



# SuperKEKB の入射ビーム選択システムの検討

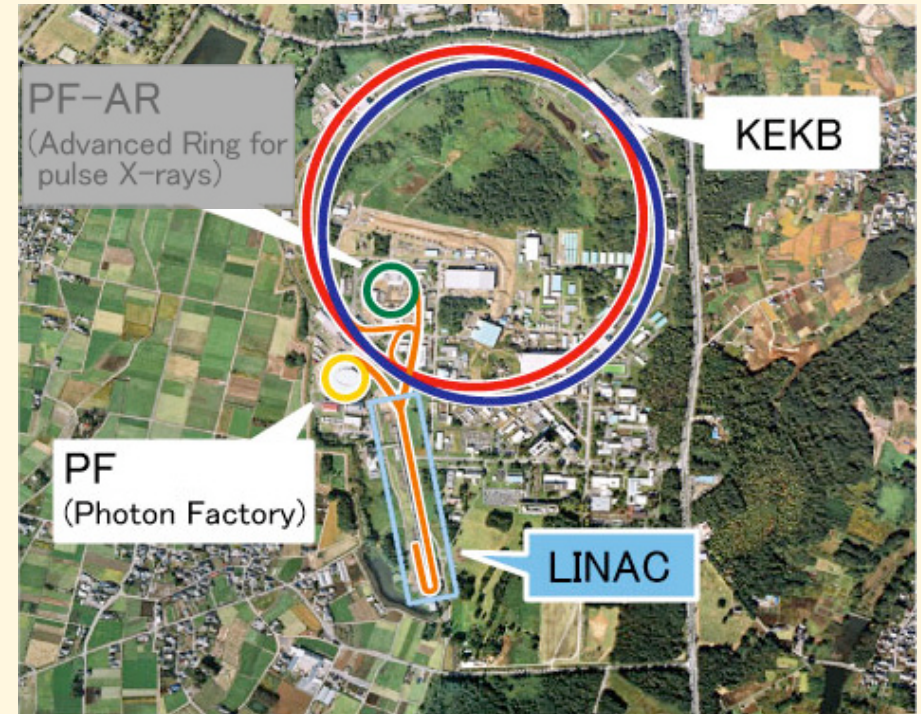
(Injection Beam Scheduling at SuperKEKB Complex through Damping Ring)

古川和朗、船越義裕、菊池光男、菊谷英司、生出勝宣、  
佐藤政則、中村達郎、末竹聖明、諏訪田剛、矢野喜治

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

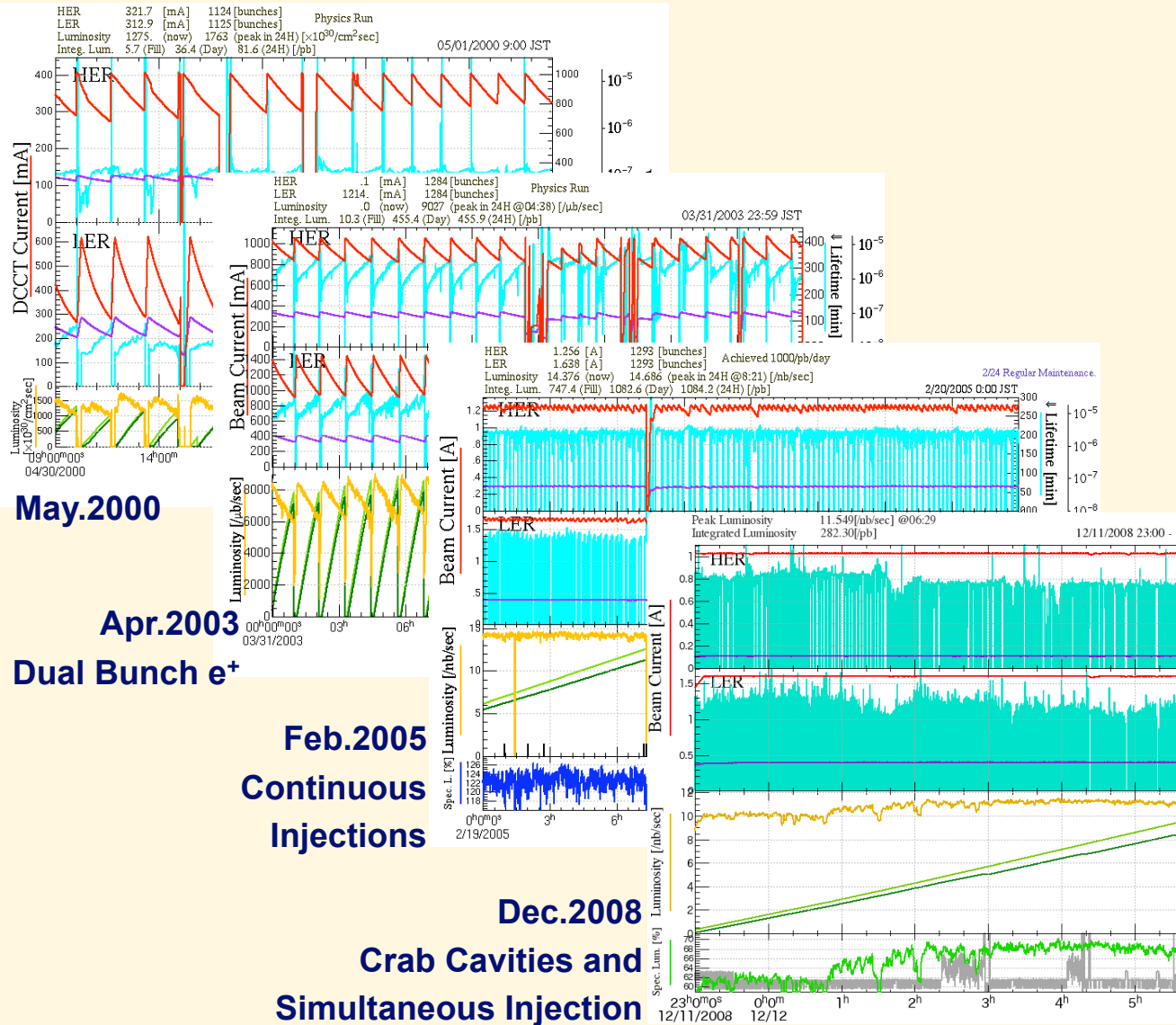
# KEK 電子加速器 (現状)

- ❖ 600m Linac
- ❖ KEKB 非対称エネルギーコライダ (→ SuperKEKB)
  - HER 8-GeV  $e^-$  1nC x2
  - LER 3.5-GeV  $e^+$  1nC x2
  - (with 10nC primary  $e^-$ )
- ❖ PF 放射光施設
  - 2.5-GeV  $e^-$  0.1nC
- ❖ PF-AR 放射光施設
  - 3-GeV  $e^-$  0.2nC
- ❖ 様々な運転形態の改善





# KEKB Operation Improvement



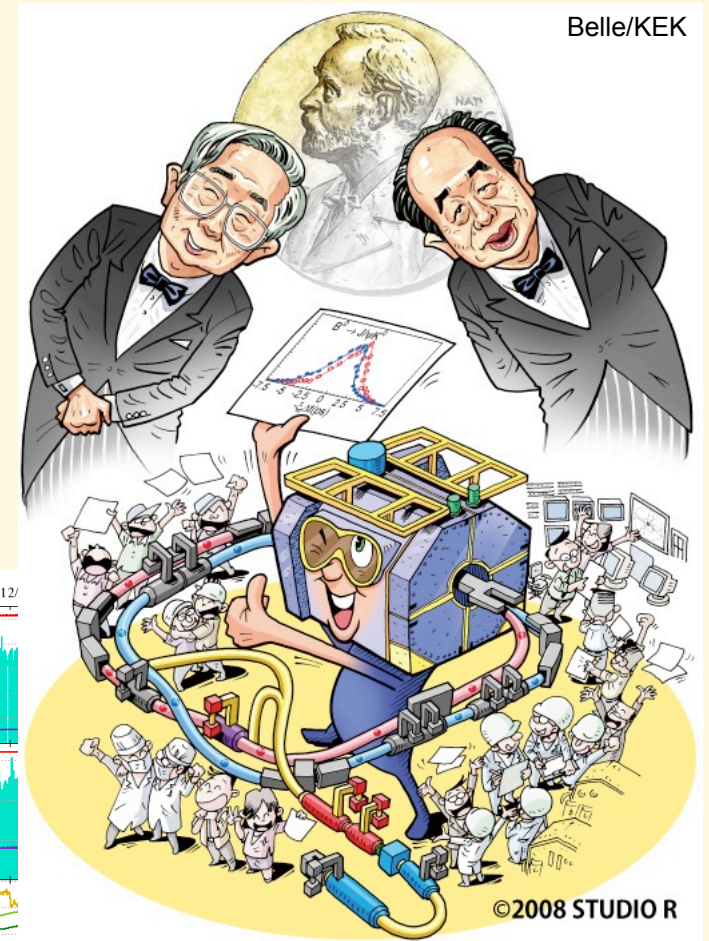
May.2000

Apr.2003

Dual Bunch e<sup>+</sup>

Feb.2005  
Continuous  
Injections

Dec.2008  
Crab Cavities and  
Simultaneous Injection



# KEKB での入射タイミング要件

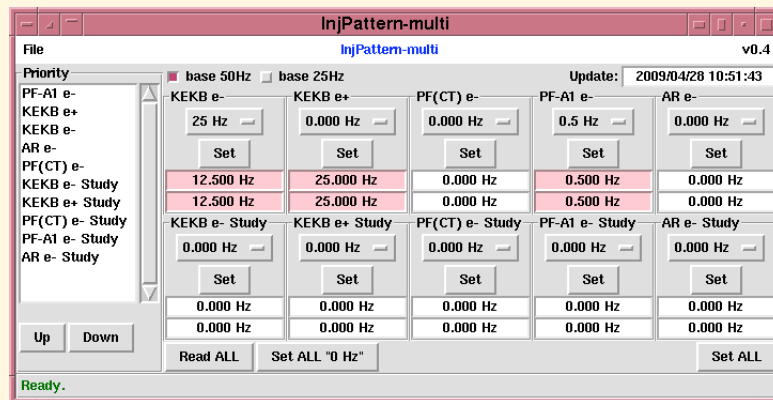
- ◆ 複数周波数 (114, 571, 2856, 509MHz) の安定生成
  - ❖ 大電流陽電子生成のための 10nC シングランチビームのバンチング
  - ❖ 逡倍・分周による整数関係が必要 (共通周波数 10.38MHz)
- ◆ 30 ピコ秒のリング入射タイミング精度
  - ❖ KEKB リング周波数 509MHz との整数関係も必要
    - ✧ PF・PF-AR は入射条件は厳しくないため、偶然の同期で実現
- ◆ 周長補正は KEKB・PF・PF-AR で独立
  - ❖ KEKB は  $4 \times 10^{-7}$  変化、PF、PF-AR は  $4 \sim 20 \times 10^{-6}$  程度
- ◆ 1 パルス 2 バンチ入射
  - ❖ KEKB - Linac 共通周波数 10.38MHz (=96ns) 間隔
- ◆ KEKB HER/LER と PF は同時 Top-up 運転を実現
  - ❖ KEKB と PF-AR はビームトランスポートラインが共通
    - ✧ 同時入射は不可能

# KEKB でのビーム選択

## ◆ KEKB HER、 LER 及び PF への同時入射

❖ 各リングの要求入射頻度を調停し 50Hz ビームを振り分ける

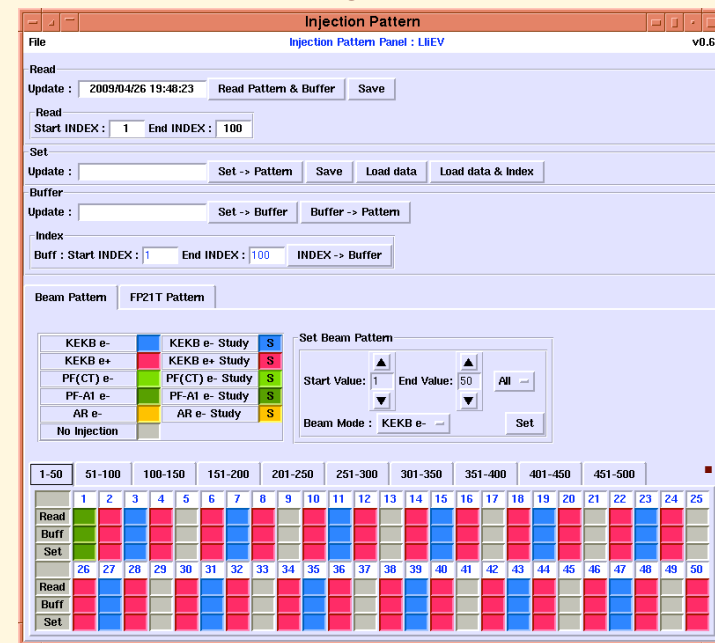
Remote controlled automatic pattern arbitrator



### ❖ Recent typical operation.

- ❖ ~37Hz for KEKB LER (3.5GeV e+)
- ❖ ~12.5Hz for KEKB HER (8GeV e-)
- ❖ ~0.5Hz for PF (2.5GeV e-)

Manual pattern generator



- ❖ ~25Hz
- ❖ ~12.5Hz
- ❖ ~0.5Hz

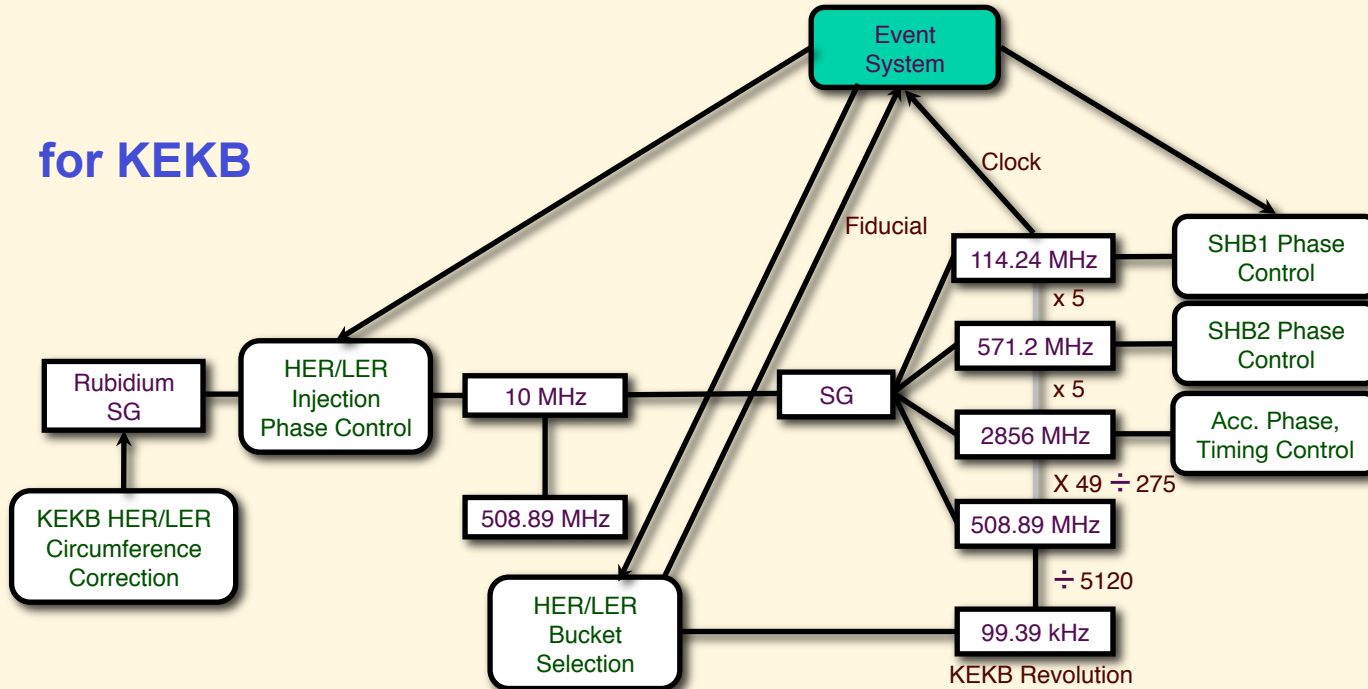


## KEKB のビーム・バケット選択

- ◆ パルス電源の特性などからビーム入射間隔に制限がある
- ◆ リング内バケット選択は速いタイミングとは半独立にリング内のバンチ電流の少ないバケットに入射できるタイミングを選択
  - ❖ KEBB は 509MHz 5120 バケットを持つ
  - ❖ Linac – Ring 共通周波数 10.38MHz は 49 バケット (96ns) に相当
  - ❖ 最大  $5120 \times 96\text{ns} = \text{約 } 500\mu\text{s}$  待つと全てのバケットを選択できる

# タイミング同期関係

## for KEKB



### ◆ Synchronization Req.

- ❖ KEKB : < 30ps
- ❖ PF : < 300~700ps

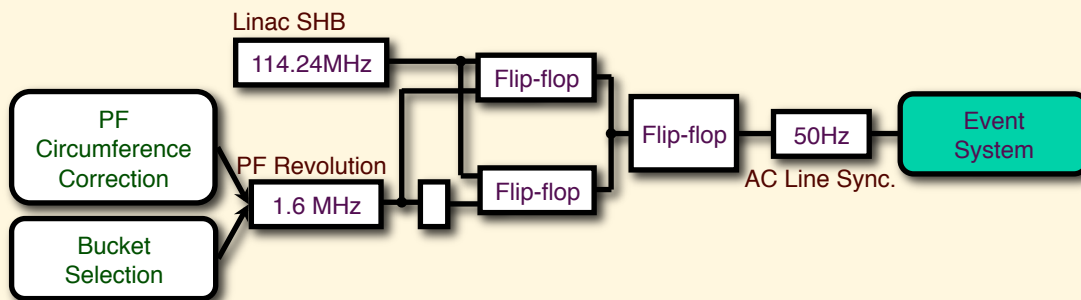
### ◆ Linac rf is Synchronized to KEKB rf

### ◆ Event Clock is 114.24MHz

### ◆ We have to manage

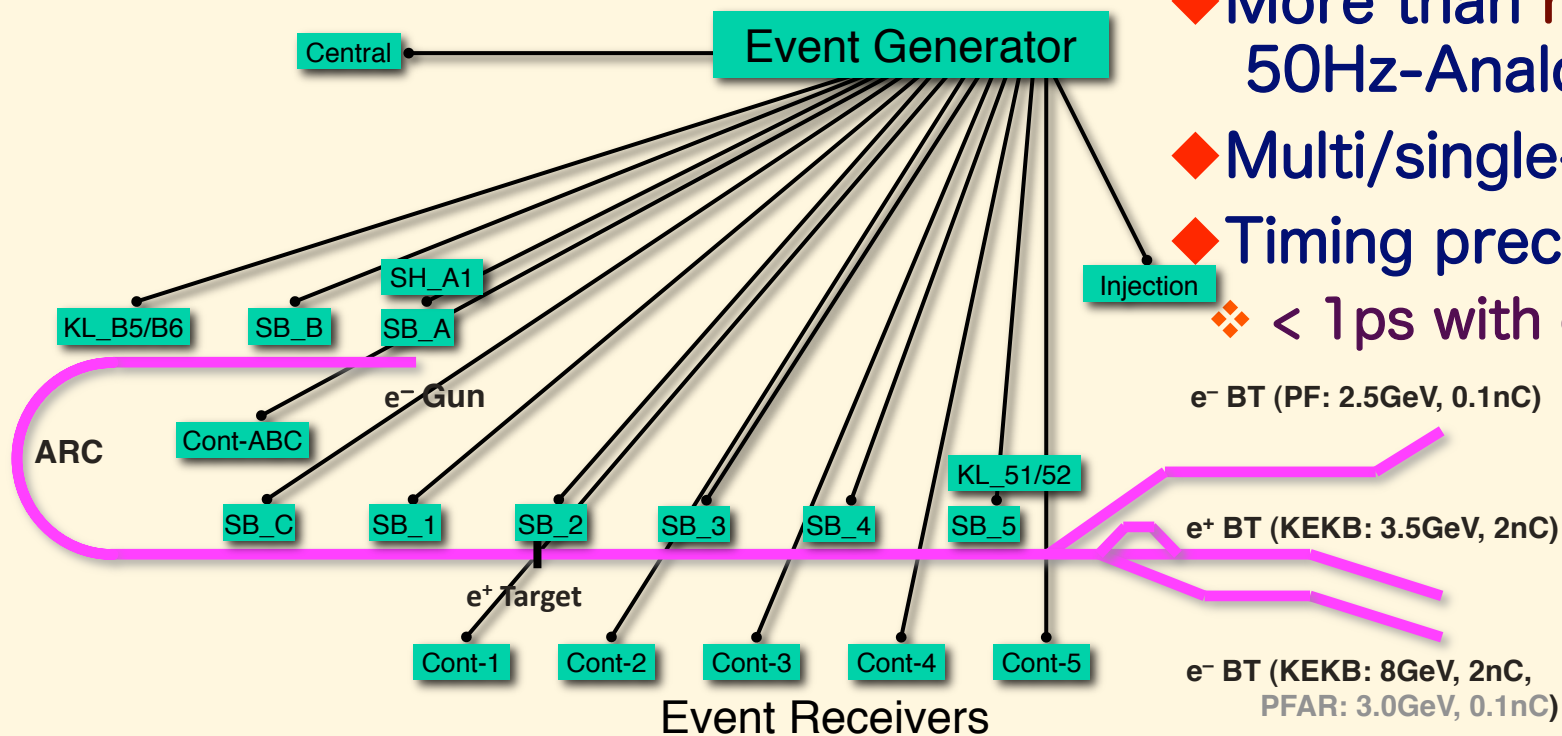
- ❖ Circumference compensation
- ❖ Bucket selection
- ❖ Injection phase controls

## for PF



# イベントタイミング制御システムの構成

- ◆ MRF's series-230 Event Generator / Receivers
- ◆ VME64x and VxWorks v5.5.1
- ◆ EPICS R3.14.9 with DevSup v2.4.1
- ◆ 17 event receivers up to now
- ◆ 114.24MHz event rate, 50Hz fiducials
- ◆ More than **hundred** 50Hz-Analog/Timing data
- ◆ Multi/single-mode fiber
- ◆ Timing precision is < 10ps.  
 ◆ < 1ps with external module.

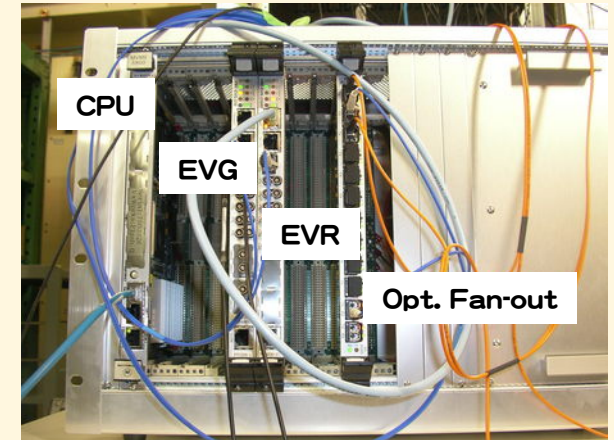




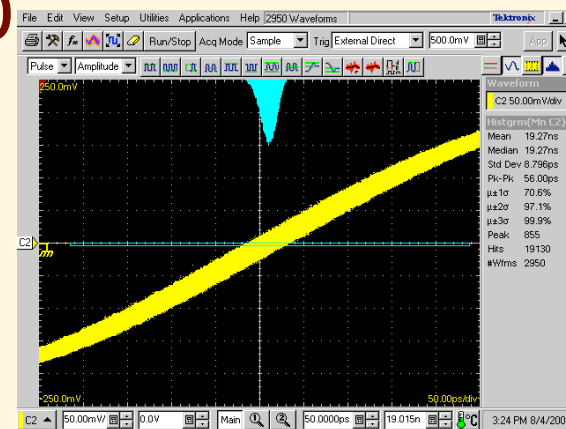
# Linac Event System

## ◆ Specifications

- ❖ Event rate : 114.24MHz
  - ✧ Bit rate : ~2.3GHz
- ❖ Fiducial rate : 50Hz
- ❖ Timing jitter (Short term) : ~8ps
- ❖ No. of defined events : ~50
- ❖ No. of receiver stations : 17
- ❖ No. of Fast parameters : ~130



**EVR & LLRF**



# ビームイベントの取り扱い

Human Operator

Injection Programs

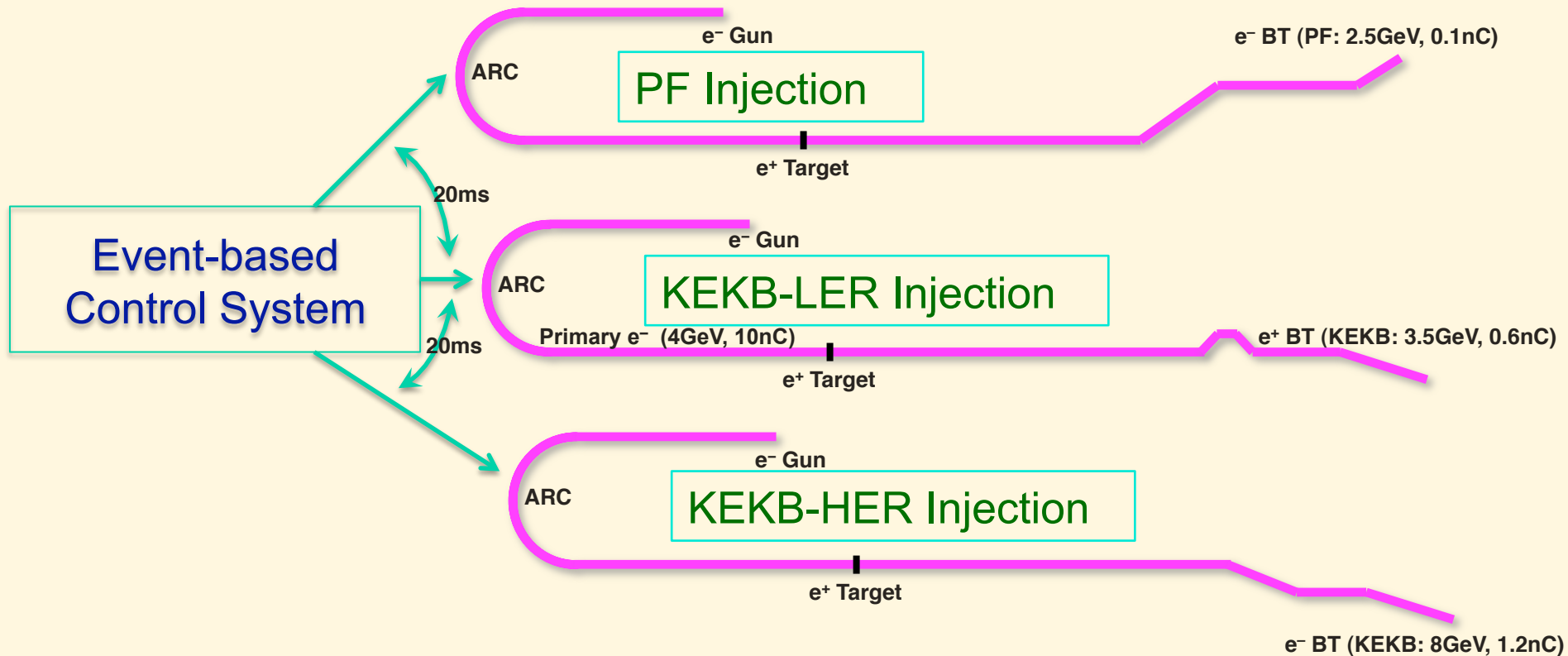
Arbitrate and Generate Beam Mode Pattern (in PythonTk)  
considering priorities of the rings  
equalizing pulsed power supply interval  
in 4 arrays (waveforms) of length 2 (40ms) to 500 (10s)  
each element corresponds to a 20-ms time slot and a beam mode

Generate Events for the Next 20-ms Time Slot (in Event Generator)  
reading two consecutive elements from the beam mode pattern  
generate several events for the next pulse  
generate preparation events for the next after next

Generate Signals based on Received Events (in Event Receiver)  
generate pulsed signals as prepared in the previous time slot  
program the signals (enable/disable, delays, etc) for the next  
start to generate analog signals for the next

# 3つの仮想加速器の切り換え

- ◆ Controls and instrumentations are essentially mode-dependent, and mutually independent
- ◆ Selecting a real machine out of three virtual machines
  - ❖ Managing three parameter sets



# SuperKEKB への増強

## ◆ SuperKEKB のナノビームスキーム

### ❖ 低エミッタンス大電流入射ビームの要請

- ❏ 電子はフォトカソード RF 電子銃 (7GeV, 5nC)
- ❏ 陽電子は捕獲セクションの改造とダンピングリング増設
- ❏ 40 倍のルミノシティ

### ❖ ダンピングリングの設計

- ❏ RF 周波数の選択
- ❏ ハーモニック数の選択

### ❖ PF-AR 入射

- ❏ KEKB とビームトランスポートを共有
  - ◆ ビーム切り換えと入射に 5-10 分ほど必要

KEKB		SuperKEKB	
e-	e+	e-	e+
8GeV	3.5GeV	7GeV	4GeV
1nC	1nC	5nC	4nC
100 $\mu$ m	2000 $\mu$ m	20 $\mu$ m	10 $\mu$ m
2bunch	2bunch	2bunch	2bunch

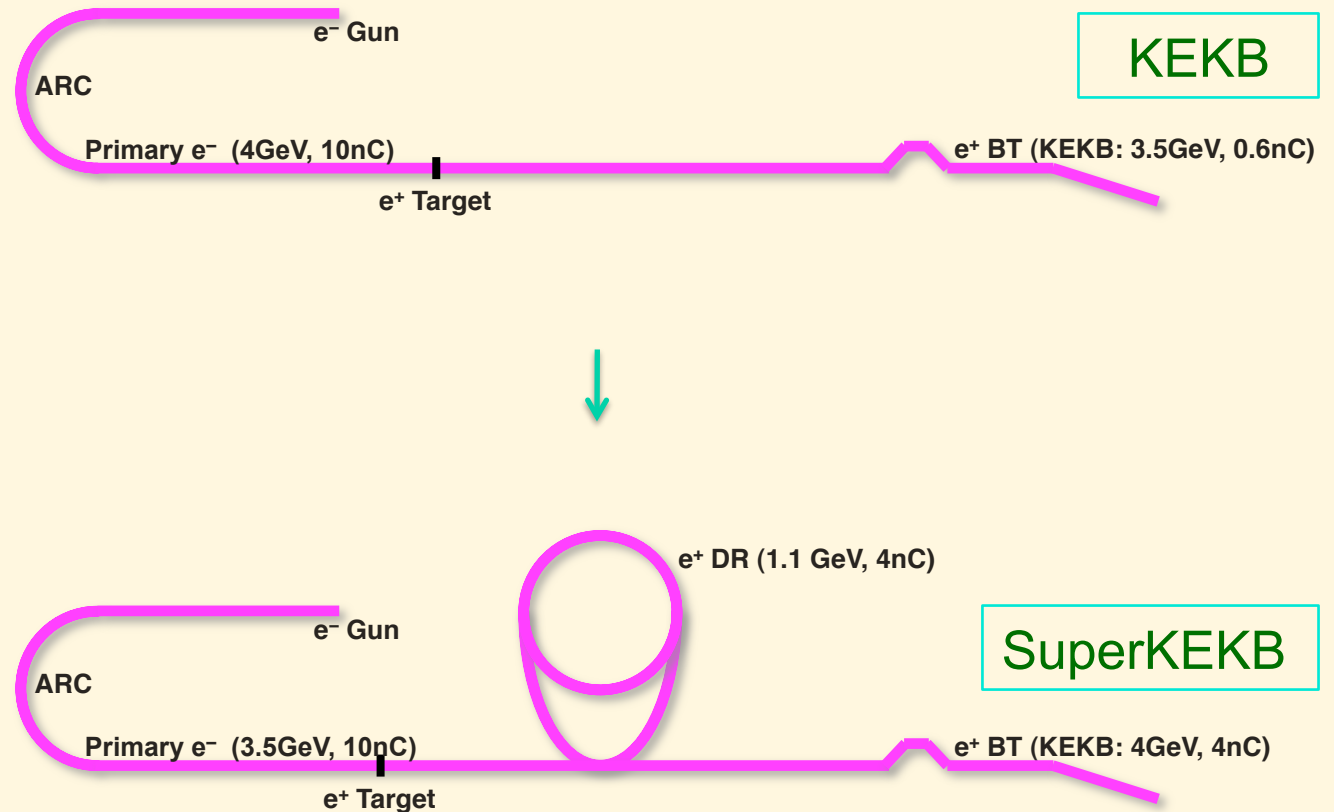
◆ SuperKEKB のビーム寿命予測約 10 分 → 実験の中断が避けられない

# SuperKEKB のダンピングリング (DR)

## ◆ 2 バンチパルス、2 パルスを収容

e+ 25Hz e- 25Hz の場合

前半	D.R.	後半
e+ 1	e+ 1	
e- 2	e+ 1	e- 2
e+ 3	e+ 3,1	e+ 1
e- 4	e+ 3	e- 4
e+ 5	e+ 5,3	e+ 3
e- 6	e+ 5	e- 6



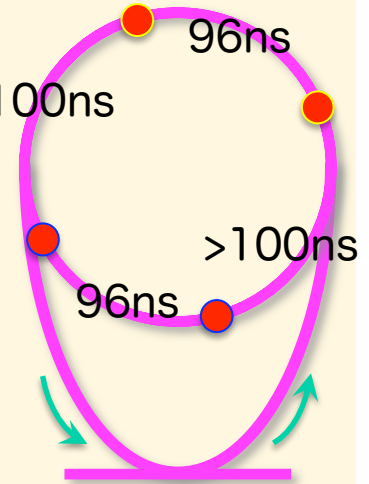


## ダンピングリングの RF

- ◆ **メインリング (MR) バケット選択**
  - ❖ MR は 509MHz 5120 バケットを持つ
  - ❖ Linac – MR 共通周波数 10.38MHz は 49 バケットに相当
  - ❖ 最大  $5120 \times 96\text{ns} = \text{約 } 500\mu\text{s}$  待つと全てのバケットを選択できる
- ◆ **RF として 10.38MHz の整数倍を選ばないと上の条件よりもさらに自由度は下がる**
  - ❖ 509MHz, 571MHz などは可能
  - ❖ 476MHz, 714MHz などは有用ではない
- ◆ **CW クライストロン等の資源を考えると 509MHz を選ぶことが適当と思われる**

# ダンピングリングのハーモニック数

- ◆ 1 パルス 2 バンチ入射のバンチ間隔 96ns
- ◆ 入出射キッカー立ち上がり立ち下がり ~100ns
- ◆ ハーモニック数
  - ❖ 少なくとも ~200 ( $\cong$  400ns)
  - ❖ メインリング (MR) のハーモニック数 5120 (または 5120x49) と単純な整数関係が無いことが好ましい
- ◆ 入射 (パルスモジュレータ) の最大待ち時間 2ms
  - ❖ 現状は最大待ち時間 500  $\mu$ s であるが、安定性許容度によっては 2ms 程度まで可能



## ダンピングリング (DR) – Linac - SuperKEKB メインリング (MR)

### ◆ Linac 後半の位相を固定する場合の入射選択可能 MR バケット数

❖ ハーモニック数  $hDR=224$ 、キッカー立ち上がり  $96\text{ns}$  として  $2\text{ms}$  以内で探す場合

❏  $49*2 \sim hDR-49$  で 1760 個 (1 バンチ入射)

❏  $49*2 \sim hDR-49*2$  で 662 個 (2 バンチ入射)

❖  $hDR=225$ ,  $2\text{ms}$  以内

❏  $49*2 \sim hDR-49$  で 2123 個

❏  $49*2 \sim hDR-49*2$  で 1008 個

❖  $hDR=223$ ,  $2\text{ms}$  以内

❏  $49*2 \sim hDR-49$  で 2096 個

❏  $49*2 \sim hDR-49*2$  で 971 個

❖  $hDR=230$ ,  $2\text{ms}$  以内

❏  $49*2 \sim hDR-49$  で 5120 個

❏  $49*2 \sim hDR-49*2$  で 3065 個

❖  $hDR=245$ ,  $2\text{ms}$  以内

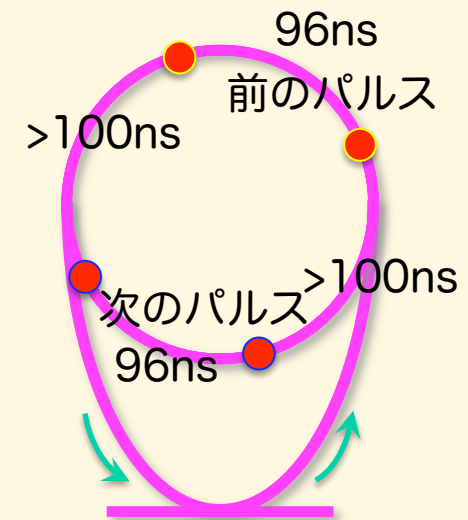
❏  $49*2 \sim hDR-49$  で 2048 個

❏  $49*2 \sim hDR-49*2$  で 1024 個

❖  $hDR=252$ ,  $2\text{ms}$  以内

❏  $49*2 \sim hDR-49$  で 4986 個

❏  $49*2 \sim hDR-49*2$  で 3447 個





# ダンピングリングのハーモニック数

- ◆ 現実的な周長で自由度の大きなハーモニック数として、230 を選ぶことが適当と思われる
- ◆ この方法で直接選択できないバケットについても
  - ❖ DR 出射後、Linac 後半の位相をパルス毎に変更する
  - ❖ DR 蓄積中に DR 位相を変更する
- ◆ とすれば選択可能
  - ❖ 前者について、電子との切り換えの際いずれにせよ位相変更は必要
    - ✧ ただし再現性だけでなく LLRF の直線性も必要となる
  - ❖ 後者について、次のパルスとの依存関係が増えるので不利

# PF-AR の入射

- ◆ PF-AR のビームトランスポートは SuperKEKB と共通
  - ❖ 10 分で切り換え入射、または 7GeV e<sup>-</sup>、4GeV e<sup>+</sup>
- ◆ SuperKEKB のビーム寿命が 10 分程度と短いため、PF-AR への切り換え入射は Belle2 の実験中断を意味する
- ◆ ダンピングリング経由の 4GeV 陽電子同時入射の可能性？
  - ❖ 残念ながら Top-up は不可
- ◆ PF-AR の周長補正は SuperKEKB と独立
  - ❖ PF-AR の RF は Linac と整数関係に無い (補正量  $4 \times 10^{-6}$  vs.  $4 \times 10^{-7}$ )
- ◆ 偶然の入射確率 (300-700ps 精度 2ms 以内) は、ダンピングリングを経由すると約 1/11 になるが不可能ではない
- ◆ パルスを跨いでも同期を維持するため入射時には周波数を Linac に対して固定する必要
- ◆ (入射エネルギーは Belle2 実験に依存)

# イベントタイミング制御システムの構成

## ◆ KEKB において

- ❖ 1 系統のイベントタイミングシステム
- ❖ バケット選択システムは半独立

## ◆ SuperKEKB において

- ❖ パルス間の依存関係が増える
- ❖ 大きな ( $\sim 20\text{ms} \times n$ ) の遅延の管理が必要
- ❖ Linac 前半と後半の 2 系統のカスケード半独立イベントシステム (?)
- ❖ バケット選択システムとは一体化の必要

## まとめ

- ◆ KEKB の同時入射タイミングと比較しながら、SuperKEKB のダンピングリングを含めた入射タイミングを検討した
- ◆ PF-AR も含めて入射スケジュールの構成は可能
- ◆ 検討結果も含めて、ダンピングリングの設計が進んでいる
- ◆ イベント制御システムと LLRF システム (特に直線性) の詳細の検討を継続する



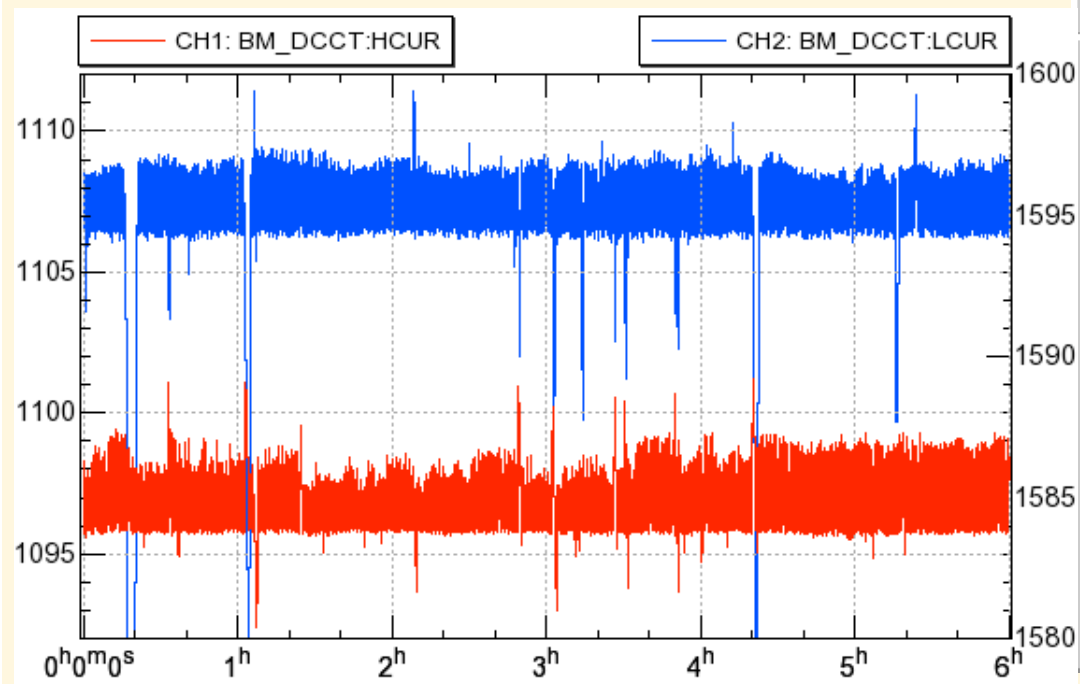
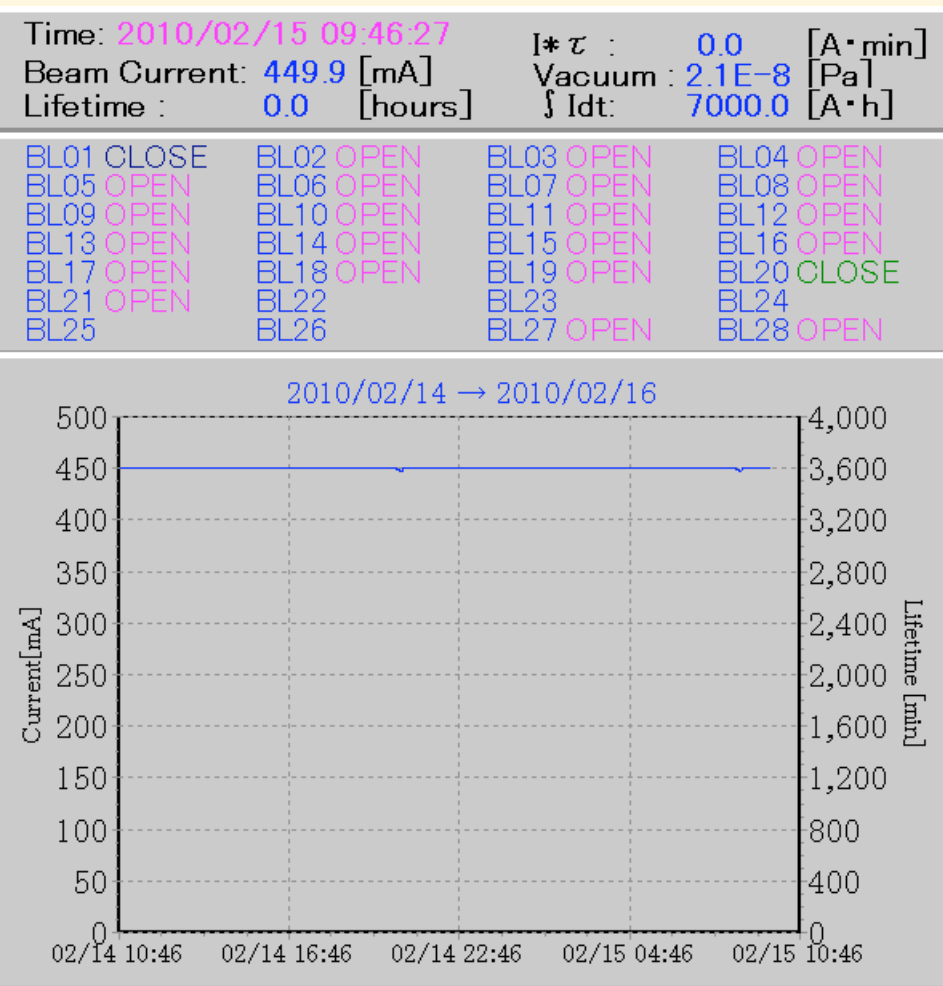
Thank you



# Simultaneous Top-up Injection Results

## ◆ Beam currents are kept within

- ❖ KEKB 1mA (~0.05%)
- ❖ PF 0.05mA (~0.01%)





# Three-fold Independent Closed Loops

- ◆ Feedback loop software act on one of three virtual machines
  - ❖ Managing independent parameter sets

