

SuperKEKB 国内レビュー

2017.09.08

入射部G

SuperKEKBでの入射ビーム

SuperKEKBにおける
入射ビームパラメーター

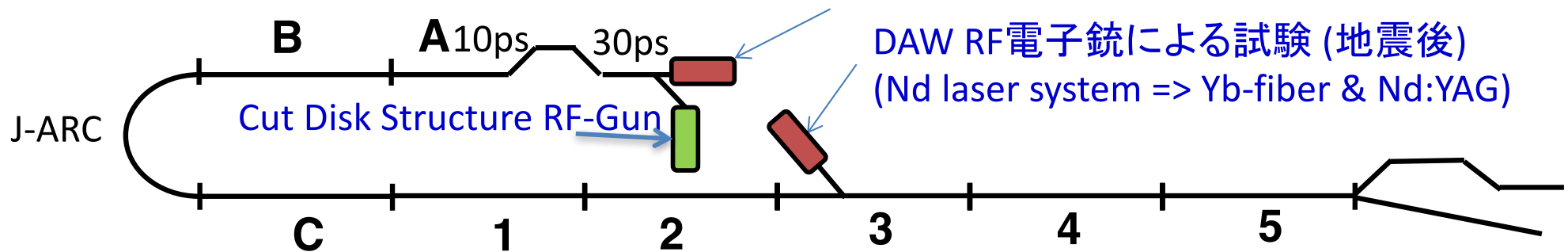
	KEKB obtained (e+ / e-)	SuperKEKB required (e+ / e-)
Beam energy	3.5 GeV / 8.0 GeV	4.0 GeV / 7.0 GeV
Bunch charge	e- → e+ / e- 10 → 1.0 nC / 1.0 nC	e- → e+ / e- 10 → 4.0 nC / 4.0 nC
Beam emittance ($\gamma\epsilon$)[1 σ]	2100 μm / 300 μm	6 μm / 20 μm

RF電子銃 4 nC 10 mm-mrad

ビーム伝搬 + 10mm-mrad エミッタンス増加が許容

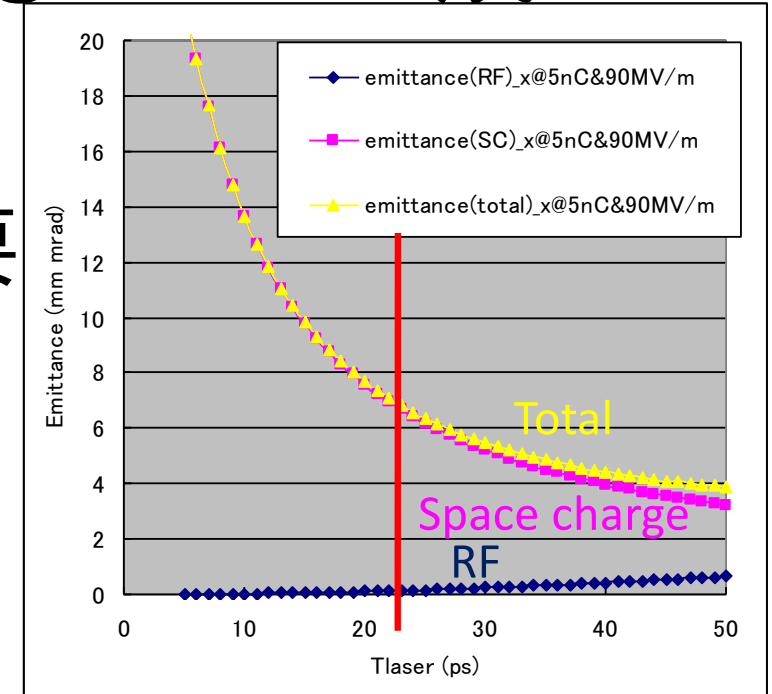
Quasi-travelling side couple RF-Gun
(Yb-fiber and Nd/Yb solid laser system)

DAW RF電子銃による試験 (地震後)
(Nd laser system => Yb-fiber & Nd:YAG)



SバンドRF電子銃による5 nC 生成

- 空間電荷が主
=> 15-25 ps のパルス幅が必要
- 長期の安定運転
 - 比較的低いRF電界： $< 100\text{MV/m}$
- 集束力が必要
 - RF電子銃からのビームをソレノイド集束でエミッタンス補償するのは条件が難しい
 - **RF電界による集束力を用いる。**

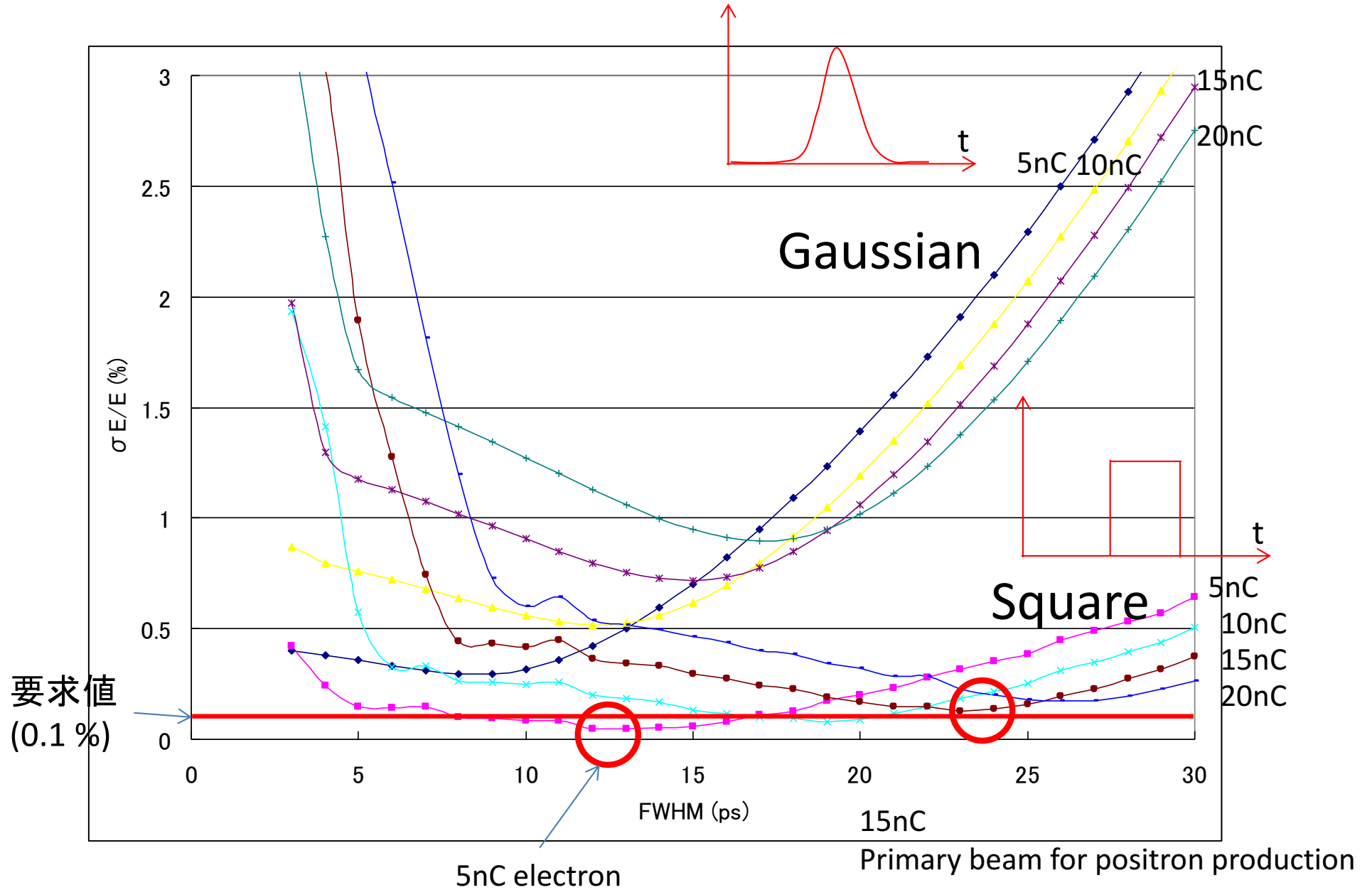


~~軸上結合空洞~~ : 例 BNLタイプ

軸外結合空洞 : Disk and washer / Side couple 等

エネルギー分散

Longitudinal wakefield と RF の位相の最適値からのエネルギー分散

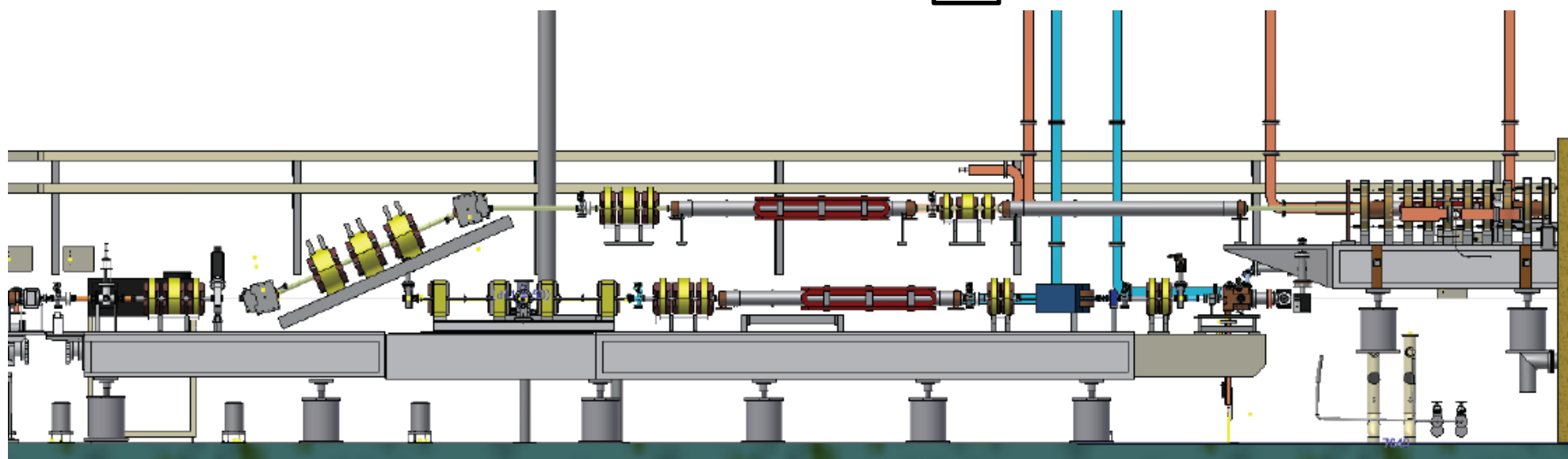
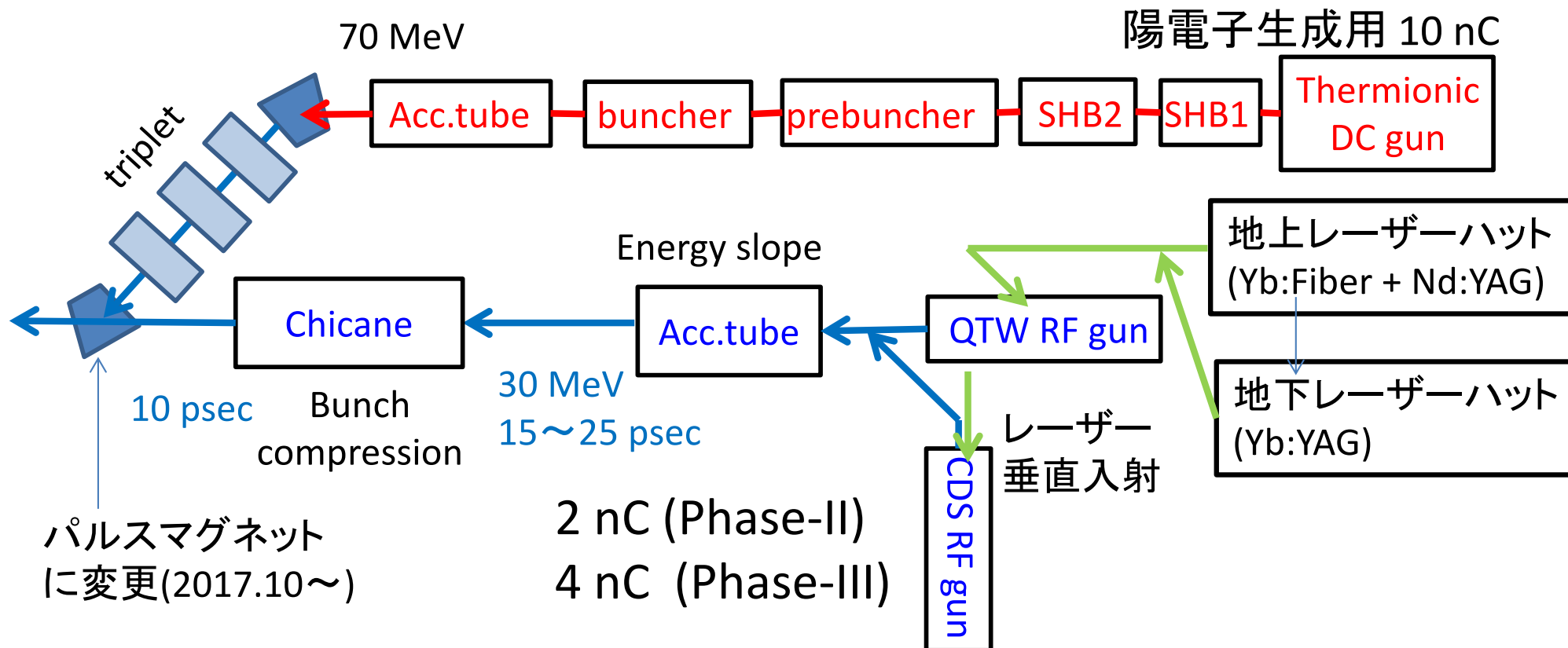


S-band RF-Gun の開発

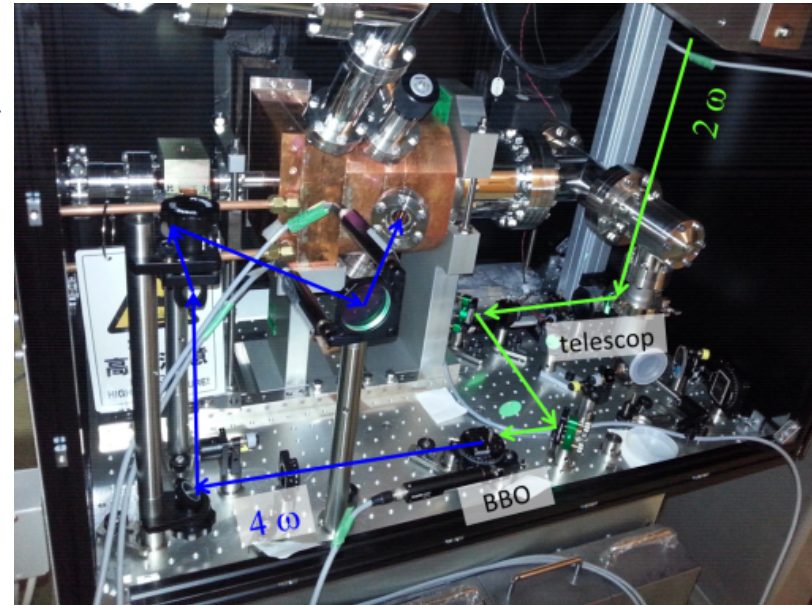
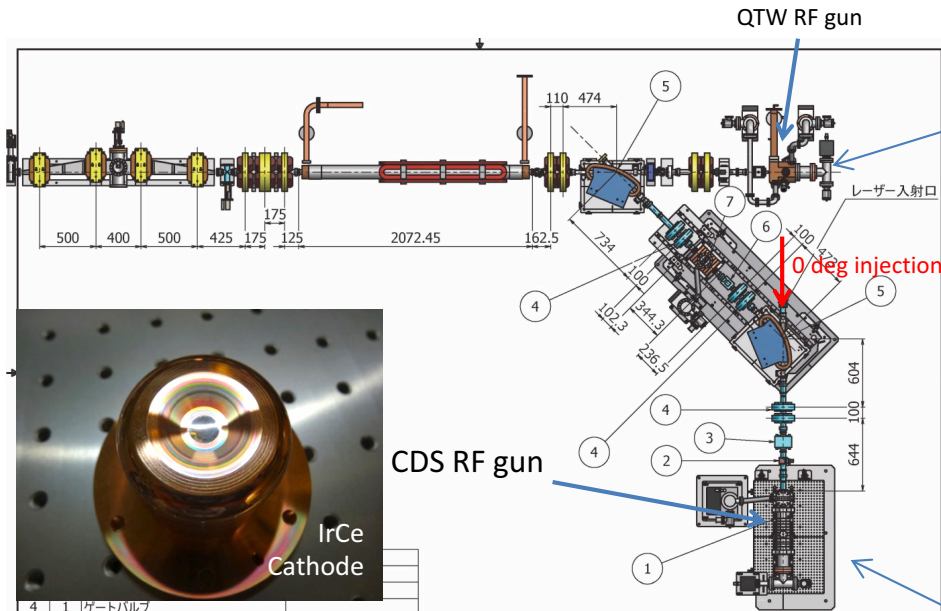
- 空洞：電界による集束力を利用したRF電子銃
 - Disk And Washer (DAW) => 3-2
 - Quasi Traveling Wave Side Couple => A-1 0度ライン
 - Cut Disk Structure => A-1 90度ライン
 - => 垂直レーザー入射による水平エミッタンスの低減
- カソード：長期安定性
 - 長寿命で中間の量子効率 ($QE=10^{-4} \sim 10^{-3}$ @266nm)
 - 固体カソード(薄膜でない) => 金属間化合物が有力
 - => 当初 LaB_6 を採用したが短寿命
 - => IrCe が非常に長寿命かつ $QE > 10^{-4}$ @266nm
- レーザー：長期運転かつ、Phase-IIIでは時間構造の制御
 - フロントエンドには Ybファイバーレーザーを使用
 - LD励起の固体レーザー増幅器
 - Phase-II 用 Nd:YAG 増幅器 => A-1 地上レーザー
 - Phase-III 用 Yb:YAG Thin Disk 増幅器 => A-1 地下レーザー
 - => 時間構造の制御 => エネルギー分散の低減

電子入射系

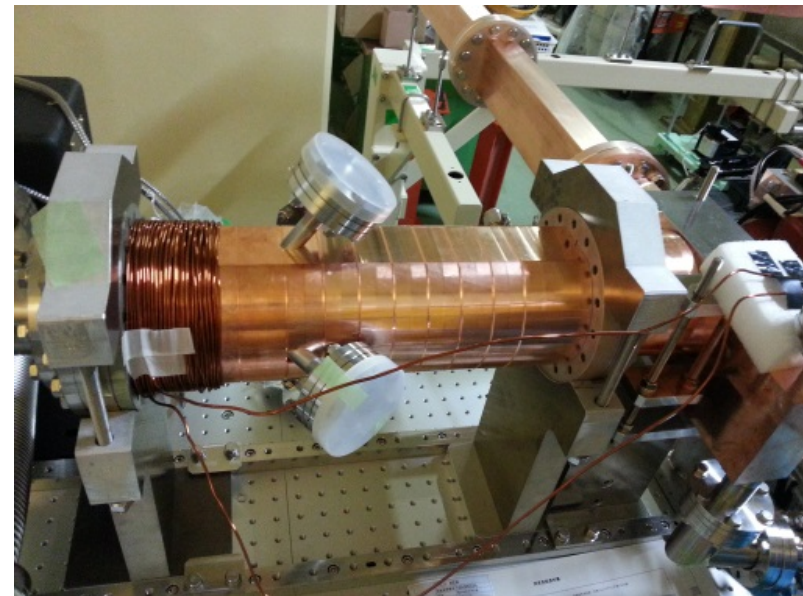
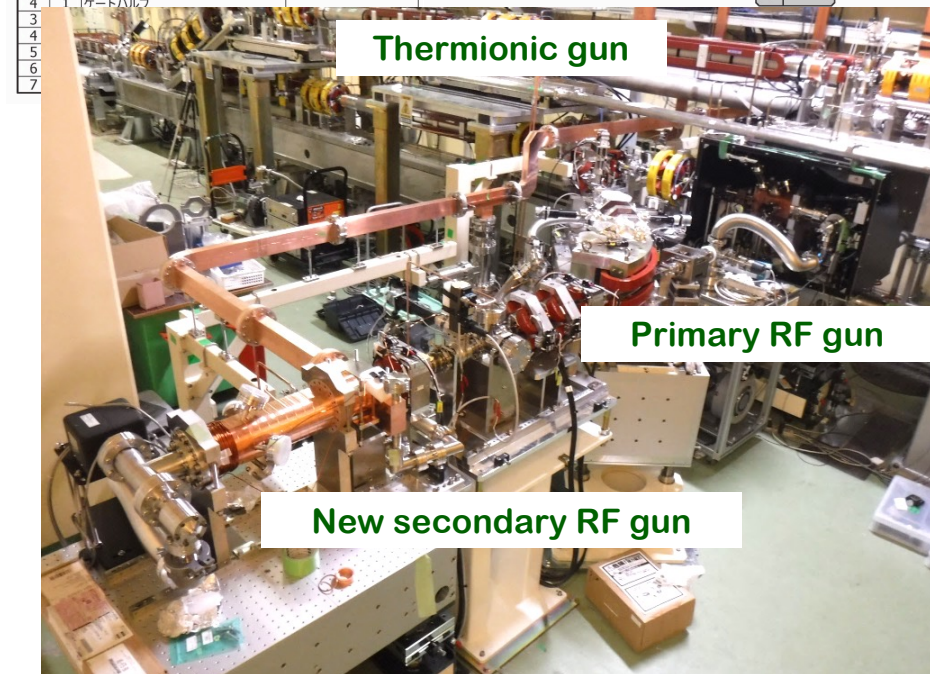
入射部



0度ライン QTW RF gun



90度ライン CDS RF gun

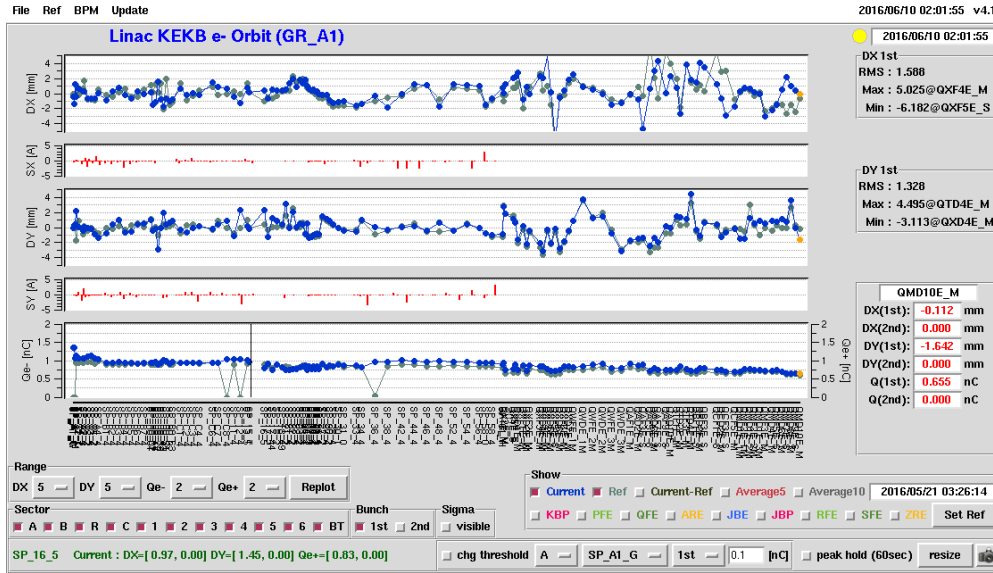


※CDSはカソード交換時のトラブルにより、QTWへの置き換えの可能性有

SuperKEKB HER (electron) Phase-I injection at 2016/6

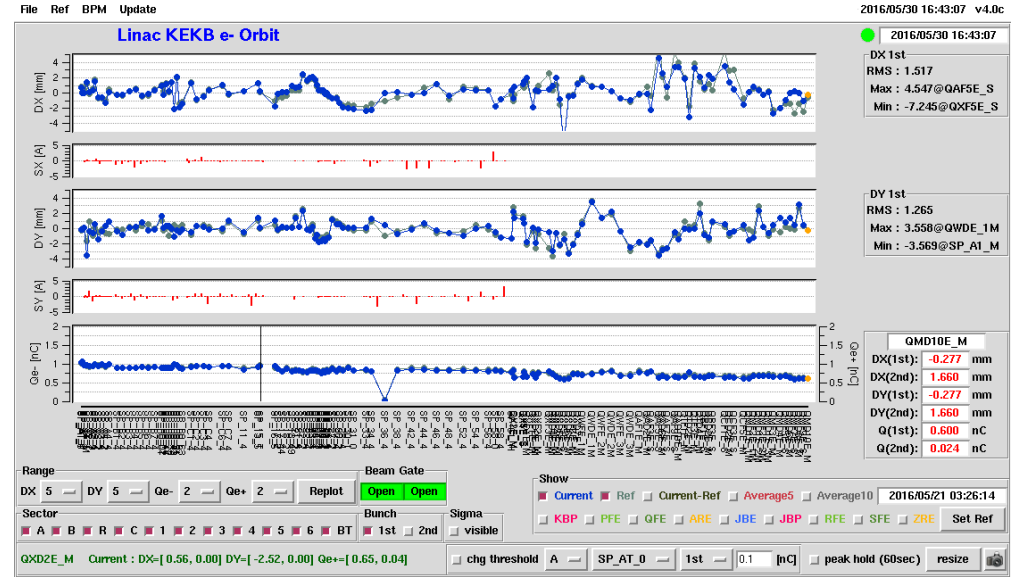
GR_A1 (QTW RF-Gun)

レーザーは地下の Yb:YAG ディスクレーザー

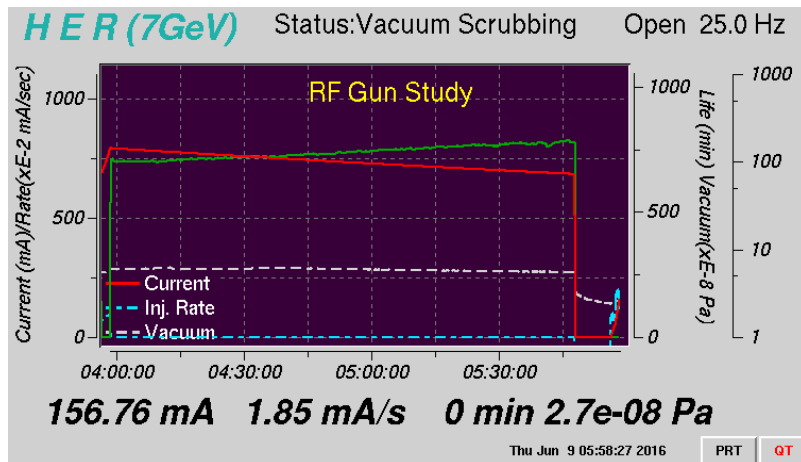


Current(blue): 2016/06/10 02:01、GR_A1 KEKB HER e- injection
 Ref(green): 2016/05/21 03:26、GU_AT KEKB HER e- injection

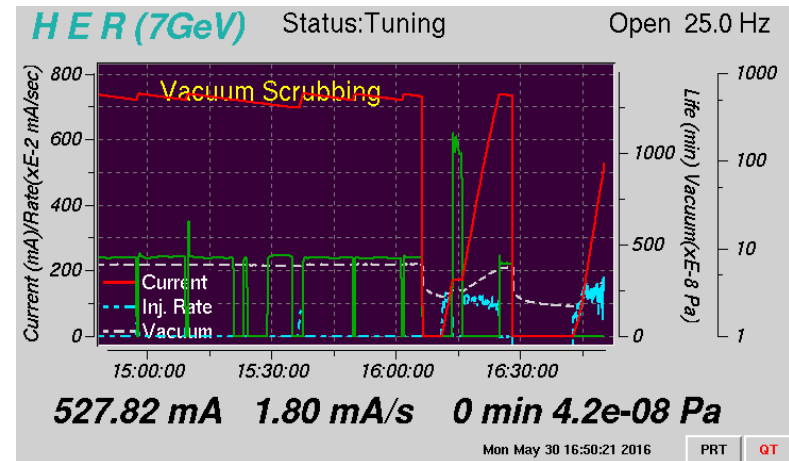
GU_AT (Thermal Electron Gun)



Current(blue): 2016/05/30 16:43、GU_AT KEKB HER e- injection
 Ref(green): 2016/05/21 03:26、GU_AT KEKB HER e- injection

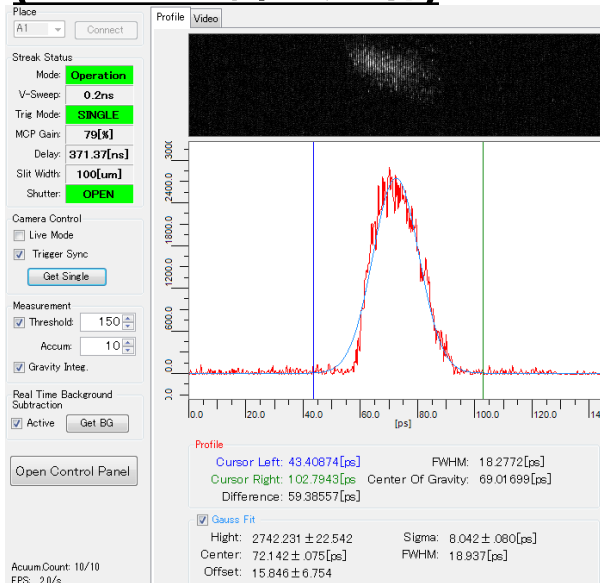


GR_A1 KEKB HER e- injection



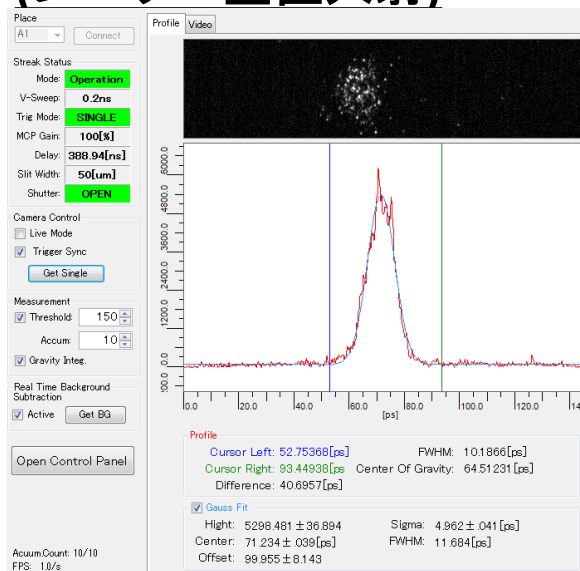
GU_AT KEKB HER e- injection

0度ライン QTW RF gun (レーザー斜め入射)



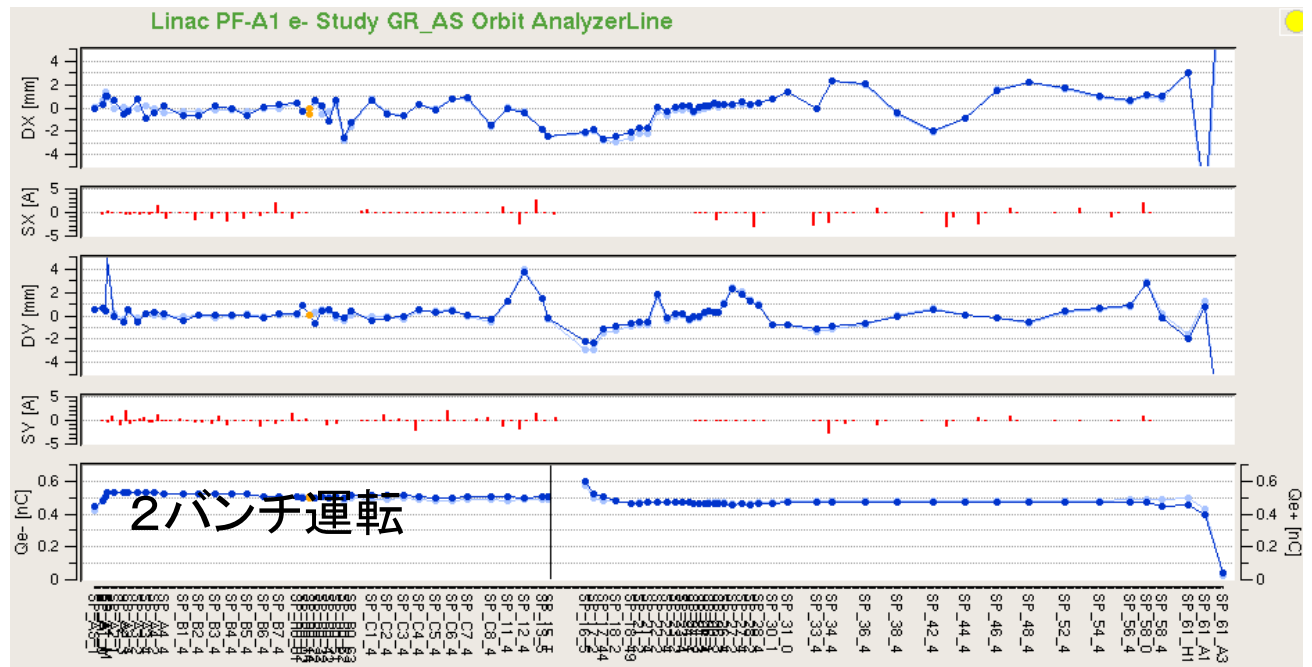
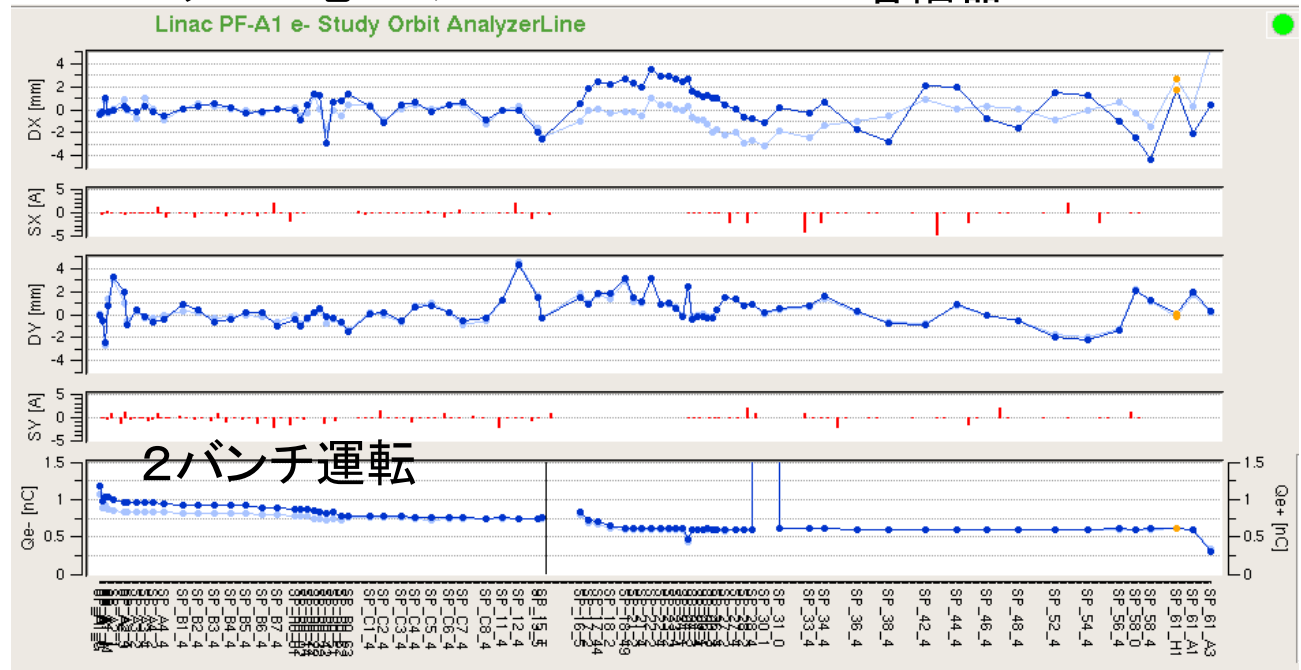
18.9 psec (FWHM 10 shots)

90度ライン CDS RF gun (レーザー垂直入射)



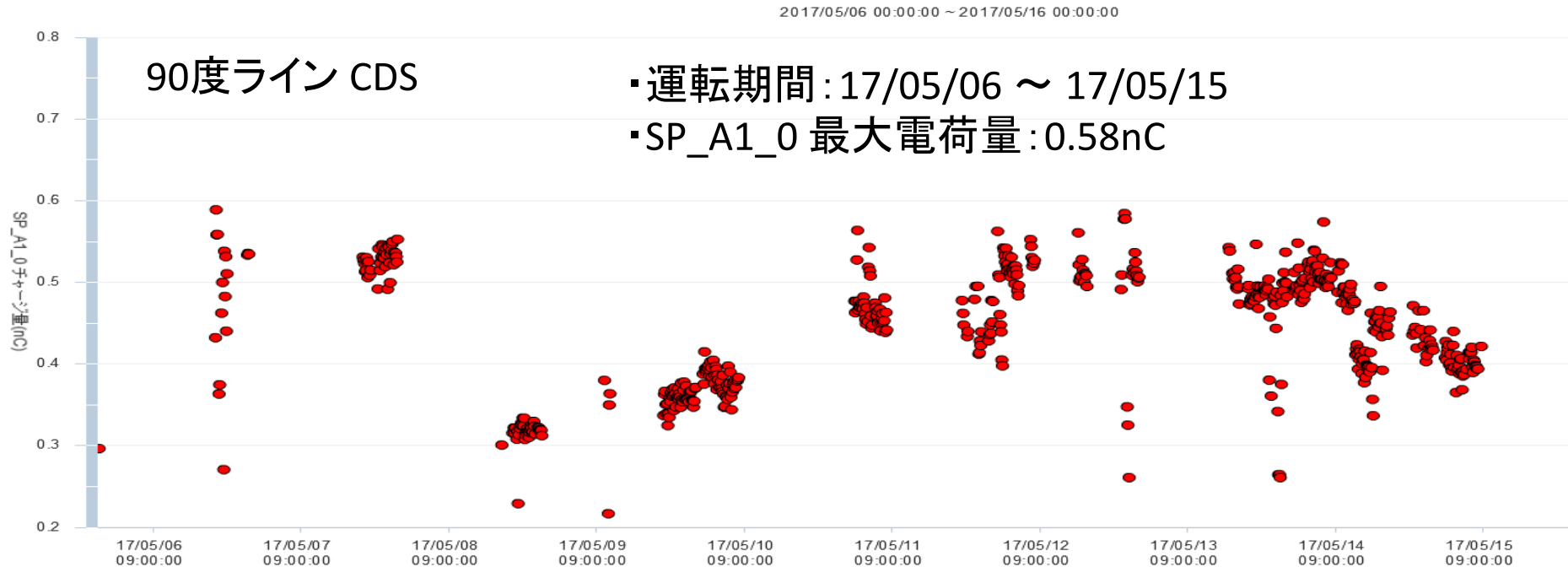
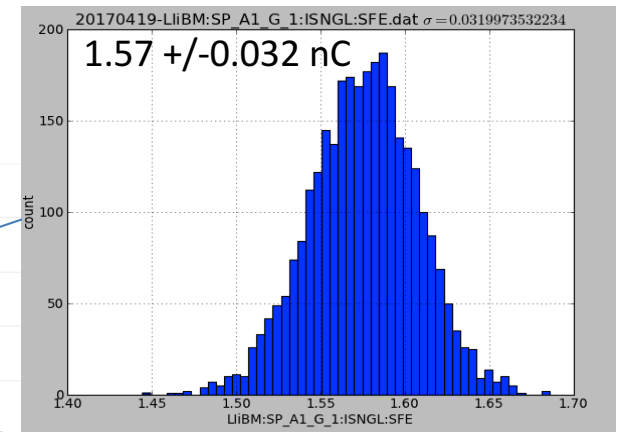
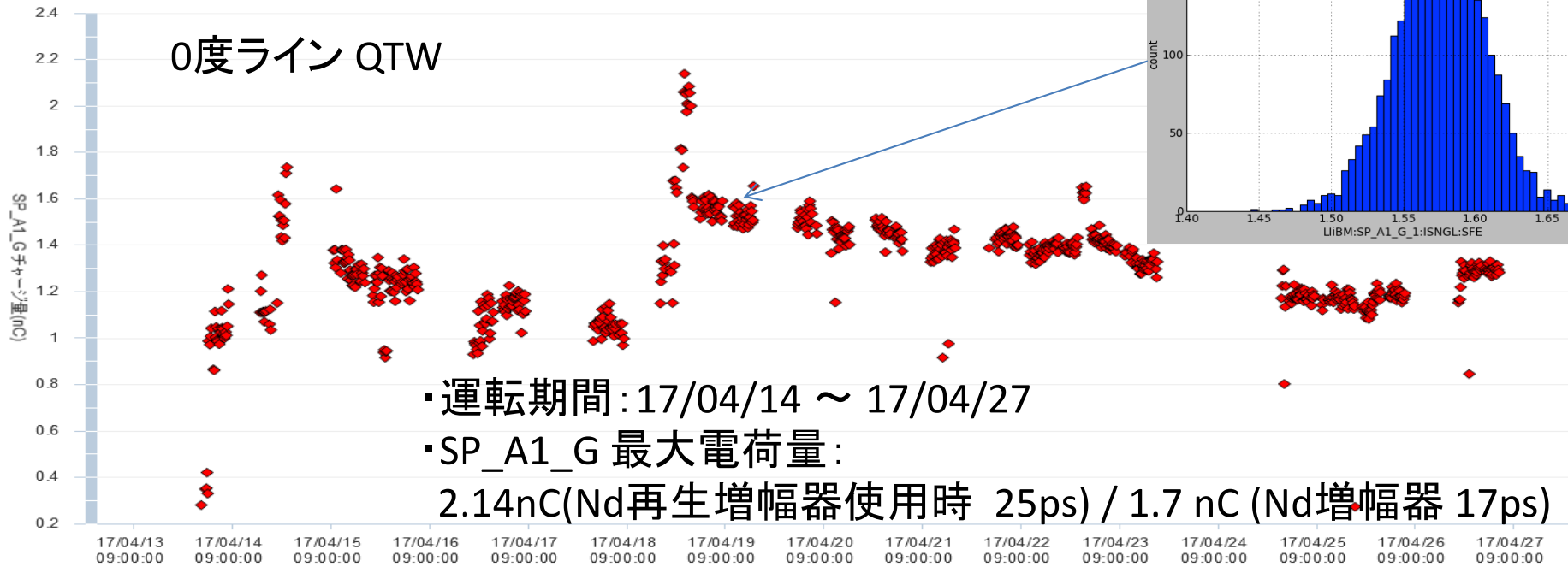
11.68 ps (FWHM 10 shots)

春の運転 レーザー: 地上の Yb:Fiber + Nd:YAG 増幅器



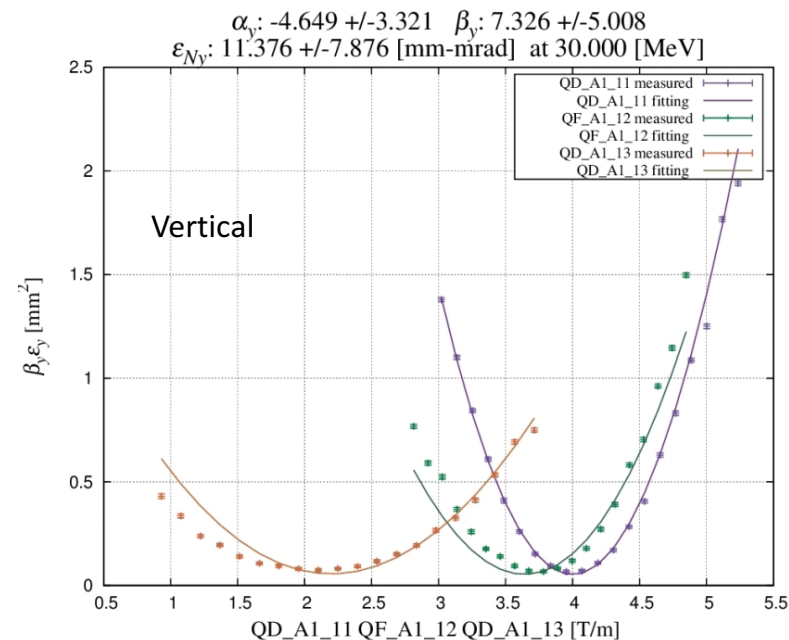
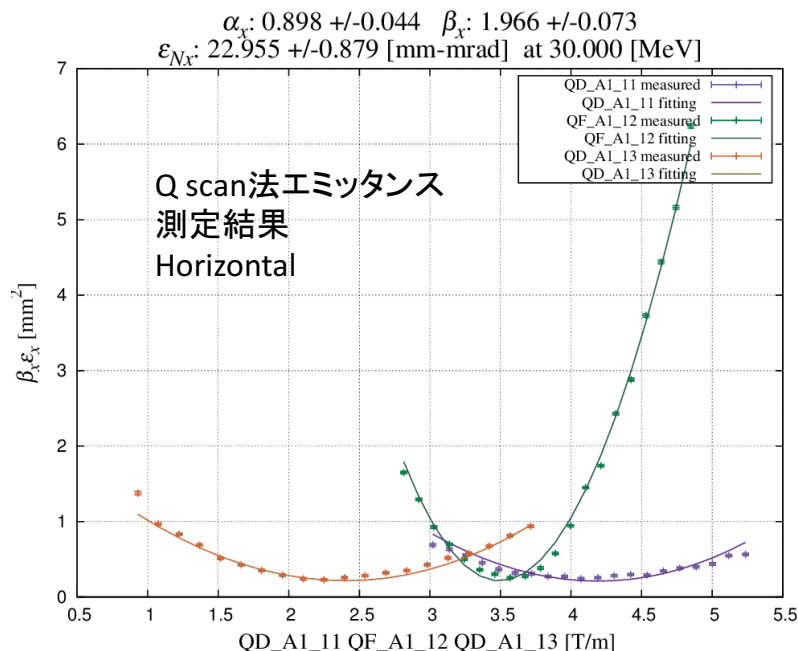
春の運転状況

2017/04/13 00:00:00 ~ 2017/04/28 00:00:00



エミッタンス測定結果まとめ

A1_C2_0 Q scan
@ 1.25 nC



		x	error	y	error
Q scan	A1_C2_0	22.96	0.88	11.38	7.88
	A1_M	22.25	0.426	59.35	26.53
	A4_4(OFF chicane)	45.64	10.17	111.9	21.22
	A4_4(ON chicane)	47.67	52.9	73.64	86.54
	R0_D3	43.17	2.42	101.67	50.69
Wire scanner	B sector	1.69	66.1	59.61	24.72
	C sector	67.7	789.2	104.5	85.4

電荷量とエミッタンス

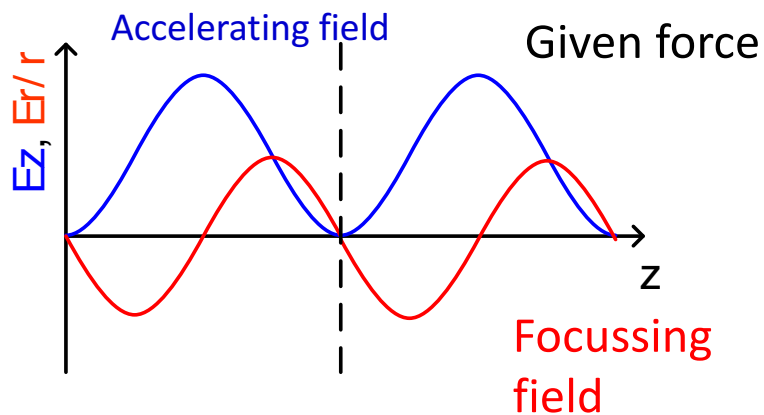
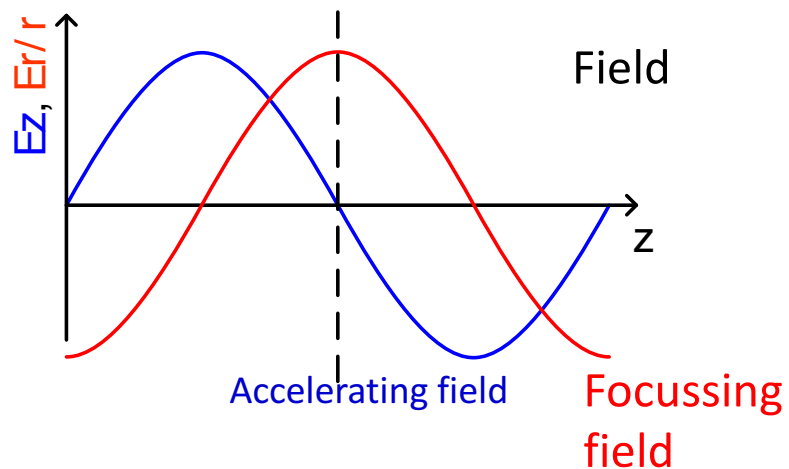
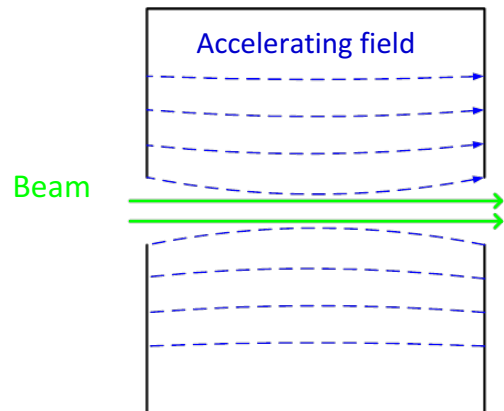
	Charge (nC)	Emittance H/V (mm·mrad)
Phase-II Design	2	150 (LINAC end)
Phase-III Design	4	20 / 20 (LINAC end)
QTW + Yb:YAG	5.6(50ps?)	28.3 / 26.4 (1.8 nC, 30ps)
QTW + Nd:YAG	2.2(25ps), 1.6(17ps)	23 / 11 (1 nC)
CDS + Nd:YAG	0.6 (17ps)	22 / 12 (0.5nC)

電荷量、エミッタンス共に、カソード上での不均一性が制限している
レーザーのプロファイルとカソードのQEの均一性の改善が重要

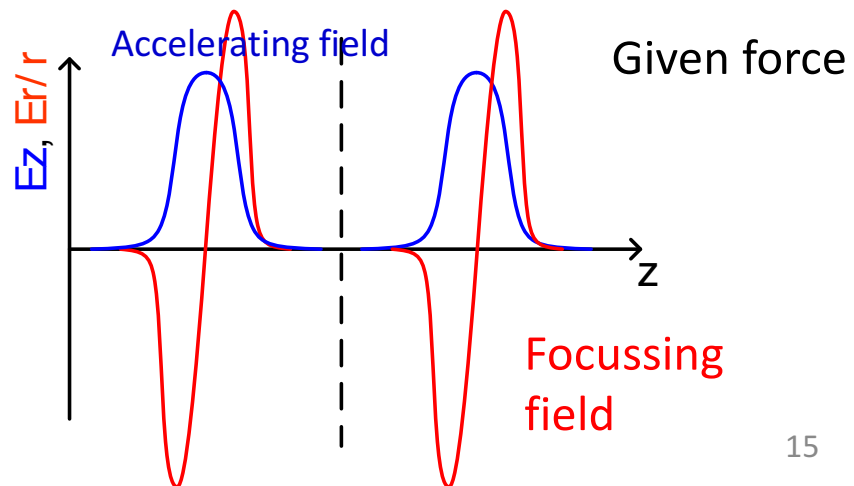
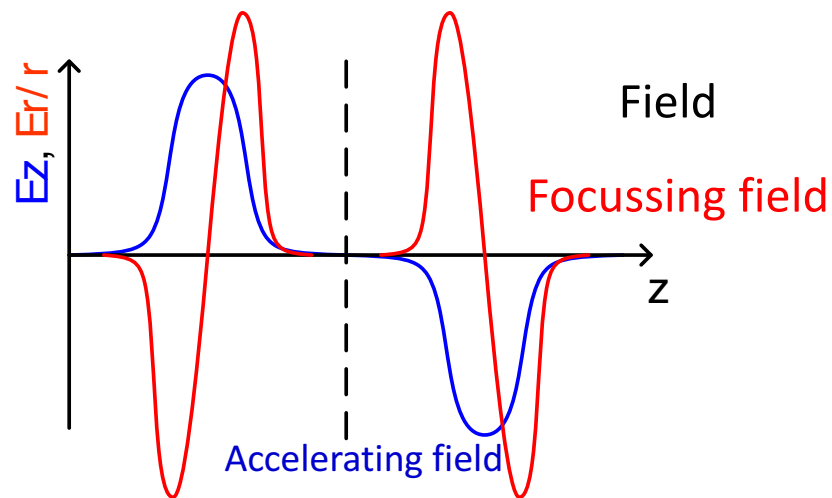
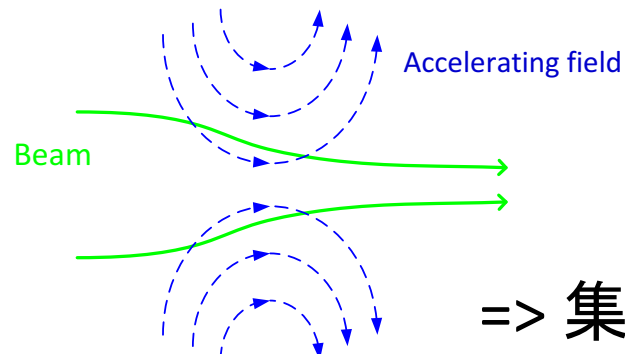
またエミッタンスに関しては、測定方法の検討が必要
(Qスキャンでは最小のビームサイズの測定が課題)

RF電子銃空洞

Pill-box cavity

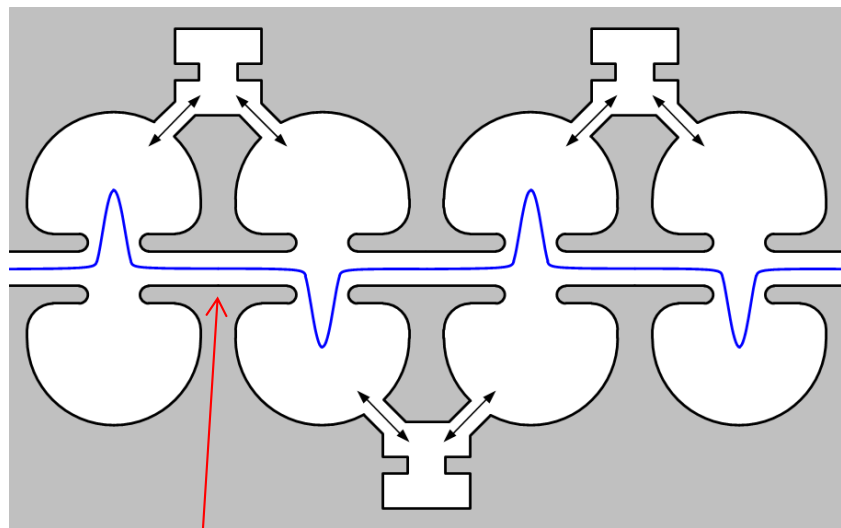


Annular coupled cavity with nose



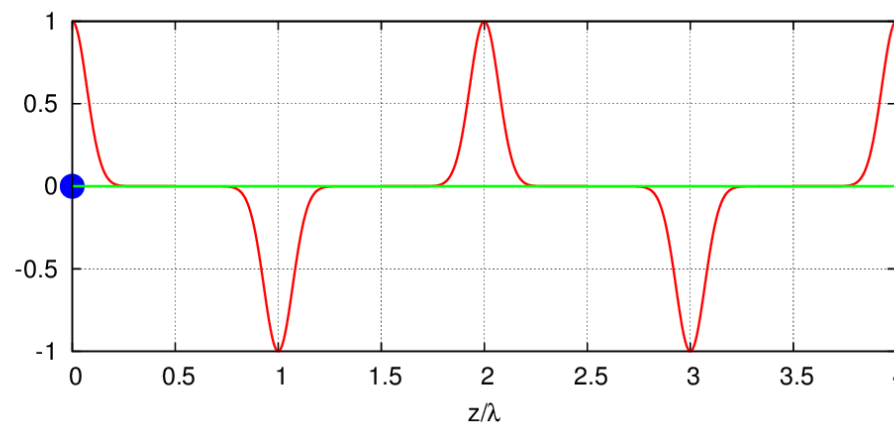
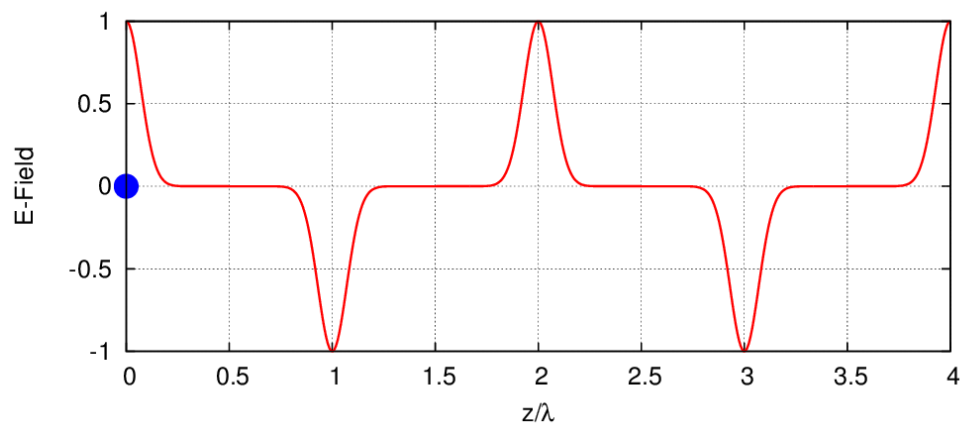
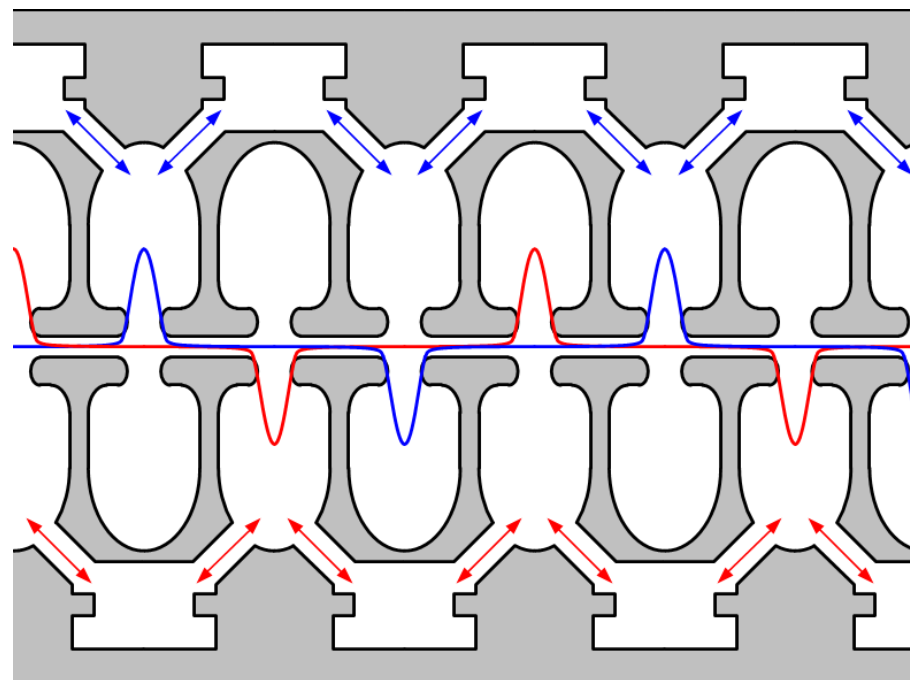
Design of a quasi traveling wave side couple RF gun

Normal side couple structure



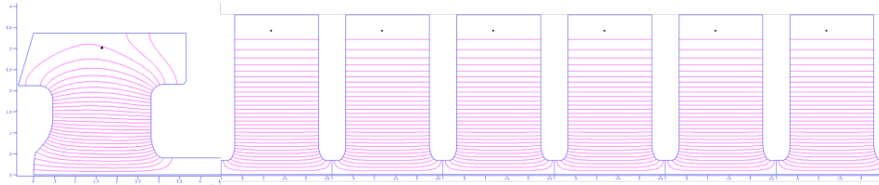
Long drift space is problem.

Quasi traveling wave sidecouple structure

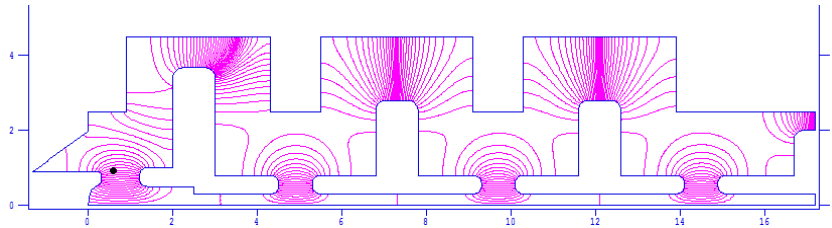


Quasi traveling wave side couple has stronger focusing and accelerated gradient than DAW.

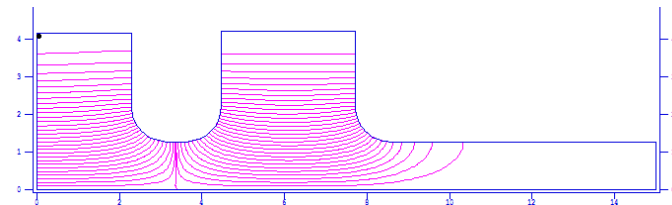
RF-Gun comparison



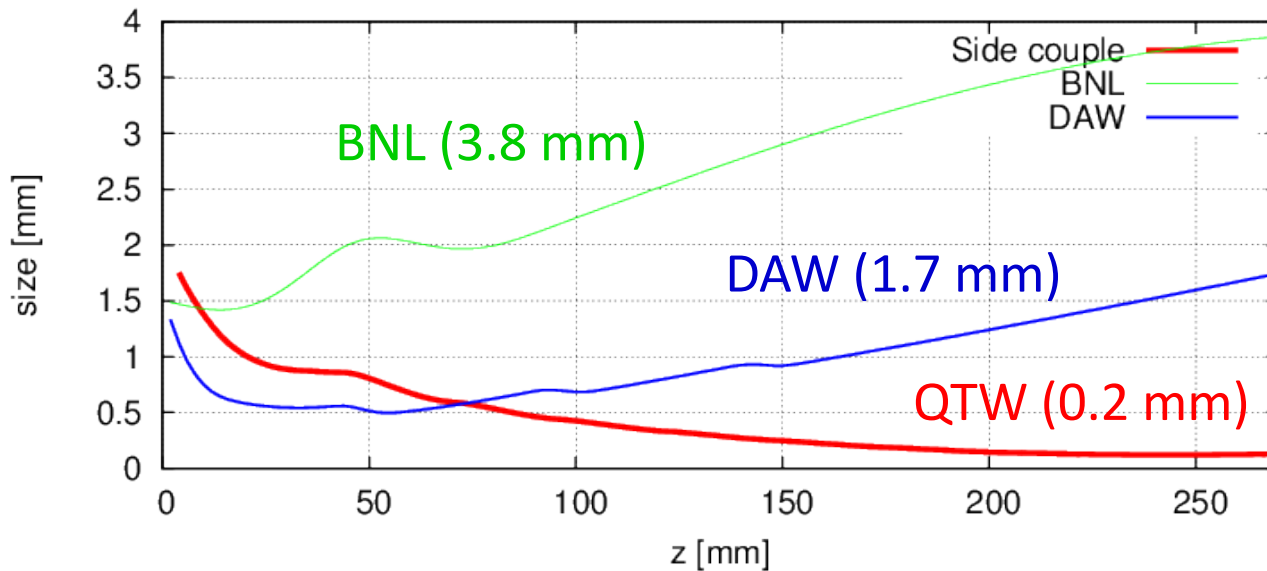
Quasi traveling wave side couple RF gun
(100 MV/m, 6mm-mrad, 13.5 MeV)



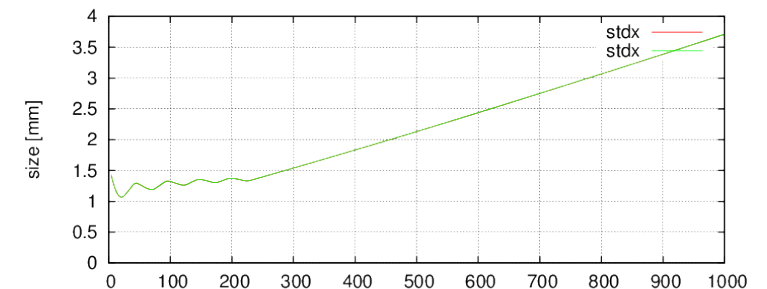
DAW-type RF gun
(90 MV/m, 5 mm-mrad, 3.2 MeV)



BNL-type RF gun
(120 MV/m, 11.0 mm-mrad, 5.5 MeV)

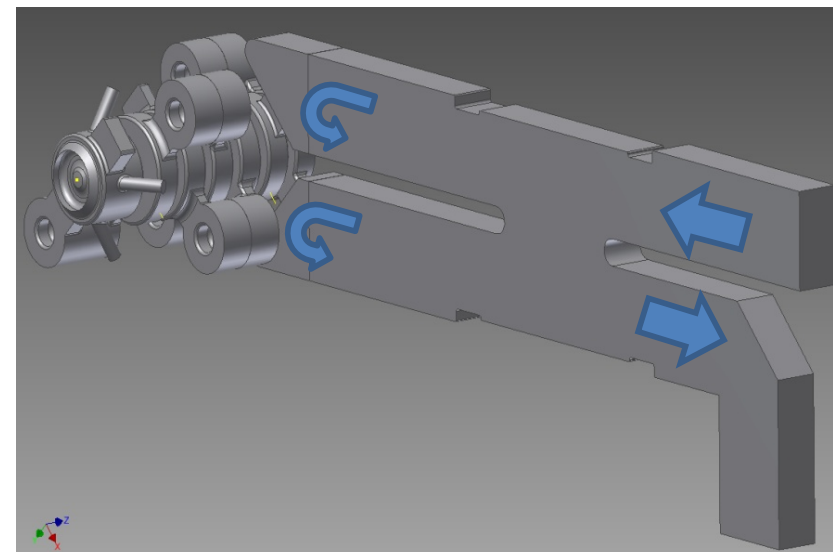
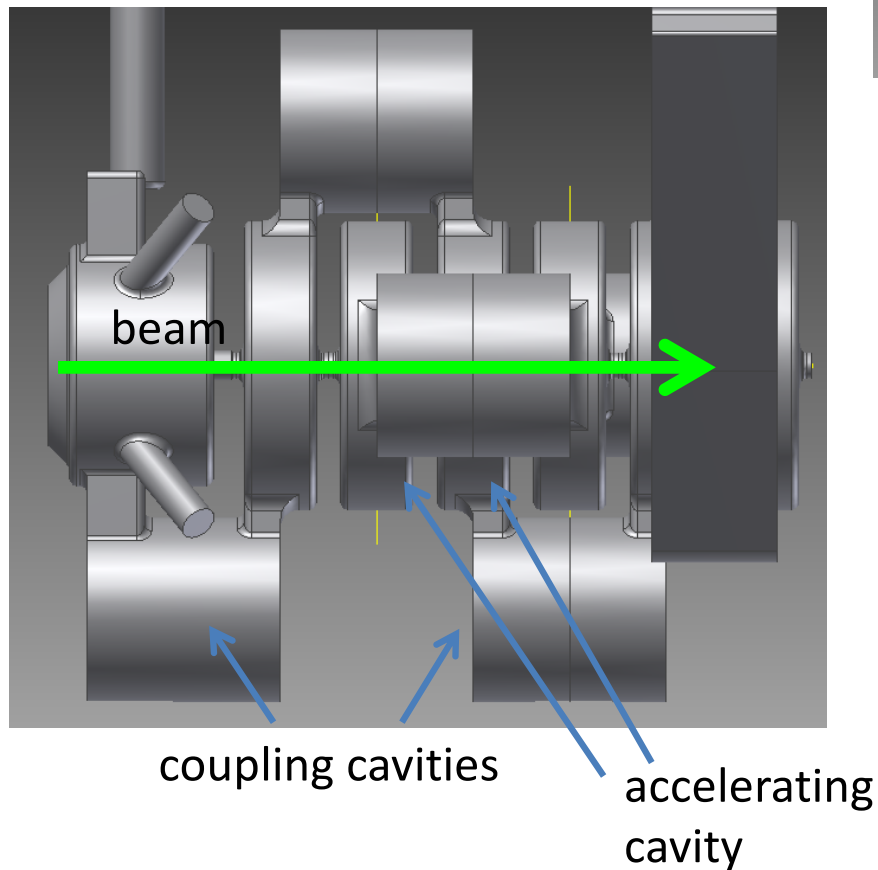
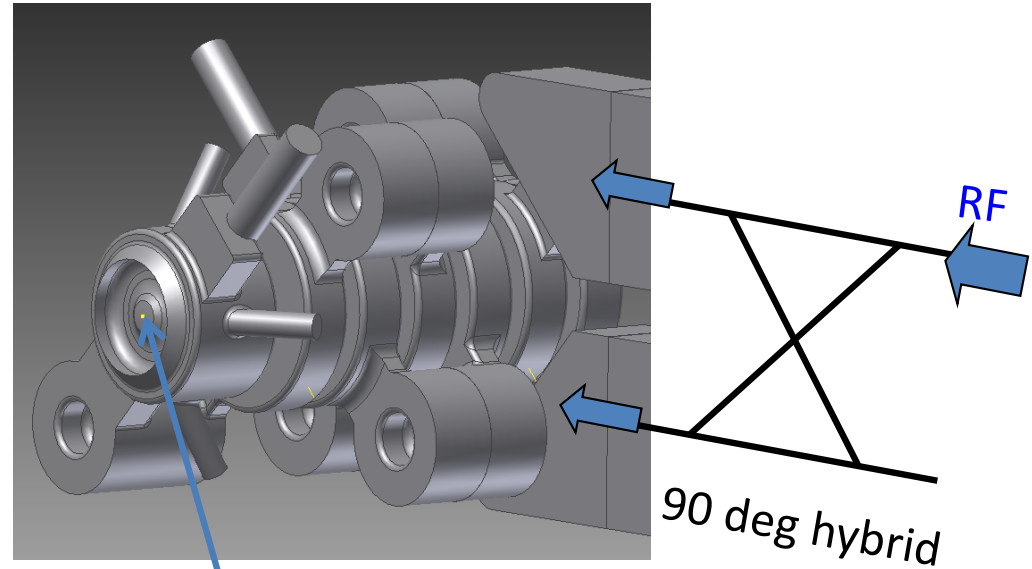
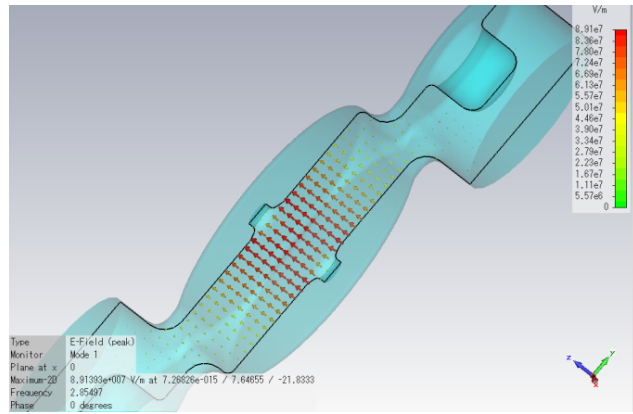


Cut disk structure



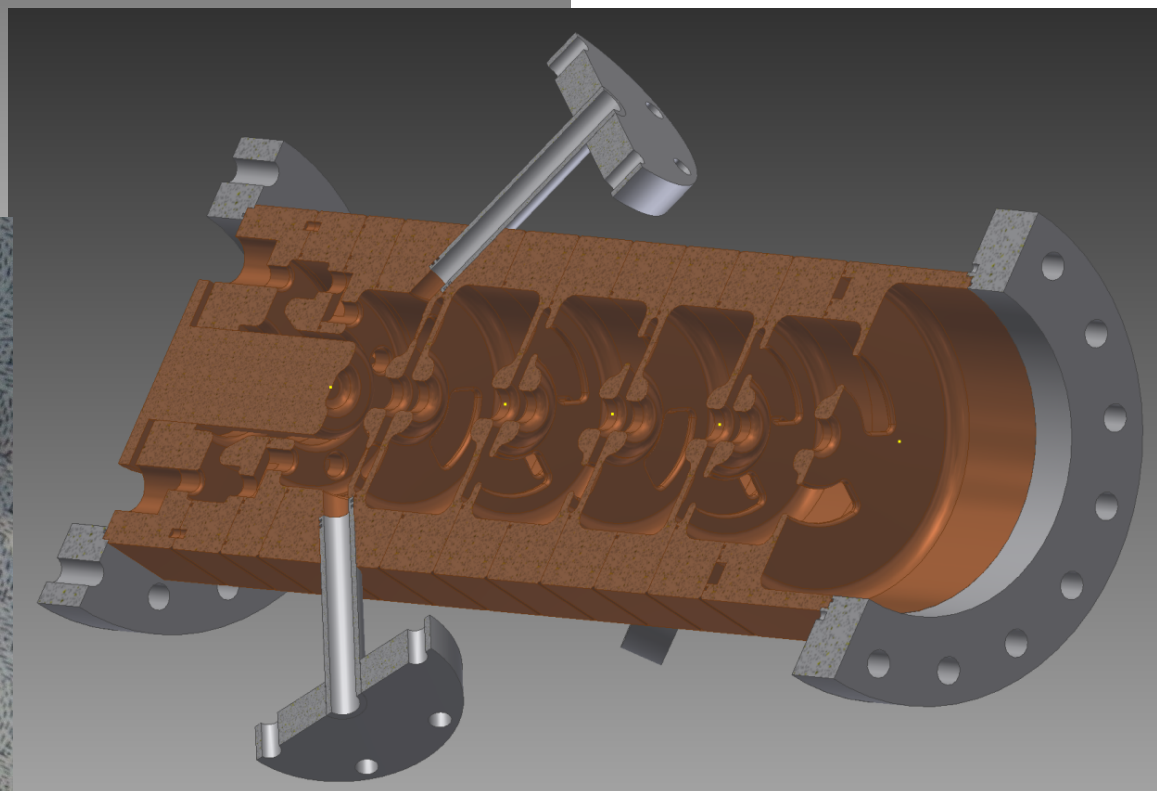
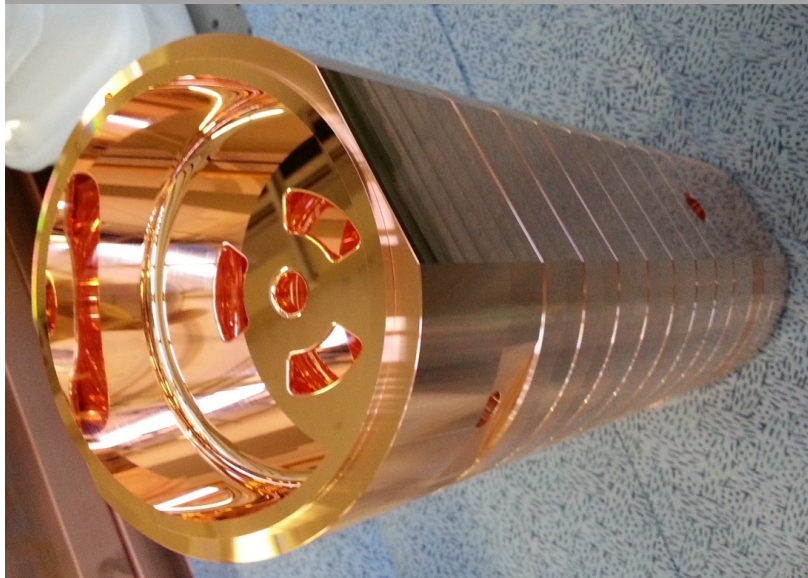
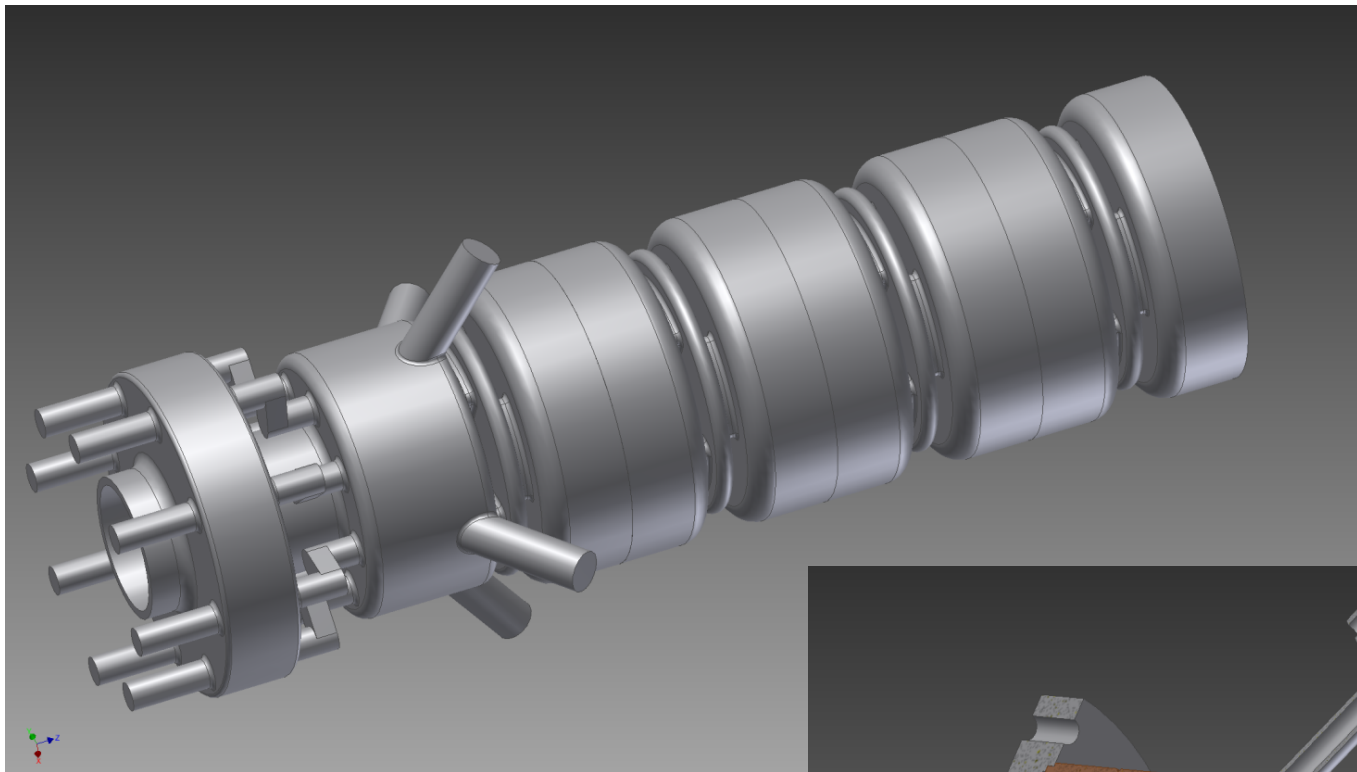
Beam Size

Quasi traveling wave side couple RF gun



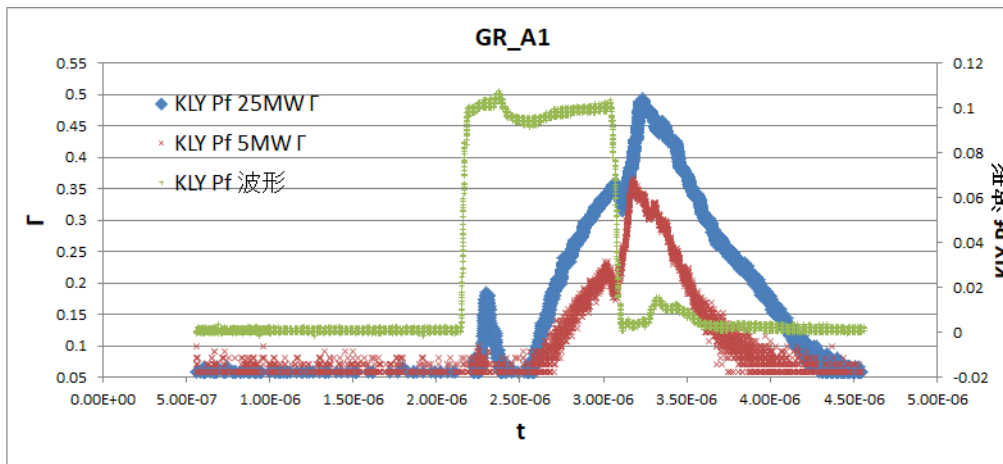
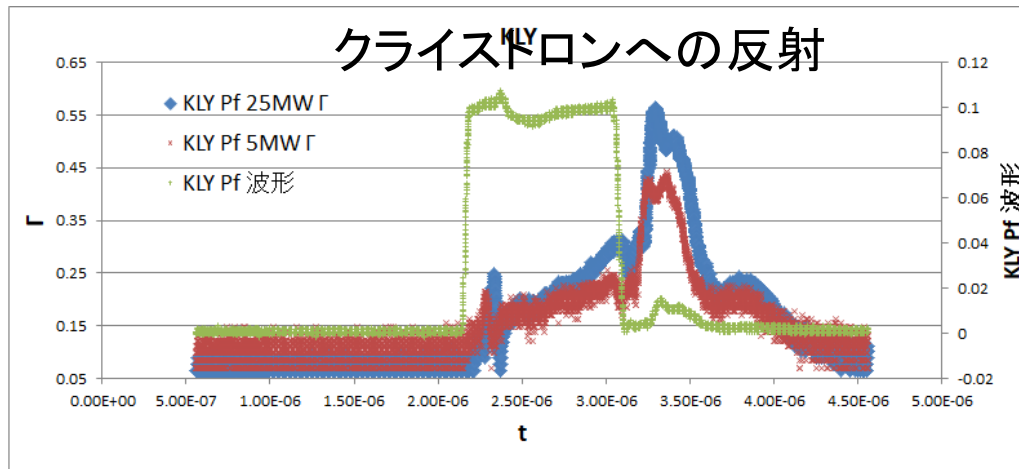
90度ライン 垂直入射用の RF電子銃

Cut Disk Structure
(CDS)

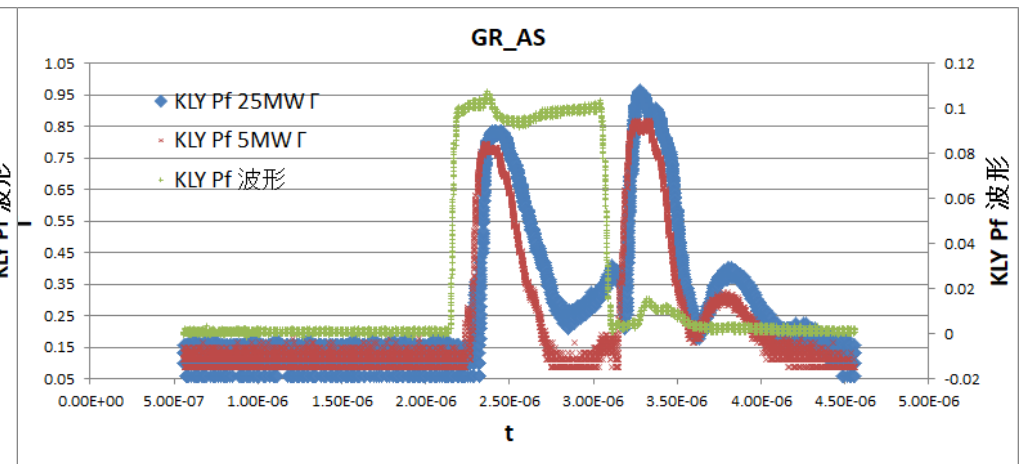


RF電子銃空洞からの反射

- QTWは水温を 60°C にして運転中
- VSWR のインターロックを 1.6 に上げて運転中
カソードの熱コンタクトの改善(現在カソード交換中)
将来的に RF空洞の改良



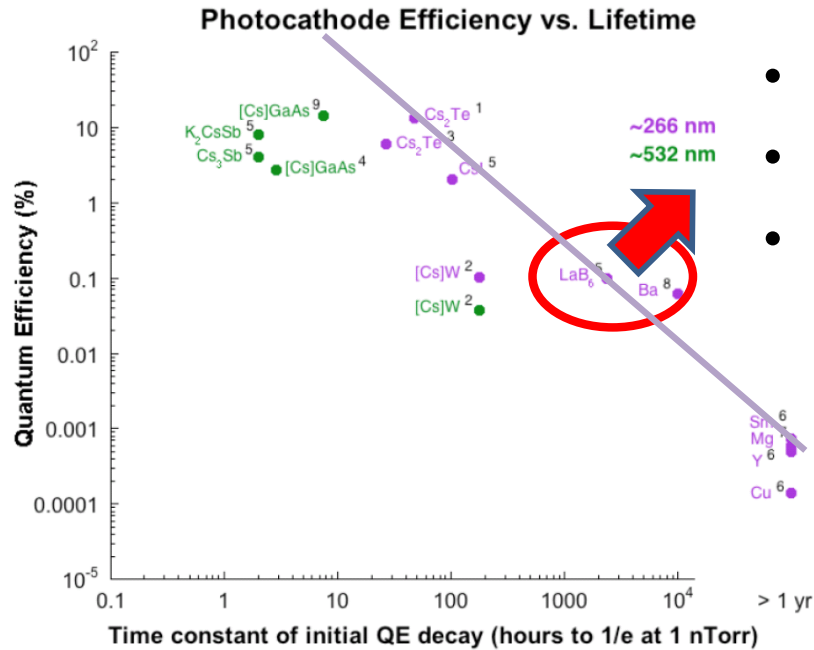
0度ライン QTWからの反射



90度ライン CDSからの反射

IrCe カソード

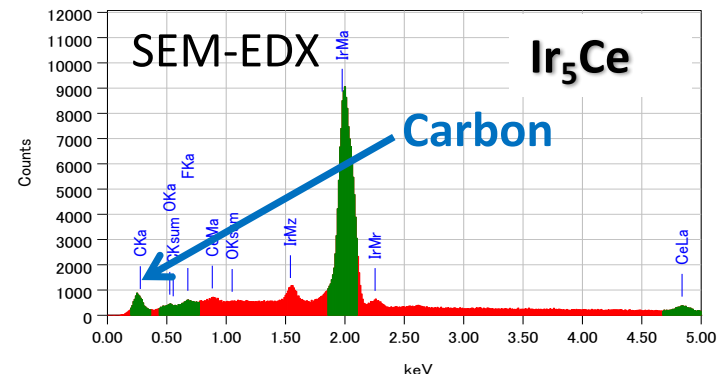
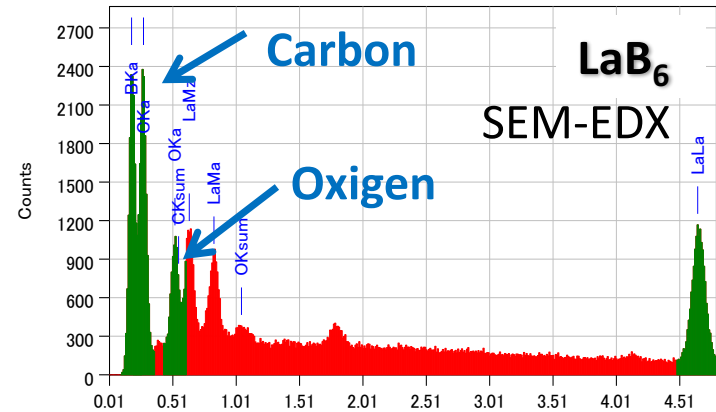
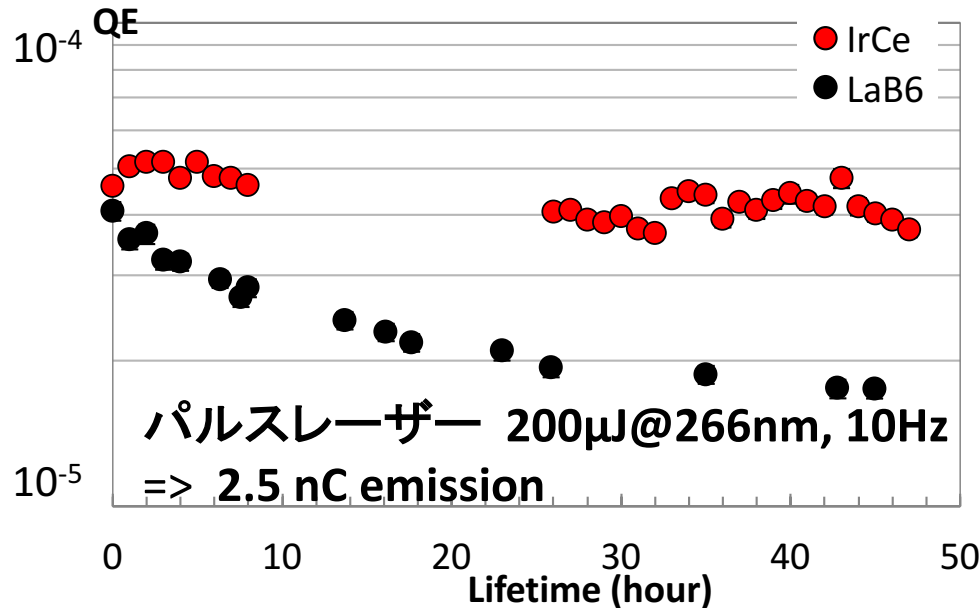
カソード：金属間化合物 (LaB₆ or Ir₅Ce)



- 十分な QE (10^{-4})
- 大気中でも安定
- 加熱またはレーザークリーニングによる回復



**SuperKEKB 5 nC
長期運転に最適**



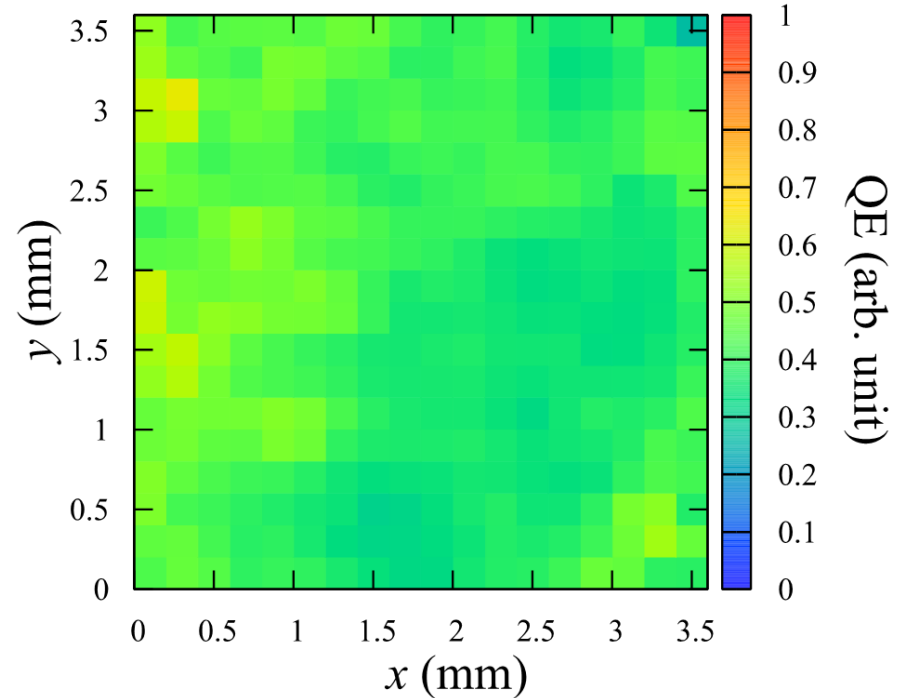
No oxidization is observed

フォトカソード材料に関して

【イリジウムセリウム化合物】

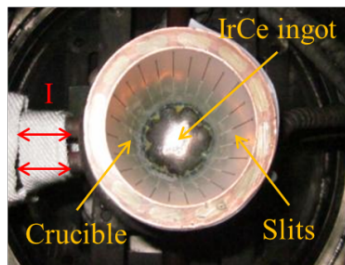
【カソード材料の改善点】

融点	> 1900 °C
仕事関数	2.57 eV
利点①	大気中で安定
利点②	イオン衝撃に高耐性
利点③	表面汚染に高耐性

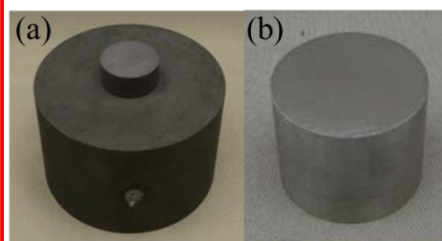


IrCe化合物材料製造プロセス

一次溶解プロセス (PAM法, CCIM法)



再焼結プロセス (HP法, SPS法)



表面に量子効率の空間分布有り
→ ビーム品質の悪化につながる



【光電子放出特性】

- 量子効率@266nm, RT : 1.54×10^{-4}
- 1/e寿命 : > 2 year (A1 RF gun)

【要素技術開発の方向性】

- 単晶で晶析 → 単結晶成長
- 高量子効率化

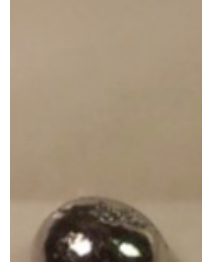
フォトカソード材料の開発状況(多結晶)

【成分組成の最適化】

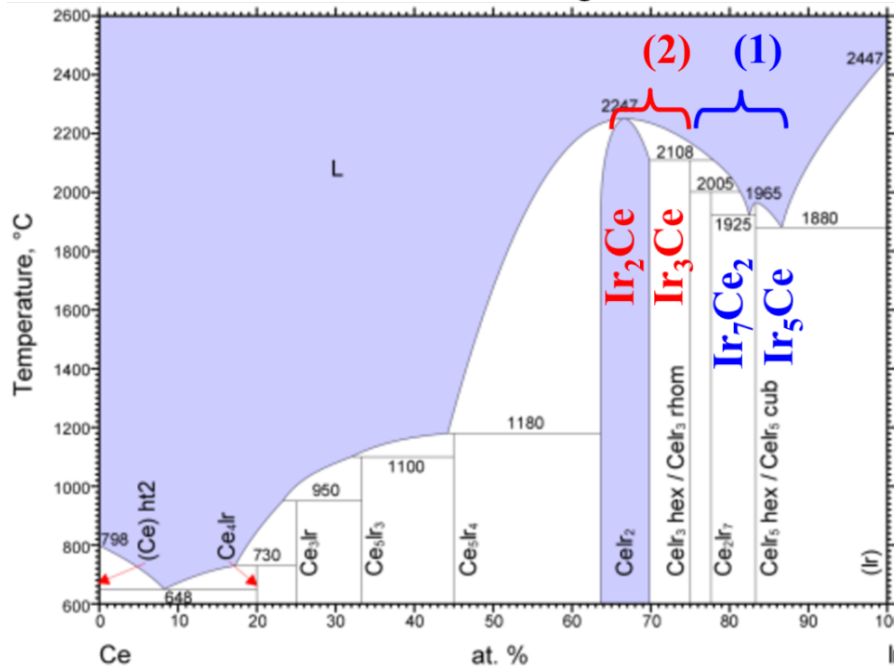
高量子効率化を目指して、
IrとCeの成分組成の最適化を実施。

【材料開発について】

- 神戸大学・菅原氏のご協力でご新組成の材料開発を実施。
- 小型テトラアーク炉を用いたアーク溶解を用いた製造方法を採用。



Ce-Ir Phase Diagram



- (1) これまで製作の組成 : Ir_5Ce , Ir_7Ce_2
 (2) 新たに製作の組成 : Ir_3Ce , Ir_2Ce
 (セリウムリッチ組成)

【量子効率測定結果】

Material	QE@266nm
Ir_5Ce	1.87×10^{-4}
Ir_7Ce_2	2.24×10^{-4}
Ir_3Ce	2.89×10^{-4}
Ir_2Ce	3.87×10^{-4}

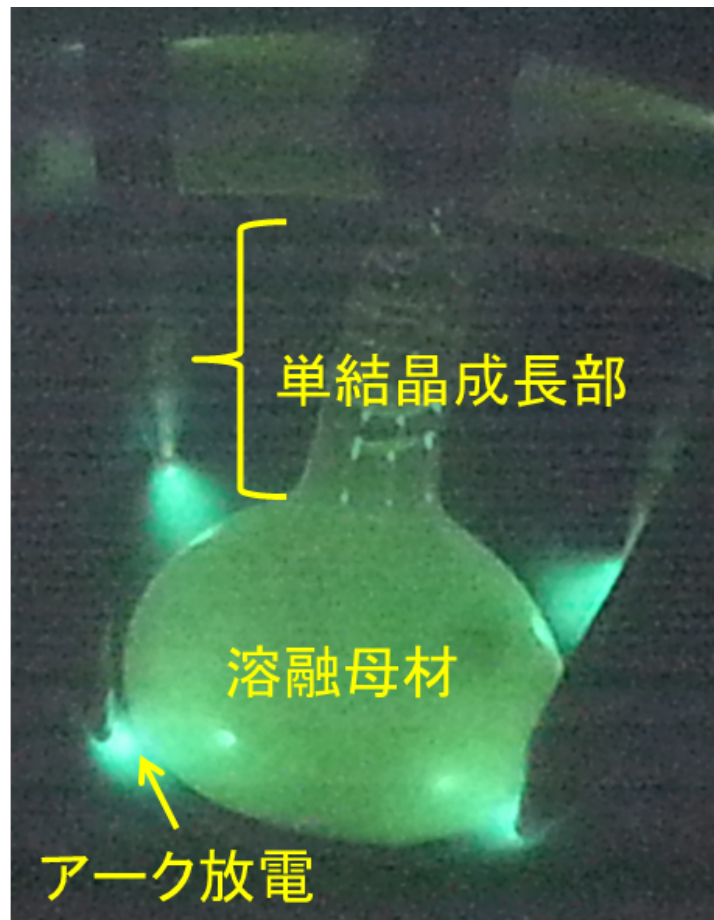
Ce比率が多くなるにつれて、量子効率が向上
 → Ir_2Ce が最大の量子効率。

- Ir_2Ce の表面状態を分析中
- Ir_2Ce の寿命測定実施中

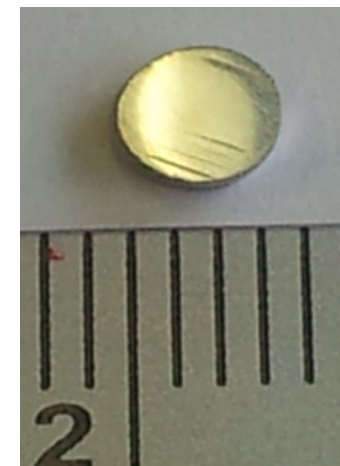
フォトカソード材料の開発状況（単結

神戸大学・菅原氏のご協力を得て、チョクラルスキー法によるIrCe単結晶引き上げ試験を実施

【単結晶成長過程】



【単結晶IrCe】



【今後の研究開発方針】

- 結晶表面の量子効率の空間分布測定
- RF電子銃で利用可能な大口径単結晶の製作
- 量子効率が最大となる結晶方位の同定

Phase II 運転に向けて

【多結晶Ir₇Ce₂材】

【多結晶Ir₂Ce材】

* QTWSC-gunでの使用母材

利点

- 1/e寿命が2年以上
- RF gunでの運用実績(多)

問題点

- 多少量子効率の空間分布有り→
ビーム品質に影響

利点

- 高量子効率 : 3.87×10^{-4}

問題点

- 劈開性による加工の困難さ
→ カソードロッドへの冷やしバメ
加工困難
- 1/e寿命が未知

【カソード材料の選択】

Phase IIでは、目標電荷量が少ないため空間電荷効果の影響小

→ **電子ビームをRF-gunから長期安定供給できることを最優先。**

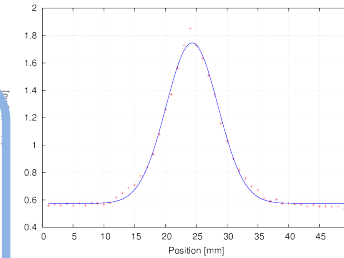
十分な運用実績があるIr₇Ce₂を採用。Ir₂Ceはローカル測定を徹底する予定。

A1レーザー関連

RF電子銃用レーザーシステム

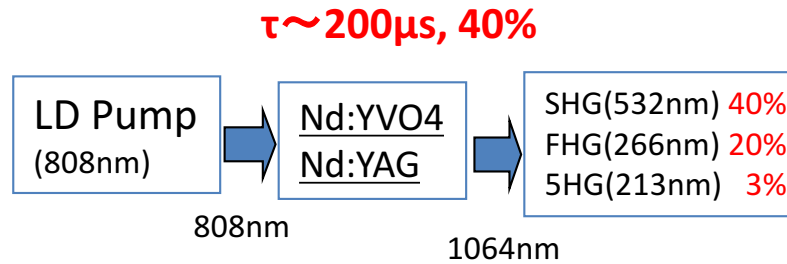
- IrCe カソード用のパルスエネルギー
 - 500 μ J @ 266nm × 50 Hz, 2バンチ (96ns間隔)
- Phase-II 2nC 向け (2017.10～)
 - 位置安定度 / プロファイルの改善
 - レーザーの光路の真空ダクトの改善
 - 結晶の交換 / 再調整
 - 大口径増幅モジュールの使用 (2列目)
 - モニター系の増強 (結晶のダメージ等)
 - 長期運転のための 2重化
 - 発振器 : 商用発振器(MENLO x 2(1台は12月～))と自作発振器
 - 増幅器 : 2列のNd:YAG の増幅器
(2列目に VCSEL タイプの長寿命LDを採用)
- Phase-III 5nC 時間構造制御
 - Yb ディスクレーザー
 - Chirped Pulse Amplification の導入

Properties of laser medium



Nd-doped

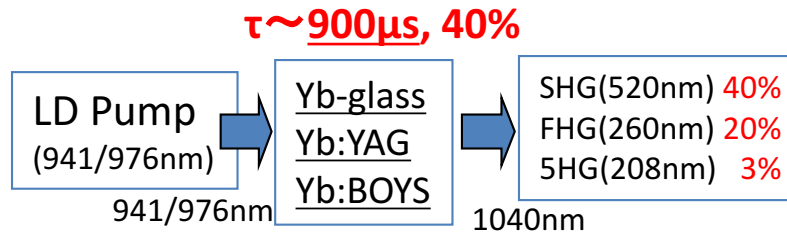
- 4準位レーザーで閾値が低い
- 808nm 高出力LDが利用可
- 大型結晶も製造可能
- × 狭帯域 → 波形制御は不可能



➡ A-1 地上レーザーハット

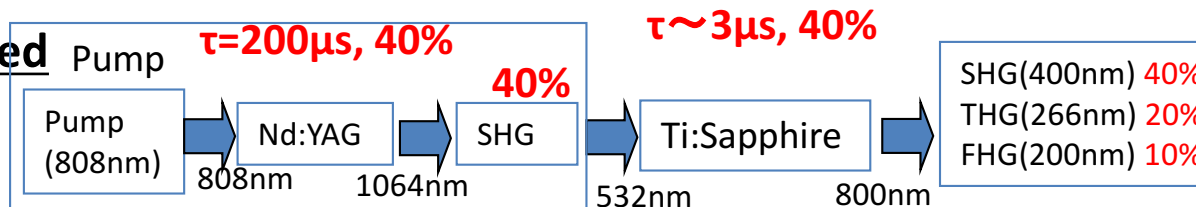
Yb-doped

- 広帯域 => 波形制御が可能
- 長い蛍光寿命 => 高出力化
- ファイバーレーザーの安定性
- 量子効率が高い
- × ASE が起きる
- × 3準位で閾値が高い
=> ディスクレーザー



➡ A-1 地下レーザーハット

Ti-doped

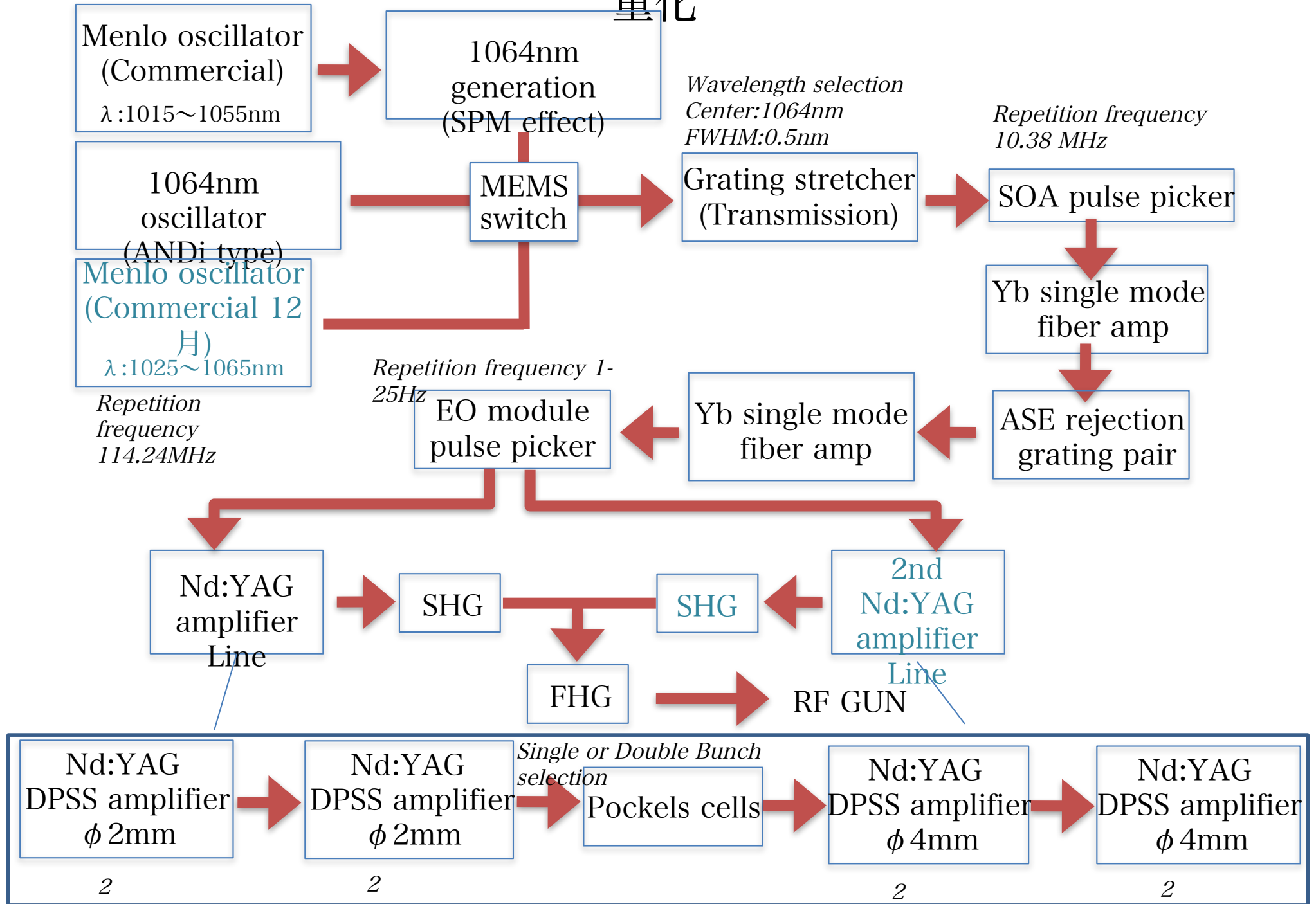


- 超広帯域
 - 非常に高いダメージ閾値
 - × クロスセクションが小さい
 - × 短い蛍光寿命 => Qスイッチレーザーが励起に必要
- } TWレーザーは Ti-Sapphire

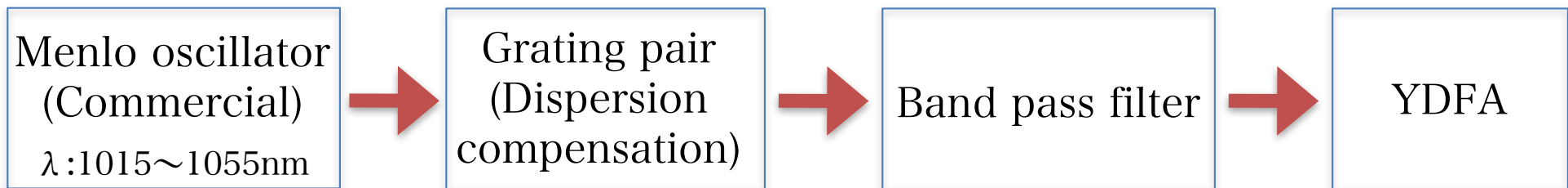
	Material	Nd:YAG	Yb:YAG	Ti:Sapphire
Fluorescence	Wavelength	1064nm	1030nm	660-1100nm
	Fluorescent time	230ms	960ms	3.2ms
	Spectral width	0.67nm	9.5nm	440nm
	Fourier minimum Pulse width	2.48ps	165fs	2.59fs
Absorption	Wavelength	807.5nm	941nm	488nm
	Spectral width	1.5nm	21nm	200nm
	Quantum efficiency	76%	91%	55%

Nd:YAGレーザーシステム (A-1地上) の発振器 / 増幅器 2

重化

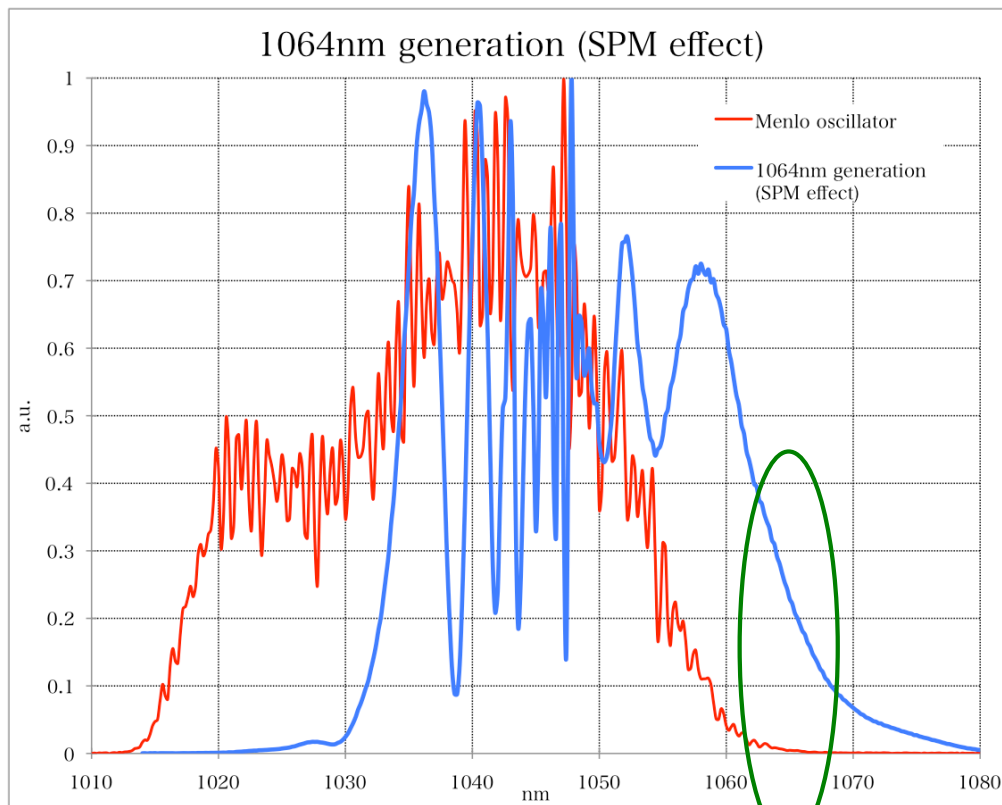


既存の MENLO 発振器 → 1064nm 生成 Self Phase Modulation (SPM)

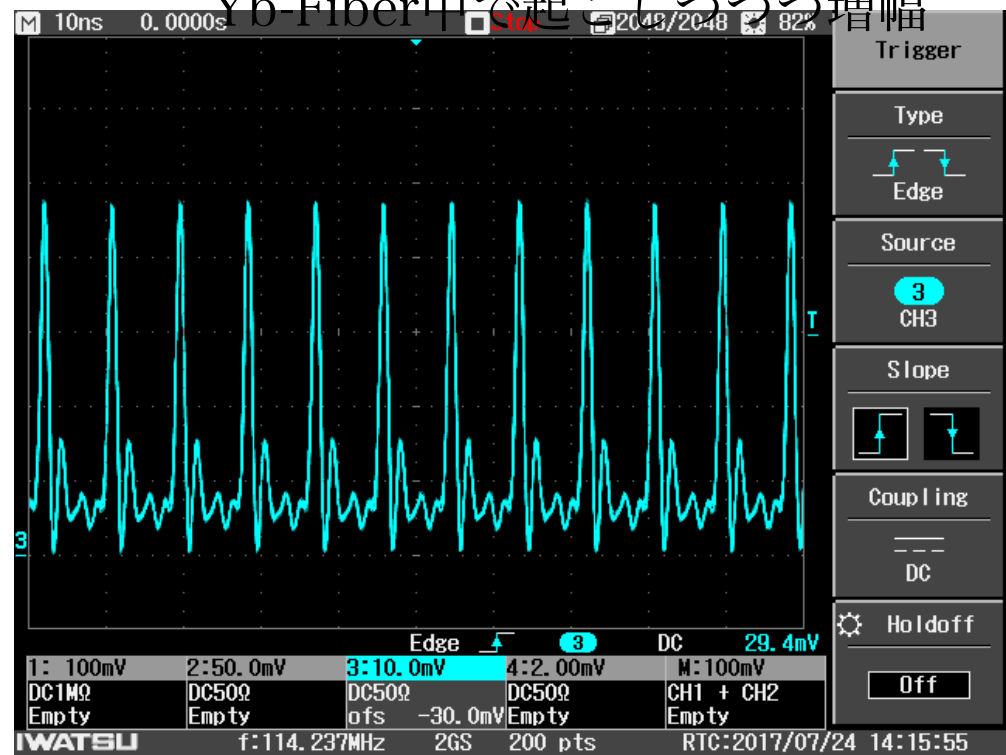


Self Phase Modulation (SPM)
を

Yb-Fiber中で起こしつつ増幅

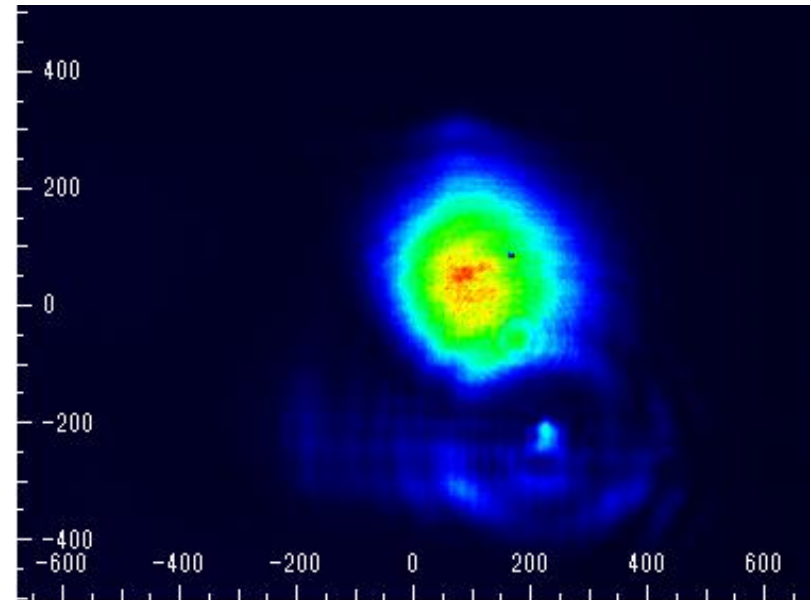
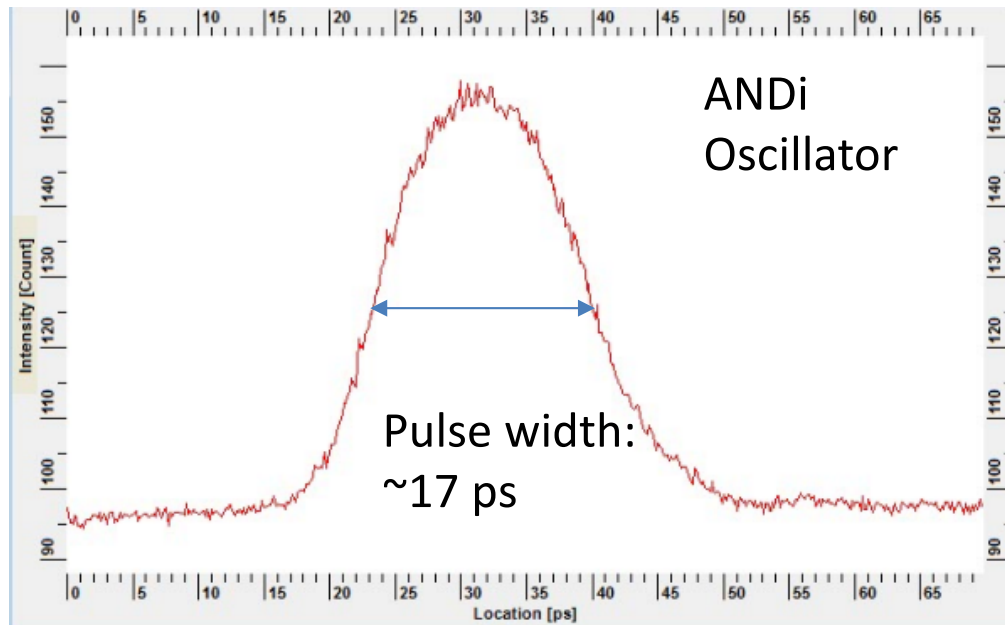


1064nm

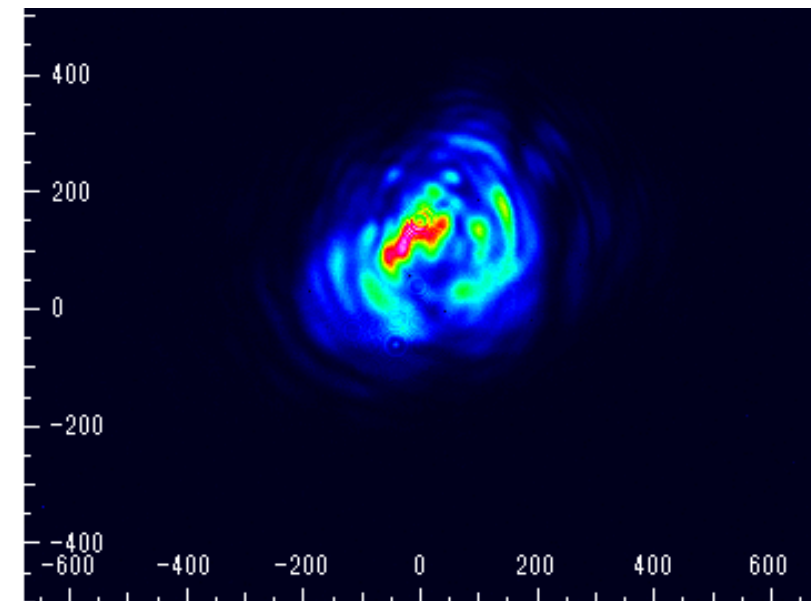
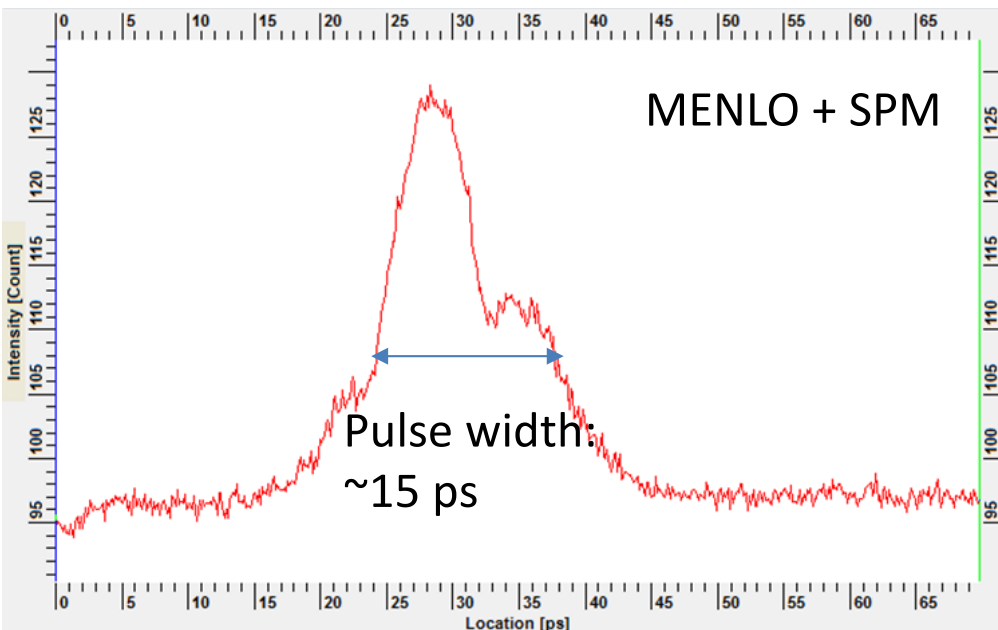


2倍波でのレーザーのビーム特性

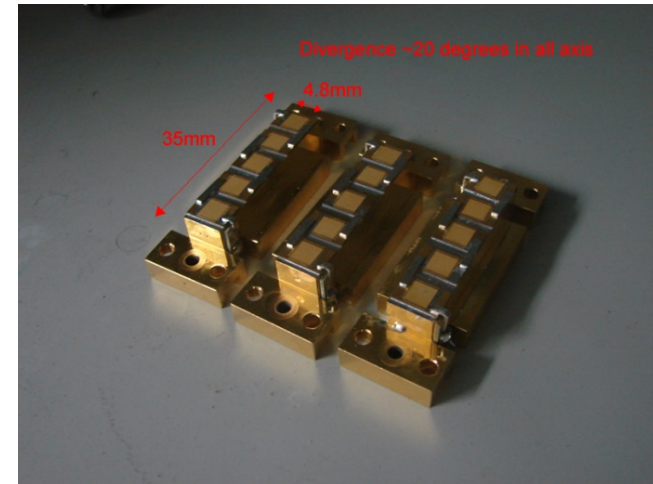
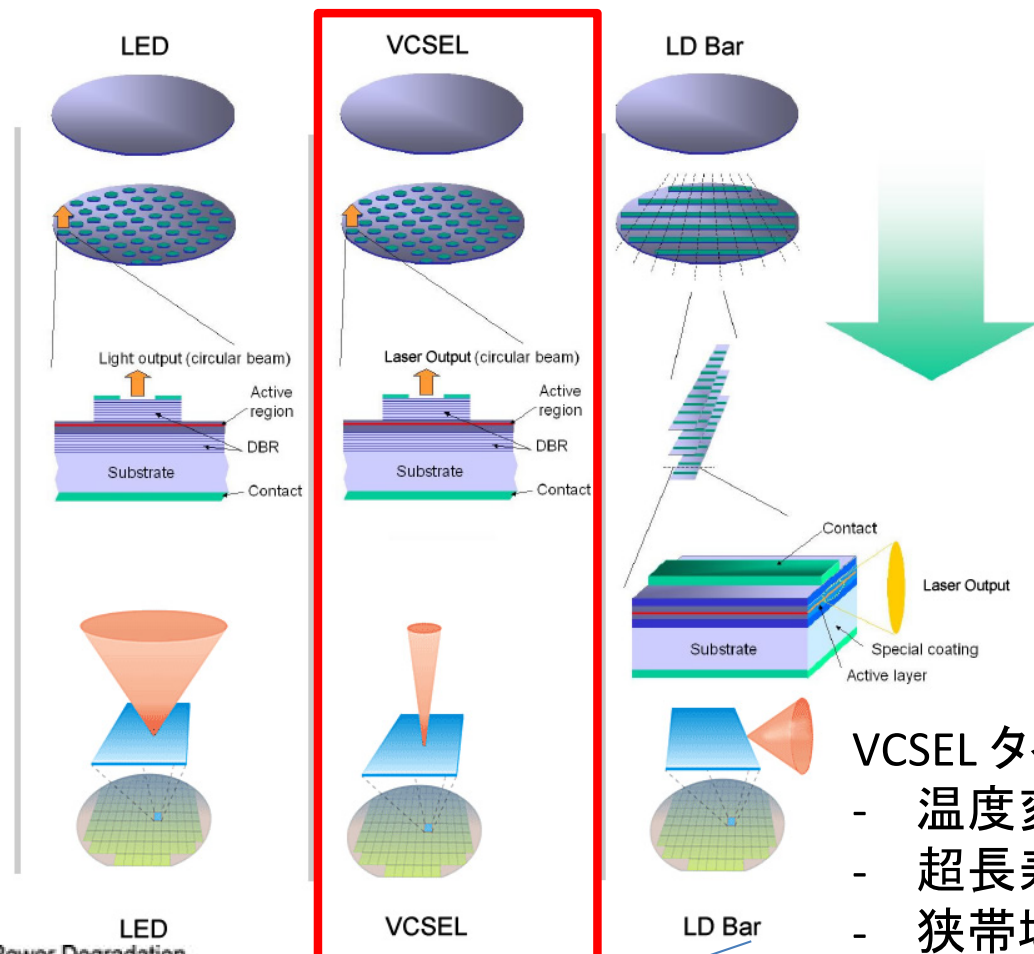
ビームプロファイル(現在)



ビームプロファイル(春運転時)

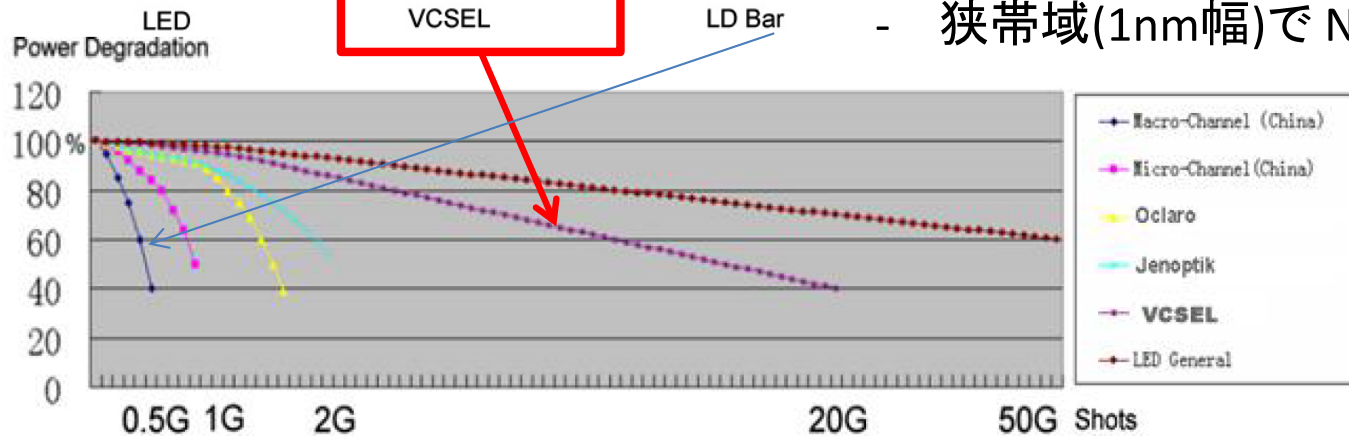


VCSELタイプの Nd:YAG DPSS Moduleへの置換

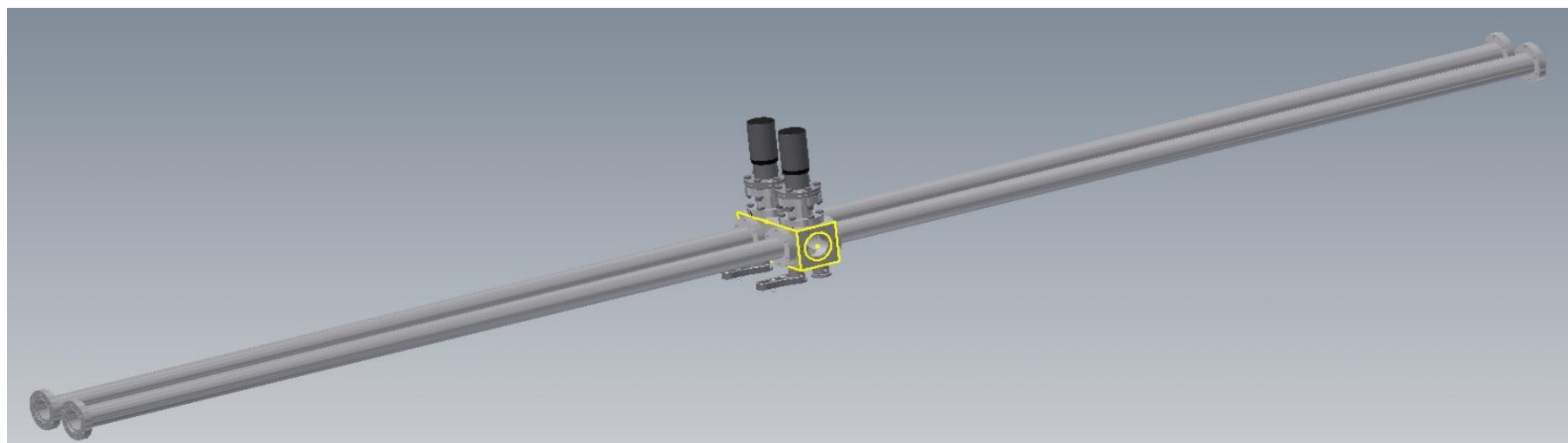
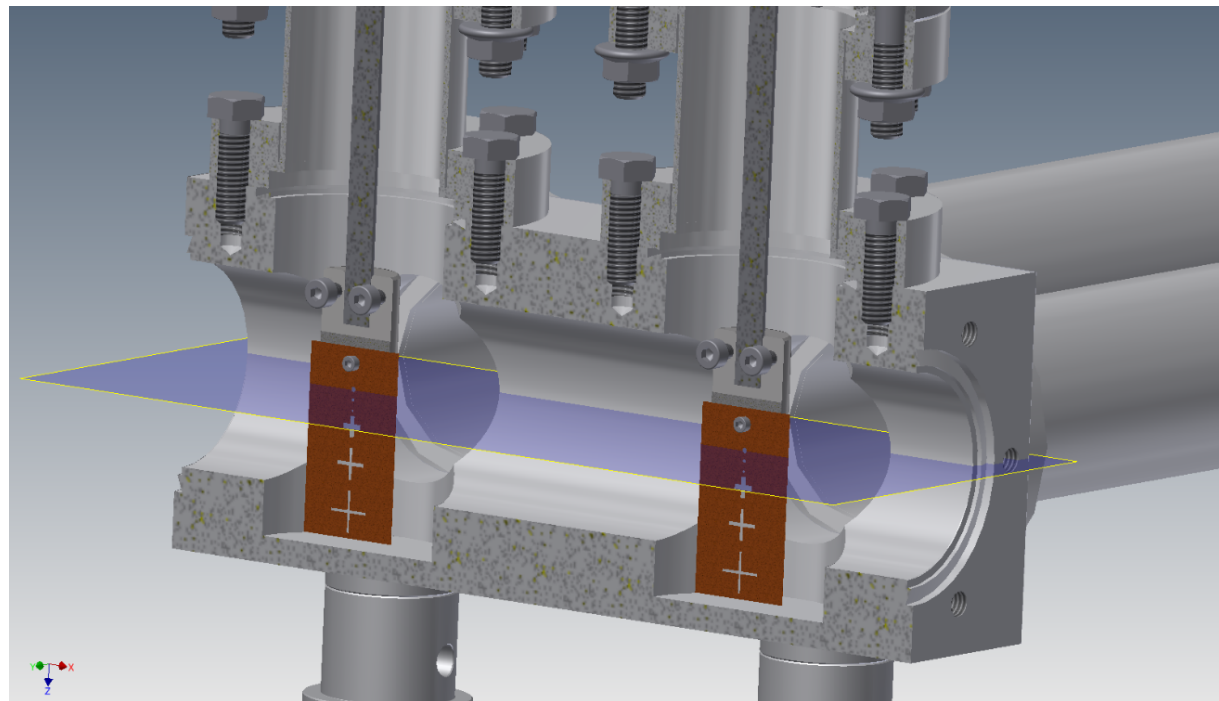


VCSELタイプのLDの特徴

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



プロファイル改善のための空間フィルター



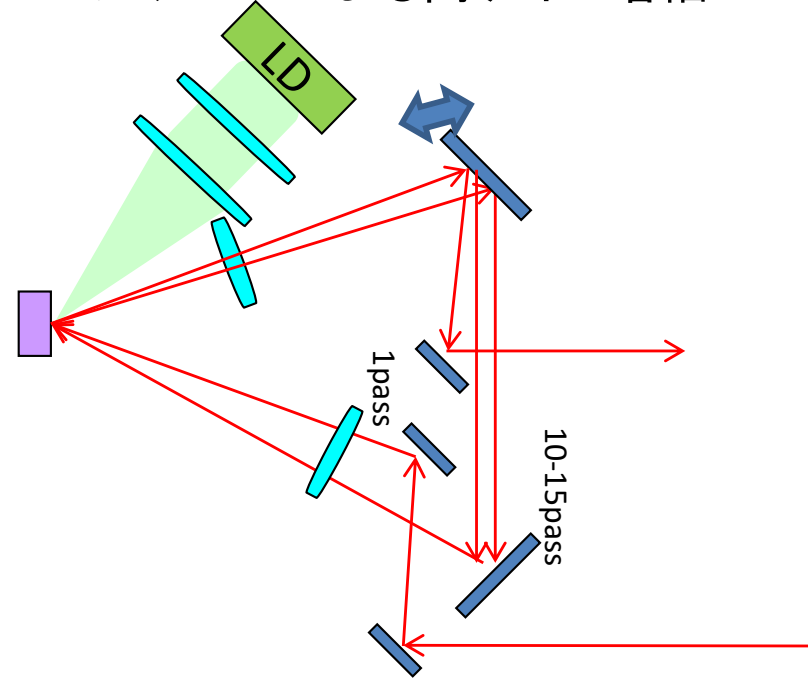
Phase-III 用 Yb:YAG レーザー

Yb:YAG ディスクレーザー増幅器

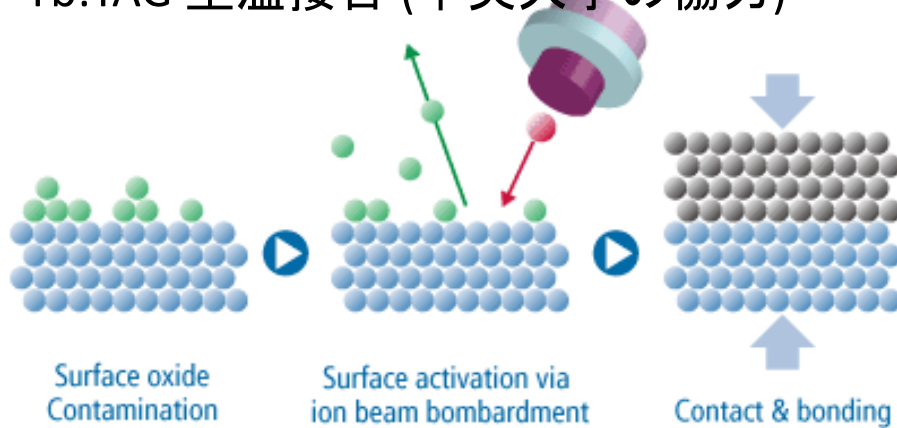
Yb:YAG結晶のインジウム接合



マルチパスによる高ゲイン増幅

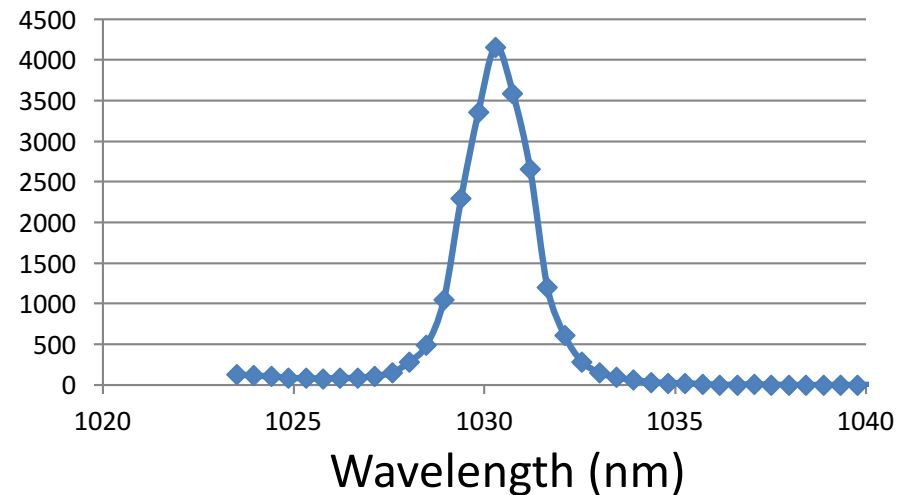


Yb:YAG 室温接合 (中央大学の協力)



gain

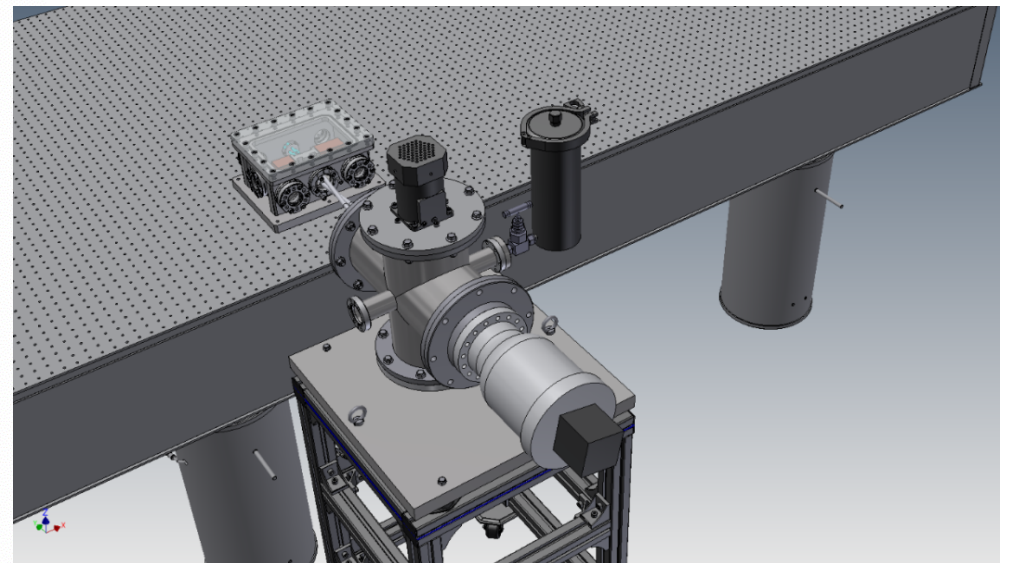
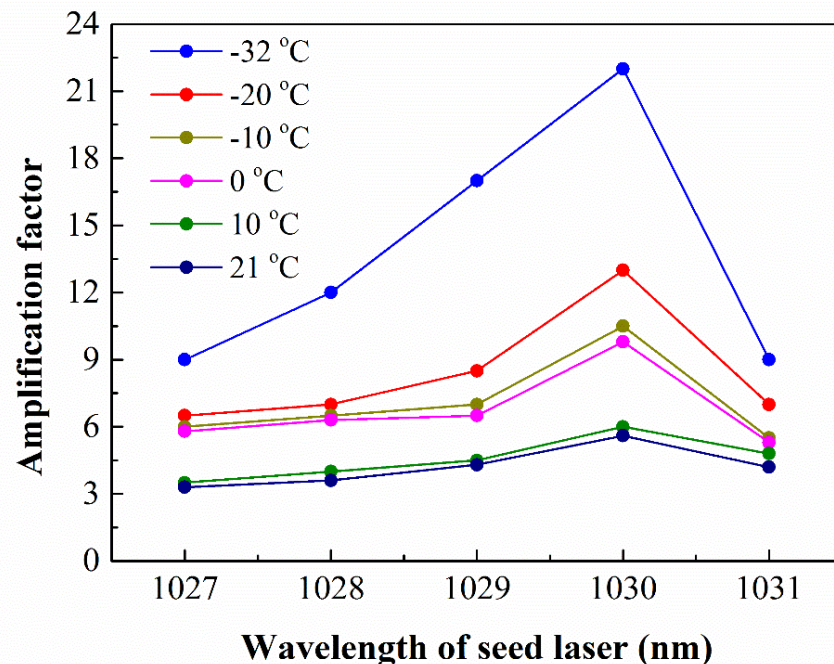
gain13



Yb:YAG ディスクレーザー増幅器(冷却最終段)

冷却の効果

- 準3準位の吸収の低減
- 熱伝導率が向上
- 屈折率の温度依存性が低減
=> 増幅率の向上 熱レンズの抑制



Phase-II Schedule

- A-1 地上レーザー

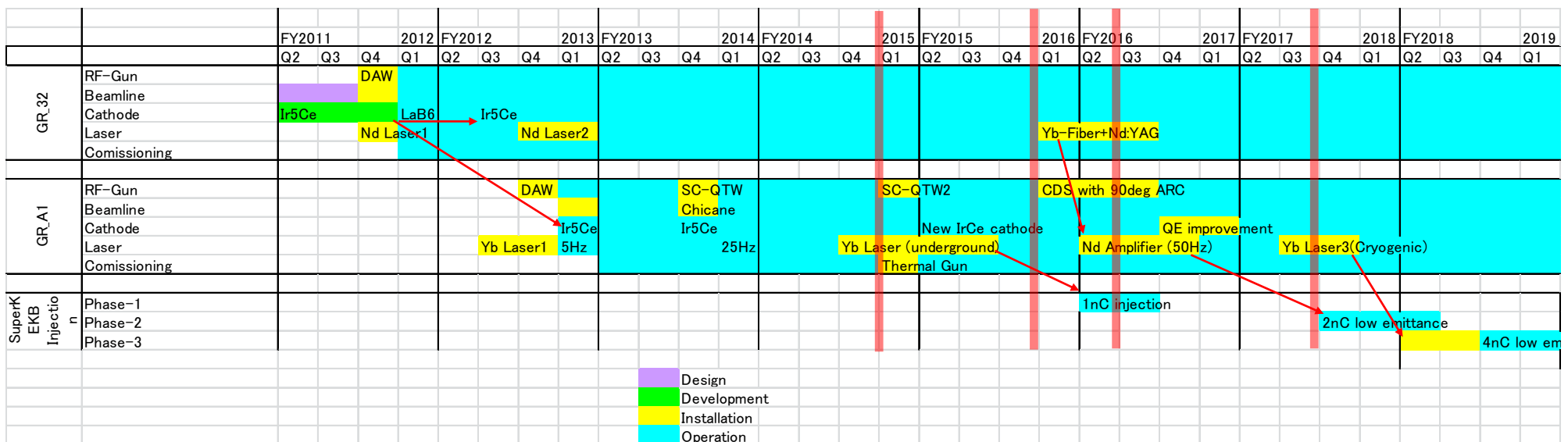
- 2重化されたレーザー：発振器 / Nd増幅器
- 空間プロファイルの改善 / 光伝送系の改善

- カソードの量子効率の均一化

• Phase-III

- A-1 地下の Yb:YAG ディスクレーザー

=> 高出力 / 時間構造制御



今後の開発項目

- Phase-II
 - 電荷量、エミッタンスの改善
 - レーザープロファイルの改善
 - カソードの量子効率の均一化
 - 長期安定性
 - 新規に導入したレーザー光路の評価
 - RF空洞の改良 (カソードの熱コンタクト、空洞の改良)
- Phase-III
 - レーザーの時間構造制御
(CBG による伸長 / 圧縮 + 波長分布制御方法)