



# SACLA光ファイバ光路長制御システムの 設計と性能

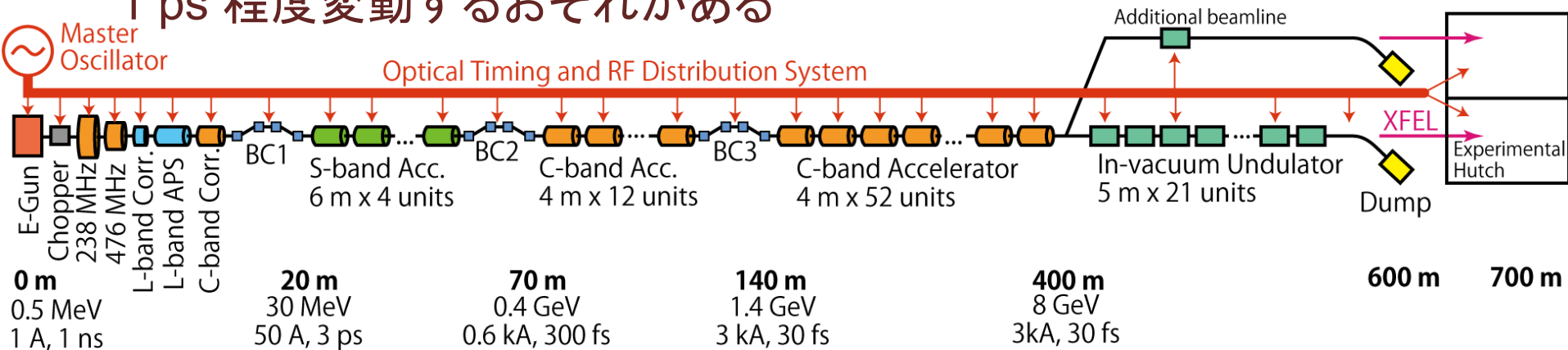
## Design and Performance of Optical Fiber Length Stabilization System for SACLA

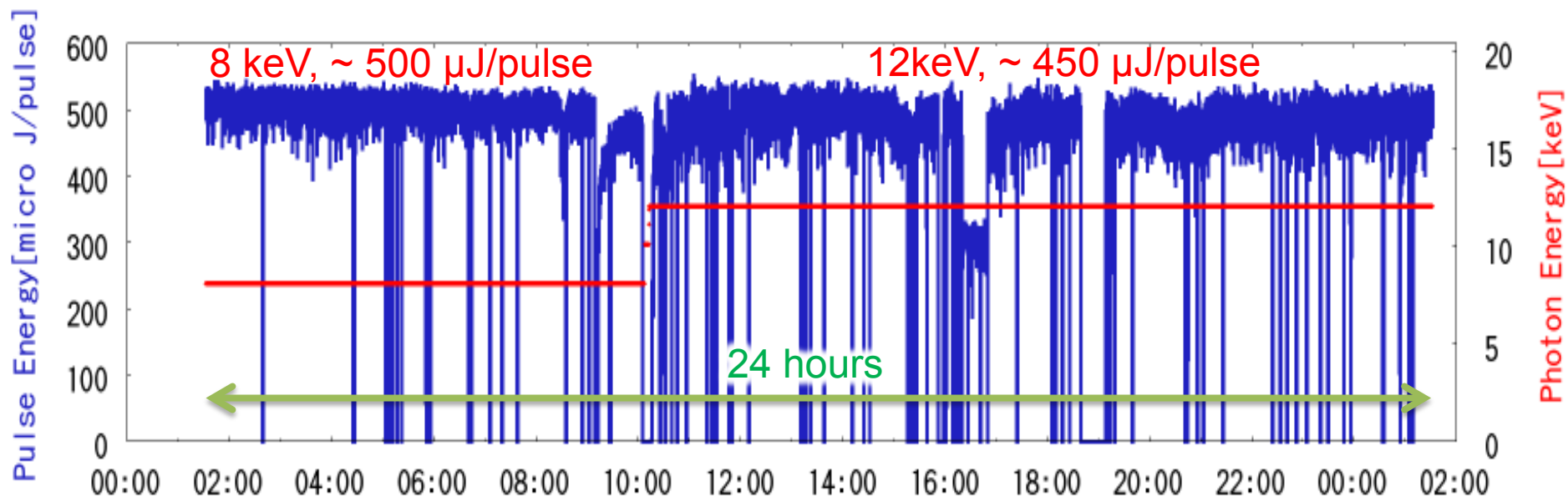
前坂 比呂和<sup>A)</sup>, 大島隆<sup>A)</sup>, 松原伸一<sup>B)</sup>, 大竹雄次<sup>A)</sup>  
A) (独)理化学研究所 放射光科学総合研究センター  
B) (財)高輝度光科学研究センター

平成26年8月9日

第11回日本加速器学会年会

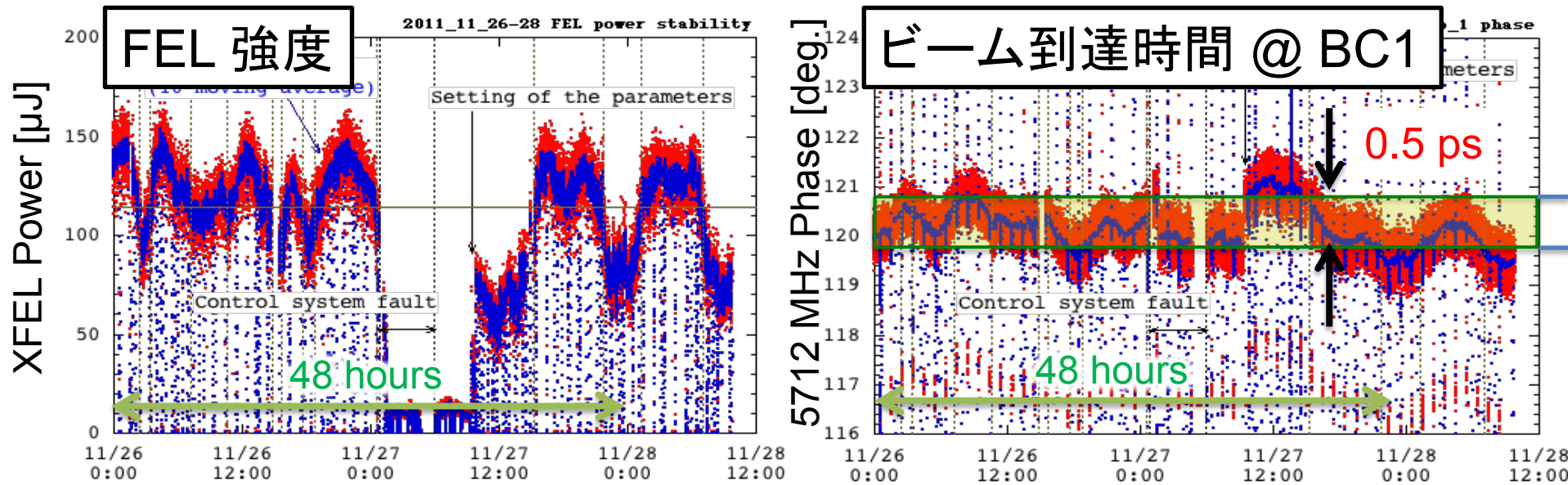
- X線自由電子レーザー(XFEL)施設 SACLA では、加速器構成機器を高精度に同期する必要がある
  - バunch長を最終的に 30 fs まで圧縮するため
  - ポンプ・プローブ実験にて外部レーザーとXFELを同期させるため
- 必要な時間精度は 50 fs
  - 施設全長 700 m にわたってこの精度が必要
- 安定な光タイミングRF伝送システムを構築
  - 波長 1550 nm 帯の光信号で各機器にタイミング信号を分配
  - 位相安定化光ファイバ (5 ps/km/K) を使用して温度ドリフトを低減
  - 光ファイバは水冷式恒温ダクト (0.4 K pk-pk)に通している.
  - 電子回路も水冷式恒温19インチラック (0.4 K pk-pk) に収納
- ただし、このような対策をとっていても、1 km 長の光ファイバが 1 ps 程度変動するおそれがある





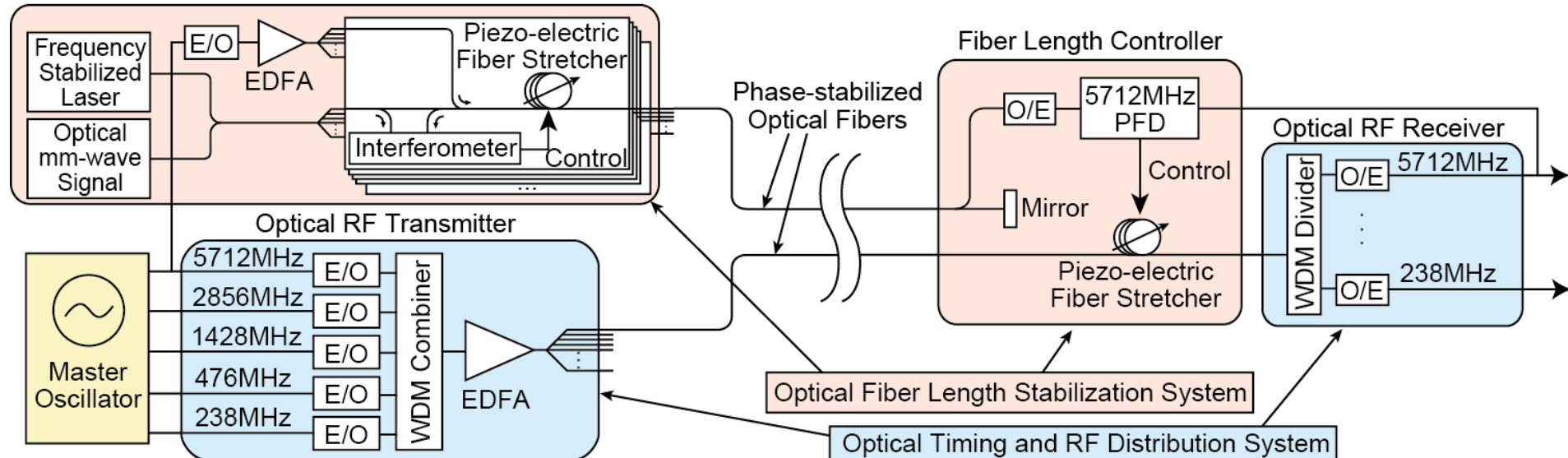
## • 現状の安定度

- 10 keV 付近の XFEL では 約 500  $\mu\text{J}/\text{pulse}$  で 24時間以上安定に供給できる
- この安定度は各種ビームフィードバックや運転員による微調整によって保たれている

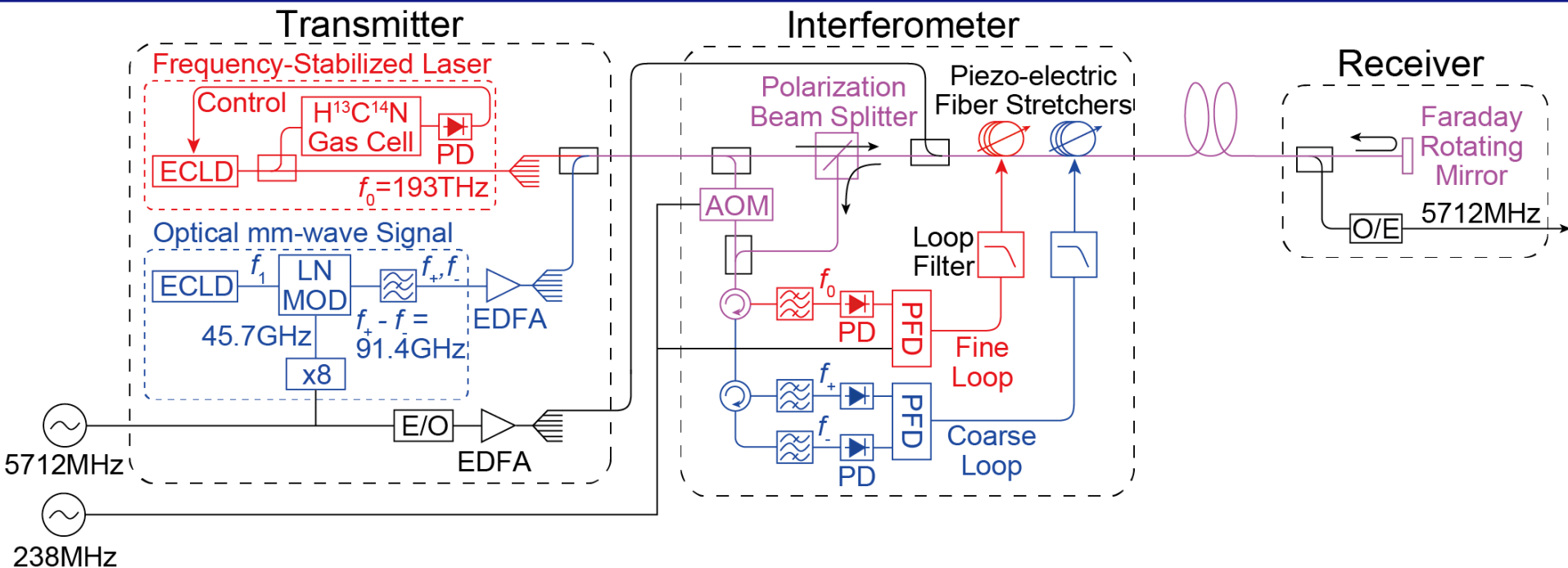


- 初期の運転時に、ビームフィードバックや微調整なしにフリーランでのXFEL安定度を取得
  - 不安定要素を探索するため
- XFEL強度が1時間程度で上下することがわかる
- バンチ圧縮器 (BC) にてビーム到達時間に 500 fs 程度のドリフトがみられた
  - 光タイミングRF伝送システムの光ファイバ光路長変動が一因と思われる
- 光ファイバ光路長を安定化する必要がある

Optical Fiber Length Stabilization System



- **光タイミングRF分配システム (Optical Timing and RF Distribution System)**
  - マスタオシレータからのRF信号をE/O変換・波長分割多重 (Wavelength-division multiplexing, WDM) して増幅・分配
  - 受信機にてWDM分波し、O/E変換
- **光ファイバ光路長制御システム (Optical Fiber Length Stabilization System)**
  - 2つの測長基準: **周波数安定化レーザ** と **ミリ波光信号**
  - 受信機側で反射して干渉計で光路長変動を検出し、ファイバストレッチャに帰還
  - 5.712 GHz の光RF信号も同時に伝送
- **両システムの光ファイバは別々のものを用意**
  - 光タイミングRF分配システムへの影響を低減
  - 光ファイバ光路長制御システムの設計の自由度を広げるため



- 2つの測長基準それぞれにフィードバックループを用意

- Fine系: 周波数安定化レーザ (波長: 1549 nm, 周波数: ~193 THz, 周期: 5 fs)
  - 精密な制御のため
- Coarse系: ミリ波光信号 (波長: ~3.3 mm, 周波数: 91.4 GHz, 周期: 11 ps)
  - 精度は若干劣るが、測長範囲が広いいため電源を切った後でも元の長さに戻すことが可能
- 2つの測長系を比較することで精度をクロスチェックすることが可能

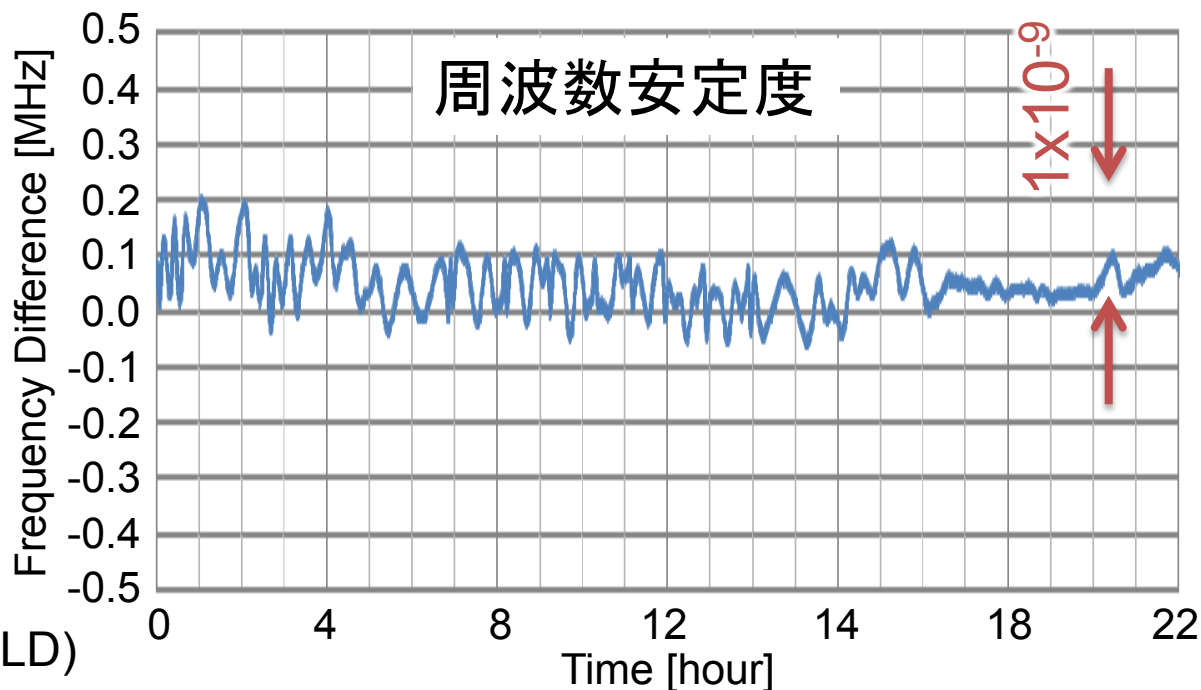
- 干渉計

- 偏光ビームスプリッタ、および、ファラデー回転ミラーを使用
  - 途中のコネクタなどでの散乱光を偏光で分離
- 参照光は 音響光学変調器 (Acousto-Optic Modulator, AOM) にて 238 MHz 信号で周波数シフト
- 干渉信号として 238 MHz ビート信号 が得られ、ヘテロダイン検波

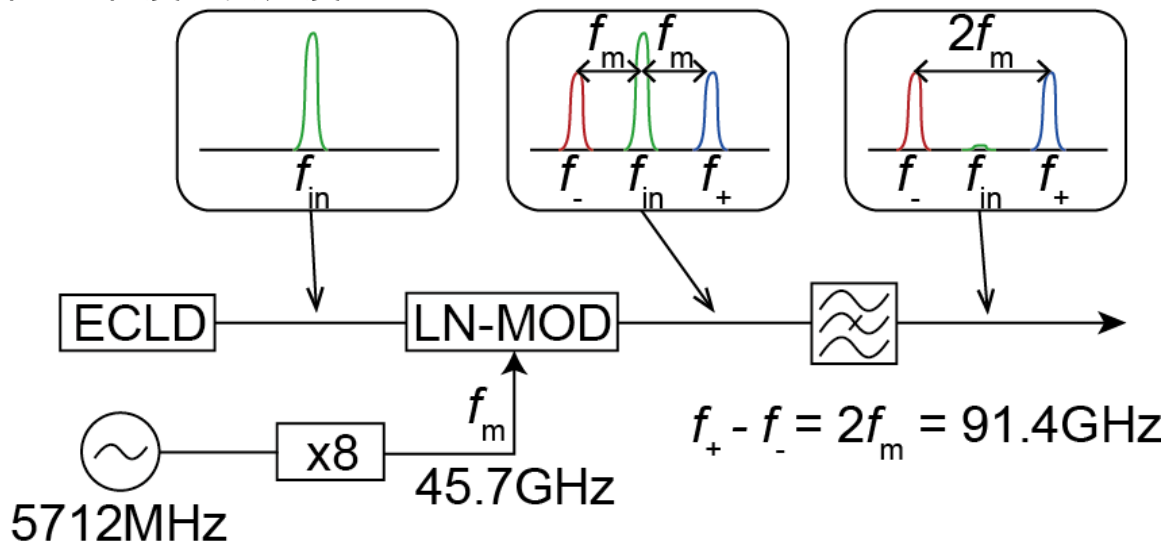
- Fine系の測長基準
- 外部共振器型レーザーダイオード (External Cavity Laser Diode, ECLD) を光源として使用
  - 線幅: 3 kHz 以下 (十分な時間コヒーレンス、距離にして100 km以上)
- 光周波数はシアン化水素ガスの吸収線にロックする
  - 波長: 1548.955 nm (周波数: 193.545 THz)
  - $\text{H}^{13}\text{C}^{14}\text{N}$  の P9 吸収線
- 周波数安定度:  $1 \times 10^{-9}$ 
  - 1 km の距離を  $1 \mu\text{m}$  の精度で測定することができる。



External cavity laser diode (ECLD)

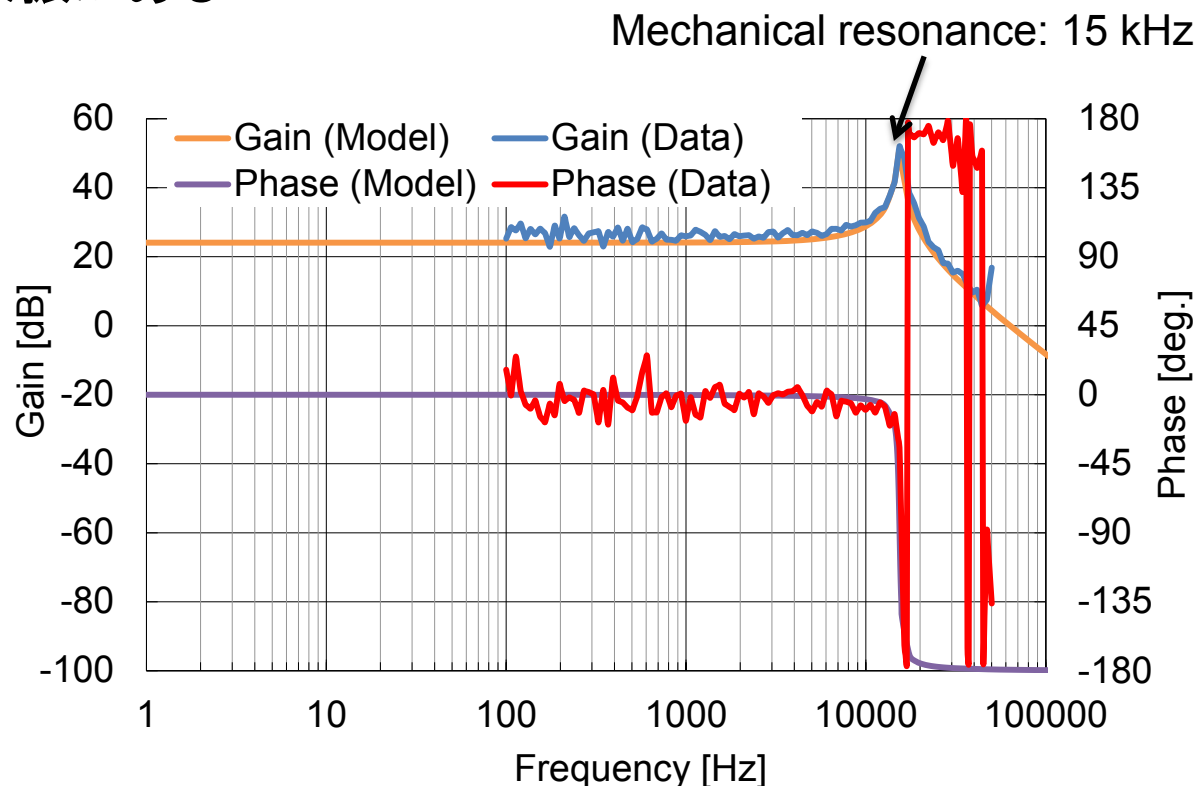
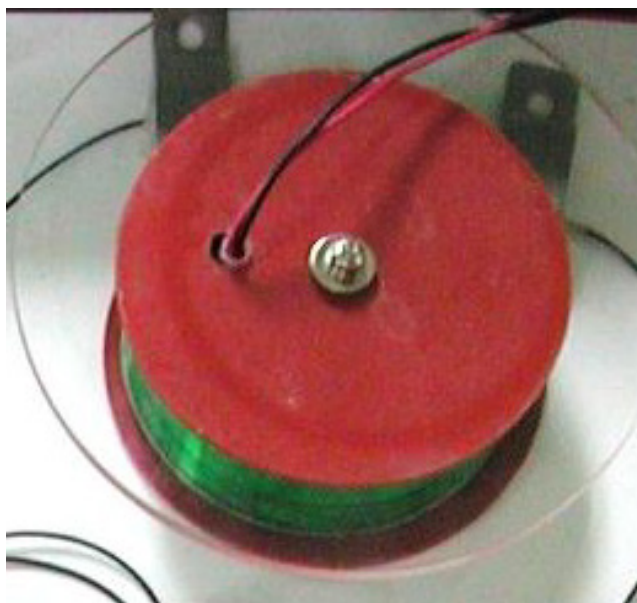


- 外部共振器型レーザダイオード (External Cavity Laser Diode, ECLD) の光 ( $f_{in}$ ) に LN変調器 (LiNbO<sub>3</sub> Modulator, LN-MOD) でミリ波変調をかける
  - 5.712 GHz の 8 通倍の 45.7 GHz で変調 ( $f_m = 5.712 \text{ GHz} \times 8$ )
  - LN-MOD により、2本のサイドバンド ( $f_+$  and  $f_-$ ) が立つ
- バンド阻止フィルタで搬送波 ( $f_{in}$ ) を除去
- 残った2本のサイドバンド ( $f_+$  and  $f_-$ ) は 91.4 GHz のミリ波でAM変調された光信号としてふるまうので、それを測長に使用する
  - $f_+ - f_- = 2 f_m = 91.4 \text{ GHz}$
- 安定性
  - 5712 MHz RF信号の周波数安定度は  $1 \times 10^{-9}$  以下
  - 8通倍器による位相ノイズの増加は無視できる程度であることを確認済み
  - LN-MODの変調度が一定になるように監視し、DCバイアス電圧を制御している
  - Fine系と同程度の安定度

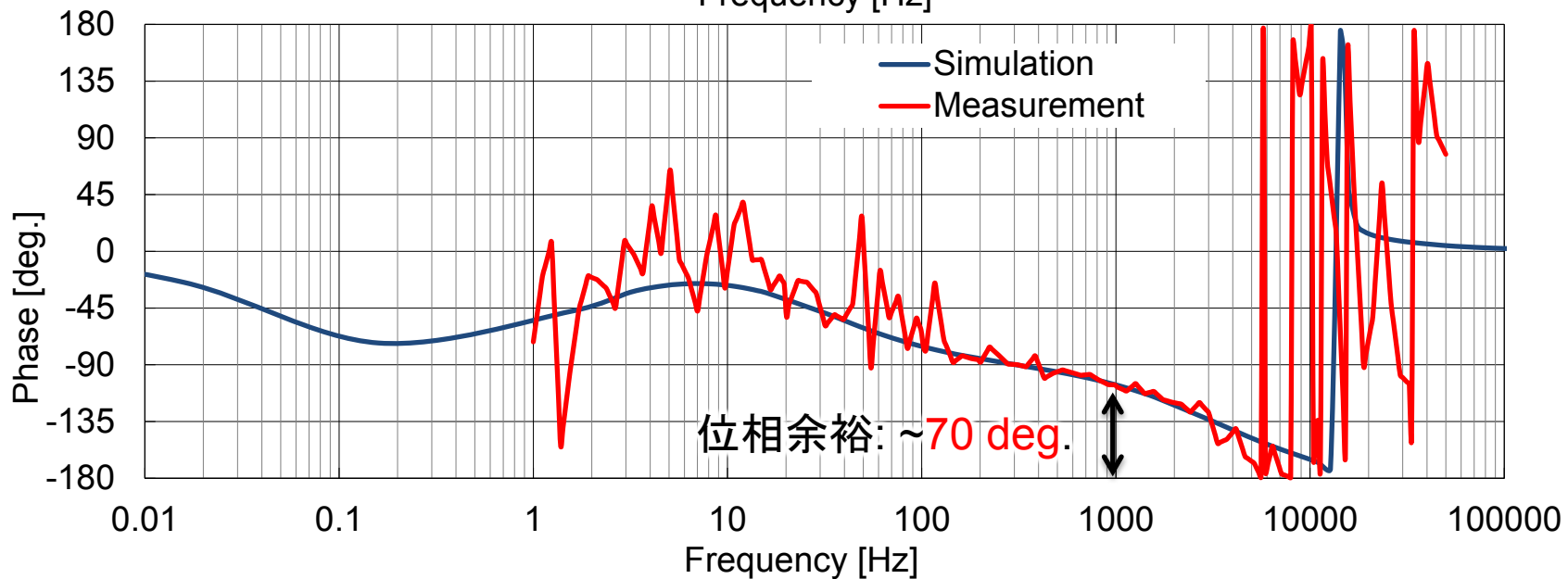
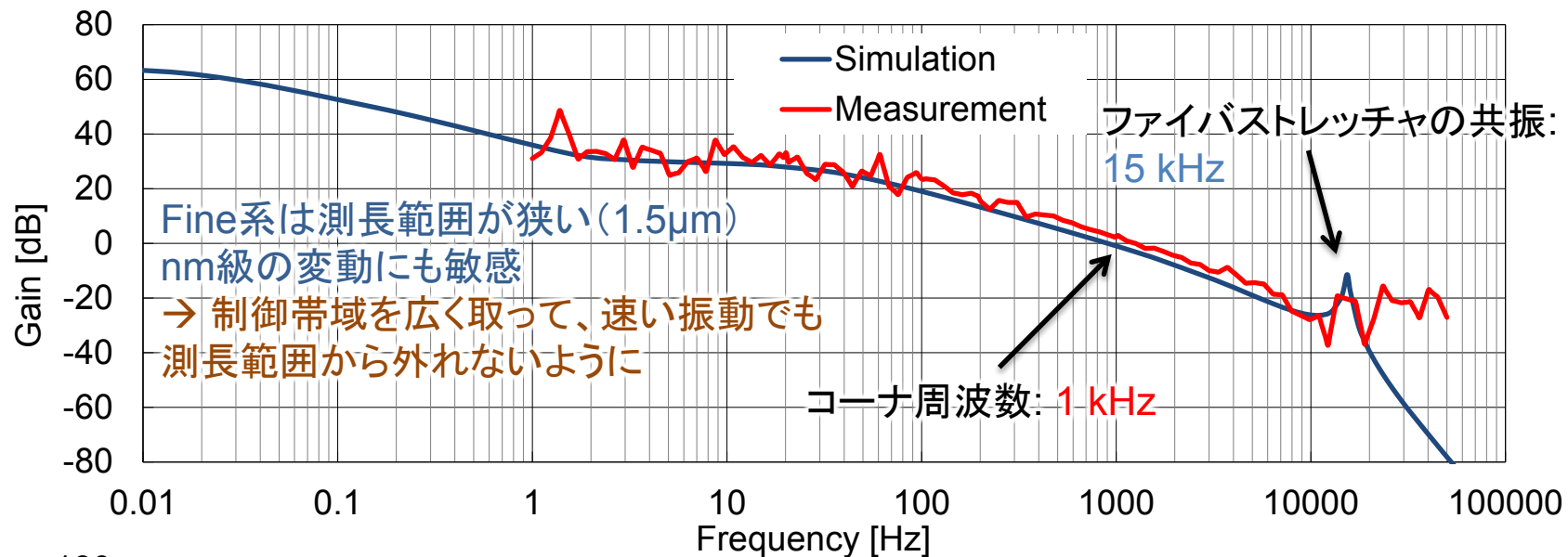




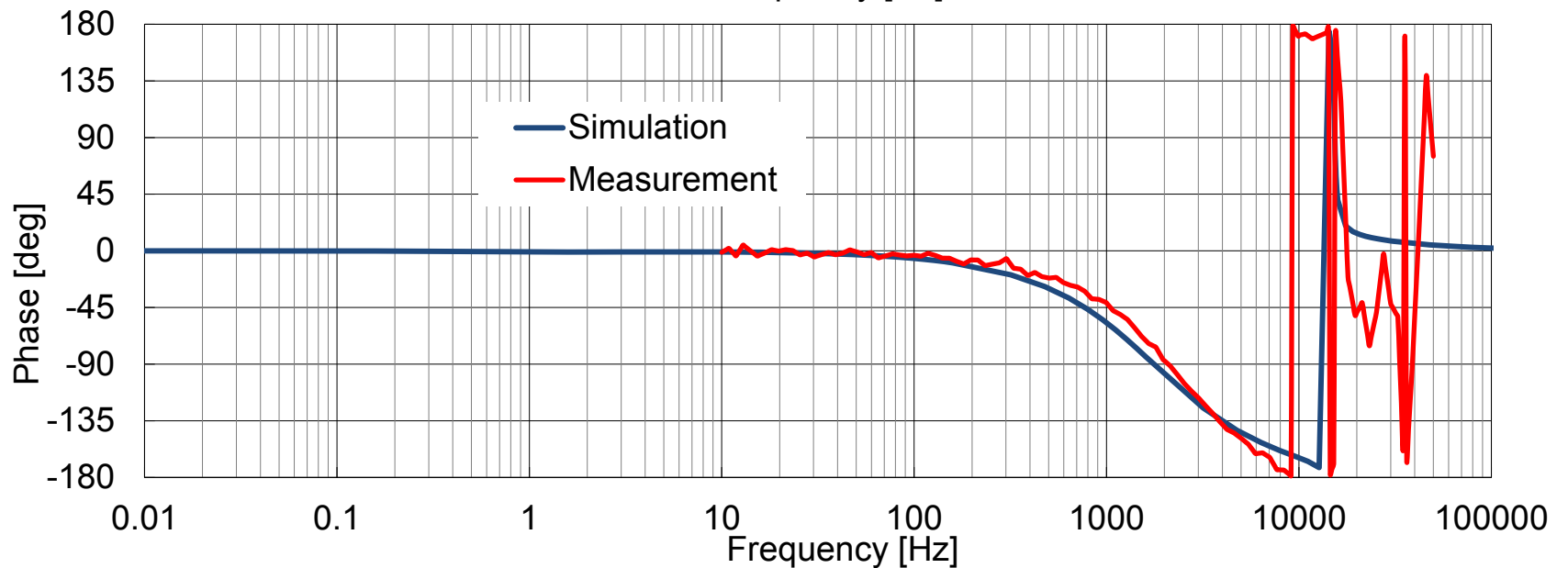
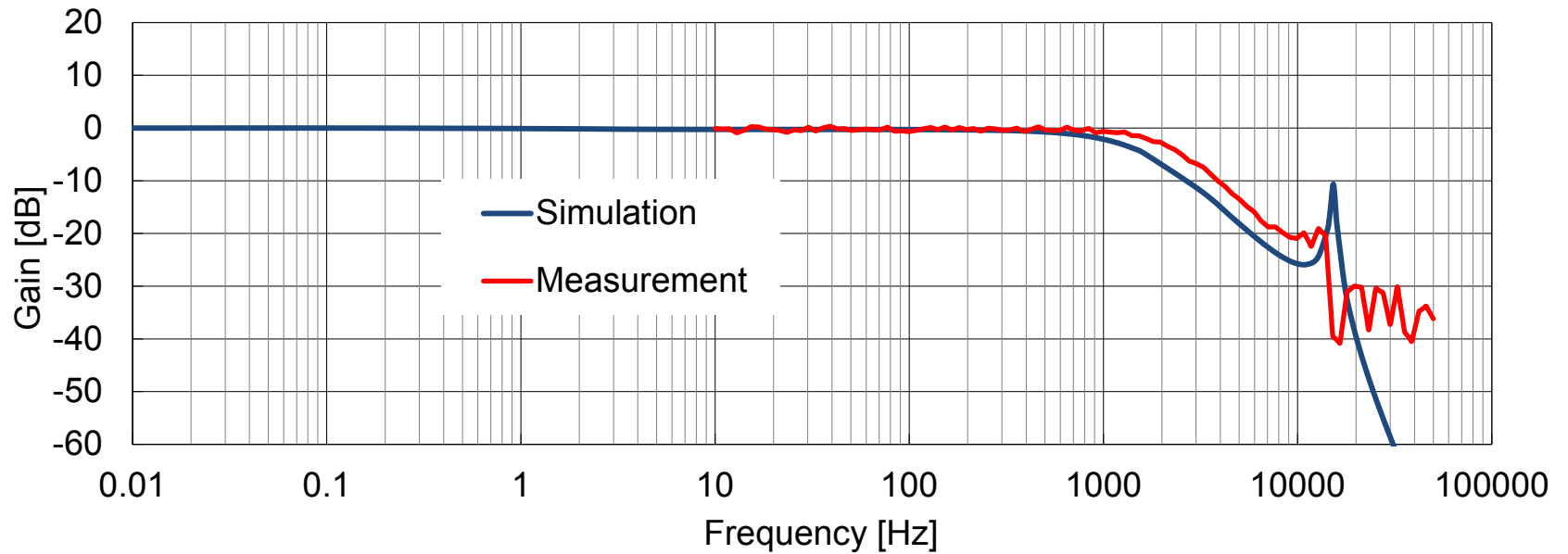
- 円筒型圧電素子に光ファイバを巻いて、物理的に伸び縮みさせる
- 制御範囲: 3 mm peak-to-peak
  - バイアス電圧: 0 V – 300 V
- 周波数応答
  - 3 kHz 程度まで平坦
  - 15 kHz に機械的な共振がある



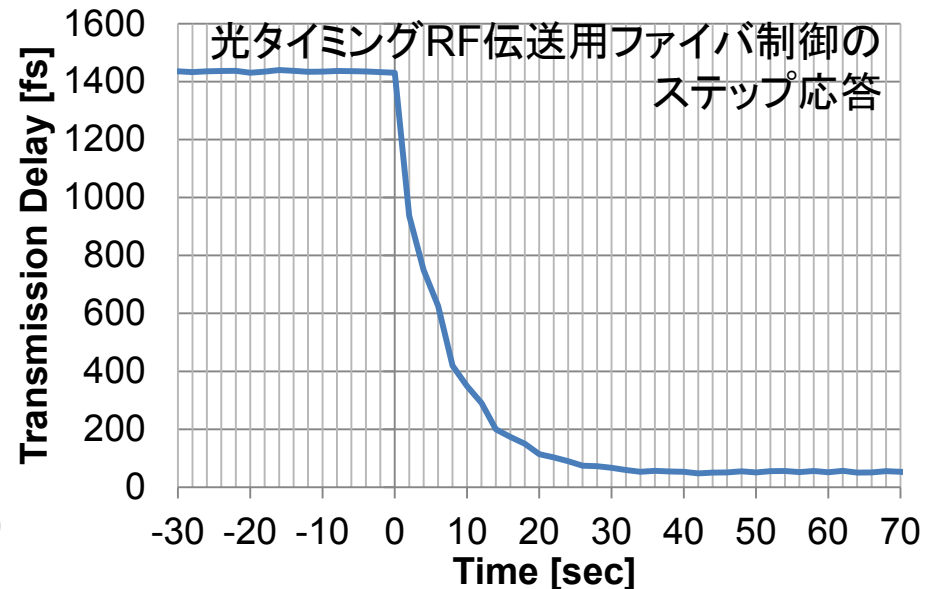
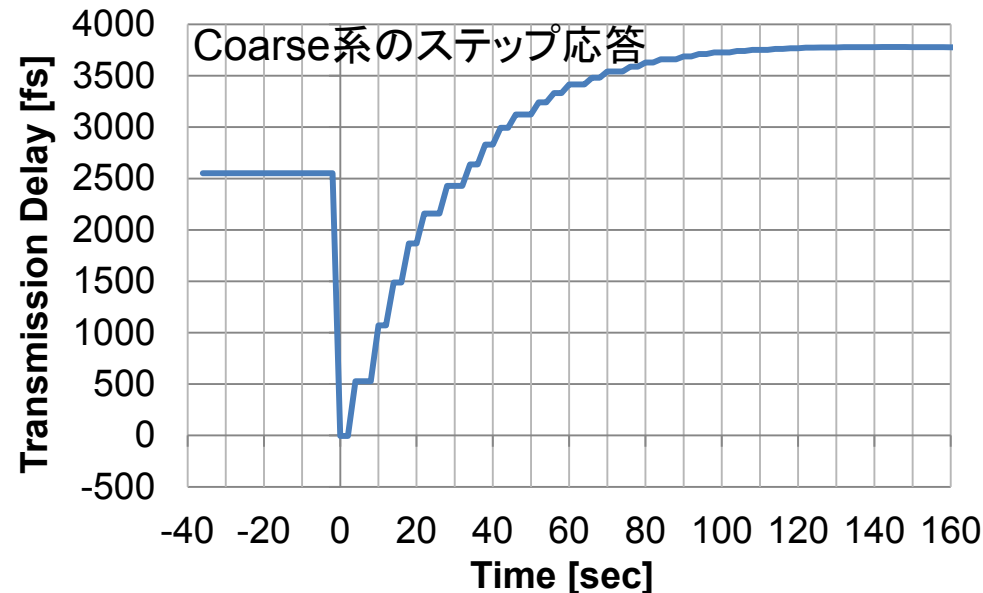
# 開ループ特性 (Fine系)



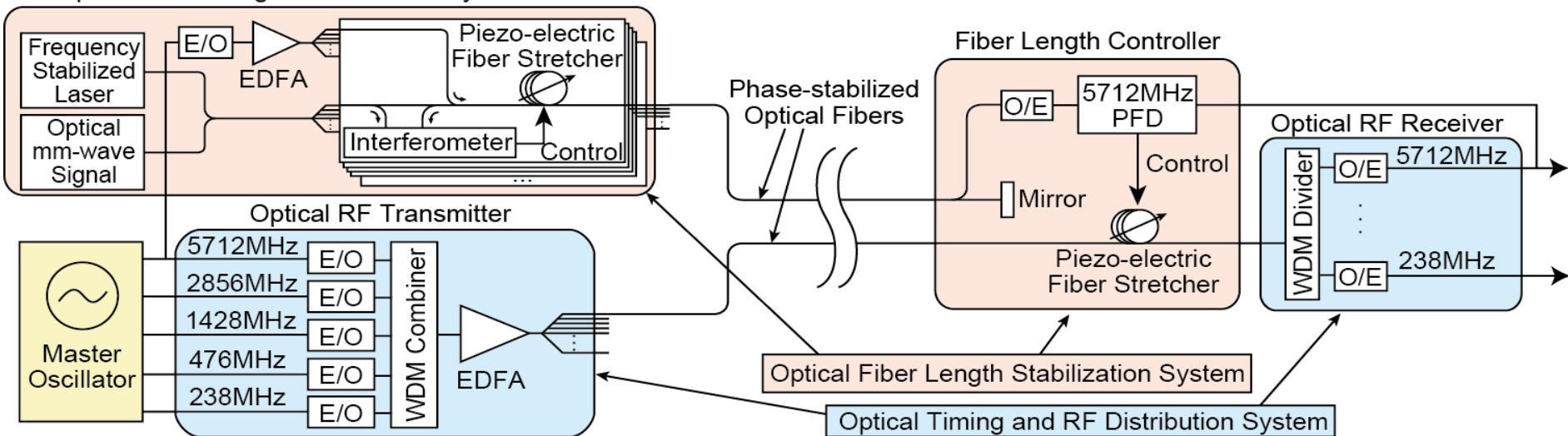
# 閉ループ特性 (Fine系)



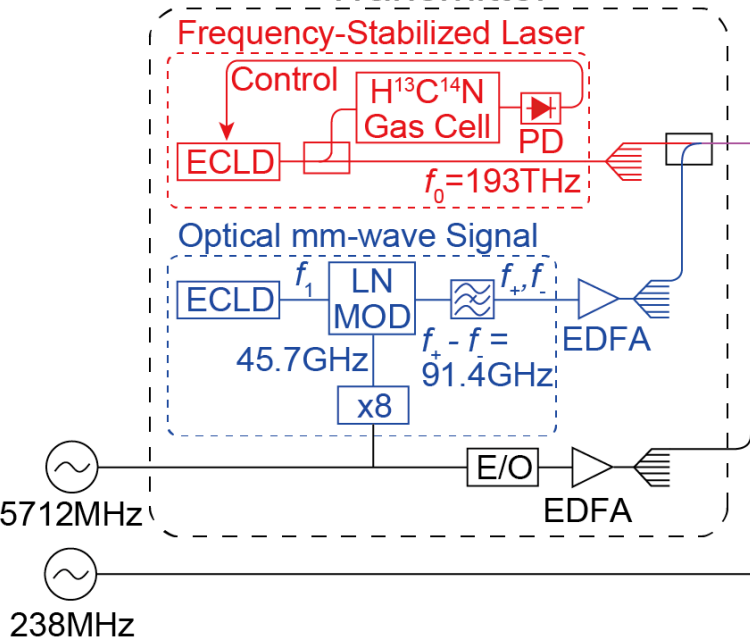
- Coarse系
  - PI制御 (Proportional-Integral Control)
  - コーナ周波数:  $\sim 0.02$  Hz
  - Fine系に比べて測長範囲が広く制御範囲を超えることがないため、ドリフトを抑えるだけでよいこととした
- 光タイミングRF伝送用ファイバのストレッチャ制御
  - PI制御
  - コーナ周波数:  $\sim 0.1$  Hz



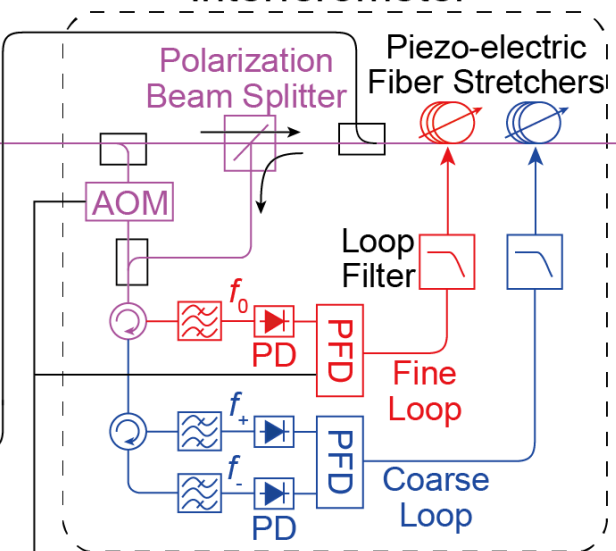
# Optical Fiber Length Stabilization System



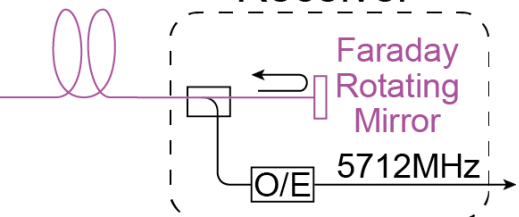
## Transmitter

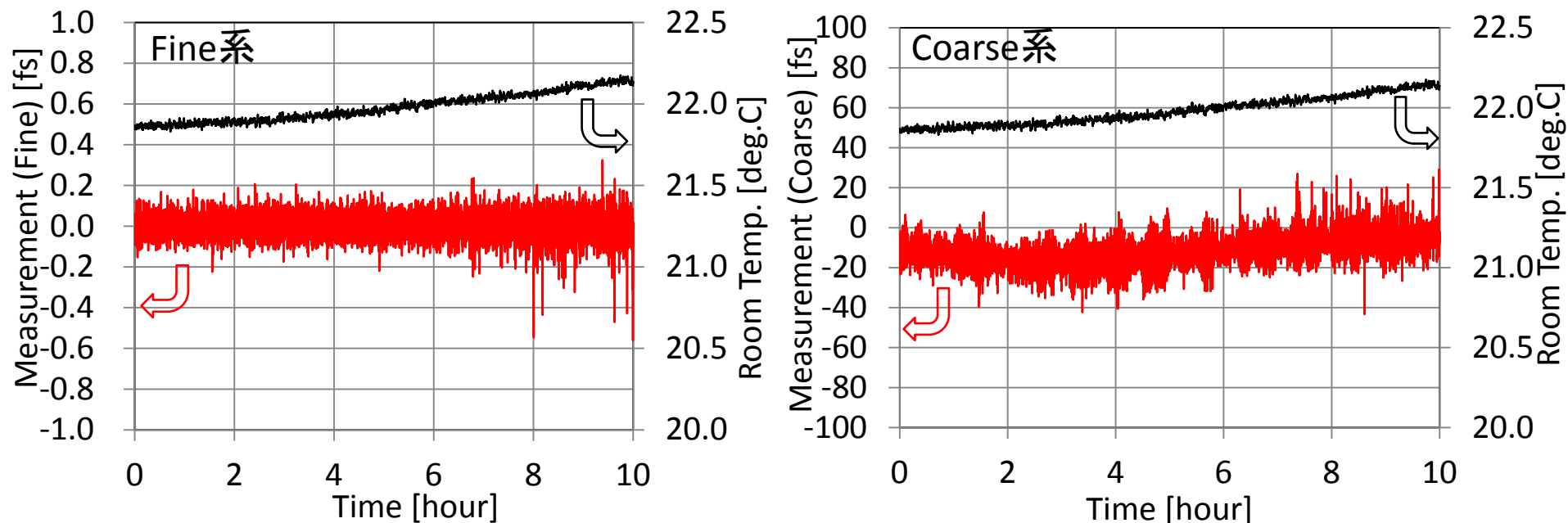


## Interferometer



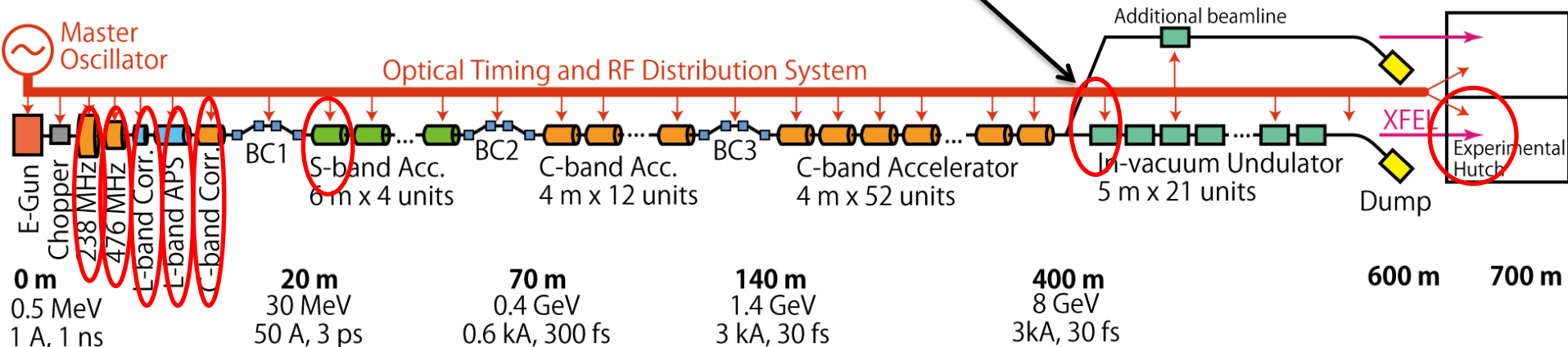
## Receiver



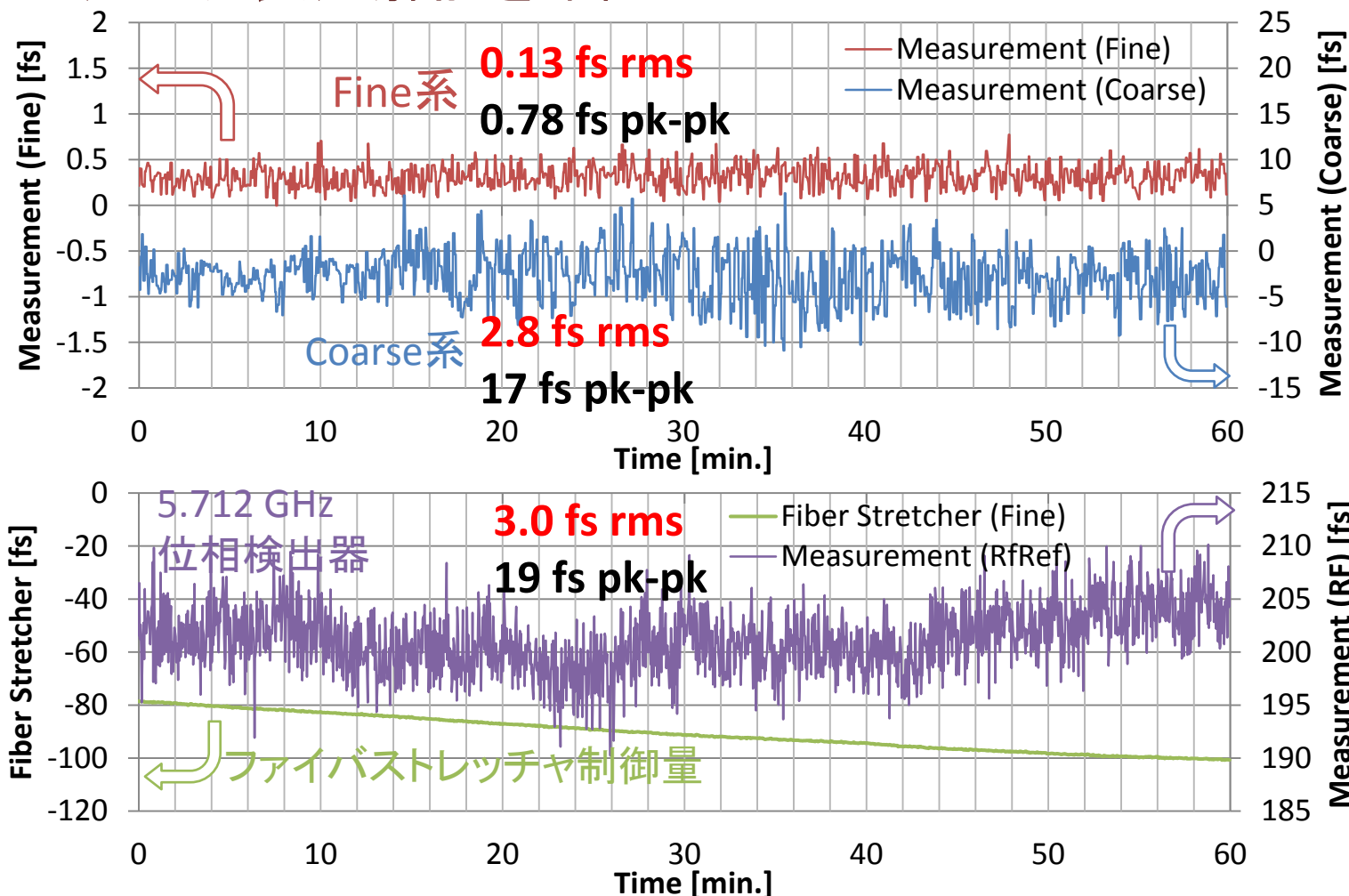


- 実験室にて、長さ 1.5 km の光ファイバの光路長を制御
- ループ内の光路長安定度
  - Fine系: 1 fs peak-to-peak
  - Coarse系: 70 fs peak-to-peak
- 十分な制御性能を確認

- 今夏まで、SACLA に 8系統の光路長制御システムを導入し、試験運用してきた
  - 入射部からSバンド加速器まで 6系統
  - アンジュレータ部 1系統
  - 実験ホール 1系統
- 秋からの予定
  - 夏季停止期間に 4系統増やし、BC3 まで光路長制御を導入
  - 秋からは合計12系統で正式運用に入る予定
- ここでは、アンジュレータ部の系統（ファイバ長約 400 m）のデータを紹介します

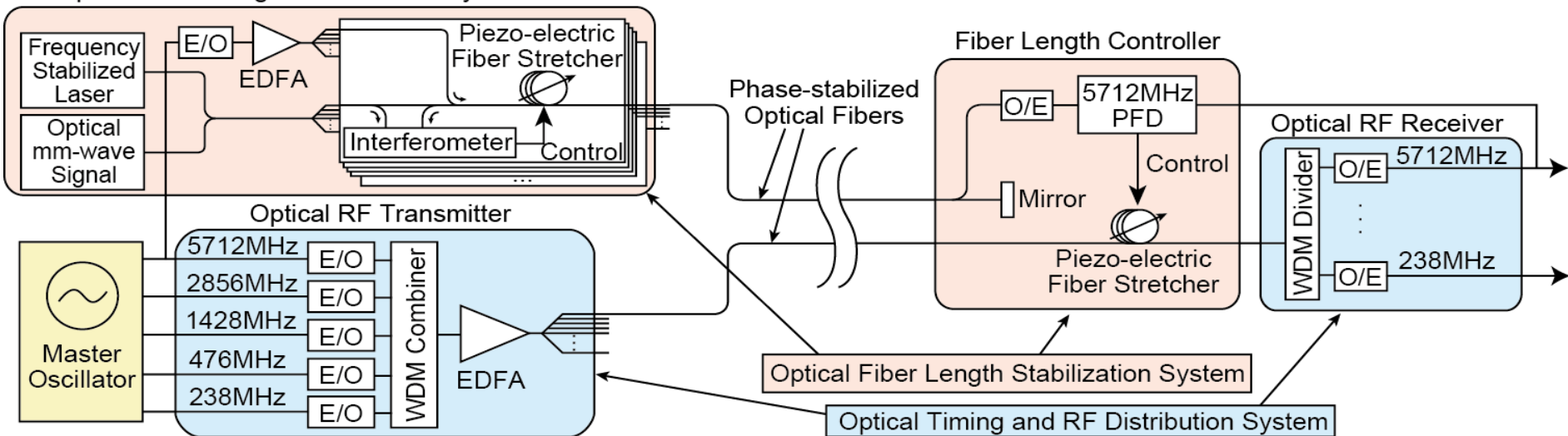


- 比較的光路長が安定な1時間のデータを選択してプロット
  - このときは、**Fine系**で光路長を制御 (ファイバ長 ~400 m)
- 十分な測長分解能を確認

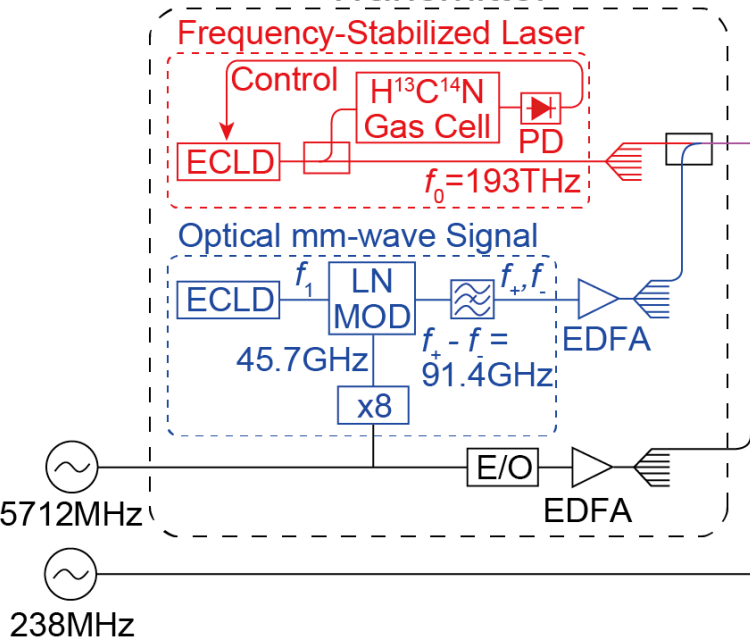




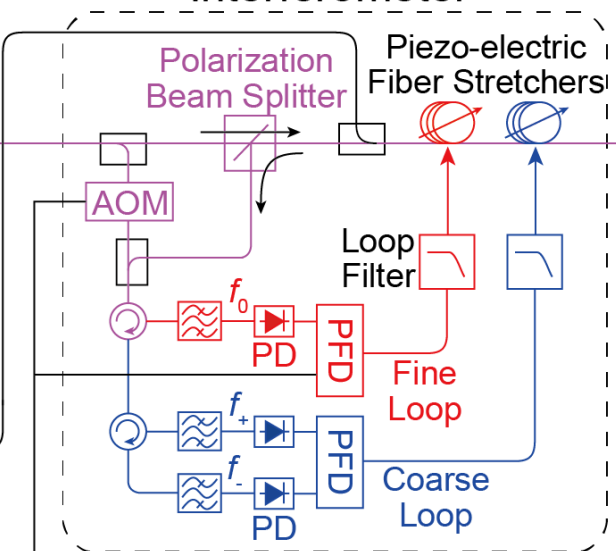
# Optical Fiber Length Stabilization System



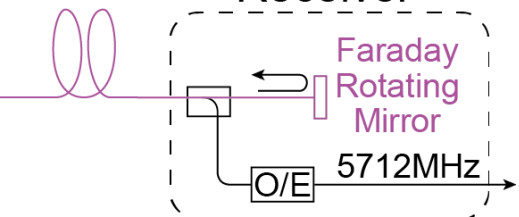
## Transmitter



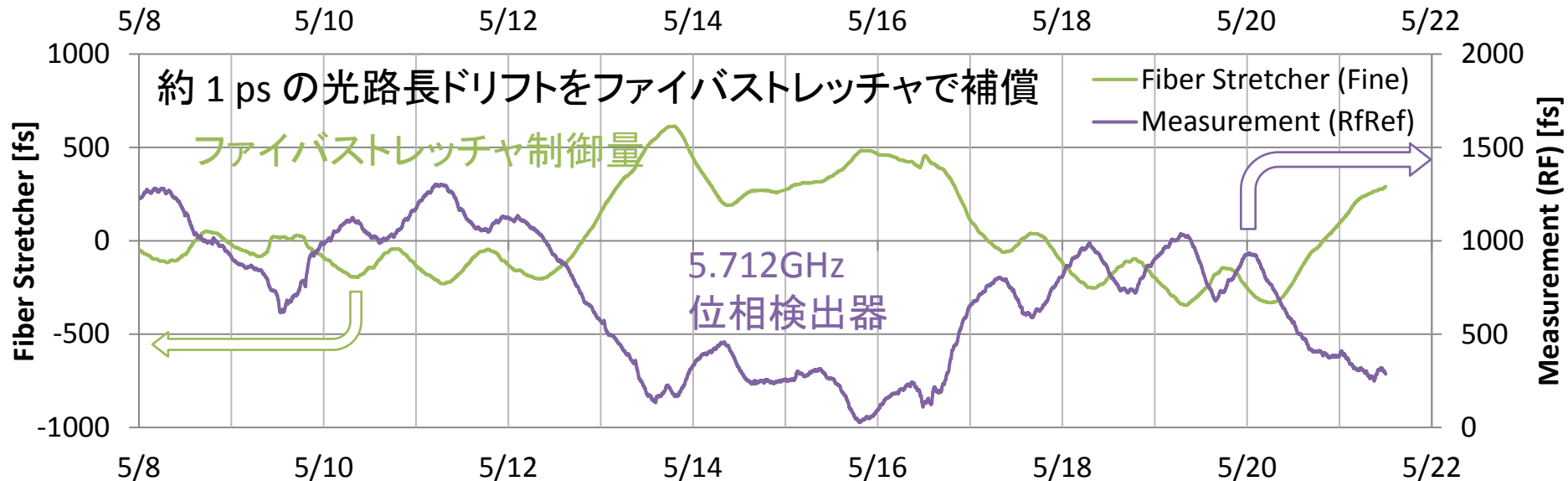
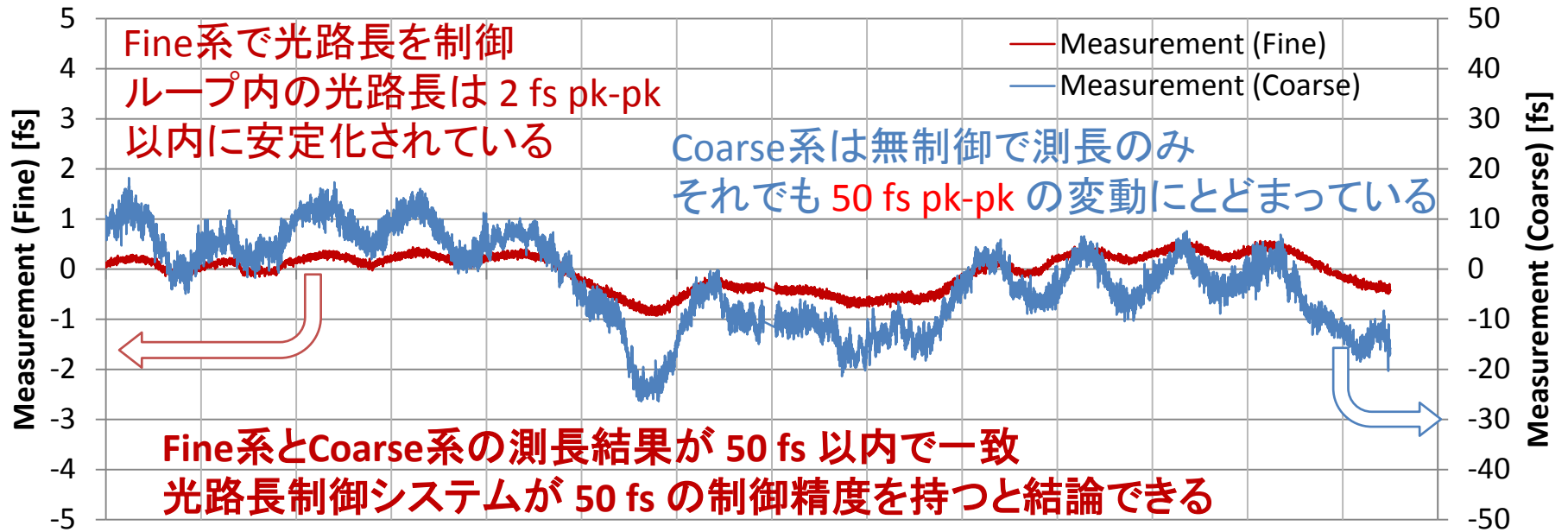
## Interferometer



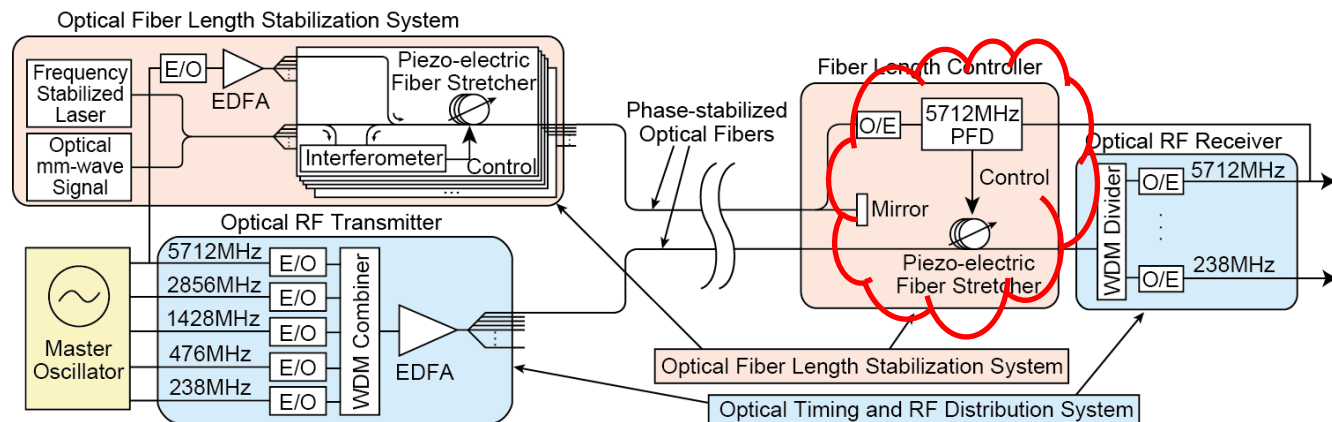
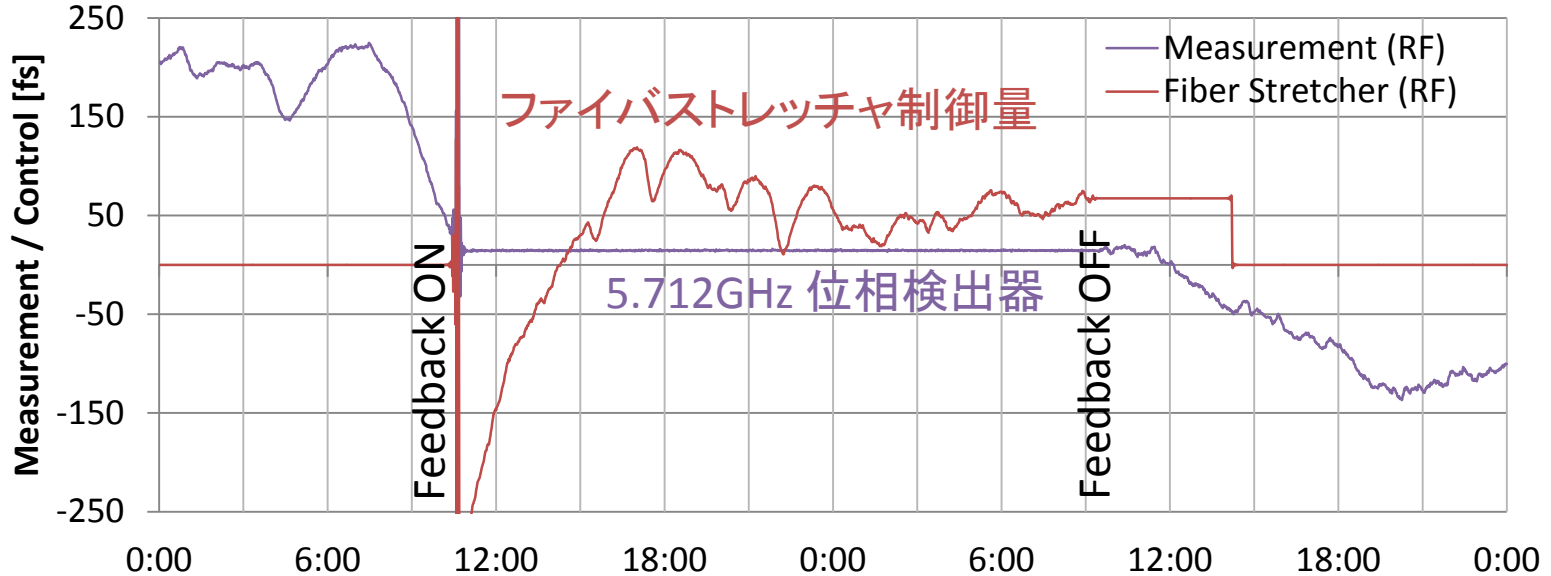
## Receiver



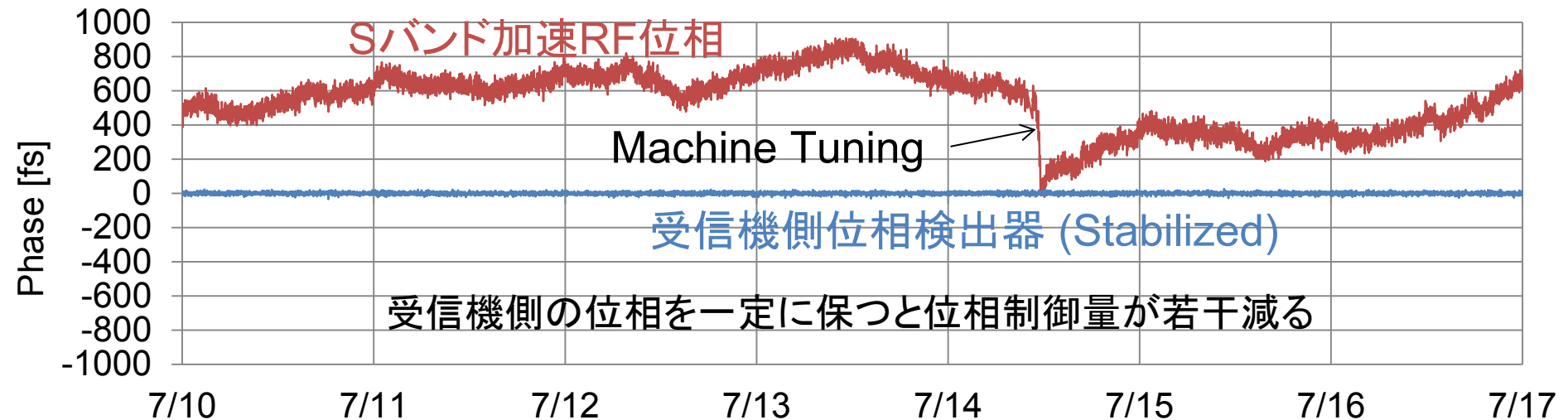
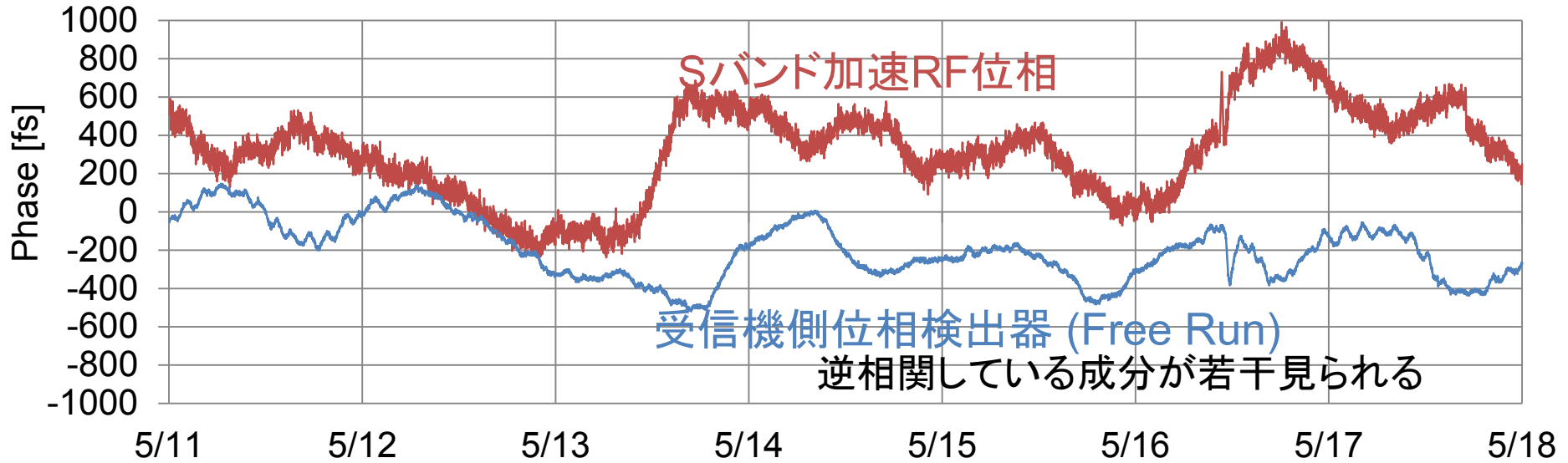
# 長期安定性 (2週間)



- 光タイミングRF信号用光ファイバの光路長は受信機側のファイバストレッチャで補償
  - 5.712 GHz 位相検出器の値をフィードバック



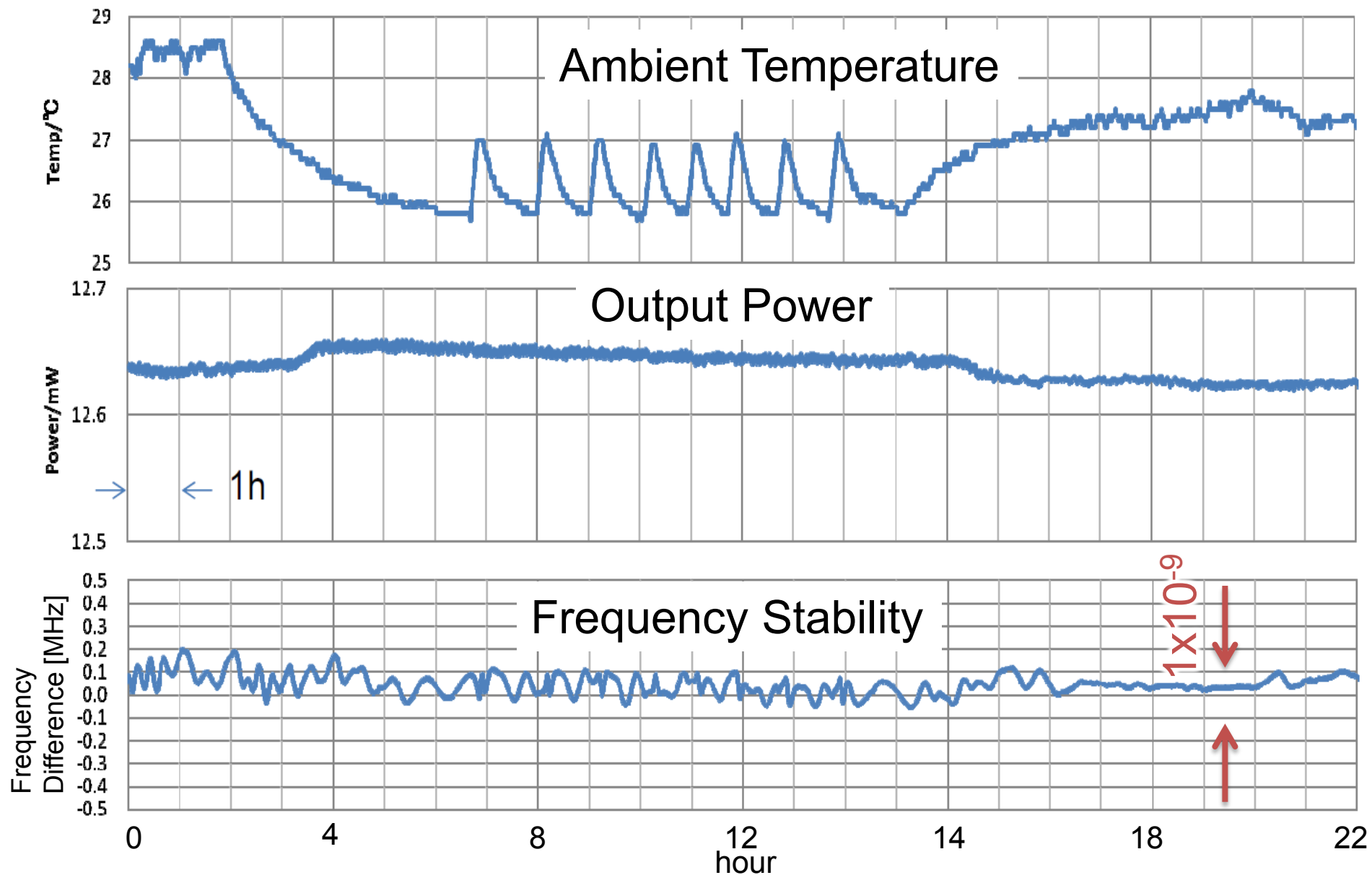
- BC1-BC2間のSバンド加速RF位相を1週間分プロット
  - この位相はXFEL強度を安定に保つために自動制御されている



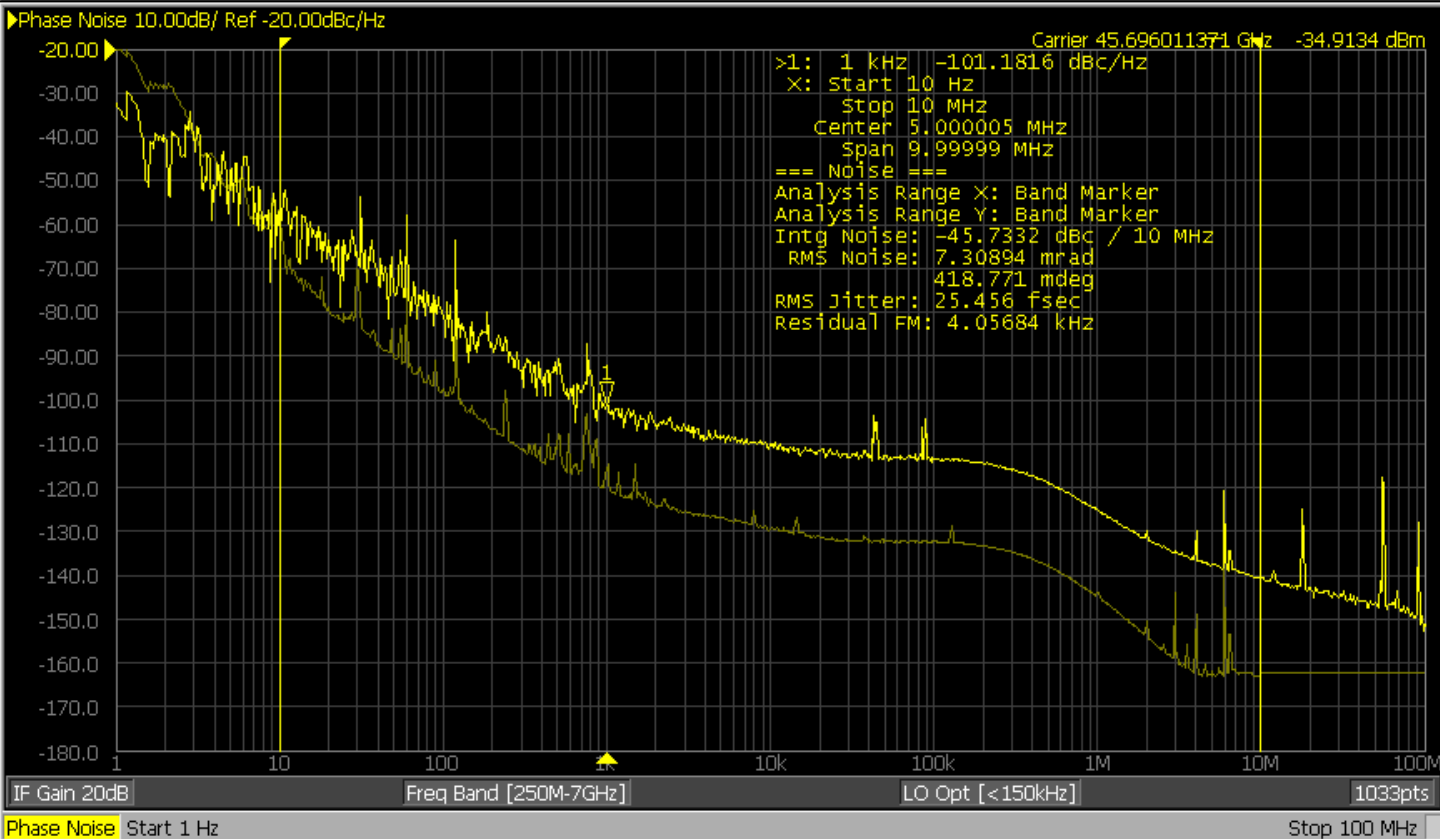
- SACLA 光タイミングRF分配システムを安定化するため、**光ファイバ光路長制御システム**を開発
  - 加速器構成機器などを **50 fs** 以内に同期させるため
- 構成
  - 光路長制御システム用に別の光ファイバを使用
  - **周波数安定化レーザー (1549 nm, Fine系)** および **91.4 GHz ミリ波光信号 (Coarse系)** の2種類の測長基準を使用
  - 光干渉計で光路長変動を監視
  - 圧電ファイバストレッチャで光路長変動を補償
  - 光 5.712 GHz 信号も位相基準として送信し、光タイミングRF分配用光ファイバの光路長変動を受信機側で補償
- 性能
  - 測長分解能: **0.13 fs rms (Fine系)** and **2.8 fs rms (Coarse系)**
  - 制御精度: **50 fs peak-to-peak**
    - Fine系とCoarse系の測長結果の差から推定
  - 光タイミングRF分配用光ファイバの制御も適切に動作
  - 実際のXFEL運転にて加速RF位相の制御量が抑制されていることを確認
- **光ファイバ光路長制御システムに要求される性能が満たされている**

- 光ファイバ光路長制御システムの導入にあたり、以下の方々をはじめとする多くのみなさまから多大なるご協力をいただきました
- この場を借りて感謝申し上げます
- 三菱電機特機システム株式会社:  
百足氏、池田氏、宮村氏をはじめとするみなさま
  - 本システム全体の設計・製作・設置
- 電気通信大学: 武者准教授
  - 本システムの設計
- 三菱電機株式会社 情報総合研究所:  
平野博士、安藤博士、秋山氏、亀山氏
  - 本システムの設計
- 株式会社光コム: 興柁博士、今井博士
  - 本システムの設計・光源製作
- スプリングエイトサービス株式会社: 森本博士
  - 受信機側フィードバックプログラムの制作

# Backup







- Almost no additive noise from frequency multiplier
- Integral of the phase noise
  - RMS jitter: 25 fs (10 Hz – 10 MHz)

- Polarization Mode Dispersion for a usual optical fiber
  - $< 1 \text{ ps}/\sqrt{\text{km}}$
- If the length of a 1km-long optical fiber varies 1mm ( $1 \times 10^{-6}$ ), the optical length for different polarization varies only 1 as ( $=1 \text{ ps} \times 10^{-6}$ ).