

# 純CsI結晶複合型の光子中性子検出器 の開発

特定領域「フレーバー物理の新展開」研究会@大洗

2010/2/23

河崎直樹(京都大学 D1)



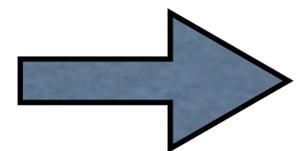
# 目次

- Neutron Collar Counter (NCC)の基本デザイン
  - モチベーション
  - デザイン及びMCによる性能評価
- 純CsI結晶の波長変換ファイバー読み出し
  - Fiber読み出しの特長
  - 読み出し系の最適化と光量測定結果
- 1モジュールプロトタイプ製作、性能評価
  - 光量、クロストーク評価
- ビームサーベイ用9モジュールプロトタイプ製作

# Neutron Collar Counter(NCC)開発のモチベーション

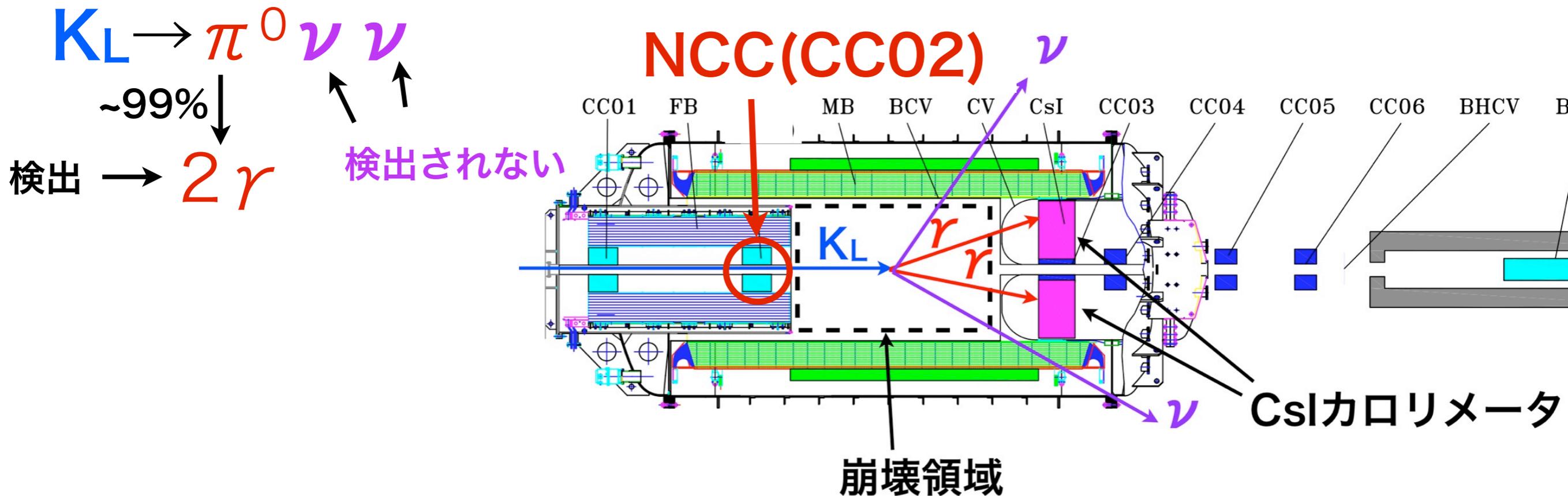
## ● 物理的動機

- NCC :  $K^0$ TO実験 ( $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  探索実験) で用いる検出器 (E391a CC02のアップグレード)
  - e391a CC02 : 鉛シンチ積層型のサンプリングカロリメータ
- E391a実験 では、ハロー中性子が、検出器(CC02)と相互作用し主要バックグラウンド生成 → 対策が必要 (ハローの少ないビームライン等)
  - $K^0$ TO実験 → CC02に2つの要求
    - 中性子起源バックグラウンドを十分
    - 中性子の数とenergyを実験中に測定



segmented pure CsI full active counter

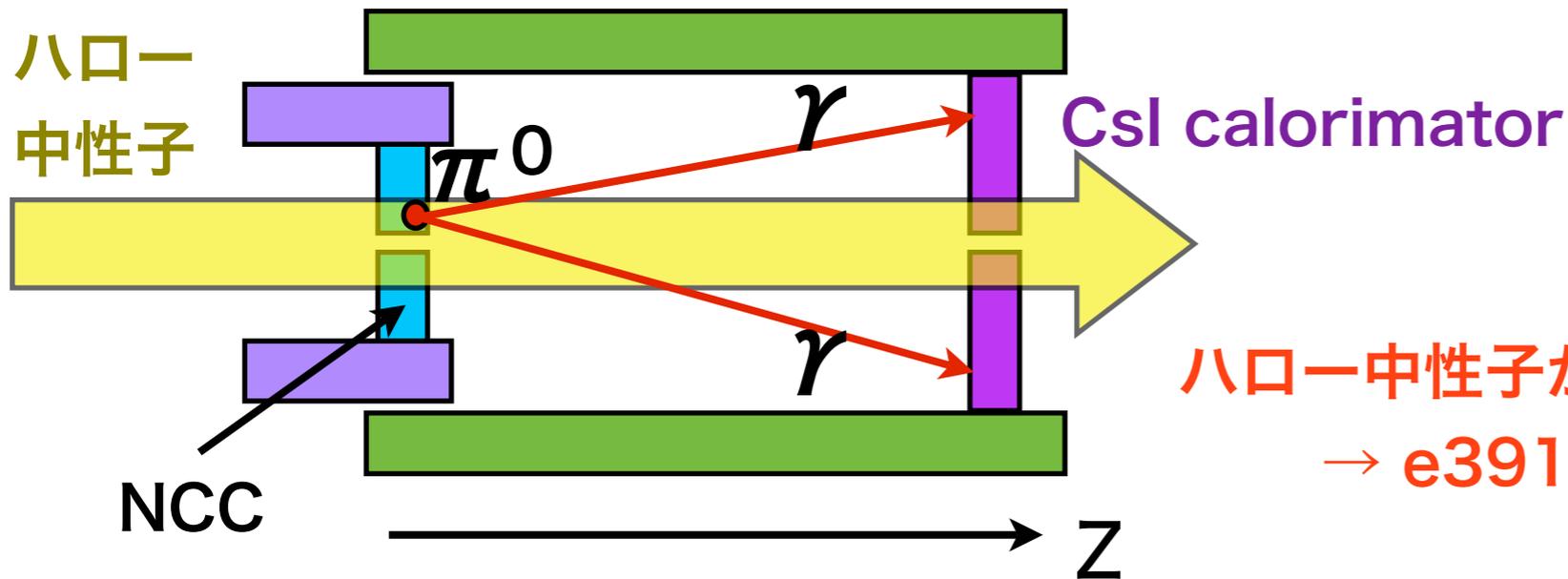
# K<sup>0</sup>T0実験検出原理



- 検出原理：「 $2\gamma$ 以外何も無い」eventをsignalと特定
- 崩壊領域内で $K_L$ を崩壊させ、CsIカロリメータで $2\gamma$ を検出
- 崩壊領域全体をveto検出器で囲み、他に検出可能粒子が存在しない事を保証

NCC(CC02)の本来の役割は、崩壊領域と上流を区切る  
 ビーム軸周りの $\gamma$ -veto counter

# ハロー中性子BGについて



ハロー中性子が  $\pi^0$  生成して background となる  
 → e391a 実験の主要BG (CC02 BG)

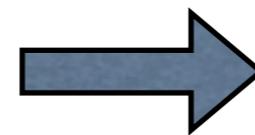
## 対策

- 中性子と反応しにくく、かつ  $\pi^0$  崩壊の  $2\gamma$  を止め易い物質を使用
- NCCでのenergy depositを検出、veto
  - 何処で  $\pi^0$  生成しても確実にveto
  - ソフトな  $\pi^0$  生成eventも確実にveto

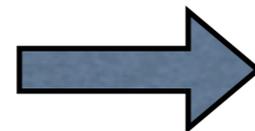


**Csl 結晶を使用**

( $X_0$ : 1.85cm,  $\lambda_1$ : 36.5cm)



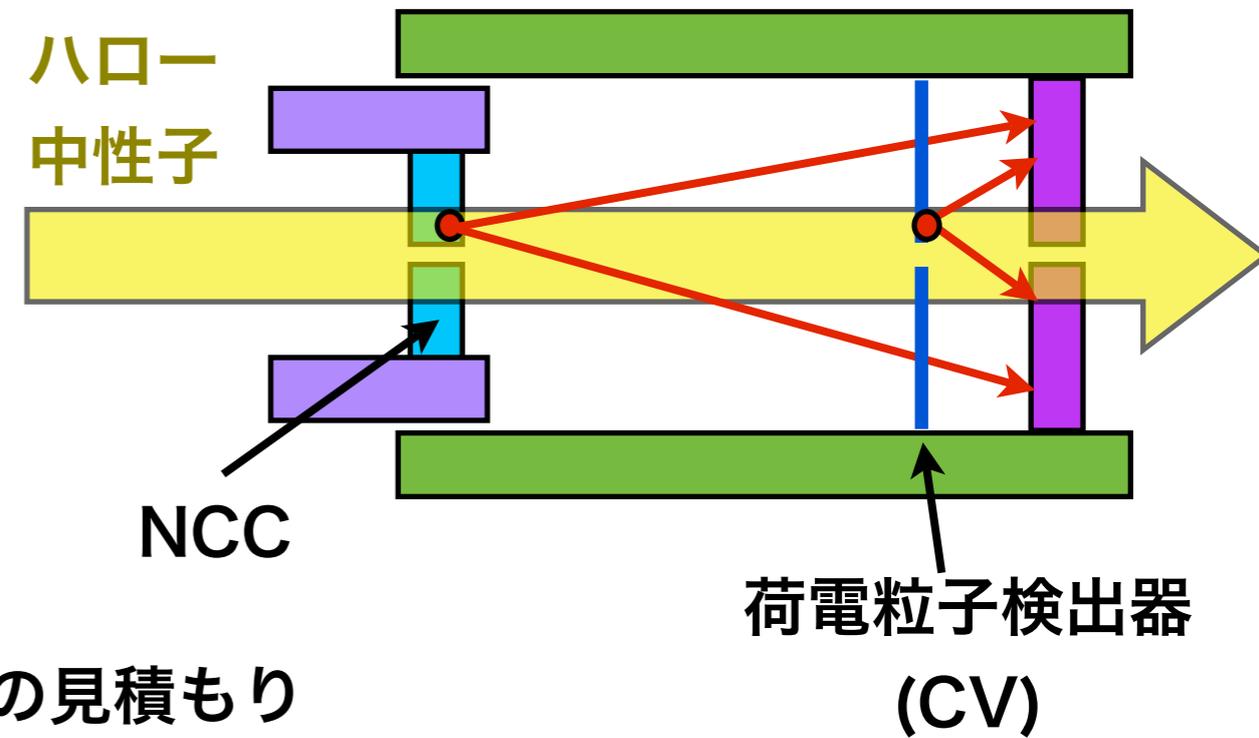
**Full active counter**



**~1 MeVまで検出できる  
十分な光量**

# ハロー中性子測定のみotivation

- ハロー中性子起源のBG
  - NCC以外にも、荷電粒子検出器(CV)でも  $\pi^0$ 等を生成し、BGとなる。



$K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  1事象に対するハロー中性子BG数の見積もり

Signal or BG	event数
荷電粒子検出器で生成されるBG	0.16
NCCで生成されるBG	0.23

上記の値はMC上のハロー中性子のspectrumによって算出 → MCの不定性

**BG源であるハロー中性子を実験中に測定、監視したい!!**

# ハロー中性子測定原理

$\gamma$  hit rateはハロー中性子の

**47倍**も存在 (K崩壊起源)

→中性子を $\gamma$ と分離する必要がある

## NCCのsegment化

NCCを $\gamma$  veto部と中性子測定部に分割し、 $\gamma$  eventを排除

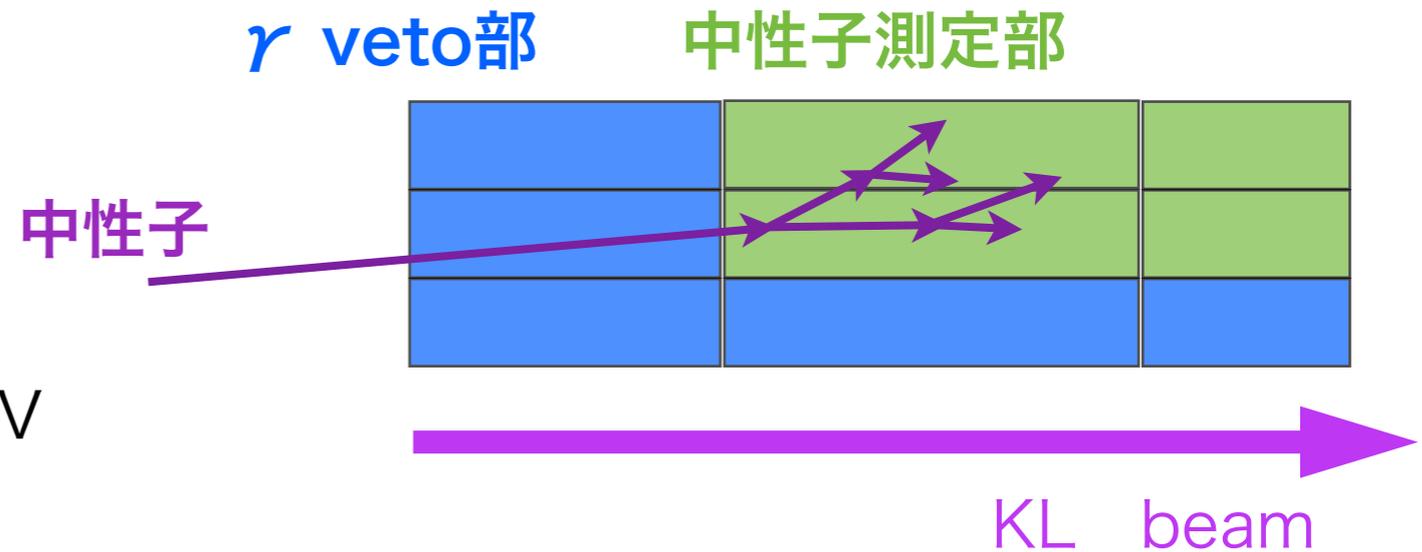
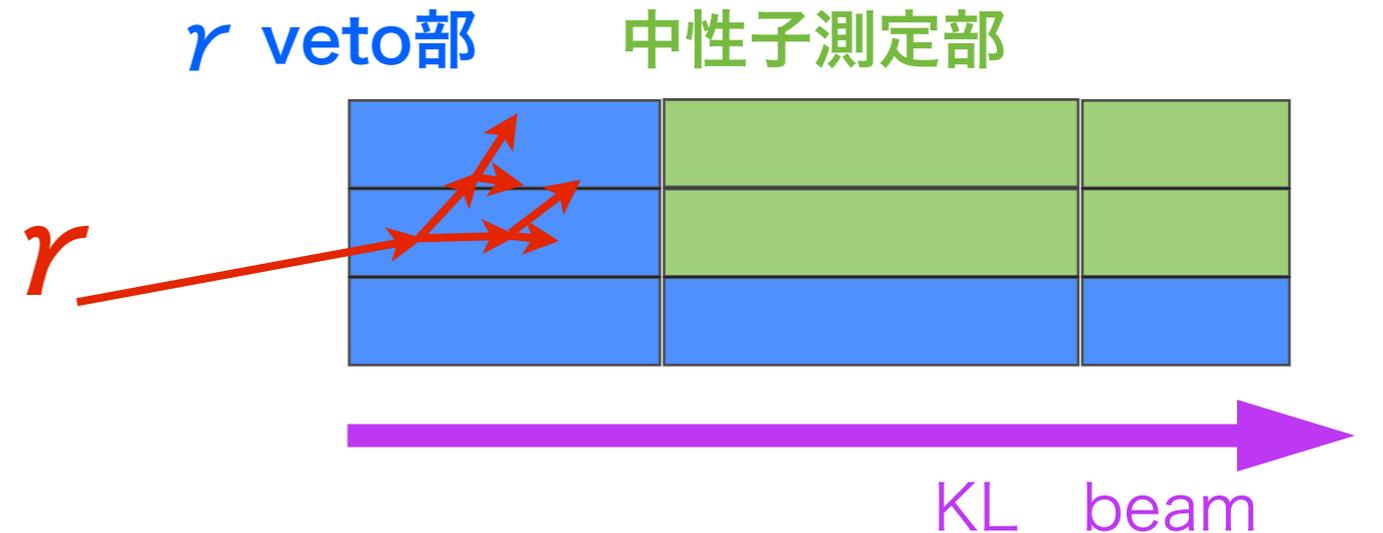
### Simulation結果

- efficiency : ~5 %  
(~ $10^7$  event/day)
- energy resolution : ~42% @ 1GeV
- $\gamma$ の寄与 : 27.5%

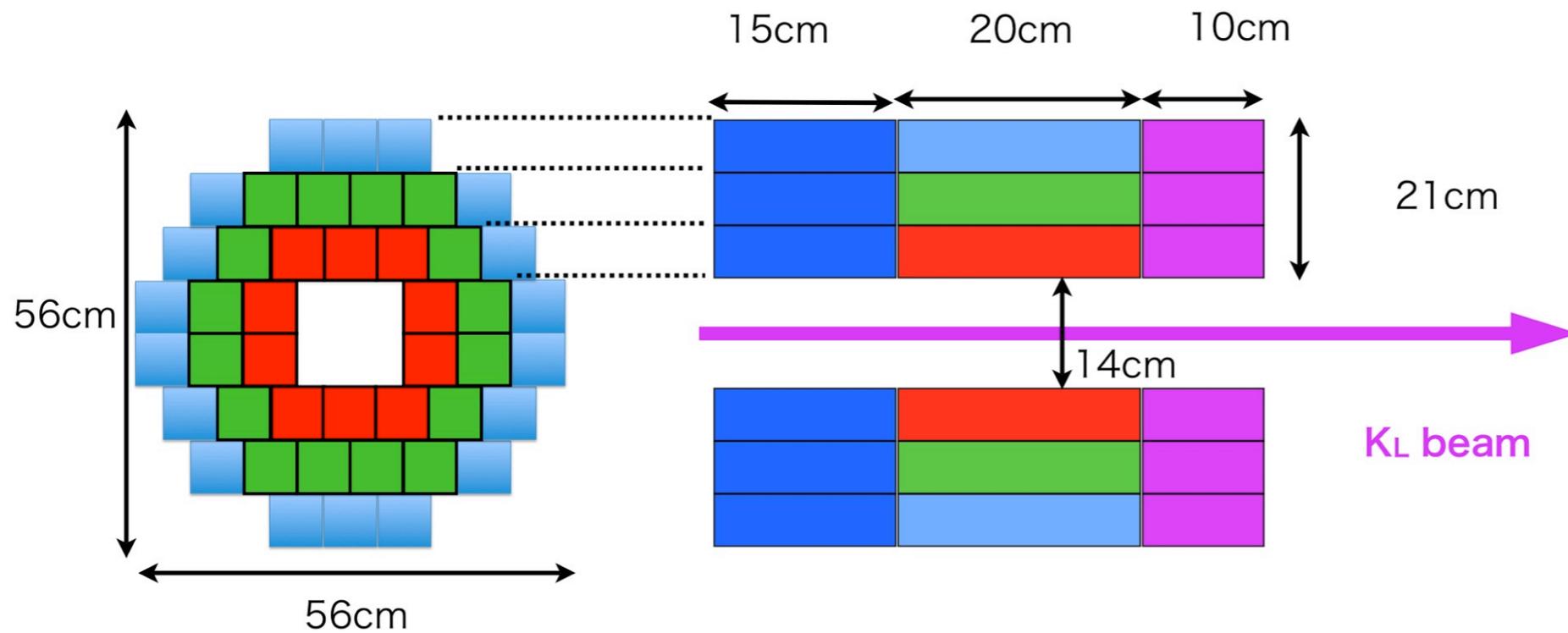
### CsI結晶の特徴

$\gamma$ に対し放射長が短い

中性子に対し反応長が長い

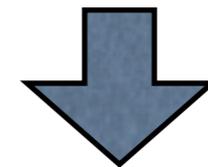


# NCC design



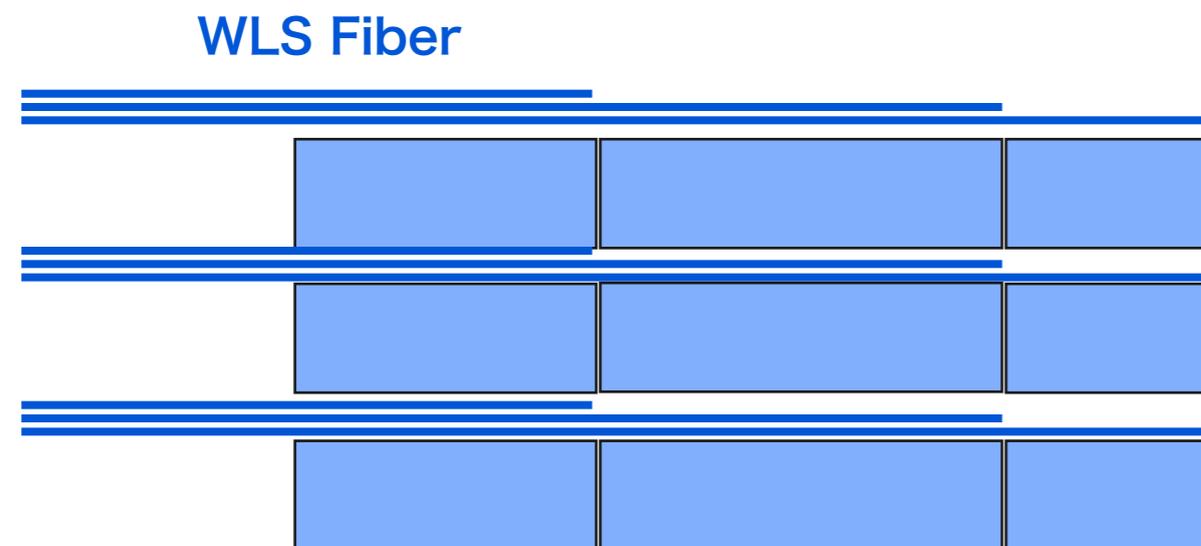
Side View

各結晶を、結晶間の隙間から読み出す



波長変換ファイバー読み出し

**ファイバー読み出しの光量確保  
の為の研究を行った。**



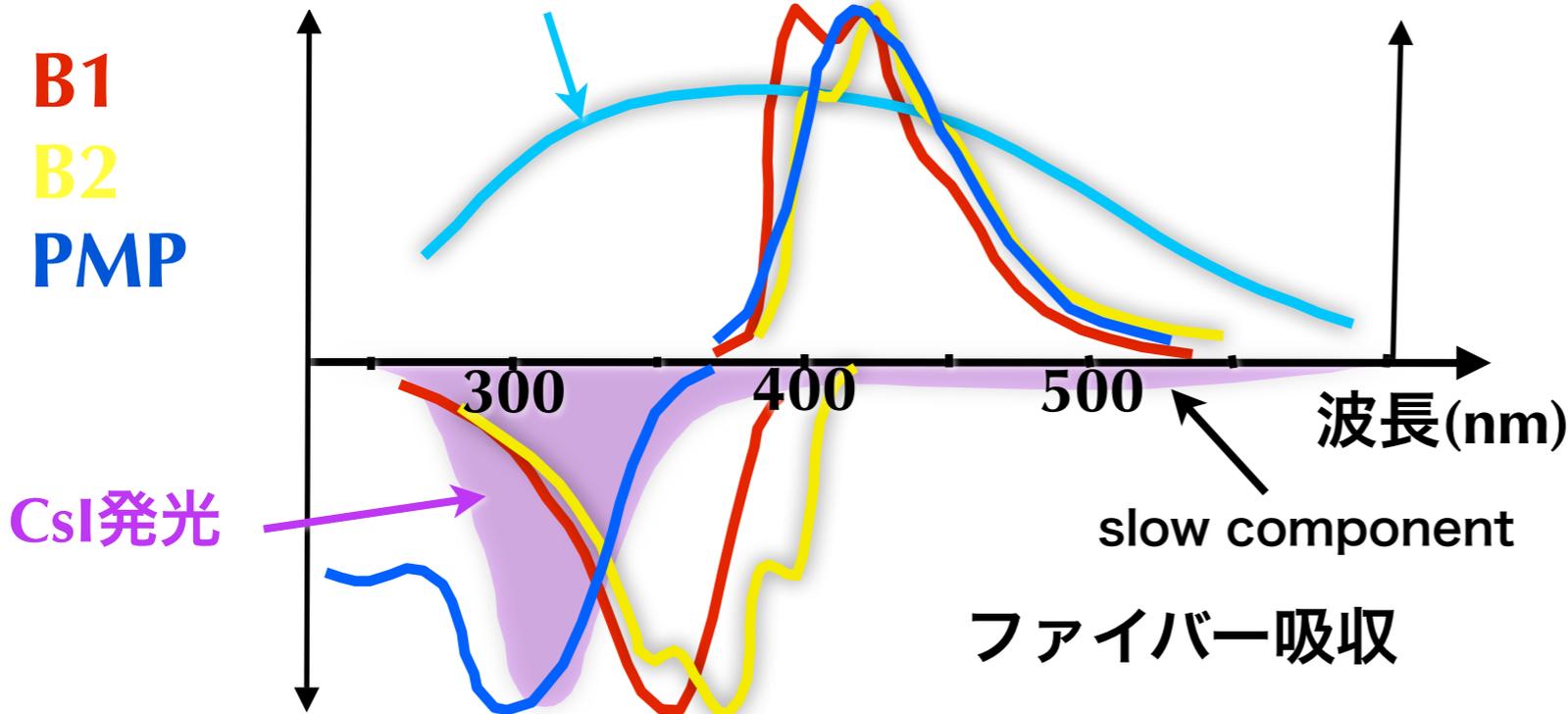
# Csl Fiber読み出し

# ファイバー読み出しのメリット

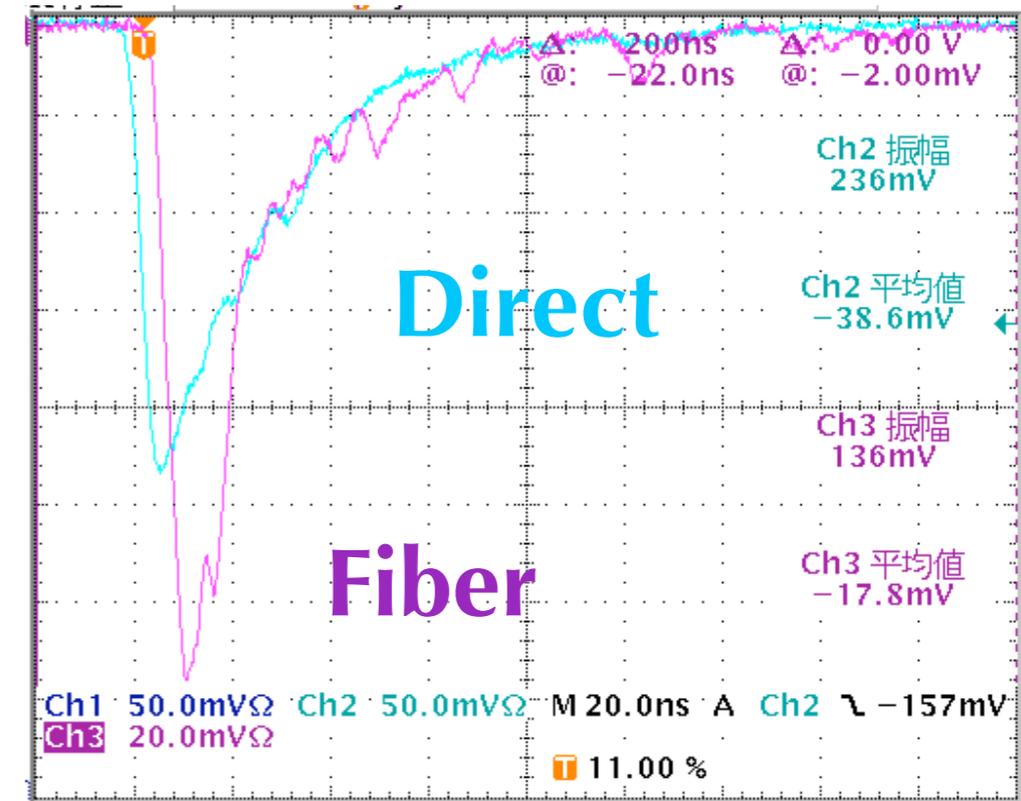
候補となる、紫外吸収の波長変換ファイバーの吸収発光spectrum

PMT(Bialkali)のQ.E.

ファイバー発光



cosmic muonで取得した波形



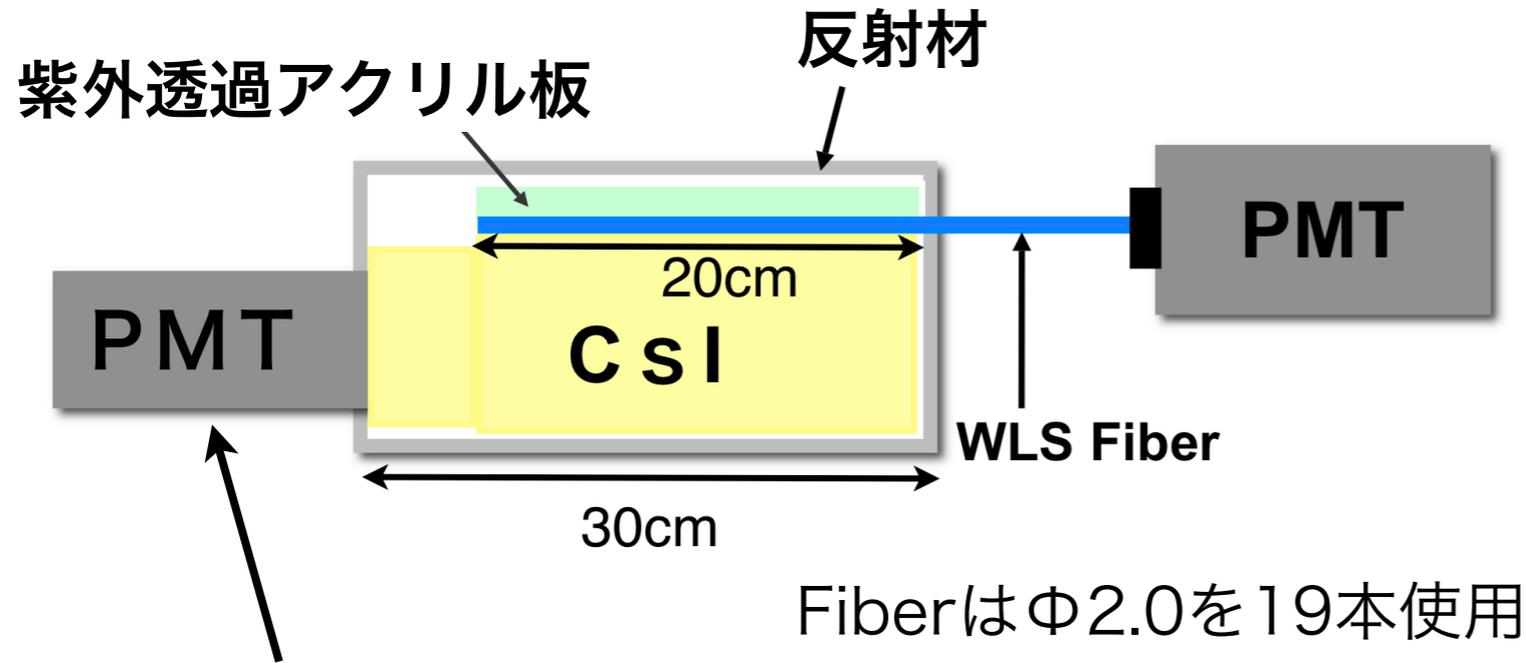
## ● ファイバー読み出しの利点

- 狭い隙間から読み出し可能
- 長波長にshiftする事で 量子効率向上
- CsI発光の長波長の遅い成分を落とせる

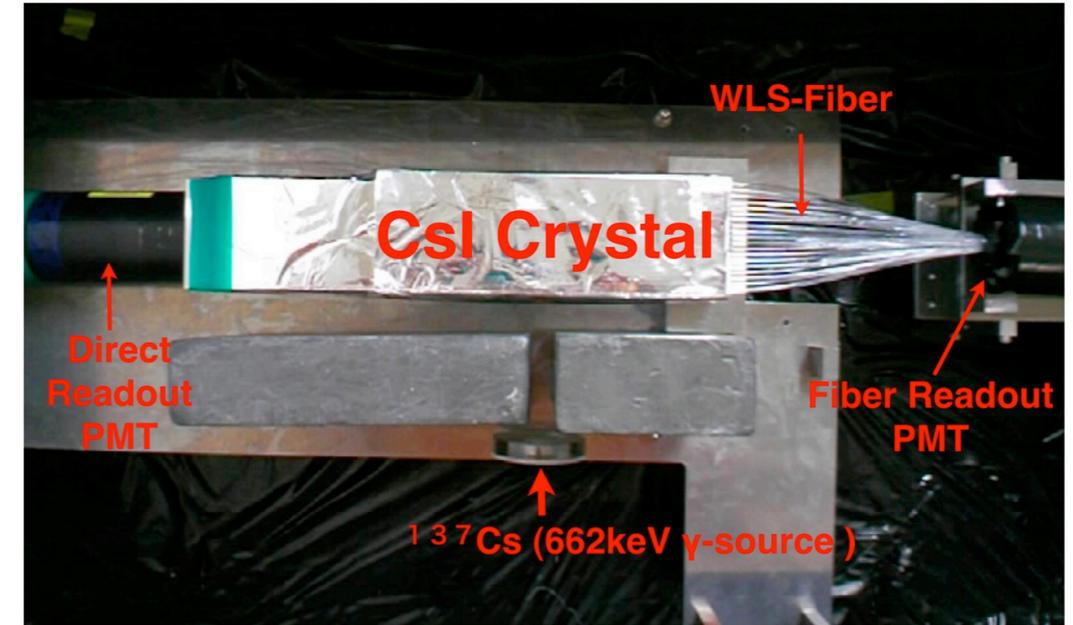
十分な光量は得られるか？

# 線源を用いた光量測定setup

137Csの662keV  $\gamma$  source 使用



結晶の発光を直接読み出し、Triggerに用いる

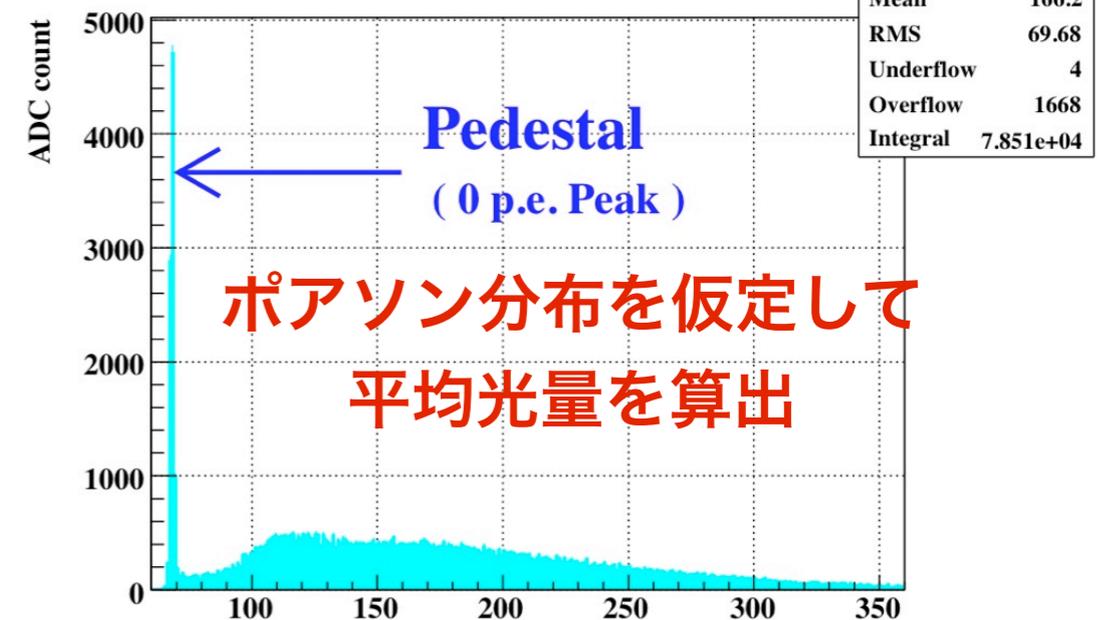


CsI結晶：7×7×30cm<sup>3</sup>

E391aで使用したCsI

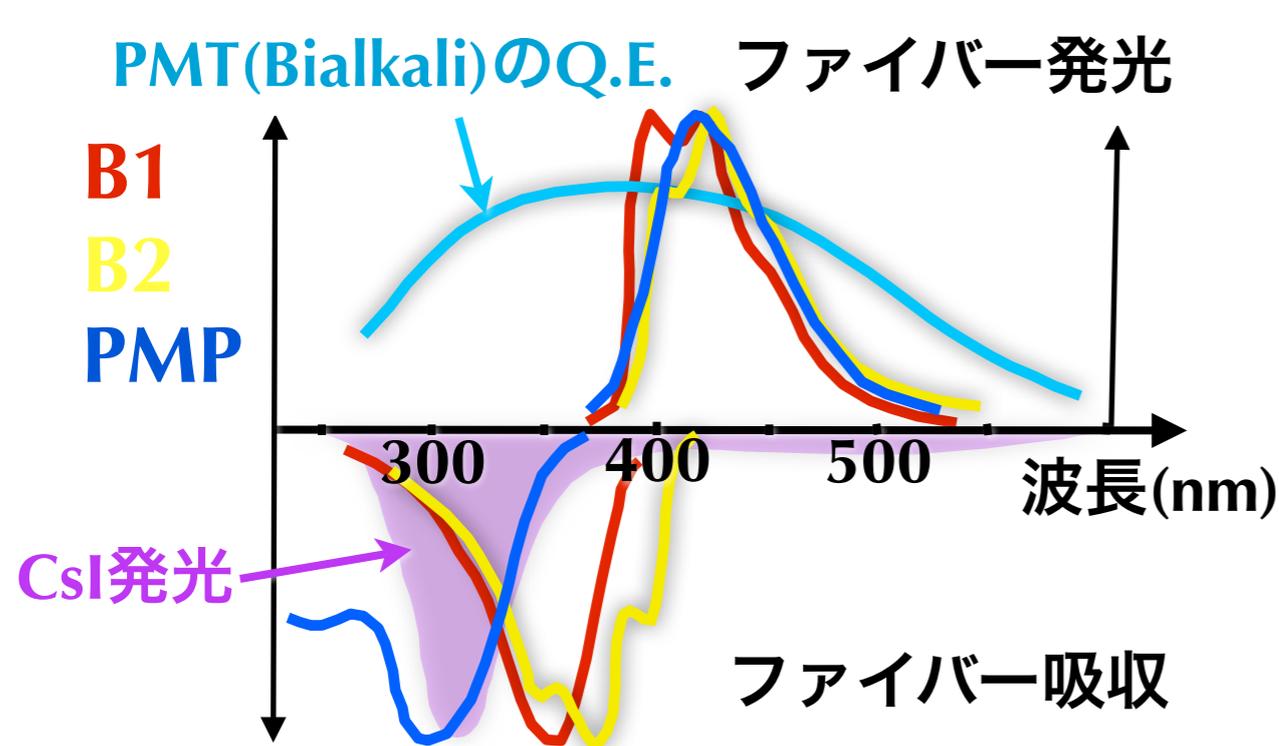
実機で使用予定の結晶と同等の物でテスト

Fiber読み出しのADC分布

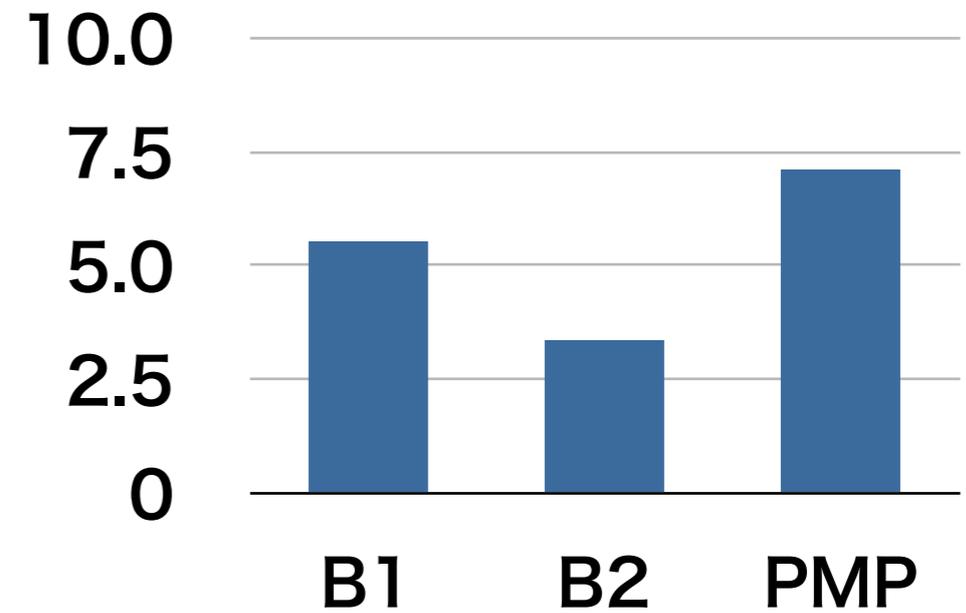


# 波長変換ファイバーの選定

## ● ファイバー選定

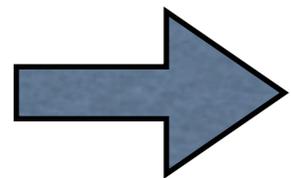


ファイバー別光量比較(p.e./MeV)



光量はPMPが最大

さらに、PMPの発光時定数は3.4nsであり、CsI発光時定数~20nsより十分小さい

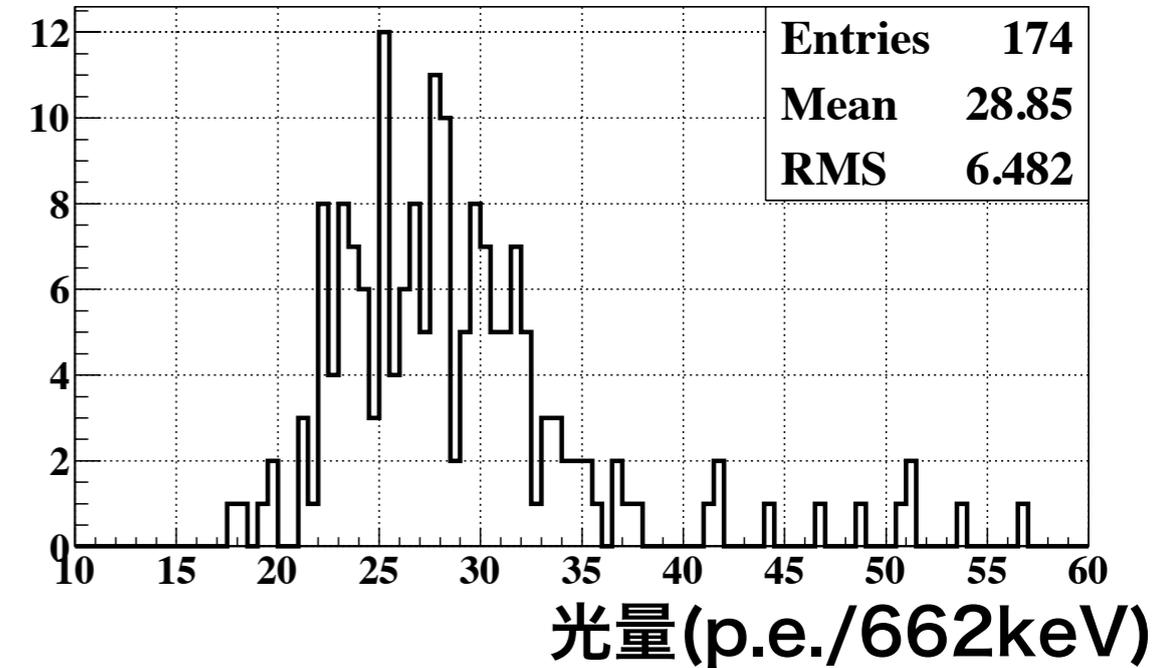


ファイバーはPMPで決定

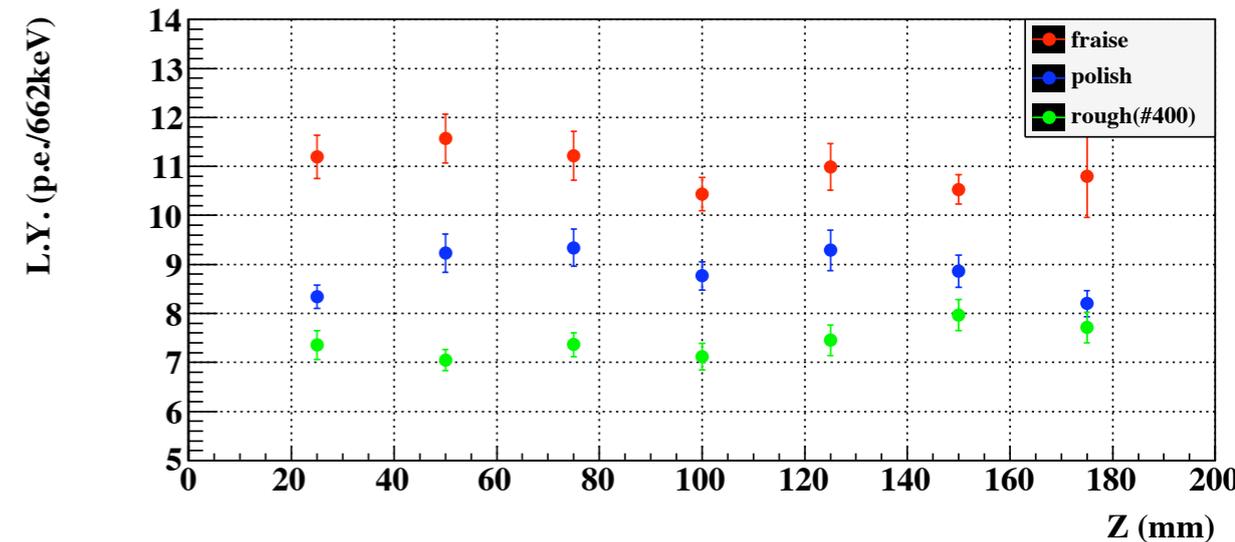
# その他の最適化

- 反射材
  - ルミラーE60L (東レ) → ゴアテックス反射材  
→ **光量1.4倍**
- Fiber end
  - ファイバーの端面にアルミ蒸着  
→ **光量1.2倍**
- その他
  - 用いる結晶の選別(光量の多い個体のみ使用)
  - 結晶の表面状態の最適化 (適度に粗い表面)
  - Fiberの本数や形状(丸 or 角), 径等最適化  
→  $\phi 1.0$  丸ファイバー40本 に決定

CsI結晶の光量分布(PMT直接読み出し)



結晶表面の粗さとFiber光量および光量一様性



これらを合わせ、

**光量: 14p.e./MeV 以上を達成**

# 1 モジューラルプロトタイプ製作

# 具体的な読み出しデザイン

- NCCは2つの役割

- ハロー中性子BGのVeto

- 光量が必要 ( $\sim 10$  p.e./MeV)
- 分割読み出しは必要ない

- ハロー中性子の測定

- 光量はそれほど必要ない ( $\sim 1$  p.e./MeV程度)
- 分割読み出しが必要 (クロストーク  $<$  数%)

2つの読み出し系統を分けて、それぞれの要請を満たす具体的なデザインを作成

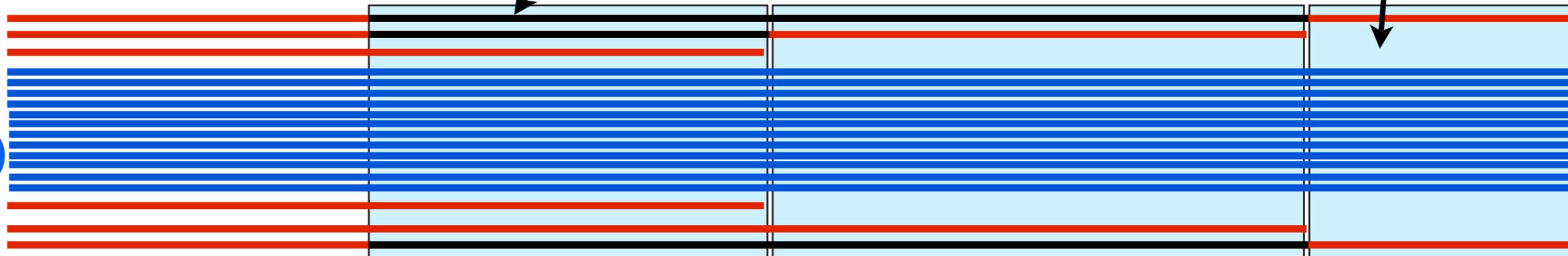
# 読み出しデザイン

**Individual**  
(ハロー中性子測定用)

ファイバーを遮光 (熱収縮チューブ)

紫外透過アクリル板

**Common**  
(BG Veto用)



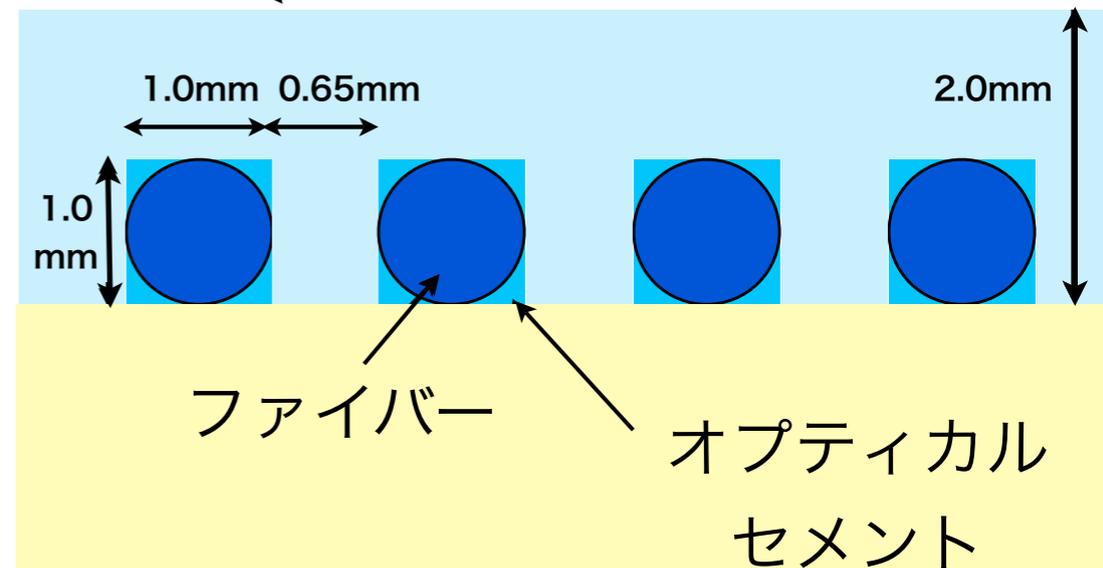
Common readout (BG Veto用)

- 3つの結晶を28本のFiber でまとめて読み出し  
→光量を確保

Individual readout (ハロー中性子測定用)

- 各結晶を4本ずつのファイバーで分割読み出し

紫外透過アクリル板



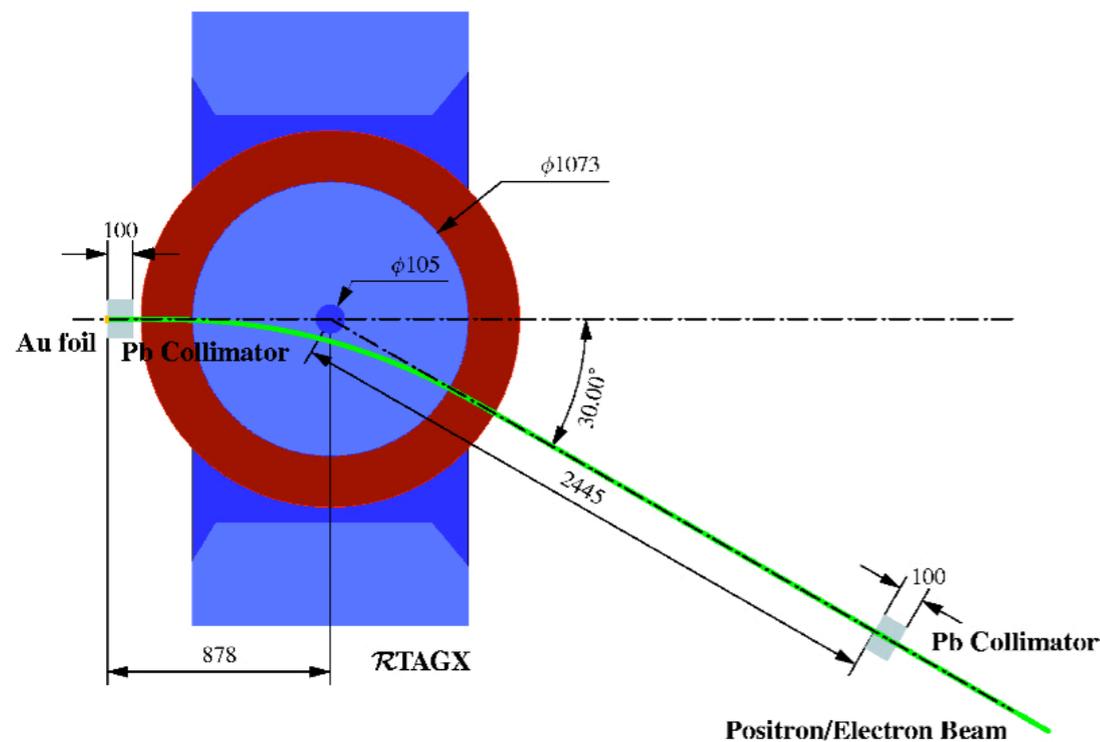
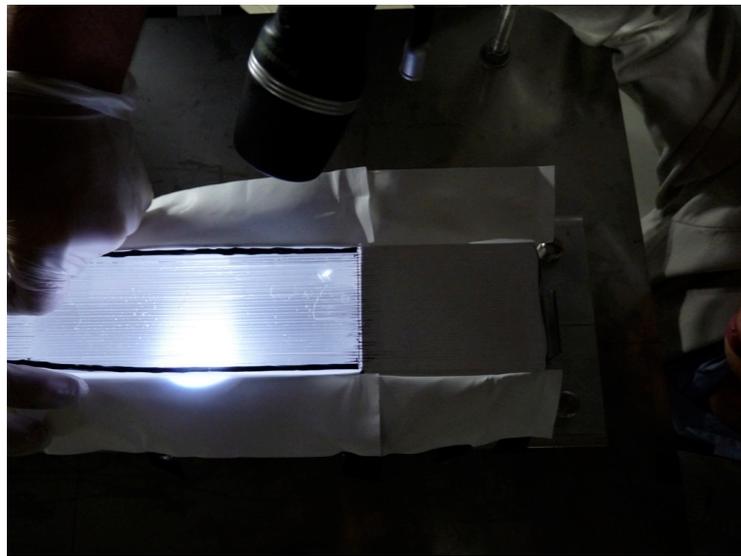
十分な光量はあるか？

クロストークは抑えられるか？

CsI

# 光量およびクロストーク測定

- 光量とクロストークを測定するため、1モジュール(縦に3結晶)分のプロトタイプを製作し、東北大核理研でビームテストを行った。

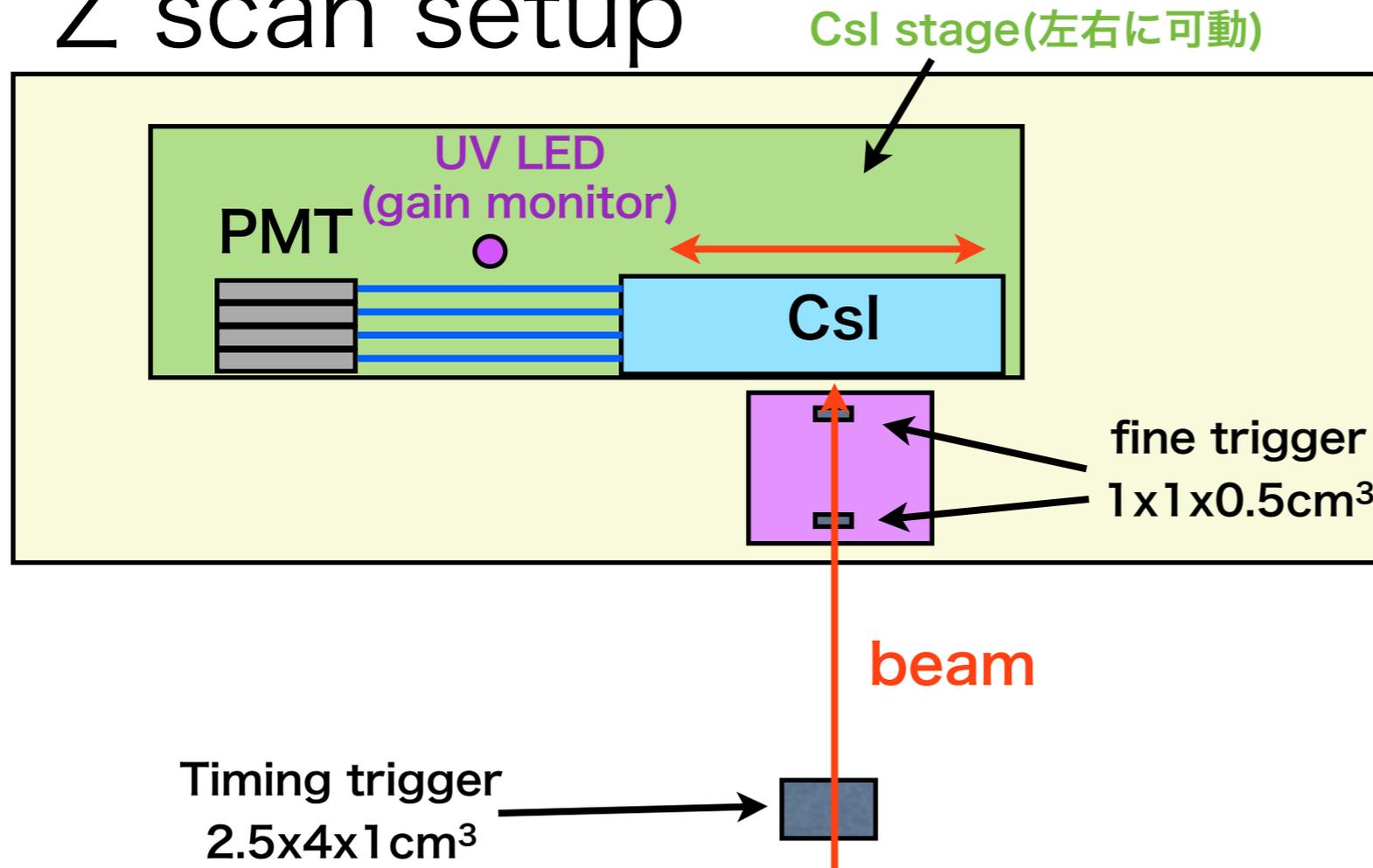


## 東北大核理研e<sup>+</sup> ビーム

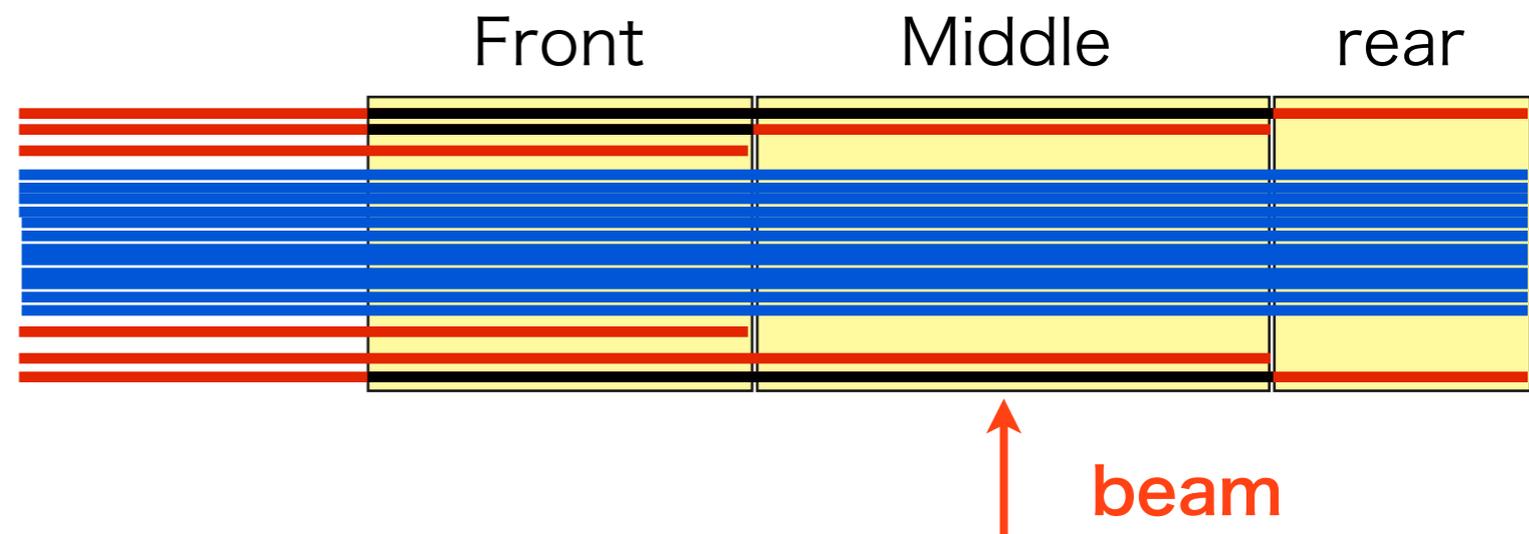
金箔ターゲットに $\gamma$ を照射し生成したe<sup>+</sup>を双曲電磁石で30°方向に取り出す。

# Setup

## Z scan setup

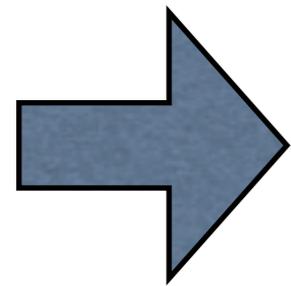


Middleの結晶にビームを当て、  
光量およびCross talkを測定



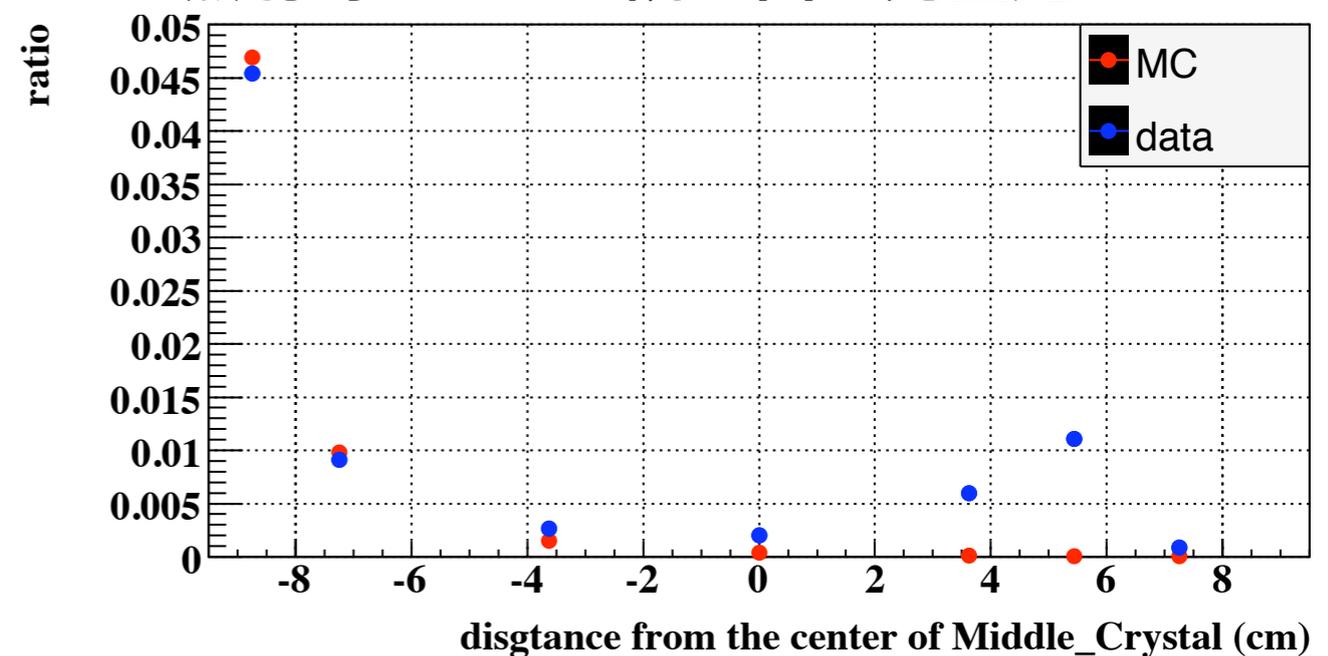
# 光量およびクロストーク

- Veto用Common readoutで10.5p.e./MeV
- ハ口一測定用 Individual readoutで1.4p.e./MeV

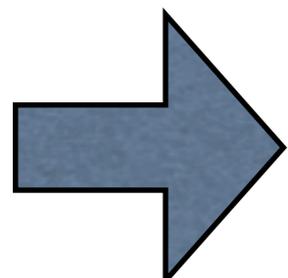


ほぼ予想通りの十分な光量

Middle照射時のFront読み出し光量比



- クロストーク率：~1%



クロストークは十分に抑えられた

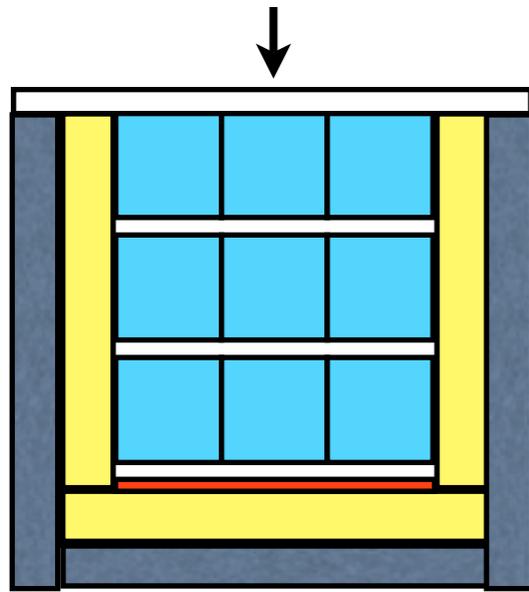
# 9モジュールプロトタイプ製作

# 9モジュールプロトタイプとビームサーベイ

- 1モジュールプロトタイプでの結果を受けて、より実機に近いデザインの9モジュールプロトタイプを製作
- 去年10月からスタートしたビームサーベイにおいて、実際にハロー中性子を測定する事を目的として製作

# 試作機デザイン

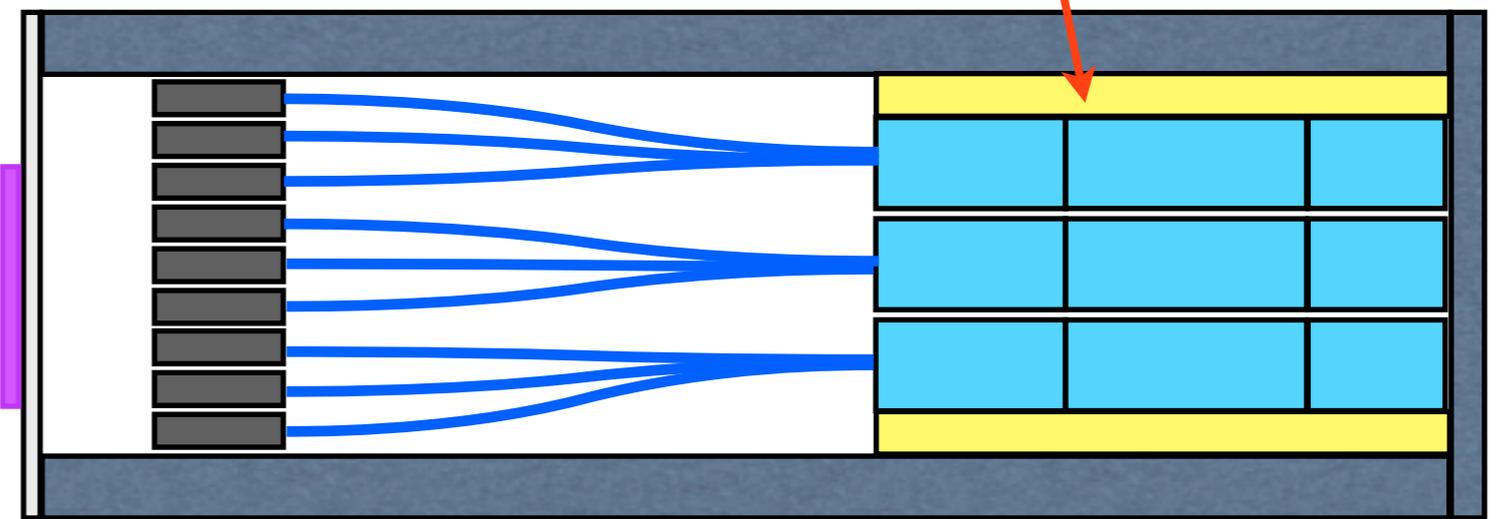
アクリル板



モジュール積み上げ時の写真

箱はアルミで構成

クッション



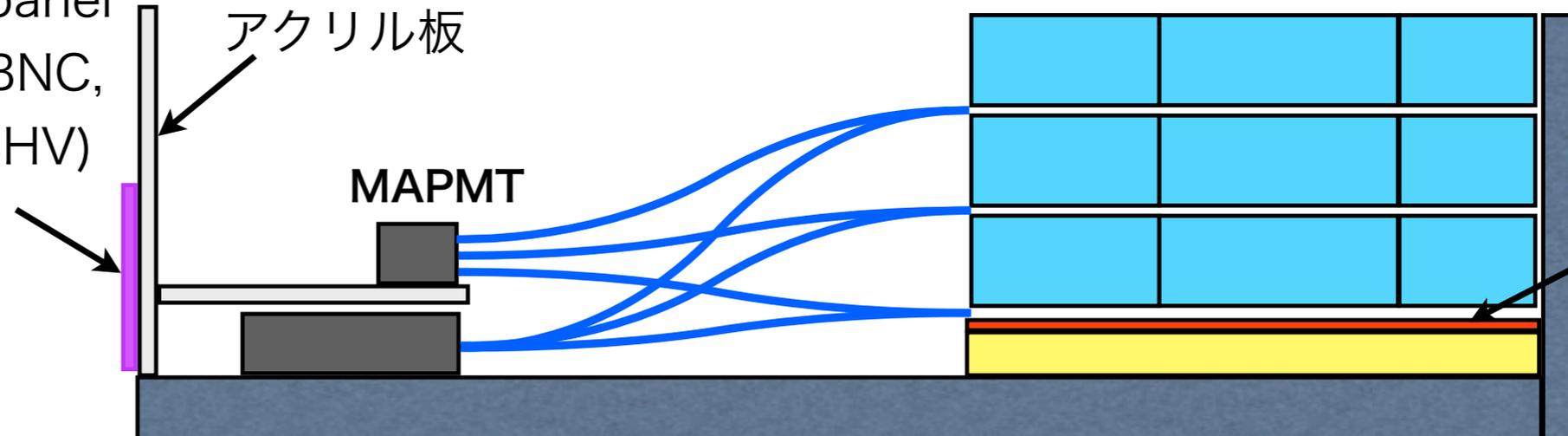
beam



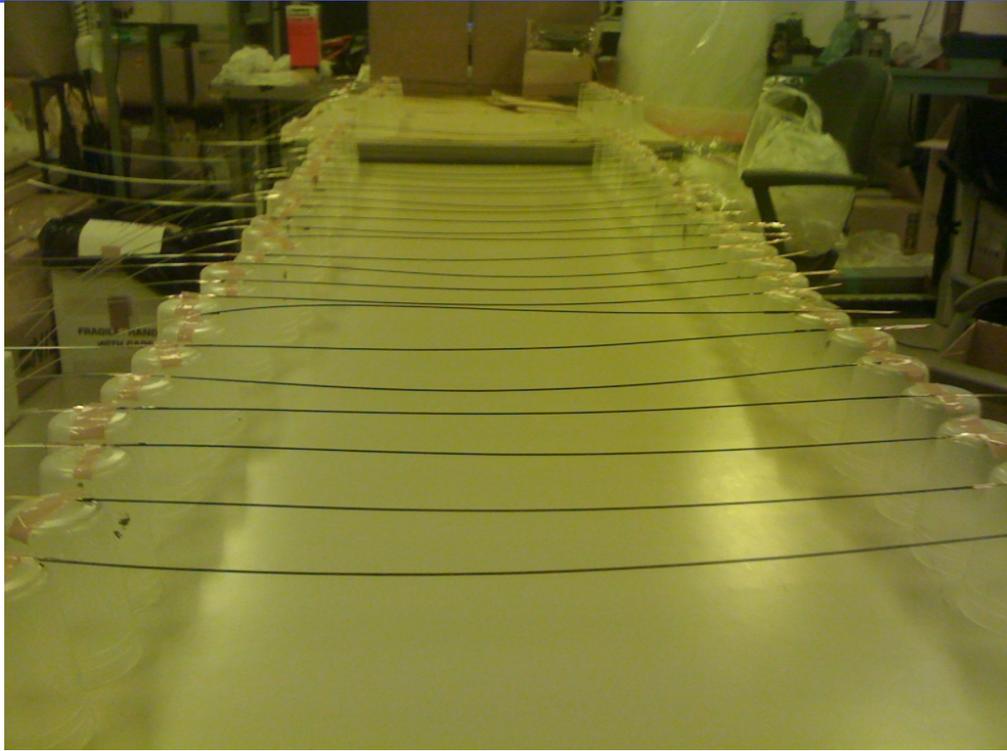
patch panel  
(BNC-BNC,  
SHV-SHV)

アクリル板

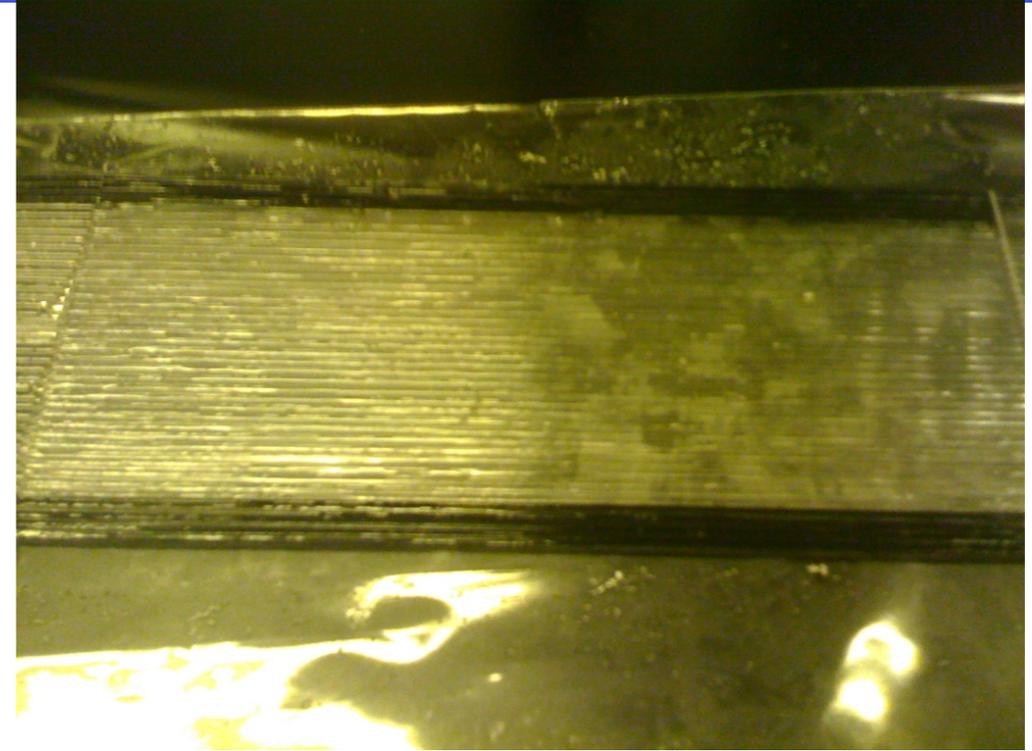
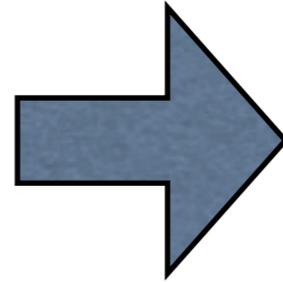
MAPMT



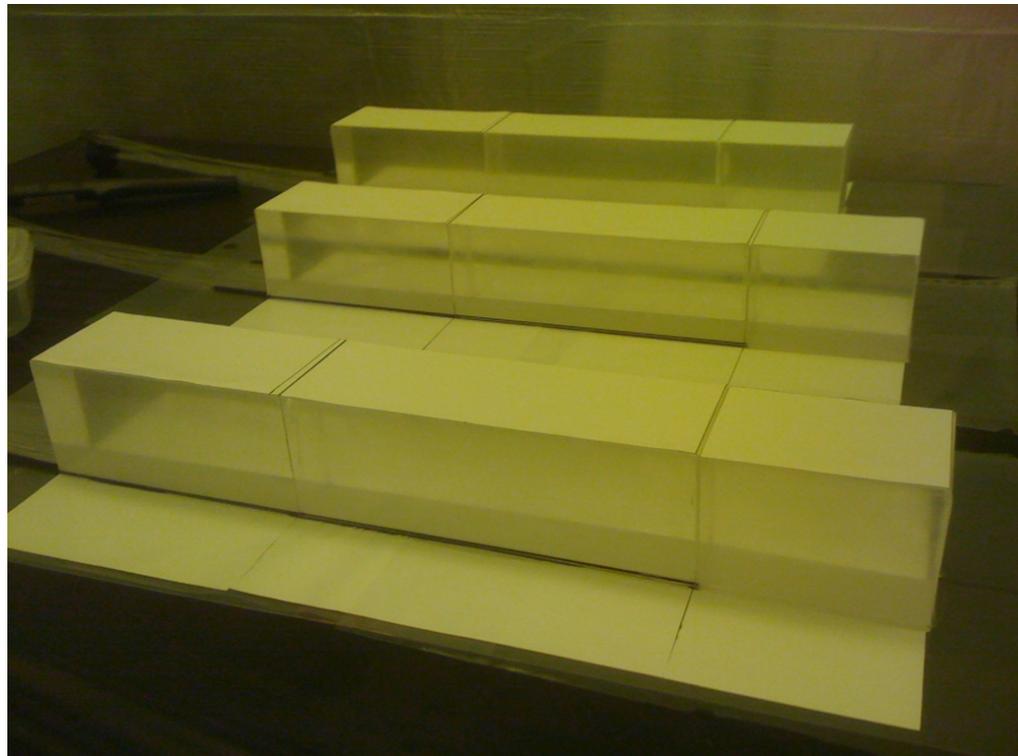
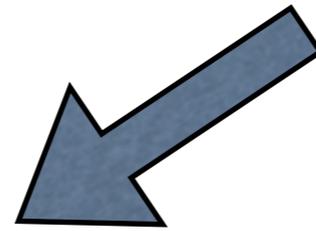
# モジュール製作過程



ファイバーの遮光部塗装



ファイバーをアクリル板に接着



結晶とアクリル板の接着

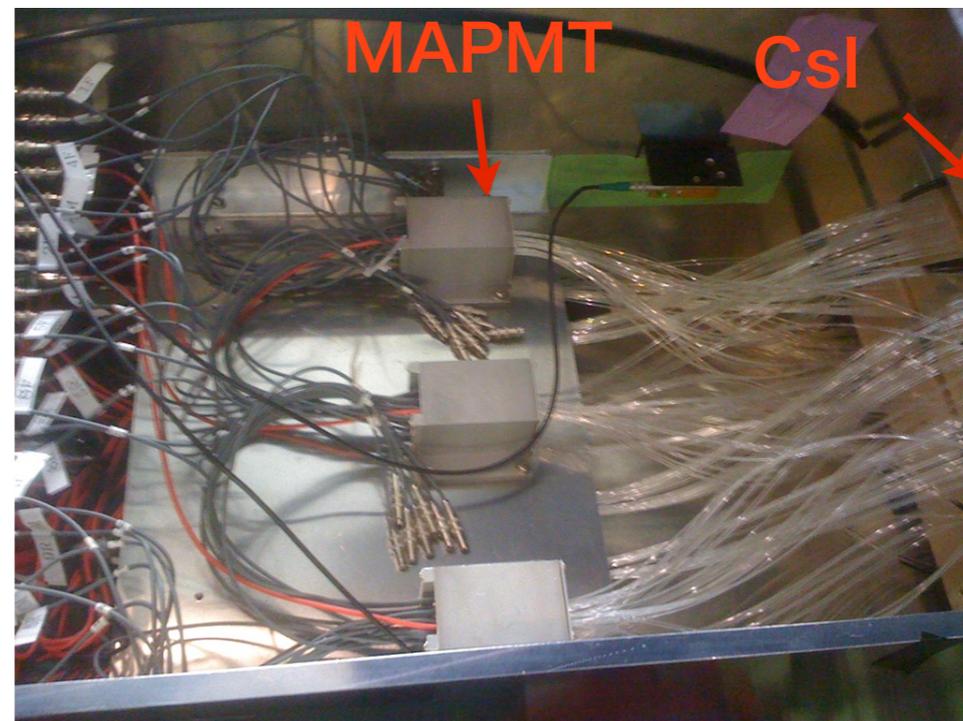


反射材巻いて完成

# エリア内搬入

昨年12月にエリア内にインストール完了

2/19未明までハロー中性子測定



現在、測定データを解析中

# Summary

- 純CsI結晶複合型検出器(NCC)をデザインし、K<sup>0</sup>TO実験におけるハロー中性子バックグラウンドの抑制と、ハロー中性子の測定および監視を行なう事を考案した
- 読み出しスペースの制約から、波長変換ファイバー読み出しを採用
  - バックグラウンド抑制に必要な十分な検出効率 (読み出し光量)を達成
  - ハロー中性子測定に必要な、各結晶の独立な読み出し方法を考案
- 1モジュールプロトタイプ製作、性能評価
  - 光量は十分(Common : 10.5p.e./MeV , Individual : 1.4p.e./MeV)
  - クロストークは十分に抑えられた (~1%程度)
- 9モジュールプロトタイプ製作
  - ビームサーベイにて実際にハロー中性子を測定することが目的
  - 昨年12月に完成、インストール
  - モジュールは正常に動作し、2/18までdata取得
  - 現在、測定データを解析中

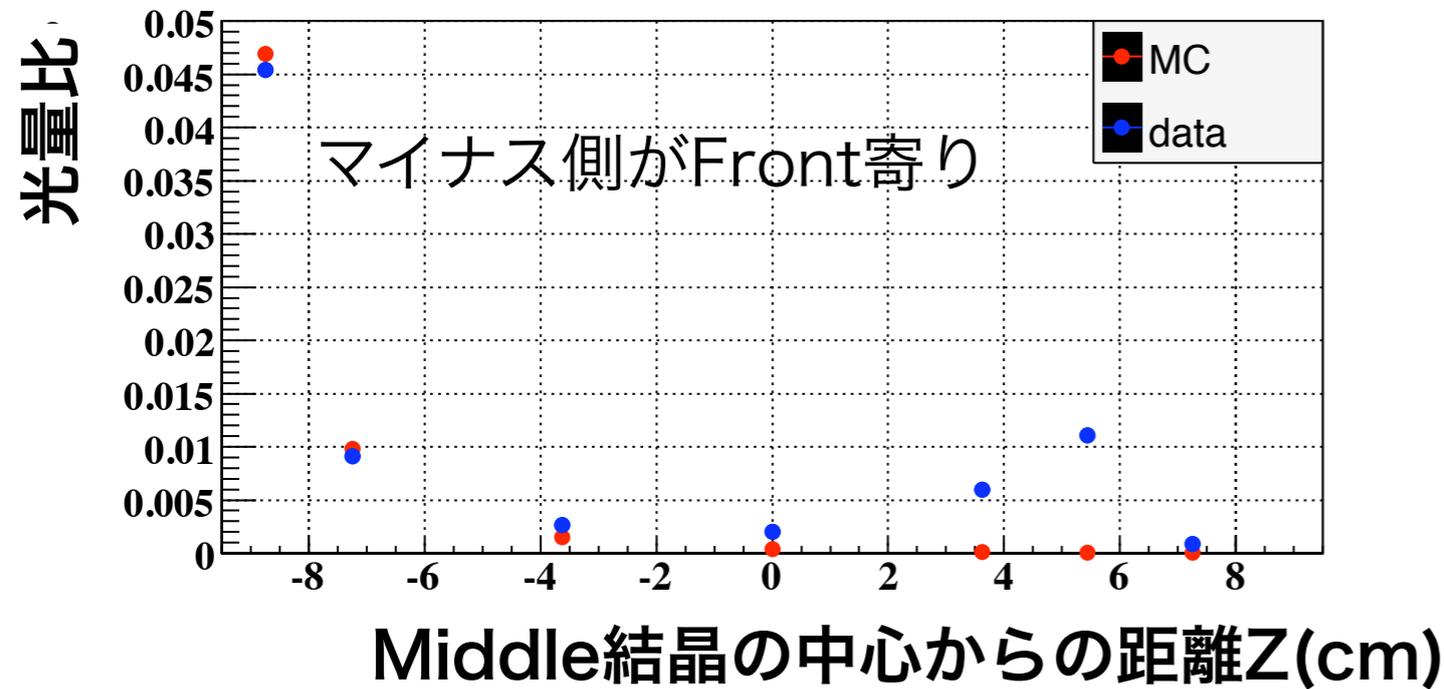
# Backup

# Cross Talk

MC : Middleへのshower漏れ

data : shower漏れ+ CrossTalk(Frontへの光漏れ)

## Front結晶読み出しの光量比



Front結晶のCross Talk率

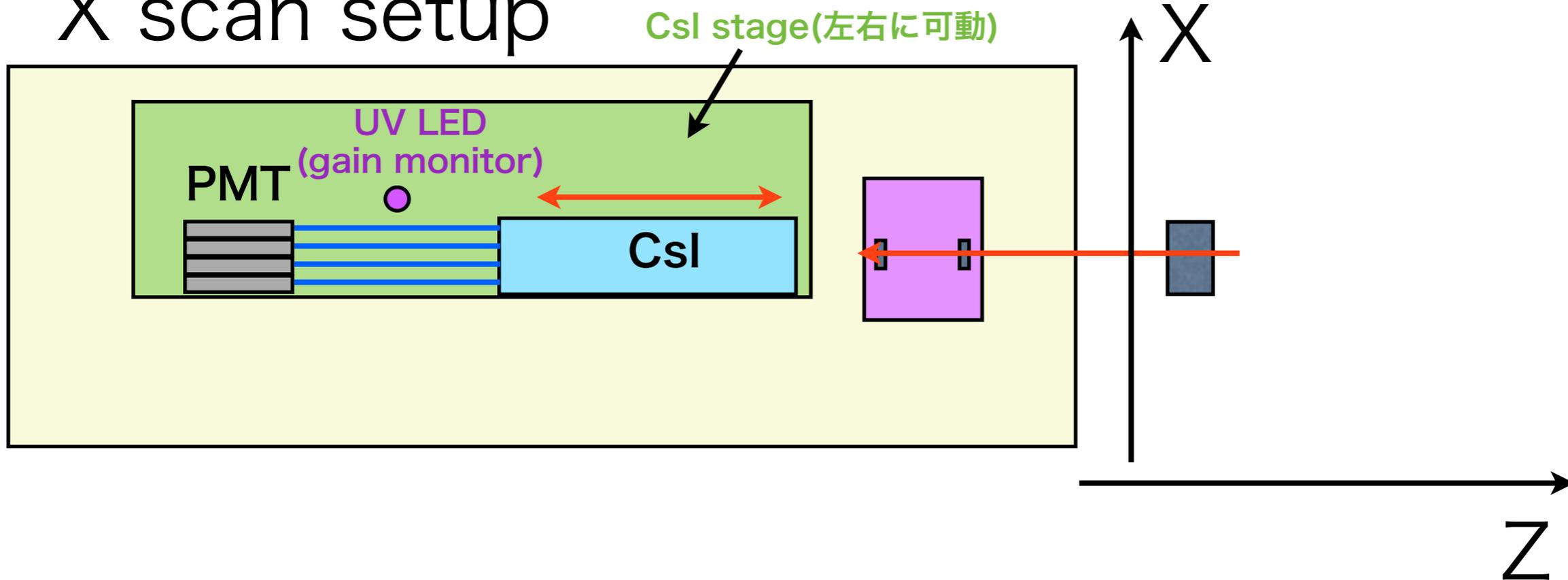
$$= (\text{Middle照射時のFrontへの光漏れ}) / (\text{Front照射時のFrontの光量})$$

(data-MC) が、遮光しきれなかった正味のCross Talk率

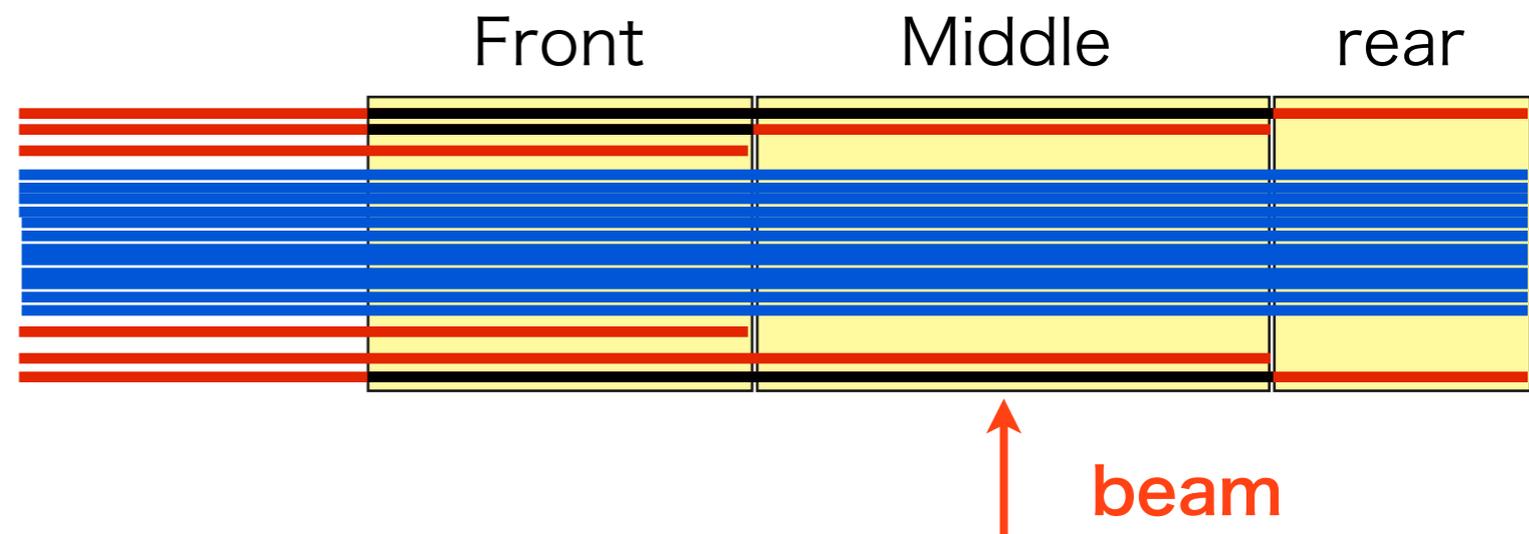
結果、Cross Talk率~1%を確認

# Setup

## X scan setup

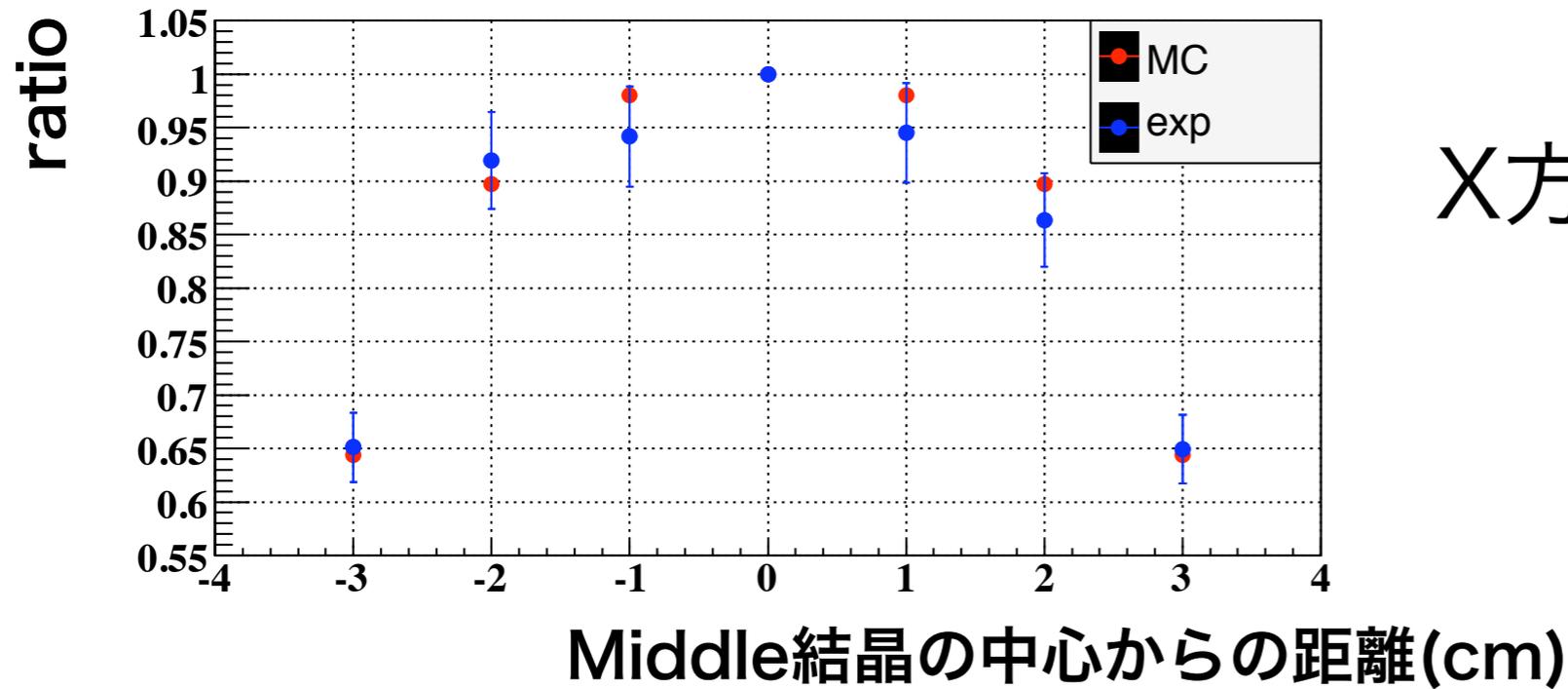


Middleの結晶にビームを当て、  
Cross talkおよび光量一様性を測定



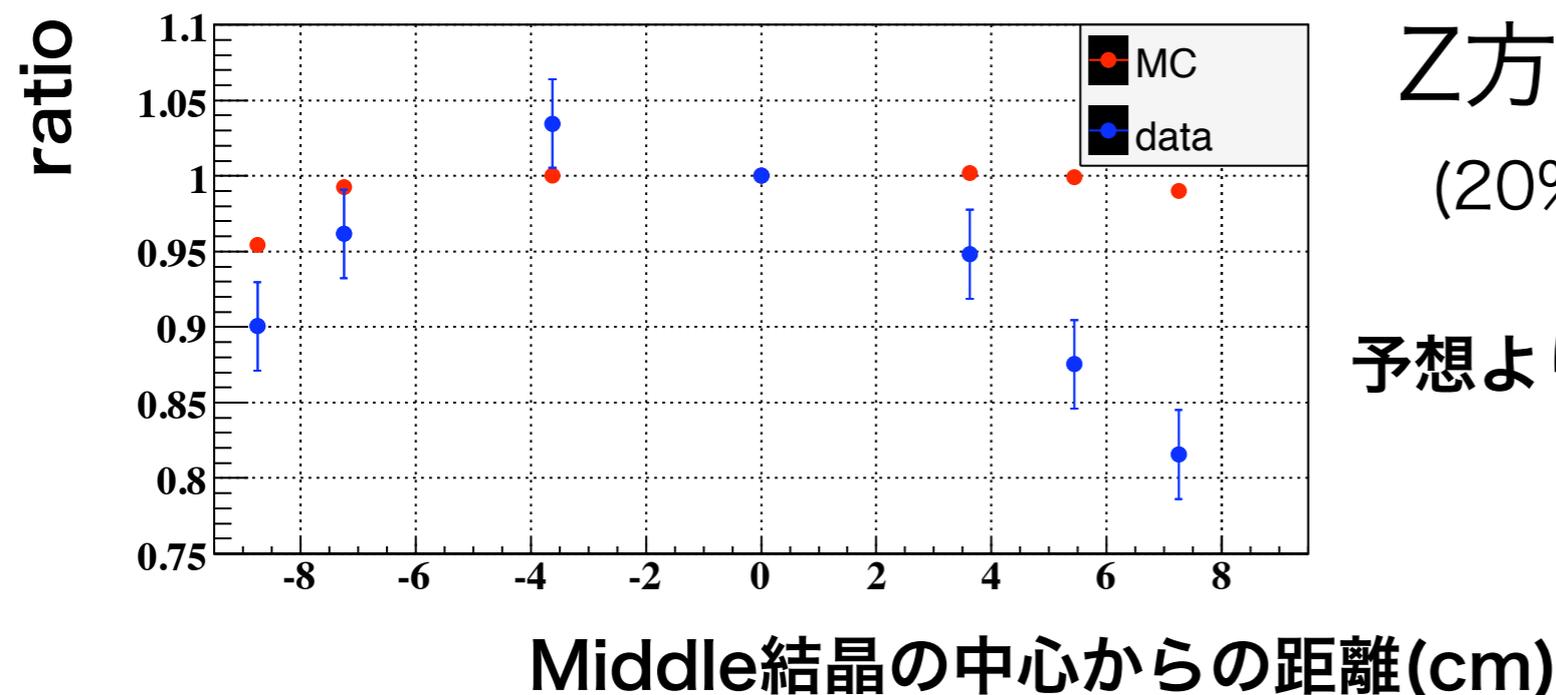
# 光量一様性

結晶に垂直方向(X方向)にScanした際の光量比



X方向の光量一様性：<5%

結晶の長手方向(Z方向)にScanした際の光量比



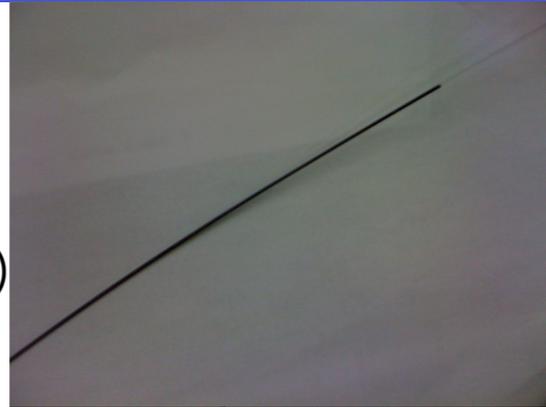
Z方向の光量一様性：~20%  
(20%の非一様性の原因は不明)

予想より悪かったが、<40%の要請は満たした

# ファイバー読み出し

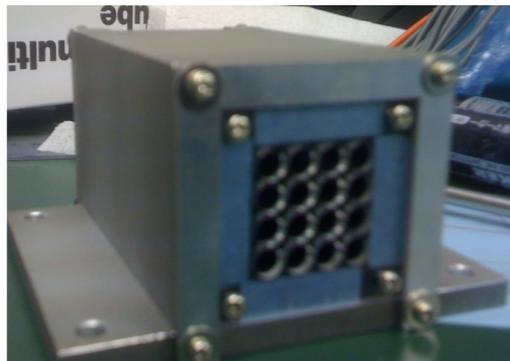
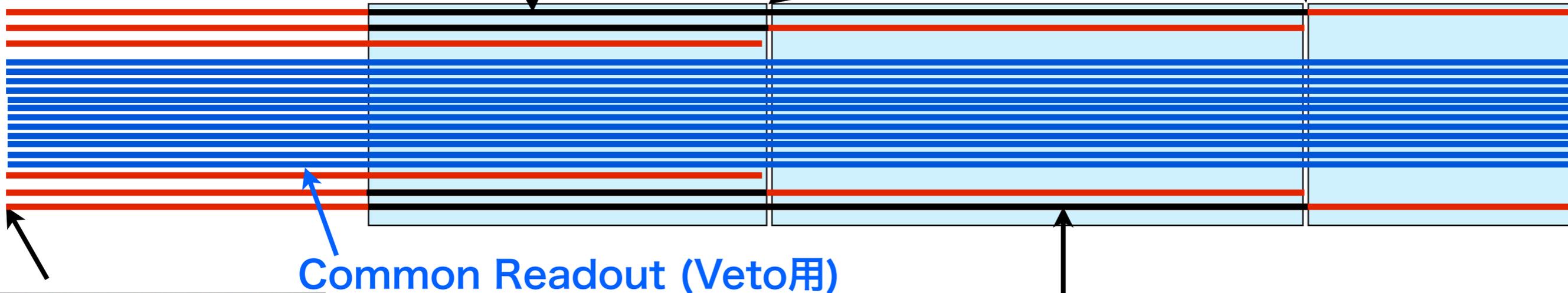
## Individual Readout (halo 測定用)

(遮光部はファイバーを黒く塗装)



## アルミ遮光板

(穴にファイバーを通し、アクリル板間に接着)



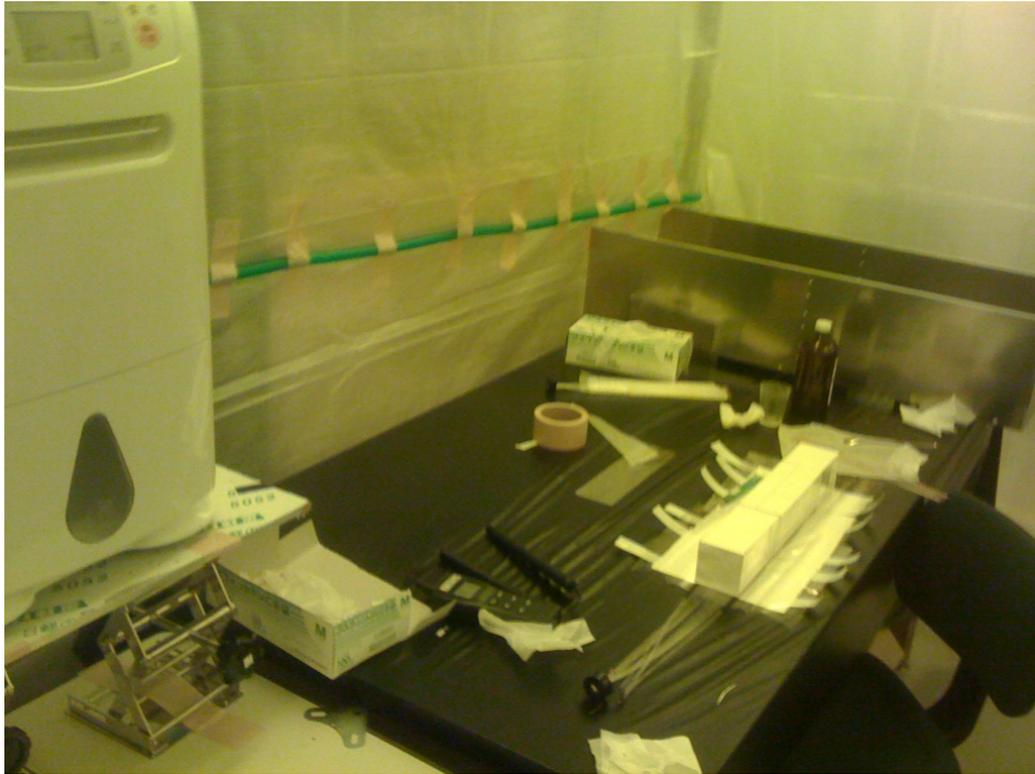
## Individual用クッキー

(4本束ねて1chとし、16chMAPMTで読み出す。PMT側のクッキーの穴に差し込み、爪で固定。抜き差し可能)



溝を切ったアクリル板 (2t, 溝径:  $\phi 1.1$ )

# モジュール製作環境

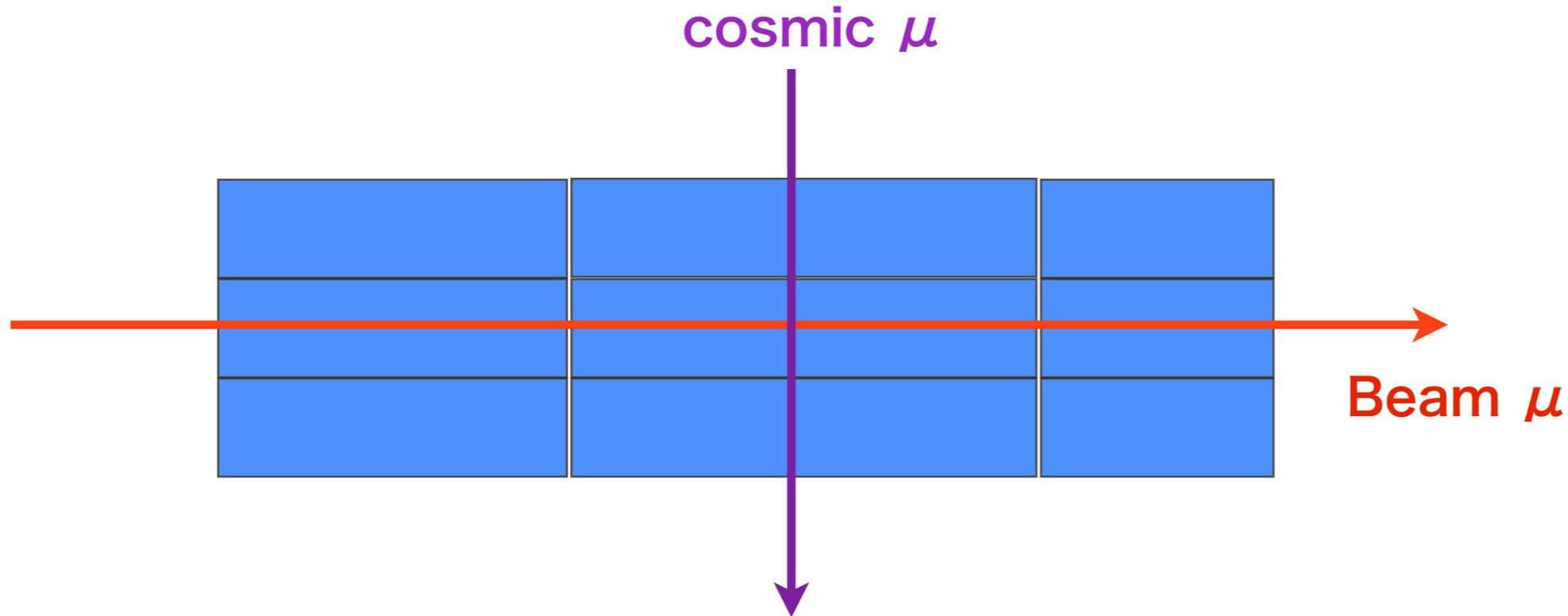


- ビニルシートで覆った簡易乾燥室(縦1.5m,横3m,高さ1.8m)の中に家庭用除湿機設置
- 温度：23~25°C
- 湿度：長時間無人状態で湿度~30%以下、一人作業中で~35%以下 (外が30~50%くらい)

# NCC ビームサーベイ現状

- cosmic muon 測定
  - 動作試験、長期安定性試験
    - 全チャンネル正常に動作、インストール時 (昨年12月)から今まで、大きなgain変動等も無く安定に動作
- beam muonを用いたキャリブレーション Run
  - segmentを活かしてselfでmuon のMIP eventをtrigger
    - < 2%の統計誤差でキャリブレーション
  - cosmic muonでの結果とconsistent
- ビームコアでの中性子測定
  - ハロー中性子測定に先がけ、中性子dominantなコア領域で中性子を測定
  - 解析およびMCとの比較等進行中 (中性子eventが見える事は確認)
- ハロー領域での中性子測定
  - ビームコア領域がAir , He ,真空の3つの場合でハロー中性子測定を行なった
    - 現在解析中

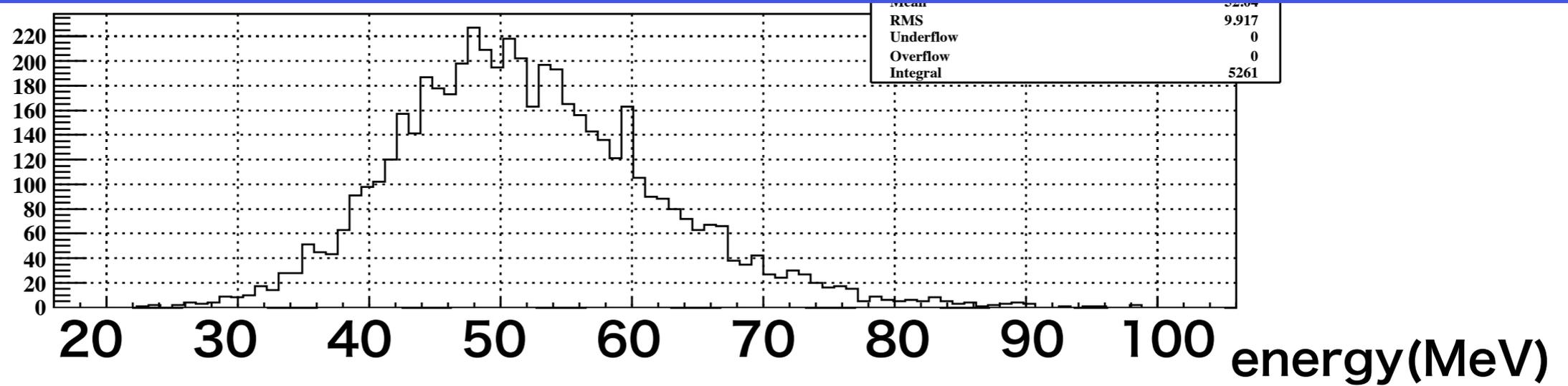
# muonを用いたキャリブレーション



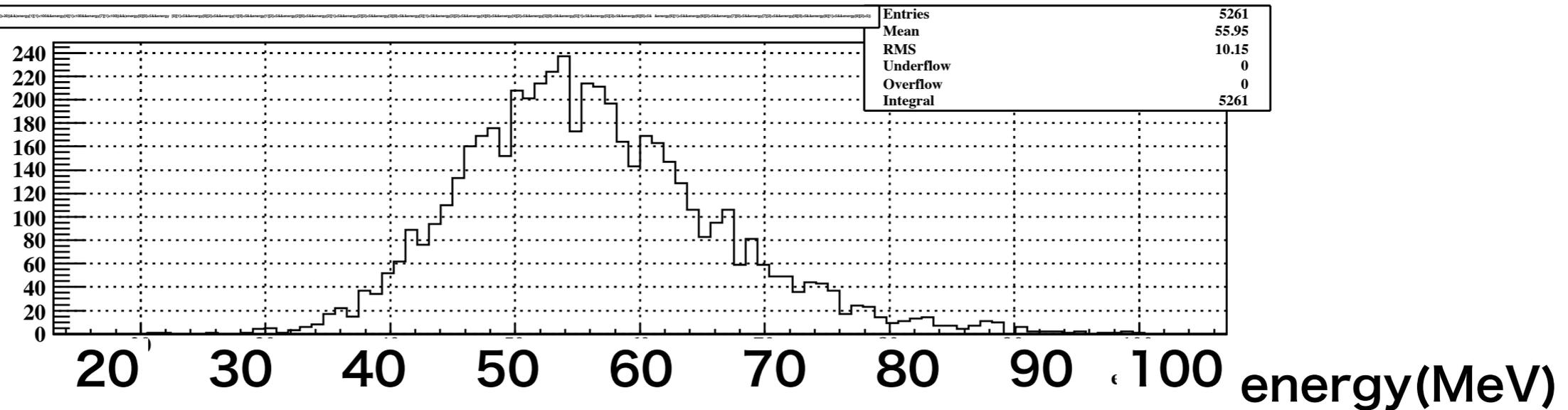
- segment化されている為、縦横のmuon MIP貫通eventをselfでtriggerできる
- キャリブレーション
  - muon runで縦方向のMIP 貫通eventをtrigger →キャリブレーション
  - 物理run中、offspillでcosmic  $\mu$ 測定  
→キャリブレーションのチェック、gainモニター

# Cosmic MuonのMIP Peak

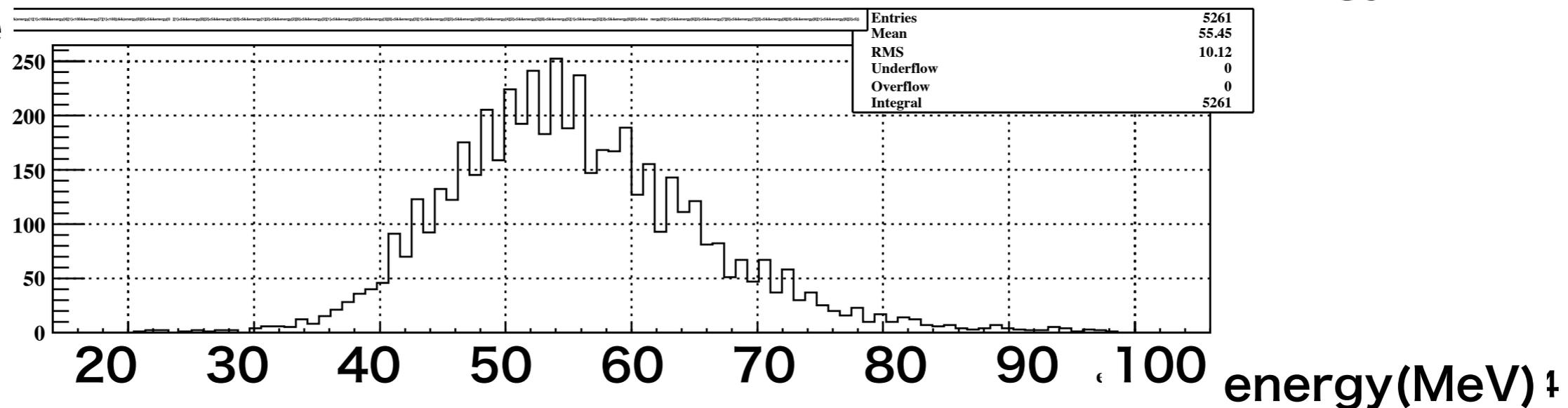
Mod8\_Middle



Mod5\_Middle



Mod2\_Middle

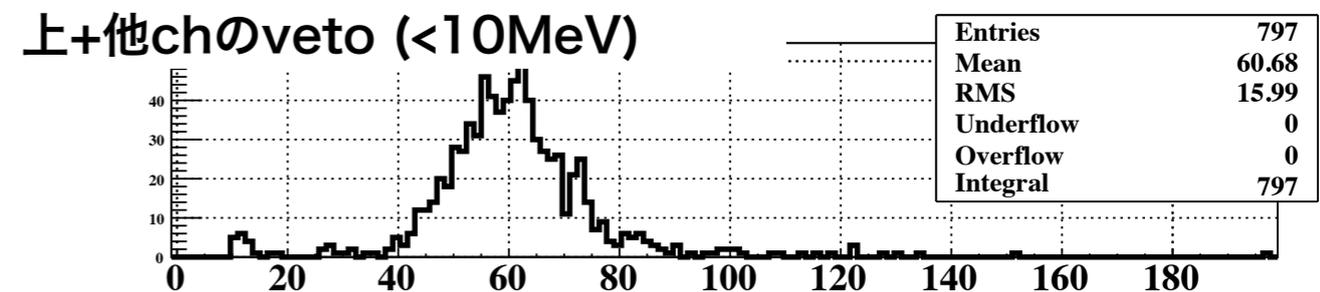
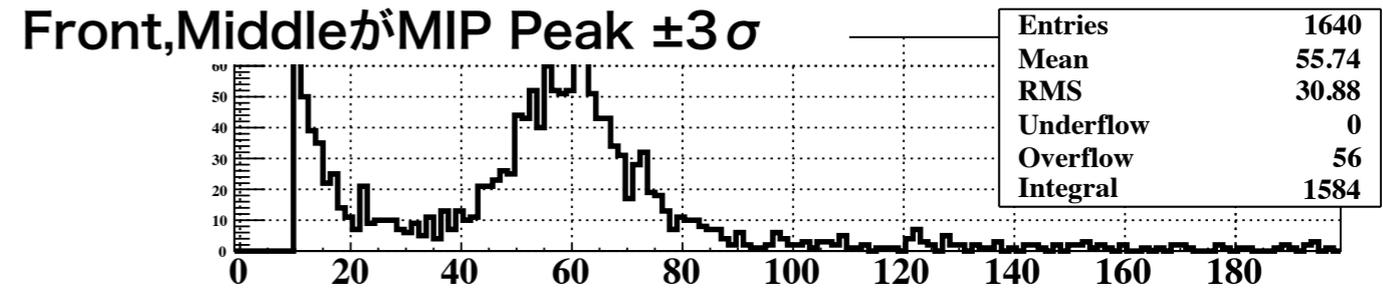
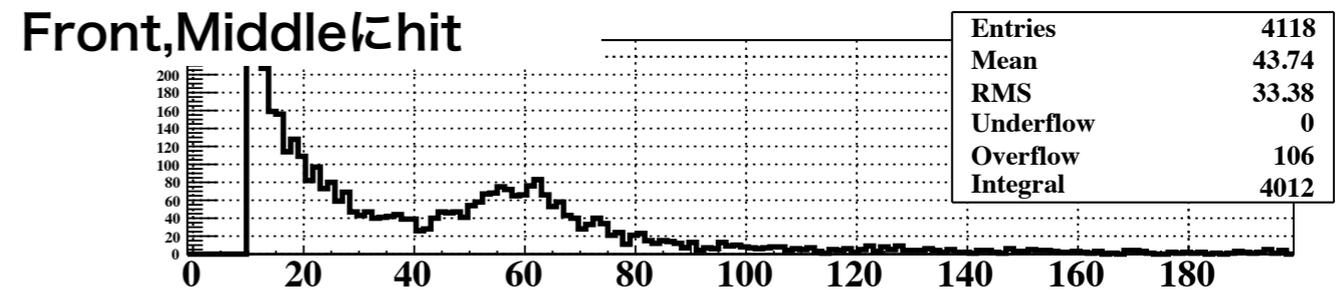
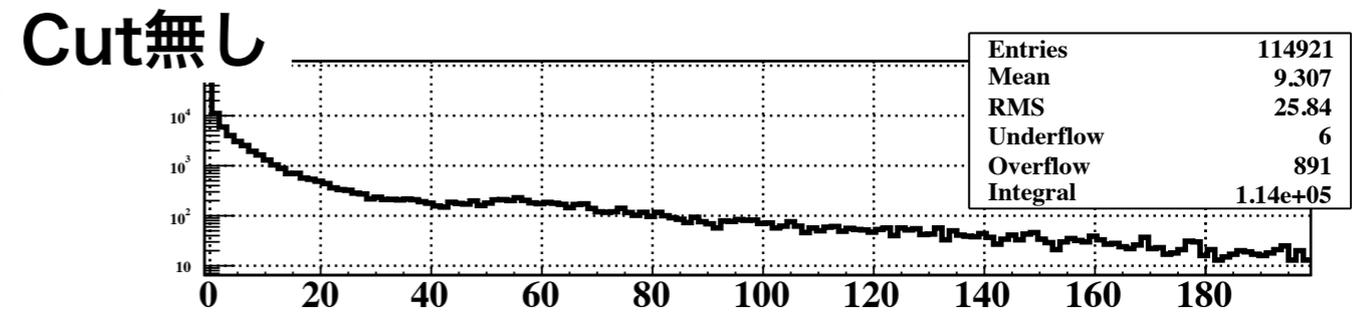


# Beam Muon Calibration Run

● 各モジュール毎に以下のCut

- F,M,RにMIP peak  $\pm 3\sigma$  以内のdeposit
- その他のモジュールにhit無し( $\sim 10\text{MeV}$ )

## Cut毎のMIP PeakのADC histの変化 (真ん中(Mod5)のRear)



## 各モジュールの $\mu$ event数

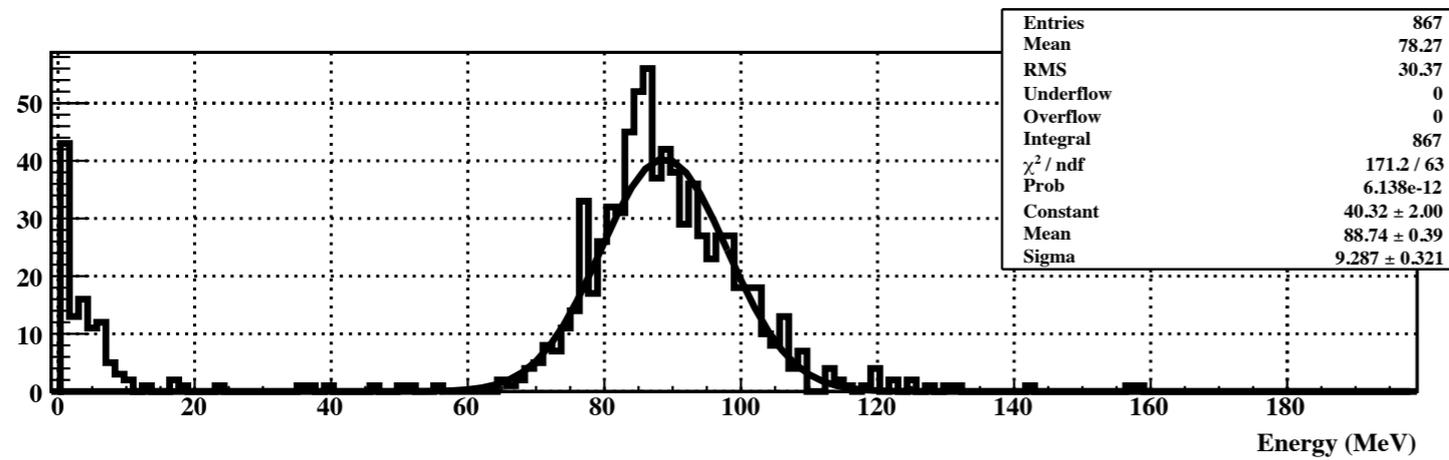
448	618	496
404	867	336
328	576	436



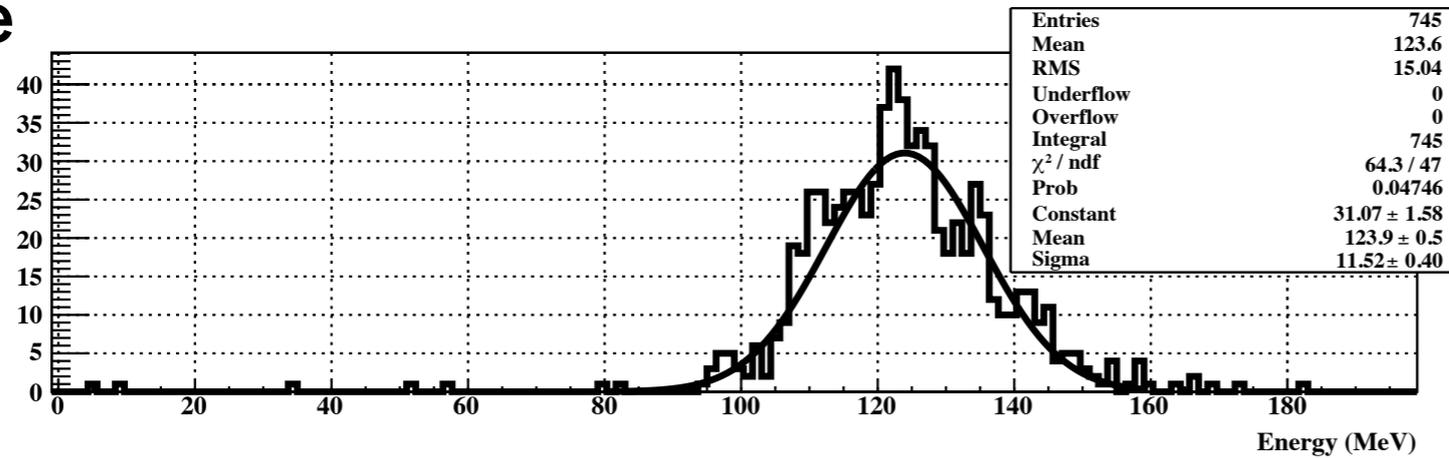
# Cut後のMIP Peak

## Mod5

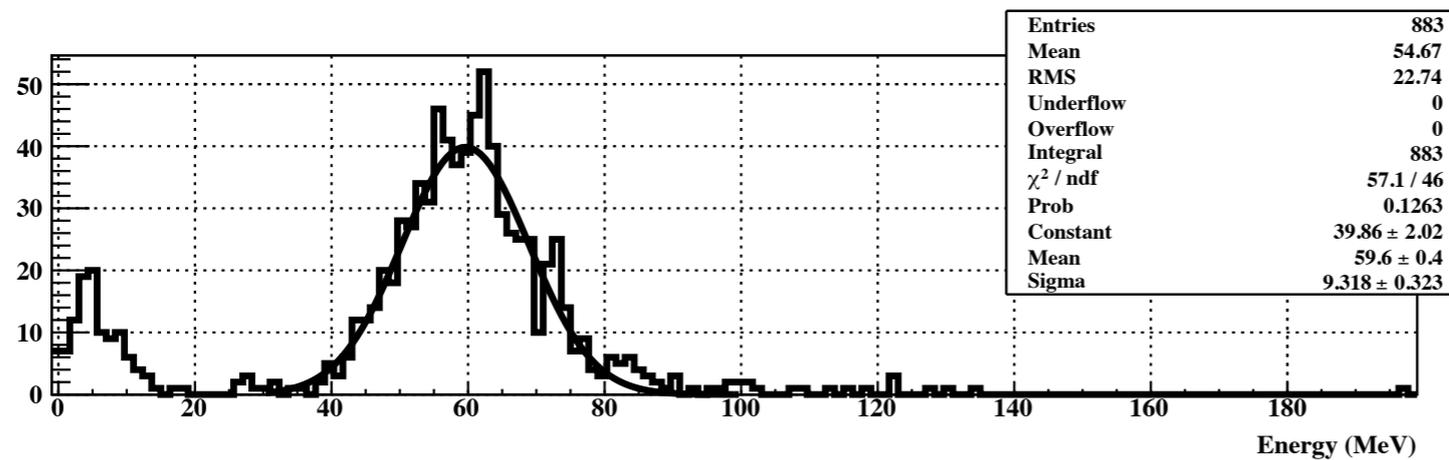
Front



Middle



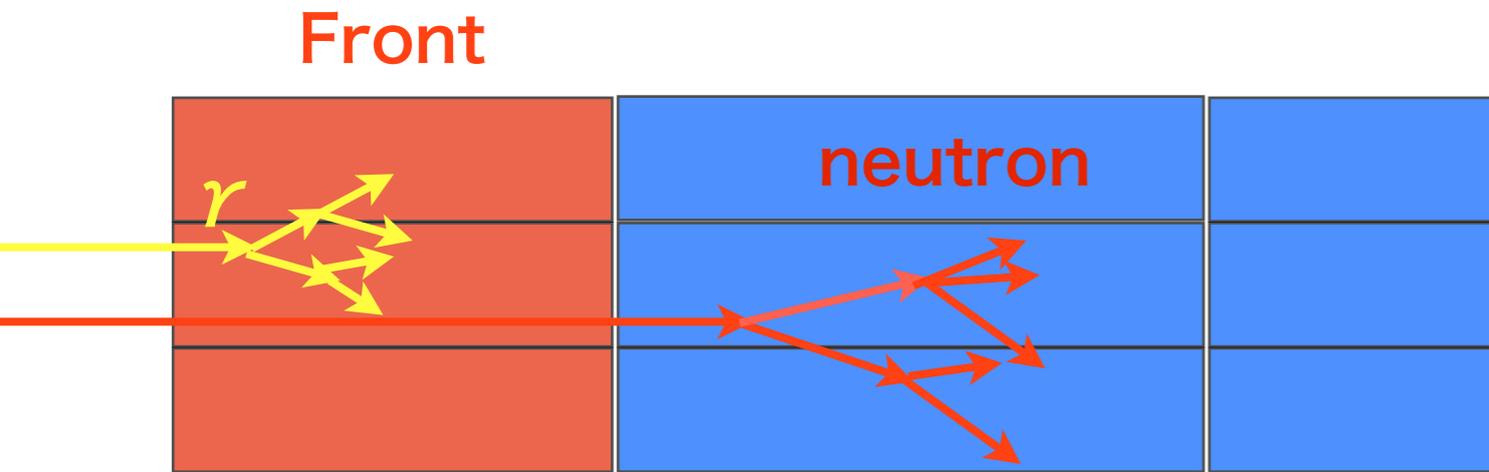
Rear



全chのcalibrationの統計誤差<2%

# FT ratioとコア中性子測定

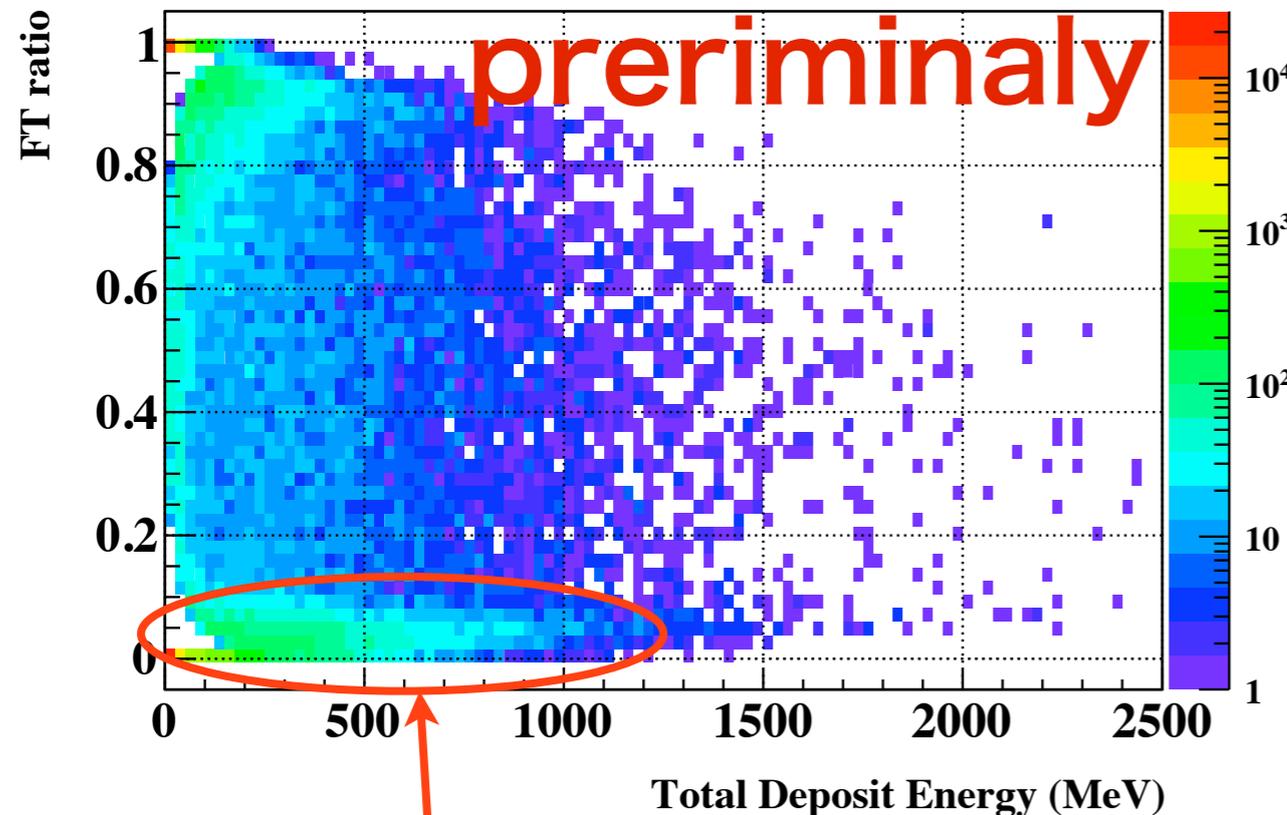
FT ratio =(Frontのenergy deposit)/(全energy deposit)



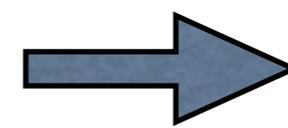
$\gamma$  : FT ratio  $\sim 1$

n : FT ratio 0 $\sim$ 1

FT ratio vs TotEdep



中性子eventが見えている

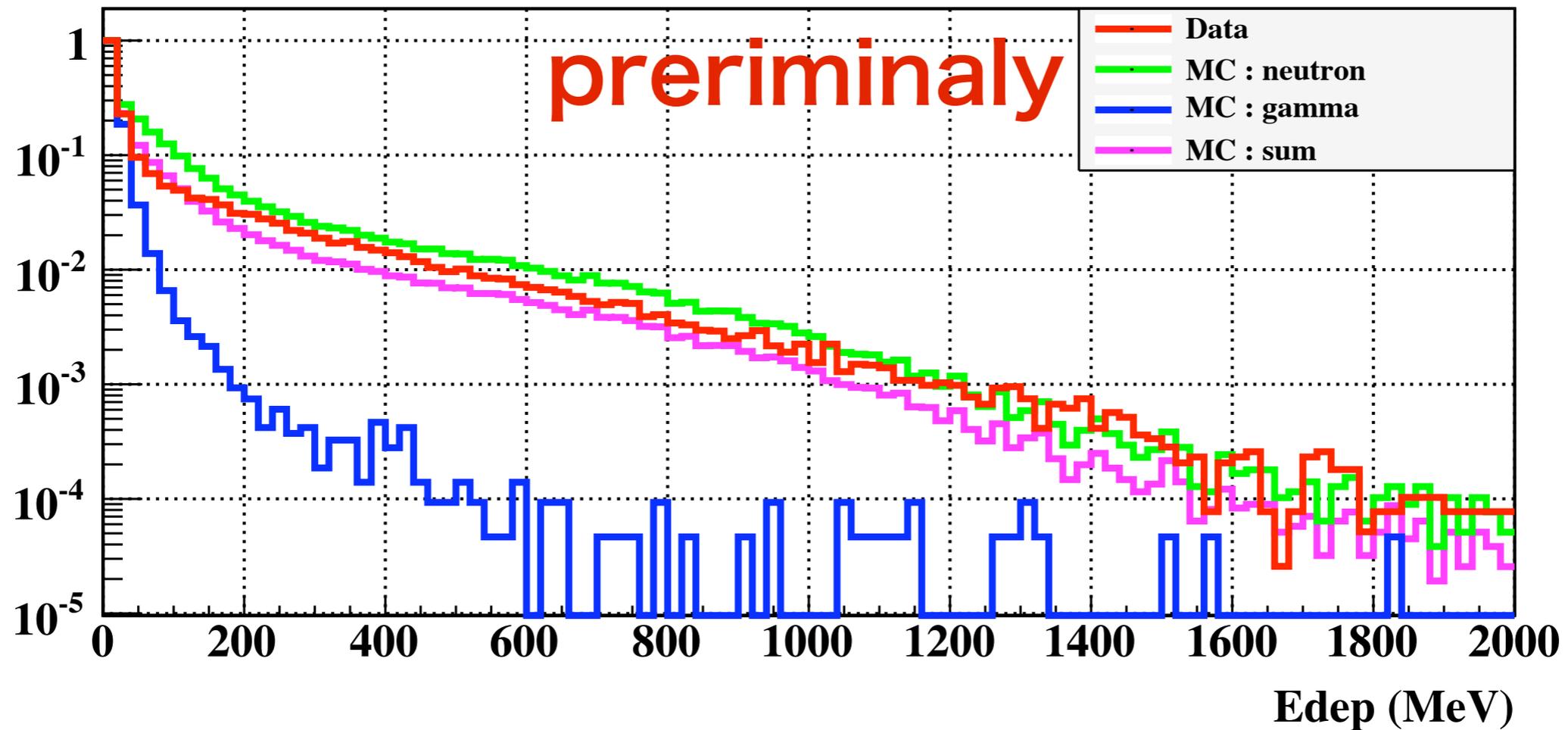


FT ratio  $\sim 0$ のevent  
は中性子event

# Total Energy deposit

data とMCのEnergy spectrum 比較 (最初のbin を1に規格化)

TotEdep



event数自体は今の所、MCとdataでFactor ~2 くらいdataの方が少ない