

平成25年1月10日

第10回高輝度・高周波電子銃研究会

# ファイバーレーザー駆動による SバンドRFガンの安定化

上坂 充、小山 和義、松村 陽介、上田 徹  
東京大学大学院工学系研究科原子力専攻

室屋 裕佐

大阪大学産業科学研究所

吉田 光宏

高エネルギー加速器研究開発機構

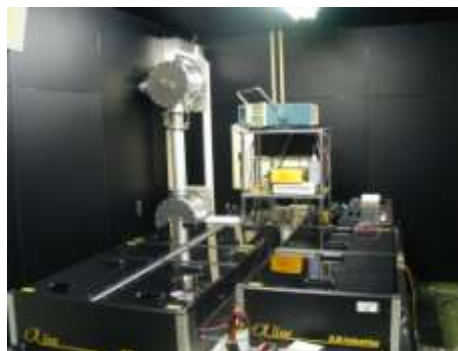
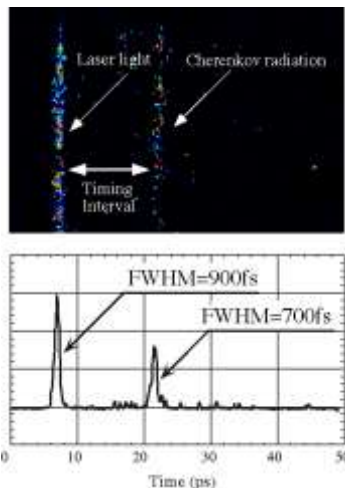
大熊 春夫

高輝度光科学研究センター

# 発表内容

1. 東大Sバンドライナック・レーザーシステムの現状
2. 東大原子力専攻でのファイバーレーザー開発
3. RFガン駆動用新ファイバーレーザーシステム
4. まとめ

# Sバンドツイン電子ライナック・レーザーシステム

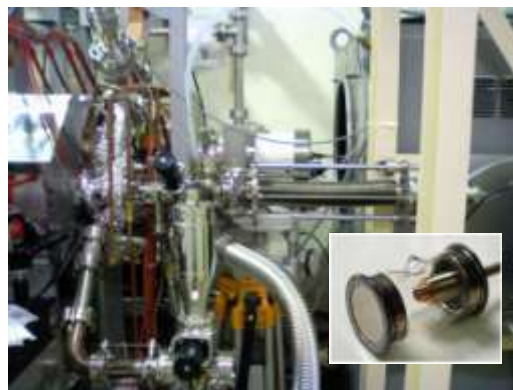
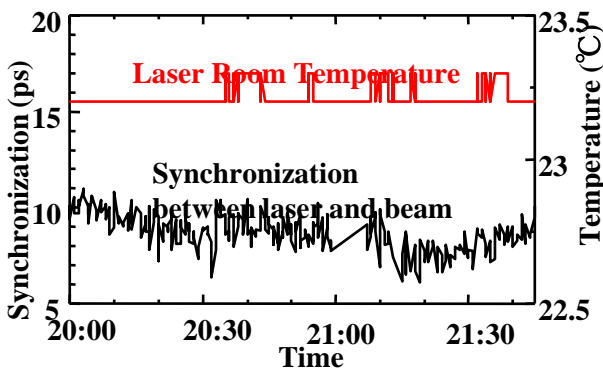


レーザーと電子ビームの同期が  
600fs(RMS)で、世界最高クラス

カートリッジ式カソード交換システムと  
カソードカートリッジプラグ

Femtosecond Beam Scienceの創成

フォトカソード使用実績



Cathode		QE	Charge (max)
Cu	BNL	$1.4 \times 10^{-4}$	10 pC
	SLAC	$3 \times 10^{-5}$	15 pC
	U-Tokyo	$1.4 \times 10^{-4}$	7 nC (@250 $\mu$ J)
Mg	BNL	$5 \times 10^{-4}$	4 nC (@70 $\mu$ J)
	SHI	$1 \times 10^{-3}$	< 2 nC
	U-Tokyo	$1.3 \times 10^{-4}$	4 nC (@70 $\mu$ J)
Cs <sub>2</sub> Te	CERN	0.015	2.4 nC
	KEK	<0.01	1.6 nC (@several $\mu$ J)
	U-Tokyo	<0.01	9 nC (@several $\mu$ J)
Na <sub>2</sub> KSb	U-Tokyo	<0.01	4nC (@several $\mu$ J)

- M. Uesaka, et al., *Phy. Rev. E* 50 p3068(1994) (世界初の700fs電子パルス)
- M. Uesaka, et al., *Trans. Plasma Science*, 28,4,p.1133(2000) (200fs高品質ビーム)
- M. Uesaka et al., *Nucl. Instr. Meth. B*241 p.880 (2005) (安定同期システム)

# ライナック被災状況



ライナック本体室



パルスラジオリシス制御系



パルスラジオリシス測定系



電源喪失

高圧ブレーカー破損

(6600V400A)

パルスラジオリシス測定系  
破損

レーザーランジット破損、

パルスジェネレータ破損

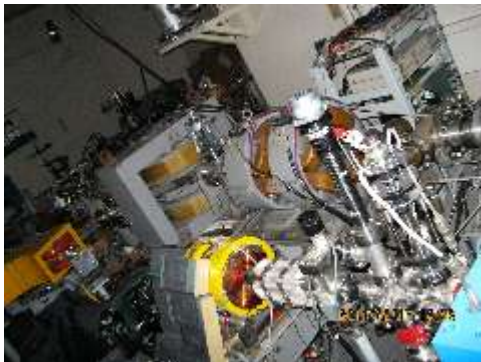
オシロスコープ破損

高圧変電室外壁破損→漏  
水

ビームポート漏水

建家外壁ひび割れ

# ライナック被災状況



駆動レーザーシステム破損  
→復旧対応中  
ビームアライメント  
→復旧対応中  
マグネットアライメント  
→復旧対応中

# ライナック被災状況



フェムト秒チレンコフ光測定系破損→復旧対応中

高圧電源室隔壁破損漏水→復旧対応中

ビームポート漏水→復旧対応中



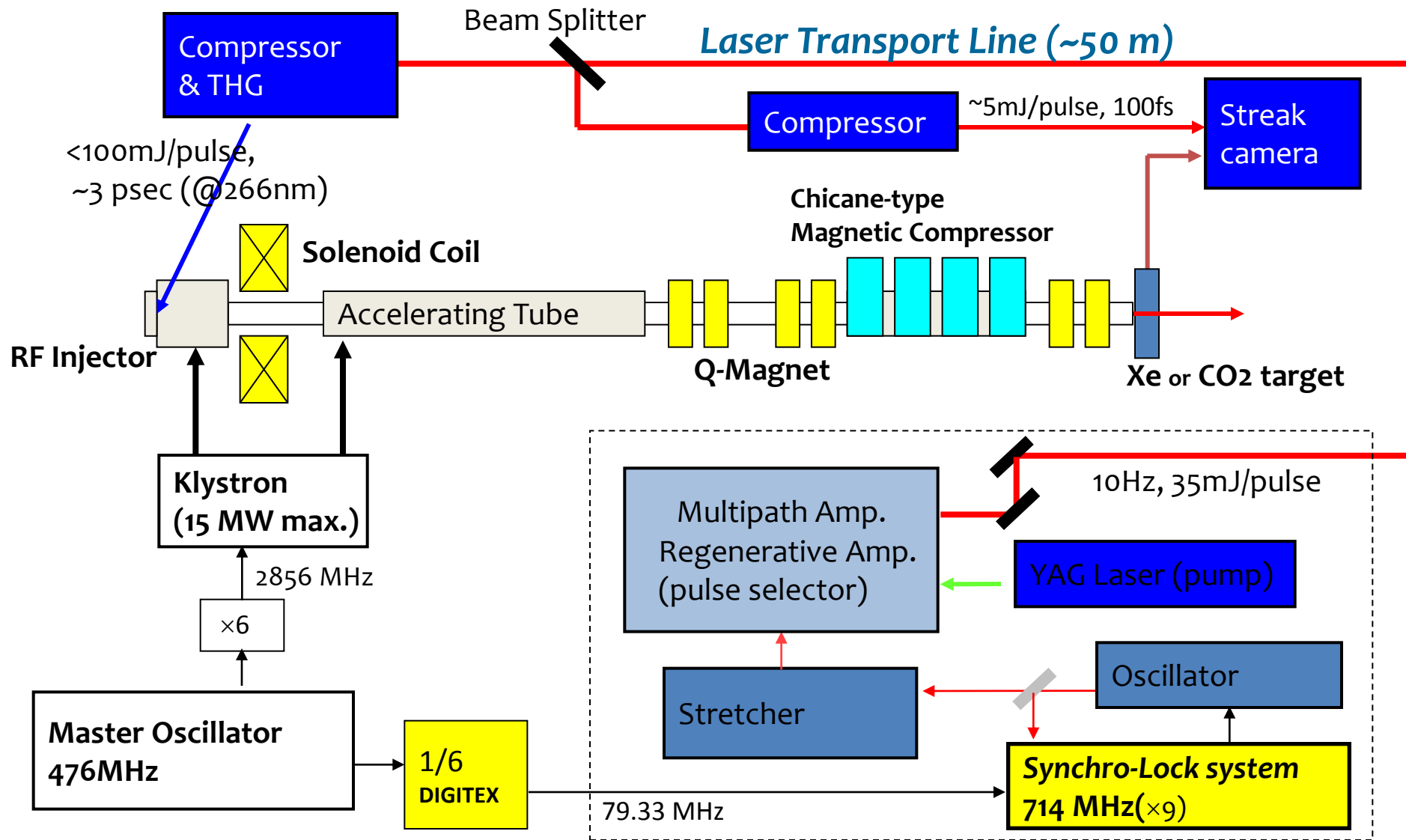
建家周辺地盤沈下、

雨水ピットより漏水→対応済

建家土盛り部分地割れ→復旧対応中

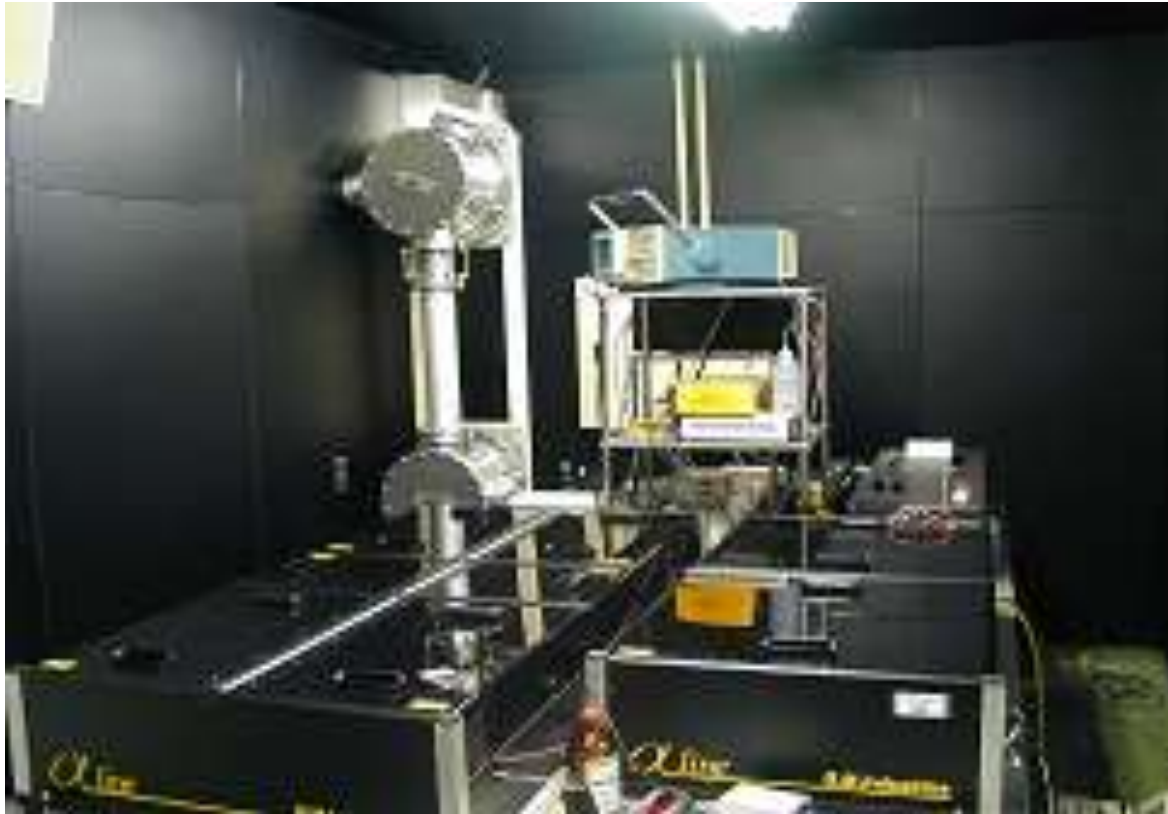


# 加速器とレーザーの同期システム



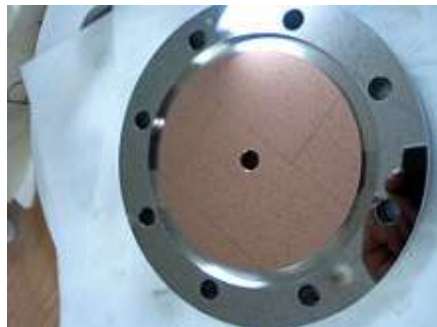
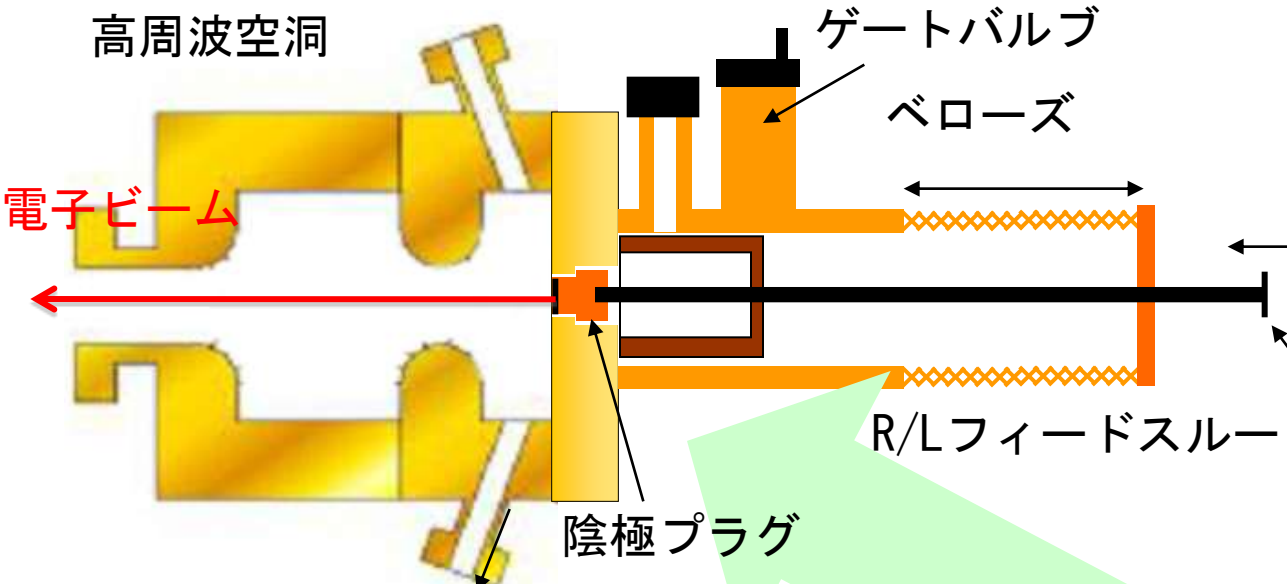
フォトカソードへフェムト秒パルスレーザーを照射することにより電子発生

# 光陰極励起用0.3[TW] Ti:Sa レーザー



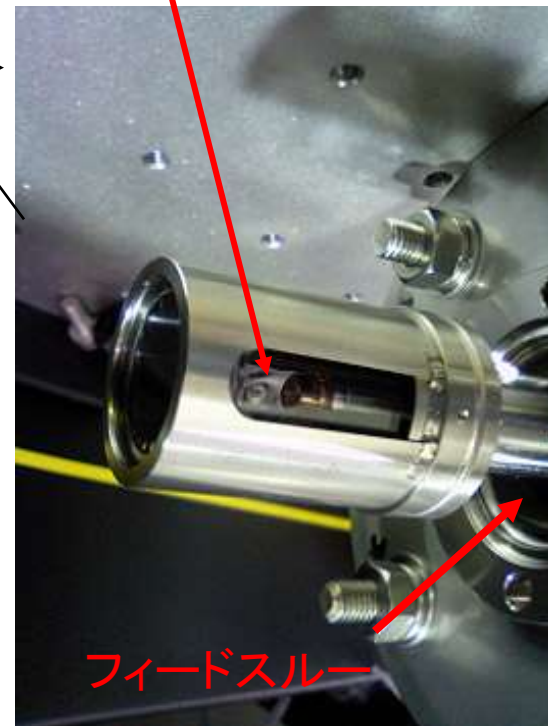
- 800 nm (Fundamental) => 1.5[eV] ( $\sim$ 30[mJ])
- 400 nm (2nd harmonic) => 3.1[eV]
- 266 nm (3rd harmonic) => 4.66 [eV] ( $\sim$ 100[ $\mu$ J])





端板

陰極プラグ  
(Cu, Cs<sub>2</sub>Te, Multi-Alkali)

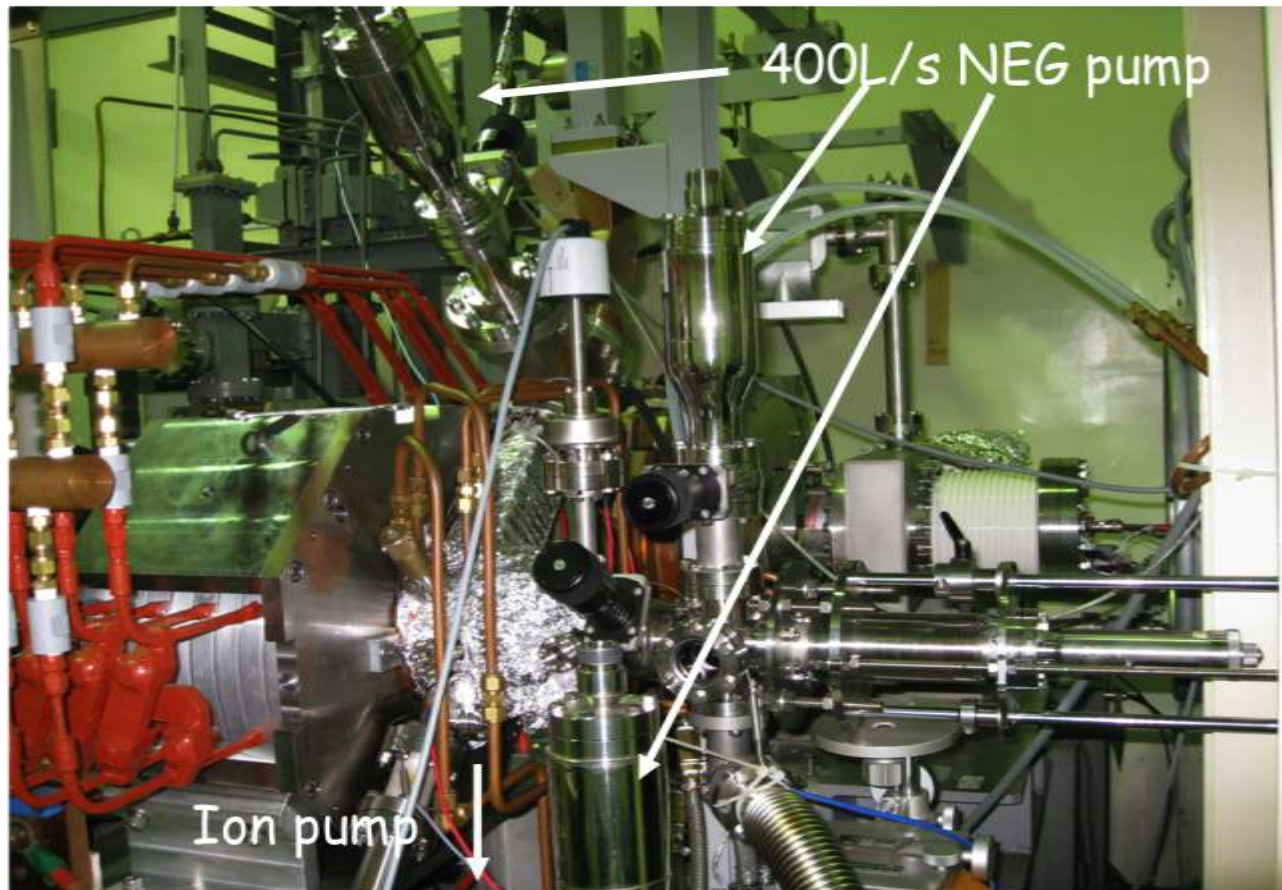


フィードスルー

真空を保ったまま陰極を端板まで輸送できる。

浜松ホトニクス(株) 製作

# 電子銃周辺の真空系

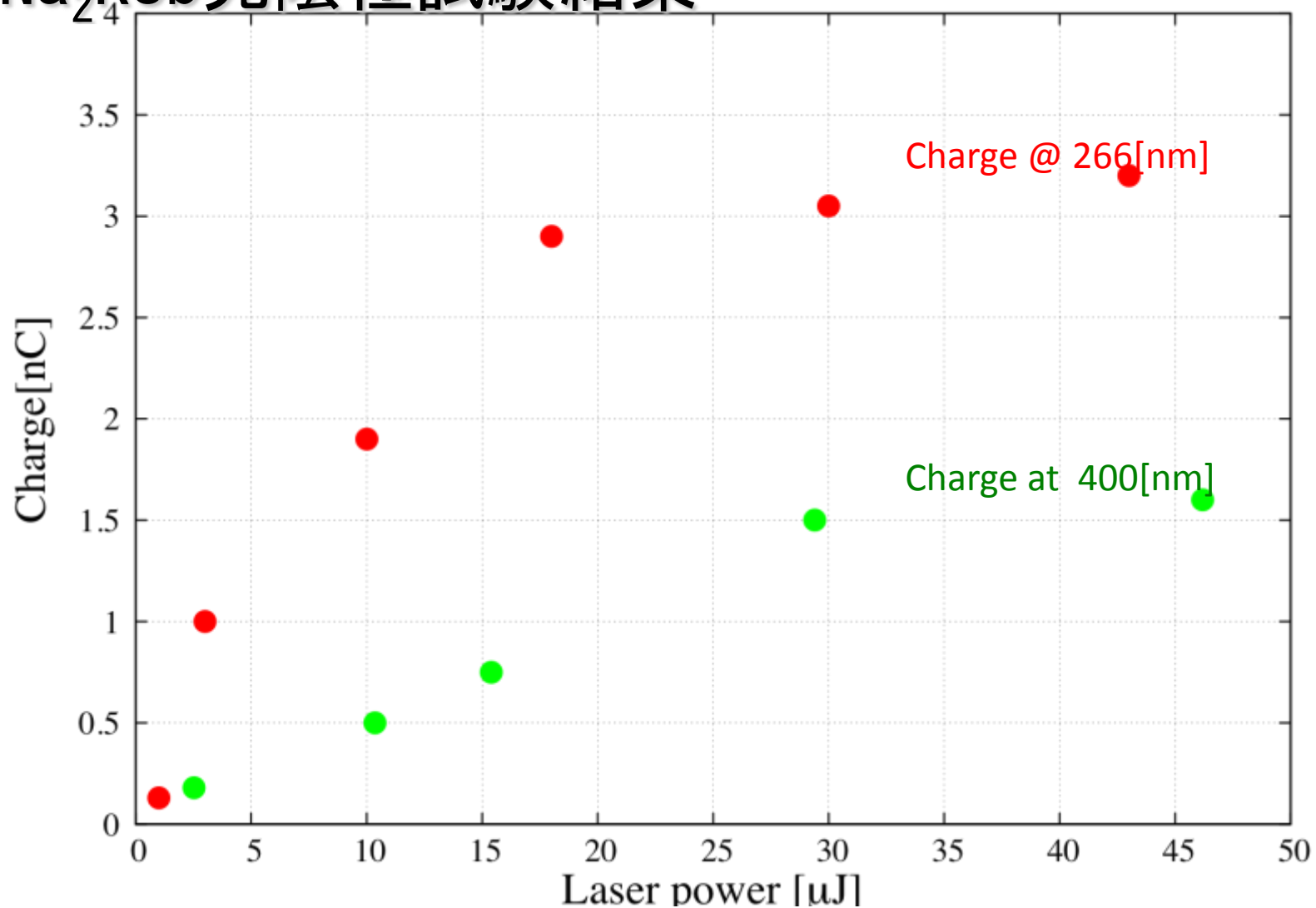


電子銃を超高真空に保つために  
400[L/s]NEGポンプ 3台、  
140[L/s]イオンポンプ1台 で真空引き



・到達真空度  
イオンポンプ  $1.2 \times 10^{-6}$  [Pa]  
端板後方  $2.5 \times 10^{-6}$  [Pa]  
比較的低い真空度で運転

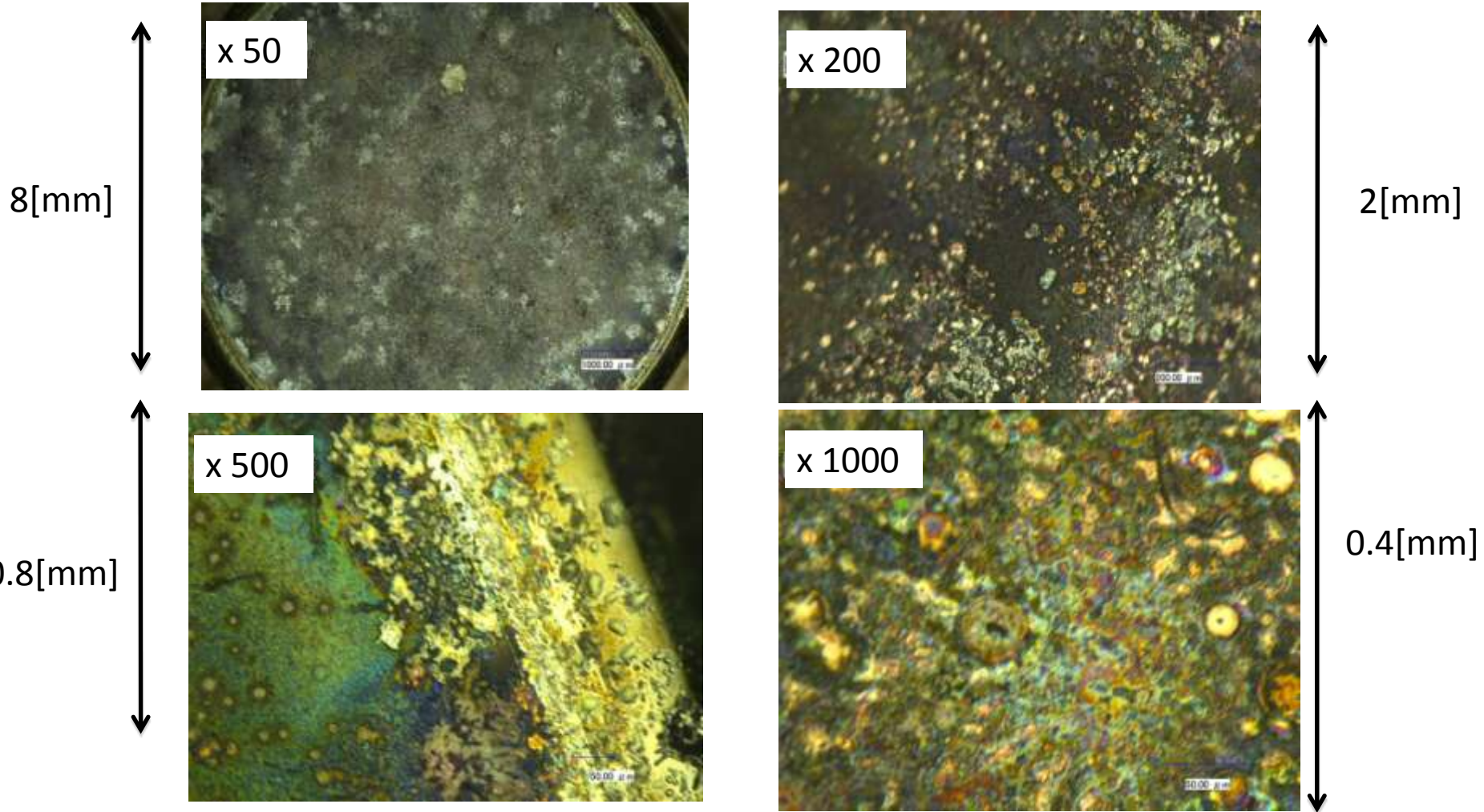
# Na<sub>2</sub>KSb光陰極試験結果



陰極プラグ挿入から90日後に測定。可視光400nmレーザーにより駆動に成功。試験時多数回の放電を観測。

# Close view of photocathode after discharge

Microscope view



Damaged photocathode after discharge  
→ Decrease of QE

Added an ion-pump and replaced cathode plug

# Na<sub>2</sub>KSbカソード状況のまとめ

- RF電子銃において、Na<sub>2</sub>KSb光陰極の試験を行った。
- 266nmレーザーで2300hにてQE≒0.02%の動作に成功
- 可視光400nmレーザーで駆動に成功し1.6 nCの電子バンチ発生を確認した
- 放電や残留ガスによる陰極表面の劣化の可能性があり、QE、パルス当たりチャージ量の向上、メカニズムの解明が必要と予想される

# JAEAと共同のマルチアルカリ光電面の開発

- - 可視光レーザーで駆動可能な高輝度光陰極を開発する
- JAEA ERL羽島氏グループのMBE真空蒸着チャンバーお借りしている
- 劣化に耐性を持つ陰極物質の開発



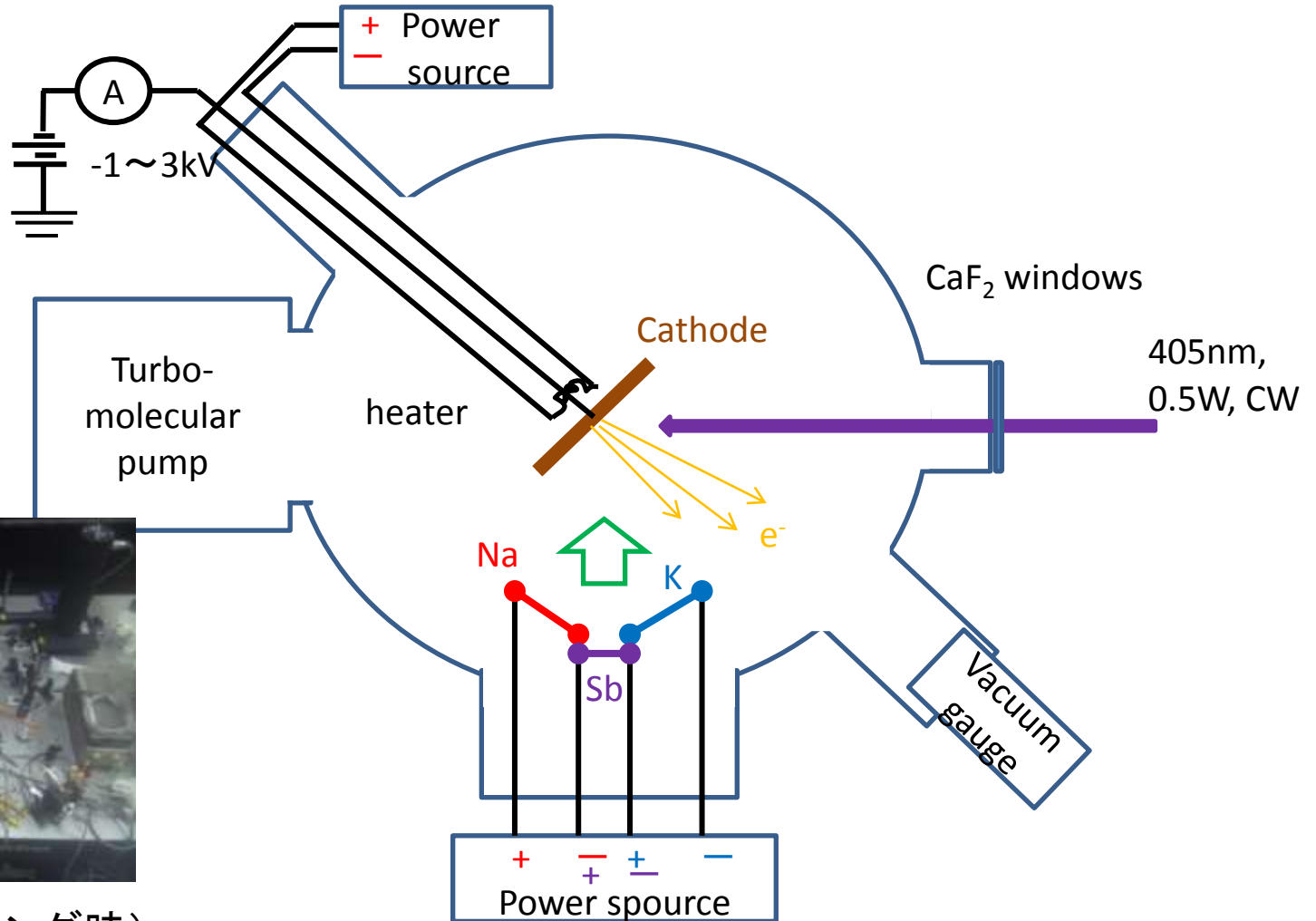
- アンチモン系光陰極の開発
- Cs-Sb でMBE製膜手順・測定系の確立
- Cs-Sb の特性評価 (QE、寿命)
- (Na-K-Sb, Cs-K-Sb, Cs-Na-K-Sb等の試験)

ERL : Energy Recovery Linac

# Na<sub>2</sub>KSbカソードの製膜(KEKと共同)

## 装置概要

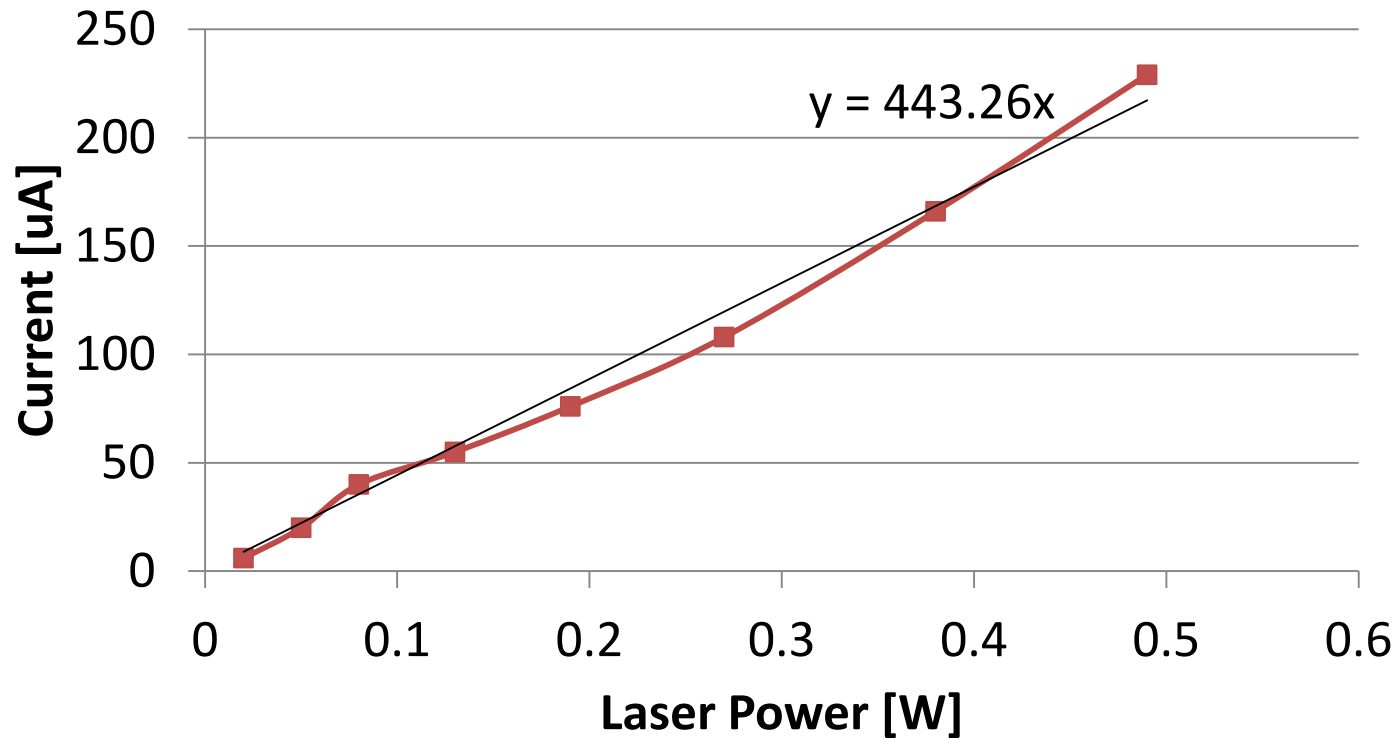
NaとKはディスペンサーに電流を流すことによってカソードに蒸着させ、SbはSb粒をるつぼに入れ、タングステンワイヤーによってるつぼを加熱することでカソードに蒸着させた。カソードは裏のヒーターによって加熱される。光源は波長405nmのLDを使用した。



装置外観(ベーキング時)

# Na<sub>2</sub>KSbカソードのQE測定

Laser:  $\lambda=400\text{nm}$ , CW



→ QE=0.00138

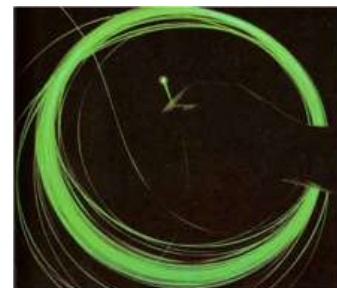
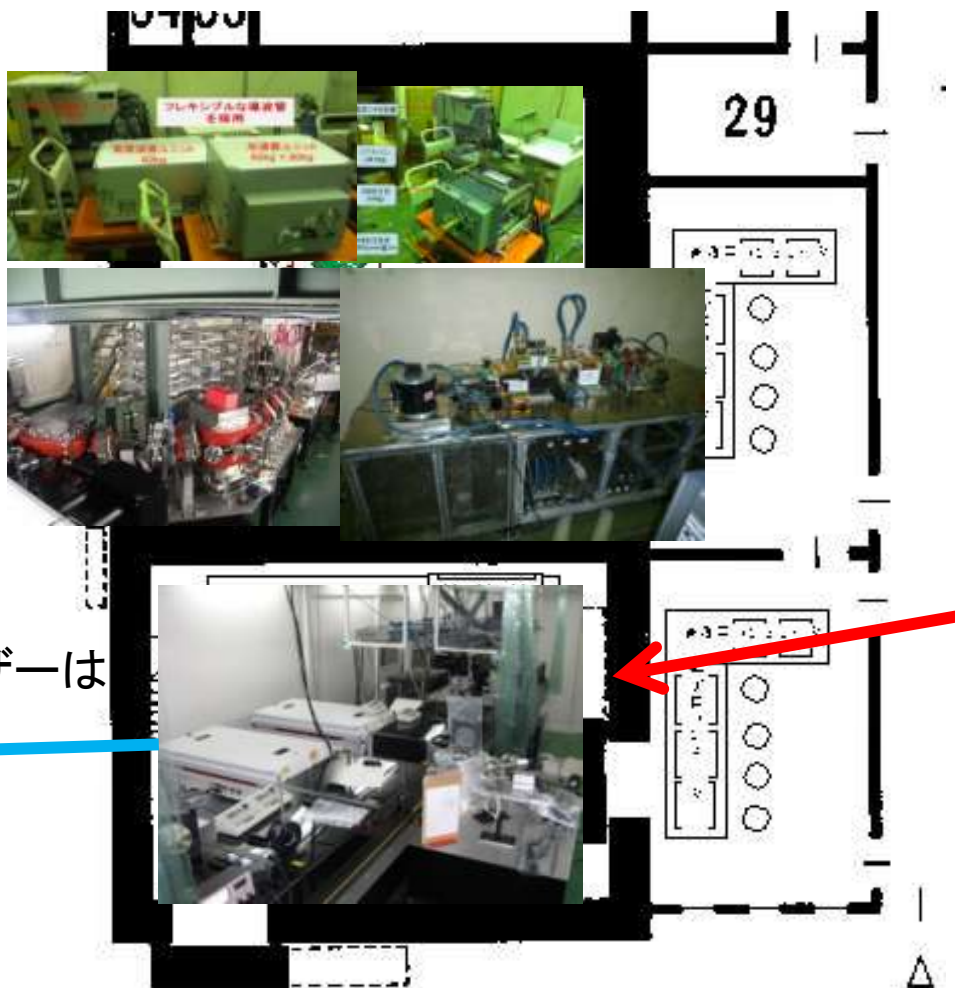
Cs<sub>2</sub>KSbも製作中



# 発表内容

1. 東大Sバンドライナック・レーザーシステムの現状
2. 東大原子力専攻でのファイバーレーザー開発
3. RFガン駆動用新ファイバーレーザーシステム
4. まとめ

# 12TW50fsレーザーをKEKに移設(平成24年7月)し、 ファイバーレーザー駆動オンチップナノサイズビーム 源開発・利用へ移行



1mm以下のマイクロ光ライナック



ブランケット棟1レーザーライナック室

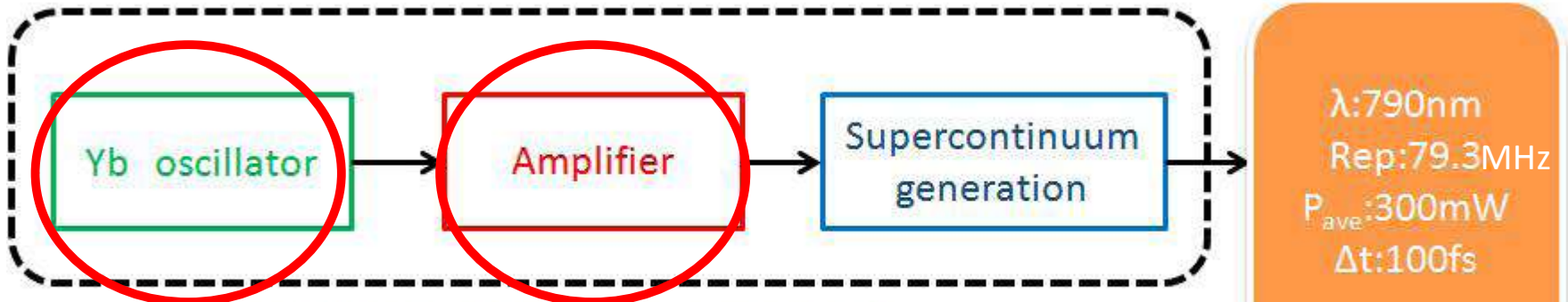
# Er・Ybファイバーレーザーの比較

	Yb	Er	注
準位系	ほぼ2準位	3準位	980nm 励起で考えた
光-光変換効率	92%	63%	980nm 励起で考えた
励起波長	980nm,914nm	980nm,1480nm	
中心波長	1060nm	1550nm	
帯域	50nm	40nm	おおよそ
出力	高出力可	-	Ybは高濃度ドープが可能
他のレーザーとのつながり	Ndと発振帯域が重なる(倍波532nmでTi:Sapphire励起等)	倍波772nmでTi:sapphireの発振帯域と重なる	

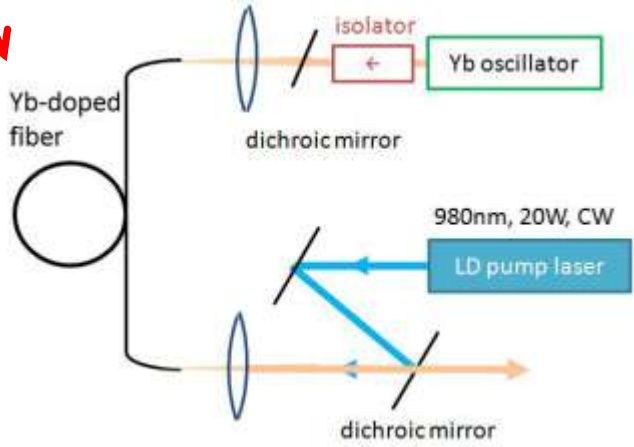
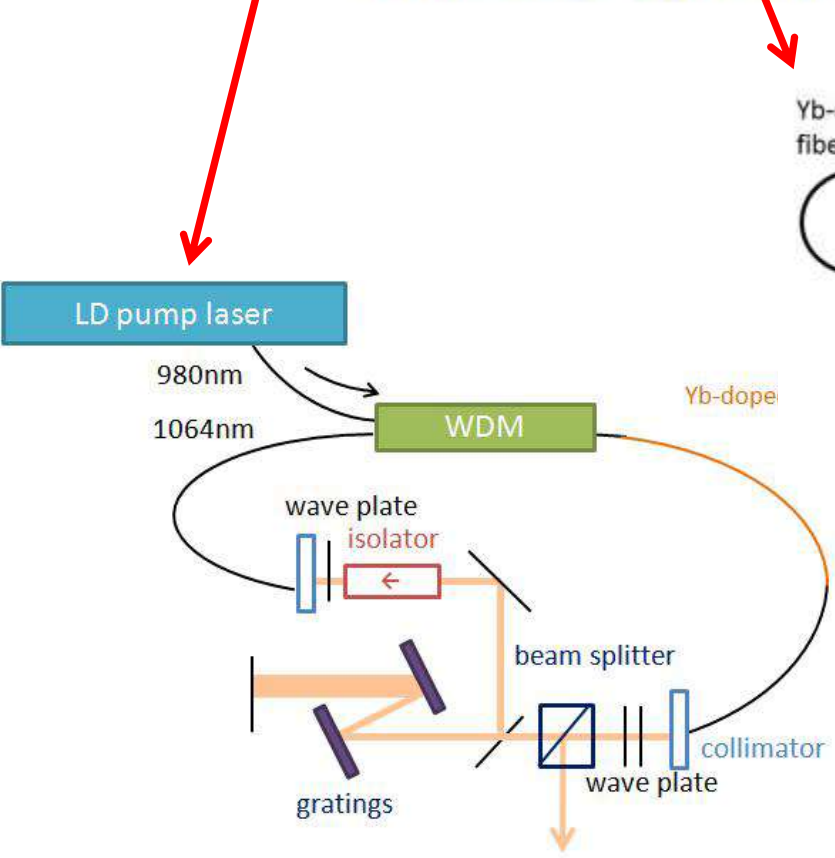
# 東大・KEKのファイバーレーザー開発の方針

- **スーパーコンティニューム光**で波長変換を考えると、高出力化が容易なYbファイバーレーザーを採用
- Ybでスーパーコンティニューム光発生による超短パルスは前例がない
- Ybファイバーレーザーでパルス幅フェムト秒の市販品はない
- オンチップナノサイズビーム源、レーザー加速用オシレータの適用
- ディスクレーザー増幅器を開発

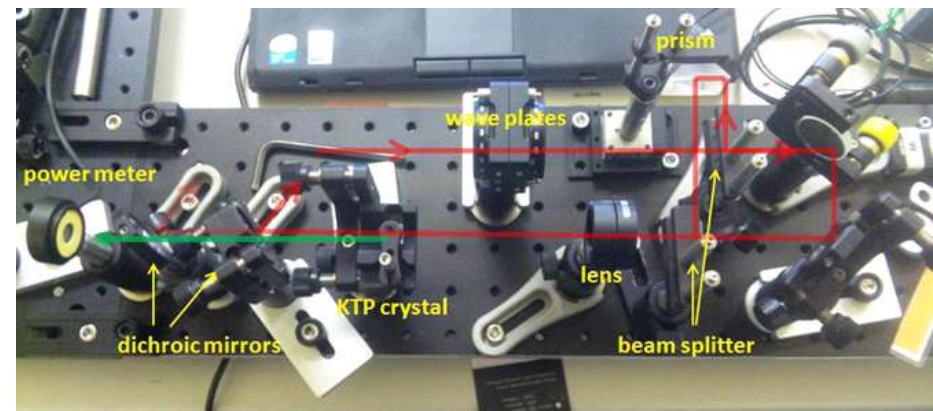
# Ybファイバーレーザーシステムの手作り



Oscillator for S-band Linac and 12TW laser

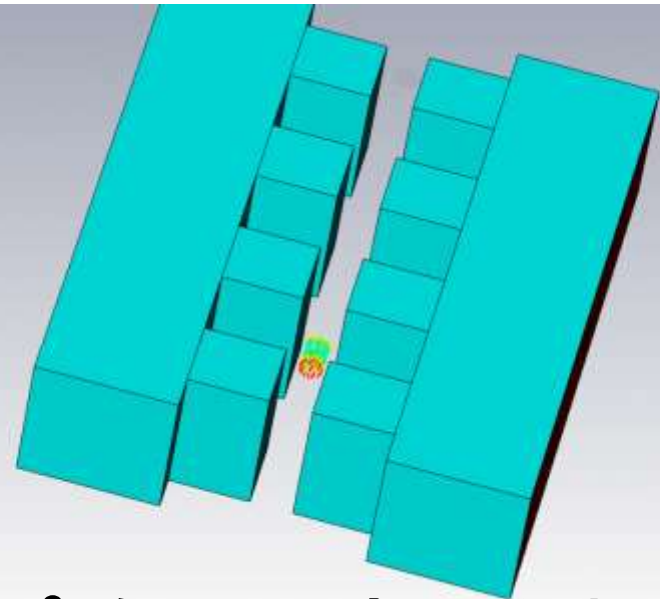
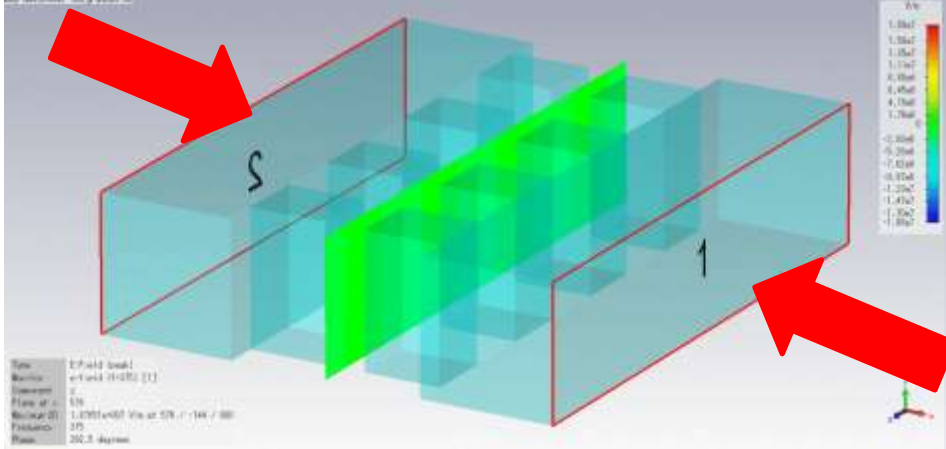


パルス幅計測用  
オートコリレータ

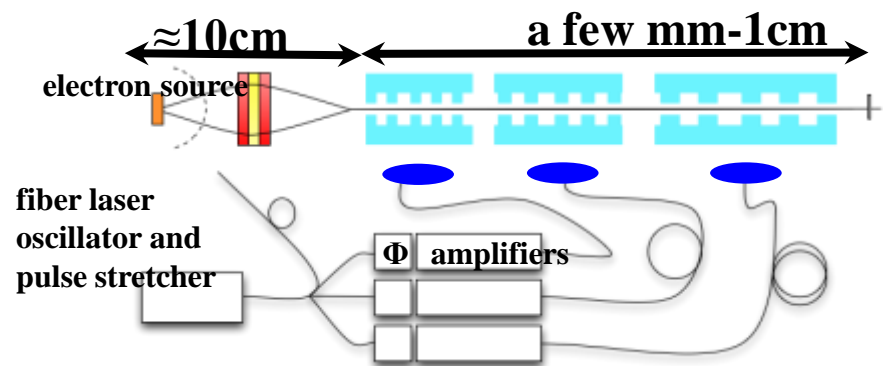


# ナノメートルサイズの電子加速器の数値解析・設計

ファイバーレーザーからの  
レーザーパルス



全体でcm程度のオンチップ線形加速器を製作

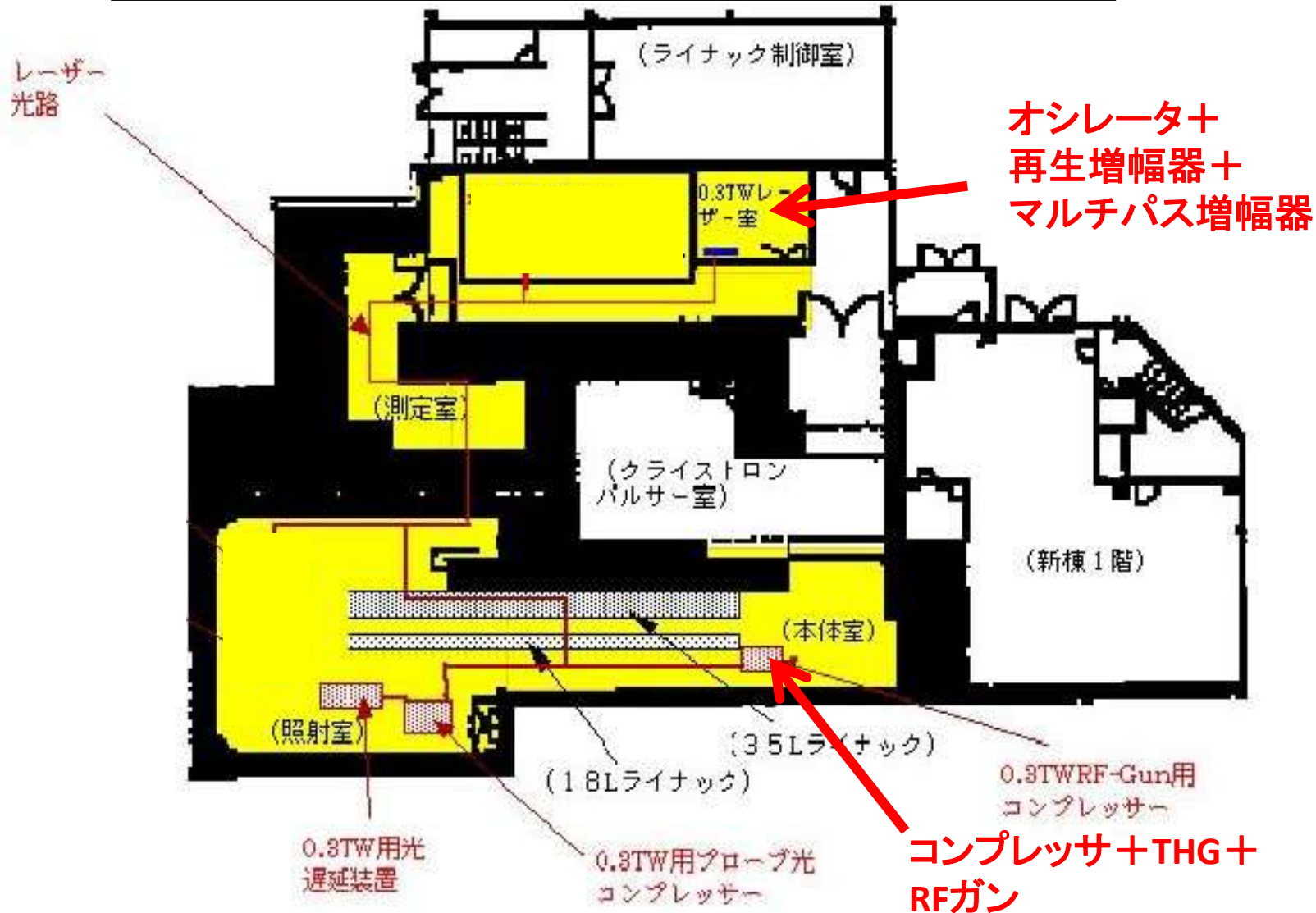


ダイヤモンドマイクロ構造の試作して電界の発生をチェックしたい

# 発表内容

1. 東大Sバンドライナック・レーザーシステムの現状
2. 東大原子力専攻でのファイバーレーザー開発
3. RFガン駆動用新ファイバーレーザーシステム
4. まとめ

0.3TWTi:Saオシレータ+再生増幅器+マルチパス増幅器と  
3倍高調波発生器+RFガンの間の  
40mレーザー伝送ライン(窒素封入、大気圧)



昼夜の建家の温度変化による伸縮により数psの長期ドリフトが発生



# 現レーザー・RFガンシステムの問題点

1. レーザー伝送路が40m
  - ・0.1mradの角度揺らぎがカソード面で数mmに拡大
  - ・エネルギー損失が~50%
  - ・建家の温度変化による同期の長期ドリフト~10ps
  - ・ミラーの経年劣化
2. THGでのエネルギー効率が~10%程度
3. レーザーの光学素子の経年劣化

# 新レーザーシステムへの重要事項

1. 安定性に優れたファイバーレーザーオシレータを採用
2. 基本波1,550nm,2倍高調波775nmのEr100fsファイバー・レーザーオシレータと実績のあるTi:Sa再生増幅器
3. カソードの量子効率・仕事関数の向上による低出力化  
・15年前はCu(文献値 $10^{-4}$ 、実際は $\sim 10^{-5}$ )から  
Mg(文献値 $10^{-3}$ ),Cs<sub>2</sub>Te(文献値 $10^{-2}$ 以上)を経て  
Na<sub>2</sub>KSb(可視光駆動で $10^{-2}$ 以上、現状266 nmでQE $\doteq$ 0.07%, 400nmでQE $\doteq$ 0.02%)
4. マルチパス増幅器が不要になり、全体システムが小型化し、RFガン真横に設置可能  
・40mの伝送路が不要
5. 光学台の温度制御  
・中時間のドリフト抑制

# 新フェムト秒レーザーの構成

## ファイバーレーザーオシレータ

- Menlo systems社製 C-fiber 780 (119MHz)
- 日本の代理店: Thorlabs Japan
- 諸性能
  - 出力: 65mW
  - パルス幅: <120fs(FWHM)
  - 周波数: 119MHz
  - 中心波長: 780~790nm

## 再生増幅器

- Coherent社製 Libra-HE-F
- 日本の代理店: Coherent Japan
- 諸性能
  - 出力: >3.4mJ/pulse
  - パルス幅: オシレータと同様
  - 繰り返し:
    - 本体は907Hzで駆動(476MHzの $(1/2)^{19}$ 倍)
    - ⇒ 間引いて加速器に供給(後述の図を参照)
  - 中心波長: オシレータと同様



- 同期精度
  - ジッター: <100fs(rms)
  - ドリフト: 1日にわたり<数ps
- 強度揺れ:
  - 1日にわたり0.5%(rms)

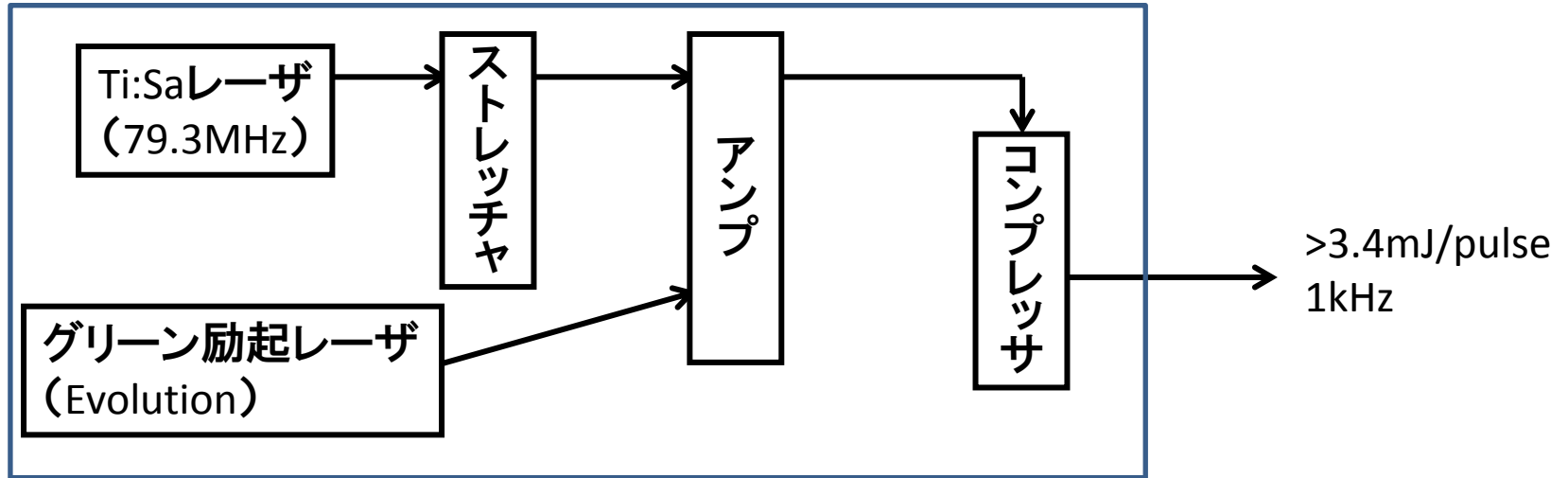


一つの筐体内に収める(正確なサイズは確定していないが  
およそ100cm×240cmの光学台には乗る予定)

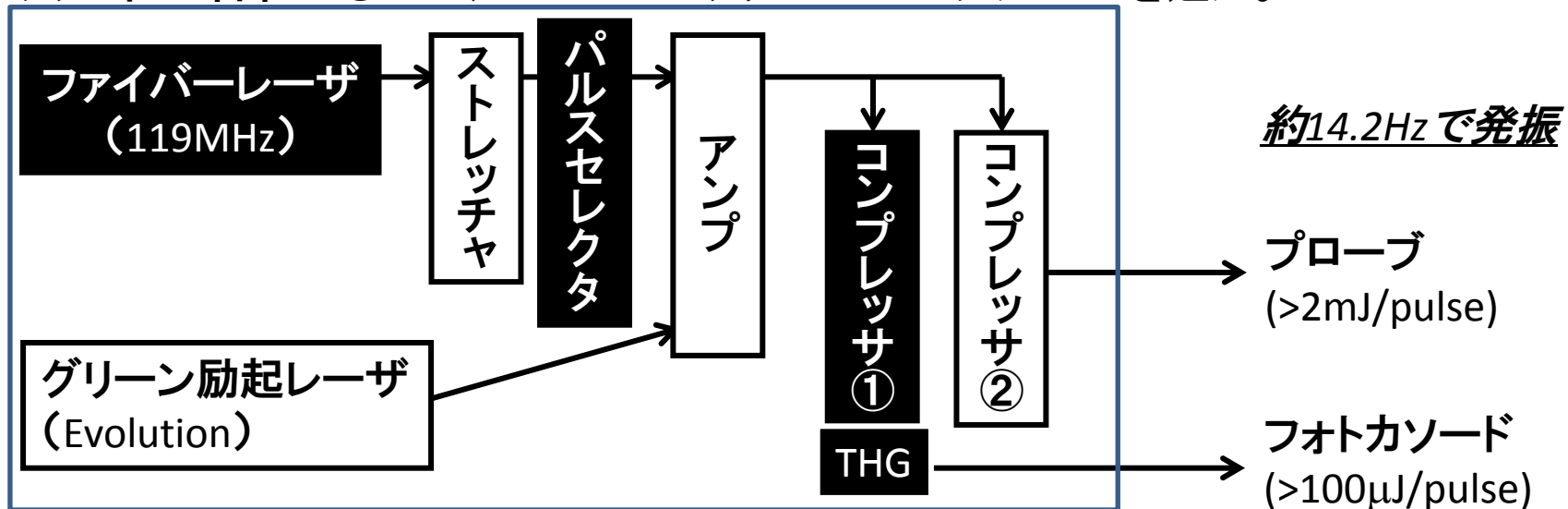
フォトカソードのすぐ横に設置  
⇒ 強度・位置共に安定

# 標準仕様からの改造

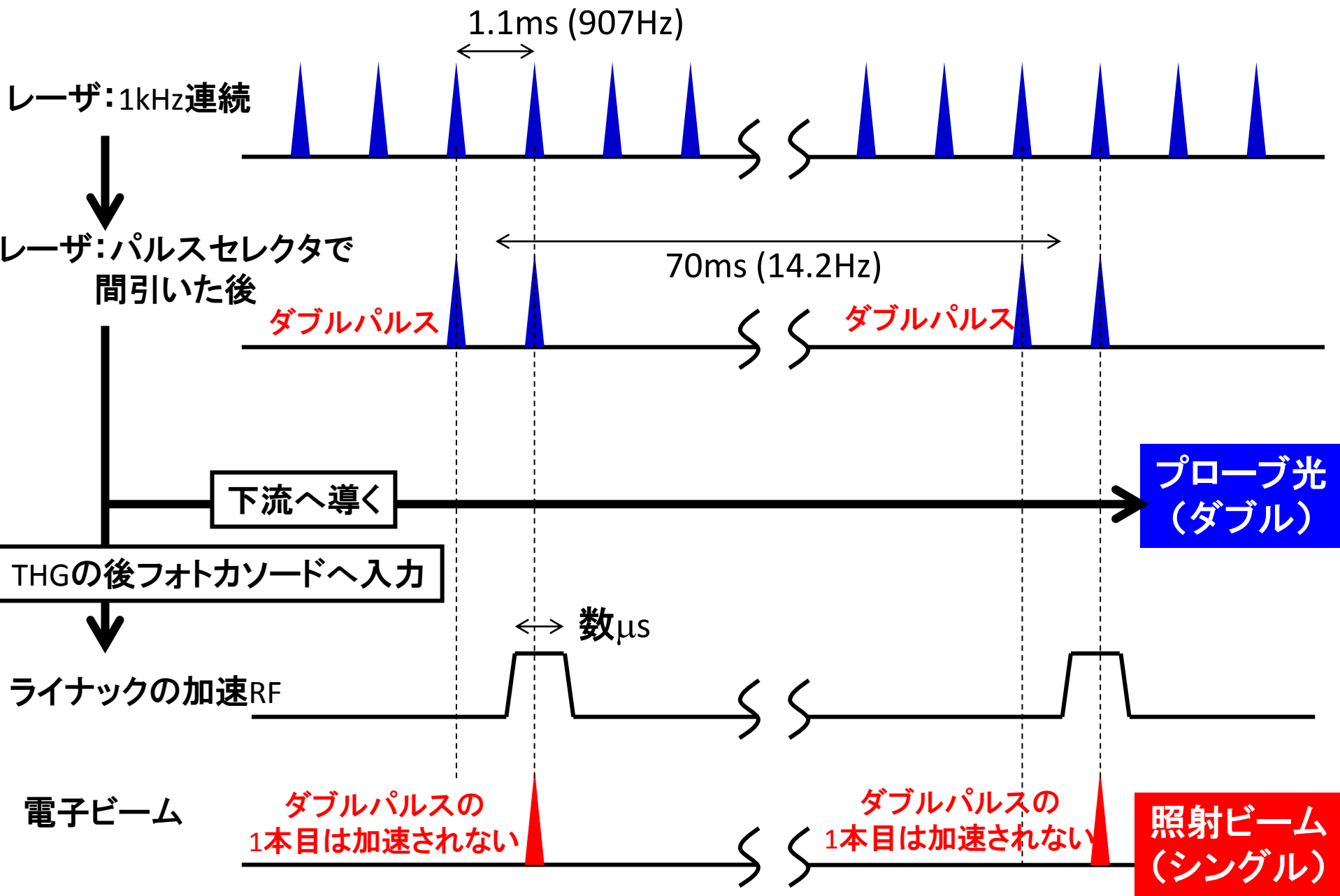
- 標準のタイプ：1kHzで発振



- 東大用の改造型：約14.2Hzで発振 (476MHzの $(1/2)^{19}$ 倍が907Hzで、さらに $(1/2)^6$ 倍)
  - オシレータがファイバーレーザ
  - ライナックと組み合わせるため、パルスセクタ・コンプレッサ・THGを追加。



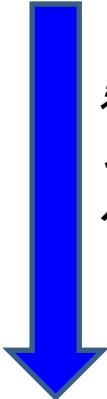
# 電子ビームおよびプローブ光の生成



# 期待されること: フォトカソードの高性能化とビーム計測の高度化

## • これまでのフォトカソードにおける問題

- 旧レーザでは、光強度が数%揺れる上に、時間ドリフトもあり、  
更に、長いトランスポートライン(約40m)により  
ポインティングスタビリティも良くなかった
  - ⇒ 電子ビームの品質も良くない(電荷量・位置が共に揺れる)
  - ⇒ QEやエミッタンス等の評価の精度が良くない  
(18Lのビーム透過率は、大電荷量でないかぎりほぼ100%に近いが、  
かつて、エミッタンスが $70\pi\text{mmrad}$ と計測されたことがある)



新レーザは光強度が極めて安定な上、  
フォトカソードのすぐ近くに設置するため  
ポインティングスタビリティも良好

- ビーム品質の向上
- ビーム計測精度の向上

# まとめ

1. 東大Sバンド電子ライナック・レーザー施設は、震災被害からの復旧がほぼ完了し、平成24年度4月より正式に全国共同利用を再開した。
2. KEKと共同で、オンチップサブミクロン電子・X線源(誘電体加速Dielectric Laser Accelerator or Photonic Crystal Accelerator)用、Ybファイバーレーザーオシレータ+スーパーコンティニウムアンプ+ディクスレーザーアンプを開発中である。
3. RFガン用レーザードライバとしてErファイバーレーザー・Ti:Sapphire再生増幅器システムを導入し、3月に設置する。短時間時間ジッター100fs(rms)以下をキープしながら、長時間ドリフト(1ps以内を期待)、レーザースポット位置安定性(数mmから0.1mm以下)を格段に向上させる。
4. 様々な放射線化学分析、塩水の放射線化学、超臨界圧水の放射線化学、高速シンチレータ開発に供していく。