



入射器の現状

新規陽電子生成装置からの陽電子

K. Furukawa
for injector linac

SuperKEKB 電子加速器群における入射器の役割

◆ 40 倍の Luminosity による実験成果のために

❖ ナノビームによる 20 倍の衝突率

- ❏ → 低エミッタンスの入射ビーム
- ❏ → リング内の短いビーム寿命

→ Linac での低エミッタンス・低エネルギー幅のビーム

❖ 2 倍の蓄積電流

→ Linac のビーム電流の増強 (特に陽電子)

◆ Linac での試練

❖ 震災復旧、アライメント

❖ 低エミッタンス電子

- ❏ 大電流光陰極 RF-電子銃

❖ 低エミッタンス陽電子

- ❏ ダンピングリング

❖ 陽電子ビームの電流増強

- ❏ 新しい生成捕獲部

❖ 低エミッタンスビーム輸送

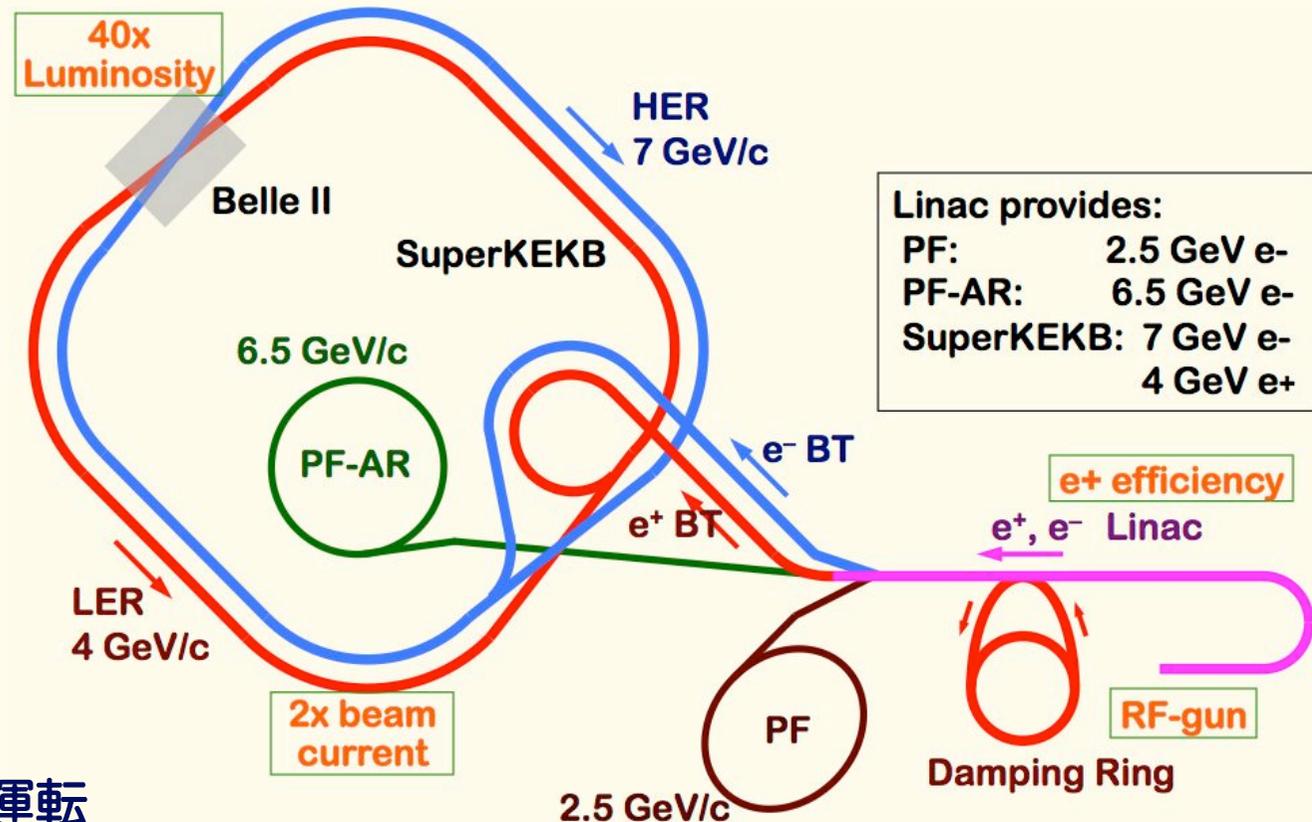
- ❏ 最適なビーム光学系の開発
- ❏ アライメント、安定化、高信頼性

❖ 4+1 リングの同時入射

- ❏ レーザ同期, リング周長補正

◆ 2015 年度前半入射器本格的試運転

- ❖ 多くの機器の設置・調整、3ヶ月の本格的試運転が必要



昨年度運転統計

◆ 2013 年度の運転統計

❖ 総運転時間は 5315 時間 (先年度比 -0.3%)

❖ 故障率は 0.43% (先年度比 -0.87 ポイント)

✧ 故障率については入射器としての故障を表しており、PF・PF-AR 入射に使用していない機器の故障や予備装置を使用した時間も含まれているため、全てが実際の入射へ影響したわけではない。

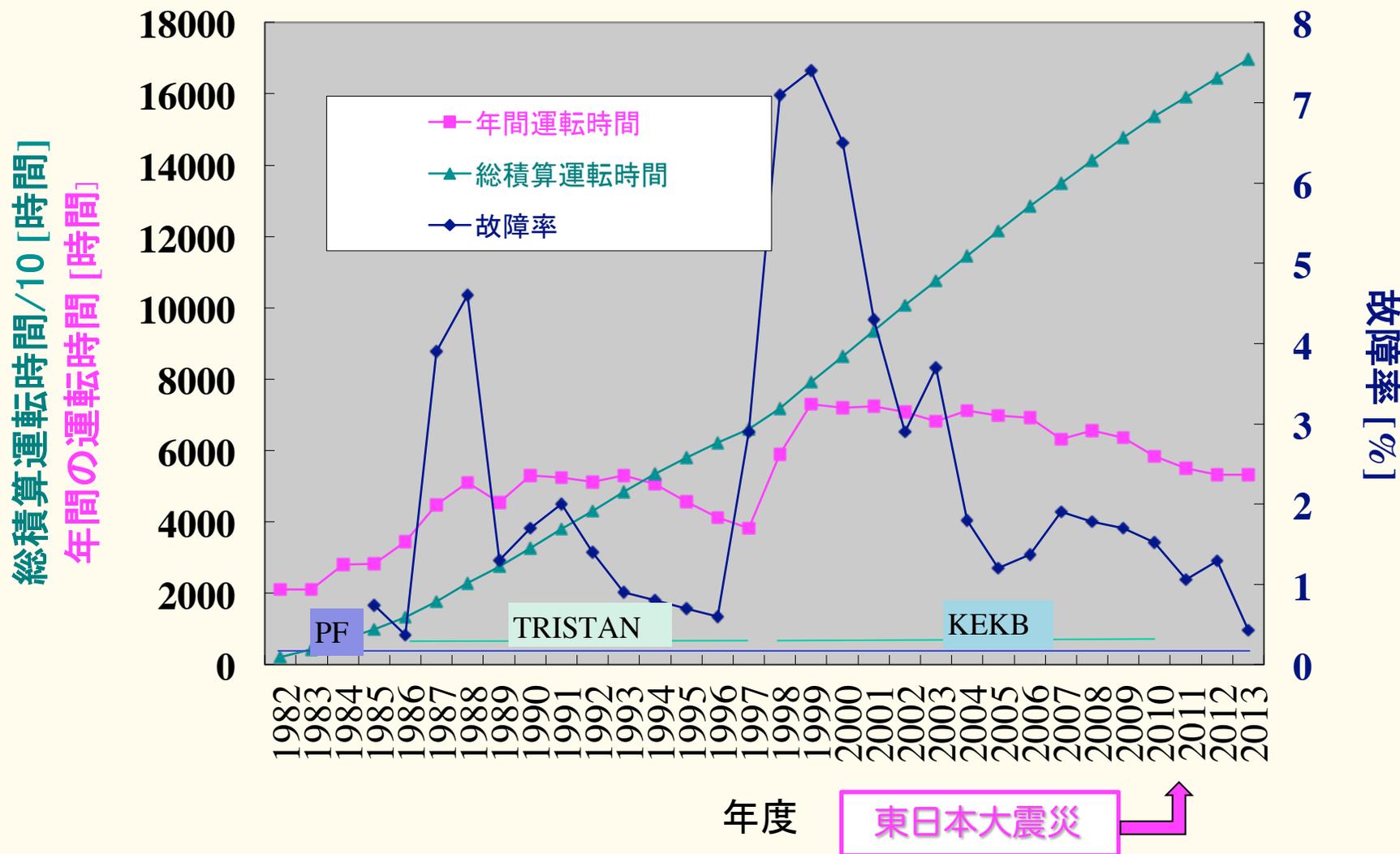
❖ 故障率についてはここ 20 年で最も良い数値

✧ 震災復旧が適切に進行して安定してきた

✧ SuperKEKB の試験運転がまだ慎重に進められている

運転時間と故障率の推移

KEK 電子・陽電子入射器の運転時間と故障率の履歴

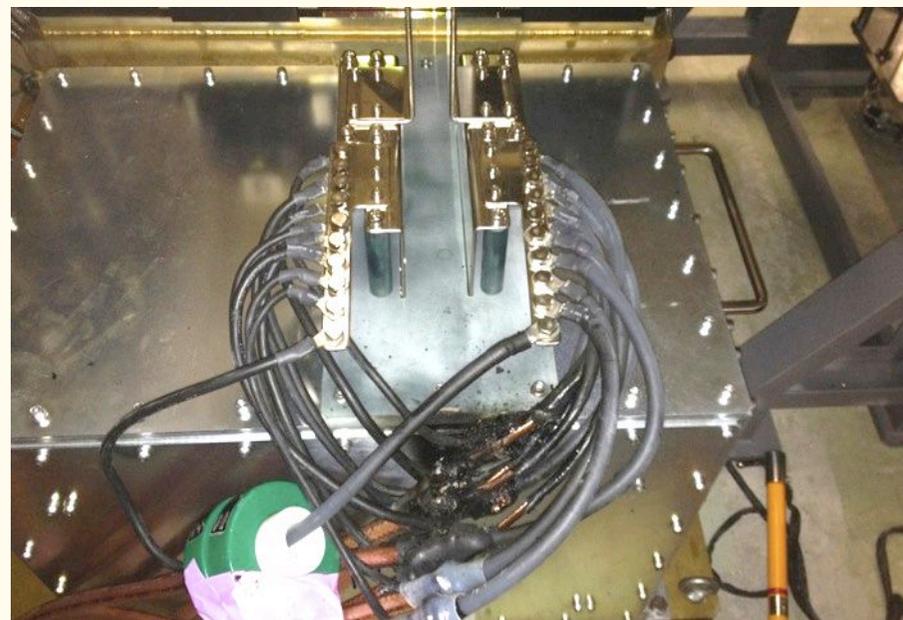
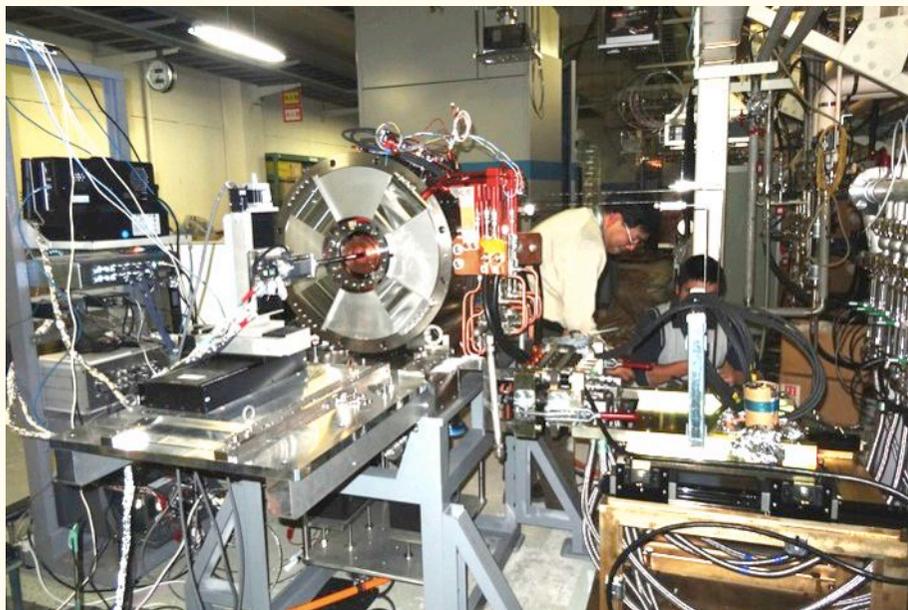


2014 年度前期運転概要

- ◆ **Apr.11** 入射器運転立ち上げ、**Apr.18** PF 入射
- ◆ **Apr.25** 運転停止
- ◆ **May.7** 入射器運転立ち上げ、**May.9** PF/PF-AR 入射
 - ❖ 下流部、入射運転は順調
 - ❖ 上流部、主に日中は震災復旧、建設作業、準夜早朝ビーム試験運転
- ◆ **May.12** 異臭 (発煙) 事案 2 件
 - ❖ 上流部のため入射運転には影響なし (後述)
- ◆ **Jun.30** PF/PF-AR 入射停止
- ◆ **Jun.30** 放射線施設検査
 - ❖ 電子ビーム特性解析部 (#A2)、陽電子ビームダンプ (#28)
- ◆ **Jul.1** 夏季保守期間
- ◆ **Sep.24** 運転準備開始
- ◆ **Oct.1** コンディショニングと試験運転
- ◆ **Oct.14** PF 入射

フラックスコンセントレータ試験時のケーブル焼損

◆ 昨年末ケーブルを 20cm 焼損した

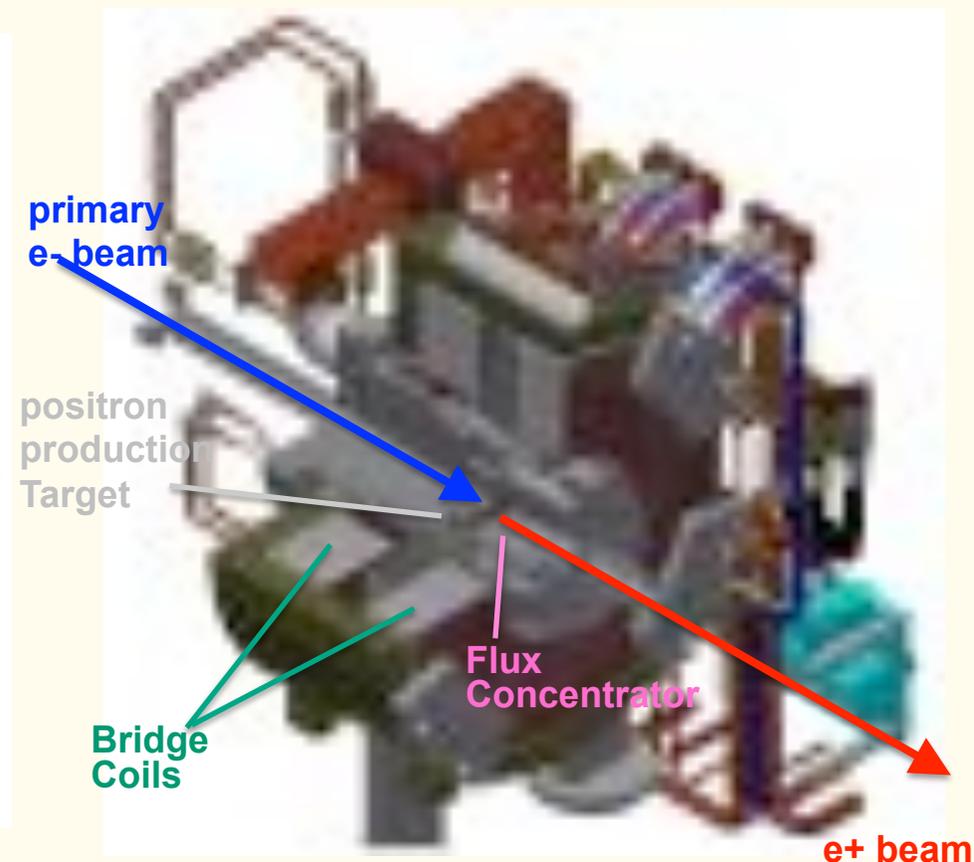
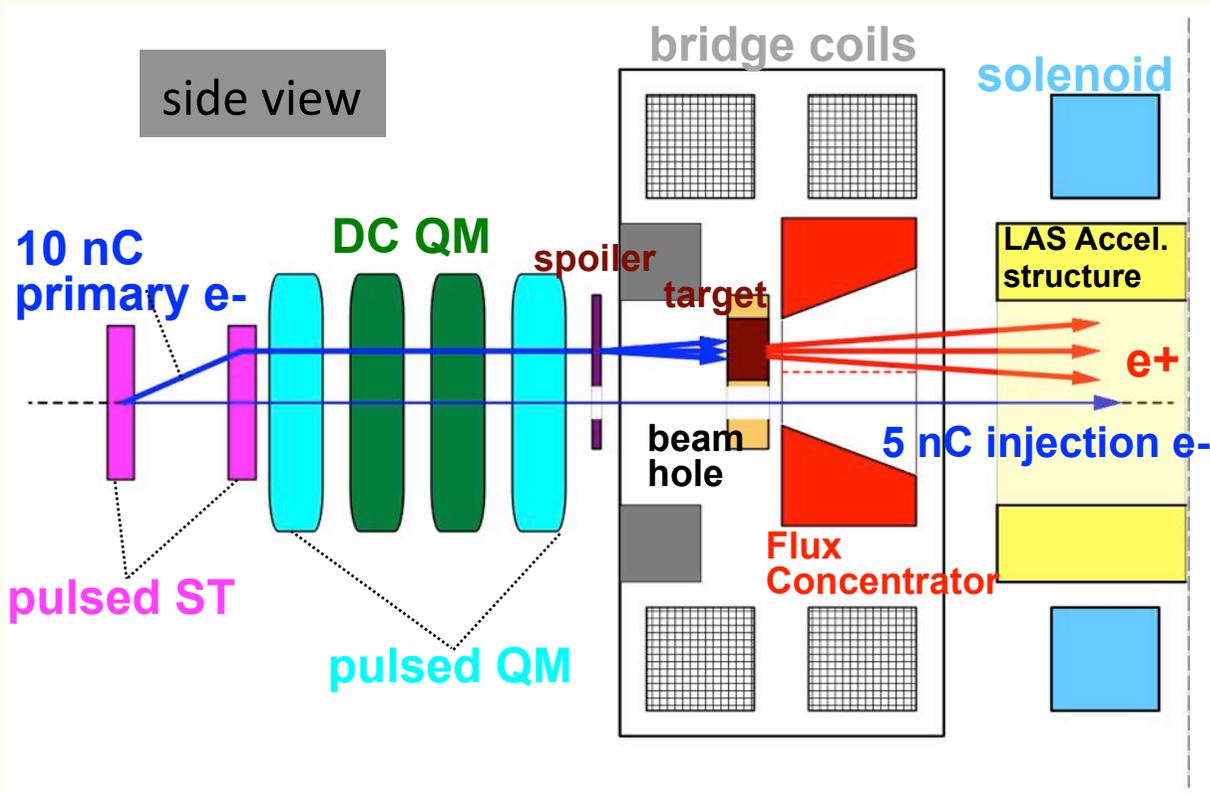


陽電子捕獲装置

- ◆ **SuperKEKB** においては **KEKB** に比べ、**4 倍以上**の陽電子増倍が必要
 - ❖ 昨年末 Flux Concentrator (FC) 試験時に Cable 焼損事故、十分な安全対策を講じた
 - ❖ 昨年度末から、100 m 近くに亘る構成機器の試験が段階的に行われた
 - ❖ 4 月に現場における高圧印加試験
 - ❖ 5 月から一次電子の調整、標的穴を通した標的下流の電子の調整及び機器の調整



SuperKEKB 向け陽電子生成

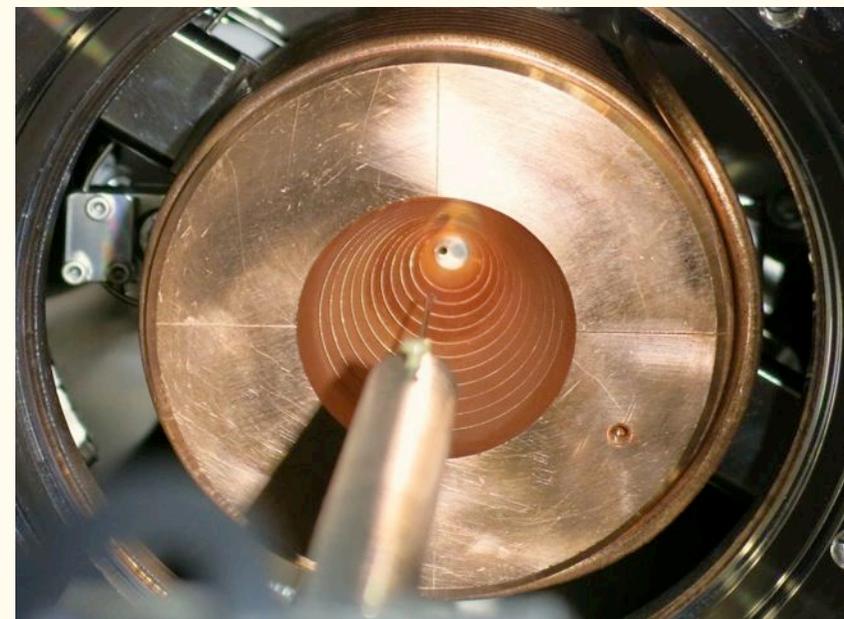
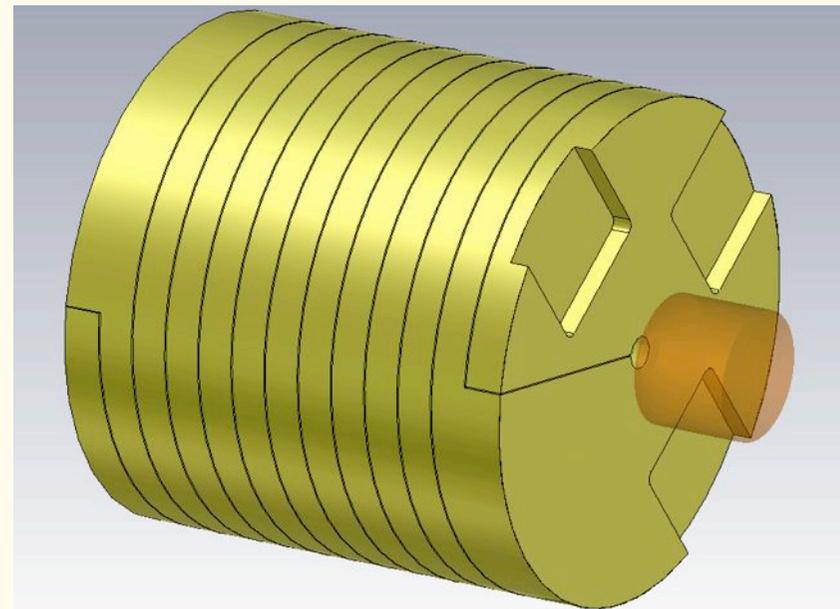


標的後の陽電子捕獲は、新規開発の
 フラックスコンセンレータ (FC) と、大口径 S-band 加速管 (LAS)
 減速捕獲による Satellite bunch (Beam loss) 削減
 標的脇 (3.5mm) の電子通過用ピンホール (2mm)
 標的保護用ビームスポイラ

Flux Concentrator (FC)

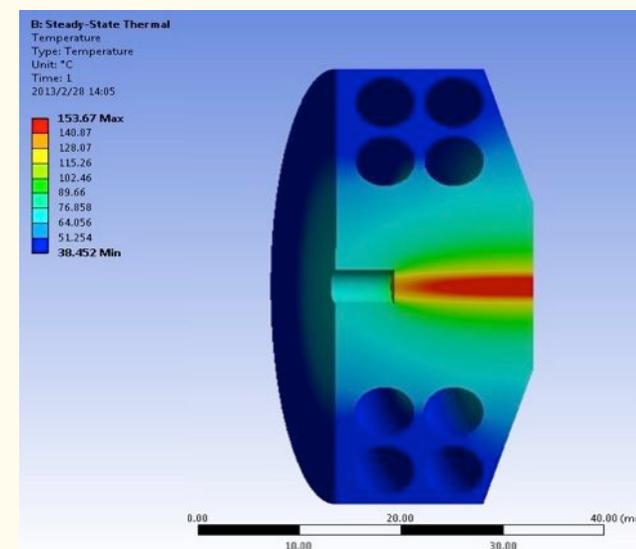
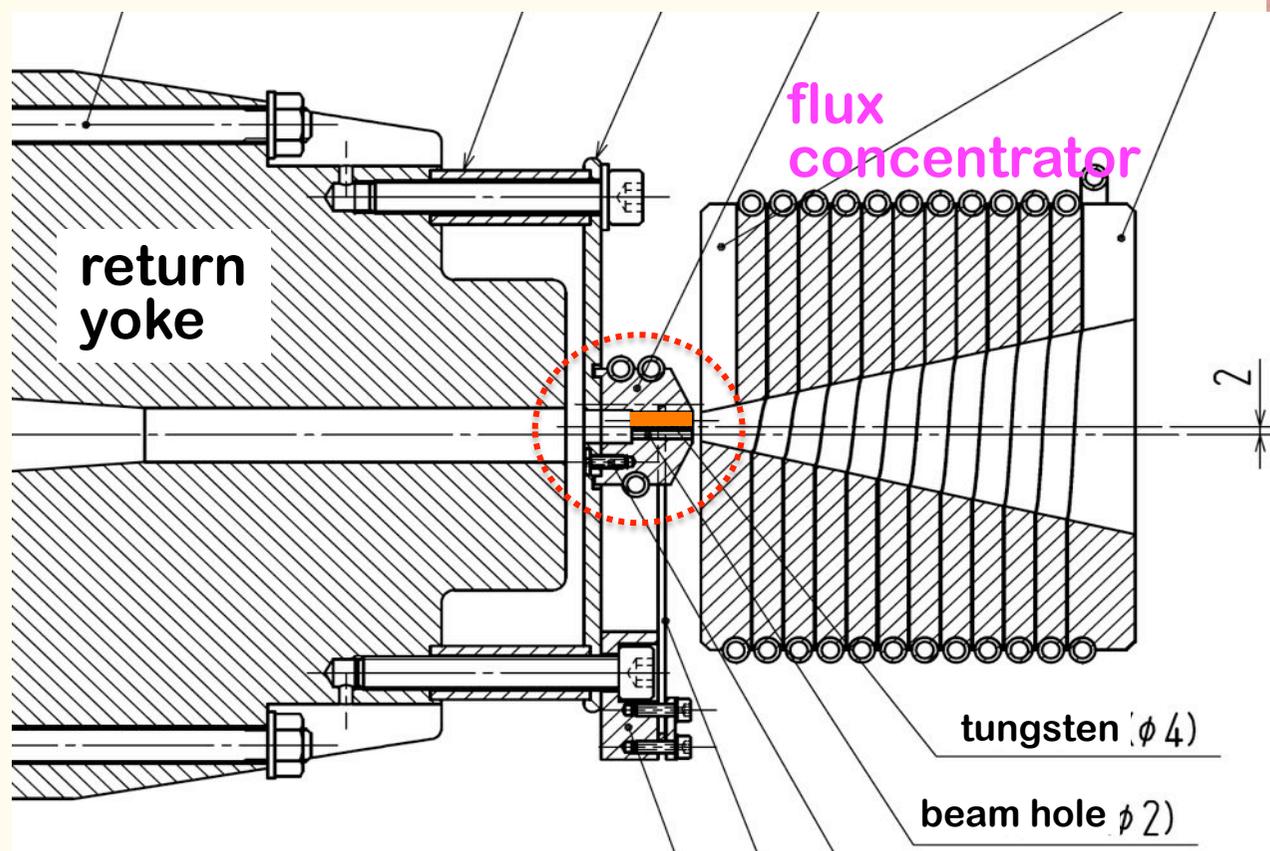
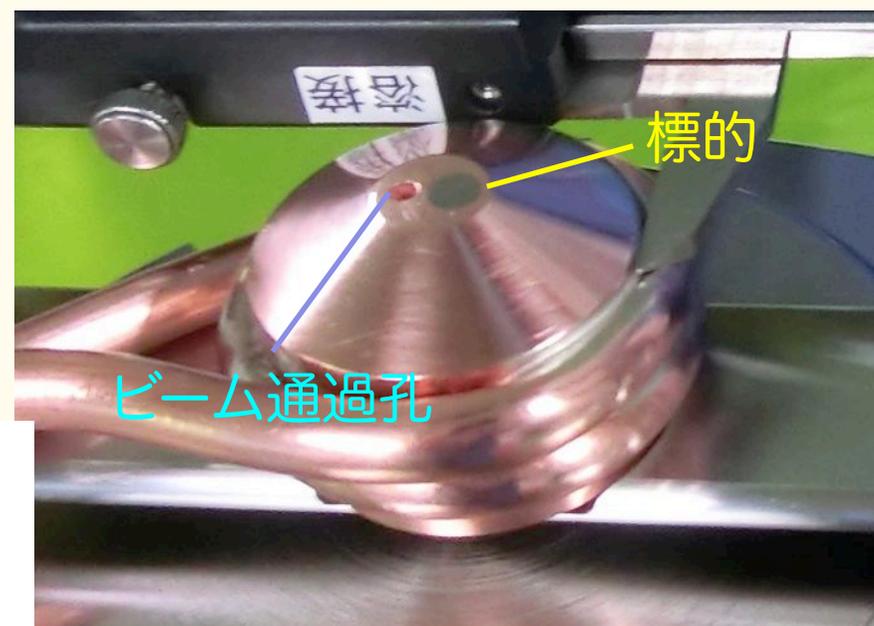
- ◆ 外周の一次コイルにパルス電流を流して導体内に誘導電流を発生させると、磁束(**flux**)が開口部内に圧縮(**concentrate**)され強いソレノイド磁場ができる。

FC	parameters
length	100 mm
outer diameter	100 mm
inner diameter (min.)	7 mm
inner diameter (max.)	52 mm
peak current	12 kA
pulse width	6 μ s (half-sine)
peak field	3.5 T
inductance	1.0 μ H



陽電子生成標的

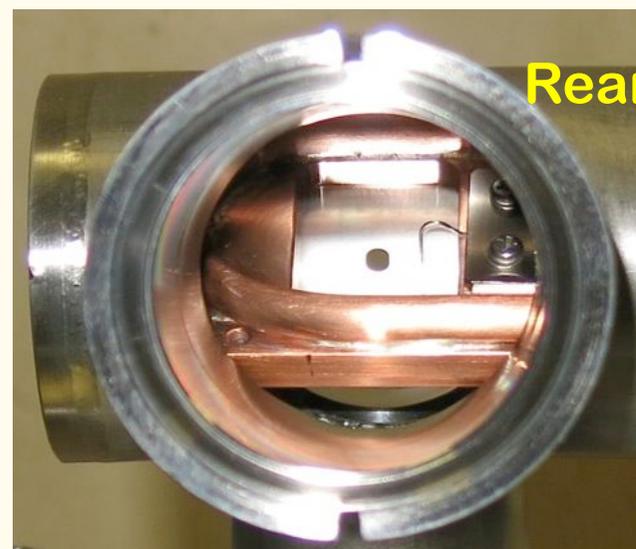
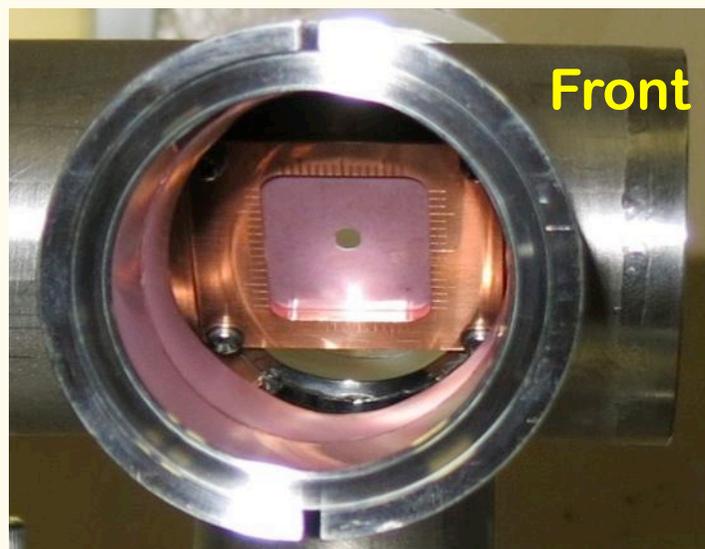
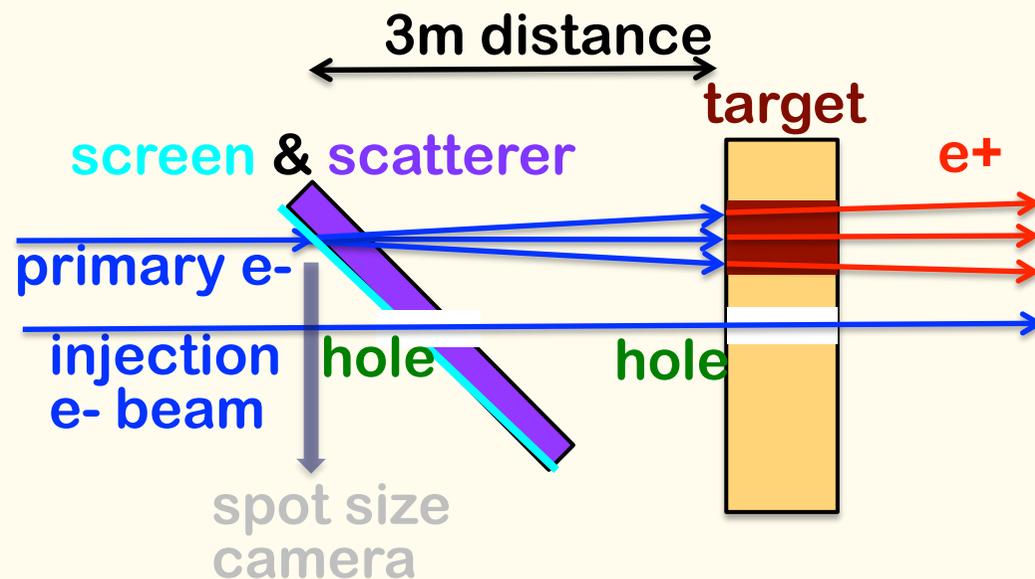
- ◆ 標的材料
タングステン 14 mm長 (= 4.0 X_0)
- ◆ タングステンと銅の胴体はHIP加工で接合



標的内の熱分布

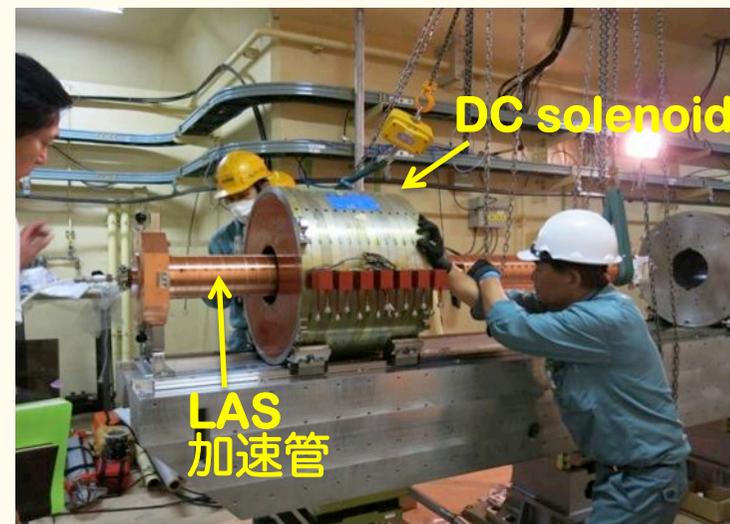
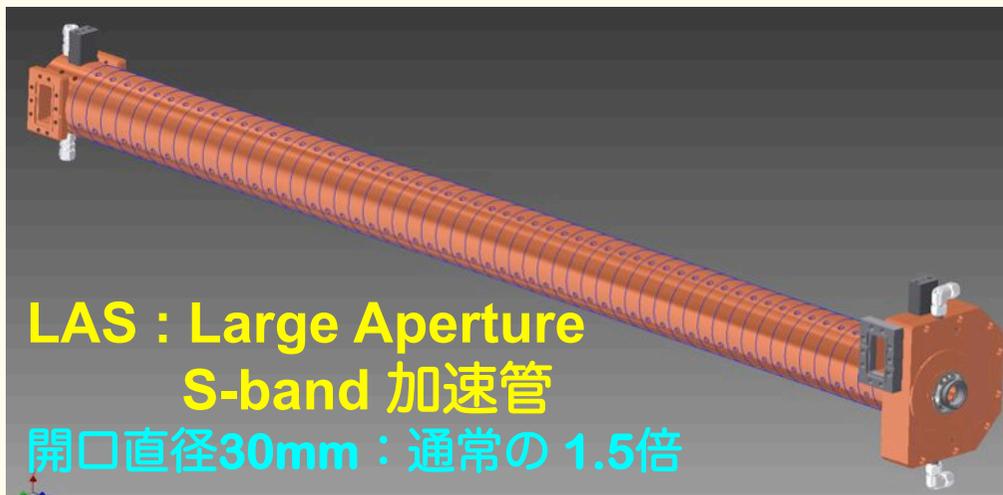
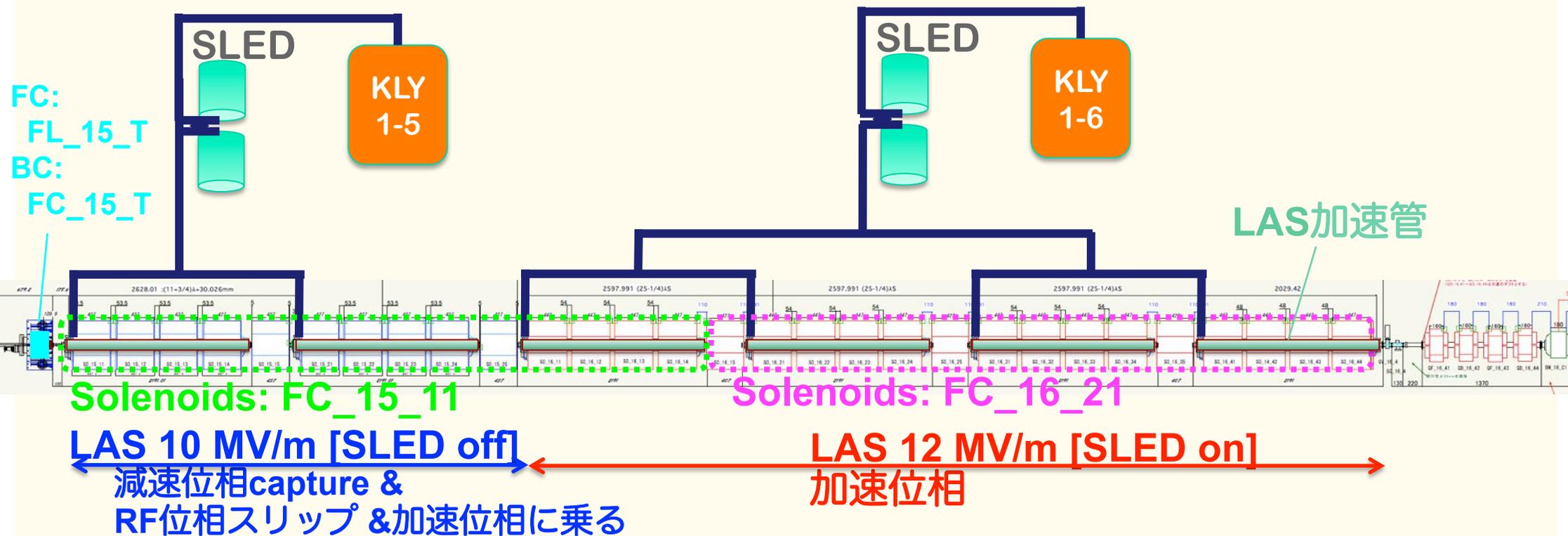
標的破壊防止用 Beam spoiler

- target上でのbeam spot sizeを $\sigma_x, \sigma_y > 0.7$ mm に広げてpeak energy 密度を下げ、破壊を防ぐ
- スクリーン兼用 Al_2O_3 板 (0.14 mm thick)
+ Al 散乱板 (0.25 mm thick)
[総物質質量 = $0.05 X_0$]
- spoiler上にも beam hole 有り

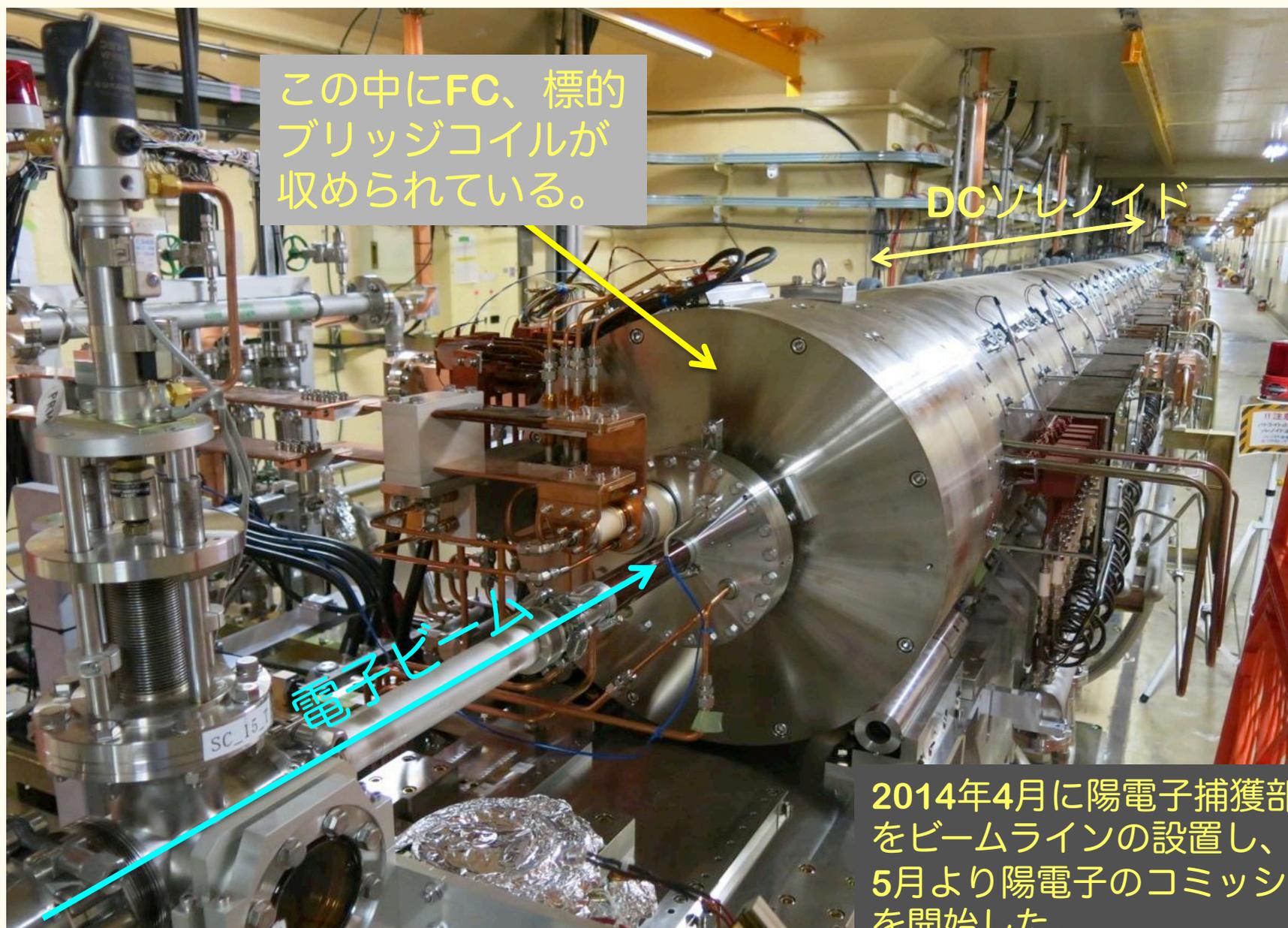




陽電子捕獲部 (e+ capture section)



陽電子捕獲部@Linacトンネル



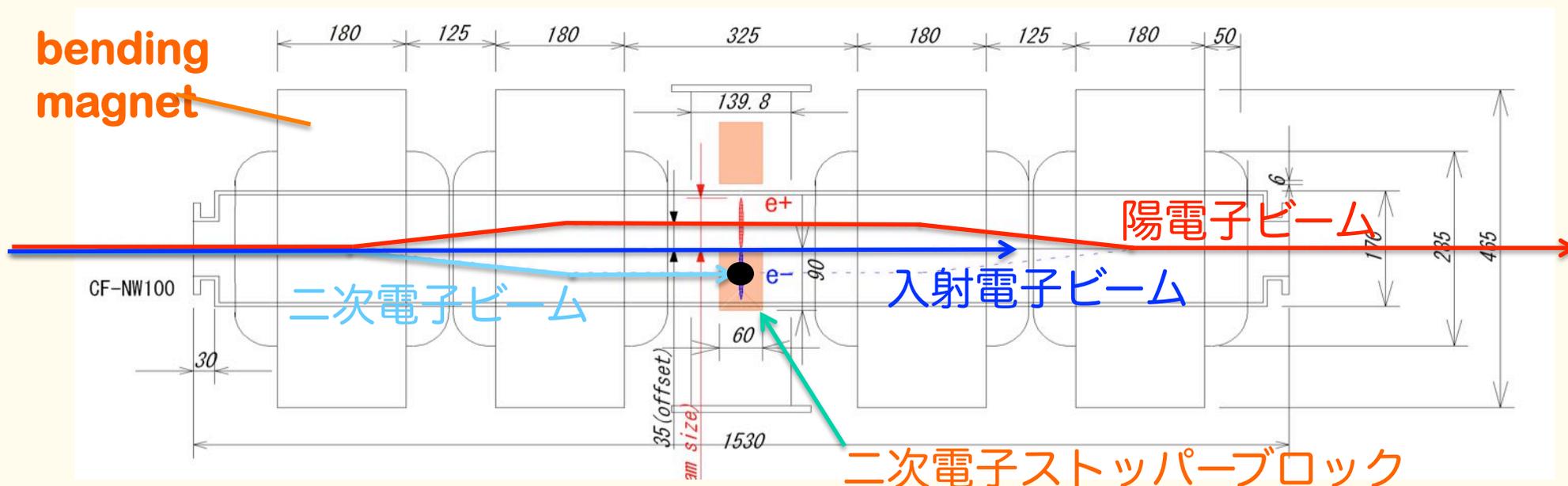
この中にFC、標的ブリッジコイルが収められている。

DCソレノイド

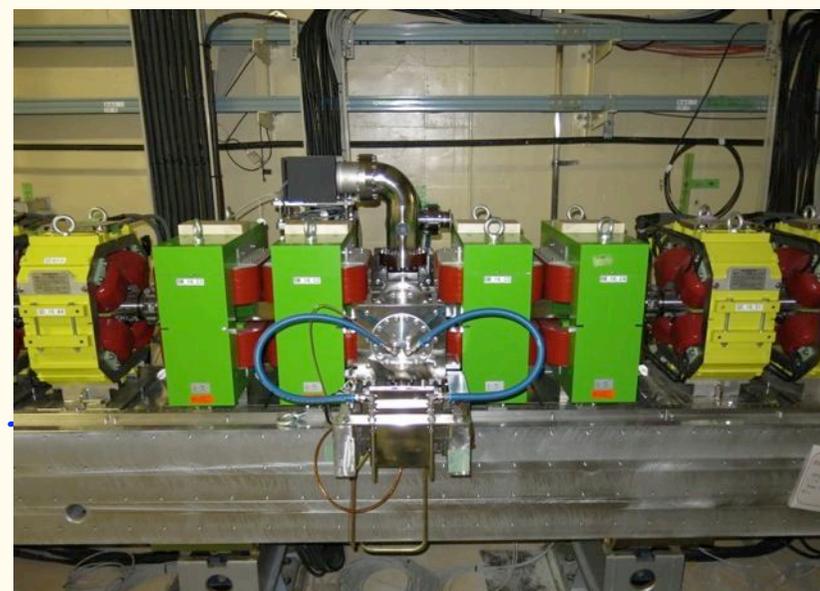
電子ビーム

2014年4月に陽電子捕獲部をビームラインの設置し、5月より陽電子のコミッショニングを開始した。

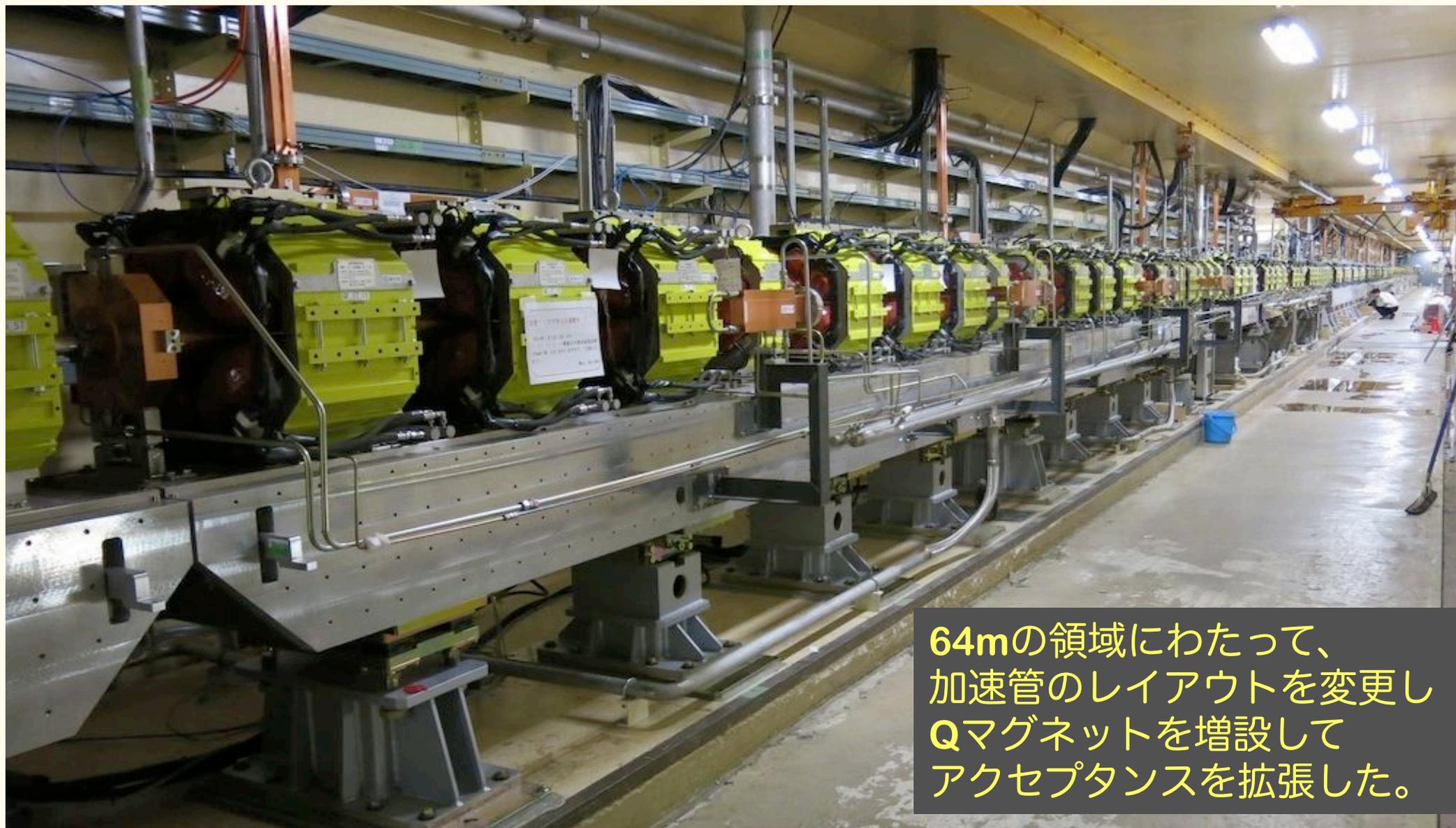
電子陽電子セパレータ



- FCの広いアクセプタンスのため
捕獲部の出口まで、陽電子とほぼ等量
の二次電子がやってくる
- ビーム位置モニターの信号が電子と陽電子
で混ざってしまい正しい情報が得られない
- 二次電子はシケイン中のストップブロック
止め、陽電子のみ通す。
- 入射電子ビームは真ん中を通る。



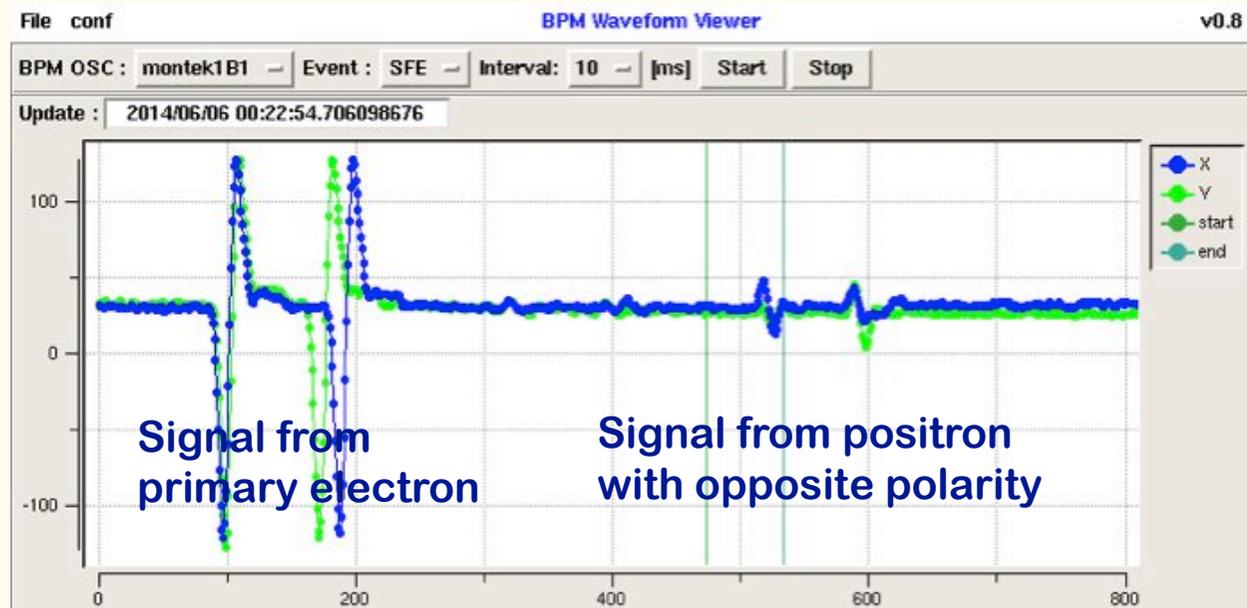
Qマグネット収束系



64mの領域にわたって、
加速管のレイアウトを変更し
Qマグネットを増設して
アクセプタンスを拡張した。

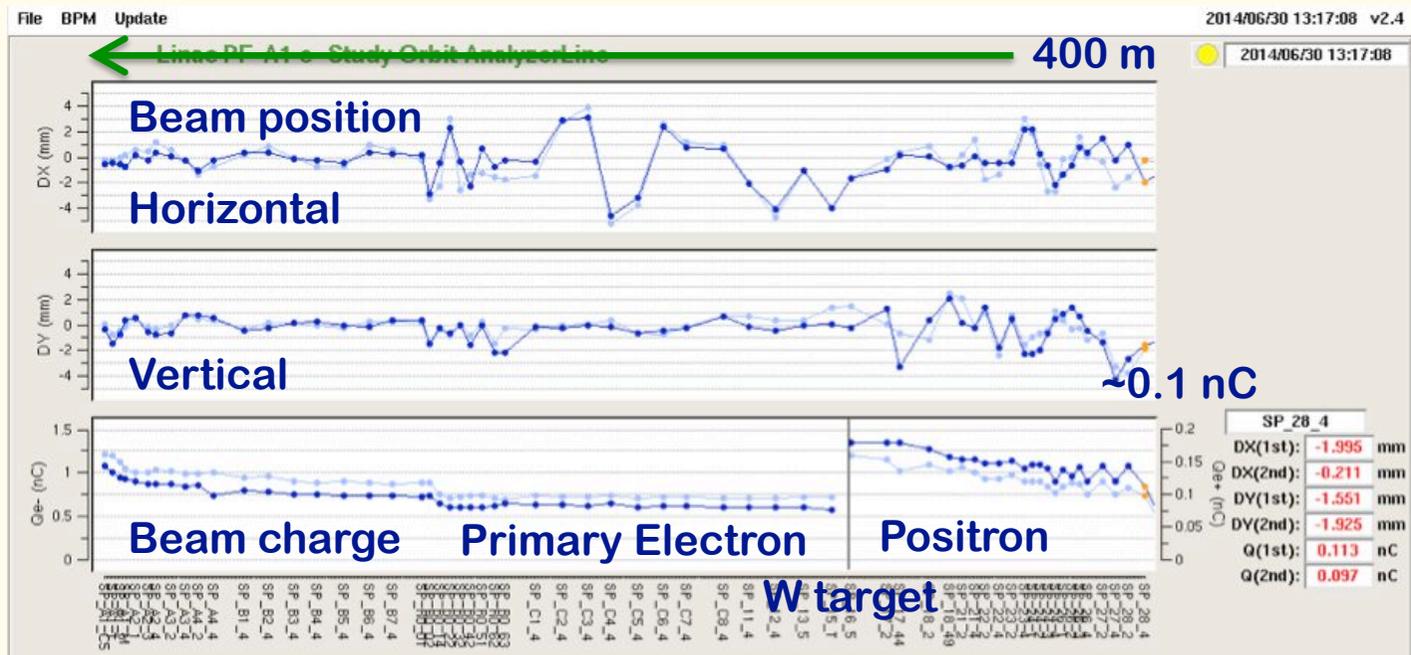
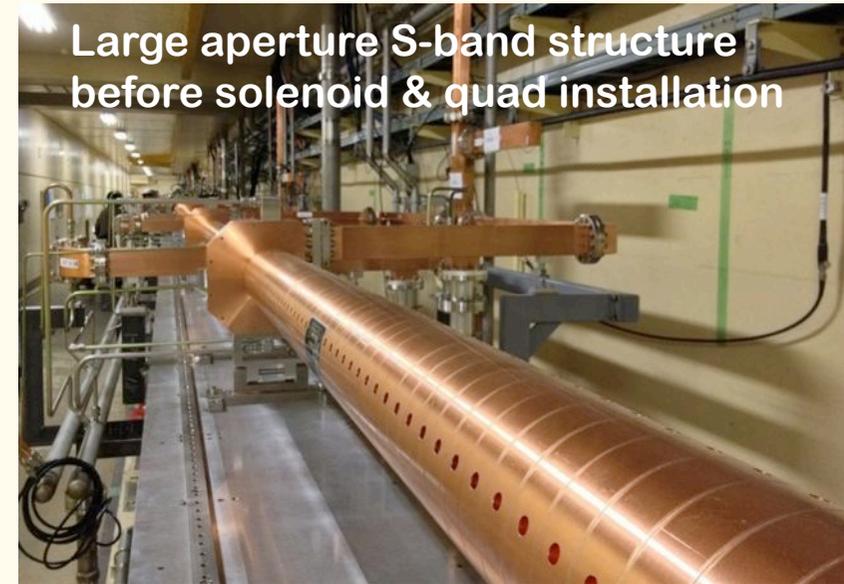
新陽電子捕獲装置からの初めての陽電子観測

- ◆ 一次電子を標的に向け軌道・角度等の調整
- ◆ さらに、マイクロ波・収束・タイミングの調整
- ◆ 6月5日に初めての陽電子の信号を確認
- ◆ 6月6日に予定したSY2のビームダンプで確認
- ◆ 事前シミュレーションと矛盾しない陽電子
- ◆ 一次電子を17倍、最終版電源による捕獲効率2.5倍とし、2015-16年に設計値を達成する予定

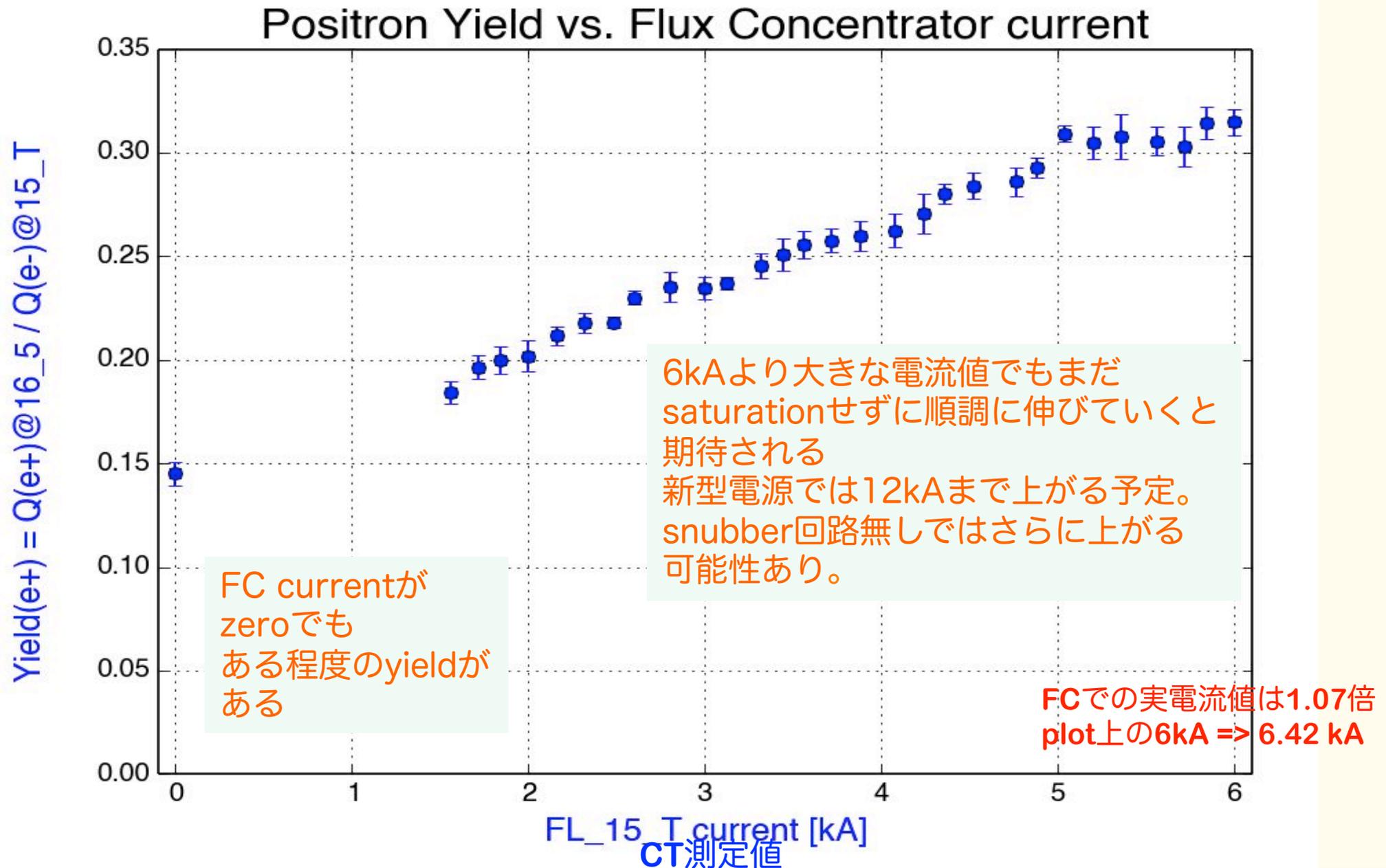


新陽電子捕獲装置からの初めての陽電子観測

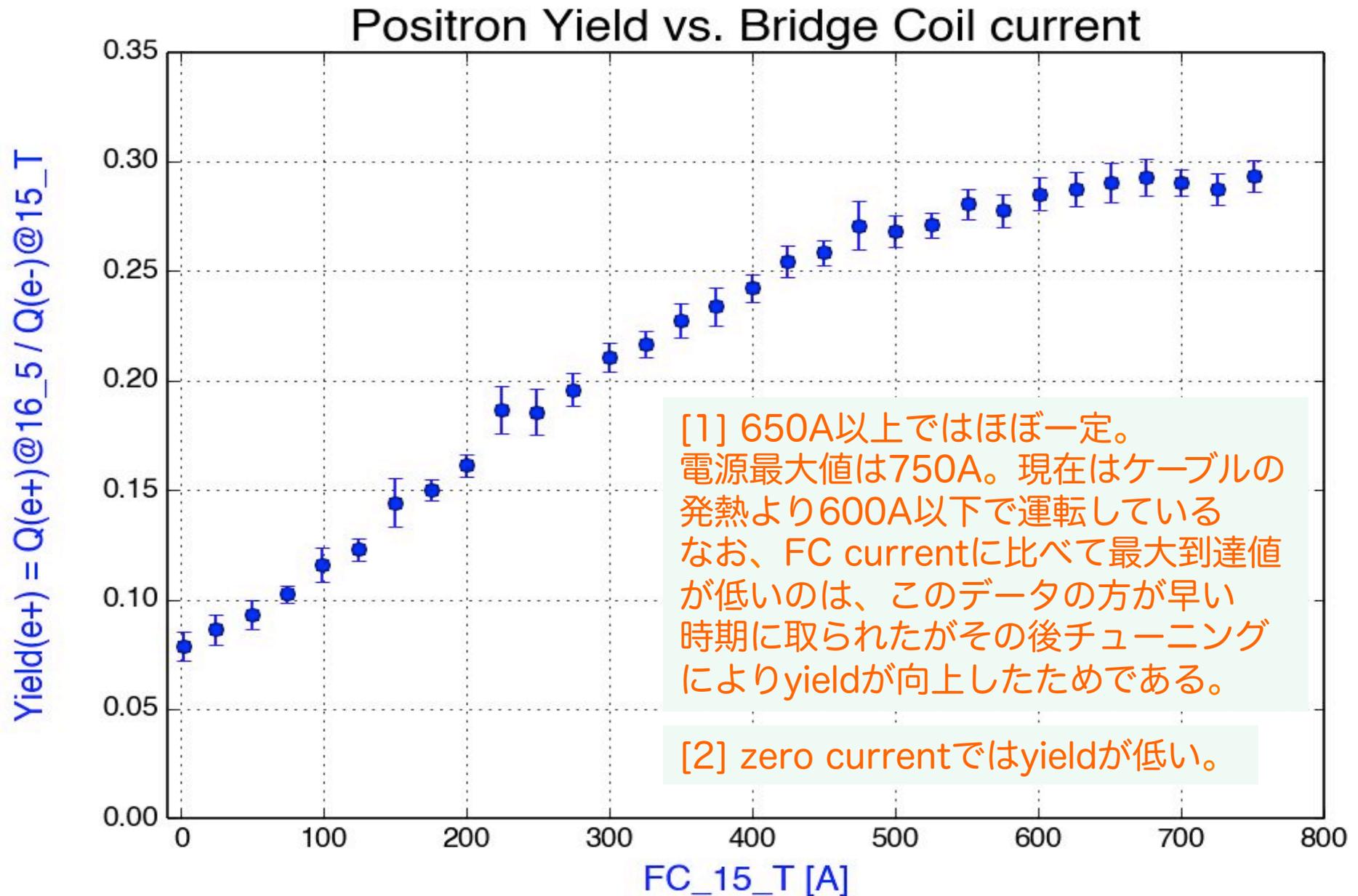
- ◆ Generated positron ~ 0.1 nC was transferred to the entrance of damping ring
- ◆ With higher magnetic and electric field, 4-nC positron will be generated
- ◆ Target shield (40cm x 6m long) will be finalized
- ◆ Alignment will be improved
3mm \rightarrow 0.1mm



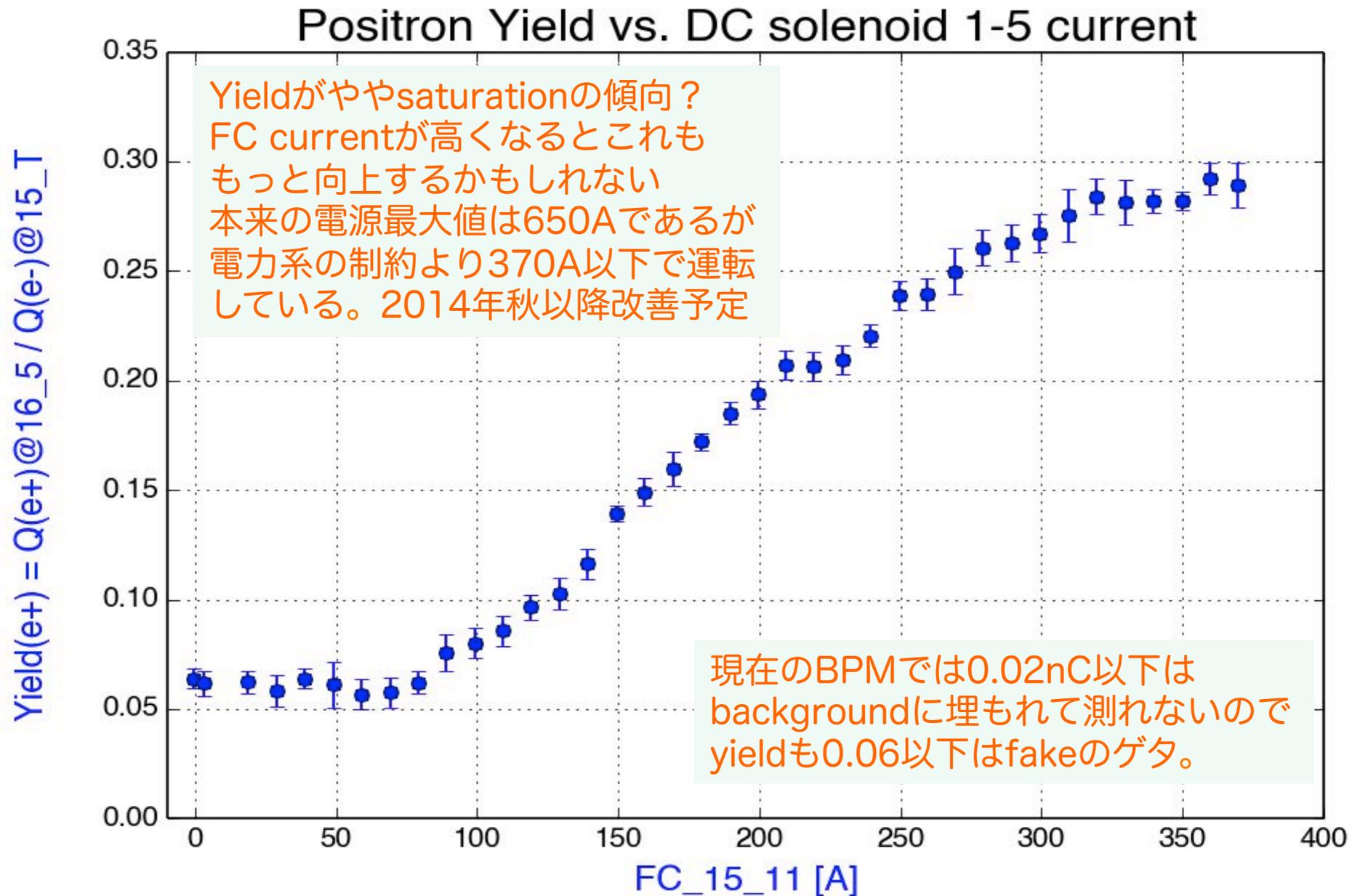
(1) FC current



(2) Bridge Coil current

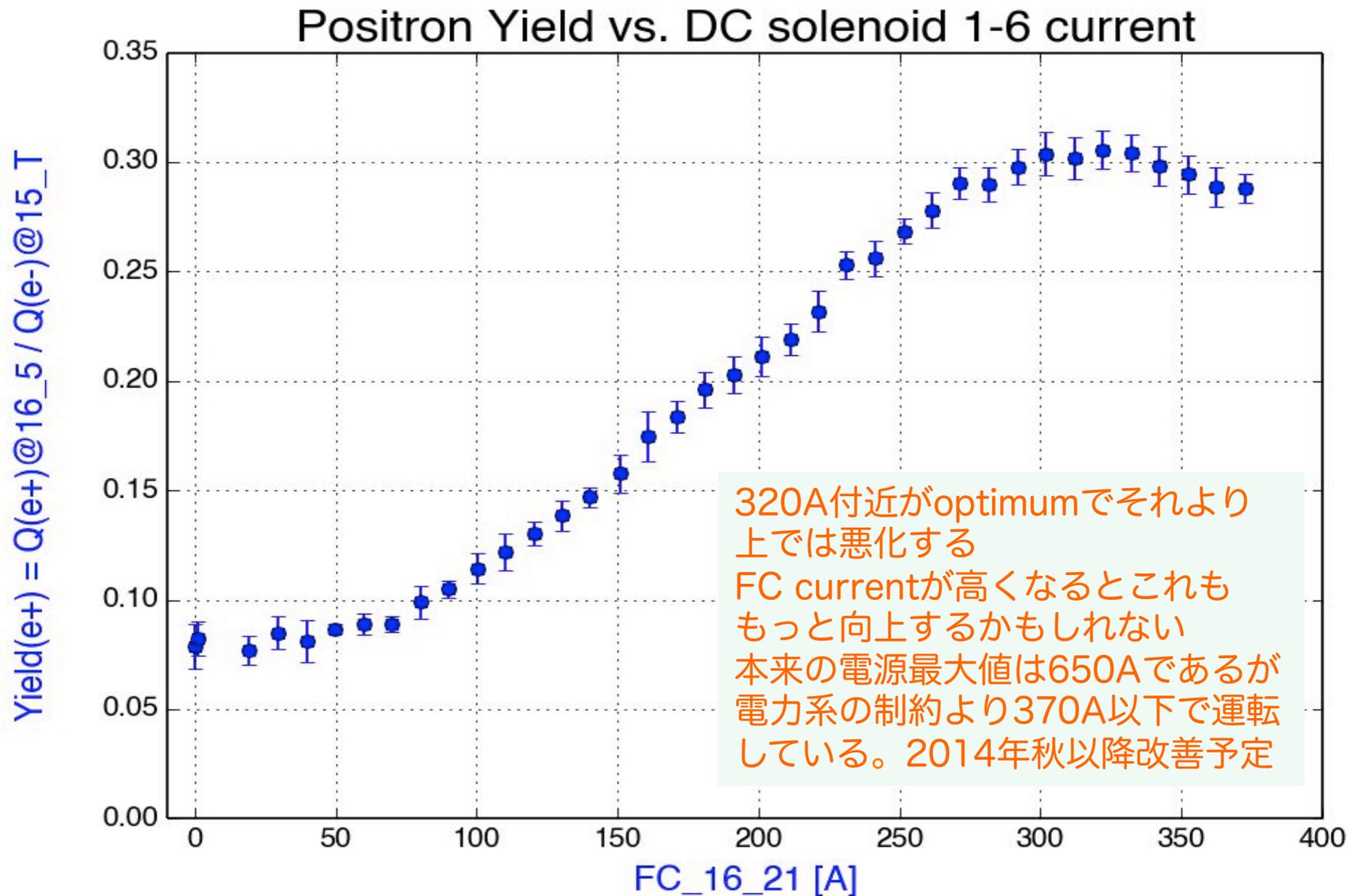


(3) DC solenoid 1-5 current



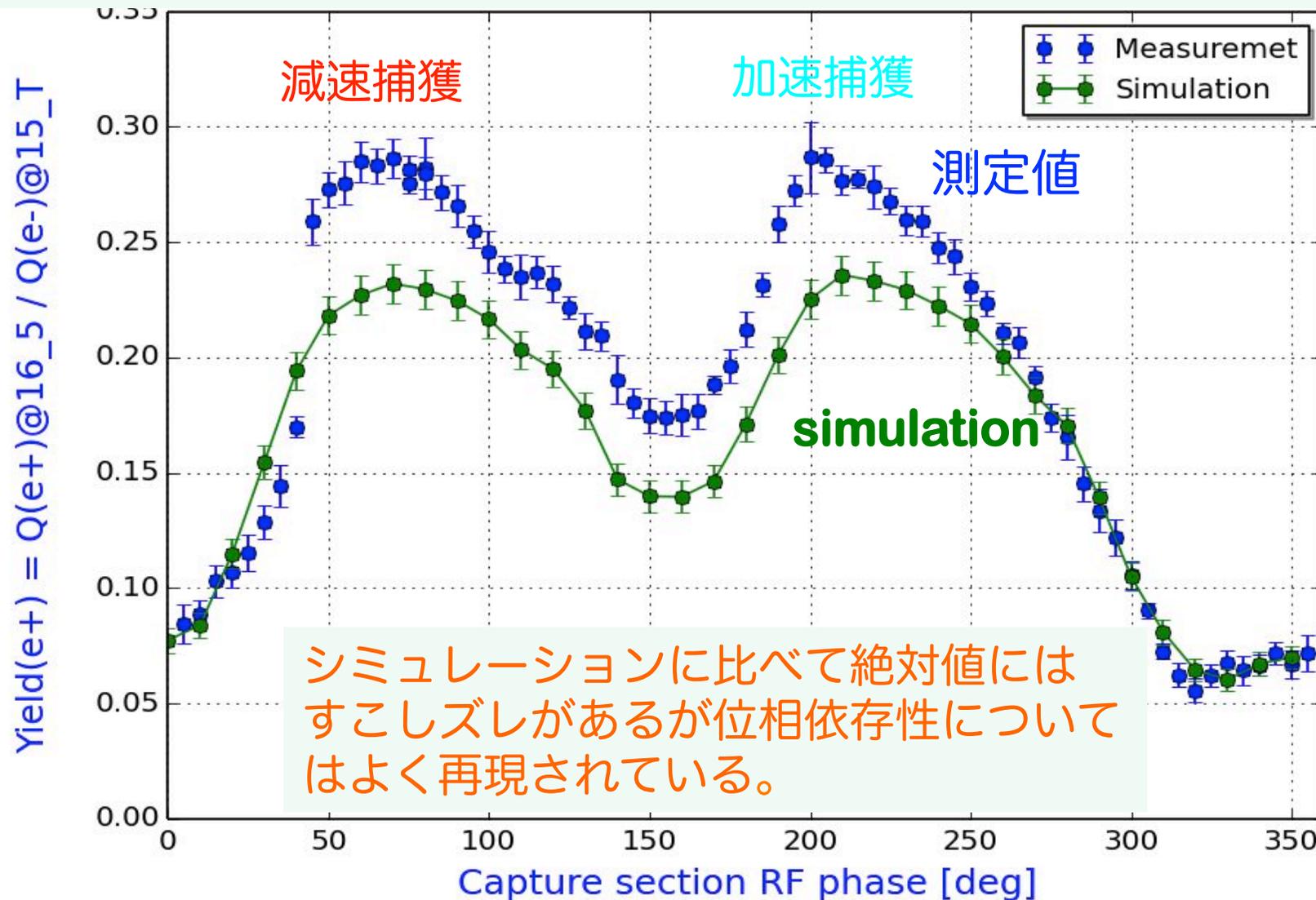


(4) DC solenoid 1-6 current



(5) e⁺ RF phase [1-5と1-6の位相関係は固定]

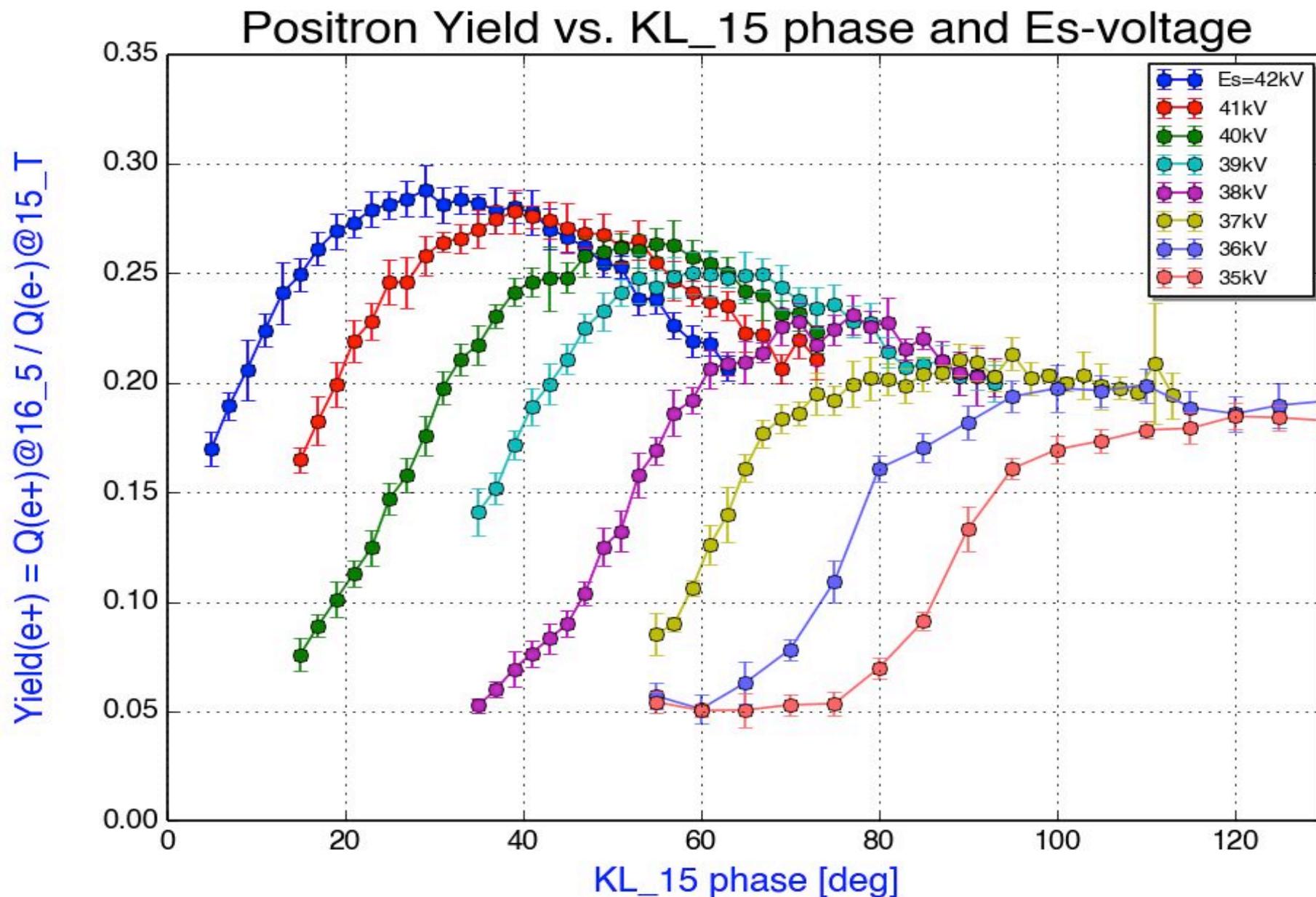
FCの広いアクセプタンスのおかげで減速捕獲でもほぼ同じ収量が得られる。減速捕獲の方が陽電子のバンチ長、エネルギー広がりが小さい。



シミュレーションに比べて絶対値にはすこしズレがあるが位相依存性についてはよく再現されている。

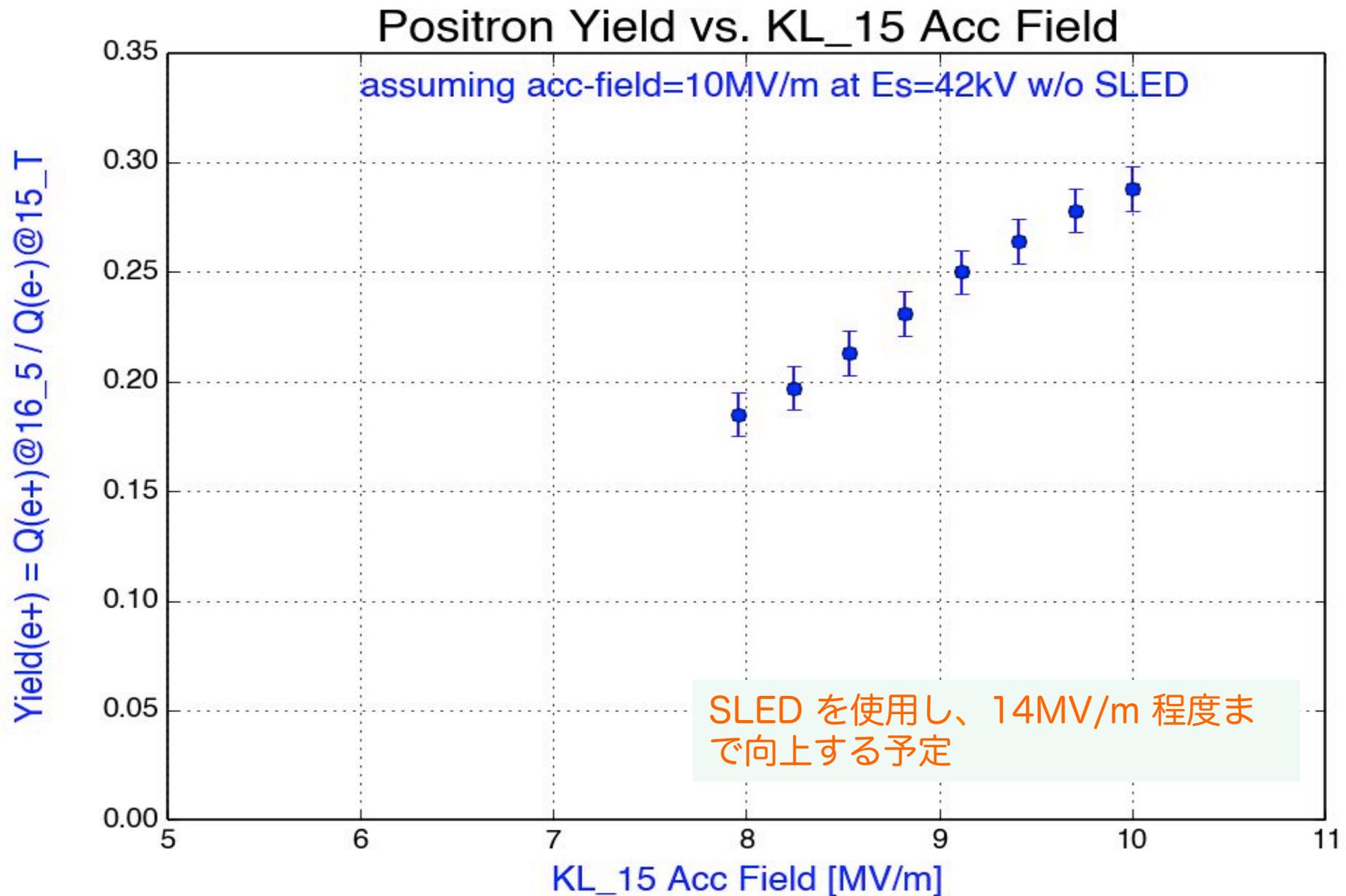


(6) Acc-field grad./phase at 1-5





(6-2) Acc-field grad. [MV/m] at 1-5



陽電子生成

1) SuperKEKB陽電子源は2014年4月に設置された。

(ビームラインの改造はすでに2013年夏より開始していた。)

(陽電子生成標的、ビームスポイラ、Flux Concentrator, ブリッジコイル、LAS加速管[6本]、DCソレノイド流用[16台+新設13台]、電子陽電子セパレータ、Qマグネット[新設約90台])

2) 陽電子ビームのコミッショニングを開始し、SuperKEKB向けの改造後としては初めての陽電子を観測した。まだ陽電子の電荷量、収量ともに低いが、さらなる性能向上が期待される。

	一次電子 [nC] @標的直前	陽電子 [nC] @DRへの分岐点	陽電子収量 @DRへの分岐点	主なコンポーネント の達成値と仕様値
2014年6月 達成値	0.6	0.12	20 %	FC 6.4kA, ソレノイド 370A Acc field 10, 12 MV/m
	↓ x17	↓ x42	↓ x2.5	
設計仕様値	10.0	5.0	50 %	FC 12kA, ソレノイド 650 A Acc field 14, 12 MV/m

DR入射 → 4.0 DR入射 → 40%

3) 2014年10月～12月 : Linac コミッショニング

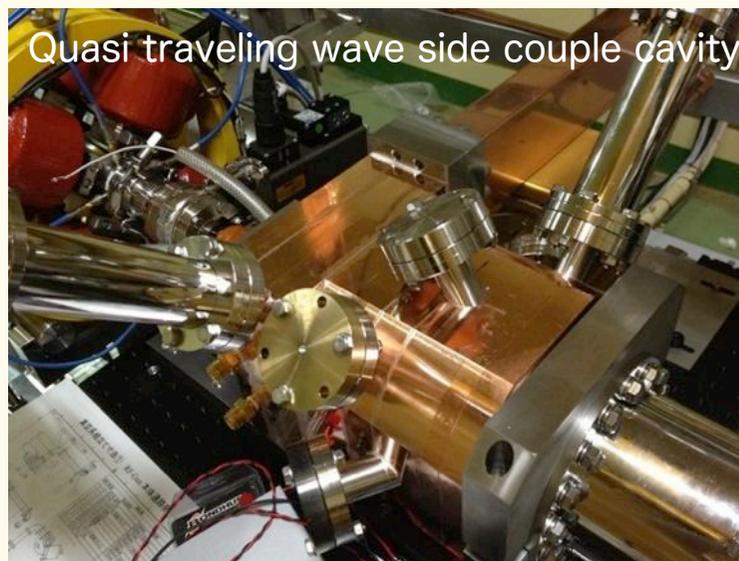
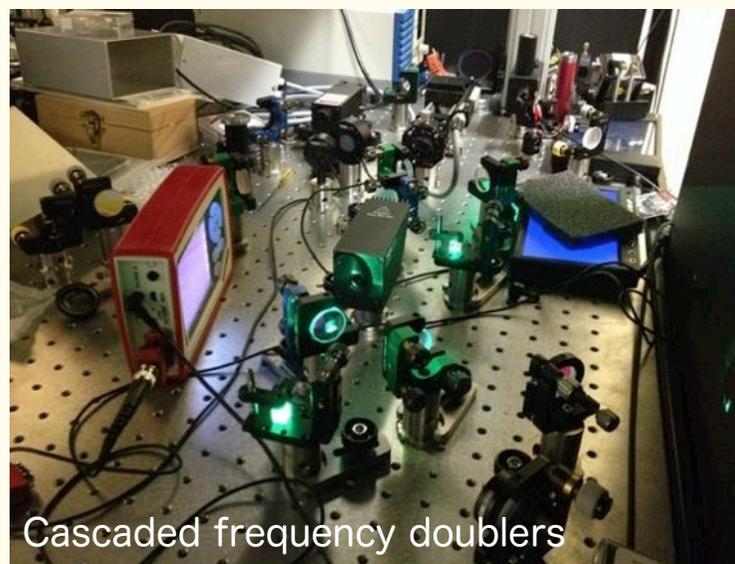
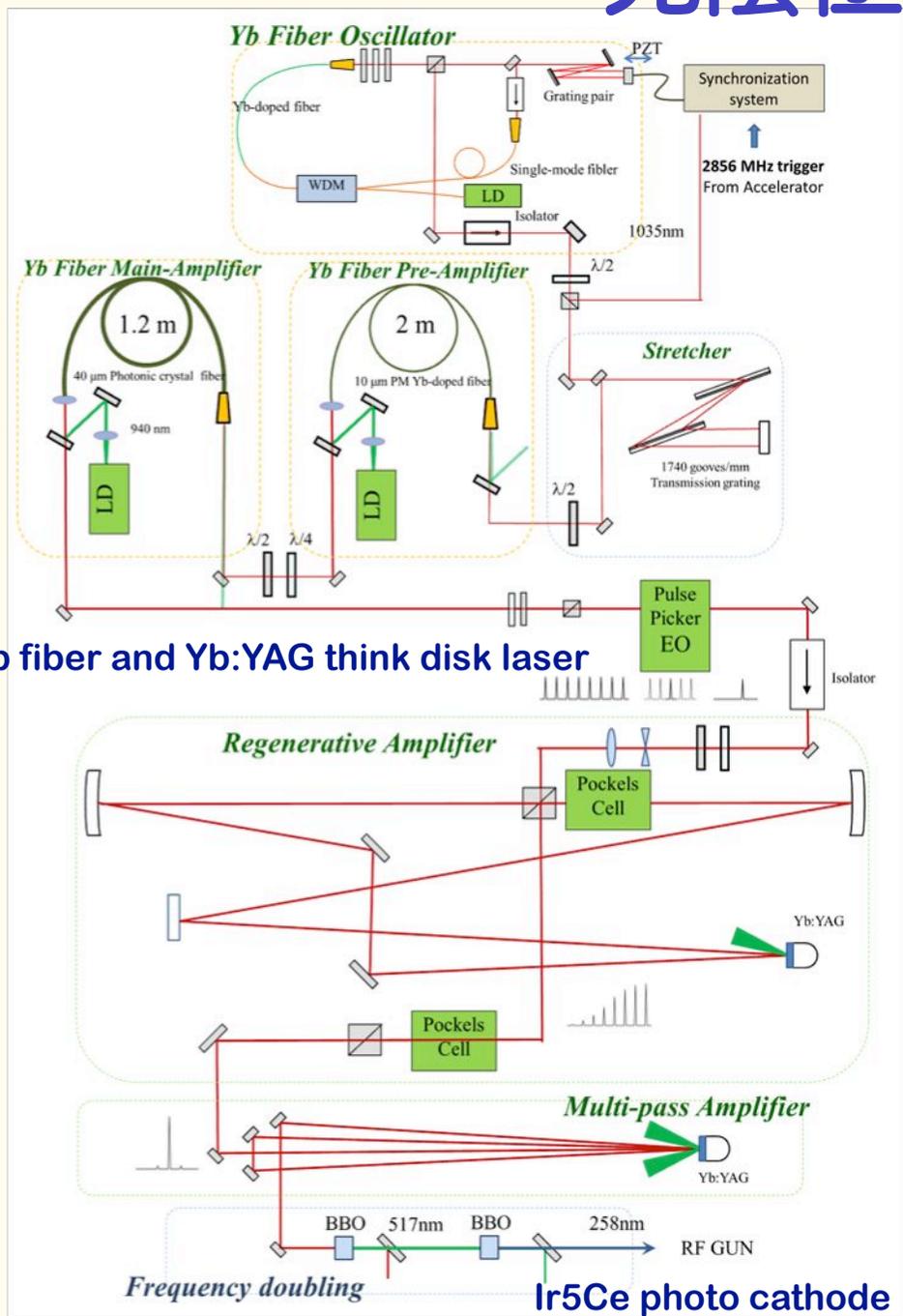
2015年1月～3月 : 改造工事、

4月～6月 : Linac コミッショニング

2015年7月～9月 : 改造工事、

10月～ : LER入射開始

光陰極 RF 電子銃



- ◆ 5.6 nC / bunch was confirmed
- ◆ Next step: 50-Hz beam generation & Radiation control

光陰極 RF 電子銃の改造

- ◆ 大電流・低エミッタンスビームの生成
- ◆ 新しい光陰極 Ir5Ce 及び新しい空洞 QTWSC が成功
- ◆ これまでの 2 ~ 5 Hz では基本性能達成が近い
- ◆ 50 Hz での性能および安定度達成が期待される
- ◆ レーザーは複数種類の増幅段から構成
- ◆ 媒体の発熱により再生増幅器の利用は困難、装置を取り外し、マルチパス増幅器追加し、これまでの 5 Hz の繰り返しから、25 Hz の繰り返しに向上させて、次項の施設検査に対応

Alignment

- ◆ 架台の柔構造を改め、中央固定、ジャッキボルト化を進めている
- ◆ Quad や加速管に測定座を取り付け
- ◆ 500m 直線 Laser と位置 Sensor による繰り返し計測、ずれ 0.3mm 程度を達成しつつある
- ◆ 10m Unit 内は Laser tracker による計測で、ずれ 0.1mm 程度を達成しつつある
- ◆ 長期的には、部分的な遠隔 (運転中) 測定、Mover 付き架台、を開発中

Instrumentation

- ◆ **RF stability is crucial for the beam**
 - ❖ LLRF monitor is being developed
 - ❖ 60 high-power klystrons and 10 middle-power systems
 - ❖ 50Hz synchronized data acquisition with event (beam-mode) recognition
 - ❖ 0.1% amplitude and 0.1degree phase resolution
- ◆ **BPM precision improvement**
 - ❖ $100\ \mu\text{m} \rightarrow 50\ \mu\text{m} \rightarrow < 10\ \mu\text{m}$
 - ❖ Event recognition
 - ❖ Mass production is underway
- ◆ **Other beam monitors**



SuperKEKB に向けた段階的な施設検査

◆ 電子銃直後の #A2 ビーム特性解析部

❖ 現在 RF 電子銃の最大電流で検査 (申請値 1250nC 2bunch 50Hz)

◆ ダンピングリングへの分岐部の #28 ビームダンプ

❖ 現在の一次電子の電流制限値 0.7nC で、0.1nC の陽電子を導き検査

❖ いずれも予定よりも少ない電流値での検査になったが、放射線管理に対応していただいた

◆ さらに陽電子生成部の放射線量評価

❖ 今後の遮蔽追加の際に計算が容易になり、遮蔽厚さを最適化できる

◆ いずれも合格をいただいた

電力節約の試み

- ◆ 大電力パルス電源の繰り返しも50 Hz として運転してきた
- ◆ 電源の安定度を考慮し、これまでは電源繰り返しの 50 Hz からの変更を考えることはほとんどなかった
- ◆ ビームはいつも 50 Hz で供給するわけではなくある意味無駄
- ◆ 最近の電力料金の高騰により、少しでも電力削減を行うことが好ましい
- ◆ 3月の停止時にイベント・タイミング制御装置のソフトウェアを変更、50 Hz 未満のパルス電源運転に対応できるように改造
- ◆ 各電源装置の動作点の変更調整も行ったところ、25 Hz の運転によって、0.7 MW の電力使用量削減に成功
- ◆ PF や PF-AR は当面 50 Hz の入射は行わないため、25 Hz の運転を継続

5月12日発熱事案2件

- ◆ 日中、第2スイッチヤード (SY2) で異臭とうっすらとした発煙が有り、試験中の SY2 の電源を停止し調査したところ、偏光電磁石 BM_28_4 (BC1E.2) のコイルが発熱
- ◆ コイル交換予定、今後業者との連絡に注意を払う必要
- ◆ 準夜、A セクター部で異臭とうっすらとした発煙が有り、A, B セクターの電源を停止した上で調査したところ、約 30 分後に大電力クライストロン KL_A2 のパルス電源のデスパイカーという素子の発熱を発見
- ◆ 経年変化による障害、同じロットは交換済み



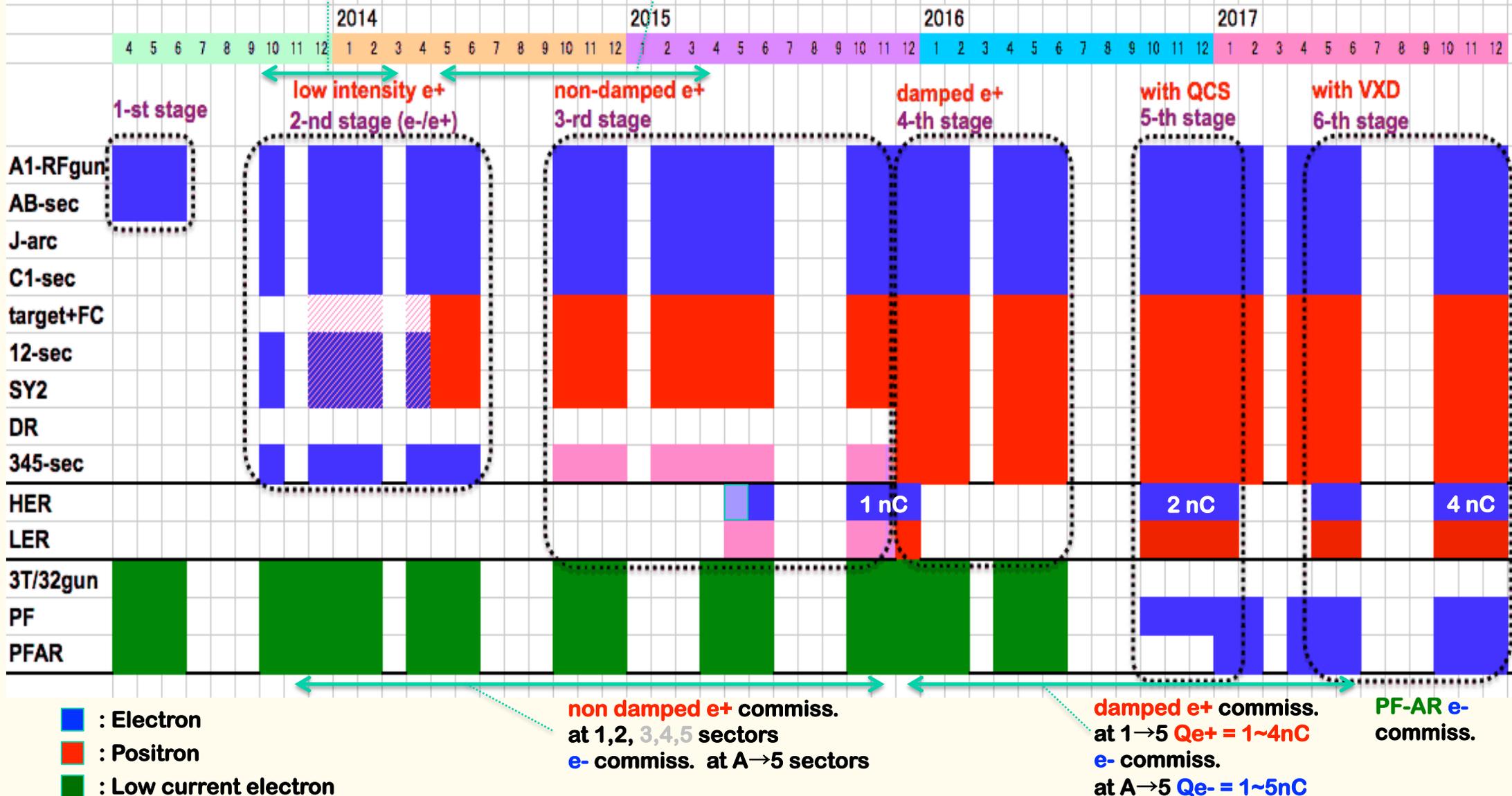


Linac Schedule Overview

RF-Gun e- beam commissioning at A,B-sector
Qe- = 5nC

e- commiss. at A,B,J,C,1
Qe- = 5nC

e+ commiss. at 1,2 Qe+ = 0.5nC (FC, DCS, Qe- 50%)
e- commiss. at 1,2,3,4,5 Qe- = 5nC



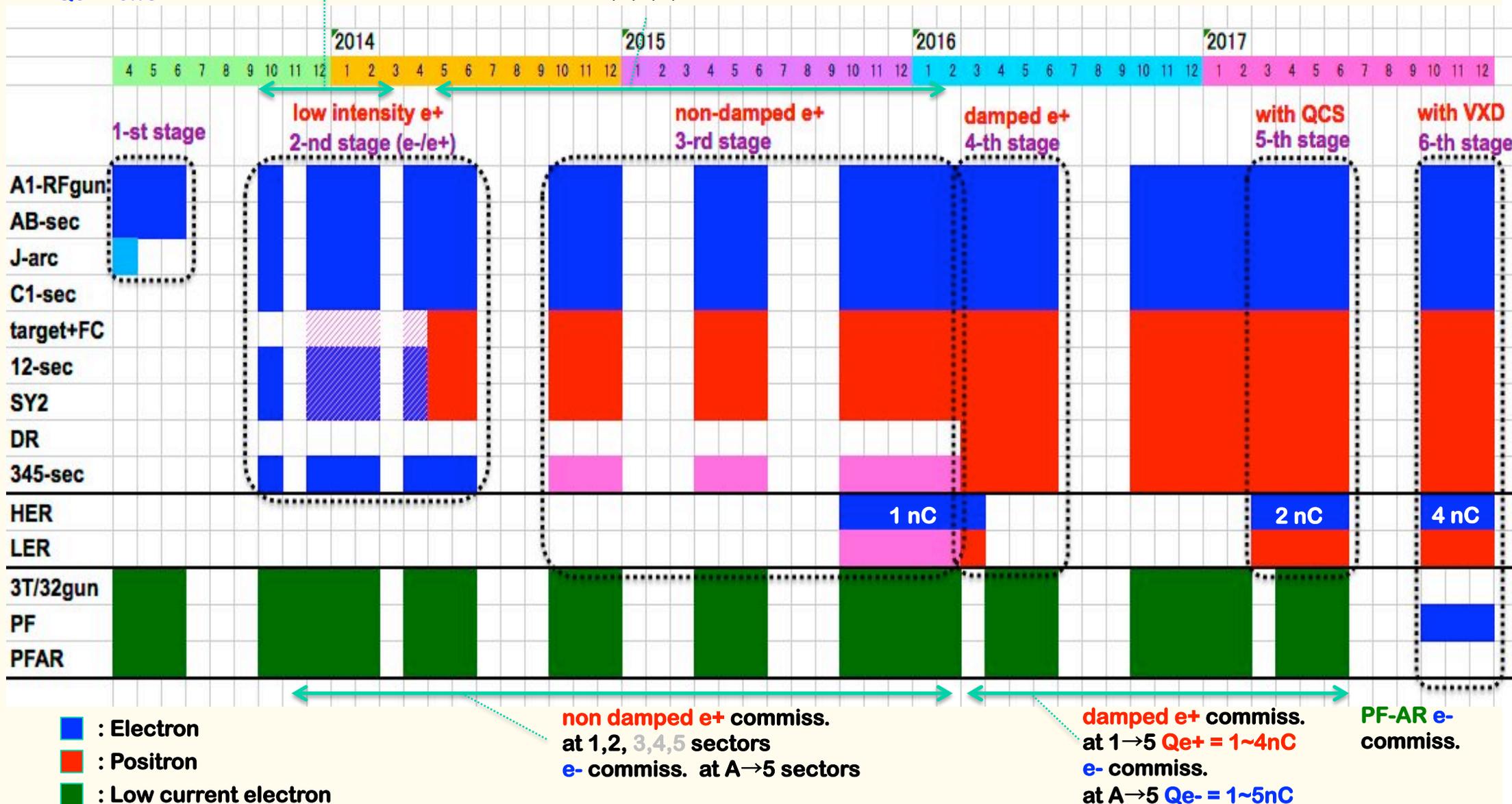


Linac Schedule Overview

RF-Gun e- beam
commissioning
at A,B-sector
Qe- = 5nC

e- commiss.
at A,B,J,C,1
Qe- = 5nC

e+ commiss.
at 1,2 Qe+ = 0.5nC (FC, DCS, Qe- 50%)
e- commiss.
at 1,2,3,4,5 Qe- = 5nC





Summary

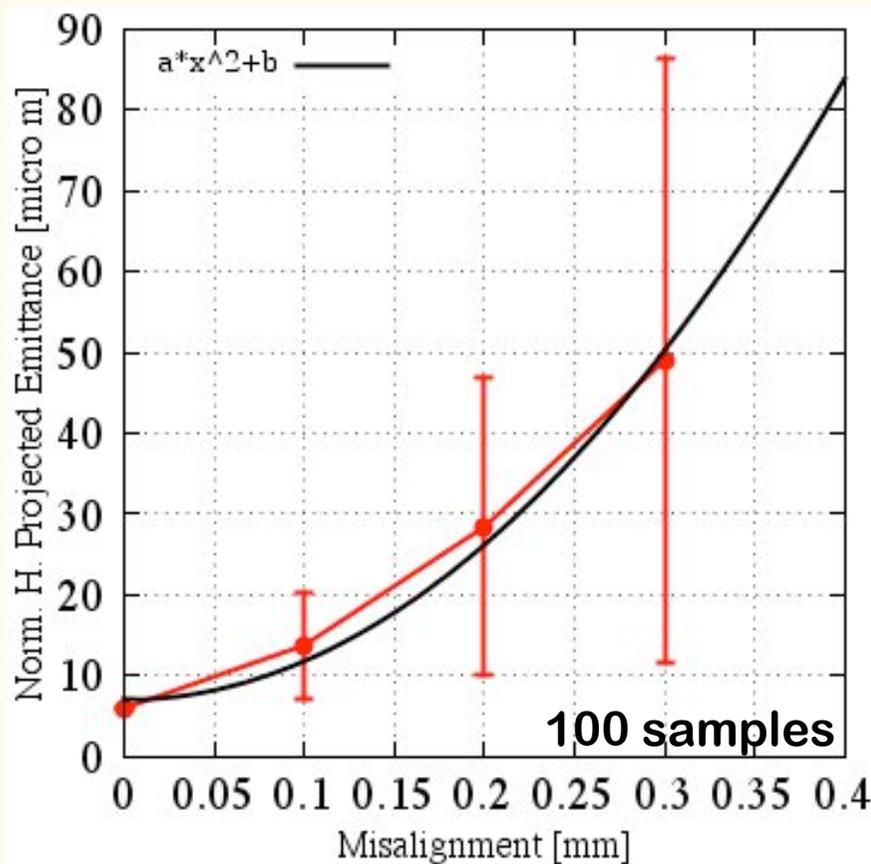
- ◆ **Steady progress towards first MR injection in 2015**
- ◆ **Will finish earthquake disaster recovery in 2014**
- ◆ **Will make staged improvements before 2017**
- ◆ **Will balance between final beam quality and stable/staged operation**
- ◆ **Will select optimized route depending on available resources**



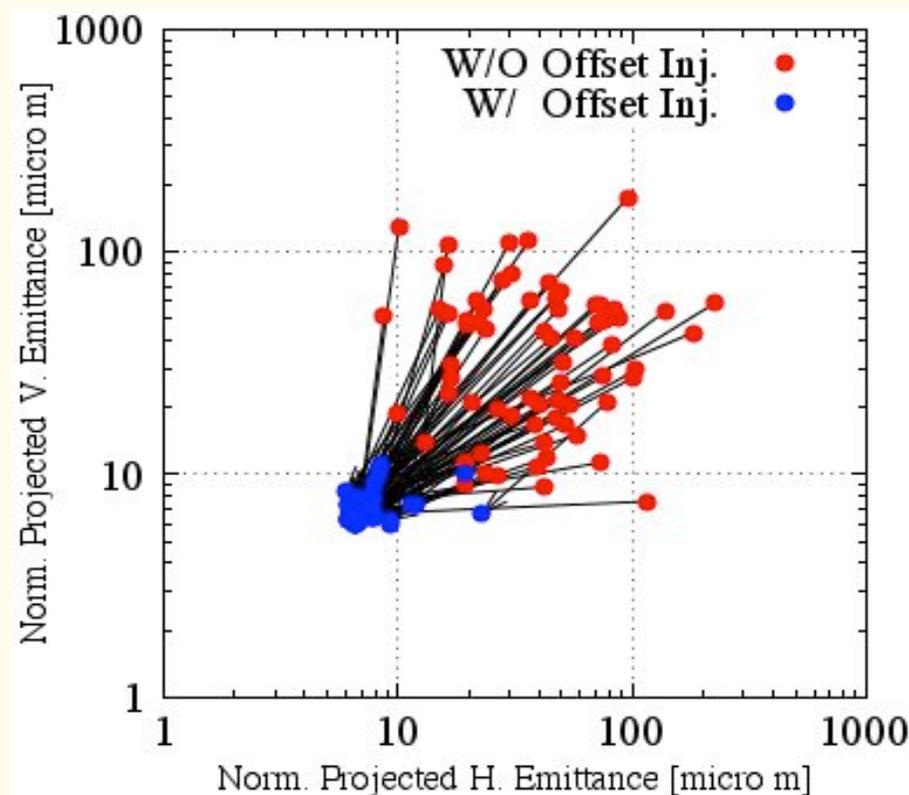
Emittance Preservation

- ◆ Offset injection may solve the issue
- ◆ Orbit have to be maintained precisely

Mis-alignment leads to Emittance blow-up

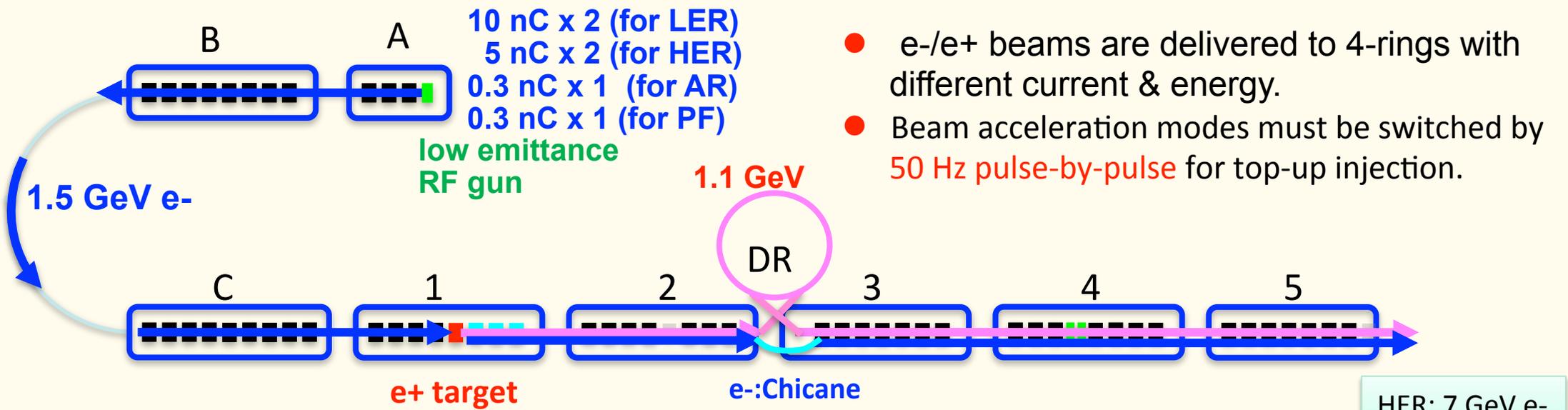


Orbit manipulation compensates it

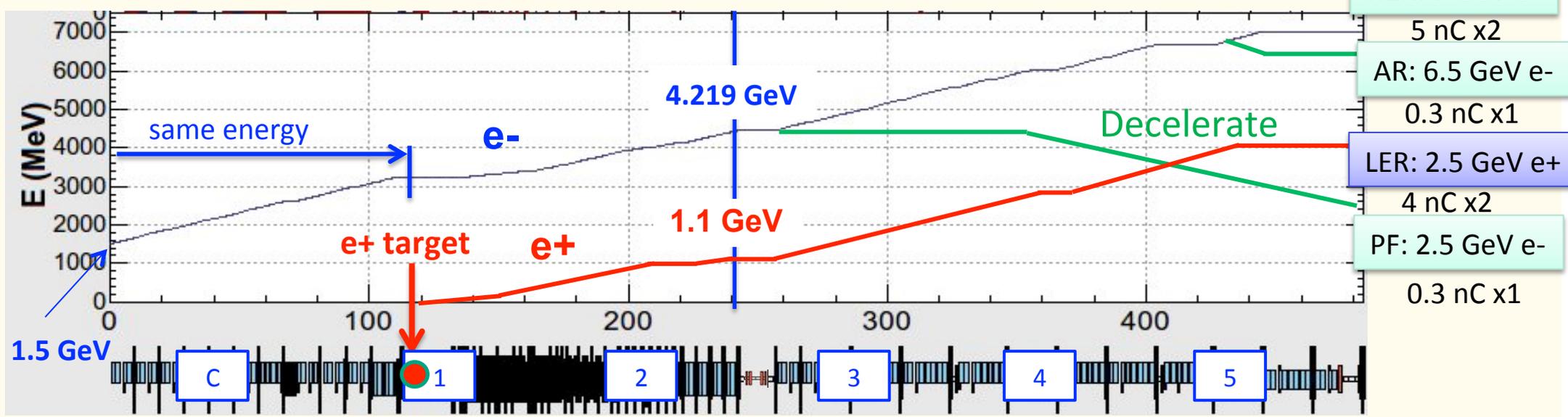


Sugimoto et al.

Energy profiles and beam properties



- e-/e+ beams are delivered to 4-rings with different current & energy.
- Beam acceleration modes must be switched by 50 Hz pulse-by-pulse for top-up injection.



Beam optics should satisfy the fast beam-mode switching.

Pulse-to-pulse modulation

◆ Four PPM virtual accelerators for SuperKEKB project

maybe with additional PPM VAs for stealth beam measurements

based on Dual-tier controls with EPICS and event-system

