

RHIC-sPHENIX 実験のための INTT 検出器の データ読出し性能の評価

高エネルギー物理学研究室 修士2年

20810151 森田美羽



目次

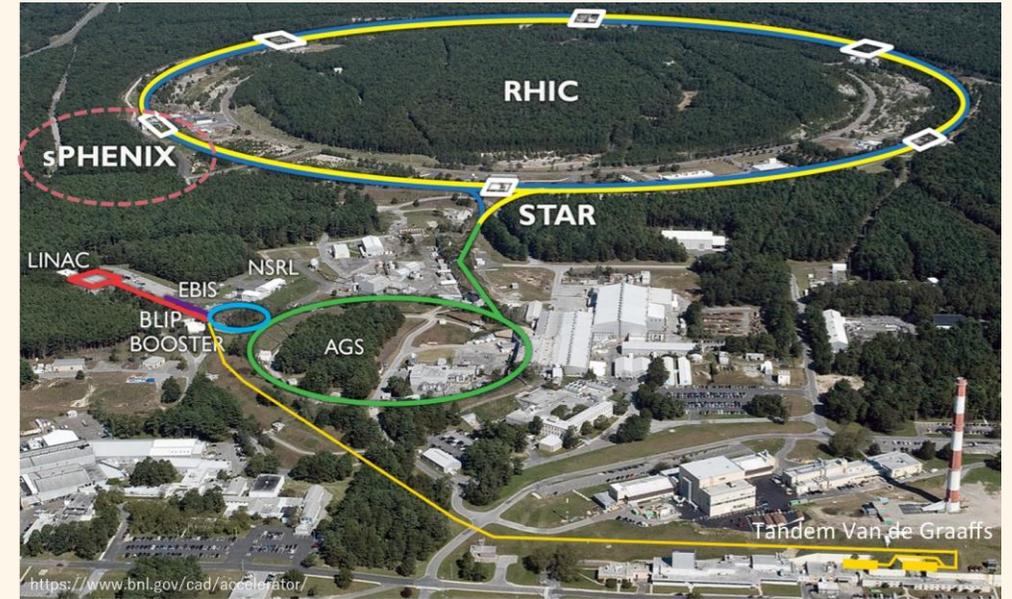
- 研究背景
 - sPHENIX 実験
 - INTT ラダー
 - Bus-Extender
- 研究の目的
- Bus-Extender の性能評価
 - 物理特性 –剥離試験–
 - 電気特性 –出力波形の観測–
- テストビーム実験によるINTT の検出効率の評価
 - 実験セットアップ
 - 解析手法
 - 結果
 - 考察と課題
- まとめ

重イオン加速器実験

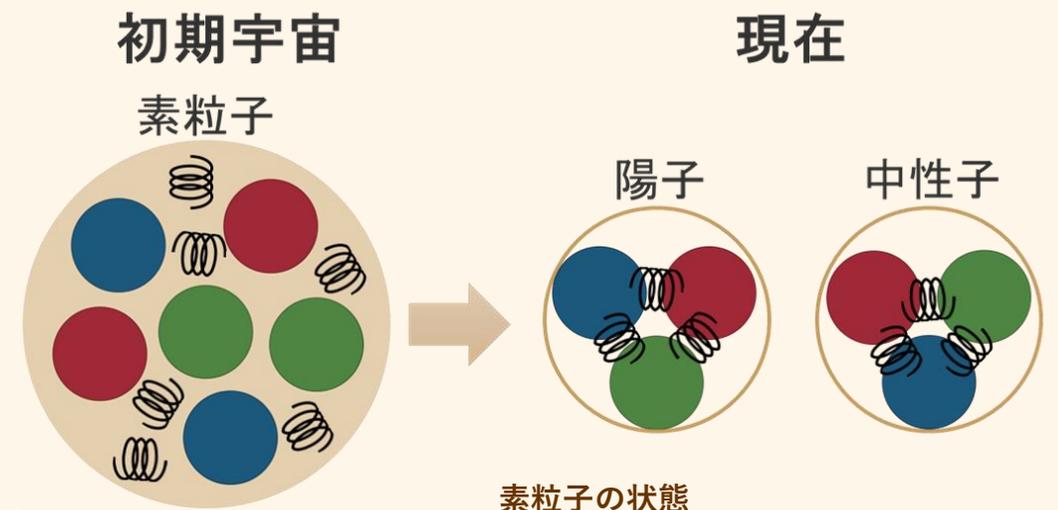
- クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) の生成とその性質の究明が目的
- 米国ブルックヘブン国立研究所の RHIC 加速器を用いた sPHENIX 実験が 2023年稼働予定
- ハドロンジェットやウプシロン粒子の観測を計画
- 初期宇宙の状態、QGPを実験室で再現する

QGP

- クォークとグルーオンが核子の束縛から解放されたプラズマ状態



RHIC加速器



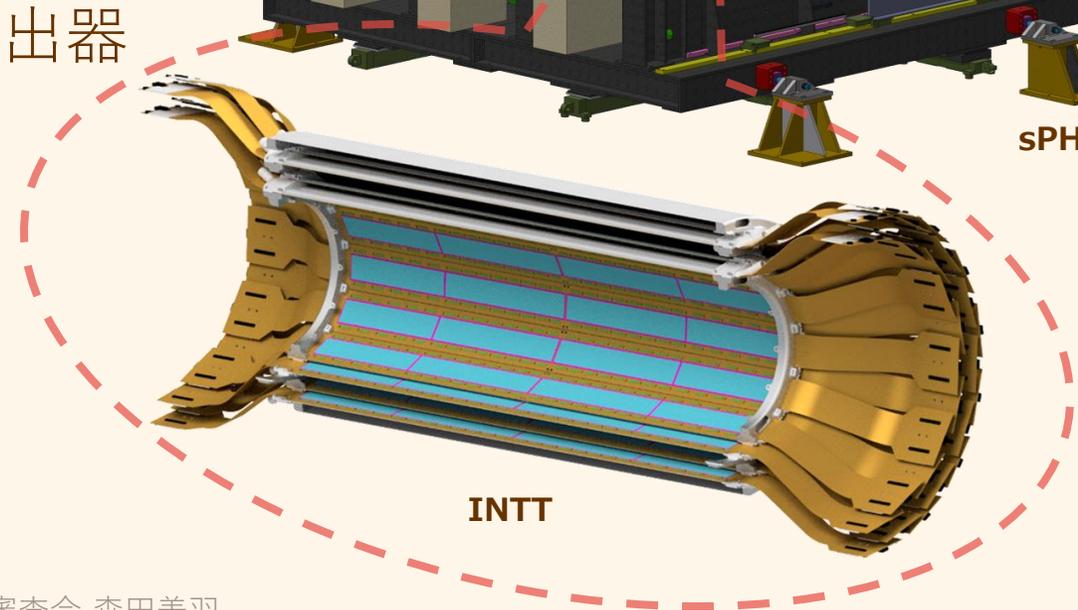
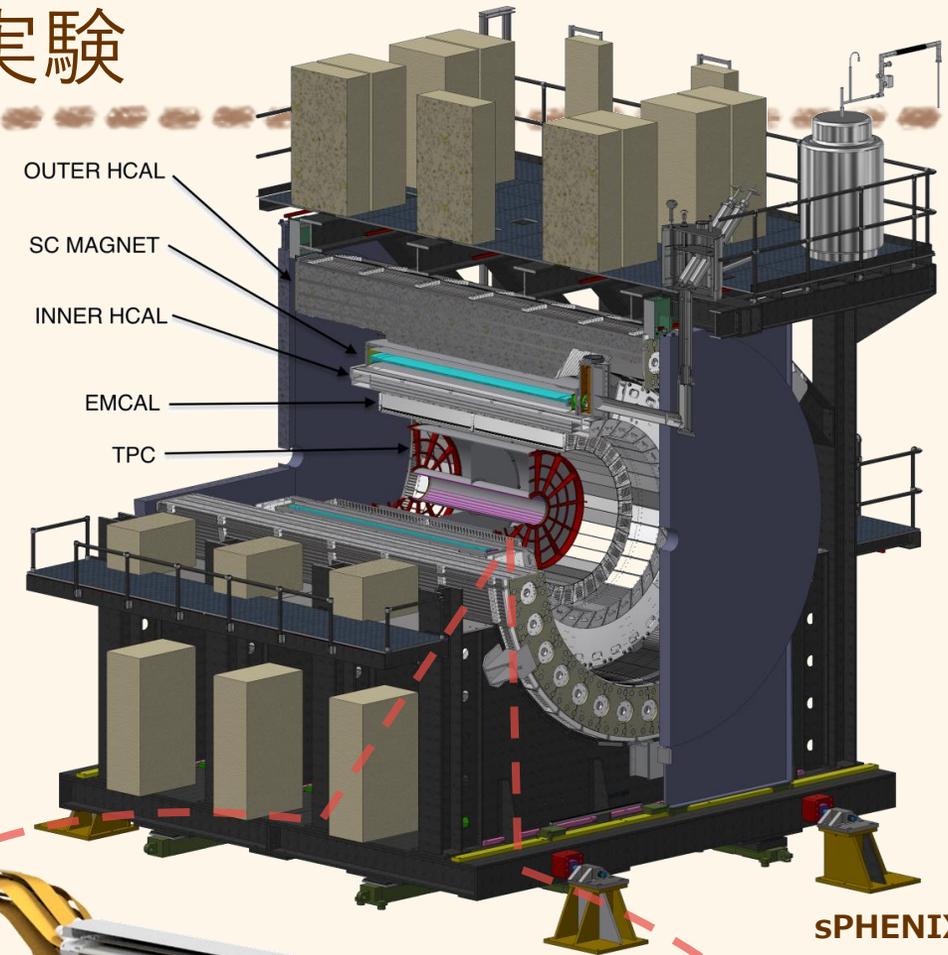
sPHENIX 実験

sPHENIX 実験

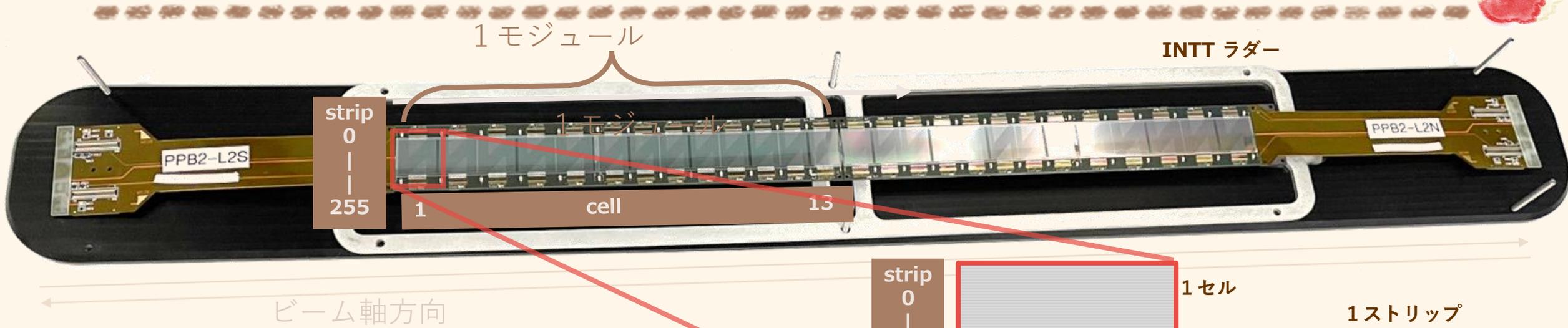
- ハドロンジェットを再構成
ウプシロン粒子の観測
 - 荷電粒子の飛跡を検出
 - 荷電粒子の種類を識別
 - 荷電粒子の崩壊の再構成

INtermediate Tracker (INTT)

- 飛跡検出器群の中間に位置する飛跡検出器
- ストリップ型シリコンセンサーを
2層の円筒構造に設置
- 時間分解能が高い
 - 1 ビームバンチの交差間隔である
106 ns以内でデータを処理する
- 計56本のINTT ラダーを使用する

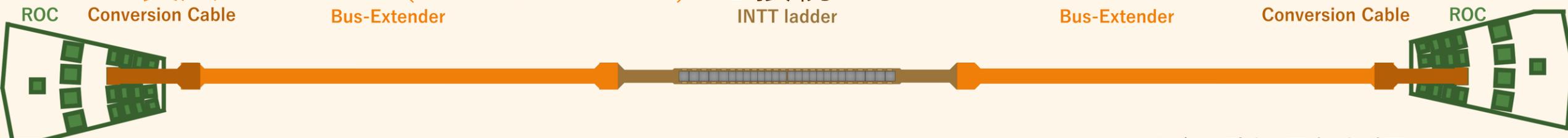


INTT ラダー



INTT ラダー

- 1 ラダーに 2 対のモジュールを設置
- 1 モジュールに 13 セルのシリコンセンサー
- 1 セルに 256 本のストリップ ($78 \mu\text{m} \times 16 \text{ mm}$ (20 mm) $\times 320 \mu\text{m}$)
セル: 1 ~ 13、ストリップ: 0 ~ 255
- 後段の読出し回路 (ROC) まで 1.3 m 離れている
 - 長尺ケーブル (Bus-Extender) を接続



INTT ラダーと読出し回路の概略図

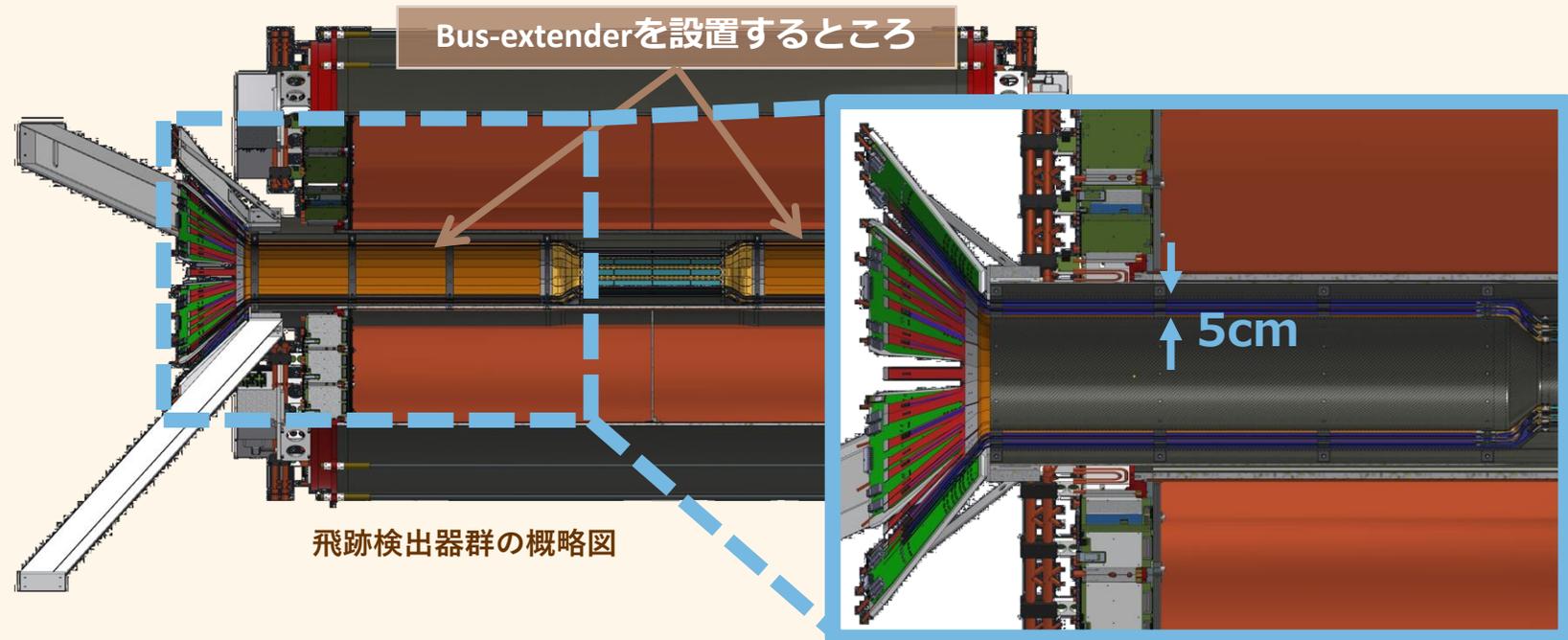
Bus-Extender

Bus-Extender

- INTT で検出した大量の生データを後段の読み出し回路へ伝送する
 - 長尺 : 1.11 m
 - 高密度 : 3.5 cm幅に130 μm \times 6 2 ペア
 - 高速 : 200 Mbps
 - 柔軟性 : 5 cm厚の狭い領域
一部曲線を描きながら設置



Bus-Extender



飛跡検出器群の概略図

条件を満たす市販品は存在しないため
独自開発を行ってきた

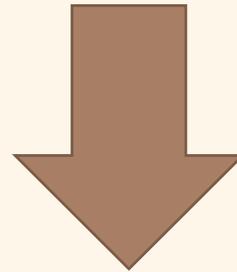
目次

- 研究背景
 - sPHENIX 実験
 - INTT ラダー
 - Bus-Extender
- 研究の目的
- Bus-Extender の性能評価
 - 物理特性 –剥離試験–
 - 電気特性 –出力波形の観測–
- テストビーム実験によるINTT の検出効率の評価
 - 実験セットアップ
 - 解析手法
 - 結果
 - 考察と課題
- まとめ



本研究では

- センサーで測定したデータを記録する能力を評価すること
- INTT が粒子を検出できる能力を評価すること
を目的としている



それらを検査するために

- 信号伝送率の悪化の原因となるBus-Extender による波形の減衰・なまりについて調べた
- テストビーム実験を行って検出効率を求めた

目次

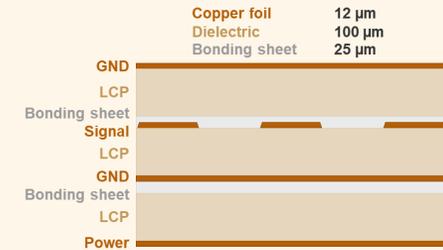
- 研究背景
 - sPHENIX 実験
 - INTT ラダー
 - Bus-Extender
- 研究の目的
- **Bus-Extender の性能評価**
 - 物理特性 –剥離試験–
 - 電気特性 –出力波形の観測–
- テストビーム実験によるINTT の検出効率の評価
 - 実験セットアップ
 - 解析手法
 - 結果
 - 考察と課題
- まとめ

Bus-Extender の性能評価



物理特性

- 目的：Bus-Extender の放射線耐性を調べること
 - Bus-Extender は放射線環境下で使用される
 - Bus-Extender は積層構造
 - 接着剤が破壊されるとインピーダンスコントロールができなくなる
電氣的な性能を保てなくなる
- 方法：剥離試験によって剥離強度を測定し評価を行う
 - 接着面の剥離強度を調べるためBus-Extender のサンプルを使用する



Bus-Extender の断面

電気特性

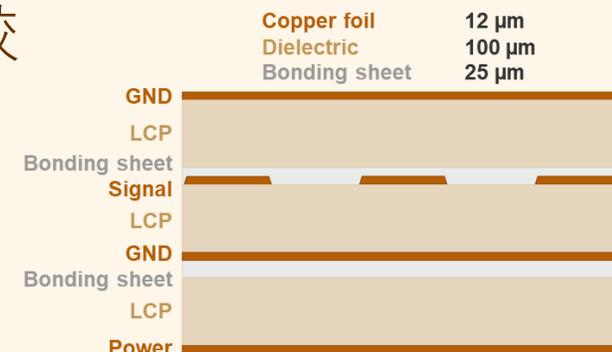
- 目的：INTT ラダーと接続したときのBus-Extender の伝送性能を調べること
 - Bus-Extender の単体測定よりBus-Extender を通過した信号は3割減衰するとわかった
 - 信号の減衰やなまりによりデータ受信数に影響がある
- 方法：INTT ラダーからの出力波形をオシロスコープで観測する
 - Bus-Extender ありなしの結果を比較する



Bus-Extender

剥離試験

- 放射線照射前のサンプルと5 kGy照射したサンプルを比較
- 万能試験機を用いてサンプルの接着面の剥離強度を測定

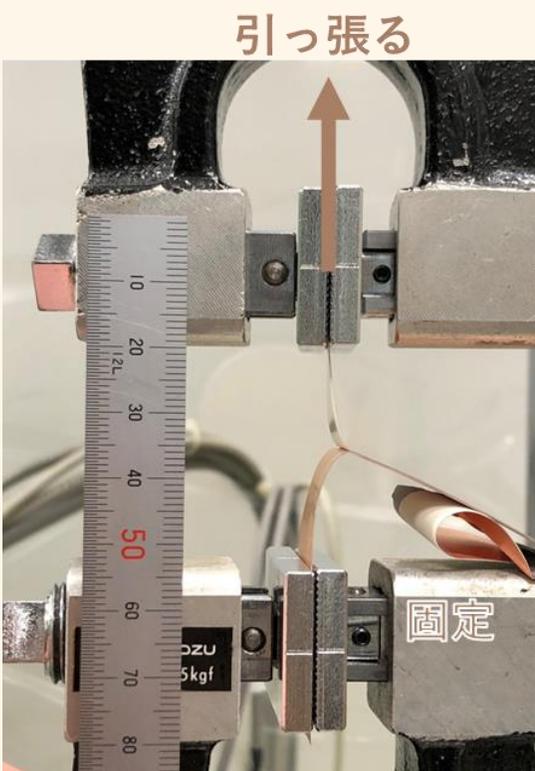


Bus-Extender の断面

試験片



剥離強度を測る接着層の位置

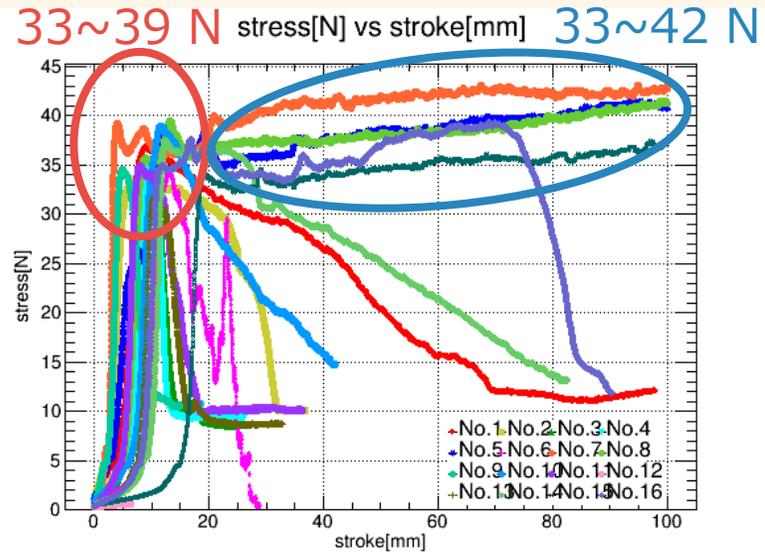


万能試験機による剥離試験

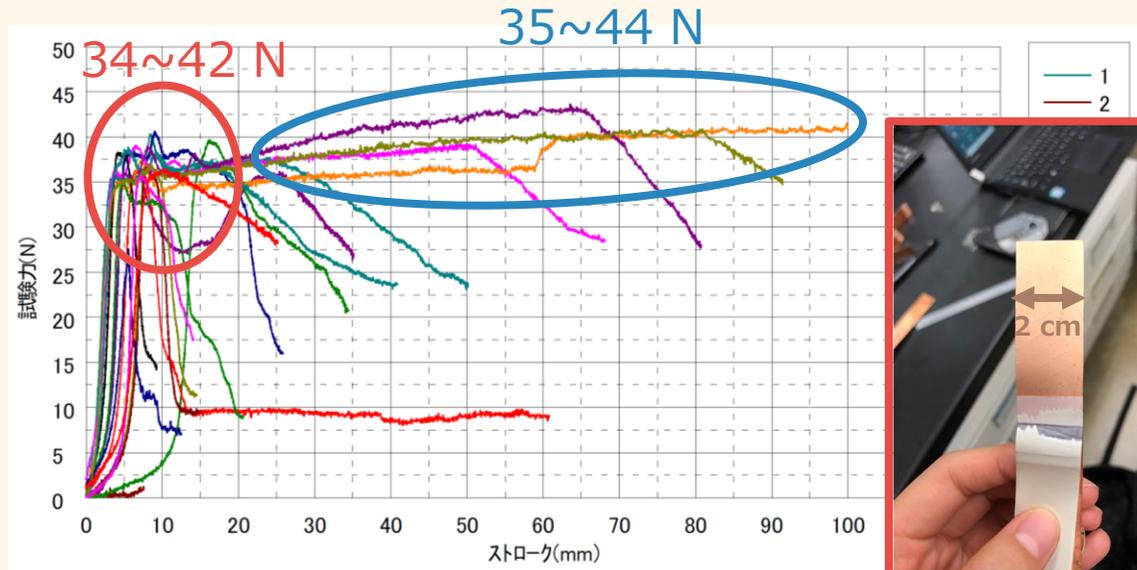


剥離するサンプル

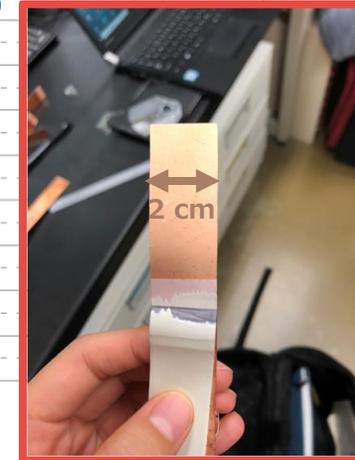
剥離試験の結果



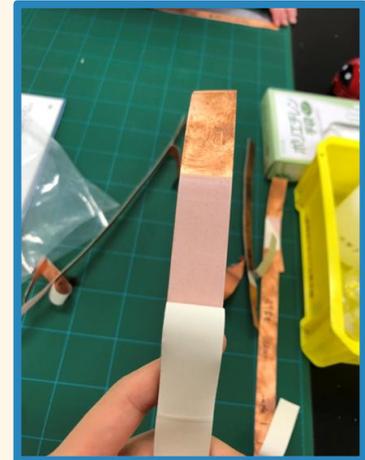
放射線照射前のサンプルの剥離試験結果



5 kGy照射したサンプルの剥離試験結果



接着層が剥離する前に
基板が破断したサンプル



接着層が剥離したサンプル

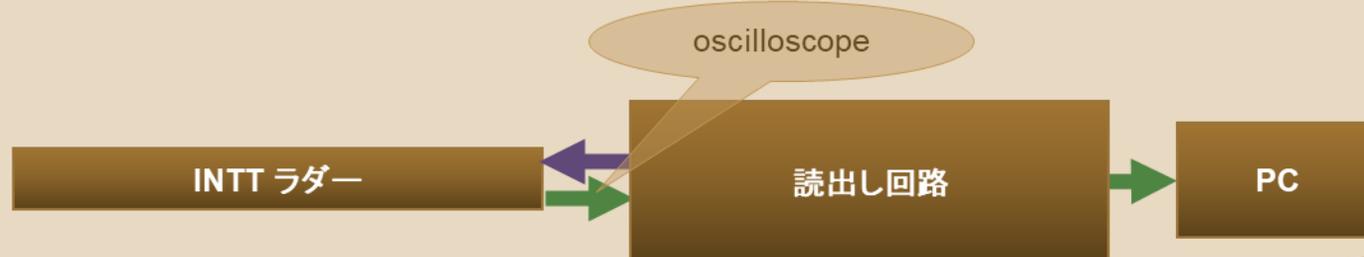
- 放射線照射前のサンプルは単位幅あたり16~21 Nの剥離強度
- 5 kGy放射線照射したサンプルは単位幅あたり17~22 Nの剥離強度
 - 一般的な基板の剥離強度は8 N程度
 - 5 kGyはsPHENIX 実験で想定される放射線照射量に相当する

剥離強度は十分であり、放射線耐性は十分であるとわかった

INTT ラダーの出力波形の観測

- オシロスコープを使ってINTT ラダーの出力波形を観測する
- Bus-Extender なしとありを比較してBus-Extender を評価する

INTT 用テストベンチによる測定



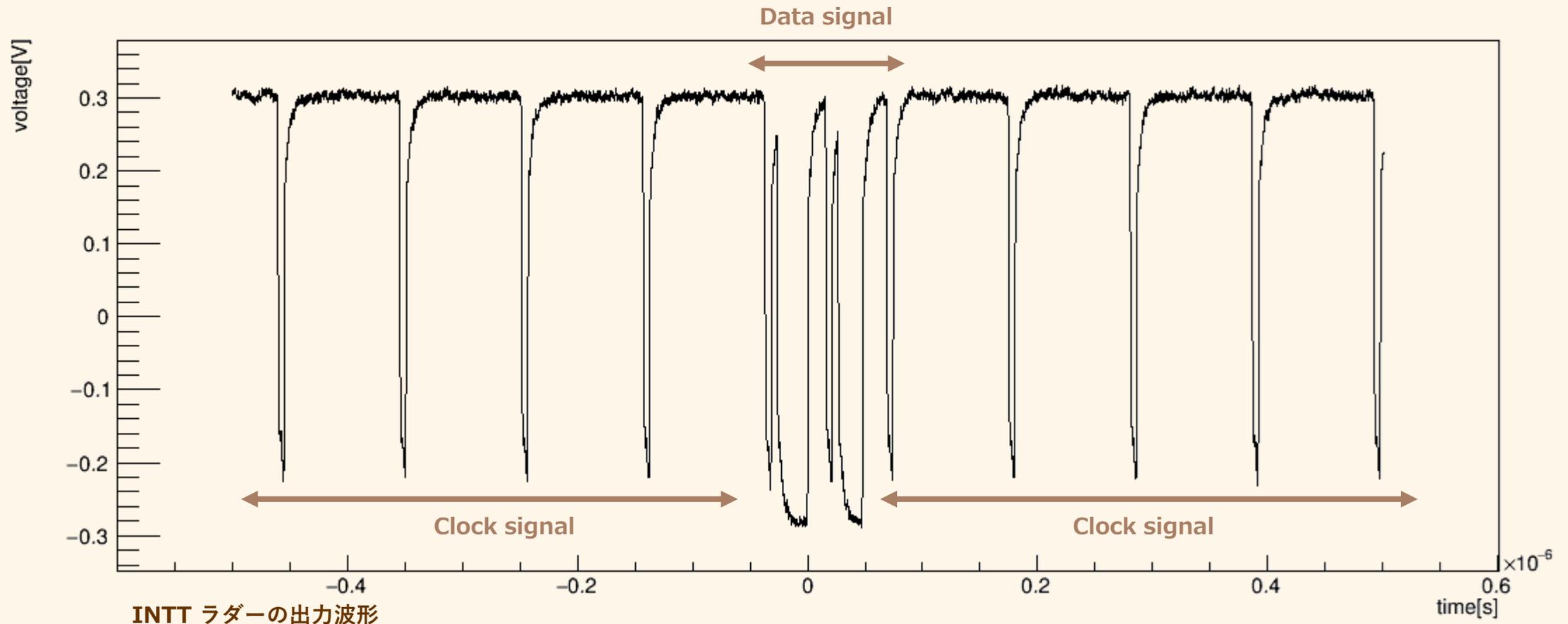
INTT 用テストベンチの概略図

INTT ラダーの出力波形



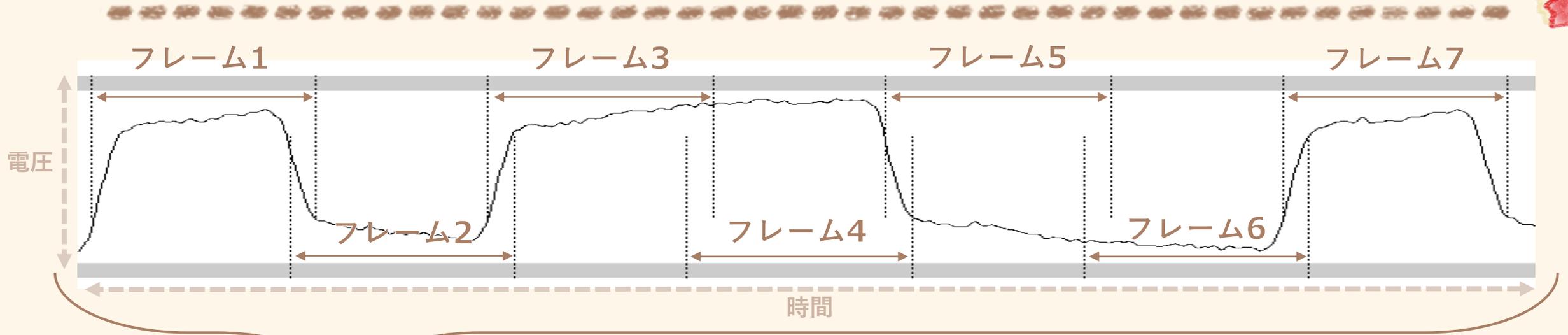
出力波形の観測

- オシロスコープで観測したデジタル出力波形
 - 106 nsごとにクロック信号を送信している
 - 検出位置や波高、タイミングの情報を持ったデータを含む

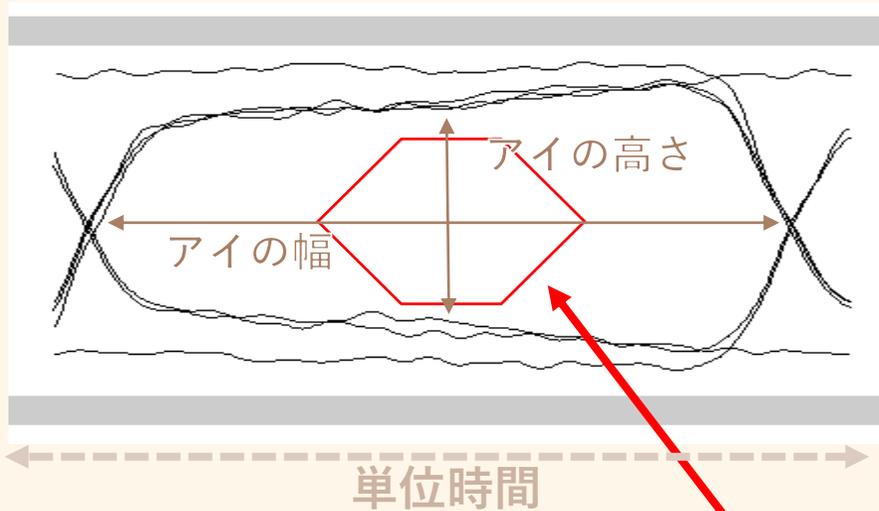


INTT ラダーの出力波形

アイダイアグラム



アイダイアグラム



アイダイアグラムの作成方法

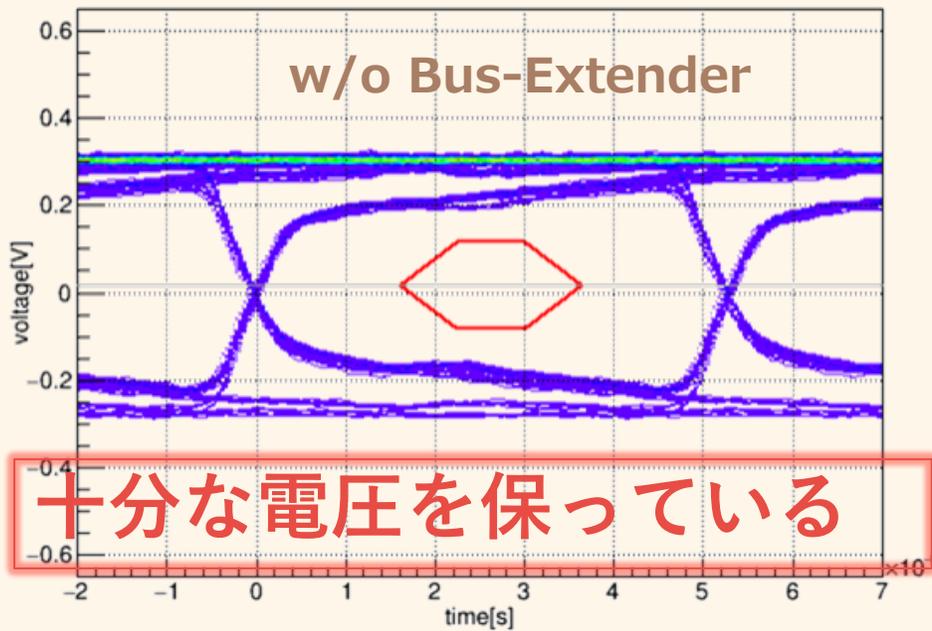
アイダイヤグラムとは

- 信号の伝送時の波形のゆがみを可視化するもの
- デジタル信号波形を多数サンプリングし重ね合わせて表示したものである
 - 目のように見える→「アイ」ダイアグラム
- 高さや幅から電圧やタイミングのマーヅンを評価できる
- マスクはデータ判定に必要な最低限の高さと幅を示す
 - 観測した信号がマスクに触れていないかを確認
 - マスクは単体測定の結果より誤判定率 10^{-9} 以下になるように設定

Bus-Extender ありなしのアイダイアグラムと受信数



アイダイアグラム



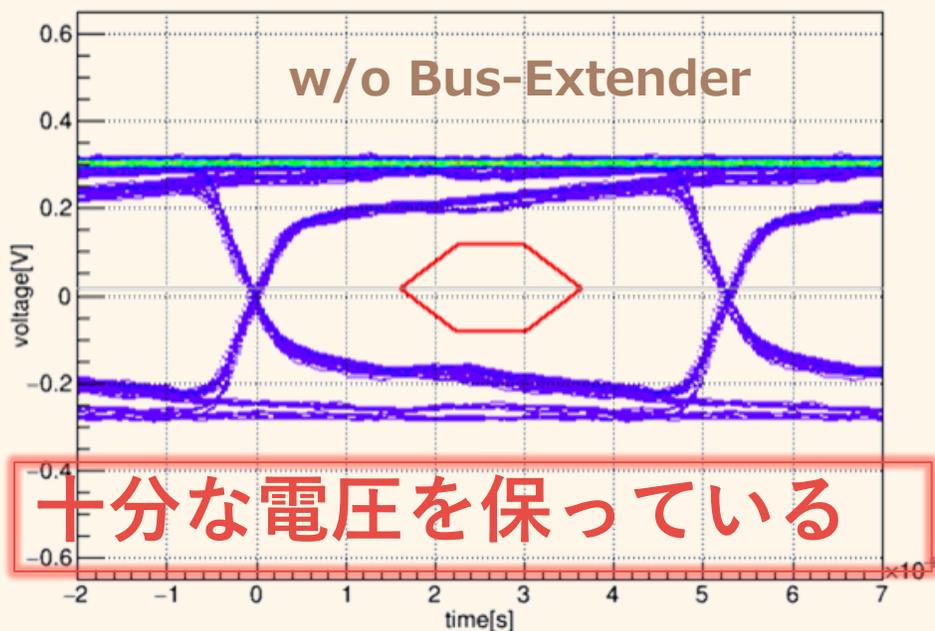
3mA



.....→
Bus-Extender
を使用すると

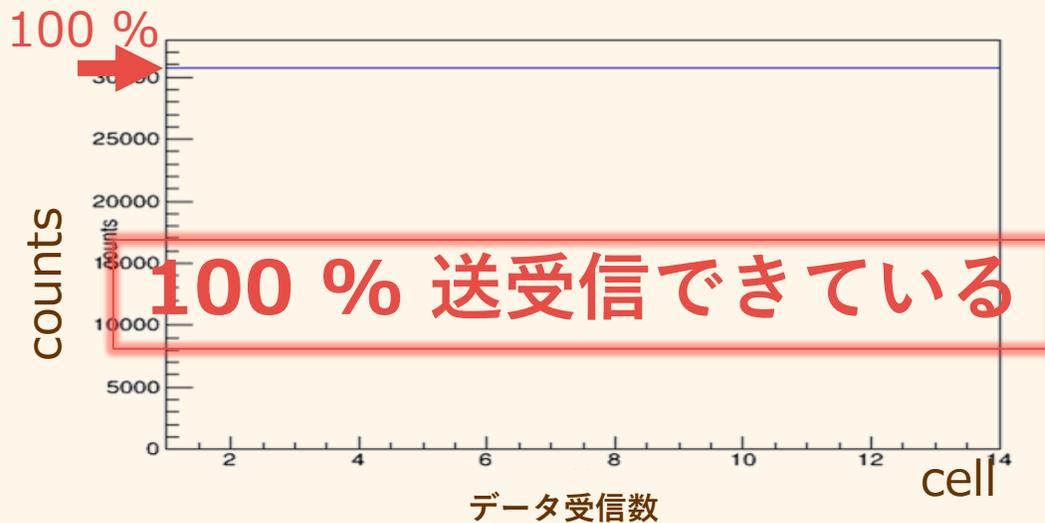
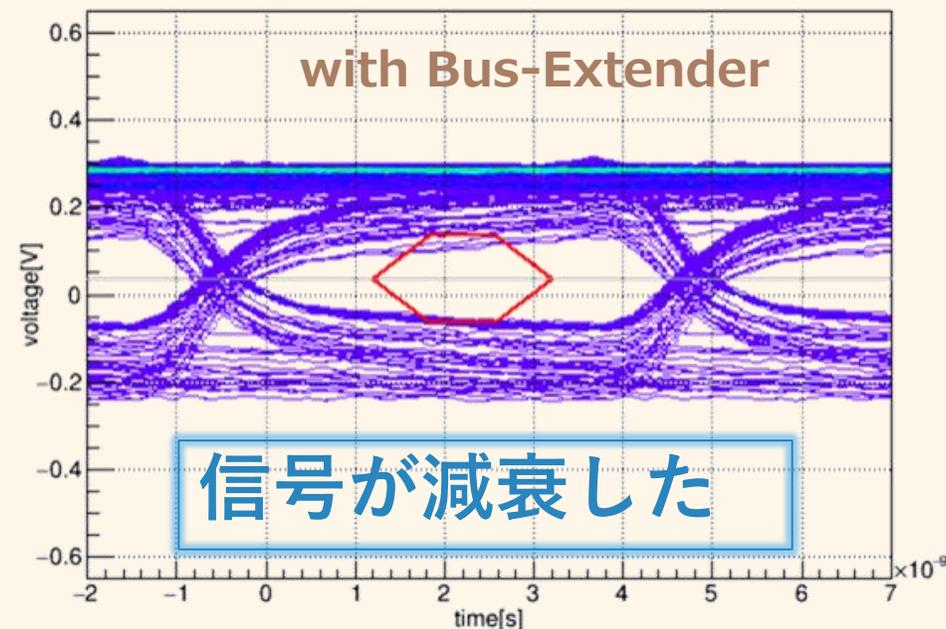
Bus-Extender ありなしのアイダイアグラムと受信数

アイダイアグラム

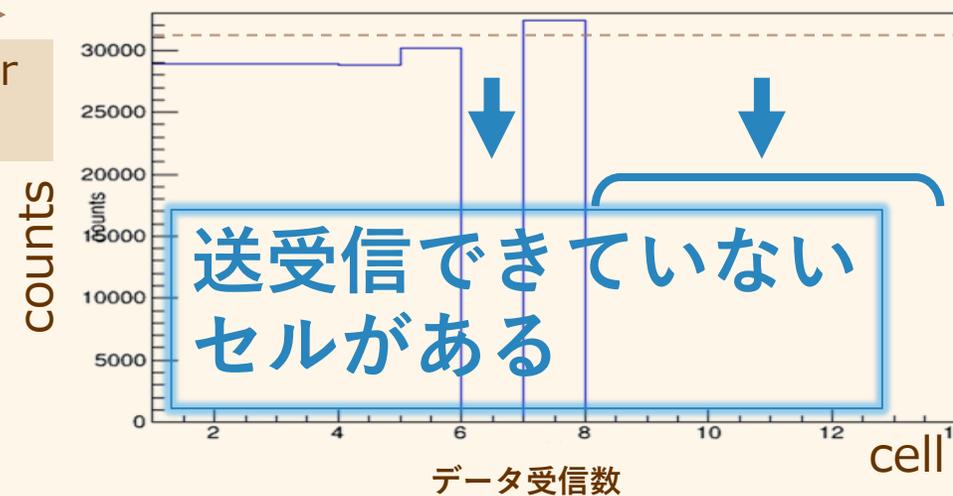


3mA

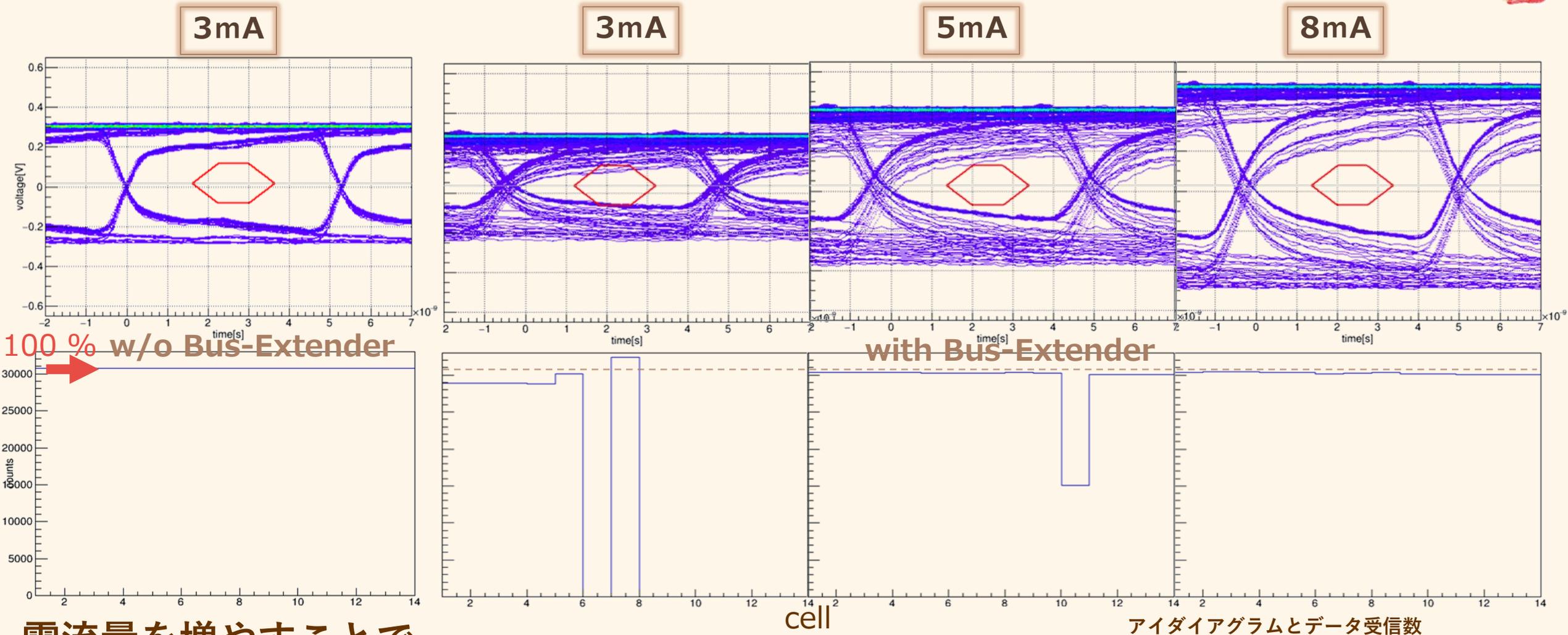
アイダイアグラム



----->
Bus-Extender
を使用すると



電流量を増やしたときの結果



電流量を増やすことで

- 信号波高がマスクよりも十分に高くなった
- 全てのセルで送受信できている

Bus-Extender の伝送性能は十分である

目次

- 研究背景
 - sPHENIX 実験
 - INTT ラダー
 - Bus-Extender
- 研究の目的
- Bus-Extender の性能評価
 - 物理特性 –剥離試験–
 - 電気特性 –出力波形の観測–
- テストビーム実験によるINTT の検出効率の評価
 - 実験セットアップ
 - 解析手法
 - 結果
 - 考察と課題
- まとめ

目的

- 実機に近い測定でINTT ラダーの動作確認を行う
- 過去の測定よりも高い精度で検出効率を求めること

テストビーム実験

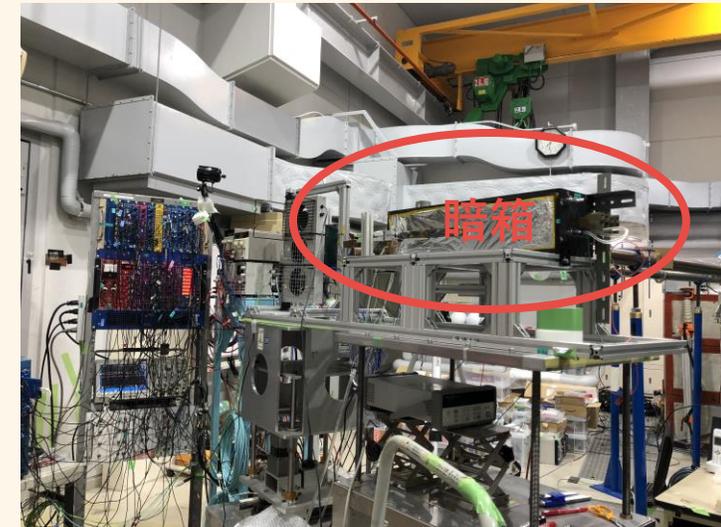
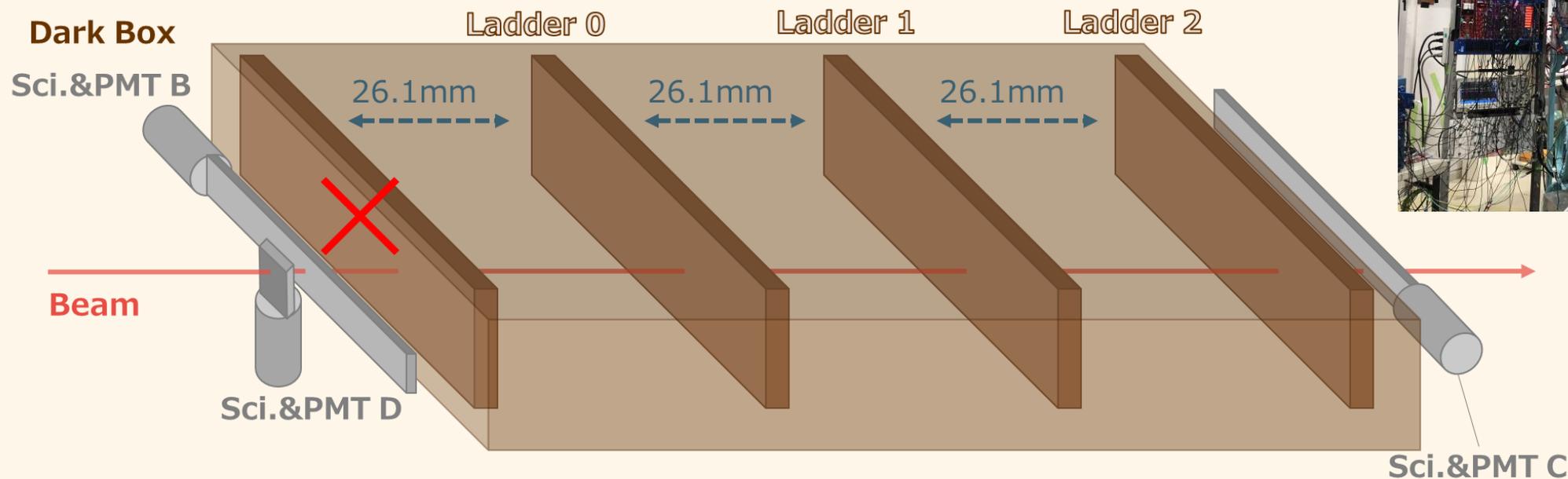
- 加速させた粒子ビームを用いた測定
- 2021年12月に東北大学電子光理学研究センター（ELPH）にてテストビーム実験を行った
- エネルギーが1 GeVの陽電子ビーム
- 新構築した外部トリガーシステムと量産型のINTT ラダー3台とBus-Extender を使用



東北大ELPH のGeV-y 加速器

実験セットアップ

- 暗箱の中にINTT ラダーを4台設置、うち3台を使用
 - ビームライン最上流の1台は不具合のため使用せず
- 外部トリガーとしてシンチレーションカウンタを2台暗箱の前後に設置
- 外部トリガーとは別にサイズの異なるシンチをビーム照射位置に設置

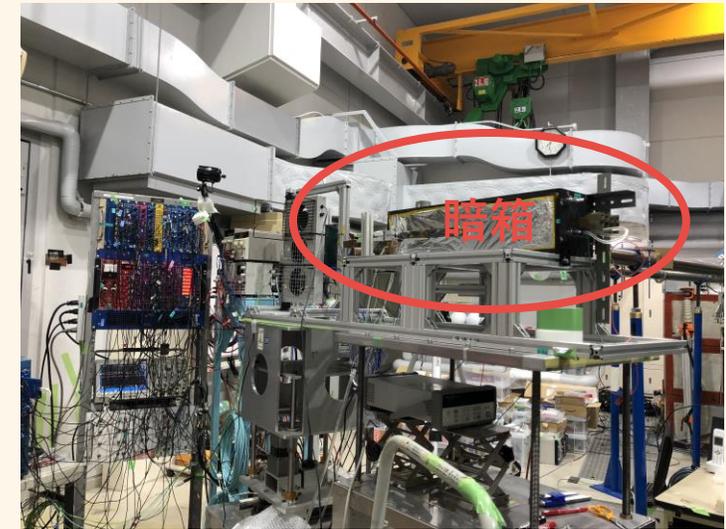
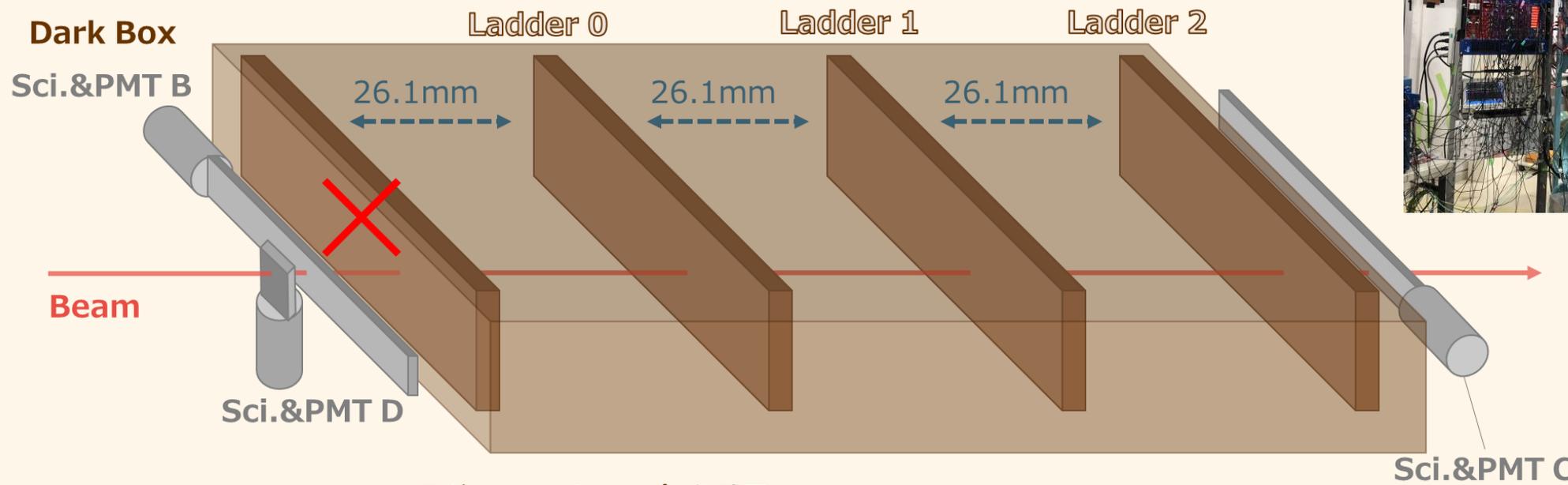


実験セットアップの様子

INTT ラダーのセットアップの概略図

Ladder1 の検出効率の定義

$$ladder1\ efficiency = \frac{N(ladder0 \ \&\& \ ladder1 \ \&\& \ ladder2)}{N(ladder0 \ \&\& \ ladder2)}$$

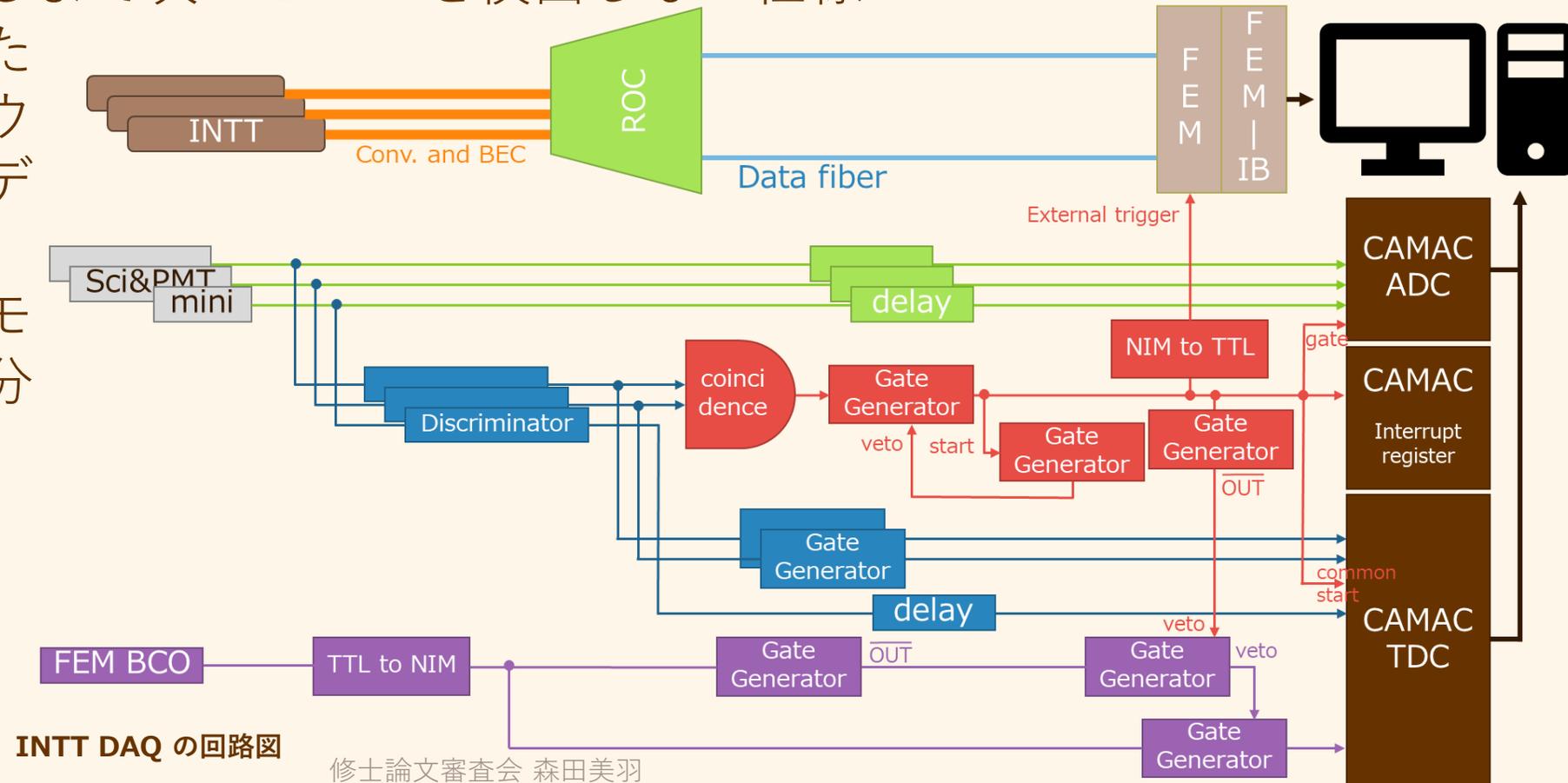


実験セットアップの様子

INTT ラダーのセットアップの概略図

データ収集システム (DAQ)

- NIM、CAMAC を使ってシンチレーションカウンタの波高やタイミングデータを収集
- DAQ 回路中にハードウェア veto 回路を組んでおり、ビームを検出した後にそのデータを処理し終わるまで次のビームを検出しない仕様
- 暗箱の前後に設置したシンチレーションカウンタ 2 台の Coincidence 信号がトリガー
- トリガーシンチは 1 モジュールの 13 セル分と同サイズ



INTT DAQ の回路図

修士論文審査会 森田美羽

Ladder1 の検出効率の定義

$$ladder1\ efficiency = \frac{N(ladder0 \ \&\& \ ladder1 \ \&\& \ ladder2)}{N(ladder0 \ \&\& \ ladder2)}$$

解析の手順

- 検出効率を求めるために
 - 1) イベント選択
 - 2) クラスター化 ←new
 - 3) 検出効率の計算の順でデータ解析を行った

イベント選択

- ノイズを除く
- ビームと関係ないヒットを出力するホットチャンネルを除く

クラスター化

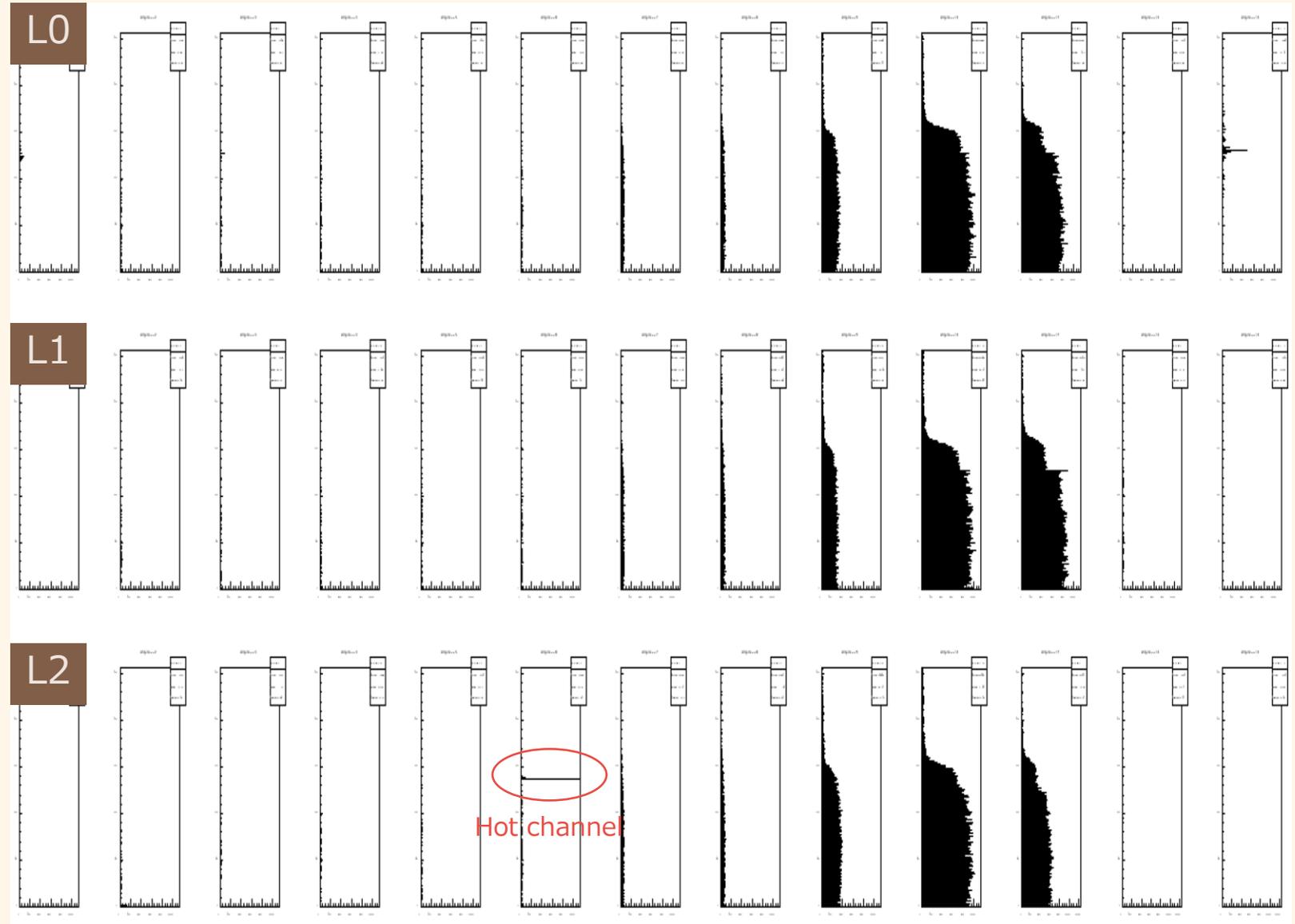
- 複数のストリップを通過する1つのイベントを1つのかたまりにまとめる

検出効率の計算

- ビームによるヒットを厳選するために計算式の分母を絞る
- 選んだ分母に対する分子を求める

1) イベント選択

- データフォーマットに合っていないデータなどのノイズを除く
- ビームと無関係にヒットを検出するホットチャンネルを除く
 - 横軸ストリップのヒストグラム
1 3セル分

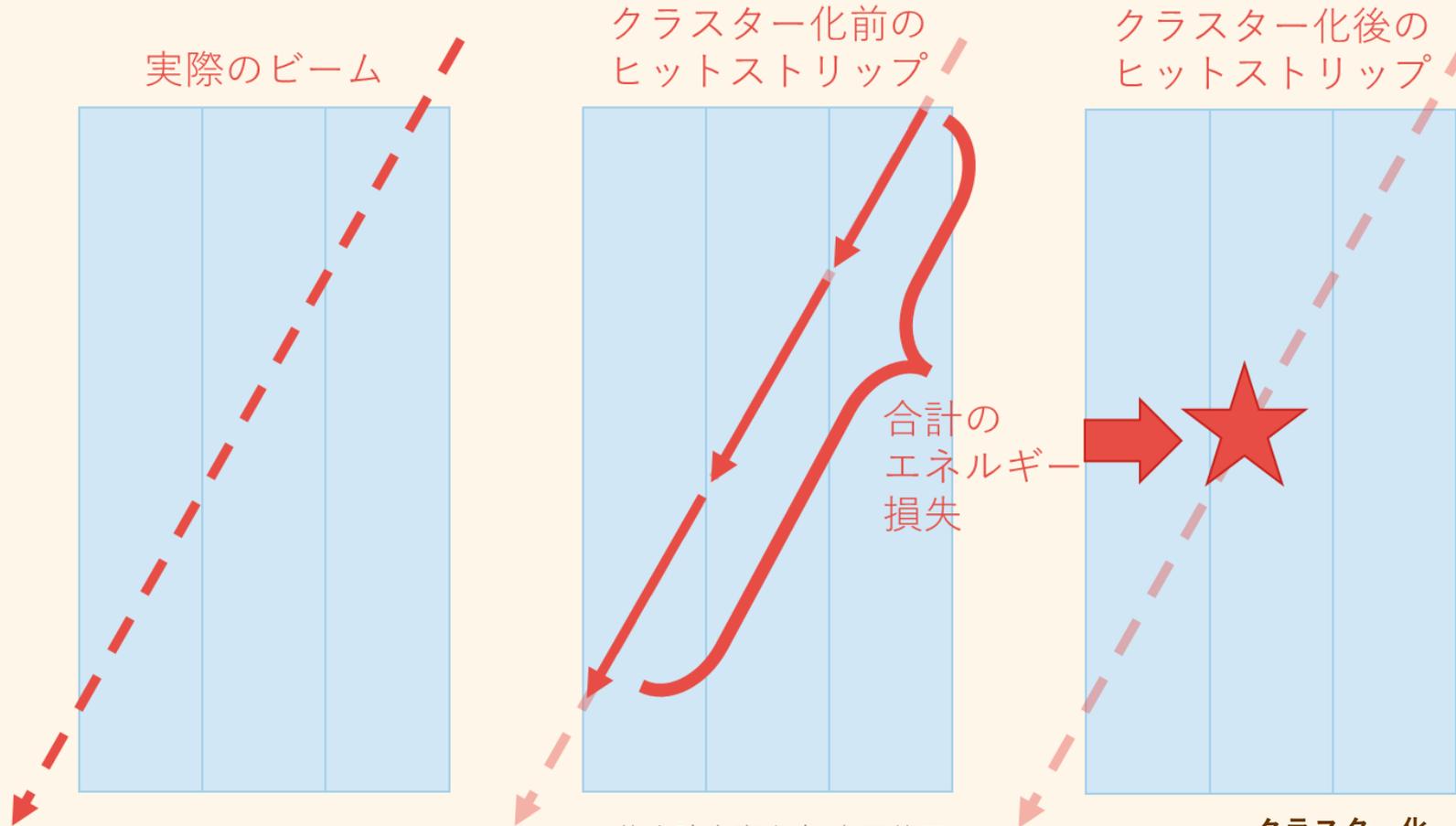


2) クラスター化

- 隣り合ったストリップとストリップのエネルギー損失の重み付き平均からクラスター位置を計算する

クラスター位置の計算

$$\text{clustered strip} = \frac{\sum \text{strip} \times \text{energy deposit}}{\sum \text{energy deposit}}$$



Ladder1 の検出効率の定義

$$ladder1\ efficiency = \frac{N(ladder0 \ \&\& \ ladder1 \ \&\& \ ladder2)}{N(ladder0 \ \&\& \ ladder2)}$$

3) 検出効率の計算

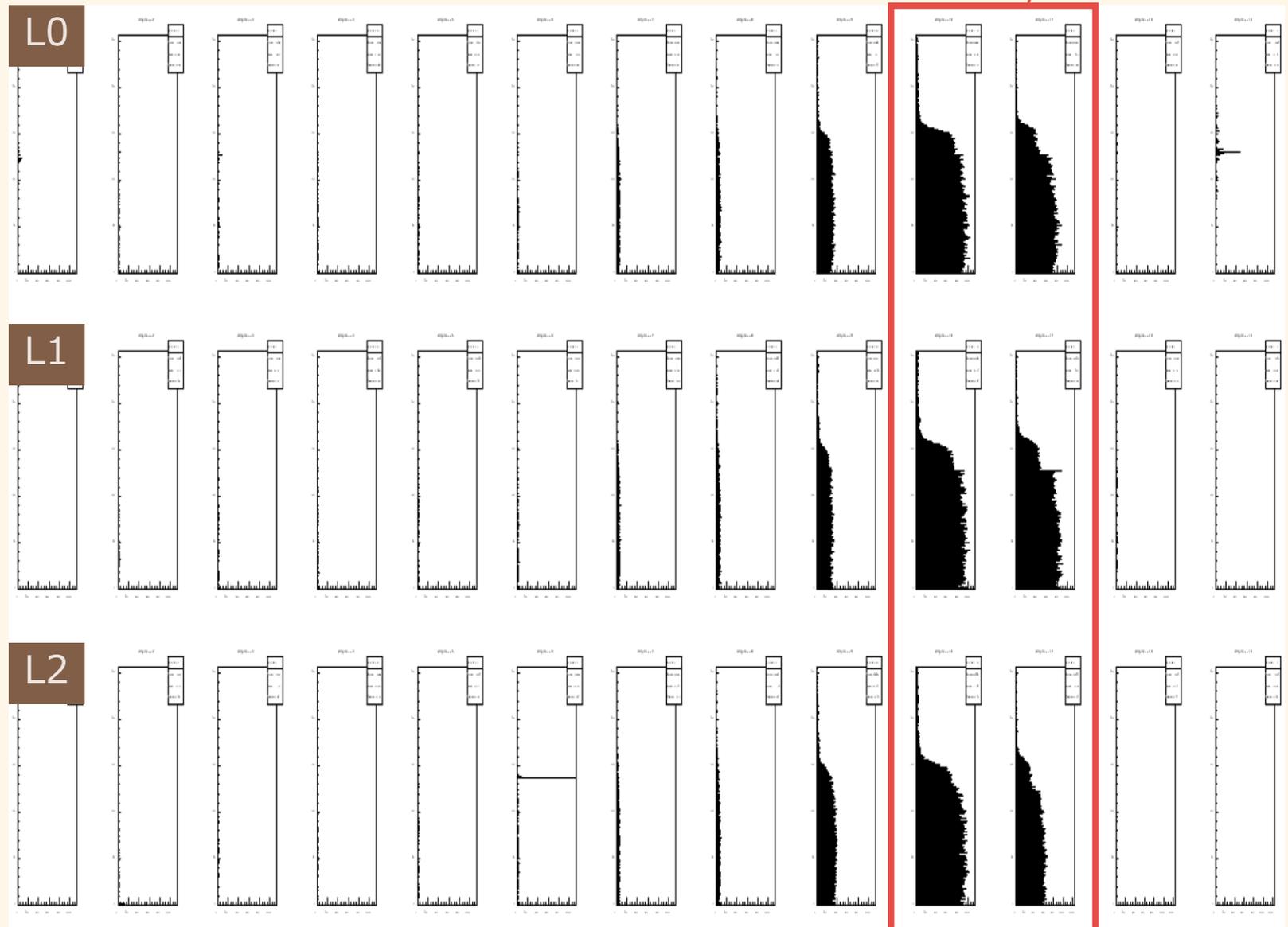
- 分母のイベントを選択する
 - 検出効率を求めたいINTT ラダーを注目ラダー、その他の分母に該当する2つのINTT ラダーをまとめて基準ラダーと呼ぶ
 - 基準ラダーは1 イベントに1 クラスターのみ
 - 基準ラダーから求めた注目ラダーの期待位置は存在するセンサーの位置のみ
 $1 \leq cell < 14$ 、 $0 \leq strip < 256$

ビーム照射位置の選択



ビームの照射位置

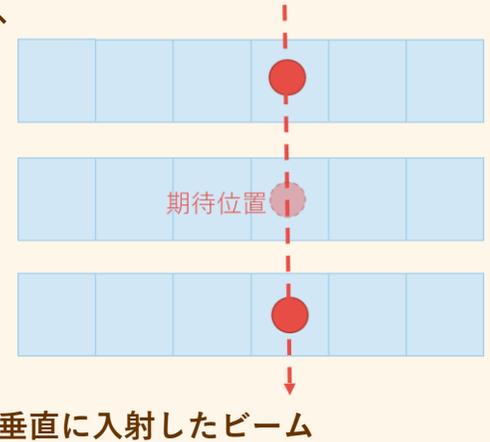
- ビームが照射する位置にあたるセルを選択する
cell = 10 または
cell = 11



テストビーム実験のヒットマップ

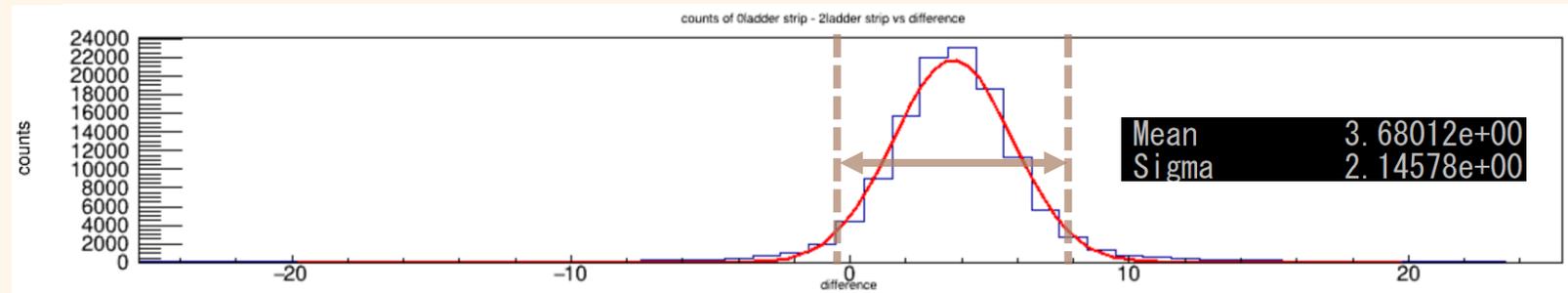
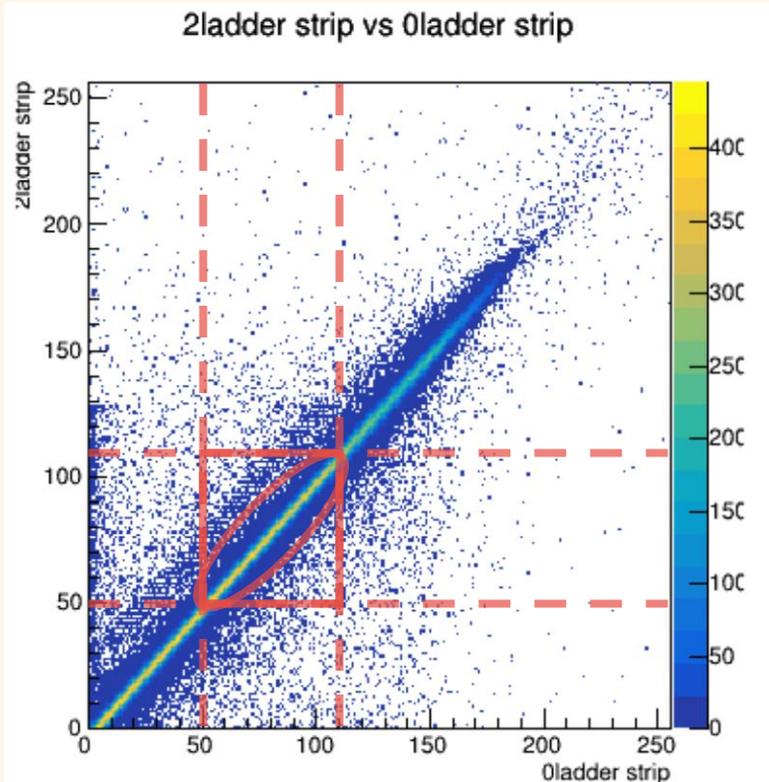
センサーの中央のヒット

- 全てのINTT ラダーを通過するイベントを選択する
- 期待位置がセンサーの外側を通過してしまいやすい端のヒットを除く
 $50 < \text{strip} < 120$



基準ラダーの相関関係

- ビームがセンサー表面に垂直に入射したイベントを選択する



基準ラダーの差分布

- 各分布にガウス分布をFit する
- Fit 関数から中央値 (mean) と幅 (sigma) を得る
- $\text{mean} \pm 2\text{sigma}$ のヒットを選ぶ

基準ラダーの相関分布

結果



結果	基準ラダーのヒットに対して注目ラダーのヒット数を求めた結果		
	基準ラダーのヒット数	注目ラダーのヒット数	検出効率 [%]
ラダー 0	76829	76473	99.53 ± 0.02
ラダー 1	84618	84059	99.39 ± 0.03
ラダー 2	90299	89902	99.56 ± 0.02

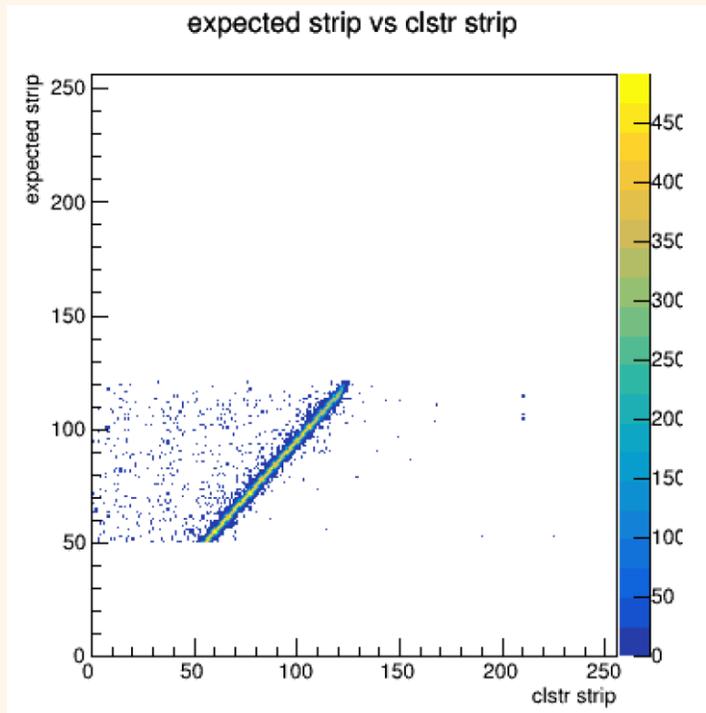
結果

- 基準ラダーのヒットに対して注目ラダーのヒットは全てのINTT ラダーで**99 %以上**の割合であった
- 2019年のテストビーム実験では検出効率が**96.5 %**であったが、精度の高い測定により前回よりも高い検出効率を得た
- 検出器に期待する検出効率は**99 %**

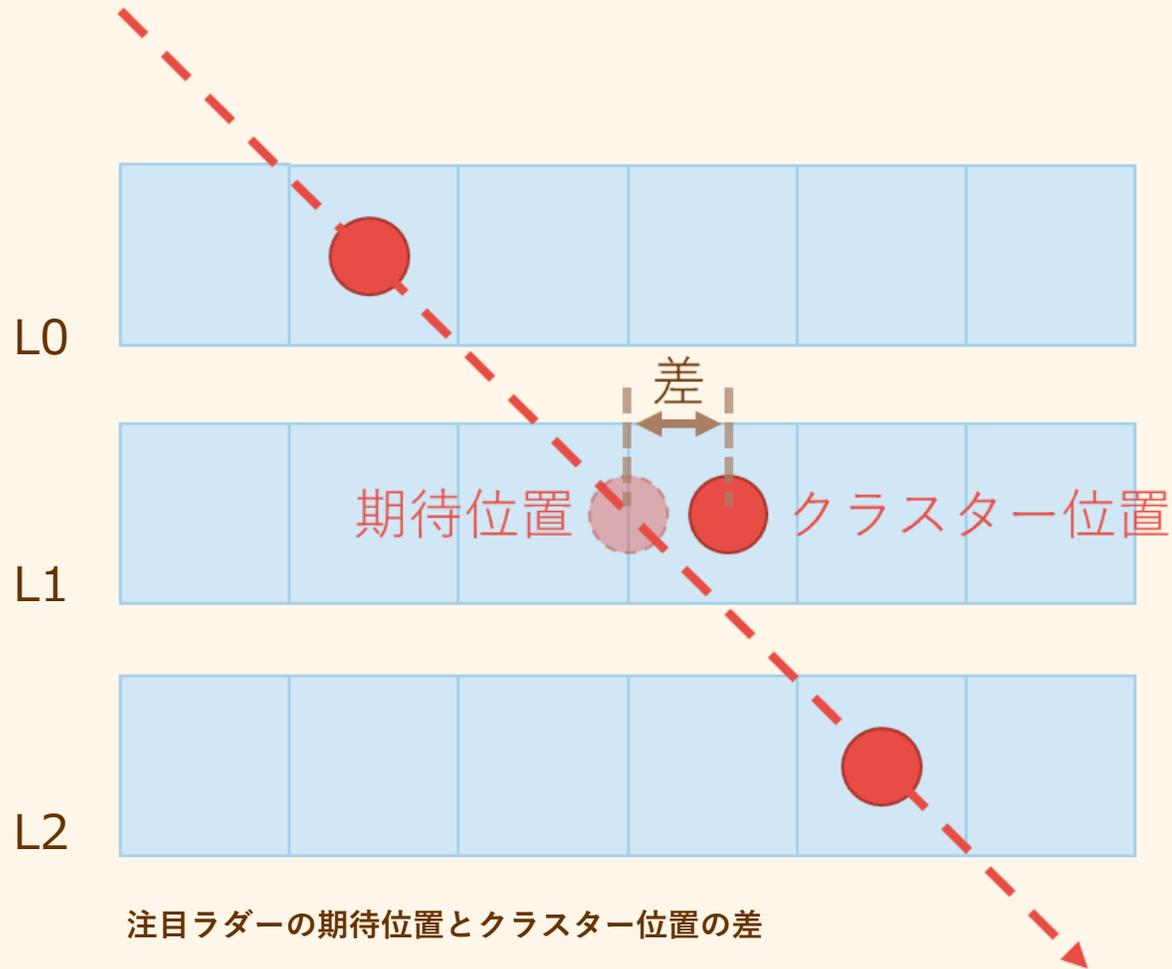
INTT ラダーの検出効率は十分であると示せた

期待位置とクラスター位置

- 複数クラスターの場合は、最も期待位置に近いヒットを選ぶ



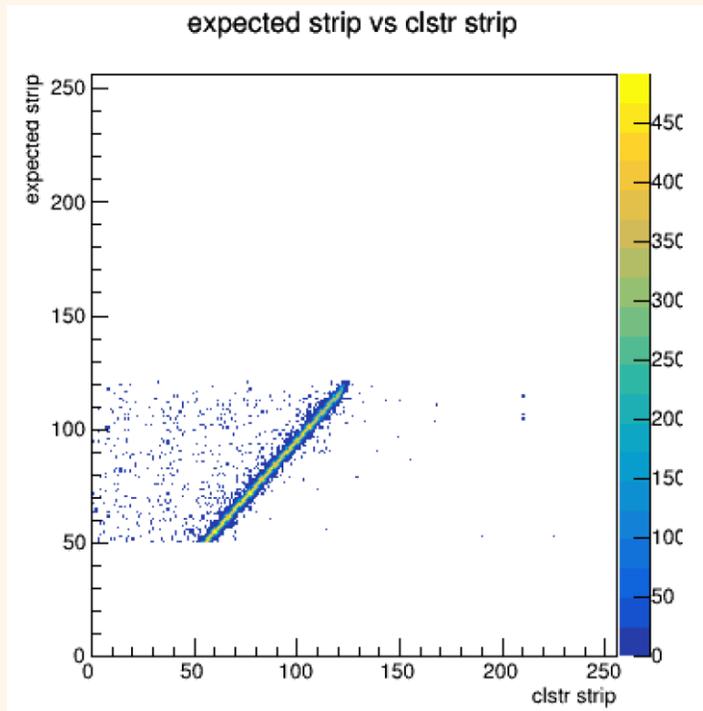
注目ラダーの期待位置と
クラスター位置の相関分布



注目ラダーの期待位置とクラスター位置の差

期待位置とクラスターヒット

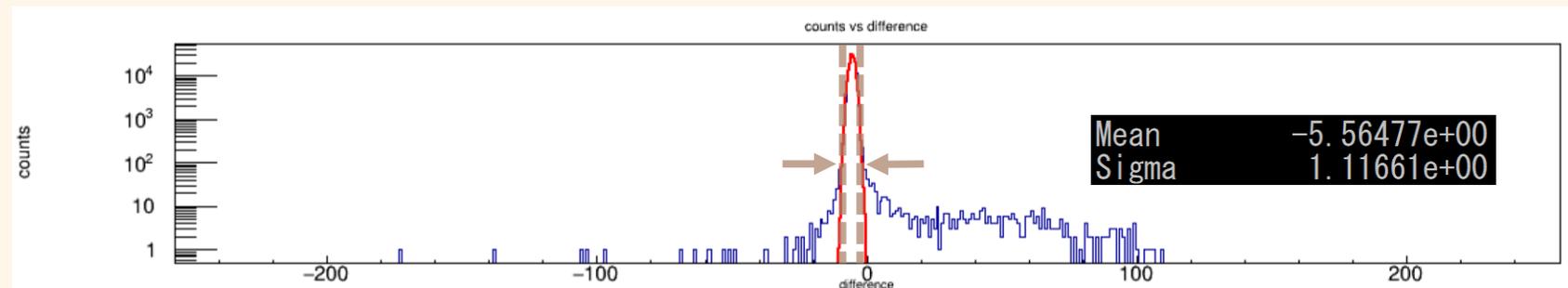
- 複数クラスターの場合は、最も期待位置に近いヒットを選ぶ



注目ラダーの期待位置と
クラスター位置の相関分布

注目ラダーのヒット

- 期待位置とクラスター位置の差を計算する
 - 期待位置 - クラスター位置 = 差
- 差が少ないものを同一粒子によるヒットとしてとらえる



注目ラダーの期待位置とクラスター位置の差分布

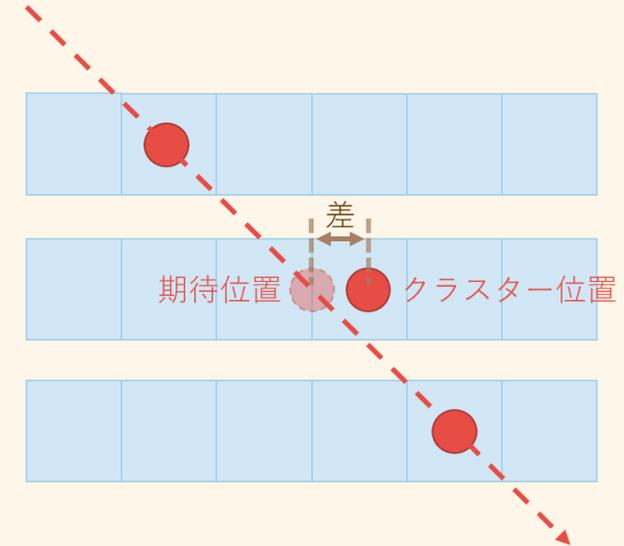
- 各分布にガウス分布をFit する
- Fit 関数から中央値 (mean) と幅 (sigma) を得る
- $\text{mean} \pm 3\text{sigma}$ のヒットを選ぶ

結果	期待位置と強い位置相関があったクラスターを選んだ結果		
	基準ラダーのヒット数	注目ラダーのヒット数	検出効率 [%]
ラダー0	76829	75040	97.67 ± 0.05
ラダー1	84618	83240	98.37 ± 0.04
ラダー2	90299	87458	96.85 ± 0.06

考察

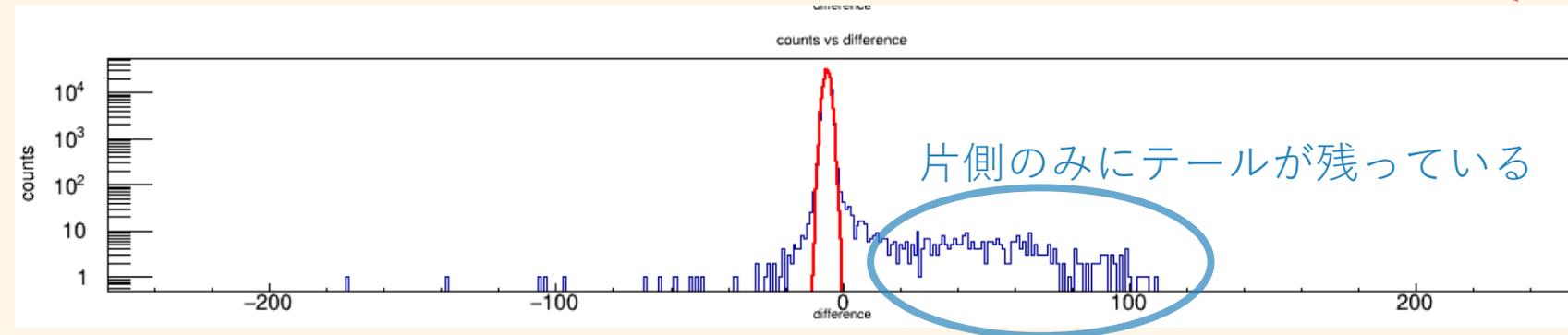
- 期待位置から3sigma 以内にあるヒットは96.85~98.37 % の割合であった
- 期待位置から3sigma 以上離れているヒットが数 %程度ある
- 差分布の片側のみにテールが残っている

注目ラダーの期待位置とクラスター位置の差



課題

- このテールに関連するイベントについてより調べる必要がある



目次

- 研究背景
 - sPHENIX 実験
 - INTT ラダー
 - Bus-Extender
- 研究の目的
- Bus-Extender の性能評価
 - 物理特性 –剥離試験–
 - 電気特性 –出力波形の観測–
- テストビーム実験によるINTT の検出効率の評価
 - 実験セットアップ
 - 解析手法
 - 結果
 - 考察と課題
- まとめ

まとめ



- Bus-Extender の性能評価とテストビーム実験によるINTT の検出効率の評価を行った
- Bus-Extender の性能評価では物理特性と電気特性を測定した
 - 5 kGy照射後のサンプルは20 N程度であり、十分な強度と放射線耐性を確認した
 - 電流量を8 mAに増やすと信号伝送が十分にできていることがわかった
- INTT の検出効率を評価するために新構築したトリガーシステムを用いて、東北大ELPH にてテストビーム実験を行った
 - ビームによるヒットを厳選することですべてのラダーが99 %以上の検出効率になることを確認した
 - 期待ヒット位置に対して 3σ 以上離れているクラスターヒットが数 %存在するため詳しく調べる必要がある
- ② 本研究より、INTT とBus-Extender の開発が完了し、量産・建設を進めている



Back Up

