

# KALLIOPEを用いた ミュオンスピンイメージング 測定システムの開発

大阪大学大学院 理学研究科 物理学専攻 M2 石谷 壮史

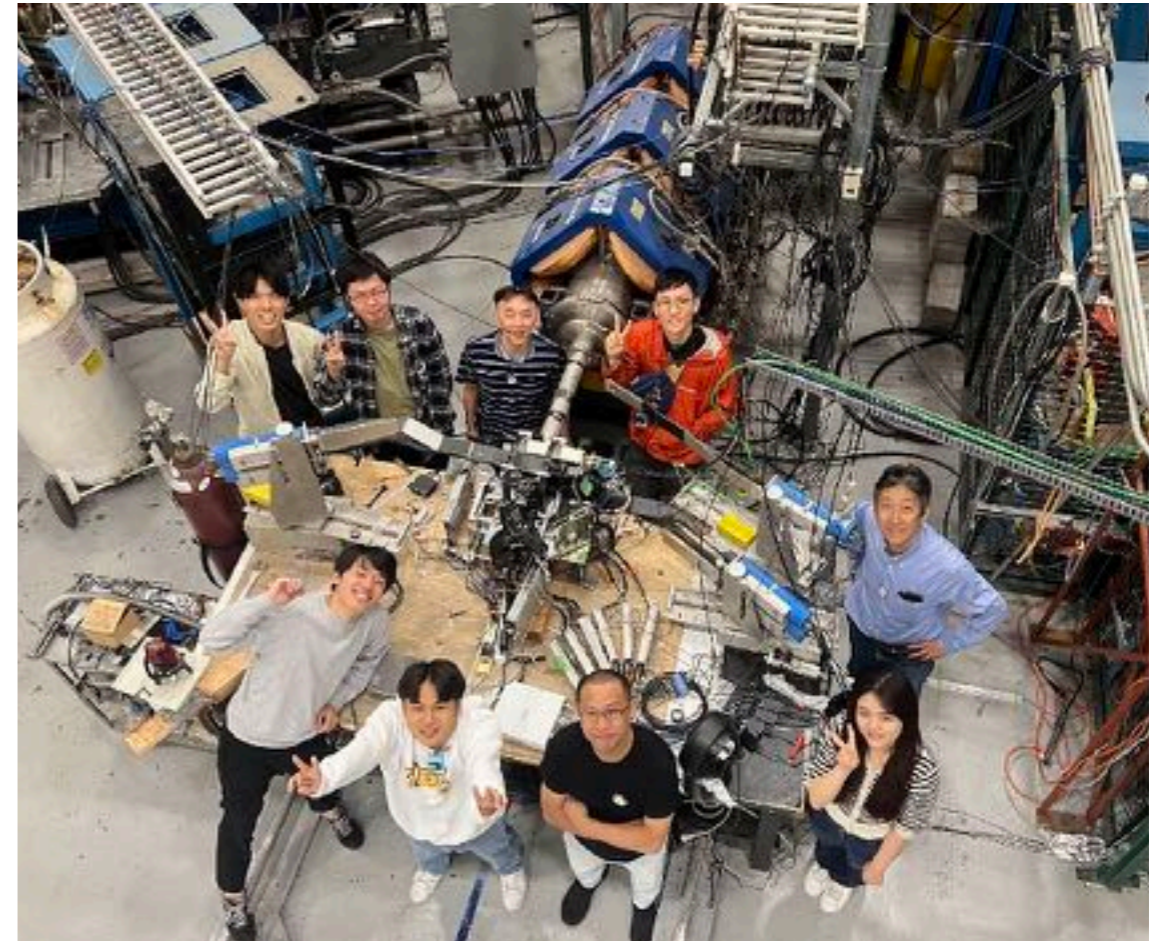
# 共同実験者

## Collaborators :

S.Ishitani<sup>B,J</sup>, K. Kojima<sup>A,I</sup>, M. Mihara<sup>B,I</sup>,  
A. Sato<sup>B</sup>, G. Takayama<sup>B</sup>, K. Yasuda<sup>B</sup>,  
T.Sugisaki<sup>B</sup>, Y. Kimura<sup>B,I</sup>, R.Taguchi<sup>B</sup>,  
M. Fukutome<sup>B</sup>, S. Shimizu<sup>B</sup>, R. Imai<sup>B</sup>, S. Ide<sup>B</sup>,  
K.Shimizu<sup>C</sup>, M. Kamon<sup>C</sup>, M. Fukushima<sup>C</sup>,  
Y. Mizoi<sup>D</sup>, K.Horie<sup>B</sup>, A. Koda<sup>E</sup>, S. Kanda<sup>E</sup>,  
W. Sato<sup>E</sup>, D. Nishimura<sup>G</sup>, M. Tanaka<sup>F,I</sup>,  
G. Morris<sup>A</sup>, B. Hitti<sup>A</sup>, D. Arseneau<sup>A</sup>,  
R. Abasalti<sup>A</sup>, D. Vyas<sup>A</sup>, R. Yasuda<sup>H</sup>, M. Fukuda<sup>B</sup>

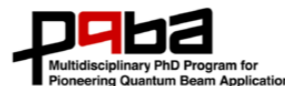
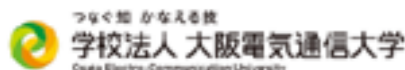
## Affiliation :

<sup>A</sup>CMMS, TRIUMF, <sup>B</sup>Dept. Phys., Osaka U., <sup>C</sup>KYOKUGEN,  
Osaka U., <sup>D</sup>OECU, <sup>E</sup>KEK, <sup>F</sup>Kanazawa U., <sup>G</sup>Kyushu U.,  
<sup>H</sup>Tokyo City Univ., <sup>I</sup>Tokyo Noko Univ., <sup>J</sup>Open-it



## Acknowledgement :

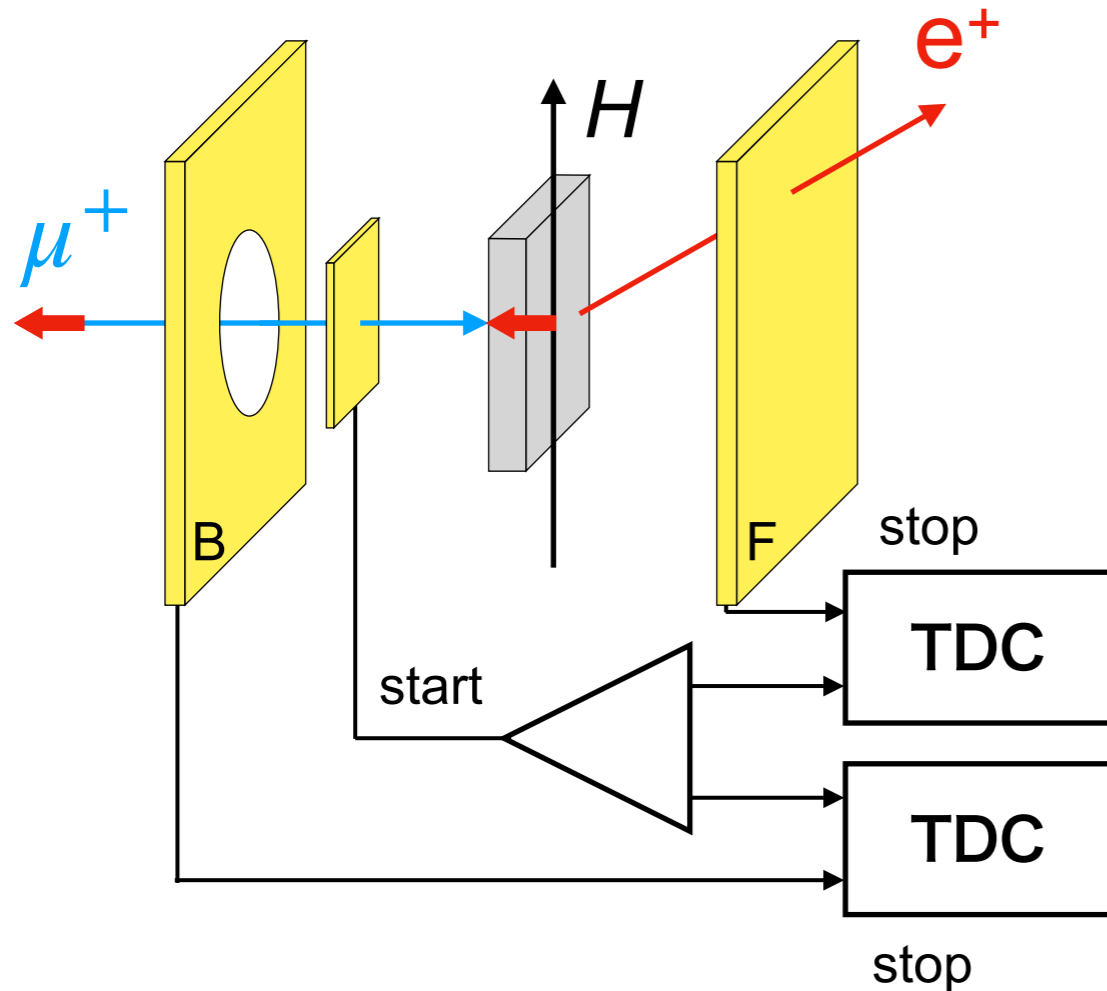
- Multidisciplinary PhD Program for Pioneering Quantum Beam Application (PQBA) at Osaka University.
- Scholarship of Graduate School of Science of Osaka University for Overseas Research Activities.
- Fundamental Electronics Research Institute (FERI), Osaka Electro-Communication University (OECU).
- JSPS Kakenhi Grant Number JP22H00110. • KEK-TRIUMF Exchange Program for Early Career Researchers (EPECR)



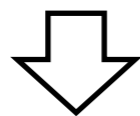
# μSR法とは

## Muon Spin Rotation/Relaxation/Resonance

= スピン偏極したミュオンビームを利用した分光法

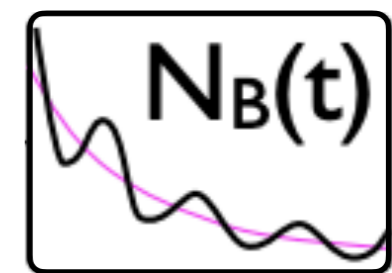
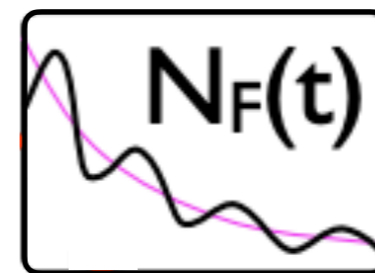


$\mu^+$ ,  $e^+$  の時間を計測

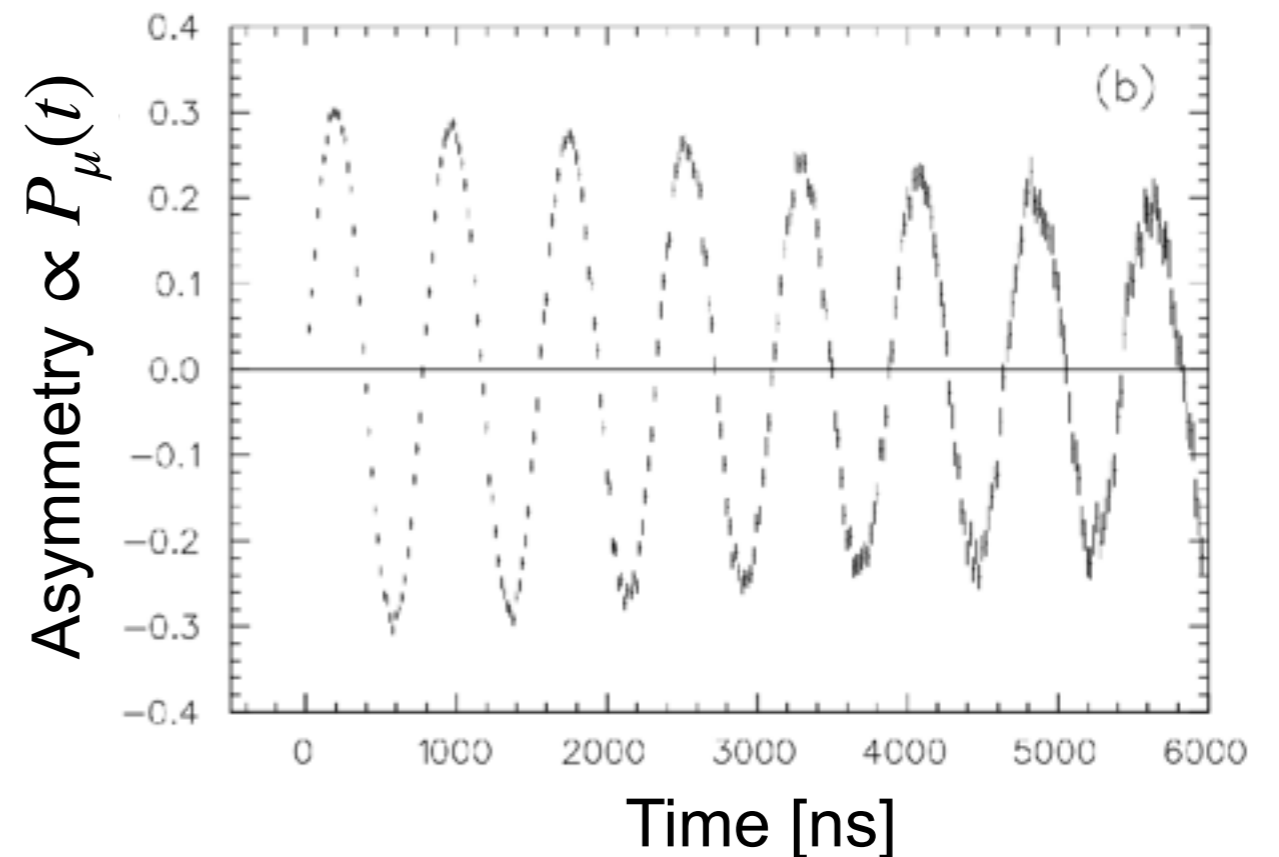


試料全体のμSRスペクトル

Forward/Backward : Time Spectra

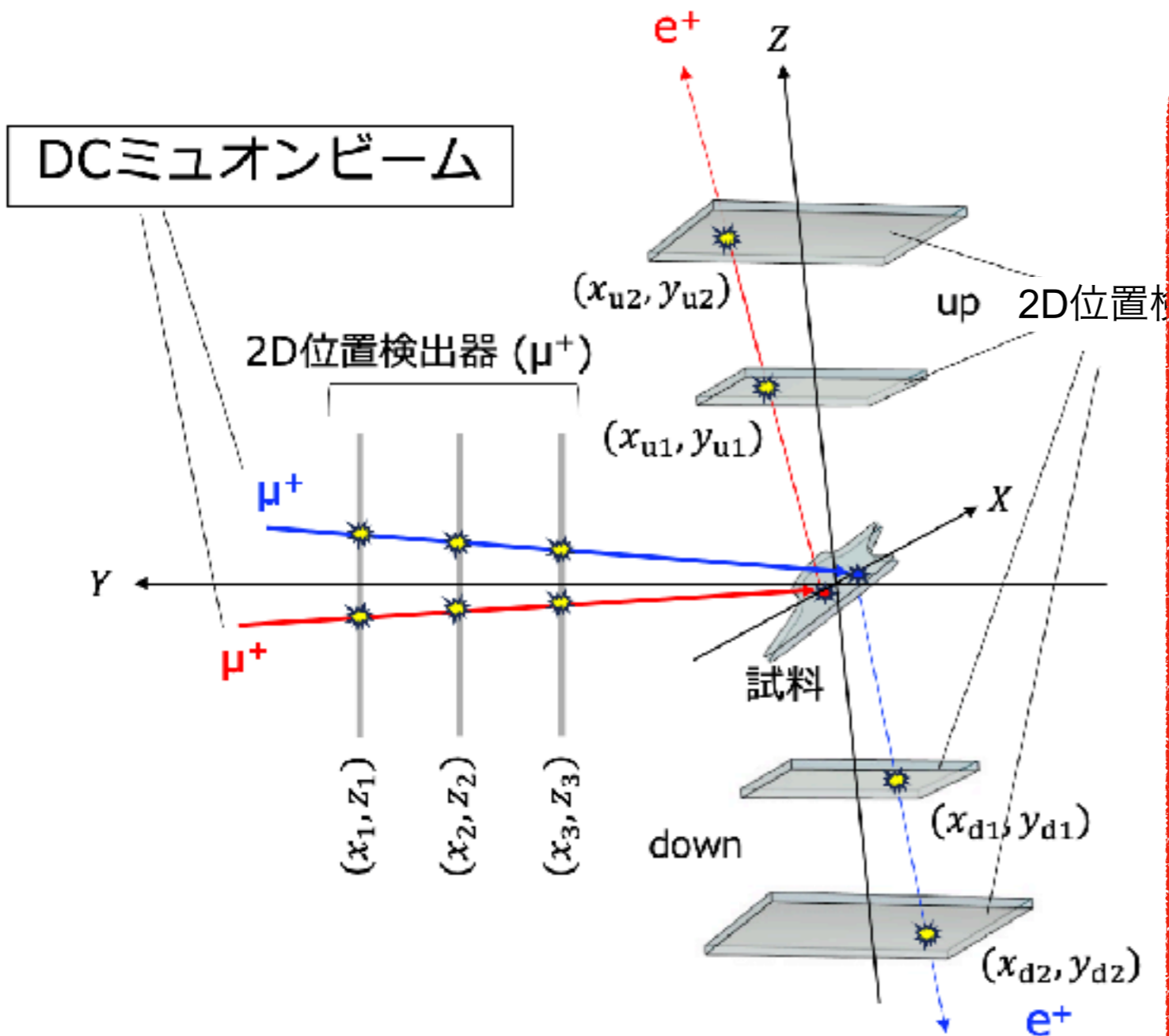


$$A(t) = (\alpha N_B - N_F) / (\alpha N_B + N_F)$$

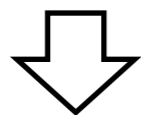




# ミュオンスピニメージング



$\mu^+$ ,  $e^+$  の時間と位置を計測

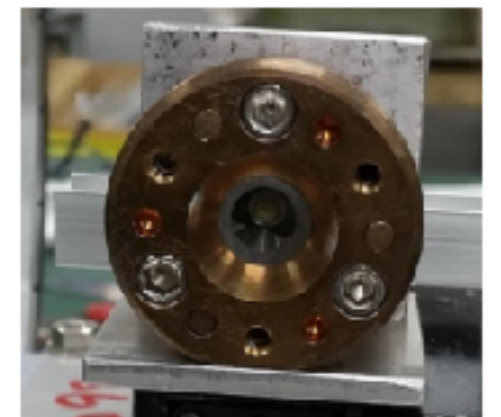
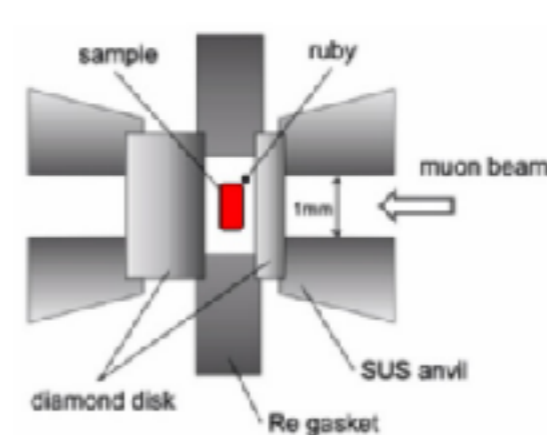


試料の微小領域の $\mu$ SRスペクトル

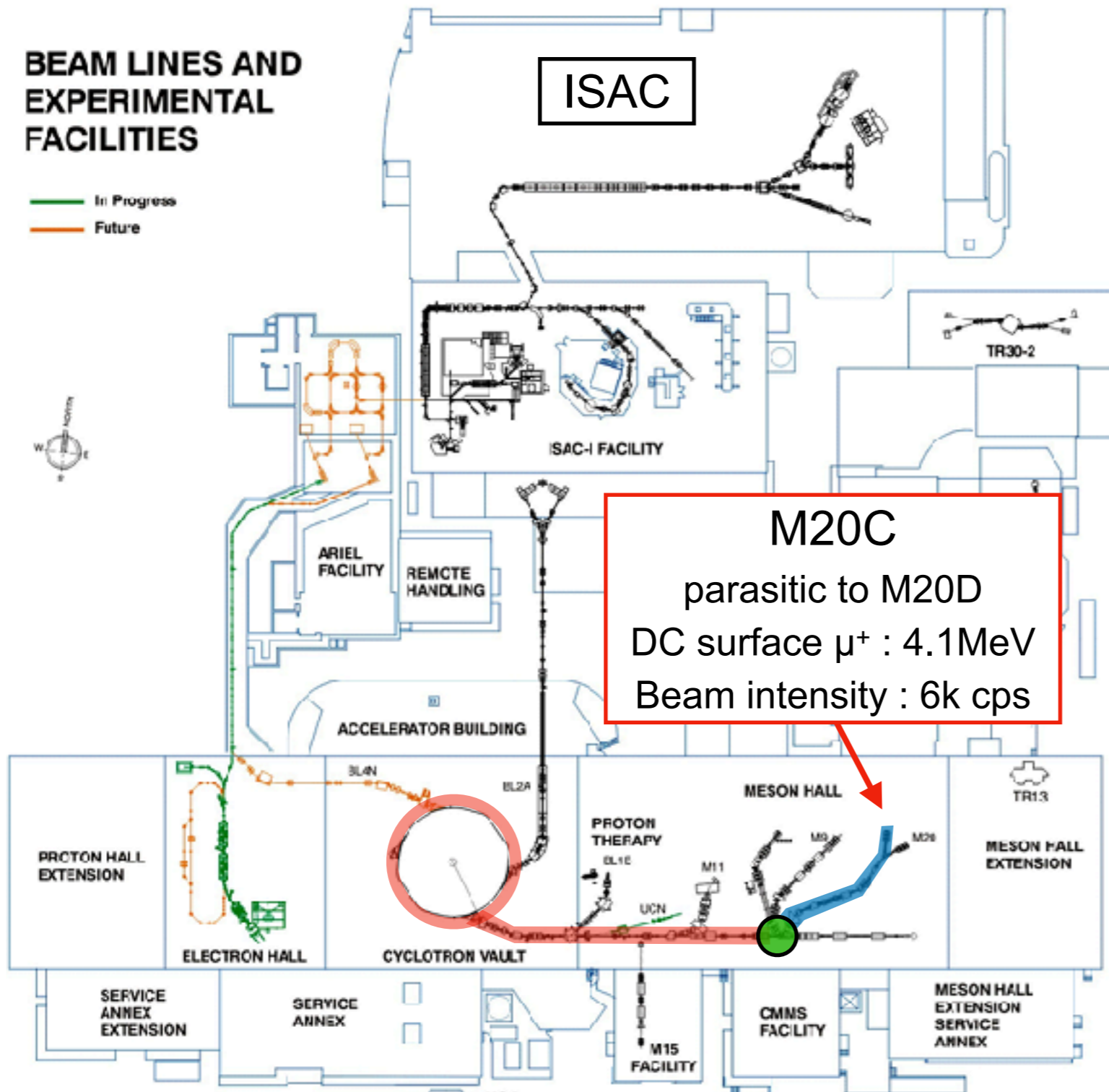
何ができるようになるか？

- ✓ バックグラウンドの除去
  - 微小試料の  $\mu$ SR測定
  - 複数/混合試料の同時測定
  - 非破壊分析
  - 大強度  $\mu$ SR

e.g.) Diamond Anvil Cell → 超高压 $\mu$ SR  
試料サイズ(<1mm)  $\ll$  ビームサイズ



# 実験施設 - TRIUMF in Vancouver, Canada

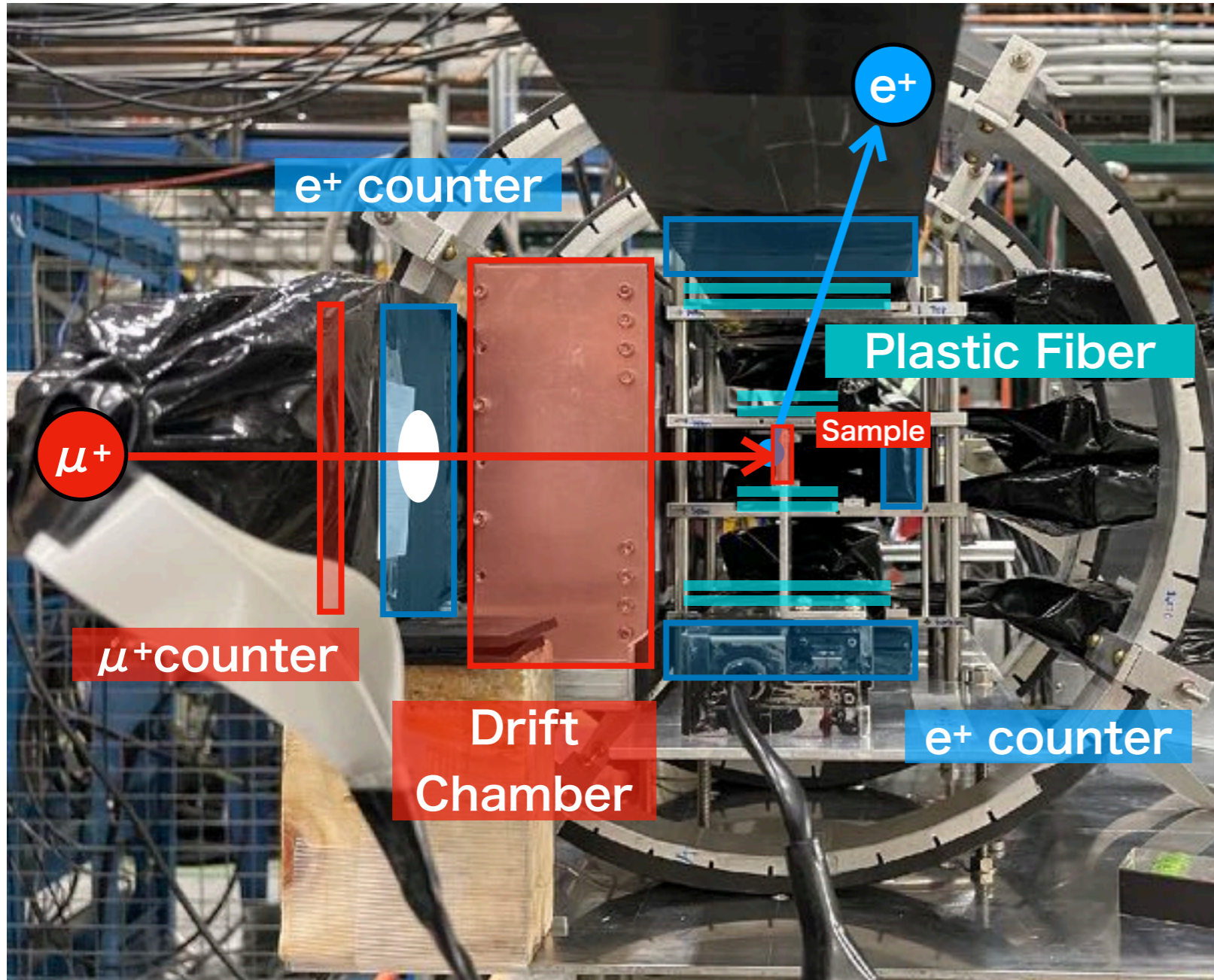


Proton (520 MeV)  $\longrightarrow$   $\pi^+$  (Be target)  $\longrightarrow$   $\mu^+$  beam (4.1 MeV)

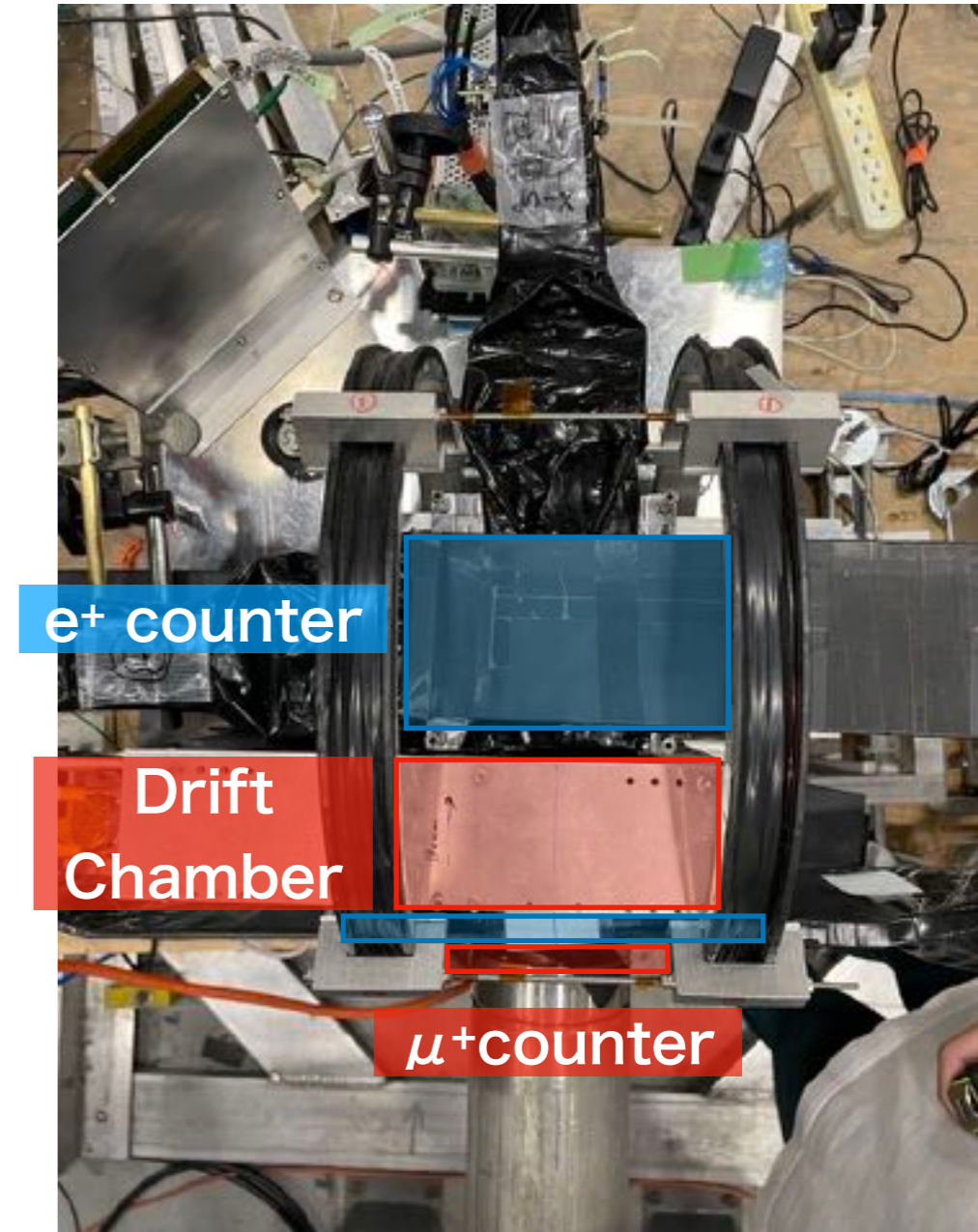


# 測定セットアップ

Side view



Top view



Trig.( $T_{\text{start}}$ ) :  $\mu^+$  counter

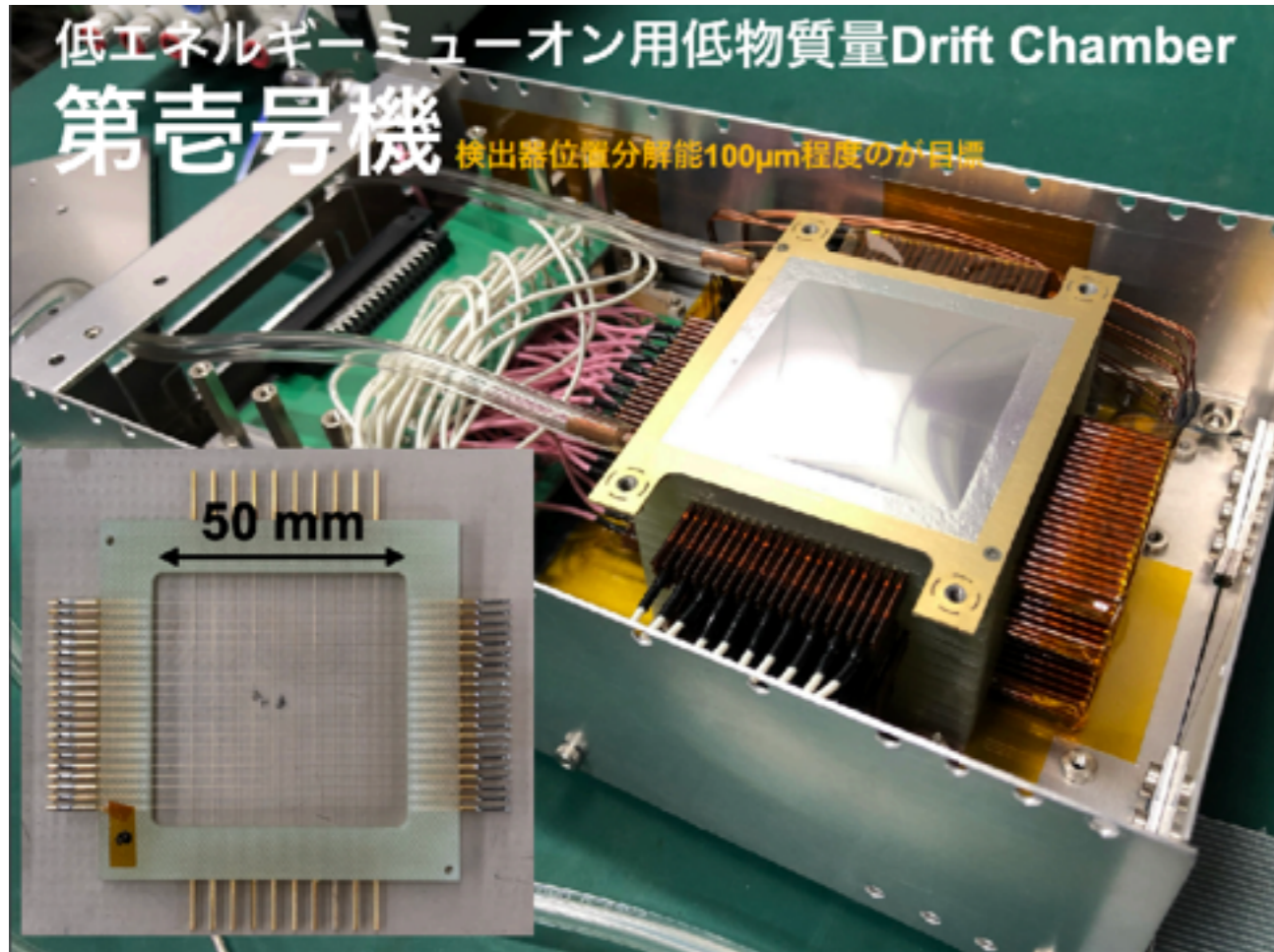
$T_{\text{stop}}$  :  $e^+$  counter (Forward/Backward, Up/Down)

$\mu^+$  : Drift Chamber

$e^+$  : Plastic Fiber



# ドリフトチェンバー： $\mu^+$ のトラッキング

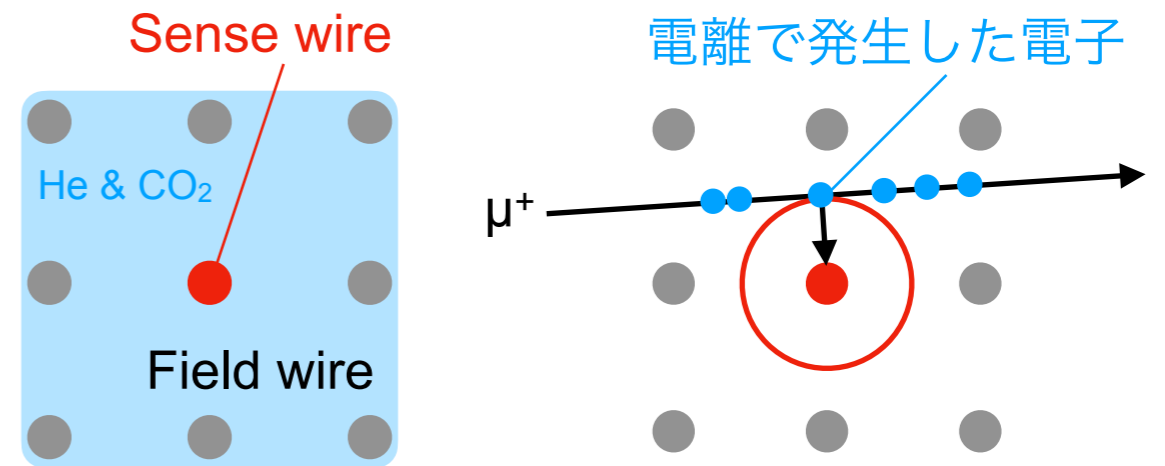


## DC760 (ハヤシレピック)

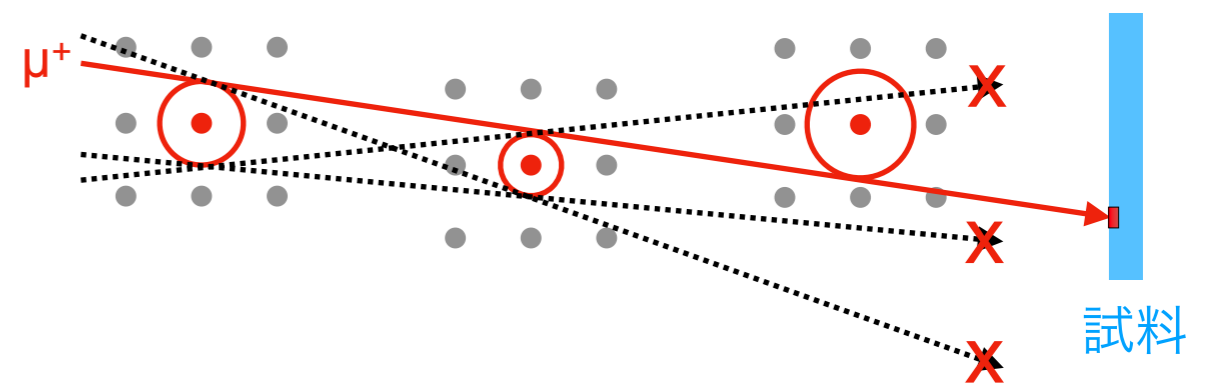
- ✓ CH /Layer : 10ch \*X,Y each 3-layers
- ✓ ワイヤーピッチ : 2mm
- ✓ 有感領域 : 38 x 38 x 60mm
- ✓ ガス : He : CO<sub>2</sub> = 90 : 10
- ✓ 印加電圧 : -1450V

## Drift Chamber

電子のドリフト時間 → 入射位置  
高い位置分解能 ~ 数百 $\mu\text{m}$



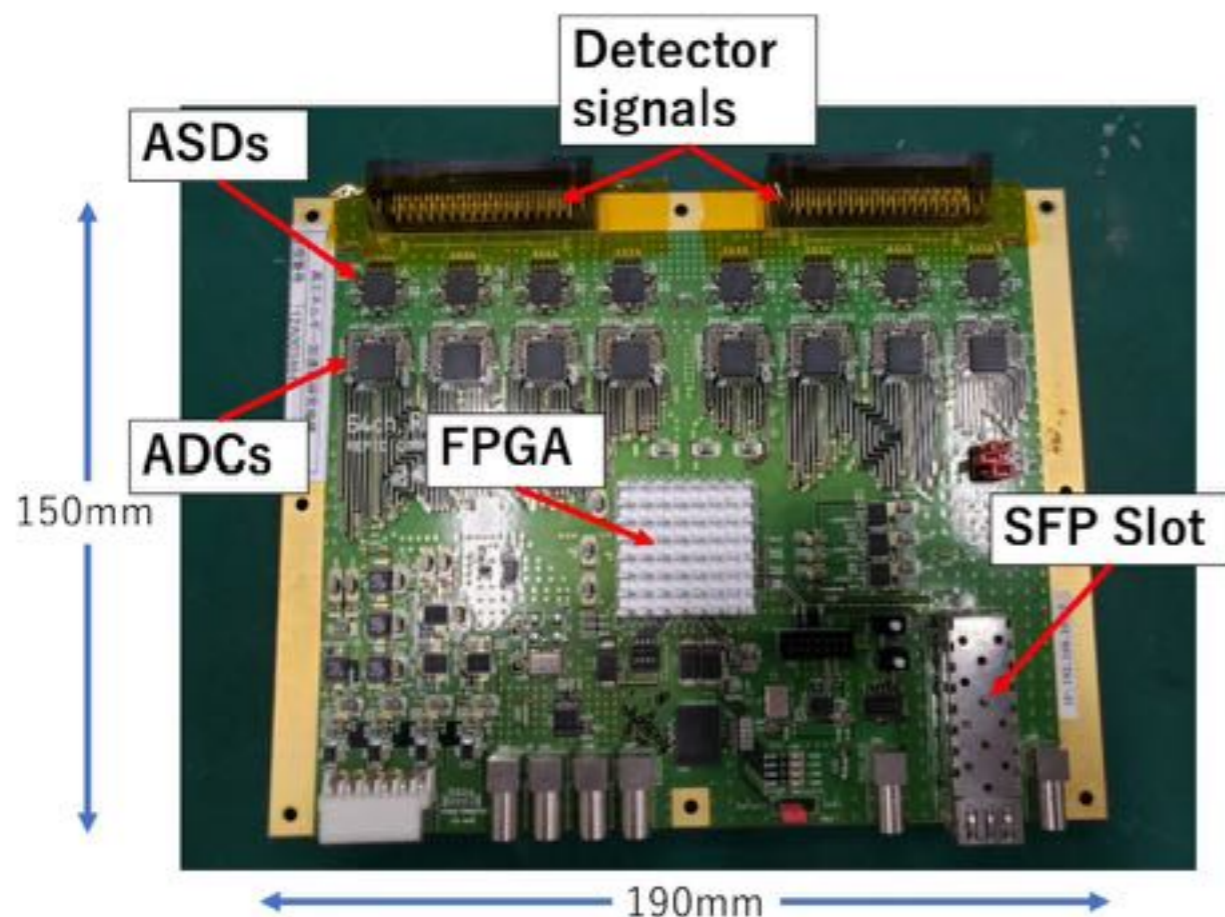
$\mu^+$  のトラッキングから試料の位置を特定



3層なので、Left-Rightが解けないeventもある  
 $e^+$  はPlastic counterで計測が必要

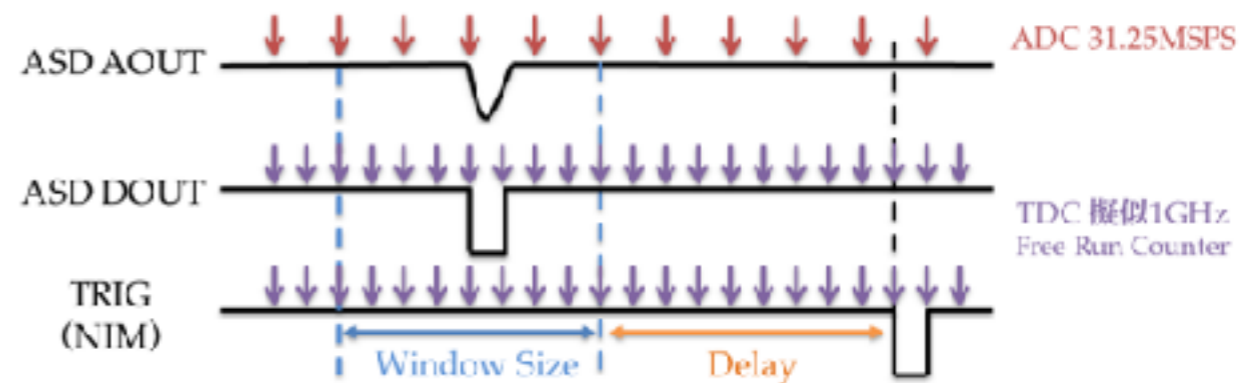
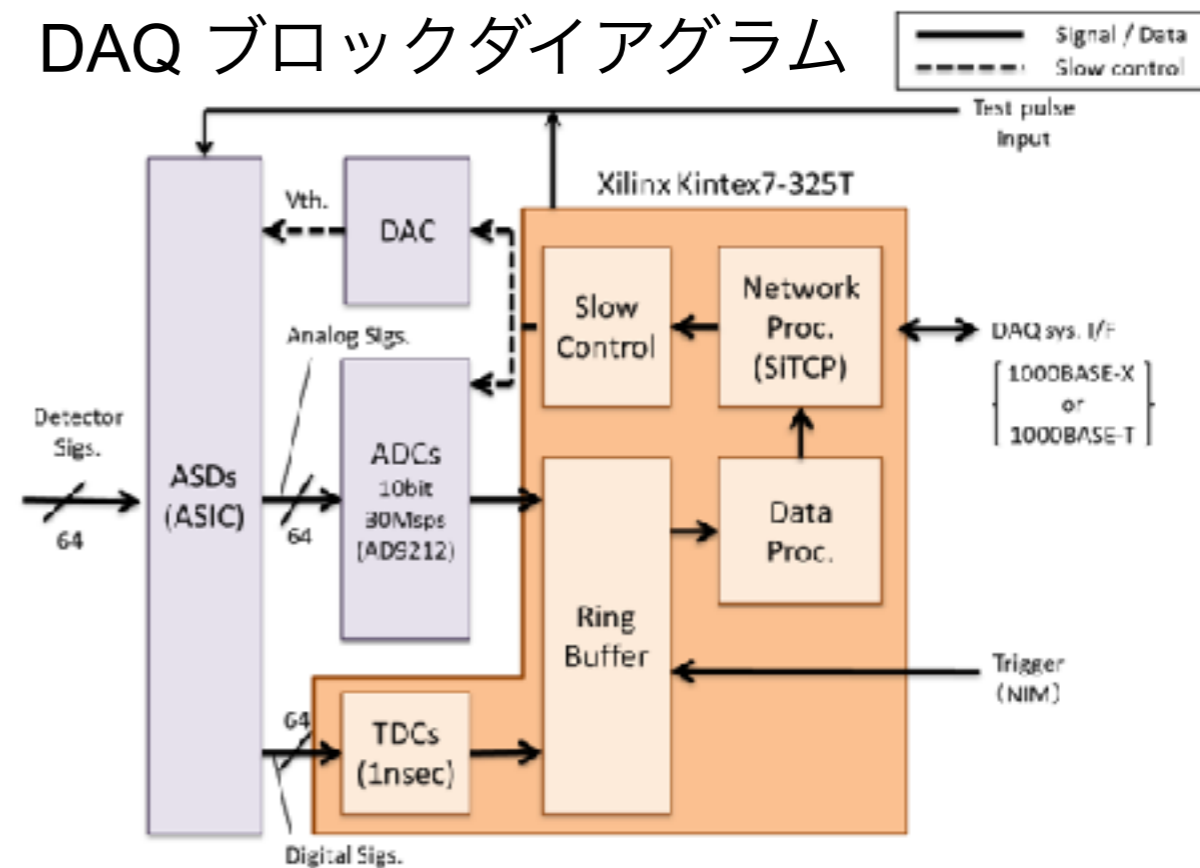
# DAQ : ドリフトチェンバー

## 64ch Readout RP1212



- ✓ 検出器入力信号64chを処理可能
- ✓ アナログ波形取り込み
  - : 解像度 10bit, サンプリング周波数 31.25MHz
- ✓ TDC (FPGA内に実装) : 解像度 1ns
- ✓ リングバッファ : 8us
- ✓ データ転送モード
  - Raw : 波形, Suppress : ADCSum, TOT, TDC time

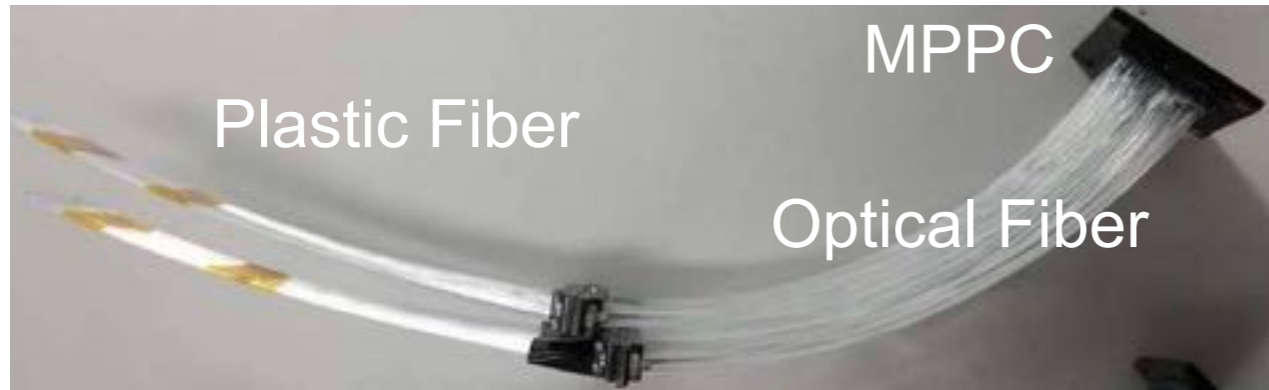
## DAQ ブロックダイアグラム



- Test pulse input で全てのCHに同じ波形を生成可能
- Clock : 40MHz on board or 外部入力
- マルチトリガ連続15トリガまで受付可能

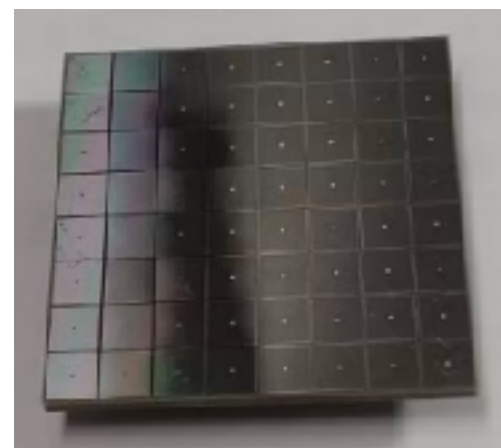


# プラスチックファイバー： $e^+$ のトラッキング



## Plastic Scintillation Fibers (PSF) SCSF-78 (Kuraray)

- ✓ X, Y 各2層でトラッキング
  - ✓ Inner Fiber : 32 x2 ch, Outer Fiber : 64ch
  - ✓ Fiber size : 1mm 角
- (X,Y) (Up, Down) (In, Out) → Total : 384ch



## MPPC

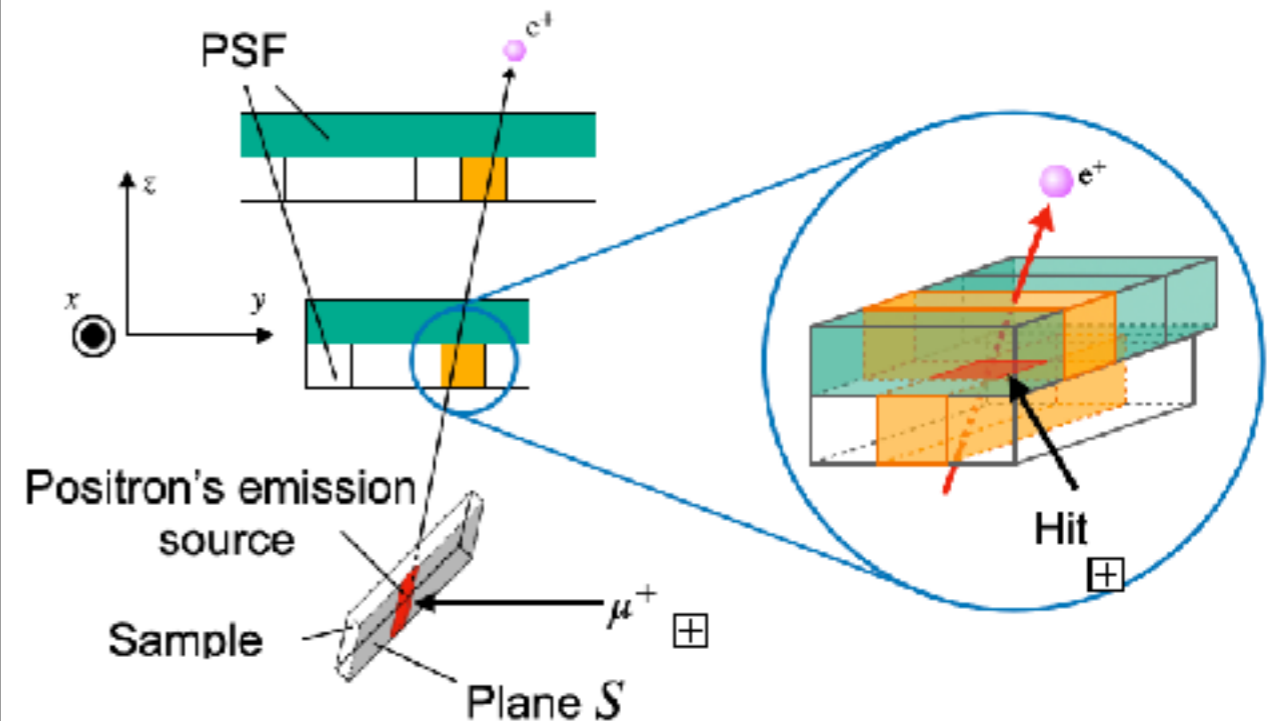
S13361-3050E-08(Hamamatsu)

- ✓  $8 \times 8 = 64$ ch
- ✓  $V_{\text{Actual}} : 56.5 \sim 58$ V
- \* $V_{\text{BR}} : 52 \pm 5$ V

## Plastic Fiber

$e^+$  のトラッキング &  $\mu$ SR法 の両立  
Plastic Scintillator → 磁場耐性

$e^+$  のトラッキングから試料の位置を特定

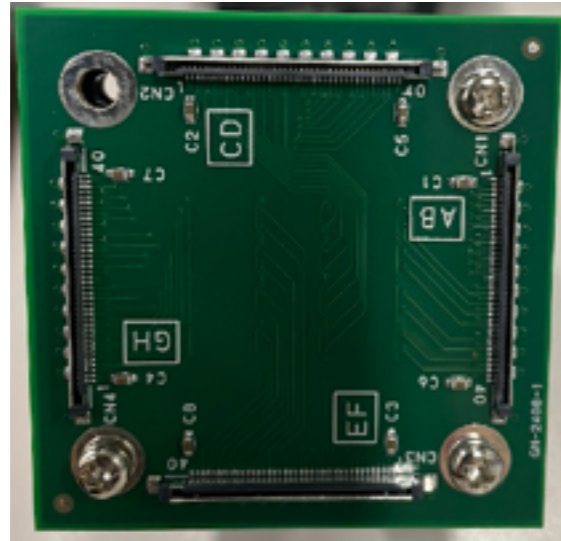


位置分解能 > Fiber のサイズ  
Fiberを小さくするとS/N悪化してしまう

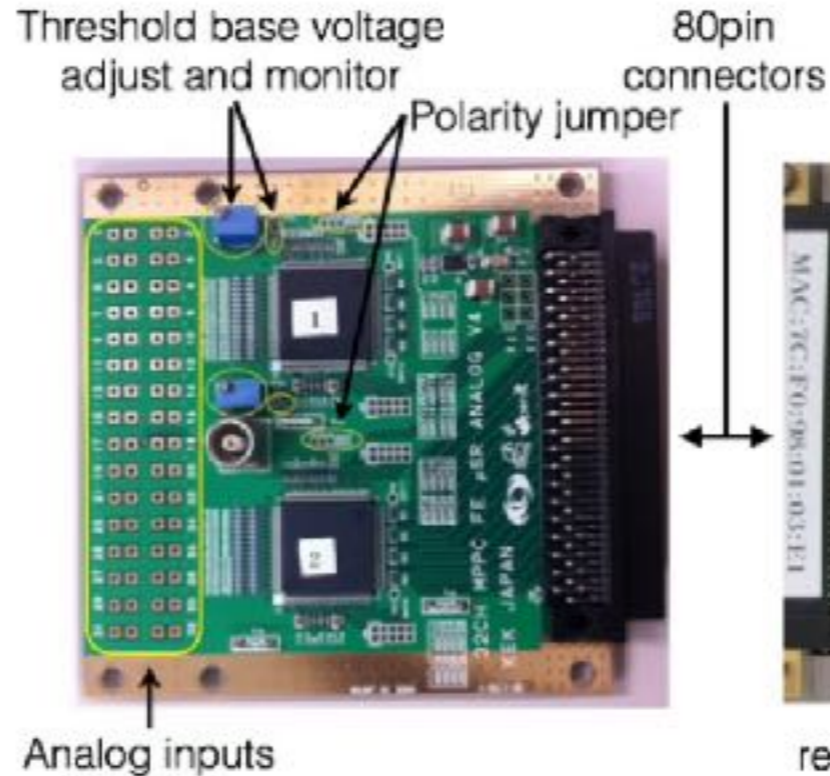
# DAQ : プラスチックファイバー, e<sup>+</sup> counter

## KALLIOPE, NIM-TDC

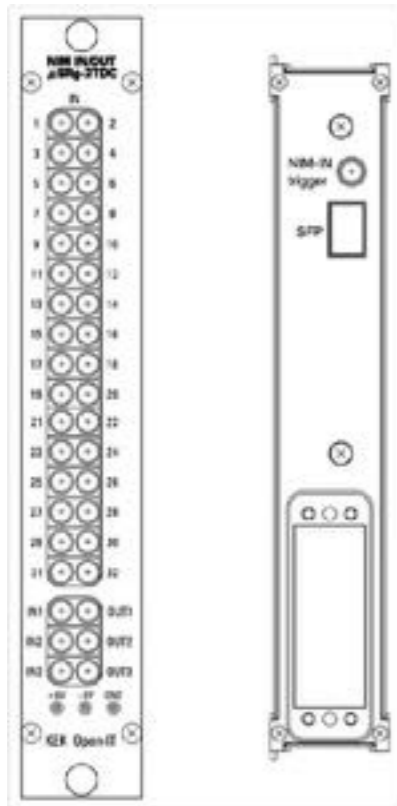
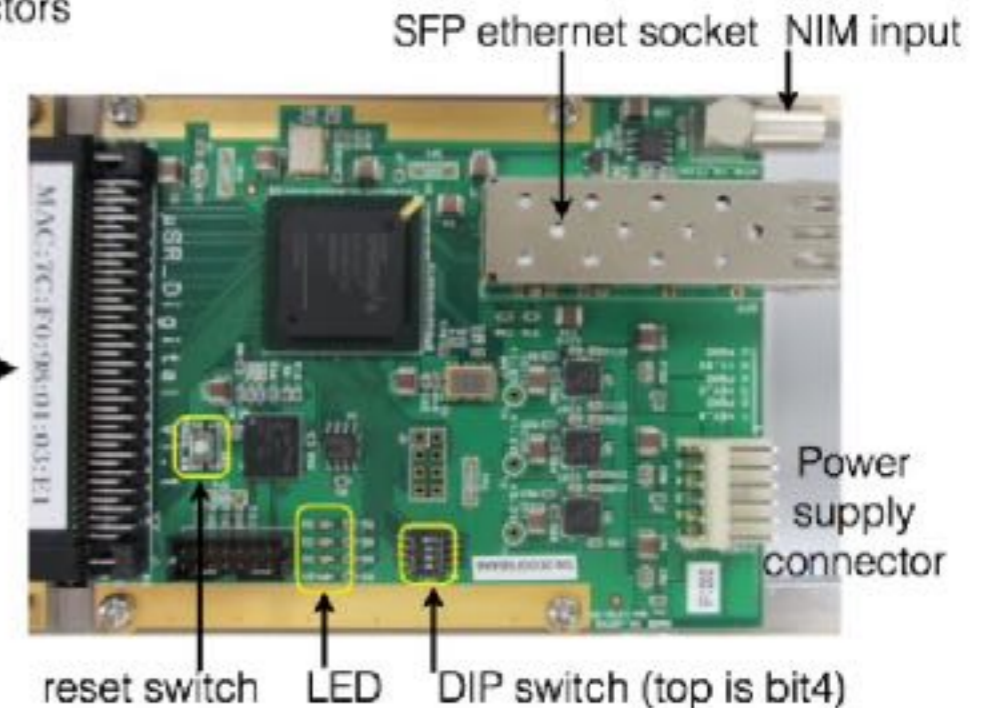
MPPC CN Board V1 基板(GN-2408-1)



Analog Board (GN1372-1)



Digital Board (GN1078-3)



NIM-TDC

### KALLIOPE Analog Board

- ✓ Input/output ports : 32ch  
in : NIF or KEL(SSL00-40S)
- ✓ Common Threshold (for 16ch)
- ✓ Threshold DAC (for each ch)  
resolution :  $\pm 1.6$  or  $16\text{mV/bit} \times 8\text{bit}$
- ✓ HV供給 & 信号取得

### KALLIOPE Digital Board

- ✓ Input ports : 32ch
- ✓ NIM input for trigger
- ✓ TDC Leading/Trailing time  
resolution : 1ns



# データ収集システム



RP1212

64ch  
波形 / T, Q

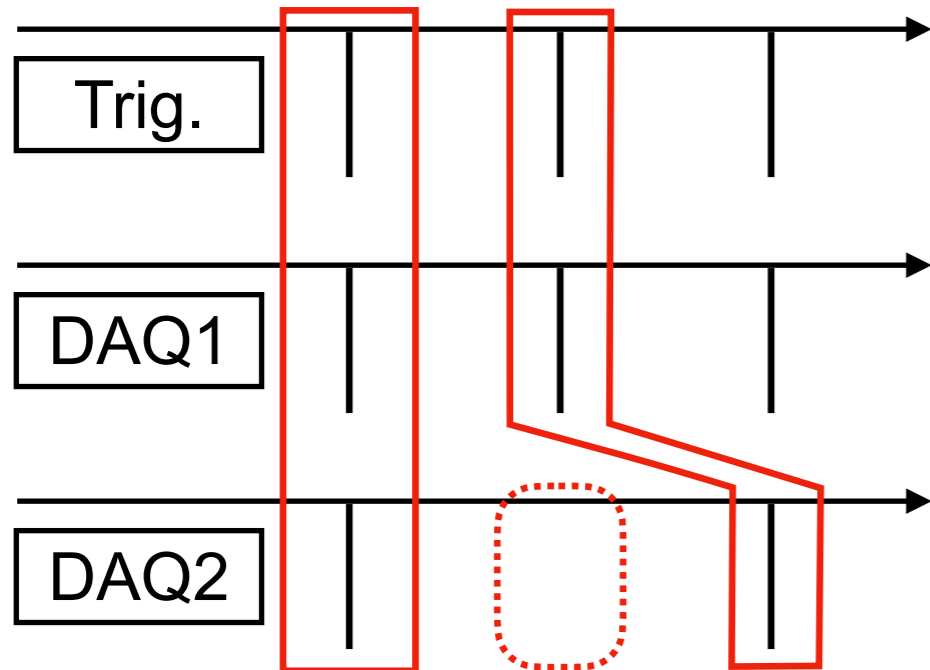
Drift Chamber

x/y 3-layer  
10ch for each  
→ 60ch

DAQが複数 (3種類, 14個)  
Event by event でデータ取得



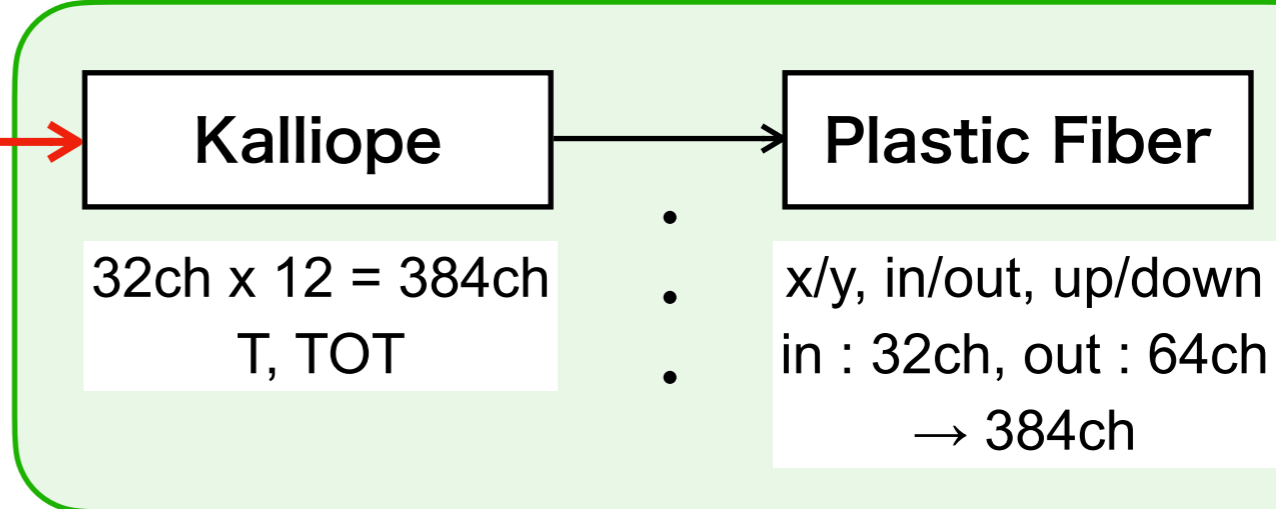
Triggerの数え落とし → Eventズレ



event 1

event 2

\*以降、全てズレたまま

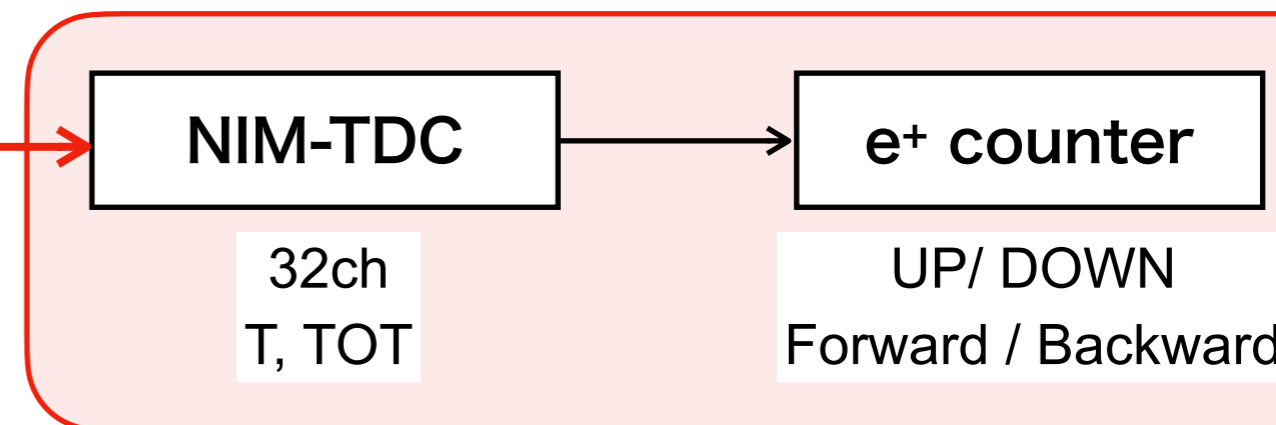


Kalliope

32ch x 12 = 384ch  
T, TOT

Plastic Fiber

x/y, in/out, up/down  
in : 32ch, out : 64ch  
→ 384ch



NIM-TDC

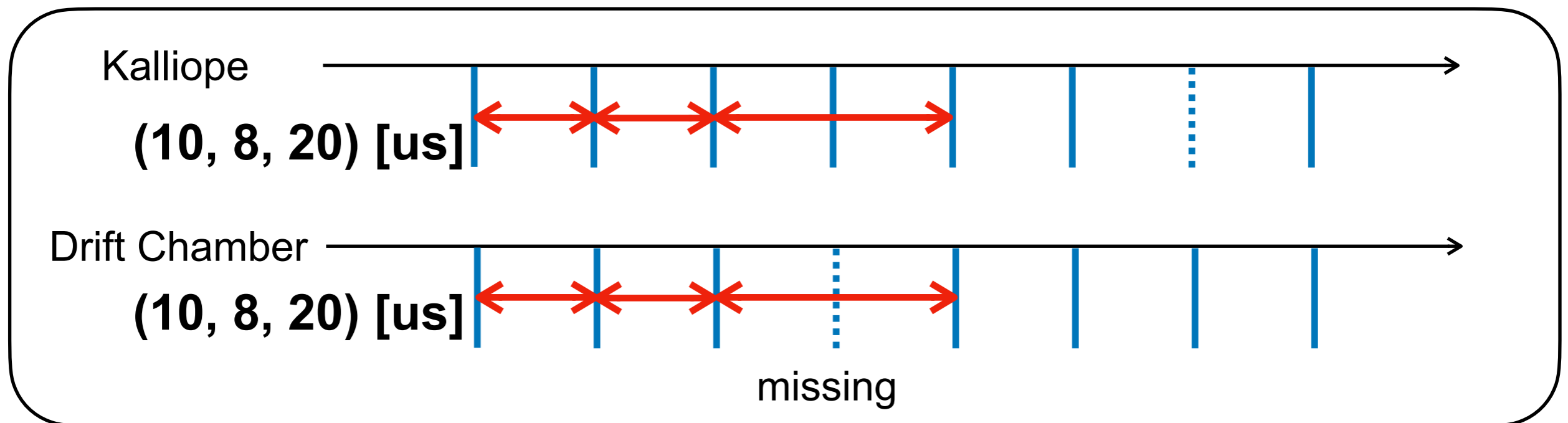
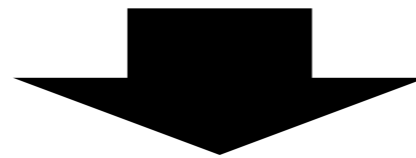
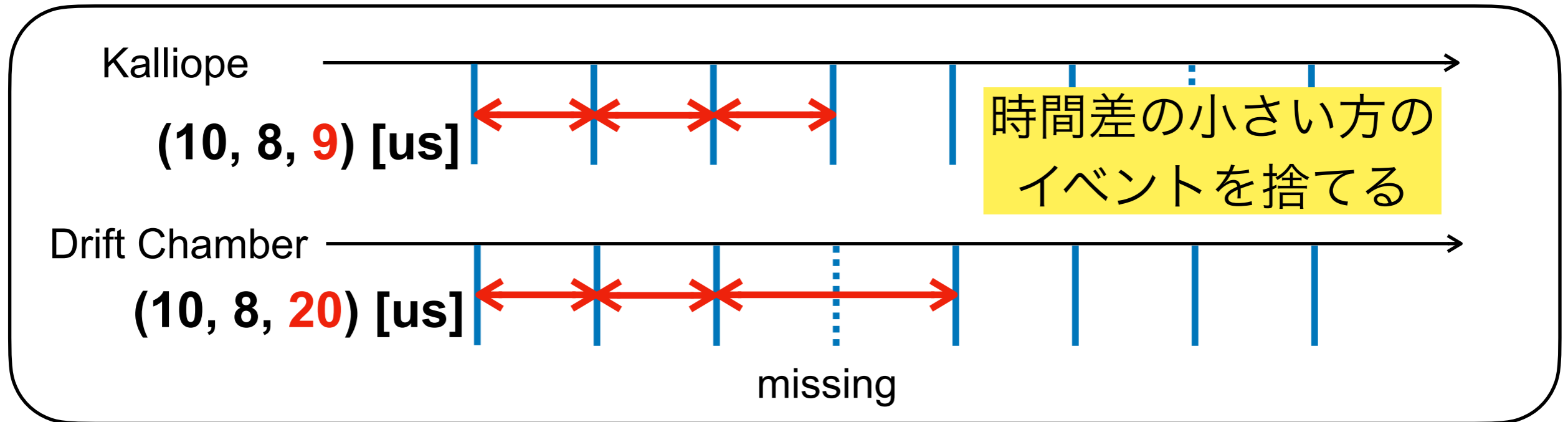
32ch  
T, TOT

e<sup>+</sup> counter

UP/ DOWN  
Forward / Backward

# DAQ Synchronization

Common Clock がない → Triggerの時間差のパターンでマッチング





# 課題

## KALLIOPE :

- 擬似トリガの識別が不可能 = Common Clock がない
  - Synchronization をソフトで頑張る必要あり
- Analog out を見ることができず不便 → EASIROC を通して使う？
- S/Nが悪い → データ量が多い上にほとんどがノイズ
  - FWを書き換えて65us以降のデータを取らないようにする？

## RP1212 :

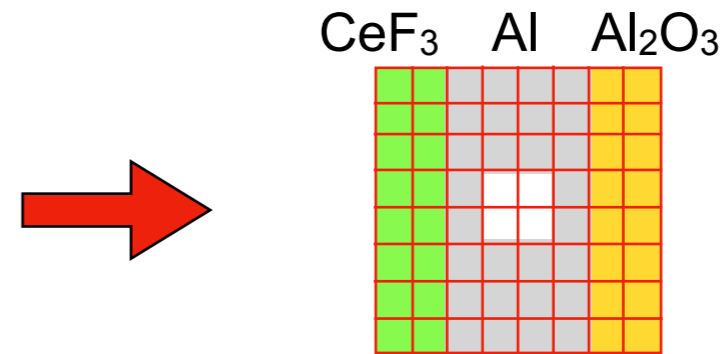
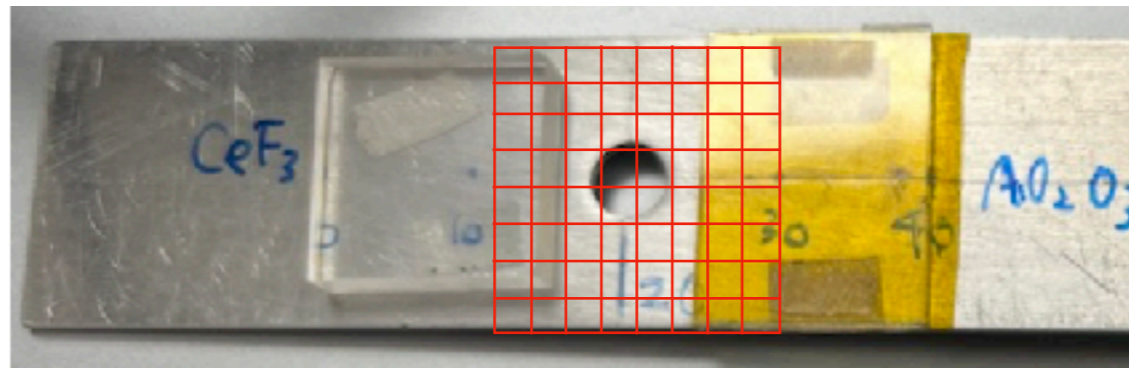
- Suppress mode(データ可変長) でパケットロスすることがあった
  - パケットロスを無視してデータ取得するようにする

何かアドバイスあれば是非お願いします 🙏

# 今後の展望

## $\mu$ SRスペクトルが異なる3つの試料のイメージング

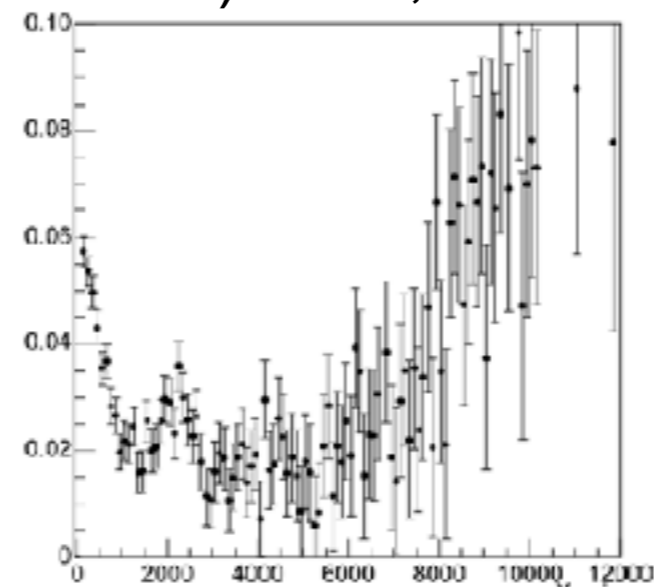
- $\text{CeF}_3$  : ZF, Room Temperature で F- $\mu$ -F 回転
- Al w/hole :  $\mu^+$ の回転、穴が空いた部分では何も見えないはず
- $\text{Al}_2\text{O}_3$  : Al Magnetic moment で  $\mu^+$  spin は緩和する



- $\mu^+$  tracking &  $e^+$  tracking
  - セルごとに $\mu$ SRスペクトルを作成
  - スペクトルの形や周波数成分の解析
  - 物質を識別 & イメージング
- Vertex Matching → 高い画像分解能

詳細な解析はこれから

例)  $\text{CeF}_3$ , ZF



例) Al, TF

