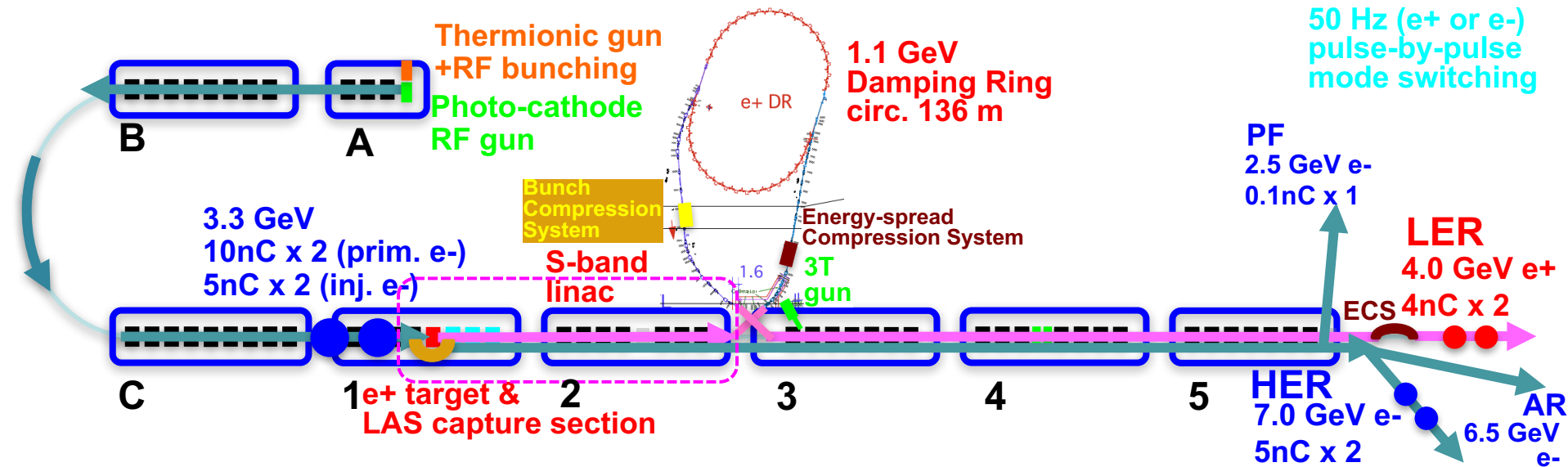


陽電子源の現状

紙谷 琢哉 (KEK)

SuperKEKB入射器レイアウト



【SuperKEKBのための主な増強項目】

- Photo-cathode RF-gunからの低emittance e- beam / 熱電子銃からの大電流 e- beam
- 低emittance e+ beam生成のためのDamping Ring 新設
- 陽電子生成部の移設、改良(FC、LAS加速管、QM収束系強化)による e+ beam 強度増強
- 3T仮入射部設置による、PF, AR運転を継続しながらのSKB用改造&commissioning
- Pulse magnet系(特に pulse Q)導入による beam optics/orbitのfast switching
- Beam Position Monitor系の高分解能化
- Beam line alignment の高精度化

本日の報告者: 陽電子(紙谷)、RF電子銃(吉田)、加速管(肥後)、パルスマグネット(榎本嘉)

Positron source members

■ KEK

- ◆ 榎本嘉範, 紙谷, 福田, Zang, 横山
- ◆ 田中, 池田, 柿原, 荒木田, 大沢, 榎本收志
- ◆ 中島, 明本, 松本修二, 肥後
- ◆ 三浦, 宮原, 杉本, 清宮, 飯田, 大西
- ◆ 岡田, 高富, 染谷, 風間

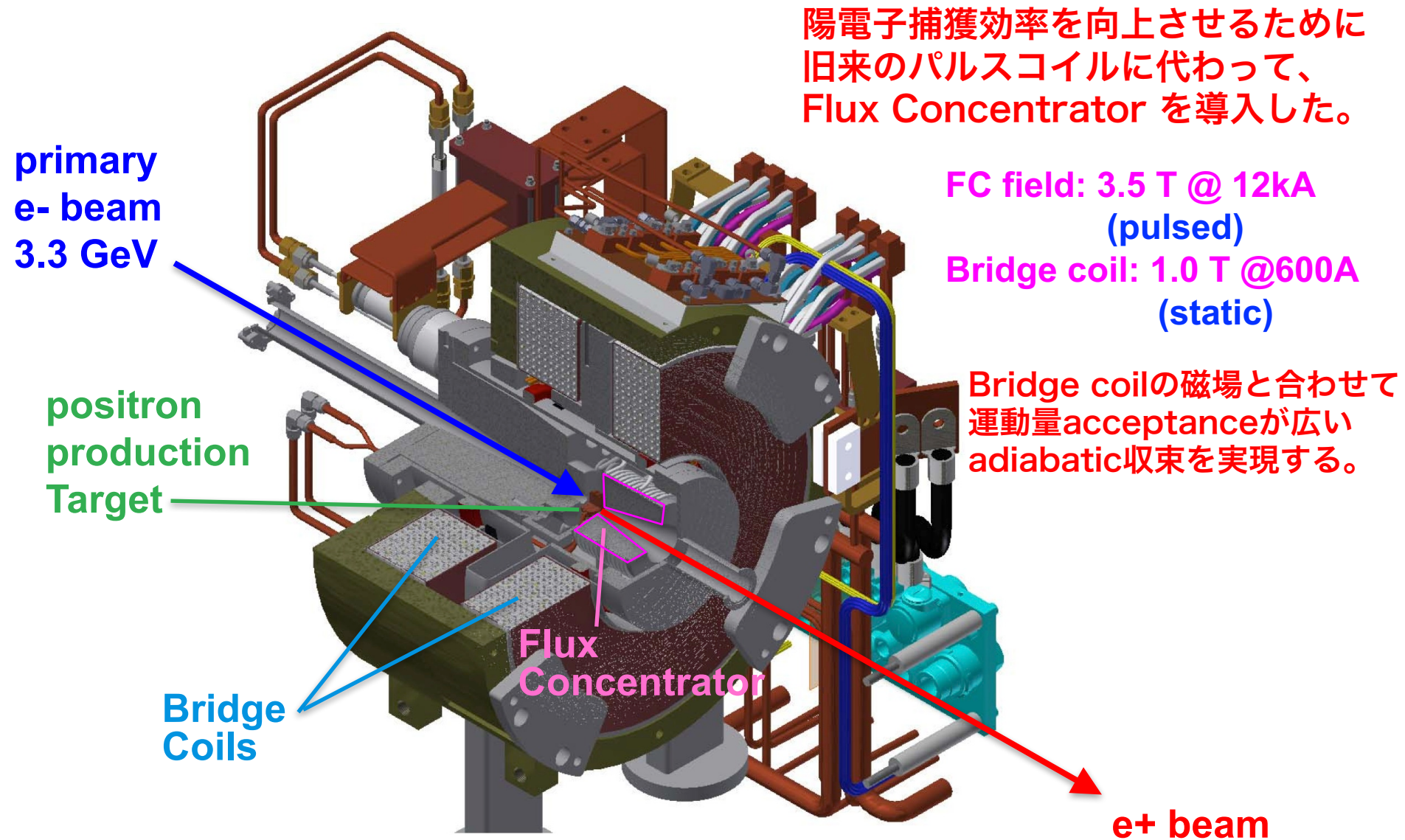
■ 三菱電機システムサービス

- ◆ 牛本, 鈴木, 木村, 黒田

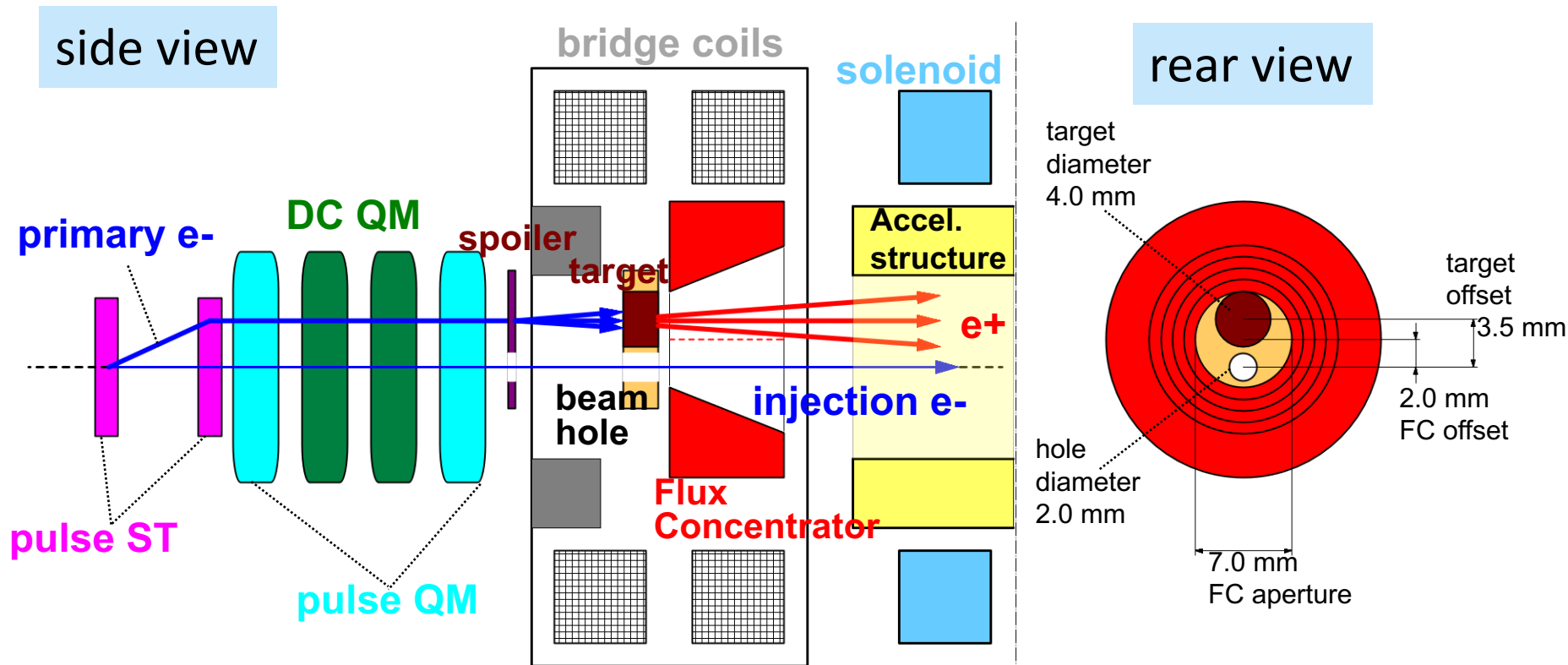
■ トヤマ

- ◆ 佐藤, 諸田, 飯野, 酒井, 山口, 迫田

SuperKEKB positron source



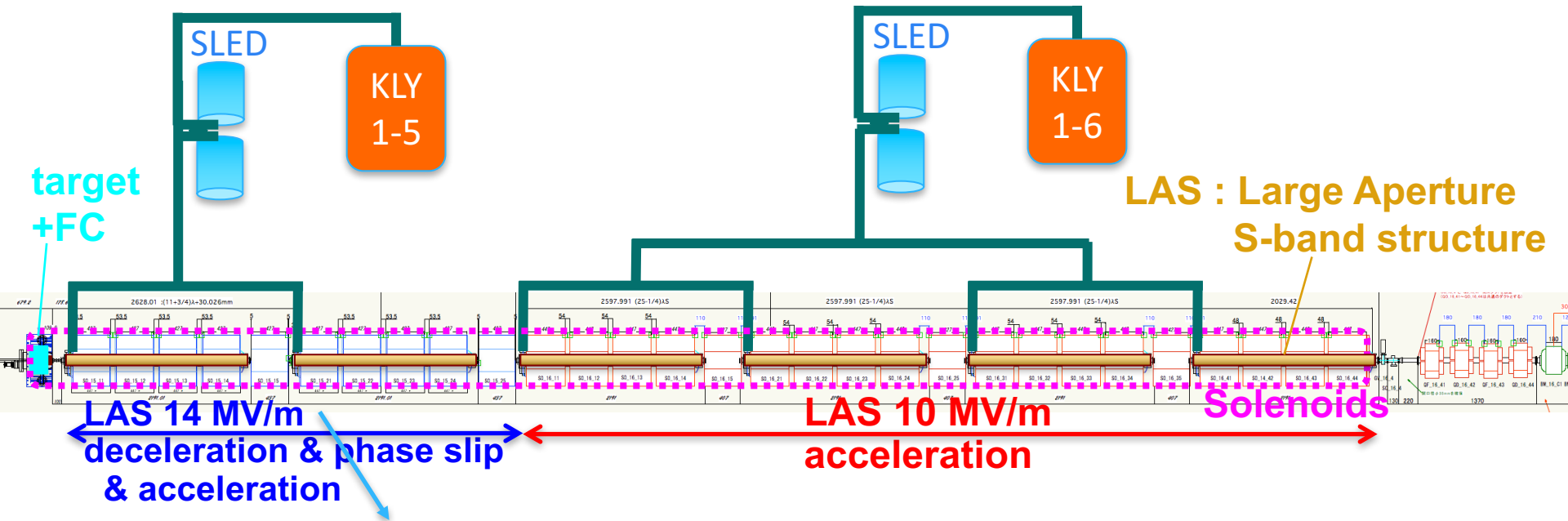
target offset & beam hole



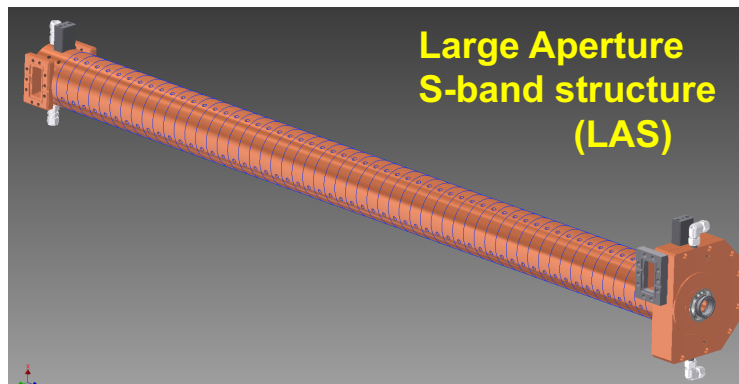
入射電子ビームはターゲット横の穴を通すことで、パルス毎に電子、陽電子を切り替えることができる。

- 入射用 e- beam : low emittance保存のためビームライン中心を通す
- 陽電子生成用 e- beam : 2.5 mm off してターゲットに当てる (この位置がe+量最大)
(target offset 3.5 mm, FC offset 2.0mm)

Positron Capture Section



operated at 10 MV/m
with SLED detuned



陽電子捕獲効率を向上させるために
通常の1.5倍の開口径（30mmΦ）を持つ
LAS加速管を導入する。

（LAS加速管開発 By 肥後、松本修）

DR入射時のビームロスを減らすために
ターゲット直後の2本のLAS管には
減速位相で陽電子を入射する。

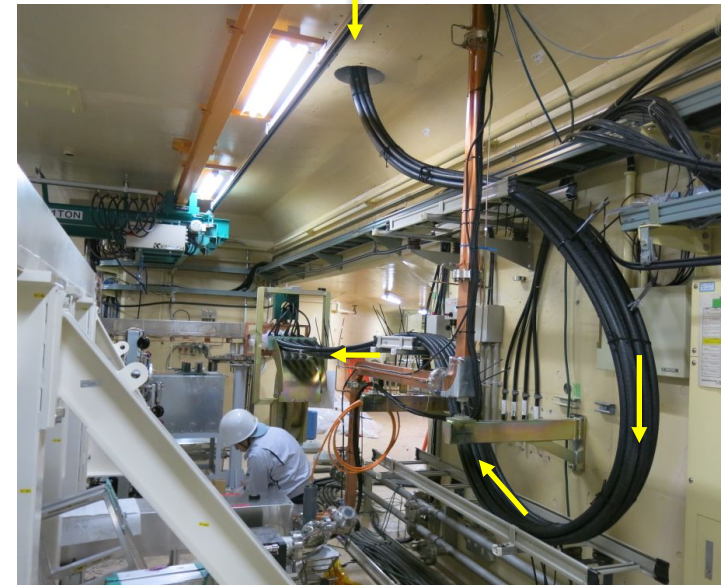
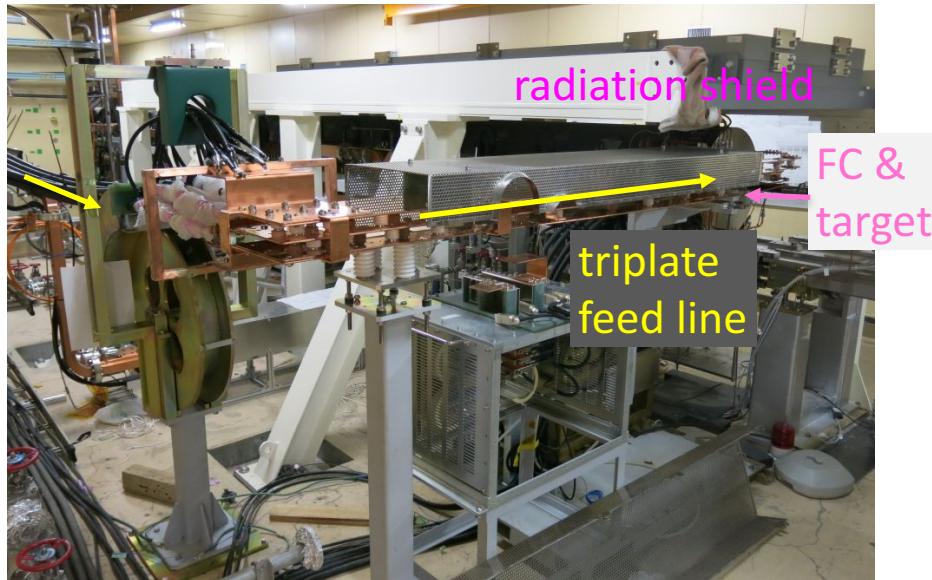
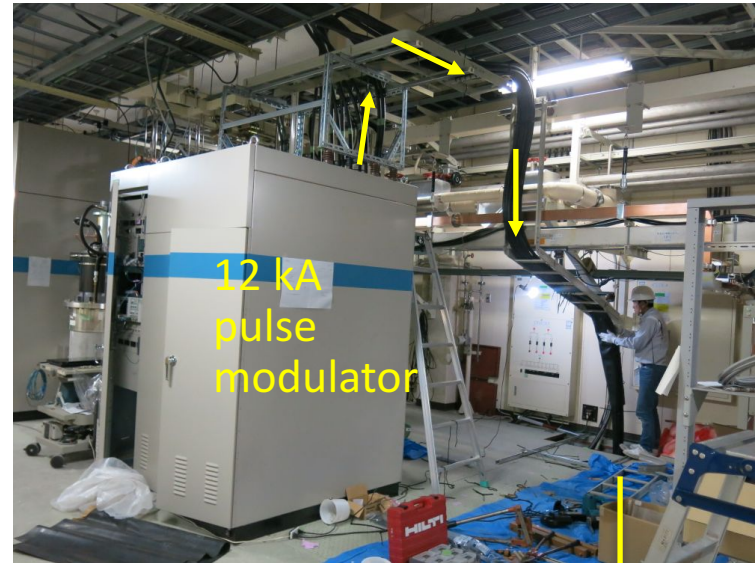
LAS加速管の問題

- 陽電子キャプチャー部 1-5ユニットのLAS加速管は RF conditioning してもなかなか電界が上げられない。
- SLED ON での conditioning は難しく、現在 **SLED OFF** で使用し、KLY出力最大でも **10 MV/m** である。
- 特にターゲット直後の1本目の加速管には放電が多い。
但し、10 MV/m では安定している。
- その下流の 1-6ユニットのLAS加速管は同じくソレノイド磁場中に置かれているが、こちらは SLED ON で使用可能で、加速電界は 13 MV/m となっている。
- その下流の 1-7ユニットのLAS加速管はソレノイド磁場中ではないが、Qマグネットの磁場下にある。また開口径が急に狭くなる場所である。後日 collimatorを設置した。こちらも SLED ON で使用可能で、加速電界は 13 MV/m となっているが、一旦放電をおこすと conditioning により回復させるのに1シフト程度かかることがある。

SuperKEKB e⁺ source (2015 September)

■ fullspec電流12kAでの運転開始

- ◆ FC assembly #1 (FC-base #3)
- ◆ 12-kA pulse modulator for FC
 - new coaxial cables
 - new triplate feeder line
 - snubber circuit
- ◆ Bridge Coils
- ◆ DC solenoids
- ◆ LAS accel. structures

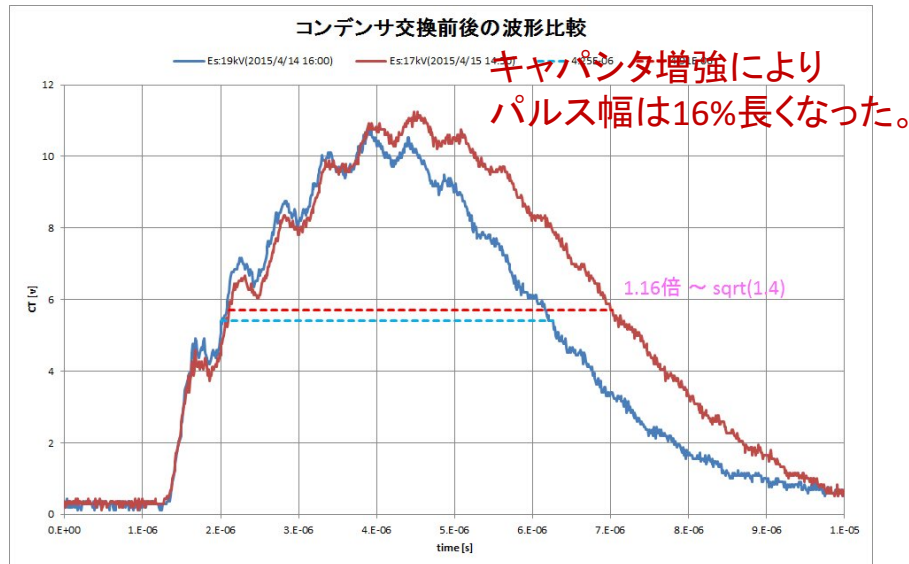


FC用パルス電源

■ 当初、同軸ケーブル端末の焼損事故が起きたこともあり、

- ◆ 高耐圧ケーブルへの変更 (By 横山)
- ◆ 三重平行銅板線によるインダクタンス低減と電源キャパシタ容量増加によるFC電圧の低減 (By 福田、明本)
(これにより12kAを達成する充電電圧が $E_s = 19 \rightarrow 17 \text{ kV}$ に低下)

■ などの対策が行われた。



(パルス電源 By:明本、中島)

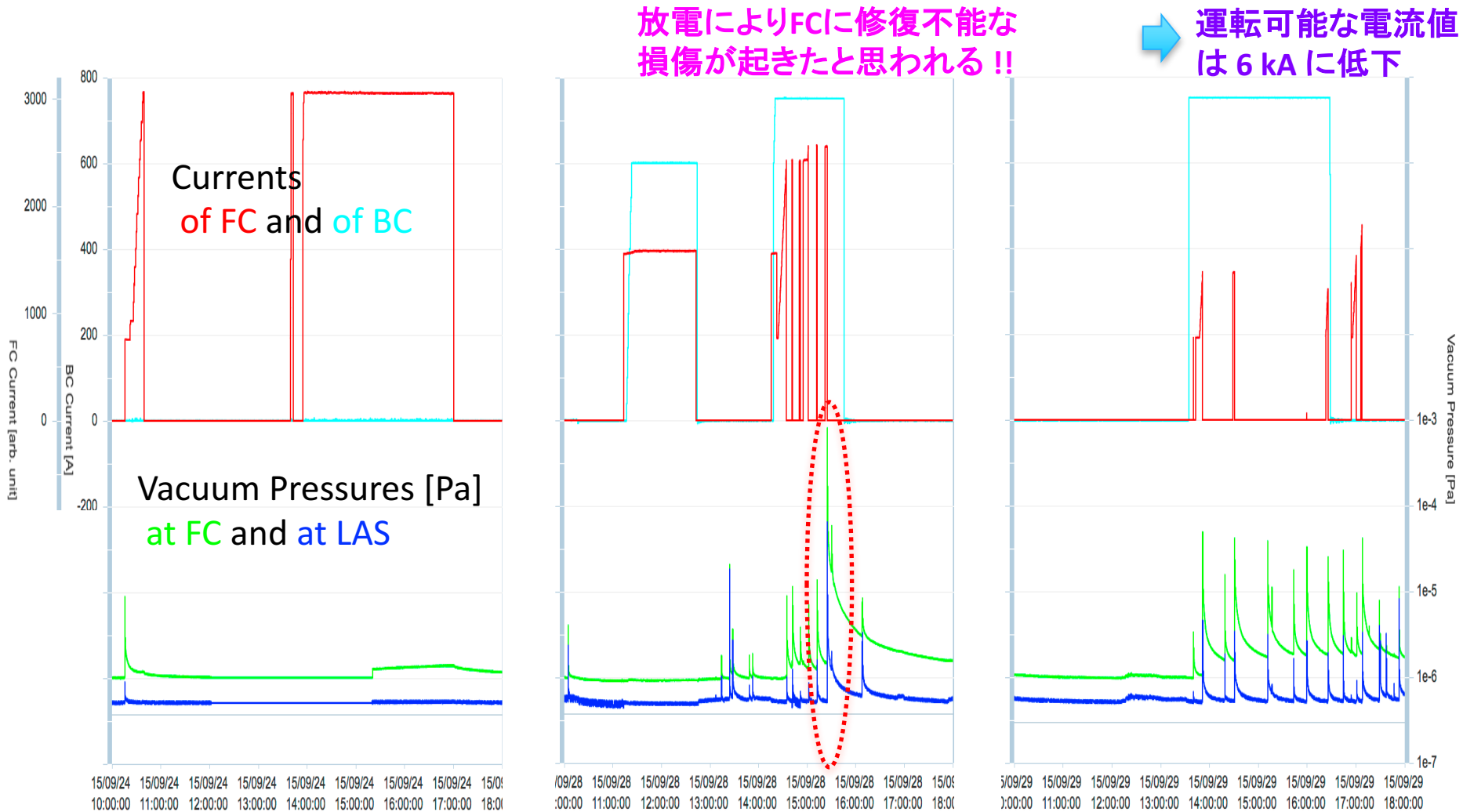


Bridge Coil 通電開始後に大きな放電で損傷

2015.09.24
FC 安定 at $I_{FC} = 11.5$ kA
但しBC 磁場無し

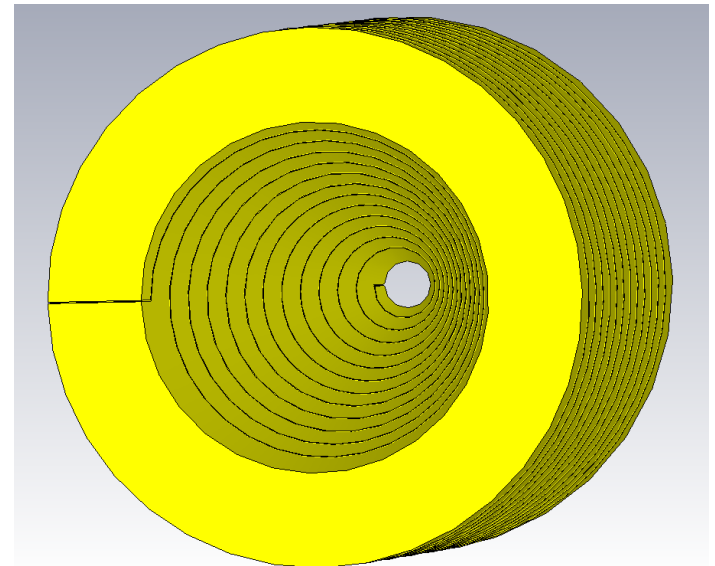
2015.09.28
非常に大きな圧力上昇発生
at $I_{FC} = 9.8$ kA @ $I_{BC} = 750$ A

2015.09.29
BC 磁場無しの状態
でも放電する



FC 銅ブロックの加工硬化の重要性

- 2015年12月に榎本嘉範氏と肥後氏が SLAC で陽電子のエキスパート (A. Kulikov and E. Bong) と FC の放電問題について議論した。
- 放電によるダメージを防ぐためには、FCの無酸素銅ブロックの加工硬化 (hardening) が重要であることが示唆された。(我々にはその重要性の認識が不十分で、この過程をさぼってしまった。)
- "加工硬化 (ひずみ硬化)" は塑性変形を繰り返すことで金属を固くするやり方のことである。
- FCが加工硬化してあると、放電が起きても、スプリング形状が一旦変形するがまた元の形状にもどる。
- 加工硬化していないと放電時の変形がそのまま残り、スリットのギャップが狭い場所ができる可能性がある。

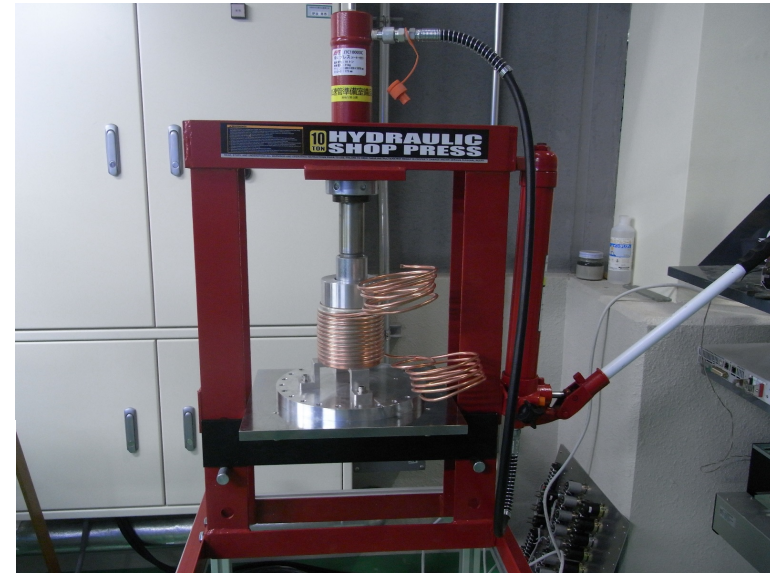
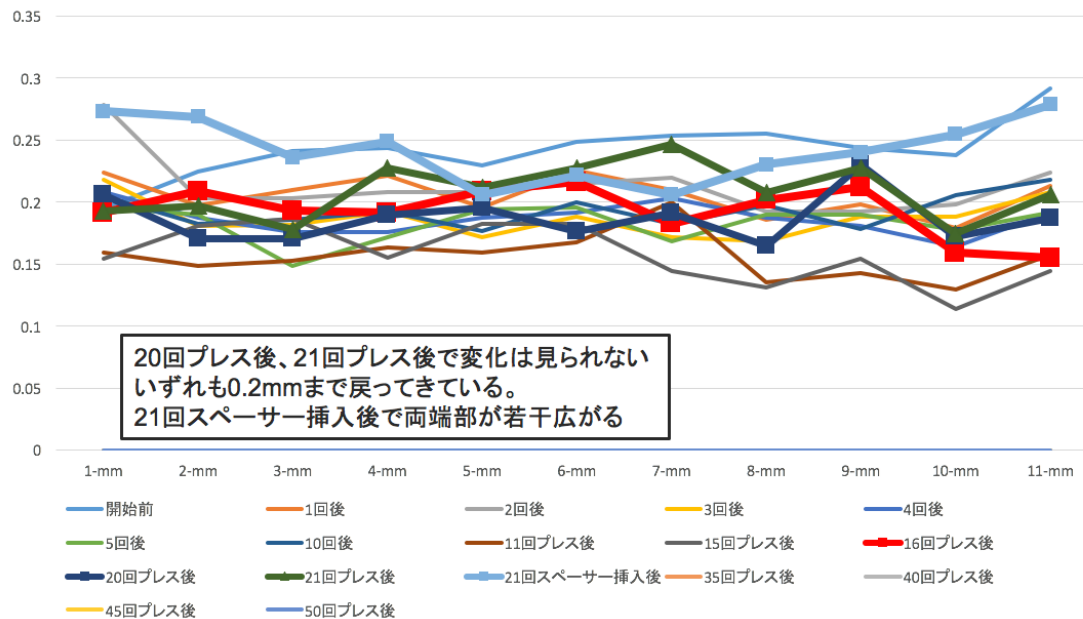


加工硬化(hardening)の様子

(FC Hardening & 測定 By 榎本嘉)

Hardening 手順

1. FC-head をスリット間が接するまでプレスする
2. スリットにスペーサを挿入する
3. ギャップサイズを測定する
4. 手順(1) に戻って繰り返す。



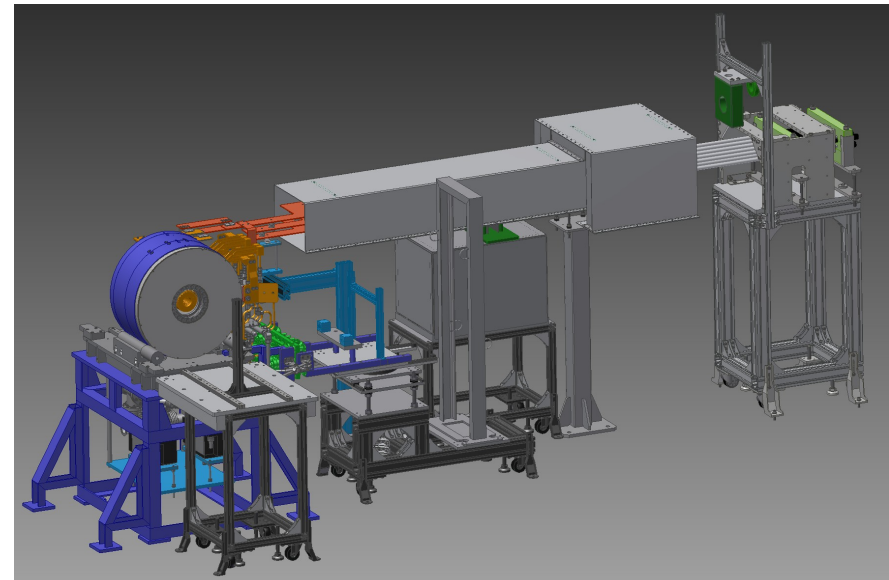
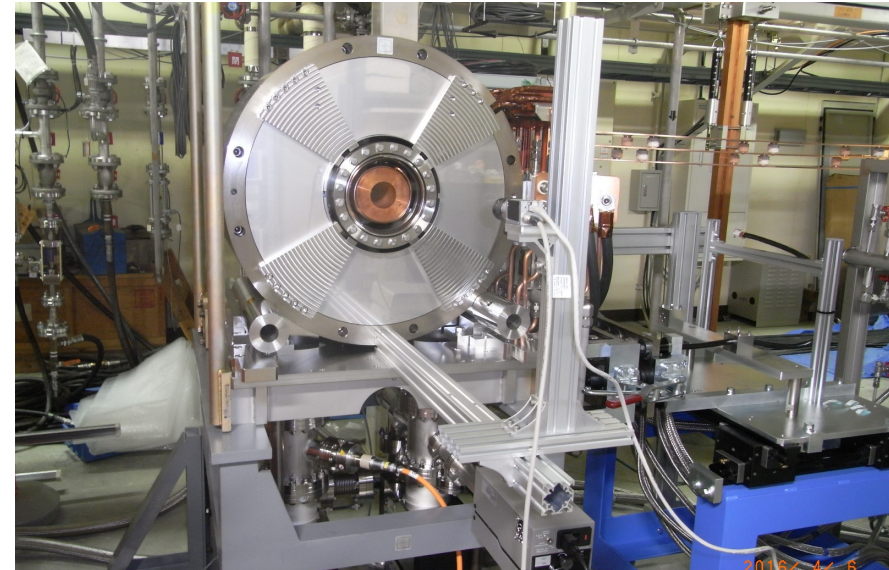
FC-head #5



加工硬化(Hardening)処理を行った
FC-head#5 を製作し、
FC-assembly#2 に組み込んで
テストスタンドで試験することにした。

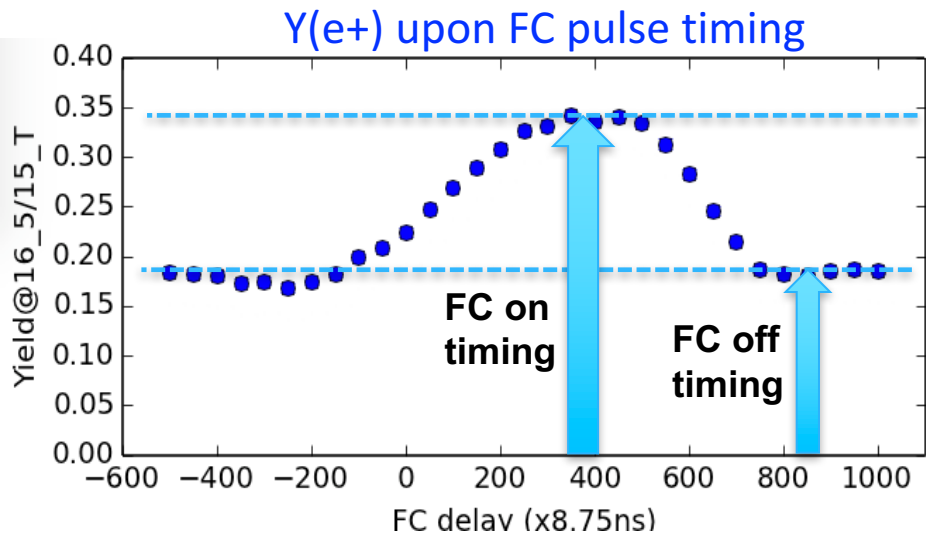
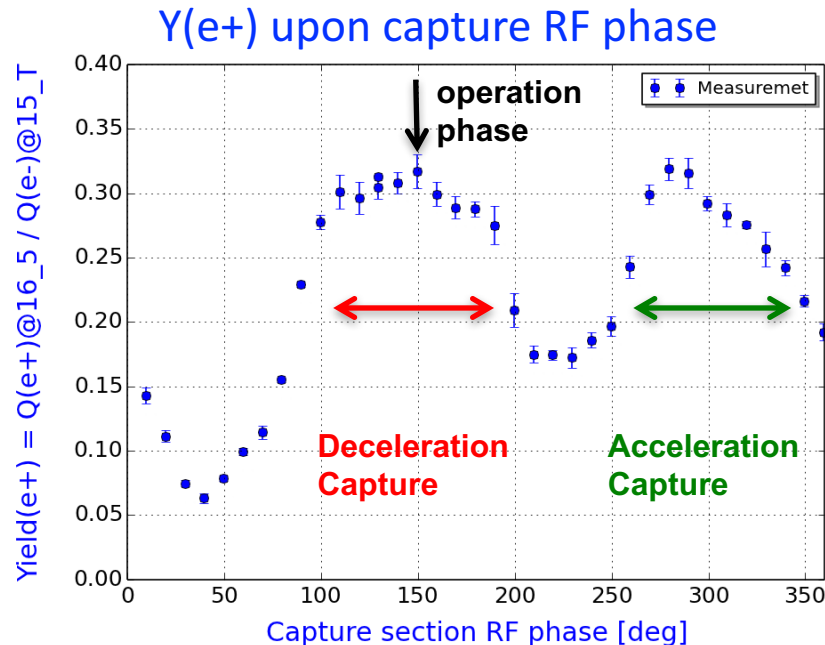
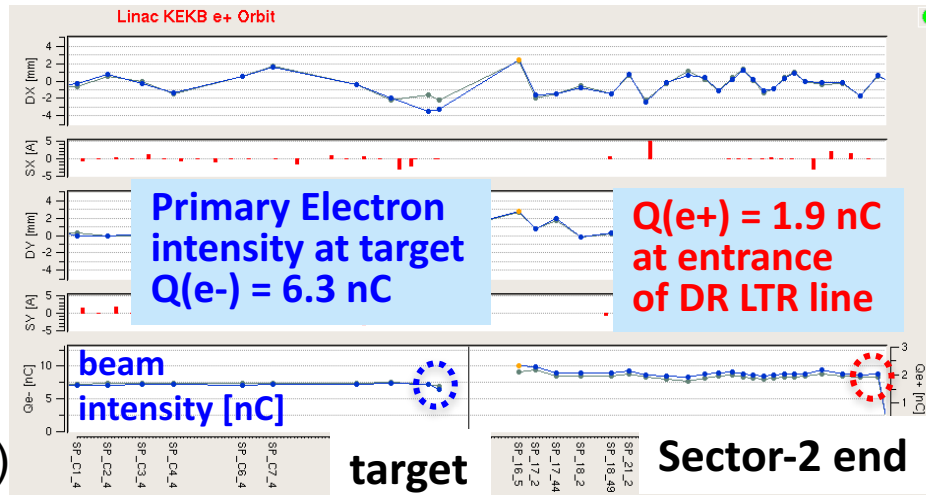
FC assembly #2 & test stand

- FC assembly #1 のテストスタンドでの試験は、BC磁場は無しであった。
- FC assembly #2 はBC磁場をかけて試験できるようなテストスタンドを構築した。この際、データ収集系、インターロック系を増強し、マルチカップリング接続部、ケーブル接続部などを改良した。（By:榎本嘉）
- 参考のために、HardeningしていないFC-head#4 をFC assembly #2に組み込んでBC磁場有りの条件で通電試験してみたが、FC損傷に至るような放電は起きなかった。（By:榎本嘉）



FC assembly #1 は 6kA以下でビーム運転 (2015 Nov.)

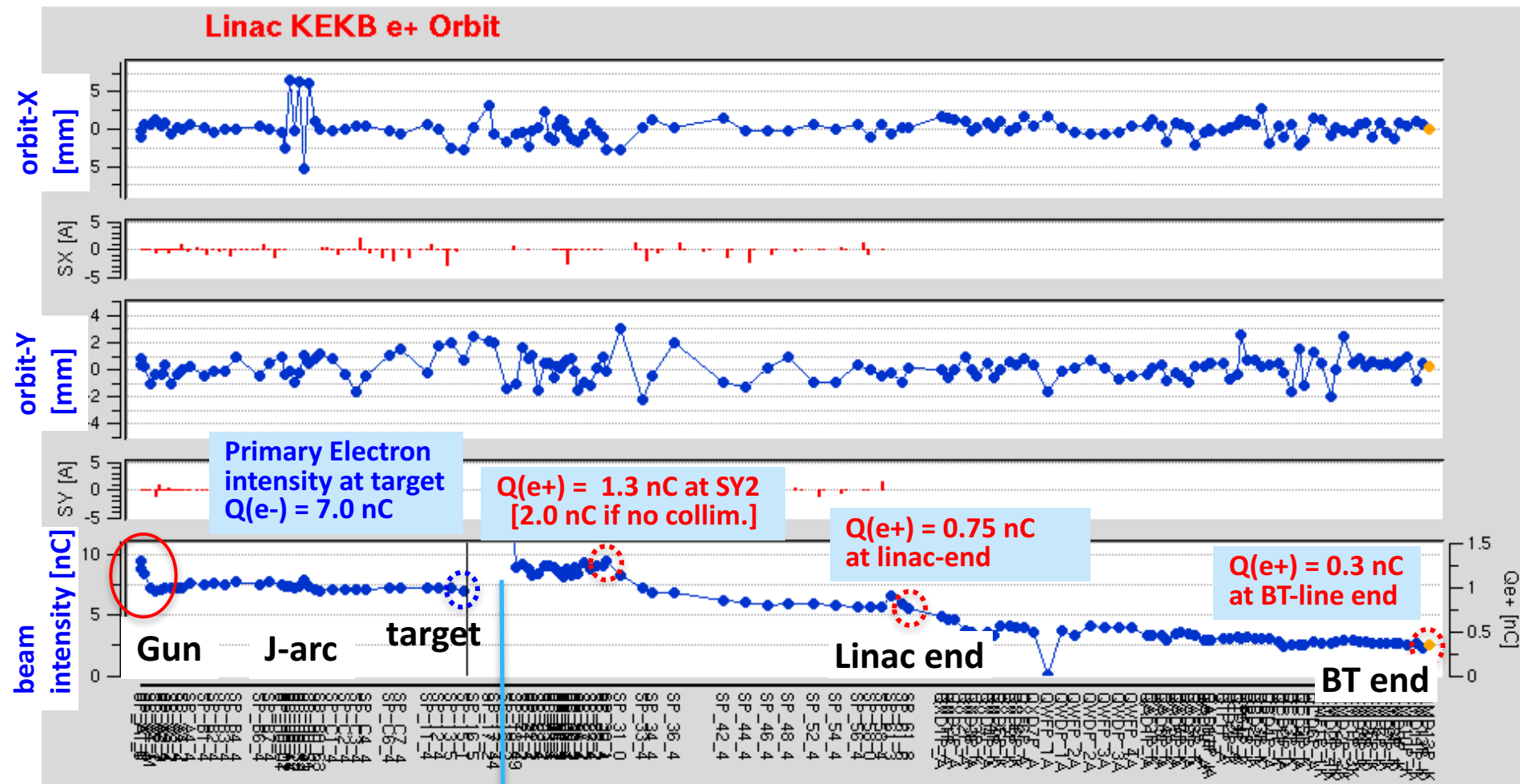
- 2015年10月～12月に陽電子収量を最大化するビーム調整実施
- $I_{FC} = 6 \text{ kA}$ (design 12 kA) での enhancement は FC ~ 1.8
- $Q(e^-) = 6.3 \text{ nC @ target}$
 $Q(e^+) = 1.9 \text{ nC at SY2}$
 $Y(e^+) = 1.9/6.3 \Rightarrow 30 \%$ (design 50 %)



Yield enhancement by FC (6 kA) ~ 1.8

SuperKEKB Phase-1 での e^+ 運転状況

Typical e^+ injection beam at linac and BT-line



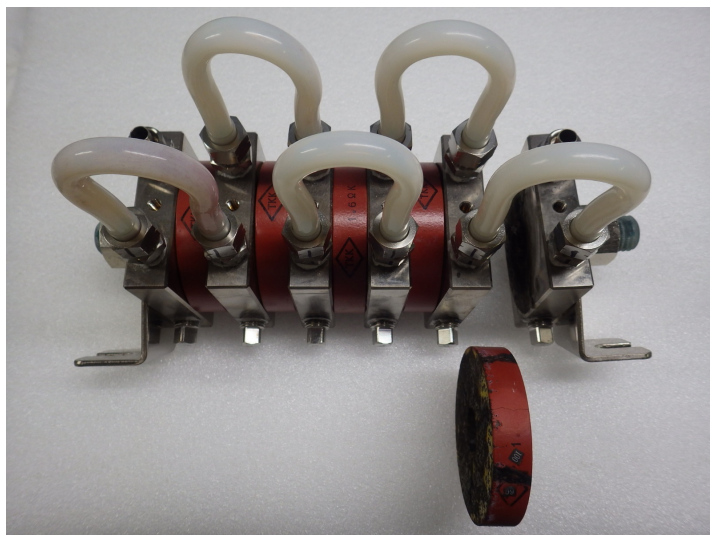
24度合流ラインで
ビームロスする。

下流でのビームロスを低減するため
1-8 部のcollimator を使用している。

DR無しでのLER入射のため、Sec-3以降及びBTライン
でビームロスしている。

Test Standパルス電源の抵抗器発熱問題

- FC-assembly#2 にhardeningしたFC-head#5 を組み込んで通電試験を 2016年10月から開始したが、**パルス電源内の抵抗器が異常発熱**する問題が発生した(2016.10.08)。
(By 榎本嘉)

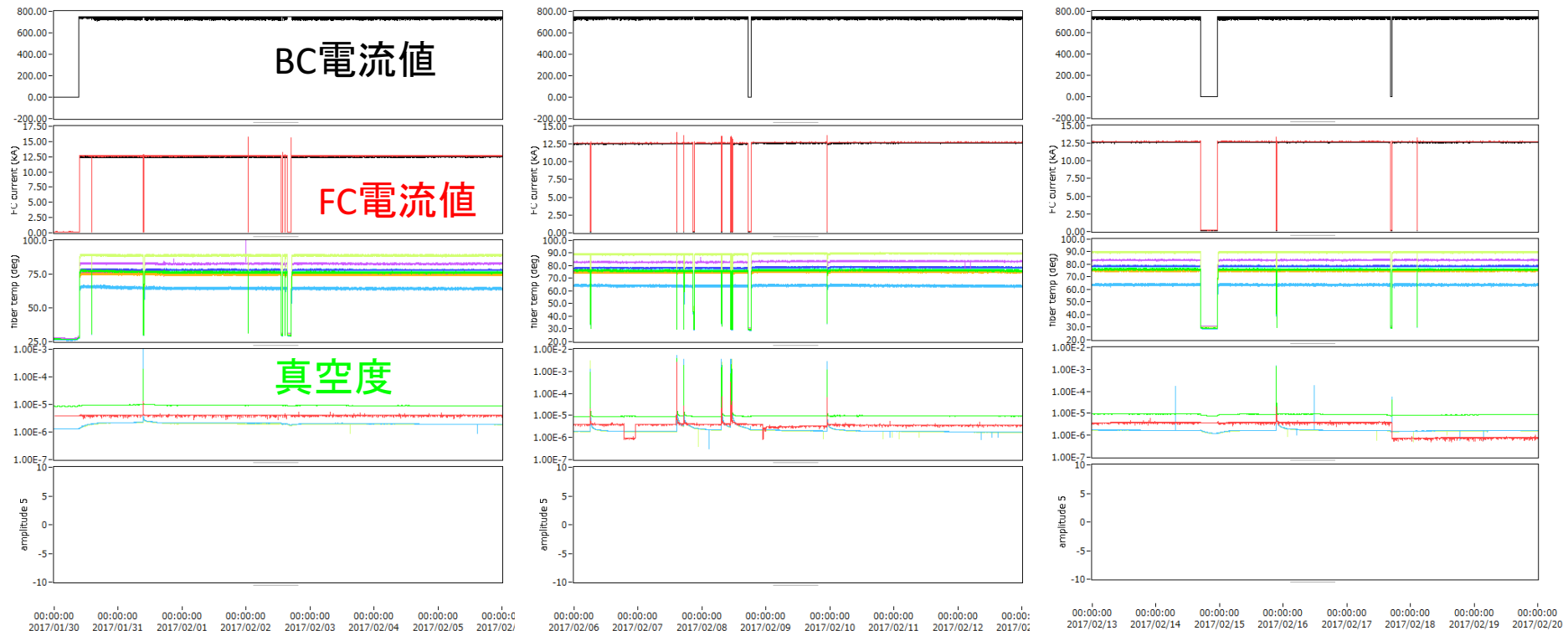


- 抵抗器(同型器)の再製作を行った。熱的な接触が不十分であったためと思われる。(By 明本、中島)
- 交換後、2017年1月より通電再開し、異常発熱は起きていない。

Test Standでの FC-assembly#2 通電試験

- FC-assembly#2 は 2017年1月～3月にかけて、約30日間通電試験を行った。時折、放電で真空が跳ねることはあるが基本的に安定に運転
- 通電期間中の大部分の時間で、FC電流値は 12 kA、BridgeCoil電流値は 750 A と最大電流(最大磁場)状態を維持した。

(By 榎本嘉)



FC-assembly#1 取り外し

2017.03.16

- 残留放射線はLAS直前で 600 $\mu\text{Sv/h}$ 、FC直後で 800 $\mu\text{Sv/h}$ 。
シールド板で 80 $\mu\text{Sv/h}$ に、シールドカップで 200 $\mu\text{Sv/h}$ に

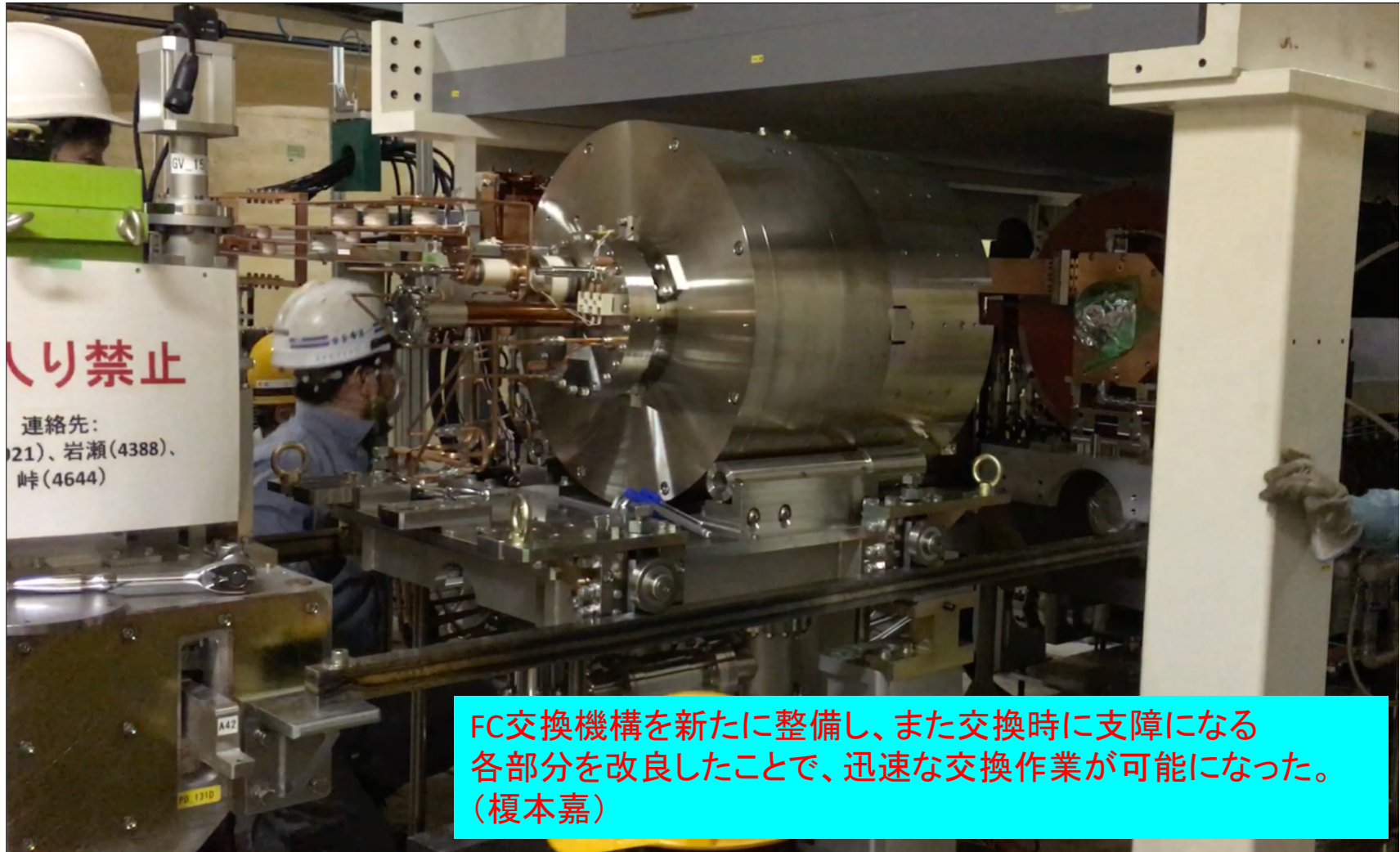


- FC assembly を吊り下げて、搬送台車へ



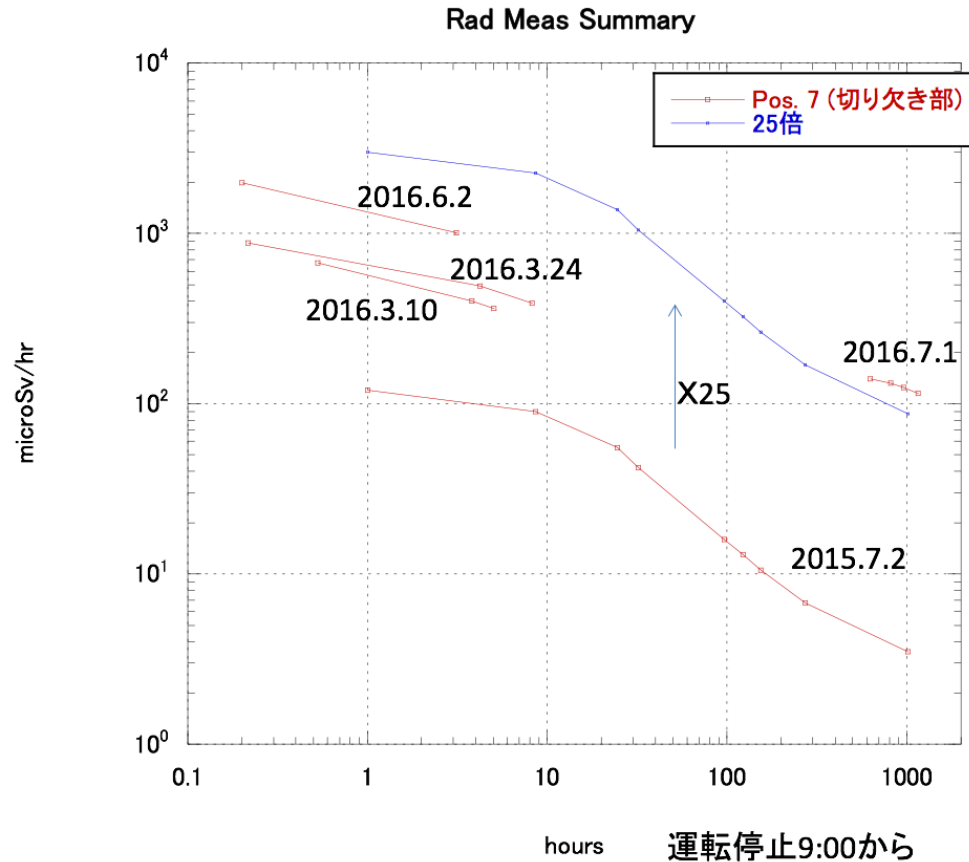
FC-assembly#2 ビームライン設置 2017.03.27

- シールド構造が有る状態で、新設FC交換機構を用いて設置。



作業被曝量低減の努力

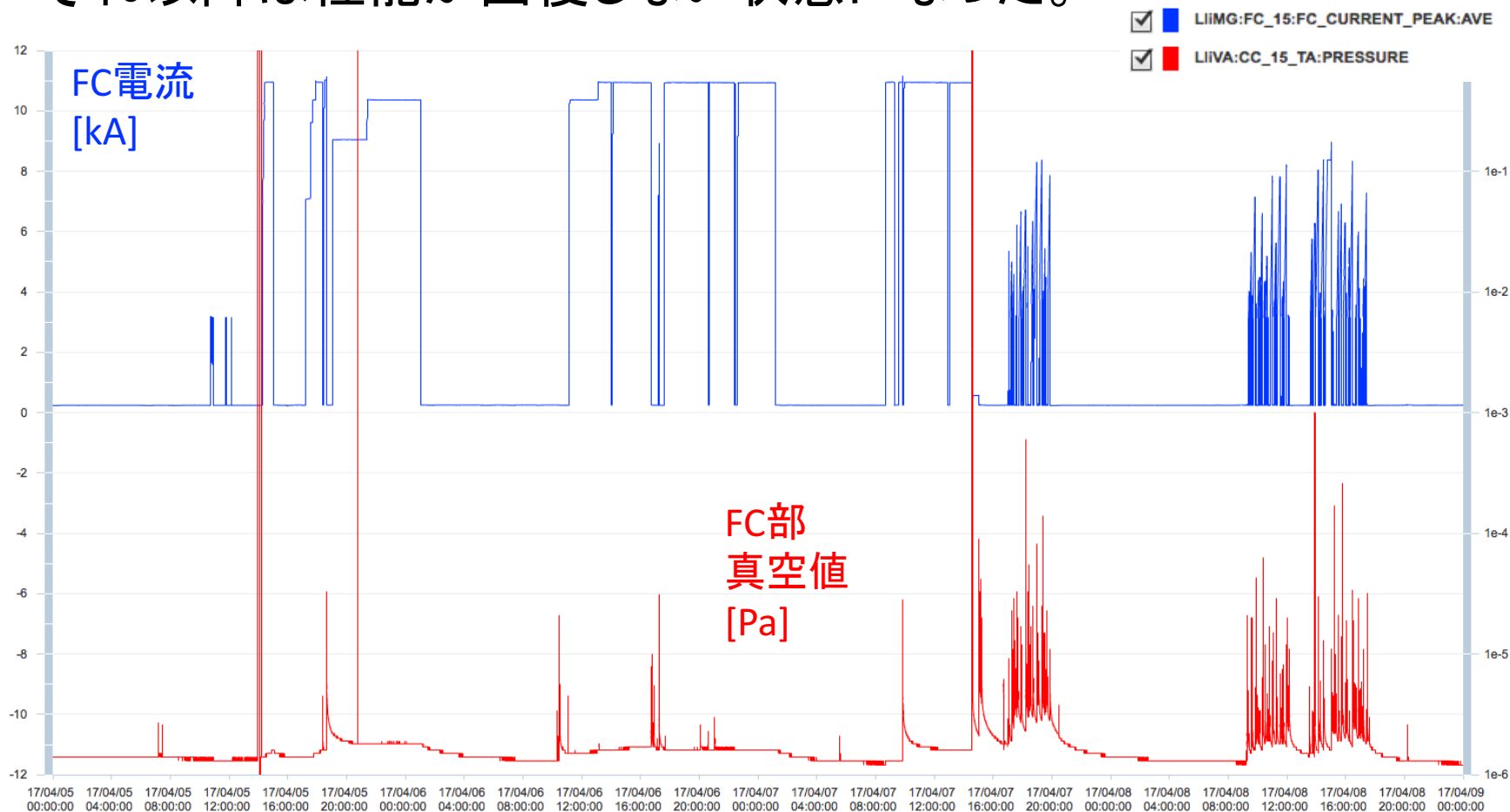
- FC交換の作業被曝量を低減するための処置
 - ◆ FC交換機構
 - ◆ 局所シールド器具
 - ◆ シールド付き搬送台車
 - ◆ 各部の作業迅速化のための改良
- により、比較的に条件の悪い FC-assembly#1 の交換作業でも、**作業者の被曝量は数 uSv/day**に抑えることができた。
(By 榎本嘉)
- 残留放射線の減衰曲線から考えて、ビーム停止直後にこの100倍の放射線があっても、作業者の被曝量を**数100 uSv/day**に抑えることができると考えられる。
(By 榎本嘉)



残留放射線減衰特性測定 By 松本修

ビームラインでの通電開始後問題発生

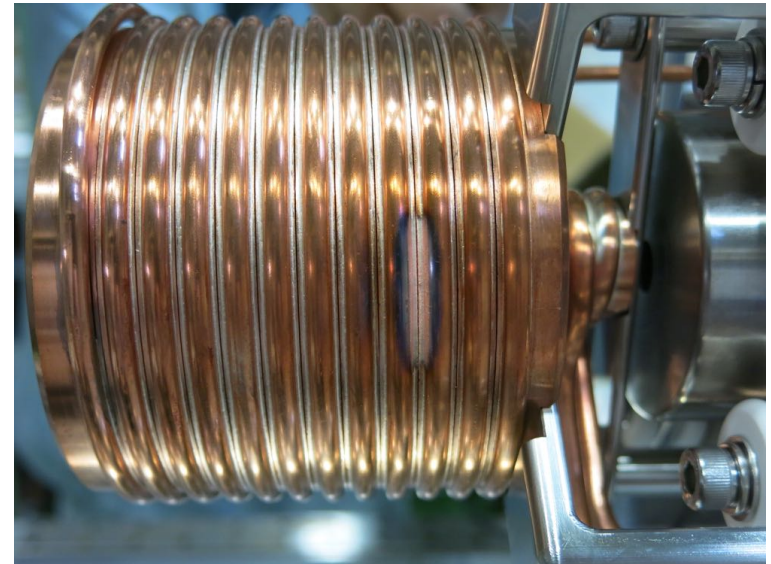
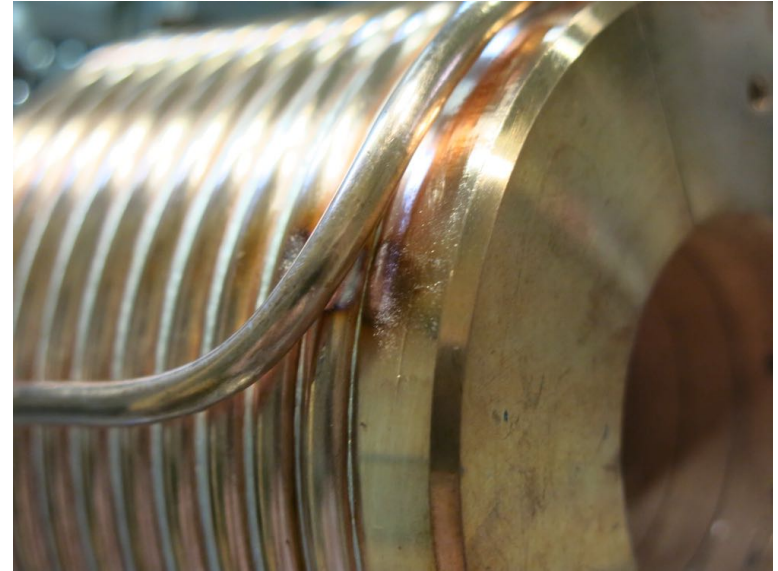
- 通電開始3日目で大きな真空悪化を伴う放電が発生し、それ以降は性能が回復しない状態になった。



問題発生後は、陽電子ビームスタディーは中止し、なるべくFC周辺の放射化量を増やさないようターゲットにビームを当てるのを避け、早期に取り出して観察することにした。

FC-headの状況

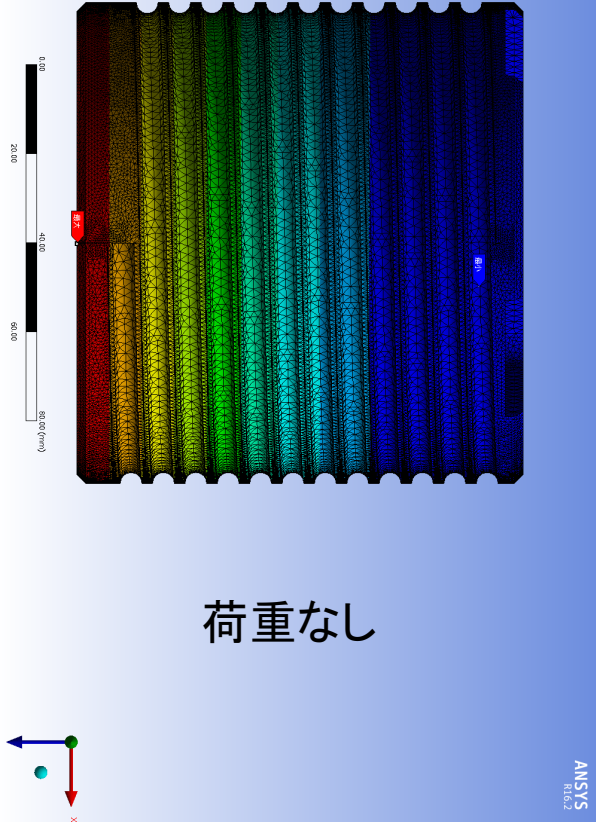
- FC-head上部の電流導入銅パイプが隣のターンと近接している部分に放電痕が見られる。
- FC-head下部の3ターン目のslit部にも放電痕が見られる。放電部分付近はgapが狭いようである。



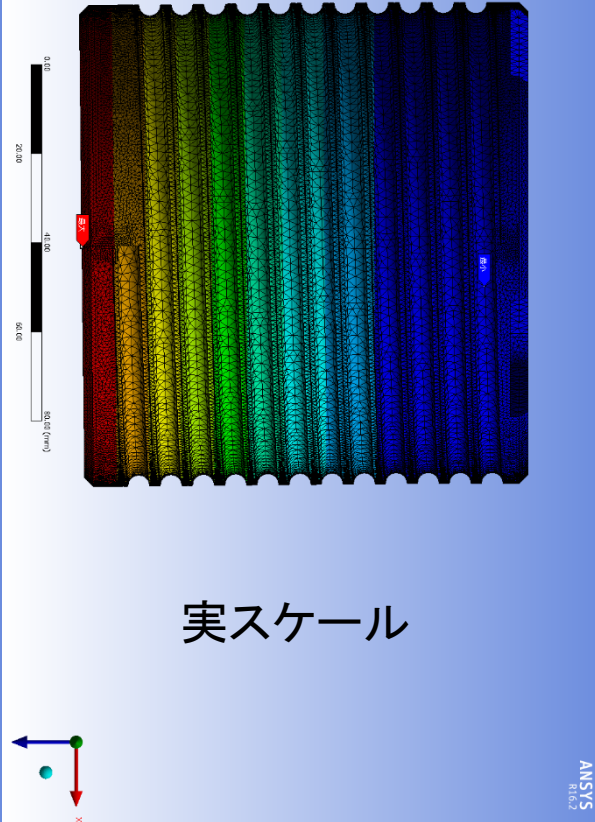
FC-headの自重による垂れ量の評価

(ANSYS simulation By 榎本嘉)

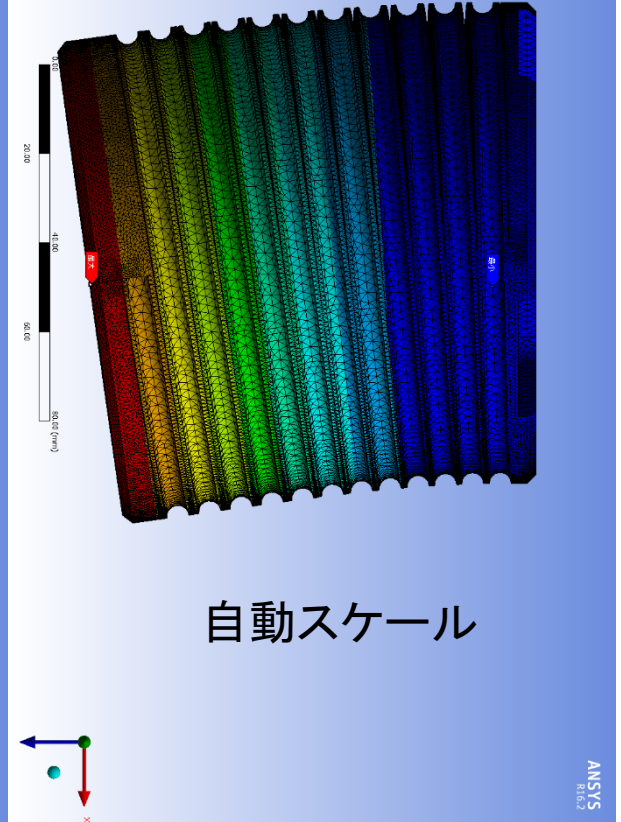
自重による撓み(0.7mm)表示の比較



荷重なし



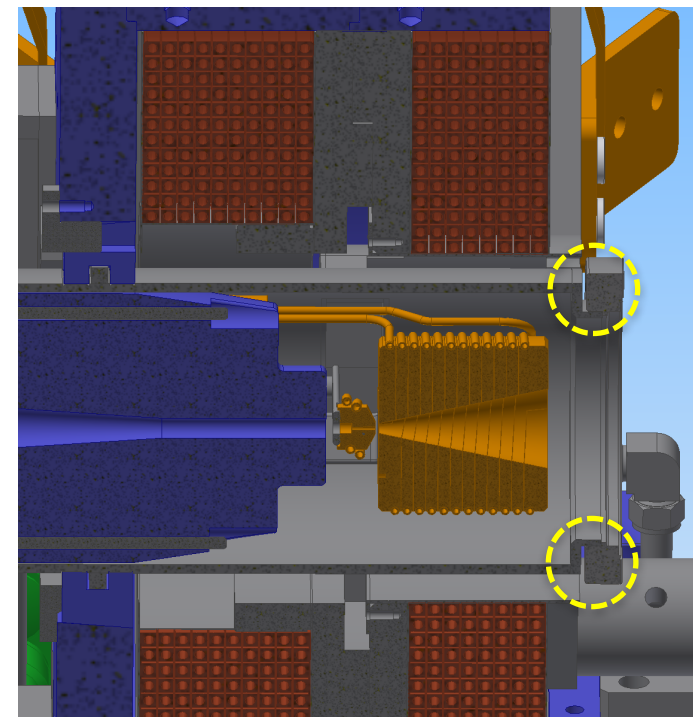
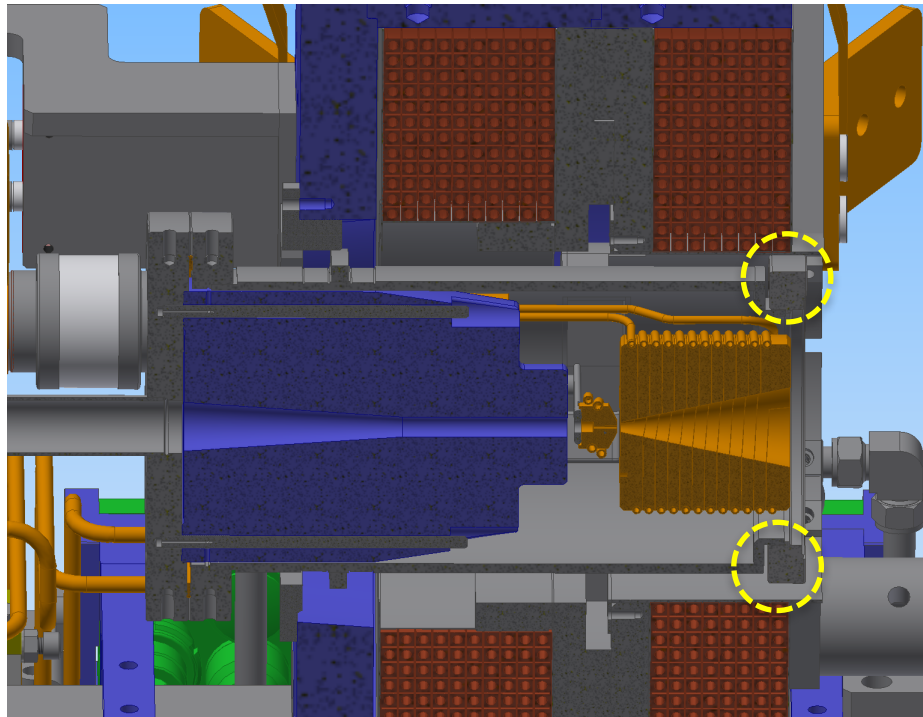
実スケール



自動スケール

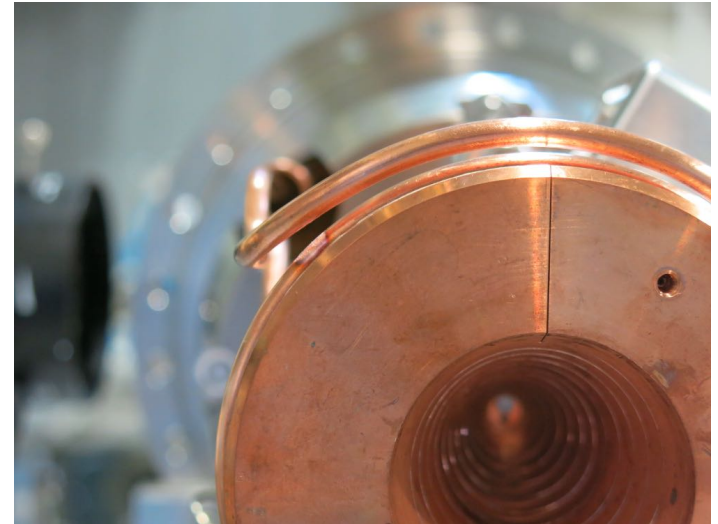
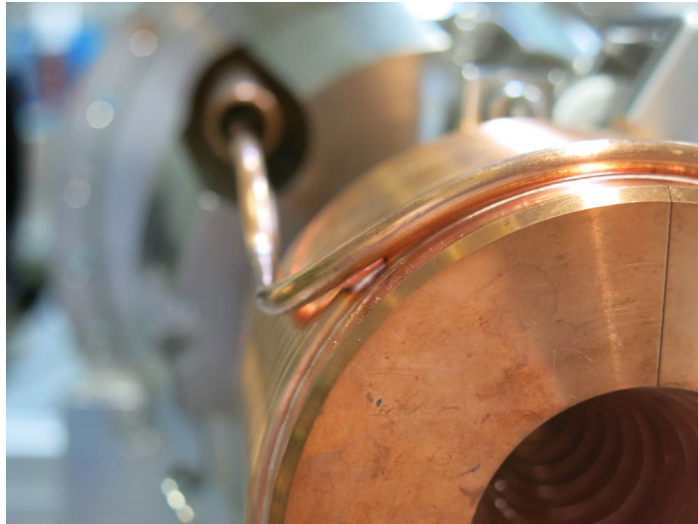
損傷FC-headの手入れ、chamber改良

- FC-head下部放電部分に0.2mmのスペーサ板を通して、放電箇所荒れた表面を削った。
- FC chamber を改良し、FC-head下流端付近のchamberのくびれが遠ざかった(35 mm)ものに入れ替えた。(By 榎本嘉)



銅パイプ配管経路変更

- FC-head上部放電部分の銅パイプ引き出し部分が隣のターンの銅パイプと遠ざかるように経路をずらした。
(chamber 改良によりくびれ部分が遠くなったので、この経路変更が可能になった。)



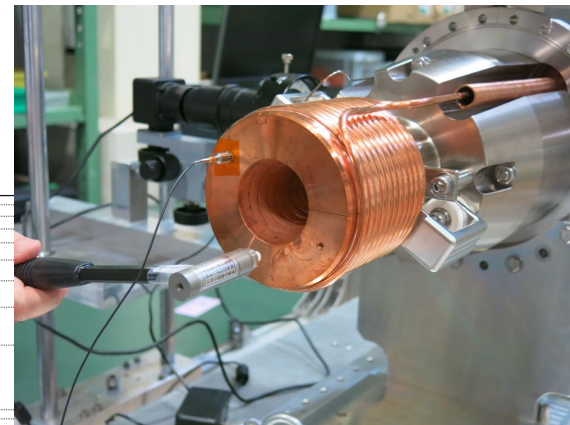
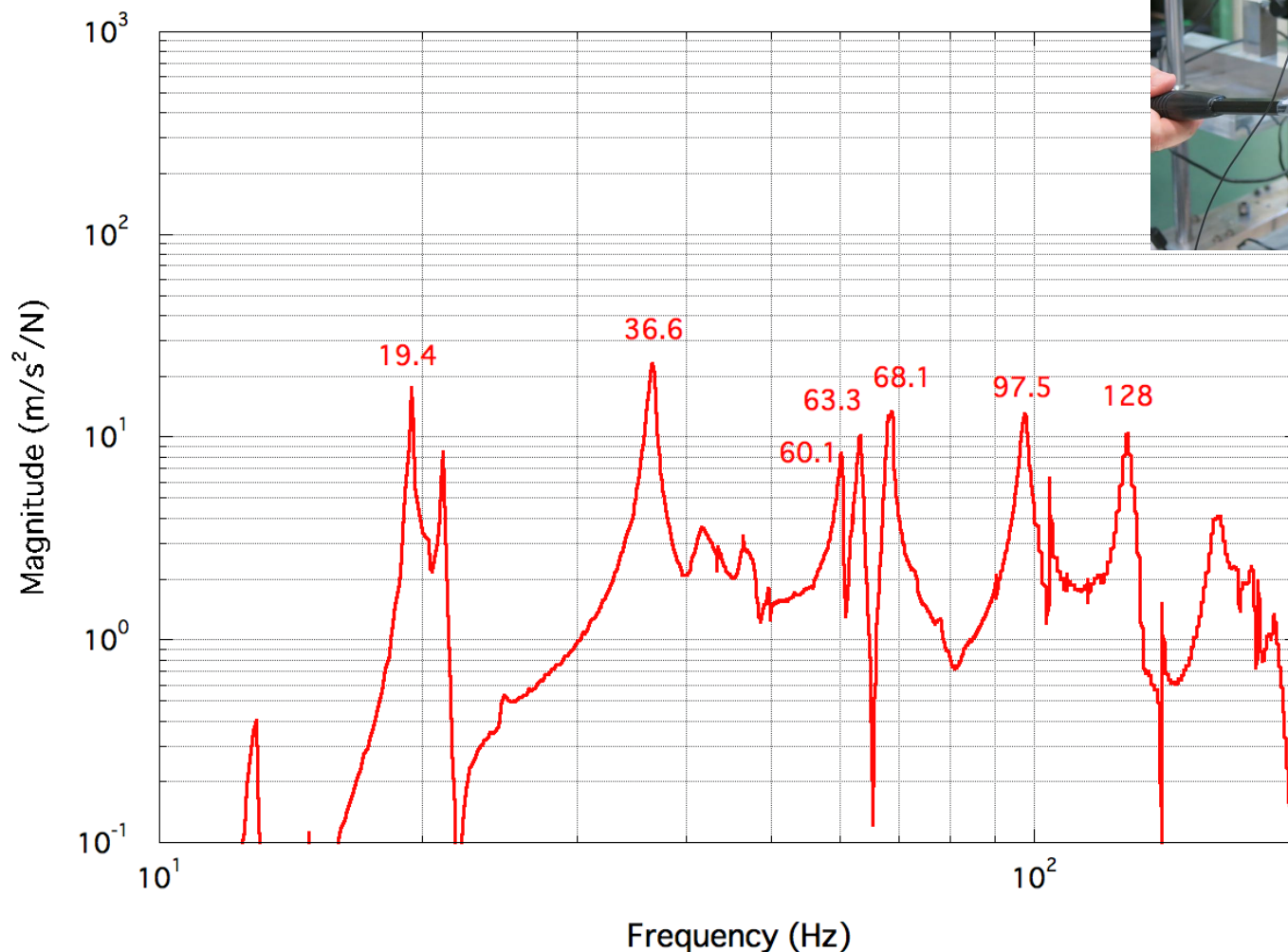
なぜビームラインに入れてから問題が発生したか

- テストスタンドからビームラインへの移動、設置作業中に何か起きたか？
→特に心当たりはないが、否定はできない
- FC-BC間の磁場極性は正しいか？
→正しいことを確認
- 真空度の違い？
→あまり違いは無い
- パルス間隔のジッターの違い？
→テストスタンドでも実際のビーム運転用のトリガー信号をもらっていたはず
- ビーム照射によるシャワーなどの影響？
→ターゲットにはまだ本格的に当てる前に発生している
- ビームがターゲット横の穴($\Phi 2\text{mm}$)を通過することによる影響？（影山さんより、ビームのwake fieldによりFC slitでマルチパクタリングが起きる可能性について示唆あり）
→ビーム電荷量は低い状態 (0.3nC) での運転時に発生。

なぜビームラインに入れてからFCの放電、損傷が起きたかについては、まだよくわかっていない。

FC-head#5 実機の振動特性

- 振動特性測定 (By 柿原、山岡)
50 Hz付近にピークはなし。



FCの当面の方針

- 現在の損傷したFC-headに最低限の手入れ及びFC chamberの改良を行って、ビームラインに再投入し、低い電流値（仕様値の半分である 6kA 以下）で運転に使用する。
（2017年秋の運転、DRコミッショニング、SKB Phase-2）
（Phase-3もその状態のままの可能性が高い。）
- FC-assembly#3 の製作を進める（2017年度内に完成予定）
これは FC-assembly#2 と基本的に同一の設計
- FC用full-specパルス電源2台目の製作を進める（2017年度内に完成予定）
- Bridge Coil用電源2台目の製作を進める（2017年末に納品予定）、これに必要な分電盤増設を行う。
- FC用テストスタンドの構築を行う（2018年度より）
- SuperKEKB運転と平行して、テストスタンドでの試験を通して、FCの改良方針を決める。（マンパワーの問題あり）

今後進めていくべき改良項目

1. 一次電子ビーム電荷量@ターゲット

- ◆ 仕様値 10 nC /bunch に対して、現在の達成値は $Q(e^-) = 7 \text{ nC}$ である。
- ◆ 熱電子銃入射部からの電荷量を増やす、24度合流ラインのビーム透過率を改善することを検討する。
(陽電子電荷量改善余地ファクター : 10/7 ~ 1.4)

2. ターゲット直後のLAS加速管の加速電界

- ◆ 仕様値 14 MV/m に対して、現在の達成値は 10 MV/m である。
- ◆ ターゲット直後でソレノイド磁場中にある加速管は放電しやすいので、改善の方策を検討する。
(陽電子電荷量改善余地ファクター : ~1.1)

3. FCの放電対策

- ◆ 仕様値 12 kA に対して、現在の達成値は 6 kA である。
- ◆ 放電問題の原因を調べ、改善の方策を検討する。
(陽電子電荷量改善余地ファクター : ~1.2)