

高エネルギー将来計画委員会： 第7回 勉強会 / THz加速、誘電体加速

2021.01.27

KEK加速器：吉田 光宏，
張 叡, 周 翔宇, 本田 洋介, 森 伸悟
分子研/理研：平等 拓範, 石月 秀貴,
Arvydas Kausas, Yahia Vincent

超高電界加速の方式

加速器の電界を大幅に上げるには

● 耐圧の高い媒質

- × 金属
- ◎ プラズマ
- 誘電体

$$W(\text{蓄積エネルギー}) = \int \frac{\epsilon E^2 + \mu H^2}{2} dV$$

$$E = \sqrt{\frac{2W}{\epsilon V}} \sim f \sqrt{W}$$

E: 電界、H: 磁界
V: 体積
f: 周波数

● 体積を小さくする or 蓄積エネルギーを上げる

周波数の高い加速器: THz

- 従来のGHz帯加速方式
→ 20GHz以上の高周波源が無い

- 周波数重畳

- 100 fs 程度の超短パルスと

プラズマ or 誘電体による変換

- ・レーザー駆動 レーザー高強度化は著しく速い
- ・電子ビーム駆動 SLAC/KEK等で可能&世界最高電圧の実績
- ・陽子ビーム駆動 CERN/J-PARC等で可能 → バンチ圧縮が問題

Q値の高い材料

- 常伝導Cu: $Q \sim 10,000$
- 超伝導Nb: $Q \sim 10^{10}$ しかし電界 $< 40 \text{ MV/m}$
- 誘電体 : $Q \sim 10^6$

$$Q = \frac{\omega W}{P_{wall}}$$

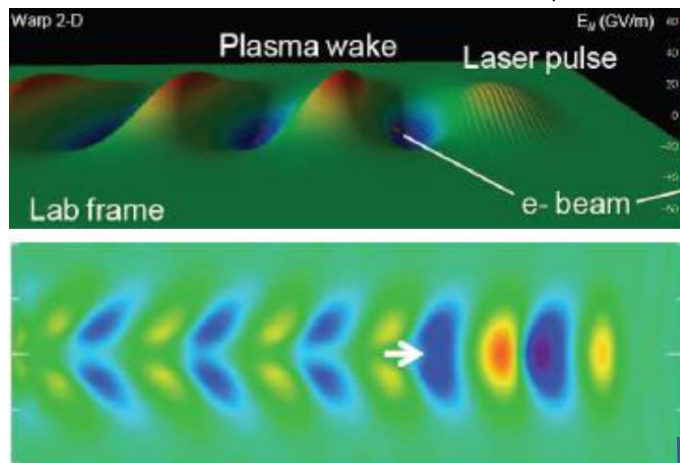
両方を併せ持つような超高電界加速が望まれる

→ Q値(Enhancement Cavity等)で上げられればレーザーへの要求性能は極端に下がる

超高電界加速方式

レーザー駆動加速器

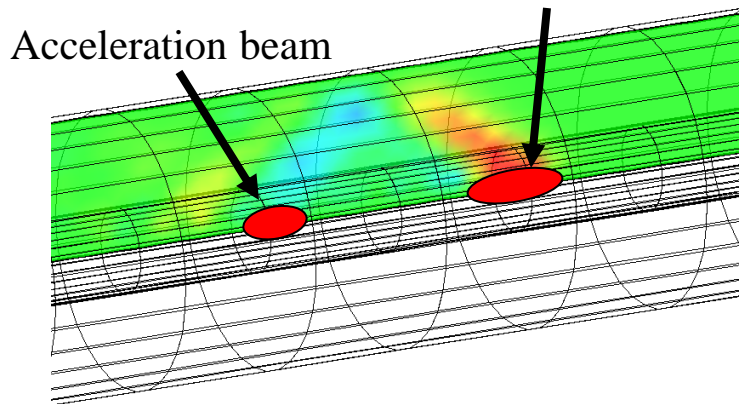
レーザープラズマ加速(LWFA)



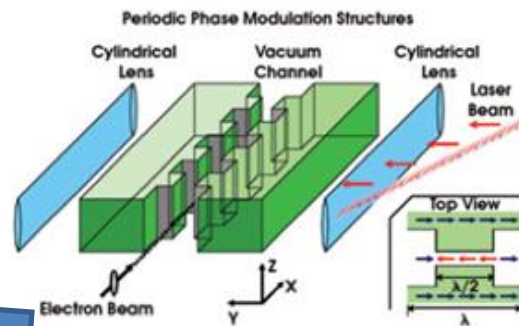
ビーム駆動加速器

誘電体加速(DWA)

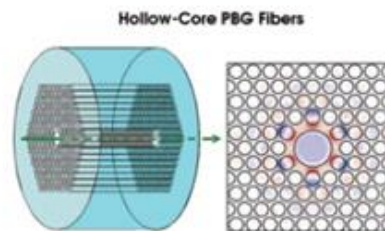
Drive beam



レーザー誘電体加速

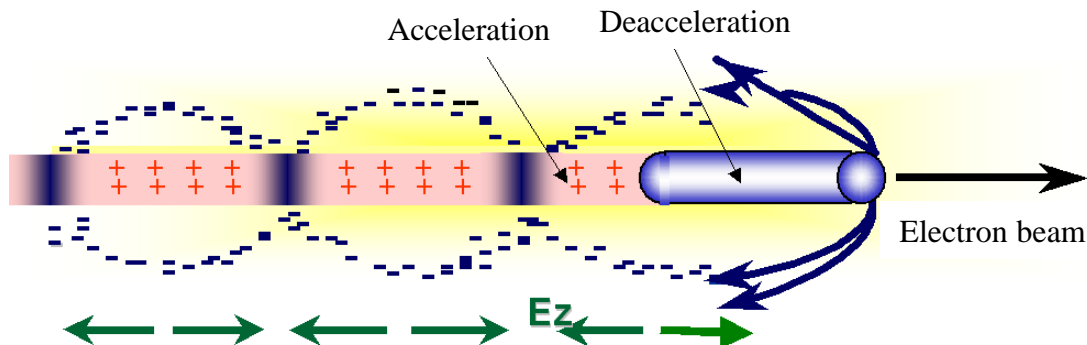


Laser or THz



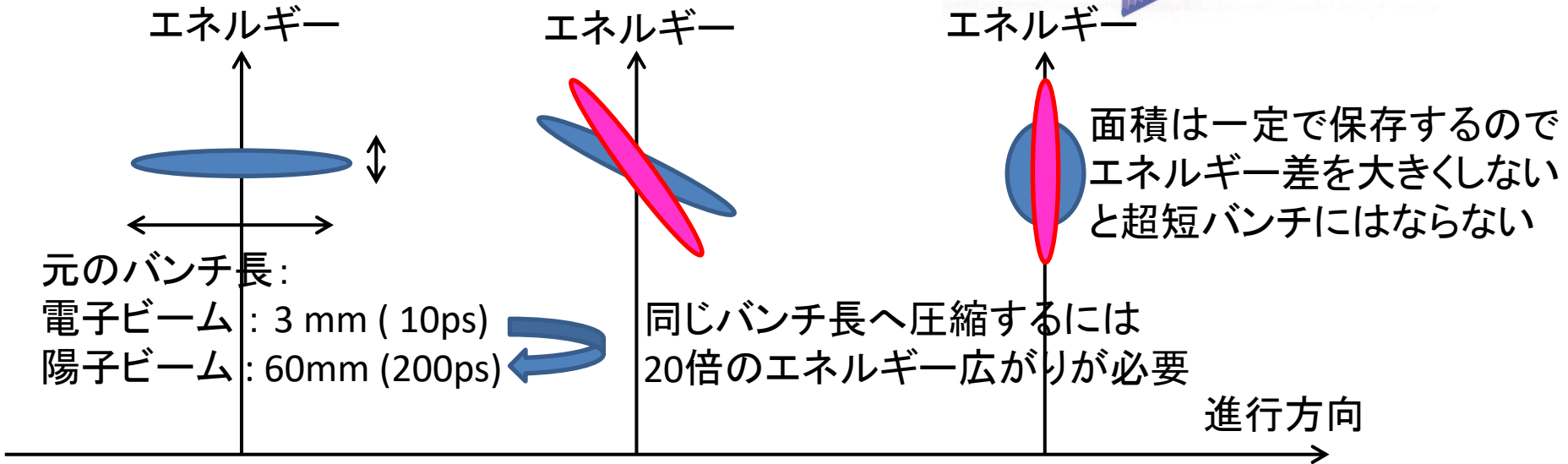
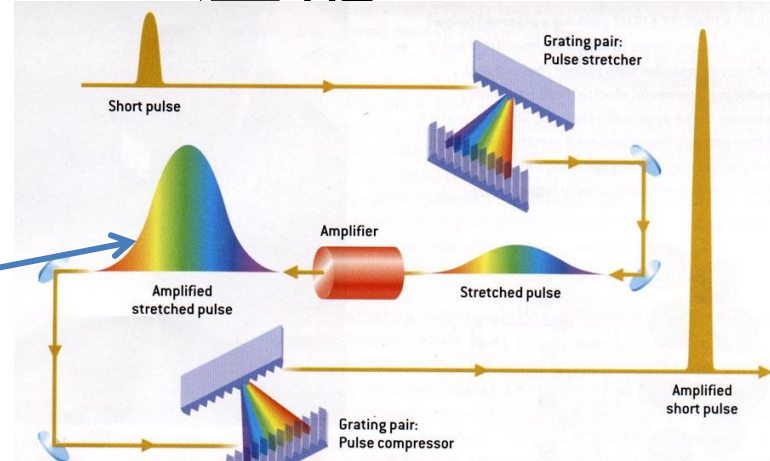
これらは
THzの加速器

プラズマ加速 (PWFA)

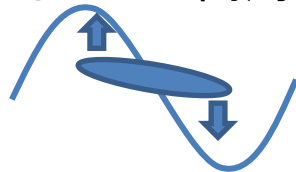


超短パルスを作るための圧縮

- バンチ圧縮にはエネルギー差が必要
 - レーザー: CPA(チャープパルス増幅)
 - ビーム: 位相回転



傾きを付けるための高周波加速



シケイン等でエネルギー依存の経路差

エネルギー源と電界

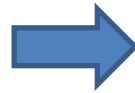
	常伝導	超伝導	電子ビーム 駆動	レーザー 駆動	陽子ビーム駆動
	6/12GHz	1.3GHz	5THz (50fs)	5THz (50fs)	? THz (後述)
駆動 エネルギー	20J [/m] = 40MW × 500ns	200J [/m] = 300kW × 700μs	70J (SLAC) = 23GeV × 3nC 35J (KEK) = 7GeV × 5nC	40J (→ 1kJ)	15kJ (SPS) = 450GeV × 30nC 150kJ (LHC) = 7TeV × 20nC 300kJ (J-PARC MR) = 40GeV × 8μC
電界	40/80MV/m 放電限界	40MV/m クエンチ	20GV/m × 2m = 40 GV	10 GV/m	?
繰り返し	50Hz	5Hz	50Hz	10Hz	1/18 Hz (SPS) 0.3 Hz (J-PARC MR)
ビーム電力 /駆動/AC	400W / 1 kW / 8 kW (1m辺り)	10 MW / 23 MW / 150 MW (ILC)	? / 3.5 kW / 70 kW	4 W ? /400W /4kW(LD)	? / 833W/75MW (SPS) / 300kW/25MW (J-PARC)
効率	5% ?	8%	5%(電子生成) × η(e→e)	現状 0.1 % → 10%?	1%(陽子ビーム生成) × η(p→e)

加速器と高電界加速への展望

常伝導加速器

LCLS 120Hz

SACLA 60Hz



超伝導加速器 (高繰り返し)

Euro-XFEL 27 kHz

LCLS-II 300 kHz



小型化のための高電界加速の候補:

レーザープラズマ加速

ビーム駆動プラズマ加速

レーザー駆動THz 加速

ビーム駆動THz加速

> 100GV/m だが、繰り返しを上げる方法

超伝導加速器駆動 (Flash Forward)

<1 GV/m

>10 GV/m

THz-Enhancement Cavity で
バーストモードが可能

THz加速の有効性

- THz の誘電体加速 12 GV/m が World Record
実用上は 1 GV/m 程度が利用しやすい
(加速器の全長が 1/30 になるので十分高い電界)
- 共振器を形成可能
→ マルチバンチによる大電流ビームの加速が可能
(高繰り返しレーザーが無くても多バンチを加速可能)
- 装置が簡単 (ガラスの筒しかない)
- プラズマ加速と比べて追加速に利用し易い
超高真空に対応 / 収束力の問題が無い / 散乱無



- THz 加速器の KEK/分子研/理研での実証試験



- ビーム駆動による
追加速の実証実験



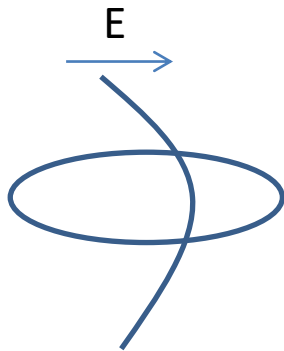
- 分子研・理研との協力による
高強度THz源開発

レーザー加速で必要な加速パラメーター

パルス幅 $\sim 300\text{fs}$ (位相空間から)
バースト (効率から)

ビームの位相空間 → パルス幅(周波数)

- 横方向位相空間



$$\sigma_x = \sqrt{\varepsilon_n \beta / \gamma}$$

$$\delta_x = \frac{\delta p}{p} = 1 - \cos \frac{2\pi \sigma_x}{\lambda} \approx \frac{\pi^2 \sigma_x^2}{2\lambda^2} = \frac{2\pi^2 \varepsilon_n \beta}{\lambda^2 \gamma}$$

1 GeV, $\varepsilon_n=1\mu\text{m}\cdot\text{rad}$, $\beta=1\text{m}$ → $\sigma_x=20\mu\text{m}$

Energy Spread = $1 - \cos(2\pi \sigma_x/\lambda)$

= 0.01% ($\lambda=10\text{mm}$), 0.4% ($\lambda=1.5\text{mm} = 2\text{ps} = 200\text{GHz}$)

10% ($\lambda=0.3\text{mm} = 400\text{fs} = 1\text{THz}$)

そもそも 30fs だと位相空間に入らない

- 縦方向位相空間

$$\delta = \frac{\delta p}{p} = 1 - \cos \omega \sigma_T$$

$\sigma_T = 30\text{fs}$

Energy Spread = $1 - \cos(\omega \sigma_T)$

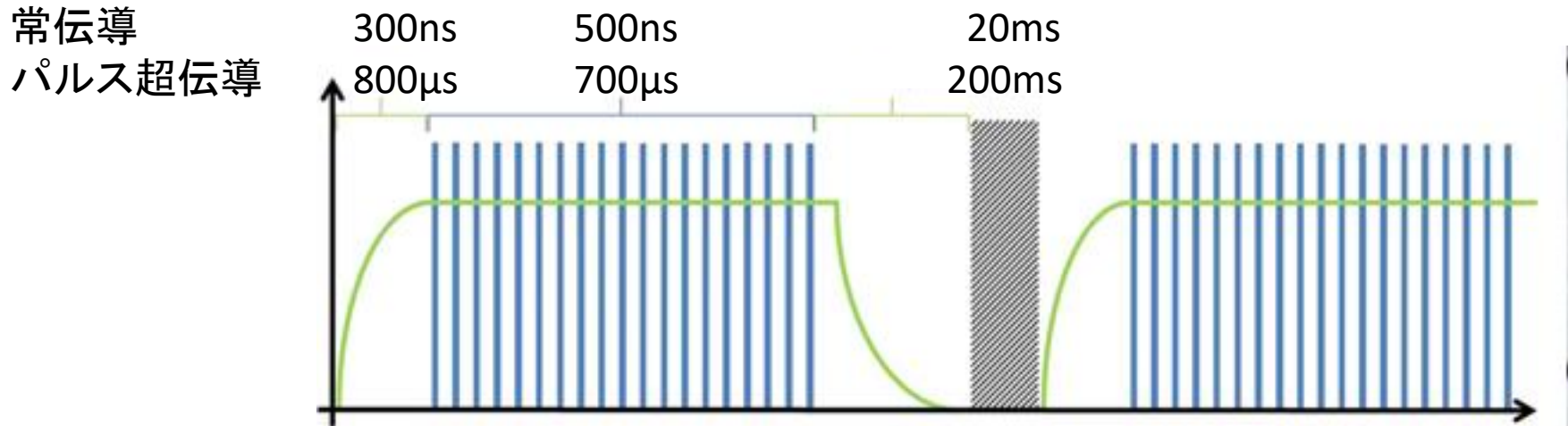
= 0.7% ($\lambda=1.5\text{mm} = 2\text{ps} = 200\text{GHz}$)

2% ($\lambda=0.3\text{mm} = 400\text{fs} = 1\text{THz}$)

そもそも 30fs だと位相空間に入らない

加速効率 : Accelerator pulsed operation

- RF accelerator operates burst micro bunch



バーストパルスでビームエネルギーへの変換効率を上げない限り、総合効率は上がらない

$$\delta_x = \frac{2\pi^2 \sigma_x^2}{\lambda^2}, \quad q = \pi^2 \rho \sigma_x^2 \sigma_t, \quad I = qN, \quad Q = \frac{\omega U}{P_{loss}}$$

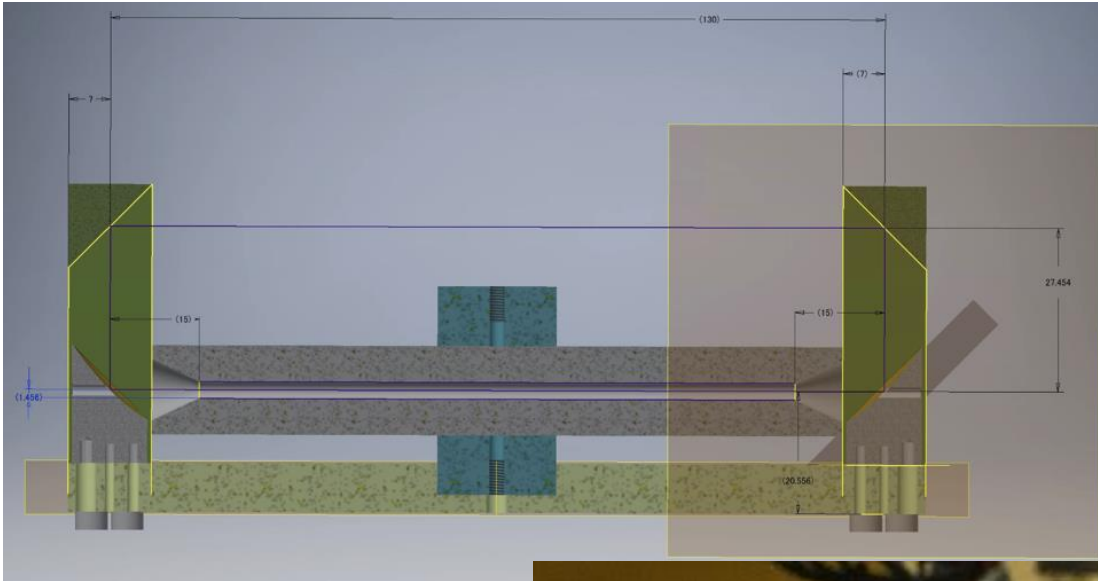
$$U = \int \frac{\epsilon E^2 + \mu H^2}{2} dV \sim \frac{\epsilon_0 E^2 \lambda^2 \pi^2}{8} L$$

$$P_{beam} = \int I E dz = I E L = \rho \frac{\delta_x \lambda^2}{2} \sigma_t N E L$$

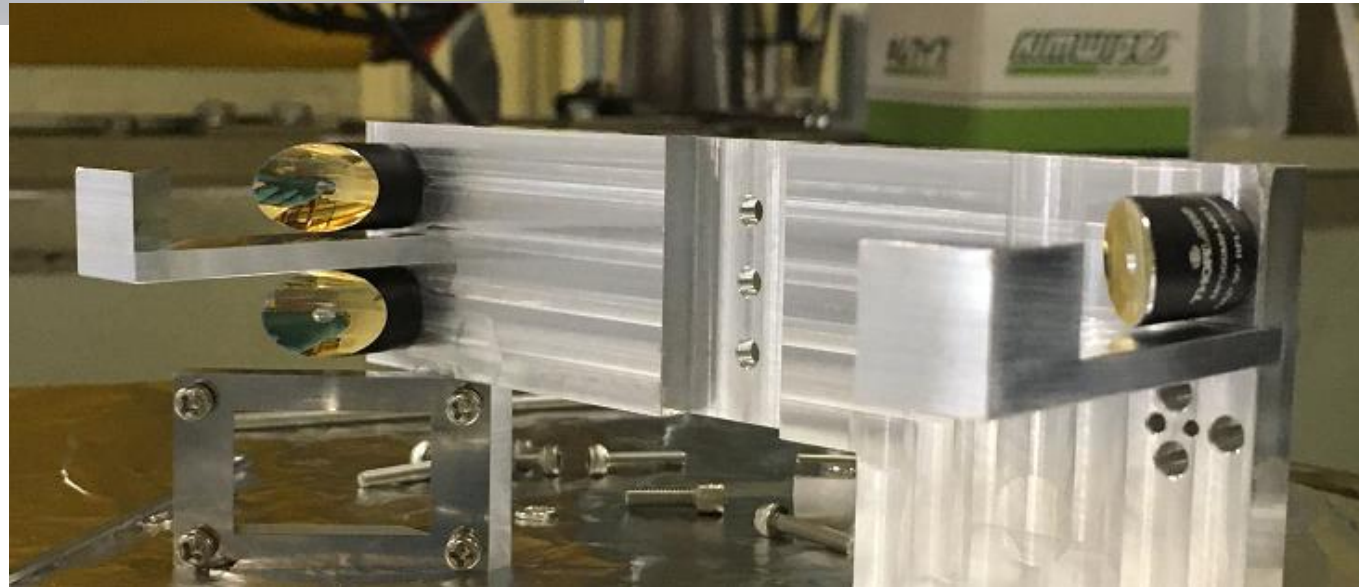
$$\eta = \frac{P_{beam}}{P_{loss}} = \frac{8Q \rho \delta_x \sigma_t N}{\pi^2 \epsilon_0 \omega E}$$

Parameter	ILC	FLASH	Euro XFEL
Energy	250 GeV*2	1.2 GeV	17.5 GeV
Length	31 km	200 m	1500 m
Cavity type	9-cell TESLA-type SSCs		
Resonance frequency	1300 MHz		
Cavity gradient (MV/m)	31.5±20%	20	23.6
Loaded Q	3e6 ~ 10e6	~3e6	~3e6
Number of cavities (e-,e+,RTML,ML)	15,814	42	928
Cavities per klystron	39	16	32
Number of klystrons	378	5	29
Beam pulse length	727 us	650 us	650 us
Beam current	5.8 mA	3 mA	5.0 mA

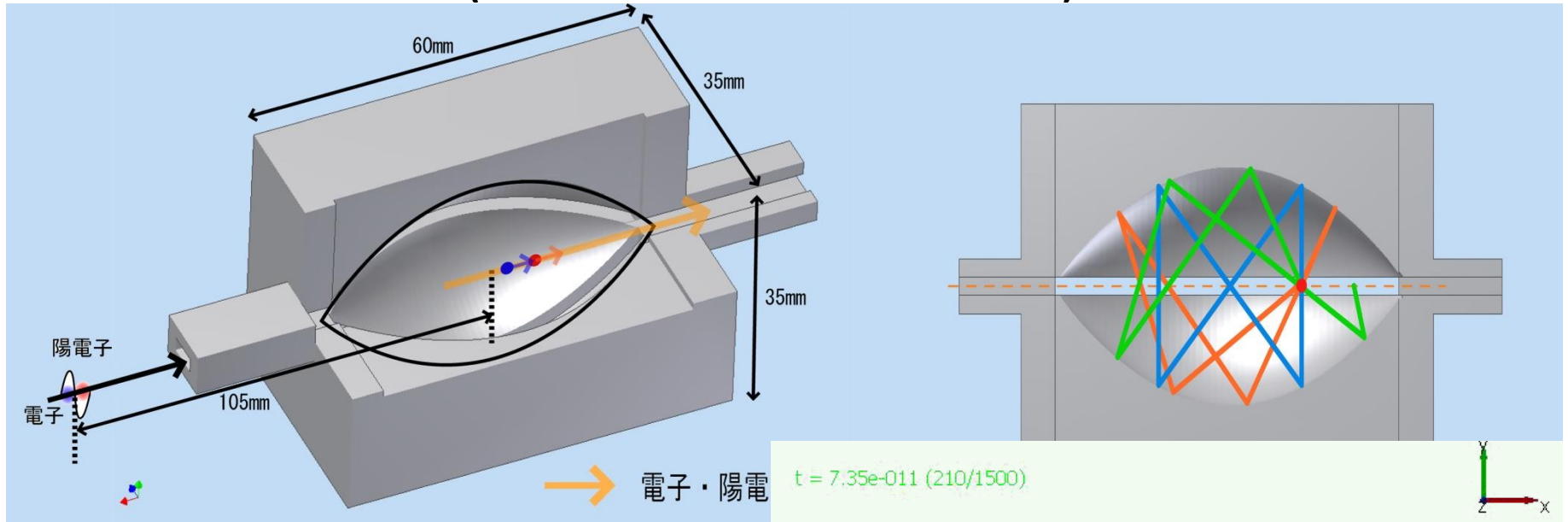
共振型 DLW の試験 穴径 $\Phi 2\text{mm}$, 100GHz帯



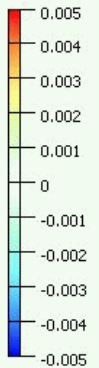
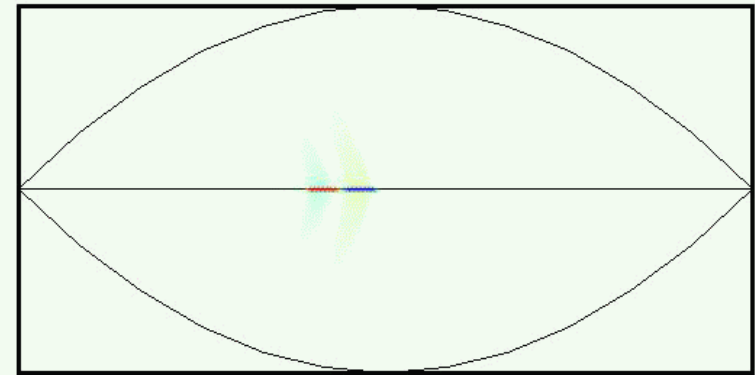
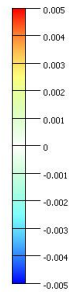
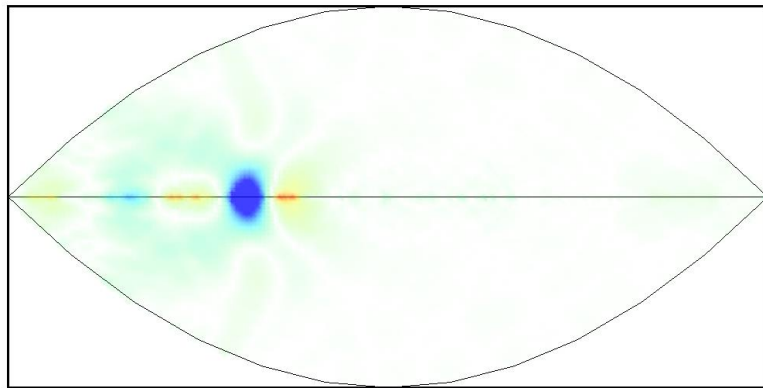
KEK-LINAC に
インストール済



THz帯周波数重畳 = モードロック加速管 (誘電体加速ではない)



$t = 4.2e-010$ (1200/1200)



※本田さんもファブリペロー共振器型のを ERL で実験中

誘電体加速/THz-DLW

THz- Dielectric Lines Waveguide

※ただのガラス管です

誘電体加速

Dielectric Laser Acceleration (DLA) :

グレーティング構造に電磁波を照射して
表面を走行する電子を加速する方式

1 μm 帯: 東大(上坂研)との共同開発(科研費)

THz帯: 分子研(平等研)・理研(南出研)との共同開発

Dielectric Lined Circular Waveguide (DLW) : 

キャピラリー中のTHzで加速

ビーム駆動: 超短パルス電子ビームを通す際に生じる
超高電界のTHz航跡場で後続のビームを加速(東大との協定)

レーザー駆動: THz-PPLN で生成した高強度 THz

産業技術総合研究所で実験 → 現在KEK/分子研・理研(平等研)

Dielectric Wall Accelerator (DWA)

光伝導スイッチ(PCSS)を用いて誘電体伝送路
を高速にスイッチして加速電界を得る

東芝との共同研究中

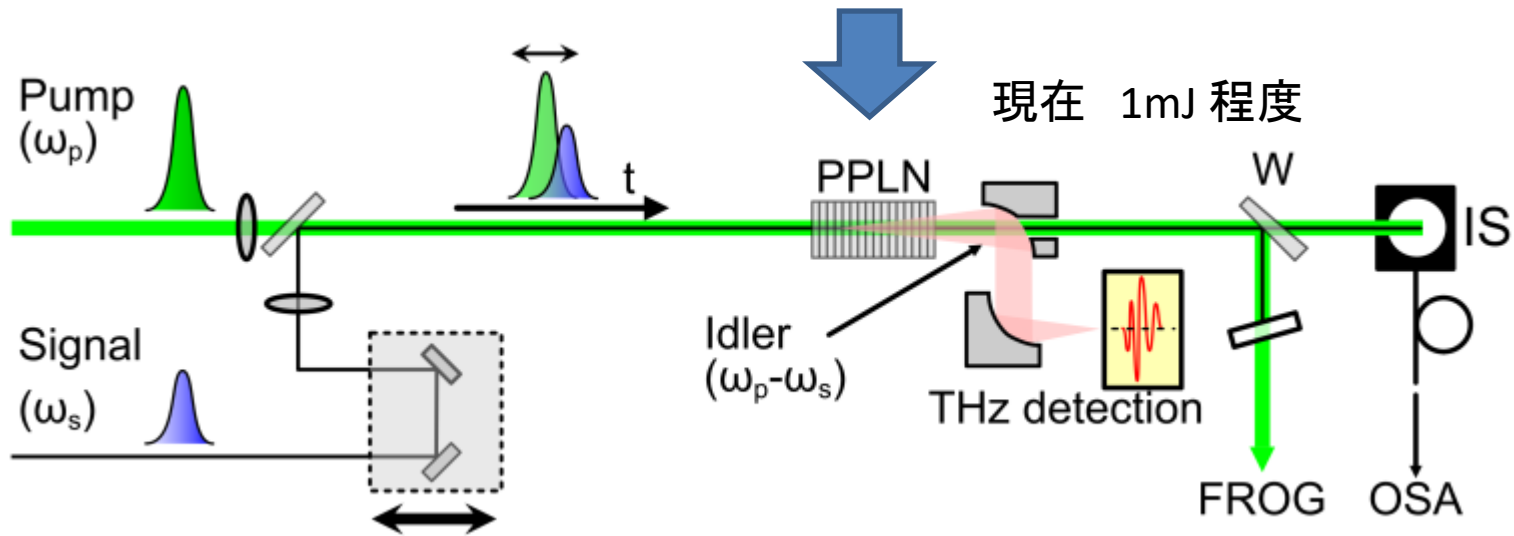
Dielectric Assisted Accelerator (DAA)

誘電体装荷型加速管 高いQ値 (10^5 @室温・ 10^8 @ 80K)

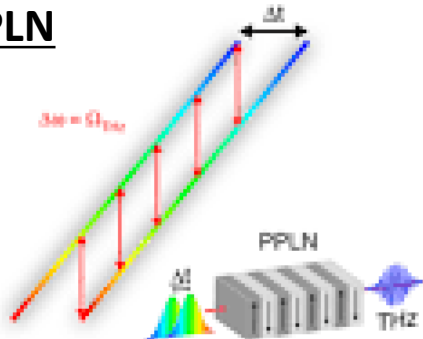
6 GHz /12 GHz : 科研費・三菱重工 / 基本特許取得

世界的な動向 : DESY(F. Kartner)

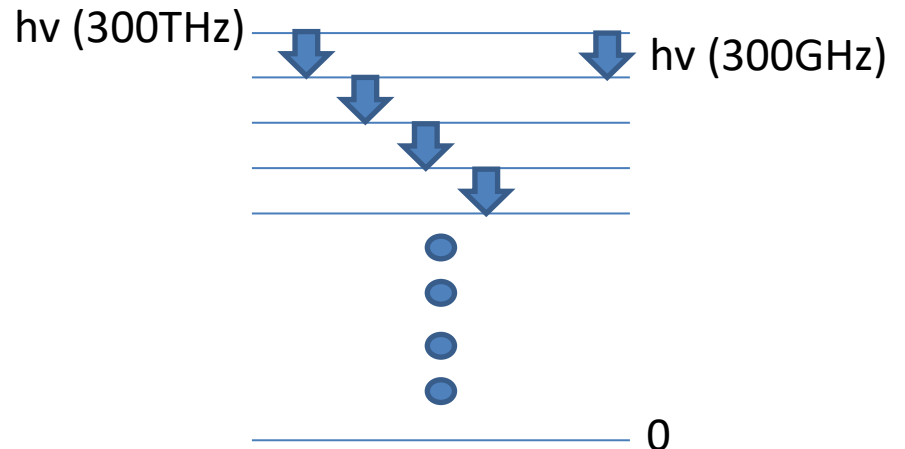
分子研製のPPLNを使用



THz-PPLN

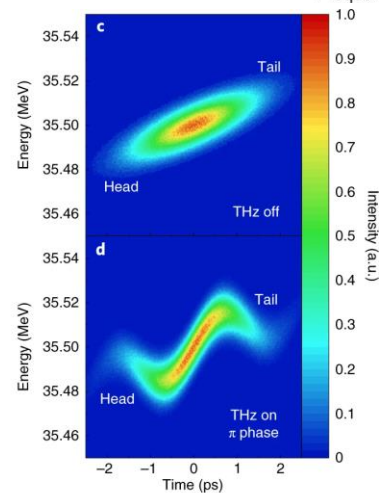
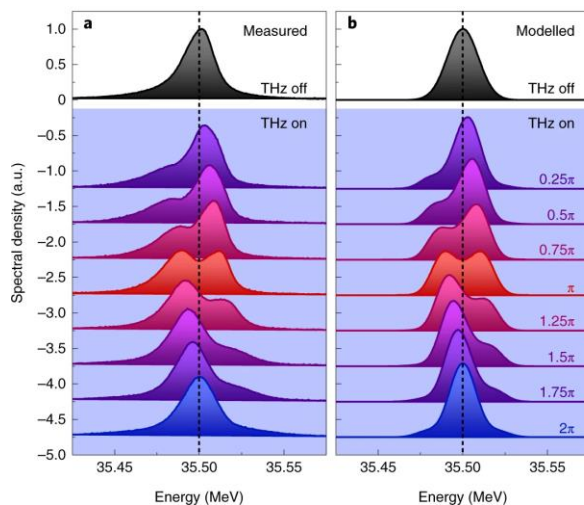
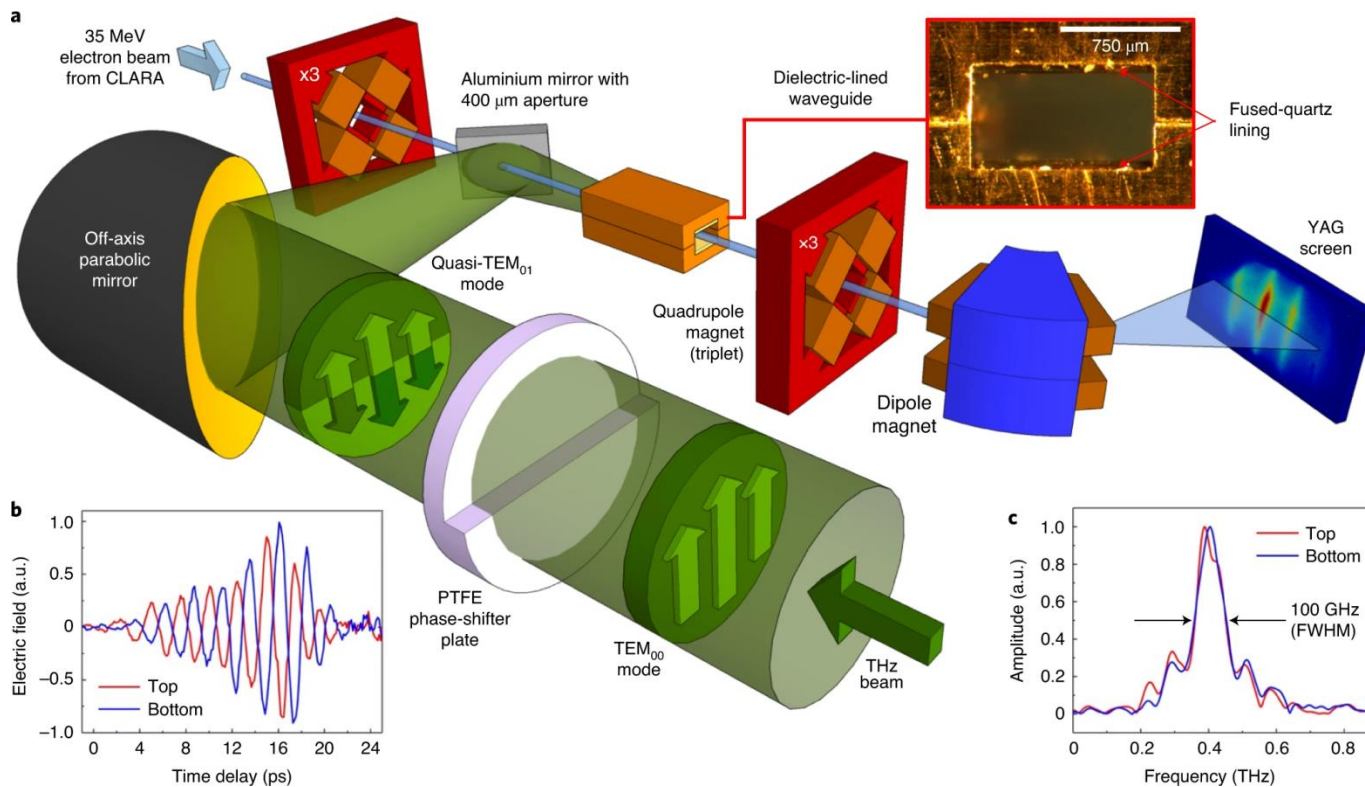


マンレーロー限界を越えるためには
カスケードイングが必須



- MgO:PPLN : Pole=212 μ m, 10x20x L=40mm (damage threshold : 1 J/cm²)
- $\tau=1$ ps, $\Delta t \sim 1$ ps

世界的な動向 : Nature Photonics(2020)



たったの 10keV

THz帯DLA 用 Si 回折格子(KEK初期の実験)

THz 光の加速器の利点:

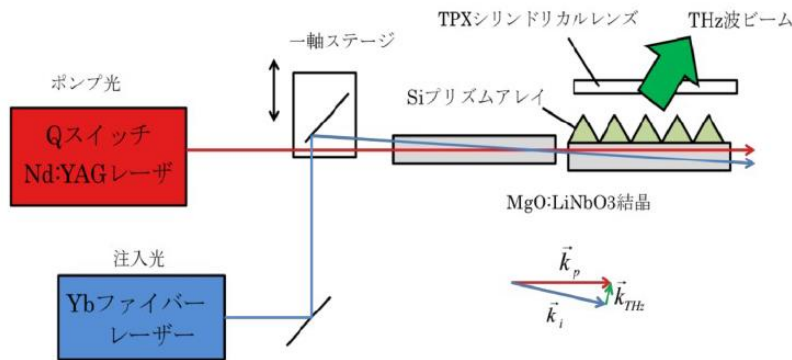
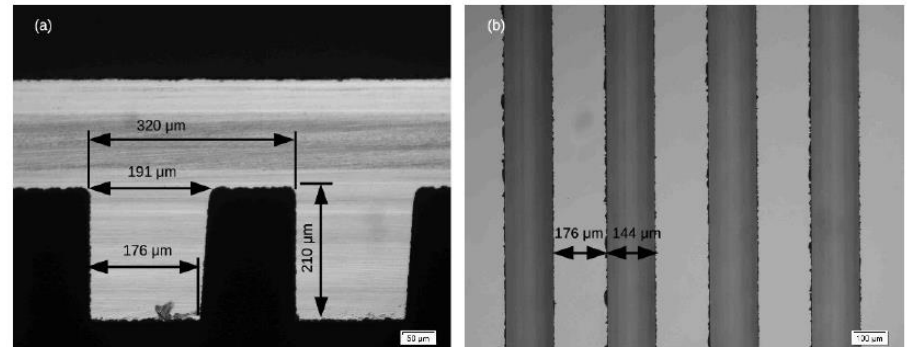
0.1 mm 程度の加速構造

- ・加速領域の体積が赤外のおよそ 100^3 倍
- ・加速構造の機械加工が可

光(赤外)に近い高い加速勾配(絶縁破壊)

- ・ 200 MV/m

THz OI-DLA のための Si 回折格子の加工



Pitch	0.320	mm
Depth	0.210	mm
Number of Pitches	10	
Material of Wafer	Si	
Thickness of Wafer	0.380	mm
Index of Si @ ~THz	3.4	

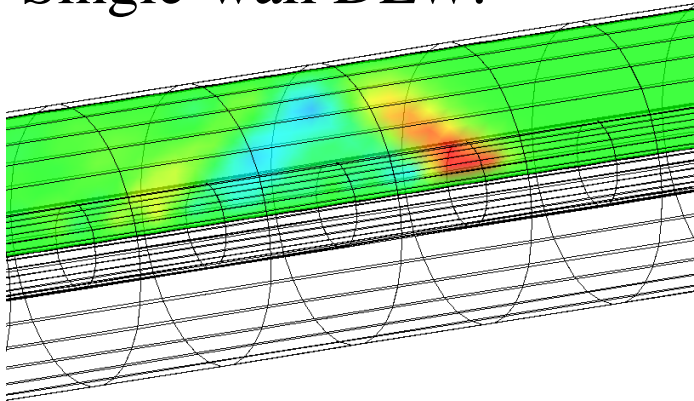
Breakdown Limits on Gigavolt-per-Meter Electron-Beam-Driven Wakefields in Dielectric Structures

M. C. Thompson,^{1,2,*} H. Badakov,¹ A. M. Cook,¹ J. B. Rosenzweig,¹ R. Tikhoplav,¹ G. Travish,¹ I. Blumenfeld,³ M. J. Hogan,³ R. Ischebeck,³ N. Kirby,³ R. Siemann,³ D. Walz,³ P. Muggli,⁴ A. Scott,⁵ and R. B. Yoder⁶

13.8 ± 0.7 GV/m.

Fused silica, THz range,
~psec exposure

Single-wall DLW:



$$a = 0.1 \text{ mm}$$

$$b = 0.324 \text{ mm}$$

$$\epsilon = 3.0 (\text{SiO}_2)$$

$$q = 5 \text{ nC}$$

$$\sigma_z = 30 \mu\text{m} (0.1 \text{ ps})$$

KEK で最大可能なパラメーター

- Mode wavelengths

$$\lambda_n \approx \frac{4(b-a)}{n} \sqrt{\epsilon - 1} = 0.7 \text{ mm}$$

- Peak decelerating field

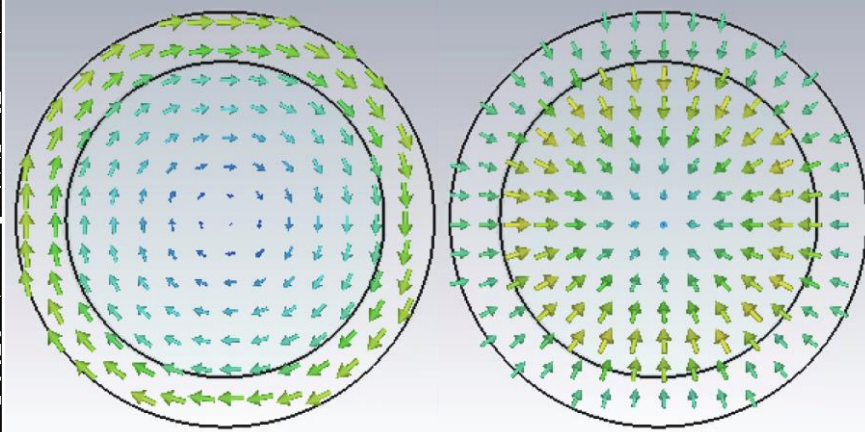
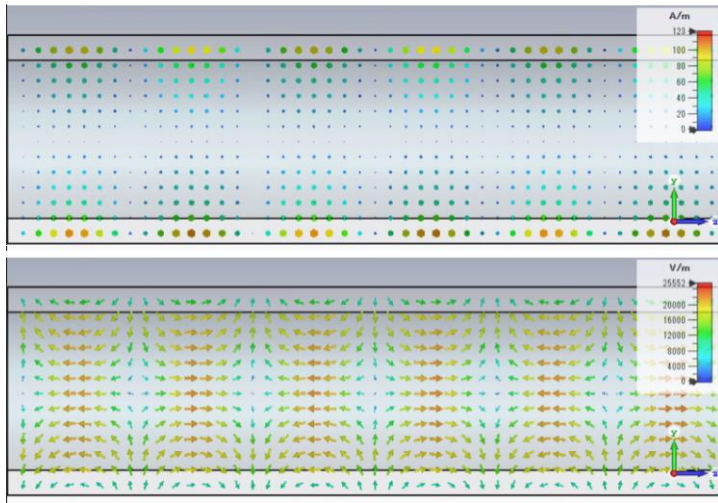
$$eE_{z,dec} \approx \frac{-4N_b r_e m_e c^2}{a \left[\sqrt{\frac{8\pi}{\epsilon - 1} \epsilon \sigma_z} + a \right]} = 2 \text{ GV / m} (\sigma_t = 0.1 \text{ ps})$$

- Transformer ratio

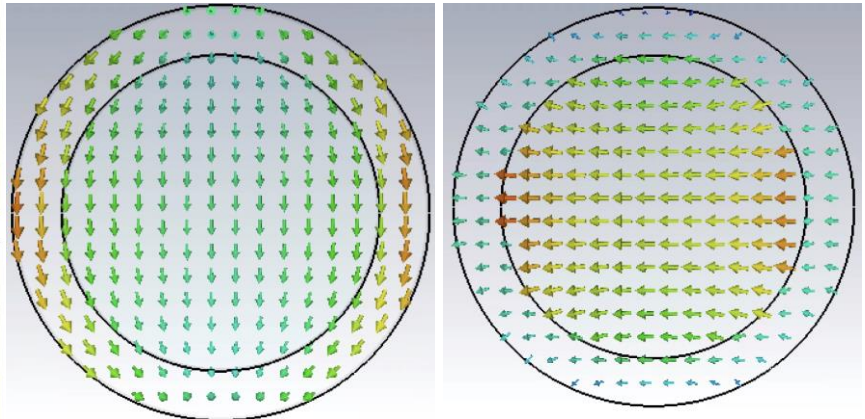
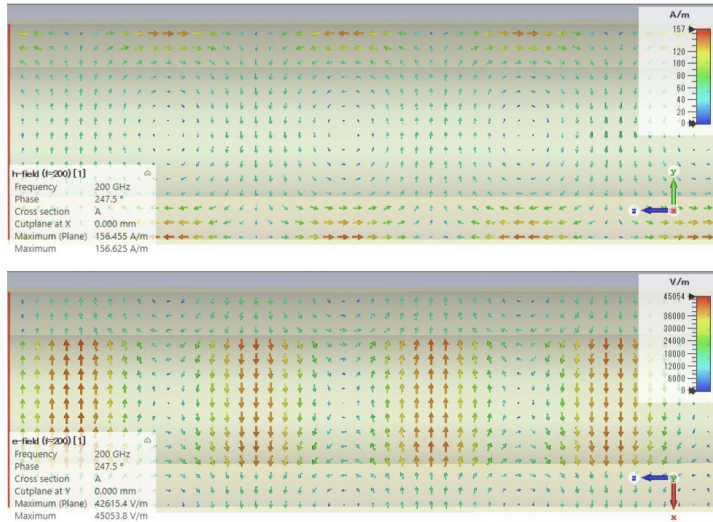
$$R = \frac{E_{z,acc}}{E_{z,dec}} \leq 2$$

DLW

加速モード



偏向モード



さらに円偏波にすれば回転方向にビームをキック可能になります

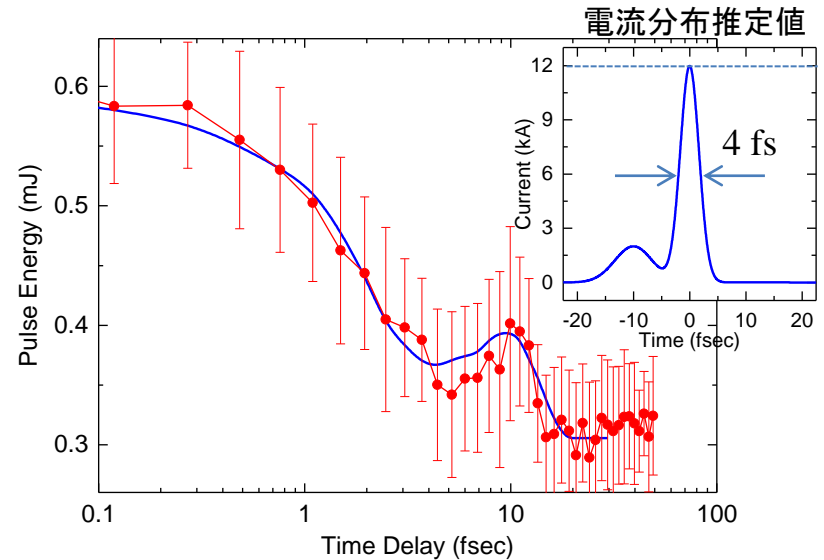
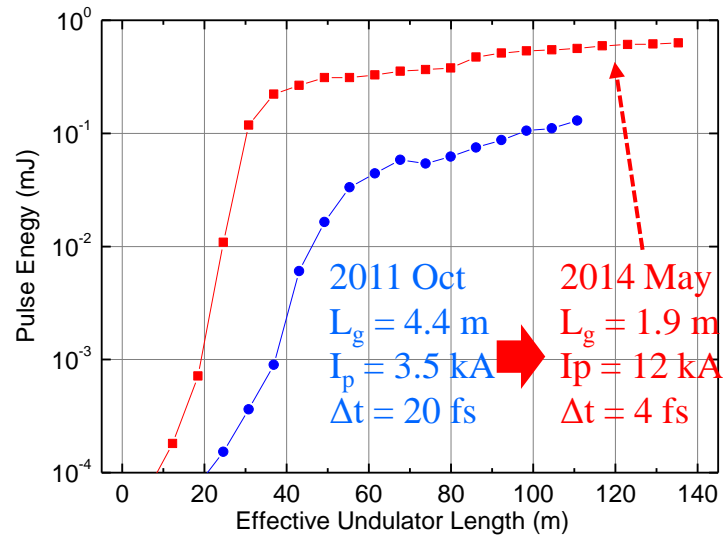
XFELでのTHz加速への期待

- THz-Deflector によるバンチ長/構造の観測
- バンチ圧縮によるFELゲインの向上
- アト秒バンチ生成
- 超小型XFEL

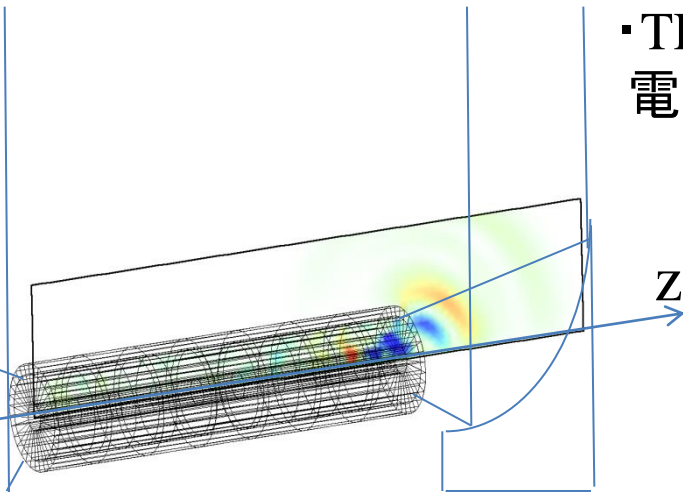
XFEL : SACLA のバンチ長測定・圧縮してアト秒へ

FELパルスと電子ビームの
相互相関

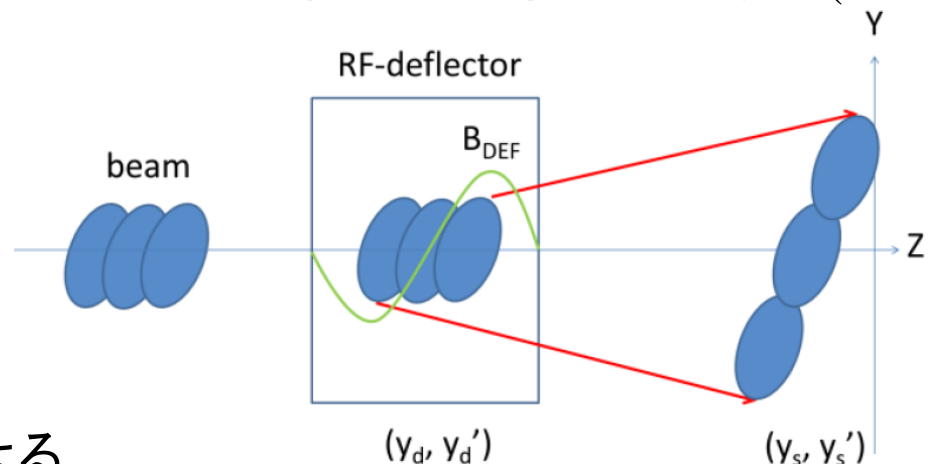
- SACLAの尖塔電流は設計値より既にかなり高い



THz



- THz ディフレクター(直線偏波)による電子ビームのアト秒時間分解能での観察(1mJ)



- THz誘電体加速器(ラジアル偏光)によるバンチ圧縮 → 尖頭電流向上/アト秒電子生成(10mJ)

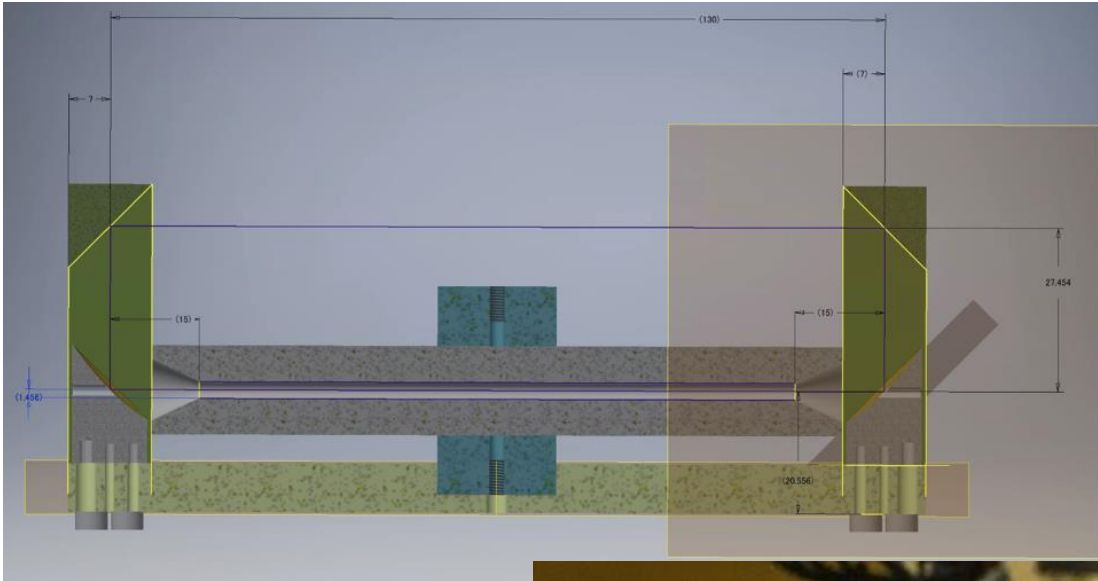
KEK

ビーム駆動THz加速

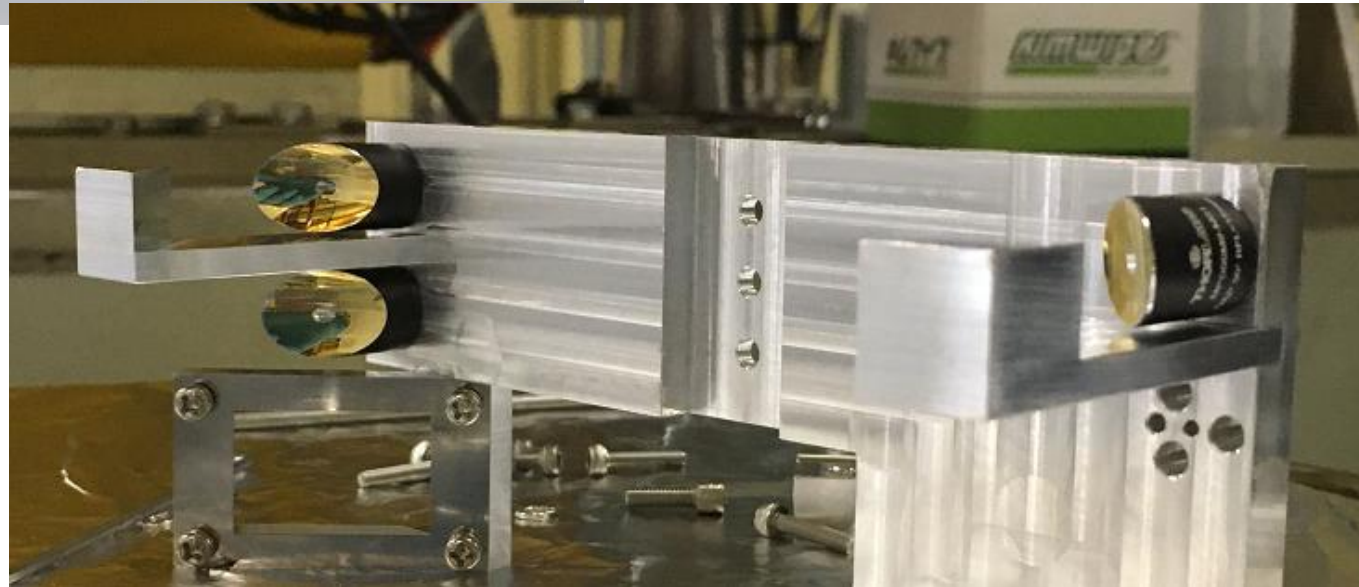
まずは超高電界のTHz加速の実証
のため

共振型 DLW の試験

穴径 $\Phi 2\text{mm}$, 100GHz帯

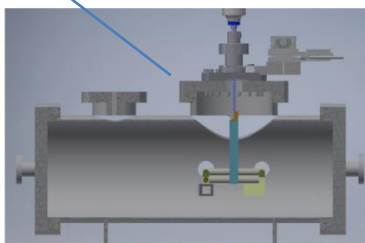
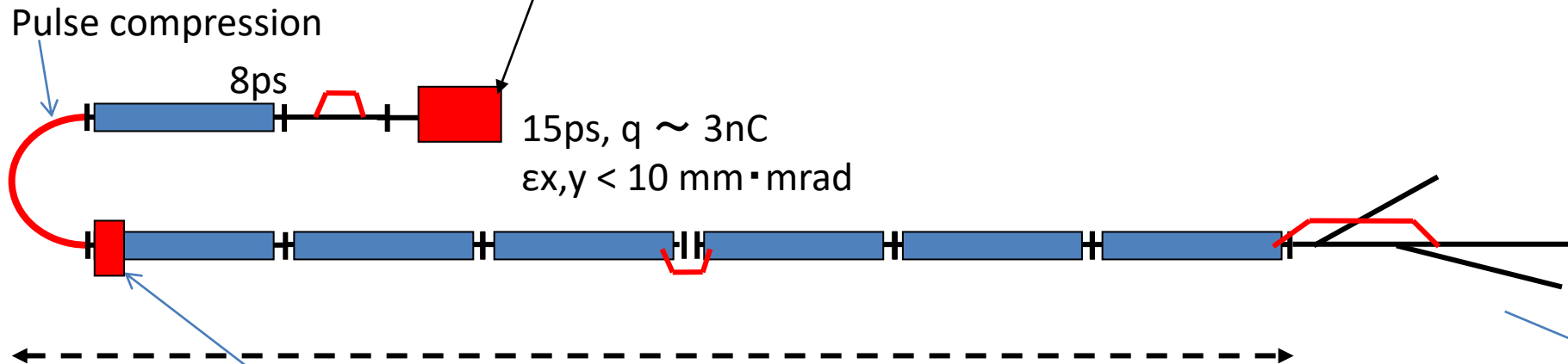


9月インストール済
→ 12月に試験



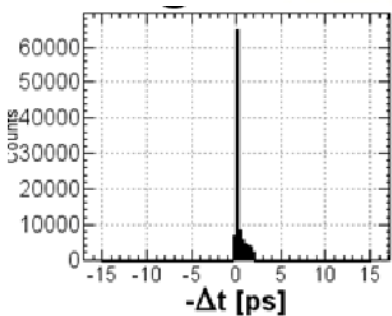
LINAC C-1 での試験スタンド

- バンチ長測定/ 圧縮の試験(東大との協定)



DLWの高さは変更可能

ビーム軸



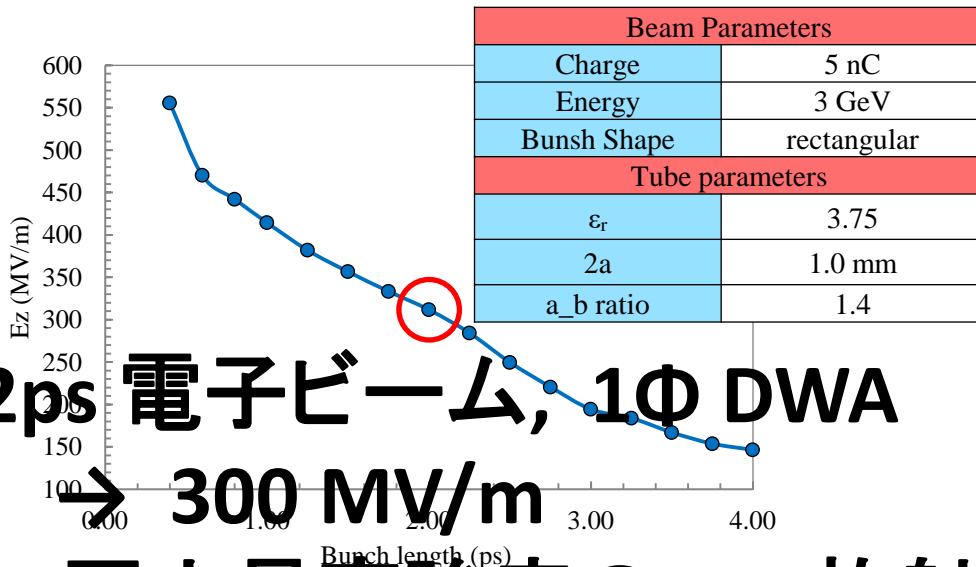
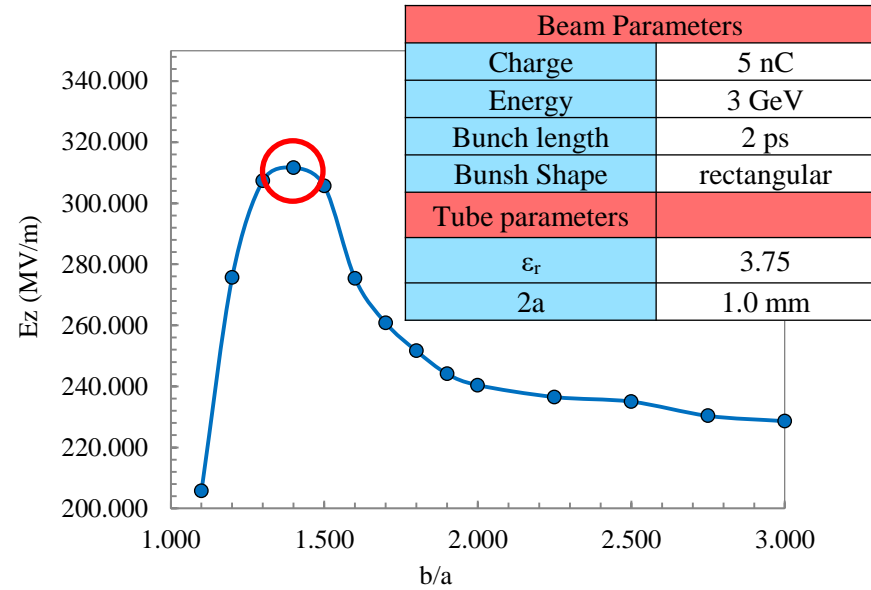
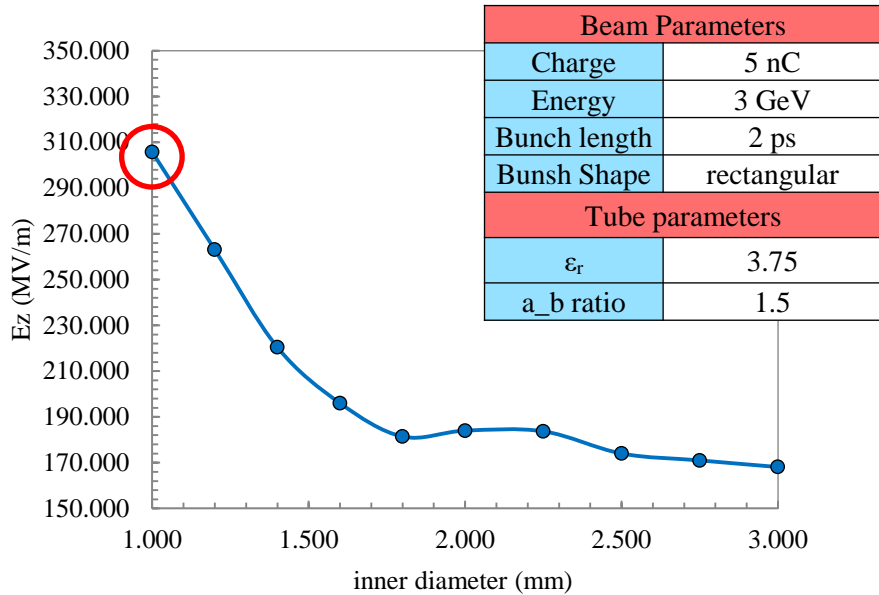
【構成要素】

- ・ DLW : 長さ100mm、穴径2mm、石英管
- ・ 軸外し放物面ミラー、アルミミラー
- ・ デマルケスト製スクリーン

【3段構成】

ビームサイズ確認用、100GHz遷移放射の測定、**ビーム追加加速試験**

DLWの加速パラメーター



ミリ波検出器での THz の確認

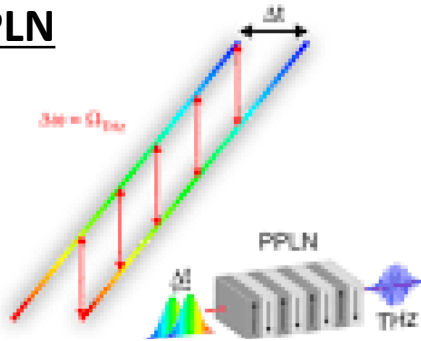


2ps 電子ビーム, 1Φ DWA
→ 300 MV/m
(国内最高強度の THz放射)

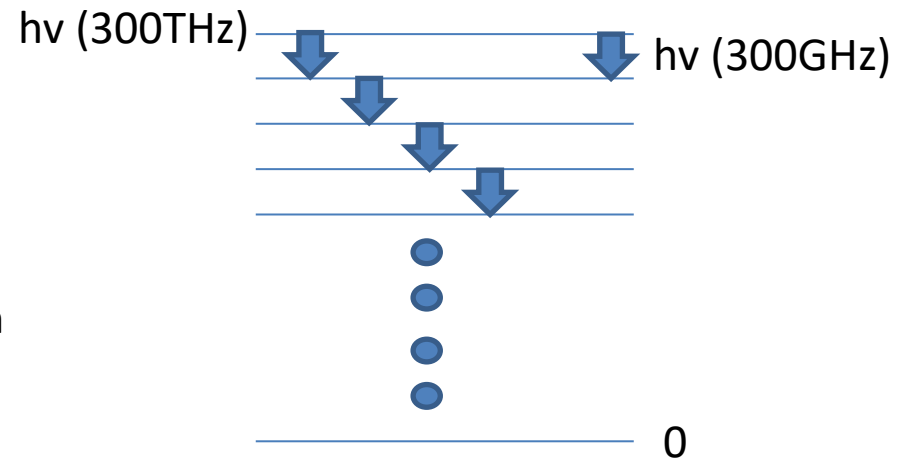
KEK/分子研・理研
レーザー駆動THz加速

MgO:PPLN / THz generation

THz-PPLN

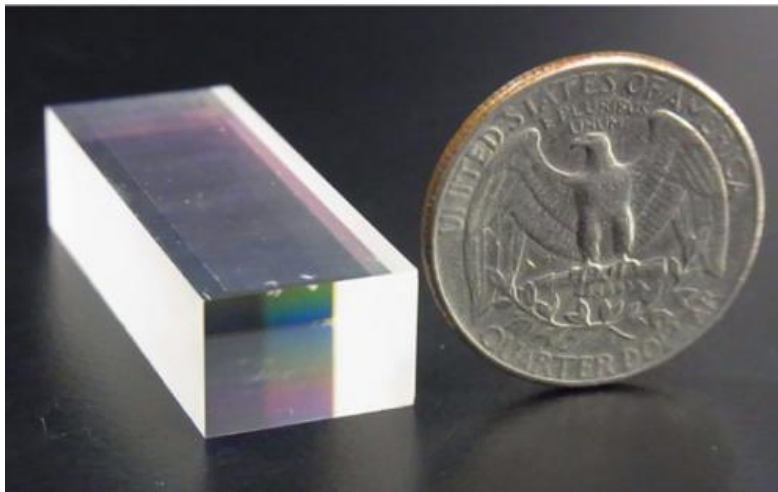


マンレーロー限界を越えるためには
カスケードニングが必須



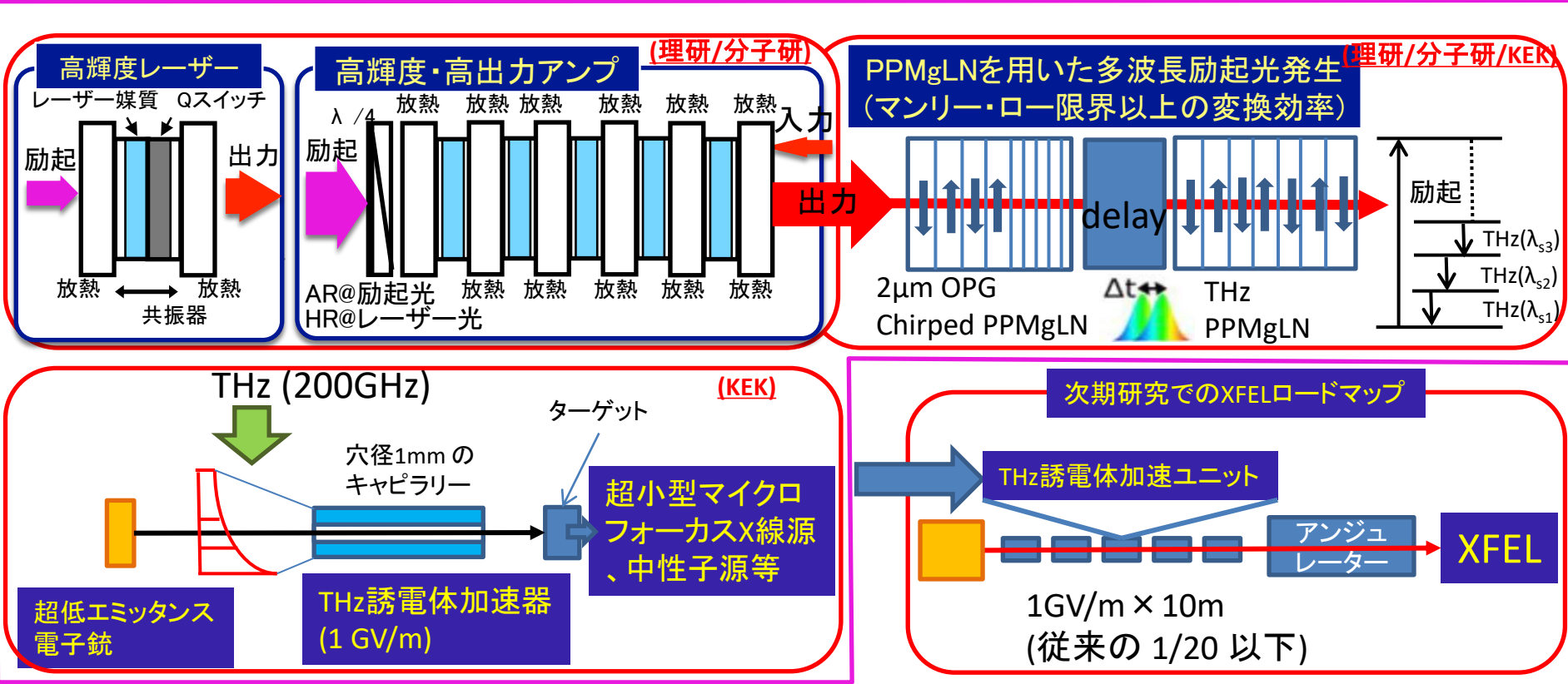
- MgO:PPLN : Pole=212 μm , 10x20x L=40mm (damage threshold : 1 J/cm²)
- $\tau=1\text{ps}$, $\Delta t \sim 1\text{ps}$

分子研製超大型 PPLN



5% 変換効率が見られれば
2J \rightarrow 100mJ THz が可能なはず

レーザー駆動の THz-DLW



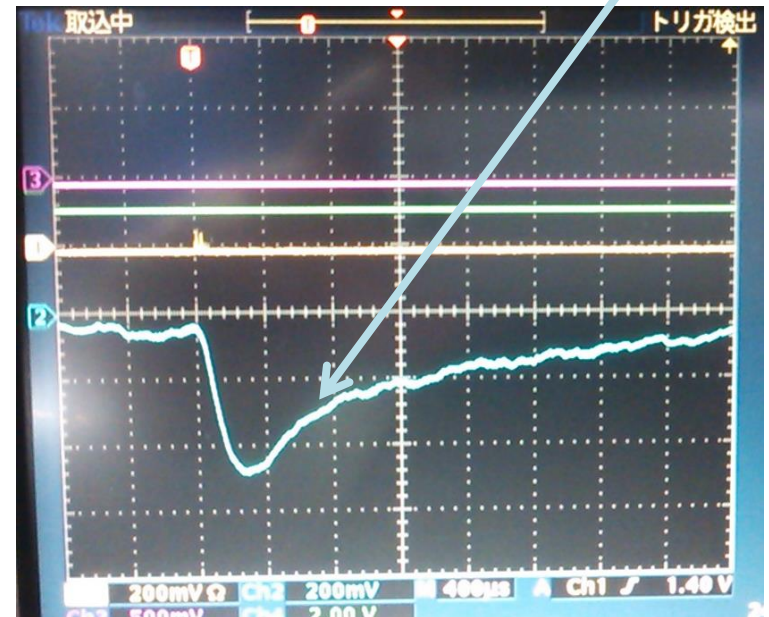
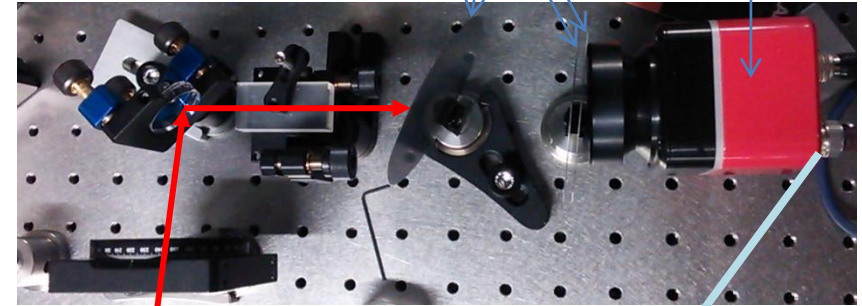
冷却 Yb:YAG / PPLN

分離型ヘッドのパルスチューブを使用 (無振動)



Silicon wafer
with metal
mesh filter x 3

THz
Detector



KEKにおけるレーザー開発

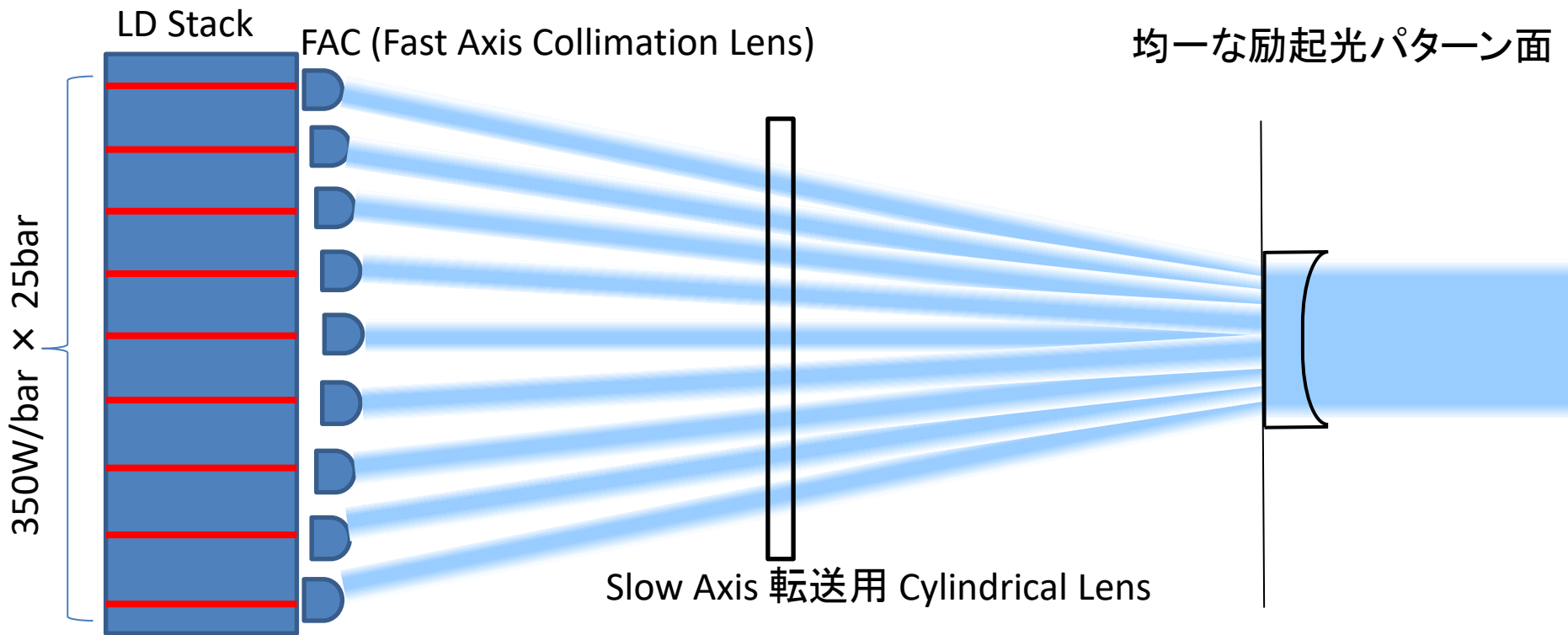
- 全てのレーザーシステムが Multi-pass
 - マルチバンチ / Enhancement Cavity に対応
- Nd系レーザー開発(未来社会創造事業レーザー開発G)
 - 平等件製 DFC を使用
 - 浜松ホトニクス製 885nm 8kW Laser Diode Stack
- Yb系レーザー開発
 - 平等研製 常温接合の Think Disk を使用
 - 浜松ホトニクス製 940nm 9kW Laser Diode Stack
 - 室温 Yb:YAG → 冷却 Yb:YAG
- Ti:Sapphire 系の増強
- 赤外 Chirped PPLN への期待

Laser Diode

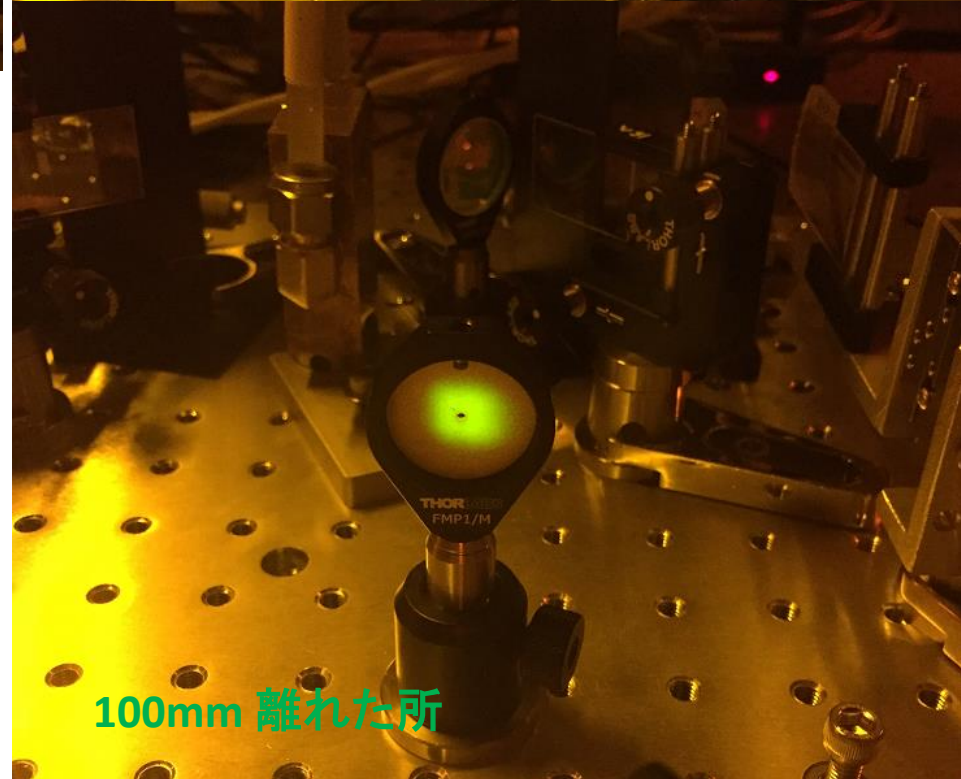
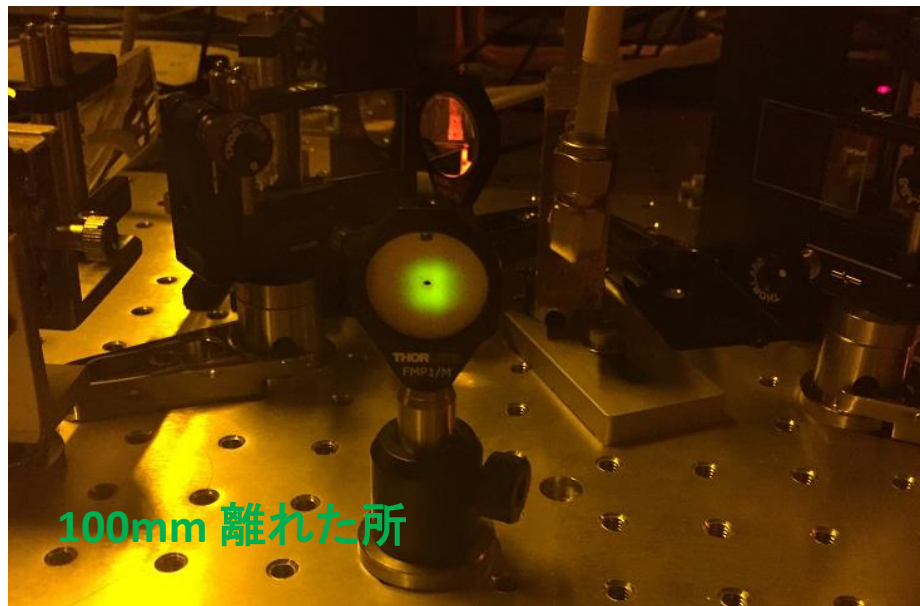
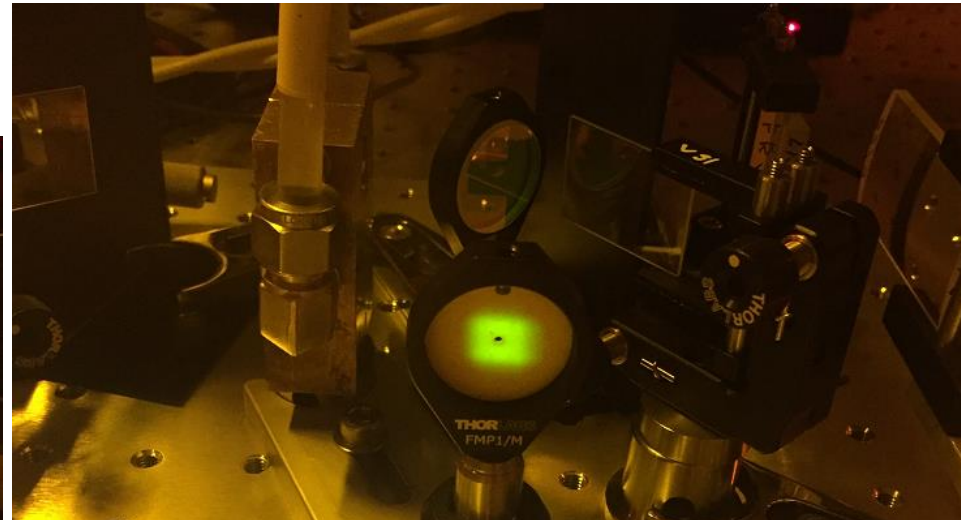
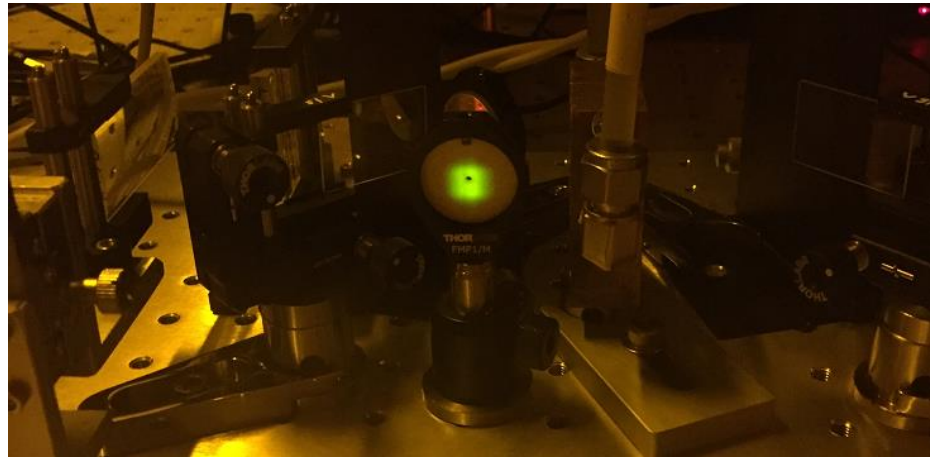
- Laser Diode Stack
 - × 帯域幅 3nm (DB)
 - △ビームパターンを成形する方法が必要
 - QCW(Duty ~3%) では kW/bar 位まで到達
 - $3\% / 100\text{Hz} = 300\mu\text{s}$ (これ以上の蛍光寿命は不要)
 - $25\text{万円/kW} \times 3\% = 30\text{W(CW)} \rightarrow 1000\text{万円/kW}$
 - CW
 - $100\text{万円/kW} \rightarrow 1\text{kHz}$ でも 1ms の蛍光寿命が必要
- Fiber Bundle
 - QCW 50万円/kW, 150万円/kW
- VCSEL
 - × 励起密度低い 150W/chip \rightarrow Nd:YAG side pump
 - QCW~CW まで連続
 - 狭帯域

Hamamatsu 製 QCW Laser Diode Stack

- QCW LD Stack : 30万円/kW (Fiber Bundle の 1/5)
- $350\text{W}/\text{bar} \times 25\text{bar} = 8.75 \text{ kW} \times 250\mu\text{s} > 2\text{J}/\text{stack}$
- FACの精密アライメントで均一な励起パターン
- 開発した安価な大電流パルスドライバ

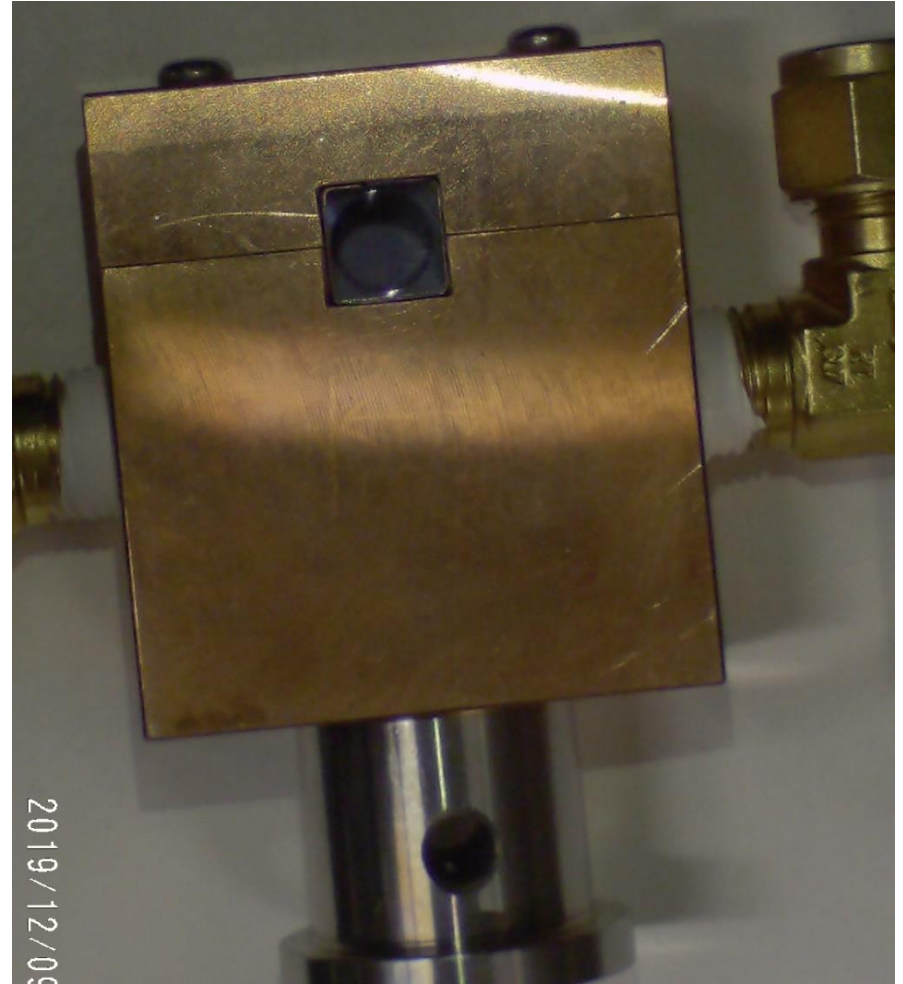
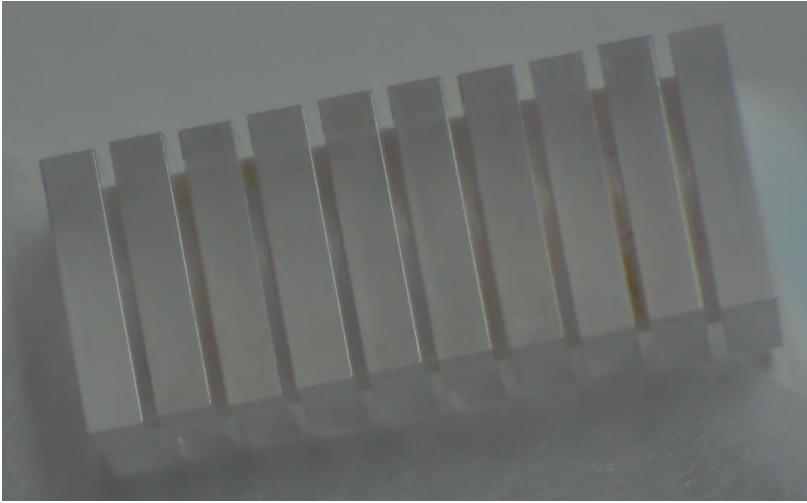


励起光プロファイル

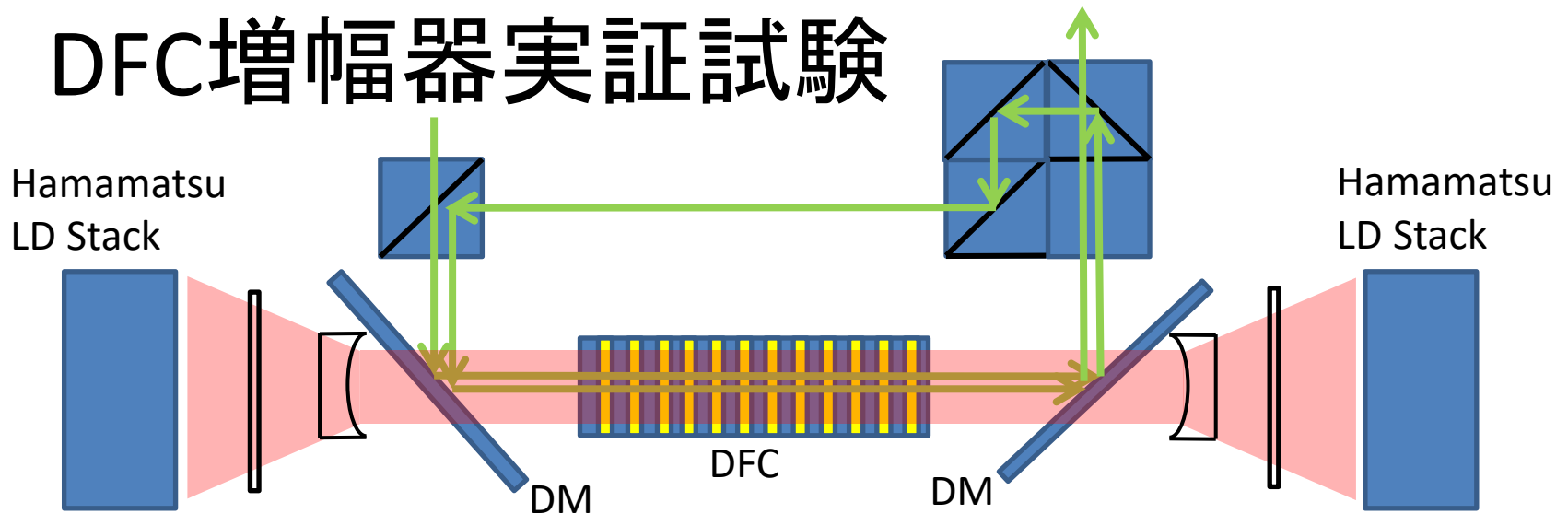


Nd:YAG DFC

- $0.65\text{t} \times 9 \text{ Nd:YAG} + 2\text{t} \times 10 \text{ Sapphire} = 25\text{mm}$



DFC増幅器実証試験



2ループにする事で戻り光を無くす & 90度回転
(結晶の複屈折による偏光回転の戻り等)

- 増幅率

- $8 \text{ kW} \times 4$ (両方向On-Axis励起) $\times 250 \mu\text{s} = 8 \text{ J} / \text{cm}^2$
- $G = 5$ for $L(\text{Nd:YAG}) = 1.3 \text{ cm} (1/e^2)$ (2-passで50倍)

- Pump(885nm)

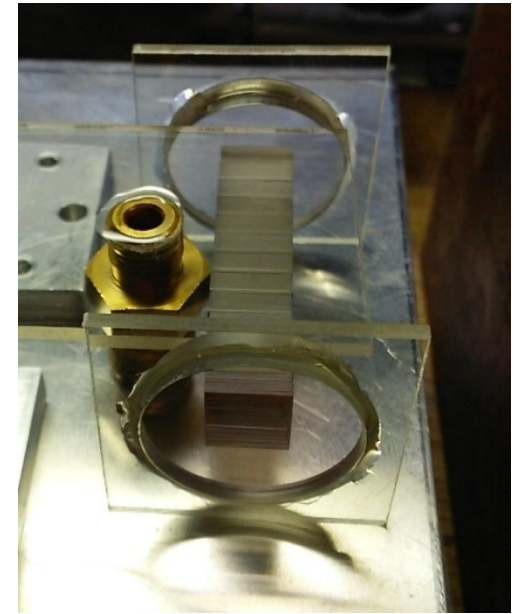
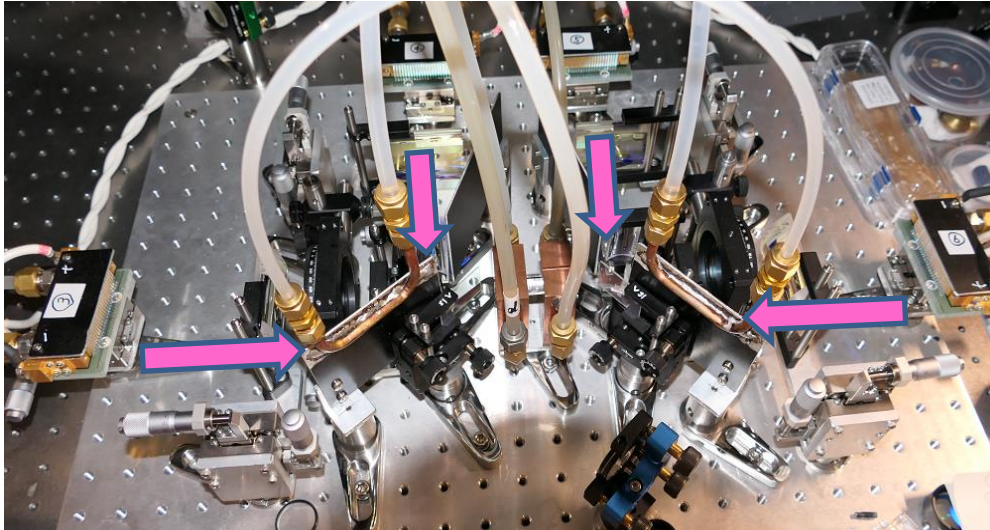
4 stack(32kW, 8J)

Output

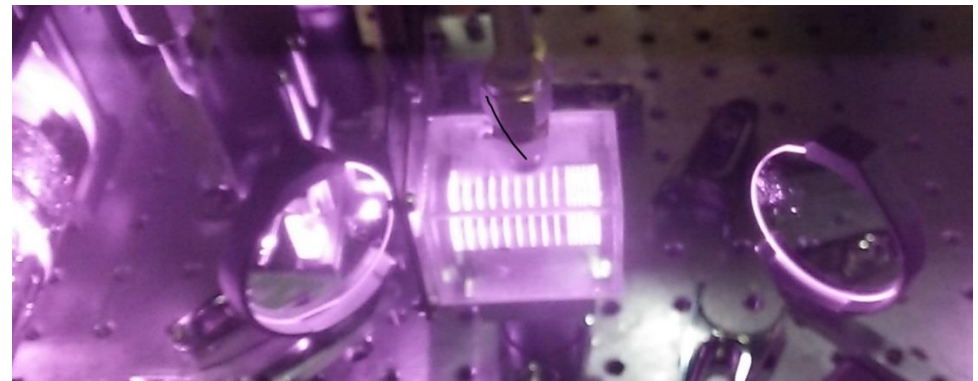
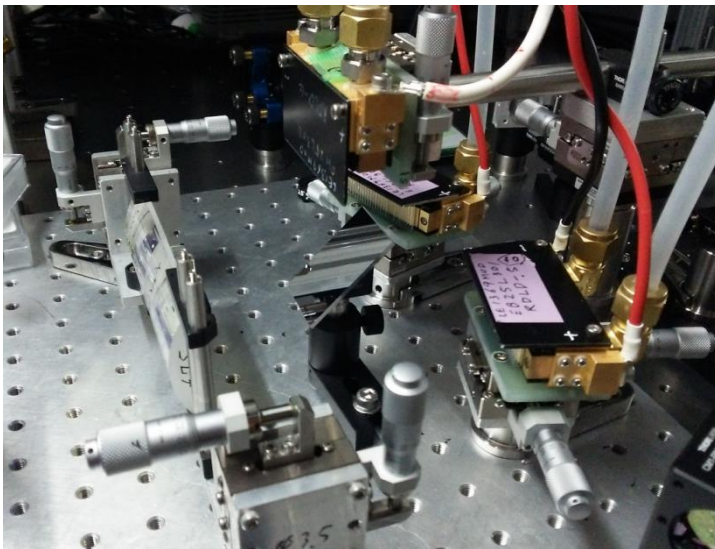
→ 2 J → 1 J @ SHG

2J Nd:YAG DFC

- $8 \text{ kW} \times 250 \mu\text{s} \times 4 = 8 \text{ J pump}$

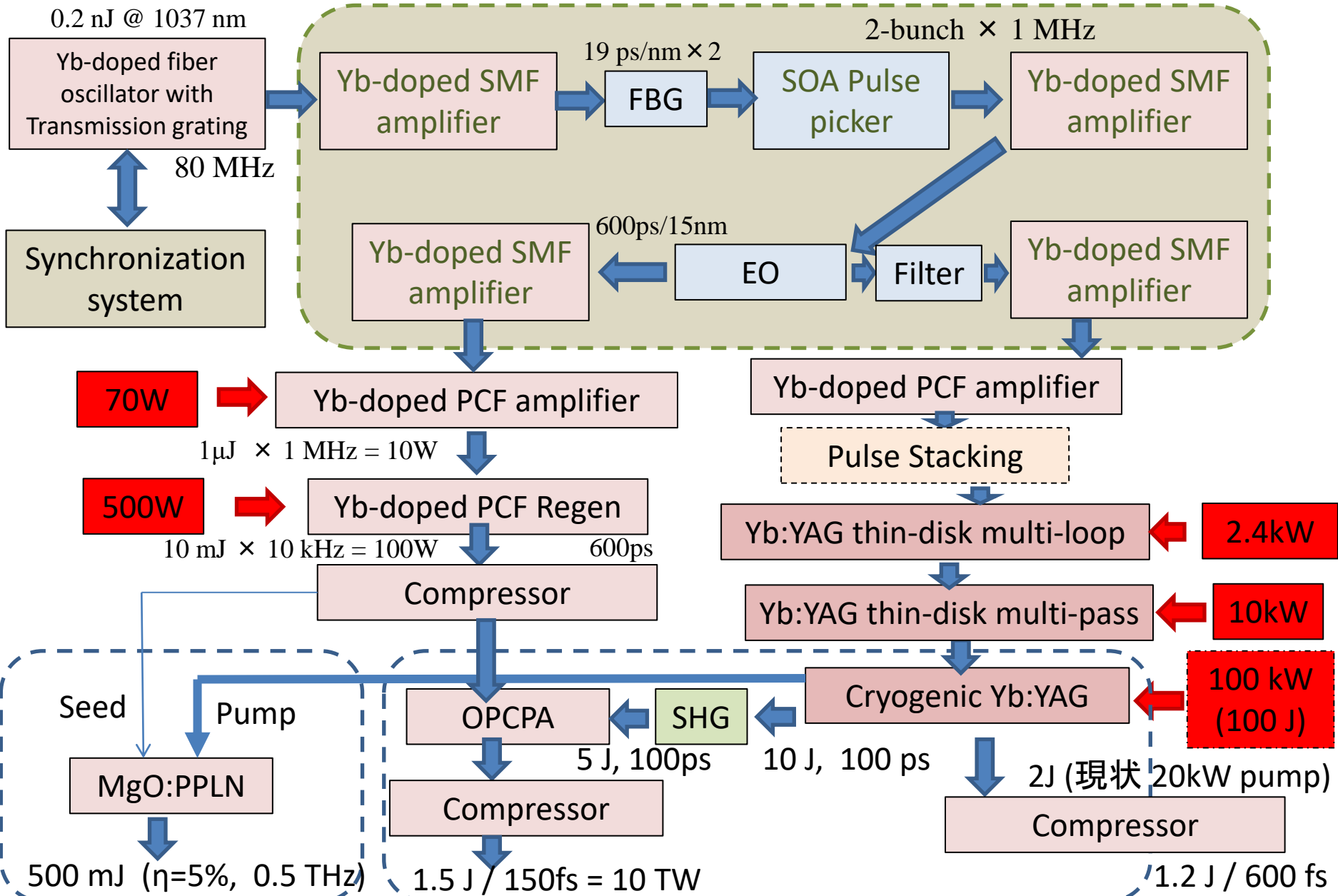


- $8 \text{ kW} \times 250 \mu\text{s} \times 3 = 6 \text{ J pump} \rightarrow \times 2 \text{ 12J pump}$



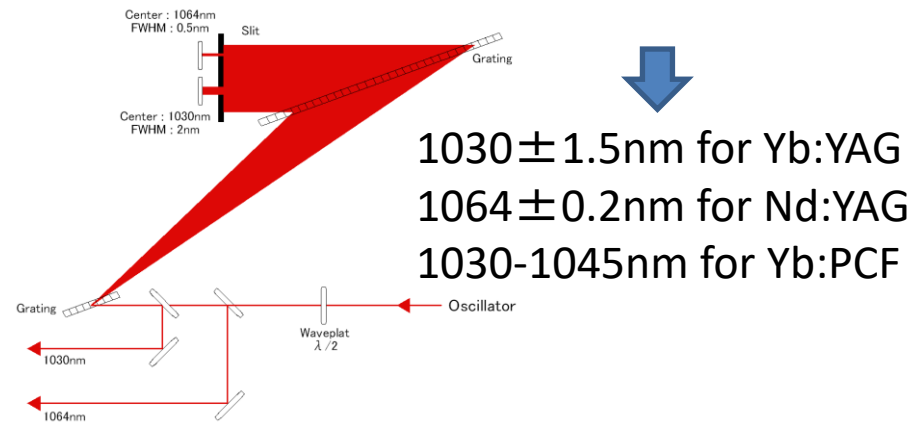
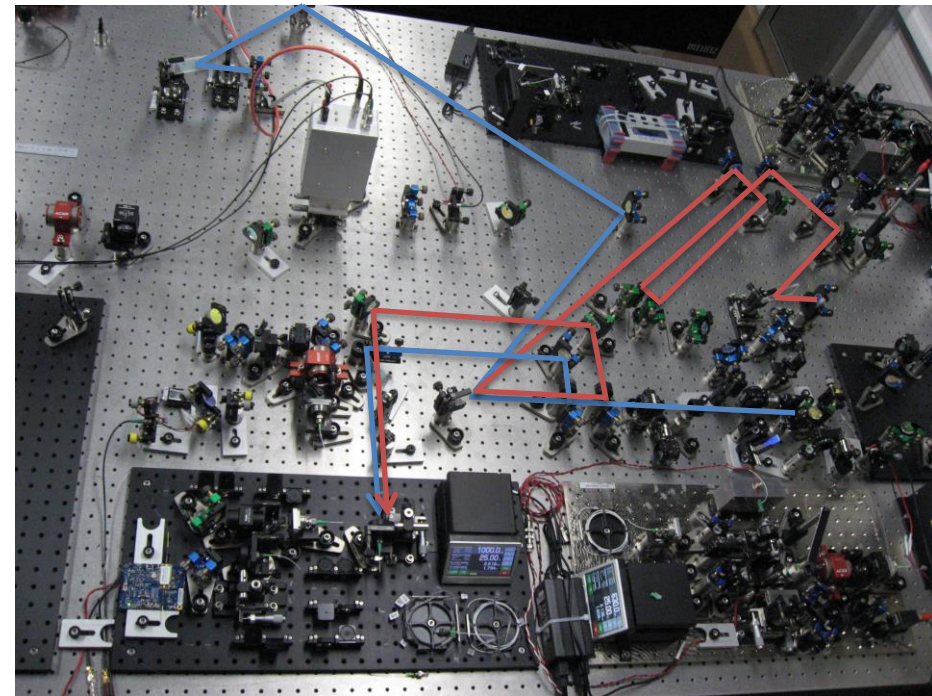
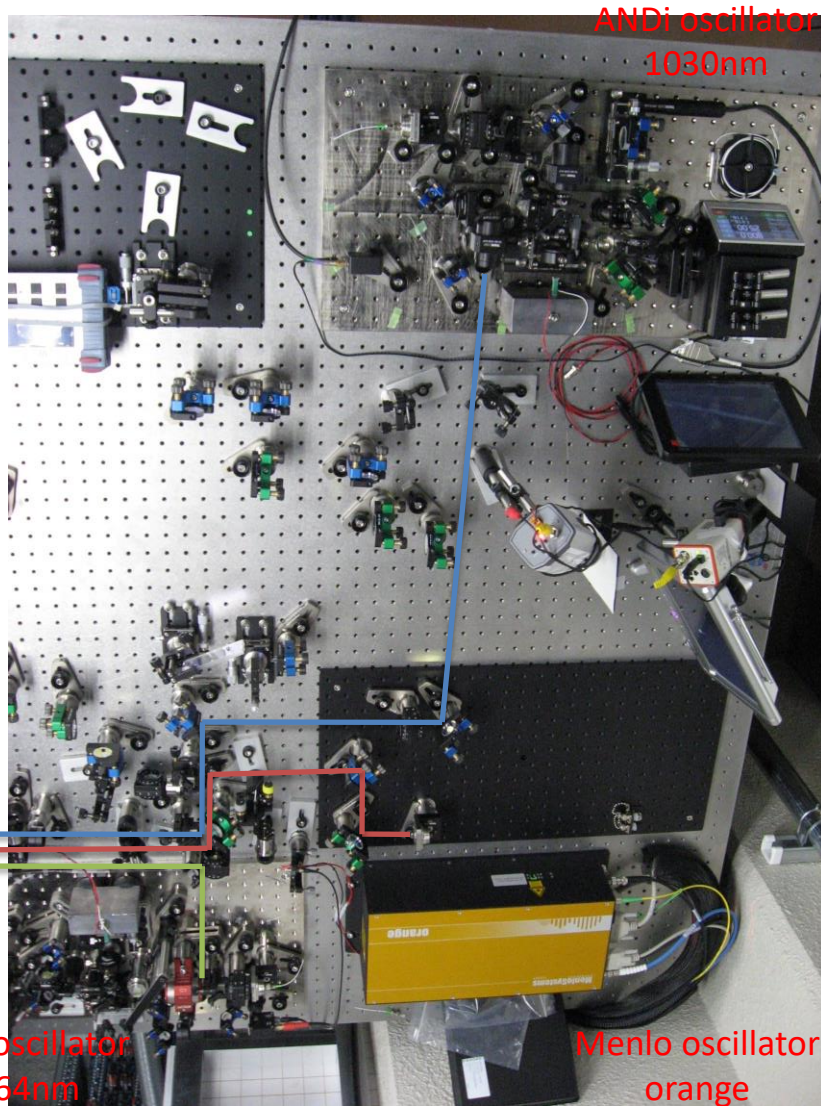
- ➔ $2.4 \text{ J output (5 Hz)}$
 $2.0 \text{ J output (25 Hz)}$

Yb:PCF/YAG + OPCPA + MgO:PPLN



Yb-fiber laser system

Oscillators (1025-1065 nm)



まとめと現在の研究活動

- 超高電界の加速方式
 - THz 加速
 - > 数100MV/m, High-Q→マルチバンチ加速が可能
 - 既存加速器との親和性が高い
- そのためのレーザー開発 / THz発生
 - 2J程度で必要十分, 既に100Hz動作まで可能
 - Yb系レーザーでの実証実験 (~25Hzバースト)
 - Nd系 → Ti:Sapphire(or Chirp PPLN) → THz PPLN
- 研究活動
 - 分子研・理研との協力体制の構築 (既に10年近い)
 - 長年競争的資金の取得に失敗が続いていた
 - 今年から予算獲得して5年で実現予定