

最先端の光の創成を目指した  
ネットワーク研究拠点



資料2-2  
科学技術・学術審議会 研究計画・評価分科会  
量子科学技術委員会(第18回)  
平成31年2月1日



# 融合光新創生 ネットワーク

Consortium for Photon Science and Technology:C-PhoS

兒玉了祐、野田進、大森賢治、近藤公伯

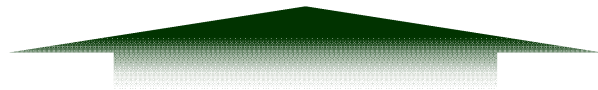
大阪大学(幹事)、京都大学、  
自然科学研究機構分子科学研究所  
量子科学研究開発機構関西光科学研究所



# 各機関の強みを生かしつつ連携により、従来できなかった 新たな可能性を開拓



- 医療分野、環境エネルギー分野、材料分野、基礎科学分野にイノベーションを起こす技術開発
- 科学技術イノベーションの基盤的な力の強化となる若手人材育成



ナノフォトニクス、パワーフォトニクス、プラズマフォトニクスの融合と量子制御技術の展開による技術と科学のイノベーション

コアコンピタンスの連携・融合によるイノベーション

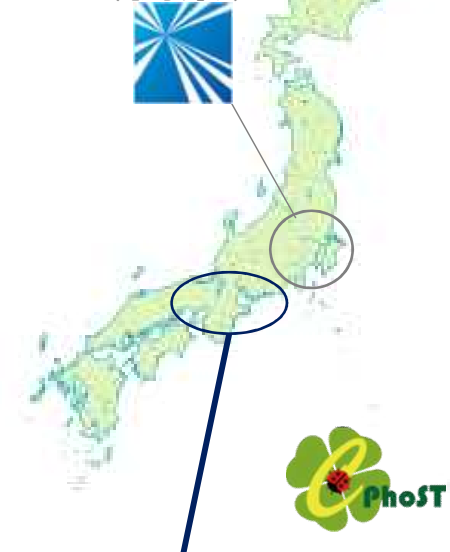
量研機構関西研 極短パルスや光量子 ビーム制御技術	大阪大学 高出力レーザーとプ ラズマデバイス技術	京都大学 フォトニック結晶に よる光デバイス技術	分子科学研究所 量子制御や超高 精度計測技術
---------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	------------------------------

国際連携(国際拠点、アジア拠点事業) 産学連携(フォーラム、NPO他)

世界トップレベルの研究と多機関連携によるグローバル若手人材育成と施設供用

幹事機関: 東京大学  
参画機関: 理化学研究所、電気通信  
大学、慶応義塾大学、東京工業大学

先端光量子科学アライ  
アンス(関東)



融合光新創生  
ネットワーク(関西)

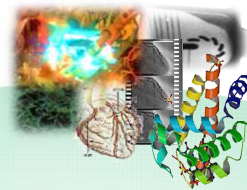
幹事機関: 大阪大学(光科学センター)  
参画機関: 京都大学、分子科学研究所、  
量子科学研究開発機構

# 10年の機関連携事業による骨太な拠点活動

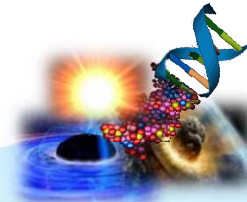


## 超スマート社会への貢献(イノベーション)

新物質材料創生  
 インテリジェントプロセス  
 ユビキタス先進医療装置  
 放射性廃棄物処理(環境技術)  
 量子シミュレーターなど



光による



## 知の探求への貢献(新学術の開拓)

宇宙の謎、星・惑星の謎  
 物質崩壊・破壊の謎  
 物質・分子の謎  
 生物分野の根源的な謎  
 の解明など

### ① オープンイノベーション

光科学フォーラムサミット  
 光エレクトロニクスフォーラム  
 中小企業技術懇親会  
 NPO光科学アライアンス

①

### コヒーレント量子制御 高エネルギー密度制御

- フォトンの性質と制御
- 波動関数の可視化と制御
- 原子・分子の可視化と制御
- 極限物質構造の可視化と制御

### ② オープンサイエンス

国内外研究機関連携  
 供用促進  
 学内部局連携  
 合同シンポジウム

②

### レーザーによる高輝度光源/高品位高輝度光源(QUADRA)

### ③ 若手人材育成(基盤強化)

- 材料デバイス開発
  - ・コンジットセラミック技術開発
  - ・プラズマデバイス開発
  - ・マイクロドメイン制御レーザー開発
  - ・フォトリソグラフィ結晶面発光半導体レーザー
- レーザーシステム開発(セラミック)
  - ・PCSEL励起固体レーザー
  - ・kHz高繰り返しセラミックパワーレーザー開発
  - ・高ピーク出力セラミックパワーレーザー開発
  - ・大型セラミックレーザーの開発
- 光源開発
  - ・高輝度THz光源
  - ・深紫外-中赤外領域超短パルス光源
  - ・レーザープラズマ加速ビーム源

\* QUADRA: highly Quality Ultra ADvanced RAdition source

① 出口から見た光源システム開発、② 拡がりある出口を見据えた光源開発と応用、③ 人材育成



## 高エネルギー密度制御

- 極限物質構造の可視化と制御
- 大型セラミックレーザーの開発
- プラズマデフオットニックバイスの開発

イノベーション: 新物質材料創生、プロセスなど  
新学術の開拓: 宇宙の謎、物質崩壊・破壊の謎など

## ナノ制御



- フォトニック結晶による光制御
- 高輝度半導体レーザーの開発
- PCELの応用展開

イノベーション: レーザープロセスなど  
新学術の開拓: 光の謎、物質の謎など

## 連携による成果



## コヒーレント量子制御

- 波動関数の可視化と制御
- 原子・分子の可視化と制御
- 深紫外-中赤外領域超短パルス光源開発

イノベーション: 量子シミュレーターなど  
新学術の開拓: 物質・分子の謎の解明など

## 量子制御



- 原子・分子の可視化と制御
- kHzセラミックパワーレーザー開発
- 高輝度THz光源

イノベーション: 放射性廃棄物処理など  
新学術の開拓: 分子の謎、物質崩壊・破壊の謎など



# 10年の機関連携事業による成果例

デバイス開発からシステム開発へ展開

京大-阪大

- ◆ フォトニック結晶レーザー(PCSEL)の高出力化とPCSELL励起固体レーザーシステム開発

システム開発から供用へ展開例

阪大-理研ほか

- ◆ XFELと同期した大型セラミックレーザーシステム開発と高エネルギー密度物質科学への展開

デバイス開発からシステム開発へ展開

阪大-関西研

- ◆ レーザープラズマ加速の開発と供用プラットフォームへの展開

人材育成を全国規模に展開

4機関+α

- 若手人材育成の全国ネットへの展開

新たな連携の芽

□ 量子制御技術とナノフォトニクスとの連携

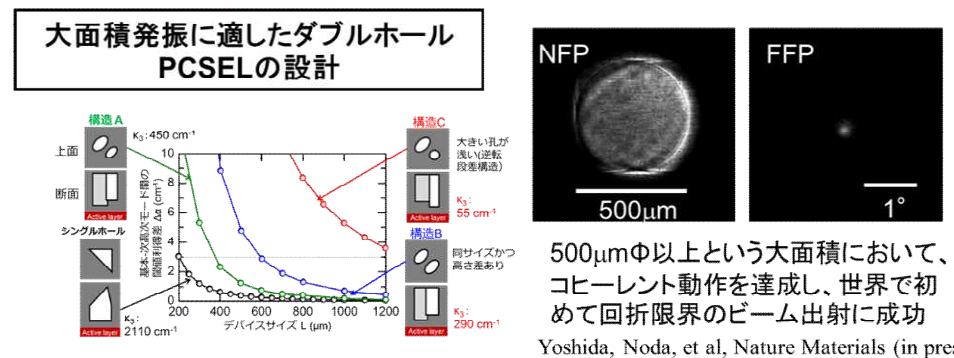
分子研-京大

- ◆ **概要:** 独自のフォトニック結晶レーザー(PCSEL)の高ビーム品質・高出力化に向けた構造設計及び作製技術の開発を行い、半導体レーザーの中で世界最高輝度を実現した。
- ◆ **意義:** 半導体レーザーは、輝度において、ファイバーレーザー等に後塵を拝してきた。本PCSELは、超小型高輝度レーザーとして、他の全てのレーザーを凌駕出来る可能性を有する。
- ◆ **成果:**

## 1. シングルホール・フォトニック結晶レーザー(PCSEL) のワット級動作

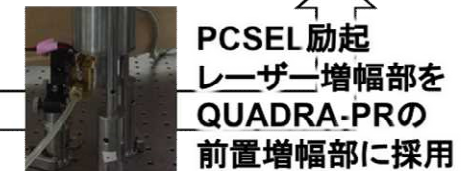
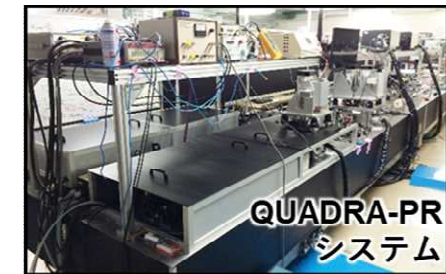
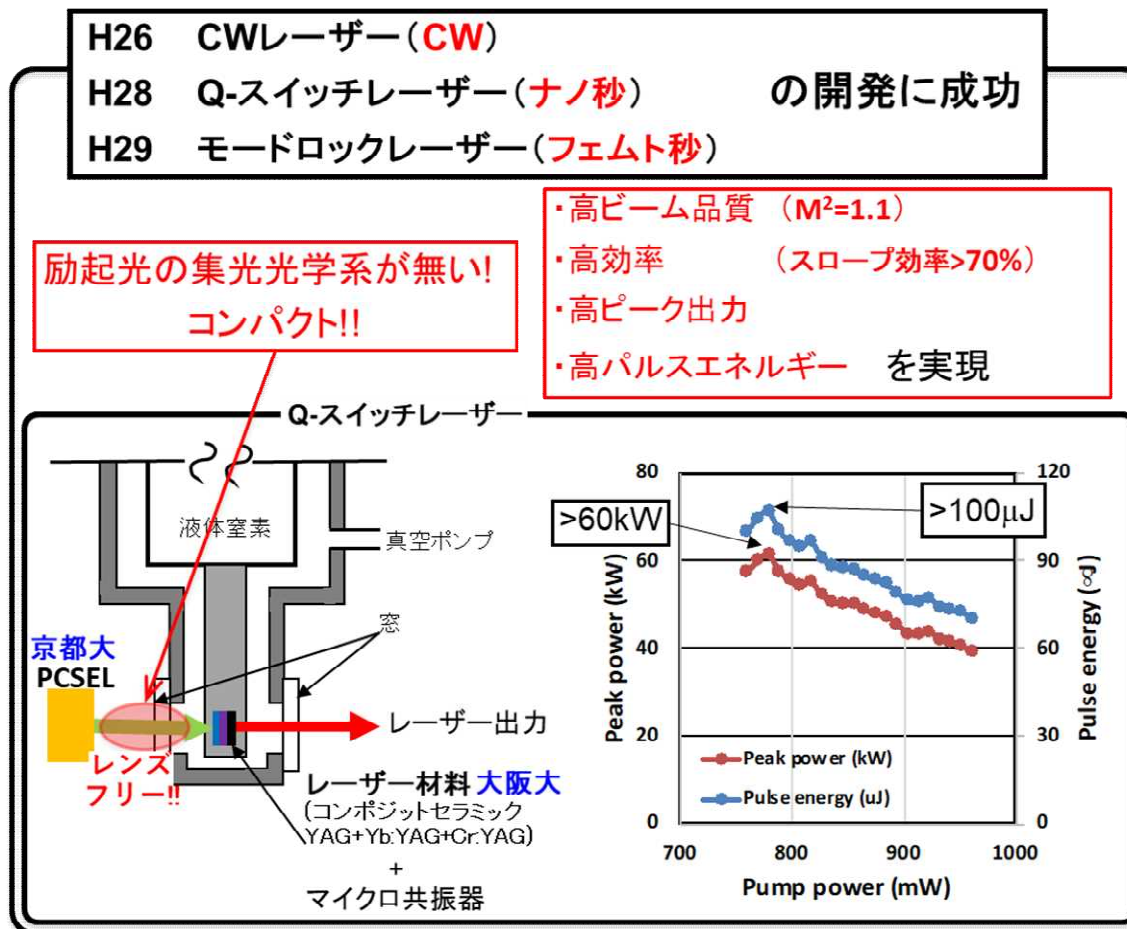


## 2. ダブルホール・フォトニック結晶レーザー(PCSEL) の高ビーム品質・10ワット級動作



- ◆ **アウトカム:** 光加工、LiDAR、センシング、医用応用など、様々な分野への波及効果。本事業から、ACCEL(JST)、NEDO、SIP「光・量子」などへ展開。

- ◆ **概要**: 京都大学のフォトニック結晶面発光レーザー(PCSEL)の特長(狭い発散角)と大阪大学のパワーフォトニクス技術を融合させて、世界初のレンズフリーPCSEL励起の小型・高性能固体レーザーシステムを開発。
- ◆ **意義**: 最先端光デバイス(PCSEL)を最先端システムに搭載して、その優位性・革新性(超小型・高ビーム品質光源)を示し、科学技術の進展に寄与。
- ◆ **成果**:



CW, ps~fsの超小型・高ビーム品質光源 **アウトカム**

- 産業利用への展開
- ・微細加工
  - ・薄膜形成(PLD)
  - ・超微粒子創成
  - ・元素分析
  - ・半導体アニール
  - ・センシング(自動車など)

- ◆ **概要:** 新物質創成を目指し、超高压力・温度の時間的制御及び物質状態の制御目的として、XFEL(理研SACLA)と同期した 高繰り返しで高精度の時間波形整形パワーレーザーシステムの開発を行った。
- ◆ **意義:** 高い時間分解能と大きなダイナミックレンジ制御を同時に可能とするパワーレーザーシステムが XFELと同期して実現できれば、超高压の極限状態の高速ダイナミクスを観測しながら制御することで、新物質創成につながる。
- ◆ **成果:**
  - 大型セラミックス(100mmφ)レーザー材料の実用化。
  - 0.1Hz/100J級レーザーにおける任意時間波形制御の実現。
  - 理化学研究所SACLA施設内に本パワーレーザー装置を設置し(図1)
  - XFELと同期した状態でユーザーへの利用を開始した(例: 次ページ)。

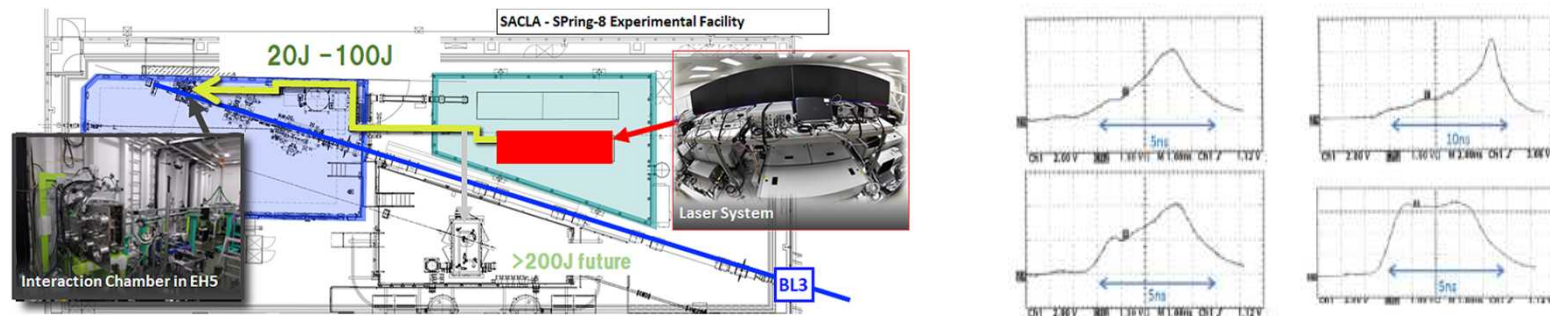


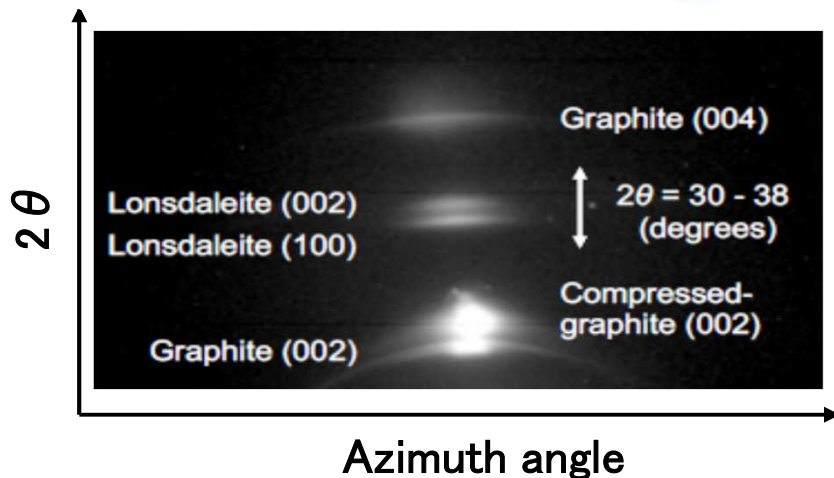
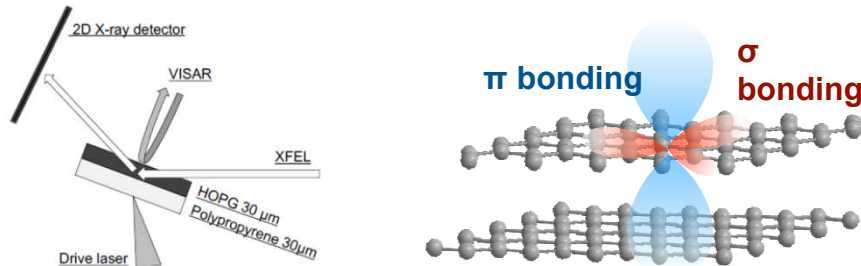
図1 時間波形整形レーザーシステムの概観

- ◆ **アウトカム:**
  - XFELである理研SACLAと連携することを見据え緊密な連携・協働体制を構築した。
  - 今後の展望(成果のアウトカム)  
XFELと同期した状態で本レーザー装置のユーザーへの利用が始まっており、新物質創成のみならず他研究分野へ広範な波及が期待できる。



高い圧縮歪み速度と指向性あるレーザー衝撃波と高配向性熱分解グラファイト(HOPG)により新しい六方晶ダイヤモンド(ロンズデーライト結晶)を従来の1/5程度の圧力で創成することに成功

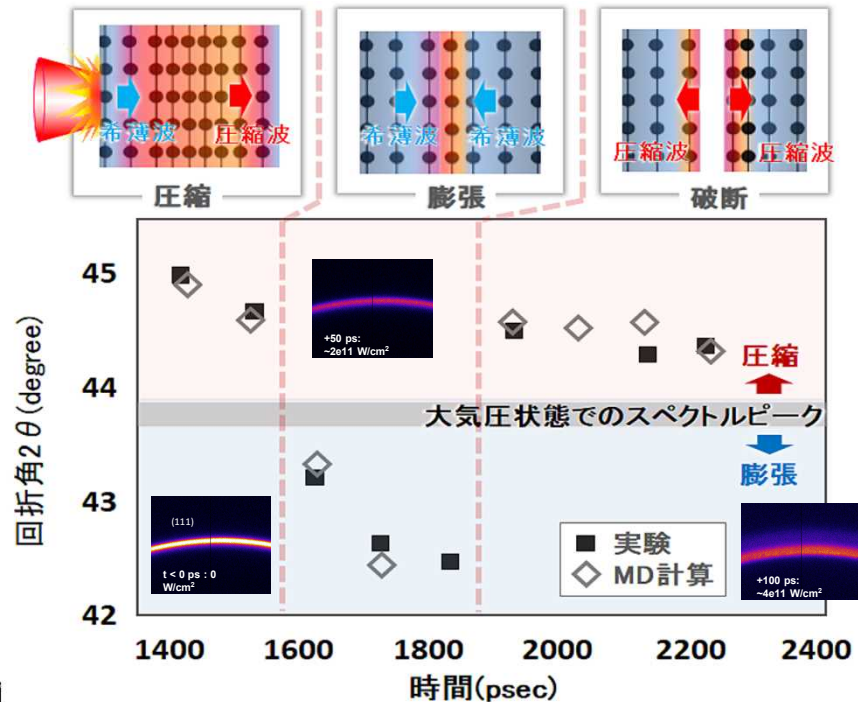
- 無拡散性相転移により、一般的な塑性変形による相転移に比べ、低い圧力(1/5程度:30万気圧)で高压相を実現した。
- ロンズデーライト結晶は、ダイヤモンドに比べ1.5倍以上硬いと予測されているが、天然には殆どなく人工合成も進んでいない。



30万気圧程度のレーザー衝撃波を伝播させXFELによる回折パターン

レーザー衝撃波により、単位時間当たり8桁以上格子が歪む“超高歪み速度場” ( $\sim 3 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ ) が形成され、破断破壊(スポール破壊)に進む現象をXFELで直接観測することに成功

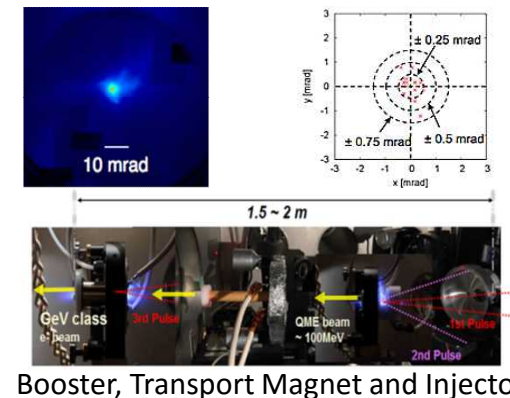
- 超高速破壊時に圧縮から膨張(引張),そして再び圧縮に転じる格子の応力状態の超高速変化を可視化することに成功。
- 極限環境下の材料の振る舞いがより正しく理解され、新材料や新素材の設計に生かされるものと期待される。宇宙構造物や航空機などの安全性向上や新高耐力材料の開発促進に繋がる。



変化: 圧縮・膨張・破断を示す実験結果と第一原理計算結果

- ◆ **概要**: 超高速過渡現象を直接観測するための極短パルス電子源やレーザー加速器の実現を目的に、レーザー航跡場による電子ビーム加速の再現性と制御性を高い精度で確立した。
- ◆ **意義**: 高エネルギー・極短・高密度・高品質な小型ビーム源を開発し、レーザープラズマ加速電子ビームの高いポテンシャルを示すとともに、プラズマ制御技術の重要性が示された。
- ◆ **成果**: プラズマで作る光学素子(プラズマフォトリックデバイス)を開発し、レーザー加速による電子ビームを利用可能なレベルまで安定化することに成功した。

- 世界一安定なレーザープラズマ加速電子ビーム実現。
- エネルギー拡がり $\Delta E/E$ : <1%を実現
- 電子加速源、パルス輸送磁場、追加速プラズマなどの世界初のユニット化に成功
- 世界で最も効率的なレーザープラズマ加速の実現 (0.8GeV/0.3J vs GeV1-10J 海外研究機関)



- ★特許 第6319920号「放電プラズマによる光導波路形成方法」米国特許 Patent No.: US 10,104,753 B2, 細貝 他
- ★特許 第5611699号「電子ビームパルス出射装置および電子顕微鏡」, 細貝, 他
- ★特許 第5744612号「粒子加速法および粒子加速装置並びにミュオン生成・加速システム」大石祐嗣、細貝、他

- ◆ **アウトカム**:
  - レーザー駆動量子ビームを原理実証のフェーズから実用デバイス構築のフェーズへと進めることができたことで、レーザープラズマ加速器の実装へ向けた指針を立てることができた。
  - レーザープラズマ電子加速に関する連携強化(阪大・QST・理研)につながった。
  - 内閣府ImPACTや文科省未来社会創造事業につながり、レーザープラズマ加速器の実現に大きく貢献できた。(レーザープラズマ加速器開発プラットフォームLAPLACIANへ発展)

# 人材育成:各機関の特徴・強みを生かしつつ、 若手の緊密な連携・協働体制の構築を目指した連携



## 分担

- 光科学全般に関する人材育成(大阪大学) ◆「学際光科学」教科書(朝倉書店)の刊行
- 先進光源システムに関する人材育成(量子科学研究開発機構)
- 光デバイスに関する人材育成(京都大学) ◆ 学生主導の泊まり込みセミナー道場
- 光と原子分子の相互作用に関する人材育成(自然科学研究機構)

## 連携

- 関西の機関連携により効率的な講師派遣(アウトリーチ):  
高校出張講義(2-3回/年)、高校生のための遠隔講義eラーニング(延べ150-200人/年)
- レーザー夏の学校(院生企画):  
阪大から関西拠点全体に拡大し、関東拠点との共同運営(H25)へと発展。延べ400名(H21-H29)の参加と協賛企業(8社)による自走化
- 次世代光科学ネットワークの構築支援:  
関東・関西を中心に光科学の若手研究者が独自の研究会(光科学異分野横断萌芽研究会)を開催(光科学若手の会登録数 約170名)

## その他の連携(産学連携、国際連携)

- 国際連携を利用した実践教育:  
JSPS先端拠点事業(H19-23:日18機関+英米仏29機関;H25-H29:日21機関+英米独仏24機関)を活用し、次々世代・次世代国際ネットワーク構築の芽を育成。国際ウインタースクール開催と定例化(国内3回、国外5回開催、海外の4回は仏国CNRS-欧州連携事業との連携)
- 産学連携と人材育成:  
共同研究のみならず若手人材育成のための持続可能な体制として、参加企業は110社(H20年20社)による光エレクトロニクスフォーラムを設立・運営を行った。  
光科学フォーラムサミット(200名以上140社以上参加)や「JPC関西」ならびに「りそな銀行」との共催による定期的な企業との技術交流会を開催し、若手研究者の育成、光科学コミュニティの活性化に役立てた。

## ① 出口から見た光源システム開発

- ・QUADRA-P: 高エネルギー密度物質材料科学開拓を目的としたパワーレーザー開発 (大阪大学)
- ・QUADRA-T: 量子制御同位体分離を目指したkHz高輝度テラヘルツ光源の開発 (QST関西研)
- ・QUADRA-IR: コヒーレント量子制御を目的とした高精度超広帯域極短パルス光源開発 (分子研)

## ② 拡がりある出口を見据えた光源開発と応用

拠点の強みを生かした技術開発: 3つのフォトニクスとこれらの融合による光源開発

- ・パワーフォトニクスによる光源開発 (4機関)
- ・プラズマフォトニクスによる光源開発 (大阪大学、QST関西研)
- ・ナノフォトニクスによる光源開発 (京都大学)
- ・パワーフォトニクスとナノフォトニクスの連携(大阪大学・京都大学連携)

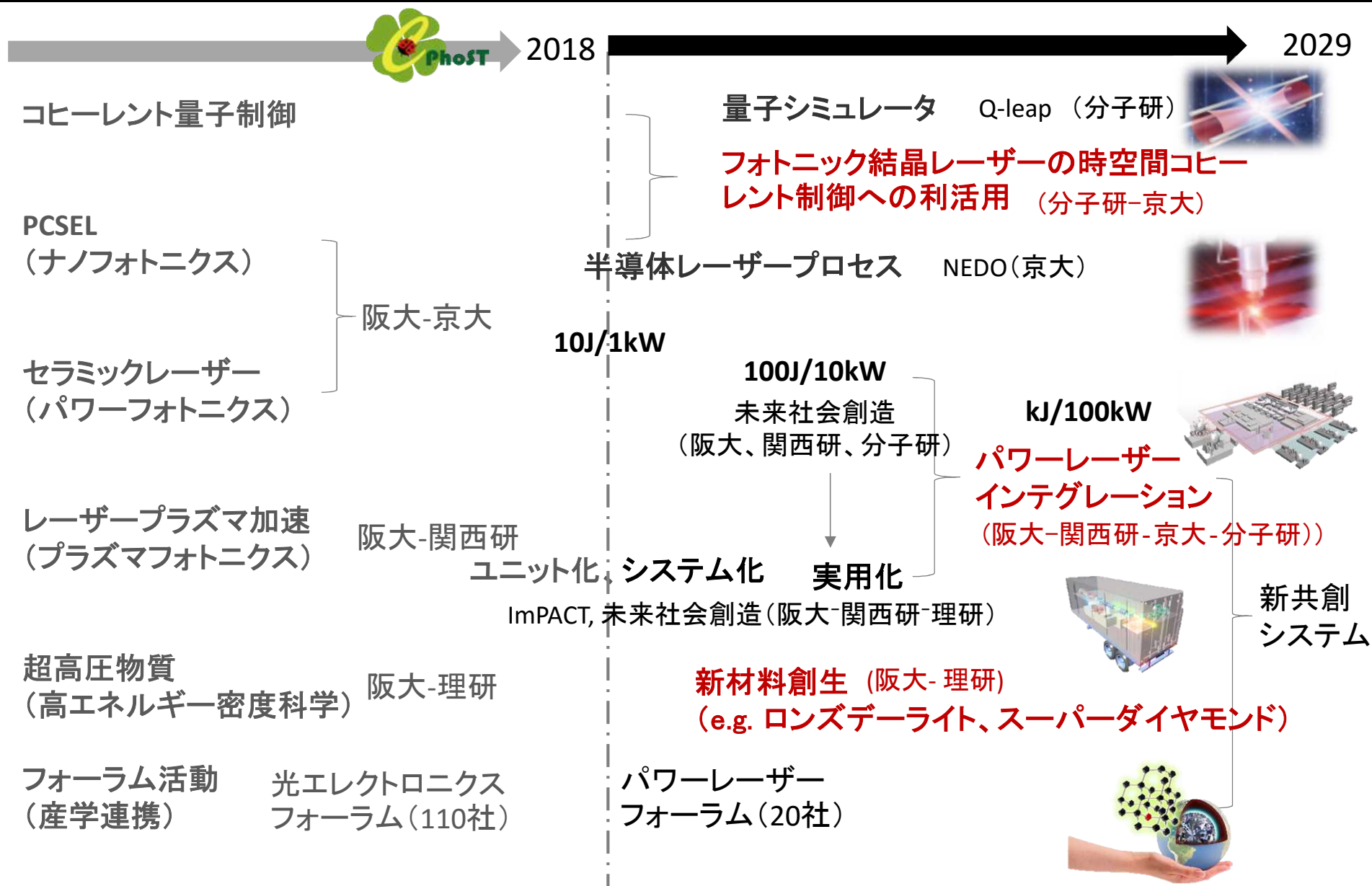
拠点の強みを生かした応用

- ・コヒーレント量子制御 (分子研、QST関西研)
- ・高エネルギー密度制御 (大阪大学)

## ③ 人材育成

- ・ 光科学全般(トリニティブプログラム、産学連携)に関する人材育成(大阪大学)
- ・ 先進光源システムに関する人材育成(日本原子力研究開発機構)
- ・ 光デバイスに関する人材育成(京都大学)
- ・ 光と原子分子の相互作用に関する人材育成(自然科学研究機構)
- ・ **拠点連携**
  - ・ 機関連携により効率的な講師相互派遣
  - ・ サマースクール等の合同企画
  - ・ 若手研究者が企画する研究会の連携したサポート

# 今後の展望：今後の研究開発の方向性と予想される成果例



# 展望：構築したネットワーク研究拠点の今後



- ◆ 研究の今後：  
地域（関東・関西）の拠点から、オールジャパン体制による分野の拠点に発展

光拠点



国際競争力ある分野の拠点へ

量子制御工学  
レーザー加速  
フォトニック結晶

Q-leap  
ImPACT、未来社会創造事業  
NEDO

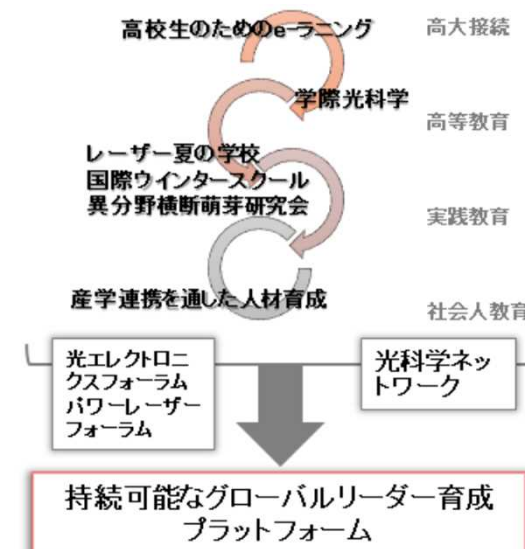
↑ 予算化されている

高エネルギー密度科学

日米協力、国際連携、SCJマスタープラン

## ◆ 人材育成の今後：

- 機関が有するレーザーに関する光材料、デバイス、システム開発ならびに応用の研究開発サイクルや、国際連携・産学連携による共同研究を活用したグローバル人材育成を継続する。
- 企業に就職した人材が光エレクトロニクスフォーラムに参画し、研究機関の人材育成およびキャリアパスに大きく関わるといった流れを継続する。
- 持続可能な自立したグローバルリーダー育成プラットフォームを学内外研究所・研究科連携組織を活用して構築する。
- 新たにパワーレーザーフォーラムを設立し（H30.11.1）、研究開発と共に人材育成での産学連携強化を推進する。



# 参考資料

1. 拠点ファクトデータ(代表的な論文)
2. その他の代表的な成果(各機関)



# 拠点達成度:ファクトデータ



## 国立大学法人大阪大学

論文数:344編

Science Advan. 3, (2017) 1602705 B. Albertazzi et al など

発表数:1171件

若手参画数:19人(180人)

8名が国内外の大学・研究機関の常勤・テニユアへ

若手論文数:126編

Nature Physics 6, (2010) 1010 M. Nakatsutsumi et al など

## 国立大学法人京都大学

論文数:298編

Nature 498 (2013) 470 Y. Takahashi et al など

発表数:601件

若手参画数:14人(169人)

3名が国内大学の常勤・テニユアへ

若手論文数:112編

Optical Express 25, (2017) 6104 M.Nishimoto et al. など

## 大学共同利用機関法人自然科学研究機構

論文数:131編

Nature Physics 7 (2011) 383, H. Goto et al. など

発表数:654件

若手参画数:29人

10名が上位の職位に昇進

若手論文数:76編

Nature Commun. 7 (2016) 13449, N. Takei et al. など

## 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

論文数:76編

Opt. Express 23, (2015)15057 Y. Ochi et al. など

発表数:311件

若手参画数:28人

5名が大学、1名が JAEA (現QST) の常勤研究員へ

若手論文数:44編

Physical Review A 95, (2017) 063404 M. Nakano et al など



1. **Nature Communication. 10 (2018) 280, 10, (2016) 723**

“Self-generated surface magnetic fields inhibit laser-driven sheath acceleration of high-energy protons” M Nakatsutsumi et al.  
**概要:** 超高強度レーザーを自主開発したプラズマ集光鏡で極限的に小さくし集光強度を上げることでより高エネルギーのプロトン加速を試みた結果、自己生成磁場により高エネルギー下に制限がかかることが実験で初めてわかった。

**アウトカム:** レーザープラズマ加速イオンの生成におけるスケージングの物理的詳細が理解できたことで、医療応用、中性子発生とそれによる非破壊検査などへ指針を与えるものである。

2. **Nature Photonics, 10, (2016) 723**

“Promotion of protein crystal growth by actively switching crystal growth mode via femtosecond laser ablation” Y Tominaga et al.  
**概要:** 溶液内で成長しているタンパク質単結晶の表面にフェムト秒レーザーで加工痕を作り、結晶成長モードで最も理想的なスパイラル成長への転換を行い、結晶が大型・高品質化することを世界で初めて実証した。

**アウトカム:** 創薬分野の課題の1つであるタンパク質単結晶の大型化にブレイクスルーをもたらす新技術であり、結晶を一部破壊することで理想的な結晶成長が実現するという逆転の発想が当該学術分野に大きなインパクトを与えた。

3. **PNAS 113 (2016) 7745**

“Dynamic X-ray diffraction observation of shocked solid iron up to 170 Gpa” A. Denoeud et al.

**概要:** パワーレーザーで地球の核に相当する超高圧状態を生成し、その場観測のための超高速X線回折イメージング法により、鉄原子配列の高速変化の様子を初めて観測することに成功した。

**アウトカム:** 惑星の内部の物性研究として新たな手法を提供できることが実証された。さらに極短時間の超高圧環境で、新物質や新構造などを実現させる「惑星深部環境を利用した物質・材料工場」のような応用が期待される。

4. **Optics Letters, (2015) 855-858**

“1-J operation of monolithic composite ceramics with Yb:YAG thin layers: multi-TRAM at 10-Hz repetition rate and prospects for 100-Hz operation,” M. Divoky et al.

**概要:** 光拠点事業で開発したセラミックの複合化技術を利用して独自に考案したTRAM型レーザー増幅器を開発しパルスエネルギー 1 J、繰り返し 100Hzの世界最高レベルのレーザー出力を小型装置(QUADRA-PR)で発生させることに成功した。

**アウトカム:** TRAM型増幅器は熱耐力とパワースケーリングに特に優れており、高パルスエネルギーと繰り返し動作を両立するパワーレーザーが実現できる。これによりパワーレーザーの基礎科学から医療、産業応用として実用化することが期待できる。

5. **Phys. Rev. Lett. 107, (2011) 265003**

“Tunable Radiation Source by Coupling Laser-Plasma-Generated Electrons to a Periodic Structure” Z Jin et al.

**概要:** パワーレーザーにより加速された電子ビームと周期構造持つ金属のカップリングにより発生したスミス・パーセル放射の実験的観測に初めて成功した。

**アウトカム:** パワーレーザーによる高エネルギー電子を利用した準単色・波長可変の高輝度テラヘルツ源の可能性を示す成果であり、実現できれば、小型で超高輝度かつ可変のテラヘルツ源となり基礎科学から産業にインパクトを与える成果である。

## 1. Nature Materials, On-line, Dec. 17 (On-line 2018)

“Double-lattice photonic-crystal resonators enabling high-brightness semiconductor lasers with symmetric narrow-divergence beams”,  
M. Yoshida, S. Noda, et al.

**概要:** 下記2の論文の成果をさらに発展させ、独自の「2重格子フォトニック結晶」により、単一レーザーとして10W級の高出力でありながら、ビーム拡がり角が極めて狭く( $<0.3^\circ$ )、極めて高いビーム品質( $M^2 \sim 2$ )を世界で初めて達成した。

**アウトカム:** 来るべき超スマート社会Society5.0におけるスマートモビリティやスマート製造の核となる高度センシングや光加工用、高輝度光源としての適応可能性が、実証されたことを意味しており、その意義は極めて大きいと言える。

## 2. Nature Photonics 8 (2014) pp. 406–411

“Watt-class high-power, high-beam-quality photonic-crystal lasers”, K. Hirose, S. Noda, et al.

**概要:** フォトニック結晶共振器として、格子点が直角三角形という非対称フォトニック結晶により、 $200\mu\text{m}$ 角のビーム出射面積でも、単一縦横モード発振を実現し、高ビーム品質ワットクラス発振を実現したもの。

**アウトカム:** 高ビーム品質ワット級動作の実現は、ものづくり日本を支える光製造への応用に向けた重要な成果である。波長変換、光励起、バイオ、分析等の分野へも応用の裾野が広がる成果である。

## 3. Nature Materials, 13, (2014) pp. 928–931

“Realization of dynamic thermal emission control”, T. Inoue, S. Noda, et al.

**概要:** 物体と光の相互作用を電気的に変化させることにより、熱輻射を超高速に制御するという全く新しい概念を見出した。その結果、物体からの熱輻射のオン・オフ時間が、従来の6,000倍以上も高速に出来るようになった。

**アウトカム:** 熱輻射のもつ「幅広過ぎるスペクトル」および「オン・オフに時間がかかりすぎる」という二つの課題を同時に克服することに、世界で初めて成功した特筆すべき論文と言える。

## 4. Nature, 498, (2013) pp. 470–474

“A micrometre-scale Raman silicon laser with a microwatt threshold”, Y. Takahashi, S. Noda, et al.

**概要:** 独自のフォトニック・ダブルヘテロ構造を用いて、ラマン励起光およびラマン散乱光を同時に極微小領域に、強く、かつ長く閉じ込めることに成功し、その結果、室温で、マイクロワットレベルの励起電力で、レーザー発振に成功した。

**アウトカム:** 発光に適さないシリコンを用いて、極微小レーザー動作を、世界で初めて実現した特筆すべき論文と言える。

## 5. Nature Photonics, 7, (2013) pp. 133–137

“Realization of three-dimensional guiding of photons in photonic crystals”, K. Ishizaki, S. Noda, et al.

**概要:** 3次元フォトニック結晶構造を活用し、その内部に光の通り道となる人為的な欠陥構造の導入のための設計・計算・作製・評価を行った結果を報告している。

**アウトカム:** 3次元的な光の曲げ伸ばしをフォトニック結晶を用いて初めて実現することに成功したもので、将来の3次元光チップ実現の道を開いた特筆すべき論文と言える。

## 1. Nature Phys., 7, (2011) 383

“Strong-laser-induced quantum interference” H Goto et al.

**概要:** 世界最速レベルのスパコンの1クロックの1000倍以上速い超高速演算を可能にする「分子コンピュータ」(下記4番参照)の内部の情報を量子干渉を使って書き換える新しい光・量子技術の開発に成功した。

**アウトカム:** 分子コンピュータの汎用性に結びつく重要な基盤技術の開発である。独フンボルト賞・松尾財団宅間宏記念学術賞・文部科学大臣表彰など権威ある受賞に結びついた。

## 2. Nature Commun., 7, (2016) 13449

“Direct observation of ultrafast many-body electron dynamics in an ultracold Rydberg gas” N Takei et al.

**概要:** ほぼ絶対零度まで冷やした極低温のルビジウム原子集団の電子波動関数をアト秒(アト= $10^{-18}$ )精度で超高速コヒーレント制御することによって世界最速の量子シミュレータを開発することに成功した。

**アウトカム:** 「超高速化学」と「極低温物理」の手法を融合させた世界初の試みであり、固体物理・材料科学など様々な分野への波及効果が期待される。松尾財団宅間宏記念学術賞・文部科学大臣表彰など権威ある受賞に結びついた。

## 3. Nature Commun., 4, (2013) 2801

“All-optical control and visualization of ultrafast two-dimensional atomic motions in a single crystal of bismuth”

H Katsuki et al.

**概要:** 固体中の原子の2次元運動を100フェムト秒単位で制御・画像化する新しい光・量子技術の開発に成功した。

**アウトカム:** 革新的な光デバイスの開発につながる汎用的な基盤技術として、また固体の物理的な機能性を探求するための新たな手段として期待される。松尾財団宅間宏記念学術賞・文部科学大臣表彰など権威ある受賞に結びついた。

## 4. Phys. Rev. Lett., 104, (2010) 180501

“Ultrafast Fourier transform with a femtosecond-laser-driven molecule” K Hosaka et al.

**概要:** 分子の振動波動関数をアト秒(アト= $10^{-18}$ )精度で超高速コヒーレント制御することによって僅か145フェムト秒(フェムト= $10^{-15}$ )でフーリエ変換を実行する「分子コンピュータ」の開発に成功した。

**アウトカム:** 世界最速スパコンの1クロックの1000倍以上速い超高速演算の実行によって分子1個がコンピュータとなり得ることを実証した。独フンボルト賞・松尾財団宅間宏記念学術賞・文部科学大臣表彰など権威ある受賞に結びついた。

## 5. Phys. Rev. Lett., 102, (2009) 103602

“Actively tailored spatiotemporal images of quantum interference on the picometer and femtosecond scales”

H Katsuki et al.

**概要:** 「分子の中を動き回る二つの原子の波の衝突と干渉」を、アト秒(アト= $10^{-18}$ )・ピコメートル(ピコ= $10^{-12}$ )という極限的な時空間精度で超高速コヒーレント制御し可視化する新しい光・量子技術の開発に成功した。

**アウトカム:** 量子の波の干渉をリアルタイムに観測する「量子干渉実験の新たな方法論」を開拓した。独フンボルト賞・米国物理学会フェロー表彰・松尾財団宅間宏記念学術賞・文部科学大臣表彰など権威ある受賞に結びついた。

1. Opt. Lett. 39, (2014) 5439

“Contact grating device with Fabry–Perot resonator for effective terahertz light” M Tsubouchi et al.

**概要:**従来の高強度テラヘルツ光発生法で問題であった装置の大型化と空間不均一性を解決するために、多層膜技術を用いて小型チップ状テラヘルツ光発生デバイスを開発した。

**アウトカム:**複雑な光学配置を使わず、回転カスケード励起法による同位体分離に要求される高強度テラヘルツパルスを発生できるデバイスを実現

2. Opt. Express 23, (2015) 15057

“Yb:YAG thin-disk chirped pulse amplification laser system for intense terahertz pulse generation” Y Ochi et al.

**概要:**繰り返し1キロヘルツのピコ秒はYb:YAG薄ディスク増幅器を開発した。再生増幅器の出力はパルス当たり10 mJを超え、パルス幅は1.3ピコ秒である。このレーザーをポンプ源として4  $\mu$ mのテラヘルツパルスを発生した。

**アウトカム:**同位体分離に利用する高強度テラヘルツパルスに必要な高出力ドライバーレーザーを開発

3. Opt. Express 20, (2012) 28500

“Development of high efficiency etalons with an optical shutter for terahertz laser pulses” M Tsubouchi et al.

**概要:**シリコン板で構成したキャビティ内にテラヘルツパルスを導入後、紫外光照射によりシリコン板をプラズマミラー化してテラヘルツをトラップし、テラヘルツパルス列の形成効率を劇的に上昇させることに成功した。

**アウトカム:**回転カスケード励起法による同位体分離に要求されるテラヘルツパルス列の発生法を開発

4. Opt. Express 23, (2015) 10914

“Frequency-resolved optical gating for characterization of VUV pulses using ultrafast plasma mirror switching” R Itakura et al.

**概要:**極短パルスレーザーを固体表面に集光して生成したプラズマを超高速光スイッチとして真空紫外領域の短波長パルスの波形計測法を開発した。この方法は超高速プラズマ診断法としても利用できる。

**アウトカム:**X線自由電子レーザーに利用できる先進プローブ技術として、真空紫外領域の独自の超高速計測法を開発

5. Phys. Rev. A 91, (2015) 063416

“Isotope-selective ionization utilizing field-free alignment of isotopologues with a train of femtosecond laser pulses” H Akagi et al.

**概要:**2種のN<sub>2</sub>同位体分子の混合ガスに対し、フェムト秒レーザーパルス列を時間間隔を微調整して照射し、回転励起が同位体選択的に起こせることを実証し、さらにイオン化による同位体選択を実現した。

**アウトカム:**既存のレーザー光源による非線形励起を用いて、回転カスケード励起による同位体選択イオン化を実証



## 高エネルギー密度制御

- 極限物質構造の可視化と制御
- 大型セラミックレーザーの開発
- プラズマデフォニックバイスの開発

イノベーション: 新物質材料創生、プロセスなど  
新学術の開拓: 宇宙の謎、物質崩壊・破壊の謎など

## ナノ制御



- フォトニック結晶による光制御
- 高輝度半導体レーザーの開発
- PCELの応用展開

イノベーション: レーザープロセスなど  
新学術の開拓: 光の謎、物質の謎など

## 連携成果



## コヒーレント量子制御

- 波動関数の可視化と制御
- 原子・分子の可視化と制御
- 深紫外-中赤外領域超短パルス光源開発

イノベーション: 量子シミュレーターなど  
新学術の開拓: 物質・分子の謎の解明など

## 量子制御



- 原子・分子の可視化と制御
- kHzセラミックパワーレーザー開発
- 高輝度THz光源

イノベーション: 放射性廃棄物処理など  
新学術の開拓: 分子の謎、物質崩壊・破壊の謎など



# 先進パワーレーザーシステム化のための要素技術開発

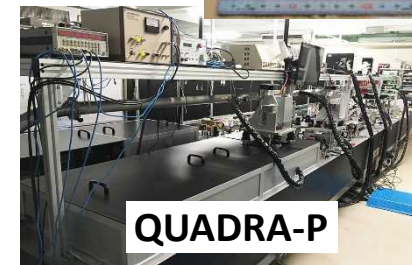


- ◆ **概要:** 高品質レーザーセラミックスの製造技術とその接合(コンポジット)技術を新規に確立し独自のレーザー増幅器を開発して世界最高レベルのパルスパワーレーザーを開発した。
- ◆ **意義:** 次世代高繰り返しパワーレーザーに関する要素技術開発を行い、レーザー加工、加速、新物創成、宇宙デブリ除去など様々な応用に展開できる国際競争力ある100J-kJ/100Hzレーザーの開発指針をたてることのできるようになった。

## ◆ 成果:

- 従来の固相法に替えて、新しく液相合成法による光散乱の少ない高品質セラミックス製造法を確立した。
- 従来の拡散接合に比べて格段に容易な常温接合技術を開発し、複雑な形状のコンポジット増幅素子を可能にした。
- 開発したコンポジット技術を利用して、1J/100Hzのパルスパワーレーザー(QUADRA-P)を実現した。
- PCSEL(フォトニック結晶)励起固体レーザーを世界で初めて開発しQUADRA-Pの前増幅部に導入した(阪大-京大連携)。

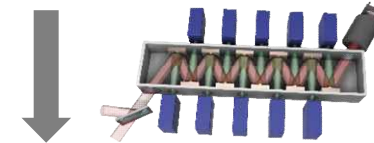
コンポジットセラミックス



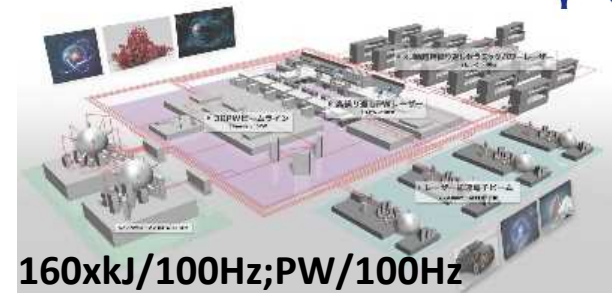
QUADRA-P

## ◆ アウトカム:

- 本事業で開発した技術をもとに新たな増幅法(アクティブミラー)により10J/100Hzのレーザーをほぼ実現でき、次世代パワーレーザー(100J-kJ/100Hz/10kW-100kW)の開発指針につながった。
- 高平均出力パワーレーザーの実現性をもとに、産業界との連携を見据えたパワーレーザーフォーラム設立(H 30 11)につながった。



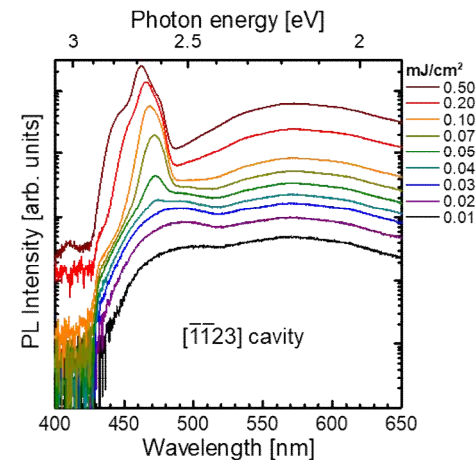
次世代パワーレーザーシステム: J-EPoCH



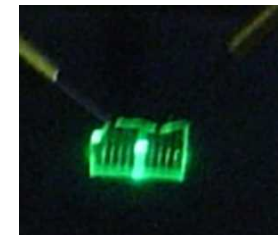
160xkJ/100Hz;PW/100Hz

- ◆ **概要**: 高品位高輝度光源の波長域拡大・高性能化を担う次世代・基盤技術として、独自に見出した半極性面(11-22) GaN基板上への $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$ 量子井戸 (MQW) 発光層の内部量子効率の向上を図った。
- ◆ **意義**: 独自 (ピエゾ分極を抑制) の半極性面(11-22)GaN基板上でのデバイス構造を提案し、その基盤技術の確立により、紫外～緑色領域の高品質光源実現への道を拓いた。
- ◆ **成果**: 新奇半極性面上に弾性歪限界内で緑色LD多層構造を成長する指針・手法確立 [Kawakami, Funato, *JAP* 112, 033513]

p-GaN (100 nm)
p- $\text{Al}_{0.025}\text{Ga}_{0.975}\text{N}$ clad (220 nm)
p-GaN WG (300 nm)
p-InGaN WG (avg. 2%, 65 nm)
InGaN QW (4.5 nm)
n-InGaN WG (avg. 2%, 70 nm)
n-GaN WG (20 nm)
n- $\text{Al}_{0.025}\text{Ga}_{0.975}\text{N}$ clad (330 nm)
n-GaN (2 $\mu\text{m}$ )
(11 $\bar{2}$ 2) GaN substrate



半極性面での青色472nm  
光励起誘導放出動作の実現



半極性面上の緑色535 nm  
成長技術の確立

- ◆ **アウトカム**: 紫外～緑色域の高輝度・高品質光源への道を拓いた。  
事業展開をも見据えた研究開発事業として、NEDO「次々世代加工に向けた新規光源・要素技術開発」において「フォトリソ結晶レーザーの短パルス化・短波長化」(H28-H32)がスタートした。

- ◆ **概要:** 電子や原子の量子的な波(波動関数)の干渉をアト秒・ピコメートルの極限精度でレーザー制御する世界最高水準の「コヒーレント制御」技術を確立した。
- ◆ **意義:** コヒーレント制御は量子情報処理や特定の化学結合を選択的に操作する反応制御などの超先端技術に繋がる「第2次量子革命」の基盤技術として大きく期待されている。
- ◆ **成果:**
  - ・ 分子内の原子波の干渉をアト秒・ピコメートル精度で制御・可視化。
  - ・ 分子内の波動関数を使って145フェムト秒でフーリエ変換を実行する「分子コンピュータ」を実現。
  - ・ 固体中の原子の2次元運動を100 フェムト秒単位で制御・画像化。
  - ・ 極低温ルビジウム原子集団を用いて60万粒子の量子多体問題を1ナノ秒でシミュレートする超高速量子シミュレータを開発 → 図1。これら一連の成果は、米国物理学会フェロー表彰・独フンボルト賞・松尾財団宅間宏記念学術賞・文部科学大臣表彰など数々の権威ある受賞に結びついた。

- ★ Nature Commun. 7 (2016) 13449, N. Takei et al.
- ★ Nature Commun. 4 (2013) 2801, H. Katsuki et al.
- ★ Nature Physics 7 (2011) 383, H. Goto et al.
- ★ Phys. Rev. Lett. 104 (2010) 180501, K. Hosaka et al.
- ★ Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 103602, H. Katsuki et al.

- ◆ **アウトカム:**
  - ・ 量子力学の基礎的な検証・情報工学・固体物理・量子シミュレータ等の様々な科学技術分野へ波及効果をもたらし、我が国の光科学技術のポテンシャルを大きく高めた。
  - ・ 物質の波の性質を活用した「量子科学技術」の開発を通じて「第2次量子革命」への貢献が期待される。

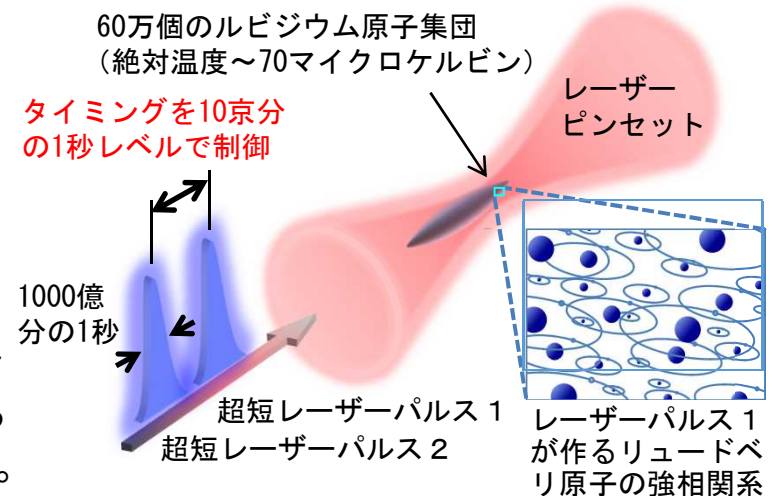
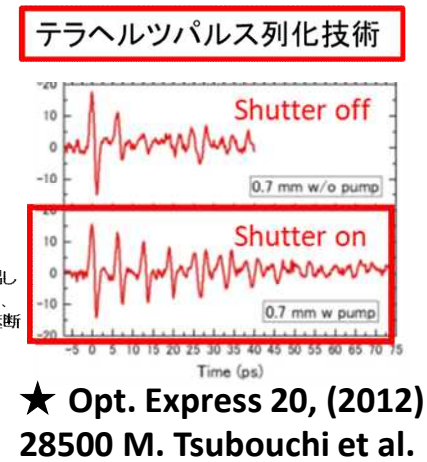
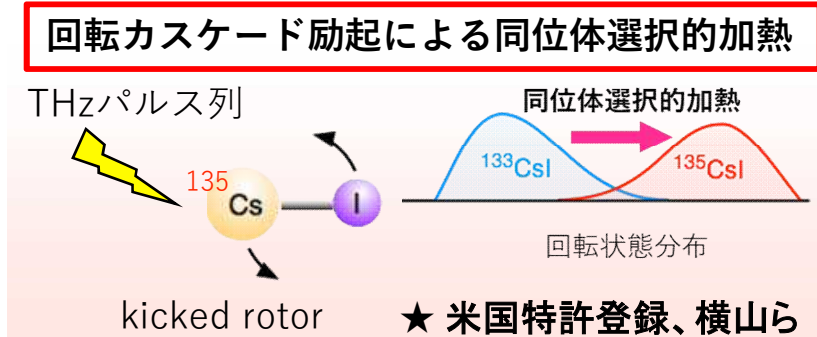
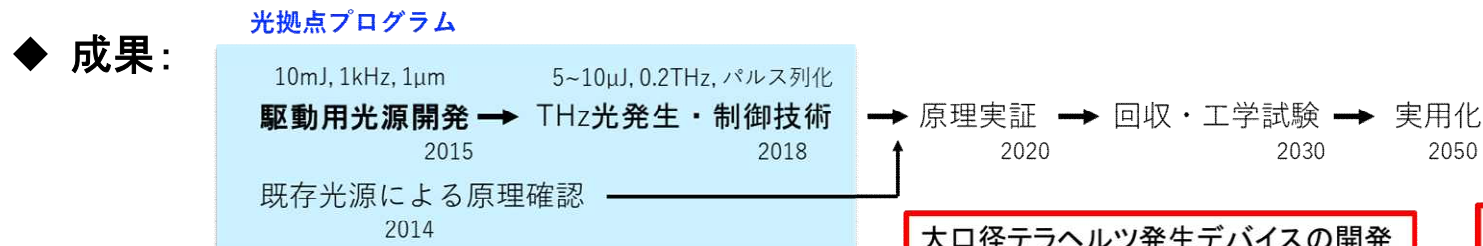


図1. 超高速量子シミュレータの概要



- ◆ **概要**: 高効率なレーザー同位体分離に向けて、高出力ピコ秒レーザーおよびテラヘルツパルス列発生装置を開発し、分子の回転量子制御技術による同位体分離の応用を目指す。
- ◆ **意義**: 分子の回転量子制御による同位体選別につながる可能性ある革新的技術であり、核燃料サイクルにおける放射性廃棄物の低減など社会への貢献が期待できる。



- 高出力ピコ秒レーザー、高効率テラヘルツ発生、テラヘルツパルス列など必要とされる要素技術を実現。レーザーによる回転コヒーレンスを用いた同位体選択イオン化も実現。分子回転制御については、分子研との密接な連携のもと実施。

- ◆ **アウトカム**:
  - 今後の展望

光源要素技術を高強度化し、テラヘルツパルスによる回転カスケード励起の原理実証へ

10年間、ご支援いただきまして  
ありがとうございました。

