

平成 2 9 年度実施方針

I o T 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 I o T (I n t e r n e t o f T h i n g s) 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 2 0 1 6 (平成 2 8 年 5 月 2 4 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「S o c i e t y 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 2 8 年 1 月 2 2 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 3 2 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 10 p s 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 100 p s 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28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）

本研究開発テーマでは、近赤外光から深紫外光へ波長変換するための光学結晶について、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行う。以下のサブテーマを設定し実施した。

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、将来の大型CLBO結晶作製が見込める新しい育成組成比（L-i-p-o-o-r）から単結晶作製を行った。小型結晶では内部に輝点・光路状散乱が少なく、従来のB-p-o-o-r組成の結晶よりも損傷耐性（素子寿命）が優れていることが確認できた。また、結晶内の転位欠陥抑制に向けて、結晶の評価指標となるエッチング条件を検討し、エッチピットの露出条件を確立した。

b) 大型結晶作製技術の開発

大型化に効果的な溶液攪拌を可能にする特殊攪拌翼（大容量溶液仕様）を流動解析シミュレーションにより検討し、仕様を確定した上で製作を行った。大型結晶を保持するた

めの種子結晶保持ホルダーの仕様検討を行った。また、現時点での結晶から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した。

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)

本研究開発テーマでは、ピコ秒パルスファイバレーザーの高出力化技術開発、およびビームコンバイニング技術によるレーザーの高出力化を行う。これらを一体化し、素材の特性に合った高精度かつ高品位なレーザー加工を可能とする短波長・短パルスレーザーの実用化を目指す。平成28年度は、平均出力10W級のレーザー損傷耐性を考慮した波長変換部、深紫外出力部の最適化設計を行い、266nm帯、10Wピコ秒高出力深紫外光源の試作に着手、構成段毎の動作確認を実施した。併せて、平均出力20W級光源の基本波部最適化設計、動作確認に着手し、増幅器の検証を実施した。また、高出力深紫外光源の一般特性評価試験装置、及び同光源のパルス幅特性試験装置の導入を行った。

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)

本研究開発テーマでは、短波長・短パルスレーザー装置に加工モニタリング機能を組み込んだレーザー加工システムを実用化し、加工プラットフォームを開発する。また、研究開発項目④と連携し、先駆的な高精度・高品位レーザー加工に関する次世代加工要素技術開発を行う。以下のサブテーマを設定し実施した。

a) 高出力DUV加工プラットフォームの開発

複数種類の光学材料に266nm帯のピコ秒レーザーを集光照射して光学材料の耐光強度特性を評価し、高出力DUV加工プラットフォームに搭載する光学系に関する設計指針を得た。並行して、平成29年度に構築予定の加工プラットフォーム用の光学素子を設計・試作した。

b) 研究開発項目④と連携した次世代加工要素技術開発

①-2) で開発するピコ秒高出力深紫外光源と加工機とを協調して動作させるための統合制御システムを設計、製作準備した。並行して、次世代レーザー加工において必要となるデータ通信機能の仕様を検討し、加工プラットフォームに搭載するデータ通信機能部の設計、製作準備を行った。

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)

本研究開発テーマでは、固体光増幅器技術、高効率冷却技術の開発により、平均出力10kW級の高出力励起LDモジュールと、500J級の高出力パルスレーザー装置の開発を行い、キロジュール級パルスレーザー装置の実現可能性を検討する。サブテーマとして以下を設定し実施した。

a) 高出力パルスレーザー装置の開発

200W出力のLD励起による25W(50J×0.5Hz)の出力試験を実施し、100J級高出力レーザー装置の基本設計を固めた。10kW級高出力LDモジュールの要素技術を確立させるため、400W級出力の小型LDモジュールの試作と、シードレーザー発生部および前置増幅器部等の試作を開始した。

b) 高出力パルスレーザーの基本設計技術の開発

既存のレーザー装置による50J級のレーザー出力特性の評価・検証結果を基に、高出力化・高効率化に向けた設計指針を示し、100J級高出力レーザー装置の基本設計へ反映した。

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)

本研究開発テーマでは、高出力パルスレーザーの加工技術を表面改質(ピーニング)や成型(フォーミング)、表面クリーニングなどへ応用する開発を行う。研究開発項目④と連携して高パルスエネルギーレーザーによる加工現象を高精度モニタリングする計測分析評価技術を開発

し、加工システムの実用性評価と実証を行う。平成28年度は、既存のレーザー装置（パルスエネルギー1~10 J）を用い、SUS304等の金属材料への応力付与の加工検証試験および分析評価を開始し、レーザー照射試験および衝撃波速度の計測試験を実施した。パルス幅およびパルス波形をパラメータとすることで試料への影響を調査、X線回折装置による高出力レーザー加工サンプルの応力分析を実施し、レーザー加工サンプル（SUS304）の表層付近（~100 μm）の残留応力状態を評価した結果、圧縮残留応力層が形成されていることを確認した。

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。本項目に対し、以下の6つのテーマを採択した。

- 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）

本研究開発テーマでは、高ビーム品質・高出力動作を可能とするフォトニック結晶レーザーの実現に向け、短パルス化（パルス幅：サブナノ秒以下、平均出力：数ワットかそれ以上）と、短波長化（青～紫色でのワット級動作）開発を行い、素子設計や製造プロセス等の基礎技術を確立する。以下のサブテーマを設定し実施した。

a) フォトニック結晶レーザー（PCSEL）の短パルス化

分割電極構造PCSELを用いたQスイッチングによる短パルス動作に関して、最初にPCSEL内の光空間分布を無視したレート方程式による基礎解析を行い、パルス幅100 ps以下かつ平均出力1W以上の自励パルス発振が実現可能であることを示した。次に、結合波理論とレート方程式を統合した理論解析手法の構築に取り組み、PCSEL内の光空間分布を考慮した短パルス動作の解析を可能とした。さらに、分割電極構造PCSELの形成に向けて、水素イオン注入による電極間絶縁手法の確立に着手した。

b) フォトニック結晶レーザー（PCSEL）の短波長化

GaN系PCSELに対する設計を開始し、フォトニック結晶構造（孔サイズ、高さなど）や、エピ全体の構造設計を進めた。GaN系材料へのフォトニック結晶の形成においては、空孔を残した埋め込み再成長法を見出した。また、GaN系のMOCVD装置を準備し平成29年3月末導入予定である。

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、高品質AlN結晶基板上にAlGaN系深紫外レーザーダイオード（LD）を作製し、高い発光効率の実現、高濃度p型クラッド層の開発と電子注入の高効率化等を行い、最短波長領域（UVB~UVC 260~320 nm）のLDを実現する技術開発を行う。また、実用型の長寿命かつ高出力な深紫外LDを実現するため、AlN単結晶基板上の深紫外LD開発を行う。以下のサブテーマを設定し実施した。

a) サファイア基板上高品質AlN結晶の開発

本年度目標としている高品質AlN結晶成長用の有機金属気相成長装置（MOCVD装置）の導入を準備し、平成29年3月に完了する予定である。

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（PSS）上のAlN成膜に適した微細パターンの構造形状の検討

を行い、PSSの作製を実施した。

c) 深紫外活性層の高い内部量子効率 (IQE) の実現

深紫外LD構造において高効率発光が得られるAlGaIn量子井戸の成膜条件の検討を行い、量子井戸発光層ならびにバリア層へのシリコンドーピングによるIQEの向上効果を検討した。平成29年3月までにIQEの実効値が得られる予定である。

d) 高濃度p型クラッド層と高い注入効率の実現

短周期超格子効果によるp型AlGaInのホール濃度向上の検討を行い、超格子導入による発光効率の向上効果を実現した。

e) UVB~UVC領域深紫外LDの実現とその高出力化

深紫外AlGaIn系LD構造の試作を行い、深紫外LD測定システムを構築した。

3) 高効率加工用GaIn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)

本研究開発テーマでは、GaIn(窒化ガリウム)系レーザーアレイの研究開発により、高出力性と高ビーム品質を両立させたレーザー加工用半導体レーザーを開発する。更に、低損失で構成が容易なビーム合成による高出力化、レーザーモジュール技術の開発を行い、加工評価を行う。平成28年度は、GaIn系レーザーエミッタを多数同一基板に集積したアレイ素子、ならびに、そのアレイ素子の基板面およびエピ面から放熱を行う金属両面放熱構造を設計、試作した。光出力の共振器長/エミッタ幅/エミッタ間隔/実装条件依存性を評価し高出力動作に必要な設計指針を明確化した。

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)

本研究開発テーマでは、面発光レーザー素子と光増幅器をモノシリックに集積化させた新規構造による高出力な面発光レーザーの研究開発を行う。また、高効率・大規模アレイ化と周辺技術の研究開発、ビーム品質の評価を行う。以下のサブテーマを設定し実施した。

a) 高出力面発光レーザーの研究開発

新型面発光レーザーの高出力化研究開発では、スローライトと増幅自然放光を取り入れた進行波レイト方程式による面発光レーザー増幅器の動作解析手法を確立し、ワット級高出力動作の可能性を示すとともに、実験的にその有効性を明らかにした。さらに面発光レーザー・増幅器集積素子を製作し、ビーム広がり角 0.2° 以下の高品質ビームを実現した。

b) 高効率・大規模アレイ化と周辺技術の研究開発

新型面発光レーザーの大規模アレイ化と周辺技術の研究開発では、高出力面発光レーザーの評価装置を導入するとともに、放熱性を改善する新規ウェハ構造の設計と試作準備を完了した。また、ビーム品質を評価するための測定系を準備し、対照評価試験を行った。

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)

本研究開発テーマでは、量子ドットレーザーの高出力化に向けた高密度量子ドット形成技術基盤の開発と、高出力化設計技術の確立を行い、さらに加工応用に向けた周辺要素技術開発を行う。以下のサブテーマを設定し実施した。

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ェ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InGaAs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。

b) 高出力量子ドットレーザーの設計と実現可能性実証

レーザー出力 $1\text{W}/\text{mm}^2$ の可能性実証を目指し、高出力量子ドットレーザーの活性層、積層構造、光共振器、レーザメサ構造等の基本設計を行い、実デバイスに反映させた。

1.05-1.1 μ m帯 InGaAs 量子ドットを活性層とした量子ドットレーザーウエハを製作し、レーザー素子試作、光出力評価を行い、層構造設計、プロセス等の課題を抽出した。

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

半導体レーザーを加工に適用するための外部光学系に関する技術動向を調査し、これを踏まえ外部光学系の動作解析用シミュレーションツールを作成した。波長分散ビーム結合外部光学系について既存の半導体レーザーを用いた試作を行い、原理的な動作検証を行った。

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)

本研究開発テーマでは、Pr添加フッ化物耐候ファイバーを用いたレーザー発振器により、可視光を基本波としてUV(紫外)光へ波長変換する方式にて、連続光で高ビーム品質、光出力2W級の固体UVレーザー光源の開発を行うとともに、更に高出力化の設計、要素技術開発により出力10W級の高出力化を目指す。平成28年度は、基本波レーザー出力1W以上を達成すべく、半導体レーザーの波長制御及び励起集光光学系の最適化設計製作を行い、基本波出力の向上に取り組み、目標とした基本波レーザー出力1Wについては達成の見通しを得た。波長変換光学系については、リング共振器及びV字内部共振器型の設計を行い、妥当性を評価した。紫外レーザーの高レーザー光耐力を持つ2W級対応のUVミラーコーティングについては設計及び試作を行った。実験機上において波長変換効率の向上を確認した。

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 株式会社島津製作所、共同実施 ヤマザキマザック株式会社)

本研究開発テーマでは、レーザー加工現象を解明し素材の特性に合った高品位かつ効率的な加工を実現するため、重要パラメータを抽出するテストプラットフォームの構築を行う。更に加工・評価を通じて得られる結果をもとにレーザー加工データベースを構築する。以下のサブテーマを設定し実施した。

a) 時間制御型レーザー加工テスト装置の開発

ファイバーレーザーによるチャープパルス増幅方式時間制御型レーザーシステム開発に着手するとともに、時間制御型レーザー加工の評価法について検討した。並行して、10psから1 μ sの光パルスを発生する発振器用のレーザーダイオード(LD)素子の設計を行い、分光評価を行う装置を導入するとともに、高速化・高強度化用利得スイッチLD用のエピウエハー成長とプロセス試験を開始した。LD発振器から1ns~1 μ s領域の光パルスを発生させる駆動技術開発と中間増幅器の試験も開始した。

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環境の設計、構築を行うべく各要素の技術開発を開始した。サブps級の波長可変光源、30fs級の波長可変光源、あるいは、1 μ m帯の光源の高調波を想定し、加工テストに必要な光源、ステージ、観測系などの設計および開発に着手した。特に、深紫外極超短波パルスを用いたレーザー加工を行うため、光パラメトリック増幅器の仕様を策定し増幅器の立ち上げに着手した。また、光源波長が加工に与える影響を議論する為のシミュレーション内容の検討を開始した。

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

平成28年度は、既存のレーザーと加工ステージ、照射光学系、計測装置とを組み合わせ193nmの極短波長レーザー光による加工評価装置を立ち上げ、強化ガラス、CFRP、有機インターポーザ材料などの加工評価を開始した。また平成29年度に設置する新規実験設備用のエキシマレーザー増幅器の製作を開始した。

d) 高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発

本テーマでは、加工材料に対し光吸収率の高い高輝度青色半導体レーザーを用い、マル

チビーム重畳したユニット光源の開発と、空間多重、波長多重等による高効率コンパニング技術の開発を行う。また工作機搭載を見据えた要素技術開発として、溶接現象のモニタリングとデータ解析をもとに、リアルタイムによるモニタリングシステムとフィードバック制御技術の開発を行う。平成28年度は、工作機搭載を見据えた基盤技術の開発として、100W級青色半導体レーザー集光ユニットを工作機械に組み込むための設計を行った。

- 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
 レーザー加工プラットフォームの運用法を検討し、必要な光源群および評価装置群のリストの作成を開始するとともに、各実施者とスケジュール調整を行い、加工結果の評価を含むプラットフォームに必要な評価装置の導入を開始した。

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)

レーザー加工の計測評価基盤技術の開発に向けた取組として、次世代非熱的レーザー加工技術開拓ため、固体表面粒子放出現象やレーザー加工部位の原子レベル計測を実現するためのフラグメントイオン計測装置の設計に着手した。深紫外極超短パルスを用いた誘電体加工実験に向けては、実験系構築の準備を進めた。また可搬型高輝度レーザー光評価用計測装置の作製にも着手した。材料と光との相互作用データベース構築のための取組としては、真空紫外域の偏光吸収スペクトル測定装置等の技術を基に、真空紫外域エリプソメトリー分光計測装置の設計に着手、関連装置類の各仕様を決定した。

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)

レーザー加工技術の標準化、ニーズ探索に係る調査を行うため、調査の対象について検討を開始した。

4. 2 実績推移

	平成28年度
実績額推移 需給勘定 (百万円)	2, 000
特許出願件数 (件)	0
論文発表数 (報)	26
フォーラム等 (件)	2

※平成29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oton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

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欠陥領域を、エッチング、ネッキング技術等で低減し、結晶外周部と同等品質となる高均質性を備えた高レーザー

損傷耐性結晶の開発に取り組む。本検討によって、波長変換素子の作製効率（素子化率）を現状製品技術から約2倍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28年度の検討結果を踏まえ、直径20cm坩堝用の大型結晶育成装置、新型攪拌翼を試作し、結晶育成の検証を開始する。現有設備でも高品質結晶を作製し、さらに国内波長変換結晶メーカーとも連携しながら、素子を提供、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る。
- 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28年度に試作した266nm帯、平均出力10Wピコ秒高出力深紫外光源を用いて安定運用を目的とした波長変換方式の改善・改良を実施する。同時に、平均出力10W級光源を追加1台試作し、①-3)における加工技術の開発用として提供する。制御システムについては、繰り返し周波数、ピークパワーをそれぞれ独自に設定できる方式等の検討を行う。また、平均出力20W級に対応したMOPA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、構成段毎の動作確認を開始した後、平均出力20W級光源2台の試作を行い、性能評価を行う。さらに50W級MOPA基本波部の最適化設計、動作確認にも着手する。
- 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
加工プラットフォームのベースとなる機械装置として、高速・高精度のビームスキャン機能を備えたレーザー加工機ベースシステムを導入する。導入したベースシステムに平成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深紫外光源を結合し、10W級のピコ秒DUV加工プラットフォームの原型を構築する。
 - b) 研究開発項目④と連携した次世代加工要素技術開発
a) の加工プラットフォーム原型に平成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、加工モニター系を試作して加工プラットフォーム原型に接続する。これを用いて、次世代加工において重要な要素となるデータ通信動作を評価する。

研究開発項目② 「高出力レーザーによる加工技術の開発」

- 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
複数の高出力LDスタックを集積して10kW級高出力LDモジュールの1号機を試作し、光出力等の特性を評価し基本設計を検証、更なる特性改善のための方策を検討する。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を、シミュレーション解析手法等を用い設計し、これを具備した100J級レーザー増幅器を試作、レーザー波面および時間波形等の諸特性を評価の上、レーザー波面及び光伝搬の制御について検討する。
 - b) 高出力パルスレーザーの基本設計技術の開発
100J級レーザー増幅器の諸特性を評価した結果をシミュレーション解析と比較し、高出力化・高効率化の方策を検討して、100J級高出力レーザー装置の構築に反映させる。
- 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29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
100J級高出力レーザーに対応できる加工システムの構築に着手する。高出力レーザーの

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について、ユーザー機関と連携して基本設計を固め、試作を開始する。

b) 高出力レーザーの加工技術の開発

将来想定されるユーザーのニーズを見据え、パルス波形可変の高出力レーザーを材料に照射し、発生するプラズマ、衝撃波等の現象を観測し、加工性能の向上もしくは最適化のための加工条件や加工手法をシミュレーションによる解析と合わせて検討し、その結果を高出力レーザー加工システムの基本設計にフィードバックする。

c) 計測分析評価技術の開発

平成28年度に構築したレーザー加工検証試験機を用いて、各種材料へのレーザー照射試験を行い、作成した加工サンプルを分析・評価し、得られた知見をレーザー加工システムへフィードバックする。さらにレーザー照射時に発生する光誘起現象の計測手法の検討に着手する。

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29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29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28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、分割電極構造PCSEL内の光空間分布を考慮した短パルス動作の解析を進め、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う。また、平成28年度に引き続き、分割電極構造PCSELの形成手法の確立を進め、設計した分割電極構造PCSELの試作・評価を行う。

b) フォトニック結晶レーザー（PCSEL）の短波長化

平成28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に対する設計と、GaN系材料への空孔を残した埋め込み再成長法に関する検討を進める。特に、埋め込み後に所望のフォトニック結晶空孔を残すため、ファセットを制御した選択成長やアニーリングによるマストランSPORT条件を中心に探索する。また、GaN系のMOCVD装置の導入・立ち上げを完了させ、各層のエピ条件を探索する。

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29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

平成28年度に構築した結晶成長装置に材料ガス供給装置を増設し、AlGaN系LDの作製を開始する。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（PSS）上AlN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う。

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を用いて作製されたAlNテンプレート上にAlGaN深紫外LD構造を作製し60%程度のIQEを実現する。

d) 高濃度p型クラッド層と高い注入効率の実現

平成28年度実施の方法に加え、交互ガス供給法を用いたホール濃度向上の検討を行う。

e) UVB～UV C領域深紫外LDの実現とその高出力化

UVA領域の波長320～340nmの深紫外LDの動作実証を行う。

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基板を準備し基板上へのA l G a Nバッファ成膜の検討を行う。

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)

平成28年度に設計したG a N系レーザーアレイ素子/金属両面放熱構造の試作、評価、及び設計フィードバックを実施し、基本動作の検証を行う。更に、ビーム高品質化を実現するレーザー新構造、ならびに、レーザー発振器光学系との結合を容易にするビームツイスターの設計と基礎検討を実施する。

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29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28年度に引き続き面発光レーザー増幅器の動作解析を行うとともに、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を明らかにする。さらに横方向集積素子を製作し、モード安定性、出力向上、ビーム品質などの諸特性を明らかにする。

b) 高効率・大規模アレイ化と周辺技術の研究開発

新型面発光レーザーの大規模アレイ化と周辺技術の研究開発では、面発光レーザー増幅器を試作、評価し、面発光レーザー増幅器長尺化による高出力化の具現化検討を行い、増幅素子の設計値と増幅光出力との関係性を把握する。また、V C S E L素子を多数個集積するインコヒーレントアレイの高出力ビーム品質について評価を行う。

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29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28年度に行った検討を踏まえ、更なる面内密度の向上に取り組むとともに、積層密度向上に向けた課題抽出を行う。また、試作に向けたレーザー基板形成技術開発も継続する。

b) 高出力量子ドットレーザーの設計と実現可能性実証

平成28年度に得られた成果を踏まえ、量子ドット積層密度、積層数、ドーピングレベル等含めたレーザー構造の最適化を進めるとともに、素子試作を継続し、発振基礎特性の評価、解析を行う。結果は量子ドット形成技術へフィードバックさせる。

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

半導体レーザーを加工に適用するための外部光学系の考案、試作、動作検証を継続するとともに、サブテーマa)、b)で開発する量子ドットレーザーに向けた高冷却パッケージを試作し、冷却性能を評価する。

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29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

基本波レーザー出力2W以上の達成に向け、基本波狭帯域発振(<0.1nm)の設計、試作、評価を行う。波長変換光学系は、波長変換効率15%以上達成に向け、試作したリング共振器、V字内部共振器の評価と、非線形結晶の組み込み評価を行う。UVレーザー用高耐性コーティング技術の開発については、基本波出力10W発振に必要な高耐力端面コーティングの設計、試作、及び評価を行う。また高効率波長変換に必要な低散乱、高反射率コート試作を行う。0.5W出力タイプUVレーザー光源試作に向けては、目標波長で

0.5W出力の発振器部、電源部、電気系の設計を完了させる。2W出力タイプUVレーザー光源に向けては、多段対応半導体レーザー駆動回路を設計完了させ、試作を検証する。

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の集光系の試作、評価を行い、評価結果をまとめる。

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する。

a) 時間制御型レーザー加工テスト装置の開発

時間制御型レーザー装置の開発を進め、パルス幅可変動作等の動作試験を行う。10psから1μs領域の発振器用のLDのチップ作製と実装を行い評価する。LDから時間幅10psから1μs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・製作を行う。試作素子での利得スイッチパルス幅とピーク強度の限界、時間制御性を調査し、改良型LD素子の設計を行う。

b) 波長制御型レーザー加工テスト装置の開発

評価装置など加工テスト環境の構築を進める。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等を④-2)と連携して議論、検討し、随時設計にフィードバックを行う。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、議論に必要な試験加工の内容を検討する。これら知見を得るために有用なシミュレーションの内容や試行について検討する。

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

平成28年度実施の加工評価を継続する。また新規の実験設備を立ち上げ、加工評価装置を製作する。平成28年度に製作したエキシマレーザーを用いて、193nmレーザー加工の有意性を実証する。また、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)を製作する。

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を開発する。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、加工特性を調査する。

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

テストプラットフォーム環境の整備を開始する。先導評価用テスト加工装置を導入し、評価を開始する。加工状態の評価ができる装置の導入を進める。

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ー再委託 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する。

a) 計測評価基盤技術

平成28年度に設計および要素開発を開始し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する。この情報を他のテーマ、サブテーマと共有することにより、各々の計測評価手法の特徴の確認と加工へのフィードバック方法について議論を行い、④-1)や④-2)b)におけるデータベース整備も視野に入れつつ、各要素技術の開発や計測評価技術の開発へ知見を反映させる。

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

平成28年度実施した光学設計等を基に、真空紫外域でのエリプソメトリー分光計測装置の開発を行い、標準的な試料の計測により装置性能を評価する。更にこの装置や分析装置等により各種材料の吸収・屈折等のスペクトル計測を開始する。また、計測領域を可視紫外域に拡張するための高度化に着手する。

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調査を開始する。レーザー加工技術ロードマップ
の策定を開始する。

5. 2 平成29年度事業規模

委託事業 需給勘定 2, 118百万円(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 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 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29年4月 第1回アドバイザリーボード

平成29年7月 第2回推進会議

平成29年10月 第2回アドバイザリーボード

平成30年1月 第3回推進会議

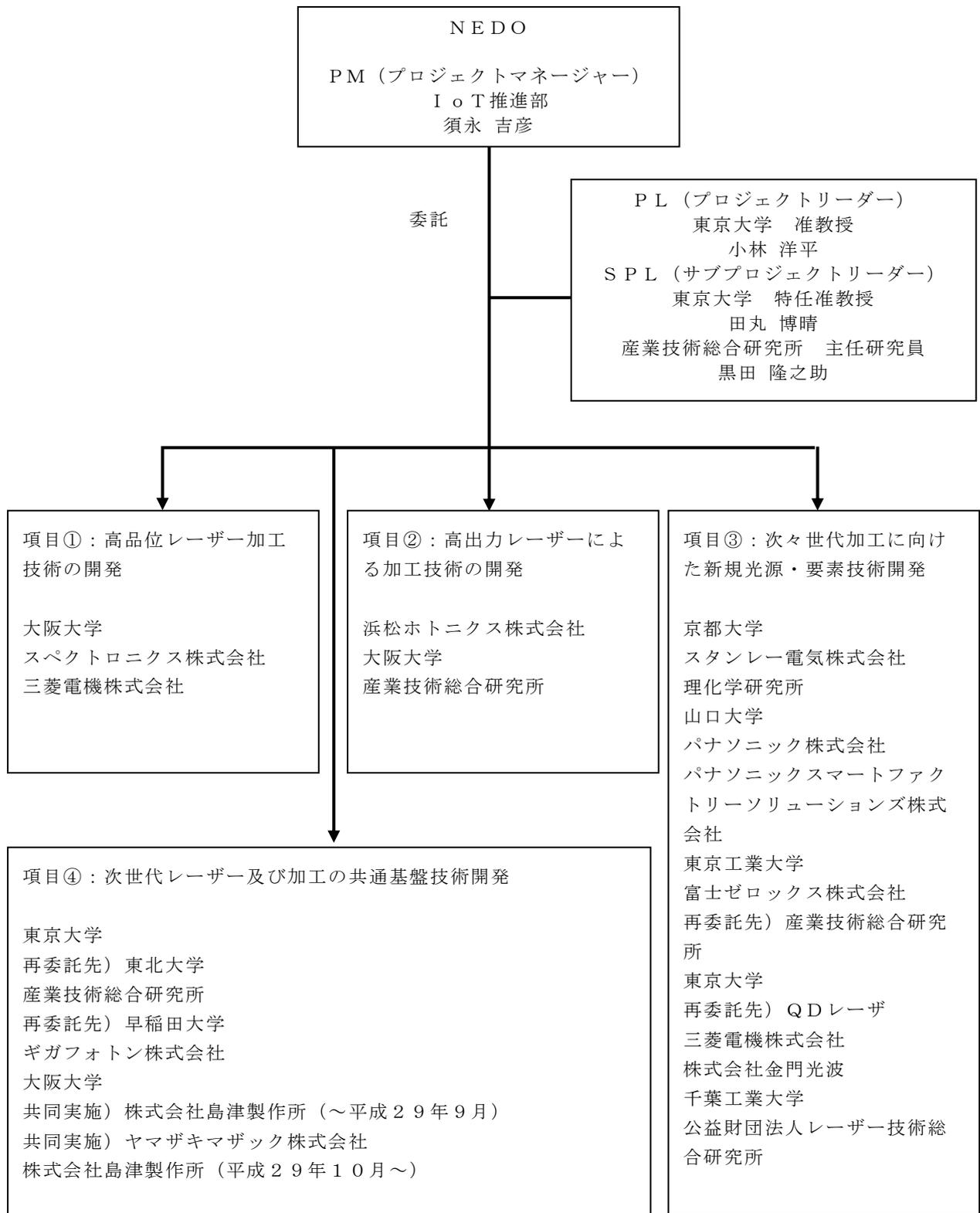
9. 実施方針の改定履歴

9. 1 平成29年2月、制定

9. 2 平成29年9月、平成29年度実施体制の見直しにより改訂

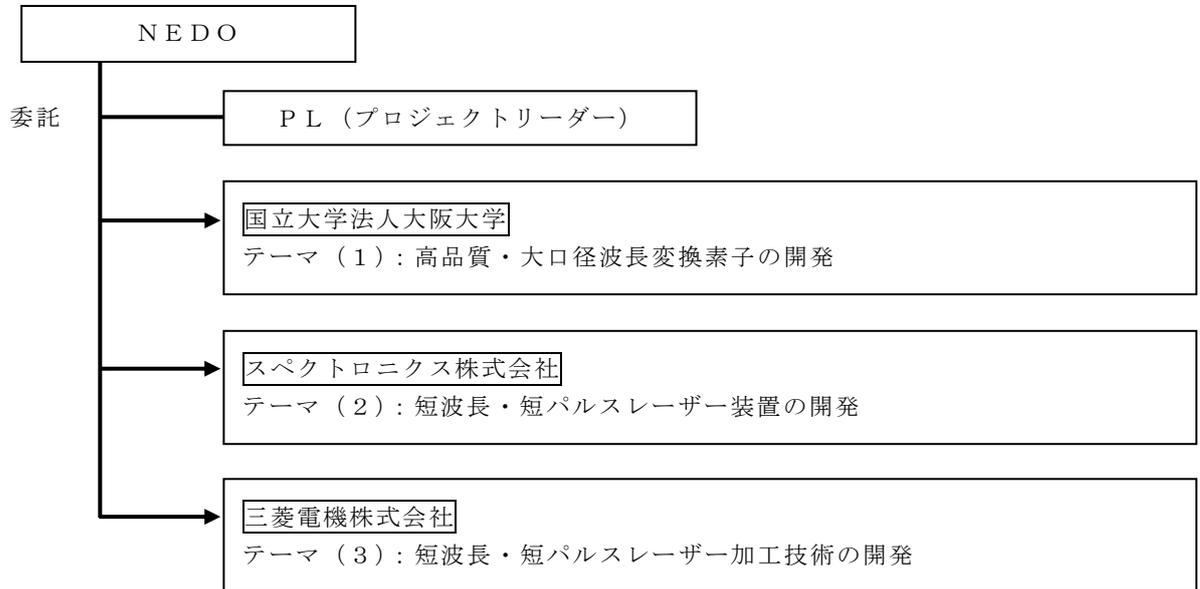
(別紙) 実施体制図

【全体概要】

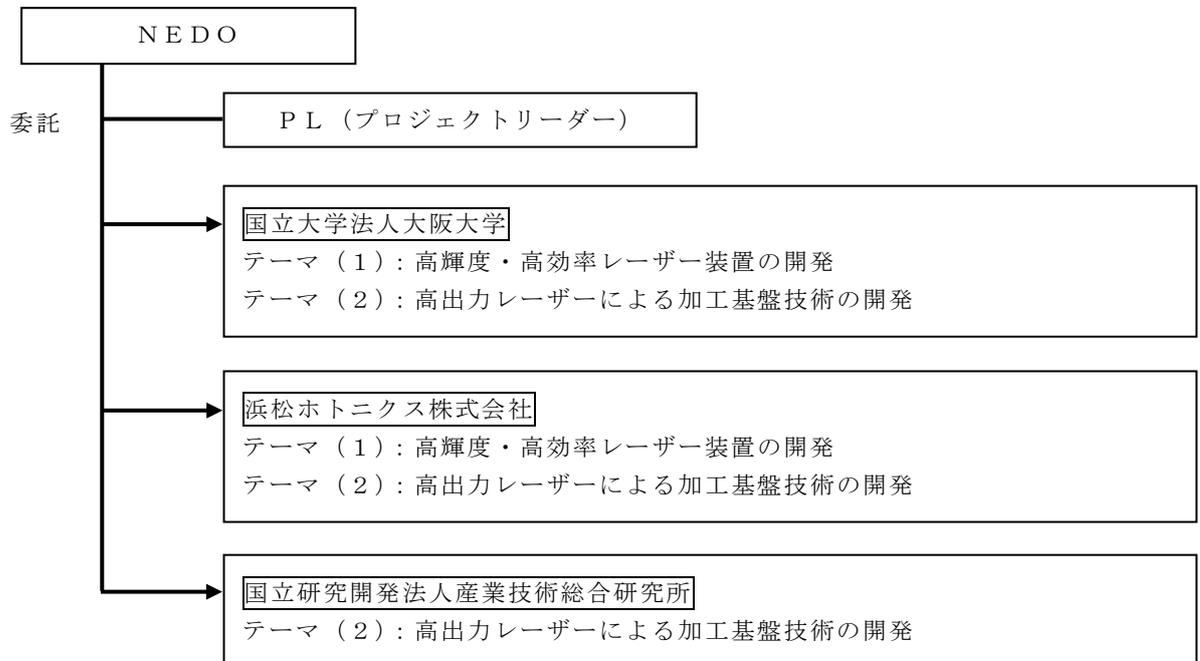


【項目別詳細】

< 研究開発項目①：高品位レーザー加工技術の開発 >

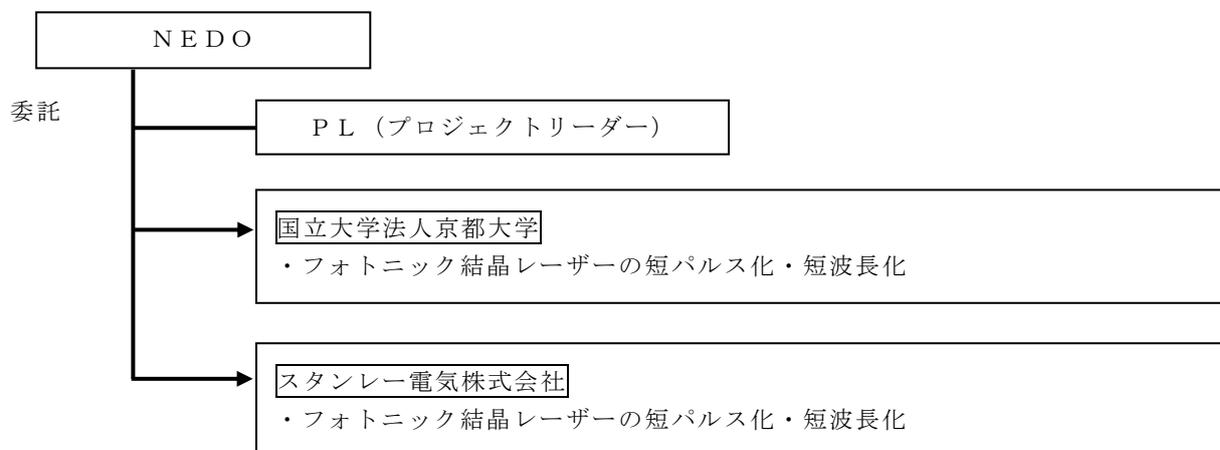


< 研究開発項目②：高出力レーザーによる加工技術の開発 >

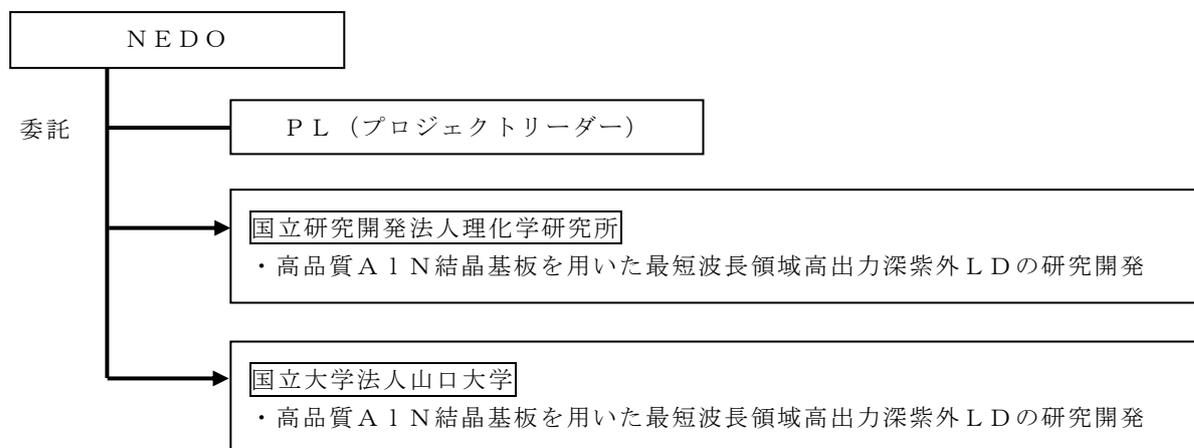


< 研究開発項目③：次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発 >

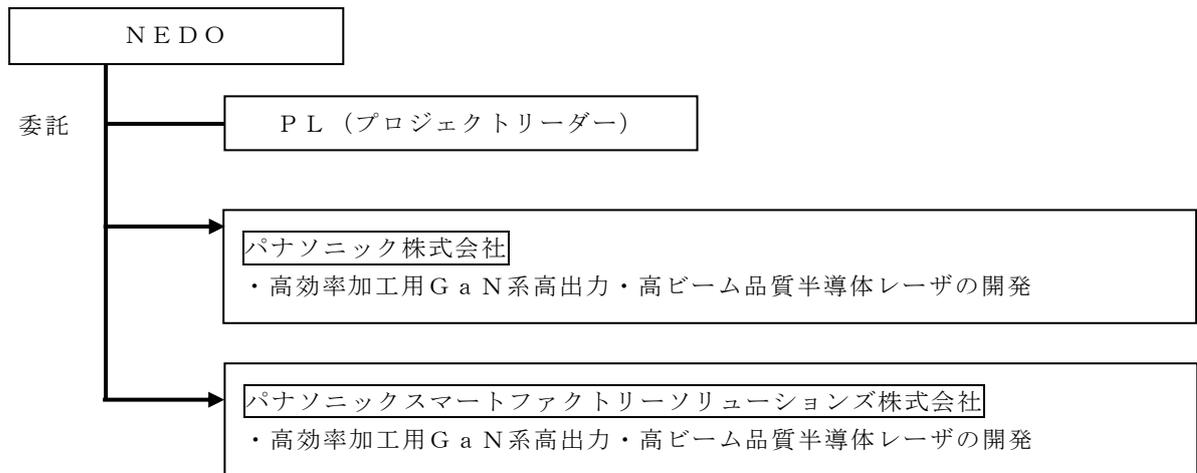
【テーマ（１）：フォトリソグラフィ結晶レーザーの短パルス化・短波長化】



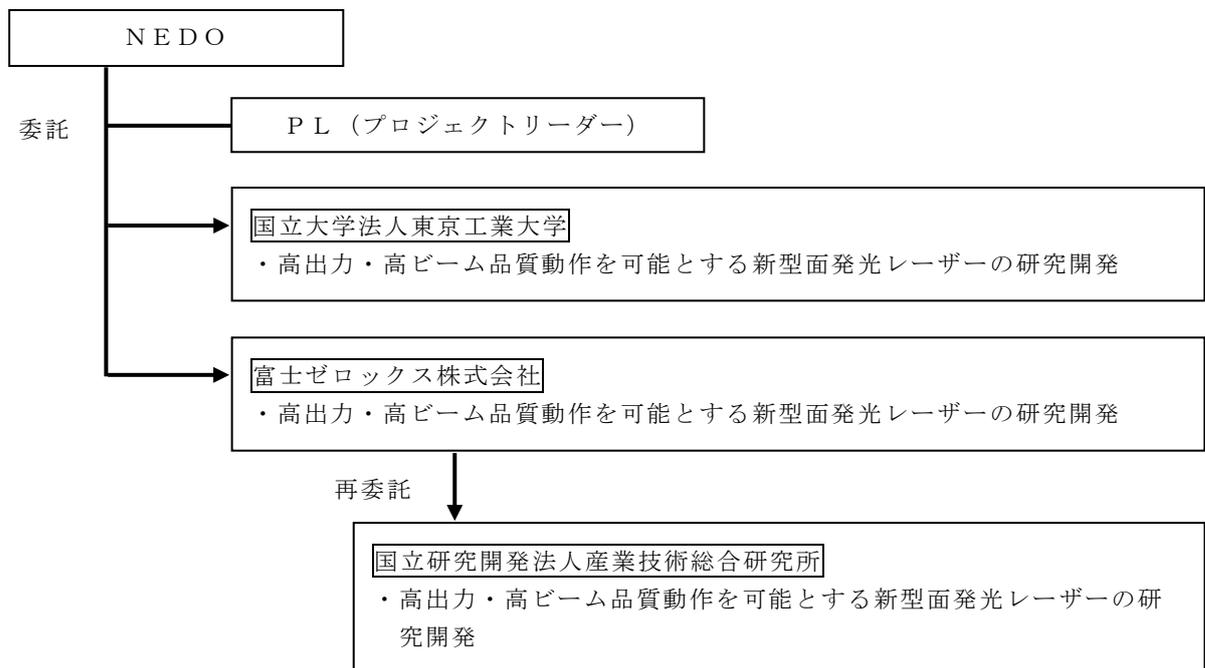
【テーマ（２）：高品質AlN結晶基板を用いた最短波長領域高出力深紫外LEDの研究開発】



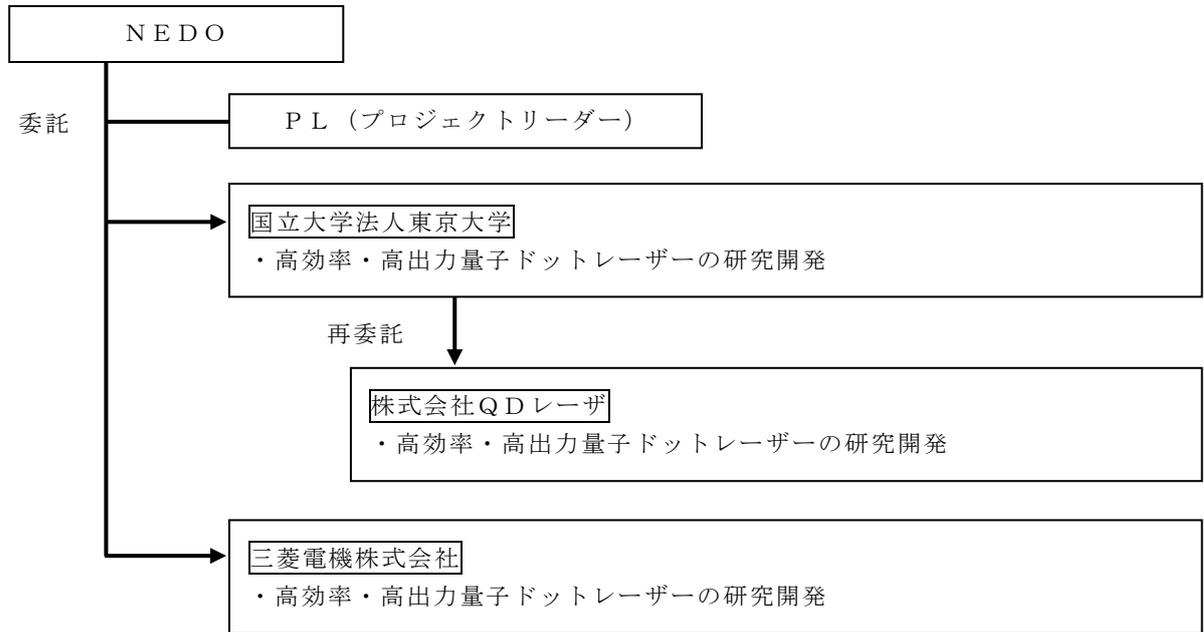
【テーマ（３）：高効率加工用GaN系高出力・高ビーム品質半導体レーザーの開発】



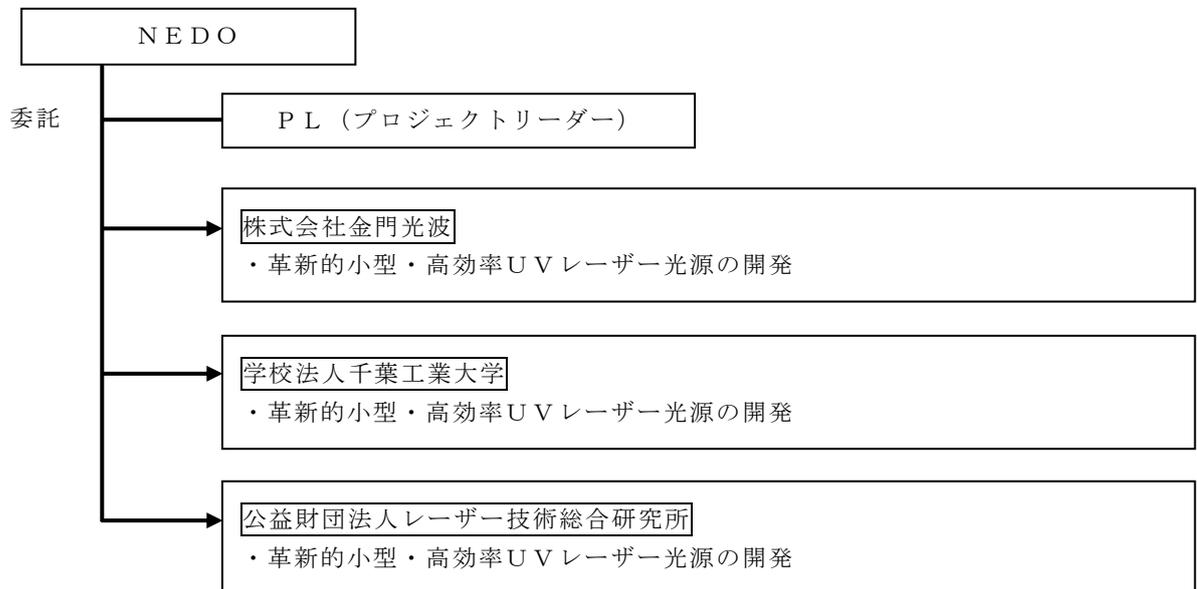
【テーマ（４）：高出力・高ビーム品質動作を可能とする新型面発光レーザーの研究開発】



【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 >

