

SuperKEKB Phase1 における 入射器とリングの現状

発表者：紙谷 琢哉 (KEK)

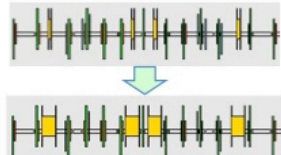
(共著者)

赤井和憲、秋山篤美、明本光生、安達利一、阿部哲郎、荒川大、荒木田是夫、有永三洋、有本靖、飯田直子、飯沼裕美、池田仁美、池田光男、石井仁、石橋拓弥、岩崎昌子、岩瀬広、植木竜一、上原貞治、宇野彰二、江川一美、榎本收志、榎本嘉範、Dima El Khechen、海老原清一、生出勝宣、大内徳人、大木俊征、大沢哲、大澤康伸、大西幸喜、大見和史、小川雄二郎、小田切淳一、小野正明、柿原和久、影山達也、風間慎吾、梶裕志、片桐広明、加藤茂樹、金澤健一、可部農志、川村真人、川本崇、菊池光男、工藤喜久男、倉品美帆、小磯晴代、小島裕二、小玉恒太、小林鉄也、坂井浩、坂本裕、佐々木信哉、佐武いつか、佐藤大輔、佐藤政則、佐藤政行、佐波俊哉、宗占国、設楽哲夫、柴田恭、清水洋孝、周翔宇、周徳民、白井満、白川明広、末武聖明、末次祐介、菅原龍平、杉本寛、諏訪田剛、清宮裕史、鷹崎誠治、竹内保直、竹中たてる、田中窓香、多和田正文、張勲、邱丰、土屋清澄、照井真司、峠暢一、飛山真理、内藤孝、仲井浩孝、中尾克巳、中島啓光、中西功太、中村衆、中村達郎、中山浩幸、夏井拓也、西脇みちる、二宮重史、野島健大、原和文、肥後寿泰、久松広美、福田茂樹、福間均、船越義裕、舟橋義聖、フラナガンジョン、古川和朗、古屋貴章、細山謙二、本間輝也、本間博幸、増澤美佳、松下英樹、松本修二、松本利広、丸塚勝美、三浦孝子、三川勝彦、道園真一郎、光延信二、三増俊弘、宮原房史、森健児、森隆志、森田昭夫、森田欣之、矢野喜治、山岡広、横山和枝、吉田正人、吉田光宏、吉野一男、吉本伸一、渡邊謙、王旭東

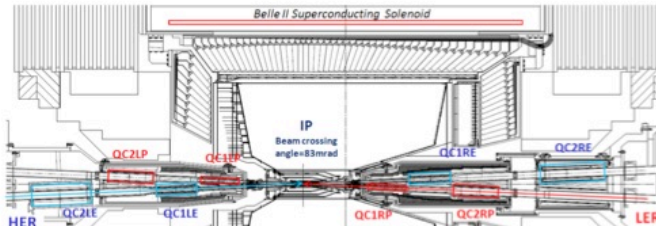
SuperKEKB とは？



LER偏向電磁石を長い磁石に交換するなど、低エミッタンスを実現するためにラティス設計を変更。電磁石の大幅な追加と配置変更



Belle 検出器の改造



衝突点でビームを極限まで絞り込むための超伝導4極電磁石システム



e⁺ 3.6A

e⁻ 2.6A

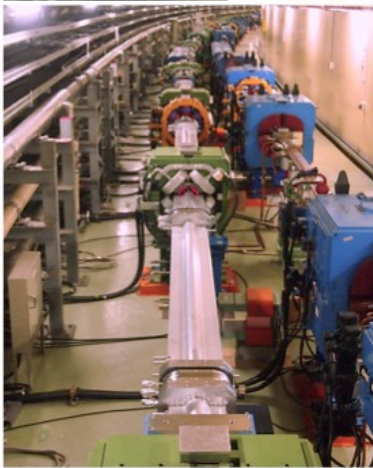
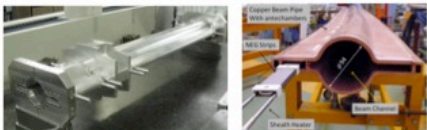
衝突点

SuperKEKB

- ◆ Nano-Beam scheme
extremely small β_y^*
low emittance
- ◆ Beam current double

$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2e_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \frac{I_{\pm} \xi_{\pm y}}{\beta_y^*} \frac{R_L}{R_y} \right)$$

40 times higher luminosity
2.1x10³⁴ --> 8x10³⁵ cm⁻²s⁻¹



電子雲を抑制し、ビームサイズ増大や不安定を防ぐための新型ビームパイプ (アンテナチャンパー+内面コーティング)



高品質の陽電子ビームを得るためのダンピングリング新設

New e⁺ Damping Ring

Injector Linac upgrade

- 入射器の改造
- RF電子銃
- 陽電子源の増強



ウィグラー部の増強(LER)・新設(HER)





ビーム電流を高めるために高周波システムを増強

ビーム診断・制御システムの精密化・高速化

ThanksTo
赤井さん

SuperKEKB machine parameters

Alternative luminosity formula: $L \propto \frac{\xi_y \cdot I}{\beta_y^*}$ $\sigma_y^* = \sqrt{\varepsilon_y \beta_y^*}$

	KEKB		SuperKEKB		Luminosity gain
	LER	HER	LER	HER	
ξ_y	0.129	0.09	0.088	0.081	x 1
β_y^* [mm]	5.9	5.9	0.27	0.3	x 20 
I [A]	1.64	1.19	3.6	2.6	x 2
σ_y^* [nm]	940	940	48	62	nano beam ! 
ε_y [pm]	150	150	< 10	< 10	Low emittance !
L [cm ⁻² s ⁻¹]	2.1x10³⁴		8x10³⁵		x 40

ThanksTo
大西さん

SuperKEKB commissioning Phases

- **Phase1**: 2016年1月～7月: **初期コミッショニングを行う**
 - ◆ Linac、BTライン、LER、HERは基本的に稼働状態
 - ◆ Belle II 検出器は**未設置**
(代わりに簡易型 BEAST 2 を設置してバックグラウンドスタディー)
 - ◆ 衝突点超伝導収束系 QCSは**未設置**
 - ◆ 陽電子ダンピングリングは**未設置**

- **Phase2**: 2017年秋～2018年春: **ビーム衝突実験開始**
 - ◆ Belle II 検出器: 設置、稼働(但しVertex detectorは除く)
 - ◆ 衝突点超伝導収束系 QCS: 設置、稼働
 - ◆ 陽電子ダンピングリング: 設置、稼働

- **Phase3**: 2018年秋～: **本格的な実験開始**
& 高ルミノシティへの挑戦
 - ◆ Belle II 検出器 full install 状態

SuperKEKB リングの現状

SuperKEKB Phase1の3つの重要な目標 ⁶

(目標その1) 機器の立ち上げと安定した運転状態の確立

- ◆ ビーム入射、蓄積が安定して行えるようにビーム調整を行い、そのビームを用いて各種機器の立ち上げ、初期調整や較正、また各種運転用ソフトウェアの整備などを行うこと。

(目標その2) 真空チャンバーのビーム焼き出し

- ◆ 2つのリングに設置された多数の新しい真空チャンバーについて、ビームによる真空焼き出しを進めて圧力を低下させておくこと。

(目標その3) 低エミッタンスビーム調整

- ◆ 高いルミノシティでの運転に必須である、蓄積ビームの低エミッタンス状態を実現するようなビームオプティクスの調整をすること。

初期入射、蓄積調整

2016年

- (1/25) Linac(e^- , e^+)ビーム調整開始
- (2/01) e^+ ビームトランスポート(BT)ライン調整開始
- (2/08) LERビーム入射開始
- (2/10) LERビーム蓄積に成功！
- (2/18) e^- ビームトランスポート(BT)ライン調整開始
- (2/22) HERビーム入射開始
- (2/26) HERビーム蓄積に成功！

両リングともに入射、蓄積がうまくいったことで、

- ☆ Linac->BT->リングまでの入射システム
- ☆ リング全周の真空チェンバー、排気系
- ☆ リング全周の電磁石システム
- ☆ RF加速システム

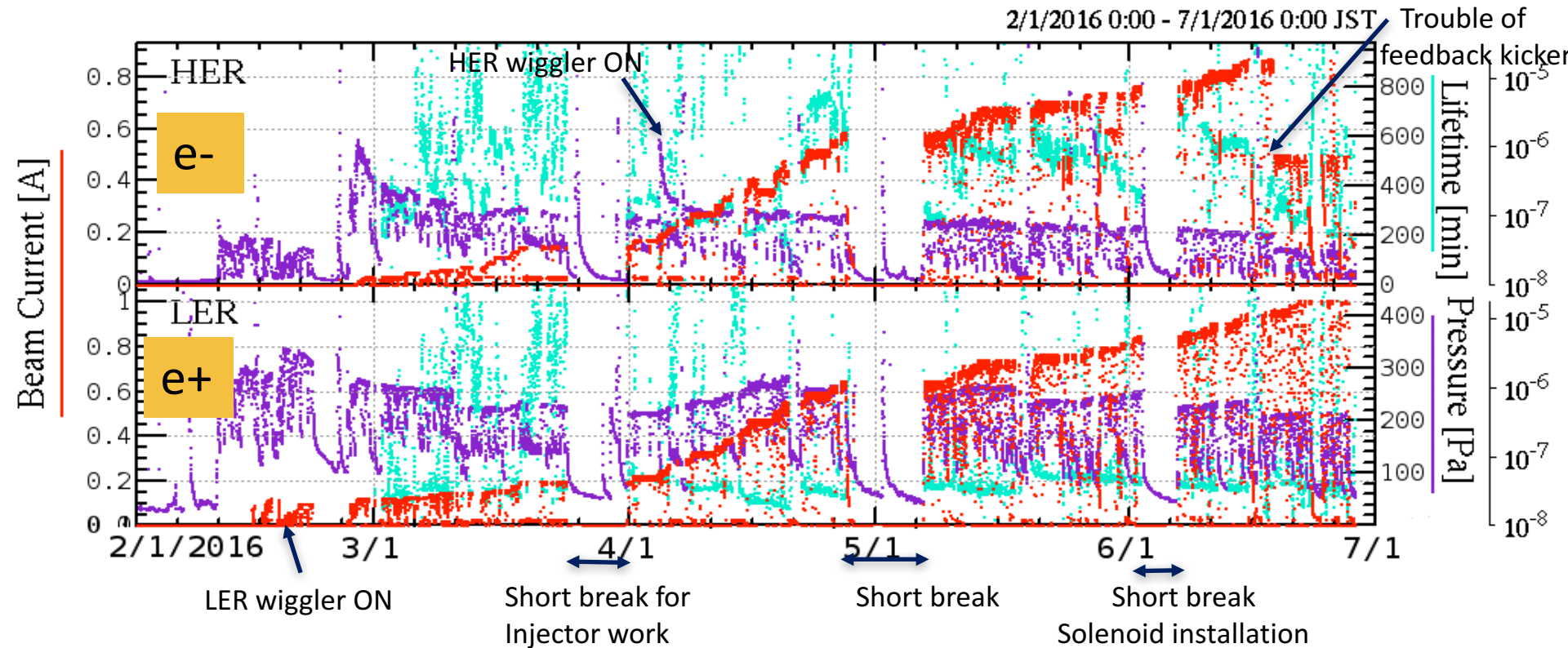
について基本的な問題がないことが確認された。

各種装置の立ち上げ、調整

以下のような各種の機器等について、ビームを用いての初期調整や較正が進められた。

- Linac, BT, 入射キッカー、セプタム系
- 真空チェンバー、排気系
- 電磁石及び電源系
- RF空洞(常伝導ARES/超伝導空洞)及びクライストロン系
- ビームアポートシステム(蓄積ビームを安全に捨てる)
- ビーム電流モニター、バンチ電流モニター
- ビームロスモニター
- ビームチューン測定系
- ビーム位置モニター
- ビームサイズモニター(可視光、X-ray)
- ビーム入射タイミング同期系、入射バケット選択システム
- ビームフィードバック系
- アラームシステム(装置の異常などを知らせる)
- 運転制御、ソフトウェア系

SuperKEKB Phase1 運転の概要



Red: total beam current

Purple: vacuum pressure

Cyan: beam lifetime

HER: 870 mA, 5.7×10^{-8} Pa, ~ 200 min. (6/17)

LER: 1010mA, 4.7×10^{-7} Pa, ~ 60 min. (6/22)

安定したビーム運転状態が確立され、蓄積電流も徐々に増加した。

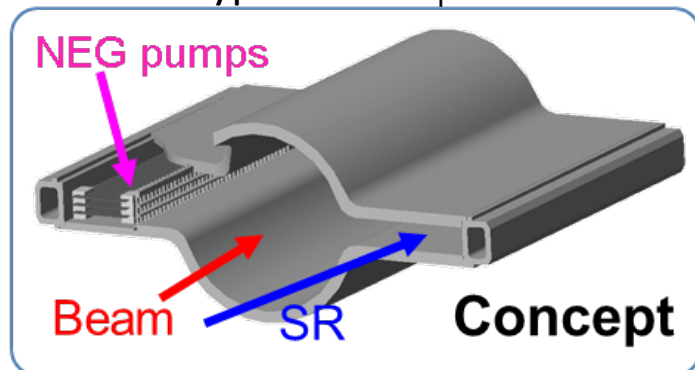
Phase1目標その1達成！

ThanksTo
船越さん

SuperKEKBの真空チェンバー

アンテチェンバーの構造

Typical size: $\phi 90 \times {}^w 220$

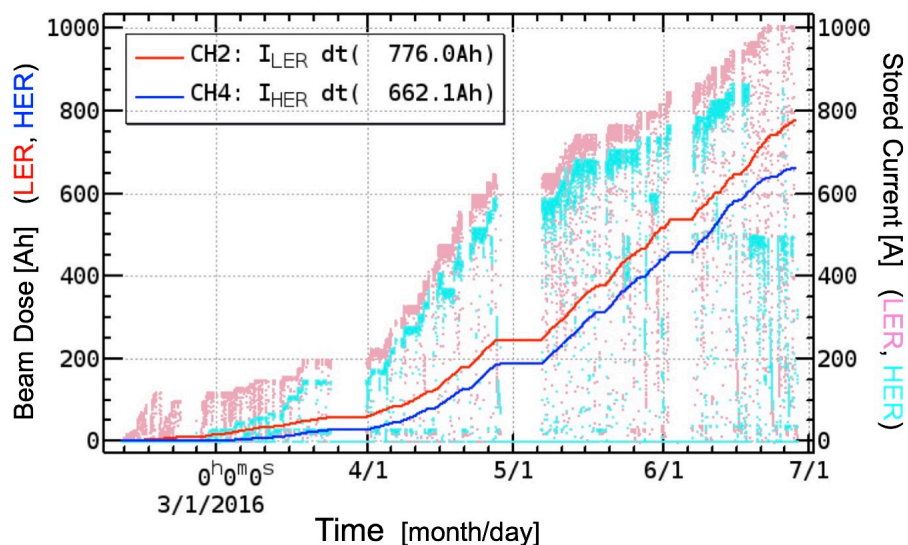


- SuperKEKBではビームからの放射光により真空チェンバー壁面から放出される電子によるビーム不安定性の問題が懸念された。
- 陽電子ビームを蓄積するLERでは、対策として側室を設けた構造のアンテチェンバーを多数導入した。
- また内部表面にTiNコーティングをしたり、放出電子吸収用の電極を付けたチェンバーを導入した。
- 多数の新規チェンバーのため、初期到達圧力は高いことが予測された。
- Phase2からのBelle IIを用いた実験のためには残留ガスによるバックグラウンドが高いと問題になる。

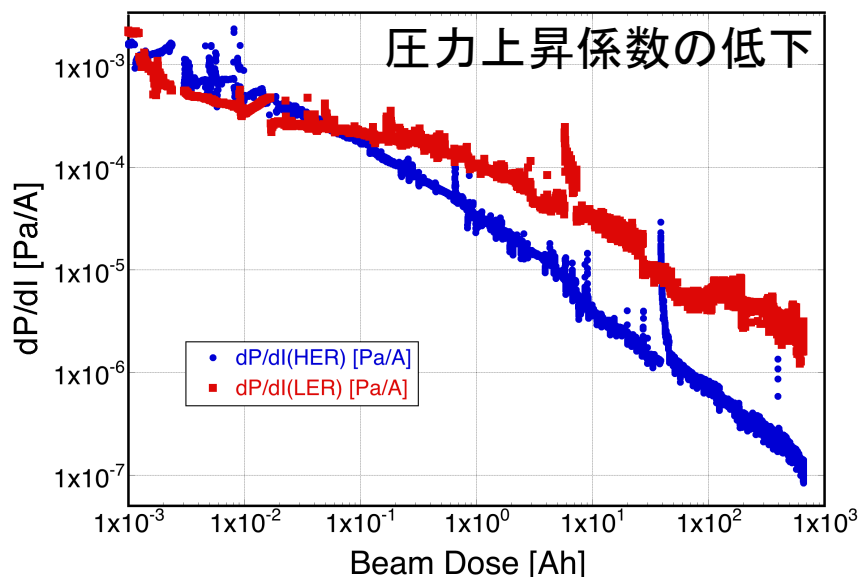
ThanksTo
末次さん

焼き出しによる圧カレベルの低下

Beam Dose 量の積み上げ



圧カ上昇係数の低下



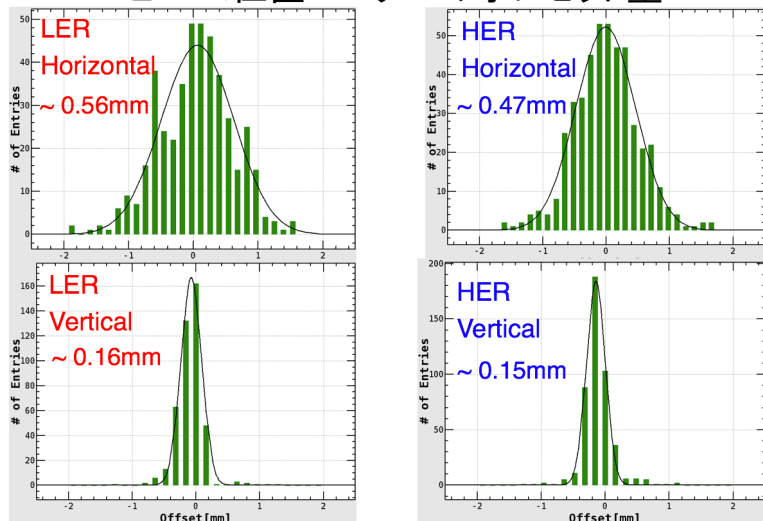
- Belle II検出器がまだ設置されていないPhase1の期間にチェンバー内の圧カレベルをなるべく下げることが求められた。
- ビームからの放射光が真空チェンバー壁面からガス放出をうながして圧カを低下させる真空焼き出しを進めた。
- 積分ビーム電流量 (Beam dose量)
 - ◆ LER: 776 [A.h] max電流値: 1.01 [A]
 - ◆ HER: 662 [A.h] max電流値: 0.87 [A]
 を達成した。
- 単位ビーム電流量当たりの圧カ上昇係数 (dP/dI) 値は、3桁程度低下した。

Phase1目標その2達成!

ThanksTo
末次さん

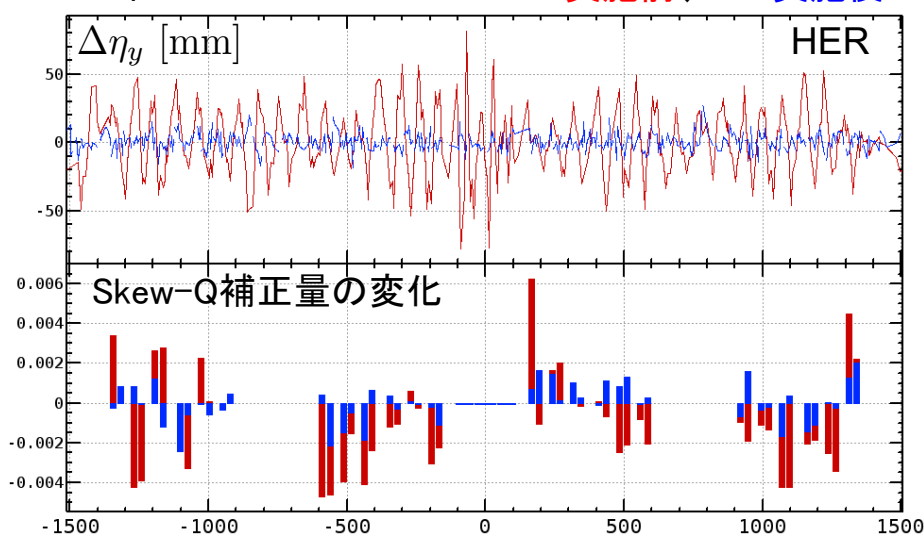
オプティクス調整(dispersion補正)

ビーム位置モニターのオフセット量



Dispersion値の変化

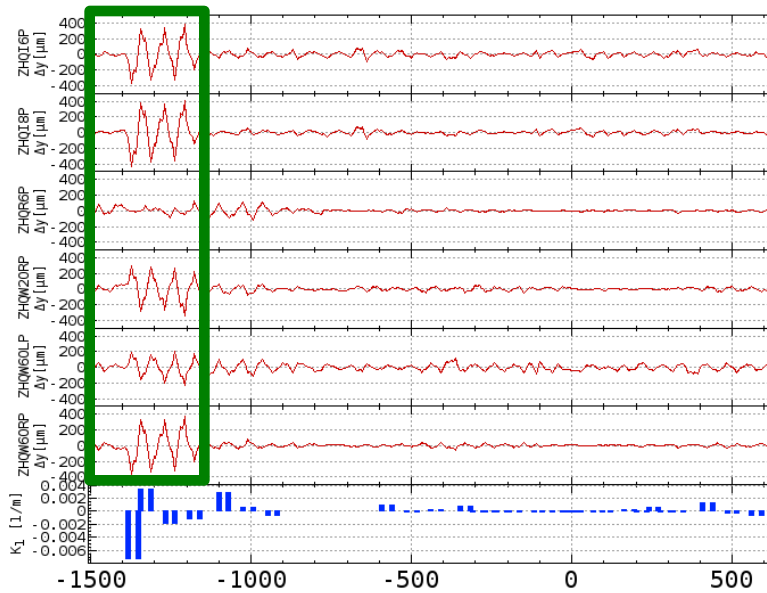
BBA実施前、BBA実施後



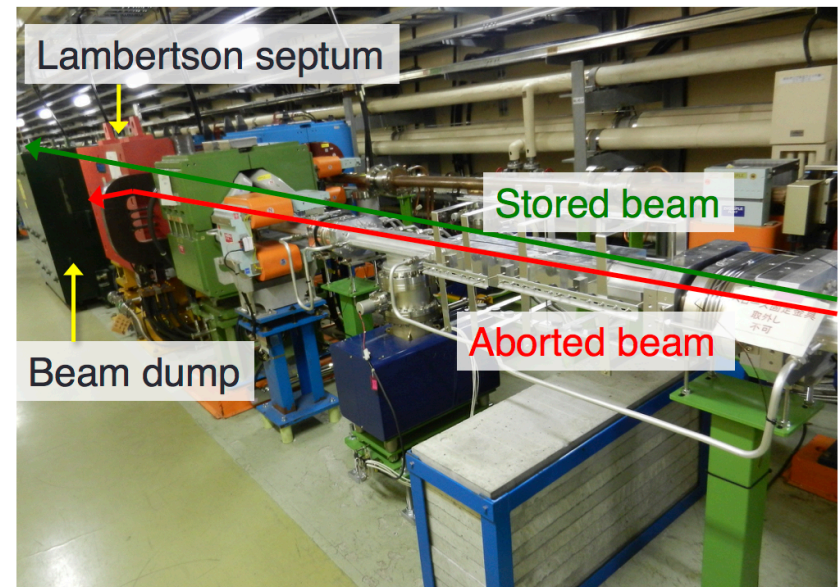
- リングのRF周波数を変えてビーム軌道の変化率からdispersionを評価する。
- skew-四極マグネットによる補正を行うが、初期には補正量が大きすぎて現状の調整パラメータでは補正しきれなかった。
- [1] Beam-Based Alignmentを行い、ビーム位置モニターのoffsetを補正した結果、ビーム軌道が四極及び六極マグネットの中心に近いところを通るようになった。
- [2] 六極マグネットにskew-四極成分の補助コイルを巻いて使用できるようにした。
- これらの結果として、dispersion値を小さくすることができた。

ThanksTo
杉本さん

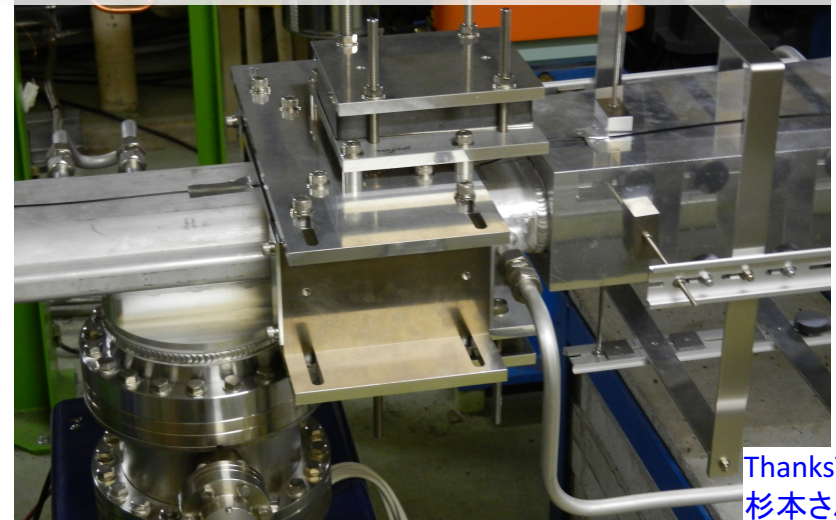
オプティクス調整(XY-coupling補正)



- アボートラインのLambertsonマグネットの漏れ磁場が大きなXYカップリングを発生させていることが判明。
- オプティクス補正量から計算された強さのフェライトマグネットを取り付けて、有害なskew-四極成分を打ち消すようにした。
- XYカップリングの強さを小さくすることができた。

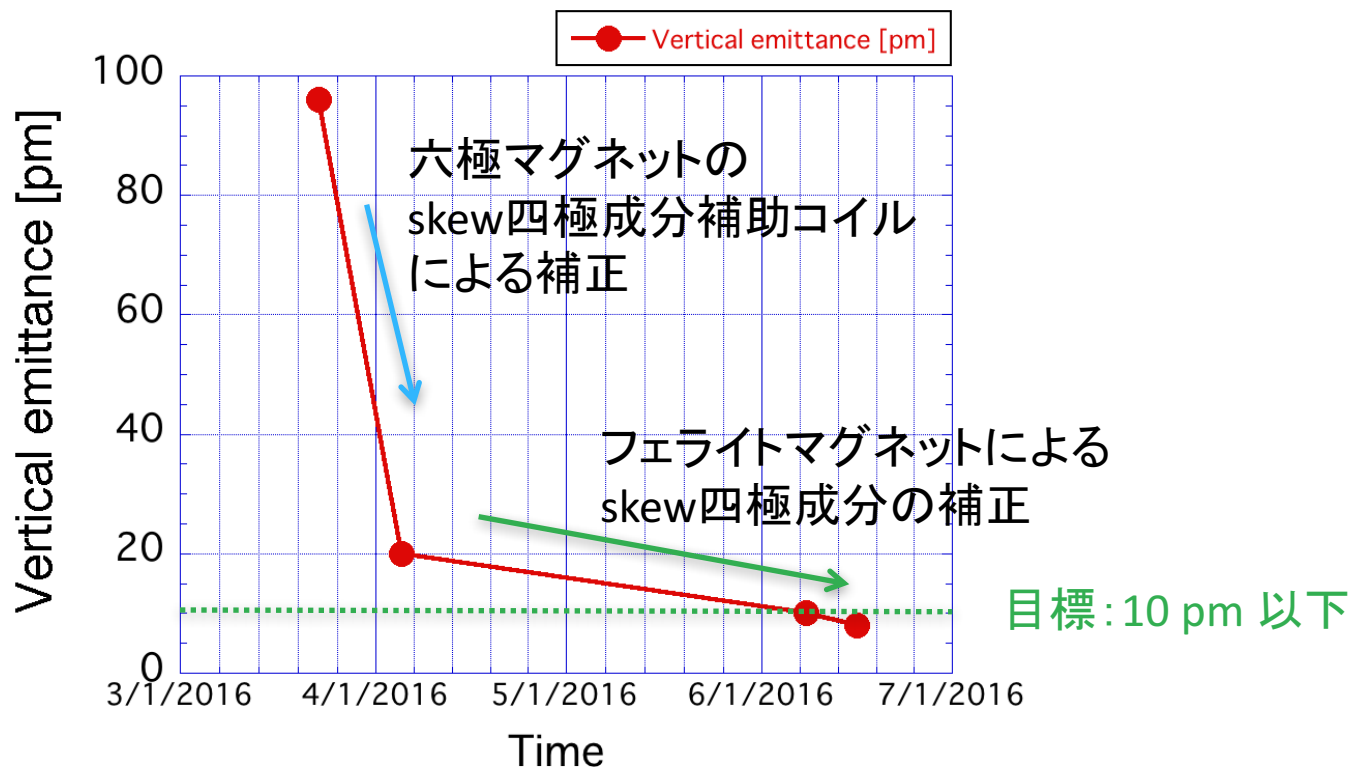


取り付けしたフェライトマグネット



ThanksTo
杉本さん

蓄積ビームemittance値の低下(LER)¹⁴



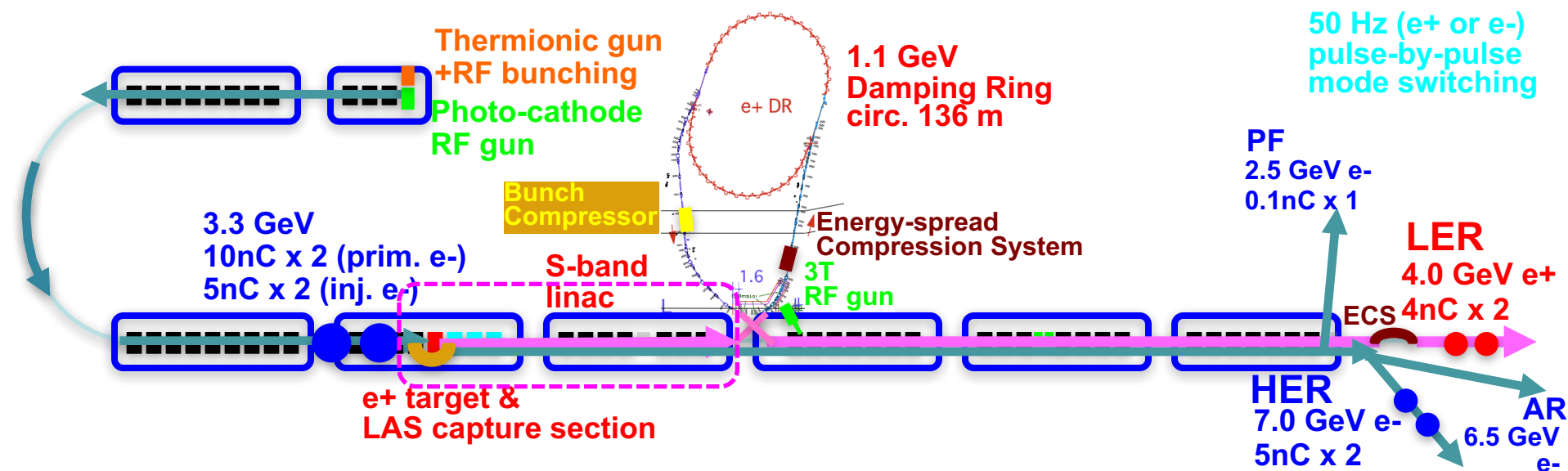
- オプティクス補正が進むにつれて、リングのビームの垂直エミッタンス値は低下し、**目標の 10 pm 以下に到達した(LER)。**
- 一方HERについては、X-rayビームサイズモニターによる測定値とオプティクスからの推定値のずれがあり、原因を調査中である。

Phase1目標その3達成！

ThanksTo
船越さん

SuperKEKB Linacの現状

SuperKEKB 入射Linac



☆Linacへの増強要求: KEKB → SuperKEKB

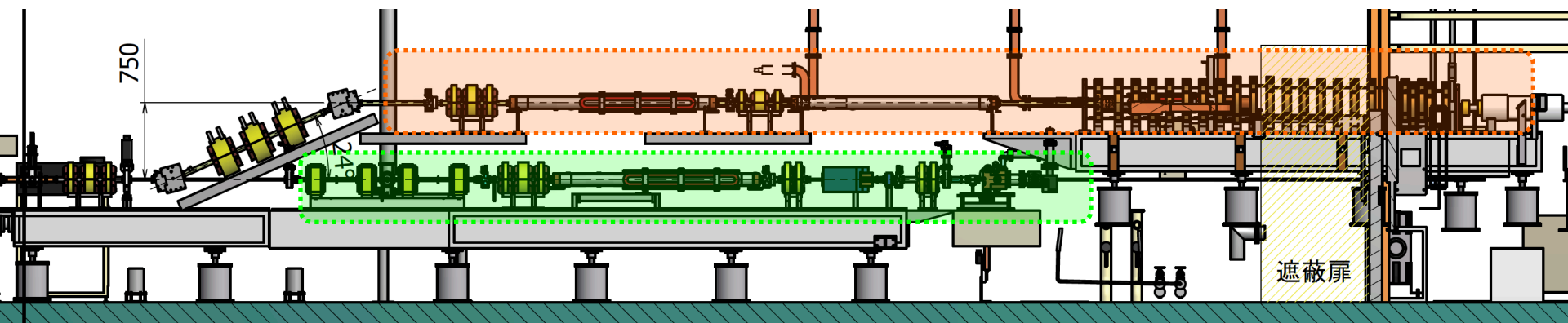
- (1) 電荷量増加 $Q(e^-) = 1 \rightarrow 5 \text{ nC}$
 (1バンチ当たり) $Q(e^+) = 1 \rightarrow 4 \text{ nC}$ Flux Concentratorと大口径S-band加速管
- (2) 低エミッタンス化 $\gamma\varepsilon(e^-) = 310 \rightarrow 50/20 \text{ } \mu\text{m (H/V)}$ RF gun
 $\gamma\varepsilon(e^+) = 1400 \rightarrow 100/20 \text{ } \mu\text{m (H/V)}$ Damping Ring

Linacでの加速中にエミッタンスを増大させないためには
 ビームラインの精密アライメントと高精度なビーム軌道のコントロールも重要

二階建て入射部

上段: 旧 KEKB のものを移設、再構築した大電流用前段入射部
熱電子銃 + RF bunching section

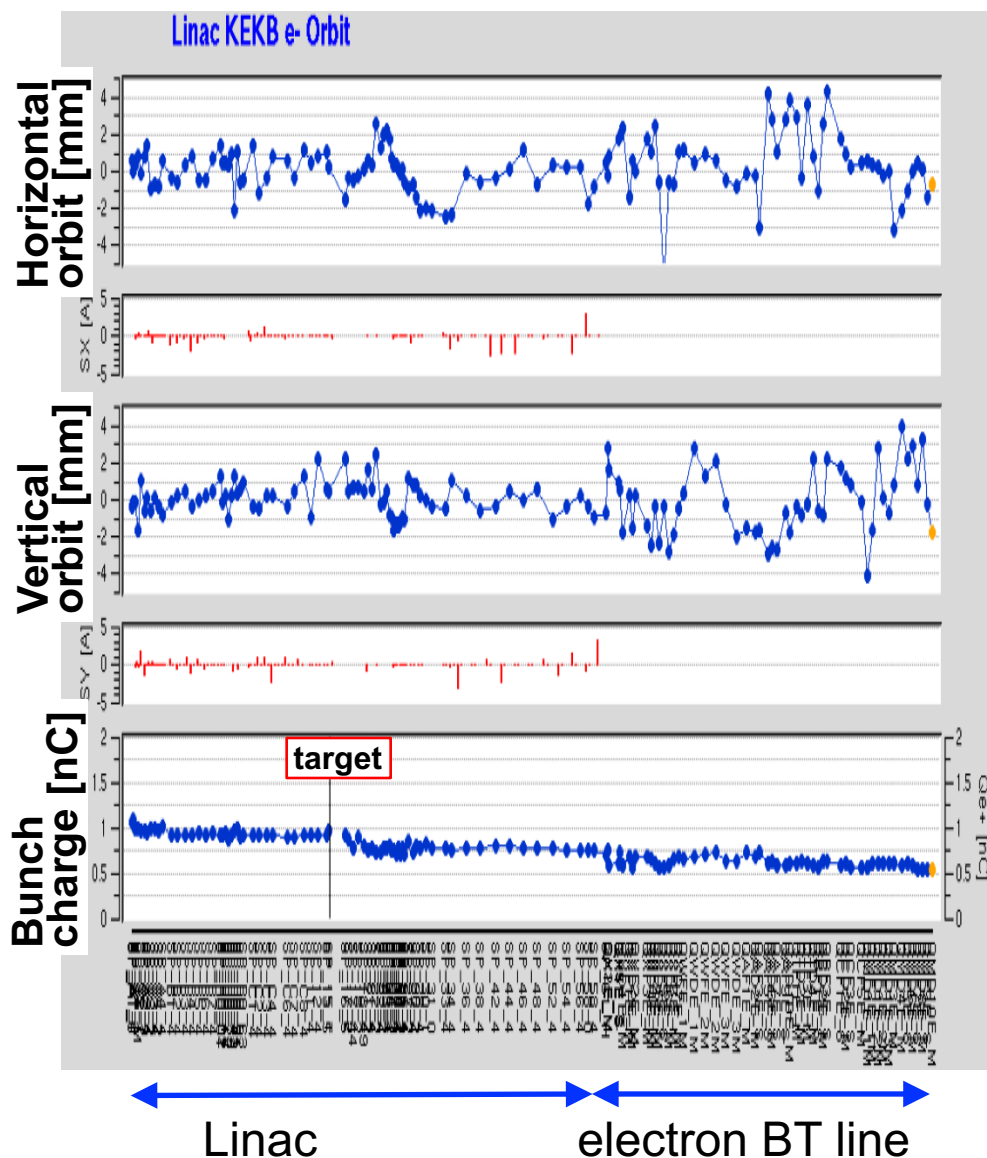
Gun 200 kV (\Rightarrow 5 MV/m)	1300 ps	↓ bunch length
Sub Harmonic Buncher 1 (114 MHz)	500 ps	
Sub Harmonic Buncher 2 (571 MHz)	330 ps	
Prebuncher (2856 MHz)	70 ps	
Buncher (2856 MHz)	10 ps	



下段: SuperKEKBで新規に導入した低エミッタンス用前段入射部
photo-cathode RF電子銃 + magnetic bunching

Ir ₅ Ce cathode		
Yb-doped fiber laser + Yb:YAG multipath-amplifier		
quasi traveling-wave side couple cavity	25 ps	↓ bunch length
Chicane	10 ps	

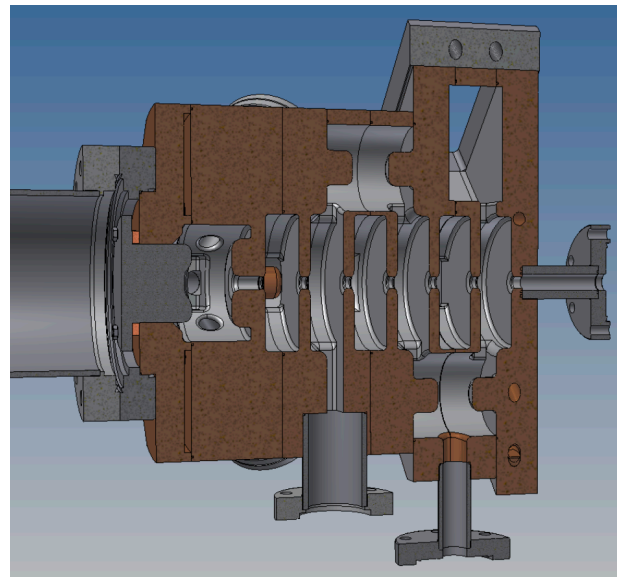
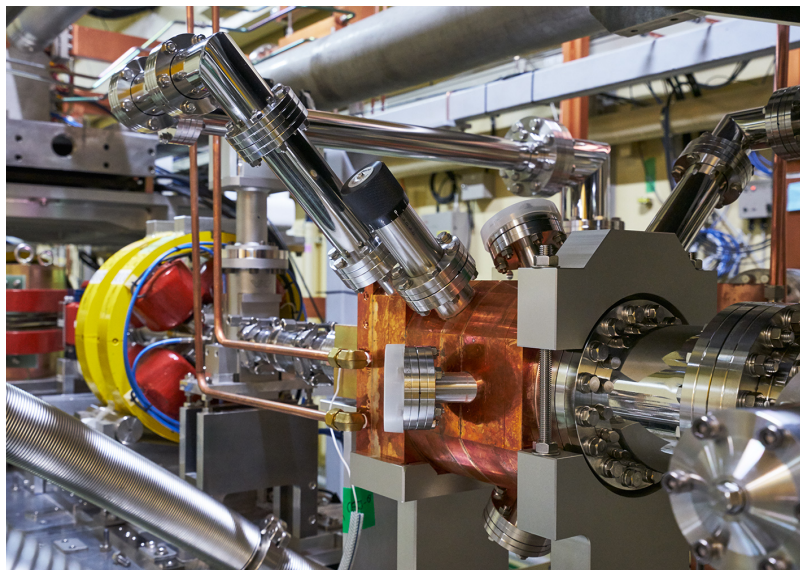
熱電子銃からの電子ビーム入射



- 電荷量 (1バンチ/1パルス)
 - ◆ 1 nC @Gun
 - ◆ 0.8 nC @Linac終端
 - ◆ 0.5 nC @BTライン終端
- バンチ長
 - ◆ 8 ps (FWHM)
[ストリークカメラ]
- エミッタンス
 - ◆ 160/300 (mm.mrad) (H/V)
[ワイヤースキャナ@Linac終端付近]
- 2月～6月の長期間にわたって大きなトラブルも無く、安定な電荷量(変動は2%以下)で入射を続けることができた。

ThanksTo
佐藤さん

フォトカソードRF電子銃



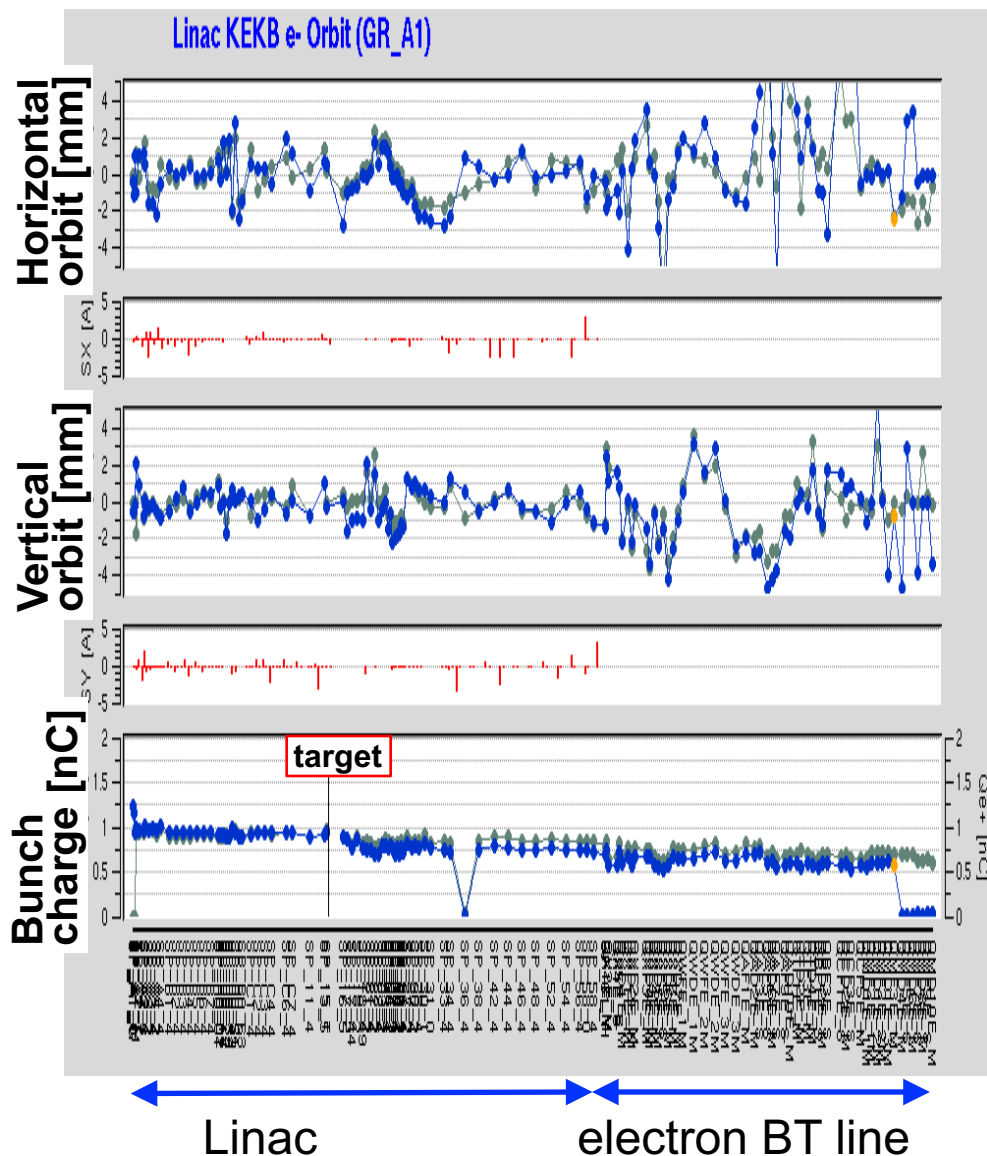
ファイバーレーザー発振器



- Ir_5Ce カソード
- Ybドープファイバーレーザー発振器
+ Yb:YAG マルチパス増幅器
- 擬似進行波型サイドカップル空洞
- 下流のシケインでバンチ圧縮
25 ps \rightarrow 10 ps

ThanksTo
吉田さん、
夏井さん、
周さん

RF電子銃からの電子ビーム入射



■ 電荷量 (1バンチ/1パルス)

- ◆ 1 nC @Gun
 - ◆ 0.7 nC @Linac終端
 - ◆ 0.5 nC @BTライン終端
- 電荷量変動: 4 ~ 5 %

■ エミッタンス

- ◆ 20/18 (mm.mrad) (H/V)
[Q-scan@前段入射部出口]
- ◆ 106/77 (mm.mrad) (H/V)
[ワイヤースキャナ@Linac終端付近]

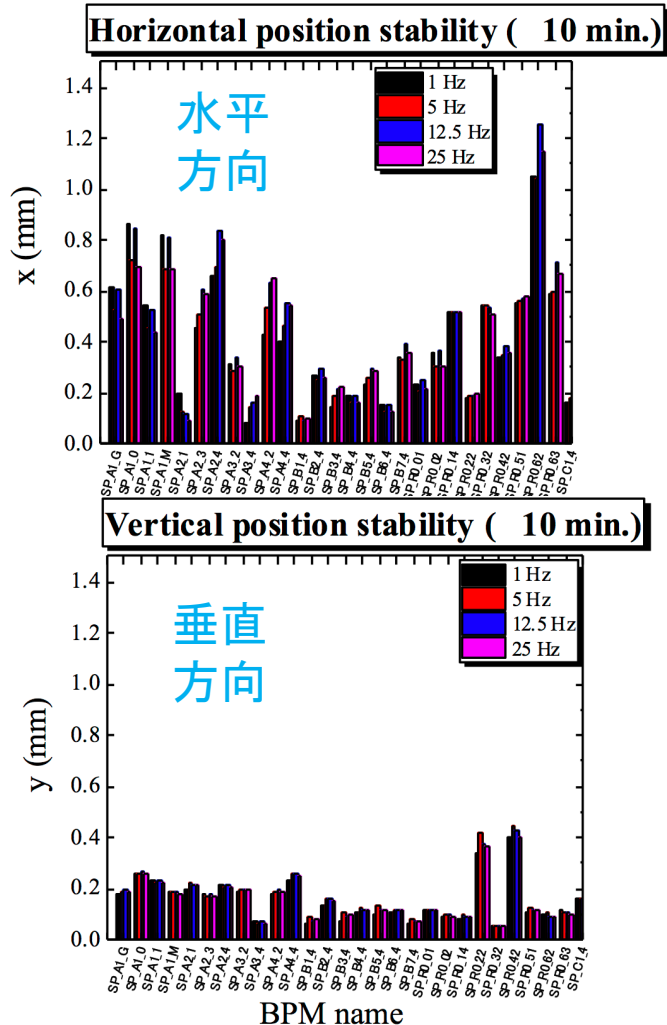
■ 低エミッタンスビームの生成に成功した。エミッタンス増大の抑制はこれからの課題である。

■ 6/8~6/18の約10日間にわたって安定に入射を続けることができ、長期連続運転のめどが立った。

ThanksTo
佐藤さん

ビーム軌道変動問題

RF電子銃からのビーム軌道変動の場所依存性



■ 熱電子銃の軌道変動

- ◆ 垂直方向が大きい (1mm以上)
- ◆ 前段入射部でのエネルギー変動が(2階から1階への)24度合流部でdispersionが漏れているため下流を及ぼしている可能性

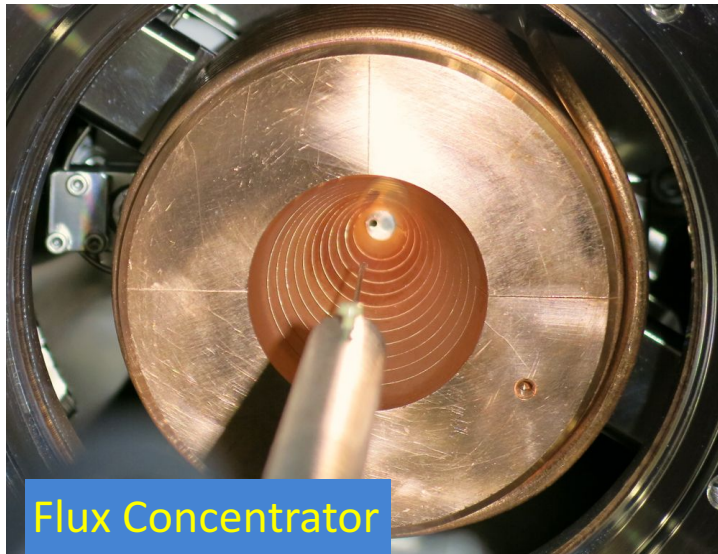
■ RF電子銃の軌道変動

- ◆ 水平方向が大きい (左の図)
- ◆ レーザーがカソードに当たる位置或いは当たり方が変動している?

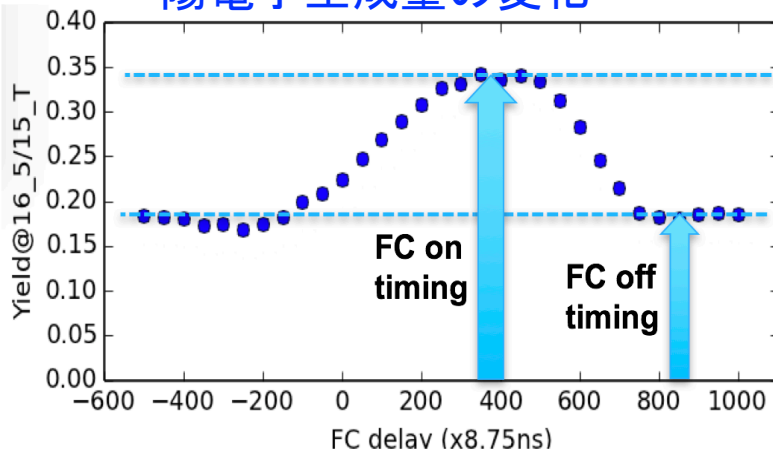
- いずれも、原因については調査中である。

ThanksTo
佐藤さん

陽電子生成、Flux Concentrator



FCパルスタイミングによる
陽電子生成量の変化



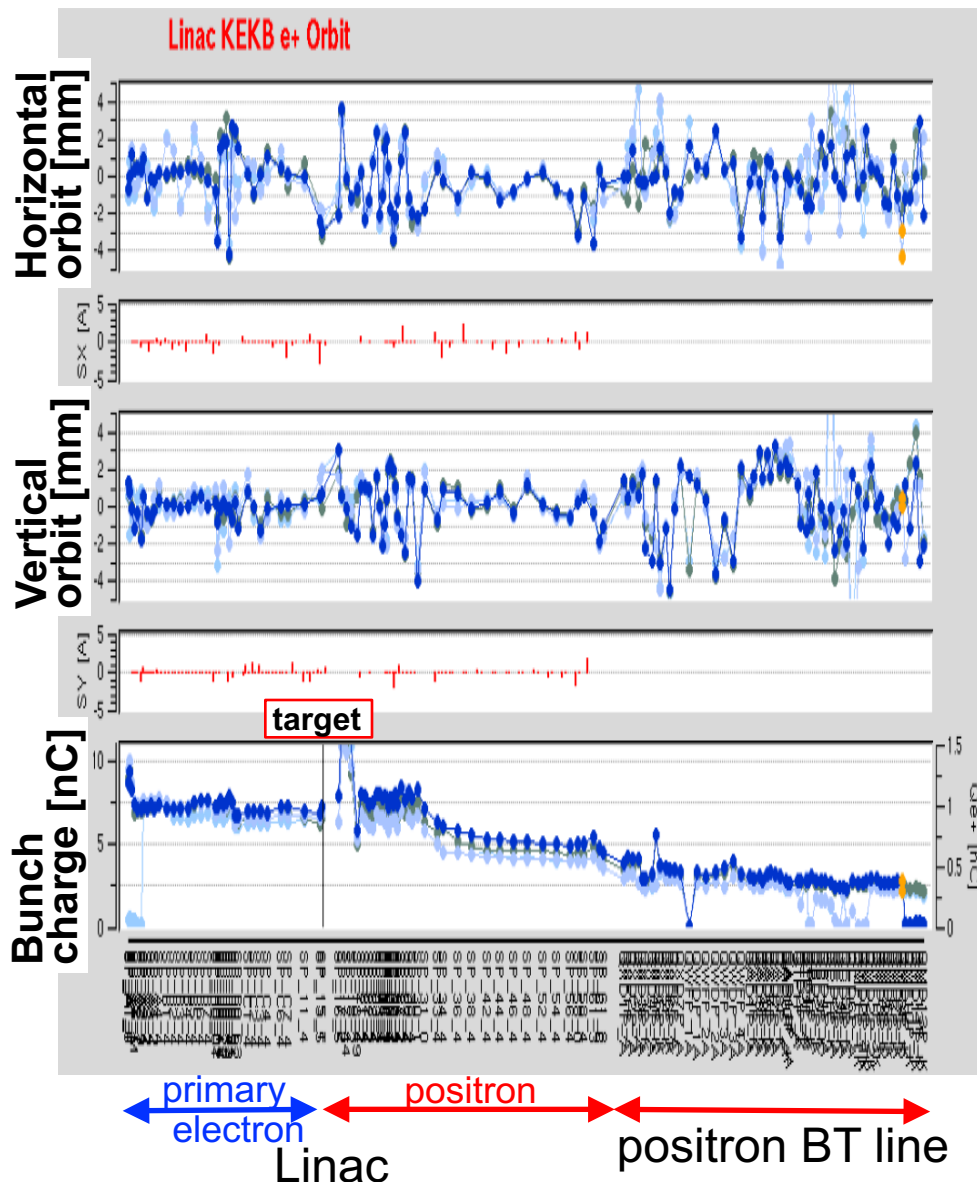
- ターゲット直後の陽電子収束
 - ◆ Flux Concentrator (3.5 T @ 12 kA)
 - ◆ Bridge Coil (1.0 T @ 600 A)

- 昨年のFCの試験運転中に大きな放電が起きてヘッド部分に損傷、それ以降**定格値の半分 6 kA 以下に制限**した。
- 現在使用しているFCヘッドの銅材では加工硬化のプロセスを省略したことが原因と考えられ、**改良型FCヘッド**を製作して近日中に試験する予定。

- 6 kA 通電でも、FCを使用することにより**陽電子生成量は 1.8 倍**に増加している。

ThanksTo
榎本さん

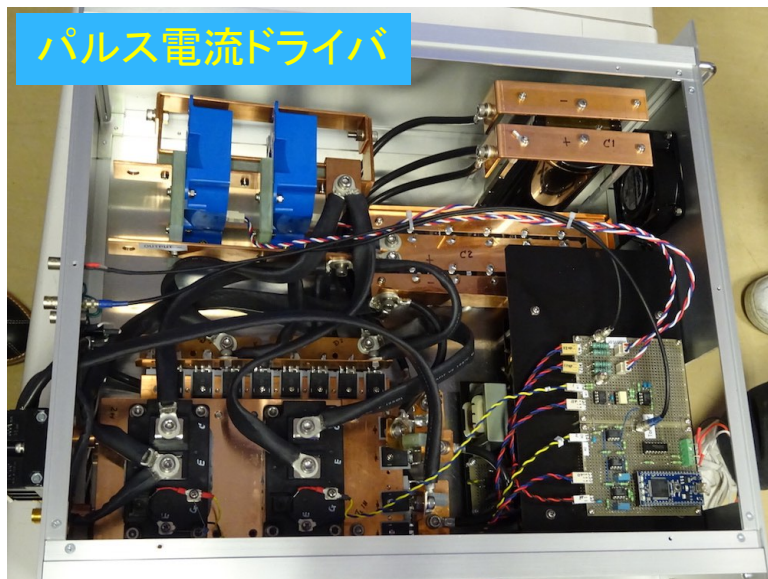
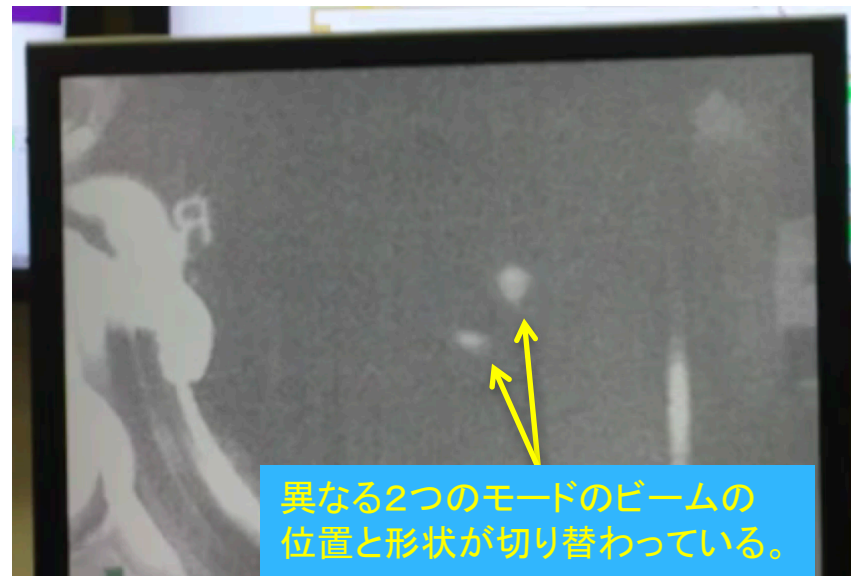
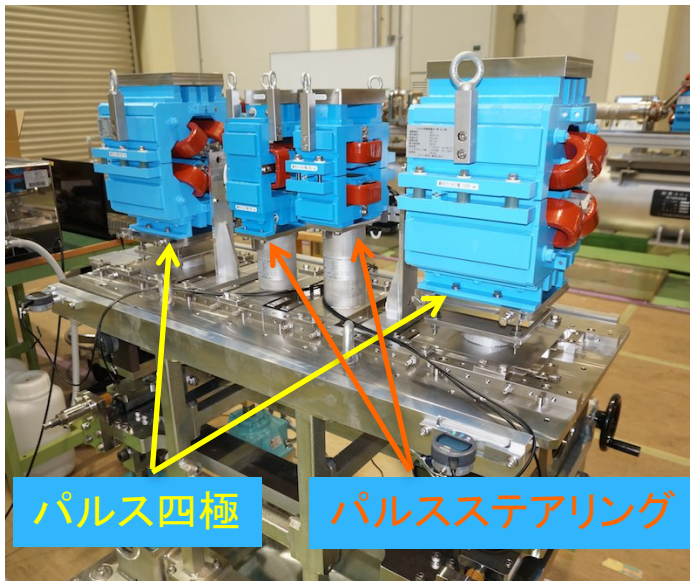
陽電子ビーム入射状況



- 電荷量 (2バンチ/1パルス)
 - ◆ 10 nC @Gun (一次電子)
 - ◆ 7 nC @陽電子生成ターゲット
 - ◆ 0.6 nC @Linac終端 (陽電子)
 - ◆ 0.3 nC @BTライン終端
- バンチ長 (一次電子)
 - ◆ 15 ps (FWHM)
[ストリークカメラ]
- エミッタンス (陽電子)
 - ◆ 1000/1200 mm.mrad (H/V)
[ワイヤースキャナ@Linac終端付近]
- 2月～6月の長期間にわたって、安定に入射を続けることができた。FCの電流値を下げた期間は、2バンチ入射で電荷量を補った。

ThanksTo
佐藤さん

パルス四極マグネット試験



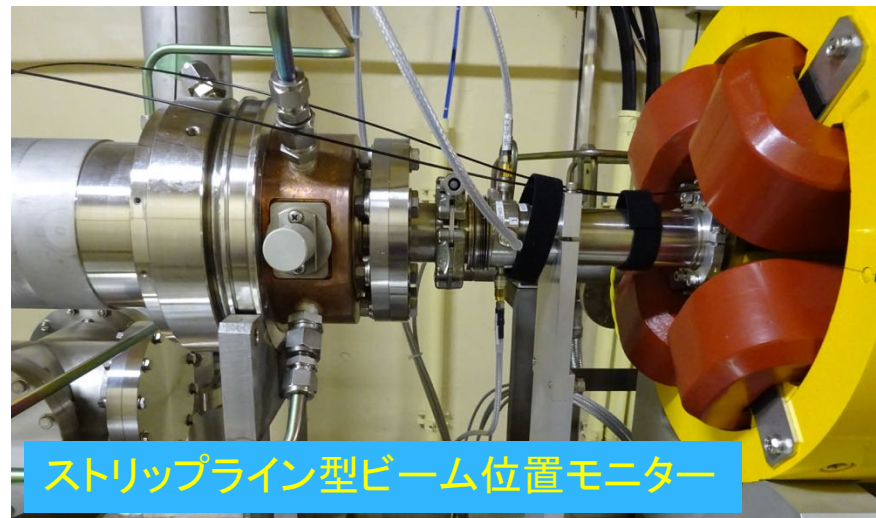
- 各モード(LER, HER, PF, AR)のビームオプティクスと軌道を独立に制御するためにLinacの後半部に多数のパルス四極とパルスステアリングを配備する。
- 先行配備されたパルス四極2台とKEKで開発した試作パルス電流ドライバ(最大定格330A)を用いて、ビームの形状をモードごとに変えることに成功した。

ThanksTo
榎本さん、夏井さん

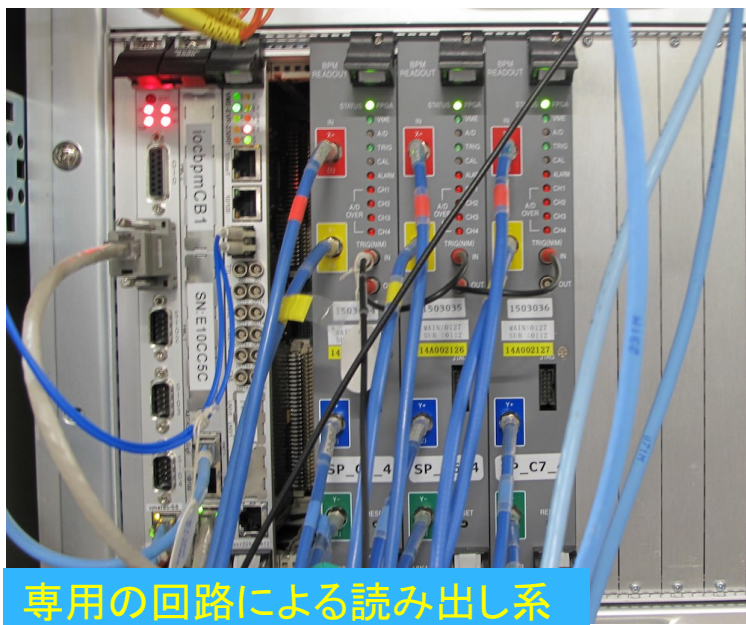
高精度BPM読み出し回路



オシロスコープによる読み出し系



ストリップライン型ビーム位置モニター



専用の回路による読み出し系

- Linacで使用されているビーム位置モニター(BPM)の信号はこれまでオシロスコープを使ってdigitizeしていた。
- 専用の読み出し回路を開発し、オンラインでのゲイン校正も可能になり、位置分解能が $50 \rightarrow 5 \mu\text{m}$ に向上した。
- 現在、全91台のBPMのうち36台について新しい読み出し回路に置き換え済みである。

ThanksTo
諏訪田さん

今学会での 関連する報告について

関連する口頭発表 & 施設報告ポスター

- MOOL02 船越 義裕 SuperKEKBのフェーズ1のビームコミッショニング
- TUOL07 中村 衆 SuperKEKB電磁石用電源
- TUOL08 大木 俊征 SuperKEKB用高安定度電磁石電源
- TUOM06 飛山 真理 SuperKEKBリング用個別バンチフィードバックシステム
- WEOM02 周 翔宇 SuperKEKBに向けたRF電子銃用Nd/Ybハイブリッドレーザーシステム

- FSP020 横山 和枝 KEK電子陽電子入射器の現状

関連するポスター報告：8/8(月)

- MOP016 影山 達也 高周波窓が交換可能なARES空洞用入力結合器
- MOP023 吉野 一男 ARES空洞用高周波窓可換式入力結合器の熱解析
- MOP028 末次 祐介 スパークプラズマ焼結法で製作されたフェライト-銅接合ブロックの特性
- MOP032 川村 真人 KEK電子陽電子入射器モジュレータ用インバータ電源の現状
- MOP041 佐藤 大輔 SuperKEKB電子入射器におけるイリジウム・セリウム光陰極の高量子効率化に向けた検討
- MOP059 古川 和朗 KEK 7-GeV 電子陽電子入射器と複数の蓄積リングへの入射運転
- MOP060 佐藤 政則 SuperKEKB入射器コミッショニングの現状 (III)
- MOP062 杉本 寛 SuperKEKBの初期コミッショニングにおけるビーム光学の測定とその補正
- MOP063 榎本 嘉範 SuperKEKB用フラックスコンセントレータの開発
- MOP064 夏井 拓也 SuperKEKB用RF gunのコミッショニング状況
- MOP065 清宮 裕史 SuperKEKB入射器におけるミスアラインメント、ジッターによるエミッタンス増大
- MOP066 清宮 裕史 BPMの感度最適化シミュレーション
- MOP082 宮原 房史 高電流密度電子ビームに対する結晶スクリーンの性能評価
- MOP107 柴田 恭 SuperKEKB陽電子ダンピングリングの真空システム

関連するポスター報告: 8/9(火)

- TUP011 小林 鉄也 SuperKEKBビームコミッショニングにおけるLLRF制御システムの稼働状況
- TUP012 廣澤 航輝 SuperKEKBにおける加速モードに起因する結合バンチ不安定性抑制ダンパーの開発
- TUP016 肥後 寿泰 KEKの電子陽電子入射器に30年以上用いられてきた加速管の内面検査と高電界特性
- TUP033 東福 知之 KEK 電子陽電子入射器における大電力高周波源の運転保守(II)
- TUP054 張 叡 SuperKEKB入射器におけるRF電子銃用レーザー安定性と出力エネルギーの高性能化
- TUP057 矢野 喜治 光ファイバビームロスモニタとワイヤスキャナ-2
- TUP060 牛本 信二 パルスマグネット架台のモーター駆動制御
- TUP083 井上 彬 KEK入射部用カットディスク型RFディフレクターの設計
- TUP089 浅野 和哉 EPICSを用いたSuperKEKB最終集束系超伝導磁石システムビームライン磁場測定制御ソフトウェアの開発
- TUP090 芳藤 直樹 SuperKEKBにおける真空制御ソフトウェアの現状
- TUP091 廣瀬 雅哉 SuperKEKBにおけるCSS Archiver及びChannel Archiverの現状
- TUP092 梶 裕志 SuperKEKB phase-IIにおける入射運転制御システム
- TUP093 森田 昭夫 SuperKEKBにおけるデータアーカイブの読み出し高速化
- TUP094 中村 達郎 SuperKEKBのための電磁石電源制御システムの改造
- TUP095 中村 卓也 SuperKEKBのCSSアラームシステム運用状況
- TUP105 末次 祐介 SuperKEKB真空システムのコミッショニング
- TUP106 植木 竜一 SuperKEKB主リング電磁石システムの運転報告
- TUP116 荒木田 是夫 貫通溝内の発熱を考慮した電力線敷設計
- TUP131 清水 洋孝 熱収縮による波長の変化を用いた極低温用光ファイバ温度計の開発
- TUP132 川本 崇 HLSでモニターしたSuperKEKB衝突点近傍床レベル変動
- TUP133 松本 修二 KEK電子陽電子入射器陽電子生成部の放射線遮蔽
- TUP134 諏訪田 剛 KEKB入射器における遅いトンネル床面変動の動的観測 (II)
- TUP135 田中 窓香 KEKB入射線形加速器トンネル床変動の測定(3)

まとめ : SuperKEKB Phase1の主要な成果

蓄積リング

- 1) 電子、陽電子リングへのビーム入射、蓄積に成功し、各種機器の立上げが行われ、安定したビーム運転の状態が確立された。
- 2) リングの真空チェンバーのビームによる焼きだしが5ヶ月間にわたって行われた結果、圧カレベルは3桁以上低下した。
- 3) 蓄積ビームの低エミッタンスを実現するためのオプティクス調整、磁場補正機器設置により、目標の10 pm に到達した。

Linac

- 1) 熱電子銃及びRF電子銃からのビーム(バンチ当たり電荷量約 0.7 nC @Linac終端)を安定に入射することができた。新たに導入されたRF電子銃についても約10日間の入射を行い、長期運転で使用するめどがついた。
- 2) フラックスコンセントレータを用いた陽電子生成部からのビーム(バンチ当たり電荷量約 0.6 nC @Linac終端)を安定に入射することができた。
- 3) Phase2運転に向けた、パルスマグネットの試験や高精度ビーム位置モニター信号読み出し系の試験を進めている。