

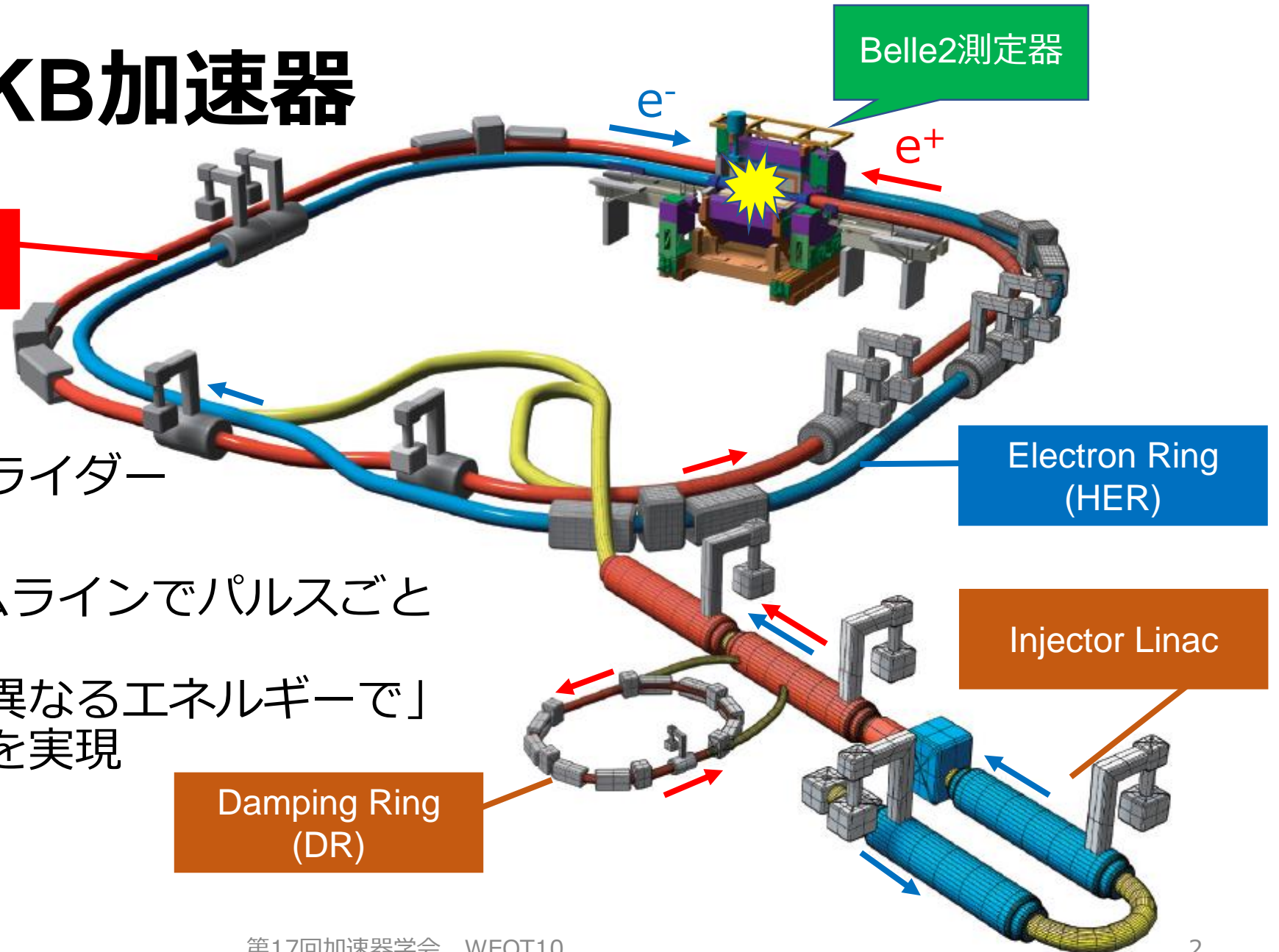
SuperKEKBにおける RF位相変調を用いたバケットセレクション

杉村仁志^A, 梶裕志^A, 小林鉄也^A, 佐藤政則^A, 松本利広^A, 三浦孝子^A, 宮原房史^A

DiWang^B, 草野史郎^C, 工藤拓弥^C, 飯塚祐一^D

KEK 加速器^A, 総研大^B, 三菱SC^C, 東日本技研^D

SuperKEKB加速器

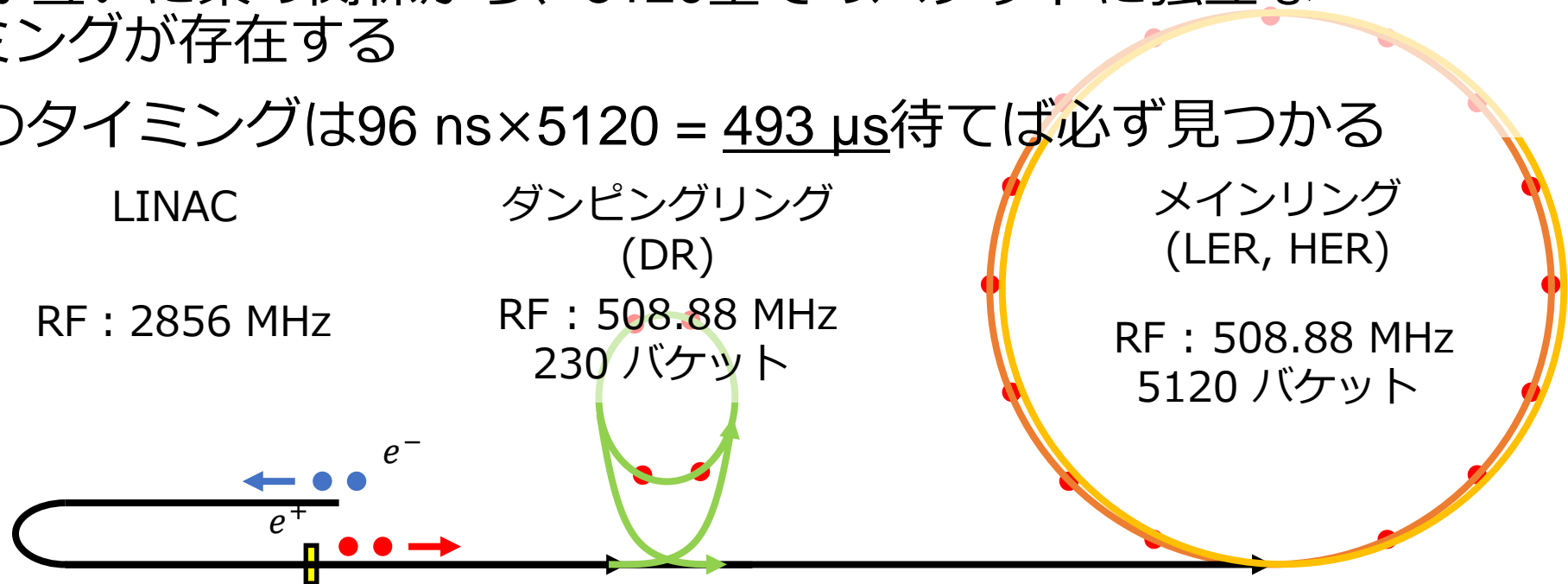


特徴

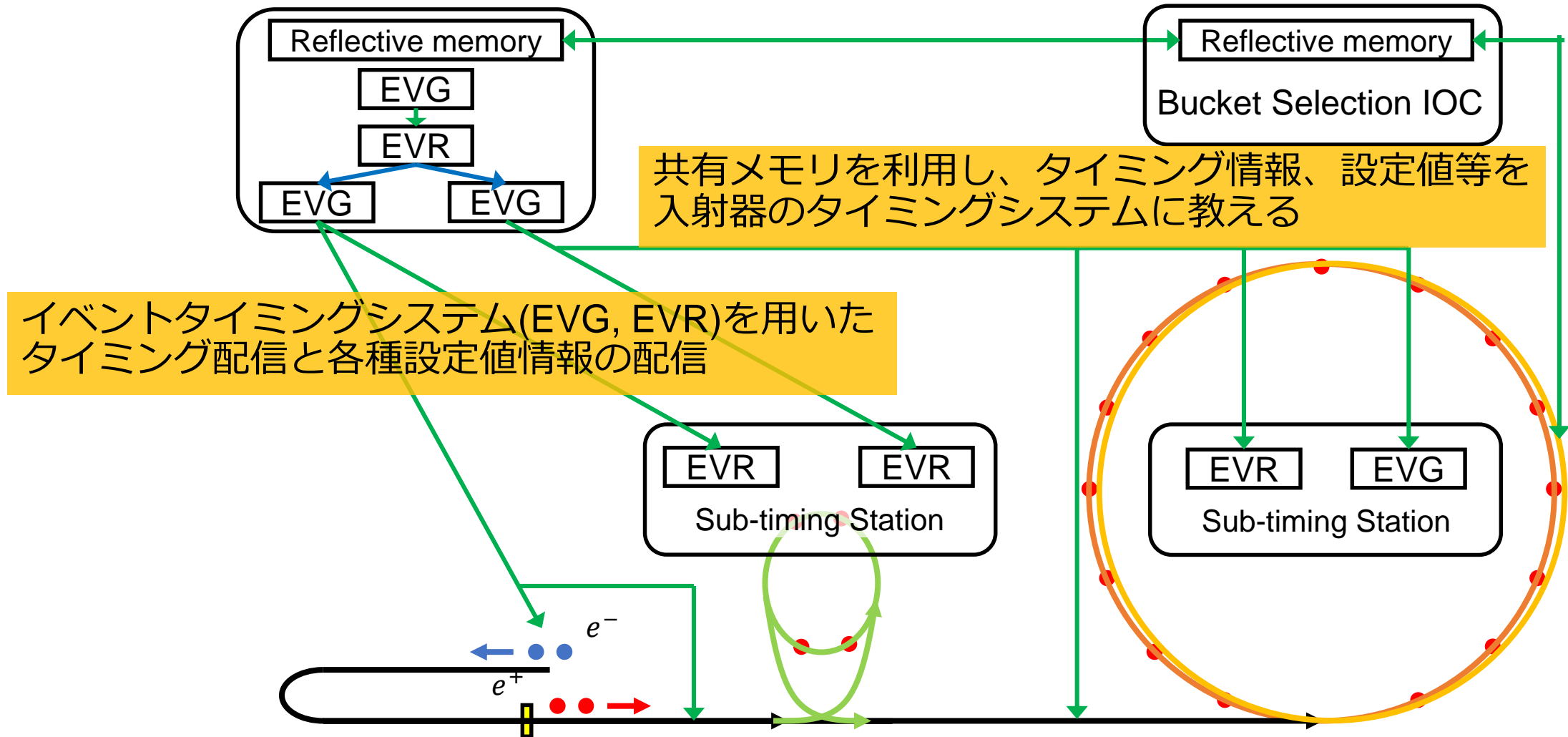
- 電子陽電子非対称コライダー
- 入射器の1つのビームラインでパルスごとに切り替えながら「異種の粒子を」「異なるエネルギーで」「複数のリングへ」を実現

バケットセレクション

- リング内のRFバケットの中から入射を行うバケットを選択し、対応する入射タイミングを計算する
- LINACとリングの共通周波数は10.38 MHzであり、96 ns毎(49バケット毎)に入射タイミングが存在する
- 5120と49が互いに素の関係から、5120全てのバケットに独立な入射タイミングが存在する
- 5120通りのタイミングは $96 \text{ ns} \times 5120 = 493 \text{ } \mu\text{s}$ 待てば必ず見つかる



タイミングの配信

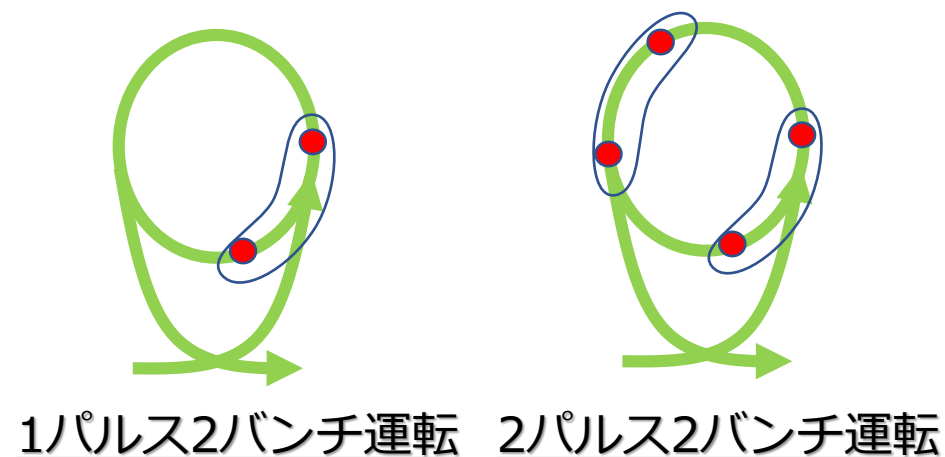
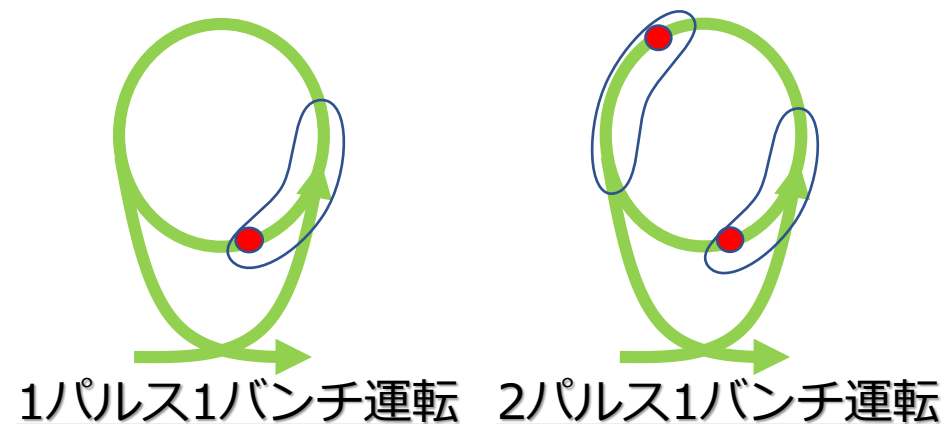


DRを含めたバケットセレクション

- DRの入射バケットも計算に含めると、5120と230の最小公倍数である117760通りのタイミング列が必要となる
 - 必ず入射できるタイミングを選ぶには最大で $117760 \times 96.3 \sim 11.3$ ms待つ必要がある
- 入射器ではクライストロン50 Hz運転を行っており、仕様上 (20 ± 2) ms 間隔での動作制約がある
- この制約により、以下のような運転方法を利用している
 - LERの入射バケットを選択する。
この時、DRに入射可能なバケットは11.3 msの中に23通り存在する
 - 23通りの中から2 ms以内にあるタイミングを選択する
 - DRの入射バケットを自由に選べるならば493 μ sの待ち時間で決定可能
 - DR入射時に出射タイミングがあらかじめ決める(蓄積時間に依存)
 - DR 1パルス運転の場合はこの方法でうまくいく(入射頻度25 Hzまで)
- 入射頻度を50 Hzに上げると2パルス運転に切り替える必要がある

ダンピングリングの 1, 2パルス運転と1, 2バンチ運転

- **1パルス**：クライストロン1発の出力で加速する
"まとまり"に相当
- **2バンチ**：1発で2つのバンチを加速
 - バンチ間隔は96 ns
- 2020年6月までの運転では主に1パルス1バンチ
を利用(たまに1パルス2バンチも行った)



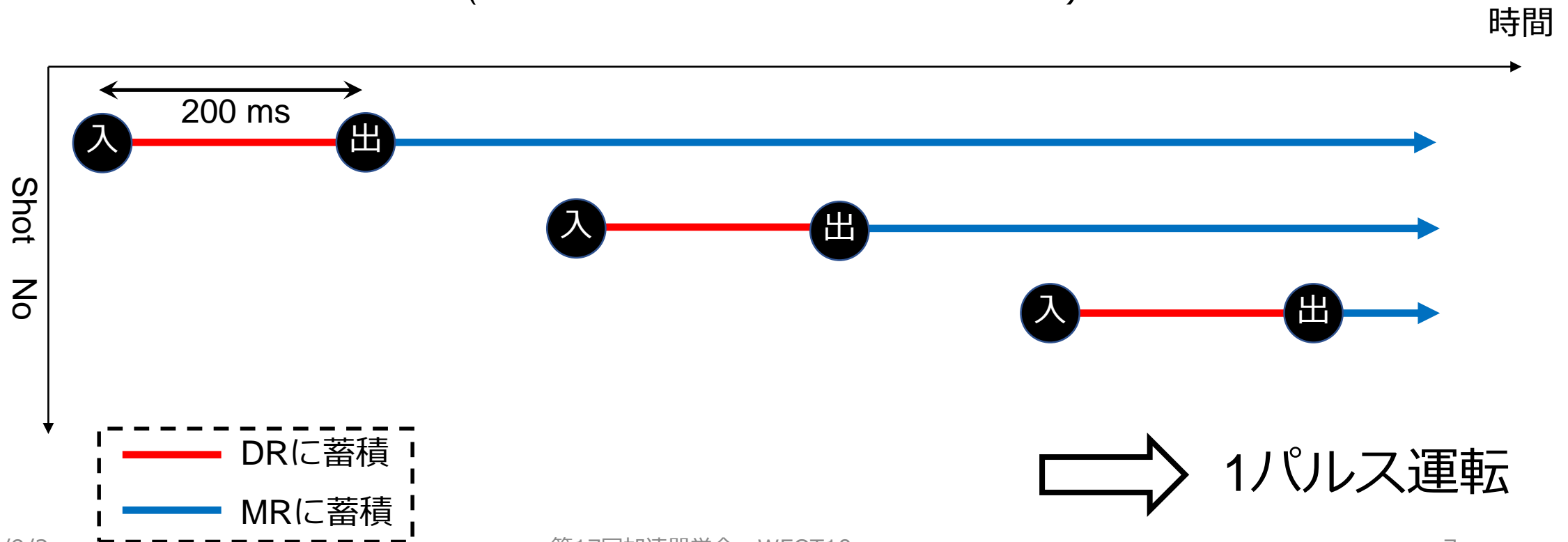
- 1パルス運転の場合、蓄積パルスを出射してから
次のパルスを入射するため、全てのバケット(230)に
入射が可能
- 2パルス運転の場合、蓄積パルスのうち1パルスは
蓄積されたまま、次のパルスを入れるため、
入射可能なバケットには制限がかかる。

陽電子入射パルス頻度に応じた DR入射出射制御①

DRの蓄積時間は最大200 ms、最小40 msとしている

<5 Hzの場合

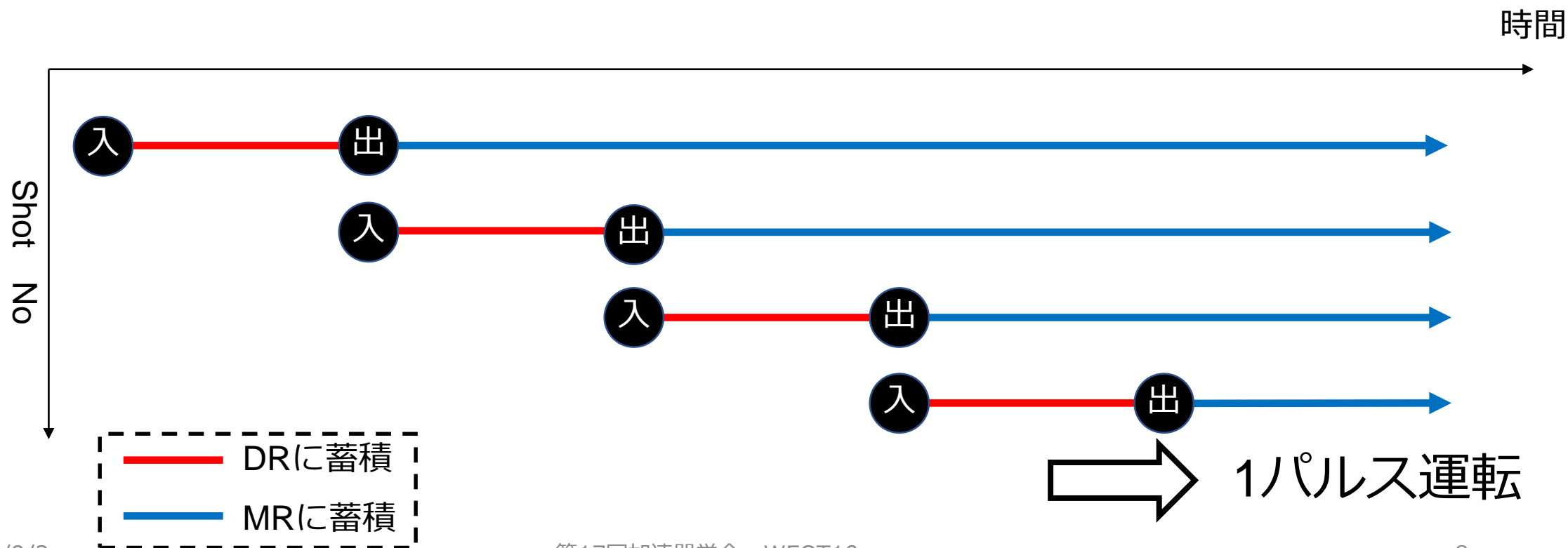
- 入射、出射が独立に行われる。(#n を入射し、200 ms後に #n を出射)



陽電子入射パルス頻度に応じた DR入射出射制御②

5~25Hzの場合

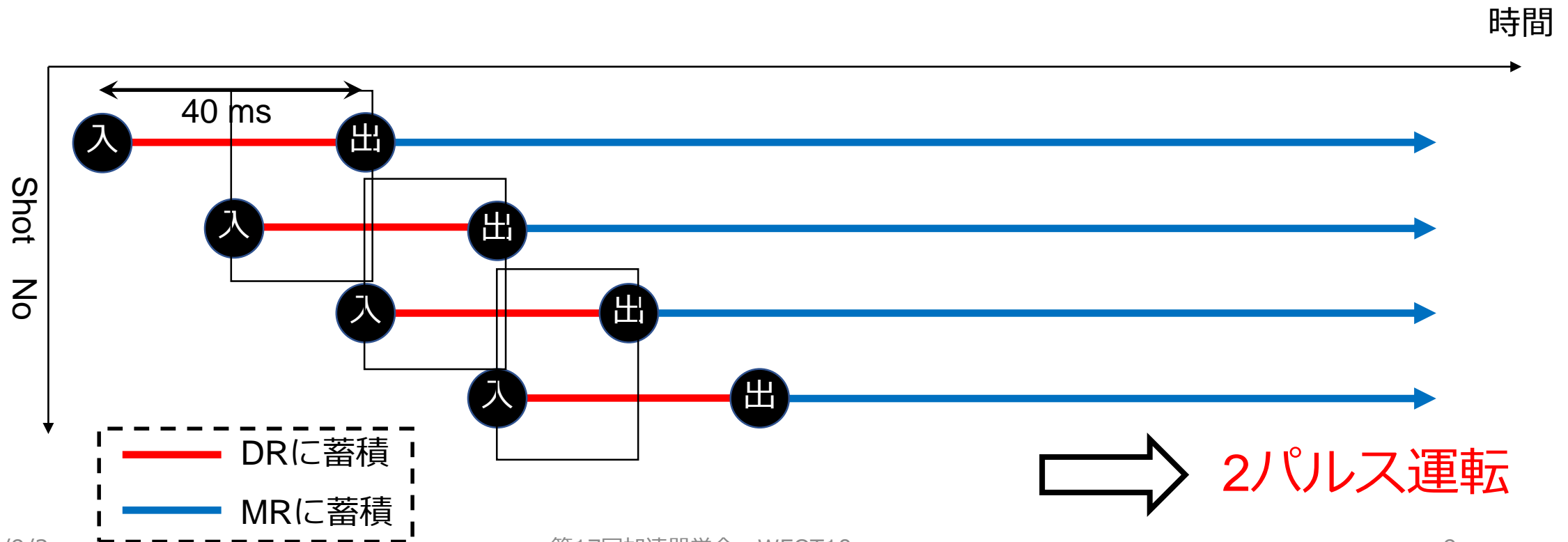
- 入射、出射が同一ショット内で行われる。
(#nを入射し、同時に#n-1を出射)



陽電子入射パルス頻度に応じた DR入射出射制御③

50Hzの場合

- 入射、出射が同一ショット内で行われる。
(#nを入射し、同時に#n-2を出射)



バケットセレクションのアップグレード

- ビーム入射頻度50 HzになるとDR 2パルス運転が必要となる
 - これまでは1パルス運転のみの運転実績
- 2パルス運転時にはDR入射可能なバケットが制限されるため、全ての組み合わせから遅延時間を決定させると最大で11 msの遅延時間が生じ、2 ms以内のタイミングが決定できない。

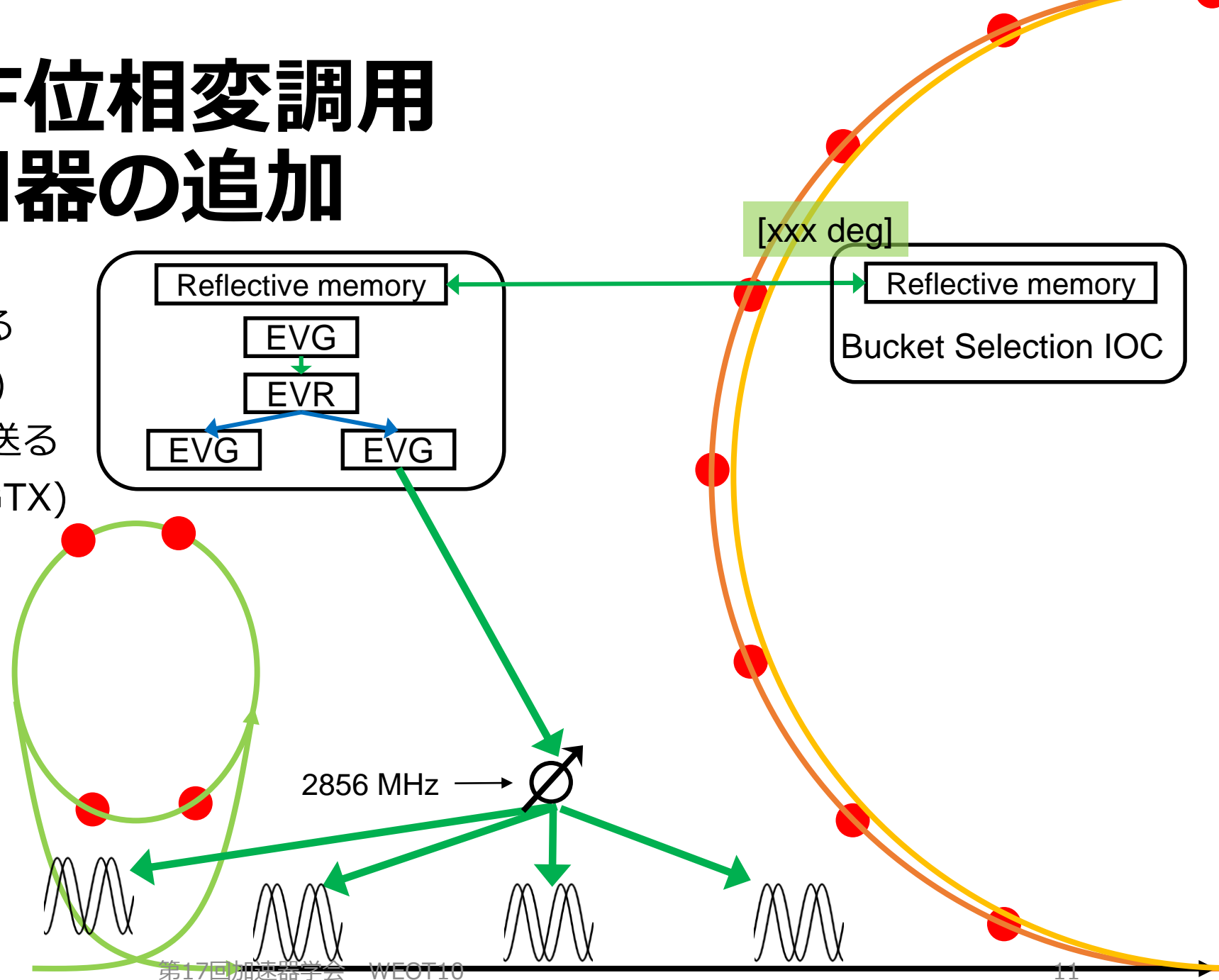


- ダンピングリング出射後のLinacのRF位相を**パルス毎**に変調させて、リングの位相と同期させることで、全ての組み合わせにおいて2 ms以内にタイミングを決定させる。

DR下流のRF位相変調用 Sバンド移相器の追加

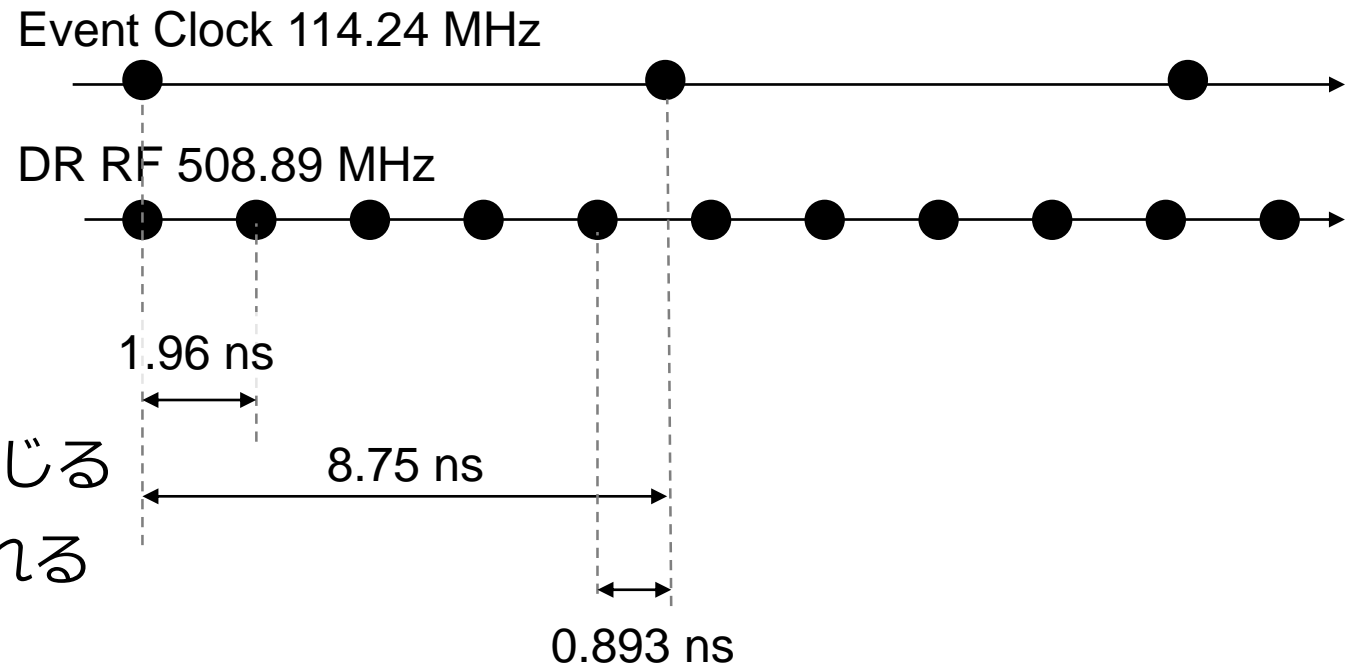
- バケットセレクションIOCで次のパルスの位相設定値を送る
(出射タイミングの10数ms前)
- 入射器EVGで設定値をEVRに送る
 - EVRは独自開発(FPGAのGTX)

THPP40 三浦孝子
「SuperKEKB入射器の
高周波基準信号位相制御系」



ビームとRFとのタイミングの関係

- タイミングは114.24MHzのEvent Clockを用いて生成される
- 位相変調を行わない場合、11 clockに1回同期する($10.385 \text{ MHz} \times 11 = 114.24 \text{ MHz}$)
- 位相変調を行うことで毎Event Clockで同期させることができる
- しかし、ビームとトリガーには時間差が生じる
 - 右図の場合、1 clock後には0.893 nsずれる
- ビームとトリガーのずれによる影響を調べる必要がある

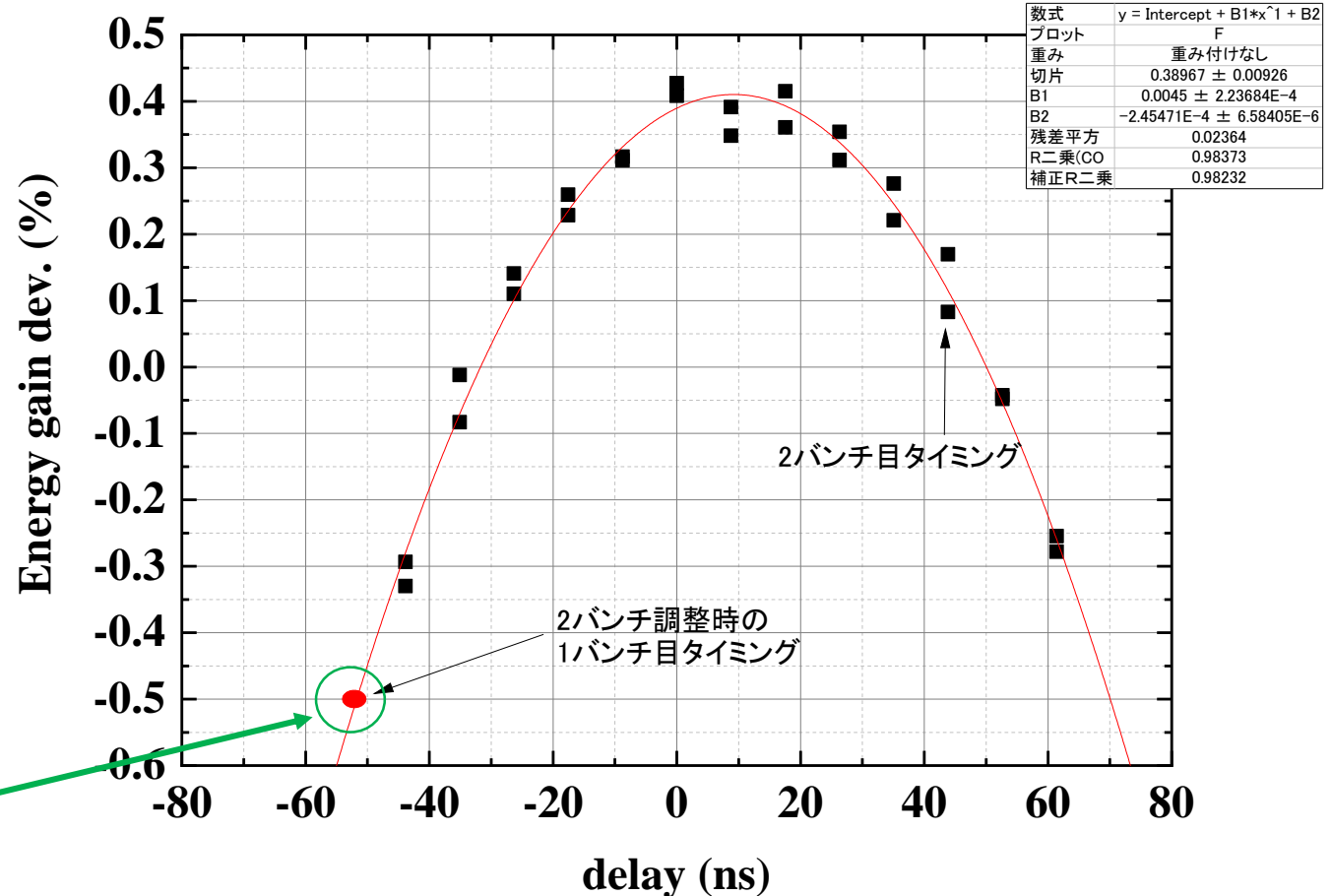


タイミングのずれによるエネルギー変化

過去の測定結果より考察

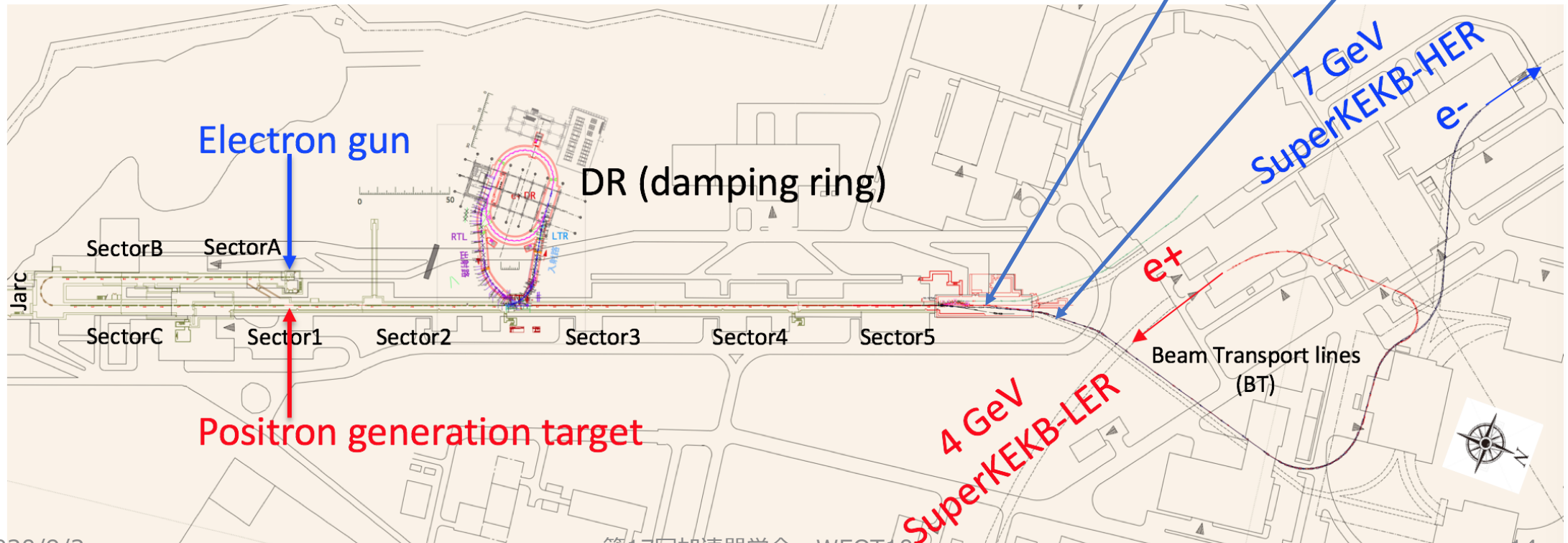
- タイミングのずれの影響として、SLED反転タイミングのずれによるエネルギーゲインの変化が生じる。
- エネルギー圧縮により、ずれは最終的に1/3になる
- 過去の実績では、 $<0.025\%$ でメインリングに入射している
- 2バンチ運転も考慮しているため、ビームはSLEDの頂点ではなく、両肩に乗せるようにタイミングを決める

例えばこの付近では
0.023%/ns程度エネルギー
が変化



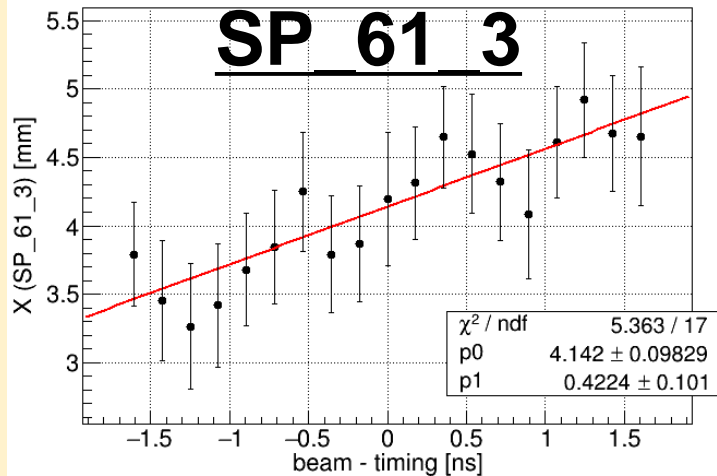
位相変調による影響の測定

- シケインの中心にあるBPM(SP_61_3)とエネルギー圧縮後のBTライン第0アークのBPM(QXF3P)で測定を行った
- $\eta_x(\text{SP_61_3}) = 1678$ [mm], $\eta_x(\text{QXF3P}) = 2832$ [mm]



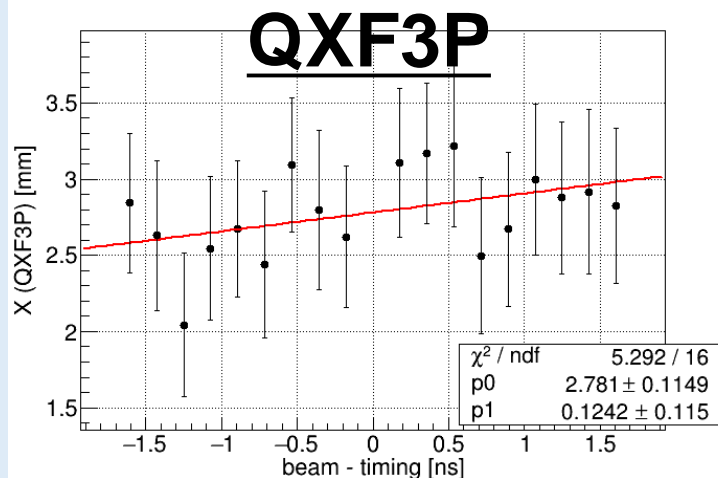
測定結果

➤ ビームとタイミングの時間差が1.6 nsまでの範囲で測定を行った



- $dx/dt = 0.4224 \text{ mm/ns}$
- $dE/dt = (dx/dt)/\eta_x = 0.025\%/ns$

0.025%/nsはp13での測定結果と一致している



- $dx/dt = 0.1242 \text{ mm/ns}$
- $dE/dt = (dx/dt)/\eta_x = 0.0044\%/ns$

1.6 nsのタイミングのずれは0.007%であり、入射エネルギーずれの要求値を満たしている

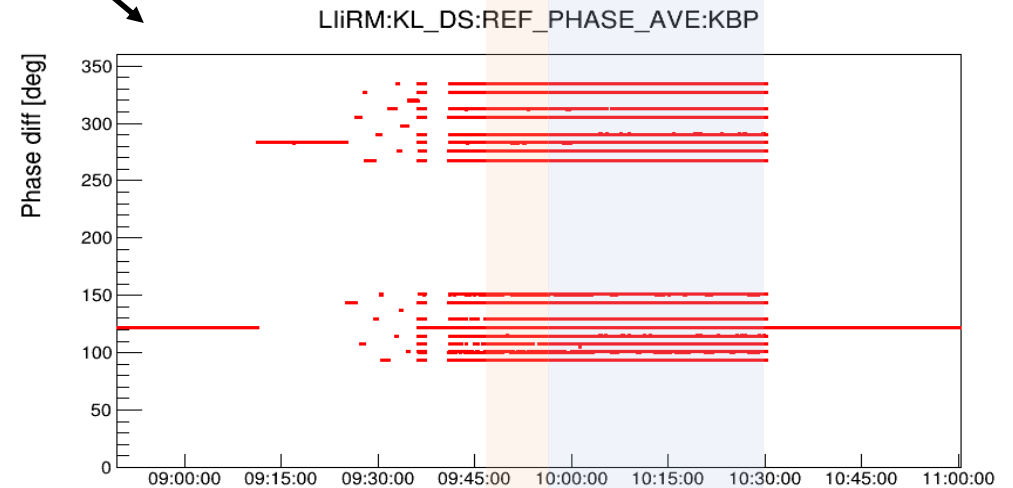
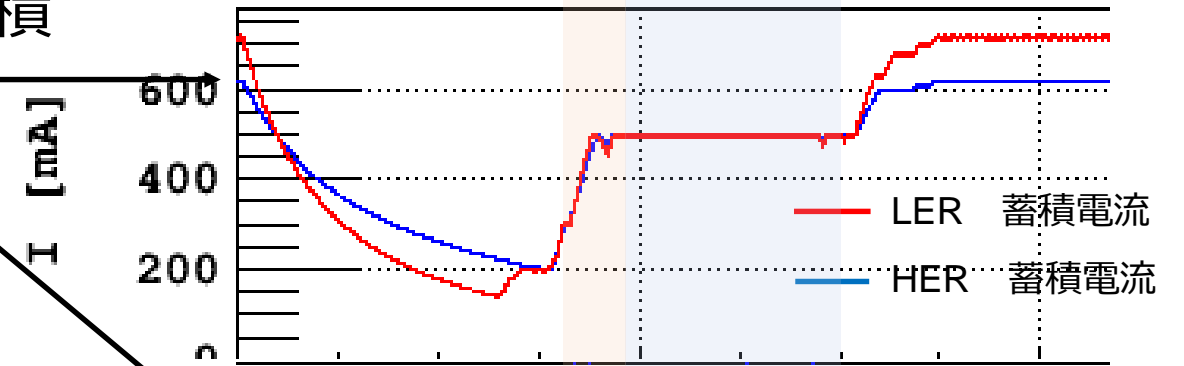
LER入射試験と入射効率の測定

LER 入射中

Belle II
Physics Run

2020.6.22
9:00 - 11:00

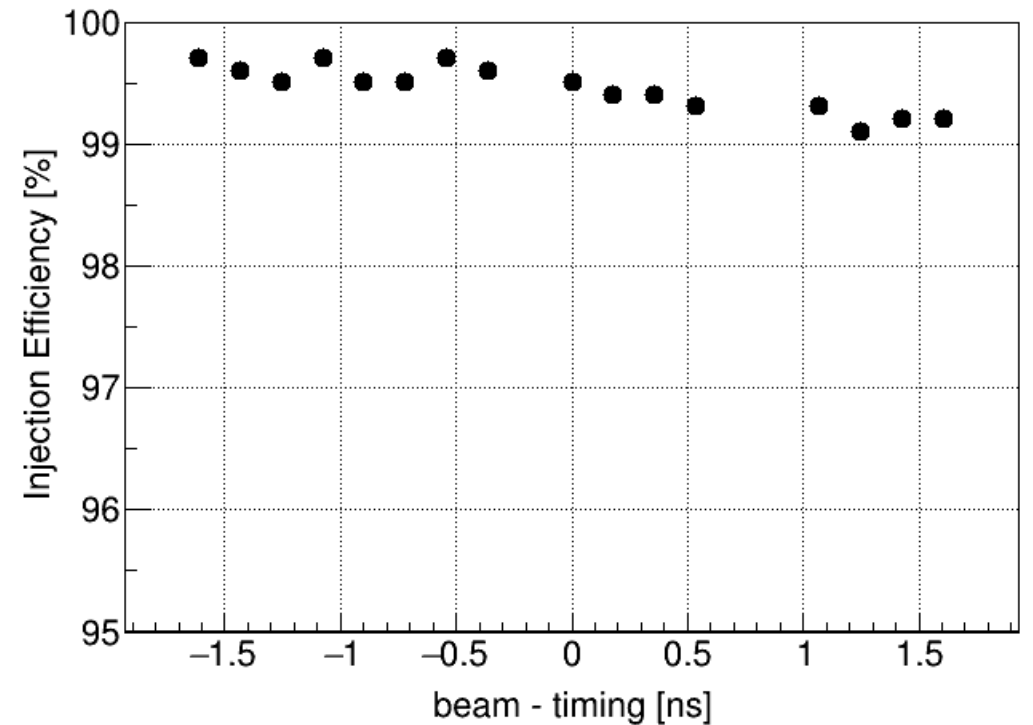
- LERにビームを200mAから500mAまで蓄積
 - 位相変調を用いてLERに入射が成功!
 - 位相がパルス毎に変化をしている
- 物理ランを500mAで実施
 - 通常運転にも利用できることを確認した



LER入射試験と入射効率の測定

- 入射バンチに対するバンチ電流の増分から入射効率を測定した
- ビームとトリガーの時間差によりエネルギーが変動し、それに応じて入射効率も変化している
- しかし、99%以上を保っており、**位相変調の影響はLER入射において十分無視できる**

ビームとトリガーの時間差に対する入射効率



まとめ

- 陽電子ビーム入射頻度が50 Hzになると、DR 2パルス運転が必須となり、バケットセレクションでパルス毎に**入射器RFの位相変調を行う機構を追加した**
- ビームとトリガーの時間差によるエネルギー変動の大きさをシケイン部とBTラインで測定し、**変動は0.007%以下**でLER入射には影響がない
- LERへの入射試験を実施し、ビームを蓄積することができた。入射効率も**99%以上**を保っており、**ビームの影響は十分無視**できる
- LER 50 Hz入射により蓄積電流の増加が期待され、SuperKEKBの性能向上および、より多くの物理データ取得が期待できる