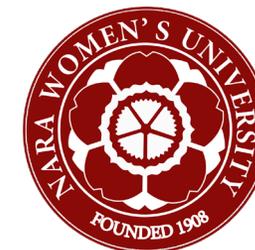
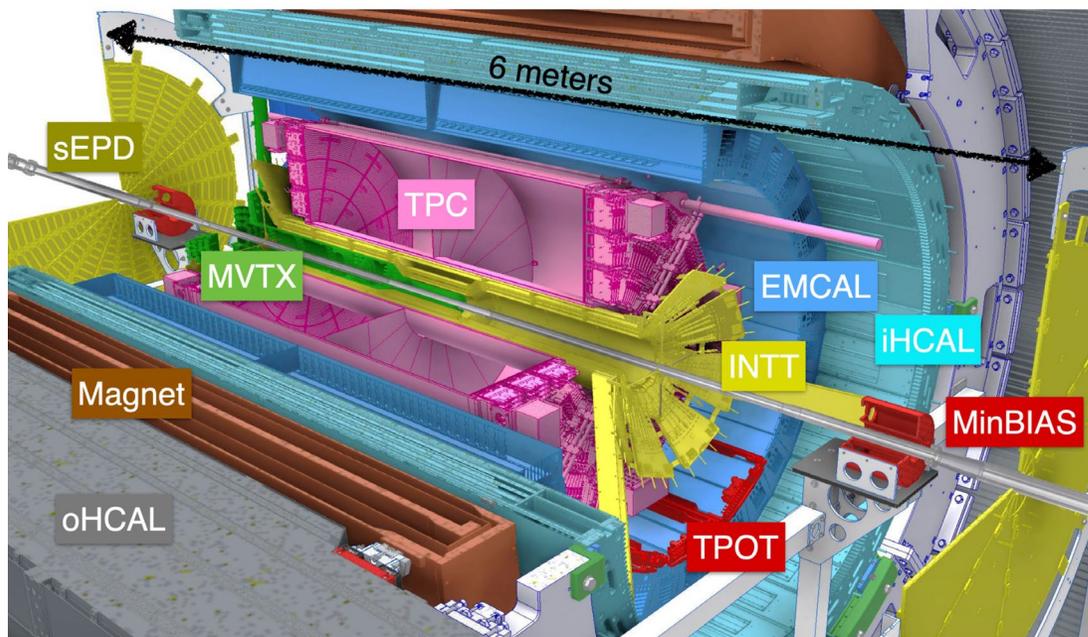
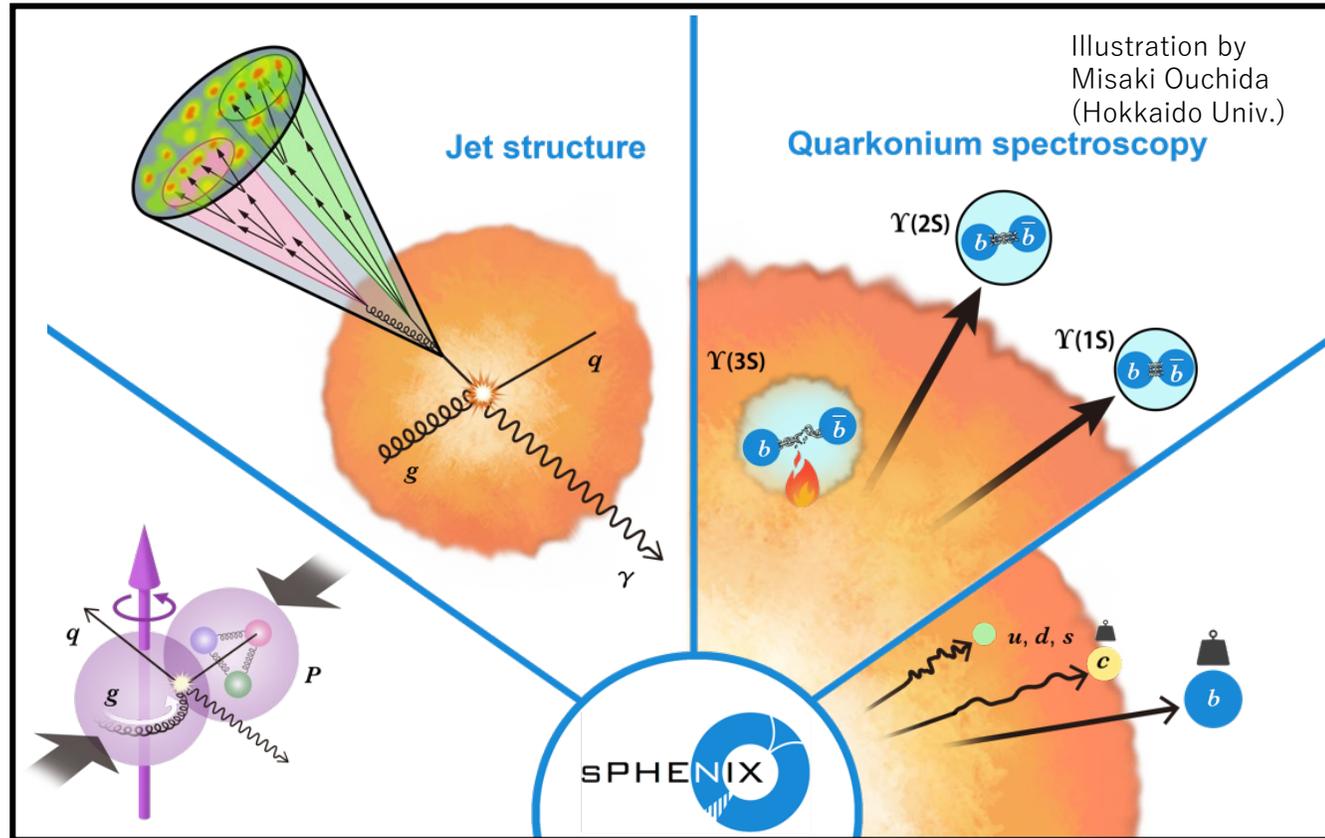
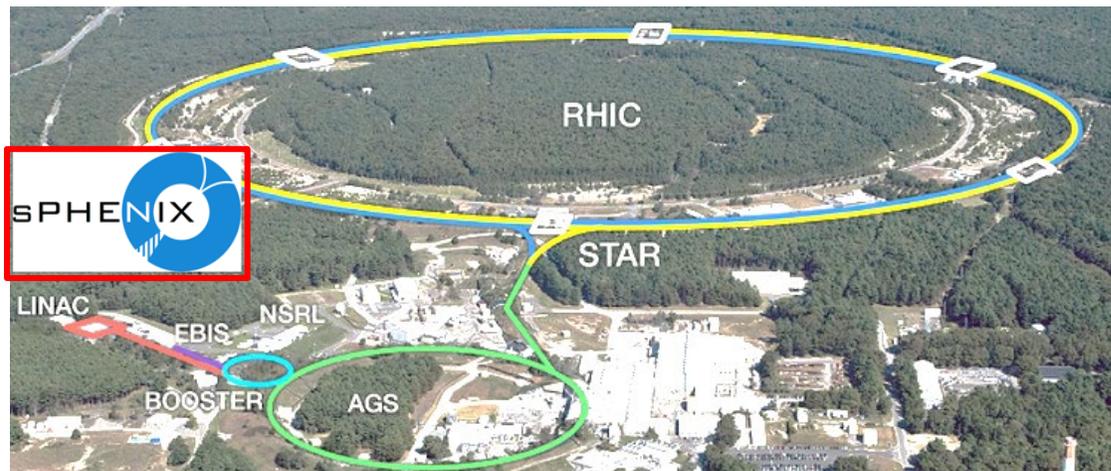


sPHENIX実験INTT検出器 の建設と運転状況の報告

蜂谷 崇
奈良女子大学

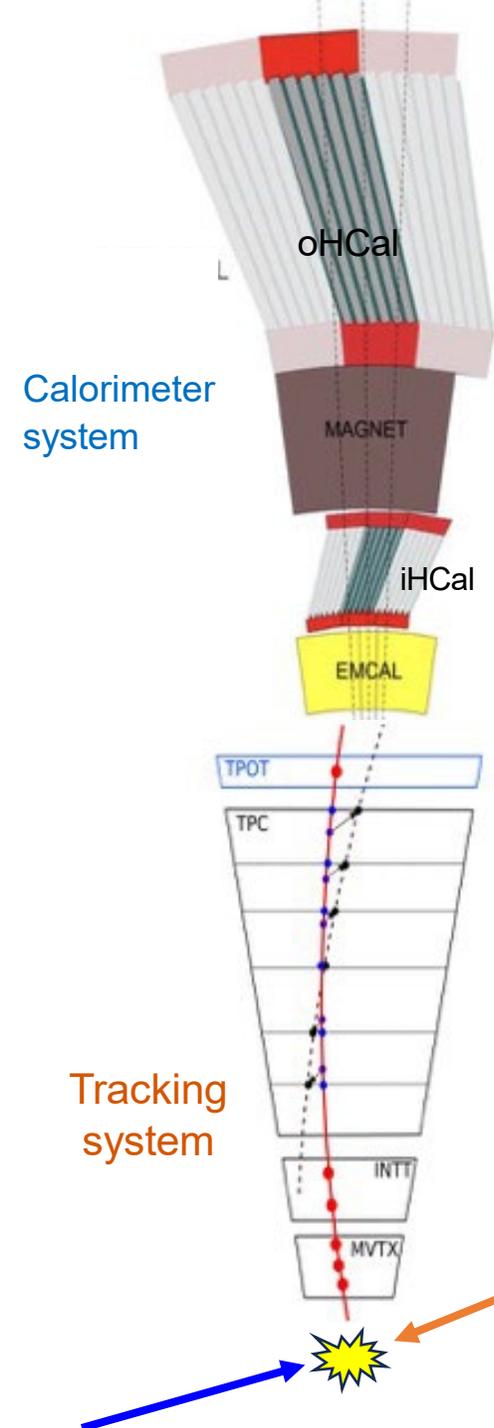
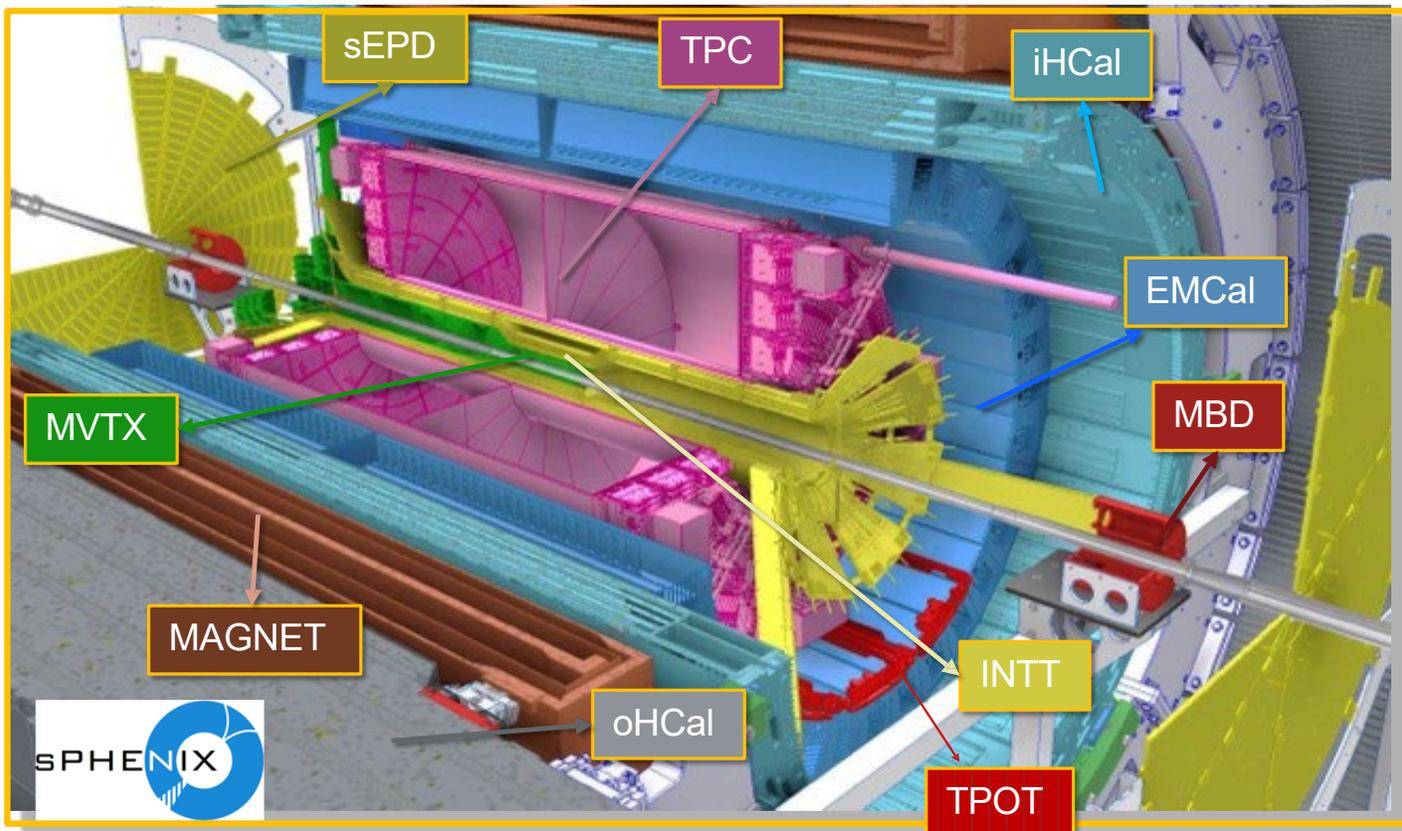


RHIC-sPHENIX実験



- sPHENIX実験: RHIC で クォーク・グルーオン・プラズマと Cold-QCD を研究を行う
- ジェットの測定に主眼

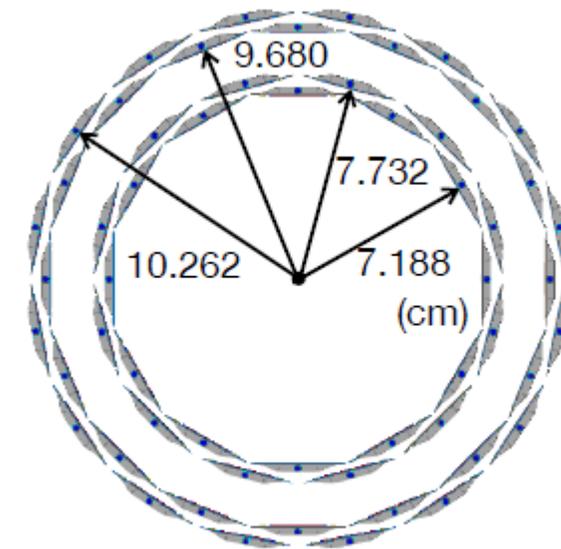
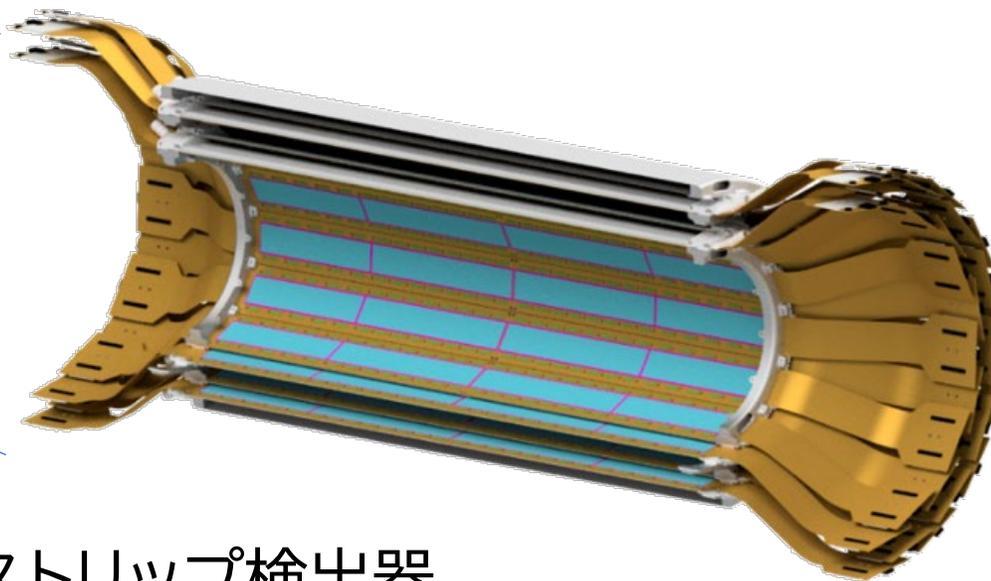
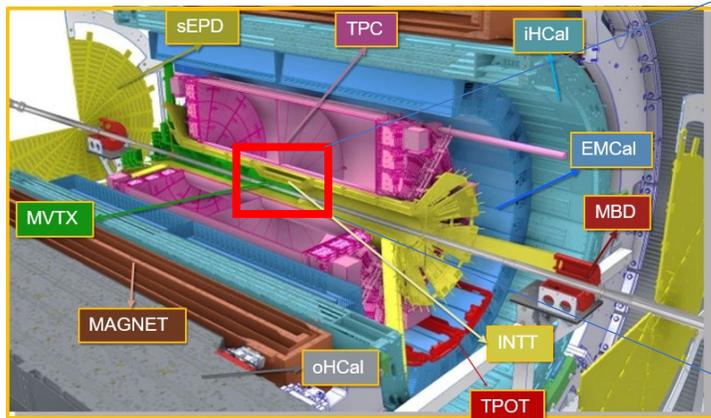
sPHENIX 検出器群



sPHENIX: RHIC初のfullジェット & b-jet測定器

- **RHIC初のHCAL+EMCAL**
- アクセプタンス: $|\eta| < 1.1$, 2π in ϕ
- 1.4T ソレノイド (BaBar)
- 高速DAQ: 15 kHz for all subdetectors
- 内層の飛跡検出器群

INTT検出器



2層のバレル型シリコンストリップ検出器

- $|\eta| < 1.1$, 全方位角のアクセプタンス
- 低放射長: $X/X_0 < \sim 1.1\%$ / ladder
- 総計 360k チャンネル

合計 56 ラダーでバレルを構成
 内側: 12×2
 外側: 16×2

INTT の役割

- MVTX と TPC の間で荷電粒子の位置測定を行い、トラッキング精度を強化する
- **トラック時間情報の決定**
- Z-衝突点の決定

INTT Collaboration



Donald Pinelli



Rachid Nouicer



Yasuyuki Akiba



Takashi Hachiya



Maya Shimomura



Genki Nukazuka



Akitomo Enokizono



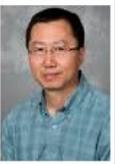
Shoichi Hasegawa



Yuko Sekiguchi



Dan Cacace



Wei Xie



Itaru Nakagawa

Rikkyo Univ.

Yusuke Fujino,
Tomoki Harada,
Tomoya Kato,
Takahiro Kikuchi,
Ryota Shishikura



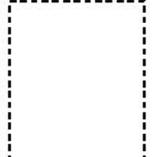
Ryota Shishikura



Tomoya Kato



Takahiro Kikuchi



Tomoki Harada



Hayato Yanagawa



Yusuke Fujino

BNL

Steven Andrade, Stephen Boose,
Daniel Cacace, Raul Cecato,
Donald Pinelli, Rachid Nouicer,
Robert Pisani, Nick Seberg,
Antonio Vederosa

Korea Univ.

Byungsik Hong,
Jaein Hwang

National Taiwan Univ.

Rong-Shyang Lu, Jenny Huang,
Lian-Sheng Tsai, Ou-Wei Cheng

National Central Univ.

Chia-Ming Kuo, Kai-Yu Cheng,
Cheng-Wei Shih, Wei-Che Tang

TIRI

Takashi Kondo

JAEA

Shoichi Hasegawa

RIKEN, RBRC

Yasuyuki Akiba, Akitomo Enokizono,
Itaru Nakagawa, Genki Nukazuka, Yuko Sekiguchi

Nara Women's Univ.

Manami Fujiwara, Takashi Hachiya,
Mahiro Ikemoto, Mai Kano,
Nao Morimoto, Maya Shimomura,
Hinako Tsujibata, Mai Watanabe



Robert Pisani



Antonio Vederosa



Steven Andrade



Nick Seberg



Stephen Boose



Milan Stojanovic



Byungsik Hong



Jaein Hwang



Lian-Sheng Tsai



Jenny Huang



Raul Cecato



Joseph Bertaux



Chia-Ming Kuo



Rong-Shyang Lu



Kai-Yu Cheng



Wei-Che Tang



Ou-Wei Cheng



Cheng-Wei Shih



Hinako Tsujibata



Mai Kano



Manami Fujiwara



Mahiro Ikemoto



Nao Morimoto

2024/11/19

sPHENIX実験IN検出器の開発と運転

INTTラダー

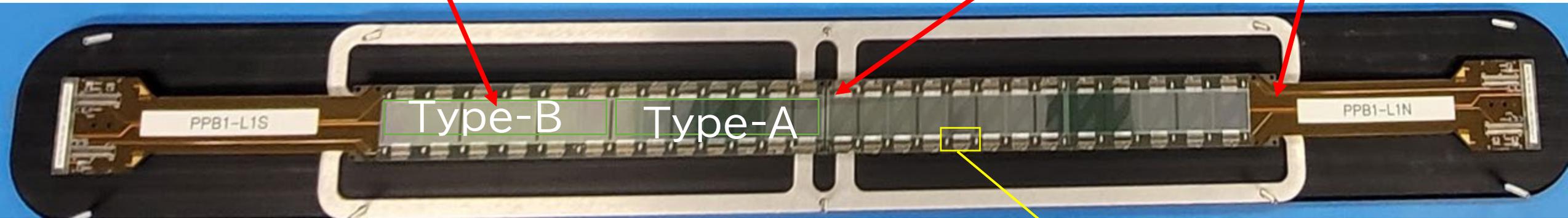
INTT Full Ladder



1. Silicon strip sensors

2. FPHX Chips

3. HDI Readout Cable

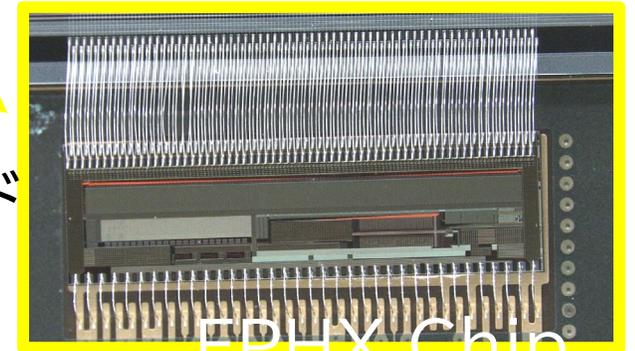


128 ストリップ/読出しチップ(FPHX)

• type-A: 78 μm \times 320 μm \times 16 mm

• type-B: 78 μm \times 320 μm \times 20 mm

ワイヤーボンド
(silicon-FPHX)



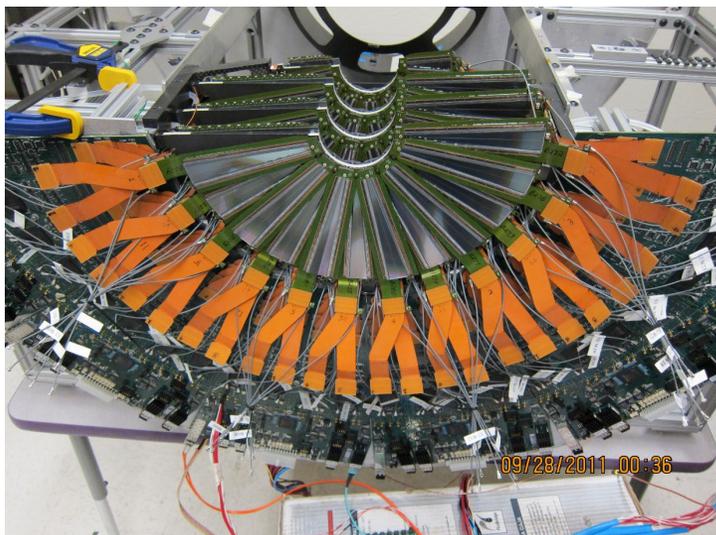
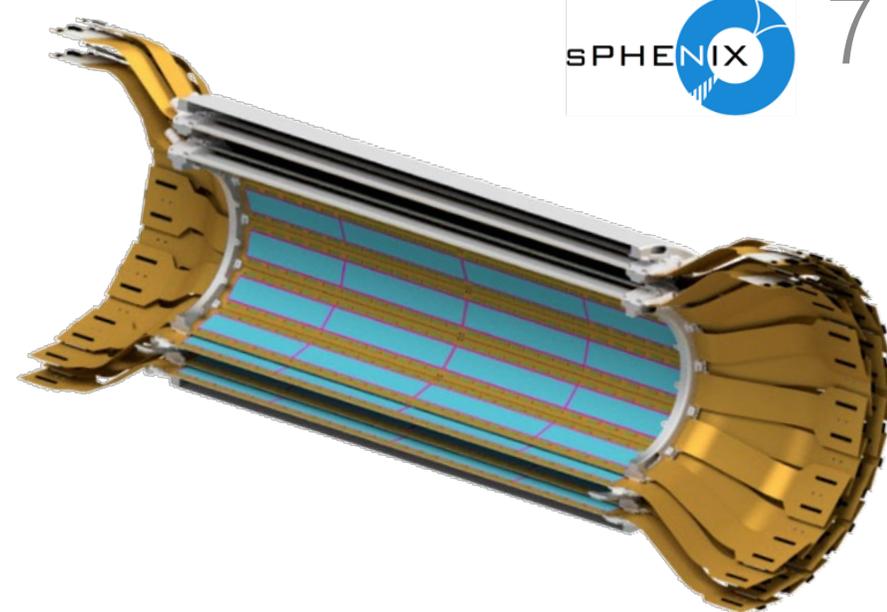
INTT検出器の開発コンセプト

既存のコア技術を活用し、検出器のパッケージングに専念

- Siセンサーの開発なし
- ASICの開発なし
- フロントエンド読み出し回路の開発なし

短い開発期間・足りない人手でも要求を満たすように！

PHENIX-FVTX検出器の技術を活用



PHENIX-FVTX

- Siストリップセンサー
- ディスクタイプの形状(前方用)
 - ラダー長:10cm
- 合計100万読み出しチャンネル
- FPHX読み出しチップ
 - 消費電力が65mWと小さい
 - ストリーム読み出し対応

sPHENIX-INTT

- Siストリップセンサー
- バレルタイプの形状(中央用)
 - ラダー長:20cm
- 合計37万読み出しチャンネル
- FPHX読み出しチップ
- ストリーム読み出し

INTTと多くの共通点

sPHENIX実験INTT検出器の開発と運転

INTT検出器の開発コンセプト

既存のコア技術を活用し、検出器のパッケージングに専念

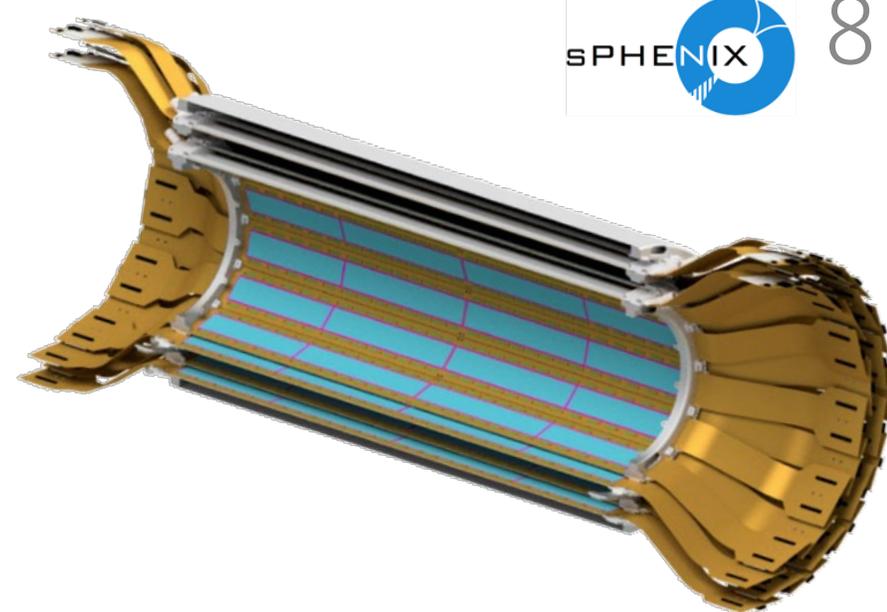
- Siセンサーの開発なし
- ASICの開発なし
- フロントエンド読み出し回路の開発なし

短い開発期間・足りない人手でも要求を満たすように！

PHENIX-FVTX検出器の技術を活用

開発項目

- **長尺データケーブル**
- ラダー用FPC (HDI)
- ラダー用ステーブ (高い平面度、高い排熱)
- ストリーム用DAQのファームウェア



ストリームDAQボード
FELIX



長尺データケーブル

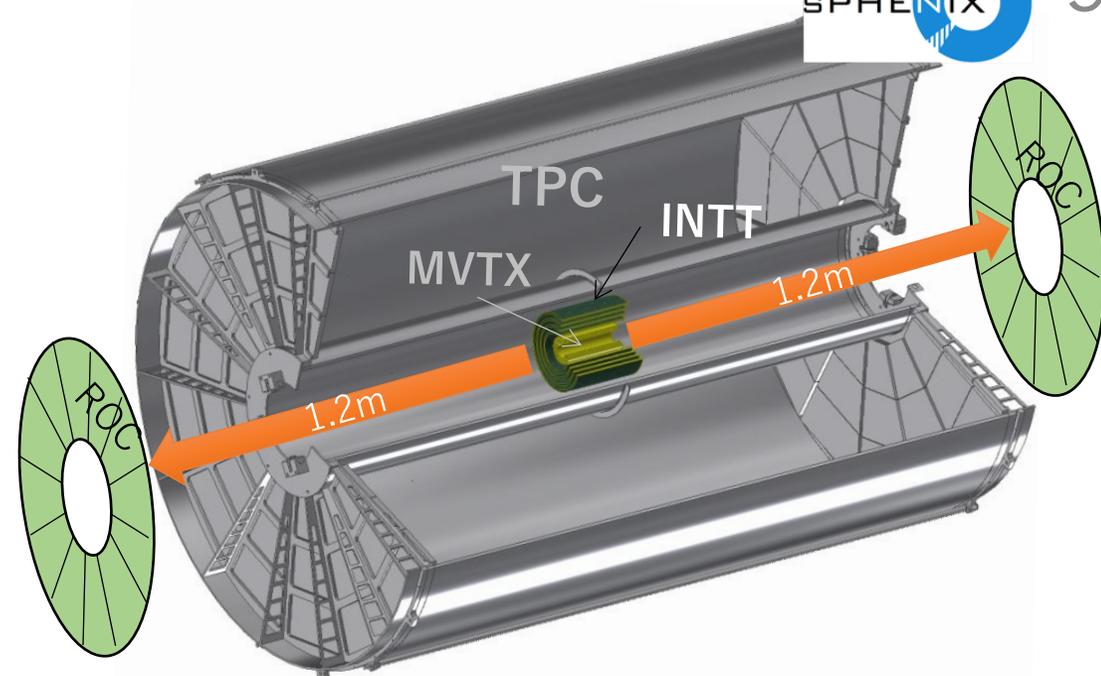
長尺データケーブル - バスエクステンダ

- 大量のデータを1.2m離れたデータ処理回路ROCまで伝送する。
- 設置場所の制約から5cm幅程度の狭く曲がった空間に収まる。

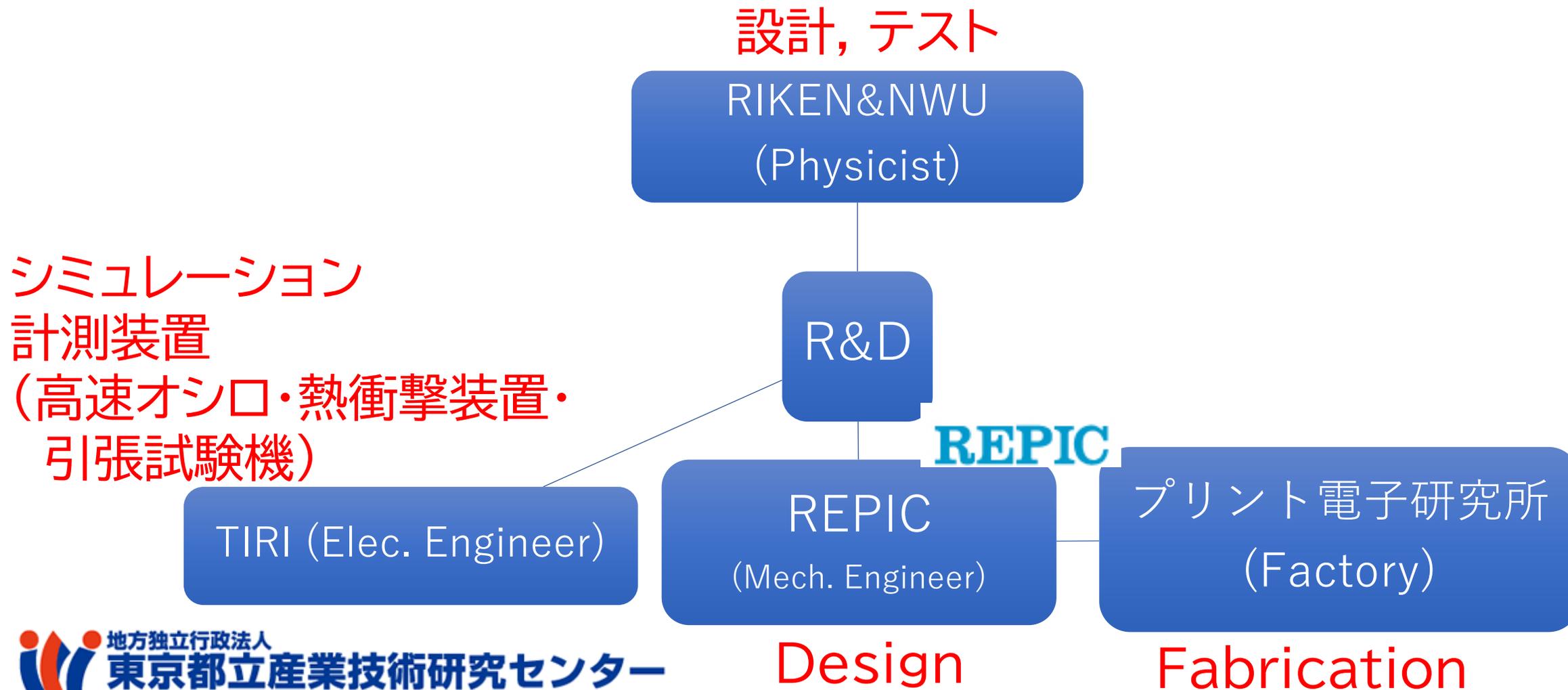
データケーブルに対する要求

- 長さ ~ 120cm
- 配線密度 = 62 対のLVDSペア + Power/GND
- 通信速度 = 200 Mbps LVDS ($Z_{diff}=100\Omega$)
- スペース制約 ~ 5cm幅に収まる柔軟なケーブル

要求を満たすケーブルは市場に存在せず、
独自に開発した。

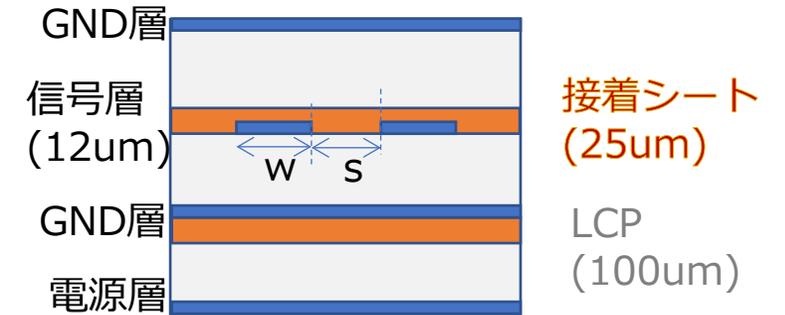


長尺データケーブル開発体制



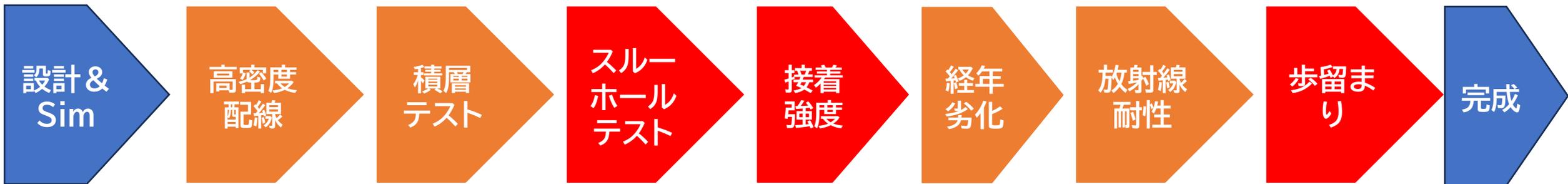
長尺データケーブルの開発

- ケーブルは、**柔軟性と微細配線性**を持つフレキシブル基板FPCの技術を応用した。
- 試作バスエクステンダBEXのデザイン
 - 長尺かつ高配線密度
 - 130 x 3.5 cm²、
 - 4層構造(信号,GND層x2, 電源層)
 - 配線数: 62対 (Line and space : 130 & 130 μm)
 - Z_{diff} : 100Ω ストリップライン構造
 - **誘電体として新素材:液晶ポリマー (LCP)を採用**
 - ポリイミドに比べ誘電率(主に誘電正接)が低く、**伝送損失が少ない**。
- 設計: デザインはプリント基板の電磁界SIMにより決定した

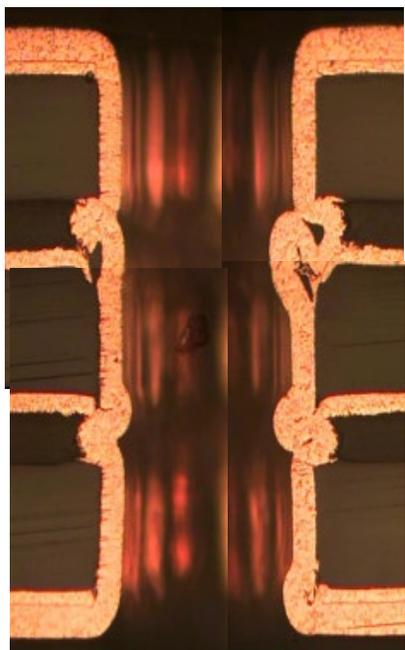


130cm

試作・試作・試作 失敗・失敗・失敗

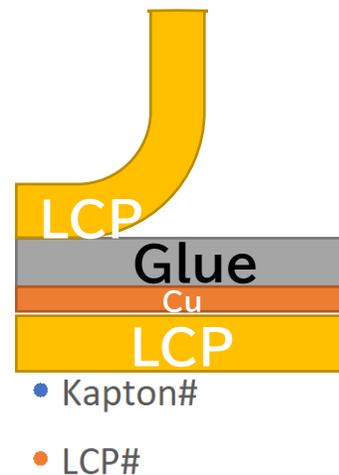
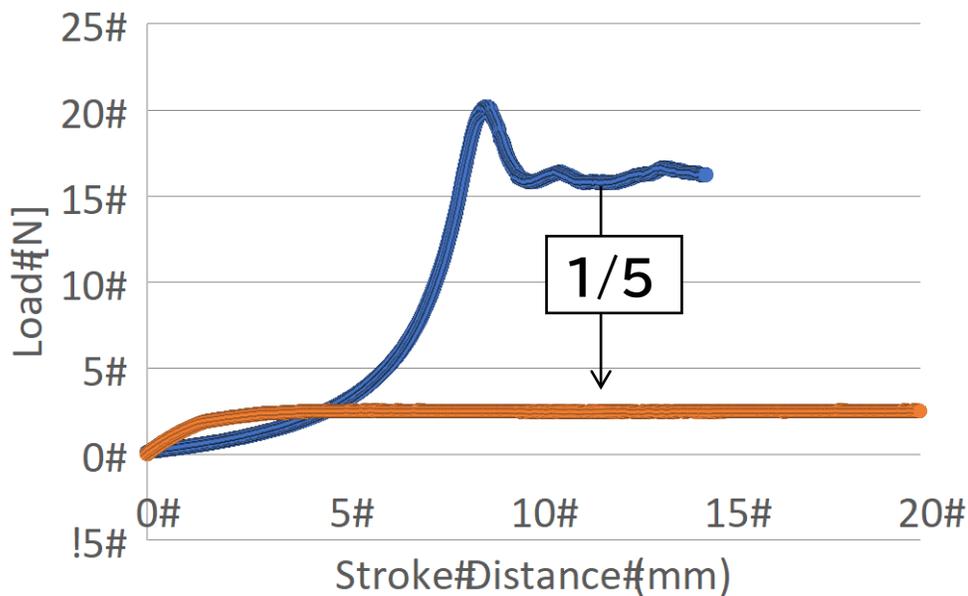


NG



2024/11/19

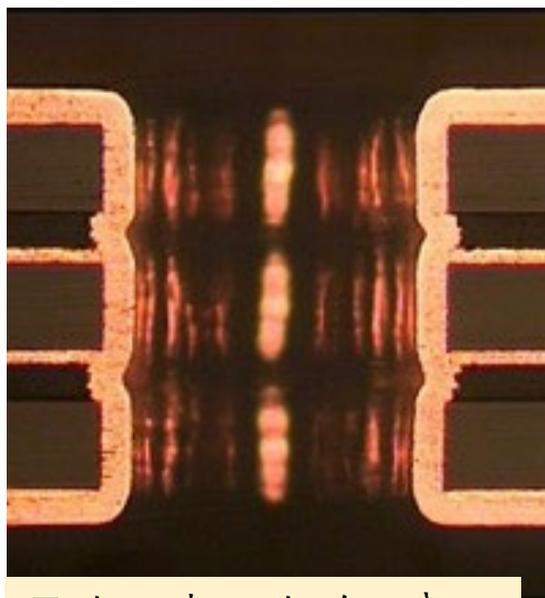
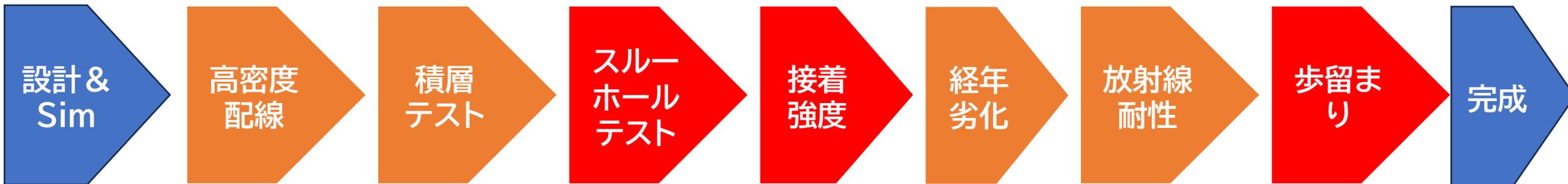
Peer#Test#Results



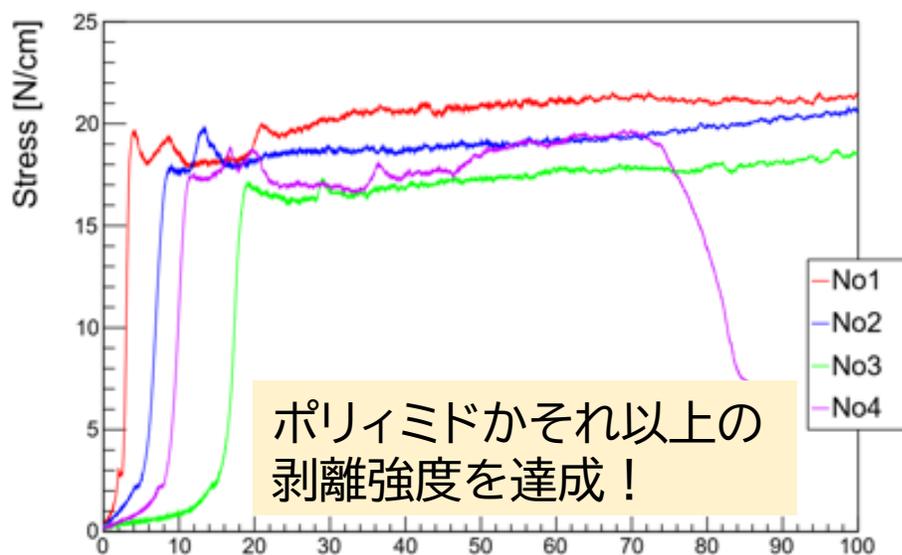
- 様々な課題
 - LCP・接着剤の調達
 - 劣悪なスルーホール
 - 接着力が弱い

開発は泥沼化

改善・改善・改善



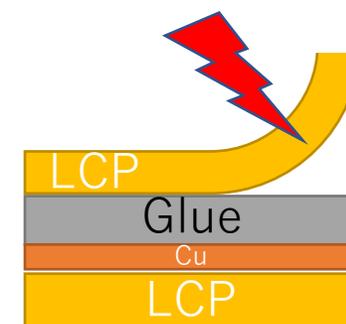
スルーホールメッキの品質問題が解決！



ポリイミドかそれ以上の剥離強度を達成！

- 接着剤の最適化
- 穴あけの最適化
- 穴の掃除(デスマア)の最適化
- メッキの最適化

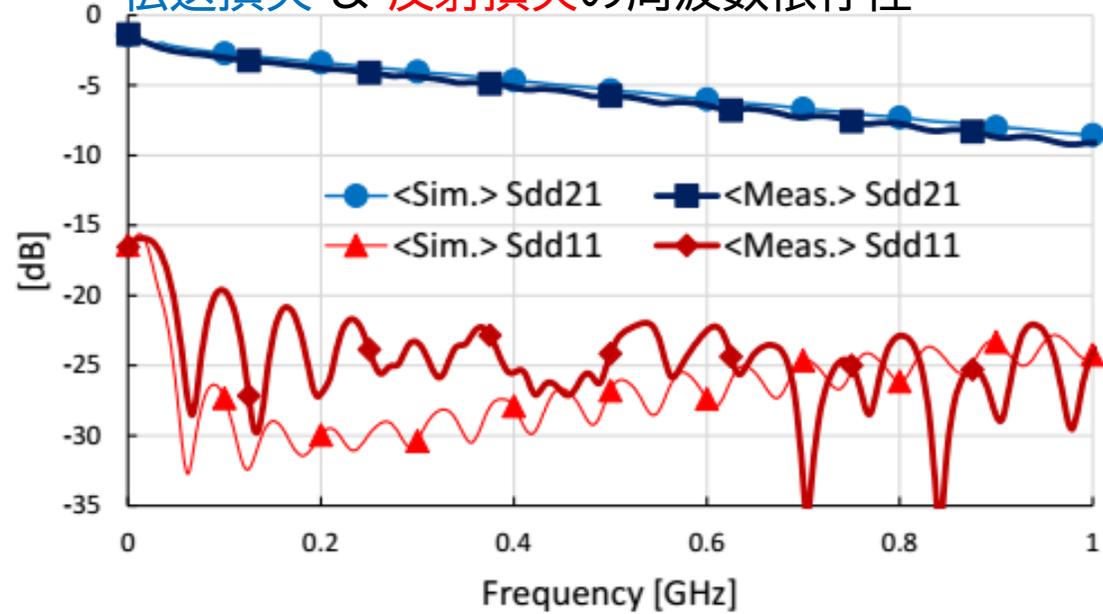
なんとLCPが破断



解決まで4年
パッケージングも一筋縄ではいかない

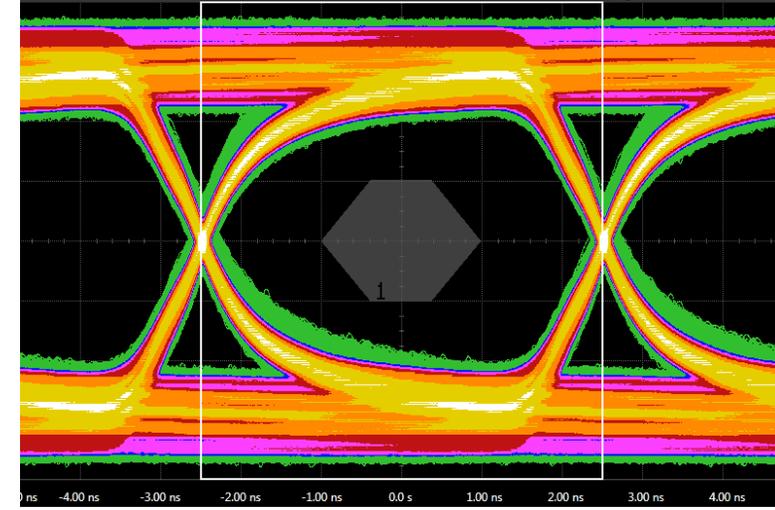
試作130cmBEXの伝送性能

伝送損失 & 反射損失の周波数依存性



- sパラメータによる評価
 - 伝送損失: ~58% @ 400MHz
 - 反射損失: < 5% @ 400MHz

アイダイアグラムとマスクの比較



ELEX(電気電子情報学会)に論文投稿

- アイダイアグラム: 1bitの波形の積算
- 十分なEye開口
 - 電圧 vs 時間空間で、伝送に余裕がある。

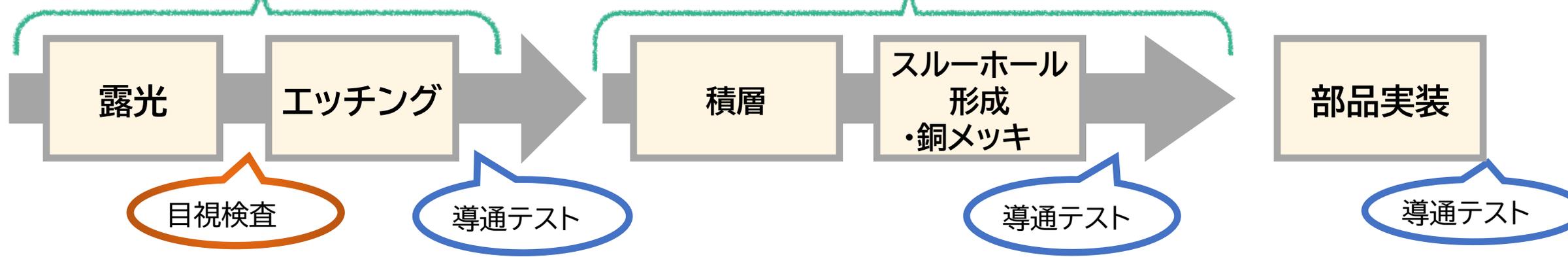
測定から試作BEXは要求を満たすことがわかった。
劣化試験や放射線耐性も調べ、十分な性能を有していることが分かった。

量産のための歩留まり改善

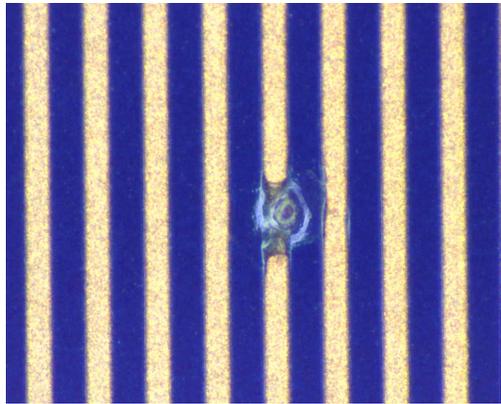
製造過程

単層形成

多層化



露光ミス

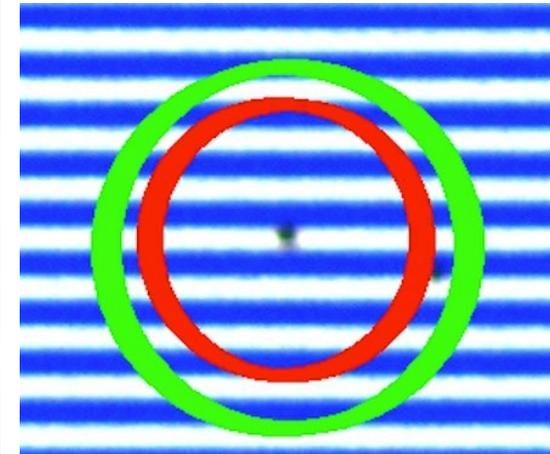


エッチングミス



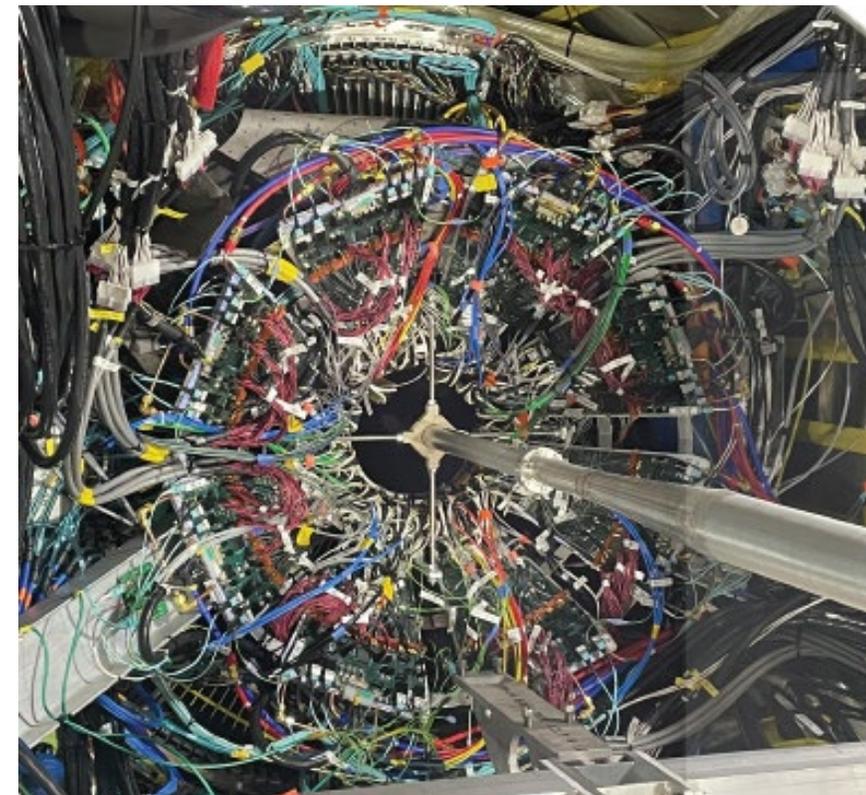
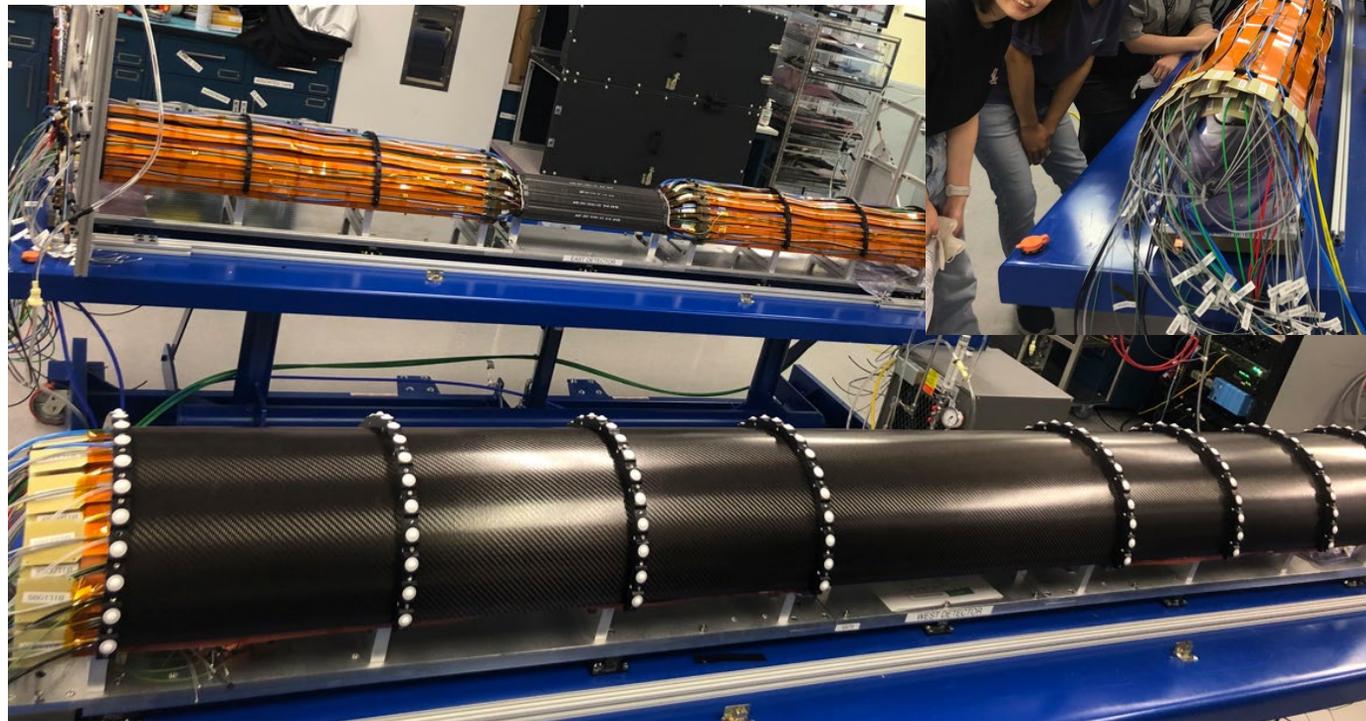
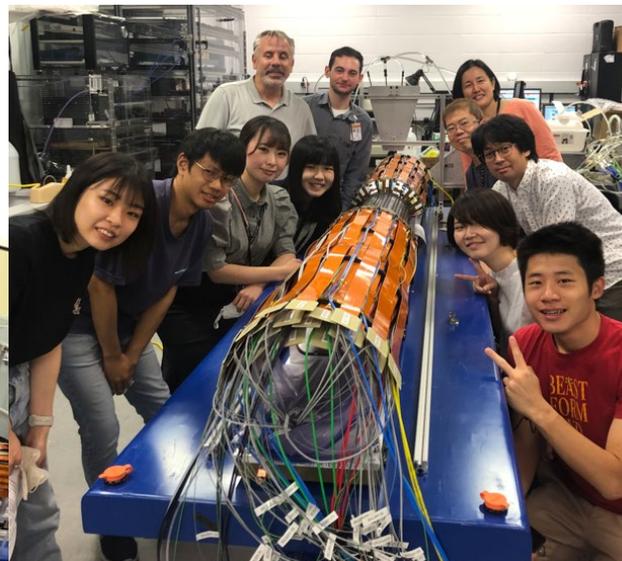
・目視検査

- ・ 検査装置の開発
- ・ 配線を補修



導通 + 目視検査で歩留まり大幅改善
30~50% → ~100%

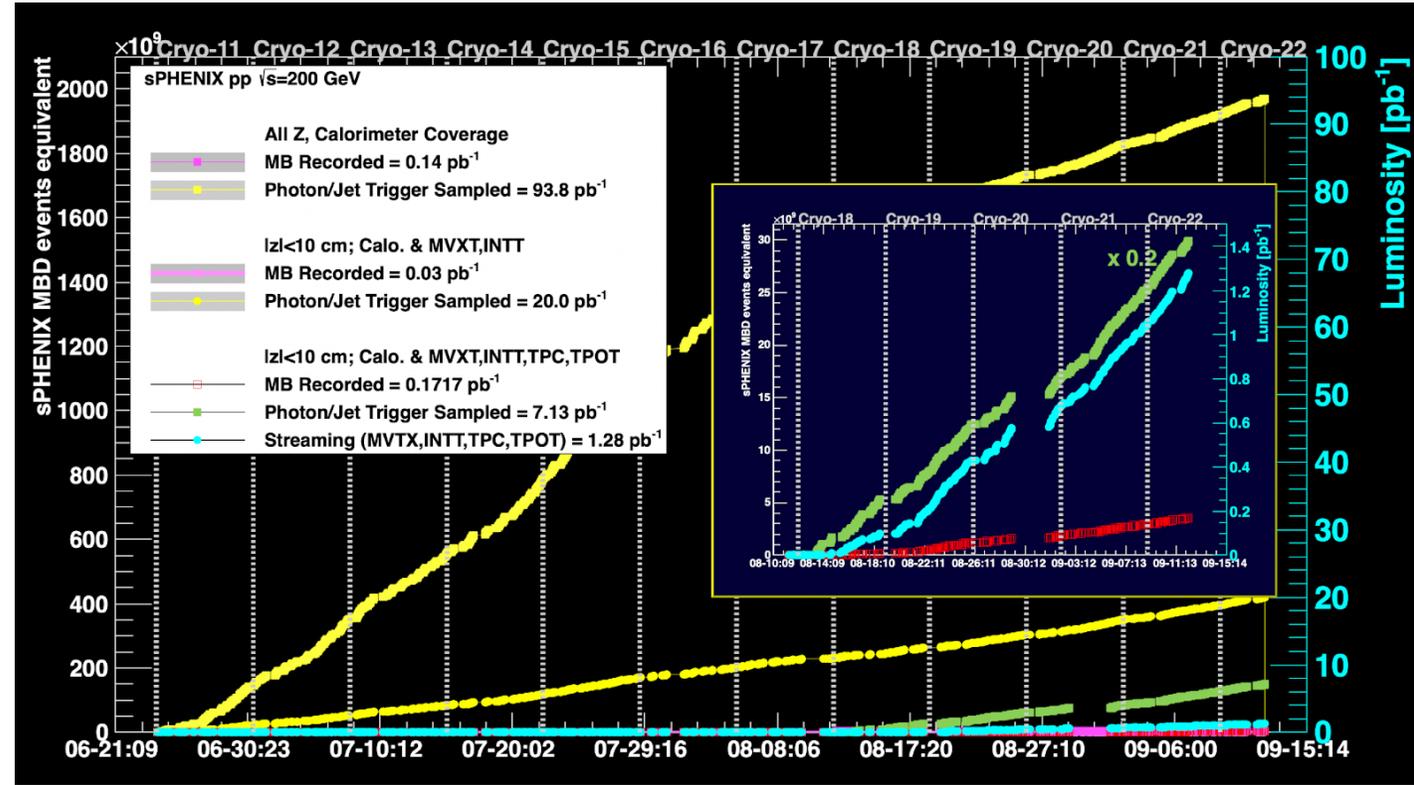
INTTの建設



組立が完了 + 組立後の動作テストの良好: 99%が動作

- 国際共同チーム:
 - 日本グループ、米国グループ(BNL、Purdue大)、台湾グループ(NCU、NTU)
- 日本グループ(奈良女子大、理研、立教大)の大きな貢献

- 2024年ラン
 - 横偏極 pp 衝突測定
 - コミッショニング
 - 物理測定 (~2024/09)
 - 金・金衝突測定のコミッショニング
- INTTのオペレーション
 - 2024/4 コミッショニング開始
 - 2024/6 タイミング調整完了
トリガー読出しで安定稼働
 - 2024/8— ストリーミング読出し
に切り替え安定稼働



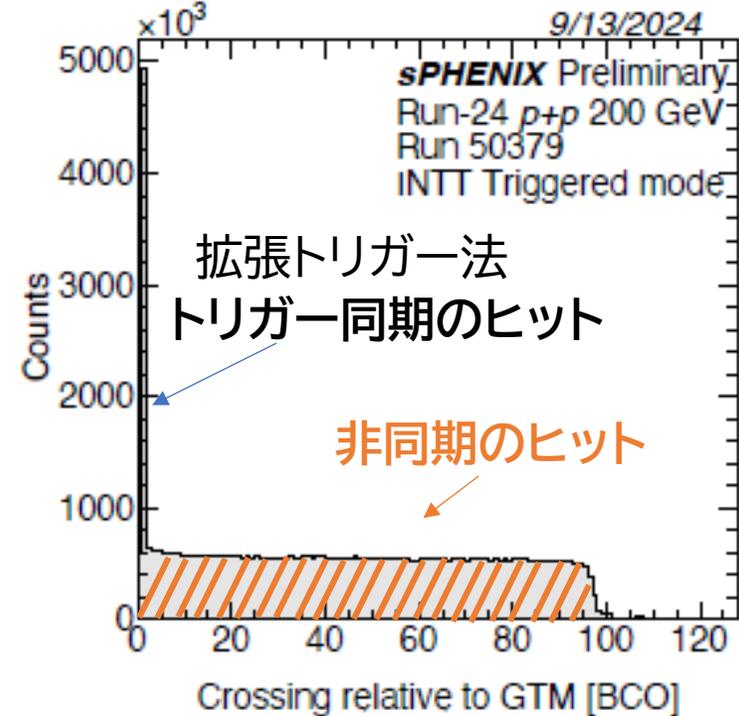
データ取得 検出器	物理	対目標値比
カロリメータ	ジェット	2倍以上
カロリメータ+ トラックer (noTPC)	ジェット構造、D-メソン	~1/2
カロリメータ+ トラックer	ジェット構造、 Y, b/c分離、	~1/4

INTTのデータ読み出し



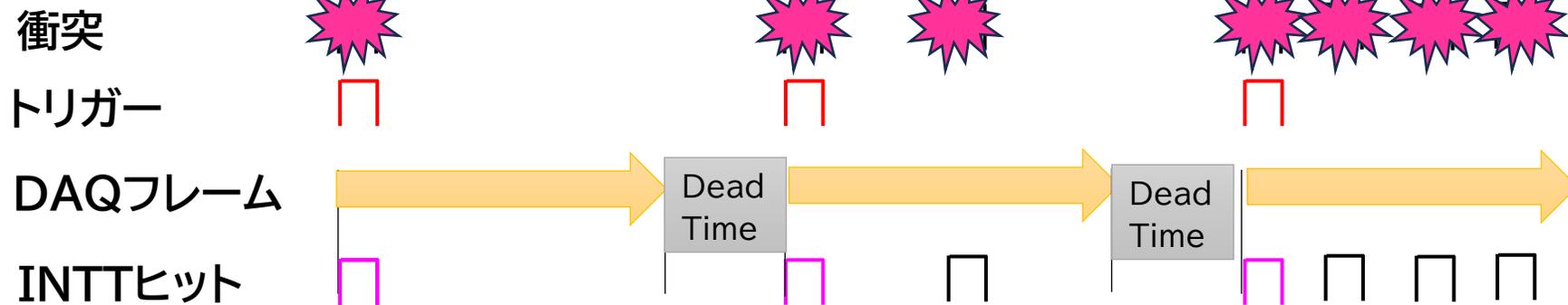
時刻付きヒット=ビーム交差(106ns)を区別できる

- 拡張トリガー法: トリガー+拡張時間(10 μ s)の収集
 - トリガーに同期してDAQフレームを開ける
 - DeadTimeがある



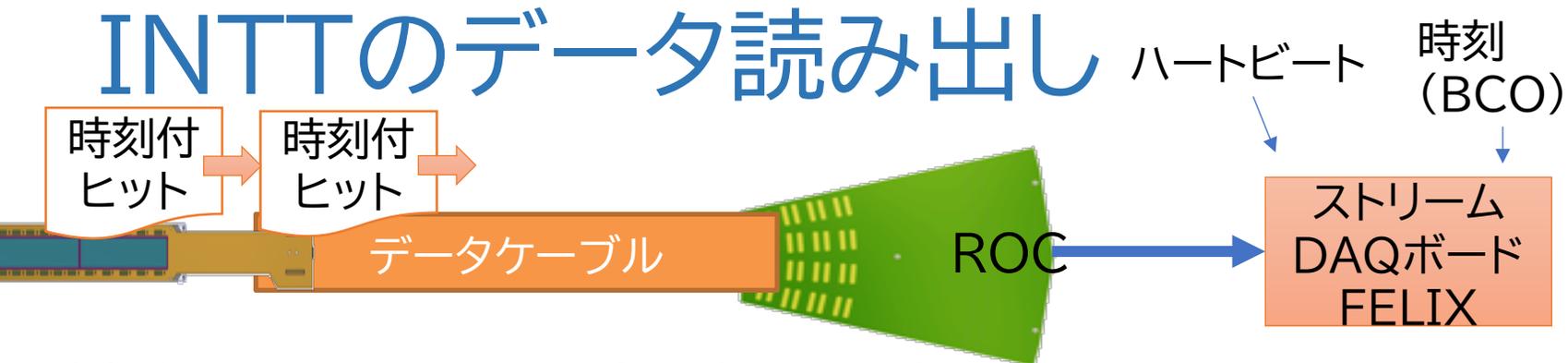
拡張時間もデータが収集できている

タイミングチャート



- 拡張トリガーでデータ収集に成功

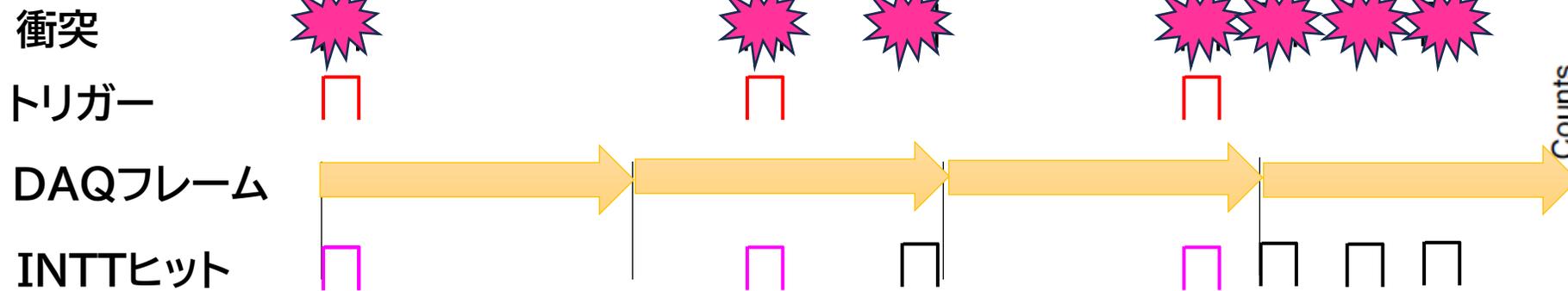
INTTのデータ読み出し



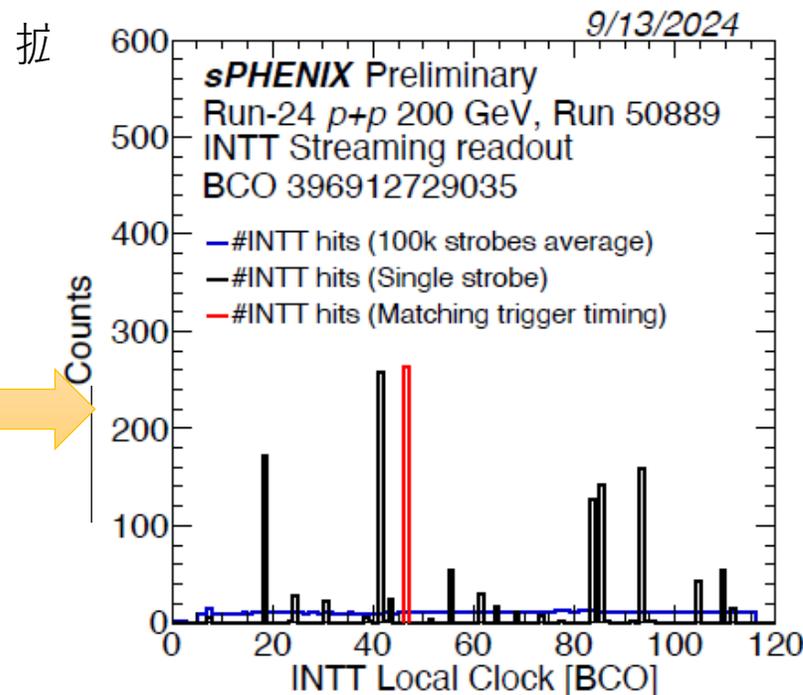
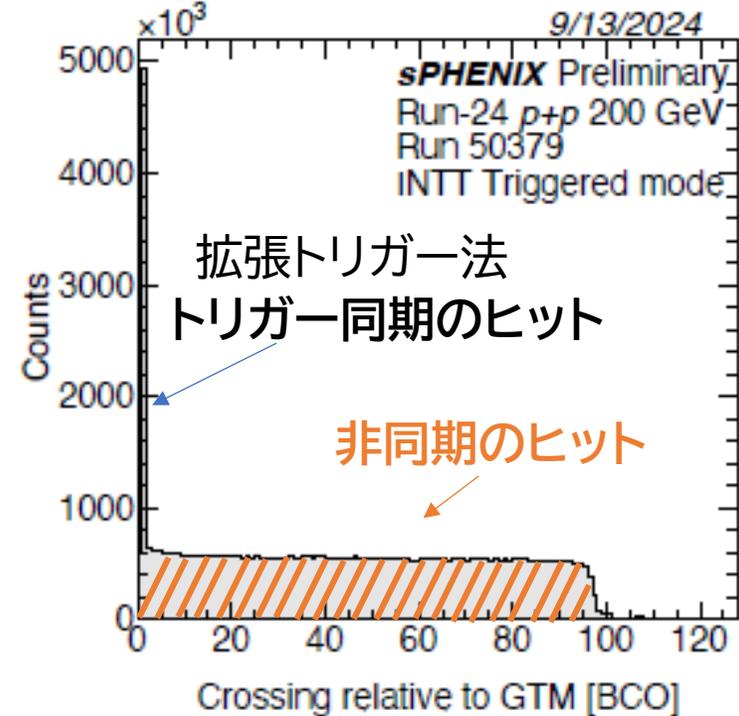
時刻付きヒット=ビーム交差(106ns)を区別できる

- 拡張トリガー法: トリガー+拡張時間(10us)の収集
- ストリーム法 : トリガーなしで連続収集
 - DeadTimeレス、全データを収集

タイミングチャート

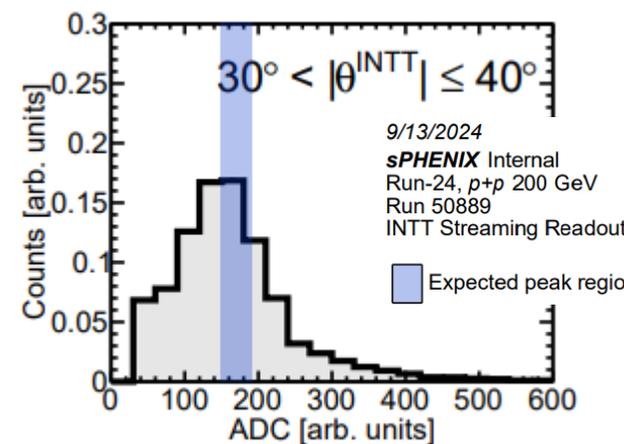
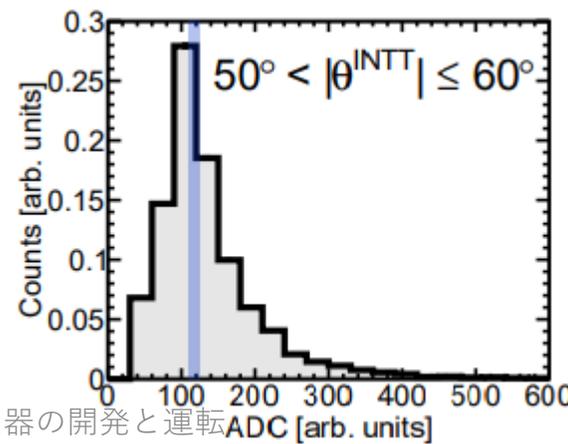
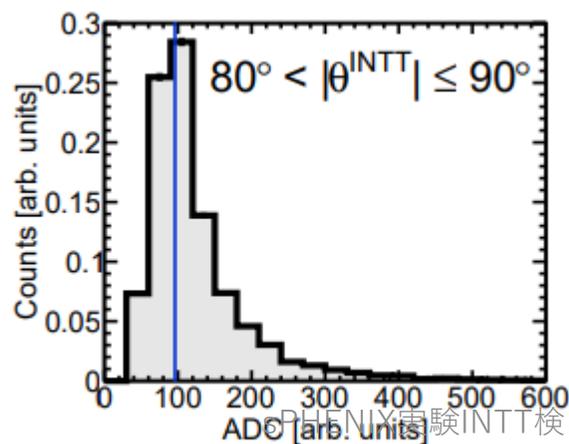
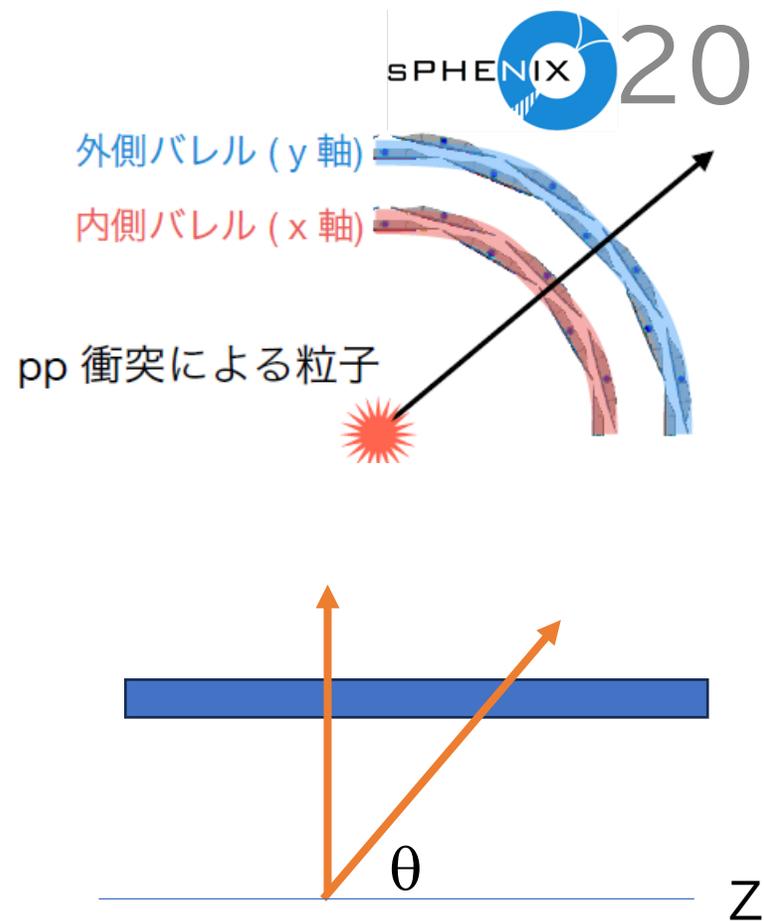
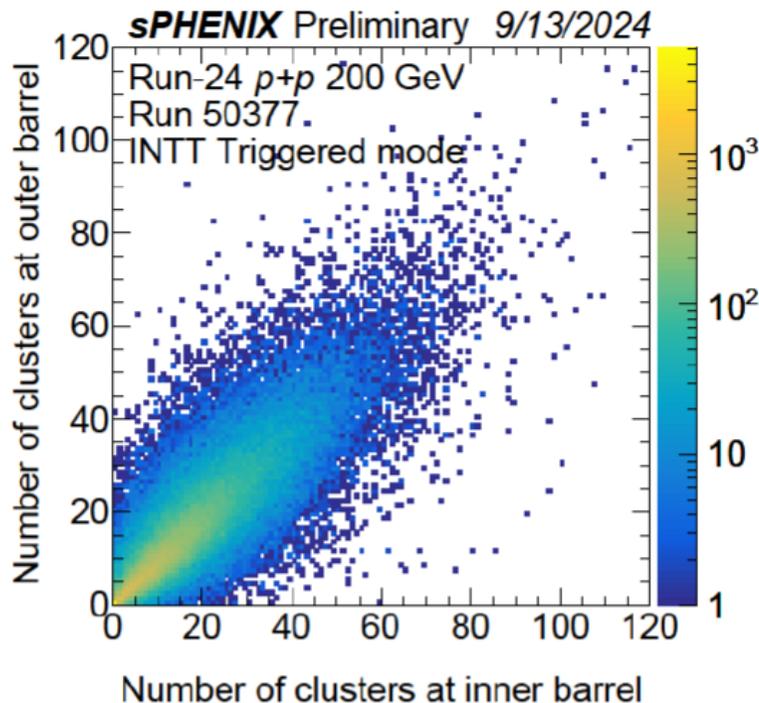


- 拡張トリガーとストリーム法でデータ収集→ビーム交差の識別成功



INTTのヒット相関

- 内層vs外層の
クラスター数に
明確な相関
- ADC vs θ
 - 3 ビット ADC
- MIP ピークを確認
- 天頂角依存性確認

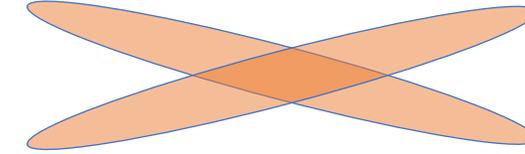


INTTによる飛跡とZ-衝突点測定

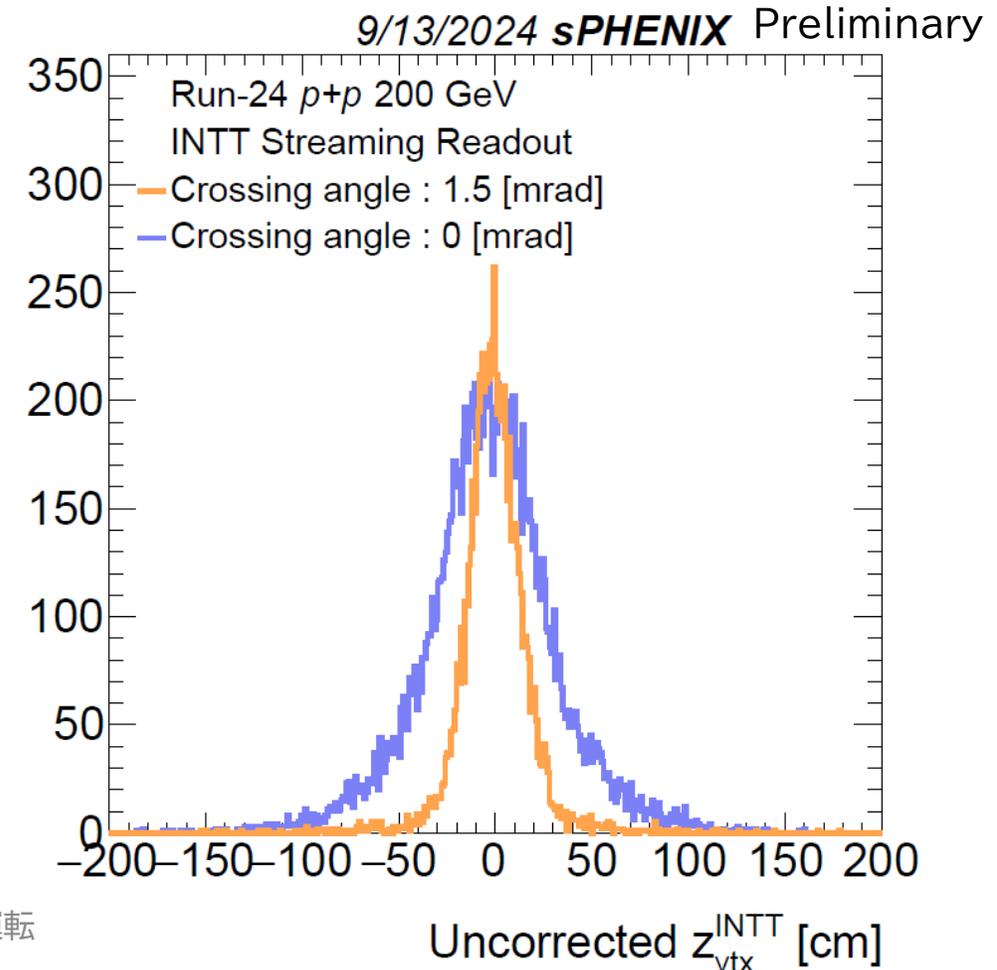
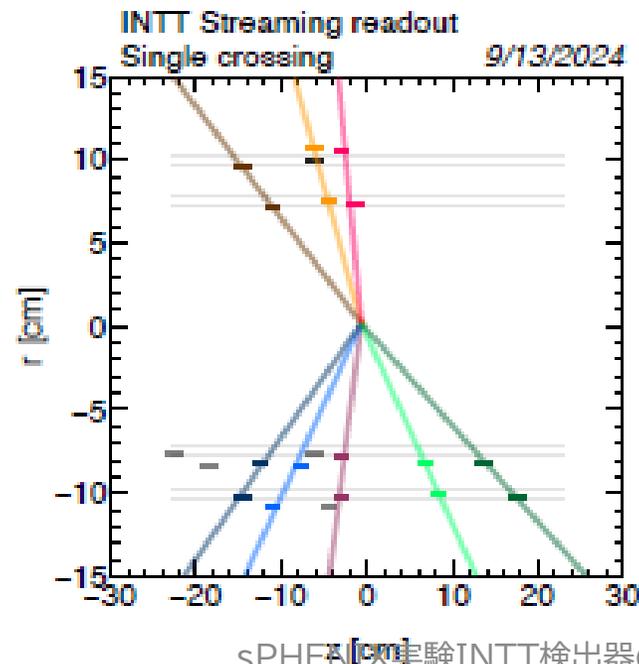
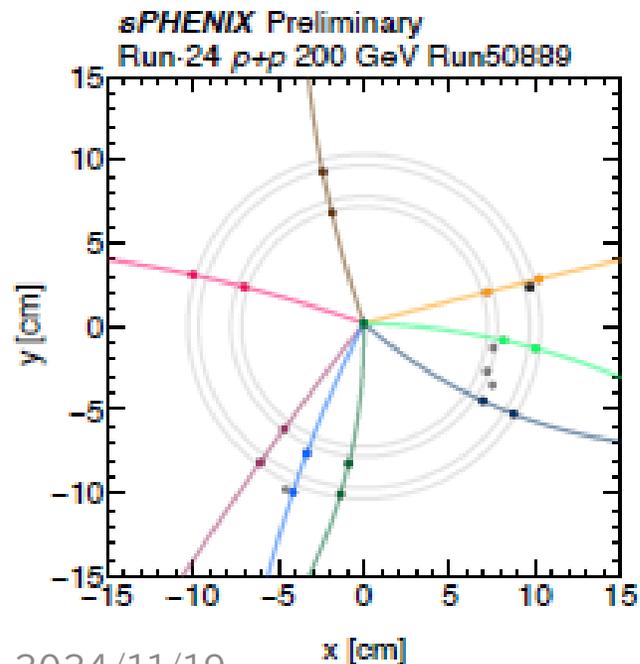
交差角: 0 rad



交差角: 1.5m rad



- 検出器性能評価のための
INTT 単独トラック再構成 — 成功
- 単独トラックによる
Z-衝突点の再構成 — 成功
 - 交差角による幅の違いを実測



まとめ

sPHENIX-INTT検出器

- 2層のバレル型シリコンストリップ検出器
- トラッキング性能強化 + トラック時間情報の決定が責務
- ビームバンチの区別ができる唯一の検出器

INTT開発 + 建設

- リスクを最小限に抑えるため、シリコンセンサーやASICは既存技術を採用
- 高信号線密度・長尺バスエクステンダーは最新技術で独自開発
- 日本/台湾/米国チームの共同開発研究
- 2022年9月完成 + 2023年1月にsPHENIXに設置

sPHENIX ランとINTTの運転: 順調に稼働した

- 2024年は横偏極陽子・陽子衝突のデータ収集と金・金衝突のコミッショニング
- ビームバンチの区別を実現 - 拡張トリガー & ストリームによる運用も成功
- クラスタ数相関、MIP ピーク 確認、単独トラック再構成、Z-衝突点の再構成を完了