

Powerchip による THz-DLAの基礎研究

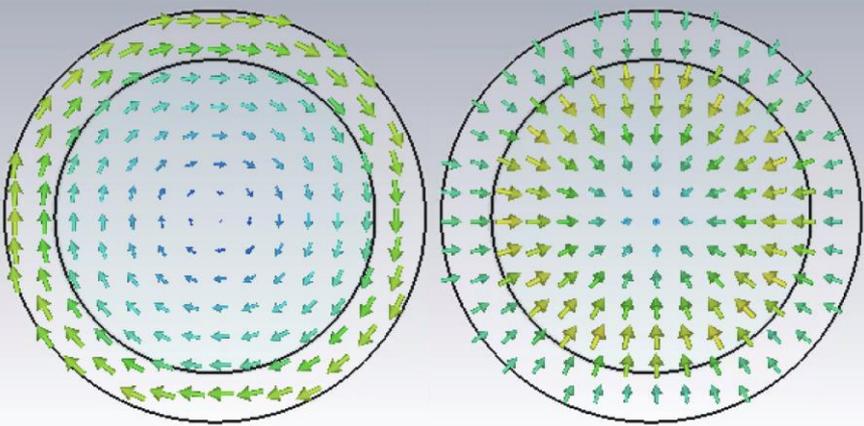
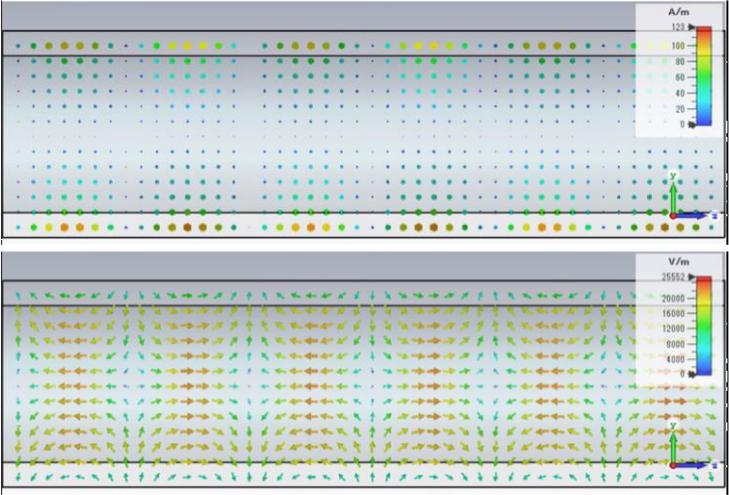
KEK: 吉田 光宏, 張 叡, 周 翔羽, 本田 洋介
分子研/理研: 平等 拓載, Arydas Kausas,
Vincent Yahia, 石月 秀貴

XFELでのテラヘルツ加速への期待

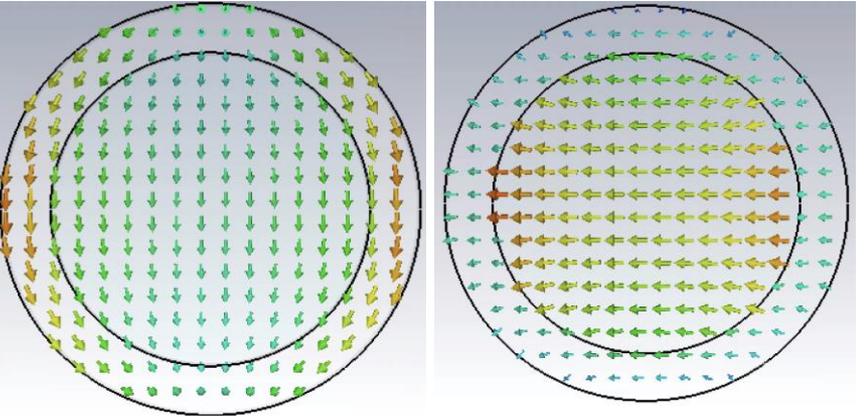
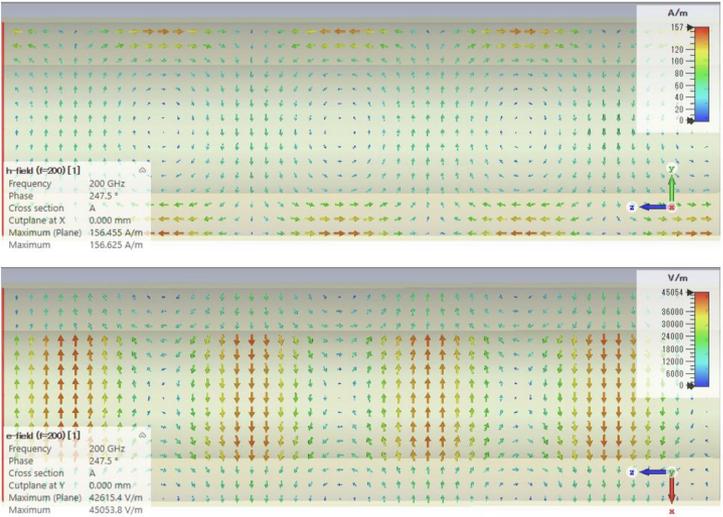
- THz-Deflector によるバンチ長/構造の観測
- バンチ圧縮によるFELゲインの向上
- アト秒バンチ生成
- 超小型XFEL

DWA

加速モード



偏向モード

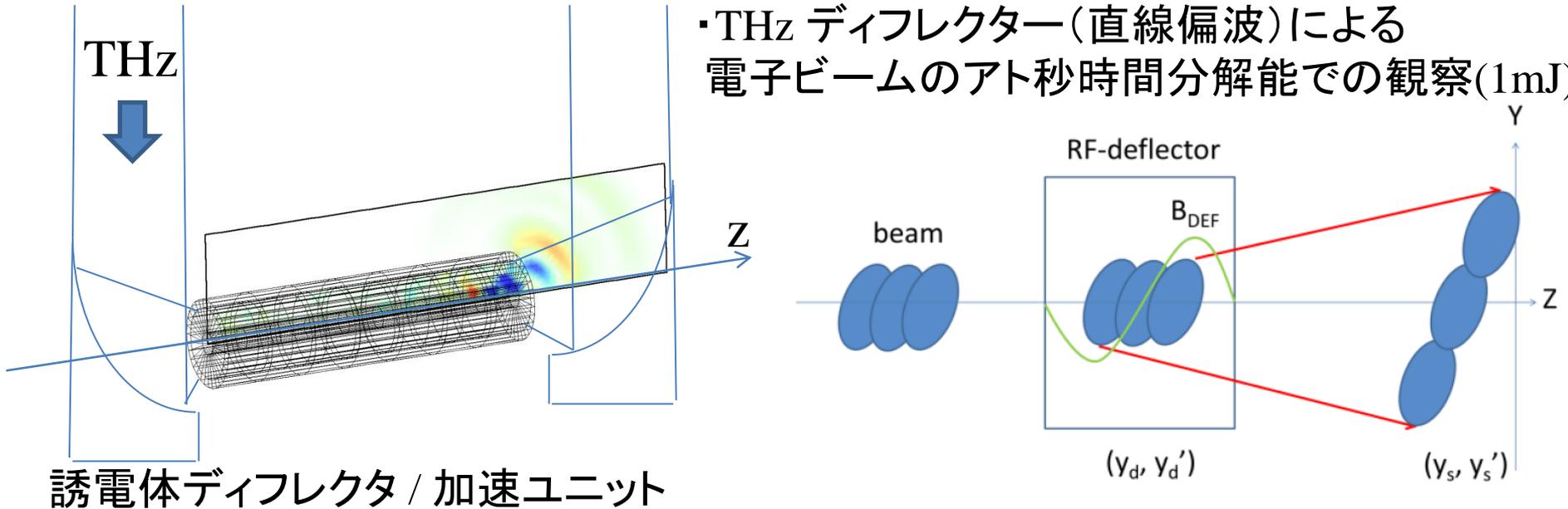


さらに円偏波にすれば



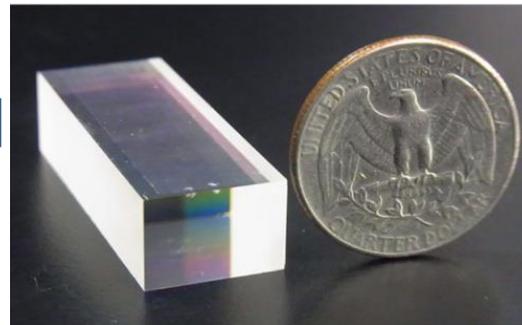
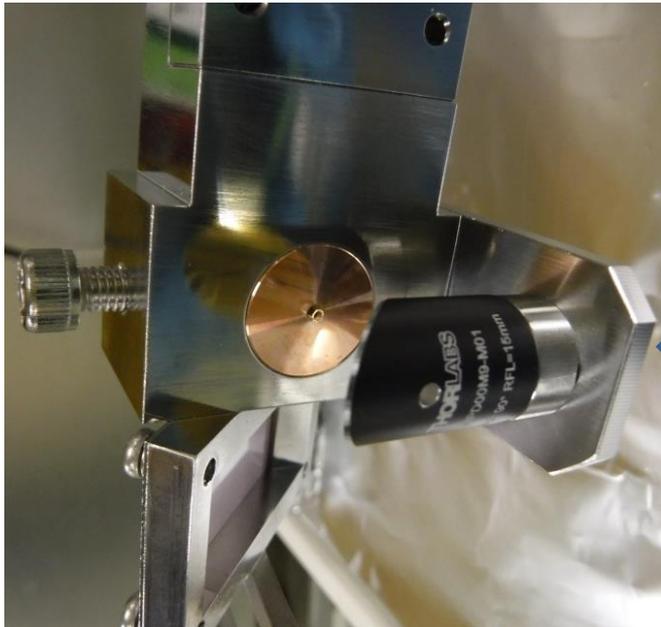
THz 加速器の利用

- ・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)



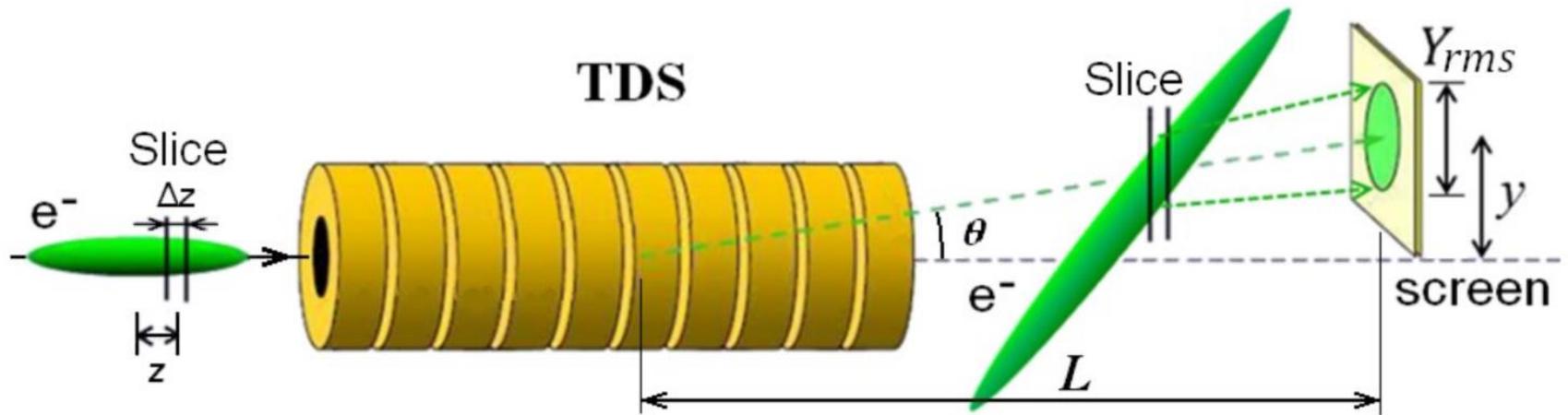
誘電体ディフレクタ / 加速ユニット

- ・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)高繰返し XFEL (~ 300 MV/m)

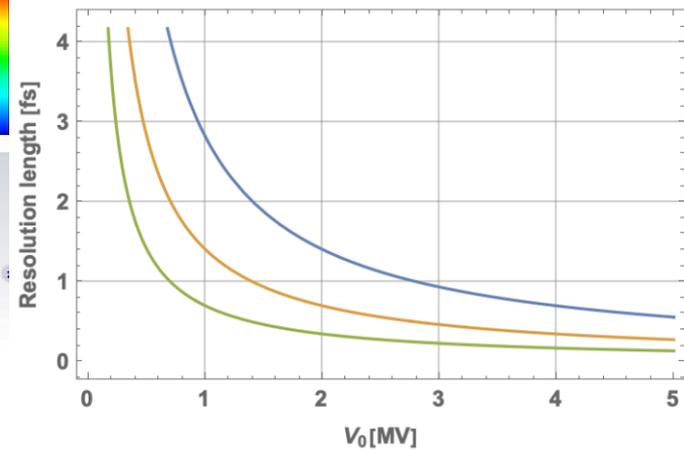
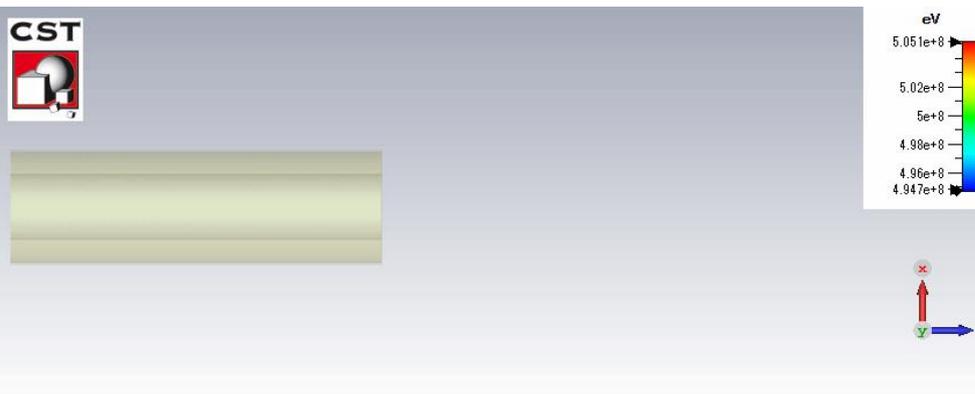


MgO:PPLN(IMS製)による高強度THz生成

THz-Deflector



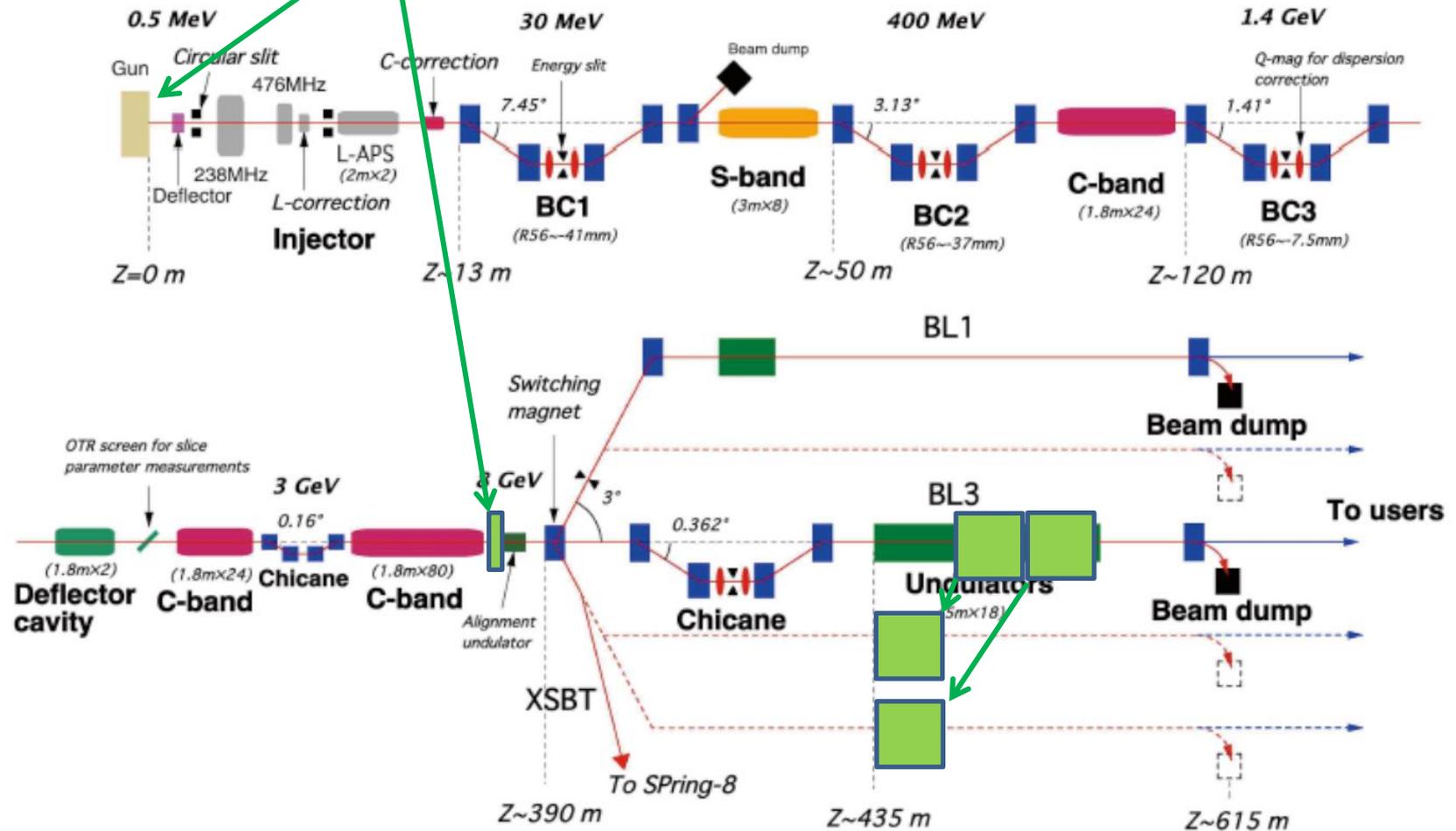
分解能



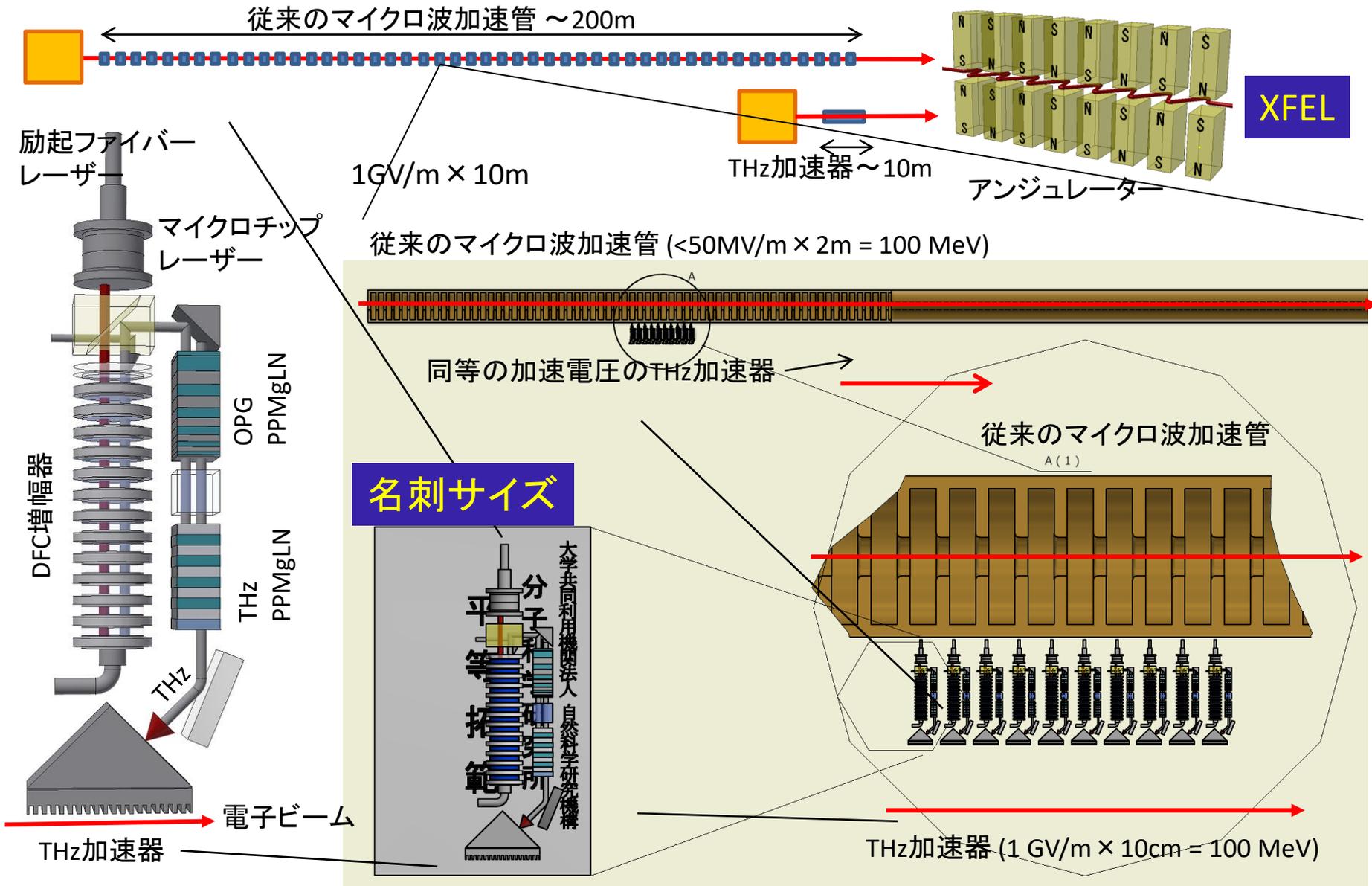
- $Y_{rms}=0.15$ [mm]
- $Y_{rms}=0.3$ [mm]
- $Y_{rms}=0.6$ [mm]

SACLA 1.5 ?

- 高輝度化 (IrCeカソード)
- THz 圧縮ユニット

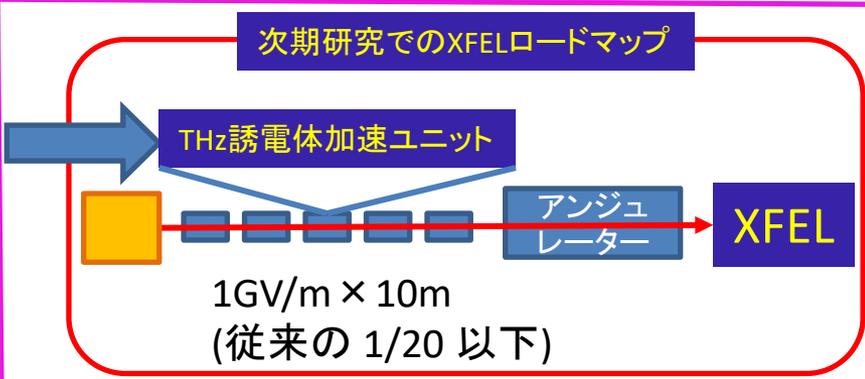
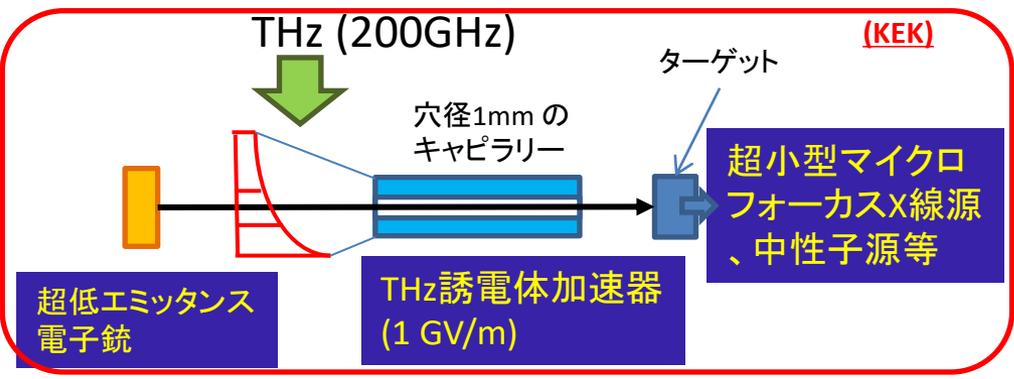
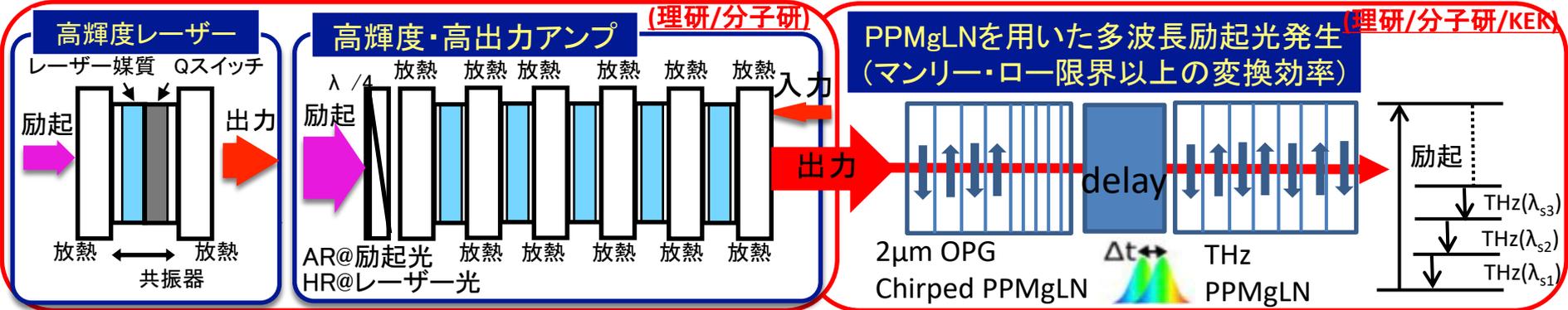


THz-DWA による線形加速器ユニット



THz-DWA ユニットの实証

本研究期間内でのTHz誘電体加速ユニットの実証試験



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

・電子ビーム駆動

・陽子ビーム駆動

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



Q値の高い材料

- 常伝導Cu: Q~10,000

- 超伝導Nb: Q~10¹⁰ しかし電界<40MV/m

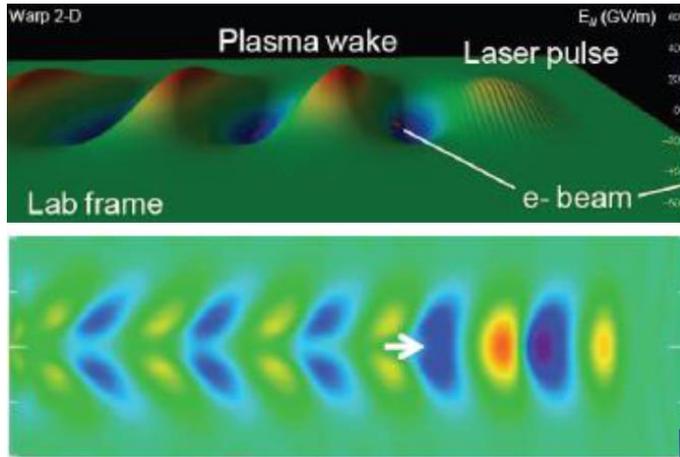
- 誘電体 : Q~10⁶

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

超高電界加速方式

レーザー駆動加速器

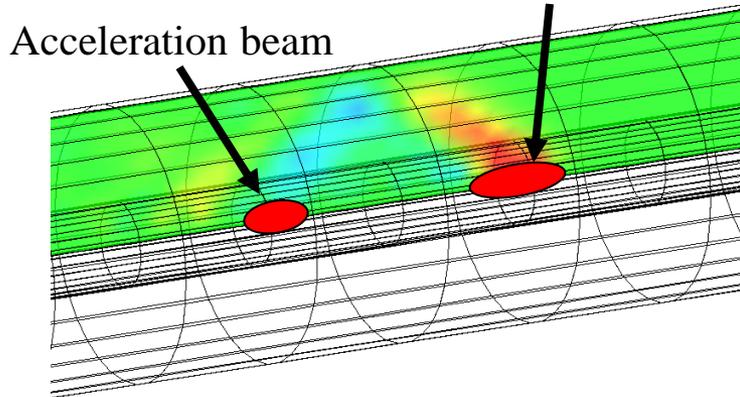
レーザープラズマ加速(LWFA)



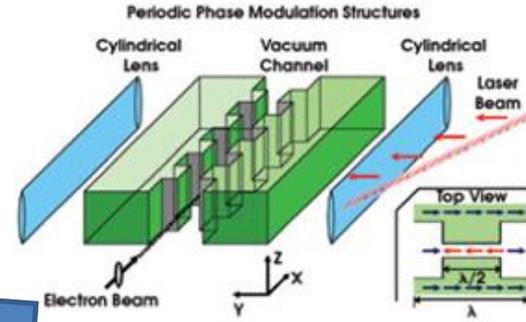
ビーム駆動加速器

誘電体加速(DWA)

Drive beam

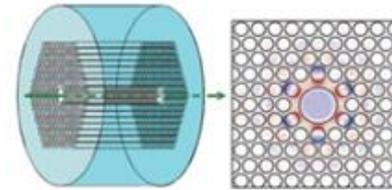


レーザー誘電体加速



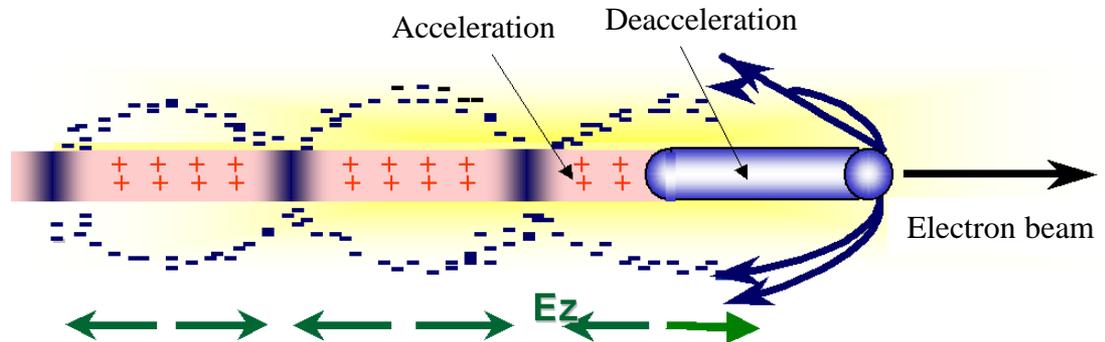
Laser or THz

Hollow-Core PBG Fibers



これらは
THzの加速器

プラズマ加速 (PWFA)

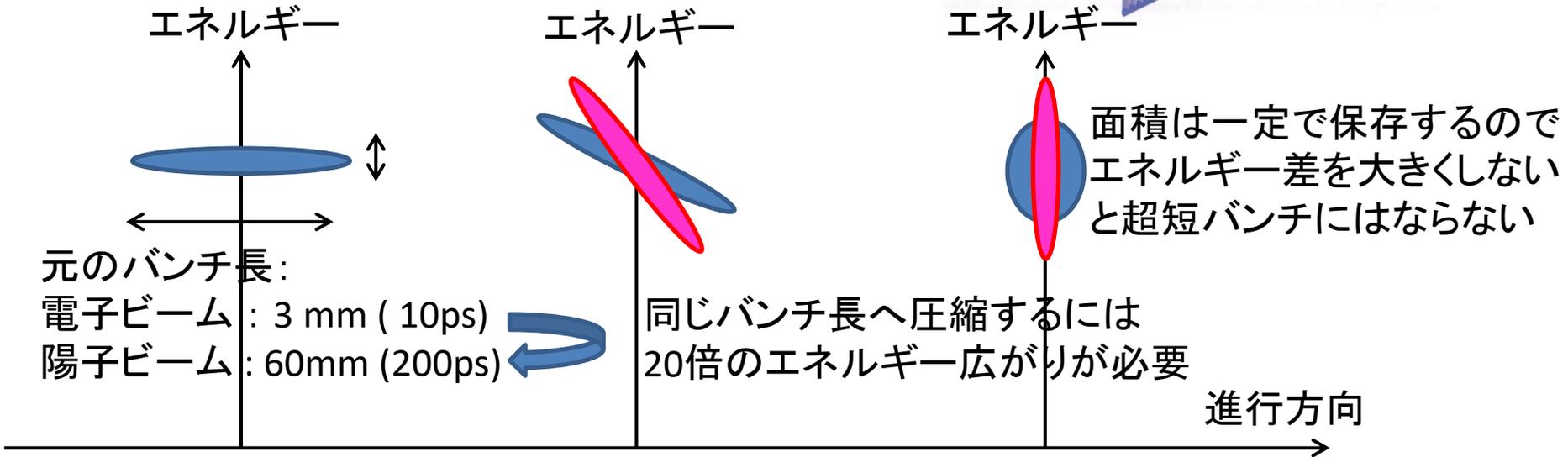
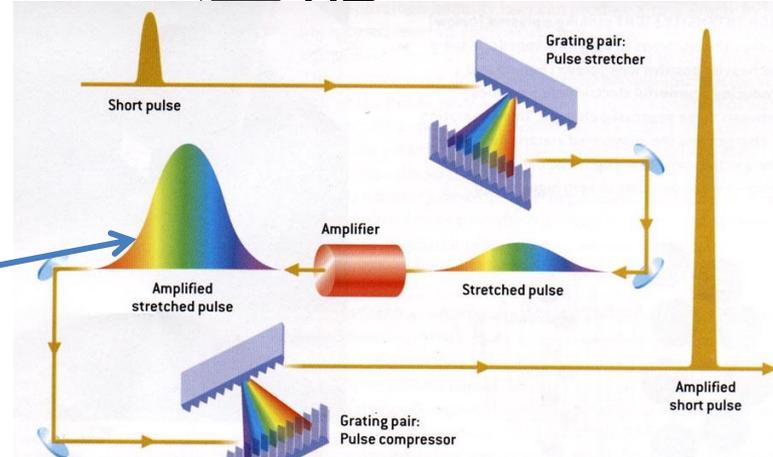


エネルギー源と電界

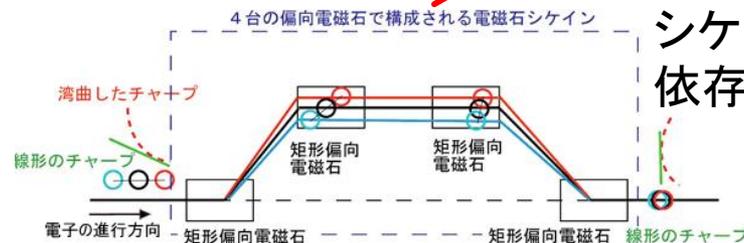
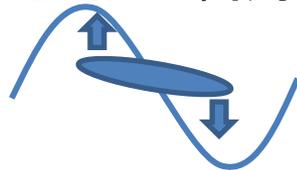
	常伝導	超伝導	電子ビーム 駆動	レーザー 駆動	陽子ビーム駆動
	6/12GHz	1.3GHz	5THz (50fs)	5THz (50fs)	? THz (後述)
駆動 エネルギー	20J [/m] = 40MW × 500ns	200J [/m] = 300kW × 700μs	70J (SLAC) =23GeV × 3nC 35J (KEK) =7GeV × 5nC	40J (→ 1kJ)	15kJ (SPS) = 450GeV × 30nC 150kJ (LHC) = 7TeV × 20nC 300kJ (J-PARC MR) = 40GeV × 8μC
電界	40/80MV/m 放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

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



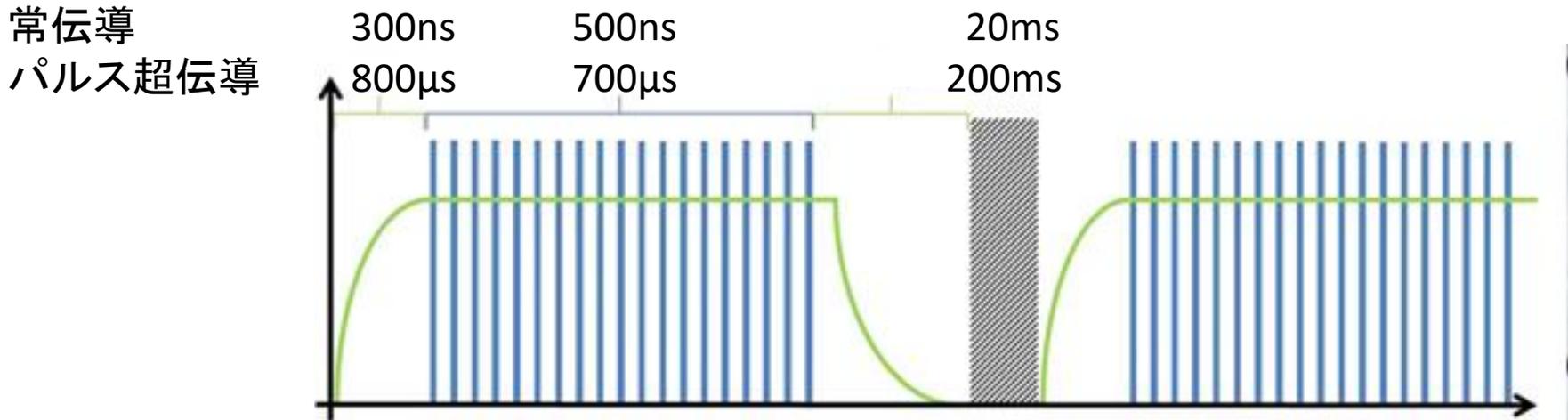
- ビーム駆動による
追加速の実証実験



- 分子研・理研との協力による
高強度THz源開発

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/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

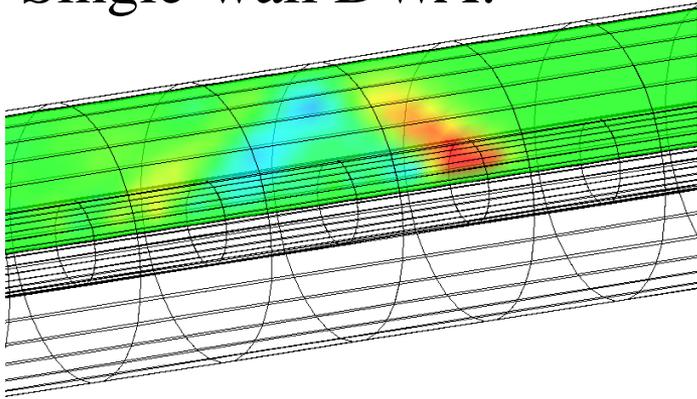
Breakdown Limits on Gigavolt-per-Meter Electron-Beam-Driven Wakefields in Dielectric Structures

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 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

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

- 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:

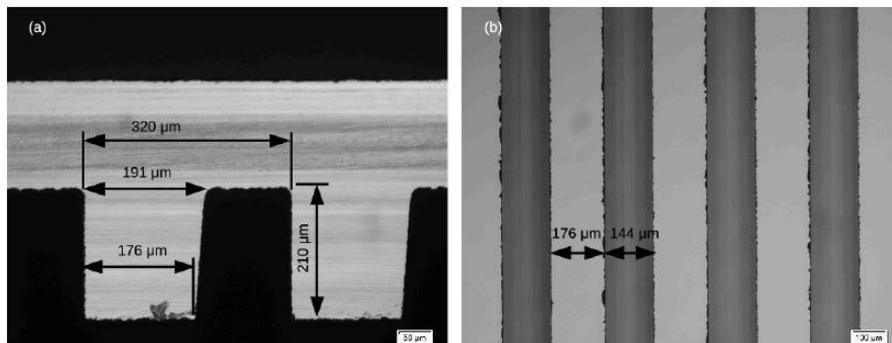
0.1 mm 程度の加速構造

- ・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

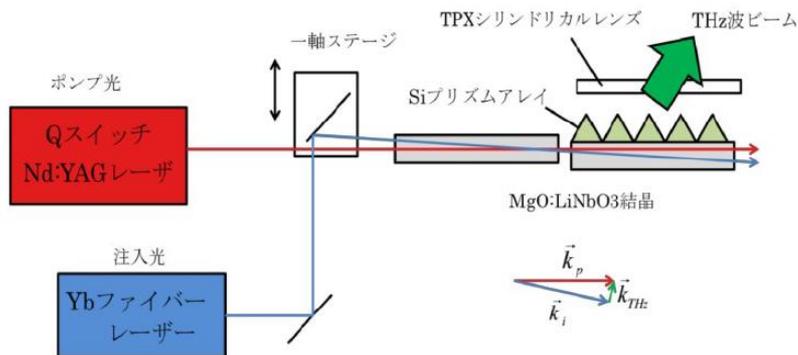
光(赤外)に近い高い加速勾配(絶縁破壊)

- ・ 200 MV/m

THz OI-DLA のための Si 回折格子の加工

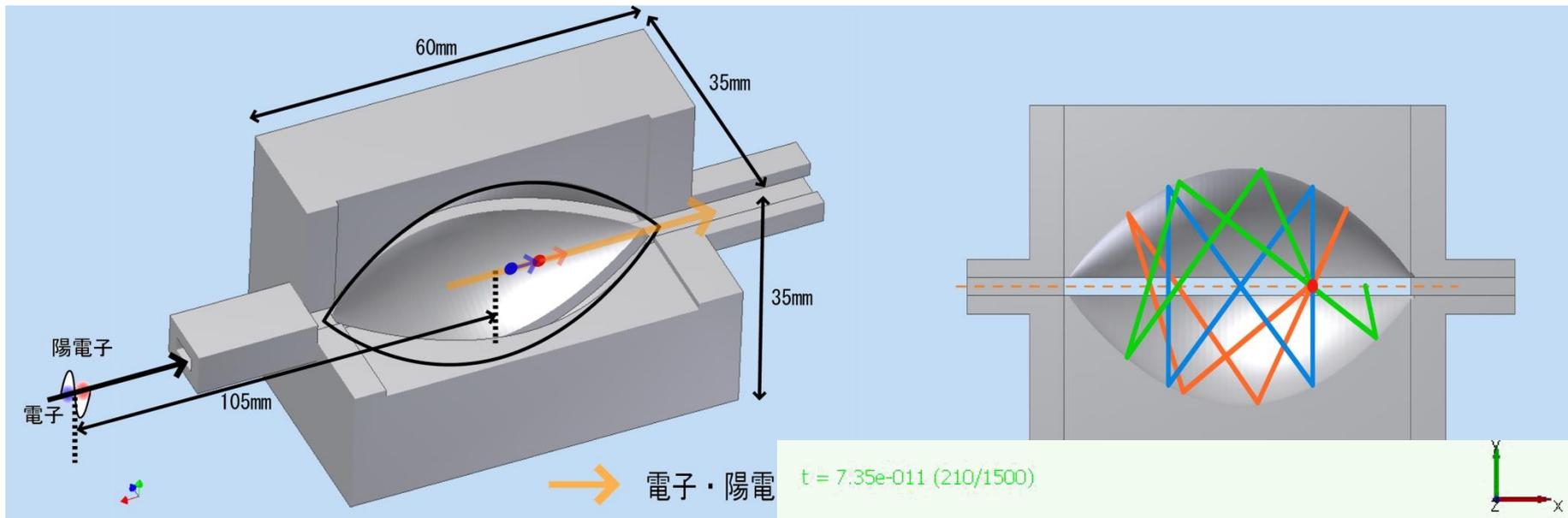


KEK で共同開発中の高強度 THz レーザ



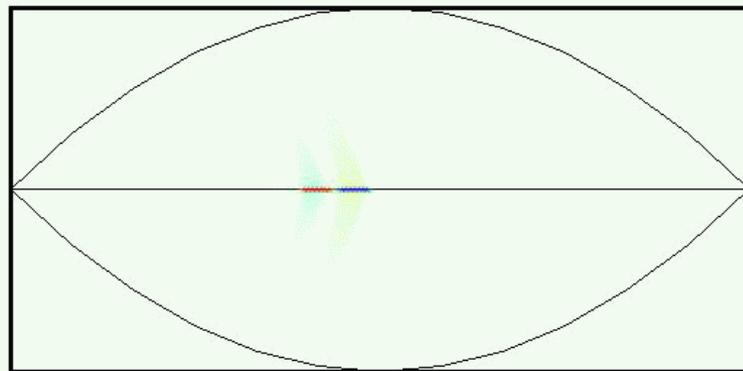
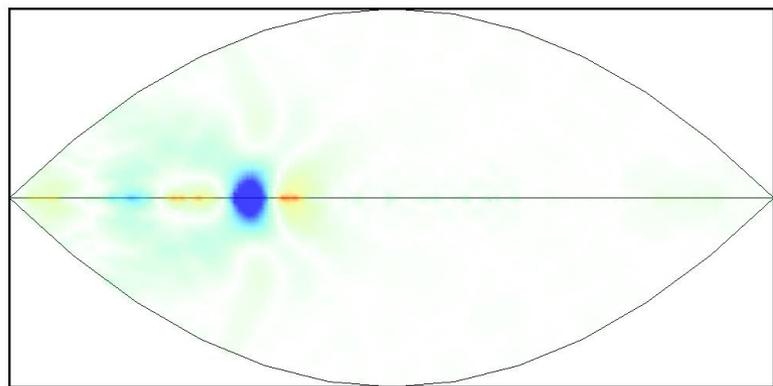
Pitch	0.320	mm
Depth	0.210	mm
Number of Pitches	10	
Material of Wafer	Si	
Thickness of Wafer	0.380	mm
Index of Si @ ~THz	3.4	

THz帯周波数重畳 = モードロック加速管



$t = 7.35e-011$ (210/1500)

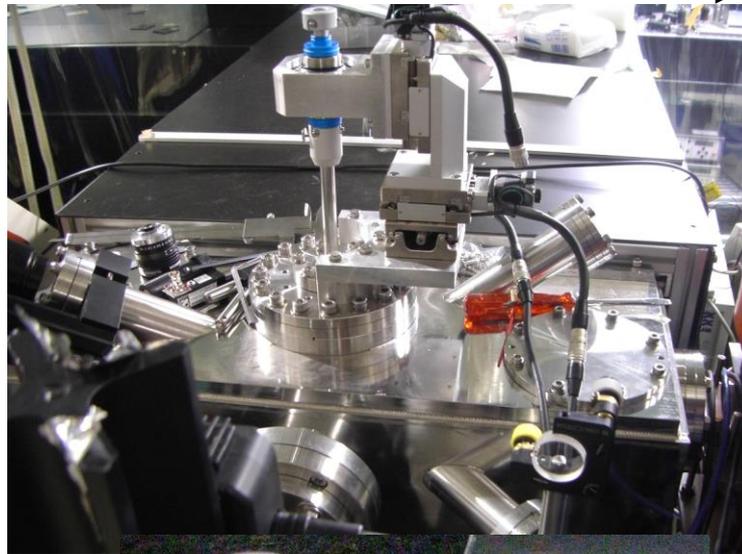
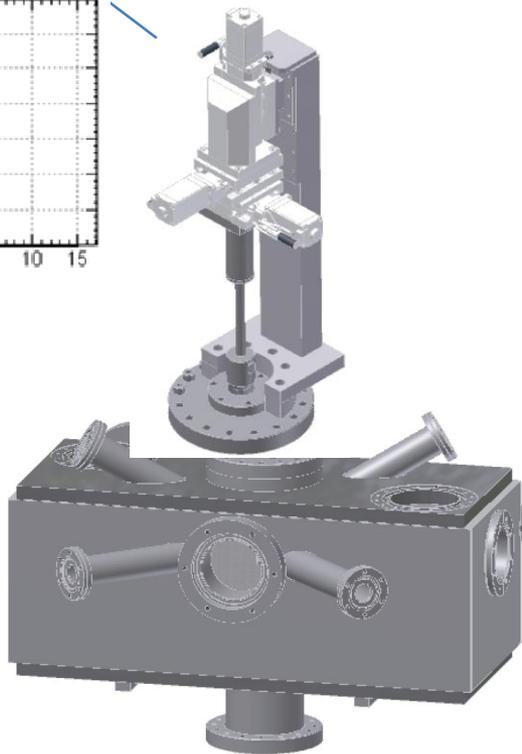
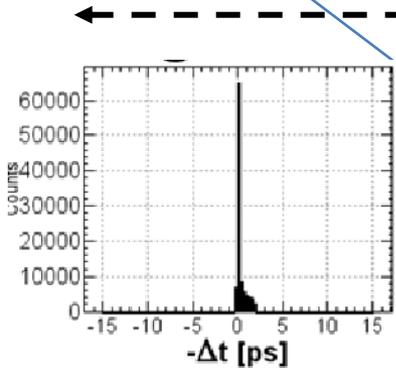
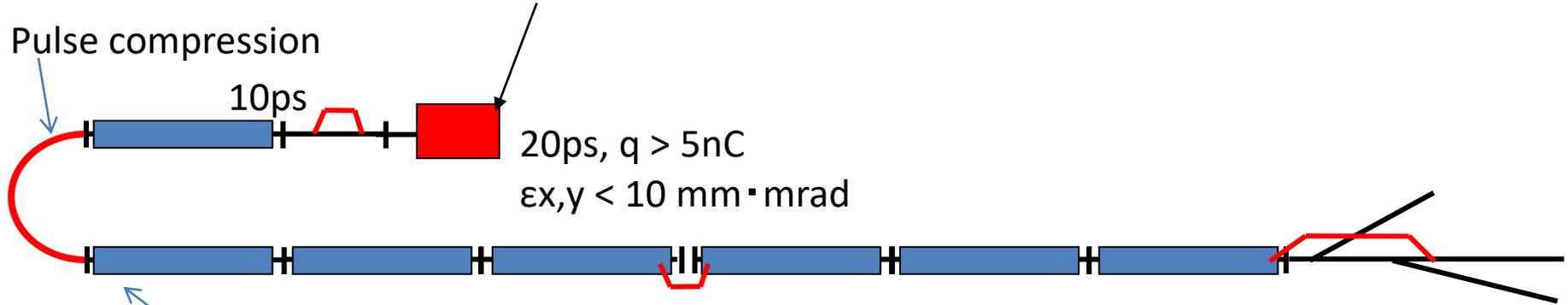
$t = 4.2e-010$ (1200/1200)



ビーム駆動THz加速

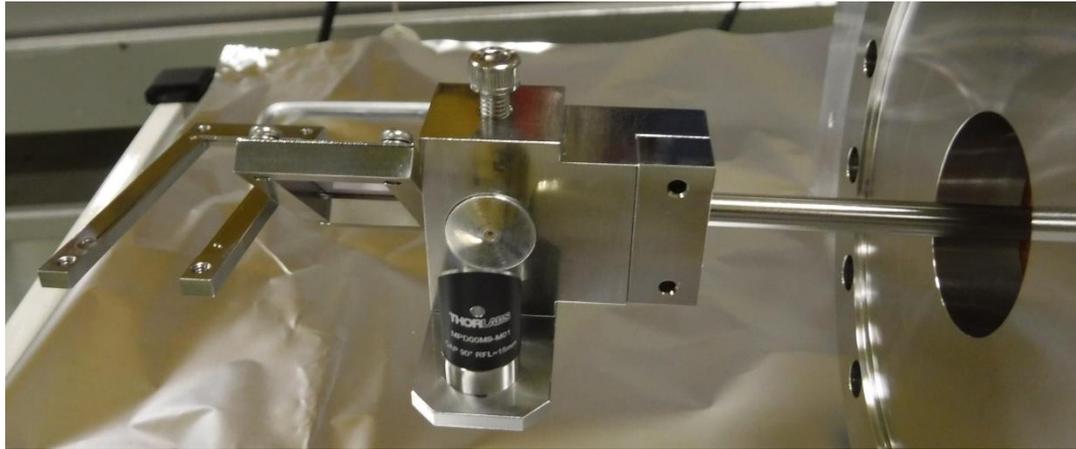
まずは超高電界のTHz加速の実証
のため

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。

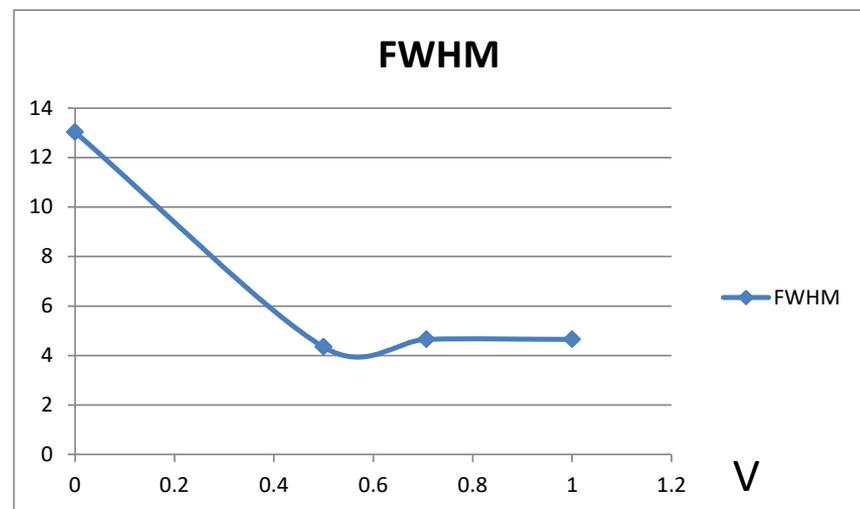


ビームラインに復元済み。

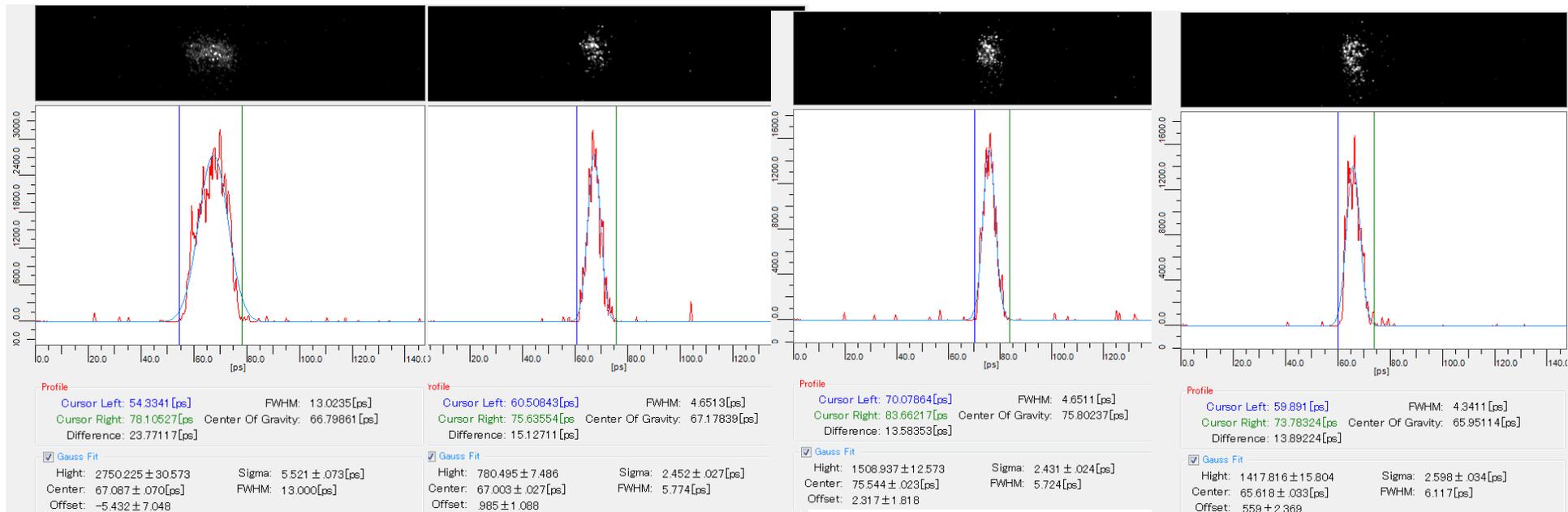
バンチ圧縮

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

FWHM(ps)



- R56=-0.17m → 145MV/1.5GV 必要



圧縮無

B6 最大

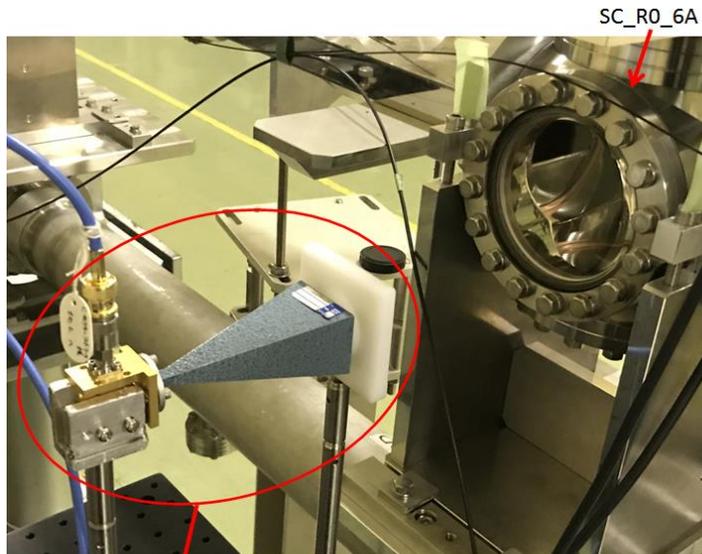
B6 電力 1/2

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

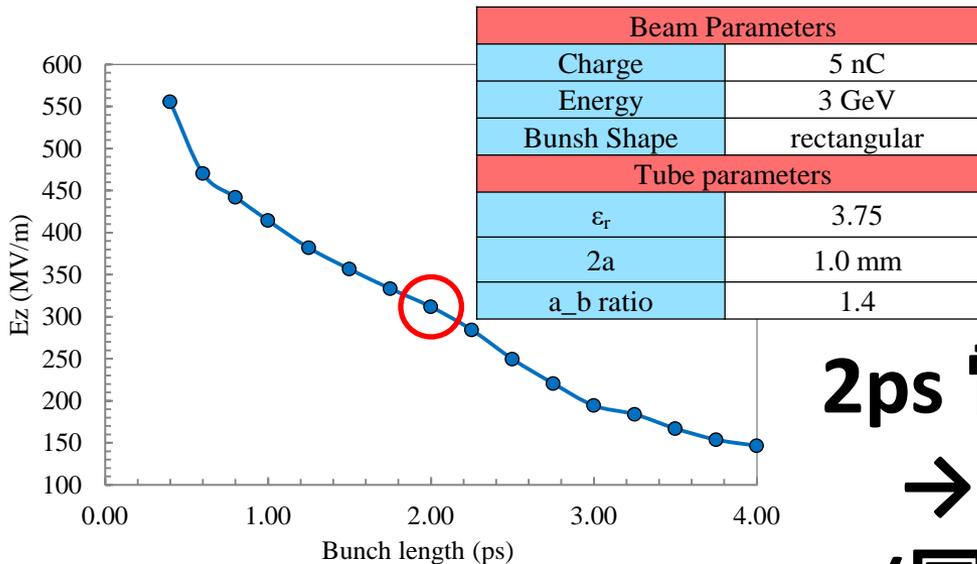
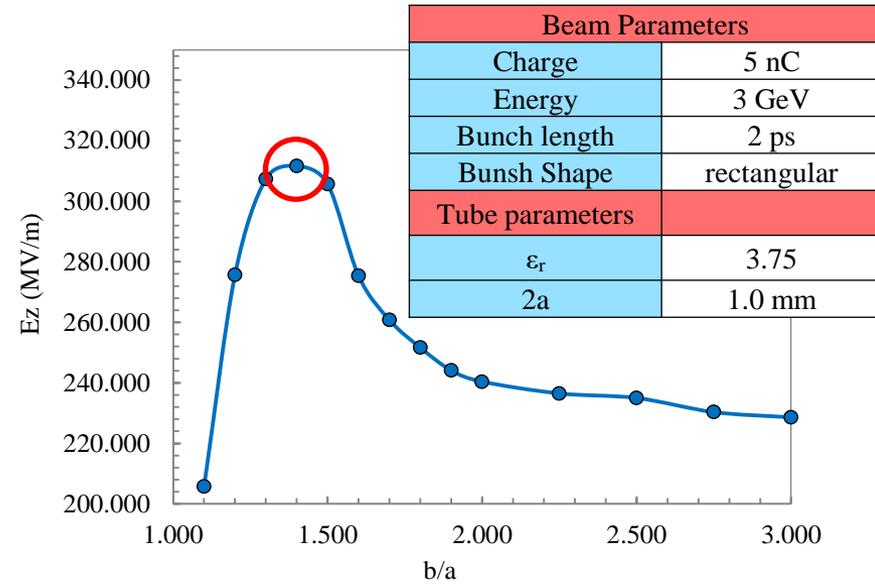
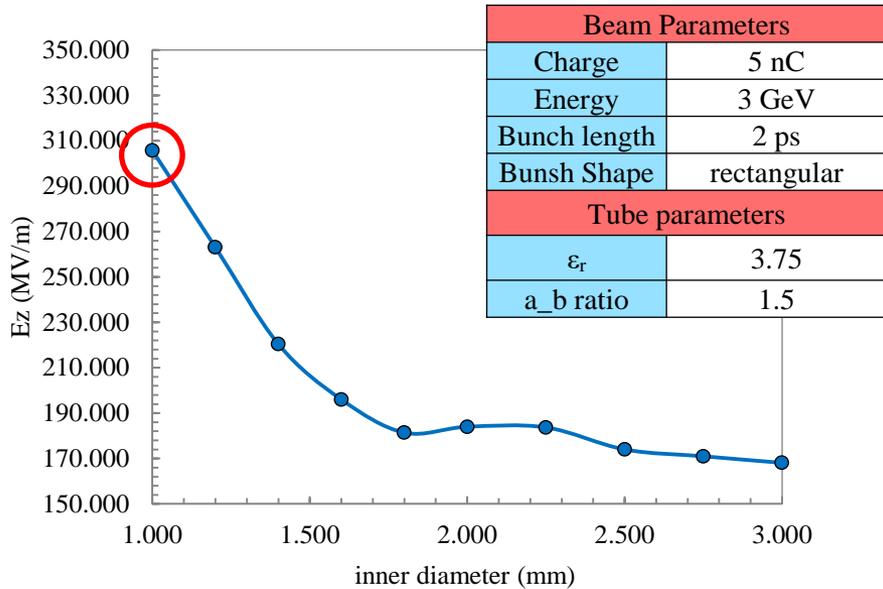


ミリ波検出器



\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)

レーザー駆動THz加速

小型化
アト秒発生

DFG

Frequency(GHz)	$\Delta\lambda$ (nm)	η (%)
100	0.354666667	0.0333333333
200	0.7093333333	0.0666666667
300	1.064	0.1
400	1.418666667	0.1333333333
500	1.7733333333	0.1666666667

THz generation (カスケードニング)

• DESY method

THz-Wave Generation via Cascaded Optical Parametric Amplification

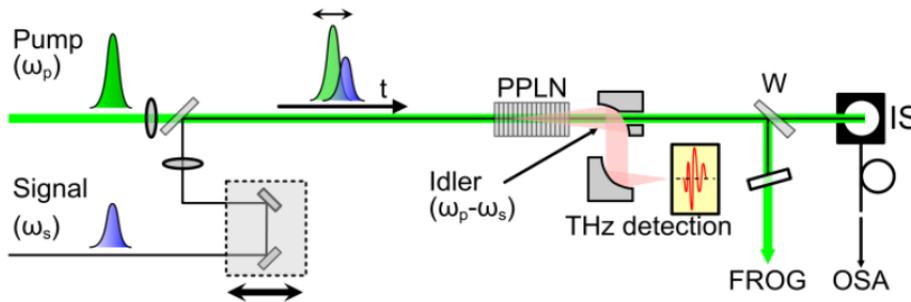
M. Hemmer¹, G. Cirmi^{1,2}, F. Reichert³, K. Ravi^{1,4}, F. Ahr^{1,3}, H. Çankaya^{1,2}, N. H. Matlis¹,
O. D. Mücke^{1,2}, L. E. Zapata¹, and F. X. Kärtner^{1,2,3,4}

¹Center for Free-Electron Laser Science, DESY, Hamburg, Germany

²The Hamburg Center for Ultrafast Imaging, Hamburg, Germany

³Physics Department, University of Hamburg, Hamburg, Germany

⁴Department of EECS and RLE, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA



MgO:PPLN : Pole=212 μ m, 3x3x L=20mm
(damage threshold : 1 J/cm²)

Pump : 1029.45nm $\Delta\lambda < 0.5$ nm, $\tau = 300$ ps
(Cryogenically cooled Yb:YAG amp)

Idler : 1031.2nm

=> 0.5 THz $\eta = 5\%$?

• 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^{1,3*}, Damian N. Schimpf¹ and Franz X. Kärtner^{1,3}

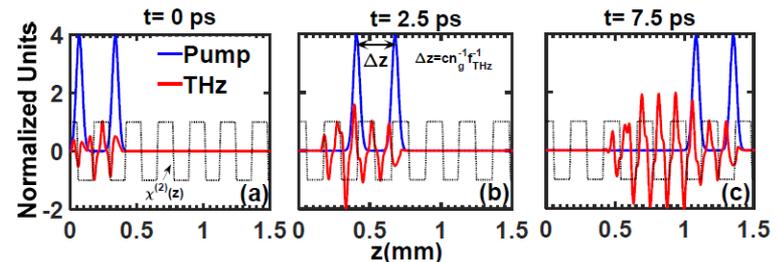
¹Center for Free-Electron Laser Science, Deutsches Elektronen Synchrotron, Hamburg 22607, Germany

²Department of Physics and the Hamburg Center for Ultrafast Imaging, University of Hamburg, Germany

³Department of Electrical Engineering and Computer Science, Research Laboratory of Electronics, Massachusetts

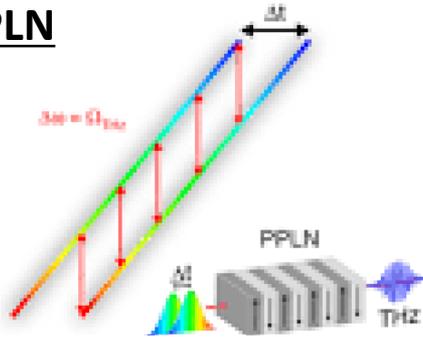
Institute of Technology, Cambridge, MA 02139, USA

koust@mit.edu

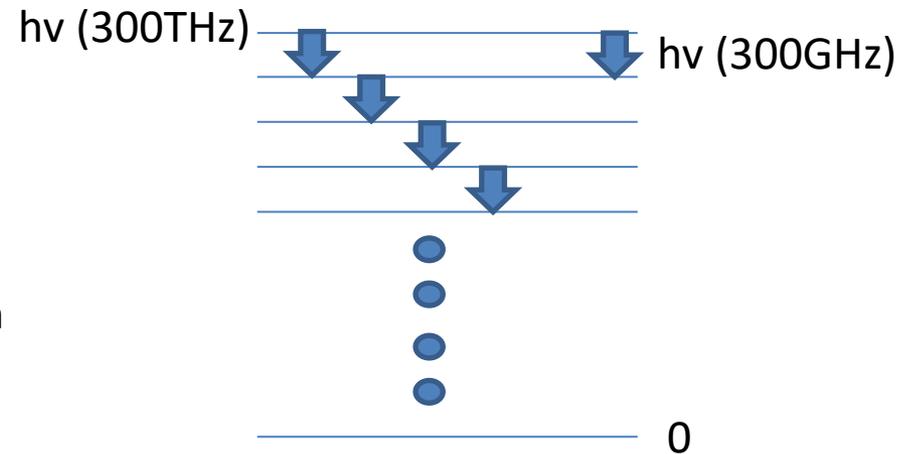


MgO:PPLN / THz generation

THz-PPLN

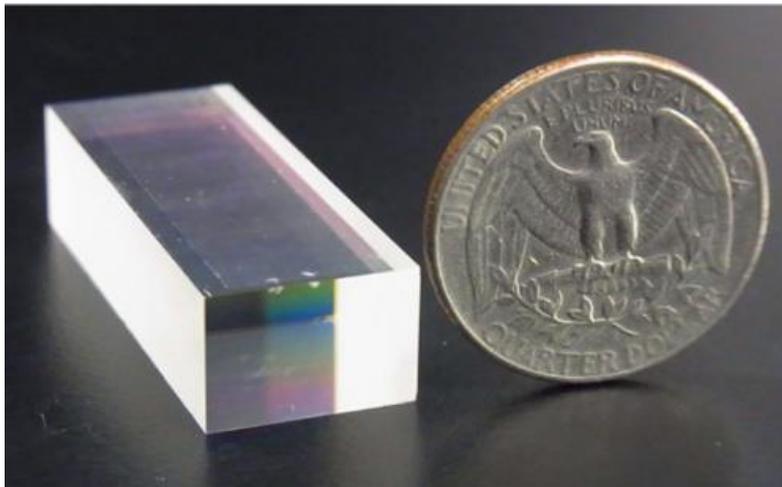


マンレーロー限界を越えるためには
カスケードニングが必須



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

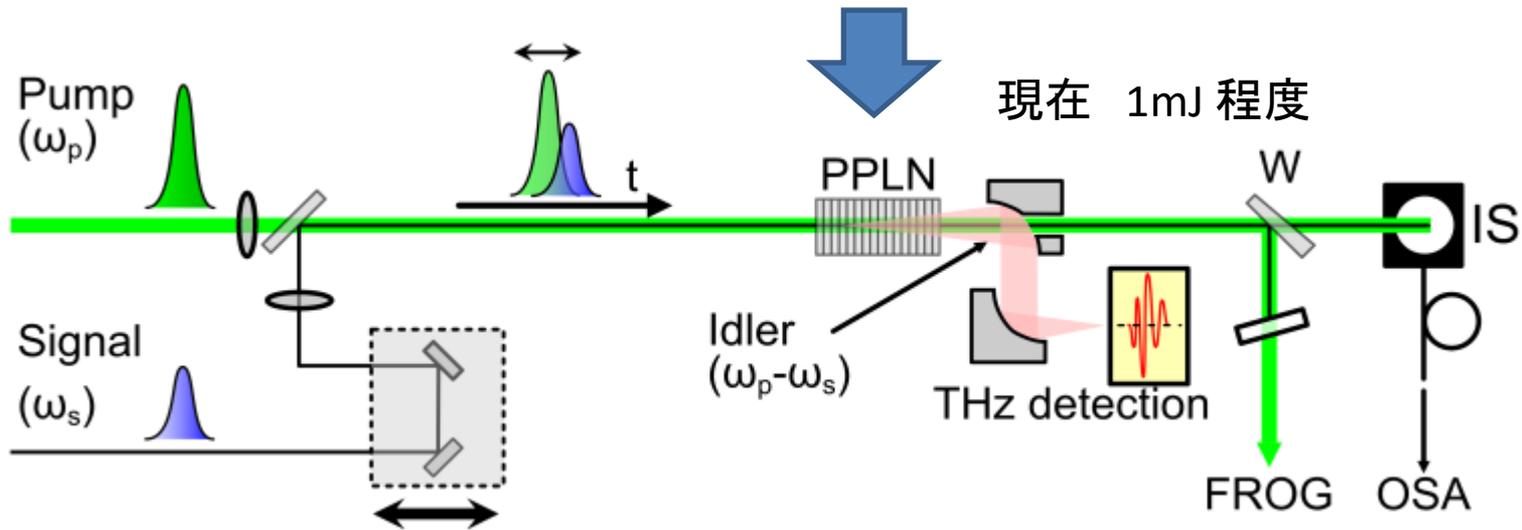
分子研製超大型 PPLN



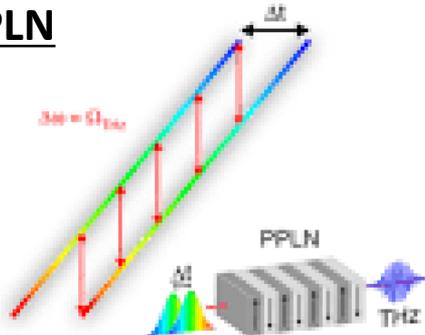
5% 変換効率が得られれば
2J \rightarrow 100mJ THz が可能なはず

世界的な動向 : DESY(F. Kartner)

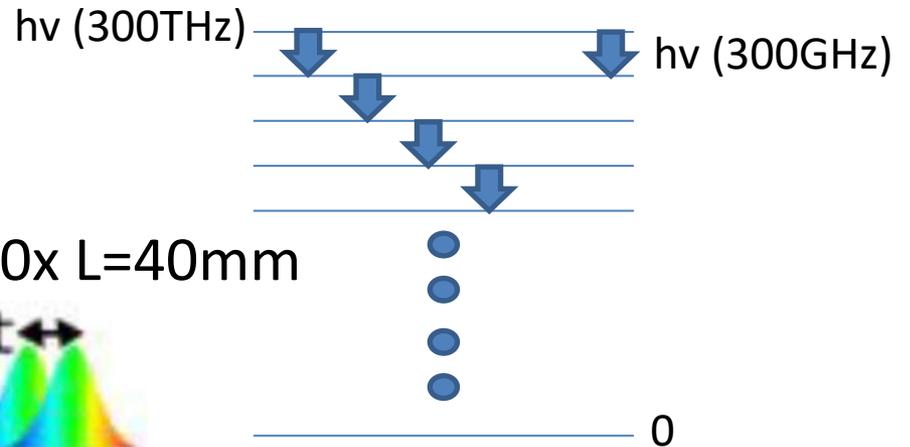
分子研製のPPLNを使用



THz-PPLN



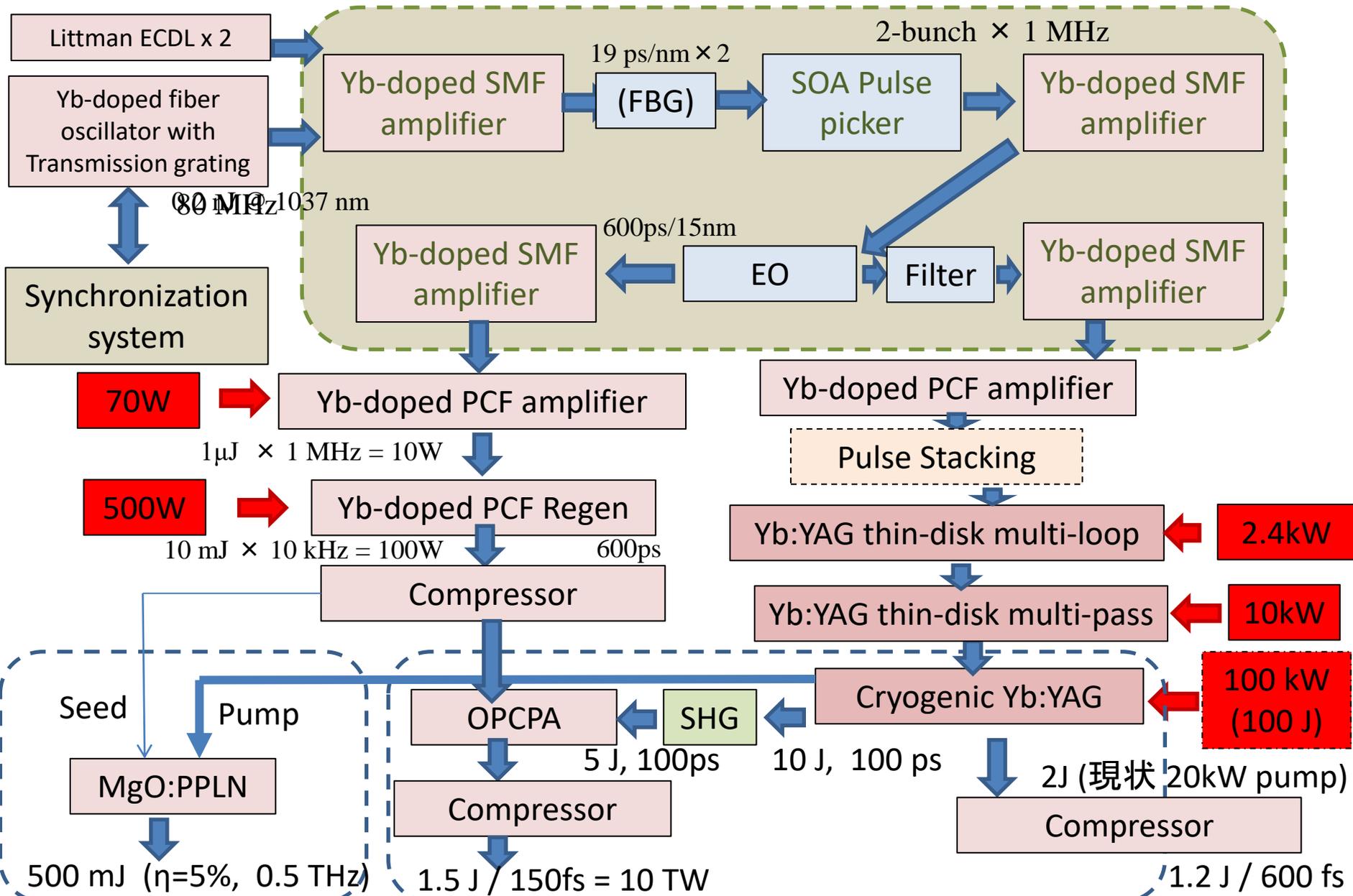
マンレーロー限界を越えるためには
カスケードニングが必須



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

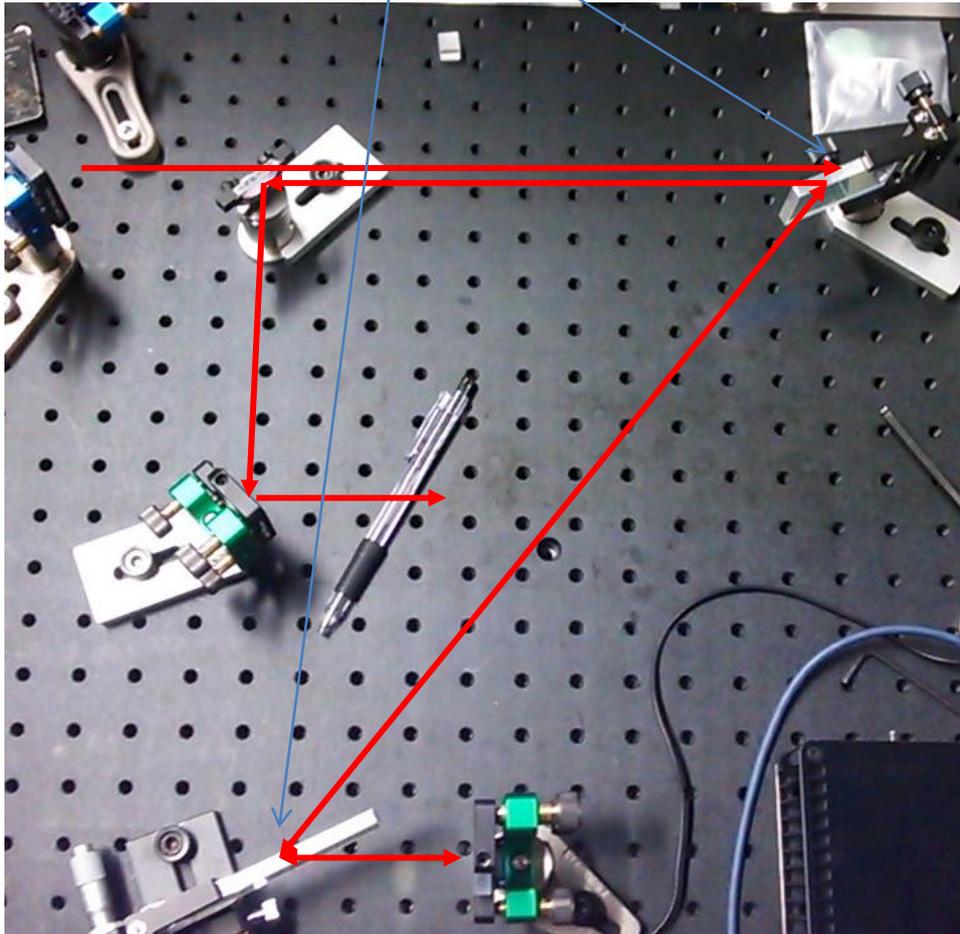


Yb:PCF/YAG + OPCPA + MgO:PPLN



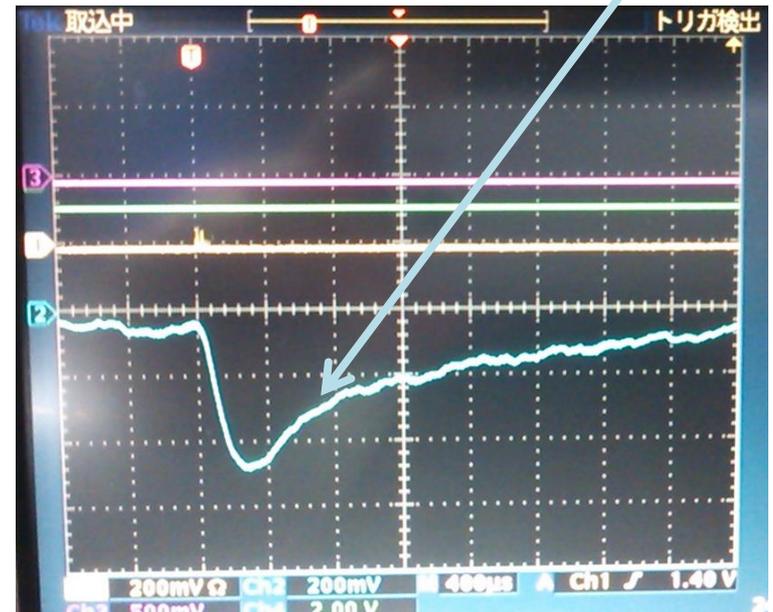
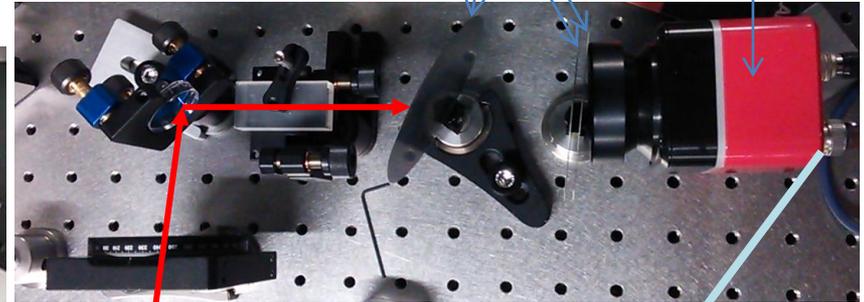
Compressor & PPLN

Grating : 1750 lines/mm



Silicon wafer
with metal
mesh filter x 3

THz
Detector



冷却 PPLN

分離型ヘッドのパルスチューブを使用 (無振動)



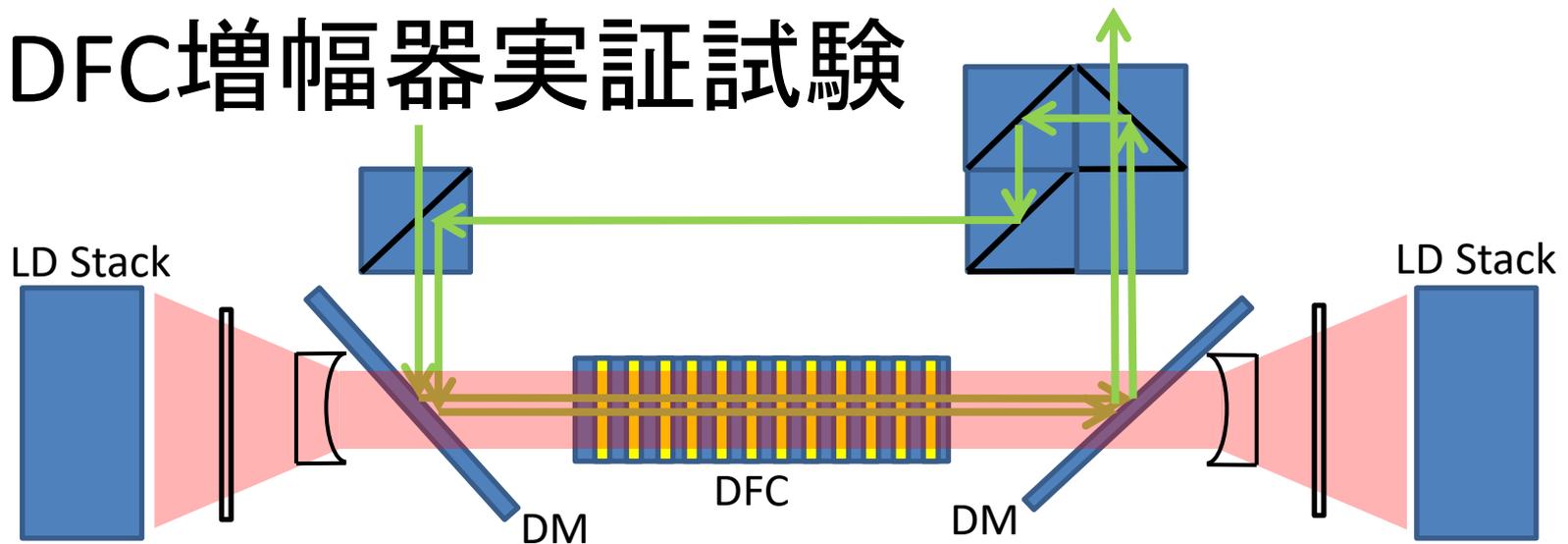
高強度レーザー開発

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

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)

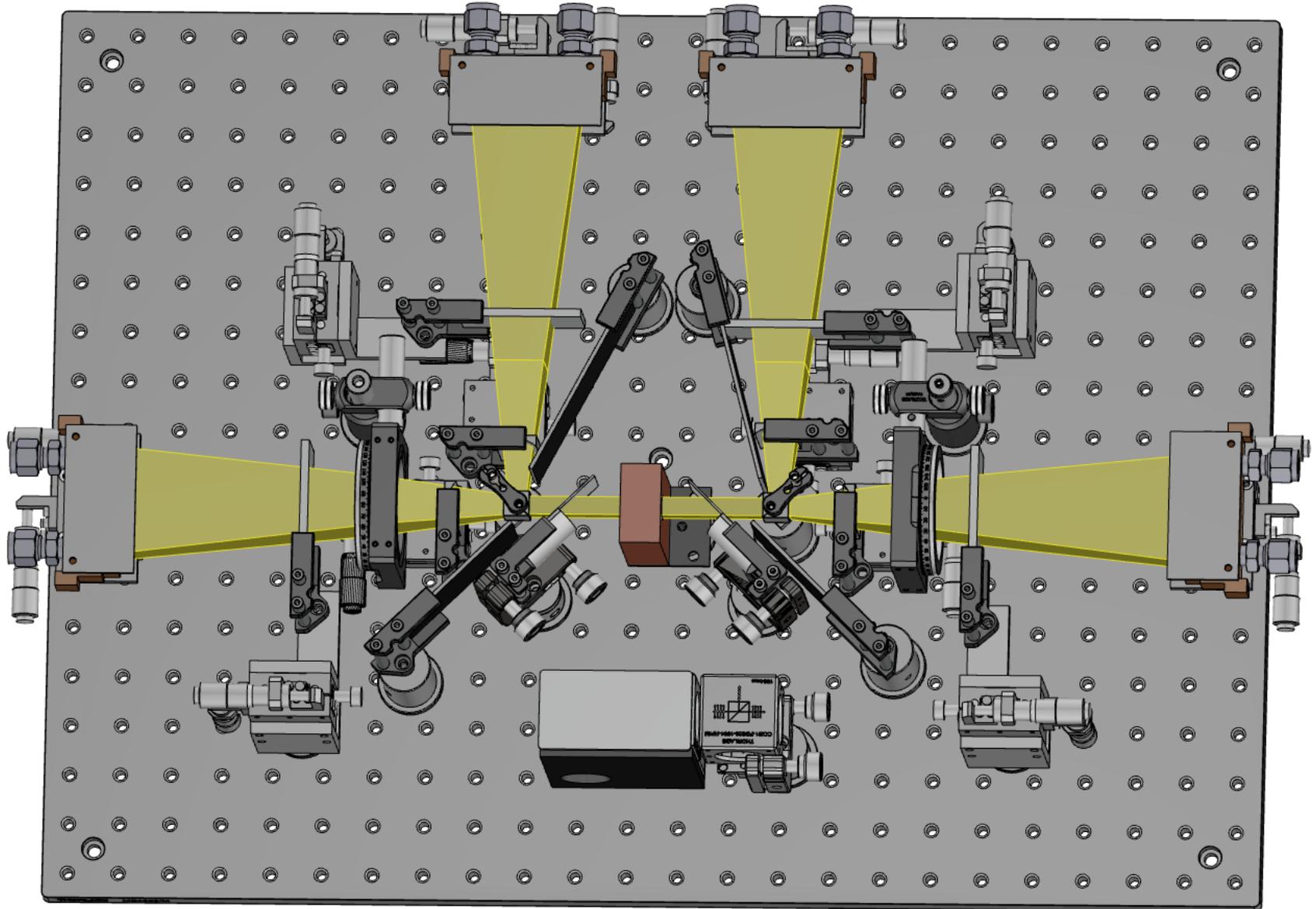
- 4 stack(32kW, 8J)

- Output

- $2 \text{ J} \rightarrow 1 \text{ J} @ \text{SHG}$

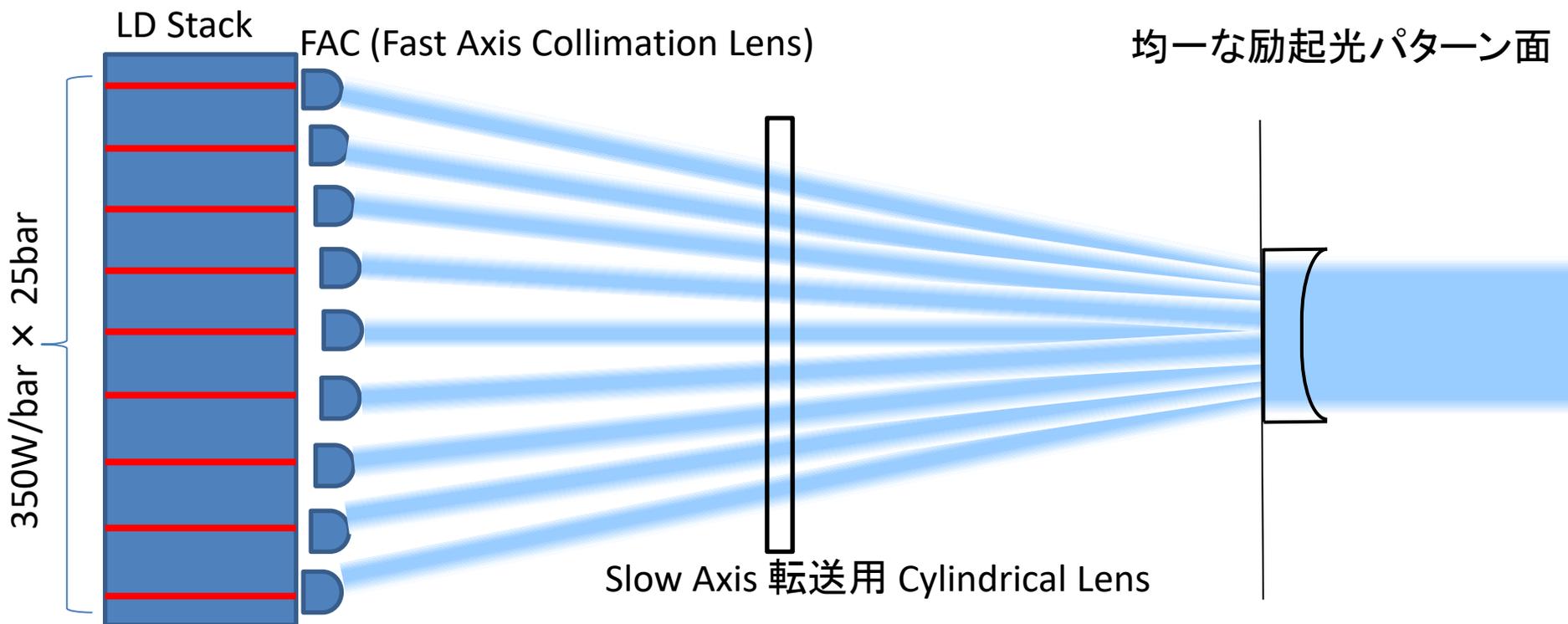
DFC増幅器実証試験

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



KEK版QCWレーザーダイオードスタック

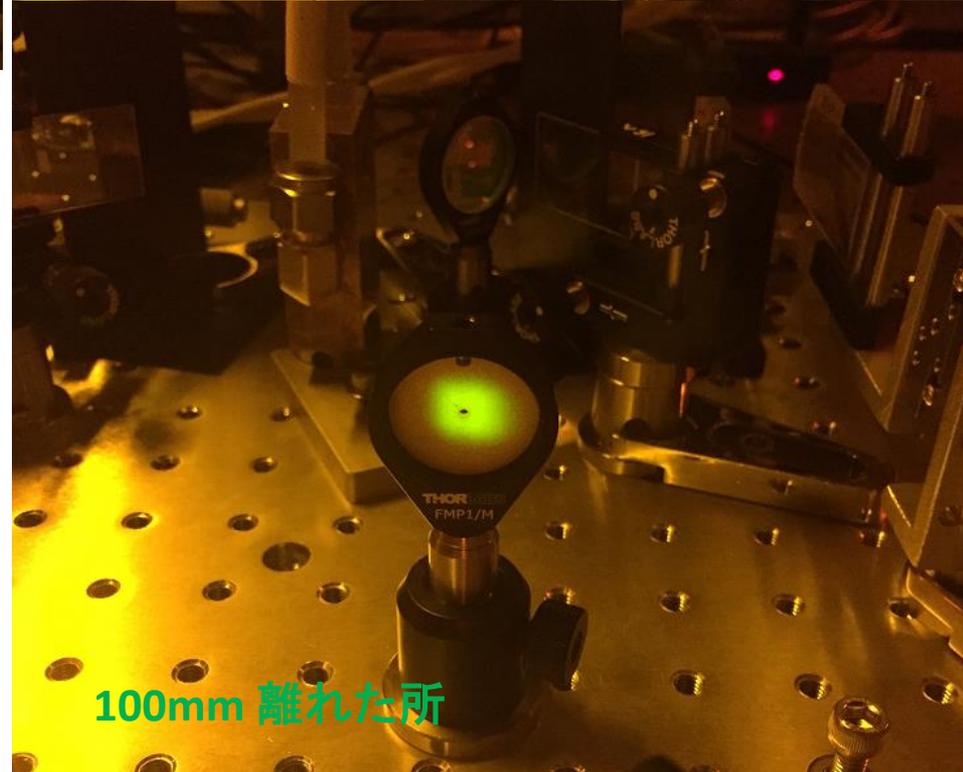
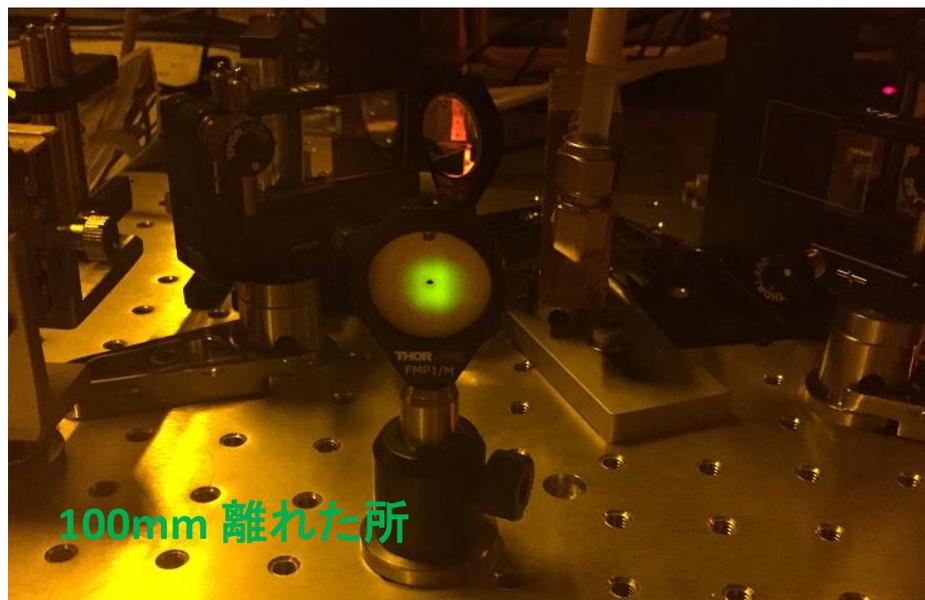
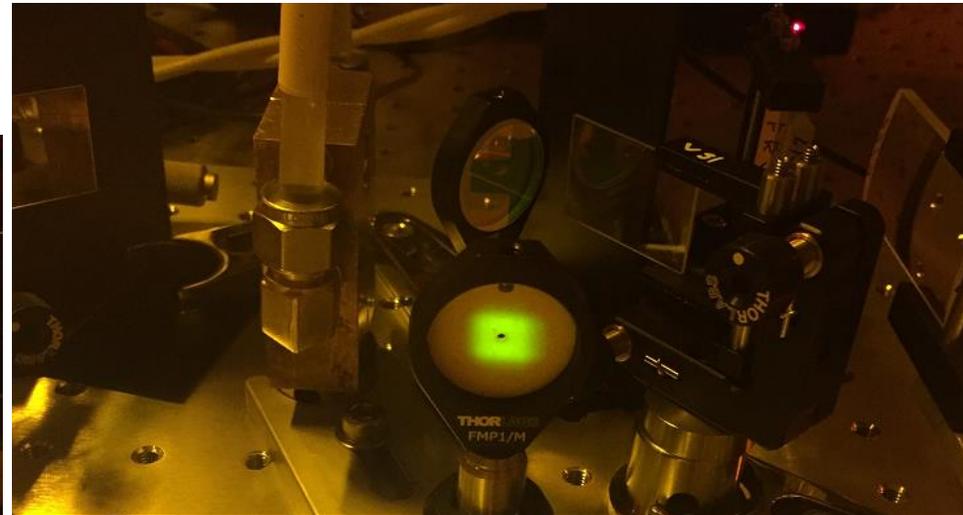
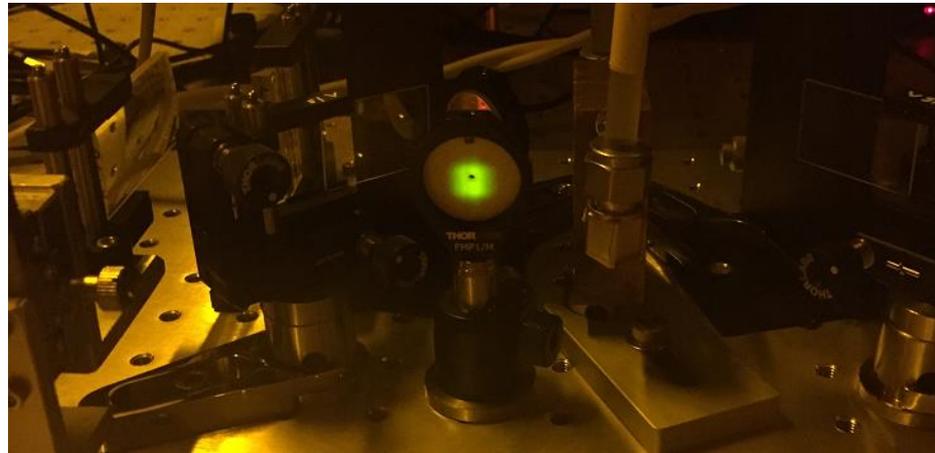
- QCW LD Stack : 30万円/kW (Fiber Bundle の 1/5)
- $350\text{W}/\text{bar} \times 25\text{bar} = 8.75\text{ kW} \times 250\mu\text{s} > 2\text{J}/\text{stack}$
- FACの精密アラインメントで均一な励起パターン
- 開発した安価な大電流パルスドライバ



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

10kW LD 用 600A QCW LD Driver (KEKで開発、長期運用実績有)

1、外 観



2、仕 様

- | | |
|---------------|--|
| (1) AC電源入力 | 単相AC100V 50/60Hz 3A |
| (2) DC電源入力 | DC80V以下 |
| (3) 出力電流 | 最大1200A (パルス幅: 1.2ms) |
| (4) パルス幅・繰り返し | デューティー 3%
0.25ms × 120Hz ~ 1ms × 30Hz |
| (5) 冷却方式 | 25°C 水冷 (接続口径: Rc1/4) |
| (6) 外形 | 幅: 260mm 高さ: 149mm
奥行: 430mm |

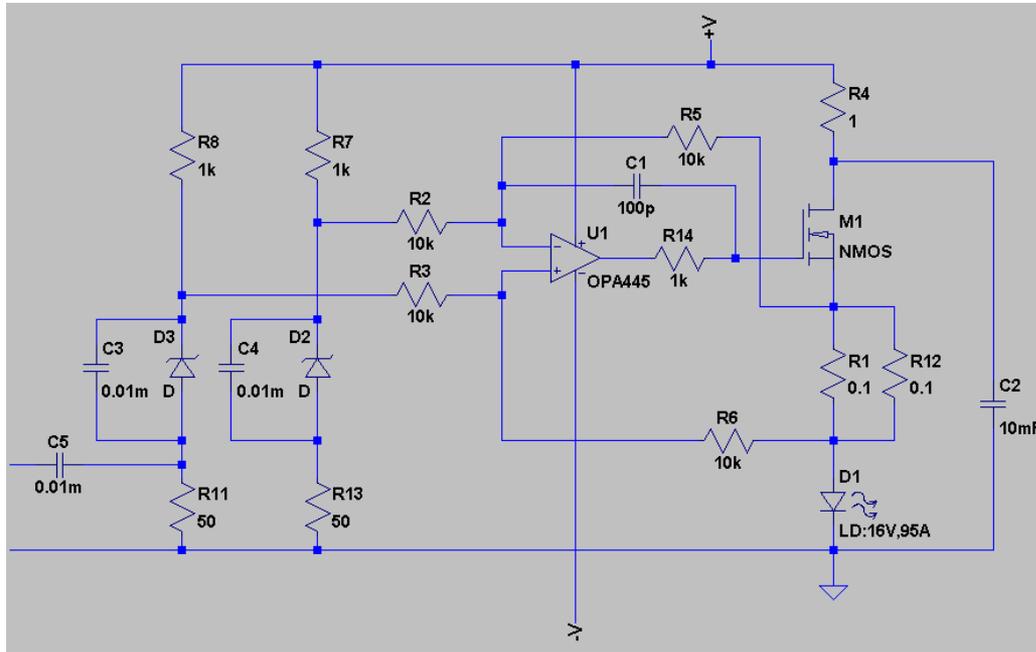
3、裏 面



4、内 部



LD Driver Circuit 2



PA85

200mA(CW)

APT

$$\frac{R_2}{R_5 + R_2} (V_+ - V_0) + V_0 = \frac{R_3}{R_6 + R_3} (V_- - V_0 - V_{in}) + V_0 + V_{in}$$

$$\frac{R_2}{R_5 + R_2} = \frac{R_3}{R_6 + R_3} = \frac{1}{a+1}$$

$$V_+ + aV_0 = V_- + aV_0 + aV_{in}$$

$$RI = V_+ - V_- = aV_{in}$$

$$\frac{R_2}{R_5 + R_2} (V_+ - V_0) + V_0 = \frac{R_3}{R_6 + R_3} (V_- - V_1) + V_1$$

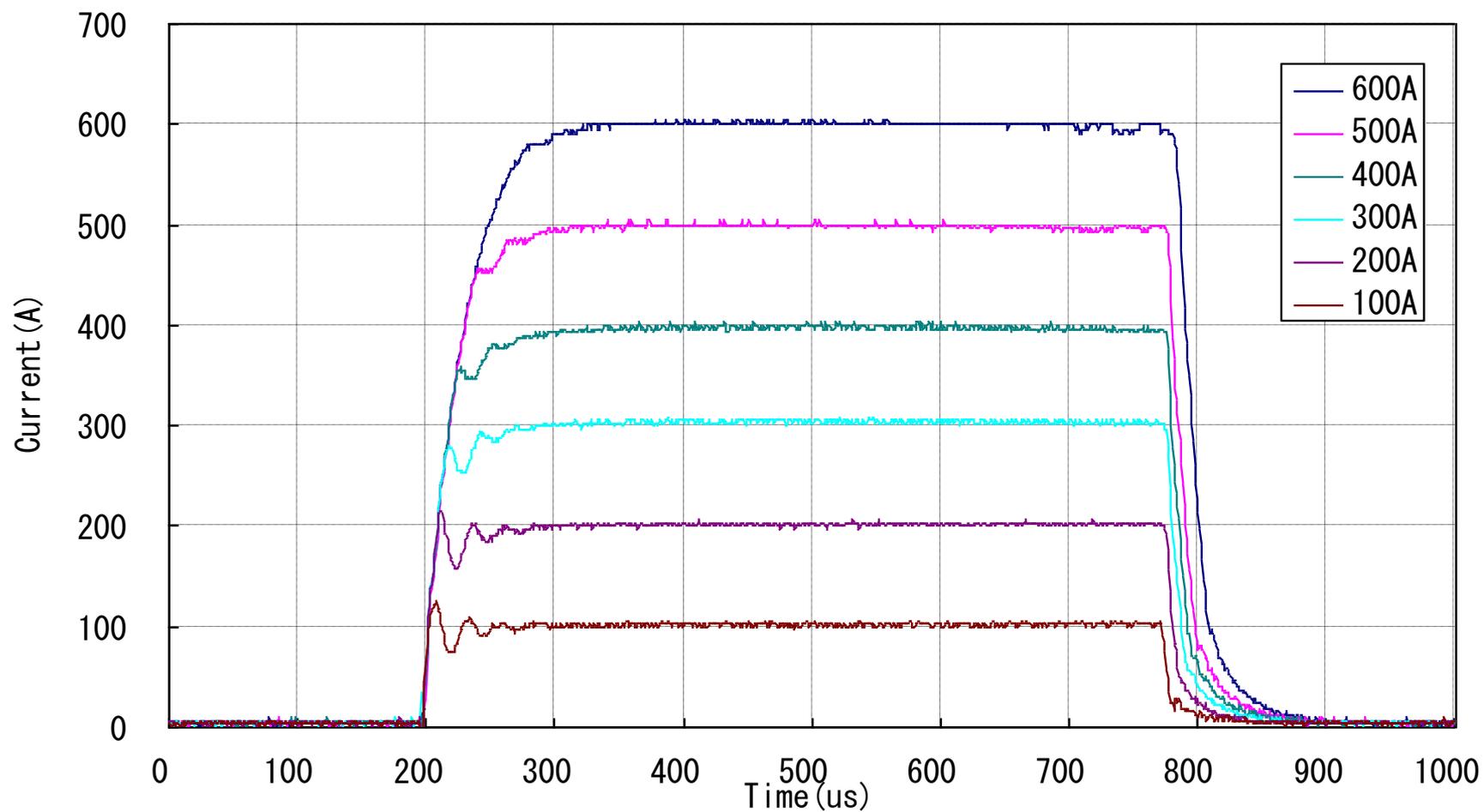
$$\frac{1}{a+1} (V_+ - V_0) + V_0 = \frac{1}{a+1} (V_- - V_1) + V_1$$

$$V_+ - aV_0 = V_- - aV_1$$

$$V_+ - V_- = aV_{in}$$

6、出力電流 測定DATA

600A QCW LD Driver



885nm Direct Pump

- 885nm だと励起LDのバー辺りの出力が大きい
(従来 Yb:YAG 用に開発してきた 940nm と同程度、808nm の倍)
- 吸収帯域が広く既存のLDバーで高効率
- 吸収係数 $\sim 1.5\text{cm}^{-1}$ で On-Axis 励起が可能

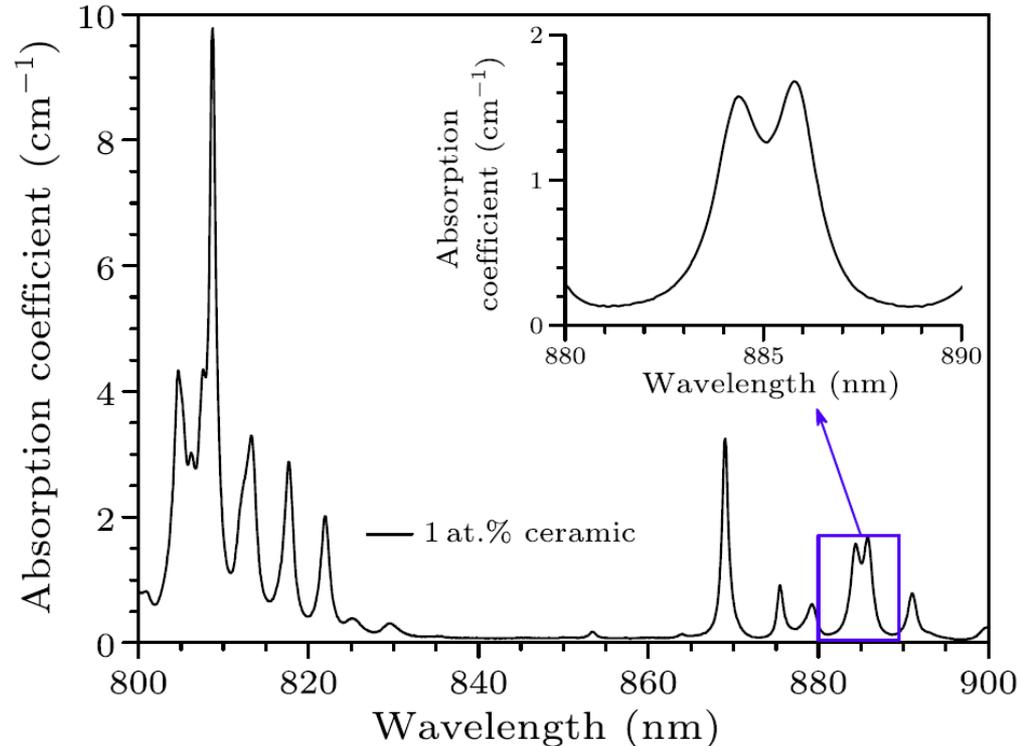
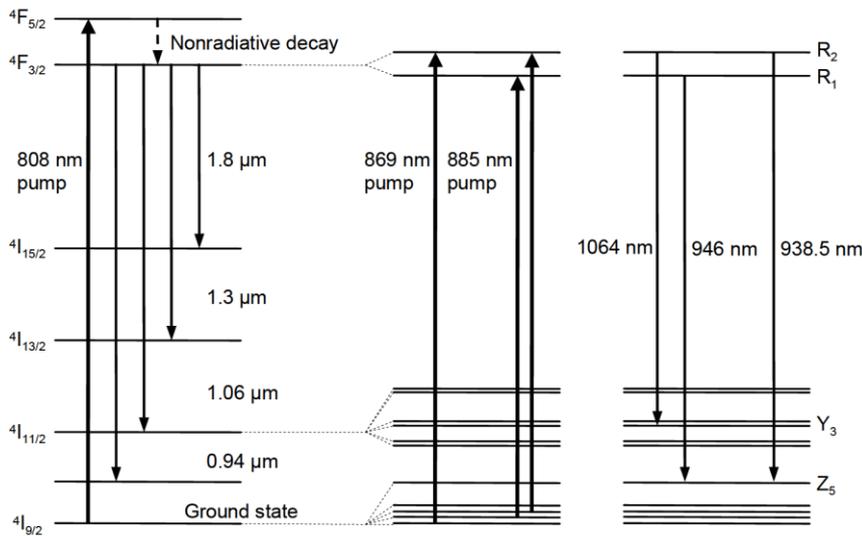


Fig. 2. Absorption spectrum of 1 at.% Nd:YAG ceramic.

Required Input Energy for 2-pass amp

$$E_{pump} = \frac{P_{pump}}{A} T_{pulse} \left(1 - e^{-\frac{T_{pulse}}{\tau}} \right) \eta_{pump} \eta_{quantum}, \quad E_s = \frac{h\nu_e}{\sigma_e} : \text{Saturation fluence.}$$

$$\frac{dE_{pump}}{dz} = \alpha E_{pump} e^{-\alpha z}, \quad N_2 = \frac{dE_{pump}}{dz} / h\nu_{pump}, \quad N_s = \frac{1}{\sigma_e}$$

$$g = \sigma_e N_2 + \sigma_a N_1 = \frac{\alpha e^{-\alpha z} P_{pump} T_{pulse} \left(1 - e^{-\frac{T_{pulse}}{\tau}} \right) \eta_{pump} \eta_{quantum}}{h\nu_{pump} A}$$

$$g_L = \int_0^L \sigma_e N_2 dz = \frac{E_{pump} / h\nu_{pump} (1 - e^{-\alpha L})}{E_s / h\nu_e} = \frac{N_p}{N_s}$$

11/21 は E_0 を引きそびれていました

$$\text{small signal gain : } G = e^{g_L}, \quad G_0 = e^{\frac{N_p}{N_s}}, \quad G_1 = e^{\frac{N_p - (E_1 - E_0)/h\nu_e}{N_s}} = e^{\frac{N_p - N_s \frac{E_1 - E_0}{E_s}}{N_s}} = G_0 e^{-E_1/E_s} e^{E_0/E_s}$$

$$e^{E_0/E_s} - 1 = x_0, \quad e^{E_1/E_s} - 1 = x_1, \quad e^{E_2/E_s} - 1 = x_2$$

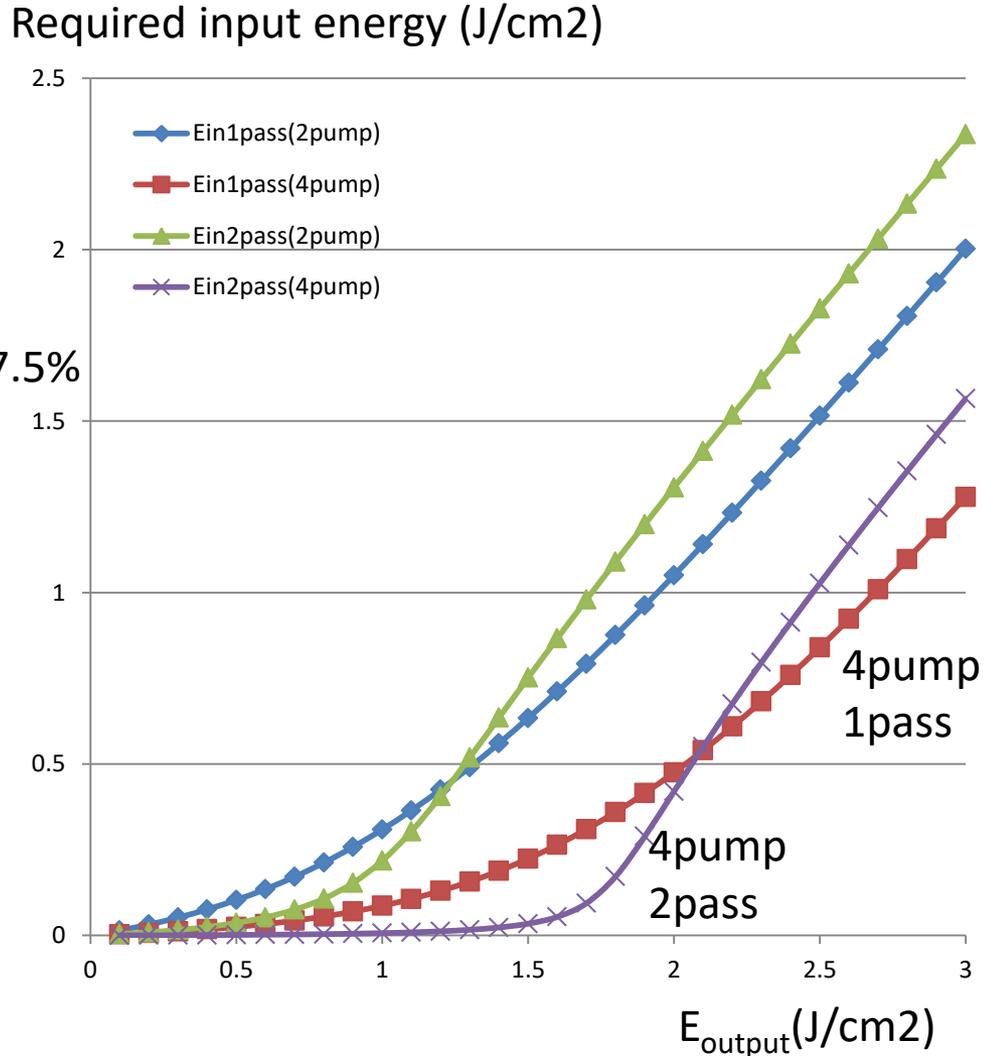
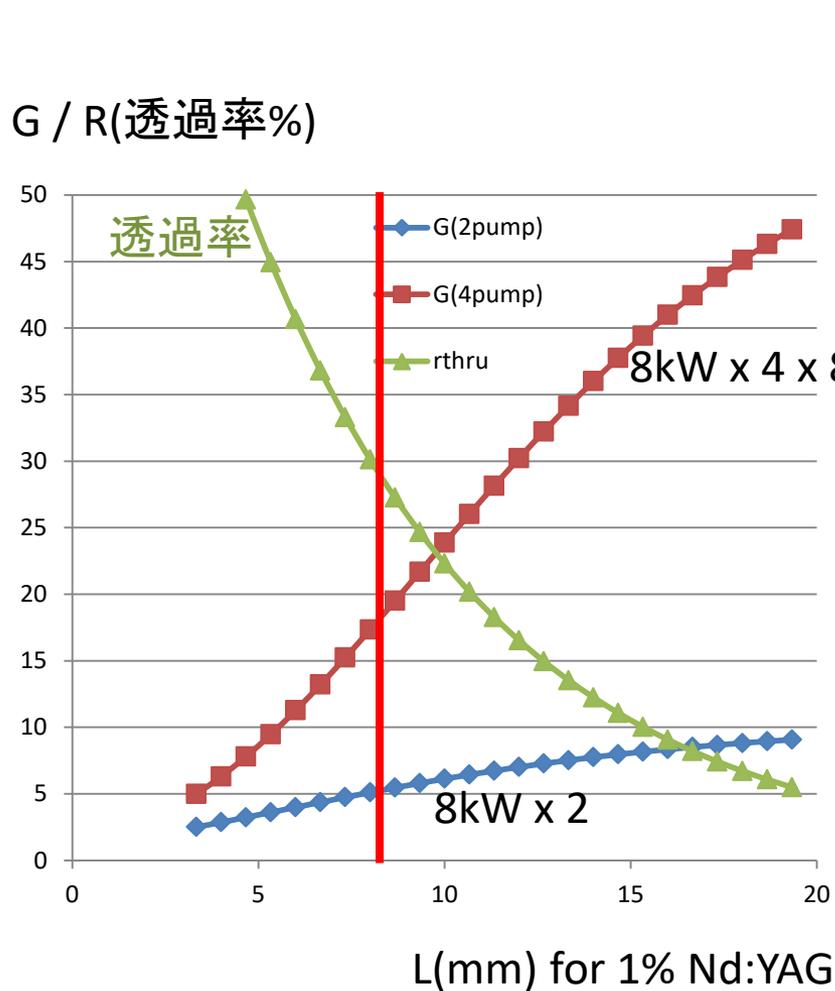
$$e^{E_1/E_s} - 1 = (e^{E_0/E_s} - 1) G_0 = x_1 = x_0 G_0 : \text{Frantz-Nodvik eq.}$$

$$e^{E_2/E_s} - 1 = (e^{E_1/E_s} - 1) G_1 = (1 - e^{-E_1/E_s}) e^{E_0/E_s} G_0 = \left(1 - \frac{1}{1 + (e^{E_0/E_s} - 1) G_0} \right) e^{E_0/E_s} G_0 = \frac{x_0 G_0^2 (x_0 + 1)}{1 + x_0 G_0} : \text{for 2nd-pass}$$

$$G_0^2 x_0^2 + (G_0^2 - G_0 x_2) x_0 - x_2 = 0, \quad x_0 = \frac{-G_0^2 + G_0 x_2 + \sqrt{G_0^4 - 2G_0^3 x_2 + G_0^2 x_2^2 + 4G_0^2 x_2}}{G_0^2}, \quad E_0 = E_s \log(x_0 + 1)$$

Required input energy for 2-pass amp

- Saturation fluence : 0.5 J/cm^2 (0.66 J/cm^2 @ $\sigma=28 \times 10^{-20}$)



Efficiency

$$\eta = \frac{E_1 - E_0}{E_{pump}} = \frac{E_s (\log(x_0 G_0 + 1) - \log(x_0 + 1))}{E_{pump}}$$

$$\rightarrow \eta_{\max} (x_0 \gg 1) = \frac{E_s \log(G_0)}{E_{pump}} = \frac{1/h\nu_{pump} (1 - e^{-\alpha L})}{1/h\nu_e} = \eta_{stokes} (1 - e^{-\alpha L})$$

$$q = \frac{E_{pump}}{E_s}, \quad g_L = \frac{E_{pump} / h\nu_{pump} (1 - e^{-\alpha L})}{E_s / h\nu_e} = q\eta_{\max}, \quad G_0 = e^{q\eta_{\max}}$$

$$\eta = \frac{E_1 - E_0}{E_{pump}} = \frac{\log(x_1 + 1) - \log(x_1 e^{-q\eta_{\max}} + 1)}{q}$$

$$\frac{x_n}{x_{n-1}} = \frac{e^{E_n/E_s} - 1}{e^{E_{n-1}/E_s} - 1} = G_0 \rightarrow \frac{x_n}{x_0} = G_0^n = e^{nq\eta_{\max}}$$

$$\eta_{total} = \frac{E_n - E_0}{nE_{pump}} = \frac{\log(x_n + 1) - \log(x_0 + 1)}{nq} = \eta_{\max} \frac{\log(x_n + 1) - \log(x_0 + 1)}{\log(x_n) - \log(x_0)} = \eta_{\max} \eta_{amp}$$

$$\frac{E_{pump}}{P_{pump} / AT_{pulse}} = \frac{\left(1 - e^{-\frac{T_{pulse}}{\tau}}\right)}{\frac{T_{pulse}}{\tau}} \eta_{pump} \eta_{quantum}$$

$$\frac{\left(1 - e^{-\frac{T_{pulse}}{\tau}}\right)}{\frac{T_{pulse}}{\tau}} = 0.63$$

$$\eta_{pump} \eta_{quantum} = 0.8 \text{ (experimental)}$$

$$\eta_{stokes} = 0.83$$

$$(1 - e^{-\alpha L}) = 0.86$$

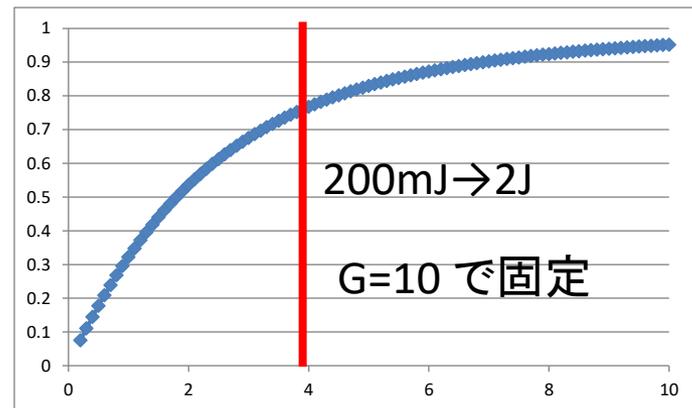
$$\eta_{amp} = 0.77 \text{ (200mJ} \rightarrow \text{2J)}$$

$$\eta_{all} = 0.27$$

7.4J pump is required to obtain 2 J output

$$\frac{\log(x_n + 1) - \log(x_0 + 1)}{\log(x_n) - \log(x_0)} = \eta_{\max} \eta_{amp}$$

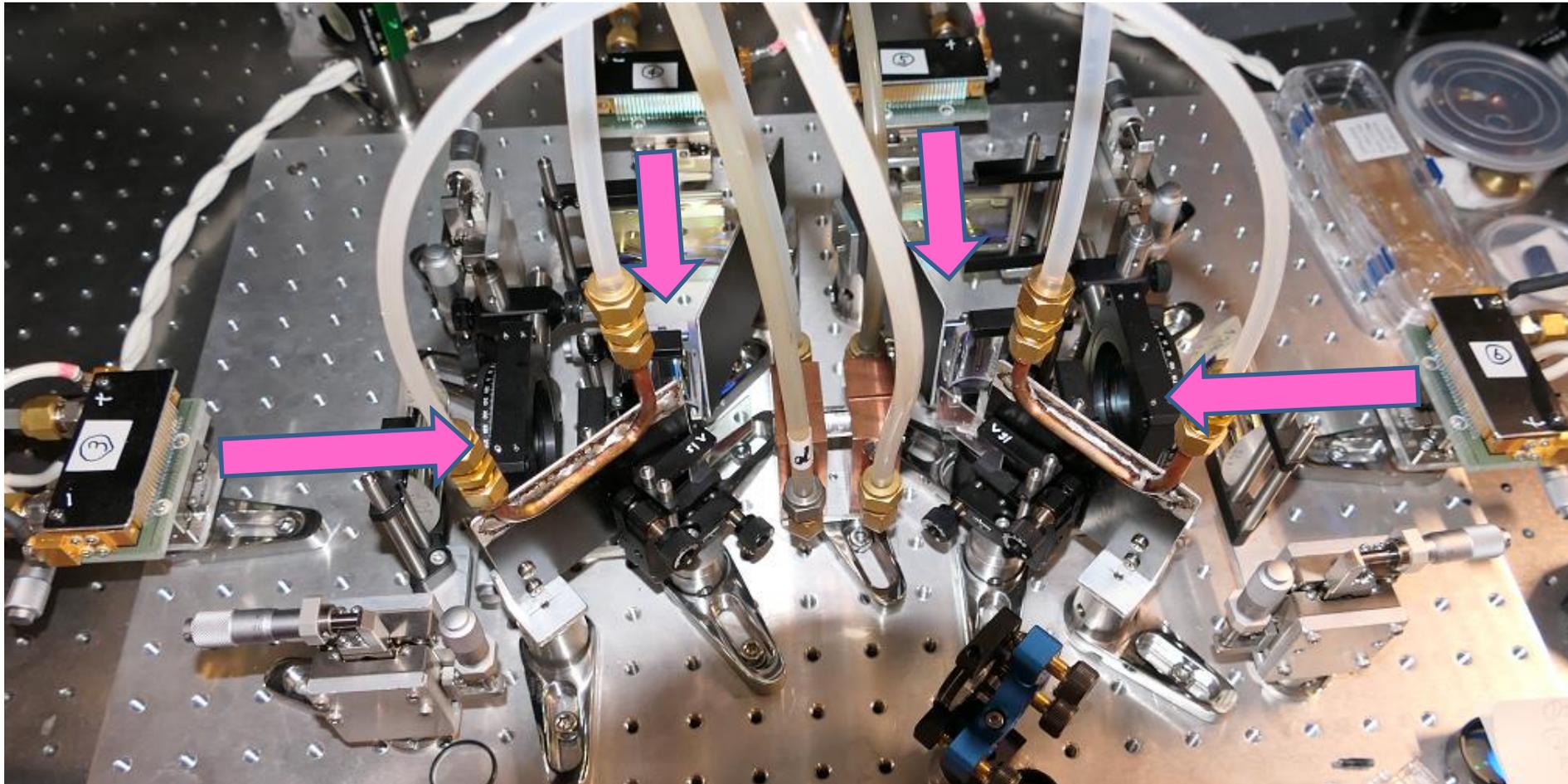
η_{amp}



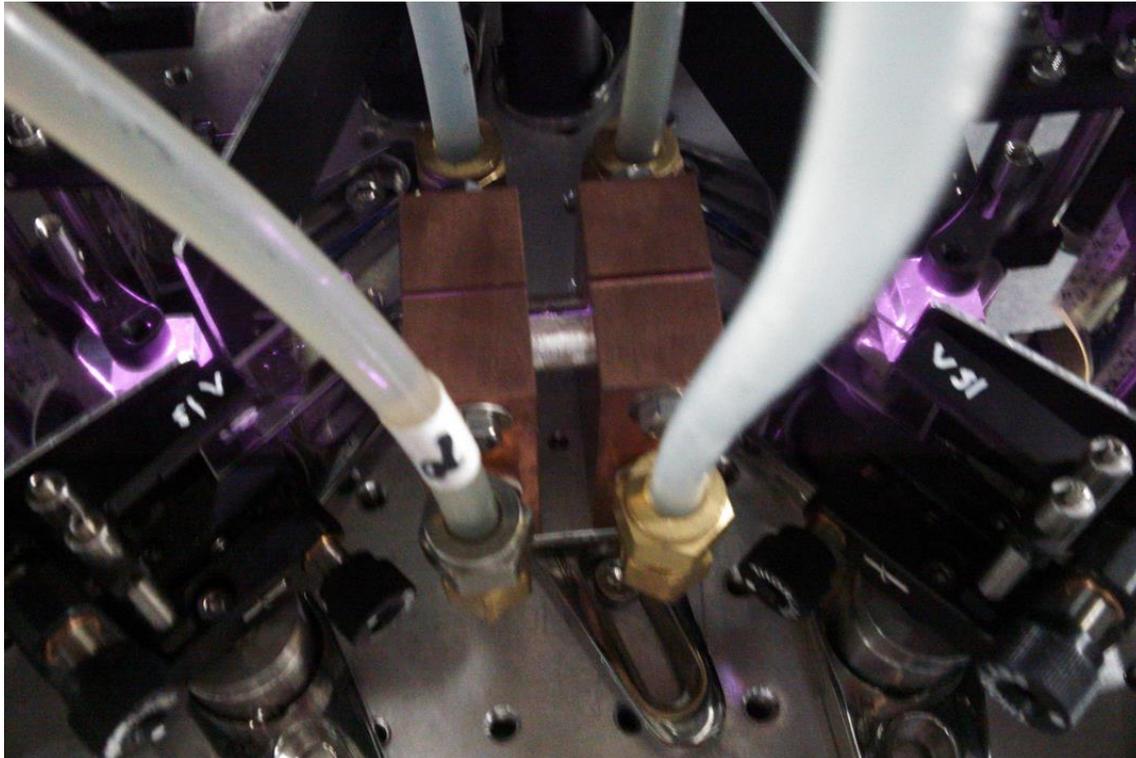
E_n/E_s

4-pump

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



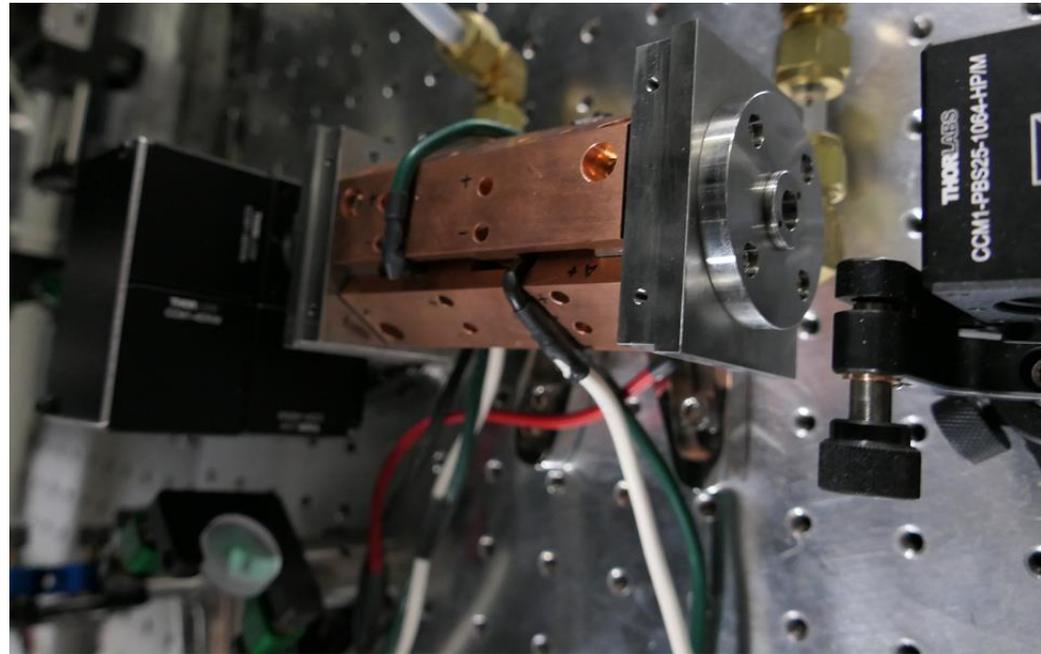
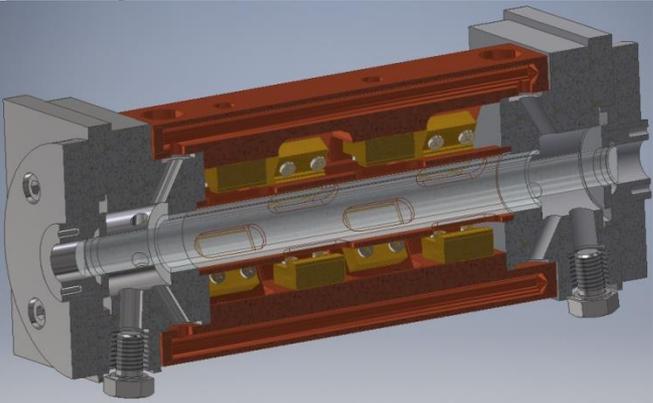
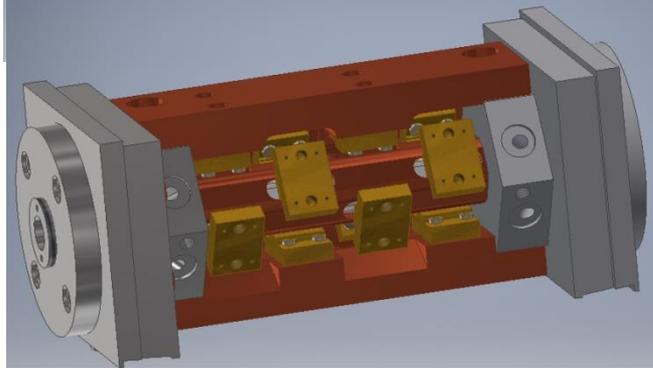
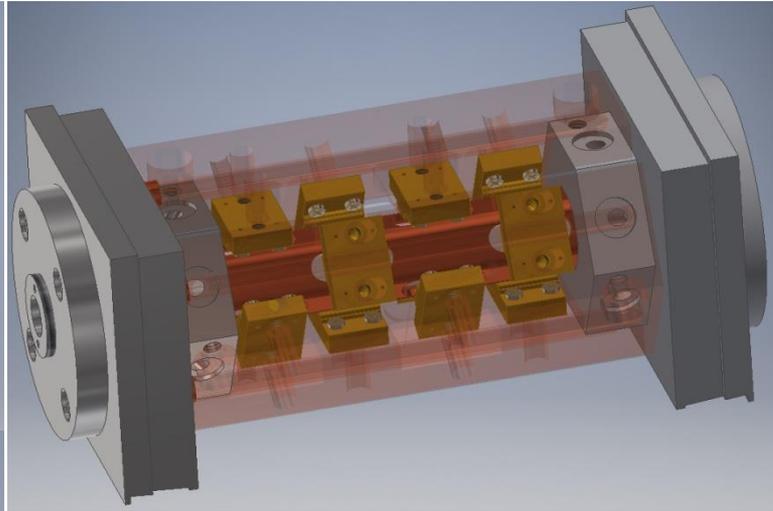
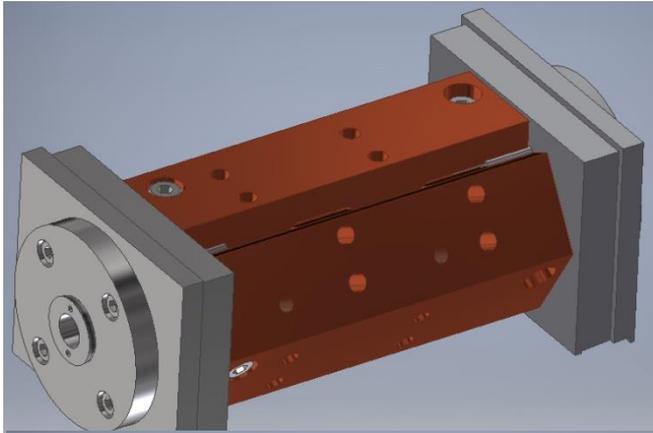
Nd:YAG 1.1%



885nm 透過率：10%

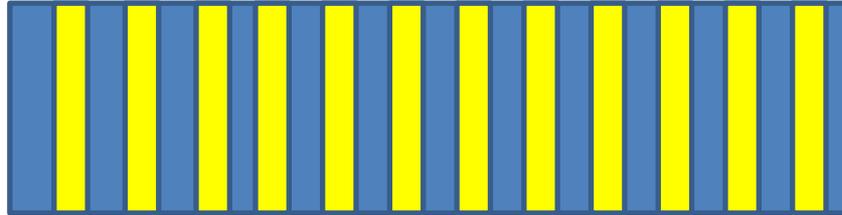
Preamp 用 DPSS module

- 808nm 1.2kW x 12個=14.4kW=3.6J DPSS module



Nd:YAG DFC 試験状況

DFC 熱伝導

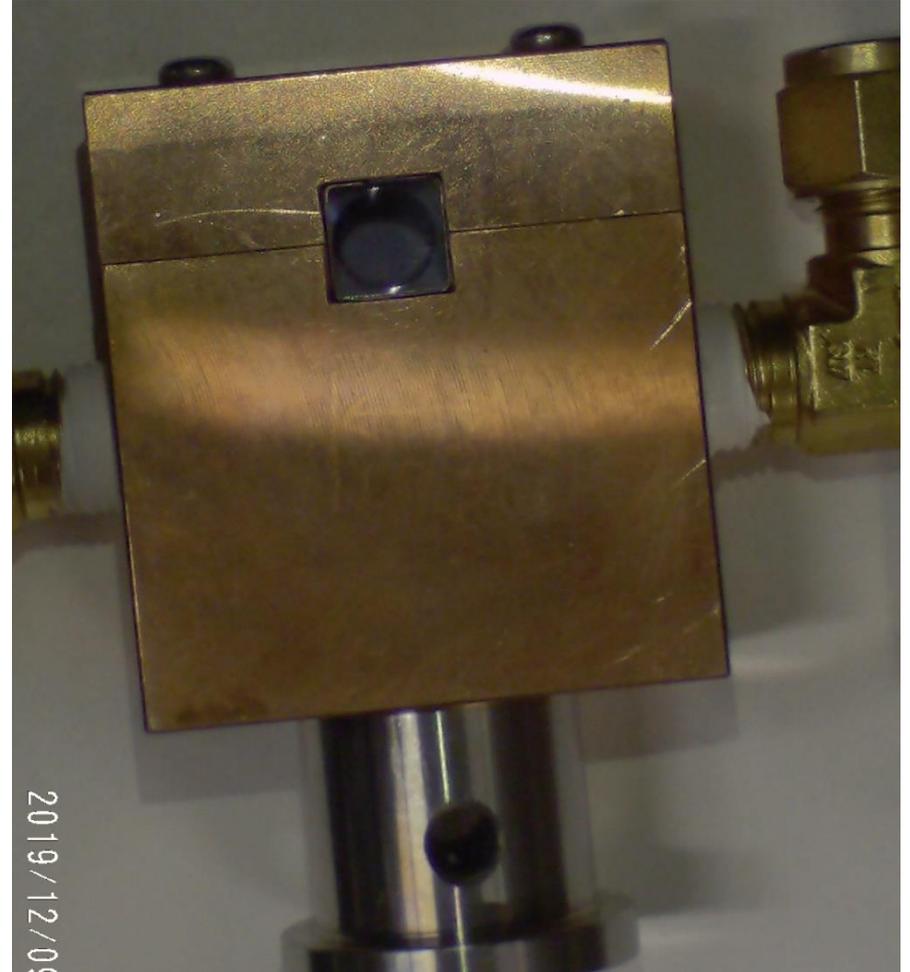
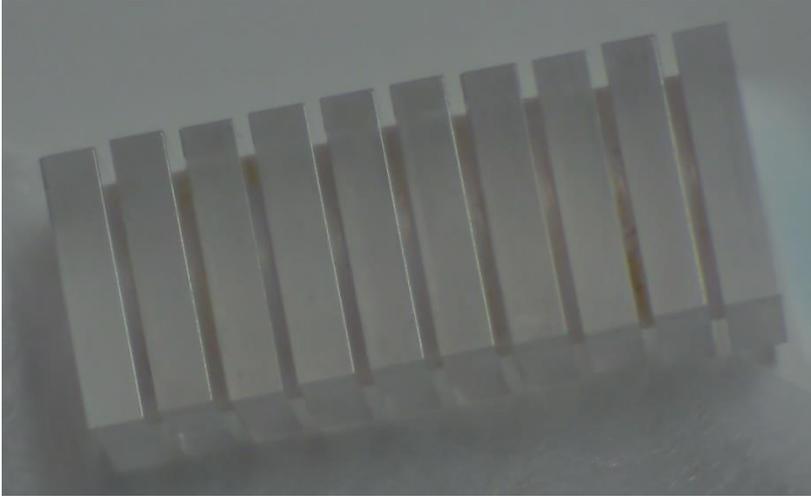


3mm(Sapphire) + 0.65mm(Nd:YAG) x 20 stack → 75mm

P _{loss}	Δ T
16.4058	78.1228
15.3161	72.934
14.3722	68.4392
13.565	64.5954
12.8869	61.3662
12.3314	58.7209
11.8932	56.6341
11.5681	55.0862
11.3531	54.0624
11.2461	53.5529
11.2461	53.5529
11.3531	54.0624
11.5681	55.0862
11.8932	56.6341
12.3314	58.7209
12.8869	61.3662
13.565	64.5954
14.3722	68.4392
15.3161	72.934
16.4058	78.1228

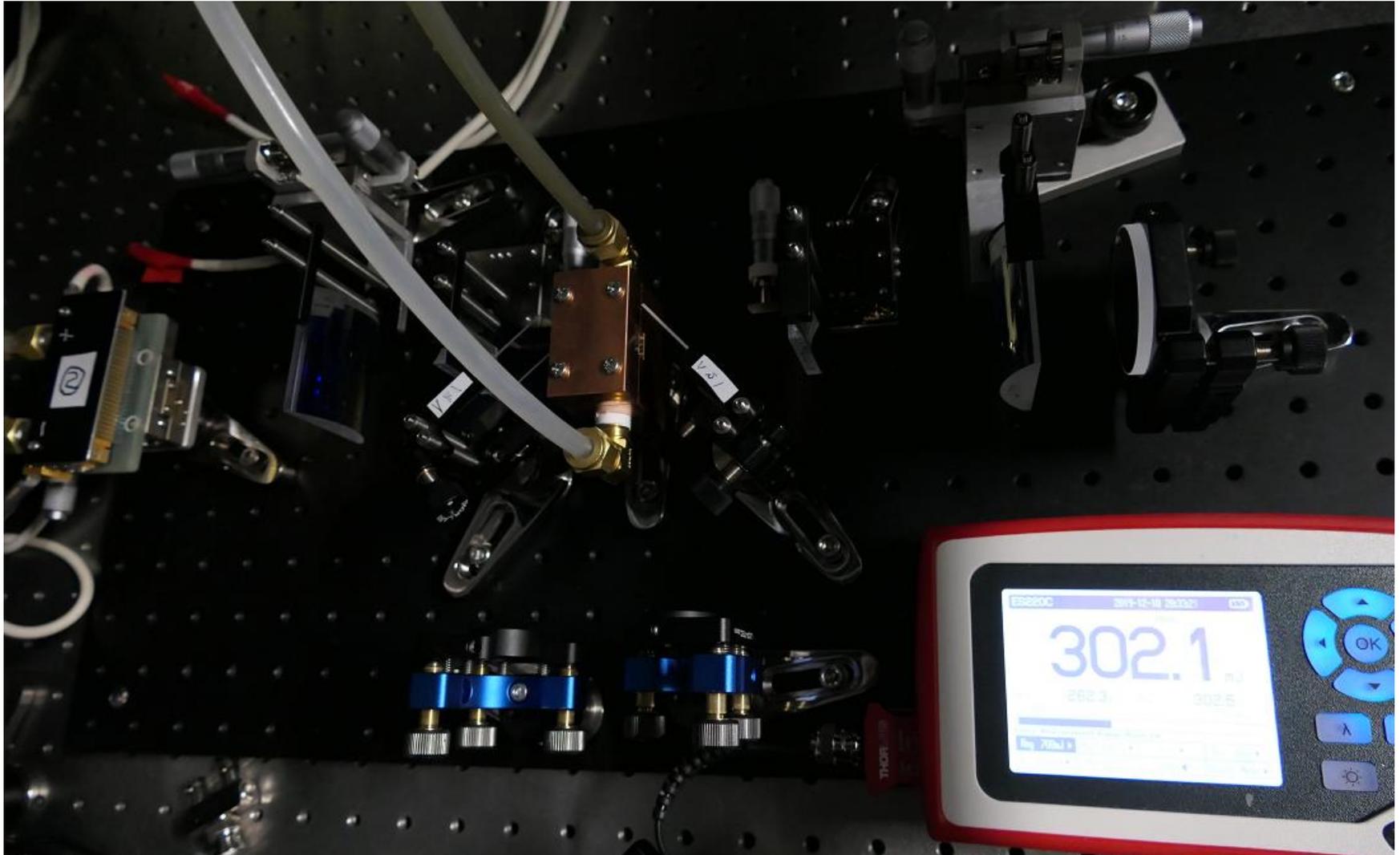
Nd:YAG DFC

- 0.65t x 9 Nd:YAG + 2t x 10 Sapphire = 25mm



Nd:YAG DFC

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



5J モジュールの開発検討

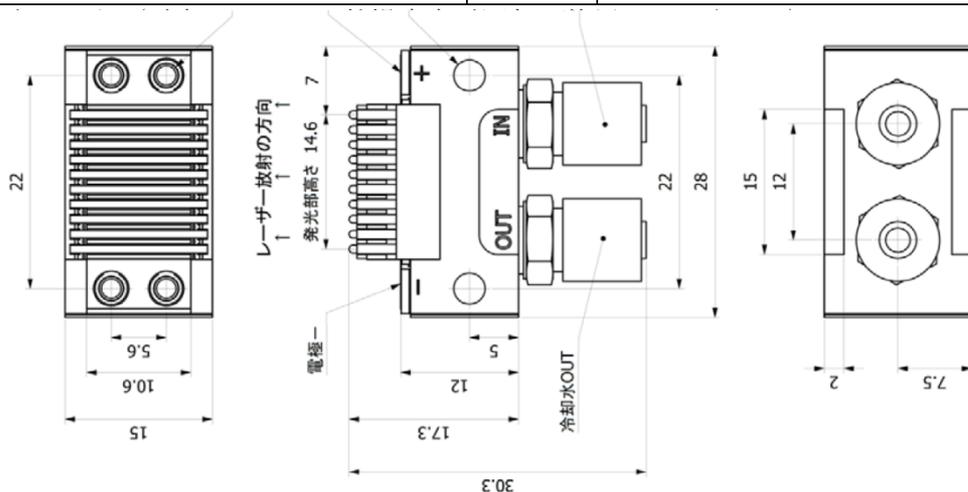
NEDO用LD 1kW/barの実績有

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。

定格7.5kW

項目	記号	定格	単位
パルス順電流	I_{fp}	800	A
ピーク光出力	Φ_{ep}	8.5	kW
パルス幅	t_w	1.0	ms
デューティ比	DR	1.0	%
逆電圧	V_R	2	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 注1)	%
冷却水条件	冷却水媒体	—	市水
	冷却水温度 (冷却水 IN 側)	—	+15 ~ +30
	冷却水圧力 (ヒートシンク部)	—	0.3 注3)
	冷却水流量 (全体)	—	0.8 ~ 1.8



180万円/stack(10bar)
18万円/750W

現在のモジュールは
300万円/stack(25bar)
12万円/350W

5J モジュールの開発

- 15mm x 15mm DFC
- 750W/bar × 27bar = 20 kW (現在の2.5倍)
 - 1.5mm ピッチ → 2.5mm ピッチ
 - マイクロチャンネル冷却

FY2020

DFC励起 小型Ti:Sapphire レーザー構築

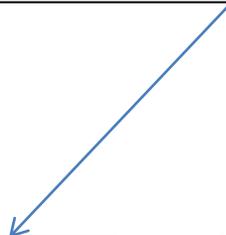
2J DFC → YCOB/QPM → 1J SHG

Oscillator
+Pulse picker
+Stretcher

OPCPA

Ti:Sapphire

Compressor
透過型グレーティング
(将来はVBG開発)



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 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