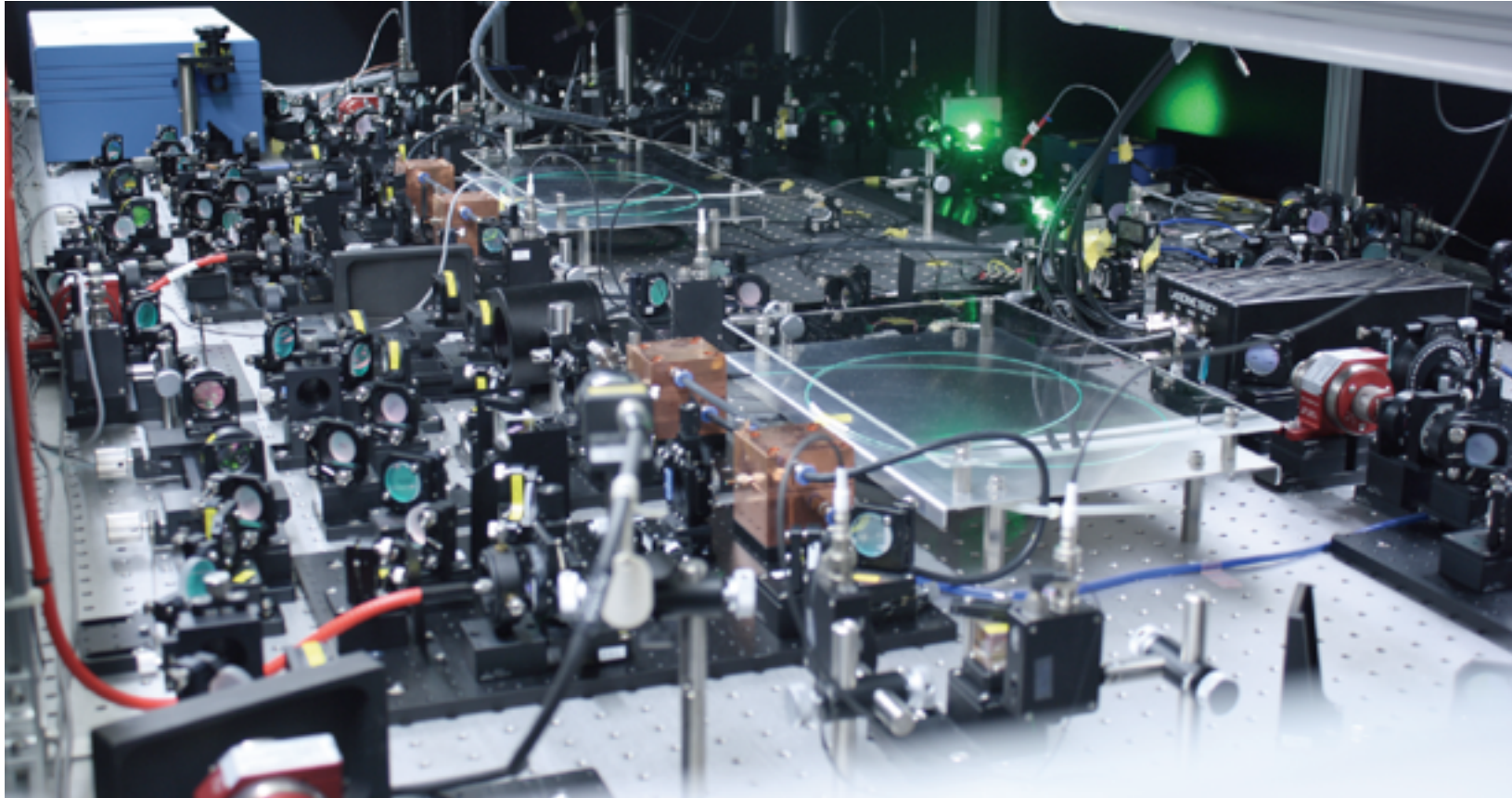


# レーザー開発



- 本ワークショップでの議論
  - これまでの進捗、cERL運転での達成、今後の課題
- レーザー開発について、これまでの役割分担
  - 大規模ERL実機に向けた開発 (産総研)
  - とにかくcERLの運転に必要なものを用意 (KEK)
- ここでの発表
  - レーザー室は立入禁止だけど、中身はどうなっているのか。
  - ビーム運転にどうやって対応しているか
  - cERLで今後必要となるビームを実現するにはどうするか

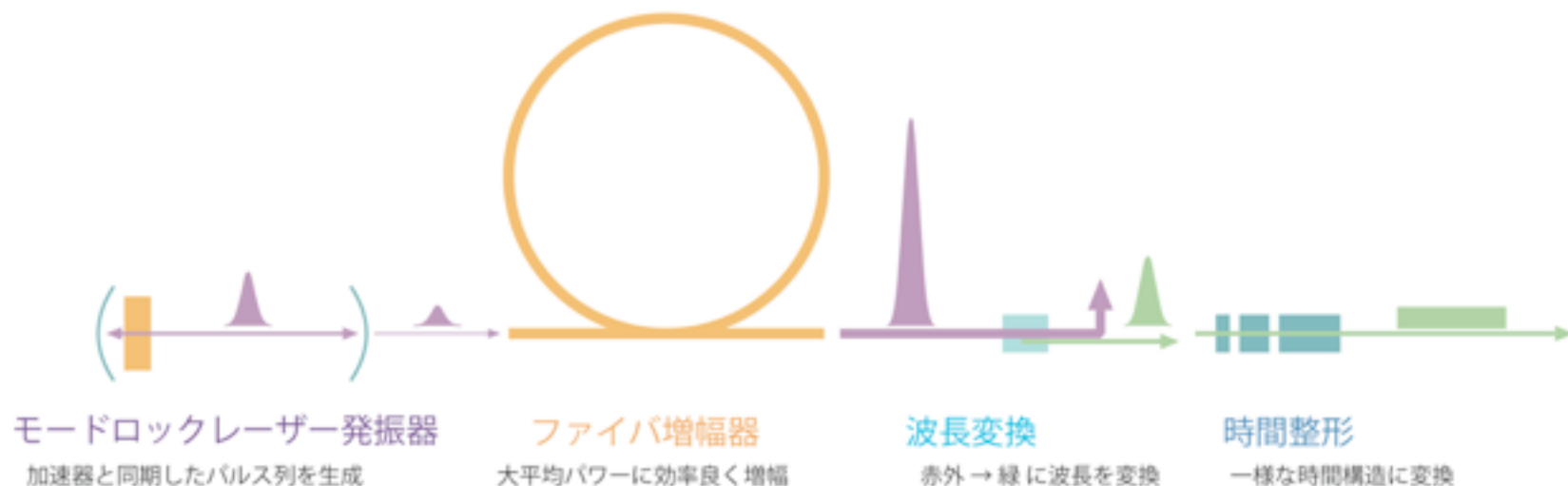
コンパクトERLミニワークショップ(第2部)

2015.1.19

本田洋介

# cERL電子銃用レーザーの仕様

- cERLにおける電子ビームの仕様
  - 繰り返し1.3GHzで連続
  - 平均電流 10mA (8pC/bunch)
  - 規格化エミッタンス  $1\mu\text{m}$
  - バunch長 30ps (電子銃直後)
- レーザーの仕様
  - 1.3GHzを基本に
  - 平均パワー2.3W(2nJ/pulse) (カソードQE=1%と仮定)
    - レーザー室で、532nmで5W (1064nmで25W)
  - カソード上の直径1mm
  - バunch長3psを8スタックで24ps (時間ジッタはこれより十分小さければ良い<1ps)
  - バーストモードに対応 (ローディングが影響しない $1\mu\text{s}$ 切り出し)
  - 安全最優先



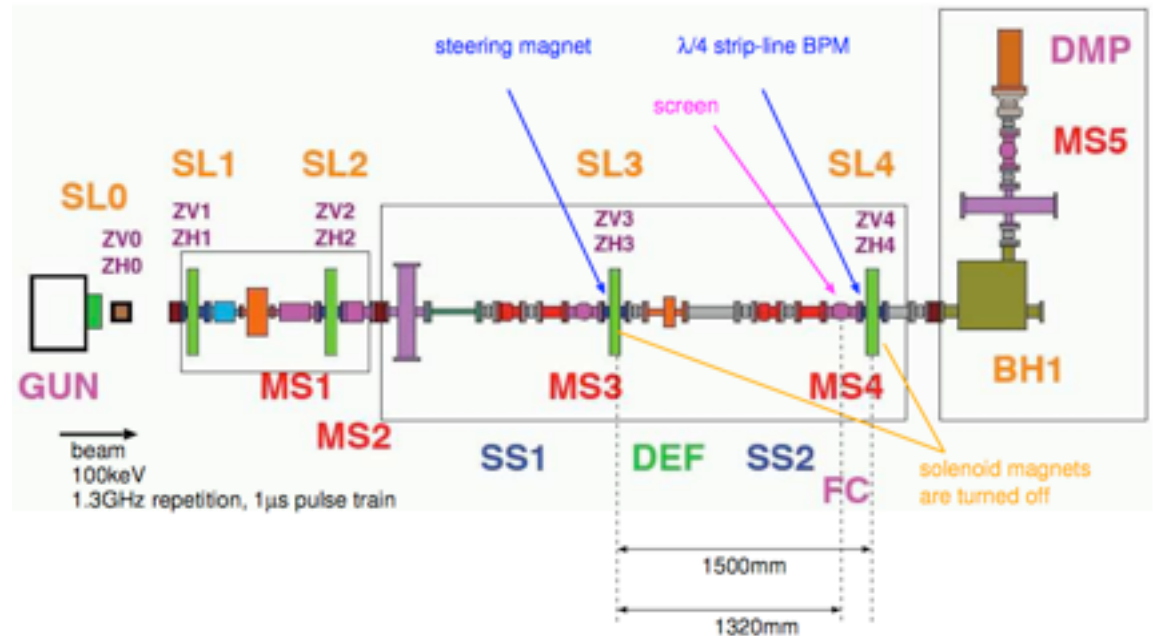
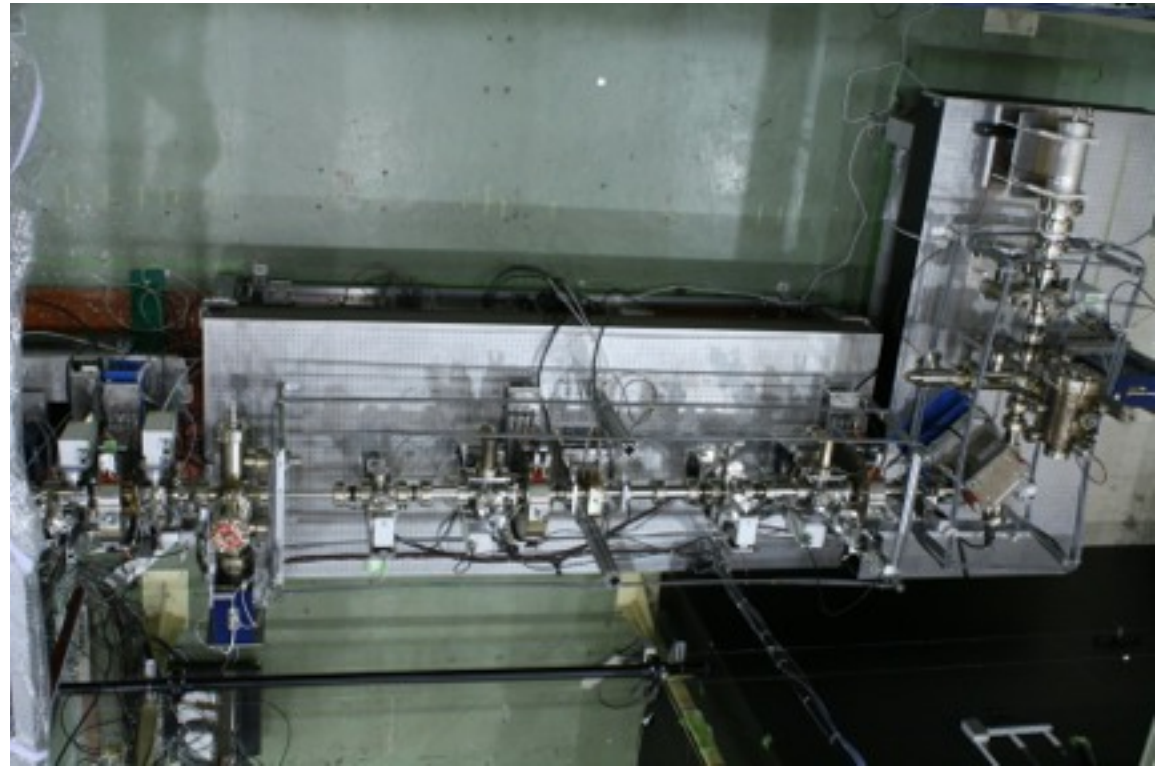
# これまでの経緯

- 2008年頃
  - ERL用のレーザーの検討(栗木ほか)
  - 産総研(と物性研)で開発を始める (このとき開発の主体があいまい)
  - 波長700~800nmで検討
- 2010年頃
  - 波長500nmの方針に (AR南の電子銃でのカソード試験より)
- 2011年夏
  - 物性研撤退、cERLのレーザーはKEKでやり直すことに
  - ERL実機に向けた開発は産総研が引き続き行う
- 2012年
  - AR南で大電荷試験のレーザーを用意 (100kV電子銃で100pC/b)
  - cERL用のレーザーは構成要素の個別試験から始め、4月頃に一応目処はついた
  - STF量子ビーム共振器用に増幅器を開発
  - cERL用に再構成し準備室で試験、レーザー室完成後移設。
- 2013年
  - ビーム運転
  - 高電荷運転のため、間に合わせてポストアンプ追加
- 現状
  - 運転が始まると、基本的に触れない。
  - 必要なビームに応じてその都度対応。(モード変換が面倒。)
  - ビーム運転については、ほぼトラブル無し。(ばれていないだけという説もある)
  - 実質1名(その1名はビーム診断にも忙しい)、レーザーの専門家は居ない
  - ここ2年間は予算ほぼゼロ。

AR南の電子銃試験でのレーザー

# AR南電子銃試験での診断システム

- 2008~2011
- 目的
  - 電子銃から入射部までの立ち上げ
  - カソードの試験
- 予定
  - 200kV電子銃で診断装置を立ち上げ
  - 500kVが完成したら診断装置を移設
  - そのあとcERLに設置
- 成果
  - カソード初期エミッタンス
  - カソード時間応答
  - 大電荷生成(評価は道半ば)
- 現状
  - cERL建設のため解体(2012)
  - cERL入射器診断ラインとして稼働
  - レーザーのタイミング系もcERLに移設
- レーザーとしては、
  - 低電荷試験は市販のもの
  - 高電荷試験はパルス増幅して対応
  - カソードへの結像系





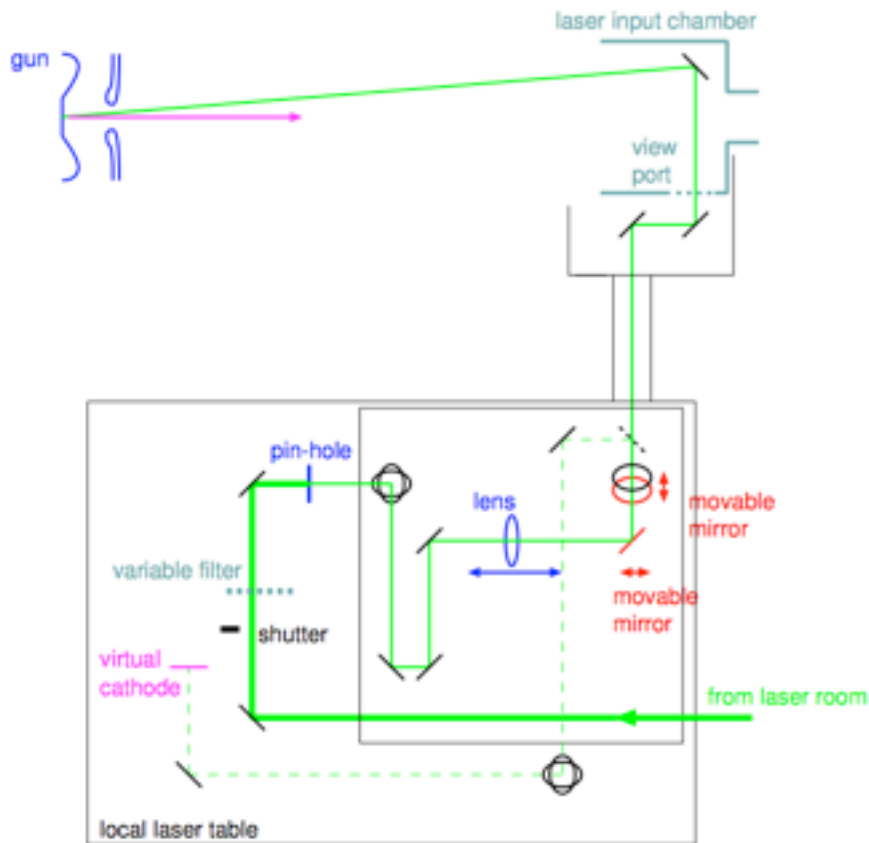
# AR南カソード試験でのレーザー結像系

- カソード試験のために、よく定義されたスポットが必要
- 一様ビームの生成
  - ピンホール切り出し、カソードへ結像
- さらに、電子ビームをカソードからスクリーンへ結像し確認
- cERLのレーザー入射系はこれをベースに設計

スクリーンモニタで見た電子ビーム形状

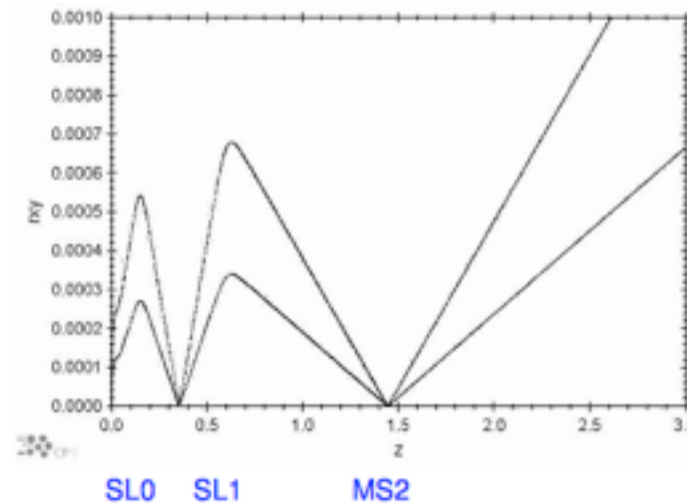
レンズ系微調整前

レンズ系微調整後



*Like a Full Moon  
(stable and clean)*

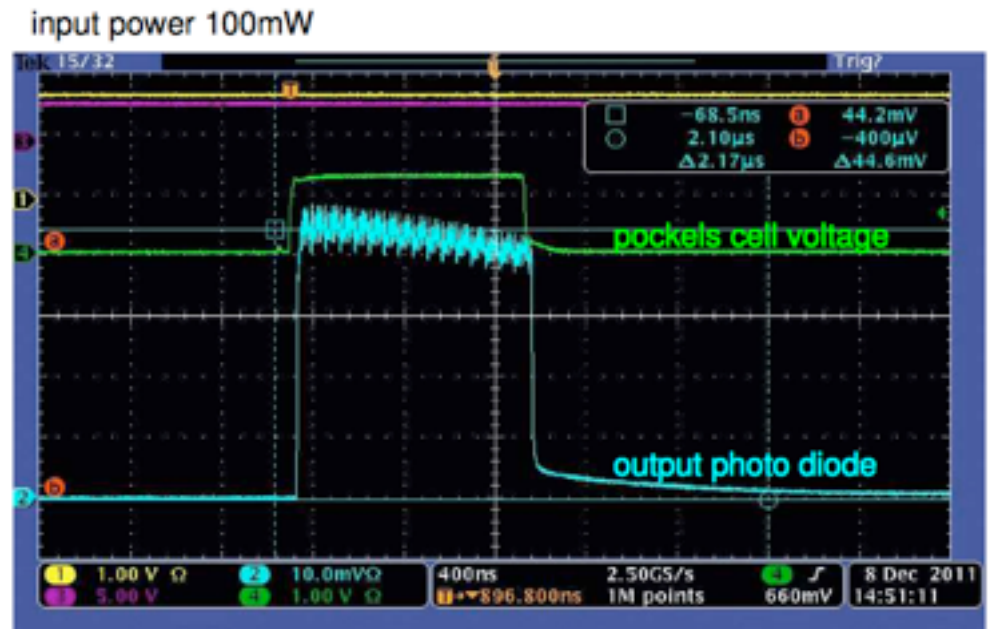
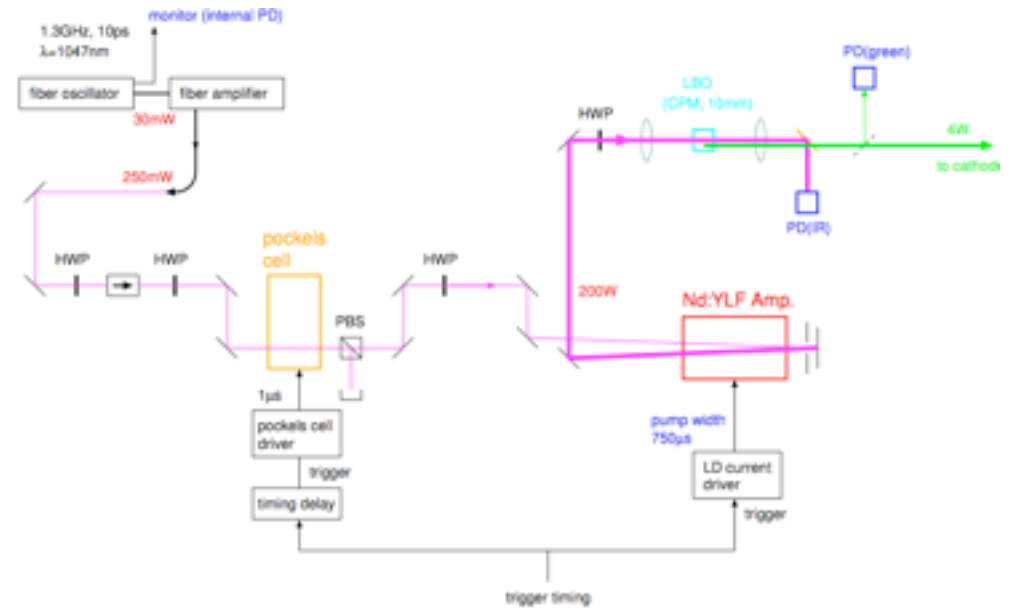
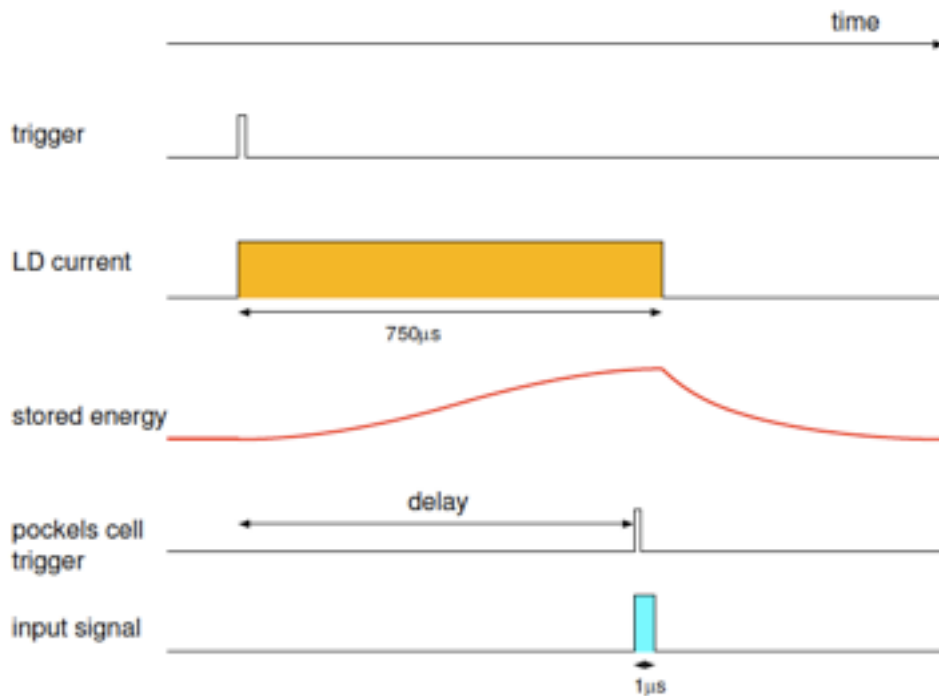
particles diverging from center of the cathode



「月待図」『江戸年中行事図聚』より

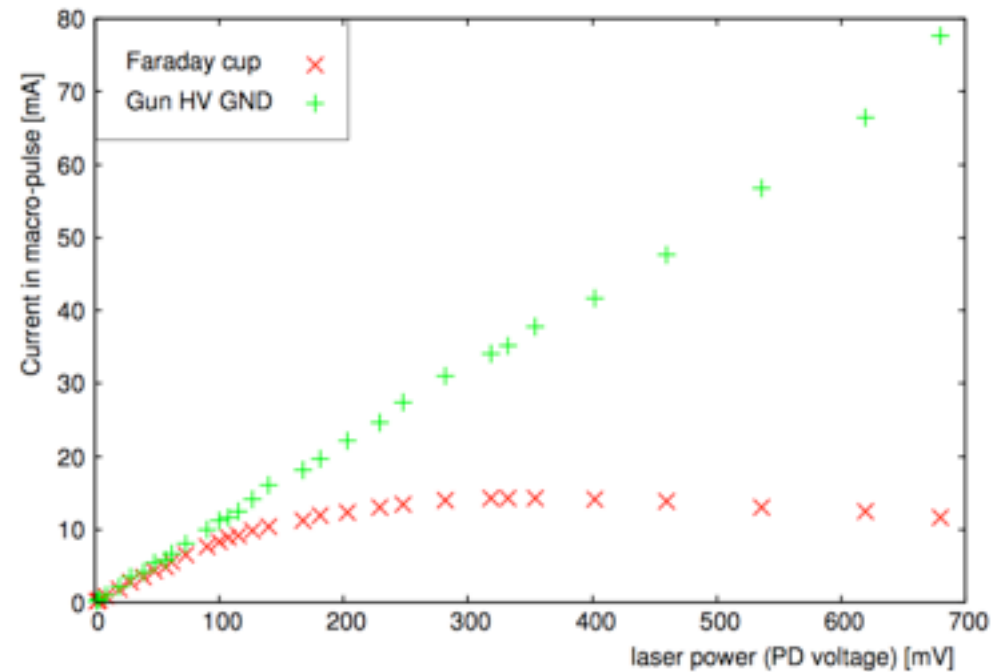
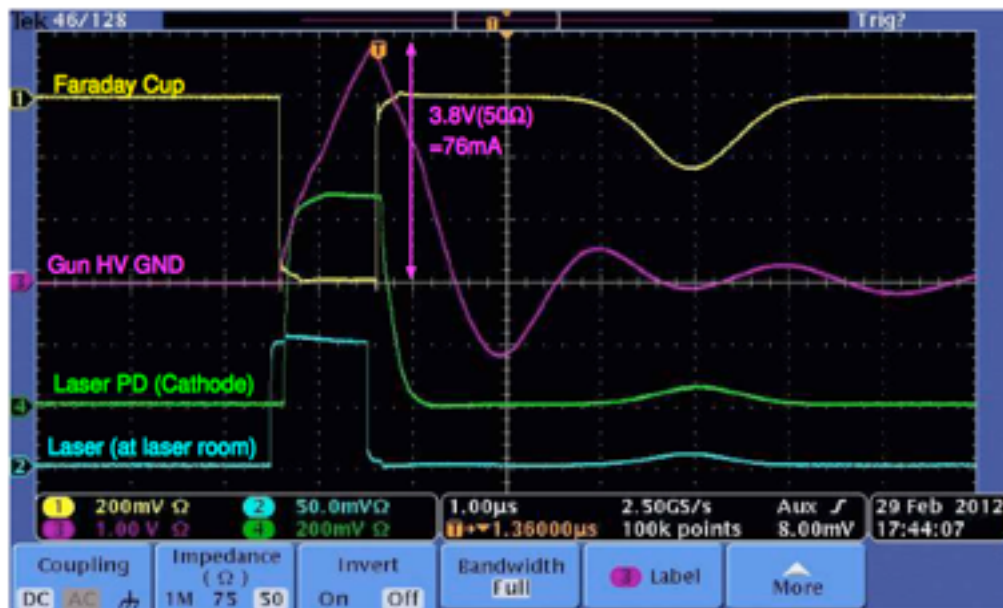
# AR南高電荷試験でのレーザーシステム

- CW大電流運転は考えない、バースト運転
  - 蓄積型の固体パルスアンプ (Nd:YLF)。
  - 切り取って増幅
  - 余裕で200Wクラス



# AR南電子銃での高電荷試験

- 100kVの電子銃で試験
- カソードからビームは出ているが、輸送系が通らない。(1.3GHz,  $1\mu\text{s}$ バーストで、76mA生成、11mA輸送)
- 高バンチ電荷試験に限れば、比較的簡単に可能。
- いざとなったらcERLでもこの方法で

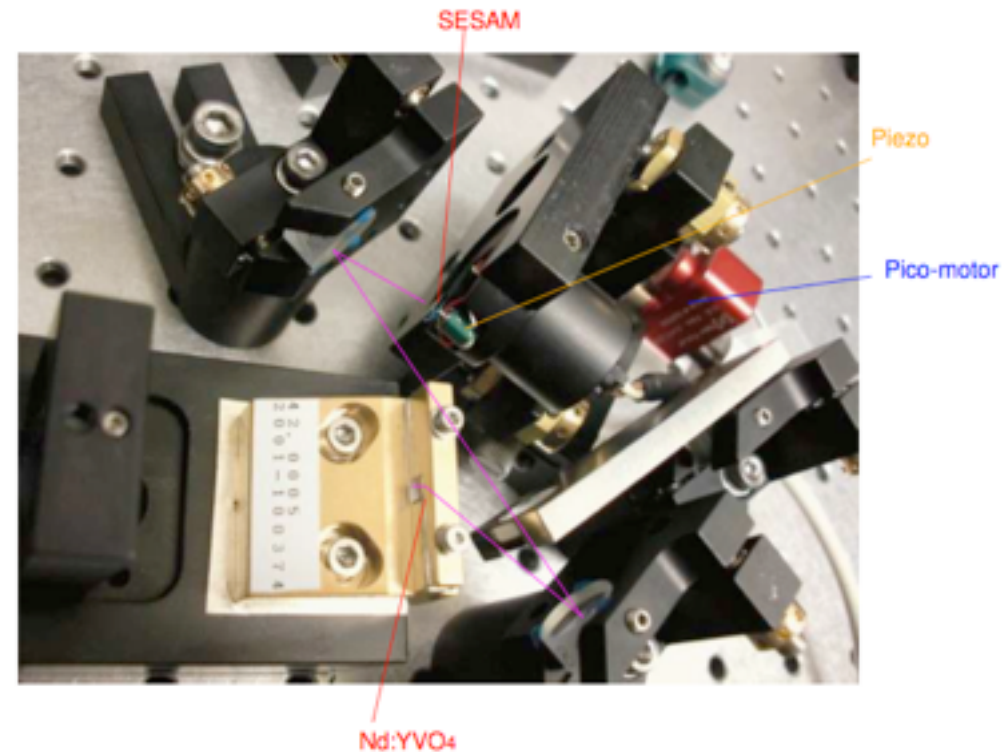
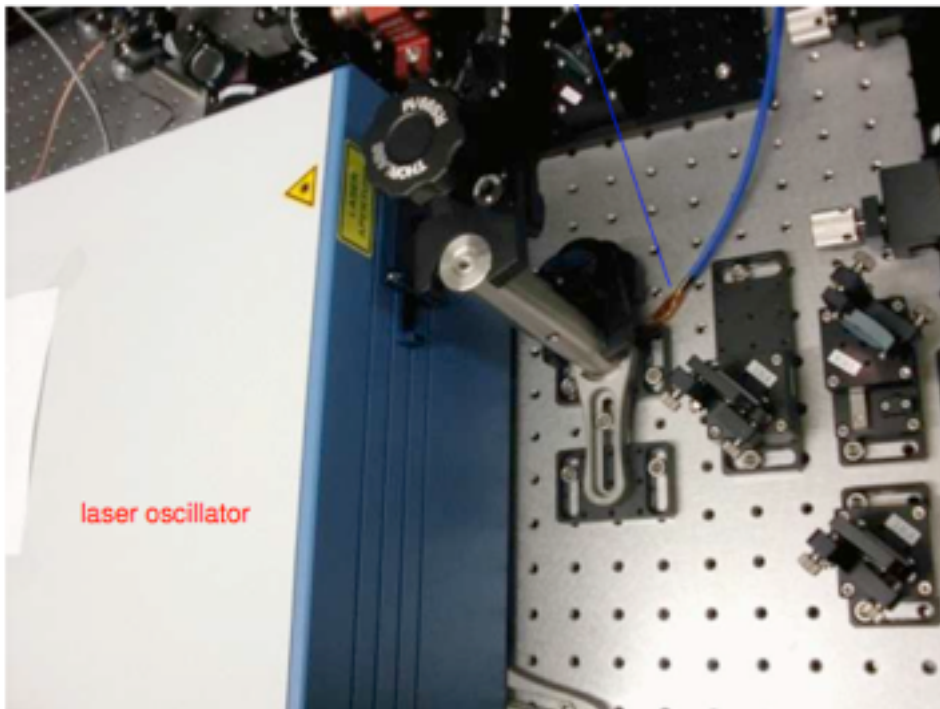
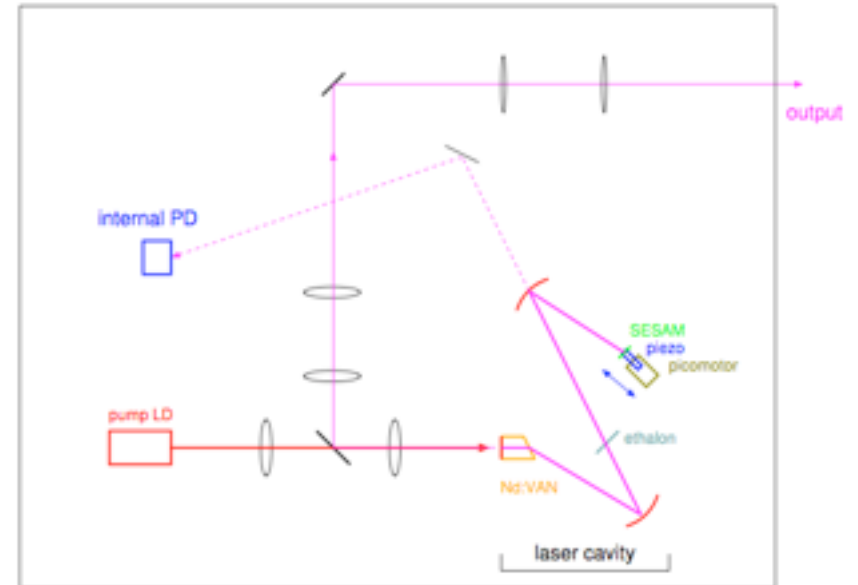




# ファイバ増幅器の開発

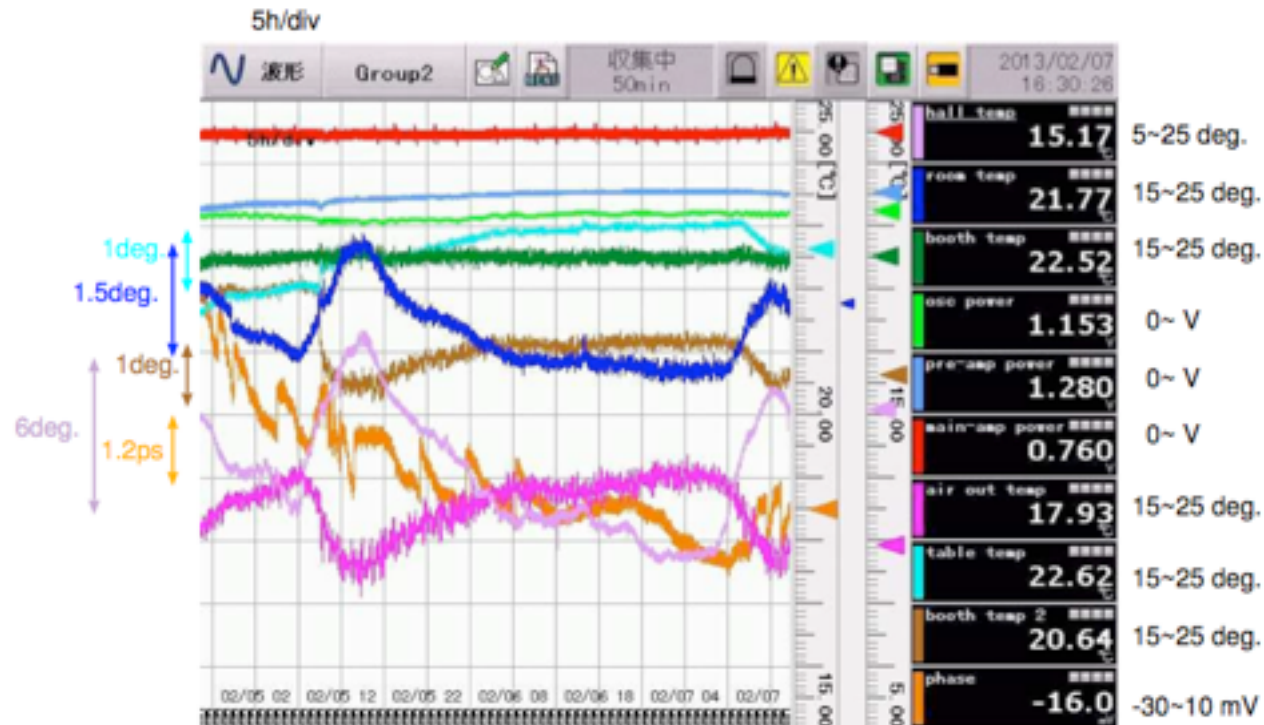
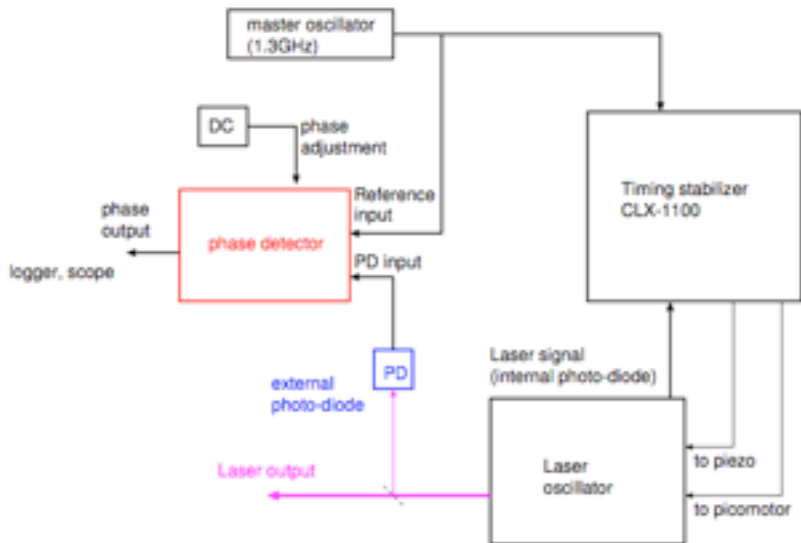
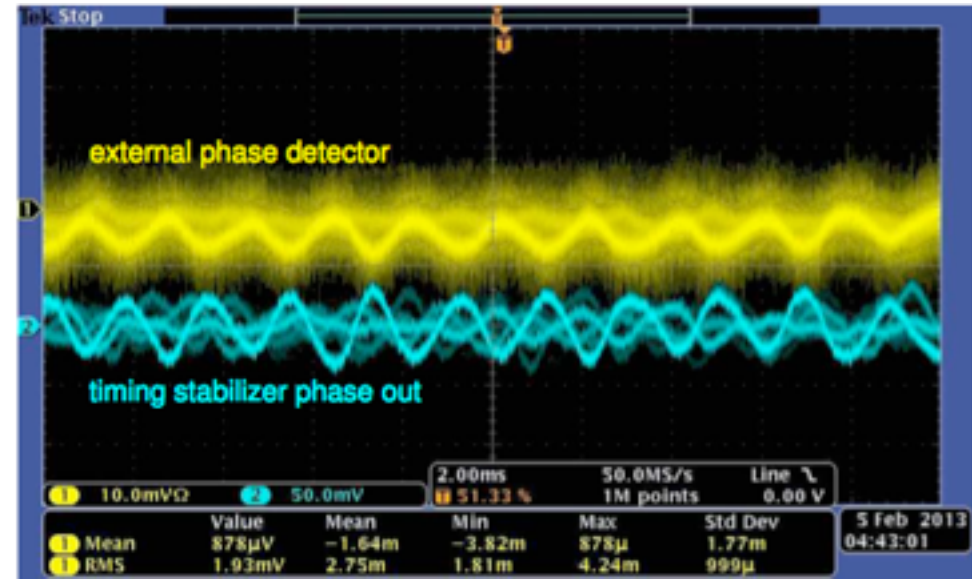
# レーザー発振器

- 市販品(TimeBandwidthProduct, GE-100)を購入
  - ATFで実績有り。良く分かっている。
- 1.3GHz Nd:YVO SESAM mode-lock laser
- 本当はYb系が良いが、1.3GHz対応の市販品が無い。
- 波長1064nmなので、Ybアンプにとって最適ではないが、時間が無いので購入。
- これまでの運転状況
  - レーザー室が安定している限りは、メンテナンスフリー



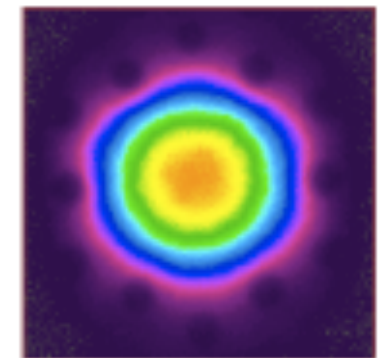
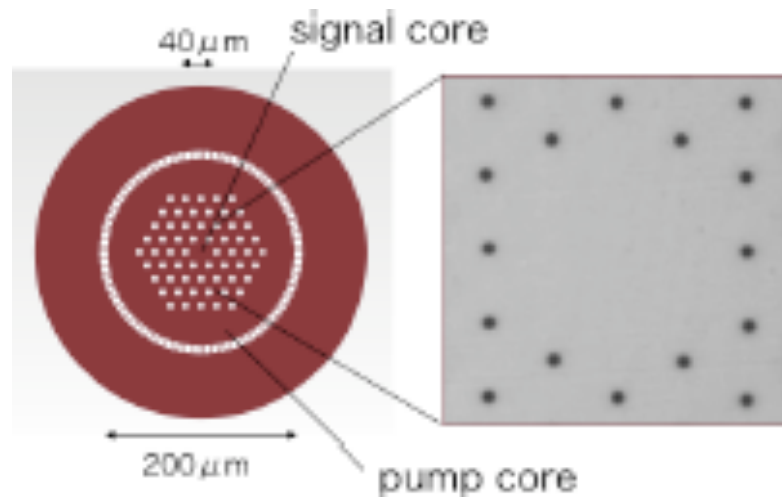
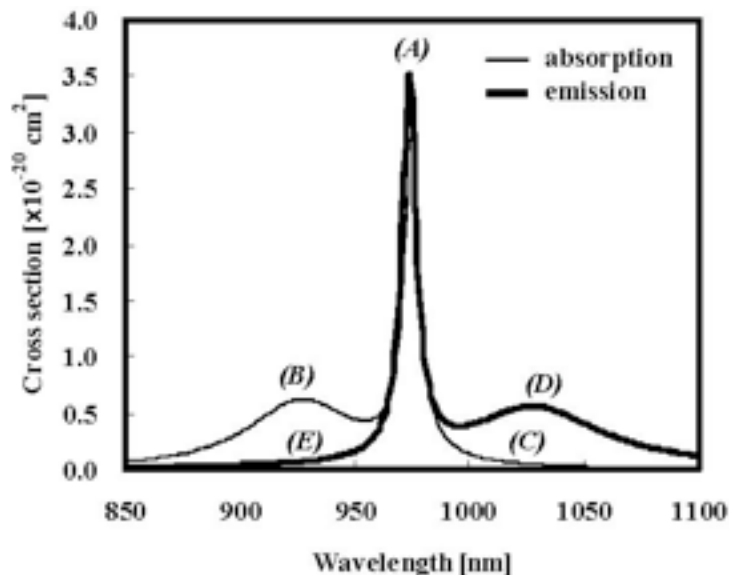
# 発振器のタイミング安定性

- 基準信号のレーザー室までの輸送の安定性はさておき、
- PLLの精度を別途用意した位相検出器で測定
- 1日のスケールで1ps程度
- ジッタは0.3ps
- ひとまず問題無い



# ファイバ増幅器の特性試験

- 大平均電流連続運転では、効率の良いレーザー増幅器が重要
- Ybファイバ増幅器を良く理解することから始めた (とくに増幅率で不利な1064nmの条件で)
- 利点
  - 小信号利得/損失比が大きい(最大引き出し効率)
  - 量子欠損が小さい(Yb)
  - 放熱面積が大きい
  - シングルモード
- 不利な点
  - 端面の強度限界、入射調整
  - 光密度が高いため非線形性
- PCF(フォトニック結晶ファイバ)増幅器
  - もっともメジャーなもの (DC-200-40-PZ-Yb)
  - シングルモードで出来るだけ大口径、十分な励起光を投入できるダブルクラッド



cited from NKT photonics

# レーザー増幅器のモデル

- 理想的な4準位モデルを仮定
- 定常状態のレート方程式から、励起光と信号光のファイバに沿った方程式が得られる。
- この系は4つのパラメータ、 $A$ ,  $G$ ,  $P_s$ ,  $I_s$  で表される。特性試験でこれらを決める。

原子数の保存

$$N_0(z) + N_2(z) = N$$

レート方程式

$$\frac{dN_2}{dt} = N_0 B_p P - \frac{N_2}{\tau} - N_2 B I$$

励起光の吸収

$$\frac{dP(z)}{dz} = -\alpha N_0(z) B_p P(z)$$

信号光の増幅

$$\frac{dI(z)}{dz} = \gamma N_2(z) B I(z)$$

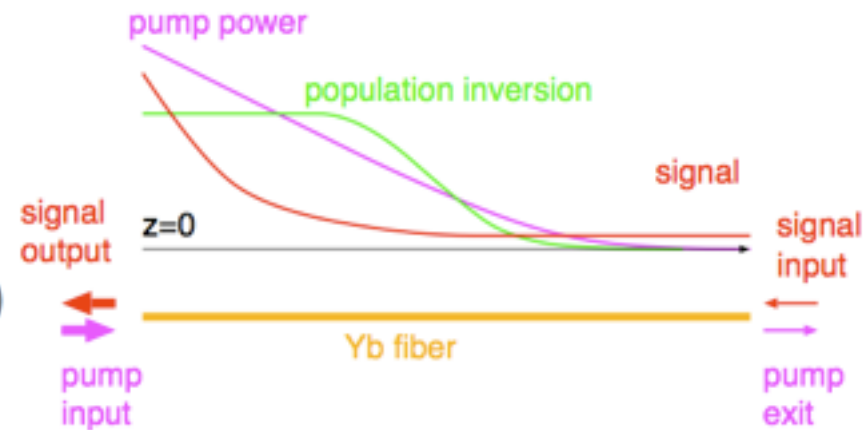
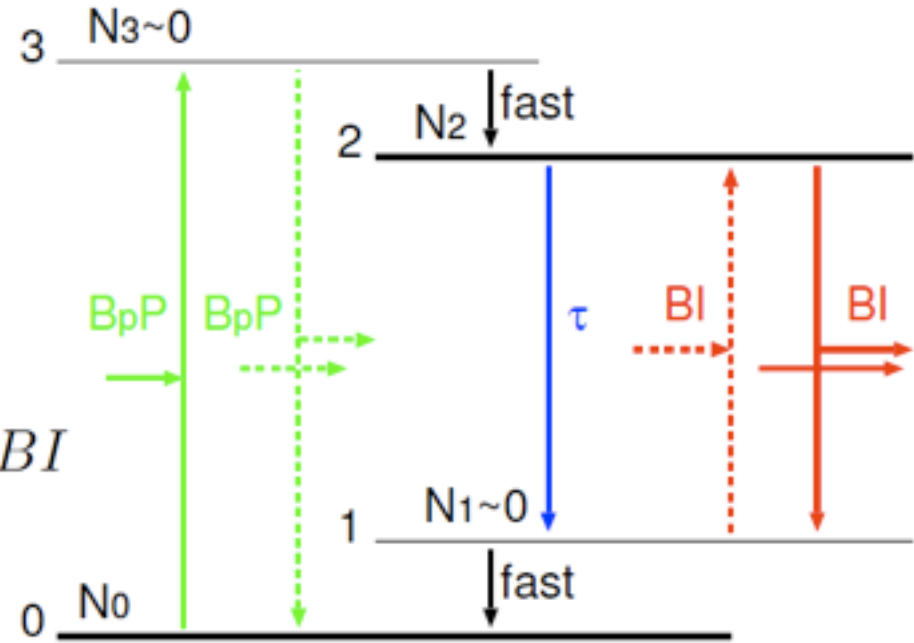
結果として、

励起光の伝搬方程式

$$\frac{dP(z)}{dz} = -A \frac{1 + I(z)/I_s}{1 + P(z)/P_s + I(z)/I_s} P(z)$$

信号光の伝搬方程式

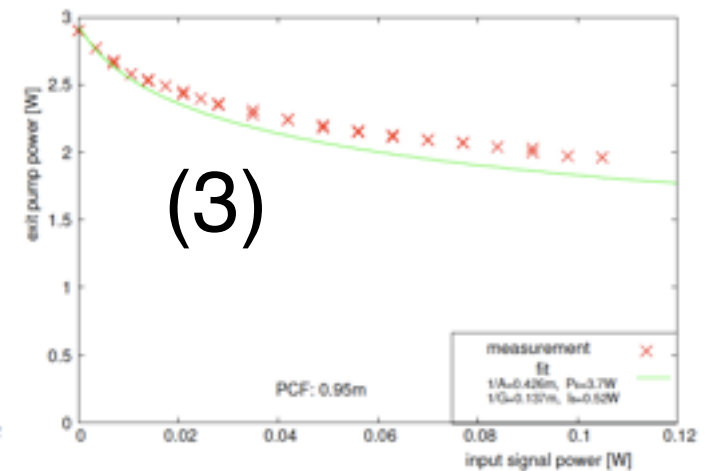
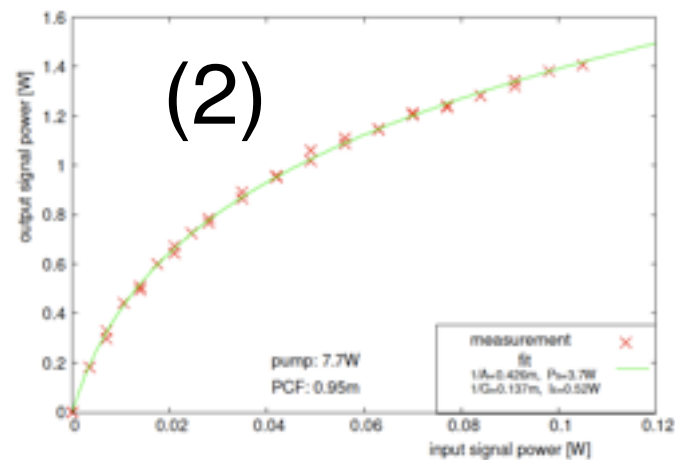
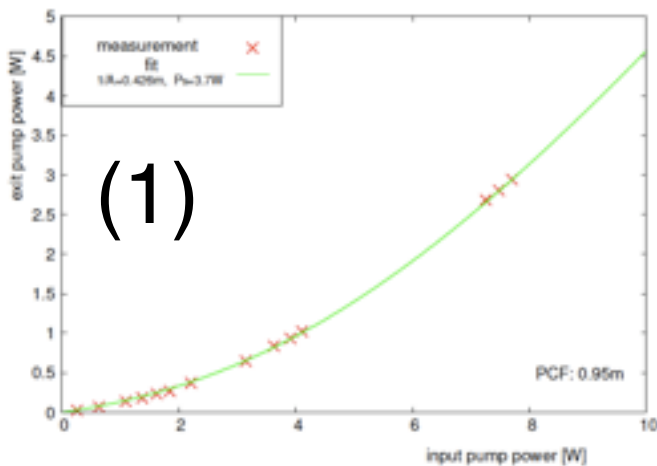
$$\frac{dI(z)}{dz} = G \frac{P(z)/P_0}{1 + P(z)/P_s + I(z)/I_s} I(z)$$





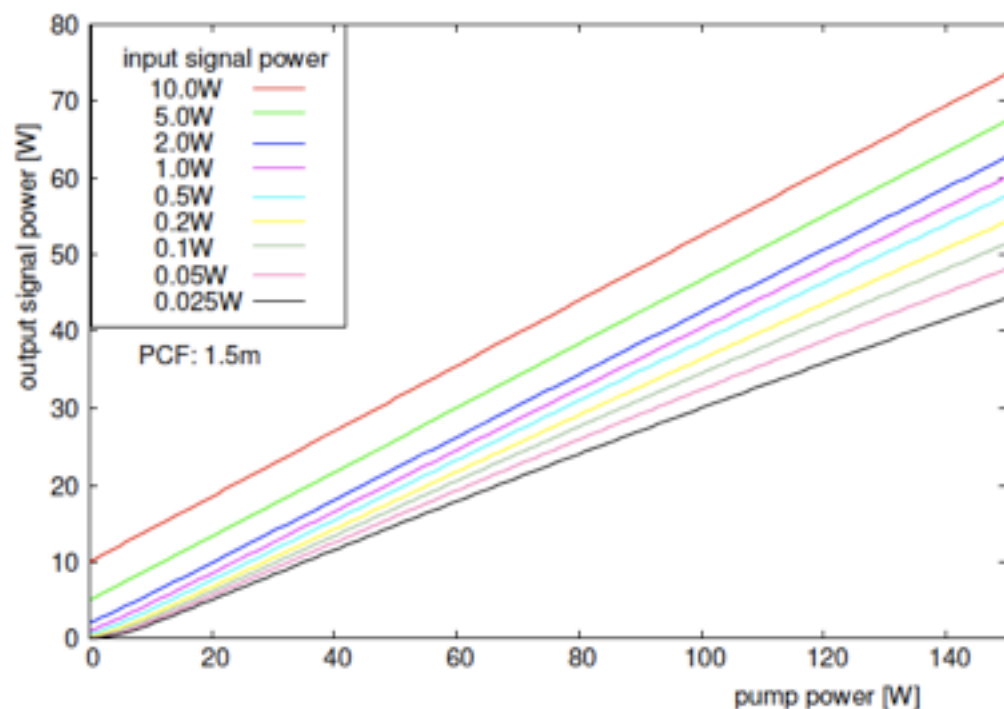
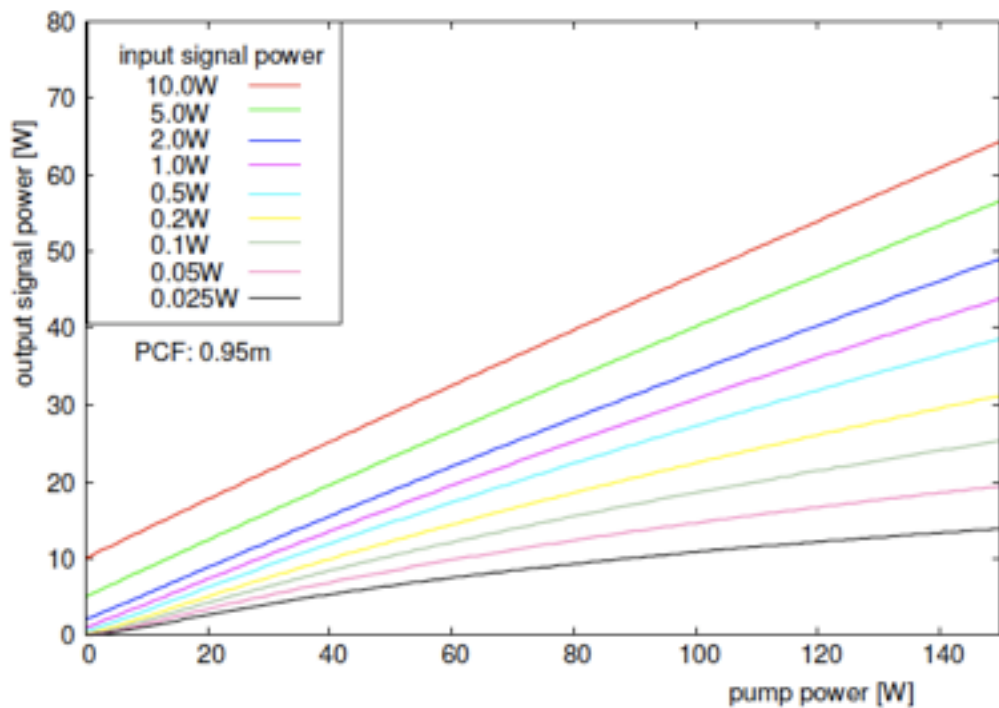
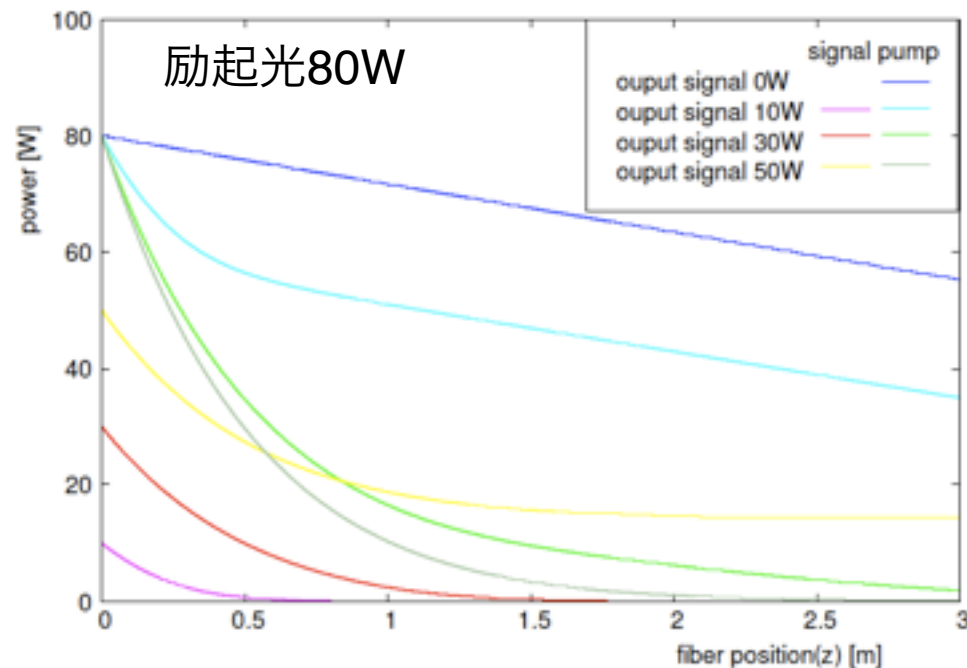
# 基礎実験からパラメータを決める

- ファイバの切れ端を使って、低出力試験で特性を決めた。
- 3組の依存性測定結果
  - 信号光無しで、励起光の吸収の強度依存性(1)
  - 励起一定(7.7W)で、信号光強度依存性
    - 信号出力(2)
    - 透過励起強度(3)
  - これらを4準位モデルでフィットし、4つのパラメータを決める。
    - $1/A=0.43\text{m}$ ,  $P_s=3.7\text{W}$ ,  $1/G=0.14\text{m}$ ,  $I_s=0.52\text{W}$ 。



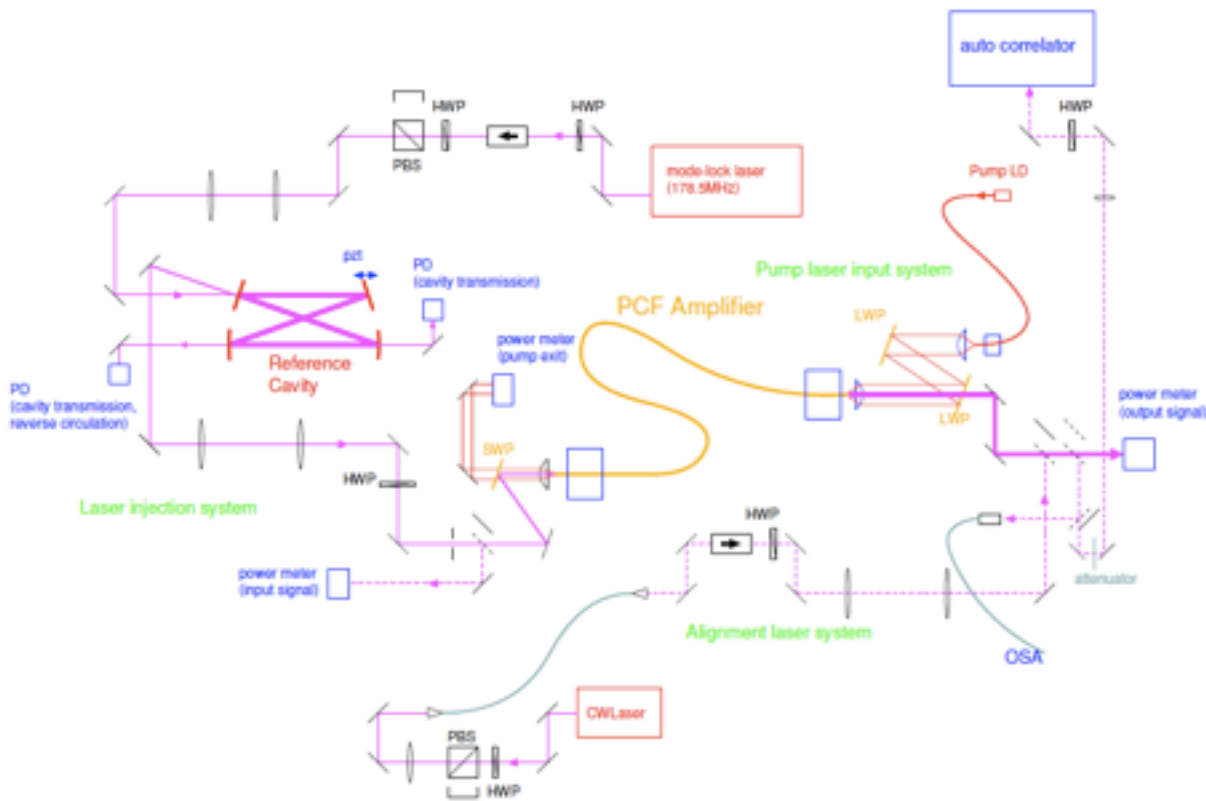
# 高出力での動作の予想

- 決めたモデルに従って、任意の条件でのファイバ内のパワー分布が計算できる。
- 励起80Wで、30Wくらいまでは行けそう。
- ファイバ長1.5mが良さそう。

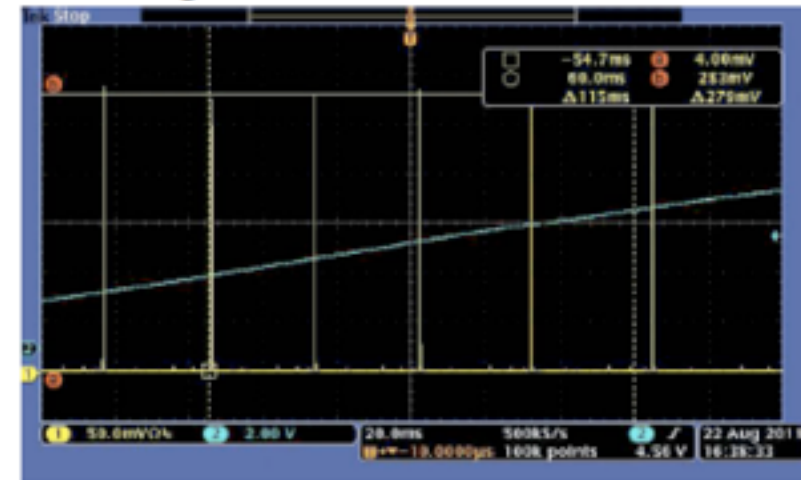


# ファイバへの入力調整

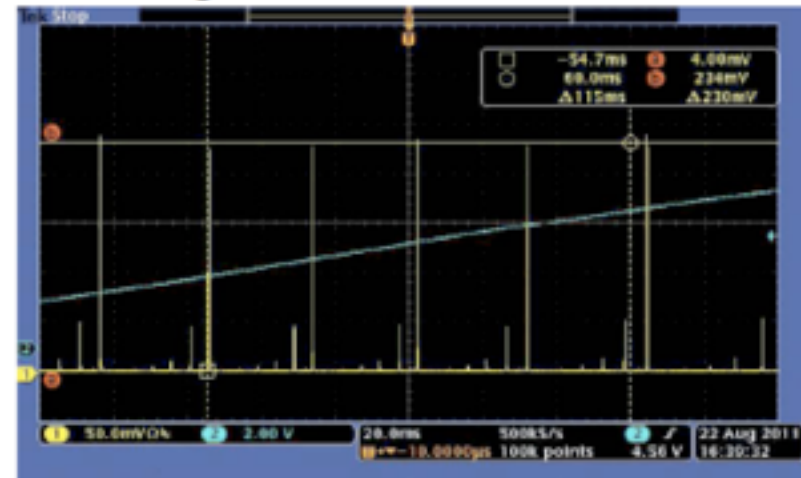
- シングルモードファイバへの入射はなかなか簡単ではない。
- 入射光が正しく確立できなければ、モデル決定の測定は出来ない。
- 基準共振器を使用する入射調整法を開発
  - ファイバへ向かう光を基準共振器の基本モードに結合
  - ファイバから逆走させた光を同じ基準共振器の基本モードに結合
  - 結果的に、入射光がファイバ伝搬も一度に結合
- この手法により、
  - 短時間で調整ができる。(ものの10分)
  - 確実に入射最適化ができる。最適であることが判断できる。
- 産総研では、増幅パワー最大が正義。入射調整に何ヶ月も。



detuning 0

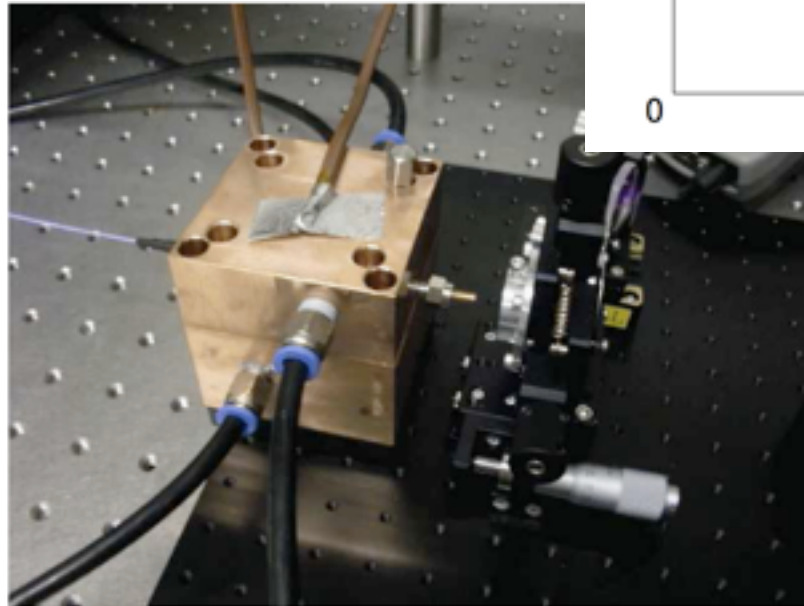
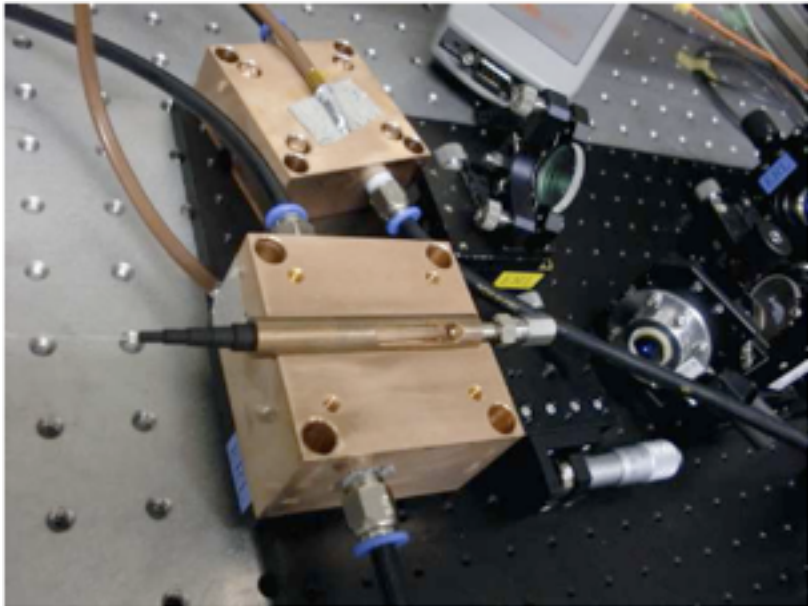
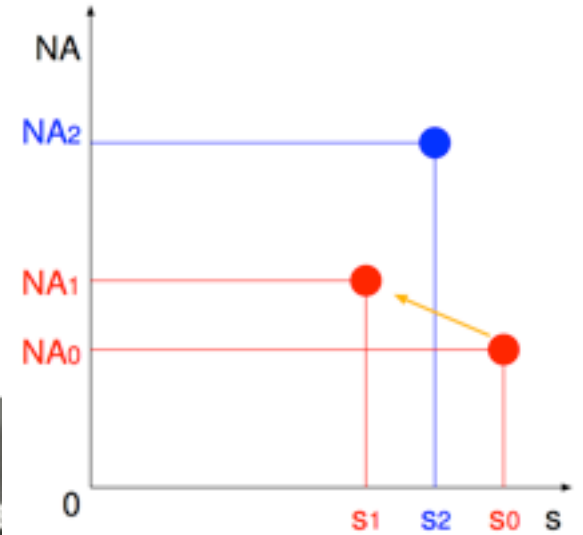
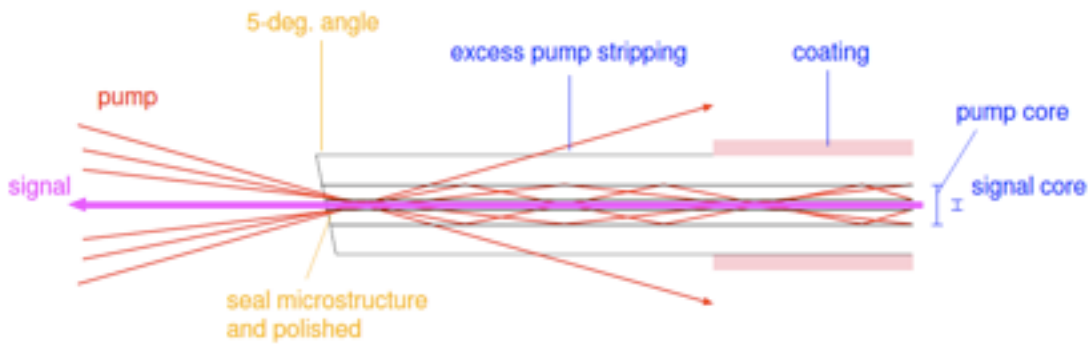
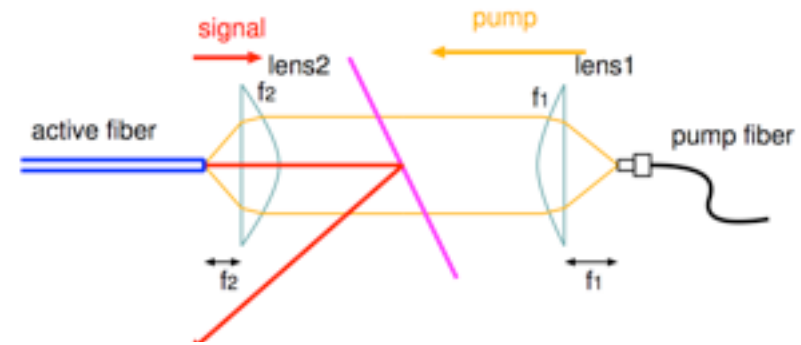


detuning 1



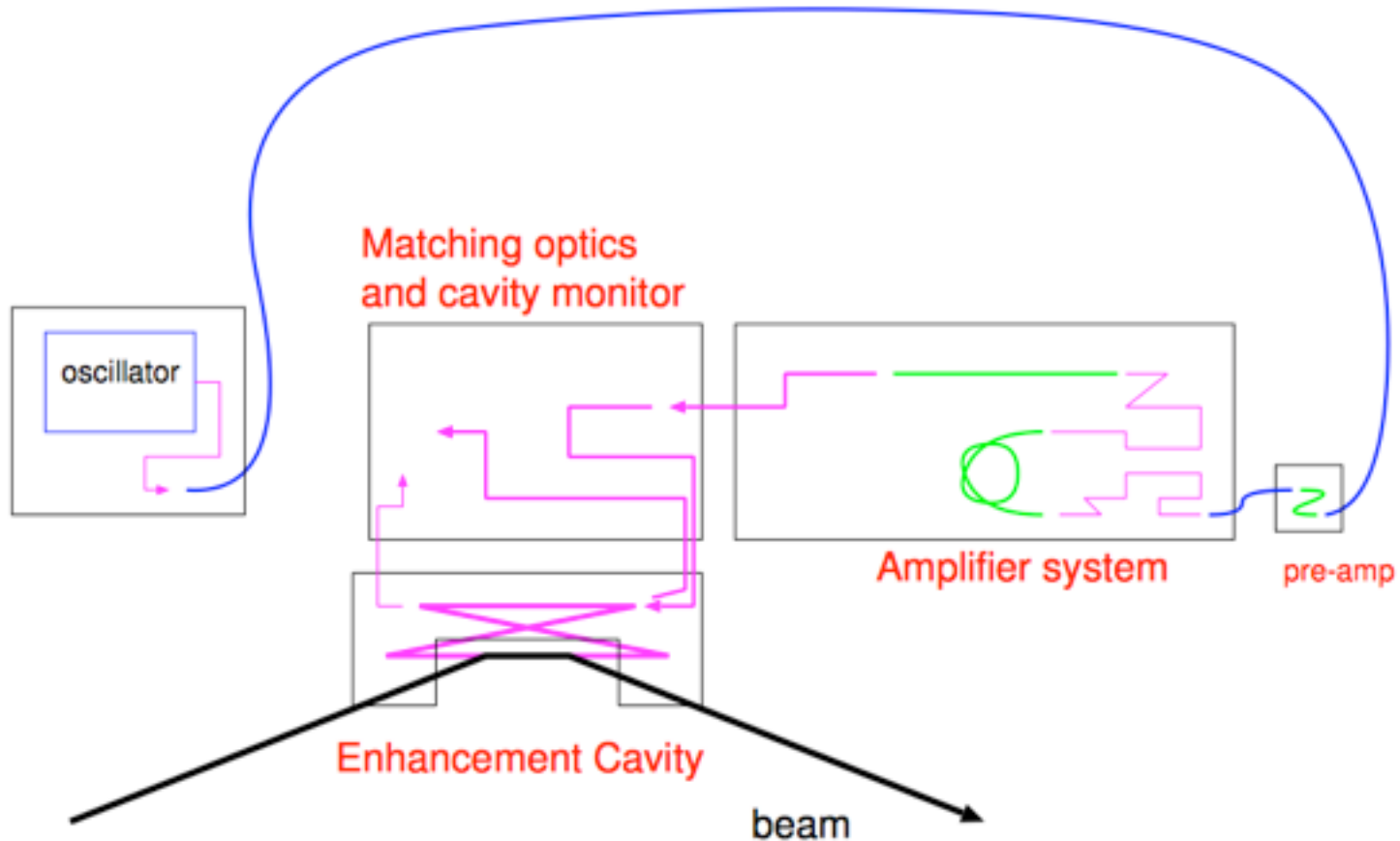
# 励起光の導入

- 励起光の入射部の熱の取り扱いが一番問題
  - 産総研では燃やしたりふらついたり
- 真面目につくった
  - ハイパワー用SMA905コネクタ(モードストリッパー)
  - 水冷のホルダーを製作
  - レンズ系の設計を最適化 (角度発散とサイズのマッチング)
- 低出力で吸収最大を調整する手法を確立 (ASE最大化)



# STF量子ビーム用のレーザーシステム

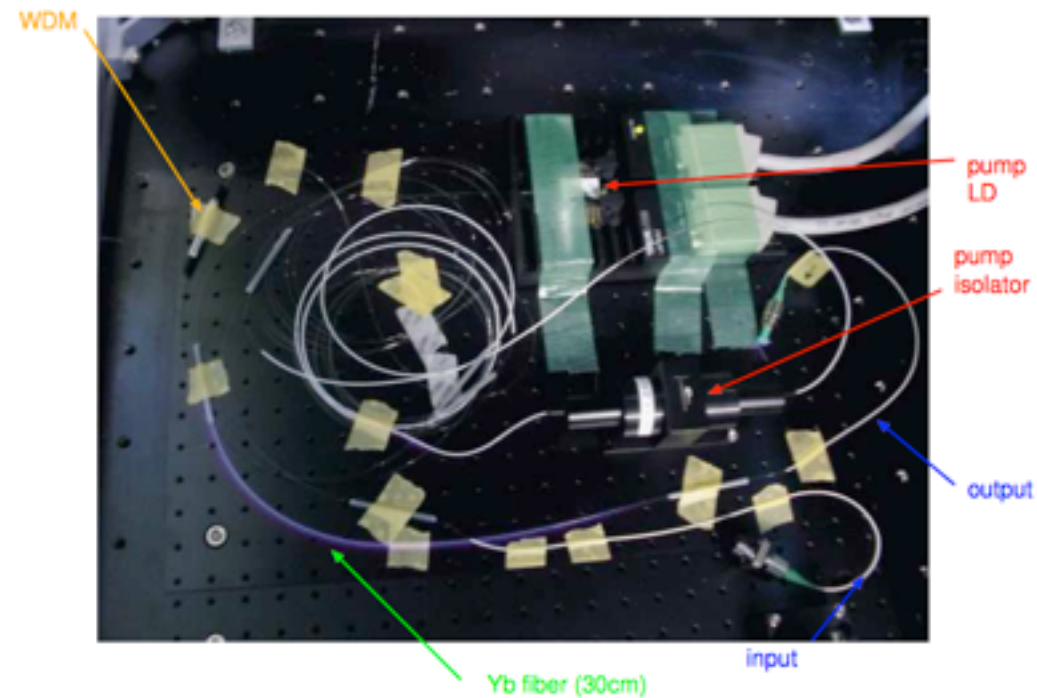
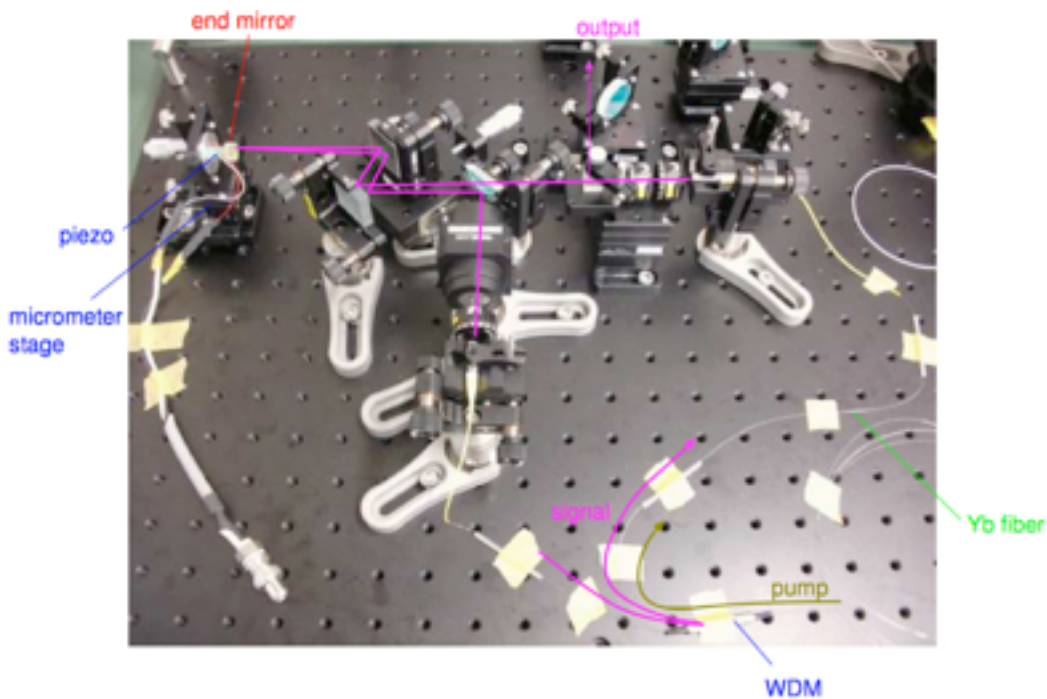
- ファイバ増幅器について大体理解できた段階で、一通りのシステムを作る機会があった。
- STF量子ビーム用共振器へのレーザー
- パルス運転だがロングパルス。(LCSSと似たようなもの)
  - 162.5MHz, 100W, 1ms幅
- これを踏み台にcERLの電子銃用に繋げる。





# ファイバ発振器とプリアンプ

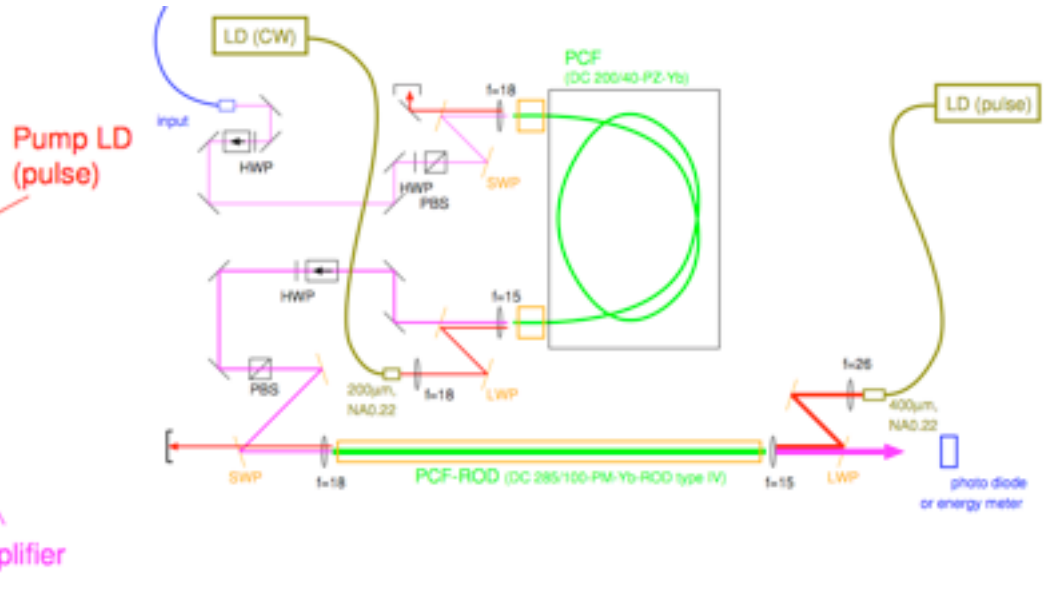
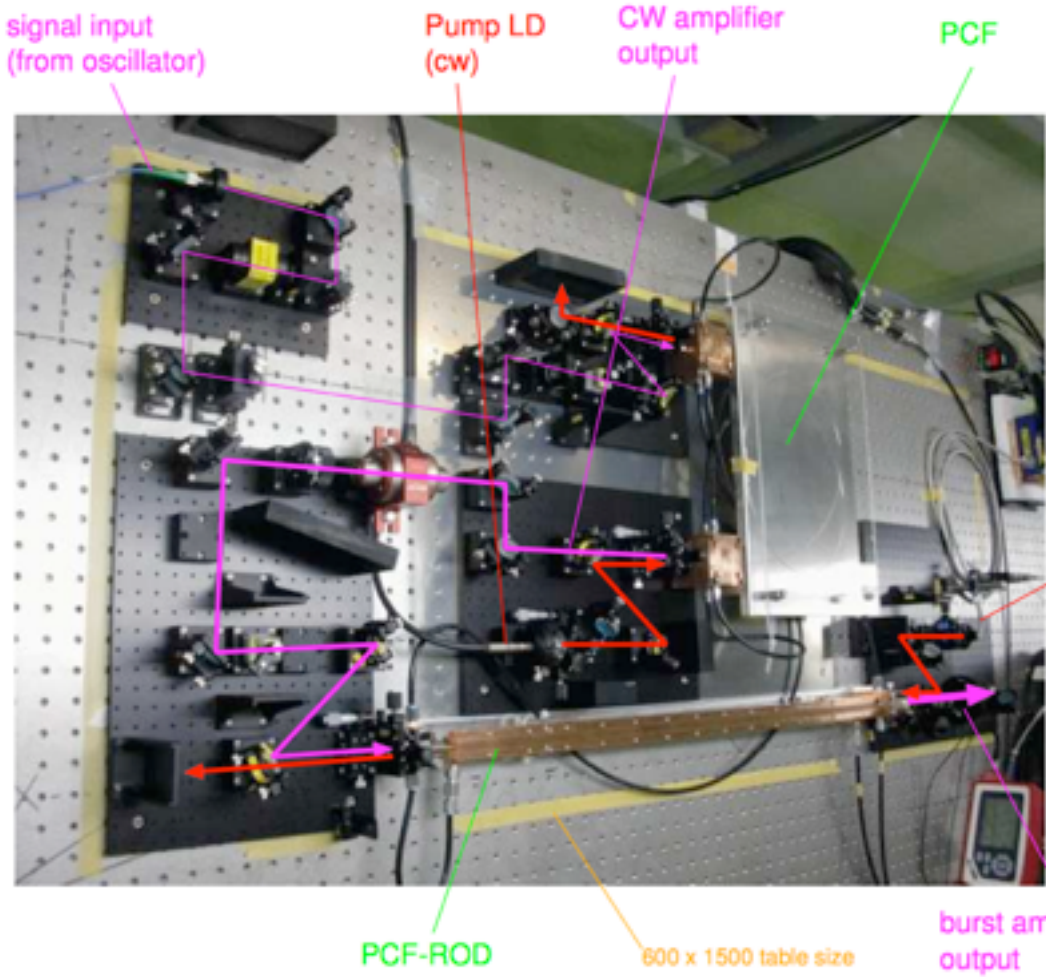
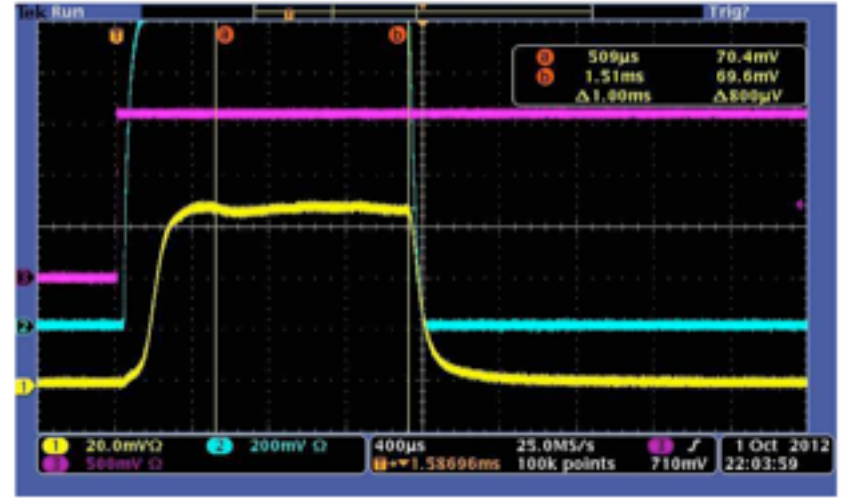
- 2012年夏、cERLの実機をそろそろ作らないと間に合わない時だが、、、
- 162.5MHzのファイバ発振器の製作
- プリアンプも製作
- これらも同様に、ファイバ長最適化試験などなどやった上で製作
- 最終的には、発振器は市販品(162.5MHz, Nd:YLF)を購入した。



# STF量子ビーム用の増幅器

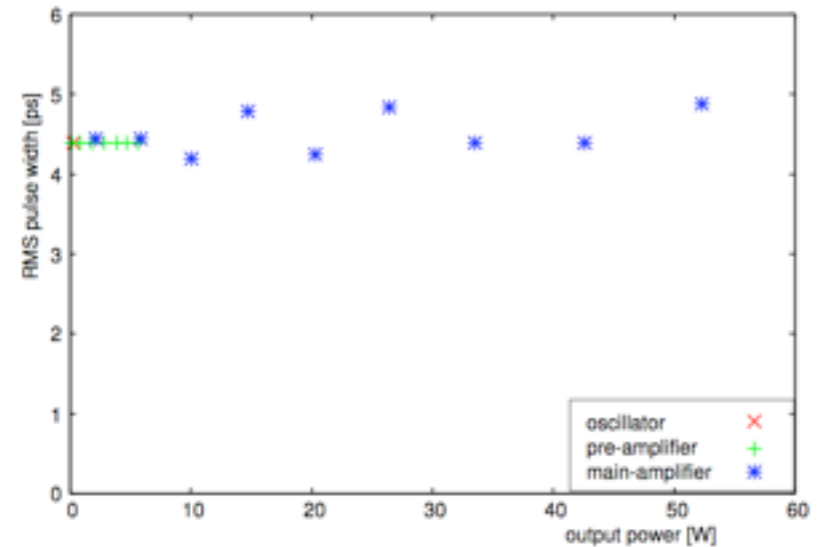
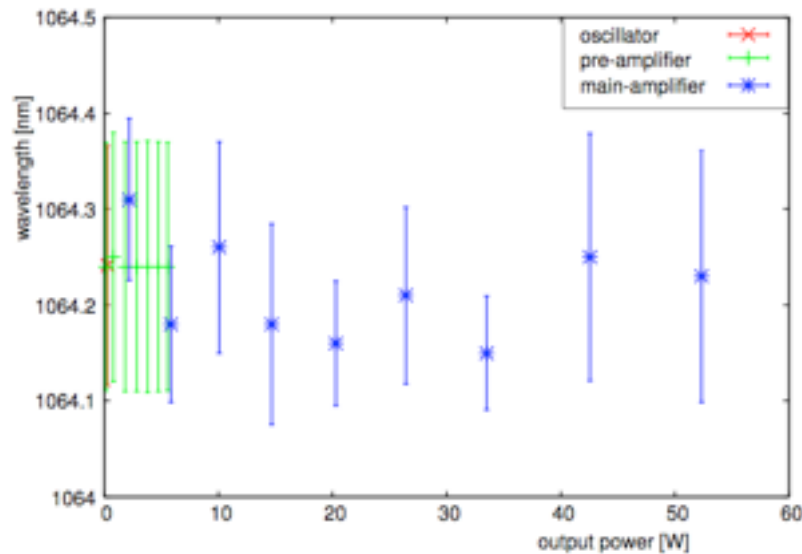
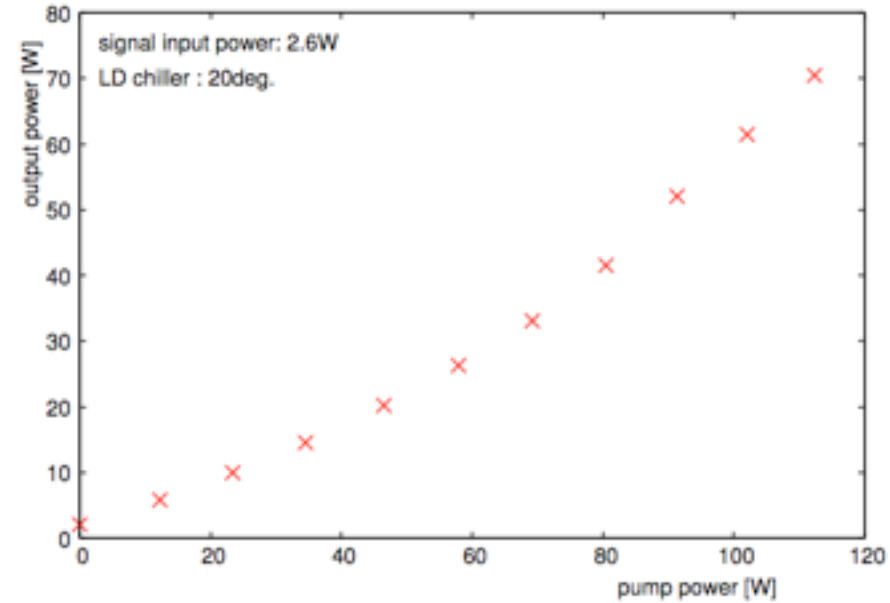
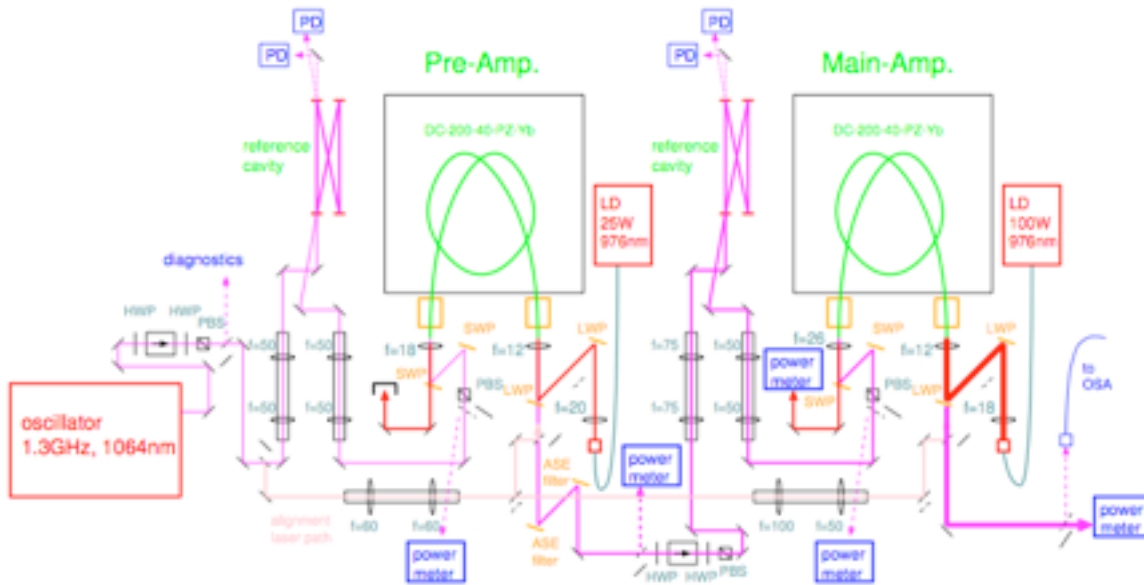
- ファイバ増幅器について大体理解できた段階で、一通りのシステムを作る機会があった。
- STF量子ビーム用共振器へのレーザー
- パルス運転だがロングパルス。(LCSSと似たようなもの)
  - 162.5MHz, 100W, 1ms幅
- これを踏み台にcERLの電子銃用に繋げる。
  - PCF増幅器とロッドファイバ
  - 構成の小型化、規格化

output 106mJ (CW amp. 16A, burst amp. 40A)



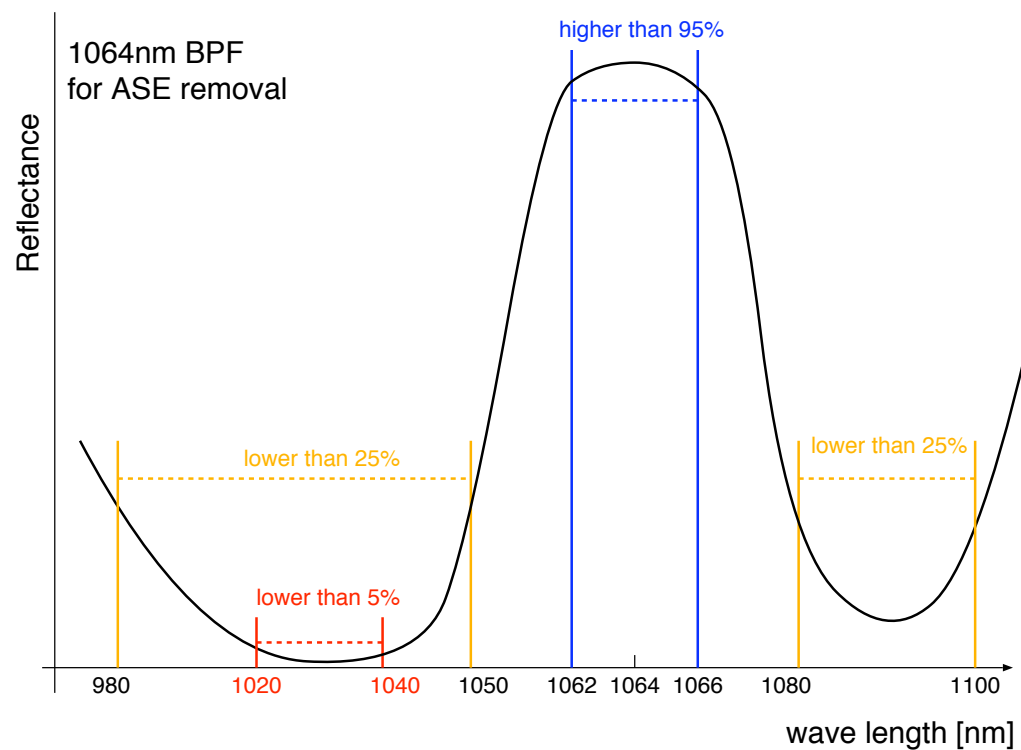
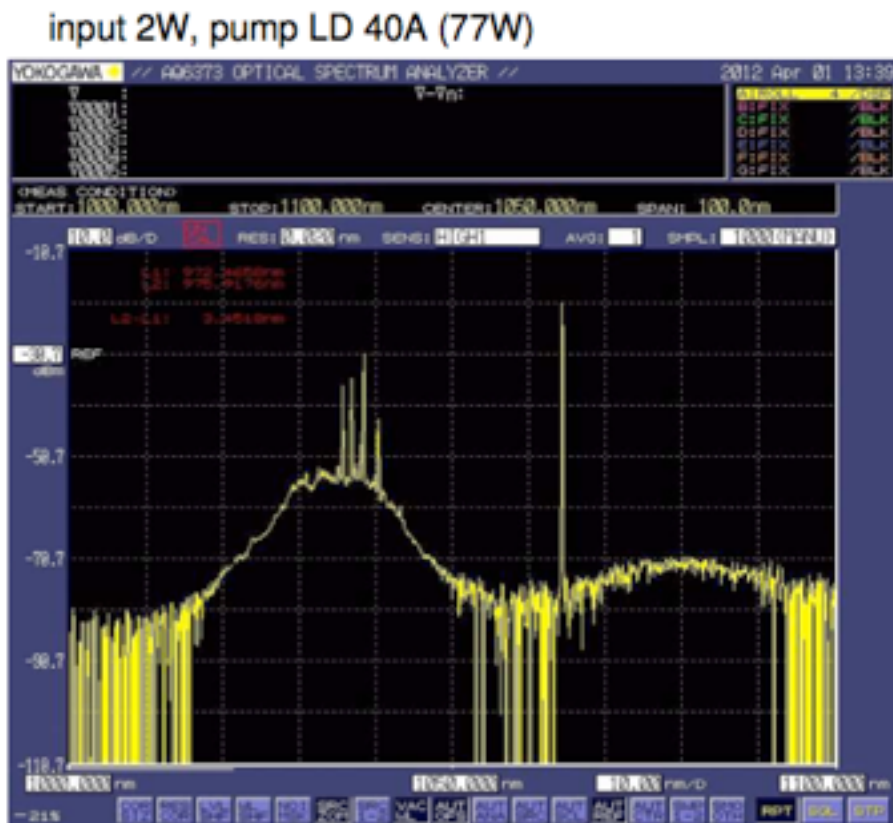
# 高出力試験

- cERL実機は、2段階のファイバ増幅器とし、連続動作するシステムとして設計



# ASEの除去

- Ybのゲインピークは1030nmあたり、1064nmより速く成長する
- 1064nmを増幅する場合、長いファイバで1段のシステムではASEが発振してしまう
- 2段にして、間にASEをフィルタする特注のダイクロイックミラーを挿入





# 波長変換

- 低繰り返しレーザーで試験した
  - 1064nm、178.5MHz、3Wの基本波から、0.6Wの2倍波を生成
- これをパルス強度でスケールして、
  - 1064nm、1300MHz、21Wの基本波から、4.3Wの2倍波が生成できると見込んでいた

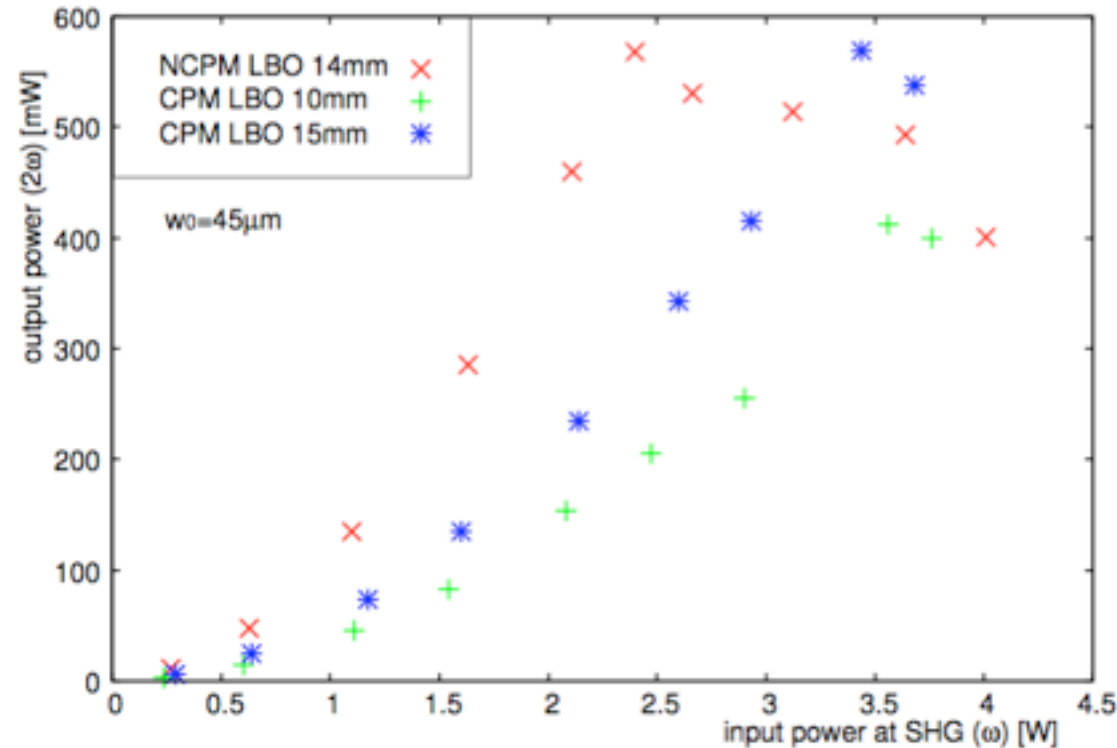
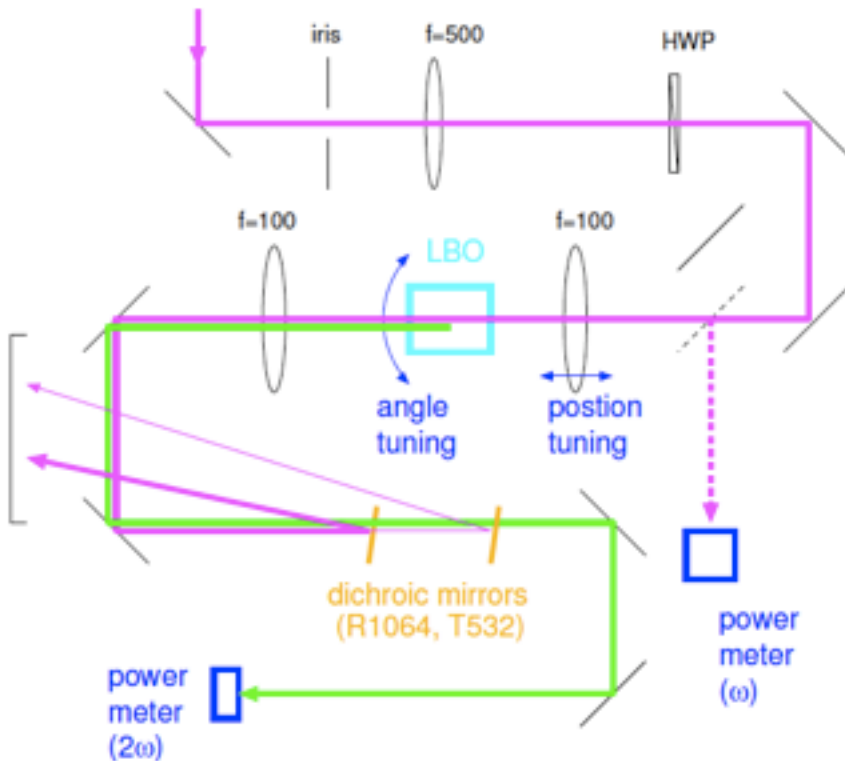


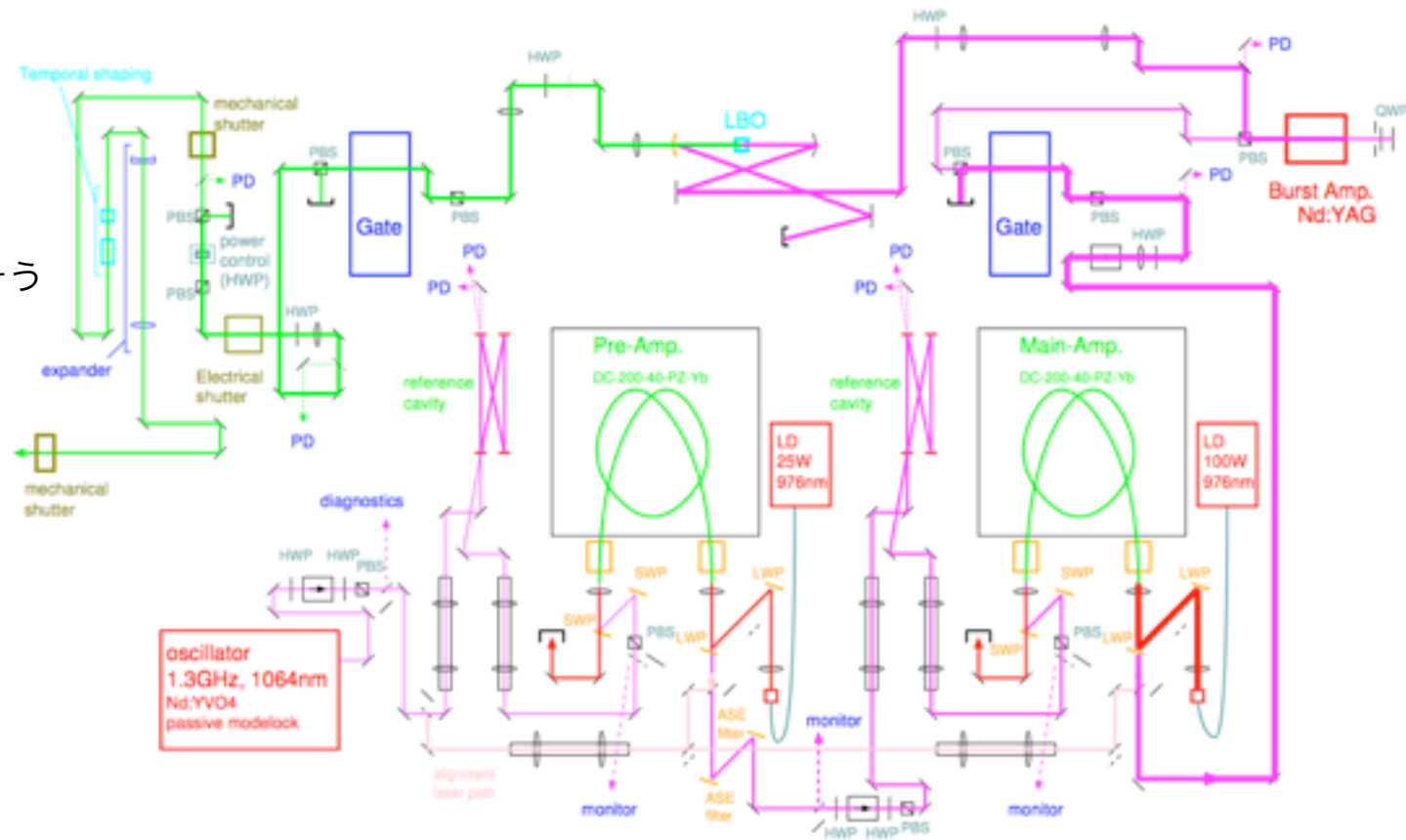
図 4: 入力基本波にたいする 2 倍波の強度 (増幅器の励起 LD を変化させた)



# cERL電子銃レーザーの開発

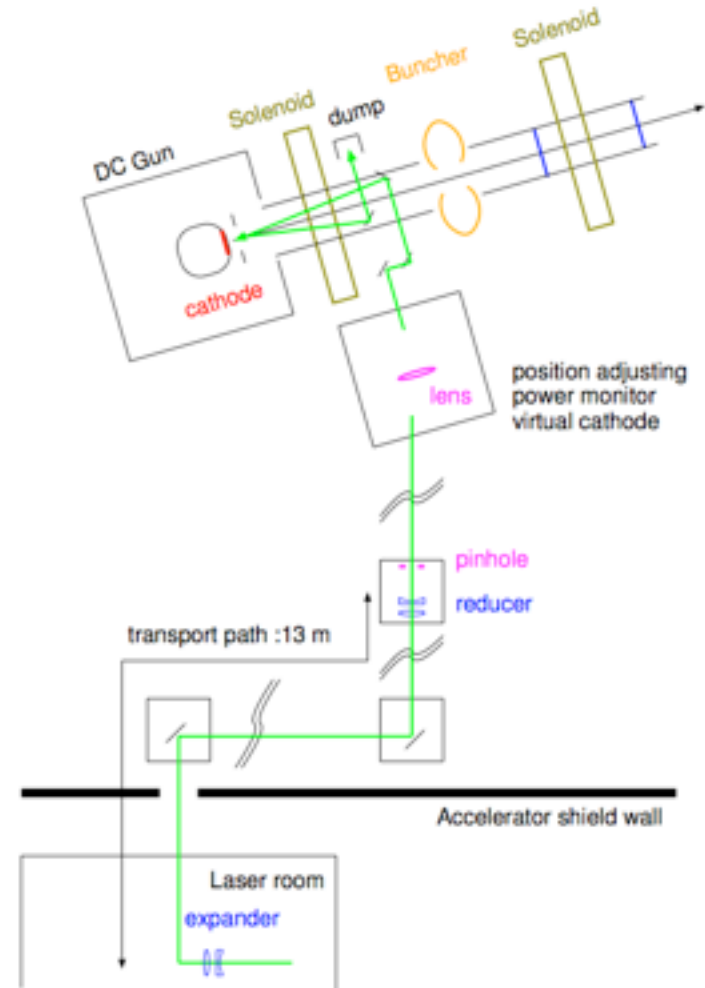
# cERLでのレーザーシステムの構築

- レーザーシステムは原理的には問題無くできる。
- 2013.2月にレーザー室にひとつとおり並べた。
- ビーム運転を想定すると、色々必要なことがある
  - ビーム調整用のバースト運転
  - パワー調整、位置調整
  - 空間整形、時間整形
  - 輸送の安定化
  - 環境の安定化
  - 速いインターロック
  - レーザー安全
- 当面、高平均パワーは必要なさそう
  - バースト運転が主
  - 波長変換はまだいい加減



# レーザー光の輸送

- 平坦プロファイルを作るため、ピンホールできりとり
  - ピンホール直径1.2mm
- レーザー室から加速器室のピンホールまでを輸送
- 大気中だが、一応、拡大縮小の光学系で
  - M=3なので1桁得しているつもり
  - 13m先だが、1.4m先に飛ばすつもりで。

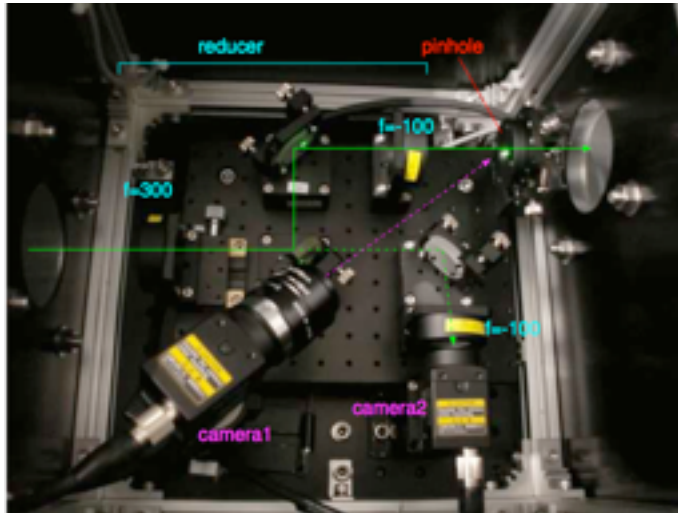


$$\begin{aligned}
 M_{transfer} &= M_{expander}(1/M) \cdot D(L) \cdot M_{expander}(M) \\
 &= \begin{pmatrix} 1 & \frac{L}{M^2} + \frac{2l}{M} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_{eff} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

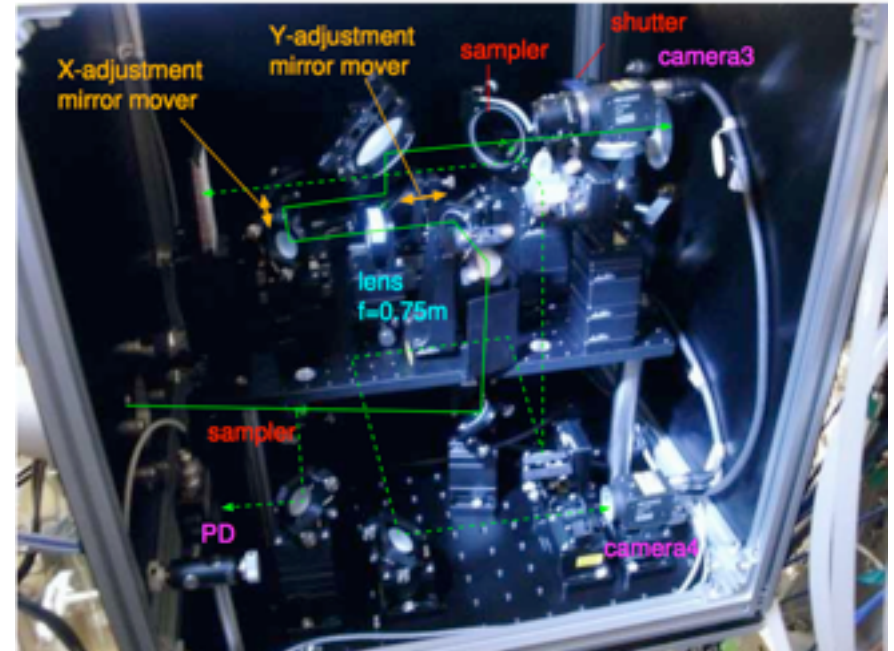
# 空間整形

- ピンホールで切り取り、カソード上に等倍で結像するつもり
  - 実は、はじめ、ちょっと調整が甘かった

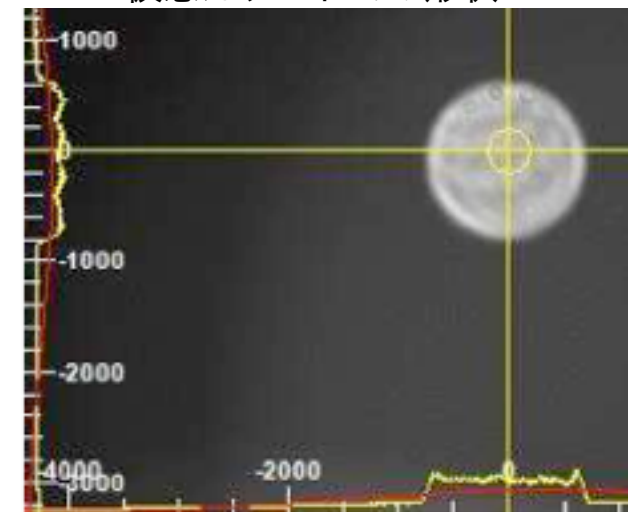
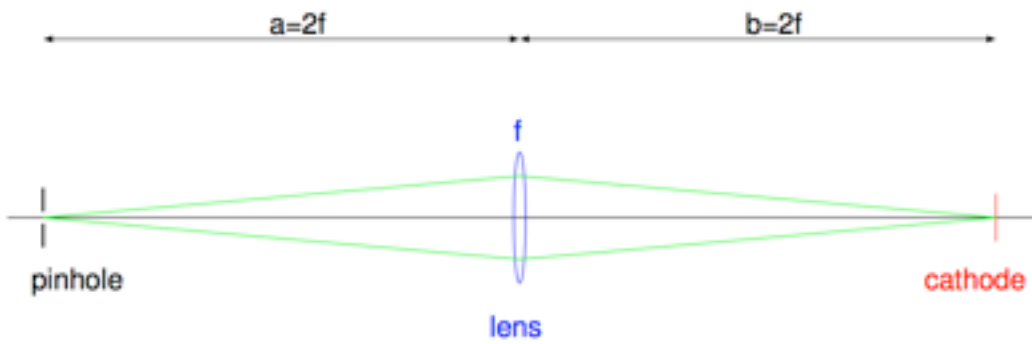
ピンホールのテーブル



入射調整のテーブル

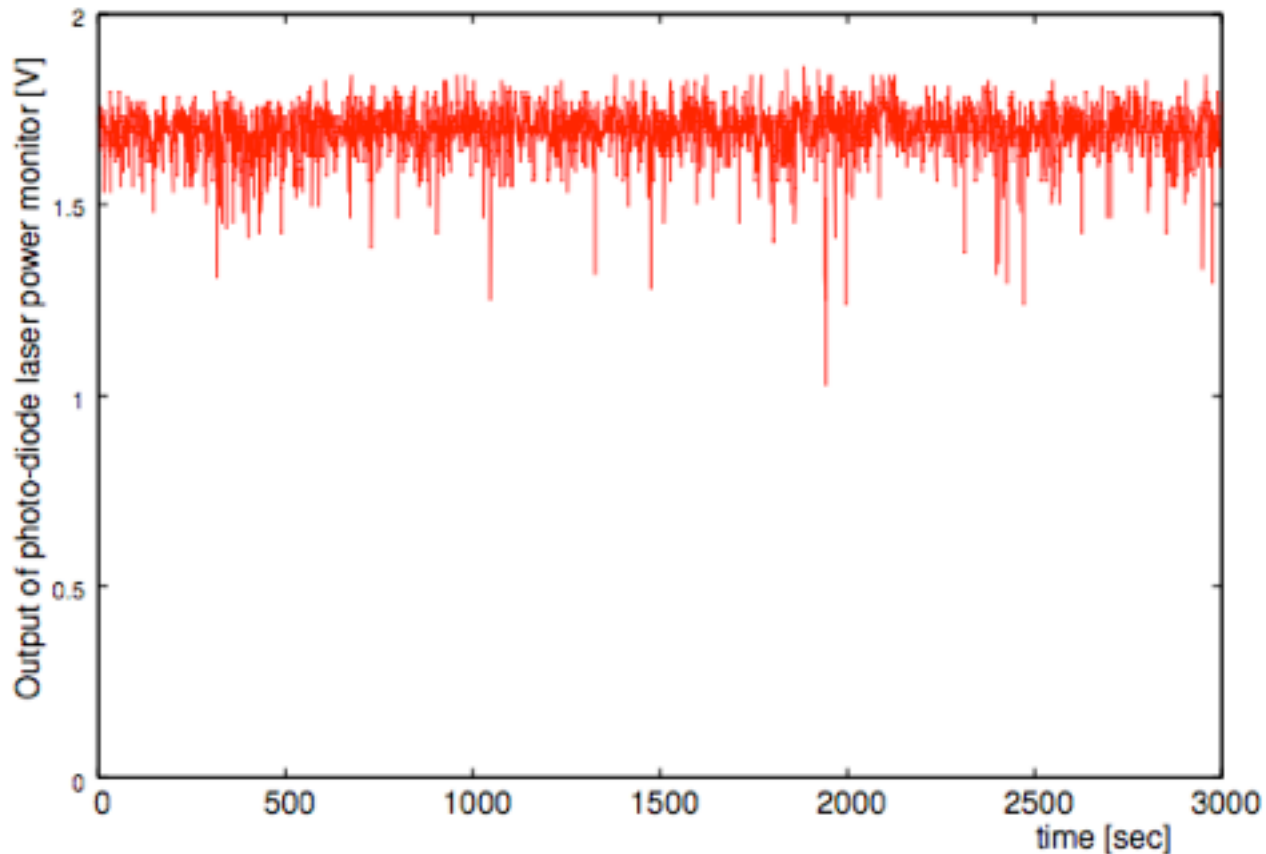


仮想カソードでの形状



# 輸送安定性

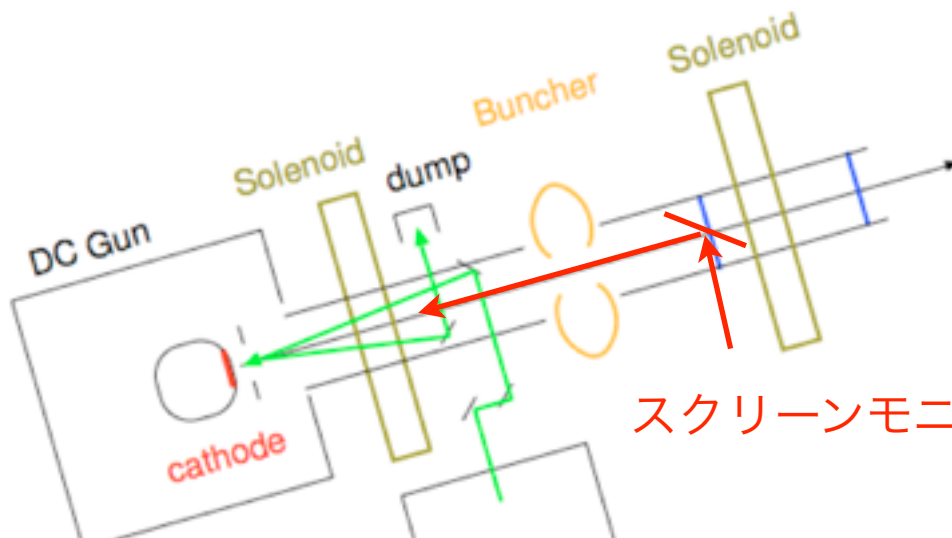
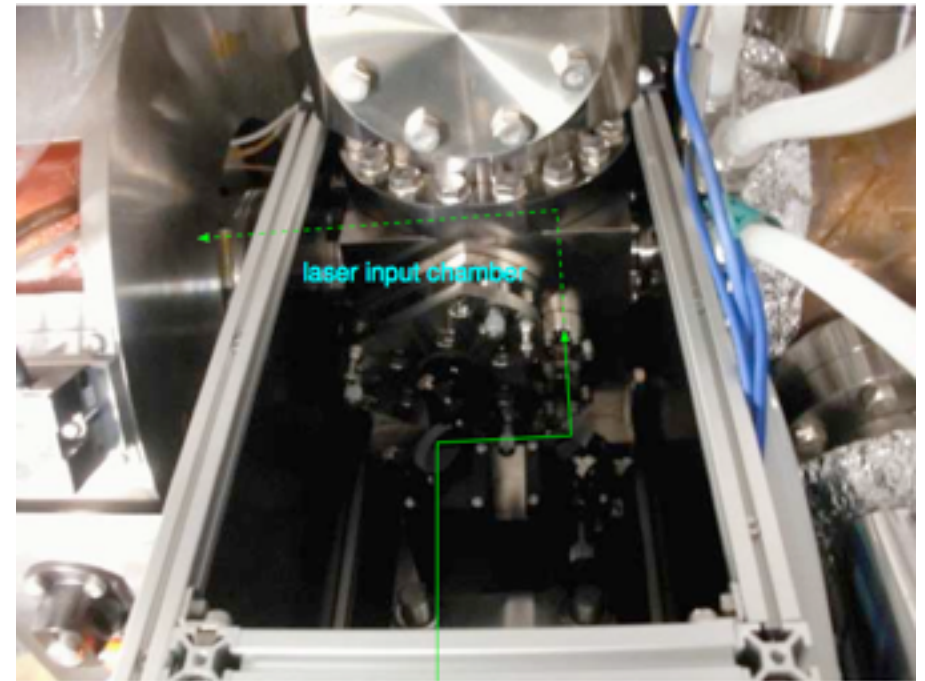
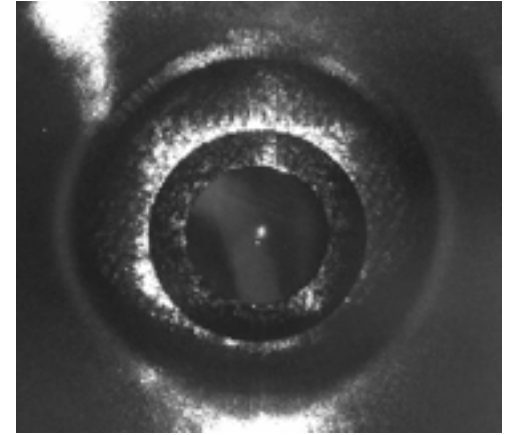
- ピンホールで中央部だけ切り取って、カソードに結像している。
  - 直径1.2mmのピンホール。透過パワー1/3程度でやっている。
  - 長距離輸送系に位置ジッタがあっても電子ビームの位置やサイズには影響しない。
  - ただし、強度ジッタになる
- 強度変動
  - 良い時は割と良い。5%。
  - 50%とか、悪い時もあった。レーザー重心がピンホール中央から外れていた場合。





# カソード上の位置合わせ

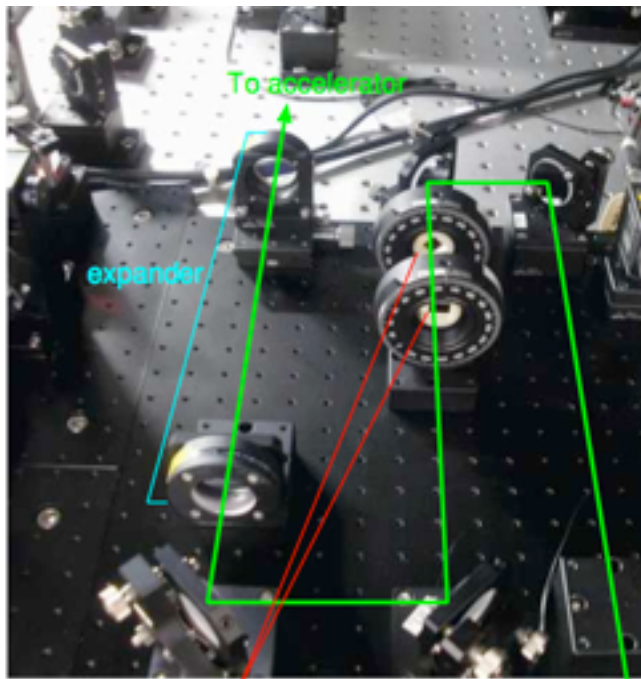
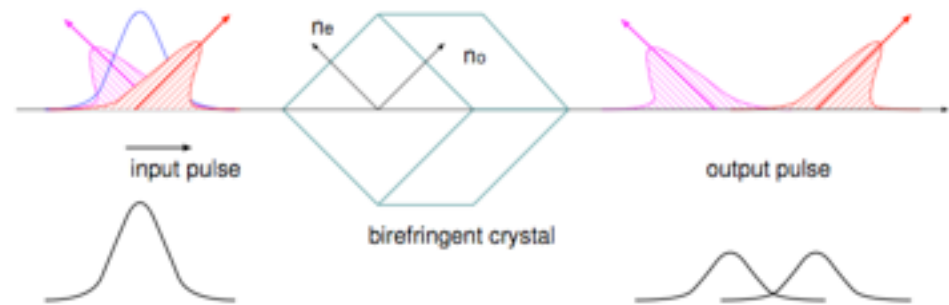
- 運転調整における余計なパラメータを減らしたい。
- 運転前に正しい位置に合わせておきたい。
  - RFガンだと、位相と位置と合わせるのに、はじめごたごたしがち。
- GaAsはピカピカだから直接は見えないか？
  - LCSSの高反射率共振器ミラーですら乱反射が測定できる。
  - 少しは乱反射するので、カメラの露光時間を長くとれば見える。
- 速やかにビームを出すことに貢献



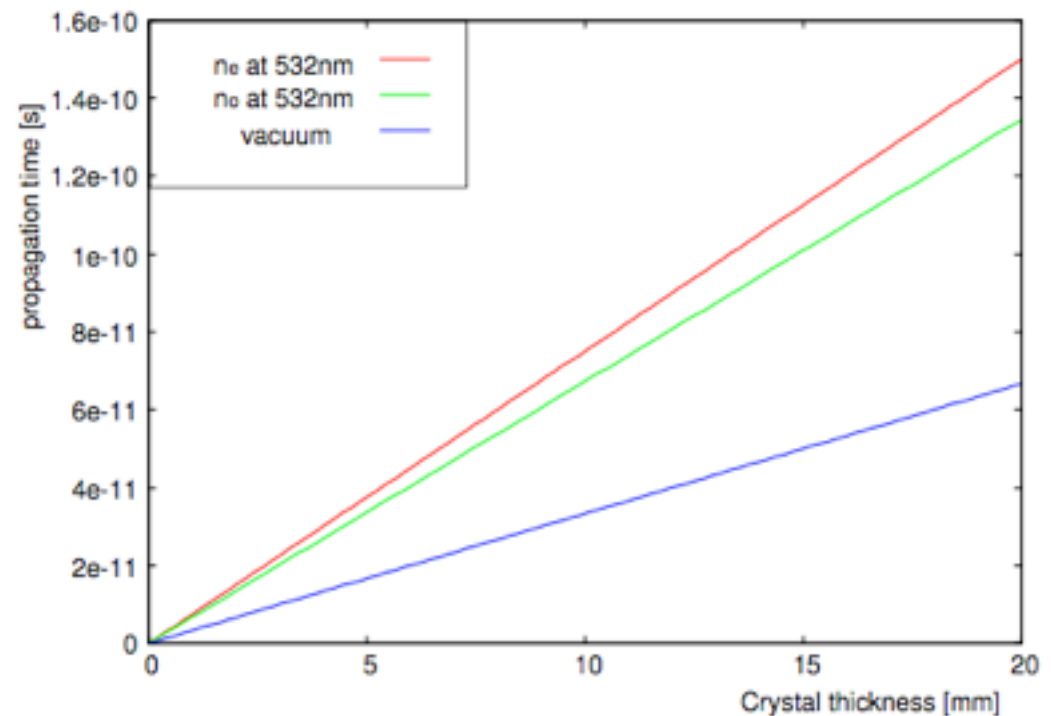
スクリーンモニタのミラーから見える

# 時間整形

- 空間電荷効果の対策として、フラットで比較的長いパルスが望ましい。
- Nd系のレーザーだとバンド幅が狭いので、スペクトルでの制御はできない。
- もともと3ps(RMS)。
- 一番お手軽な方法、複屈折結晶による分割の方法で行っている。
- 3結晶で8分割



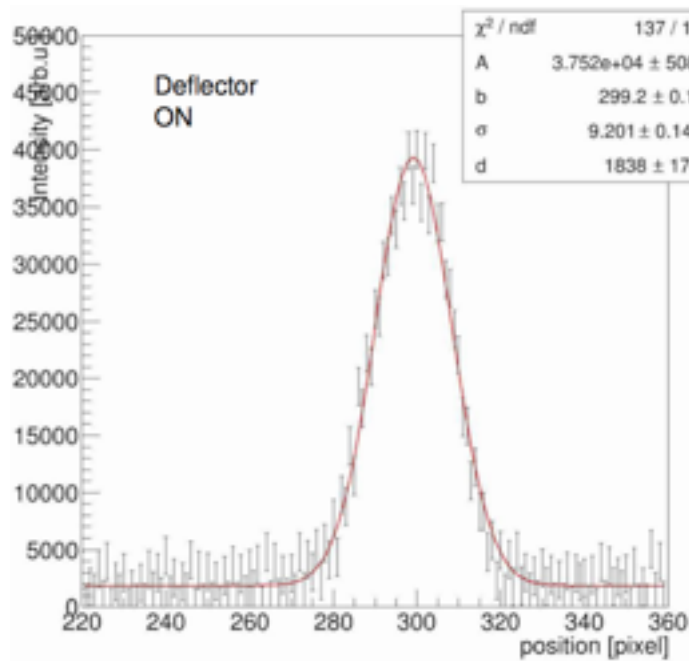
YVO<sub>4</sub> crystal



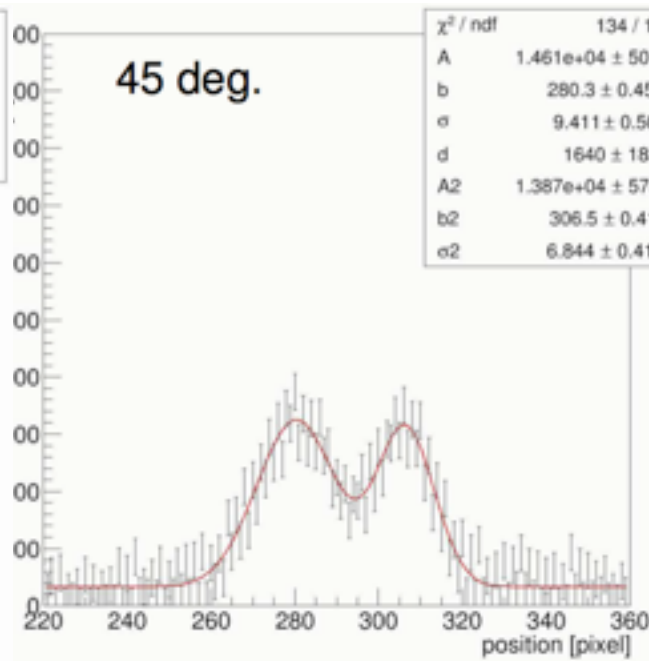
# 時間整形

- 調整は現場合わせ
- 電子ビームの時間構造を偏向空洞で測定しながら、結晶を回転調整
- 2013年は2結晶で16ps(FWHM)
- 2014年は3結晶で32psにしたつもり

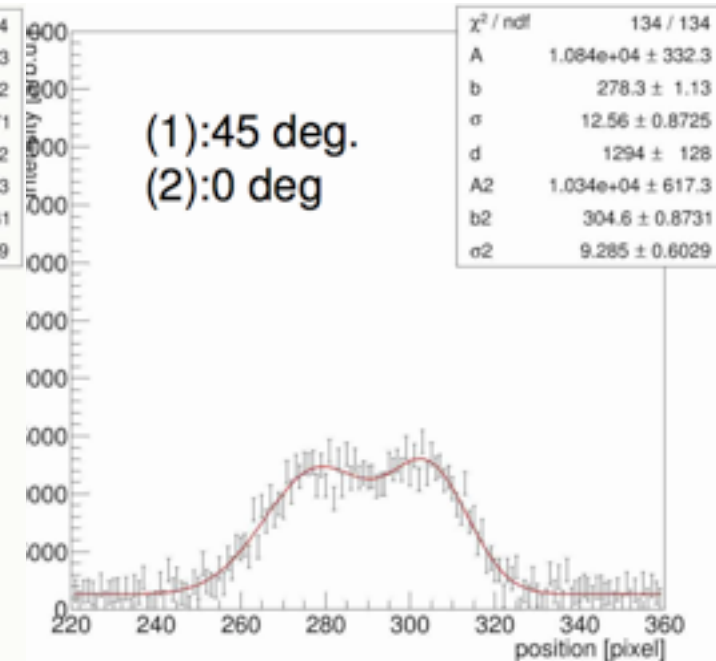
もともと



11.6mm



11.6mm+5.8mm



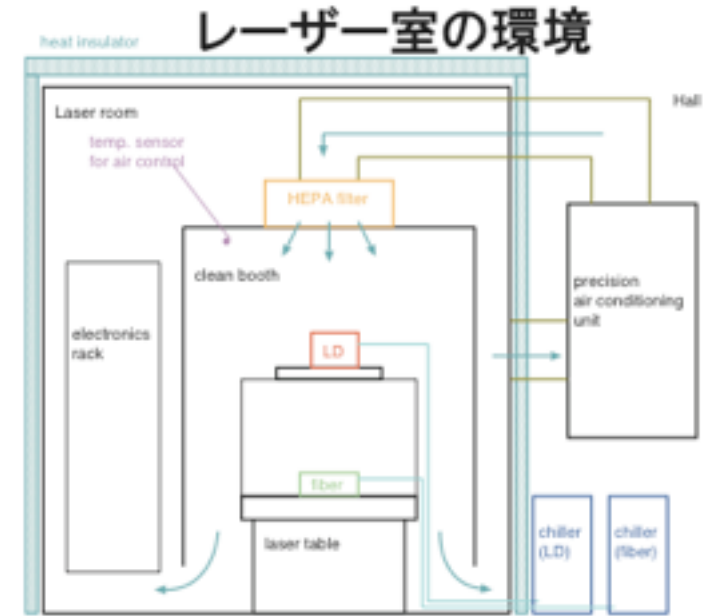
# レーザー室環境安定化

- エアコンのオンオフ制御の周期が見える、というふうにはなりたくない
- できるだけパッシブに安定化したうえで、PID精密空調
- 猛暑日に追いつけなかったため、断熱性能の強化。
- 夏は27度設定、冬は23度設定で運用。

before



after

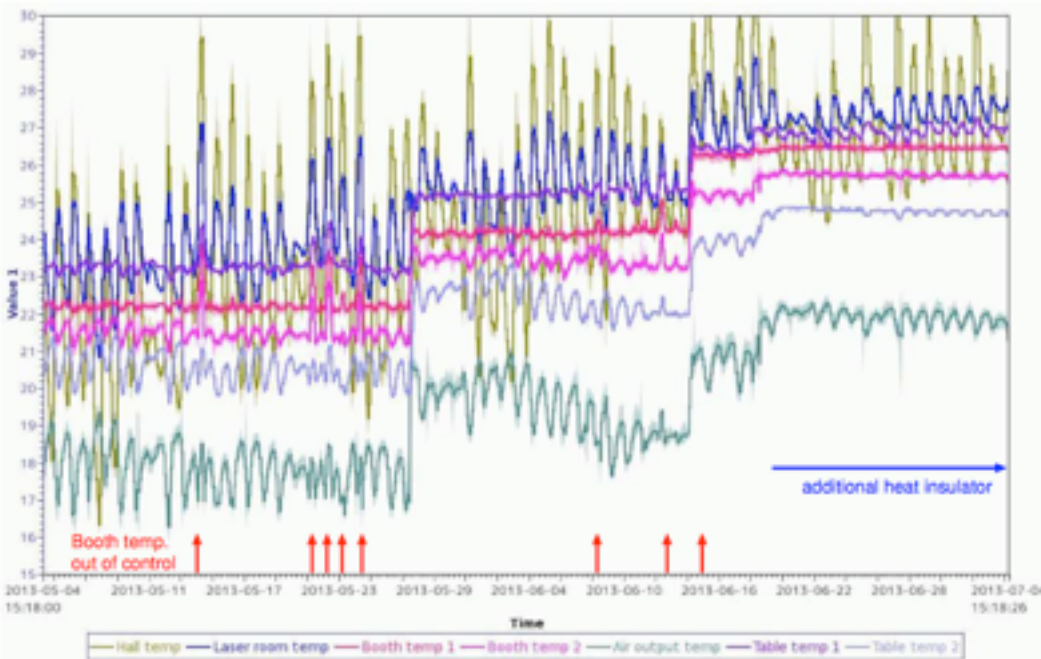




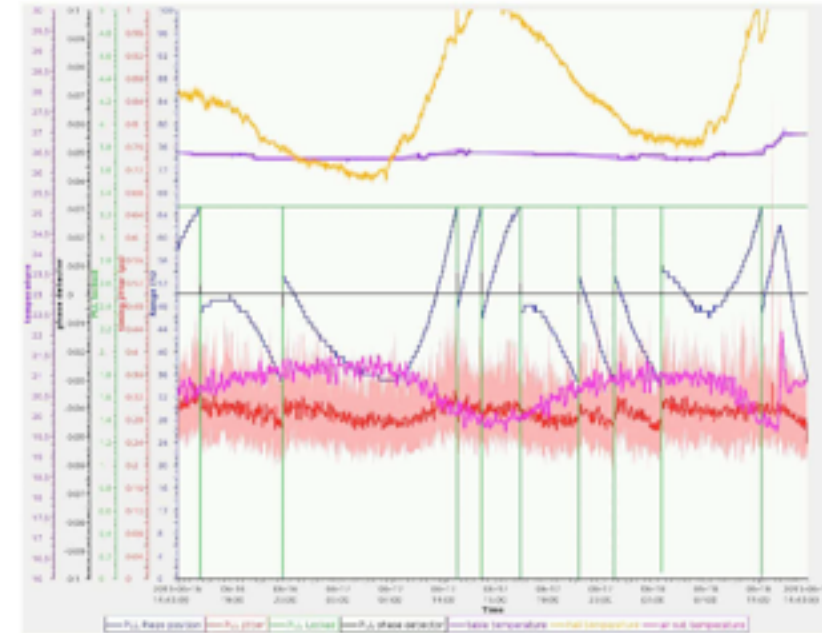
# レーザー室環境安定化

- 断熱性能の強化は効果あり
- 発振器ピエゾのリセットが3回/日から、1回以下/日に改善。
- ピエゾリセットすると位相がふっとぶ。大電流運転時は要注意。

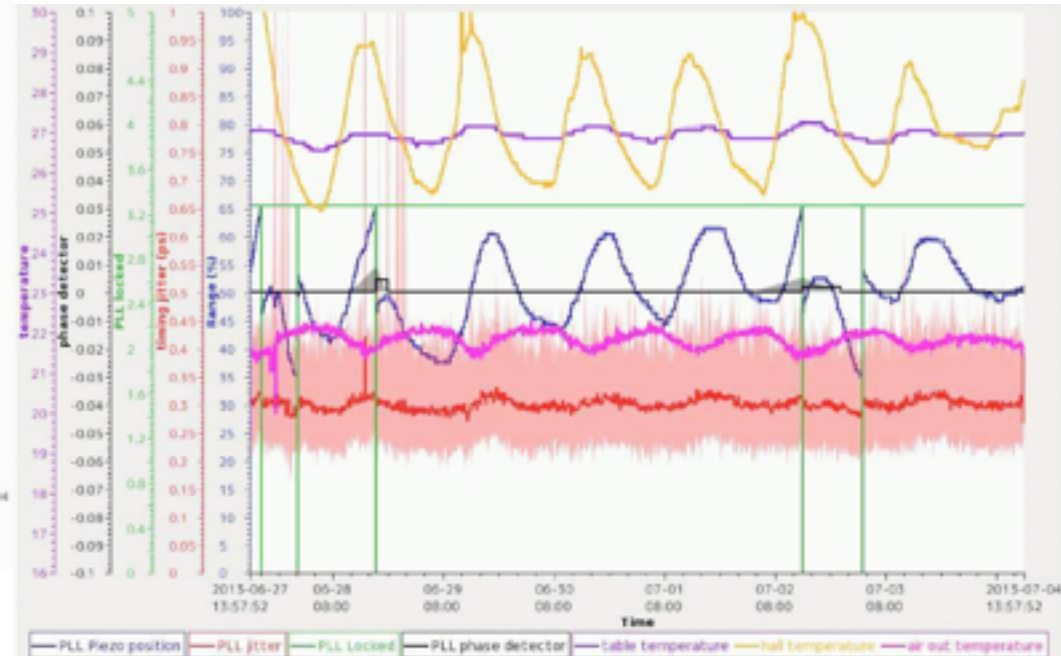
Temperature set value  
23.0 deg.      Temperature set value  
25.0 deg.      Temperature set value  
27.0 deg.



before



after

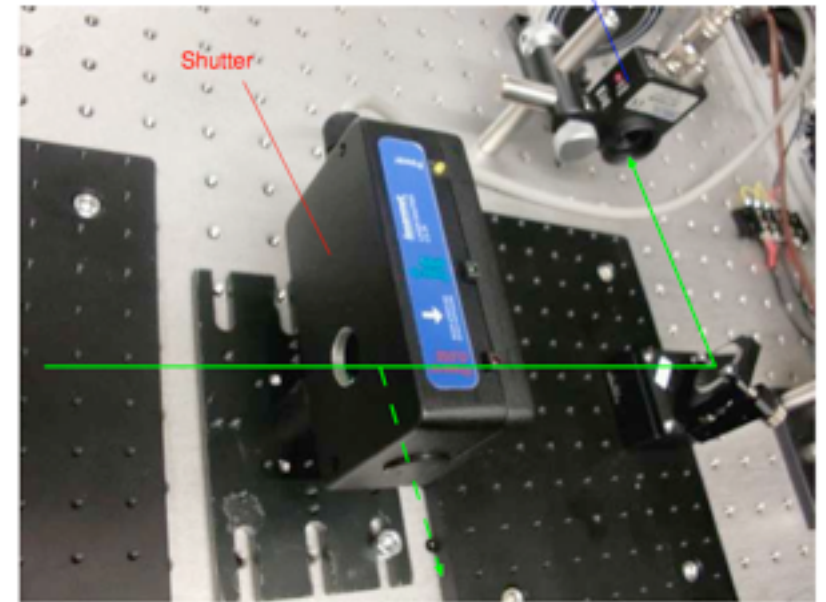




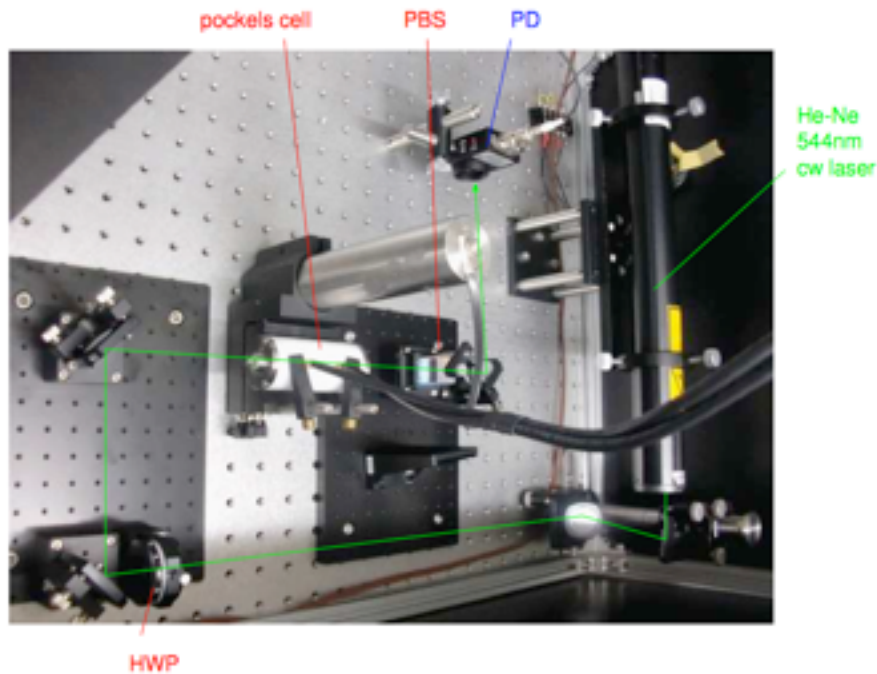
# レーザーシャッター

- マシンプロテクションでビームを止める
- 3種直列のシステム
  - ハイパワー用機械シャッター：動作速度60ms
  - 高速機械シャッター：動作速度 1.5ms
  - ポッケルスセル電気シャッター：動作速度  $0.5\mu\text{s}$

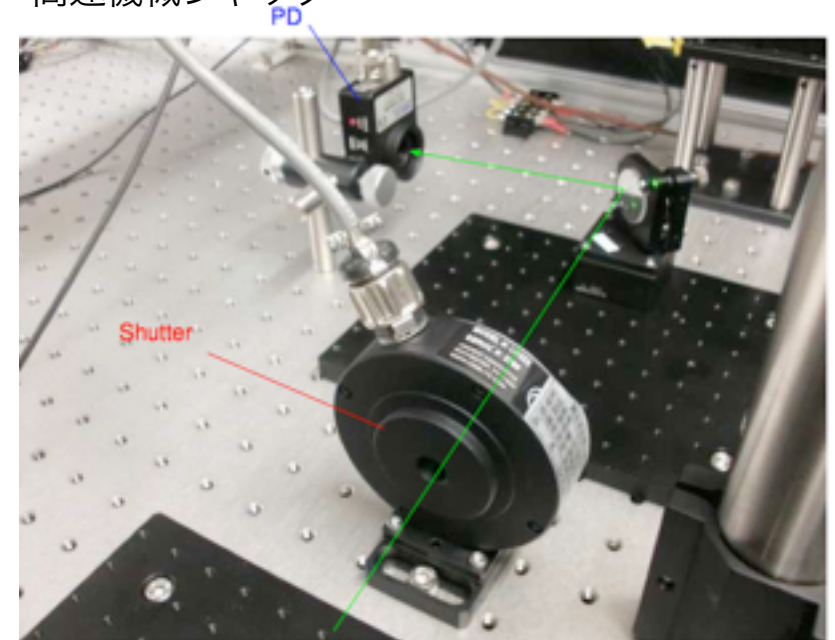
ハイパワー用機械シャッター



電気シャッター

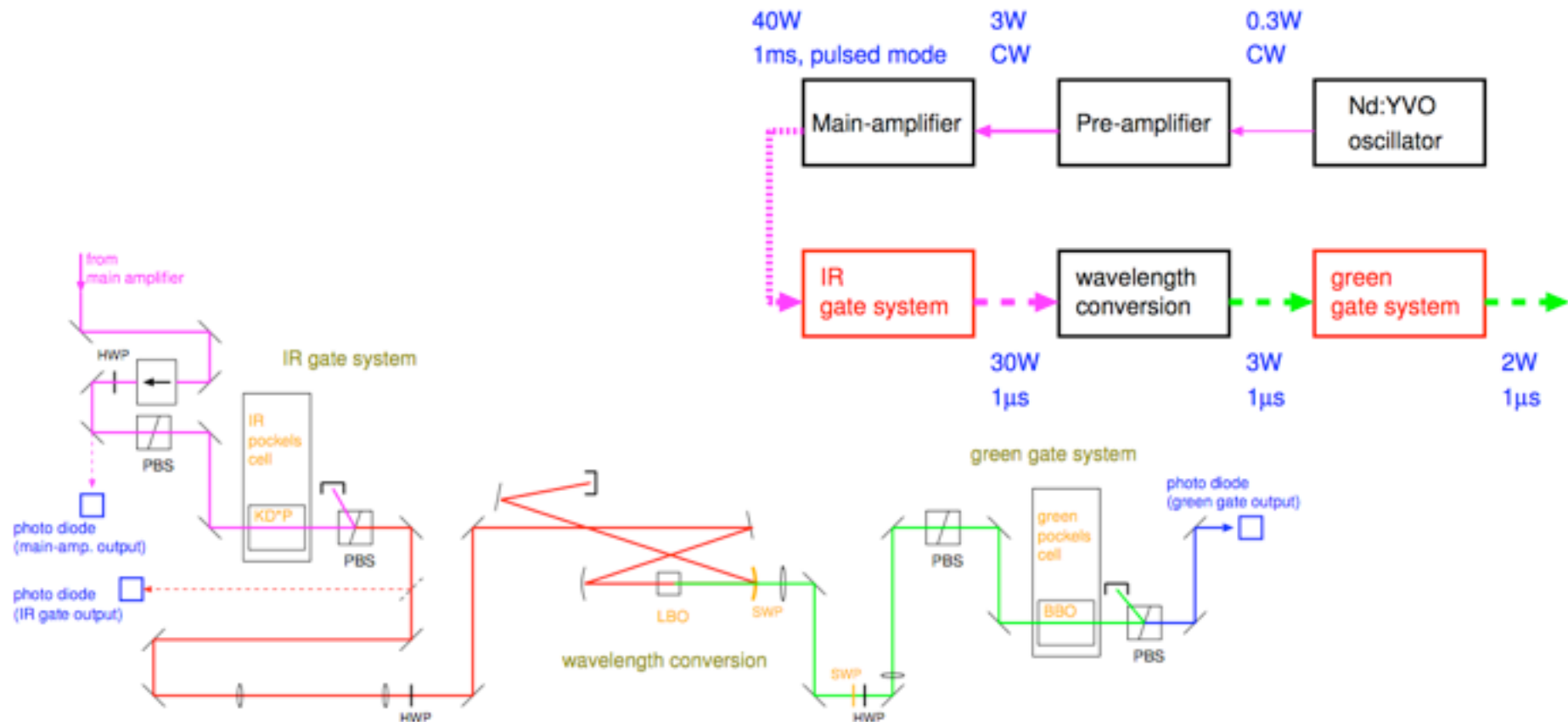


高速機械シャッター



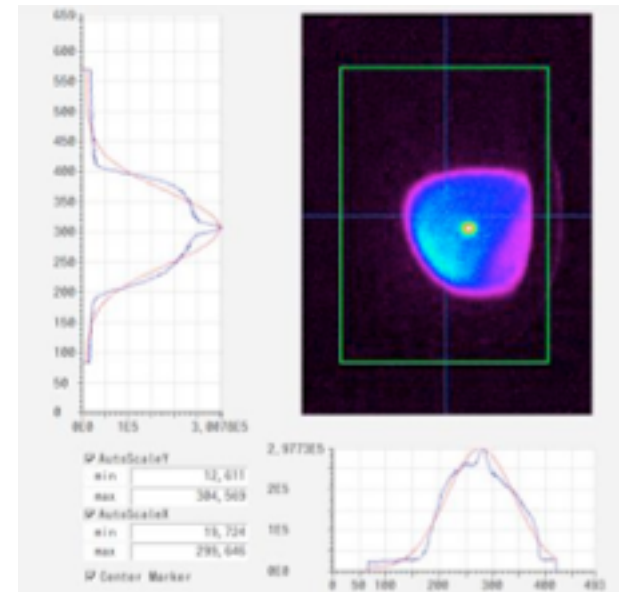
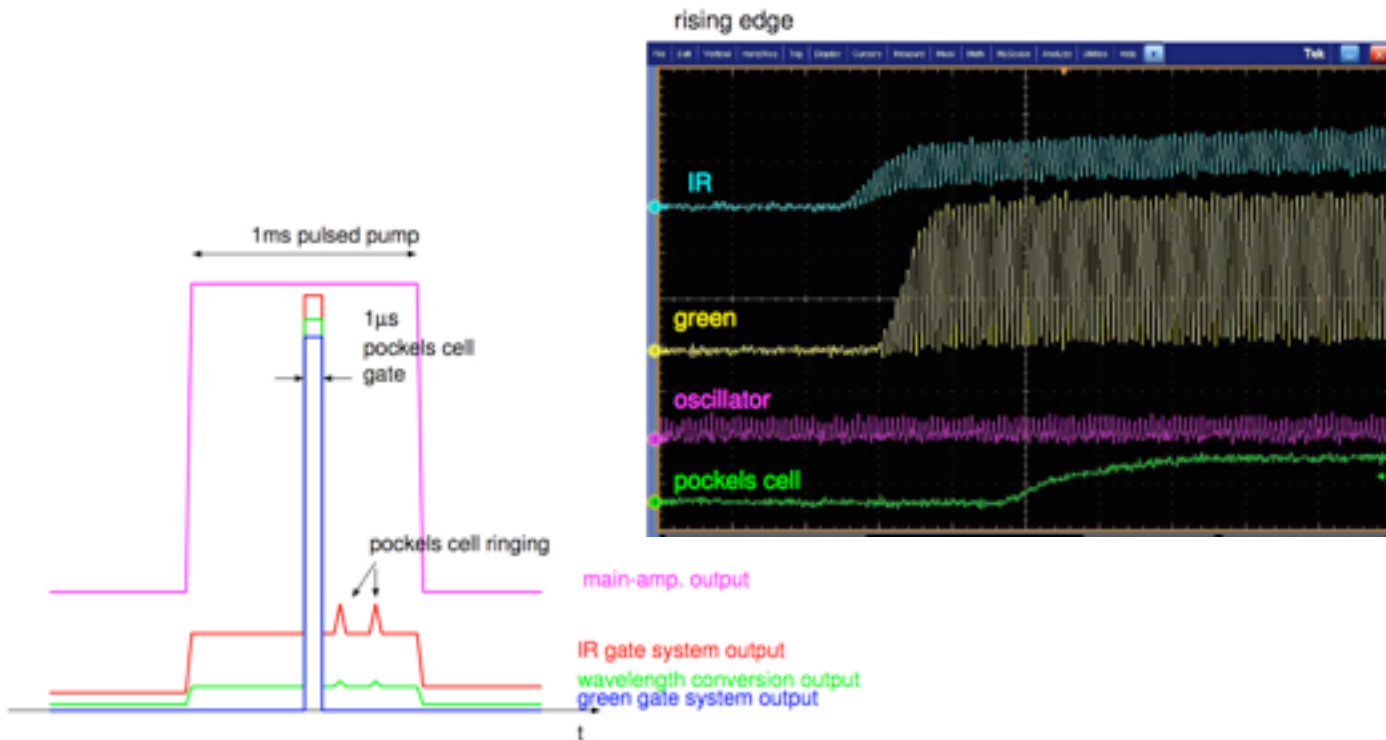
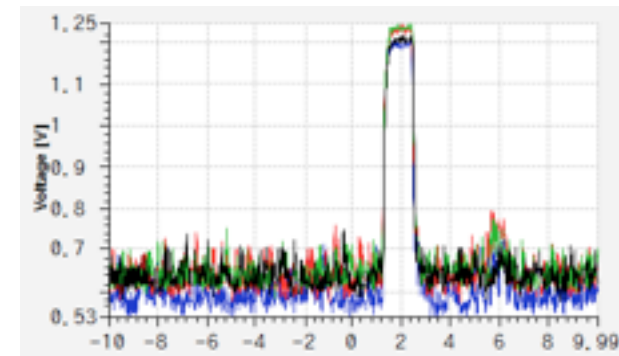
# バースト運転

- ビーム運転は、基本、 $1\mu\text{s}$ 幅のバーストモード
  - IR, greenの2段階のポッケルスセルで切り取り
  - 立ち上がりが10バンチくらい。
- CW加速器ならでの、ごたごたが結構ある。
  - 5Hzで $1\mu\text{s}$ 幅なので、デュティが $1/200000$
  - JLabではバースト運転での消光比が問題になっている、とさんざん言われた。
- 消光比を十分とるため、増幅器もパルス駆動
- IRとgreenの2段階のポッケルスセル、波長変換の非線形性、アンプのパルス駆動、で消光比 $10^9$ 以上



# バースト運転固有の問題

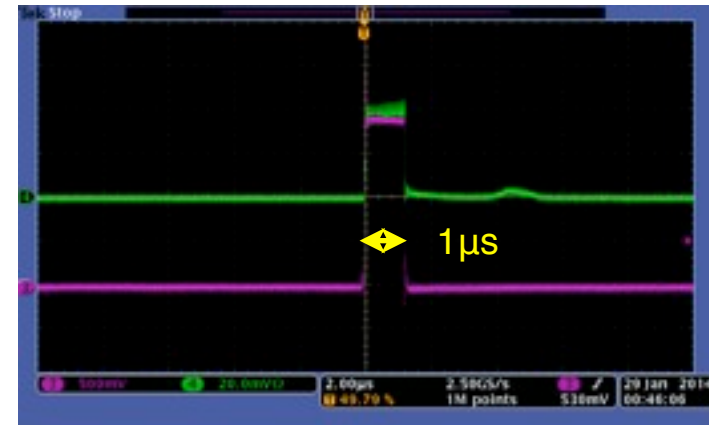
- 調整運転上、消光比はほぼ問題無い。
- 多少気になること
  - ポッケルスセルのリングングは見えている
    - リングング構造が主空洞のインタロックにひっかかったことがある
    - BPMのログ検出で見て僅かに見える程度なので、何桁も下。
  - 立ち上がりが10バンチくらい。
    - バンチ電荷の小さいバンチが混ざり込む。ビームコアのように見える
- 励起光モジュールの熱負荷が無い。波長がずれる。
  - 本来チラーで冷却するところを逆に温めている。
  - そのまま高強度CW運転に移行すると温度インターロック



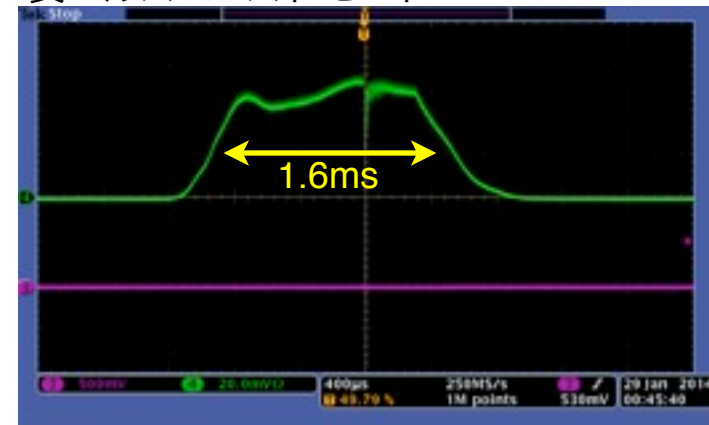
# 多様なバースト運転

- ビーム運転の都合で、いろいろなパターンのバースト運転が要求される。
- 100nm~1 $\mu$ sの通常の調整用バースト
  - ポッケルスセルで切り出し。矩形。
- 1ms程度のロングパルス
  - メインアンプをパルス励起。Ybの励起状態の時定数で可変。
  - 1ms程度の立ち上がり/立ち下がり
  - ポッケルスセルはオフ
- 高電荷運転
  - Ndポストアンプを追加、三角形状
  - ポッケルスセルで切り出して1 $\mu$ s矩形
- CWのなかでパルス
  - 低電荷CW運転時にもBPMでモニタできるように
  - メインアンプはCWで、ポストアンプを駆動
- 1 $\mu$ sの抜け構造
  - 2ビーム部のBPMを読めるように
  - ポッケルスセルを反転して、矩形の抜け

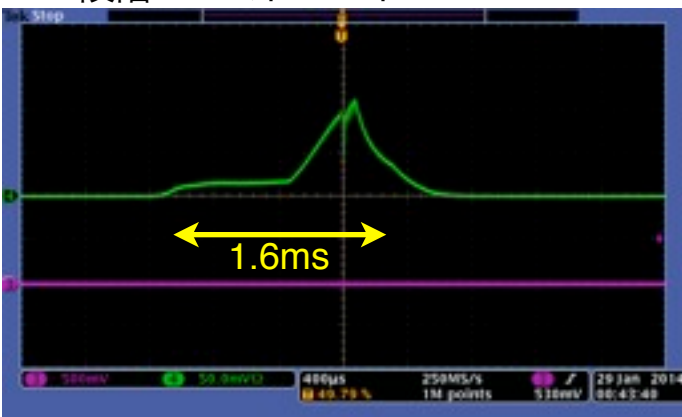
通常のバーストモード



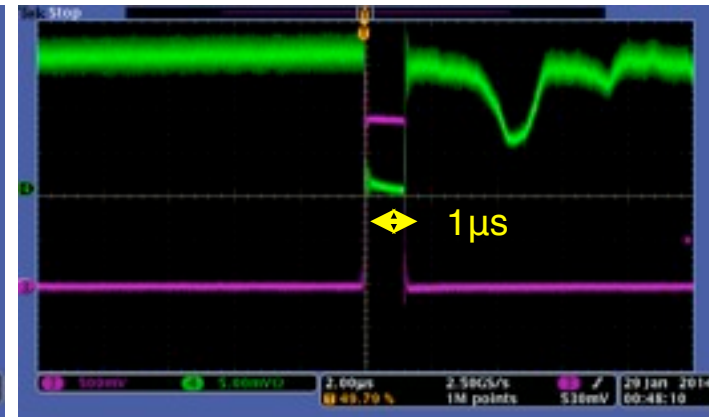
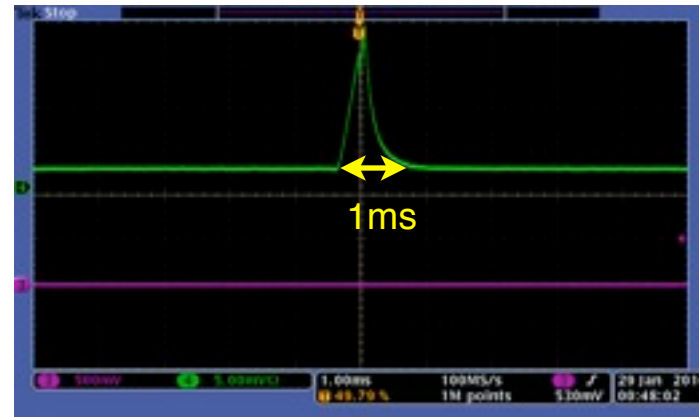
長パルスバーストモード



2段階バーストモード



CW+バースト-矩形モード

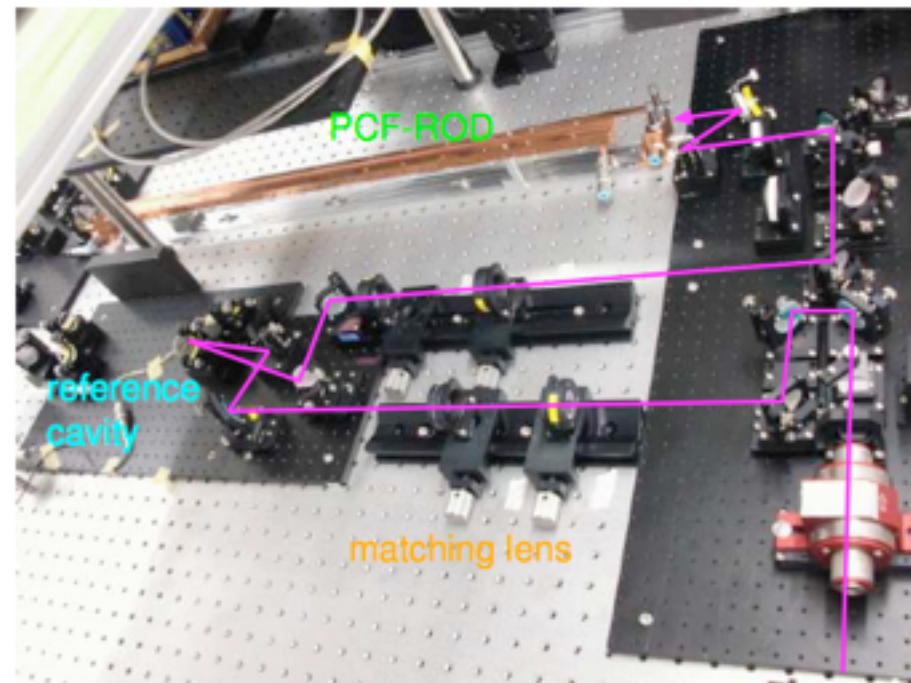


# 現在の更新状況



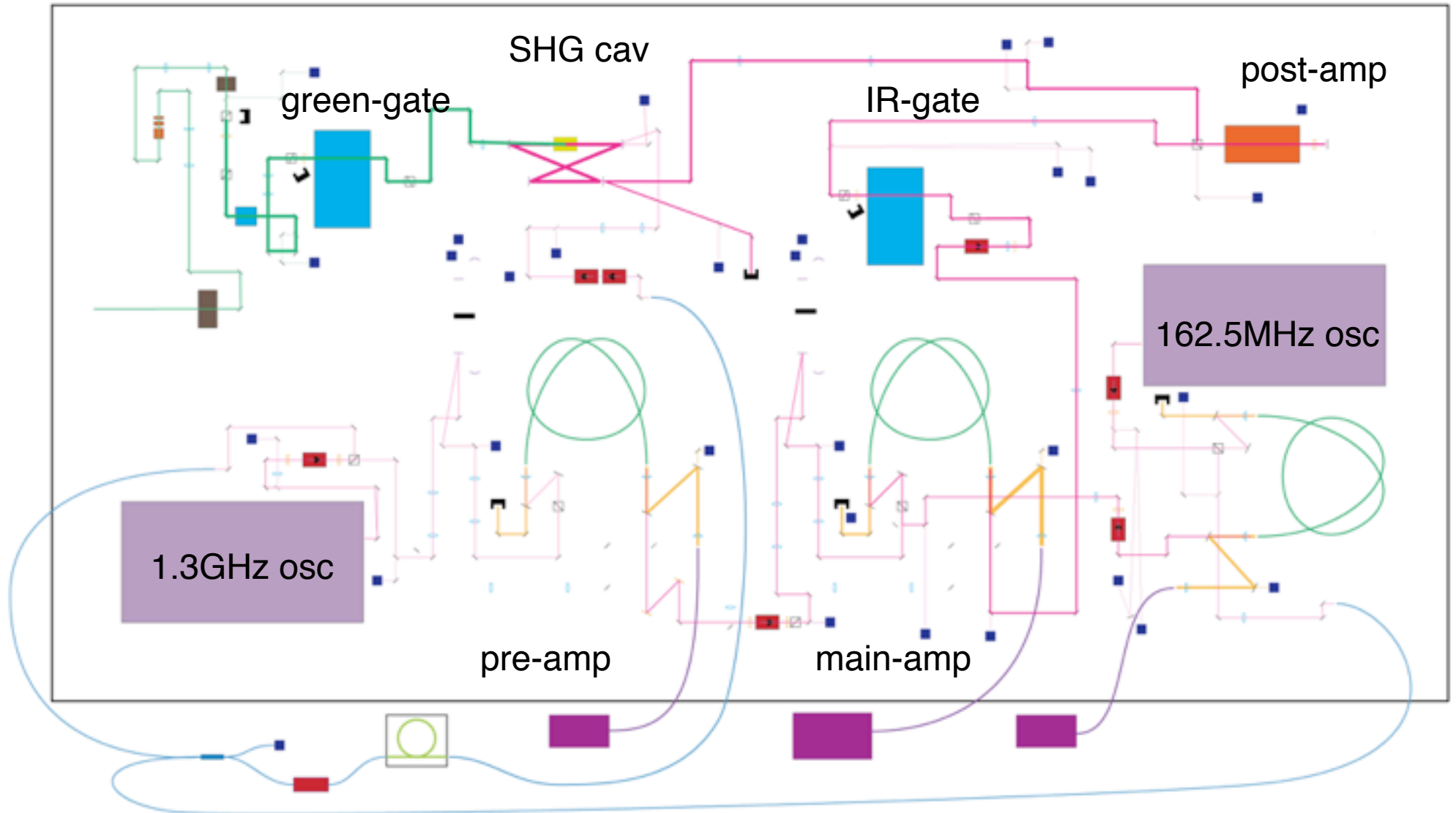
# 今期のレーザーのセットアップの変更点

- LCSS用に162.5MHz対応が必要
  - STF量子ビームの発振器を持って来た。Nd:YLF 波長1047nm
- 元々、100mAに向けて、3段目ロッドアンプを用意していたのだが、場所を空けた。
  - 大電流化は共振器型SHGで対応
- 思った以上に色々必要
  - 基準信号、1.3GHzから分周。
  - 波長が違うので、メインアンプから合流させる
  - バースト切り出しも必須。ポッケルスセル共通
  - ポストアンプは波長が違うので使えないが、無駄に経由
  - SHGは温度を変更して使えるはず
  - 増幅器保護のインターロックなども必要
  - 励起LDの場所が無い、まとめて別テーブルに移設
  - レイアウトを変えたらモニタ用ケーブルの張り直し
- とかやっていたら今になった
  - ひとつおりに並べた。
  - 調整と性能評価はこれから。
  - まにあうのか？



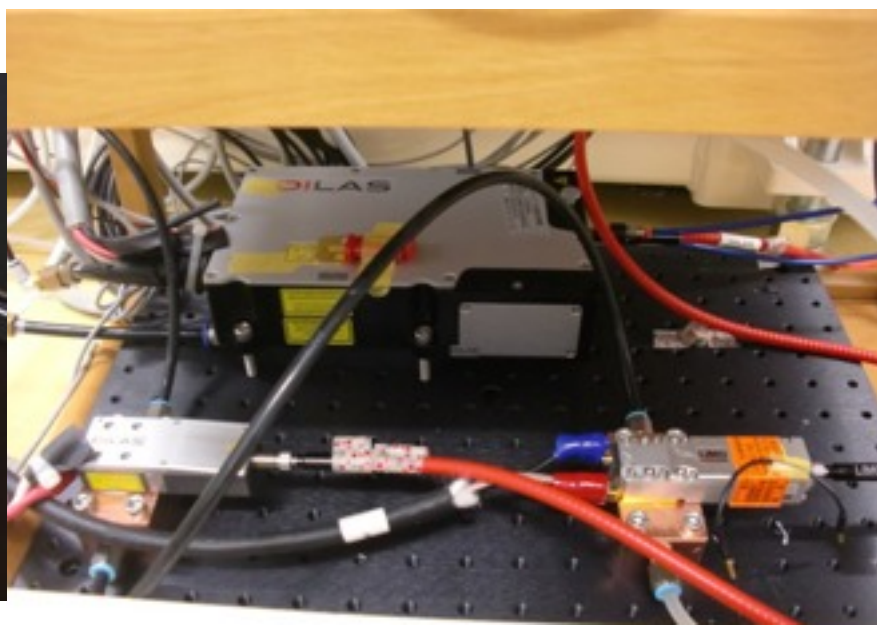
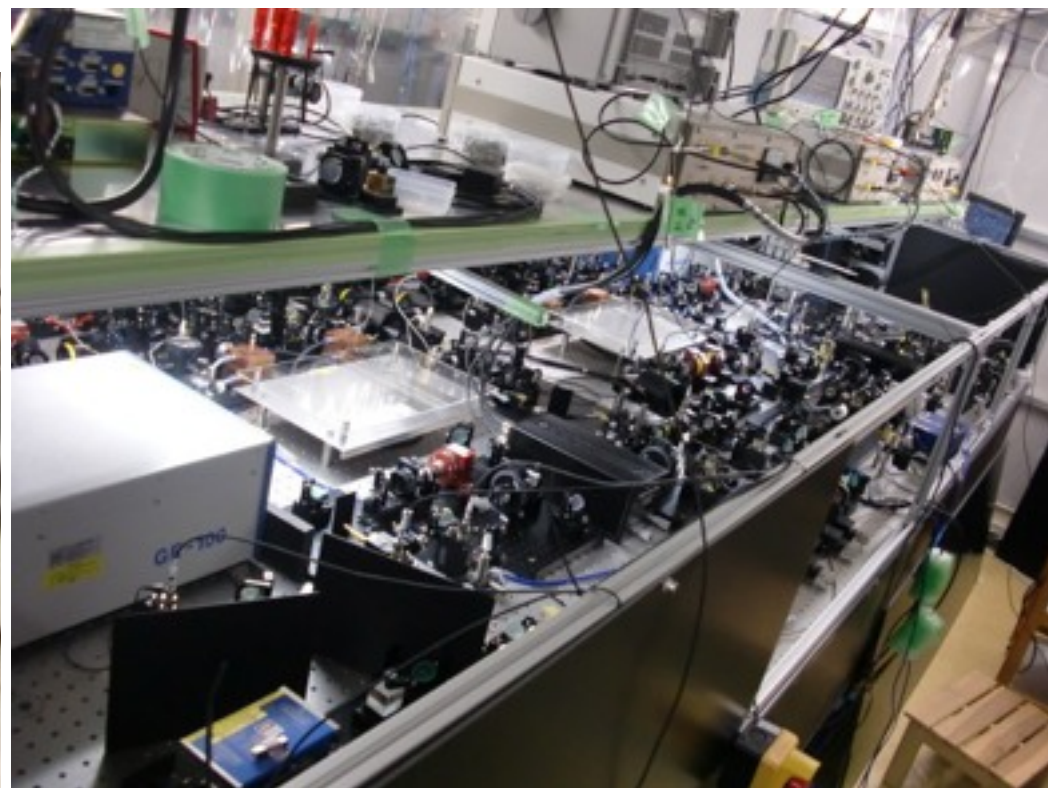
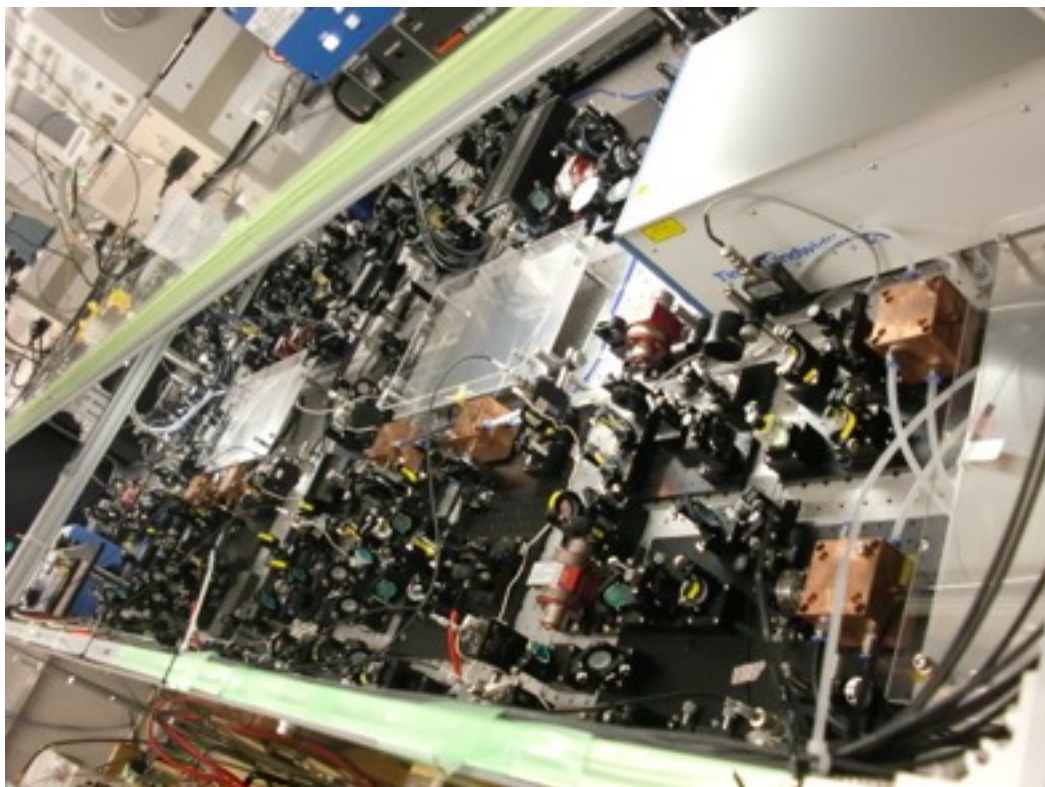
# 現状のレーザーのセットアップ

- 3m x 1.5mのテーブルだが、もう一杯。

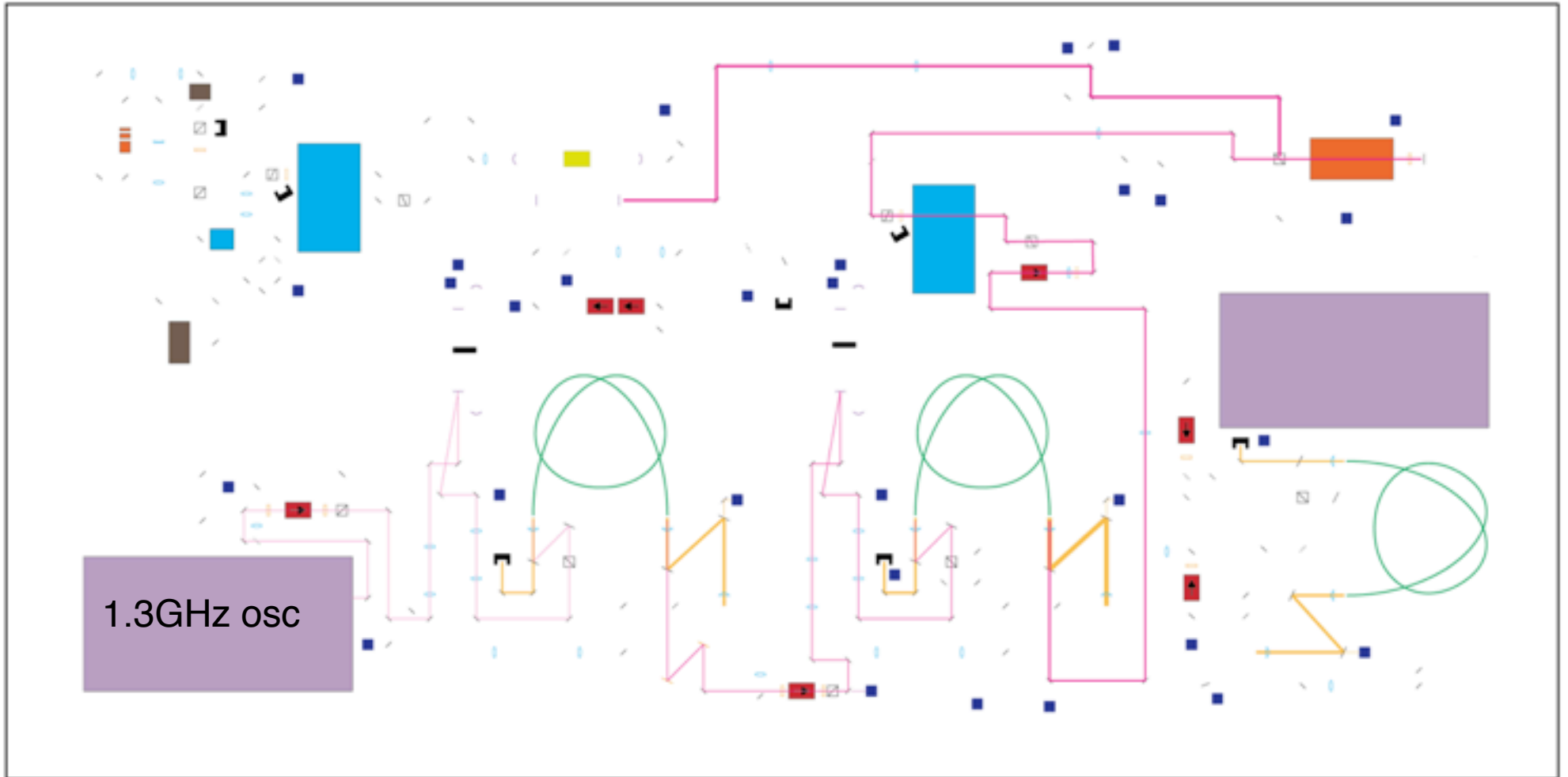




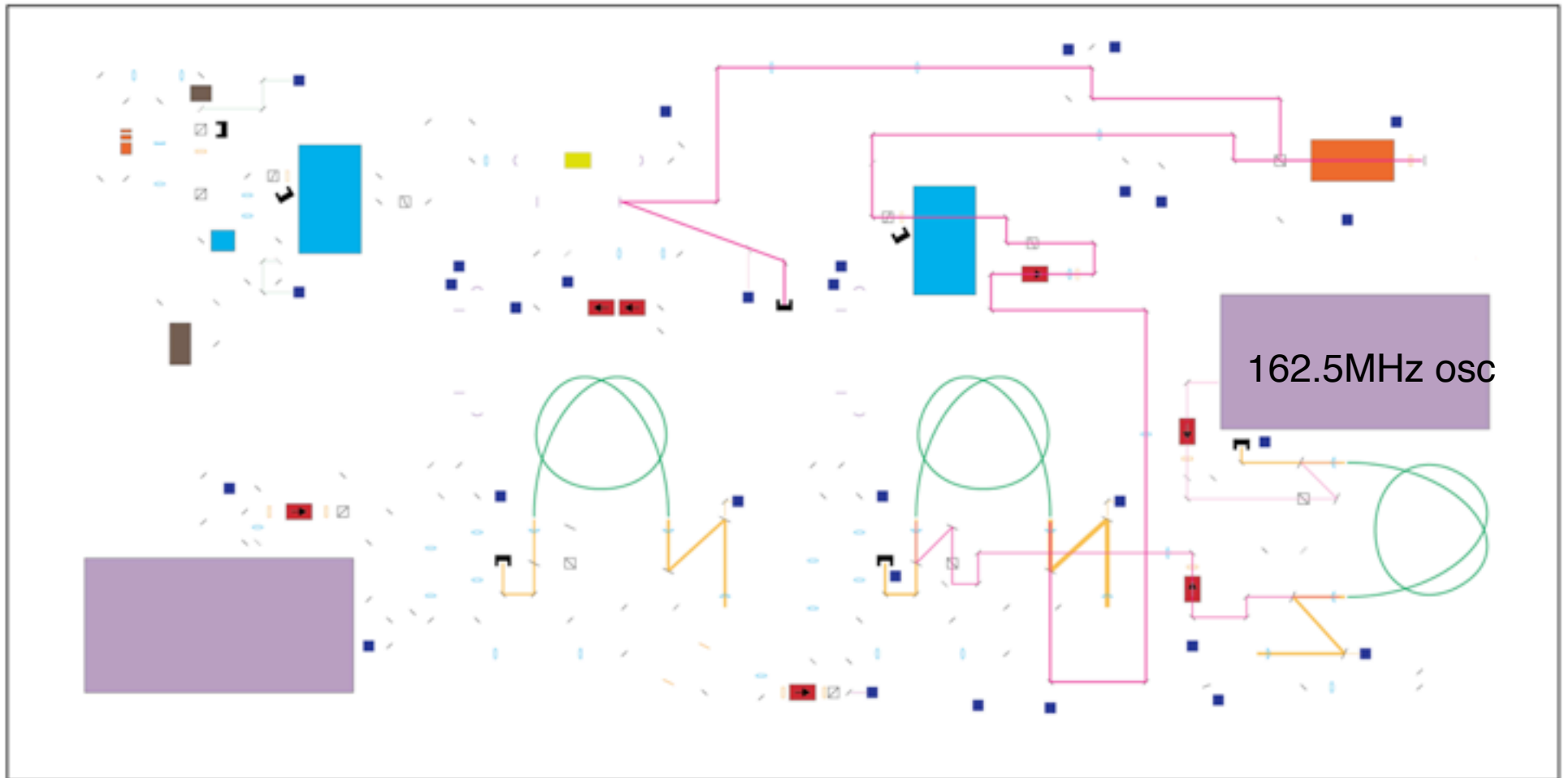
# 現状のレーザーテーブル



# 1.3GHzシステム



# 162.5MHzシステム

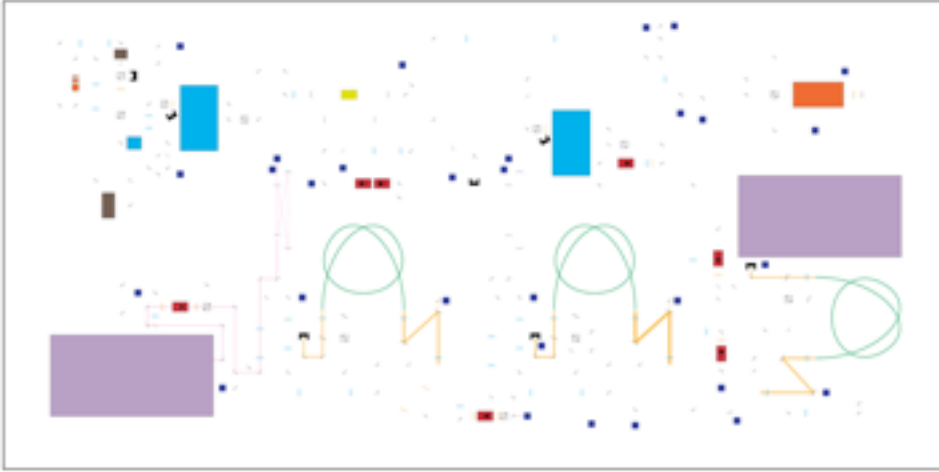




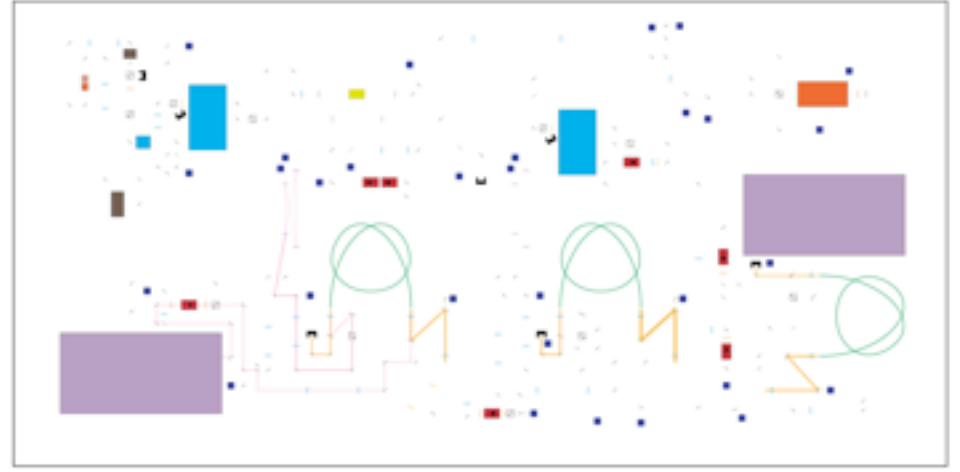
# ファイバ入射調整手順

- 基準共振器をもちいて、機械的に調整が可能。長期停止後の確認もすぐできる。

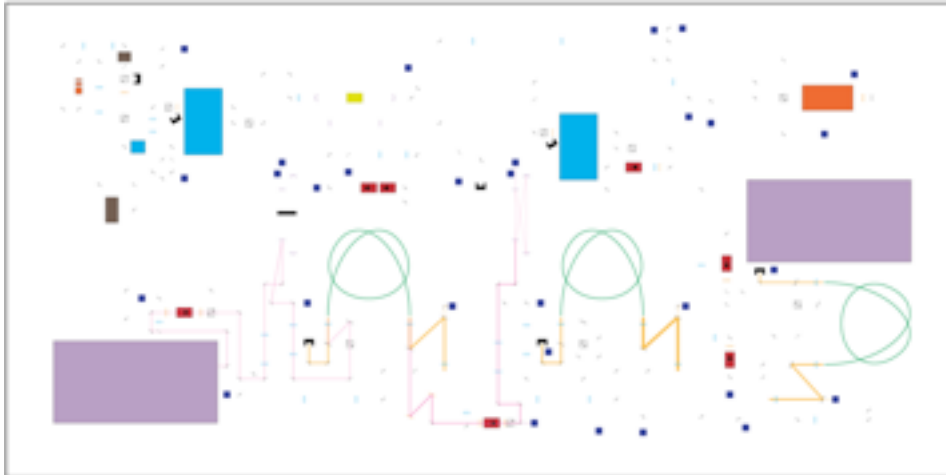
(1) プリアンプ順方向



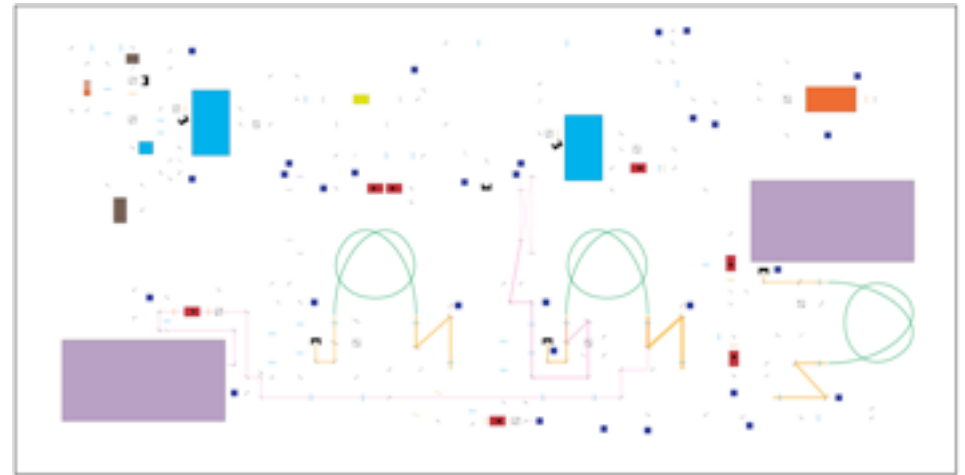
(2) プリアンプ逆方向



(3) メインアンプ順方向

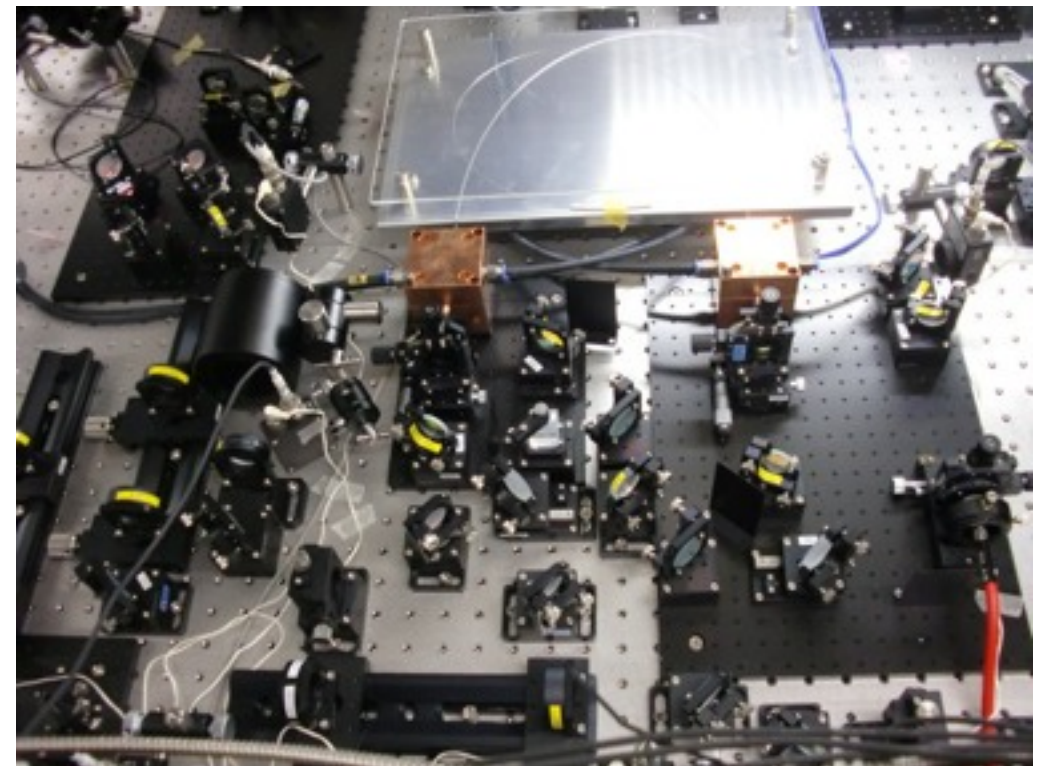
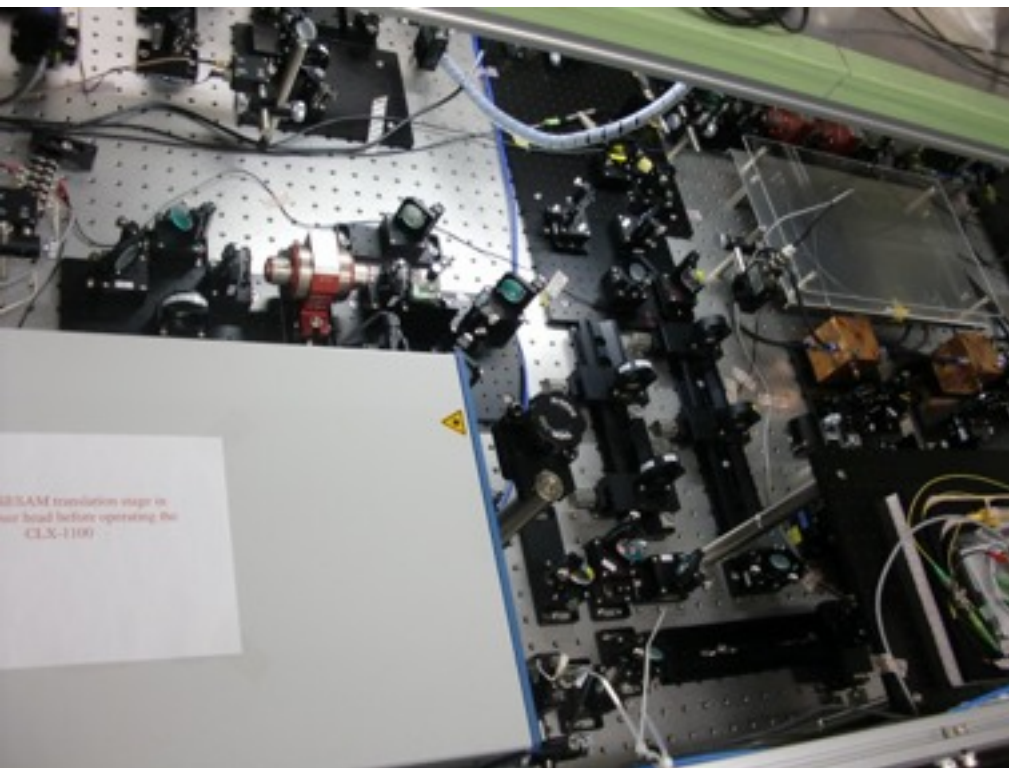
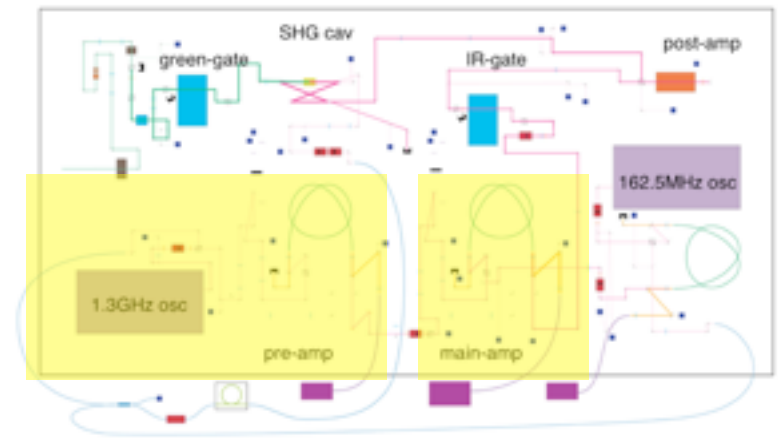


(4) メインアンプ逆方向



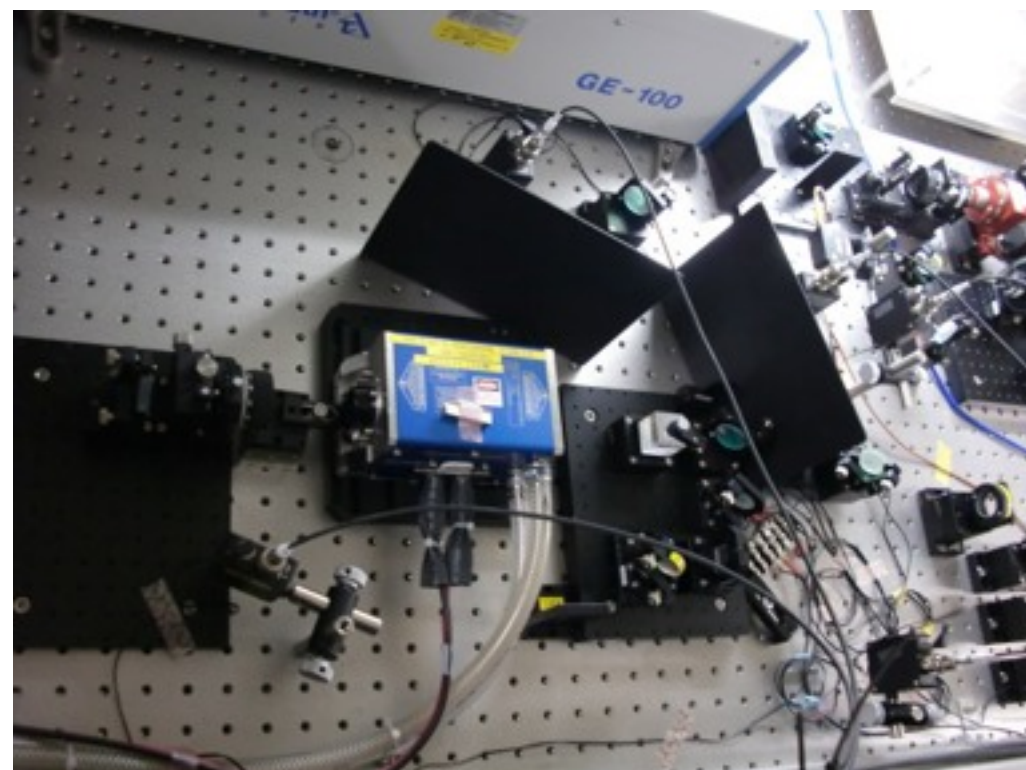
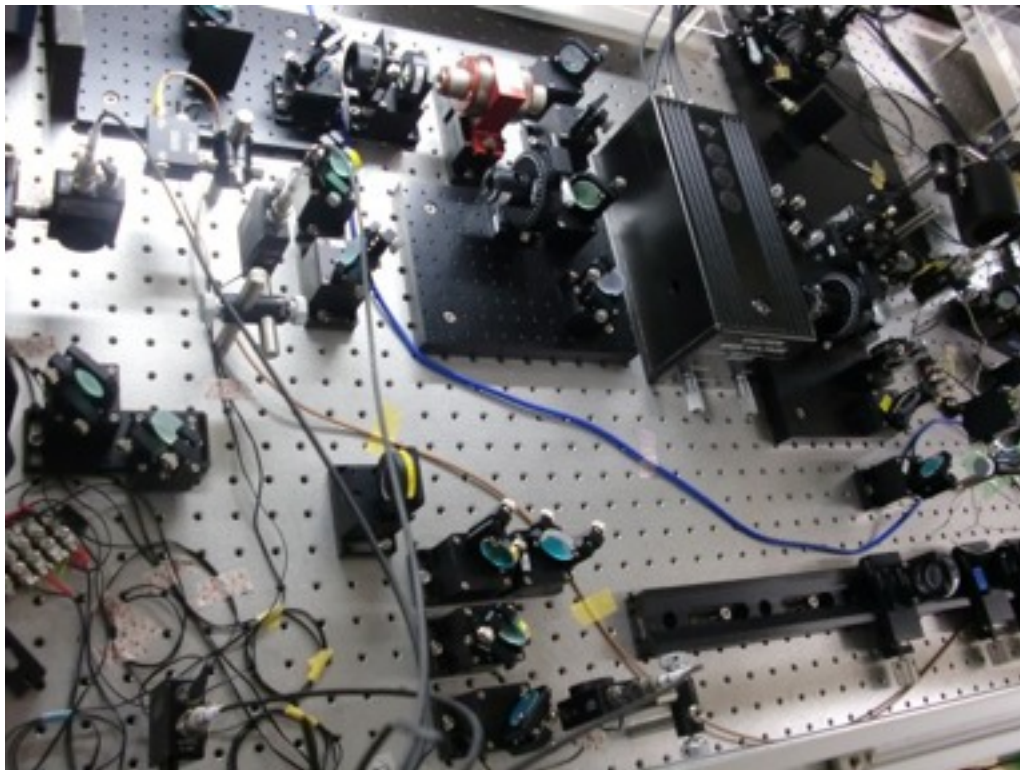
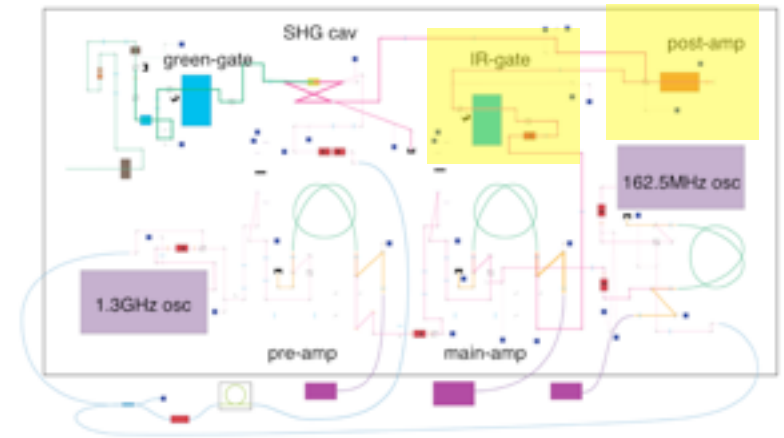
# 写真

- 1.3GHz用、プリアンプとメインアンプ



# 写真

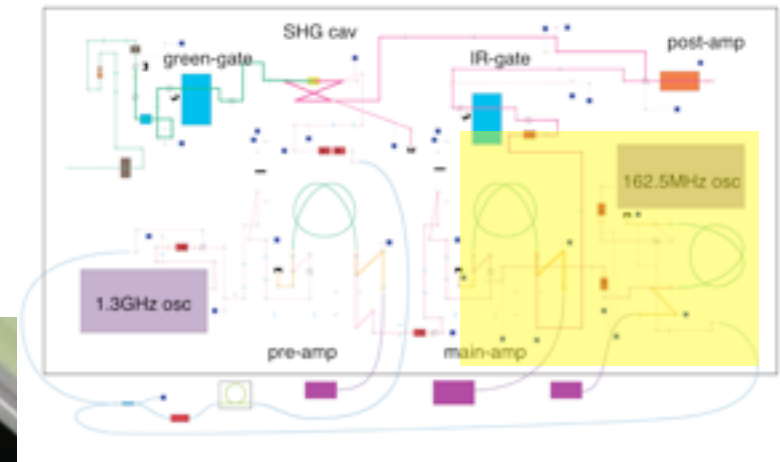
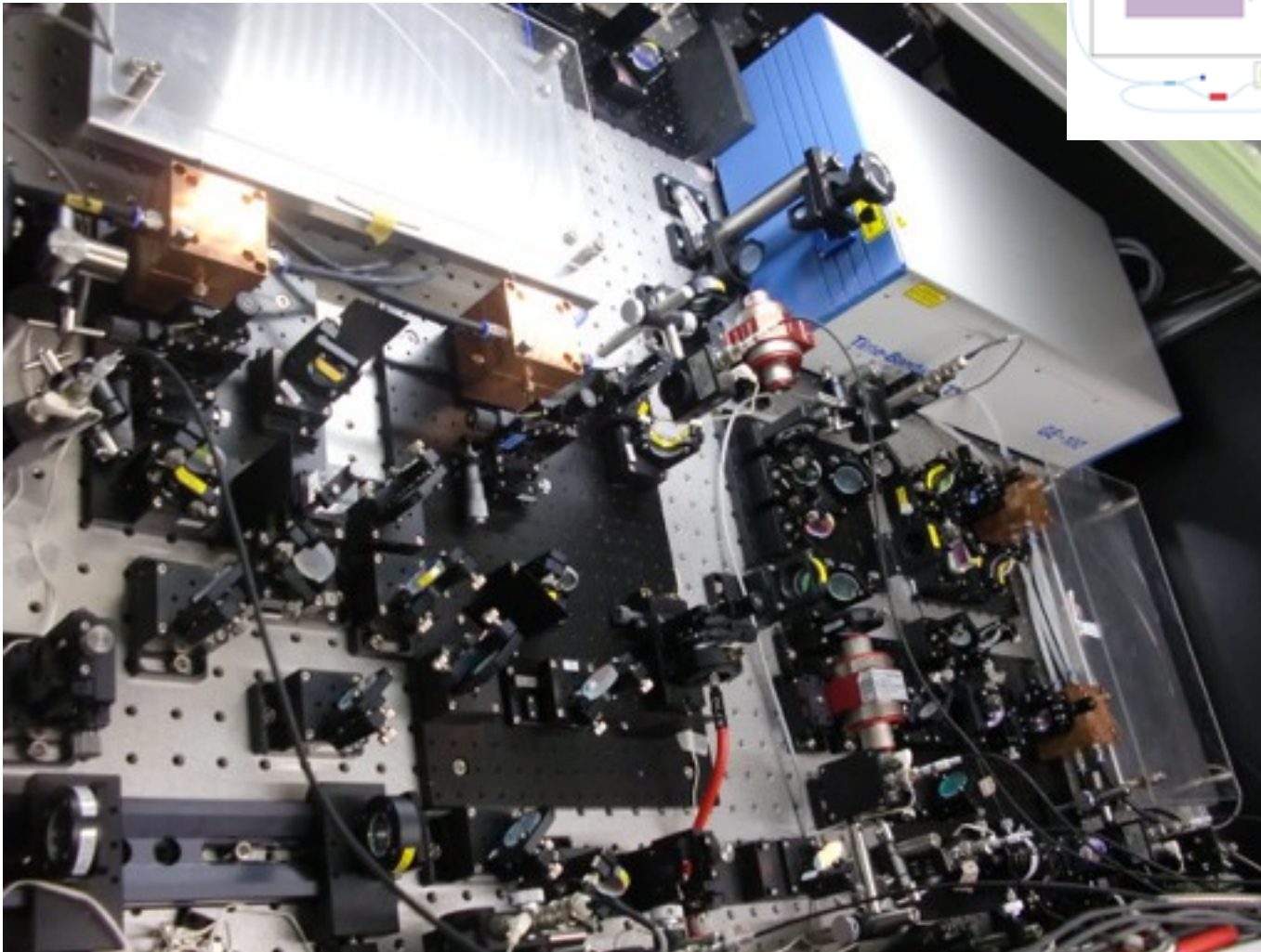
- IR切り出しとポストアンプ





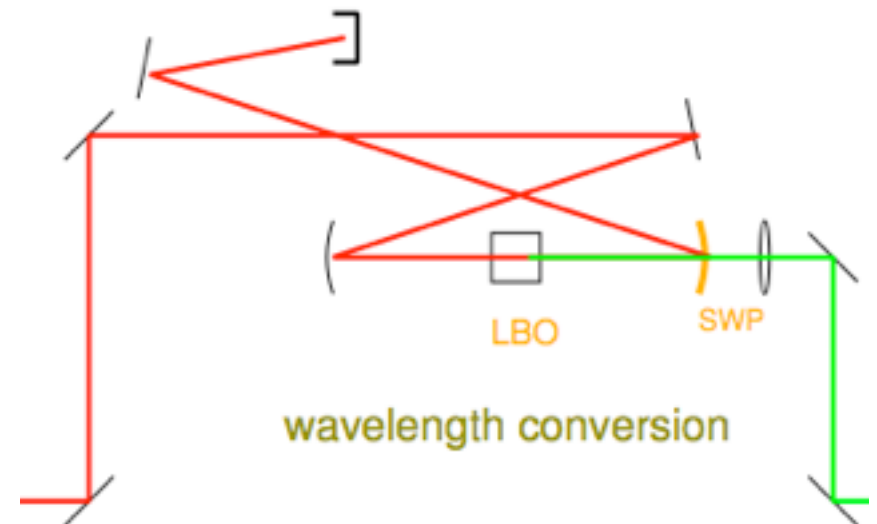
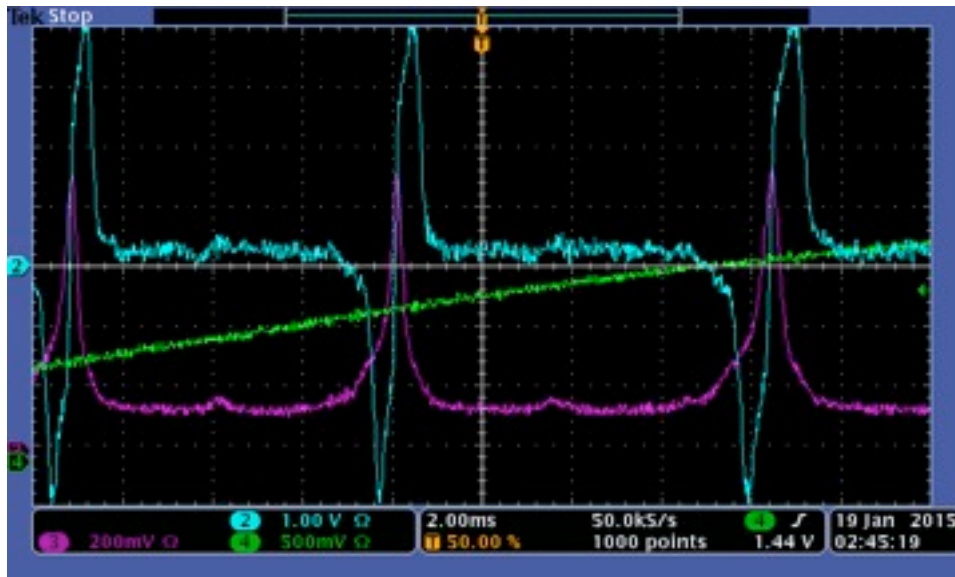
# 写真

- 今回設置した162.5MHz発振器とプリアンプ。
- 既存のメインアンプに合流



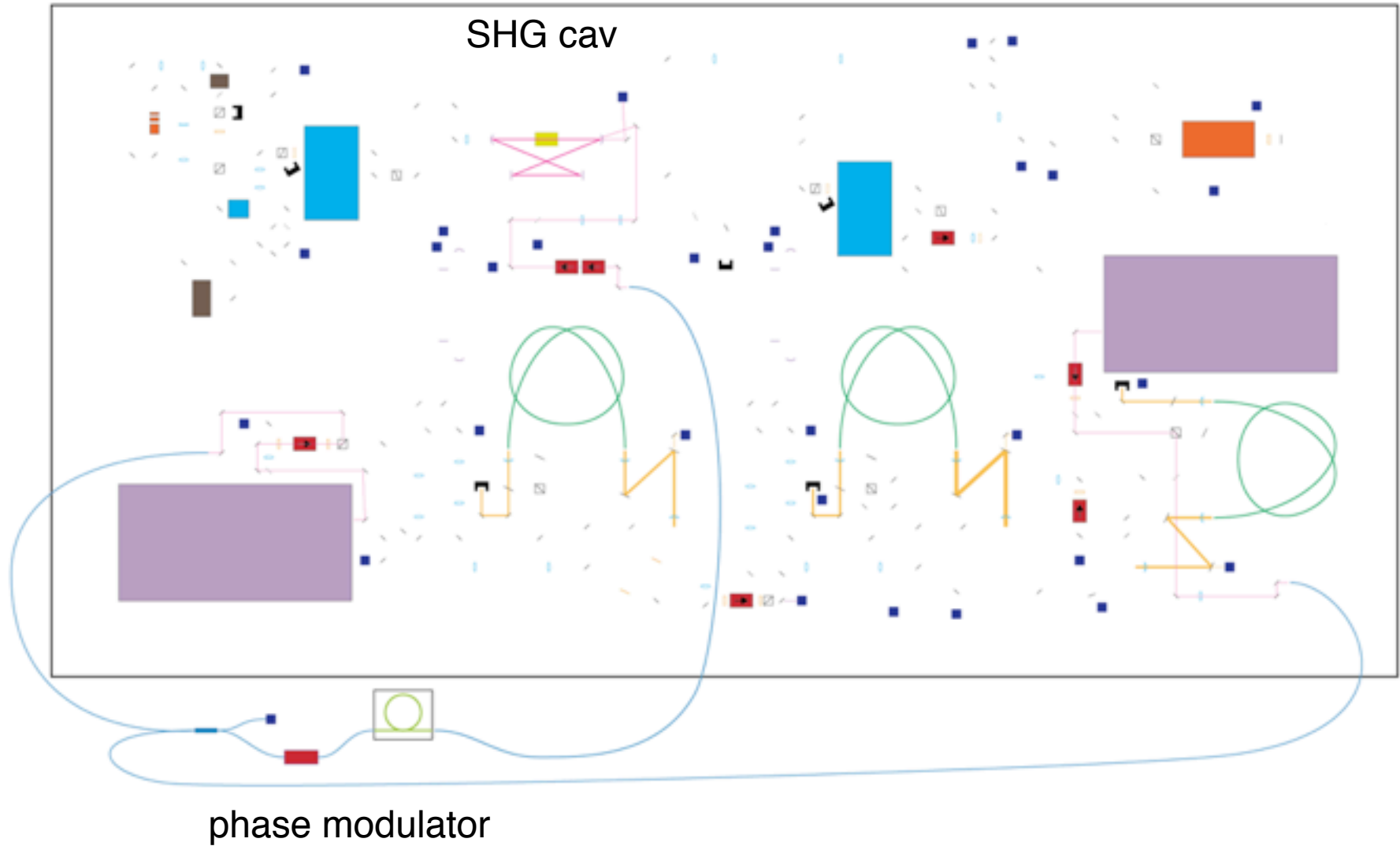
# 共振器型波長変換

- 現時点でパワーは足りているので、いらんことをやる必要はないが、
- 平均パワーを抑えて、変換効率を上げる事が可能
- 1.3GHzでも162.5MHzでも対応するように、162.5MHzの共振器を構成
- やはり、バースト運転に対応する必要がある。
  - 通常は入射パワー無し状態で共振器をロック
  - フィネス30相当(10倍程度)の共振器を構成
- 発振器から分岐し、位相変調をかけて逆向きに周回させ、共振器をロック



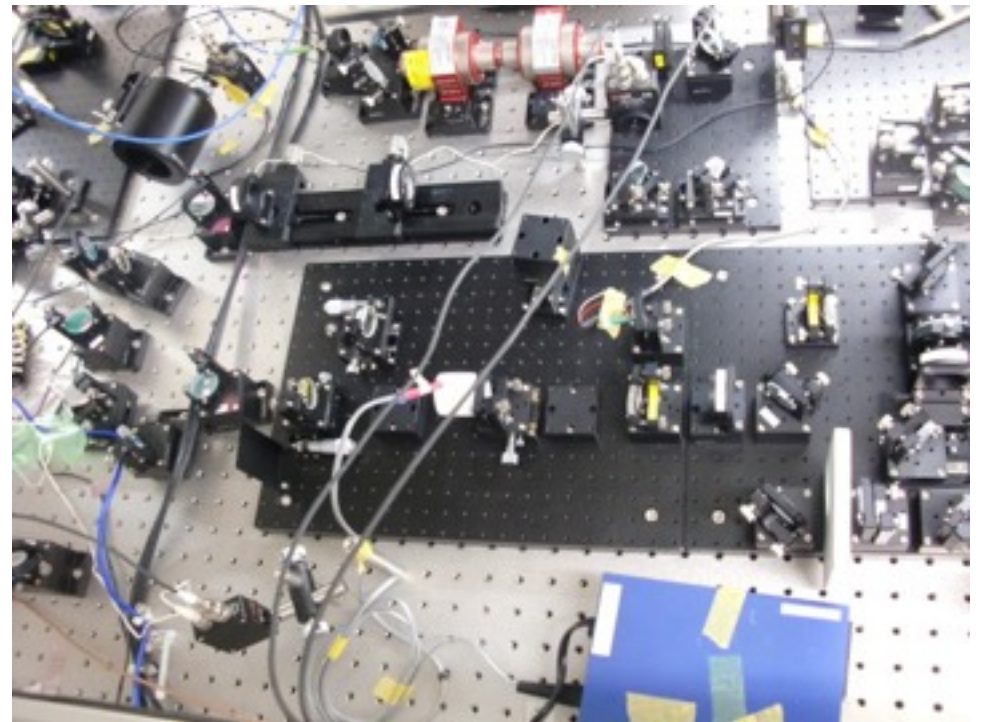
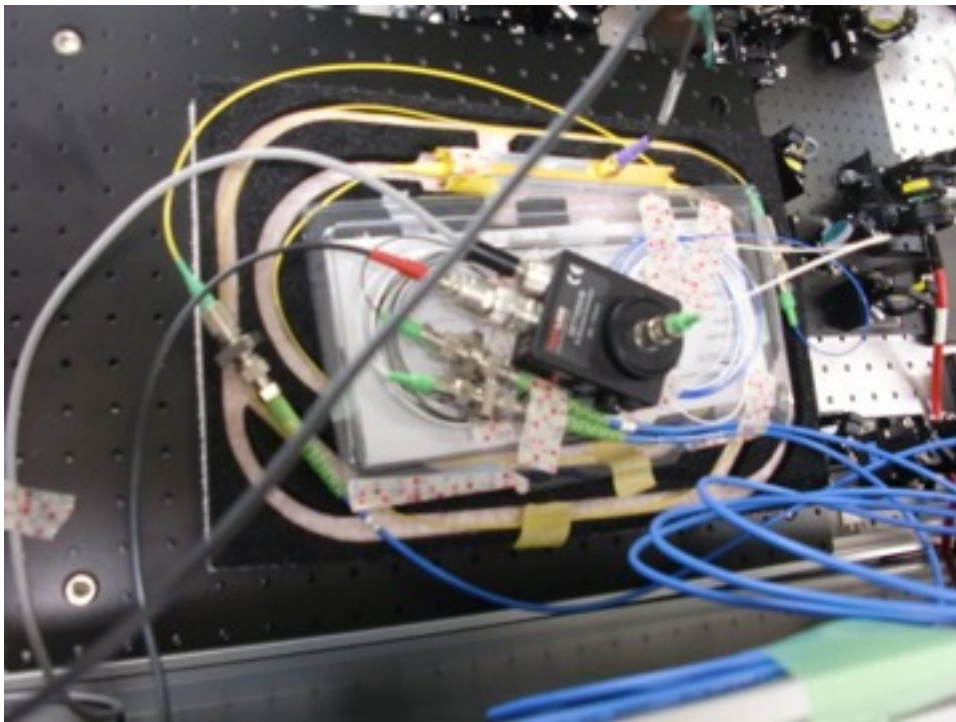
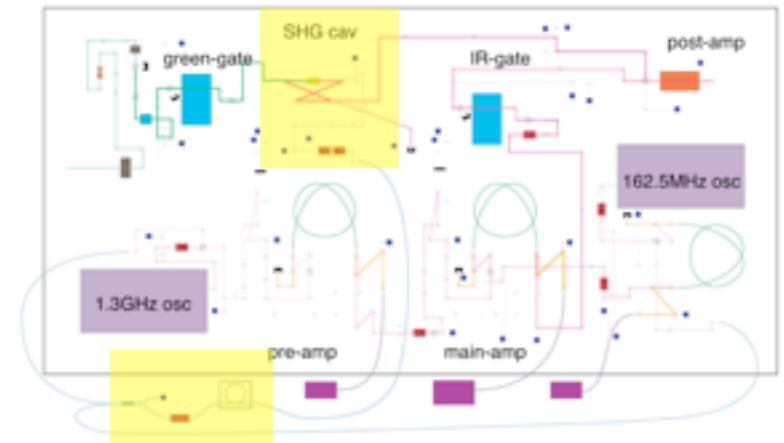


# 波長変換共振器の制御光



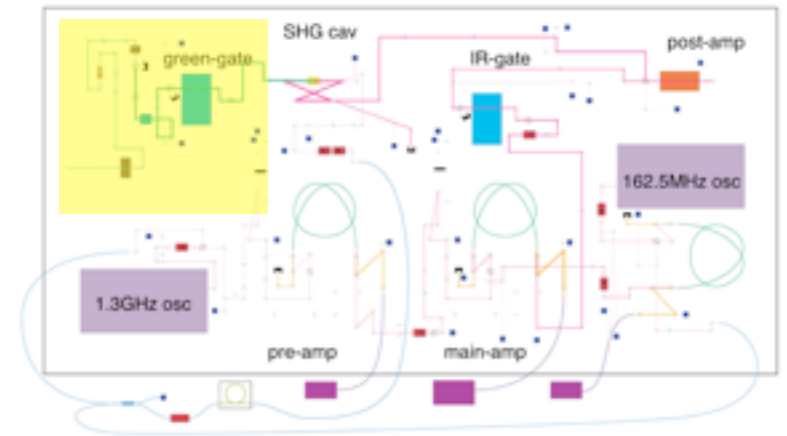
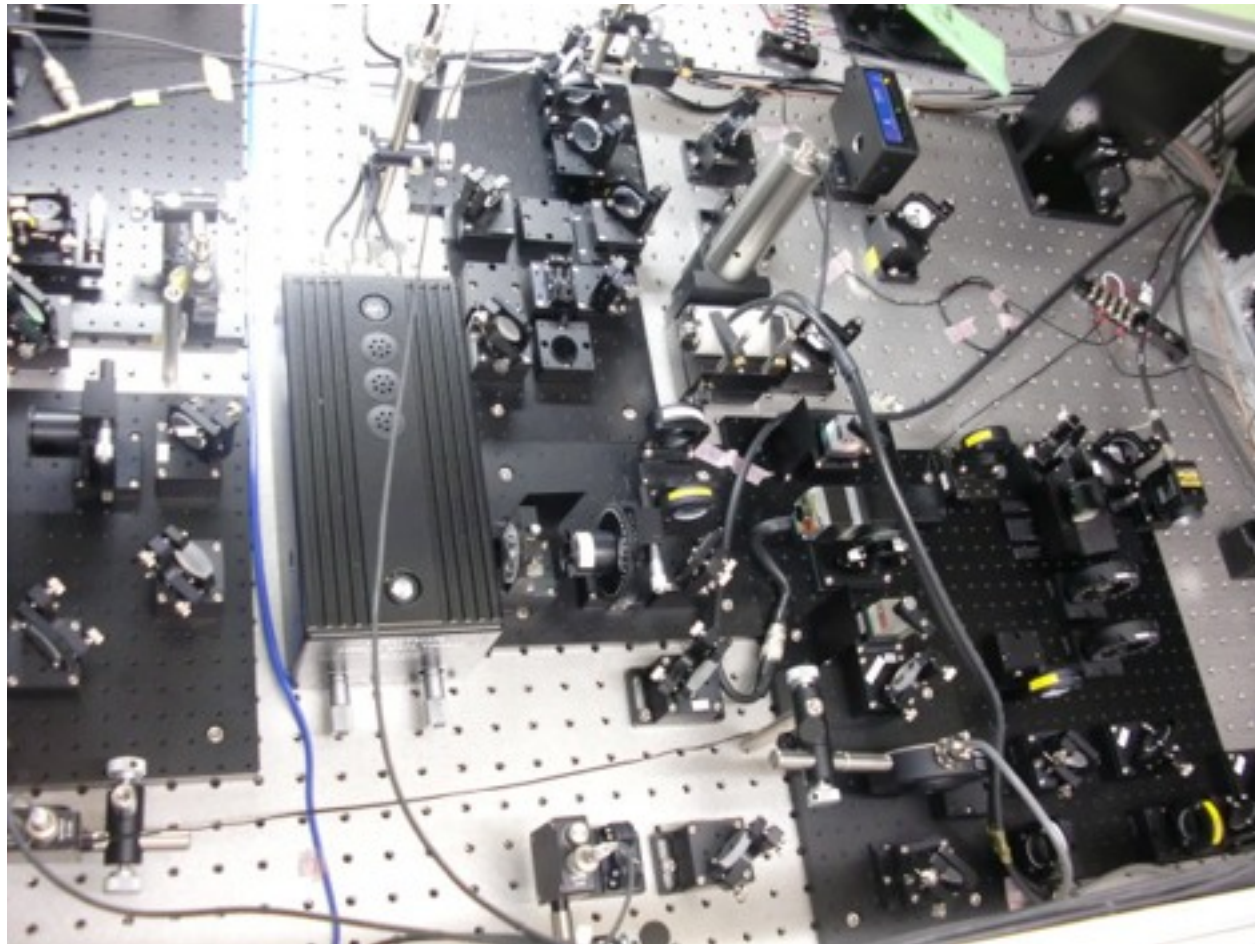
# 写真

- 共振器型波長変換と制御光用ファイバ変調器



# 写真

- 2倍波の切り出しと時間整形



# まとめ

- 残された課題
  - 大電流連続運転
    - 原理的に大丈夫なはずだが、波長変換以降いい加減。
    - いまのところ、最後は時間が無くなって力任せ。ビームが始まると触れない。
  - きっと、ビームが不安定になると、まずレーザーが疑われる。
    - モニタ系の充実
- 今後の予定
  - 朝令暮改なので、あまり今後のことは考えてやっていない。
  - その都度対応、自転車操業でやっている。
- 予算ゼロのなか、ほぼ枯渇状態
- 事実上マンパワー1人以下
  - 倒れたらどうなるのか。リスクが大きい。
  - 人材の育成も必要