



ImPACT PROGRAM

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

Ubiquitous Power Laser for Achieving a Safe, Secure and Longevity Society

最終シンポジウム

2019年2月18日

大崎ブライトコアホール

ご挨拶

総合科学技術・イノベーション会議（CSTI）が主導する ImPACT 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」では、レーザー電子加速により X 線自由電子レーザー（XFEL）を超小型化する技術や大型の高出力パルスレーザーを手のひらサイズに超小型化する技術を開発し、新しい応用に供することにより、新技術・新産業の創出を目指して参りました。

レーザー電子加速におきましては、理化学研究所放射光科学研究センター内に電子加速専用のレーザー装置を開発・導入し、放射光発生用のアンジュレーターや最新の計測システムを備えた実験プラットフォームとして整備を完了いたしました。そこでは電子ビームの発生と加速部分をモジュール化し、電子の高エネルギー化を容易に達成することができる多段加速の技術開発に取り組んで参りました。その結果、モジュール毎にレーザー条件を最適化することによって多段加速を実証し、世界トップクラスの加速利得を得ることに成功しました。また、電子ビームを極短周期の超小型アンジュレーターに入射させることで、放射光の発生を確認しております。

超小型パワーレーザーにおきましては、レーザー媒質と冷却基板の常温接合技術を開発し、世界最高出力密度のサブナノ秒パルスレーザーの開発に成功しました。また、それらの技術をメーカー3社に移転しレーザーの製品化開発を推進した結果、皆様のお手元へ製品を順次お届けする体制が整いました。一方、レーザー開発と並行してレーザーの有用性を実証するための応用システム開発を推進するとともに、ImPACT 終了後も開発したレーザーを気軽にお試しいただけるレーザー試用プラットフォームを浜松工業技術支援センターに開設いたしました。

今回の最終シンポジウムでは、この5年間の開発成果を身近に実感いただけるよう、講演に留まらず可能な限りの展示・デモを準備いたしました。レーザー電子加速やレーザーの超小型とその応用は今後ますます発展していく分野です。皆様からのご意見を頂戴することにより、海外を凌駕するレーザー技術確立し、応用ならびに産業へと展開して参ります。本日はシンポジウムへのご参加、誠にありがとうございます。



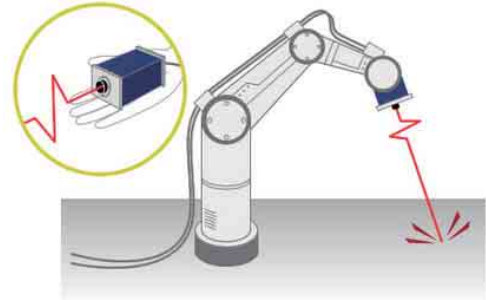
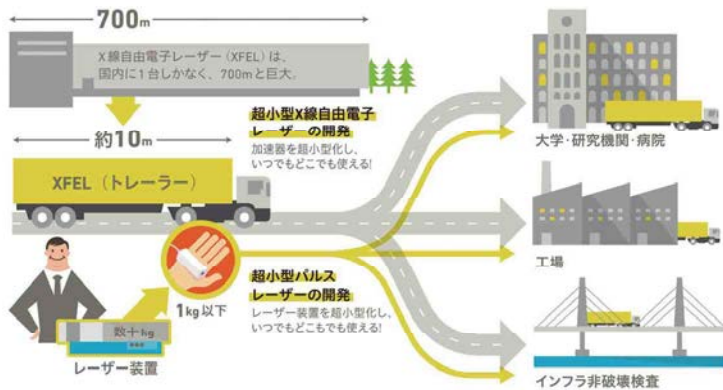
革新的研究開発推進プログラム（ImPACT）
プログラム・マネージャー 佐野 雄二

目 次

プログラムの目的	3
プログラムの構成	4
開発体制	5
開発成果	6
(1) レーザー電子加速開発・評価	
レーザー加速プラットフォームの開発	7
レーザー加速要素技術の開発	8
一体型マイクロアンジュレータの開発	14
ビーム・プラズマ計測技術の開発	17
電子ビーム・X線の評価応用技術開発	22
(2) 超小型パワーレーザー開発と応用	
超小型パワーレーザー開発	25
超小型パワーレーザー 試用プラットフォーム開発	30
超小型パワーレーザー 製品化開発	31
超小型パワーレーザー システム化開発	34
セキュリティ応用開発	38
超小型パワーレーザー アイディア応用開発	39

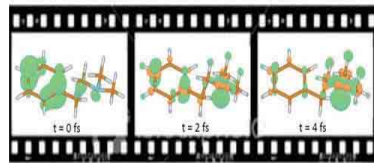
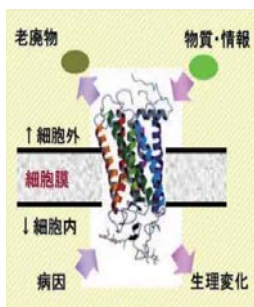
プログラムの目的

**レーザーを超小型化し
いつでもどこでも誰でも使えるように“ユビキタス化”**



XFELにより、1分子の動的イメージングが可能

パワーレーザーでインフラ保守や製造の革新が可能



www.aerospace-technology.com



■X線自由電子レーザー (XFEL)

原子レベルの構造をフェムト秒の時間分解能で観ることが可能。創薬（膜たんぱく質の構造解析）や触媒（化学反応時のダイナミクス）等、多くの研究開発分野で有用な最先端の研究開発基盤

世界に2つしかないため、利用機会・ユーザーが限られている

■パワーレーザー

高出力のパルスレーザーは、材料の加工・材質改善や曲面形成への応用が可能。構造物の寿命延長や製造工期の短縮、3Dプリンタのような新たな加工・成形技術への展開、計測技術の革新、医療への応用等が可能

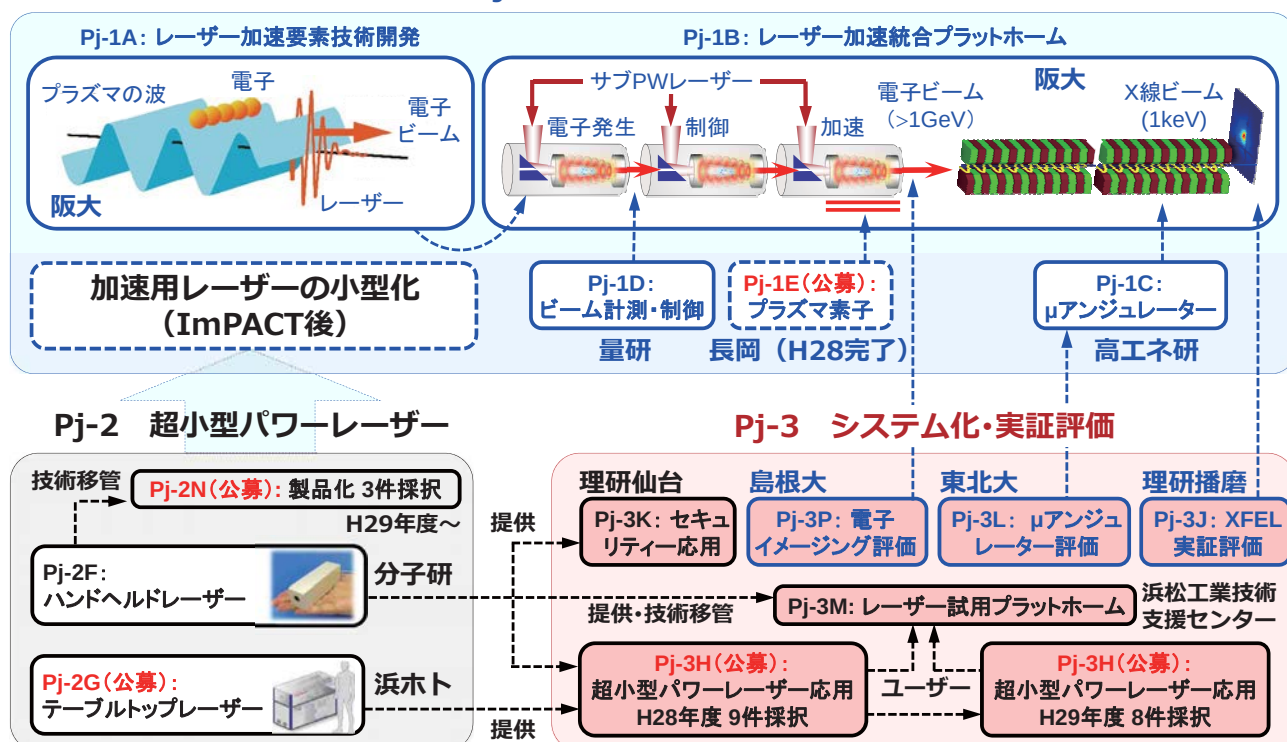
サイズが大きく、高コスト。装置や主要部品の海外依存率が高い

研究開発機関に配備できるサイズ・コストにし、研究開発・商品開発のLT短縮

国産技術/調達で超小型のレーザーを開発し、産業界へ展開。「こと」づくり立国を再建

プログラムの構成

Pj-1 レーザー加速XFEL



■レーザー加速XFEL開発

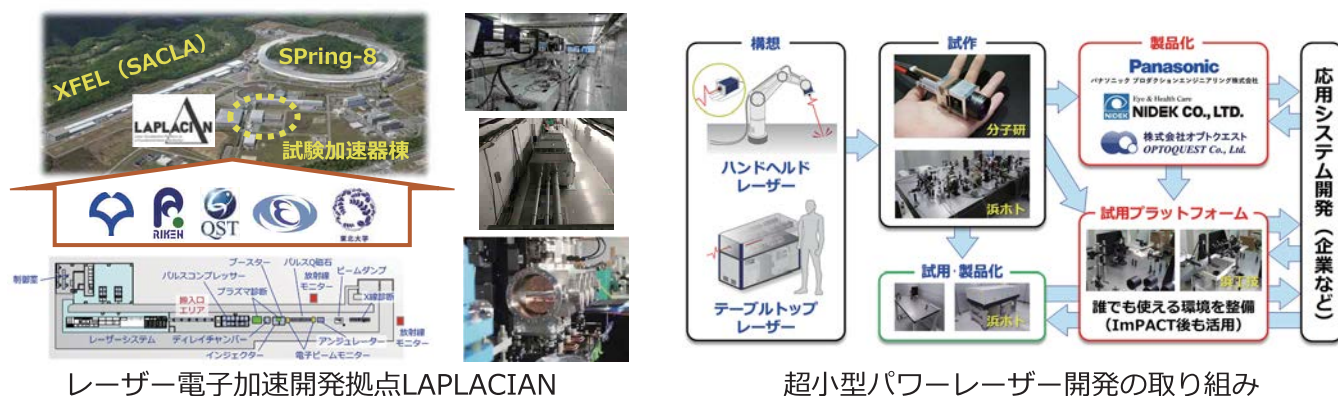
超小型XFELの実現に必要な基盤技術の確立を目指し、レーザー、プラズマ、加速器の専門家を集結。世界で最も安定なレーザー電子加速技術の開発と、オールジャパン体制で誰もが研究に参画できるオープンイノベーションな開発拠点「LAPLACIAN」を構築。

■超小型パワーレーザー開発

超小型パワーレーザーの開発から製品化までを推進。どこでも使えるように、持ち運びが可能で、屋外や工場などの現場でも利用できる環境にロバストな高出力のパルスレーザーを開発。

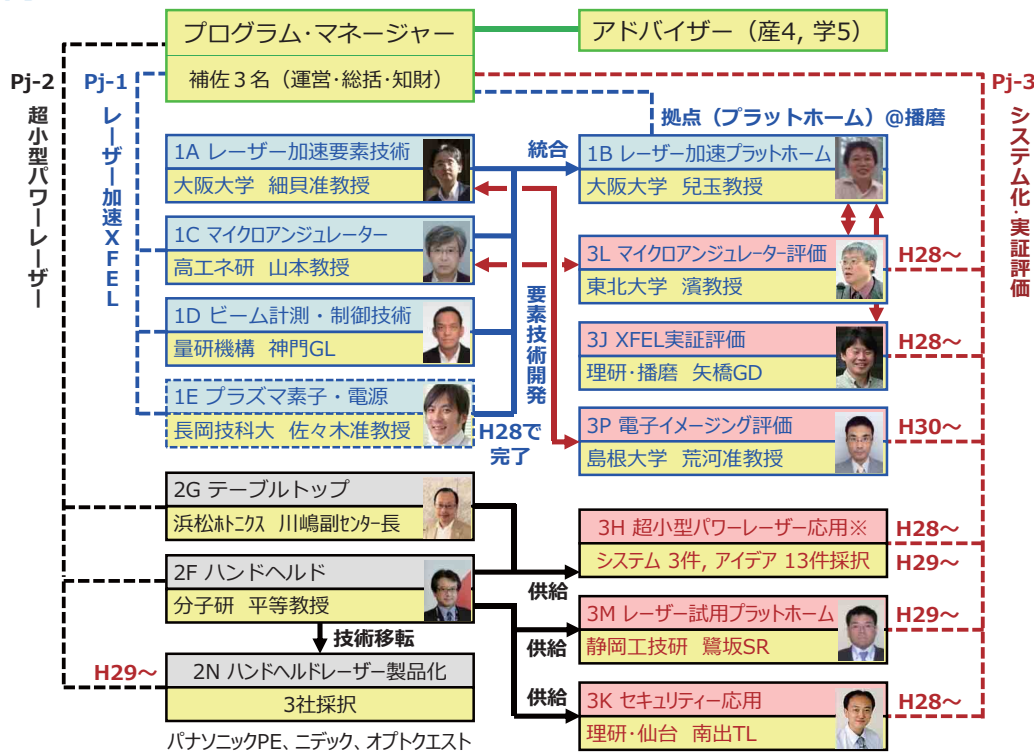
■システム化・実証評価

開発した技術・装置の応用システム化およびユーザーによる評価を実施。開発したレーザーをImPACT後もユーザーが利用できる場として「レーザー試用プラットフォーム」を公設試に開設。また、開発したレーザーを様々な市場へ展開させるための応用開発を実施。





開発体制



【PJ-3H】超小型パワーレーザー応用 アイディア (FS) 公募 採択一覧 (H28年度)

採択課題	機関・企業	研究開発責任者 (PI)
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	高原和弘
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	高橋一哲
航空機構造部材のレーザーピーニング技術の開発	沖縄工業高等専門学校	政木清孝
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	浅井知
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 IHI エアロスペース	松浦芳樹
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	高坪純治
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	崎野良比呂
ナノ秒 J (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	新納弘之
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	勝身俊之

【PJ-3H】超小型パワーレーザー応用 システム化・アイデア公募 採択一覧 (H29年度~)

採択課題	機関・企業	研究開発責任者 (PI)
システム化開発		
革新的スマート溶接システムの開発	大阪大学	浅井知
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	岡田直忠
超小型皮膚疾患用レーザー治療器の開発及び実証評価	株式会社ユニタック	高橋一哲
アイデア検証		
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	和氣弘明
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	佐野智一
装置組み込み可能な超小型深紫外レーザーユニットの開発	株式会社 T C K	小坂光二
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	菅育正
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 IHI エアロスペース	松浦芳樹

【PJ-2N】ハンドヘルドレーザー製品化 採択一覧 (H29年度~)

採択課題	機関・企業	研究開発責任者 (PI)
μ CHIP 及び、 μ CHIP 応用レーザーの製品化	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	永田毅
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製品化	株式会社ニデック	羽根淵昌明
スケ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	多久島裕一



開発成果

パネル番号	所属	研究開発責任者 (PI)	パネルタイトル	ページ数
レーザー電子加速開発・評価				
PJ-1B	大阪大学	兒玉 PI	レーザー加速統合プラットホームの開発	7
PJ-1A	大阪大学	細貝 PI	レーザー加速要素技術開発	8
PJ-1A-1			LWFA 電子ビーム入射器制御技術の開発	9
PJ-1A-2			放電型光導波路の開発	10
PJ-1A-3			ステージングレーザー追加速のためのプラズマレンズによる電子ビーム伝搬制御	11
PJ-1A-4			Staging Laser Wake-field Acceleration	12
PJ-1A-5			レーザー加速電子ビームの電子輸送システムの構築	13
PJ-1C	高エネルギー加速器研究機構	山本 PI	世界最短周期の一体型マイクロアンジュレータの開発	14
PJ-1C-1			極短周期アンジュレータ磁場生成の研究開発	15
PJ-1C-2			極短周期アンジュレータの評価試験	16
PJ-1D	量子科学技術研究開発機構	神門 PI	ビーム・プラズマを測る～安定な電子ビームのために～	17
PJ-1D-1			極短パルス光プローブによる加速場診断	18
PJ-1D-2			周波数領域のホログラフィーを用いた高速現象の取得～プラズマ波の干渉計測～	19
PJ-1D-3			Laser wakefield electron temporal diagnostics via single shot electro-optic sampling	20
PJ-1D-4			ベータトロン X 線用 Laue 型分光器の性能評価	21
PJ-3J	理化学研究所	矢橋 PI	レーザー駆動 X 線特性のシングルショット診断装置の開発	22
PJ-3L	東北大学	濱 PI	μ アンジュレータのビーム試験と機能を活かす応用開拓	23
PJ-3P	島根大学	荒河 PI	極限環境材料研究のためのレーザー加速電子によるイメージングシステムの最適化	24
超小型/パワーレーザー開発				
PJ-2F	分子科学研究所	平等 PI	手のひらサイズの 20mJ 超パワーレーザーの開発	25
PJ-2F-1			CW Operation in Distributed Face Cooling Chip	26
PJ-2F-2			Gain Aperture for Ubiquitous High Power Lasers	27
PJ-2F-3			100Hz 駆動 10PW/sr/cm ² 級マイクロ MOPA	28
PJ-2G	浜松ホトニクス (株)	川崎 PI	ジュール級 300Hz パワーレーザーの実用化・製品化	29
超小型/パワーレーザー 試用プラットフォーム開発				
PJ-3M	浜松工業技術支援センター	鷲坂 PI	マイクロチップレーザーを試せる「レーザー試用プラットフォーム」	30
超小型/パワーレーザー 製品化開発				
PJ-2N-1	パナソニック P.E. (株)	永田 PI	幅広い加工用途へのマッチングを目指したマイクロチップレーザー	31
PJ-2N-2	(株) ニデック	羽根淵 PI	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	32
PJ-2N-3	(株) オプトクエスト	多久島 PI	多様なニーズに応えるスケーラブルな高出力マイクロチップレーザーの開発	33
超小型/パワーレーザー システム化開発				
PJ-3H-1	大阪大学	浅井 PI	レーザー超音波による溶接中リアルタイム欠陥検知技術	34
PJ-3H-2	(株) ユニタック	高橋 PI	超小型皮膚疾患用レーザー治療器の開発及び実証評価	35
PJ-3H-2-1			マイクロチップ用超小型電源/ポータブル電源の開発	36
PJ-3H-3	(株) 東芝	岡田 PI	パルスレーザーによるリチウムイオン電池電解液の "そのまま" 除去・回収	37
セキュリティ応用開発				
PJ-3K	理化学研究所	南出 PI	パワーレーザーによる高出力 THz 波の発生・検出とセキュリティ応用	38
超小型/パワーレーザー アイディア応用開発				
PJ-3H-4	大阪大学	佐野 PI	パルスレーザー支援レーザー溶接法の開発	39
PJ-3H-5	(株) 菅製作所	菅 PI	光放出電子顕微鏡 (PEEM) への応用による性能向上	40
PJ-3H-6	(株) TCK	小坂 PI	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	41
PJ-3H-7	(株) IHI エアロスペース	松浦 PI	宇宙用エンジンのレーザー着火技術開発	42

レーザー加速統合プラットフォームの開発

大阪大学 児玉 了祐 (○末田敬一 *、大塚崇光 **)

(現所属 * 理研放射光科学研究センター, ** 宇都宮大)

概要

資金・人材で勝る海外勢に対抗するため、「レーザー」「プラズマ」「加速器」の分野統合を図り、オールジャパン体制でオープンイノベーションな開発拠点を構築する

レーザー加速統合プラットフォーム(LAPLACIAN)を構築

安定なGeV級電子ビームシステムを開発することで真に应用へ「使える」レーザー電子加速技術を確立する

安定な多段加速技術を実現可能なシステムの確立

実験プラットフォーム

<レーザーシステム>

- ・チャープパルス増幅によるTi:Sapphireレーザー加速の各ステージに合わせた独立した3本のビームライン。
- ・フロントエンド部の共通化による3ビーム間のジッター低減。
- ・独立した増幅器・圧縮器によりパルス幅等の最適化が可能。
- ・圧縮器の一体収納などの振動対策による高安定化。

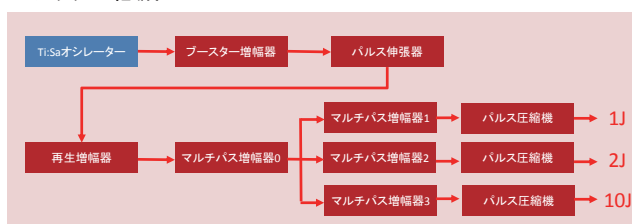


図2. プラットホームレーザーシステム

	BL1	BL2	BL3
パルス幅	25fs	50fs	100fs
エネルギー(圧縮後)	1J	2J	10J
繰り返し	10Hz	5Hz	0.1Hz
出力安定性	1.2%	1.2%	1.2%
ストレーラレシオ	0.9	0.9	0.9
ビームポインティング安定性	<5μrad	<5μrad	<5μrad
コントラスト	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²

図4. 各ビームラインの諸特性

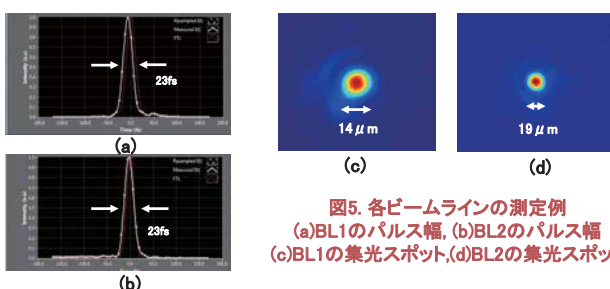


図5. 各ビームラインの測定例
(a) BL1のパルス幅、(b) BL2のパルス幅
(c) BL1の集光スポット、(d) BL2の集光スポット

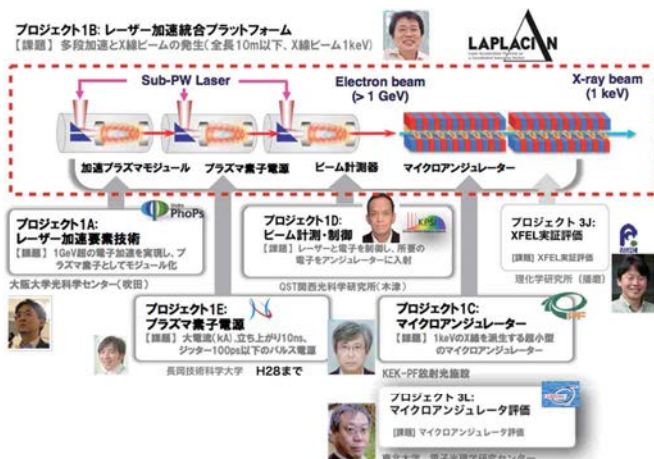


図1. レーザー加速統合プラットフォーム

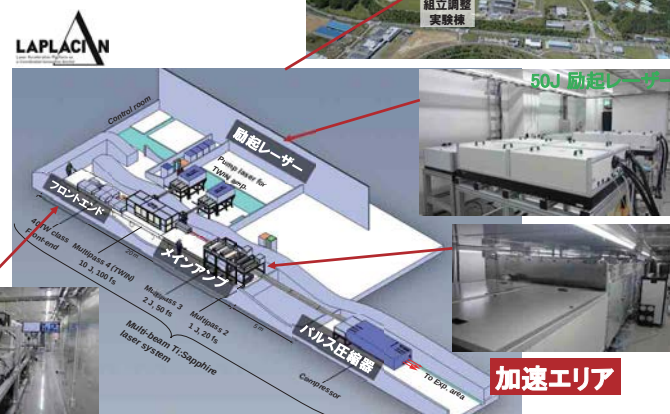
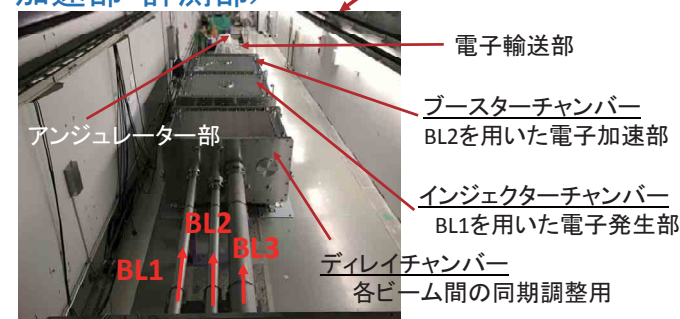


図3. レーザーシステムの概観
<電子加速部・計測部>



結論

レーザー加速統合プラットフォームLAPLACIANを理研播磨事業所内に整備した。今後はレーザー加速の研究開発拠点としてオールジャパン体制での研究開発を推進していく。

LWFA 電子ビーム入射器制御技術の開発

○酒井 泰雄¹, 谷沢 優介¹, 陳 博順¹, 金 展², 寺本 高啓¹,
末田 敬一², パサック ナビーン¹, 清野 英晃¹, 黄 開³, 大東 出³,
神門 正城³, アレクセイ ジドコフ¹, 兒玉 了祐^{1,4}, 細貝 知直^{1,2}

(1: 阪大工学研究科, 2: 理化学研究所, 3: 量研関西研, 4: 阪大レーザー研)

概要

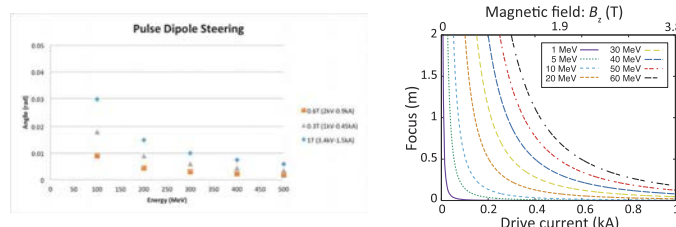
- ✓ 高強度パルスレーザーの安定性の向上とLWFAにおける電子ビーム加速媒体である標的の物理の理解によりLWFA電子ビームの安定性が向上
- ✓ 従来加速器工学にて用いられている電子ビーム光学系の利用が可能になってきた

LWFAの強みである“小型装置化”のためにパルスパワー技術を応用した小型ビーム光学系を構築

方法

大電力放電に基づく電子ビーム光学系の開発

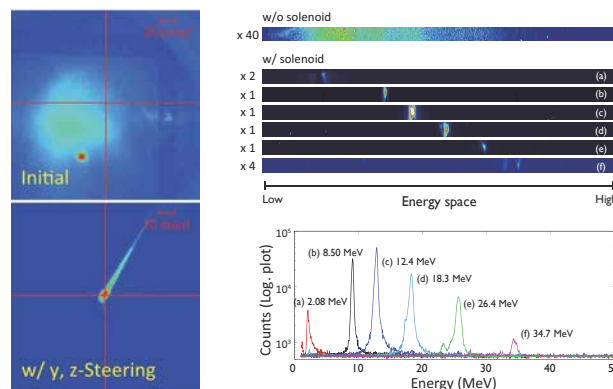
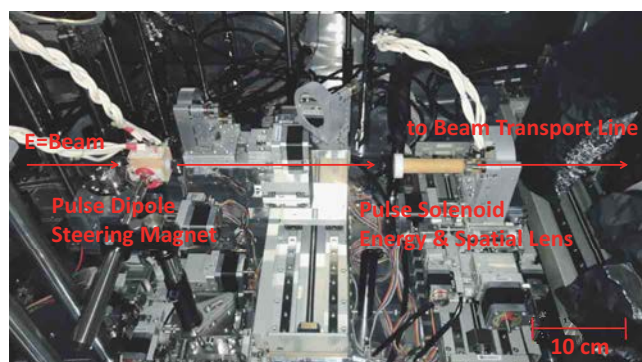
- ✓ MeV-GeV級電子ビーム制御にはテスラ級の電子ビーム光学素子が不可欠
- ✓ LWFA生成電子ビームの位置不安定性は数mrad
- ✓ パルスパワー技術を用いることで強磁場が励磁できる大電流(ピーク電流kA級)の小型装置が可能



(左): パルス駆動ダイポールステアリング,
および(右): エネルギー・実空間レンズの設計指針

パワー個体スイッチを利用した低ジッター・コンパクトな大電力装置を利用することで
サイズcm級の小型電子ビームステアラー, エネルギー空間及び空間のレンズを構築することが可能[1]

結果



(左): パルスステアリングとソレノイドレンズ
(中): 250MeV電子ビームのステアリング
(右): 1-100MeV級電子ビームのフォーカス

- ✓ 密度勾配型標的により発生されたサブGeV級電子ビームを20 mrad偏向し下流の電子輸送系[2]に伝送[3]
- ✓ 磁気レンズを併用した安定小型LWFA入射器を実証: 安定度mradビームをレンズ効果によりmrad以下に向上[1]

参考文献

- [1] Y. Sakai, et al., Physical Review Accelerators and Beams, 21 (2018) 10130
- [2] 詳細は本ポスターセッション寺本研究員資料
- [3] プラズマ核融合学会誌小特集 “電子加速器の小型化を目指したレーザー加速研究: X線自由電子レーザーへの挑戦” (2019年5月), 出版予定

放電型光導波路の開発

○酒井 泰雄¹, 陳 博順¹, 谷沢 優介¹, 金 展², 末田 敬一², 寺本 高啓¹,
 パサック ナビン¹, 清野 英晃¹, 黄 開³, 大東 出³, 小瀧 秀行³,
 神門 正城³, アレクセイ ジドコフ¹, 兒玉 了祐^{1,4}, 細貝 知直^{1,2}

(1: 阪大工学研究科, 2: 理化学研究所, 3: 量研関西研, 4: 阪大レーザー研)

概要

- ✓ レーザー航跡場加速では加速距離は集光するレーザーの回折限界であるレイリー長で制限
- ✓ 電子ビームのエネルギー利得は, プラズマ航跡場のなす電界強度と加速距離の積として決定[1]

航跡場の駆動源であるレーザーパルスを集光強度を保持させたまま長距離伝搬することで利得向上

方法

非破壊の光ファイバーをプラズマで形成!

- ✓ プラズマの屈折率: $N = \{1 - (\omega_p/\omega_L)^2\}$, ここで,
 $\omega_p = (n_e e^2 / m_e \epsilon_0)$ および ω_L はそれぞれプラズマ振動数と入射光の振動数
- ✓ プラズマ中では, プラズマ数密度 $n_p \sim$ プラズマ電子数密度 n_e
- ✓ レーザーパルスの伝搬方向に沿って $dn_p/dr > 0$ ($dn_e/dr > 0$) となるプラズマが用意できれば伝搬長を延長可能

1) Confinement: Magnetic pressure vs Thermal pressure

Bennett criterion:

$$“\mu_0 I^2 / (8\pi^2 (D_p/2)^2) > nkT”$$

2) Plasma diffusion vs Current rizing speed

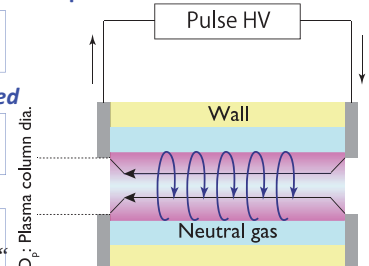
Bohm velocity:

$$“D_p(t) \sim (2k_b T_e / m_i)^{1/2} \times t”$$

3) Initial plasma resistivity vs Voltage

Spitzer resistivity:

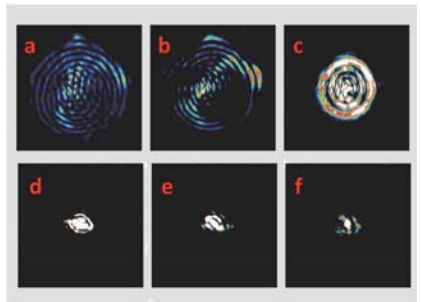
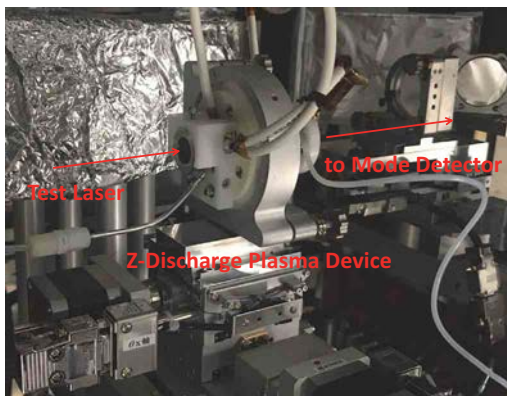
$$“\eta = 5.2 \times 10^{-3} \times (Z \ln(A)) / (T^{3/2}) \times L”$$



キャピラリー-Zピンチプラズマによる制御可能な導波路形成

半径方向に自己収縮するプラズマにより中空状のプラズマを生成 & 導波路形成

結果



- (左): キャピラリー-Zピンチプラズマ発生装置
 (中): 放電生成されたプラズマ
 (右): 導波された高強度レーザーパルスのモード

多段加速ブースターに要求される 10^{17} m^{-3} 領域の密度にて, Zピンチプラズマの安定生成を実現 [2]
 $10^{17} - 10^{18} \text{ w/cm}^2$ の高強度レーザーの光導波に成功。また, 導波モード特性はアクティブに制御可能 [2, 3]

参考文献

- [1] T. Hosokai, et al., Optics Letters, Vol. 25, No. 1, (2000)
 [2] 特願 2018-213150, 光導波路形成方法, 及び光導波路形成装置, 細貝知直, 酒井泰雄, 兒玉了祐
 [3] プラズマ核融合学会誌小特集 “電子加速器の小型化を目指したレーザー加速研究: X線自由電子レーザーへの挑戦” (2019年5月), 出版予定

ステージングレーザー追加速のための プラズマレンズによる電子ビーム伝搬制御

○中村浩隆¹、ALEXEI ZHIDKOV¹、細貝知直^{1,2}、兒玉了祐¹

(1: 大阪大学, 2: 理化学研究所)

概要

Budker-Bennett効果[1]を利用したプラズマレンズによる電子ビーム収束法を提案し、2次元 Particle-in-cell(PIC)シミュレーションによりその効果を明らかにした。数mmサイズのプラズマレンズでのビーム伝搬制御を利用することで、より小型で簡易な構造のレーザー加速システムを実現する可能性がある。

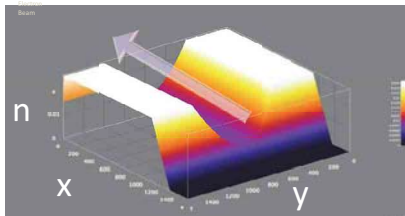
緒言

高効率ステージング追加速のためには電子ビームの発散を抑制し、その電荷密度を維持したまま伝搬させる必要がある。またレーザー加速システムの小型化のために、構造の簡易な収束法を実現する必要がある。ここでは数mm以下のサイズのプラズマレンズを用いた手法を提案した。

Budker-Bennett効果

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_r) = -4\pi e [N_B / \gamma_0 - \gamma_0 (N_i - N_e)] \left\{ \begin{array}{l} \bullet \text{ プラズマ密度効果} \\ \bullet \text{ 密度勾配効果} \\ \bullet \text{ チャンネル幅効果} \end{array} \right\}$$

方法 (2d- PIC simulation)



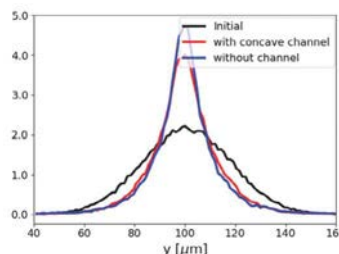
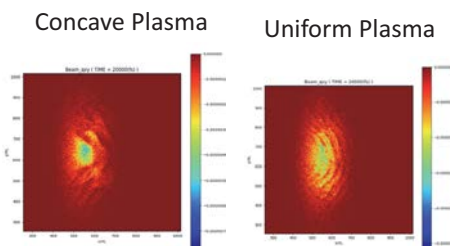
異なる分布、密度を持つプラズマ中の電子ビームの伝搬

- (1) Concave Plasma channel
- (2) Uniform Plasma

それぞれの分布での密度依存性を計算

- (a) 電子ビーム密度 > プラズマ密度
- (b) 電子ビーム密度 < プラズマ密度

結果



- Concave plasma channel での収束効果を観測
- 希薄プラズマでの収束

プラズマレンズでの収束効果を確認し、簡易な構造の電子ビーム制御を実現できることを明らかにした。

参考文献

- (1) 'Self-Focusing Stream', W. H. Bennett, Physical Review , 98, 6, 1584 (1955)

Staging Laser Wake-field Acceleration

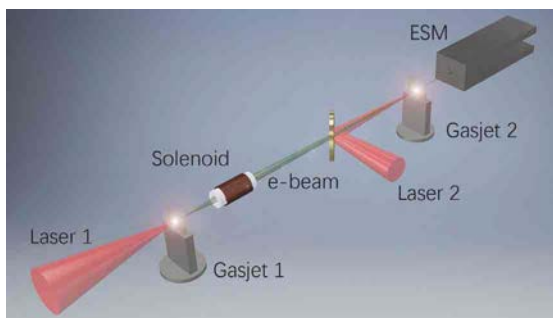
Z. Jin¹, H. Nakamura², N. Pathak², Y. Sakai², A. Zhidkov²,
K. Sueda¹, R. Kodama², T. Hosokai^{1,2}

(1: RIKEN SPring-8 Center, 2: Osaka University)

概要

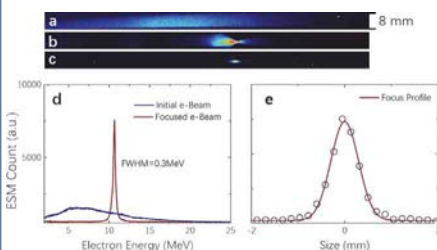
Staging laser wake-field acceleration is considered as a necessary technique for developing full-optical jitter-free electron accelerators. Here we demonstrate the strong coupling of electrons accelerated with the laser pulse from a gas-jet, with wave breaking electron self-injection, and the booster produced in the second gas jet by another laser pulse temporally and spatially synchronized with the first laser beam. Measured characteristics of electron beams modified by the booster wake field agree well with those obtained by multidimensional particle-in-cell simulations.

方法



The experiment was carried out with the P-cube 80-TW Ti:Sapphire laser system at Osaka University, which can deliver 2 synchronized CPA laser beams from the same oscillator. The laser beam 1 was focused a He gas jet producing injector electrons. A solenoid collected and focus the electrons with desired energy to the booster plasma wake-field at 1 meter away. An electron spectrometer was installed just after the second gas jet.

結果



Injector electron beam:

- (a) Initial spectrum.
 - (b) Spectrum focusing solenoid.
 - (c) Spectrum with 500 μm aperture.
- Energy spread $\sim 3\%$. Focus spot < 0.7 mm. Charge of ~ 1.6 pC.

Clear deceleration and/or acceleration of the beam electrons were observed depending on the time delay exhibiting the coupling of the injection electron beams with the laser wake field in the booster.

Also, strong coupling with an injection efficiency up to 90% was observed, due to the self-focusing effect (Bennet-Budker effect).

The results were verified with multidimensional particle-in-cell simulations.

Please check the poster for more details.

レーザー加速電子ビームの電子輸送システムの構築

○寺本高啓¹, 神門正城², 武藤俊哉³, 南部健一³, 酒井泰雄¹, 清野英晃¹,
金展⁴, 黄開², 大東出², 末田敬一⁴, 夏井卓也⁵, 吉田光宏⁵, 益田伸一⁵,
山本樹⁵, 柏木茂³, 濱広幸³, 兒玉了祐⁶, 細貝知直^{1,4}

(1: 阪大院工, 2: 量研関西研, 3: 東北大電子光理学セ, 4: 高工ネ研, 5: 理研 RSC, 6: 阪大レーザー研)

概要

レーザープラズマ加速されたGeV級の電子ビームを電子発生点からアンジュレーターまでガイドするための電子輸送系の設計・構築を行った。

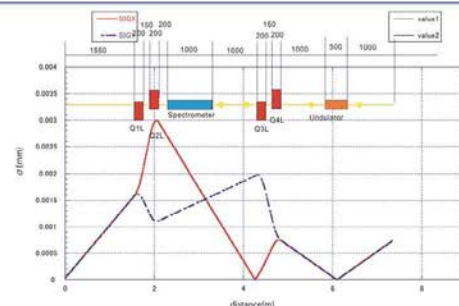
電子輸送系シミュレーション

シミュレーションソフト

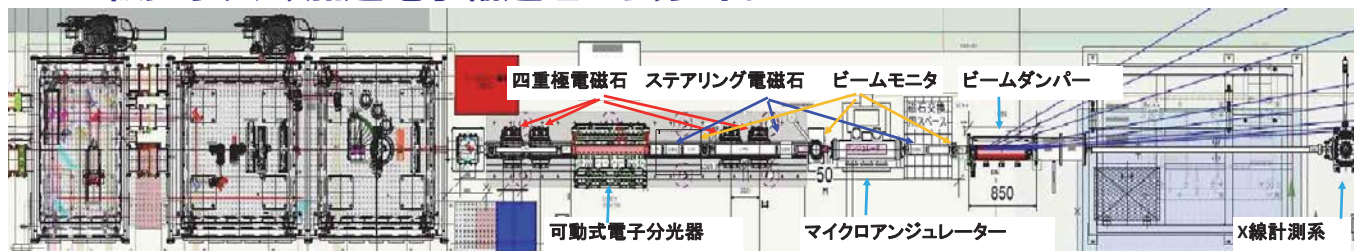
Strategic Accelerator Design (SAD)

電子ビームエネルギー1GeV, 発散角1mradと仮定
電子ビームが拡がり、ビームライン用単管(内径Φ17mm)の内壁との衝突による損失を減らす必要がある。

DF (D: Defocus, F: Focus) のダブルレット四重極電磁石を2組配置することにより
アンジュレーター入射時の電子ビームサイズの $<150\mu\text{m}$,
および電子発生点からアンジュレーター出口までの距離 $<7\text{m}$ を達成可能。



GeV級プラズマ加速電子輸送ビームライン



パルス四重極電磁石
最大磁場勾配60T/m @330A
実効長 211mm

ステアリング電磁石
最大中心磁場55mT@10A
実効長170mm



250MeV電子ビーム輸送実験

構築した電子輸送系の評価のため、250MeV電子ビームで電子輸送実験を行った。

- ・レーザープラズマ加速された電子ビームのエネルギースペクトル計測から、250MeVにピークを持つ電子ビームが発生していることを確認した。
- ・電子輸送ライン中に設置されたビームモニタを用いて、電子ビームプロファイルが軸中心でフォーカスされるように、四重極電磁石の磁場勾配およびステアリング電磁石の磁場を調整した。
- ・その結果、アンジュレーター下流にあるビームモニタおよびビームダンパーにて電子ビームを観測することに成功した。これにより電子ビームを電子発生点から8.5m輸送することに成功した。
- ・シミュレーションソフトGeneral Particle Tracer (GPT)を用いて、実験結果が再現できることを確認した。

まとめ、今後の方針

パルス四重極電磁石およびステアリング電磁石を用いた1GeV電子ビーム用の電子輸送ビームラインを設計・構築した。
レーザープラズマ加速された250MeV電子ビームの輸送実験に成功した。
今後、多段加速された1GeV電子ビームの電子輸送を行う。

世界最短周期の一体型マイクロアンジュレータの開発

高エネルギー加速器研究機構 山本 樹

目指す姿

アンジュレータの周期長を既存技術の1/10まで短縮し、高エネルギー放射光を実現

- ・従来の1/10以下の周期長の極短周期アンジュレータを開発し、低エネルギー加速器（～1GeV程度）においてもアンジュレータの基本波によってX線ビーム（1keV）を実現する
- ・現状技術で到達できる周期長は10数mm-40mmであり、光源の小型化・放射光利用の高エネルギー化に問題があった
- ・世界標準となった真空封止アンジュレータの発明・開発（KEK-PF）と実用化の経験を活用し、アンジュレータの小型化に挑む

開発目標

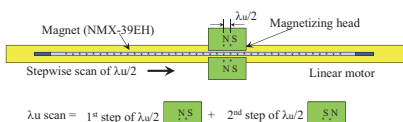
周期長4mm以下の高精度・高強度周期磁場を生成できる、極短周期アンジュレータを開発

- ・多極着磁法により板状磁石素材に極短周期磁場を高精度で書き込む方式を確立し、通常の1/10の周期長を持つモノリシックアンジュレータ磁石を実現する。
- ・極短周期長・高精度磁場に対応する、精密ギャップ駆動装置（分解能0.1 μ m）を開発、極短周期アンジュレータを装置化する
- ・開発技術をレーザー加速統合プラットフォーム LAPLACIANへ集結。各要素技術を統合し、有効性を実証

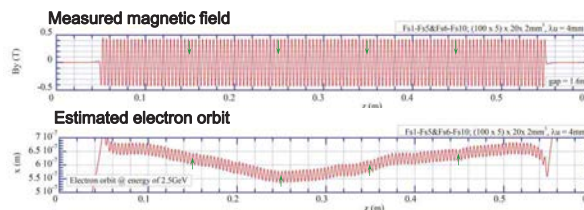
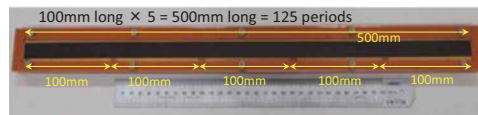
成果

- ・ステップ式多極着磁法の開発による高精度極短周期磁場の生成
- ・接続式多極着磁法の開発による極短周期磁場の長尺化
- ・精密ギャップ駆動装置の開発・極短周期アンジュレータの装置化
- ・東北大電子光物理学研究センターにおける性能評価試験の実施
- ・LAPLACIANへの極短周期アンジュレータ装置の設置。評価試験の準備

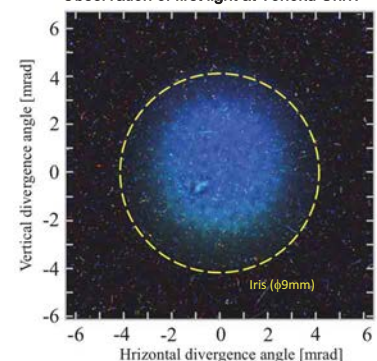
Step-wise multipole magnetization



500mm long plate type magnet with very-short-period undulator field elongated by connected multipole magnetization



Observation of first light at Tohoku Univ.



200mm long undulator frame at Tohoku Univ.



500mm long undulator frame at LAPLACIAN



今後の展開

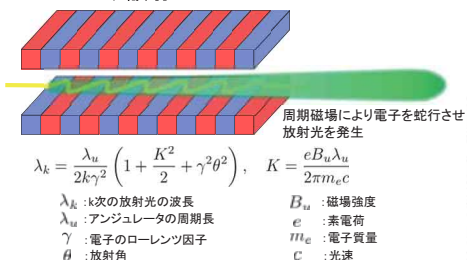
- ・極短周期磁気回路着磁法の確立：より短周期・強磁場へ
- ・系統的な精密磁場測定による極短周期磁場の評価
- ・磁石板接続法の確立＋端部磁場補正法の確立
- ・精密ギャップ駆動装置の開発（継続）
- ・実在ビームを用いた性能評価・実証試験（継続）

極短周期アンジュレータ磁場生成の研究開発

高エネルギー加速器研究機構 山本 樹、益田伸一

概要これまでの経緯と目標

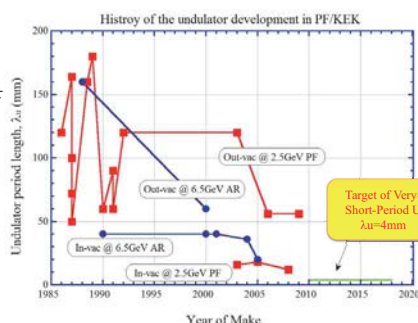
アンジュレータ放射



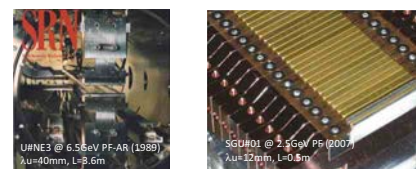
アンジュレータの短周期化

より短波長(高エネルギー)のアンジュレータ放射
より低エネルギーの電子ビームで放射可能

KEK PF における周期長 λ_u の短周期化



KEK PFで開発した真空封止アンジュレータの例



既存のアンジュレータは磁石の配列により構成
 ・磁場周期の小型化に限界
 ・複雑な磁場構成・組立調整

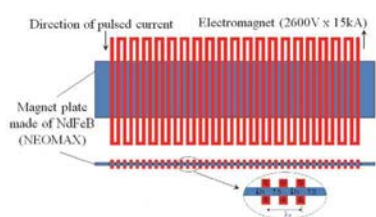
極短周期化が可能で調整が不要な
モノリシックアンジュレータを開発

・従来の1/10周期長のアンジュレータ磁場生成
 ・より低次のアンジュレータ放射によるX線生成

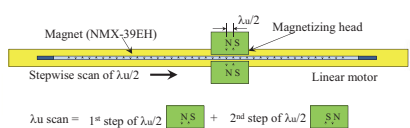
極短周期アンジュレータ磁場の生成

極短周期アンジュレータ磁場生成の原理

手法1 多極着磁法による磁場の書き込み

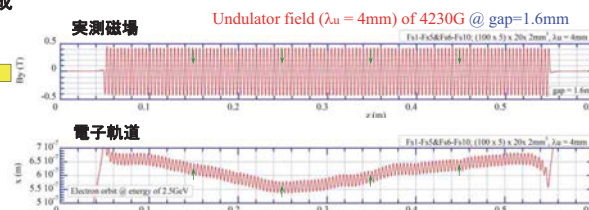


手法2 ステップ着磁による高精度磁場の達成



実測磁場に基づく極短周期アンジュレータ放射の評価

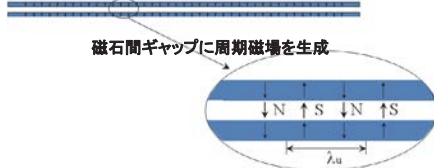
連結磁石の極短周期アンジュレータ磁場と電子軌道



連結部で滑らかに接続

極短周期アンジュレータ磁場の生成

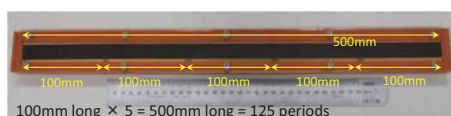
着磁法で作成した磁石を対向



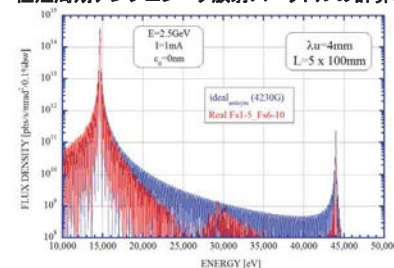
着磁後の磁石 $\lambda_u = 4\text{mm}$



接続式多極着磁法による極短周期磁場の長尺化



極短周期アンジュレータ放射スペクトルの計算結果

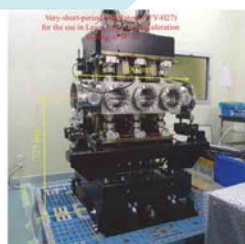


理想磁場によるスペクトルと一致

極短周期アンジュレータ装置の開発

- ・実在電子ビームを用いた評価試験のための真空封止極短周期アンジュレータ装置を開発
- ・精密ギャップ駆動機構の分解能0.1 μm を達成
- ・200mm、500mm、1000mm長までの磁石を装着できる装置をそれぞれ製作

磁場周期4mmのモノリシックアンジュレータが実現

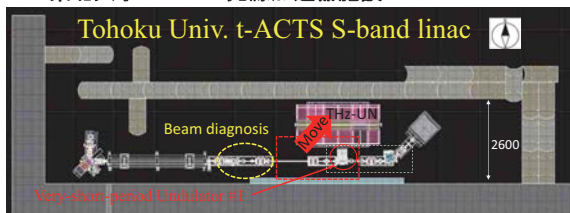


極短周期アンジュレータの評価試験

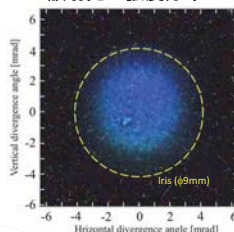
高エネルギー加速器研究機構 山本 樹、益田伸一

東北大学電子光物理学研究センターにおけるFirst lightの観測評価

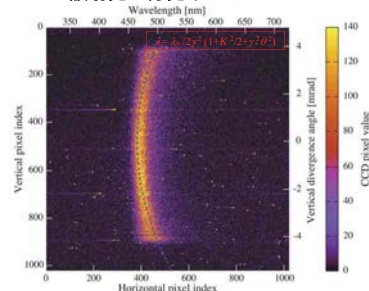
東北大学 ELPH 光源加速器施設



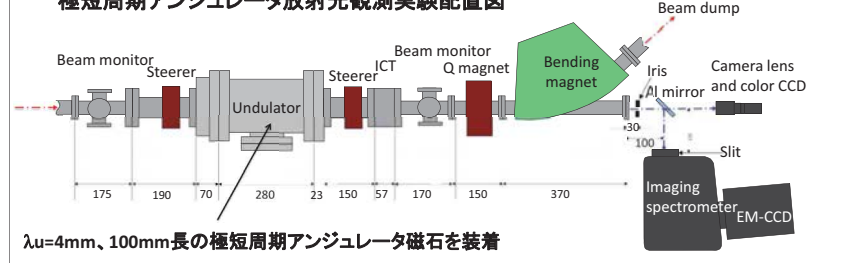
カラーCCDカメラによる
放射光の強度分布



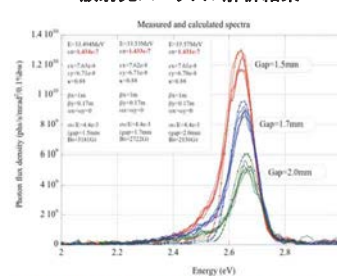
高感度CCDカメラによる
放射光の分光イメージ



極短周期アンジュレータ放射光観測実験配置図



放射光スペクトル解析結果

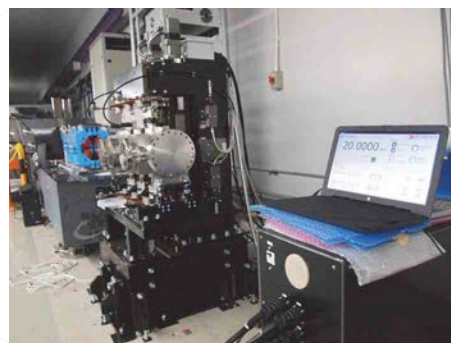
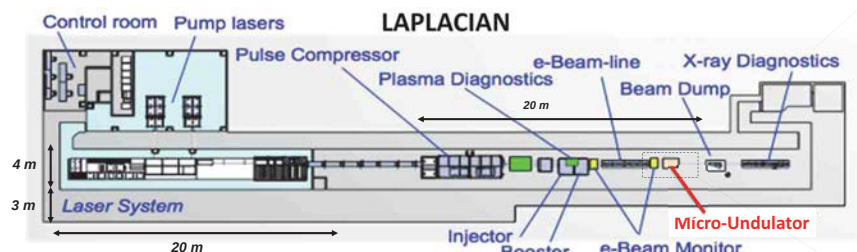


- ・極短周期アンジュレータによる放射光生成・観測に成功
- ・電子ビームパラメータから予測される放射光スペクトルに一致

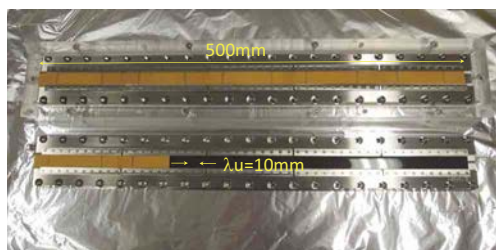
レーザー加速統合プラットフォームLAPLACIANにおける評価試験

レーザー加速統合プラットフォーム

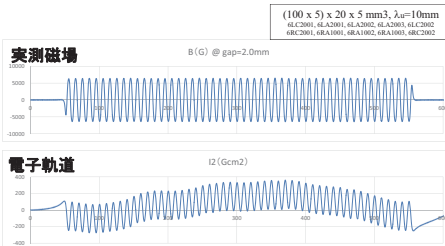
500m長磁石用極短周期アンジュレータ装置の設置



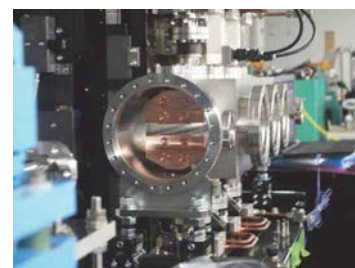
$\lambda u=10\text{mm}$ 、500mm長のアンジュレータ磁石



アンジュレータ磁場計測結果



500mm駆動架台への磁石列の装着

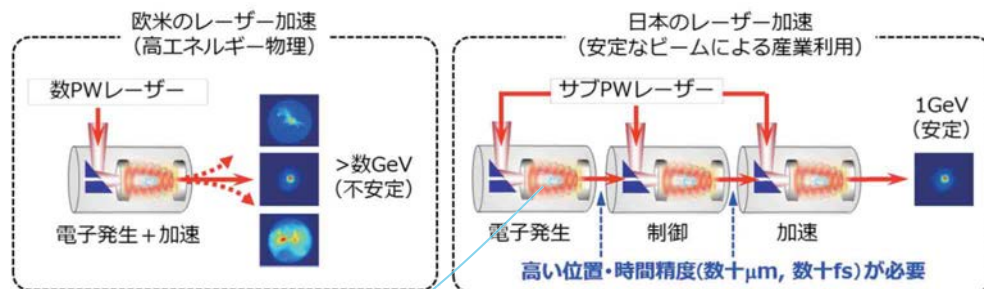


ビーム・プラズマを測る～安定な電子ビームのために～

量子科学技術研究開発機構（QST） 神門 正城

概要・緒言

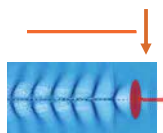
小型・高性能電子加速器の実現のため、多段型レーザー加速に挑戦！そのためのモニターを開発する。



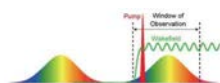
- ① 航跡場のサイズ、強さ
- ② 電子の長さ、タイミング
- ③ 電子の航跡場の位置ずれ

方法

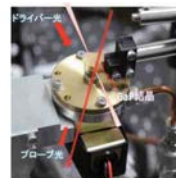
fsの短いパルスで観察



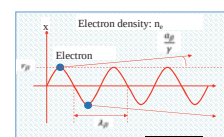
周波数領域の干渉計で観察



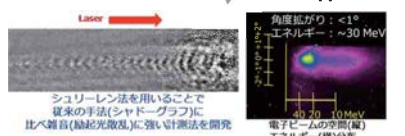
電気光学素子で電子電場を観察



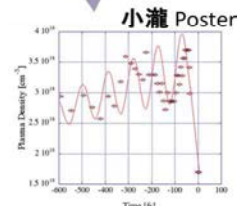
航跡場からの放射光（ベータトロン放射）を観察



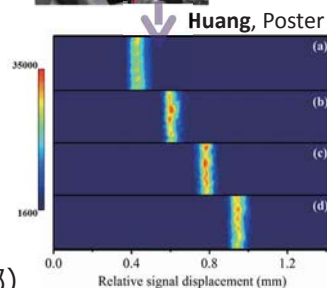
結果



比較的高密度（電子発生部）の航跡場サイズ計測 (1~5 μm)



比較的低密度（加速部）の航跡場サイズと振幅計測



電子長 (300 μm)とfsのタイミング分解能



10-100 keVのX線分光計測 ->位置ずれ

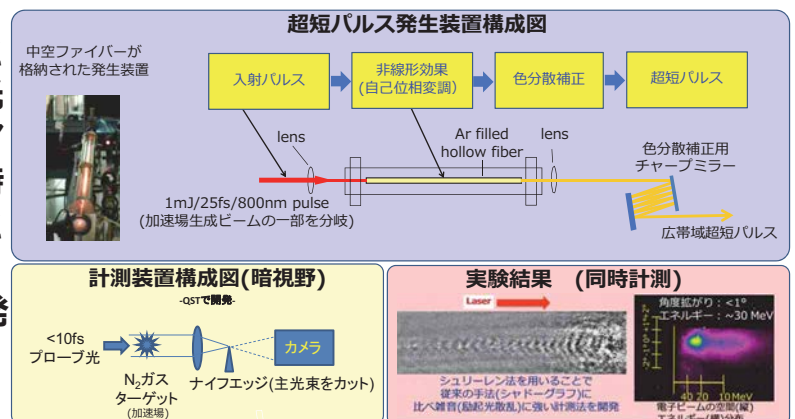
結言

4つのモニターを開発し、基本動作を確認。播磨拠点への導入を一部実施。

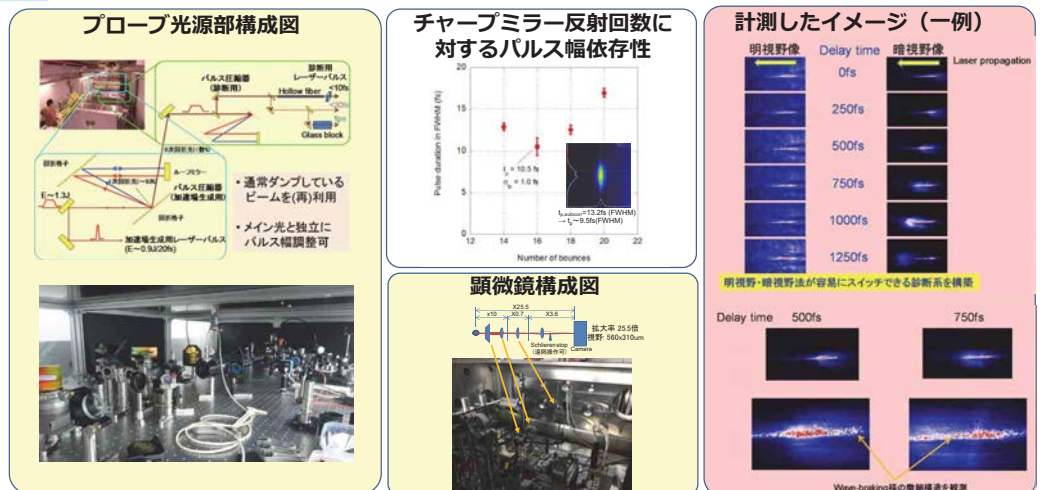
森道昭、Huang Kai、小瀧秀行、林由紀雄、中新信彦、大東出、神門正城
量子科学技術研究開発機構（QST） 関西光科学研究所

多段ステージによるレーザー加速において、加速場のモニターは最適な加速場構造を形成させるためのパラメーター最適化や安定性評価のツールとして役立つ。本研究開発では、初段であるインジェクター部のモニターを目的に、横(90度)からの超短パルス光プローブによる加速場のモニター装置を構築した。

自己位相変調光学効果を利用することで、入射光より短い時間幅を持つ光パルスの生成が可能である。プラズマの粗密状態から形成される加速場の時間周期よりも短いパルスを生成することで、瞬間撮影(可視化)ができる。QSTでは、この技術開発を行い、開発拠点(LAPLACIAN)に導入した。



インジェクター部励起光の一部を利用したプローブ光源部と、明・暗視野のスイッチ可能な25倍顕微鏡で構成した。本セットアップにより、加速場の構造が詳細にモニターできるようになった。



ウェーク場の微細構造の観測装置を開発し、LAPLACIANプラットフォームに導入した。この成果は、フェムト秒ダイナミックスのイメージングそのものであり、プラズマ診断以外の広範な応用に繋がるのが期待できる。

周波数領域のホログラフィーを用いた高速現象の取得 ～プラズマ波の干渉計測～

○小瀧秀行、森道昭、林由起雄、黄開、大東出、中新信彦、神門正城
(量子科学技術研究開発機構)

概要

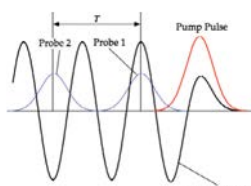
レーザー加速電子ビームの**安定化・制御**には、加速と収束を行う**航跡場**（**プラズマ密度の振動**）を計測する必要がある。この**振動周期**は**10-100 fs**であり、**サイズ**は**数-10 μm**である。このため、**周波数領域ホログラフィー**を用いたシングルショット計測器を開発した。

方法

2つの**プローブパルス**を時間差をつけてスペクトロメーターへ入射すると、**周波数領域での干渉**が起こる。プローブパルスとして、チャープパルスを用いることにより、シングルショットでの計測が可能となる。

■ 計測原理（短パルスの場合）

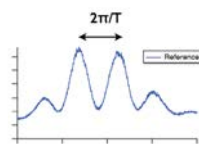
2つのプローブパルス



$$E_1(t) = E(t) \exp(i\omega_0 t)$$

$$E_2(t) = E(t - T) \exp(i\omega_0(t - T))$$

周波数領域での干渉

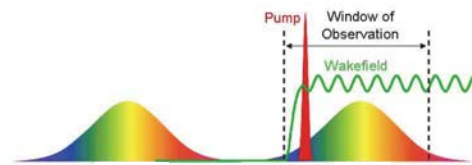


$$I(\omega) = |F[E_1(t) + E_2(t)]|^2$$

$$= |E(\omega - \omega_0) \{1 + \exp(-i\omega T)\}|^2$$

$$= 2|E(\omega - \omega_0)|^2 \{1 + \cos(\omega T)\}$$

■ 計測原理（チャープ光の場合：シングルショット可能）



Probe 2 Probe 1

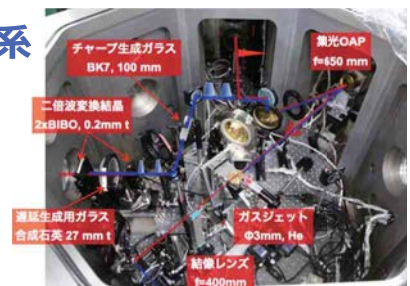
Spectrum → Time

N. H. Matlis, et al., Nature Physics, 2, 749 -753 (2006).

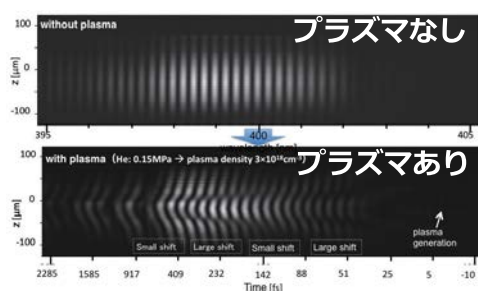
結果

右図に示すように、シングルショットでのプラズマ振動計測に成功し、基本動作を確認した。今後、導波路中の構造などを行う。本方式は、**高速の密度変動の計測**などにも役に立つ。

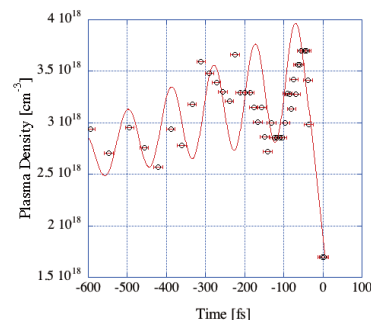
■ 実験体系



■ 結果：干渉縞



■ 結果：密度振動



Laser wakefield electron temporal diagnostics via single shot electro-optic sampling

K. Huang¹, T. Esirkepov¹, J. K. Koga¹, H. Kotaki¹, M. Mori¹, Y. Hayashi¹, N. Nakanii¹, S. V. Bulanov¹, and M. Kando¹

¹Kansai Photon Science Institute, National Institutes for Quantum and Radiological Science and Technology (QST), 8-1-7 Umemidai, Kizugawa-city, Kyoto, 619-0215, Japan

概要

One of the main goals of the **ImPACT** program is to generate high energy electron beams from staged acceleration. To achieve energy gain, the electron bunches from injector should be incident into the booster stage at proper phases. Thus, the arrival timings of the electron bunches are of great importance. We for the first time introduce the **electro-optical (EO) spatial decoding** technique into laser wakefield acceleration (LWFA) [T. Tajima and J. Dawson, *Phys. Rev. Lett.* 43, 267 (1979)]. A temporal mapping relationship with generality was derived in a geometry where the signals had spherical wavefronts. We believe this method could be used as a single-shot timing monitor for laser plasma acceleration experiments. Part of the results have been published as [K. Huang et al., *Scientific Reports* 8, 2938 (2018)].

方法

By introducing a EO crystal near the path of electron beam, the probe laser passing through the crystal will undergo birefringence in the exposure of the electron beam electric field. In this case, orthogonal components of the electric field will have phase retardation. By detecting the phase retardation, we can achieve the electron beam temporal information non-destructively in a single shot. [S. Casalbuoni et al., *Phys. Rev. ST Accel. Beams* 11, 072802 (2008).] When introducing an angle between the probe laser and the electron path, the temporal information of the electron bunches are encoded to the probe laser profile transversely.

結果

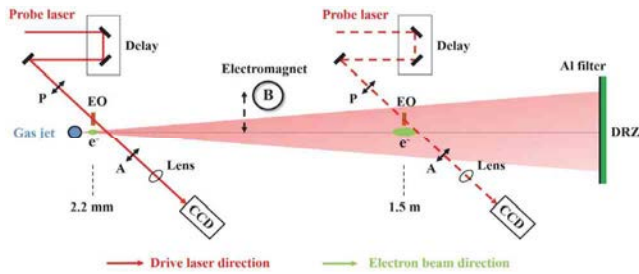


Fig. 2 Schematic of EO detection. The electron beam temporal profiles were measured at longitudinal distances of 2.2 mm and 1.5 mm from the gas jet exit to avoid damages to the crystal. The probe laser has an angle of 44 degrees to the electron path.

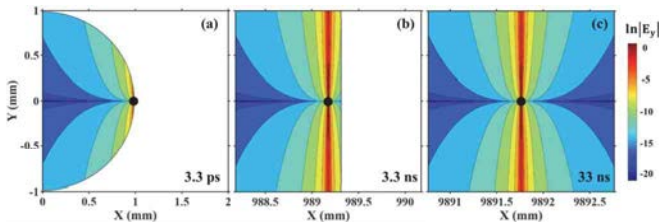


Fig. 4 The spherical wavefront Coulomb field of the electron bunches. (a) near the source position. The Coulomb field of the electron has a spherical wavefront; (b) at a propagation distance of 1 m; (c) after propagating over 10 m, similar as free space.

結言

For the characterization of the electron temporal information for the ImPACT program, we introduced the electro-optical spatial decoding method to laser wakefield acceleration. We succeeded observing the EO signal and measuring the electron energy spectrum simultaneously in a single shot. We discovered that the coulomb field of the electron bunch had a spherical wavefront near the target and deduced novel temporal mapping relationships for the application of this method. We demonstrated that this method could be a powerful tool for the monitoring of the electron timing in LWFA.

This work was funded by ImPACT Program of Council for Science, Technology and Innovation (Cabinet Office, Government of Japan).

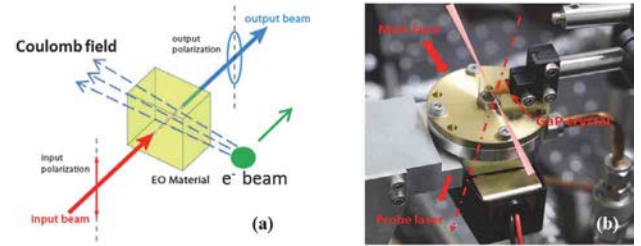


Fig. 1 Electro-optic method. (a) Linear polarized probe beam becomes elliptical polarized as a result of phase retardation. (b) By setting an angle between the probe laser and the electron path and placing the EO crystal close to the target, we perform the EO spatial decoding for LWFA.

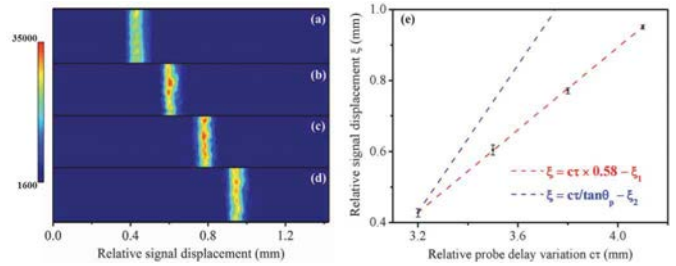


Fig. 3 Check on the temporal mapping relationship. (a-d) We measured the electron signal at 4 different probe delay settings. (e) We found that the detected timing relationship was quite different from a widely used model.

Due to the plasma shielding, coulomb field of the electron bunch possessed a spherical shape at the detection point, which is different from a widely used model considering the electrons propagating in free space. Based on this, we detailedly discussed the temporal mapping relationship in three cases as below, in which (2) is applicable for LWFA.

$$\begin{aligned}
 (1) c\Delta\tau &= \Delta\xi \tan \theta_p + \frac{L}{\cos \theta_{s0}} - \frac{L}{\cos \theta_{s0}} \sqrt{1 - \frac{2 \sin \theta_{s0} \cos \theta_{s0}}{\cos \theta_p} \frac{\Delta\xi}{L} + \frac{\cos^2 \theta_{s0}}{\cos^2 \theta_p} \frac{\Delta\xi^2}{L^2}} \quad [\text{spherical wave}] \\
 (2) c\Delta\tau &= \left(1 + \frac{\sin \theta_{s0}}{\sin \theta_p}\right) \tan \theta_p \Delta\xi \quad (\Delta\xi \ll L) \quad [\text{Plane wave, with an incident angle } \theta_p] \\
 (3) c\Delta\tau &= \tan \theta_p \Delta\xi \quad (\Delta\xi \ll L, \theta_{s0} \rightarrow 0) \quad [\text{Plane wave, free space}]
 \end{aligned}$$

Notes: $\Delta\xi$ displacement on CCD, L longitudinal distance from crystal to target, θ_{s0} signal incident angle on crystal surface, θ_p probe laser angle to the electron path.

ベータトロン X 線用 Laue 型分光器の性能評価

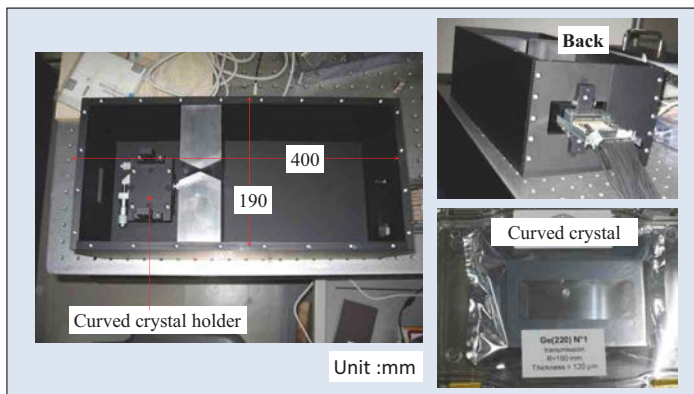
○林 由紀雄、小瀧 秀行、黄 開、森 道昭、神門 正城
量子科学技術研究開発機構 関西光科学研究所

概要

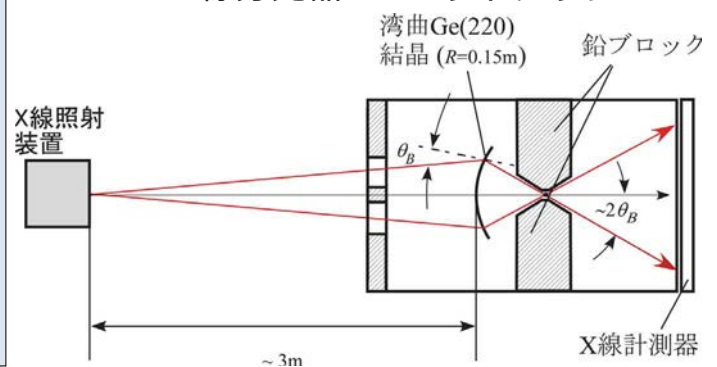
レーザー航跡場加速により1GeV級電子が生成される際、副次的に10 - 100 keVのベータトロンX線が放射される。このX線のエネルギー分布を測定可能なLaue型分光器を製作したので、本分光器の分光特性を確認する。

方法

エネルギー既知のX線照射装置(JAEA 施設供用)¹⁾を利用し、分光器で回折されるX線のエネルギー分布を取得する。

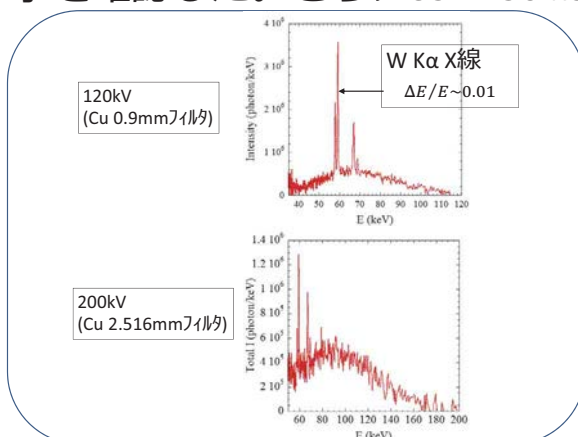


X線分光器²⁾のセットアップ

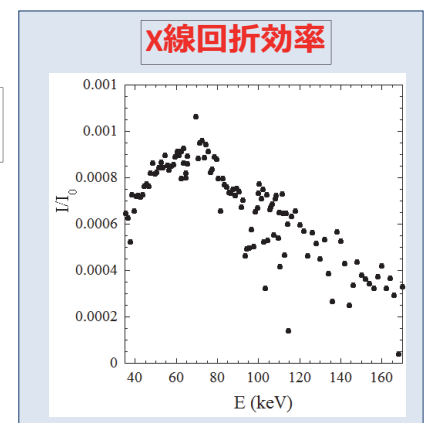


結果

約1%のエネルギー分解能で60keVの特性X線(W K α X線)の分光出来る事を確認した。さらに35 - 150 keVのX線に対する回折効率を取得した。



X線照射装置のエネルギー
スペクトルと比較



参考文献

- 1) S. Shimizu et al., JAEA-Technology, 2010-009 (2010).
- 2) J. F. Seely et al., Appl. Opt. **47**, 2767 (2008).

レーザー駆動 X 線特性のシングルショット診断装置の開発

理化学研究所 放射光科学研究センター 矢橋 牧名

概要

レーザー駆動のX線光源開発に関連して、以下の研究開発を行なった。

1) 安全な開発基盤システムの構築、2) シングルショットで光の特性を診断する光診断システムの開発

開発基盤システムの構築

レーザー駆動X線源開発には、放射線及びレーザーに対する安全性を確保した上で、柔軟に装置を調整・運転できるシステムを構築することが必要である。X線源開発基盤の構築にあたり、以下のシステムを開発・整備した。

レーザー安全インターロックシステム

- ・レーザー輸送路に光遮断用のシャッターを設けることで、レーザー安全性を担保。
- ・レーザー調整・運転の作業性を確保するために、3種類の運転モードを用意。
- ・レーザー電子加速器として運転するモードでは、放射線安全インターロックシステムと共同して安全性を担保。

	Mode 1 メンテナンス モード	Mode 2 実験装置調整 モード	Mode 3 加速器 モード
レーザー・実験 エリアへの立入り	○	○	X
フルエネルギー でのレーザー運転	○	X	○
微小スポットへの レーザー集光	X	○	○

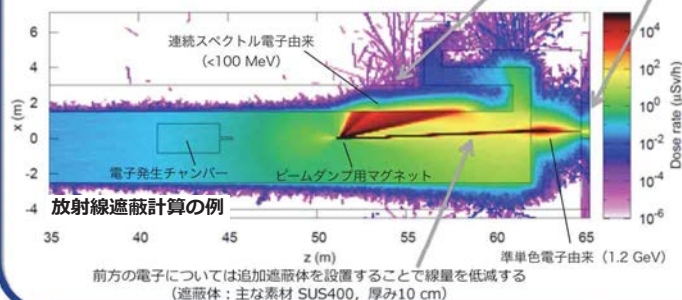
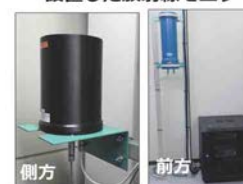
○：許可、X：不許可

↑
高エネルギー電子が発生するため、放射線安全
インターロックを併用して安全を担保

放射線安全インターロックシステム

- ・加速器のシステムに準じた放射線安全インターロックを整備。
- ・計画されるレーザー駆動電子ビームの特性に対して放射線遮蔽計算を実施し、十分な遮蔽性能が実現されることを確認。
- ・漏洩放射線モニタシステムが組み込まれたインターロックシステムを整備。放射線安全性を担保。

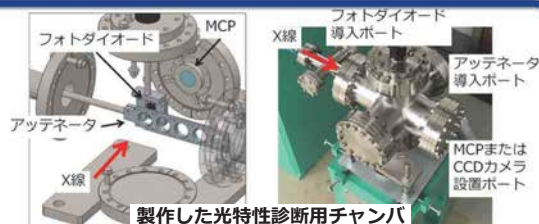
設置した放射線モニタ



光診断システムの開発

X線光源特性診断システム

- ・X線光源の代表的な特性として、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測定するシステム。
- ・パルスエネルギーは、X線フォトダイオード (PD) または1次元MCPを用いて測定。
- ・空間プロファイルは、2次元MCPまたはCCDカメラを用いて測定。
- ・アッテネータ (金属箔) による光量調整が可能。



ビーム輸送・真空制御リモート操作システム

- ・レーザー及び電子ビーム輸送部の機器を、収納部外から遠隔で制御する。
- ・光源特性診断システムの主要な機器を、収納部外から遠隔で監視・制御。

まとめ

- ・レーザー駆動ベースのX線光源開発が安全に実施できるよう、開発基盤システムの構築を行なった。
- ・X線光源特性診断のため、X線パルスエネルギー及び空間プロファイルをシングルショットで診断する装置を製作した。

μアンジュレータのビーム試験と機能を活かす応用開拓

東北大学 濱 広幸

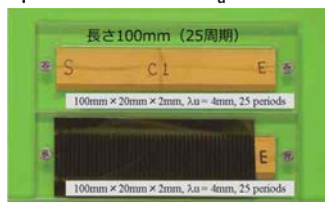
開発目標

レーザープラズマ加速器を用いた次世代コンパクトX線FELのキーデバイスである「μアンジュレータ」の基本性能を東北大学電子光理学センターの試験加速器（t-ACTS）の実ビームを使い評価する。周期長4mmのμアンジュレータで発生した放射光のスペクトルを超前方向に設置したイメージング分光器を使い測定する。また、μアンジュレータの特性評価で得られた知見をもとにコンパクトXFELとは異なる応用技術があるかを検討する。

開発内容

■ 東北大学 電子光理学研究センターの試験加速器(t-ACTS)を用いて、μアンジュレータ性能検証を実施 → 数値計算との比較・評価

□ KEK・山本樹教授により開発されたμアンジュレーター（λ_u=4mm）

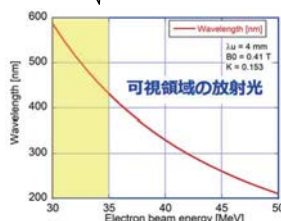


Undulator	
Period length and number	4 mm・25 periods
Undulator length	100 mm
Undulator gap	1.6 - 17 mm
Peak magnetic strength	0.41 T (@gap = 1.6 mm)
K value	0.153 (max)

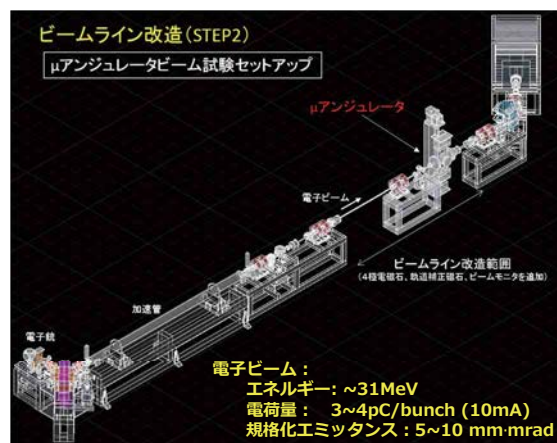
□ μアンジュレータの放射波長と角度拡がり

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right), \quad K = \frac{eB_u \lambda_u}{2\pi m_e c}$$

$$\sigma_u \approx \frac{1}{\gamma} \sqrt{\frac{1 + K^2/2}{2 \cdot N_u}}$$

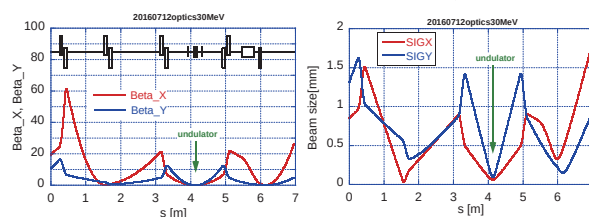


- ✓ K < 1のため、放射波長は電子ビームのエネルギーによりほぼ決定される。
- ✓ 放射の角度拡がりは、E ~ 30 MeVの時に ~ 2.5 mrad程度となる。



μアンジュレータ実験のためのビーム光学系の検討

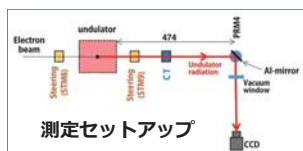
- ✓ 狭い (2mm以下) アンジュレータギャップにビームを通す必要あり



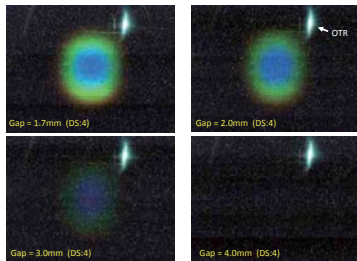
成果

放射光発生実験 I (Dec. 2016)

- 一体着磁型アンジュレータによる世界初の放射光発生を確認
- 放射光はアンジュレータ下流のミラーで90度方向に反射させ、カラーCCDで放射光プロファイルを測定



- ✓ 放射光の波長は軸外になるにしたがって長波長へと変化（青→緑→赤）、波長はギャップを変えても変化しない。
- ✓ ギャップを広げることK値が減少し、放射強度が低下（∝ K²）



ギャップを変えアンジュレータ放射を測定

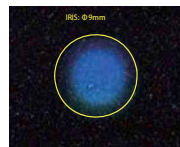
今後の展開

- μアンジュレータは、K値（=93.4B₀[T]λ_u[m]）が小さいために蓄積リングなどではギャップを変えても波長を変えることができないが、レーザー加速器などの線形加速器においてはビームエネルギーを変化させ幅広い波長域にわたって放射光を発生することができる。また、ギャップ間隙を確保しつつ、磁場強度（K値）を向上させ高輝度化を図る。
- μアンジュレータとハイチューディーの超伝導線形加速器との組み合わせも、魅力的な波長可変の高輝度光源の候補として挙げられる。

放射光発生実験 II (June. 2018)

- ビームライン改造により、放射光のアーチャーを確保、偏向電磁石で放射光と電子ビームを分離してスペクトルを測定。
- 加速器の大電力RFを改造：エネルギー分散を縮小（改造前ΔE(rms) ~ 2.1 % → 改造後：~ 0.5 %）

- ✓ 軸上付近の放射だけを光学アイリスで切り出し、分光器へ入射。（→）



スペクトロメータで測定された分光イメージと波長スペクトル
（左）分光なし（中央）分光あり（右）波長スペクトル

極限環境材料研究のためのレーザー加速電子によるイメージングシステムの最適化

島根大学 荒河 一渡

目指す姿

本プログラムにおいて、レーザー加速 XFEL 実証のためのレーザー加速要素技術の開発が進められてきた。この要素技術開発において達成される加速エネルギー GeV レベルの極短パルス電子は、加速エネルギーの MeV レベルへの変更によって、極短パルス電子そのものをプローブとするレーザー加速パルス電子イメージングシステムへと発展させることが可能と期待される。このシステムは、高エネルギー粒子照射、衝撃変形、および高圧水素印加といった、さまざまな極限環境における材料挙動の原子・ナノスケールかつフェムト〜ピコ秒スケールでの解明に役立つ。これらは、核融合炉材料、耐衝撃材料、および高圧水素貯蔵材料といった、極限環境材料の革新的開発に直接繋がるものである。以て、本研究開発は、安全・安心な社会の実現に資することを目指すものである。本研究開発では、H30年度より、レーザー加速パルス電子イメージングシステムの実現およびその応用のための基礎的検討をおこなった。

課題

本研究開発では、次の二つの課題に取り組んだ。

(1) レーザー加速パルス電子によるイメージングシステムの最適化

本プログラムにおけるレーザー加速要素技術を基盤とした、レーザー加速パルス電子をプローブとするイメージングシステムの実現を目指し、パルス電子源およびシステムに要求される性能を検討する。

(2) 極限環境における原子・ナノレベル材料挙動の観測

本システムの極限環境材料研究への応用を見据えて、従来型の非パルス電子源を備えた電子顕微鏡によって極限環境における材料挙動の原子・ナノスケールでの観測をおこない、基礎となる知見を獲得する。

成果

(1) レーザー加速パルス電子によるイメージングシステムの最適化

XFEL に代表されるパルスX線源は、材料研究において極めて有用なプローブである。一方で、極限環境材料挙動の鍵を握ると考えられる材料中の結晶格子欠陥の挙動を捉えるには、パルス電子源が極めて有効と期待される。これは、電子波はX線に比べて、物質との相互作用が桁違いに強いこと及び逆空間におけるエバルト球の半径が桁違いに大きいこと、そのために回折が多波かつ動力学的であることに由来する。

これまで、RFフォトリソソード・パルス電子源によるパルス電子回折 (図1) 計測は既に為されている。しかし、その適用は、材料の様な相変態に留まり、極限環境材料挙動の鍵を握ると考えられる欠陥挙動の計測には至っていない。本課題では、レーザー加速パルス電子イメージングシステムによって、世界に先駆けて、シングルショットで積層欠陥 (図1) 等の欠陥挙動を捉えるための諸条件—逆格子点の欠陥由来の変調の検出が可能となるような、パルス電子源のビーム・ダイバージェンス、電子数、エネルギー分散、およびシステムのジオメトリ等—を検討した。

(2) 極限環境における原子・ナノレベル材料挙動の観測

極限環境材料においては、しばしば原子・ナノスケールの欠陥の挙動が材料全体のマクロな性質を支配する。したがって、極限環境材料を安全・安心に使用するには、材料中の欠陥挙動を正確に理解し制御する必要がある。

レーザー加速パルス電子イメージングシステムは、極限環境における欠陥挙動の原子・ナノスケールかつフェムト〜ピコ秒スケールでの観測に適用され得る。しかし、そのような測定結果の解釈には、より長い時間スケールでの欠陥挙動についての正確な知見が役立つと期待される。また桁の異なる時間スケールにおける観測結果の結合によって、極限環境における欠陥挙動の全貌が解明されると期待される。ここでは、従来型の非パルス電子源を備えた透過電子顕微鏡によって極限環境における欠陥挙動の原子・ナノスケールでの観測をおこない、ミリ秒スケールの欠陥挙動に関する知見を獲得した。この手法では、実空間におけるイメージングによって欠陥挙動の空間的非一様性までも含めた知見が得られる。ここでは、その時間スケールはミリ秒程度に限られるが、この時間スケールに適合した遅いナノスケール欠陥の挙動であれば直接観測できる (K. Arakawa et al. Science 318(2007)956)。

具体例として、核融合炉ダイバーターに対する核融合中性子照射環境を模した、自己イオン照射下でのタングステンへの欠陥形成過程の観測をおこなった。また比較のために、高エネルギー電子照射下での欠陥形成過程の観測もおこなった。これらの実験のために、大阪大学超高压電子顕微鏡センターの超高压電子顕微鏡およびフランス・オルセーのJANNuS-Orsay 施設における重イオン加速器結合型電子顕微鏡をそれぞれ使用した。高エネルギー電子照射下では、極微細な欠陥が生成し徐々にナノスケールへ成長した (図3)。これに対し、自己イオン照射では、通常の透過電子顕微鏡の時間分解能である 0.03 s 以内に、ナノスケールの欠陥形成が突然におこった (図4)。詳しい解析から、本来は極めて移動度が高く材料中に留まれないはずの欠陥を材料中に安定化させる因子、すなわち核融合炉材料劣化の支配因子を同定しつつある (MMM国際会議 (大阪 10月) 招待講演)。このような観測結果は、近い将来のレーザー加速パルス電子イメージングシステムによる、欠陥生成素過程のフェムト〜ピコ秒スケールでの観測結果と結合されることによって、核融合材料の劣化過程の全貌の解明に繋がると期待される。

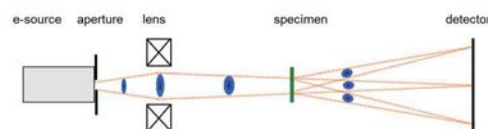


図1 パルス電子回折システムの概図

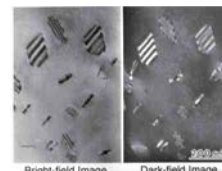


図2 銅における積層欠陥の透過電子顕微鏡像



図3 タングステンへの 2 MeV 電子照射下での欠陥形成(透過電子顕微鏡像)。白い粒状のコントラストは、欠陥周りの歪をイメージングしたものである。

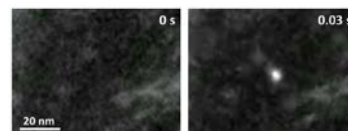


図4 タングステンへの 500 keV 自己イオン照射下での欠陥形成 (透過電子顕微鏡像)

今後の展開

本プログラムにおけるレーザー加速要素技術を基盤とした、実際のレーザー加速パルス電子源を用いた、イメージングシステムの開発およびその応用を世界に先駆けて実現させてゆく必要がある。

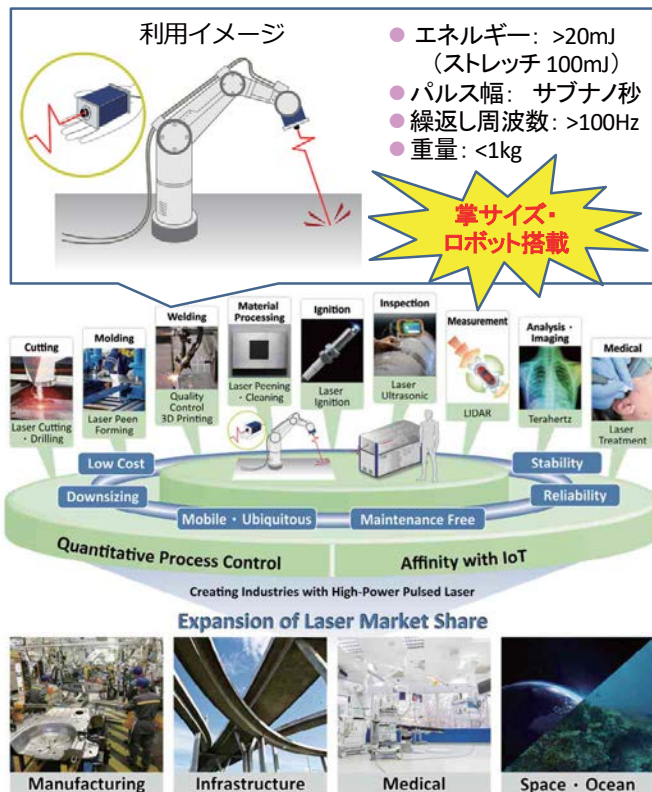
手のひらサイズの 20mJ 超パワーレーザーの開発

分子科学研究所／理化学研究所 平等 拓範

高出力なパルスレーザーをいつでもどこでも簡単に使えるようにすることで、レーザー応用技術を革新し、製造現場・インフラ保守・メディカル・セキュリティ等の様々な分野へ展開

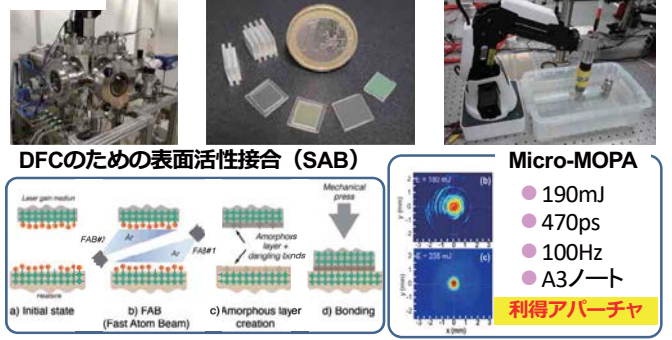
- 卓上サイズのレーザーを手のひらサイズに超小型化・低価格化し、ユーザーの利用を促進
- 姿勢によらず発振可能。ファイバ伝送が困難なパルスレーザーをロボットへ搭載可能に

開発開始時の構想



実証・製品化・プラットフォーム化

実証



試作機完成



製品化 (3社へ移管)



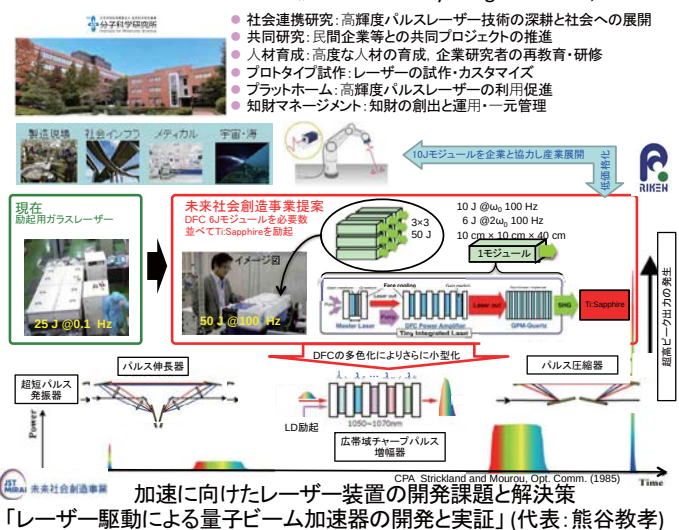
プラットフォーム化

- ・ 浜松工業技術支援センターへ装置を移管
- ・ (ImPACT後も) 誰でも使える環境を構築

社会連携研究部門、小型集積レーザー (TILA) コンソーシアム

小型集積レーザー (Tiny Integrated Laser, TILA)

- ・ 社会連携研究: 高輝度パルスレーザー技術の深耕と社会への展開
- ・ 共同研究: 民間企業等との共同プロジェクトの推進
- ・ 人材育成: 高度な人材の育成、企業研究者の再教育・研修
- ・ プロトタイプ試作: レーザーの試作・カスタマイズ
- ・ プラットホーム: 高輝度パルスレーザーの利用促進
- ・ 知財マネジメント: 知財の創出と運用・一元管理



DFC構造による高性能レーザーの提案

分布面冷却 (Distributed Face Cooling, DFC)

形状	ロッド	ファイバー	ディスク	DFC
パラメータ				
最大抽出パワー	$P_{ex} = \frac{8\pi R_f L}{\chi}$	$P_{ex} = \frac{8\pi R_f L}{\chi}$	$P_{ex} = \frac{12R_f}{\chi} \left(\frac{A}{L} \right)$	$P_{ex} = 2N \cdot \frac{12R_f}{\chi} \left(\frac{A}{L} \right)$
スケーリング	x	○	○	◎
利得 $g = \Delta n \alpha L$	○	○	x	◎
最大エネルギー $E_{max} = A \times LIDT$	○	x	○	◎

熱衝撃パラメーター

$$R_f = \frac{\kappa(1-\nu)\sigma_{max}}{\alpha E} \propto \frac{\kappa\sigma_{max}}{\alpha}$$

A: area of gain medium, L: gain medium length, χ : heating parameter, N: number of chips or disks, Δn : population inversion density, α : emission cross-section

ν : Poisson ratio, E: Young's modulus, α : expansion ratio, σ_{max} : maximum tensile strength, κ : Thermal conductivity,

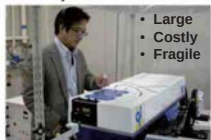
Ref. L. Zheng, A. Kausas, T. Taira, Opt. Mater. Express 7, 3214 (2017)

CW Operation in Distributed Face Cooling Chip

O A. Kausas¹, L. Zheng¹, T. Taira^{1,2}

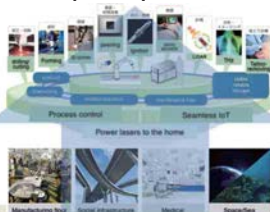
(1: 分子科学研究所, 2: 理化学研究所)

Ultra-compact pulsed power laser



- Large
- Costly
- Fragile

Ubiquitous power laser



OUR AIM

- Tiny-integrated mJ class, sub-ns laser
- Average power over 100 W
- Repetition rate > 10 kHz
- Current limitation: heat generation**

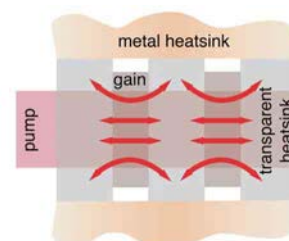
V. Yahia et al., Opt. Express 26, 8609-8618 (2018)

Types of laser configuration

Shape	Rod	Fiber	Thin disk	DFC
Parameter				
Maximum extractable power	$P_{ex} = \frac{8\pi R_f L}{\chi}$	$P_{ex} = \frac{8\pi R_f L}{\chi}$	$P_{ex} = \frac{12 R_d (A)}{\chi}$	$P_{ex} = \frac{24 N R_d (A)}{\chi}$
Power scalability	poor	high	medium	high
Gain	medium	high	poor	high
Damage threshold	medium	poor	high	high

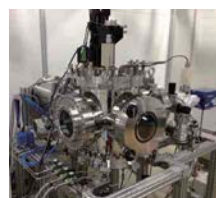
DFC: distributed face cooling. R_f : thermal shock parameter, A : area of gain medium, L : gain medium length, χ : gain medium thickness, χ : heating parameter, N : number of chips or disks.

Heat distribution in DFC chip



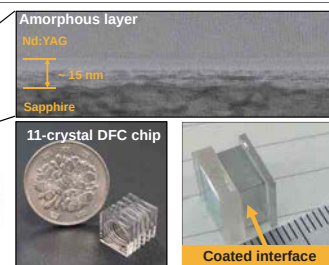
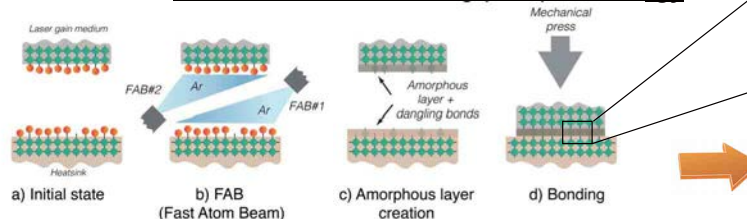
Heatsink: YAG, Sapphire, Diamond
Gain medium: Nd:YAG, Yb:YAG, Cr:YAG etc.

Coated materials are possible too!!



Ultra-high vacuum chamber

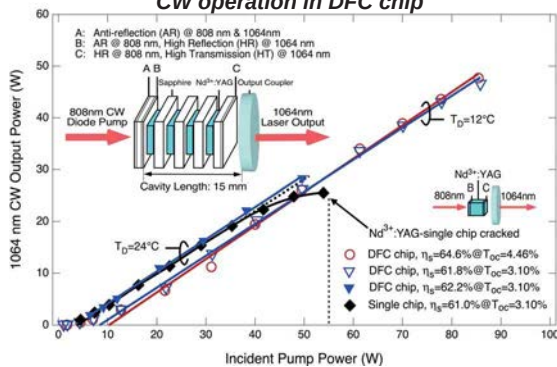
Surface activated bonding (SAB) technology



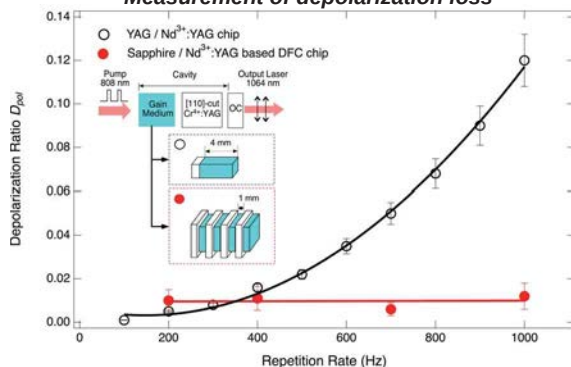
T. Suga et al., Acta Metall. Mater. 40, S133-S137 (1992)

Experimental results

CW operation in DFC chip



Measurement of depolarization loss



L. Zheng et al., Opt. Mater. Express 7, 3214-3221 (2017)

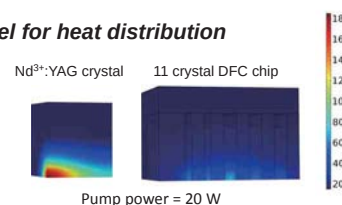
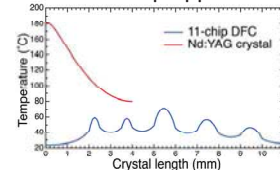
Optimization of DFC chip. FEA analysis

Simulation model for heat distribution

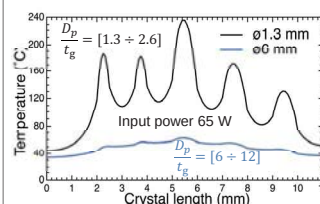
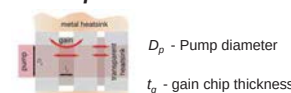
- Top-Hat profile
- Fractional heat load η_h equal to 0.37
- Absorption coefficient is constant
- No saturation of absorption coefficient ($I_{pump} \ll I_{saturation, pump}$)

Y. Sato et al. in IEEE JQE, vol. 40, pp. 270-280 (2004)

Heat distribution at pump power of 20 W

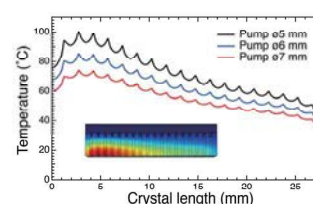


1. Effective heat removing. Pump beam increase



2. Heat load reduction. Direct pump by 885 nm

- Nd:YAG thickness 0.5 mm
- Over 300 W of absorbed power
- 37 crystal in total



Distributed face cooling method improves CW output by two times

Gain Aperture for Ubiquitous High Power Lasers

○ V. Yahia¹, T. Taira^{1,2}

(1:Institute for Molecular Science, 2:RIKEN Spring-8 Center)

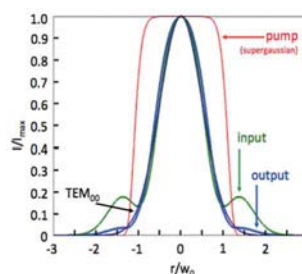
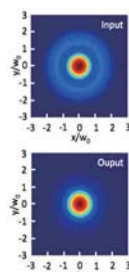
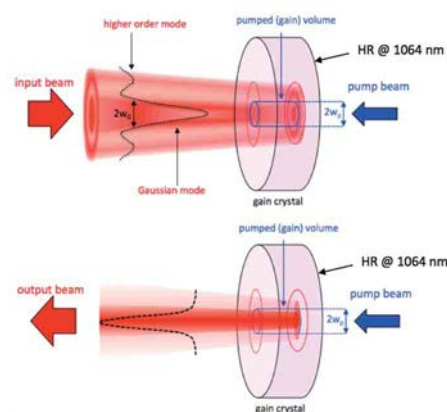
Introduction

High power high quality compact laser systems are required for various applications such as ignition of spacecraft engines, compact pumping system for high intensity lasers and, in future, for particle acceleration. In the Master-Oscillator Power-Amplifier (MOPA) scheme energy scaling is often get at the cost of system size increase and beam quality degradation. Development of micro-MOPA system thus requires a high-gain compact amplifying medium whose conception mitigates thermal and nonlinear effects, as well as low-footprint beam cleaning elements ensuring a high quality seeder beam.

Gain aperture

beam can be amplified and cleaned by gain aperture

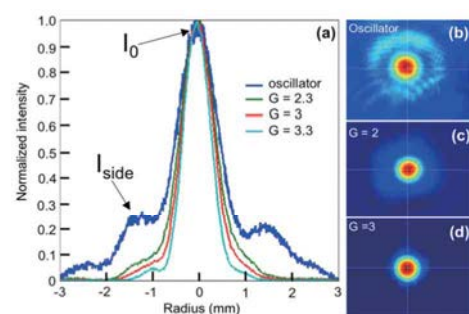
cleaning effect is modeled by radially dependent gain calculation



- higher gain increases efficiency
- gain saturation decreases efficiency

One must work with the highest possible gain such as saturation remains low during 2 pass amplification .

Results



- Relative reduction of side peak intensity :

$$I_{\text{side}}/I_0 = 0.01$$

- Energy increased up to 6 mJ : good for amplification

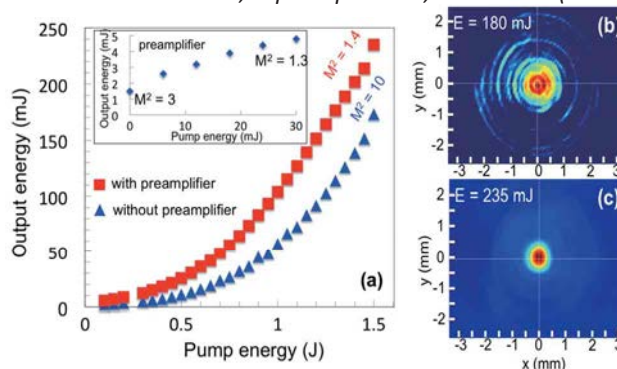
- M² reduced from 3.0 to 1.3

Conclusion

The demand of ultra-compact, high-brightness, high-energy laser sources led us to develop a micro-MOPA system. For maintaining good beam quality at high-energy, it was shown that end-pumping configuration should be used. A compact beam-cleaning element was developed based on the principle of gain aperture, ensuring near-Gaussian beam quality even after amplification.

GA was implemented into a compact high energy MOPA

V. Yahia and T. Taira, *Opt. Express* **26**, 8609-8618 (2018)



	Microchip	MOPA without gain aperture	MOPA with gain aperture
Footprint [cm x cm]	5 x 5	30 x 45	30 x 45
Energy [mJ]	2	180	235
M ²	3	10	1.4
Brightness [PW/sr.cm ²]	0.051	0.42	18
		(increase x8)	(increase x353)
Repetition rate [Hz]	100	100	10

100Hz 駆動 10PW/sr/cm² 級マイクロ MOPA

○川崎泰介¹, Vincent Yahia¹, 平等拓範^{2,1}

(1: 分子科学研究所, 2: 理科学研究所)

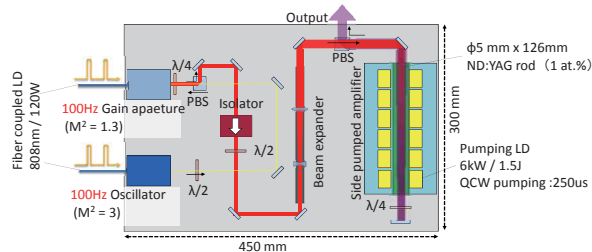
Background

Compact : palm-top - note size -> Portable / Vehicles
Short pulse : sub ns
High peak power : ~ MW
-> Ignition, THz generation, particle acceleration, etc.

Higher brightness requirement -> Micro-MOPA

$$\text{Brightness } B = \frac{P}{A\Omega} = \frac{P}{(\lambda M^2)^2} \quad \begin{matrix} P: \text{power} \\ A: \text{mode area} \\ \Omega: \text{solid angle at far-field} \end{matrix}$$

PW/sr/cm²-class Micro-MOPA



Gain aperture	Energy	Peak power	M²	Brightness	Repetition rate
No	180 mJ	0.4 GW	>10	418 TW/sr/cm²	100 Hz
Yes	235 mJ	0.34 GW	1.4	18 PW/sr/cm²	10 Hz

Repetition rate limitation

Thermal lens in amplifier can focus high quality beam easily -> Optics damage

We evaluated thermal lens effect to avoid the optics damages

Thermal lens estimation result

Parameters

Probe beam

Medium : Yb:YAG laser
Wave length : 1030 nm
Effective pulse length 2μs

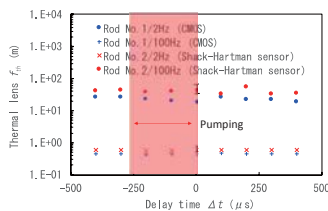
Nd:YAG rod

Pumping duration : 250 us
Pumping energy : 1.5 J
Pumping rate : variable

Sensors

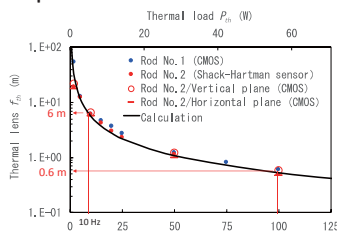
CMOS camera (CMOS-1202, CINOGY)
Shack-Hartman sensor (HASO 4, IMAGE OPTIC)

Delay time dependence caused by QCW pumping for Nd:YAG rod



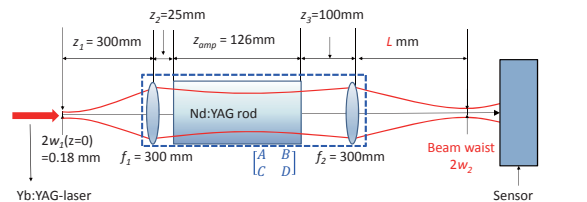
-> f_{th} does not have significant time dependence

Repetition rate dependence



-> f_{th} at 100 Hz operation : 0.6 m

Method



$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & z_3 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(yz_{amp}) & (n_0\gamma)^{-1} \sin(yz_{amp}) \\ -n_{p0}\gamma \sin(yz_{amp}) & \cos(yz_{amp}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & z_2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{bmatrix}$$

Focal length of thermal Lens f_{th}

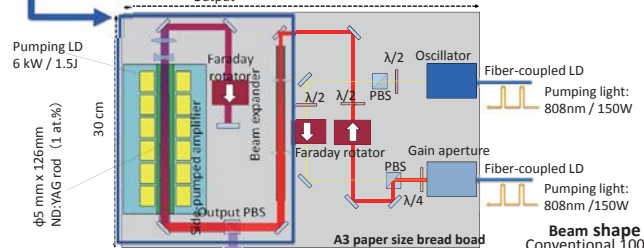
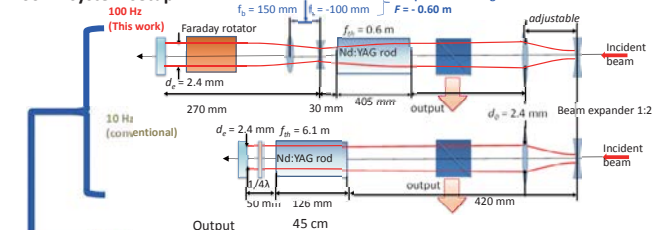
$$f_{th} = \frac{1}{n_{p0}\gamma(n_{p2})} \cot(z_{amp}\gamma(n_{p2}))$$

$$\gamma(n_{p2}) \equiv \sqrt{\frac{n_{p2}}{n_{p0}}} \quad \begin{matrix} n_{p0}: \text{Refractive index at the center of Nd:YAG-rod} \\ n_{p2}: \text{Refractive index divergence of Nd:YAG-rod for radial direction} \end{matrix}$$

-> f_{th} can be estimated from the beam waist position L

Construction of 100 Hz system

100 Hz system setup

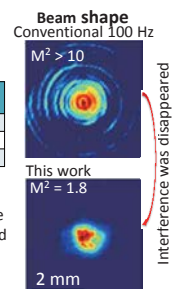


100 Hz operation Result

Gain aperture	Repetition rate	Energy	Average power	Pulse length	Peak power	M²	Brightness
No	100 Hz	180 mJ	18 W	430 ps	0.40 GW	>10	0.4 PW/sr/cm²
Yes	10 Hz	235 mJ	2 W	700 ps	0.34 GW	1.4	18 PW/sr/cm²
Yes	100 Hz	190 mJ	19 W	470 ps	0.40 GW	1.8	11 PW/sr/cm²

Conclusion

We achieved 100 Hz, 190 mJ and 11 PW/sr/cm² operation within A3 size footprint by analyzing thermal lens of the Nd:YAG rod in the amplifier and optimizing optics.



ジュール級 300Hz パワーレーザーの実用化・製品化

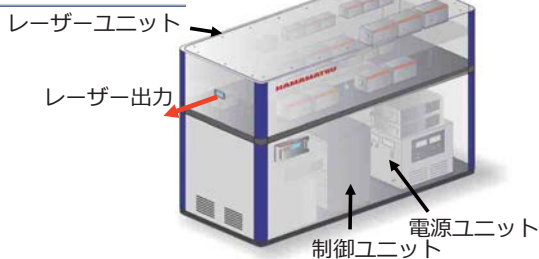
浜松ホトニクス株式会社 川嶋 利幸

目指す姿

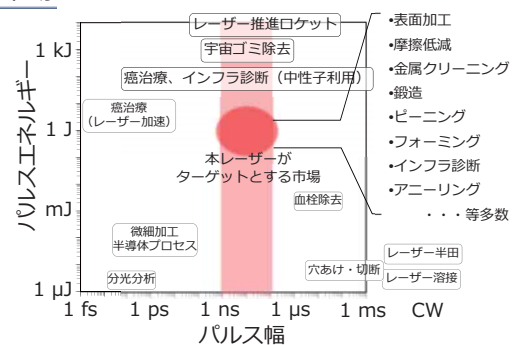
パルスエネルギーがジュール級、パルス幅がナノ秒、かつ高繰り返し出力のレーザーは、潜在的な需要があるものの、十分に市場に展開されていない

これを励起用高出力半導体レーザーをキーデバイスとして用いて、テーブルトップサイズのパワーレーザーを実現する。

製品化のイメージ



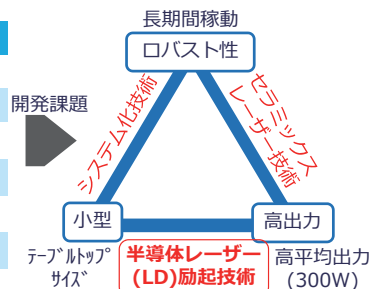
期待される市場



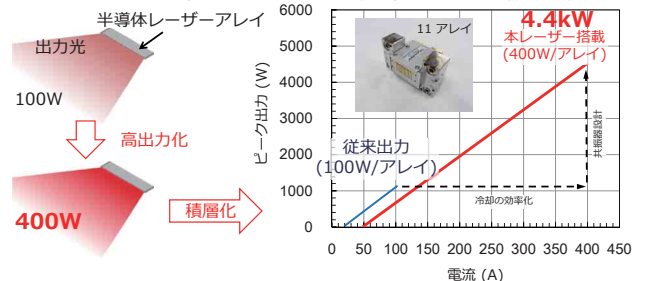
開発目標

レーザーの仕様

項目	単位	仕様
パルス幅	ns	10~40
パルスエネルギー	J	1
繰り返し周波数	Hz	300
波長	μm	1
サイズ	m ²	1.2 × 2.4
出力安定性	%	< ±5



パワーレーザーのキーデバイスである半導体レーザーの高出力化

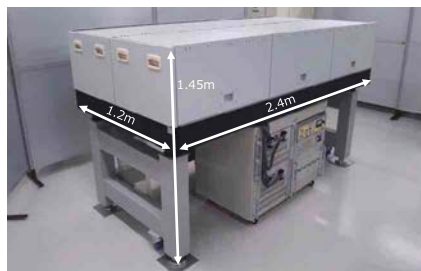


成果

開発目標の平均出力300W (1J × 300Hz)を達成

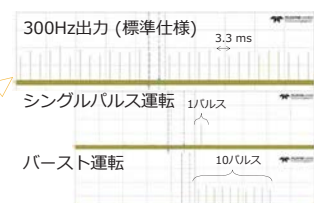
- パルス幅：37ns
- ユーザー検証試験に本レーザーを使用

検証試験機の外観



ユーザーの要望に応じた柔軟な出力制御

外部信号制御に加え
手元スイッチで
ON/OFF制御



今後の展開

- ユーザーニーズに対応した小型高出力レーザー製品ラインナップ化
- レーザー装置のさらなる小型化・低コスト化（国産レーザーの競争力強化）
- レーザー加工応用ユーザの開拓（他プロジェクトへの展開を含む）

マイクロチップレーザーを試せる 「レーザー試用プラットフォーム」

浜松工業技術支援センター 鷲坂 芳弘

目指す姿

誰もが気軽にマイクロチップレーザーを試せる環境を提供します

- ◆ 公的機関である浜松工業技術支援センター内に、マイクロチップレーザーをお試しできるプラットフォーム（実験場）を設置し、一般に開放します。
- ◆ 初心者でも容易にレーザーを試すことができる環境を提供するとともにマイクロチップレーザーの用途開発を支援し、応用の拡大、ユビキタス化に貢献します。

開発目標

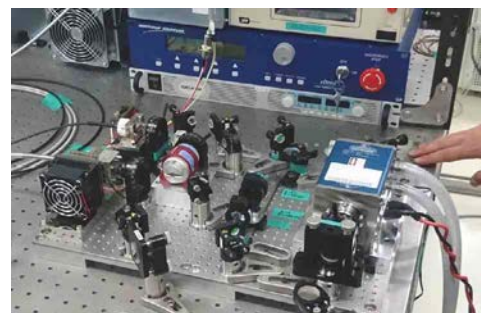
据置型（Micro-MOPA）ならびにハンドヘルド型のマイクロチップレーザー試用プラットフォームを構築して、一般に開放し、プログラム終了後も誰でもレーザーを利用できるよう運営していきます。

成 果

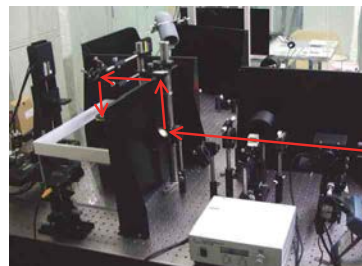
Micro-MOPAの試用プラットフォームを構築し、一般に開放しました。縦型、横型の2系統の加工場があり、水中での照射も可能です。オシロスコープ、フォトディテクタ、ビームプロファイラ、エネルギーメータなどの基礎的な測定器も揃えています。誰でも無料で利用できます。オペレーターは職員が務めますので、レーザーを触ったことがない方でも利用可能です。

レーザー発振器の仕様（2仕様に切替が可能です）

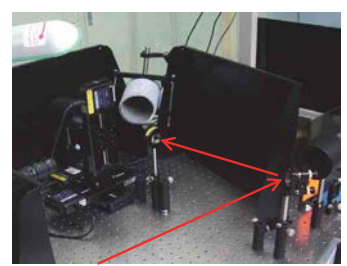
	標準仕様	オプション
波長	1064 nm	
パルス幅	700 ps	
繰返し周波数	10 Hz	100 Hz
パルスエネルギー	<100 mJ	<2.5 mJ



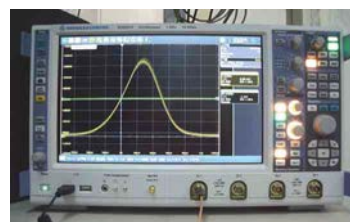
マイクロチップレーザー発振器
(Micro-MOPA)



縦型加工場



横型加工場



オシロスコープ



エネルギーメーター

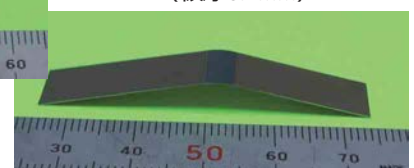
今後の展開

- ◆ H31年3月にハンドヘルド型（4mJ級）の発振器も導入し、2台体制とします。
- ◆ H31年度以降も無料で、可能性試験、用途開発、設備導入検討等にご利用いただけます。
- ◆ レーザーピーンフォーミングなどの独自の用途開発を行います。



▲純アルミニウムのレーザー
ピーンフォーミング
(板厚1mm)

▼純チタンのレーザー
ピーンフォーミング
(板厚0.2mm)



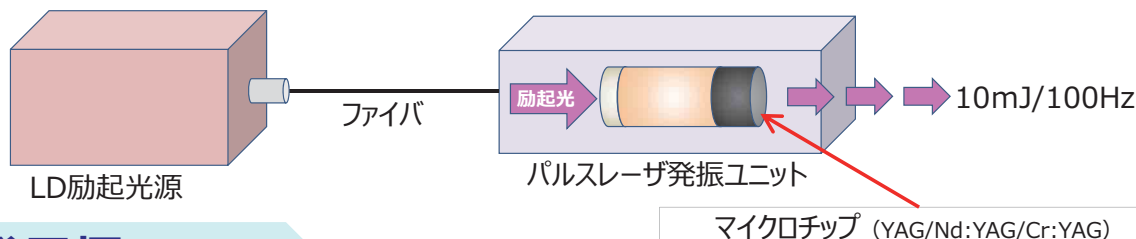
問合せ・利用申込先：浜松工業技術支援センター 光科 鷲坂（さぎさか） TEL：053-428-4157

幅広い加工用途へのマッチングを目指したマイクロチップレーザー

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 永田 毅

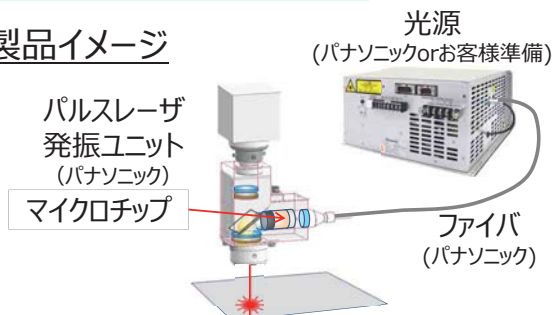
目指す姿

コンパクトなパルスレーザ発振ユニットとコンパクトなLD励起光源で構成し、小型・低価格のハンドヘルドパワーレーザユニットとして製品化



開発目標

製品イメージ



- ◆お客様のアプリケーションに合わせて装置化できるよう、発振ユニットを中心としたユニットで供給
- ◆発振ユニットは複数のパルス仕様を設定

	開発目標仕様
レーザ構成	マイクロチップ発振ユニット (+光源)
ピーク出力	約25MW
平均出力	約1w
レーザ波長	1064nm
パルスエネルギー	10mJ/100Hz
パルス幅(FWHM)	0.4~1ns
繰り返し周波数	100
ビーム品質(M ²)	<2

成果

発振ユニット(セラミックコンポジット型マイクロチップ搭載)

パルスエネルギー10mJのレーザ発振ユニット

- ◆セラミックコンポジット型マイクロチップを搭載したパルスレーザ発振ユニットのプロト機を製作
- ◆手のひらサイズのパルスレーザ発振ユニットよりパルスエネルギー12mJ、繰り返し周波数80Hzのパルスレーザ出力を確認



一次試作品

サイズ: W16×D70×H21
重量: 200g

(パルスレーザ出力)
パルスエネルギー: 3mJ/plus
パルス幅: 1.2ns
ピーク出力: 2.5MW
繰り返し周波数: 50Hz



二次試作品(冷却機構搭載)

サイズ: W50×D55×H46
重量: 700g

(パルスレーザ出力)
パルスエネルギー: 12mJ/plus
パルス幅: 1.2ns
ピーク出力: 10MW
繰り返し周波数: 80Hz

今後の展開

1. パルスレーザ発振ユニットの販売

- ◆2019年度上期を目標に販売開始

2. 高出力発振ユニットの開発

- ◆常温接合型マイクロチップを搭載し、パルスエネルギー20mJ、サブナノのパルス幅を出力する発振ユニットを開発

	2019年度		2020年度
	上期	下期	上期
製品化	性能・品質評価 販売開始		
高出力化	試作	試作評価(波長変換含)	量産化検討 性能・品質評価

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

株式会社ニデック 羽根淵 昌明

目指す姿

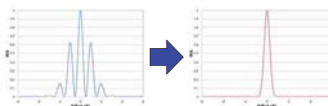
- 分子研にて開発されたマイクロチップレーザーの技術移転を受け、世界に先駆けた**低侵襲・高精度・高機能**な眼科向けレーザー手術装置（緑内障・後発白内障）の製品化を目指す。
◆手術装置 予定生産台数 1,200台/年 ※世界市場予測（2020年） 台数 3600台/年、規模 137億円
- 眼科向け次世代レーザー手術装置実現のキーになるのは**小型サブナノ秒レーザー技術**であり、分子研にて開発されたレーザーは仕様を変更することなくほぼそのまま適応することが可能。
- 年間1,000台以上の生産を達成することで、他アプリケーションへの**低価格な光源供給**を可能にする。
◆レーザー単体での目標販売価格 100万円未満

開発目標

マイクロチップレーザーによって**低侵襲・高精度・高機能化を実現！**

■短パルス化（＜1ns）

- ⇒ 高ピークエネルギー
- ⇒ プラズマ発生閾値の改善（1mJ未満）



■クリーンパルス化

- ⇒ プラズマ発生閾値とプラズマサイズが安定する。
- ⇒ レーザー光の吸収効率が改善する。*サイドパルスが無くなる。
- ⇒ 手術に必要なパルスエネルギーを低くできる。

■高繰り返しパルス化（＞20Hz）

- ⇒ パターン照射（均一照射）
- ⇒ 手術時間の短縮による、医師・患者の負担軽減。

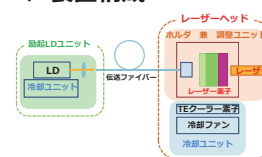


レーザー手術装置

◆目標仕様

- ・パルス幅 1ns未満
- ・波長 1,064nm
- ・パルスエネルギー 5mJ
- ・繰返し周波数 50Hz
- ・偏光 直線偏光
- ・冷却方式 空冷
- ・環境温度 15-30℃

◆装置構成



構成別想定費用

励起光源	20万円
光学部品	15万円
メカ部品	10万円
電気部品	15万円
生産、人件費等	40万円
合計	100万円

目標販売価格 100万円/台（生産台数 1,200台/年）

成果

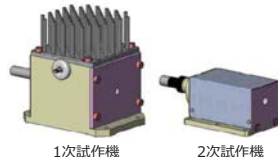
1. レーザー基本性能の確立

目標：手術装置に要求されるレーザー性能の確保

- ・分子研の装置と同等のレーザー性能
- ・偏光子による直線偏光化

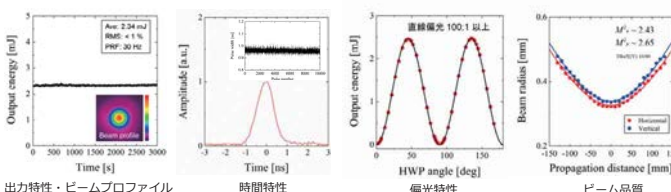
実績・成果

- ・出力：＞4.5mJ、安定性：＜1% rms
- ・安定した直線偏光 100:1 以上
- ・要求されるレーザー性能の確保（試作機）



1次試作機

2次試作機



出力特性・ビームプロファイル

時間特性

偏光特性

ビーム品質

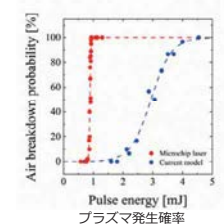
2. 手術性能の確立

目標：目指す治療性能の確保

- ・低侵襲化：低プラズマ閾値化
- ・高精度化：プラズマ発生の安定化

実績・成果

- ・プラズマ閾値：0.8mJ 程度
- ・プラズマ安定化：発生確率の改善



プラズマ発生確率

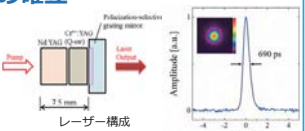
3. 新技術開発：偏光制御技術の確立

目標：新たな偏光制御技術の確保

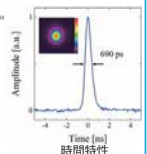
- ・共振器長を維持した偏光制御
- ・偏光特性の安定化

実績・成果

- ・フォトニック結晶ミラーによる偏光制御
- ・共振器長の短尺化による短パルス化



レーザー構成



時間特性

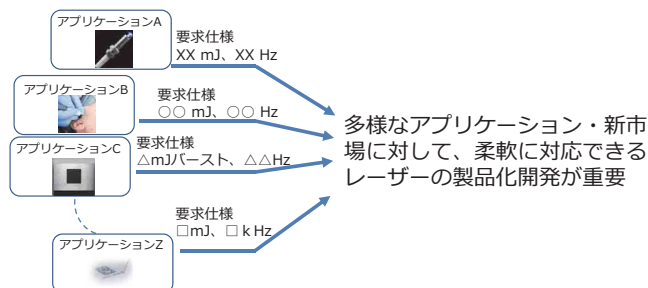
今後の展開

- マイクロチップレーザーを搭載した手術装置は、2023年度の販売を目指す。
- レーザーヘッドの販売は、眼科手術装置の販売と合わせ検討する。
- 高出力化・高ビーム品質化等の高性能化を目指し、マイクロチップレーザー開発を継続する予定。

多様なニーズに応えるスケーラブルな 高出力マイクロチップレーザーの開発

株式会社オプトクエスト 多久島 裕一

目指す姿・提案内容



提案内容

- コスト的に大きな比重を占める励起光源部にファイバーレーザー技術を用いて、励起光源を分散させ、パルスエネルギーに対してスケーラブルな構成を実現

▶少量多品種化、カスタム化に柔軟に対応

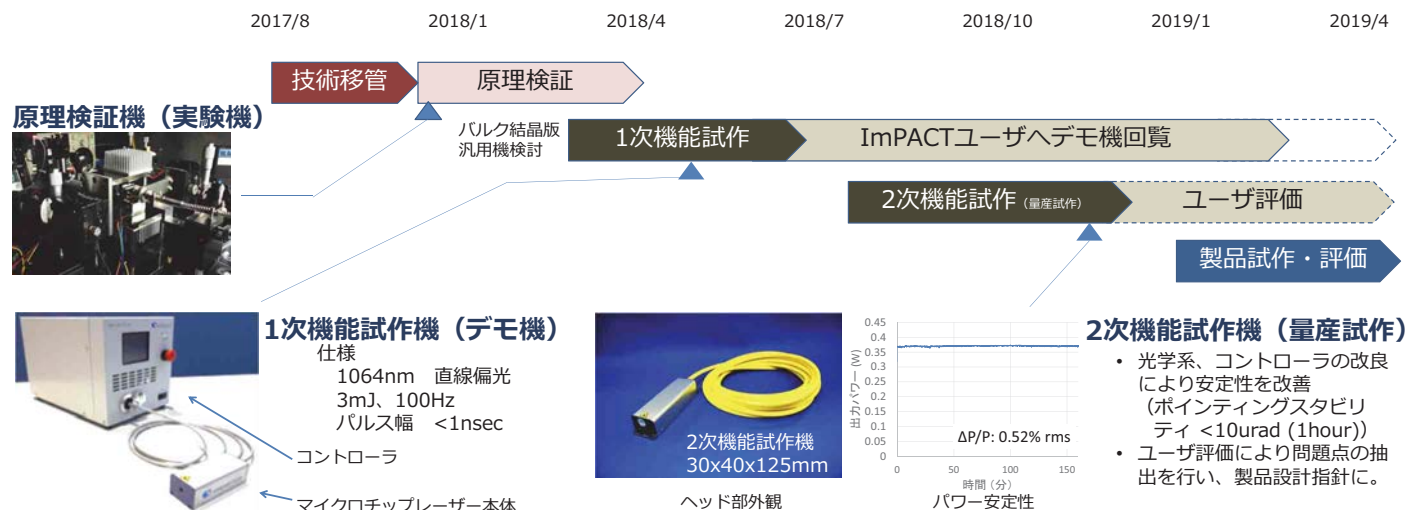


- 弊社の光部品からシステム構築まで含む試作・OEM対応により、レーザー周辺技術・応用製品構築を全面的にバックアップ
- ▶マイクロチップレーザーの市場展開を加速

開発目標

課題「ユビキタス・パワーレーザーによる安心・安全・長寿社会の実現」で開発された高出力マイクロチップレーザーの実験装置に関する技術移管を受け、それらをベースにした製品開発を行う。開発期間中に、マイクロチップレーザーの技術移管、及び、機能試作機・量産試作器試作を行うことを目標とし、概ね所期の成果を達成した。

開発課題の達成状況と成果



今後の展開

- 安定性の更なる改良、環境試験を経た後に、製品として2019/2Q～にリリース予定。
- 製品の高性能化に関する研究開発はImPACT終了後も進めます。
 - ✓高パルスエネルギー化
 - ✓高繰り返し化、ショット制御
 - ✓短波長化
 →デモ機のお貸し出しについても、継続して行います。

<https://www.optoquest.co.jp/>

予定している製品仕様

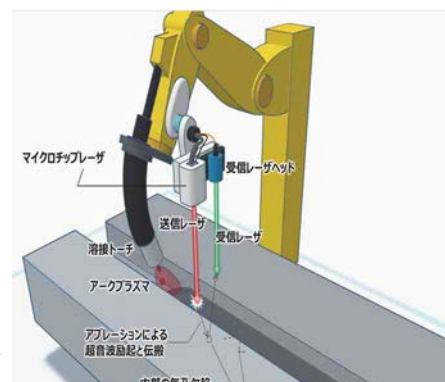
項目	仕様
波長	1064nm
パルスエネルギー	2.5mJ
繰り返し周波数	20-100Hz
パルス幅	<1nsec
偏光	直線偏光
ヘッド部	30x40x125mm、空冷（ペルチエ制御）

レーザー超音波による溶接中リアルタイム欠陥検知技術

大阪大学大学院工学研究科 浅井 知

目指す姿

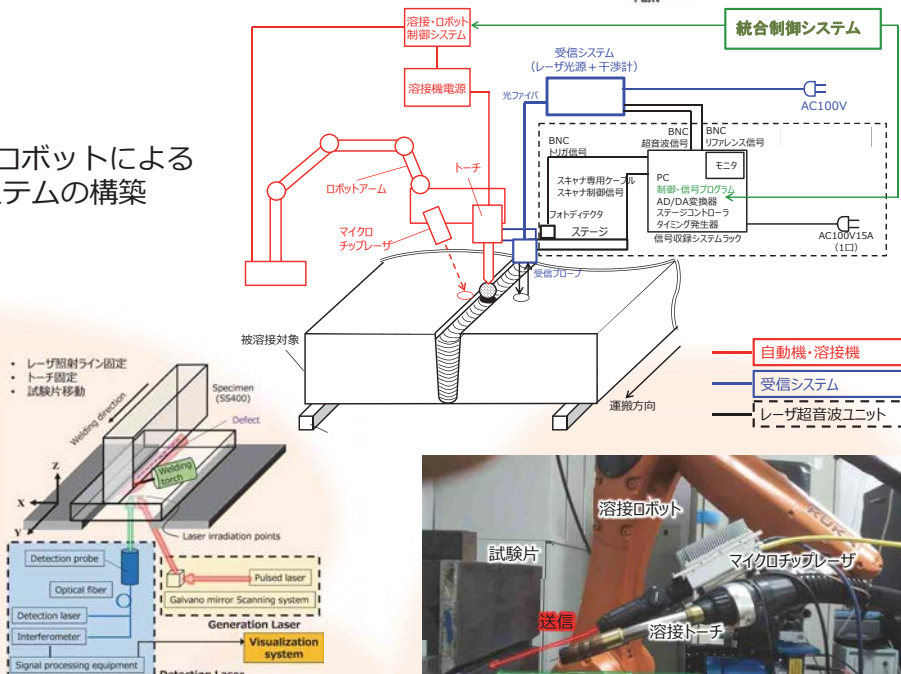
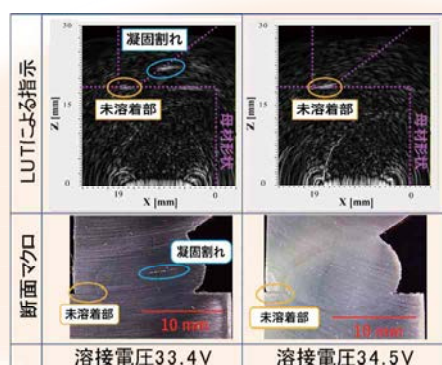
超小型パワーレーザを応用し、溶接中にその場で、検査を含めて品質を制御ならびに保証する**革新的スマート溶接システム**の実証開発を行うことを目的とする。超小型パワーレーザを溶接部に照射し内部に超音波を励起させる**レーザ超音波法（LUT）**を用いることで高温場である溶接中にその場で溶接欠陥の検出や溶融池形状計測などの品質状態を検知することが可能になり、生産性ならびに品質信頼性の向上がはかれる。さらに、品質情報をベースとしたIoTへの展開により、従来の生産工程の溶接作業の革新が期待できる。



開発目標

- 溶接中の欠陥検出技術の開発
- マイクロチップレーザと溶接ロボットによるレーザ超音波計測 統合化システムの構築

成果



- レーザ超音波法による溶接中のリアルタイム欠陥指示

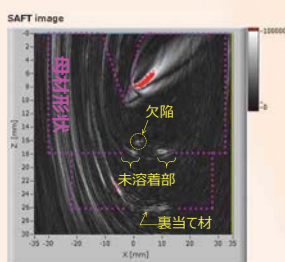
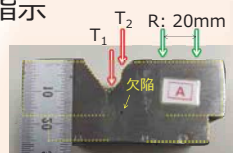
今後の展開

革新的スマートシステムの
実証と実用化

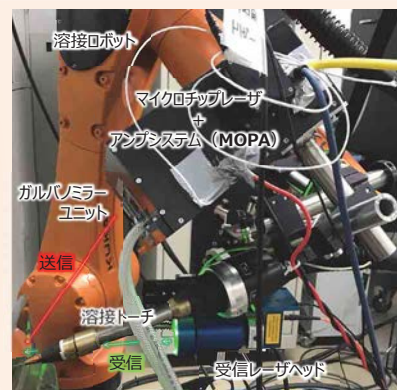
- ・ 建築鉄骨，建設機械，…などの溶接構造物への展開
- ・ 3D金属積層



© Shimz Smart Site



- 多層盛溶接部の欠陥検出
- マイクロチップレーザをロボットアームに搭載したスマート溶接システムによる超音波探傷



超小型皮膚疾患用レーザー治療器の開発及び実証評価

株式会社ユニタック 高橋 一哲

目指す姿

安全で治療効果が高い
ピコ秒レーザー治療装置を持ち運び
可能なサイズにし低価格で市場へ提供

開発目標

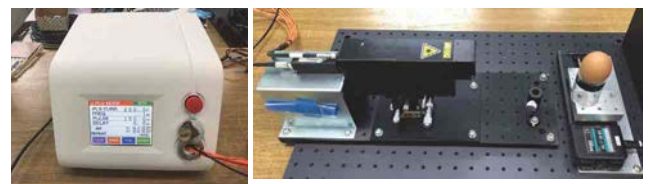
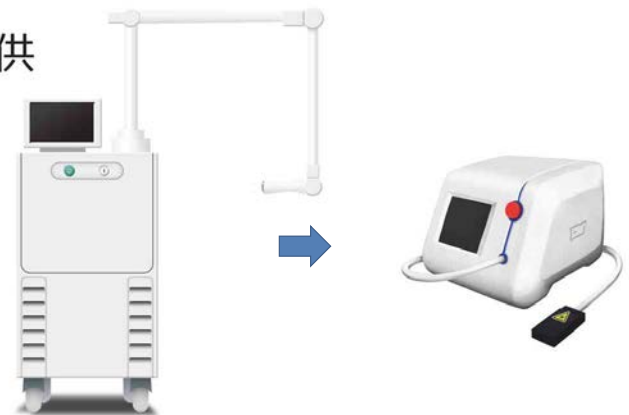
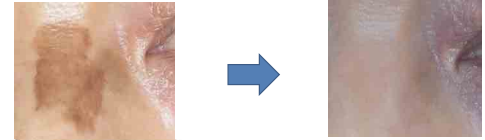
- ・据え置き型から卓上型へ
- ・体積・重量：10分の1以下
- ・1064nm/532nmの切替可能
- ・ピコ秒のパルス幅を実現
- ・スポットサイズも調整可能

成 果

- ・2.5mJのマイクロチップレーザを
アンプにより約40mJに増幅
- ・SHGユニットを装着することで
532nmでの照射を実現
- ・褐色鶏卵で2mmスポットでの
脱色効果を確認

今後の展開

- ・スポットサイズ調整機構の開発
- ・広島大学での動物実験の実施
- ・2023年上市を目指す



国内 出荷台数の推移 (台)



(出典: 矢野経済研究所)

形成外科、美容外科、皮膚科

病院 4,000施設 クリニック 15,000施設

マイクロチップ用超小型電源／ポータブル電源の開発

株式会社ユニタック 高橋 一哲

目指す姿

- ・ **マイクロチップレーザ**に最適化し**小型化・低価格化**を実現したLD内蔵電源を開発する。
- ・ マイクロチップレーザを**どこでも利用可能**にするために持ち運び可能な**バッテリー駆動型**LD内蔵電源を開発する。

開発目標

- ・ LD、放熱板、ペルチェを内蔵しレーザー用電源の超小型化・低価格化を実現する。
- ・ 1時間以上のバッテリー駆動が可能で持ち運べる重さを実現する。

成 果

マイクロチップレーザ用励起光源



容積比で従来の31%へ小型化を達成

- ・ **150WLD及び冷加熱ペルチェドライバー内蔵**
- ・ 外形寸法：200Wx320Dx200H
- ・ **小型・軽量 10 kg**

今後の展開

- ・ 用途に応じてさらなる小型化を目指す
- ・ アンプにより高出力化した光源の開発

バッテリー駆動型励起光源



- ・ **バッテリー内蔵**で屋外使用可能
- ・ **1時間以上の連続動作可能**
- ・ 外形寸法240Wx290Dx100H
- ・ 小型・軽量 **約5kg** 肩掛け可能

お問い合わせ

Eメール office@unitac.net

インターネット

ユニタック

検索

<http://www.unitac.net>

パルスレーザーによるリチウムイオン電池電解液の “そのまま” 除去・回収

株式会社 東芝 岡田 直忠

目指す姿

- ◆ 金属に付着した液体を気化させず，“そのまま” 除去・回収する超低エネルギープロセス
- ◆ 超小型レーザーで電解液を除去する技術を開発し，リベット法より低コストなレーザー溶接によるリチウムイオン電池の注液口封止を実現



正常



電解液起因の
穴あき

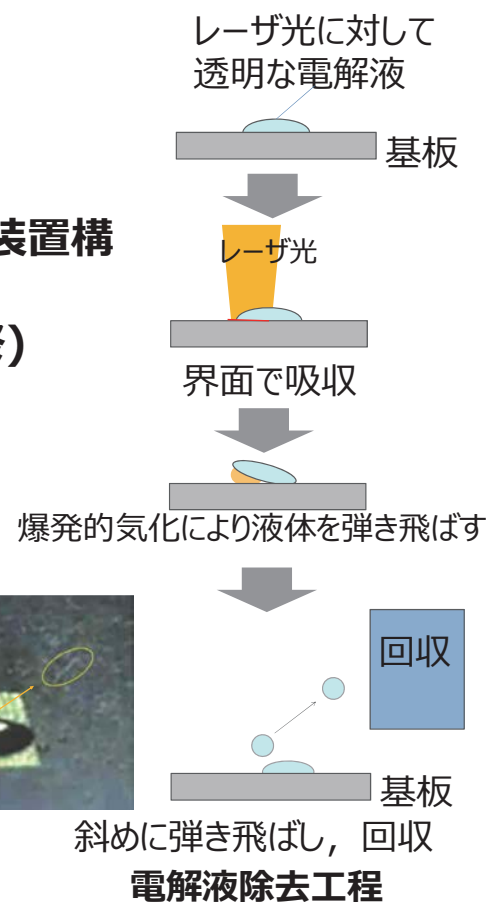
電解液による溶接不良

開発目標

- ◆ 電解液の除去に最適なレーザー照射条件と装置構成を求める（18年度末）
- ◆ リチウムイオン電池製造工程に適用(最終)

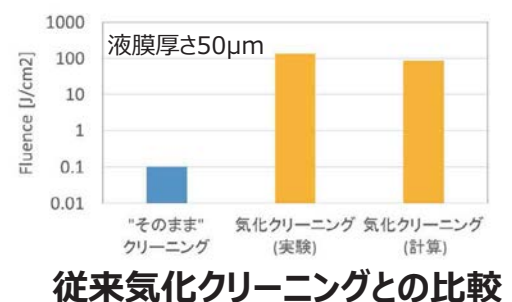
成果

- ◆ ハンドヘルドレーザーの小スポットビーム(Φ1-2 mm)で，斜め上方に弾き飛ばし回収
- ◆ 従来気化クリーニングの1/1000のエネルギーで除去



今後の展開

- ◆ 試作設備により電解液除去効果を検証後，月産100万個級の生産ラインに適用

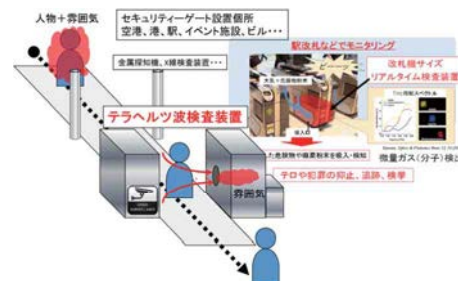


パワーレーザーによる高出力 THz 波の発生・検出とセキュリティ応用

理化学研究所 南出 泰亜

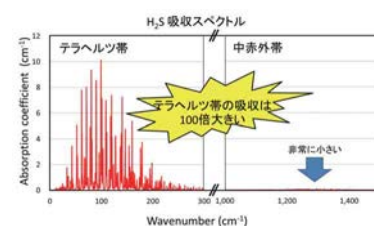
目指す姿

実社会においてセキュリティに関する技術は、国民の命と財産を守るインフラとして重要であり注目されている。人の往来が多く、人口が集中する都市部、新幹線や駅、空港ターミナルなどでは、危険物質の持ち込み・存在をいち早く検出する必要がある。本プロジェクトでは、テラヘルツ波帯にある分子の大きな共鳴吸収と指紋スペクトルを利用して、危険物質からの漂う微量分子を高感度・高速に検出するテラヘルツ波技術の開発を目的とする。



検出可能な危険ガスのリスト

事象	対象	検出ガスの候補	吸収スペクトルの例
テロ事件	爆発物 神経ガス	NH_3 , NO_2 , N_2O サリン, VX など	
危険物の 持ちこたえ	ガソリン・都市ガス などの毒物・劇物	付随剤: TBM , CH_3OH , H_2S , HCl , HCN , NH_3 , SO_2 , UF_6	
薬物犯罪	麻薬・覚醒剤・ハーブ シンナーなど	?	
自然災害	火山性ガス	H_2S , CO_2 , SO_2	
環境問題	フロンガス 温室効果ガス	HFCs , PFCs , CO_2 , CH_4 , N_2O , SF_6	



開発目標

- (1) 広帯域・高出力テラヘルツ波発生技術
開発目標 1: 0.8THz~3.0THzの広帯域テラヘルツ波発生
2: 全帯域でパルス尖頭値1kW以上の出力
- (2) リアルタイムでの微弱(1fJ以下)テラヘルツ波分光検出技術
開発目標 1: 0.8THz~3THzの検出範囲で高感度検出の実現
2: 最小1fJの微弱テラヘルツ波エネルギーの検出
- (3) 高速(1秒以下)で1ppmレベルの複数ガスの検出技術
開発目標 1: 1ppmレベルで1秒以内でのガス検出
2: 複数ガスに対応した検出

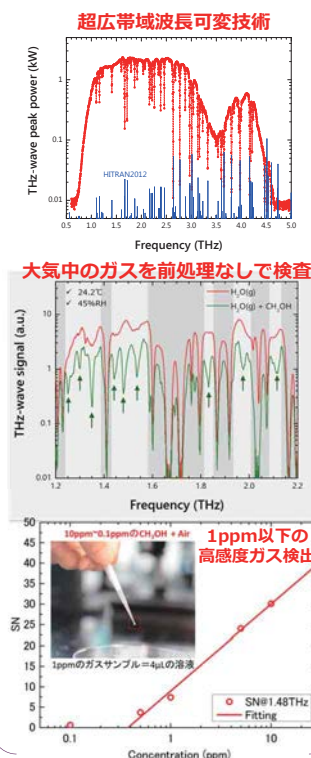
成果

テラヘルツ波危険ガス検出装置



特願2018-163717

開発技術の成果



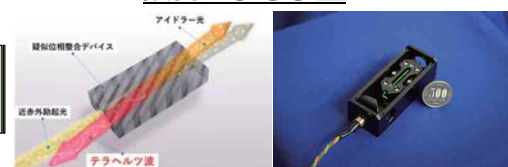
今後の展開

プロトタイプ装置を用いた原理検証によって、将来の社会実装に向けた基盤技術を創出する。

将来応用例



理化学研究所の最新波長可変テラヘルツ光源との融合による小型



独自設計の非線形光学結晶とサブナノ秒パルス光源による手のひらサイズのテラヘルツ波発生器

テラヘルツ波発生器のプロトタイプ

パルスレーザ支援レーザ溶接法の開発

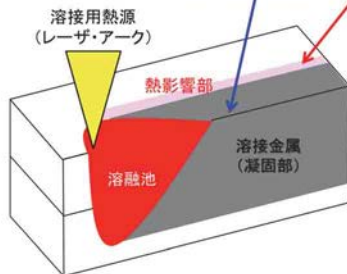
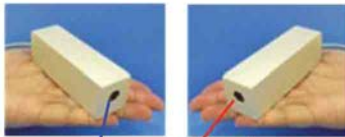


佐野 智一 准教授
 大阪大学 大学院工学研究科 マテリアル生産科学専攻

開発目標

パルスレーザ支援溶接法による
 ダメージレスレーザ溶接技術の確立

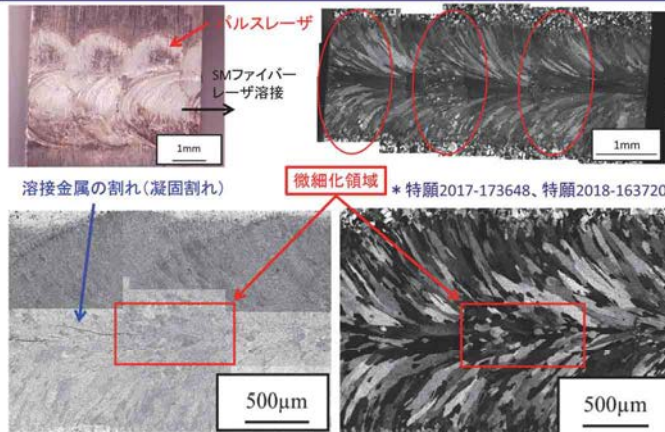
金属組織微細化用
 ハンドヘルドレーザ
 →等軸晶のみの凝固
 組織の形成
 ⇒高強度化



ドライピーニング用
 ハンドヘルドレーザ
 →溶接金属・熱影響部
 の強化
 ⇒疲労寿命向上

- ✓ ALL LASERによる健全な溶接継手の形成
- ✓ 溶接を感じさせない新しい溶接法
- ✓ オール国産

溶接が困難な2024-T3アルミニウム合金の
 溶接金属微細化に成功 ⇒ 割れの進展を抑止



今後の展開

◆応用展開

1. ハンドヘルドレーザの利用

本ImPACTプログラムで開発中の高ピークパワー・高繰り返し手のハンドヘルドレーザを用いて継手を作製 ⇒ 強度評価

2. 本手法の実継手への適用(航空機部品)

高出力レーザ溶接によるアルミニウム合金厚板への適用 ⇒ 航空機部品としての特性評価

3. 本手法の適用箇所の拡大(航空機部品以外)

アルミニウム合金以外の材料への本手法の適用・レーザ以外の溶接用熱源(アークなど)の適用 ⇒ 重電・重工・車両等への展開

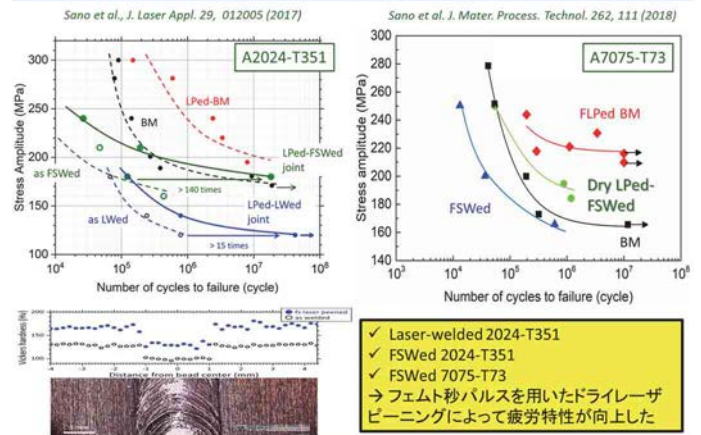
◆学術展開

4. レーザ加工による材料強靱化の機構解明・指導原理の構築

本ImPACT研究開発を学術的に深化・発展させる内容で、文部科学省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム(Q-LEAP)」次世代レーザー基礎基盤研究(2018～2027)に採択された。このQ-LEAPプログラムを活用し、レーザ加工による材料強靱化の機構解明と、その指導原理の構築を目指す。

成果

ドライレーザピーニングによる
 レーザ溶接継手・摩擦攪拌接合継手の疲労特性向上



SUS304のTIGアーク溶接への適用
 → 溶接金属微細化に成功



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 菅 育正

目指す姿

光電子イメージング = 化学変化の動的観察を**ユビキタス化**
現場分析力の深化に伴う**安心・安全・長寿社会の実現**

Ex.



トラック1台サイズ
X線光源

×



MyPEEM
(菅製作所)

=



内核光電子
動的イメージング

開発目標

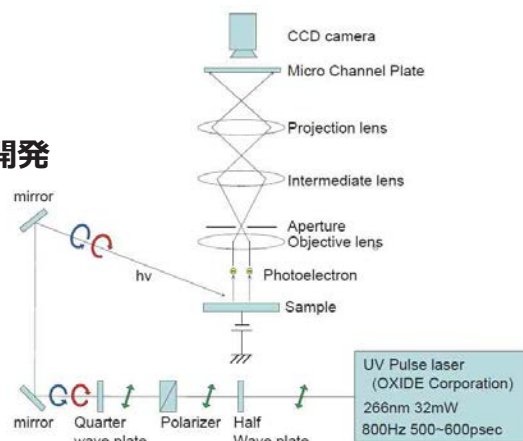
光電子イメージングの応用例拡充

UVレーザーの直線性を活かした円偏光源ユニットを開発
MyPEEMと組み合わせて光電子像観察実施



円偏光源ユニット

UVレーザー



実験系統図

成果

右旋円偏光,左旋円偏光でのPEEM像の差分をとることで
3.5 inch floppy discの磁区観察に成功

→The 8th International Symposium Surface Science in つくば
にて成果報告(ポスター発表)

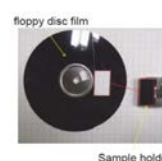


Fig. 2 Schematic view of sample setting

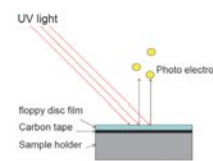


Fig. 3 Sectional view of sample

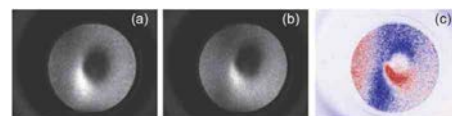


Fig. 4 PEEM image of Magnetic recording surface of floppy disc in FOV 250μm
(a) in right-circularly polarized lights (b) in left-circularly polarized lights and (c)
The MCD asymmetry is defined here by $c=(b-a)/(b+a)$

今後の展開

- ・ 空間分解能の向上, 定量分析機能の取り込みが課題
 - ・ 技術的課題と企業ニーズを取り込んだ新たな装置を開発し、分析サービス事業の展開を検討
- A-STEP 研究成果最適展開支援プログラム(NexTEP-Aタイプ)への申請を検討

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 T C K 小坂 光二

目指す姿

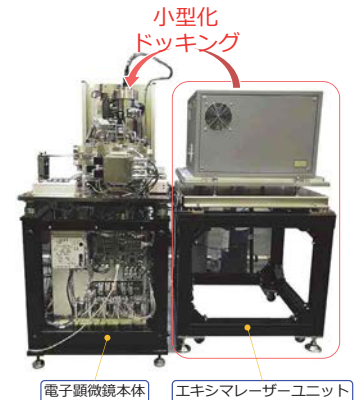
生体組織および高分子材料等のための三次元画像データ生成

生体組織などの切片をエキシマレーザー(深紫外)と電子顕微鏡を融合した立体電子顕微鏡(CT-SEM)によりナノレベルで微細構造の解析が可能。市場に普及するためにはエキシマレーザーの以下の課題解決が必要。

巨大なサイズ
ガスの入手性と耐久性
困難な取り扱い
入手性が不安定な海外製



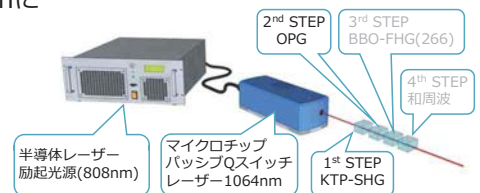
小型化
ガスの不使用
容易な取り扱い
国産製



開発目標

深紫外(DUV)レーザー発生メカニズム

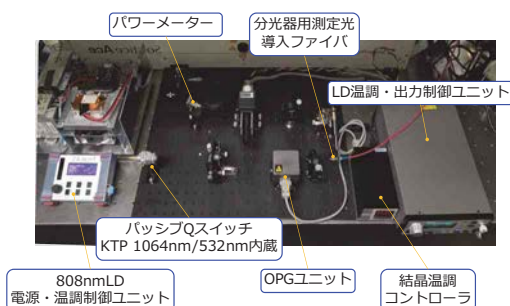
- 808nmのレーザー光をマイクロチップ受動Qスイッチで1064nmに波長変換
- 1st STEP KTP-SHG結晶を使い532nmに波長変換
- 2nd STEP 光パラメトリック発振器(OPG)で755nmに波長変換
- 3rd, 4th STEPの波長変換は算出により本実証実験では省略



実証実験内容

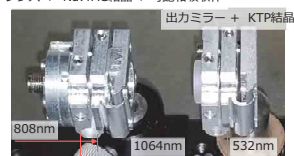
- PPLN-OPGで532nm波長のレーザー光源を高効率で755nmに変換
- 755nm $\pm$ 0.1nm以下の波長コントロール

成果

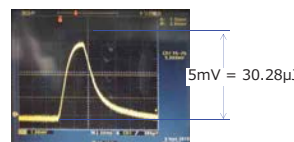


テストベンチ構成

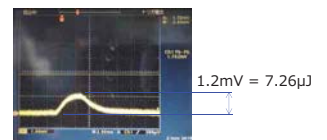
コリメートレンズ + Nd:YAG結晶 + 可飽和吸収体



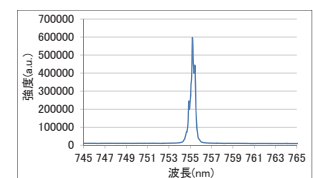
光源から532nmへの波長変換



パッシブQ-SW出力532nmエネルギー測定



OPGから出力したエネルギー測定



OPGで発生した波長測定

今後の展開

- レーザー出力の高出力化
- 深紫外(DUV)固体レーザーの開発
- CT-SEMへの搭載
- その他 応用アプリケーションへの展開

5倍程度の高出力化
残りの波長変換の実証実験
当該装置に最適な構造化
適したアプリケーションの模索

～2019年3月
～2020年
～2021年
2021年～

宇宙用エンジンのレーザー着火技術開発

株式会社 IHI エアロスペース 松浦 芳樹

目指す姿

小型・高出力なImPACTレーザーで、極低温流体を推進剤に用いた宇宙機用エンジン内部に点火用の火種(プラズマ)を生成させることで、**信頼性の高い着火システムを実現**する。

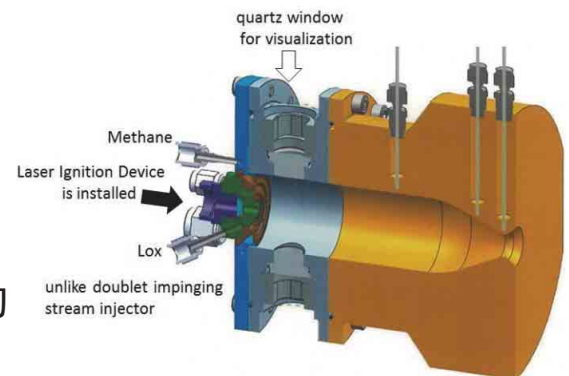
これにより、月探査や惑星間航行で有望視されている**酸素／メタンを活用したエンジンの効果的な運用**(複数回作動によるきめ細かな軌道制御)を実現し、**国産エンジンの競争力強化と市場シェアの確保**を達成する。

開発目標

レーザー搭載型エンジン試験

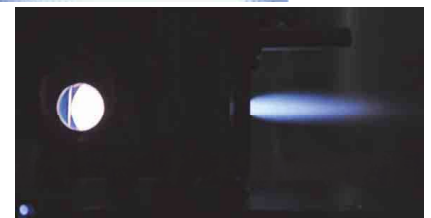
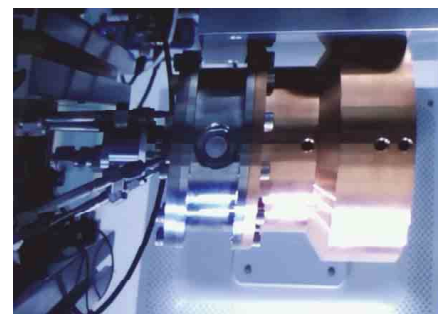
- ・可視化窓付、着火状況を確認可能

目標：ImPACTレーザーの特徴であるバースト駆動の着火に対する有効性を試験確認する。



成果

成立性確認用の酸素／メタン用のデモ用小型燃焼器にImPACTで開発された**ハンドヘルド型パワーレーザーを用いて着火試験**を実施。プラズマを火種として**エンジン着火が可能であることを試験実証した**。



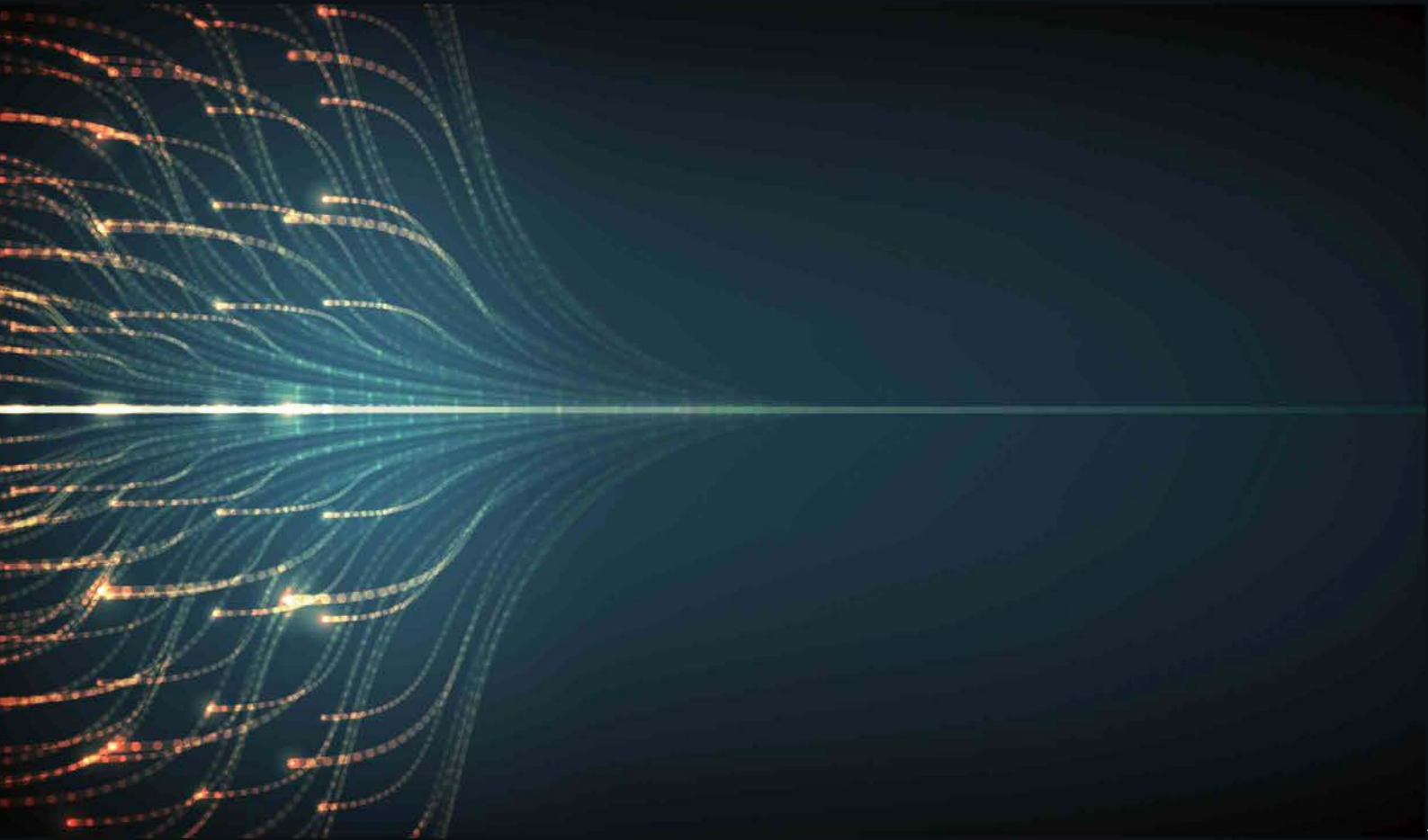
今後の展開

レーザー搭載型のエンジン燃焼試験を2019年後半～2020年に実現させ、更なる発展を目指す。

ImPACT PROGRAM

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

Ubiquitous Power Laser for Achieving a Safe, Secure and Longevity Society



主催



内閣府



革新的研究開発推進プログラム
ImPACT
Impulsing Paradigm Change through Disruptive Technologies Program



国立研究開発法人
科学技術振興機構
Japan Science and Technology Agency

お問合せ先

国立研究開発法人 科学技術振興機構 (JST)
革新的研究開発推進室 (ImPACT) 佐野プログラム担当
e-mail: impact-sn@jst.go.jp

2019年3月 増版