

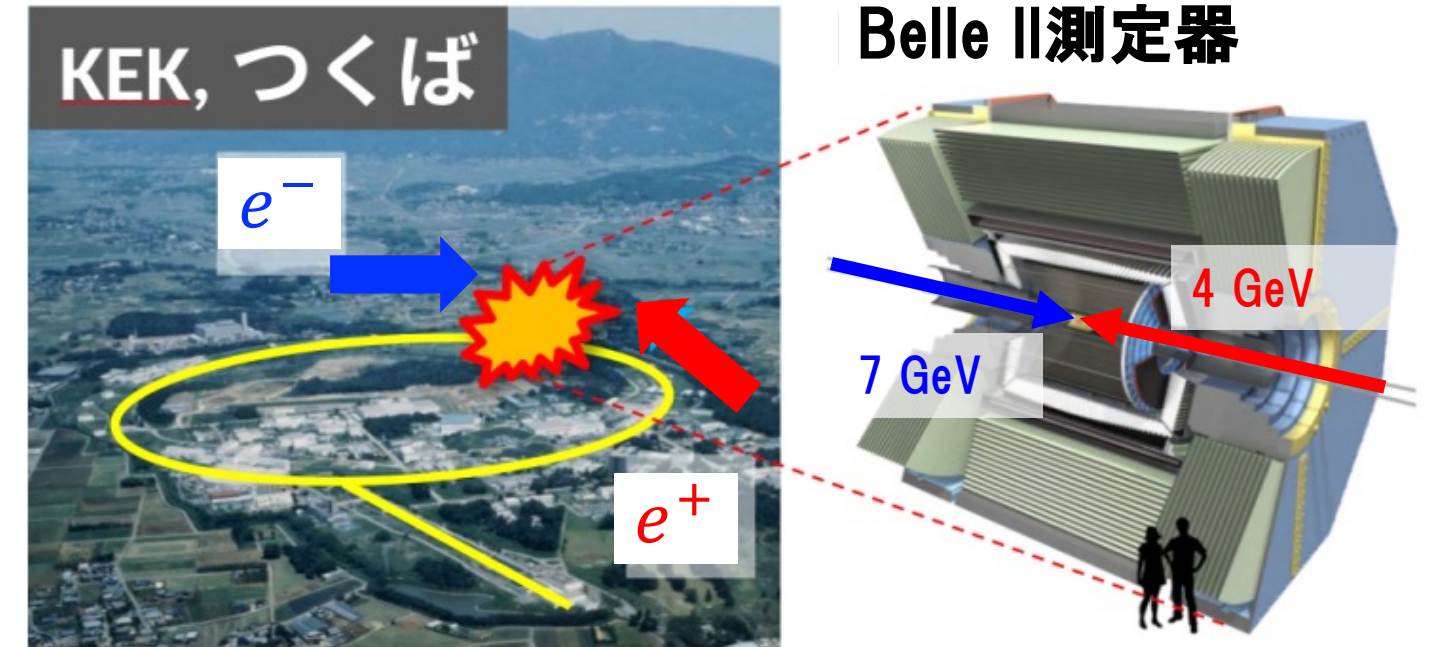


Belle II実験における 新しい入射Vetoシステム

Hanwook BAE | KEK, Institute of Particle and Nuclear Studies (IPNS)

Belle II実験の紹介

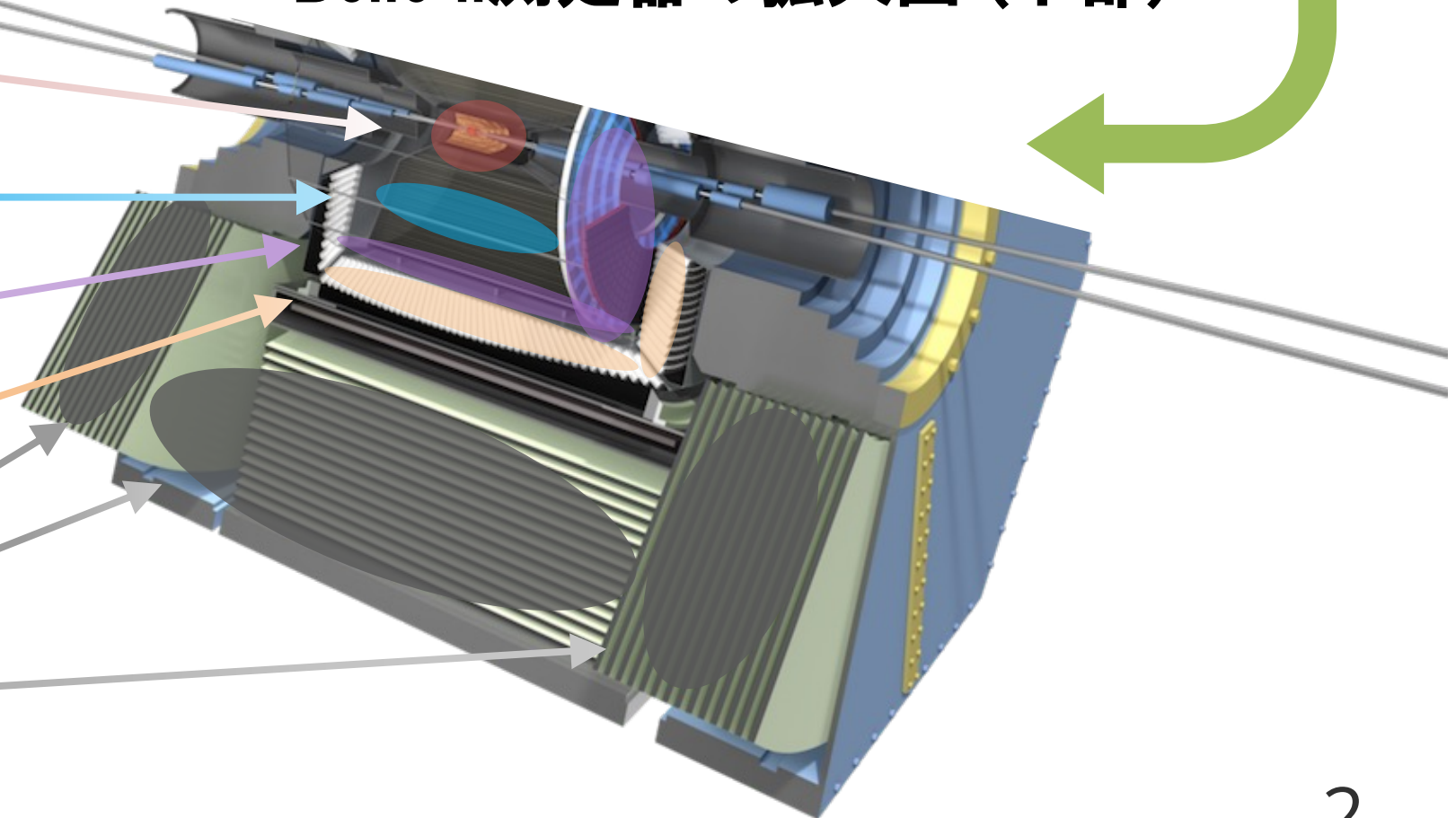
- SuperKEKB加速器を用いて行われる電子・陽電子衝突実験
- 7つの検出器からなる汎用測定器Belle IIで電子と陽電子の衝突事象を観測
 - 衝突事象の統計量を円滑に増やすためには、**高いデータ収集効率が重要**



内
↓
外

- **PXD/SVD半導体検出器**: IPで崩壊した粒子の崩壊点を検出 (分解能: 数10um)
- **ドリフトチェンバー(CDC)**: IPから飛び出す粒子の飛跡を検出
- **チェレンコフ光検出器(ARICH/TOP)**: 粒子の速度を測定し、荷電 K/π を識別
- **電磁カロリメーター(ECL)**: 光子のエネルギーを測定
- **K_L & μ 検出器**: 測定器の外まで飛んでくる K_L 検出、 μ を識別

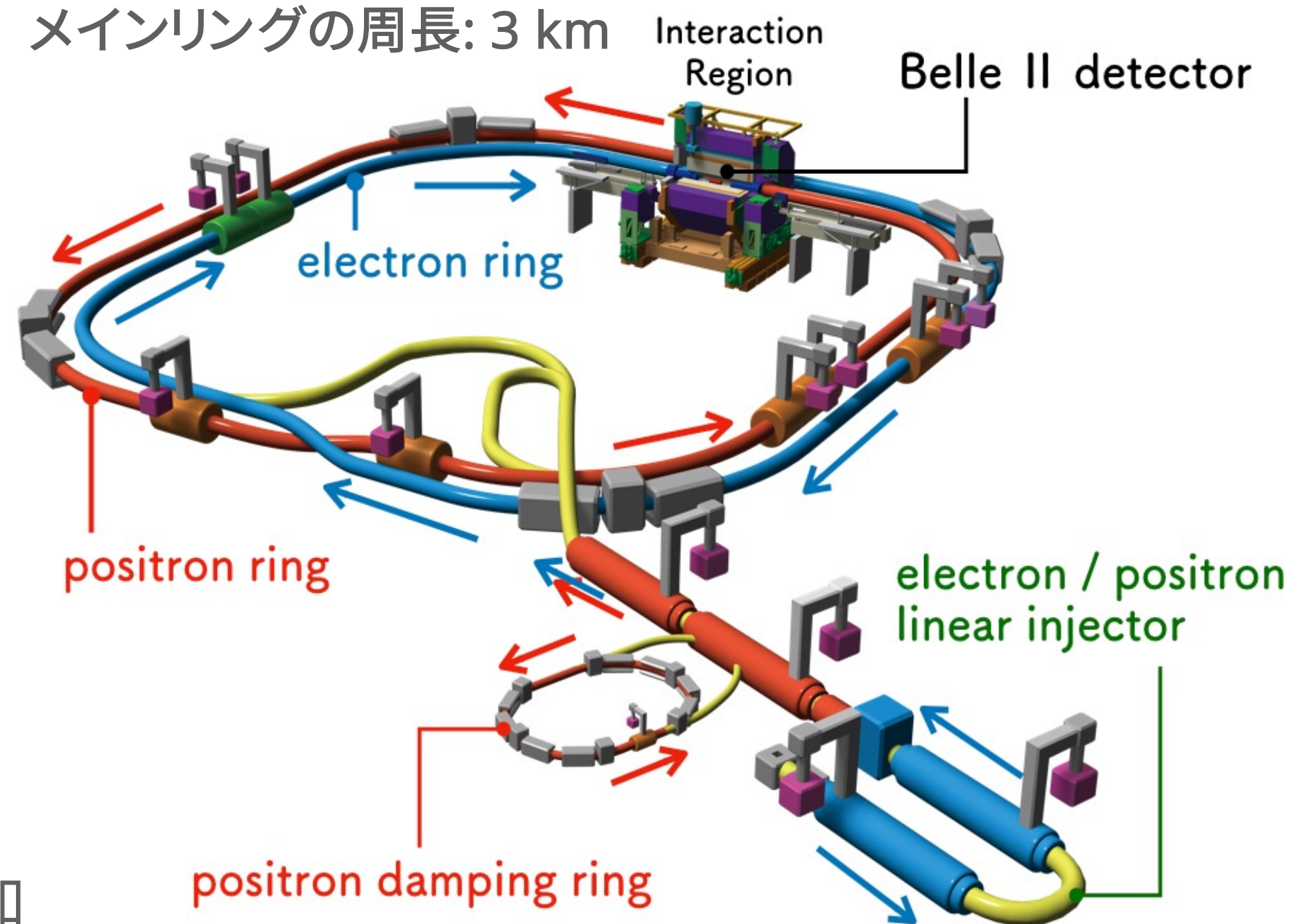
Belle II測定器の拡大図 (下部)



SuperKEKB加速器



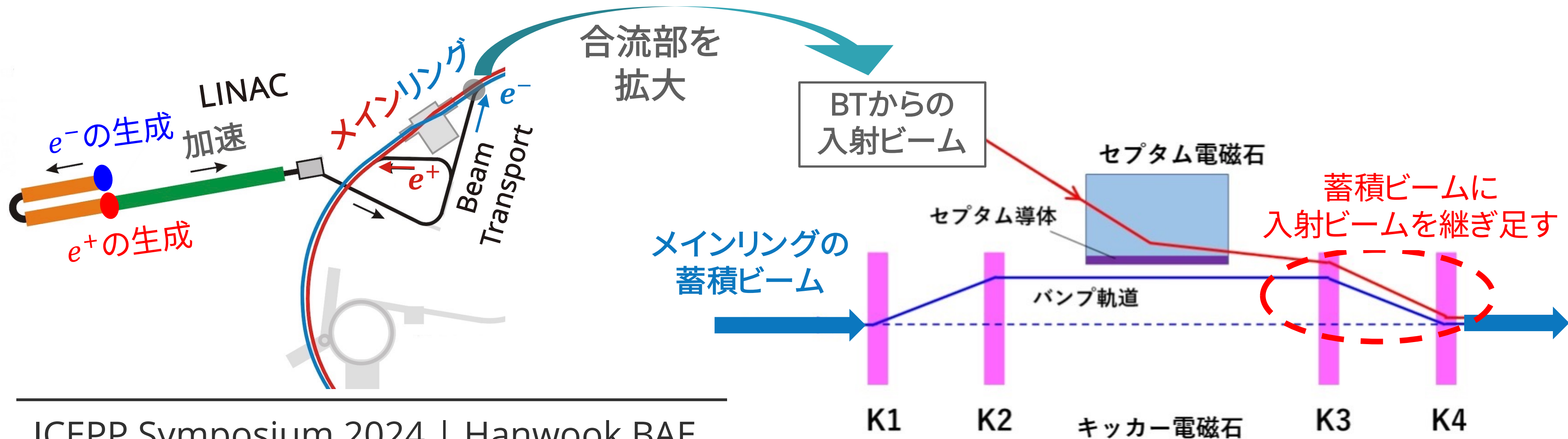
- SuperKEKB加速器はBelle II実験のために電子と陽電子を加速し、衝突させる
 - 非対称的なエネルギー: e^- (7GeV), e^+ (4GeV)
- 前身加速器のKEKBより30倍高いルミノシティ ($6.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)を目指す
- ナノビーム方式を採用し、ルミノシティを増強
 - ナノビーム方式: e^+ と e^- の衝突点でビームバンチの幅を非常に小さく絞る方法
- ナノビーム方式の採用と蓄積ビーム電流の増加によりビームの入射がどんどん難しくなっている





e^+e^- ビームの生成とメインリングへの入射

- e^+ と e^- はSuperKEKB前線の線形加速器(LINAC)で作られ、それぞれ4GeVと7GeVに加速される
 - LINACからの e^+e^- は、Beam Transport(BT)を経てSuperKEKBのメインリング(MR)に継ぎ足される(入射)
- LINACからのビームとメインリングのビームが合流する地点で、4つのキッカー電磁石とセプタム電磁石が e^+e^- ビームを入射する



入射による影響: 入射背景

- LINACから作られた e^+e^- を完璧にメインリングへ入射させることは難しい

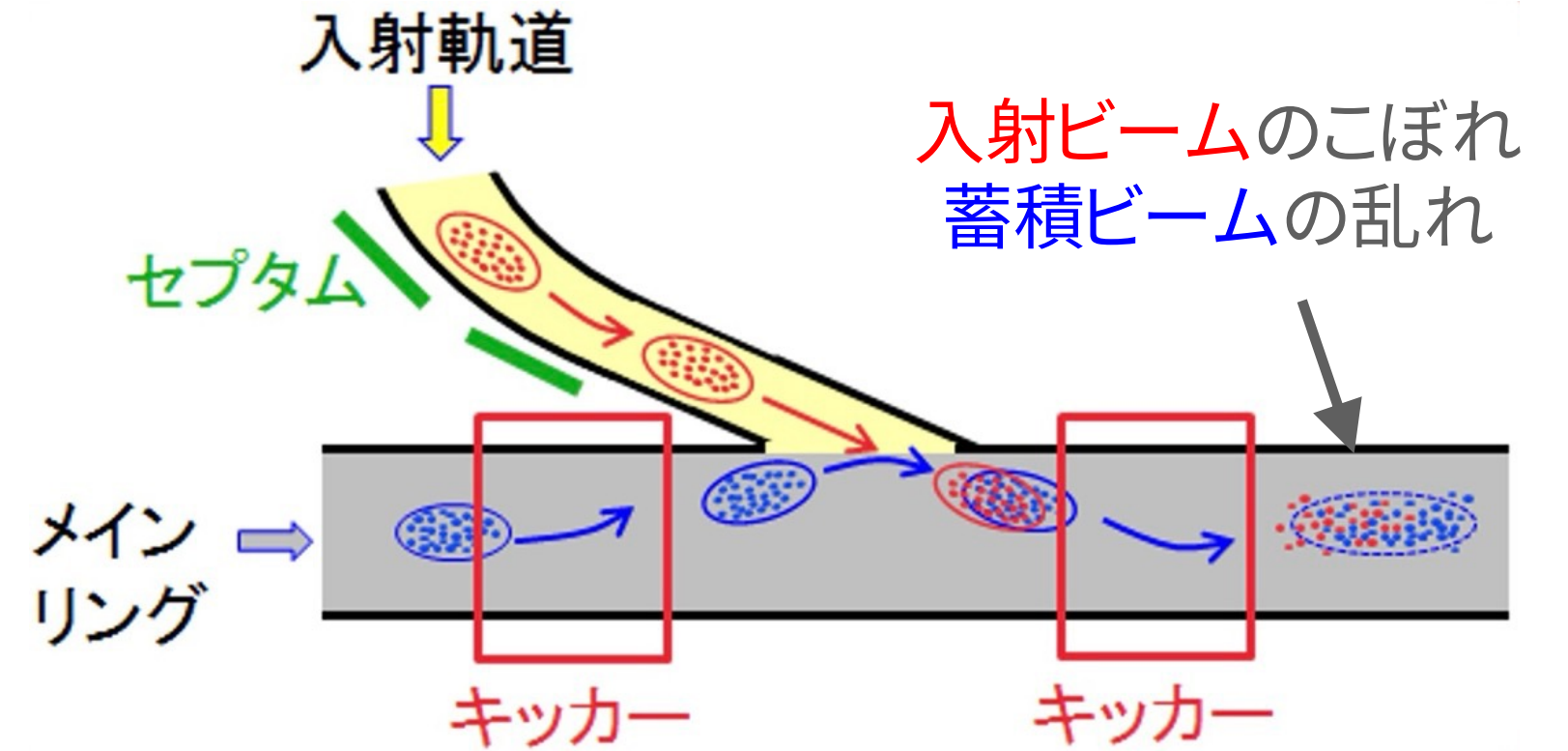
入射の不完全さの例:

- 安定した軌道に安着させなかった粒子。ビームパイプの壁に衝突して電磁シャワーを作りやすい
- 合流する蓄積ビーム(すでに周回しているビーム)との電磁相互作用。蓄積ビームの軌道を不安定にする

➡ Belle II実験においての背景事象
(入射背景)を生じさせる

入射背景は、

- ベータトロン振動によって位置と運動量が振動しながらメインリングを周回する
- 入射後時間経過によって減衰していく



横山紗依の修士論文(2017)から抜粋

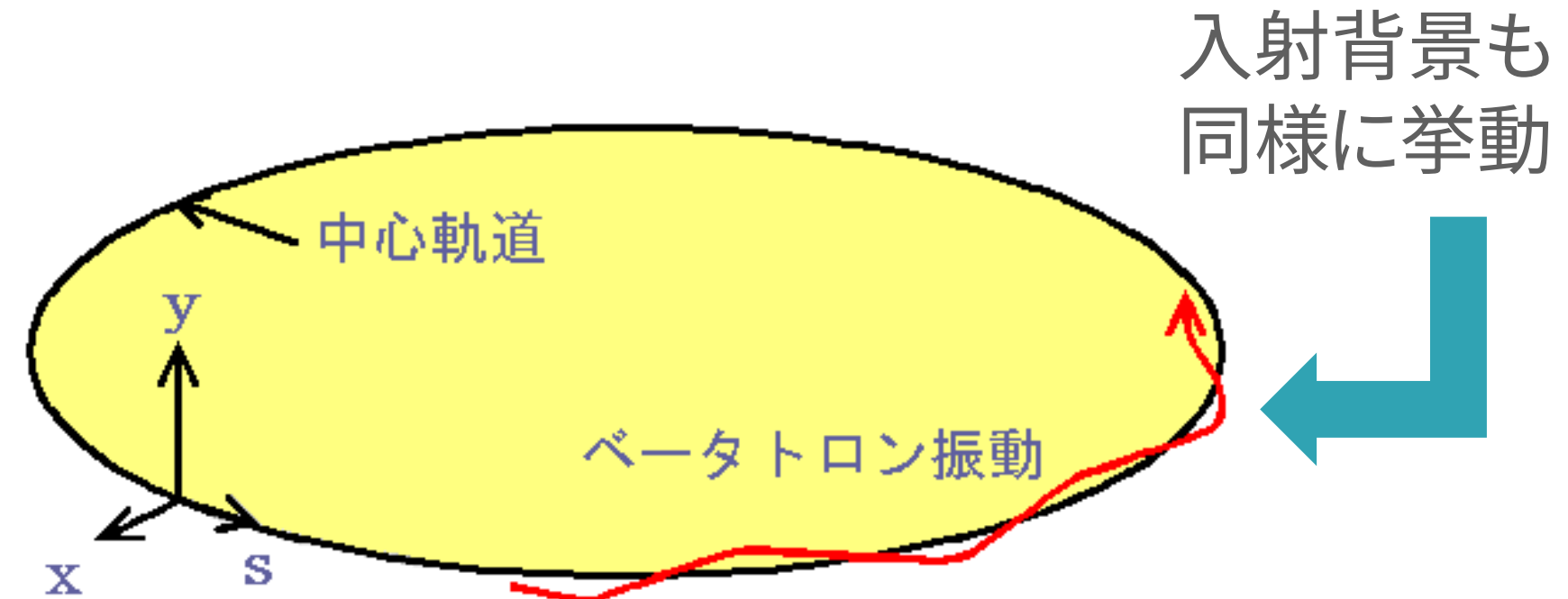
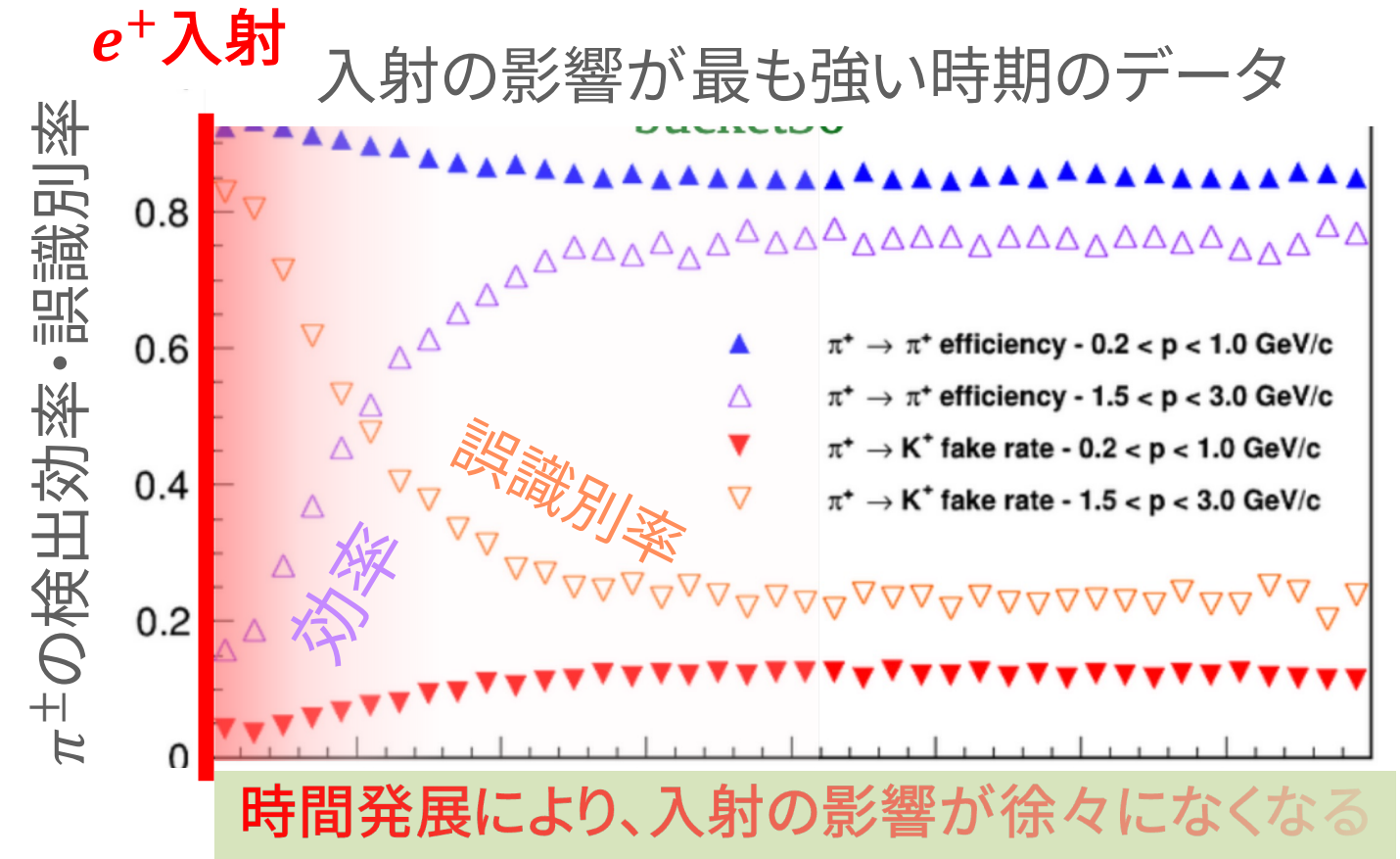


図5 ベータトロン振動

[出典]日本物理学会(編):シンクロトン放射、培風館(1986年12月)、p.28

入射背景が Belle II に与える悪影響

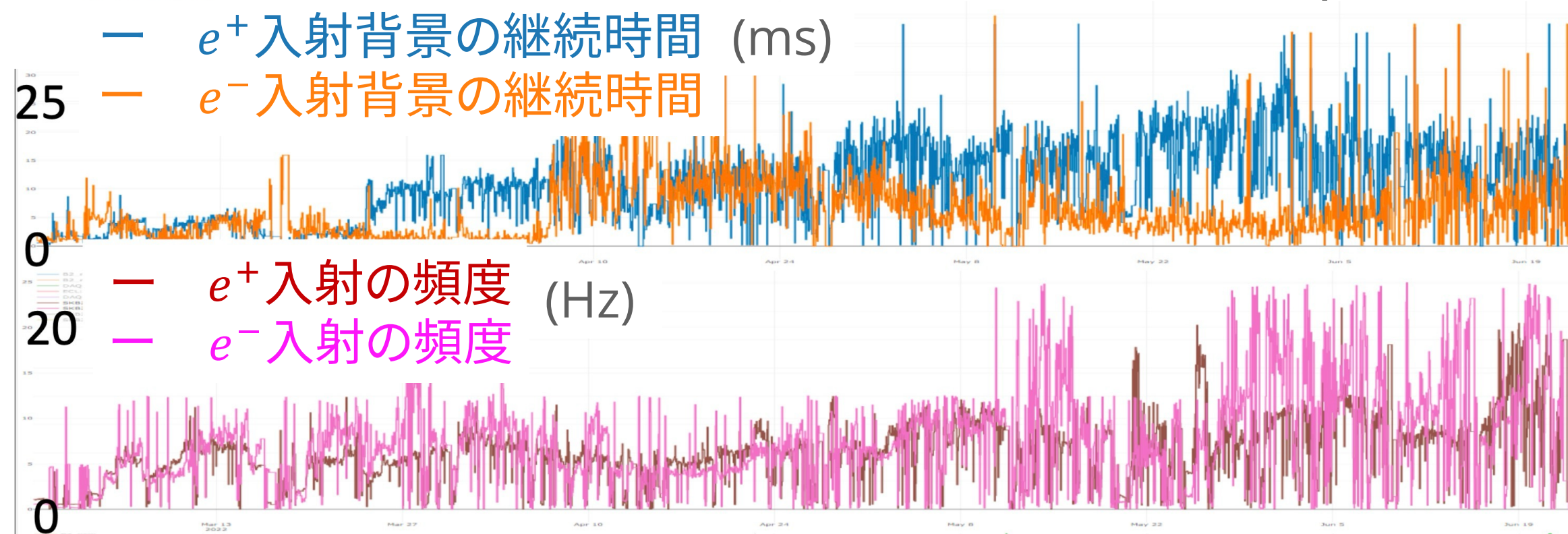
- 入射背景は Belle II のデータ収集や、品質に様々な悪影響を与える
- 入射背景による悪影響の例:
 - Belle II の **物理パフォーマンス** (Tracking, PID) への影響
 - 入射ベトーの長期化による **データ収集効率低下** (後述)



- ルミノシティ増強に伴い、入射頻度と入射背景が減衰するまでの時間が増加

- 入射背景の継続時間が伸びる (およそ 20ms, Belle の時や想定より **数倍も長い**)
- 入射頻度もともに増加し、20Hz に達している (50 ms ごとに入射)
- 2024 年の運転でもさらに増加する見込み

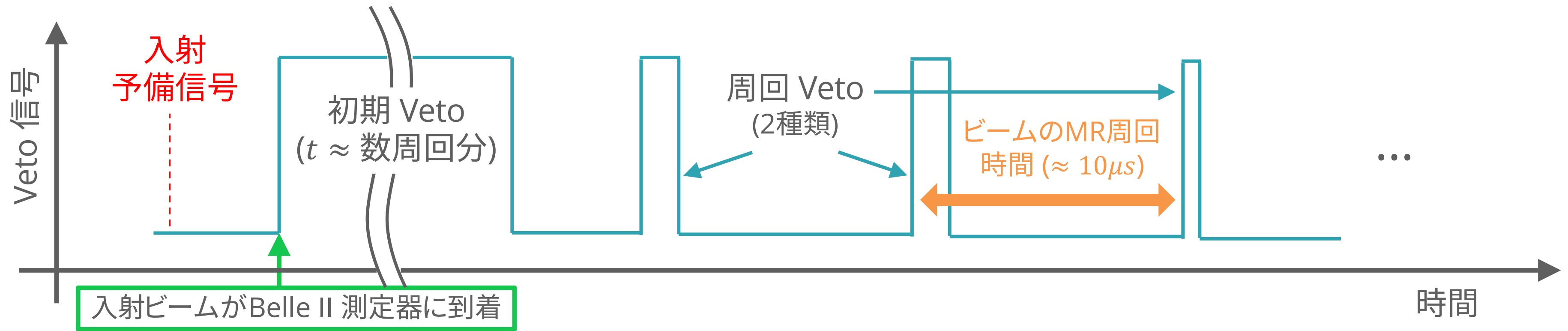
2022 年のデータ





入射背景を防ぐ: 受動的入射Veto

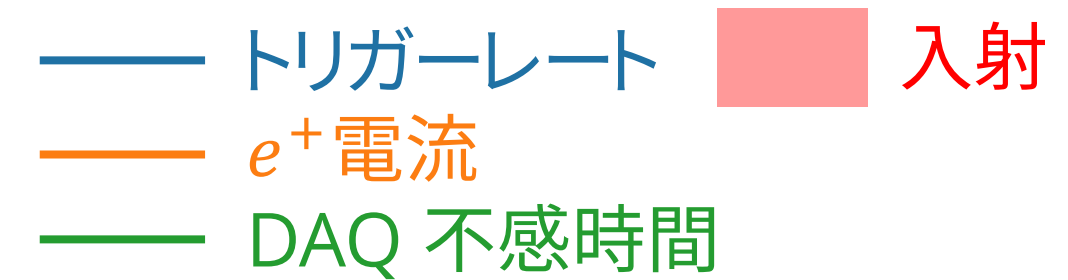
- 入射背景は入射ビームと共にMRを周回し、その影響は**周期的にBelle II測定器を訪れる**
 - この影響を防ぐため、入射背景がBelle II測定器を訪れるタイミングに合わせてデータ収集を一時停止する → **受動的入射Vetoシステム**
- 加速器側から入射の予備信号を受け取り、入射ビームが着くタイミングにVeto信号を発出
 - 入射ビームがBelle II測定器を過ぎ去った後は周回して戻ってくるまでVeto信号を解消し、データ収集を再開
 - 入射からある程度時間が経ったら(~a few ms)、Veto信号の発出を停止



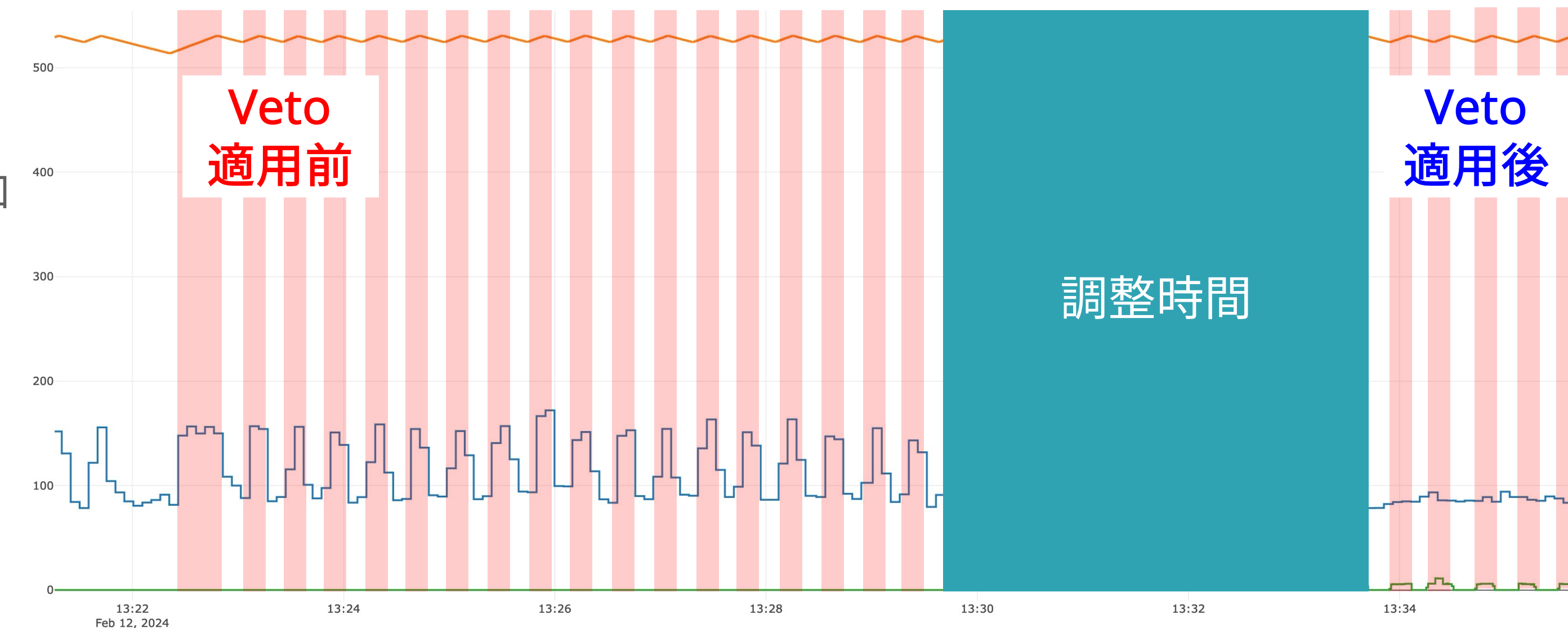
受動的入射Vetoの効果



- 受動的入射Vetoを適用する前と後のトリガーレートを比較
- Vetoの適用前は、入射がある時にトリガーレートにギザギザが見える
→ **入射背景がBelle IIのデータに入ってしまった**



- Vetoをかけると:
 - トリガーレートが安定 (入射背景の排除)
 - DAQ不感時間が増加




受動的入射Vetoの限界



- ベータatron振動により、Belle IIが入射ビームから受ける影響は入射ビームの周回ごとに異なる
- 受動的入射Vetoは単に周回タイミングに合わせてVeto信号を発生: 周回ごとの対応が難しい



Veto信号が余計に頻発し、DAQ不感時間が
増える・今後のルミノシティ増強の障壁になる

- 余計な入射Veto信号の例示 
- Belle II測定器で感じている入射背景(黄色)は5回しか検知されていないが、Veto信号は毎回発生されている



入射の影響とベトー信号の波形

受動的入射Vetoの限界

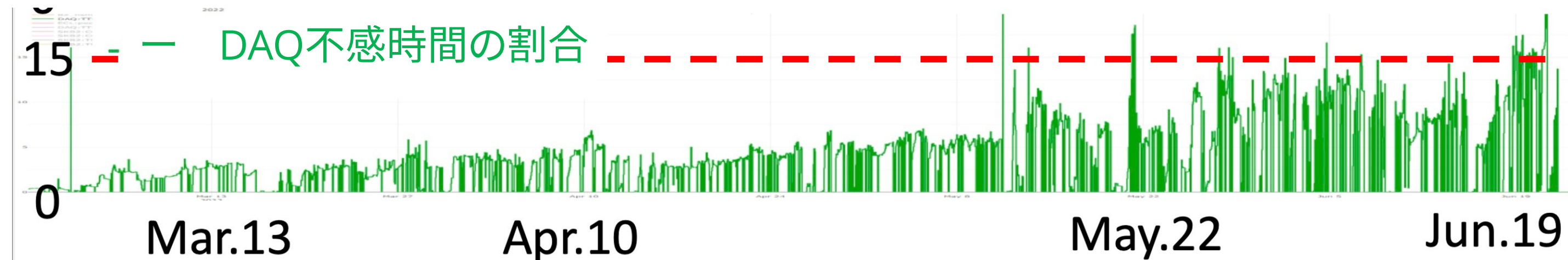


- ベータatron振動により、Belle IIが入射ビームから受ける影響は入射ビームの周回ごとに異なる
- 受動的入射Vetoは単に周回タイミングに合わせてVeto信号を発生: 周回ごとの対応が難しい



Veto信号が余計に頻発し、DAQ不感時間が
増える・今後のルミノシティ増強の障壁になる

- 2022年の運転で、入射Vetoによる不感時間はすでに15%に達していた
 - 2024年の運転では20%を超える可能性も



Belle IIが順調にルミノシティを増やすためには、入射Vetoの改良が必要である!

新しいVetoシステム: 能動的入射Veto



- 入射背景の影響は、主に(陽)電子が作る電磁シャワーの形でBelle IIの測定器に現れる
 - 入射背景が激しい時には、たくさんの(通常より数倍以上) e^\pm や γ がBelle II測定器を襲う

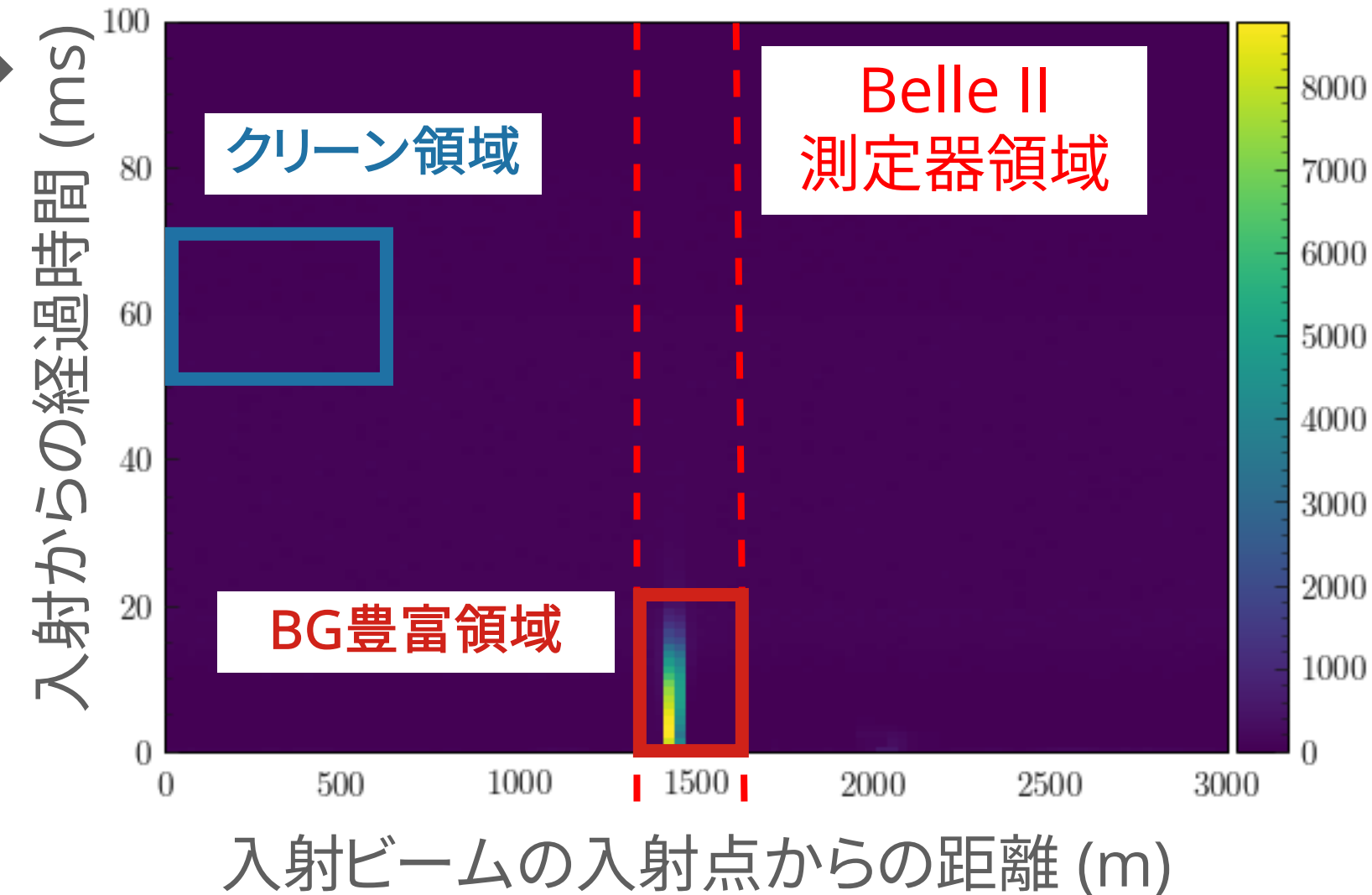
- Belle IIで **荷電粒子(e^\pm)を検出するCDC** と **光子(γ)を検出するECL** を用いて、荷電粒子と光子の量が測れる
→ **ビームの周回ごとに入射背景の強度がわかる!**

- CDCとECLから測定した入射の影響が強くない時には、入射Veto信号を抑制すれば(能動的なVeto)、**受動的入射Vetoの限界を乗り越え**、Belle IIのルミノシティ増強に貢献できる!
- 本研究では、Belle IIのCDCとECLの情報(ヒットの数)を用いた**能動的入射Vetoシステムを開発し、データ収集への影響(DAQ不感時間の削減量、トリガーレートなど)を評価してみた。**

入射背景による影響を解析



- 入射による影響を観察するためにビームが回る時に入射Vetoなしの特別データを収集し、解析
 - ビームがある時に入射Vetoなしでデータを取得すると、入射背景が圧倒的に多くなる
- 取得された事象の時間・入射点距離の分布を描画 →
 - 横軸: 入射ビームの入射点からの距離。1500m付近に密集して分布
 - 縦軸: 入射からの経過時間。入射直後に密集して分布。入射背景が継続する時間はおよそ20ms
- 収集したサンプルを二つの領域で分離して観察
 - **BG豊富領域:** 入射ビームがBelle IIにいる + 入射直後
 - **クリーン領域:** 入射ビームがBelle IIから遠い + 入射から長時間が経過



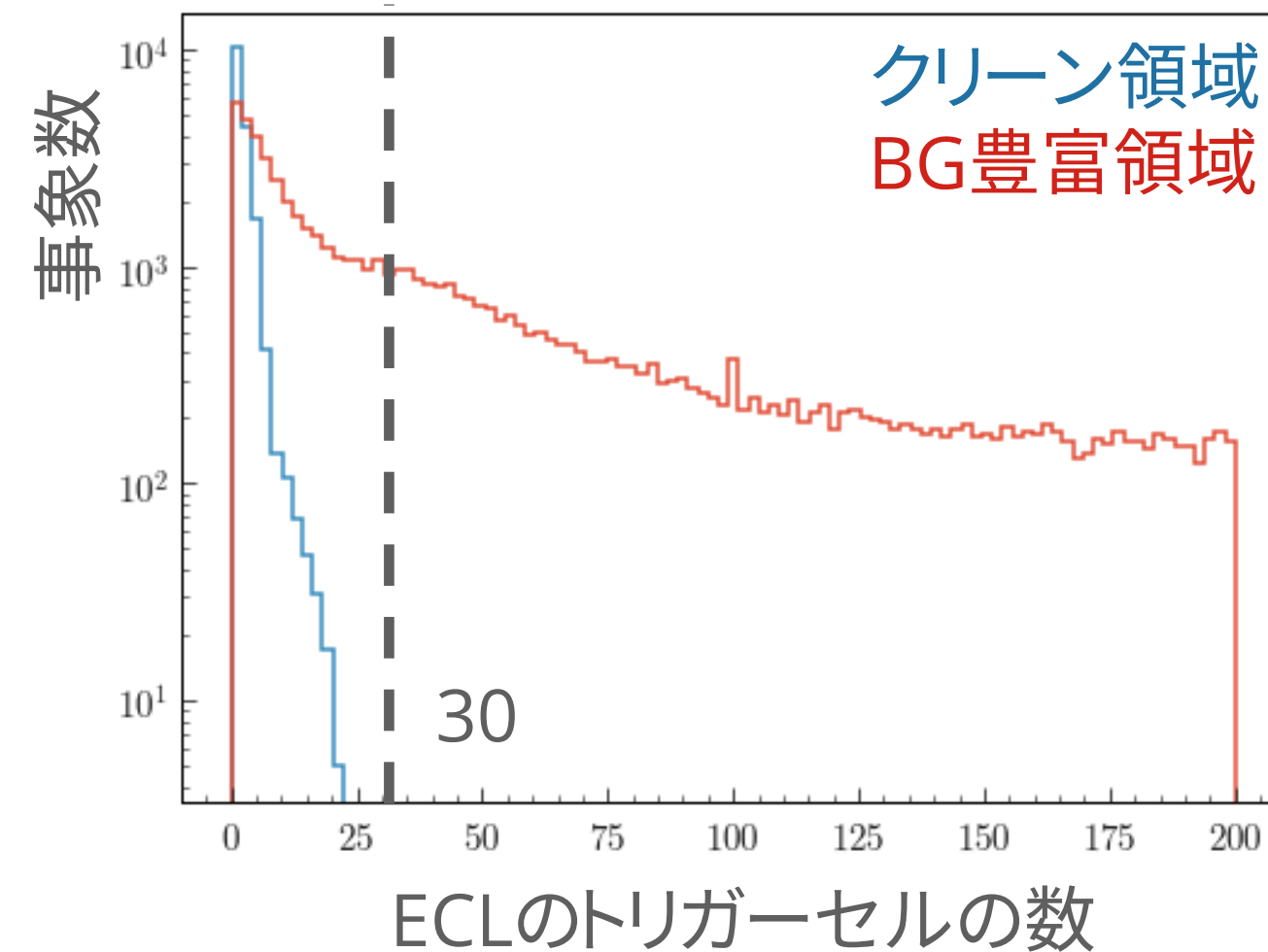
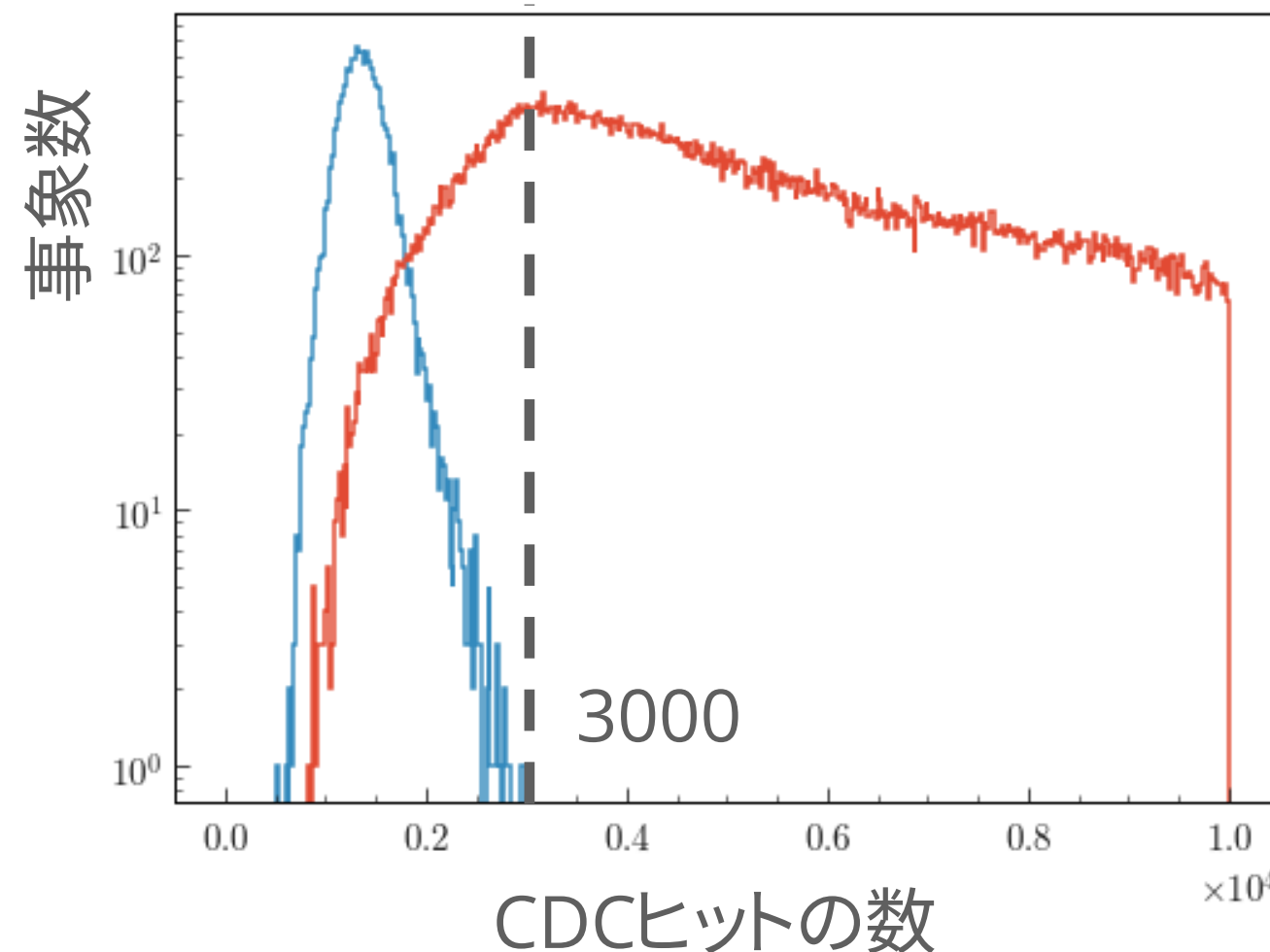
CDCとECLからのヒット数を比較

👉 トリガーセル (TC)とは?

隣接しているECLヒットの括り。ECLトリガーロジックの判断材料になる。



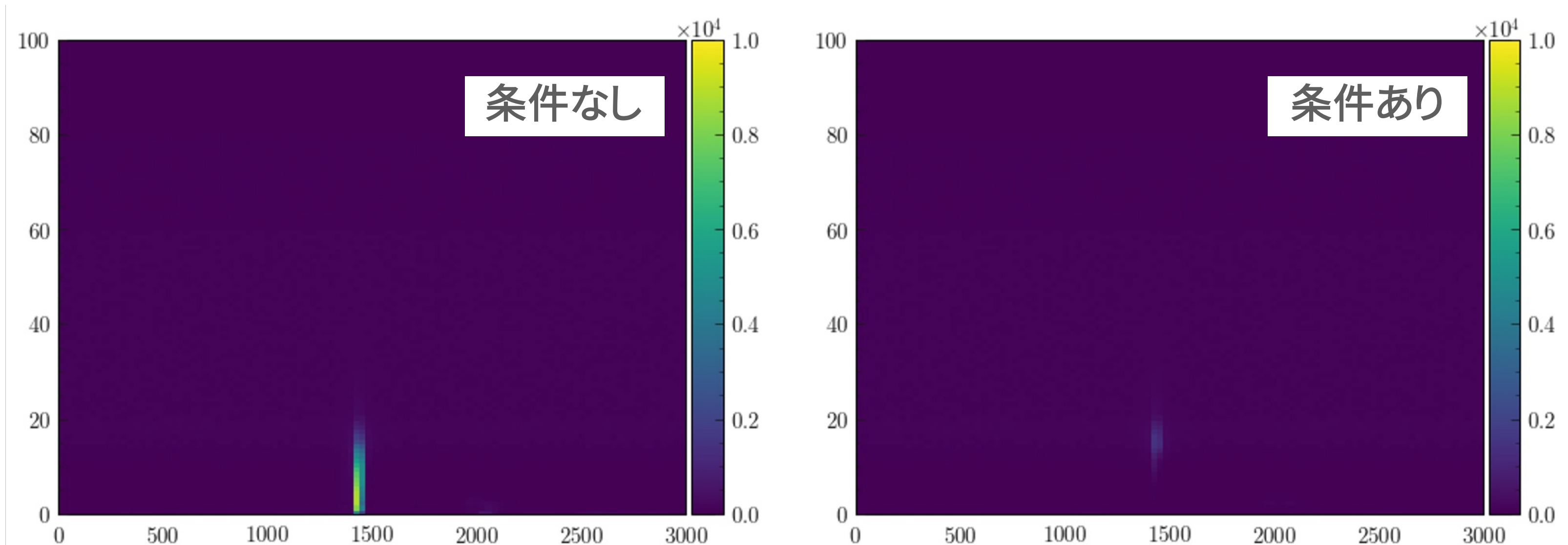
- CDCワイヤーヒットの数とECLトリガーセルの数の分布を各々の領域のサンプルで比較してみた
 - 二つの分布いずれも「**クリーン領域**」の分布が「**BG豊富領域**」の分布に比べて低い傾向性を見せている
→ 入射背景事象を分別するいい判断基準となる
- この比較より、入射背景事象と判断する基準を設けた: $N_{TC}^{ECL} > 30 \quad \vee \quad N_{Hit}^{CDC} > 3000$



入射背景の条件による事象数・トリガー変化



- 入射背景の条件のありなしで時間・距離の2D分布と、主要なトリガー判定出力の変化を比較した
 - BG豊富領域の事象が著しく減少
 - 入射背景の条件をかけると、主要トリガー判定に当てはまる事象数が1/10以下に減る

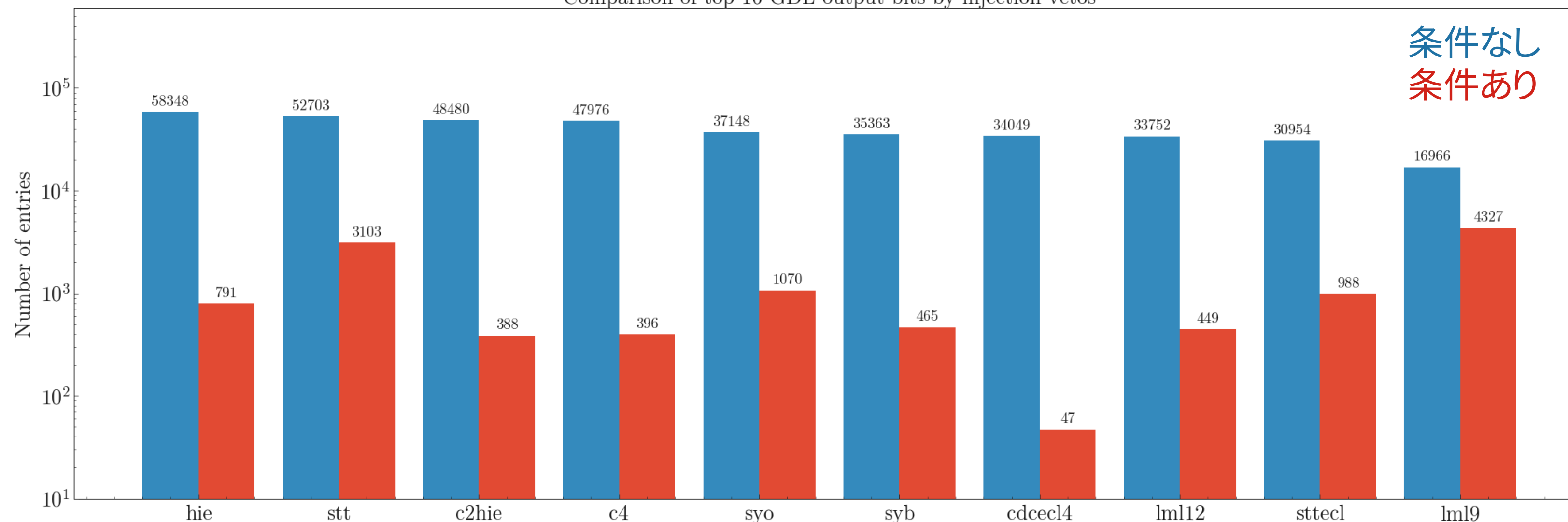


入射背景の条件による事象数・トリガー変化



- 入射背景の条件のありなしで時間・距離の2D分布と、主要なトリガー判定出力の変化を比較した
 - BG豊富領域の事象が著しく減少
 - 入射背景の条件をかけると、主要トリガー判定に当てはまる事象数が1/10以下に減る

Comparison of top 10 GDL output bits by injection vetos

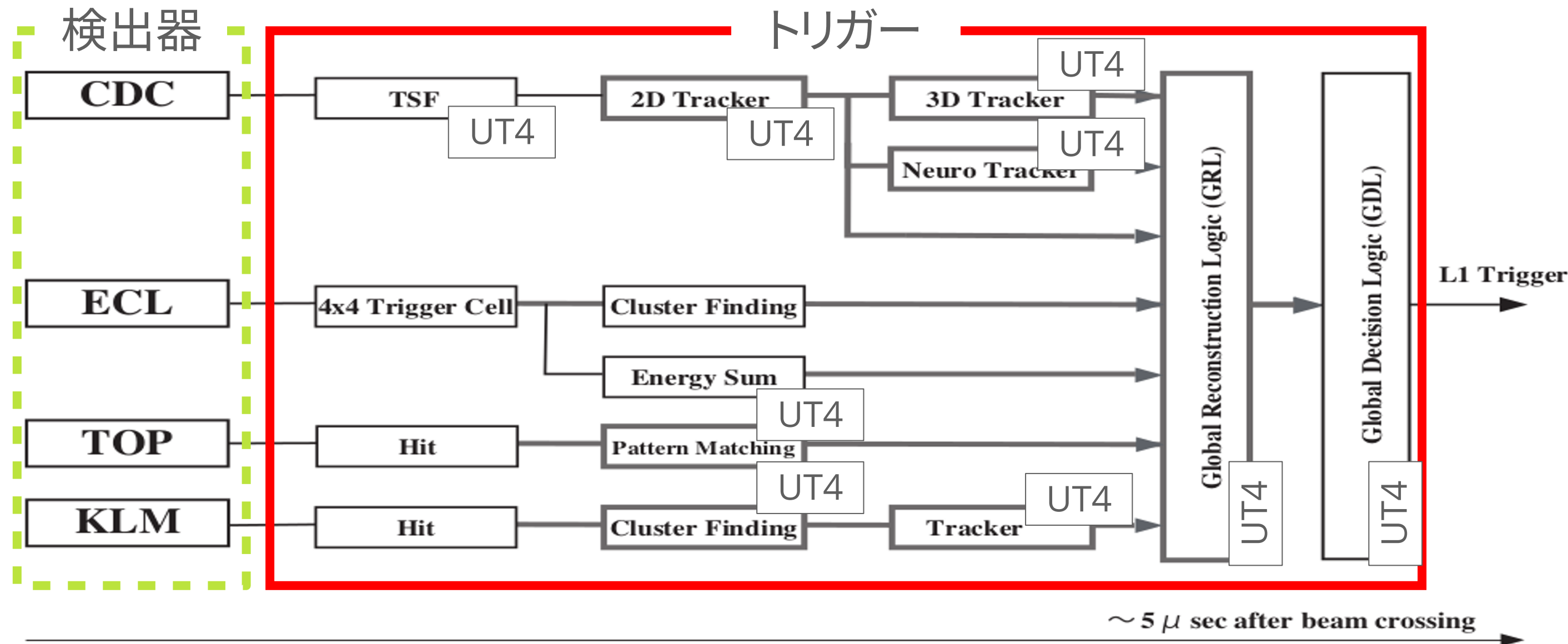


Belle IIトリガー系統の紹介



- Belle IIのトリガー系統は、4つの部分検出器(CDC, ECL, TOP, KLM)からの情報を受け取り、その瞬間に収集したデータを記録するか否かを5 μ s以内に判断する系統
- 大量の複雑な演算を高速で行うため、大型FPGAを載せた汎用ボード(UT4)を複数使い、段階的に構成して運用中

- 実機での入射Veto信号の判定と発出は、このトリガー系統が担当している



能動的入射Vetoの概要



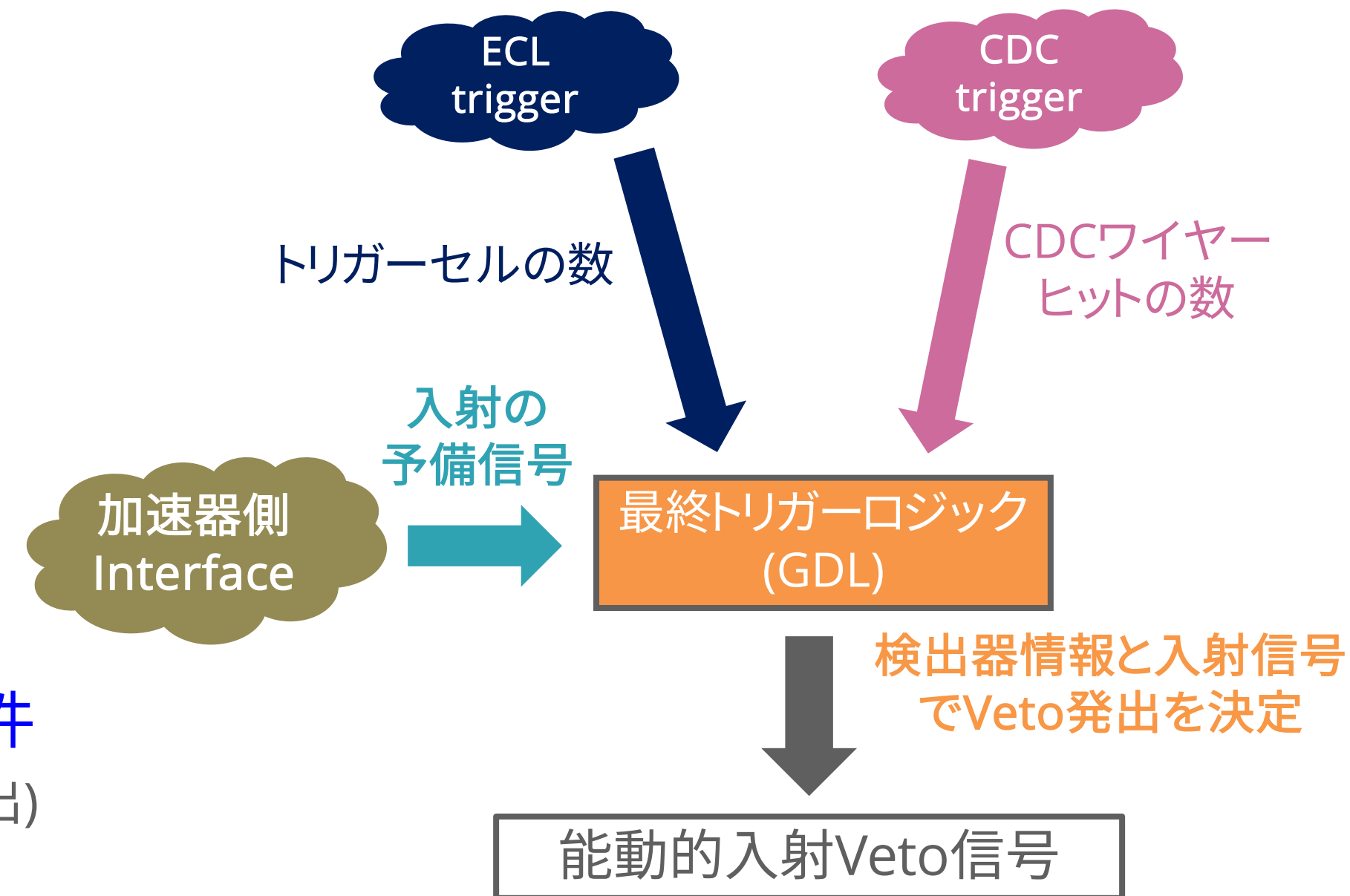
- ECLとCDCTリガー系統は、入射背景条件の判定に必要な情報を光通信で後段に送る

- 最後段のGDL(Global Decision Logic)はこれらの情報を受け取り、能動的入射Veto信号を発出
 - GDL: Belle IIの各トリガー系統からの情報をまとめ、最終的にL1トリガー信号の発出を判断するロジック

- 発出の条件:

受動的入射Veto信号 **AND** 入射背景の条件
(但し、初期Veto信号はそのまま発出)

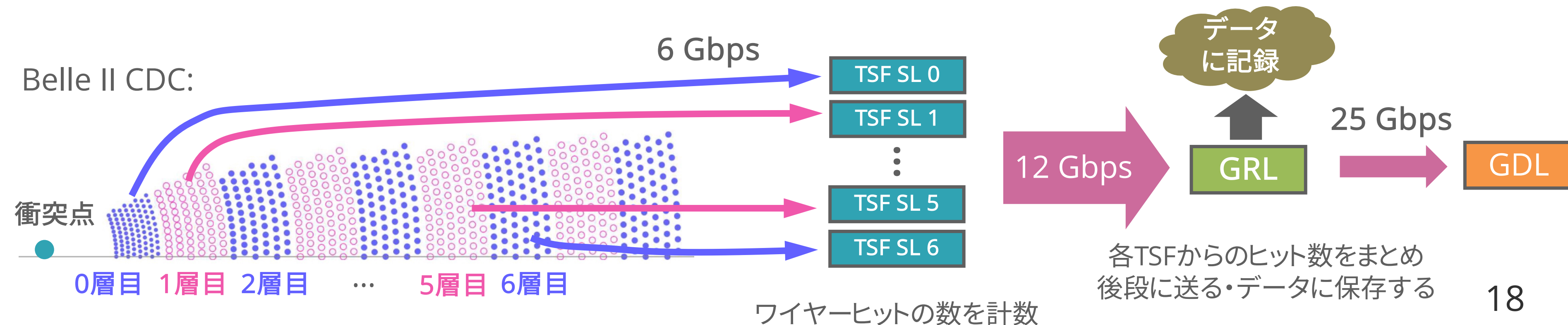
能動的入射Vetoの系統図:





能動的入射Vetoの実装: CDCTリガーの修正

- 能動的入射Vetoシステムを実装するために、CDCTリガーのFirmwareを修正
- CDCのワイヤー情報を初めて処理する「TSFモジュール」でワイヤーヒットの数を計数
 - TSF: 後段のFPGAが処理しやすいよう、CDCワイヤーヒットをClusteringするモジュール。同心円状に分けた9つの区画(Super Layer; SL)を一個つづのUT4ボードが処理する
- TSFでの計数結果は、全ての部分検出器トリガーの判断を総合する「GRLモジュール」で集合され、実験データで保存とGDLに送られる

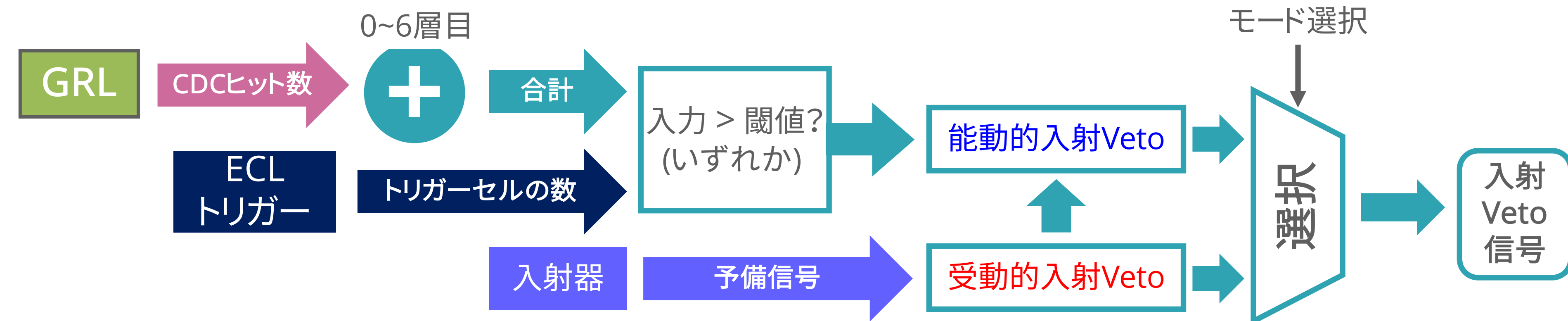




能動的入射Vetoの実装: GDLの修正

- GDLのFirmwareの中に、能動的入射Veto判定を行うモジュールを実装
- GDL内部の入射Vetoの構造 ( がGDL内部のモジュール):
 - 外部設定によりVetoモードを受動・能動に入れ替えるように設計

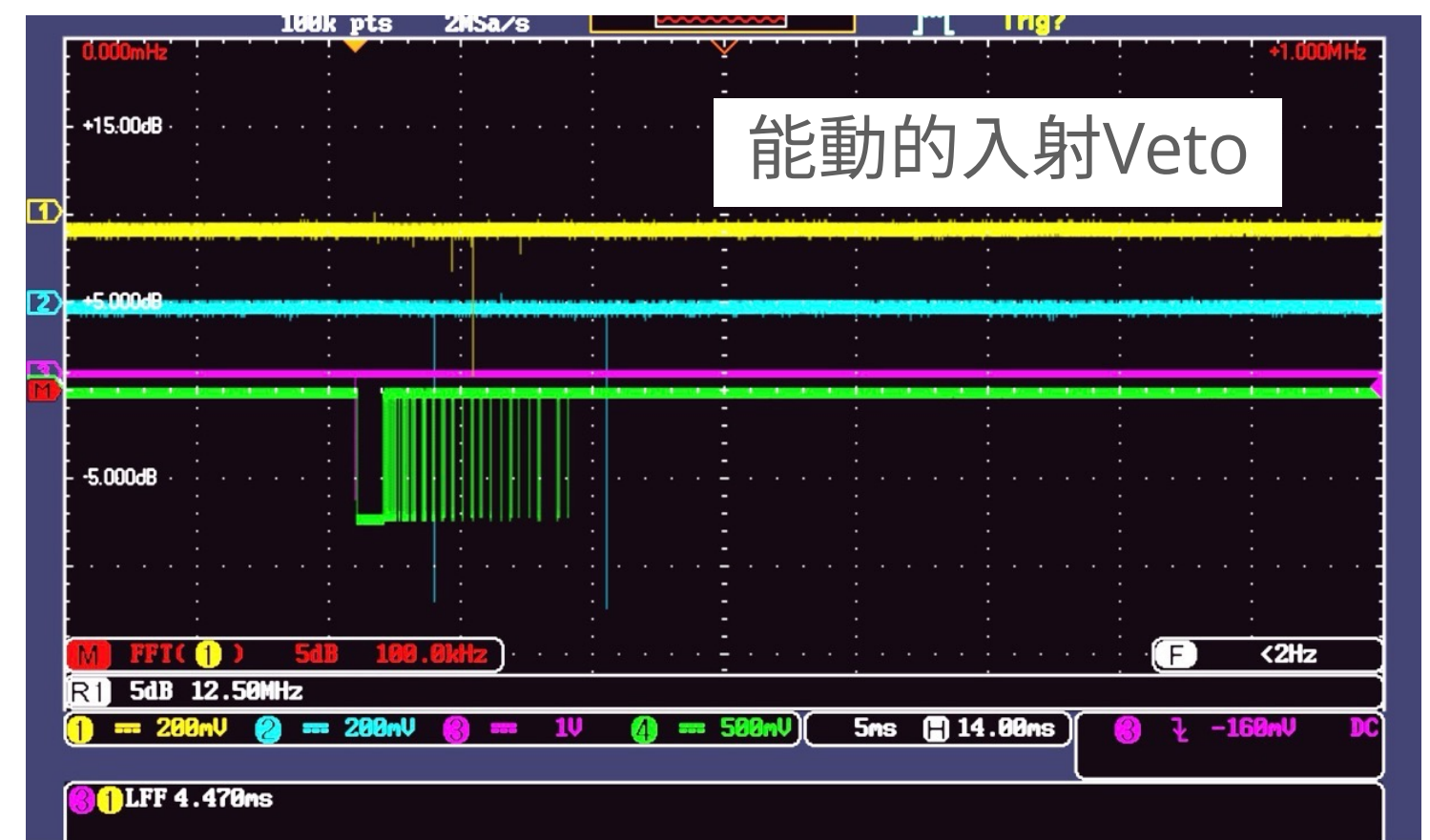
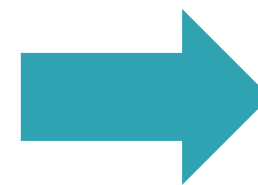
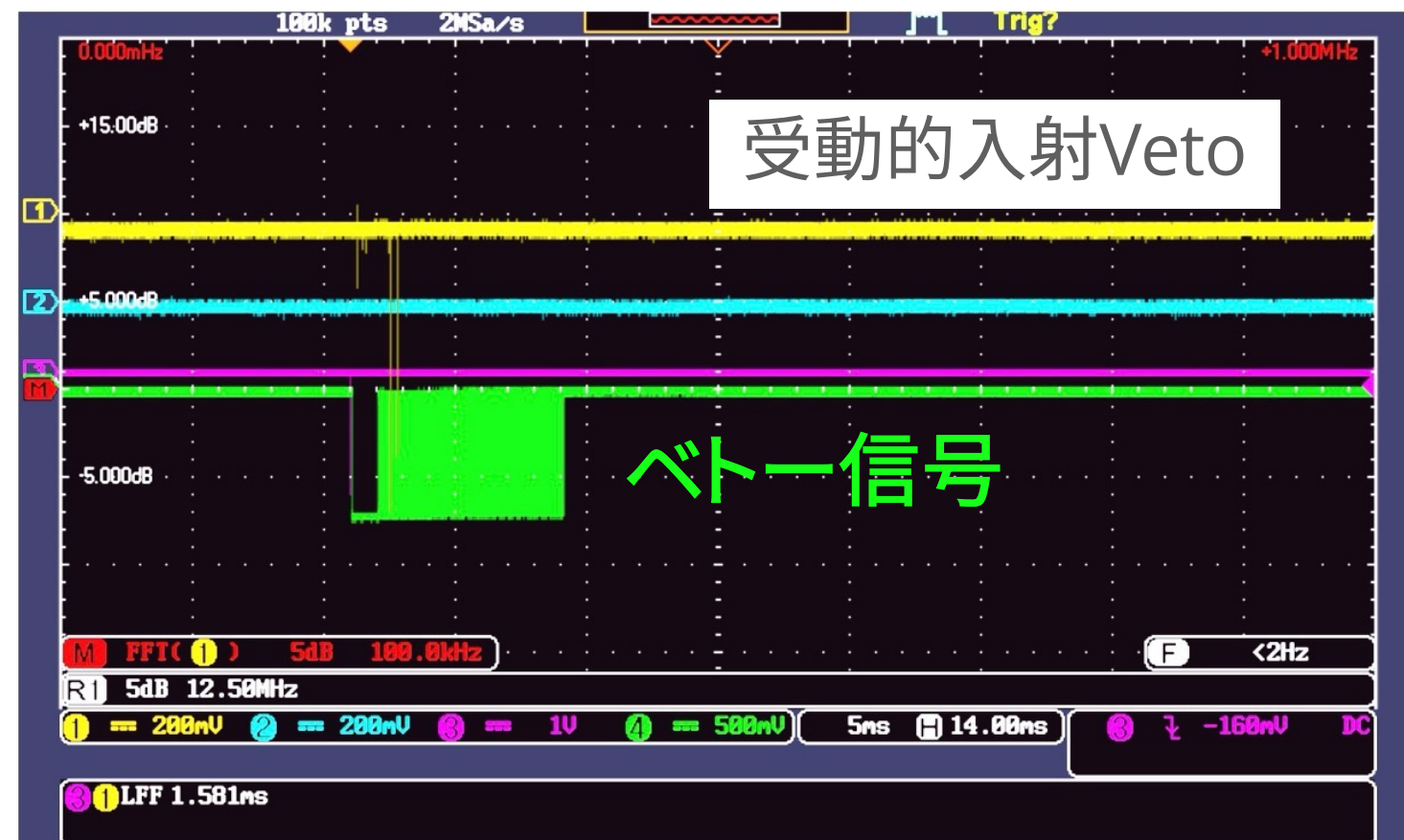
FWの模式図:



能動的入射Vetoの実装: Veto信号の変化



- 修正したFirmwareの動作を確認するために、VetoモードによるGDLからの入射Veto信号を観察
- 周回Veto信号の頻度が明確に減少したことを確認 → 新しい入射Vetoがよく動いている



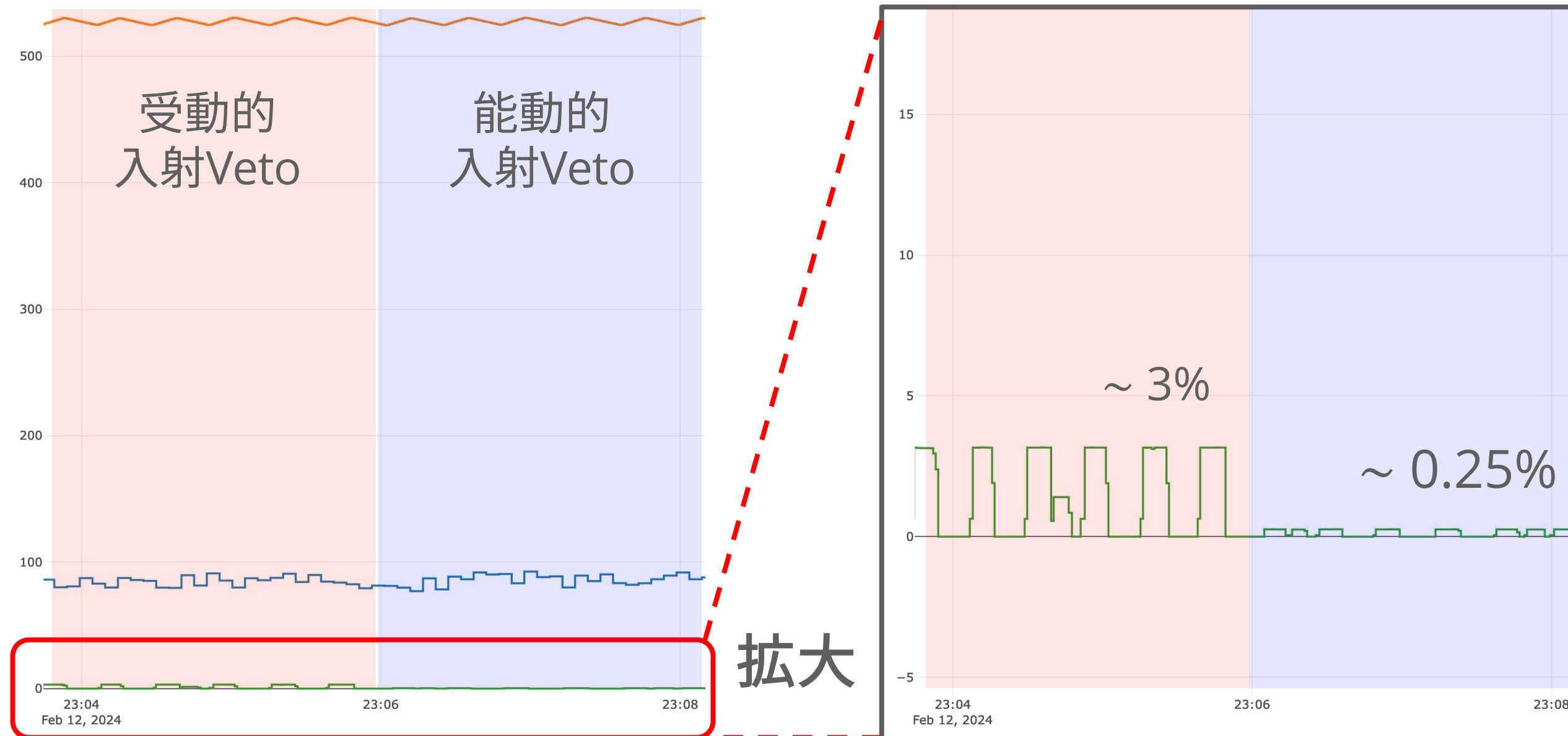
不感時間とトリガーレートの比較



- 入射Vetoモードを受動・能動に入れ替えながらレート・不感時間を観察
 - 先週(2月12日)の結果。CDCはまだ準備中であるため、ECLの入射条件だけで判断
 - e^- ビーム電流: 600mA
 - e^+ ビーム電流: 530mA

- トリガーレート
- e^+ 電流
- DAQ不感時間

- 受動・能動モードを切り替えてもトリガーレートの様子が変わらない
 - 能動的入射Vetoが入射背景をちゃんと防いでいる
- DAQ不感時間が従来の1/10のレベルに減少



まとめ



- SuperKEKB加速器のルミノシティ増強に伴って入射背景の影響が増大しており、Belle II実験はこの影響を防いで円滑なデータ収集のために入射Vetoシステムを導入している
- 従来のVetoシステムはビームの周回タイミングに合わせた受動的方式を採用していたが、DAQの不感時間が余計に増えてしまう問題があり、改良が必要な状況である
- 本研究では入射背景がたくさん(陽)電子と光子を作ることに着目し、それらの量を測って入射背景が強い時だけに入射Veto信号を発出する能動的入射Vetoシステムを開発した
- 2024年2月のSuperKEKBビーム運転で能動的入射Vetoシステムをテストし、トリガーレートに異常がないことや、DAQの不感時間が大幅に短縮されることを確認した
- 今週に予定されている本格的なビーム衝突開始に向けた準備を進める予定

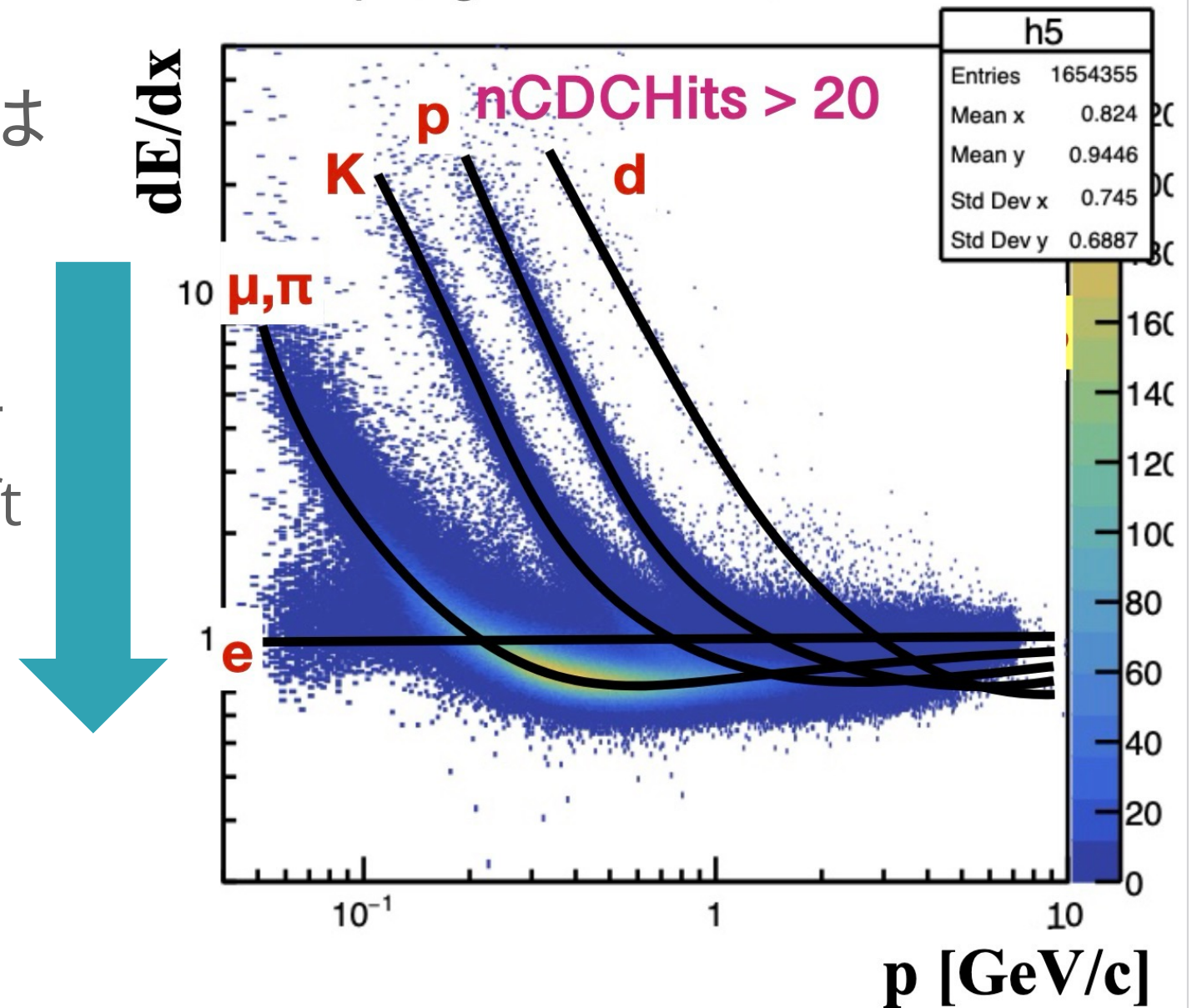
Backups

入射背景によるパフォーマンスの低下はどこから?



- 入射背景は、CDCのゲインを下げる効果があり、これによって dE/dx が下がる現象が見えている
 - 原因はまだ完全に理解されていない。荷電粒子が急に殺到してSense wireに流す電流が足りない?
- CDCの dE/dx は粒子識別に使われているため、その変化はパフォーマンスに直に影響する

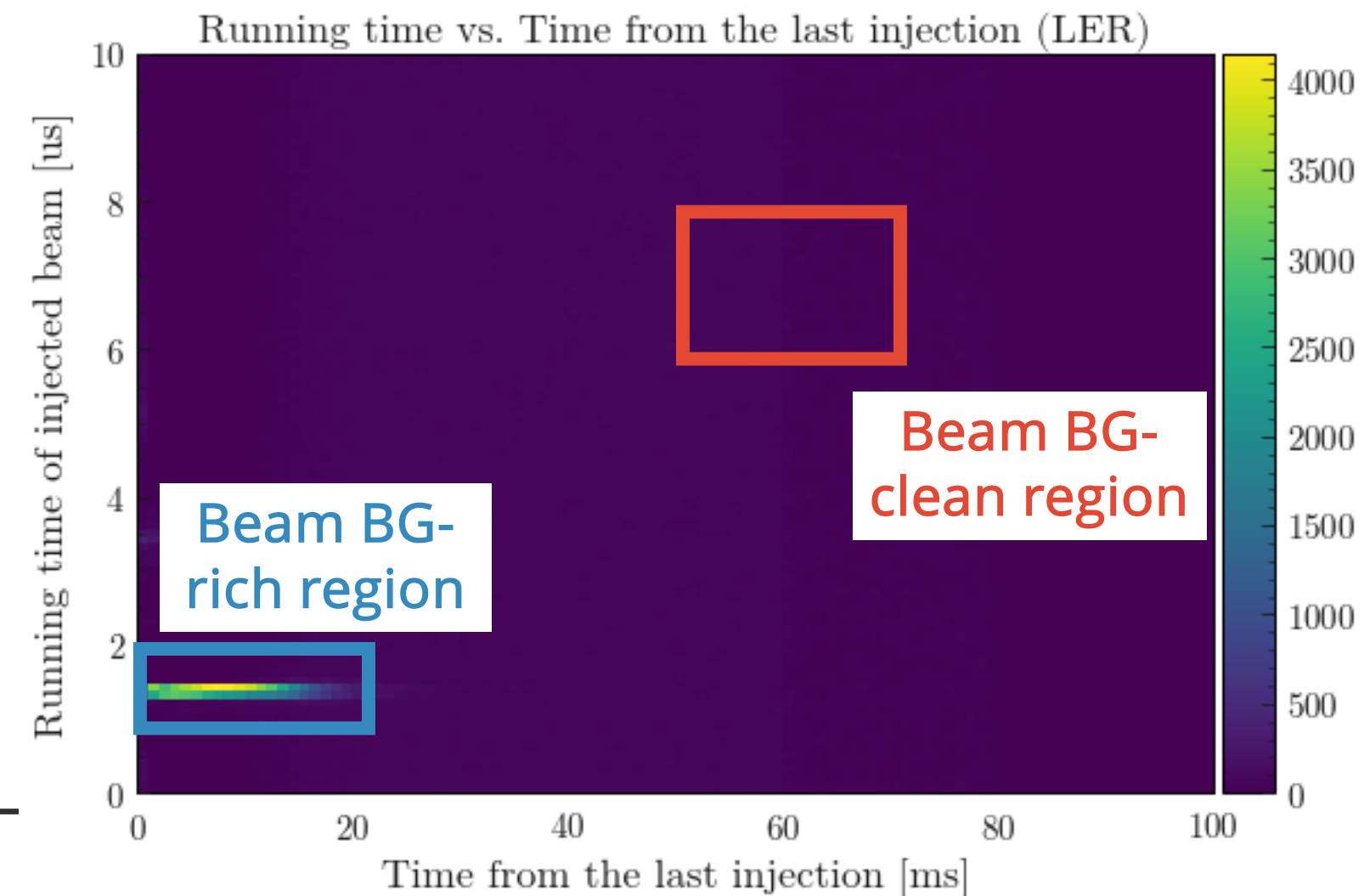
入射背景によって
 dE/dx が下へshift



Analysis Strategy for Injection Background Data

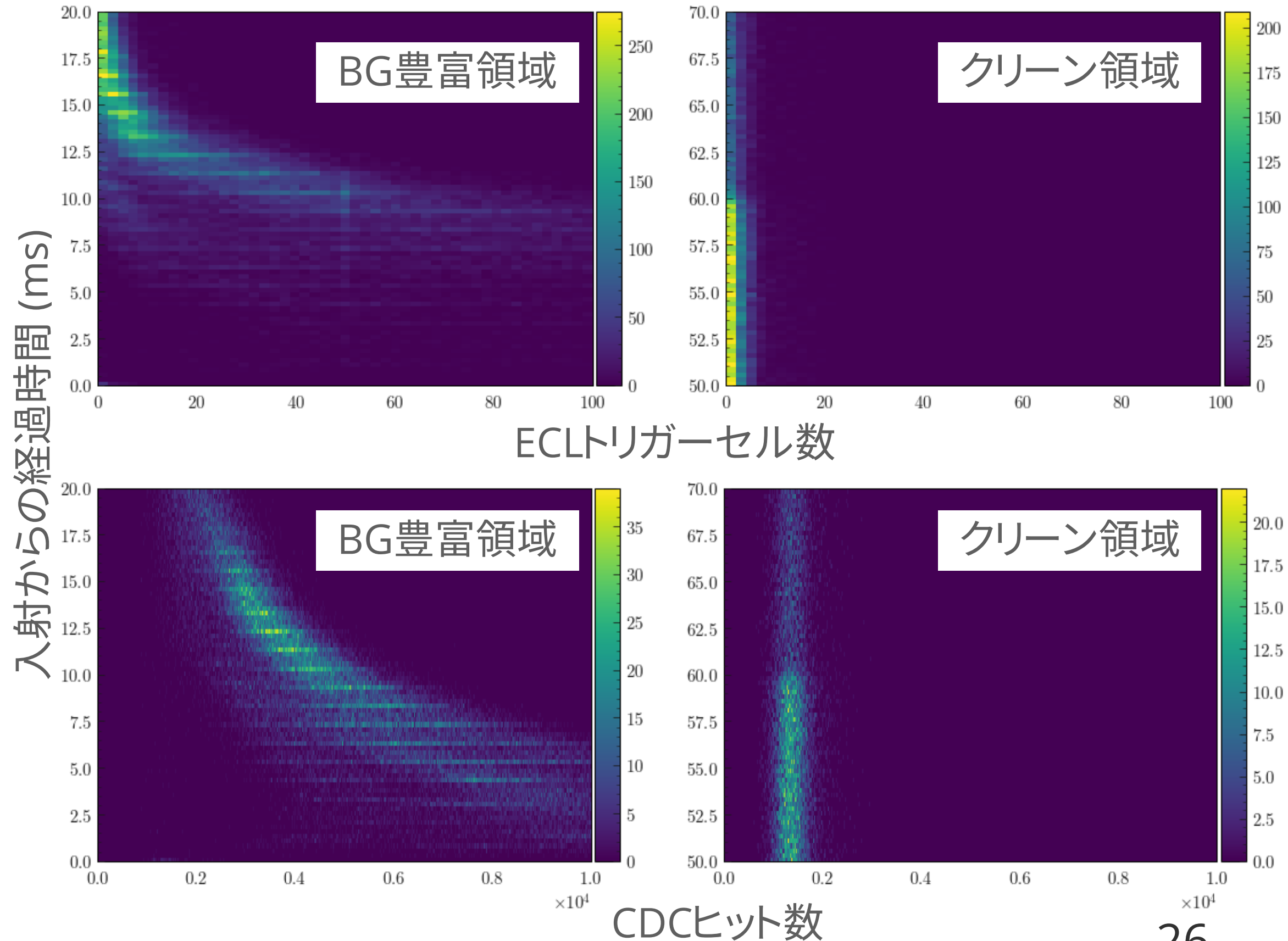


- We used two variables for data analysis:
 - Time from the last injection (t_{last} , ms): The elapsed time from the most recent injection when events were taken.
 - Running time (t_{run} , μs): The elapsed time from the passing of injected beams to the injection point per each revolution. It suggests the position of the injected beam.
- We defined two regions:
 - **Injection**: Right after the injection, and injected beams are right at the Belle II detector.
(Condition: $1\mu s < t_{run} < 2\mu s \wedge t_{last} < 20ms$)
 - **Stable**: Relatively long time elapsed from injection, and injected beams are far from our detector.
(Condition: $6\mu s < t_{run} < 8\mu s \wedge 50ms < t_{last} < 70ms$)
- We compared some distributions between two regions when positron is injected into LER.



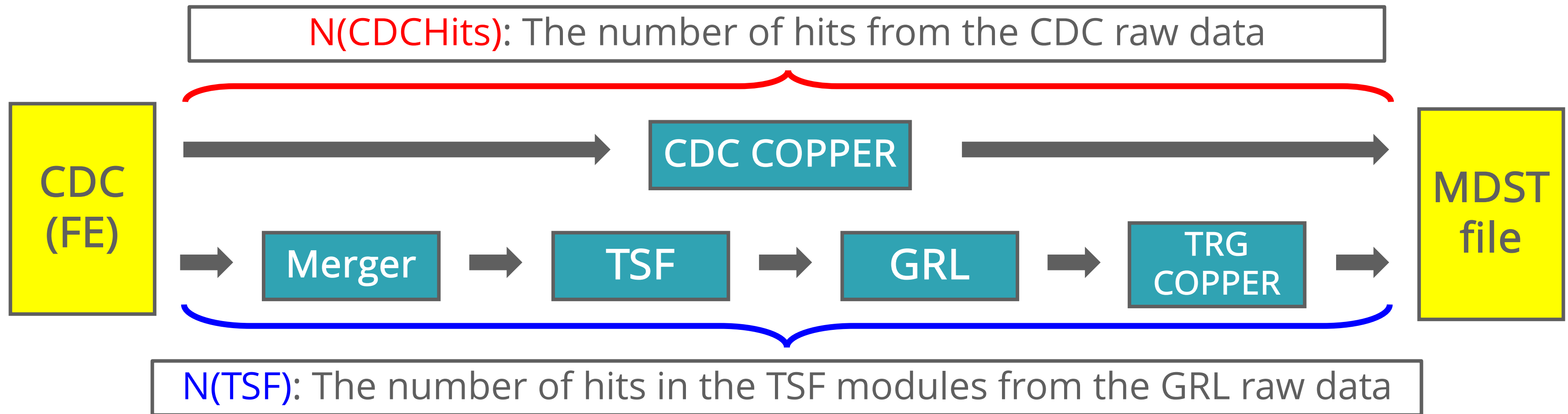
入射からの経過時間とヒット数の関係

- 入射から時間が経つと、入射したビームが安定し、入射背景の量が減衰する。
- 入射からの経過時間とヒット数をみたらこのような関係がよく見える



The Consistency Check: $N(\text{TSF})$ and $N(\text{CDCHits})$

- We check the correlation between $N(\text{TSF})$ from GRL & the $N(\text{CDCHits})$ from CDC.
 - The data path for two variables is as follows:

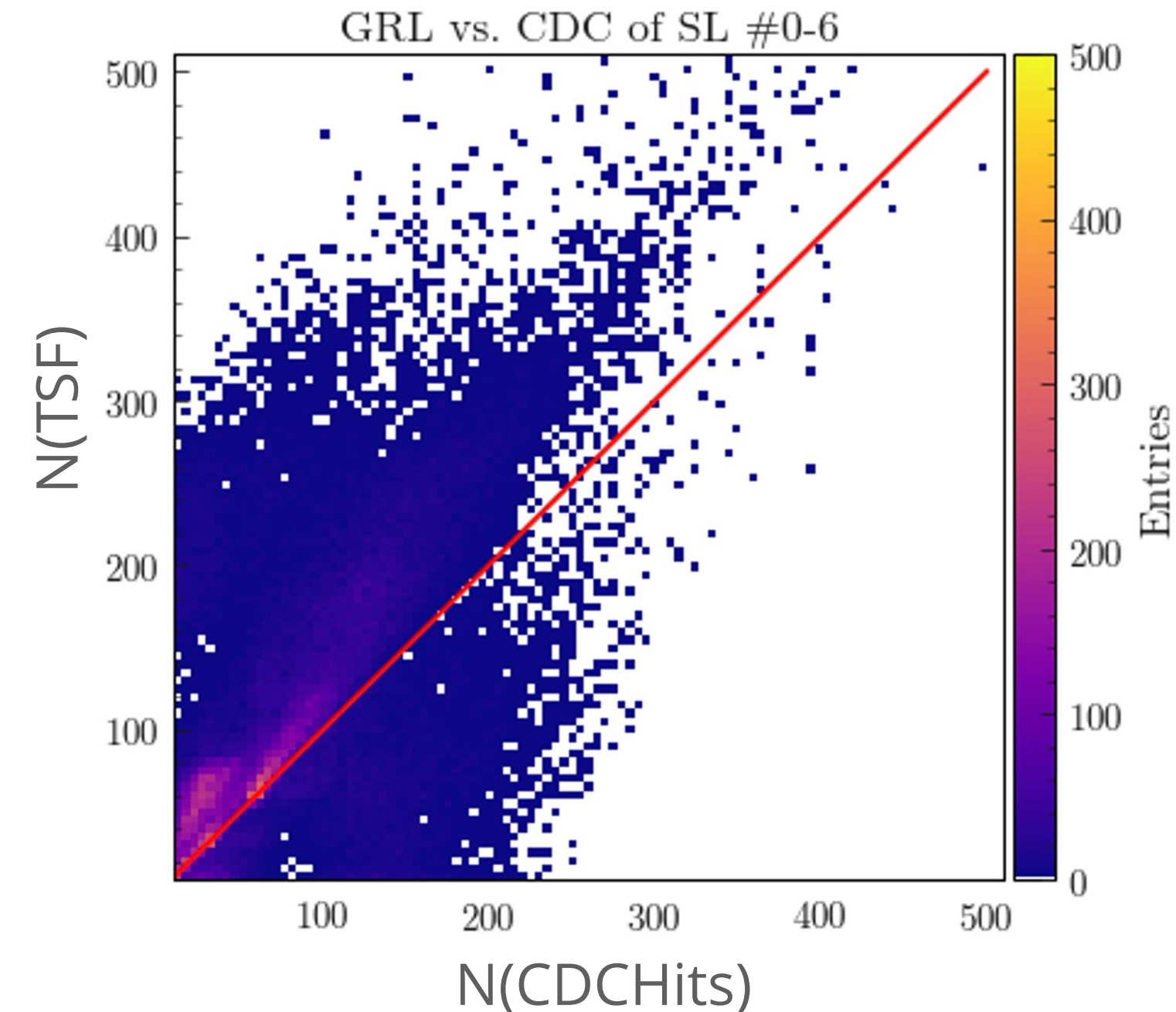


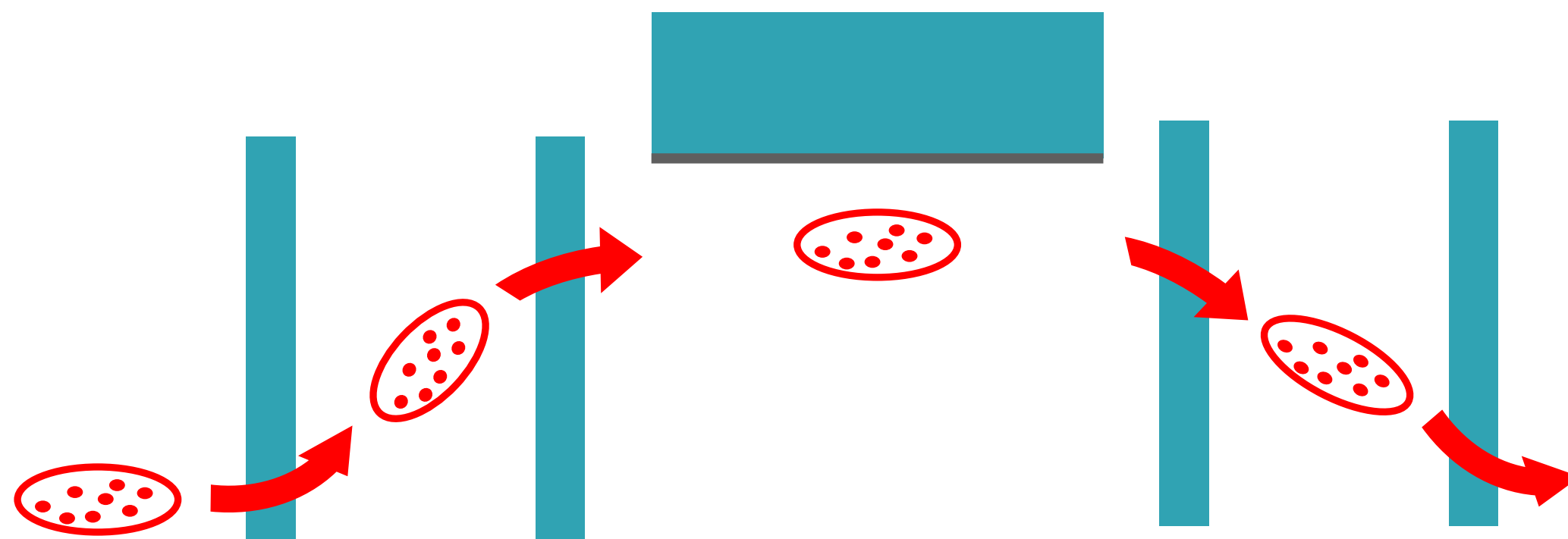
- Two values might be different due to the timing difference or any other reasons
 - However, we can expect a clear correlation ($x = y$) between the two values

The Correlation Between N(TSF) and N(CDCHits)



- We draw a 2D scatter plot for N(TSF) vs. N(CDCHits)
 - Summation over the super layers 0-6
 - X-axis: N(CDCHits), Y-axis: N(TSF)
 - **Red line: the reference line for the $x = y$ correlation**
- We can confirm the clear correlation between the two variables, but there are entries off the line.
 - We are investigating the reason for those entries.
- One possible reason might be the masked mergers in the TSF modules.
 - TSF adds an offset #CDCHits in masked mergers, but the CDC raw data can contain real hits from wires of the mergers







e^+e^- ビームの生成とメインリングへの入射

- e^+ と e^- はSuperKEKB前線の線形加速器(LINAC)で作られ、それぞれ4GeVと7GeVに加速される
 - LINACからの e^+e^- は、Beam Transport(BT)を経てSuperKEKBのメインリング(MR)に継ぎ足される(入射)
 - Belle IIはメインリングのビームを継ぎ足す時にもデータ記録を止めずに運転している: 連続的入射
- LINACからのビームとメインリングのビームが合流する地点で、4つのキッカー電磁石とセプタム電磁石が e^+e^- ビームを入射する

