

平成30年度実施方針

IoT推進部

1. 件名

(大項目) 高輝度・高効率次世代レーザー技術開発

2. 根拠法

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第十五条第二号

3. 背景及び目的・目標

天然資源の乏しい日本にとって、ものづくり産業は生命線である。しかしながら、将来的に人口減少が進むと予想されており、社会構造の変革に対応した技術革新を取り入れることで従来のものづくり産業構造から脱却し、新産業革命を推進していくことが求められている。

近年の技術革新を鑑みるに、将来のものづくり産業では、あらゆる「もの」がインターネットでつながるIoT (Internet of Things) や人工知能の更なる活用により、クラウドを通じた工作機器の連携や人工知能を駆使した自動化・無人化が進むと考えられる。その中で、照射強度や照射時間などをデジタル制御し易いレーザー加工は、将来のものづくり産業における最重要ツールの一つとして期待されている。例えば、科学技術イノベーション総合戦略2016 (平成28年5月24日閣議決定) では、「新たな産業や技術基盤の創出の核となる先端レーザー等の量子ビーム利用技術の高度化」を「Society 5.0」(超スマート社会) の実現に向けて重きを置くべき取組の一つとして位置づけている。また、第5期科学技術基本計画 (平成28年1月22日閣議決定) では、「超スマート社会」の実現に向けた新たな価値創出のコアとなる強みを有する基盤技術の一つとして、「革新的な計測技術、情報・エネルギー伝達技術、加工技術など、様々なコンポーネントの高度化によりシステムの差別化につながる「光・量子技術」の強化を図るとしている。

世界に目を向ければ、レーザー技術先進国である米国と、国主導のプロジェクトを通じて絶え間なくレーザー関連分野の研究開発に投資をしてきたドイツが世界をリードしているという現状がある。また、世界の工場として急速に成長した中国もレーザー関連分野において先進国を追い上げている。日本のものづくり産業が将来にわたって競争力を維持していくためには、高付加価値製品の製造に適した高精度・高品位加工に対応する次世代レーザー加工システムを世界に先立って開発し、早期実用化を進め、ものづくり業界へ広く普及させることが必要となる。

以上より、我が国ものづくり産業の競争力強化を図ることを目的に、国が先導して産学官の英知を集結し、高輝度で高効率な実用性の高いレーザー装置、これを組み込んだレーザー加工機、これらを活用するレーザー加工技術の開発を行う意義は変わらない。そこで、本プロジェクトにおいては、以下の研究開発を引き続き実施する。また、プロジェクト全体での成果も創出すべく、協調領域を形成する取り組みも引き続き推進する。

[委託事業]

研究開発項目① 「高品位レーザー加工技術の開発」

最終目標 (平成32年度)

- 1) 高品質・大口径波長変換素子の開発
 - ・ 赤外域 (波長1ミクロン帯) から深紫外域へ波長変換後に平均光出力50W以上取り出すことが可能な、信頼性の高い波長変換素子を開発する。
- 2) 短波長・短パルスレーザー装置の開発
 - ・ 深紫外域においてパルス幅10ps級で発振する波長変換器集積ファイバーレーザーあるいは青色域においてパルス幅100ps級で発振するLDを用いた、平均光出力50Wの短波長・短パルスレーザー装置を開発する。

3) 短波長・短パルスレーザー加工技術の開発

- ・ その場観察した加工状態をもとに加工パラメータへフィードバックし、素材に適した加工状態を探索可能な、実用的な短波長・短パルスレーザー加工システムを開発する。

中間目標（平成30年度）

1) 高品質・大口径波長変換素子の開発

- ・ 赤外域（波長1ミクロン帯）のレーザー光を深紫外域へ波長変換可能な非線形光学結晶の、大型結晶育成技術（直径30mm以上）を開発する。

2) 短波長・短パルスレーザー装置の開発

- ・ 深紫外域において平均光出力20Wかつ発振パルス幅10ps級の短波長・短パルスレーザー装置を開発する。

3) 短波長・短パルスレーザー加工技術の開発

- ・ レーザー加工の評価基準、および必要な加工パラメータ設定に関する指針を明らかにする。
- ・ 短波長・短パルスレーザー装置に、加工時の様々な物理現象をその場観察可能な測定装置を組み合わせたレーザー加工評価システムを構築する。

研究開発項目② 「高出力レーザーによる加工技術の開発」

最終目標（平成32年度）

1) 高輝度・高効率レーザー装置の開発

- ・ 光パルスエネルギー500J級の固体パルスレーザー装置を開発し、同1kJ級固体パルスレーザー装置の実現可能性を明らかにする。

2) 高出力レーザーによる加工基盤技術の開発

- ・ 高パルスエネルギーレーザー照射による物質の状態変化の非破壊非接触その場観察技術、及び分析評価技術を開発する。また、高パルスエネルギーレーザーの新たな産業応用を開拓する。

中間目標（平成30年度）

1) 高輝度・高効率レーザー装置の開発

- ・ 平均光出力10kW級の高出力LDモジュールを開発する。
- ・ キロジュール級パルスレーザー装置の基本設計技術を確立する。
- ・ 光パルスエネルギー100ジュール（J）超級の固体パルスレーザー装置を開発する。

2) 高出力レーザーによる加工基盤技術の開発

- ・ 光パルスエネルギー100J級のレーザー加工システムを構築する。

研究開発項目③ 「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発」

最終目標（平成32年度）

- ・ 先導要素の強い研究開発項目であることから、中間目標時点における研究開発成果ならびに当該技術分野の動向を考慮して、平成30年度に設定する。

中間目標（平成30年度）

1) 新規構造LD基盤技術及び周辺要素技術の開発

- ・ 高輝度化・高出力化・省電力化・短波長化・小型化等に資する独創的な新規LD構造に関する設計論を確立し、これに基づいて実現可能な諸性能を定量的に明らかにする。また、要素技術を開発し、光源試作を通じてその実現可能性を明らかにする。

2) 新しい波長域及び短パルスレーザー基盤技術の開発

- ・ 既存のレーザー加工機でカバーされていない波長域・パルス幅で発振可能な光源に関する設計論を確立し、これに基づいて実現可能な諸性能を定量的に明らかにする。また、要素技術を開発し、光源試作を通じてその実現可能性を明らかにする。

研究開発項目④ 「次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発」

最終目標（平成32年度）

- 1) レーザー加工プラットフォームの構築
 - ・ 最適加工パラメータ（波長・パルス幅・繰り返し周期など）の探索が可能なレーザー加工機を試作・運用し、加工条件と加工結果とを対応付けるデータベースを構築する。
- 2) レーザー加工の計測評価基盤技術の開発
 - ・ レーザー加工シミュレーション技術と加工結果とを結び付けるうえで不可欠な、物性評価技術や先端計測技術を産学官が連携して確立する。
 - ・ レーザー加工現象を予測するための解析モデルを構築し、加工結果との比較を通じてその妥当性や適用限界を示し、最適加工レシピの導出やものづくり現場における新しい設計手法の体系化にあたって解決すべき課題を明らかにする。
- 3) レーザー加工技術の標準化・調査研究
 - ・ レーザー加工機メーカーと共同で、レーザー加工におけるプロセスモニタリング技術に関する指針をまとめる。

中間目標（平成30年度）

- 1) レーザー加工プラットフォームの構築
 - ・ 研究開発項目①で開発された短波長・短パルスレーザー装置を応用して、レーザー加工プラットフォームを構築する。
- 2) レーザー加工の計測評価基盤技術の開発
 - ・ レーザー加工時のプロセスモニタリングのカギとなる、加工部の非破壊非接触その場観察手法を提案する。
 - ・ 加工状態を的確に表す物理パラメータの定義に関する指針を明らかにする。
- 3) レーザー加工技術の標準化・調査研究
 - ・ 基準サンプルや標準作業に関する指針を明らかにする。
 - ・ レーザー加工技術に関する調査研究を行い、技術ロードマップを策定する。

4. 実施内容及び進捗（達成）状況

プロジェクトマネージャーにNEDO IoT推進部 須永吉彦を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理し、プロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させた。

国立大学法人東京大学 物性研究所 准教授 小林洋平をプロジェクトリーダーとし、国立大学法人東京大学 大学院理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構 特任准教授 田丸博晴、及び国立研究開発法人産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門 主任研究員 黒田隆之助をサブプロジェクトリーダーとし、以下の研究開発を実施した。

4. 1 平成29年度（委託）事業内容

研究開発項目① 「高品位レーザー加工技術の開発」

1) 高品質・大口径波長変換素子の開発（実施体制：大阪大学）

平成29年度は、前年度に引き続き、レーザーの高出力化に向け波長変換効率やレーザー損傷耐性を向上させた光学結晶の開発と大型結晶作成技術の開発を実施した。

a) 高レーザー損傷耐性結晶の開発

現有の溶液攪拌育成装置を用いて、大型CLBO結晶作製が見込める新しいLi-poorの育成組成比で単結晶作製を行った。その際、種子結晶の加工歪層を化学エッチングにより取り除き、従来種子結晶から下方の結晶インゴット中央に向かって伝搬する転位欠陥を低減させることに成功した。新しい組成で得られた結晶の内部散乱欠陥、及び耐紫外レーザー損傷耐性は、過去の組成条件での高品質結晶と同等以上の品質と耐性を有していることを確認した。更に低転位となった結晶中央部の素子については損傷耐性の評価を実施中である。

b) 大型結晶作製技術の開発

Li-poor組成・新型攪拌翼を組み合わせた結晶大型化の検証試験として、現有装置

(直径 15 c m 坩堝) の限界に近い 600 g 級バルク状結晶を目指して育成を行った。現在まで、重量 531 g で低欠陥密度である高品質結晶の作製に成功している。これまでの検討結果を踏まえて特殊攪拌翼の詳細仕様を確定し、直径 20 c m 坩堝から重量 1.5 k g 級の超大型結晶の作製が見込める大型結晶育成装置、新型攪拌翼の設備導入を行った。また、試作した C L B O 結晶から現時点で取得可能な大型素子を作製し、①-2) のレーザー装置用光源開発へ提供、評価を受けて、ピコ秒レーザー光源の高出力化に必要な素子の仕様条件を確立させた。

2) 短波長・短パルスレーザー装置の開発 (実施体制：スペクトロニクス株式会社)

平成 29 年度は、前年度に引き続き、266 n m 帯、ピコ秒高出力深紫外光源の技術開発を実施した。

a) ピコ秒高出力深紫外光源の開発

前年度に試作した平均出力 10W ピコ秒高出力深紫外光源について、安定運用のための長期評価性能を検証し改良を実施するとともに、平均出力 10W 級光源を 1 台追加試作し、①-3) における加工技術の開発用として提供した。また、平均出力 20W 級に向けて、M O P A 基本波部、及びレーザー損傷耐性の向上を含めた波長変換部の最適化設計と構成段毎の動作確認の後、光源の試作を行った。試作品を評価の結果、平均出力 26W を達成した。

3) 短波長・短パルスレーザー加工技術の開発 (実施体制：三菱電機株式会社)

平成 29 年度は、前年度に引き続き、高出力 D U V (深紫外光) 加工プラットフォームの開発と、研究開発項目④と連携した次世代加工要素技術の開発を実施した。

a) 高出力 D U V 加工プラットフォームの開発

高速・高精度のビームデリバリー機能を備えたレーザー加工機ベースを導入し、平成 28 年度に試作した光学系ならびに①-2) で開発されたピコ秒高出力レーザー光源を組み合わせ、10W 級のピコ秒 D U V レーザー加工システムを構築し、加工評価を開始した。

b) 研究開発項目④と連携した次世代加工要素技術開発

a) で製作した 10W 級ピコ秒 D U V レーザー加工システムに、平成 28 年度に手配したデータ通信機能部を搭載するとともに、クラウドサービスを利用して研究開発項目④と加工に関するデータ交換を行うためのネットワーク基盤を構築した。

研究開発項目② 「高出力レーザーによる加工技術の開発」

1) 高輝度・高効率レーザー装置の開発 (実施体制：浜松ホトニクス株式会社、大阪大学)

平成 29 年度は、前年度に引き続き、10 k W 級高出力 L D モジュールと 100 J 級レーザー増幅器(前段部)の開発を実施した。

a) 高出力パルスレーザー装置の開発

複数の高出力 L D スタックを集積して 10 k W 級高出力 L D モジュールの 1 号機を試作するとともに、100 J 級レーザー増幅器(前段部)においてレーザー増幅器内のセラミックスを高効率に冷却する機構およびレーザー増幅チャンバーの試作を行った(3月に完成予定)。前置増幅装置の冷却機構について評価・改良を行い、100 J 級レーザー増幅器のレーザー増幅およびレーザー波面等の光伝搬の制御について評価検討を開始した。

b) 高出力パルスレーザーの基本設計技術の開発

100 J 級レーザー増幅器の残留複屈折等の諸特性を評価した結果を基に、高出力化・高効率化の方策を検討して、100 J 級高出力レーザー装置の設計に反映させた。

2) 高出力レーザーによる加工基盤技術の開発 (実施体制：浜松ホトニクス株式会社、産業技術総合研究所、大阪大学)

平成 29 年度は、前年度に引き続き高出力レーザー加工システム開発とその加工技術の開発、および計測分析評価技術の開発を実施した。

高出力レーザー加工システムの開発については、大エネルギーパルスレーザーの産業利用

に向けた出口応用の検討をユーザー機関と連携して行った。その上で、100 J 級高出力レーザーに対応できる加工システムのレーザーパラメータ（波長、パルス幅等）、レーザー光の伝送・集光、加工ワークおよび計測モニター等の基本設計を固め、試作を開始した。今年度中に新しい加工応用を探索するための一次試作機が完成する予定である。

高出力レーザーの加工技術の開発については、新しい加工技術を探索する取組みとして、キロジュール級レーザーによるイオン衝突型ピーニングの原理実証を行い、これと共に、高出力レーザーを金属材料へ照射したときに発生する衝撃波をシミュレーションにより解析した。また、産業利用を目指した別の取組みとして、レーザークリーニング（錆取り）の検証実験を開始するとともに、大面積一括加工の応用探索に向けた分析評価を開始した。

研究開発項目③ 「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発」

本研究開発項目では、将来のレーザー加工技術に資する新しいレーザー構造創出や波長域開拓に向けて、半導体レーザーダイオード技術を始めとする光源基盤技術・周辺要素技術の開発を行う。平成29年度は、前年度に引き続き、以下の6つのテーマを実施した。

- 1) フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化
- 2) 高品質AlN結晶基板を用いた最短波長領域高出力深紫外LDの研究開発
- 3) 高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発
- 4) 高出力・高ビーム品質動作を可能とする新型面発光レーザーの研究開発
- 5) 高効率・高出力量子ドットレーザーの研究開発
- 6) 革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発

1) フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化（実施体制：京都大学、スタンレー電気株式会社）

平成29年度は、前年度に引き続き、以下のサブテーマを実施した。

a) フォトニック結晶レーザー（PCSEL）の短パルス化

前年度に確立した結合波理論とレート方程式を統合した解析手法を用いて、利得領域と可飽和吸収領域を有するPCSELの自励パルス発振の動作解析を進め、高平均出力・短パルス動作を実現するための具体的なフォトニック結晶構造および分割電極構造の設計を行った。その結果、幅100ps未満、平均出力1W超の自励発振パルスが実現可能であることを示した。さらに、前年度に引き続き、分割電極構造PCSELの形成手法の確立および評価系の構築を進め、設計したPCSELの試作・評価を行った結果、ビーム広がり角0.4°未満、パルス幅100ps程度の自励パルス発振の実証に当初計画より前倒しで成功した。

b) フォトニック結晶レーザー（PCSEL）の短波長化

前年度に引き続き、フォトニック結晶構造や活性層とフォトニック結晶の距離等、GaN系PCSELに対する設計を進め、低閾値化に向けた構造の検討を進めた。また、京都大学へのGaN系のMOCVD装置の導入・立ち上げを完了した上で、各層のエピ条件を探索し、設計PCSELを十分発振させ得るだけの利得を有する高品質な活性層の形成に成功した。併せて、デバイスの試作を前倒しで実施し、フォトニックバンド構造の測定等により1次元および2次元結合係数の導出等に成功した。さらに、GaNの結晶特性を考慮しつつフォトニック結晶効果を更に高めるための格子点構造の設計を行うとともに、本格子点構造をMOCVDによる埋め込み再成長法により実現することに成功した。

2) 高品質AlN結晶基板を用いた最短波長領域高出力深紫外LDの研究開発（実施体制：理化学研究所、山口大学）

本研究開発テーマでは、前年度に引き続き高温アニール法を用いた高品質AlN結晶の実現と内部量子効率（IQE）の向上、p型AlGaN層の高濃度化と高電流注入の実現、UV-A～UV-B領域でのLD作成に取り組み、開発を実施した。

a) サファイア基板上高品質AlN結晶の開発

前年度に導入した高品質 A l N 結晶成長用の有機金属気相成長装置 (MOCVD 装置) に材料ガス供給装置を増設し、アンモニアパルス供給多段成長法の最適化を行い $1 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$ 程度の低貫通位密度の A l N テンプレートを製造することができた。

- b) 加工サファイア基板上高品質 A l N 結晶基板の実現
加工サファイア基板 (PSS) 上の A l N 結晶成長において、平坦成長が得られる成膜条件の検討を行った。
 - c) 深紫外活性層の高い内部量子効率 (IQE) の実現
アンモニアパルス供給多段成長法を用いて作製された A l N テンプレート上に A l G a N 深紫外 LD 構造を作製し、IQE は 51% を実現した。
 - d) 高濃度 p 型クラッド層と高い注入効率の実現
前年度実施の短周期超格子効果による p 型 A l G a N のホール濃度向上の検討に加え、交互ガス供給法を用いたホール濃度向上の検討を行った。
 - e) UVB ~ UVC 領域深紫外 LD の実現とその高出力化
今年度中に UVB 領域の波長 300 ~ 320 nm の深紫外 LD の試作を行う予定である。
- 3) 高効率加工用 G a N 系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発 (実施体制: パナソニック株式会社、パナソニックスマートファクトリーソリューションズ株式会社)
前年度に設計した G a N 系レーザーアレイ素子 / 金属両面放熱構造を用いたレーザーモジュールの試作および評価を行い、予定している目標光出力 80W 以上の連続動作を確認した。引き続き、その結果をフィードバックした高放熱化構造ならびにレーザービームを高品質化させる発光部構造の設計を行った。また、改造結晶成長装置の均一性向上を確認し、大面積素子用成膜条件を検討した。発振器光学系結合用のビームツイスターユニットについては、G a N 系レーザーの発振波長帯において高効率となる形状の設計を行った。

- 4) 高出力・高ビーム品質動作を可能とする新型面発光レーザーの研究開発 (実施体制: 東京工業大学、富士ゼロックス株式会社 - 再委託 産業技術総合研究所)

平成 29 年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施した。

- a) 高出力面発光レーザーの研究開発
前年度に引き続き面発光レーザー増幅器の動作解析とモデルの検証を行うとともに、一方向性結合を可能とする単一波長面発光レーザーと増幅器の集積構造の検討と改良を行った。面発光レーザー増幅については、ビーム拡がり角 0.04° 以下、パルス動作で出力 1.2W を実現した。さらに 2 次元レイアウト構造で 1mm 角以下のチップサイズで実効的に 4mm 長となる増幅器を実現し、放射パターン特性を明らかにした。
- b) 高効率・大規模アレイ化と周辺技術の研究開発
高出力面発光レーザーの評価装置を設計、導入するとともに、3 インチウエハプロセスにより新型面発光レーザー増幅器の試作を行った。素子長が 2mm において CW で 0.47 W の出力を実現した。さらに、素子長 6mm においては CW で 1.3W の出力を得、スケールアップによる高出力化ができることを確認した。

- 5) 高効率・高出力量子ドットレーザーの研究開発 (実施体制: 東京大学 - 再委託 株式会社 QD レーザ、三菱電機株式会社)

平成 29 年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施した。

- a) 高密度量子ドット形成技術基盤の開発
高出力化のため、高密度量子ドットレーザーウエハの実現に向けた結晶成長技術の検討を行い、基礎的な成長条件出しに続いて、主として成長温度の最適化を図り、 $1.05 \mu\text{m}$ 帯 I n G a A s 量子ドットについて $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ までの面内高密度化を達成した。量子ドットおよび障壁層の条件を最適化することで、 $1.05 \mu\text{m}$ 帯で $1.7 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ の高面内密度を有する I n G a A s 量子ドット層の形成に成功した。また、8 層の量子ドット構造を形成し、レーザーウエハに展開する一方、更なる多層積層構造化のための指針を得た。

- b) 高出力量子ドットレーザーの設計と実現可能性実証
高出力化を目指し、レーザー素子構造の最適化（量子ドット層数や素子長）のための試作を行い、特性を評価検討するとともに、量子井戸レーザーとの比較検討も開始した。さらに、今後のパッケージへの実装に向けて、16 レーザーアレイ構造の試作も行った。
- c) 高出力量子ドットレーザー加工応用に向けた周辺要素技術開発
目標とする集積出力 10W 以上の実証に向けて、複数発光点を有する量子ドットレーザーアレイを実装するための高冷却パッケージを設計するとともに、複数発光点の発振ビームを同軸上に結合する外部光学系の検討を行った。

6) 革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発（実施体制：株式会社金門光波、大阪大学、レーザー技術総合研究所）

平成29年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施した。

- a) 0.5W/2W級UVレーザー光源の設計、製作、及び評価
可視光基本波ファイバレーザーの出力 2W (CW) 以上の達成に向けた設計、試作、評価を行った。冷却効率向上のため、冷却システムとファイバハウス構造・素材の変更、金属ファイバフェルールを導入し、基本波部の出力 1044mW を達成した。波長変換光学系は、共振器の改良及び評価を行い、UV 光出力で 58mW、変換効率 13.5% を得た。また、ファイバ端面及び、共振器用の高耐力UVレーザー用コーティング技術の開発と、利得ファイバのファイバハウスへの設置方法及びコーティング温度条件等の検討を行い、最適化を実施した。UVレーザー光源試作については、0.5W級のプロトタイプを製作し市場の反応調査を実施中である。
- b) 10W級次世代UVレーザーに関する要素技術の開発
基本波レーザー出力の向上のため、大口径のダブルクラッドファイバと励起コンバイナの開発を行った。ダブルクラッドファイバについてはコア径/ポンプクラッド径：9.8 μ m/16.5 μ m、NA：0.04 となる大口径化の製造に成功した。励起コンバイナについては、研究開発項目④のグループと連携し、GAN-LD用空間結合型ファイバ型コンバイナの開発検討を行った。

研究開発項目④ 「次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発」

1) レーザー加工プラットフォームの構築（実施体制：東京大学ー再委託 東北大学、産業技術総合研究所、ギガフォトン株式会社、大阪大学ー共同実施 株式会社島津製作所（～平成29年9月）、共同実施 ヤマザキマザック株式会社、株式会社島津製作所（平成29年10月～））

平成29年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施した。

- a) 時間制御型レーザー加工テスト装置の開発
レーザー加工テスト装置を構成するための時間制御型ファイバレーザーと試験加工装置の開発を進めた。チャープパルス増幅方式のシステムを開発し、サブピコ秒からサブナノ秒のパルス幅可変動作及び 100W の増幅出力を実証すると共に、課題の抽出を行った。また、10ps から 1 μ s 領域の発振器用LDのチップ作製と実装を行いつつ、時間幅 10ps から 1 μ s の光パルスを任意繰り返しで発生させる駆動技術開発と、駆動回路および低ノイズ光増幅器の設計・製作を行った。
- b) 波長制御型レーザー加工テスト装置の開発
波長制御型レーザー加工テストで必要となる評価装置等の構築を進めた。ガラスやCFRP等の典型的な被加工材料に対して試験的なレーザー加工を行い、光源波長が加工に与える影響についてモニタリングすべき情報を検討し、設計に反映させた。また、加工に対する波長の影響とパルス幅の影響について検討を行い、シミュレーションを試行した。
- c) 極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術の開発
新規の実験設備を立ち上げ、加工評価装置を製作した。これと前年度に製作したエキシ

マレーザーを用いて、193nmによるレーザー加工の有意性を実証するためのサンプル加工を実施した。また、改良のため193nmハイブリッドArFレーザーのシード用固体オシレータ基本波部（ファイバーレーザー、パルス幅1ns）を製作した。

- d) 高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発
マルチビーム重畳による300W級青色半導体レーザーマルチビーム集光ユニットの開発を行った。青色半導体レーザーマルチビーム集光ユニットを工作機械に組み込み、加工特性の調査を進めた。
- e) レーザー加工プラットフォームの整備と運営、レーザー加工データベースの構築
テストプラットフォームの環境整備を開始し、先導評価用テスト加工装置の導入を進めた。

2) レーザー加工の計測評価基盤技術の開発（実施体制：東京大学、産業技術総合研究所－再委託 早稲田大学）

平成29年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施した。

- a) 計測評価基盤技術
前年度に設計および要素開発を行った計測評価手法について、各々のテスト環境における初期のデータ取得を開始した。レーザー加工部位の特性を原子レベルで計測するためのフラグメントイオン計測装置については、パルス幅100fsのレーザー光源を用い、性能評価を行った。また典型的な固体材料として金及び石英のデータ取得を行った。さらに、第一原理シミュレーションを用いた酸化グラフェンおよび石英の強いレーザー照射による非熱的挙動の解析及びパルス幅依存性の検討を行った。
- b) レーザー加工のための材料との相互作用データベース構築
前年度に実施した光学設計等を基に、可視～真空紫外域でのエリプソメトリー分光計測装置を製作し、Siウェハーなどの標準的な試料の計測を行って装置の性能評価を実施した。更にこの装置や既設の分析装置等により、レーザー加工ニーズの高い無アルカリガラス試料などの材料を中心に吸収係数や屈折率スペクトルの計測を開始した。

3) レーザー加工技術の標準化・調査研究（実施体制：産業技術総合研究所、東京大学）

テストプラットフォームで統一的に扱うべき材料や加工法について、および加工装置における基準サンプルや加工標準のニーズについてユーザー調査を実施した。また、レーザー加工技術ロードマップの策定を開始した。

4. 2 実績推移

	平成28年度	平成29年度
実績額推移 需給勘定（百万円）	2,000	2,113
特許出願件数（件）	2	3
論文発表数（報）	26	71
フォーラム等（件）	2	1

※平成30年1月31日時点、但し論文発表数には3月末までの発表投稿数を含む。

5. 事業内容

プロジェクトマネージャーにNEDO IoT推進部 須永吉彦を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理し、プロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。

国立大学法人東京大学 物性研究所 准教授 小林洋平をプロジェクトリーダーとし、国立大学法人東京大学 大学院理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構 特任准教授 田丸博晴、及び国立研究開発法人産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門 主任研究員 黒田隆之助をサブプロジェクトリーダーとし、以下の研究開発を実施する。実施体制については、別紙を参照のこと。

5. 1 平成30年度（委託）事業内容

研究開発項目① 「高品位レーザー加工技術の開発」

1) 高品質・大口径波長変換素子の開発（実施体制：大阪大学）

平成30年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施する。

a) 高レーザー損傷耐性結晶の開発

平成29年度までの基礎検討技術を組み合わせ、導入した大型装置を用いて高出力ピコ秒レーザーに適用可能な高レーザー損傷耐性の実現に取り組む。素子寿命（出力の経時劣化耐性）はプロジェクト開始時の1.5倍に向上させることを目指す。

b) 大型結晶作製技術の開発

平成29年度までの検討を踏まえ、大型結晶（重量1kg）において、高品質・高均質性となるCLBOの結晶成長技術を確立させる。大口径30mm角断面素子を作製し、①-2で開発するピコ秒光源への搭載を行うと共に長期安定性試験を進め、実用性を評価しつつ更なる改良を行う。

2) 短波長・短パルスレーザー装置の開発（実施体制：スペクトロニクス株式会社）

平成30年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施する。

a) ピコ秒高出力深紫外光源の開発

平成29年度に引き続き平均出力20W級の高出力深紫外光源の最適化設計、評価を行い、266nm帯、平均出力20Wピコ秒高出力深紫外光源を3台試作する。前年度開発した制御システムの実装検証を行う。平均出力20W級試作機は、「①-3 短波長・短パルス幅レーザー加工技術の開発」用と「④ 次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発」用として各1台を提供する。残り1台を用いてランニング評価を行う。併せて、平均出力50W級のMOPA基本波部、さらなる損傷耐性向上を考慮した波長変換部の最適化設計と動作確認に取り組むとともに、検証を行う。

3) 短波長・短パルスレーザー加工技術の開発（実施体制：三菱電機株式会社）

平成30年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施する。

a) 高出力DUV加工プラットフォームの開発

10W級加工プラットフォームでの動作評価を踏まえて、20W級に向けた加工光学系の改良設計、試作を行う。改良試作光学系と①-2で開発された20W級光源をベースシステムに結合することで20W級の加工システムを構築する。

b) 研究開発項目④と連携した次世代加工要素技術開発

項目④で得られた知見を踏まえて、加工データがその場で得られる小型のモニター系を試作し、プラットフォームに組み込む。また、項目④とも連携して、加工パラメータを最適化し、266nm帯20Wの高品位加工の実証を行う。

研究開発項目② 「高出力レーザーによる加工技術の開発」

1) 高輝度・高効率レーザー装置の開発（実施体制：浜松ホトニクス株式会社、大阪大学）

平成30年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施する。

a) 高出力パルスレーザー装置の開発

平成29年度に検討した改良方策を施した高出力LDモジュール試作2号機を試作し、諸特性を評価して中間目標である10kW（1kJ×10Hz）出力を確認する。前年度までに試作した100J級レーザー増幅器（前段部）等を改良し、平成30年度に試作する100J級レーザー増幅器（後段部）と統合した100J級高出力レーザー装置を構築し、諸特性の評価を行いパルスエネルギー100Jの出力を確認する。また得られた結果を基に、キロジュール級レーザーの基本設計技術を確立する。そして高出力レーザー装置の光出力を2)で構築する加工システムへ供給し、これと連動して動作の確認を行う。

b) 高出力パルスレーザーの基本設計技術の開発

100J級レーザー増幅器等に関するエネルギー特性、熱特性、ビーム品質等の特性改善の

ための方策を検討し、キロジュール級レーザーの基本設計技術にフィードバックする。

2) 高出力レーザーによる加工基盤技術の開発 (実施体制：浜松ホトニクス株式会社、産業技術総合研究所、大阪大学)

平成30年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施する。

- a) 高出力レーザー加工システムの開発
 - 1) で開発した高出力レーザー装置を用いて、レーザー伝送部、レーザー集光部、サンプル保持部および駆動部、計測モニター部、システム制御部等からなる100 J級レーザー出力に対応した高出力レーザー加工システムを構築し、基本仕様を満足しつつ、10~100 GW/cm²の強度で繰り返し照射可能なことを確認する。
- b) 高出力レーザーの加工技術の開発

既存の高出力レーザー装置を用いて、サンプルへの照射試験およびシミュレーションによる解析結果や分析・評価結果と比較検討することで、材料の深部の領域への応力分布を付与する等の従来を凌駕する新しい加工技術を確立する。また、ここで得られた知見をa)で構築する高出力レーザー加工システムにフィードバックする。
- c) 計測分析評価技術の開発
 - b) で検討する加工技術の検証と作成した加工サンプルの分析・評価を通して、高パルスエネルギーを照射された試料の状態変化を非接触で分析・観察するために必要な計測技術の仕様を明らかにする。

研究開発項目③ 「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発」

平成30年度は、前年度に引き続き以下6つのテーマを継続し実施する。

1) フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化 (実施体制：京都大学、スタンレー電気株式会社)

平成30年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施する。

- a) フォトニック結晶レーザー(PCSEL)の短パルス化

平成29年度に得られた、短パルスPCSELデバイスの評価結果について、数値計算結果と定量的な比較を行い、作製デバイスの活性層の利得係数やキャリア寿命等の物理パラメータの推定を行う。その後、デバイス設計へのフィードバックを行い、高平均出力・短パルス動作を実現するための最適なデバイス構造を見出していく。これらの結果を踏まえ、平成29年度に引き続き、デバイスの試作・評価を進め、短パルスPCSELの高ピークパワー化を目指す。
- b) フォトニック結晶レーザー(PCSEL)の短波長化

これまでに得られたフォトニック結晶構造の設計結果を踏まえたデバイス試作を行うとともに、材料の吸収係数低減や、活性層利得向上を実現するための、各層のエピ条件の探索を実施し、PCSEL作製に反映させることにより、低閾値GaN系PCSELの発振の実現を目指す。また、GaN系PCSELの高出力動作に向けた基礎検討として、面垂直方向への放射係数の増大が期待できる非対称性の高い格子点構造の検討や、出射光を遮らない窓状電極の導入についての検討などを行う。

2) 高品質AlN結晶基板を用いた最短波長領域高出力深紫外LDの研究開発 (実施体制：理化学研究所、山口大学)

平成30年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施する。

- a) サファイア基板上高品質AlN結晶の開発

高温アニール装置を導入し、「高温アニール法」によるAlN結晶の転位の低減交換を実証する。また、「アンモニアパルス供給多段成長法」と「高温アニール法」を併用して用いて 2×10^8 cm⁻²程度の貫通転位密度のAlNテンプレートを製造する。
- b) 加工サファイア基板上高品質AlN結晶基板の実現

加工サファイア基板(PSG)上AlN結晶成長を用いて、原子層平坦でかつ貫通転移

密度が $5 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$ 程度の A l N 結晶を実現し、深紫外 LD 用のテンプレートとして供給する。

- c) 深紫外活性層の高い内部量子効率の実現
「アンモニアパルス供給多段成長法」と「高温アニール法」を用いて作製された A l N テンプレート上に A l G a N 深紫外 LD 構造を作製し 70% 程度の I Q E を実現する。I n A l G a N 量子井戸活性層の成膜の検討を行う。
- d) 高濃度 p 型クラッド層と高い注入効率の実現
高ホール濃度化と MQ B 電子ブロック層の導入を行うことにより深紫外 LD 構造への $5 \text{ KA} / \text{cm}^2$ 程度の注入電流密度を実現する。また、高注入時の注入効率の向上を検討する。
- e) UV B ~ UV C 領域深紫外 LD の実現とその高出力化
UV A 領域の波長 320-340 nm の深紫外 LD において、ピーク出力 50mW 程度のパルス動作を実現する。また、UV B 領域の波長 280-320 nm の深紫外 LD の動作実証を行う。LD の高出力化の為、高真空 A l 系蒸着装置を導入する。
- f) A l N 単結晶基板上高出力深紫外 LD の実現
単結晶 A l N 基板上への A l G a N 量子井戸発光層の成膜の検討を行う。また、単結晶 A l N 基板上に UV A 領域深紫外 LD の試作を行う。

3) 高効率加工用 G a N 系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発 (実施体制：パナソニック株式会社、パナソニックスマートファクトリーソリューションズ株式会社)

レーザーモジュールの信頼性を向上させる構造を設計し、80W 動作品として仕上げる。また平成 29 年度に設計したビームツイスターユニットを試作し、本モジュールに集積させる技術を構築する。レーザービーム高品質化技術については設計手法の妥当性を実験により検証する。また産学連携等により短波長レーザー加工の応用研究に着手する。

4) 高出力・高ビーム品質動作を可能とする新型面発光レーザーの研究開発 (実施体制：東京工業大学、富士ゼロックス株式会社—再委託 産業技術総合研究所)

平成 30 年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施する。

- a) 高出力面発光レーザーの研究開発
平成 29 年度に引き続き、面発光レーザーと面発光レーザー増幅器を横方向にモノリシックに集積した高出力光源のモード安定化と、高出力化とビーム品質の両立に取り組み、 1 cm 角のチップサイズで、出力 1 kW 以上、ビーム品質 $M^2 < 2$ の高出力・高ビーム品質動作を行う実現可能性を理論的に明らかにする。実験的には、面発光レーザー・増幅器集積光源により、光出力 $> 1 \text{ W}$ (パルス動作)、ビーム品質 $M^2 < 2$ を実現する。
- b) 高効率・大規模アレイ化と周辺技術の研究開発
スローライトモードの安定化する設計を行うと共に、長尺素子との光結合形状を最適化し結合効率を向上する。面発光レーザー増幅器の長尺化試作と評価を実施し、面発光レーザー増幅器長尺化による光出力 5 W 以上を達成する。

5) 高効率・高出力量子ドットレーザーの研究開発 (実施体制：東京大学—再委託 株式会社 Q D レーザ、三菱電機株式会社)

平成 30 年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施する。

- a) 高密度量子ドット形成技術基盤の開発
平成 29 年度に得られた成果を踏まえ、10 層以上の積層量子ドット構造を形成するとともに、これまでの成果をレーザー素子用ウエハ成長技術に展開する。また、量子ドットレーザーの性能向上に向けて、量子ドットの更なる高密度化・高均一化も図る。
- b) 高出力量子ドットレーザーの設計と実現可能性実証
これまでに最適化された設計と開発されたデバイス作製プロセスを基礎に、高密度量子ドット形成技術基盤の開発成果も取り入れることにより、レーザー出力 $1 \text{ W} / \text{mm}^2$ 超の動作可能性を実証する。

c) 高出力量子ドットレーザー加工応用に向けた周辺要素技術開発

量子ドットレーザーを高冷却パッケージに搭載して動作特性を評価するとともに、複数発光点の発振ビームを結合する外部光学系により、加工応用に適した集積ビームを実現する。さらに、既存半導体レーザーとの特性比較を行うことにより、量子ドットレーザーの特長を活かした加工応用に向けた指針を得るとともに課題を明らかにする。

6) 革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発 (実施体制：株式会社金門光波、千葉工業大学、レーザー技術総合研究所)

平成30年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施する。

a) 0.5W/2W級UVレーザー光源の設計、製作、及び評価

可視光基本波ファイバレーザーの出力2W(CW)の達成に向け、前年度に引き続き、励起効率の向上、共振器内ロスの低減等の特性改善を進める。UVファイバレーザー光源用の高耐力コーティングの設計、製作、及び評価を行うとともに、UV変換効率25%を達成するため、外部共振器位相ロック制御システムの高精度化を実施する。また、以上の開発技術を搭載した0.5WプロトタイプUVレーザー(発振器部、電源)の製作を行う。

b) 10W級次世代UVレーザーに関する要素技術の開発

UV光10W出力(CW)のため、主発振器出力増幅器(MOPA)構成の設計を行うとともに、ダブルクラッドファイバのコア及びクラッド径拡大を行う。励起コンバイナについては、研究開発項目④グループと連携して、GAN-LD用空間結合型ファイバ型コンバイナの開発検討を引き続き行うと共に、研究開発項目④との連携により次世代のファイバ型GAN-LD光源用コンバイナの開発検討を進める。

研究開発項目④ 「次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発」

1) レーザー加工プラットフォームの構築 (実施体制：東京大学一再委託 東北大学、産業技術総合研究所、ギガフォトン株式会社、大阪大学一共同実施 ヤマザキマザック株式会社、株式会社島津製作所)

平成30年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施する。

a) 時間制御型レーザー加工テスト装置の開発

サブピコ秒～サブナノ秒域パルス幅可変の高出力時間制御型レーザーの構築を行い平均100W以上の動作試験を行うとともに、試験加工装置と協調して動作させる技術を開発して、試作機として加工評価と組み合わせたテスト加工プラットフォーム利用を開始する。広帯域パルス幅可変半導体レーザーについては、平成29年度試作素子の利得スイッチパルス幅とピーク強度の限界、時間制御性の詳細測定を行い、数psから1μsまでの制御のための改良型素子を試作する。さらに開発した制御エレクトロニクス・中間増幅器を用いて、時間波形が柔軟に制御できる数Wレベル出力の発振器を製作し、レーザー加工テスト装置にて評価を開始する。

b) 波長制御型レーザー加工テスト装置の開発

これまでの知見をもとに波長制御型の加工テスト装置を構築し、レーザー加工プラットフォームを構成する。また、④-2)-a)とともに、加工とシミュレーションとの比較を行い、シミュレーション手法の評価方法を確立する。また、必要に応じて、シミュレーションと差異について実験的に検証を行う。

c) 極短波長領域のハイブリッドArFレーザー加工技術の開発

既存のハイブリッドArFレーザー装置に加工システムを付加した試作加工機を製作し、加工プラットフォームとして構成した上で、これを用いた加工評価を開始する。また、平成29年度に製作したシード用固体オシレータ基本波部及び波長変換部を用いて、高い集光性による高フルーエンス化を可能とするパルス幅1nsのハイブリッドArFレーザーの開発を行う。

d) 高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発

100W級青色半導体レーザーを6ビーム重畳させる600W級青色半導体レーザーマルチビ

ーム集光ユニットを開発する。600W級青色半導体レーザーマルチビーム集光ユニットの特性評価および溶接に適用した場合の加工特性を評価するための実践的評価装置の開発を行う。また、コア径 200 μ m以下のファイバー一本あたりの出力 200W、波長 400~530 nmで波長コンバイニング方式を用いた高輝度青色半導体レーザーを開発し、特性評価を行う。更に 300W~600W級青色半導体レーザーマルチビーム集光ユニットを工作機械に組み込み、高品質な溶接を行うために必要な基礎実験を行うと共に、解析手法の開発を進める。

- e) レーザー加工プラットフォームの整備と運営、レーザー加工データベースの構築
平成30年度はテストプラットフォームの運用を開始する。また、それぞれの装置で統一的に評価する方法を策定の後、データベース構築を開始する。

2) レーザー加工の計測評価基盤技術の開発 (実施体制：東京大学、産業技術総合研究所―再委託 早稲田大学)

平成30年度は、前年度に引き続き以下のサブテーマを実施する。

a) 計測評価基盤技術

前年度までに設計および開発を進めた計測評価手法について、実際の加工に適用するための開発を進める。材料評価は典型的な対象材料への適用を開始し、加工中観察や加工後計測評価において、試行をはじめた実サンプルへの適用など、加工プラットフォームの構築と連携した計測評価を開始する。また計測評価を行ったデータのアーカイブを試み、可能な情報からプロジェクト内で共有をはかることにより、データベースに必要とされる項目や、レーザー加工時のプロセスモニタリングの観察手法、加工状態を的確に表す物理パラメータの定義について議論と検討を進める。

b) レーザー加工のための材料との相互作用データベース構築

開発してきたエリブソメトリー装置に関して、測定時間の短縮化や直線偏光反射率測定機能についての改良を行う。また分子軌道計算などによる吸収スペクトルの理論予測に着手する。これら手法を用いて各種材料のスペクトル計測を進めていき、光学係数データベースの雛形案を作成する。また必要に応じて試料作製装置を導入する。

3) レーザー加工技術の標準化・調査研究 (実施体制：産業技術総合研究所、東京大学)

テストプラットフォームで統一的に扱うべき材料や加工法について基準サンプルや標準作業に関する指針を作成する。平成30年度時点でのレーザー加工技術ロードマップを策定する。

5. 2 平成30年度事業規模

委託事業 需給勘定 2, 550百万円(継続)

※事業規模については、変動があり得る。

6. 事業の実施方式

6. 1 公募

必要に応じて、追加公募を実施する。

(1) 掲載する媒体

「NEDOホームページ」で行う。

(2) 公募開始前の事前周知

公募開始の1か月前にNEDOホームページで行う。

(3) 公募時期・公募回数

必要に応じて、平成30年6月以降に1回の追加公募を実施する。

(4) 公募期間

原則30日間以上とする。

(5) 公募説明会

原則NEDO本部（川崎）で開催する。

6. 2 採択方法

(1) 審査方法

事業者の選定・審査は、公募要領に合致する応募を対象にNEDOが設置する審査委員会（外部有識者で構成）で行う。当該委員会の結果を参考とし、本事業の目的の達成に有効と認められる事業者を選定した後、NEDO内に設置した契約・助成審査委員会において採択の可否を決定する。申請者に対しては、必要に応じてヒアリング等を実施する。審査委員会は非公開のため、審査経過に関する問い合わせには応じない。

(2) 公募締切から採択決定までの審査等の期間

原則45日以内とする。

(3) 採択結果の通知

採択結果については、NEDOから申請者に通知する。なお不採択の場合は、その明確な理由を添えて通知する。

(4) 採択結果の公表

採択案件については、申請者の名称、研究開発テーマの名称・概要を公表する。

6. 3 その他

本プロジェクトは非連続ナショナルプロジェクトとして扱う。

7. その他重要事項

7. 1 評価の方法

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、技術評価実施規程に基づき、プロジェクト評価を実施する。中間評価は平成30年5月から6月の間に実施する。

7. 2 運営・管理

本研究開発については、中間評価を実施し、その結果を適切に反映し着実な運営を図る。なお、この評価はプロジェクト基本計画に予定されているものである。

7. 3 複数年度契約の実施

既契約を延長する、または新規契約を締結する場合には、最長で平成32年度までの複数年度契約を行う。

7. 4 知財マネジメントにかかる運用

「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」プロジェクトにおける知財マネジメント基本方針に従ってプロジェクトを実施する。

8. スケジュール

8. 1 本年度のスケジュール

平成30年5月頃	中間評価
平成30年7月頃～	追加公募開始
平成30年9月頃	追加公募採択決定

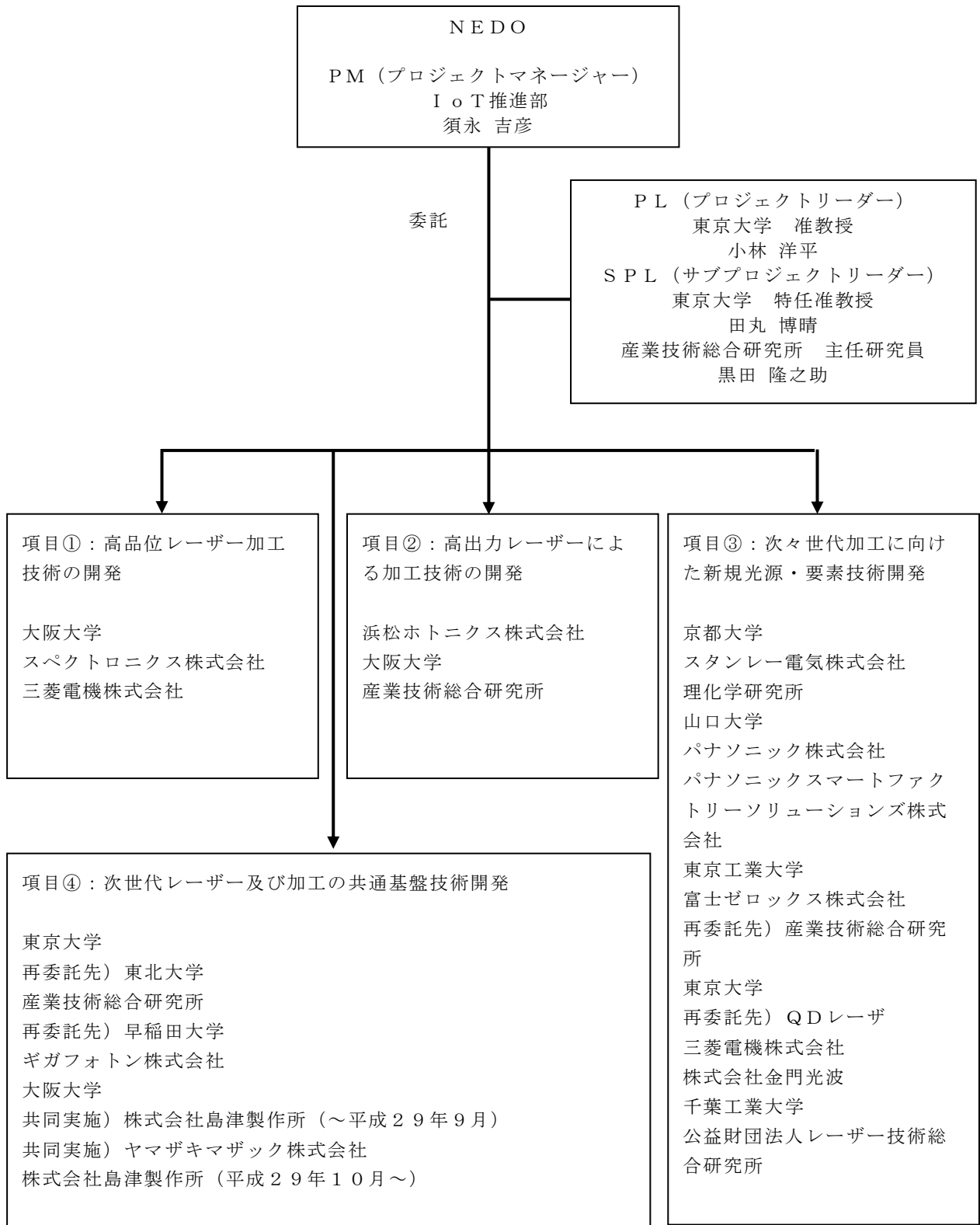
平成30年10月頃 第3回アドバイザー委員会
平成30年10月頃 ステージゲート審査
平成31年1月 第4回推進会議

9. 実施方針の改定履歴

(1) 平成30年3月、制定

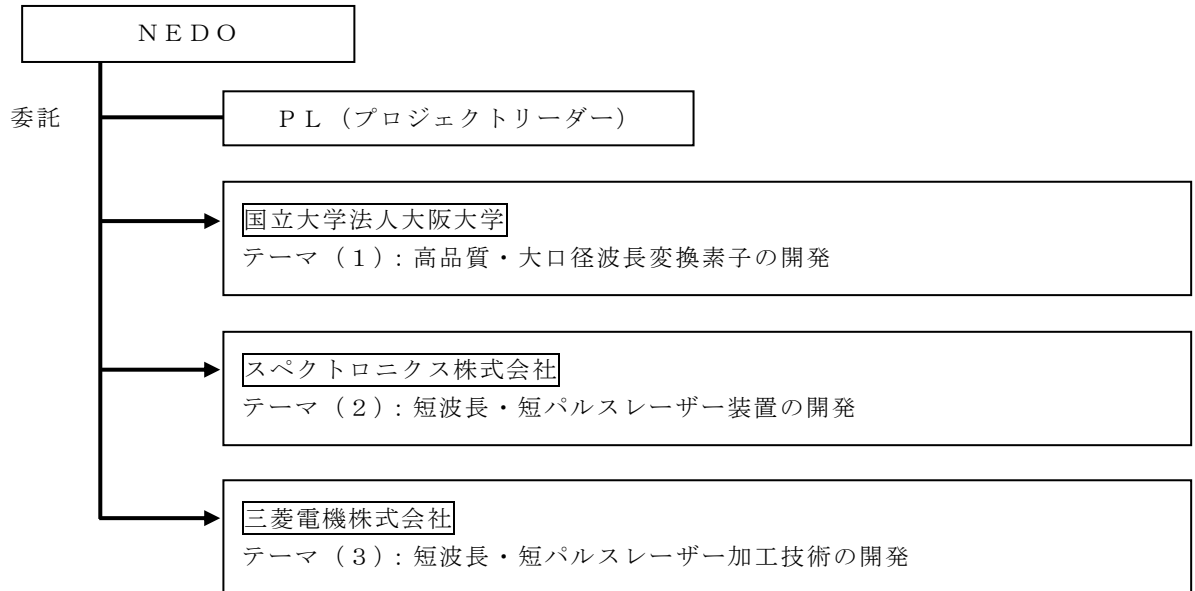
(別紙) 実施体制図

【全体概要】

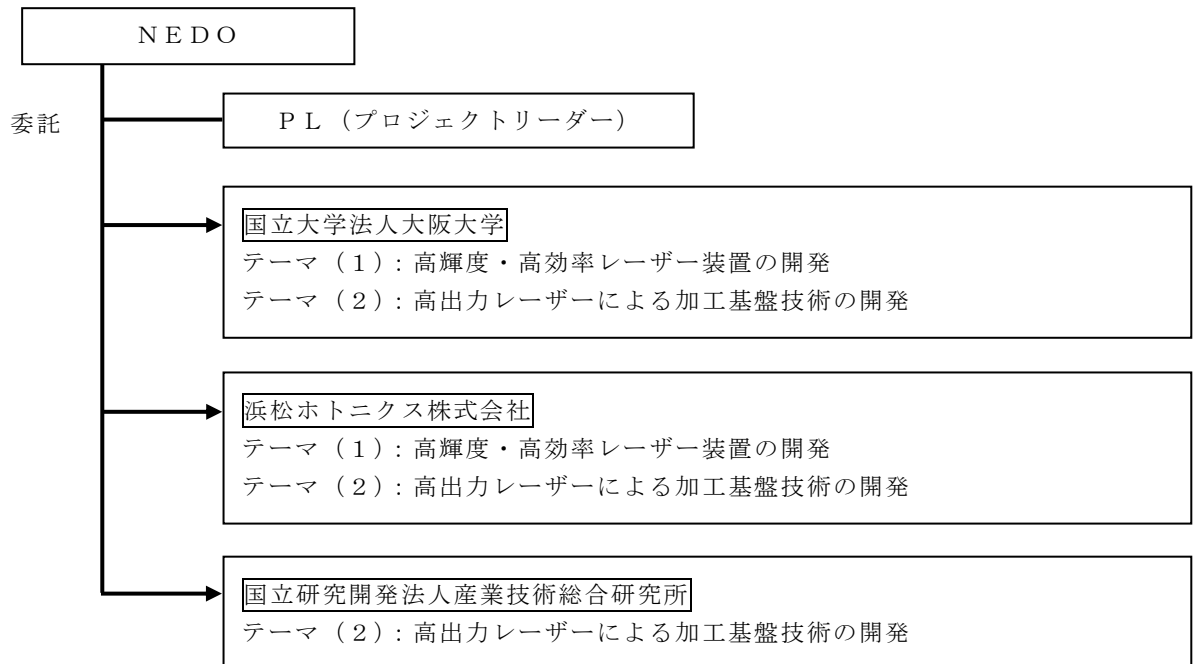


【項目別詳細】

< 研究開発項目①：高品位レーザー加工技術の開発 >

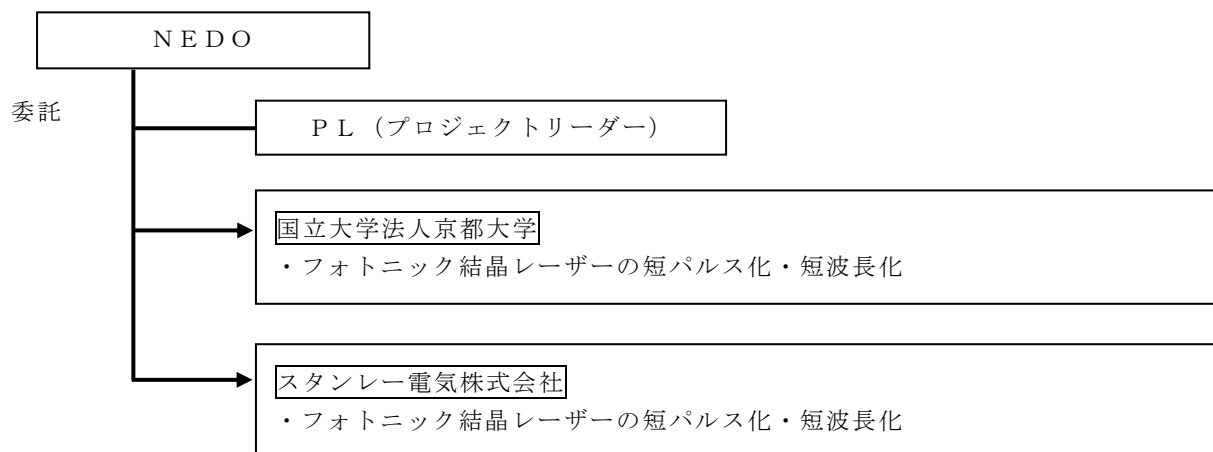


< 研究開発項目②：高出力レーザーによる加工技術の開発 >

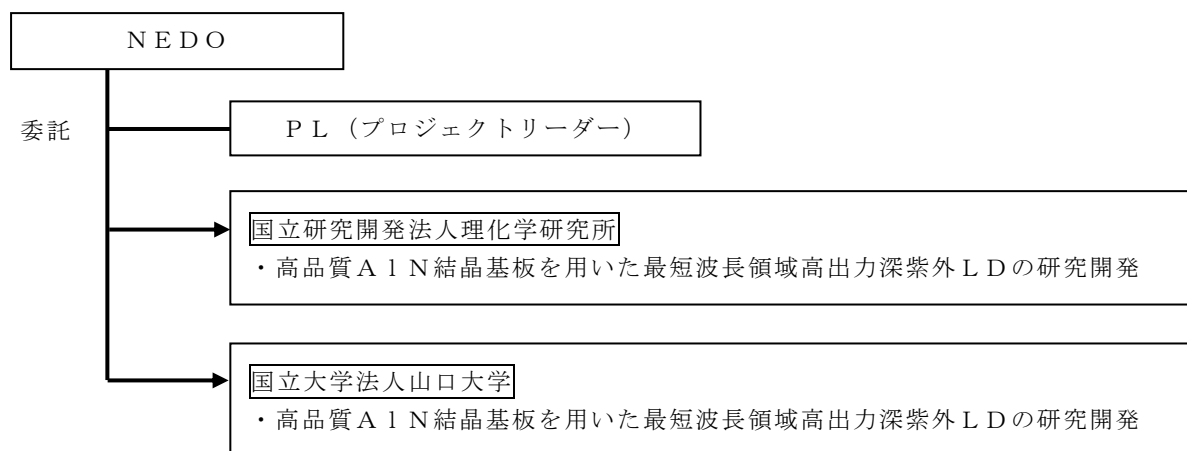


< 研究開発項目③：次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発 >

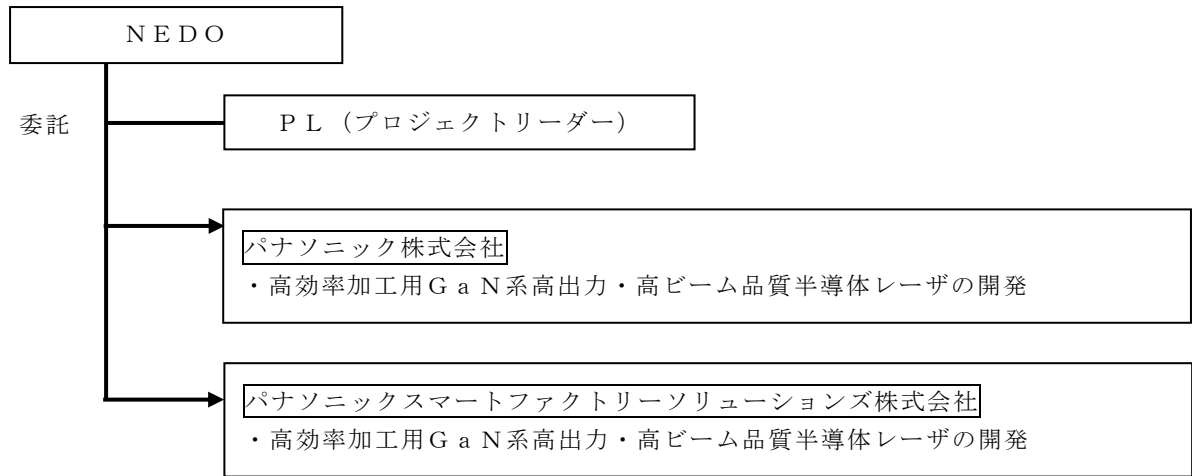
【テーマ（１）：フォトニック結晶レーザーの短パルス化・短波長化】



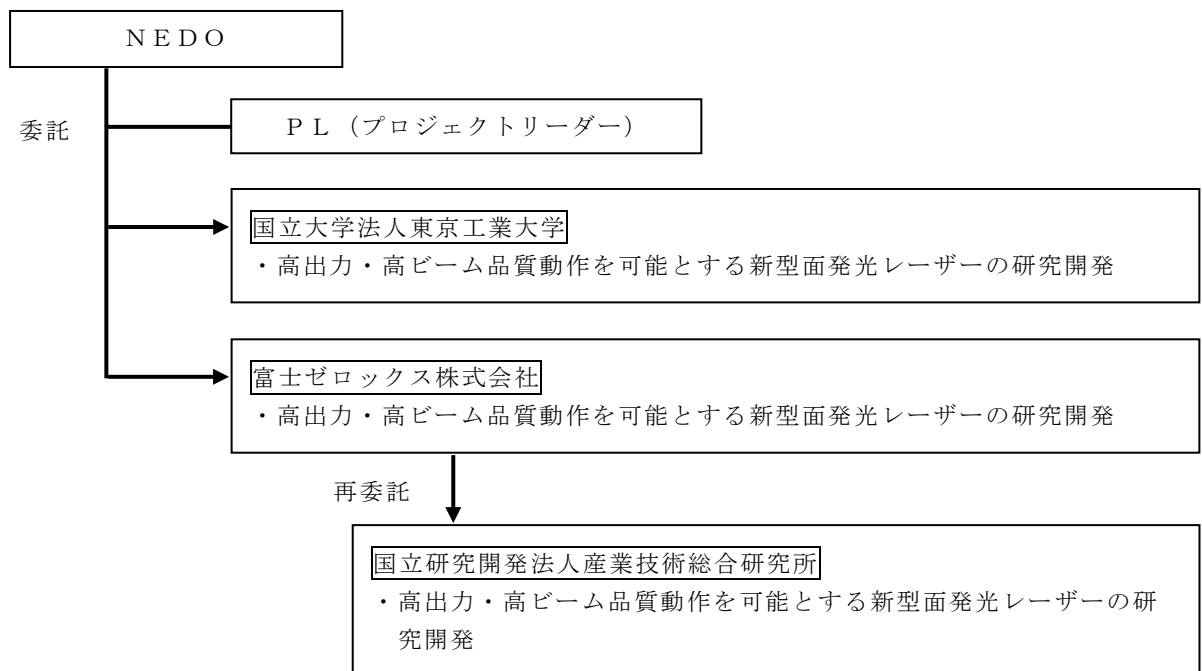
【テーマ（２）：高品質A1N結晶基板を用いた最短波長領域高出力深紫外LDの研究開発】



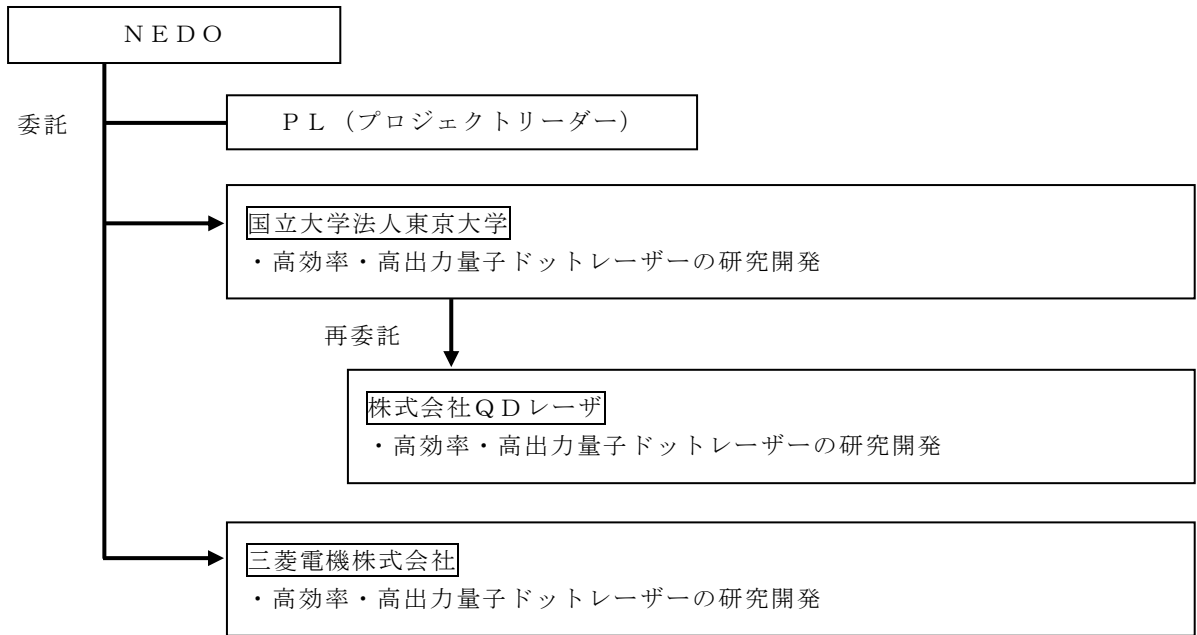
【テーマ（３）：高効率加工用G a N系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発】



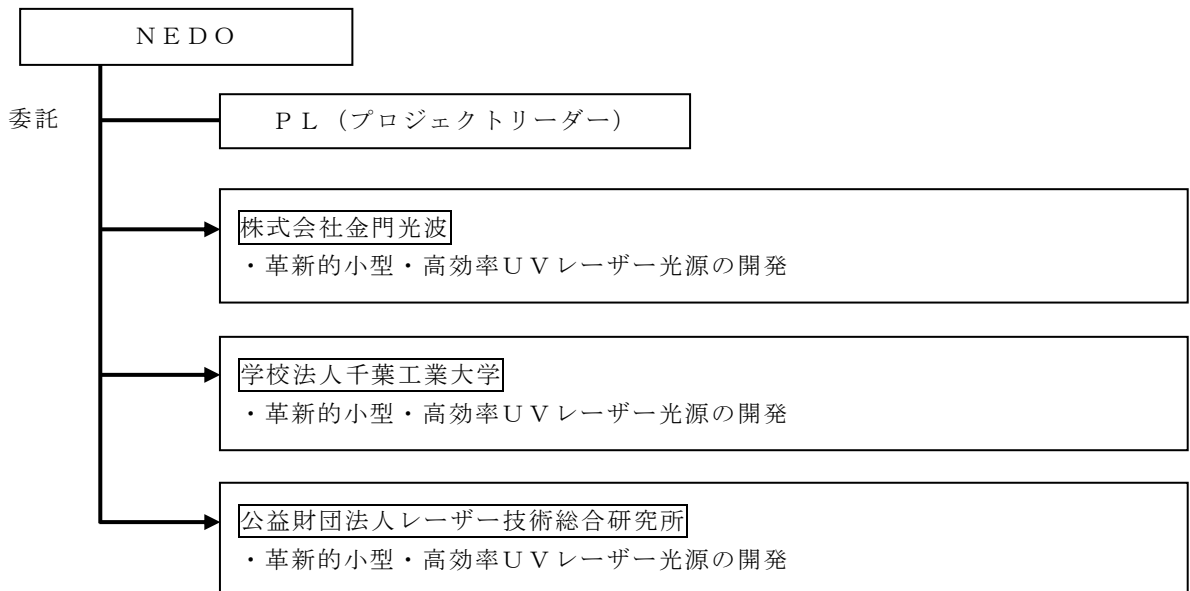
【テーマ（４）：高出力・高ビーム品質動作を可能とする新型面発光レーザーの研究開発】



【テーマ（５）：高効率・高出力量子ドットレーザーの研究開発】



【テーマ（６）：革新的小型・高効率UVレーザー光源の開発】



< 研究開発項目④：次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発 >

