



JST-Mirai Program

# レーザー駆動粒子加速がもたらす次世代加速器の可能性



大阪大学 産業科学研究所

- ・ 第2研究部門 量子ビーム物理研究分野
- ・ 量子ビーム科学研究施設



理化学研究所放射光科学研究センター

先端光源開発研究部門 レーザー加速開発チーム

細貝知直

マイクロ固体フォトニクス研究会

第11回レーザー学会「ユビキタスパワーレーザー」

専門委員会 2020.12.17

# 本日の講演内容

---

## 1. レーザー航跡場加速 研究

- レーザー航跡場加速とは
- 大型研究プロジェクト
- 最近の成果と研究進捗状況

## 2. レーザー加速プラットフォーム'LAPLACIAN'

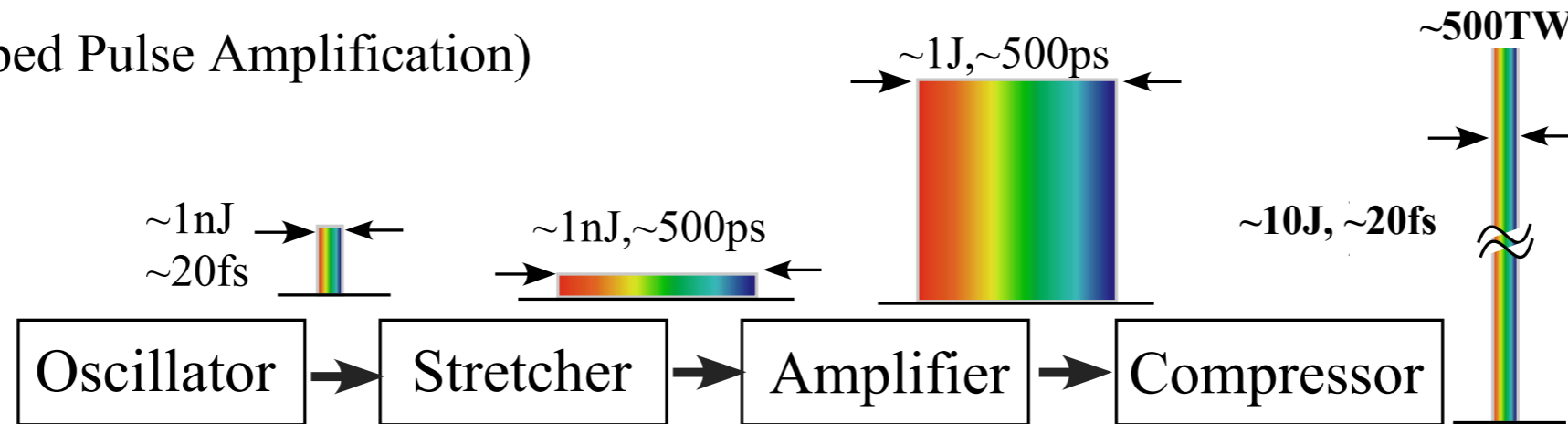
バーチャル ラボツアー

# 超高強度極短パルスレーザー チャープパルス増幅法

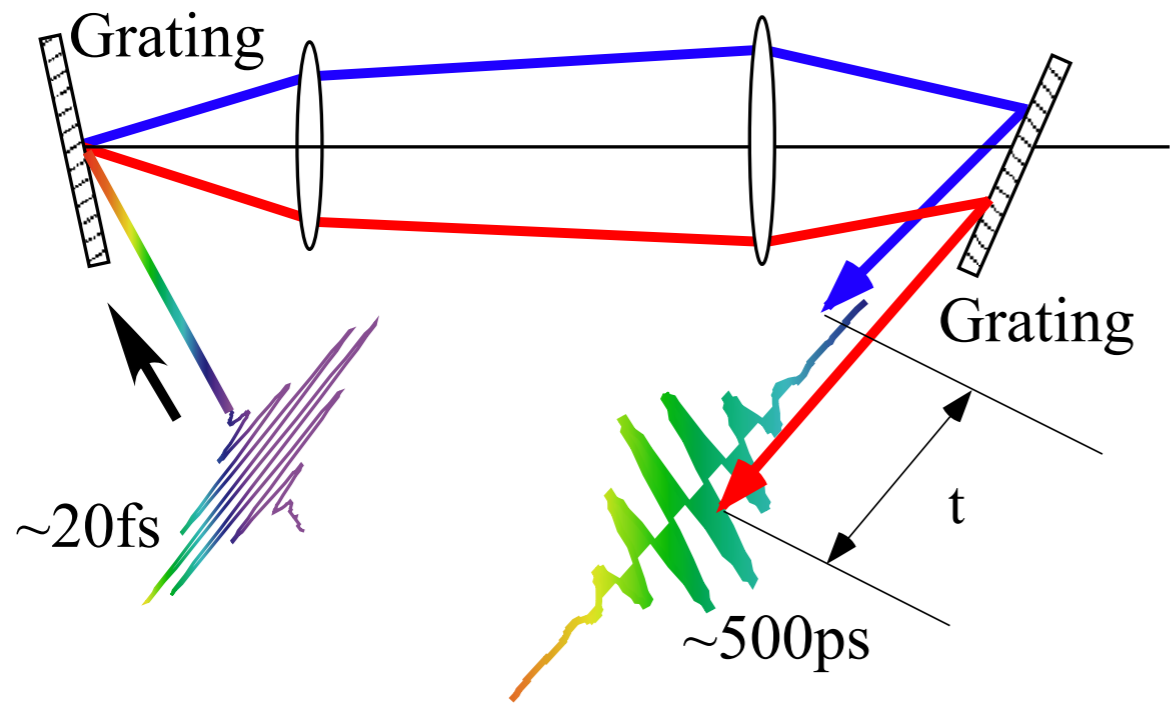


Dr. Gerard Mourou  
2018 ノーベル物理学賞

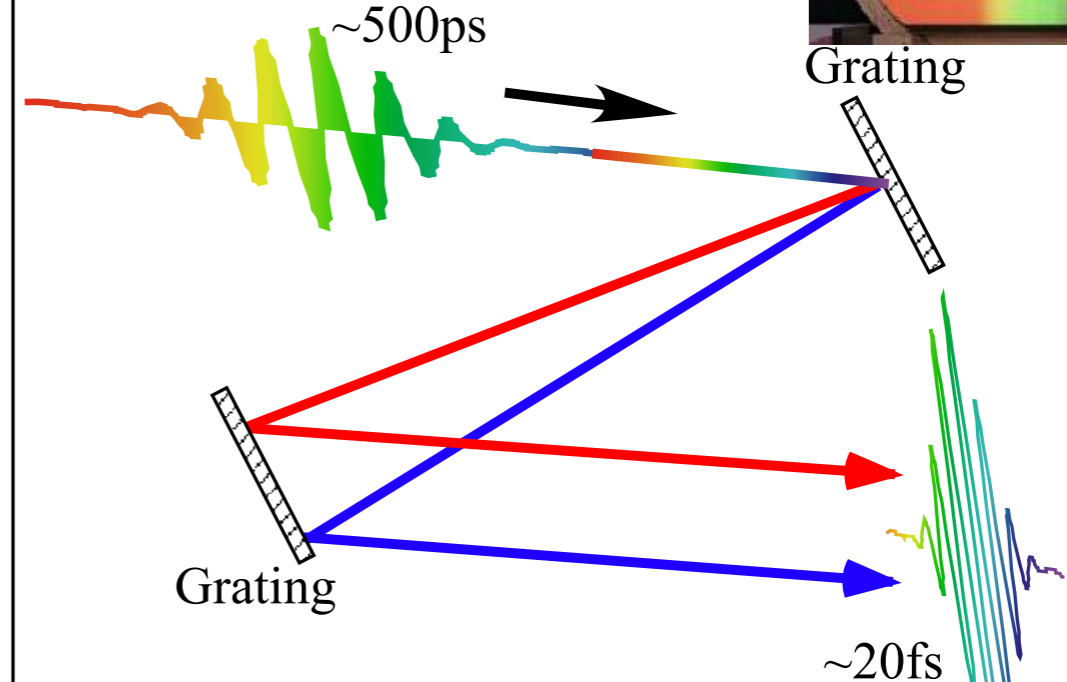
CPA (Chirped Pulse Amplification)



Stretcher

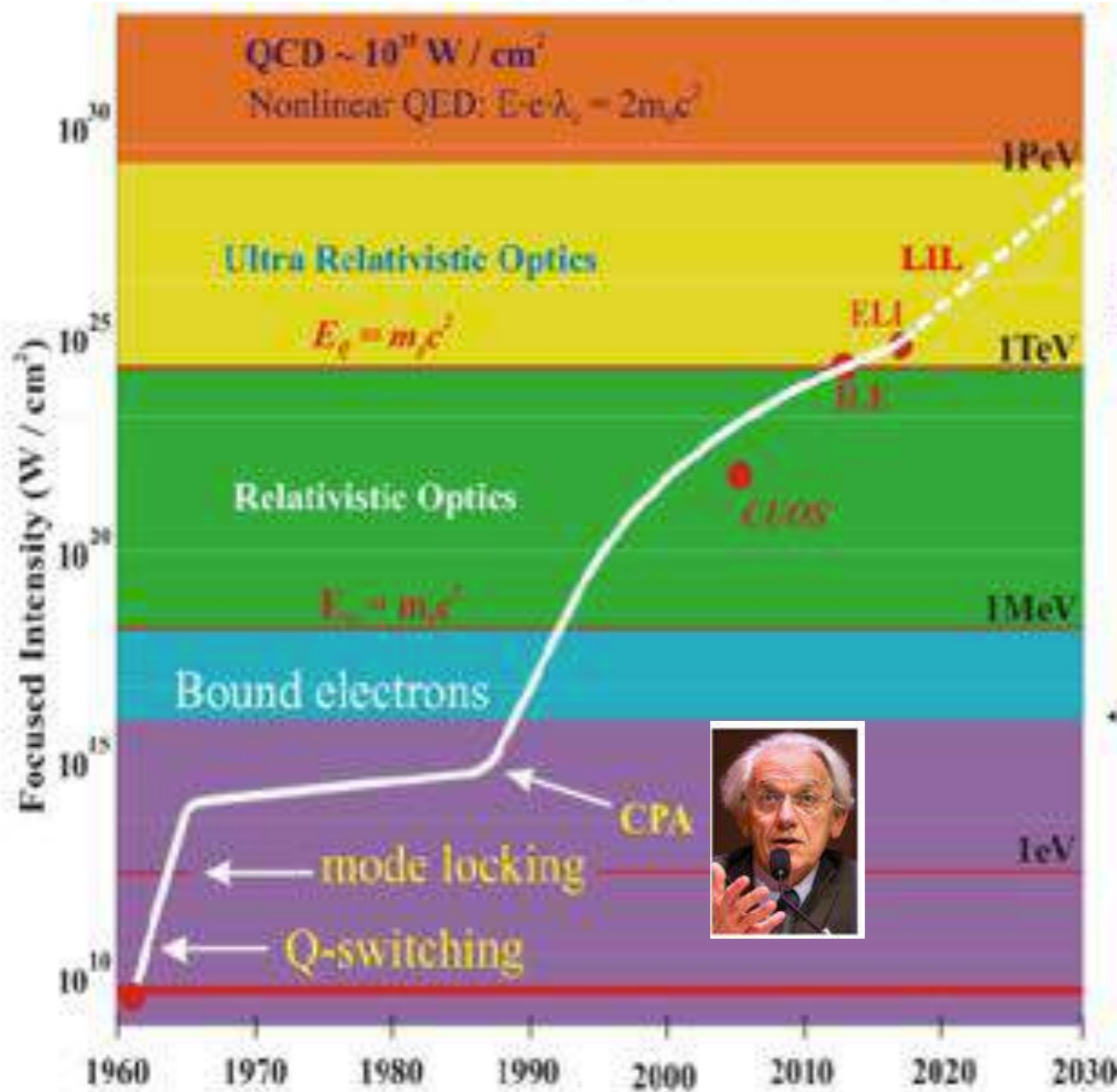


Compressor

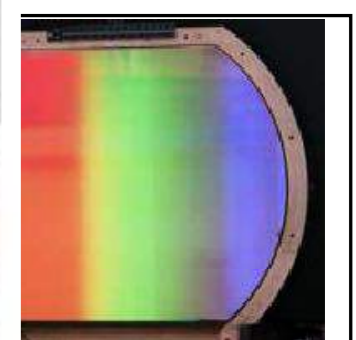
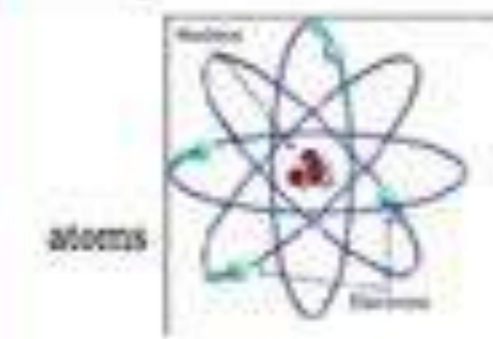
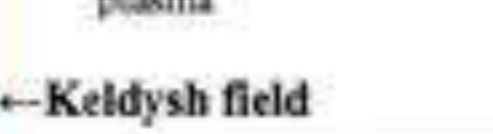
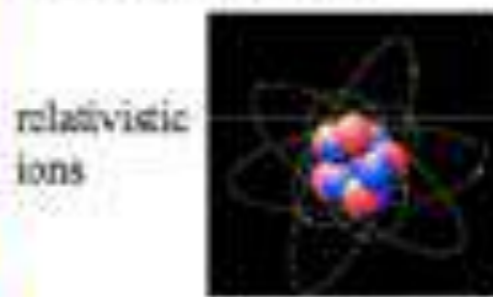




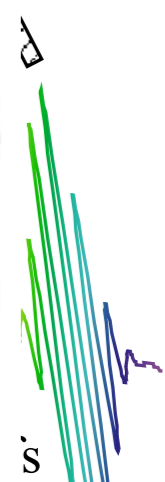
# 超高強度極短パルスレーザー レーザー集光強度の変遷



Dr. Gerard Mourou  
2018 ノーベル物理学賞



1g

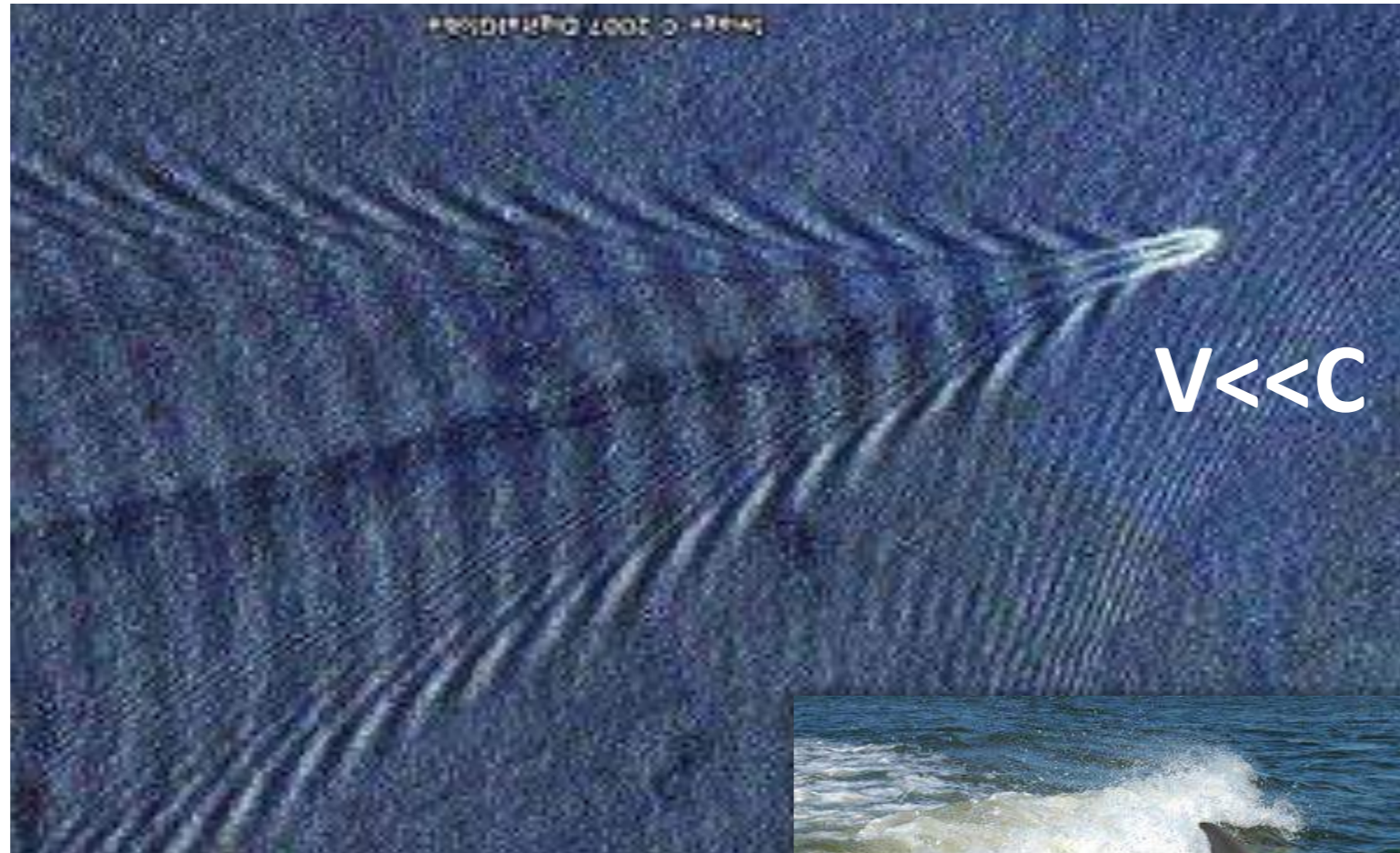




# レーザー航跡場加速 *Laser Wakefield Acceleration (LWFA)*

レーザーの力でプラズマ中にほぼ光速の波を作り電子を加速

- ボートで立てられで海の波とイルカ

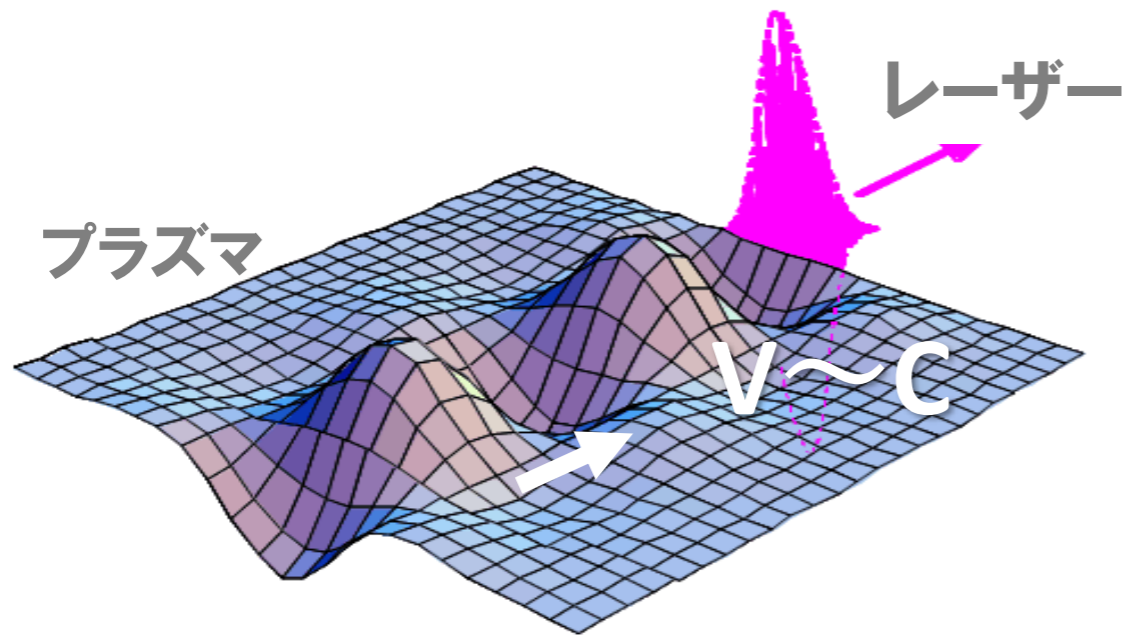




# レーザー航跡場加速 *Laser Wakefield Acceleration (LWFA)*

レーザーの力でプラズマ中にほぼ光速の波を作り電子を加速

- レーザーで立てられでプラズマの波

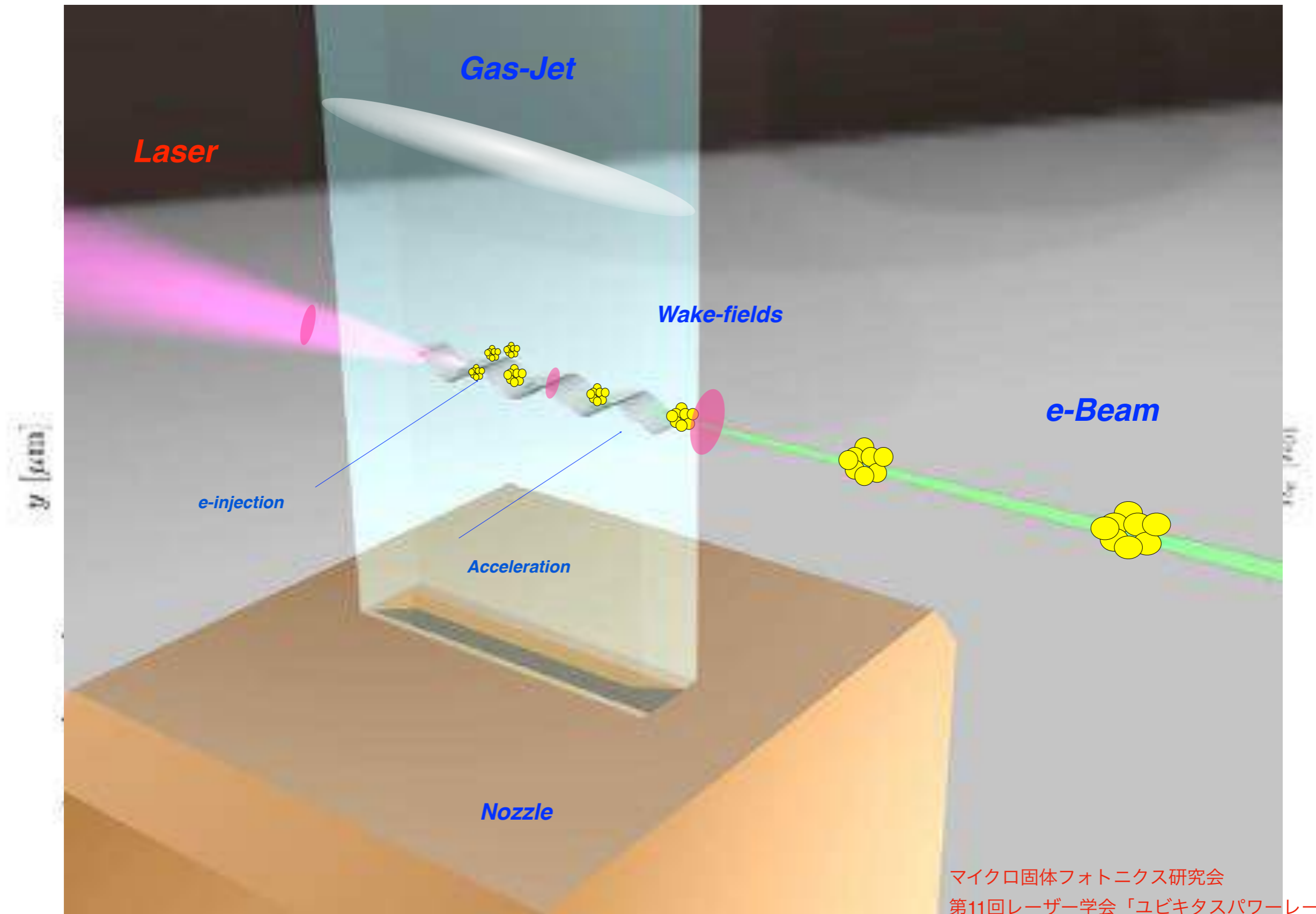


- ボートで立てられで海の波とイルカ



電子はレーザーで作られた波（レーザー航跡場）からエネルギーとコヒーレンスをもらう

# レーザー航跡場加速の原理（電子の発生と加速）

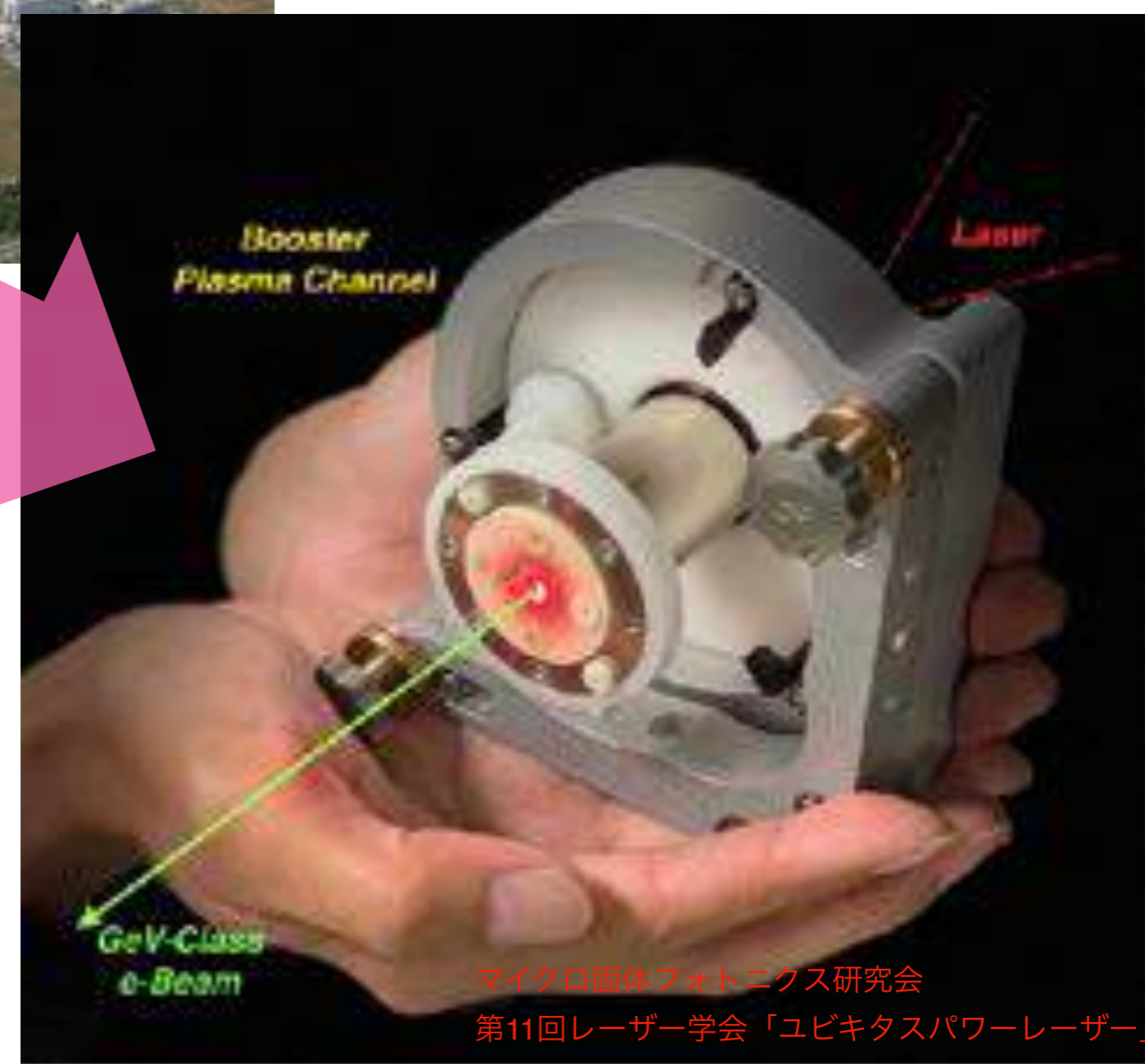
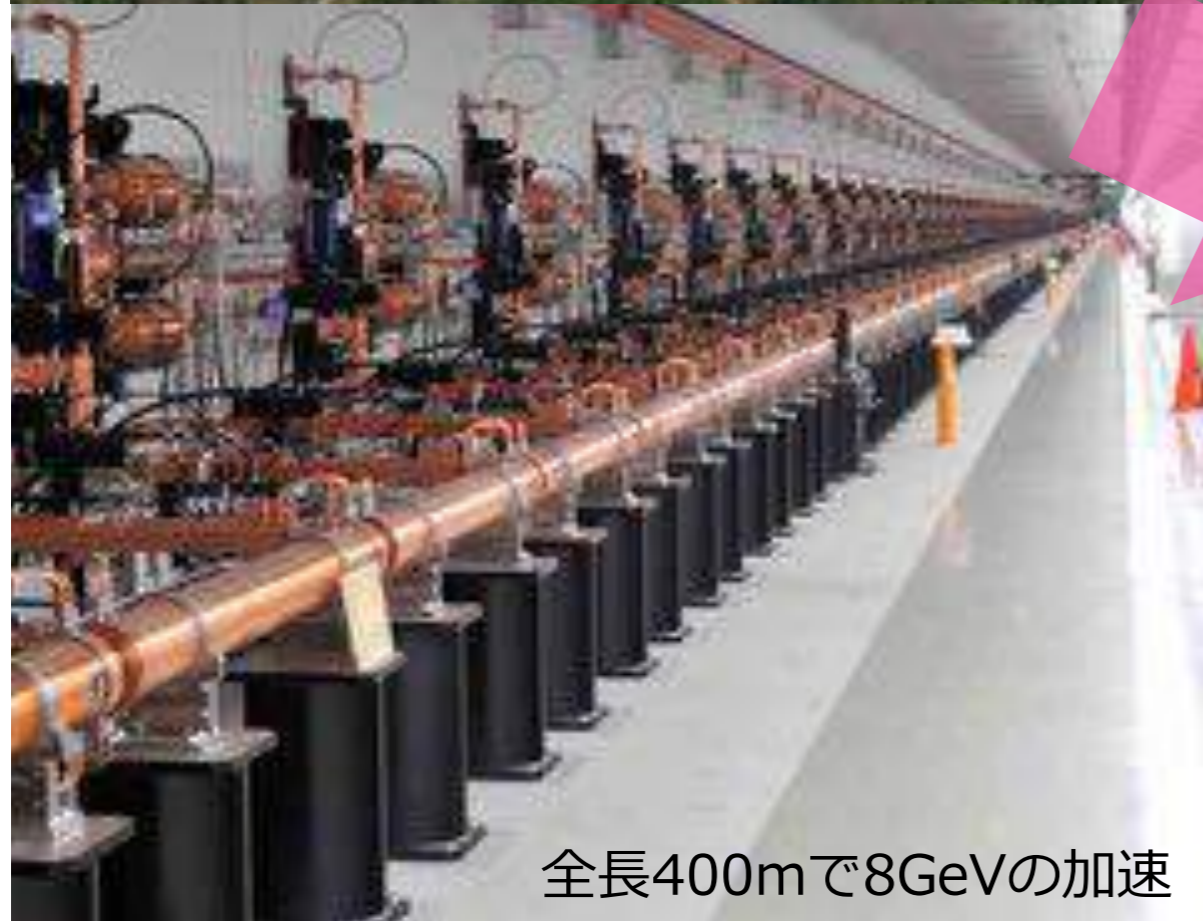




# 手のひらサイズのGeV級電子加速を目指して



阪大で開発中のレーザー加速装置 (~5cm)





# 加速距離 30cmで 8GeVの加速利得

PHYSICAL REVIEW LETTERS 122, 084801 (2019)

Editors' Suggestion

Featured in Physics

## Petawatt Laser Guiding and Electron Beam Acceleration to 8 GeV in a Laser-Heated Capillary Discharge Waveguide

A. J. Gonsalves,<sup>1,\*</sup> K. Nakamura,<sup>1</sup> J. Daniels,<sup>1</sup> C. Benedetti,<sup>1</sup> C. Pieronek,<sup>1,2</sup> T. C. H. de Raadt,<sup>1</sup> S. Steinke,<sup>1</sup> J. H. Bin,<sup>1</sup> S. S. Bulanov,<sup>1</sup> J. van Tilborg,<sup>1</sup> C. G. R. Geddes,<sup>1</sup> C. B. Schroeder,<sup>1,2</sup> Cs. Tóth,<sup>1</sup> E. Esarey,<sup>1</sup> K. Swanson,<sup>1,2</sup> L. Fan-Chiang,<sup>1,2</sup> G. Bagdasarov,<sup>3,4</sup> N. Bobrova,<sup>3,5</sup> V. Gasilov,<sup>3,4</sup> G. Korn,<sup>6</sup> P. Sasorov,<sup>3,6</sup> and W. P. Leemans<sup>1,2,†</sup>

<sup>1</sup>Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, California 94720, USA

<sup>2</sup>University of California, Berkeley, California 94720, USA

<sup>3</sup>Keldysh Institute of Applied Mathematics RAS, Moscow 125047, Russia

<sup>4</sup>National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow 115409, Russia

<sup>5</sup>Faculty of Nuclear Science and Physical Engineering, CTU in Prague, Brehova 7, Prague 1, Czech Republic

<sup>6</sup>Institute of Physics ASCR, v.v.i. (FZU), ELI-Beamlines Project, 182 21 Prague, Czech Republic



(Received 7 December 2018; revised manuscript received 30 January 2019; published 25 February 2019)

Guiding of relativistically intense laser pulses with peak power of 0.85 PW over 15 diffraction lengths was demonstrated by increasing the focusing strength of a capillary discharge waveguide using laser inverse bremsstrahlung heating. This allowed for the production of electron beams with quasimonoe-nergetic peaks up to 7.8 GeV, double the energy that was previously demonstrated. Charge was 5 pC at 7.8 GeV and up to 62 pC in 6 GeV peaks, and typical beam divergence was 0.2 mrad.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.084801

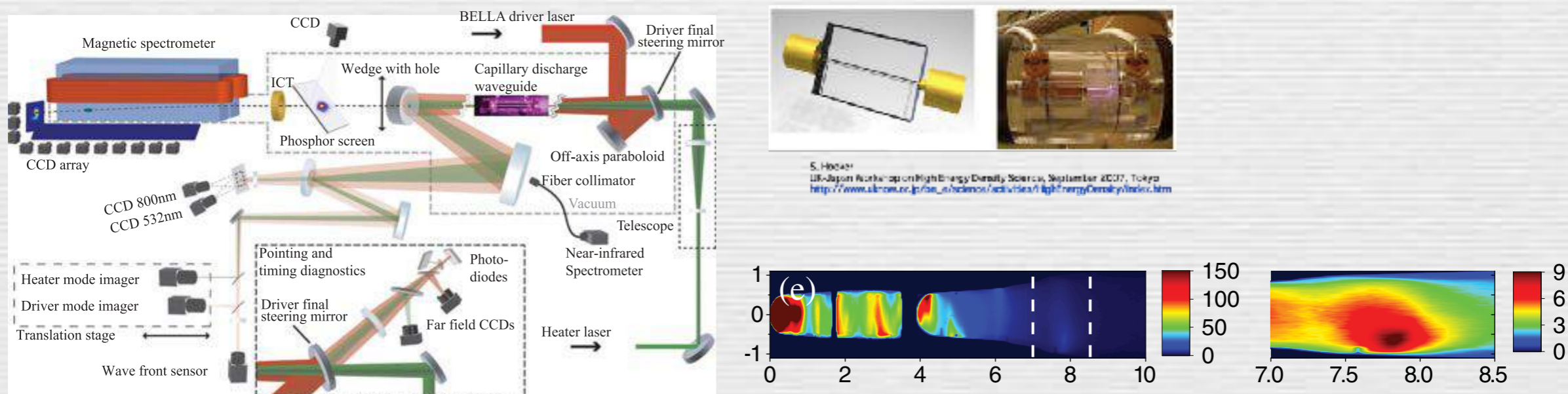
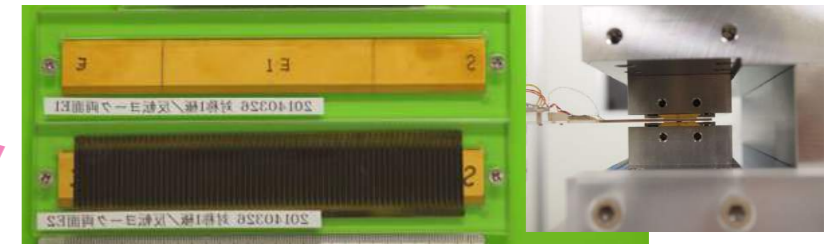
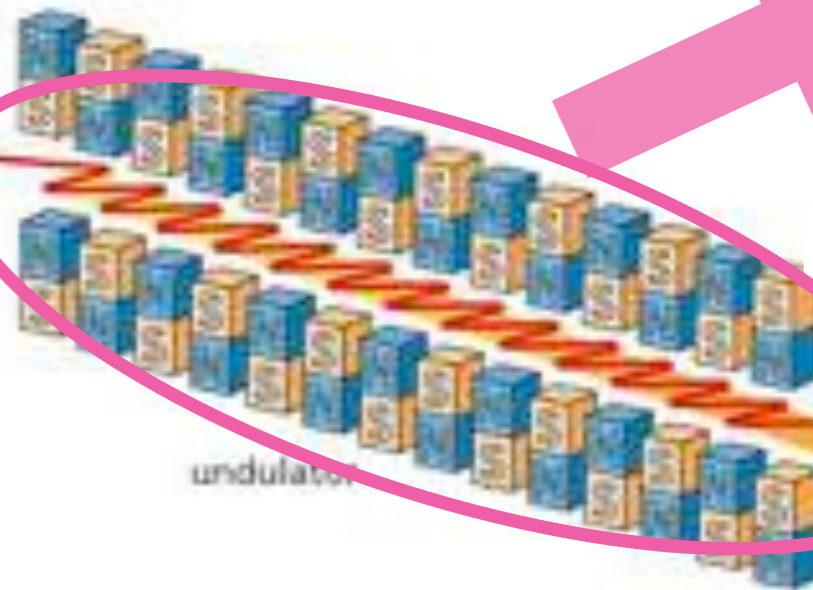
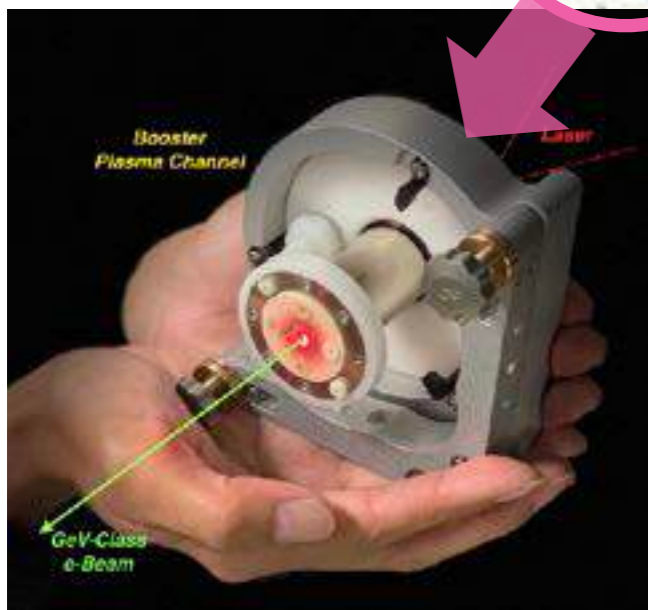


FIG. 2. Schematic layout of the BELLA LPA, including the heater laser system for enhancing the capillary discharge waveguide.

マイクロ固体フォトニクス研究会  
第11回レーザー学会「ユビキタスパワーレーザー」  
専門委員会 2020.12.17



# 夢の超小型 卓上XFEL



マイクロアンジュレータ  
によるコンパクト化

Method D  
 $I_p=10\text{kA}$   
 $B=4.5\text{kG}$

レーザー加速機器による  
ドライバーのコンパクト化

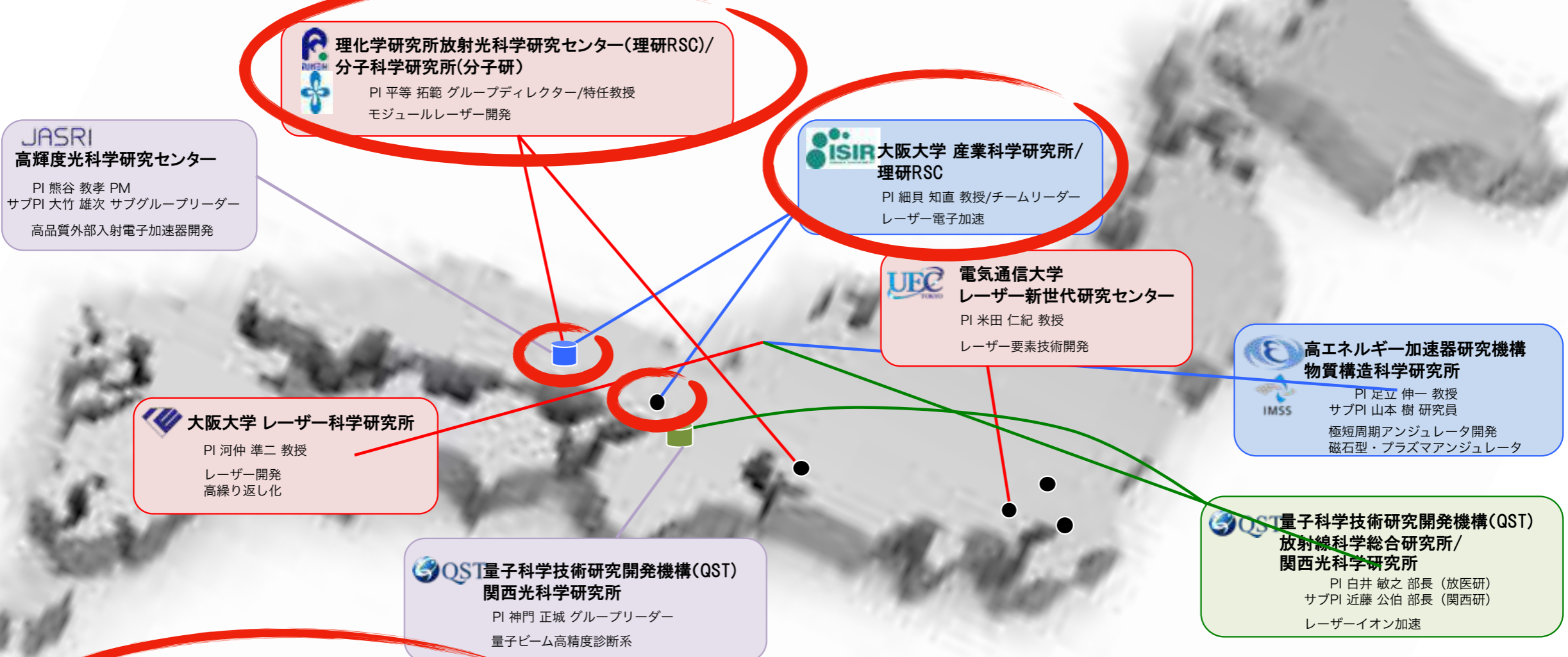
マイクロ固体フォトニクス研究会  
第11回レーザー学会「ユビキタスパワーレーザー」  
専門委員会 2020.12.17



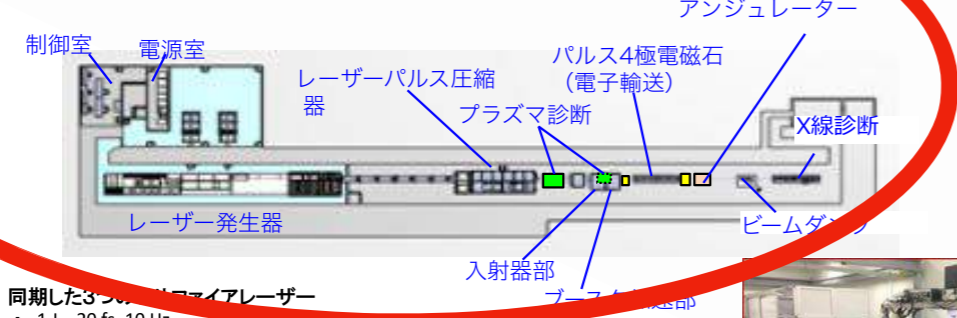
- レーザー加速による量子ビーム加速器の開発と実証 - (2017-2026)



開発体制 オールジャパン体制でレーザー加速実証プラットフォームを構築



開発拠点 レーザー電子加速プラットフォーム (理研播磨)



同期した3つのファイバーレーザー  
 ・ 1 J, 20 fs, 10 Hz  
 ・ 2 J, 50 fs, 5 Hz  
 ・ 10 J, 100 fs, 0.1 Hz  
 を用いて、ステージングレーザー加速、電子発生を行っている。



開発拠点 イオン加速実証プラットフォーム (QST関西研)

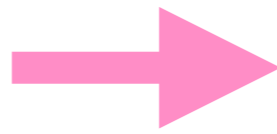


プラットフォームIIファイバーレーザー(開発中)

・ 1 J, 30-40 fs, 10 Hz  
 を用いて10 Hz動作のイオン加速を実証する。

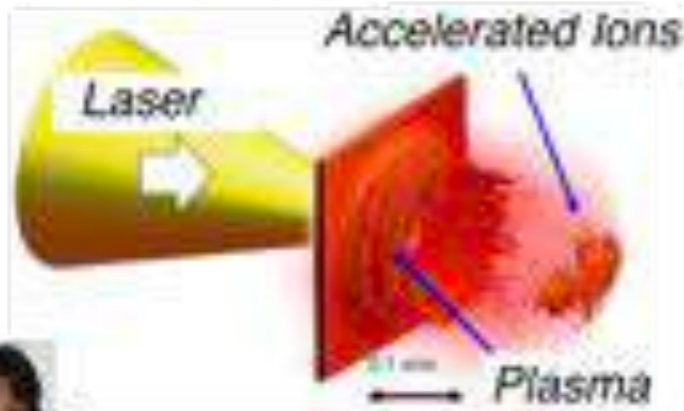
マサチューセッツ工科大学  
 KARENレーザー(ファイバーレーザー)  
 ・ 20 J, 30 fs, 0.1 Hz  
 を用いてイオン加速の新しい効率的な加速法を研究する。





### イオン加速器開発ユニット

イオン加速手法、ターゲットシステムの開発



K. Kondo



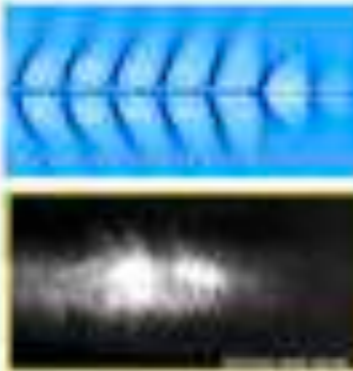
T. Shirai

Development of Beam Transport



QST 放医研, 関西研

### 計測技術グループ



QST 関西研 M. Kando

### 電子加速開発ユニット

ステージングレーザー加速技術の開発

1. RF フォトカソード + レーザー駆動ブースター
2. レーザー駆動入射器



T. Hosokai

Injectors

RF-Linac 20MeV <100C-1pC e-beam probe



Y. Otake

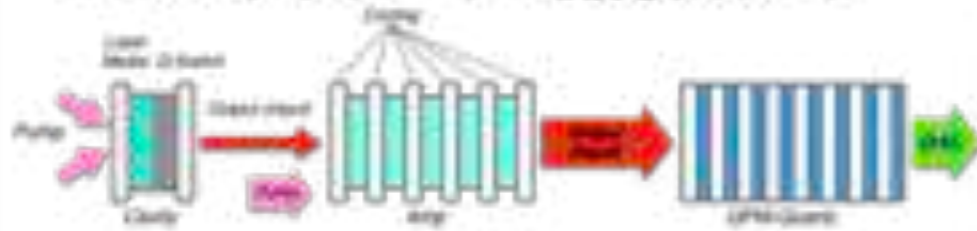


S. Yamamoto



阪大産研, 理研, JASRI, KEK

### コンパクトレーザー開発グループ



チタンサファイア励起用YAGレーザーの小型化・高効率化開発

大口径DFC構造技術開発, 新材料開発

分子研, 理研



T. Taira

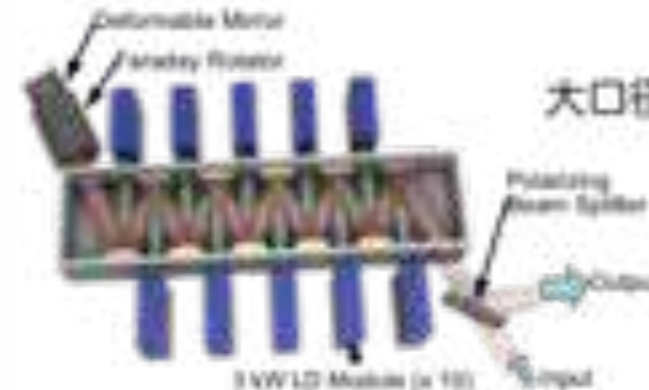
超小型・高出力  
レーザー



応用展開  
製品化開発

### ハイパワーレーザー開発グループ

極短パルスレーザー励起用レーザーのハイパワー化開発



大口径アクテブミラー技術開発,  
新規光学材料,  
素子開発

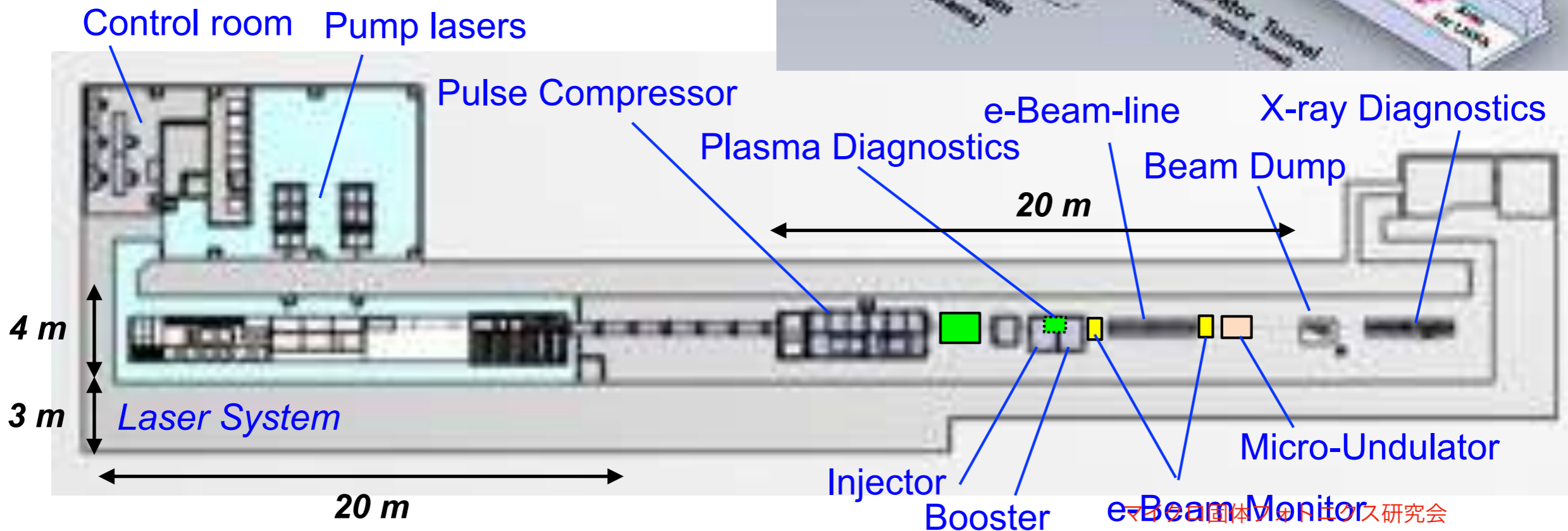
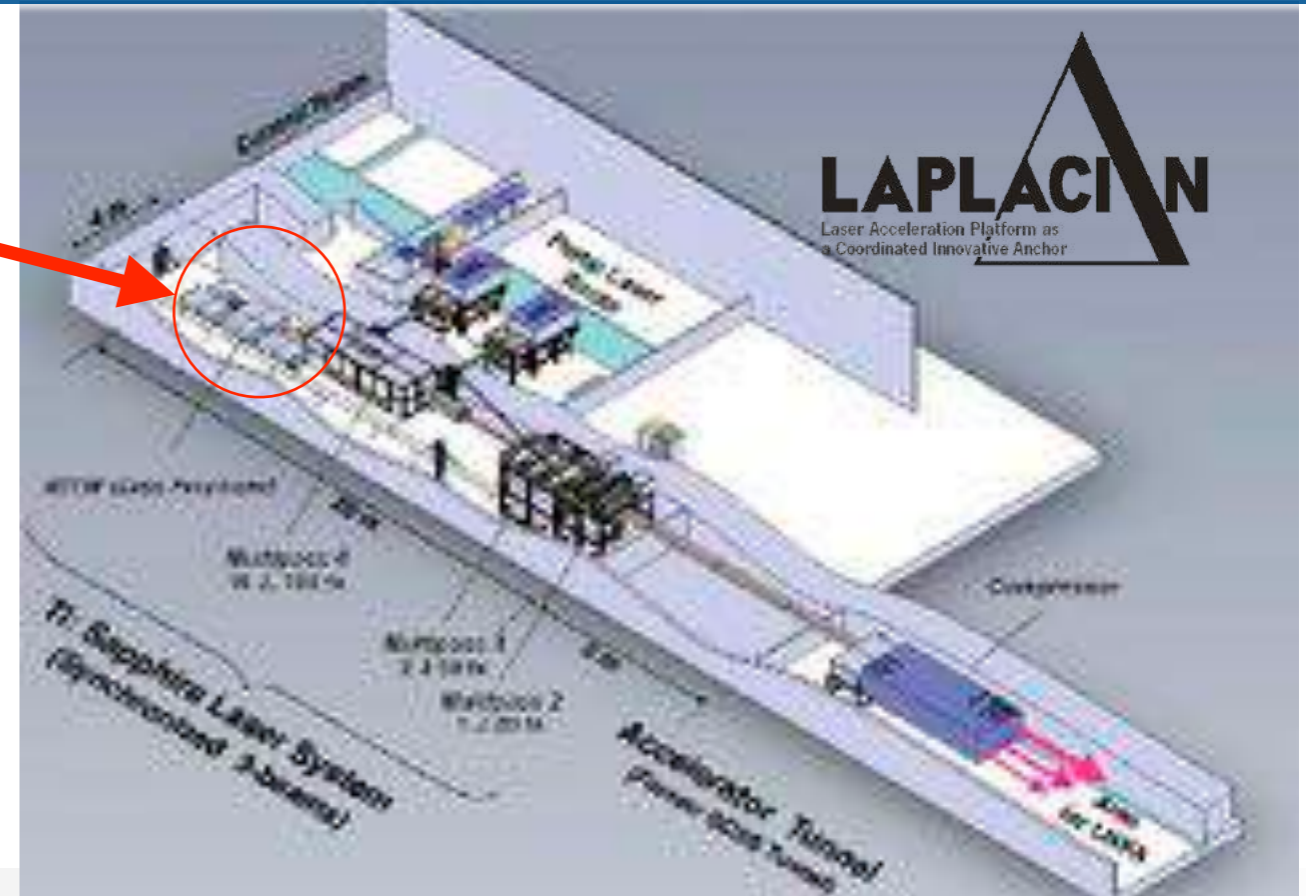
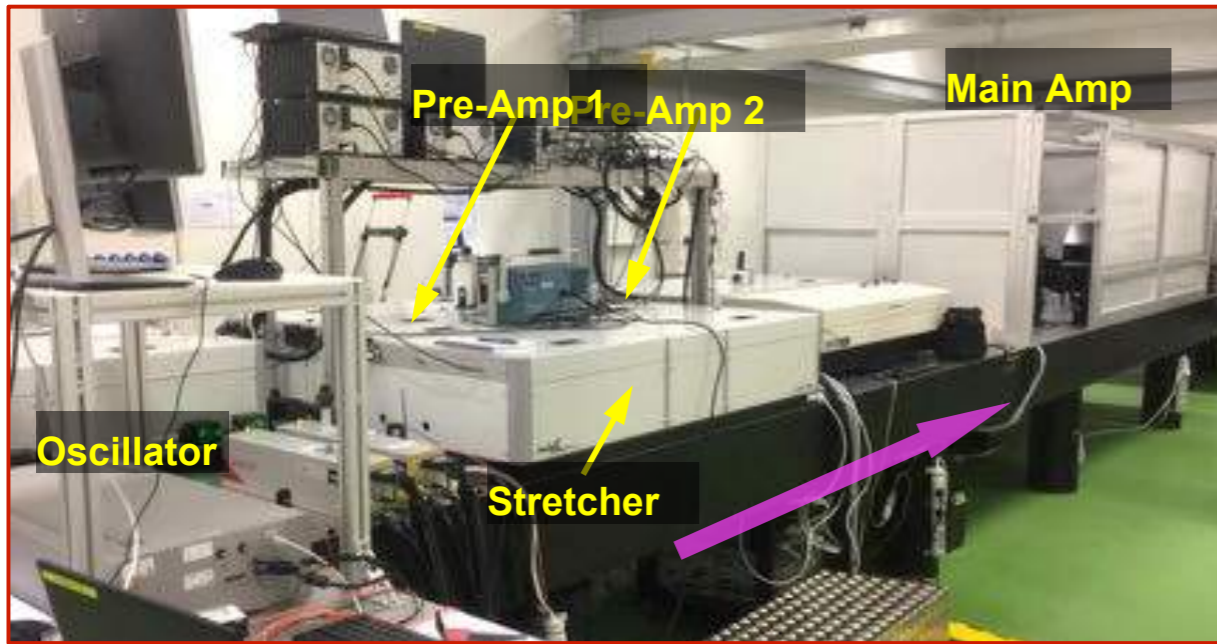


J. Yamashita

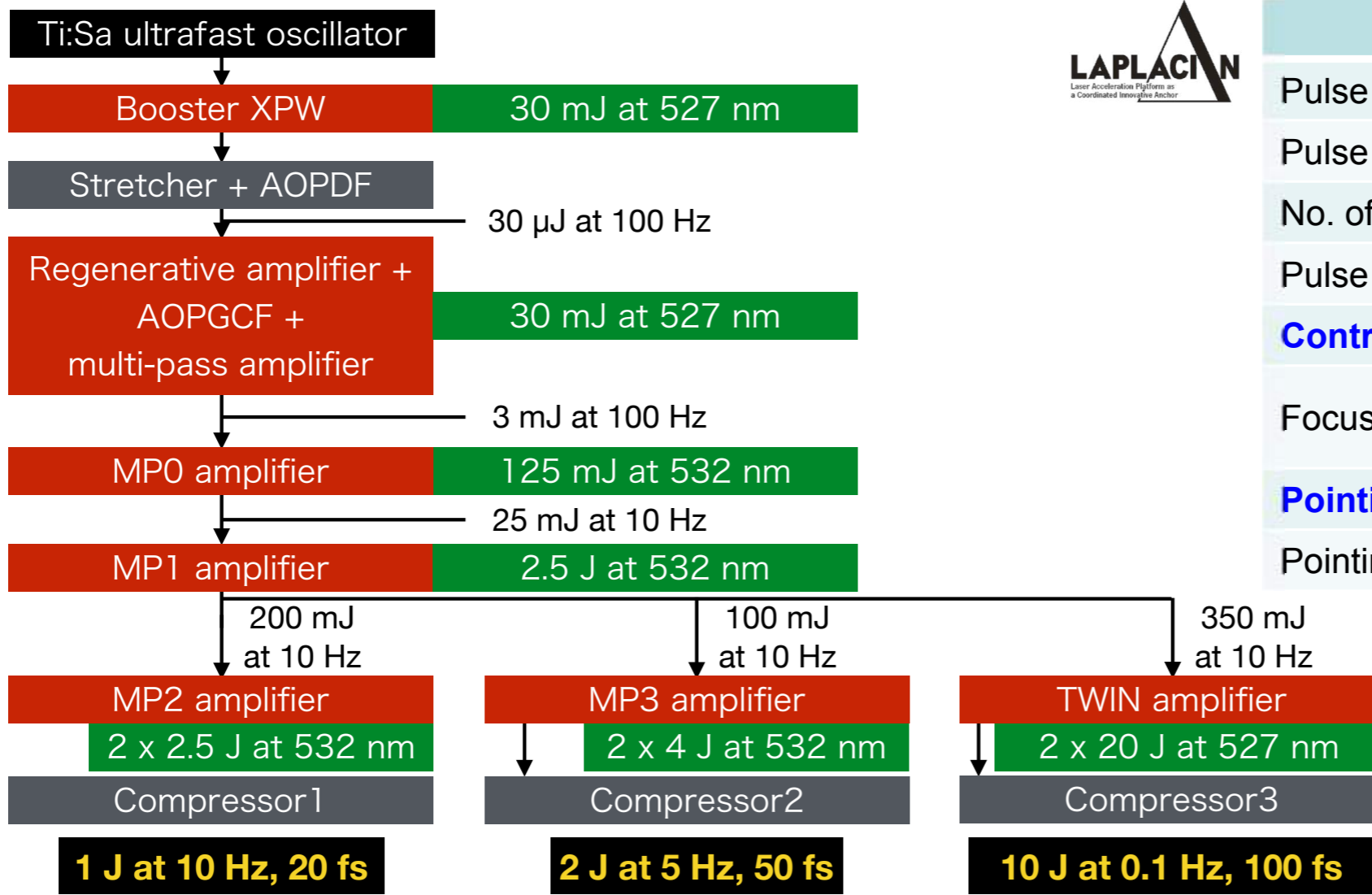
マイクロ固体フォトリソグラフィ研究会  
 第11回レーザー学会「ユビキタスパワーレーザー」  
 阪大レーザー研



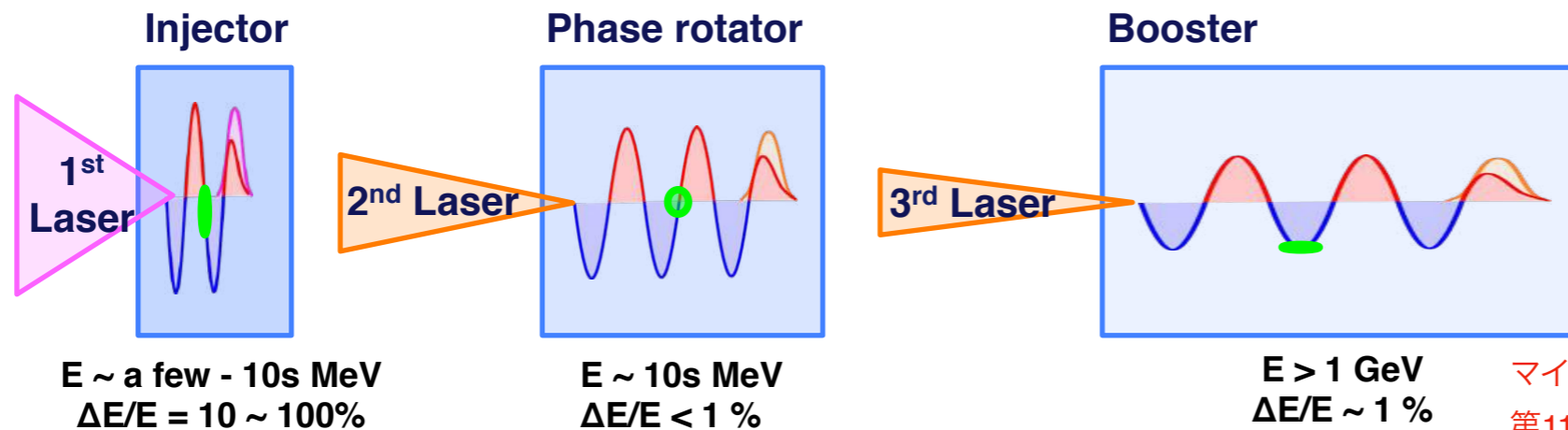
# LWFA Platform @RIKEN SPring-8



## Synchronized 3 laser beams (1J-25fs, 2J-50fs, 10J-100fs)



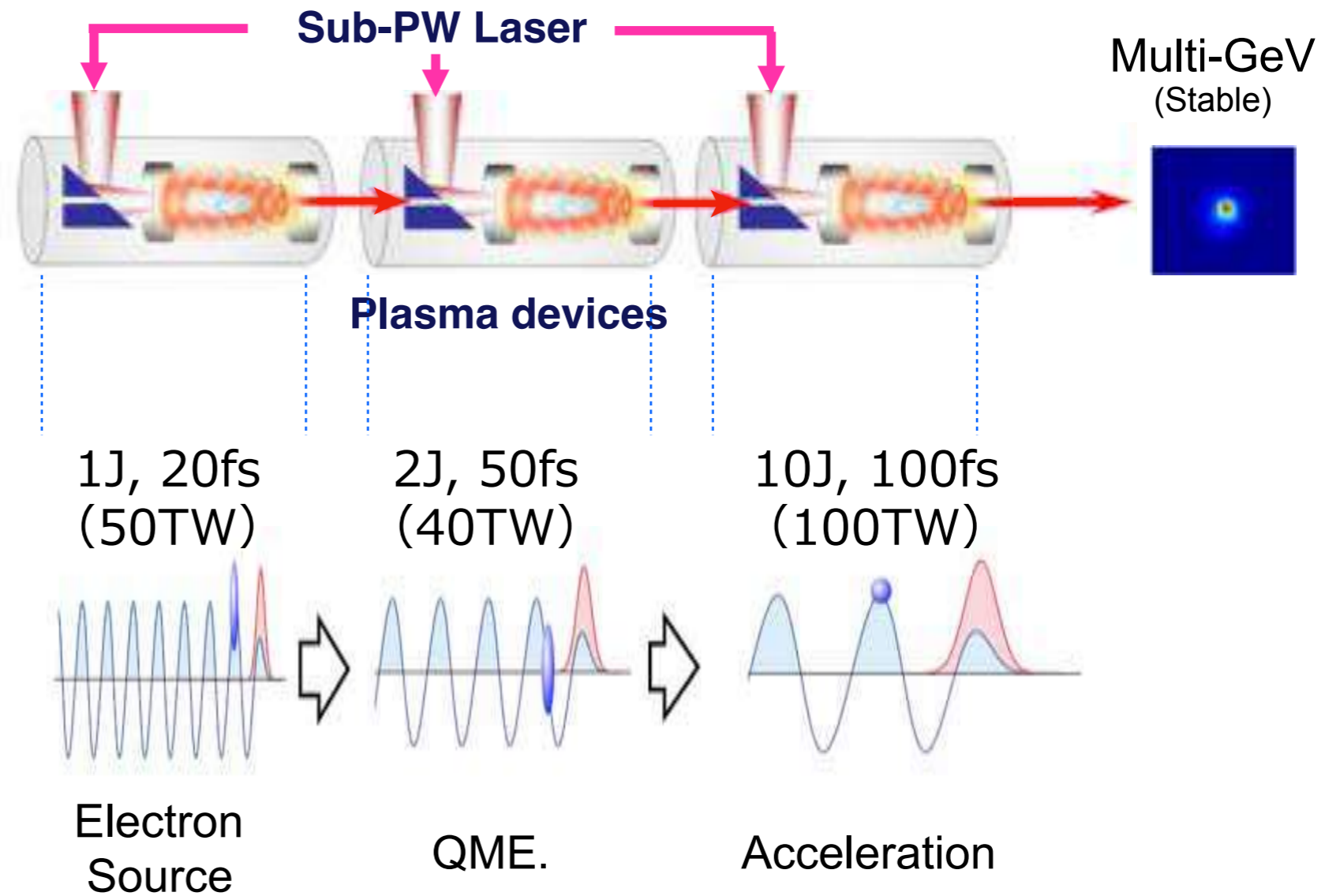
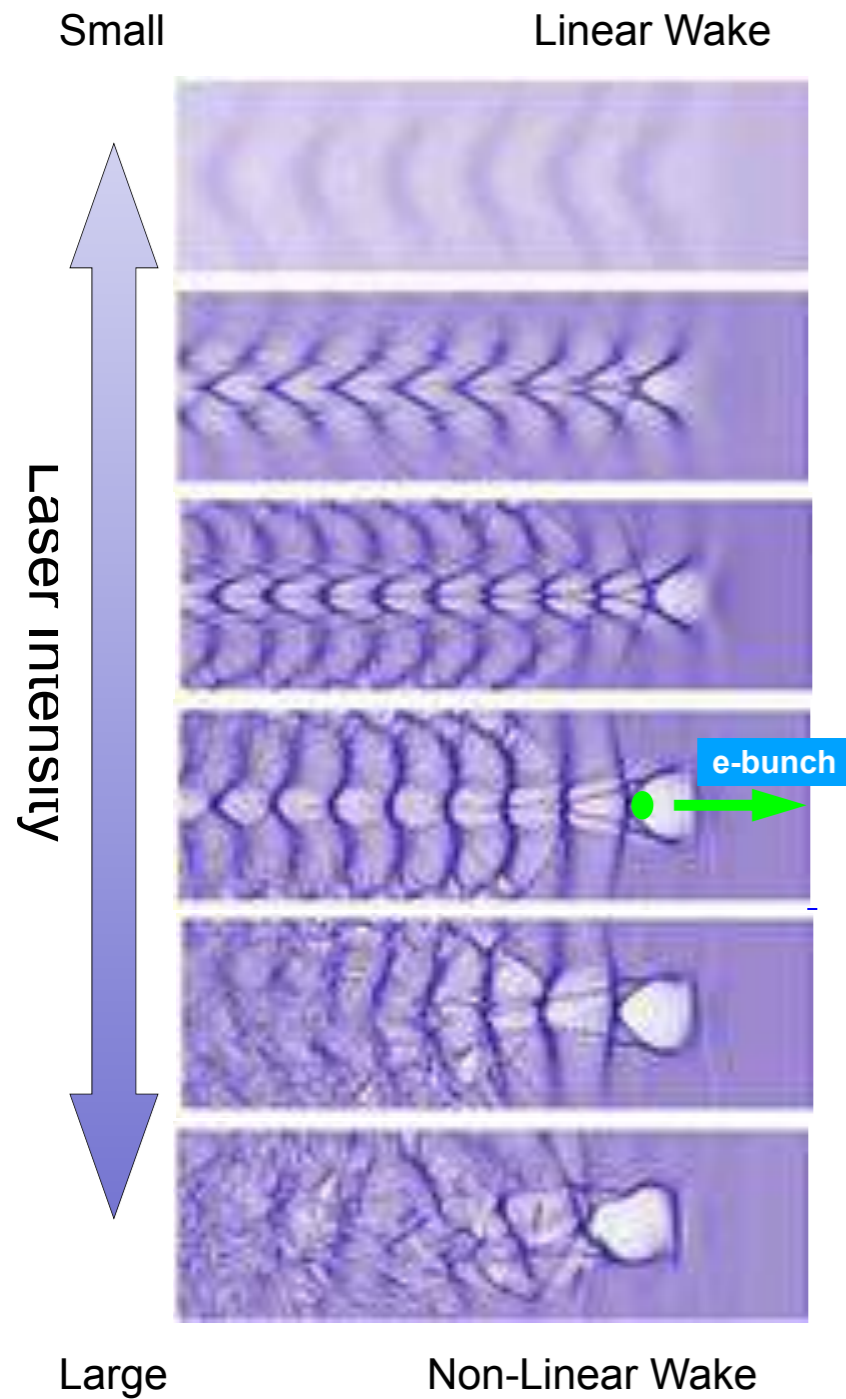
		Platform		
Pulse energy		1 J	2J	10J
Pulse energy stability		RMS 1%		
No. of beam line		3		
Pulse width		20fs	50fs	100fs
<b>Contrast</b>		<b>10<sup>-12</sup>@40~ps</b>		
Focusing pattern		Near diffraction limit Strehl ratio: 0.98		
<b>Pointing</b>		<b>RMS ±8μrad</b>		
Pointing requirement		RMS ±10μrad		



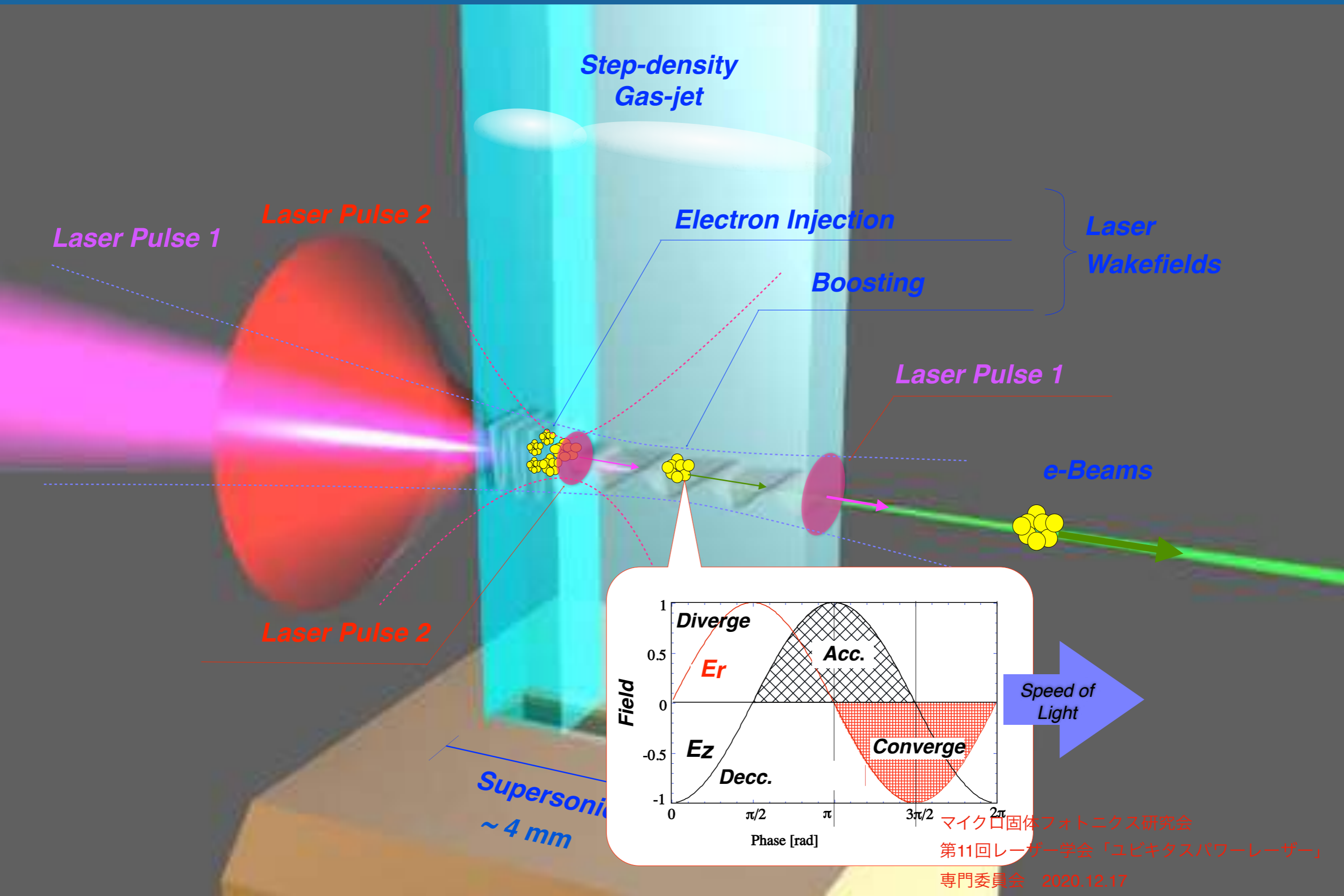


# 多段（ステージ）加速

レーザー航跡場の機能分離による安定加速



# 多段加速の原理実証





# GeV 級多段レーザー航跡場加速のパラメータ

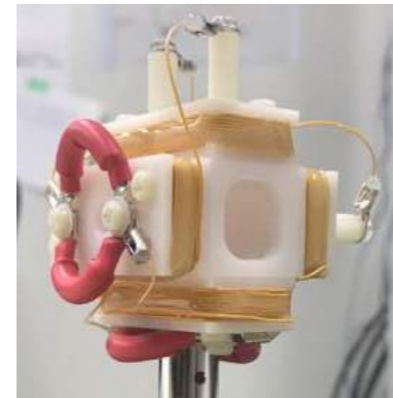
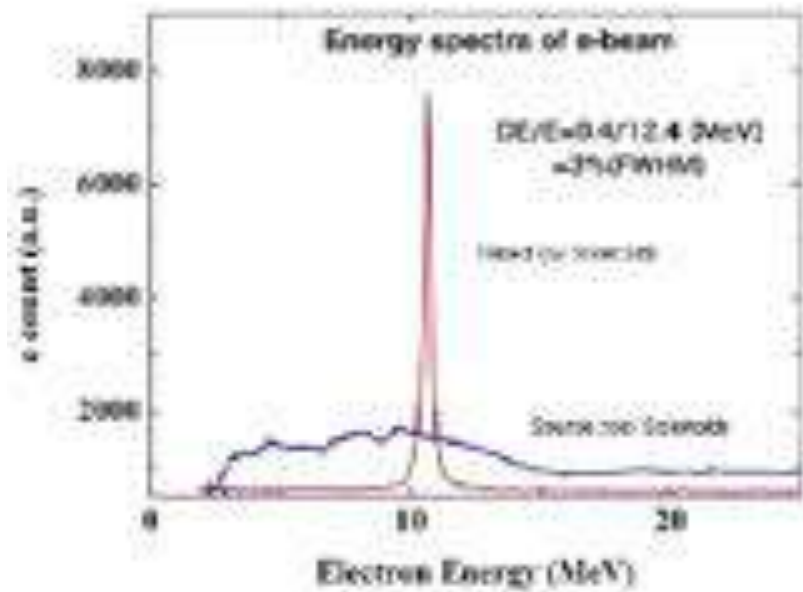
M.Kando of KPSI, QST

パラメータ	単位	Case-I (0.1+2+2 GeV)	Case-II (0.1+4 GeV)
レーザーエネルギー $W$	J	4.7	10
パルス幅 $c\tau$	fs	60	50
集光径 $w_0$	$\mu\text{m}$	48	40
規格化レーザー強度 $a_0$	-	1	2
プラズマ密度 $n_e$	$\text{cm}^{-3}$	$4.8 \times 10^{17}$	$7.2 \times 10^{17}$
最大加速電場 $E_{\text{acc}}$	GV/m	27	94
位相ずれの距離 $L_{\text{dp}}$	cm	8.6	4.7
加速長	cm	7.4	4.3
電子エネルギー利得	GeV	2 GeV/段	4.0 GeV/段

見積は1次元解析式を用いた (E. Esarey et al., IEEE Trans. Plasma Sci. 1996)

# Overview of Staging LWFA Experiment @SPring-8

## QME e-beam transport



Pulse-driven  
Beam Optics (Solenoid, Steering)

Short Focus OAP  
 $F\# \sim 3, I \sim 10^{19} \text{W/cm}^2$

Injector



Supersonic  
Gas-jet

Plasma  
Lens  
Effects

Pulse-c

Pre-formed (Discharge)  
Plasma Channel ~5cm

Long Focus OAP  
 $F\# \sim 20-40, I \sim 10^{18} \text{W/cm}^2$

GeV Class  
electrons

for Staging acc.

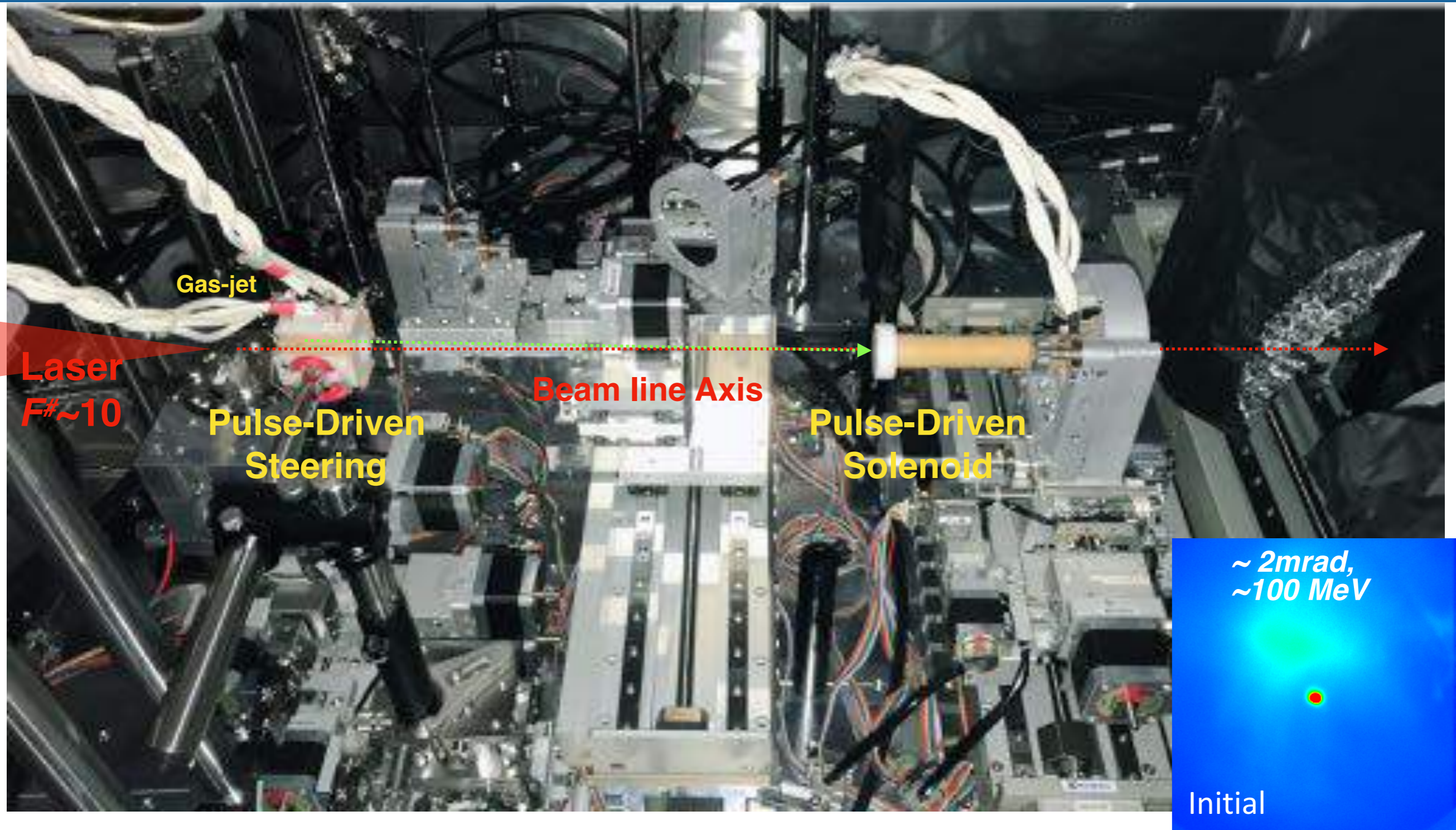


マイクロ固体フォトニクス研究会  
第11回レーザー学会「ユビキタスパワーレーザー」

専門委員会 2020.12.17



# Experimental setup inside chamber





# Overview of Staging LWFA Experiment @SPring-8

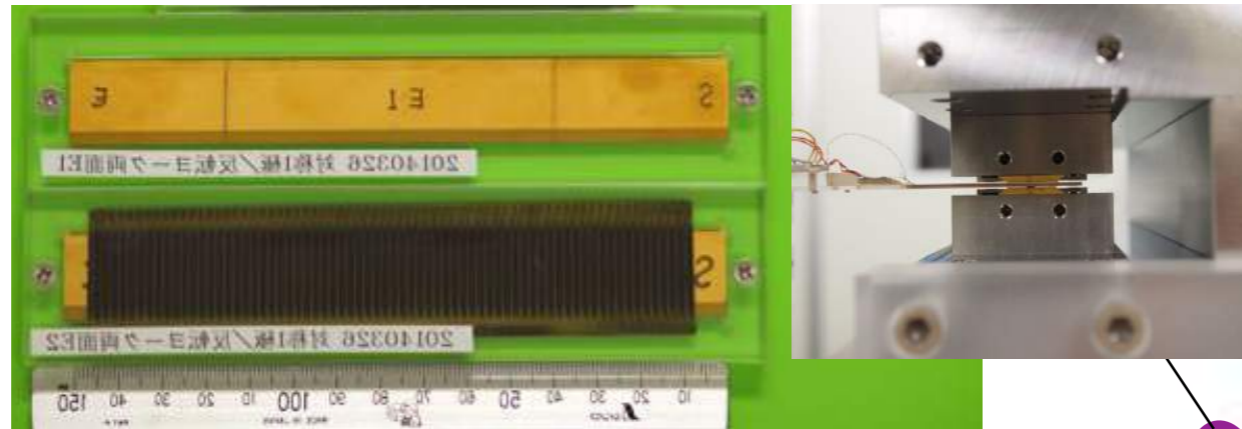
ImPACT-UPL; Pj1-1C:  
Micro-Undulator



S. Yamamoto  
(KEK)



100mm × 2



GeV Class  
electrons

Capillary DC  
Plasma Channel ~5cm

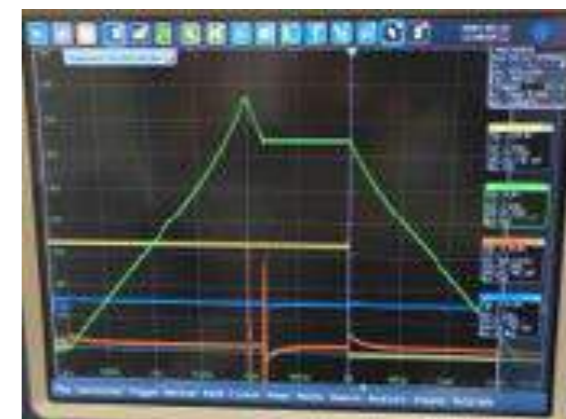
Pulse-driven  
Q-Magnets

Booster  
for Post acc.

Long Focus  
F# ~ 20-40,

Micro-Undulator

X-Ray Lasers



60T/m

マイクロ固体フォトニクス研究会  
第11回レーザー学会「ユビキタスパワーレーザー」  
専門委員会 2020.12.17



M. Yoshida  
T. Natsui  
T. Kamitani  
(KEK)

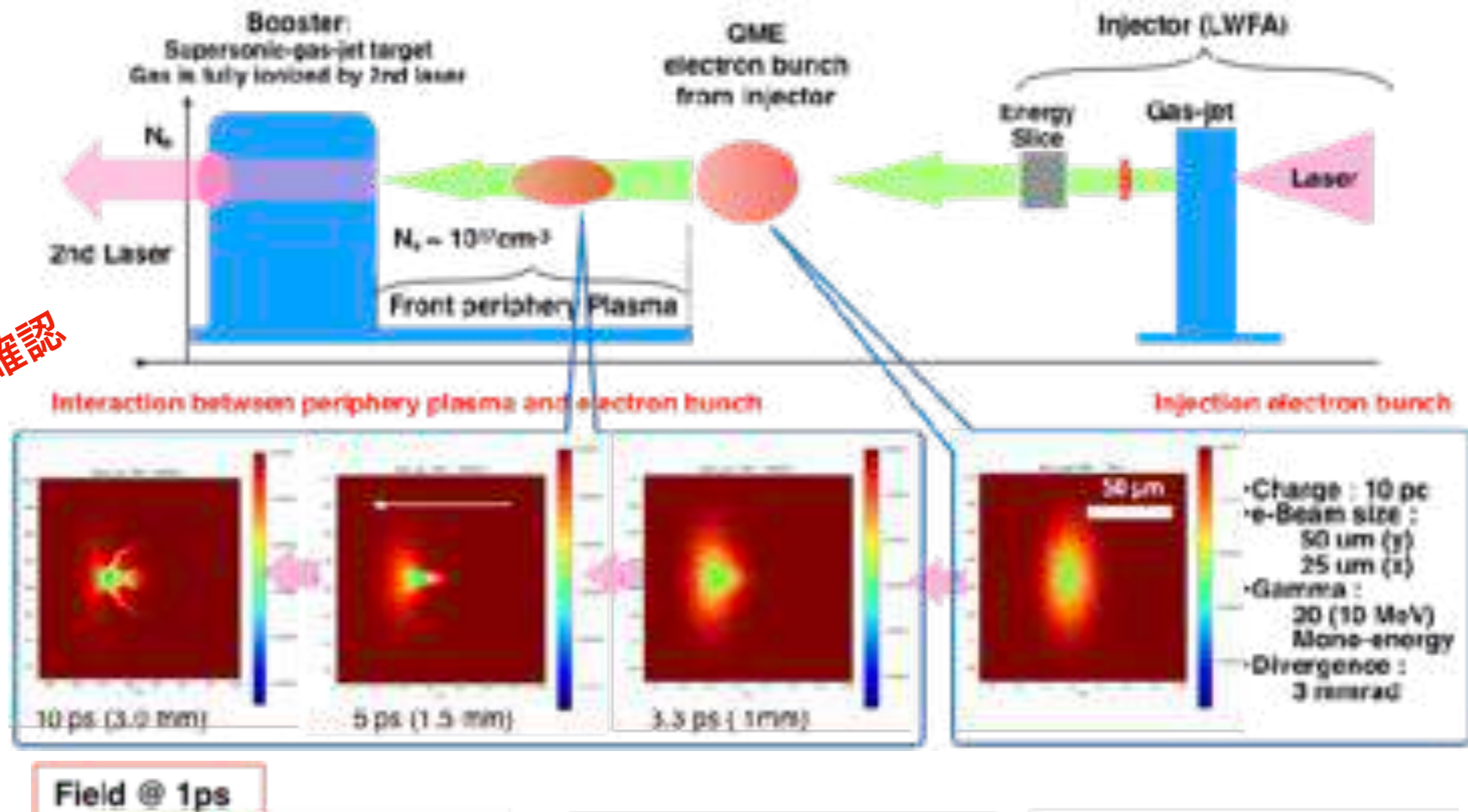




# 低密度プラズマでのパッシブプラズマレンズ効果を発見

## 輸送部のダウンサイズの可能性

実験でも確認

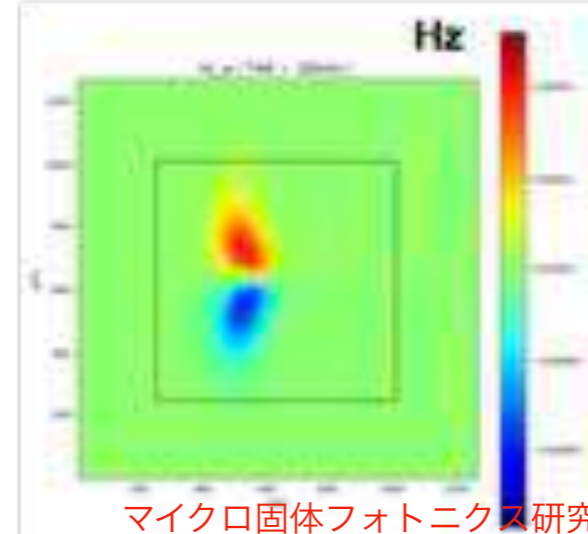
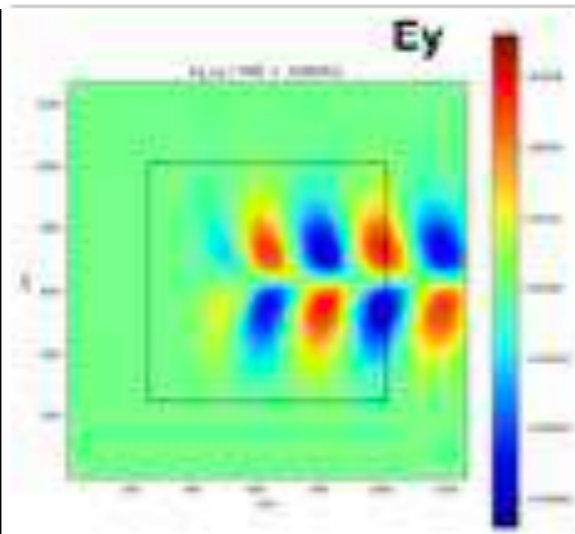


SCIENTIFIC REPORTS  
nature research

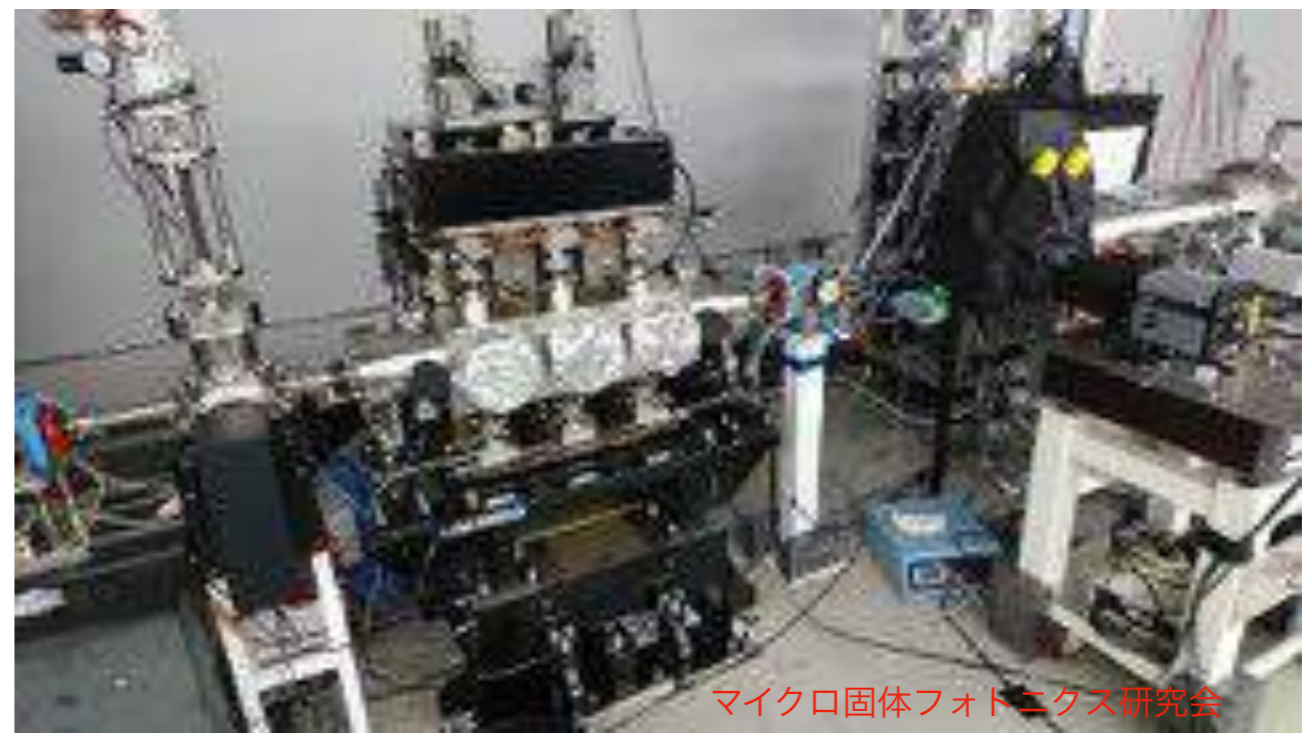
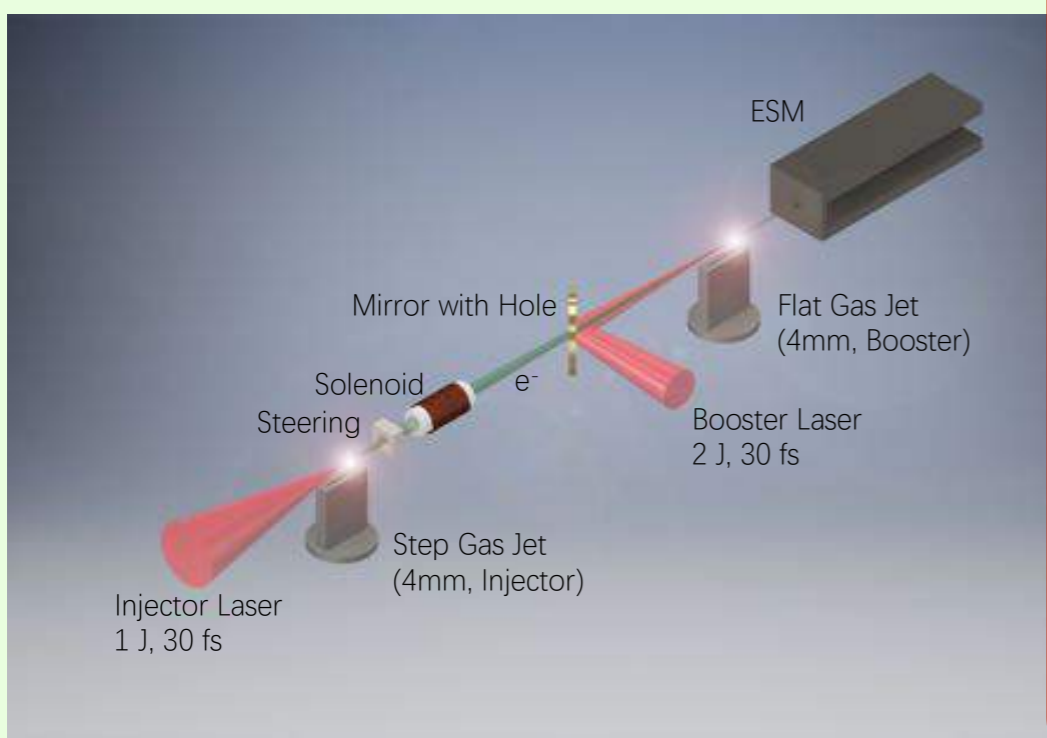
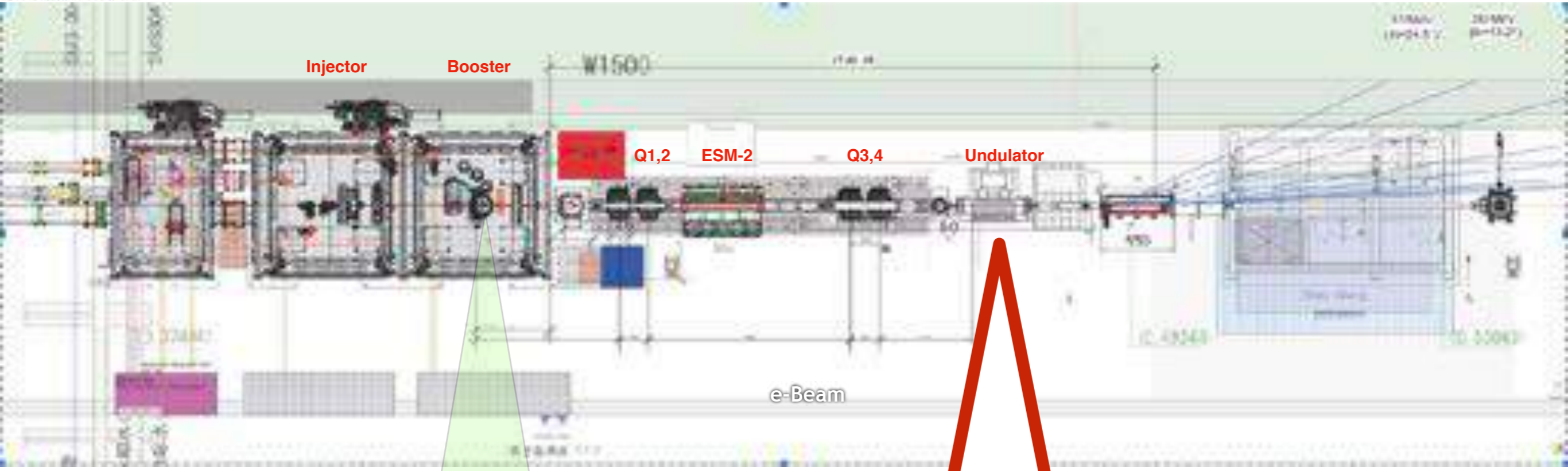
OPEN Coupling Effects in Multistage Laser Wake-field Acceleration of Electrons

Zhan Jin<sup>1,2</sup>, Hirotaka Nakamura<sup>3</sup>, Naveen Pathak<sup>1,2</sup>, Yasuo Sakai<sup>1,2</sup>, Alexei Zhidkov<sup>1,2</sup>, Keiichi Sueda<sup>2</sup>, Ryosuke Kodama<sup>3</sup> & Tomonao Hosoka<sup>1,2\*</sup>

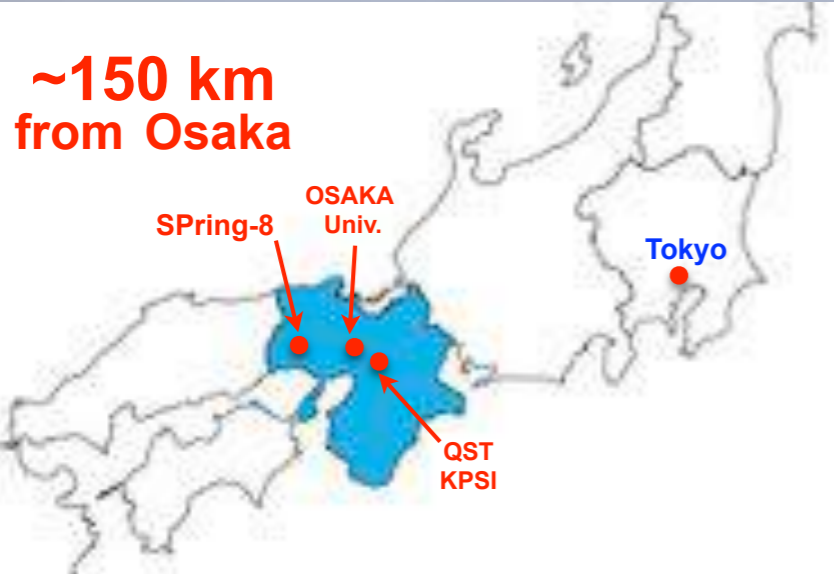
Staging laser wake-field acceleration is considered to be a necessary technique for developing full-optical jitter-free high energy electron accelerators. Splitting of the acceleration length into several technical parts and with independent laser drivers allows not only the generation of stable, reproducible acceleration fields but also overcoming the dephasing length while maintaining an overall high acceleration gradient and a compact footprint. Temporal and spatial coupling of pre-accelerated electron bunches for their injection in the acceleration phase of a successive laser pulse wake field is the key part of the staging laser-driven acceleration. Here, characterization of the coupling is performed with a dense, stable, narrow energy band of <3% and energy-selectable electron beams with a charge of ~1.6 pC and energy of ~10 MeV generated from a laser plasma cathode. Cumulative focusing of electron bunches in a low-density preplasma, exhibiting the Budker–Bennett effect, is shown to result in the efficient injection of electrons, even with a long distance between the injector and the booster in the laser pulse wake. The measured characteristics of electron beams modified by the booster wake field agree well with those obtained by multidimensional particle-in-cell simulations.



# アンジュレーター実験を開始

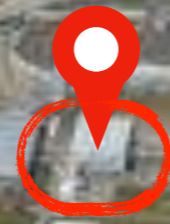






**SPring-8**

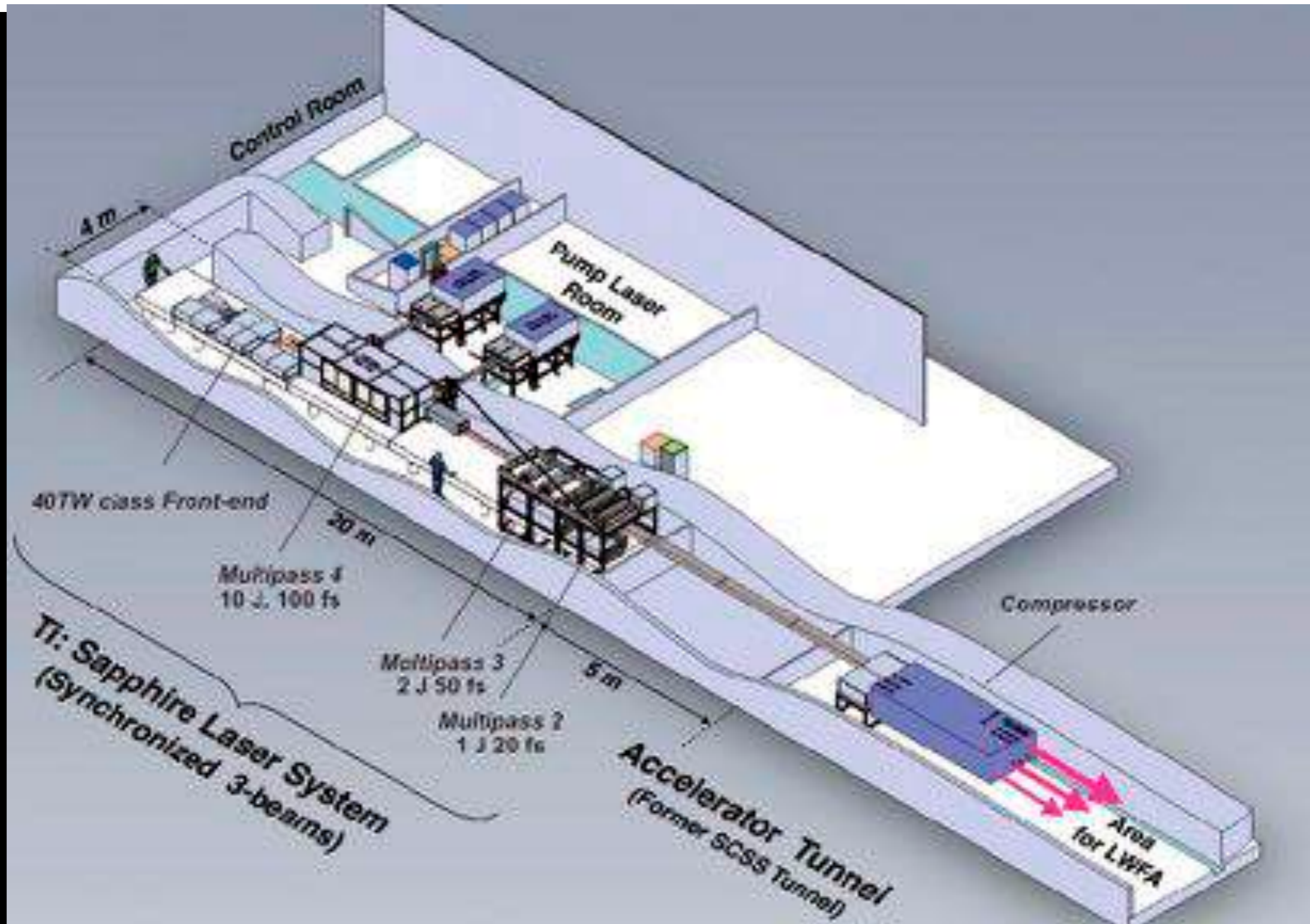
**XFEL SACLA**



**LWFA Platform**



# Welcome to Laser-driven Accel. Platform 'LAPLACIAN'





# まとめ

チャープパルス増幅法の発明により高強度超短レーザーパルスが実現

高強度超短レーザーパルスとプラズマの相互作用で励起される超高強度の電場は従来高周波加速器の加速電場の1000倍以上の強度を持つ。

→ 高エネルギー加速器を1 / 1000以下にダウンサイズできる可能性

→ 卓上型の超高エネルギー加速器の可能性

レーザー航跡場加速研究は原理実証の段階からリピータブルな高品質ビームの生成へとシフトしつつある。

理研SPring-8キャンパスにてオールジャパン体制の機関連携で研究開発を推進中  
(JST未来社会創造事業 (大規模型) )