

研究評価委員会
「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」(事後評価) 分科会
議事録及び書面による質疑応答

日 時 : 2021年12月17日(金) 10:20~16:00

場 所 : NEDO川崎 2301~2303 会議室 (オンラインあり)

出席者(敬称略、順不同)

<分科会委員>*リモート参加

分科会長	吉田 実	近畿大学 理工学部 電気電子工学科 教授
分科会長代理	庄司 一郎	中央大学 理工学部 電気電子情報通信工学科 教授
委員	岩崎 拓也	みずほリサーチ&テクノロジーズ株式会社 事業統括部 参事役
委員	近藤 公伯*	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構 量子ビーム科学研究部門 関西光科学研究所 光量子科学研究部 部長
委員	斎木 敏治	慶應義塾大学 理工学部 電気情報工学科 教授
委員	樽井 大志	日産自動車株式会社 生産技術研究開発センター エキスパートリーダー
委員	水谷 孝治	三菱重工航空エンジン株式会社 民間エンジン事業推進部 部長

<推進部署>

有馬 伸明	NEDO IoT 推進部 部長
柿沼 遼(PM)	NEDO IoT 推進部 主任
熊谷 正伸	NEDO IoT 推進部 主査
矢田 勝啓	NEDO IoT 推進部 主査
岩崎 光治	NEDO IoT 推進部 専門調査員

<実施者>*リモート参加

小林 洋平(PL)	東京大学 物性研究所 教授
田丸 博晴(SPL)	東京大学大学院 理学系研究科付属フォトンサイエンス研究機構 特任准教授
黒田 隆之助(SPL)	産業技術総合研究所 先端オペランド計測技術 OIL/分析計測標準研究部門 ラボチーム長
湯本 潤司	東京大学特命教授室 特任教授
秋山 英文	東京大学物性研究所 教授
奈良崎 愛子	産業技術総合研究所 電子光基礎技術研究部門 研究グループ長
田中 真人	産業技術総合研究所 分析計測標準研究部門 研究グループ長
横山 弘之	東北大学未来科学技術共同研究センター 教授
中里 智治	東京大学物性研究所 特任研究員
吉富 大	産業技術総合研究所 電子光基礎技術研究部門 主任研究員
西前 順一	三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 主席研究員
吉村 政志	大阪大学レーザー科学研究所 教授
片山 琢磨	パナソニック株式会社 インダストリー社 技術本部 センシングソリューション開発センター 所長
塚本 雅裕	大阪大学 接合科学研究所 レーザープロセス学分野 教授
大田 昌弘	(株)島津製作所 デバイス部 部長

宇野 進吾 (株)島津製作所 基盤技術研究所 先端分析ユニット フォトニクス G グループ長
野田 進* 京都大学 工学研究科 電子工学専攻 光量子電子工学分野 教授

<オブザーバー>

佐藤 正健 経済産業省 産業技術環境局 研究開発課 産業技術総括調査官

<評価事務局>*リモート参加

森嶋 誠治 NEDO 評価部 部長
木村 秀樹 NEDO 評価部 専門調査員
中島 史夫 NEDO 評価部 専門調査員
田辺 敬一朗* NEDO 評価部 主査
村上 康二* NEDO 評価部 専門調査員

議事次第

(公開セッション)

1. 開会、資料の確認
2. 分科会の設置について
3. 分科会の公開について
4. 評価の実施方法について
5. プロジェクトの概要説明
 - 5.1 事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメント
 - 5.2 研究開発成果、成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し
 - 5.3 質疑応答

(非公開セッション)

6. プロジェクトの詳細説明
 - 6.1 【項目 4】 次世代レーザー及び加工の共通基盤技術開発
 - 6.2 【項目 1】 高品位レーザー加工技術の開発
 - 6.3 【項目 5-1】 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
 - 6.4 【項目 5-4】 高輝度青色半導体レーザー及び加工技術の開発
 - 6.5 【項目 3-1】 次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発
「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」
7. 全体を通しての質疑

(公開セッション)

8. まとめ・講評
9. 今後の予定
10. 閉会

議事内容

(公開セッション)

1. 開会、資料の確認
 - ・開会宣言 (評価事務局)
 - ・配布資料確認 (評価事務局)
2. 分科会の設置について
 - ・研究評価委員会分科会の設置について、資料1に基づき事務局より説明
 - ・出席者の紹介 (評価事務局、推進部署)
3. 分科会の公開について、4. 評価の実施方法について

議題3及び議題4に関しては、評価事務局より、既に資料を用いて各委員に事前説明を実施し委員からの質問にも回答済みであること、推進部署、実施者にも事前に説明済みであること、また、Youtube で視聴の一般傍聴者にも、配信 URL を連絡した際に議題3及び議題4についての資料を格納した URL を示

し、事前に閲覧できるよう案内済であること、の説明があった。よって、議題3及び4については、事前の説明と質疑応答をもって実施済とした。

5. プロジェクトの概要説明

5.1 事業の位置付け・必要性、研究開発マネジメント

5.2 研究開発成果、成果の実用化・事業化に向けた取組及び見通し

推進部署より資料5に基づき説明が行われ、その内容に対し質疑応答が行われた。

5.3 質疑応答

【吉田分科会長】技術の詳細については議題6で扱うので、ここでは主に事業の位置付け・必要性、マネジメントについて議論をします。それでは、事前にやり取りをした質疑応答も踏まえて、意見、質問をお願いします。オンラインで参加の方は、質問や発言の際は、ミュートを解除してから、名前と所属、質疑の対象となる資料番号やページ数等を特定してから、お願いします。

【齋木委員】予算についてお聞きしたい。今回、非常に大きなプロジェクトだったと思います。大きなプロジェクトだからこそ予算の効率化ができた、無駄づかいが減らせたといった点で、特に大きなものがあつたら教えてください。

【柿沼PM】予算が大きかったから効率的にできたことです。

【齋木委員】多くの研究者や企業が参加したからということですか。

【柿沼PM】そうです。

【小林PL】大きなプロジェクトをNEDOがけん引したということです。例えば、プラットフォームをつくる際に、各実施者がうまくいかよく分からないけれども、NEDOが背中を押して実施することが、大きな予算のためにできたわけです。なかなか各法人が費用を出して行うということでは、進みにくいのではないかと。そういう点は、非常に大きな効果があったと思います。

【田丸SPL】補足します。レーザー加工のパラメーター出しというのは、材料加工の種類を選ばないとならないときに、一つの装置だけで行うことは難しい部分があります。これだけ大規模で、バラエティーのあるものがそろっていて、プラットフォーム化できたということは、大きなプロジェクトならではの成果だと思います。

【水谷委員】プロジェクトの進捗管理についての質問です。さまざまなプロジェクトがあり、途中でコロナ禍があり、中間目標でテーマを変えるなど、いろいろ大変な中で成果を出したことは素晴らしいと思います。細かいところでいうと、△が付いていた項目がありました。その辺りの進捗について、どのような議論が行われていましたか。

【柿沼PM】目標達成は進捗会議というより、アドバイザー委員会から質疑をいただきながら進めました。特に後半、新型コロナウイルス感染症が広まったころは、残りの期間とプロジェクトの目標を照らし合わせて、効率的に開発を進めていく方法を委員会の場で話をしました。それを実施計画にフィードバックして、開発を進めていきました。

【水谷委員】途中で目標を変えるといたところもありました。最後のほうは、少し言葉が悪いですが、時間切れのような決断をして、△で仕方がないとなったのでしょうか。

【柿沼PM】もちろん○になるように開発を進めてきました。項目3など、不確実性が多い研究開発は特に最後、出力が上がらない、要素が決まらずにタイムアップというものもあります。

【水谷委員】分かりました。

【樽井委員】効果の見積もりで、アウトプットが約1000億円という話が最初にありました。最後の24ページの市場規模は2兆円で、将来は5兆円とあります。どういう計算方法で1000億円になったのか、

簡単に説明をお願いします。

【小林 PL】この 1000 億円は、本プロジェクトの実施者が将来製品化する積み上げによるものです。2 兆円というのは、世界の市場規模です。

【樽井委員】今回、参加されている企業が、今回の成果を使って、世界においてデータとして、5 兆円とか 16 兆円あるパイの中で、少なくとも 1000 億円はメリットを受けられるのではないかという解釈になりますか。

【小林 PL】そういうことです。

【岩崎委員】研究開発マネジメントについて伺います。資料 5-1 の 3 ページです。この事業を始めるにあたっての背景、課題認識があります。世界市場と比べると、日本はファイバーレーザーや半導体レーザーの伸びが小さいという課題があります。その要因をどのようにお考えですか。その要因を踏まえて、今回のプロジェクトで課題をクリアするためにどのような研究開発マネジメント上の工夫を行ってきたのでしょうか。その点について、教えてください。

【柿沼 PM】日本のファイバーレーザーが伸びない要因の一つに、ファイバーレーザーは現在、海外製がメインなので日本製に手を出しにくいということがあります。オペレーションの面でも、そういった背景があります。プロジェクトとしては、日本製の加工機をしっかり市場に出していくことが重要だと思っています。TACMI プラットフォームの取り組みなどで、いろいろな方に使っていただいて、信頼性を得て、日本製を市場に出していくということを重要視して取り組んできました。

【小林 PL】補足します。波長 1 μ m のレーザーは、ご存じのとおり、海外製が非常に強く、日本の加工機にも使われています。ただ、日本製のレーザーを使いたいという声も多く、回帰してきています。そういうレーザーを開発する力を付けることは、非常に重要だと考えています。このプロジェクトで最も大きな方針としては、今後、付加価値が上がる部分は微細加工だということで、精密加工に日本の強みを持っていこうという戦略をとっています。紫外と短パルスは日本のレーザー技術が優れているので、それを搭載した加工機に結び付けていこうという方針です。

【岩崎委員】海外との比較において、日本の強みをしっかりつくっていく、あるいは強みを活用していくという方針でしっかり進めていると理解しました。どうもありがとうございます。

【庄司分科会長代理】今の話に関連することですが、資料にアウトカムとして、レーザー加工機は 1000 億円波及効果として加工市場には 7000 億円とあります。日本だけでなく、海外に売り込んでいかないと、なかなかこういう金額は達成しないと思います。具体的に国内と海外の売り上げは、どの程度の割合を考えていますか。海外にどの程度、切り込んでいこうとしているのでしょうか。こちらは 2030 年の目標ですけれども、どのようなカーブを描きながら、ここまで達するかということがあります。既に製品化して販売しているものもあると思いますが、利益はどの程度、出ていますか。

【小林 PL】日本のレーザー加工機メーカーは、現在でも、グローバルで非常に強いです。例えば、大手の加工機メーカーで、50%世界で販売しています。そこに、日本製のレーザーが搭載されます。そのままの比率で行くと思います。ですから、国内より、むしろ海外のほうが大きいという波及効果になっています。

【吉田分科会長】今の庄司先生のご質問に関連して質問をします。現在、海外から非常に安いレーザーが入ってきているので、国内でサプライチェーンをきちんと構築して、レーザー装置をつくっていくことも考えていかなければならない。結晶から短波長レーザーまで一貫してつくられたことは、素晴らしい。ただし、それがメーカーとしてきちんと供給され、将来に渡って、何千億という売り上げに貢献できる仕組みづくりが、ユーザーにレーザーを使って体験してもらうことと並んで大事だと思います。これに関して、コメントがあればお願いします。

【小林 PL】なかなか難しいご質問です。この点に関しては、プロジェクトと多少離れてしまうので、私の

意見になるかもしれません。このプロジェクトに絡めていいますと、例えば株式会社 QD レーザは今回の委託期間中に上場したという大きいニュースがありました。国の政策で、中小を後押しして、そこが大きく飛躍するという例の一つになっていると思います。私は、こういうプロジェクトを継続的に行うことが、日本のレーザー業界のこれからの飛躍に大きく役立っていると感じています。

【吉田分科会長】単に価格を下げるだけの消耗戦ではなく、新しい日本を支えていく、その種まきも行っていと理解しました。

【近藤委員】資料 5 の 4 ページ目です。海外の技術開発で、日本の状況とアメリカ、ドイツが示されています。これを受けて、短波長のパワーレーザーの開発を行ったという説明がありました。NEDO のプロジェクトを実施することで、短波長のパワーレーザーが進んだということを実感しています。一方、アメリカやドイツは、ファイバーレーザーが進んでいるという話は、われわれもよく知っています。短波長や青色での海外の開発の動向については、本日の話に出てこなかったと思います。こちらについては、いかがでしょうか。

【小林 PL】研究開発項目 1 で少し触れました。波長 355nm の UV については、ドイツが非常に強く、正直なところ、遠く及びません。それもあって、波長 266nm の UV にターゲットを設定した部分もあります。波長 266nm の UV については、この期間中に海外で幾つかは出てきてはいるものの、あまり顕著な伸びはありません。日本で、2W から 50W まで仕上げたというのが、最も目立つ成果になっていると思います。

短パルスのご質問についてです。日本は短パルスレーザー業界が大きくて、技術力自体は非常に良いものを持っています。それを市場に持っているかどうかだと思います。アメリカ、ドイツの大きな企業に製品力は及びませんが、力は持っているので、中小企業から出していくということを私は期待しています。

【近藤委員】質問を続けます。3 ページです。エキシマレーザーを見ると、日本では割合が大きくなっています。ここを新たに開発している固体レーザーの紫外線で、置き換えようという話でしょうか。また、海外はエキシマレーザーが小さいというのは、何か理由がありますか。

【小林 PL】ご存じの通り、エキシマはほぼリソ（グラフィ）用です。一部液晶のアニール等に使われています。日本はギガフォトンがリソ用市場の半分程度を持っているので、日本ではエキシマレーザーが非常に大きいものになります。これは日本の特徴だと思います。もう 1 点、エキシマレーザーを加工に使えるのではないかとというのが、今回の新しい仕掛けになっています。研究開発項目 5 で行っています。

【近藤委員】日本で割合が大きいというのは、あくまでもリソ用に提供しているからということですか。世界的に見ると同じような比率になるのではないかと考えました。

【吉田分科会長】近藤先生、今のお話はエキシマレーザーがリソ用であれば、国内の販売額ではないかというご質問でしょうか。

【近藤委員】そうです。そのようにとれるのではないかと思います。

【小林 PL】吉田先生、ありがとうございます。その通りです。

【斎木委員】他事業との関係で、2010 年から 2014 年のプロジェクトがあったと思います。今回のプロジェクトがこの後継という位置付けかは存じませんが、良かった点、反省点があったと思います。それが、今回にどのように生かされているのでしょうか。もしあれば教えていただきたい。

【柿沼 PM】後継かどうかは、レーザー加工技術という点では一緒ですが、1 年空いているので、直接後継とは考えていません。プロジェクトの成果は、NEDO ではプロジェクト終了後に実用化状況を定期的に確認しています。このプロジェクトで実用化状況がいいものからレーザーの技術を実用化にうまくつなげていけるといって、このプロジェクトでも引き継いでいきたいと思っています。

【黒田 SPL】 補足します。前回、NEDO プロジェクトで行われていた次世代素材等のレーザー加工技術開発に関連して言いますと、CFRP に特化した、特に切断加工、自動車用がメインテーマでした。今回のプロジェクトは、NEDO から説明があったように、日本の強みという点で世界市場に打ち勝てるような領域を担っていこうと立ち上げたものです。今回のプロジェクトでは、まずはレーザー光源に注力ということで、勝てる光源を開発して、どのような材料分野、加工用途、応用分野があるかも含めて、いろいろな調査を行い、取り組むことが主眼になっています。NEDO プロジェクトのレーザーの前身、次世代素材等のレーザー加工技術開発で行われていた特定の材料に注力するということから、レーザー光源に注力した開発に移行したというものです。

【吉田分科会長】 資料の 5 の 8 枚目と 9 枚目のスライドに相当しますが、本プロジェクトと SIP のプロジェクト、サイバーフィジカルシステムが一般の方には少し分かりにくいと思います。可能であれば、説明をお願いします。

【田丸 SPL】 サブプロジェクトリーダーの田丸から説明します。本プロジェクトが 2016 年から始まって、当時はまだあまりサイバーフィジカルシステムという話までは出ていませんでした。ただし、加工の条件出しが非常に大変です。材料ごとに違うので、適用できるプロセスが市場性から限定されてしまうという問題は認識していました。そのため、このプロジェクトでは、それを試せるプラットフォームをつかって、データベースを使って、いかに早く協調的にパラメーター出しができるかということに注力しました。それが進んでいた途中で、世の中でデジタル化、サイバーフィジカルシステムという話が盛んになってきて、われわれの進捗から見ると、レーザー加工も狙えるのではないかなってなってきました。このプロジェクトにも関わっているメンバーがある程度関わる形で、そのようなテーマ出しが行われたと理解しています。ステージとして違うということ、経緯として違うこと、そして、目標が少し違うという形です。

【吉田分科会長】 それでは、ほぼ定刻になりましたので、この質疑応答をここで締め切りたいと思います。皆様、どうもありがとうございました。

(非公開セッション)

6. プロジェクトの詳細説明

省略

7. 全体を通しての質疑

省略

(公開セッション)

8. まとめ・講評

【吉田分科会長】 議題 8、まとめ・講評です。水谷委員から始めて、最後に私という順序で講評を行っていききたいと思います。

【水谷委員】 先ほど、細かい部分を質問したので全体のコメントも含めてお話します。5 年のプロジェクトで、新型コロナウイルス感染症も始まってしまい、大変ご苦労があったと思います。最初に立てた目標が海外も含めて、世の中が動いている中でどうかという点も踏まえて、途中で目標設定を変えるなど、柔軟に対応されていたことは、マネジメント的にも素晴らしいと考えます。その中で、いろいろな成果も、大いに達成できたと思います。特に私が注目しているのは、TACMI の活動です。思い描いたようにサイクルを回していくには課題があるとは認識していますが、チャレンジしたという点は素晴らしいと思います。先ほど海外展開という話もありましたが、まずは日本の中中だと思います。秘密ではありませんが、われわれは、ドイツの研究機構と共同研究を行うなどしています。海外に行

かずとも、素晴らしい環境があれば、日本で行いたいというのが本意です。TACMI の活動には期待しています。

企業側として、高出力で達成できたというのは良いことですが、安定性や品質が気になります。そういうアピールは、目標にも掲げにくいという部分もあります。ユーザー側としては、ときどきホームランを打つ選手ではなく、毎回、単発の安打で十分ですし、むしろ使いやすいです。企業サイドの人間がいるときには、そういった点をうまくアピールしていただきたい。そういうことをお聞きしたかったので質問をしました。いろいろな成果が数多く達成できたと思います。5年間、お疲れさまでした。

【樽井委員】今回はベンチマークにこだわって質問をしました。知見が薄い領域について、本日のお話を聞いて、よく分かりました。

私も TACMI が気になっています。この後、継続的に育てていくことが非常に大事だと思っています。協調領域をいかに具体的に広げていくかが、非常に大事だと考えていましたが、そこに関して意見がいただけたので勉強になりました。

レーザーのライバル、北米、ドイツは継続して取り組んでいます。今回、このプロジェクトで良いところまで日本が到達しても、それを継続していかないと、また3年後に逆転されてしまうことは避けたい。具体的に進めていくのが TACMI などかと思います。継続的に競争力を維持するための活動を、私も現在はあまり協力できませんが、できる限りで行わせていただきたいと思います。今後ともよろしくお願いします。

【齋木委員】成果に関しては申し分ないものと感じています。改めて、日本の研究者の皆さんの技術力の高さを実感することができました。ぜひ、製品化を進めていただいて、個人的にずっとウォッチしていきたいと思っています。

個人的には次世代の話をもっと聞きたかった。加工用途という高いハードルを掲げたからこそ、いろいろな課題をクリアできたと思います。レーザーの用途はいろいろあって、パワーがさほど必要がないものもあると思います。ここで一気に高いハードルを掲げて、それをクリアしたので、他の応用に必要な要求に簡単にこたえているスキームになっていたと感じました。

皆さんが言われるように、TACMI コンソーシアムは非常に楽しみです。ユーザーからどれだけの情報をフィードバックとしてとれるかが、一番の鍵だと思います。デフォルトはお答えできませんということになると思いますが、日本の技術力を全体的に上げていくために必要だと説得して、出せる情報は出していくという一体感を出して盛り上げていっていただきたい。そのためには、ある程度、求心力を持った方がいないと、難しいです。プロジェクトリーダー、サブプロジェクトリーダーの方々が、そういう役割を今後も担うのかもしれないですし、企業の方で雰囲気を持った方が、そういう役割を担うのかもしれませんが、そこは分かりませんが、ここで終わってしまうのは本当にもったいないので、継続することを楽しみにしています。

【近藤委員】委員の方が皆さん、言われているように、レーザー加工に関連するパワーレーザーの技術がこのプロジェクトによって非常に進んだと思っています。私はレーザーとプラズマの相互作用をずっと研究してきました。レーザー加工の様子をずっと見てきましたが、このプロジェクトの前を思い起こすと、今回のように、材料をどのようにレーザーで加工していくかを体系だっとならえていく取り組みは、行われてきませんでした。その状況に対して、この NEDO プロジェクトでは小林先生、田丸先生、黒田先生が中心になってチャレンジされて、他の国プロジェクトなども一緒に、うまくすみ分けて研究開発を進めています。具体的には、加工のプラットフォームを構築して、そこでデータを蓄積して、最先端の機械学習や AI で分析できるようになった話を聞き、非常に変わったと思います。ただ、完全に利用できる状況は、もう一歩先だという印象を持ちました。課題ごとのロードマップをつ

くるなどされており、非常に期待できる状況ができたと感じました。これを継続できる状況をつくるのが、わが国にとって非常に重要だと思います。それを行うことで、この取り組みが、日本が先を走って発信する技術になっていけるのではないかと。繰り返しになりますが、TACMI コンソーシアムの取り組みが継続できるような形がよいという印象を持っています。

【岩崎委員】 今回のプロジェクトは非常に多くの光源、装置、加工技術などさまざまな観点での研究開発、あるいはプラットフォームの構築、データベースの構築が行われています。お話を聞いて、海外の状況、あるいは市場をしっかりと見据えた上で、日本の勝ち筋を見ながら、研究開発が進められていることがよく分かりました。その中で、成果として、一部上市されている製品も出てきており、社会の実装が進んでいるということで、非常に素晴らしいと思います。研究開発を推進しているプロジェクトリーダーの小林先生、田丸先生、黒田先生や NEDO のマネジメントがしっかりきいていたという印象を受けました。

プラットフォーム、データベースの構築、TACMI コンソーシアムについては、非常に素晴らしい成果ですし、必ず継続して、続けていかなければいけない。続けるだけではなくて、発展していかなければいけないと考えています。今後も苦労があるかと思われ、企業間の協調領域、競争領域をしっかりと切り分けながら進めていく必要もあります。さらにコンソーシアムの取組に対する企業側の理解も深めていかなければいけないといった課題もあります。せっかく構築したプラットフォームを今後も継続的に発展していけるよう、頑張ってください。

【庄司分科会長代理】 私もレーザーに関する研究を行っていますが、使うレーザーも海外製が多いです。レーザー加工や装置も、ほぼ海外製で、もどかしい思いをしてきました。この NEDO のプロジェクトが始まる時に、日本でいわゆる反転攻勢をしかけるということを目指した取り組みと聞いて、非常に期待していました。今回、まとめの話を聞く機会をいただいて、どの項目も非常に素晴らしい成果が得られて、国内だけではなく、世界に入っていくきっかけになったという印象を受けました。

レーザー加工は、少し前まで、職人芸といいますが、勘と経験に頼る部分が大きい印象があります。データベースで体系的にまとめることを最初から目指して、実際にできていることは素晴らしいとおもいます。

今回の NEDO プロジェクトの進め方を見ていて、参画しているメンバーは、非常に進めやすかったのではないのでしょうか。うまくいったものは製品化したり、途中から項目を入れ替えたり、柔軟性をもって進められています。それぞれの力を発揮して、最終的に良い成果につながったという印象を受けています。プロジェクトマネージャー、プロジェクトリーダー、サブプロジェクトリーダーの皆様のご尽力に敬意を表したいと思います。

他の委員の先生がたも言われていましたが、日本製のレーザーが世界を席巻するためには、今後の取り組みが大切です。TACMI を中心にしっかり発展させていきたい。私も楽しみに今後もウォッチしていきたいと思えます。

【吉田分科会長】 今回、最先端のレーザーを開発されて、多くのユーザーが使える形にされたのは素晴らしい成果です。これは大事な出口だと思います。既に製品化を始めているものもあると聞いています。特筆すべき成果として、TACMI を今後、どのように運営していくのかということが大事です。費用、人、ものによく言われます。どれも一つだけ独立したものではなく、リンクしているようなものだと思います。例えば、装置には寿命があります。メンテナンスや装置の寿命だけではなく、最先端としての寿命があります。どういうことかということ、日本ができるからということで、私たちは5年で行った研究開発は、キャッチアップする側は、もっと短い時間でキャッチアップします。どのように今後も逃げ続けるかを考えなければいけない。また、CPS（サイバーフィジカルシステム）については、少しだけ触れただけでした。近藤先生も先ほどお話しされていましたが、機械学習のモデルだけでは

なく、物理モデルを入れなければ、条件が少し変わると使えないこととなります。その辺り、どのように展開するかについて、興味があります。

評価する立場から、考えていることをお話します。従来の国プロジェクトは、どちらかというと成功させることに目的があったと思います。うまくいかなかったこと、難しかったこともきちんと評価して、残していくと、次のプロジェクトが一層うまく進むように持っていけるとと思います。そういう意味合いでは、難しかったこと、苦勞したこと、プロジェクトの進め方を変えていったらいいということなども、今後のために残していきたい。その点は、よろしくお願ひしたいと思います。

【中島専門調査員】委員の皆様、ありがとうございます。それでは、最後に推進部より、有馬部長、次に実施者を代表して小林 PL、そして経済産業省の佐藤産業技術統括調査官より、一言ずついただきたいと思います。

【有馬部長】本日は、皆さんお忙しいところ、長時間に渡り、お時間をいただきまして、ありがとうございます。こちらに来ていただいた方ももちろん、遠くからご参加いただいた近藤先生もありがとうございます。先日の現地調査会も、新型コロナウイルス感染症が落ち着いている時期で、現地を見ていただくことができ、本当に良かったと思っています。そのときに見た印象も思い浮かべながら、いろいろなお話を聞くことができました。

今回、皆様の議論、最後の講評をお聞きして、研究開発の成果をいかに社会に出していくかという重要性を改めて認識しました。今回のプロジェクトは、小林先生を始め、関係する皆様のご尽力で、TACMI コンソーシアムという、社会実装に向けた、ある意味、ゆりかごのようなものができたわけです。こういった形で、多くのかたがたが集うコンソーシアムができたのは、NEDO プロジェクトの中でも、そんなに多く事例がありません。そういう意味ではベストプラクティスという大げさかもしれませんが、NEDO プロジェクトの一つの出口のあり方として、こういった形があるというプラクティスになっていると考えています。皆さん、一人残らず、TACMI コンソーシアムの継続ということを言われていました。われわれとしても、産学が一緒につくる枠組みができたことによって、多くのアイデアが社会に出ていくことを期待したいと思っています。

【小林 PL】本日は長時間に渡り、ご審議をいただきありがとうございます。今回を含めて、このプロジェクトはこれまで非常に多くの方に支えられてきました。各評価委員、アドバイザーの先生がた、NEDO の前 PM の須永さん、現 PM 柿沼さん、NEDO の加藤さん、服部さん、熊谷さん、矢田さん、岩崎さん、IoT 推進部長の歴代、都築さん、安田さん、有馬さん、本当に皆さんに感謝しています。今、無事プロジェクトが終了できたという思いを持っています。本日の皆さんのご意見、誠にありがとうございました。改めて、TACMI というものを生み出したというのが、一つの大きな成果だったと思います。これを絶やすことなく、発展させていきなさいというご指示がありましたので、われわれは全力を挙げて、この活動を続けていきたいと思っていますので、皆さんのご支援を今後ともよろしくお願ひします。

【佐藤産業技術統括調査員】本日は1日、ご審議ありがとうございます。委員の先生がた、どうもありがとうございます。話を聞かせていただいて、非常に素晴らしい成果がプロジェクトで上がっているということが理解できました。実施者の皆様、またプロジェクトを推進されてきた NEDO の IoT 推進部の皆様に、敬意を表したいと思っています。

講評の中でも言われたように、パワーレーザの技術が、このプロジェクトによって大きく進んできました。その中で、日本の勝ち筋という話も出てきました。そういった部分の技術が進んできたことは、非常に素晴らしいと思います。プロジェクトは終了しますが、ある意味、ここがスタートになるかと思っています。実施者の中の企業の方には、ぜひ製品を事業化して、販売展開を進めてもらうようご尽力いただきたいと思っています。さらに、TACMI を使って、ユーザーの方が試験をするといった用

途展開も広がっていくと素晴らしいと思いますので、引き続き、よろしくお願いします。本日はありがとうございました。

【吉田分科会長】 それでは、以上で議題8を終了します。

9. 今後の予定

10. 閉会

配布資料

資料 1	研究評価委員会分科会の設置について
資料 2	研究評価委員会分科会の公開について
資料 3	研究評価委員会分科会における秘密情報の守秘と非公開資料の取り扱いについて
資料 4-1	NEDOにおける研究評価について
資料 4-2	評価項目・評価基準
資料 4-3	評点法の実施について
資料 4-4	評価コメント及び評点票
資料 4-5	評価報告書の構成について
資料 5	プロジェクトの概要説明資料（公開）
資料 6	プロジェクトの詳細説明資料（非公開）
資料 7-1	事業原簿（公開）
資料 7-2	事業原簿（非公開）
資料 8	評価スケジュール
番号なし	質問票と回答（公開及び非公開）

以上

「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」
 (事後評価) 分科会

質問票

資料番号 ・ご質問箇所	ご質問の内容	回答		委員氏名
		公開可/ 非公開	説明	
資料 5-1 P.8	本PJで構築したレーザー加工プラットフォーム/データベースは他事業(文科省、内閣府)と連携することで、相乗的により効果を発揮すると思えます。他府省との連携に関して取組等あればお教えてください。	公開可	レーザー加工プラットフォームから生み出されるデータは、文科省事業のQ-LEAPなどでもシミュレータを開発するために利用されたり、学理を探究するための基礎データとして重要な役割を担っています。また、多様の最先端のレーザー加工機を用いることで、SIPで構築すべき対象の選択や、自動で取得すべきパラメータの範囲に対して知見を与えています。さらに、市場調査をベースとしたロードマップは開発すべきシステムの方向性を与えており、新規プロジェクト提案などにも役立てられています。	岩崎委員
事業原簿【公開】III-172	「現在、樹脂メーカー、レーザーメーカーに成果を示し産業応用への展開を模索中」との記載がありますが、中赤外高出力レーザーに対する	公開可	OPIE'21にて項目3-8の本成果をブースで紹介。レーザー業界のたくさんの方々から展示ブースで質問をいただきました。(コロ	岩崎委員

	<p>ニーズや反応はどのような状況でしょうか。</p>		<p>ナ禍の中での開催だったが、問い合わせカードで 40 件以上の質問をいただきました)。一番多かった質問は今まで可視光領域しかレーザー加工をイメージしていなかったため、中赤外領域でテフロン(PTFE)など様々な樹脂加工がきれいに (高効率で) できているので非常に興味を持ったとの意見でありました。そのため、中赤外レーザーを利用した加工を是非検討してみたいとの話、および QCL を利用して見たいとの意見をいただきました。また、FEL では波長可変で分子振動を狙い撃ちできる加工ができるが、それを QCL でもできないかという話もいただきました。このような場を継続していけば、中赤外レーザーでの樹脂加工への応用などの様々な展開が見つかるのではないかと思います。</p>
--	-----------------------------	--	---

「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」
 (事後評価) 分科会

質問票

資料番号 ・ご質問箇所	ご質問の内容	回答		委員氏名
		公開可/ 非公開	説明	
7-1・I-5 2.2 実施の効果	本プロジェクト実施の効果に関する記述で「2030年にCO2換算で約655万トン/年が期待」と記述があるが、この量の有意性が不明に思った。この655万トン/年の意義について説明していただきたい。およそ10億トン/年の0.6%程度の意義は。	公開可	プロジェクト開始時に設定したCO2削減量655万トン、レーザー光源が次世代レーザーに置き換わったときに、エネルギー変換効率の改善などによる見込みから算出したの削減量です。政府目標では2030年度までにエネルギー起源の産業部門における目標の排出量は4億トンとしているため、波及効果はもう少し大きいと考えられます。さらに、レーザーの加工による材料の軽量化によるエネルギー使用量の抑制なども考慮すると我が国の排出量削減目標達成に一定の効果が見込めると考えています。	近藤委員
7-1・III-15 2-1-1	質問というより確認したいのであるが、「数多くの非線形光学結晶の中で・・・CLBOが唯一	公開可	産業製品として入手が可能で深紫外光発生が行える非線形光学結晶は、位相整合条件	近藤委員

	<p>の候補結晶となっている」とあるが唯一である理由は大型結晶へ成長できるものがこれしかないからか？</p>		<p>の厳しい制約から CsLiB₆O₁₀ (CLBO)、β-BaB₂O₄(BBO)、Li₂B₄O₇ (LB4)、KH₂PO₄ (KDP)、特殊な位相整合で LiB₃O₅ (LBO)に限られる。実用化されていない結晶では、これらに加えて3種類ほど候補が挙げられる。LB4は非線形光学定数が小さいため変換効率が極めて低く、BBO、KDP、LBOはCLBOに比べて深紫外領域でレーザー損傷耐性が著しく低いため、レーザー加工に必要な高出力光源への適用は困難となっている。そのため、本事業の目的に合致する候補結晶はCLBOに限られる。これまでLBOやBBOのような重量がキログラム級となる大型結晶成長の取り組みは少なく、本事業において高品質化と大型化の両立を目指した。</p>	
7-1・Ⅲ-22	<p>高品位なレーザー加工の実現には波長 300nm 以下の深紫外でピコ秒オーダーのパルスが良いということが知られているという記述があるが、レーザー加工業界で常識なのかもしれないが、論文等での公になっている記述はあるのか？Ⅲ-24の図Ⅲ2-1-2-1の目指すパラメータ領域をここに決める根拠は？</p>	公開	<p>プロジェクト開始前までにスペクトロニクスを中心に実施してきた1000件を超える加工データからその傾向がみられており、第80回、第83回レーザ加工学会講演会等で発表されています。また、今後の微細加工市場では10μm以下のシングルマイクロメータ加工への要求が高まっていることから、目指すパラメータ領域として質問票</p>	近藤委員

			の末尾に添付した別紙の図に示されるシングルマイクロメータ加工を効率良く実行する条件（スマート加工条件）を満たすよう設定し、実際の開発では波長 266nm パルス幅 10ps を目指しました。	
7-1・Ⅲ-28	図Ⅲ2-1-7の縦軸と横軸の物理量は何を指すのか？吸収パワーより増幅パワーが増えているのはパルス幅のせいかな？	公開	<p>当該図は出力増強のために追加した増幅器の増幅特性を示しています。縦軸は増幅器を通過した後の平均出力、横軸は増幅器内の増幅結晶が励起光を吸収したパワーを示しています。</p> <p>増幅結晶の吸収パワーが 135W の動作点において、増幅器に入力する増幅前のパワー 60W に増幅器から引き出された 80W が加算されて 140W になっていることを示しています。</p> <p>入力パワー 60W は増幅前から存在するベースとなりますので、差し引いていただき、増幅特性としては、吸収パワー 135W と増幅による増分 80W とで評価いただければと思います。</p>	近藤委員
7-1・Ⅲ-26 あたり	波長変換の効率を上げ、安定性を確保するために UV による自己加熱の影響を制御したことが極めて重要であったと理解したが、この制御	公開	<p>研究開発者の創意工夫や努力によるものでした。本制御の長期的に維持するためには複数のパラメータを有機的に制御する必要</p>	近藤委員

	についても AI による最適化を使ったということか？あるいは研究開発者の創意工夫や努力によるものだったのか？		があり、将来的には、このような制御過程にもディープラーニングや AI を用いられればと考えております。	
7-1・Ⅲ-27	試験終了時の 10,000 時間でビーム形状の劣化があったとあるが、これについては原因説明や対策はどのようなのか？	公開可	NEDO のポスト 5G の助成事業（令和 3 年採択）の研究開発の中で原因説明と対策を継続する計画としております。	近藤委員
7-1・Ⅲ-45	250 J レーザーのスケールが 1.8m × 20 m とあるが、他の装置もそうであるが実際には電源やチラーの設置が必要なはず。これらのスケール感はどうなのか？	公開可	LD 電源は、1.8 m × 20 m の設置面積に含まれています。その他の大きな装置として、チラーとヘリウムガス循環装置があります。それぞれのサイズと台数は以下の通りとなります。設置面積としては僅か 17% 程度の増加となり、これは LD 励起レーザーの効率がフラッシュランプ励起レーザーより高いことから小型であることを示しています。今後、レーザーの高効率化やレイアウトの最適化により 1 / 2 のる小型化を進めて参ります。 チラー：1.4m幅×0.9m奥行き D×1.5m高さ、2 台 ヘリウムガス循環装置：1.7m幅×1.1m奥行き×1.8m高さ、2 台	近藤委員
7-1・Ⅲ-47	目標にキロジュール級レーザー装置とあるが、これは 1 ビームがキロジュールという意味か？百ジュールではなくキロジュールが必要	公開可	その通り 1 ビームあたり 1 kJ です。 本事業にて 30 J 規模のパルスエネルギーを加工対象に大面積でレーザー照射するこ	近藤委員

	<p>な理由は？実用化にあたり、すなわち例えばピーニングのような用途を想定したときに設置面積は気にしなくて良いのか？</p>		<p>とにより、深さ 1 mm 以上にまで圧縮残留応力を付与できることが確認されました。この深部に及ぶレーザーピーニングは、鉄道や航空機などで高い疲労強度が求められる部品への応用が期待されています。まずは、繰り返し動作の 100 J レーザーの実現によりレーザーピーニング加工などの応用展開を進め、並行してレーザーの高効率化や設計の最適化により 100J レーザーの小型化の開発も行います。</p> <p>一方で、この先更に大面積の一括加工や超深部への圧縮残留応力層の形成が求められることを念頭に、1kJ レーザーの実現可能性を明らかにしておくことは重要だと考えております。更にキロジュールレーザーは、レーザー加工以外の多くの分野へ波及する可能性のある重要な技術となります。</p>	
7-1・Ⅲ-50	<p>図Ⅲ2-2-1-4(b) (図Ⅲ2-2-1-9(a)も) はビーム性能を示す重要な像だと思うが小さすぎて良いのか悪いのか不明である。結局 M2 はどれくらいなのか？</p>	公開可	<p>説明が不十分で大変申し訳ございません。M2 はまだ計測しておりません。現状の評価では、5 倍の回折限界エリア内の包含エネルギーが全パルスエネルギーの 72.1%となっており、可変ミラーの最適化により更なる向上を図ると共により分かり易い M2 値についても今後評価致したいと思いま</p>	近藤委員

			す。	
7-1・Ⅲ-50	図Ⅲ2-2-1-3の高エネルギーにおける計算値と実験値の差の発生の理由は何か？繰り返しを落としてやっても熱の問題なのか？	公開可	その通りです。低繰り返しにおいても、1kJで励起することにより瞬間的に発生する熱の影響はあると考えています。但し、250J増幅器内の熱の問題ではなく、入力光に用いた100J増幅器内で生じた熱が原因であると考えています。本試験では、100J増幅器内のLDの電流値を調整して、250J増幅器への入力エネルギーを増減させる方法で増幅試験を行いました。そのため、入力光のエネルギーの増大に伴い入力光の波面歪みが大きくなり、その結果250J増幅器内でのロスが増加し出力エネルギー計算との不一致が生じたと考察しています。100J増幅器も一定のLD電流値で稼働させた状態で、フロントエンド部からの出力光のエネルギーをフィルター等で増減させた実験を行い、原因を究明していきます。	近藤委員
7-1・Ⅲ-77	図Ⅲ2-3-1-2(c)はパルスレーンの間隔が徐々に詰まってきているように見えるが、そもそもこのレーザーの場合パルス間隔は何で決まるのか？CWよりパルス発振させることで尖頭値を増やせることは理解できるが、CW平均パワーに対して原理的にどの程度まで高くでき	公開可	ご質問ありがとうございます。パルス間隔は、1回のパルス発振で消費したキャリアが再び蓄積されるまでの時間で決まります。例えば、可飽和吸収領域の面積や可飽和吸収領域のキャリア寿命を調整し、可飽和吸収効果を増大することで、1回のパル	近藤委員

	<p>るのか？</p>	<p>ス発振で消費されるキャリアの数が増加し、パルス間隔が増大します。一方、レーザーへの注入電流を大きくするほど、キャリアの蓄積時間が短くなり、パルス間隔は減少します。具体的には、十分な可飽和吸収効果が得られるデバイスにおいては、自励パルスの間隔は、閾値電流付近で数 ns（活性層のキャリア寿命程度）であり、高電流注入時には 400~500 ps 程度となります。一方、パルス幅は、活性層の微分利得で主に決定され、開発したレーザーの場合は約 25~30ps 程度となります。従って、パルス幅とパルス間隔の比を考慮すると、自励パルス発振のピーク出力は CW 平均出力の約 20~50 倍となります。また、将来的には、活性層の微分利得をさらに向上させることで、~10 ps のパルス幅も実現出来ると考えられるため、自励パルス発振のピーク出力と CW 平均出力の比を最大 100 倍程度まで増大出来ることが期待されます。なお、レーザーの駆動にナノ秒程度のパルス幅の電源を用いることで、自励パルスのうちの最初の単一パルスを取り出すことが出来るため、パルス電源の周期でパルス間隔を自由</p>	
--	-------------	---	--

			に変えることも可能です。	
7-1・Ⅲ-89	ピーク出力が kW 級に達することがレーザーエネルギー密度 0.2-2 J/cm ² に相当とあり、それが材料の加工閾値を超えることという記述があるが、もう少し詳細に説明が欲しい。レーザースポット径とパルス幅を仮定する必要があるし、照射時間の設定もわからない。	公開	ご質問ありがとうございます。レーザーエネルギー密度の計算においては、単一の短パルスを、M ² で決まるスポット径まで集光して、材料に照射した場合を想定しております。例えば、レーザーのピーク出力を 1~2 kW と仮定し、現在得られているパルス幅 (30 ps) で、直径 2~4 μm まで集光することを仮定しますと、単一パルスのエネルギー密度が 0.24~1.9 J/cm ² に相当します。また、開発した短パルスフォトリック結晶レーザーは、高繰返し (GHz) という特長がありますので、それに比例して積算エネルギー密度を増大することが出来ます。さらに、レーザーの駆動条件 (電流注入時間等) を調整することで、照射するパルス数を用途に応じて自在に制御することが出来ます。	近藤委員
7-1・Ⅲ-143	この超高速利得スイッチ LD をシードとするレーザー加工用光源の開発においてファブレスで実施することが研究開発の進め方としての特徴を示そうとされていたと思うが、結局何がもっとも困難であったのか？大学においてファブレスでものづくりを行うために何が最	公開	はい。そのとおりです。 本プロジェクトで、新しい LD の開発や小規模生産のファブレス方式での実施が、実際に可能であり有効だということを実証しました。 通常の大学の研究体制でファブレス型の開	近藤委員

	<p>も改善すべき点だったのか？</p>	<p>発を行う最大の困難は、スケジュール管理と進捗把握、発注時の仕様・納期の交渉や検品など、周辺の業務量が予想していた以上に非常に大きいことだと痛感しました。スケジュール管理が不十分だと、各工程の完了と次の工程の発注の間の時間遅延が大きくなり、進捗がどんどん遅れて行きます。コロナ禍の影響で、ファブのクリーンルームの閉鎖期間や出勤率制限などがあり、納期が長期化したので、スケジュール管理は特に大変でした。</p> <p>また、後段加工ファブで失敗が起きたときに、初段加工で費やしたコストの賠償をそのファブに求めることはできないので、我々自身の負担でやり直す必要がありました。それを見越して最初から予備を作製しておくコストが増加しました。リスクとコストの妥協点を上手く見極めるのが難しいことだと感じました。</p> <p>改善した点は、民間企業の熟練技術者を見出して、スケジュール管理・進捗把握・発注仕様書作成・納期交渉などの事務・業務を業務委託して手伝って頂くことができました。私たち自身も経験を積んだことでスケ</p>	
--	----------------------	--	--

			ジュールの予測精度やリスクとコストの妥協点の見極めも上手になったと思います。これらが、改善点だと思います。	
7-1・Ⅲ-166	図Ⅲ2-3-8-4 に赤外と 532nm の加工痕の比較があり赤外が良いことを印象付けているが、レーザー照射条件をどのように統一して比較しているのか？あるいは 532 の場合はどう頑張ってもこの程度しかできないという意味か？	公開可	二つの赤外波長は 8.3 および 8.7 μm であり、波長を変えても（アンジュレータの間隔を変化させます）レーザー強度（J/マイクロパルス）は誤差範囲内で変化しません。ビームパターンについても同様です。測定直前にパワーメーターでレーザー強度がほぼ同じであることを確認していますが、その他の補正等は特に行っていません。また YAG レーザー(532 nm)の場合はレーザー強度を上げていっても、赤外のようなきれいで表面がスムーズな穿孔は全く実現できません。	近藤委員
7-1・Ⅲ-168	量子カスケードレーザーのところで中空ファイバー内径が大きいので何もしなければビーム不均一が出るが振動をあたえることで図Ⅲ2-3-8-8 左のような均一パターンが得られたとあるが、振動させなければこれがどうなるのか？振動させても 1 発 1 発に対してはやはりポインティングが揺れているのでは？	公開可	均一パターンは、モードスクランブルの効果によるもので、ご指摘の通り 1 発 1 発に対してはポインティングが揺れています。ただし、レーザー照射による光熱加工の相互作用の時定数より速い揺れであるため、加工精度や仕上がりには影響しないことを確認しております。	近藤委員
7-1・Ⅲ-170	図Ⅲ2-3-8-10 に 7.7 μm による 5 種の樹脂に対する加工例が示されているが、図Ⅲ2-3-8-1 では	公開可	理想的には各樹脂の最も吸収の強い波長で QCL をそれぞれ作成し実験を行うことが	近藤委員

	エネルギー準位が全てマッチしていないが、共鳴をはずした効果をねらったということか？		最良の方法ではありますが、2年強の期間と限られた予算で行うことは無理でありました。そのため、第1段階として並行して行ったFELの実験、CO ₂ レーザーおよび完全にQCLと波長が一致していない樹脂で傾向をつかみその原理実証をおこないました。第2段階として最も困難で同時に効果的に行えると予想したPTFEに着目し波長の一致したQCLで高効率なプロセス実験を検証しました。	
7-1・Ⅲ-203	ここの記述は重要で、結局さまざまなアプローチで物質表面と強いレーザー光の相互作用について理論的な再現を試みるものの、現状の計算機の能力では不可能という結論なのか？もしそうであれば学理による加工最適化は、計算機の能力により不可能で、AIによる学習で最適化することに集中すべしということか？	公開可	AIによる学習でレーザー加工最適化へと集中するには、そもそも実験及び第一原理計算による信頼性の高い大量のデータをAI学習のために提供することが必要となります。そのためにも現状の計算機の能力向上が必須となり「ポスト富岳」の挑戦は継続すべきと考えます。一方学理による加工最適化のために必要な問題サイズは加工対象物質の特徴にも依存しますが必ずしも実験スケール丸ごとを再現するサイズではないと考えますので、現状の計算機の次世代機種あたりで実験を再現するシミュレーションに手が届くと期待しています。今後は物理法則に基づく演繹的手段とAIを含	近藤委員

			むデータサイエンスによる回帰的手段を相補的に用いることで、学理によるレーザー加工最適化を達成すべきと考え、データサイエンスのおかげで新たな機構解明(AI for Physics)に至ることもあると期待します。	
7-1・IV-250	レーザーの 10 Hz 以上の高繰り返し試験は 2021 年度に行うとあるが、結果はどうだったのか？まだであればいつ実施するのか？先述では 1 Hz、5Hz で試験しているので見通を得ていると書いていたと思うが、実際に倍、一桁の違いは極めて大きいと思っている。	公開可	これまでに 50 J×10 Hz の動作を確認しております。この試験では、レーザー媒質に対し 100 J×10 Hz 出力に必要な約 1 kJ×10 Hz の励起を行っておりますため、後は種光のエネルギーを増加させるだけで 100 J×10 Hz の実証試験を行える状況です。しかし、100 J×10 Hz 試験を行うことで予期せぬダメージの発生も懸念されることから、ユーザー向けの加工試験とスケジュールを調整し 2022 年 3 月までに 100 J×10 Hz を達成します。	近藤委員
7-1・IV-273	「TACMI サジェスト」という言葉はとても良いと思う。一方で企業側だけではなくアカデミアから「TACMI サジェスト」で大変研究が進んだという事例は TACMI にとってどうなのか？	公開可	サジェストは TACMI 参画企業に実際に利用して頂いています。企業からのリクエストに基づいてサジェストの解析や AI の機能向上を図るために、アカデミア側の研究も促進するというスパイラルを期待しています。現在、このループが実際に起こりつつあります	近藤委員

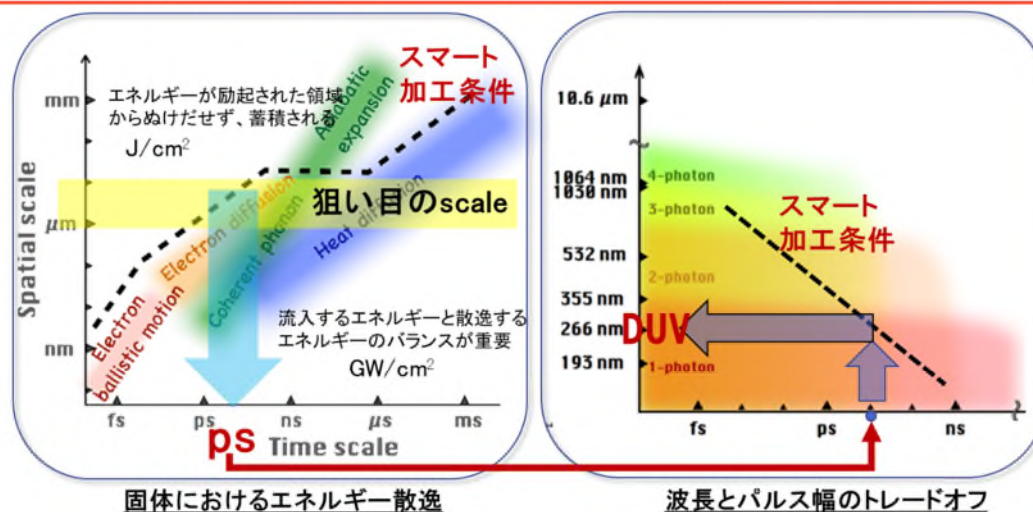
			<p>アカデミア側の研究促進により加工の学理解明がなされた暁には、学理シミュレーターによりあらゆる材料であらゆる加工の最適加工条件を求められるはずであり、TACMIにとっても非常に有益な事例です。</p>	
7-1・IV-274	<p>「レーザー加工データベースはクリティカルボリュームを超える」日がいつかくると思うのであるが、そのためには何が必要なのか？また、それはいつ頃実現すると予測されるのか？早期実現のためにどんなことを行えば良いと思われるのか？実際にデータベースはいろいろな関係者から情報提供があつていいと考えられるが、TACMIが整理した形式になっている必要があると思われるので、その辺りの整理やデータベース登録の働きかけについてコメント願いたい。</p>	公開	<p>クリティカルボリュームを超えるためには、良質なデータを大量に取得できる態勢が必要です。我々は、レーザー加工ロードマップに基づいてニーズのある材料と加工を選定し、レーザー加工プラットフォームで供される本プロジェクト開発装置で実際に加工実験を実施するという、ニーズに基づく良質なデータを取得できる態勢を整えました。5年以内には、レーザー加工データベースが加工の最適条件探索に欠かせないツールとして求心力を発揮するまでに成長させることを目指しています。さらに前倒しで実現するために、装置のデジタル化を推進し、自動で効率的にデータを取得できるよう整備を進めています。</p> <p>ご指摘の通り、データフォーマットの策定はレーザー加工データベース構築において重要な課題でした。多様な加工における加工条件と加工結果を記述できるよう、冗長</p>	近藤委員

			性を担保した共通フォーマットを作成しました。さらに、エクセル形式での記入ができるようにするなど使い勝手についても改善を進めています。	
--	--	--	--	--

何故 DUV・ピコ秒なのか？

DUV・ピコ秒

ターゲット市場で求められるシングルマイクロメータ加工に適した波長とパルス幅



固体におけるエネルギー散逸

波長とパルス幅のトレードオフ

全体計画において、深紫外・ピコ秒領域の加工を担当

ボトルネック: 高品位加工と実用的な生産性(=出力)を併せ持つ装置がない

29

図は小林洋平, 趙智剛, 谷俊太郎:OPTRONICS, No.10 (2016) 60 より抜粋

補足資料 1

(第 3 回アドバイザー委員会資料)

「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」
(事後評価) 分科会

質問票

資料番号 ・ご質問箇所	ご質問の内容	回答		委員氏名
		公開可/ 非公開	説明	
5-1 p.11	上記※に関連して、現状、加工機は日本製であってもそれに搭載されているレーザーは海外製ということも多い。これを日本製に置き換えて売り上げを伸ばしていくために、本プロジェクトの成果をどのように生かしていくのか、具体的な方策を教えてください。 ※非公開資料<5-1 p.11>への質問	公開可	現在レーザー加工機には1ミクロン帯の海外製ファイバーレーザーが利用されることが多いです。本プロジェクトでは日本が得意とする短波長や短パルスに狙いを定めました。これらは、半導体の超微細加工やEV用の銅の溶接などに有用なレーザーであり、本成果はこれらの応用に興味がある企業とTACMIコンソーシアムを通じてマッチングが進んでいます。	庄司委員
6-1 p.18-19	技術ロードマップの原案を20項目について策定したとのことだが、各項目についてどの程度の内容が盛り込まれているのか。	公開可	ロードマップでは、2020年(プロジェクト終了時)、2025年(5年後)、2030年(10年後)における市場規模予測値および加工目標値とそれらを実現するためのレーザー仕様目標値が記載されています。具体的には、加工目標値では加工速度(m/min),	庄司委員

			<p>材料厚さ(mm), 加工粗さ(μm)等、レーザースペックでは、出力(W)、波長(nm)、パルス幅(s)、繰り返し周波数(Hz)等を各年代において記しています。また、比較のため代表的な既存加工技術の上記に対する典型値(加工速度, 材料厚さ, 加工粗さ等)を併記しています。</p> <p>これらの数値は、ユーザー企業へヒアリング、TACMI 会員へのアンケートや OPIE 来場者アンケートの結果を基に決定しています。</p>	
7-1 p.III-61-63, III-65-67	レーザーピーニングの実験結果, および分析評価結果もレーザー加工データベースのデータとして取り込んでいるのか.	公開	<p>取り込んでおります。具体的にはナノ秒レーザー照射時の表面状態の計測結果を提供しました。数 10 ジュールクラスによるレーザーピーニングの実験結果についても今後データベースへ取り込んでいく予定です。</p> <p>その他、現在、TACMI コンソーシアムの会員企業様からの利用が開始されております。レーザーパラメータと分析評価結果の加工データベースへの提供可否についてはユーザー企業様の意向も考慮しています。</p>	庄司委員
7-1 p.III-135	「量子ドットレーザーの, 同一波長量子井戸レーザーからの優位性」とは具体的に何か.	公開	<p>1.1μm 帯波長域において、量子ドットレーザーの方が、量子井戸レーザーと比較して最大出力値が 1.3 倍程度高く、効率も高い</p>	庄司委員

			ことを実験的に示したことが対応しております。	
7-1 p.146, 152	ファブリペロー型 LD に加えて DFB-LD にも加工用光源として取り組んだ目的は何か。	公開可	2つあります。1つは、利得スイッチで直接発生したパルス幅を、後段でスペクトル切出し (S. Chen, A. Sato, T. Ito, M. Yoshita, H. Akiyama, H. Yokoyama, "Sub-5-ps optical pulse generation from a 1.55- μ m distributed-feedback laser diode with nanosecond electric pulse excitation and spectral filtering", Optics Express. 20, 24843 (2012)) することで半減させる手法があり、その適用を試すためです。もう1つは、後段の増幅の都合で、例えば 1064nm など、1nm 以下の精度で波長を制御したい一部ユーザーの市場ニーズに対応したかったからです。	庄司委員
7-1 p.III-166	図 III 2-3-8-4 の左の 2 つの図の結果が得られたときの FEL 照射パワーはいくらか。また、写真の穴径はいくらか。	公開可	穴の直径 (図で黄色く映っている外周部分) はいずれも $\sim 200 \mu\text{m}$ です。FEL レーザーフルーエンスは $\sim 0.15 \text{ J/cm}^2$ です。ちなみに右端の 532 nm のフルーエンスは $> 50 \text{ J/cm}^2$ で、FEL の場合に比べ約 100 倍ものパワーをつぎ込んでいるにもかかわらず、表面盛り上がりの無いきれいな円形の穴をあけることはできません。(上記 7-1・III-166 の質問に関連して)	庄司委員

「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」
 (事後評価) 分科会

質問票

資料番号 ・ご質問箇所	ご質問の内容	回答		委員氏名
		公開可/ 非公開	説明	
資料 5-1(p14)、資料 5-2(p2)、資料 7-1 表 II 1-2 他	項目 1:目標を確認したい。「平均”光出力 50W の深紫外…”と「光パワー 50W”以上”の深紫外 …」とあるが、どちらが正しい表記か。	公開可	「光パワー」の表現ですと、ピークパワーとの混同が生じますので 目標は「平均光出力 50W 超」がより正しい表記となります。	水谷委員
資料 5-1(p14) 及び資料 5-2(p2)	項目 2: kJ 化への準備は他資料にも説明あり理解したつもりですが、500J を“想定”した 250J の開発というのは、具体例にどのようなことが想定されたのか。	公開可	当初計画では、500 J レーザーの実証を基に 1 kJ レーザーの実現可能性を確認することを目標としていましたが、中間評価後に計画が見直され、より実証し易い 250 J レーザーへ目標が変更されました。但し、1kJ へのスケール拡大への道筋は残すことは重要視された結果です。	水谷委員
資料 5-1(p5) 最下段、(p17)	青色レーザーの他には、本プロジェクトの期間中に、プロジェクトの目標や獲得しようとした市場競争力に影響を与えるような海外での成果はなか	公開可	各研究開発項目毎に、公開可能情報としての海外の状況は以下のように把握しています。	水谷委員

	<p>ったという理解でよいか。</p>	<p><項目 2 > 我々の目標に影響を与える海外での成果はありませんでした。 我々のレーザー出力は、プロジェクト前は 50J 程度でしたが本プロジェクトにて中間評価時に 100J 出力を達成し世界に追い付き、最終評価時に 250J を出力し世界最高峰に到達することができました。 パルス繰り返し周波数においても、2022 年 3 月までに 100 J×10 Hz を実証し、250 J ×10 Hz 動作を 1 年以内に達成します。</p> <p><項目 3-1 > ご質問ありがとうございます。項目 3-1 では、プロジェクトの推進により、フォトリソグラフィ用結晶レーザーの 100 ワット超の高ピーク出力動作（短パルス化）および青色帯域でのワット級・高ビーム品質動作（短波長化）を実現しました。これらの成果は、本プロジェクト期間中の国内外の他の半導体レーザーと比較して、10～100 倍の出力（輝度）に相当しており、圧倒的な優位性を有すると位置づけられます。つまり、本プロジェクト期間中に、プロジェクトの目標や獲得しようとした市場競争力に影響を与え</p>	
--	---------------------	---	--

		<p>るような海外の成果はなかったと言えます。</p> <p><項目 3-8> 本プロジェクト期間の最後に 2W 級 QCL 光源モジュールの開発に関するプレスリリースを行いました。プロジェクト終了間際のリリースであったため、期間中に海外からの具体的な反応は得られませんでした。プロジェクト終了後には加工試験の問合せなどが寄越されています。今後この QCL が国内外への市場へ影響を及ぼすことを期待しています。</p> <p><項目 5-1> 海外での成果として、高ビーム品質と高出力を両立させる GaN レーザー素子技術が大変注目された事があります。2020 年 9 月開催の米国電気電子学会 (IEEE) Photonics Conference において本技術が招待講演に選択されました。招待講演は顕著な技術に対して選ばれるものですので、この技術力認知は市場競争力を向上させます。</p> <p><項目 5-3> 我々の知る限り、本プロジェクトの期間中では、</p>	
--	--	---	--

			プロジェクト外の目標や獲得しようとした市場競争力に影響を与えるような海外での成果は有りませんでした。CMCの斜め穴加工では、CO2レーザーを使ったパーカッション加工やウォータージェット加工等がありますが、前者は熱によりファイバ繊維の崩れ等が発生すること、後者は加工後の液体の除去方法や高圧によるサンプルへの影響等がある、等各方式共に課題を抱えています。	
非公開資料 6-2、6-3、6-5 等	ユーザー側として、装置の安定性が気になるための質問です。資料 6-2(p5、p17)には課題やそれに対する今後の取り組みが、また資料 7-1 III-229 にも安定性に関する記述あるが、一方、資料 6-3 や 6-5 には“実現”という言葉はあるものの安定性に関する言及がないのは、確認されており課題ではないから、という素直な解釈でよいか。資料作成者がそれぞれのテーマで違うと思われるので、念の為確認致したく。	公開可	<項目 3-1 / 資料 6-5> ご質問ありがとうございます。左記の「装置の安定性」という言葉を「作製光源の性能の安定性」と解釈いたしますと、開発したフォトニック結晶レーザーは、同じ構造を複数回作製したときにも、毎回ほぼ設計通りの構造で作製出来ることを確認しております。より詳細な歩留まりの評価等につきましては、今後、連携企業と協力しながら定量的に評価したいと考えております。	水谷委員
資料 7-1 III-26 下から 3 行目	<質問ではありません、TYPO かと> 出力は低い。	公開可	ご指摘のとおり、以下に修正させていただきます。 誤：低い 正：低い	水谷委員

資料 7-1 III-64	<p>転移密度モデルが、内部層での残留応力分布を良く捉えているとの説明だが、比較的表層にしか応力が付加されないショットピーニングでもそれなりに疲労寿命向上への寄与があることからすると、表層部こそ応力分布が一致しないと妥当なモデルとは言えないのではないか。</p>	公開可	<p>レーザーピーニングの効果を模擬する上では妥当なモデルと考えております。その理由として、この転位密度モデルは、材料中に伝播する衝撃波による残留応力生成のメカニズムを表したものです。ショットピーニングは表面をゆっくりと塑性変形させますが、レーザーでは極短時間大きな圧力が付加されます。レーザーピーニングでは、表面の塑性変形が比較的少なく、表面の塑性変形を入れるショットピーニングとは異なる残留応力生成のメカニズムが存在することを意味します。表面での膨張は疲労強度にとっては好ましくないため、レーザーピーニングでは犠牲層や水中照射など、表面を膨張させないための処置が行われます。この表面の膨張は本モデルとは別の熱的効果によるものであり、現状の計算では考慮されていません。</p>	水谷委員
資料 7-1 III-138-139	<p>高冷却パッケージの開発と記述あるが、出力飽和を生じなかったという結果のみで、課題をどのように解決したのか不明なので説明して頂きたい。</p>	公開可	<p>出力密度 $> 10\text{W}/\text{mm}^2$ を想定してパッケージ構造を検討し、活性層温度上昇 20K 以下の熱設計を行いました。当該構造における応力シミュレーション等を活用して、量子ドットレーザーバーの接合においてボイド発生や劣化のないハンダプロセスを確立しま</p>	水谷委員

			した。	
資料 7-1 III-234	CMC への穴あけ加工について、加工速度に関する言及はあるが、表面粗さや径のバラつきなどは依頼側の要求を満足できるものだったのか？	公開可	依頼を受けた第 1 次評価において、表面粗さや径のバラツキ等は依頼側の要求を満足結果が得られました。	水谷委員

「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」
 (事後評価) 分科会

質問票

資料番号・質問箇所	質問の内容	回答		委員名
		公開可/非公開	説明	
資料7-1・III-45	表III2-2-1-1ベンチマーク表のデータはプロジェクト終了時のものでしょうか？開始時のものであった場合、現在のベンチマークはどうなっていますか？	公開可	プロジェクト終了時のものになります。 追加させて頂けるのであれば、英国研究機関のYb:YAGセラミクスによるエネルギー150J出力のレーザーがあります。 大きさが60m2と大きく、250Jを出力する我々のレーザーの1.6倍のシステムとなります。用途は学術研究となります。	樽井委員
資料6-5・P.20	一番左の枠のセンシングですがレーザーをどう活用するということでしょうか？開発されたレーザー発振機を計測機として商品に使うということでしょうか？安全性（アイセーフとありますが）の確保とコスト成立性のめどを教えてください。	公開可	ご質問ありがとうございます。ご質問の通り、開発した短パルスフォトリック結晶レーザーを、Time of Flight (ToF)方式（短パルスを物体に照射して返ってくるまでの時間を計測することで距離を測る方式）の測距センサとして応用することを検討しております。本プロジェクトで開発したレーザーは、従来のToFセンサで用いられるパルス半導体レーザー（パルス幅～ns）と比べて、パルス幅を1/10以下に出来、結果として、同じピークパワーに対して、パルスエネルギーを1/10以下にすることが出来、アイセーフ条件が十分に確保されるため、従来よりピーク出力を高めて、より長距離の測距を行うことが可能です。コストに関しても、フォトリック結晶レーザーの高指向性によって、従来のToFセンサで必要であったビーム成型用の光学素子（レンズ等）が不要になるため、従来よりも低コスト化が実現すると期待されます。既に、その実用化に向けて、ユーザー企業（LiDARメーカー、モバイルメーカー等）との連携を開始しています。	樽井委員

<p>資料6-1・P.16</p>	<p>データベースについて質問です。自動車の車体で使用している鉄やアルミは自動車メーカ（トヨタさん、ホンダさん、日産など）毎に添加元素の仕様などが少しずつ異なっていて相称としては例えば980MPa級のハイテンとか6xxx系アルミ板など同じものように呼んでいますが同じではありません。材料の高性能化にともない溶接もどんどん難しくなっており、溶接条件のノウハウ化も重要な企業の競争力になってしまっています。そのため、材料情報も溶接条件情報も秘匿扱いとなり複数企業にまたがったデータベース化が困難な状況です。今回のデータベース化の対象材料、対象加工、対象企業においてはそのような課題はないという認識であってますか。もしも過去に同様の課題があって、それを打破した実績があるとすればどのような取り組みであったか、またそれは日本のいろいろな業種に適用可能な方策か教えてください。</p>	<p>公開可</p>	<p>ご指摘の通り、実際の製品に使用される材料情報・加工条件は秘匿情報に相当するかと思います。一方、これまで本プロジェクトを通して様々なユーザー様との議論を重ねてきた結果、秘匿とされた情報の中にも実は公知であったり、他のユーザー様も同様に知っているという例があることもわかってきました。そうした秘匿しても利益を生み出さない情報の共有や、市販の一般的な材料を用いた標準サンプルを対象とした加工データを大量に蓄積することで、共有データ活用の機運の醸成を進め協調領域の底上げを目指してまいります。もちろん、一朝一夕に実現できることではありません。レーザー加工プラットフォームやレーザー加工ロードマップと連携し、価値あるデータを蓄積することで求心力を高めて参りたいと考えています。</p> <p>標準サンプルと各社秘匿の材料との違いは各社が秘伝の知識として持っているかと推測しています。</p> <p>TACMIでは標準サンプルについてデータをとり揃えることで、各社はそれを参照して独自の材料ではどうなるかを推定し、競争領域に用いることができるとの考えです。そのために、まずは、公開できる標準サンプルのデータベースを充実させ、それを起点として、個々の企業とTACMIとの間のクローズド戦略に展開するという戦略です。</p>	<p>樽井委員</p>
-------------------	---	------------	---	-------------

「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」
 (事後評価) 分科会

質問票

資料番号 ・ご質問箇所	ご質問の内容	回答		委員氏名
		公開可/ 非公開	説明	
資料 5-1 No. 21 資料 5-2 No. 17	ニュースリリースは国民の理解を得るために重要と考えます。21 件は立派だと思います。番号①～⑤-4 までの 13 のタイトル毎のリリース件数を教えて下さい。	公開可	<p>ニュースリリースの項目毎の件数は以下の通りです。(リリースタイトル一覧を別紙に添付します。)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・項目 1 : 4 件 ・項目 2 : 3 件 ・項目 3-1 : 2 件 ・項目 4 : 1 件 ・項目 5-1 : 1 件 ・項目 5-4 : 5 件 ・項目共通 1 (プロジェクト開始) : 1 件 ・項目共通 2 (TACMI コンソーシアム) : 2 件 ・項目共通 3 (OPIE 出展) : 1 件 ・項目共通 4 (柏 II プラットフォーム、項目 1、2、4、5-1～5-4) : 1 件 	吉田委員

資料番号 ・ご質問箇所	ご質問の内容	回答		委員氏名
		公開可/ 非公開	説明	
資料 7-1 Ⅲ-49	資料 6-5 によりますと、パルス繰り返し周波数は 0.2Hz となっています。このレーザーをこのまま産業用途に利用しても十分なスループットを得られる用途もあるかと思いますが、高繰り返し化が必要ではないかと思えます。見通しを教えてください。	公開可	現在、50 J×10 Hz の動作を確認しております。2022 年 3 月までに 100 J×10 Hz を実証し、250 J×10 Hz 動作を 1 年以内に達成します。	吉田委員
資料 7-1 Ⅲ-71、段落 (A)	当初の予想より 3 桁短パルス化できたことは素晴らしいですが、当初の見積もりが不正確であったとも言えます。一方でこのことが新しい知見となったとも言えるのですが、それに関して記載されていません。この点に関して報告すべきです。また、知財化されていますか？ その知見は国民の財産として正しく運用されるように知財に組み込まれ共有されていますか？	公開可	ご質問ありがとうございます。資料 7-1 に記載した通り、本プロジェクトでは、当初、パルス幅をサブナノ秒、またピークパワーを～10W と設定しておりました。中間評価までに、これらの目標を満たす成果 (100ps パルス幅 (=サブナノ秒)、8W ピークパワー) を実現したため、最終目標として、ピーク出力を 1 桁増大させ、100W 級に設定しました。また、それに応じて、パルス幅も、100ps を切り、数 10ps になるようになっています。これらの知見に関しては、今回の成果報告書にも、理論解析手法およびそれにより予測されるピークパワーやパルス幅の情報も記しておりました。本プロジェクトを通じて、それと対応した実験成果が得られたと思っています。そのことが伝わり	吉田委員

			にくい記述になっていたかも知れませんが、その点を、深く、お詫び致します。以上の学術的な研究成果（ノウハウに関わる部分を除く）に関しては、2021年4月号のNature Photonicsに報告しました。また、知財化をも完了しております。	
--	--	--	--	--

資料番号 ・ご質問箇所	ご質問の内容	回答		委員氏名
		公開可/ 非公開	説明	
資料 7-1 Ⅲ-105(6)①	素晴らしい成果だと思えます。しかしながら重要なことは「できた」だけではなく、将来の価格見通しだと思えます。100万円/2in からどの程度に低価格化可能ですか。その根拠は？	公開可	AIN 単結晶基板を使う LD 構造は現状では価格は高く、今後の AIN 基板の低価格化を待たなければなりません。これは予測はされているものの現状では難しい状況です。我々は、その現状を鑑み、安価なサファイア基板上の LD 構造作製を行なっております。サファイア基板上の LD は、量産とともに LED と同等に低価格化できると考えております。	吉田委員

資料番号 ・ご質問箇所	ご質問の内容	回答		委員氏名
		公開可/ 非公開	説明	
資料 7-1 Ⅲ-141(6)	ここで言われている「競争力」について具体的に説明をして下さい。	公開可	性能（効率等）と価格の両面で優位性を発揮したいと考えております。	吉田委員
資料 7-1 Ⅲ-144、下 2 行目	海外のファブも利用されていますが、知財流出防止の手段について具体的に教えて下さい。（NDA など実質的に役に立たないことはご承知だと思います）	公開可	最終的なデバイス性能を実現するためには、ノウハウ A、B、C など複数の必須技術要素があるので、海外ファブを用いる際には複数の必須技術要素を含まないように工程を分割して発注しました。 1 つの工程に対して複数のファブを並列に	吉田委員

			<p>使う（すなわち、第2・第3オプションを持つ）ことで、最終デバイス作製にどこのファブが実際に使われたのかを秘匿できました。複数ファブを並列に使うことは、もともとはファブの比較・選定の目的で実施しました。コストはかかりましたが、このことが、知財流出対策や、コロナ禍での供給中断や遅延のバックアップ対策の意味合いでも有効なことだと気づきました。</p>	
<p>資料 7-1 Ⅲ-145、下 2 行目</p>	<p>この課題は、結果的にファブレスの弱点が露呈しています。実施者は改善できますか？</p>	<p>公開</p>	<p>ファブレス開発試作は、多くの外部ファブを使うので、コロナ禍の影響を強く受け、大きな遅延が発生しました。確かにそこは弱点でした。一方、1か所で垂直統合式に開発試作を行うことにも、コロナ禍での弱点があります。例えば東京隣接地域では非常事態宣言が長期化し大学内活動制限も長期化しています。故障時に外部エンジニアを呼ぶことができないなど修理が長期化する場面も起きています。開発に1か所の設備のみを用いているとそのようなリスクがあります。ファブレス方式は、地域的に分散したファブを用いたことで有利であった側面があります。</p> <p>改善策は、完全なファブレスではなく自家</p>	<p>吉田委員</p>

			開発ファブと外部ファブ群を組み合わせたハイブリッド形態（いわゆるファブライト体制）をもつこと、各工程に第2・第3オプションを持つことだと考えます。	
資料 7-1 Ⅲ-146 表中の ②の成果	ファイバアンプの自作ごときは成果とは言えません。どのような工夫を持った(新規な)ファイバアンプを作って最適化したのか、それを記載すべきです。	公開	<p>背景説明が必要です。表中の開発項目②は、課題提案時には存在していませんでしたが、委託契約時に必須の項目として要請されて追加した開発項目です。本チームは、半導体レーザーが専門で、ファイバー増幅器は専門外でした。その本チームが、この項目を要請された趣旨は、「極端に弱いあるいは不安定な半導体レーザーを開発しても、シード光源にならない。少なくともファイバ・プリアンプで増幅して、市販のファイバアンプなどに接続できるところまではやってほしい。目標として、加工用光源として使えることを示してほしい。」ということでした。実施者として我々もこの趣旨に賛同し、開発項目に追加しました。</p> <p>我々はこの課題を達成するために、本 NEDO プロ内のファイバアンプの専門家に相談して（非公開の）設計をご教示頂き、作製・実験をし、要請のうちの中核部のところを実施したという次第です。</p>	吉田委員

			<p>上述のとおりなので、この部分は私たちのオリジナルな研究成果として主張している部分ではありません。要請事項への対応を果たしたことを報告する目的で記載しました。Yb ドープファイバの種類や長さを変えるなど仕様の最適化はまだしていません。ファイバアンプの設計や詳細や工夫などは、他者の技術なので私たちからは公開しておりません。ご理解ください。</p>	
資料 7-1 Ⅲ-146、①	<p>ファイバ結合時に 800mW から 0.09mW まで約 40dB の損失があります。この原因について説明がありません。導波路設計ができていなかったのかも知れませんが、理由並びに直ちにフィードバックを行わなかった理由を教えてください。</p>	公開可	<p>ファイバー結合前の LD 端面での平均出力は 0.65mW でした。ファイバー結合後で 0.09mW でした。結合効率は 14% でした。</p>	吉田委員
資料 7-1 Ⅲ-146、下 4 行目	<p>なぜ 100MHz なのか。この繰り返し周波数で加工を行えば CW と変わらない結果になる可能性が高いと考えます。パルスをピックアップしても良いかも知れませんが、平均出力で議論が進められています。パルスエネルギーやパルスのピーク出力で議論すべきです。まとめ直すべきでは無いでしょうか。</p>	公開可	<p>開発した LD 素子自体の増幅前の評価は、ほとんど、計測に適した 100MHz で行いました。前置増幅前後の比較も主に 100MHz で実施しました。繰り返しを下げた実験については 10MHz までを行いました。パルス幅に変化は殆ど無く、パルスエネルギーやピーク出力は 100MHz のときよりも同様にやや高めの値になりました。ご指摘の通り、加工で必要な繰り返しは</p>	吉田委員

			<p>1MHz 以下です。そのため追加で1－2桁の間引きと増幅が必要ですが、そこまでは期間内に実施できませんでした。</p> <p>主に平均出力で表記をしたのはそれが直接測定された測定値だからです。測定されたパルス幅と繰り返しから、必要に応じて、パルスのピーク出力を換算して示す形をとりました。</p>	
資料 7-1 Ⅲ-147	<p>実施者は「遅延は生じたものの」問題は生じなかったと考えているように読めます。他の部分の記載と矛盾していますが、遅延自体がトラブルではないのでしょうか。ご自身の研究室で開発を実施されていればこの遅延は無かった(少なかった)のでは無いのでしょうか。</p>	公開可	<p>「問題は生じなかった」とは考えていません。ご指摘の通り、コロナ禍による遅延自体が大きな問題だったと認識しています。該当箇所では、「遅延は生じたものの、中断などには陥らなかった」ということのみを述べました。</p> <p>全てを内製する体制を持てば、確かにコロナ禍の影響はより少なく、遅延も生じにくかった可能性があります。しかし、逆に、東京隣接地域では非常事態宣言が長期化し大学内の活動制限も長期だったので遅延が拡大していた可能性もあります。1か所での開発の場合は、膨大な初期設備導入や立上エフォート、修理・メンテナンスも必要で、コロナ禍の影響によりそれらの遅延や中断も予想されます。トータルでいずれの方式</p>	吉田委員

			が遅延・リスクが少ないかは一概には言えません。	
資料 7-1 Ⅲ-148、12 行 目	入力 0.09mW、平均出力 5.2mW は、利得に換算すると 17.6dB に過ぎません。小信号域にもかかわらず低利得となった原因を明確にしてください。	公 開 可	小信号域の前置増幅段階で一気に大きな利得を得ようとする、大きな ASE ノイズが混入してしまうことが懸念されました。そこで、1 段目プリアンプでは、高利得を求めずに、低雑音であることを優先して、増幅条件を決めました。	吉田委員
資料 7-1 Ⅲ-148、第 2 段落	MOPA を利用した多段増幅によってパルスを高出力化する場合は、パルスの時間的な消光比が重要になります。 この際、ファイバアンプの NF も重要になります。これらの数値を示してください。	公 開 可	1 段目アンプ後の時間的な消光比は、38dB と評価しました。アンプの ASE ノイズと利得の測定値から、ビート雑音限界 NF の値を 6～9dB と評価しました。	吉田委員
資料 7-1 Ⅲ-149、1 行 目	18ps 程度であれば、ご記載のように従来技術(市販品)の DFB や量子井戸構造でも実施可能です。また、それらをシーダーとして利用した高出力パルスファイバレーザも販売されています。ここで示された数値は「成果」と言ってもよいのでしょうか。	公 開 可	短パルス幅の達成を示した成果としては、最速の 8.4ps のパルス発生を報告しておりますので、そちらのデータをご評価頂きたいです。 該当箇所のデータの意義は、最速パルスを示すことではありません。趣旨は以下に述べる通りです。パルス幅 15ps の市販利得スイッチ半導体レーザは存在しますが、価格や製造歩留まりなど、いくつかの課題が指摘されています。すなわち市場では、この領域のパルス発生にもまだまだ改善の余	吉田委員

			地があります。 我々のやり方で、それらに近い性能が達成され評価もなされたこと、スペクトル切出しでそれをペデスタル成分のない 11ps パルスにまで高速化できたことなどは、価値のある結果です。報告に値すると考え、データと共に記載しました。	
資料 7-1 Ⅲ-150、図Ⅲ 2-3-7-3	増幅後の時間波形の雑音が高い様です。理由と、これでも使えるという説明をお願いします。	公開可	この測定では、増幅後のパルスの自己相関測定を同時に行うために、スプリッタで一部のみを分岐させてオシロスコープに導き時間波形測定をしていました。そのため強度が低下して測定の SN が低下しました。元のパルス自体の強度が揺らいでいたわけではないです。問題なく使えると考えます。	吉田委員
資料 7-1 Ⅲ-154、下 3 行目	「3 桁の増幅を行えば」とあります。何故実施して実証しなかったのですか？ 実証すべきではないでしょうか。その理由を説明して下さい。	公開可	加工試験には、繰返し 1MHz 以下への間引きがまず必要で、その後、3 桁の増幅が必要でした。既存技術の組合せで実現できる見通しはありましたが、期間内にそこまでを実施する時間と予算が、主としてコロナ禍での研究の遅延やコスト増のために足りなくなりました。	吉田委員
資料 7-1 Ⅲ-155、6 行 目	「…明らかになった。」とありますが、ここに記載の事項は(この分野の研究者ではなくても)自明なことです。このプロジェクトの成果	公開可	確かに、パルス繰返しが可変なことは自明ですし、ロングパルス領域でのパルス幅制御性は自明です。しかし、ペデスタル成分	吉田委員

	であることを説明して下さい。		や第2パルスなどのない 20ps 近傍領域でのパルス発生とパルス幅制御は自明なことではないと思います。実際、出力光パルスは、励起電気パルスの形状や強度に応じて非線形で複雑な変化をします。実験をしてみると、パルス幅制御は非線形で難しいながら可能という認識です。そのことは、報告する価値のある内容と考えて、実際の結果のデータと共に記載しました。	
資料 7-1 Ⅲ-156	「結局のところ、海外を含めファブを利用するノウハウが大切だと言うことがわかった」と読めます。そのノウハウを開示する必要があります。	公開	<p>ノウハウとまでは言いませんし、聞けば当たり前のことばかりですが、多くのファブを使ってファブレス開発・生産をおこなうことに伴う、困難、対策、利点・欠点など、やってみて気づき理解したことが多くありました。</p> <p>通常の大学の研究体制でファブレス型の開発を行う最大の困難は、スケジュール管理と進捗把握、発注時の仕様・納期の交渉や検品など、周辺の業務量が予想していた以上に非常に大きいことだと痛感しました。スケジュール管理が不十分だと、各工程の完了と次の工程の発注の間の時間遅延が大きくなり、進捗がどんどん遅れて行きます。コロナ禍の影響で、ファブのクリーンルー</p>	吉田委員

			<p>ムの閉鎖期間や出勤率制限などがあり、納期が長期化したので、スケジュール管理は特に大変でした。また、後段加工ファブで失敗が起きたときに、初段加工で費やしたコストの賠償をそのファブに求めることはできないので、我々自身の負担でやり直す必要がありました。それを見越して最初から予備を作製しておくコストが増加しました。リスクとコストの妥協点を上手く見極めるのが難しいことだと感じました。</p> <p>知財流出防止策や、ファブレス開発の弱点対策に関して回答したポイントも重要でした。また、156 ページ2 段落目後半に記載したポイントも重要でした。これは利用したファブ群に特有の事情だったかもしれませんが、重要な学びでした。</p>	
資料 7-1 Ⅲ-156	今回、国費を投じて外注を行った試作が、日本のモノづくり能力の向上のために有効に残されていることが説明されていません。	公開	<p>項目 3-7「超高速利得スイッチ LD をシードとするレーザー加工用光源の開発」は、大学のみの研究チームですので、産業への貢献が見えにくいかと思いますが、我々は、本研究成果の実用化・事業化を進めるための努力を現在も行っています。実用化を果すことで、日本のモノづくりに有効に活かしたいと考えています。</p>	吉田委員

<p>資料 7-1 Ⅲ-156</p>	<p>他の学会誌からのコピーアンドペーストが多いのは感心できません。(国民に広く公開され、残る資料である事をお忘れ無く)</p>	<p>公開 可</p>	<p>2021年5月に提出したNEDOプロジェクトの終了報告書がオリジナルです。その後、研究者・一般向けにNEDO成果の紹介のための学会誌特集号記事を依頼され、2021年7月に執筆しました。これらをもとに、2021年10月に、事業内容の記録公表のための事業原簿の原稿を作成しました。基本的に同じ内容を伝えているので重複があります。重複した内容や表現がありますが、異なる目的の文章なので、目的ごとに然るべき配慮や労力を注いで執筆・編集しました。</p>	<p>吉田委員</p>
-------------------------	--	-----------------	---	-------------

資料番号 ・ご質問箇所	ご質問の内容	回答		委員氏名
		公開可/ 非公開	説明	
資料 7-1 Ⅲ-159	<p>FEL を企業に販売されるというお考えではないものと思います。もしも販売されるお考えがないのであれば、なぜ対象となった FEL に投資をしなければならなかったのか教えて下さい。(その国費を利用して QCL を加速すべきではなかったかと思います)</p> <p>データベース化が目的だと理解することもできますが、得られたデータベースは企業に利用して頂くには不十分であり、役に立たないのではないかと思います。(これで十分であればその根拠の説明をご説明下さい)</p>	公開可	<p>FEL への投資を行った理由の 1 つは FEL が唯一波長可変性を持った赤外レーザーを実現できるものであり、様々な樹脂の吸収ピークに狙い撃ちした樹脂などの高効率に加工できるかを確実に評価するために必須であったためです。「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」の枠組みの中で我々項目 3-8 のプロジェクトだけが唯一中赤外領域のレーザー加工を目指したプロジェクトで、樹脂などの 5~20 μm の加工データベースづくりが重要であると認識しておりました。特に分子振動を狙い撃ちした高効率の加工を行うというものであり、プロジェクトとしては波長可変性が重要なキーワードです。そういう意味で、波長可変の FEL を用いてレーザー加工のデータベース化が目的であるという質問はその通りであります。具体的には、5~10 μm の東京理科大の FEL でレーザー加工実験を行うとともに、さらに 10~20 μm の波長での加工性を見るために KEK で FEL の製作を新た</p>	吉田委員

		<p>に行い、W級のFELを中赤外の5~20μmの領域で網羅できるようにしました。本プロジェクトの成果ではPTFEの樹脂加工に最適な波長をFELで探し、それをデータ化し、その情報をもとにW級のQCLの開発を行う際にそのPTFEの吸収ピーク波長を選択し、PTFEの高効率なレーザー加工を実現しました。FELでABSでも同様の波長ごとの加工データを得ております。FELによる異なる材料に対する波長ごとの条件だしデータが、分子振動を狙い撃ちした中赤外樹脂加工の有用性を示し、QCL設計への指針を出すことができおり、QCLでの高効率加工応用の結果となりました。FELにより得られたデータベースが樹脂加工に対し、十分に有用なデータを示しているものと思われます。企業に利用していただくにも十分なデータかと思っております。また、QCLでは10μm以上の長い波長を出すことは厳しいため、10μm以上の波長依存をもつFELの製作を行ったことがFELへの投資を行ったもう一つの理由です。本プロジェクトは2年強という短期間ではありましたが、その中でKEKに</p>	
--	--	--	--

			て $10\mu\text{m}$ 以上 $20\mu\text{m}$ の波長の FEL の製作を行い、FEL の波長可変性と照射実験まで行うことができました。PTFE 同様、FEL の強度や照射の条件を最適化することで QCL では提供できない $10\mu\text{m}$ 以上の有用な加工のデータベースを今後、十分、提供できるのではないかと考えております。	
--	--	--	---	--

資料番号 ・ご質問箇所	ご質問の内容	回答		委員氏名
		公開可/ 非公開	説明	
資料 7-1 Ⅲ-171、第 1 段落	今回の波長域の QCL で樹脂加工を実証できたことは素晴らしいと思います。一方で、今回のプロジェクトのエキシマや 266nm でも樹脂加工は可能です。ArF 等を利用した APD と呼ばれる技術もあります。紫外域と比較したメリットを説明されると説得力が増します。教えてください。	公開可	YAG レーザーの第 4 高調波 (266nm)、KrF エキシマレーザー (248nm) では今回行った、樹脂の一つ PTFE の吸収域には到達しません。193nm でも 8.6μm の吸収係数の約 1/100 に相当します。しかし、ArF エキシマレーザーの利用は一つの解です。193nm の ArF レーザーはエキシマの特徴であるフラットトップ波形などの均一照射には利点があります。同時に他の樹脂では効率よく加工できるものももちろん存在します。問題はガスのランニングコスト、ガス交換の煩雑さ、透過型光学の高品質化、光路の N ₂ パージなどではトータルのコストは大きなものとなります。出力の違いはあるものの QCL の利点としてエキシマレーザーは 1m 以上のサイズのガスレーザーであり、QCL は手のひらサイズのメンテナンスフリーに近いレーザーです。これで実現した点が最大の利点です。また、有機高分子材料の中赤外 (5 ~ 25 μm) 吸収帯は、基準振動モードに基づく強く鋭いピークを多数示します。特定の振動モードを	吉田委員

			量子状態選択的に励起することで、例えばある材料のみを加工するというような選択性を付与できる可能性があります。さらに各振動遷移双極子モーメントの方向により、ほぼ 100%直線偏光している赤外レーザー(FEL & QCL)を用いることでも、ある特定の配向で並んでいる材料のみを加工することができると考えられます。一方、紫外吸収帯は微弱かつブロードであり、そこに選択性を期待することは困難だと思われます。	
資料 7-1 Ⅲ-204、第 1 段落	真空紫外域の計測装置を開発されたと理解しました。今回の計画において開発されたレーザーには該当する波長は含まれていませんが、この波長域の計測装置を開発された理由をわかりやすく説明して下さい。 また、日本の製造現場においてどのような用途を想定されていらっしゃるでしょうか？	公開	例えば多光子励起を考えますと、真空紫外域等にバンドギャップなどがある材料（石英など）も多くあり、それらを測定するには真空紫外域まで計測する必要があります。樹脂などは真空紫外域に特長的な吸収構造を示すものもございます。また真空紫外領域と言える 193nm のレーザー加工装置も当プロジェクトにて開発されておりますし、各材料の真空紫外域を含む光学特性等から、今後のレーザー開発（必要な波長など）の戦略を立てることに貢献できると考えております。各現場で実際に利用されている材料のデータベースを作ること	吉田委員

			で、各実施者それぞれが測定する必要を無くするということを想定しています。	
資料 7-1 Ⅲ-205、7 行 目	この波長域で各種のスペクトルが異なることは、あらかじめわかっていることではないでしょうか。従来技術では測定できなかった事項が測定できた、あるいは定量化できるようになった、などの成果はないのでしょうか。	公 開 可	例えば石英の真空紫外域の吸収スペクトルなどが不純物濃度で明確かつ定量的に異なることなどが新規にわかりました。本テーマでは工業材料を中心に幅広い波長域でのデータベース化を行うことが主目的となっており、比較のためにも同じ装置・条件にて多くの材料の計測（既存のものを含む）を進めております。	吉田委員
資料 7-1 Ⅲ-206(6)	開発に「成功」されるために必要だった事項(技術要素など)は何でしょうか。 また、知財に結びついていますか?	公 開 可	フラグメントイオン計測における最大の目標は、レーザー加工データベースを充実させるために広範囲な材料、レーザー変数で測定可能にすることでした。この目標を達成するために、(1) 短時間で試料交換ができるための機構、(2) 広範囲な試料の測定に問題となる夾雑物影響の除去、(3) あらゆるレーザー光源に対応するための可搬性が開発要素となりました。これらが可能となるイオン計測の要素技術すべてを組み込んで装置を独自に設計作製しました。エリプソメトリに関しては、真空紫外域まで拡張した測定のための光学設計・偏光特性評価などです。共に知財には現時点では	吉田委員

			結びついておりませんが、計測等に不可欠な内容に関してはノウハウ登録などを検討しています。	
資料番号 ・ご質問箇所	ご質問の内容	回答		委員氏名
		公開可/ 非公開	説明	
資料 7-1 Ⅲ-207	今回のプロジェクトにおける重要なテーマだと考えます。知財の審査請求をされていないようです。されていない場合はその理由を説明して下さい。	公開可	協調-競争戦略においてロードマップは協調側としたため、知財化はしないことにしました。今後、TACMIに参加している多くの法人で共有し、継続的に更新することを想定しているため知財化にはそぐわないと考えております。一方で、今後も協調領域の求心力となりうるロードマップ知財の取り方については TACMI コンソで議論を深めていく予定です。	吉田委員
資料 5-2 No. 26	日本にとって中小企業の役割は重要です。中小企業に参加して頂く、あるいは利用して頂くための方針はお持ちですか？ 教えてください。	公開可	中小企業や大学など、利用料の支払いが困難な法人やグループに対して、コンソーシアム内に公開できるデータや情報を提供いただくことで、利用料の減免を行う仕組みがあります。モノだけではなく、データやコトで結果を提供する形へ協調領域を拡大することで、ニーズに合わせた対価で活用していただけるよう、今後も様々な制度を設計していきます。	吉田委員

資料番号 ・ご質問箇所	ご質問の内容	回答		委員氏名
		公開可/ 非公開	説明	
資料 5-2 No. 21	このスライドに阪大の名前が入っていませんが、阪大の役割はすでに終わっているのでしょうか。(12/17のご説明に含められるご予定でありましたら回答はご無用です)	公開可	すみません、本ページはアニメーションとなっており、PDF版ではうまく表示されていません。PPT版では阪大-SPX-三菱電機の例は登場します。	吉田委員

(別紙) 高輝度・高効率次世代レーザー技術開発 ニュースリリースタイトル一覧

項目	発表日	発表者	タイトル
1	2019年6月24日	スペクトロニクス(株)	266nm10Wピコ秒レーザー 世界初! 連続動作 10,000 時間達成!!
1	2019年8月20日	スペクトロニクス(株)	266nm(<15ps) 50W 級ピコ秒レーザー発振に成功!!
1	2020年3月19日	NEDO スペクトロニクス(株)	世界最高級出力の深紫外ピコ秒パルスレーザー発振器を開発 —高出力化で電機や航空・宇宙分野の部品加工の高生産性と高品位性を実現—
1	2021年6月22日	三菱電機 大阪大学 スペクトロニクス	世界最高出力でガラスなどの高速微細加工を実現 「高出力深紫外ピコ秒レーザー加工装置」を開発
2	2018年4月19日	浜松ホトニクス(株)	小型ながら高出力で均一照射が可能なレーザーモジュールを開発
2	2019年4月18日	浜松ホトニクス(株)	世界最高、117ジュールの出力を実現 半導体レーザー励起の高出力産業用パルスレーザー装置を開発
2	2021年6月28日	NEDO 浜松ホトニクス	世界最高出力 250J の産業用パルスレーザー装置を開発 —レーザー加工の効率向上により、医療・エネルギーなどの応用開拓に期待—
3-1	2018年12月20日	京都大学	新たなフォトニック結晶構造を用いて半導体レーザーの高輝度化に成功
	2021年3月26日	NEDO 京都大学 QST	短パルス・高ピーク出力動作可能な新しいフォトニック結晶レーザーの開発に成功 —超微細加工や高精度光センシング、バイオイメージングなどに応用可能—
4	2018年10月23日	産業技術総合研究所 東京大学 早稲田大学	極端紫外線レーザーにより熱影響が極めて少ない材料加工を実現
5-1	2020年1月29日	パナソニック(株)	高出力青色ダイレクトダイオードレーザーの波長合成技術を開発

			<u>～ファインプロセスに最適な高ビーム品質・高出力短波長レーザー光の提供が可能に～</u>
5-4	2017年10月24日	NEDO 大阪大学	<u>世界初、青色半導体レーザーの高輝度化により純銅を積層造形できる3Dプリンタを開発</u>
5-4	2018年1月25日	NEDO (株)島津製作所 大阪大学	<u>世界最高クラスの高出力・高輝度青色半導体レーザーを製品化へ</u>
5-4	2018年10月30日	NEDO 大阪大学 ヤマザキマザック(株) (株)島津製作所	<u>世界初、高輝度青色半導体レーザー搭載複合加工機を開発、製品化へ</u>
5-4	2019年1月29日	NEDO (株)島津製作所 大阪大学	<u>青色半導体レーザー装置の世界最高出力1kWを達成</u>
5-4	2020年7月1日	NEDO 大阪大学 ヤマザキマザック(株) (株)島津製作所	<u>従来比6倍速で銅コーティング可能な青色半導体レーザー複合加工機を開発</u> <u>—細菌・ウイルスリスク低減による公衆衛生環境実現への活用を期待—</u>
項目共通	2016年7月12日	NEDO	<u>次世代レーザー加工技術の研究開発に着手</u>
項目共通	2017年11月27日	東京大学	<u>「TACMI コンソーシアム」を設立</u>
項目共通	2017年11月27日	NEDO	<u>産学官連携で「TACMI コンソーシアム」を設立</u>
項目共通	2018年3月28日	NEDO	<u>光とレーザーの最新技術展示会「OPIE'18」に出展へ</u>
項目共通	2021年2月22日	NEDO 東京大学 産総研 三菱電機(株) スペクトロニクス(株) 大阪大学 浜松ホトニクス(株) パナソニック(株)	<u>NEDOの事業成果を集約したプラットフォームを構築</u> <u>—レーザー光源や加工機を連携させ、最適な加工条件を探索—</u>

		PSFS (株) (株) 金門光波 千葉工業大学 (公財) レーザー総研 ギガフoton (株) (株) 島津製作所	
--	--	---	--