



SuperKEKB の入射ビーム選択と Timing 制御

古川和朗

さらに書き足し (Oct.2012)

Aug.2010 の状況に一部書き足し (Apr.2012)

一部 SuperKEKB ではなく KEKB 記述であることに注意



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 10.39MHz)
- ◆ 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
 - ❖ 年較差、KEKB は 4×10^{-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 10.39MHz (=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
 - ✧ KEKB 時は、同時入射は不可能だった
 - ✧ SuperKEKB は Beam 寿命 10 分のため、Top-up できないとしても、同時入射は必要

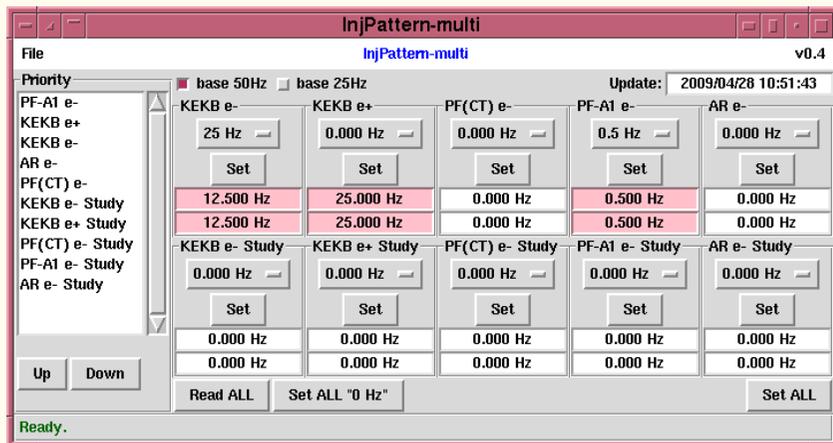


KEKB でのビーム選択

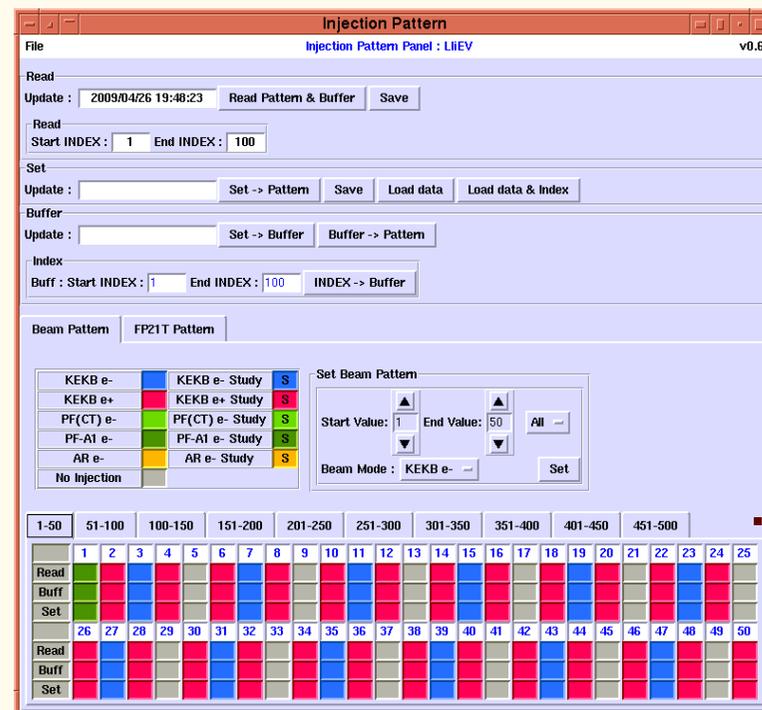
◆ KEKB HER、 LER 及び PF への同時入射

❖ 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



Manual pattern generator



❖ Recent typical operation.

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

- ❖ ~25Hz
- ❖ ~12.5Hz
- ❖ ~0.5Hz



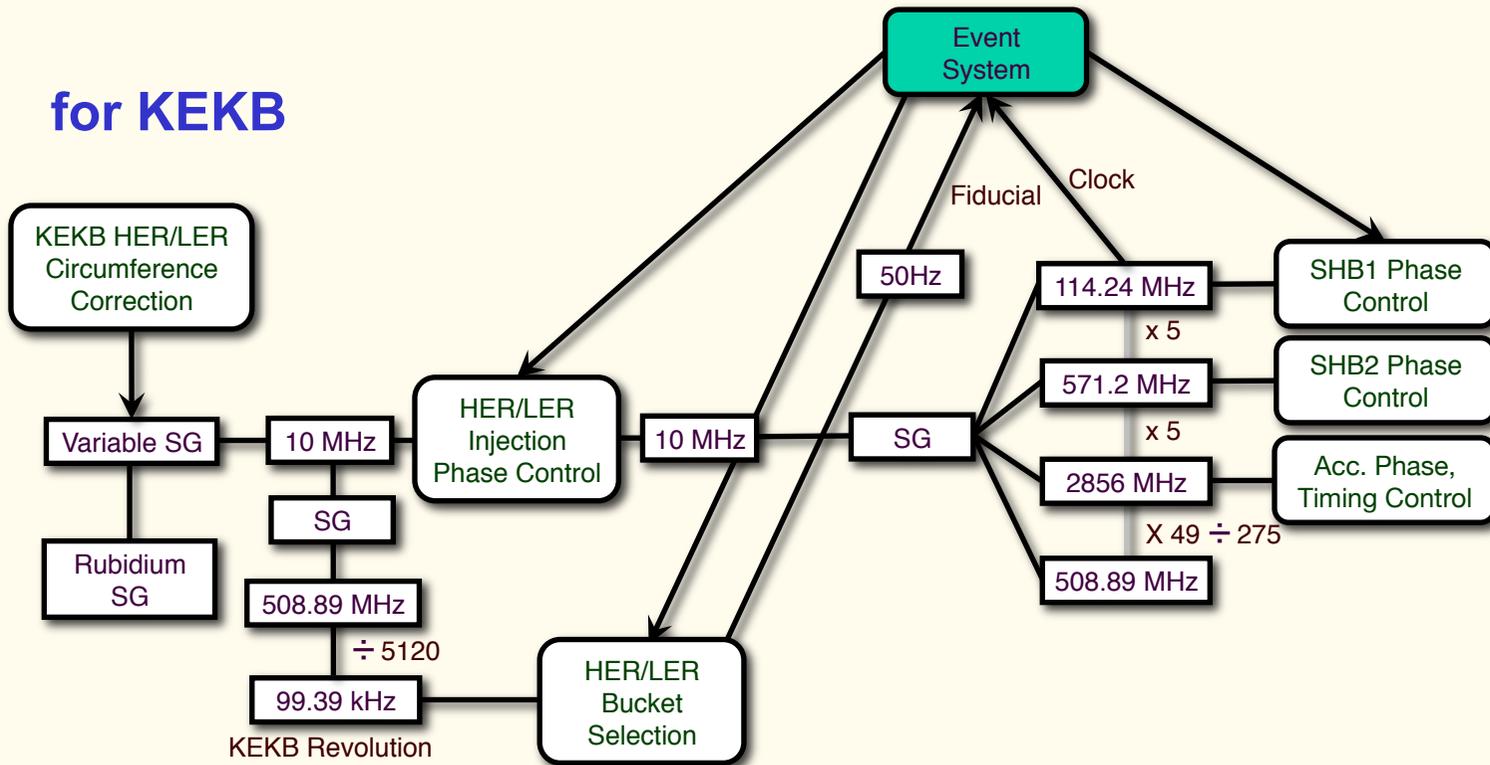
KEKB のビーム・バケット選択

- ◆ 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 (特に制御しないで、待つだけで) 全てのバケットを選択できる

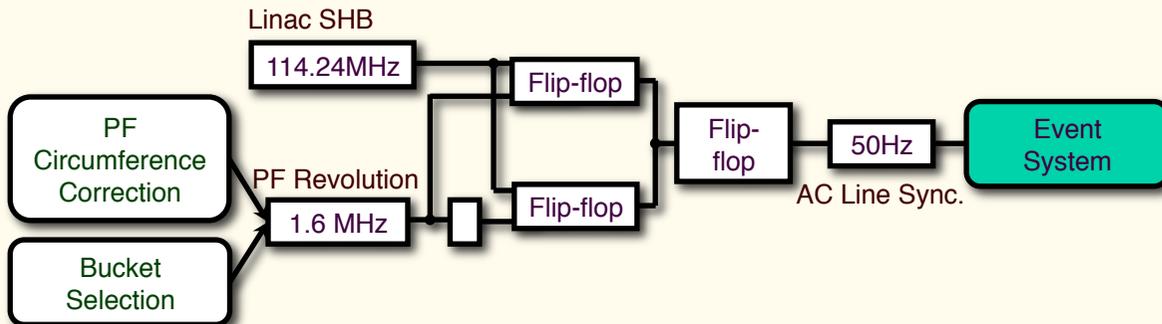


KEKB タイミング同期関係

for KEKB



for PF



◆ 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



イベント・タイミングシステム

◆ APS/ANL

- ❖ 同軸 Cable に 10MHz Clock と 8-bit Event info. Modulation
- ❖ EPICS soft event と結合

◆ SLS/PSI

- ❖ FPGA と SFP の民生技術を APS system の置き換えに応用 (MRF 110 series)
- ❖ さらに Diamond 放射光のために進化 (MRF 200 series)
- ❖ さらに改造、Platform 追加 (MRF 230 series)

◆ KEKB

- ❖ 内藤氏構築の 8-bit Event system、電磁石、モニタ同期に使用

◆ J-PARC

- ❖ FPGA と通常光変換で 16-bit Timing 分配 system

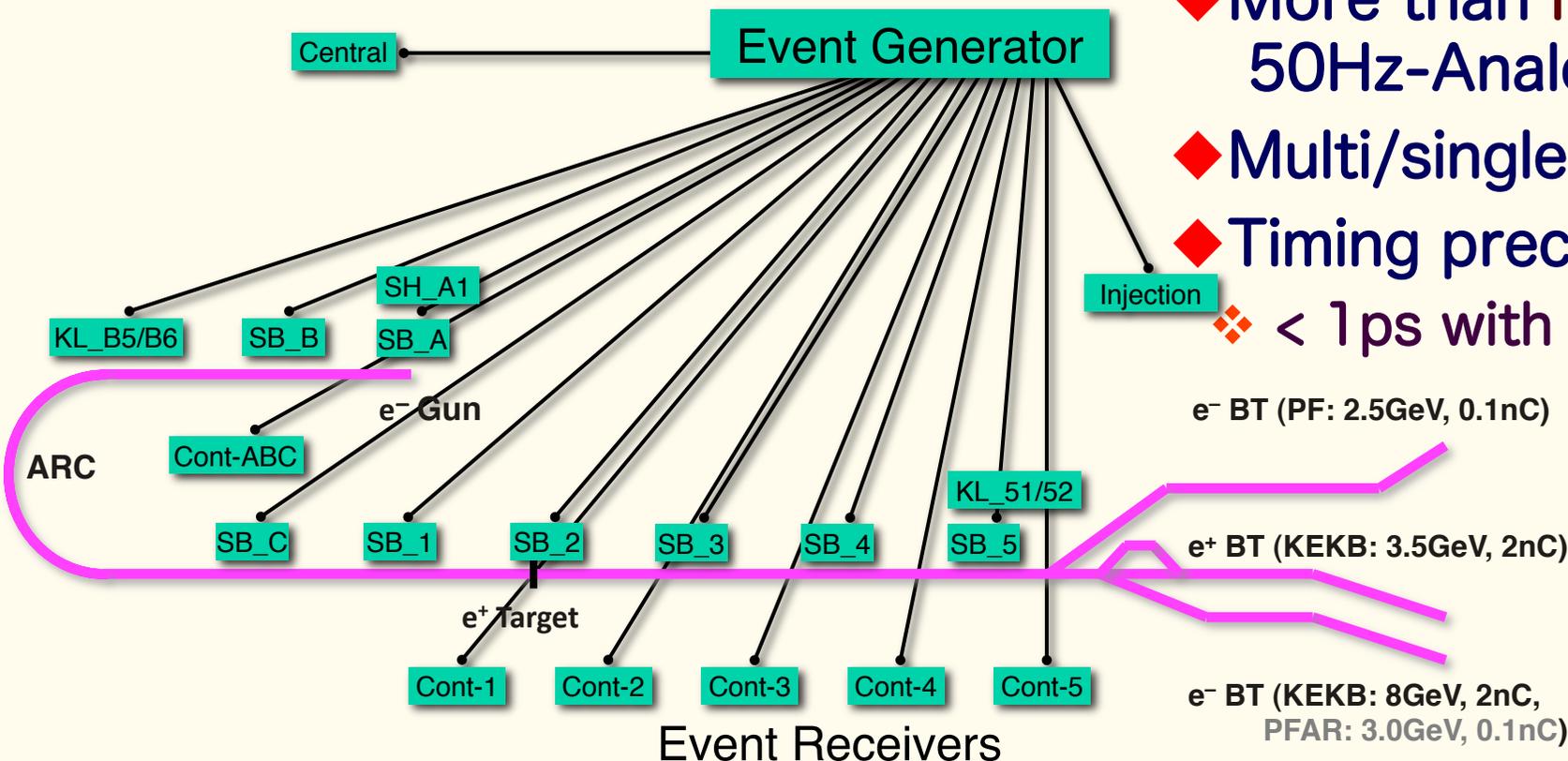
◆ Linac

- ❖ 当初、Beam 繰り返し Timing だけ専用 Cable で通知
- ❖ 後に、4 つの Beam 区別のために、専用 Cable 敷設 (Gate として)
- ❖ 同時入射計画時に 8bit では足りないので、FPGA + SFP の System 構築を検討したが、128bit 以上必要な LCLS/SLAC が MRF 採用に動いたので歩調を合わせる



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.
◆ < 1 ps with external module.

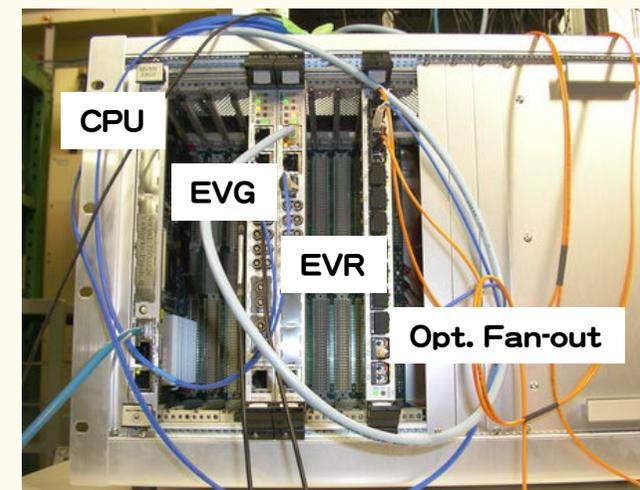




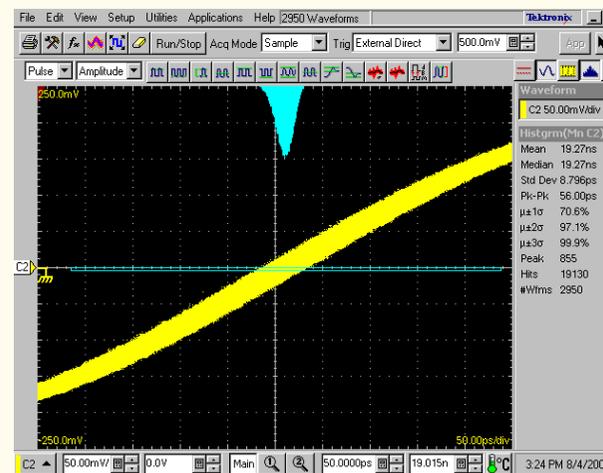
Linac Event System

◆ 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





Event Generator

- ◆ RF Clock (現在は 114.24MHz か 571.2MHz) と 50Hz Trigger (Fiducial) を受ける
- ◆ 50Hz Trigger は Event Generator 自身によって選ばれた (Super)KEKB e-/e+, PF, PF-AR のうちのどれかの加速器に同期している
- ◆ その Trigger に同期して、その加速器に対応した Beam Mode を作る Event Sequence を 114.24MHz に同期して送り出す



EVG-EVR 間の光伝送路

- ◆ 114MHz Clock 毎に 16bit の情報を送り出す
- ◆ 16bit は 8B/10B で Encode され 20bit の Bit 列になる (約 2.3GHz)
- ◆ 16bit のうち 8bit は Event code (つまり 8.5ns 毎に一つの Event が送れる)
- ◆ 残りの 8bit は情報で複数の使い方があがあるが、KEKB では使用しなかった、SuperKEKB では使用する予定



Event Receiver

- ◆ Event を受信すると事前の設定によって複数の動作を起こすことができる、このうち KEKB で使用したのは 2 種類
- ◆ CPU に割り込みを掛ける、それを 19ms 後の Pulse の Beam mode の指示と解釈し、DAC 値や Delay 値を設定する。そのような動的な変数が全体で 150 以上ある。それぞれ 11 mode ある。
- ◆ あらかじめ指示した Pulse または Level 信号を発生する、同期精度は 10ps 程度



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

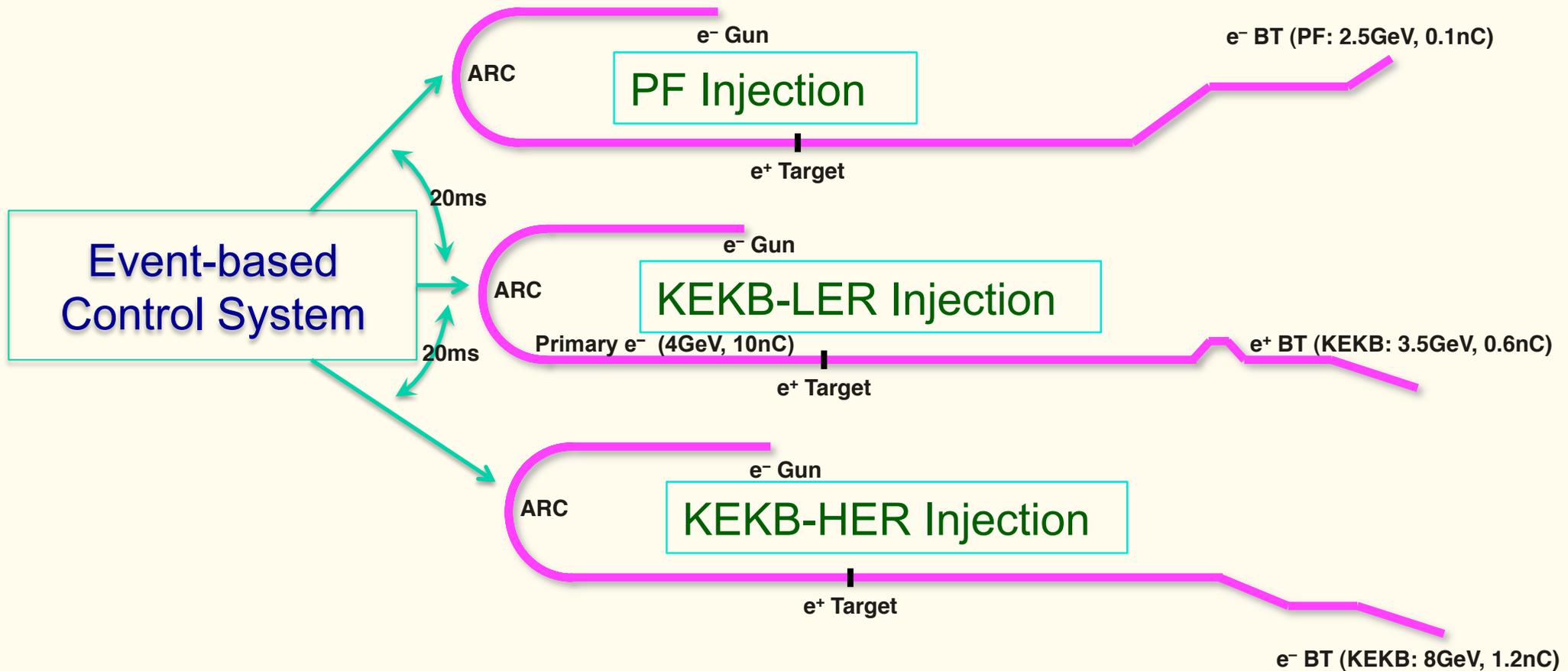
Generate Events for the Next 20-ms Time Slot (in Event Generator)
reading two consecutive elements from the beam mode pattern
generate several events for the next pulse
generate preparation events for the next after next

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

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

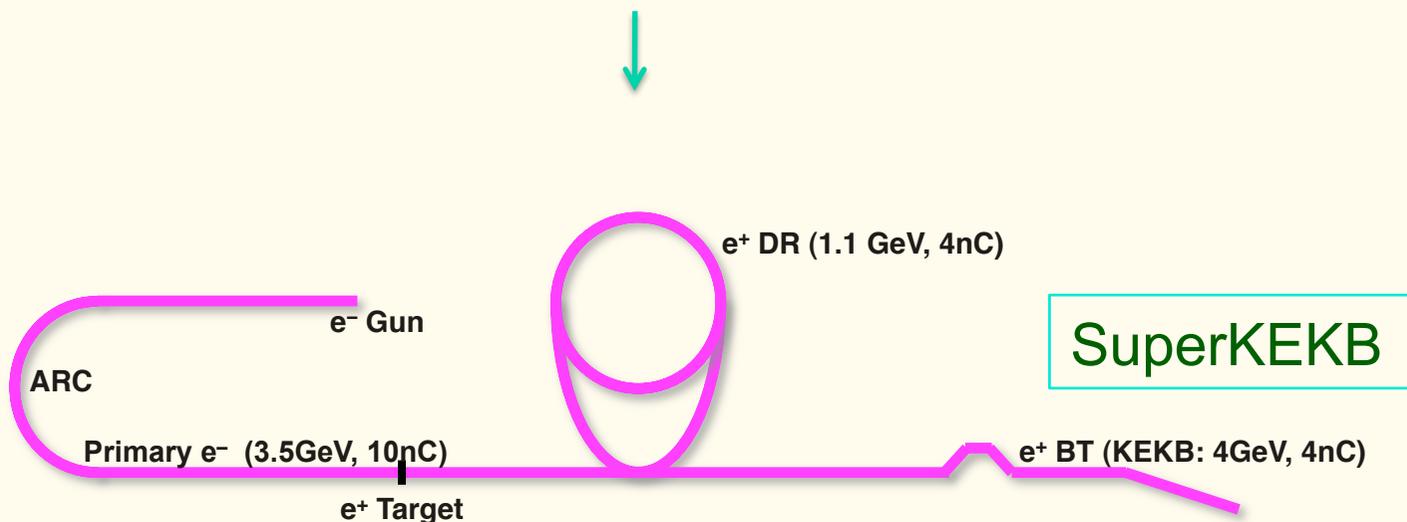


SuperKEKB のダンピングリング (DR)

◆ 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



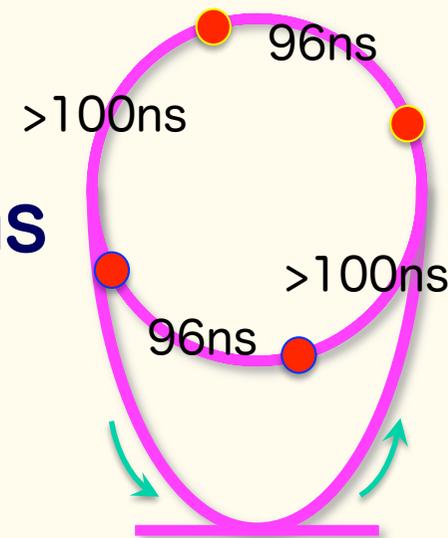


ダンピングリングの RF

- ◆ **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 5120×49) 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 $500 \mu\text{s}$ 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 96ns として 2ms 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)

❖ $hDR=225$, 2ms 以内

❏ $49*2 \sim hDR-49$ で 2123 個

❏ $49*2 \sim hDR-49*2$ で 1008 個

❖ $hDR=223$, 2ms 以内

❏ $49*2 \sim hDR-49$ で 2096 個

❏ $49*2 \sim hDR-49*2$ で 971 個

❖ $hDR=230$, 2ms 以内

❏ $49*2 \sim hDR-49$ で 5120 個

❏ $49*2 \sim hDR-49*2$ で 3065 個

❖ $hDR=245$, 2ms 以内

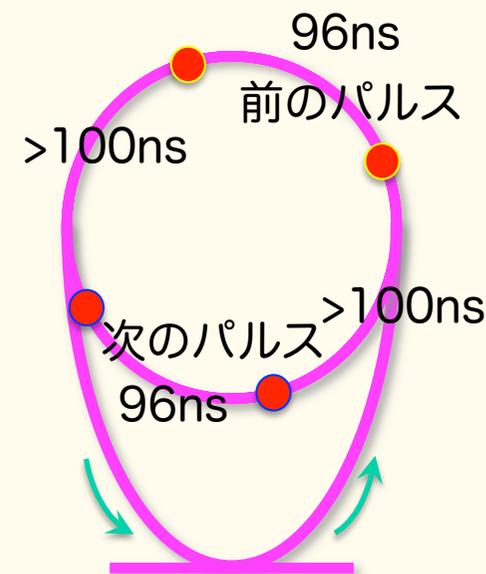
❏ $49*2 \sim hDR-49$ で 2048 個

❏ $49*2 \sim hDR-49*2$ で 1024 個

❖ $hDR=252$, 2ms 以内

❏ $49*2 \sim hDR-49$ で 4986 個

❏ $49*2 \sim hDR-49*2$ で 3447 個





ダンプ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
 - ❖ 双方とも準備しておいたほうがよい (Review committee)



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⁻、4GeV e⁺
- ◆ 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 4×10^{-6} vs. 4×10^{-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



Linac - DR

◆ Linac の RF 位相と DR の RF 位相を Pulse 毎 (20ms) に変更する可能性がある

❖ 伝達手段

❖ EVG → EVR

❖ EVG → EVR → Dedicated Ethernet (CA) → LLRF μ TCA

❖ EVG (→ EVR) → 8bit digital I/O ~4 bytes → LLRF μ TCA

❖ EVG → SFP Event Link → LLRF μ TCA (SFP 増設)

◆ Linac LLRF monitor での開発結果を利用して検討が始まった

❖ 18ms ぐらい前に次の出射時の位相を伝達できるかも

❖ Event 通知と Shared memory 機構による情報転送

◆ 双方を SFP 経由で 2.3Gbps の Bit stream に乗せる (MRF 標準機能)

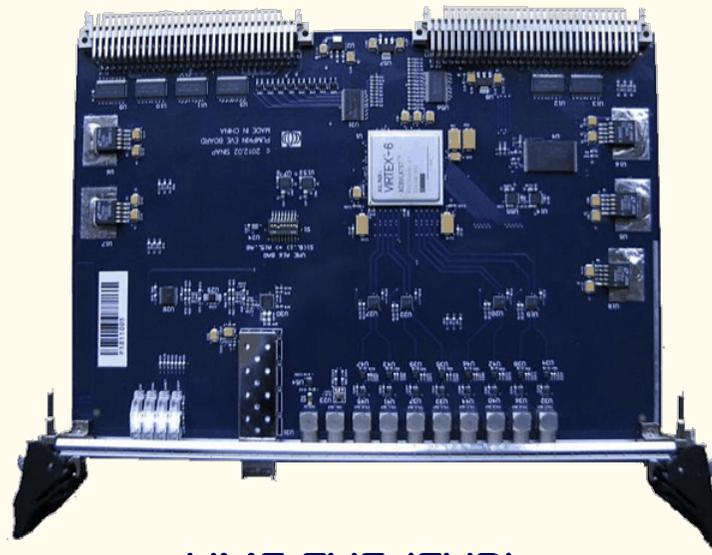


Other compatible hardware with MRF

- ◆ Efforts by RF group at Linac (三浦氏, 片桐氏, 湘南電子)
 - ❖ EVR for synchronized RF monitoring
- ◆ Embedded EVRs at NSLS2/BNL, LCLS2/SLAC, etc
- ◆ SINAP VME and PLC modules (SSRF, PLS)



VME EVO (EVG)



VME EVE (EVR)



PLC EVR



Activities in 2011-2012 (Kusano, Kudou, Okazaki)

◆ Transition of Software

- ❖ VxWorks-5.5 + DevSup v2.4.1 + Old firmware
- ❖ VxWorks-6.8 + Mrfioc v2 (BNL) + New firmware

◆ Re-evaluation of existent hardware/software

- ❖ Cascaded EVG for Slow-positron facility
- ❖ Synchronous 2k-byte shared memory transfer (~50MB/s)
- ❖ Synchronous EPICS timestamp

◆ Evaluation of SINAP modules

- ❖ VME EVG (EVO), EVR (EVE), & PLC EVR
- ❖ EPICS devsup/driver software evaluation & development
- ❖ New cascaded EVG capability for DR (MR)
- ❖ Upward shared memory transfer (quasi synchronous)



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

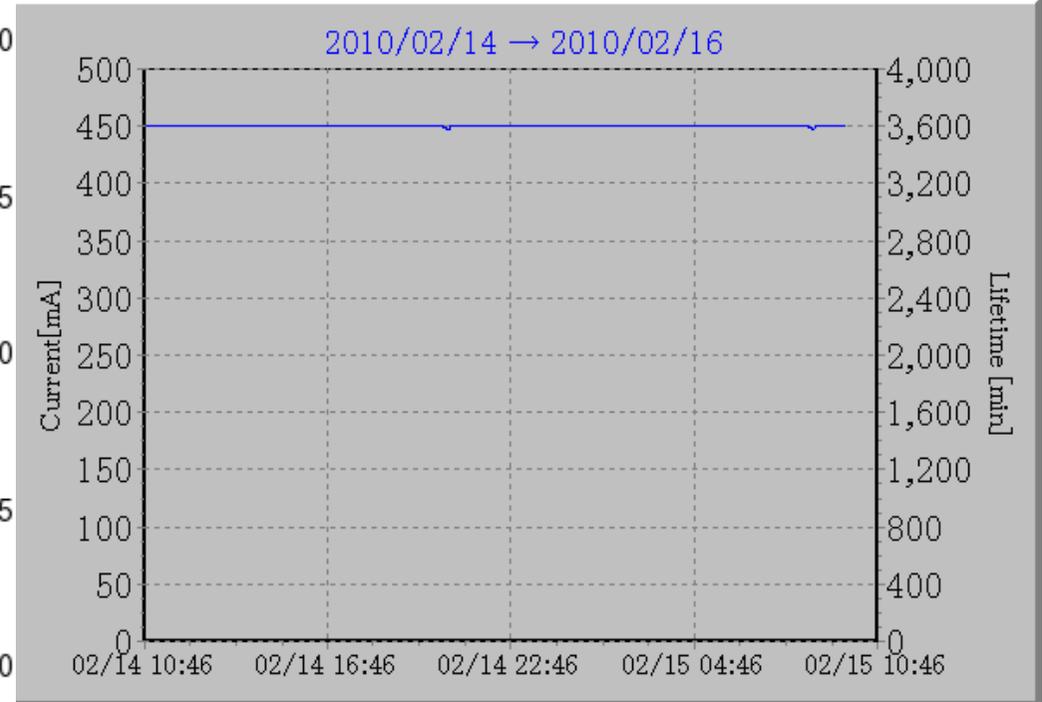
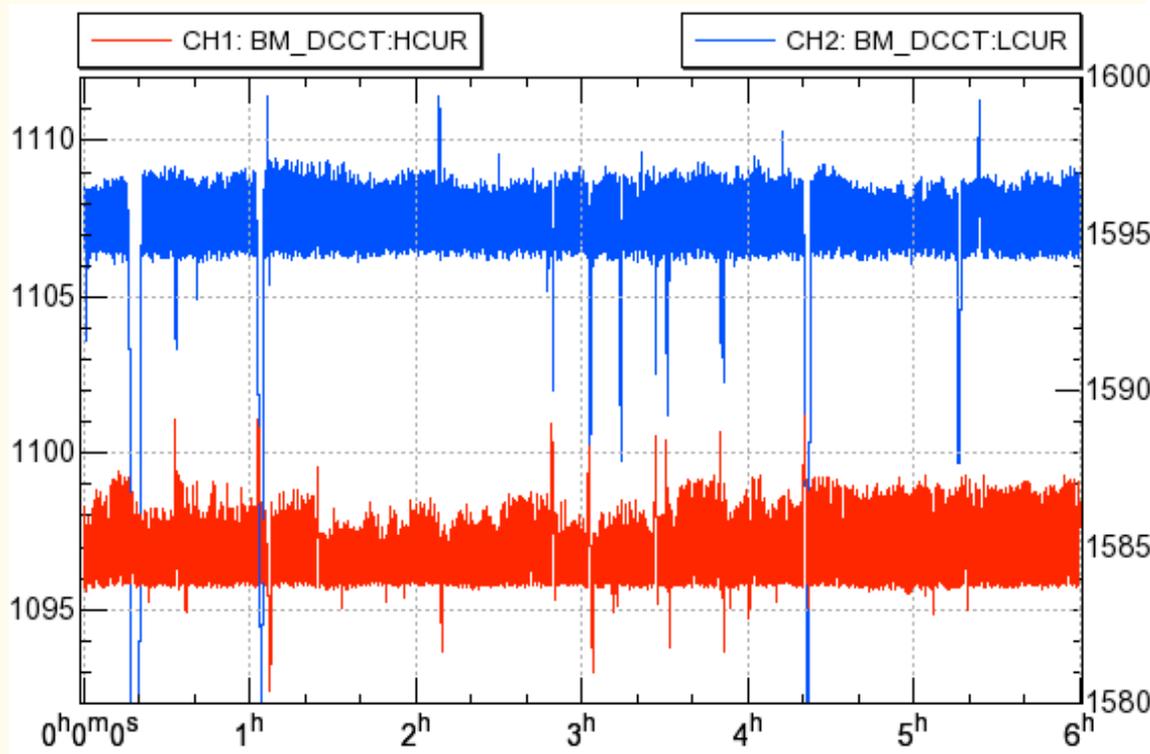
◆ Beam currents are kept within

❖ KEKB 1mA (~0.05%)

❖ PF 0.05mA (~0.01%)

Time: 2010/02/15 09:46:27	I*τ : 0.0 [A·min]
Beam Current: 449.9 [mA]	Vacuum : 2.1E-8 [Pa]
Lifetime : 0.0 [hours]	∫ Idt: 7000.0 [A·h]

BL01 CLOSE	BL02 OPEN	BL03 OPEN	BL04 OPEN
BL05 OPEN	BL06 OPEN	BL07 OPEN	BL08 OPEN
BL09 OPEN	BL10 OPEN	BL11 OPEN	BL12 OPEN
BL13 OPEN	BL14 OPEN	BL15 OPEN	BL16 OPEN
BL17 OPEN	BL18 OPEN	BL19 OPEN	BL20 CLOSE
BL21 OPEN	BL22	BL23	BL24
BL25	BL26	BL27 OPEN	BL28 OPEN





Three-fold Independent Closed Loops

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

