

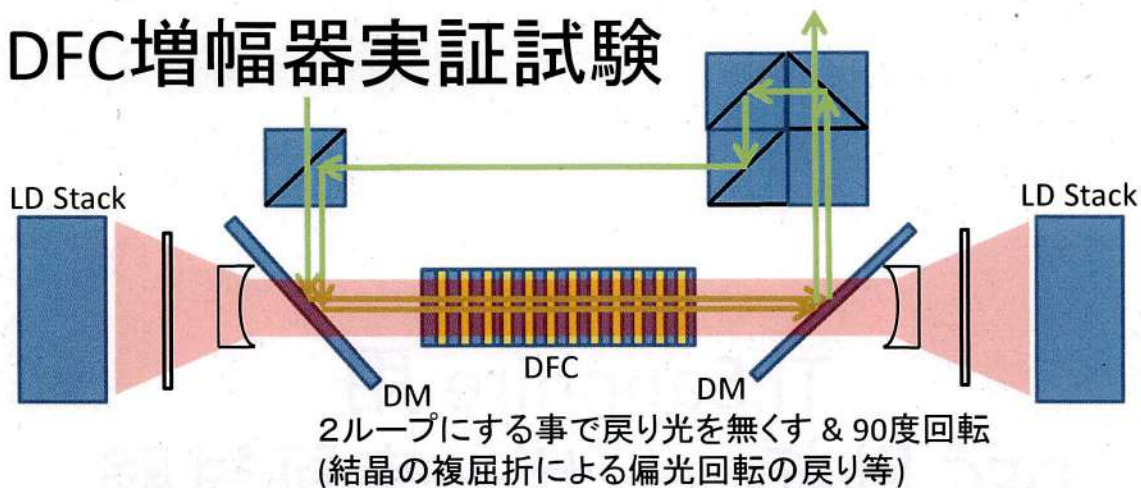
# 高強度レーザー開発

Ti:Sapphire 用  
DFC 励起レーザー実証試験

# Ti:Sapphire 用 DFC励起レーザー実証試験

- 初期実証試験 @ KEK Thales  $\alpha$ -10
  - 現状仕様 : 300mJ / 30fs = 10 TW  $\leftarrow$  1 J @ SHG  $\leftarrow$  2J
  - Long Pulse: 1.5 J / 150 fs = 10 TW  $\leftarrow$  5 J @ SHG  $\leftarrow$  10J
- 最終目標のDFC励起レーザー (J-KAREN相当)
  - 15 J / 30fs = 500 TW
  - $\leftarrow$  25 J before compression
  - $\leftarrow$  50 J @ 532nm  $\leftarrow$  100 J @ 1064nm (55 J for J-KAREN)

## DFC増幅器実証試験

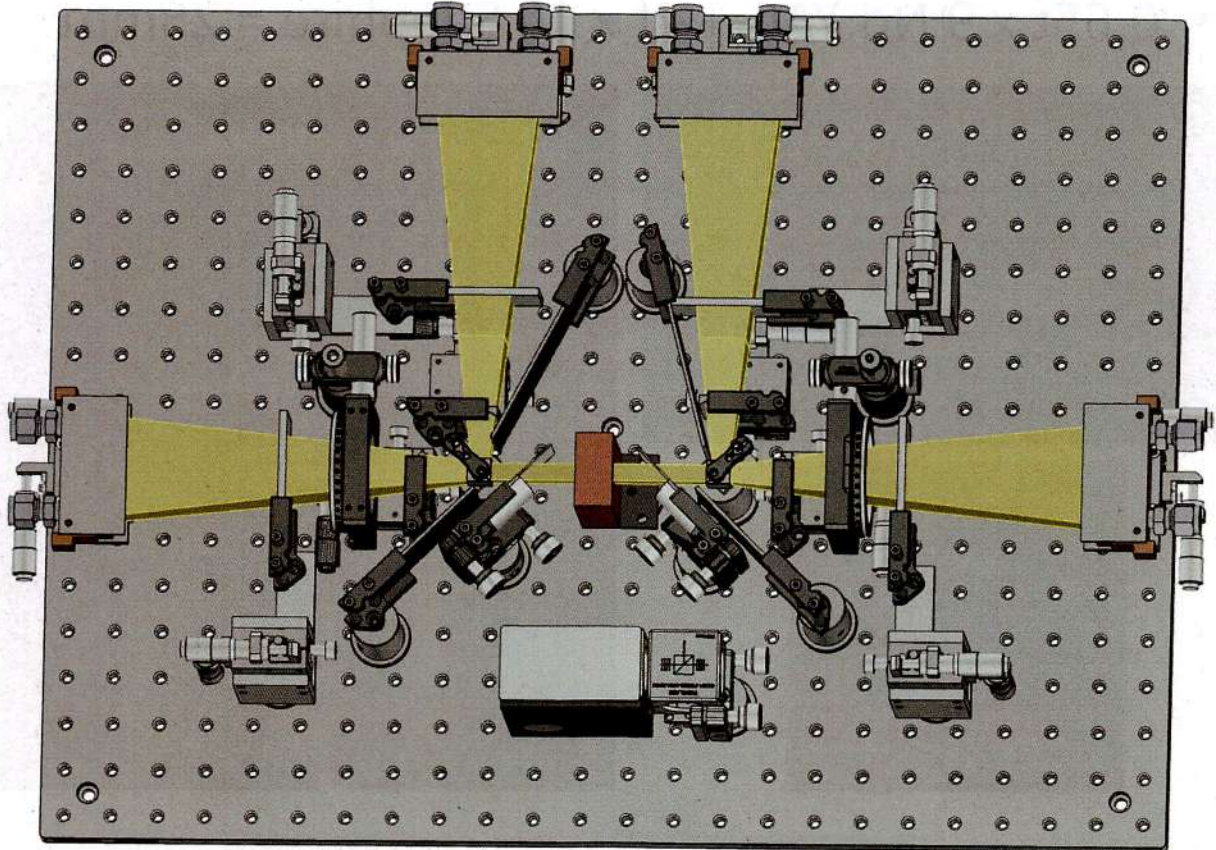


- 増幅率
  - 8 kW x 4 (両方向On-Axis励起) x 250 $\mu$ s = 8 J / cm<sup>2</sup>
  - G= 5 for L(Nd:YAG) = 1.3cm(1/e<sup>2</sup>) (2-passで50倍)
- Pump(885nm)                      Output  
4 stack(32kW, 8J)                       $\rightarrow$  2 J  $\rightarrow$  1 J @ SHG



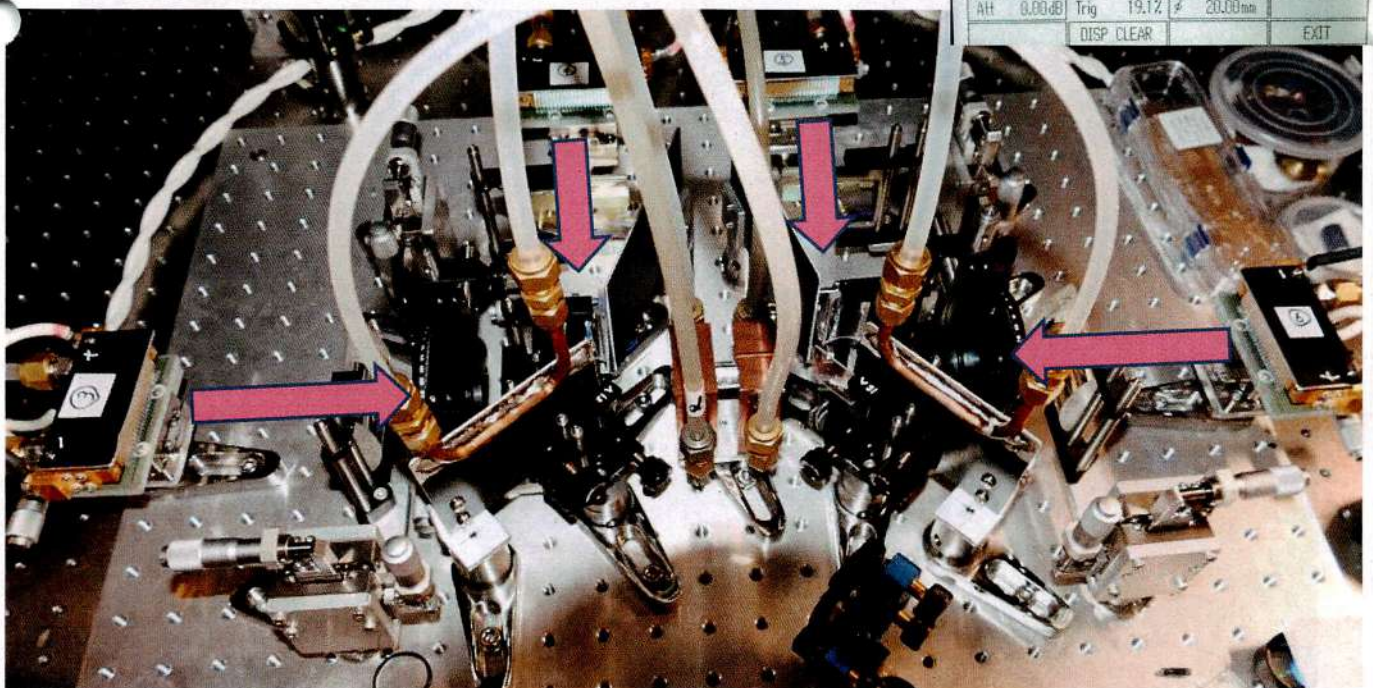
# DFC増幅器実証試験

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



## 4-pump

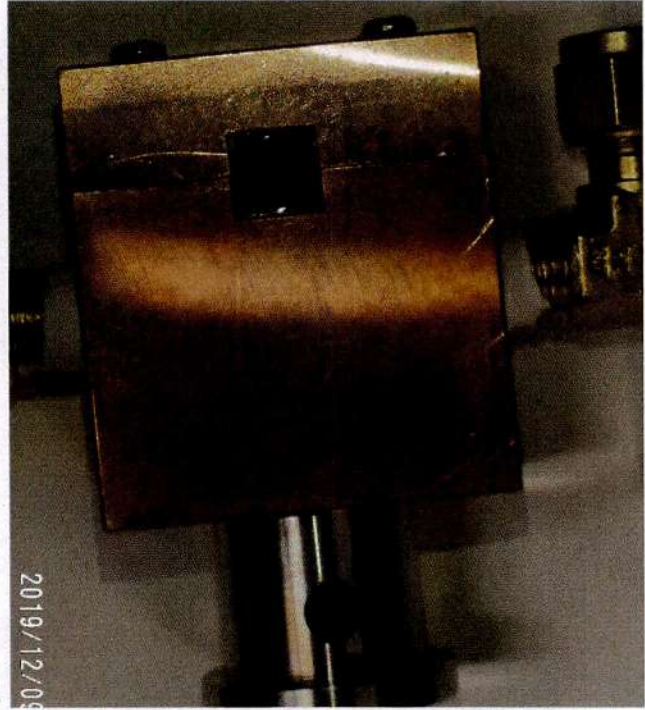
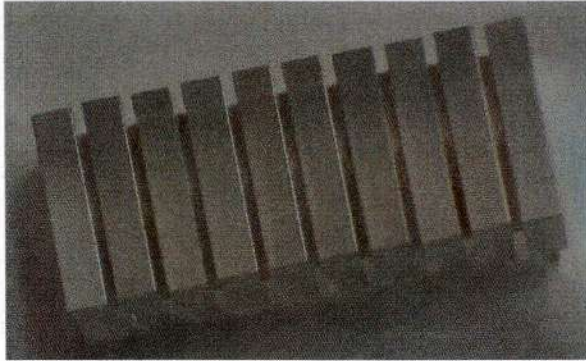
- $8.85 \text{ kW} \times 250 \mu\text{s} \times 4 = 8.85 \text{ J pump}$





## Nd:YAG DFC

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



## Nd:YAG DFC

- $8.85\text{kW} \times 250\mu\text{s} = 2\text{J pump}$



# まとめ

- 超高電界 (> 数100MV/m) の加速方式

- THz 加速

- 低密度プラズマによるレーザープラズマ加速

- 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

- or Nd系の広帯域DFCに期待

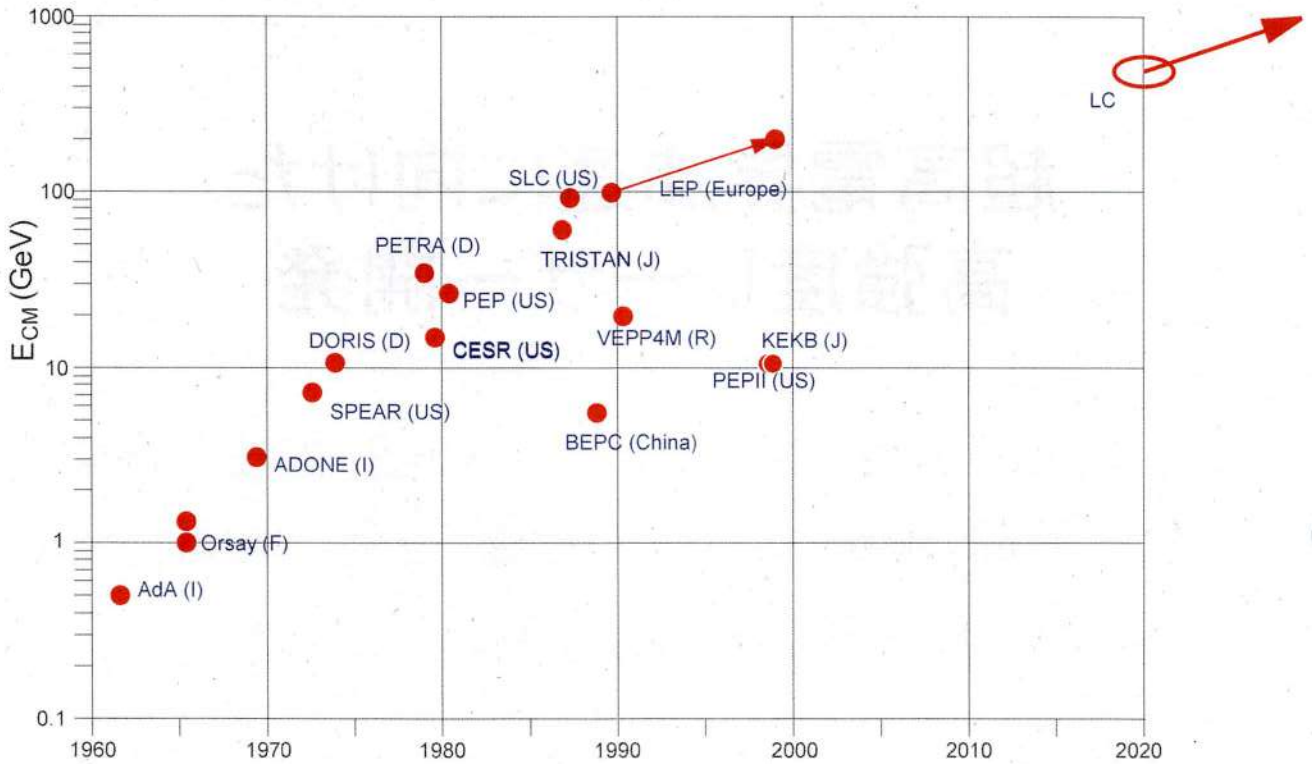
	プロトタイプ	ステージゲート
Nd:YAG DFC: 1 cm <sup>2</sup>		2.5 cm <sup>2</sup>
励起 885nm LD stack:		
8kW x 4 = 8J		20kW x 4=20Jx2
1064nm: 2 J		10J
532nm: 1J		5 J
Ti:Sapphire: 0.5 J		2.5J
	10 TW	50 TW

# 超高電界加速に向けた 高強度レーザー開発

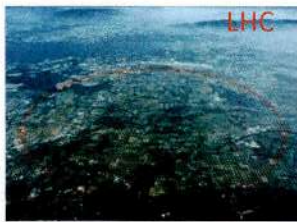
KEK: 吉田 光宏, 張 叡, 周 翔羽, 本田 洋介  
分子研/理研: 平等 拓哉, 石月 秀貴  
他、未来社会創造事業レーザーG

## 高エネルギー物理での 超高電界加速

# $e^+e^-$ Colliderの歴史



## Elementary particle physics in next 10-20 years



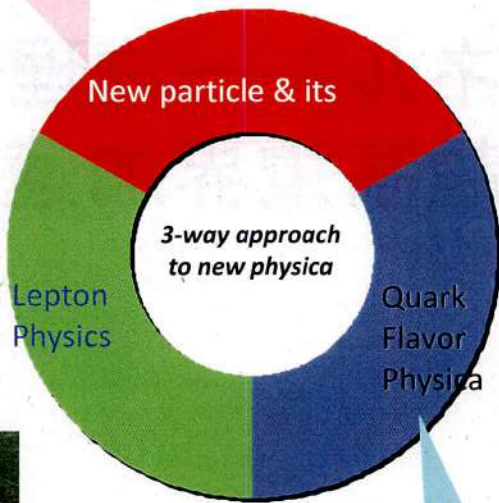
LHC

Energy Frontier  
LHC, ILC, ...



ILC

$\nu$  exp.,  $\mu$  LFV,  $\tau$  LFV,  
 $g_{\mu-2}$ ,  $0\nu\beta\beta$  etc.



KEKB upgrade



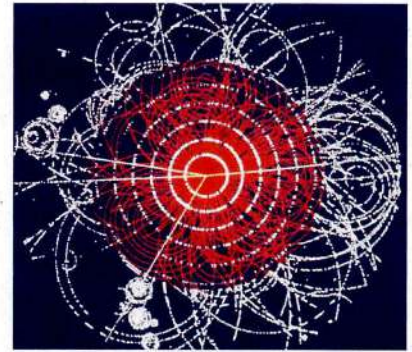
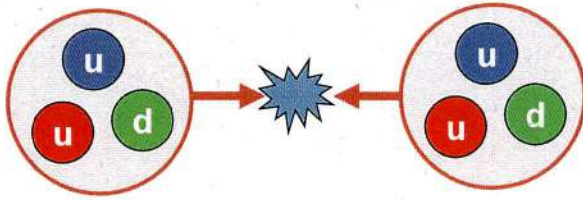
J-PARC



B-Factor,  
LHCb, K-Decay,  
nEDM etc.

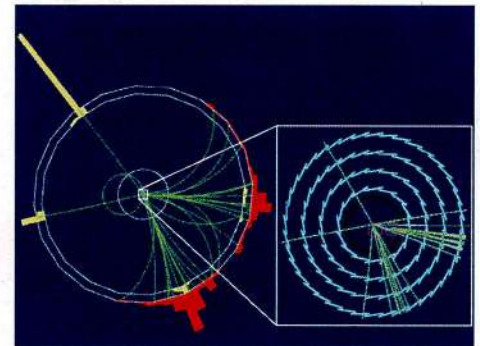
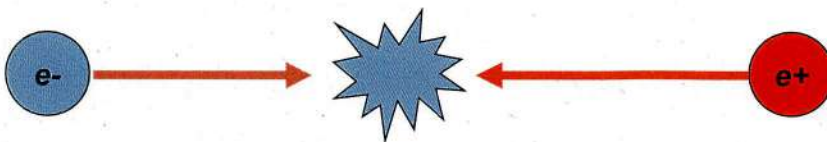


# Large Hadron Collider (LHC)



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

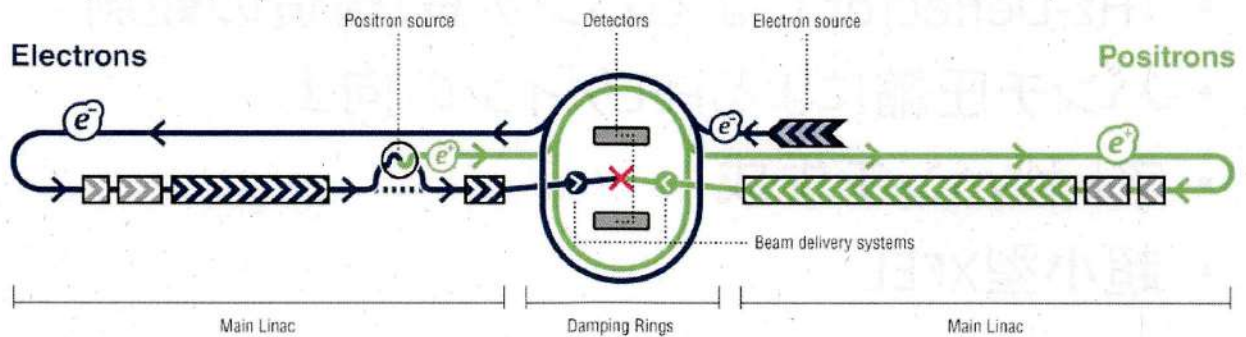
**LHC + ILC = determine new laws of nature**

June 22, 2012

University

5

# ILC Accelerator



現在の計画だと 250GeV

→ 増強の可能性としてアフターバーナーの検討



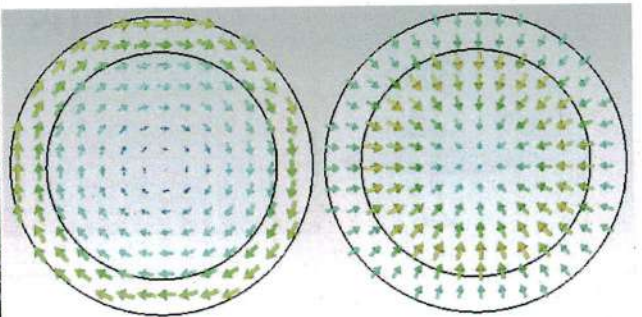
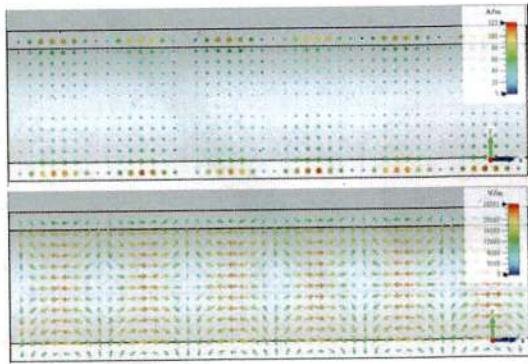
# XFEL光源でのTHzへの期待

## XFELでのテラヘルツ加速への期待

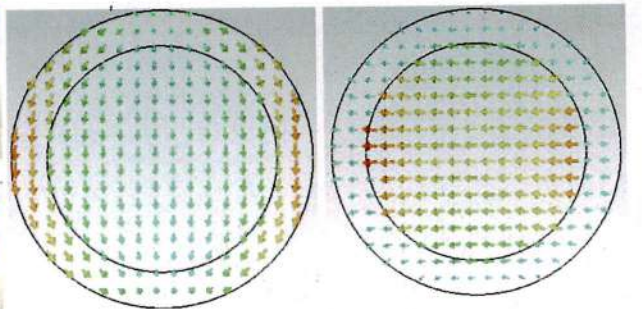
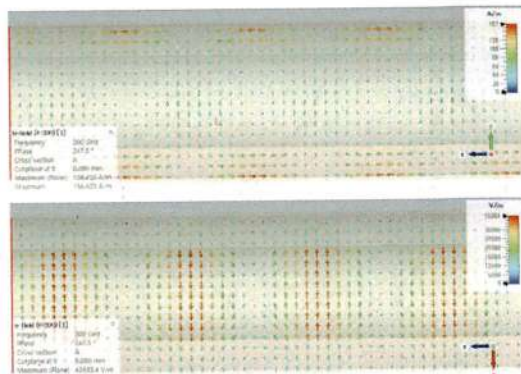
- THz-Deflector によるバンチ長/構造の観測
- バンチ圧縮によるFELゲインの向上
- アト秒バンチ生成
- 超小型XFEL

# DWA

加速モード



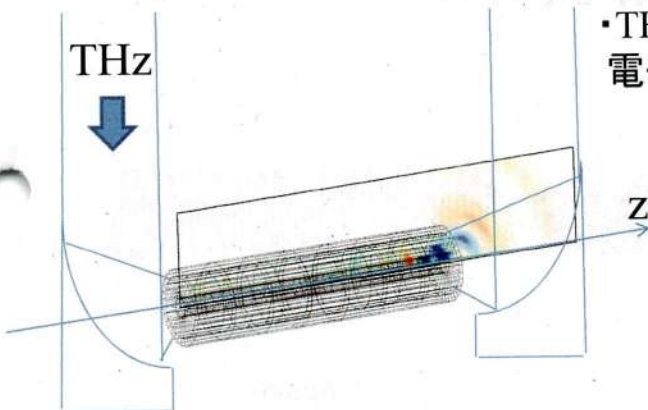
偏向モード



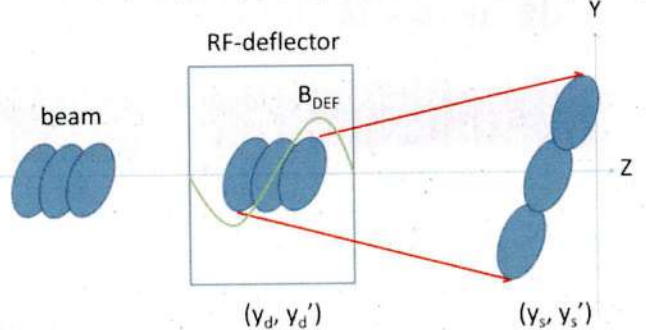
さらに円偏波にすれば →

## THz 加速器の利用

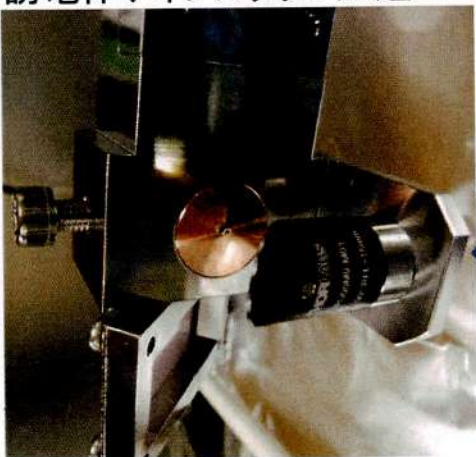
・THz ディフレクター(直線偏波)による  
電子ビームのアト秒時間分解能での観察(1mJ)



誘電体ディフレクタ / 加速ユニット



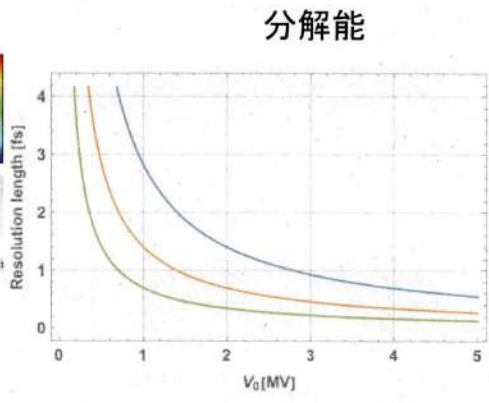
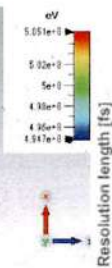
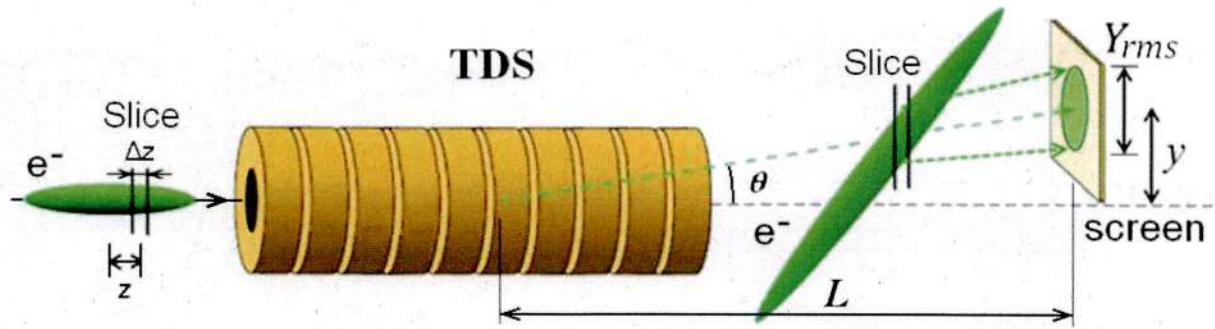
・THz誘電体加速器(ラジアル偏光)による  
バンチ圧縮 → 尖頭電流向上/アト秒電子生成(10mJ)  
→ 将来の小型(1/10)高繰り返し XFEL (~300 MV/m)



MgO:PPLN(IMS製)による高強度THz生成



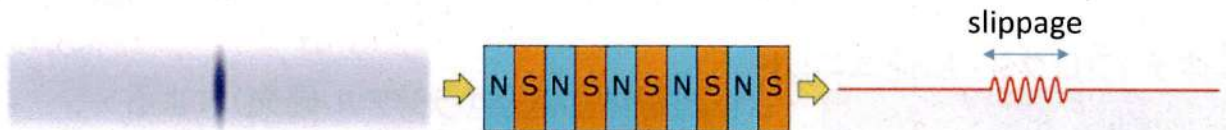
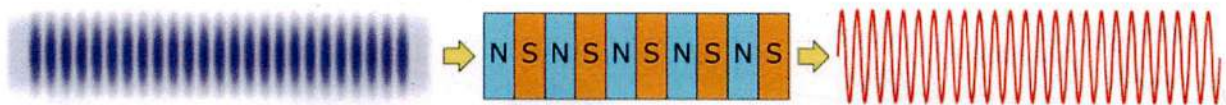
# THz-Deflector



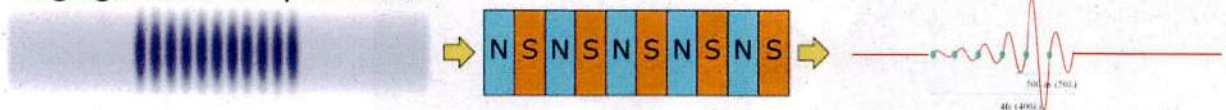
- $Y_{rms}=0.15$ [mm]
- $Y_{rms}=0.3$ [mm]
- $Y_{rms}=0.6$ [mm]

# アト秒XFEL

X線 1 cycle =  $1\text{\AA} = 0.3\text{ as}$



High gain shortest pulse SASE



Electron beam density

Undulator

# 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

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

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
- ・ 電子ビーム駆動
- ・ 陽子ビーム駆動

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 < 40MV/m
- 誘電体 :  $Q \sim 10^6$

レーザー高強度化は著しく速い

SLAC/KEK等で可能&世界最高電圧の実績

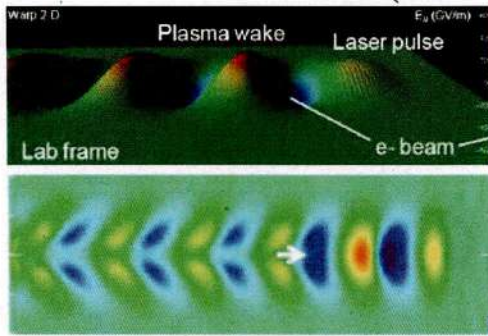
CERN/J-PARC等で可能→バンチ圧縮が問題



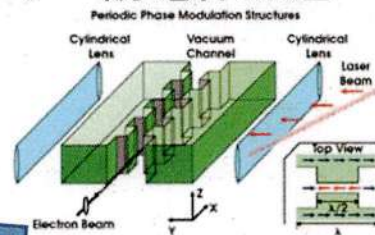
# 超高電界加速方式

## レーザー駆動加速器

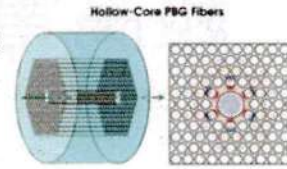
### レーザープラズマ加速(LWFA)



## レーザー誘電体加速



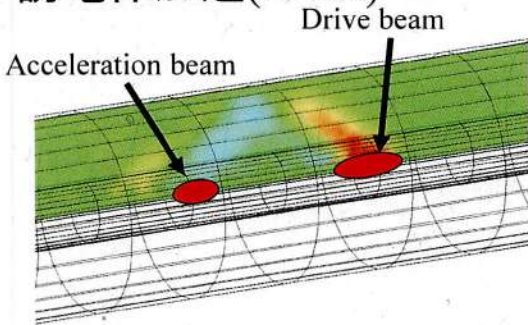
Laser or THz



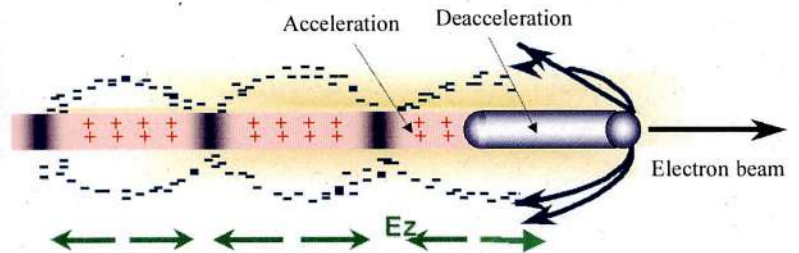
これらは  
THzの加速器

## ビーム駆動加速器

### 誘電体加速(DWA)



### プラズマ加速 (PWFA)



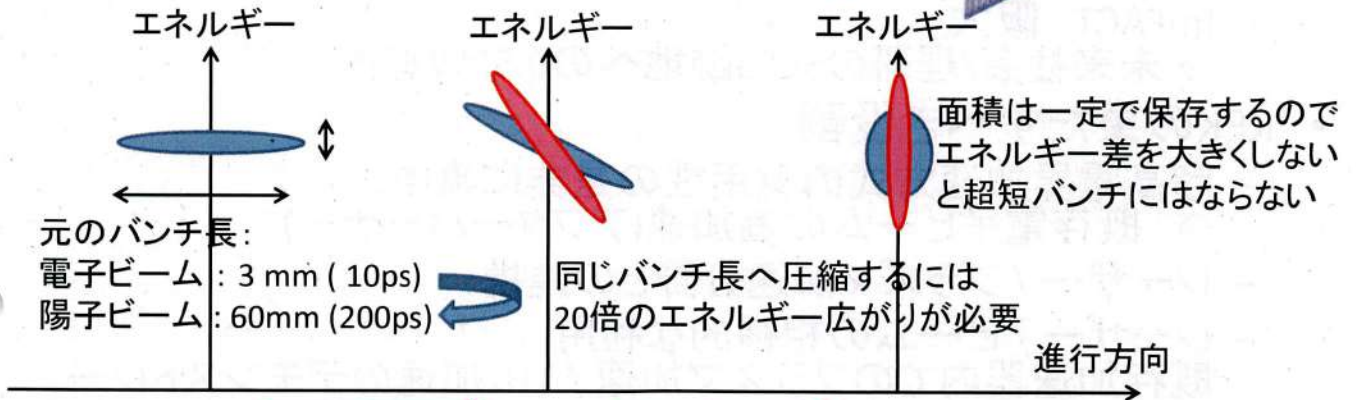
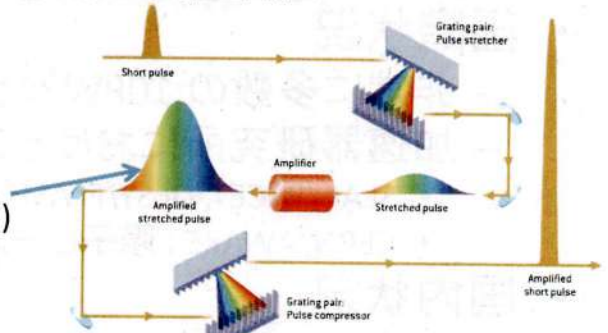
# エネルギー源と電界

	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
駆動 エネルギー	6/12GHz 20J [m] = 40MW × 500ns	1.3GHz 200J [m] = 300kW × 700μs	5THz (50fs) 70J (SLAC) = 23GeV × 3nC 35J (KEK) = 7GeV × 5nC	5THz (50fs) <b>40J (→ 1kJ)</b>	? THz (後述) <b>15kJ (SPS)</b> = 450GeV × 30nC 150kJ (LHC) = 7TeV × 20nC <b>300kJ (J-PARC MR)</b> = 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) / <b>300kW/25MW</b> <b>(J-PARC)</b>
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)

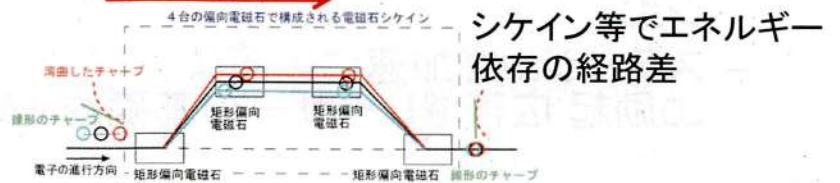
# 超短パルスを作るための圧縮

- 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



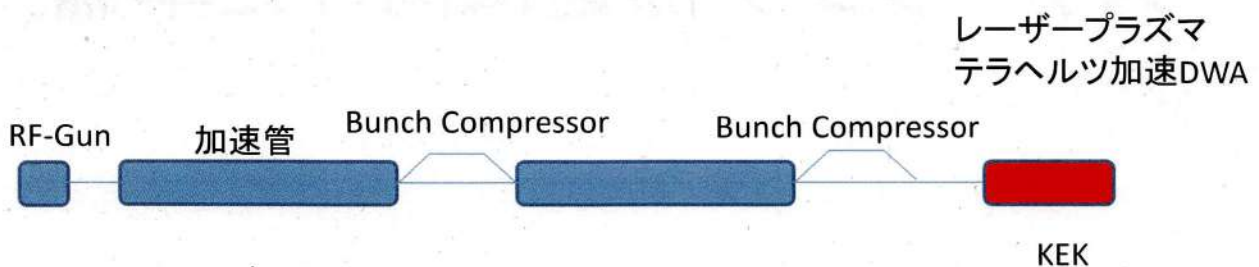
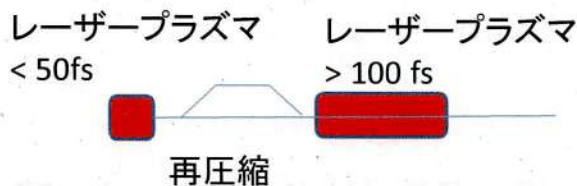
## KEKにおける超高電界加速による ステーjing加速に向けた準備



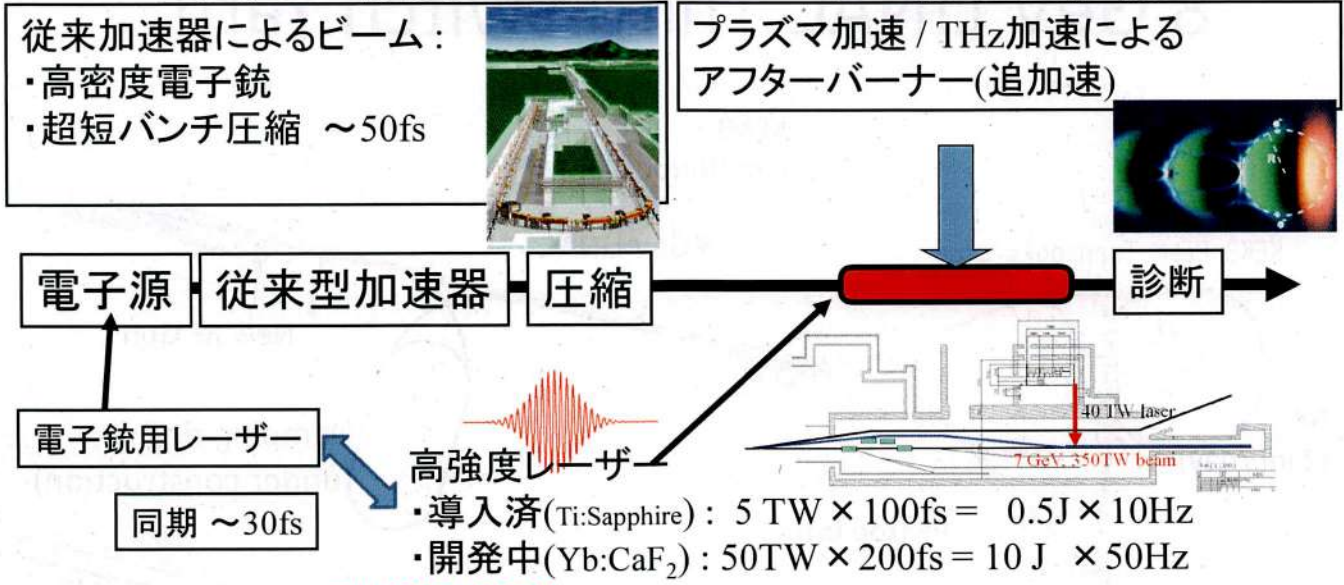
## 超光電界加速の状況

- 国際状況
  - 非常に多数の 10PW クラスのレーザー施設
  - 加速器研究所におけるプラズマ加速
    - SLAC/FACET, DESY/FLASH Forward : 電子ビームによるプラズマ加速
    - CERN/AWAKE : 陽子ビームによるプラズマ加速
- 国内状況
  - ImpACT : 阪大
    - 未来社会/理研のSCSS跡地への0.5PW導入
- KEKの果たすべき役割
  - 超高電界加速方式の実用性の是非に集中
    - 既存電子ビームの追加速(アフターバーナー)
  - レーザー / プラズマ加速分野との連携
  - レーザー / ビームの相補的な利用  
既存加速器内でのプラズマ加速 / THz加速のデモンストレーション
  - ステージング加速に最適な  
LD励起 広帯域レーザーの基礎的 R&D

## ステージングレーザー加速



# プラズマ加速によるアフターバーナー(追加速)実験



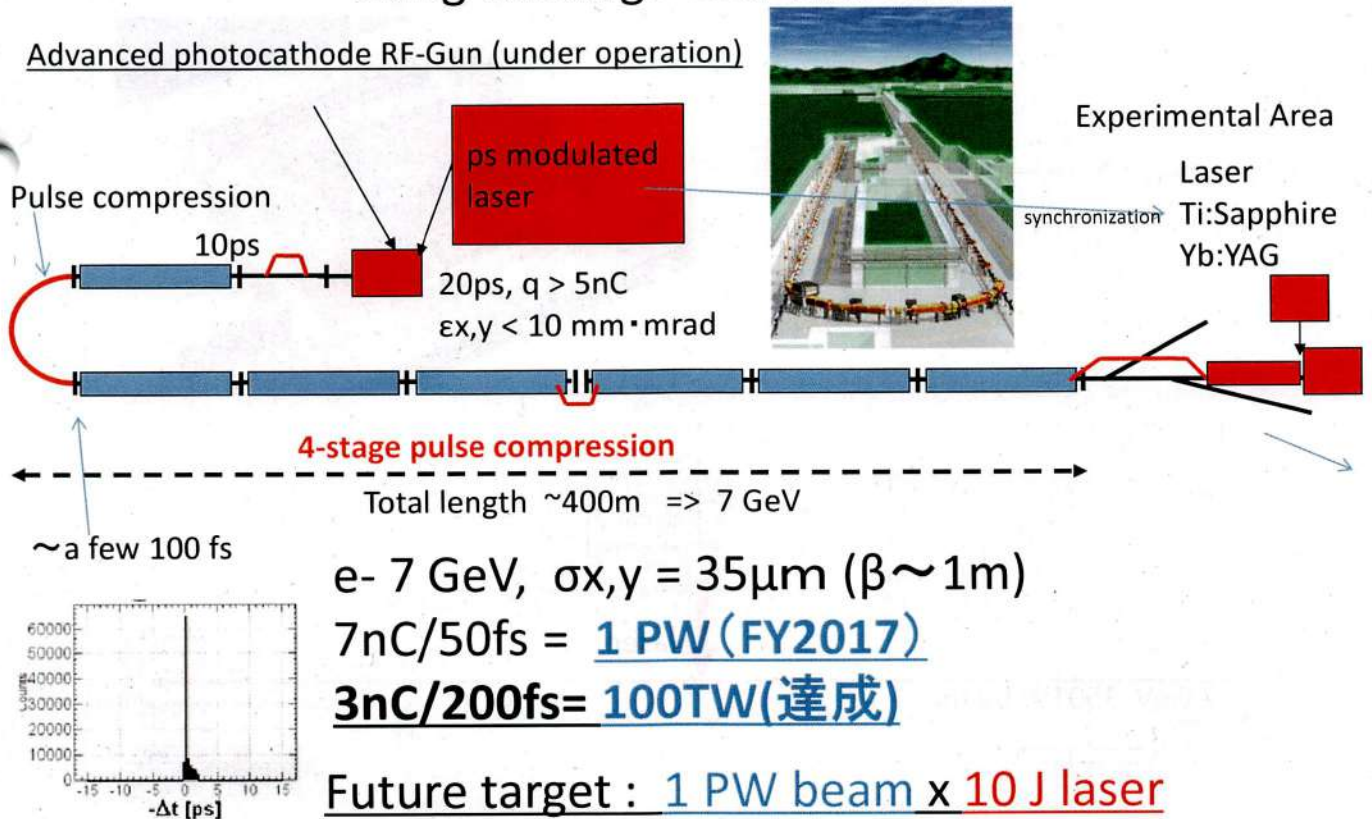
プラズマ加速の中で最も確実な方法によりアフターバーナー実証実験を行う。

- ・エネルギー源としてレーザー/ビーム駆動を相補的に使用
  - ・THz加速 or プラズマ振動の線形領域(低密度プラズマ)
  - ・従来型加速器による外部注入  
 (Self Injection等非線形領域は KEK ではやらない)
- 高電荷 ~5nC、超低エミッタンス < 100 pm·rad  
 非常に安定 (エネルギー ΔE/E < 0.1%) で超短バンチの電子ビーム  
 → 超高電界加速の最適化、測定等

既存加速器内で  
 加速デモンストレーションを  
 行い認知度を高める

## Facility concept of Ultra High Intense Beam-Laser Complex using existing 7 GeV KEK LINAC

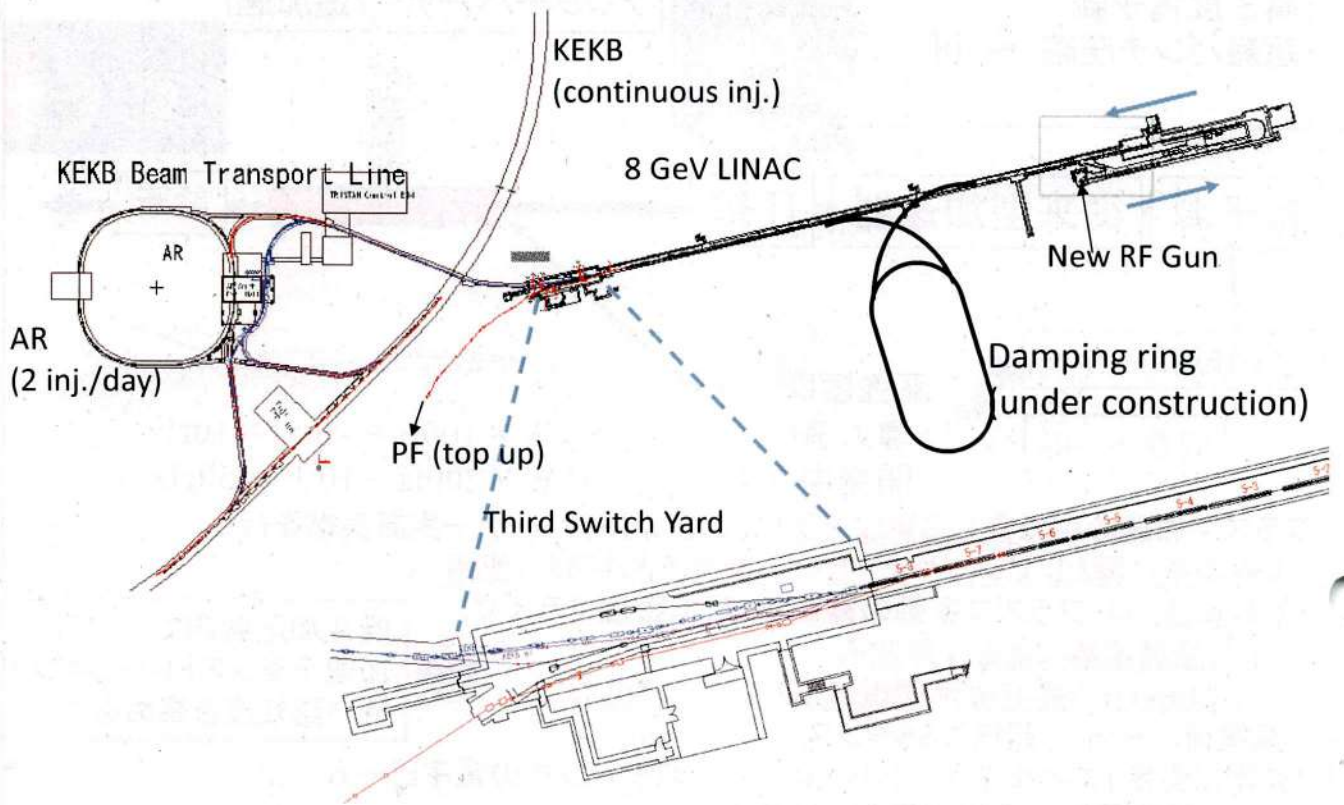
Advanced photocathode RF-Gun (under operation)



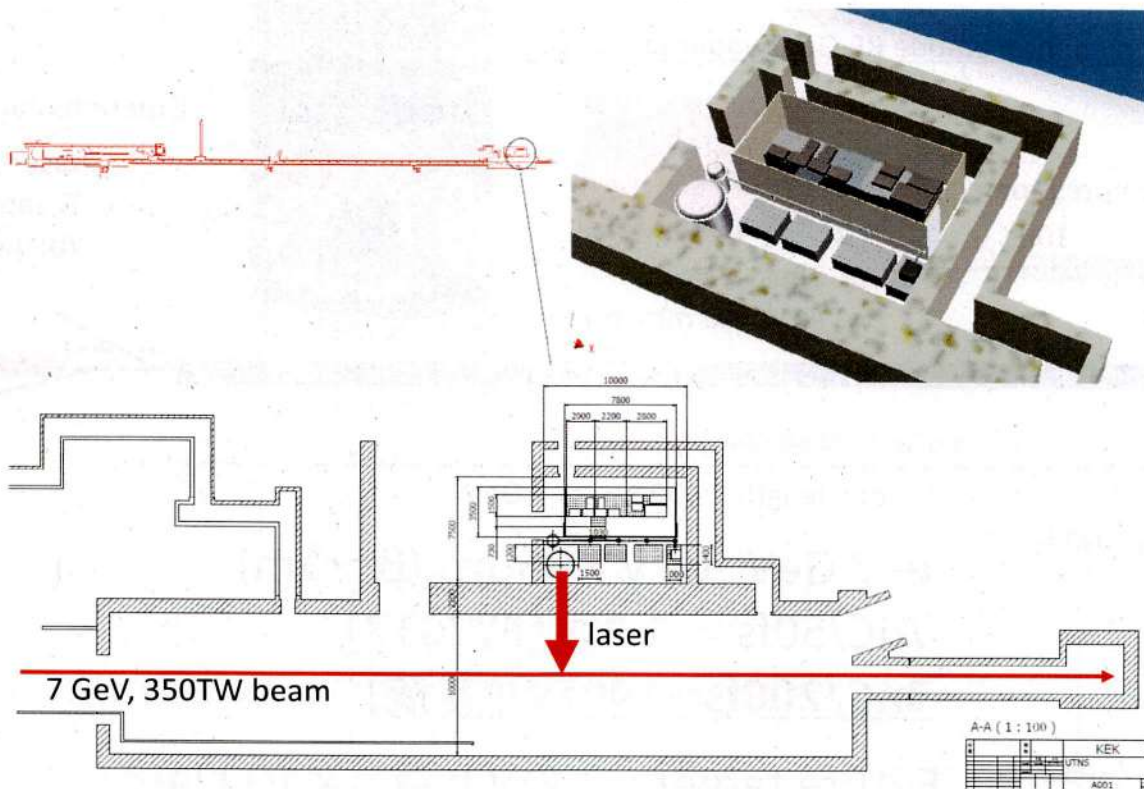
(upgrade to 100J in the future)



# 8 GeV LINAC Third Switch Yard

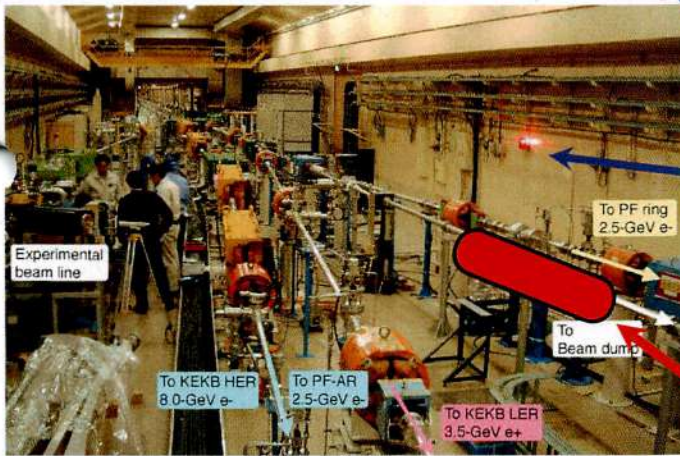
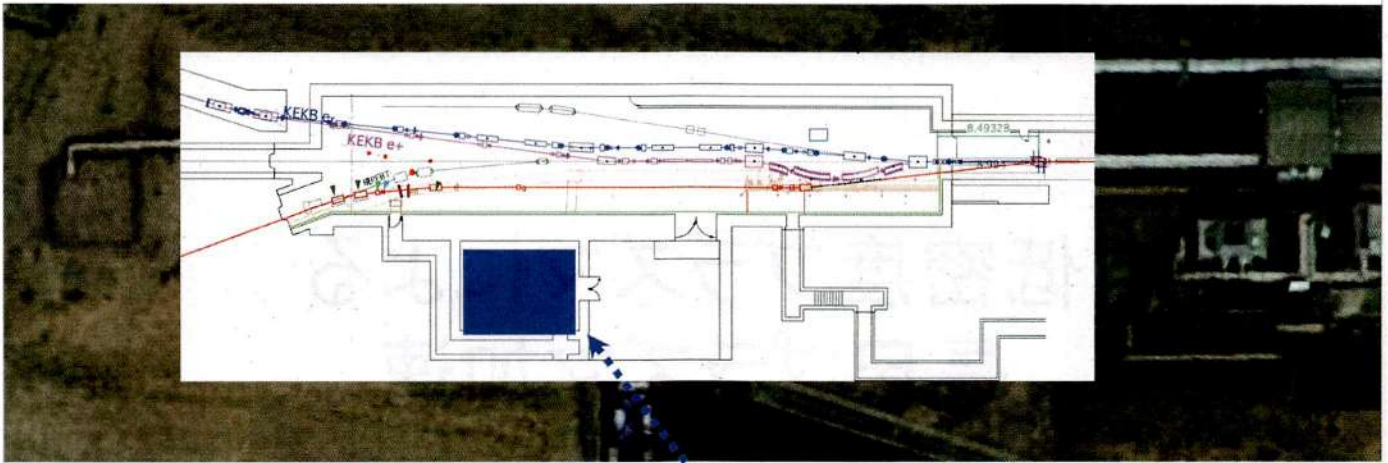


## Experimental area for laser plasma after burner





# Experimental area for laser plasma after burner

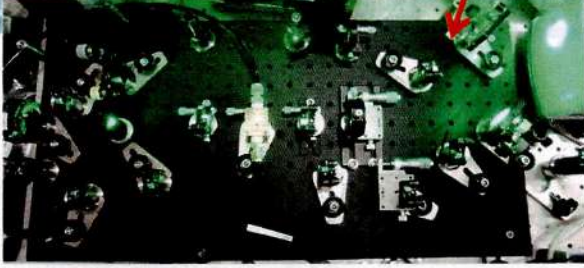
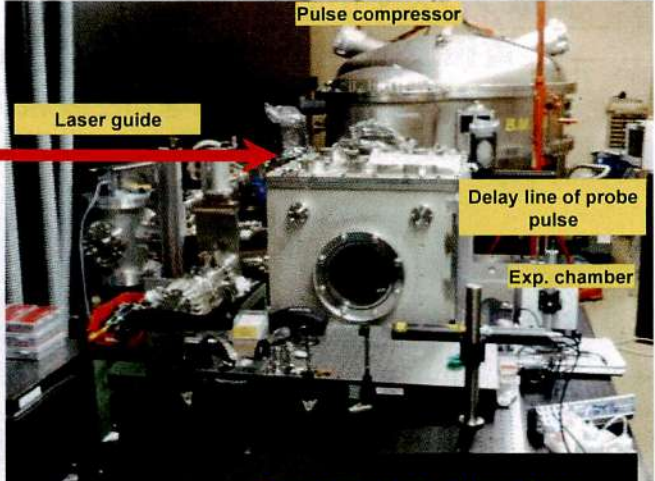
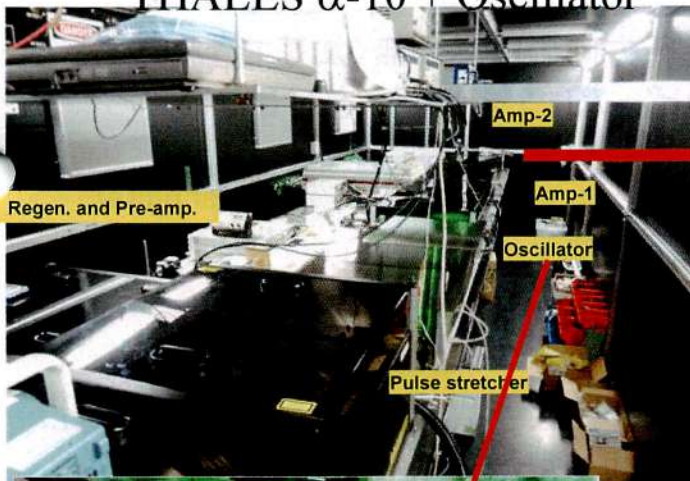


Ti:Sapphire Laser  
7 TW => 100TW(future)

Compressor  
Vacuum chamber under installation

## FY2015成果 : Ti:Sapphire Laser from U-Tokyo Uesaka-lab

### THALES $\alpha$ -10 + Oscillator



同期可能な  
フェムト秒  
発振器開発

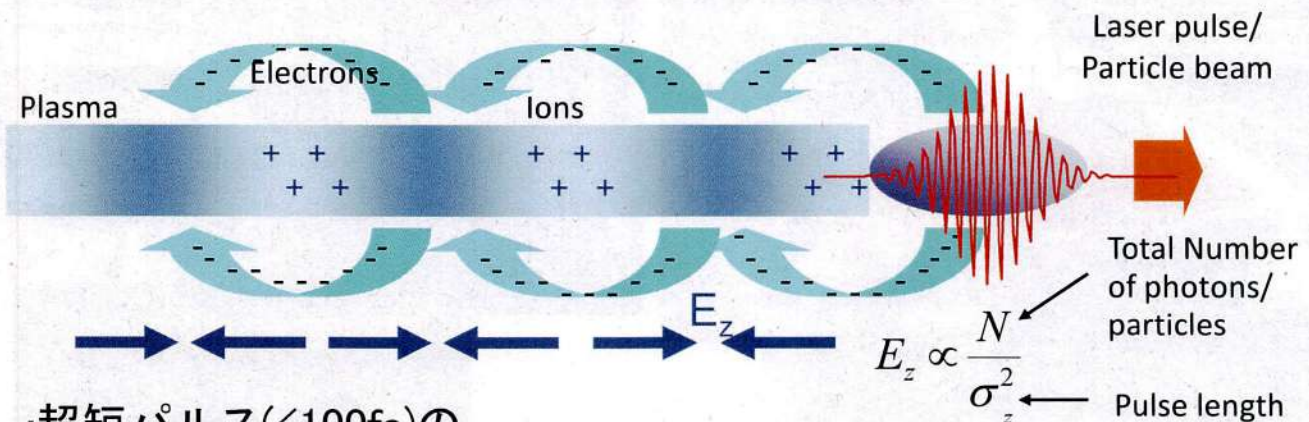
300mJ/40fs = 7 TW at present  
=> 25 TW (upgrade compressor and Nd:YAG pump) in FY2016  
=> 100 TW (Yb:YAG pump) 上坂先生、小山先生、山崎先生の尽力により移設



# 低密度プラズマによる 長尺プラズマ加速

## THzのプラズマ振動による加速

- 何故プラズマが必要か？
  - 電磁波(レーザー)は横波なので進行方向の電界が無く加速できない
  - ビームも相対論的になると後続のビームにエネルギーを渡せない  
(後続のビームが駆動ビームを減速しないと変換できない)



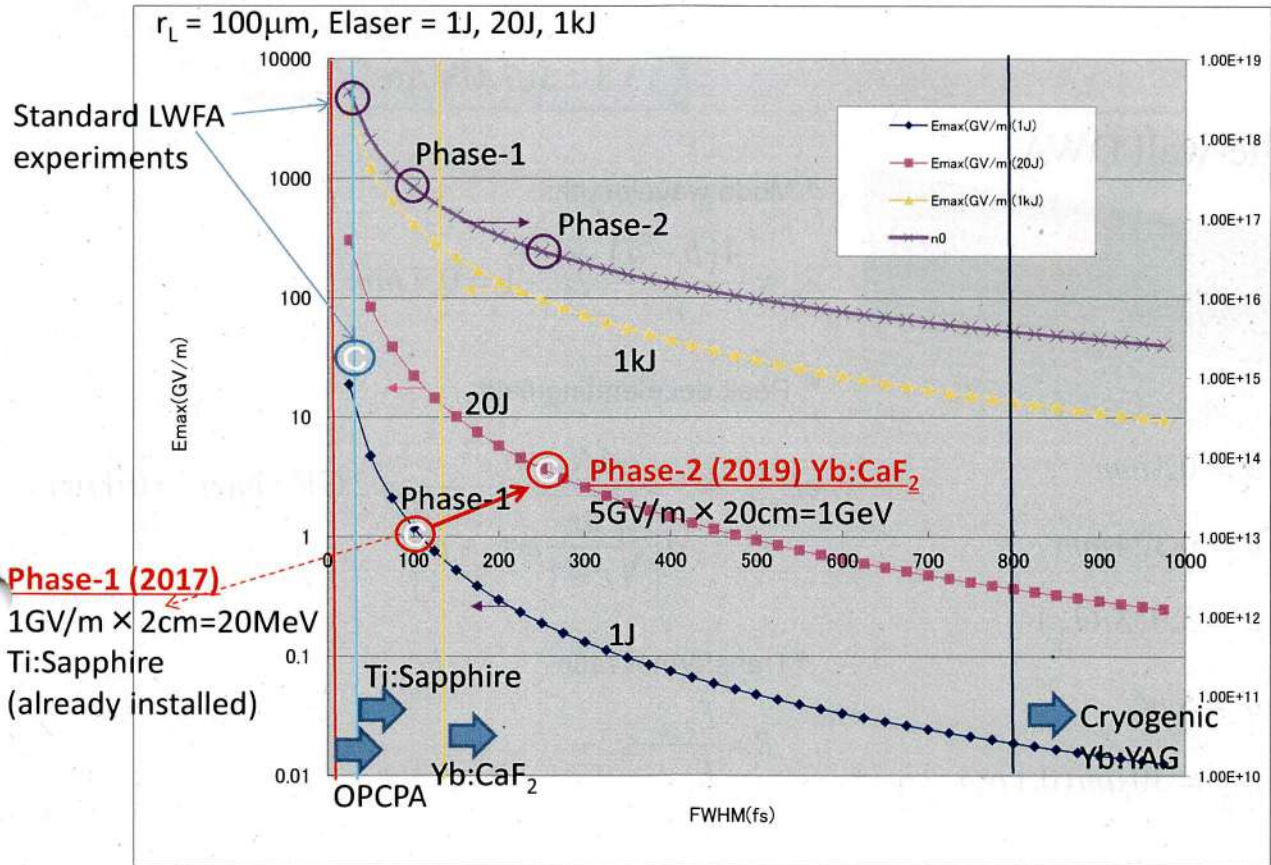
・超短パルス(<100fs)の

- レーザー場のポンデロモーティブ力
- または電子・陽子バンチのクーロン力  
がプラズマ電子を排除。

・プラズマイオンの復元力で電子を引き戻す。

・プラズマ振動が起こる → このプラズマ振動の周波数が THz

# LWFA アフターバーナーの加速パラメーター



## 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 $\mu\text{m}$ 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 Wall Accelerator (DWA) :

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

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/上坂研との共同開発 基盤A



# DWA

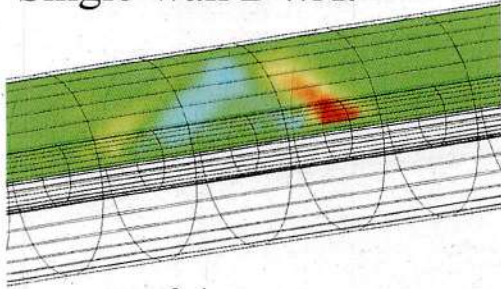
## Breakdown Limits on Gigavolt-per-Meter Electron-Beam-Driven Wakefields in Dielectric Structures

M. C. Thompson,<sup>1,2,\*</sup> H. Badakov,<sup>1</sup> A. M. Cook,<sup>1</sup> J. B. Rosenzweig,<sup>1</sup> R. Tikhoplav,<sup>1</sup> G. Travish,<sup>1</sup> I. Blumenfeld,<sup>2</sup> M. J. Hogan,<sup>3</sup> R. Ischebeck,<sup>3</sup> N. Kirby,<sup>3</sup> R. Siemann,<sup>3</sup> D. Walz,<sup>3</sup> P. Muggli,<sup>4</sup> A. Scott,<sup>5</sup> and R. B. Yoder<sup>6</sup>

$13.8 \pm 0.7$  GV/m.

Fused silica, THz range,  
~psec exposure

### Single-wall DWA:



$a = 0.1 \text{ mm}$

$b = 0.324 \text{ mm}$

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

$q = 5 \text{ nC}$

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

- Mode wavelengths

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

- Peak decelerating field

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

- Transformer ratio

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

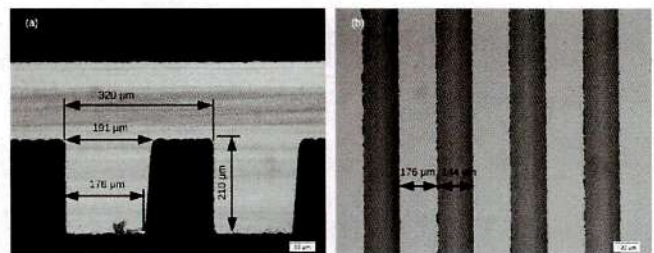
## THz帯DLA 用 Si 回折格子

### THz 光の加速器の利点:

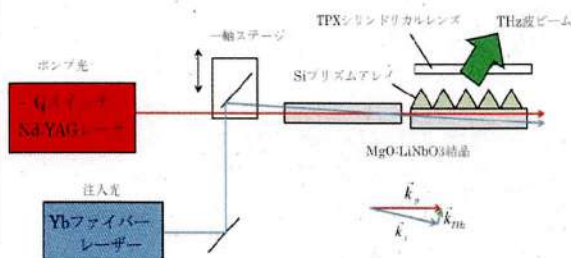
- 0.1 mm 程度の加速構造
  - 加速領域の体積が赤外のおよそ  $100^3$  倍
  - 加速構造の機械加工が可

- 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

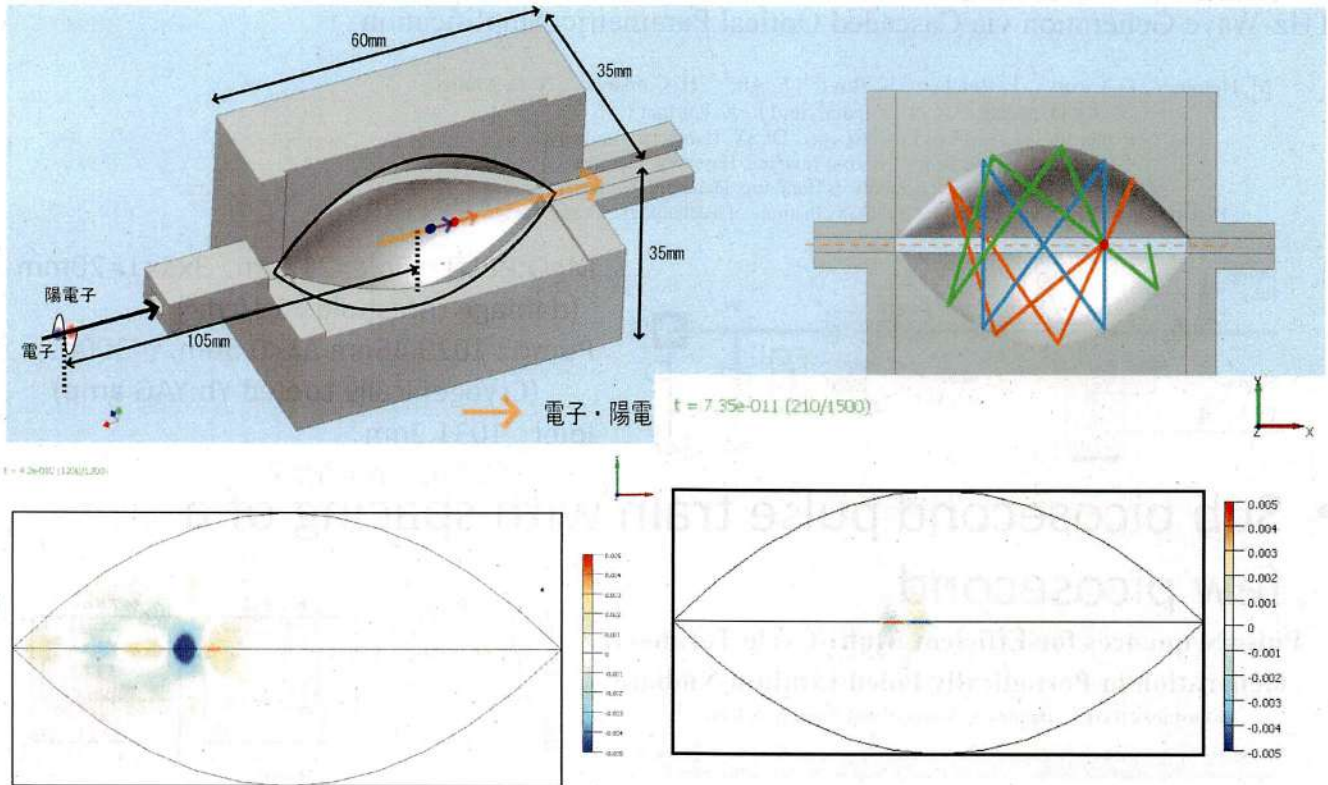


### KEK で共同開発中の高強度 THz レーザ



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



## レーザー駆動THz加速

小型化  
アト秒発生



# OPA – THz generation (カスケードが必要)

- DESY method

THz-Wave Generation via Cascaded Optical Parametric Amplification

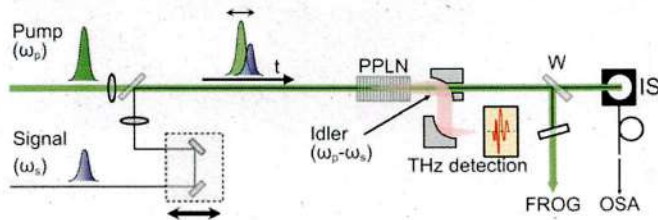
M. Hemmer<sup>1</sup>, G. Cirmi<sup>1,2</sup>, F. Reichert<sup>3</sup>, K. Ravi<sup>1,4</sup>, F. Ahr<sup>1,3</sup>, H. Çankaya<sup>1,2</sup>, N. H. Matlis<sup>1</sup>,  
O. D. Mücke<sup>1,2</sup>, L. E. Zapata<sup>1</sup>, and F. X. Kärtner<sup>1,2,3,4</sup>

<sup>1</sup> Center for Free-Electron Laser Science, DESY, Hamburg, Germany

<sup>2</sup> The Hamburg Center for Ultrafast Imaging, Hamburg, Germany

<sup>3</sup> Physics Department, University of Hamburg, Hamburg, Germany

<sup>4</sup> Department of EECS and RLE, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA



MgO:PPLN : Pole=212μm, 3x3x L=20mm  
(damage threshold : 1 J/cm<sup>2</sup>)

Pump : 1029.45nm Δλ<0.5nm, τ=300ps  
(Cryogenically cooled Yb:YAG amp)

Idler : 1031.2nm

=> 0.5 THz η = 5% ?

- Sub picosecond pulse train with spacing of a few picosecond

## Pulse Sequences for Efficient Multi-Cycle Terahertz Generation in Periodically Poled Lithium Niobate

Koustuban Ravi<sup>1,3\*</sup>, Damian N. Schimpf<sup>1</sup> and Franz X. Kärtner<sup>1,3</sup>

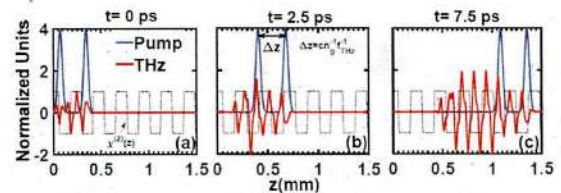
<sup>1</sup> Center for Free-Electron Laser Science, Deutsches Elektronen Synchrotron, Hamburg 22607, Germany

<sup>2</sup> Department of Physics and the Hamburg Center for Ultrafast Imaging, University of Hamburg, Germany

<sup>3</sup> Department of Electrical Engineering and Computer Science, Research Laboratory of Electronics, Massachusetts

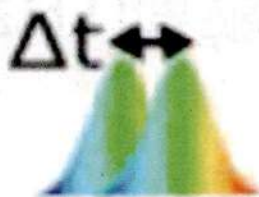
Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA

[koust@mit.edu](mailto:koust@mit.edu)



## MgO:PPLN / OPA THz generation

- MgO:PPLN : Pole=212μm, 10x20x L=40mm  
(damage threshold : 1 J/cm<sup>2</sup> => target : 2J input)
- 1030-45 nm, τ=1ps, Δt ~ 1ps



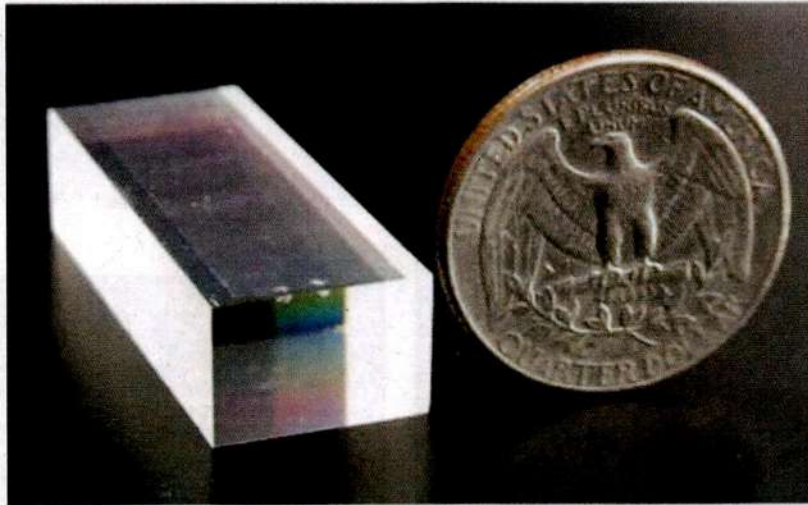
Further

- Very precise synchronization is required with RF accelerator  
(especially with RF-Gun photocathode laser based on Yb-fiber / Nd:YAG hybrid laser system)



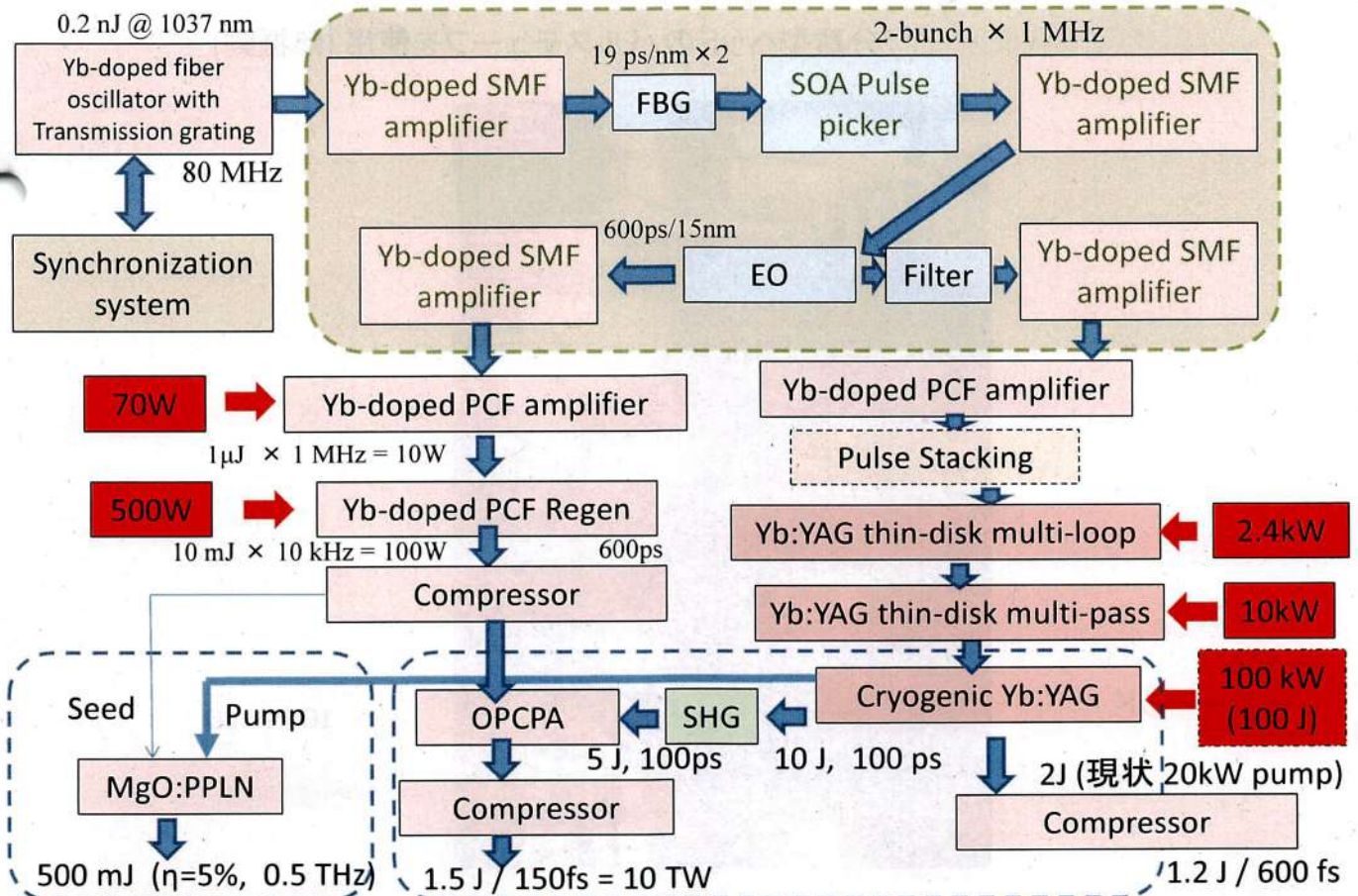
# 分子研製の大型の MgO:PPLN

- 10 mm thickness



5% 変換効率が得られれば  
2J → 100mJ THz が可能なはず

## Yb:PCF/YAG + OPCPA + MgO:PPLN



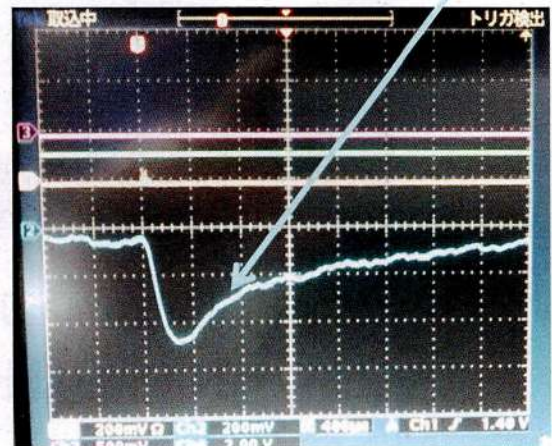
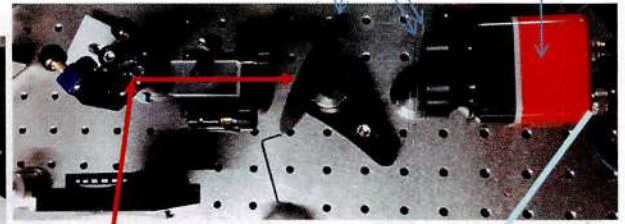
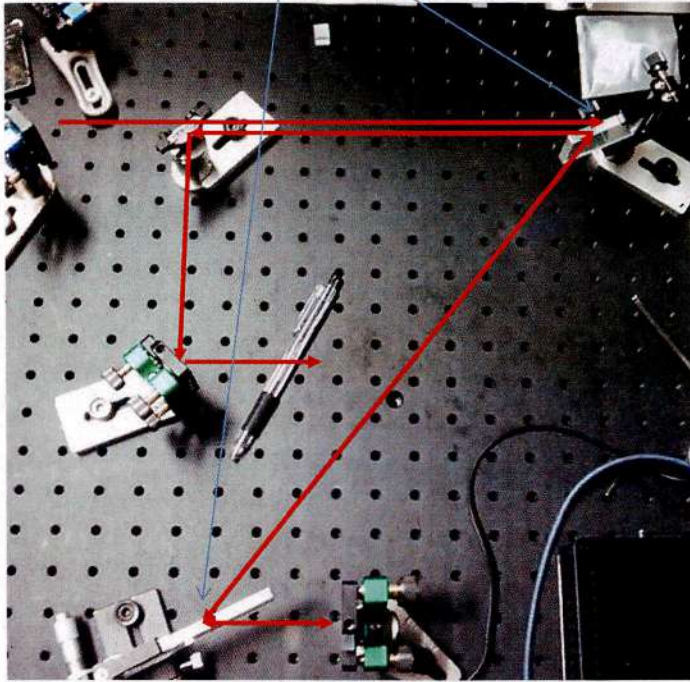


# Compressor & PPLN

Grating : 1750 lines/mm

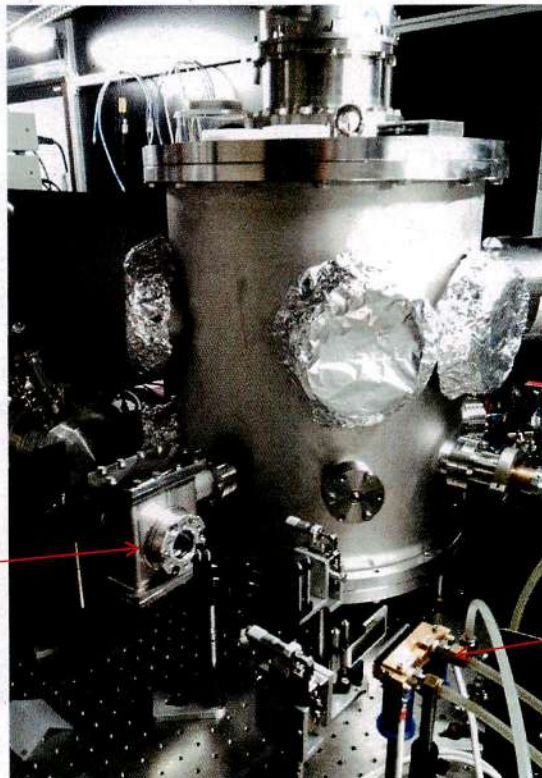
Silicon wafer  
with metal  
mesh filter x 3

THz  
Detector



# 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)



Yb:YAG  
レーザーヘッド

10 kW LD