

テラヘルツ波誘電体加速による 高電界加速器の新展開

KEK: 吉田 光宏, 張 叡, 周 翔羽,
本田 洋介, 森 伸悟
分子研/理研: 平等 拓範, 石月 秀貴,
Arvydas Kausas, Yahia Vincent,
他未来社会創造事業レーザーG

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 : $Q \sim 10^6$

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

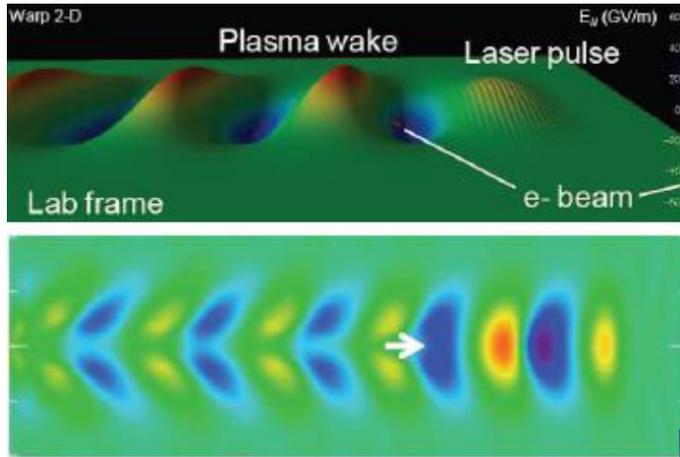
両方を併せ持つような超高電界加速が望まれる

→ 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

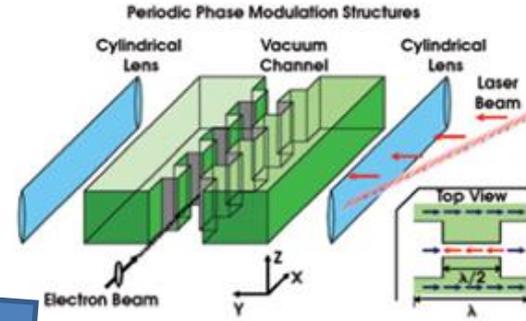
超高電界加速方式

レーザー駆動加速器

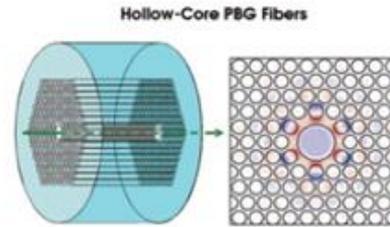
レーザープラズマ加速(LWFA)



レーザー誘電体加速



Laser or THz



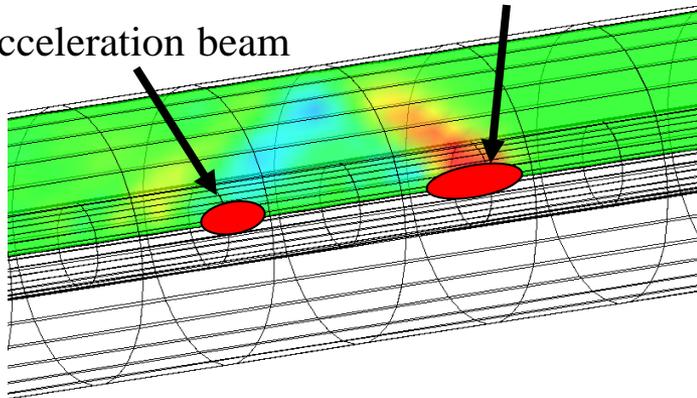
これらは
THzの加速器

ビーム駆動加速器

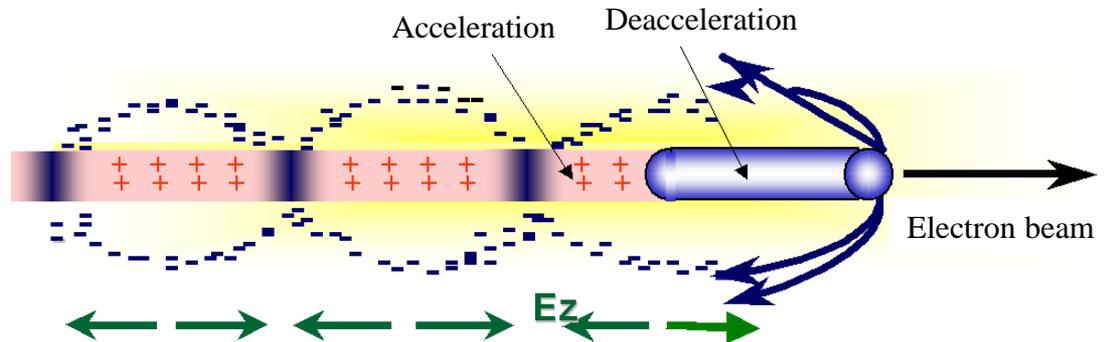
誘電体加速(DWA)

Drive beam

Acceleration beam



プラズマ加速 (PWFA)

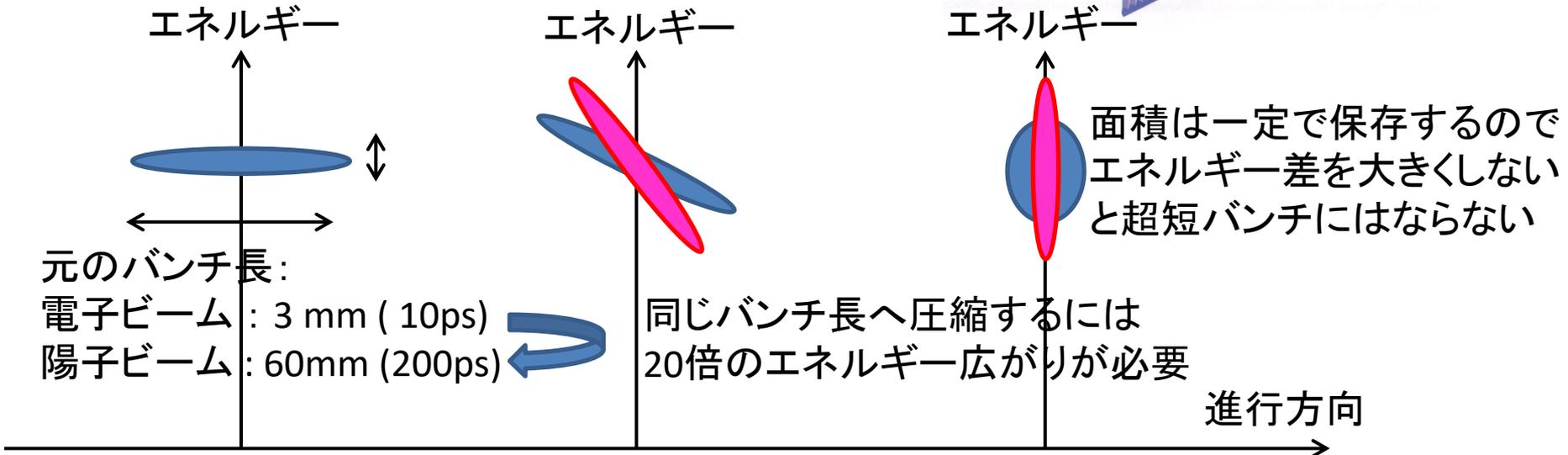
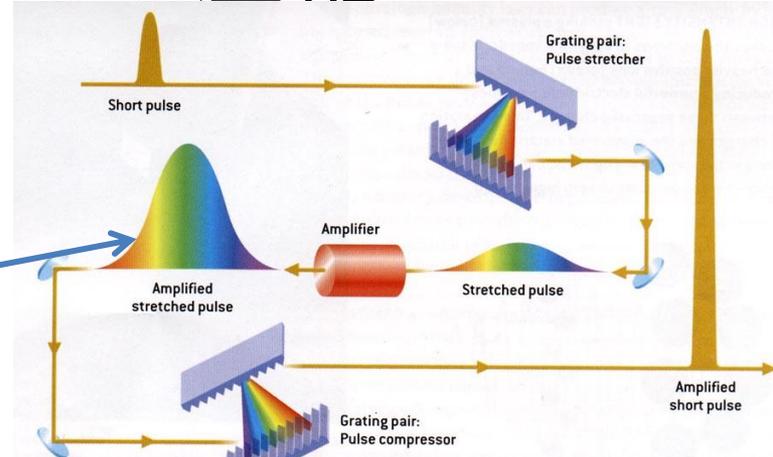


エネルギー源と電界

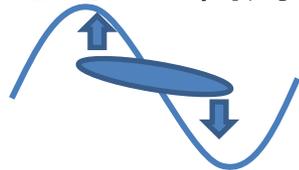
	常伝導	超伝導	電子ビーム 駆動	レーザー 駆動	陽子ビーム駆動
	6/12GHz	1.3GHz	5THz (50fs)	5THz (50fs)	? THz (後述)
駆動 エネルギー	20J [/m] = 40MW × 500ns	200J [/m] = 300kW × 700μs	70J (SLAC) =23GeV × 3nC 35J (KEK) =7GeV × 5nC	40J (→ 1kJ)	15kJ (SPS) = 450GeV × 30nC 150kJ (LHC) = 7TeV × 20nC 300kJ (J-PARC MR) = 40GeV × 8μC
電界	40/80MV/m 放電限界	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)

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

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



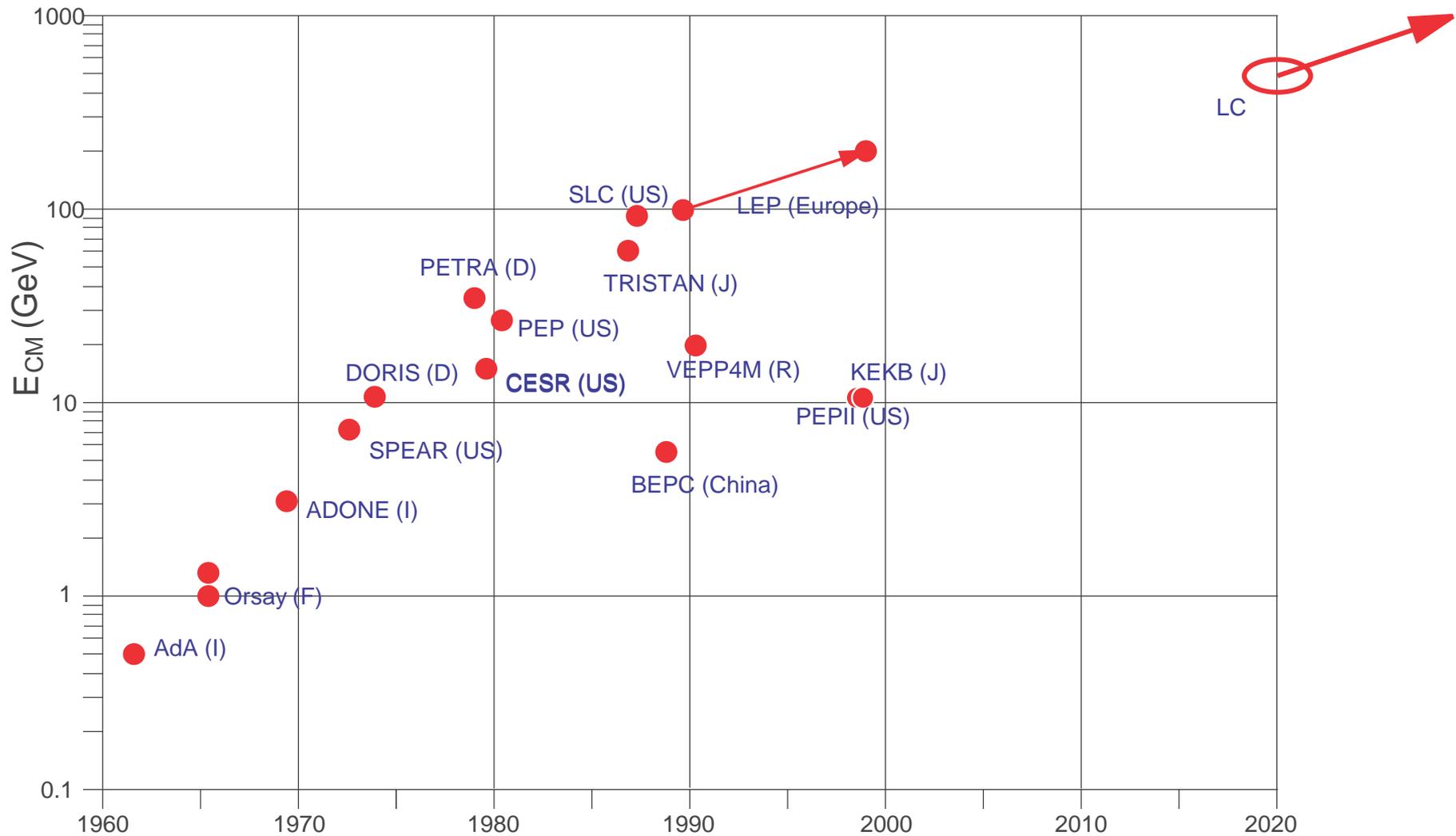
- 分子研・理研との協力による
高強度THz源開発

THz 加速器に必要なレーザー

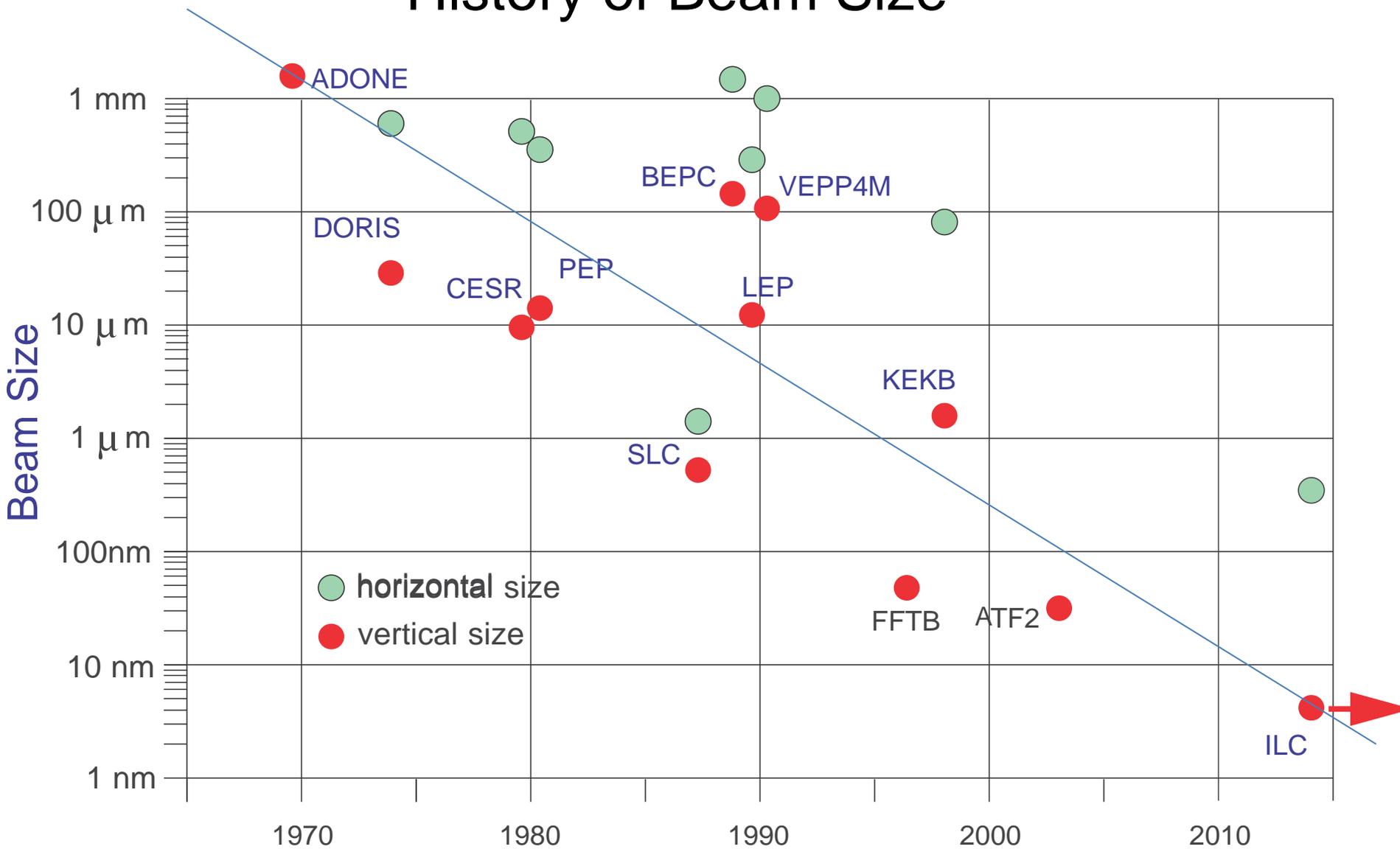
- 電子加速器についての前置き (必要な電界強度)
 - Linear Collider
 - XFEL
- RF 加速器からの追加速に必要なレーザー性能
 - パルス幅 $\sim 300\text{fs}$ (位相空間から)
 - バースト (効率から)
- レーザー固有の問題
 - LD
 - 効率
- KEKにおける超高電界追加速に関する紹介
 - レーザー開発方針:
All マルチパスアンプ (No regen) Nd/Yb/Ti:Sapphire
 - アフターバーナー(追加速)の試験スタンド

高エネルギー物理での 超高電界加速への期待

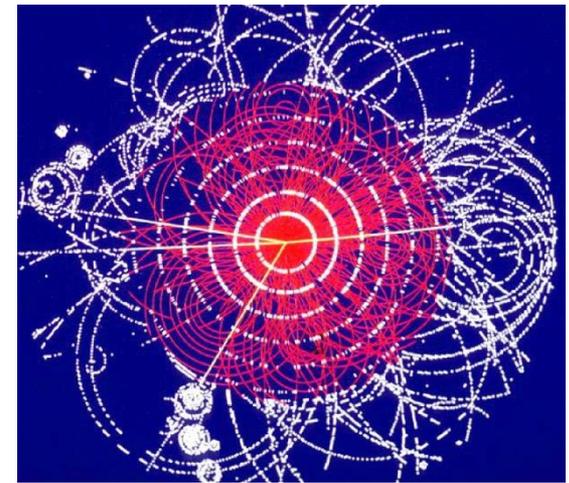
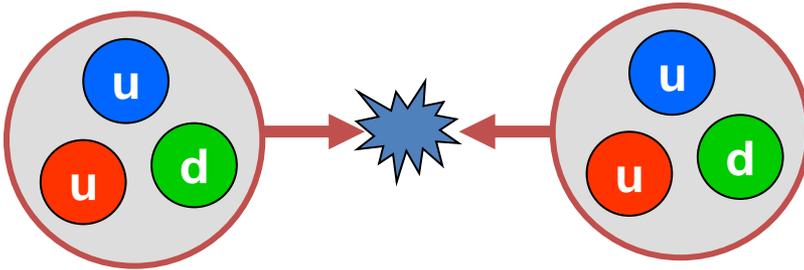
e^+e^- Colliderの歴史



History of Beam Size

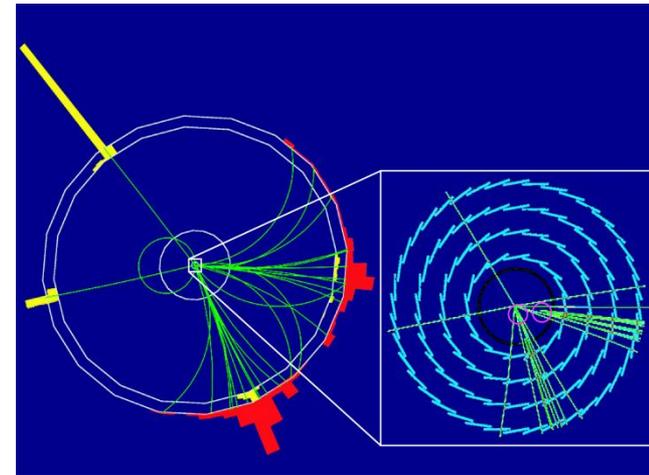
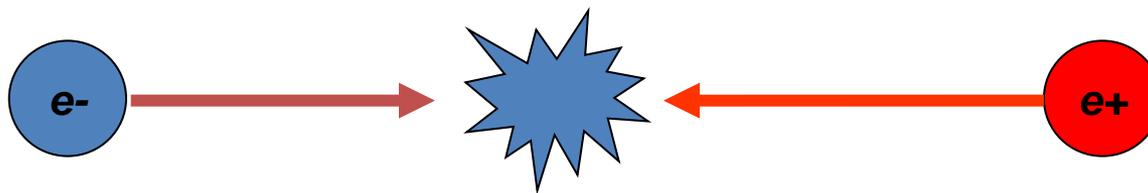


Large Hadron Collider (LHC)



Can reach very high energies to discover new particles / phenomena.

International Linear Collider (ILC)



Electron + Positron: collision of fundamental particles

All the energy participates in the reaction. The collision energy is tunable.

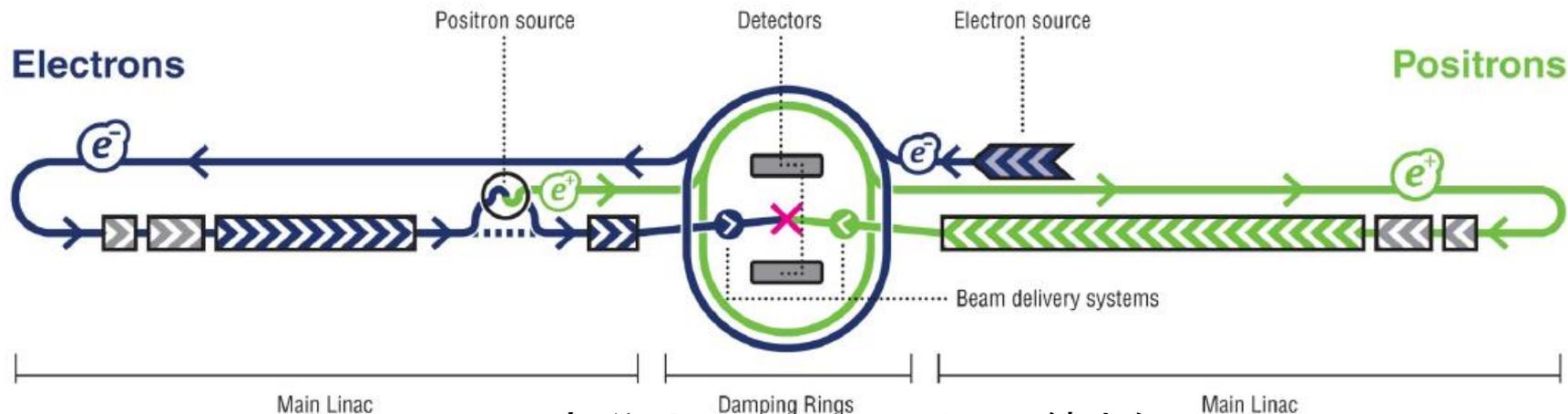
Given sufficient energy, unparalleled discovery power and measurement precision

LHC + ILC = determine new laws of nature

Linear Collider (ex. ILC)

リニアコライダーでは

- ・1-pass 衝突のためビームサイズを極限まで縮める必要がある(超低エミッタンスが必須) / 加速勾配によらずに全長は 10km 以下にはならない → 必要電界は 数100MV/m
- ・高効率にするにはマルチバンチ ~10000バンチ程度の加速が必要



この部分は Oide-limit によって縮まない
加速器が極端に短くても意味はない

~1.33 km 11.3+~1.25 km ~4.45 km 11.3 km ~1.33 km

← ~31 km →

現在の計画では 250GeV (H+Z生成ギリギリで, H self-coupling 測定できない)
→ 500 GeV/1TeV 増強の道筋(現時点では高電界の超伝導が候補?)
→ 他の高効率・高電界加速の可能性を考えたい

XFEL光源でのTHzへの期待

XFELでのテラヘルツ加速への期待

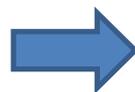
- THz-Deflector によるバンチ長/構造の観測
- バンチ圧縮によるFELゲインの向上
- アト秒バンチ生成
- 超小型XFEL

XFEL / 軟X線FEL

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

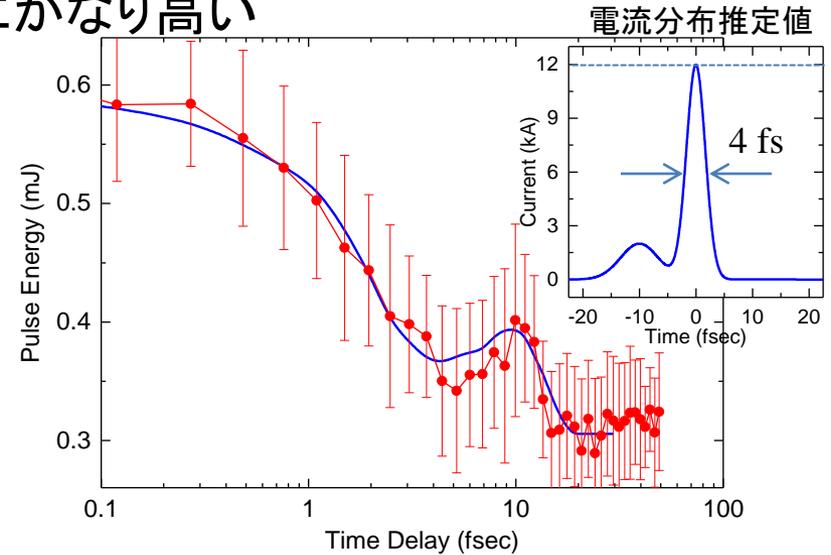
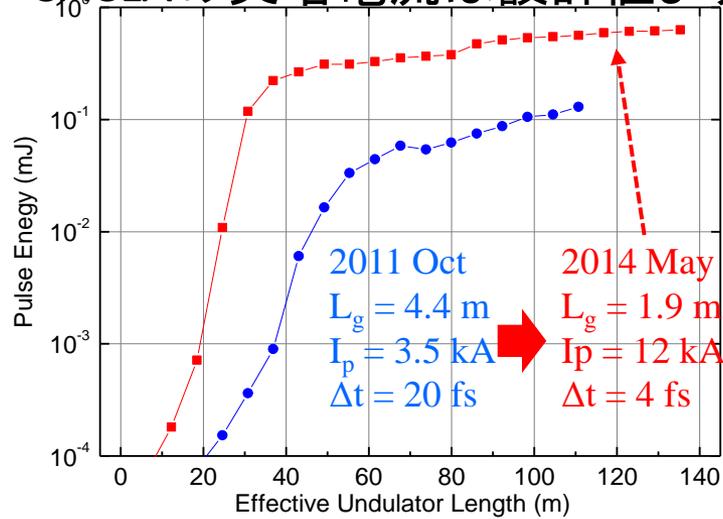
THz-Enhancement Cavity で
バーストモードが可能

XFEL (ex. ALFA) : SACLA での実績からアト秒XFELへの発展

超High Gain XFELの可能性(sub-femtosecond)

FELパルスと電子ビームの相互相関

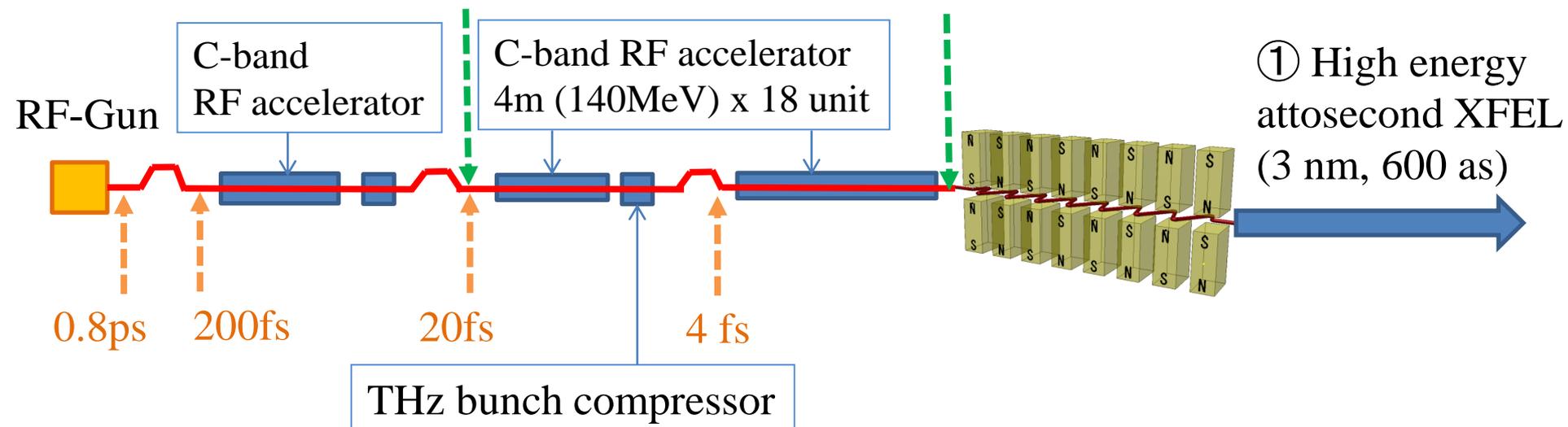
- SACLAの尖塔電流は設計値より既にかかなり高い



ALFA BL-D 計画へ

100 MeV

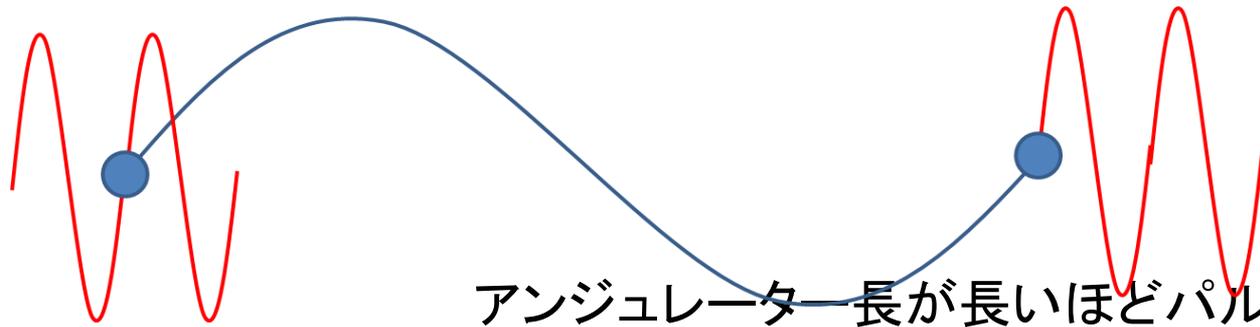
2.3 GeV



① High energy attosecond XFEL (3 nm, 600 as)

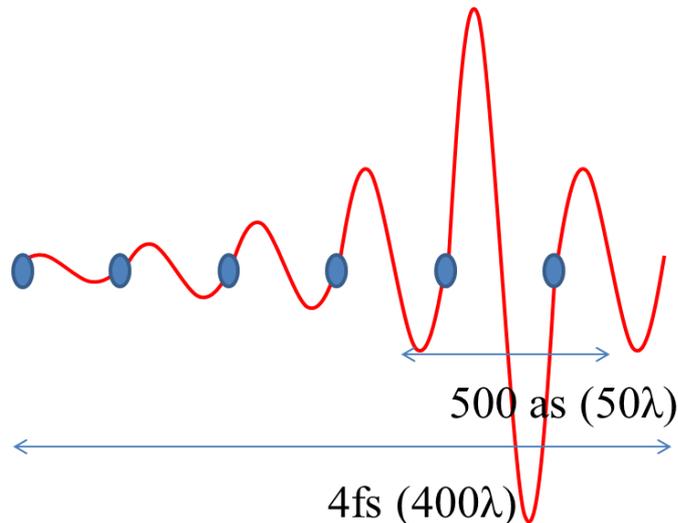
超高ゲインXFELの提案 ALFA BL-D

XFELでの光のスリッページ：電子は1周期進むたびに光の波長 λ の距離だけ遅れる



超高ゲイン XFEL：
スリッページ内で増幅する事で
短いパルス幅のX線を得る

アンジュレーター長が長いほどパルス幅が増加
 $\lambda = 3 \text{ nm}$ の場合、スリッページ1回毎に
パルス幅は10 as増加
通常のXFELではX線のパルス幅は
電子のパルス幅より長い



SACLA : 8.2 GeV, 150 pC, 3.5 kA (40 fs)

$$\lambda_U = \frac{18 \text{ mm} \times 277 \text{ period (5m)} \times 18}{K}, K = 2$$

$$\rightarrow \rho = 4 \times 10^{-4}, L_g = 2 \text{ m}, \lambda_L = 0.1 \text{ nm}$$

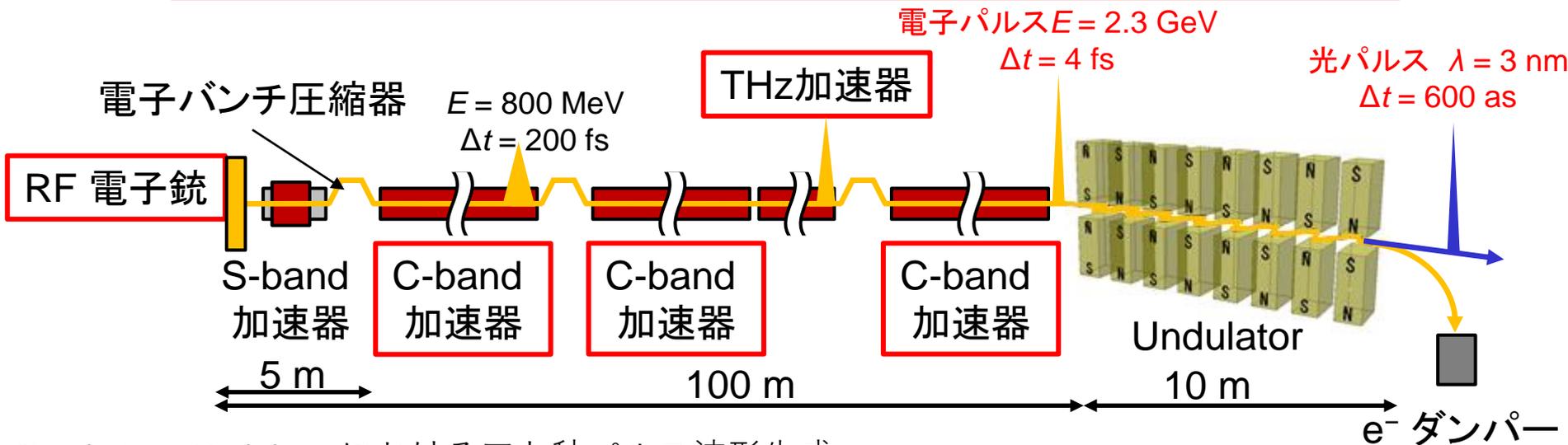
ALFA : 2.3 GeV, 40 pC, 50 A (0.8 ps) \rightarrow 10 kA (4 fs)

$$\lambda_U = \frac{30 \text{ mm} \times 110 \text{ period (3.4 m)} \times 1}{K}, K = 2.5$$

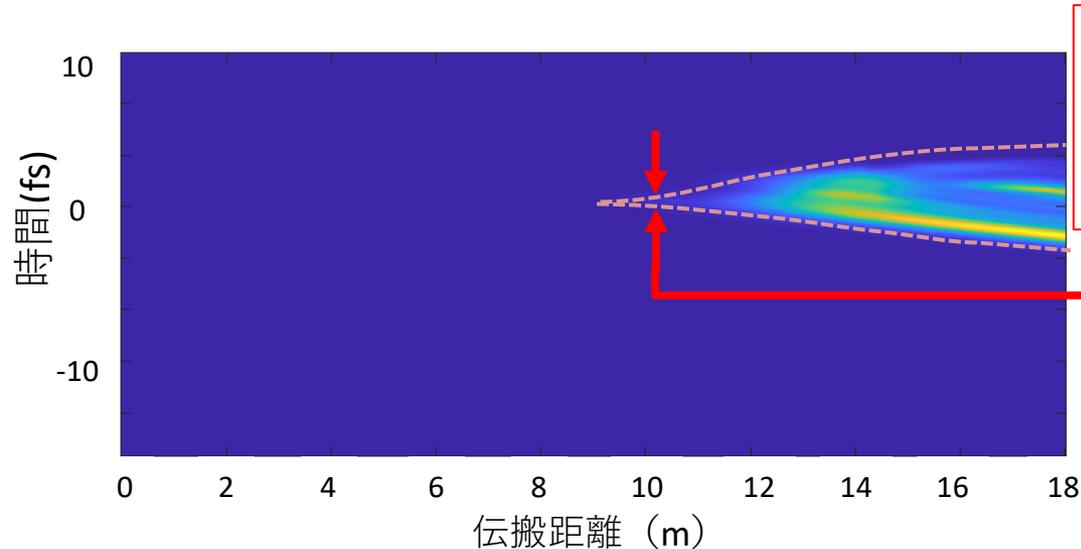
$$\rightarrow \rho = 5 \times 10^{-3}, L_g = 0.25 \text{ m}, \text{gain} = 5000, \lambda_L = 3 \text{ nm}$$

ALFA BL-D

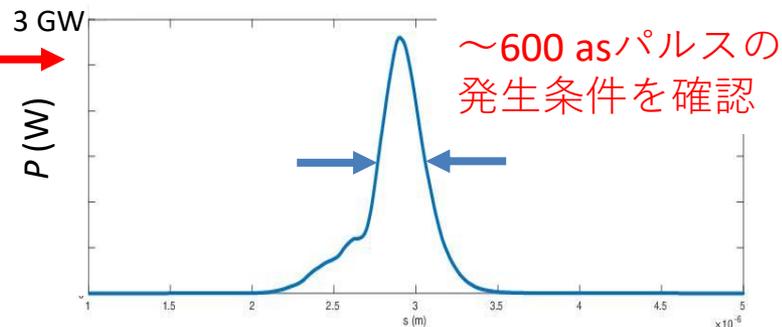
KEKと東京大学との共同研究によって開発されたアト秒加速器技術



Simulation: Undulatorにおけるアト秒パルス波形生成



- THz加速 + バンチ圧縮 (新技術)
 → ピーク電流を 10 kAまで高める
- KEK開発技術 (RF電子銃、C-band加速器)
 → コンパクト化(100 m)

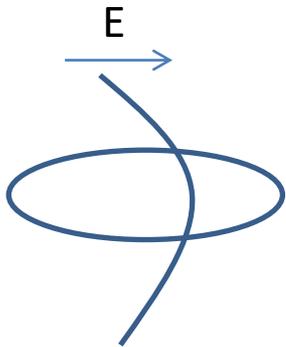


レーザー加速で必要な加速パラメーター

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

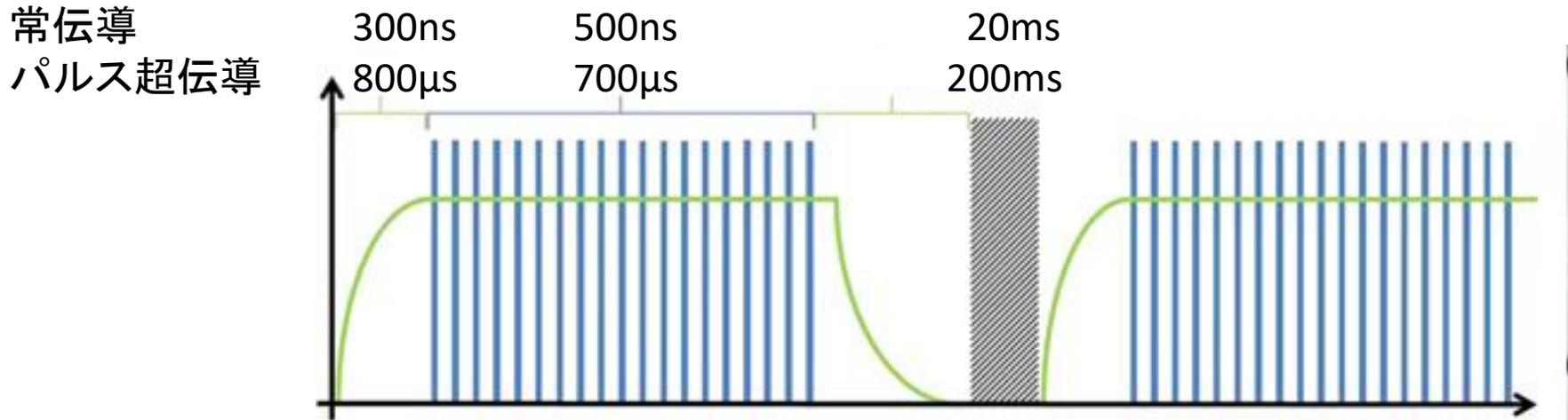
= 0.7% ($\lambda=1.5\text{mm} = 2\text{ps} = 200\text{GHz}$)

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

誘電体加速

Dielectric Laser Acceleration (DLA) :

グレーティング構造にレーザーを照射して
表面を走行する電子を加速する方式

1 μm 帯: 東京大学/ 上坂研との共同開発 小山先生基盤B

THz帯: 分子科学研究所との共同開発

Dielectric Lined Circular Waveguide (DLW) :

キャピラリーに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する方式

産業技術総合研究所で実験→現在KEK/分子研/理研

Dielectric Wall Accelerator

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

東京大学/上坂研究との共同開発 基盤A

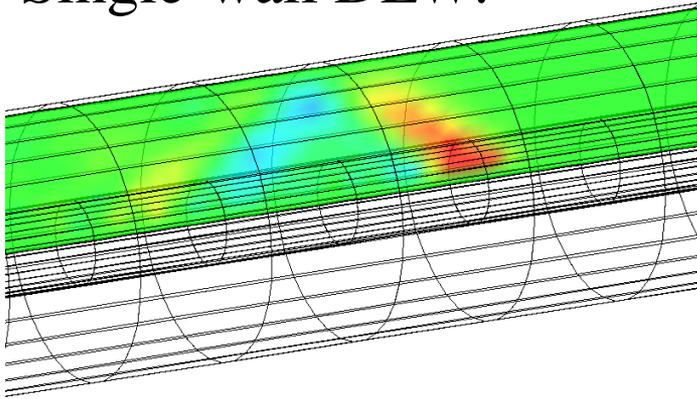
Breakdown Limits on Gigavolt-per-Meter Electron-Beam-Driven Wakefields in Dielectric Structures

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:



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

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

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

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

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

- Mode wavelengths

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

- Peak decelerating field

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

- Transformer ratio

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

THz帯DLA 用 Si 回折格子

THz 光の加速器の利点:

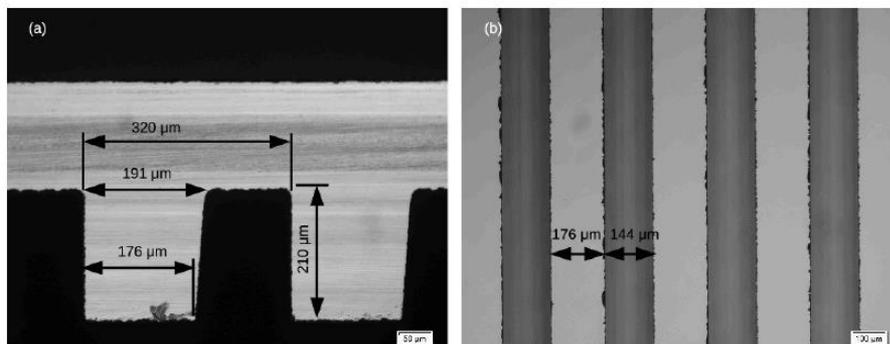
0.1 mm 程度の加速構造

- ・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

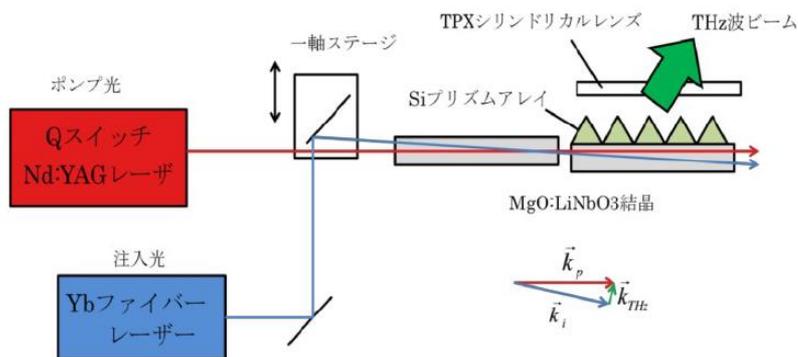
光(赤外)に近い高い加速勾配(絶縁破壊)

- ・ 200 MV/m

THz OI-DLA のための Si 回折格子の加工

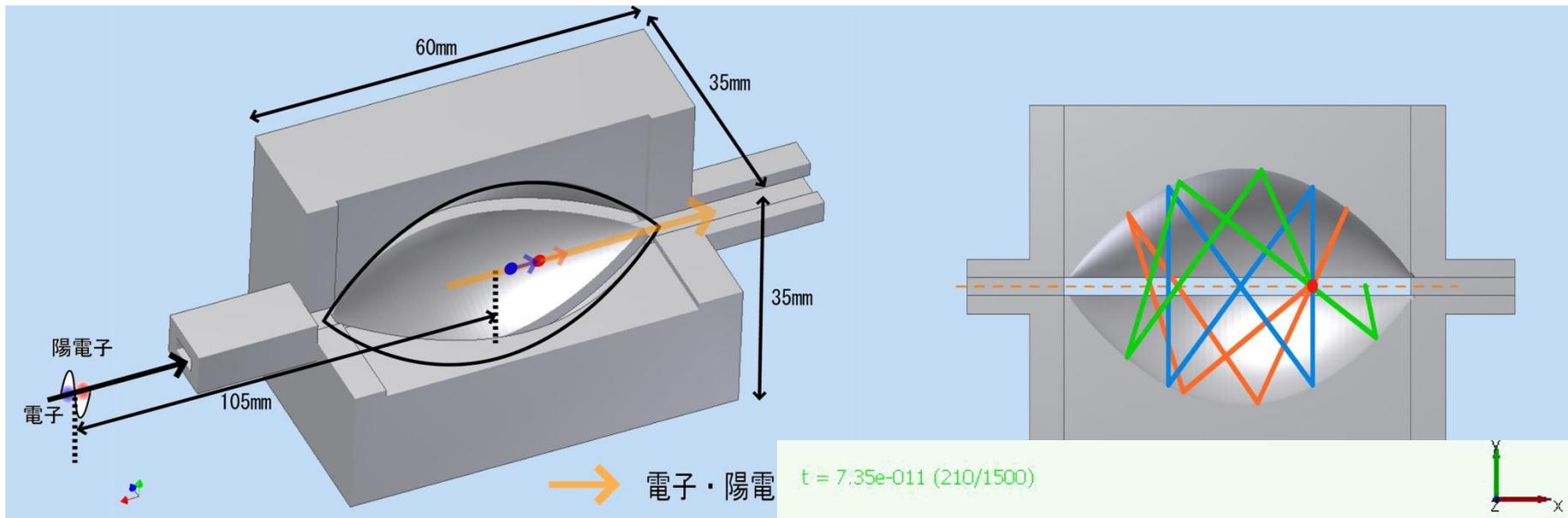


KEK で共同開発中の高強度 THz レーザ

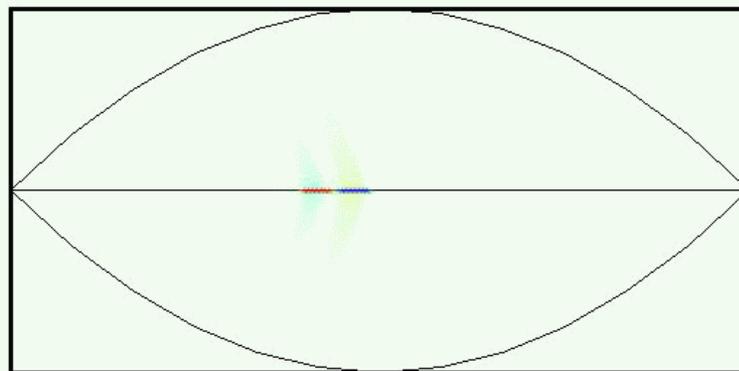
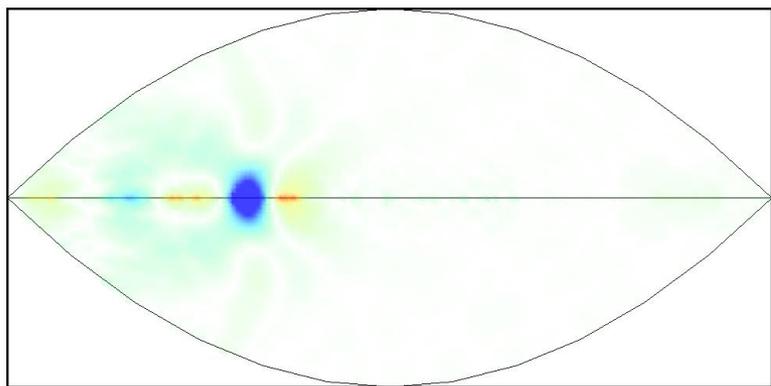


Pitch	0.320	mm
Depth	0.210	mm
Number of Pitches	10	
Material of Wafer	Si	
Thickness of Wafer	0.380	mm
Index of Si @ ~THz	3.4	

THz帯周波数重畳 = モードロック加速管



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

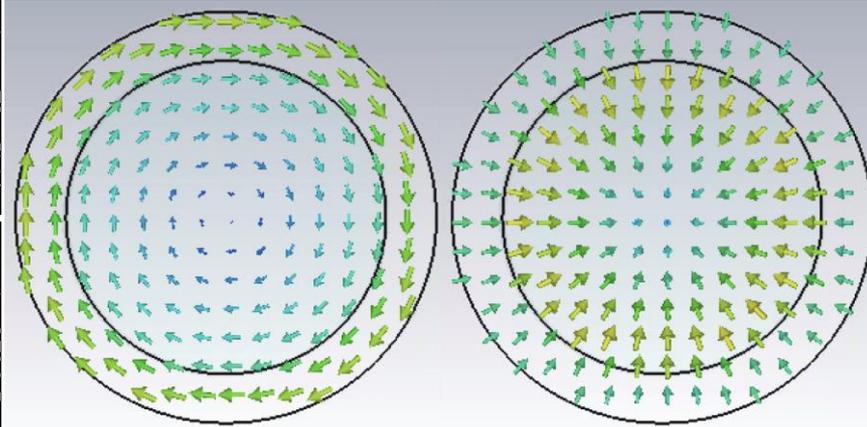
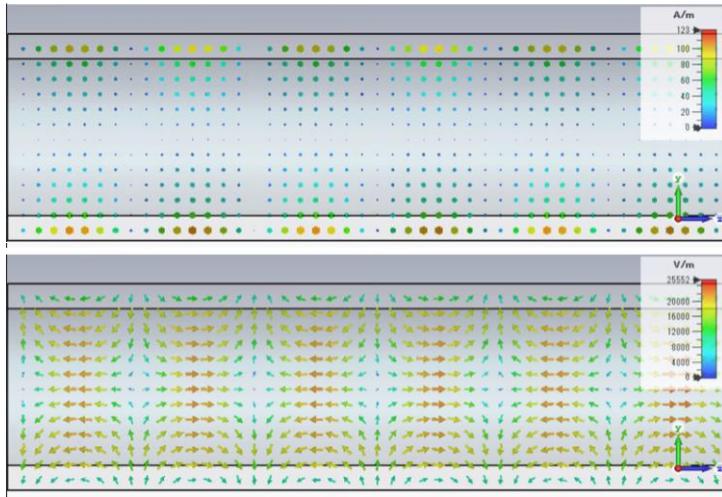


THz- Dielectric Lines Waveguide (DLW)

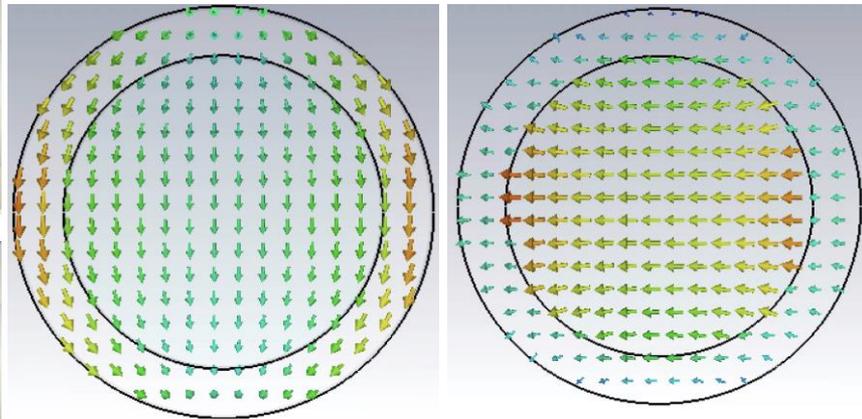
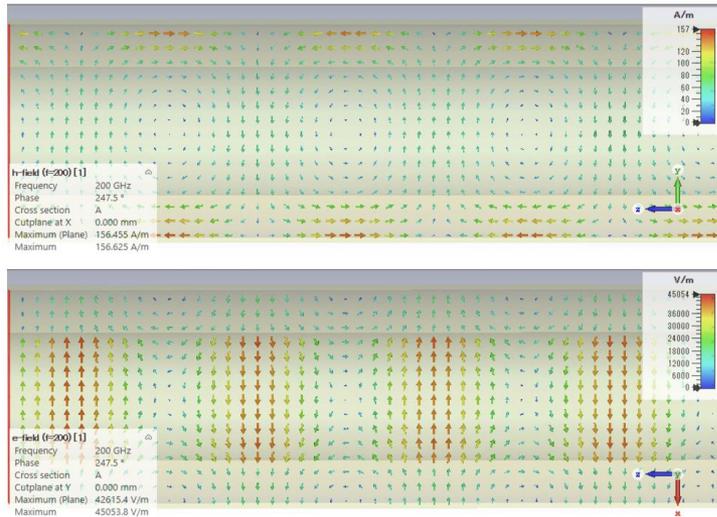
※ただのガラス管です

DLW

加速モード



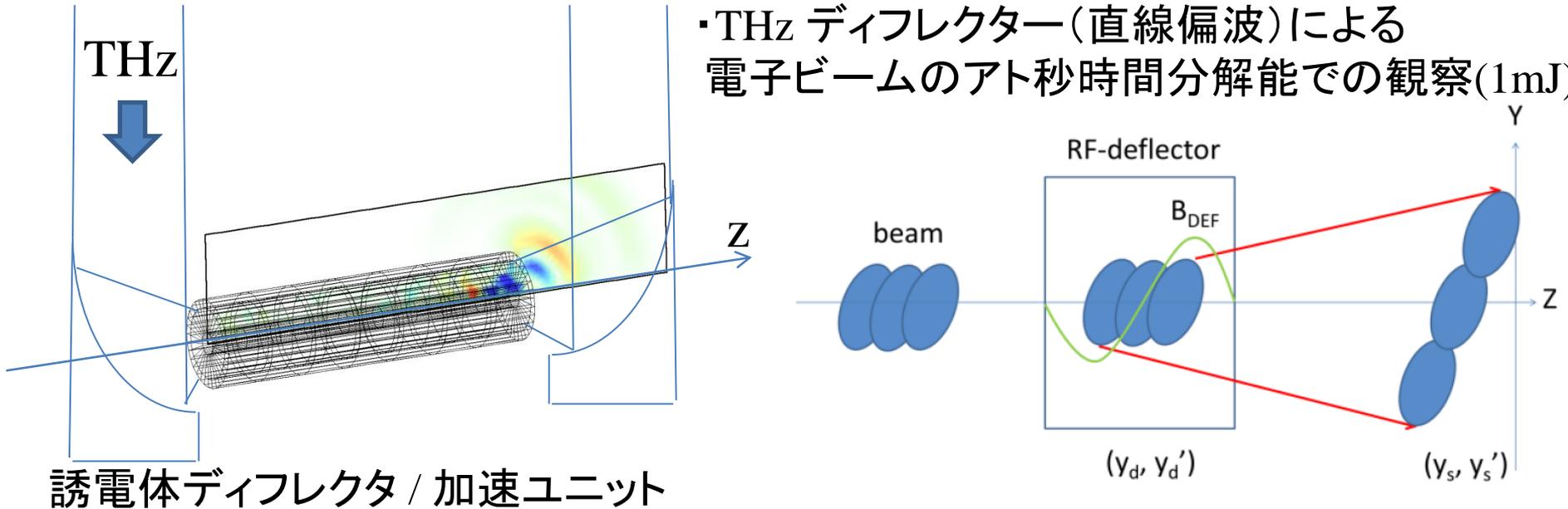
偏向モード



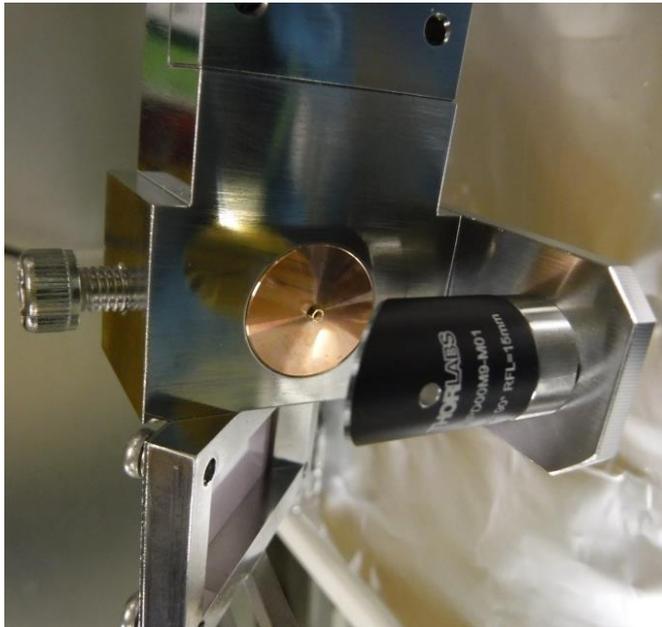
さらに円偏波にすれば回転方向にビームをキック可能になります

THz 加速器の利用

- ・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)

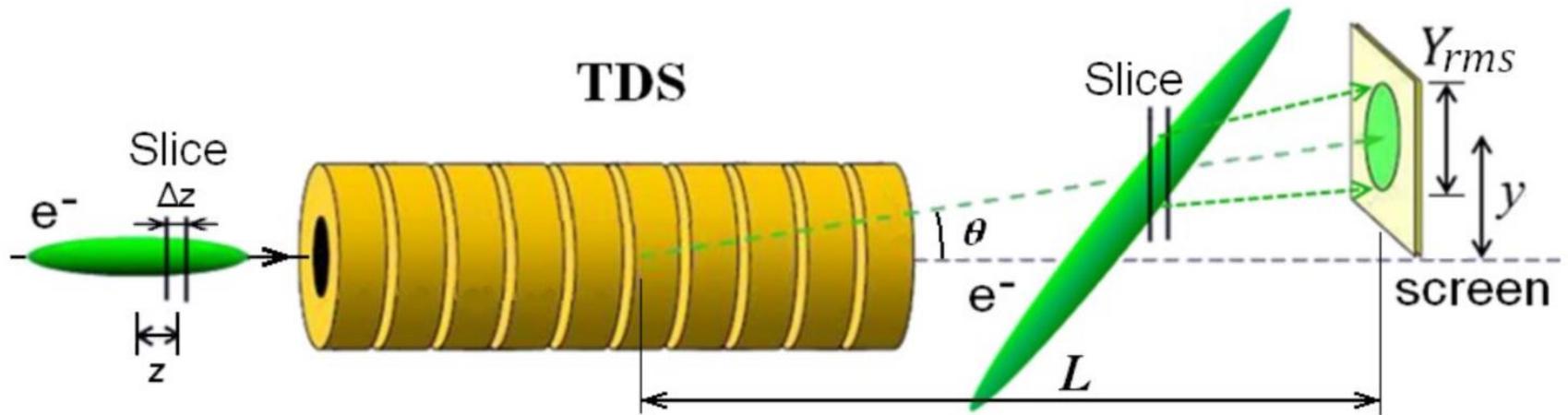


誘電体ディフレクタ / 加速ユニット

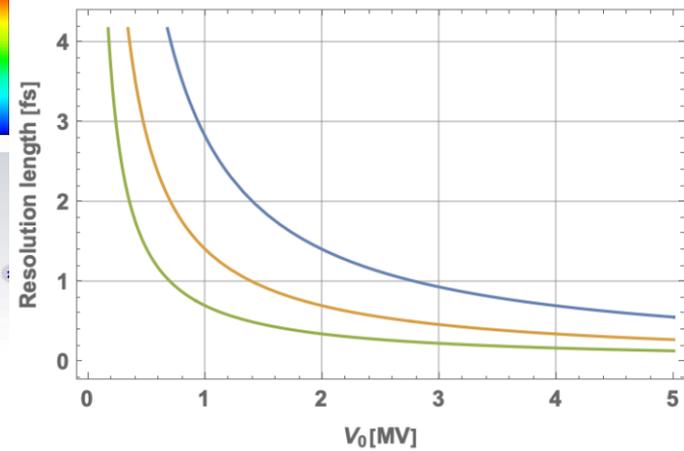
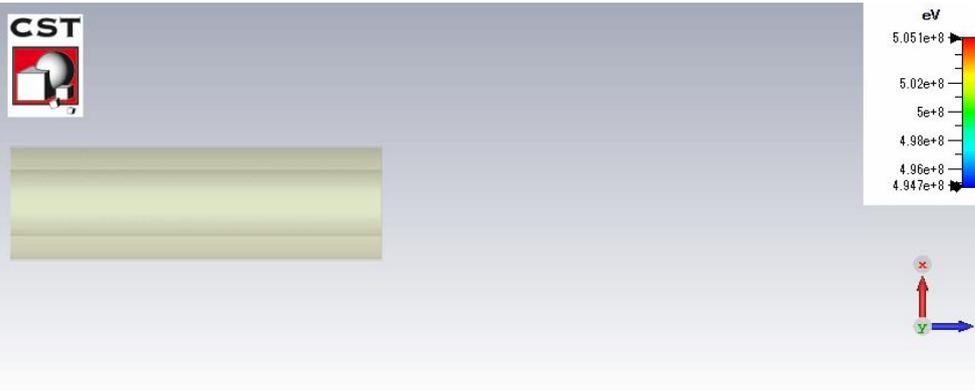


- ・THz誘電体加速器(ラジアル偏光)によるバンチ圧縮 → 尖頭電流向上/アト秒電子生成(10mJ)
- 将来の小型(1/10)高繰返し XFEL (~300 MV/m)

THz-Deflector



分解能

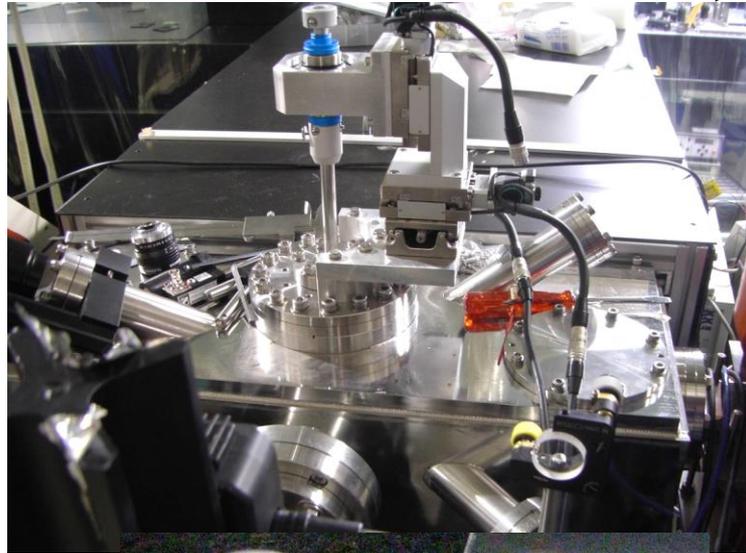
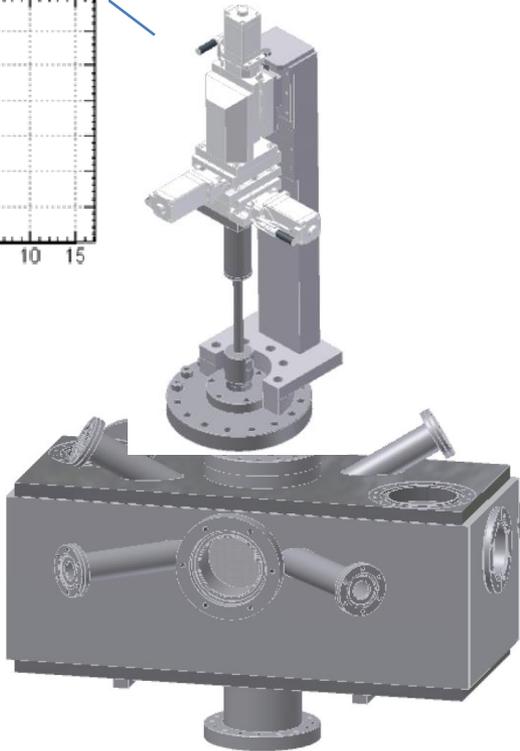
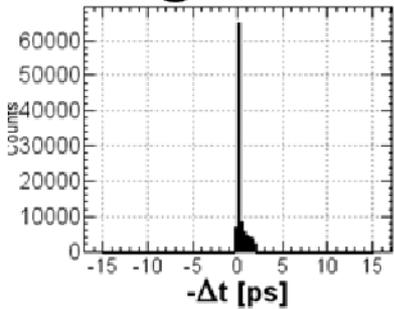
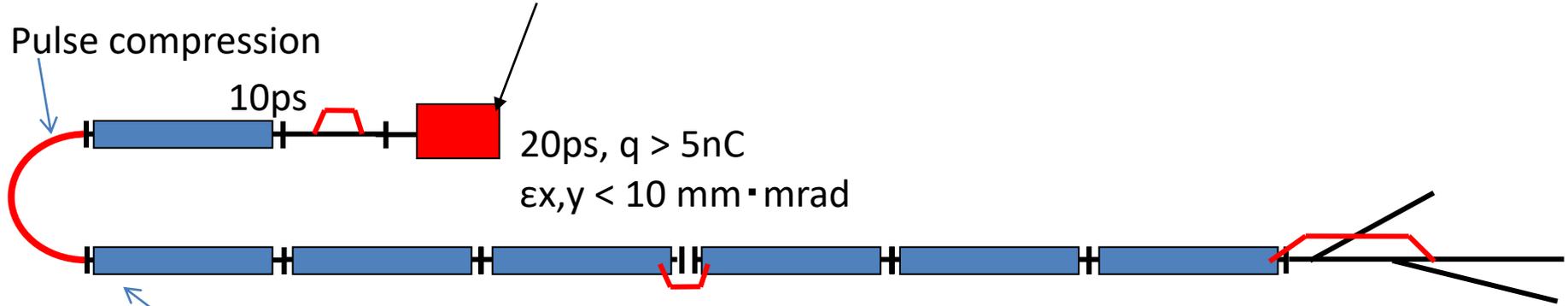


- $Y_{rms}=0.15$ [mm]
- $Y_{rms}=0.3$ [mm]
- $Y_{rms}=0.6$ [mm]

ビーム駆動THz加速

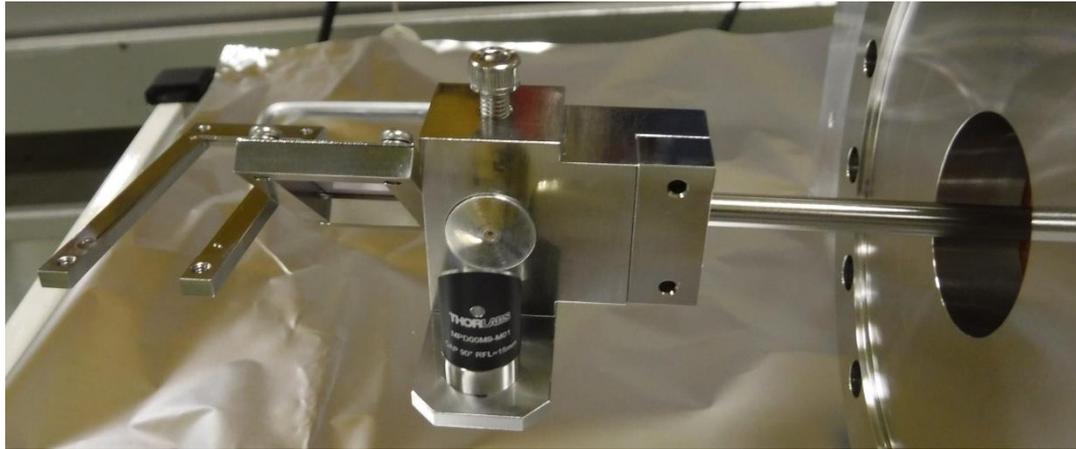
まずは超高電界のTHz加速の実証
のため

THz-DWA のビーム駆動による実証試験



SC_R0_6A ターゲット交換

交換前



SUS筒にセラミックチューブを付けていた。

交換後



銅筒に石英管を取り付けるように変更。

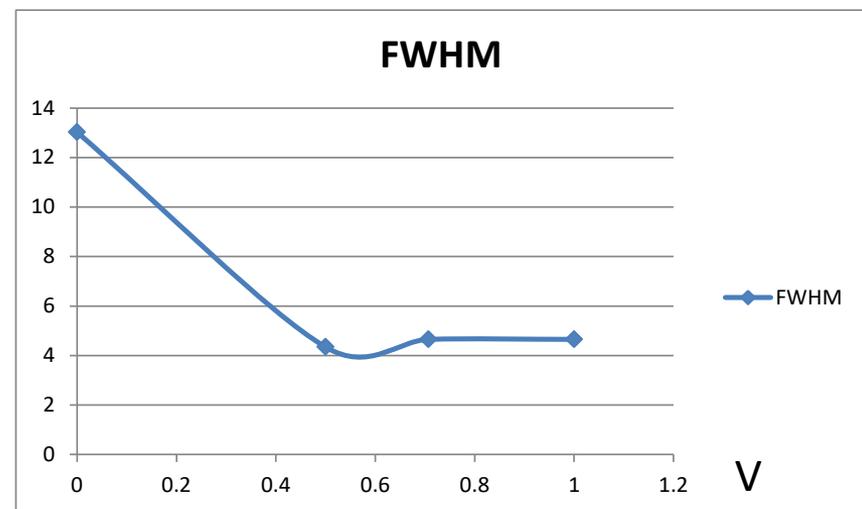


ビームラインに復元済み。

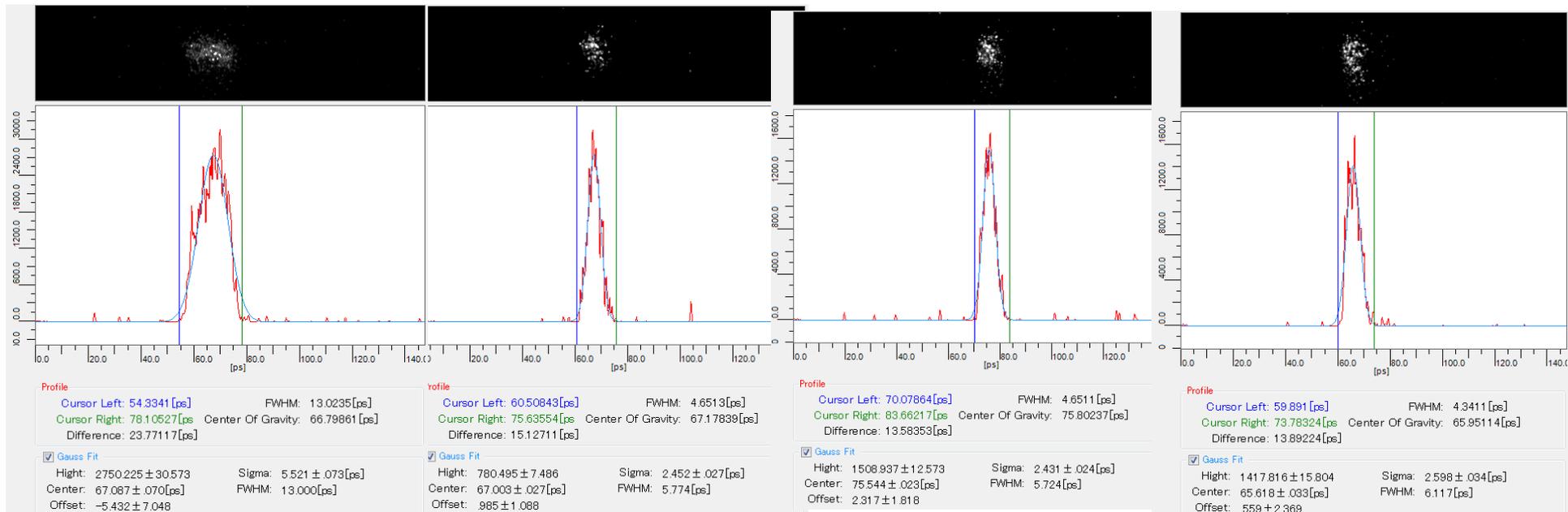
バンチ圧縮

$$\Delta z = R_{56} \frac{\Delta p}{p}$$

FWHM(ps)



- R56=-0.17m → 145MV/1.5GV 必要



圧縮無

B6 最大

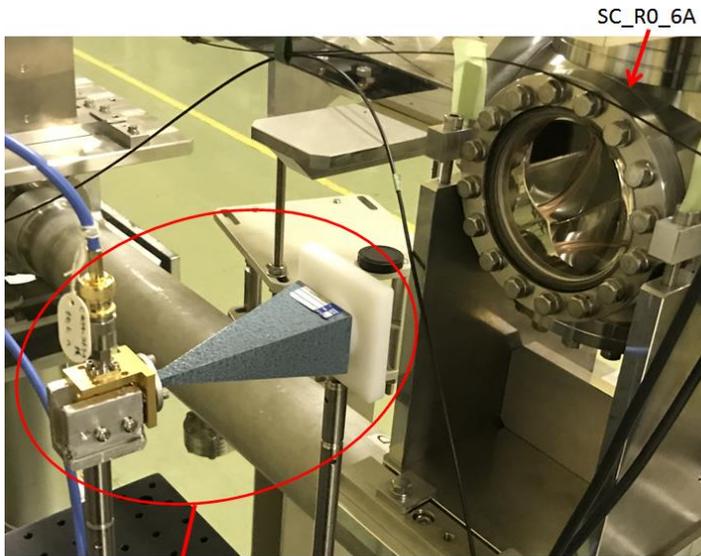
B6 電力 1/2

B6 電力 1/4

Millimeter-wave detector

- WR-22 (40-66 GHz) 検波器を設置
50GHz = 6ps \rightarrow 2ps 程度のバンチ長に相当

B6 +90deg

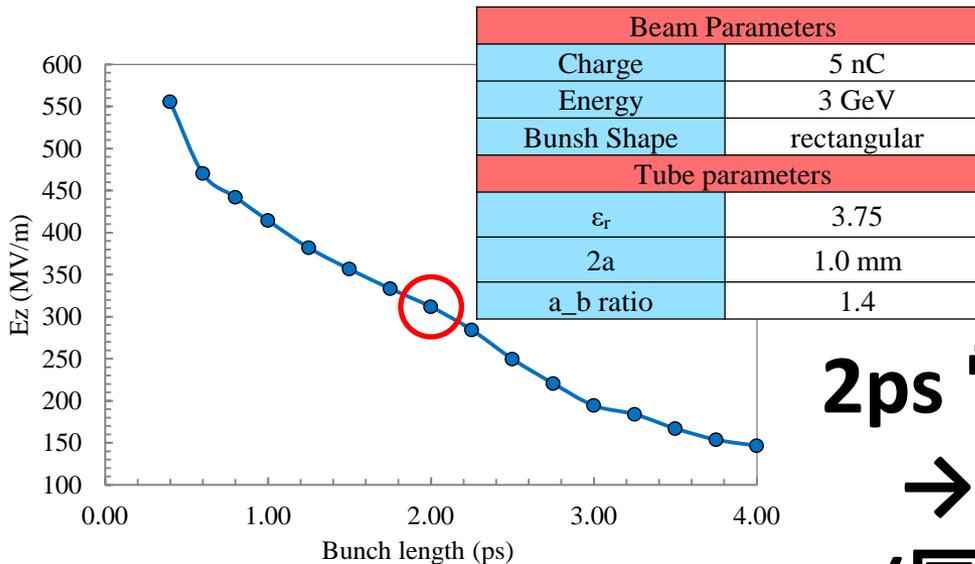
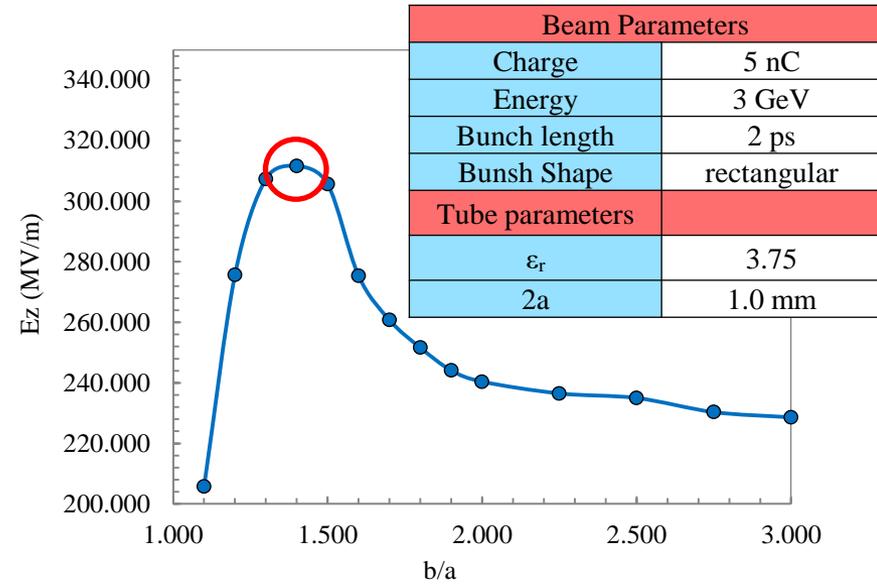
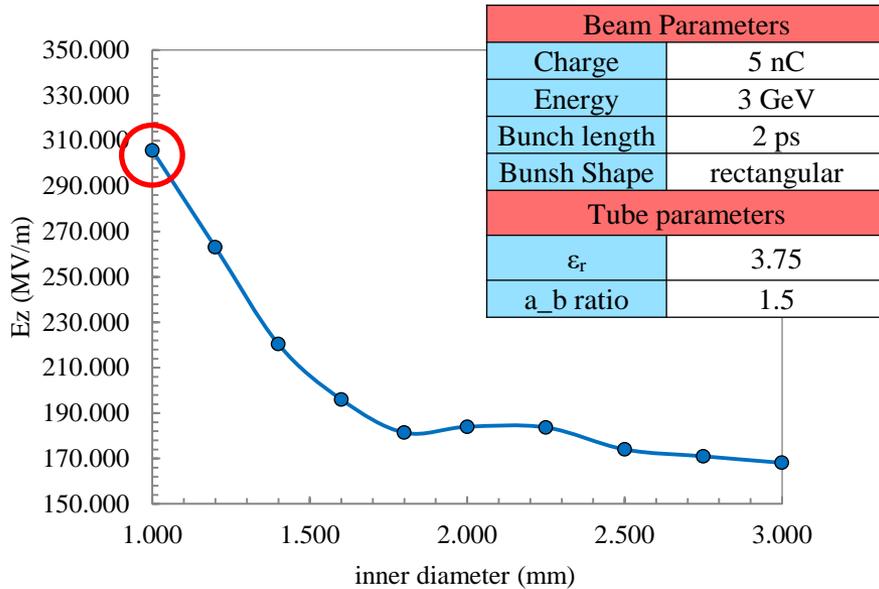


ミリ波検出器



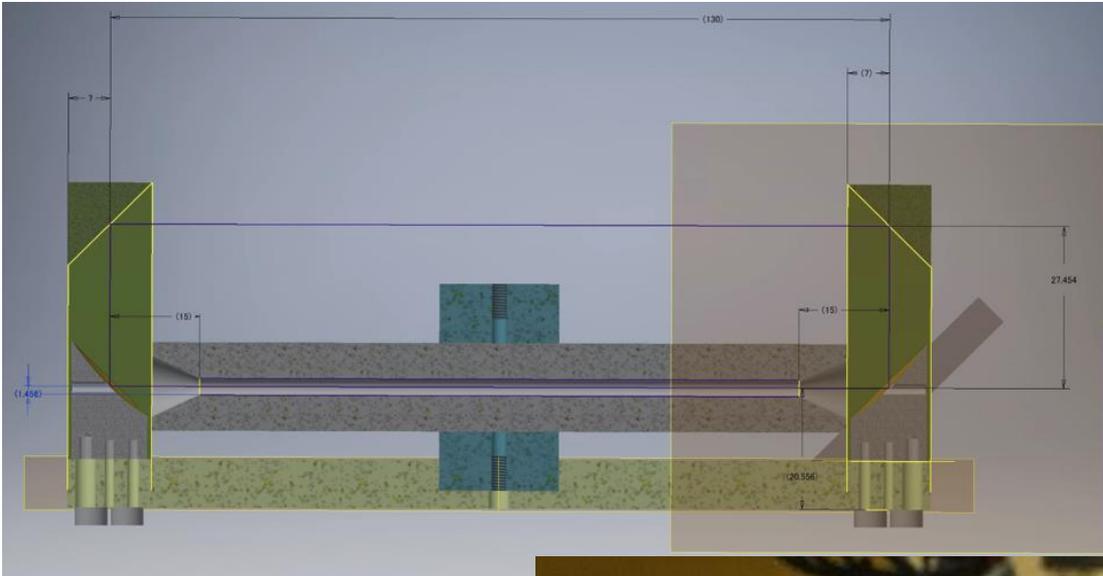
\rightarrow 今後遅延ラインを導入して
マルチバンチ減速 \rightarrow 後続のバンチを加速

DWAの加速パラメーター(Simulation)

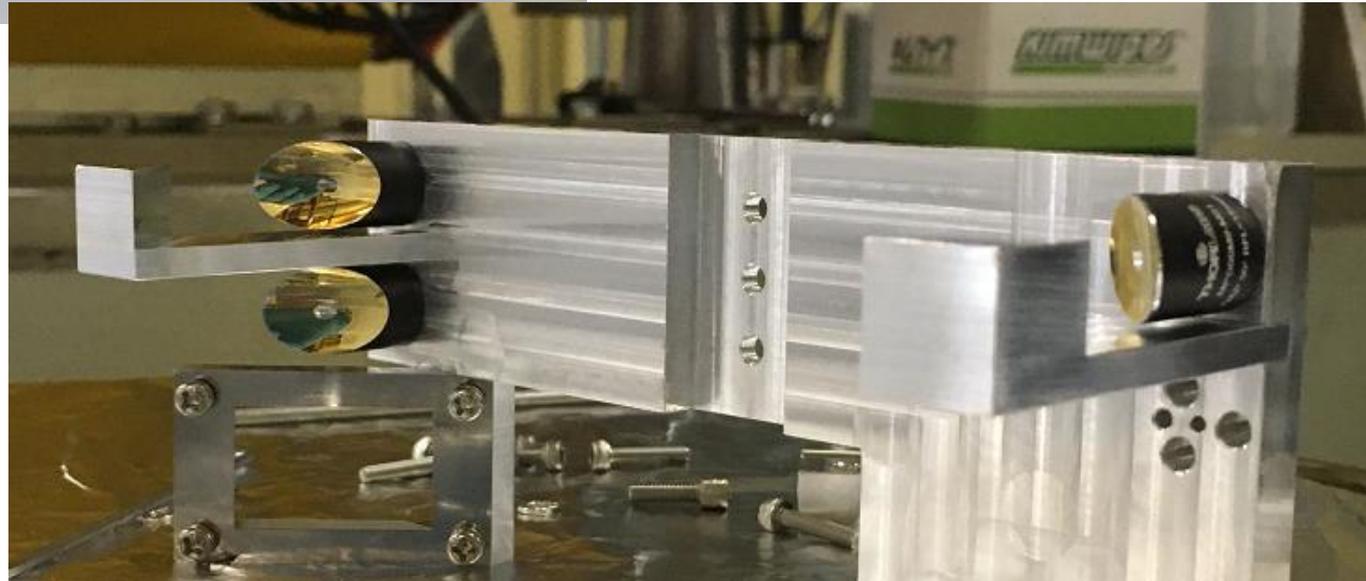


**2ps 電子ビーム, 1Φ DWA
→ 300 MV/m
(国内最高強度の THz放射)**

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

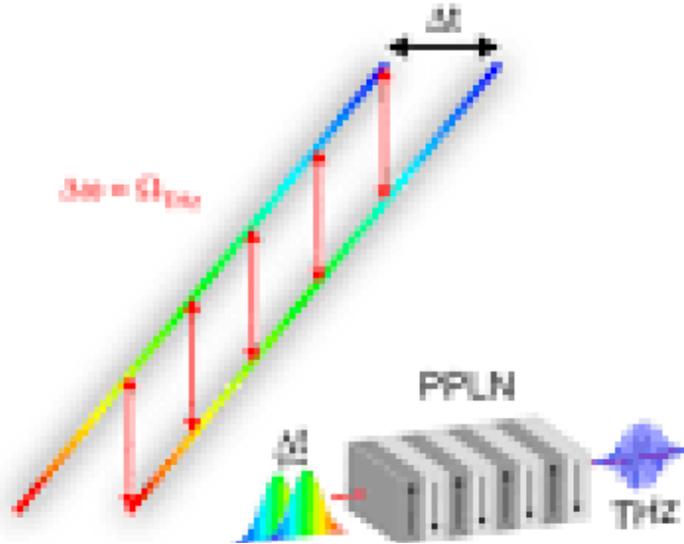


今月インストール済
→ 10月に試験



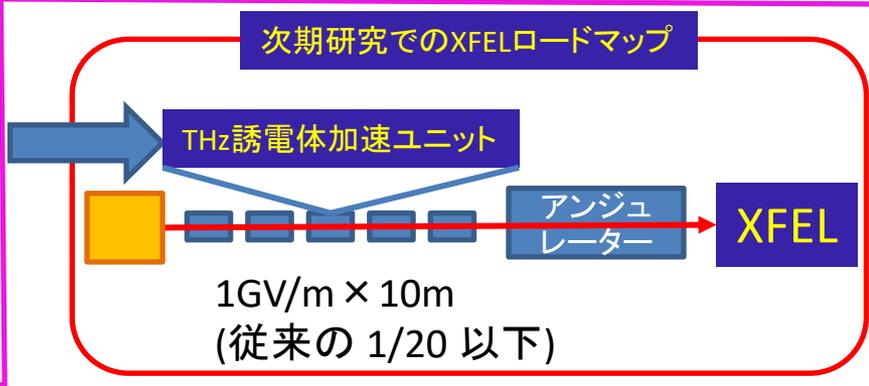
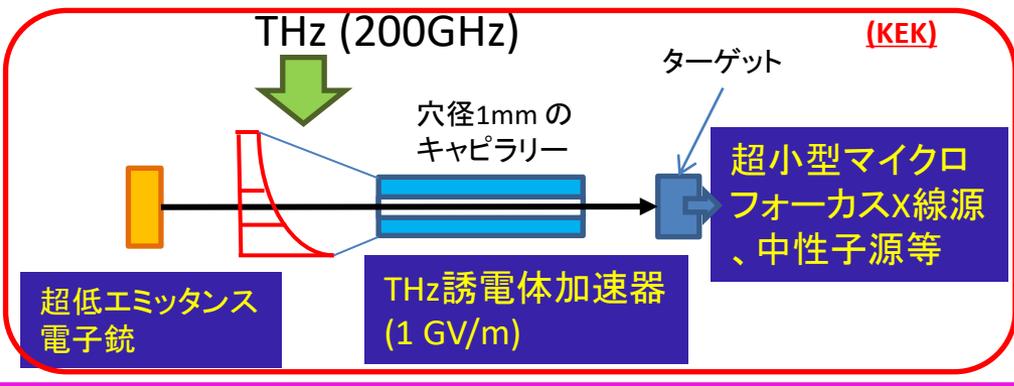
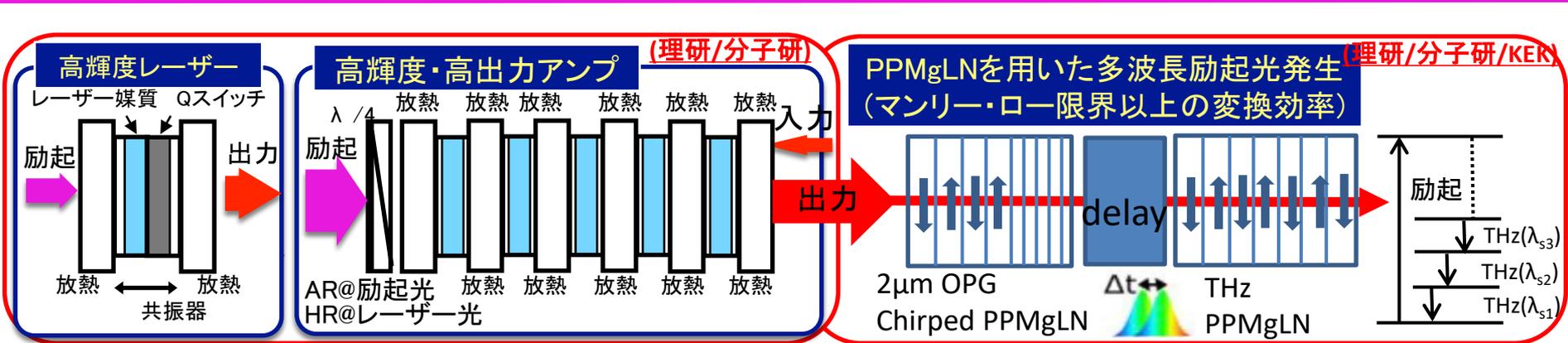
レーザー駆動THz加速

MgO:PPLN / OPA THz generation



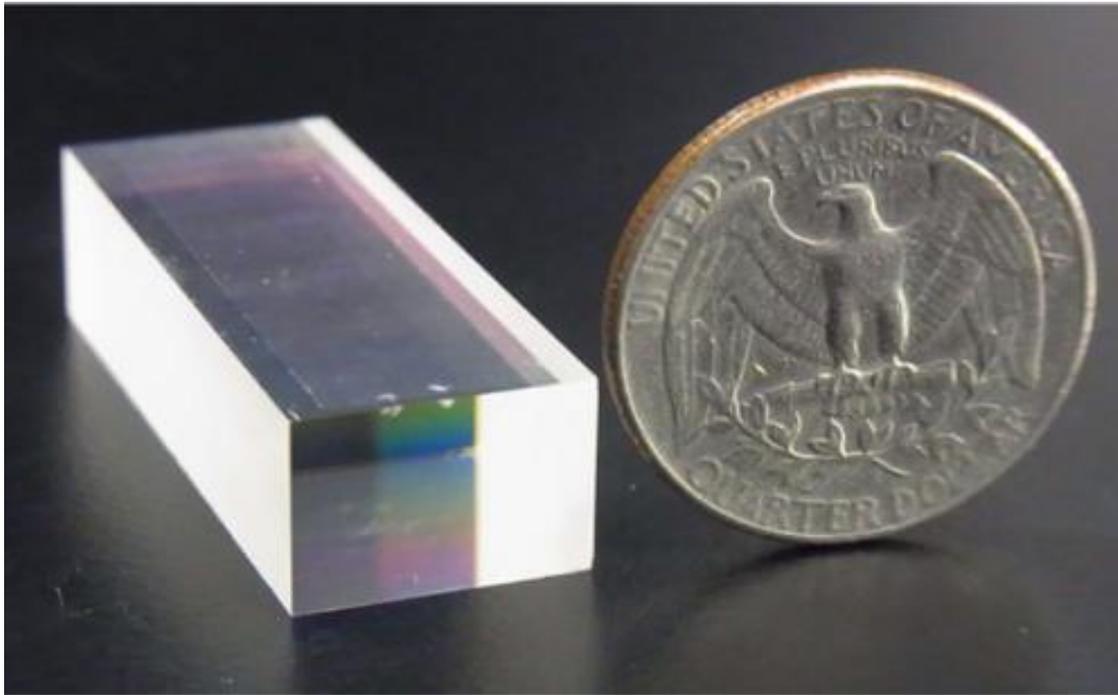
- MgO:PPLN : Pole= $212\mu\text{m}$, $10\times 20\times L=40\text{mm}$
(damage threshold : $1\text{ J/cm}^2 \Rightarrow$ target : 2J input)
- $\tau=1\text{ps}$, $\Delta t \sim 1\text{ps}$

レーザー駆動の THz-DLW



分子研製の大型の MgO:PPLN

- 10 mm thickness



5% 変換効率が得られれば
2J → 100mJ THz が可能なはず

レーザー固有の問題

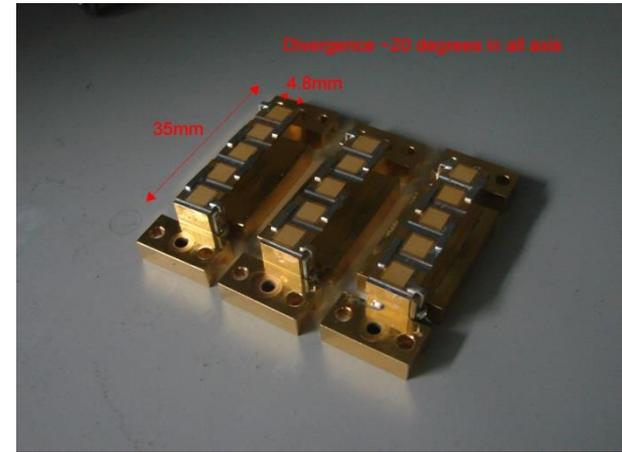
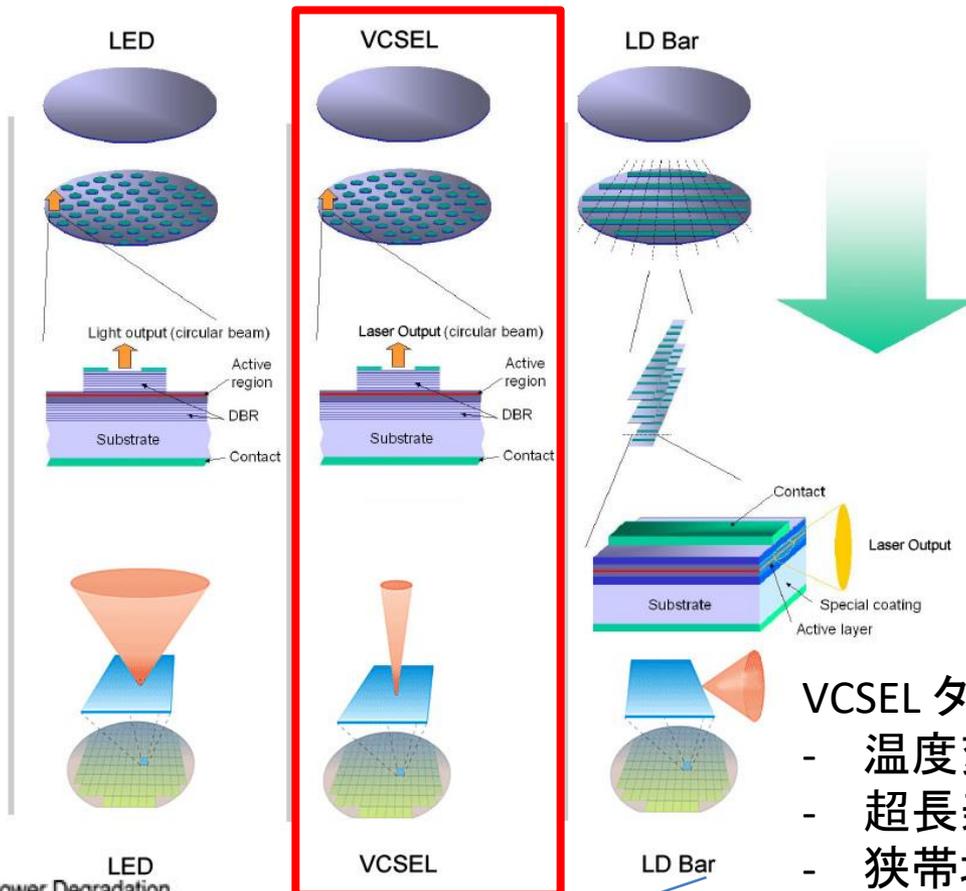
エネルギー源と電界

	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
駆動 エネルギー	20J [/m] = 40MW × 500ns	200J [/m] = 300kW × 700μs	70J (SLAC) = 23GeV × 3nC 35J (KEK) = 7GeV × 5nC	10J	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 × N	5Hz × N	50Hz × N	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 % ?	1%(陽子ビーム生成) × η(p→e)

Laser Diode

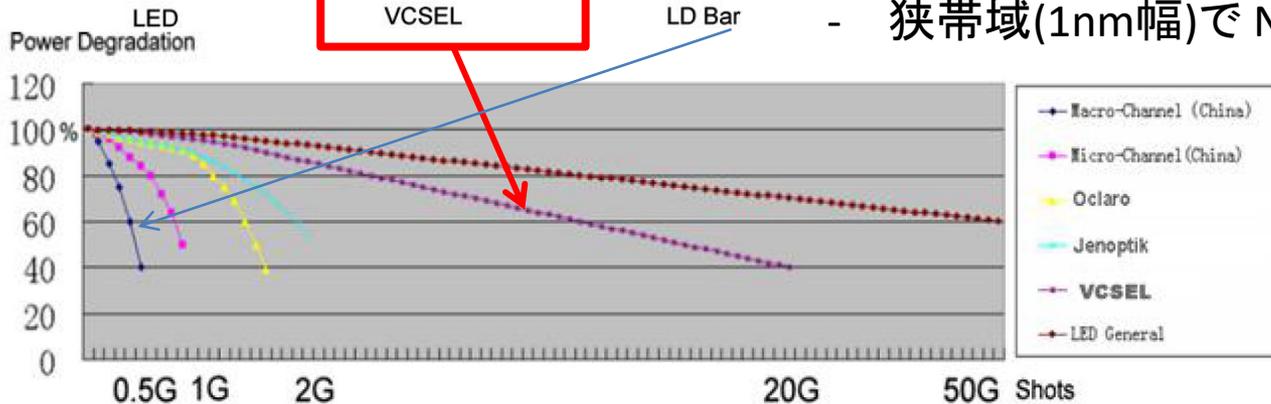
- Laser Diode Stack
 - × 帯域幅 3nm (DB)
 - △ビームパターンを成形する方法が必要
 - QCW(Duty ~3%) では kW/bar 位まで到達
 - $3\% / 100\text{Hz} = 300\mu\text{s}$ (これ以上の蛍光寿命は不要)
 - $25\text{万円/kW} \times 3\% = 30\text{W(CW)} \rightarrow 1000\text{万円/kW}$
 - CW
 - $100\text{万円/kW} \rightarrow 1\text{kHz}$ でも 1ms の蛍光寿命が必要
- Fiber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

VCSELタイプの Nd:YAG DPSS Module



VCSELタイプのLDの特徴

- 温度変化による影響が LD bar の 1/5
- 超長寿命(20G shot \leftrightarrow 従来のLD bar は1G shot)
- 狭帯域(1nm幅)で Nd の808nm 励起にフィット

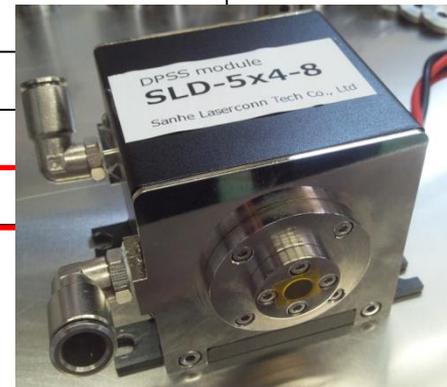


VECSEL DPSS Module

Model No.	Nd:YAG Diameter (mm)	VCSEL Chips	Pump Power @200us,100Hz	Pulse Energy @200us, 100Hz
SLD-3x3-3	φ3	9	1350 W	>68 mJ
SLD-3x3-4	φ4	9	1350 W	>68 mJ
SLD-3x3-8	φ8	9	1350 W	>81 mJ
SLD-3x4-3	φ3 → Φ2	12	1800 W	>90 mJ
SLD-3x4-4	φ4	12	1800 W	>90 mJ
SLD-3x4-8	φ8	12	1800 W	>108 mJ

Model No.	Nd:YAG Diameter (mm)	VCSEL Chips	Pump Power @200us,100Hz	Pulse Energy @200us, 100Hz
SLD-5x3-3	φ3	15	2250 W	>113 mJ
SLD-5x3-4	φ4	15	2250 W	>113 mJ
SLD-5x3-8	φ8	15	2250 W	>135 mJ
SLD-5x4-3	φ3	20	3000 W	>150 mJ
SLD-5x4-4	φ4	20	3000 W	>150 mJ
SLD-5x4-8	φ8	20	3000 W	>180 mJ

Φ8, 3 kW, 5方向励起 →



VCSEL vs LD Bar

Parameters	VCSEL	LD Bar	VCSEL Advantages
EO efficiency	40~50%	50~60%	-
Spectrum width	~1nm	~3nm	Narrow spectrum
Wavelength-temperature shift	0.06nm/K	0.3nm/K	Very stable for pumping
Long time wavelength shift	No	Yes	Very stable for pumping
Optical damage threshold	No COD	Terrible COD	High damage threshold
Direct heat conductive area	Big	Small (by FF)	Easy heat sinking
Heat stress during pulsing	Low	Very high	Long pulsed life time
Max operation temperature	>85 Deg.C	35~45 Deg.C	High temperature operation
Current inrush sensitivity	None-Sensitive	Very Sensitive	Very robust to driver
Voltage-current relation	Linear	None-Linear	Very simple driver design
Chip-water isolation	Isolated	Connected	No need de-ionized water
CW life time	10~20K hours	10~20K hours	-
Pulsed life time (20ms pulsing)	~100M shots	~10M shots	10 times longer life time
QCW life time (250us pulsing)	>20G shots	1~2G Shots	+10 times longer life time
Operation Mode	CW & Pulsed	CW or Pulsed	Free modulation in all mode
Power degradation	Near-Linear	None-Linear	Life time can be expected
Manufacture cost & price	Low	High	Very low cost

効率

LD Bar:

1.6~2.1V/Bar,

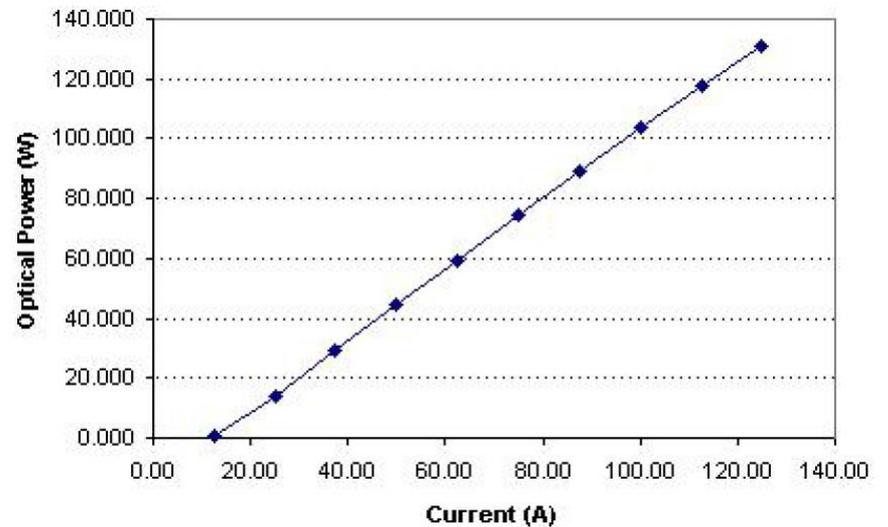
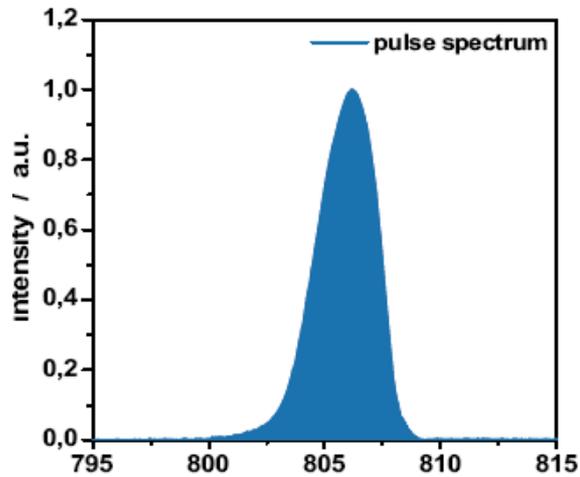
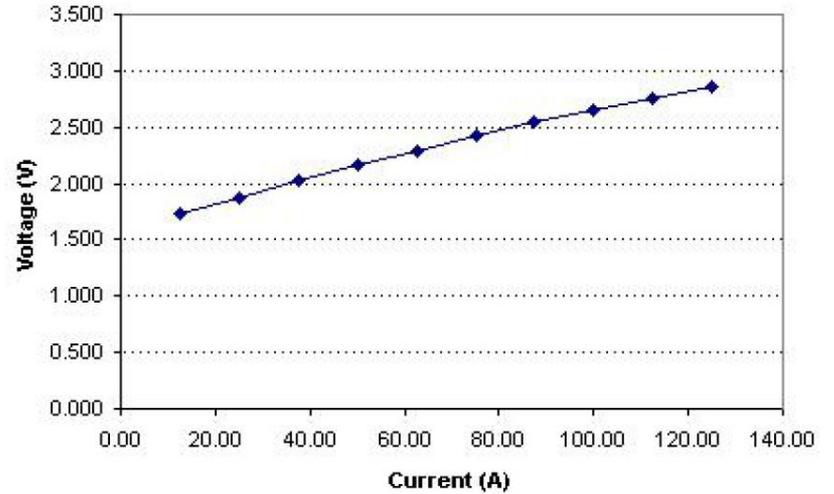
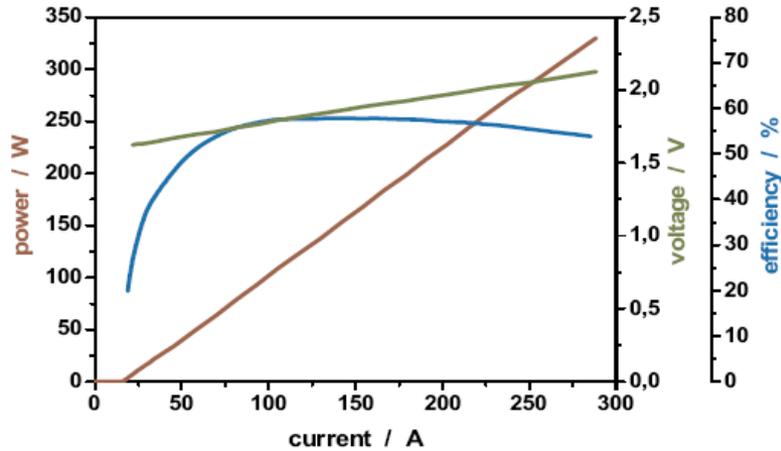
808nm(3nm) 50~60%

VCSEL:

1.6~3.8V/Bar,

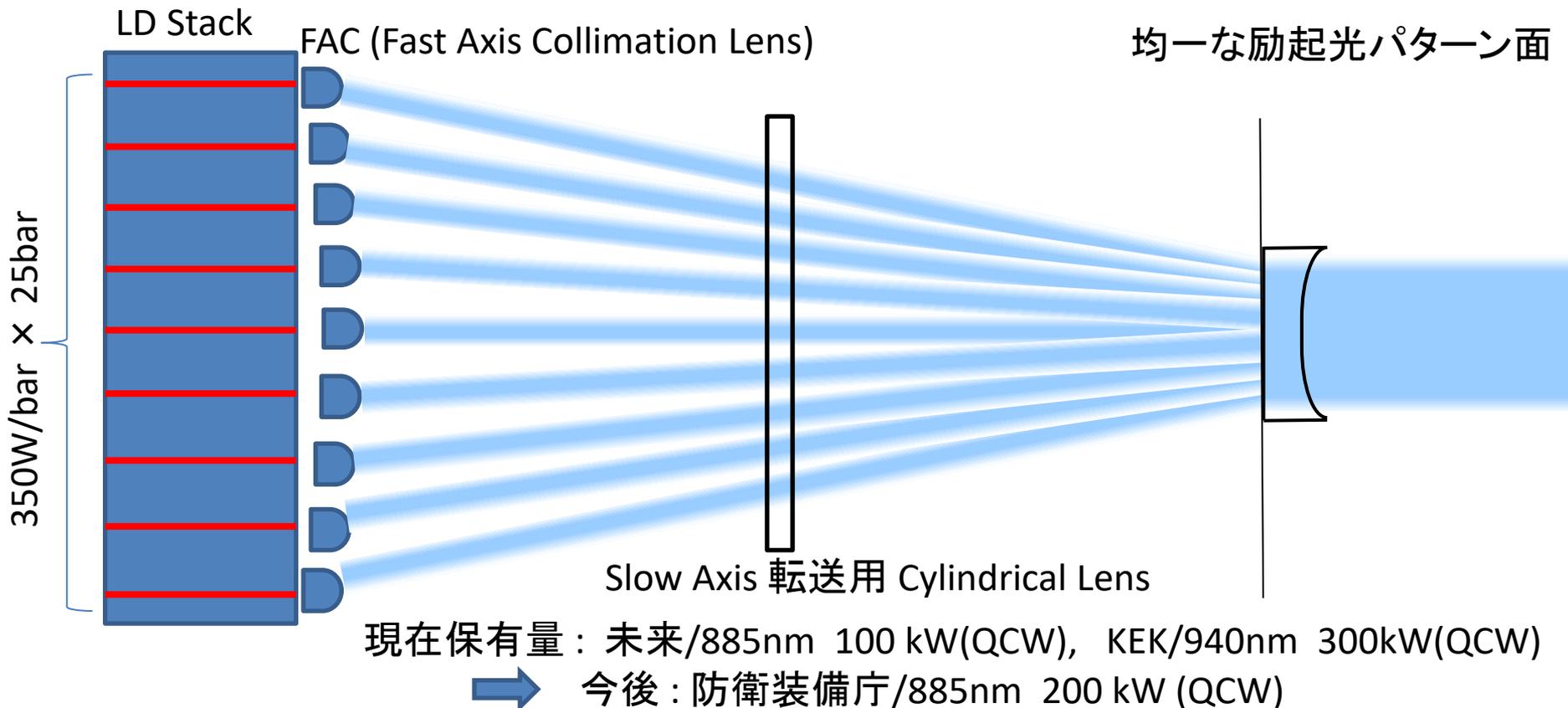
808nm(1nm) 40~45%

Power - Current - Voltage - Characteristics*



KEK版QCWレーザーダイオードスタック

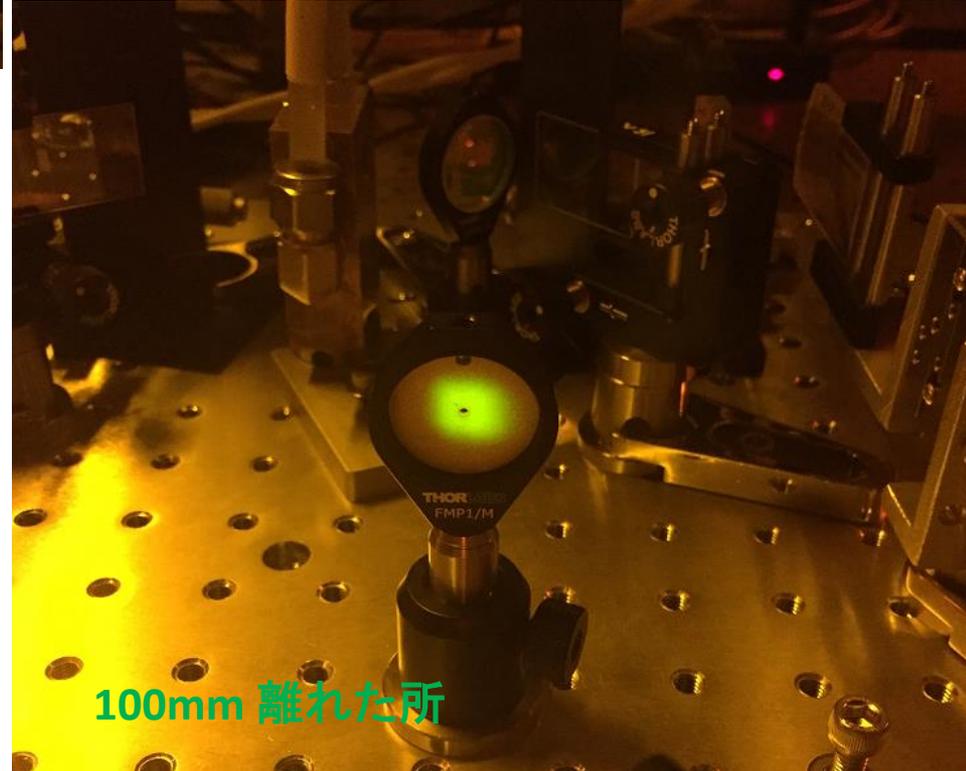
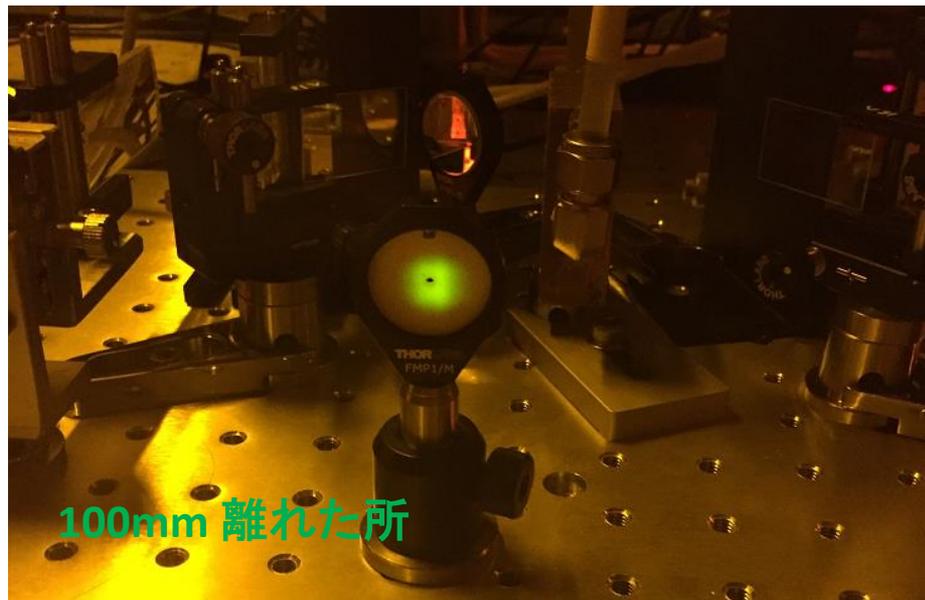
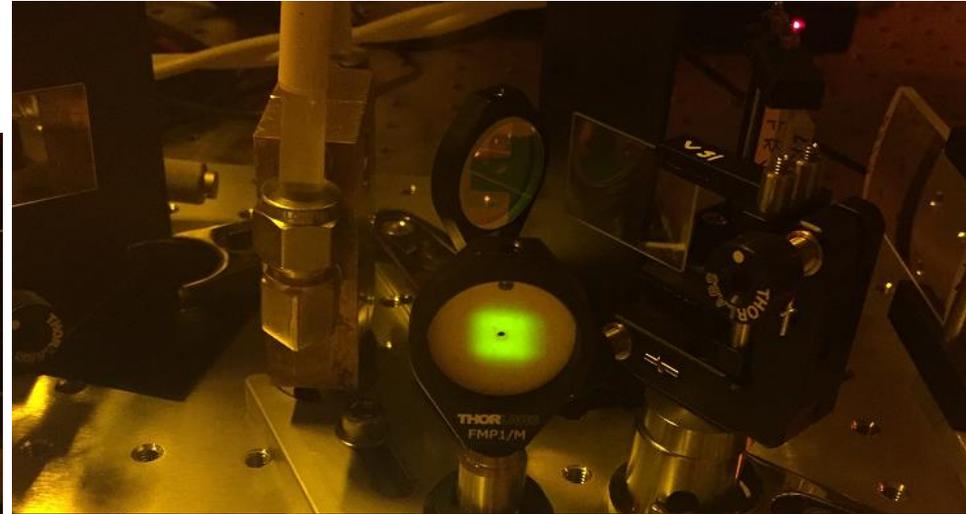
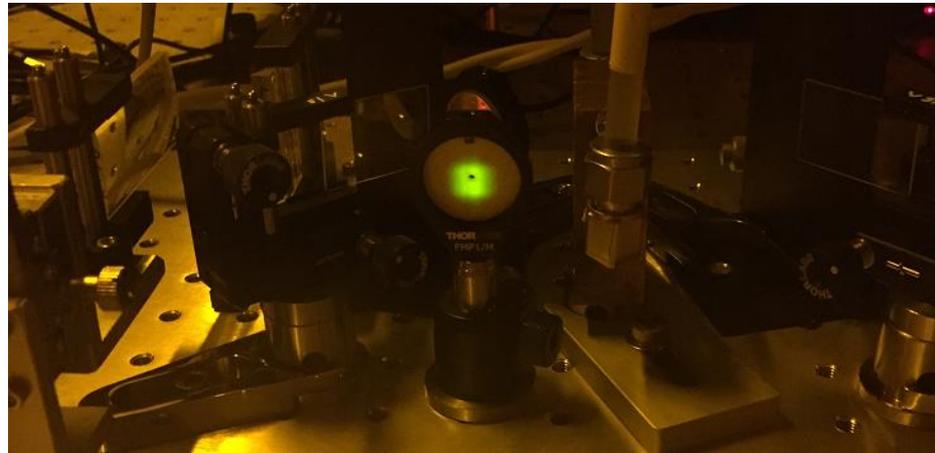
- QCW LD Stack : 30万円/kW (Fiber Bundle の 1/5)
- $350\text{W}/\text{bar} \times 25\text{bar} = 8.75 \text{ kW} \times 250\mu\text{s} > 2\text{J}/\text{stack}$
- FACの精密アライメントで均一な励起パターン
- 開発した安価な大電流パルスドライバ



励起光プロファイル

右からの励起

左からの励起



LDの最大定格

- $250\mu\text{s} \times 120\text{Hz} = 3\%$ を保証

2.1 絶対最大定格

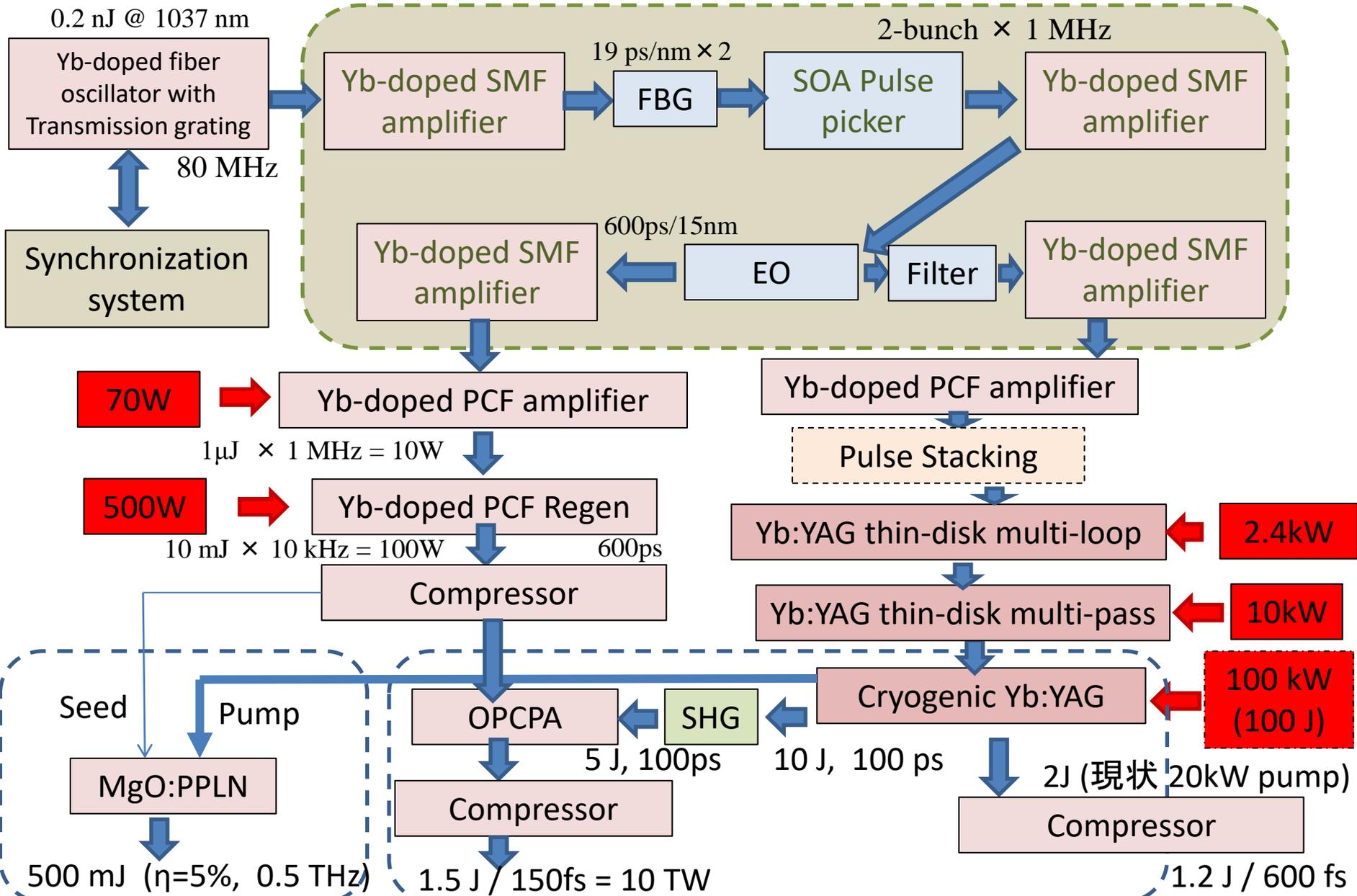
瞬時でも超過してはならない限界値で示し、どの一つの定格値も超えてはならないものとする。

項目		記号	定格	単位
パルス順電流		I_{fp}	350	A
ピーク光出力		Φ_{ep}	9.0	kW
パルス幅		t_w	250	μs
デューティ比		DR	3.0	%
逆電圧		V_r	2.0	V
動作周囲温度		$T_{op(a)}$	+5 ~ +40 注1)	°C
保存温度		T_{stg}	0 ~ +50 注1) 注2)	°C
動作および保存湿度		—	50	%
冷却水条件	冷却水媒体	—	市水	—
	冷却水温度 (冷却水 IN 側)	—	+15 ~ +30	°C
	冷却水圧力 (ヒートシンク部)	—	0.3 注3)	MPa
	冷却水流量 (全体)	—	0.8 ~ 1.8	L/min

KEKにおけるレーザー開発

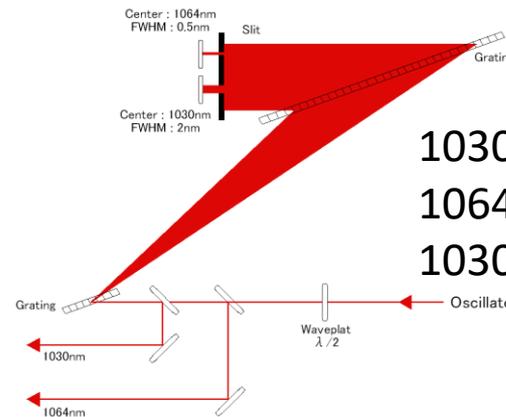
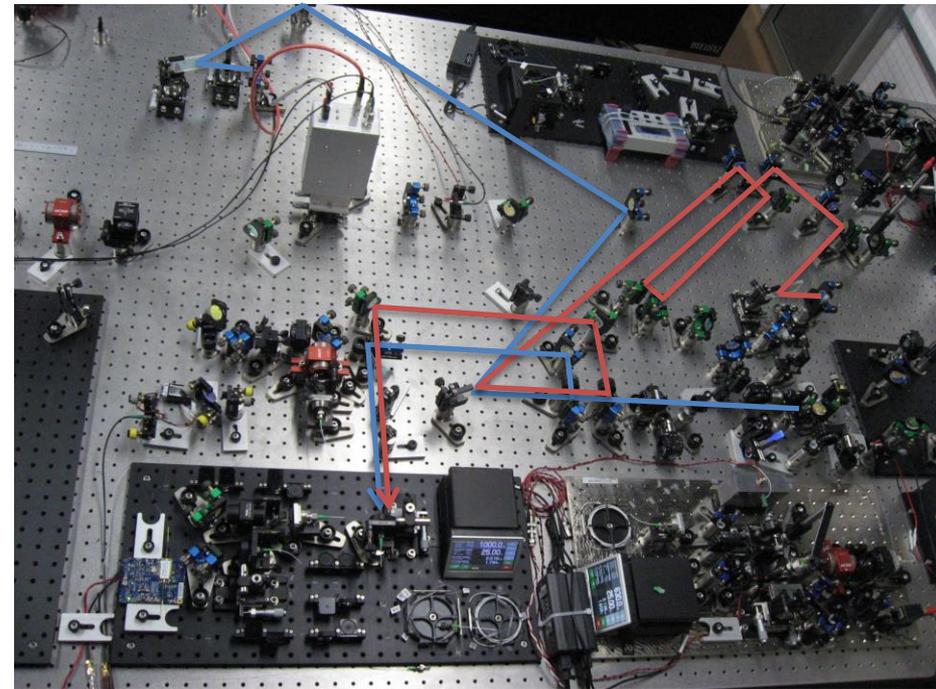
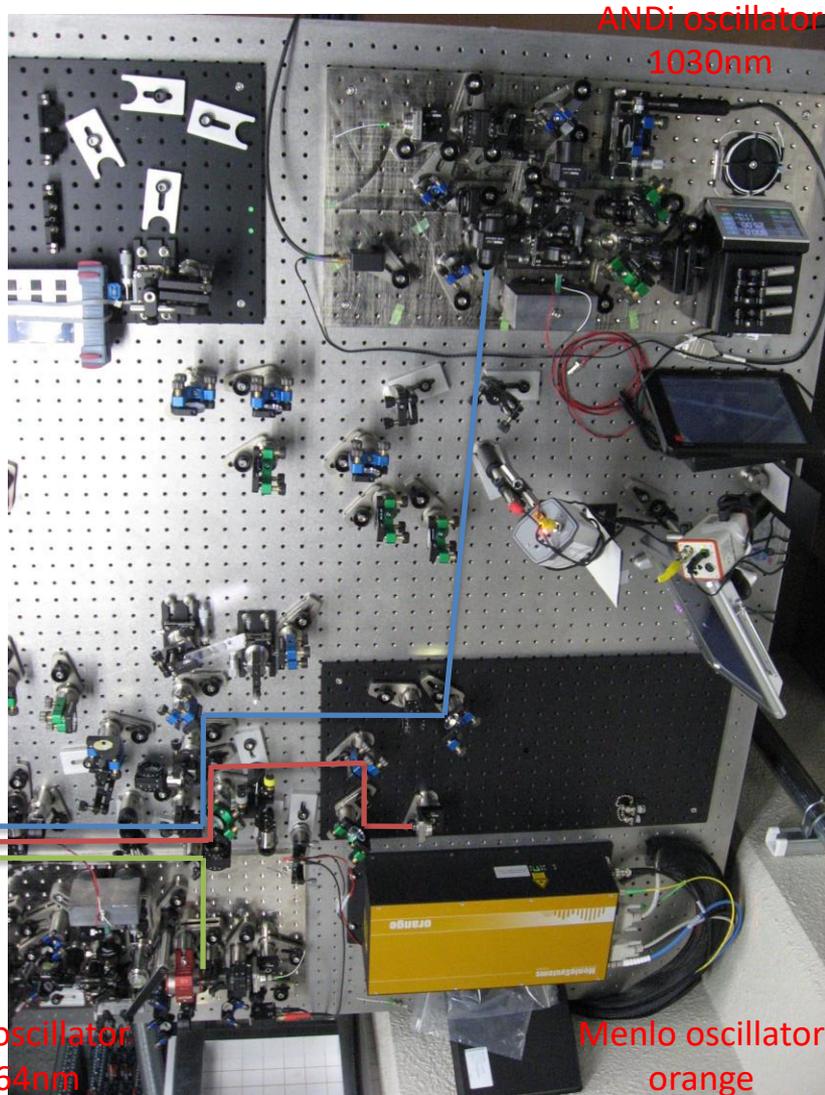
- 全てのレーザーシステムが Multi-pass
 - マルチバンチ / Enhancement Cavity に対応
- 将来的には小型のシステムを多数使用
- Yb系レーザー開発
 - 分子研製常温接合の Think Disk を使用
 - 室温 Yb:YAG → 冷却 Yb:YAG
- Ti:Sapphire 系の増強
 - Nd:YAG DFC pump laser の導入
(未来社会創造事業 / 平等レーザー開発G)
- Chirped PPLN への期待

Yb:PCF/YAG + OPCPA + MgO:PPLN



Yb-fiber laser system

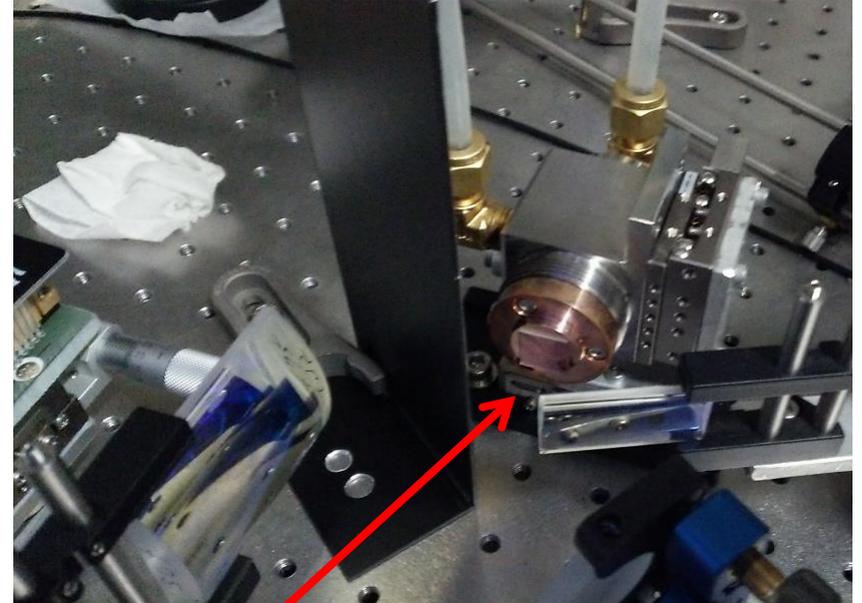
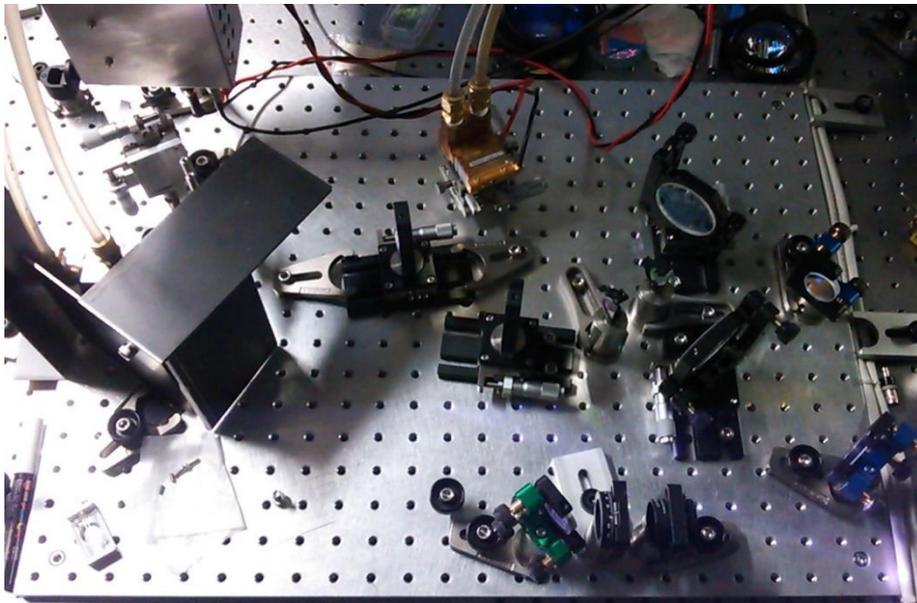
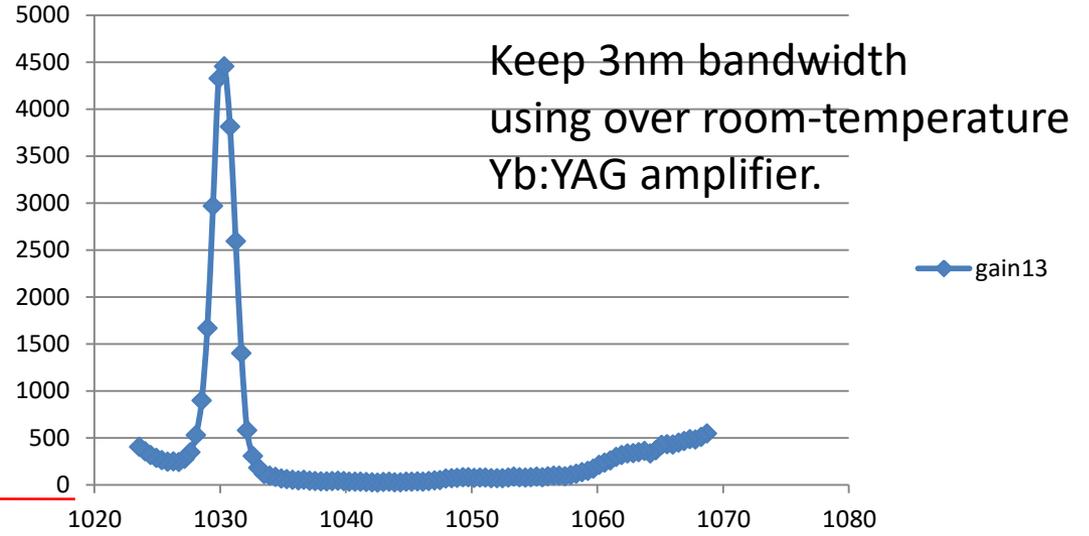
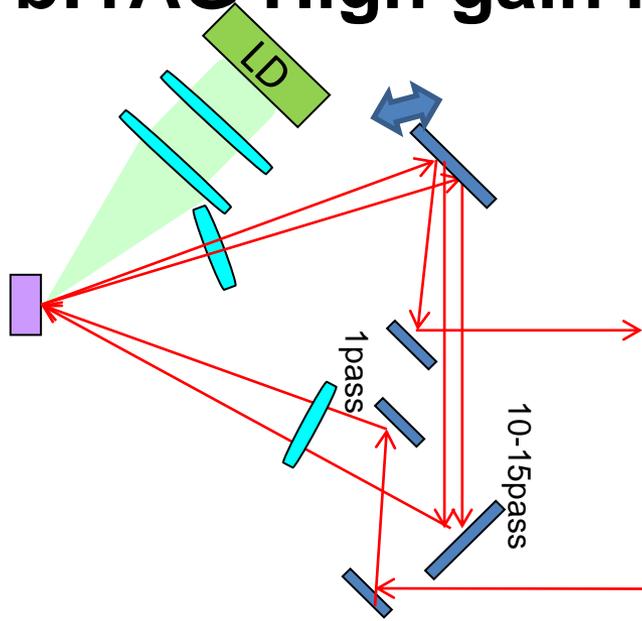
Oscillators (1025-1065 nm)



$1030 \pm 1.5\text{nm}$ for Yb:YAG
 $1064 \pm 0.2\text{nm}$ for Nd:YAG
1030-1045nm for Yb:PCF

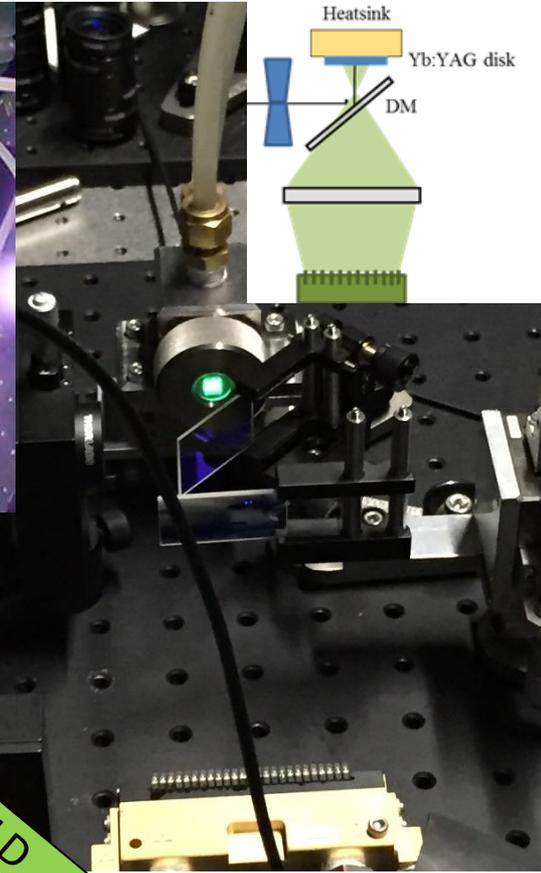
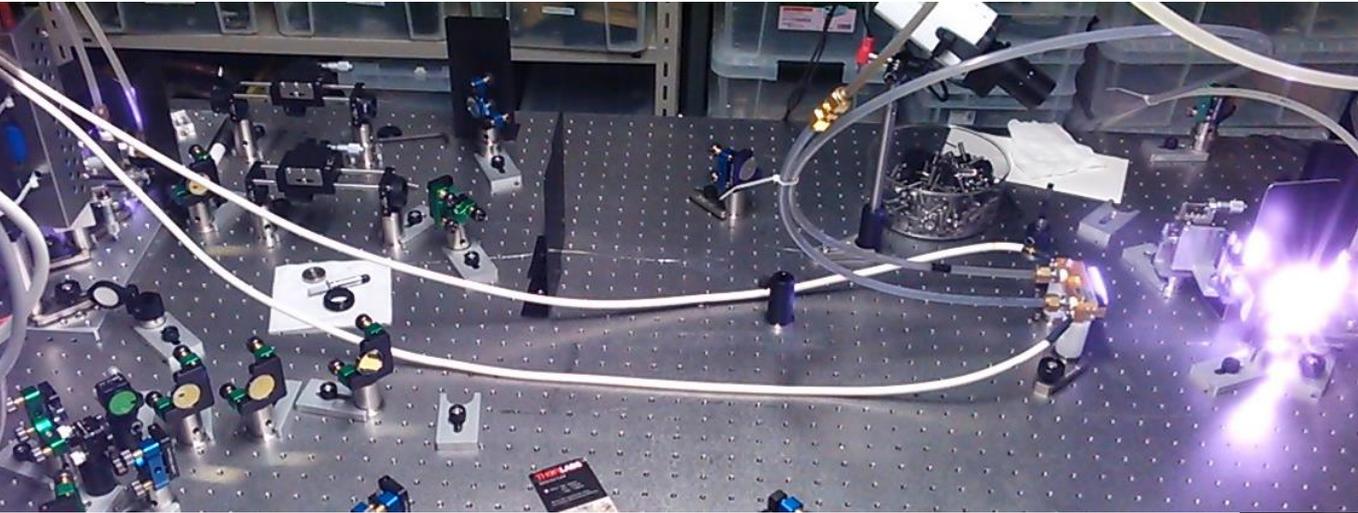
Yb:YAG High gain multi-pass amplifier (10-15 pass)

gain13

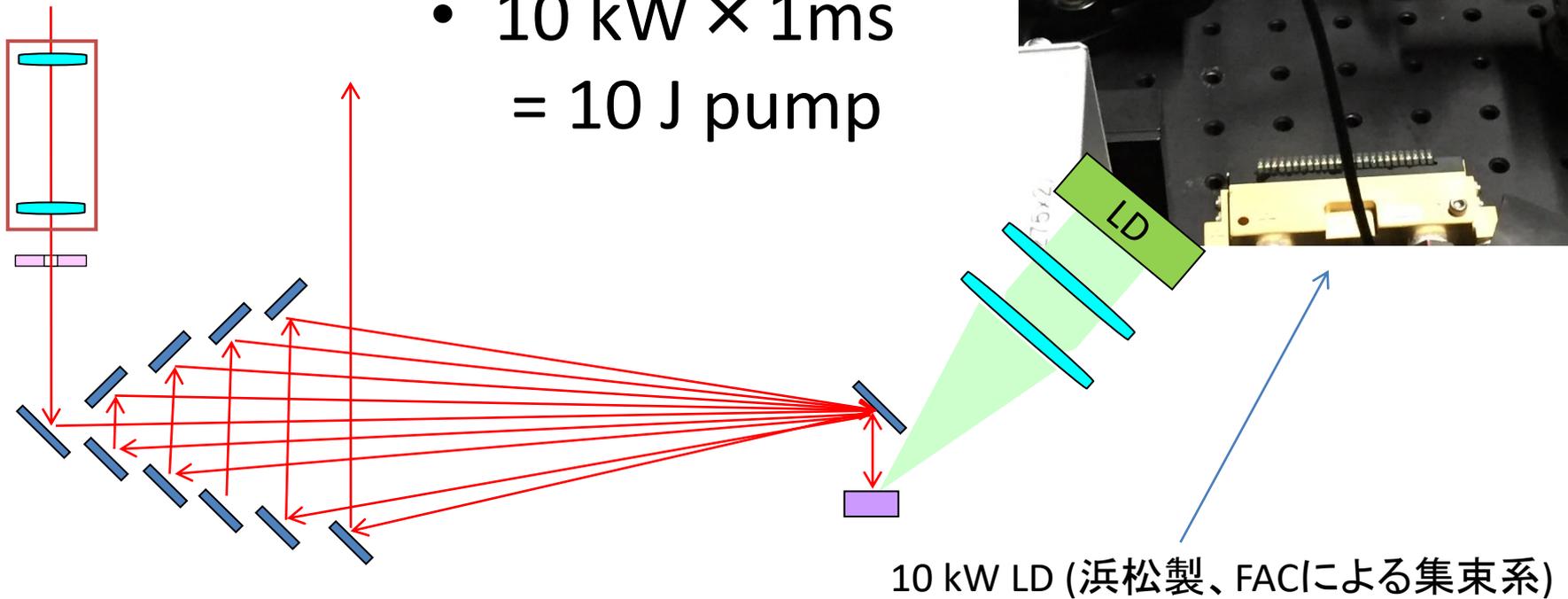


分子研製 常温接合 Yb:YAG Thin Disk (Kausasさん)

Ex. Our Yb:YAG thin disk loop mult-pass amplifier



- $10 \text{ kW} \times 1 \text{ ms}$
= 10 J pump



10 kW LD (浜松製、FACによる集束系)

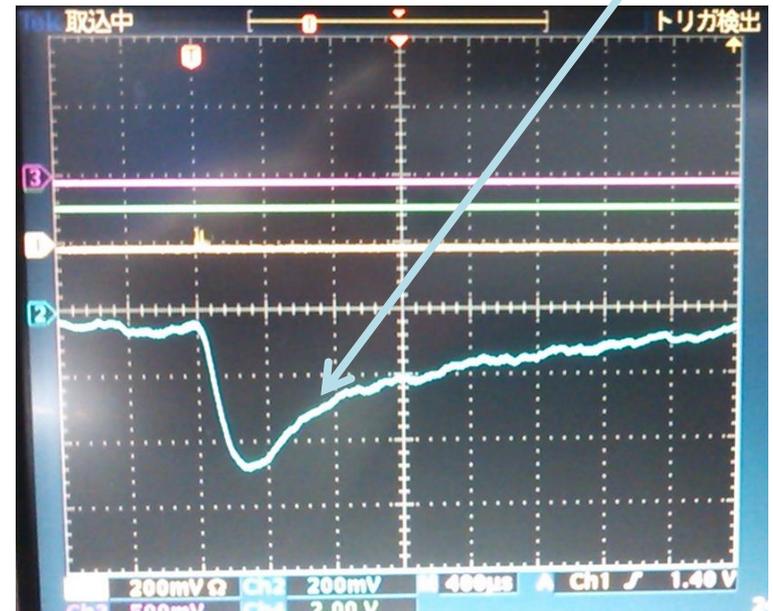
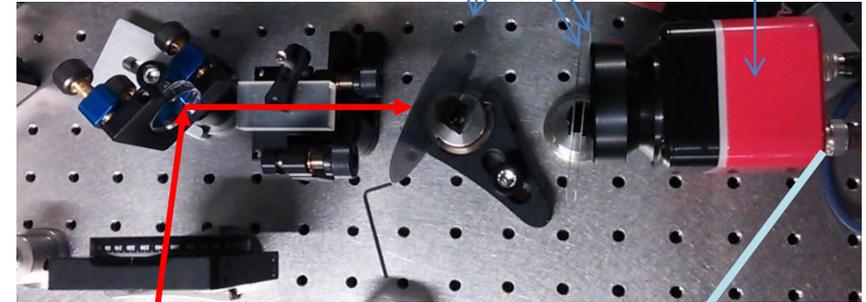
冷却 Yb:YAG / PPLN

分離型ヘッドのパルスチューブを使用 (無振動)



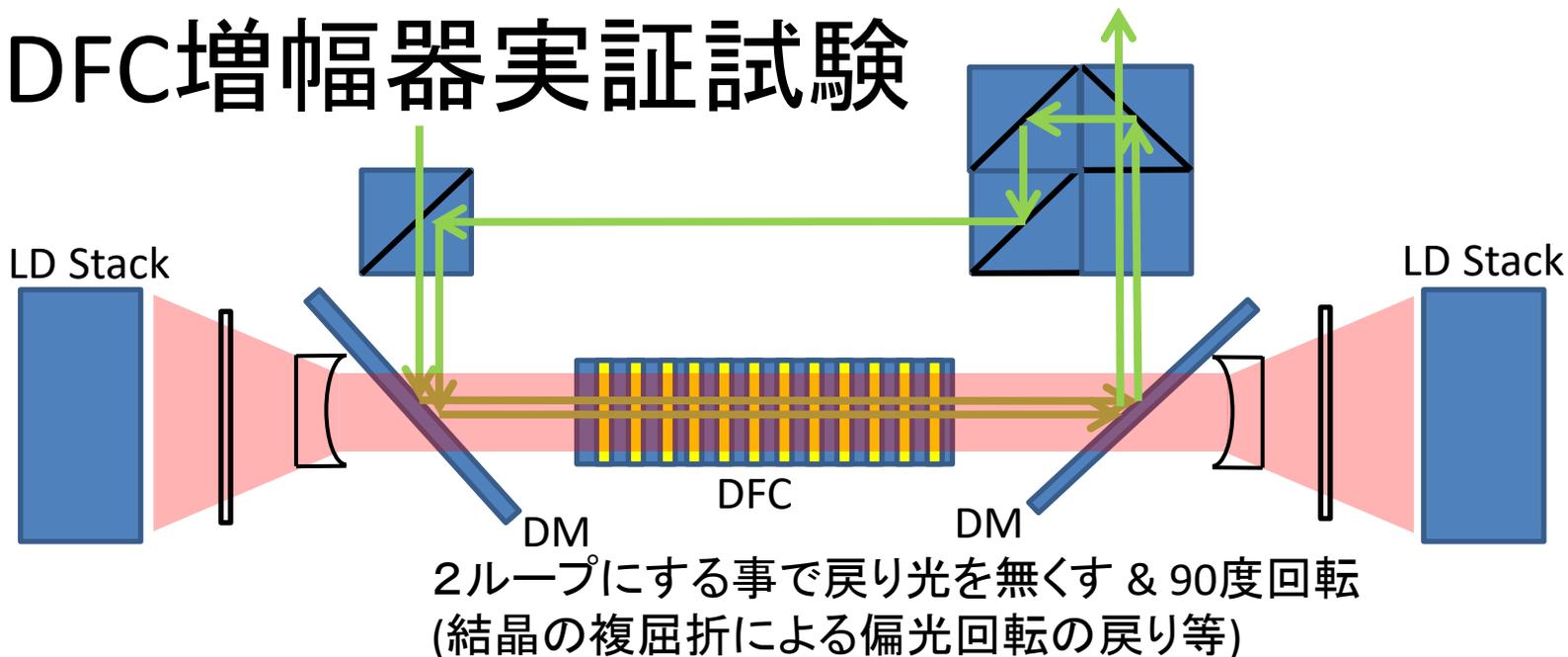
Silicon wafer
with metal
mesh filter x 3

THz
Detector



Nd:YAG - DFC
高強度レーザー開発

DFC増幅器実証試験



- 増幅率

- 8 kW x 4 (両方向On-Axis励起) x 250 μ s = 8 J / cm²

- G= 5 for L(Nd:YAG) = 1.3cm(1/e²) (2-passで50倍)

- Pump(885nm)

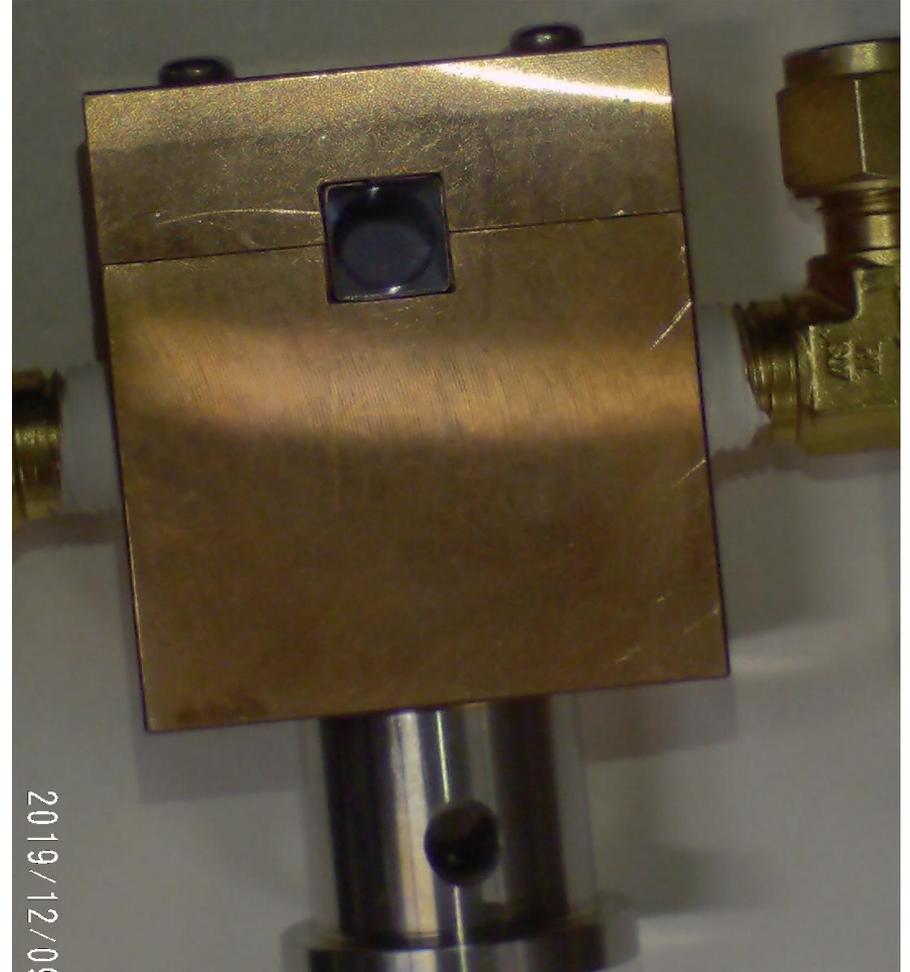
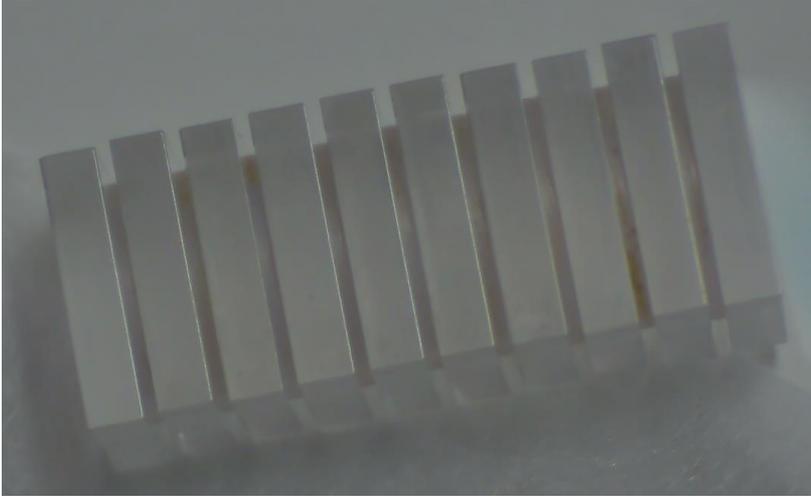
- 4 stack(32kW, 8J)

- Output

- 2 J → 1 J @ SHG

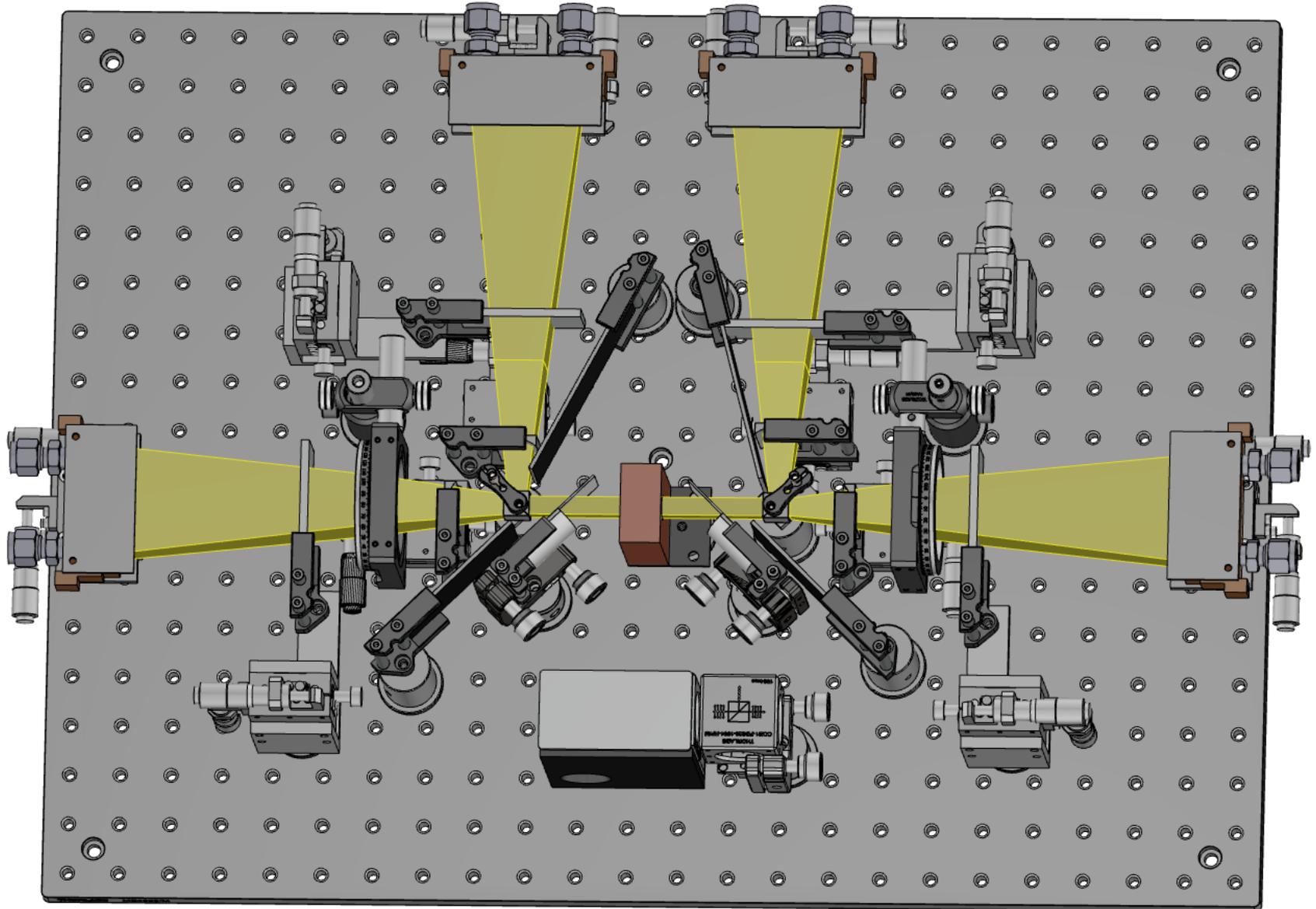
Nd:YAG DFC

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



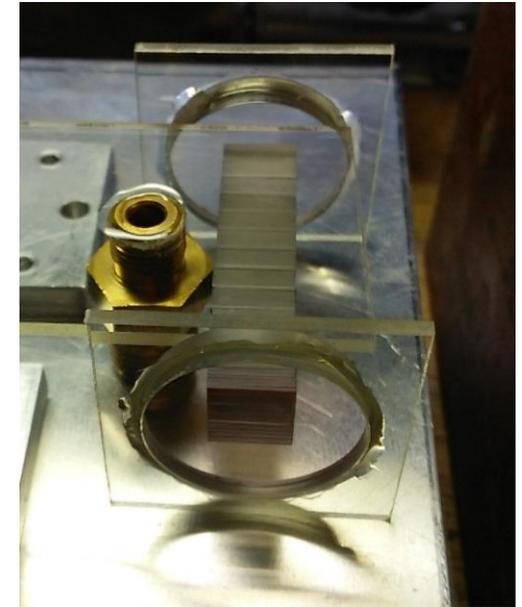
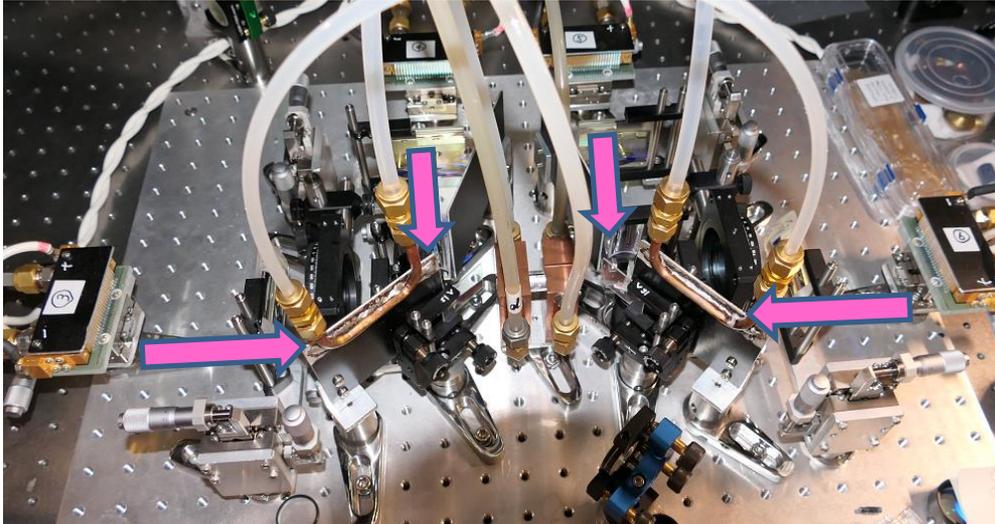
2J DFC増幅器実証試験

- 1 cm^2 , 4 stack ($8.85 \text{ kW} \times 4 = 8.8 \text{ J}$) $\rightarrow 2 \text{ J} \rightarrow 1 \text{ J} @ \text{SHG}$

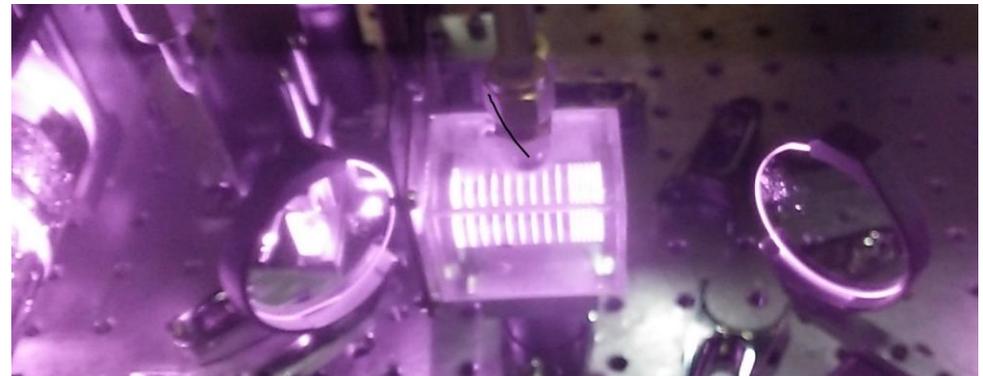
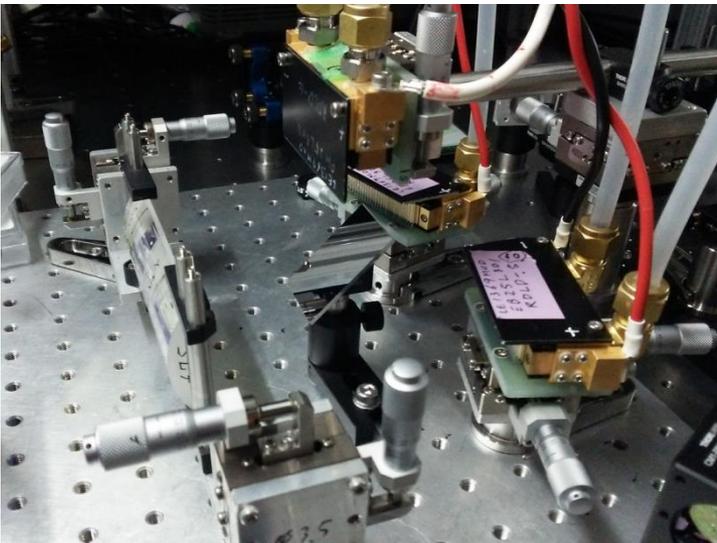


2J Nd:YAG DFC

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



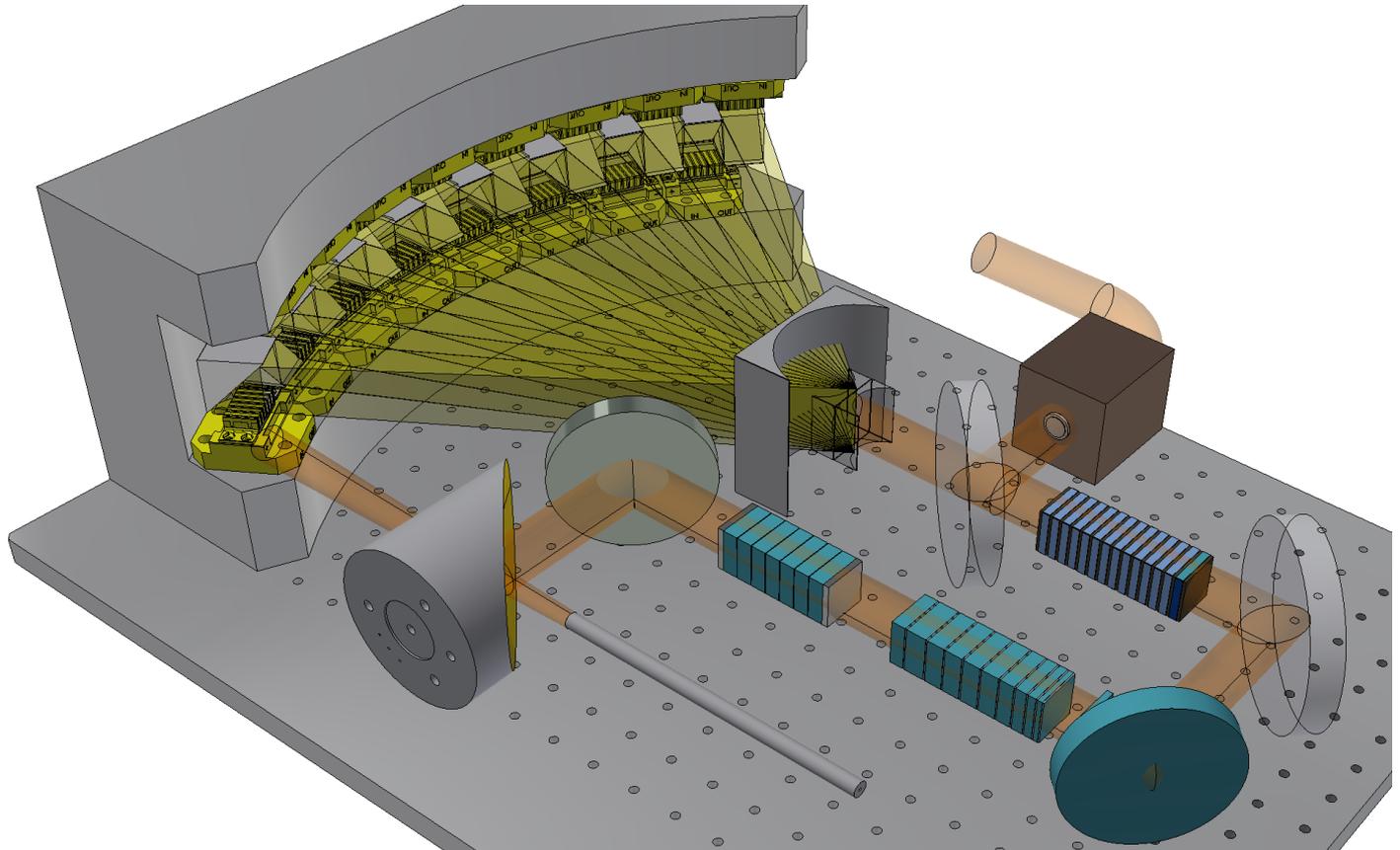
- $8 \text{ kW} \times 250 \mu\text{s} \times 3 = 6 \text{ J pump} \rightarrow \times 2 \text{ 12J pump}$



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

5Jモジュールへ

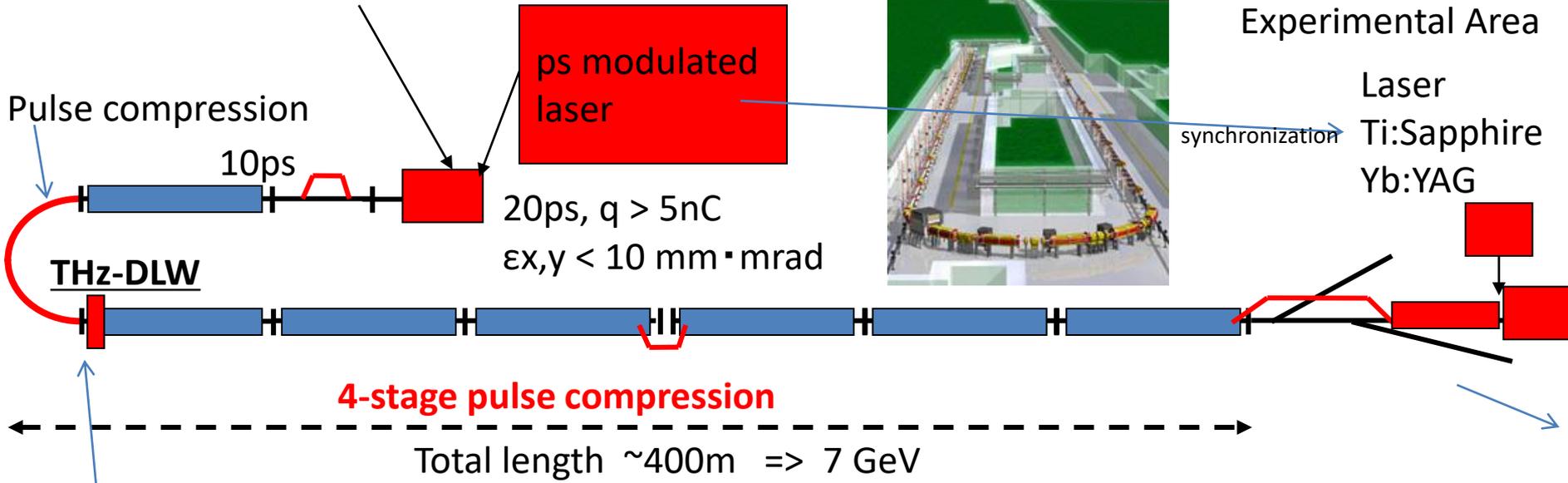
- 15mm x 15mm DFC
- $750\text{W}/\text{bar} \times 27\text{bar} = 20\text{ kW}$ (現在の2.5倍)
 - 1.5mm ピッチ \rightarrow 2.5mm ピッチ



KEKにおける超高電界加速による ステージング加速に向けた準備

KEKにおけるステージング加速の試験

Advanced photocathode RF-Gun (under operation)



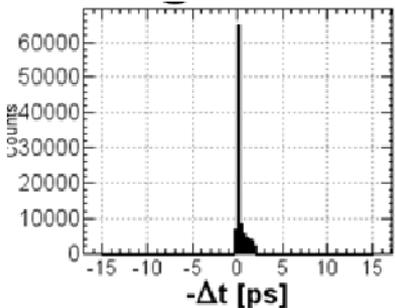
$e^- 7\text{ GeV}$, $\sigma_{x,y} = 35\mu\text{m}$ ($\beta \sim 1\text{m}$)

$3\text{nC}/200\text{fs} = \underline{100\text{TW}}(\text{FY2019})$

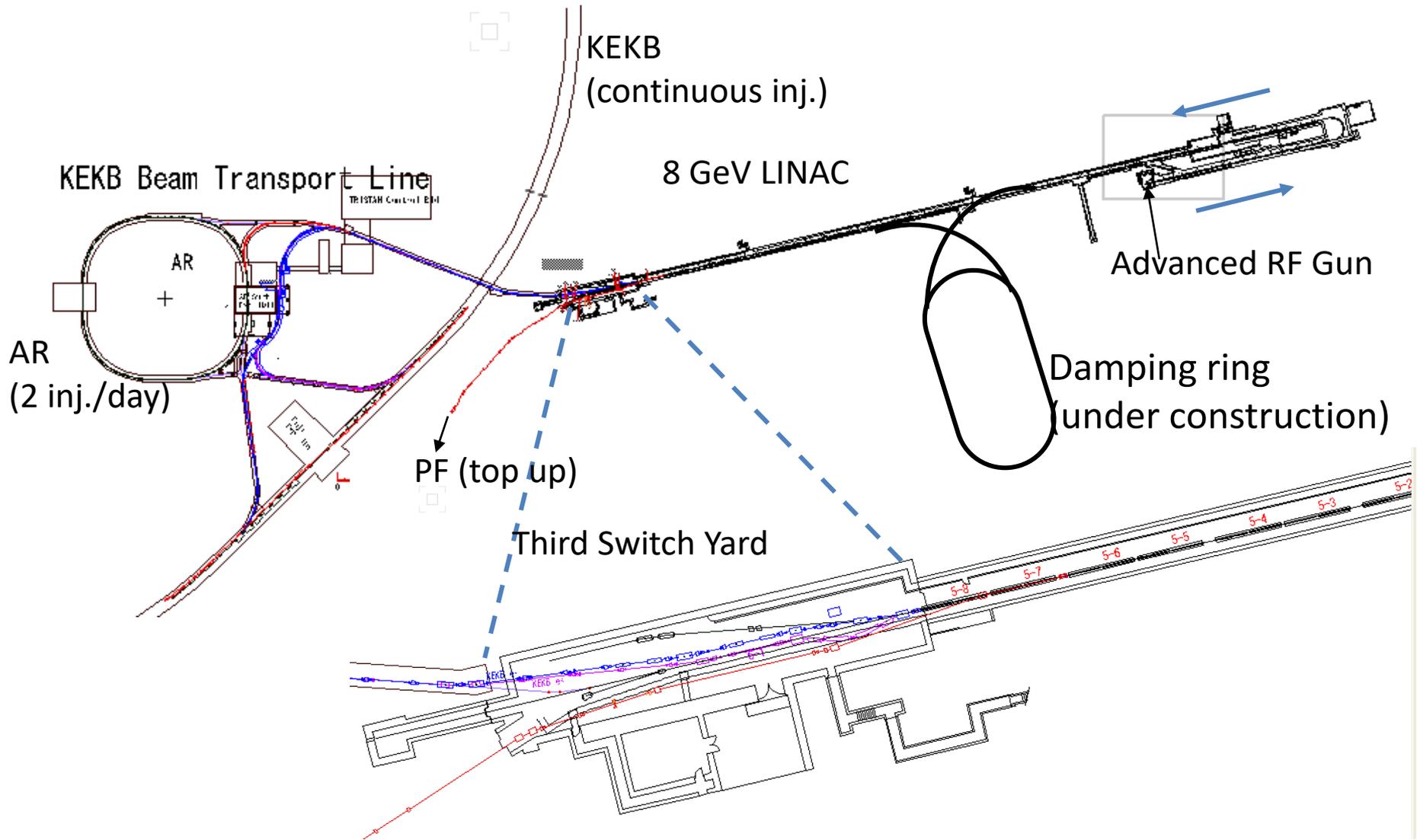
$5\text{nC}/30\text{fs} = \underline{1\text{PW}}(\text{FY2021})$

Future target : 1PW beam x 10J laser

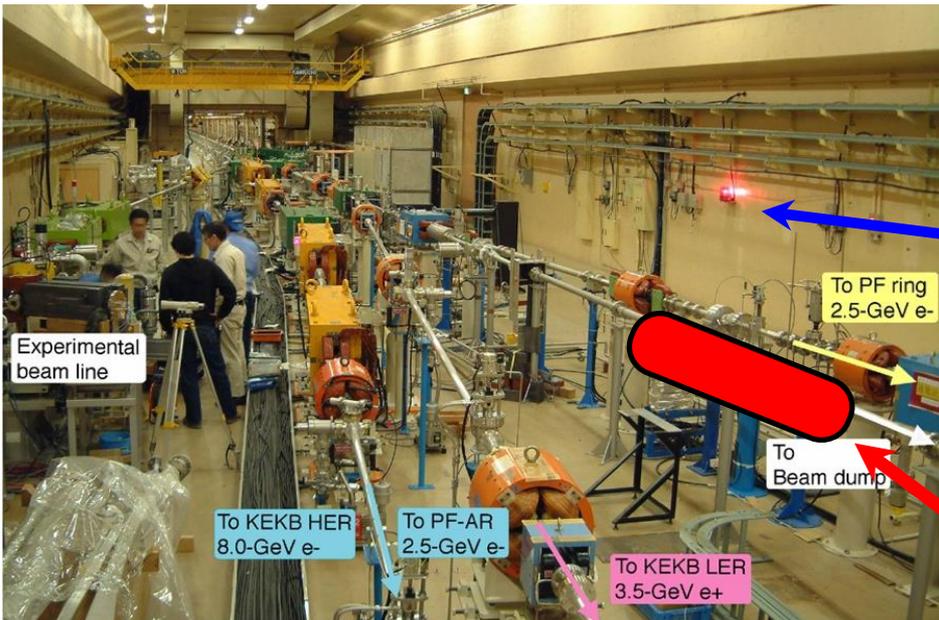
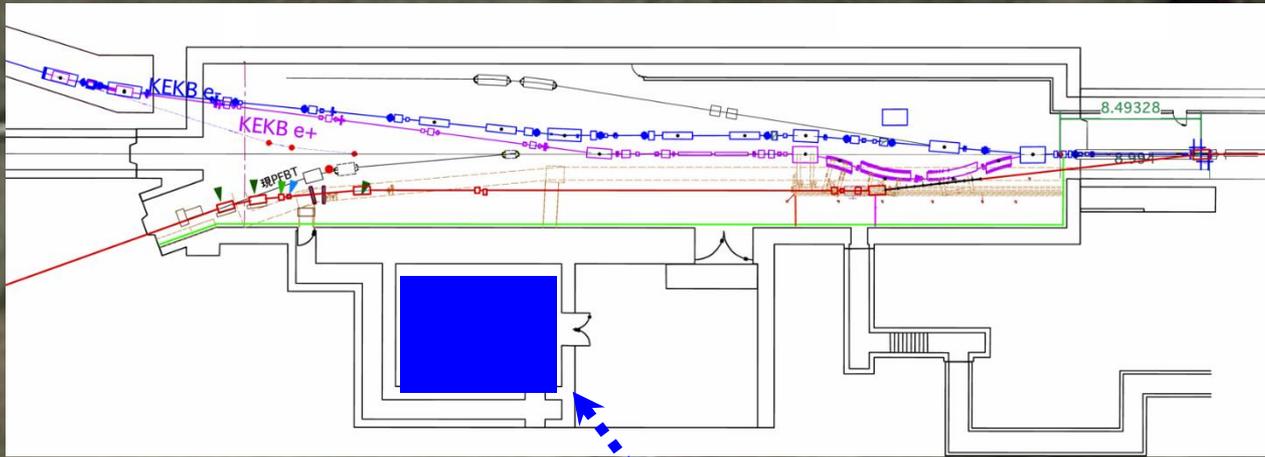
(upgrade to 100J in the future)



8 GeV LINAC Third Switch Yard



Experimental area for laser plasma after burner

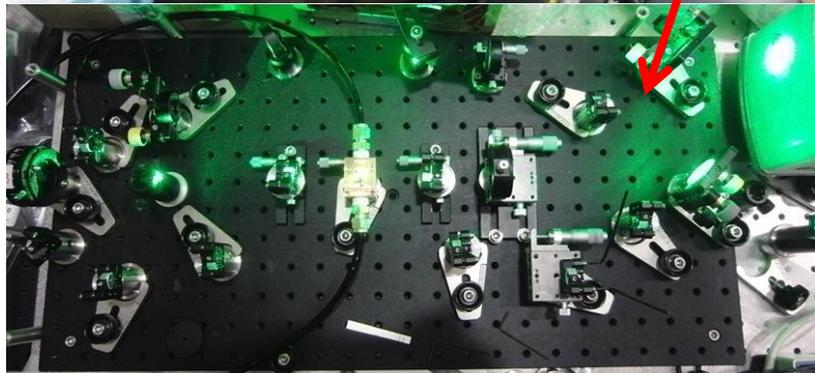
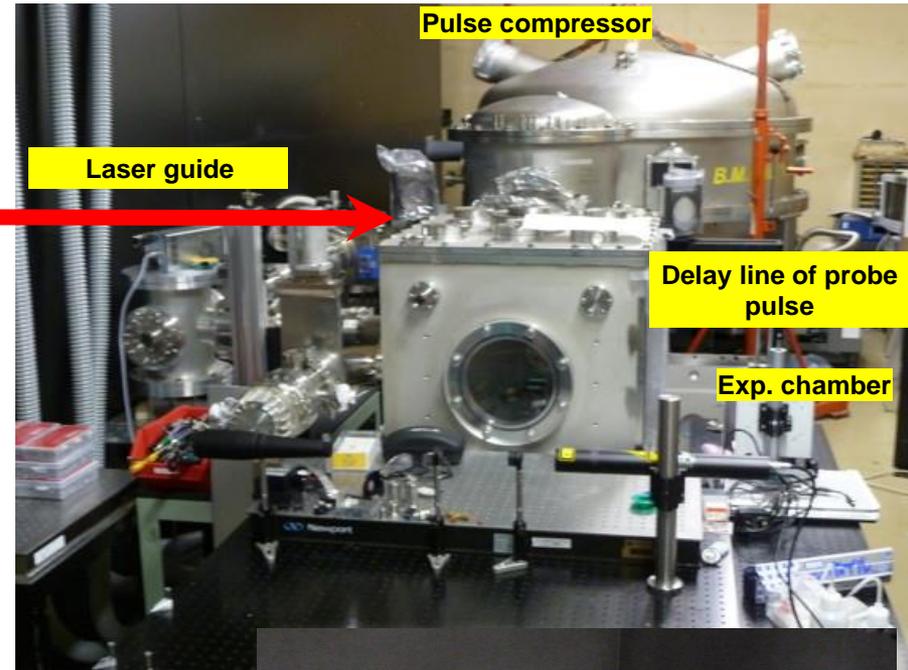
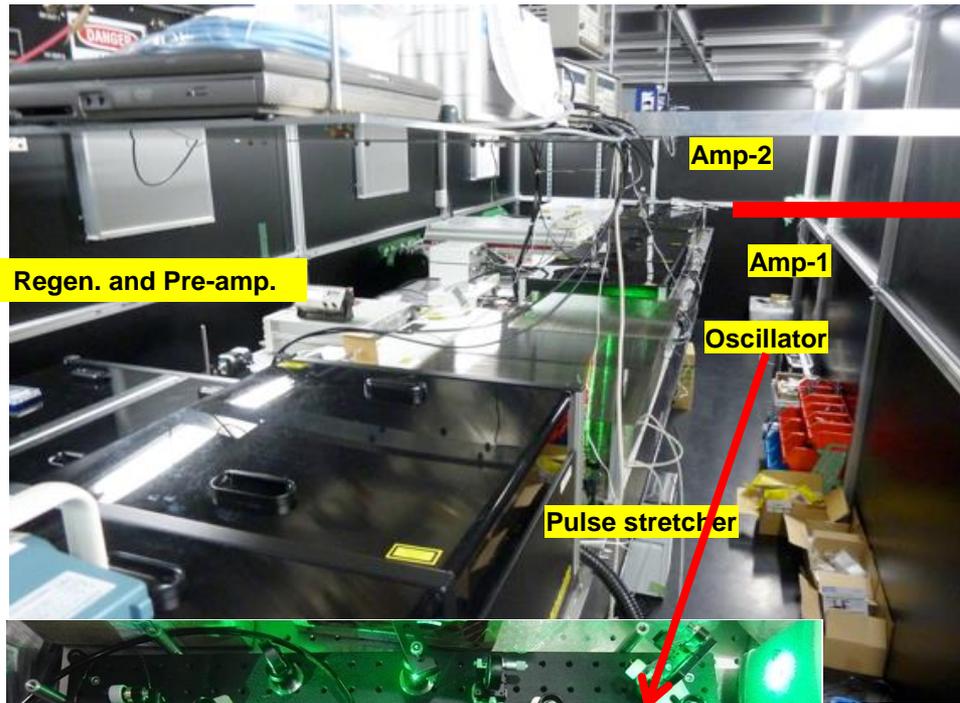


Ti:Sapphire Laser
7 TW \Rightarrow 100TW(future)

Compressor
Vacuum chamber under installation

Ti:Sapphire Laser from U-Tokyo Uesaka-lab

THALES α -10 + Oscillator



300mJ/40fs = 7 TW at present

=> 25 TW ← Nd:YAG DFC pump

(未来社会創造事業 / 平等レーザー開発G)

まとめ

- 超高電界 (> 数100MV/m) の加速方式

- THz 加速

- そのためのレーザー開発 / THz発生

- 2J 程度で必要十分, 50Hz 動作が必要

- Yb 系レーザーでの実証実験

- Nd系 → Ti:Sapphire

- Chirp PPLN

- THz - PPLN

プロトタイプ	ステージゲート
--------	---------

Nd:YAG DFC : 1 cm ²	2.5 cm ²
--------------------------------	---------------------

励起 885nm LD stack:

8kW x 4 = 8J 20kW x 4=20Jx2

1064nm:	2 J	10J
---------	-----	-----

532nm:	1J	5 J
--------	----	-----

Ti:Sapphire:	0.5 J	2.5J
--------------	-------	------

	10 TW	50 TW
--	-------	-------