

革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) におけるパワーレーザーの開発 「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」

革新的研究開発推進プログラム (ImPACT) プログラム・マネージャー 佐野 雄二

1. はじめに

革新的研究開発推進プログラム¹⁾ (Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies: 以降ImPACTと書く) は、実現すれば産業や社会のあり方に大きな変革をもたらす革新的な科学技術イノベーションの創出を目指し、ハイリスク・ハイインパクトな挑戦的研究開発を推進することを目的としたプログラムである。平成21年度から25年度まで実施された最先端研究開発支援プログラム²⁾ (FIRST) における研究者優先の制度的優位点と、研究開発の企画・遂行・管理などに関して大胆な権限を付与する米国国防高等研究計画局 (DARPA) のプログラム・マネージャー (PM) 方式の利点を融合した、新たな仕組みを特徴としている¹⁾。

ImPACTは、平成25年6月に閣議決定された「日本再興戦略」や「科学技術イノベーション総合戦略」などの策定における議論を経て、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) と並びその創設が決定された。その後、プログラム・マネージャーの公募を経て、平成26年6月24日に開催された第2回総合科学技術・イノベーション会議³⁾ において、12名のプログラム・マネージャーが決定され、5年間の研究開発がスタートした。

「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⁴⁾」は、医療・生産現場・社会インフラなど、様々な分野で応用が可能な高出力のパルスレーザー装置とレーザーによる光量子ビーム発生装置を超小型化・低コスト化する技術確立し、我が国の研究開発および産業競争力の飛躍的な向上

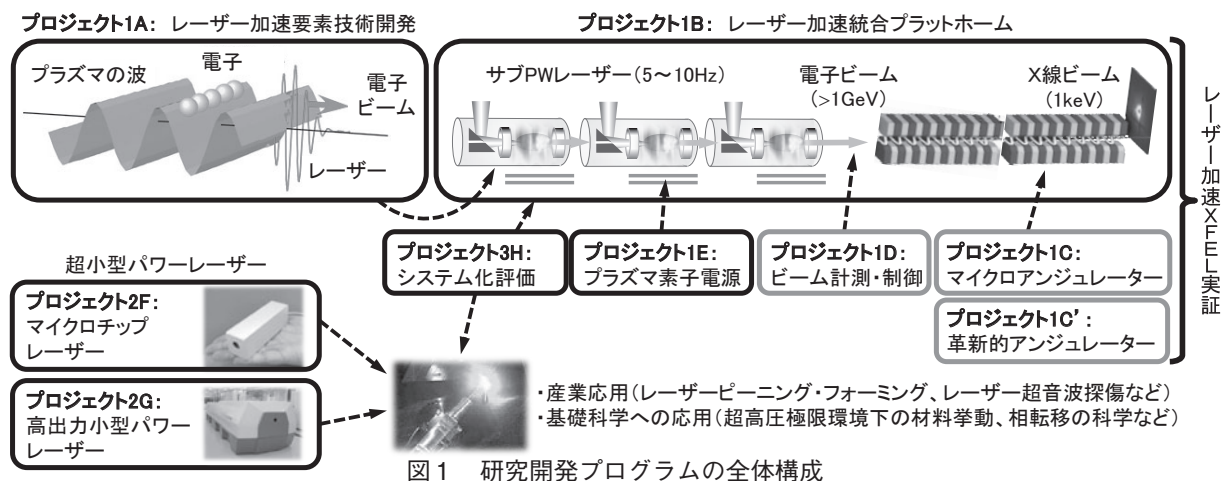
と、開発した装置を広く普及させることで安全・安心・長寿社会の実現に寄与することを目的としている。

2. プログラムの全体構想

本プログラム (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) で推進する研究開発の全体構成を図1に示す。本プログラムは、光量子ビーム発生装置の一つであるX線自由電子レーザー (XFEL) をレーザープラズマ加速により実現するための基盤技術の確立と、パルス発振の高出力レーザーの超小型化を目的としている。

本プログラムは、XFELの超小型化のための技術開発および原理実証を行う「レーザー加速XFEL実証 (プロジェクト1)」、パルス発振の高出力レーザーを超小型化するための「超小型パワーレーザー (プロジェクト2)」、および開発・実証した技術およびシステムの有用性を評価する「システム化評価 (プロジェクト3)」の三つのプロジェクトで構成され、「レーザー加速XFEL実証」および「超小型パワーレーザー」の両プロジェクトは、さらに複数のサブプロジェクトで構成されている。

これらの研究開発を成功に導くためには、従来は個別の専門分野として発展してきた「レーザー」「プラズマ」「加速器」の技術を有機的に統合する必要がある。また、将来の生活様式や産業構造を予測してニーズに合致した研究開発とするため、ユーザーの直接的な参画や助言が必要不可欠である。このため、幅広い専門分野にわたる水平的な協業体制



と、大学・研究所・産業界・ユーザーが一体となった垂直的な協業体制を構築する。なお、具体的な研究開発の体制は4章に記載する。

2.1 レーザー加速XFEL実証（プロジェクト1）

我が国はX線自由電子レーザー施設SACLA、大強度陽子加速器施設J-PARCなどの世界最高性能の加速器を建設・運用し、研究開発に供してきた。その結果、最先端の研究開発成果が続々と生まれている。例えば、X線自由電子レーザー施設SACLAでは、タンパク質一分子の構造解析、生きた細胞のイメージング、化学反応の実時間測定などが進められており、創薬、疾病・伝染病対策、触媒の開発などへの応用が期待されている⁵⁾。これらの世界最高性能を誇る施設の機能が、一部ではあっても一研究室、一企業で利用可能となれば、研究開発の期間が大幅に短縮され、我が国の研究開発および産業競争力の飛躍的な向上が期待できる。

プロジェクト1（レーザー加速XFEL実証）では、XFELを超小型化するための技術開発および原理実証を行う。具体的には、従来の高周波による加速をレーザープラズマ加速に置換えることにより、電子の加速長さを約1/1000に短縮し、超小型化したアンジュレーターと組合せてX線ビームを実現するための技術を開発する。

レーザープラズマによる電子加速の概念を図2に示す。高周波加速では50MV/m程度の加速勾配が限界であるが、レーザープラズマ加速では100GV/mの加速勾配を得ることが可能であり、原理的には加速長さを1/1000以下とすることができる。さら

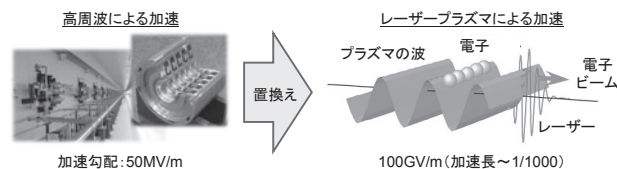


図2 高周波による電子加速とレーザープラズマによる加速

にマイクロアンジュレーターを開発し、超小型のX線自由電子レーザーの実現に必要な要素技術を開発する。

2.2 超小型パワーレーザー（プロジェクト2）

これまでのパワーレーザー、特にパルス発振のパワーレーザーは寸法・重量や消費電力が大きいいため、産業分野における適用は必ずしも進んでいない。このため、プロジェクト2では、パルス発振のパワーレーザーの超小型化を実現し、各産業分野における適用拡大を目指す。

一般にレーザー装置は温度変化や振動、湿気などに弱く耐環境性に劣るため、レーザー装置を安定な環境に設置し、レーザー光をミラーや光ファイバーで伝送することにより、様々な適用に供している。しかしながら、高出力のパルスレーザーの伝送にはミラーや光ファイバーの損傷のリスクを伴うほか、空気やガラスなどの伝送媒質による散乱損失、媒質との非線形な相互作用による損失や損傷などが生じるため、その取扱いは容易ではなく普及を妨げていた。

そこで本プロジェクトでは、日本が得意とするマイクロチップレーザー技術やセラミックレーザー媒

質技術などを活用し、パルス発振のパワーレーザーを小型化するための技術開発を行い、これまで寸法・重量の制限で適用が不可能であった宇宙・地下・海底などを含むあらゆる環境下での適用を推進する。具体的な応用としては例えば、レーザーピーニング、レーザー超音波探傷、レーザー分光分析などの検査・予防保全、深海での掘削、アブレーションによる宇宙ゴミ処理、金属疲労対策などが想定される。また、高い繰返し周波数での発振が可能になれば、処理時間が律速となる製造現場への適用拡大が期待できる。さらには、従来の機械加工では形状や寸法に対する制約が大きいフォーミングなどの新しい加工技術やそれによる新産業の創出も考えられる。

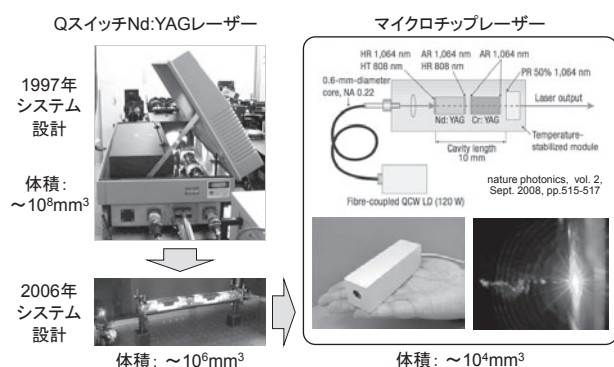


図3 レーザーピーニング用発振器の小型化

レーザーピーニング用に開発されてきたレーザー発振器の変遷を図3に示す。本プロジェクトでは、パワーレーザーの普及を妨げてきた装置寸法・重量、発振周波数、およびコストに関わる課題を解決し、研究開発分野や産業界への展開を推進する。

2.3 システム化評価（プロジェクト3）

「レーザー加速XFEL実証」および「超小型パワーレーザー」の両プロジェクトにおける技術開発の内容および実証したシステムの有用性をユーザーの立場から評価し、要素技術やシステムの改善点および将来の開発と実用化の方向性を提示する。

3. 各プロジェクトの実施内容

本プログラムで計画している研究開発の内容を図4に示す。図1に記載したとおり、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）は複数のサブプロジェクトで構成されている。以下に各プロジェクトおよびサブプロジェクトの概要を説明する。

3.1 レーザー加速XFEL実証（プロジェクト1）

日本独自のプラズマ素子技術で、従来の加速器と比較して加速長さが1/1000以下の安定な電子加速を実現する（プロジェクト1A）。さらに、超小型

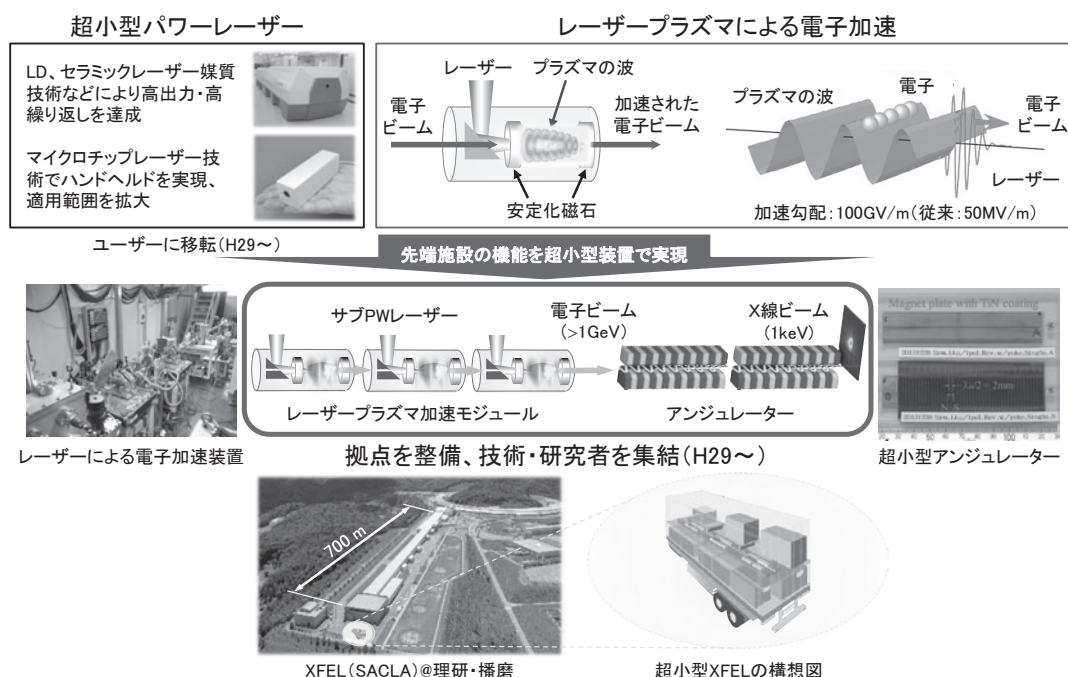


図4 研究開発の全体構想

のマイクロアンジュレーターを開発し、X線ビームを実現する（プロジェクト1 C）。また、安定な電子加速に必要な計測・制御技術（プロジェクト1 D）や、電子の追加速技術とその電源の高度化・効率化（プロジェクト1 E）などXFELの超小型化に必要な要素技術を開発し、開発した各要素技術を統合・検証するプラットフォームを構築する（プロジェクト1 B）。

3.1.1 レーザー加速要素技術（プロジェクト1 A）

加速の安定性・再現性に優れ、マイクロアンジュレーター（プロジェクト1 C）への電子入射が可能なGeV級のエネルギーのレーザー加速技術を開発する。

大阪大学において、単一のプラズマ素子を使用して約300MeVの安定な電子加速を実現しているが⁶⁾、プラズマ素子を多段化し、「電子バンチの発生」「電子ビームのエネルギースペクトルの準単色化」「ビーム加速」をそれぞれ個別のプラズマ素子で実施することにより、GeV級の安定したレーザー加速を実現する。多段化においては、各段間の時間的同期や電子ビームおよびレーザービームの高精度な空間位置制御が課題となる。そこで、プロジェクト1 D（ビーム計測・制御技術）やプロジェクト1 E（プラズマ素子電源）における開発と連携し、電子ビームの安定制御やビーム加速に関わる技術を確立する。最終的には、開発した要素技術をレーザー加速統合プラットフォーム（プロジェクト1 B）に集約し、マイクロアンジュレーター（プロジェクト1 C）にGeV級の電子ビームをサブミリの精度で入射させる装置を開発する。

開発中の単一プラズマ素子によるレーザープラズ

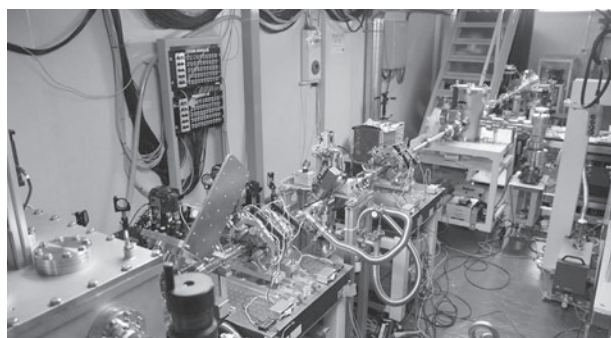


図5 レーザープラズマによる電子加速装置
（提供：大阪大学 細貝准教授）

マ電子加速装置を図5に示す。

3.1.2 レーザー加速統合プラットフォーム（プロジェクト1 B）

レーザープラズマ加速によるXFELの実験プラットフォームを構築し、プロジェクト1で開発する各要素技術および装置（プロジェクト1 A、1 C、1 D、1 E）を集約・統合・システム化することにより、総合的な技術検証を行うための拠点として活用する。

世界で初めての安定な多段電子加速とX線ビームの発生を実現するため、レーザーシステムや専用コンプレッサー、レーザービームラインなどを開発・整備する。また、1 Cで開発するマイクロアンジュレーターを組み込むことにより、約1 keVのX線ビームの発生を平成30年度末までに確認する。

3.1.3 マイクロアンジュレーター（プロジェクト1 C）

プロジェクト1 A（レーザー加速要素技術）で開発する電子加速の多段モジュールと組合せることにより、約1 keVのX線ビームを発生する超小型のマイクロアンジュレーターを開発する。

現状200mオーダーの長さを必要とするアンジュレーターを1/10以下（<10m）に短尺化するため、既存のアンジュレーターで使用している数十mm周期の磁石を数mm以下に極短周期化する技術を開発する。板状磁石の一体成型技術と新たに開発した着磁ヘッドにより約4 mm周期のアンジュレーターの要素技術は確立しているが、より周期長が短い板状磁石の開発を行う。また、着磁させた板状磁石の連結部分の磁場乱れの抑制技術や端部磁場の最適化技術を開発する。これらの開発の成果を反映し、レーザー加速統合プラットフォーム（プロジェクト1 B）で使用可能なモジュールを平成29年度末までに試作する。

マイクロアンジュレーター用に試作した板状磁石（磁場周期4 mm）を図6に示す。

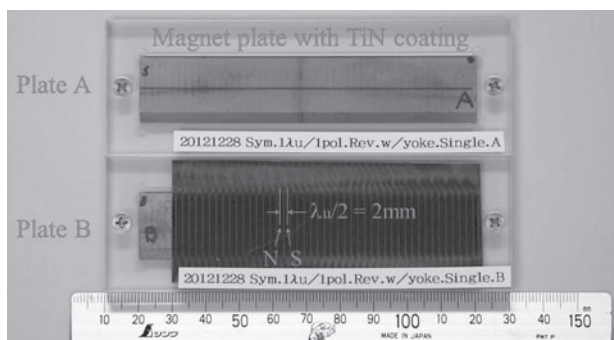


図6 試作したマイクロアンジュレーター用板状磁石
(提供：高エネルギー加速器研究機構 山本教授)

3.1.4 ビーム計測・制御技術（プロジェクト1 D）

レーザーによる安定な電子ビームの生成、さらには多段加速を実現するためには、レーザープラズマ加速に関わる原理・現象の解明が必須となる。そこで、レーザーが生成する航跡場をリアルタイムで確認するための超高速の計測技術を確立し、不安定要因を抽出してレーザー波形などにフィードバックすることにより、レーザープラズマを安定に制御する技術を開発する。

本開発はプロジェクト1 A（レーザー加速要素技術）および1 E（プラズマ素子電源）と密に連携しながら開発を行い、プロジェクト1 B（レーザー加速統合プラットフォーム）が構築する拠点においてマイクロアンジュレーター（プロジェクト1 C）への電子ビーム入射およびX線ビームの発生を実現する。

3.1.5 プラズマ素子電源（プロジェクト1 E）

パルス放電によりプラズマ素子内に急峻なプラズマ密度分布を生成し、レーザーをガイドして効果的に電子加速を行うための電源を開発する。

プロジェクト1 A（レーザー加速要素技術）およびプロジェクト1 D（ビーム計測・制御技術）と密に連携し、多段レーザー加速の最終段となる追加速に必要なプラズマチャネルの開発を行う。繰返し放電が可能な劣化のない安定したプラズマチャネルの生成技術と、電子加速に必要な大電流（1～5 kA）の高繰返しパルス電源（10ns以下の立上り、100nsの持続時間、100ps以下のジッター）を平成28年度末までに開発する。

3.2 超小型パワーレーザー（プロジェクト2）

日本独自のマイクロチップレーザー技術、セラミックレーザー媒質技術などを活用することによりパルス発振のパワーレーザーを超小型化し、各種応用（材料強化、非破壊検査、分析、医療など）に展開する。

現在、光学定盤サイズの寸法が必要な数十～百mJクラスのパルスレーザー装置を手のひらサイズまで超小型化し、ロボットやメカトロニクスへ搭載することにより応用範囲を拡大する（プロジェクト2 F）。また、エネルギーがより大きい数J級のパルスレーザー装置では、これまで達成できなかった高繰返し（100Hz以上）発振が可能な小型レーザー装置を開発する（プロジェクト2 G）。

本プロジェクトで開発する技術は、プロジェクト1（レーザー加速XFEL実証）で使用するレーザー光源の小型化・高度化技術として、将来の活用を図る。

3.2.1 マイクロチップレーザーの開発（プロジェクト2 F）

パルスエネルギー 3mJクラスのパルスマイクロチップレーザーを20mJ以上に高出力化し、1 kg以下の発振器総重量で実用に供する装置を開発する。

光の波長と同程度のマイクロメートルオーダーで物質・材料を設計するマイクロドメイン構造制御技術や、出力を増幅させるためのレーザーアンプの開発を行う。高出力化における一番の課題である熱問題を結晶方位制御やヒートシンク材料・接合技術の



図7 マイクロチップレーザー
(提供：分子科学研究所 平等准教授)

開発によって解決し、パルスエネルギー数十mJの発振が可能な手のひらサイズのレーザー装置を平成28年度末までに実現する。平成29年度および30年度は開発した超小型マイクロチップレーザーを企業の製造現場などで使用し、適用性の評価・検証を行う。

エンジン点火用に開発されたマイクロチップレーザー（パルスエネルギー3mJ）を図7に示す。

3.2.2 高出力小型パワーレーザーの開発（プロジェクト2G）

数J級のパルスエネルギーを持つレーザー装置を100Hz以上の繰返しで発振させるための技術を開発し、装置の製作と応用展開を行う。

数J級のパルスレーザー装置はフラッシュランプ励起によるものがほとんどであり、発熱のため発振周波数は高くとも数十Hzに制限されてきた。実産業での応用において、発振周波数は処理時間に直結する重要なパラメータであり、高繰返し化が望まれる。また、高繰返し化によりフラッシュランプの交換頻度が高まるため、稼働率の低下やメンテナンスコストが上昇するという課題がある。そこで、セラミックレーザー媒質技術やレーザーダイオード（LD）による励起技術などを活用し、高出力で繰返し周波数が高く、メンテナンスが容易なレーザー装置の開発と実用化を行い、適用範囲の大幅な拡大を

図る。

本プロジェクトで開発したレーザー装置は平成29年度または30年度にユーザーの研究開発施設または工場へ移設し、検証試験を行って適用性を実証する。そのため、可搬でかつ耐環境の高い装置を開発する。

4. 実施体制

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、明確な出口戦略のもとで5年間の集中的な研究開発を実施する。平成27年2月時点の実施体制を図8に示す。平成26年10月2日に開催された第7回革新的研究開発推進会議にて、細貝知直准教授（大阪大学）がプロジェクト1A（レーザー加速要素技術）、兒玉了祐教授（大阪大学）がプロジェクト1B（レーザー加速統合プラットフォーム）、平等拓範准教授（分子科学研究所）がプロジェクト2F（マイクロチップレーザー）の研究開発責任者（PI）に指名された。また、平成27年2月5日の第11回革新的研究開発推進会議では、山本樹教授（高エネルギー加速器研究機構）がプロジェクト1C（マイクロアンジュレーター）、神門正城グループリーダー（日本原子力研究開発機構）がプロジェクト1D（ビーム計測・制御技術）の研究開発責任者

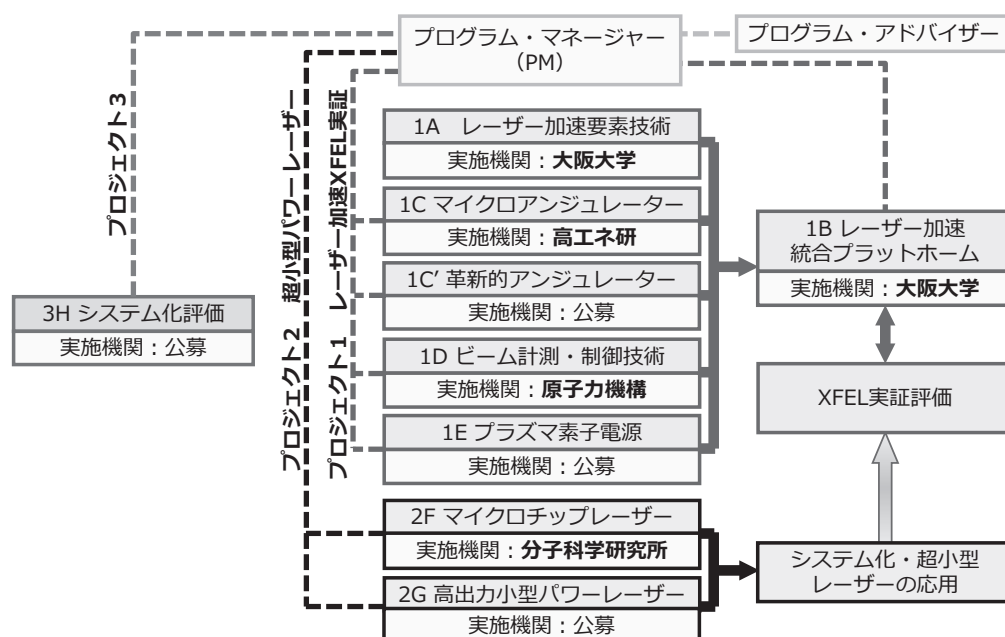


図8 プログラム実施体制（平成27年2月時点）

に指名されている。他のプロジェクト（1C'、1E、2G、3H）についても、研究開発責任者および実施機関を順次選定し、平成27年度には研究開発を開始する予定である。

限られた期間の研究開発で成果を最大化するため、実施体制（図8）に明示されていない研究者・機関とも緊密な協力関係を構築・維持し、叡智を結集したオールジャパン体制で研究開発を推進する。また、ユーザーの直接的な参加・助言によりニーズを的確に把握して研究開発に反映し、開発後のスムーズな実用化に繋げる。

研究開発の成果はImPACT期間内に一部は実用化されるものの、多くはImPACT終了後もさらなる研究開発や実用化の努力が必要である。このため、若手研究者の積極的な参加を促し、コミュニティの育成にも努めていく。

5. おわりに

革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）「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」の概要を紹介した。本プログラムは、X線自由電子レーザー（XFEL）の機能を実験室で実現するための基盤技術を確立するとともに、パルス発振の高出力レーザーを超小型化し、各種の応用に展開していくことを目的としている。約半年間の研究開発計画の検討を経て内容や主な実施機関が決定したところであり、これから本格的な研究開発がスタートする。社会ニーズの変遷に臨機応変に対応できる柔軟な体制を構築し、大胆なマネジメントによりリスクを最小化して成果を最大化する所存である。ImPACTが今後の日本を牽引するイノベーションのモデルケースとなるよう、全力を挙げて取り組んでいく。皆様方の絶大なご支援を頂戴したい。

参考資料

- 1) 内閣府ホームページ「革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）」 <http://www8.cao.go.jp/cstp/sentan/about-kakushin.html>
- 2) 内閣府ホームページ「最先端研究開発支援プログラム（FIRST）について」 <http://www8.cao.go.jp/cstp/sentan/about.html>
- 3) 内閣府ホームページ「第2回総合科学技術・イノベーション会議」 <http://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/honkaigi/i002index.html>
- 4) 科学技術振興機構ホームページ「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」 <http://www.jst.go.jp/impact/program03.html>
- 5) 文部科学省ホームページ「SACLAってなあに？」 http://www.mext.go.jp/a_menu/shinkou/ryoushi/detail/1316012.htm
- 6) 科学技術振興機構ホームページ「光制御極短シグナル電子パルスによる原子スケール動的イメージング」 <http://www.laser.jst.go.jp/reserchers/reserchers21.html#hosokai>