

**平成27年度 研究拠点形成事業(A. 先端拠点形成型)
中間評価資料(進捗状況報告書)**

1. 概要

| | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|-----------------|--|
| 研究交流課題名 (和文) | 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 | | |
| 日本側拠点機関名 | 大阪大学 | | |
| コーディネーター 所属・職・氏名 | 大学院工学研究科・教授・兒玉了祐 | | |
| 相手国側 | 国名 | 拠点機関名 | コーディネーター所属・職・氏名 |
| | 英国 | オックスフォード大学 | Department of Physics・Professor・Justin WARK |
| | 仏国 | エコールポリテクニク | LULI・Directeur de recherché au CNRS・Michel KOENIG |
| | ドイツ | ドレスデン工科大学 | Institute of Radiation Physics・Director/Professor・Thomas COWAN |
| | 米国 | ローレンスバークレー国立研究所 | Advanced Light Source・Group Leader・Roger FALCONE |

2. 研究交流目標

申請時に計画した目標と現時点における達成度について記入してください。

○申請時の研究交流目標

本課題の目標は、X線自由電子レーザーとパワーレーザー技術の融合により、産業応用に繋がる材料科学から基礎学術としての惑星科学など学際的な極限物質科学として我が国独自の高エネルギー密度物質科学を開拓するために、国際研究教育ネットワークの拠点を構築することである。

パワーレーザーやX線自由電子レーザーを利用することで、1000万気圧以上の地上に存在しない極めて超高压の極限状態を容易に作り出すことができる。これらを利用した産業応用から新物質創生、惑星科学といった学術・産業イノベーションが期待できる。一方、X線自由電子レーザーやパワーレーザーによる量子ビームを利用した新たな極限状態の診断手法が期待されている。X線自由電子レーザーやパワーレーザー、プラズマ制御技術における我が国のコアコンピタンスを集結・収斂することで、世界をリードする我が国独自の極限物質科学を体系的に開拓する国際研究教育拠点の形成が可能である。

本研究交流課題では、特に4つのテーマについて重点的かつ横断的なアプローチを実施することで新しい境界領域を俯瞰的・戦略的に開拓する。1. 高エネルギー密度物質科学、2. 超高压惑星科学、3. 高压材料・プロセス科学、4. 光・量子ビーム科学。そのために、我が国のX線自由電子レーザーやパワーレーザーだけでなく世界の高出力レーザー、X線自由電子レーザーおよび関連する国際ネットワークと連携する。さらに本拠点を中心に国際ネットワークを利用した効率的な情報収集や世界に通じる次世代若手人材育成を行う国際研究教育拠点を目指す。

○目標に対する達成度とその理由

上記目標に対する2カ年分の計画について、

- 十分に達成された
- 概ね達成された
- ある程度達成された
- ほとんど達成されなかった

【理由】

共同研究、セミナー、研究者交流において、大学改革など学内からの支援、欧州での連携事業の採択などもあり、以下に示す通り、当初計画以上の成果が得られた。

【共同研究】

本ネットワークのもと世界にある既存のパワーレーザー・XFELを有機的且つ効率的に利用し、大型装置利用が抱える利用制約を大幅に削減し効率的な共同研究を進めるために下記に示す人材交流などを行うとともに共同研究のための連携体制が構築でき目標に対する計画を十分達成した。

- ・日仏英の共同研究を推進するため、我が国のXFELであるSACLA利用申請を行った。またこれを推進するために、英仏より若手研究者を雇用し連携強化を図るとともに、仏国LULIにおける大型施設を利用した共同実験を実施した。
- ・さらに仏国CNRSによる欧州多国間連携事業（GDRI）と本拠点形成事業を効率的に推進するために、超高圧下における水を共同の研究対象とし、仏国大型施設（PETAL）、仏国中型施設（LULI）ならびに理研SACLAにおける大阪大学パワーレーザーの連携した利用による戦略的な取り組みを開始した。
- ・独国に関しては、欧州XFELとの新たな部局間協定ならびにクロスアポイントメント制度による研究者雇用を実施し、双方で役立つ時間分解計測技術の共同開発を開始した。
- ・米国に関しては、個別議論を進めるとともに、2015年度に日米ワークショップを企画し、米国大型施設、ならびにXFEL施設利用を含めた具体的な共同研究推進のための議論が開始された。
- ・国際共同研究を推進するための実験プラットフォームに関して、我が国のXFEL施設SACLAにおけるパワーレーザー装置の運用と整備が計画通り行われた。また光量子ビーム科学に関しては大阪大学で別予算（内閣府ImPACT）によるレーザー加速実験プラットフォームの整備計画を開始した。さらに理化学研究所放射光科学総合研究センター内に大阪大学未来戦略光科学連携センターを正式に設置し、パワーレーザーとXFELの連携、レーザー加速実験などによる共同研究体制の強化を図った。

【セミナー等】

5ヶ国の連携の要として、我が国がリーダーシップをもって最先端の情報収集、新たな共同研究の展開、若手人材育成を目的としたワークショップ・セミナー、スクールを下記の通り開催し、目標に対する計画を十分達成した。

- ・国際サマースクール（2013年度）、国際ウインタースクール（2014年度）を仏国とも共同で開催し若手人材育成に貢献した。特に2014年度から仏国で当拠点形成事業に対応する仏国CNRSによる欧州多国間連携事業（GDRI）が採択され、日欧の連携強化のもとでウインタースクールを開催した。
- ・定期的なワークショップ・セミナーとして毎年4月に高エネルギー密度科学に関する国際会議（OPIC-HEDS）を主催し情報交換とともに共同研究に関する打ち合わせ、人材育成に役立てた。特に2013年度は、5か国（日、米、独、仏、英）のコーディネーターによる当拠点形成事業のキックオフ国際シンポジウムを開催し、我が国のプレゼンスを示した。

- ・1年半ごとに開催されている「高エネルギー密度物質に関する国際ワークショップ第7回(2015年度)」を我が国で開催した。情報交換はもとより当分野における我が国の成果ならびに施設に関する高い評価を得た。同時に若手育成を目的に当ワークショップで初めて若手賞を設けるなど我が国のリーダーシップによる人材育成にも貢献した。
- ・さらに大阪大学の独自予算(大学改革)により仏国・独国コーディネーターを招聘し定期的なセミナーを開催することにより、情報交換とともに若手人材育成に役立てた。

【研究者交流】

研究者交流においては、外国人研究者を招聘し、当該研究者を交えたセミナーを開催することにより交流を図った。また若手研究者を中心に国際共同研究や上記国際セミナー・ワークショップに積極的に参加させたり、ウインタースクールを企画させたりすることで、国際的なリーダーシップを持った次世代の若手研究者育成を図った。さらに学際的・学術融合的な学術分野の研究を通じた人材育成とともに、広い視野とリーダーシップを持った若手研究者が次世代の国際ネットワークの発展基盤を作るための体制を整えた。下記の通り具体的取り組みを通し目標に対する計画を十分達成した。

- ・仏国コーディネーター・独国コーディネーターを招聘し、定期的なセミナーを開催することにより情報交換とともに若手人材育成に役立てた。仏国コーディネーターのM. Koenig 主任研究員、独国コーディネーターのT. Cowan 教授やA. Pelka 博士を、米国LCLSから実験責任者H. Ja LEE 教授等を、大阪大学別予算(大学改革)で招聘し研究者交流を促進させた。特に仏国コーディネーターであるM. Koenig 主任研究員を大阪大学客員教授として招聘した。年間1か月以上滞在することで、より密接な関係を構築できる体制を整えた。
- ・外国人若手人材として仏国幹事機関エコールポリテクニク、英国オックスフォード大学より各1名ずつ(合計2名)若手研究者を大阪大学の特任研究員・特任助教として雇用することで、共同研究の体制強化を図るとともに若手研究者交流に貢献した。
- ・英国の光量子ビーム開発プロジェクトにも参加しているインペリアル大学若手研究者を大阪大学助教としたり、独国にある欧州XFELパワーレーザー施設設備現場責任者の若手正規職員をクロスアポイントメント制度により特任准教授として大阪大学で雇用した。これにより、共同研究体制強化を図るとともに、若手研究者による次世代国際ネットワークの発展基盤を作るための基盤整備を図った。

3. これまでの研究交流活動の進捗状況

(1)これまで(平成27年3月末まで)の研究交流活動について、「共同研究」、「セミナー」及び「研究者交流」の交流の形態ごとに、派遣及び受入の概要を記入してください。※各年度における派遣及び受入実績については、「中間評価資料(経費関係調書)」に記入してください。

○共同研究

【概要】

世界にある既存のパワーレーザー・XFELを有機的且つ効率的に利用し、大型装置利用が抱える利用制約を大幅に削減し効率的な共同研究を進めるために下記に示す人材交流などを行うとともに、共同研究のための研究交流活動を行った。

各領域に関する進捗を以下に示す。

高エネルギー密度物質科学

- ・仏国エコールポリテクニク、パリ天文台、英国オックスフォード大学、独国ドレスデン工科大学、ロストック大学、欧州連合XFEL、米国ローレンス・リバモア国立研究所、ローレンスバークレー国

立研究所(LBNL)、SLAC(米国スタンフォード直線加速器研究所)などへの派遣により、パワーレーザーを利用した高エネルギー密度物質科学に関する共同研究の可能性を議論した。

- ・日英仏の派遣・受け入れによる共同研究を理化学研究所 XFEL (SACLA) と大阪大学のパワーレーザーを利用して実施し、これまで未解明であったレーザー衝撃波 (10-100 万気圧程度) による相転移ダイナミックスをピコ秒以下の時間分解で明らかにすることができた。
- ・日仏の派遣・受け入れによりレーザーパルス波形を制御し超高压低エントロピー圧縮状態を日仏のレーザー施設で実現し、その状態量とともに構造解析を行うことを目的にフランス (エコールポリテクニック、パリ天文台など) との共同実験を行った。
- ・日独の派遣・受け入れにより将来の欧州 XFEL 稼働を考慮した共同研究のテーマ設定と予備実験の可能性などを独国ドレスデン工科大学、ロストック大学、欧州 XFEL などと検討した。これに関連し欧州 XFEL ならびに理化学研究所 XFEL の双方で必要な超高速光学計測器の必要とされる条件が明らかになった。
- ・日米の派遣・受け入れにより、リバモア研究所、理化学研究所放射光科学総合研究センターならびに大阪大学未来戦略光科学連携センターとの高エネルギー密度科学に関する共同研究の可能性を議論するとともに H27 年度、日米ワークショップを米国で開催することとなった。

超高压材料科学

- ・仏国エコールポリテクニック、パリ大学、英国オックスフォード大学、インペリアル大学、独国 ドレスデン工科大学、欧州連合XFEL、米国NASA・ローレンスリバモア研究所・スタンフォード加速器研究所、ロスアラモス研究所などへの派遣により、パワーレーザーを利用した超高压物質材料科学に関する共同研究の可能性を議論した。
- ・英国への派遣により、パワーレーザー照射時の物質・材料の変形機構、レーザー衝撃波による物質・材料の変形挙動をレーザープラズマ X 線および X 線自由電子レーザーの利用でマクロ・ミクロの両面から明らかにすることを目的に英国 (オックスフォード大学・インペリアルカレッジロンドンなど) との情報交換を行い、我々が既に取得している鉄での非平衡圧縮時の物理機構が従来の動的圧縮と異なることが明らかになった。
- ・日仏の派遣・受け入れにより、パワーレーザーによる物質・材料の変形および破壊機構を明らかにすることを目的にフランス (エコールポリテクニック、パリ大学など) との共同研究実験を実施した。
- ・日独の派遣・受け入れにより、レーザープラズマを利用した極限環境下での物質・材料の破壊を理解し高耐力材料開発に役立てることを目的に独国 (ドレスデン工科大学など) との検討を開始した。

惑星物質科学

- ・仏国エコールポリテクニック、仏国原子力庁プラズマ研究所、パリ大、パリ天文台、英国オックスフォード大学、独国 ロストック大学、米国 ローレンス・リバモア国立研究所、SLAC(米国スタンフォード直線加速器研究所) などへの派遣により、レーザー超高压を利用した惑星物質科学に関する共同研究の可能性を議論した。
- ・本事業に対応する仏国 CNRS 欧州多国間連携事業 (GDRI) が採択され、欧州との本格的な共同研究が始まった。日仏の派遣・受け入れにより、仏国 (エコールポリテクニック欧州中央レーザー施設) と我が国の施設 (SACLA パワーレーザー施設・大阪大学未来戦略光科学連携センター) を利用した巨大系外惑星内部に匹敵する物質状態の生成を目指した国際共同実験を開始し、惑星内高压物質に関する新たな知見が得られた。また、マクロ状態量を独立に観察するための計測機器の開発に関しても共同で実施することができた。
- ・日仏の派遣・受け入れにより、パリ天文台—愛媛大学を中心とした高压下における物質構造ダイナミックスシミュレーションに関する連携が進められた。

光・量子ビーム科学

- ・米国ローレンスバークレー国立研究所(LBNL)、SLAC(米国スタンフォード直線加速器研究所)、独国ドレスデン工科大学、マックスボルン国立研究所、マックスプランク国立研究所、ハンブルグ大学、DESY(ドイツ電子シンクロトロン研究所)、欧州連合 XFEL、英国インペリアルカレッジ、オックスフォード大学、仏国エコールポリテクニック応用光学研究所 (LOA) などへの派遣により、光量子ビーム、レーザー加速器技術、レーザー加速電子による放射線源とイメージング技術をはじめ光量子ビーム技

術を中心とした情報交換ならびに共同研究の可能性を議論した。

- ・日独の派遣・受け入れにより、独国の欧州連合 XFEL とは部局間協定、クロスアポイントメントによる職員雇用により共同研究体制が整い、双方で必要となる診断装置の共同開発を開始した。

共同研究を推進するための研究協力体制に関しても以下に示す進捗があった。

- ・H25 年度、H26 年度は、計画通り我が国を中心とした 2 国間連携に重点をおいた共同研究を進めた。これにより H27 年度から多国間に重点を移行する準備を整えた。
- ・日英に関しては、英国オックスフォード大学、インペリアル大学、ラザフォード研究所などを中心に議論を進めた。本格的な共同研究推進を念頭に英国の光量子ビーム開発プロジェクトにも参加しているインペリアル大学若手研究者を大阪大学助教として雇用したり、オックスフォード大学より若手研究者を独自別予算（大学改革）により大阪大学特任助教として採用したり、共同研究推進体制を強化した。
- ・日仏に関しては、仏国エコールポリテクニックやパリ天文台などを中心に議論を進めた。仏国コーディネーターである M. Koenig 主任研究員を大阪大学客員教授として招聘した。年間 1 か月以上滞在することで、より密接な関係を構築できる体制を整えた。大学別予算で仏国エコールポリテクニックを卒業した若手研究者を大阪大学の特任研究員として雇用することで、日仏共同研究の体制強化を図った。また本事業に対応する仏国 CNRS 欧州多国間連携事業（GDRI）が採択され本格的な連携が始まった。特に超高圧下における水や鉄など高圧物質材料科学や惑星科学に関する物質を共同の研究対象とし、仏国大型施設（PETAL）、仏国中型施設（LULI）ならびに理研 SACLA における大阪大学パワーレーザーの連携した利用による戦略的な取り組みを開始した。
- ・日独に関しては、高エネルギー密度物質、レーザー量子ビーム応用に関する共同研究については、独国より別予算で T. Cowan 教授を複数回招聘し議論を深めた。また独国の欧州連合 XFEL 施設職員を大阪大学の職員としてクロスアポイントメントにより雇用し連携強化を図り、双方で必要となる診断装置の共同開発を開始した。
- ・日米による連携に関しては、従来のレーザー・XFEL 生成 WDM/原子過程に関する共同研究だけでなくカルフォルニア大学バークレー校とレーザー加速に関する情報交換やリバモア研究所、LCLS、大阪大学ならびに理化学研究所との連携強化のためのワークショップを H27 年度開催することとなった。
- ・多国間連携の体制に関しては、次年度以降を見据え、多国間連携の要としての我が国の位置づけを明確にすることを目的に、我が国の実験プラットフォームの整備と 5 か国によるキックオフ会議を 2013 年 4 月に横浜で開催し本事業の国際的プレゼンスを示した。実験プラットフォームは、我が国の XFEL 施設に XFEL と同期した 40TW 短パルスレーザーを別予算で整備するとともに 400J ロングパルスレーザーの一部を整備した。また次年度からの本格的な実験に備え、同期実験を開始するとともに仏国、独国の研究者をオブザーバーとして参加させ共同実験体制の準備を行った。

○セミナー

| | 平成25年度 | 平成26年度 |
|------|--------|--------|
| 国内開催 | 1 回 | 1 回 |
| 海外開催 | 1 回 | 1 回 |
| 合計 | 2 回 | 2 回 |

【概要】

5ヶ国の連携の要として、我が国がリーダーシップをもって最先端の情報収集、新たな共同研究の展開、若手人材育成を目的としたワークショップ・セミナー、スクールを下記の通り開催し目標に対する計画を十分達成した

- ・H25 年度、5 か国（日、米、独、仏、英）のコーディネーターによる当拠点形成事業のキックオフ国際シンポジウムを横浜で開催し、国内外から 70 名程度の参加があった。従来 2 国間で行われてきた国際連携に関して XFEL とパワーレーザー連携利用の可能性や国際協力に関する議論を多国間に広げ、新たな共同研究の可能性を議論した。我が国の実験プラットフォームの整備状況を報告すると

ともにXFELとパワーレーザー連携利用による極限物質科学開拓における我が国のリーダーシップを国際的に示すことができた。さらに英米仏独国の当分野の進展状況などの効率的な情報収集ができた。若手研究者、大学院生を積極的に参加させることで若手人材育成にも役立てた。これらにより当分野における我が国のプレゼンスを示した。

- 定期的なワークショップ・セミナーとしてH25年度キックオフ会議を第1回とし、H26年度、H27年度、毎年4月に高エネルギー密度科学に関する国際会議（OPIC-HEDS）を開催し70名程度の参加があった。特に会議テーマをレーザー駆動粒子加速とその応用研究、さらにパワーレーザーとXFELの連携利用に絞ることで、より具体的な議論が行われ、我が国の当分野におけるリーダーシップを国際的に示しつつ、新たな国際共同研究の可能性も見出すことができた。さらに、英米仏独国の当分野の進展状況などの最新の情報収集を行うと共に、若手研究者、大学院生を積極的に参加させることで、若手人材の実践育成にも役立てることが出来た。
- 国際サマースクール（H25年度）、国際ウインタースクール（H26年度）を仏国にて共同で開催し若手人材育成に貢献した。特にH26年度から仏国で当拠点形成事業に対応する仏国CNRSによる欧州多国間連携事業（GDRI）が採択され、日欧の連携強化のもとでウインタースクールを開催した。

「X線自由電子レーザー2013スクール・会議」

XFEL2013の国際会議と連携したサマースクールを仏国で開催し、共同研究などの実践教育とともに若手人材育成を行った。学生や若手研究者のみならず他分野の研究者を含めてXFELと応用に関する基礎的な理解を深めることができ、世代間・分野間連携の輪が広がることが期待できた。さらに世界のXFEL技術の進展とともにそれを利用した研究の進捗状況を効率的に把握することができた。

「日仏ワークショップならびに国際ウインタースクール」

仏国、独国、英国や他の欧州諸国の第1線で活躍する研究者による高エネルギー密度科学に関する講演および講義によるスクール・ワークショップを開催した。単にスクールだけでなく、研究に直結した議論も行うことができ、日英仏独共同での国際共同実験の企画提案の議論に参加するなど、若手研究者に対して国際的な実践教育を行うことができた。参加した大学院生による会議報告が日本高圧力学会誌に投稿されている。

- 1年半ごとに開催されている「高エネルギー密度物質に関する国際ワークショップ第7回（2015年度）」を我が国で開催し80名程度（欧州24名、アジア48名、北米11名）の参加があった。情報交換はもとより当分野における我が国の成果ならびに施設に関する高い評価を得た。同時に若手育成を目的に当ワークショップで初めて若手賞を設けるなど、我が国のリーダーシップによる人材育成にも貢献した。
- さらに大阪大学の独自予算（大学改革）により仏国・独国コーディネーターを招聘し定期的なセミナーを開催することで、情報交換とともに若手人材育成に役立てた。

○研究者交流

【概要】

研究者交流においては、外国人研究者を招聘しセミナーを開催し交流を図った。また若手研究者を中心に国際共同研究や上記国際セミナー・ワークショップに積極的に参加させたり、ウインタースクールを企画させたりすることで、国際的なリーダーシップを持った次世代の若手研究者育成を図った。さらに学際的・学術融合的な学術分野の研究を通じた人材育成とともに、広い視野とリーダーシップを持った若手研究者が次世代の国際ネットワークの発展基盤を作るための体制を整えた。下記の通り具体的な取り組みを通し目標に対する計画を十分達成した。

- ・ 仏国コーディネーター・独国コーディネーターを招聘し定期的なセミナーを開催することで情報交換とともに若手人材育成に役立てた。仏国コーディネーターのM. Koenig 主任研究員、独国コーディネーターの T. Cowan 教授や A. Pelka 博士を、米国 LCLS から実験責任者 H. Ja LEE 教授等を、大阪大学別予算（大学改革）で招聘し研究者交流を促進させた。特に仏国コーディネーターである M. Koenig 主任研究員を大阪大学客員教授として招聘した。年間1か月以上滞在することでより密接な関係を構築できる体制を整えた。
- ・ 外国人若手人材として仏国幹事機関エコールポリテクニク、英国オックスフォード大学より各1名ずつ（合計2名）若手研究者を大阪大学の特任研究員・特任助教とし雇用することで、共同研究の体制強化を図るとともに若手研究者交流に貢献した。
- ・ 英国の光量子ビーム開発プロジェクトにも参加しているインペリアル大学若手研究者を大阪大学助教としたり、独国にある欧州 XFEL パワーレーザー施設設備現場責任者の若手正規職員をクロスアポイントメント制度により特任准教授として大阪大学で雇用した。これにより、共同研究体制強化を図るとともに、若手研究者による次世代国際ネットワークの発展基盤を作るための基盤整備を図った。

(2)(1)の研究交流活動を通じて、申請時の計画がどの程度進展したか、「学術的側面」、「若手研究者の育成」、及び「研究教育拠点の構築」の観点から記入してください。

○学術的側面

以下に示す4つの領域に関して学術的成果を得た。また本事業による国際ネットワークを通じて、これらの成果は効率的に世界に発信され、我が国の当分野における高い評価とプレゼンスを示すことができた。

高エネルギー密度物質科学

- ・ 短パルスレーザーによる新しい低エントロピー圧縮法の可能性について検討した。また短パルスを作るチャープパルスをパルス圧縮することなく固体試料に照射することで従来考えられていたより短い時間スケールでの構造相転移が可能であることが実験的に明らかになった。
- ・ 日英仏の共同研究として理化学研究所 XFEL (SACLA) と大阪大学のパワーレーザーの連携利用により、これまで未解明であったレーザー衝撃波（10-100 万気圧程度）による相転移ダイナミクスをピコ秒以下の時間分解で明らかにすることができた。その結果、衝撃波による物質構造相転移に結晶格子の方向依存性を持つ物質があることが明らかになった。例えば鉄の[001]格子面からの圧縮により ps の時間スケールで高圧相の hcp に構造装填を起こし、圧縮後に元に戻ることが分かった。一方、[011]格子面からの圧縮により準安定な fcc 構造が得られることが分かった。またパワーレーザー圧縮したシリコンにおいて、衝撃波の圧力の増大とともに異常弾性状態の増大が確認された。60 万気圧の最終到達圧力のケースでは、これまでの知見に基づく六方細密構造シリコンの生成は確認できず、異常圧縮された立方相ダイヤモンド構造シリコン（元の半導体シリコン構造）と imma 金属シリコン構造の規則的な混合状態の生成を初めて実証した。シングルショット観察で優位に認められる信号から、無視できない量のエキゾチックシリコン状態が生成されたこと、その残存時間が長いことが示唆された。

超高压材料科学

- ・ パワーレーザー照射時の物質・材料の変形機構、レーザー衝撃波による物質・材料の変形挙動を XFEL などの利用でマクロ・ミクロの両面から明らかにした。鉄での非平衡圧縮時の物理機構が従来の動的圧縮と異なることが明らかになった。さらに新物質・材料開発につながる衝撃圧縮時の高速物質

挙動の直接観察が可能となった。

- ・パルス波形の違いによる破壊の変化の可能性が検討された。壊れにくい物質・材料の設計指針の構築に活かすため、観測結果からレーザー誘起高速変形挙動のモデル化を進めることができた。またパルス波形を制御することで深層域レーザーピーニングの可能性を計算シミュレーションで初めて明らかにした。
- ・既存の材料力学では理解されてこなかったピコサブピコ秒の超高速変形時の物質・材料の変形挙動を超高速格子レベルで解明することが可能となった。例えばシリコンのダイヤモンド構造が通常の静圧縮に比べ3倍以上高い圧力でも相変化することなくもとに戻る異常弾性圧縮をすることが明らかになった。また静圧縮では観測されない異なる物質相が混合したようなメソスケールの構造を示唆する結果が得られ、超高压相凍結機構の可能性として議論が開始されている。
- ・パワーレーザー駆動のマルテンサイト変態組織生成のダイナミクスを直接観察することができ、レーザーピーニングを始めとするレーザープロセスの物理的な理解を深めることができた。これにより、高耐性材料の設計指針の構築に役立てることが可能になった。
- ・これまで困難であった動的超高压下の構造相転移のダイナミクスを、XFELプローブを用いることによりフェムト秒時間分解原子レベルで直接観察することができ、無拡散タイプの構造変化に関する時定数などを明らかにすることができた。

惑星物質科学

- ・パワーレーザーを用いて巨大系外惑星内部に匹敵する物質状態の生成を目指すとともに、同期したレーザープラズマX線プローブやX線自由電子レーザーによるその場構造解析が可能となり、状態方程式や相関係の理解を進めた。また地球内殻-外殻境界領域における鉄の電子状態の決定のための新しい診断手法の開発が進展した。系外氷惑星内部状態における電気伝導度と惑星磁場の評価などが実験から検討可能になった。
- ・レーザー高压制御によりケイ酸塩化合物および酸化マグネシウムをはじめとする地球型惑星深部物質に関して惑星内部環境に相当する物質状態の生成に成功した。ケイ酸塩化合物に関しては、液相における新しい反応過程の可能性を初めて提唱し、惑星形成期においてこの過程の重要性を示した。酸化マグネシウムの結果からは、これまで固体と考えられてきた木星核が融体である可能性が高いことを示唆する結果を初めて得るなど、惑星科学において重要な知見が得られ始めた。さらに超高压下における化学反応（かい離と再結晶化）をとらえることができた。
- ・惑星深部層構造の理解を進展させるため、第一原理アプローチによる計算を行った。また本拠点事業とは異なるが、関連してロシアランダウ理論研究所との連携を含め超高压相状態を理論計算によって予測・解明するため、パワーレーザーが駆動する動的な高速物質ダイナミクスを第一原理構造計算に組み込むことを目標に、熱力学積分法に基づいた自由エネルギー計算法を第一原理分子動力学法に組み込む独自のプログラム開発を進めた。

光・量子ビーム科学

- ・海外の研究機関との技術交流によりレーザー粒子ビーム加速において、ビームの安定化、高エネルギー化ならびに高品位化のための知見を得ることができた。より制御性を上げるために我が国独自の多段化システム構築のための技術的課題が明らかになった。
- ・XFELによる核励起と核コヒーレント光学の開拓として、コヒーレントX線による量子干渉効果と反応粒子の多体効果を取り入れることで、従来考えられていたより6ケタ高い核反応率が期待できることを理論的に明らかにした。

○若手研究者の育成

以下に示すような国際共同研究を通じた実践教育、外国人講師によるセミナー、国際スクールの開催ならびに海外の若手研究者雇用を通じて若手研究者育成を行った。

- ・若手研究人材育成に関しては、多分野、多国籍の研究者による XFEL やパワーレーザーを利用した共同実験に若手研究者・博士課程学生を積極的に参加させることで、国際感覚溢れた若手人材育成に役立てた。また研究課題も産業から学術に及ぶ幅広い連携による学際的・学術融合的な新しい学術分野の開拓を通して、幅広い視野と先見性を養うのに適した実践的な教育を行った。
- ・大阪大学客員教授として仏国コーディネーター M. Koenig 主任研究員を招聘し若手研究者・大学院生を対象としたセミナーやコロキウムを開催した。同様に米国 LCLS から実験責任者 H. Ja LEE 教授、独国ドレスデン工科大学から T. Cowan 教授や A. Pelka 博士等を招聘しセミナーを実施することで若手研究者育成に役立てた。
- ・XFEL2013 の国際会議と連携したサマースクールを仏国で開催し、共同研究などの実践教育とともに若手人材育成を行った。さらに H26 年度は仏国 CNRS の欧州連合多国間連携（仏日英独）事業（GDRI）と連携して若手研究者育成を目的に、仏国において XFEL とパワーレーザーによる高エネルギー密度科学に関するウインタースクールを開催し、同時に日仏英独国を中心としたワークショップを開催したことで、単にスクールだけでなく研究に直結した議論も行う事ができ、これにより若手研究者の実践的教育も行う事が出来た。
- ・連携相手国（英国、仏国）から若手研究者をポストクとして招聘することで頭脳循環を図るだけでなく、研究を通して大学院生と外国人ポストクとの交流を積極的にさせることで実践的な人材育成に役立てた。さらに欧州 XFEL の若手研究者をクロスアポイントメント制度により大阪大学で雇用し共同研究を推進した。これらとは別に英国インペリアル大学の若手研究者を大阪大学助教として雇用するなどグローバルな若手研究者育成に貢献した。

○研究教育拠点の構築

XFEL とパワーレーザーの連携を主体とした本拠点で実施する国際連携は世界的に注目されており多くの共同研究依頼が来ている。これら連携研究を効率的に実施するために平成 26 年度、大阪大学と理化学研究所（放射光科学総合研究センター）との大学間協定を締結するとともに放射光科学総合研究センター（播磨）内に大阪大学未来戦略光科学連携センターを正式に設置した。また平成 25 年度、露国科学アカデミーからも政府間共同研究依頼が来ており、平成 26 年度より大阪大学の独自予算で露国科学アカデミーからの研究者を雇用したり大学間協定を締結したりするなどし、当事業を核とし広く国際共同研究を行うことで、国内連携強化はもとより世界に開かれた国際研究教育拠点形成を目指した着実な進展が得られている。

4. 事業の実施体制

本事業を実施する上での、「日本側拠点機関の実施体制」、「相手国拠点機関との協力体制」、及び「日本側拠点機関の事務支援体制」について記入してください。

○日本側拠点機関の実施体制（拠点機関としての役割・国内の協力機関との協力体制等）

申請時において大阪大学内においては、2009 年より部局横断組織としての光科学センターを中心として、工学研究科、理学研究科、基礎工学研究科、レーザーエネルギー学研究センターなどと研究教育に

関する連携体制が構築されていた。本センターはこれまで当分野における上記活動の中心的役割を果たしており、大阪大学として産業から基礎科学と極めて学際的な本研究交流課題（共同研究・情報収集・人材育成）を実施する体制は整っていた。さらにこれらの部局間連携体制強化として平成 25 年度より総長イニシアチブの未来戦略機構内に光量子科学研究部門が設置され日本のコーディネーターである児玉が当部門長につき協力体制が強化された。また理化学研究所の X F E L 施設と連携しパワーレーザシステムを予定通り構築することで、ハード面での拠点整備を行うと同時に理化学研究所放射光科学総合研究センター内に大阪大学未来戦略光科学連携センターを平成 26 年度設置することで、国内はもとより海外機関との連携の効率化を図り国際研究教育拠点形成に向けた連携機能強化が当初の予定以上に進められた。

○相手国拠点機関との協力体制（各国の役割分担・ネットワーク構築状況等）

英国

英国コーディネーターの J. Wark 教授との定期的な議論を行い密接な連携体制が構築できている。またオックスフォード大学より若手研究者を大阪大学独自予算により雇用することで、効率的な研究だけでなく研究を通して大学院生と外国人ポスドクとの交流を積極的にさせることで実践的な人材育成の協力体制構築にも役立っている。また英国インペリアル大学の若手研究者を大阪大学助教として雇用することにより強力な協力体制を構築している。

フランス

フランスコーディネーターの M. Koenig 博士を大阪大学客員教授として招聘し、1 か月/年は大阪に滞在することでより密接な協力体制を構築している。またフランス C N R の欧州連携事業（GDRI）の採択によりフランスのみならず欧州全体をまとめた形で本拠点との協力体制の強化が行われている。さらにエコールポリテクニクより若手研究者を大阪大学独自予算により雇用することで、効率的な研究だけでなく研究を通して大学院生と外国人ポスドクとの交流を積極的にさせることで実践的な人材育成の協力体制構築にも役立っている。

ドイツ

ドイツコーディネーターの T. Cowan 教授とは、招へい教授として大阪大学に招くなど密接な連携関係を構築している。独国にある欧州 X F E L との部局間協定ならびにクロスアポイントメントによる若手職員の雇用などが進み、より密接な連携体制を構築できている。

米国

米国コーディネーターの R. Falcone 教授との定期的な議論を行い密接な連携体制が構築できている。またリバモア研究所、スタンフォード大学、SLAC(米国スタンフォード直線加速器研究所)の連携が進み、これらとの協力体制強化を図るためワークショップの実施を H27 年度に計画している。

○日本側拠点機関の事務支援体制（拠点機関全体としての事務運営・支援体制等）

本研究交流課題は、拠点機関内の全学組織である大阪大学光科学センターが中心的役割を果たし、他部局・他機関との連携を図った。また新たに大阪大学に部局横断組織である未来戦略機構光量子科学研究部門や未来戦略光科学連携センターが設置され、これら事務との連携を図った。その上で事務業務に関しては大阪大学本部事務機構と工学研究科及び光科学センター（特任事務員ならびに事務補佐員 2 名）が密な連携体制のもとで本事業にあたった。