



SACLA加速器構成機器高度化状況

Improvements of the Accelerator Components at SACLA

前坂 比呂和

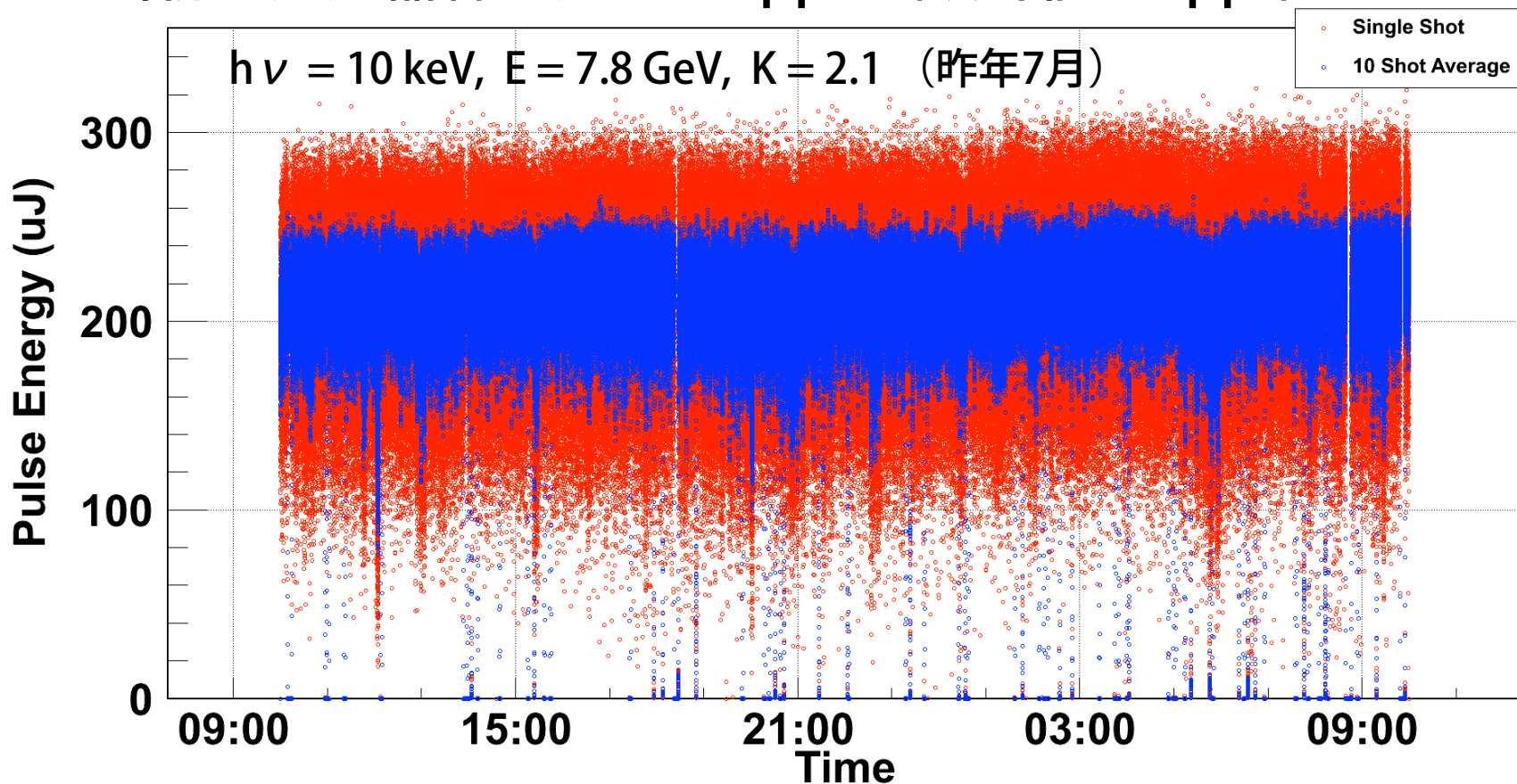
ほか SACLA加速器研究開発グループメンバー

(独) 理化学研究所 播磨研究所

2013.8.5.

於 名古屋大学

- XFELを有効に利用するためには強度増強と安定化, 加速器の高繰り返し化が重要
 - 昨年7月のXFEL強度 200 ~ 250 $\mu\text{J} / \text{pulse}$ (ave.) @ 10 keV
 - 当初の加速器繰り返し 10 pps (設計値 60 pps)



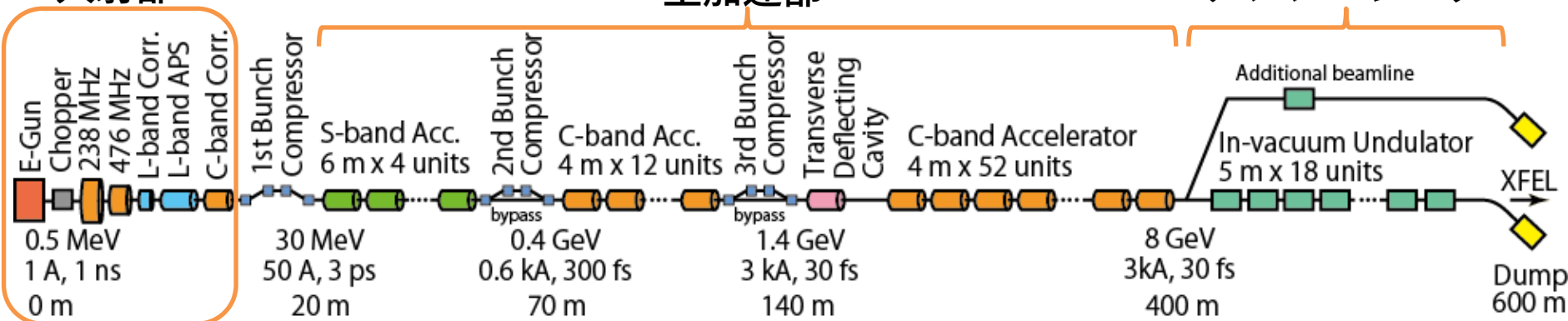
SACLAの構成

- 入射部の速度変調バンチングと3段の磁気シケイン型バンチ圧縮器を使用した複雑な構成
 - 1 A, 1 ns → 3 kA, 30 fs
 - 規格化エミッタンス 1 mm mrad
- 高加速勾配 Cバンド主加速器
- 真空封止アンジュレータ
- とくに入射部の安定度向上が重要
- 主加速部のトリップ頻度を低減して高繰り返しへ
 - 当初 10 pps で供用開始
- アンジュレータの磁場調整
- アンジュレータ増設による光源性能の増強

入射部

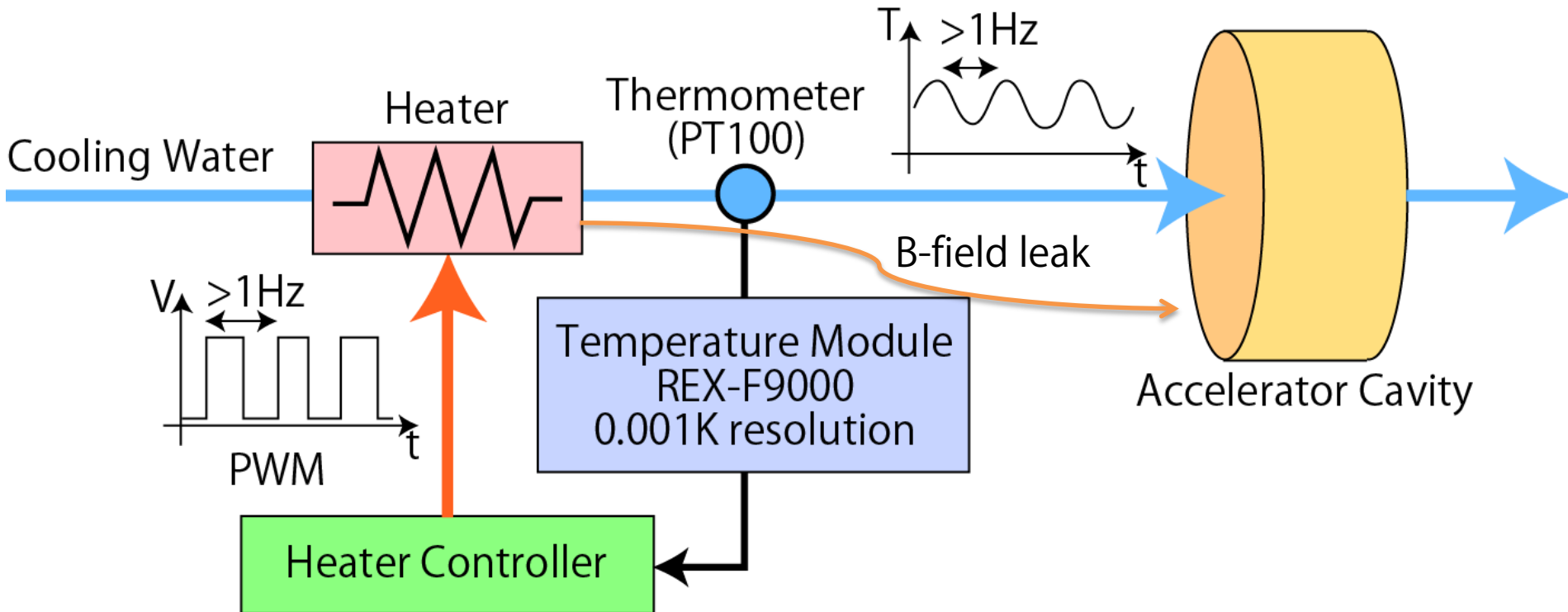
主加速部

アンジュレータ

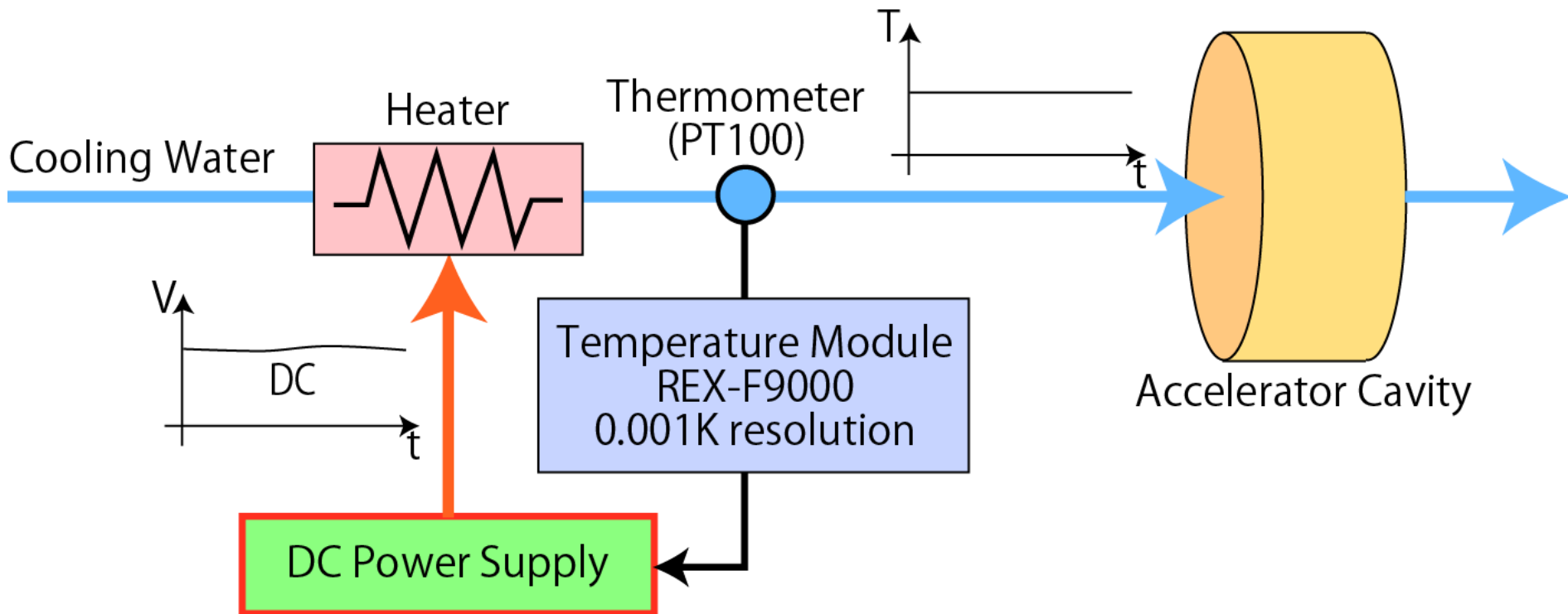


- **精密温度調整装置のDC化**
 - PWM制御のACヒータを使用すると、ビーム軌道などが変動するため
 - 昨年8月改修
- **水冷式恒温19インチラックへの精密温度調整装置導入**
 - 低電力RF系の温度ドリフトを改善するため
 - 昨年11月改修
- **Sバンド加速器の精密温度調整装置の精度向上**
 - 入射部の安定化の結果、Sバンド加速器の精密温度調整装置の精度の悪さが目立ってきた
 - 入射部と同じ制御モジュールに交換
 - 今年6月改修

- 入射部加速空洞の精密温度調節装置にはPWM制御のACヒータが使用されていた
 - PWM: Pulse Width Modulation
 - 加速空洞に温度変動を与えて加速RF位相がふらつく
 - ヒータからの周期的な漏れ磁場によってビーム軌道が変動する
- ヒータの制御をPWMでなくDCでおこなう必要がある

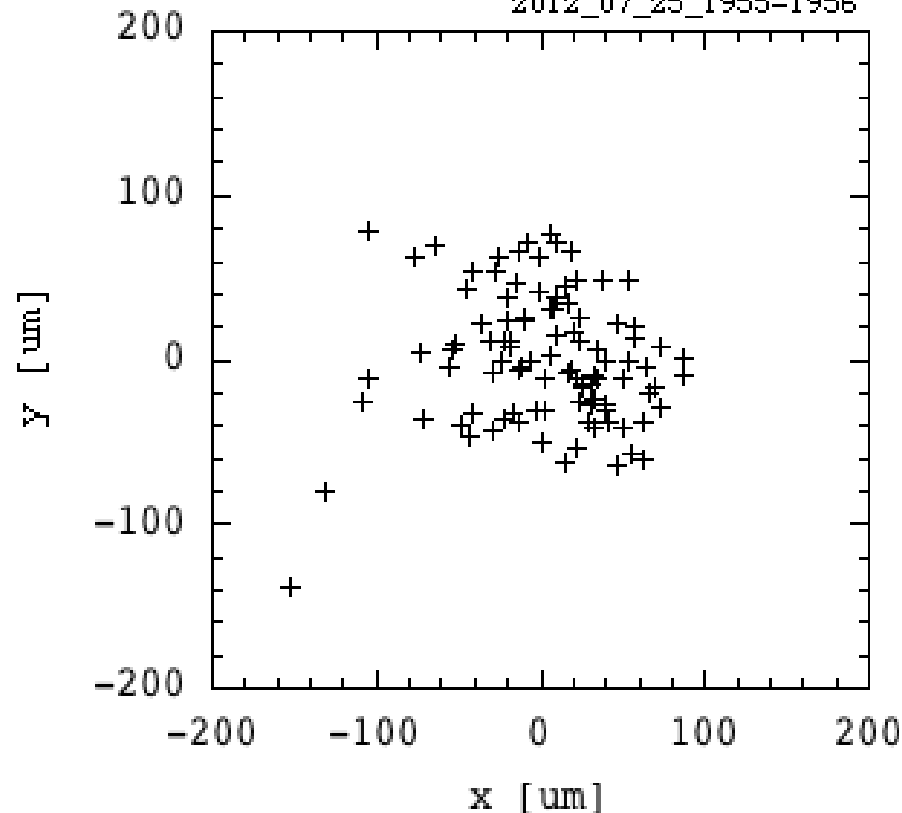


- PWM ACヒータをDCヒータに交換
– 昨年8月
- PWM制御による短期変動を完全になくした



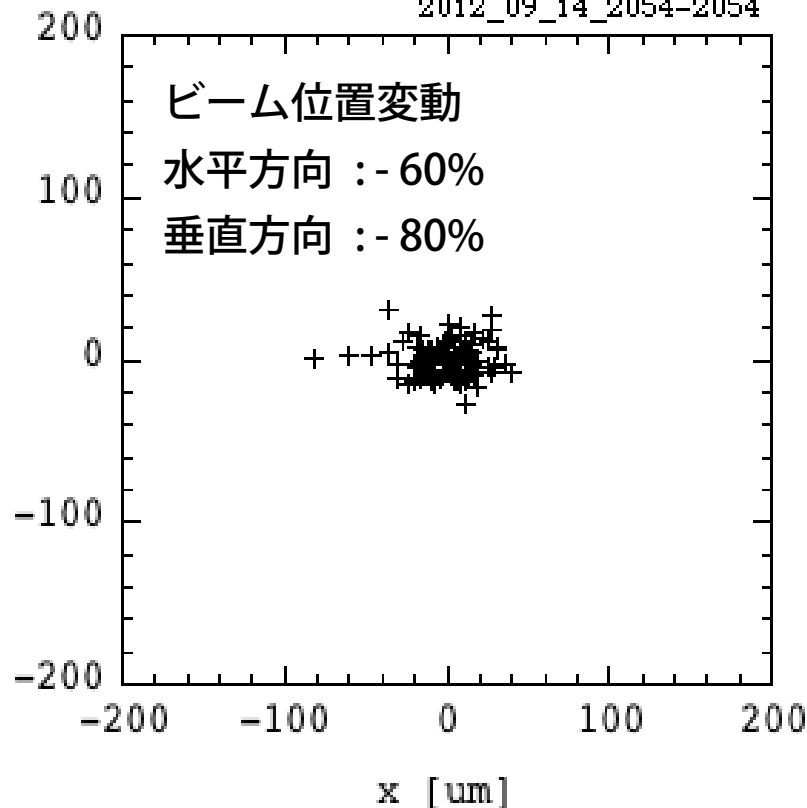
PWM AC heater

2012_07_25_1955-1956

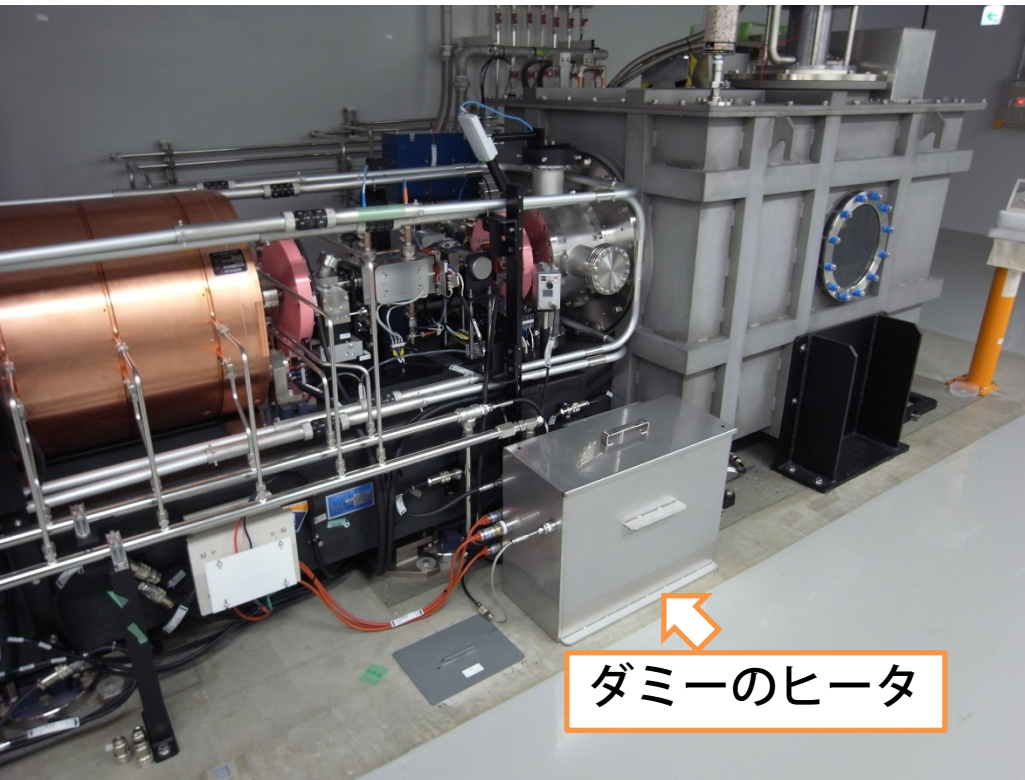


DC heater

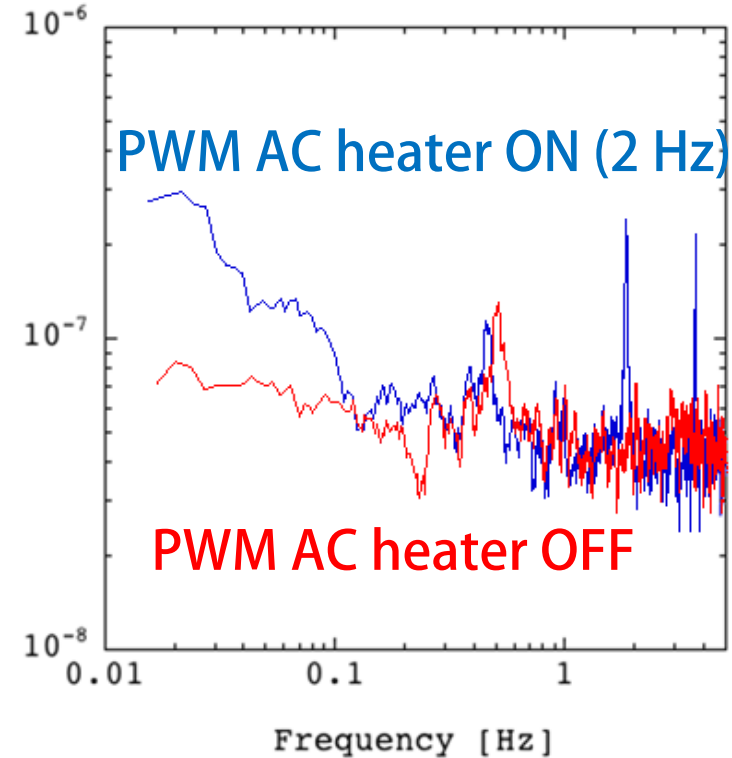
2012_09_14_2054-2054



- 実験研究棟で測定したXFEL位置の散布図
- DCヒータに変えることで入射部のビーム軌道が安定し、XFELのポインティングの安定度が向上



入射部出口のビーム位置のスペクトル

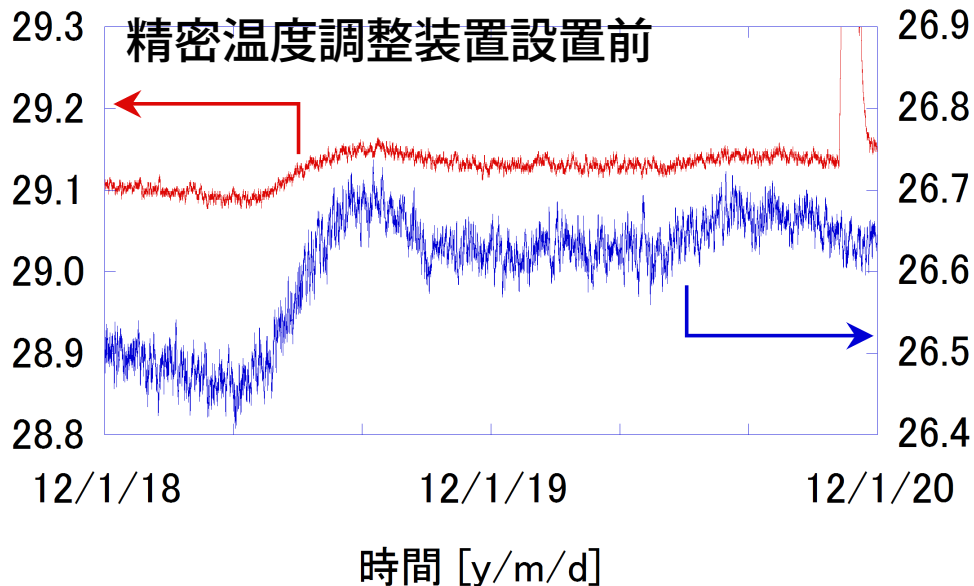


- 入射部の軌道変動が、空腔温度変動からくるRF位相変動によるものか、ヒータからの漏れ磁場によるものかを確認するため、ダミーのヒータを電子銃付近に設置して実験した
- その結果、ダミーのヒータでもビーム位置が揺らぐことが判明
 - ヒータからの漏れ磁場の影響であることを検証
 - PWM ACヒータをONすると、0.1 Hz以下のゆらぎも引き起こす
 - この理由は不明

- 低電力RF系の温度ドリフトを低減するため
- 加速空洞に用いている精密温度調整装置と同じものを水冷式恒温19インチラックに適用
 - 温度安定度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ \rightarrow $\pm 0.01^{\circ}\text{C}$

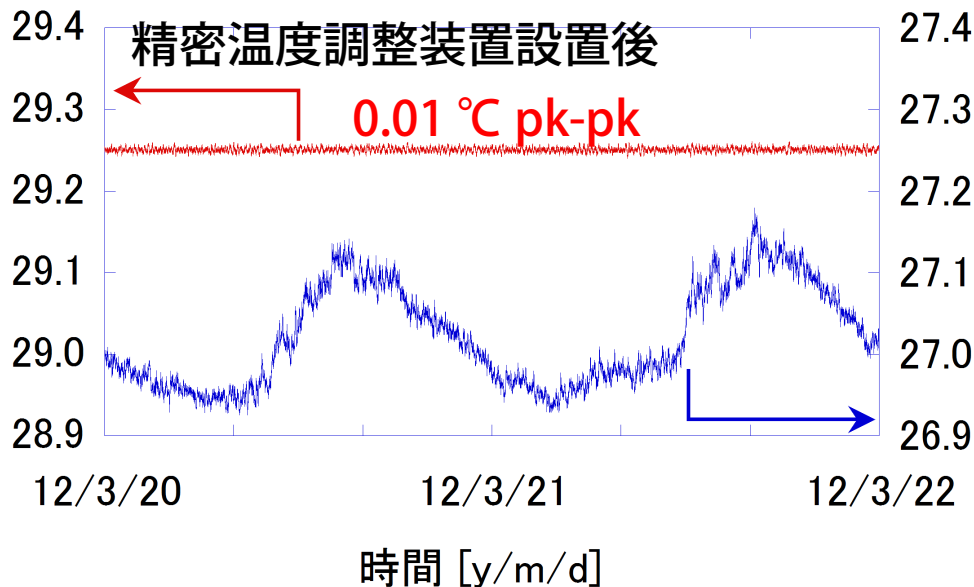


水冷ラック内温度 [°C]



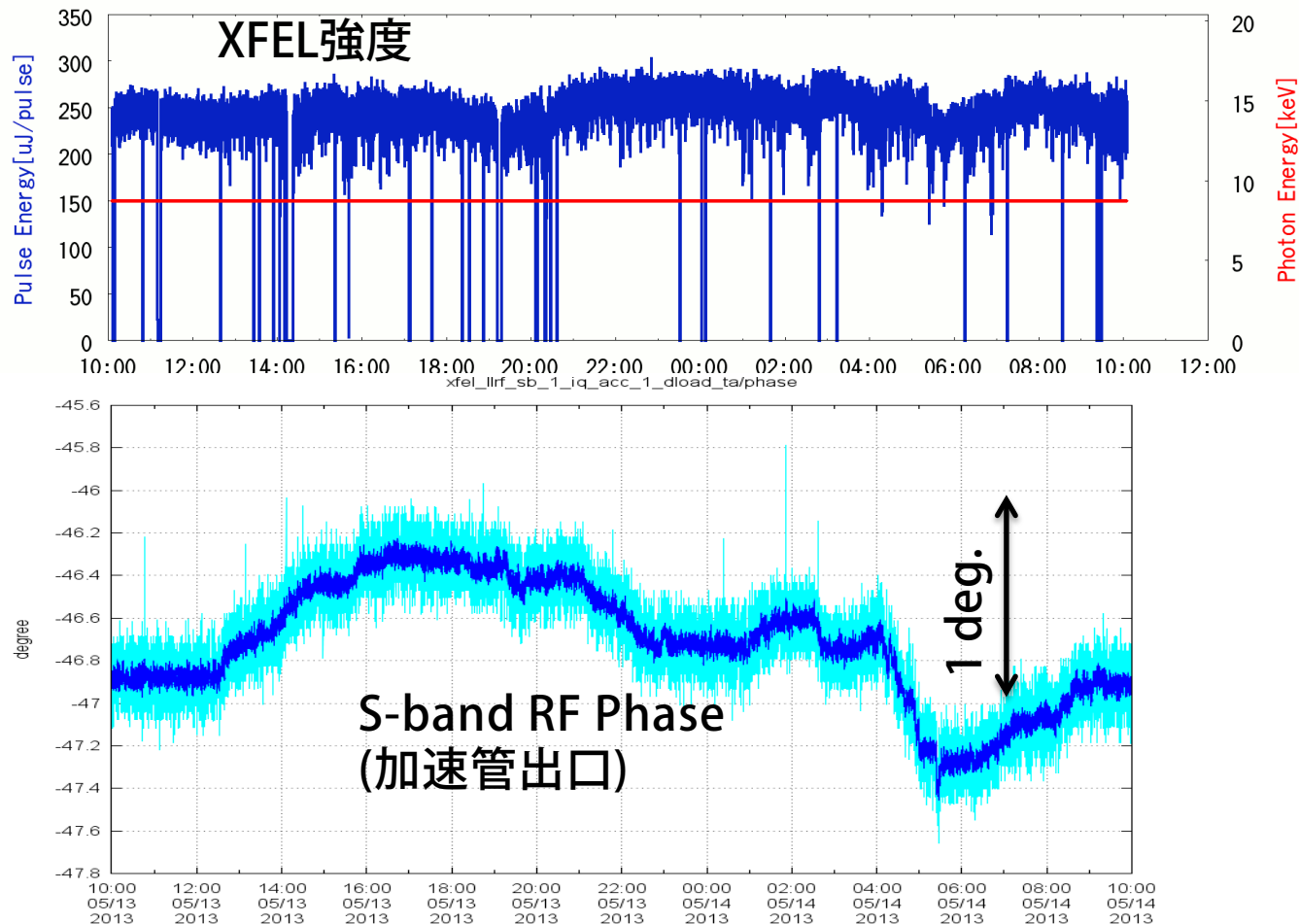
ギャラリー温度 [°C]

水冷ラック内温度 [°C]



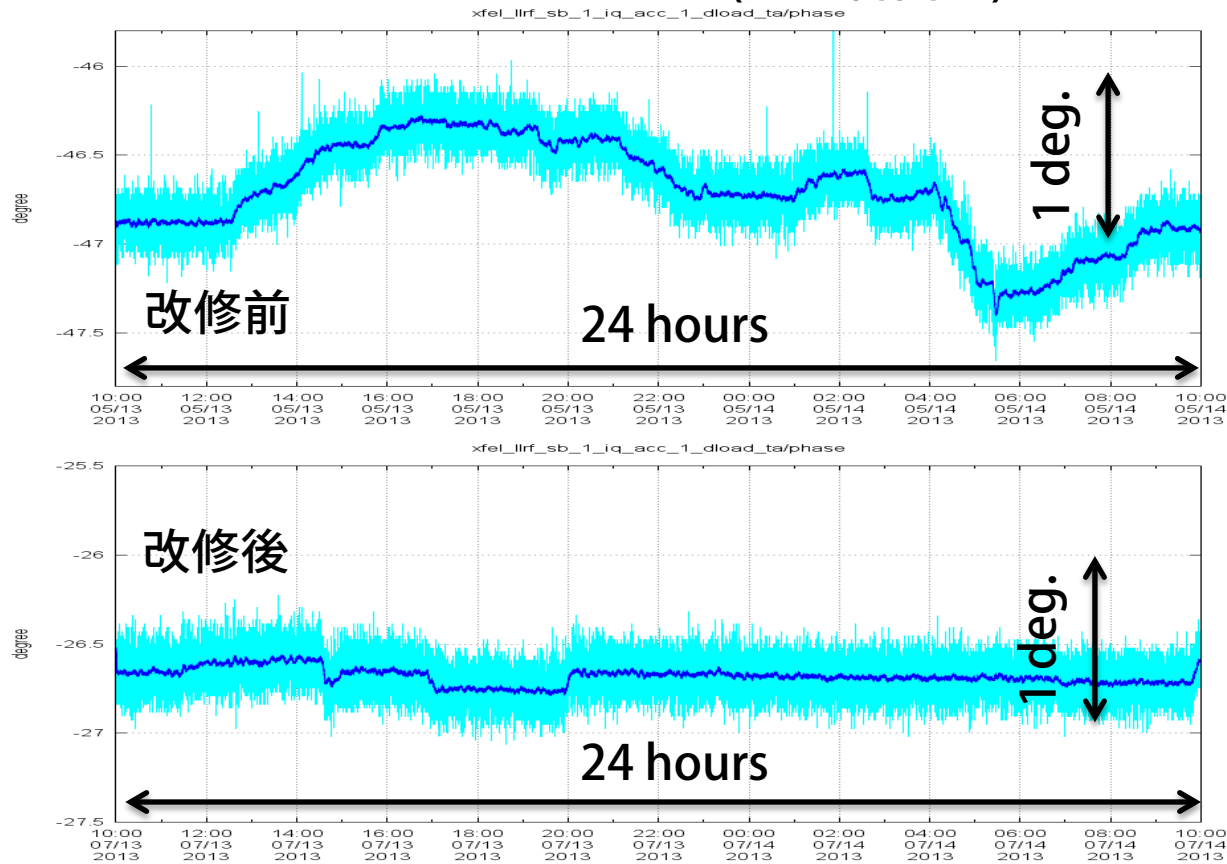
ギャラリー温度 [°C]

低電力RF系の温度ドリフトが1桁改善されたと考えられる



- 入射部の安定化の結果，Sバンド加速器のドリフトが顕著に見えるようになった
 - Sバンド加速位相のドリフトがXFEL強度に影響を与える

S-band RF Phase (加速管出口)



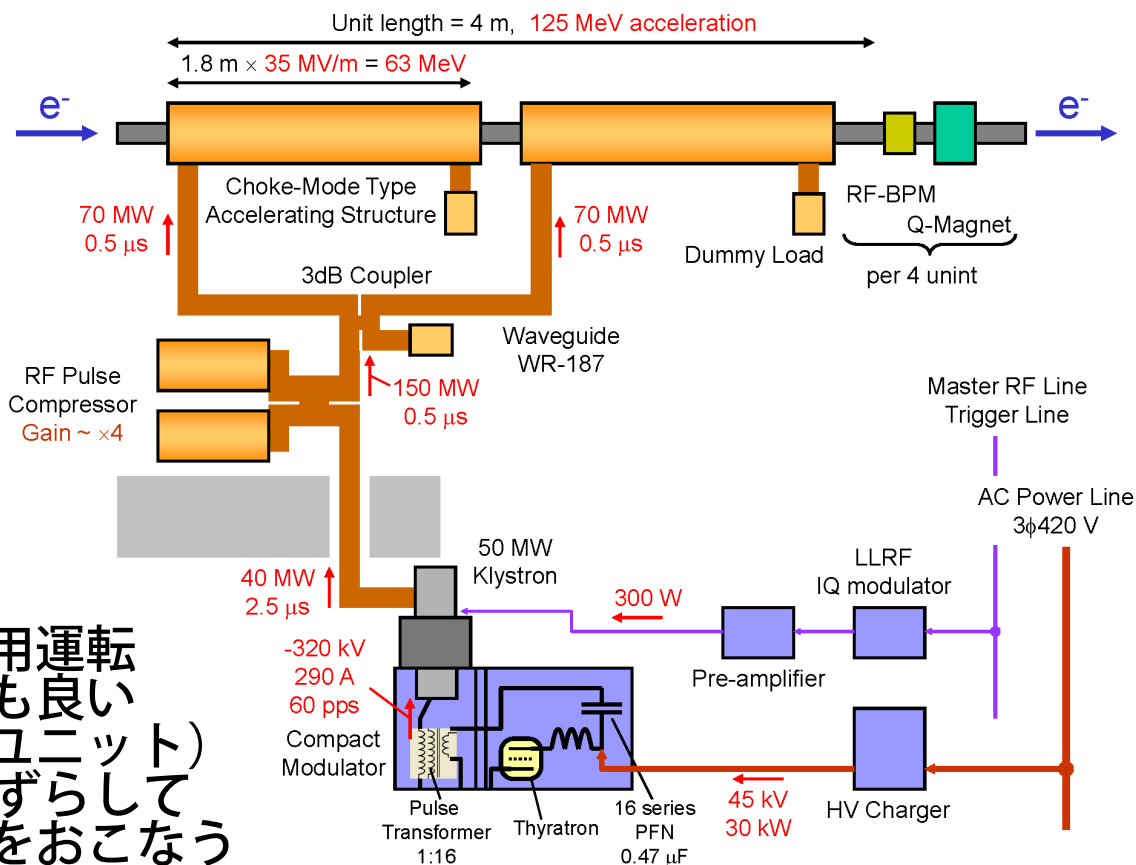
- Sバンド加速管の精密温度調整装置の制御モジュールを入射部と同じものにした
 - 旧制御モジュールには0.1°C程度のドリフト → 新制御モジュールで0.01°Cの安定度に
 - ヒータはPWM ACのまま
 - エネルギーが十分に高く、軌道変動への心配はிரらない
- この改修の結果、Sバンドの位相ドリフトによる影響が低減された

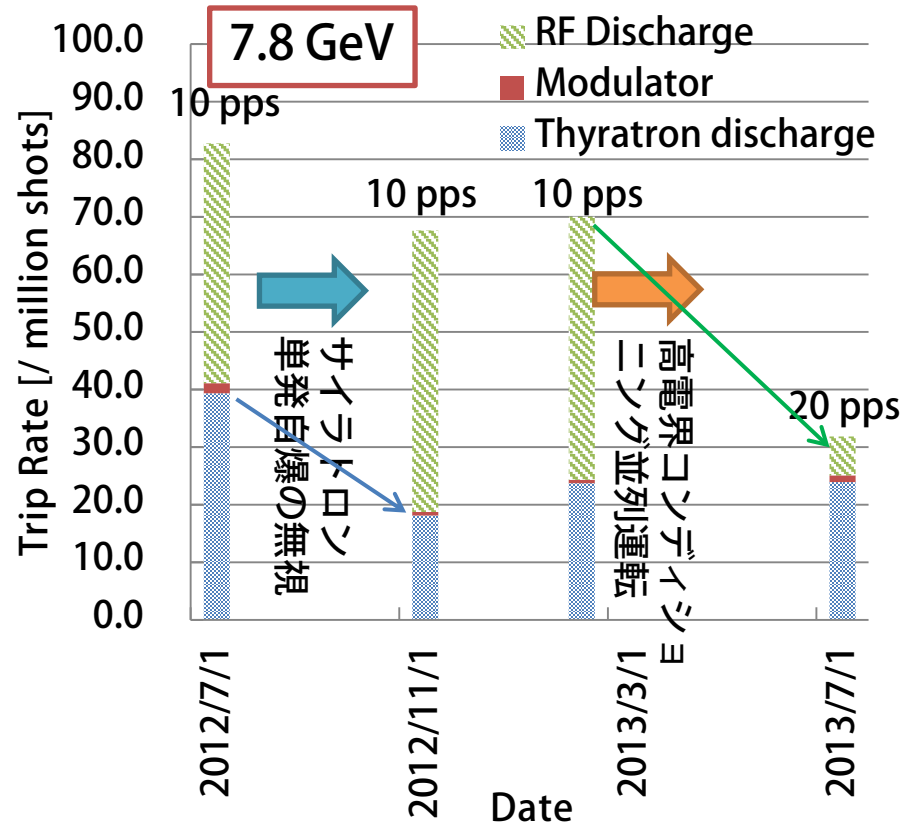
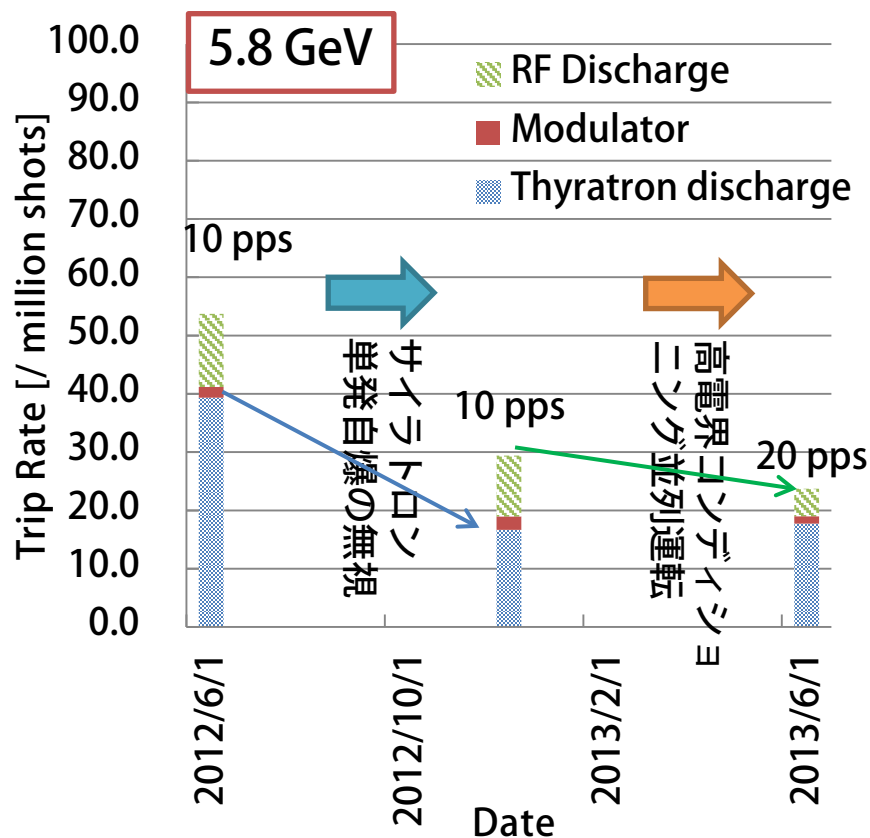
- 昨年7月の時点で、8 GeV 10 pps での平均トリップ間隔が30分程度だった
- トリップ頻度を減らし、加速器繰り返しを増やしたい
- トリップの原因

- サイクロトロン（注）の自爆
- 加速管での放電
- その他

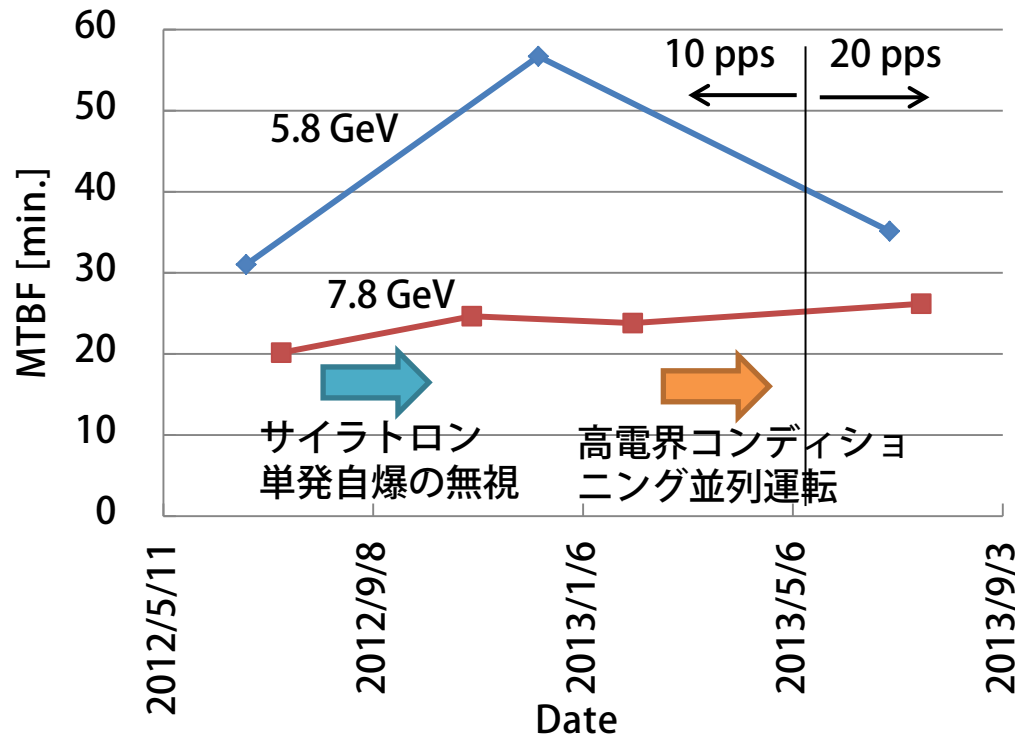
トリップ削減の方法

- トリップ条件の緩和
 - サイクロトロン（注）の単発の自爆を無視する
- 加速管の高電界コンディショニング
 - 低エネルギーでの供用運転の際に使用しなくても良い加速ユニット（待機ユニット）のRFのタイミングをずらしてコンディショニングをおこなう



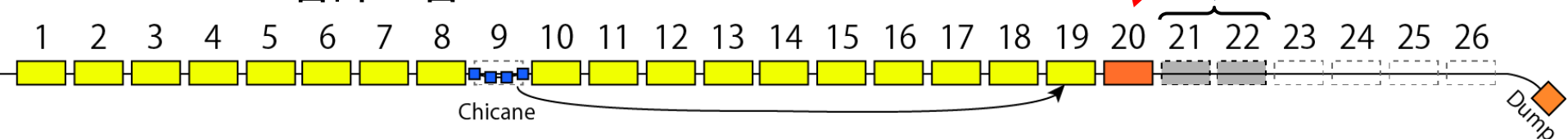


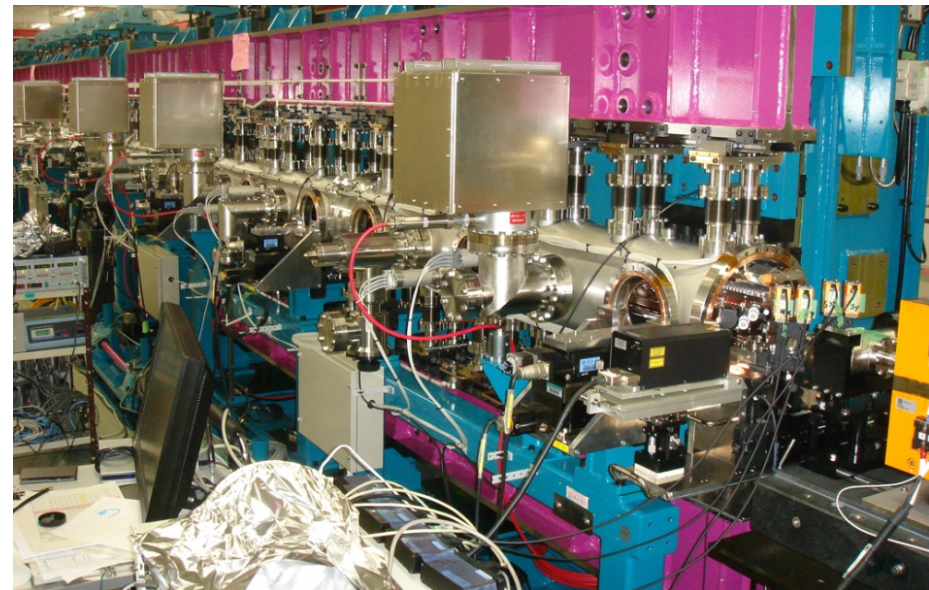
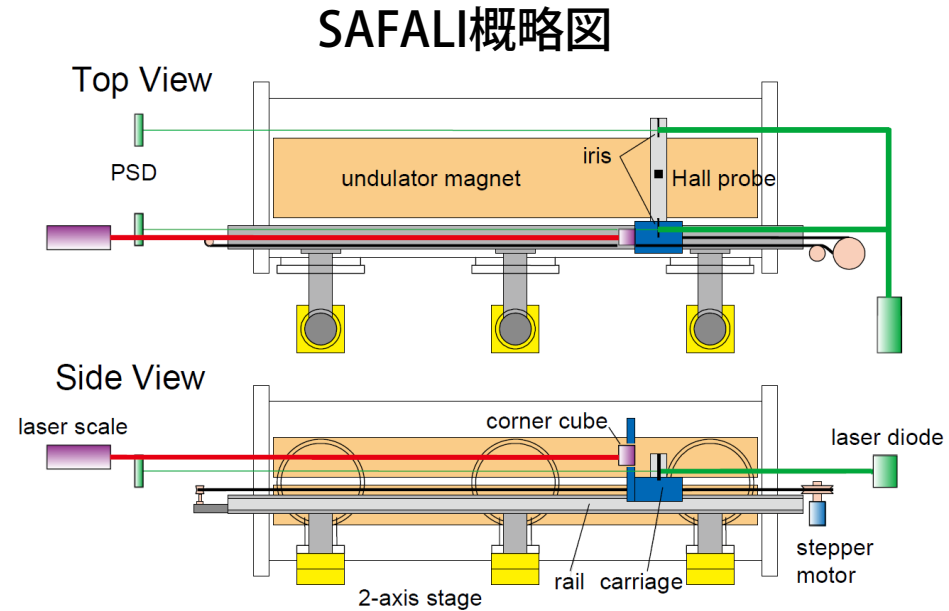
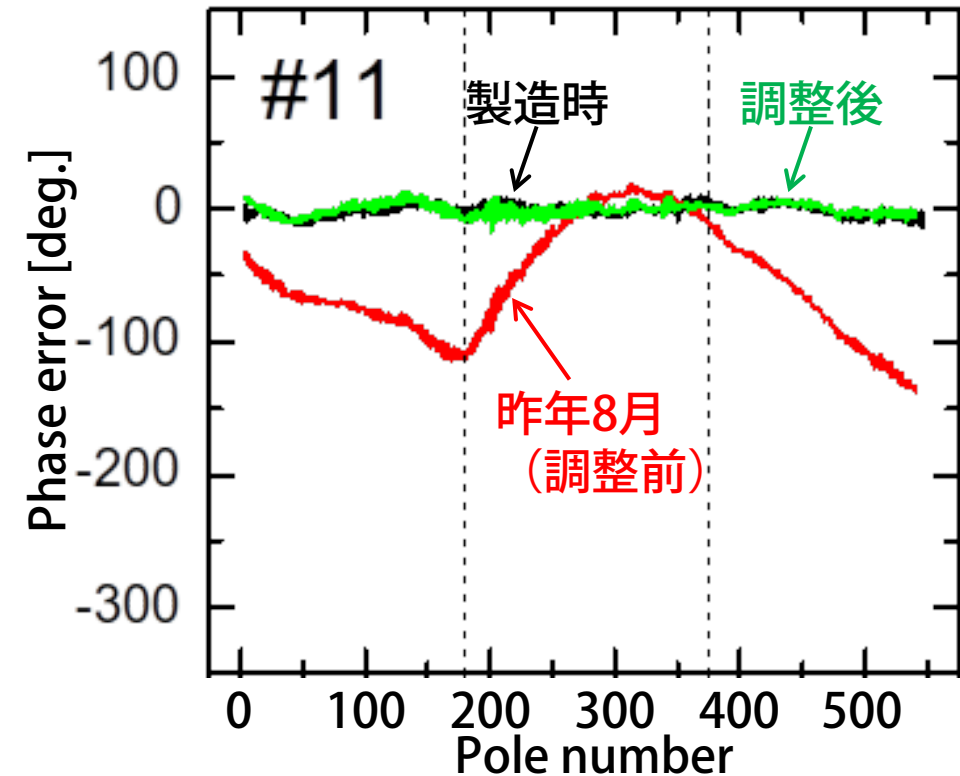
- 昨年8月にサイラトロン単発自爆を無視するように全数改修した
 - 昨年7月以前も70台中25台について試験的に改修していた
 - 昨年9月以降, サイラトロン自爆によるトリップが半減
- 今年2月より待機ユニットの高電界コンディショニング並列運転を開始
 - とくに高エネルギー側での運転で加速管放電によるトリップが激減
- 今年5月より, 20 pps での供用運転をおこなっている



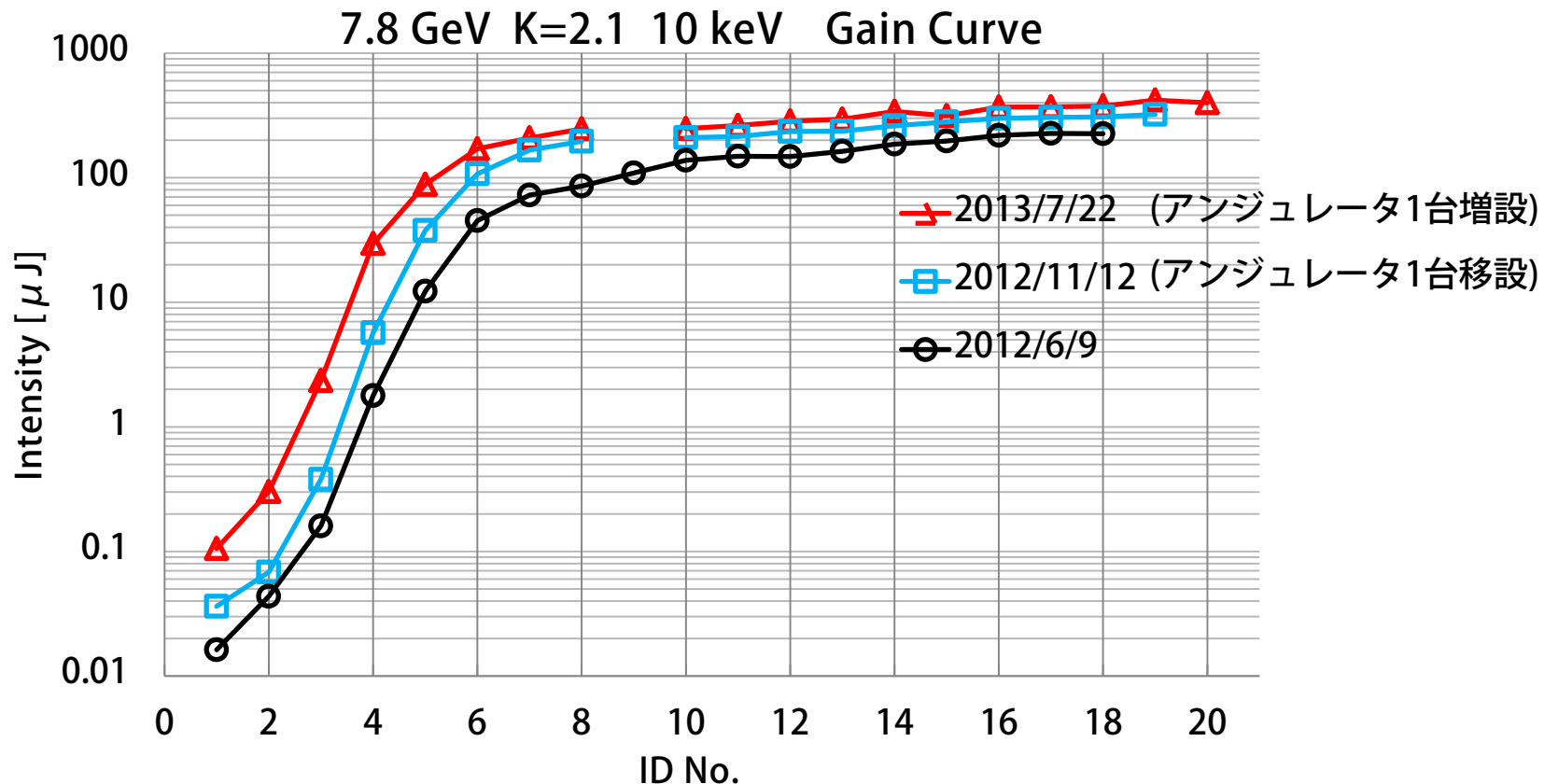
- サイラトロン単発自爆の無視をすることで、平均トリップ間隔が伸びた
 - 5.8 GeV で倍増 (~30分 → ~60分)
 - 7.8 GeV で微増 (~20分 → ~25分)
- 高電界コンディショニング並列運転でトリップ頻度がさらに下がり、20 pps 運転へ
 - 5.8 GeV では恩恵が少ないため平均トリップ間隔が35分程度に減少
 - この程度なら問題ない。繰り返しが増えることの恩恵のほうが大きい。
 - 7.8 GeV では効果が大きく、20 pps にしても30分弱の平均トリップ間隔を維持

- アンジュレータの磁場調整
 - 昨年7月の時点で、自発光のスペクトル測定やFELゲインのデータから、いくつかのアンジュレータの磁場に誤差があることが示唆された
 - 昨年8月に現場にてSAFALIで磁場を測定
 - SAFALI: Self-Aligned Field Analyzer with Laser Instrumentation
 - 誤差があったものについては磁石列駆動系の調整をおこなった
- アンジュレータの移設と増強
 - 昨年8月に18台中9台目のアンジュレータを最下流に移設
 - シケインを設置して、セルフシード型FELの生成や自己相関測定、時間差をつけた2色XFELを発生させるため
 - 今年1月にアンジュレータを1台増設
 - 合計19台に
 - 今月、アンジュレータをさらに2台増設中
 - 合計21台へ

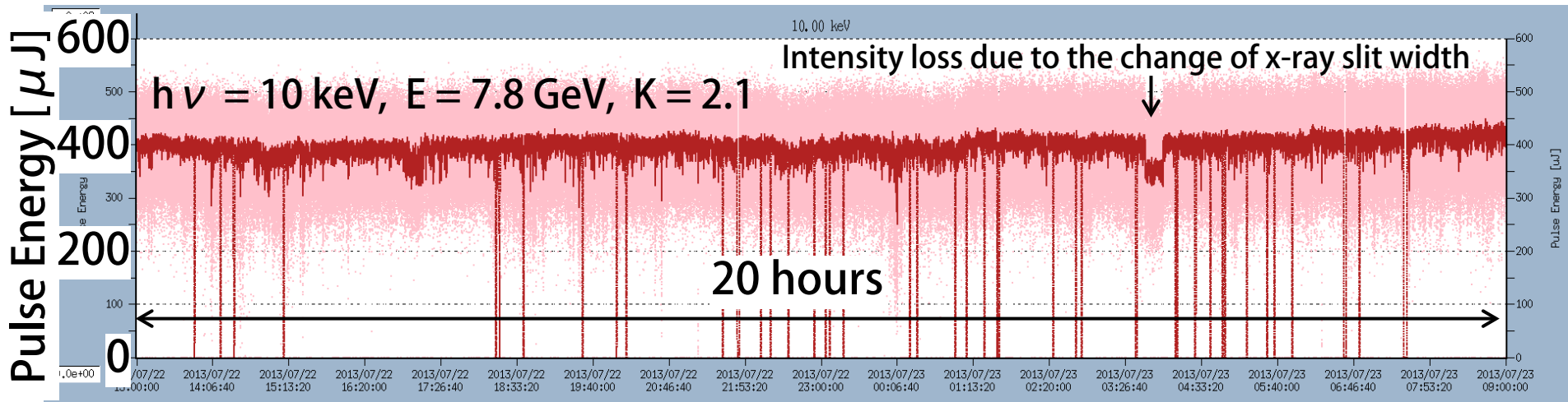




- SAFALIによる測定
- 磁石列駆動系の調整で改善
 - 調整量は数 $10\mu\text{m}$
 - 昨年8月



- 昨年に比べてFELゲイン長が短くなっている
 - 加速器の安定化され, より精密な調整ができるようになった
- XFEL強度も昨年夏の $250 \mu\text{J}$ から $400 \mu\text{J}$ に増大
- 9台目のアンジュレータを移設した影響は見られない



Pink dots: shot-by-shot intensity
 Red dots: 100-shot moving average

- 10 keV の XFEL が 400 $\mu\text{J} / \text{pulse}$ (ave.) で安定に供給できている
 - 1年前は 250 $\mu\text{J} / \text{pulse}$ (ave.) だった

- **入射部の安定化**
 - RF加速空洞の精密温度調整装置のDC化（昨年8月）
 - PWM ACヒータの漏れ磁場によるビーム軌道変動を除去
 - 低電力RF機器用水冷19インチラックへの精密温度調整装置の導入（昨年11月）
 - 低電力RF系の温度ドリフトの抑制
 - Sバンド加速管の精密温度調整装置の精度向上（今年6月）
- **加速器のトリップ頻度低減**
 - サイラトロンの単発の自爆を無視するようにトリップ条件を改修（昨年8月）
 - 待機ユニットの高電界コンディショニング（昨年2月以降）
 - 繰り返しを 10 pps から 20 pps にあげて供用運転（今年5月以降）
- **アンジュレータの調整と増設**
 - アンジュレータの磁場調整（昨年8月）
 - アンジュレータ9台目の最下流への移設（昨年8月）
 - セルフシード型FEL, 時間差付き2色FEL発振, 自己相関測定などのため
 - アンジュレータを1台増設（今年1月）
- **XFEL強度**
 - 昨年7月： 250 μJ / pulse (ave.) @ 10 keV
 - 今年7月： **400 μJ** / pulse (ave.) @ 10 keV
- **今後の高度化**
 - アンジュレータをさらに2台増設（現在作業中）
 - BC3より上流のCバンド加速管の精密温度調整装置の精度向上（今年中）
 - 基準信号伝送用光ファイバの光路長制御（今年中）
 - 30 pps への繰り返し増加（今年中）
 - その他