

レーザーコンプトン散乱X線 今回の達成状況と今後の展開

第3回コンパクトERLミニワークショップ

2016.05.31

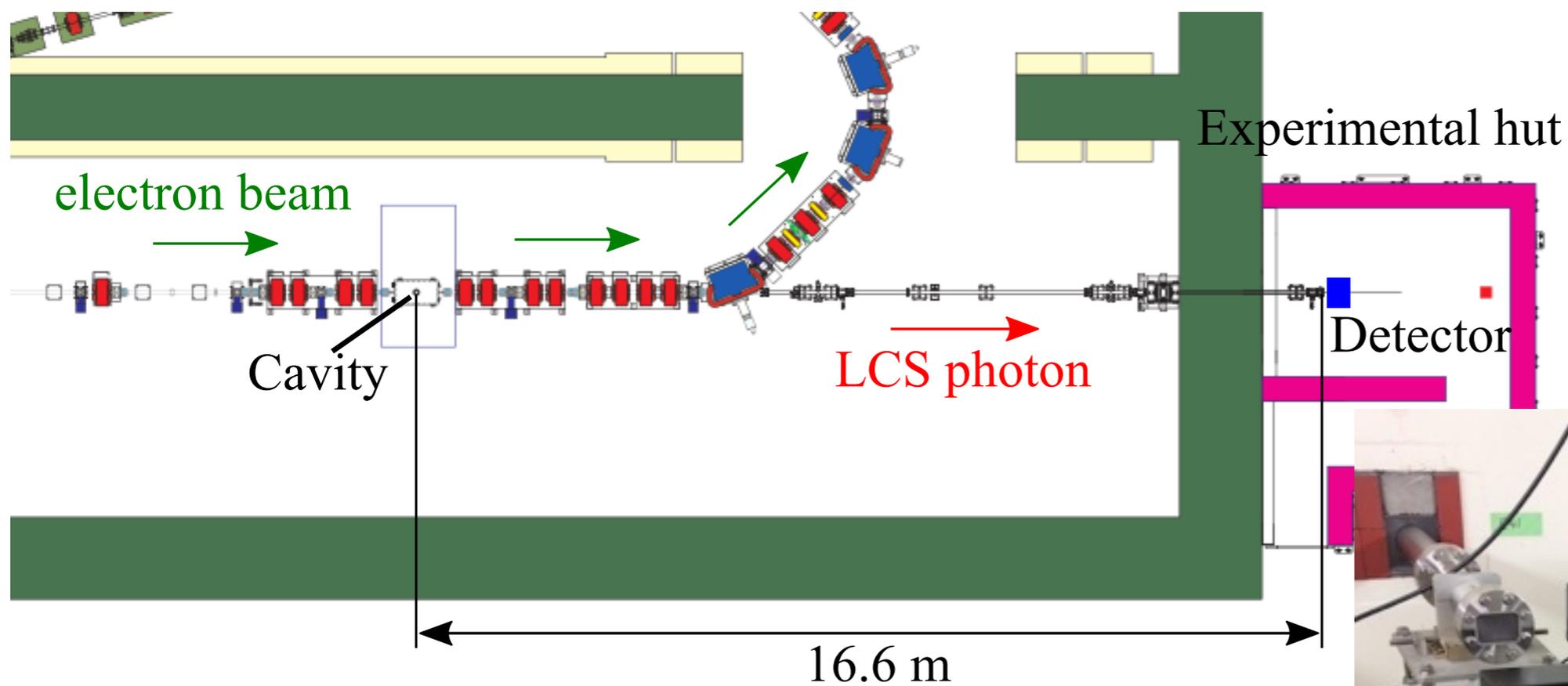
赤木 智哉

- 今回の達成状況
- 共振器の熱問題について

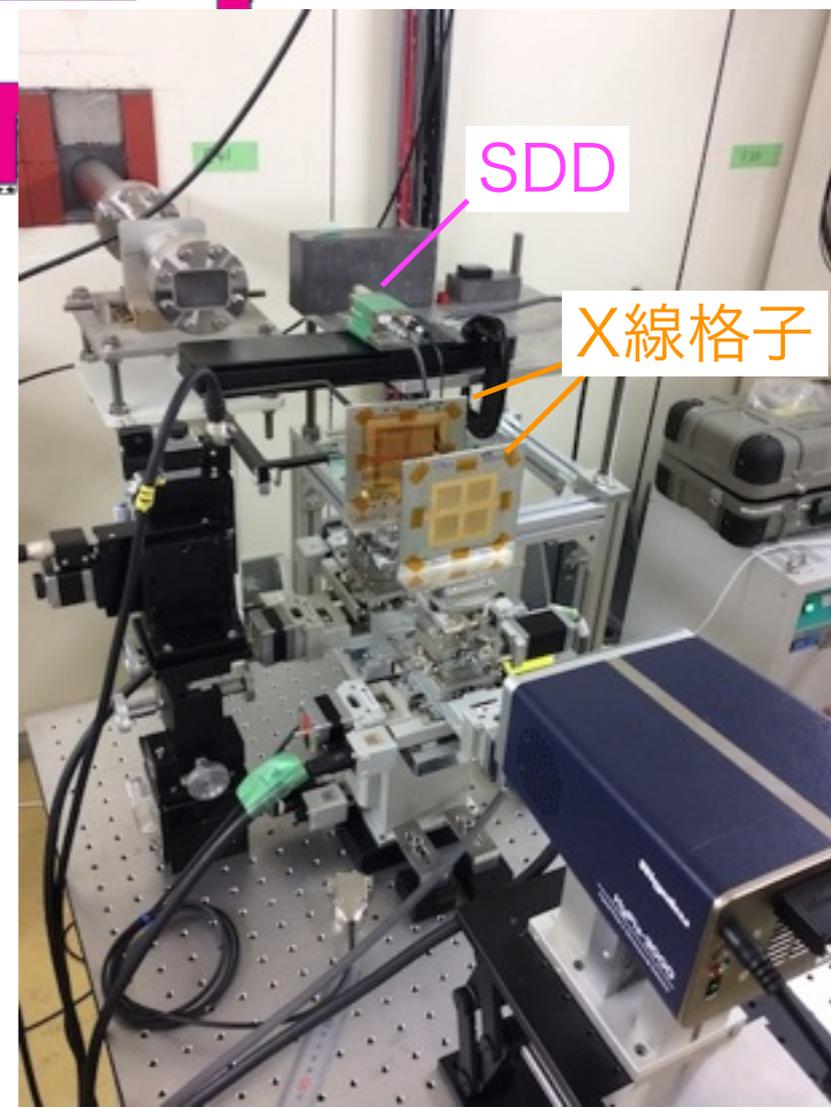
2016年3月のLCS実験概要

- **前回の実験からの変更点**
- 加速器
 - 最大電流 0.1 mA → 1 mA
- レーザー
 - 共振器はずっと真空中で維持
 - 共振器のフィードバックとして逆周回PDH法を導入、安定化を試みた。
- CW 900 μ A運転でX線量を測定
 - レーザー蓄積による共振器の温度上昇で共振器長が伸び、加速器との位相同期ができなくなるという問題があった。
 - タルボ干渉計を用いたイメージング試験を試みた。
 - 時間不足によりビジビリティの評価まで至らず終了

セットアップ

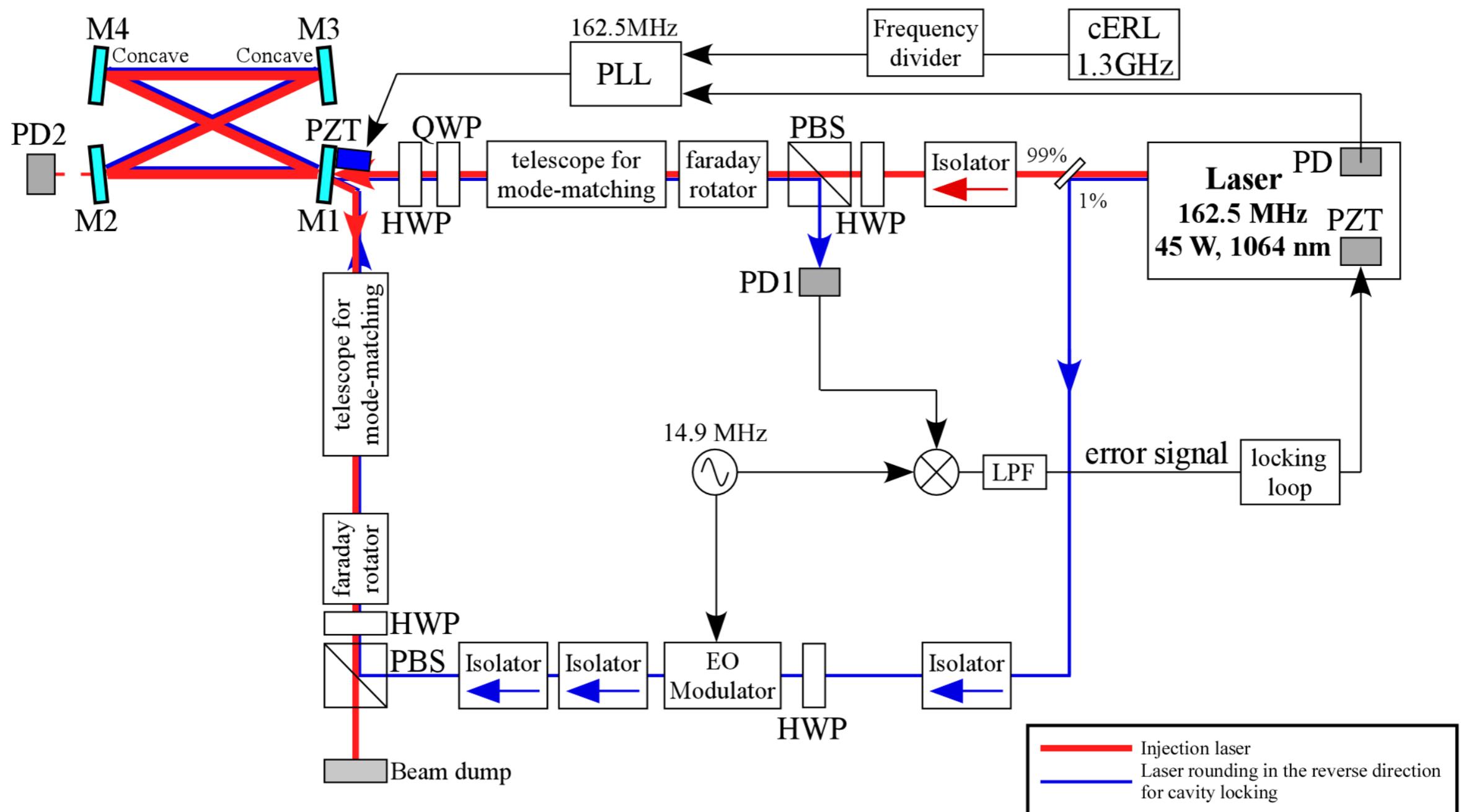


シリコンドリフト検出器 (SDD) で光量を評価する。
SDDの下流にタルボ干渉計を設置した。

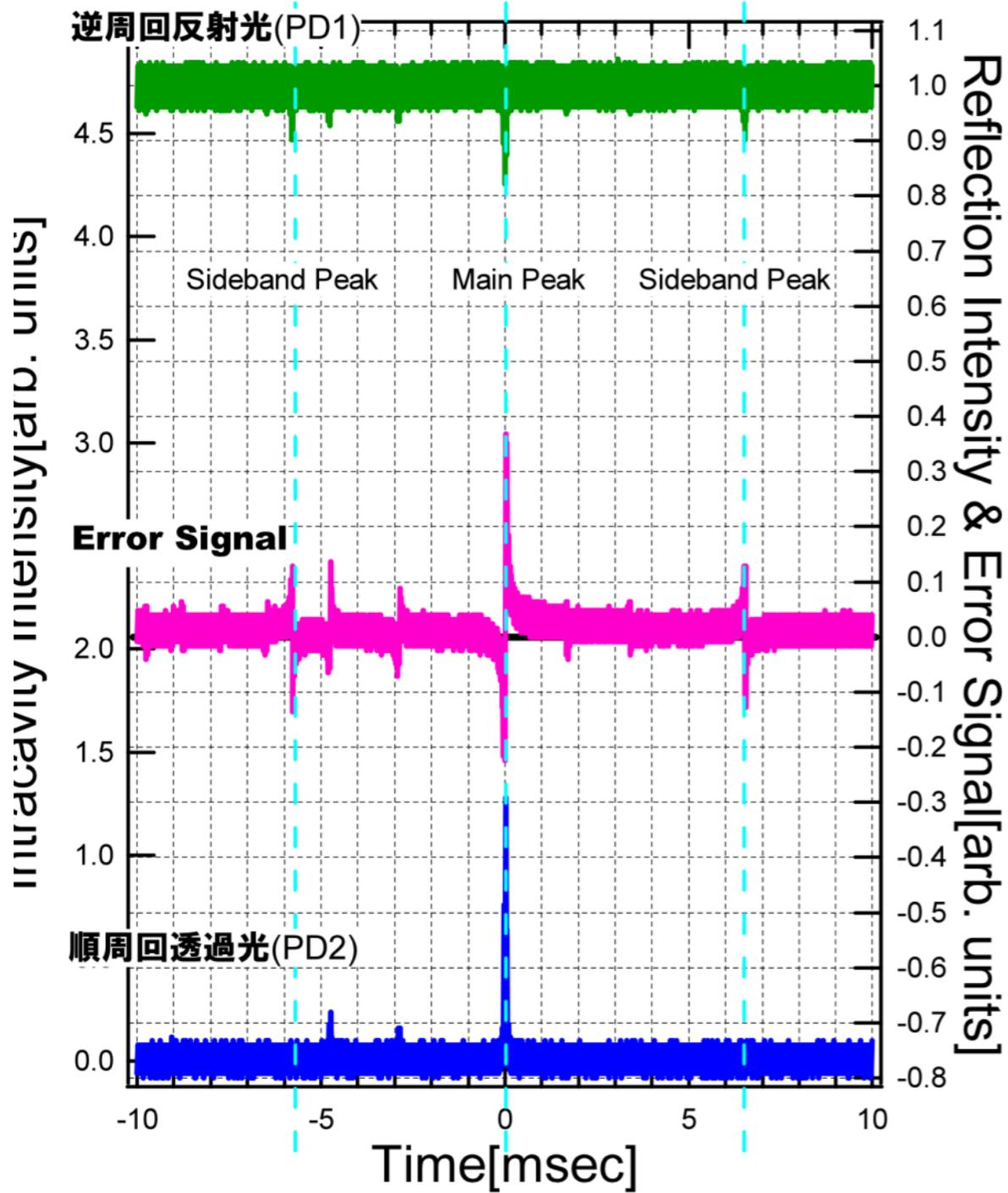


逆周回PDH法のセットアップ

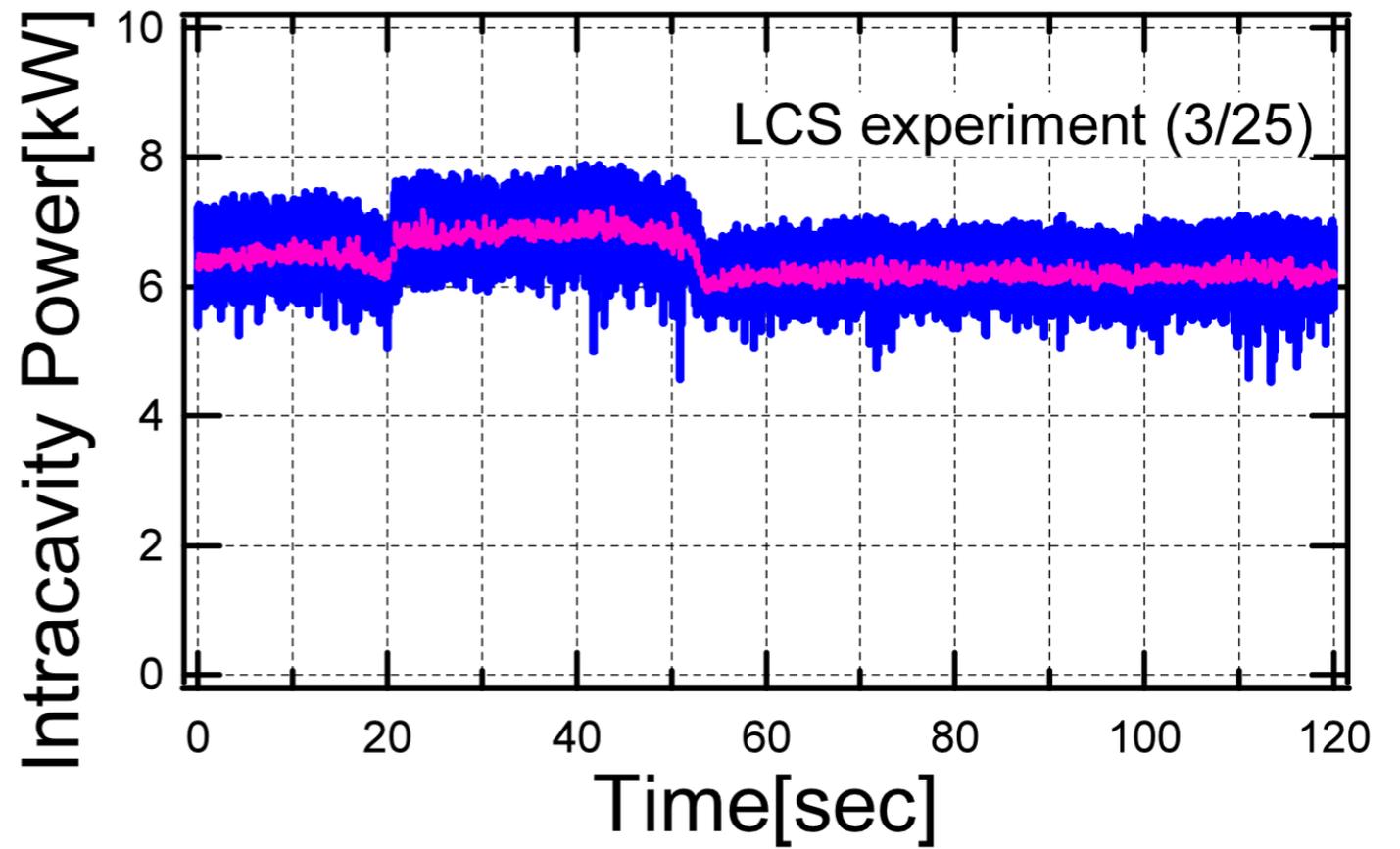
- 入射光にEOMで位相変調（ここでは15 MHz）をかけ、共振器の反射光信号をその変調周波数で復調してやると共振周波数でzero-crossの信号を得ることができる。
- 45Wの入射光をそのままEOMに通すことはできないので、入射光の一部を取り出して位相変調をかけ共振器を逆向きに周回するように入射している。



レーザー蓄積状況



- これまでの方法と同等の安定度でレーザー蓄積を確認
- 蓄積強度は以前の実験時よりも下がってしまったがフィードバックの方法が原因ではない。



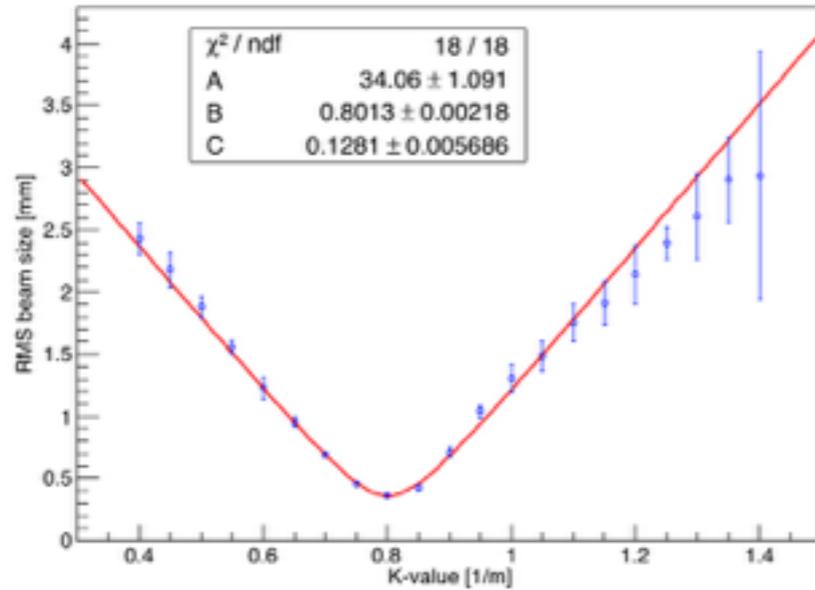
エミッタンス測定値 (3/25測定)

2015年3月の
エミッタンスはH,Vともに
0.3 μm 程度

QMAM01-cam13

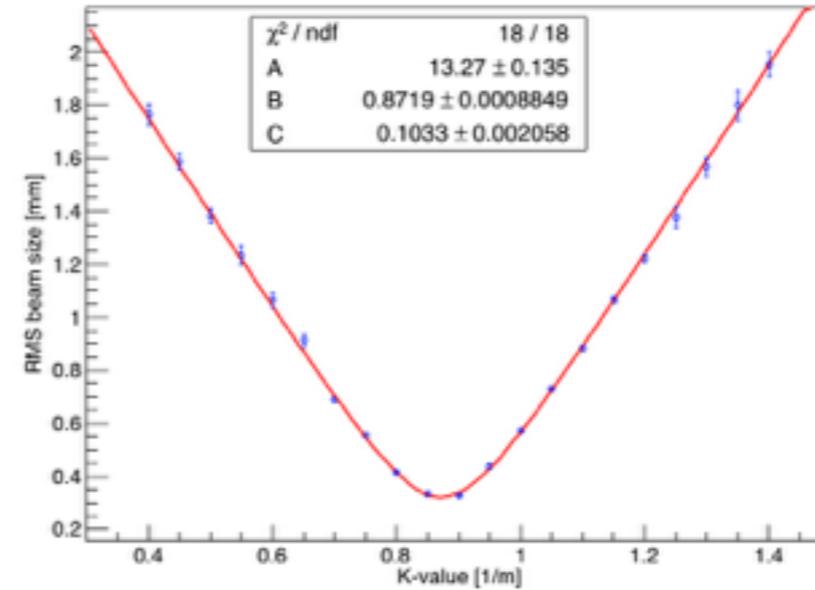
Horizontal

$$\varepsilon_{nx} = 2.23 \pm 0.06 \text{ mm mrad}$$



Vertical

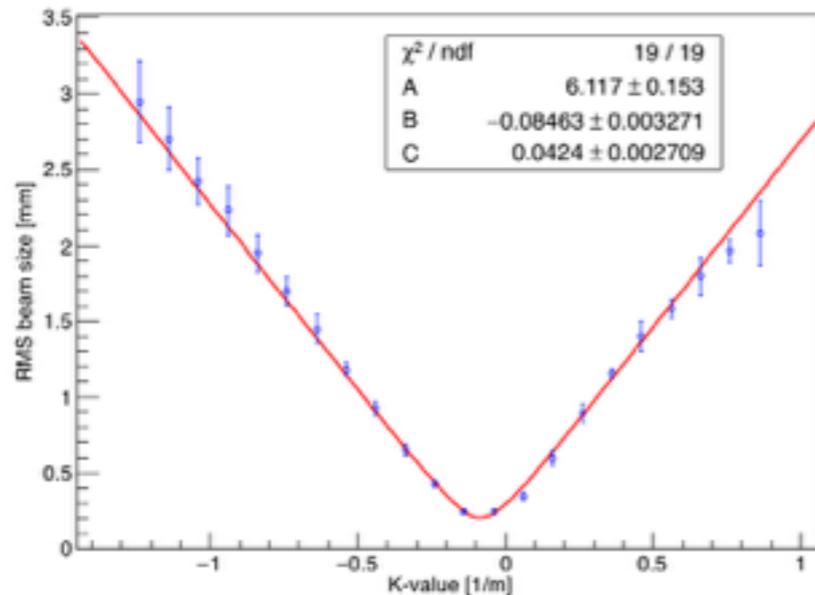
$$\varepsilon_{ny} = 1.25 \pm 0.01 \text{ mm mrad}$$



QMIM03-cam18

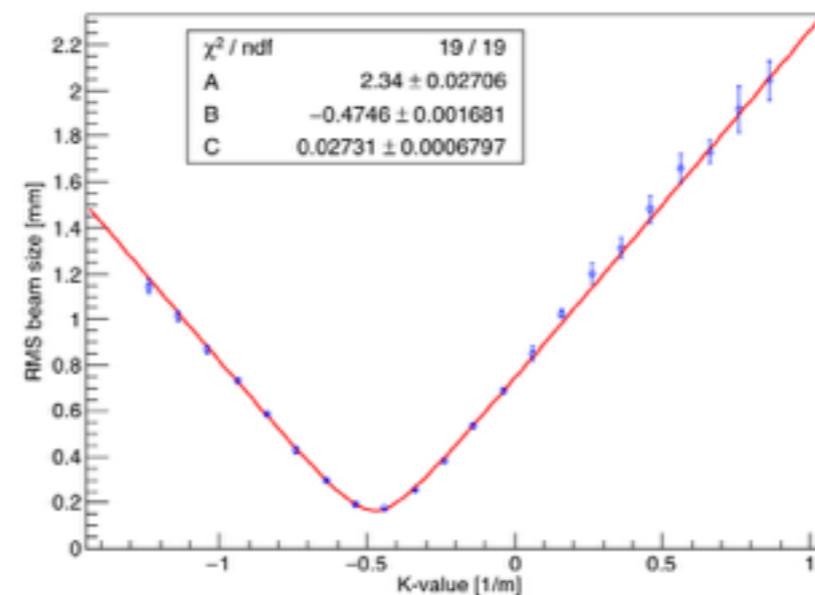
Horizontal

$$\varepsilon_{nx} = 2.52 \pm 0.09 \text{ mm mrad}$$



Vertical

$$\varepsilon_{ny} = 1.25 \pm 0.02 \text{ mm mrad}$$



IPの電子ビームサイズ見積り

QMLC04-cam23A (L=0.9 m)

エミッタンスを $\varepsilon_{nx}=2.38 \mu\text{m}$ ($\varepsilon_x=60.8 \text{ nm}$)、 $\varepsilon_{ny}=1.25 \mu\text{m}$ ($\varepsilon_{ny}=32.0 \text{ nm}$)
として、傾きからサイズを見積もる

$$\sigma_0 = \frac{L^2 \varepsilon}{a}$$

Horizontal

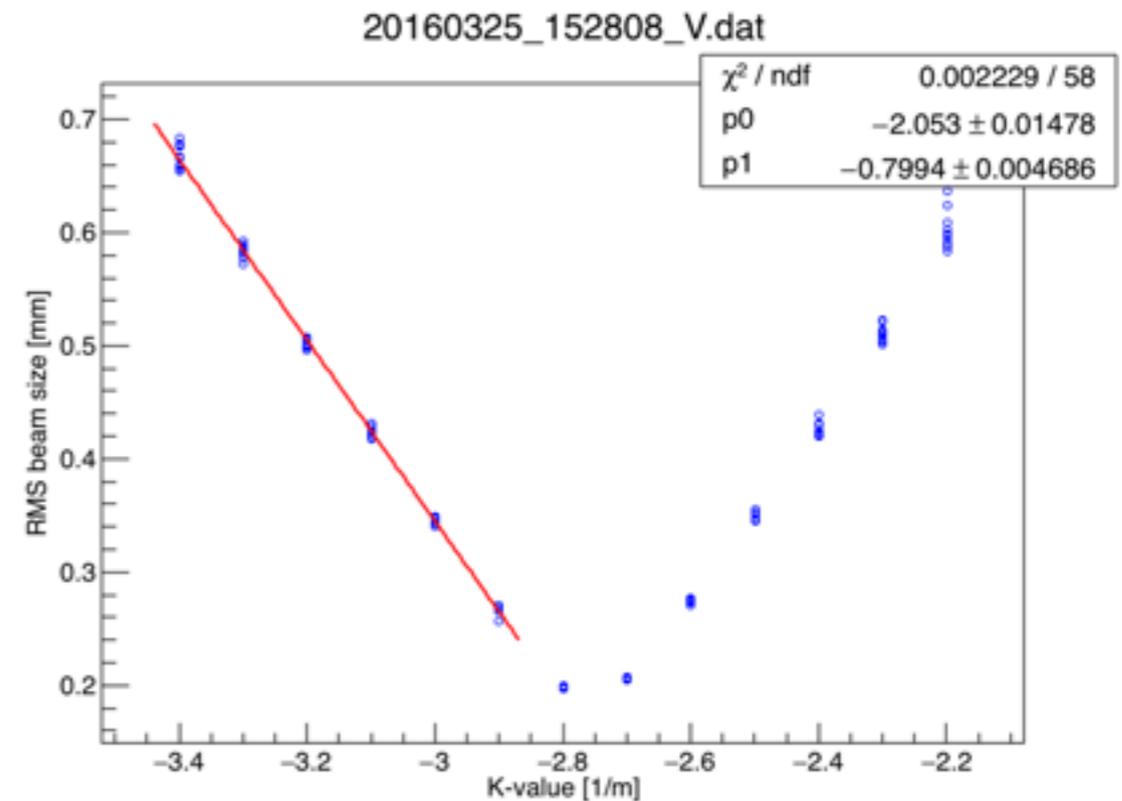
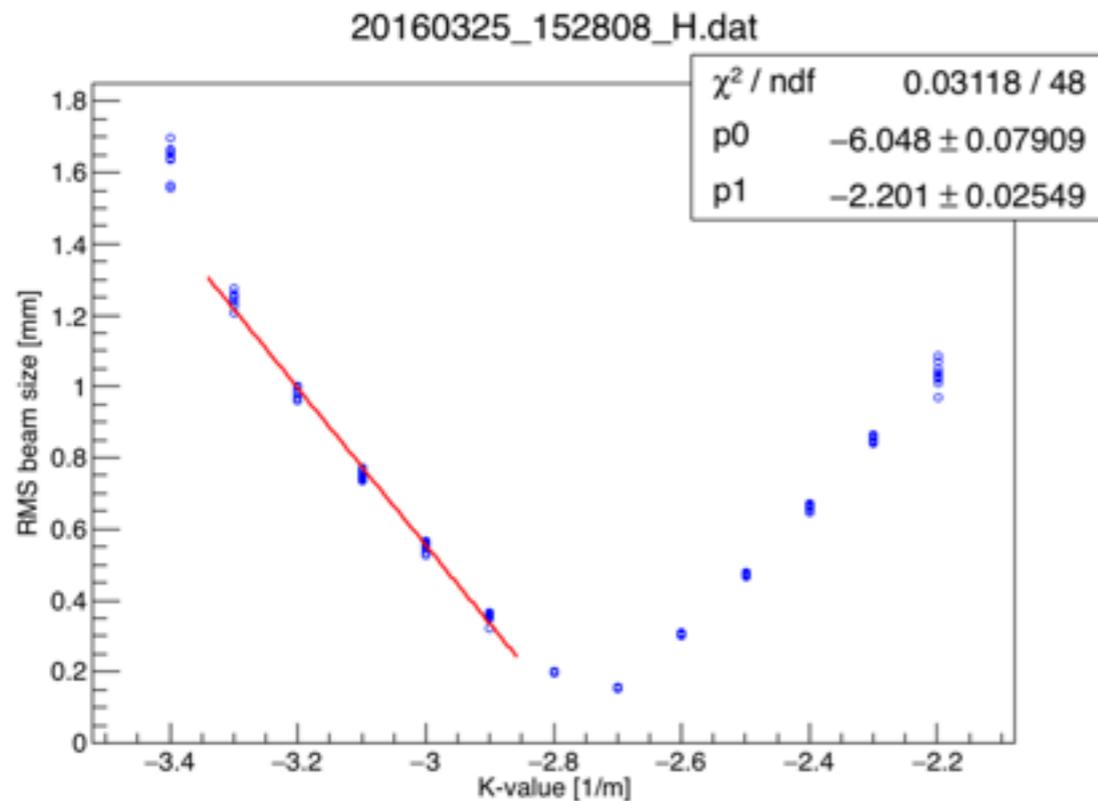
傾き $a_x : (2.2 \pm 0.3) \times 10^{-3} \text{ m}^2$

$\sigma_x : 22 \pm 3 \mu\text{m}$

Vertical

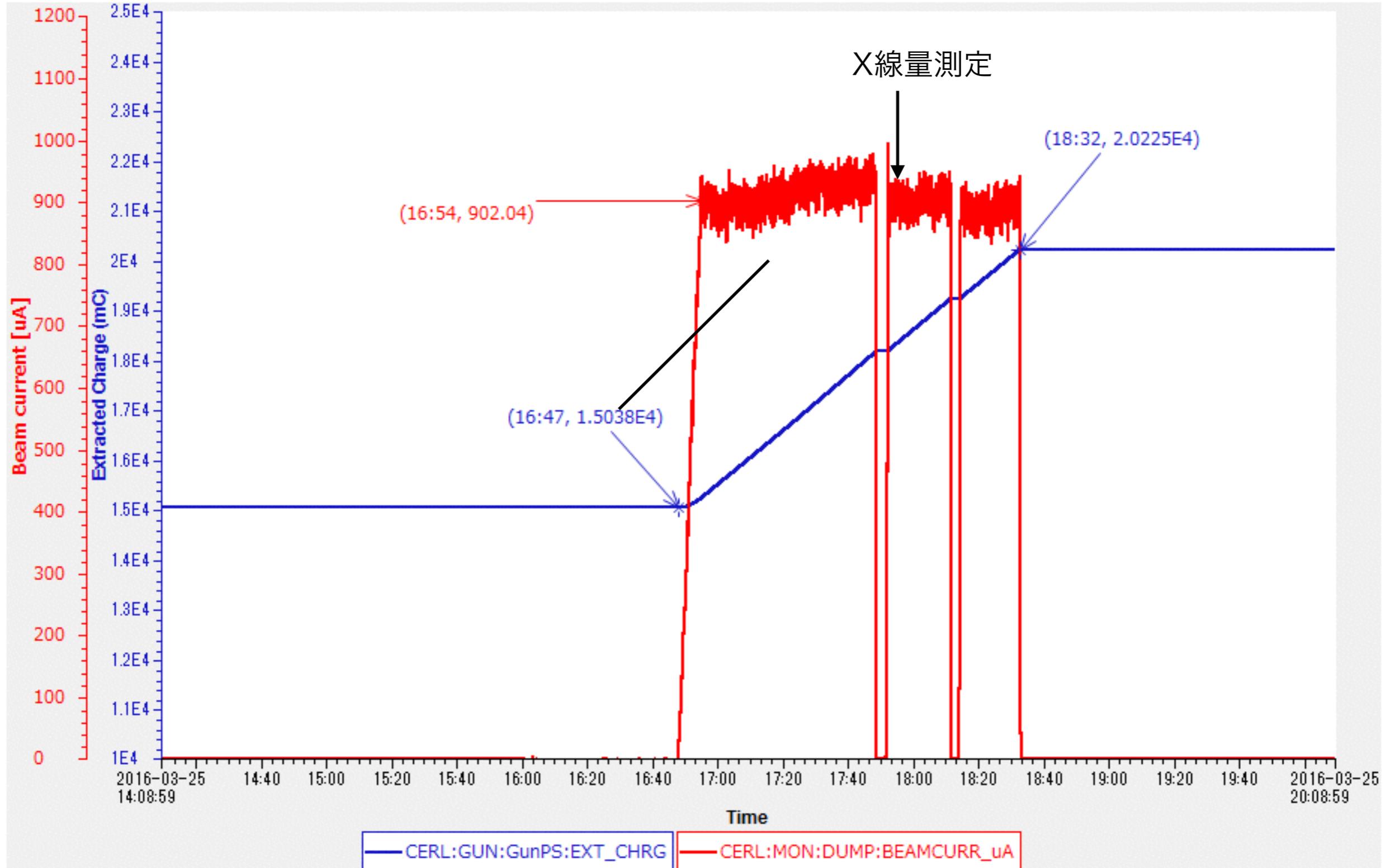
傾き $a_y : (0.81 \pm 0.01) \times 10^{-3} \text{ m}^2$

$\sigma_y : 32 \pm 1 \mu\text{m}$



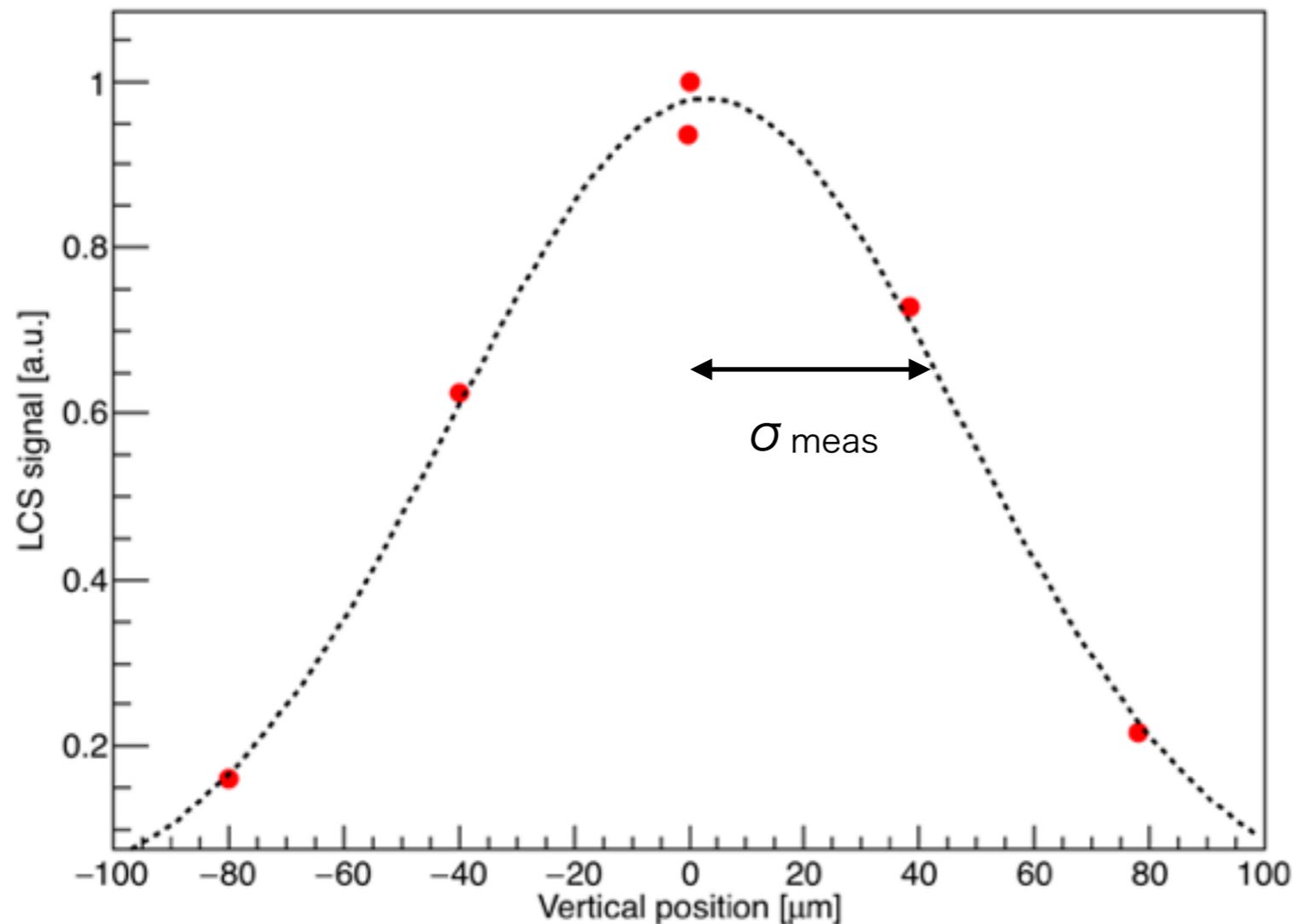
ビーム電流

バンチ電荷約5.5pC



位置scanの測定結果

レーザーの位相はロックせずにムーバーを垂直方向に動かしてLCS信号量の変化を確認



fitの結果

$$\sigma_{\text{meas}} = 44 \mu\text{m}$$

レーザーのスポットサイズ

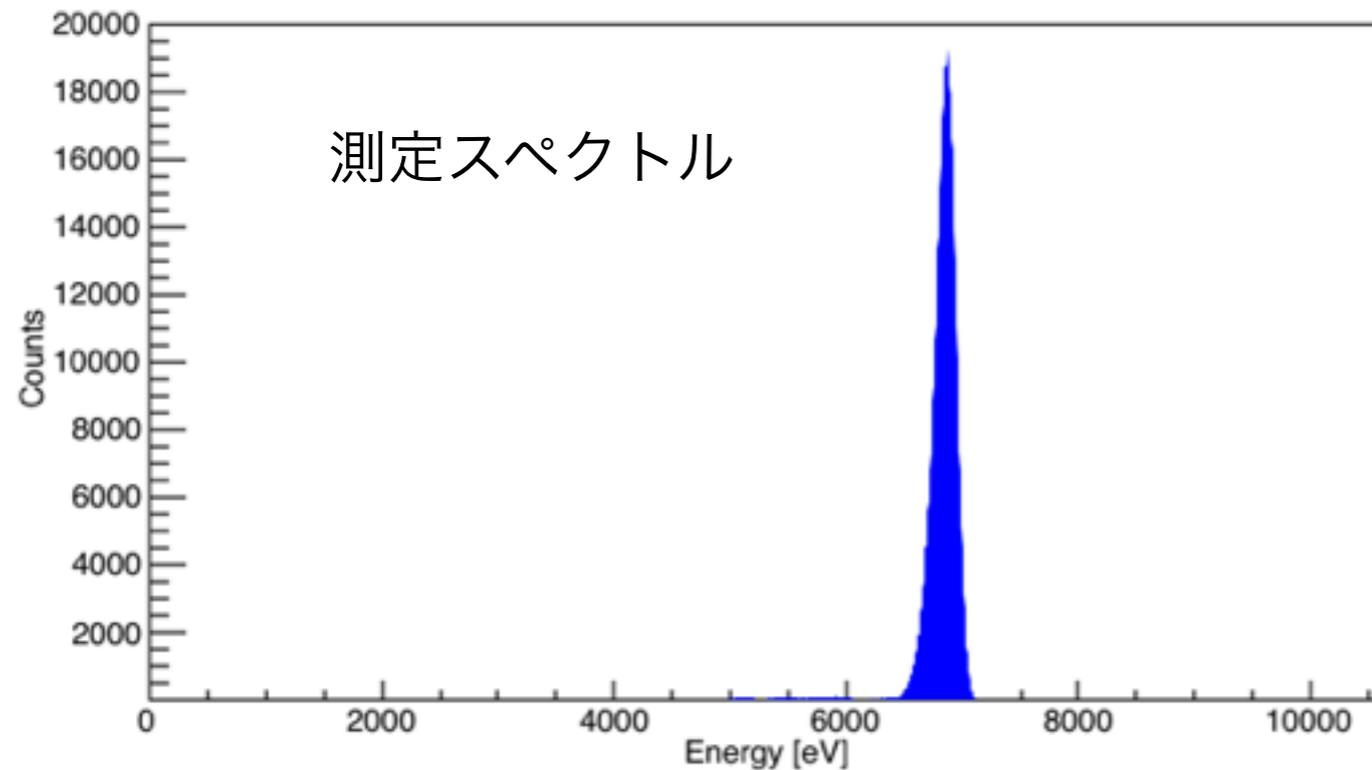
$$\sigma_y = 32 \mu\text{m}$$

$$\text{Sqrt}(44^2 - 32^2) = 30$$

推定電子ビームサイズは32 μm

なので概ね一致

SDDで取得したX線のスペクトル (3/25測定)



ピークエネルギー 6.87 keV
エネルギー幅 (FWHM) 210 eV

LCS-X線量

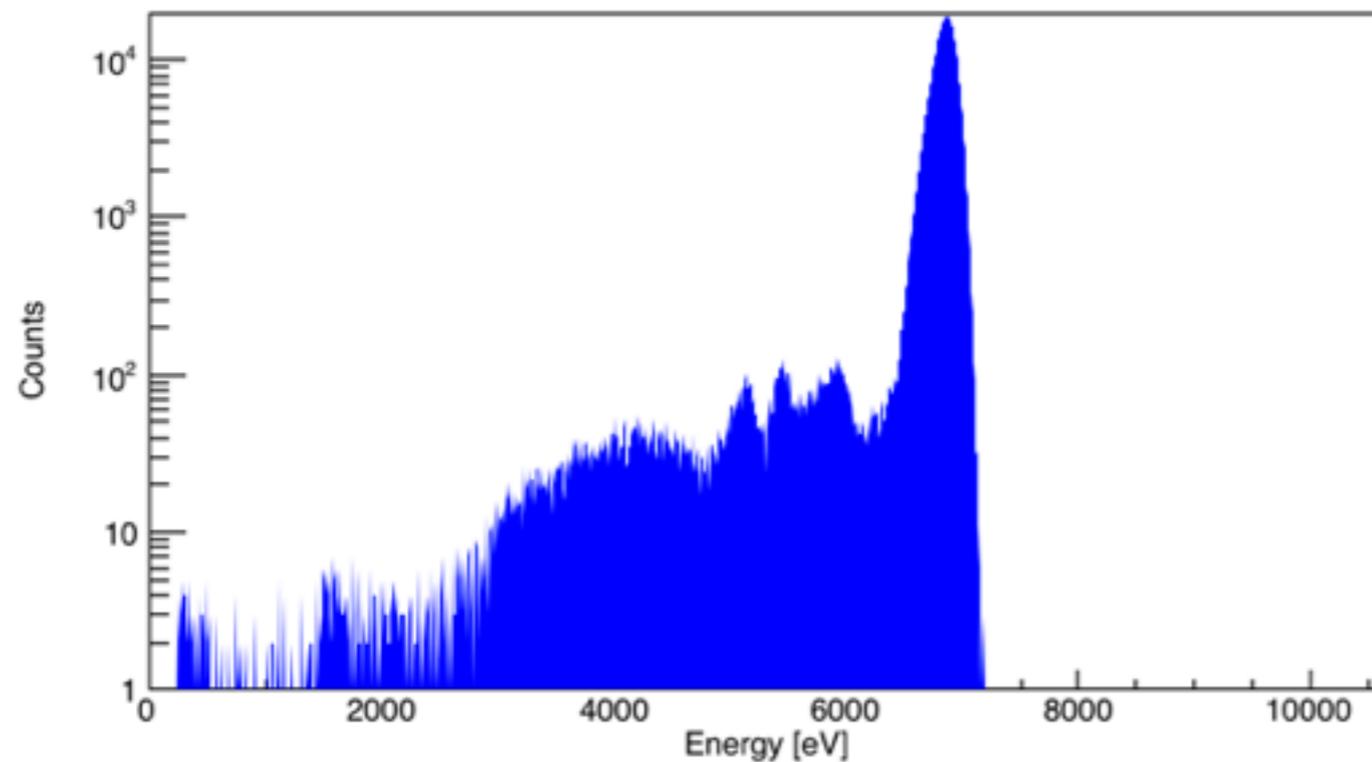
ピーク付近のカウント数を測定時間
(108.15秒) で割って

8558.09 cps

2015/4/3のデータと比較すると

1367.39 cps → 8558.09 cps

約6倍

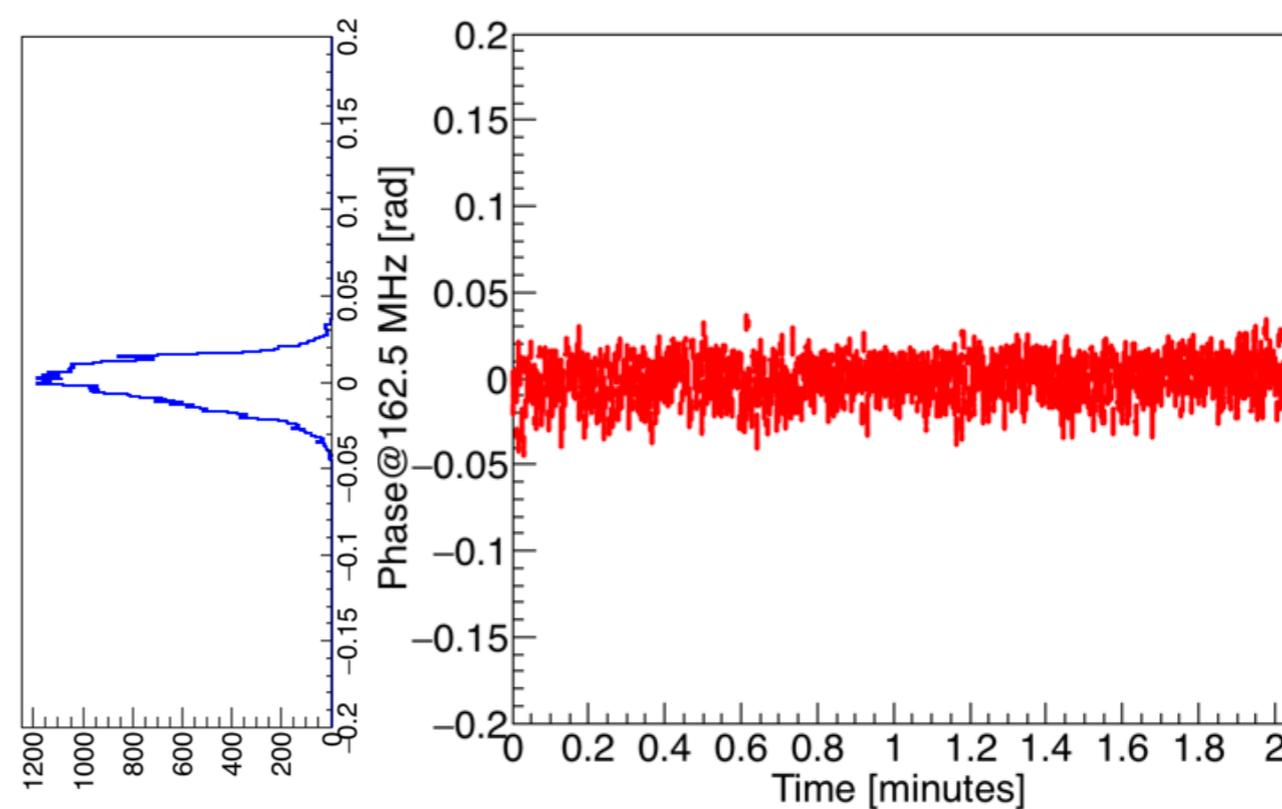
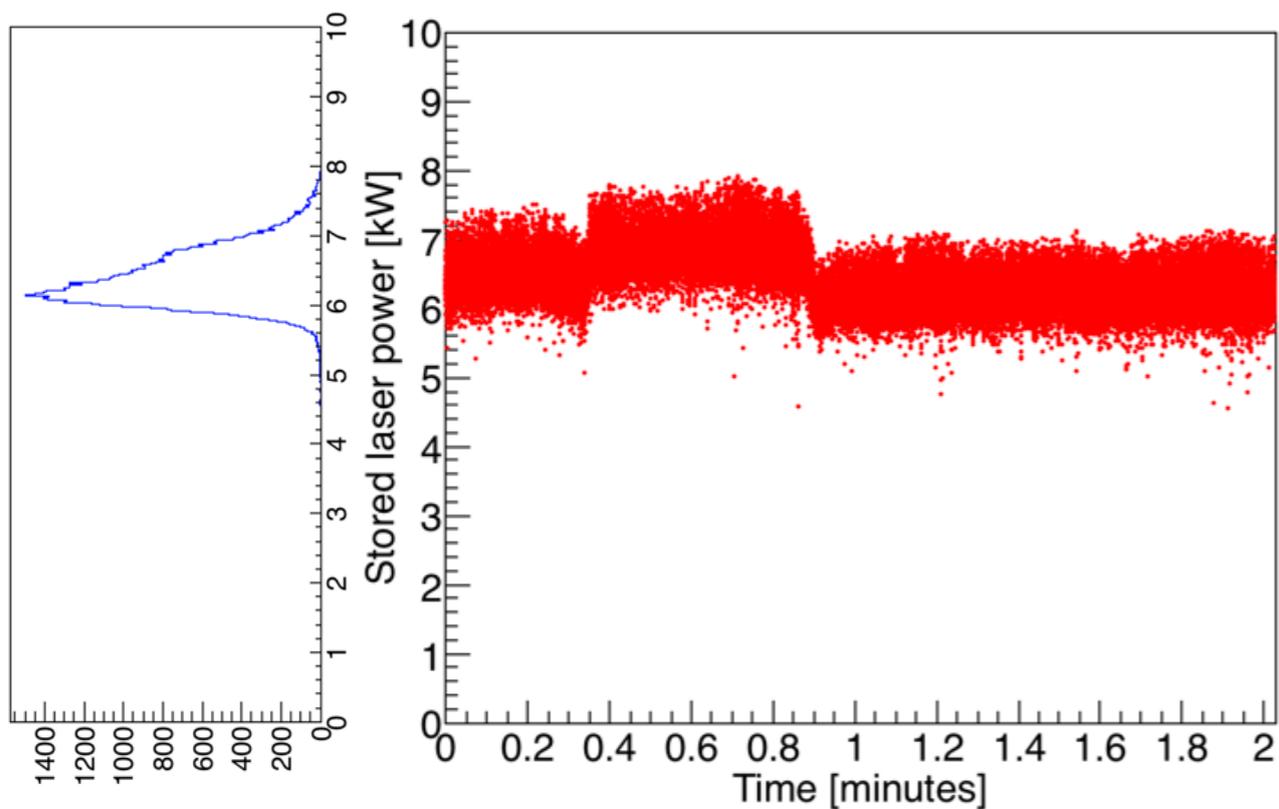


レーザー蓄積の状況

SDDのデータを取得した2分間のデータ

強度

位相



平均強度 6.4 kW

RMS 0.0115 rad
=11.3 ps

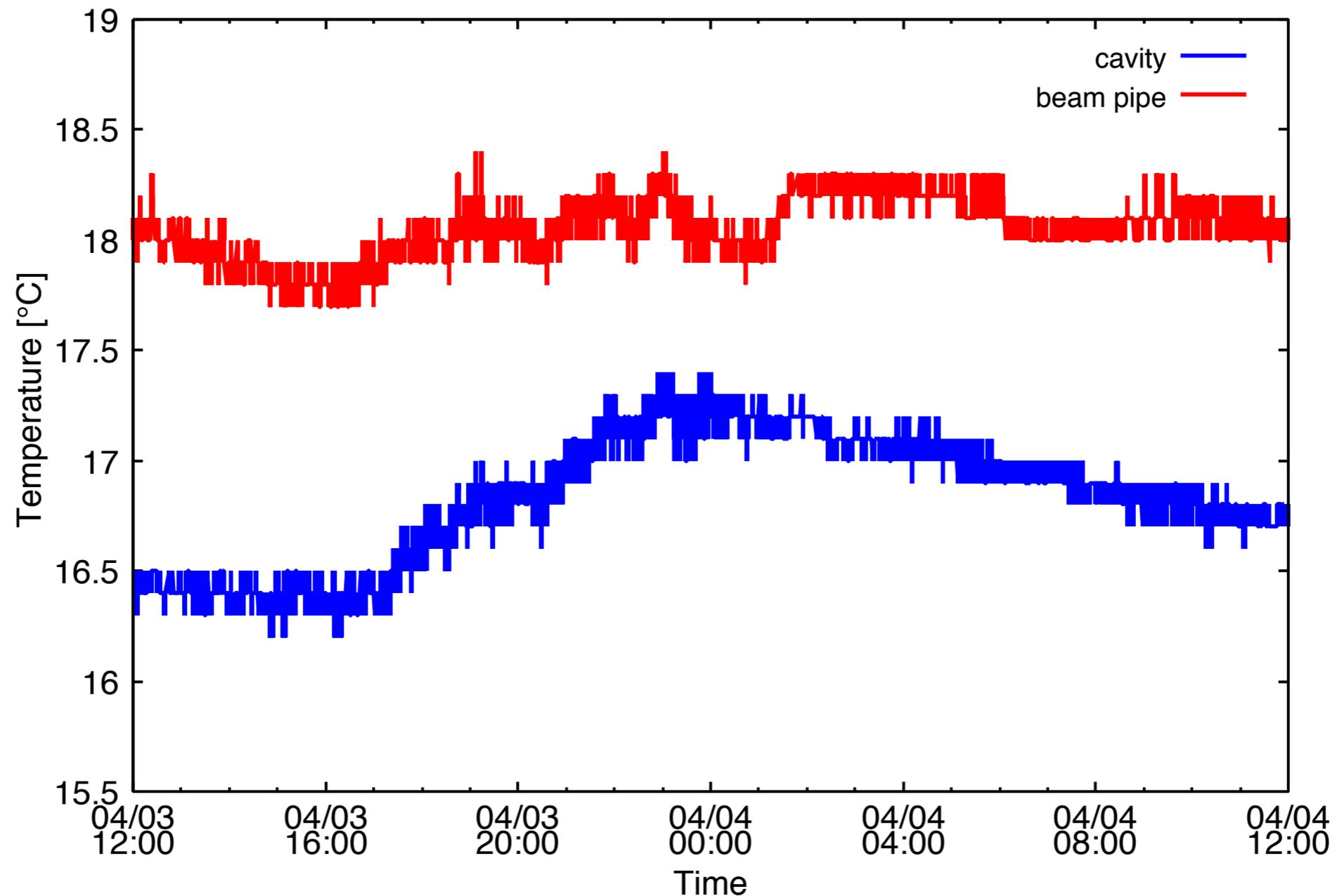
今回の達成状況まとめ

- 電流値900 μA
 - バンチ電荷5.5 pC
 - 規格化エミッタンス
 - 実験当日に周回部の2ヶ所で測定
 - QMAM01-cam13 $en_x=2.23\pm0.06$ mm.mrad、 $en_y=1.25\pm0.01$ mm.mrad
 - QMIM03-cam18 $en_x=2.52\pm0.09$ mm.mrad、 $en_y=1.25\pm0.02$ mm.mrad
 - IPでの推定電子ビームサイズ (σ)
 - $\sigma_x=22\pm3$ μm 、 $\sigma_y=32\pm1$ μm
 - SDDでデータを取得した2分間の平均レーザー強度
 - 6.4 kW
 - LCS-X線量
 - 実験室のSDDで8558.09 cps (Φ 4.66mmのコリメータ、取り込み角度 0.14 mrad)
 - 2015/4月と比較して約6倍
 - 衝突点で 2.1×10^8 photons/sec相当
 - CAINで計算した予想X線量
 - 衝突点で 1.06×10^9 photons/sec
- レーザーのパルス長を10ps(rms)として計算すると
- 6.26×10^8 photons/sec

共振器の熱問題

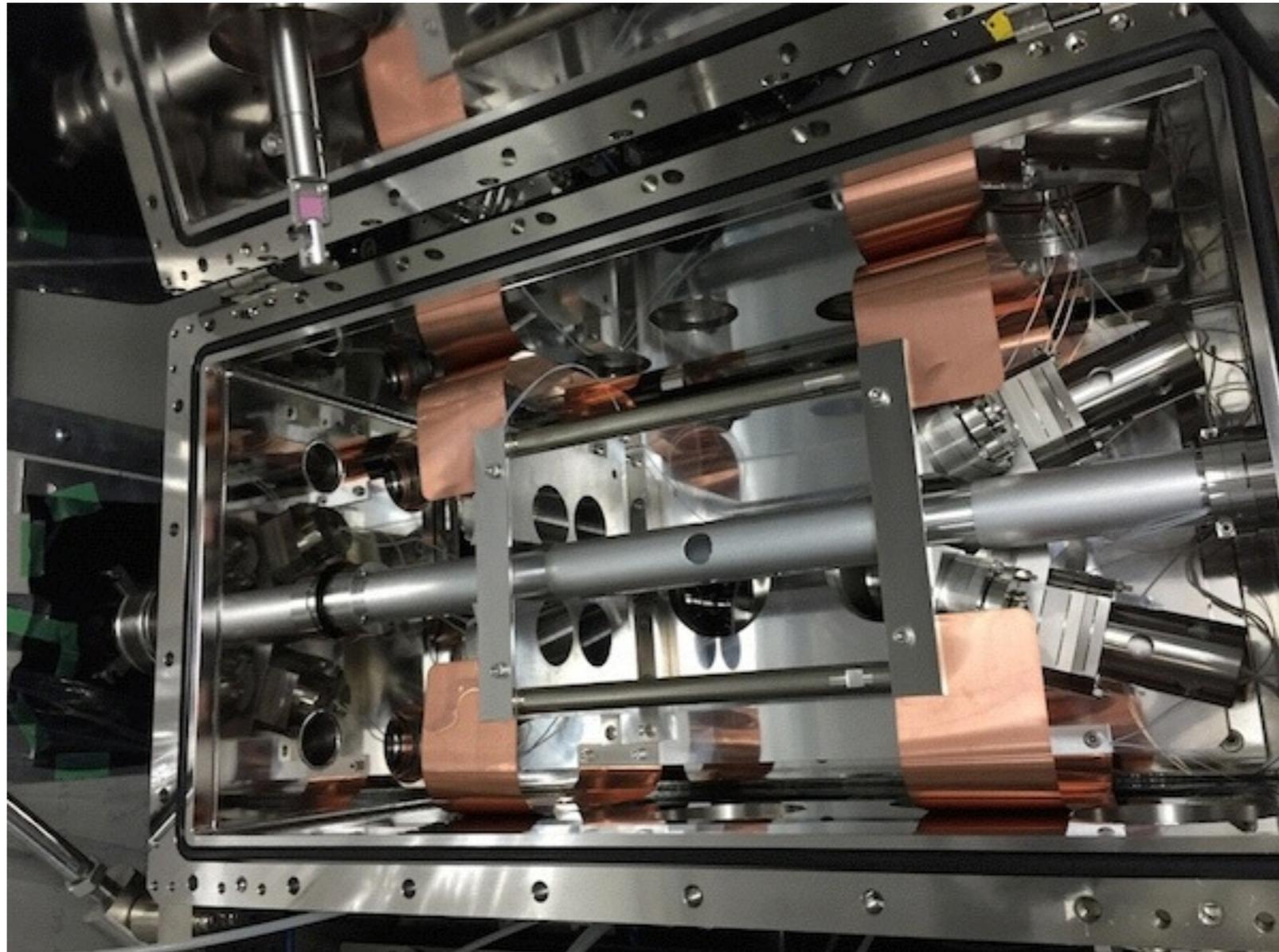
共振器の温度上昇

- 2015年4月のLCS実験時、レーザー蓄積による共振器の温度上昇が見られた
 - 7時間で約1°Cの温度上昇があった。
 - 温度上昇による共振器長の変化も起きている
- レーザーoffの後も温度低下は非常にゆっくりで一晩では元の温度まで下がりきらない。



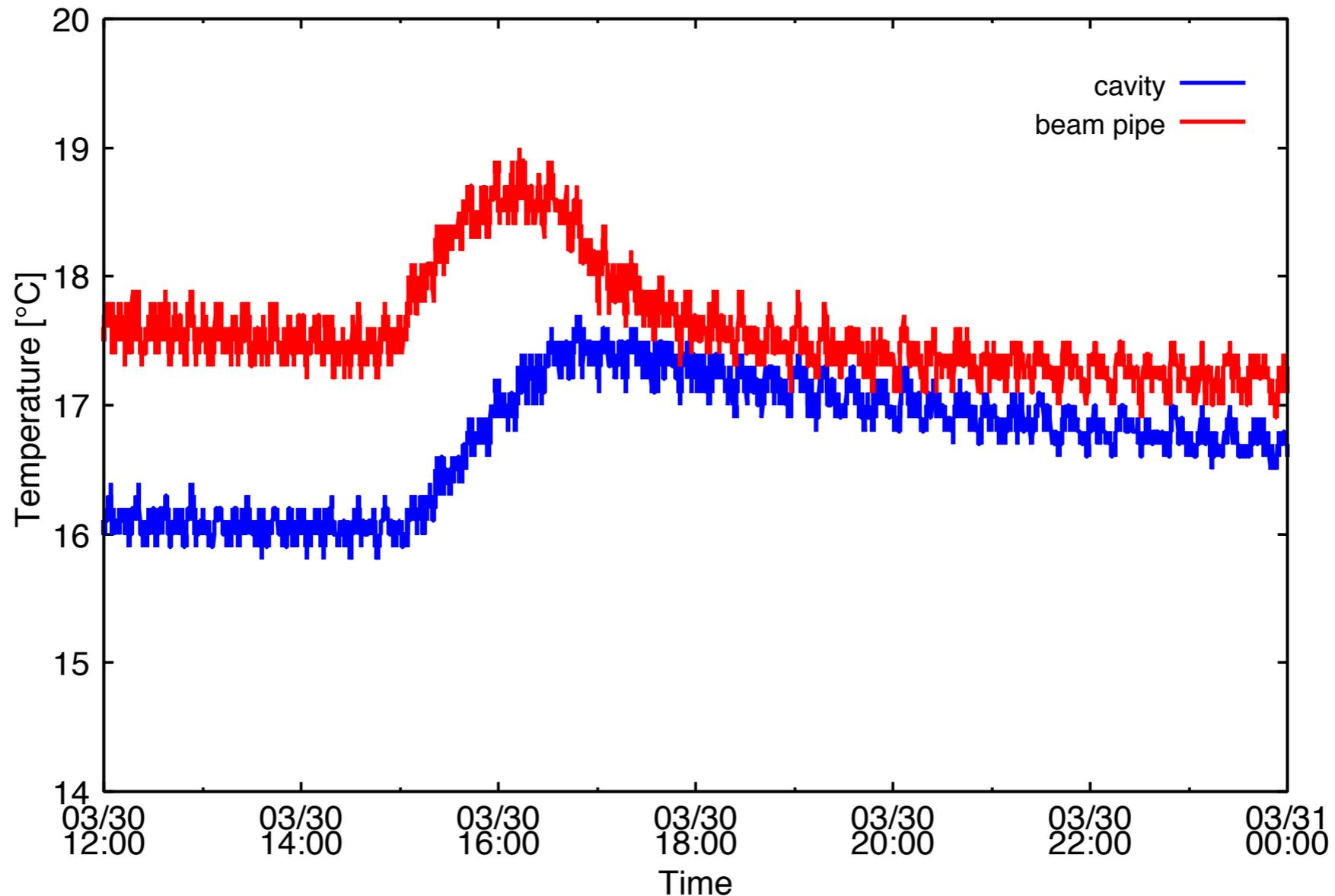
対策

- ・ 共振器の温度は真空チェンバーの天井と底板の外側から水冷銅板調整しているが共振器はベース板に3点でしか接していないため効率が良くない。
そこで、共振器の冷却効率を良くするためサーマルアンカーを設置した。
- ・ サーマルアンカーは厚さ0.1mmの銅板で、共振器とベース板に固定した。



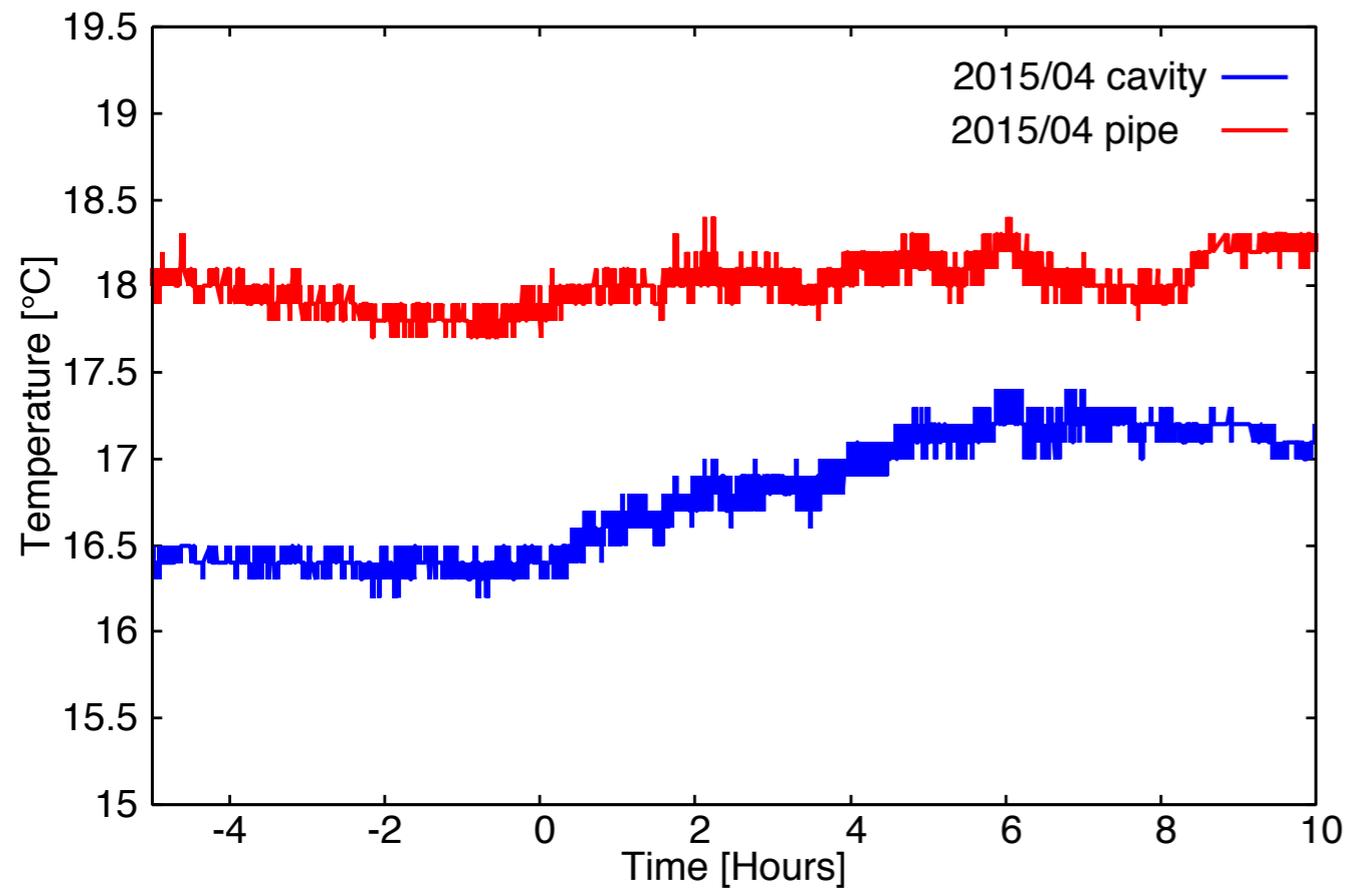
2016年3月の実験

- 2016年3月の実験でも共振器の温度上昇がみられた
しかも2時間程度で 1.5°C も温度が上昇、以前より温度が上がりやすくなっている。
 - レーザーの蓄積強度については2015年4月が 10kW 、今回が 6kW のためむしろ低い。
- レーザー蓄積強度を今よりももっと上げていく必要があり、対策が不可欠である。



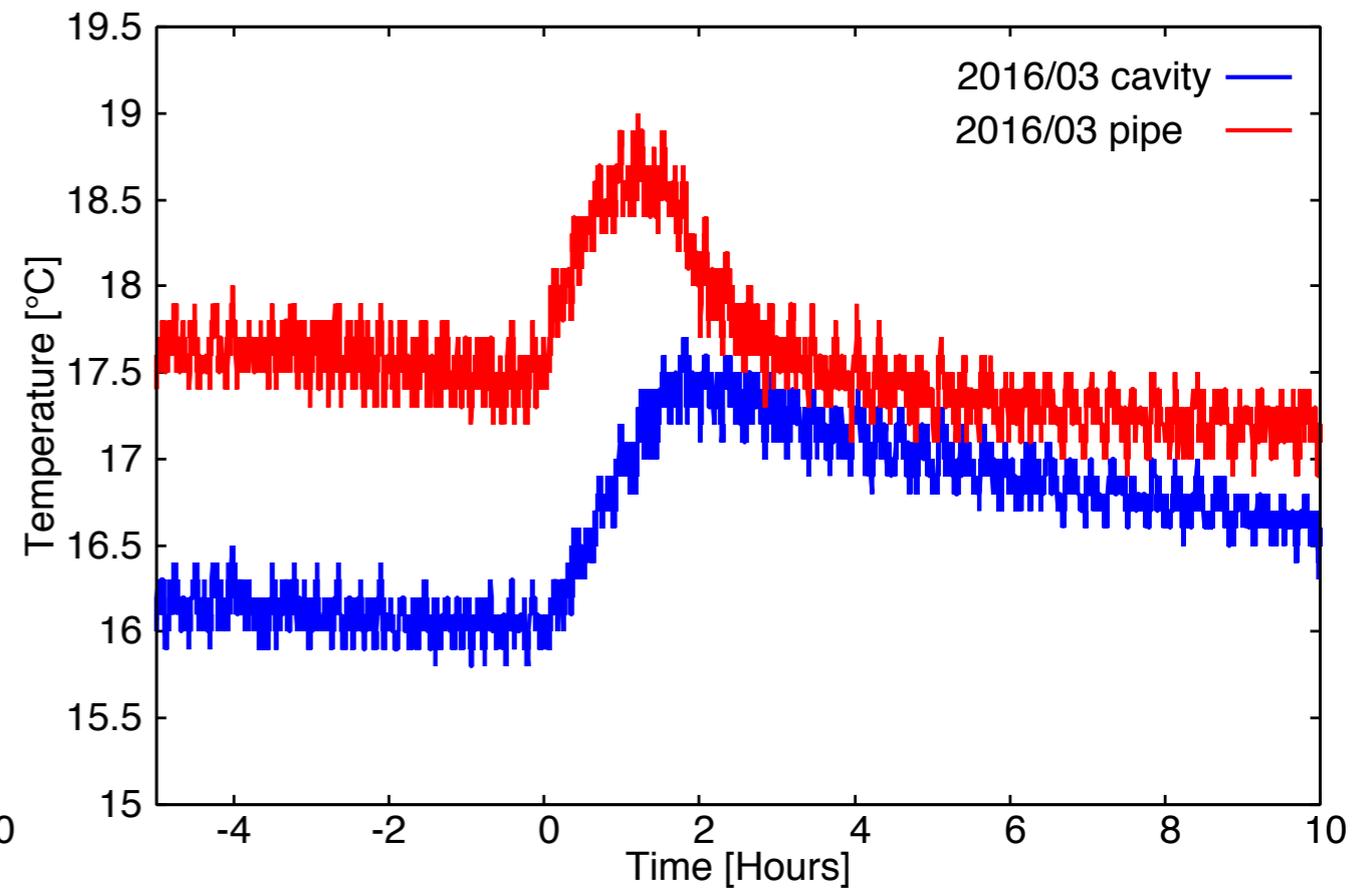
2015年4月と2016年3月のLCS実験時の共振器の温度変化比較

2015/04/03



Stored power 10.8 kW
Stored time 6.3 hours

2016/03/30



Stored power 6.2 kW
Stored time 1.8 hours

共振器長の変化

共振器の繰り返し周波数：162.5 MHz

共振器の周長：1.845 m

$\Delta f = -1$ kHzは周長の+11.35 μm に相当する。

共振器のロングピエゾで調整できる共振器長は周長で約30 μm

周波数でいうと162.5 MHzに対して2.64 kHz相当

測定値から、共振器の温度が1°C上昇すると周波数は約-2 kHz

周長にして+22.7 μm 相当変化するということが分かっている。

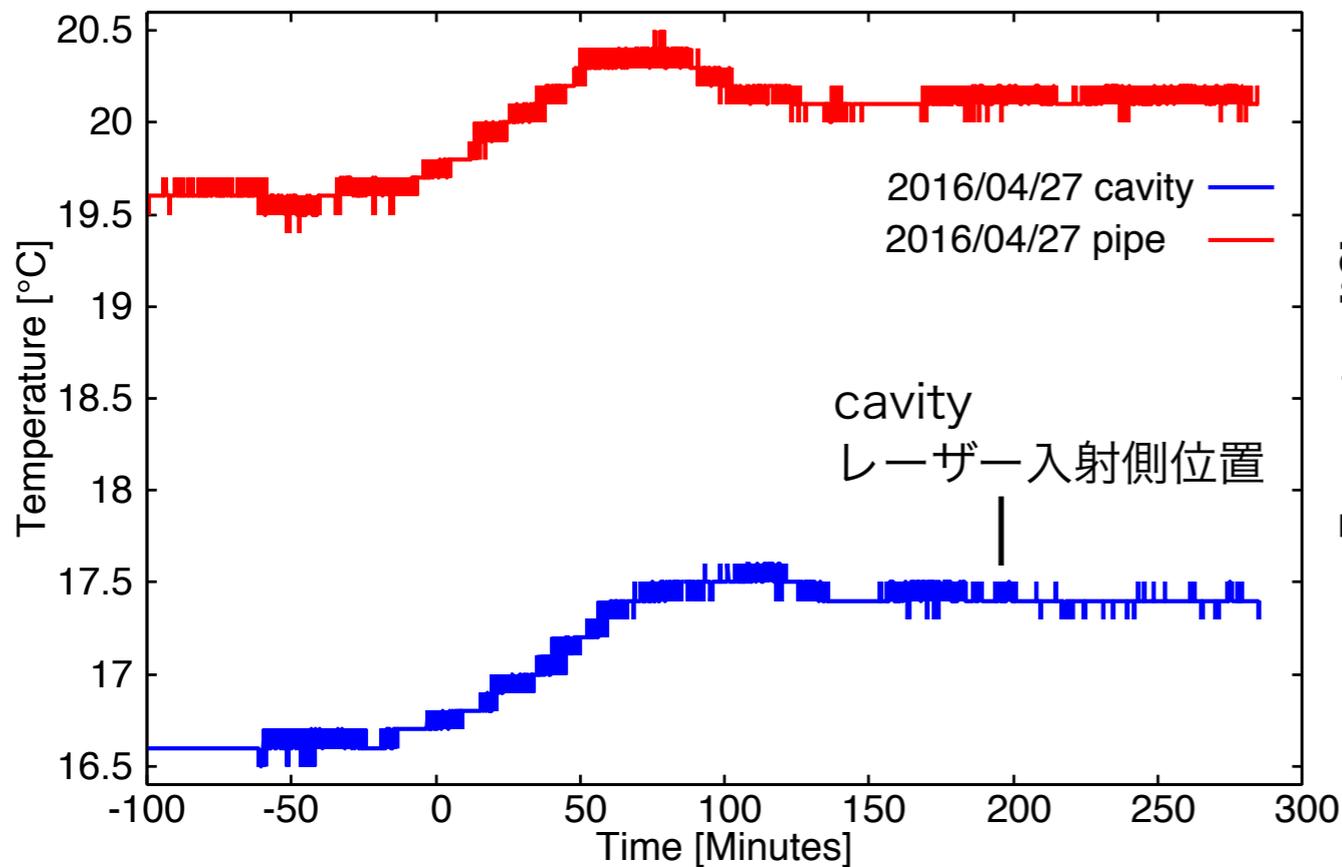
つまり、共振器の温度が約1.3°C上昇すると調整範囲を超えてしまう。

共振器はSUS304製

SUS304の熱膨張係数 $17.3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

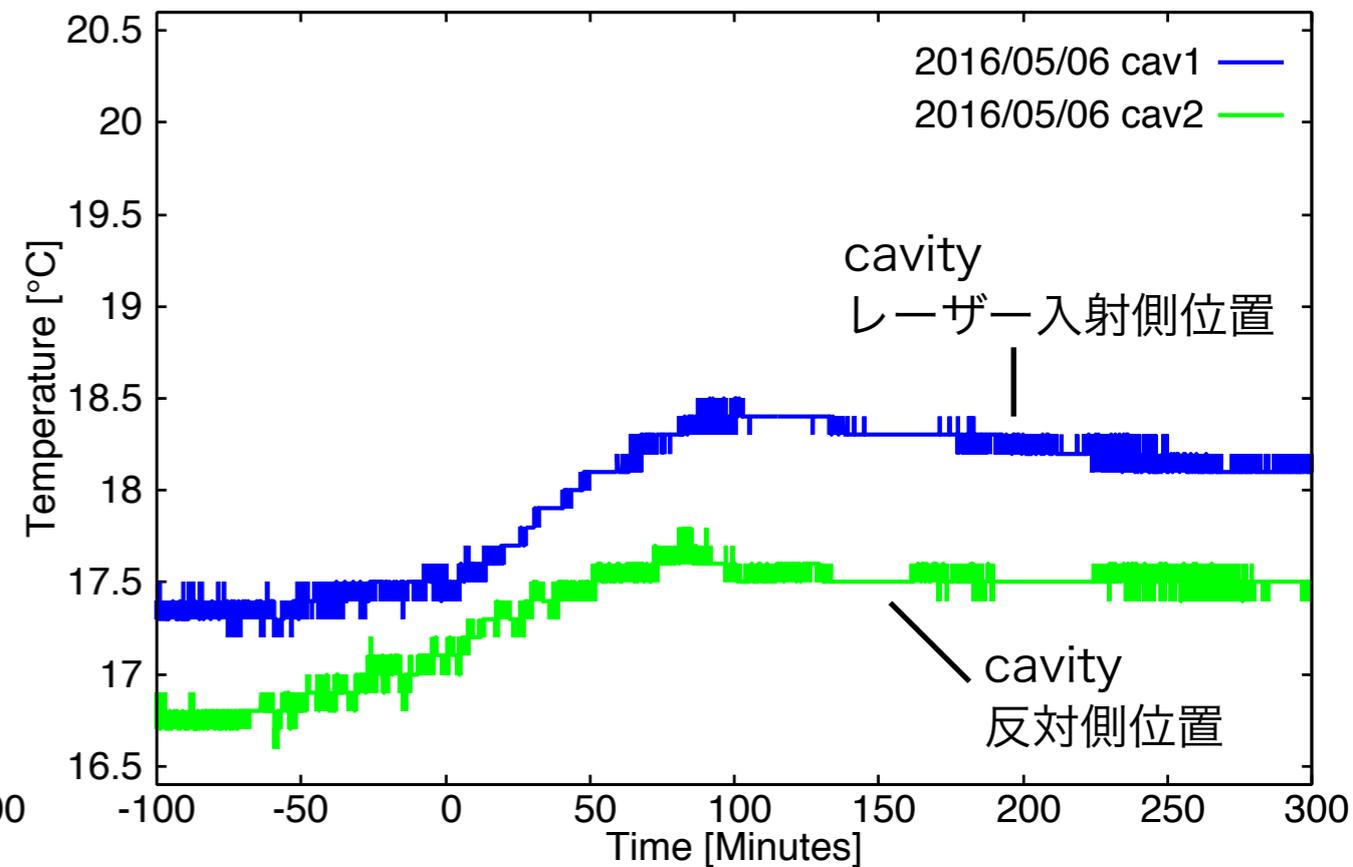
LCS実験後、レーザー蓄積試験を行い共振器の温度上昇が再現することを確認した。
ビームパイプの有無で温度変化に差があるか確認したところ、優位な差は見られなかった。

ビームパイプあり



Stored power 2.8 kW
Stored time 68 Minutes
1時間あたりRep. rateの変化 -1.6 kHz
周長の変化 18 μm

ビームパイプなし



Stored power 3.3 kW
Stored time 83 minutes
1時間あたりRep. rateの変化 -1.9 kHz
周長の変化 20 μm

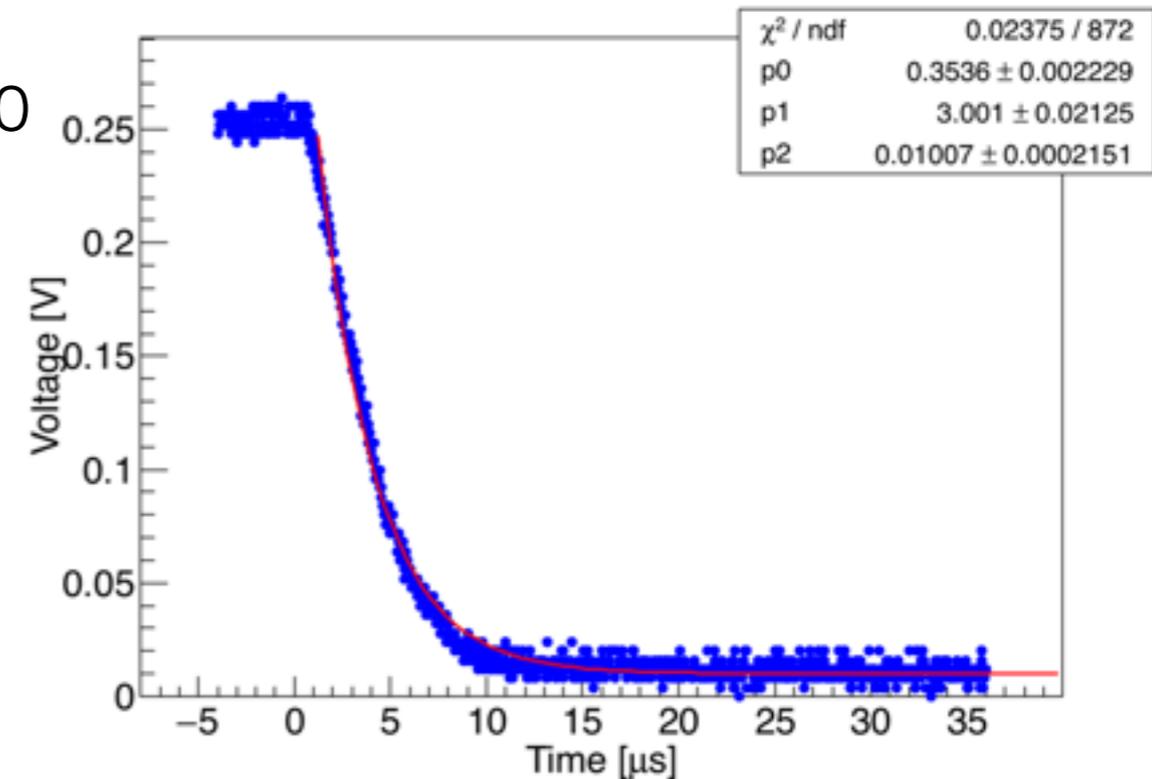
フィネス測定

- 蓄積強度の減衰時間を測定しフィネスを評価した
- 共振器ミラーの反射率から期待されるフィネスは5600
このとき減衰時間は5.5 μs

$$F = \frac{2\pi c\tau}{L}$$

F: フィネス
L: 共振器の周長 1.845 m
c: 光速度

ビームパイプ有り
測定結果例



測定結果は平均3.10 μs 、フィネス3170に相当する。

ビームパイプの有り無しでは優位な差はなかった。

5600との差から共振器一周分の余分なロスを見積もると860 ppmに相当

原因は分からないが共振器ミラーのロス増加の可能性はある。

温度上昇率の増加、蓄積強度の低下とも関係があるか。

今後の予定

- ・ 熱問題

- ・ 共振器の温度分布調査

- ・ 熱電対の追加

- ・ 共振器ミラー調査

- ・ インバーまたはスーパーインバーで共振器を製作

- ・ インバーの熱膨張係数はSUSの1/10

- ・ 蓄積強度向上

レーザー発振器のピエゾを使うフィードバックでは応答速度に限界があるので、それに加えEOMを使って光に変調をかけることでより高速なフィードバックを行うことを検討