安全保障技術研究推進制度　令和６年度終了課題　終了評価結果

1.　評価対象研究課題

（１）研究課題名：ジャイアント・マイクロフォトニクス[*1]による高出力極限固体レーザ

（２）研究代表者：理化学研究所　平等　拓範

（３）研究期間　：令和２年度～令和６年度

2.　終了評価の実施概要

日時　　：令和７年１１月１０日

場所　　：ＴＫＰ新橋カンファレンスセンター

評価委員：長岡技術科学大学　名誉教授、特任教授
井原　郁夫
東京科学大学　工学院　電気電子系　教授
梶川　浩太郎
情報通信研究機構　主席研究員
門脇　直人
慶應義塾大学　名誉教授
神成　文彦
大阪大学　大学院工学研究科　教授
近藤　正彦
東京農工大学　名誉教授
佐藤　勝昭
国立健康危機管理研究機構　国立感染症研究所　客員研究員
防衛医科大学校　名誉教授
四ノ宮　成祥
科学技術振興機構　研究開発戦略センター　戦略総括監
中山　智弘
量子科学技術研究開発機構　高崎量子技術基盤研究所
先端機能材料研究部長
八巻　徹也
情報通信研究機構　電磁波研究所　総括研究員
山本　真之

（五十音順・敬称略）

3. 研究と成果の概要

研究の概要

本研究では、固体レーザの極限波長にあたる THz（テラヘルツ）波領域において、自由電子レーザを超える高出力・高輝度の THz 波固体レーザを目指す。5 年間の業務において、新しい透明セラミックス材料、その表面処理、接合に関する研究や製造プロセス開発を実施し、最終的にはパワースケラブルで実用的な極限高出力密度レーザを開発するとともに、長波長極限への波長変換を行うことで、世界最高の高出力・高輝度 THz 波固体レーザの創製を目指す。併せて、高出力高密度の小型パワーレーザの新たな応用のための環境を整備することで先端高出力レーザの社会実装を目指す。そこで（1）パワースケラブル高出力密度レーザ、（2）高出力・高輝度 THz 波固体レーザ、（3）先端高出力レーザの社会実装、の目標に向かい、「プロセス創製」、「デバイス創製」、「量子ビーム創成」、の視点から研究項目を①～⑳と細分化し実施した。

成果の概要

細分化した研究項目①～⑨「プロセス創製」では、DFC[*2] および QPM[*3]-PowerChip[*4] に求められる接合界面強靭化にかかる新たなプロセス発見を含めた観察・分析手法、新しい透明セラミックス育成プロセス、求められる装置開発などを成功させ、⑩～⑮にかかる「デバイス創製」では、DFC および QPM-PowerChip に求められる評価手法の確立から試作までを実現し、⑯～⑳「量子ビーム創成」では、まずは基本波である 1064nm、そして波長 mm に及ぶ THz 波、266nm の DUV[*5] において世界記録または世界最高水準の発生に成功し、プラットホームとなる光源構築にまで至っている。すなわち（1）パワースケラブル高出力密度レーザ、（2）高出力・高輝度 THz 波固体レーザ、（3）先端高出力レーザの社会実装、など当初掲げた目標を概ね達成できた。

成果として、新材料の発見と、その材料を超高出力レーザデバイスとして開発する過程における多数の発明、さらにはその多面的な社会実装など、当初計画を上回る成果を挙げた。

4. 終了評価の評点

ＡＡ　想定以上の成果をあげた。

5. 総合コメント

世界で初めて成功した接合界面強靭化により DFC-PowerChip が、世界最高となるパワー密度を室温にて達成したことは評価できる。高出力密度レーザやテラヘルツ波固体レーザなどは、今後のこの分野の発展の土台になるものと思われる。

掲げた目標に必ずしも達していない課題があり、今後のさらなる進捗を期待する。

本技術開発を通して価値ある基礎科学的、基盤技術的な蓄積が得られている。今後、大型の国プロを通して、様々な応用展開や産業化が進むことを期待する。

6. 評価の観点ごとの評価結果と個々の委員によるコメント

6-1. 研究開始時に設定した研究目標の達成度（主題的成果）

（１）パワースケラブル高出力密度レーザ【達成度：達成（世界記録達成)】

新たなDFC-PowerChip構造によるサブナノ秒5J級超小型構成との主題においては、

・室温でパルスエネルギー 5.2J、パルス幅 619ps（ピーク出力 8.4GW)、繰り返し 100Hz（バーストモード)

との主題を達成した。なお、レーザ媒質パワー密度 0.81GW/cm^3（室温動作）と 150K の He ガス冷却である DiPOLE 報告値の 105J 出力（提案書当時の世界記録）である 0.026GW/cm^3 に比較して桁違いで高い記録を達成した。

その後、シードレーザの改良により 400ps までパルス幅を短くできており、現在は 1.3J 出力だが、途中にある光学素子の破損などがなく 5J 出力までアップできればピーク出力を 12.5GW まで向上でき、世界記録をさらに更新できると期待される。

（２）高出力・高輝度 THz 波固体レーザ【達成度：本質的に達成（一般に狭線幅 THz 波で出力 μJ を超えると>5kW であり高輝度 THz 波としては大出力である)】

新たな DFC-PowerChip と QPM-PowerChip を用いてブレッドボードサイズで出力 10mJ 以上(輝度温度：>10^{20}K)との主題においては、

・多段化で THz 波出力を 1mJ、10mJ スケーリング可能な展望を得た(QPM-PoweChip 破損で変更)

・波長 1μm、560mJ 入力 DFG 検証に急遽変更し、QPM-PowerChip から THz 波出力 1.05mJ との世界記録を検証（これまでの世界記録 0.6mJ, Nature Commun.10 (2591),1-8 (2019) の値を超えた)

> QPM-PowerChip の最大変換効率で 0.181%が得られた。

> 光学素子破壊を克服し 5J 励起を可能とするなら THz 波出力 9.05mJ が多段化せずとも望める。

> 光学素子破壊が克服できない場合でも 5J 出力を実証できているので、その出力を 10 分割しそれぞれ QPM-PowerChip である 10mm 厚 PPLN で THz 波

発生を行うことで最終目標の THz 波出力 10mJ が得られる（世界最大記録である 10mm 厚 PPLN は当研究室で開発のため必要個数を自作できる)。

（３）先端高出力レーザの社会実装【達成度：ほぼ達成（世界記録達成とプラットホーム整備)】

・UV レーザプラットホーム整備：世界最高性能のサブナノ秒 266nm、200mJ レーザ、PLD[*6] 等に展開

・THz 波プラットホーム整備：世界最高精度の THz-cTDS システム構築

・LIDT[*7] プラットホーム整備：世界初の接合強靭化にフィードバックできる計測法確立、装置構築

・THz-DLA 仮作検証：検証となる THz 波 RF ディフレクタに向けた装置を構築中

など、世界最高性能を達成した高出力極限固体レーザの社会実装を目的としたプラットホームをほぼ整備できた。

(主題に関連する成果)

上記３項目の主題に関連し、①～⑳の細分化したテーマを推進してきた。多くは主題に反映されているが、補足するなら開発課題①「接合界面観察の高度化」において接合プロセスのその場観察につながるナノスケールの埋没界面層・アモルファス層の高感度観測に成功したもので基礎研究における革新的な成果となる。また、産業界で広く使われていながらも大型化が難しく普及が妨げられている $Nd:YVO_4$ をレーザセラミックスとして育成することを試みた。そもそも RE:YAG 単結晶（RE=Nd, Yb etc.）は大型化・均質化・ドーパントの自由度向上などが難しいことから先端科学、産業化が阻まれてきた。これが焼結法によるレーザセラミックスの成功で世界が変わった。しかし、立方晶系に限定され、$Nd:YVO_4$ のような異方性材料には手が出せなかった。開発課題④「異方性材料の磁場による配向制御及び超高圧など焼結プロセスの高度化の検討」ではこの様な状況を打破すべく、$Nd:YVO_4$ 粒子の磁場配向技術を確立し、配向制御を駆使することで透光性 $Nd:YVO_4$ 焼結体の創製に初めて成功した。ただ、最終目標としたレーザ発振に関しては今後の課題となっている。一方、開発課題⑩「低温接合や表面処理に適した高品位レーザ材料の開発」においてレーザ材料であるセラミックスの表面処理耐性と材料パラメータ（組成や粒子サイズ）の関係を明らかにし、表面処理条件の最適化につながる指針を得るだけでなく、接合強度に優れたレーザ材料の作製を可能とした。そして開発課題⑲「次世代レーザセラミックス原料の評価」にて材料開発に重要な材料発掘・評価のみならず活用するためのネットワークの強化、拠点化に関しマネジメントに協力、推進してきた。

【個々の委員によるコメント】（主題的成果）

・パワースケラブル高出力密度レーザ、高出力・高輝度 THz 波固体レーザ、高出力レーザの社会実装などにおいて、概ね所期目標は達成されていると考えられる。
・主題的成果については、パワースケラブル高出力密度レーザに関しては達成された（世界記録を達成)。高出力・高輝度 THz 波固体レーザについては、「本質的に達成」とされているが、かなり近いレベルにまで到達しているものの、真の意味では達成ではない。先端高出力レーザの社会実装についても「ほぼ達成」とあるが、現在進行形である印象を受ける。しかしながら、全体的に高いレベルでの研究成果発出ができているものと思料される。
・ブレッドボードサイズでの出力 10mJ は未達成であるが、9mJ とそれが視野に十分入る価値ある成果が得られている。
・一部目標が未達成の部分はあったが、研究目標を高いレベルで達成した。

6-2.　計画時に想定していなかった成果（副次的成果）

世界最高強光密度のジュール級出力のレーザを室温動作で達成したことに関連し：

・DFC-PowerChip にて室温動作でのパワー密度にて目標の 0.25GW/cm^3 を超える 0.81GW/cm^{3}を達成(プロジェクト開始当時の比較値:欧州の ELI-DiPOLE では 150K 動作でも当時 0.026GW/cm^3)
  > 国際会議 ASSL2024 の AW5A.2（仏 CEA CESTA）におけるイントロダクションにて写真を含め引用される
  > 海外の研究機関、企業より問い合わせ(6-7.科学技術への波及効果を参照)
  > シードレーザ改良でパルス幅 400ps となり当初目標の 10GW を超える 13GW 出力が期待される
・ワンチップの PowerChip レーザで出力 80MW、更に 100MW を超えるまでの高性能化（世界記録）
  > 国際会議 ICO25 にて大出力レーザのポストデッドラインに採択
  > JAXA より衛星ライダ光源として注目されハイティラ株式会社のスタートアップに至る（受注案件）
  > JAXA 基金、防衛装備庁橋渡し研究など関連した３件のプロジェクトに発展
・QPM-PowerChip に関連し、過去に共同研究を行なった Prof. F. Krausz がノーベル物理学賞受賞
・開発課題⑤「YAG 材料の外場（熱勾配）による配向制御及び超高圧など焼結プロセスの高度化の検討」に関連し、SEM-EDS を用いて Nd:添加サファイアセラミックスの可能性を発見

常温接合のその場観察手法を構築する過程で：

・FAB 照射も長時間になると水酸基形成が促進され良好な接合を妨げる要因となることを発見

THz 波プラットホーム整備：世界最高精度の THz-cTDS システム構築

・THz 波による分光解析性能を飛躍的に高めることに成功、詳細なデータベース構築に寄与

LIDT プラットホーム整備：世界初の接合強靭化にフィードバックできる計測法を確立、装置構築

・接合界面の強靭化のみならず光学素子表面の強靭化も望める表面前処理プロセスを発見

開発課題④「異方性材料の磁場による配向制御及び超高圧など焼結プロセスの高度化の検討」

・1000℃を超える高温まで極微量の水分が残存することを発見

> 残存水分が焼結体の透光性に影響を与える可能性が示唆された

> 透明体の作製における水熱合成微粒子利用時の重要な知見、材料合成分野における新たな成果

開発課題⑧「DFC-PowerChip を利用した UV レーザによる表面処理・素子育成系構築」

・波長 266nm にて世界最高となる 200mJ を超える 500ps パルスの発生に成功

> プロセス時間短縮に資する高繰り返し化を行い、二光子吸収が課題となることを解明

> 200mJ を超える特性実証とは別途、繰り返し 20Hz にて最大 147mJ を達成

> 関連した再委託先のプレス発表とパンフレット掲載

開発課題⑩「常温接合や表面処理に適した高品位レーザ材料の開発」

・接合プロセスにおいて、種々の材料で表面構造や熱特性の差異を可視化できた：新たな知見

> 母材である YAG に添加された元素の種類に影響されることは想定していなかった

> 材料の表面処理や接合後の熱処理条件の最適化にフィードバック、接合の信頼性向上に資するものとなった

【個々の委員によるコメント】（副次的成果）

・世界最高強光密度のジュール級出力のレーザを室温動作で達成しているほか、再委託先でもそれぞれ新たな成果や知見を得ている。

・多くの共同研究がなされており、活発な研究状況が窺える。企業との連携もなされており、研究開発や応用の広がりが期待できる。

・他のプロジェクトにつながる成果や、スタートアップなどにつながった。
・ジュール級出力のレーザに関する成果が国際的に評価されたこと、世界最高精度の THz-cTDS システムの構築により THz 帯の分光解析性能の向上、接合界面と光学素子表面の強靭化も望める表面前処理プロセスの発見など多くの成果がある。
・YAG サファイヤの接合の実現、接合強靭化のための計測法の確立など、副次的な成果も複数得られている。

6-3.　他の者により派生した成果（間接的成果）

・JST 未来社会創造事業「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」における小型集積レーザ
・文部科学省（Q-LEAP）「次世代レーザー技術領域」における常温接合による新型光源
・資源エネルギー庁「廃炉・汚染水・処理水対策事業」における LIBS[*8] のための小型集積レーザ
・中部経産局「狭隘部への適用が可能な可搬型レーザーピーニング装置の開発」におけるレーザーピーニングのための小型集積レーザ
・ムーンショット「大規模・高コヒーレンスな動的原子アレー型・誤り耐性量子コンピュータ」における小型高性能レーザ
・JAXA 基金「高出力レーザの宇宙適用による革新的衛星ライダー技術」における小型高性能レーザ
・防衛装備庁「超小型ロバストテラヘルツ波イメージング装置」における小型集積レーザ
・防衛装備庁橋渡し研究「小型集積レーザーを用いた水中目標探索技術の研究」における小型集積レーザ
・JAXA 基金「月面インフラ構築に資する要素技術」における LIBS 解析のための小型集積レーザ

【個々の委員によるコメント】（間接的成果）

・常温接合による DFC チップが数々の他プロジェクトに展開されていることは評価できる。
・低温接合の均一性、メカニズムをラマン散乱で計測するような展開ができていた。
・QPM-PowerChip 関連では、Prof. F. Krausz との交流もあり、世界レベルでの研究に波及している。多数の研究者や企業と連携を行っていることも評価できる。
・研究者が多く参画する課題であり、周囲との連携による間接的成果は多様で量も多い。
・分担研究機関も含め、多くの副次的成果が得られている。研究成果の実用化を目的としたスタートアップ企業を設立し、JAXA から衛星ライダ案件を受注したことを

高く評価する。
・高出力レーザによる衛星ライダへの適用など、新たな応用の可能性に発展する。

6-4.　科学技術上特筆すべき成果

・DFC-PowerChip にてパワー密度 0.81GW/cm^3（室温動作）の世界記録を得たことは意義深い
　＞ 5.2J、8.4GW を達成しており本質的に極限高出力固体レーザである
　＞ LIDT において材料開発に資する新手法を確立したことから常温接合の強靭化に成功
　＞ レーザおよび非線形材料の精密測定、利用のプラットホーム構築は目立たないが重要案件
　＞ 常温接合界面の強靭化を果たしたことから国内外で注目（各種プロジェクトの採択と問い合わせ）
　＞ 再委託先のプレスリリース、パンフレットへの掲載など産業界からも注目

・ワンチップ DFC-PowerChip にて 80MW,100MW に至る世界最高出力を更新
　＞ ICO25 (Dresden,2022.9.5-9)高出力レーザのポストデッドライン採択

・QPM-PowerChip にて mJ に至る高出力 THz 波発生の基礎検証
　＞ 関連した過去の共同研究者が 2023 年のノーベル物理学賞（Prof. Ferenc Krausz）

・未来につながるレーザ材料開発にも一部成功
　＞ レーザセラミックスの配向制御（Nd:YVO_4, RE:サファイアなど）

【個々の委員によるコメント】（科学技術上特筆すべき成果）
・特筆すべき事柄としては、DFC-PowerChip にてパワー密度 0.81GW/cm^3（室温動作）の世界記録を得たこと、ワンチップ DFC-PowerChip にて 80MW、100MW に至る世界最高出力を更新したこと、QPM-PowerChip にて mJ に至る高出力 THz 波発生の基礎検証などが挙げられる。
・学術性というよりは接合技術の高精度化が寄与している印象である。
・レーザの出力という点で世界トップクラスの記録を打ち出しており、研究の応用展開も期待される。

6-5.　論文（投稿中のものも含む）、学会発表等

論文 14 件、学会発表 121 件、プレス 2 件、展示・講演(Siegmans School 2 件)
受賞 4 件、パンフレット 1 件（再委託先のパンフレットへの掲載）

6-6.　特許（出願中のものも含む）

出願中１件、準備中１件

【個々の委員によるコメント】（論文、特許、学会発表等の研究成果）

・論文 14 件、学会発表 121 件、プレス 2 件、受賞 4 件など十分な成果を挙げている。
・トップクラスの国際誌に多数の論文を掲載しており、研究論文の成果発出は十分にできている。国際学会などでの活動も評価できる。
・評価の高い論文を出版している。また、学会発表でも注目度の高い発表をしており、評価できる。
・レーザ部品・装置・システムに関するもの、光学素子に関連するものなどで複数の特許を出願している。
・重要な技術開発、それによる成果である割には知財創出が少ない印象である。
・得られた成果は、論文だけでなく知財も確保することが好ましい。

6-7.　科学技術への波及効果

・スタートアップの成立と JAXA 受注と並行して JAXA 基金で２件の採択
・上記スタートアップにて防衛装備庁橋渡し研究にて採択
・次世代 EUV 露光装置のプラズマ励起光源への展開
・エコ循環社会実現にかかる LIBS としての展開
・LIDT に関し材料開発における新計測手法として国際標準提案を企画中
・その他
　＞ ELI-DiPOLE の研究者より常温接合に関し UK 経費での国際共同研究要請（2025 年８月６日）
　＞ ディスクレーザで著名な Dausinger+Giesen 社より協力要請（ASSL2025 期間中）
　＞ 非線形光学結晶で著名な仏 Cristal Laser 社より協力要請（ASSL2025 期間中）

【個々の委員によるコメント】（発展性と波及効果）

・次世代 EUV 露光装置のプラズマ励起光源への展開、エコ循環社会実現にかかる LIBS としての展開、LIDT に関し材料開発における新計測手法として国際標準提案など、発展性と波及効果が期待される。
・コンソーシアム TILA の拡大があり、今後の利用展開が期待できる。
・本課題で開発したレーザを実用化する取り組みをすでに始めており、今後も多くの発展と波及効果が見込める。
・高出力レーザによる衛星ライダへの適用など、新たな応用の可能性に発展、新規スタートアップの立ち上げなどの波及効果が見られる。

6-8.　効率的な研究実施体制とマネジメント

再委託先がその他の再委託先の研究内容の取りまとめを実施。理化学研究所と再委託先による 6 機関連絡会（年 4 回）を開催して研究進捗の相互確認を実施。研究内容については第三者の研究協力者による推進委員会（年 3 回）にて研究進捗に対するご意見、ご講評を受けた。

また、2022 年度から再委託先を追加したことにより、理化学研究所でマネジメントを担当する人員を増員し、防衛装備庁－理化学研究所、協力機関の連絡や予算・資産管理体制を強化することで、研究推進を円滑に実施することができた。

【個々の委員によるコメント】（効率的な研究実施体制とマネジメント）

・適切なマネジメントにより、研究が円滑に推進されている。
・研究施設並びに企業の研究所との連携を取りつつ研究が展開されており、研究の相乗効果が生み出されている。
・研究代表者は大きな研究体制をうまく束ね、効率的な成果創出を行った。
・他のプロジェクトとの切り分けが不明瞭であった。

6-9.　研究推進時に生じた問題への対応

内定時に再委託先の 1 機関で参画の合意が取れなく、当初再委託先から外れることとなった。しかし、再委託先の敷地内に理化学研究所分室を設置でき、その中で実質的な活動ができるようになった。これにより実質的な活動が可能になった。

しかし、2020 年に始まった COVID-19 の感染拡大はなかなか収束せず、サプライチェーンも混乱し、工程が遅れた。特に、環境整備のために 2020 年に計画された新たな実験棟の建屋工事が大幅に遅れた。さらに、その頃は銅線や配電盤も入荷しないなど研究環境整備はさらに遅れた。そして品不足、人手不足のため物品の値上がりが著しく、特に輸入品は当初予定の価格では入手できなくなった。そこで当初予定から目指す目標をより本質的な課題に絞り、さらに、UV レーザプラットホーム整備では、理化学研究所等からの技術開発の後に技術移管を行い、それを装置化する予定だったものを早期の技術移管のため理化学研究所等における実証に参加することで基本波出力 2J を達成し、技術移管を行うことで工程を短縮するなどの工夫を行なった。

【個々の委員によるコメント】（研究推進時に生じた問題への対応）

・COVID-19 の感染拡大の影響を受けつつも、適切な対応によりその影響を最小限に食い止め、相応の成果を得ていることは評価する。
・専門性のもとに役割分担をうまく利用して、問題解決に当たっている。
・適切に問題に対応し成果創出につなげたと評価できる。

6-10.　経費の効率的な執行

2022 年度から理化学研究所においてマネジメント担当者を新たに雇用し、再委託機関も含め経費執行を有機的に行うことで効率的な執行を実施した。

【個々の委員によるコメント】（経費の効率的な執行）

・適切に執行されている。

・導入した装置がどのくらい有効に機能したのかが不明瞭である。

---

*1　ジャイアント・マイクロフォトニクス：物質の微小秩序領域を制御することでジャイアントな光を操作するフォトニクス（Giant Micro-Photonics）

*2　DFC：分布面冷却（Distributed Face Cooling）

*3　QPM：擬似位相整合（Quasi Phase Matching）

*4　PowerChip：レーザおよび波長変換におけるチップ型の高出力素子

*5　DUV：深紫外レーザ（Deep Ultra Violet）

*6　PLD：パルスレーザによる薄膜成長法（Pulse Laser Deposition）

*7　LIDT：レーザ誘起損傷耐性閾値（Laser Induced Breakdown Threshold）

*8　LIBS：レーザ誘起損傷分光法（Laser Induced Breakdown Spectroscopy）