出力を中間目標とする

CFRP 加工用レーザーには、10ns 以下のパルス幅が求められる。②-(1)-3 高出力化技術開発においてシード光源として要求される出力を得るため、半導体レーザーの直接変調出力を用い、3～10ns のパルス発生および、偏光保持イットリビウムクラッド励起

ファイバー増幅器を開発し、77kHz で出力させる。本レーザーは後段の出力特性向上のため、1nm 程度の波長チューニングを可能とする。また、②-(1)-3 において、高出力化のため、異なる波長のレーザーを 2 台用意し合波させるため、波長 1070nm の同一特性のパルスレーザーを開発する。

粉末成形および CFRP 加工システム化のため、上記の特性を有するシードレーザーユニットを作成する。中間目標値を表Ⅲ-2.3.1 及び表Ⅲ-2.3.2 にまとめる。

表Ⅲ-2.3.1 粉末成形用シードレーザー中間目標値

項目	Min.	Typ.	Max.	備考
波長 (nm)		1064		
パルス幅 (ns)			100	
繰返周波数 (kHz)		1000		

表Ⅲ-2.3.2 CFRP 加工用シードレーザー中間目標値

項目	Min.	Typ.	Max.	備考
波長 (nm)		1064	1070	1064nm 及び 1070nm 各 1 台
パルス幅 (ns)	3	5	10	
繰返周波数 (kHz)		77		

2.3.3 研究開発スケジュール

平成 24 年度はシードレーザーの特性向上を推進し、②-(1)-2)のモジュール化および②-(1)-3)ファイバーレーザーの高出力化技術の開発の成果で得られる出力波形に対しシードレーザーのパルス形状をフィードバック制御する総合動作試験と全体最適化を実施する。2 種類のシードレーザーに関してはファームウェア、ソフトウェアの改良を主体に行い、制御回路のハードウェア設計にこれを反映させる。CFRP 加工用シードレーザーについては波長多重化のため同期動作も配慮した設計を実施する。粉末成形用シードレーザーに関してはパルス幅可変機能と任意波形生成機能についての最適化を実施する。

開発されたそれぞれのシードレーザーの評価を行い、それらのデータをシードレーザー開発へフィードバック。②-(1)-2)および②-(1)-3)の中間目標を達成するために必要なパルス幅可変機能および任意波形制御技術開発を推進する。

2.3.4 研究開発目標と達成状況

研究開発目標に対して現時点での達成度を表Ⅲ-2.3.3 および表Ⅲ-2.3.4 に示す。

表Ⅲ-2.3.3 粉末成形用シードレーザーの開発目標と達成度

項目	中間目標	最終目標	成果	中間目標の達成度
波長	1064nm	1064nm	1064nm	○
パルス幅	100ns	100ns	100ns	○
パルス幅可変	10ns-200ns	10ns-200ns	10ns, 100ns	△
繰返し周波数	1MHz	1MHz	1MHz	○
偏光	直線	直線	直線	○

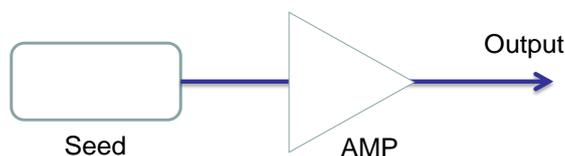
中間目標の達成度：○達成、△今年度中に達成見込み、×今年度中未達成

表Ⅲ-2.3.4 CFRP 加工用シードレーザーの開発目標と達成度

項目	中間目標	最終目標	成果	中間目標の達成度
波長	1064nm, 1070nm	1064nm, 1070nm	1064nm, 1070nm	○
パルス幅	5ns	5ns	5ns	○
パルス波形可変	3ns-10ns	3ns-10ns	3ns, 5-10ns	○
繰返し周波数	77kHz	77kHz	77kHz	○
偏光	直線	直線	直線	○

中間目標の達成度：○達成、△今年度中に達成見込み、×今年度中未達成

2.3.5 成果の詳細



図Ⅲ-2.3.5 パルスファイバーレーザーの構成

図Ⅲ-2.3.1 にパルスレーザーの構成を示す。シードレーザーは、ファイバーレーザー (FL) または半導体レーザーを用い開発する。ファイバーレーザーベースでは、外部変調器を用いることで、短パルス発生を行った。半導体レーザーは、高速変調特性に優位性がある。両者の特性を生かし、粉末成形用 CFRP 用に最適な Seed に用いて開発を進めた。両者の比較を表Ⅲ-2.3.5 に示す。

表Ⅲ－2.3.5 Seed レーザー特性比較

項目	ファイバー レーザー	半導体レーザー	備考
高出力化	○	△	パルス幅、繰返し周波数に依存
短パルス化	△	◎	
繰返し周波数可変	◎	◎	
波長可変性	△	◎	

2.3.6 最終目標の達成の見通し

2.3.4 に示したように中間目標を最終目標としている

2.3.7 知的財産権 及び 成果の普及

本プロジェクトにおけるファイバーレーザー開発に必要な知財として「特開 2007-142380」「特開 2011-187825」がある。成果の普及として、平成 23 年度は、16 件の研究発表・講演を行っている。平成 24 年度については、3 件行っている。

2.4 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

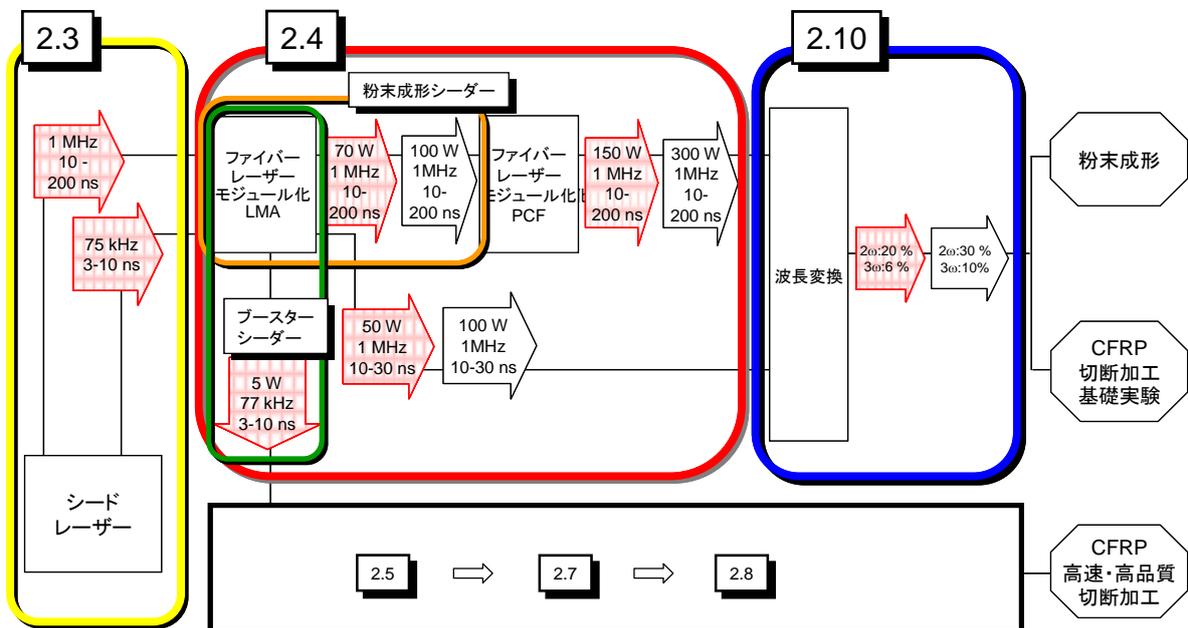
「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」

「2) ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発」

(阪大接合研、古河電工、片岡製作所)

2.4.1 事業の背景・意義（目的・概要）

本研究開発では、図Ⅲ-2.4.1に示したように粉末成形用レーザーには、②-(1)-1)で開発した繰り返し周波数 1MHz、パルス幅 100 ns のシードレーザーを LMA ファイバーレーザーモジュールにより中間目標と出力して、平均 70W、最終目標として平均出力 100W まで増幅し、さらにフォトニッククリスタルファイバーレーザーモジュールにより、中間目標として平均出力 150W、最終目標として平均出力 300W まで増幅する。CFRP 切断加工基礎実験用レーザーには②-(1)-1)で開発した繰り返し周波数 1MHz、パルス幅 10 ns のシードレーザーを 50 W まで増幅する。CFRP 高速・高品質切断加工用レーザーには、②-(1)-1)で開発した繰り返し周波数 77 kHz、パルス幅 3-10 ns のシードレーザーを平均出力 5 W まで増幅する。図Ⅲ-2.4.1 中に示したように繰り返し周波数 1MHz、パルス幅 100 ns、平均出力 70W(中間目標)および平均出力 100W(最終目標)の LMA ファイバーレーザーモジュールを「粉末成形シーダー」、繰り返し周波数 77 kHz、パルス幅 3-10 ns、平均出力 5 W の LMA ファイバーレーザーモジュールを「ブースターシーダー」と呼ぶことにする。



図Ⅲ-2.4.1 目的別に開発されるパルスファイバーレーザー開発目標：中間目標(矢印赤)と最終目標(矢印白)

2.4.2 研究開発目標と根拠

粉末成形において成形体の構造制御の高度化に必要なレーザーには、100 ns 程度の

パルス幅が要求される。成形速度から繰り返し周波数には 1MHz、平均出力には 300 W 程度必要となる。CFRP 切断加工基礎実験用には、パルス幅 10ns が必要となる。CFRP 高速・高品質加工用レーザーについては、パルス幅 3-10 ns、繰り返し周波数 1 MHz、平均出力 50 W 程度が必要となる。CFRP 高速・高品質切断加工用レーザーは、②-(1)-3 および②-(2)-1 で所望の平均出力に増幅されるが、そのレーザー増幅器に供給するレーザーには、パルス幅 3-10 ns、繰り返し周波数 77 kHz、平均出力 5 W 要求されるので、同平均出力を目標値とした。本レーザーの波長は 1064 nm であるが、後段の出力特性向上のため、1nm 程度の波長チューニングを可能とするように開発した。また、②-(1)-3 において、高出力化のため、異なる波長のレーザーを 2 台用意し合波させるため、波長 1070nm の同一特性のパルスレーザーを開発する。

粉末成形用レーザーの出力として、②-(1)-1 で開発する繰り返し周波数 1 MHz、パルス幅 100 ns のシードレーザーを最終目標として平均出力 300 W まで増幅することが必要となる。そのために、LMA ファイバー増幅により最終目標として平均出力 100W を達成し、その後、フォトニッククリスタルファイバー増幅により平均出力 300W を得る方法を選択した。中間目標値と最終目標値を表 III-2.4.1 に示す。

表 III-2.4.1 粉末成形用パルスファイバーレーザーモジュール開発の中間目標値と最終目標値

研究項目	評価項目		
	評価項目	中間目標	最終目標
②レーザー高品位化技術の研究開発 (1)ファイバーレーザーの パルス制御・高性能化技術の開発 2)ファイバーレーザーの モジュール化技術の開発	ブースター シードレーザー	出力: 5 W@5 ns 繰り返し: 77 kHz 波長: 1064 nm, 1070 nm パルス幅(可変): 3 ns - 10 ns 偏光: 直線	中間目標を最終目標とする
	粉末成形シードレーザー	出力: 70 W@100 ns 繰り返し: 1 MHz 波長: 1064 nm パルス幅(可変): 10 ns - 200 ns 偏光: 直線	出力: 100 W@100 ns 繰り返し: 1 MHz 波長: 1064 nm パルス幅(可変): 10 ns - 200 ns 偏光: 直線
	PCF増幅	出力: 150 W@100 ns 偏光: 保持	出力: 300 W@100 ns 偏光: 保持
	CFRP切断加工基礎実験用レーザー	出力: 50 W@10 ns 繰り返し: 1 MHz 波長: 1064 nm 偏光: 直線	出力: 100 W@10-30 ns 繰り返し: 1 MHz 波長: 1064 nm 偏光: 直線

CFRP 切断加工基礎実験用には、短パルス化が必要で、②-(1)-1 にてシードレーザーの短パルス化を行い、本研究開発では、パルス幅を保持したまま平均出力 50W までの増幅を行った。

CFRP 高速・高品質切断加工用レーザーの平均出力 1.5kW、繰り返し周波数 150 kHz およびパルス幅 3-10 ns を最終的に得るために、本研究では、発振波長 1064nm と 1070 nm のそれぞれのそれぞれのレーザーにおいて、パルス幅 3-10 ns、繰り返し周波数 77 kHz、平均出力 5 W を開発目標とした。

2.4.3 研究開発スケジュール

平成24年6月までの実績及び最終目標達成までの予定を表Ⅲ-2.4.5に示す。平成24年度はシードレーザーの特性向上を推進し、②-(1)-2)のモジュール化および②-(1)-3)ファイバーレーザーの高出力化技術の開発の成果で得られる出力波形に対しシードレーザーのパルス形状をフィードバック制御する総合動作試験と全体最適化を実施する。2種類のシードレーザーに関してはファームウェア、ソフトウェアの改良を主体に行い、制御回路のハードウェア設計にこれを反映させる。ブースターシードレーザーについては波長多重化のため同期動作も配慮した設計を実施する。粉末成形シードレーザーに関してはパルス幅可変機能と任意波形生成機能についての最適化を実施する。開発されたそれぞれのシードレーザーの評価を行い、それらのデータをシードレーザー開発へフィードバック。②-(1)-2)および②-(1)-3)の中間目標を達成するために必要なパルス幅可変機能および任意波形制御技術開発を推進する。

2.4.4 研究開発目標と達成状況

研究開発目標に対して現時点での達成度を表Ⅲ-2.4.2、表Ⅲ-2.4.3および表Ⅲ-2.4.4に示す。

表Ⅲ-2.4.2 粉末成形用パルスファイバーレーザーの開発目標と達成状況

研究項目	評価項目			成果	達成度
	評価項目	中間目標	最終目標		
②レーザー高品位化技術の研究開発 (1)ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発 2)ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発	粉末成形シード	出力: 70 W@100 ns 繰り返し: 1 MHz 波長: 1064 nm パルス幅: 100 ns パルス幅(可変): 10 ns - 200 ns 偏光: 直線	出力: 100 W@100 ns 繰り返し: 1 MHz 波長: 1064 nm パルス幅: 100 ns パルス幅(可変): 10 ns - 200 ns 偏光: 直線	出力: 70 W@100 ns 繰り返し: 1 MHz 波長: 1064 nm パルス幅: 100 ns パルス幅(可変): 10 ns、100 ns 偏光: 直線	○ ○ ○ ○ △ ○
	PCF増幅	出力: 150 W@100 ns 偏光: 保持	出力: 300 W@100 ns 偏光: 保持	出力: 171 W@100 ns 偏光: 保持	○ ○

中間目標の達成度：○達成、△今年度中に達成見込み、×今年度中未達成

表Ⅲ-2.4.3 CFRP切断加工基礎実験用パルスファイバーレーザー開発目標と達成状況

項目	中間目標	最終目標	成果	中間目標の達成度
波長	1064nm	1064nm	1064nm	○
パルス幅	10ns	10-30ns	10ns	○
繰り返し周波数	1MHz	1MHz	1MHz	○
出力	50W	100W	50W	○
偏光	直線	直線	直線	○

中間目標の達成度：○達成、△今年度中に達成見込み、×今年度中未達成

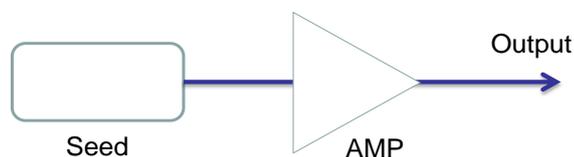
表Ⅲ－2.4.4 ブースターシーダー開発目標と達成状況

項目	中間目標	最終目標	成果	中間目標の達成度
波長	1064nm, 1070nm	1064nm, 1070nm	1064nm, 1070nm	○
パルス幅	5ns	5ns	5ns	○
パルス波形可変	3ns-10ns	3ns-10ns	3ns, 5-10ns	○
繰返し周波数	77kHz	77kHz	77kHz	○
出力	5W@ 5ns, 77kHz	5W@ 5ns, 77kHz	5W@ 5ns, 77kHz	○
偏光	直線	直線	直線	○

中間目標の達成度：○達成、△今年度中に達成見込み、×今年度中未達成

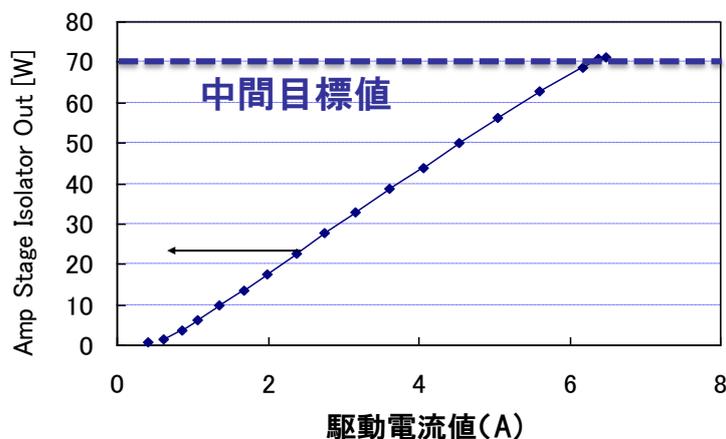
2.4.5 成果の詳細

【粉末成形シーダーの開発】



図Ⅲ－2.4.2 パルスファイバーレーザーの構成

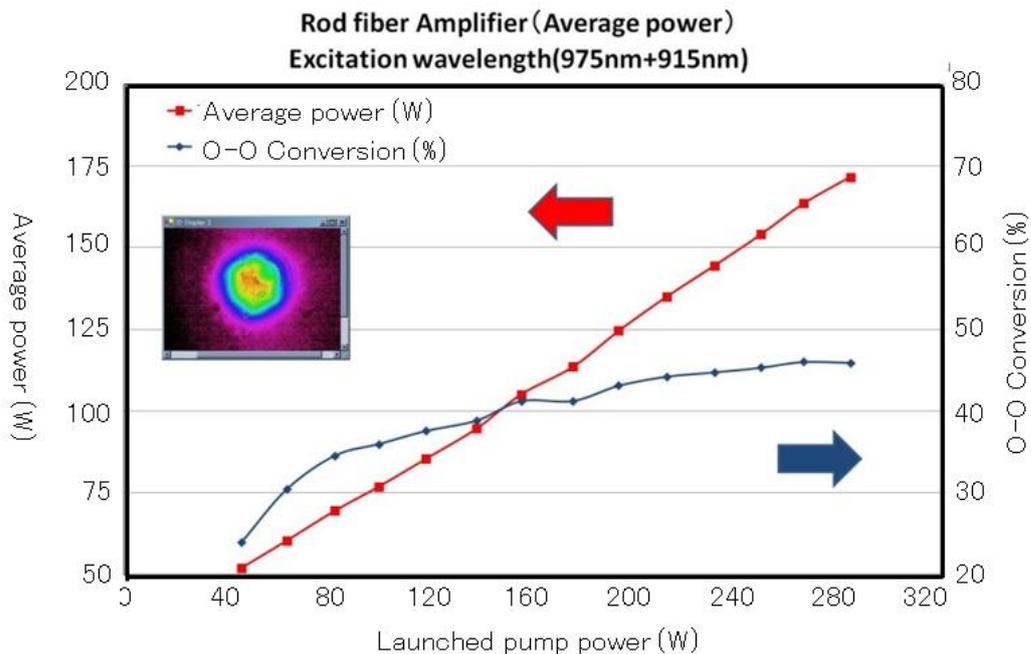
図Ⅲ－2.4.2 にパルスレーザーの構成を示す。シードレーザー (Seed) は、外部変調により初期の目標値である 10ns 及び 100ns パルスを発生させる。Seed からの出力パルスは、クラッド励起イッテルビウムファイバーを用いて増幅される。各増幅器は、最終パルスの出力スペクトルの信号-ノイズ比、ビーム品質を考慮し、増幅器の最適化を行った。出力特性を図Ⅲ－2.4.3 に示す。結果、中間目標値である 70W 出力を達成した。



図Ⅲ－2.4.3 出力特性

上述のシードレーザーを、フォトニッククリスタルファイバーレーザーモジュールにより、中間目標として平均出力 150W のところを、図Ⅲ－2.4.4 に示すように 171 W

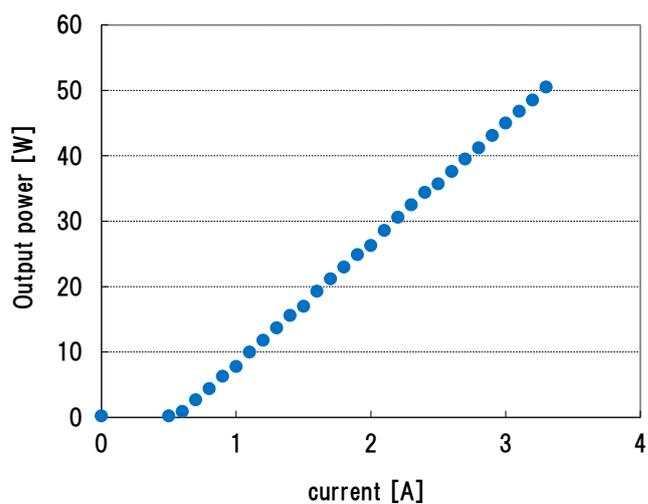
までの増幅に成功した。



図Ⅲ－2.4.4 フォトニッククリスタルファイバーモジュールの出力特性

【CFRP 切断加工基礎実験用レーザーの開発】

上述のパルス増幅技術及び、後述する CFRP 用シードレーザーの開発技術を応用し、パルスアンプの増幅条件及び非線形効果の抑圧条件を最適化することにより、パルス幅 10ns 繰り返し周波数 1MHz において、50W 出力を達成した。 図Ⅲ－2.4.5 に出力特性、図Ⅲ－2.4.6 にパルス波形を示す



図Ⅲ－2.4.5 出力特性 10ns 1MHz

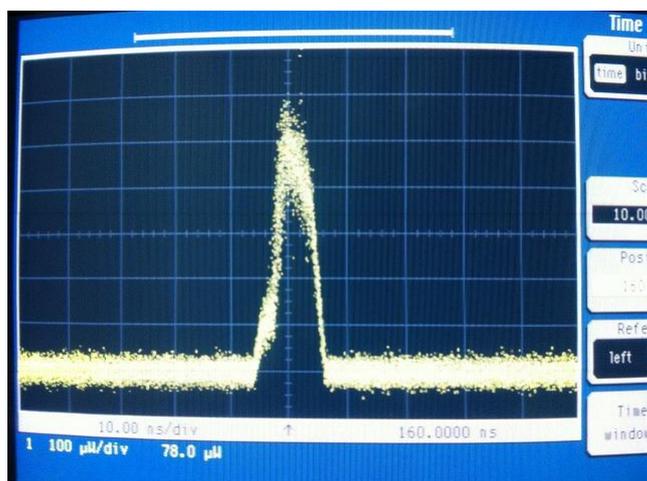


図 III-2.4.6 パルス波形特性 10ns 1MHz 50W

【ブースターシーダーの開発】

Seed は、直接変調により、3~10ns の短パルス発生を行う。パルス幅および繰り返し周波数を可変させるため、プログラマブルなパルス発生が可能な直接変調用半導体レーザー駆動基板を用いた。図 III-2.4.7 に Seed パルス出力の一例として、5ns~30ns までパルス幅の可変性を示す。本 Seed 光源から出力される光パルスを、クラッド励起イッテルビウムファイバーアンプを用いて、目標出力まで増幅させる。出力特性を図 III-2.4.8 に示す。中間目標値である、5ns 77KHz 時 5W 出力を達成した。Seed レーザーの中心波長は、動作温度により制御する。図 III-2.4.9 に出力パルススペクトルを示す。

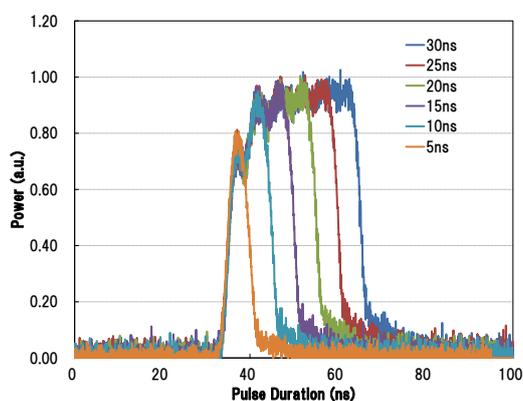


図 III-2.4.7 直接変調半導体レーザー出力(5~30ns)

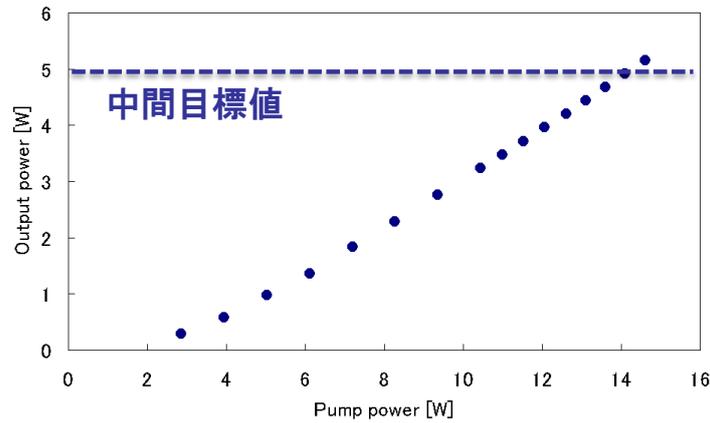


図 III-2.4.8 出力特性 (5ns 77kHz)

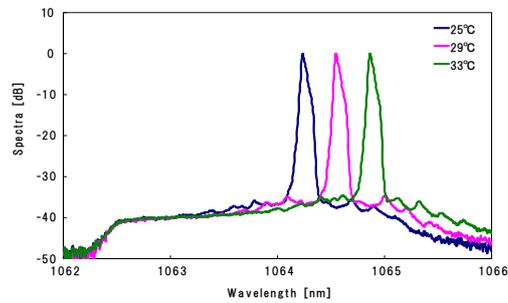


図 III-2.4.9 出力パルススペクトルの波長可変性

上述の特性を有するパルスレーザーをそれぞれ2式作成し、大阪大学接合研およびレーザー研に収め、高出力増幅用のシードレーザーとして評価を進めている。CFRP加工用シードレーザーは、2ビーム合波を行うため、1070nmの波長の異なる同一特性のパルスレーザーを作成した。図III-2.4.10にパルスレーザーユニットの外観を示す。



図 III-2.4.10 パルスレーザーユニット外観

一連の開発を通じ、CFRP切断加工基礎実験用として偏波保持型の50W以上のパルスファイバーレーザー、10ns以下の高いピークパワー出力のパルスレーザーの開発に成

功した。ファイバーレーザーの高輝度特性や取り扱いの容易さに加え、高出力化、短パルス化、パルス幅や繰り返し可変性、偏波保持出力により、粉末成形や CFRP 加工などの成形及び加工条件の最適化開発に重要な光源の特性を（加工条件）を大きく変化させることが可能となった。

2.4.6 最終目標の達成の見通し

最終目標の達成見込みを表Ⅲ-2.4.5 に示す。

表Ⅲ-2.4.5 最終目標、成果および最終目標到達見込み

項目	最終目標	成果	最終目標の到達見込み
【粉末成形ブースター】	平均出力：100 W@100 ns 繰り返し周波数：1 MHz 波長：1064 nm パルス幅：100ns パルス幅可変： 10 ns - 200 ns 偏光：直線	平均出力：70 W@100 ns 繰り返し周波数：1 Hz 波長：1064 nm パルス幅：100ns パルス幅可変： 10 ns - 200 ns 偏光：直線	PCF を用いた高出力パルス増幅器に入力する前段のファイバーパルスレーザーの中間目標を達成。出力も最終目標の7割に達しており、プロジェクト期間内に目標達成の見通し。
【PCF 増幅】	平均出力：300 W 偏光：保持	平均出力：171 W 偏光：保持	
CFRP 切断加工基礎実験用パルスファイバーレーザー	波長：1064 nm パルス幅：10-30 ns 繰り返し周波数：1 MHz 平均出力：100 W 偏光：直線	波長：1064 nm パルス幅：10 ns 繰り返し周波数：1 Hz 平均出力：50 W 偏光：直線	高繰り返し短パルス発生技術を確立。本プロジェクト終了までに励起光出力の増加及び増幅条件の最適化により目標達成の見通し。
ブースターシード	中間目標を最終目標とする。	出力：5W@5ns, 77kHz 繰り返し周波数： 77kHz 波長：1064nm, 1070nm パルス幅：5ns パルス波形可変： 3ns, 5 ns - 10 ns 偏光：直線	

2.4.7 知的財産権 及び 成果の普及

本プロジェクトにおけるファイバーレーザー開発に必要な知財として「特開 2007-142380」「特開 2011-187825」がある。平成 24 年 8 月中に「PCF の劣化を抑制する制御方法」および「PCF の空間モードを改善する制御技術」を出願予定である。成果の普及として、平成 23 年度は、16 件の研究発表・講演を行っている。平成 24 年度については、3 件行っている。

2.5 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

- 「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」
- 「(3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発」
- 「(2) パルスレーザー増幅（ブースター）技術の開発」
- 「(1) kW級ブースター増幅器の開発」
- 「(3) 高出力波長変換技術の開発」
- 「(2) 波長変換の高効率化技術の開発」

CFRP 加工用レーザーの全体構成とその概要

(1) システム構成

システムは、図1に示すように、ファイバーフロントエンド、ブースター増幅器及び波長変換部から構成する。基本計画書のブースター増幅器の目標平均出力（1.5kW）を達成するために、Nd:YAG/YAG コンポジットセラミック増幅器を採用し、そのエネルギー取り出し効率を高めるために注入平均パワーを300Wと設定した。この注入パワーを実現するために、150W×2ビームのファイバーフロントエンドを用いる。また、高調波変換については、2倍高調波変換（SHG）、3倍高調波変換（THG）において、各々40%、13%の変換効率が最終目標である。フロントエンド、ブースター増幅器及び波長変換の個々の課題は図1に示す通りであり、システム全体を通して光路設計とビーム結合の最適化を図る。

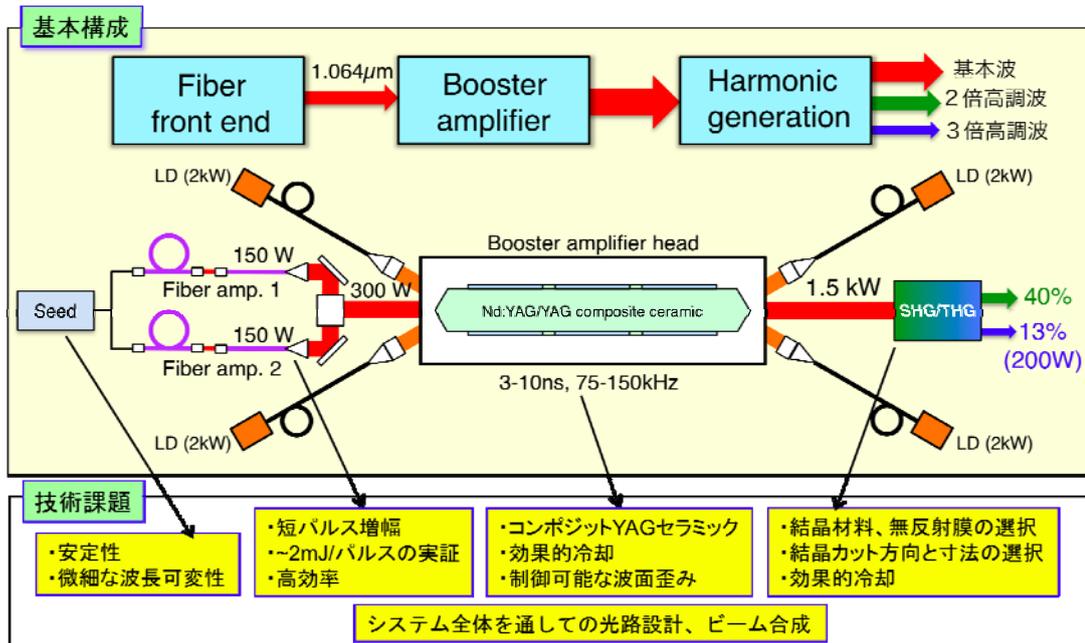


図1 CFRP加工用レーザーの全体構成図

(2) 開発体制

以下の開発体制で研究を行っている。

種光：

ALPROT（古河電工）が供給

ファイバー増幅器：

光源技術開発センター阪大レーザー研(以下、阪大レーザー研)が中心となり、光源技術開発センター阪大接合研(以下、接合研)、ALPROT(片岡製作所)と連携して開発する。

ブースター増幅器：

阪大レーザー研が中心となり、ALPROT(片岡製作所、レーザー総研)と連携して開発する。

波長変換：

阪大レーザー研が中心となり、ALPROT(レーザー総研)と連携して開発する。

(3) 開発目標の位置づけ

図2にパルス幅、繰り返し周波数及び平均出力の目標値をプロットし、市販レーザーと比較した。本プロジェクトでは従来の市販レーザーでは対応できない10nsを切るパルス幅で、繰り返し周波数も高い領域を目指している。また、平均出力に関しても、基本波、2倍高調波、3倍高調波ともにトップの性能を目指している。

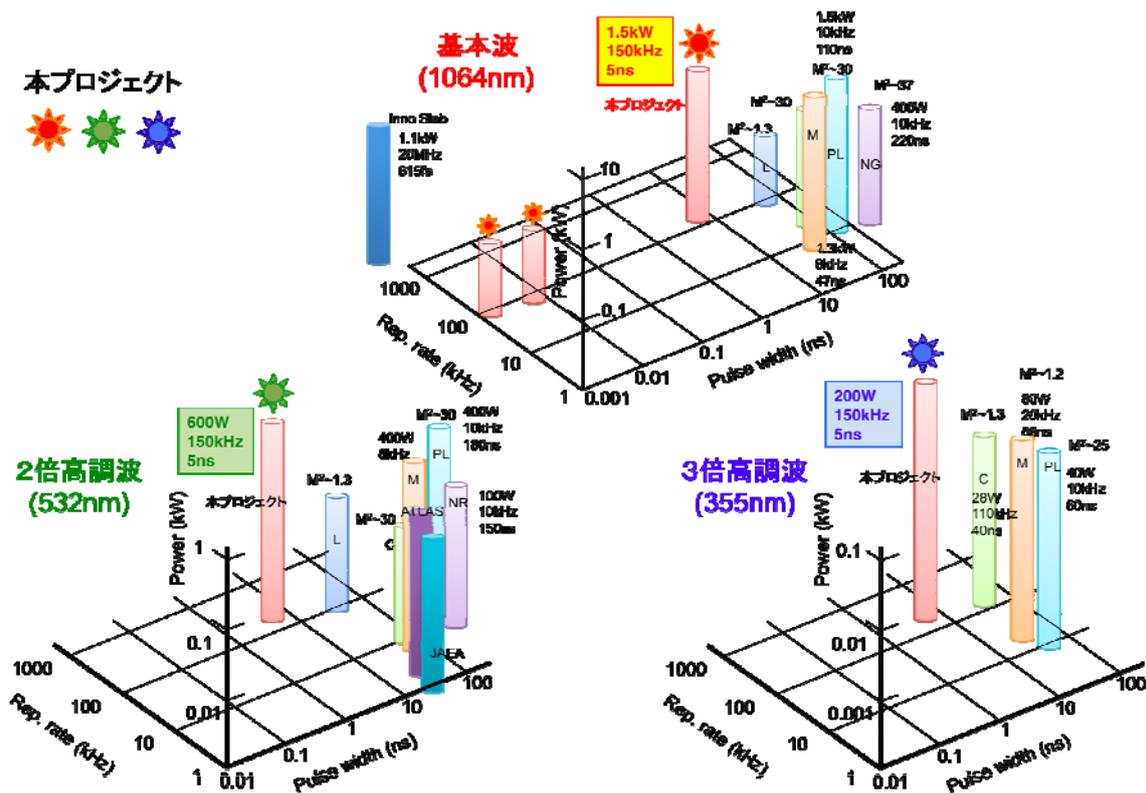


図2 レーザー性能の市販品との比較

2.5 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」

「3) ファイバーレーザーの高出力化技術の開発」

(阪大レーザー研、阪大接合研、ALPROT(古河電工、片岡製作所))

※CFRP 加工用レーザーの全体構成とその概要を「Ⅲ-6-1、2」頁に記載

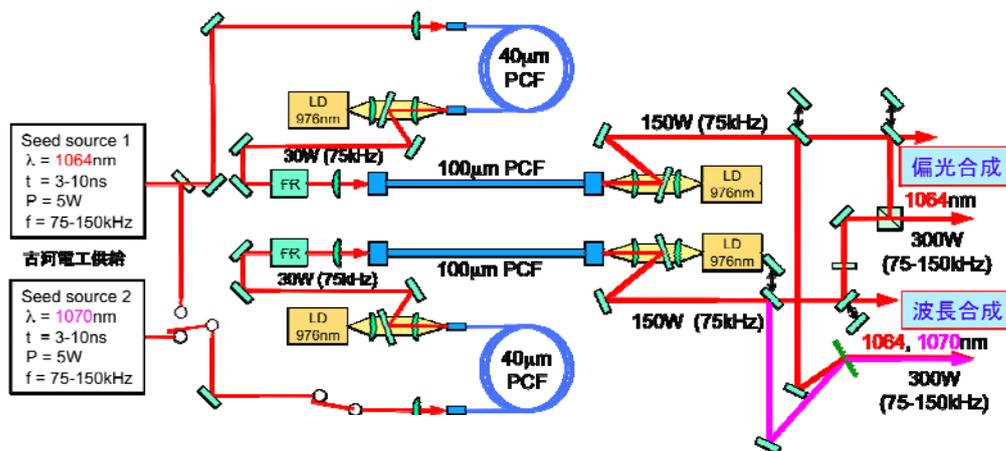
2.5.1 事業の背景・意義（目的・概要）

連続発振（CW）ファイバーレーザーは、10kW 級の出力を高ビーム品質で達成している。一方、パルスファイバーレーザーは、非線形光学効果や損傷により出力が制限されている。このため、高効率・高平均出力・高ビーム品質パルスファイバーレーザーの開発を行う。

2.5.2 研究開発目標と根拠

図Ⅲ-2.5.1 に高出力ファイバーレーザーシステムの構成図を示す。増幅部はコア径 40 μm 及び 100 μm の Yb 添加フォトニック結晶ファイバーで構成される。励起源は波長 976nm の CW 半導体レーザーである。この増幅器を 2 ビーム分設置し、古河電工が供給する種光源（波長 1064.1-1064.8nm、パルス幅 3-10ns、繰り返し 75-150kHz、平均パワー 5W）からのパルス列を 1 ビームあたり 150W まで増幅する。さらに、2 ビームを偏光合成して、300W を後段のブースター増幅器（ジグザグアクティブミラー型 Nd:YAG コンポジットセラミック増幅器）の入力として注入する。

また、基本計画書のただし書きに記載されているように、ファイバーレーザー単独で「多波長複合加工技術の開発」に活用できることも、レーザーの高効率化の観点から重要である。そのために、本プロジェクトでは、上記のブースター増幅器注入用のファイバーレーザーの構成を変えることなく、機能付加によって 2 ビーム波長合成の開発を行い、多波長多ビーム合成技術に基づくスケーラブルな高出力化技術の基盤技術確立につなげる。



図Ⅲ-2.5.1 高出力ファイバーレーザーシステムの構成図

ブースター注入用及び2ビーム波長合成に関する研究開発目標と根拠は以下の通りである。

(1) ブースター注入用

基本計画書に記載されているように、ファイバーレーザーの出力は後段のパルスレーザー増幅器（ブースター増幅器）の種光として用いられるため、ブースター増幅器に適した条件で供給する必要がある。以下に、研究開発目標とそれらの根拠を述べる。

パルスエネルギー

目標値：2mJ/pulse

設定根拠：既存のフォトニック結晶ファイバーのコア直径は100 μ m（モードフィールド直径=約80 μ m）である。パルス幅10nsに対するレーザー損傷閾値からこの目標値を設定した。

繰り返し周波数

目標値：75-150kHz

設定根拠：CFRP切断加工において、前のパルスが生成するブルームの影響を避けることができるパルス繰り返し周波数を設定した。但し、ファイバーレーザー、及び後段のブースター増幅器ともに効率を維持したままさらに繰り返し周波数を上げることは容易であることから、パルス増幅としては困難な条件（比較的低繰り返しで高パルスエネルギー）に目標設定した。

出力パワー

目標値：300W（2ビーム）

設定根拠：CFRP加工速度への要求仕様から、後段のブースター増幅器の出力は1.5kWとなっている。ブースター増幅器において、単純化した光路設計（単一パスあるいはダブルパス）においてエネルギー抽出効率を高めるには、十分な種光パワーが必要である。ファイバー増幅器のビーム当たり出力が150W（2mJ/pulse \times 75kHz）であることから、ファイバーレーザーの2ビーム出力を合成して、300Wをブースターに入力することが妥当である。

波長

目標値：1064.1-1064.8nm（可変）

設定根拠：ブースター増幅器のレーザー材料であるNd:YAGの利得ピーク波長の温度依存性（1nm/200K）、及び計算から予測されるNd:YAGレーザーの最大温度から、上記の波長可変範囲を設定した。ファイバーレーザーとブースター増幅器のシステム化段階では、種光源の波長を最適値に同調する。

パルス幅

目標値：3-10ns

設定根拠：CFRP切断加工の品質（反応層（熱変性領域の幅） $<$ 100 μ m）から要請されるパルス幅を最大値に設定した。一方、パルス幅を短くすることによってファイバー出力端面の損傷が問題となる。繰り返し周波数を設定目標の最大値（150kHz）にすると、パルスエネルギーは1mJ/pulseとなり、レーザー損傷閾値に関するパルス

幅の2乗則から、損傷回避に必要なパルス幅の下限は約3nsとなる。

M²

目標値：1.5

設定根拠：想定されるフォトニック結晶ファイバー増幅器のコア直径（100μm）とNA（0.02）で決まる値（ほぼ限界値）に設定した。

(2) 2ビーム波長合成

出力パワー

目標値：300W

設定根拠：上記ブースター注入用ファイバー増幅器の1ビームを異なる波長で動作させて、回折格子で合成する。回折格子の効率は90-95%が可能であるので、ファイバー損傷のマーゼンの範囲内で300Wは可能である。

波長

目標値：1064nmと1070nm

設定根拠：2ビーム波長合成によるスケーラブルな高出力化の技術的実証であるため、ブースター注入用と増幅特性が同等で、かつ回折格子による合成において十分な入射角度差となる波長を選択した。

これらの最終目標と中間目標を併せて表Ⅲ-2.5.1に示す。

表Ⅲ-2.5.1 ファイバーレーザーの高出力化の研究開発目標と根拠

ファイバーの高出力化				
項目	最終目標	設定根拠	中間目標	設定根拠
ブースター増幅器注入用：後段のNd:YAGブースター増幅器に適切な仕様のパルス列を供給する。(基本計画書の範囲内)				
エネルギー	2mJ/pulse	100μmコアファイバーの損傷閾値	2mJ/pulse	-----
繰り返し	75-150kHz	前のパルスが生成するブルームによる影響を避ける	75kHz	-----
平均出力	300W (2ビーム)	後段のNd:YAGブースター増幅器の取り出し効率を向上させる。 150W×2ビーム構成	150W	2mJ/pulse×75kHz(1ビーム)
波長(可変)	1064.1-1064.8nm	Nd:YAGブースター増幅器の利得中心波長の温度依存性に対応	1064.1-1064.8nm	-----
パルス幅	3-10ns	下限:ファイバー損傷抑制。 上限:熱変性領域の低減	3-10ns	-----
M ²	<1.5	100μmコアフォトニック結晶ファイバーの限界値	<1.5	-----
2ビーム波長合成：高品位のファイバーレーザーの利点を活用して、多ビーム合成によるスケーラブルな高出力パルスレーザーの基盤技術を開発する。				
出力パワー	300W	2ビームを異なる波長で動作させて合成。	波長合成の試験をH24年度内に開始(業務計画書)	
波長	1064, 1070nm	利得の低い長波長側で特性評価のため(1050nm帯は既存装置のデータを活用)		

2.5.3 研究開発スケジュール

表Ⅲ-2.5.2に示すスケジュールで開発を進めている。ブースター注入用ファイバーレーザー（波長：1064nm帯）に関しては、昨年度までに基本的な特性試験を完了し、今年度に入って全ての中間目標を達成した。今後、ブースター増幅器との組み合わせ試験に入る。

2ビームの波長合成については、波長1070nmの試験を行い、150Wの目標値を達成した。次年度に2波長合成試験を行い、目標合成出力300Wを達成する計画である。

表Ⅲ-2.5.2 ファイバーレーザーの高出力化の開発スケジュール

ファイバーの高出力化						
項目	2010	2011	2012	2013	2014	最終目標値
ブースター増幅器注入用：後段のNd:YAGブースター増幅器に適切な仕様のパルス列を供給。						
エネルギー		▲	●			2mJ/pulse
繰り返し		▲	●			75-150kHz
平均出力		▲	●			300W
波長(可変)		▲	●			1064.1-1064.8nm
パルス幅		▲	●			3-10ns
M ²		▲	●			<1.5
2ビーム波長合成：多ビーム合成によるスケラブルな高出力パルスレーザーの基盤技術を開発。						
出力パワー			▲	●		300W
波長			▲	●		1064, 1070nm

2.5.4 研究開発目標と達成状況

ブースター注入用(波長1064nm帯)としては、全ての項目について目標値を達成し、今年度後半にはブースター増幅器との組み合わせ試験に移行する。また、最終目標の300Wを達成するための2ビーム偏光合成試験を行うとともに、100μmコアファイバーの冷却構造を改善し、目標性能を大幅に超える出力パワーにおいても高ビーム品質の実現を目指す。CFRP加工のためのパルス幅の最適化(数nsのパルス幅)については、ファイバーの破壊試験となるため、ブースター増幅器との組み合わせ試験の進捗状況を見て判断する。

表Ⅲ-2.5.3 ファイバーレーザーの高出力化の達成状況

ファイバーの高出力化				
項目	中間目標	成果	達成度	今後の課題
ブースター増幅器注入用				
1) エネルギー	2mJ/pulse	2.1mJ/pulse (9.5ns)	○	数nsでの試験
2) 繰り返し	75kHz	77kHz	○	
3) 出力パワー	150W	150W (M ² =1.5) 200W (M ² =2-3)	○	偏光合成の前倒し 実証
4) 波長(可変)	1064.1-1064.8nm	1064.1-1064.8nm	○	
5) パルス幅	3-10ns	3-10ns(可変)	○	最適パルス幅対応
6) M ²	<1.5	1.5 (100-170W)	○	冷却構造の改善
2ビーム波長合成				
1) 出力パワー	—	2波長で各々に150W	◎前倒し	2波長合成の実証
2) 波長	1070nm	1070, 1075nm	○	

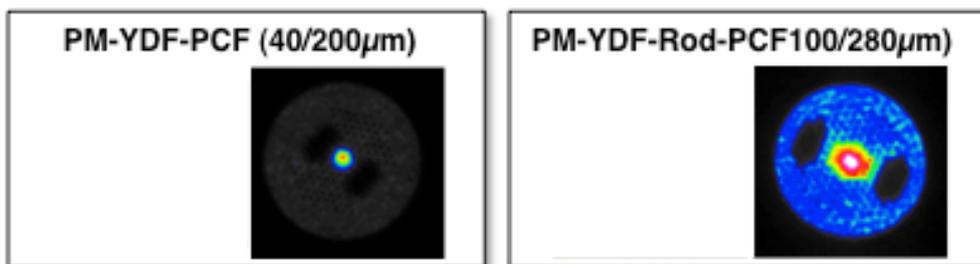
◎ 大幅達成、○ 達成、△ 達成見込み、× 未達

2ビーム波長合成については、波長1070nm、1075nmでの増幅試験を完了し、150W (M²=1.5)、200W (M²=2-3)の出力パワーを前倒し達成した。高耐力・高効率の石英製

透過型回折格子（開発者：キヤノン、東大物性研）の導入によって、今年度中に2ビーム合成 300W を前倒し達成できる見込みである。

2.5.5 成果の詳細

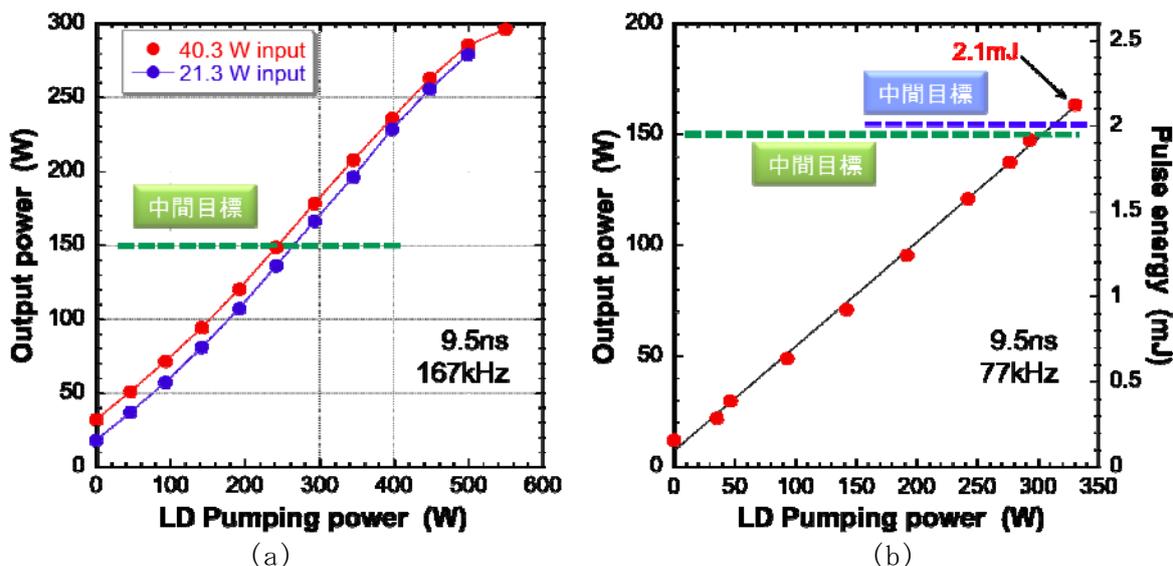
ファイバーシステム（構成図：図Ⅲ-2.5.1）は、LD 直接変調発振器部と偏波保持シングルファイバーモード増幅器部（以上古河電工供給）、フォトニック結晶ファイバー(PCF)の 40 μm コア径と 100 μm の PCF ロッドファイバー増幅器部で構成した。各々のファイバー断面図を図Ⅲ-2.5.2 に示す。PCF は Yb 添加コアを囲む様に配置された空孔によって、ファイバーの NA 値を制御できるファイバーであり、NA 値 0.02-0.03 を実現し、優れた出力ビーム性能が得られた。



図Ⅲ-2.5.2 PCF ファイバーの出力ビームパターン

(1) ブースター注入用ファイバーシステムの成果

図Ⅲ-2.5.1 の上側の1ビーム（ファイバー①）について励起条件と伝搬モード制御を最適化し、中間目標（出力 150W、パルス幅 3-10ns、繰り返し周波数 75-150kHz、高ビーム品質を達成するとともに、ブースター増幅器への注入に供する。この最適化に基づき、全く同じものをもう1台（ファイバー②、図Ⅲ-2.5.1 の下側のビーム）構築する。2台のファイバーレーザーを同一波長で動作させて、2ビーム偏光合成法の試験を行い、1本に合成されたビームの安定性やビーム品質等の課題を明らかにするとともに、その解決手法を開発することを目的としている。



図Ⅲ-2.5.3 ファイバー①の増幅試験結果。(a):平均パワーの試験、(b):1パルスエネルギー取り出し試験。

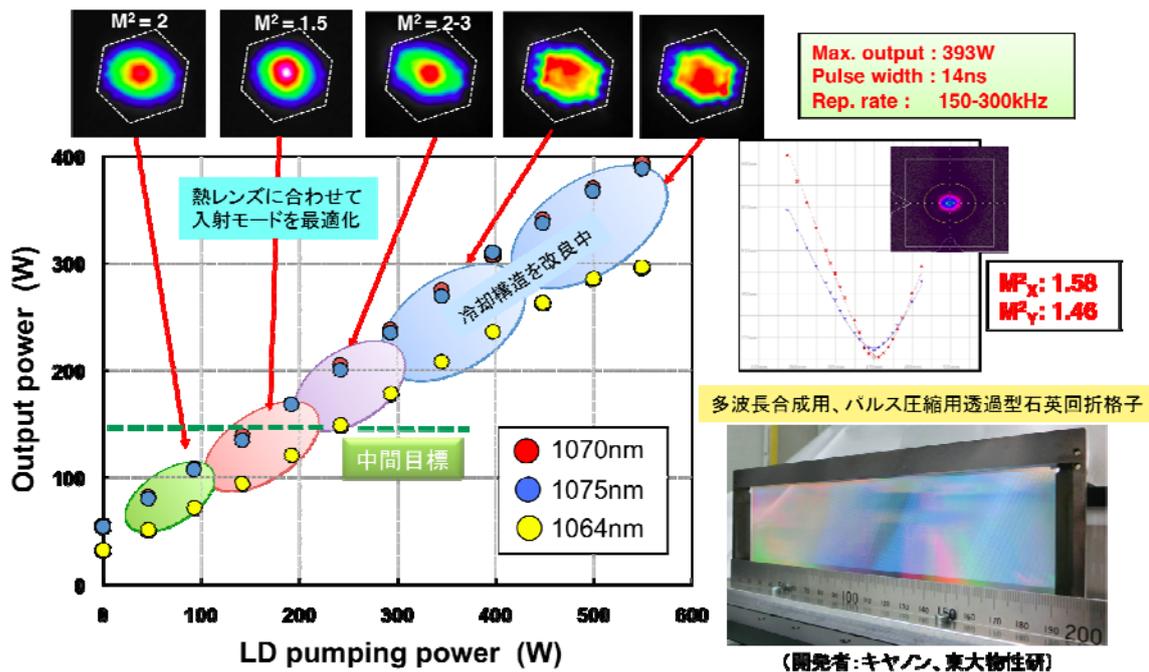
図Ⅲ-2.5-3(a)は、入射パワー21、40W時のCW LD励起パワーに対する増幅出力特性を示す。パルス幅 9.5ns、繰り返し周波 167 kHz の試験を行い、レーザー損傷と非線形過程（SBS、SRS）を考慮した結果、中間目標値である150Wを大幅に超える平均出力296Wを達成し、約50%の高効率エネルギー抽出が可能であることを実証した。

また、図Ⅲ-2.5-3(b)は、繰り返し数77kHz動作時の1パルスエネルギー取り出し実験の増幅特性を示す。中間目標値である2mJ出力に対し、レーザー損傷閾値に近い2.12mJ(ピークパワー223kW)のパルスエネルギーを達成した。

(2) 2波長合成技術開発における成果

ファイバー②をファイバー①と異なる波長で動作させ、2ビーム波長合成法の試験を行い、1本に合成されたビームの安定性やビーム品質等の課題を明らかにするとともに最適な波長合成手法を開発することを目的としている。

波長1070nm帯の種光源を用い、ファイバー②で増幅試験を行い、図Ⅲ-2.5.4に示す出力特性が得られた。ここでは、中間目標150Wと $M^2=1.5$ を両立させて達成するために、種光注入の空間モードがコア径100 μm ロッドファイバーの熱レンズ効果を相殺するように調整した。結果として、150W($M^2=1.5$)を達成し、200W(抽出効率>60%)においても良好なビーム品質($M^2=2-3$)を実証した。現在、冷却構造のさらなる改善を行うことによって、さらなる高出力と高ビーム品質の両立を目指している。



図Ⅲ-2.5.4 異なる波長での増幅試験及びビーム品質の評価

上記のように、異なる波長で個々に150W出力が可能となったことから、2波長合成試験を今年度前倒し試験する計画である。そのために必要な高効率(回折効率>90%)で波面特性の良い石英製透過型回折格子について、国産技術(図Ⅲ-2.5.4の右下の写真、キヤノン製、共同開発機関:東大物性研)活用の見通しが立った。現在、この回折格子の高耐力無反射層の設計とレーザー耐力試験について、同社と検討を開始して

いる。

2.5.6 最終目標の達成の見通し

(1) ブースター注入用

最終目標：75-150kHz, 300W, 1064.1-1064.8nm, 3-10ns, $M^2 < 1.5$ (平成 26 年度末)

達成見通し：2 ビーム各々 150W を達成しており、偏光合成により最終目標達成は容易である。

(2) 2 ビーム波長合成

最終目標：75-150kHz, 300W, 1064nm 及び 1070nm, 3-10ns, $M^2 < 1.5$ (平成 26 年度末)

達成見通し：2 ビーム個々に 1064nm で 150W、1070nm で >150W を達成している。回折格子の効率 (>90%) とファイバー出力のマージンから評価して、波長合成の最終目標達成は容易である。

2.5.7 知的財産権及び成果の普及

高出力動作のファイバーレーザーの技術について、光源技術開発センター接合研サイトの片岡製作所と連携して開発を行っている。特に、ロッド型 PCF ファイバーの冷却構造、入射ビームの空間モードとファイバー熱レンズの相殺などのノウハウが蓄積されており、これらに関する特許出願を検討している。また、接合研サイトと連携して開発された技術は、加工技術開発センター産総研サイトに納入されるファイバーレーザーに活用されている。

また、本プロジェクトで得られた出力パワー (162W@77kHz、296W@167kHz、パルス幅約 10ns) は、市販のパルスファイバーレーザー (パルス幅数 10ns) の性能を上回っており、製品化された場合の競争力は十分高いと考えられる。

2.6 研究開発項目②「レーザー高品位化技術の研究開発」

「(1) ファイバーレーザーのパルス制御・高性能化技術の開発」

「(4) 励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発」

(古河電気工業株式会社)

2.6.1 背景及び目的

本事業は「高出力多ファイバーレーザー加工基盤技術開発プロジェクト」で進めている次世代レーザー加工技術の研究開発に係わり、昨今のファイバーレーザーの技術動向を踏まえて従来検討してきたレーザーの特性向上と加工適用分野の拡大を狙って、②レーザー高品位化技術の開発のなかの1項目として、(4)「励起半導体レーザーの高速変調とその応用技術の開発」という主題でファイバーレーザー励起半導体レーザーの変調特性改善と信頼性の確保、高速変調可能な励起半導体レーザーの②-(2)「ファイバーレーザーのモジュール化技術の開発」のブースターアンプ部分への適用、さらに高速変調励起半導体レーザーを使ったQCWレーザーの開発を進める。本開発ではさらにプロジェクトの他の実施項目と連携をとりながら加工技術の開発も実施する。

ファイバーレーザー技術の優位性は発振効率の高さや待機電力が小さいという性能から実現できる省エネの効果、ファイバー伝搬に伴うデリバリーの容易さ、さらに高いビーム品質、ビーム品質の高さから活用できるガルバノ等のスキャナ技術との親和性、励起半導体技術の進化にともなう高信頼、メンテナンスフリー機能、等々従来の他のレーザー技術と比較して多数のアドバンテージが見出されており、それに伴い既存のレーザー技術であるランプ励起の固体レーザーや、炭酸ガスレーザーが既に使われている分野での置き換えが進んでいるが、この部分では既存の国産製品が海外製品へと置き換わる動きになっている。レーザー加工機にとって発振器は非常に重要な構成部品であり、製品の安定供給、設計のカスタマイズ、情報の開示性の観点から国内製のファイバーレーザー製品の出現が渴望されている。

半導体レーザー技術はファイバーレーザー技術の一つの基幹技術となっているが、従来の励起方式と比較した場合の大きな特徴である高速変調性能を活用する事でレーザー加工の性能向上が期待されている。QCWファイバーレーザーは既存のCWファイバーレーザーの基本設計を踏襲することで構成が簡単で安価な部品コストを維持しながら、励起半導体レーザーの高速パルス駆動により高いビーム品質を維持したままCW連続光と比較すると熱影響の小さな加工を実現することが出来、切断、溶接、AM等の幅広い用途で今後の応用展開が期待されている。

2.6.2 研究開発目標と根拠

QCW ファイバーレーザーの開発

大電流高速変調が可能な励起半導体レーザーを連続駆動用ファイバーレーザーキャビティの励起に適用し、QCW (Quasi Continuous Wave ; 疑似連続駆動) 動作するファイバーレーザーを実際に試作する。23年度に目標とする特性は平均出力 250W で、パルス駆動時ピーク出力 700W、パルス幅 200 μ sec \sim CW、中心波長 1080nm \pm 20nm とする。レーザー装置として筐体の実装されたレーザーを試作し、加工拠点での評価のために提出する。ピーク 700W の目標値については既存の CW ファイバーレーザーの性能と早期の試作による加工拠点からの早期のフィードバックを実現するべく決定した。

24年度の開発については、開発した励起半導体レーザーを連続駆動用ファイバーレーザーキャビティの励起に適用し、平均出力 250W、パルス駆動時ピーク出力 1600W、パルス幅 200 μ sec \sim CW、中心波長 1080nm \pm 20nm を実現するレーザーの開発を行う。23年度で得られた試作結果を基に、加工特性を考慮したレーザー設計を行い、実際に筐体の実装されたレーザーを試作し、加工拠点での評価のために提出する。目標の設定根拠としては金属材料の溶接を主用途とする要求仕様をまず考慮し、同等な設計コンセプトとなっている海外競合製品の仕様を超える性能を確保することも考慮し、また開発期間内に現状のファイバーレーザー技術から十分達成しうる目標として設定した。

最終目標	設定根拠	中間目標 (23年度)	設定根拠
ピーク 1.6kW 平均 250W M2=1.1 以下	金属材料の溶接を主用途とする要求仕様から設定した。 また海外競合製品の仕様を超える性能を確保することを考慮した。 現状のファイバーレーザー技術から十分達成しうる目標として設定した。	ピーク 700W 平均 250W M2=1.1 以下	最終目標の半分のピークパワーとし、技術的に短納期で装置化を行うことができ、なおかつ、既存のレーザーと比較してパルスピークを利用した加工が期待でき、さらに早い時点で加工拠点に試作レーザーを提出することによりしてフィードバックをもらえるような設定をした。

2.6.3 研究開発スケジュール

表Ⅲ-2.6.1 研究開発スケジュール

項目	2010	2011	2012	2013	2014	最終目標値
高速変調 半導体 レーザ		— ▲	— ●	(量産化検討) →		
耐パワー光 部品評価			— ●			
ファイバ非線 形低減		— ▲	— ●			
QCWLレーザ 試作		— ▲	— ●	(高出力多重化) →		

2.6.4 研究開発目標と達成状況

表Ⅲ-2.6.2 研究開発目標と達成状況 (まとめ)

研究項目	評価目標			成果	達成度
	評価項目	中間目標(基本計画)	中間目標		
QCWファイバレーザの作製	ピーク出力		ピーク出力:700W 平均出力:250W M ² :1.1以下	ピーク出力:800W 平均出力:500W M ² :1.1以下	○

2.6.5 成果の詳細

QCW ファイバーレーザーの開発

ピーク出力 700W、平均出力 250W 以上、 $M^2 < 1.1$ を実現した QCW 動作可能なファイバーレーザーを作成した。

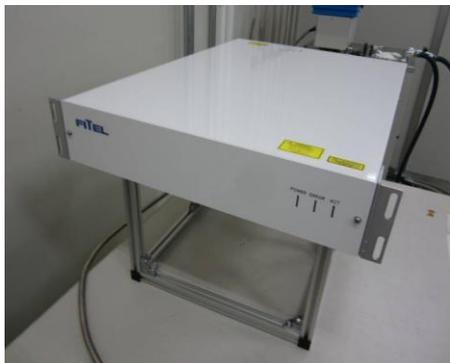


図 III-2.6.1 試作した QCW ファイバーレーザー

試作したピーク出力 700W のファイバーレーザーを用いて、CFRP の試験片の切断検討を行った。ピーク出力 700W 時において、1kHz、duty20%、切断速度 10mm/s の条件で切断加工を行った。CW 条件での切断結果と比較して表面状態として熱影響の小さな切断を実現することができた。



図 III-2.6.2 CFRP 切断検討

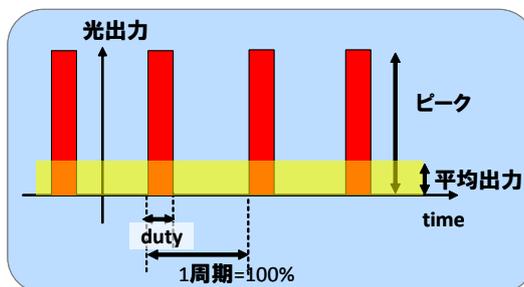


図 III-2.6.3 パルス形状

2.6.6 最終目標達成の見通し

表Ⅲ-2.6.4 現状の成果と最終目標達成の見通し

研究項目	評価目標と成果			最終目標の達成見通し
	評価項目	最終目標	成果(現時点)	
5.1.3 QCWファイバレーザーの開発	QCWファイバレーザー	ピーク出力: 1.6W 平均出力: 250W ビーム品質: M2<1.1	800 W 500W M2<1.1	(課題とその対応) 順調に開発は進んでいる。 励起半導体の輝度向上と ファイバ非線形の低減を行い ピーク出力を確保する。 最終目標は十分達成可能。

2.6.7 知的財産権および成果の普及

特許出願については平成 23 年度に 8 件の出願を行った。

関連する研究発表、講演を平成 23 年度に 5 件実施した。

学会発表等

1. ”シングルモードファイバレーザーの開発と加工事例 “ 2011 年 4 月 22 日 シンポジウム「パワーファイバレーザーとその産業応用」
2. ”シングルモードファイバレーザーの特性と加工事例” 2011 年 10 月 17 日 レーザー学会第 419 研究会
3. “シングルモードファイバレーザーの特性と加工応用” 2011 年 10 月 28 日 レーザー学会東京支部第 13 回先進レーザー応用技術セミナー
4. ”High power single-mode fiber laser and a multi-mode delivery cable” Photonics West 2012
5. “シングルモードファイバレーザーの技術と加工応用” 2012 年 2 月 1 日 レーザー学会学術講演会第 32 回年次大会シンポジウム