

Event Timing Systemによる SuperKEKB入射制御

梶裕志^A、岩崎昌子^A、岡崎知博^B、菊谷英司^A、草野史郎^C、
工藤拓弥^C、小林鉄也^A、末武聖明^A、飛山真理^A、中村達郎^A、
古川和朗^A、宮原房史^A

^A高エネルギー加速器研究機構

^B東日本技術研究所

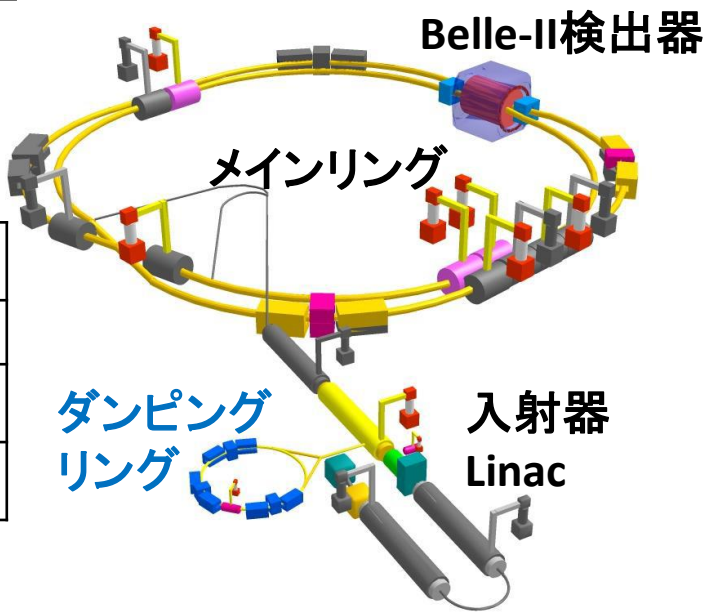
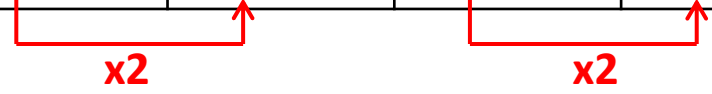
^C三菱電機システムサービス

SuperKEKB

KEKBの後継プロジェクト

- 2015年運転開始
- ルミノシティ: KEBK到達値 × 40倍 ($8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

	電子ビーム		陽電子ビーム	
	KEKB	SuperKEKB	KEKB	SuperKEKB
エネルギー	8 GeV	7 GeV	3.5 GeV	4 GeV
蓄積電流	1.64 A	3.6 A	1.19 A	2.6 A



Linac入射制御への要求

今まで以上に効率的な入射
(素早い電荷の積み上げが重要)

- メインリング (MR) の蓄積電流を2倍
- トップアップ運転により最大電流を維持
MRビーム寿命: 5分

しかし今までよりも複雑な入射制御

- 陽電子入射にダンピングリング (DR) を使用
- トップアップ入射 3リング ⇒ 4リング

「Main Trigger Station」が入射制御



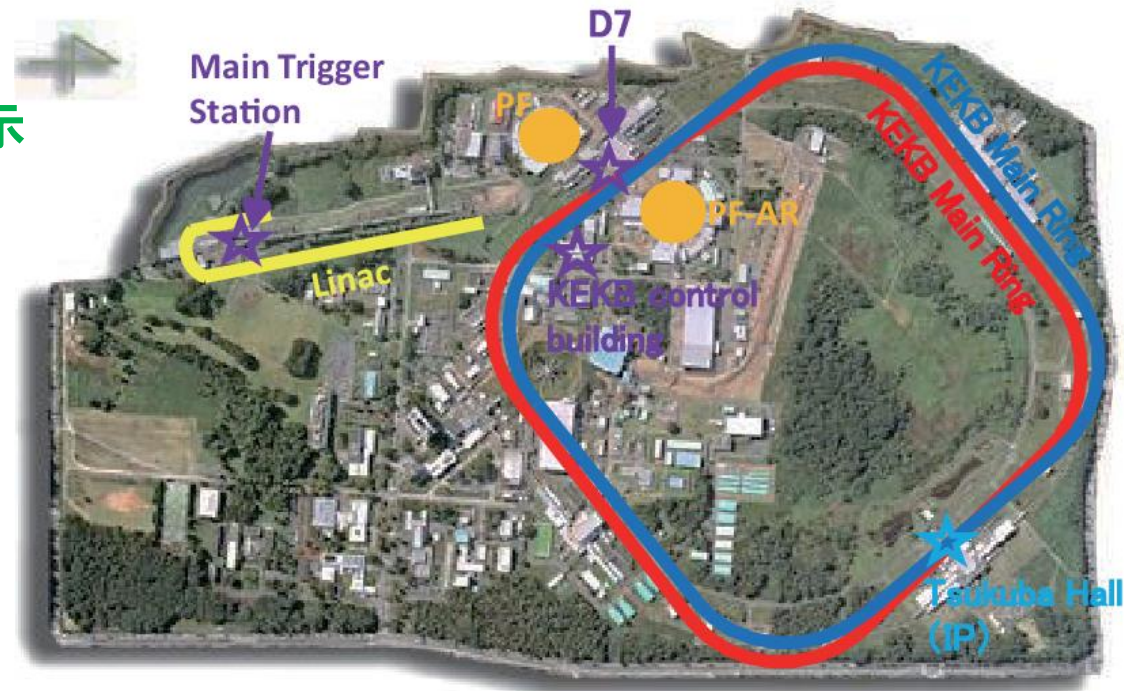
SuperKEKBの為に改良

入射リング選択制御

電子・陽電子MRs, PF, PF-ARの4リングから入射先を決定



Main Trigger Stationは
入射リング毎に異なる動作を指示



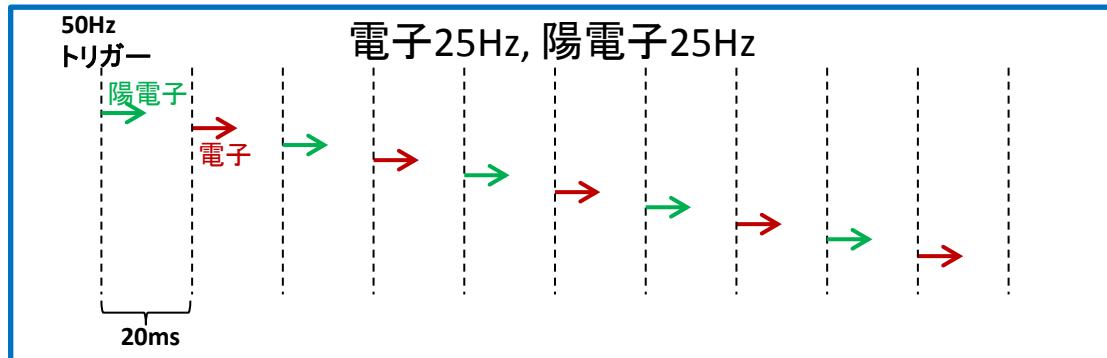
4リング同時にトップアップ運転 ⇒ 50Hzごとに入射リングを変更
入射器パラメータのうち150以上を50Hzで変更

SuperKEKBの入射リング選択制御

陽電子入射のDR使用がMain Trigger Stationの入射リング選択制御を複雑化・長時間化

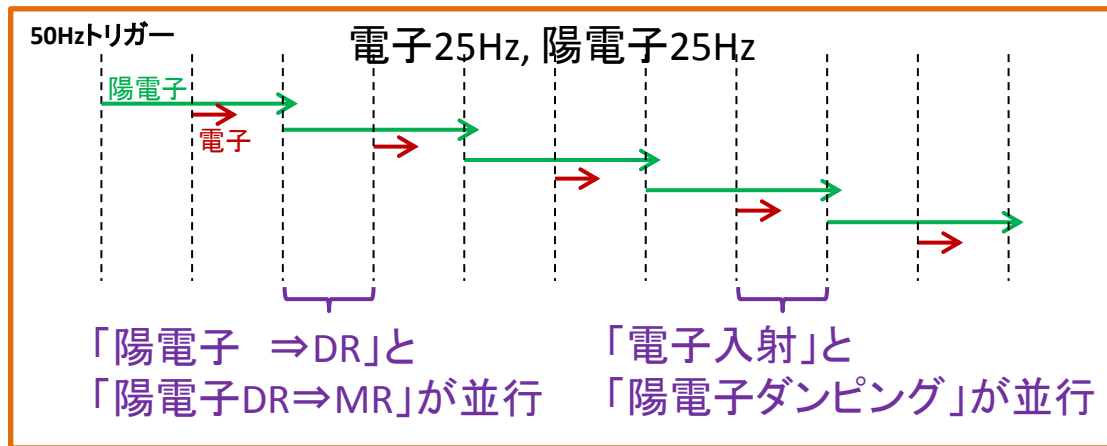
KEKB

入射過程は20ms毎に完了

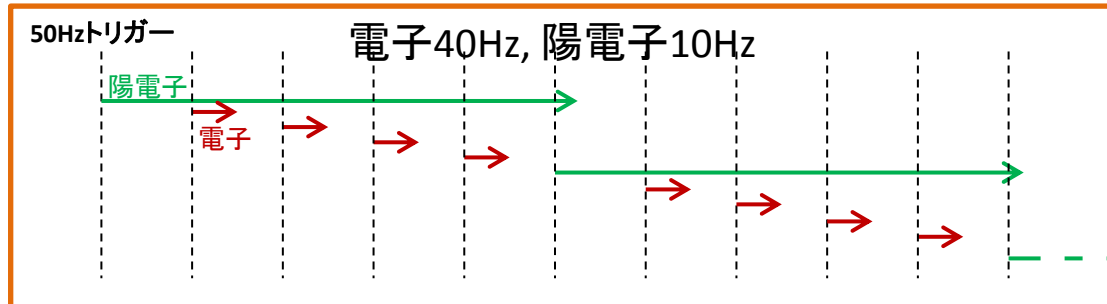


SuperKEKB

入射過程は20msで完了せず
陽電子は少なくとも40ms間ダンピング
複数の入射過程が並行する場合がある。



陽電子のDR蓄積時間は
入射頻度により変化



メインリング入射バケット選択制御

電子・陽電子MRsでは5120あるRFバケットのうち
任意のバケットを入射パルスごとに選択

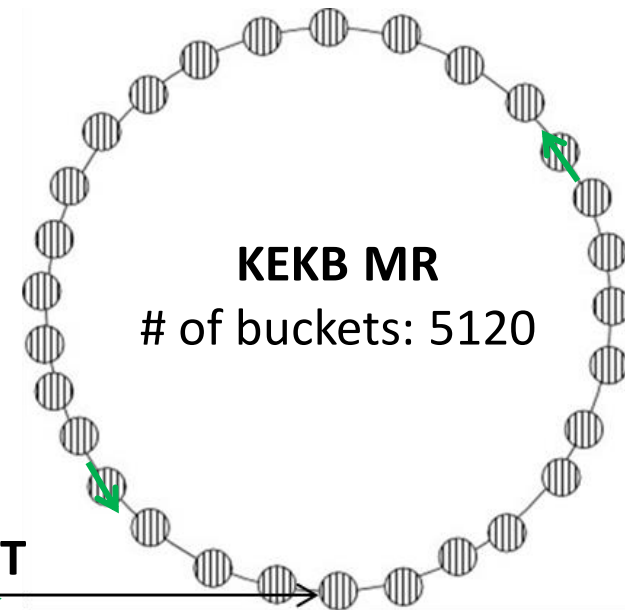
入射機会は、

Linac・MRのRFの位相が揃うとき ⇒ 96ns毎

493 μ s周期

= 96ns × 5120 (MRバケット数)

で、すべてのバケットに1度ずつ入射機会が訪れる



50Hzの入射パルスは、より短い時間の中で

⇒ 「周期493 μ s (実際はrevolution/49)」の基準信号に同期

⇒ 基準信号と実際の入射の間に**任意の遅延時間(ただし96nsステップ)**

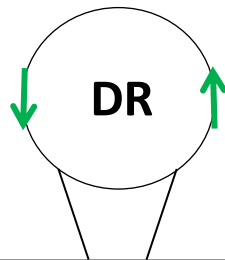
SuperKEKB入射バケット選択制御

SuperKEKB陽電子入射では、

- 前述の遅延時間で出射するDRバケット選択も必要
- ただし「DRとMRの組み合わせ」は全部で23通り
- 493 μ s毎に組み合わせは変化

of buckets: 230

入出射機会: 96ns毎

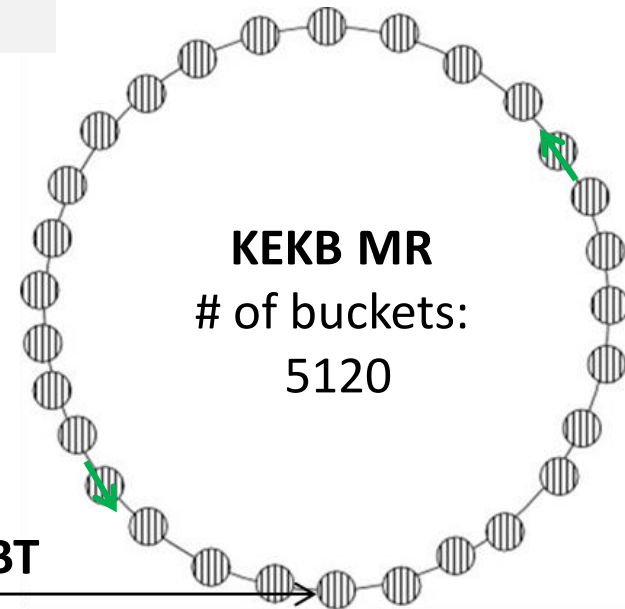


Linac/BT

KEKB MR

of buckets:

5120



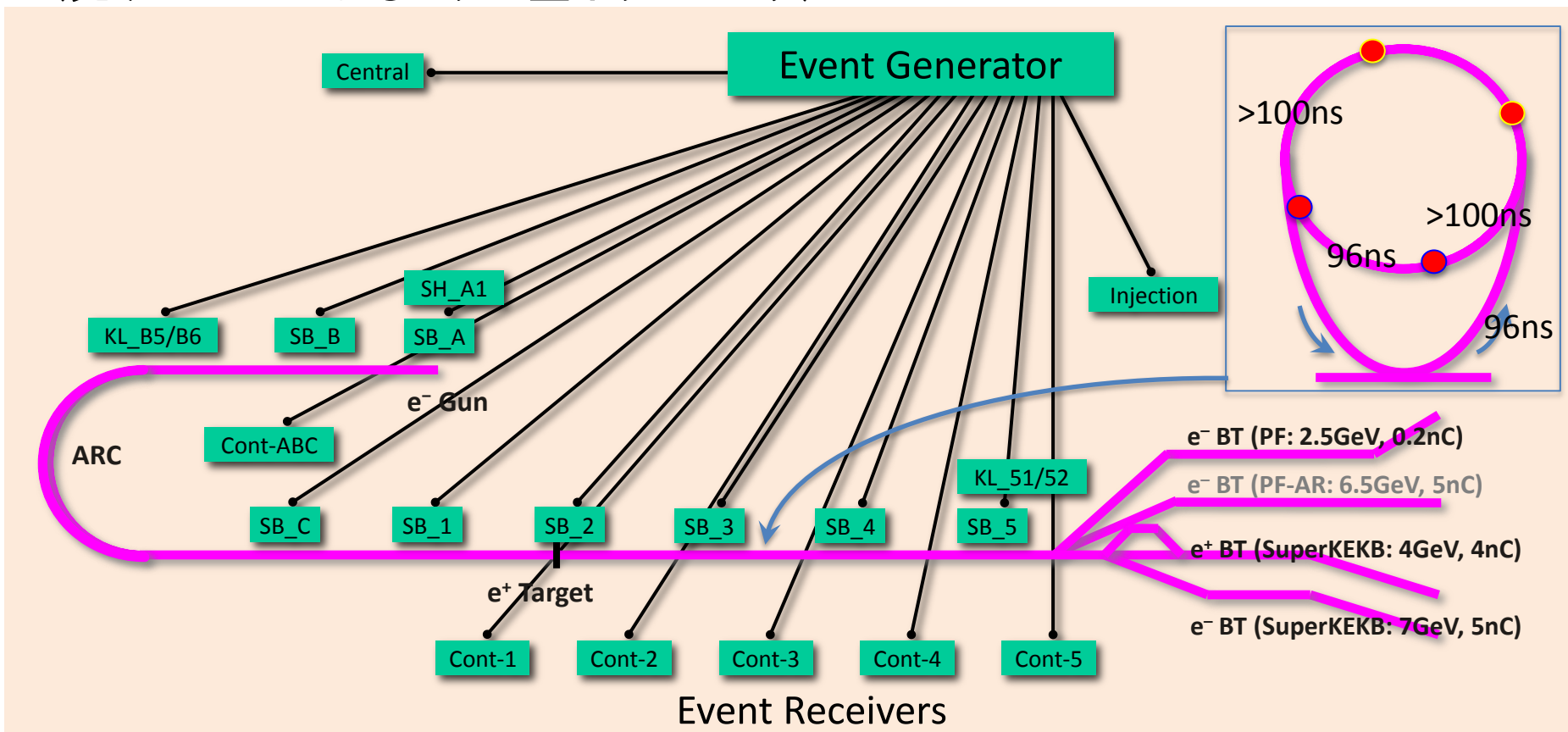
遅延時間のみでMR/DRバケット両方を選択するならば、
 基準信号の周期: **11.34ms** ← 「50Hzと常に同期」はやや難しい
 = 96ns × 5120(MRバケット数) × 23(DR-MR組み合わせ)

**SuperKEKBは
これで運転開始**

(Linac RFの位相変調で、「96ns毎」の制約を無くすこともできる ⇒ アップグレード予定)

Event Timing SystemによるLinac制御

Main Trigger StationにあるEvent GeneratorとLinac各所のEvent Receiverを接続
(光ケーブルによるスター型ネットワーク)



GeneratorがReceiverに対し20ms毎に以下2種類の制御を実行

- 動作タイミングのトリガーを送信
- CPU割り込み ⇒ 次入射の動作パラメータをセット

Event Timing Systemモジュール

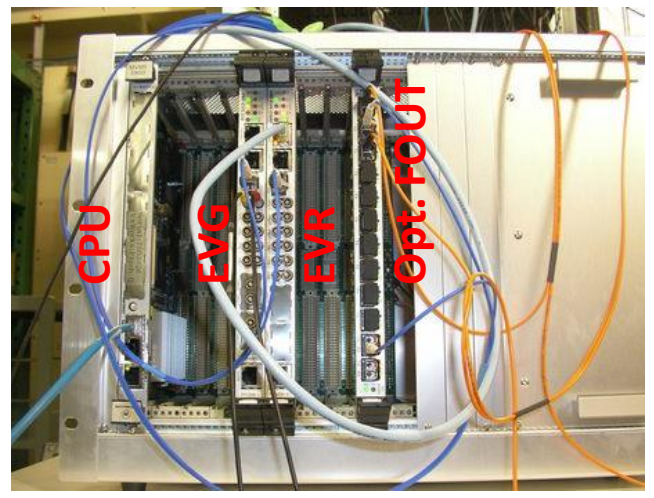
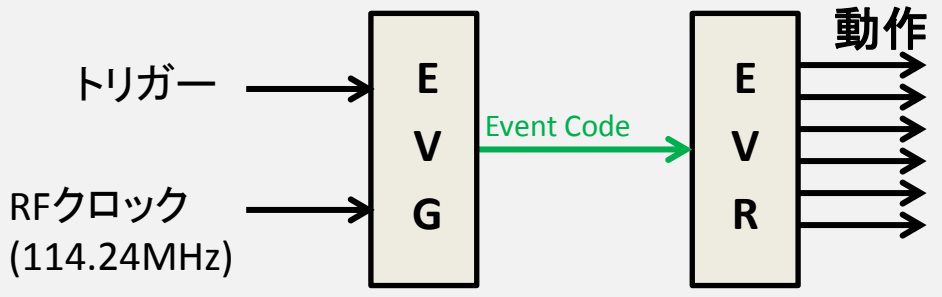
LinacではMRF社製
VMEモジュールを使用

Event Generator (EVG)
Event Receiver (EVR)

VME-MRF-230
VME-MRF-230RF

EVG: Event Codeと呼ばれる1byte dataを送信し、EVRを制御
入力RFに同期し、常時、Event Code #0 を送信
入力トリガーにより #1-#255を送信

EVR: Event Code #1-#255を受信すると動作



	EVG	EVR
内部クロック	入力RFクロックと同期	Event Codeが位相ロック
トリガー	入力TTL	Event Code
動作	Event Code送信 最大2048個まで発信可能	NIM/TTL信号の発信, CPU割り込み
遅延時間	入力トリガーからの 遅延時間を設定可能	受信Event Codeからの 遅延時間を設定可能

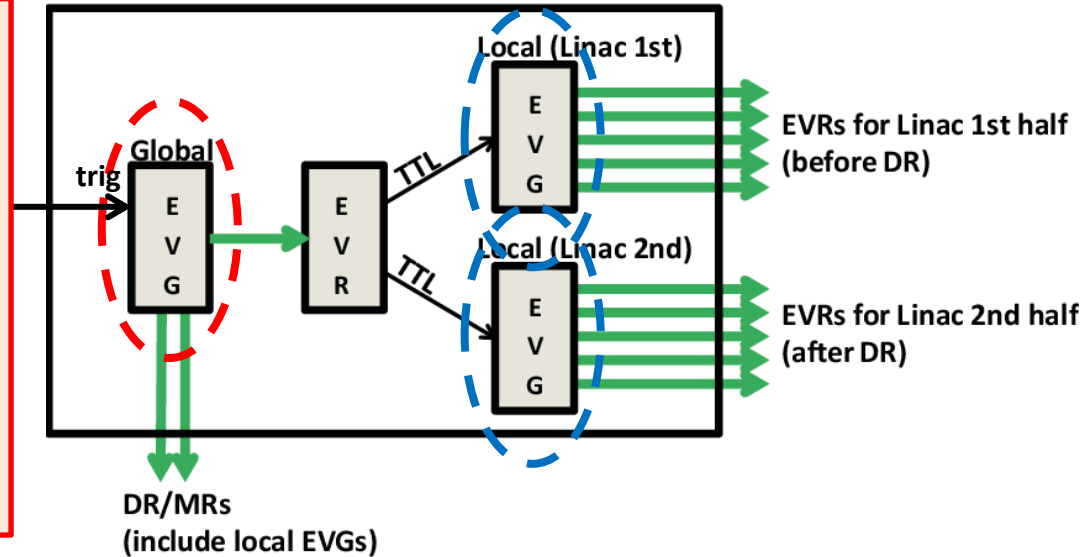
Main Trigger Stationデザイン

3台のEVGを同じVMEバス上に設置、直列に接続、1つのCPUで管理
(すべてのEVGは114.24MHz RFクロック同期)

上位EVGは1回のトリガーで2秒程度の
入射分のEvent Codeを送信
(20ms間隔で100個程度送信)

11.34ms基準信号同期の入力トリガー
⇒ 送信した全てのEvent Codeと
11.34ms周期信号の関係がわかる
(Event Timing Systemの精度で理解)
⇒ その関係性を下位EVGが使用

Main Trigger Station



下位のEVGは20ms毎に動作し、
上位からのトリガー信号に入射バケット選択用の遅延時間を足す。
CPUは上位からの信号と11.34ms周期倍数とEvent Codeタイミングの関係を知っているため、
その差分を考慮して遅延時間を足し、Event Codeを生成
2つのEVGは並列でそれぞれLinac前後半を制御

送信トリガーへの要求されるタイミング精度は $\mathcal{O}(100)$ ps

このEVG2段のセットアップでは?

上位EVGに対し2秒の遅延時間を与えた時の精度は?

動作試験によりこれを調査

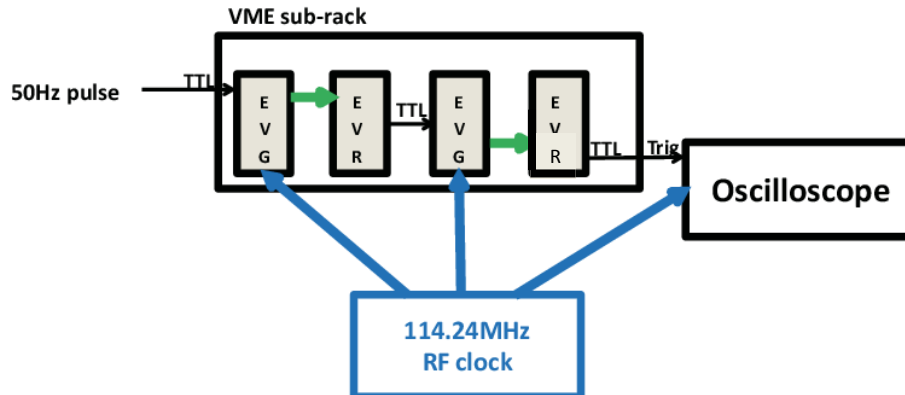
試験セットアップ

新Main Trigger StationのEvent Timing Systemセットアップを再現し、動作試験を実施
 (一番下位のEVRは本来は隔離された場所に設置される)

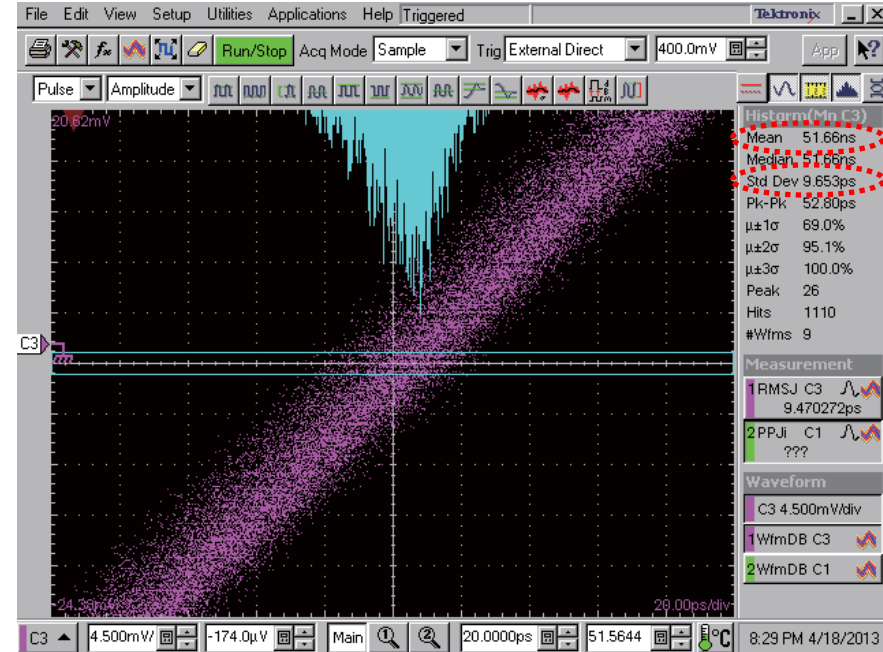
オシロスコープで

- Event Timing Systemの出力をトリガーとして
- RFクロックの位相0度の時間を測定

等価時間サンプリング機能で<1psの測定精度



CPU:	MVME5500
EPICS version:	3.14.9
MRF device driver:	mrfioc
	http://www-linac2.kek.jp/cont/atf/mrfioc_atf.tar.gz
EVG firmware:	E403
EVR firmware:	D507
RF clock:	114MHz (8.8ns step)
Trigger:	50Hz, TTL

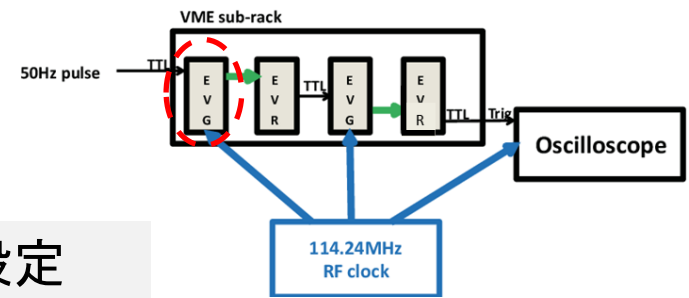


1000事象測定し、

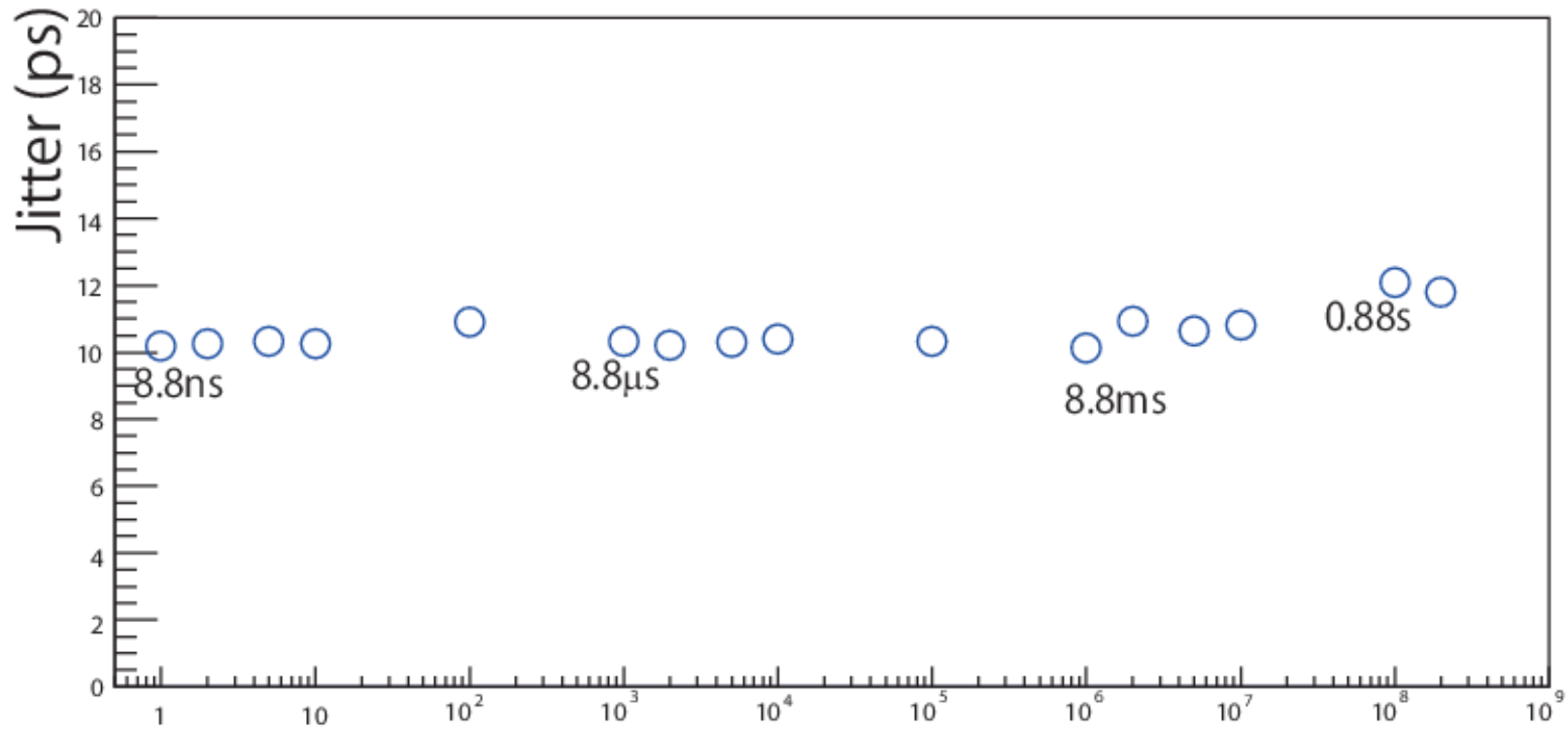
{ 平均値 ⇒ タイミング
 標準偏差 ⇒ その不定性

とした。

測定結果



上位EVGのトリガーからの遅延時間を0-2秒まで設定
その時のタイミング不定性を測定
(測定中、下位EVGの遅延時間は8.8nsに固定した)

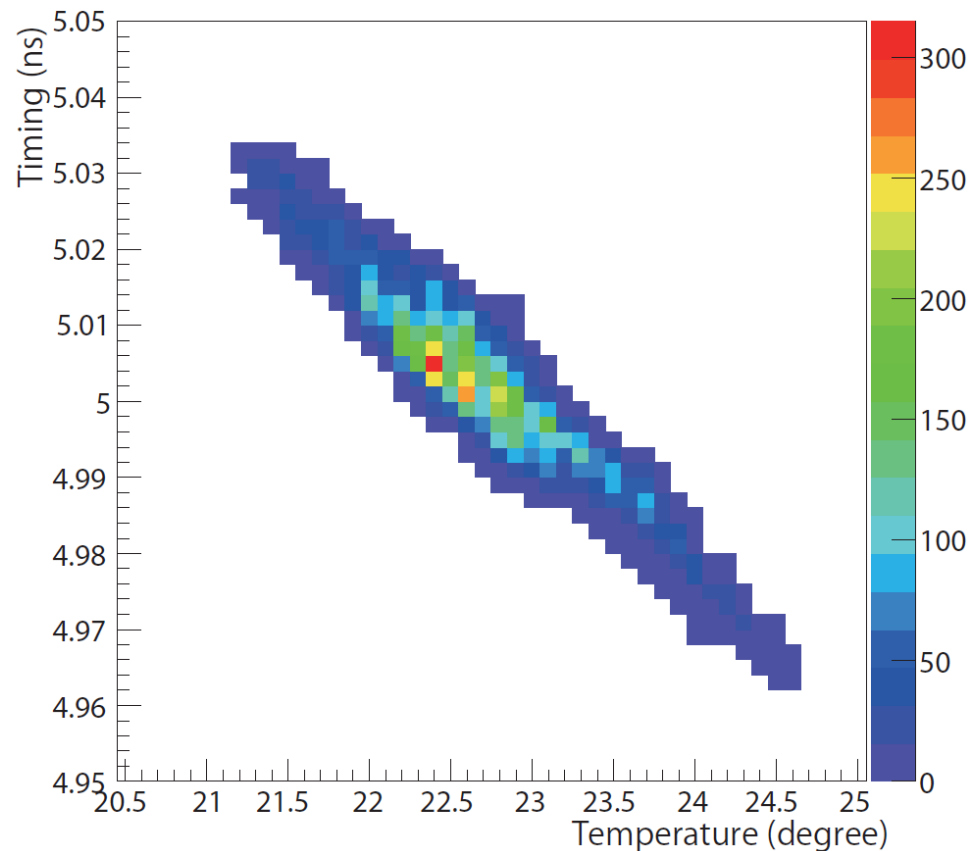
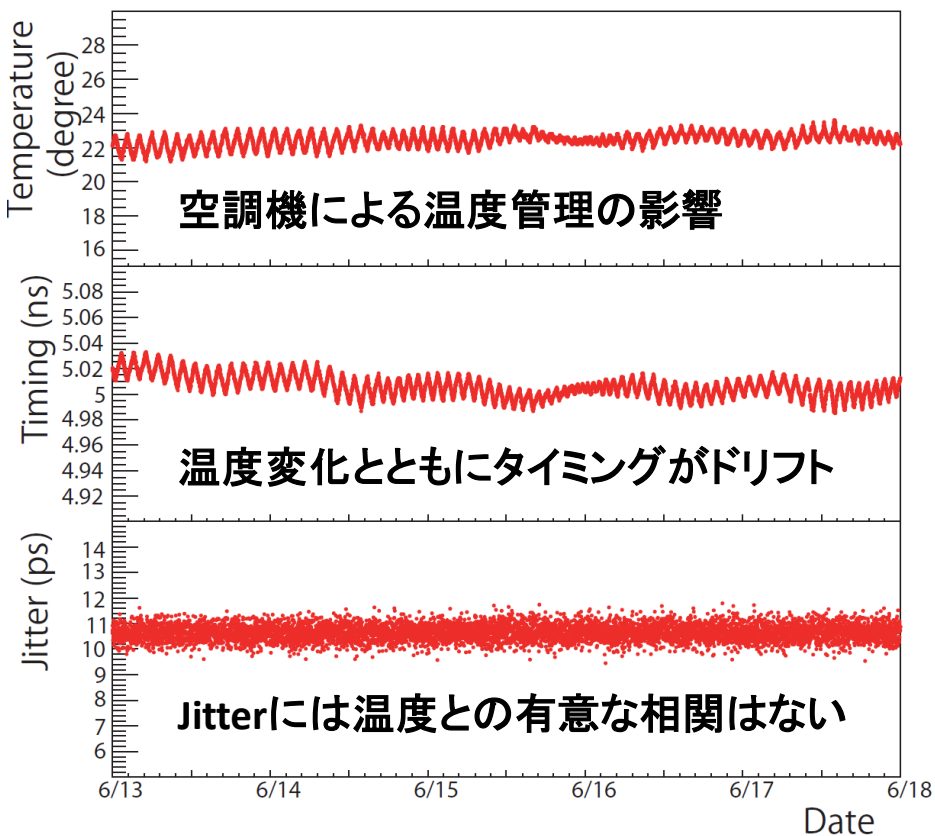


上位EVGの遅延時間 (clock, 8.8ns単位)

タイミングの不定性 (jitter) は上位EVGの遅延時間に依存せず10ps程度

長期安定性試験

2013年6月13日から5日間、連続的に動作試験を実施
 1分毎に測定し平均値と標準偏差を記録
 同時にモジュール付近の温度も温度センサーで記録



温度変化によりタイミングに18ps/°Cドリフトがあることを確認

光ケーブル転送

「Main Trigger Station – KEKB制御棟」間でもEvent Codeを転送
転送距離が1kmあり、転送時間の不定性(特に温度によるタイミングドリフト)が
無視できない。

⇒ 本番で使用する光ケーブルで転送時間のドリフトを測定

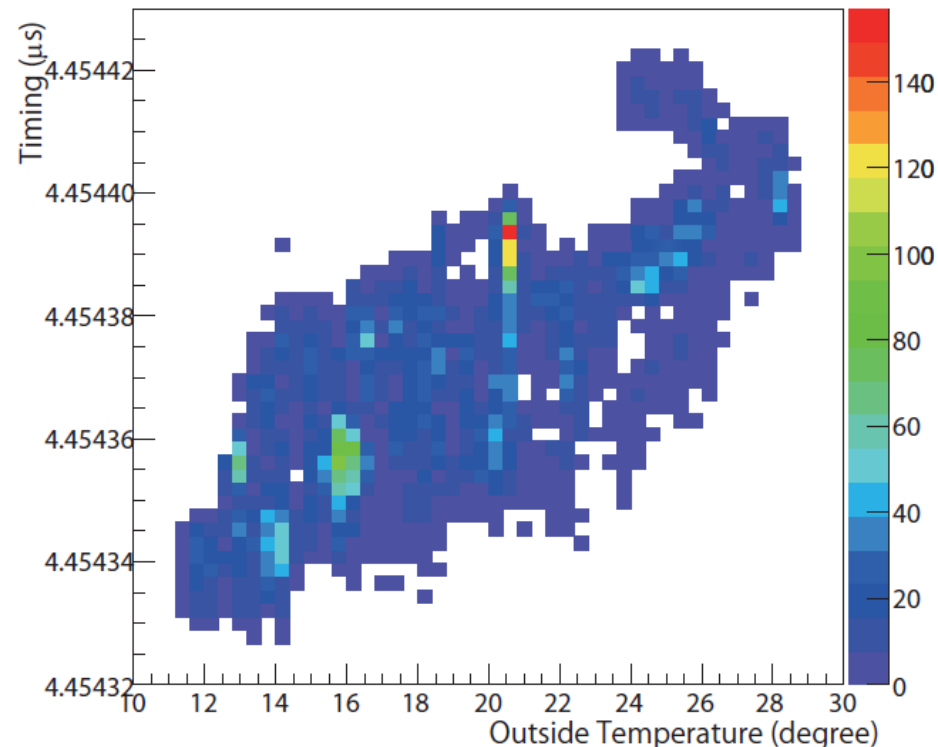
8芯シングルモードケーブルで、
光信号を1-4往復させ、転送時間を測定

外気温も同時にモニター

ただし今回はE/O, O/Eモジュールにより測定
Event Timing Systemによる測定は今後予定

	Transmission time (μs)	Jitter (ps)
1 往復	8.9	62
2 往復	17.7	96
3 往復	26.5	106
4 往復	35.3	233

Main Trigger Station – KEKB制御棟間の
転送時間は $4.5\mu\text{s}$



外気温の変化により $3\text{ps}/^\circ\text{C}$ のタイミングドリフトを確認

まとめ

SuperKEKBは、ルミノシティを「KEKB到達値の40倍」に増強するプロジェクト

- 入射器は蓄積電流を2倍にし、トップアップ運転で維持
効率良い入射 ⇒ 入射制御はますます重要
- 陽電子入射でDRを使用するため**入射制御は複雑化・長時間化**

DRを用いた入射制御を実現するため、新しいMain Trigger Stationをデザイン

- **Event Timing SystemのEVGを2段構成に変更**
- 上位EVGで2秒程度の入射スケジュール管理
- 下位EVGで「MR入射バケットを選択用の遅延時間」を生成

新Main Trigger Stationで使用するEvent Timing System構成には、以下の不定性が考えられるが、 $\mathcal{O}(100)$ psという要求時間精度を実現できる

- 新しいEvent Timing System構成の生成する**タイミングの精度は ~ 10 ps**
- このモジュールには **$18\text{ps}/^\circ\text{C}$ の温度変化によるタイミングドリフト**を確認
空調管理により付近温度を $\pm 1^\circ\text{C}$ に管理することが可能
- 光ケーブル転送の温度変化による転送時間ドリフト $3\text{ps}/^\circ\text{C}$
外気温が昼夜で 20°C 変化するとしても 60ps の変化