



WEOOP01

同時トップアップ入射のための KEK電子陽電子入射器の加速モード切替の高度化

古川和朗、明本光生、荒川大、荒木田是夫、飯田直子、池田光男、岩瀬広、
惠郷博文、榎本收志、榎本嘉範、大越隆夫、大沢哲、大西幸喜、岡安雄一、
小川雄二郎、柿原和久、梶裕志、片桐広明、紙谷琢哉、川村真人、菊池光男、
佐武いつか、佐藤政則、周翔宇、白川明広、杉村仁志、諏訪田剛、清宮裕史、
染谷宏彦、竹中たてる、田中窓香、張叡、邱丰、峠暢一、中島啓光、夏井拓也、
東保男、肥後寿泰、船越義裕、本間博幸、松下英樹、松本修二、松本利広、
三浦孝子、三川勝彦、三増俊弘、宮原房史、矢野喜治、横山和枝、吉田光宏、王迪
(KEK、SOKENDAI)

<<http://www-linac.kek.jp/linac/>>

< kazuro.furukawa @ kek.jp >



はじめに

電子陽電子入射器と複合加速器

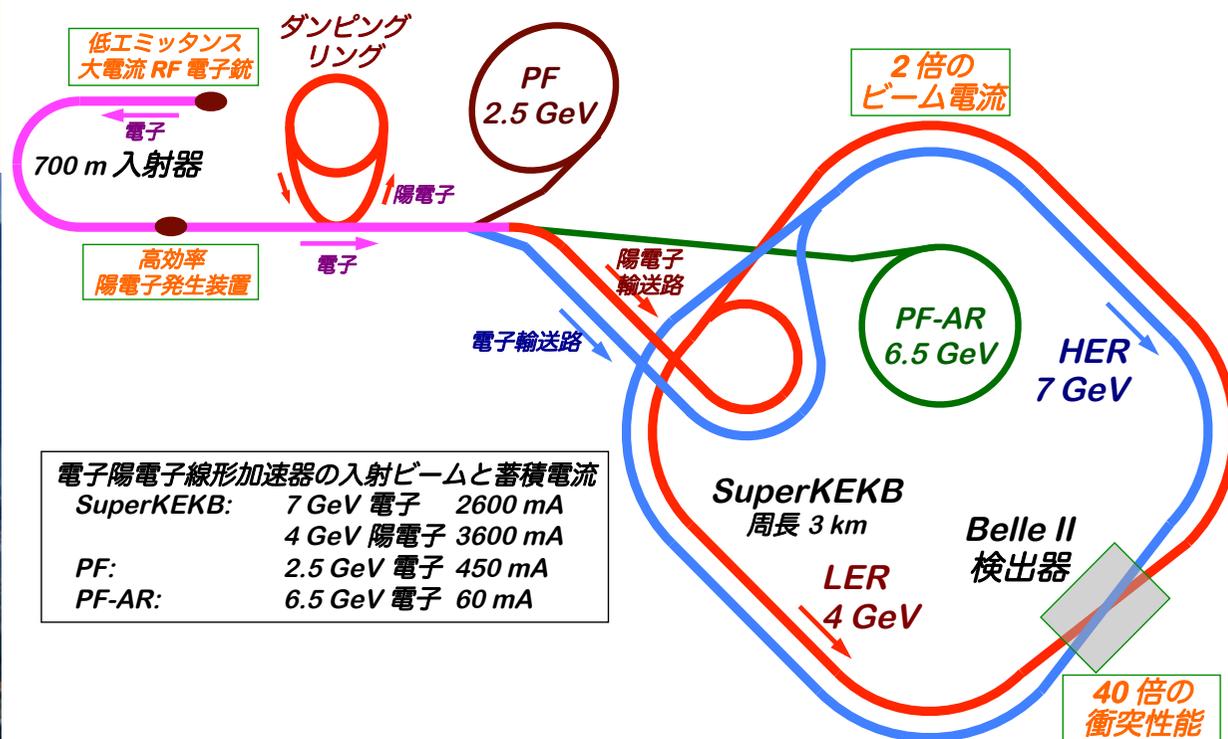
Mt. Tsukuba

SuperKEKB dual rings

PF-AR

PF

700m Injector Linac



電子陽電子線形加速器の入射ビームと蓄積電流	
SuperKEKB:	7 GeV 電子 2600 mA 4 GeV 陽電子 3600 mA
PF:	2.5 GeV 電子 450 mA
PF-AR:	6.5 GeV 電子 60 mA

一つの入射器を複数の目的に

◆ 1970年代国内の動き

❖ 世界最高エネルギーの衝突型加速器の素粒子物理実験

✧ TRISTAN 計画

❖ 放射光専用加速器を中心とする放射光総合研究所

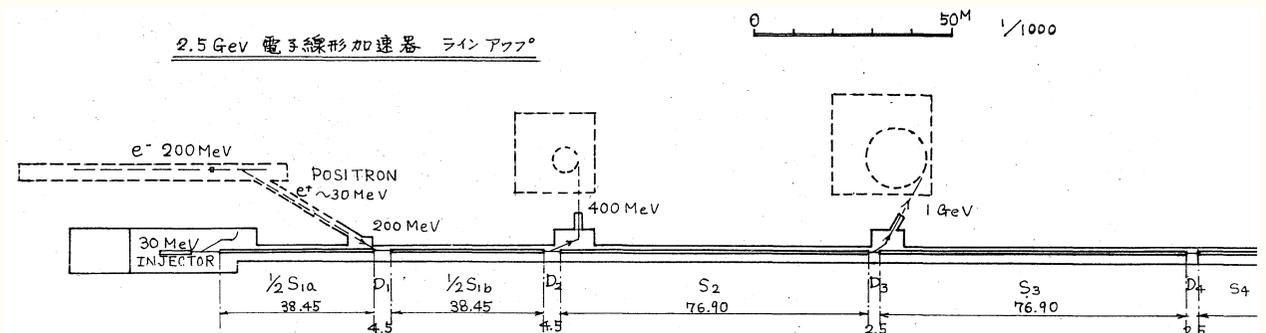
✧ フォトンファクトリ (PF)

◆ 当初から複数目的の入射器

❖ 実際 PF、TRISTAN、KEKB、PF-AR、SuperKEKB

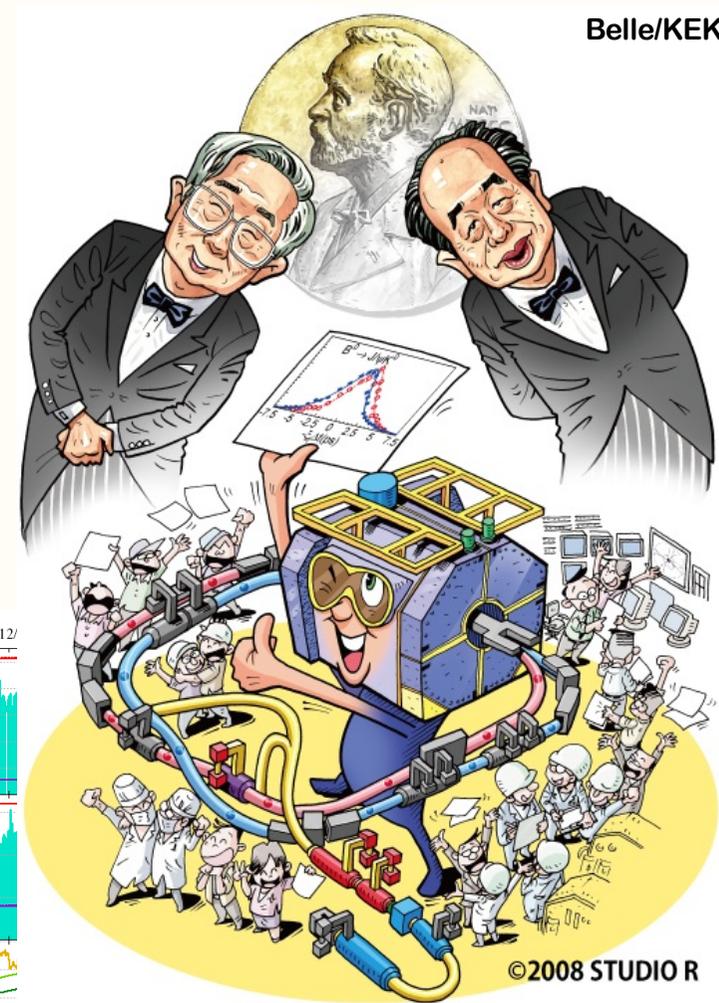
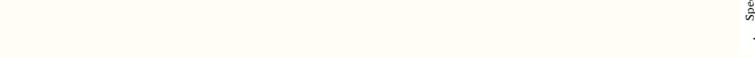
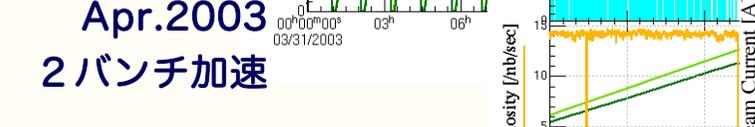
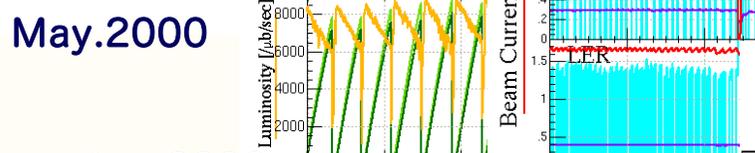
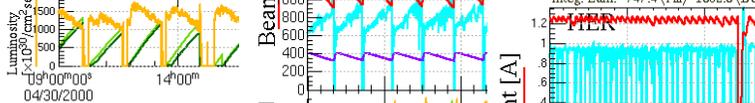
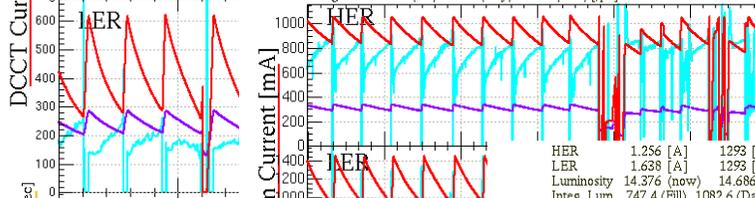
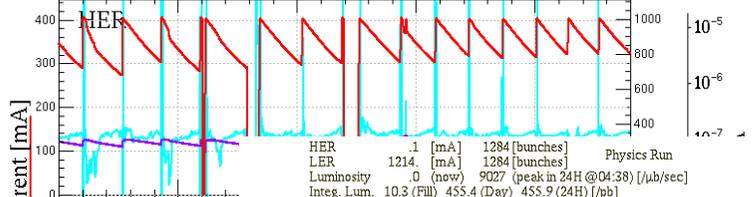
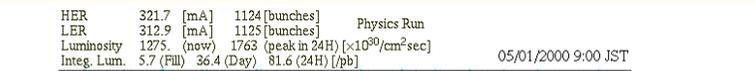
✧ 今年、入射器は 20 万時間の運転実績達成

1976年時の計画の上流部



KEKB 入射運転の進展

1日あたりの運転状況
 赤: ビーム電流 (電子, 陽電子)
 紫: 真空 (電子, 陽電子)
 黄: 衝突ルミノシティ
 緑: 積分ルミノシティ



ルミノシティの世界記録を保持



SuperKEKB 向け改造



KEKB 入射設計

◆ 歴史的経緯によるマイクロ波周波数

❖ 入射器 2856 MHz

❖ TRISTAN リング 508.5 MHz

✧ 陽子シンクロトロン (PS) から陽子入射の要請

◆ 周波数を変更して整数関係を持たせる

❖ 入射の口径が狭く 30 ps、精度の高い同期が必要

✧ 入射器 2856 MHz : 10.39 MHz x 275

✧ KEB (508.5 MHz →) 508.9 MHz : 10.39 MHz x 49

❖ ハーモニック数は 5120

◆ 49 と互いに素

✧ 最長、共通周波数の 5120 倍 (492 μ s) 待つだけで入射が可能

❖ 電流の少なくなったバケットを狙って入射

◆ BCE: Bunch current equalizing

SuperKEKB での入射タイミング要件

- ◆ 複数周波数 (114, 571, 2856, 509MHz) の分周逡倍安定生成
 - ✧ 大電流陽電子生成のための 10nC シングルバンチビームのバンチング
- ◆ 30 ピコ秒のリング入射タイミング精度
 - ✧ SuperKEKB リング周波数 509MHz との整数関係
 - ✧ PF・PF-AR は入射条件が厳しくないため、偶然の同期で実現
- ◆ 周長補正は SuperKEKB・PF・PF-AR で独立
 - ❖ 年較差、SuperKEKB は 4×10^{-7} 変化、PF-AR、PF は $4 \sim 20 \times 10^{-6}$ 程度
 - ✧ 低気圧、潮汐、地震、温度、深度による、SuperKEKB は地下 11 m ほど、PF は地表
 - ❖ 閉軌道観測により蓄積リング毎に連続的にマイクロ波周波数を補正
- ◆ 1 パルス 2 バンチ、50 Hz 入射
 - ✧ SuperKEKB - 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、PF-AR 同時入射は不可能だった
 - ❖ SuperKEKB はビーム寿命 6 分のため、PF-AR を含めた同時入射は必須

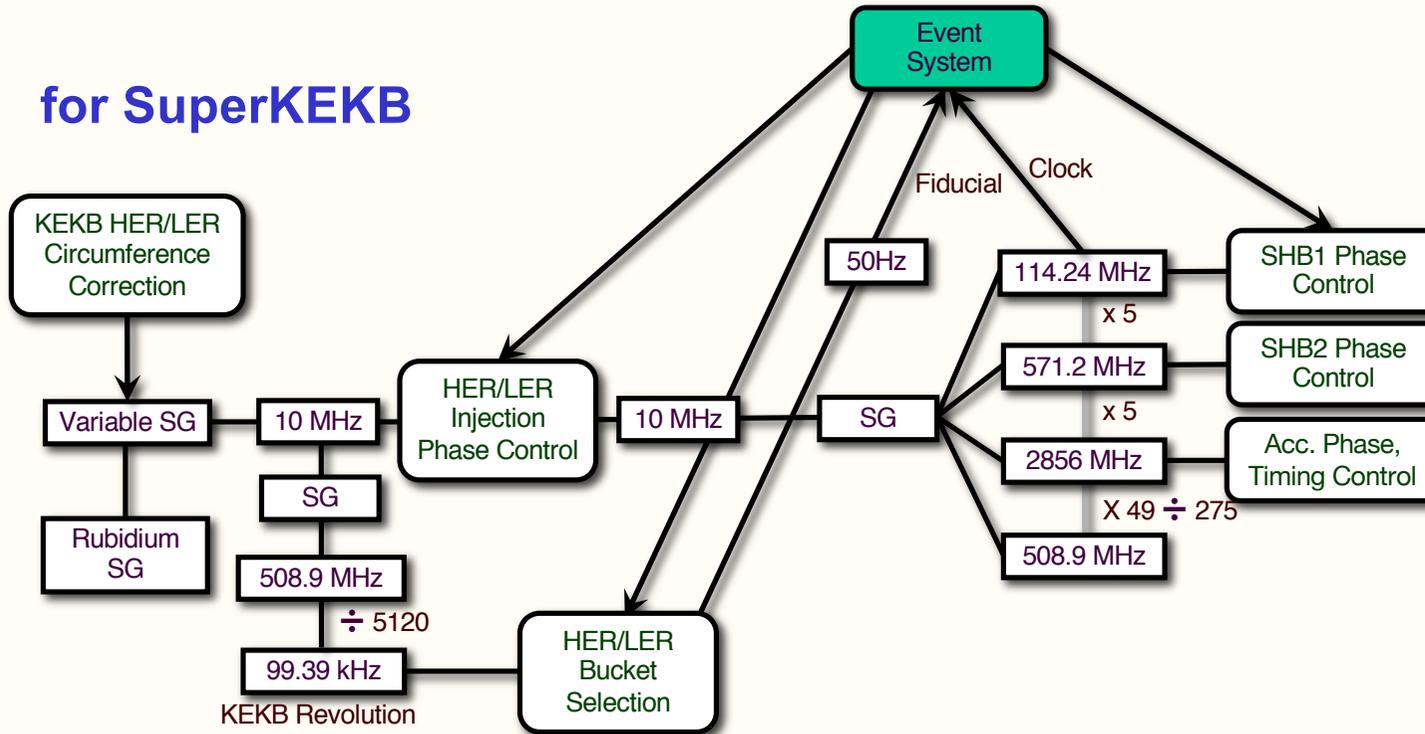


KEKB/SuperKEKB の入射のビーム

Stage	KEKB (final)		Phase-I		Phase-II		Phase-III (interim)		Phase-III (final)	
Beam	e+	e-	e+	e-	e+	e-	e+	e-	e+	e-
Energy	3.5 GeV	8.0 GeV	4.0 GeV	7.0 GeV	4.0 GeV	7.0 GeV	4.0 GeV	7.0 GeV	4.0 GeV	7.0 GeV
Stored current	1.6 A	1.1 A	1.0 A	1.0 A	-	-	1.8 A	1.3 A	3.6 A	2.6 A
Life time (min.)	150	200	100	100	-	-	-	-	6	6
	primary e- 10		primary e- 8						primary e- 10	
Bunch charge (nC)	→1	1	→0.4	1	0.5	1	2	2	→4	4
Norm. Emittance	1400	310	1000	130	200/40	150	150/30	100/40	<u>100/15</u>	<u>40/20</u>
($\gamma\beta\epsilon$) (mrad)					(Hor./Ver.)		(Hor./Ver.)	(Hor./Ver.)	(Hor./Ver.)	(Hor./Ver.)
Energy spread	0.13%	0.13%	0.50%	0.50%	0.16%	0.10%	0.16%	0.10%	<u>0.16%</u>	<u>0.07%</u>
Bunch / Pulse	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Repetition rate	50 Hz		25 Hz		25 Hz		50 Hz		50 Hz	
Simultaneous top-up injection (PPM)	3 rings (LER, HER, PF)		No top-up		Partially		4+1 rings (LER, HER, DR, PF, PF-AR)		4+1 rings (LER, HER, DR, PF, PF-AR)	

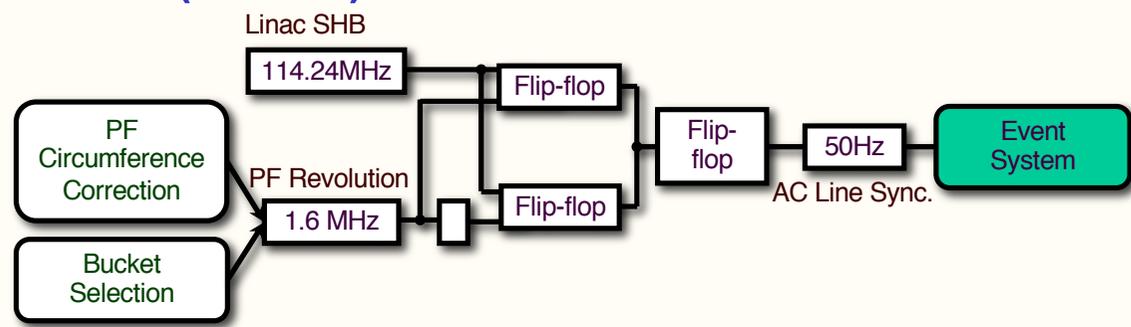
SuperKEKB タイミング同期関係

for SuperKEKB



- ◆ Synchronization Req.
 - ❖ KEKB : < 30ps
 - ❖ PF/PF-AR : < ~700ps
- ◆ Linac rf is Synchronized to SuperKEKB rf
- ◆ Event Clock is 114.24MHz
- ◆ We have to manage
 - ❖ Bucket selection
 - ❖ Injection phase controls
 - ❖ Circumference compensation

for PF (PF-AR)



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, 4nC)
- ❏ 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 6 分 → 実験の中断が避けられない
- ❏ SuperKEKB 向けに PF-AR の直接入射路を建設

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



ダンピングリング (DR) の RF

◆メインリング (MR) バケット選択

- ✧ MR は 508.9MHz 5120 バケットを持つ
- ✧ Linac – MR 共通周波数 10.39MHz 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

◆DR RF として 10.39MHz 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

- ❖ 508.9MHz, 571MHz などは可能
- ❖ 単純な整数関係の 476MHz, 714MHz などは有用ではない

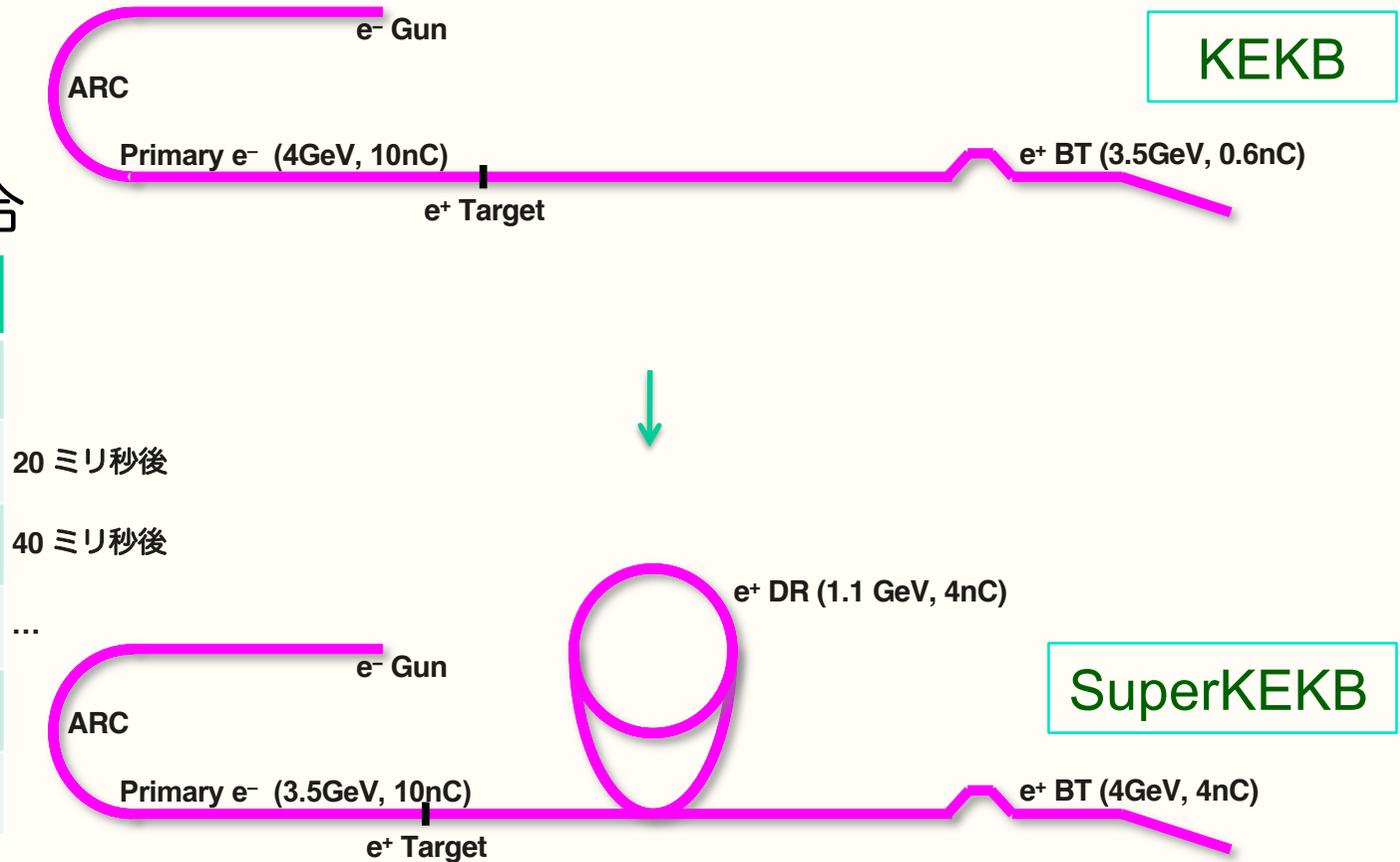
◆CW クライストロン等の資源を考えると 508.9MHz を選ぶことが適当と思われる

SuperKEKB のダンピングリング (DR)

- ◆ 20 ミリ秒以内のダンピングは困難なため 40 ミリ秒を仮定
 - ❖ 逆方向変更電磁石も導入 (Reverse-bend FODO)
- ◆ 2 バンチパルスを 2 パルスを収容する

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ハーモニック数

◆ 1パルス 2バンチのバンチ間隔 96ns

◆ 入出射キッカー立上り下り ~100ns

◆ ハーモニック数

❖ 少なくとも >200 (≒ 392ns)

❖ メインリング (MR) のハーモニック数 5120 (または 5120x49) と適度な整数関係が好ましい

❖ 大きくなり過ぎると建設費に影響

◆ 入射 (パルスモジュレータ) の最大待ち時間 2ms

❖ KEKB 時は最大待ち時間 492 μ s であったが、安定性許容度とのバランスで 2ms まで電源を改造して拡大





ダンピングリングのハーモニック数

- ◆ ハーモニック数を網羅的に検討し、例えばハーモニック数 230 で 2 ミリ秒以内のバケット選択に関しては
 - ❖ 1 バンチ入射では 5120 個全てのバケットを選択入射可能
 - ❖ 2 バンチ入射では 5120 個の内 2887 個のバケットを選択入射可能
 - ❖ 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 を選ぶことが妥当と思われる
- ◆ 2 バンチ入射時に直接選択できないバケットについても
 - ❖ 1) DR 出射後、Linac 後半の位相をパルス毎に変更する
 - ❖ 2) MR のバケット候補を複数用意する
 - ❖ 3) DR 蓄積中に DR 位相を変更する
- ◆ とすれば選択可能
 - ❖ 1) 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
 - ❖ 3) について、次のパルスとの依存関係が増えるので不利
 - ❖ 複数の方法を準備しておいたほうがよい (Review committee)

商用周波数との関係

- ◆ 商用 50 Hz との緩い同期は装置の安定度に重要
- ◆ 入射器のクライストロン・ヒータが交流駆動
 - ❖ ヒータが作る磁場が電子ビームさらには出力に影響
- ◆ できるだけ 50 Hz の同じ位相でビームを加速

- ◆ しかし、商用 50 Hz は負荷によって大きく変動し、0.1% 程度の割合まで変わる
 - ❖ 現在は許容できない場合にビームを止めているが、さらなる対策が必要

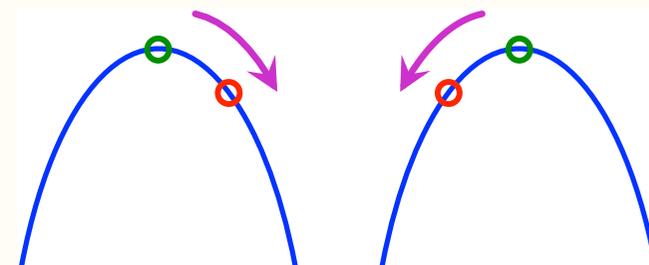
パルス同期動作装置の増設

◆ エネルギーの同期高速変更

❖ 一部の大電力マイクロ波源に

❏ 専用の高速低電力制御と半導体増幅器

❏ パルス毎にエネルギー変調



◆ ビーム光学関数の同期高速変更

❖ 約 100 台のパルス電磁石の導入

❏ コイル電力も 70% 回収



◆ 同期測定系

❖ ビーム位置モニタ、ワイヤスキャナ

❖ マイクロ波、電磁石



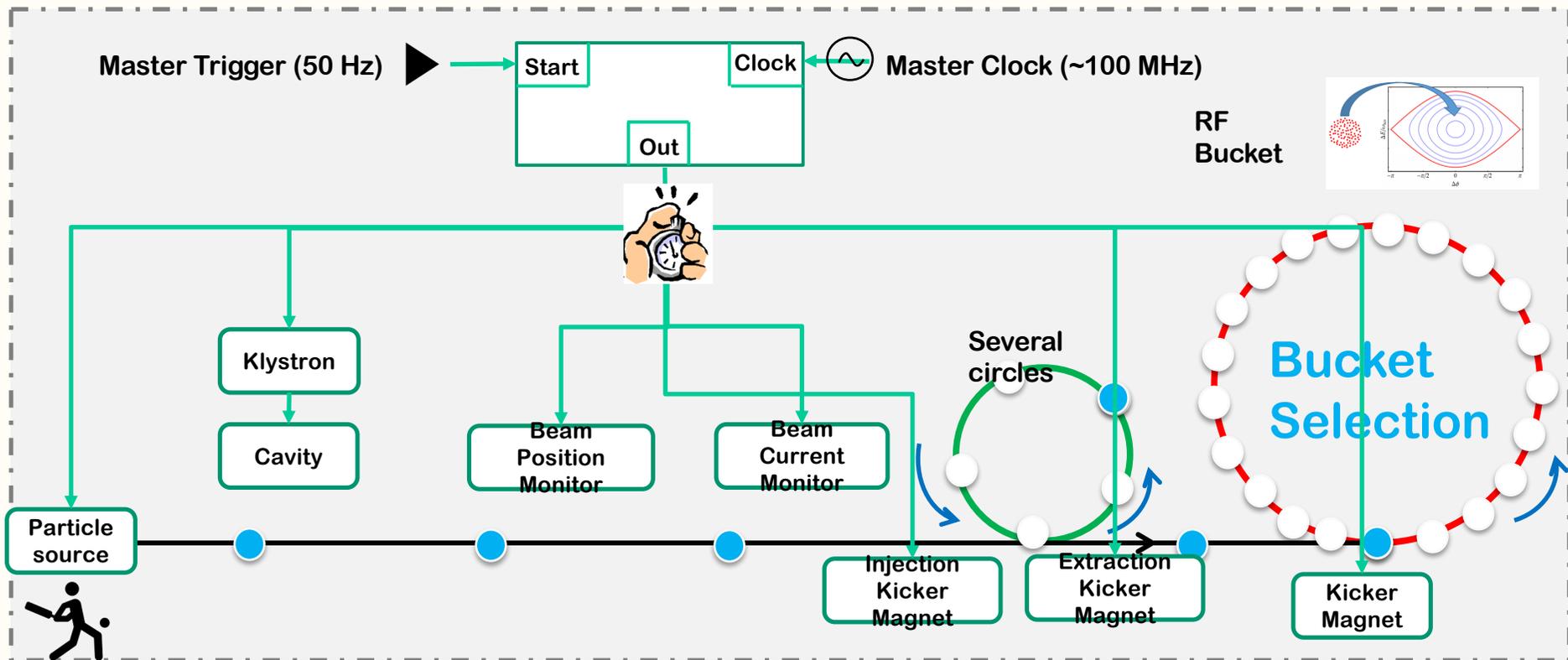


実装と運用

広域高速同期制御と仮想加速器運用

イベントタイミングシステム

Trigger a set of accelerator devices with proper relative delays.



Di Wang



イベント・タイミングシステム

- ❖ 事象に同期して制御操作を行い信号を発生させるような仕組み

◆ APS/ANL

- ❖ 同軸 Cable に 10MHz Clock と 8-bit Event 情報変調
- ❖ 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 system)
- ❖ さらに、英国 Diamond 放射光等のために進化

◆ KEKB

- ❖ 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 32-bit Event Timing 分配 system

◆ KEKB Linac 旧 system

- ❖ 4つの Beam 区別のために、専用 Cable 敷設
- ❖ 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
- ❖ その後、パルス毎にマイクロプログラムを書き換えることで、MRF イベントシステムで十分な自由度があることがわかり採用



Event Generator

- ◆ RF Clock (114.24MHz) と Fiducial (50Hz Trigger) 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 8.8ns 毎に一つの Event が送られる)
- ◆ 残りの 8bit は共有メモリ情報転送など複数の使い方があある

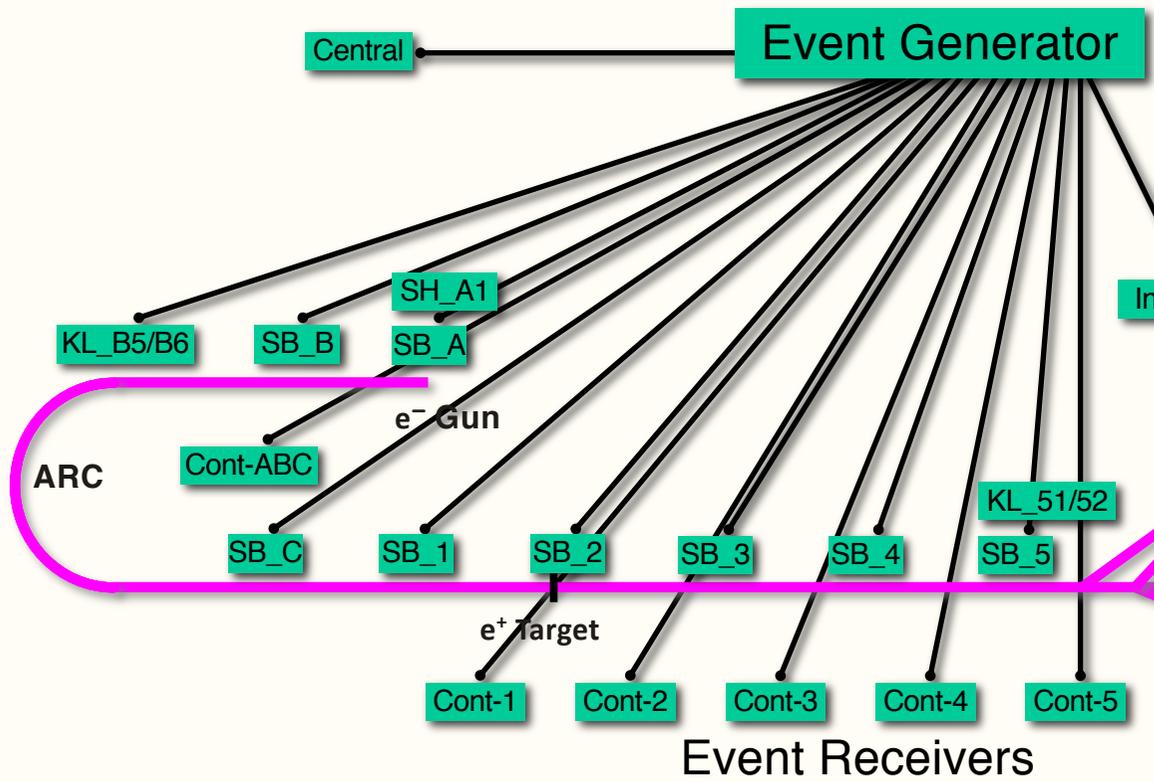
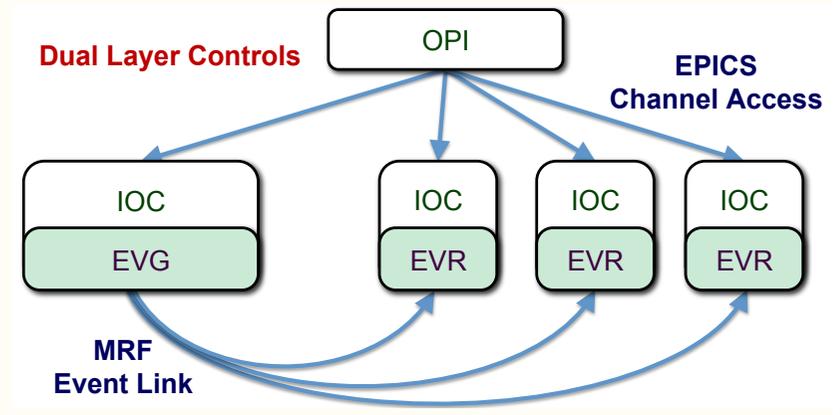
Event Receiver

- ◆ 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
- ◆ Event codeによっては、CPUに割り込みを掛け、PulseのBeam modeの指示と解釈し、DAC値やDelay値を設定したさまざまな動作を行う。そのような動的な変数が全体で200以上あり、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

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/v6.8
- ◆ EPICS R3.14 + mrfioc2 driver
- ◆ 17 event receivers in 2009 / KEKB

- ◆ 現在は VME, PXI, 組み込み, 合わせて約100台

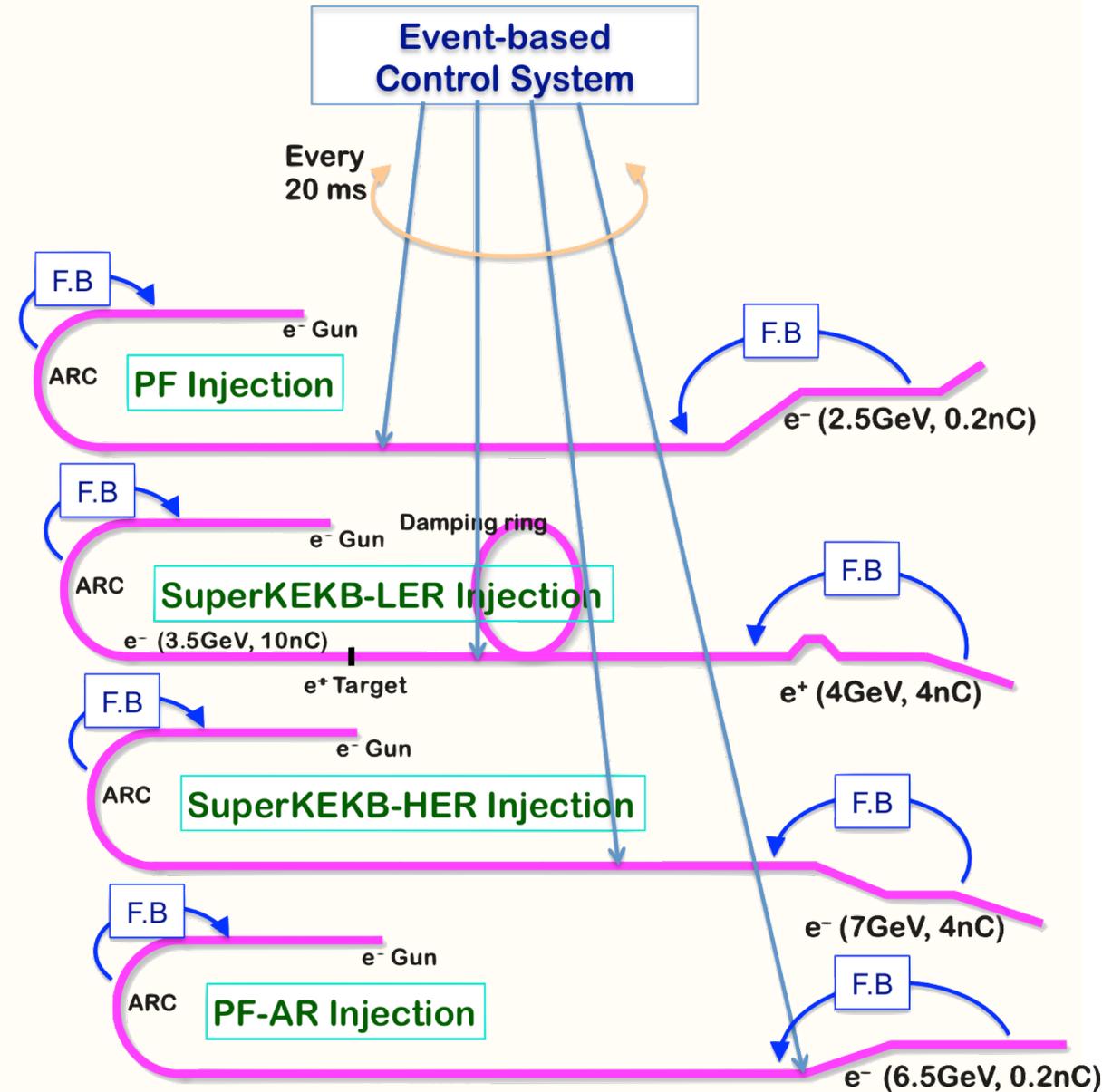


- ◆ 114.24MHz event rate, 50Hz fiducials
- ◆ Timing precision is < 10ps.

e⁻ BT (PF: 2.5GeV, 0.1nC)
 e⁺ BT (KEKB: 3.5GeV, 2nC)
 e⁻ BT (KEKB: 8GeV, 2nC, PFAR: 3.0GeV, 0.1nC)

パルス変調運転 (PPM)

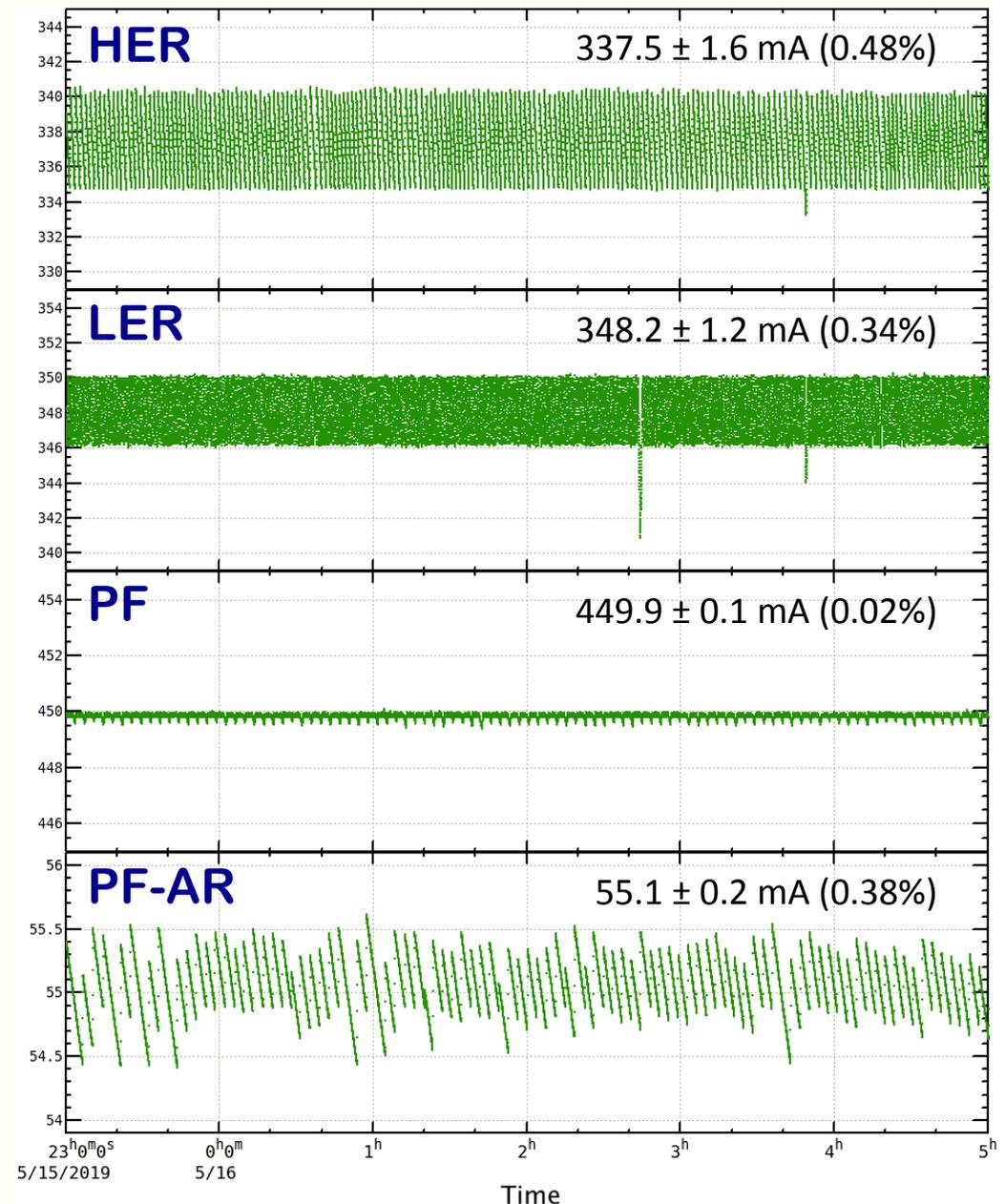
- ◆ 1つの入射器を
4つの仮想加速器のように
振る舞わせることができる
- ◆ 20ミリ秒毎に切り換える
 - ❖ (CERN/PSは1980年代から
1.2秒毎にビームを切り換え)
- ◆ 2019年5月から運用
 - ❖ 仮想加速器という言葉は
計算機上のシミュレーション
による加速器に使われること
もある



4 + 1 蓄積リングへの同時トッパップ入射

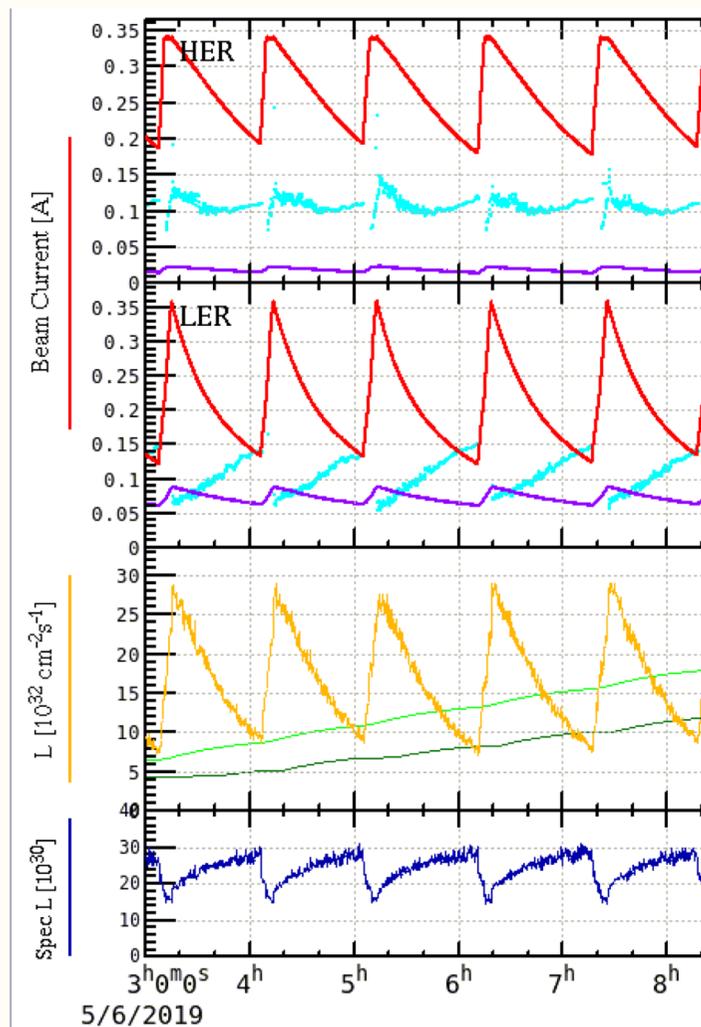
◆ 昨年 5 月より予定通り運用

- ✧ SuperKEKB HER 7 GeV e⁻
- ✧ SuperKEKB DR and LER 4 GeV e⁺
- ✧ Photon Factory 2.5 GeV e⁻
- ✧ PF-AR 5.0 / 6.5 GeV e⁻
- ❖ 4 種類のビームを 20 ミリ秒のパルス毎に切り換え
- ✧ 200 以上のパルス装置の動作を変更
- ❖ Belle II における入射バックグラウンドの試験も成功
- ❖ 各蓄積リングの電流の平滑化を達成



SuperKEKB 同時トップアップ入射の効果

❖ 積分ルミノシティの向上 (好調時の一例)

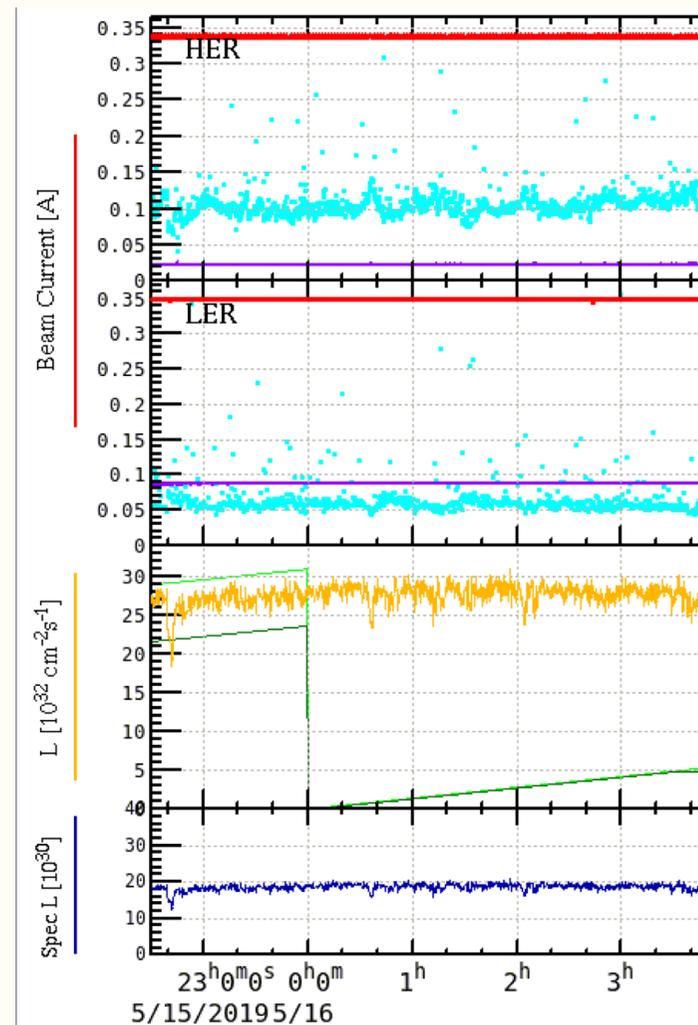


17.54 /pb in 5.15 hr
(5 fills)
on May.6



41.64 /pb in 5.15 hr
(top-up)
on May.16

237%
の性能向上



❖ 今年 6 月の世界最高ルミノシティの達成にも貢献

まとめ

- ◆ 素粒子物理実験と放射光科学実験の双方を、自由度を失わずに一つの入射器で運用する設計を行った
- ◆ 広域高速同期イベント制御によって多数のパルス動作する装置を統合した上で、仮想加速器概念により効率的な複数の実験の実現に成功した



Conference papers: <http://www-linac.kek.jp/linac/>

同時入射関係の情報: <http://www-linac.kek.jp/cont/epics/event/>

