akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

新学術領域『中性子星核物質』
第二回検出器ワークショップ

A02班
ファイバーアレイ検出器と多チャンネルMPPC読出し回路

東北大学大学院理学研究科

赤澤雄也/三輪浩司

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

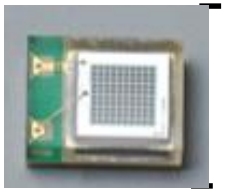
akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

目次

- 多チャンネルMPPC読み出し回路
  - EASIROC chip
  - 開発した読み出しシステム
- BFT (平面型)
- CFT (円筒形)
  - 制作方法
  - 読み出し
  - 性能
- まとめ

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

MPPC多チャンネル読み出し回路の開発



新型光検出器MPPC(2007年当時)

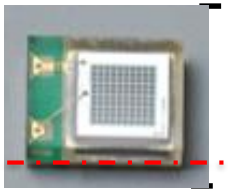
- ▷ 高い増幅率、磁場中でも使用可能。非常にポテンシャルの高い検出器
- ▶ 検出器が小型なため、多チャンネルのオペレーションが必須

開発当時・・・MPPC単体の性能評価

- MPPCのダークカレントのHV依存性
- 温度依存性
- 放射線損傷

⇒ 浜松ホトニクスにフィードバック
MPPCの性能を改善させる

MPPC多チャンネル読み出し回路の開発



新型光検出器MPPC(2007年当時)

- ▷ 高い増幅率、磁場中でも使用可能。非常にポテンシャルの高い検出器
- ▶ 検出器が小型なため、多チャンネルのオペレーションが必須

開発当時・・・MPPC単体の性能評価

- MPPCのダークカレントのHV依存性
- 温度依存性
- 放射線損傷

⇒ 浜松ホトニクスにフィードバック
MPPCの性能を改善させる

実際の実験に使用するには
多チャンネルでの読み出しが必須

例：ファイバー検出器

MPPCから読み出しまでをパッケージ化し、
多チャンネル読み出しに特化した汎用的なシステムを作る

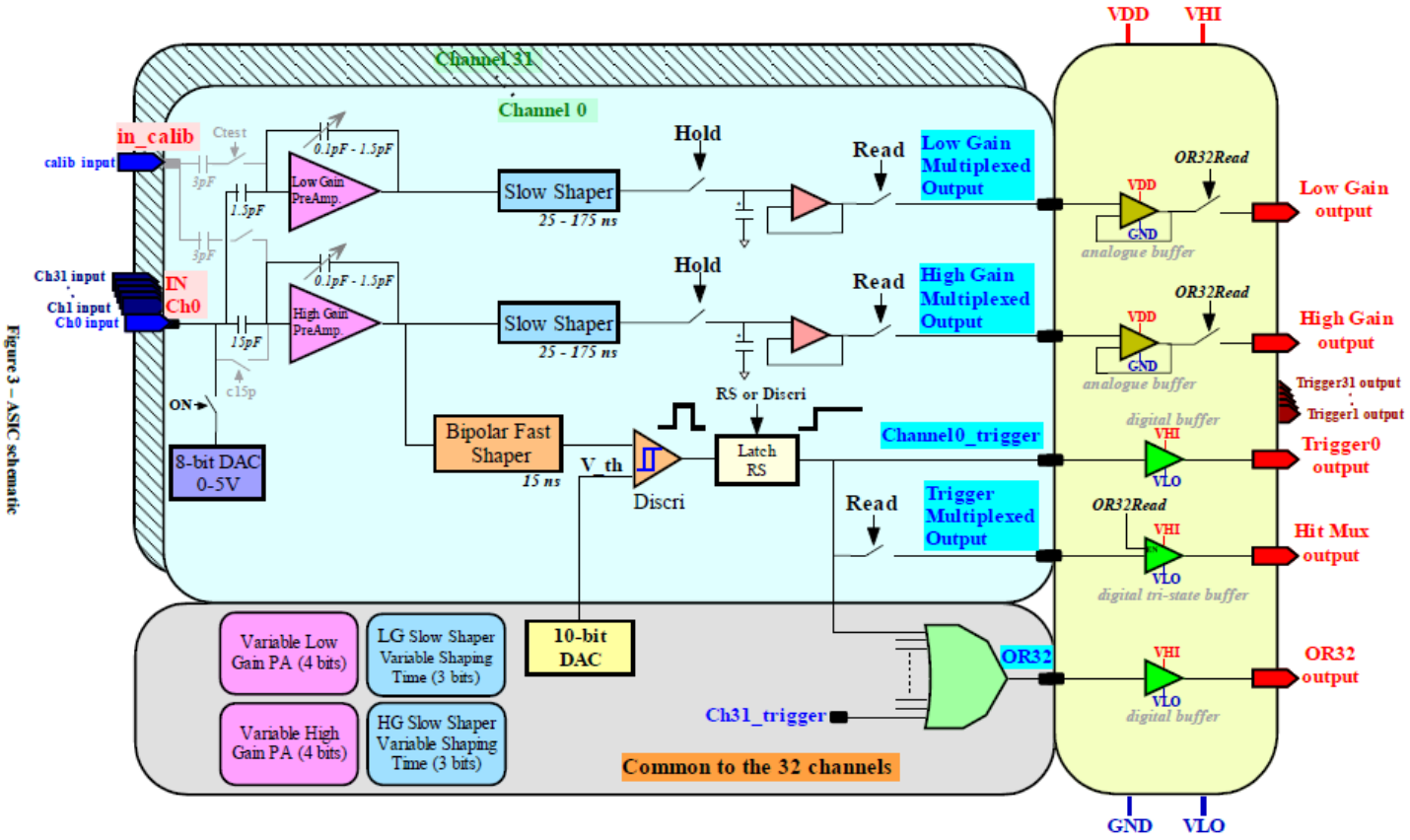
東北大、KEK測定器開発室(光センサー)、フランスOmega(IN2P3)での連携

EASIROC chipを用いたEASIROC boardを開発

⇒Backup①

Introduction of EASIROC chip

- EASIROC (Extended Analogue SiPM Integrated Read Out Chip)
  - 32 channels inputs
  - HV adjustment (4.5 V, 8 bit)
  - Amp, shaper, discriminator
  - Analog (serial)
  - discriminator (parallel) outputs

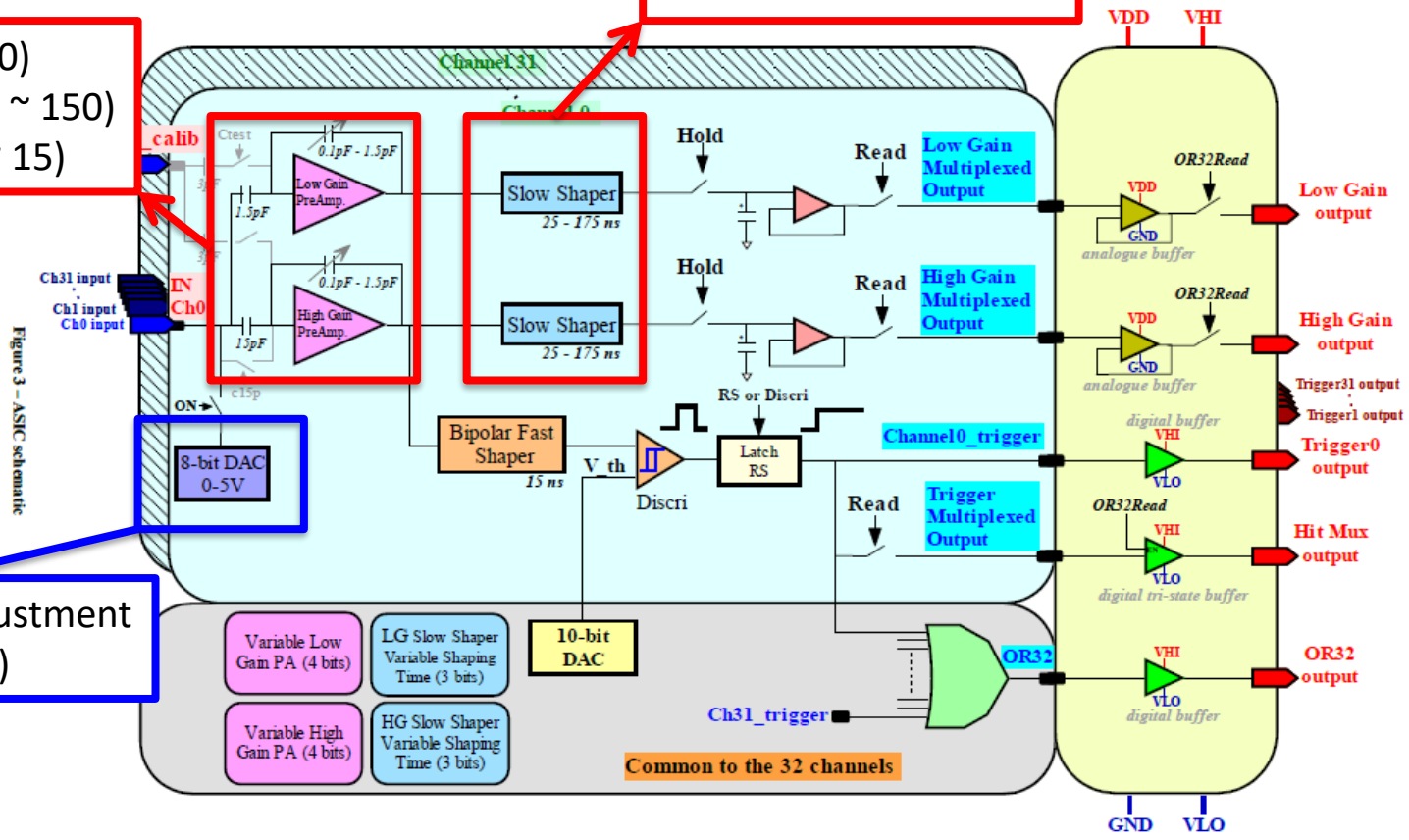


Introduction of EASIROC chip

- EASIROC (Extended Analogue SiPM Integrated Read Out Chip)
  - 32 channels inputs
  - HV adjustment (4.5 V, 8 bit)
  - Amp, shaper, discriminator
  - Analog (serial)
  - discriminator (parallel) outputs

Shaper
(Variable shaping time)
25 ~ 175 ns

Double gain (1:10)
- High gain (10 ~ 150)
- Low gain (1 ~ 15)



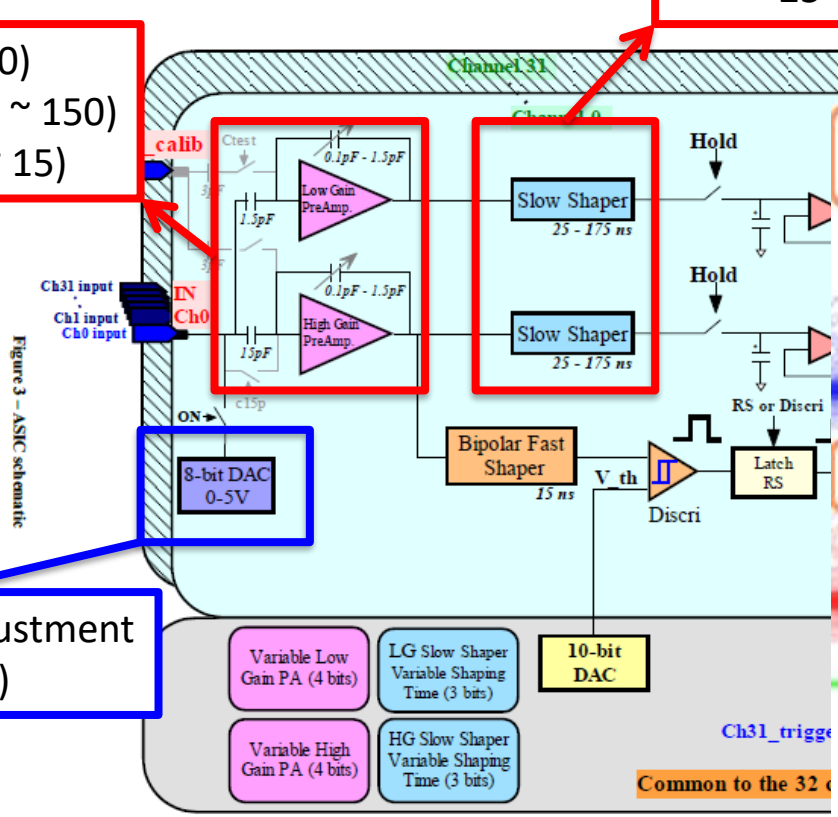
Bias Voltage adjustment
(8 bit GAC)

Introduction of EASIROC chip

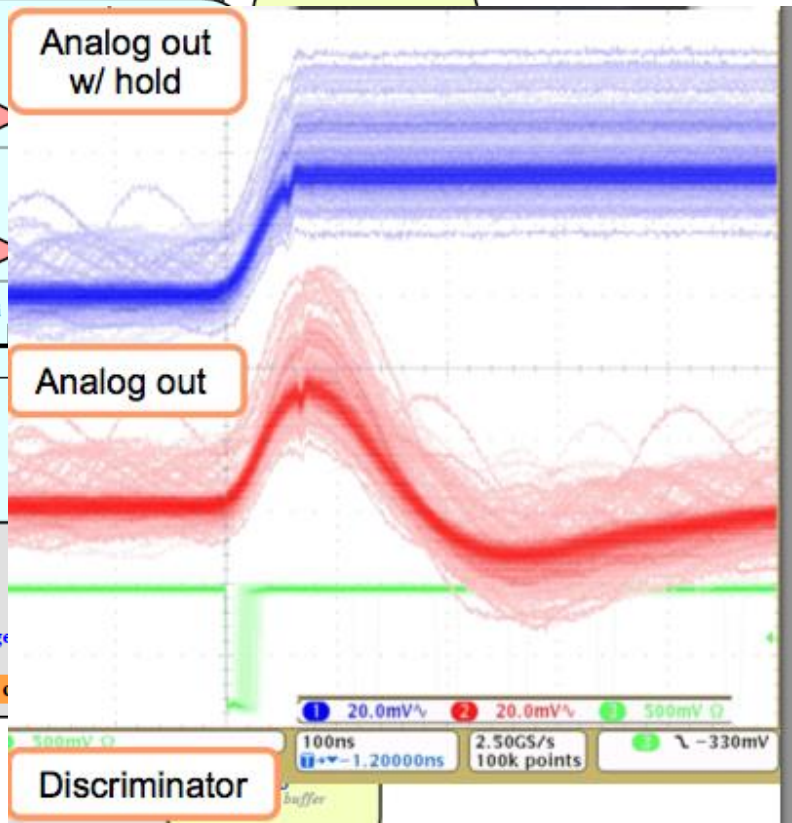
- EASIROC (Extended Analogue SiPM Integrated Read Out Chip)
  - 32 channels inputs
  - HV adjustment (4.5 V, 8 bit)
  - Amp, shaper, discriminator
  - Analog (serial)
  - discriminator (parallel) outputs

Shaper
(Variable shaping time)
25 ~ 175 ns

Double gain (1:10)
- High gain (10 ~ 150)
- Low gain (1 ~ 15)



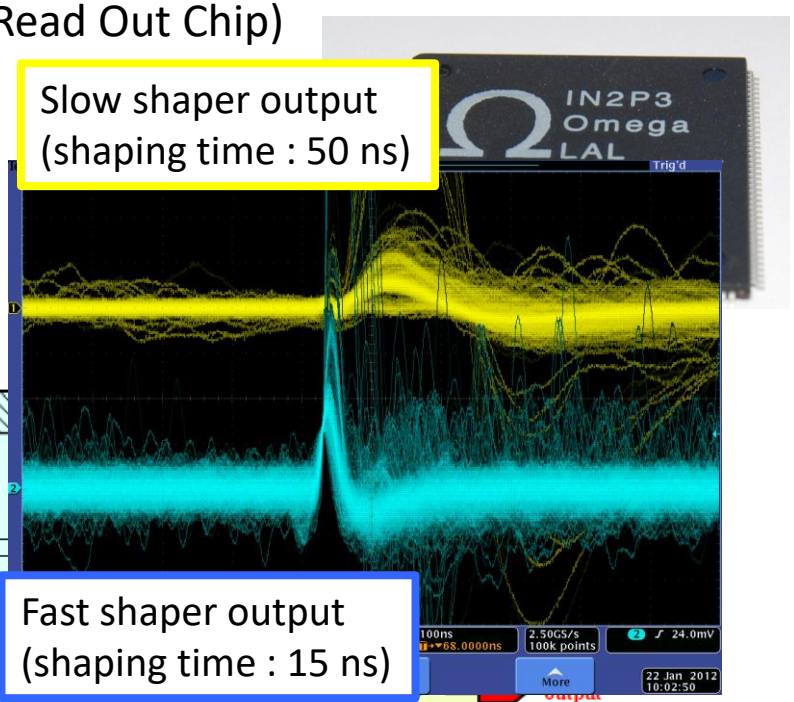
Bias Voltage adjustment
(8 bit GAC)



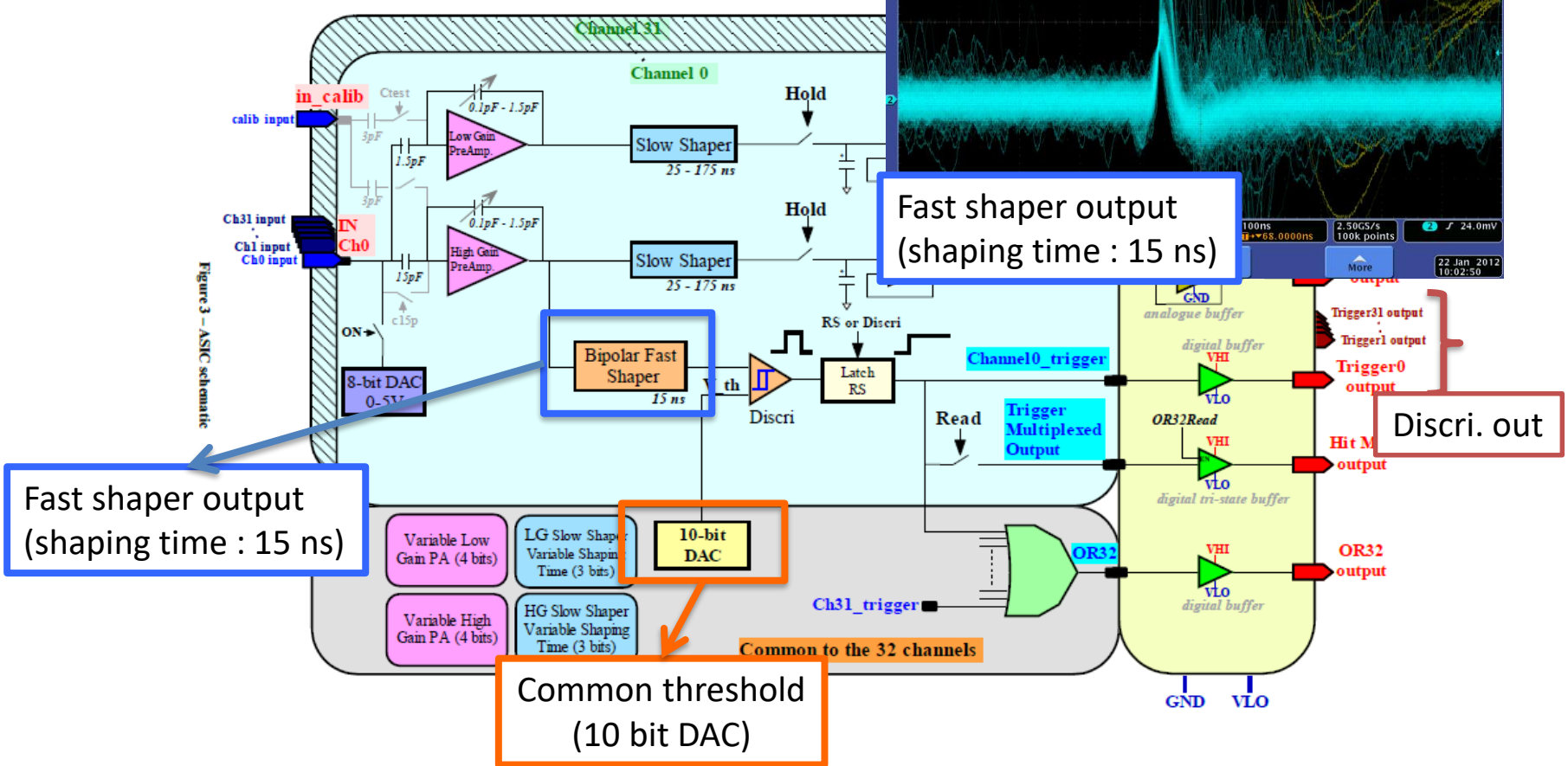
Introduction of EASIROC chip

- EASIROC (Extended Analogue SiPM Integrated Read Out Chip)
  - 32 channels inputs
  - HV adjustment (4.5 V, 8 bit)
  - Amp, shaper, discriminator
  - Analog (serial)
  - discriminator (parallel) outputs

Slow shaper output
(shaping time : 50 ns)



Fast shaper output
(shaping time : 15 ns)



Discri. out

Fast shaper output
(shaping time : 15 ns)

Common threshold
(10 bit DAC)

EASIROC evaluation board

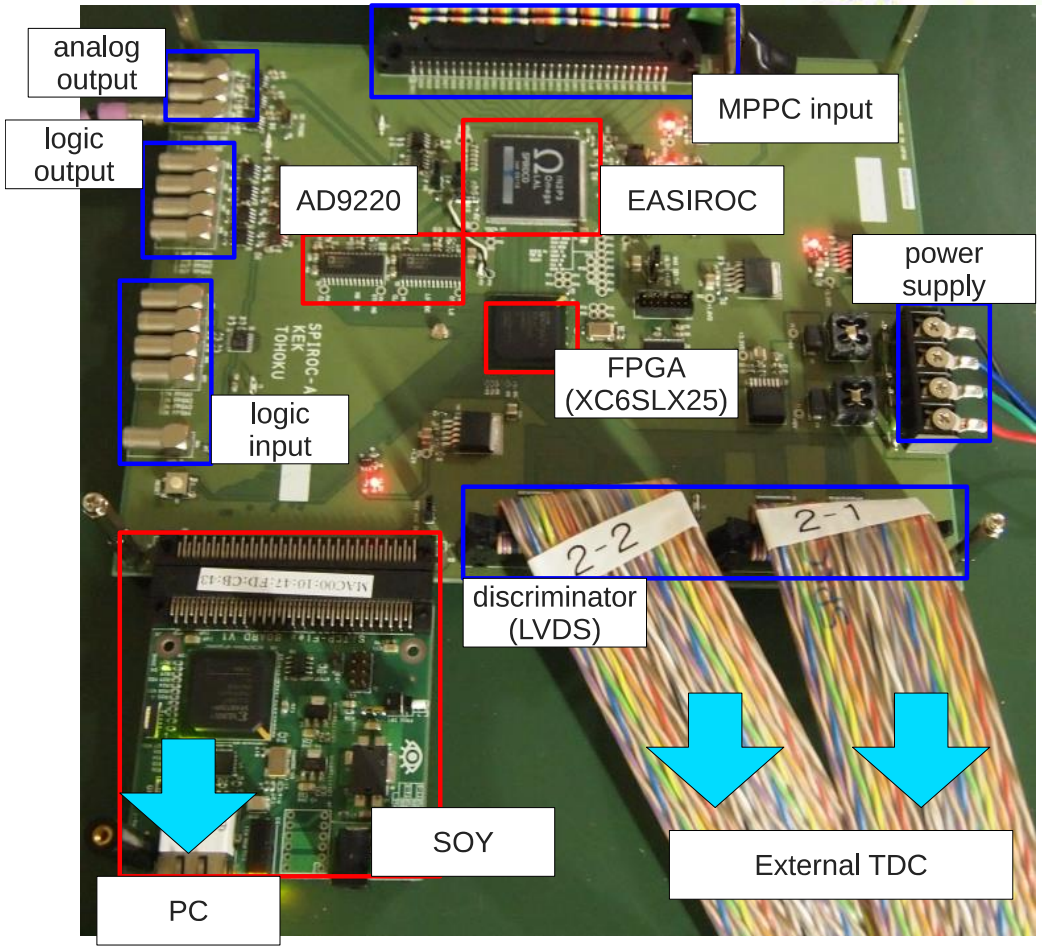
- I/O components

Analog I/O
- MPPC input (32 ch)
- HV input
- Analog output / probe output

Digital I/O
- NIM level input x 5 (400 Mbps)
- NIM level output x 5 (~1 Gbps)
- LVDS discri output (64 Mbps)
- SiTCP

On board ADC and TDC
- AD9220
- Digital MHTDC in FPGA

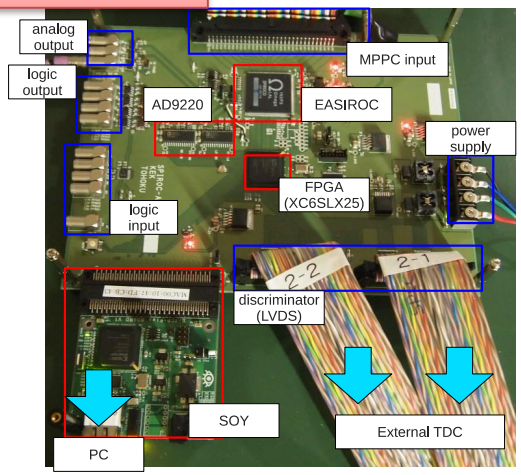
Power supply
- ±6 V



詳細⇒Backup②

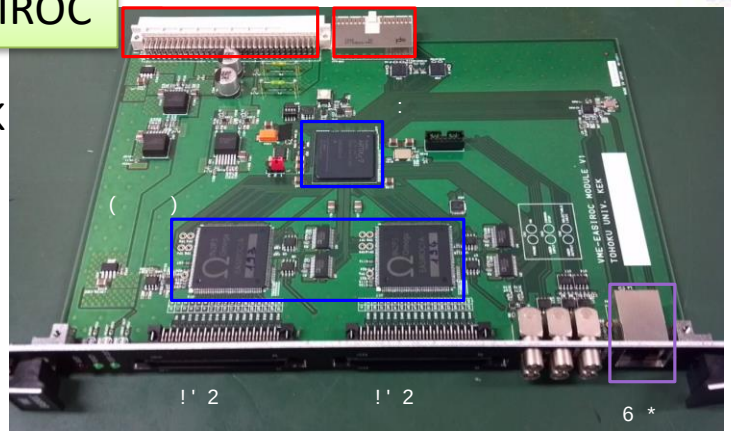
EASIROC board evolution

評価ボード



VME-EASIROC

東北大、KEK



Multi-boardでの使用を想定し、必要な機能以外は取り除いてある

- 出来るだけ安く(14万円 w/o EASIROC chip 大量作成時)
- トリガーおよびイベントタグの配布はKEK-VMEクレートのJ0バスから

NIM EASIROC (通称)

阪大、KEK

評価ボードの機能を保ち、
HV供給などの追加の機
能が付け加えられた

VME-EASIROC 仕様 (比較)

評価ボード

MPPC Input channel
- 32 ch (one EASIROC)

ADC part
- pipe line ADC (AD9220)
- Dead time ~ 100 μs (due to firmware logic)
- Not support fast clear
- Not support zero suppression

MHTDC part
- MHTDC in FPGA by using free run counter
- LSB = 1 ns
- full window 1 μs
- 16 hit/ch, 255 hit/event
- Dead time less than 10 μs (depend on # of hit)
- support fast clear

DAQ part
- event by event readout
- single event buffer
  - transmit time is included into BUSY
- Transmit time less than 15 μs (probably, depend on data word)
- LSB event tag can be received

VME-EASIROC

MPPC Input channel
- 64 ch (two EASIROCs)

ADC part
- pipe line ADC (AD9220)
- Dead time 14 μs
- Support fast clear
- Support zero suppression

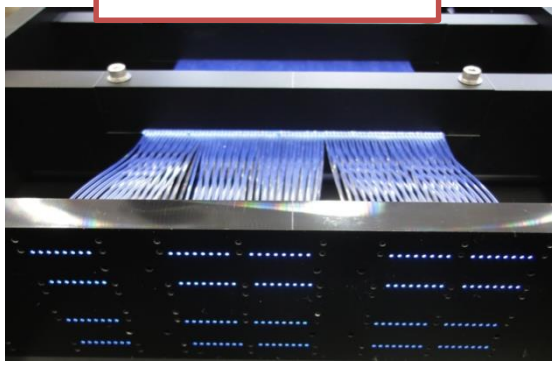
MHTDC part
- MHTDC in FPGA by using free run counter
- LSB = 1 ns
- full window 1 ~ 4 μs
- 16 hit/ch, 255 hit/event
- Dead time less than 10 μs (depend on # of hit)
- support fast clear

DAQ part
- event by event readout
- multi event buffer
  - transmit time is not included into BUSY
- Transmit time less than 15 μs (probably, depend on data word)
- FULL event tag can be received

Package of MPPC readout

使用例

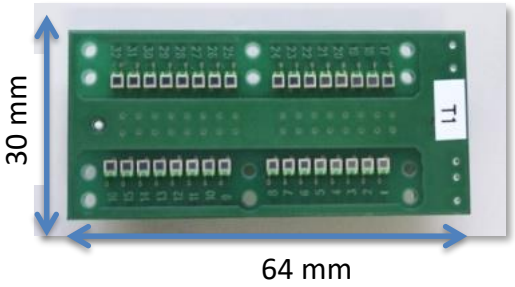
Fiber Detector



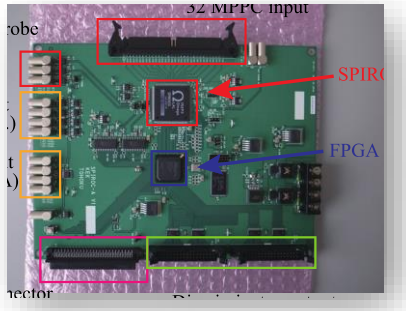
⇒多数ファイバーを配置し、
hit fiberから飛跡を再構成

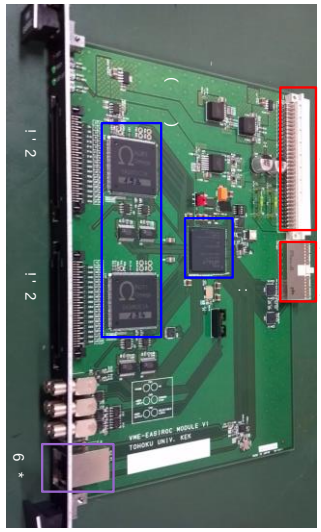
BFT, CFT

32 ch MPPC board

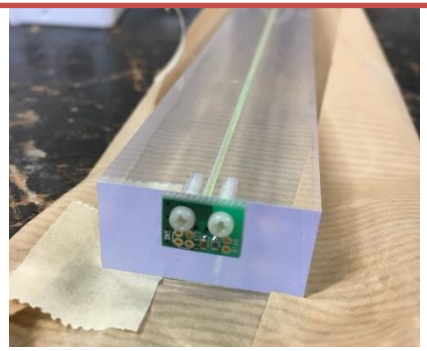


Readout board (EASIROC board)

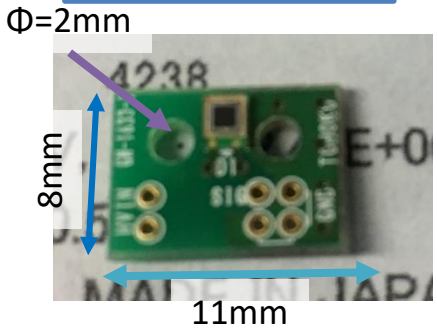




Scintillator hodoscope



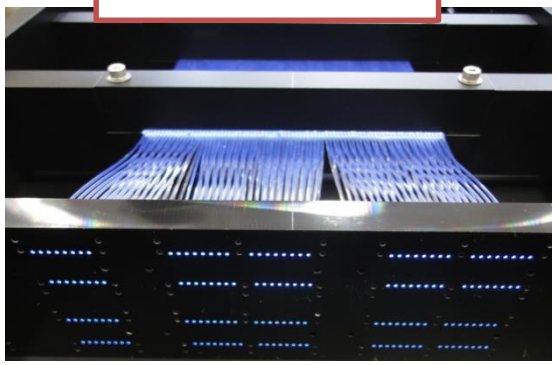
Single MPPC board



Package of MPPC readout

使用例

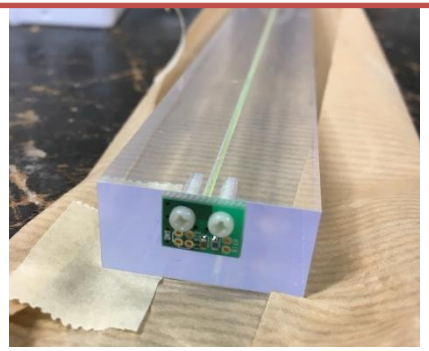
Fiber Detector



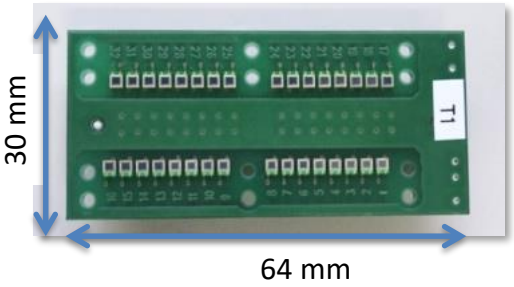
⇒多数ファイバーを配置し、
hit fiberから飛跡を再構成

BFT, CFT

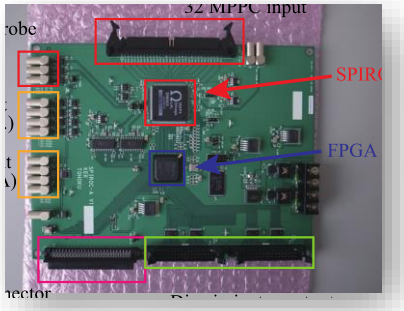
Scintillator hodoscope

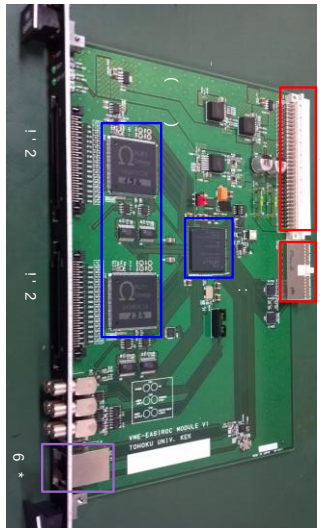


32 ch MPPC board



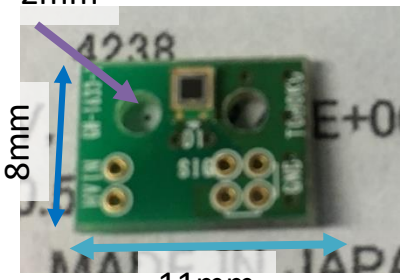
Readout board (EASIROC board)





Single MPPC board

Φ=2mm



GNDで購入可能

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

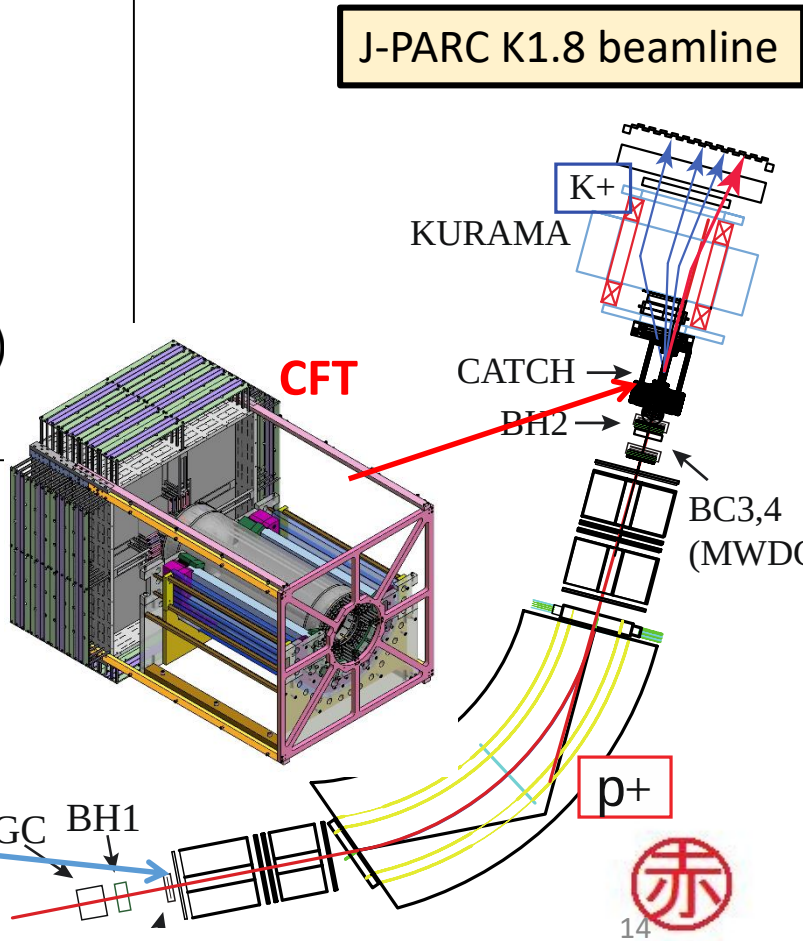
BFT&CFTの背景

J-PARC Σp散乱実験(E40) : 高統計(~10000 event)のΣp散乱事象を同定し、
精度よく散乱断面積を測定 ⇒ ΣN相互作用を研究

- 出来る限り多くのΣを生成 $\pi+p\rightarrow\Sigma+K^+$
  - ⇒ π beam強度を上げる(10 MHz)
  - ⇒ 最上流の飛跡検出器のレート耐性

  Beamline Fiber Tracker
- 標的周りの散乱事象同定用の飛跡検出器
  - 大立体角(標的を覆う)
  - 時間分解能(アクシデンタルBGを抑制)
  - エネルギー測定 ⇒ ΔE-E相関から粒子弁別(p/π)

  Cylindrical Fiber Tracker



akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

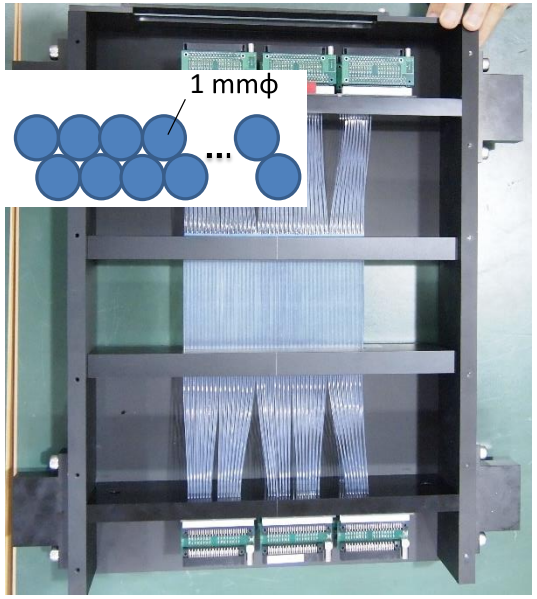
Beamline Fiber Tracker

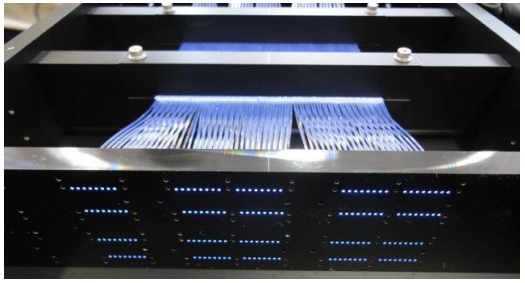
akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

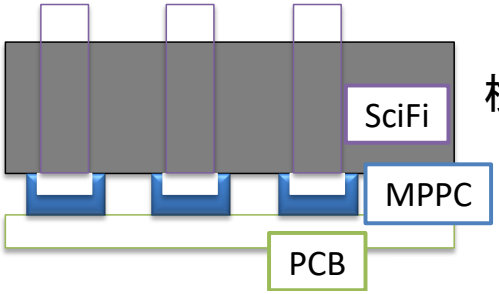
Beamline Fiber Tracker (BFT)

- 検出器への要求
  - 10MHzのビームに対して安定動作
  - アクシデンタルイベントを95%以下に抑制
    ⇒ Time gate < 5 ns

Fiber検出器の開発
- 320本の1 mm ϕのファイバーをスタッグ
  (1本当たりのレートは60 kHz)
- 多重散乱を抑えるために、
  BFTでのx位置から運動量を導出できるように
  (ビームラインスペクトロメーター)



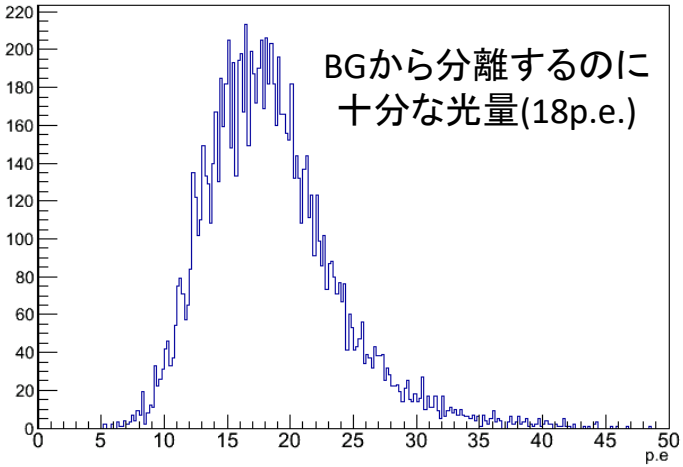




検出器製作はG-techに依頼

Fiber : KURARAY SCSF-78M
MPPC : S10362-11-100P

光量分布

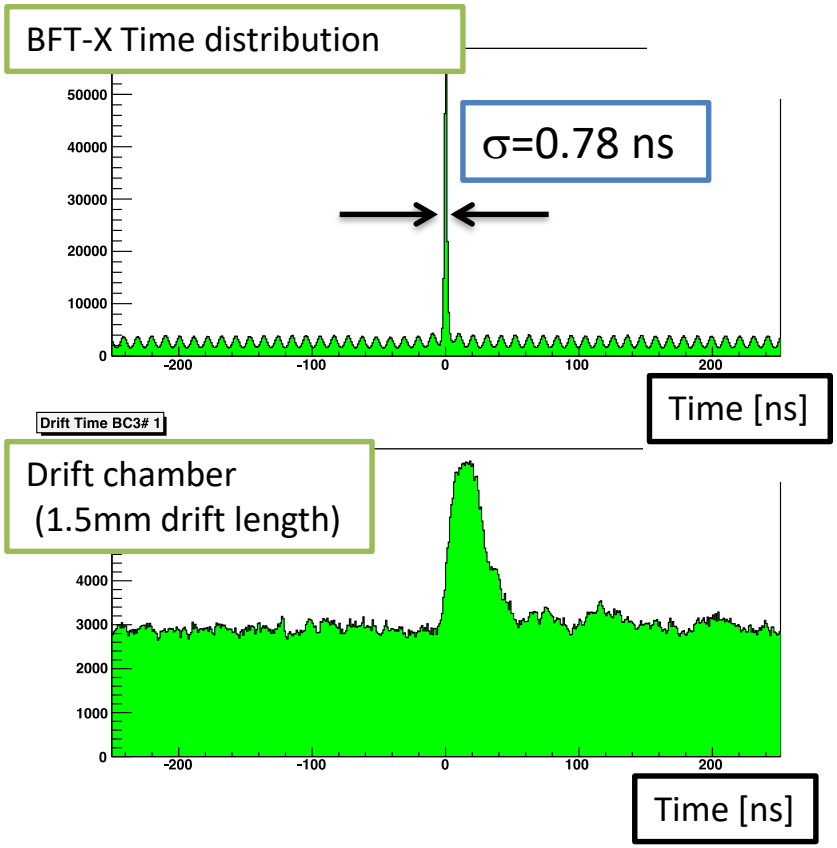


BFT performance

- Advantage of Fiber Tracker

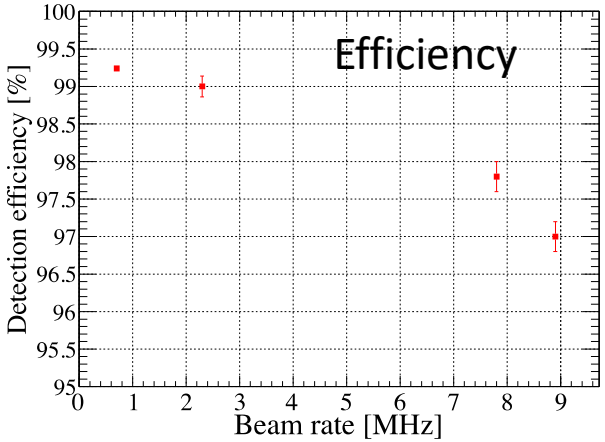
Fast timing response

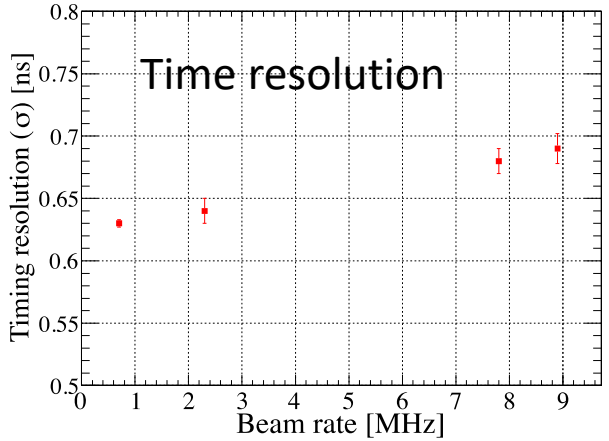
beam rate : 6 MHz



Summary of performance

- Time resolution 0.62 ns (σ)
- Position resolution 190 μm (σ)





akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

Cylindrical Fiber Tracker

- 構造
  - 制作例：Φ層(平行形)
- 全チャンネル読み出し
- 性能
  - 角度分解能
  - エネルギー分解能⇒粒子弁別

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

Cylindrical Fiber Tracker (CFT)

要求

- 標的を覆う大立体角
- 3次元飛跡検出

  ---角度分解能 σ_θ=1°

  散乱事象の同定
- エネルギー分解能

  20%(σ)@1MeV

  粒子弁別：陽子⇔π(Σ崩壊物)

特徴

– 動径方向にコンパクトかつ密

  r = 6 ~ 9 cmに8層, beam方向に 40 cm

– 2種類のファイバー構造

  - 4 Φ layers (円筒軸に平行)
  - 4 UV layers (円筒側面に沿うらせん状)

– ファイバー以外の物質を最小限に

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

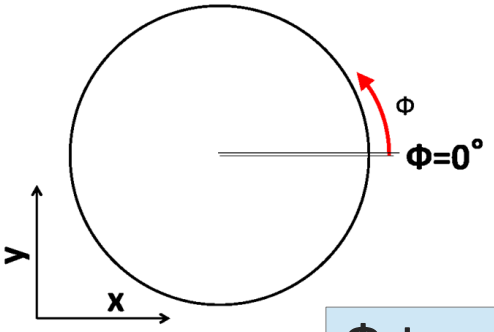
Cylindrical Fiber Tracker (CFT)

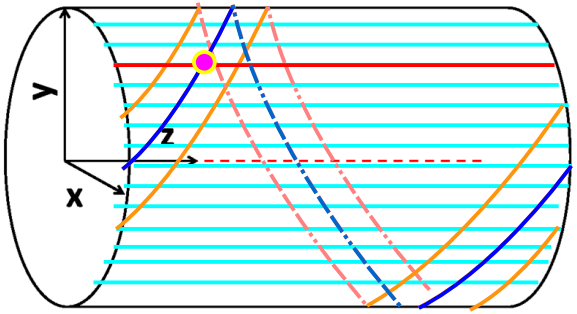
要求

- 標的を覆う大立体角
- 3次元飛跡検出
  ---角度分解能 σ_θ=1°
  散乱事象の同定
- エネルギー分解能
  20%(σ)@1MeV
  粒子弁別：陽子⇔π(Σ崩壊物)

特徴

– 動径方向にコンパクトかつ密
  r = 6 ~ 9 cmに8層, beam方向に 40 cm
– 2種類のファイバー構造
  • 4 Φ layers (円筒軸に平行)
  • 4 UV layers (円筒側面に沿うらせん状)
– ファイバー以外の物質を最小限に





Fiber本数	1st	2nd	3rd	4th
Φ層	584	692	800	910
UV層	426	472	510	538

0.75 mmΦのファイバー
計約5000本

Φ layer ヒットファイバーから“Φ”を測定

U･V layer ヒットファイバーと“Φ”からz位置を取得

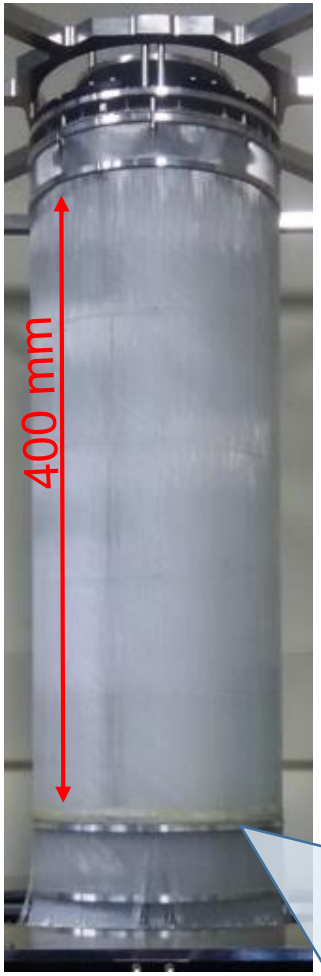
akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

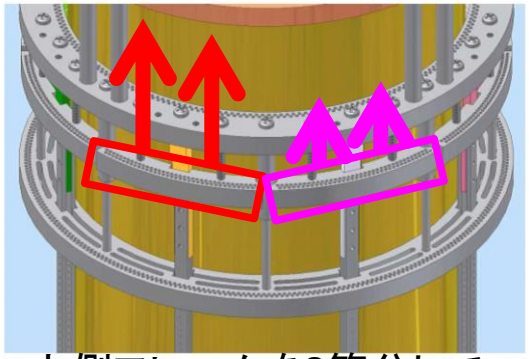
akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

制作手法例:“Φ層”

らせん層⇒Backup③

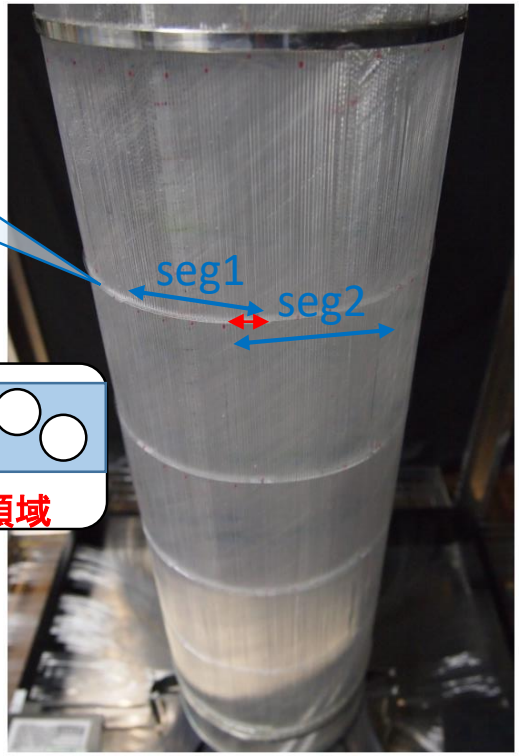
フレームにファイバーを固定することで位置決定
まっすぐにファイバーを張るための機構

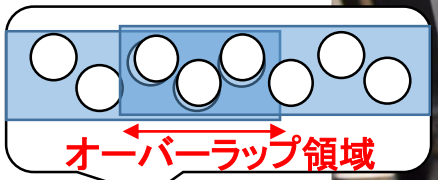


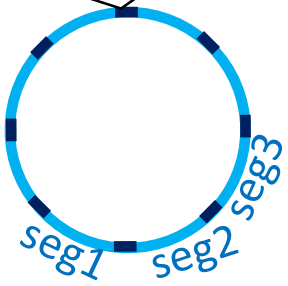


上側フレームを8等分して、
個別に張力調整
⇒張力差を吸収する

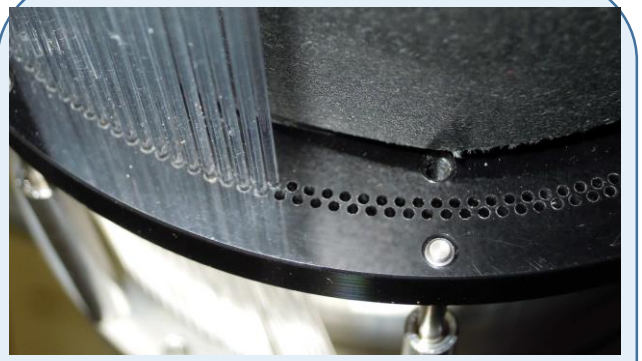
間の領域にも薄い補助フレーム







フレーム間に
オーバーラップ領域を設ける



アクティブ領域両端に、
ファイバーが1本ずつ通る穴

自分たちの手で製作!

赤

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

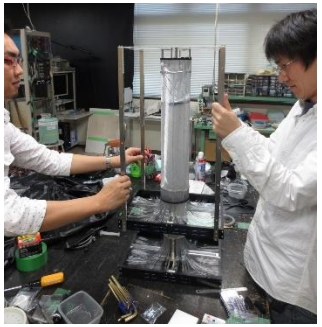
akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

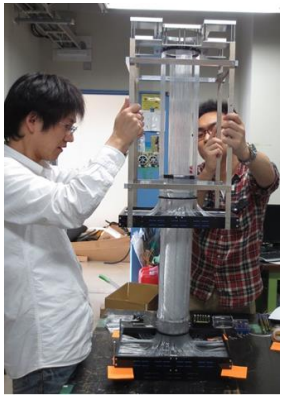
2013	2014	2015	2016	2017
試作機製作 → 性能評価実験	試作機ver.2 → 10月 性能評価実験	実機1/4制作 → 宇宙線で性能評価	全層完成！ →	1月 CFT実機性能評価 pd散乱(物理実験)

実現性の模索：らせん形など可能か？

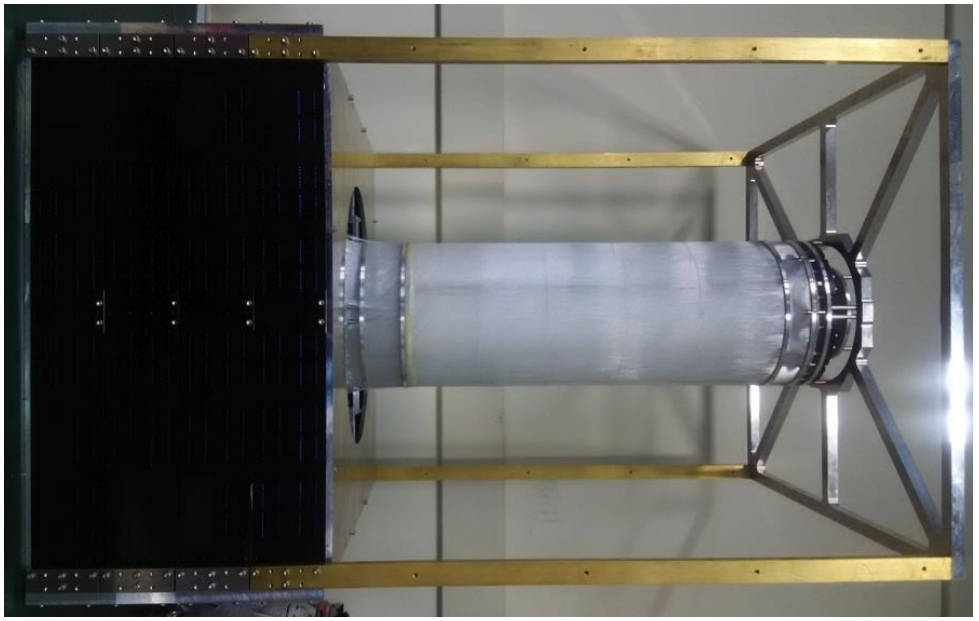
・全層合体後、初の性能評価
・Σp散乱以外への応用

CFT実機の完成（8層合体）





実機製作期間
UV層：~1ヵ月 ×4層
Φ層 ：~3週間 ×4層



読み出し

32chMPPC基板 ×157枚
+
VME-EASIROC board ×79枚

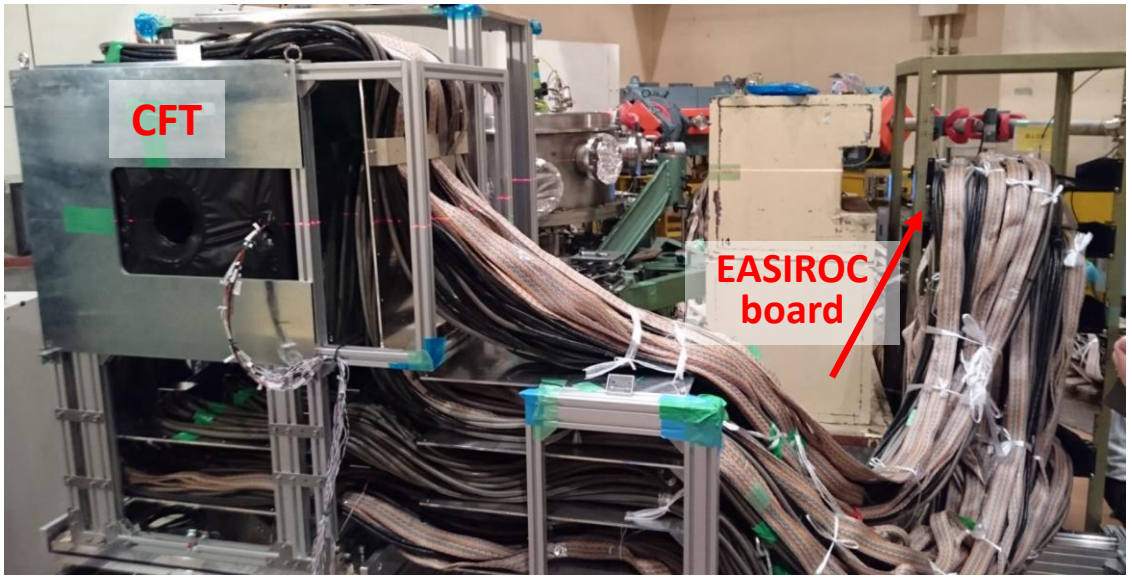
akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

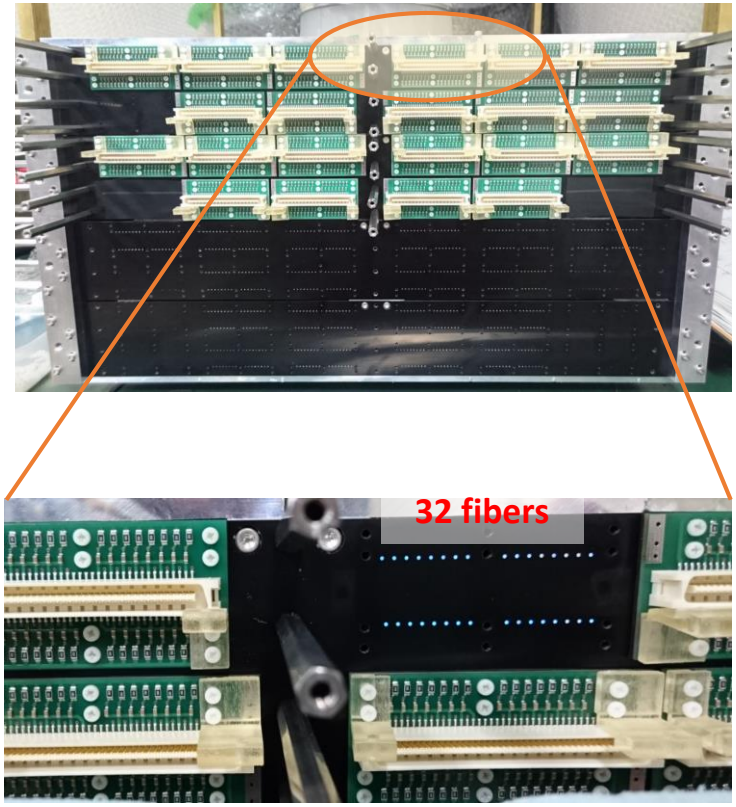
CFTの読み出し

32MPPC基板×157枚
+
VME-EASIROC board×79枚

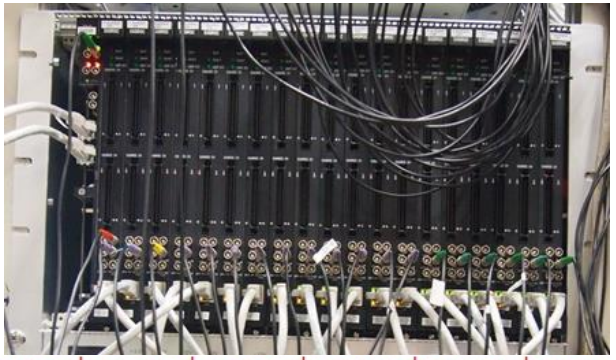
ケーブル配線



MPPC基板の取り付け



VME-EASIROC
board



akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

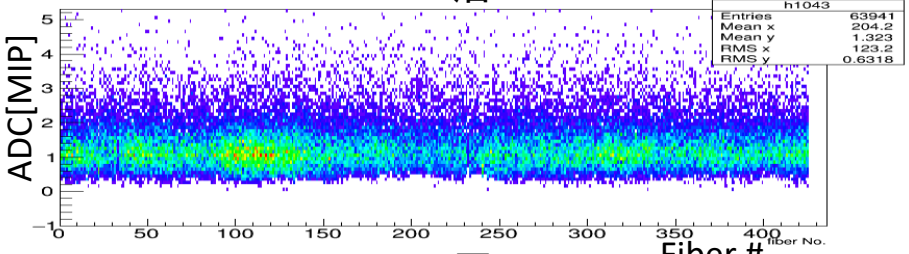
akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

CFTの読み出し

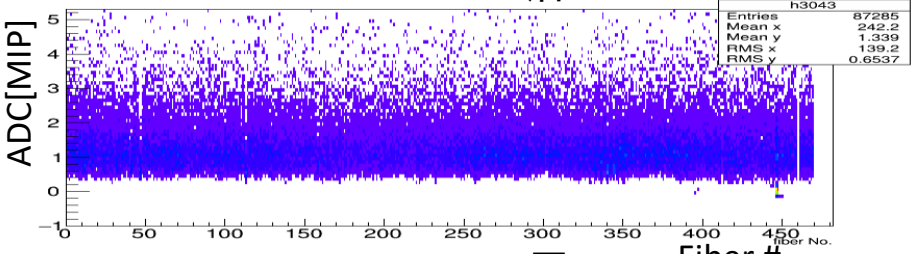
ADC(High, Low gain), MultiHitTDC(leading, trailing)

宇宙線 ADC (Offline MIP normalized)

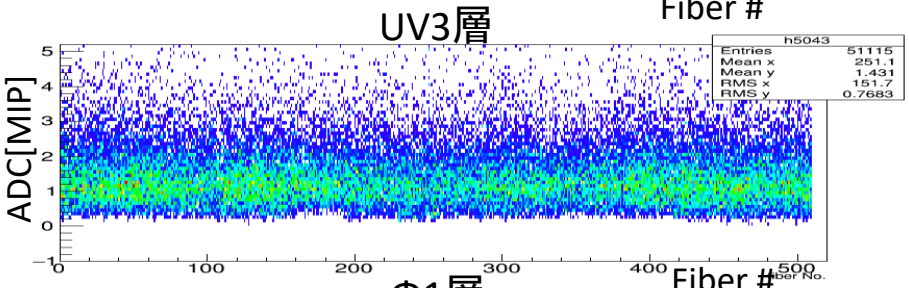
UV1層



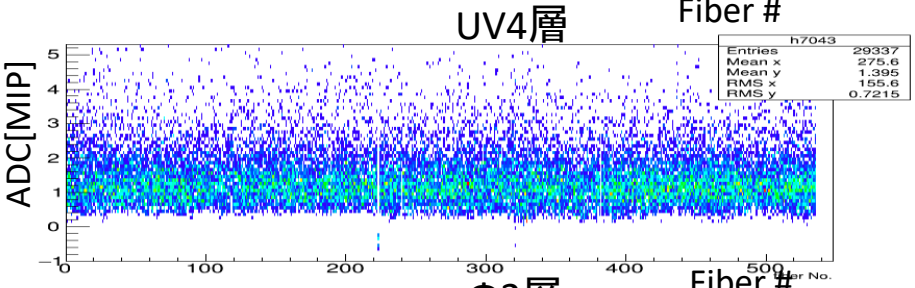
UV2層



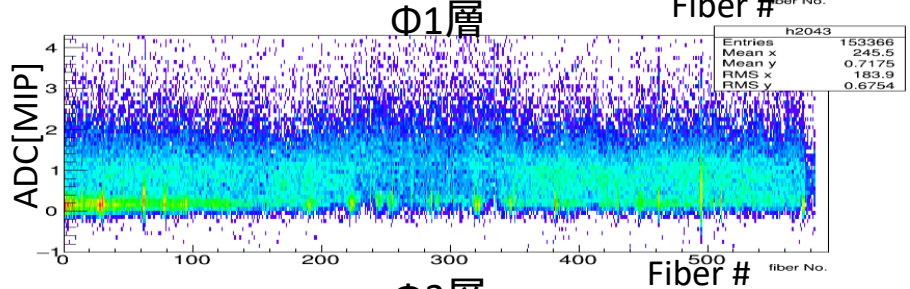
UV3層



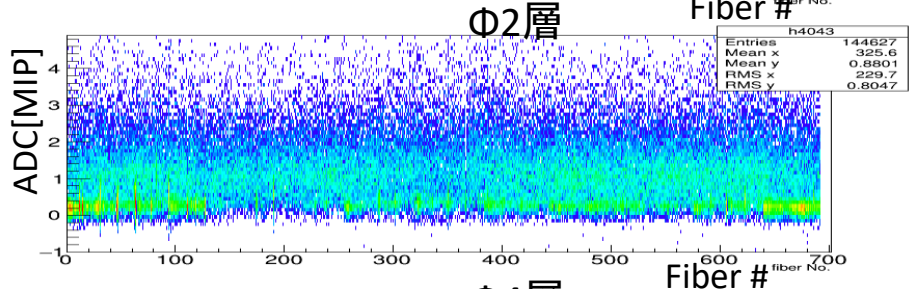
UV4層



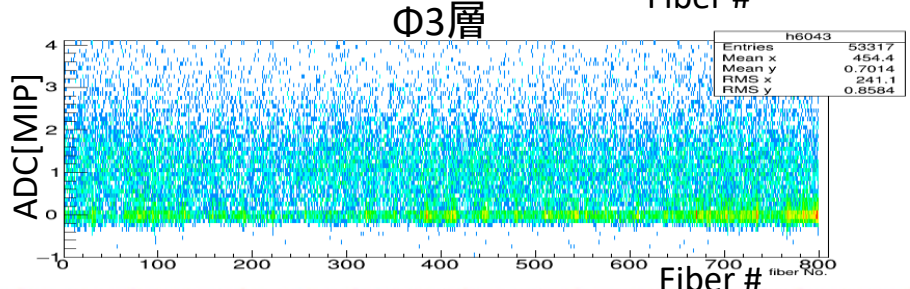
Φ1層



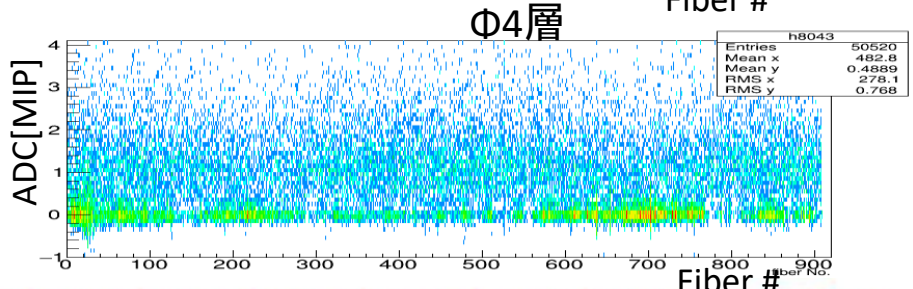
Φ2層



Φ3層



Φ4層



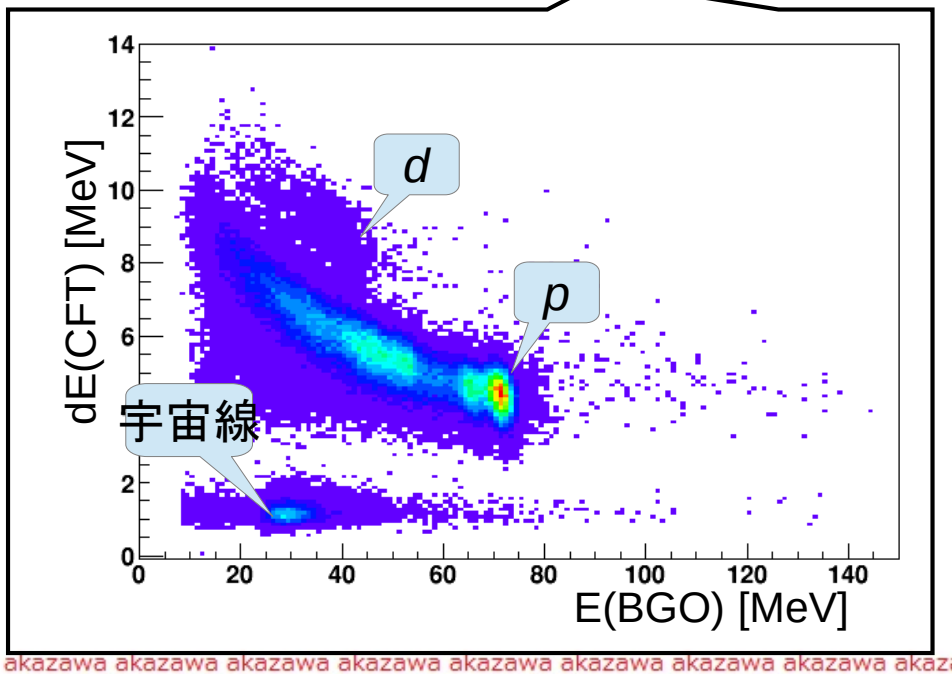
akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

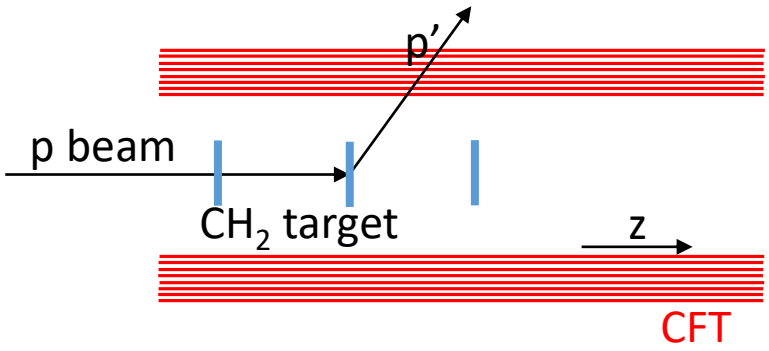
CFT 性能評価

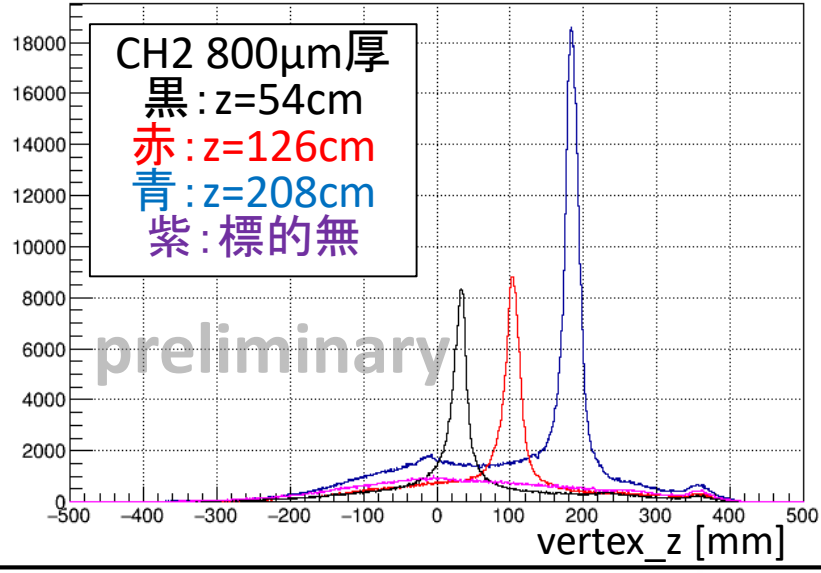
- 3次元飛跡検出
  - ▷ CFT内⇒外への陽子の飛跡
  - ▷ 角度分解能(試作機) $\sigma_\theta \simeq 1^\circ$

- エネルギー測定(試作機3層)
  - ▷ σ_{dE}=10 % (dE≃4～6 MeV) ←陽子(30~80 MeV)
  - ▷ σ_{dE}=16 % (dE≃1 MeV) ←宇宙線



東北大CYRIC 『pp, pC散乱』





akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

まとめ

- 多チャンネルMPPC読み出し回路を開発
  - ▷ BFTとCFTを開発
  - ▷ 多チャンネルMPPCのためEASIROC boardを開発
- BFT・・・平面上にファイバーを配置
  - ▷ 時間分解能 1.1ns(σ)
  - ▷ efficiency > 99%
  - ▷ 位置分解能 = 0.18 mm (σ)
- CFT・・・円筒状にファイバーを配置
  - ▷ 円筒形の構造を実現
  - ▷ 角度分解能≃1° (σ)
  - ▷ エネルギー分解能(試作機)=10%(σ) for 80MeV 陽子

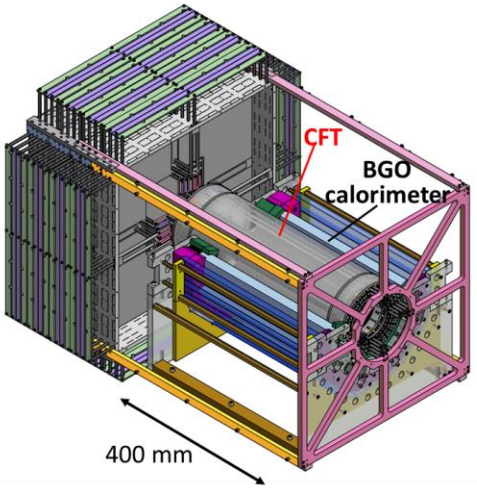
    ⇒ 陽子/MIP粒子の弁別が可能

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

割愛した話題

- BGOカロリメータ
  - 高レート対策
  - 整形回路+Flash ADC, 動作電圧を下げる
- CFT
  - 制作手法 ~詳細な部分~
    - おもりを使用してまっすぐに張る
  - MPPC 電圧調整(channel by channel)
  - 検出効率
- CATCH(=CFT+BGO)としての性能
  - 散乱事象を運動学を再構成して同定
- パッケージMPPCを使用したシンチレーション検出器
  - プラスチックシンチレータ+WLS+MPPC



akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

backup

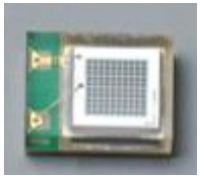
akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

MPPCの多チャンネル読み出し回路の開発

- 新型光検出器MPPC (2007年当時)
  - 高い増幅率、磁場中でも使用可能など非常にポテンシャルの高い検出器
  - 検出器が小型なため、多チャンネルのオペレーションが必須

MPPC



開発当時
MPPC単体の性能評価がさかんに行われていた
- MPPCのダークカレントのHV依存性
- 温度依存性
- 放射線損傷

これらを浜松ホトニクスにフィードバックし、MPPCの性能を改善させる

一方で実際の実験に使用する場合に必ず多チャンネルでの読み出しが必須になる。MPPCから読み出しまでをパッケージ化し汎用的なシステムを作ることを目的に東北大、KEK測定器開発室(光センサー)、フランスOmega(IN2P3)での連携で読み出し回路の開発を始めた。

赤

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

Backup②

EASIROC evaluation board

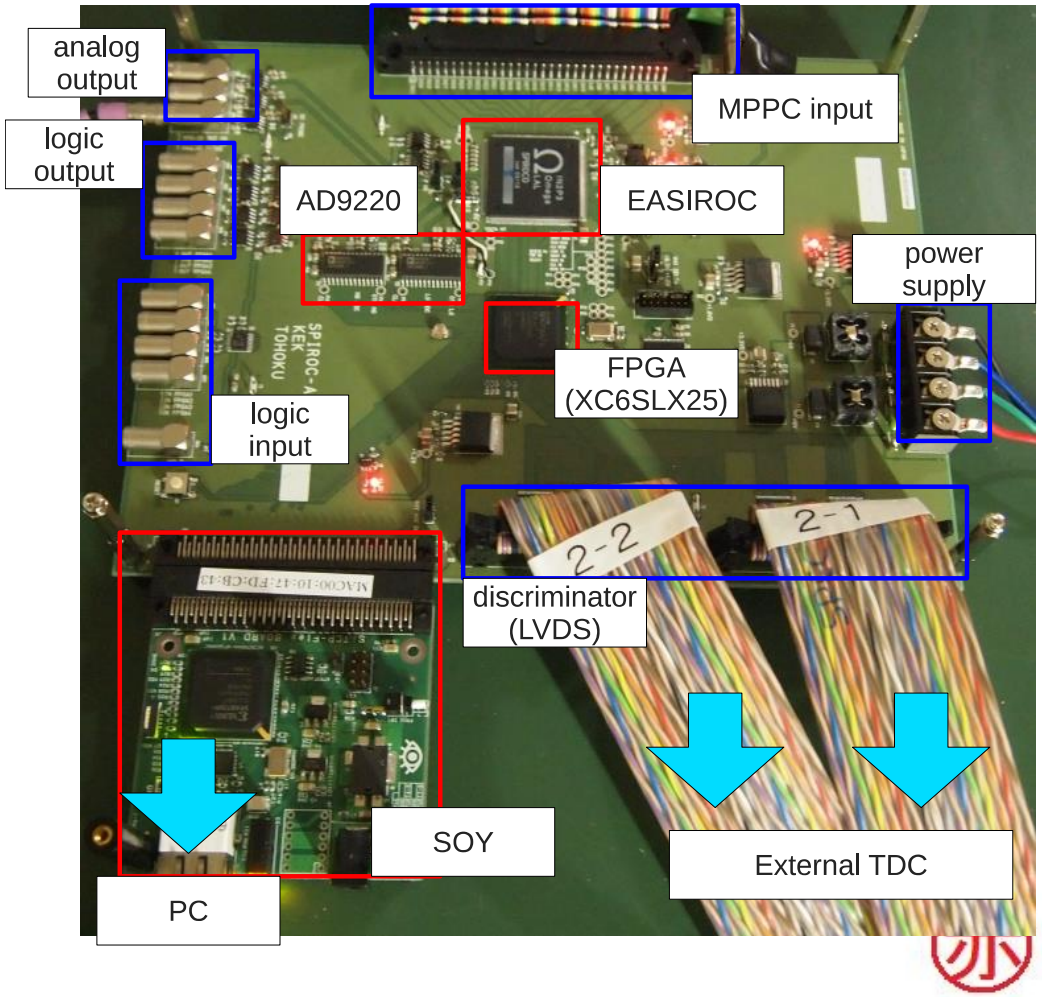
- I/O components

Analog I/O
- MPPC input (32 ch)
- HV input
- Analog output / probe output

Digital I/O
- NIM level input x 5 (400 Mbps)
- NIM level output x 5 (~1 Gbps)
- LVDS discri output (64 Mbps)
- SiTCP

On board ADC and TDC
- AD9220
- Digital MHTDC in FPGA

Power supply
- ±6 V



akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

EASIROC evaluation board

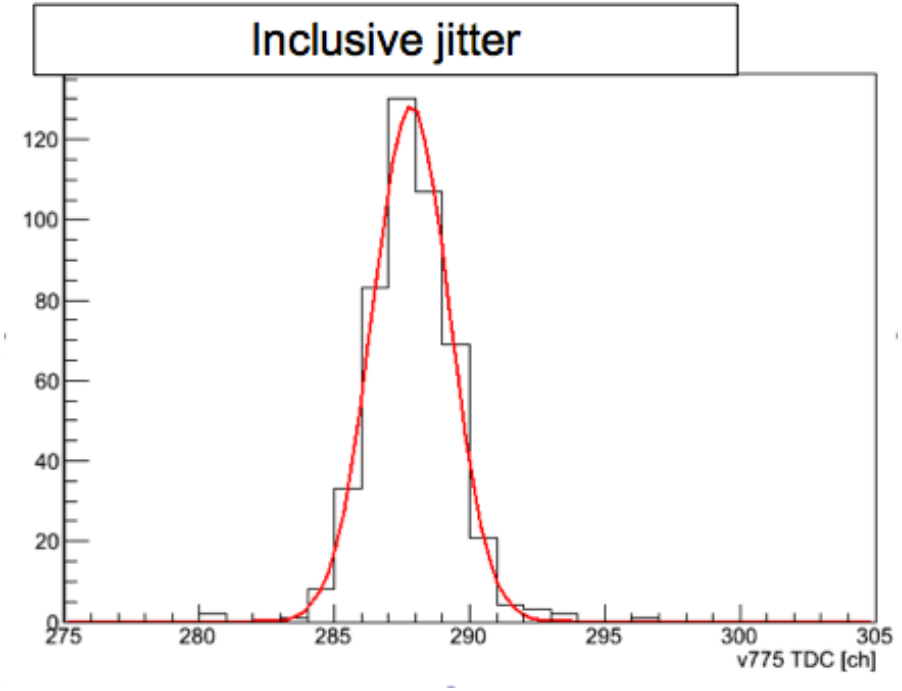
- I/O components

Analog I/O
- MPPC input (32 ch)
- HV input
- Analog output / probe output

Digital I/O
- NIM level input x 5 (400 Mbps)
- NIM level output x 5 (~1 Gbps)
- LVDS discri output (64 Mbps)
- SiTCP

On board ADC and TDC
- AD9220
- Digital MHTDC in FPGA

Power supply
- ±6 V



TDC LSB = 0.19 ps

Inclusive time jitter
270 ps (σ) @ Vth = 0.5 p.e.

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

EASIROC evaluation board

- I/O components

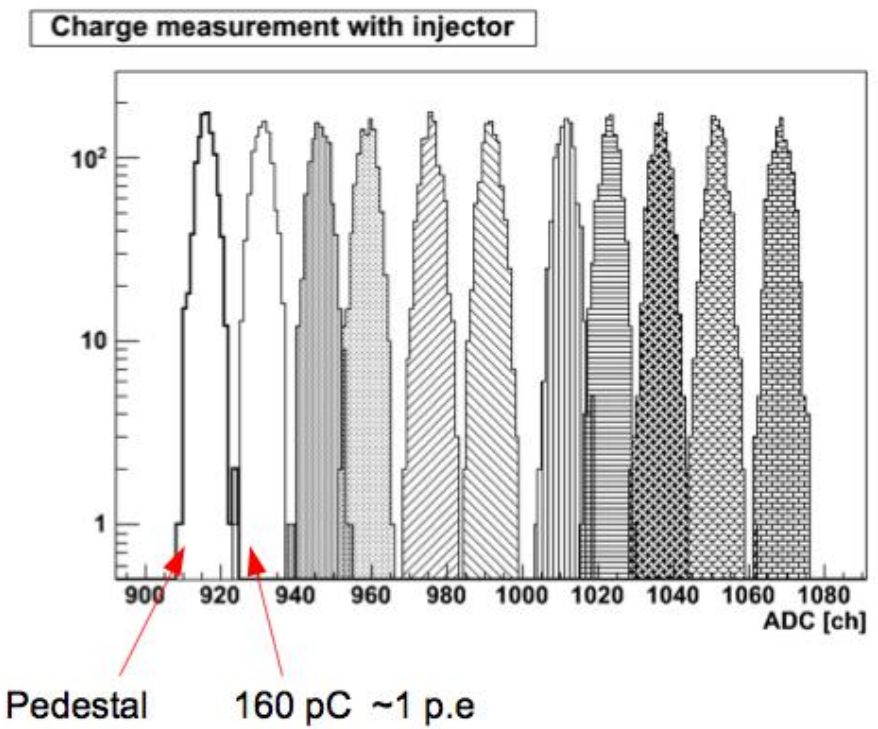
Analog I/O
- MPPC input (32 ch)
- HV input
- Analog output / probe output

Digital I/O
- NIM level input x 5 (400 Mbps)
- NIM level output x 5 (~1 Gbps)
- LVDS discri output (64 Mbps)
- SiTCP

On board ADC and TDC
- AD9220
- Digital MHTDC in FPGA

Power supply
- ±6 V

Test with charge injector
- MPPC gain : 10^6



akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

EASIROC evaluation board

- I/O components

Analog I/O
- MPPC input (32 ch)
- HV input
- Analog output / probe output

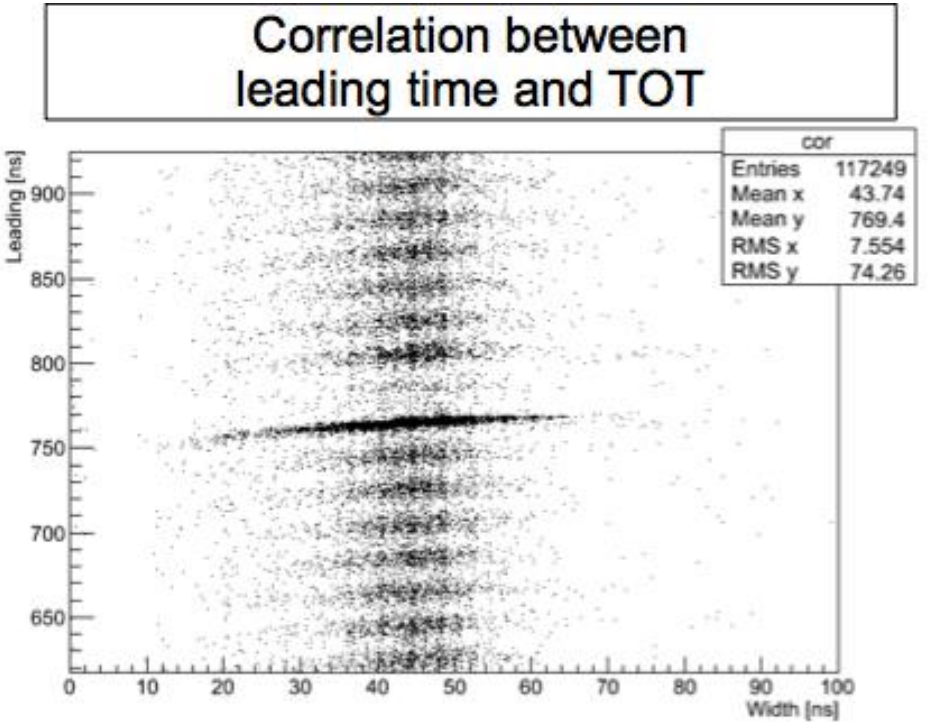
Digital I/O
- NIM level input x 5 (400 Mbps)
- NIM level output x 5 (~1 Gbps)
- LVDS discri output (64 Mbps)
- SiTCP

On board ADC and TDC
- AD9220
- Digital MHTDC in FPGA

Power supply
- ±6 V

Digital multi-hit TDC in FPGA
- Time window : 1 μs
- L1 buffer : 16 hits/ch
- Event buffer : 512 hits/event
- Leading, trailing detection

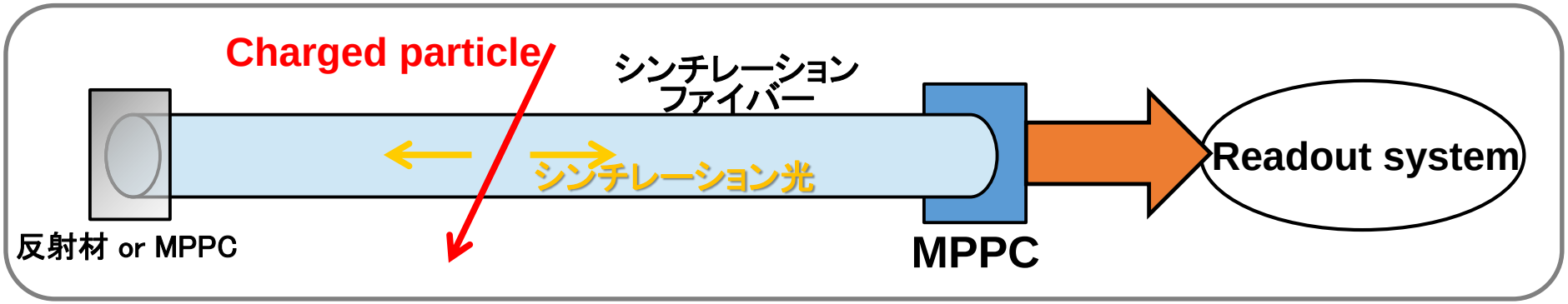
TDC correction can be possible by using Time Over Threshold (TOT) without ADC measurement



akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa

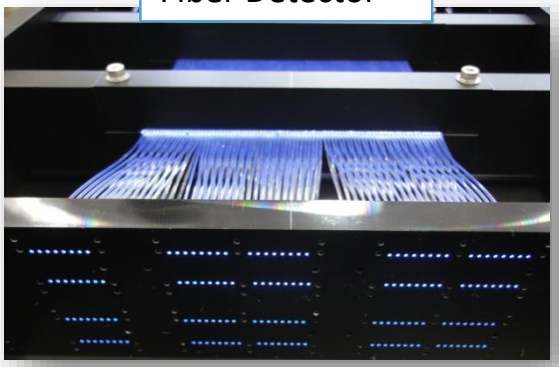
akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

ファイバー飛跡検出器



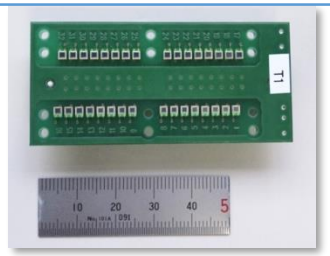
⇒多数ファイバーを配置し、hit fiberから飛跡を再構成

Fiber Detector



KURARAY scintillation fiber
- 高レート耐性
- 時間分解能

Photon Sensor (MPPC)



MPPC基板
Compact PCB
32 ch MPPCs

1本のファイバーを1MPPCで読む

ファイバー読み出し数
BFT:320本, CFT:~5000本

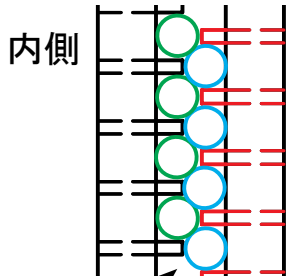
⇒ 多チャンネル読み出し回路

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

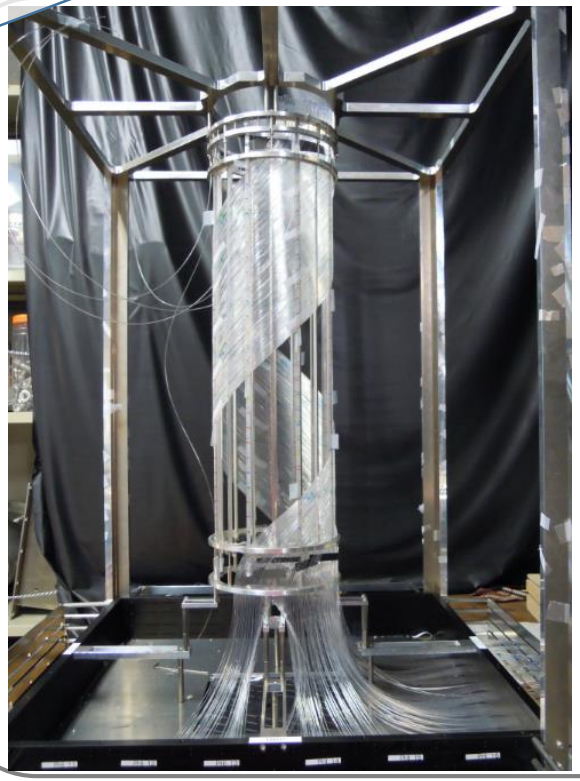
akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa

Backup③

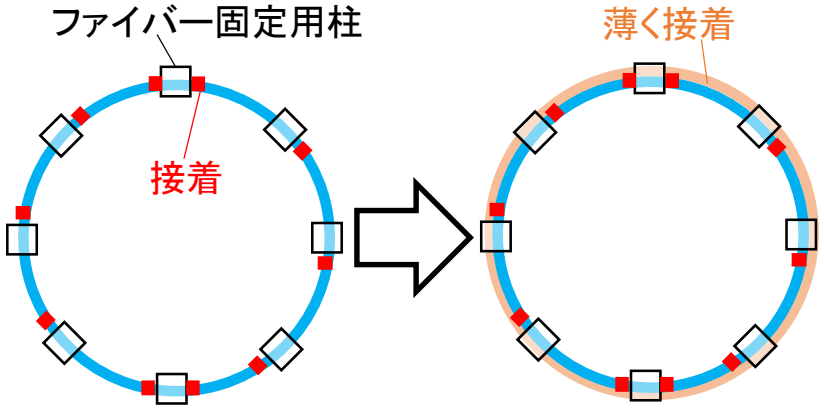
制作例：“UV層”



・ファイバー固定用柱を設置
・らせん状にファイバーを張り、
　柱との交点でファイバーを固定



接着位置の追加



固定柱間の領域を薄く
紫外線硬化樹脂で固定
⇒ ファイバー位置の固定

赤

akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akazawa akawaza akazawa akazawa akazawa akazawa