
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」

全体計画について

プログラム・マネージャー
佐野 雄二

研究開発プログラム構想

解決すべき課題等

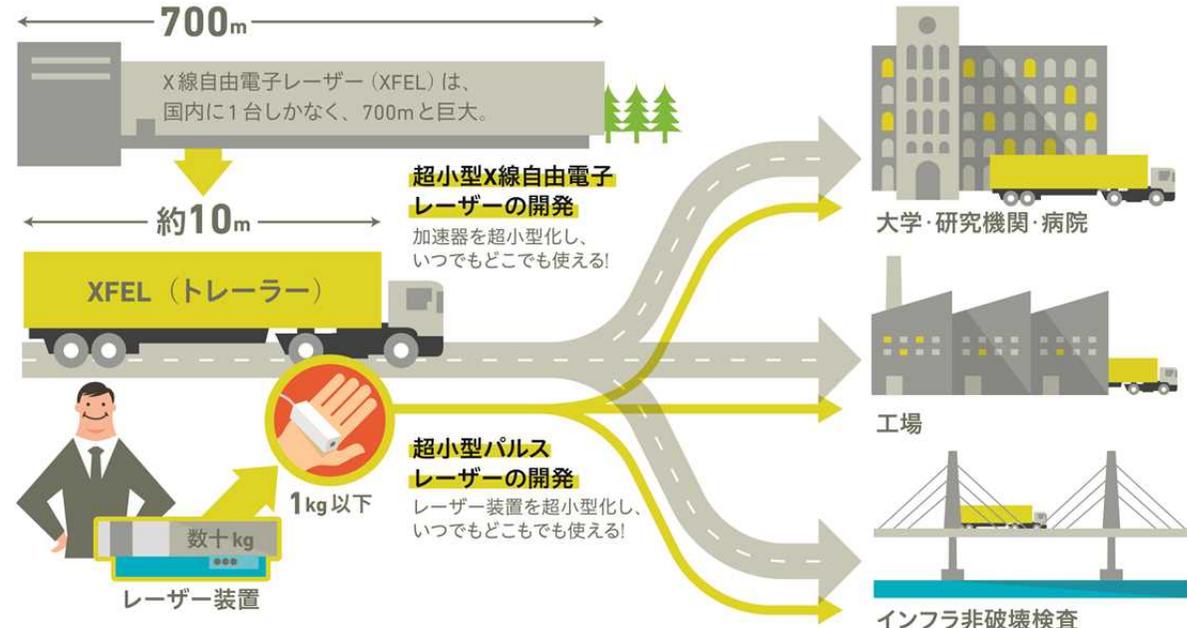
- X線自由電子レーザー（XFEL）は世界に2基しかないため、利用機会が希少。超小型XFELを開発して研究機関などに配備することにより、研究開発のサイクルを大幅に短縮し、成果を産業に展開
- レーザーは科学技術の基盤的なツールであるが、外国製が多く、大型で高価なことが普及の妨げとなっている。国産技術による超小型パワーレーザーの開発により新産業を振興し、既存産業を革新

PMの挑戦と実現したときのインパクト

- 概要：レーザーを小型化しプラズマおよび加速器技術と融合することで、超小型XFELなどユビキタスな光量子ビーム装置を開発。製造、設備保全、計測、医療などに応用し、安全・安心・長寿社会を実現

- 実現したときに産業や社会に与えるインパクト：

- ✓ 国家基幹技術として建設され、世界に2基しかないXFELの機能活用により、研究開発および製品開発が格段に進展
- ✓ 原子レベルの計測による産業の革新、さらには時間や場所を選ばないユビキタスな設備診断、補修、生体撮像や粒子線治療などが進展
- ✓ パワーレーザーを日本に復活し、産業を振興。



研究開発プログラムの出口目標

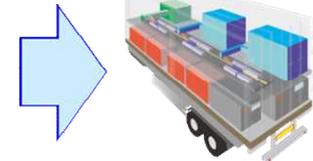
産業や社会のあり方を変革するシナリオ

- 超小型で可搬型のXFELやパワーレーザーが実現すれば、波及効果は計り知れず、産業や国民生活にパラダイムシフトを誘発
- 異なる技術（レーザー、プラズマ、加速器）の融合と、産学官の共創により、新奇技術を短期間で開発し、XFELの実証につなげる。
- 日本の強みである安定なレーザー加速と磁石技術で電子加速器とアンジュレーターを桁違いに小型化。超小型XFELとして研究機関などに配備し、研究開発を促進
- ユーザーと一体となり、国産技術によるパワーレーザーの超小型化を推進。レーザー装置・応用システムのシェアを奪還
- 本開発期間内に超小型XFELの基盤技術を開発。2020年頃の実証と2030年代のユーザー提供を目指す。超小型パワーレーザーは本開発期間内に製品化、普及を図る

超小型XFELを実現し、科学技術と産業を変革

X線自由電子レーザー
SACLA

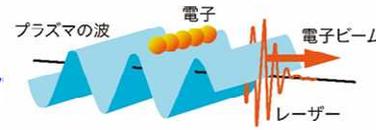
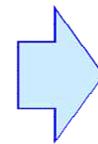
- ①400mの電子加速器と
- ②200mのアンジュレーターで構成されている



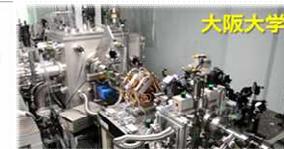
①加速器を日本のレーザー加速技術で10m以下に



電子加速器 (20keV/mm)



レーザー加速 (100MeV/mm)



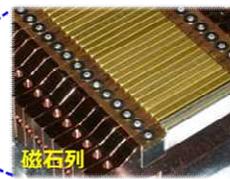
レーザー加速実験装置

②アンジュレーターを日本の磁石技術で10m以下に

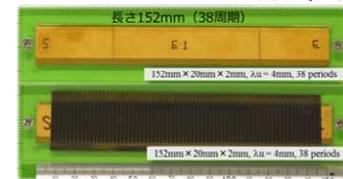
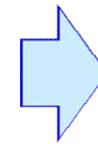


アンジュレーター

拡大

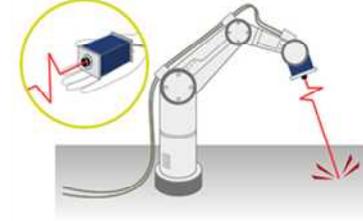
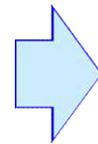
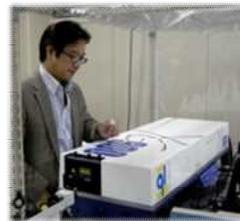


磁石列 (最小周期18mm)



76個の磁石を一体化 (周期4mm)

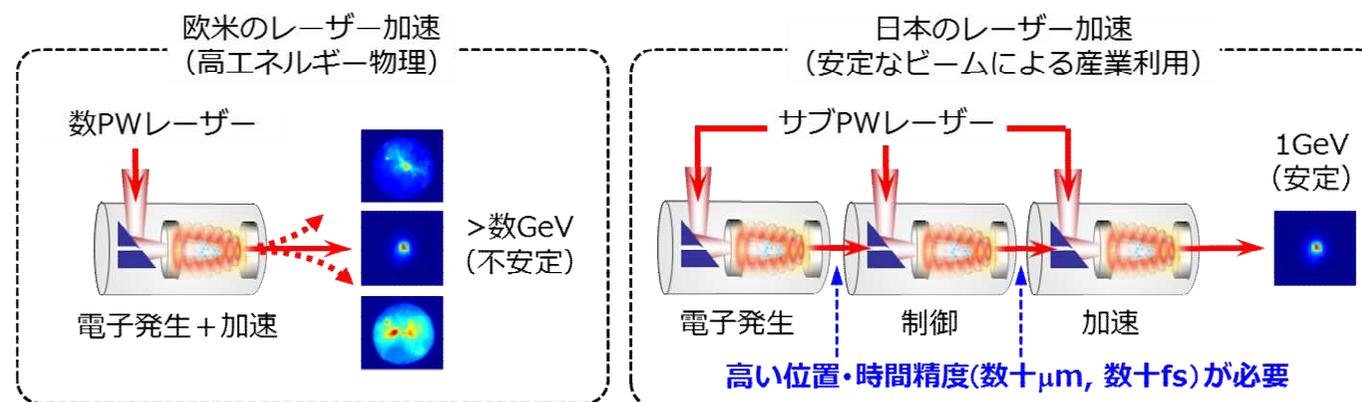
超小型パワーレーザーで産業を革新



プログラム構想のブレークスルー

非連続イノベーション、リスクの大きさ

- XFELは巨大（kmオーダー）という既成概念から、レーザー加速による超小型化（10m）へ発想を転換
- XFELの超小型化には電子加速器とアンジュレーター（磁石列）の桁違いの小型化が必須
- レーザー加速は原理確認の段階。「電子数（電荷）の増大」「エネルギースペクトルの単色化」「加速エネルギーの増大」を同時に達成し、再現性の高い「安定な電子ビーム」のアンジュレーター入射が必要
- 低エネルギー電子加速によるXFEL発振・産業応用は日本独自。欧米は大出力レーザーによる加速を志向
- 日本独自のスキーム（電子発生、制御、加速）による安定な電子加速と、モノリシック磁石によるアンジュレーターの物量と調整作業の削減を図る（従来は1万個の磁石をマイクロンオーダーで調整）



- パワーレーザーの超小型化は、日本独自のマイクロチップレーザー技術、レーザー媒質技術、結晶方位制御技術、接合技術、冷却技術により達成。
- 革新的な接合技術により、レーザー媒質とヒートシンクの多化を達成し、単体で複数段の機能を実現。熱抵抗・反射ロスを低減し、レーザー媒質の結晶方位制御により熱複雑屈折を低減
- ファイバーレーザーとディスクレーザーを超える性能を達成し、市場を席卷

達成目標

達成目標（プログラム終了時の具体的アウトプット）

青字:Pj-1、黒字:Pj-2、赤字:Pj-3

- レーザーによる超小型電子加速器の実現（加速エネルギー： $> 1\text{GeV}$ 、全長： $< 10\text{m}$ ）
- レーザー加速と超小型アンジュレーター（全長： $< 10\text{m}$ ）の組合せによるX線ビーム（ 1keV ）の発生
- 拠点（プラットホーム）における組合せ試験の完了と、超小型XFEL実現に必要な要素技術の実証
- 超小型のハンドヘルドレーザー（パルスエネルギー 20mJ 、繰返し 100Hz ）およびテーブルトップレーザー（パルスエネルギー 1J 、 300Hz ）の開発とその製品化
- ユーザーによるレーザー加速電子およびX線ビームの実用性評価の開始
- 超小型パワーレーザー用いた応用システムの開発と、その実用性評価

具体的達成目標の実現に向けた戦略・シナリオ

青字:Pj-1、黒字:Pj-2、赤字:Pj-3

- 日本の強みである産官学のネットワークを最大限に活用。「レーザー」「プラズマ」「加速器」技術を結集する拠点（プラットホーム）を構築。技術・装置・人財を集約して効果的な開発を推進。（欧米は単独の機関が独立にレーザー加速の研究開発を実施）
- 低出力レーザーによる低エネルギー加速に特化し、安定性の高い電子ビームを実現。モジュール多段化により 1GeV の電子加速を 10m 以下で実現。（欧米は高出力レーザーによる高エネルギー物理を志向）
- 日本が強みをもつ磁石およびアンジュレーター技術を発展させ、従来（ 200m ）の $1/10$ 以下の大きさのアンジュレーター（ $< 10\text{m}$ ）を開発。レーザー加速電子ビームとの組合せにより、X線ビームを発生
- 分子科学研究所などの独自技術（マイクロチップ、レーザー媒質、結晶方位制御、接合、冷却など）を活用し、パワーレーザーの超小型化を達成。ソリューションを提供し、産業応用を開拓
- 拠点（レーザー加速統合プラットホーム）でのSPring-8およびSACLAユーザー参画による実用性評価
- 公募により多様なユーザーの参画を得て応用を開拓。ユーザーニーズをレーザー開発、製品化に反映

プログラム構想・全体像の明確化

戦略・シナリオを克服すべき課題へブレークダウン

青字:Pj-1、黒字:Pj-2、赤字:Pj-3

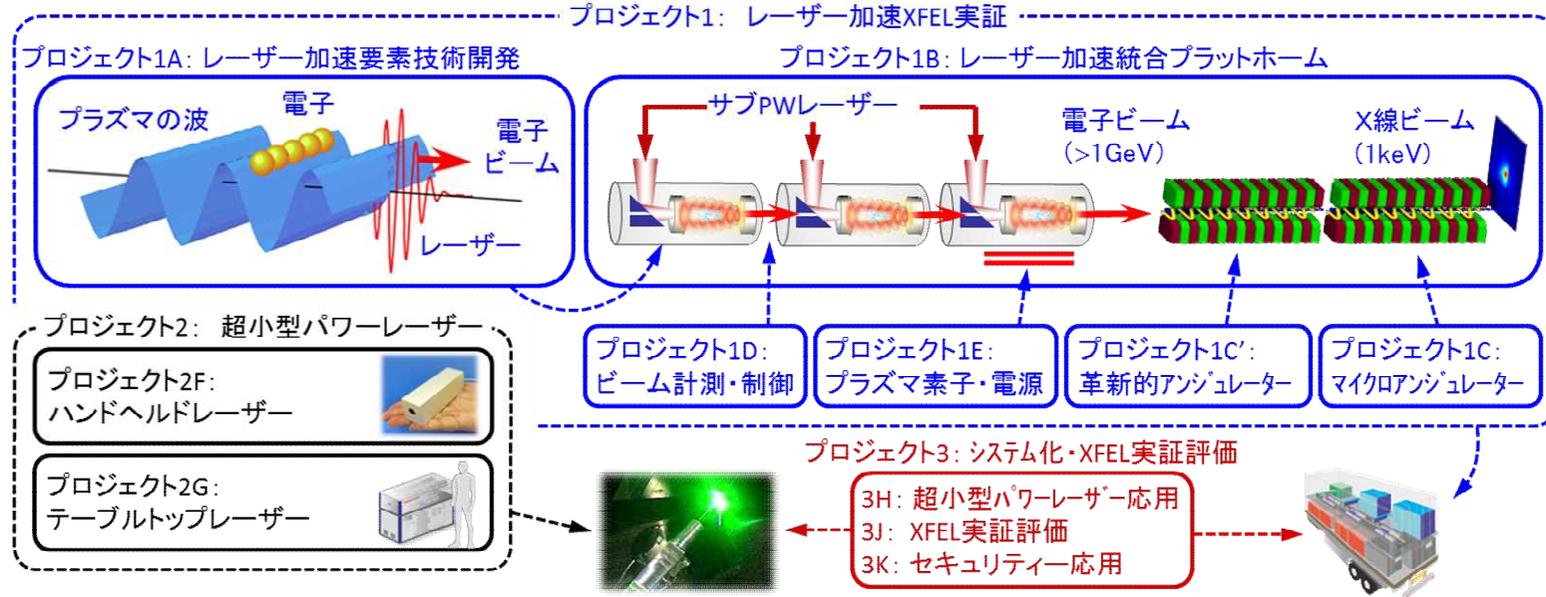
1. 叡智を結集したオールジャパン体制による開発の加速
2. レーザーによる安定な電子加速の実現
3. 超小型アンジュレーターの開発と安定な電子入射、X線ビームの発生
4. ハンドヘルドレーザーの高エネルギー化（1mJ→20mJ/パルス）と製品化
5. 高スループットを目指したテーブルトップレーザー（1J/パルス、300Hz）の実現
6. ユーザー視点でのXFELおよび超小型パワーレーザーの評価と、応用（産業）の新規創出

克服すべき課題目標の達成アプローチ

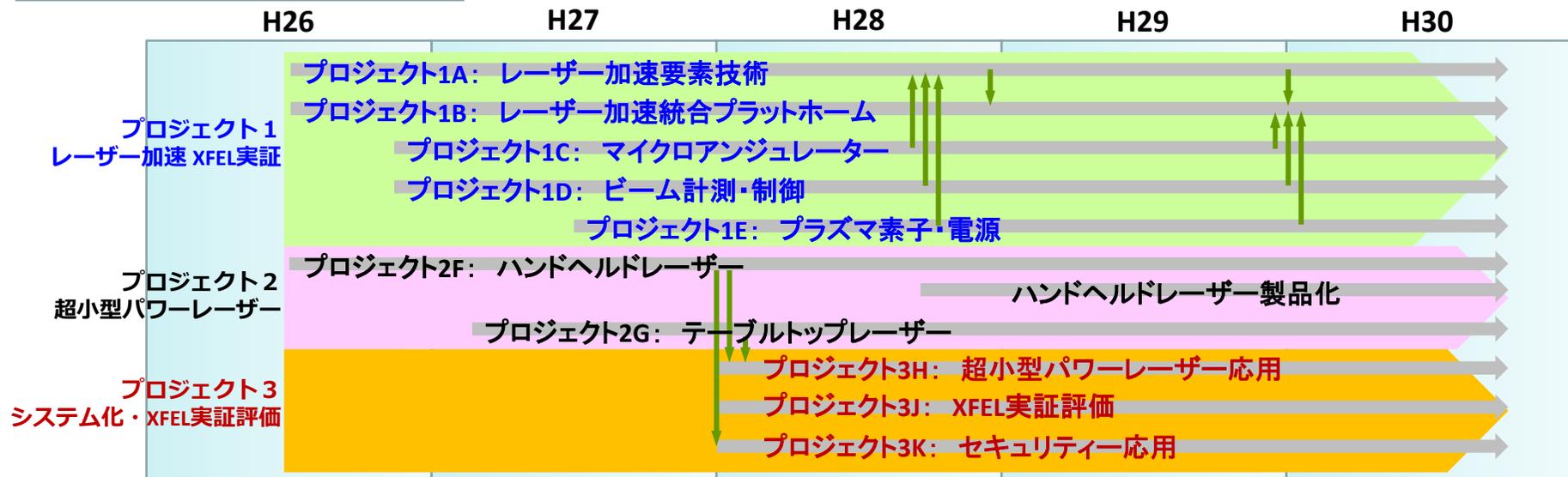
青字:Pj-1、黒字:Pj-2、赤字:Pj-3

1. 拠点（プラットフォーム）を構築し、産学官のネットワークを活用して「レーザー」「プラズマ」「加速器」分野の傑出した研究者・機関をアサイン。拠点における共創体制を構築。若手人財を育成
2. 高精度なビーム計測・制御技術、および高機能なプラズマ素子電源を開発し、ビーム位置とレーザープラズマの密度を制御し、安定な電子加速を実現
3. 磁石の超高精度加工技術により、従来の1/10の数mm周期およびギャップの超小型アンジュレーターを実現。安定かつ精度の高い電子ビーム入射により磁石のダメージを回避し、X線ビームを発生
4. 日本独自の接合、冷却技術などにより超小型化と高エネルギー化を達成（1mJ→20mJ/パルス）。公募により複数企業による製品化を目指す
5. セラミックレーザー媒質技術、高出力レーザーダイオードによる励起技術などによる発振の高効率化と冷却性能の向上により、小型・高出力化を達成。メンテナンスフリーで1年間の連続運転を実現
6. ユーザーとの協働により、ユーザーニーズを開発仕様にフィードバック。SPring-8およびSACLAのユーザーによるX線ビームの評価。公募により多様なレーザー応用を創出

研究開発プログラム全体構成



各克服すべき課題の実施時期



各プロジェクトで選定する実施機関の考え方 (1/4)

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクト1A レーザー加速要素技術

レーザーのパワーアップと電子入射・加速の工夫により、従来の実績（1段加速で20MeV）の50倍（1GeV）を実現し、多段加速に必要な安定性とモジュール間のアライメント技術を開発できる先端研究力。



選定に至る考え方・理由

◆ 選定方法：**非公募指名** 研究機関：**大阪大学**

選定理由：「研究開発の実績」「保有する研究設備」
大阪大学はCREST「光制御極短シングル電子パルスによる原子スケール動的イメージング」にて、世界で最も安定なレーザー加速を実現（1段加速で20MeV）。フェムト秒時間分解能の電子顕微鏡（TEM）開発を推進。同CRESTにて、レーザープラズマ電子加速の研究開発に必要な実績と最低限の設備を保有。

プロジェクト1B レーザー加速統合プラットフォーム

課題A、C、D、E（下記）で開発した各要素技術および装置を集約・統合し、実験プラットフォームとしてシステム化する技術。世界で初めての安定な多段電子加速とX線ビームを発生させるためには、先端研究力に加え、各機関の要素技術を統合し、運用できる協働共同力が必要。

圧倒的な技術的優位性を確保してデファクトを取るため、世界の研究開発動向を踏まえて開発の方向性を柔軟に見直す判断力・技術力とネットワーク力。



◆ 選定方法：**非公募指名** 研究機関：**大阪大学**

選定理由：「拠点としての実績」「研究開発の実績」
大阪大学はJAEAやKEKとの共同研究・発表を推進。レーザー学会「レーザープラズマ加速の将来像」専門委員会の主査・副主査を務め、関連分野の活動の中心。CRESTによる国内研究ネットワークの形成、JSPS先端拠点「X線自由電子レーザーとパワーレーザーによる極限物質科学国際アライアンス」で世界拠点を築いてきた実績があり、本プロジェクトでも中心的な役割が期待できる。
レーザー加速に関する研究開発の実績を過去3カ年の物理学会の発表件数により評価。電子加速に関しては筆頭発表者の約8割が大阪大学。

- 課題A： レーザー加速要素技術開発
- 課題C： マイクロアンジュレーター開発
- 課題D： ビーム計測・制御技術開発
- 課題E： プラズマ素子電源開発

各プロジェクトで選定する実施機関の考え方 (2/4)

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクト1C マイクロアンジュレーター開発
課題A (レーザー加速要素技術) で開発する電子加速モジュールと組合せて、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。
電子ビームのエネルギーおよび安定性に応じて磁石の周期・ギャップの最適化が可能であり、必要な製作精度を達成するための方策・経験を有すること。



選定に至る考え方・理由

◆ 選定方法: **非公募指名** 研究機関: **高エネ研 (KEK)**
選定理由: 「研究開発の実績」「保有する研究設備」
現状200mオーダーのアンジュレーターを1/10以下 (<10m) に小型化可能なアイデアとアンジュレーター製作の実績を有し、統合プラットホーム (課題B) で使用可能なモジュールの試作をH29年度末までに実現可能な機関。

プロジェクト1D ビーム計測・制御技術開発
課題Cで開発する超小型アンジュレーターに、課題Aで開発する電子加速モジュールの電子ビームを正確に入射させるための計測・制御技術を開発する。
先端研究力に加え、電子加速とマイクロアンジュレーターおよびプラズマ素子電源を担当する開発機関と密な連携が取れる協働共同力を有していること。



◆ 選定方法: **非公募指名** 研究機関: **量研機構 (QST)**
1 GeV超の電子ビームを超高精度 (ビームサイズ0.5mm以下、位置精度±0.1mm以下) で超小型のアンジュレーターへ入射するためのレーザーおよび電子ビームの計測・制御をH29年度末までに実現可能な機関。

プロジェクト1E ビーム計測・制御技術開発
パルス放電により急峻なプラズマ密度分布を生成・制御し、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。
電子加速を担当する機関と連携が取れる協働共同力を有していること。



◆ 選定方法: **公募 (1件)** 研究機関: **長岡技術科学大学**
電子加速に必要な大電流 (1~5kA)、10ns以下の立上り、持続時間100ns、ジッター100ps以下の高繰返しパルス電源をH28年度末までに開発可能な機関。
公募とすることで、技術力のある機関をより広く選定する。

各プロジェクトで選定する実施機関の考え方 (3/4)

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクト2F ハンドヘルドレーザーの開発

現状のマイクロチップレーザー (1mJ/パルス) を大出力化 (20mJ) する。また、産業応用に必須となるメカトロへの搭載が可能なレーザー発振器の試作機 (1kg以下) を平成28年度までに開発し、その後の実用に供する。

先端研究力と開発遂行力を有し、製品化・産業化を志向していること。



選定に至る考え方・理由

◆ 選定方法：非公募指名 研究機関：分子科学研究所

選定理由：「研究開発の実績」「保有する研究設備」
分子研は、マイクロチップ構造で世界で始めてメガワット出力のジャイアントパルスレーザー発振に成功し、小型レーザーで世界を先導する実績を持つ。他機関の実績はμJオーダーのパルスエネルギーであり、分子科学研究所の実績 (1mJ) には及ばない。

JST、NEDOなどの競争的資金により、レーザー材料探索・評価に関する設備が充実しており、使用のノウハウも蓄積されている。また、国内外で多数の特許を権利化し、産業化の意識が高い。

H28年度までにプロトタイプ (20mJ/パルス) の開発が可能な機関は、分子研のみと考えられる。

プロジェクト2G テーブルトップレーザーの開発

大型レーザーの機能 (1J、300Hz) をテーブルトップサイズで実現する。

先端研究力、開拓創造力、開発遂行力を有すること。



◆ 選定方法：公募 (1件) 研究機関：浜松ホトニクス

公募とすることで、アイデアと開発力を持つ機関を広く選定する。

各プロジェクトで選定する実施機関の考え方（4/4）

研究開発機関選定に際して重要視するポイント等

プロジェクト3H 超小型パワーレーザー応用
ハンドヘルドレーザー（Pj-2Fで開発）およびテーブルトップレーザー（Pj-2Gで開発）を使用した応用システム開発、ユーザーによる試適用などを行い、開発したレーザーおよびシステムの実用性評価を行う。
ユーザーニーズに基づいた最適なシステム設計を行うことが可能な能力、システム設計・評価の経験が必要。

プロジェクト3J XFEL実証評価
X線ビームの実用性評価をレーザー加速統合プラットフォーム（Pj-1Bで整備）にて実施する。
ユーザー視点で、開発した要素技術およびシステム、電子およびX線ビームの有用性評価を行うとともに、広範な応用分野に対して俯瞰的な評価を行うことができる総合力が必要。

プロジェクト3K セキュリティー応用
ハンドヘルドレーザー（Pj-2Fで開発）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ー応用システムを開発するとともに、開発したレーザーおよびシステムの有用性を評価する。
新しい技術の開発にチャレンジする先端研究力が必要とされる。

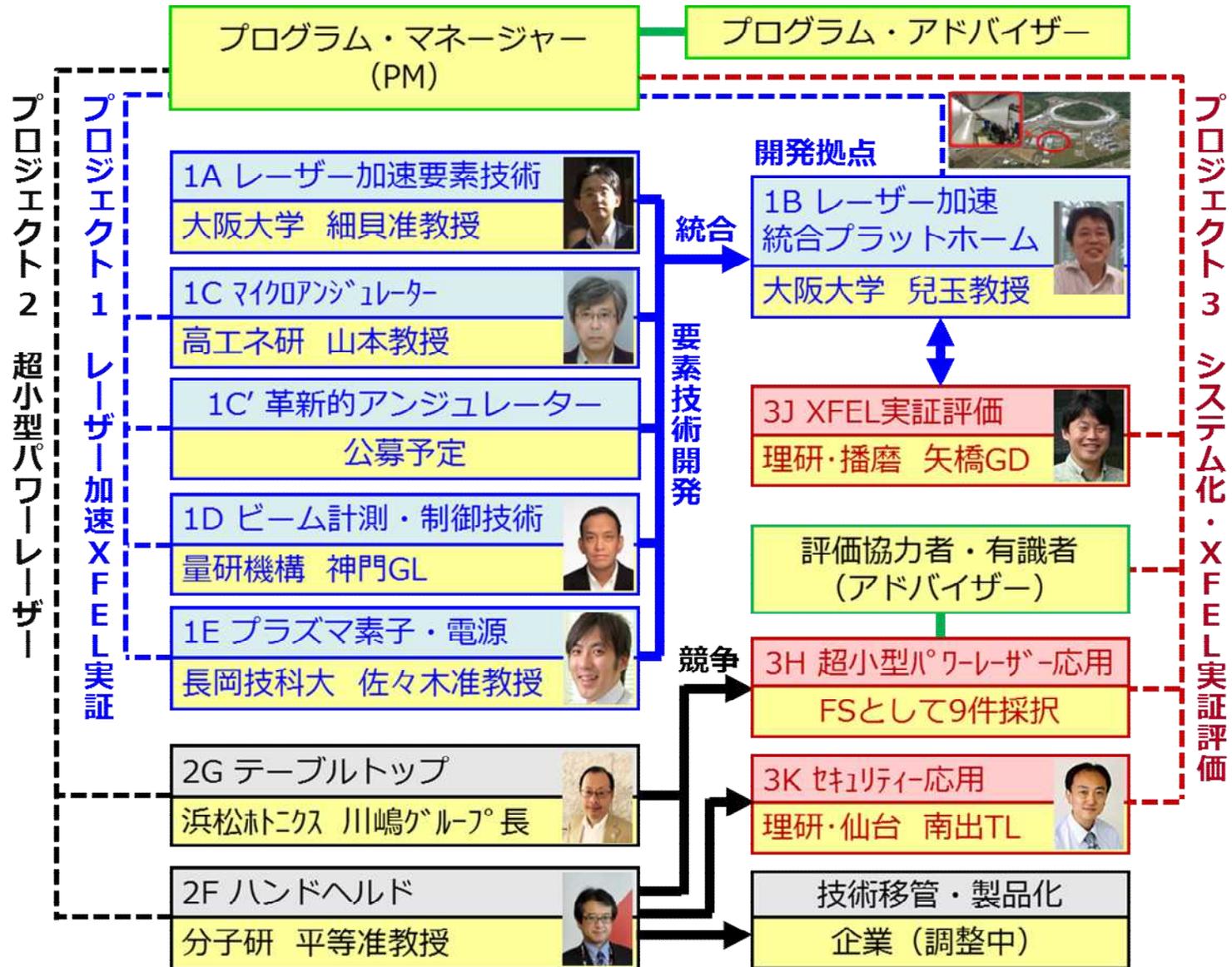
選定に至る考え方・理由

◆ 選定方法：**公募（9件）**
選定理由：公募により、民間企業からのアイデアのみならず、大学および研究所からの優れたアイデアも広く募集する。

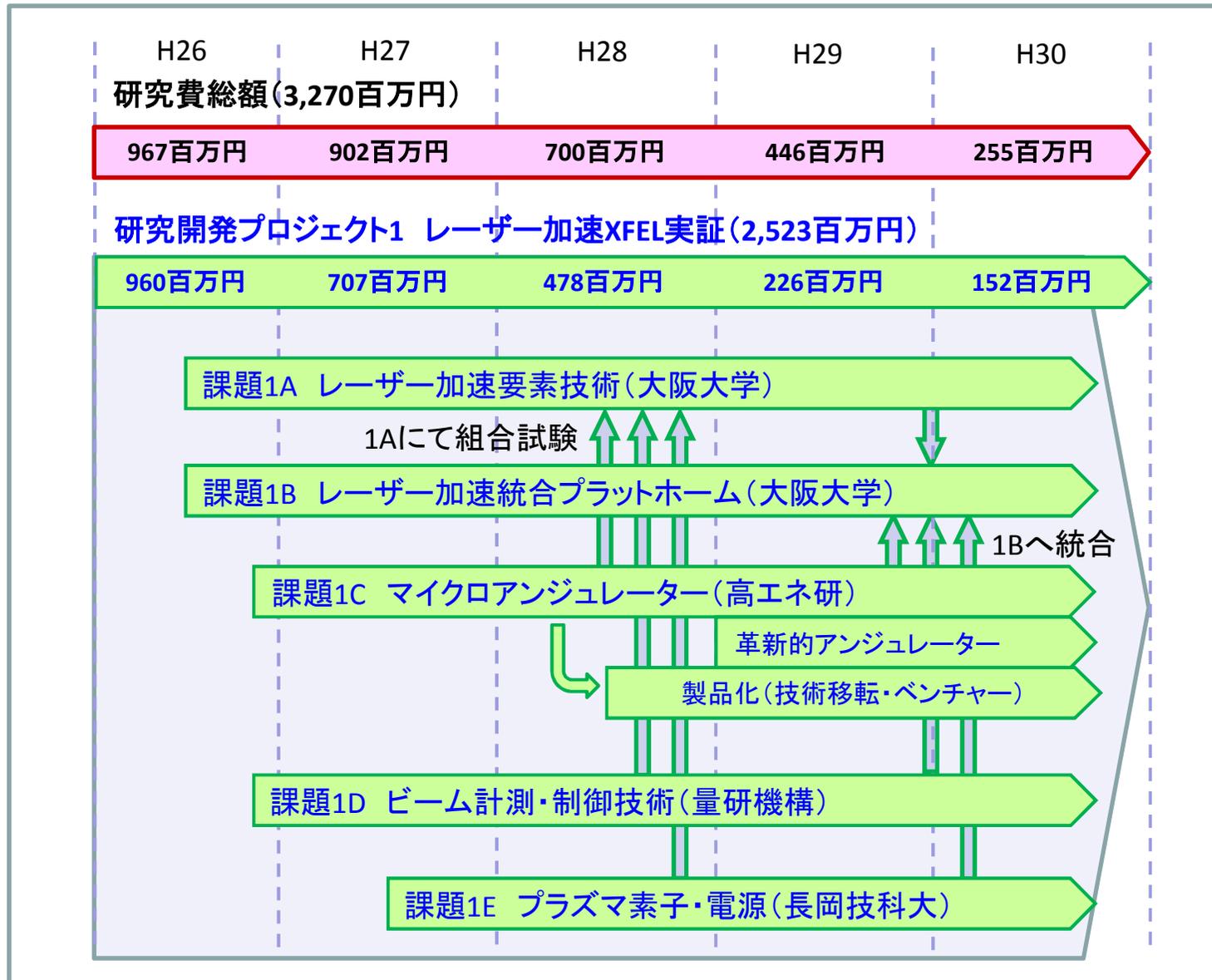
◆ 選定方法：**非公募指名** 研究機関：**理研（播磨）**
選定理由：「保有する評価設備」「拠点としての実績」
理化学研究所・放射光科学総合研究センター（播磨）は大型放射光施設Spring-8およびX線自由電子レーザー施設SACLAにて豊富なユーザーサポートの経験を持ち、X線ユーザーのニーズを的確に把握している。また、これまでの技術開発および施設運営の経緯から、電子ビームおよびX線ビームの性能評価に必要な技術と設備を保有している。さらには、レーザープラズマ加速技術やマイクロアンジュレーターの実験評価に必要な放射線遮蔽を備えた建屋を保有している。

◆ 選定方法：**非公募指名** 研究機関：**理研（仙台）**
選定理由：「研究開発の実績」
理化学研究所は、光量子工学研究領域テラヘルツ光研究グループを擁し、テラヘルツ（THz）波を応用した先進的な研究において優れた実績を有している。特にハンドヘルドレーザー（Pj-2Fで開発）を使用した超高出力THz波発生と超高感度THz波検出に成功しており、それらの技術のセキュリティー分野への応用が期待されている。

研究開発プログラム全体の体制図



研究開発プログラム予算の想定 (1/2)



研究開発プログラム予算の想定 (2/2)

