

革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）

終了時評価報告書（平成30年度）

「ユビキタス・パワーレーザーによる安全・安心・長寿社会の実現」

平成31年3月11日

P M 名： 佐野 雄二

P M補佐名： 三浦 崇広

北村 一夫

矢作 雄人

目次

1. 研究開発プログラムの全体計画

(1) 研究開発プログラムの構想

- ① 解決すべき社会的課題
- ② 上記の社会的課題を解決し、産業や社会のあり方に大きな変革をもたらす PM の構想
- ③ 出口目標及び出口に至る将来的なシナリオ
- ④ 解決のための発想・アイデア及びブレークスルーのポイント

(2) 研究開発プログラムの達成目標

(3) 研究開発プログラムの全体構成図

(4) 具体的な取組

- ① プロジェクト 1: レーザー加速 XFEL 実証
 - i) 研究開発の概要
 - ii) 成果目標
- ② プロジェクト 2: 超小型パワーレーザー
 - i) 研究開発の概要
 - ii) 成果目標
- ③ プロジェクト 3: レーザー応用システム化・XFEL 実証評価
 - i) 研究開発の概要
 - ii) 成果目標

(5) 研究開発プログラムの全体ロードマップ

(6) 研究開発プログラムのマイルストーン

(7) 研究開発プログラム実施期間

2．研究開発プロジェクト毎の実施状況及び成果

(1) プロジェクト 1: レーザー加速 XFEL 実証

- ① プロジェクトの計画
- ② プロジェクトの体制
- ③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度
- ④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

(2) プロジェクト 2: 超小型パワーレーザー

- ① プロジェクトの計画
- ② プロジェクトの体制
- ③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度
- ④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

(3) プロジェクト 3: レーザー応用システム化・XFEL 実証評価

- ① プロジェクトの計画
- ② プロジェクトの体制
- ③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度
- ④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

3．研究開発プログラムの全体成果

(1) 目標達成の状況

- ① 研究開発プロジェクト 1: レーザー加速 XFEL 実証
- ② 研究開発プロジェクト 2: 超小型パワーレーザー
- ③ 研究開発プロジェクト 3: レーザー応用システム化・XFEL 実証評価

(2) 参考指標

- ① 民間企業等とのマッチング及び橋渡しの状況
- ② 論文
- ③ 学会発表
- ④ 国際学会における招待講演
- ⑤ 特許出願件数
- ⑥ 知財・標準化等の取組状況
- ⑦ アウトリーチ等の状況
- ⑧ その他特筆すべき取り組み

4．研究開発プログラム予算の推移

5．研究開発プログラムの推進体制

6．研究開発プログラムの実施管理状況

(1) 研究開発プログラムのガバナンス

- ① 進捗状況の把握及び指導・管理状況
- ② 新たな発想・アイデアの採用（若手・女性人材の育成を含む）に関する取り組み
- ③ 研究開発機関等の評価及び追加変更の状況
- ④ 「選択と集中」に向けた取り組み

(2) 研究成果の展開に向けた取り組み

- ① これまでの取り組み
- ② 今後の方針と具体的な取り組み計画

7．PMの自己評価

(1) PMが実施管理を行った研究開発プログラム（研究成果）に関する評価

- ① 産業や社会のあり方の変革をもたらす見通しは得られたか
- ② 上記①以外の派生的な効果として、どのようなものが得られたか

(2) PM自身の活動（プログラム・マネジメント）に関する評価

- ① <目標設定>
- ② <作り込み>
- ③ <進捗管理>
- ④ <関係者の巻き込み>
- ⑤ <成果の展開>
- ⑥ <PM 支援機能の活用>
- ⑦ <アウトリーチ>
- ⑧ <人材育成>
- ⑨ <全体> 研究開発の発展、競争力の強化、困難な社会課題の解決に向けた貢献
- ⑩ <全体> 成果が得られなかった事例等の原因分析や解析、次の挑戦につながる道筋

(3) その他、ImPACT プログラム全体に対する所感・提言

1. 研究開発プログラムの全体計画

(1) 研究開発プログラムの構想

① 解決すべき社会的課題

我が国は大型放射光施設 SPring-8、大強度陽子加速器施設 J-PARC、X線自由電子レーザー (XFEL) 施設 SACLA など、世界最高性能の加速器・放射光施設を建設し、利活用してきた。その結果、ノーベル賞級の研究や産業イノベーションにつながる成果が数多く生まれている。例えば、加速器による放射光 (X線) や中性子を使用することにより、結晶化が難しいたんぱく質分子の構造が解明され、効率的な医薬品の開発が可能となっている。また、リチウムイオン電池の電極反応が解明され、大容量で安全な電池が開発されている。

加速器や放射光施設は真理の探求のみならず産業イノベーションを誘起し、経済の発展に大きく寄与する基盤技術 (KET; Key Enabling Technology) であるため、世界各国でより高性能な施設の建設が進められている。我が国においても引き続きこの分野に注力し、科学技術・産業・経済において持続的な発展を遂げ、豊かな国民生活の実現を目指していく必要がある。

一方で、これらの最先端施設の建設には莫大な費用が必要なため、多くの施設を望むことはできない。このため、必然的に利用の頻度やユーザー数が限られることとなり、「研究や製品開発のサイクルが回らない」という課題が生じている。

1960 年に発明されたレーザーは、非線形光学をはじめとする先進的な研究を先導するとともに、通信・加工・医療・照明・セキュリティなどの産業分野においても必要不可欠な基盤技術 (KET) となっており、多くの研究者・技術者がその恩恵にあずかっている。

しかしながら、レーザー発振器やそれを構成する主要部品の多くを輸入に頼っているのが現状であり、高い品質を要求する国内産業や世界最先端の研究開発においてボトルネックとなっている。さらには、これまでのレーザー装置、特に高出力のパルスレーザー装置は多くが理化学機器のレベルであり、温湿度がコントロールされた環境あるいは除振台の上での使用を余儀なくされ、使用環境が制限されるという課題があった。

② 上記の社会的課題を解決し、産業や社会のあり方に大きな変革をもたらす PM の構想

現在世界中で建設競争が繰り広げられている XFEL 施設は km オーダーの大きさである。レーザーによる電子加速技術により XFEL の機能をトレーラーサイズ (10m) で実現し、主要な研究機関・大学・病院などに配備することによって、いつでも・どこでも (ユビキタスに) XFEL を使った研究開発が実施できる環境を実現する。これにより、我が国の研究および製品開発のリードタイムを年単位から週単位に短縮し、研究および製品開発競争力の飛躍的な向上を図る。

トレーラーサイズの XFEL が実現すれば、例えば、食品工場の検査ラインにおける高感度全数検査が可能となり、食の安全が担保できる。また、航空機・発電設備のトラブル防止、橋梁・トンネル・高速道路などのインフラ設備診断、核物質や違法薬物の検知・拡散防止、セキュリティ向上などへの応用が可能であり、公共の安全確保が期待できる。さらに、レーザーで加速した高エネルギーの電子を使用して、透過力の高い中性子やテラヘルツ (THz) 波を発生させて非破壊検査に応用することも可能であり、これらを通して突発的なトラブルに見舞われることのない快適で安心な社会を実現することができる。

健康・医療関連では、移動式 XFEL による毛細血管造影検査などが可能となり、これまで体への負担により高度な検査が難しかった人々にこれらの機会を提供することができる。さらに、開発した技術のがん治療などに応用すれば、全ての国民に先進医療の機会を与えることができる。

製造関連では、例えば、半導体製造工程の露光 (リソグラフィー) に小型で安価な XFEL を使用することが考えられる。XFEL は電子のエネルギーや磁場の制御により X 線の波長を自由に設定できるため、効率的かつカスタム対応が可能な次々世代の露光装置を実現できる。また、高い信頼性が要求されるロジック IC や CPU の全数検査も可能となる。

レーザー (可視または近赤外領域で発振する固体レーザー) については、海外技術・製品に頼ることなく国産技術によってデスクトップサイズの高出力パルスレーザーを超小型化し、掌サイズを達成する。これにより、従来のレーザー装置の寸法や重量では設置やアクセスが困難であった環境での利用が可能となる。また、ロボットシステムへの搭載が可能となり被加工物に直接レーザーパルスを照射することができる。従って、高出力のパルスレーザーに付きまとう伝送の問題 (ミラーや光ファイバーの損傷) が解決され、いつでも・どこでも (ユビキタスに) レーザーを利用する環境を提供できる。さらには、これまでになく安定で使い勝手が良く、1年間メンテナンスが不要なジュールクラスの大出力パルスレーザーを実現し、大幅なスループットの改善を図る。

超小型の高出力パルスレーザーの実現により、これまで寸法・重量や使用環境により適用が不可能であった宇宙・地下・海底などを含めたあらゆる環境下で高精度な計測・分析・検査や保全・補修が可能となり、深海での掘削や宇宙ゴミ (デブリ) 処理も可能となる。さらには、レーザーによる燃料の点火技術を旅客機のジェットエンジンやロケットの点火に利用すれば、重量の軽減 (ペイロードの向上) と高い信頼性を同時に満足することができる。また、金属疲労や宇宙ゴミの衝突によって劣化した宇宙ステーションの構造材料の蘇生 (機能回復) といった特殊環境下での適用に加え、一般産業・インフラにおける構造物の疲労・損傷・破壊を時空間的に制御するインテリジェンスピーニング、レーザー超音波技術による高温部材の遠隔診断、チタン合金などの難加工材のフォーミングや大面積クリーニングなどの競争力の高い製造技術の実現が可能になる。

健康・医療関連では、例えば、小型で使い易い皮膚疾患用レーザー治療器を低価格で提供できるようになり、従来は困難であった往診によるレーザー治療も可能となる。また、緑内障や後発白内障用のレーザー治療装置を低価格で提供できる。また、病理組

組織のアブレーション加工と SEM 観察を組み合わせれば、病理組織の3次元像を容易に再構成することが可能となり、慢性的な病理医の不足を解消することができる。

プログラム開始時(平成 26 年度)に検討した「課題解決のための構想」を図 1-1 および図 1-2 に示す。当初のプログラムは光源技術(XFEL および固体レーザー)の開発のみで構成されていたが、平成 27 年度末の第 17 回レビュー会(集中レビュー会)にて進捗が評価され、開発した固体レーザーの応用および製品化をプログラムに追加した。

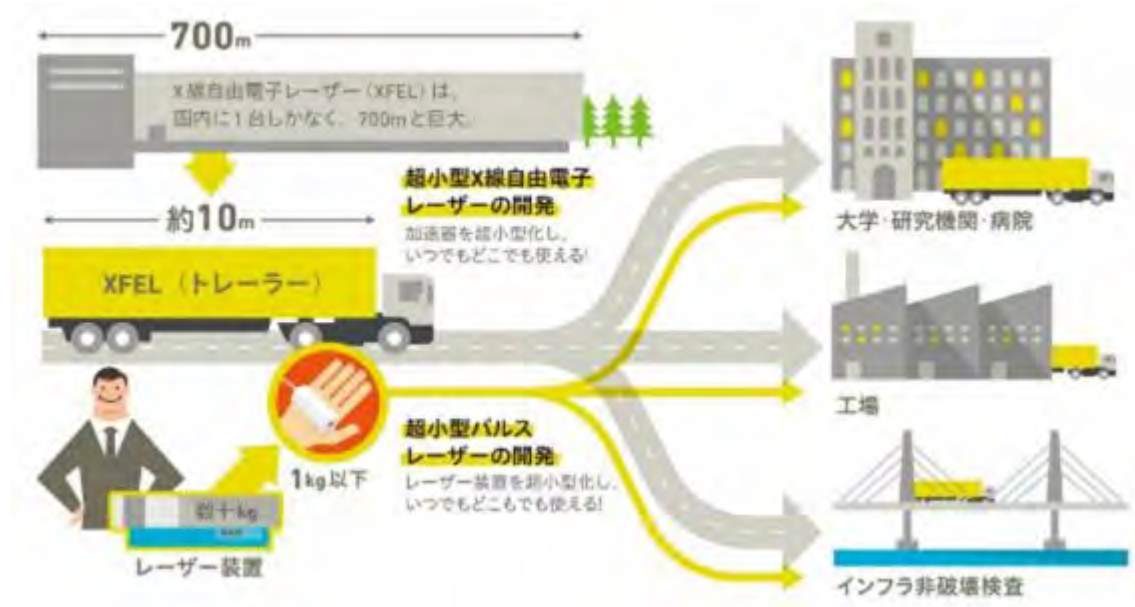


図 1-1 課題解決のための構想(超小型 XFEL の配備)

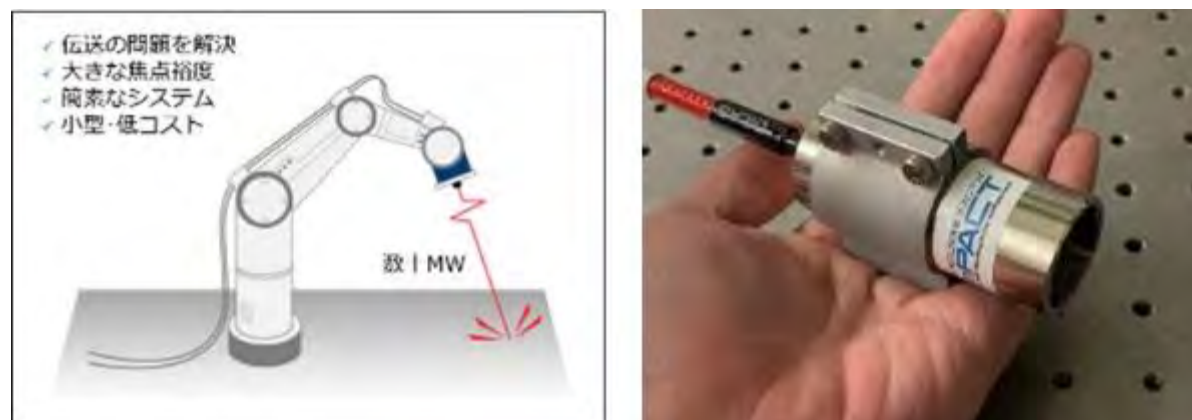


図 1-2 課題解決のための構想(掌サイズのパワーレーザーの実現)

③ 出口目標及び出口に至る将来的なシナリオ

本 ImPACT プログラムの将来的な出口目標は、10m サイズの超小型 XFEL の実現とポータブルな高出力のパルスレーザーの拡販・普及によるソリューションの提供、さらにはその活用・展開による産業や社会構造の変革である。

10m サイズの超小型 XFEL を実現するためには、XFEL を構成する主要なコンポーネントである電子加速器(SACLA で約 400m)とアンジュレーター(SACLA で約 200m)の各々

を超小型化する必要がある。近年、高強度レーザーを使用してプラズマの波 (LWF; laser wakefield、航跡波) を発生させ、その急峻な電位勾配を利用して電子を加速する技術 (レーザープラズマ加速技術) が大きく進展し、電子の加速に必要な長さを桁違いに短縮できる可能性が出てきた。なかでも、大阪大学 (阪大) の成果は加速の安定性で世界一を誇り、アンジュレーターのギャップ (磁極間) に正確に電子を入射させる技術として期待できる。また、今回の ImPACT プログラムの開発成果により、1m 程度の加速用チェンバー (真空容器) で 1GeV 程度の電子加速が可能となる見通しが得られつつある。アンジュレーターについては、高エネルギー加速器研究機構 (高エネ研、KEK) が、数十個の磁石を一体の磁石として成形・着磁する技術を開発した。また、複数の磁石を接続する技術も開発し、従来と比較して 1/10 以下の磁場周期と長さを実現できる見通しが得られている。

これらの技術を発展させることによって電子加速器およびアンジュレーターを将来大幅に小型化し、10m 以下の超小型 XFEL の実現を図る。一方で、現在は Ti:sapphire レーザーを電子加速用 (航跡波励起用) レーザーとして利用しているが、その供給はフランスの 2 社に独占されている。また、今回 ImPACT で製造を委託したレーザーで長さが約 20m であり、レーザーだけで優に 10m を超える大きさを占めている。さらに、Ti:sapphire レーザーの効率 (電気から光への変換効率) は約 0.1% と極端に低いため、小型で効率が高く、実用的なレーザーシステムを開発する必要がある。

分子科学研究所 (分子研) が開発したマイクロチップレーザーは、半導体レーザー励起による超小型・高効率のレーザーである。本プログラムで開発したレーザー材料の常温接合技術を使用してマイクロチップレーザーを多層化し、その出力をジュールクラスまで高めて Ti:sapphire 結晶の励起用レーザー (現在はフラッシュランプ励起の Nd:YAG またはガラスレーザー) を置換えれば、加速用レーザーシステムを従来の半分以下の大きさに小型化することが可能である。また、常温接合技術を使用して蛍光波長の異なるレーザー媒質を接合すれば、バンド幅の広いレーザー媒質の製作が可能であり、高額で納期の長い大口径 Ti:sapphire 結晶を将来代替することができる。さらに、パルス圧縮用に使用している大型・高価・長納期のグレーチングは非線形効果を利用した透過型の固体媒質に置換えることができる。このような技術開発を ImPACT 後も推進することにより、加速用レーザーの大幅な小型化が可能であり、10m 以下の超小型 XFEL の実現を図る。

レーザープラズマ加速による XFEL の発振には、ImPACT 終了時の達成レベル (目標) と比較して、加速電荷 (電子数) の 1 桁程度の増大、電子エネルギー単色性の 1 桁程度の改善、並びにアンジュレーター磁場の強度向上 (K 値の増大) が必要である。理化学研究所放射光科学研究センター (理研播磨地区) に建設したプラットフォーム (レーザープラズマ加速技術の開発拠点) を ImPACT 後も活用して抜本的な技術開発を継続し、今後の実用化について検討を継続する。また、超小型高出力パルスレーザーについては ImPACT 期間中の製品化を達成し、平成 31 年度に拡販を開始する。なお、マイクロチップレーザーの大出力化による電子加速用 Ti:sapphire 励起用レーザーの置換えは、平成 35 年頃の技術の完成を目指す。

④ 解決のための発想・アイデア及びブレークスルーのポイント

XFEL の桁違いの小型化には、これまでの加速器技術とは全く異なる新しい概念・技術が必要である。高周波による電子加速では、加速勾配を高めると放電が発生して装置が破壊されるため、加速エネルギー勾配 (単位長さあたりの加速エネルギー) は 50MeV/m が限界である。極短パルスの高出力レーザーでプラズマ波 (航跡波) を励起し、その電位勾配を利用して電子を加速すると、 100GeV/m 程度の加速が原理的に可能である。この手法をレーザープラズマ加速と言うが、この技術によりこれまで必要とされていた電子の加速長さを $1/1000$ に短縮し、 km サイズの加速器をトレーラーサイズ (10m) の装置で代替する。

現状では、レーザープラズマ加速による電子ビームの安定性は従来の加速器に遠く及ばないが、磁場を用いたプラズママイクロオプティクス (PMO) の導入や、加速部を多段化し電子発生・制御 (準単色化) ・加速の機能を各段 (モジュール) に分割して割り当てることにより、改善できると考えている。また、加速器としてのシステム化にはレーザー技術、プラズマ・放電技術、加速器・ビーム技術、材料技術、計測制御技術、機械システム技術などの統合が必須であり、その開発仕様には将来のニーズを的確に予測して反映する必要があるため、幅広い研究コミュニティとユーザーの直接的な参画が不可欠である。

このように、本 ImPACT プログラムの内容は従前の常識を飛び越えるハイリスクの研究開発であるため、大学・企業・産業界およびユーザーが一体となり、かつ幅広い専門分野の協業を促す開発体制を構築する必要がある。これらの取り組みを具体化するアイデアとして、世界の X 線 (放射光) ユーザーおよび研究者が集う理化学研究所放射光科学研究センター (理研播磨地区) にレーザープラズマ加速技術を実証するためのプラットフォーム (開発拠点) を構築し、研究者から産業界にわたる幅広いユーザーとの交流によるオープンサイエンス・イノベーションの場として活用し、研究開発の加速とフィードバックを図る。

レーザープラズマ加速による超小型 XFEL の実現には、加速器の小型化はもちろんのこと、アンジュレーターの小型化とレーザーシステムの小型高効率化が必須である。このため、日本がリードしている磁石技術を活用し、極短周期の超小型アンジュレーター (マイクロアンジュレーター) の開発を行うとともに、レーザー電場を利用したアンジュレーター、レーザープラズマアンジュレーター、固体内のチャネリングを利用したアンジュレーターなど、新しい概念のアンジュレーターの検討も実施する。また、我が国独自のマイクロチップレーザー技術や光学材料の常温接合技術などを駆使し、加速用レーザーの超小型化を達成する。これらの技術とレーザープラズマ加速技術を統合し、XFEL の超小型化を図る。

ブレークスルーのポイントは「レーザープラズマ加速の安定性」と「レーザーの冷却」である。上述の加速部多段化のアイデアを実現するためにはレーザーと電子ビームの高い空間・時間精度 ($\sim 10\text{mm}$ 、 $\sim 10\text{fs}$) が必要とされ、特に後段のモジュールに電子ビームを入射させるための空間精度の達成は困難を極めることが予想される。プラズママイクロオプティクス (PMO) のような革新的なアイデアの導入のみならず、建屋・空調など地道な部分にも配慮し、達成する。また、冷却は小型化の際に常に付きまとう課題であるが、レーザー媒質と透明冷却基板の常温接合技術と革新的な構造設計により達成する。両者とも、世界でまだ実現されたことのない概念・技術であるが、失敗を恐れずに取り組む。

(2) 研究開発プログラムの達成目標

プロジェクト1(レーザー加速 XFEL 実証)の達成目標は「超小型 XFEL の実現に必要な基盤技術の確立」である。具体的な到達目標を以下に示す。

1. 低エネルギー多段加速技術の開発、300MeV 電子ビームの発生 (H27)
2. 既存加速器の電子ビームとマイクロアンジュレーターによるX線ビームの発生 (H28)
3. 拠点(レーザー加速統合プラットフォーム)の構築、整備 (H28)
4. レーザー加速 XFEL 各要素技術の開発、組合せ実証 (H30)
5. 拠点における多段加速による 1GeV 超の安定な電子ビームの発生 (H30)
6. 拠点に設置したマイクロアンジュレーターによる 1keV のX線ビームの発生 (H30)
7. マイクロアンジュレーターの製品化 (H30)

第2項の達成目標「既存加速器の電子ビームとマイクロアンジュレーターによるX線ビーム発生」は、Pj-1C(マイクロアンジュレーター)が計画以上に進展したため、平成30年度の計画を28年度に前倒した。また第7項の達成目標「マイクロアンジュレーターの製品化」は、諸外国からの引き合いが多いため、平成28年度から開発計画に追加した。

プロジェクト1の達成目標と出口目標との関係を図1-3に示す。ImPACT 終了から5年程度を目途にしてレーザープラズマ加速による電子ビームの応用および超小型 XFEL (10m) 実現のための技術的課題を解決し、XFEL の技術的実証の準備を行う。

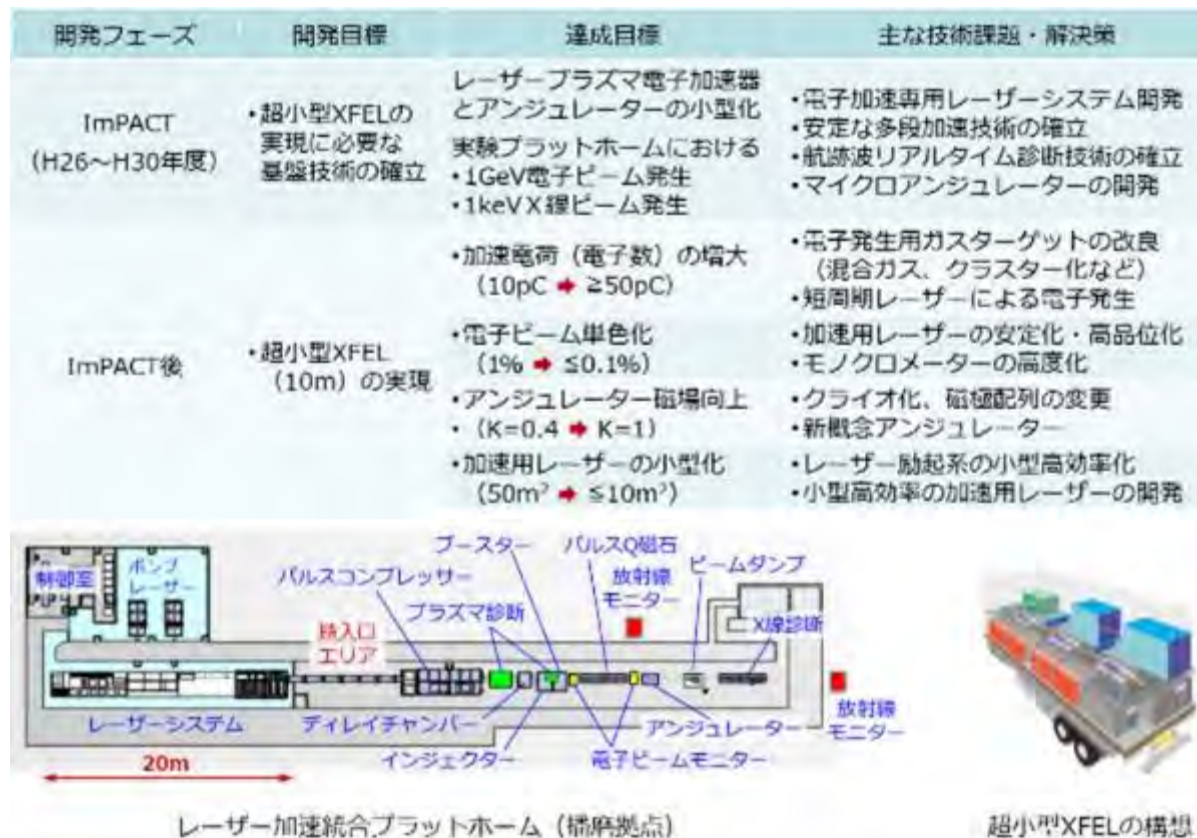


図 1-3 プロジェクト1(レーザー加速 XFEL 実証)の達成目標と出口目標の関係

プロジェクト 2 (超小型パワーレーザー) の達成目標は「超小型パワーレーザーの実現および製品化」である。具体的な到達目標を以下に示す。

1. パルスエネルギー20mJ、繰返し 100Hz のハンドヘルドレーザーの実現 (H28)
2. パルスエネルギー1J、繰返し 300Hz のテーブルトップレーザーの実現 (H28)
3. ハンドヘルドレーザー (パルスエネルギー20mJ) プロトタイプの完成 (H28)
4. ハンドヘルドレーザー (パルスエネルギー100mJ) プロトタイプの完成 (H30)
5. ハンドヘルドレーザーの企業への技術移管および製品化 (H30)
6. テーブルトップレーザーの製品化 (H30)

第5項「ハンドヘルドレーザーの企業への技術移管および製品化」は、ハンドヘルドレーザーの開発が当初計画より大幅な前倒しで進展したため、平成 28 年度から開発計画に追加した。製品化に意欲的な企業3社を公募で選定し、分子研で開発したハンドヘルドレーザーの技術を移管して製品化開発を推進した。

プロジェクト 3 (レーザー応用システム化・XFEL 実証評価) の達成目標は「レーザープラズマ加速による電子およびX線ビームの実用性評価および超小型パワーレーザーのユーザー施設での生産デモ」である。具体的な到達目標を以下に示す。

1. ユーザーニーズに基づく超小型パワーレーザーの応用提案 (H27 および H28)
2. 超小型パワーレーザーを使用したユーザーによる生産デモ (H30)
3. 超小型パワーレーザーのセキュリティ応用技術の原理実証 (H30)
4. 公設試への超小型パワーレーザーの配備および利用環境の整備 (H29)
5. 公設試における超小型パワーレーザーのユーザー利用の開始 (H30)
6. 既存加速器の電子ビームとマイクロアンジュレーターによるX線ビームの発生 (H28)
7. レーザープラズマ加速による電子およびX線ビームの実用性評価 (H30)

第3項の達成目標「超小型パワーレーザーのセキュリティ応用技術の原理実証」は、ハンドヘルドレーザーの開発が当初計画以上に進展し、そのレーザーを使用することによって従来と比較して桁違いの THz 波の発生強度と受信感度を達成したため、平成 28 年度より開発計画に追加した。

第4項、第5項の達成目標「公設試への超小型パワーレーザーの配備および利用環境整備」および「公設試における超小型パワーレーザーのユーザー利用の開始」は、ハンドヘルドレーザーの試用を希望する企業ユーザーが分子研に殺到したため、ユーザーのサポートを本来の業務とする公設試 (静岡県工業技術研究所浜松工業技術支援センター) を平成 29 年度からプログラム体制に追加した。これにより、ハンドヘルドレーザーの応用を加速するとともに、ImPACT 後のユーザー利用の道を拓いた。

(3) 研究開発プログラムの全体構成図

本研究開発プログラムの平成 30 年 12 月現在における構成を図 1-4 および図 1-5 に示す。3H「超小型パワーレーザー応用」、3J「XFEL 実証評価」、3K「セキュリティ応用」、3L「マイクロアンジュレーター評価」を平成 28 年度より研究開発体制に追加した。また、2N「ハンドヘルドレーザー製品化」および 3M「レーザー試用プラットフォーム」を平成 29 年度より研究開発体制に追加した。平成 30 年度には 3P「電子イメージング評価」を追加した。1E「プラズマ素子・電源」は平成 28 年度末で開発を中止し、その開発内容は 1A に統合し、引き継いだ。

1A、1B、1C、1D、2F、3J、3K、3L、3M、3P の開発委託先、10件は指名により決定した。1E、2G、2N (2N1～3)、3H (3H1～9、3H-I1～I5、3H-S1～S3) の 22 件の開発委託先は公募により選定した。

3H では、平成 28 年度に 9 機関を公募で選定してフィージビリティ・スタディー (FS) を行い、2F および 2G が開発するレーザーの応用に関する斬新なアイデアの育成・練上げを行った。その後、平成 29 年度に应用システム化の委託先を公募により選定した。そこでは平成 28 年度に FS を委託した 9 機関から 2 機関、新規に応募提案を行った 4 機関から 1 機関を選定した。また、新たに 5 件の FS を採択した (図 2-3-1 参照)。

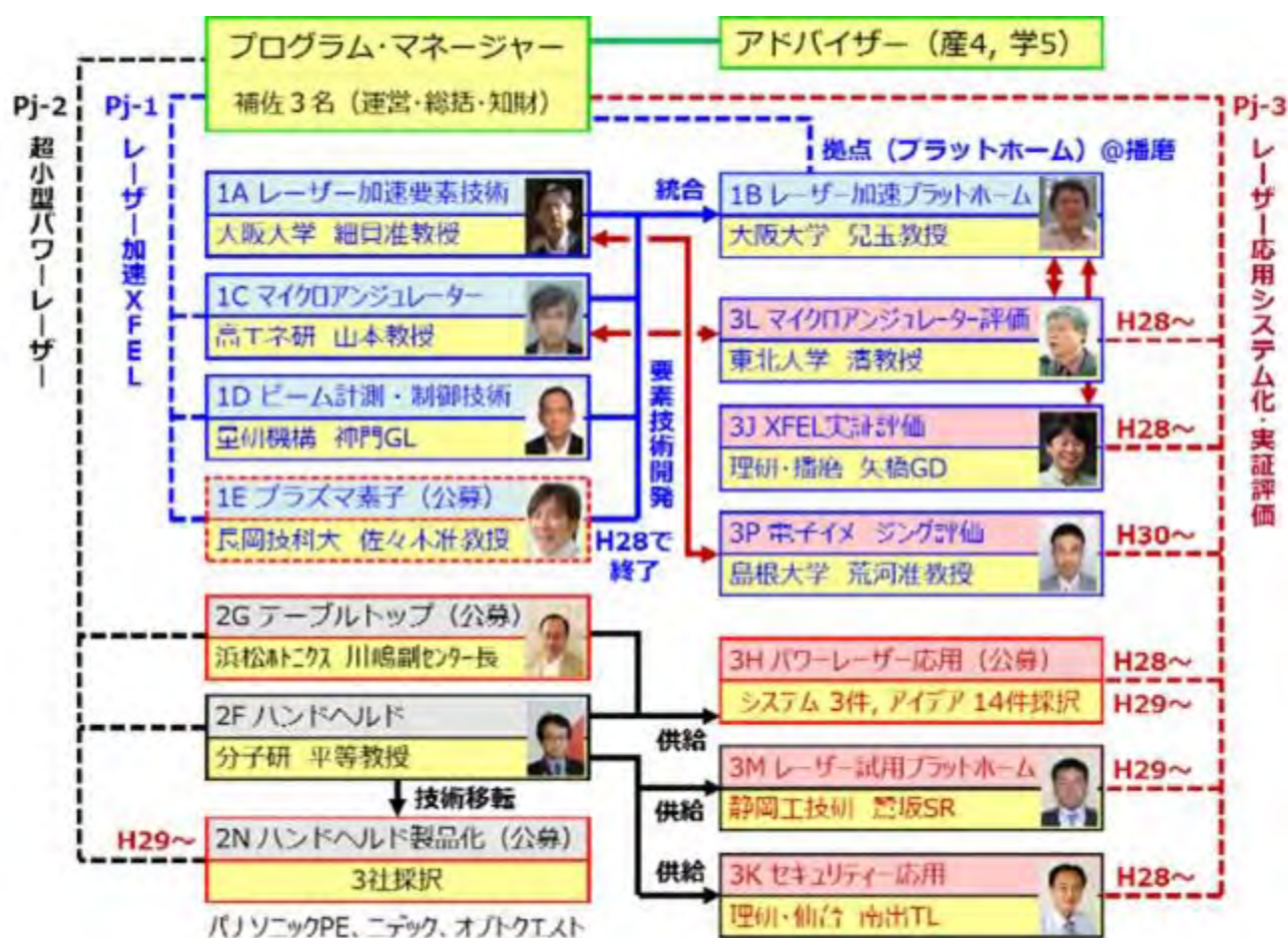


図 1-4 研究開発プログラムの構成 (委託機関および研究開発責任者)

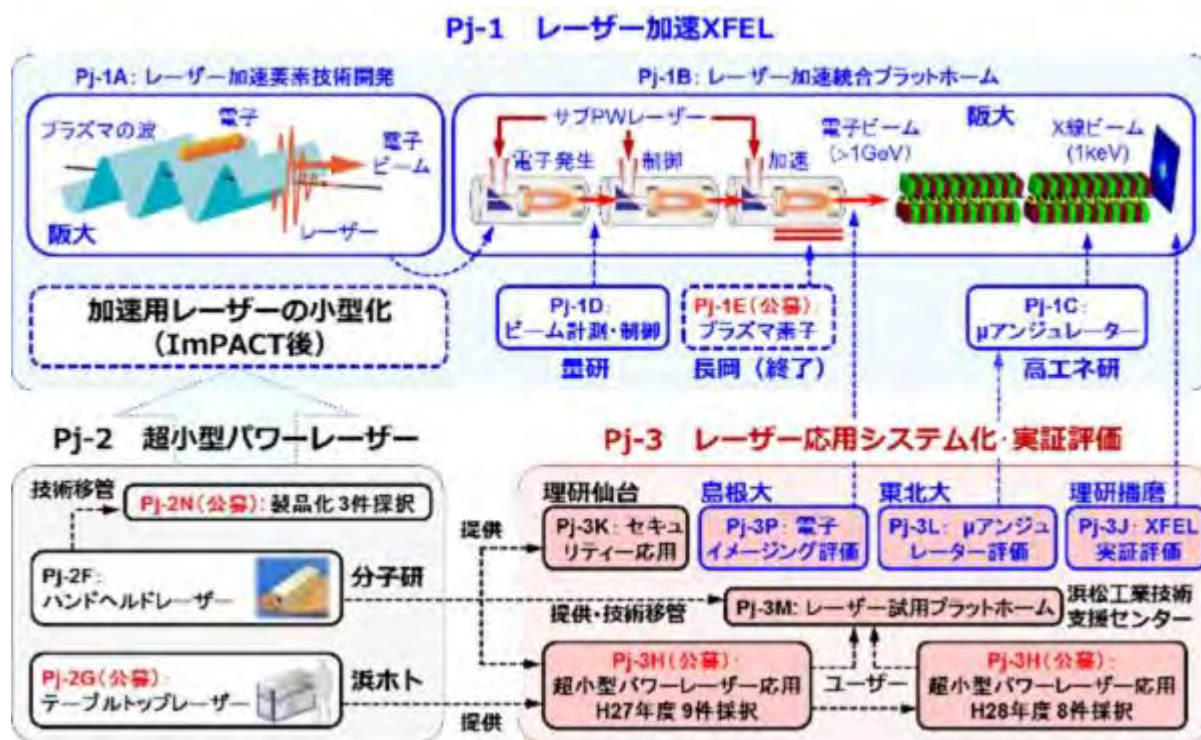


図 1-5 研究開発プログラムの構成 (サブプロジェクト間の関係)

(4) 具体的な取組

本プログラムでは、国内の特に優れた研究者・機関の参画を得て、集中的な研究開発を実施した。また、他の研究者・機関とも協力関係を構築・維持し、叡智を結集するとともにオールジャパン体制を構築し、コミュニティーの育成にも努めた。海外の研究機関・研究者との協力は研究者間の個人的協力のみに頼ることなく、PM の主導により国際会議や国際ワークショップを計画的に開催し、組織的な交流を行った。さらにはプログラムへのユーザーの直接的な参画により、開発後のスムーズな実用化を目指した。

本プログラムでは以下の3項目の研究開発を行い、各々に世界トップクラスの実力と実績を誇る研究者・機関を指名および公募により選定した。

- | | |
|--------------------------------|----------------------------|
| (1) レーザー加速 XFEL 実証 | プロジェクト 1 として実施 |
| (2) 超小型パワーレーザー | プロジェクト 2 として実施 |
| (3) レーザー応用システム化・XFEL 実証評価 | プロジェクト 3 として
H28 年度より実施 |

① プロジェクト 1： レーザー加速 XFEL 実証

i) 研究開発の概要

日本独自の線形領域での安定なレーザープラズマ加速技術により、従来の加速器と比較して 1/1000 の加速長さで電子加速を実現する。さらに、従来と比較して必要な磁石量が 1/1000 のマイクロアンジュレーター (極短周期の超小型アンジュレーター) を開発し、X線ビーム (放射光) の発生を確認する。また、加速の安定性を確認し、制御するための計測・制御技術、電源高度化・効率化など超小型 XFEL の実現に必要な要素技術を開発する。

ii) 成果目標

レーザープラズマにより電子を安定に加速し、準単色化 ($DE/E \leq 0.01$) とともに 1GeV 超の加速エネルギーを達成する。加速電子数は、電荷に換算して 10pC/バンチ以上を目指す。また、マイクロアンジュレーターへの安定した電子の入射を行い、1keV の X線ビーム (放射光) を実現する。超小型化については、既存の加速器と比較して加速長さ (加速用プラズマの長さ) で 1/1000 を達成するとともに、各要素技術・システムの評価を行い、トレーラーサイズ (10m) の XFEL を実現するための検討を行う。なお、マイクロアンジュレーターについては、個別の製品化を目指し、国内外の放射光施設などへの導入を目指す。

② プロジェクト 2： 超小型パワーレーザー

i) 研究開発の概要

日本独自のマイクロチップレーザー技術、高出力半導体レーザー (LD) 技術、セラミック Nd:YAG などのレーザー媒質技術、光学材料の常温接合技術、波長変換技術などを駆使し、高出力のパルスレーザーを超小型化・ポータブル化して各種応用 (材料強化、インフラ設備メンテナンス、非破壊検査、加工、医療応用、セキュリティーなど) に展開する。

ii) 成果目標

これまでパルスエネルギーが 1mJ クラスであったマイクロチップレーザーを、本プログラムにより発振器のみで 20mJ まで高出力化する。また、発振器と増幅器(アンプ)の構成によりパルスエネルギー100mJ、繰返し 100Hz のプロトタイプを開発する。製品化企業3社は、重量 1kg 以下のハンドヘルドレーザーを製品化する。更に、パルスエネルギー1J、パルス繰返し 300Hz の安定で使い易く、1年間メンテナンスが不要なテーブルトップレーザーを開発・製品化し、応用へ展開する。

③ プロジェクト 3： レーザー応用システム化・XFEL 実証評価

i) 研究開発の概要

プロジェクト 1 (レーザー加速 XFEL 実証) およびプロジェクト 2 (超小型パワーレーザー)の開発が順調に進展したことから、光源開発の成果をユーザーの立場で評価し、応用へ展開するためのプロジェクト 3 (レーザー応用システム化・XFEL 実証評価)を平成 28 年度に追加して立ち上げた。

プロジェクト 1 関連では、レーザープラズマ加速による電子ビームとマイクロアンジュレーターとの組合せによるX線ビーム(放射光)の評価をプラットフォームにて実施する Pj-3J、従来の高周波加速器の電子ビームを使用してマイクロアンジュレーターの性能評価を行う Pj-3L、レーザープラズマ加速による電子ビームの評価を行う Pj-3P を立ち上げた。

プロジェクト 2 関連では、超小型パワーレーザーをキーデバイスとした応用システムをユーザーが主体となって開発することとし、開発したシステムを使用した生産デモやフィールドにおける実証試験を行い、レーザーおよびシステムの実用性を評価するための Pj-3H を立ち上げた。また、ユーザーによる試用やサポートを本来の業務とする公設試(静岡県工業技術研究所浜松工業技術支援センター)に超小型パワーレーザーを整備し、ユーザー利用に供するための Pj-3M を立ち上げた。

ii) 成果目標

プロジェクト 1 関連では、開発した各要素技術をプラットフォームにて個々に評価するとともに、総合システムとしての組合せ評価を行う。また、レーザープラズマ加速による電子およびX線ビーム(放射光)の実用性評価を実施する(Pj-3P および Pj-3J)。マイクロアンジュレーターについては、従来の加速器電子ビームによるX線ビーム(放射光)の発生を行い、性能を実証する(Pj-3L)。

プロジェクト 2 関連では、レーザーをキーデバイスとした応用システムの実用性評価を、複数のユーザー機関により実施する(Pj-3H)。また、試用の希望が特に多いハンドヘルドレーザーについては公設試にレーザーを配備して利用環境を整備し、ユーザー利用に供するとともに、ImPACT 終了後もユーザーによる利用を可能とする仕組みを構築する(Pj-3M)。セキュリティー応用については、THz 波による有害ガスのリアルタイム(1秒以内)検出の原理実証を行う(Pj-3K)。

(5) 研究開発プログラムの全体ロードマップ

プロジェクト 1 (レーザー加速 XFEL 実証)、プロジェクト 2 (超小型パワーレーザー) およびプロジェクト 3 (レーザー応用システム化・XFEL 実証評価) の実施時期 (ロードマップ) を図 1-6 に示す。ロードマップには、ImPACT 後 (H31 年度～) に計画している社会実装に必要な取り組みも記載した。

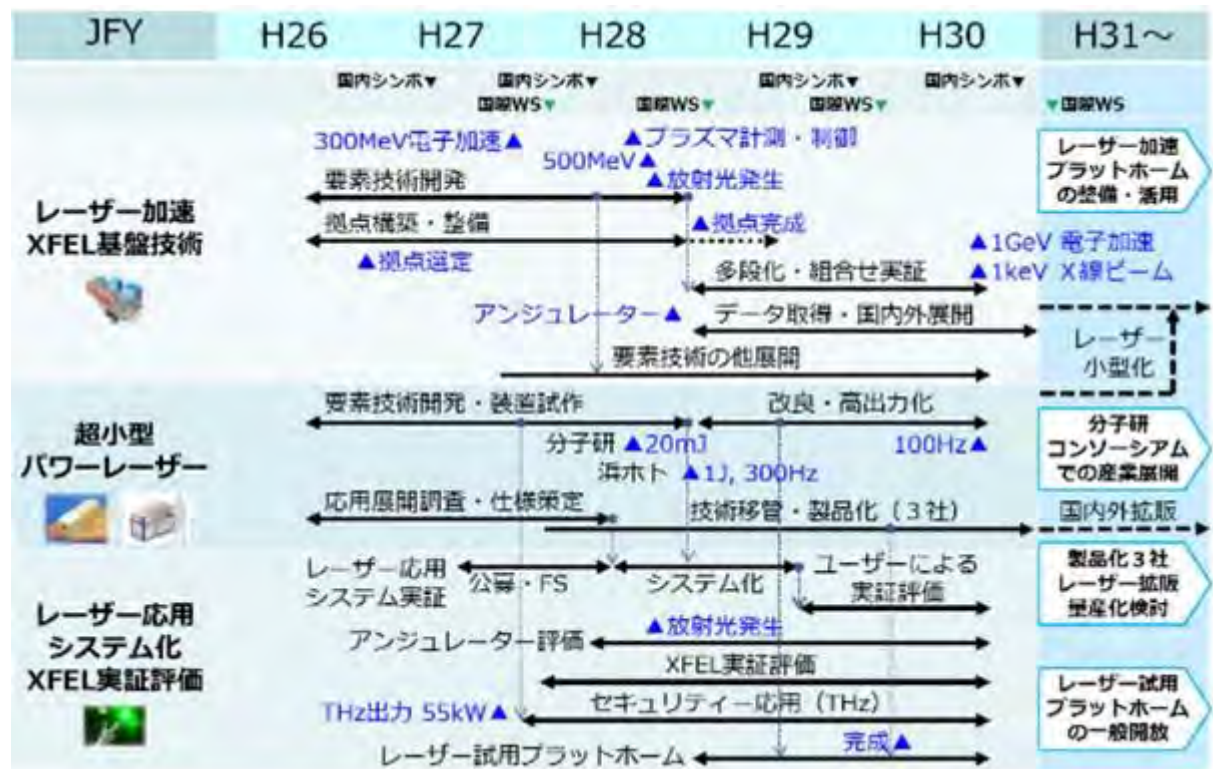


図 1-6 プログラム全体のロードマップ

(6) 研究開発プログラムのマイルストーン

研究開発プログラムを構成するプロジェクト1「レーザー加速 XFEL 実証」、プロジェクト2「超小型パワーレーザー」、およびプロジェクト3「レーザー応用システム化・XFEL 実証評価」のマイルストーンを、各々以下に記す。なお、各項目の内容は「(2) 研究開発プログラムの達成目標」と同一である。

プロジェクト1: レーザー加速 XFEL 実証

1. 低エネルギー多段加速技術の開発、300MeV 電子ビームの発生 (H27)
2. 既存加速器の電子ビームとマイクロアンジュレーターによるX線ビームの発生 (H28)
3. 拠点(レーザー加速統合プラットフォーム)の構築、整備 (H28)
4. レーザー加速 XFEL 各要素技術の開発、組合せ実証 (H30)
5. 拠点における多段加速による1GeV 超の安定な電子ビームの発生 (H30)
6. 拠点に設置したマイクロアンジュレーターによる1keV のX線ビームの発生 (H30)
7. マイクロアンジュレーターの製品化 (H30)

プロジェクト1 のマイルストーンの見直し時期は、拠点における多段加速(ステージング)実験の準備が整う平成29年度末(平成30年3月)を想定している。その時点で個々の要素技術の進捗と実証評価の結果を勘案し、判断する。

プロジェクト2: 超小型パワーレーザー

1. パルスエネルギー20mJ、繰返し100Hz のハンドヘルドレーザーの実現 (H28)
2. パルスエネルギー1J、繰返し300Hz のテーブルトップレーザーの実現 (H28)
3. ハンドヘルドレーザー(パルスエネルギー20mJ) プロトタイプの完成 (H28)
4. ハンドヘルドレーザー(パルスエネルギー100mJ) プロトタイプの完成 (H30)
5. ハンドヘルドレーザーの企業への技術移管および製品化 (H30)
6. テーブルトップレーザーの製品化 (H30)

プロジェクト2 の見直しを判断する時期としては、ハンドヘルドレーザーの製品化企業によるプロトタイプ機の完成が見込める平成29年度末(平成30年3月)を想定している。プロトタイプ機の完成度を勘案し、製品化の内容を検討する。

プロジェクト3: レーザー応用システム化・XFEL 実証評価

1. ユーザーニーズに基づく超小型パワーレーザーの応用提案 (H27 および H28)
2. 超小型パワーレーザーを使用したユーザーによる生産デモ (H30)
3. 超小型パワーレーザーのセキュリティ応用技術の原理実証 (H30)
4. 公設試への超小型パワーレーザーの配備および利用環境の整備 (H29)
5. 公設試における超小型パワーレーザーのユーザー利用の開始 (H30)
6. 既存加速器の電子ビームとマイクロアンジュレーターによるX線ビームの発生 (H28)
7. レーザープラズマ加速による電子およびX線ビームの実用性評価 (H30)

プロジェクト 3 の見直しを判断する時期としては、ハンドヘルドレーザーの製品化企業によるプロトタイプ機の完成が見込める平成 29 年度末(平成 30 年 3 月)を想定している。プロトタイプ機の完成度を勘案し、その応用展開の内容に反映する。

(7) 研究開発プログラム実施期間

平成 26 年 10 月から平成 31 年 3 月まで (4.5 年間)

2. 研究開発プロジェクトの計画及び実施状況

(1) 研究開発プロジェクト 1: レーザー加速 XFEL 実証

① プロジェクトの計画

日本独自の安定なレーザープラズマ加速技術により、従来の加速器と比較して 1/1000 の加速長さの電子加速器を実現する。さらに、従来と比較して必要な磁石量が 1/1000 のマイクロアンジュレーター（極短周期の超小型アンジュレーター）を開発し、X線ビーム（放射光）の発生を確認する。また、安定な加速を確認・維持するために必要な計測・制御技術、電源の高度化・効率化など超小型 XFEL の実現に必要な要素技術を開発する。

レーザープラズマ加速では電子を安定に加速し、準単色化 ($DE/E \leq 0.01$) とともに 1GeV 超の加速エネルギーを達成する。加速電子数は、電荷に換算して 10pC/バンチ以上を目指す。また、マイクロアンジュレーターへの安定した電子の入射を行い、1keV のX線ビーム（放射光）を実現する。超小型化については、既存の加速器と比較して加速長さ（加速用プラズマの長さ）で 1/1000 を達成するとともに、各要素技術・コンポーネントの評価を行い、トレーラーサイズ (10m) の XFEL を実現するための検討を行う。なお、マイクロアンジュレーターについては、個別の製品化を目指し、国内外の放射光施設などへの導入を目指す。

② プロジェクトの体制

Pj-1 (レーザー加速 XFEL 実証) は、以下のサブプロジェクトにより構成されている。

サブプロジェクト (研究開発課題)	内容、研究開発プロジェクトにおける役割等	想定する研究開発機関
Pj-1A: レーザー加速要素技術	レーザープラズマ加速による安定な電子加速を実現し、プラズマ素子としてモジュール化する。また、多段加速に必要なモジュール間のアライメント技術を開発する。	マイクロアンジュレーターへの入射が可能な安定な電子加速を平成29年度末までに実現可能な機関
Pj-1B: レーザー加速統合プラットフォーム	各プロジェクト (1A, 1C, 1D) で開発した要素技術・装置を1ヶ所に集約して組合せ、プラットフォームとして完成させる。また、完成させたプラットフォームを使用して、レーザープラズマ加速された電子によるX線ビーム（放射光）の発生を確認する。	各プロジェクト (1A, 1C, 1D) の開発成果を統合し、平成29年度末までにシステム化が可能な機関
Pj-1C: マイクロアンジュレーター	磁極の周期およびギャップを最適化し、超小型のマイクロアンジュレーターモジュールとして完成させる。	マイクロアンジュレーターを平成29年度末までに実現可能な機関
Pj-1D: ビーム計測・制御技術	マイクロアンジュレーターに電子を正確に入射させるための各種のビーム計測および制御技術を開発する。	レーザーおよび加速電子の計測・制御を平成29年度末までに実現可能な機関
Pj-1E: プラズマ素子・電源技術	電子加速用のプラズマ素子技術および高速・大電流・高繰り返し回の小型・高効率パルス電源を開発し、電子加速システムの電源として完成させる。	電子加速に必要な高効率パルス電源を平成28年度末までに実現可能な機関

委託機関および研究開発責任者、サブプロジェクト間の関連などは図 1-4 および図 1-5 に示した。Pj-1Cではマイクロアンジュレーターの磁場強度の増大および更なる小型化のための新概念の検討も行っている。また、Pj-1Eは平成28年度末で開発を中止し、その開発内容はPj-1Aに統合し引き継いだ。

各々の開発課題(サブプロジェクト)の成果は最終的にプラットフォームとして1ヶ所に集約し、1GeV 超の高エネルギー電子加速および 1keV のX線ビーム(放射光)の発生実験を行い、システムとしての機能を実証する。また、これらの開発を通して XFEL の実現に必要な各要素技術の高度化を行う。各開発の内容は相互に深く関連するため、密な連携により過不足のない開発を行う。

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

Pj-1(レーザー加速 XFEL 実証)の開始時および終了時のTRLを以下に示す。

<研究開発の進展状況>

	プロジェクト名	プロジェクト 開始時のTRL	プロジェクト 終了時のTRL
Pj-1A	レーザー加速要素技術	2	4
Pj-1B	レーザー加速統合プラットフォーム	2	4
Pj-1C	マイクロアンジュレーター	3	5
Pj-1D	ビーム計測・制御技術	2	4

i) プロジェクトの進捗状況

Pj-1ではプラットフォームにおいて1GeV超の電子加速および1keVのX線ビーム(放射光)の発生をプログラムの目標としている。Pj-1A(レーザー加速要素技術)では、大阪大学の40TW Ti:sapphire レーザーを使用して電子ビームの発生・加速、多段加速実験などを順調に実施し当初計画以上の進捗が得られていたが、平成30年6月18日に発生した大阪府北部地震により大阪大学のレーザーに機械的な損傷が生じ、実験の遂行が困難となった。そのため、急遽プラットフォーム(@播磨)に装置・部品を移設し、代替の実験を実施した。Pj-1C(マイクロアンジュレーター)およびPj-1D(ビーム計測・制御技術)に関しては、ほぼ計画通りの進捗となっている。

Pj-1B(レーザー加速統合プラットフォーム)では、種々の要素技術・システムの集約を進めた。建屋整備、電源・冷却水などユーティリティー整備、クリーンルーム設置、安全インターロックの調整や実験装置の搬入など概ね順調に進捗していたが、フランス Amplitude 社に製作を委託した加速用の Ti:sapphire レーザー光学系に数回のダメージが生じ、その修復とその後の調整に時間を費やした。その結果、平成29年に計画していたプラットフォームにおけるシステムの組合せ実験の開始が平成30年にずれ込んだが、平成31年3月の目標達成に向け、鋭意努力している。一方、この代替として、QST 関西研のサブ PW レーザー(J-KAREN)を使用した1GeV電子加速実験も行った。

ii) 獲得成果及び目標達成への貢献度

Pj-1A (レーザー加速要素技術) で阪大が実施した電子加速実験の一例を図 2-1-1 に示す。約 2mm 長のプラズマで約 100MeV の加速ゲインが得られた。加速エネルギーの絶対値は 100MeV と小さいが、従来の加速器と比較して約 1000 倍の加速勾配 (1/1000 の加速長) が得られ、理論的な予測を裏付けた。阪大のレーザープラズマ加速は世界でも特に安定なビームが得られており、再現性に優れている (図 2-1-2)。

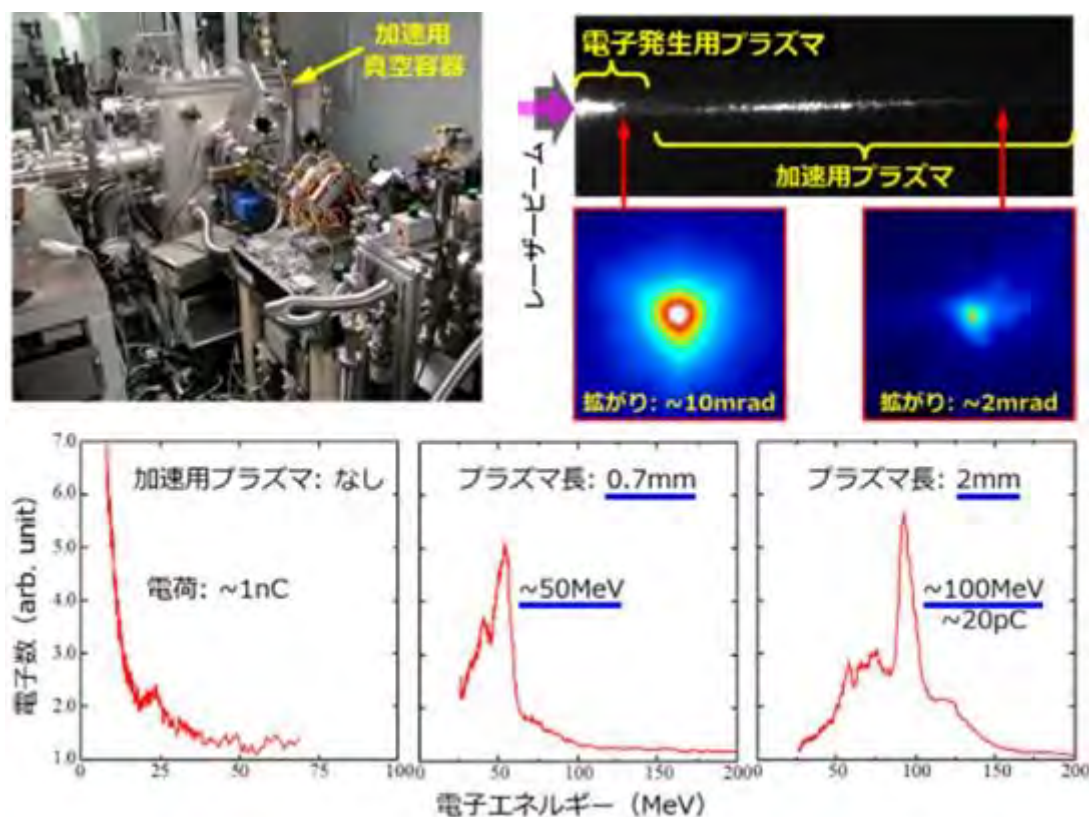


図 2-1-1 レーザープラズマ加速による 100MeV 電子ビームの発生

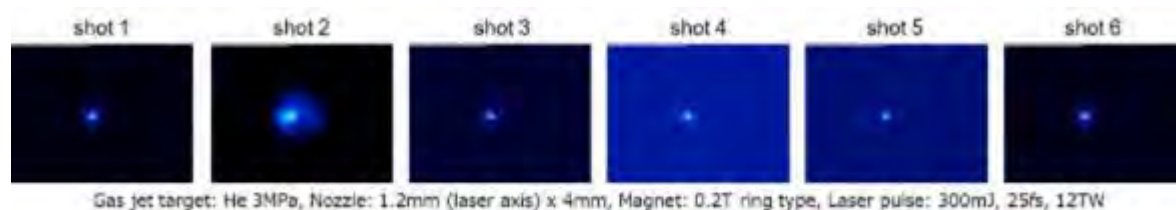


図 2-1-2 レーザープラズマ加速による電子ビームの安定性

阪大の電子加速用レーザー装置の構成を図 2-1-3 に示す。密度 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ のガスジェット中にレーザーパルスにより長さ 4mm のプラズマチャネルを形成し、6TW (300mJ, 50fs) のレーザーパルスを集光して電子を加速した。6TW という低いレーザー出力にも関わらず、500MeV 級の準単色電子ビームが得られ、そのテールは 600MeV に達した。

後述のベンチマーク (図 2-1-35) の通り、海外機関では GeV 級の電子加速に数 J~10J のパルスエネルギーを必要としている。今回の結果は効率的に非常に優れ、装置の小型化に大きく寄与する。

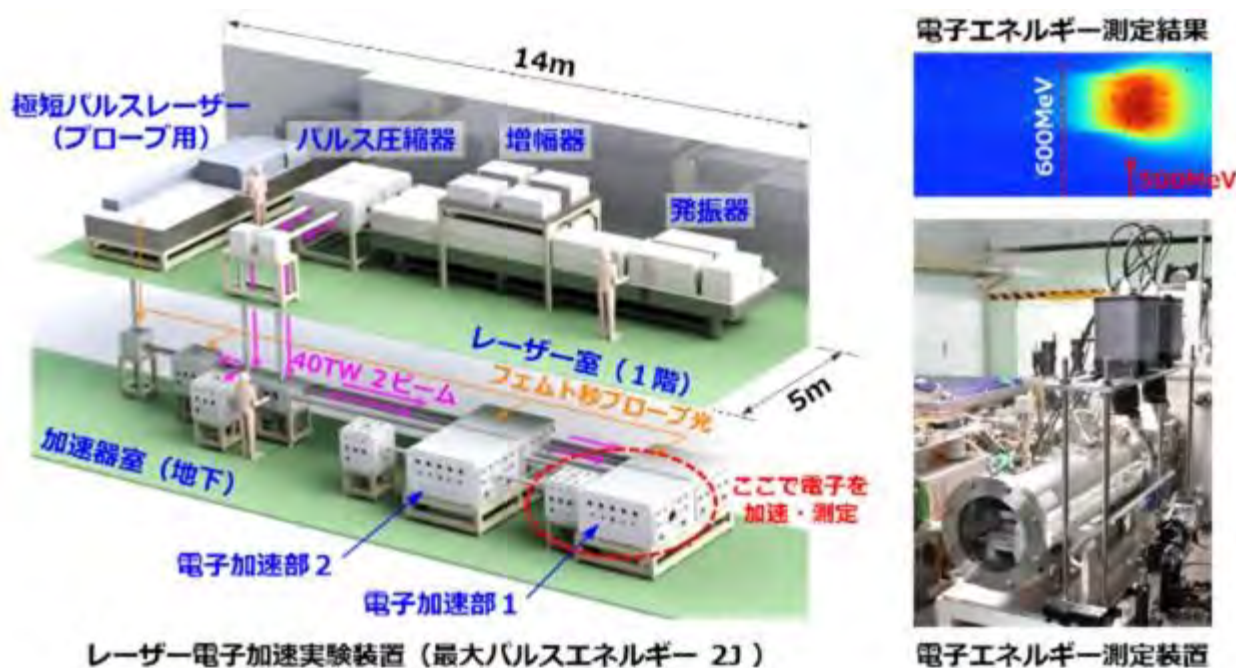


図 2-1-3 レーザープラズマ加速による 500MeV 電子ビームの発生

ソレノイドとスリットを使用した電子ビームのエネルギースペクトル準単色化 (スペクトルの切り出し) の結果を図 2-1-4 に示す。レーザー出力は 20TW (0.6J, 30fs) で、切り出した電子のエネルギーは約 10MeV である。ソレノイドとスリットを組み合わせることにより、エネルギー・スプレッド 3%程度 (0.3MeV in FWHM) の準単色化が達成された。

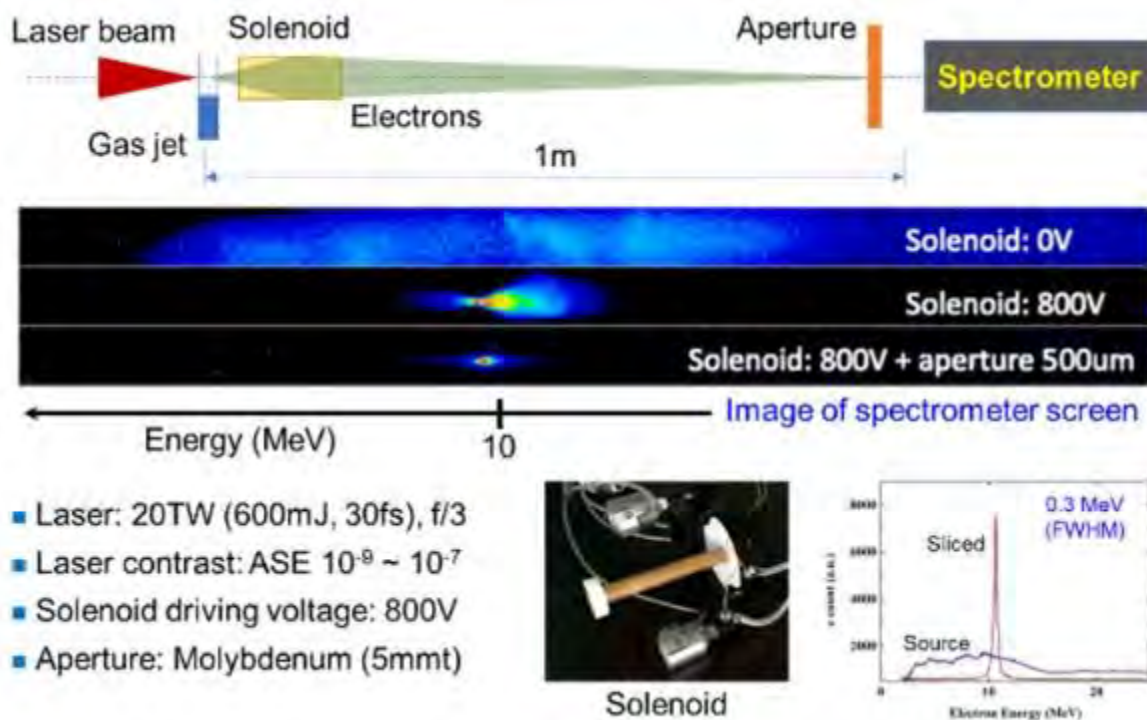


図 2-1-4 ソレノイドとスリットによる電子エネルギースペクトルの準単色化

ソレノイドの磁場強度を変えたときのエネルギースペクトルの変化を図 2-1-5 に示す。ソレノイドの磁場強度の調整により、切り出しエネルギーを制御できることを確認した。

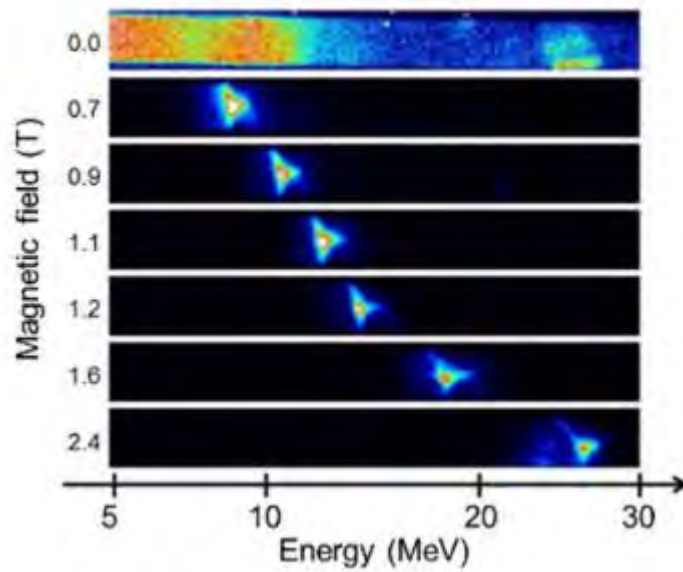


図 2-1-5 ソレノイドの磁場強度による切り出しエネルギーの制御

同じくソレノイド磁場強度を変えたときのエネルギースペクトルの変化と再現性を図 2-1-6 に示す。再現性についても良好な結果が得られた。

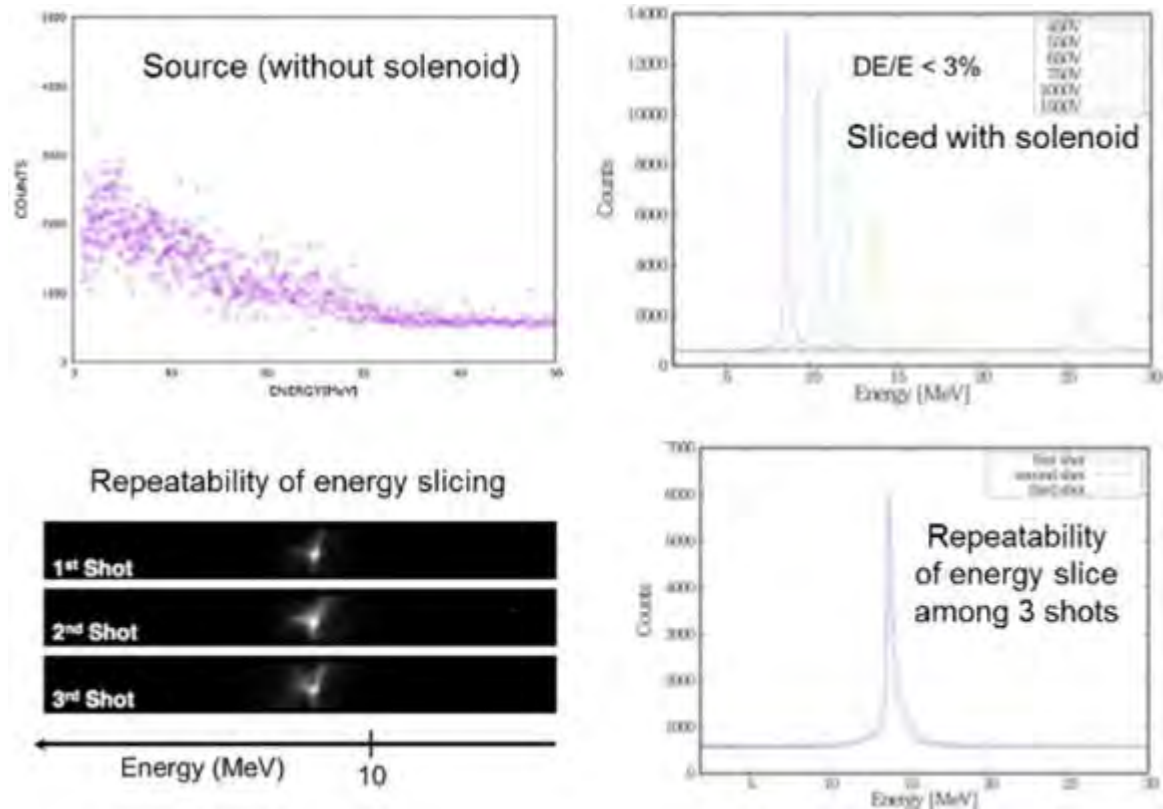


図 2-1-6 ソレノイド磁場強度による切り出しエネルギーの制御と再現性
(左上:初期スペクトル、右上:切り出し後のスペクトル、下:再現性)

2段のガスジェットによる電子ビームの追加速実験を行った。実験配置・条件を図 2-1-7 に、測定したエネルギースペクトルを図 2-1-8 に示す。

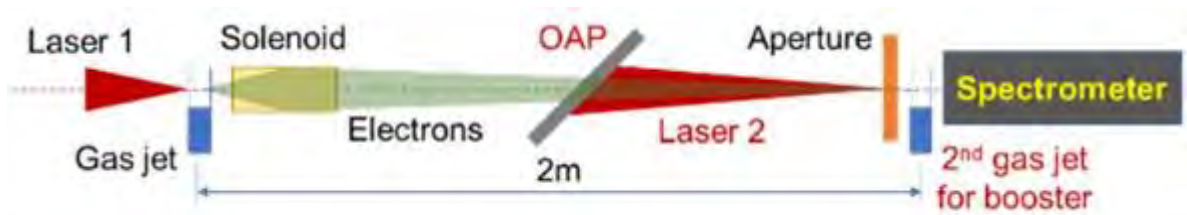


図 2-1-7 2段ガスジェットによる電子ビームの追加速実験スキーム

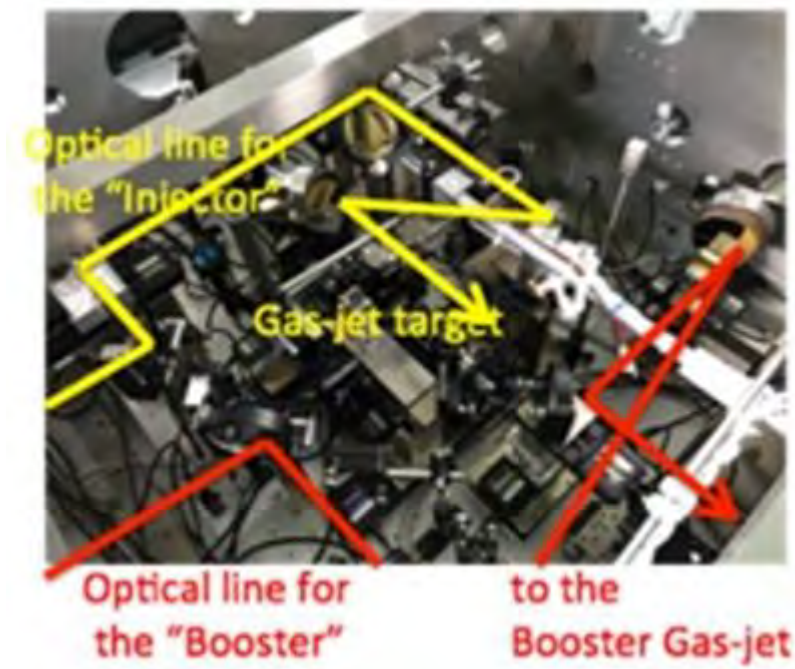


図 2-1-8 2段ガスジェットへのレーザー入射光学系

1段目のガスジェットで発生した電子のエネルギーを 10MeV、2段目までの距離を 2m とした場合、電子が2段目のガスジェットに到達するまでの間にバンチの伸長が顕著となる。その結果、電子バンチがレーザー航跡波の半周期より長くなり、加速・減速の両フェーズに電子が入射することにより複雑なスペクトルが得られた。

そこで、プラットホームにおける多段加速では初段の電子エネルギーを 100MeV 程度まで高め、電子バンチ全体が一つの加速フェーズ(径方向の収束も考慮すると、航跡波の4分の1周期以内)に入射するよう調整することとした。なお、今回の2段加速では入射電子のほとんどがエネルギー変調(加速および減速)を受けており、予想を超える高いアクセプタンスが得られた。

Pj-1C (マイクロアンジュレーター) で高エネ研が開発したマイクロアンジュレーター磁石と従来の磁石との比較を図 2-1-9 に示す。平板状に焼結した長さ 152mm、幅 20mm、厚さ 2mm の NdFeB 磁石に周期 4mm で 38 対の NS 極を着磁した。従来のアンジュレーター磁石は個々の磁石の高さをmm 単位で調整する必要があったが、開発品は一体成型のため、調整が不要である。物量の削減と、調整期間の大幅な短縮が期待できる。

長さ 100mm (周期 4mm、25 対) のマイクロアンジュレーター磁石を5本接続し、磁場の計測とそれに基づく電子軌道を計算した (図 2-1-10)。ほぼ均一な周期磁場が5本分の磁石長 (500mm) にわたって形成され、電子軌道の位置ずれも 1mm 以下であったため、アンジュレーターとして十分に機能すると思われる。また、磁石の接続部に特異な磁場分布や電子軌道は現れず、滑らかな接続が確認され、磁石の長尺化についても目途を得た。

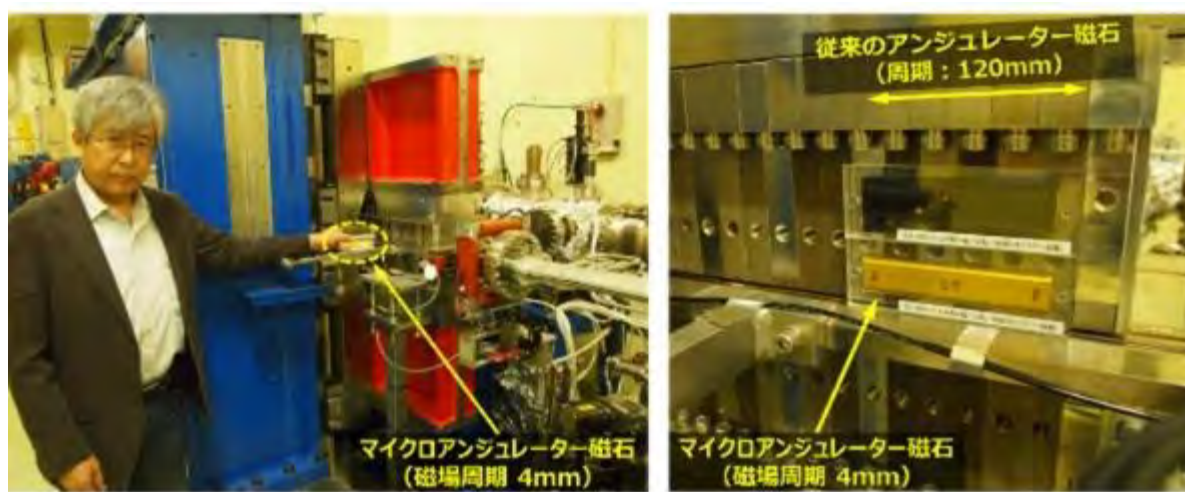


図 2-1-9 マイクロアンジュレーター磁石と従来の磁石との比較

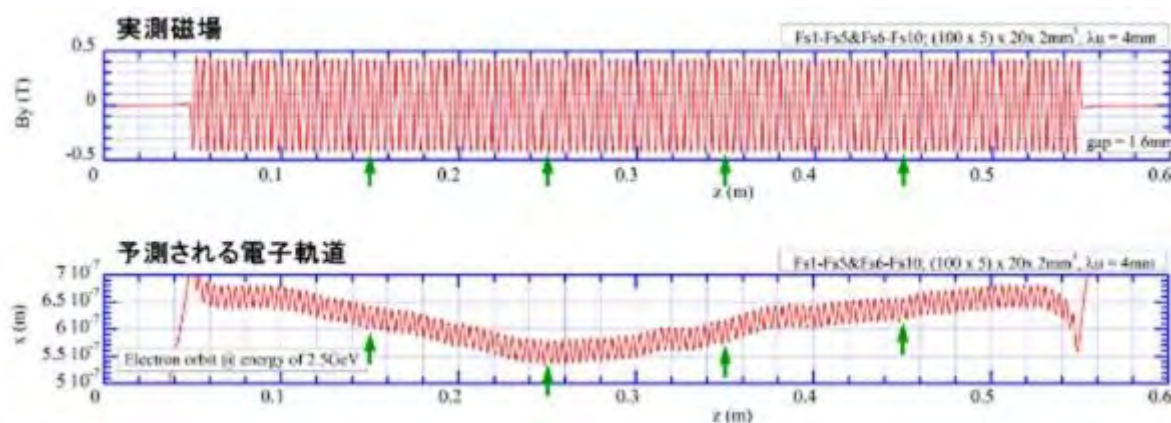


図 2-1-10 マイクロアンジュレーター磁石の磁場測定結果と電子軌道計算結果

長さ 100mm (周期 4mm、25 対) の磁石を装着したマイクロアンジュレーターを東北大学の電子光理学研究センター加速器室に持ち込み、電子加速器 (t-ACTS) と組合せて放射光の発生を確認した。磁石とモジュールの外観を図 2-1-11 に、加速器室への設置状況を図 2-1-12 に示す。観測した放射光は事前に実施したシミュレーションの結果と良く合致し、マイクロアンジュレーターの性能を検証することができた (図 2-1-13)。

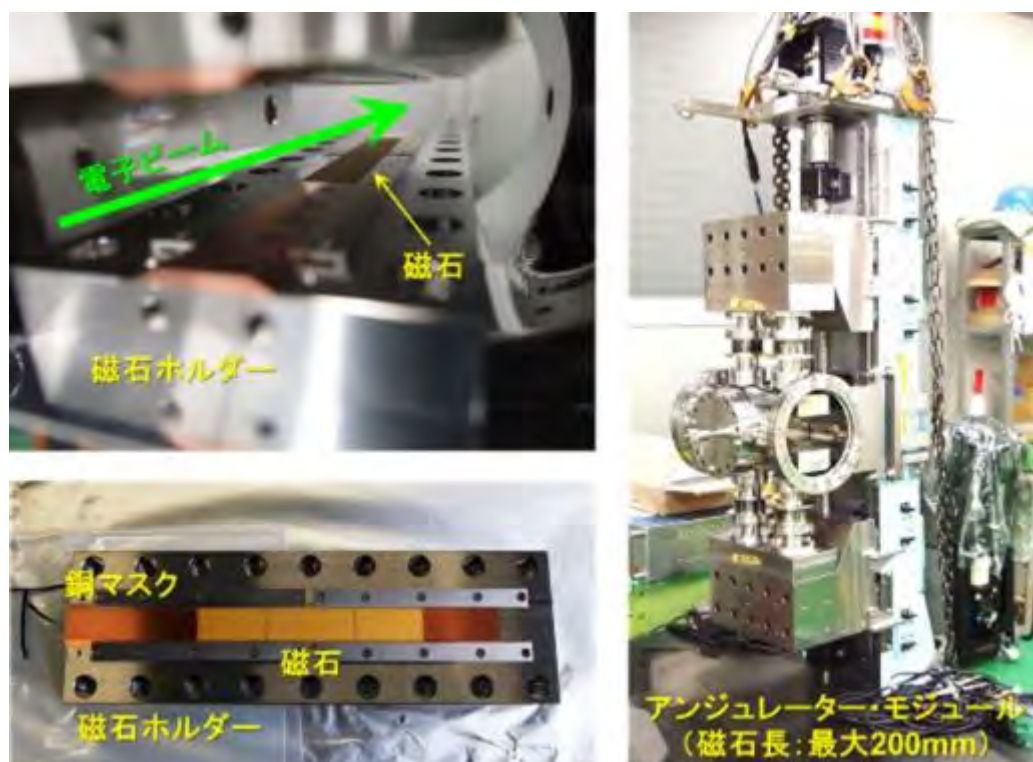


図 2-1-11 性能検証実験に使用した磁石とアンジュレーター・モジュール

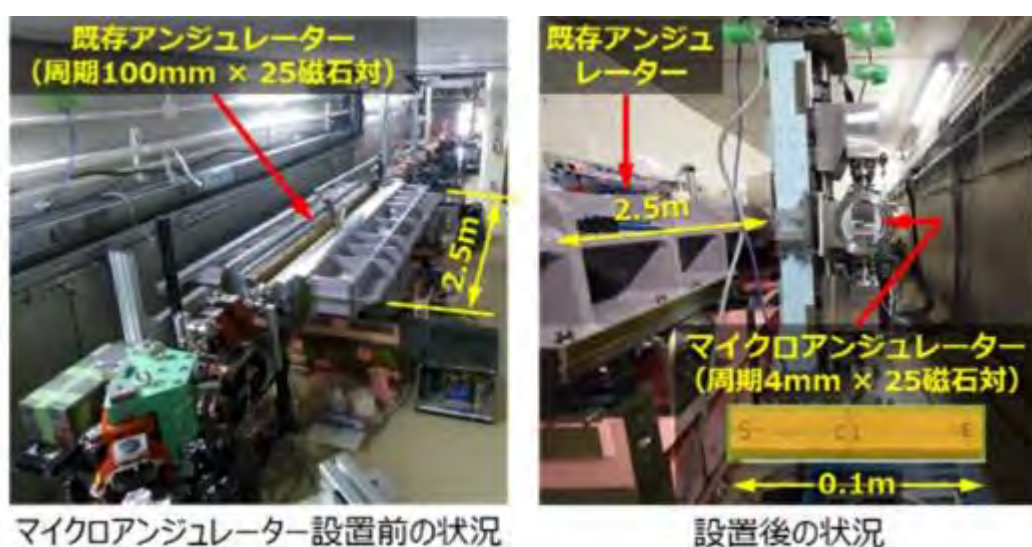


図 2-1-12 マイクロアンジュレーターの加速器室への設置状況

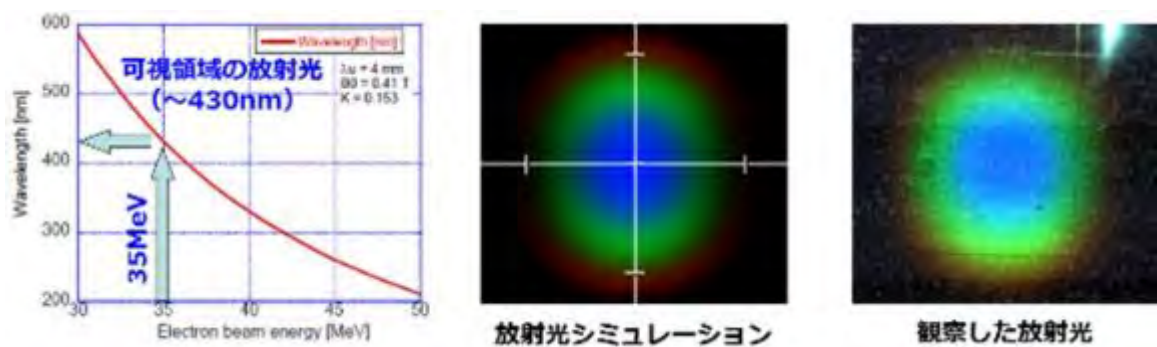


図 2-1-13 観測したマイクロアンジュレーターによる放射光とシミュレーションの比較

プラットホーム (@播磨) における電子ビームとの組合せ実証に使用するアンジュレーター (磁石長: 最大 500mm)、および他施設への展開等を図るためのアンジュレーター (磁石長: 最大 1000mm) を図 2-1-14 に示す。東北大学で使用したアンジュレーターに装着可能な磁石長は最大 200mm であるが、プラットホーム向けは光量を稼ぐため 500mm を採用した。また他施設、特に放射光施設のように細く安定した電子ビーム軌道が期待できる施設向けには磁石長 1000mm を採用した。なお、図 2-1-14 右のアンジュレーターは将来のクライオ化や脱ガスのためのベーキングにも対応した構造となっている。



図 2-1-14 試作開発したアンジュレーター (左: 磁石長 0.5m、右: 磁石長 1m)

アンジュレーター・モジュール (駆動機構) については装着磁石長さ 200mm、500mm、1000mm を、磁石周期については 4mm、6mm、10mm をラインナップした。モジュールおよび磁石とも製造は民間企業に委託しており、国内外への供給体制も整った。

Pj-1D (ビーム計測・制御技術) で量研 (QST) 関西研が実施したレーザー航跡波の計測結果を図 2-1-15 および図 2-1-16 に示す。これらの技術はプラットホームにおいて、加速用レーザーの条件にフィードバックし、安定な電子ビームの発生・制御・加速に利用する。周波数領域ホログラム (図 2-1-16) では、レーザー航跡波の有無による干渉縞のシフトを明瞭に観測した。

その他、ベータトロン放射の計測によるアライメントモニターの開発、電子ビームのバンチ長計測技術の開発などを行った。

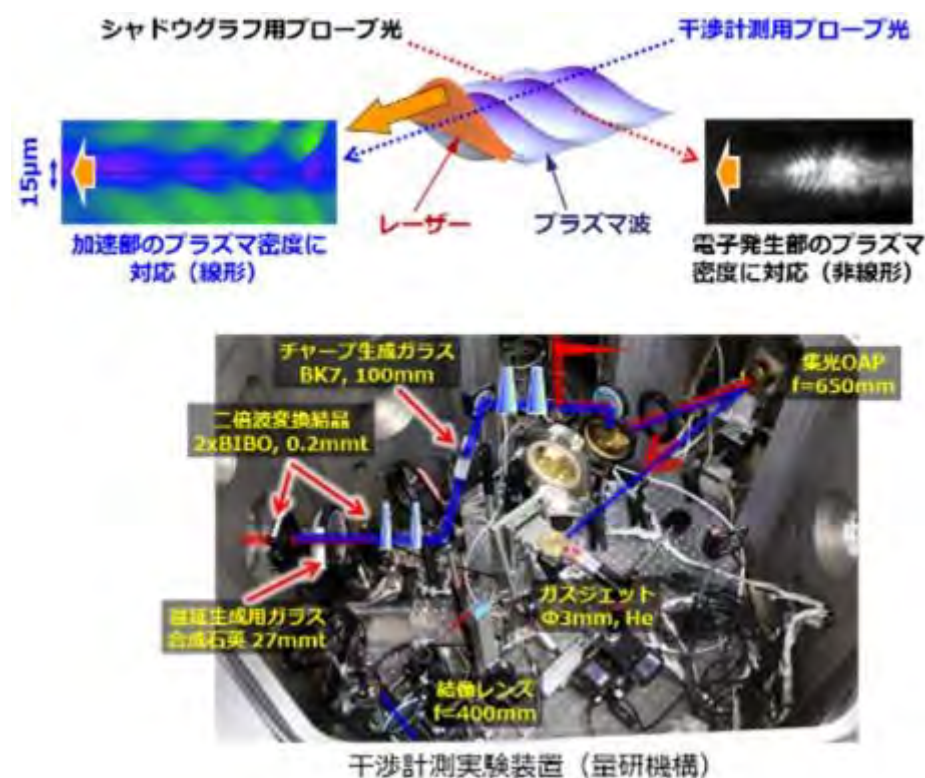


図 2-1-15 シャドウグラフおよび干渉によるプラズマ波の計測

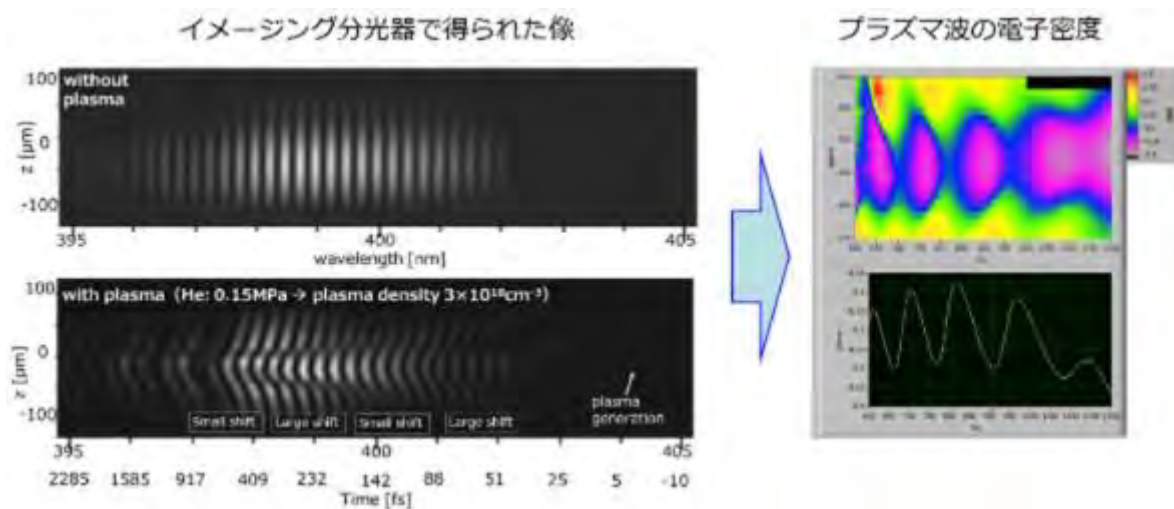


図 2-1-16 周波数領域ホログラムによるレーザー航跡波の計測

QST 関西研のサブ PW レーザー (J-KAREN) を使用して 1GeV の電子加速実験を行った。実験スキームを図 2-1-17 に示す。レーザーパルスエネルギー 12J、ガスジェット He/Ne = 99.5/0.5、ノズル径 10mm の結果である。レーザーの仕様はプラットホーム (@播磨) のビームライン3とほぼ同等である。

1GeV のピーク加速エネルギーを得たときの加速電荷は 14pC であるが、800MeV の場合には 300pC 弱 (670~870MeV で約 200pC) と、非常に大きな加速電荷を得た。また、エネルギースペクトルのテールは 1GeV を超え、拠点 (プラットホーム) における加速実験の可能性を十分に示唆する結果を得た。

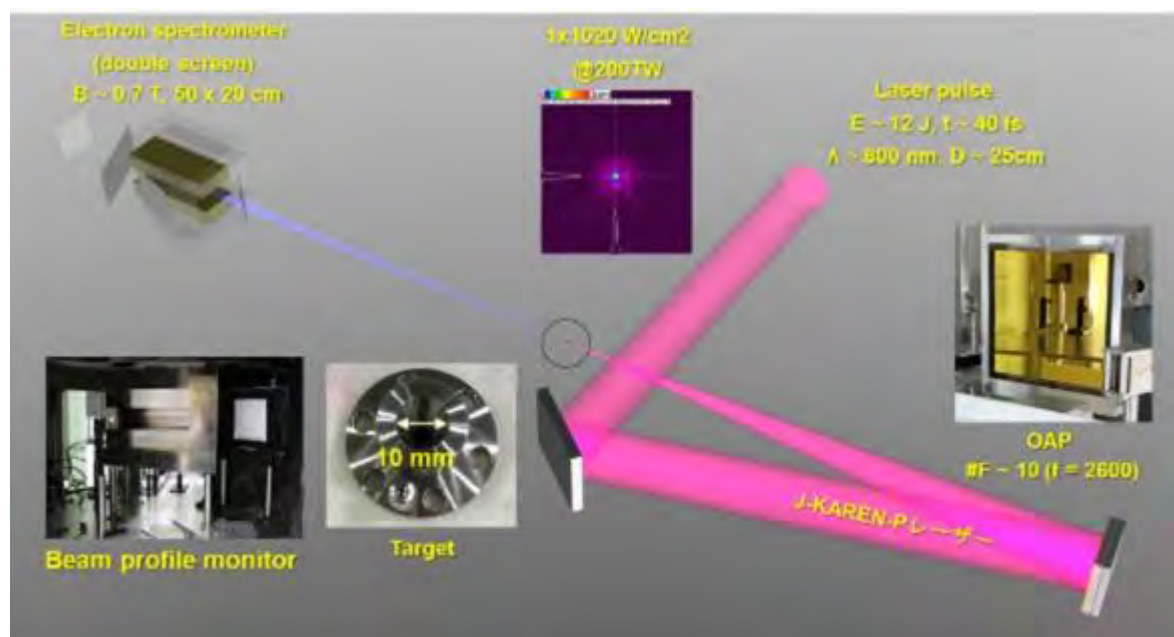


図 2-1-17 QST における 1GeV 電子加速実験のスキーム

Pj-1B (レーザー加速統合プラットホーム) で検討した電子加速専用のレーザーの機能および構成を図 2-1-18~図 2-1-20 に示す。電子発生ではガス密度とレーザー強度を高め、非線形レーザー航跡波を使用し、制御・加速ではガス密度とレーザー強度を抑えて安定な線形レーザー航跡波を使用する。本構成を基本とし、レーザーの設計および製作を行った。



図 2-1-18 海外機関の電子加速スキームと ImPACT の電子加速スキーム

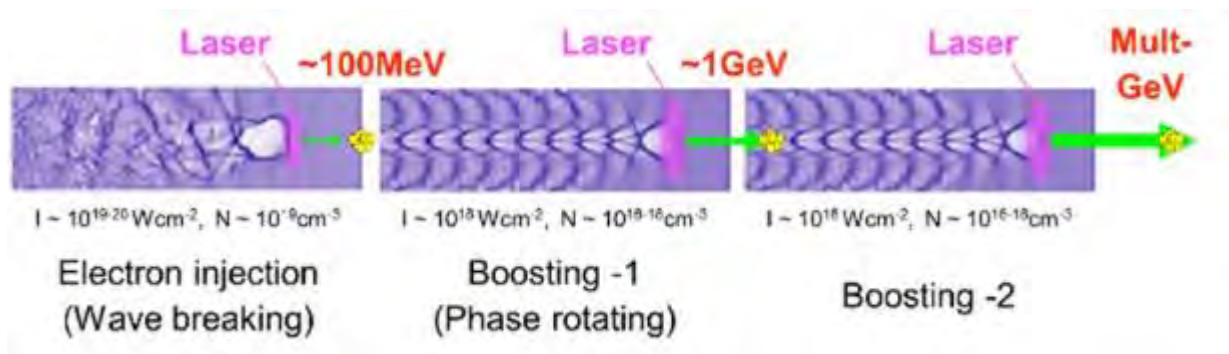


図 2-1-19 電子発生・制御 (準単色化)・加速の各段におけるプラズマ波 (航跡波)

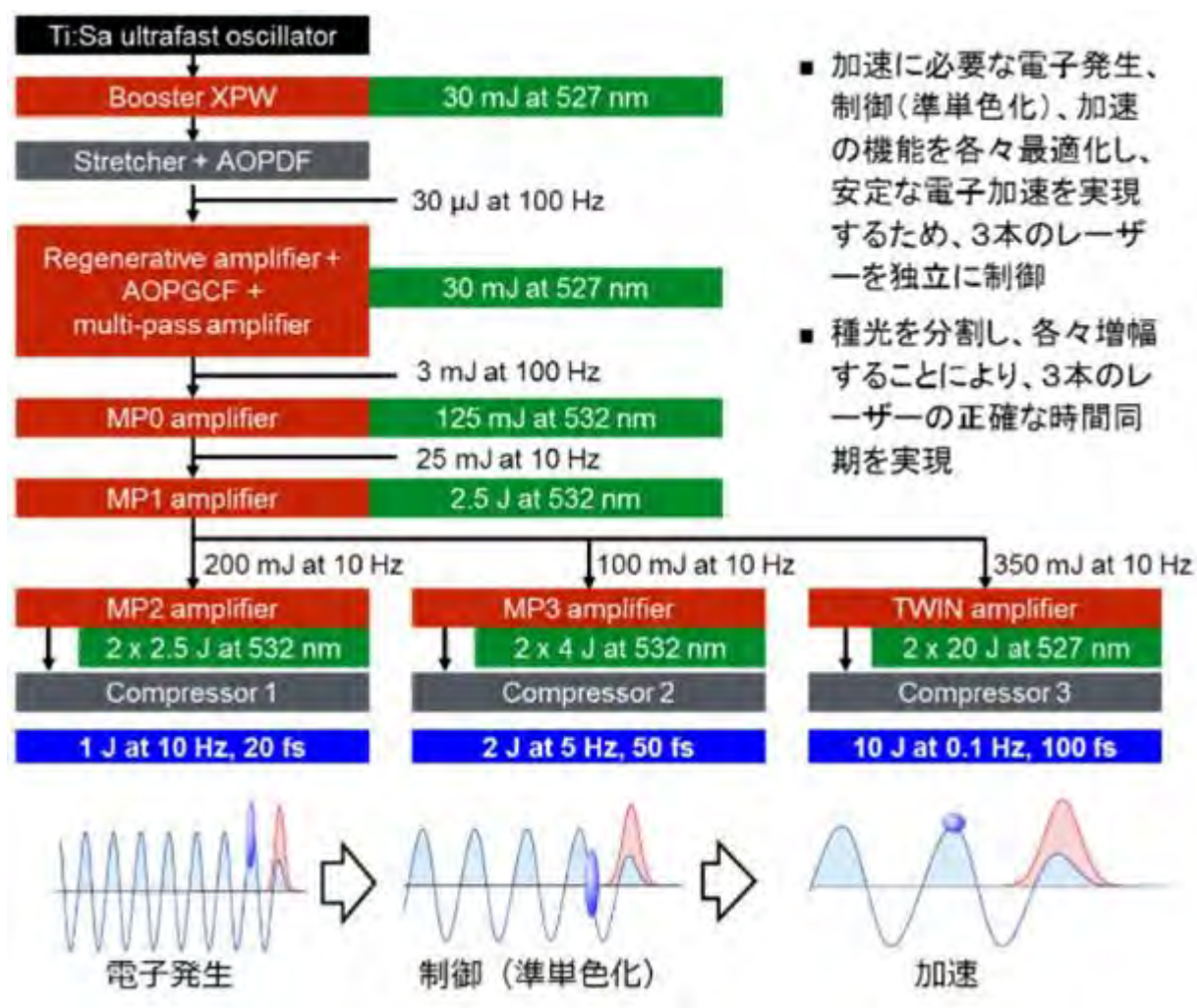


図 2-1-20 プラットホーム・レーザーシステムの構成

電子加速専用のレーザー設計を進めつつ、拠点（レーザー加速統合プラットフォーム）を構築するためのサイト選定作業を行った。複数の候補の中から最終的に「大阪大学未来戦略光科学連携センター（理化学研究所放射光科学研究センター内）」に拠点を置くこととした。プラットフォームは同センター内の組立調整実験棟に構築することとした。

プラットフォームの構築・整備に関しては、受変電設備（変圧器・配電盤ほか）の新增設、建屋整備、配線工事、火災報知器、監視設備更新、ネットワーク、データ管理、しゃへい・漏えい線量評価、放射線モニター設置、冷却・排水・補給水設備工事、しゃへい壁へのレーザー伝送用穴あけ、インターロック、クリーンルーム整備、電子ビームダンプ整備、制御室整備、消防法対応等の諸々の作業を Pj-1 と Pj-3J が協力して行った。

プラットフォーム・レーザー室の整備の様子を図 2-1-21 および図 2-1-22 に示す。組立調整実験棟には SACLA 開発時の試験加速器（SCSS）が設置されていたが、それを移設し空いたスペースの西側約 1/3 をクリーンルーム化してレーザーシステムを設置した。



図 2-1-21 プラットホーム・レーザー室の整備の様子（組立調整実験棟@理研播磨）

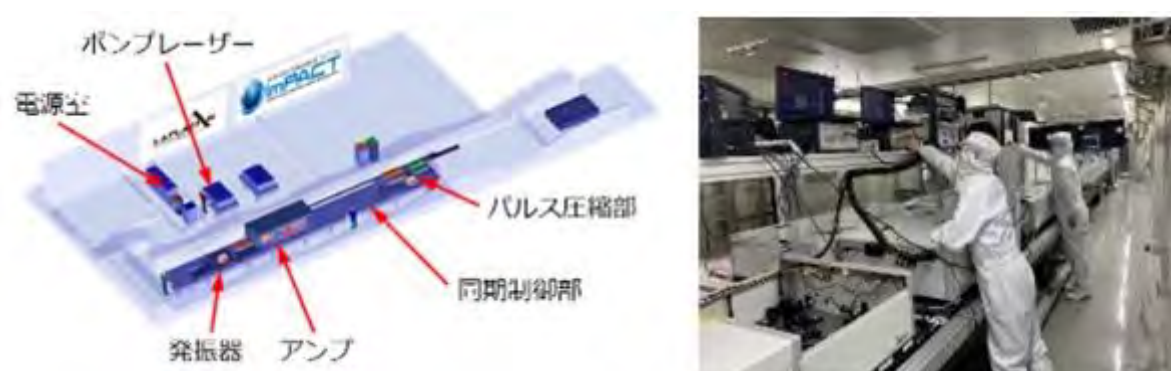


図 2-1-22 プラットホームに設置したレーザーシステム

レーザーシステムは連結一体化した大型の光学テーブル上に設置し、空間的な位置精度を高めることにより、電子加速の安定化を図った。熱源となる大型のポンプレーザーは別室に設置し、全てのレーザー電源を電源室に隔離してレーザー室における発熱を最小限に抑える設計とした。振動源となる各種ポンプ類も極力ビームラインへの影響が少ない位置に離して設置した。また、基本的な操作は制御室から全て遠隔で行う設計とした。

プラットホームに設置したレーザーシステムの安定性(レーザービームのポインティング)を図 2-1-23 に示す。前述の振動および発熱対策等により、安定なレーザーシステムが構築され、非常に優れたポインティング・スタビリティが得られた。また、モニターや制御技術の充実により、レーザーの連続運転や短時間立上げも可能なシステムとした。



図 2-1-23 レーザーシステムの安定性 (阪大とプラットホームレーザーの比較)

レーザーシステムの設置・調整を行いつつ、各機関が設計・試作開発を行ってきた種々の装置・システムをプラットホームに搬入し、組合せ実証の準備を進めた。その結果、平成 29 年 12 月にはプラットホームにおける実験準備がほぼ整った。レーザーおよび主要な機器の位置関係を図 2-1-24 に示す。

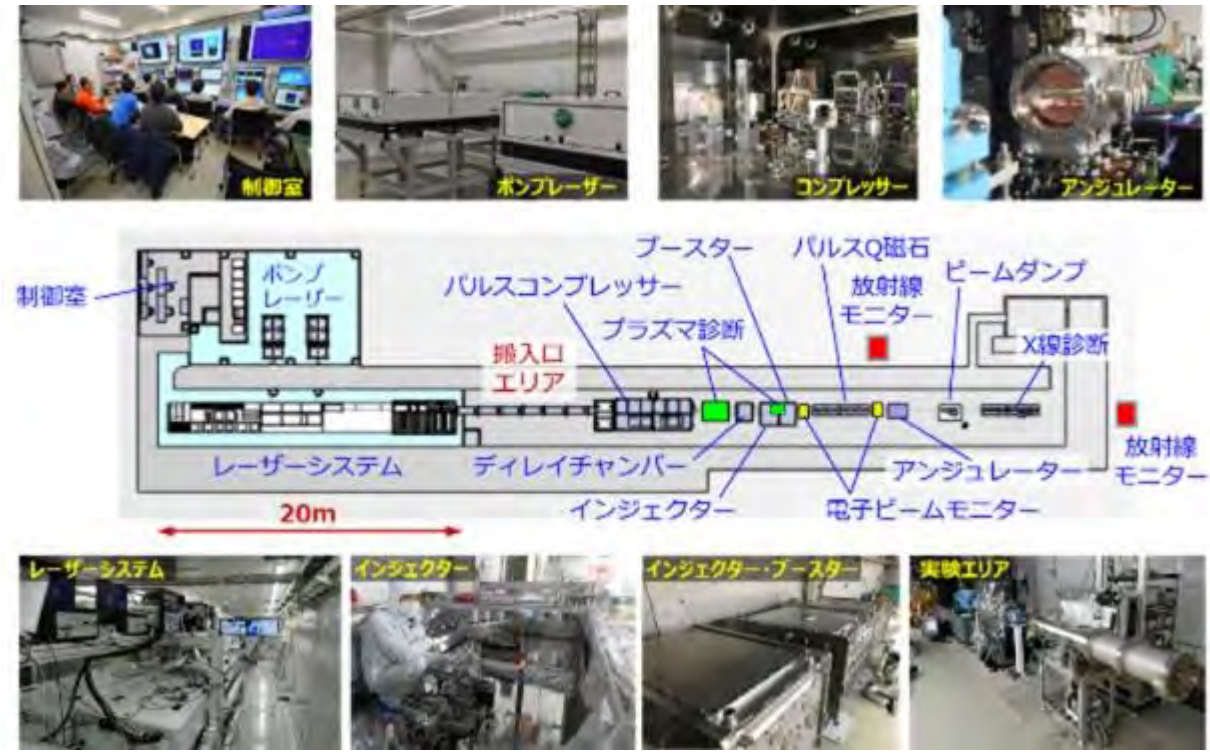


図 2-1-24 プラットホームの機器配置

プラットホームにおけるレーザープラズマ加速の組み合わせ試験は、平成 30 年 1 月より開始した。まず、大阪大学にて実証した安定な電子ビームの発生 (図 2-1-2) と、ソレノイドとスリットを組み合わせたスペクトルの準単色化 (スペクトルの切り出し、図 2-1-4~6) の再現実験を行った。実験スキームを図 2-1-25 に、結果を図 2-1-26 に示す。大阪大学における結果と同様に、安定な電子ビームの発生と準単色化が達成された。

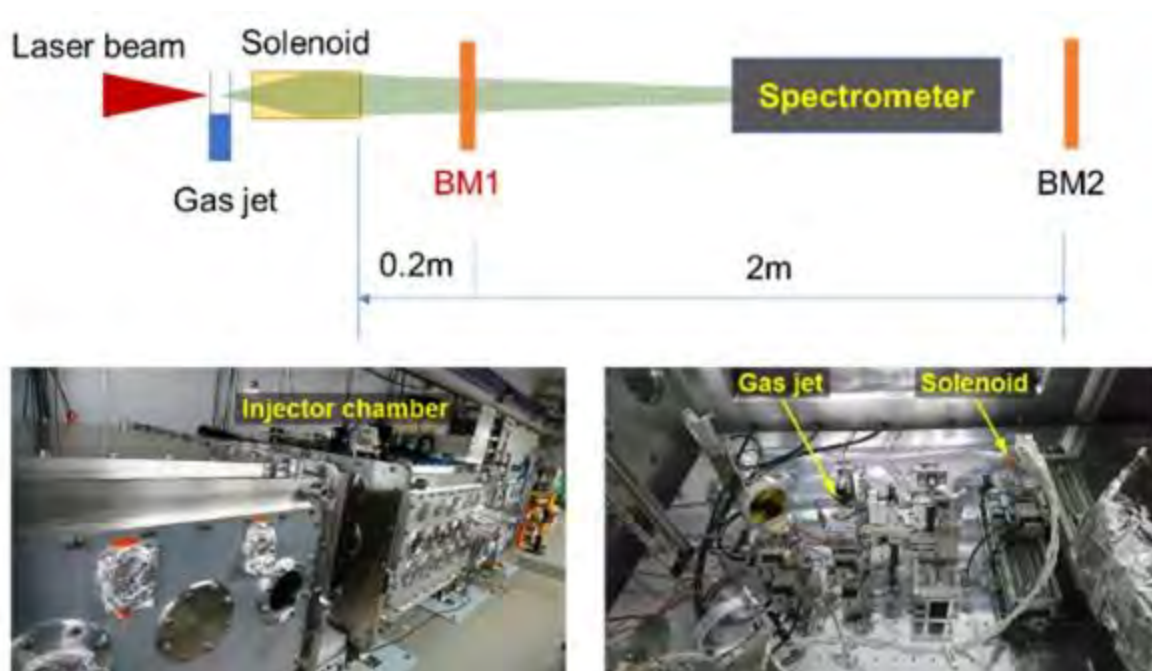


図 2-1-25 電子ビーム発生実験のスキーム (上) と加速チェンバー (下)

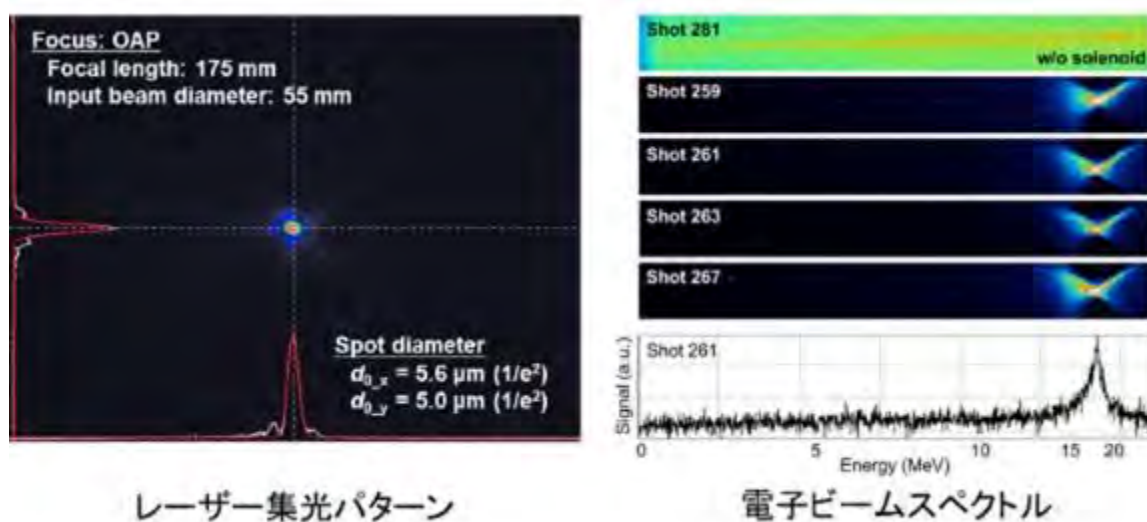


図 2-1-26 電子ビーム発生実験結果 (左:レーザー集光パターン、右:電子スペクトル)

次に、ガスジェット+ガスジェットによる2段加速実験を行った。計測装置の配置などを考慮するとガスジェット間の距離は 2m 程度必要となるため、この間のビーム輸送の安定性がキーポイントとなる。実験の結果、約 75MeV の電子ビームが 4mm 長さのブースター (2

段目のガスジェット)により約 165MeV まで加速され、約 23MeV/mm のゲインが得られた。従って、キャピラリー放電などにより、プラズマチャネルの特性を保ったまま加速長を 50mm まで延長できれば 1GeV の加速が実現することになる。

Pj-1A にて開発したブースター用プラズマチャネル (長さ 50mm) の低速 Z-pinch 放電試験の様子を図 2-1-27 に示す。更に、放電と同期させてレーザーを入射させることにより、レーザーのガイディングおよび収束を確認した。この結果から Z-pinch 放電とレーザービーム照射のタイミングを適切に設定すれば、レーザービームの収束が実現できることが分かった。チャネル両端に電圧をかけて Z-pinch 放電を行うと、時間の経過に伴ってチャネル中心付近に電子密度の窪んだ状態が生じ、レーザー光を収束・ガイディングできることが知られている。その結果、高強度のレーザーがプラズマチャネル壁にダメージを与えることなくチャネルの中心部分を伝播することになる。

今後は、プラズマチャネルに Z-pinch 放電を起こした状態でレーザーパルスガイディングして航跡波を形成し、更に初段のガスジェットから電子を入射させて追加速 (2 段加速) を行い、1GeV 電子ビームを実現する予定である。

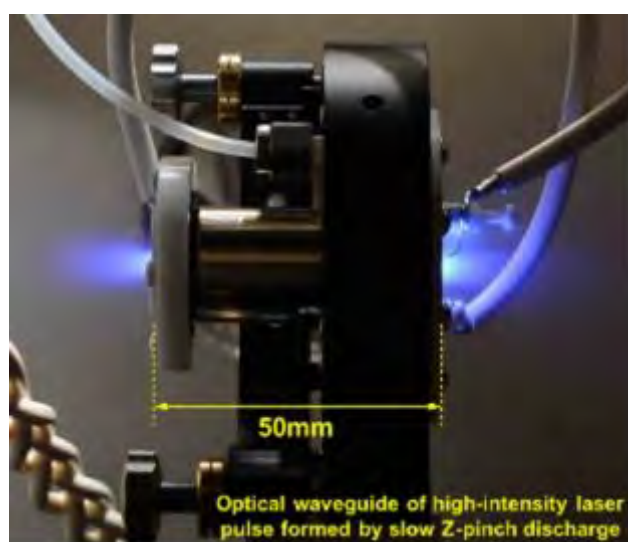


図 2-1-27 ブースター用プラズマチャネルの動作試験

レーザープラズマ加速による電子ビーム (250MeV $\pm$ 10MeV) の実験エリアへの輸送試験を行った。レーザープラズマ加速による電子ビームの長距離安定輸送は海外を含め成功した例がなかったが、今回 15m の輸送を実証した。実験エリアには、既にマイクロアンジュレーター等が設置されており、1GeV の電子加速・輸送が確認され次第、X線ビームの発生実験・計測を行う予定である。

実験エリアに設置したマイクロアンジュレーターと装着した磁石列を、図 2-1-28 および図 2-1-29 に示す。現在、磁石は周期 10mm のものが装着されているが、用途に応じて周期 4mm あるいは 6mm に変更し使用する。X線診断用検出器を図 2-1-30 に示す。ビームライン最下流にて、X線のパルスエネルギーと空間プロファイルをそれぞれシングルショットで計測する。アッテネーター等の動作は収納部の外から遠隔で制御・監視する。

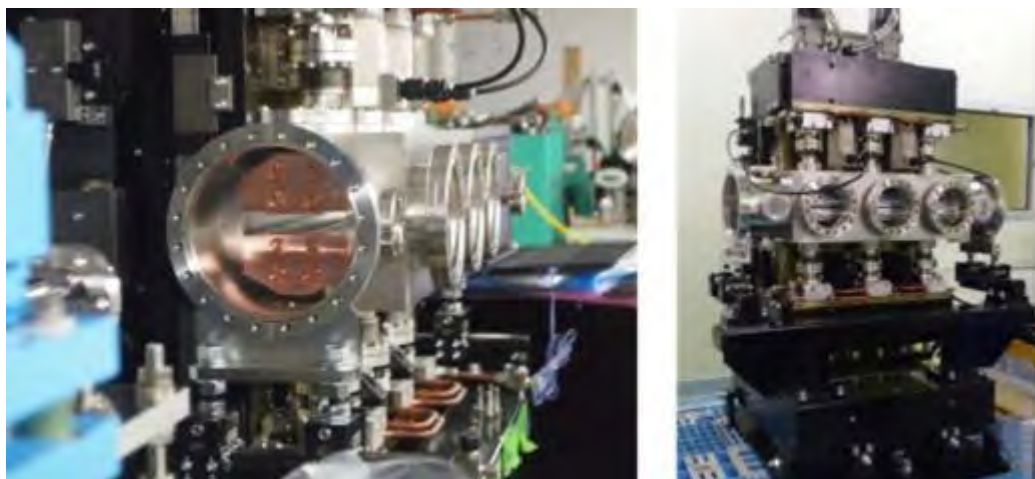


図 2-1-28 実験エリアに設置したマイクロアンジュレーター

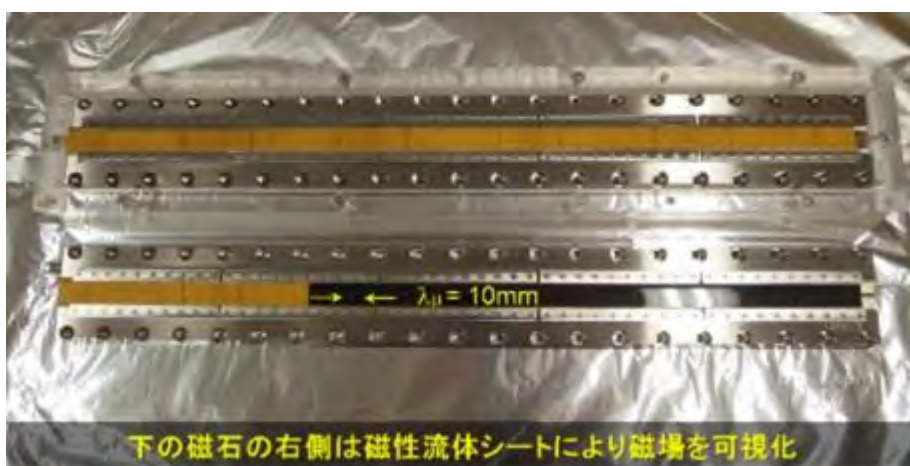


図 2-1-29 アンジュレーター磁石列 (周期 10mm)

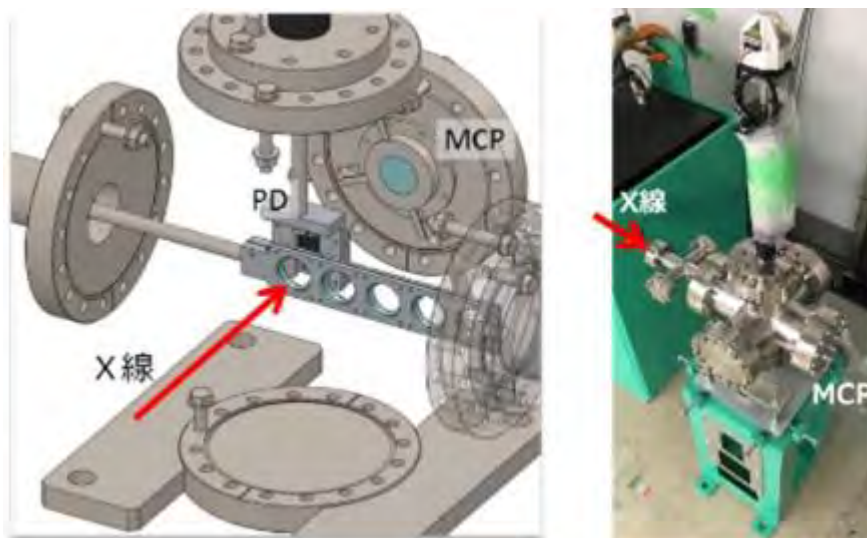


図 2-1-30 X線診断用検出器

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

Pj-1 (レーザー加速 XFEL 実証) における「獲得成果の革新性」および「獲得成果の独創性」を以下に示す。

<獲得成果の革新性>

高い加速効率

レーザープラズマ電子加速において世界最高の加速効率 (電子の加速エネルギーゲイン/レーザーパルスエネルギー) を達成 (図 2-1-31)。装置の小型化に寄与する。

高い加速の安定性

1段加速においても世界一の高い安定性を誇っているが (図 2-1-2)、プラットホームにおける多段 (2段) 加速においても、世界最高の安定性を示している。なお、これまでに m 級の多段加速に成功したグループは、ImPACT 以外にはない。

調整が不要な一体型のマイクロアンジュレーター

従来はアンジュレーターの磁石 (最大で1万個程度) を個々に組立・調整していたため、磁石の最小周期は 20mm 程度が限界。ImPACT では磁石材料を高い精度で一体成型した後、着磁。このため、磁石の組立・調整が不要となり、磁場周期の短縮 (最短 4mm)、物量の削減、調整期間の短縮を実現した。

<獲得成果の独創性>

機能分離による安定な加速とスケーラビリティ

電子加速に必要な「電子発生」「制御」「加速」の3つの機能を3本のレーザーで個別に最適化する構成を採用 (図 2-1-19、図 2-1-20)。安定な電子加速が実現され、加速モジュールを多段化していけば、さらに高い加速エネルギーを得ることが容易な設計とした。

競合する技術開発とのベンチマークを図 2-1-31 に示す。横軸は電子加速に使用したレーザーのパルスエネルギー (装置サイズにほぼ比例)、縦軸は得られた加速エネルギーである。ImPACT の実験は他と比較して小さいパルスエネルギーで行われたにもかかわらず高い加速エネルギーを得ており、エネルギー効率が非常に高いことが分かる。言い換えれば、同じ加速エネルギーを目指す場合、加速用レーザーの小型化が可能となる。

図 2-1-19 に示す通り、ImPACT は線形領域のプラズマによる多段加速方式により、安定で再現性が高くスケーラビリティのある電子加速の実現を目指している。一方、欧米は一段の加速でより高いエネルギーの電子ビームを実現する方式としていたが、近年では米国でも多段加速に取り組み始めている。今後とも、欧米の動向と限界を見極めつつ、日本独自の多段加速方式で開発を推進していく。

また、ImPACT は日本独自のマイクロアンジュレーターとの組合せにより、小型で実用的なX線源を目指すとともに、将来の XFEL 実現に必要な基盤技術の確立を目指している。

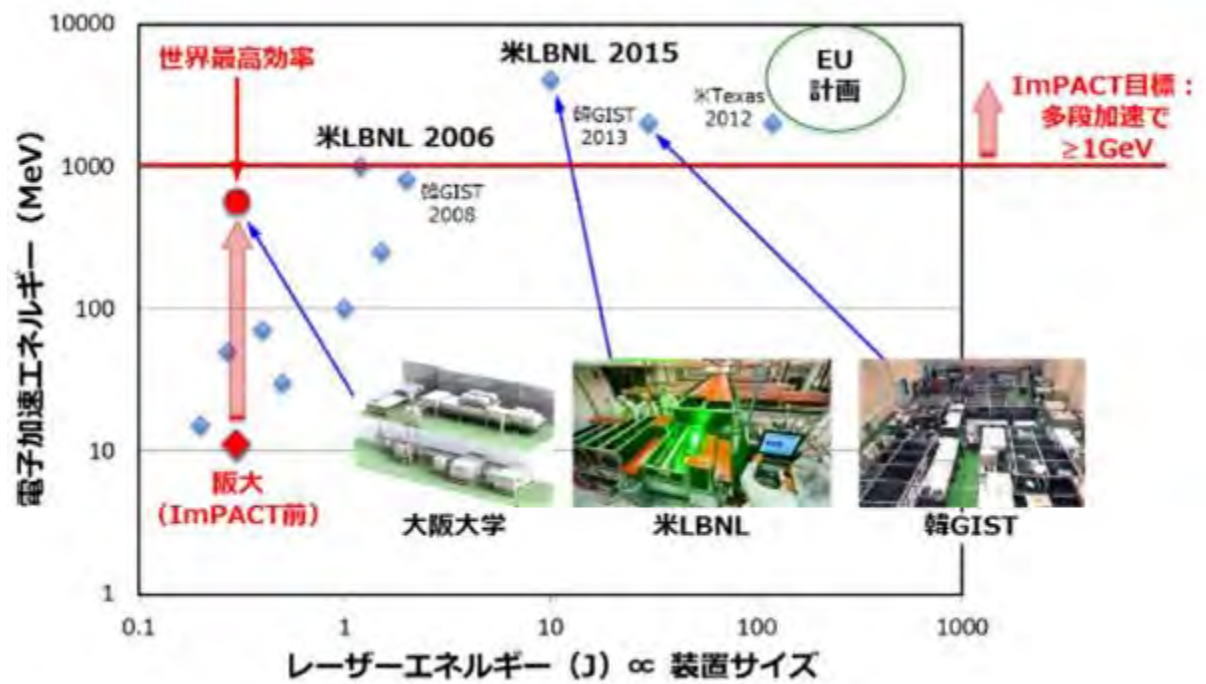


図 2-1-31 世界のレーザープラズマ電子加速のベンチマーク

米国 LBNL のレーザープラズマ加速装置 Bella、EU が Horizon 2020 の一環として推進している EuPRAXIA 計画と、ImPACT との比較を以下に示す。

開発機関	Bella (米LBNL)	EuPRAXIA計画 (欧)	ImPACT (日)
レーザー	Ti:sapphire	Ti:sapphire	Ti:sapphire
レーザー出力	1PW (実績) 4PW (計画)	1PW (計画)	40TW (実績@阪大) 100TW (計画@拠点)
加速方式	1 段加速	1 段加速	多段加速
ガスターゲット密度	$10^{16}/\text{cc}$ (非線形領域)	$10^{19}/\text{cc}$ (非線形領域)	$10^{17-18}/\text{cc}$ (線形領域)
電子加速エネルギー	4GeV (再現性に乏しい)	1~5GeV (計画)	600MeV (実績) >1GeV (計画)
アンジュレーター周期	15~25mm (従来型で計画)	15~25mm (従来型で計画)	4mm (実績)

(2) 研究開発プロジェクト 2： 超小型パワーレーザー

① プロジェクトの計画

日本独自のマイクロチップレーザー技術、高出力半導体レーザー (LD) 技術、セラミック Nd:YAG などのレーザー媒質技術、光学材料常温接合技術、波長変換技術などを駆使し、高出力のパルスレーザーを超小型化し、各種応用 (材料強化、インフラ設備メンテナンス、非破壊検査、加工、医療応用、セキュリティなど) に幅広く展開する。

これまでパルスエネルギーが 1mJ クラスであったマイクロチップレーザーを、発振器のみで 20mJ まで高出力化する。また、発振器と増幅器 (アンプ) の組合せによりパルスエネルギー 100mJ、繰返し 100Hz のプロトタイプを開発する。更に、パルスエネルギー 1J、パルス繰返し 300Hz の安定で使い易く、1年間メンテナンスが不要なテーブルトップレーザーを開発する。開発したレーザーは民間企業による製品化に繋げ、応用へ展開する。

ハンドヘルドレーザーおよびテーブルトップレーザーの開発仕様を以下に示す。また、レーザー装置の構想を図 2-2-1 に示す。

	ハンドヘルドレーザー	テーブルトップレーザー
ピーク出力	約50MW(最大500MW)	約30MW
平均出力	約2W (最大10W)	約300W
レーザー波長	1064nm	1064 nm
パルスエネルギー	20 mJ (最大100mJ)	1J
パルス幅 (半値幅)	400ps-1ns	10-40ns
繰返し周波数	100Hz	300Hz
偏 光	直線偏光 (偏光比>100:1)	直線偏光
ビーム品質 M ²	< 2	約10
装置寸法	20mJ (空冷時) ヘッド部 : W100xD150xH60mm 電源部 : 19inchラック(3U~4U)	開発機 (ヘッド,電源含む,チラー除く) W1200xD2400xH1800mm 将来機 (ヘッド,電源,チラー含む) W1200xD1700xH1600mm
重 量	ヘッド部重量 <1kg (20mJ,空冷時)	約2000kg
耐環境温度	10-30℃	10-30℃ (但し結露なきこと)

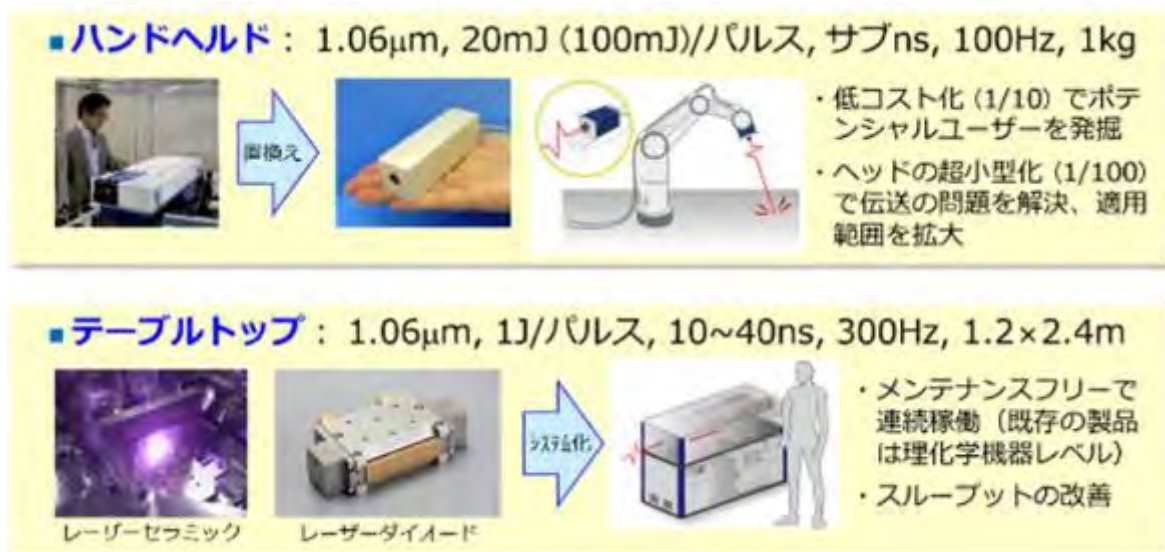


図 2-2-1 ハンドヘルドレーザーとテーブルトップレーザーの開発構想

② プロジェクトの体制

Pj-2 (超小型パワーレーザー) は、以下のサブプロジェクトにより構成されている。

サブプロジェクト： 研究開発課題	内容、研究開発プロジェクトにおける役割等	想定する研究開発機関
Pj-2F： ハンドヘルドレーザー (マイクロチップレーザー)	高出力のパルスレーザーを超小型化し大出力化することにより、レーザーの応用範囲を飛躍的に拡大する (100kg⇒1kg、1mJ⇒20mJ)。	ハンドヘルドレーザーの高出力化を平成28年度末までに実現可能な機関
Pj-2G： テーブルトップレーザー (高出力小型パワーレーザー)	パルスエネルギー1J、パルス繰返し300Hzの安定でコンパクトなレーザーシステムを開発し、応用へ展開する。	テーブルトップレーザーの開発を平成28年度末までに実現可能な機関
Pj-2N： ハンドヘルドレーザー製品化	Pj-2Fで開発したハンドヘルドレーザーを多くのユーザーに提供するため、製品化を行う。	ハンドヘルドレーザーのプロトタイプ供給を平成30年末までに実施可能な機関

Pj-2F (ハンドヘルドレーザー) では、従来の理科学用Qスイッチパルスレーザーの寸法重量 (長さ~1m、重さ~100kg) を一桁から二桁低減するとともに、安定性やビーム品質などの性能向上を図る。また、Pj-2G (テーブルトップレーザー) では、パルスエネルギー1J、パルス繰返し 300Hz の高スループットを実現し、安定で使い易くクリーンルームが不要で、1年間メンテナンスが不要なテーブルトップレーザーを開発する。

これらの開発により、レーザーの適用範囲が飛躍的に拡大し、種々の応用に展開することが可能となる。スケールの異なる二つの開発を並行して進めることにより、プロジェクトの目標を効果的かつ相補的に達成する。なお、後述の Pj-3H におけるシステム化およびユーザーによる試適用・生産デモにおいて、Pj-2F と Pj-2G は競争関係となる。

ハンドヘルドレーザー (Pj-2F) は分子科学研究所 (分子研) が開発を行うため、製品化を担当する企業を平成 28 年度下期に公募した (Pj-2N)。テーブルトップレーザー (Pj-2G) はレーザーメーカーでもある浜松ホトニクス (浜ホト) が公募により選定され開発を行うため、製品化は浜ホトが Pj-2G において実施する。

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

Pj-2 (超小型パワーレーザー) の開始時および終了時の TRL を以下に示す。

<研究開発の進展状況>

	プロジェクト名	プロジェクト 開始時の T R L	プロジェクト 終了時の T R L
Pj-2F	ハンドヘルドレーザー	2	6
Pj-2G	テーブルトップレーザー	4	6
Pj-2N	ハンドヘルドレーザー製品化	3	6

i) 研究開発の概要

Pj-2F (ハンドヘルドレーザー)、Pj-2G (テーブルトップレーザー)とも開発は順調に進捗した。Pj-2N (ハンドヘルドレーザー製品化;平成 29 年度開始)については、製品化を担当する企業3社を公募により選定し、分子研から技術移管を受けるとともに製品化開発を行った。市場への浸透を図るためには一刻も早い上市が重要であり、開発・製品化を急いだ。

Pj-2F (ハンドヘルドレーザー)の平成 27 年度の成果を図 2-2-2 に示す。平成 28 年度は、小型でビームのクリーニングが可能な利得フィルター構成を考案し、マイクロチップレーザー出力 6mJ で $M^2 < 1.3 \sim 1.5$ 程度までビーム品質を高めた。さらにこの出力を 27 年度に構築した増幅器に繋げる構成として、ガウシアン基本モードに近い高いビーム品質で 230mJ のパルスエネルギーを得た (図 2-2-3)。

また、小型かつシンプルな構成で出力 20mJ を得るため、高出力化の際に問題となる励起に付随した発熱を効果的に除去する手法を検討し、DFC (Distributed Face Cooling) 構造を発明した。さらに、この構造を実現するため、レーザー媒質 (Nd:YAG 等)と透明冷却基板 (Sapphire 等)の常温接合技術 (図 2-2-4) および装置 (図 2-2-5)を開発した。

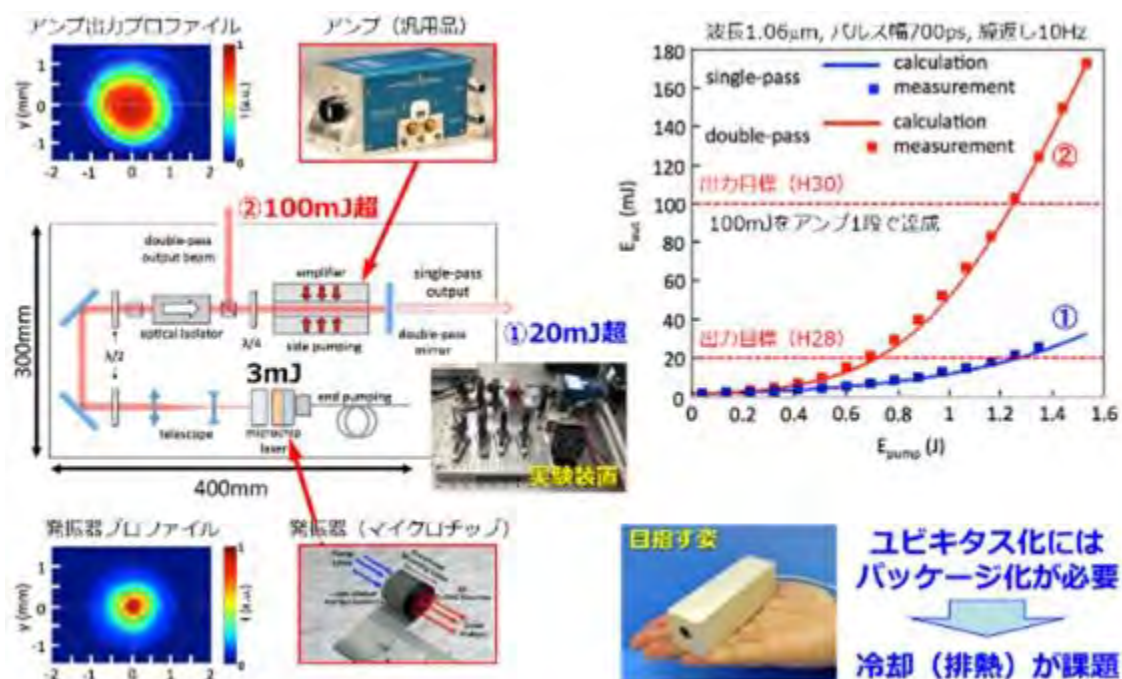


図 2-2-2 マイクロチップレーザーと増幅器による 100mJ 超システム

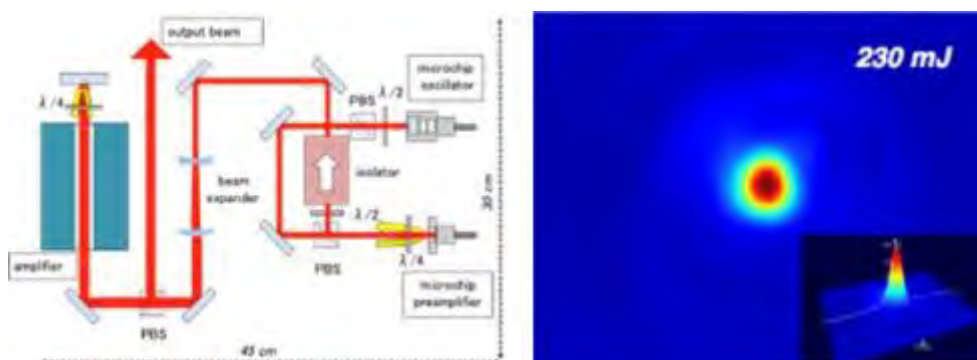


図 2-2-3 利得フィルターによる高ビーム品質の達成

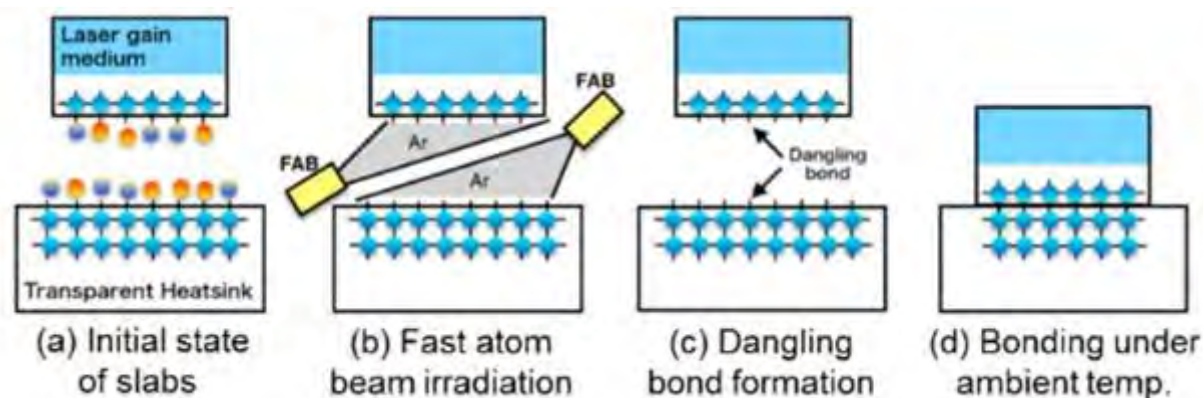


図 2-2-4 ImPACT にて開発した常温接合プロセス

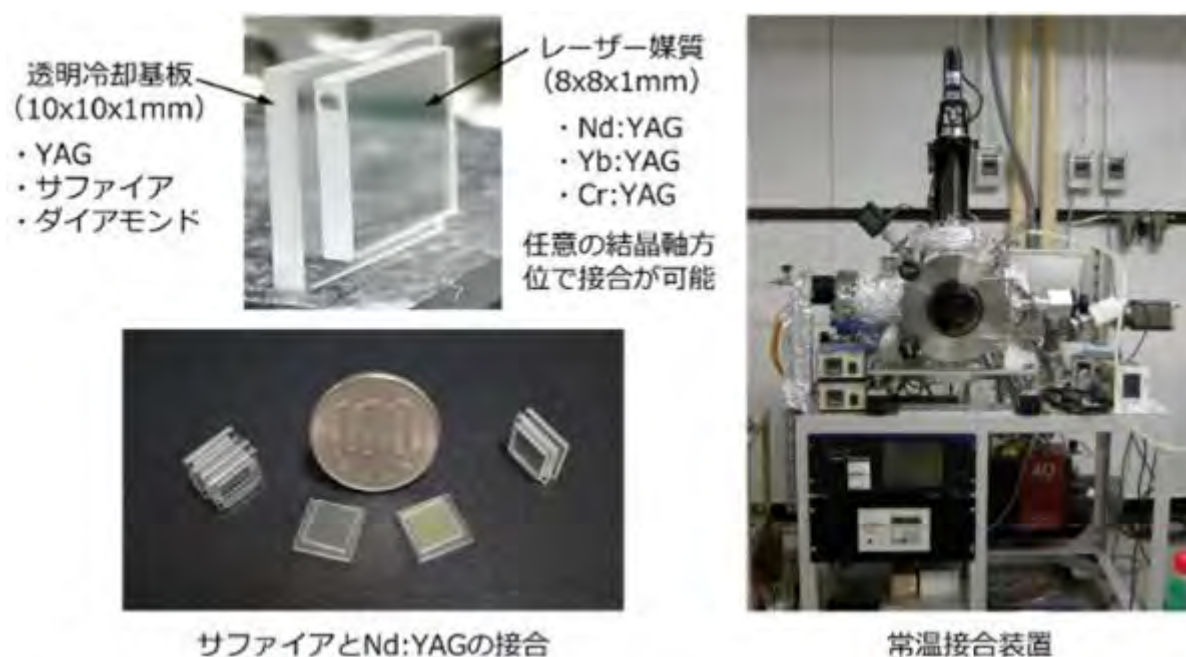


図 2-2-5 常温接合したレーザー媒質と透明冷却基板 (左) および常温接合装置 (右)

DFC 構造を採用した発振器の試作機を図 2-2-6 に、連続運転試験の結果を図 2-2-7 に示す。35mJ、15Hz で 15 時間の安定な連続運転を達成した。

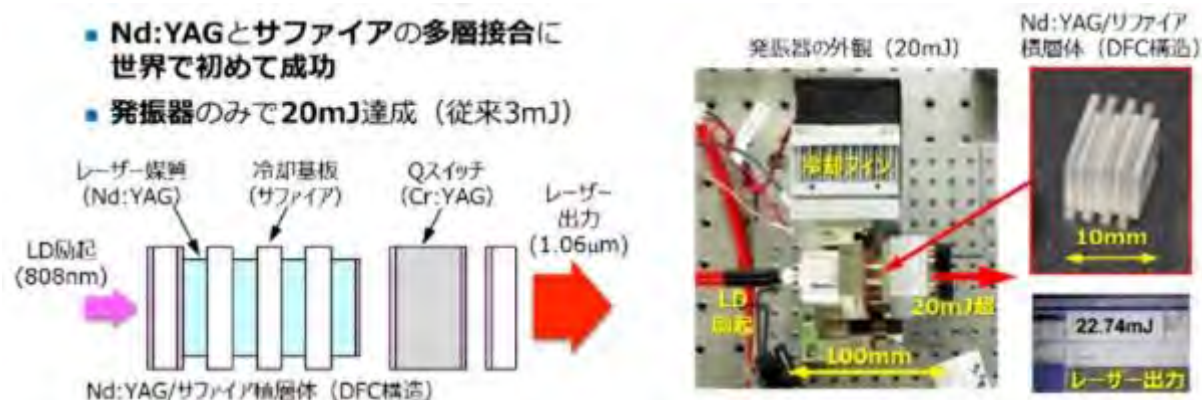


図 2-2-6 DFC (Distributed Face Cooling) 構造 (左) と開発した発振器 (右)

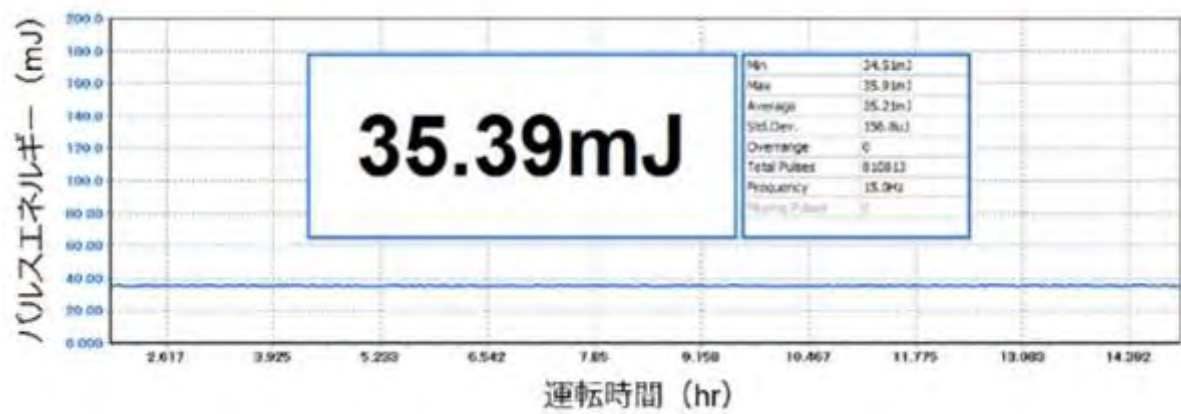


図 2-2-7 DFC 構造による発振器の連続運転試験結果

これらの開発成果を基に、発振器のみのコンパクトなハンドヘルドレーザーを開発した。図 2-2-8 は 20mJ 機、図 2-2-9 は 40mJ 機である。ロボットアームに搭載した加工試験も行い、発振器の姿勢が変化しても安定に発振が継続できることを確認した。



図 2-2-8 ハンドヘルドレーザー試作機 (パルスエネルギー20mJ)

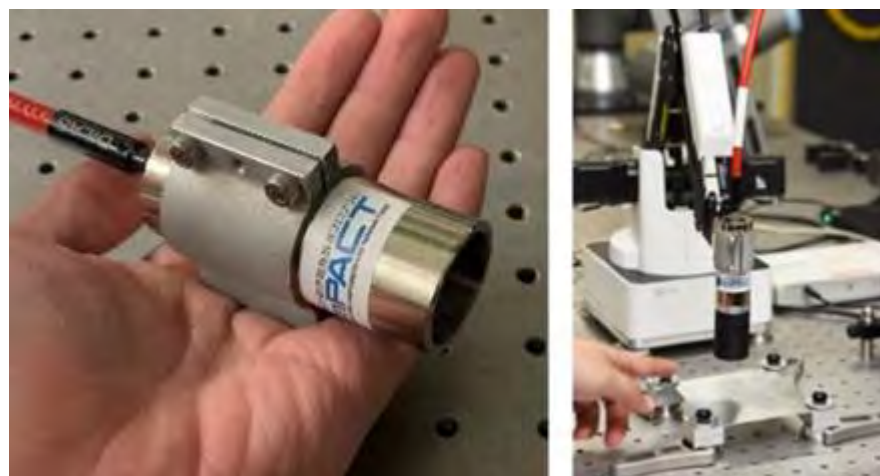


図 2-2-9 ハンドヘルドレーザー試作機 (パルスエネルギー40mJ)

Pj-2G (テーブルトップレーザー) の開発は、公募にて採択された浜松ホトニクスが担当した。構成を図 2-2-10 に示す。レーザー発振器 (OSC)、前置増幅器 (Pre-AMP) と3台の主増幅器 (AMP-I、II、III) で構成される MOPA 方式とした。

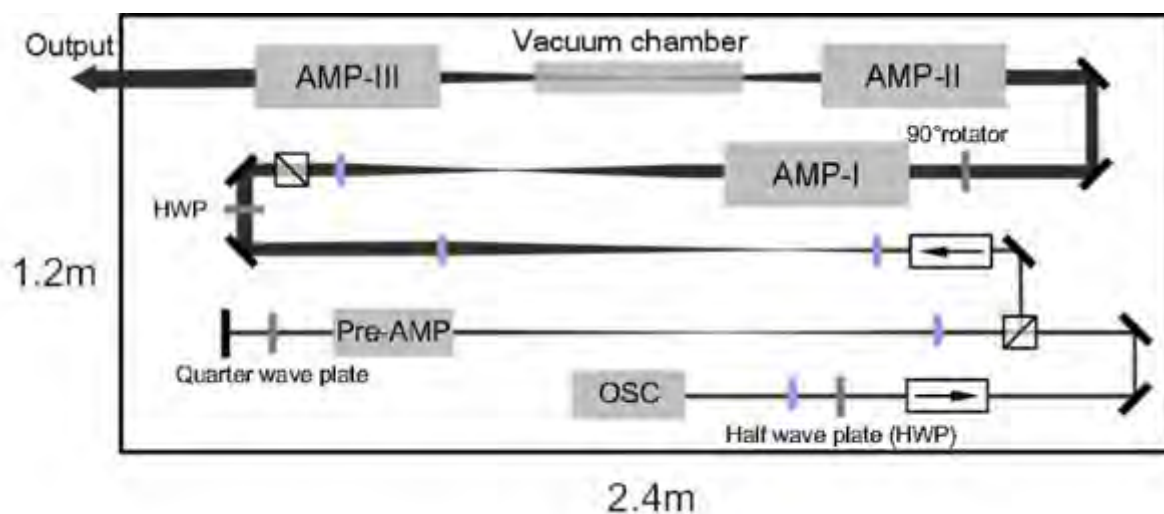


図 2-2-10 テーブルトップレーザーの構成

全体システムの動作試験結果を図 2-2-11 に示す。主増幅器1の出力 (0.15J) を主増幅器2の入力光とし、0.61J (平均出力 182W、繰返し周波数 300Hz) の出力を得た。さらにこの出力を主増幅器3へ入力した結果、励起エネルギー2.9J で抽出エネルギーは 0.40J となった。その結果、全体出力エネルギー1.01J (同 303W) が得られ、所期の目標であるパルスエネルギー1J、繰返し周波数 300Hz を達成した。

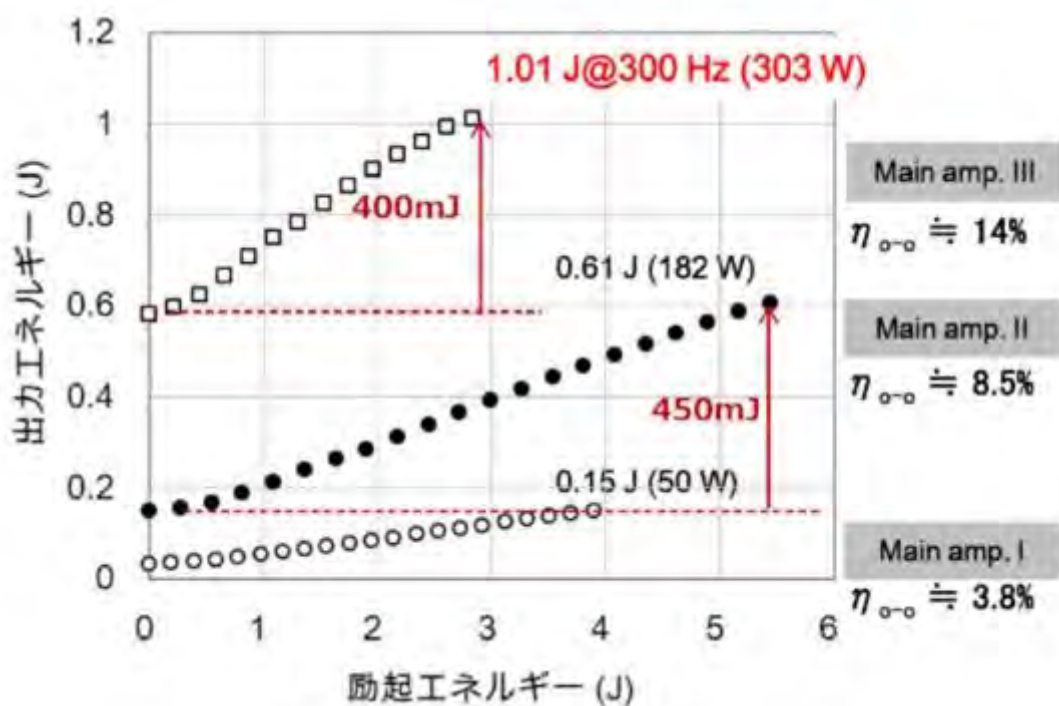


図 2-2-11 テーブルトップレーザー・メインアンプの増幅特性

開発したテーブルトップレーザーの外観を図2-2-12および図2-2-13 (左) に示す。また、ユーザーが実験を行うための利用スペースを図2-2-13 (右) に示す。ImPACT 期間中はテーブルトップレーザーをユーザーに無償で開放している。

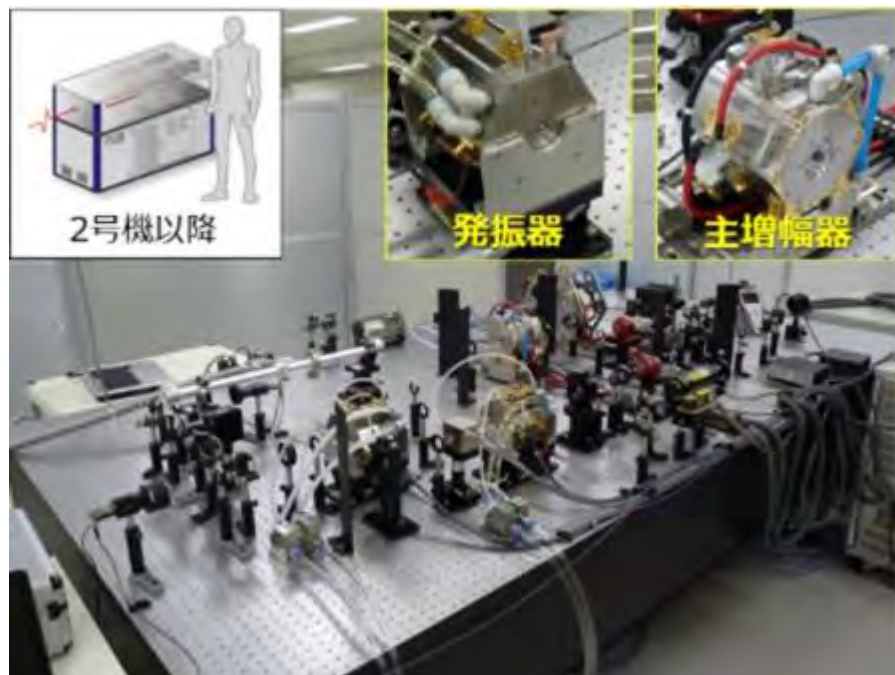


図 2-2-12 テーブルトップレーザー (性能評価用) の外観



図 2-2-13 テーブルトップレーザー (実検証試験用) とユーザー利用スペース

Pj-2N (ハンドヘルドレーザー製品化) は平成 28 年度下期に製品化を行う企業を公募し、5 件の応募から以下の 3 件を採択した。製品化開発は平成 29～30 年度に行った。

	第一期アイデア公募 実施題目	研究開発機関
2N-1	mCHIPおよびmCHIPレーザーの開発	パナソニック プロダクション エンジニアリング 株式会社
2N-2	高精度・高安定・高機能な眼科手術装置を目指したマイクロチップレーザーの開発	株式会社 ニデック
2N-3	スケーラビリティに配慮した高出力マイクロチップレーザーの製品化	株式会社 オプトクエスト

製品化を1社のみとした場合、事業環境の変化によりレーザー事業から撤退するリスクがあること、競争原理による低価格化の圧力が働きにくいことを考慮し、3社採択した。ユーザーに受け入れられるための最大の要因は製品価格である。そこで、製品化したレーザーの販売価格が量産時に100万円以下となる計画を提示することを採択の条件の1つとし、低価格化に強い意欲のある企業を募集した。

採択した3社は分子研から技術移管を受けるのみではなく、各社が持つ独自技術やアイデアを分子研の技術と融合して製品化する構想を提示したため、特徴あるハンドヘルドレーザーの製品化が期待できる。また、3社の販路やターゲット層には重複が少ないことから、お互い競争しつつ部品の融通や共通化など協力も見込める体制を構築した。3社は平成 29 年度に試作機 (図 2-2-14) を開発し、ImPACT 終了の平成 30 年度には製品プロト機を完成させた。今後、順次製品としてリリースを開始する計画である。

パナソニックPE 株式会社		株式会社 ニデック		株式会社 オプトクエスト	
					
■ 波長	1064 nm	■ 波長	1064 nm	■ 波長	1064 nm
■ パルス幅	0.4 ~ 1 ns	■ パルス幅	0.8 ns	■ パルス幅	0.7 ns
■ エネルギー	1 ~ 4 mJ	■ エネルギー	~ 4 mJ	■ エネルギー	~ 4 mJ
■ ピーク出力	~ 4 MW	■ ピーク出力	~ 5 MW	■ ピーク出力	~ 6 MW
■ 繰返し	1 ~ 100 Hz	■ 繰返し	20 Hz	■ 繰返し	~ 100 Hz
■ 偏光特性	-	■ 偏光特性	直線	■ 偏光特性	直線
■ M ² 値	< 2	■ M ² 値	評価中	■ M ² 値	評価中

図 2-2-14 製品化3社が試作したハンドヘルドレーザー

株式会社ニデックが実施した空気のブレイクダウン実験の結果を図 2-2-15 に示す。従来使用していたフラッシュランプ励起 Q スイッチ Nd:YAG レーザーに代えて、ハンドヘルドレーザーを使用することにより、低いパルスエネルギーで確実にブレイクダウンを起こすことが可能となる。緑内障や後発白内障の治療をレーザーで行う場合、手術に必要なパルスエネルギーを低減できる可能性がある。

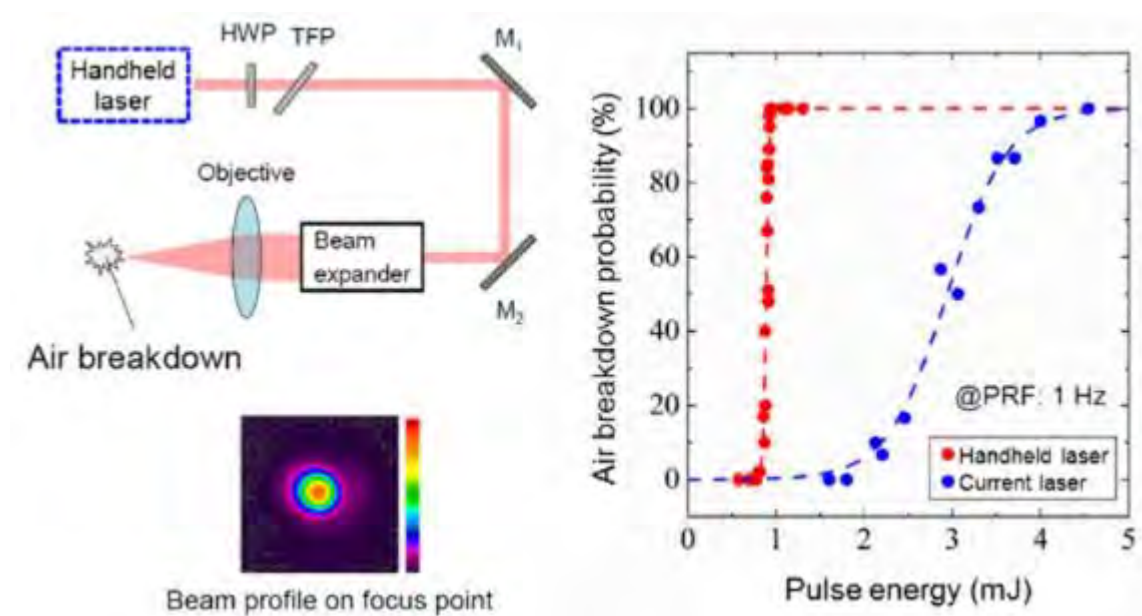


図 2-2-15 ハンドヘルドレーザーによる空気のブレイクダウン特性 (ニデック)

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

Pj-2 (超小型パワーレーザー) における「獲得成果の革新性」および「獲得成果の独創性」を以下に示す。

<獲得成果の革新性>

常温接合

レーザー媒質と透明冷却基板の常温接合技術 (図 2-2-4、図 2-2-5) を世界で初めて開発。レーザーの冷却設計の自由度が向上し、ハンドヘルドレーザーを実現。小型でシンプルな構造の高出力の多段ディスクレーザーや、異なるレーザー媒質の接合によるスペクトル設計にも道を拓いた。

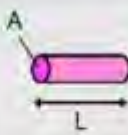
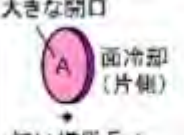
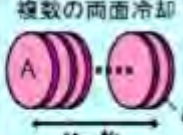
<獲得成果の独創性>

ハンドヘルドレーザーの概念

高出力パルスレーザーの実適用を妨げてきた伝送の問題 (ミラーや光ファイバーの損傷) を解決。狭隘部への適用性も向上。ポータビリティを活かしたインフラ設備メンテナンスへの応用も可能。システム部品数の大幅減少による信頼性の向上にも寄与する。

Pj-2F (ハンドヘルドレーザー) で開発した DFC 構造によるレーザーと、世界の高出力レーザーの主流であるファイバーおよびディスクレーザーとの比較を図 2-2-16 に示す。パル

スレーザーとして、ファイバーレーザーおよびディスクレーザーを凌駕する可能性のあることが分かる。また、世界の高出力パルスレーザーのベンチマークを図 2-2-17 に示す。レーザー媒質単位体積あたりの出力では、世界最高クラスに位置している。

パラメータ \ 構造	ロッド*	ファイバー	薄ディスク	DFC*
				
最大抽出パワー	$P_{ex} = \frac{8\pi R_f L}{\chi}$ R_f: 熱伝導パラメーター	$P_{ex} = \frac{8\pi R_f L}{\chi}$	$P_{ex} = \frac{12 R_f}{\chi} \left(\frac{A}{L} \right)$	$P_{ex} = 2N \cdot \frac{12 R_f}{\chi} \left(\frac{A}{L} \right)$
高平均出力化	×	○	○	◎
利得 $g = \Delta n \sigma L$	○	○ 長い L	×	◎ N 倍の L 高い Δn
最大エネルギー $E_{max} = A \times L \Delta T$	○	×	○ 寄生発振との戦い	◎ 寄生発振から開放

* レーザー媒質 (Nd:YAG など) と冷却基板 (サファイア、ダイヤモンド など) を真空中・常温で多段接合することにより、光学特性と冷却特性に優れた超小型のレーザー発振器を実現
 * 多段の直接接合により、段間の光学素子や調整が不要

図 2-2-16 ハンドヘルドレーザー (DFC 構造) とファイバー／ディスクレーザーとの比較

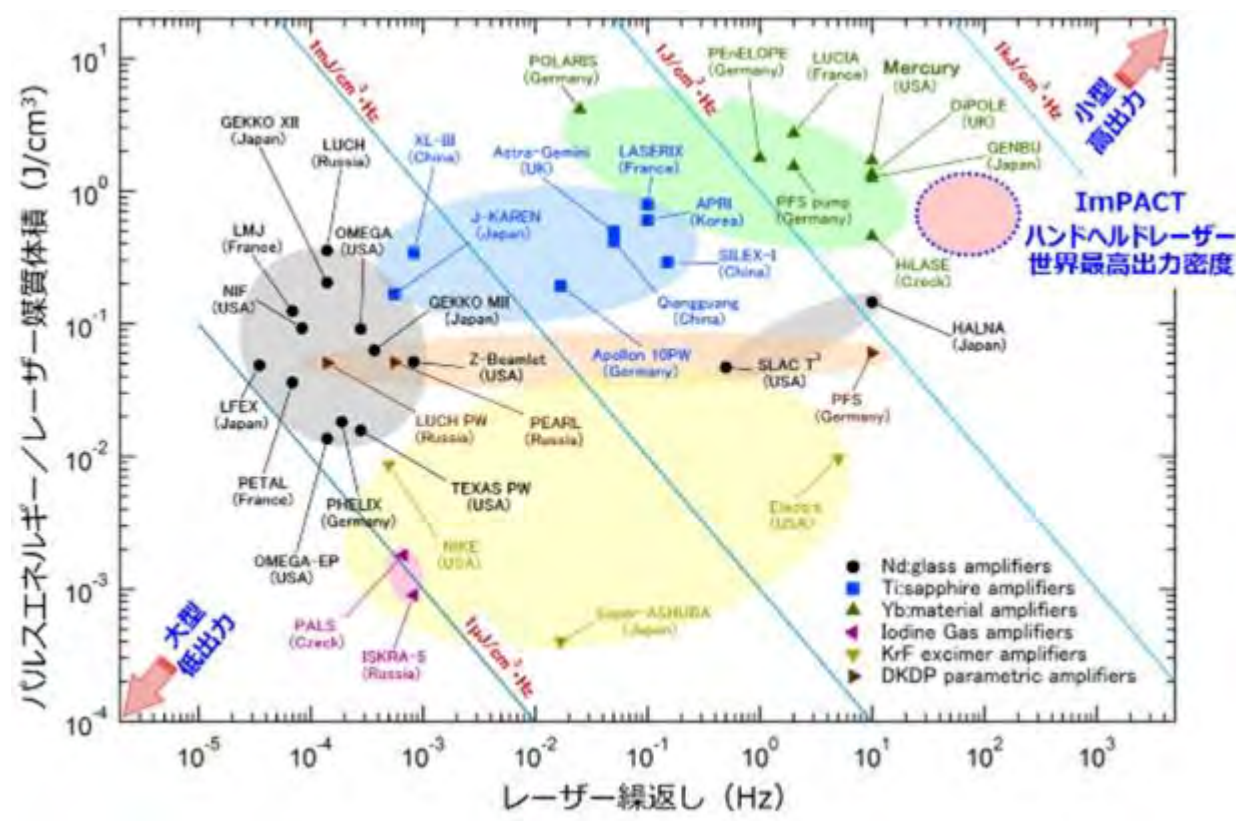


図 2-2-17 パルスレーザーのベンチマーク (出力密度)

Pj-2G (テーブルトップレーザー) のベンチマークとして、Procudo (米 LSPT 社) との比較を行った (図 2-2-18)。Procudo は高出力のパルスレーザーで市販品としてカタログ化されている唯一のレーザーと思われる。テーブルトップレーザーは現段階では試作品であるが、Procudo と互角あるいは Procudo を上回る性能が期待できる。

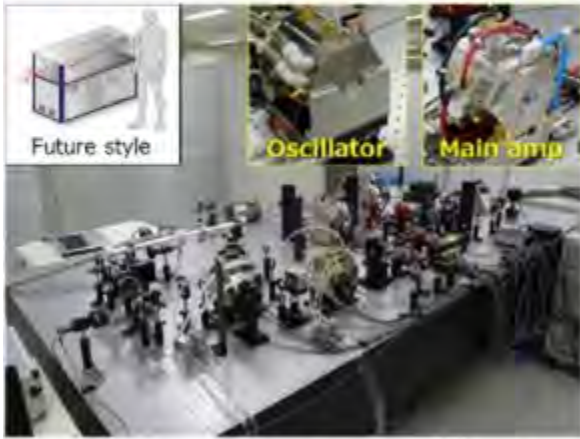
ImPACT design specifications: ■ Diode-pumped Nd:YAG ■ Wavelength: 1064nm ■ Pulse energy: 1J ■ Pulse duration: 10 ~ 40ns ■ Pulse per. rate: 300Hz	LSPT system specifications: ■ Diode pumped Nd:YLF ■ Wavelength: 1053nm ■ Pulse energy: 10J ■ Pulse duration: 8 ~ 16ns ■ Pulse rep. rate: 20Hz
 Future style Oscillator Main amp Target dimensions: 1.2m(W) X 2.4m(L)	 Dimensions: 1.4m(W) X 1.7m(H) X 3.4m(L)

図 2-2-18 テーブルトップレーザーと Procudo (LSPT 社) との比較

なお、Procudo は中国の広州工科大学 (Guangdong University of Technology) および独ハンブルクの ZAL (Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung) に既に納入されており、3式目も中国への納品準備中である。Procudo の価格は非公開であるが約2億円との情報があり、我々が想定しているテーブルトップレーザーの販売価格の2倍を優に超えるため、価格面で競争力があると考えている。

Pj-2G (テーブルトップレーザー) については、ユーザー開拓を推進し、産業界への適用を進めていく。なお現状では主増幅器が3台構成で全体効率が低い。このため、今後の改良によってコンポーネント構成を減らして効率を上げるとともに、全体システムの小型化・ビーム品質の向上などを図る計画である。

(3) 研究開発プロジェクト 3： レーザー応用システム化・XFEL 実証評価

① プロジェクトの計画

Pj-1 (レーザー加速 XFEL 実証) および Pj-2 (超小型パワーレーザー) の開発が順調に進んだことから、その成果をユーザーの立場で評価し、応用へとつなげるための Pj-3 を平成 28 年度に立ち上げた (Pj-3M は平成 29 年度に、Pj-3P は平成 30 年度に追加)。

Pj-3 では、Pj-2 で開発した超小型パワーレーザーをキーデバイスとして使用した応用システムを開発する。さらに、開発したシステムを使用した生産デモやフィールドにおける実証試験を行い、実用性を評価する (Pj-3H)。また、ハンドヘルドレーザーについては、公設試にレーザーを整備して利用環境を整え、ユーザー利用に供するとともに、ImPACT 後もユーザー利用が可能な仕組みを構築する (Pj-3M)。セキュリティ応用については、THz 波による有害ガスのリアルタイム (1秒以内) 検出の原理実証を行う (Pj-3K)。

XFEL 実証評価については、Pj-1 (レーザー加速 XFEL 実証) で開発した各要素技術をプラットフォームに持ち込みシステムとしての組合せ評価を行う。また、レーザープラズマ加速による X 線および電子ビームの実用性評価を実施する (Pj-3J、Pj-3P)。マイクロアンジュレーターについては、従来の加速器電子ビームを使用して X 線ビーム (放射光) の発生を実証し、レーザープラズマ加速による電子ビームとの比較評価を行う (Pj-3L)。

② プロジェクトの体制

研究開発プロジェクト 3 (レーザー応用システム化・XFEL 実証評価) は、以下のサブプロジェクトにより構成される。

サブプロジェクト： 研究開発課題	内容、研究開発プロジェクトにおける役割等	想定する研究開発機関
Pj-3H： 超小型 パワーレーザー 応用	超小型パワーレーザー応用 (Pj-2Fおよび2G) を使用した応用システム開発、ユーザーによる試適用を行い、開発したレーザーおよびシステムの実用性を評価する。	ユーザーニーズに精通し、平成30年末までに試適用が可能な機関
Pj-3J： XFEL実 証評価	レーザープラズマ加速による電子ビームおよびマイクロアンジュレーターによる X 線ビームの実用性評価に必要な技術・システムを開発し、レーザー加速統合プラットフォーム (Pj-1Bで整備) にて適用・評価する。	ユーザーニーズに精通し、平成29～30年度に実用性の評価が可能な機関
Pj-3K： セキュリ ティー応用	ハンドヘルドレーザー (Pj-2F) によるテラヘルツ (THz) 波技術などを活用したセキュリティ応用システムを開発し、その有用性を評価する。	ユーザーニーズに精通し、平成30年末までにシステム開発が可能な機関
Pj-3L： マイクロ アンジュレーター 評価	従来の加速器による電子ビームを使用してマイクロアンジュレーター (Pj-1C) の性能評価を行い、レーザープラズマ加速による電子ビームとの比較評価を行う。	アンジュレーターの評価が可能な電子加速器などの設備を有している機関
Pj-3M： レーザ ー試用プラットホ ーム	ハンドヘルドレーザー (Pj-2F) のプロトタイプを整備し、ユーザー利用に供することによってニーズを吸い上げ、レーザーの開発・製品化にフィードバックする。	レーザー利用者 (ユーザー) に対する豊富な支援経験を有する機関
Pj-3P： 電子イメ ージング評価	レーザープラズマで加速された電子ビームによる超高速回折イメージングなど電子ビームの応用検討を行い、その有用性を評価する。	電子ビームによる回折イメージングの経験が豊富な機関

Pj-3 (レーザー応用システム化・XFEL 実証評価) は、Pj-1 (レーザー加速 XFEL 実証) および Pj-2 (超小型パワーレーザー) の両プロジェクトについて、開発した技術・装置の有用性をユーザーの視点で評価するものである。また、その結果をもとに、将来に向けた開発ターゲット・仕様などに関する提言を行う。

Pj-1 (レーザー加速 XFEL 実証) の関連では、レーザー加速統合プラットフォーム (@播磨) にて、マイクロアンジュレーターなど各サブプロジェクトで開発した要素技術・機器・システムの組合せ試験を行う。さらにマイクロアンジュレーターについては、東北大学電子光理学研究センターにて、従来の加速器による電子ビームを使用した評価を行う。

Pj-2 (超小型パワーレーザー) の関連では、開発したレーザーのユーザーサイトにおける試適用、生産デモ、フィールド試験などを行い、レーザーの有用性を評価する。

③ プロジェクトの進捗状況、獲得成果及び目標達成への貢献度

Pj-3 (レーザー応用システム化・XFEL 実証評価) の開始時および終了時の TRL を以下に示す。

<研究開発の進展状況>

	プロジェクト名	プロジェクト 開始時の TRL	プロジェクト 終了時の TRL
Pj-3H	超小型パワーレーザー応用*	2～4	4～5
Pj-3J	XFEL 実証評価	2	3
Pj-3K	セキュリティ応用	3	5
Pj-3L	マイクロアンジュレーター評価	3	5
Pj-3M	レーザー試用プラットフォーム	4	6
Pj-3P	電子イメージング評価	3	4

*FS からシステム化まで多岐にわたるため TRL にも幅を持たせた

i) プロジェクトの進捗状況

各プロジェクト、即ち 3H (超小型パワーレーザー応用)、3J (XFEL 実証評価)、3K (セキュリティ応用)、3L (マイクロアンジュレーター評価)、3M (レーザー試用プラットフォーム;平成 29 年度開始)、3P (電子イメージング評価;平成 30 年度開始) は何れも順調に進捗している。3J (XFEL 実証評価)、3L (マイクロアンジュレーター評価) の進捗状況は、Pj-1 (レーザー加速 XFEL 実証) にて記載しているので、ここでは 3H、3K、3M の進捗を記載する。

Pj-3H で実施した公募の全体スキームを図 2-3-1 に示す。図にはハンドヘルドレーザー製品化 (Pj-2N) 公募も併せて記載した。また、これらの公募 (Pj-3H、Pj-2N) と、レーザー開発 (Pj-2F) およびレーザー試用プラットフォーム (Pj-3M) との関係を図 2-3-2 に示す。レーザー応用に関する公募 (Pj-3H) では応募レベルを3段階に分け、レーザーの専門家やレーザーの利用に熟達したユーザーから、異分野の研究者、中小企業の技術者、レーザーを操作したことのない技術者まで、幅広く応募できる仕組みを構築した。

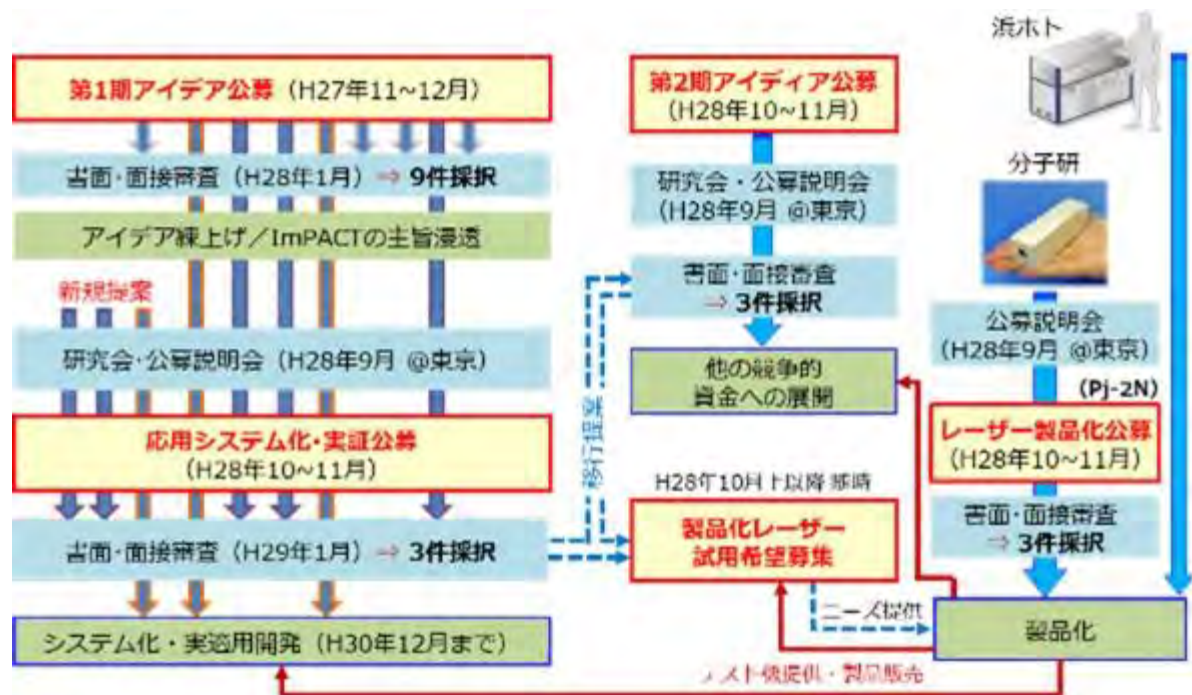


図 2-3-1 レーザーの応用・製品化公募のスキーム



図 2-3-2 レーザー応用開発への取り組み

Pj-3H (超小型パワーレーザー応用) で実施した公募 (第一期アイデア公募、第二期アイデア公募、応用システム化・実証公募) について説明する。各公募では、ImPACT で開発中のレーザーの特徴を生かした適用技術開発の提案を公募した。リスクはあってもインパクトの高い成果を実現するため、大きな経済効果が期待できるものの実現性や有効性が未

確認であり、事前にフィージビリティ・スタディ (FS) が必要な提案を「アイデア公募」として募集した。FS では原理検証を行うとともにアイデアの練上げを行った。その上で、実用化に向けたシステム化の実証まで行う提案を新規提案も含め公募した (応用システム化・実証公募)。2段階の公募とすることにより、潜在的なニーズを把握するとともに、意欲ある優れた提案に絞り込んだ。Pj-3K (セキュリティ応用) に関しては社会的意義が大きいと、実施機関を指名して開発に取り組んだ。

まず、平成 27 年度下期に第一期アイデア公募を行い、経済効果、市場規模、提案の具体性、実証可能性、レーザーの必要性、実施体制などを精査し、17 件の応募からハンドレーザー (マイクロチップレーザー) の応用 7 件とテーブルトップレーザーの応用 2 件の合計 9 件を採択した。

第一期アイデア公募の採択課題および実施機関を以下に示す。

	第一期アイデア公募 採択課題	実施機関
3H1	超小型皮膚疾患用レーザー治療器の開発	株式会社 ユニタック
3H2	超小型レーザーによる塗膜除去品質検査技術の開発	株式会社 トヨコー
3H3	超小型パワーレーザーの革新的スマート溶接システムへの応用化	大阪大学
3H4	航空機構造部材のレーザーピーンフォーミング技術の開発	沖縄工業高等専門学校
3H5	マイクロチップレーザーによる産業インフラ検査用レーザー超音波可視化検査装置の実証実験	つくばテクノロジー株式会社
3H6	携帯型レーザーピーニングによる大型鋼構造物の疲労き裂防止手法の実現	近畿大学
3H7	ナノ秒ジュールパルスを活用する材料表面加工技術の開発	産業技術総合研究所
3H8	宇宙機用 液体燃料エンジンのレーザー着火システムの実現	株式会社 [H] エアロスペース
3H9	マイクロチップレーザーによる宇宙用液体推進システムの高度化	長岡技術科学大学

採択された各機関は、約半年間でアイデアの練上げとニーズの確認を行った。また、レーザーを開発している分子研および浜ホトにてレーザー試作機を用いた FS 試験を行い、開発中の新しいレーザーのイメージを把握するとともに、基礎データの取得やシステム適用性を検証した。その結果、ハンドヘルドレーザー (マイクロチップレーザー) では低出力でのシステム成立性や信号強度 (S/N) の向上など、従来のナノ秒レーザーに対する優位性を示す結果も得た。ハンドヘルドレーザーはパルス幅が従来の約 1/10 であり、パルスエネルギーが小さくてもピーク出力は高いため、S/N 向上等の効果があったものと考えられる。

第一期アイデア公募終了後も再公募の希望が多数あったため、平成 28 年度下期に第二期アイデア公募を実施した。ただし、採択から ImPACT 終了までの期間が短くシステムとして実証することが難しいため、FS 実施中または実施後に他の競争的資金などに応募することを条件とした。第二期アイデア公募は応用システム化・実証公募と同時機に行い、両者合わせて 14 件の応募があった。第一回アイデア公募と同様の観点で審査を行い、ハンドヘルドレーザーの応用 4 件を採択した。[H] エアロスペースを除く 3 件 (神戸大学、大阪大学、株式会社菅製作所) は、第一回アイデア公募には提案のなかった新規案件である。採

択した4機関は FS 試験等により当初の目標を達成し、競争的資金などへの提案活動を行った。その結果、神戸大学は CREST「ホログラム光刺激による神経回路再編の人為的創出、平成 29 年度～」に、大阪大学は Q-LEAP「超短パルスレーザー加工時の原子スケール損傷機構の解明に基づく材料強靱化指導原理の構築、平成 30 年度～」に採択された。なお、平成 30 年度には株式会社TCK提案の「装置組み込みが可能な超小型深紫外レーザーユニットの開発」を追加で採択した。

第二期アイデア公募の採択課題および実施機関を以下に示す。

	第二期アイデア公募 採択課題	実施機関
3H-I1	生体適合性マイクロチップレーザーを用いた高次脳機能の4次元操作	神戸大学
3H-I2	航空機製造プロセス高速化のためのパルスレーザー支援レーザー溶接法の開発	大阪大学
3H-I3	光放出電子顕微鏡 (PEEM) への応用による性能向上検討	株式会社 菅製作所
3H-I4	宇宙機用液体燃料エンジンのレーザー着火システムの実現	株式会社 H エアロスペース
3H-I5	装置組み込みが可能な超小型深紫外レーザーユニットの開発	株式会社 TCK

応用システム化・実証公募は、第二回「アイデア公募」と同時期に行い、ImPACT 期間内にシステム化を完了することができる提案を募集した。第一回アイデア公募で採択した機関には原則的に応募を依頼し、新規提案を含め10件の応募があった。FS で提案内容がより具体化されていること、市場規模が大きく経済効果が期待でき事業化を実現するための実施体制が整備されていること等を精査し、3機関を採択した。採択機関は ImPACT 終了の平成 30 年度末までに応用システムを構築し、性能を実証するとともに事業化に向けた計画を作成している。

応用システム化・実証公募の採択課題および実施機関を以下に示す。

	応用システム化・実証公募 採択課題	実施機関
3H-S1	超小型皮膚疾患用レーザー治療器の開発および実証評価	株式会社 ユニタック
3H-S2	革新的スマート溶接システムの開発	大阪大学
3H-S3	リチウムイオン電池向けレーザークリーニング	株式会社 東芝

第一期アイデア公募で採択した Pj-3H1 (超小型皮膚疾患用レーザー治療器の開発:株式会社ユニタック) および Pj-3H3 (超小型パワーレーザーの革新的スマート溶接システムへの応用化:大阪大学) の2件は、アイデアの練上げと FS の結果、より魅力的な提案となっていたため、応用システム化・実証公募の実施機関として再度採択した (Pj-3H-S1 および S2)。Pj-3H-S3 (リチウムイオン電池向けレーザークリーニング) は、新規の提案である。

超小型パワーレーザーの開発・応用・実用化に関わる各プロジェクトの関係を図 2-3-3 に示す。Pj-2 において開発すべきレーザーの構想を立案し、その構想をもとに Pj-2F (分子研) および Pj-2G (浜ホト) にてレーザーの開発・試作を行った。ハンドヘルドレーザー (Pj-2F) については製品化企業を公募にて選定し、分子研から技術移転を受けることにより製

品化を行った。テーブルトップレーザー (Pj-2G) については、開発・試作者 (浜ホト) が製品化およびユーザーによるレーザー試用の対応も行った。Pj-3M は、Pj-2F からハンドヘルドレーザー (マイクロチップレーザー) の移管を受け、レーザー試用品プラットフォームを開設してユーザーによる試用の対応を行っている。

Pj-3H および Pj-3K については Pj-2 の構想によるレーザーが実現することを前提に、その仕様に基づいた応用システム開発を行った。Pj-2 のレーザー開発・試作品完成を待たず、Pj-3 の応用システム化開発を並行して進めることにより、ImPACT 期間内にレーザーおよび応用システムの開発を完了した。



図 2-3-3 超小型パワーレーザーの開発・応用システム化に関わるプロジェクトの関係

ii) 獲得成果及び目標達成への貢献度

XFEL 関係の獲得成果 (Pj-3J:XFEL 実証評価、Pj-3L:マイクロアンジュレーター評価) については Pj-1 (レーザー加速 XFEL 実証) にて記載しているので、Pj-3H、Pj-3K、Pj-3M について記載する。

A) Pj-3H の獲得成果

Pj-3H では、公募にて計17件の提案を採択し、超小型パワーレーザー (Pj-2) の応用開発を推進した。ここでは、システム開発まで実施した Pj-3H-S1 (超小型皮膚疾患用レーザー治療器の開発および実証評価) および Pj-3H-S2 (革新的スマート溶接システムの開発) について成果を記載する。両者とも、第一期アイデア公募にて提案が採択され、その後の練上げおよび FS を経て、応用システム化・実証公募でも採択された課題である。

Pj-3H-S1 (FS は Pj-3H1) にて株式会社ユニタックが提案・実施した皮膚疾患治療 (あざ取り) の模擬試験の様子を図 2-3-4 に示す。パルス幅がサブナノ秒のハンドヘルドレーザーにおいても、ナノ秒レーザーと同程度、またはそれを上回るあざ取り効果が得られる可能性が示唆された。また、ハンドヘルドレーザーを使用することにより、システム的大幅な小型化と低コスト化が実現できることが示され、システム化開発として継続した (Pj-3H-S1)。

平成 28 年度には、光学系のみならずシステム全体を小型化するため、LD およびペルチェドライバを内蔵した小型電源を開発し、外販を開始した(図 2-3-5)。また、平成 30 年度には、Li イオンバッテリーを内蔵しレーザーを1時間連続で駆動可能な携帯型電源を開発し、販売を開始した(図 2-3-6)。この携帯型電源とハンドヘルドレーザーを組み合わせれば、ドローンによるインフラ設備の点検やメンテナンスも近い将来可能になると思われる。

本開発は従業員約 50 名の中小企業の提案であったため、技術的な支援や実用化に必要な特許・商標などの知財に関しても ImPACT が全面的なサポートを行った。



図 2-3-4 皮膚疾患治療(あざ取り)の模擬試験



図 2-3-5 小型化した電源モジュール(左:従来品、右:ImPACT 開発品)



図 2-3-6 携帯型レーザー電源(左)とドローンによるインフラの点検・メンテナンス(右)

Pj-3H-S2 (FSはPj-3H3) において阪大が開発したレーザー超音波法による非接触の溶接欠陥検査システムの構成を図 2-3-7 に示す。レーザー超音波法は材料にパルスレーザーを照射した際に誘起される超音波を使用して欠陥等の検査を行う手法である。完全非接触のためカプラントが不要で、高温（あるいは極低温）の対象にも適用が可能である。大型の溶接構造物等に適用できれば、検査箇所の温度低下を待たずに溶接中に検査が可能となるため、溶接欠陥が見つかった場合の補修等をタイムリーに行うことができる。

一方で、超音波の励起には高出力のパルスレーザーが必要であり、レーザーパルスの伝送およびレーザーの使用環境等が、この技術の普及を阻んでいた。ハンドヘルドレーザーが利用できるようになれば、適用範囲が大幅に拡大すると思われる。

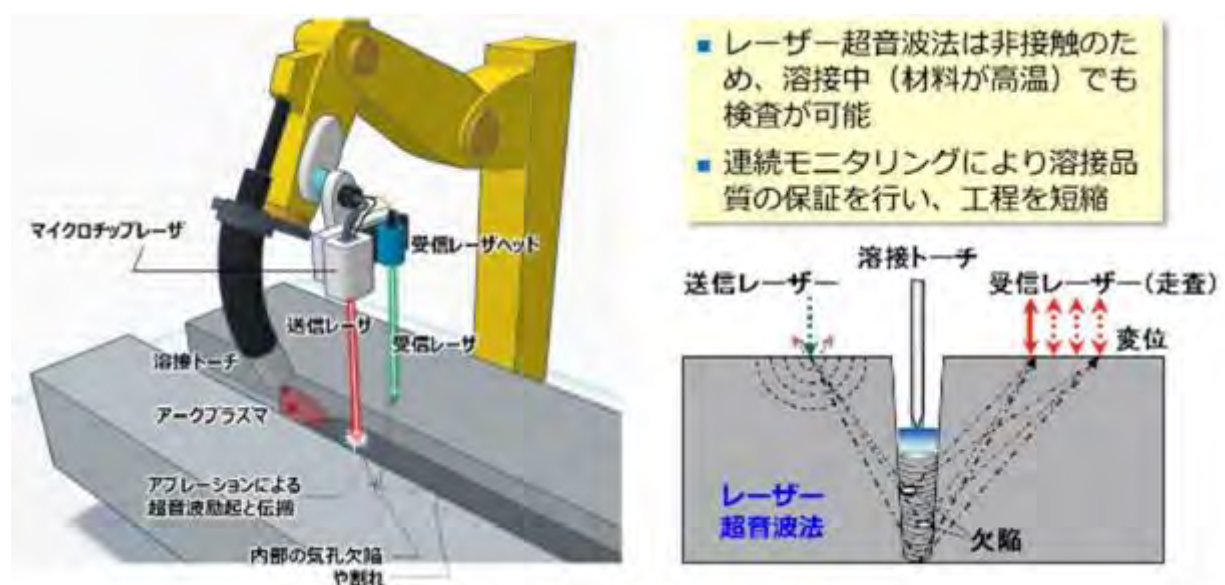


図 2-3-7 レーザー超音波法による非接触溶接欠陥検査システム

開発した溶接欠陥検査システムのロボットアーム部分を図 2-3-8 に示す。開発開始時の構想と同等のシステムが構築された。なお本システムには Pj-2N-3 (株式会社オプトクエスト) が開発・試作したハンドヘルドレーザー試作機が搭載されている。



図 2-3-8 溶接中欠陥検査システム (左:レーザーおよびロボット部分、右:適用イメージ)

B) Pj-3K の獲得成果

Pj-3K (セキュリティ応用) は、国民の生命と財産を守るための研究開発として重要である。近年のテロ対策では、人が多く集まる都市部や駅などの公共施設で危険物をいち早く検出する技術が求められている。

理研および分子研は、サブナノ秒のパルス幅で高いビーム品質のマイクロチップレーザー (ハンドヘルドレーザー) を非線形波長変換 THz 波光源に用いることで、従来の約10万倍の THz 波出力を得た (図 2-3-9)。また、光学的な逆変換を用いることで、高感度の THz 波検出も実現した。Pj-3K では、これらの技術を用いて図 2-3-10 に示すような吸収分光による危険ガス検出システムの開発を行い、危険物から漂う微量ガス分子を高感度 (10ppb) かつ高速 (1 秒以下) で検出するシステムの実証機を試作した。検出デモの様子を図 2-3-11 に示す。テロ対策をはじめとして、今後の応用が期待される。

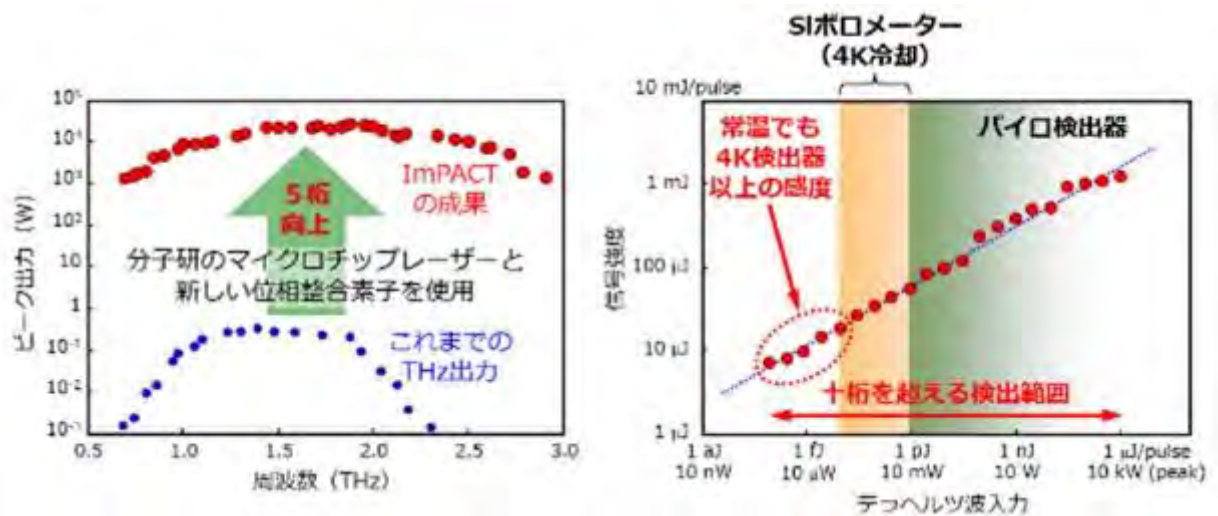


図 2-3-9 ハンドヘルドレーザーによる THz 波の発生と検出

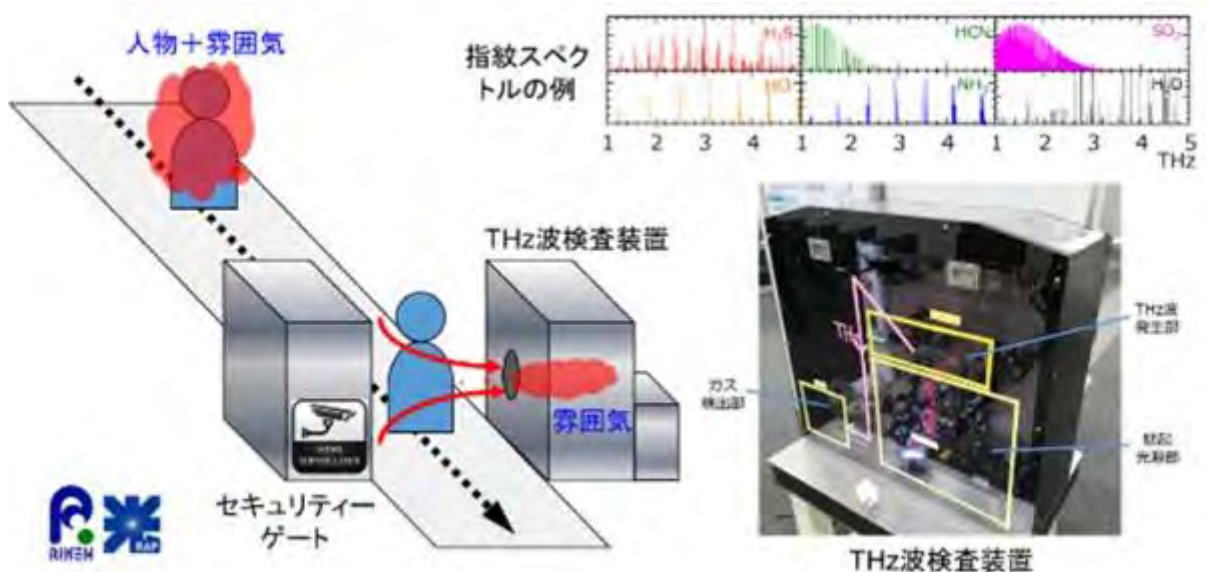


図 2-3-10 THz 波による危険物・有害薬物検出の概念



図 2-3-11 THz 波による危険物・有害薬物の検出デモ (左; 非検知、右: 検知)

C) Pj-3M の獲得成果

様々なユーザーとの議論の中で、レーザーの応用を広げるためには「レーザーを気軽に試用し実験 (FS) 等が行える場が必要」であることが明確になった。また、レーザーの取り扱いに不慣れなユーザーによる利用を促すためには「ユーザーサポートの重要性」が明確になった。そこで、ユーザーサポートを日常業務としている公設試にハンドヘルドレーザーを設置し、レーザー試用プラットフォームとして無償で公開した。これにより、ImPACT 終了後もユーザーによるレーザー試用の環境が整った。

レーザー試用プラットフォームの構築は、全国の公設試の中でも多様なレーザー装置を所有し、レーザーの操作を熟知するとともにレーザーに関するユーザーサポートの経験が豊富な浜松工業技術支援センター (浜工技) に委託した。分子研が開発したマイクロチップレーザーに増幅器を加えた MOPA 構成の 100mJ 級レーザー装置を浜工技に設置し、平成 30 年 7 月からユーザーによる無償利用を開始した。ImPACT 終了までには掌サイズのハンドヘルド型も設置し、ユーザー利用の拡大を図っていく予定である。

浜松工業技術支援センターの外観と交通アクセスを図 2-3-12 に示す。また、レーザー試用プラットフォームに設置したレーザーの仕様と実験ステーションの外観を図 2-3-13 に示す。レーザー試用プラットフォームは、浜松工業技術支援センターへの連絡により、誰でも利用することができる。



図 2-3-12 浜松工業技術支援センターの外観と交通アクセス

サブナノ秒レーザー(小型MOPA機)		
波長	1064 nm	
パルス幅	約 0.7 ns	< 0.7 ns
エネルギー	100 mJ	2.5 mJ
ピーク出力	> 100 MW	> 3 MW
繰返し	10 Hz	100 Hz
偏光特性	直線	
M ² 値	< 1.2	—



プラットフォーム設備

サブナノ秒レーザー

図 2-3-13 レーザー試用プラットフォームに設置したレーザーの仕様と設備

④ 競合する技術・アプローチに対するベンチマーク

Pj-3(レーザー応用システム化・XFEL 実証評価)における「獲得成果の革新性」および「獲得成果の独創性」を以下に示す。

<獲得成果の革新性>

サブナノ秒パルスの活用

パルス幅をナノ秒からサブナノに縮めることで種々の利点が生じた。例えば、眼科手術では手術に必要なパルスエネルギーの低減(図 2-2-15、Pj-2N-2)。また、あざ取りにおける皮膚へのダメージ低減(Pj-3H-S1)、THz 波発生効率の劇的な向上(Pj-3K)、レーザー超音波の S/N 向上(Pj-3H-S2)、エンジン点火の効率向上(Pj-3H-I4)、レーザークリーニングの効率向上(Pj-3H-S3)などの可能性がある。

<獲得成果の独創性>

レーザー開発・製品化・応用の同時進行

短期間で新しい概念のレーザーを開発し、その製品化と応用まで行うため、プログラム後半では多くを同時進行とした。開発の進展に伴い仕様が変更となるため調整に多くの労力を要したが、開発者からユーザーまで一体となった開発と交流が促進され、ニーズの迅速なフィードバックによる早期実用化が可能となった。また、開発したレーザーを無償で試用できるプラットフォームを公設試に開設し、ユーザーニーズを収集した。

大学等による単独特許

汎用性の高い基盤技術は ImPACT のサポートにより大学等が国内外に単独出願。複数企業へのライセンスを可能とし競争を誘起。事業撤退のリスクも低減。

Pj-3H-S1 で開発中の超小型皮膚疾患用レーザー治療器の現行機と開発機とのベンチマークを図 2-3-14 に示す。体積・重量・価格ともに現行機の数分の1を目指しており、十分に魅力的な商品を提供できると考えている。

従来機（A社）	従来機（B社）	ImPACT開発機イメージ
 本体幅：460 同奥行：690 同高さ：1070 同重量：125kg www.syntron-cancer.com/ja	 本体幅：305 同奥行：725 同高さ：810 同重量：58kg www.cynofarm.com	 本体幅：310 同奥行：330 同高さ：212 同重量：12kg 価格：300万円 （目標） （株）フータック

図 2-3-14 皮膚疾患用レーザー治療器の現行機と ImPACT 開発機の比較

3. 研究開発プログラムの全体成果

(1) 目標達成の状況

① 研究開発プロジェクト 1：レーザー加速 XFEL 実証

Pj-1 (レーザー加速 XFEL 実証) の達成目標は「超小型 XFEL の実現に必要な基盤技術の確立」である。前章に詳述したとおり、以下の成果を得た。

- ・世界初の多機関によるレーザープラズマ電子加速プラットフォーム (図 2-1-24)
- ・安定でスケラブルな電子加速を実現するレーザーシステムの開発 (図 2-1-20)
- ・世界一安定なレーザープラズマ加速による電子ビームの発生 (図 2-1-26)
- ・世界一効率*の高いレーザープラズマ加速による電子ビームの発生 (図 2-1-35)
(※効率：電子加速エネルギーゲイン／レーザーエネルギー)
- ・世界初の電子ビーム長距離輸送による追加速 (2段加速) の実証 (図 2-1-28)
- ・周波数領域ホログラム法によるレーザー航跡波の計測 (図 2-1-16)
- ・モノリシックで調整が不要な世界最短周期のアンジュレーター磁石 (図 2-1-9)

Pj-1 では、平成 30 年 1 月に開始したプラットフォームの運用を継続し、更なる技術の高度化と将来の実用化を目指す。平成 29 年度に 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」が立ち上がり、プラットフォームなど ImPACT 成果の一部は未来社会創造事業にて活用され、更なる展開が図られることとなった。

以下、前章に記載の具体的な到達目標 1～7 と、対応する成果を記載する。

目標 1. 低エネルギー多段加速技術の開発、300MeV 電子ビームの発生

大阪大学にて 6TW (300mJ, 50fs) のレーザーを使用して、一つのガスジェット内に圧力分布を持たせることにより電子の 2 段加速実験を行い、500MeV の加速エネルギーを得た (図 2-1-1～図 2-1-3)。

目標 2. 既存加速器の電子ビームとマイクロアンジュレーターによる X 線ビームの発生

東北大学の電子光理学研究センターにて、既存の加速器 (t-ACTS) とマイクロアンジュレーターの組合せによる放射光の発生実験を行った。その結果シミュレーションと合致する結果が得られ、マイクロアンジュレーターの性能を確認した (図 2-1-11～図 2-1-13)。

目標 3. 拠点 (レーザー加速統合プラットフォーム) の構築、整備

建屋整備、電子加速専用レーザーの設計・製作・搬入・調整、周辺機器 (Compressor、加速チェンバー、アンジュレーター、各種検出器) の開発等、レーザー加速に必要な全てのシステムを迅速に立上げ、ImPACT 期間内に運用を開始した (図 2-1-21～図 2-1-24)。競合する欧米等と比較し、少ない予算・人員で短期間の立上げに成功した。

目標 4. レーザー加速 XFEL 各要素技術の開発、組合せ実証

各研究開発機関（阪大、QST、高エネ研）にて開発した要素技術・システムをプラットフォームに集結した（図 2-1-24）。平成 30 年 1 月より組合せ試験を開始し、世界初の長距離電子輸送による 2 段加速の実証等を行った（図 2-1-25～図 2-1-31）。

目標 5. 拠点における多段加速による 1GeV 超の安定な電子ビームの発生

阪大にて 500MeV（図 2-1-3）、QST にて 1GeV（図 2-1-17）の電子加速を達成した。プラットフォームでは現時点で 250MeV の加速に留まっているが、組合せ実証に必要とされる電子入射・追加速（2 段加速）・電子ビーム輸送などは個々に実証済みであり、多段加速による 1GeV 超の安定な電子ビームの発生は時間の問題と考えている。既に 1GeV 超の電子加速の兆候もあるが、検証が必要である。

目標 6. 拠点に設置したマイクロアンジュレーターによる 1keV の X 線ビームの発生

マイクロアンジュレーターは既にプラットフォームに設置済みで、X 線ビームの発生準備は整っている（図 2-1-33）。しかしながら現在は電子の多段加速に注力しており、その実験が一段落した段階で 1KeV の X 線ビーム発生を試みる。アンジュレーターの性能は別途検証済みであり（図 2-1-13）、本件も時間の問題である。

目標 7. マイクロアンジュレーターの製品化

マイクロアンジュレーターは国内外の放射光施設などへのバックフィットも期待されるため、企業を含めて事業戦略を立案した。その結果、海外も含めた供給体制が整った。国内では、あいちシンクロトロン光センター、SPring-8、海外では ASL（ローレンス・バークレー国立研究所）等と検討を進めている。

② 研究開発プロジェクト 2：超小型パワーレーザー

Pj-2（超小型パワーレーザー）の達成目標は「超小型パワーレーザーの実現および製品化」である。前章に詳述したとおり、以下の成果を得た。

- ・世界初の異種酸化物（レーザー媒質と透明冷却基板）の常温接合（図 2-2-4）
- ・世界最高出力密度*のハンドヘルドレーザーの開発と実証（図 2-2-17）
（*出力密度：平均出力／レーザー媒質体積）
- ・民間企業 3 社によるハンドヘルドレーザーの製品化開発
- ・コストパフォーマンスに優れたテーブルトップレーザー（1J、300Hz）の開発

図 3-1 に示す通り、ハンドヘルドレーザー（掌サイズのパワーレーザー）の開発成功により、ImPACT 開始当初のコンセプト（課題解決のための構想）を実現した。ハンドヘルドレーザーは、平成 28 年度下期の公募で採択された企業 3 社により、順次製品化が進められている（図 2-2-14）。平成 31 年 3 にはプロト機の出荷が開始され、今後拡販を行っていく計画である。レーザーの改良および高機能化開発は、平成 31 年 4 月に分子研に設立される

「社会連携研究部門」および「小型集積レーザー (TILA) コンソーシアム」に引き継がれる。一方、浜松工業技術支援センター (浜工技) のレーザー試用プラットフォームで実施している企業ユーザーへのレーザー無償提供も継続する。分子研と相補的な活動とすることにより、レーザー利用の底辺拡大と産業・社会への展開を推進する。

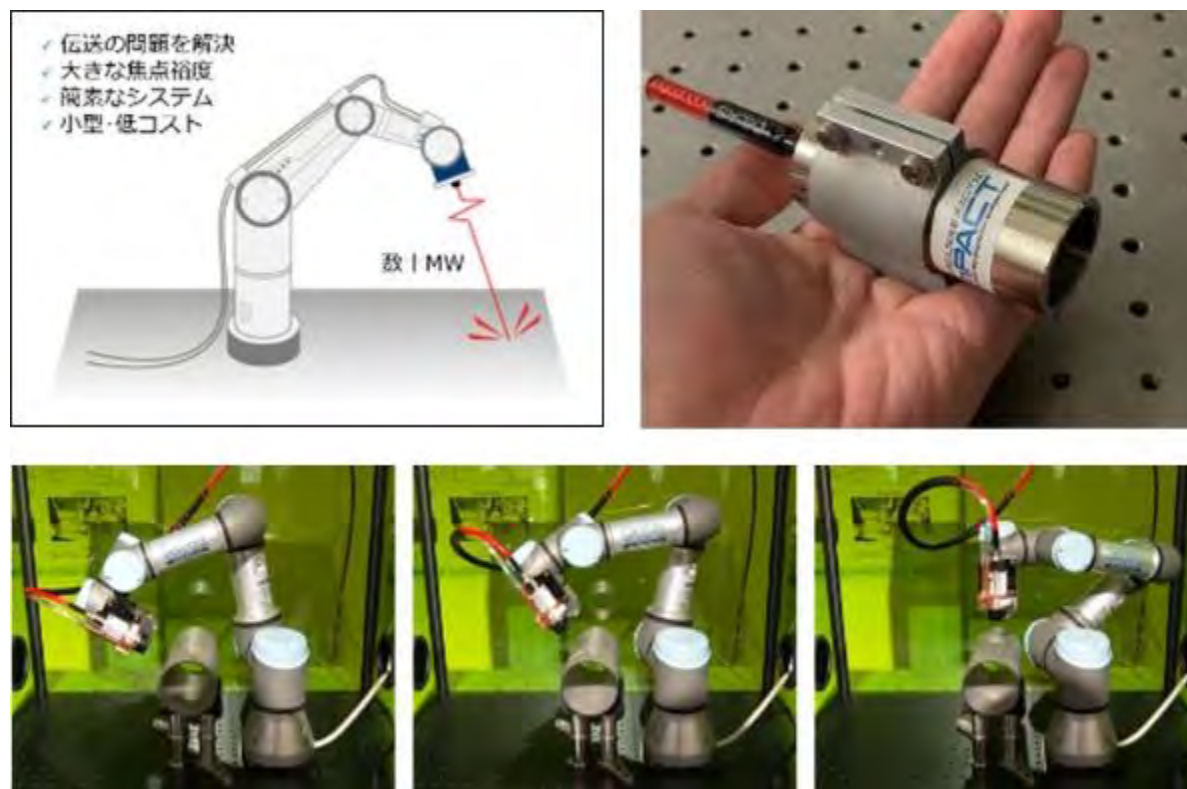


図 3-1 ハンドヘルドレーザーのコンセプト実現

以下、前章に記載の具体的な到達目標1～6と、対応する成果を記載する。

目標 1. パルスエネルギー20mJ、繰返し 100Hz のハンドヘルドレーザーの実現

パルスエネルギー20mJ のハンドヘルドレーザーの開発に成功した (図 2-2-6)。パルス繰返しに関しては、長時間の 100Hz 運転の実現には冷却構造 (DFC からの排熱) の見直しが必要であったが、ナノ秒 Nd:YAG レーザーと同等の高いパルスエネルギーを求めるユーザーの声に従い、MOPA 機開発を優先した (図 2-2-2、図 2-2-3、図 2-3-13)。MOPA 機は現在 190mJ、100Hz で運用が可能である。

目標 2. パルスエネルギー1J、繰返し 300Hz のテーブルトップレーザーの実現

平成 26 年度下期の公募にて、浜松ホトニクス (浜ホト) をテーブルトップレーザーの開発担当に選定した。平成 28 年度末には 1J、300Hz のテーブルトップレーザーが完成し、現在、システムの簡素化・パッケージ化やビーム品質の改良等を行いながら、ユーザー利用に供している (図 2-2-10～図 2-2-13)。

目標 3. ハンドヘルドレーザー (パルスエネルギー20mJ) プロトタイプの完成

パルスエネルギー20mJ および 40mJ のハンドヘルドレーザー・プロトタイプ機の開発に成功した(図 2-2-8、図 2-2-9)。ロボットアームに搭載しロボット動作中の発振にも成功した。ロボット動作中の更なる発振の安定化のため、改良を進めている。

目標 4. ハンドヘルドレーザー (パルスエネルギー100mJ) プロトタイプの完成

MOPA 機としてプロトタイプを開発した(図 2-2-2、図 2-2-3、図 2-3-13)。現在は 190mJ、100Hz で運用が可能である。

目標 5. ハンドヘルドレーザーの企業への技術移管および製品化

平成 28 年度下期の公募にて3社を選定し、ハンドヘルドレーザーの技術移管および製品化開発を行った。3社とも製品プロトタイプを完成し、拡販体制が整った(図 2-2-14)。

目標 6. テーブルトップレーザーの製品化

テーブルトップレーザーの製品化は開発者(浜ホト)が実施した。なお浜ホトは平成 28 年度に NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」事業を受注したため、NEDO 事業と連携しながら応用展開を推進した。

③ 研究開発プロジェクト 3：レーザー応用システム化・XFEL 実証評価

Pj-3(レーザー応用システム化・XFEL 実証評価)の達成目標は「レーザープラズマ加速による電子およびX線ビームの実用性評価および超小型パワーレーザーのユーザー施設での生産デモ」である。

以下、前章に記載の具体的な到達目標1～7と、対応する成果を記載する。

目標 1. ユーザーニーズに基づく超小型パワーレーザーの応用提案

超小型パワーレーザーの開発仕様・特徴を活かした応用提案を募集した。平成 27 年度下期に第一期アイデア公募を、平成 28 年度下期に第二期アイデア公募と応用システム化・実証公募を行い、合計17件の提案を採択した(図 2-3-1～図 2-3-3)。

目標 2. 超小型パワーレーザーを使用したユーザーによる生産デモ

ハンドヘルドレーザーのコンセプト(図 3-1)を提示するとともに、株式会社ユニタック(図 2-3-4)、大阪大学(図 2-3-8)、他で開発したシステムのデモンストレーションを実施した。

目標 3. 超小型パワーレーザーのセキュリティ応用技術の原理実証

テロ対策等を念頭に、危険物から漂う微量ガス分子を THz 波により高感度(10ppb)かつ高速(1秒以下)で検出するシステムを理研にて開発し、原理実証のデモンストレーションを実施した(図 2-3-11)。

目標 4. 公設試への超小型パワーレーザーの配備および利用環境の整備

目標 5. 公設試における超小型パワーレーザーのユーザー利用の開始

ユーザーサポートを日常業務としている公設試にハンドヘルドレーザー MOPA 機を設置し、平成 30 年 7 月からユーザーによる無償利用を開始した (図 2-3-13)。また、ImPACT 終了までには掌サイズのハンドヘルド型も整備する。これにより、ImPACT 終了後もユーザーによるレーザー試用の環境が整った。

目標 6. 既存加速器の電子ビームとマイクロアンジュレーターによる X 線ビームの発生

Pj-1 に記載した通り、東北大学の電子光理学研究センターにて既存加速器 (t-ACTS) との組合せによる放射光の発生実験を行った。その結果シミュレーションと合致する結果が得られ、マイクロアンジュレーターの性能を確認した (図 2-1-11～図 2-1-13)。

目標 7. レーザープラズマ加速による電子および X 線ビームの実用性評価

電子ビームに関しては、エミッタンスの小さい (光源が小さい) 安定したビームが既に得られていることから (図 2-1-2)、短バンチ性を活かした超高速電子線回折などへの応用を検討中である。

(2) 参考指標

① 民間企業等とのマッチング及び橋渡しの状況

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
企業の研究者数	50	0	7	31	50	58
協力企業数 ※	10	0	1	5	8	9

注：() は見込み数

毎年実施した本プログラムのシンポジウムには、毎回100～300名の参加があり、その約7割が産業界であった。これらの機会等を活用し民間企業とのマッチングを図ってきた。

Pj-1(レーザー加速 XFEL 実証) では、日本加速器学会、日本放射光学会、先端加速器科学技術推進協議会、日本電機工業会加速器特別委員会などの学会・業界団体研究会に参加し、民間企業との交流とマッチングを図った。また、主な研究開発責任者とともに三菱重工業、東芝、トヤマなどの加速器メーカーを訪問し、技術交流を行った。さらに、トヨタ、第一三共などの XFEL のポテンシャル・ユーザーとの意見交換も実施した。

Pj-2(超小型パワーレーザー) および Pj-3(レーザー応用システム化・XFEL 実証評価) では、Web やメーリングリストを利用してレーザーおよび応用開発に関する公募情報を広く周知し、研究会を開催して民間企業との交流とマッチングを図った。平成 28 年度には4企業(大学等と合せ9機関)の技術者が直接的に Pj-3H(超小型パワーレーザー応用) に参画し、平成 29～30 年度には Pj-3H で新たに5企業(大学等と合せ11機関)、Pj-2N(ハンドヘルドレーザー製品化) では3企業が参画した。Pj-2G(テーブルトップレーザー) は、企業(浜松ホトニクス) が平成 27 年度から開発・製品化担当として直接的に参画した。

② 論文

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全 体 数	なし	1	14	36	23	(53)
うち IP 77kV-10 以上	なし	0	0	0	0	(2)

注：() は見込み数

論文発表の目標値は設定していないが、知財のオープン・クローズ・グローバル戦略を考慮しつつ、論文発表を推奨した。なお、要素技術開発がほぼ終了する平成 28 年度の翌年度(平成 29 年度)からは、毎年 50 報程度の論文発表がなされることを期待した。

③ 学会発表

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全 体 数	なし	33	108	159	262	(223)
学会賞等の受賞数		0	0	3	2	(2)

注：() は見込み数

学会発表の目標値は設定していないが、知財のオープン・クローズ・グローバル戦略を考慮しつつ、学会発表を推奨している。加速器、プラズマ、レーザーに関する主要な学会

はコミュニティーの形成に重要であるため、特に参加・発表を推奨した。さらに、海外における ImPACT のプレゼンスを高め、ベンチマークとしても活用するため、主要な国際会議への参加・発表を推奨した。なお、要素技術開発がほぼ終了する平成 28 年度の翌年度(平成 29 年度)からは、毎年 200 報程度の学会発表を期待した。

④ 国際学会における招待講演

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全体数	なし	24	25	30	55	(54)

注：() は見込み数

⑤ 特許出願数

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
全体数(国内)	11	0	1	7	4	10
全体数(海外)	17	0	0	0	18	2
合計	28	0	1	7	22	12

注：() は見込み数

⑥ 知財・標準化等の取組状況

i) ImPACT プログラムにおける知財戦略

本プログラムでは、「オープン・クローズ・グローバル知財戦略：詳細は後述」を基本とし、プロジェクトの内容に応じて2つの異なる知財戦略を策定・実行した。

Pj-1(レーザー加速 XFEL 実証)では、レーザー加速のシステム自体は公知であり、システムの完成時期もしばらく先のため、個々の特徴ある要素部分を特許化する方針を採用した。Pj-2(超小型パワーレーザー)、特に Pj-2F(ハンドヘルドレーザー)は、レーザーおよび応用システムの事業化が ImPACT 期間内にも期待できるため、大学等のコア技術をもとに企業が新規事業を立ち上げるための知財戦略モデルを適用した。いずれの知財戦略とも、大学等発技術を知財化する上での課題解決を盛り込んだ新しい知財戦略である。

大学等発技術の知財化における課題解決の基本方針は以下とし、ImPACT 制度を活用するとともに、企業の知財専門家を知財担当 PM 補佐として迎え、実効的に運用した。

- ┆ 大学等の単独技術は大学の単独権利
- ┆ 大学等のアイデアを製品にするための企業との共同開発は共有特許
- ┆ 大学等の知財に関する意識の改革
- ┆ 質の良い特許の取得

ImPACT 終了までの残された期間は、以下の3項目に注力する。

- ┆ 日本出願および外国出願の ImPACT 期間内での権利化の促進
- ┆ 新規アイテムの特許出願に対する継続的サポート(特に、特許の質の向上)
- ┆ ImPACT 終了後の特許活用および特許ライセンス基本方針に関する合意形成

ImPACT 後の知財の取扱いには以下を基本とする。即ち、全ての特許は日本版バイドールに則り大学等あるいは企業の権利であり、ImPACT 後の権利化・ライセンス処理等については権利者が対応する。ImPACT の一部成果は JST 未来社会創造事業で活用されるため、知財に関する情報も未来社会創造事業に引き継ぎ、シームレスな知財活動に努める。

ii) 各プロジェクトにおける具体的な知財戦略

A) Pj-1（レーザー加速 XFEL 実証）の知財戦略

Pj-1 に関しては、事業化（部品の販売等）が見込める部分について特許化を推進した。特に、放電プラズマによる光導波路とマイクロアンジュレーターは、レーザー加速あるいは XFEL のキー技術となり得るため、部品単体で事業化が可能と思われる。このため、これらの技術については国内外とも特許化を図り、国内では既に権利化に成功した。また、光導波路については、簡易構成のものを新たに開発したため、新たに特許出願を行った。

B) Pj-2（超小型パワーレーザー）の知財戦略

Pj-2 に関しては早い実用化が期待されるため、以下の戦略を立案・実行した。

- Ⅰ 事業スタートアップと継続性： 他社特許クリアランス、単独特許による障害排除
- Ⅰ 事業競争力の強化： 将来事業のコア技術の特定と特許権利化
- Ⅰ 収益性の確保： 秘密保護、ノウハウの秘匿による模倣の排除

事業スタートアップと継続性： 大学等が単独で開発したコア技術は大学等単独で国内外の特許出願を行った。大学等の単独出願とすることにより複数企業への特許ライセンスが可能となり、競争原理を働かせることができる。また、共願の場合に問題となる、事業の撤退に伴う特許の死蔵を回避できる。事業を継続する上では他社特許のクリアランスも必要となるため、発明の出願前調査のみならず出願後の類似特許調査により、事業の障害となる特許についてクリアランスを実施した。

事業競争力の強化： レーザー本体の基本特許取得に加え、事業化の際に必要な周辺技術についても特許出願を行った。レーザーの小型化に関する基本特許（接合技術等）、高出力アンプに関する特許、波長変換に関する特許は既に国内で権利化され、海外も順次登録となっている。

収益性の確保： 他社による模倣を防ぐため、不必要にノウハウを開示しないことが重要である。このため、特許出願や論文における過度に詳細な記述については記載内容の見直しが必要である。大学等の研究者にはこの視点が欠けていたため、徹底した。

C) Pj-3（レーザー応用システム化・XFEL 実証評価）の知財戦略

レーザー応用システムに関する知財戦略は、システムを開発した企業に委ねた。ただし、中小企業の場合には、企業側の要望に応じて知財に関するサポートを行った。

知財戦略の具体例として、ハンドヘルドレーザーの例を図 3-2 に示す。接合・波長変換などのコア技術は分子研が単独で特許を出願・権利化する。その特許を複数の製品化企業にライセンスして競争によるレーザーの性能向上と低価格化を促すとともに、事業からの

撤退のリスクを軽減する。さらに、公設試にレーザーを提供しユーザー企業に無償で解放することにより、新しいレーザーの周知とニーズの吸い上げを図り、ユーザー企業によるシステム開発・知財化を促す。ユーザー企業は製品化企業からレーザーを購入し、自らが開発した新製品に組み込んで販売する。

この知財戦略を実効的に働かせるため、企業経験の長い知財の専門家を PM 補佐として雇用し、大学等研究者の意識改革を図るとともに、特許出願（明細書作成、経費など）を強力にサポートした。

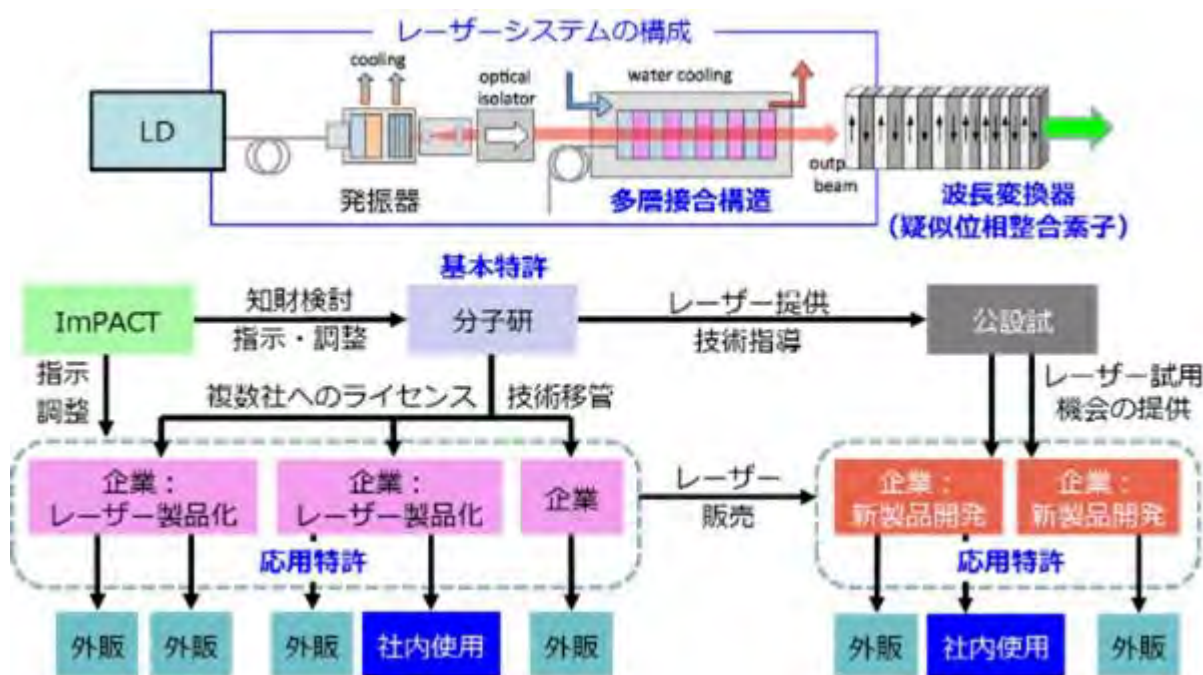


図 3-2 ハンドヘルドレーザーの知財戦略

iii) 知財戦略の推進における課題

A) 企業と大学等の知財に対する姿勢

特許を優先する企業と異なり、大学等では論文を優先する研究者がほとんどである。また、特許の書き方・出願の方法などに関する知見・経験が皆無の研究者も多く、一般に特許の優先度は低い。従って、研究者の特許意識の改革と抵抗感の払拭を先ず試みた。

新しく開発した技術であっても特許化していない場合、企業

が事業化しにくいこと、近年では特許出願が競争的資金獲得の条件になっている場合があること等を研究者に説明し、特許出願の意義を徹底した。また、知財担当 PM 補佐は、研究者の最新の研究内容を広く把握し研究者と出願内容を議論するとともに、特許提案に関わる指導を行って研究者とともに明細書を仕上げることにより、弁理士に特許の内容を理解してもらうよう努めた。これにより、研究者は特許出願に対する抵抗感が薄れ、知財の意識改革を行うことができた。

B) 質の高い特許の取得

大学等が単独で特許を取得する場合、特許に不慣れな大学等の研究者が直接弁理士と打合せを行うことが多く、質の高い特許の取得に失敗するリスクが大きかった。また、弁理士の評価や業務の管理が不十分なため、弁理士の能力を十分に引き出せないという課題があった。これを解決するため、知財専門の PM 補佐が研究者と弁理士の間に入り、内容を吟味・調整することで研究者と弁理士双方の意識を高める一方、弁理士の評価を行い弁理士の交代や特許事務所の変更も行った。

iv) 学→産→学の循環と ImPACT 知財

学(大学等)の基礎研究の成果は単独で特許出願を行い、ImPACT 後も競争的資金を獲得し研究を継続して完成度を高め、産(企業)への橋渡しを行うことを目指した。産は、学から移管された技術の完成度の高さを認識し、継続的に学と共同研究を実施する。学ではさらに研究の質を高める、という好循環の形成に知財を潤滑剤として活用した。

ImPACT は事業経験のある知財の専門家を PM 補佐として採用することで、知財戦略の立案、特許取得、契約、ノウハウ管理を含めた知財のワンストップ化を実現し、事業展開を見据えた知財戦略を実行することで、研究開発をアウトカムに繋げた。

v) 参考：ImPACT におけるオープン・クローズ・グローバル戦略

A) オープン・クローズ戦略。

第一ステップ：大学等は単独で特許出願を行ない、製造技術等に関するノウハウは開示せず、秘匿する。

第二ステップ：企業に対して、大学等はノウハウを含む技術移管を行い、開発した技術が事業化につながるようにサポートする。特許は、大学等が単独で所有しているため、複数の製品化企業に対して、技術移管が可能である。レーザー加速 XFEL の要素部品に関しては、企業と個別に契約を行うことで製造を委託し、大学等が使用する要素部品の製造にとどまることなく事業化に繋げていく。

第三ステップ：企業はレーザー製品を販売するとともに、レーザー製品を組み込んだ応用製品を社内使用または製品として販売する。レーザー製品を購入した企業は、レーザーを組み込んだ応用製品を開発し、付加価値の高い応用製品を販売する。

第四ステップ：レーザーの製品化企業および応用製品の開発会社は、必要に応じて大学等とライセンス契約を締結し、販売に応じて大学等にロイヤリティを支払う。大学等は、そのロイヤリティ収入を活用し、特許の維持や新規のレーザー開発に充てる。

第五ステップ：ImPACT 終了後は、大学等は当初のレーザー製品化企業(3社)以外の企業に対しても、技術移管の実施や特許ライセンス契約を締結し、日本全体での事業の拡大に寄与していく。

B) グローバル戦略

基本的な特許については、国内のみならず ImPACT の経費を使用して海外への出願を行う。海外へ出願することで、海外企業への特許ライセンスが可能となり、海外での模倣品の出現に対処する。

アウトリーチ活動の一環として、海外の展博で ImPACT の研究開発成果の展示を行うとともに国際学会での発表、論文投稿などを行い、海外における将来の特許ライセンシーの開拓に繋げる。

vi) 標準化等の取組状況

Pj-1C で開発したマイクロアンジュレーターは次世代のアンジュレーターとして国内外の加速器・放射光施設で利用される可能性が高い。アウトリーチ活動の結果、仏、独、米、伊などから引き合いを受けており、標準的なデバイスとしての認知を図っていく。また、国内でも放射光施設での利用等を通して、認知を図っていく。

Pj-2F で開発を進めているレーザー材料の常温接合技術およびそれを使用したレーザー媒質の冷却構造は、将来国際的に標準的な技術となる可能性があるため、国内外への特許出願および学会・論文発表を積極的に進めている。

⑦ アウトリーチ等の状況

	目標値	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
アウトリーチ回数	30／年	26	37	35	54	(52)
新聞、TV等の報道数		1	1	4	5	(12)

注：() は計画数

海外に対するアウトリーチ活動などにつき、主なものを次項(⑧ その他特筆すべき取り組み)に纏めた。

⑧ その他特筆すべき取り組み

国内のみならず海外機関とも積極的に交流し、ImPACT におけるイノベーション創出の取り組み、PM のロールモデル、技術開発の内容などについて紹介、交流を図った。

- ・平成 27 年 7 月 米 NASA Johnson Space Center Technical Seminar
- ・平成 27 年 7 月 米 U.S. - Japan Workshop on Effective Project Management
- ・平成 28 年 5 月 独 ZAL (Zentrum für Angewandte Luftfahrtforschung)



- ・平成 28 年 5 月 独 Helmholtz-Zentrum Geesthacht Seminar
- ・平成 28 年 6 月 独 AIRBUS Evening Talk
- ・平成 28 年 6 月 伊 EuPRAXIA Workshop
- ・平成 28 年 7 月 豪 ANSTO Seminar
- ・平成 28 年 9 月 米 Cross Industry Innovation Summit



- ・平成 28 年 9 月 韓 Doosan Seminar
- ・平成 29 年 2 月 米 Stanford University Seminar
- ・平成 29 年 4 月 日 WPI Seminar
- ・平成 29 年 5 月 仏 CNRS PIMM Seminar
- ・平成 29 年 6 月 中 HPSTAR Seminar
- ・平成 29 年 6 月 独 EADS Seminar
- ・平成 29 年 7 月 チェコ HiLASE Seminar
- ・平成 29 年 8 月 アイルランド Innovation Panel, International Space University
- ・平成 29 年 9 月 チェコ HiLASE Workshop
- ・平成 29 年 11 月 米 Cross Industry Innovation Summit
- ・平成 29 年 11 月 韓 KAERI Seminar
- ・平成 29 年 12 月 中 Shanghai Jiao Tong University Seminar,
- ・平成 29 年 12 月 中 SIOM Seminar
- ・平成 30 年 3 月 仏 International Space University Seminar
- ・平成 30 年 3 月 スペイン UPM Seminar
- ・平成 30 年 4 月 チェコ TACR HiLASE Seminar
- ・平成 30 年 5 月 独 Airbus Seminar
- ・平成 30 年 5 月 独 Helmholtz-Zentrum Geesthacht Seminar
- ・平成 30 年 5 月 独 DESY Seminar
- ・平成 30 年 6 月 仏 ENSMA Seminar
- ・平成 30 年 9 月 スペイン UPM Seminar
- ・平成 30 年 10 月 中 Shanghai Jiao Tong University Workshop
- ・平成 30 年 10 月 チェコ HiLASE Workshop
- ・平成 30 年 10 月 仏 Airbus Lecture
- ・平成 30 年 11 月 米 LSPT Seminar
- ・平成 30 年 11 月 韓 KAERI Doosan Seminar
- ・平成 31 年 1 月 チェコ HiLASE Seminar
- ・平成 31 年 2 月 米 Photonics West Plenary



- ・平成 31 年 2 月 欧州 EuPRAXIA Retreat Workshop

4. 研究開発プログラム予算の推移

研究開発プログラム予算の推移を図 4-1 に示す。

	平成26 年度	平成27 年度	平成28 年度	平成29 年度	平成30 年度	合計
Pj-1 レーザー加速XFEL実証	80	654	1363	227	153	2477
1A レーザー加速要素技術	72	311	252	70	34	739
1B レーザー加速統合プラットフォーム	8	137	943	41	39	1168
1C マイクロアンジュレーター		32	52	45	27	156
1D ビーム計測・制御		161	106	71	53	391
1E プラズマ素子・電源		13	10	0	0	23
Pj-2 超小型パワーレーザー	7	209	189	167	115	687
2F バンドヘルドレーザー	7	125	80	121	79	412
2G デーブルトップレーザー		84	109	5	5	203
2N バンドヘルドレーザー製品化				41	31	72
Pj-3 レーザー応用システム化・XFEL実証評価			75	124	167	366
3H 超小型パワーレーザー応用			21	54	110	185
3J XFEL実証評価			30	43	20	93
3K セキュリティ応用			19	14	11	44
3L マイクロアンジュレーター評価			5	8	4	17
3M レーザー試用プラットフォーム				5	20	25
3P 電子イメージング評価					2	2
研究費合計	87	863	1,627	518	435	3,530

図 4-1 研究開発プログラム予算の推移

5. 研究開発プログラムの推進体制

本プログラムの推進体制を図 5-1 に示す。研究開発責任者およびプログラムの構成については図 1-4 および図 1-5 に記載した。

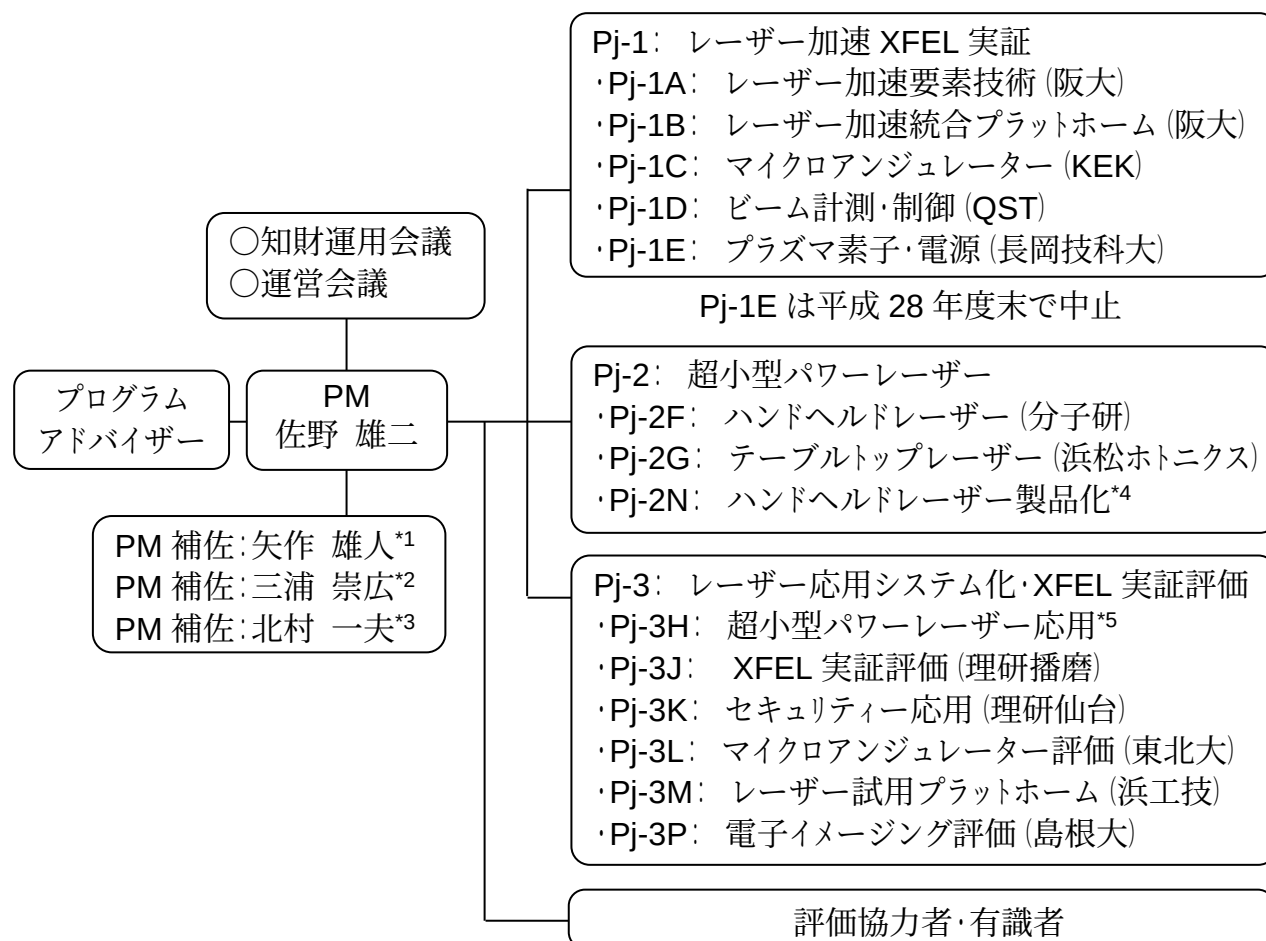


図 5-1 本プログラムの推進体制

*1 運営担当 PM 補佐

*2 研究開発担当 PM 補佐 (総括担当)

*3 研究開発担当 PM 補佐 (知財担当、H28 年 4 月着任)

*4 製品化公募 (平成 29～30 年度:平成 28 年度下期公募) による参画3機関

パナソニックプロダクションエンジニアリング 株式会社

株式会社 ニデック

株式会社 オプトクエスト

*5 Pj-3H (超小型パワーレーザー応用) には、以下の延べ17機関が参画

第一期アイデア公募 (平成 28 年度:平成 27 年度下期公募) による参画9機関

・株式会社 ユニタック

・株式会社 トヨコー

・大阪大学

・沖縄工業高等専門学校

- ・つくばテクノロジー 株式会社
- ・近畿大学
- ・産業技術総合研究所
- ・株式会社 IHIエアロスペース
- ・長岡技術科学大学

第二期アイデア公募(平成 29～30 年度:平成 28 年度下期公募)による参画5機関

- ・神戸大学
- ・大阪大学
- ・株式会社 菅製作所
- ・株式会社 IHIエアロスペース
- ・株式会社 TCK

システム化公募(平成 29～30 年度:平成 28 年度下期公募)による参画3機関

- ・株式会社 ユニタック
- ・大阪大学
- ・株式会社 東芝

プログラム・アドバイザーは、以下の9名である。

産／学	氏名	所属
学	石川哲也	理化学研究所 放射光科学研究センター
学	太田俊明	立命館大学 総合科学技術研究機構
学	加藤義章	光産業創成大学院大学
産	神納祐一郎	三菱重工業株式会社 執行役員フェロー
学	小林洋平	東京大学 物性研究所
学	柴田公博	仙台高等専門学校(元 日産自動車株式会社)
学	野崎光昭	高エネルギー加速器研究機構 研究支援戦略推進部
産	平野嘉仁	三菱電機株式会社 半導体・デバイス事業本部
産	渡部幸夫	日本精工株式会社 コーポレート経営本部 新事業推進室

評価協力者・有識者は、以下の7名である。

産／学	氏名	所属
産	浅香宗利	株式会社ティー・イー・エム 営業部
学	河野太郎	東海大学 医学部外科学系形成外科学
学	小林洋平	東京大学 物性研究所
産／学	柴田公博	仙台高等専門学校(元 日産自動車株式会社)
官	杉山精博	防衛装備庁 陸上装備研究所
産	鷺尾邦彦	有限会社パラダイムレーザーリサーチ
産	渡部幸夫	日本精工株式会社 コーポレート経営本部 新事業推進室

6. 研究開発プログラムの実施管理状況

(1) 研究開発プログラムのガバナンス

① 進捗状況の把握及び指導・管理状況

プログラムのマネージメントは、本プログラムの理念・目標に基づき、PM が主体的に実施する。研究開発担当 PM 補佐は平成 27 年度末までは1名であったが、基盤技術開発の進捗と応用システムの立ち上がりに合わせ平成 28 年 4 月に知財担当 PM 補佐を、平成 28 年 5 月にレーザー担当 PM 補佐を各1名増員し3名体制とした。なお、平成 30 年 2 月にレーザー担当 PM 補佐が転職したため、それ以降の研究開発担当 PM 補佐は2名である。

プログラム・アドバイザーは関連分野の学术界・産業界の有識者から適任者(数名)を選定・依頼している。また、本プログラムで開発する技術・システムのポテンシャル・ユーザーを海外から適宜招聘し、プレゼンテーション、サイトビジットなどを通してプログラム全体および個々の技術に対するアドバイスを得た。公募による機関選定においては、関連の分野・技術に精通する複数の有識者を評価協力者に選任し、専門的な見地からアドバイスを得た。さらに、選定した機関による研究開発の実施内容についても、評価協力者から適宜アドバイスを得た。

研究開発プログラムの日々のマネージメントは、PM および PM 補佐と研究開発責任者(PI)との間でメール・電話によるコミュニケーションにより実施したが、フォーマルな形としては以下により行った。

- Ⅰ 運営会議
- Ⅰ プロジェクト会議
- Ⅰ サイトビジット
- Ⅰ 知財運用会議

開発計画および実施管理体制は、研究開発の進展に伴い適宜見直した。見直しのタイミングは年度ごと、および運営会議に合わせた。研究の中止を含めた体制の再構築は、成果目標に対する進捗管理評価とともに、アドバイザーおよび外部有識者の評価を参考にし PM が判断した。また、競合する有力な技術が出現した場合には、外部有識者に評価を依頼し、評価の結果によっては研究開発の大胆な組み換えを行った。

「運営会議」「プロジェクト会議」「サイトビジット」「知財運用会議」の概要を以下に、会議体系を図 6-1 に示す。なお、各会議は研究開発機関を巡回する形で開催し、試験装置の見学や職場環境の確認、各機関間・研究者間の交流に活用した。

Ⅰ 運営会議

プログラム全体に関わる重要事項の連絡・調整は運営会議により行う。運営会議は PM、PM 補佐、JST、各研究開発責任者(PI)、プログラム・アドバイザーの参加を得て、半年毎に開催した。また、必要に応じ、外部有識者に出席を依頼した。

運営会議では、PM および各 PI が半年間の進捗を報告し、全体スケジュールの確認・調整を行った。また、大局的な観点から研究開発の方向性を議論し、必要に応じて研究開発内容やスケジュールに反映した。なお、平成 29 年度以降は、Pj-2N および Pj-3H に関わる公募の結果、運営会議の参加者が増大し、全体での開催が必ずしも効率的でなくなってきたため、春は全体での開催とし秋は「レーザー加速 XFEL」と「超小型パワーレーザー」関係を別々に開催することに改めた。

Ⅰ プロジェクト会議

研究開発内容やスケジュール調整、詳細な技術的議論はプロジェクト会議で実施した。Pj-1 (レーザー加速 XFEL 実証) プロジェクト会議は1～2ヶ月毎に開催し、PM または PM 補佐、各研究開発機関の担当者が出席し、進捗状況の確認や情報交換を行った。必要に応じ、外部有識者にも出席を依頼した。若手研究者間で自由闊達な議論を行うため、2回に1回程度は、若手研究者のみが参加するプロジェクト会議を開催した。

Pj-2 (超小型パワーレーザー) プロジェクト会議は3ヶ月に一回程度開催し、進捗状況の確認や情報交換を行うとともに、レーザーに関連するサブプロジェクト (2F、2G、2N、3H、3K、3M) に共通する技術的課題を議論した。

Pj-3 (レーザー応用システム化・XFEL 実証評価) は、各サブプロジェクト (3H、3J、3K、3L、3M、3P) の代表が Pj-1 または Pj-2 の関連するプロジェクト会議に出席する形で実施した。具体的には、3J、3L、3P は Pj-1 のプロジェクト会議に、3H、3K、3M は Pj-2 のプロジェクト会議に参加した。

Ⅰ サイトビジット

各研究開発機関およびレーザー加速統合プラットフォーム (@播磨) における開発の進捗状況を直接確認するため、サイトビジットを行った。半年に一回程度の訪問としたが、主要な研究開発機関にはより高い頻度 (概ね1ヶ月毎) でサイトビジットを行って開発をフォローし、問題点などを把握するとともに対応を協議した。サイトビジットには、必要に応じてアドバイザーおよび外部有識者の参加を依頼した。

Ⅰ 知財運用会議

知財運用会議は、知的財産権の実施許諾条件等の運用に関する協議のため運営会議と併せて開催し、その場を利用して研究者の知財意識向上を図った。緊急の場合には適宜関係者を招集、またはメールにて審議した。出席者は、PM、PM 補佐、JST、利害関係を有する研究開発機関の代表者、外部有識者 (必要に応じて) とした。

	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
運営会議の開催数	1	2	2	3	3
研究開発機関等の訪問回数	46	60	65	54	(56)

注：知財運用会議は運営会議に併せて開催した。

注：() は見込み数

運営会議

- ・頻度： 半年に1回
- ・出席者： PM、PM 補佐、アドバイザー、研究開発機関の代表者、JST

プロジェクト会議

- ・頻度： 1～2ヶ月に1回 (Pj-1)、3ヶ月に1回 (Pj-2)
- ・出席者： PM または PM 補佐、研究開発機関、外部有識者 (必要に応じて)

サイトビジット

- ・頻度： 半年に1回～毎月
- ・出席者： PM または PM 補佐、研究開発機関の代表者、
アドバイザー (必要に応じて)、外部有識者 (必要に応じて)

知財運用会議

- ・頻度： 必要に応じて適宜
- ・出席者： PM、PM 補佐、JST、関連する研究開発機関の代表者、
外部有識者 (必要に応じて)

図 6-1 本プログラムの会議体系

② 新たな発想・アイデアの採用 (若手・女性人材の育成を含む) に関する取り組み

技術の飛躍的な発展には、斬新な発想・アイデアが不可欠である。本プログラムでは、新たな発想やアイデアを創出し育てるため、交流 (出会い) による発想の転換を重要視している。具体的には、異なる技術分野 (コミュニティー) の交流、異なる世代 (Generation) の交流、異なる Gender の交流、異なるカルチャー (バックグラウンド) の交流などである。若手・女性人材の育成については、この取り組みの中の一環として位置付け、意識しつつ実行した。具体的な交流の場としては、運営会議、研究会、シンポジウム、国際会議、およびその後の意見交換会などである。

Pj-1 (レーザー加速 XFEL 実証) 関係では、「レーザー」「プラズマ」「加速器」という異分野のトップクラスの研究者が「レーザープラズマ加速」という目的を一つにしたテーマで議論することにより、新たな発想・アイデアを引き出す仕組みを構築した。また、Pj-2 (超小型パワーレーザー) 関係では、トップクラスの研究者から企業のエンジニアさらには営業部員といった異なるミッションを持った人々が、垂直統合的に「超小型パワーレーザー」を議論することにより、新たな発想・アイデアを引き出す仕組みとした。

既存のコミュニティーの場合には既にハイアラキーが確立していることが多く、自由な交流や発想が生まれにくい。この点分野が異なると、分野間はもちろん世代間の交流も生まれやすい。また、海外との交流は異なるカルチャーの間で行われるため、新たな発想・アイデアが生まれやすい。このため国際シンポジウムを毎年1回以上開催し、交流に努めた。また、本プログラムでは3～4年目に多くの公募を行い、約20名の新しい研究開発責任者を迎え入れるとともに約10名には退席いただき、コミュニティーの固定化を防いだ。

③ 研究開発機関等の評価及び追加変更の状況

研究開発機関等の追加・変更の状況を以下に記す。

Pj-1E (プラズマ素子・電源:長岡技科大) は平成 28 年度末をもって研究開発を中止し、研究開発の内容は Pj-1A に引継いだ。

Pj-3H では第一期アイデア公募 (平成 27 年度下期実施) にて9件の提案を採択したが、その内6件は平成 28 年度のステージゲートで研究開発を終了した。同じく Pj-3H の第二期アイデア公募 (平成 28 年度下期実施) では5件の提案を採択し、その内1件はアイデア公募の内容を発展させる形で大型の競争的資金 (CREST) を獲得したため、平成 29 年度で研究開発を終了した。

	26年度	27年度	28年度	29年度	30年度
参画研究機関数	5	7	19	21	22
参画研究者数	36	58	115	136	144
うち中止 (解任)	0	0	0	14	4
追加 (新任)	0	16	5	74	22

④ 「選択と集中」に向けた取り組み

集中と選択を行うためには、潜在的なニーズを的確に把握することが欠かせない。既に顕在化したニーズに対する技術開発は、技術が確立し製品化される頃には陳腐化している可能性が高い。このため、潜在的なニーズとその方向性を把握することが極めて重要である。

Pj-1 (レーザー加速 XFEL 実証) については、研究者数が限られているが、幸いにも我が国の研究者は世界のトップクラスであり、意識も高い。このため、これらの研究者と企業などのニーズ側との交流の場を設け、ニーズ側の意見をしっかりと聞き議論することにより、方向性を定めた。また、海外の研究開発動向および海外研究者の意見も参考にした。

Pj-2 (超小型パワーレーザー) については、上記の取り組みに加え、公募説明会や研究会、国際会議や展示会の場を活用し、ニーズ側とシーズ側との対話を意識的に行った。これらの取り組みにより研究開発の方向性が定まり、集中と選択が行われる。技術移転先および将来的な顧客開拓に関しては、新技術に対する意識が高く実力のあるポテンシャル・ユーザーをピンポイントで複数選定し、効率的な交流に進めた。その結果、海外を含め多数の企業から、直ぐにでも技術導入したいという申し出を受けている。

(2) 研究成果の展開に向けた取り組み

① これまでの取り組み

「研究成果の展開に向けた取り組み」において特に重要な「事業化戦略」および「知財戦略」について、以下に説明する。

事業化戦略については、プログラムの開始当初から複数のユーザーにアドバイザーまたは外部有識者として参画を求め、その意見を戦略立案に反映させた。また別途実施した技術動向調査・市場調査・ベンチマークの結果などを活用した。さらに、PM および PM 補佐によるユーザー訪問を適宜行い、現場のニーズを直接拾い上げることで、開発の目標・工程・内容に反映した。

レーザー加速 XFEL 実証 (Pj-1) は ImPACT 期間中の原理実証をプロジェクトの目標としており、システムの事業化はかなり先となる。しかしながら、マイクロアンジュレーター (Pj-1C) は国内外の放射光施設などへのバックフィットも期待されるため、製造拠点や品質保証を含め事業化戦略およびグローバル展開戦略を立案し、特許を含め企業との交渉を進めた。その結果、製造委託先も定まり、海外への供給を含めた体制が整った。

超小型パワーレーザー (Pj-2) は ImPACT 期間中のレーザーの製品化と応用システムの実証を目標としている。ハンドヘルドレーザー (Pj-2F) については分子研が開発を担当したため、企業への技術移転により事業化を達成し、平成 31 年 3 月には、プロト機の販売を開始する (Pj-2N)。テーブルトップレーザー (Pj-2G) は公募の結果、浜松ホトニクスが開発を担当したため、事業化は自らが行い、ImPACT はユーザー開拓 (用途開拓) を支援した。両プロジェクト (2F および 2G) の成果は、国内企業によるレーザー応用システムの開発に繋げ (Pj-3H)、試適用・評価、関連知財の権利化の後、広く国内外に展開する。また、ハンドヘルドレーザー (Pj-2F) については公設試への配備を行い、ユーザーによる無償での試用を平成 30 年 7 月に開始した (Pj-3M)。ユーザー試用を通してニーズを吸い上げ、今後の改良開発と事業化に反映する。

知財戦略については、開発している技術の実用化時期を見極め立案した。マイクロアンジュレーター (Pj-1C)、ハンドヘルドレーザー (Pj-2F) など短期で実用化が見込める技術については、海外を含め積極的に特許出願を行った。具体的な出願・権利化の戦略は前述の通りである (例えば図 3-2)。知財の運用に関しては、個々の事案は発明者 (研究開発責任者) と協議し、方針等は知財運用会議において議論・協議した。

技術動向調査・市場調査は、PM および PM 補佐による全体動向の把握と、各機関による専門的な観点からの調査を実施した。また、第三者的な視点を得るため、外部有識者の意見を参考にしながら技術動向調査を行うとともに、ベンチマークを実施した。

② 今後の方針と具体的な取り組み計画

ImPACT 後の具体的な取り組みとして、ImPACT にて整備・構築したプラットフォームおよび ImPACT 期間中に育成した研究開発人員の継続的な活用を計画している。

レーザー加速 XFEL 実証 (Pj-1) 関係では、ImPACT にて構築・整備したレーザー加速統合プラットフォーム (@播磨) の運用を継続し、更なる技術開発および実用化を目指す必要がある。このため、各研究者には公的資金への応募を働きかけていたが、平成 29 年度に 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」が立ち上がり、ImPACT 成果の一部は本未来社会創造事業にて活用されることとなった。現在、ImPACT 後のプラットフォームの運用について検討中であるが、プラットフォームとともに主な研究開発人員も有効に活用されることとなった。

超小型パワーレーザー (Pj-2) では、ハンドヘルドレーザーに関わる活動は平成 31 年 4 月に分子研に設立される「社会連携研究部門」および「小型集積レーザー (TILA) コンソーシアム」に引き継がれ、産業・社会への展開を継続して推進する計画である。一方、浜松工業技術支援センター (浜工技) のレーザー試用プラットフォームにおいて実施してきたユーザーへのレーザーの無償提供の試みも継続する。分子研の活動と相補的な形で、企業ユーザーにレーザーと使用のノウハウを提供し、レーザー利用の底辺拡大と社会展開を図る計画である。

テーブルトップレーザーに関しては、浜ホトが平成 28 年度に NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」事業から受注したため、NEDO 事業と連携しながら応用展開を推進してきた。ImPACT 後は NEDO 事業にて応用展開の取組みを継続する計画である。

7. PMの自己評価

(1) PMが実施管理を行った研究開発プログラム（研究成果）に関する評価

① 産業や社会のあり方の変革をもたらす見通しは得られたか

本プログラムで研究開発を推進したレーザー加速 XFEL および超小型パワーレーザーは様々な応用に展開可能な基盤技術 (KET; Key Enabling Technology) であり、「産業や社会のあり方の変革」に関する数多くのアイデアが生まれている。例えば、ハンドヘルドレーザーを応用した溶接欠陥検査システム (図 2-3-8) は、慢性的な建設現場の人手不足を解消し、建設産業に変革をもたらす。社会インフラのメンテナンス (図 2-3-6) や危険物・有害薬物の検出 (図 2-3-11) は、安全・安心な社会の実現に寄与する。また、ミニチュア化したハンドヘルドレーザーを内視鏡に組み込み、消化系や循環系器官に生じたがん組織の極低侵襲アブレーション治療に応用すれば、長寿社会の実現に貢献する。

ImPACT 終了時点ではハンドヘルドレーザーの出荷は始まったばかりであり直接の産業規模は小さいが、レーザー全体の市場は1兆円を超え CAGR (年平均成長率) は 5~6% の成長分野である。超小型パワーレーザー (ハンドヘルドレーザー) の投入により新規分野の開拓が進み、国内産業の牽引役となる可能性は高い。一方、XFEL はサイエンスのフロンティアを切り拓く基盤技術である。産業への貢献の数値化は難しいが、研究および産業競争力に及ぼすトリクルダウン効果は非常に大きい。

将来の産業や社会のあり方の変革をもたらすような革新性を有する研究成果:

レーザー加速 XFEL 実証 (Pj-1) では、以下のような革新的な研究成果を得た。

- ・世界初の多機関によるレーザープラズマ電子加速プラットフォーム (図 2-1-24)
- ・安定でスケーラブルな電子加速を実現するレーザーシステムの開発 (図 2-1-20)
- ・世界一安定なレーザープラズマ加速による電子ビームの発生 (図 2-1-26)
- ・世界一効率*の高いレーザープラズマ加速による電子ビームの発生 (図 2-1-31)

(*効率: 電子加速エネルギーゲイン/レーザーエネルギー)

- ・世界初の電子ビーム長距離輸送後の追加速 (2段加速) の実証
- ・周波数領域ホログラム法によるレーザー航跡波の計測 (図 2-1-16)
- ・モノリシックで調整が不要な世界最短周期のアンジュレーター磁石 (図 2-1-9)

安定でスケーラブルなレーザープラズマ電子加速を実現するため、加速に必要な要素を「電子発生」「制御」「加速」の3つに集約し、各々を独立に制御できるモジュール化された加速システムを考案した。このアイデアを具体化するため、独立な3本のレーザービームを備えた電子加速専用のレーザーシステムを設計・開発し、ImPACT期間内にプラットフォーム (@播磨) に設置して運用を開始した。また、このレーザーを使用して、世界一安定な電子ビームの発生と世界初の電子ビーム長距離輸送 (2m) 後の追加速 (2段加速) を実証した。更に、低速 Z-pinch 放電による長尺プラズマチャネル (50mm) の形成 (図 2-1-27) とレ

レーザーのガイディングを実証し、加速エネルギー1GeV 達成とマイクロアンジュレーターによるX線ビーム発生準備を整えた(図 2-1-29)。

超小型パワーレーザー (Pj-2) では、以下のような革新的な研究成果を得た。

- ・世界初の異種酸化物(レーザー媒質と透明冷却基板)の常温接合(図 2-2-4)
- ・世界最高出力密度*のハンドヘルドレーザーの開発と実証(図 2-2-17)

(*出力密度: 平均出力/レーザー媒質体積)

レーザー媒質と透明冷却基板の常温接合技術を世界で初めて開発し、レーザー媒質の冷却性能を飛躍的に高めることに成功した。その結果、レーザーの超小型化が可能となり、ロボットアームへの搭載を実現した(図 3-1)。ハンドヘルドレーザーは高出力パルスレーザーの実適用を妨げてきた伝送の問題(ミラーや光ファイバーの損傷)を解決する。また、小型化により狭隘部への適用性も向上し、インフラ設備メンテナンス等ポータビリティを活かした応用が可能となる。更に、部品の削減による信頼性の向上にも寄与する。この成果は、小型でシンプルな構造の高出力多段ディスクレーザーや、異なるレーザー媒質の接合によるスペクトル設計にも道を拓く。

レーザー応用システム化・XFEL 実証評価 (Pj-3) では、ハンドヘルドレーザーのパルス幅(サブナノ秒)の特異性に由来する革新的な応用の成果が得られている。具体的内容は②(上記①以外の派生的な効果として、どのようなものが得られたか)に記載した。

産業や社会のあり方変革に向けた戦略:

我が国の社会インフラ(橋梁、トンネル、港湾設備など)は高度経済成長期に集中的に建設され、急速な老朽化が懸念されている。また、団塊の世代が75歳以上となる2025年には国民の1/5が75歳以上という少子高齢化社会を迎えるため、医療費や介護負担の増加と生産年齢人口の減少が我が国の社会・財政基盤を揺るがす事態が懸念されている。

レーザーは、先端科学や産業イノベーションの推進に不可欠な汎用・基盤的なツール(KET)と言われており、戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)第2期「光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術」の開発課題にもなっている。インフラ維持管理・材料開発・医療の革新などに貢献し、上記社会課題の解決の一翼を担うものとして期待されている。

本プログラムでは、X線自由電子レーザー(XFEL)とパワーレーザーの超小型化により桁違いの低価格化とポータビリティを実現し、インフラ設置場所や研究施設、医療施設に配備することで利用機会・適用範囲を大幅に拡大(ユビキタス化)し、超小型レーザーにしかできない課題解決を行うという明確な出口戦略を描いた。具体的には、超高感度分子構造解析による医薬品や新規機能性材料の開発効率化、血管造影検査や内視鏡手術、緑内障・後発白内障手術や皮膚疾患治療・痣取り、レーザー分光・レーザー超音波・ピーニング等を用いたインフラ設備のメンテナンス、高強度 THz 波によるセキュリティの向上など、様々な応用に展開して安全・安心・長寿社会を実現し、産業や社会のあり方を変革する。

戦略の実現に向けた課題の整理・明確化:

超小型 XFEL では、出口戦略実現に向けた安定でスケーラブルな多段プラズマ加速を実現し、小型化と低廉化を達成する。実用化には、欧米が目指しているサイエンスのフロンティアを開拓するための電子ビーム (高い加速エネルギーであるが不安定) とは異なり、低エネルギーであっても安定な電子ビームの発生が重要である。そのため、安定な加速を実現する日本独自のレーザーシステムの開発に注力した。技術的課題は「レーザー・電子ビームの時空間同期による多段加速」「加速電子数 (電荷) の増大」「電子エネルギーの単色化」「アンジュレーター磁極間への安定な電子入射」「アンジュレーター磁石の K 値増大」「加速用レーザーの小型・高効率化」である。今後、プラットホームにおける実験結果の分析を行い、課題の再整理と定量化および優先順位付けを行う必要がある。

現在想定している最大の課題は、出口戦略として掲げたシングルショットの構造解析やポンプ・プローブ実験に必要なX線光子数 (パルスあたり 10 の 12 乗フォトン程度) の発生であり、加速電子数 (電荷) の増大 (50pC) と電子エネルギーの単色化 ($DE/E \sim 0.1\%$)、アンジュレーター磁場強度の増大 ($K=1$) が必須と考えられる。

超小型パワーレーザーについては構想を実現し (図 3-1)、ポータビリティを高めることに成功した。現在その製品化に注力しているが、ImPACT 後はハンドヘルドレーザーの製品化担当3社と協力して拡販に努める他、「信頼性の向上」と「供給およびサービス体制の構築」に注力する。また、開発したレーザーを産業界や医療分野、更には研究開発用途として浸透させることにより、IoT との融合も含めた製造の革新や新しい医療応用、セキュリティ、インフラ設備メンテナンス等に展開する。

技術的課題を克服するためのアイデア・着眼点の斬新さ、技術的なサプライズ:

アイデア・着眼点の斬新さ、技術的なサプライズとして顕著なものは以下である。

- ・安定性とスケーラビリティを実現する電子の多段加速スキーム
- ・安定な電子加速専用のレーザーシステム
- ・調整が不要なモノリシック構造の超小型アンジュレーター磁石
- ・常温接合技術の開発と DFC 構造によるレーザーの小型化・ポータブル化

欧米の実験のように1本の大出力レーザービームで電子加速を行うと、高い加速エネルギーは得られるものの、安定な加速は困難である。ImPACT ではレーザープラズマによる安定な電子加速に必要とされる要件を分析し、日本独自の加速スキームを考案するとともに、安定な加速に特化したレーザーシステムを開発した。そこでは電子加速に必要な「電子発生」「制御」「加速」の3つの機能を3本のレーザーで独立に最適化する構成 (図 2-1-19、図 2-1-20) を採用し、安定な電子加速を実現した (図 2-1-26)。なお、この構成は加速モジュールを追加することにより、電子ビームの更なる高エネルギー化が可能である。加速の際、3つのレーザービームは高い空間・時間精度 ($\sim 10\text{mm}$ 、 $\sim 10\text{fs}$) で同期させる必要があるが、同一の発振器から分岐したレーザービームを使用することにより正確な時間同期が可能となる。

レーザーシステムは連結一体化した大型の光学テーブル上に設置して空間的な位置精度を高め、電子加速の安定化を図った。熱源となる大型のポンプレーザーは別室に設置し、全てのレーザー電源を電源室に隔離してレーザー室における発熱を最小限に抑える設計とした。振動源となる各種ポンプ類も極力ビームラインへの影響が少ない位置に離して設置した。また、基本的な操作は制御室から全て遠隔で行う設計とした。

アンジュレーターについては、磁石のモノリシック構造を世界で初めて実現することにより、短周期化と小型化を達成した(図 2-1-9)。また、従来必要であった磁石数千個のミクロン単位の調整を不要とし、調整時間を大幅に短縮した。更に、新たな着磁・連結方法を発明することにより、アンジュレーター磁石の長尺化を実現した(図 2-1-10)。

超小型パワーレーザーについては、レーザー媒質(Nd:YAG など)と透明冷却基板(サファイヤ、ダイヤモンドなど)との常温接合技術(図 2-2-5)を世界で初めて開発し、レーザー媒質からの効率的な排熱を実現した。また、シンプルな多段ディスクレーザー構造(DFC: Distributed Face Cooling, 図 2-2-6)を発明し、レーザー媒質の単位体積当たりで世界最高出力を達成した(図 2-2-17)。更に、レーザー媒質の結晶方位を制御することにより熱複屈折を低減し、温度変化に強いロバストな発振器を実現した。

戦略の実現に向けた道行き(ロードマップ):

ImPACT では、播磨に構築したプラットホームを使用して「1GeV 電子ビームの発生」と「1keV のX線ビーム発生」を目指した。現時点では目標に到達していないが、達成は目前である。ImPACT 後は、技術を更に高度化して超小型 XFEL の将来の実用化を目指す。具体的には以下のような目標を設定し、研究開発を展開する(カッコ内左:ImPACT、カッコ内右:次期目標)。

- (1) 加速電荷(電子数)増大(10pC $\rightarrow$ 50pC)
- (2) 電子ビーム単色化(1% $\rightarrow$ 0.1%)
- (3) アンジュレーター磁石の K 値増大(0.4 $\rightarrow$ 1.0)
- (4) 加速用レーザーの小型化(50m² $\rightarrow$ 10m²)

(1)の実現のためには電子発生用ガスターゲットの改良(ガスクラスター化、窒素ガス化など)および数サイクルレーザーによる発生電子数の増大などを行う。(2)については収束性能に優れたモノクロメーター、磁気光学系の開発などを行う。(3)についてはクライオ化、などが考えられる。(4)については DFC 構造の採用による加速用レーザー励起系の小型高効率化などが考えられる。

超小型パワーレーザーについては、企業ユーザーの利用拡大のため、レーザー試用プラットホームを浜松工業技術支援センター(浜工技)に開設した(図 2-3-13)。平成 30 年 7 月からユーザーに無償で解放しているが、この試みを ImPACT 後も継続する。また、この 4 月には分子研に「社会連携研究部門」および「小型集積レーザー(TILA)コンソーシアム」を設立し、更なる技術の深耕と産業展開を推進する。浜工技と協力し、ユーザー絶対数の増大と将来の産業規模拡大を図る。

戦略の実現に向けた産業界との連携・橋渡し：

超小型 XFEL の基盤技術開発については、第一三共などの製薬業界、トヨタなどの自動車業界、新日鐵住金などの鉄鋼メーカーなどポテンシャル・ユーザーとの交流により、産業応用に必要とされる性能（スペック）の検討を進めた。また、三菱重工・東芝などのシステムメーカーおよびトヤマなどコンポーネントメーカーとの情報交換を進めている。マイクロアンジュレーターに関しては、製品化を希望するメーカーと調整を進め、海外展開を含めた供給体制を構築した。

超小型パワーレーザーについては、浜ホトがテーブルトップレーザーの製品化を、パナソニック PE、ニデック、オプトクエストの3社がハンドヘルドレーザーの製品化を担当している（図 2-2-13、図 2-2-14）。この 3 月にはプロト機の出荷が始まり、4 月以降順次拡販を行う。応用システム化開発は理研（セキュリティ：THz 波による危険物・有害薬物検出、図 2-3-10）、ユニタック（医療：皮膚疾患治療・痣取り、図 2-3-4）、阪大（製造：溶接中欠陥検査、図 2-3-8）、東芝（製造：電池パッケージの溶接前処理）等が担当している。優れた応用をユーザーに提示することにより、レーザー利用の底辺拡大と関連産業の振興に繋げる。産業界エンドユーザーの巻き込みに関しては、新技術に対する感度が高く実力のある国内外のポテンシャル・ユーザーをピンポイントで選定し、情報提供とニーズの収集を行った。その結果、例えば AIRBUS 社はハンドヘルドレーザーの導入を希望し、4 月から日本との共同研究を実施する予定である。その他、多数のユーザーからハンドヘルドレーザーの早期導入の希望を受けている。

知財・標準化戦略：

知財・標準化については、研究開発成果の実用化を前提とした明確な戦略を策定し、実行に移した。詳細は 65～69 ページに記載したため、ここでは概要を記載する。

先ず、ImPACT3 年目の平成 28 年 4 月、知財専任の PM 補佐を雇用した。この時期は「レーザー加速 XFEL 実証」および「超小型パワーレーザー」とも基盤的な開発成果が生まれ、システム開発・実証に進む時期であり、知財戦略を見直す時期であった。産業界から特許実務や知財に関する訴訟などの経験が豊富な知財専門家を人選し、PM とともに詳細かつ具体的な知財戦略を立案した。更に ImPACT の知財関連予算を大幅に増額し、大学・国研・中小企業などが大企業に頼らずとも知財を単独で出願・権利化できる仕組みを構築した。その結果、権利化された大学等の有力な特許を複数の企業にライセンスすることが可能となり、知財の死蔵を招くことなく ImPACT 後も有効活用する道が拓けた。また、企業間の競争による開発の加速と製品の低価格化・拡販が期待できる。既に基盤的な特許 16 件を出願済みであるが、国内のみの知財化では技術情報・ノウハウを海外に無償で開示することになりかねないため、海外での権利化も積極的に進めている。

② 上記①以外の派生的な効果として、どのようなものが得られたか

ハンドヘルドレーザー（マイクロチップレーザー）は小型で共振器長が短いため、パルス幅はサブナノ秒と短い。一般的な Q スイッチ Nd:YAG レーザーと比較して 1/10 以下のパ

ルス幅である。当初、パルス幅が短いことによる効果には着目していなかったが、応用開発を進める中で目覚ましい効果を確認した。

例えば、非線形波長変換による THz 波発生に従来の Q スイッチ Nd:YAG レーザーを用いると、競合する誘導ブリルアン散乱 (SBS) が1ナノ秒程度で立ち上がり、効率的な THz 波の発生が困難であることが分かった。一方、サブナノ秒のハンドヘルドレーザーを使用すると、SBS が立ち上がる前に波長変換が完了するため、THz 波への変換効率が約5桁向上する結果となった (図 2-3-9)。その他にも、レーザー眼科手術におけるパルスエネルギーの低減 (図 2-2-15)、あざ取りにおける皮膚ダメージの低減、レーザー超音波の S/N 向上、レーザーによるエンジン点火の効率向上、レーザークリーニングの効率向上など、様々な効果が表れ、サブナノ秒のハンドヘルドレーザーの優位性が明らかとなった。

(2) PM自身の活動（プログラム・マネージメント）に関する評価

① <目標設定>

プログラム開始時点の到達目標は、その時点の状況を正視した場合、誰が見ても期間内の実現は困難と感じるほど高く設定した。これは、不可能と思われる目標に到達するためのあらゆる思考や努力を誘発するためであり、誰もトライしたことのない新しい概念の研究開発を立ち上げる際に有効と判断したためである。予算はプログラムの作り込みにおいて50億円から30億円に減額されたが、その際も目標は変更せず、前半の2年または3年間に予算を重点配分して早い立ちあげを狙った。前半でプログラムが中止となるリスクはあったが結果的に奏功し、追加予算を獲得することができた。

豊富な予算と人員を擁する欧米や中国に対して限りある資源で伍するため、具体的な研究開発内容は日本独自のアイデアに基づいて設定した。特に、Pj-1A（レーザー加速要素技術）、Pj-1B（レーザー加速統合プラットフォーム）、Pj-1C（マイクロアンジュレーター）、Pj-2F（ハンドヘルドレーザー）では、世界の趨勢とは異なる方向を目指したため、大きなリスクを覚悟しつつ研究開発を推進した。

② <作り込み>

レーザー加速 XFEL 実証 (Pj-1) では、「レーザー」「プラズマ」「加速器」という異分野のトップクラスの研究者が「レーザープラズマ加速」という目的を一つにしたテーマで議論することにより、新たな発想・アイデアを引き出す仕組みを構築した。また、超小型パワーレーザー (Pj-2) では、トップクラスの研究者から企業のエンジニアさらには営業部員といった異なるミッションを持った人々が、垂直統合的に「超小型パワーレーザー」を議論することにより、新たな発想・アイデアを引き出す仕組みとした。

海外の優秀な研究者の取り込みは、レーザーが機微な技術であるため輸出管理の実務を考えると困難な点が多く、非居住者（海外研究者）を研究開発責任者とすることはできなかった。今後の課題である。一方、本プログラムで開発する技術・システムのポテンシャル・ユーザーを海外から適宜招聘し、相互プレゼンテーション、サイトビジットなどを通してプログラム全体および個々の技術に対するユーザー視点のアドバイスを得た。

実施体制は開始から2年間は基盤的な研究開発に注力し、プログラム3年目にその成果を以て公募を行い、ハンドヘルドレーザーの製品化および応用システム化を達成する体制に拡充した。基盤的な研究開発の進展を判断しつつ、ImPACT の仕組みを上手く活用することにより、最適な実施体制を構築できたと考えている。

③ <進捗管理>

研究開発の進捗状況や国内外における研究開発動向（ベンチマーク）等に応じ、各プロジェクトの加速・中止・方向転換等を実施した。

ImPACT にて革新的な研究開発が達成された場合でも、その成果を更に発展させ、社会実装に耐えうる技術に仕上げる必要がある。このため ImPACT 後も研究開発を継続できるよう、ImPACT 期間中から競争的資金への応募を促した。浜ホトが担当の Pj-2G（テーブル

ルトップレーザー)に関しては、NEDO「高輝度・高効率次世代レーザー技術開発」事業を平成 28 年度から受注した。このため、H29 および H30 年度に予定していたテーブルトップレーザーの高出力化検討は中止し、ImPACT では NEDO 事業と連携しながら応用実証に注力した。また、神戸大学が担当の Pj-3H-I1 (生体適合性マイクロチップレーザーを用いた高次脳機能の4次元操作)は CREST「ホログラム光刺激による神経回路再編の人為的創出、平成 29 年度～」に採択されたため、ImPACT における開発を中止した。Pj-3H では、第一期アイデア公募(平成 27 年度下期実施)にて9件の提案を採択したが、その内6件は平成 28 年度のステージゲートで研究開発を終了した。なお、JST は未来社会創造事業「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」を H29 年度より 10 年間の計画で開始した。お互いの開発を補完するとともに、相乗効果が得られるよう情報交換を行っている。

外部環境としてはレーザー加速、パワーレーザーとも海外勢との激しい競争となっているが、海外ではポータビリティを特徴とした開発は行っていない。米国 LBNL の Bella では 2026 年頃の XFEL 実現を目指しており、ペタワットレーザーを使用してレーザー加速のチャンピオンデータとなる 8GeV 電子加速を達成したとの報道がある。アンジュレーターに関しては競合する海外のレーザー加速開発グループより装置の提供や共同研究に関して多くの打診があり、ImPACT の優位性を維持しつつ協力関係を構築した。パワーレーザーについては、チェコ HiLASE が英国 STFC との協力により 10J 10Hz および 100J 10Hz の DiPOLE レーザーを整備し、産業利用を意識した運用を開始している。

④ <関係者の巻き込み>

「産業界の巻き込み」に関しては、図 2-3-1 に示す通り用途を限定せず「超小型パワーレーザーの優れた応用」を公募することによって産業界のニーズを吸い上げ、魅力あるレーザーとなるよう開発にフィードバックした。また、レーザーを使用することがない企業や技術者の応募も可能なようアイデア公募も実施した。その結果、大企業から中小企業まで、また様々な分野から提案を受け、Pj-2N (ハンドヘルドレーザー製品化)では民間企業3社を、Pj-3H (超小型パワーレーザー応用)では8社(9件)を採択した。

エンドユーザーの巻き込みに関しては、レーザー等の新技術に対する感度が高く実力のあるポテンシャル・ユーザーをピンポイントで選定し、ImPACT の研究開発内容に関わる情報提供とニーズの収集を行った。その結果、例えば AIRBUS 社はハンドヘルドレーザーおよびテーブルトップレーザーの開発に興味を示し、毎年日本を訪れて情報交換を行うとともに、開発担当の分子研および浜ホトを訪問して開発状況を確認している。また内閣府も訪問し、レーザーの開発および AIRBUS への導入につき情報交換を行っている。

「自発的な研究開発投資の誘導」という視点では、Pj-2N (ハンドヘルドレーザー製品化)で民間企業3社に製品化を競わせた。その結果、各社は数名の技術者を2年間製品化に投入し、人件費のみを考慮しても委託費と比較して一桁以上多い額の投資を誘発した。

⑤ <成果の展開>

レーザー加速 XFEL 実証 (Pj-1) 関係では、ImPACT にて構築・整備したレーザー加速統合プラットフォーム (@播磨) の運用を継続し、更なる技術開発および実用化を目指す。このため、各研究者には公的資金への応募を働きかけていたが、平成 29 年度に 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」が立ち上がり、ImPACT 成果の一部は本未来社会創造事業にて活用され、更なる発展を図ることとなった。

ハンドヘルドレーザーの製品化では民間企業3社を採択した。採択した3社は分子研から技術移管を受けるのみではなく、各社が持つ独自技術やアイデアを分子研の技術と融合して製品化する構想を持ち、特徴のあるハンドヘルドレーザーの製品化に向け努力している。また、3社は販路やターゲット層に重複が少ないことから、お互い競争しつつ部品の融通や共通化など協力も見込める体制を構築することができた。

ユーザーの絶対数を増やし、将来の産業規模拡大に繋げるため、ユーザーサポートを業務とする公設試 (浜松工業技術支援センター) に委託し、無償でハンドヘルドレーザーを試用できるプラットフォームを光産業が集積する浜松に構築した。このレーザー試用プラットフォームは ImPACT 後もユーザーに対するレーザーの無償提供を継続する。

ハンドヘルドレーザーについては、平成 31 年 4 月に「社会連携研究部門」および「小型集積レーザー (TILA) コンソーシアム」を分子研に設立し、更なる技術の深耕と産業展開を推進する。浜松工業技術支援センターのレーザー試用プラットフォームでは、分子研の活動と相補的な形でレーザーと使用のノウハウを企業ユーザーに提供し、レーザー利用の底辺拡大と社会展開を図る計画である。

⑥ <PM 支援機能の活用>

PM 補佐は、PM の出身母体である東芝から優秀な人材を集め、即戦力として活用した。この場合、PM を含め全陣容が東芝出身者となるため、同じ企業風土で育った同質の人間が集まり斬新なアイデアが生まれにくいリスクがあった。このため、PM 補佐は異なる事業部・事業所から事業分野や業務経験が異なる人材を集めた。

「調達・契約」に関しては、JST の既存ルーチンを利用することにより、国費を使用することに対するスムーズな支援を受けた。他の項目、例えば広報、輸出管理、知財等では、ImPACT における JST の位置付けが不明確と感じた。ImPACT のような新しい制度においては、先ず支援業務のあるべき姿を明確化し、既存ルール内における対応・判断だけでなく、あるべき姿を実現できるルールを主体的に作り出すというプロセスが重要である。

特に知財に関しては、国費を投入し開発した技術をプログラム終了後に知財としてどのように維持・管理していくべきかを、ImPACT 以外の研究開発も含め国全体で見直す必要がある。

⑦ <アウトリーチ>

シンポジウムや研究会の開催、展博への出展、公式ホームページ開設、リーフレット配布、レーザー試用プラットホームの公開、国内外学協会講演、論文投稿・特許出願、大学等での講義、公募の周知、企業交流会、等々、あらゆる機会を活用して幅広いアウトリーチ活動を行った。研究開発の内容のみならず、ImPACT 創設の理念や PM の役割などについても国内外に周知した。

ハンドヘルドレーザー（マイクロチップレーザー）については、特に国内外の産業界の関心が高く、海外からも多数の引き合いを受けている。また、マイクロアンジュレーターについては、仏、独、米、伊の放射光施設等から引き合いを受けている。

今後は、理化学研究所・播磨地区に構築したレーザー加速統合プラットホームの公開、オープン・サイエンス、オープン・イノベーションの場としての活用等を進める。また、毎年4月末に行われる SPring-8 の施設公開に合わせた公開も検討する。

⑧ <人材育成>

「研究人材の育成」という視点では、斬新な発想・アイデアを誘発する場の提供に組み込み、交流（出会い）による発想の転換とアイデアの交換を重視した。具体的には、異なる技術分野（コミュニティ）の交流、異なる世代（Generation）の交流、異なる Gender の交流、異なるカルチャー（バックグラウンド）の交流などに努めた。若手・女性人材の育成については、この取り組みの中の一環として位置付け、実行した。交流の場としては、運営会議、研究会、シンポジウム、国際会議、およびその後の意見交換会などを活用した。

「参画研究者の意識改革」という視点では、特許出願を意識したことのない研究者が大多数であったため、知財に対する意識改革を行った。PM 自らの経験を基に研究開発成果の社会実装における知財の重要性を説くとともに、企業の実務者を知財専任の PM 補佐に迎え、研究者に対して知財に関する指導を徹底した。

⑨ <全体>研究開発の発展、競争力の強化、困難な社会課題の解決に向けた貢献

レーザー加速 XFEL の関連では、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」が平成 29 年度に立ち上がった。ImPACT にて整備した研究開発基盤（プラットホーム）と相まって、更なる研究開発の発展が期待できる。超小型パワーレーザーについては、分子研に「社会連携研究部門」および「小型集積レーザー（TILA）コンソーシアム」がこの 4 月に設立され、ハンドヘルドレーザー（マイクロチップレーザー）の更なる高度化と産業展開が推進される予定である。

レーザーは戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第2期「光・量子を活用した Society 5.0 実現化技術」の開発課題でもある。インフラ維持管理・材料開発・医療の革新などに貢献し、困難な社会課題の解決の一翼を担うものと期待する。

⑩ <全体>成果が得られなかった事例等の原因分析や解析、次の挑戦につながる道筋

本プログラムの委託先は「指名」で延べ10機関を選定し、6回の「公募」で延べ22機関を選定した。「指名」については候補者の所属機関を事前に訪問して ImPACT の主旨徹底を図るとともに、紙や電子情報に留まらず十分な調査を行った。その結果、10件全てのプロジェクトにおいて PM が想定していた以上の成果を得た。

「公募」に関しては、公平性を担保するため、公募要領と採点基準をもとに多数の応募者から委託者を短期間で決定した。その結果、レーザーの応用に関して想像していなかったような斬新な提案が多数あり、採択してプログラムに幅を持たせることができた。一方、数件の委託先からは期待していた成果が得られなかった。

このように、指名と公募には各々利点と欠点があるが、PM の構想を明確に定義できる場合には指名、新しいアイデアを広く求める場合には公募が適していると考ええる。また、公募については、先ず初めに FS を実施することにより、PM の構想に適合した提案に絞り込むことが可能である。本プログラムでも、FS で期待していた成果が得られなかったプロジェクトはステージゲートにより全て中止した。

(3) その他、ImPACT プログラム全体に対する所感・提言（自由記載）

既に、ImPACT 制度検証におけるアンケート調査、ImPACT 制度検証チーム会合などで所感・提言などを詳述しており、特に追記するものはない。