



COMET実験に用いる トリガー検出器の開発

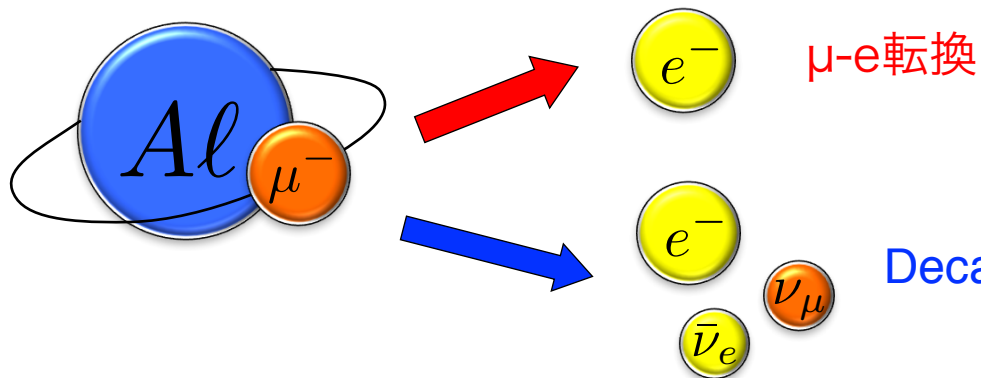


中居 勇樹
(九州大学)



- Introduction
 - COMET実験
 - トリガー検出器
 - 要求性能
- トリガー検出器の開発
 - デザイン
 - 性能評価
 - サポート構造体
(ヘリウムの対策)
 - 高放射線環境の対策
- まとめ

ミューオン-電子転換過程



単色の105 MeV/c e^-

エンドポイント ~ 105 MeV/c
 \rightarrow 主なphysics BG

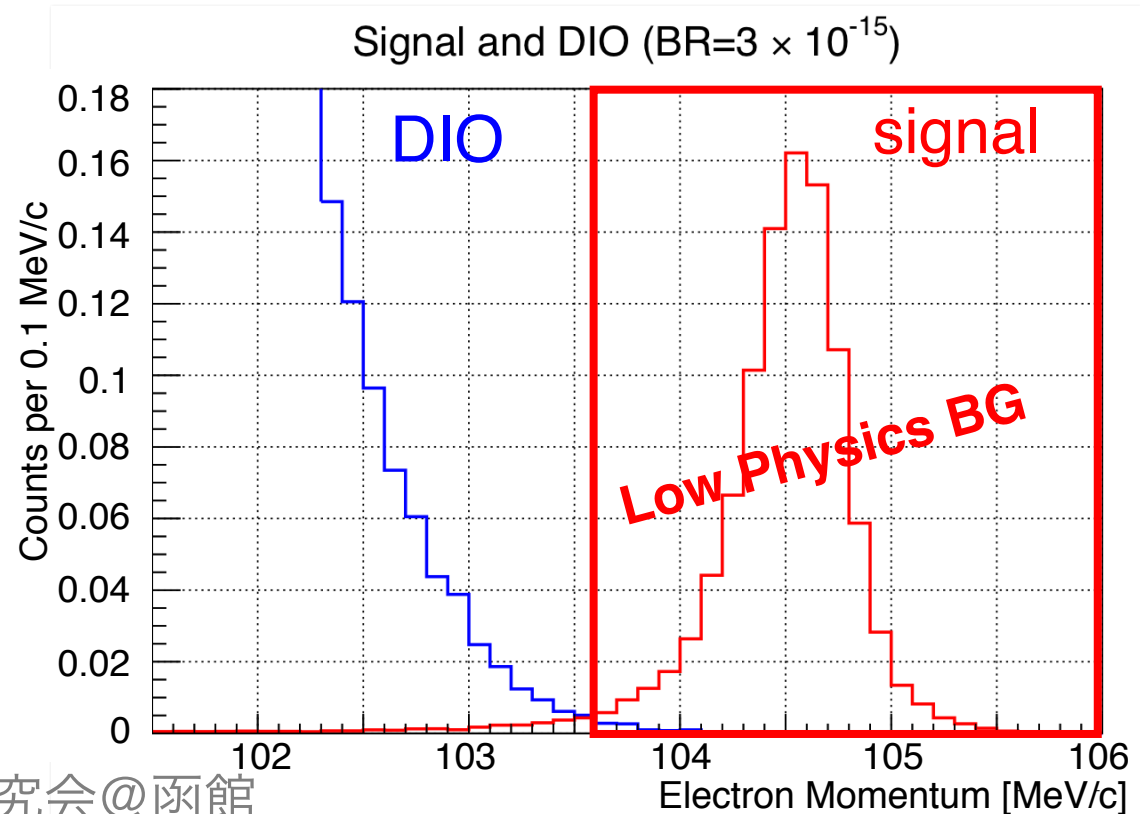
< μ - e 転換過程のメリット >

(1) 信号電子が105 MeV/c

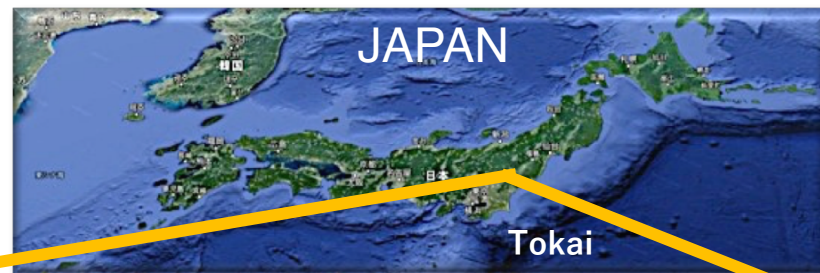
\rightarrow physics BGが少ない

(2) coincidenceが不要

\rightarrow accidental BGが無い

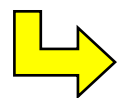


Proton Beam at J-PARC

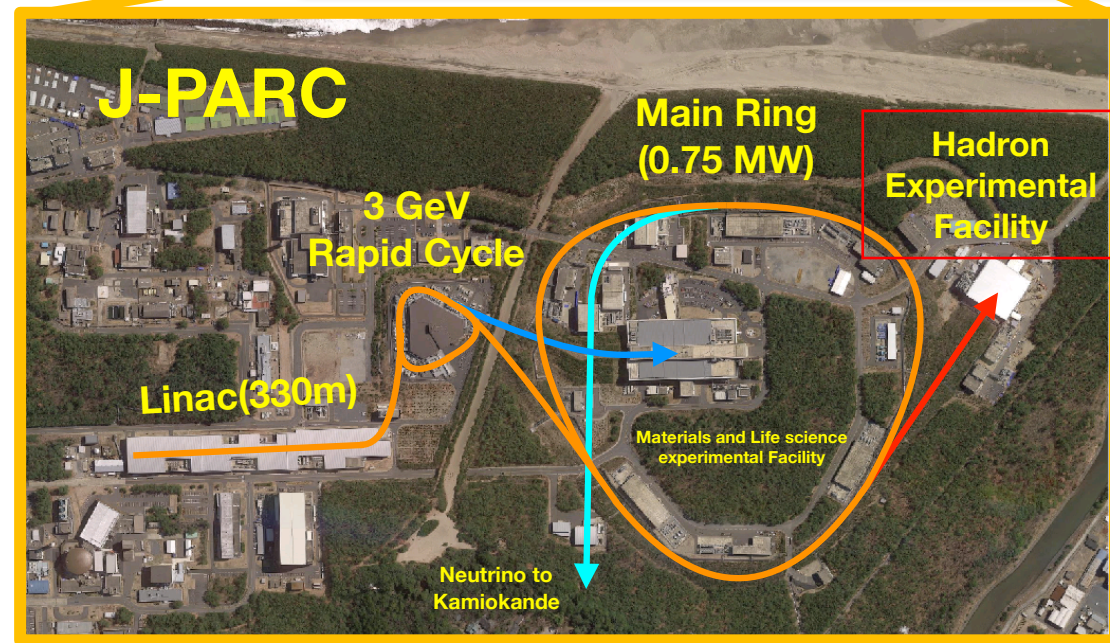
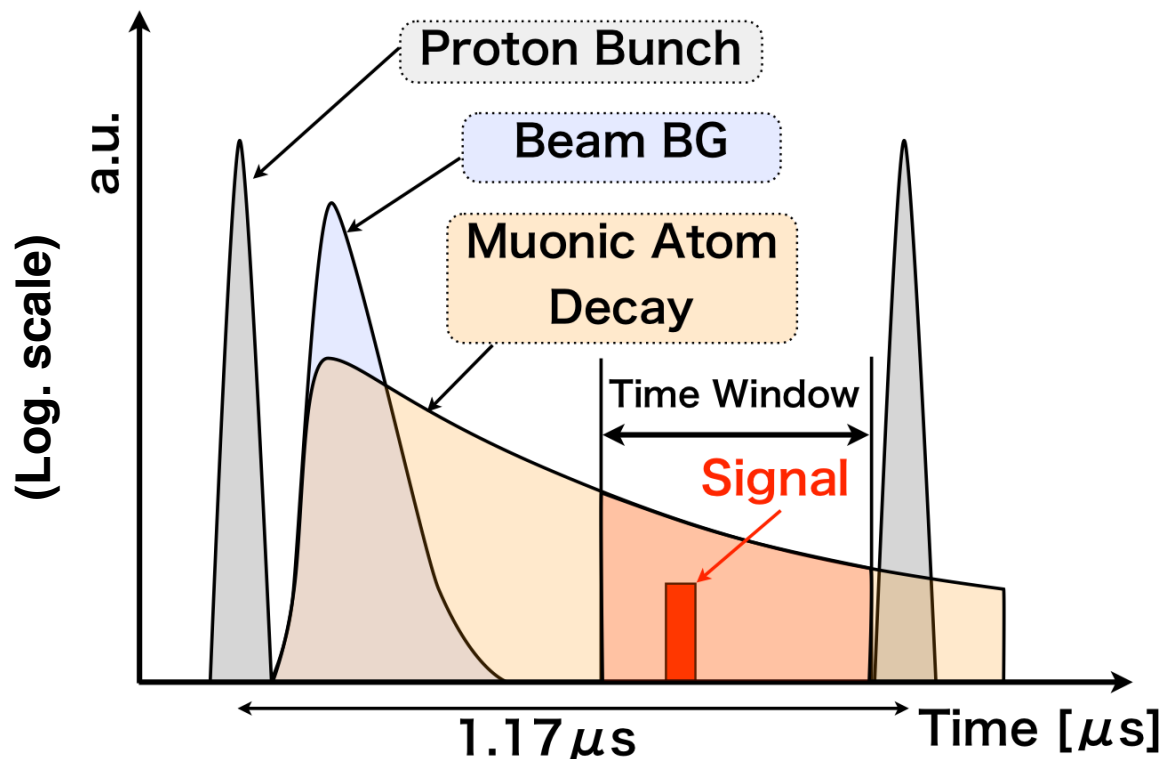


最高強度の陽子ビームを用いる

8 GeV, 3.2 kWの大強度ビーム



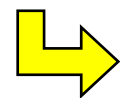
統計量の大幅な向上



パルスビームと & time windowの採用

Lifetime of muonic Aluminum : 864 ns

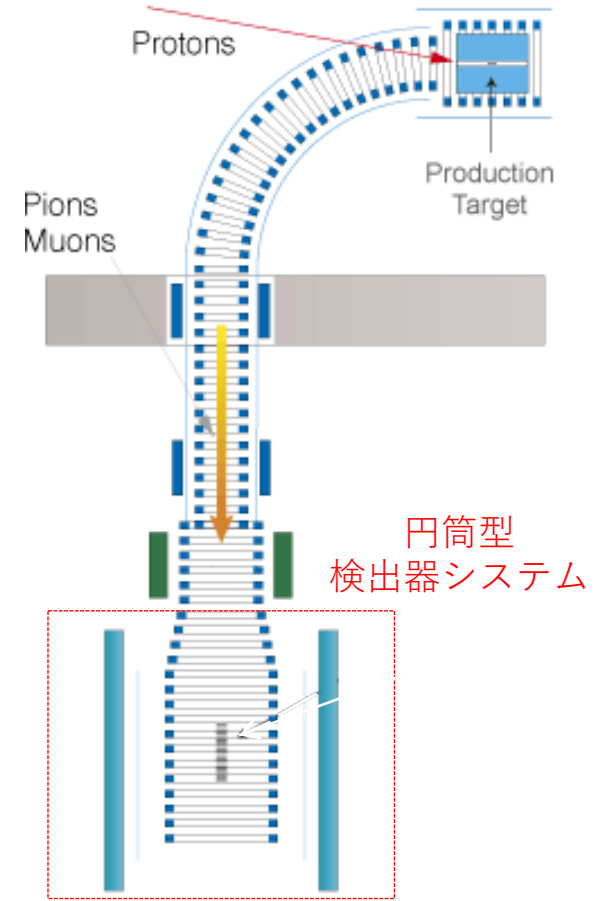
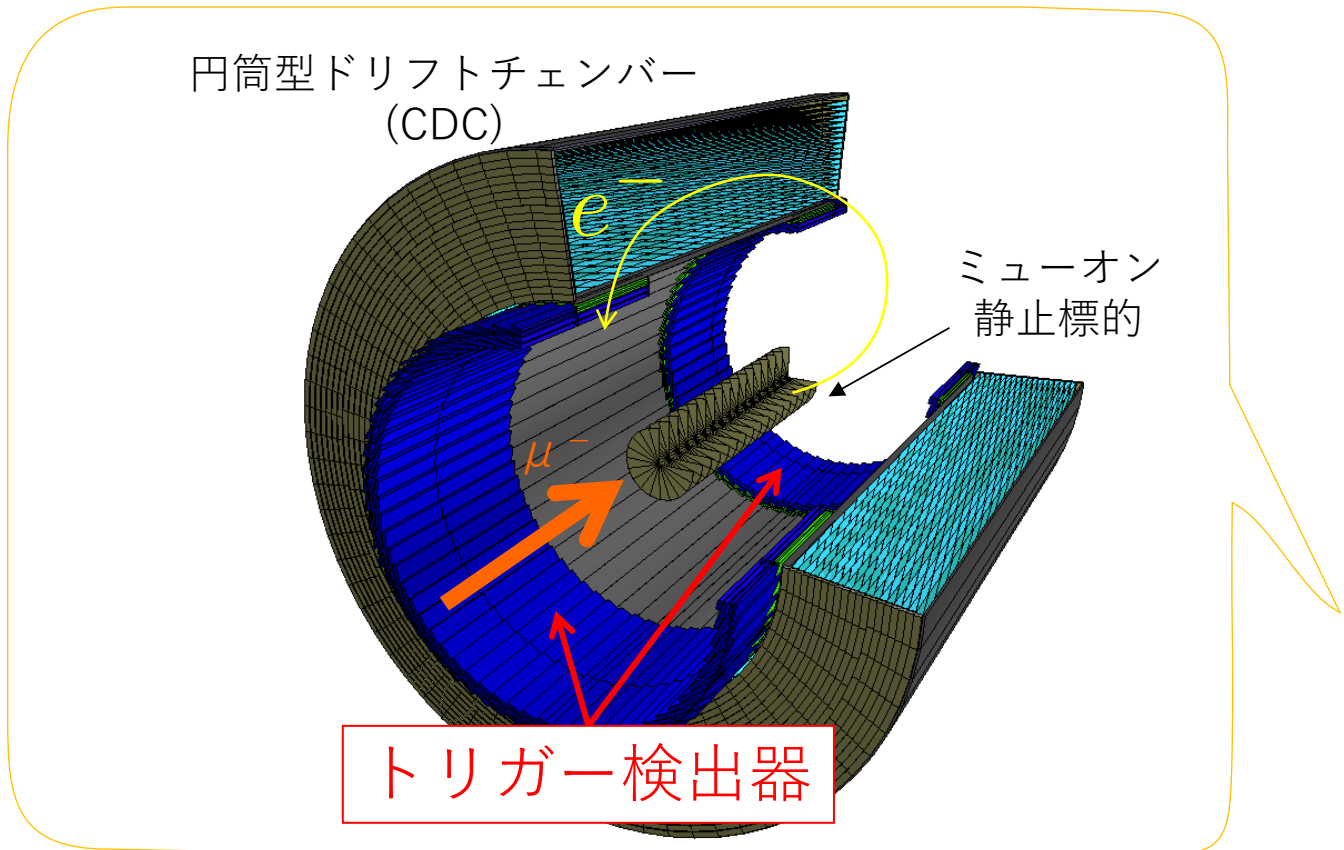
Time window : 700-1170 ns



ビーム起因のBGを大幅に削減

COMET Phase-I

- J-PARC (茨城県東海村) の大強度陽子パルスビームを利用。
 - π をソレノイドで輸送し、パルス μ^- ビームを生成。
 - μ 静止標的へ入射し、標的からの電子を円筒型検出器システムで測定。
- 約150日間で 3.2×10^{19} Proton On Target (POT)
 - 10^{-15} の感度で転換過程を探索する。(現在の上限値 x 100倍)





トリガー検出器：要求性能

- 高レート耐性：~30 kHzでの読み出し
- 信号ノイズ (S/N) 比：目標値20以上
- 時間分解能：飛跡検出器からの要求として1 ns以下
- 磁場耐性：1 T磁場中で使用するため、耐性が必要
- ヘリウム耐性：electronの多重散乱を抑えるための1気圧Heに対して、耐性が必要
- 放射線耐性： 10^{12} neutrons/cm²の中性子耐性、2 kGyのガンマ線耐性（後述）

以下、4つに分けてお話しします。

<デザイン>

<性能評価>

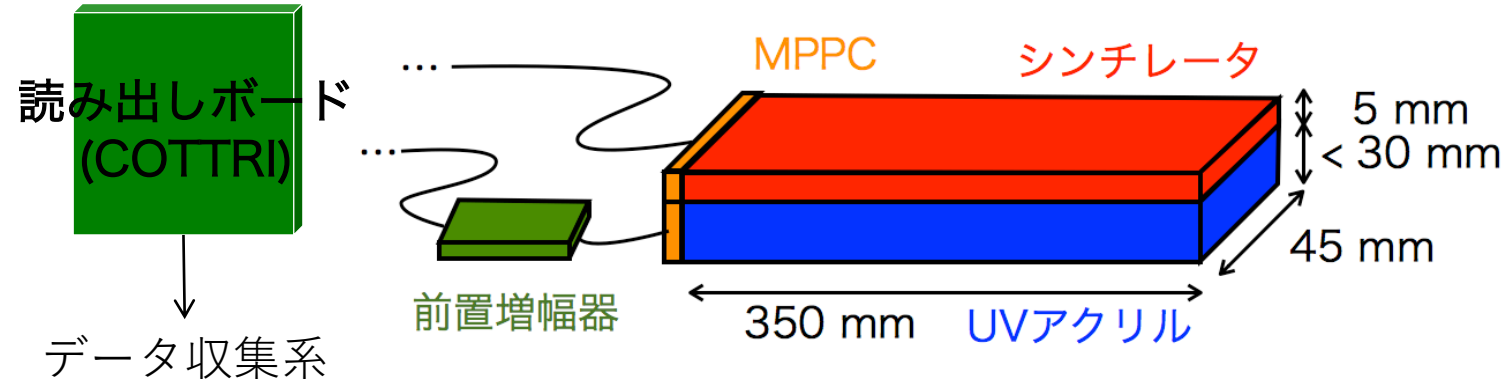
<ヘリウム耐性>

<放射線耐性>

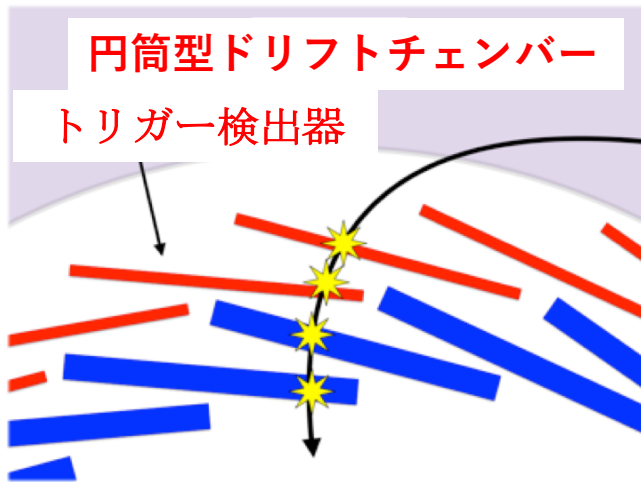
デザイン

トリガー検出器：旧デザイン

1.5年間R&Dを進め、productionの目処が付きそうだったが、放射線耐性が論外だったため白紙撤回に。
→ 修士学生1名が痛い目に会う…。



コインシデンスに対して
トリガーを生成する

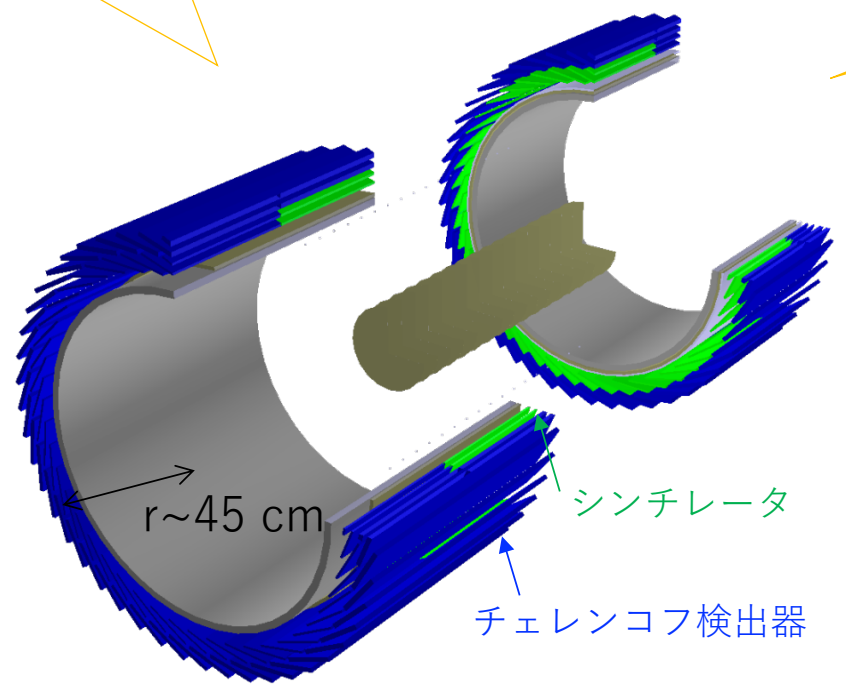
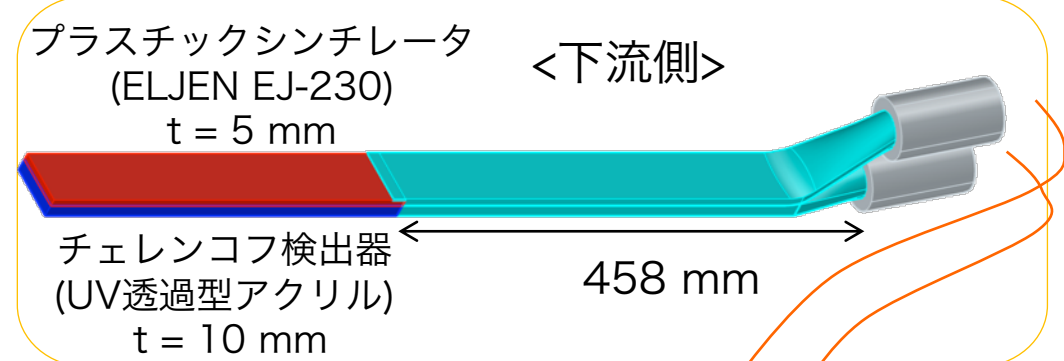
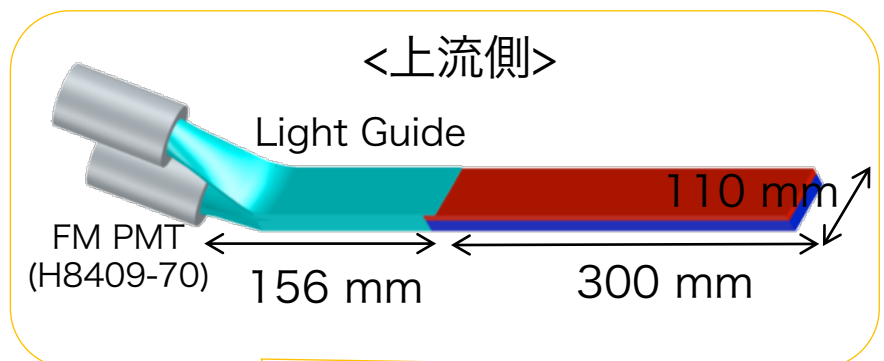


- 高レート耐性：~30 kHzでの読み出し OKデザイン上
- 信号ノイズ (S/N) 比：目標値20以上 clear
- 時間分解能：飛跡検出器からの要求として1 ns以下 clear
- 磁場耐性：1 T磁場中で使用するため、耐性が必要 OK
- 放射線耐性： 10^{12} neutrons/cm²の中性子耐性
(後から発覚) 2 kGyのガンマ線耐性 NG

敗因：放射線の見積もりをせずにデザイン決定した事

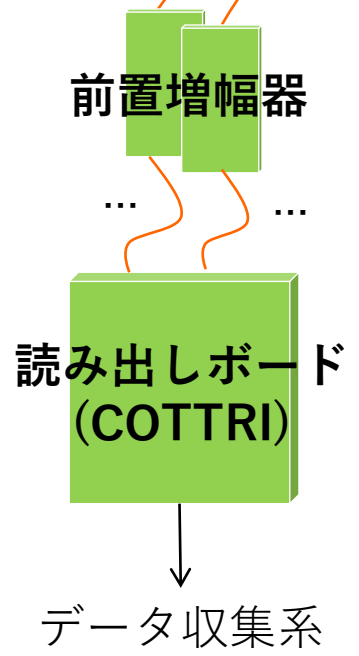
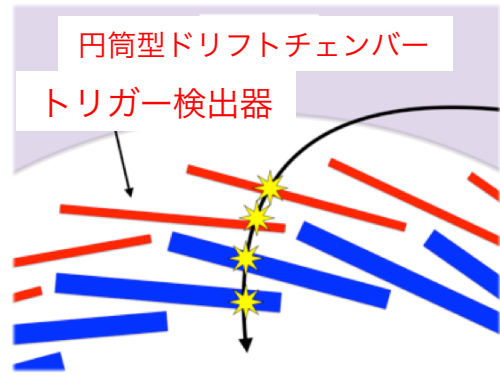
トリガー検出器：現行デザイン

高運動量の電子をトリガーし、効率的にデータを取得する



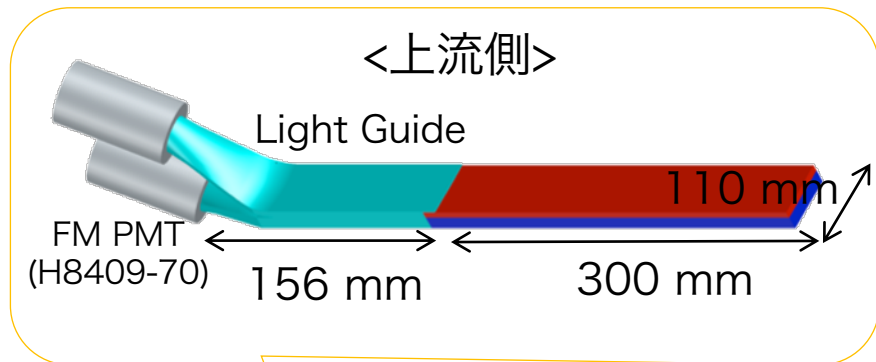
円周方向に48分割

4層にHitしたイベントに対してトリガーを発行する

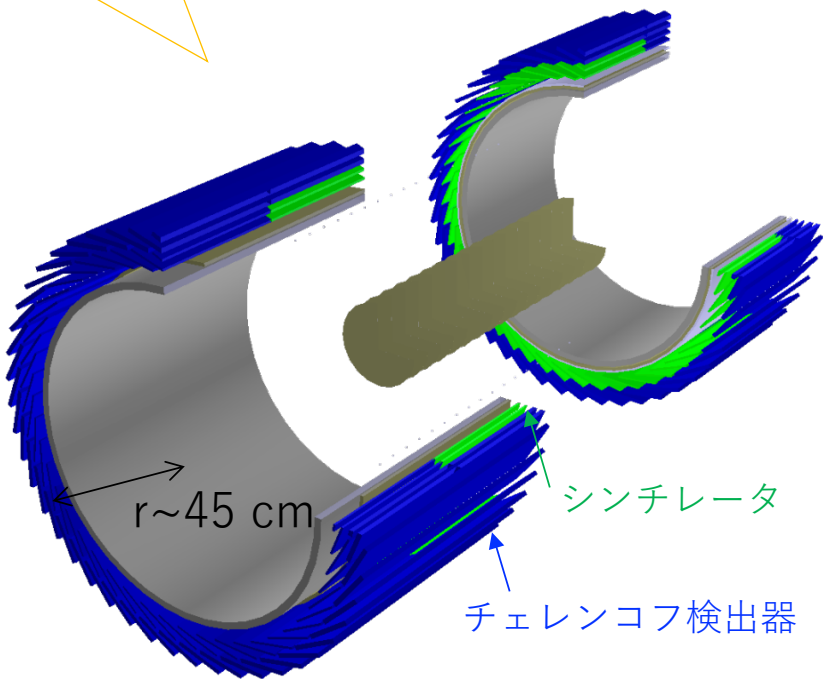
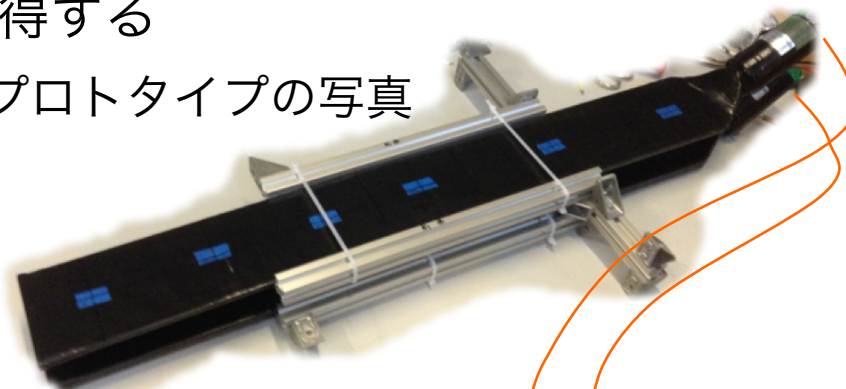


トリガー検出器：現行デザイン

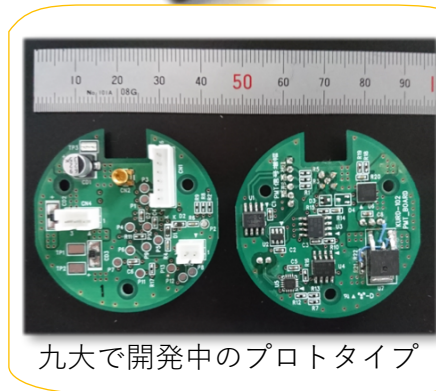
高運動量の電子をトリガーし、効率的にデータを取得する



プロトタイプの写真



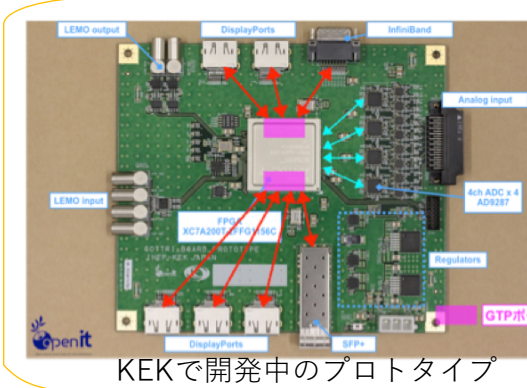
円周方向に48分割



前置増幅器

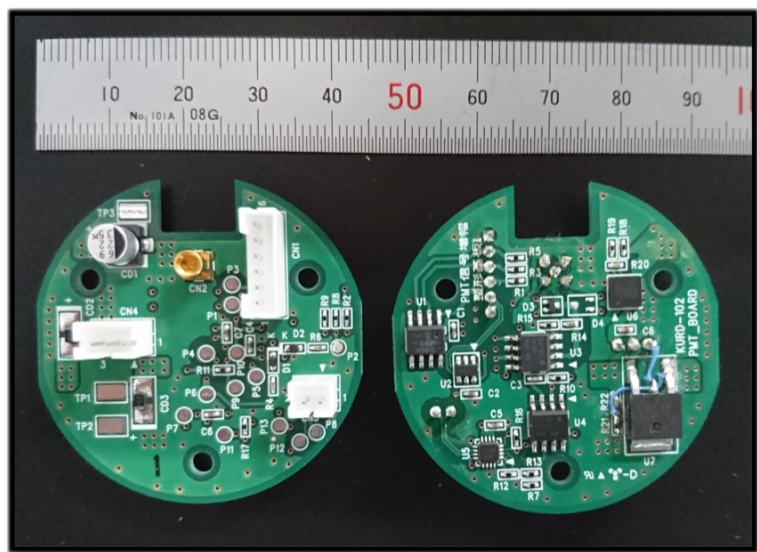
読み出しボード (COTTRI)

データ収集系



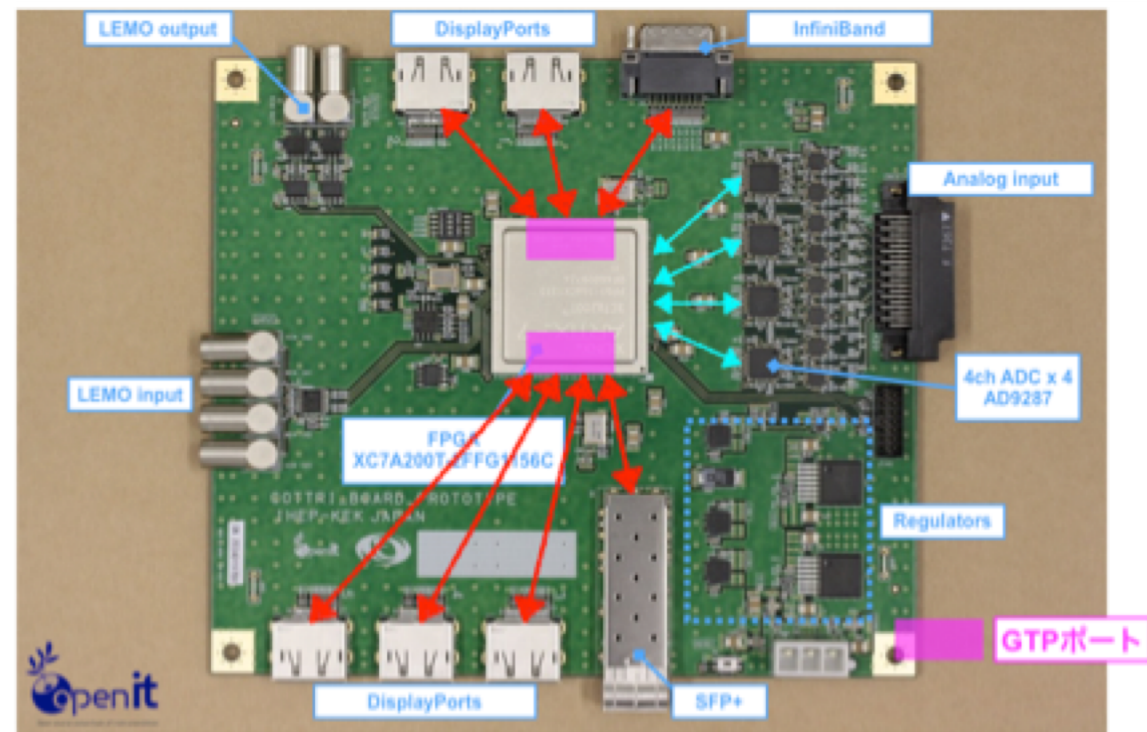
前置増幅器/読み出しエレキ関係

トリガー検出器 前置増幅器



- (1) PMTの信号を増幅し、差動出力で波形を出力
- (2) discriminator + DACを搭載しdiscriminator信号も出力
PMTの背後に取り付ける

- (1) 波形をFADCで**逐次読み出し**、デジタイズする
- (2) discriminator + DACを搭載 (予備)
- (3) discriminator信号からTDC情報を取得
- (4) FPGAで論理処理し、プリトリガーを生成
- (5) 後段のMother Boardで最終的なトリガーを生成



COTTRI board (prototype)

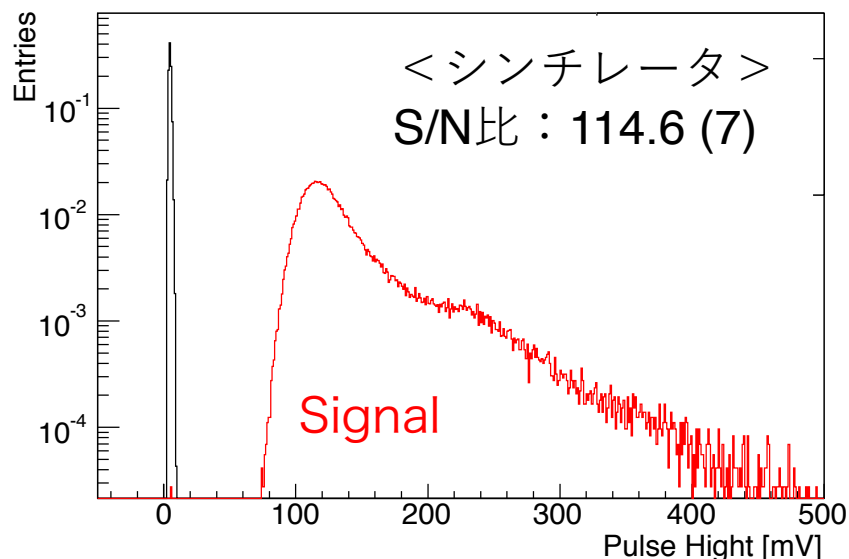
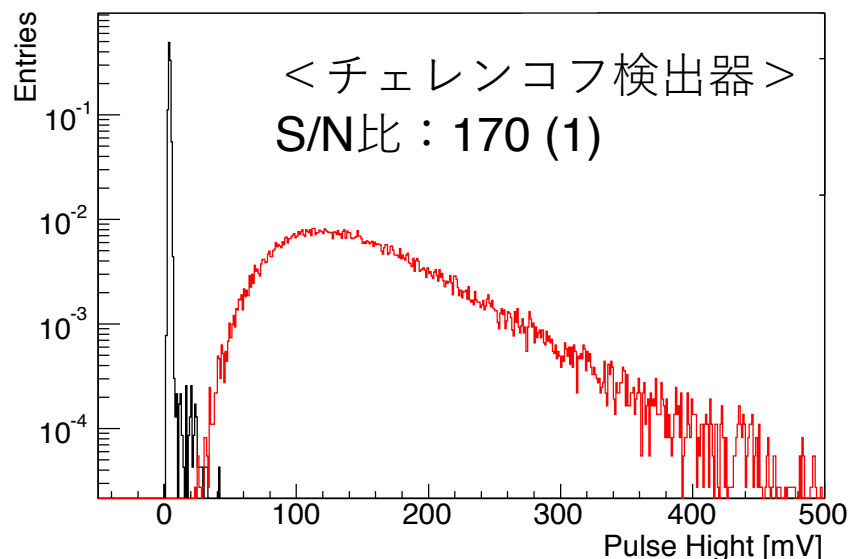
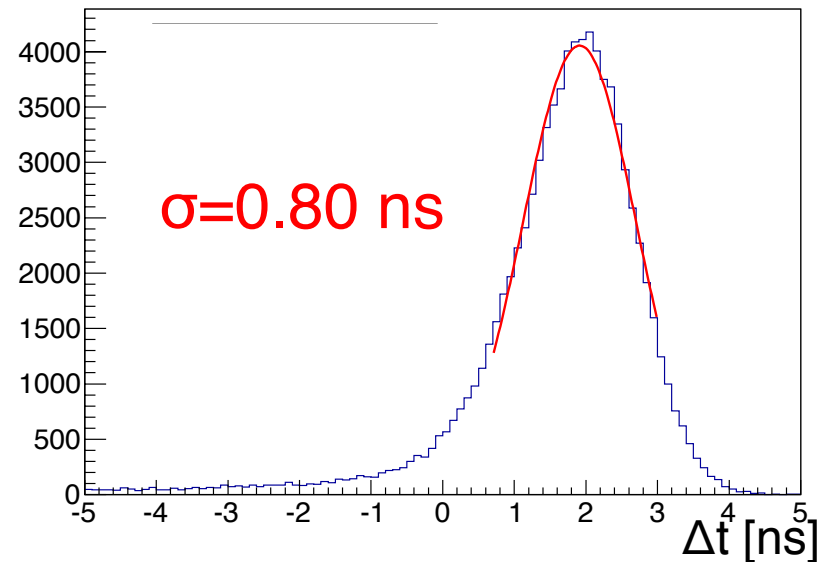
性能評価

COMET^μ_e トリガー検出器の開発：性能評価

- 115 MeVの電子ビームを用いた性能評価
- 時間分解能
 - 要求値 1 nsを満たしている
- 信号ノイズ (S/N) 比
 - 目標値 20を十分に上回っている

トリガー検出器の要求性能を満たす

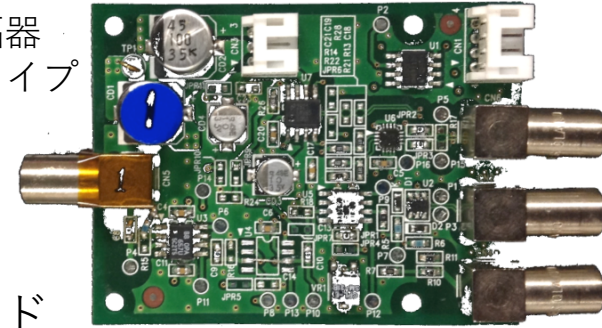
シンチレータとチェレンコフ検出器の時間差



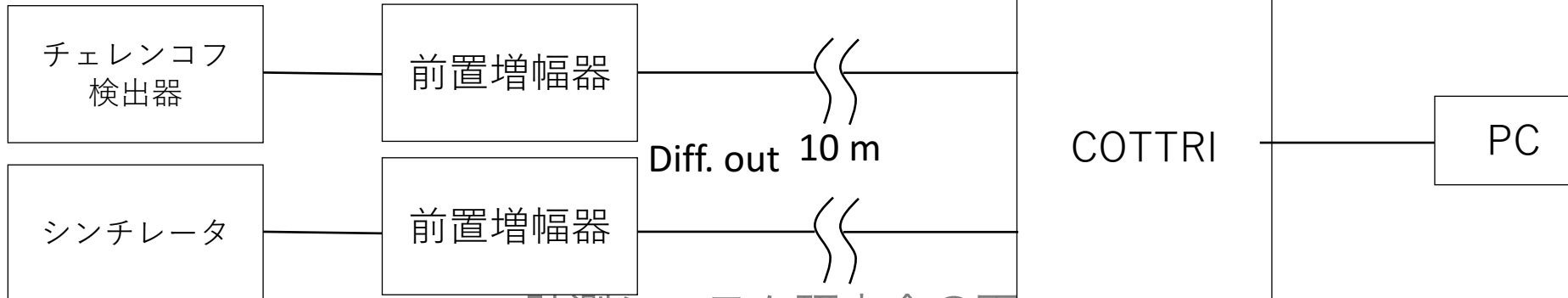
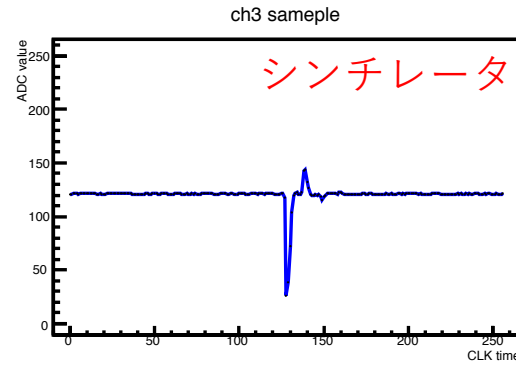
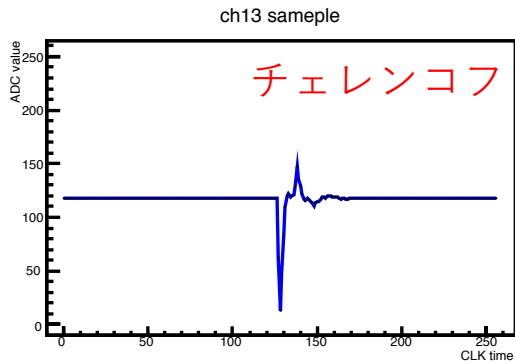
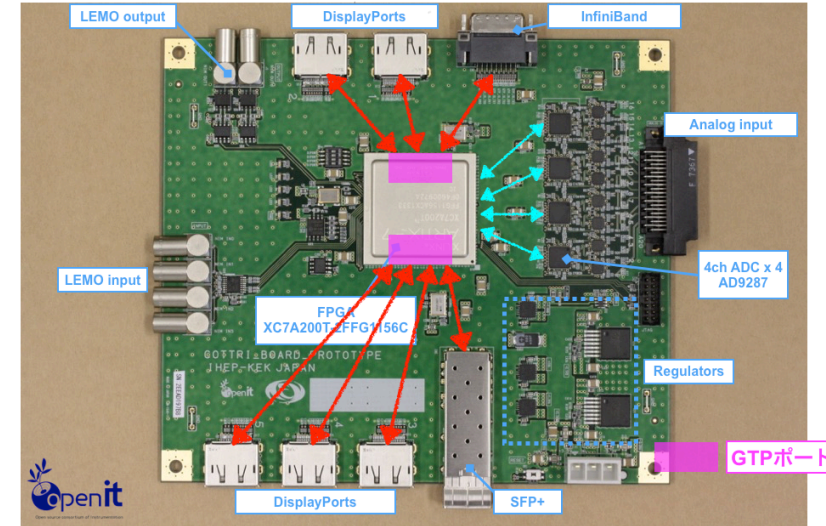
前置増幅器とCOTTRIの接続試験

- 宇宙線を用いて旧プロトタイプの前置増幅器とCOTTRIの接続試験を行った
- 1モジュールを想定してチェレンコフ検出器とシンチレータを使用
 - PMT Gain : 1 T磁場中で想定される電圧で動作
 - トリガー：2層のコインシデンス
 - 記録された波形を解析し、性能を評価した

前置増幅器
旧プロトタイプ



COTTRIボード

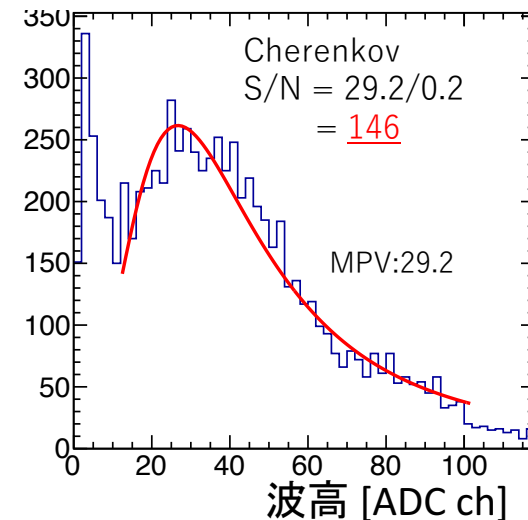
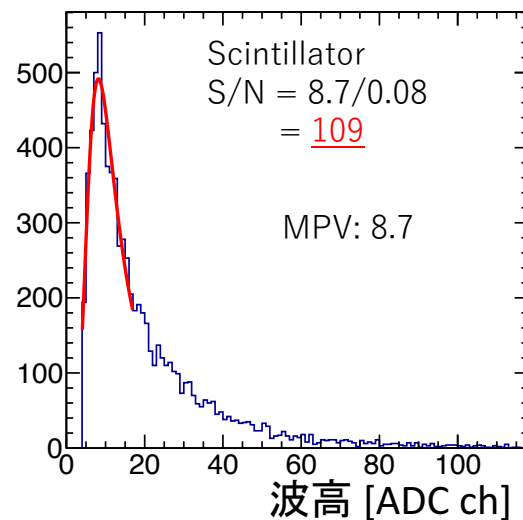


OMET^μ_e 前置増幅器とCOTTRIの接続試験

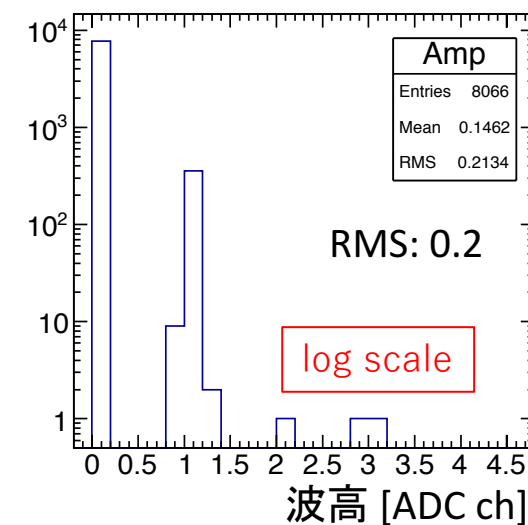
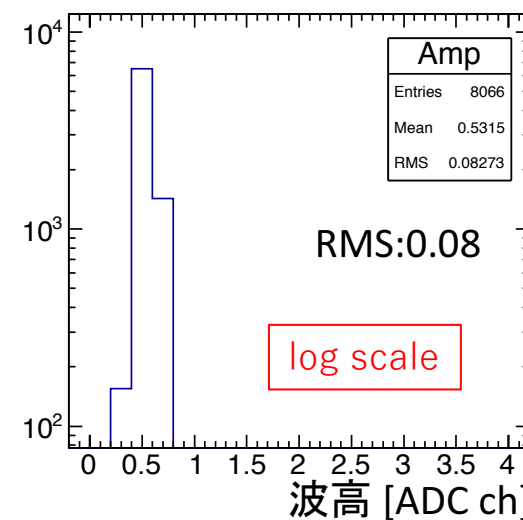
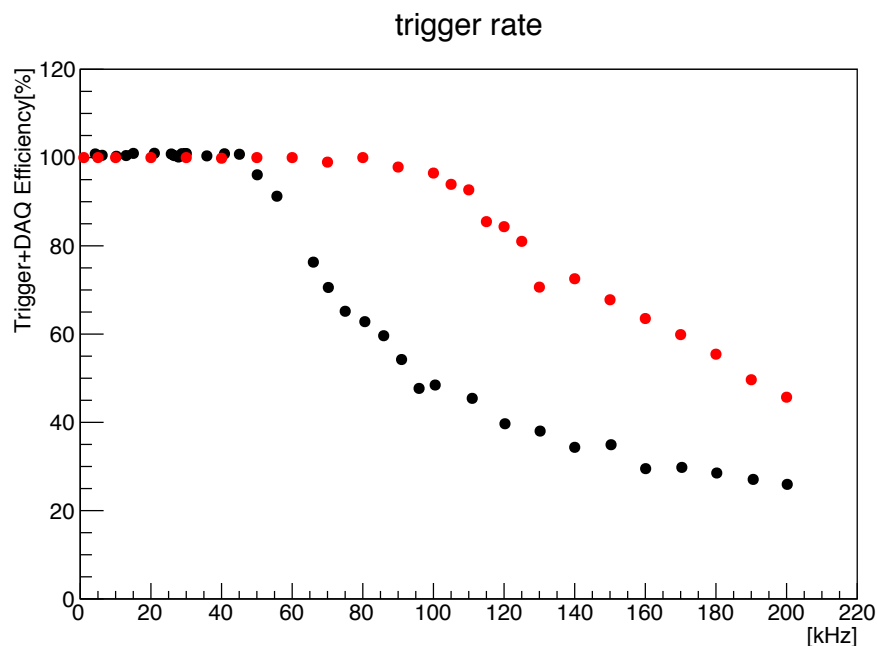
signal

取得した波形の波高を用いてS/N比を評価。
 → 十分なS/N比を達成している事を確認。

COTTRIボード自体のトリガーレート耐性試験も実施。
 (JPS2017秋, 14pS35-02, 宮崎祐太)
 SiTCPの上限での動作を確認できている。
30 kHzで99.9%, 60 kHzで99%以上のefficiency



pedestal



サポート構造体 (ヘリウムの対策)

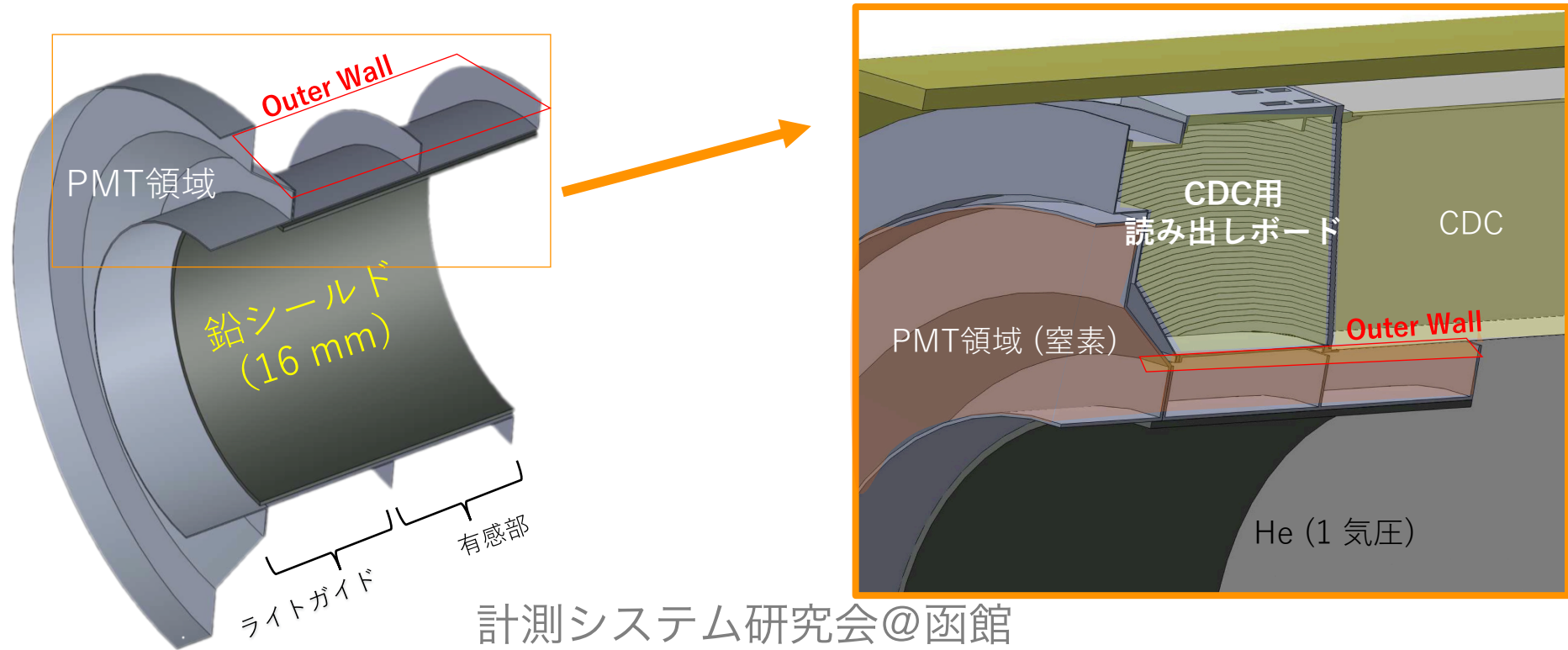
サポート構造：役割(1)

検出器を支持する以外にも役割を持たせている

① HeガスによるPMTの劣化対策

→ Heを遮蔽し、窒素を循環させて希釈・排気

一般的にはエバールなどの樹脂フィルムやAlマイラーで遮蔽することもあるが、我々は容器+ネジ部分をエポキシで埋めて密閉する。

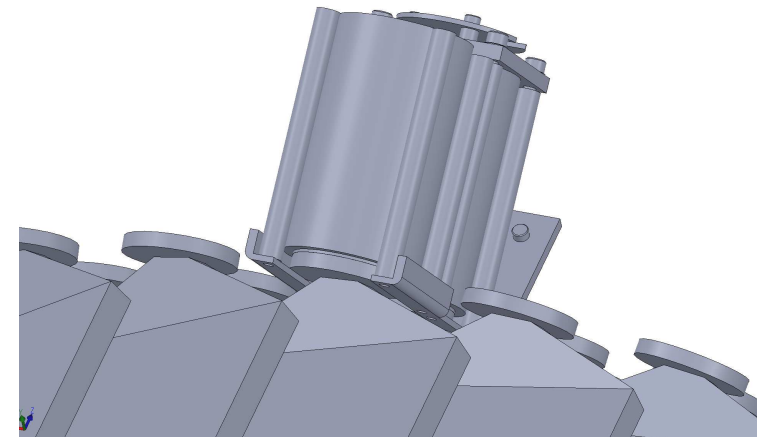
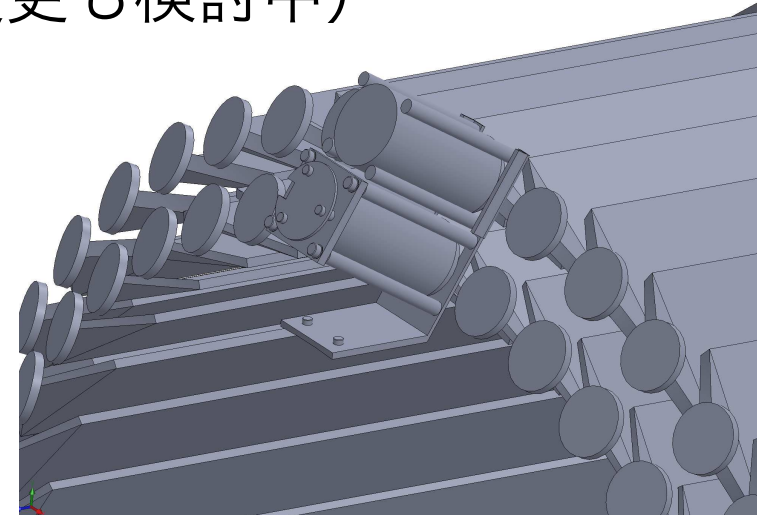
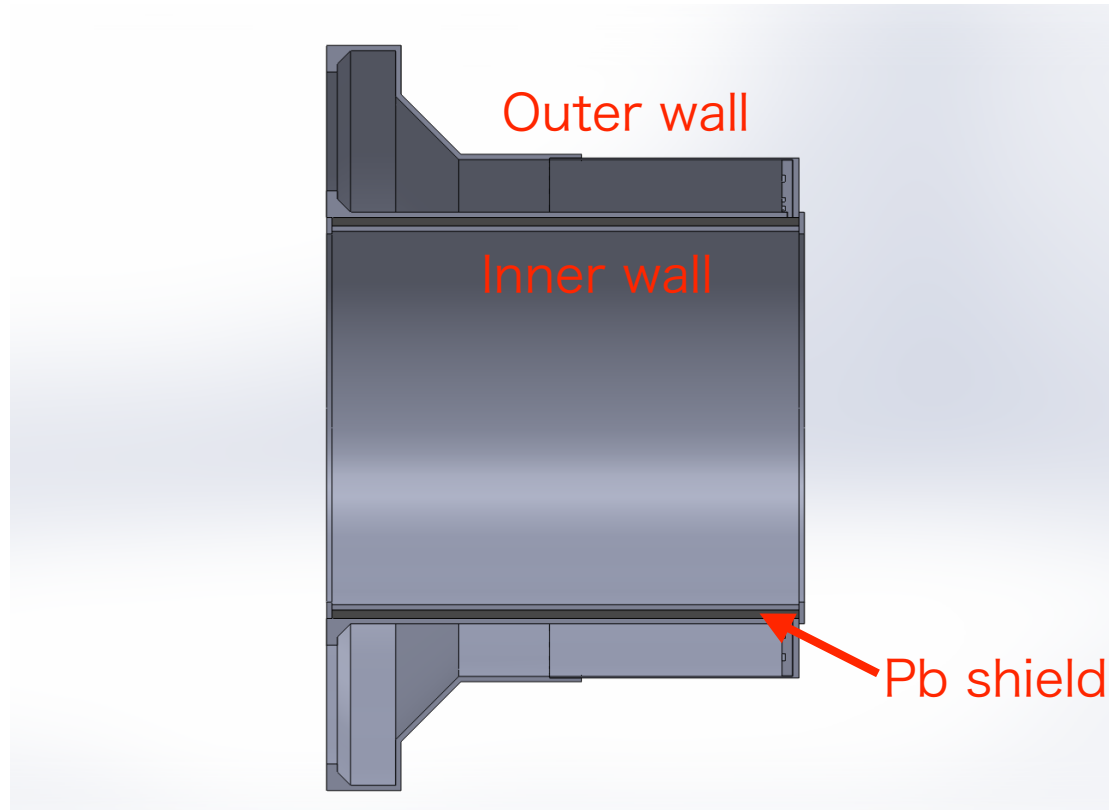


サポート構造：役割(2)

② ガンマ線による不要なトリガーへの対策

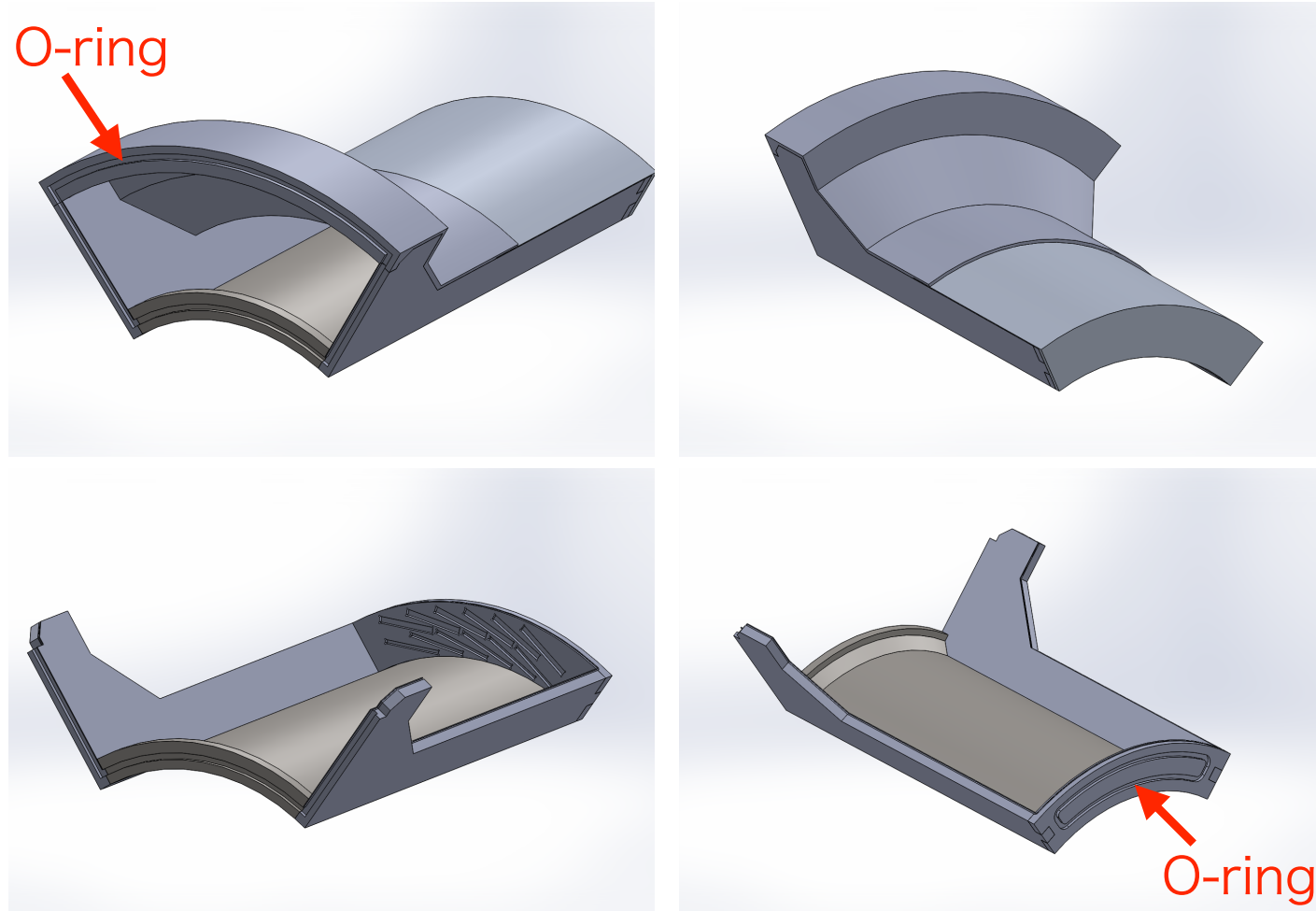
→ 鉛シールドでガンマ線を遮蔽し、低減する

材質には非磁性ステンレスを使用予定（アルミへの変更も検討中）



サポート構造：

ヘリウム遮蔽性能については1/8プロトタイプを製作して評価予定。
integration手法の確立などもstudy予定。



放射線耐性

Geant4を用いた放射線量の見積もり

大強度陽子ビームを固定標的に入射 → μ 以外にの粒子が大量に生成される
放射線レベルは高くなる

Geant4を用いて以下4箇所での吸収線量と中性子流量を見積もった。

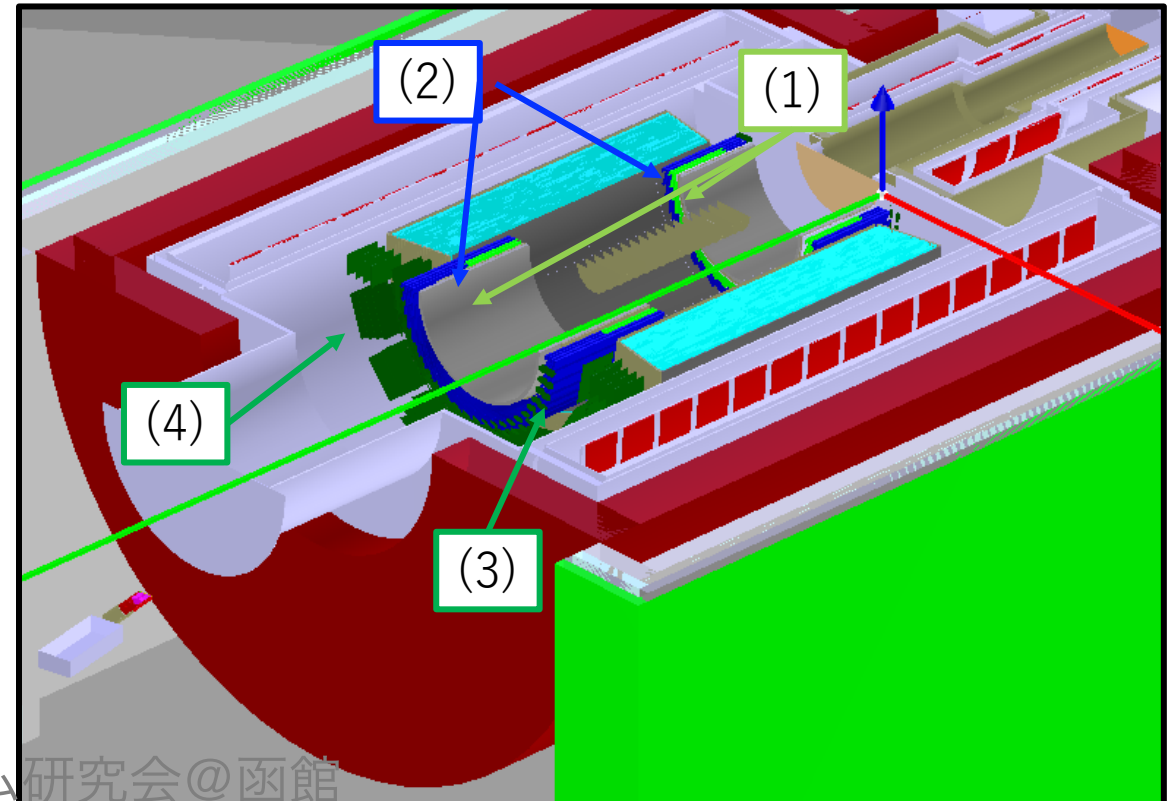
- (1)トリガー検出器 (シンチレータ, 以下CTH Sc.)
- (2)トリガー検出器 (チェレンコフ検出器, CTH Ch.)
- (3)トリガー検出器 (前置増幅器, CTH FE)
- (4)CDC読み出しエレキ部 (CDC Elec.)

<中性子流量>

各部での中性子数を取得し、面積で規格化して評価。

< 吸収線量 [Gy] >

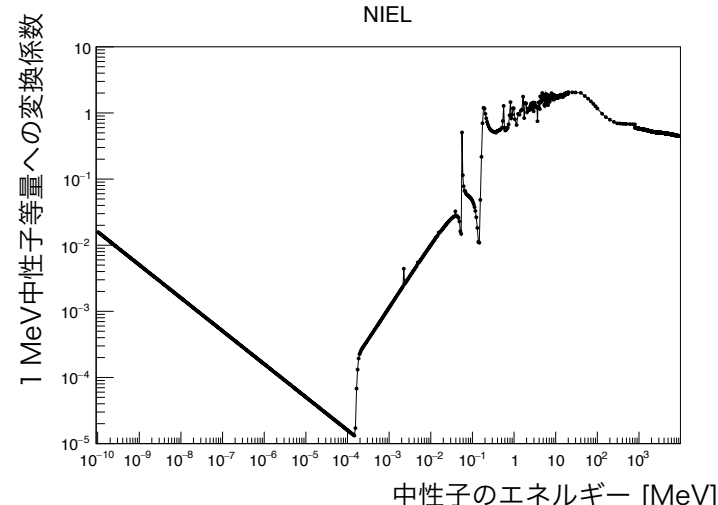
各部の質量とenergy depositから計算。



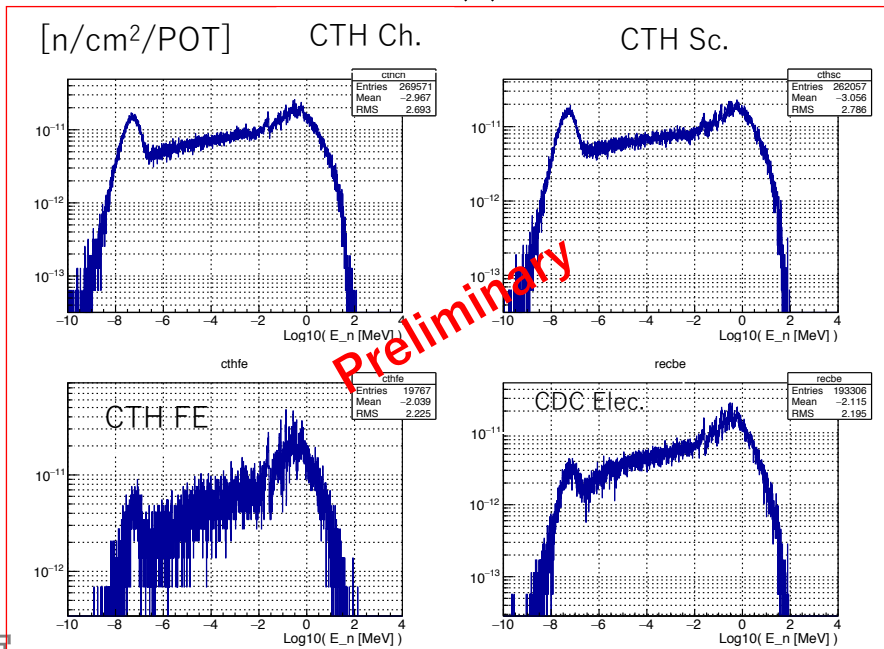
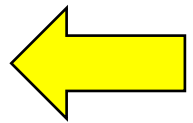
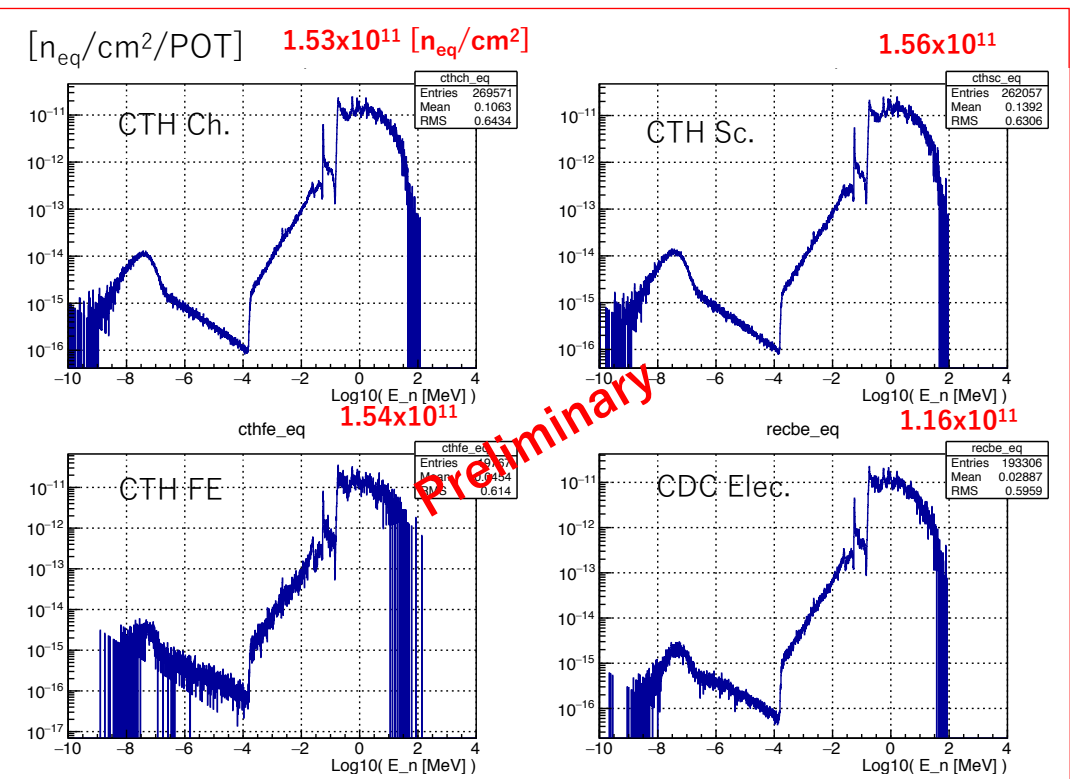
Geant4を用いた放射線量の見積もり

中性子のエネルギーによってSiに与えるダメージが異なる。
 → 1 MeV中性子等量 (n_{eq})に補正して中性子流量(n_{eq}/cm^2)を評価。

~ $10^{11} n_{eq}/cm^2$ と見積もられている。
 (PHITSでもconsistentな結果が得られている。)



A. Vasilescu (INPE Bucharest) and G. Lindstrom (University of Hamburg),
 "Displacement damage in silicon",
 on-line compilation

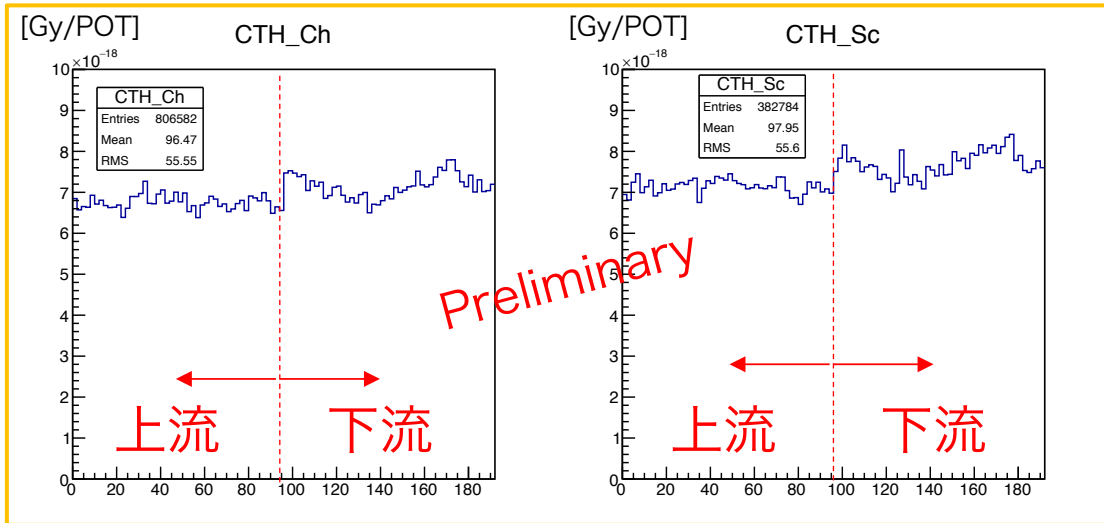


Geant4を用いた放射線量の見積もり

- 各部の吸収線量は **~200 Gy**
 - <CTH Ch. & Sc. >
 - 静止標的に近いため検出器の線量がやや高く、230 Gy前後。
 - 下流側は磁場が広がっているため、beamの影響を受けやすい。→ ~250 Gyと若干高い。
 - <CTH FE & CDC Elec. >
 - Electronicsは静止標的から遠くに配置されるため <150 Gy。

ガンマ線についてもPHITSでconsistentな値が得られている。

average



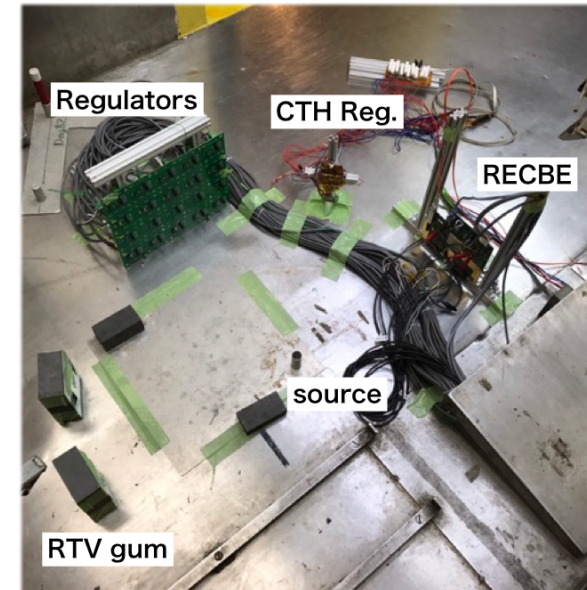
Parts	Dose [Gy]	Fluence [n_{eq}/cm^2]
CTH Ch.	222.4	1.53×10^{11}
CTH Sc.	237.2	1.56×10^{11}
CTH FE	149.0	1.54×10^{11}
CDC Elec.	141.4	1.16×10^{11}

中性子/ガンマ線照射試験

- 放射線耐性試験として、ガンマ線/中性子照射試験を実施
 - 中性子：神戸大学、ガンマ線：東京工業大学、大阪大学、九州大学
- 試験では、安全係数10を含めた放射線を照射
 - 中性子： 10^{12} neutrons/cm²
 - ガンマ線：2 kGy



タンデム加速器（神戸大学）



照射setup@コバルト60照射施設
(大阪大学産業科学研究所)

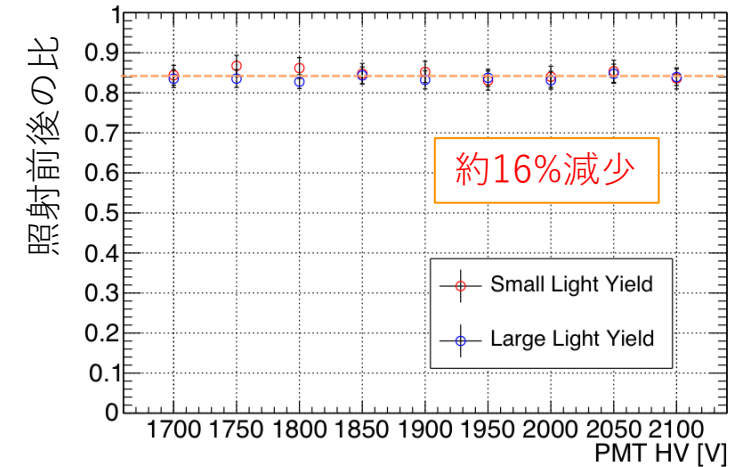
OMET^μ_e 各コンポーネントの放射線耐性

FM PMT : 出力信号が中性子照射によって16%
 γ 線照射によって78%減少
 → 窓材などの変更で対応予定。

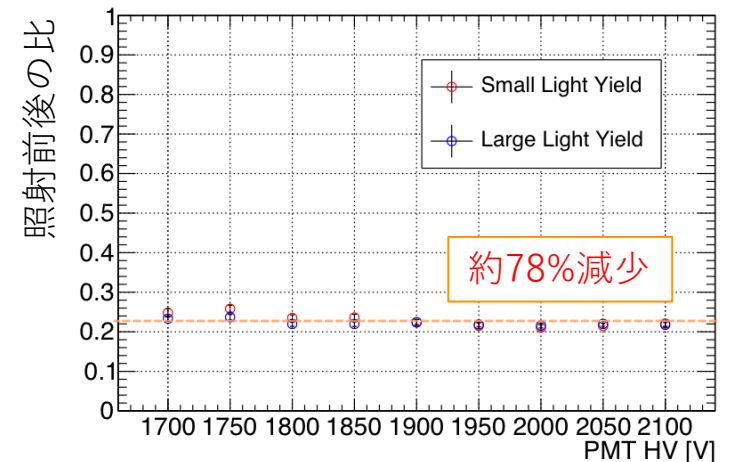
前置増幅器 : 中性子照射によってレギュレータ(-5 V出力)が故障。
 → 代替品を選定中 しかし、難航中…。
 (negative typeのモデルが少ない…。)

	Company	Model	Gamma (2 kGy)	Neutron (10 ¹² n/cm ²)
1 st group	Linear Technology	LT3032	dead	/
		LT1964	dead	
		LT3090	dead	
		LT3015	dead	
		LT3091	dead	
2 nd group	ON semiconductor	MC7905	To Be Tested	alive
	STMicroelectronics	LM337		alive
		L79 series		alive
	microchip	TC59		alive
		MIC5270		dead
		MIC5271		alive
	新日本無線	NJM2828		alive?
	analog devices	ADP7182		alive

中性子

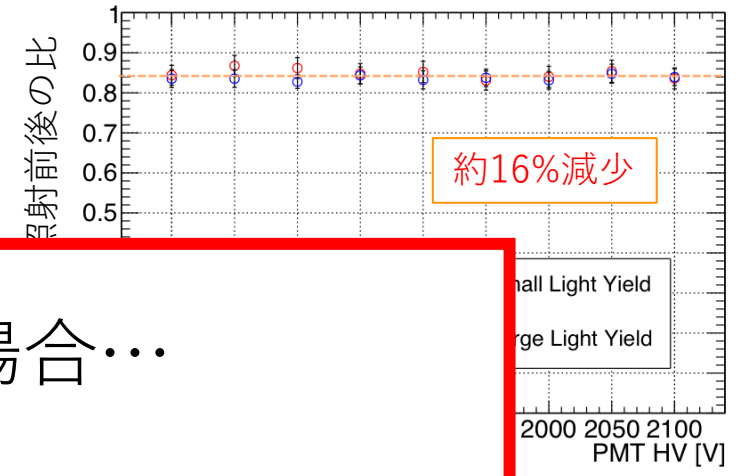


ガンマ線



OMET^μe 各コンポーネントの放射線耐性

中性子

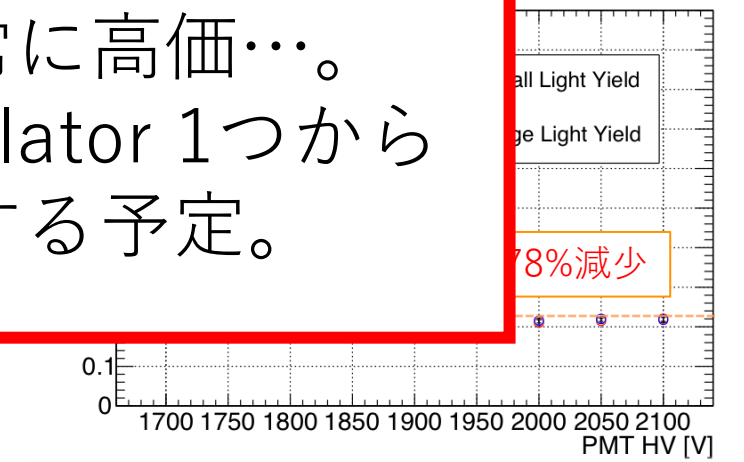


FM PMT : 出力信号が中性子照射によって16%
 γ 線照射によって78%減少
 → 窓材などの変更で対応予定。

前置増幅器 : 中性子照射によってレギュレータ(-5 V出力)が故障。
 → 代替品 (negative)

市販品で耐性を持つ製品がない場合…
 → 放射線耐性型の使用を検討中。

しかし、~6-7万/regulatorと非常に高価…。
 → 電圧分配基板を作成し、Regulator 1つから複数の前置増幅器へ電圧を供給する予定。



	Cor			
1 st group	Li Tech			
2 nd group	ON sem			
	STMicro			
	microchip	TC59	To Be Tested	alive
		MIC5270		dead
		MIC5271		alive
	新日本無線	NJM2828	alive?	
	analog devices	ADP7182	alive	

- COMET実験に使用するトリガー検出器の開発を進めている。
 - (MPPCを用いた旧デザインでは放射線耐性で棄却。)
 - PMTを用いたデザインを進めている。
 - 性能面 (検出器の時間分解能、S/N比、エレキの転送レート) での要求値はクリアしていることを確認した。
 - 環境面での要求はstudy中。
 - ヘリウム対策はサポート内に空間を確保し、密閉、空気を循環させる。プロトタイプで遮蔽性能などを評価する予定。
 - 放射線耐性は負電圧レギュレータの選定で難航中。放射線耐性型の使用も検討中。



Transport Solenoid



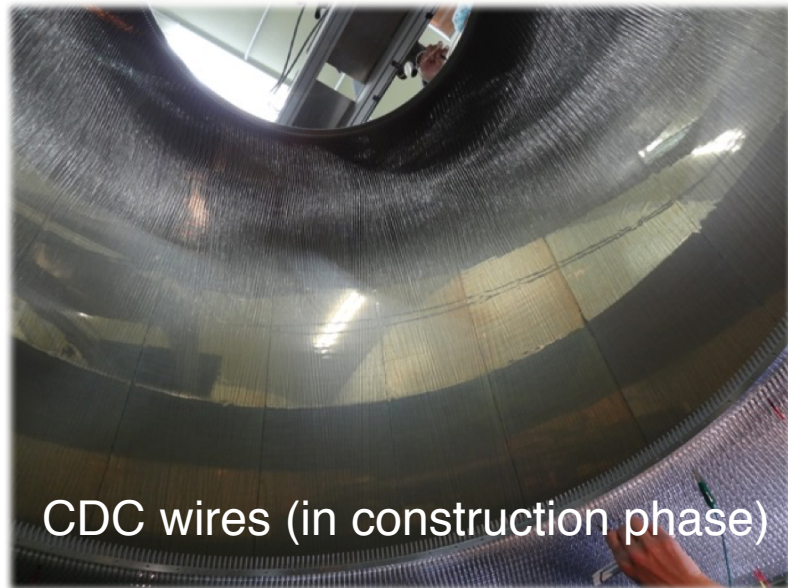
COMET Collaborators
(176 collaborators)



Beam Line



CDC wires (in construction phase)



Thank you!

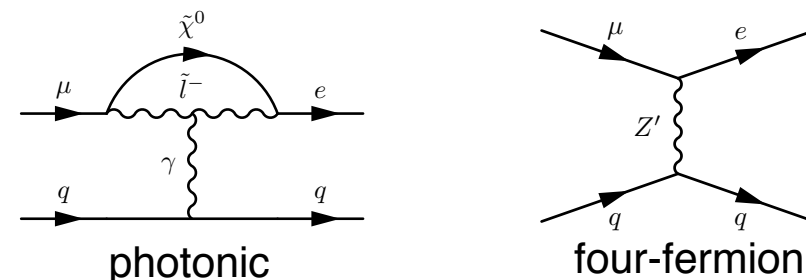
our mascot, COMET-chan



backup slides



CLFV and μ -e Conversion



CLFV processes are good probes for BSM search.

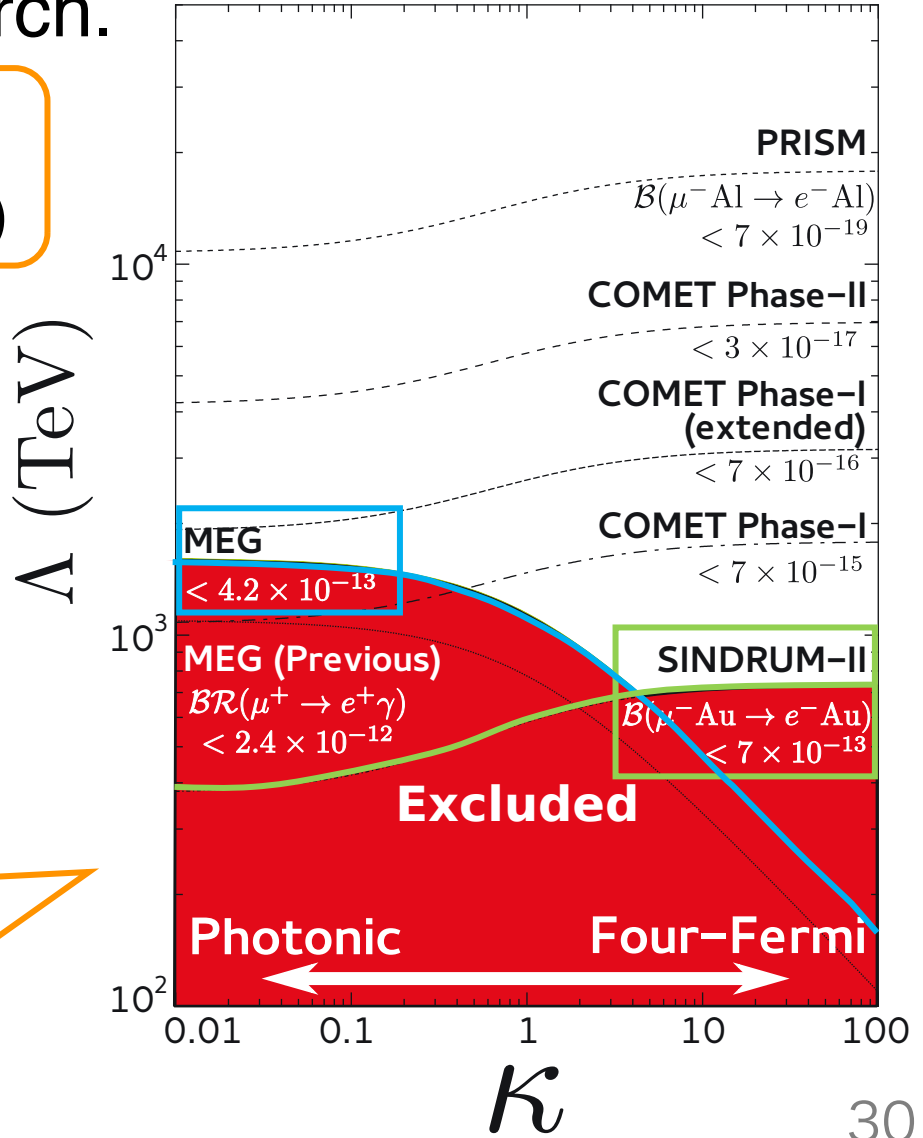
BSM : $O(10^{-15})$
 SM : $< O(10^{-50})$

< Current Limits of CLFV (90% C.L.) >

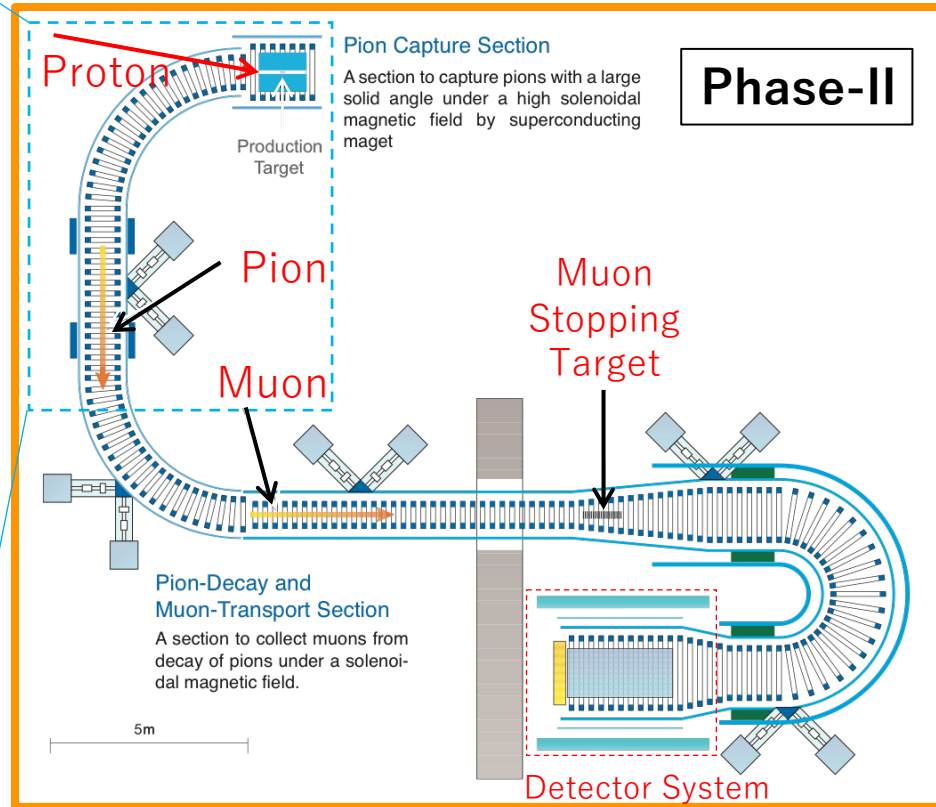
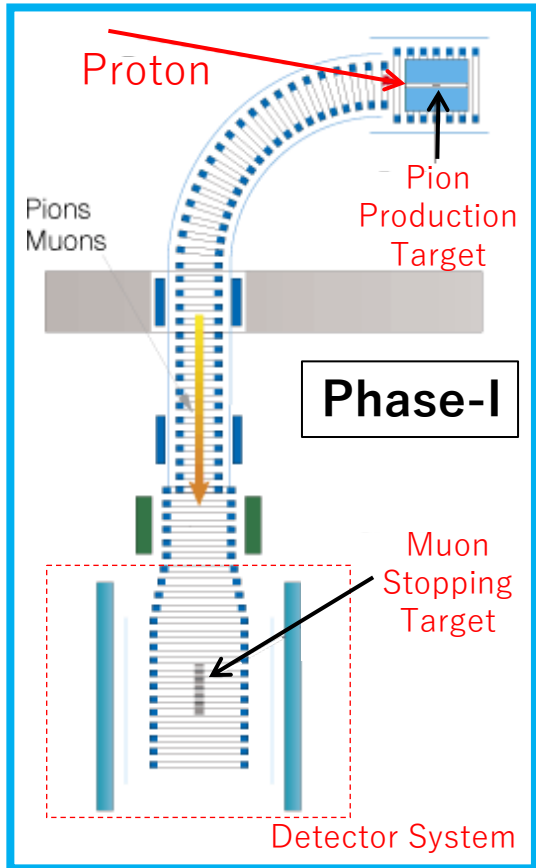
$$\mu \rightarrow e + \gamma : < 4.2 \times 10^{-13} \text{ (MEG)}$$

$$\mu + N \rightarrow e + N : < 7 \times 10^{-13} \text{ (SINDRUM II)}$$

$\mu \rightarrow e\gamma$: photonic
 $\mu N \rightarrow eN$: photonic & four-fermi
 ➡ **Combined result can distinguish physics models.**

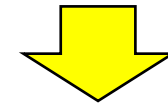


Staging approach



< Phase-I > start in 2018 or 2019

- (1) **Beam measurement** $\sim 1-2$ weeks
-> study of the new beam line
- (2) **Physics measurement** \sim half year
with sensitivity, $O(10^{-15})$
(improvement of ~ 100)



< Phase-II > start in 202X

Physics measurement
with the highest sensitivity, $O(10^{-17})$
(improvement of **10,000**)

Preparation of the
COMET Phase-I is on going!



Detector System (CyDet)

Physics measurement (in Phase-I)

Cylindrical Drift Chamber (CDC)

consists of 20 stereo layers
~15,000 field wires, ~5,000 sense wires
momentum resolution : < 200 keV/c

<Performance of the prototype>

requirement

Spatial resolution : **< 200 um at 1 T** 200 um

Completed construction! (June 2016)

Under Commissioning with cosmic ray

Cylindrical Trigger Hodoscopes (CTH)

plastic-scintillators and Cherenkov detectors
measures event time

identifies electron events

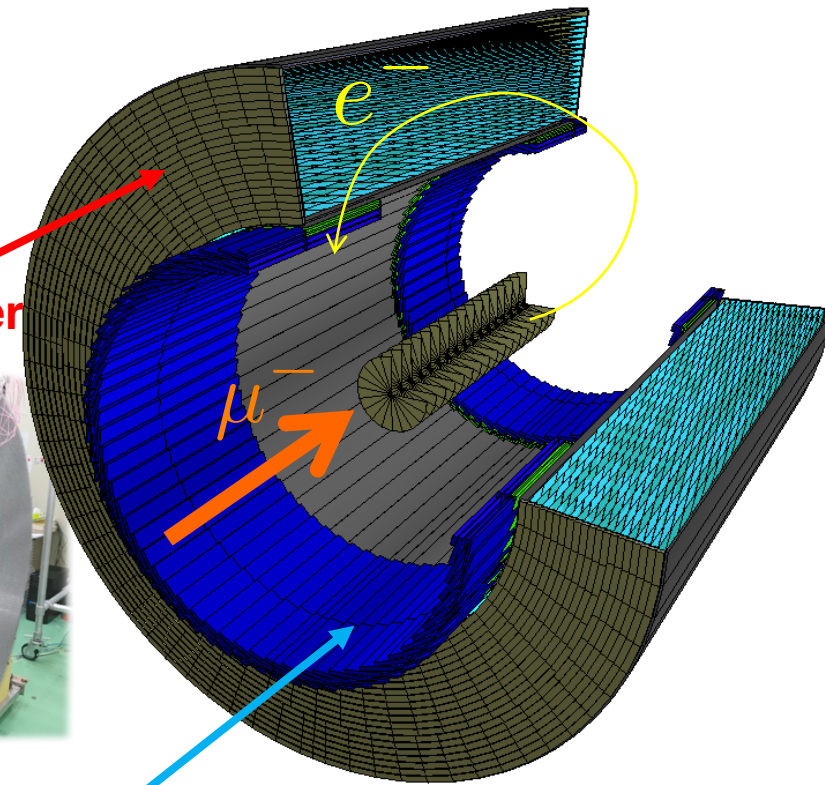
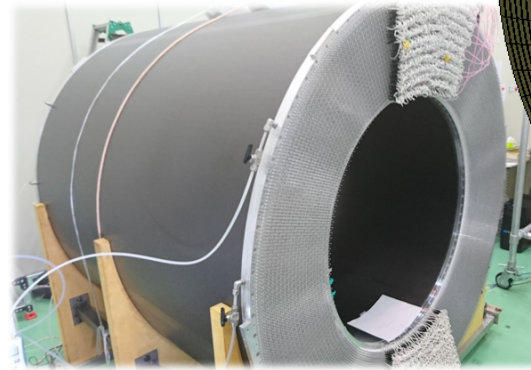
<Performance of the prototype>

requirement

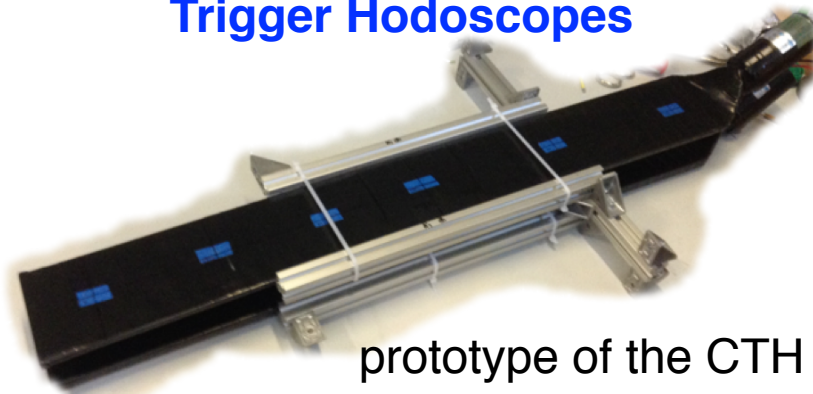
Time resolution : **< 0.8 ns** 1 ns

S/N ratio : **S/N > 100** 20

Cylindrical Drift Chamber

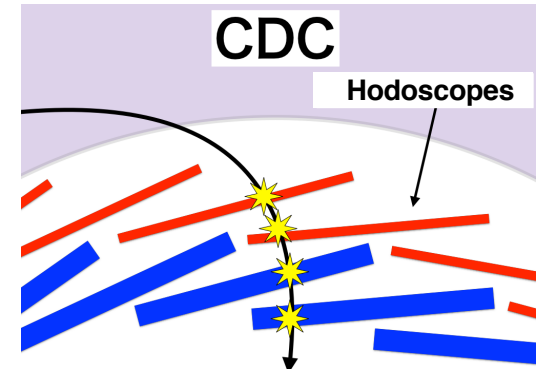


Cylindrical Trigger Hodoscopes



prototype of the CTH

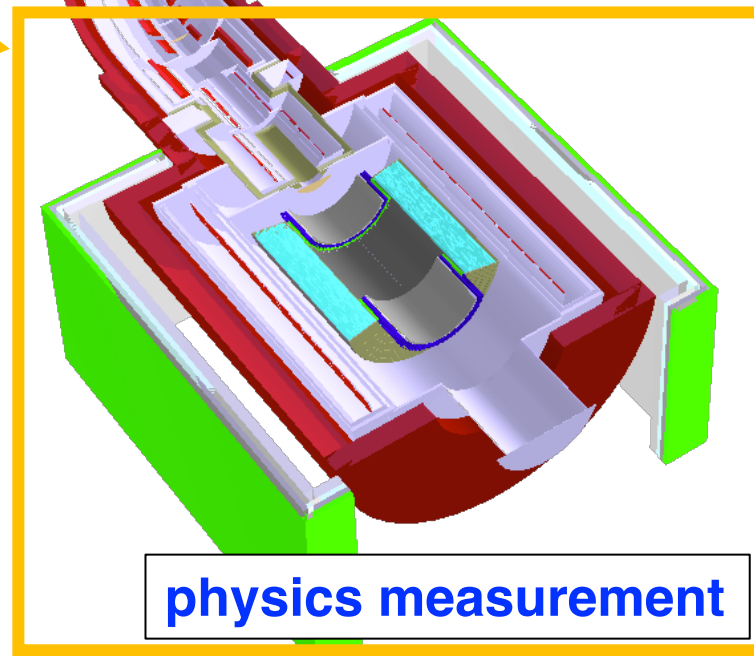
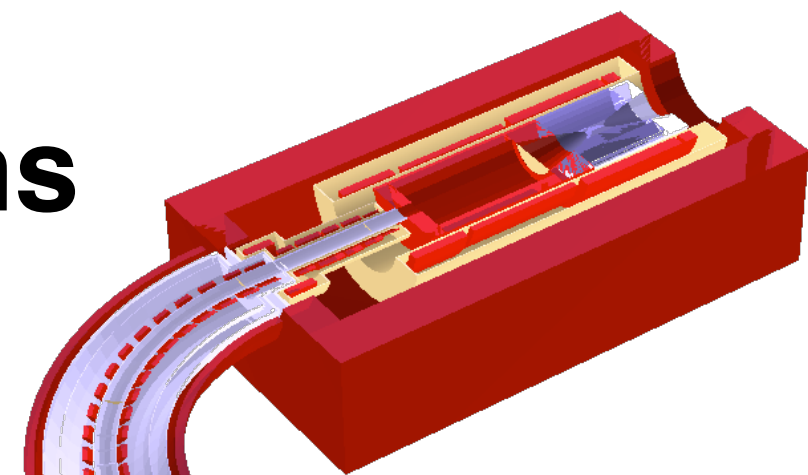
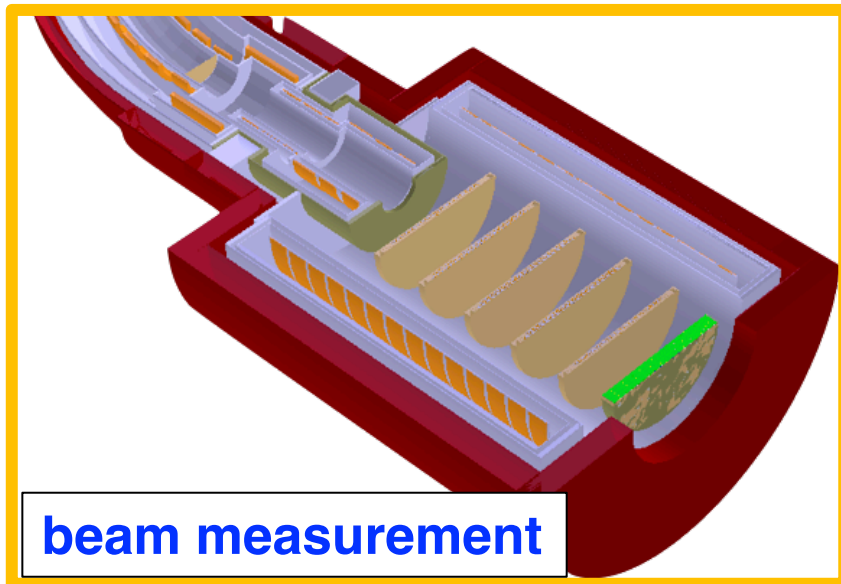
(magnetic field = 1 T)



Status of the Detector Systems

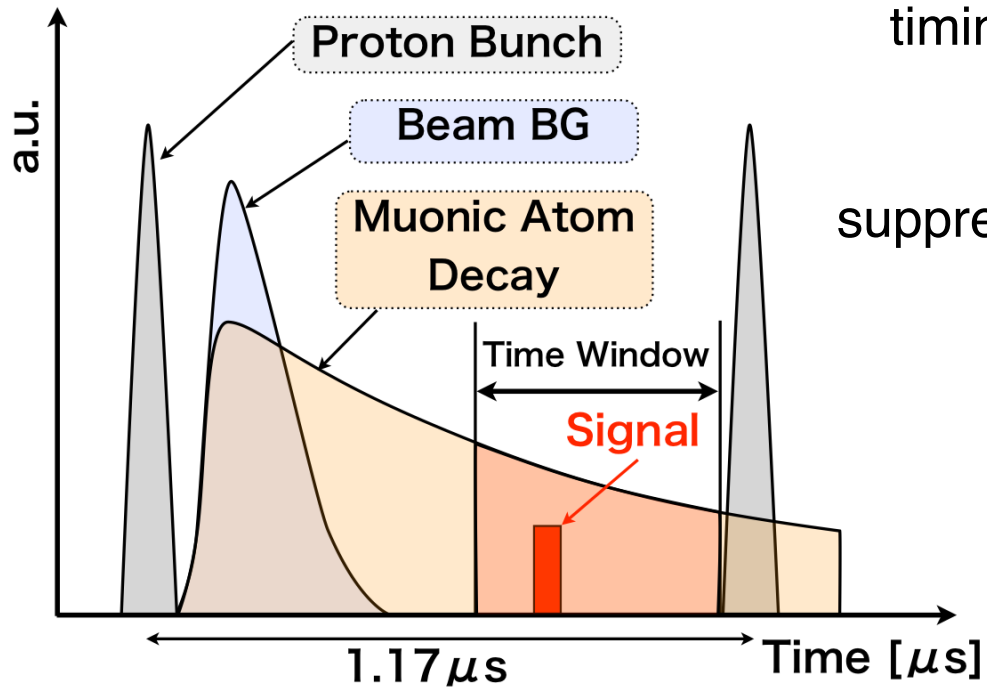
There are 2 detector systems
in COMET Phase-I

**Straw Tube Trackers + ECAL
(StrECAL)**

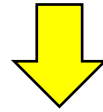


**Cylindrical Detector System
(CyDet)**

Beam Structure

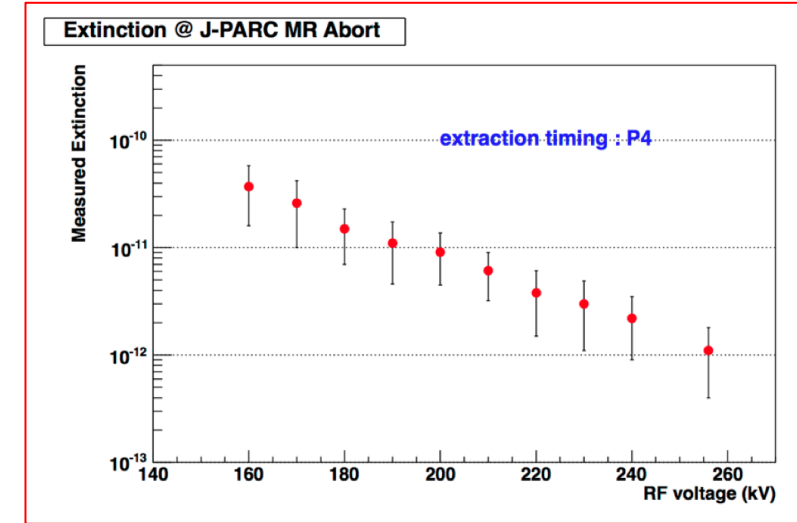


timing window method

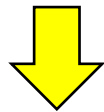


suppress beam related BG

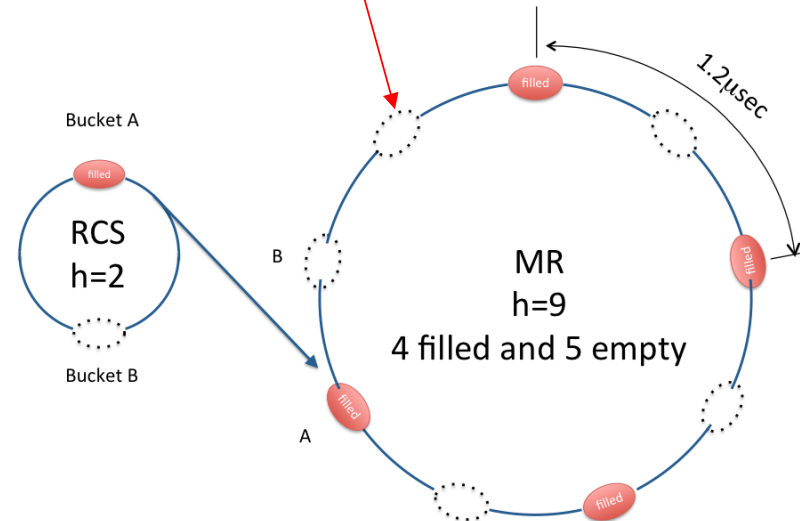
extinction factor
(requirement : $< 10^{-9}$)



Main Ring is operated in "COMET mode"

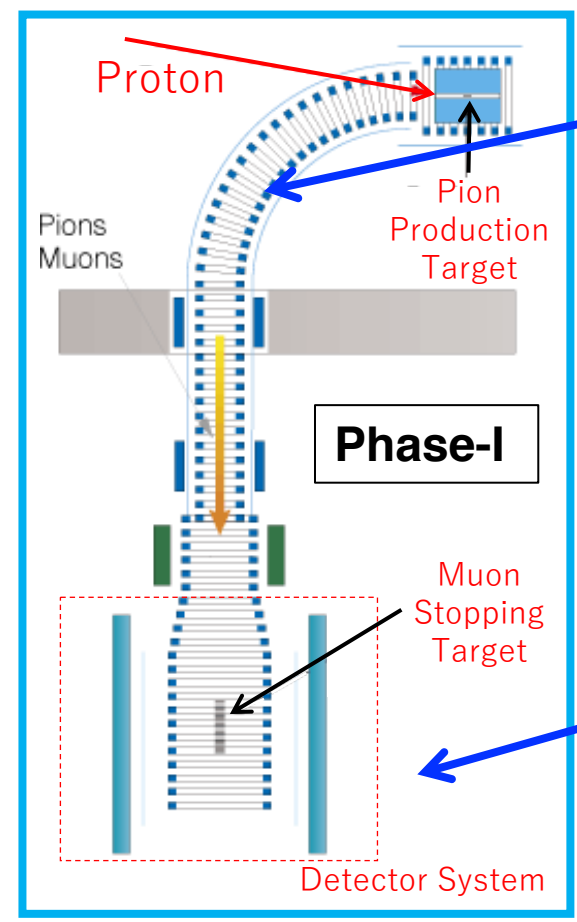


No protons in the time window





Status of the Facility & Magnet

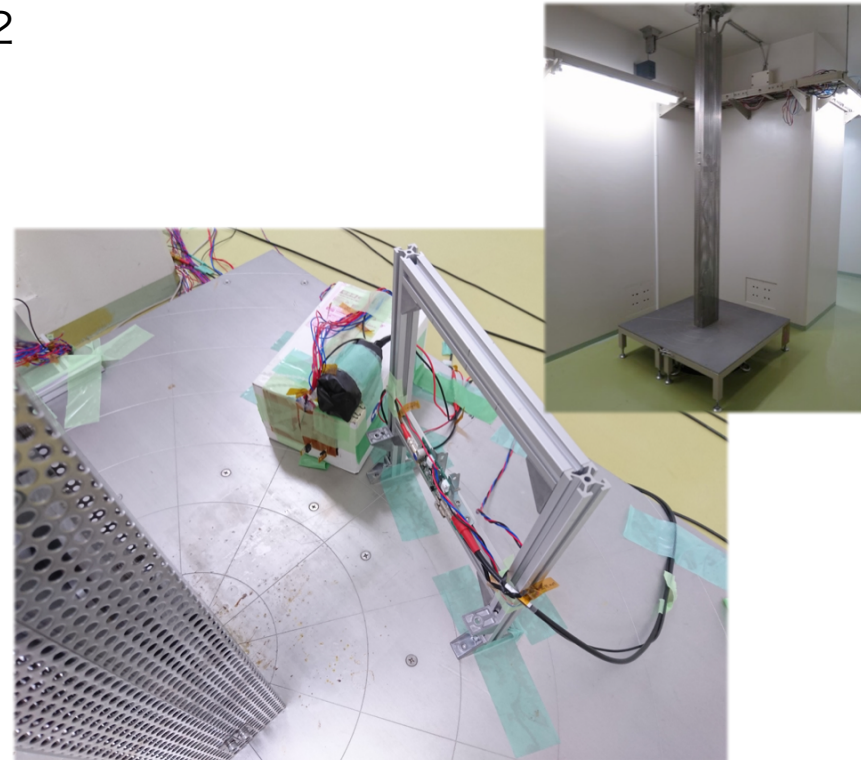


中性子/ガンマ線照射試験

- 放射線耐性試験として、九州大学⁶⁰Coガンマ線照射施設でガンマ線照射試験を、神戸大学にて中性子照射試験を実施
- 前置増幅器やFM PMTに、要求される放射線を照射した
 - 中性子 : 10^{12} neutrons/cm²
 - ガンマ線 : 2 kGy



タンデム加速器 (神戸大学)



ガンマ線照射室 (九州大学)

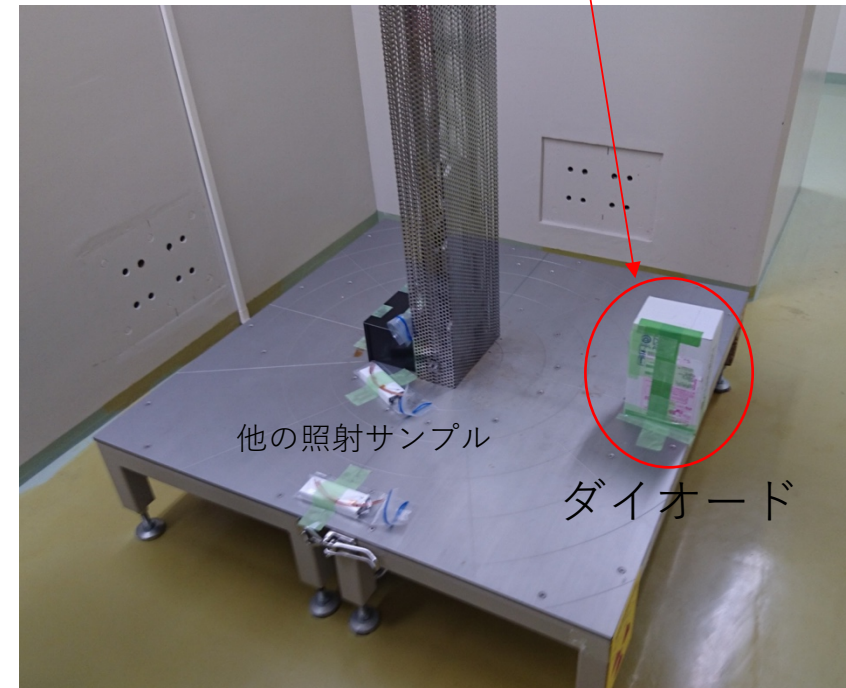
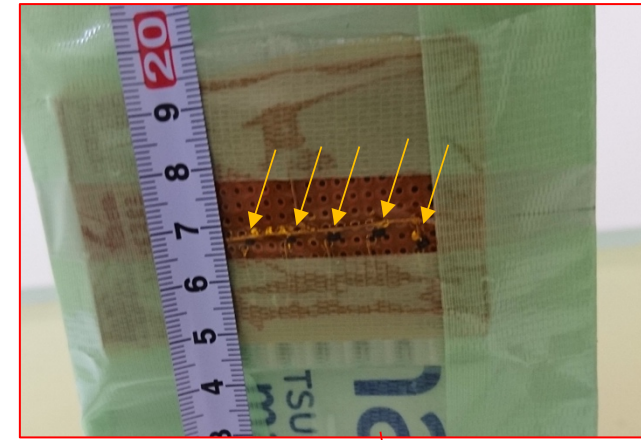
ダイオードへのガンマ線照射

九州大学コバルト照射施設でガンマ線照射試験を実施
線源： ^{60}Co (188.3 TBq @ 2009/06/29)

以下の5モデルに照射

DA221 (Rohm)
DAN217WM (Rohm)
1SS302A (Toshiba)
1PS302 (NXP)
BAV99WT1G (FAIRCHILD)

照射線量：2.8 kGy
(線源から40 cmの位置で~23 時間照射)

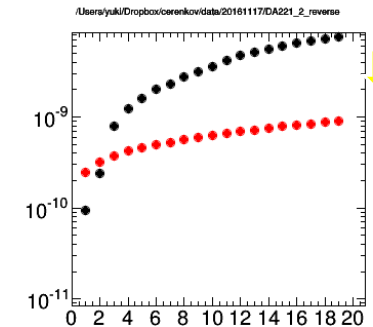
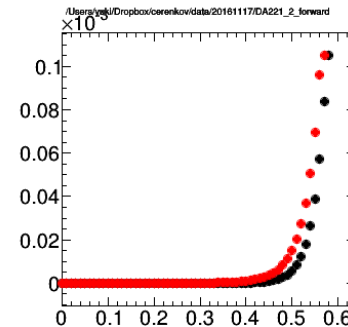
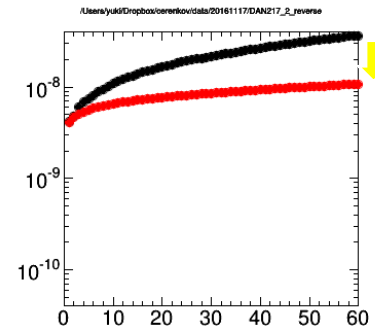
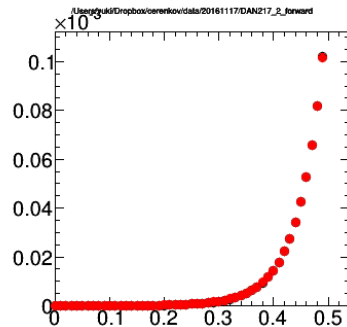
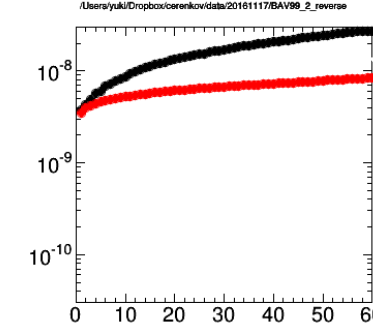
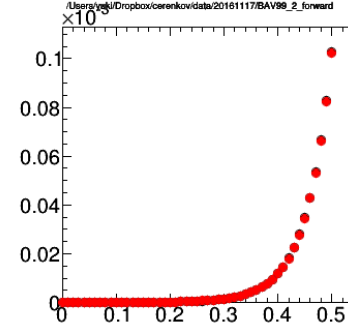
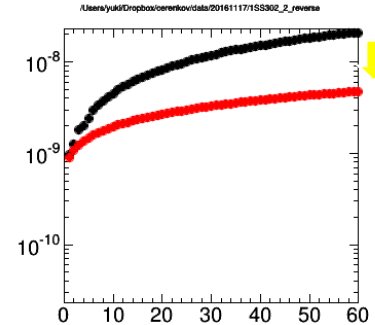
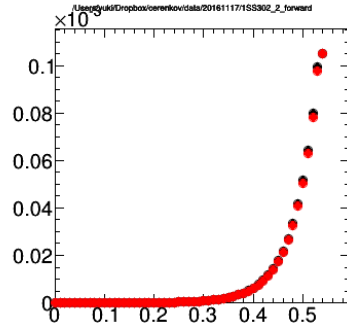
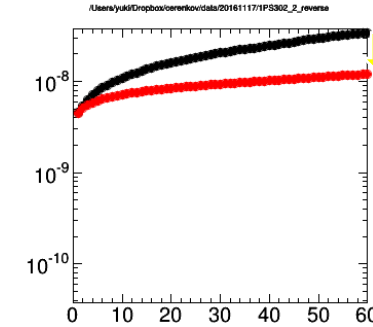
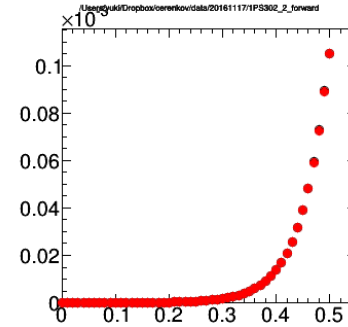


ダイオードへのガンマ線照射

各ダイオードのI-V曲線

黒点と赤点はそれぞれ照射前と後を表す

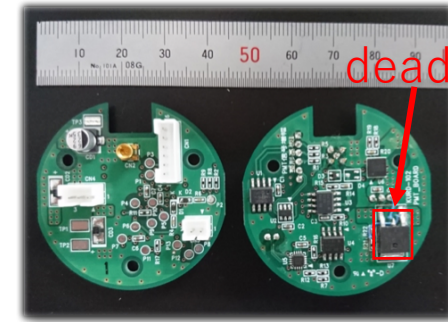
左: 順方向, 右: 逆方向



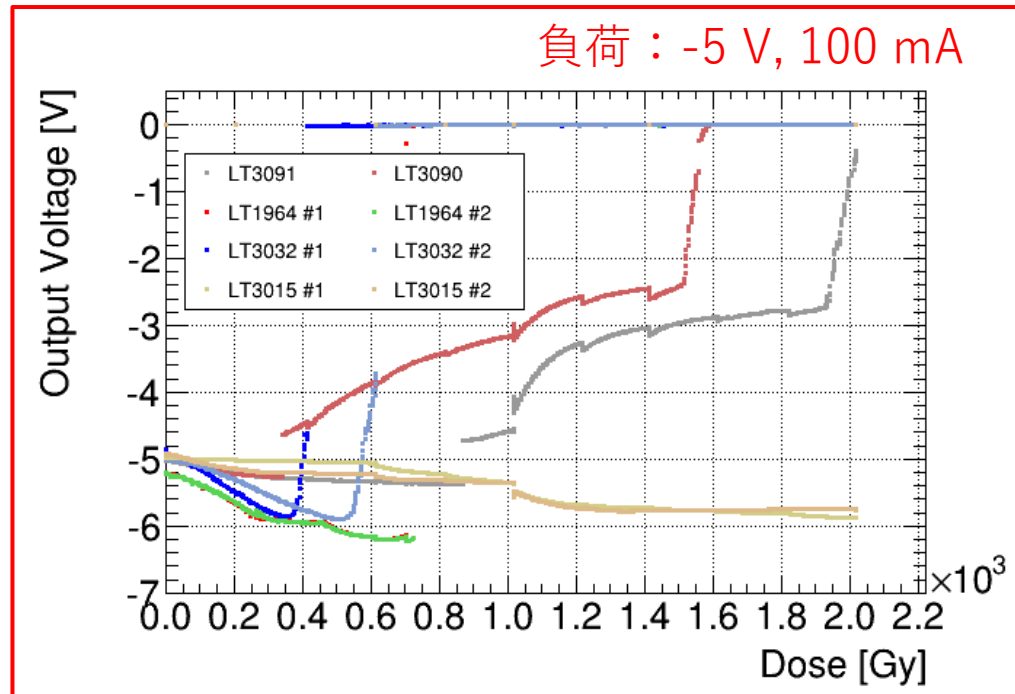
Regulatorの放射線耐性試験

Regulatorの耐性が不十分であることが判明 (2017年年次大会で報告)

→ 代替品候補としてLinear Technology社の5つのモデル (LT3090, LT3091, LT1964, LT3032, LT3015)のガンマ線耐性試験を実施した。



トリガー検出器の前置増幅器

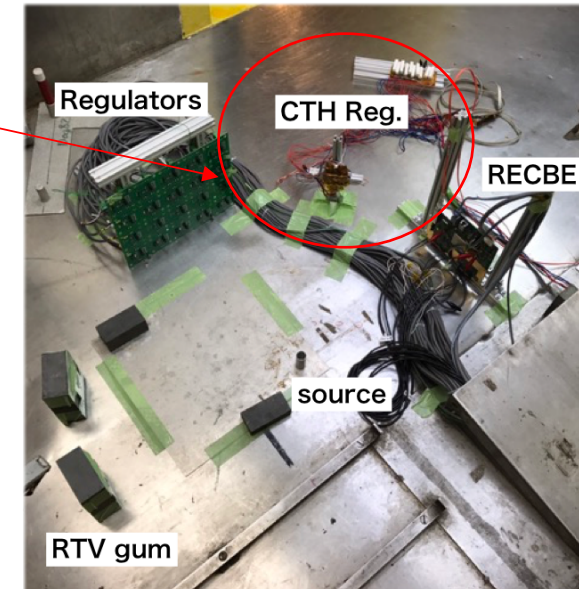


電圧値をモニターしながら2 kGyのガンマ線を照射。

→ LT3015以外は十分な電圧供給が不可に。

LT3015は供給電圧が-6 Vに変化。

5種とも十分な耐性を持たないことが分かった。



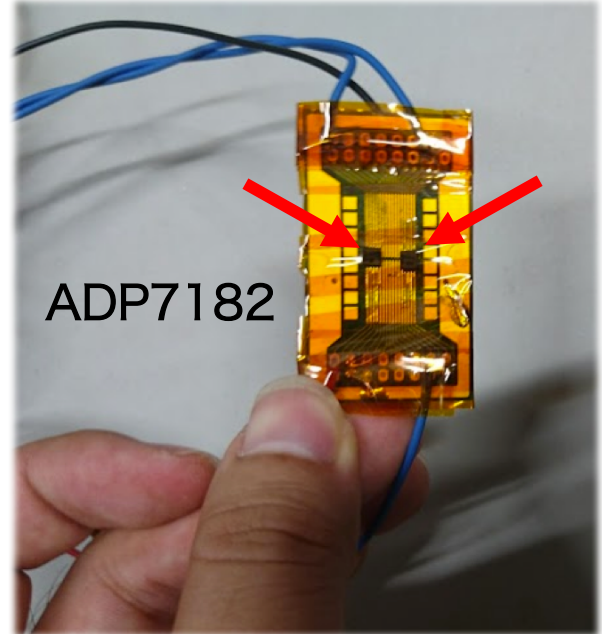
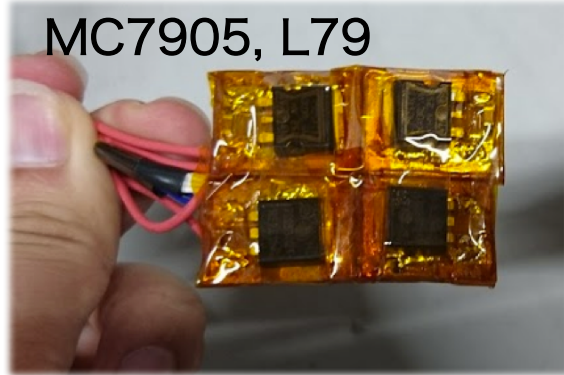
照射setup@コバルト60照射施設 (大阪大学産業科学研究所)

その他パーツについての試験結果 (12pS35-4, 中沢)

Regulatorの放射線耐性試験

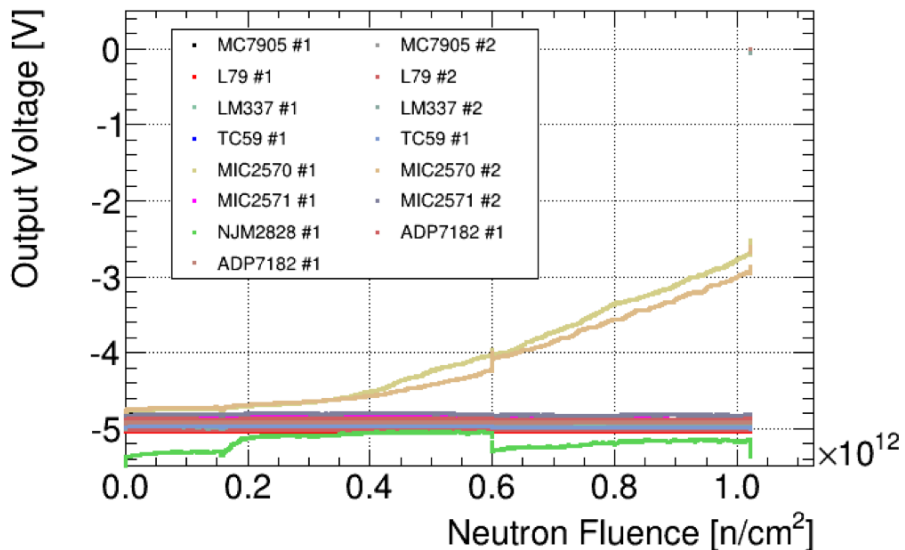
代替品の候補として5社8種のRegulatorについて、中性子照射試験を実施

電圧値をモニターしながら 10^{12} n/cm²の中性子を照射。
 → MIC5270は十分な電圧供給が不可に。
 7種で中性子耐性を持つことを確認した。



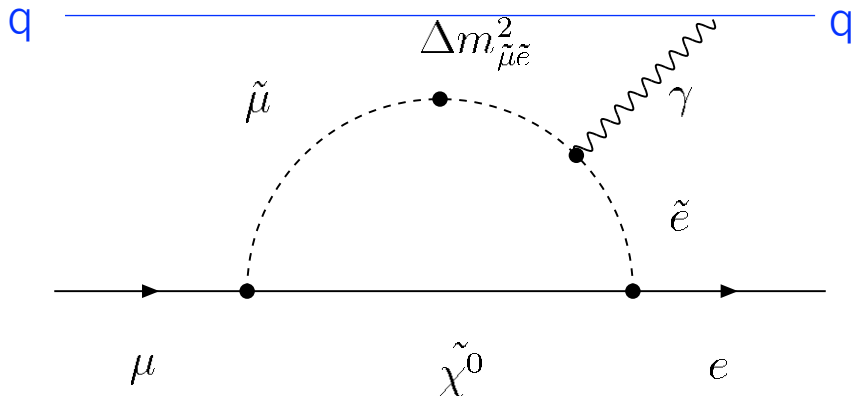
今後、7種のガンマ線耐性試験を行う予定。

負荷：-5 V, 100 mA

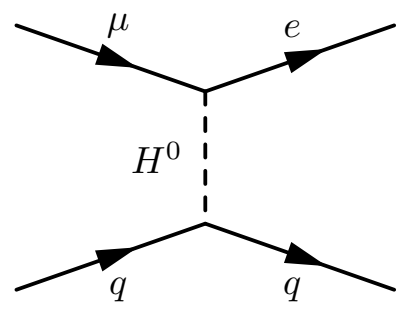


	Company	Model	Gamma (2 kGy)	Neutron (10 ¹² n/cm ²)
1 st group	Linear Technology	LT3032	dead	/
		LT1964	dead	
		LT3090	dead	
		LT3015	dead	
		LT3091	dead	
2 nd group	ON semiconductor	MC7905	To Be Tested	alive
	STMicroelectronics	LM337		alive
		L79 series		alive
	microchip	TC59		alive
		MIC5270		dead
		MIC5271		alive
	新日本無線	NJM2828		alive?
	analog devices	ADP7182		alive

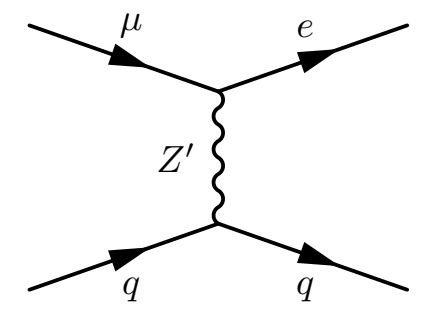
$\mu \rightarrow e \gamma$ and $\mu N \rightarrow e N$



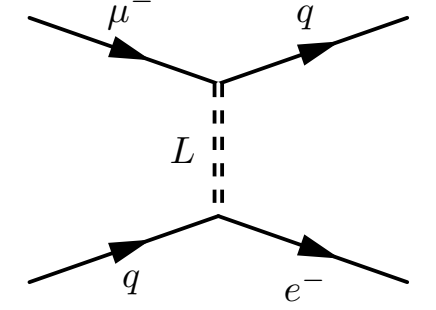
in BSM (SUSY model)



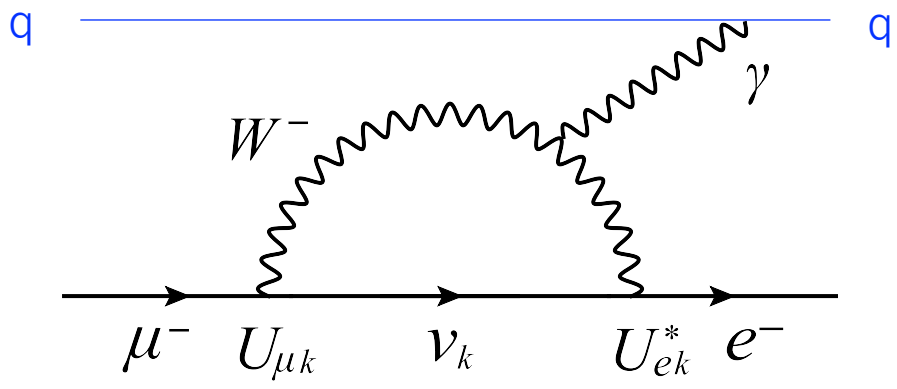
(a) Exotic Higgs



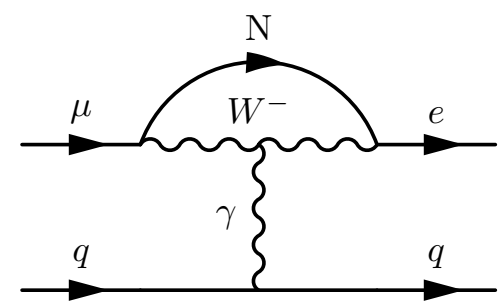
(b) Z-prime



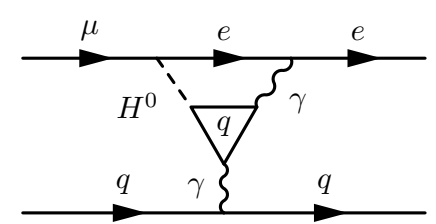
(c) Leptoquarks



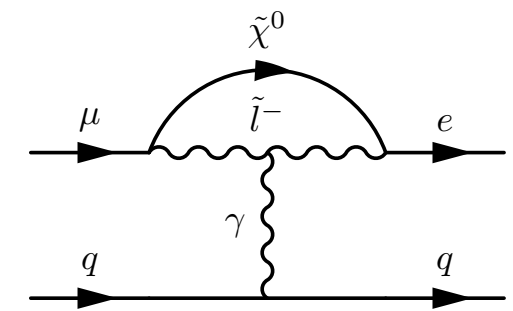
in SM



(d) Heavy Neutrinos



(e) Exotic Higgs



(f) Supersymmetry

diagrams of μ -e conv. process

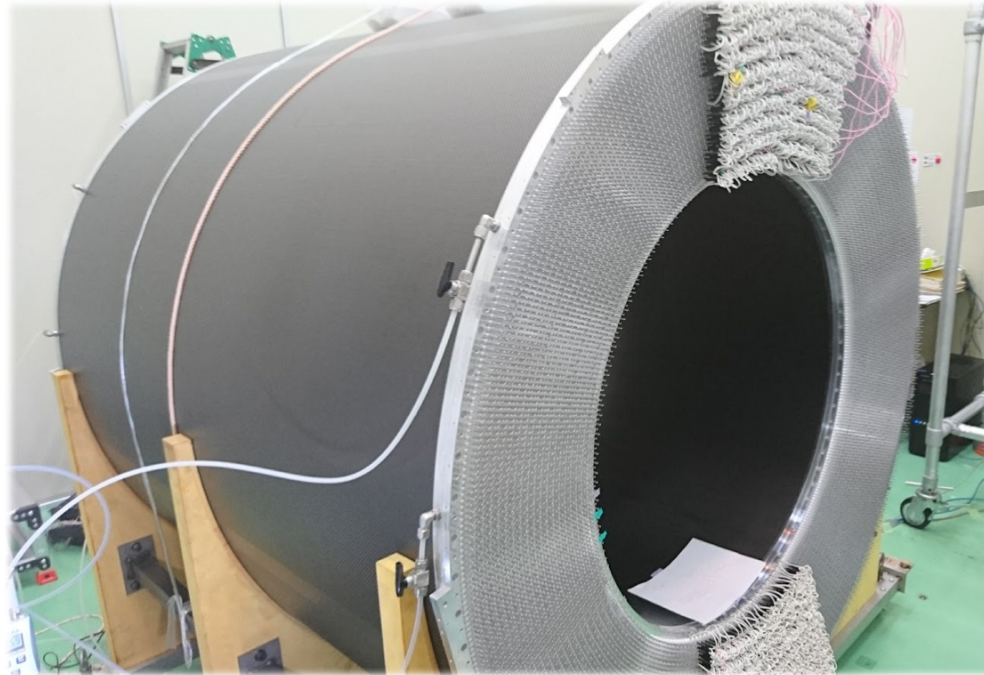
Status of the CDC

Prototype study has finished.

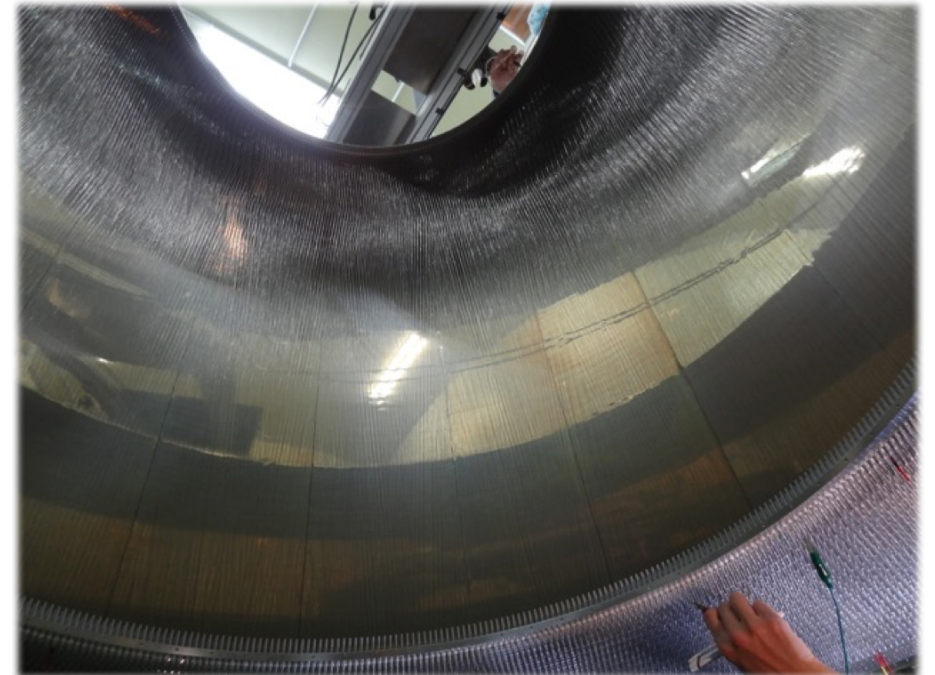
Construction of the CDC already completed. (June 2016)

Now under commissioning with cosmic ray

from upstream



CDC (under cosmic ray test)

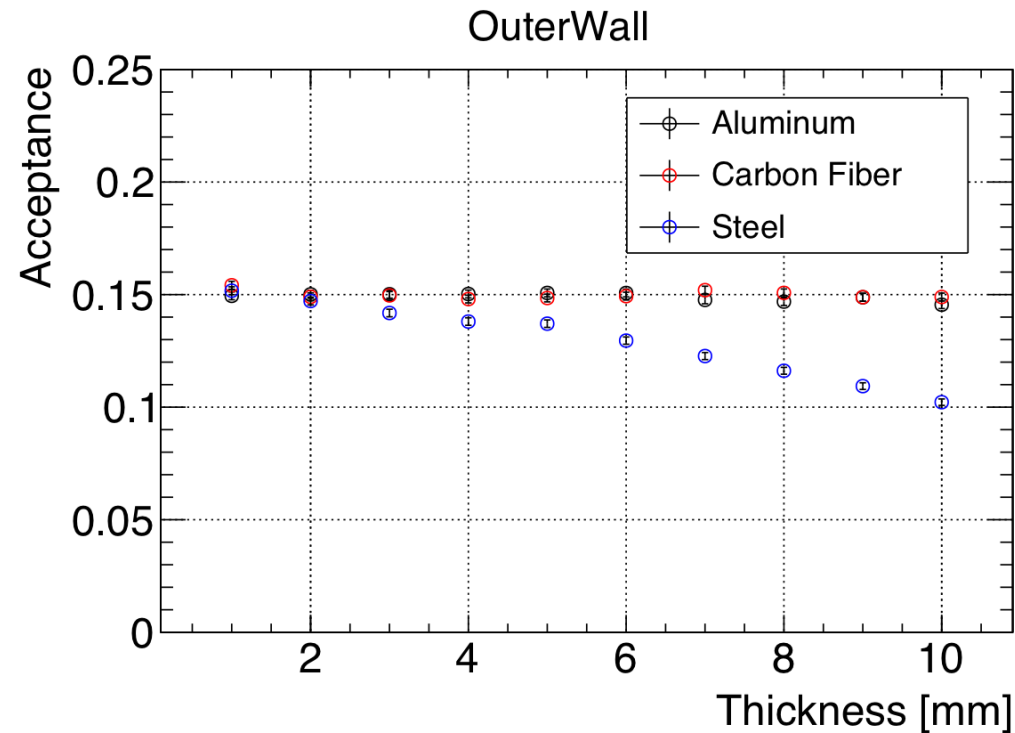


CDC wires (in construction phase)

サポート構造：材質の最適化

以下の要求を満たしたイベントの割合をアクセプタンスと定義した

- (1) トリガー検出器で4層以上のヒットがある
- (2) CDCで4層目より外の層にヒットがある
- (3) CDCで30 cell以上のヒットがある

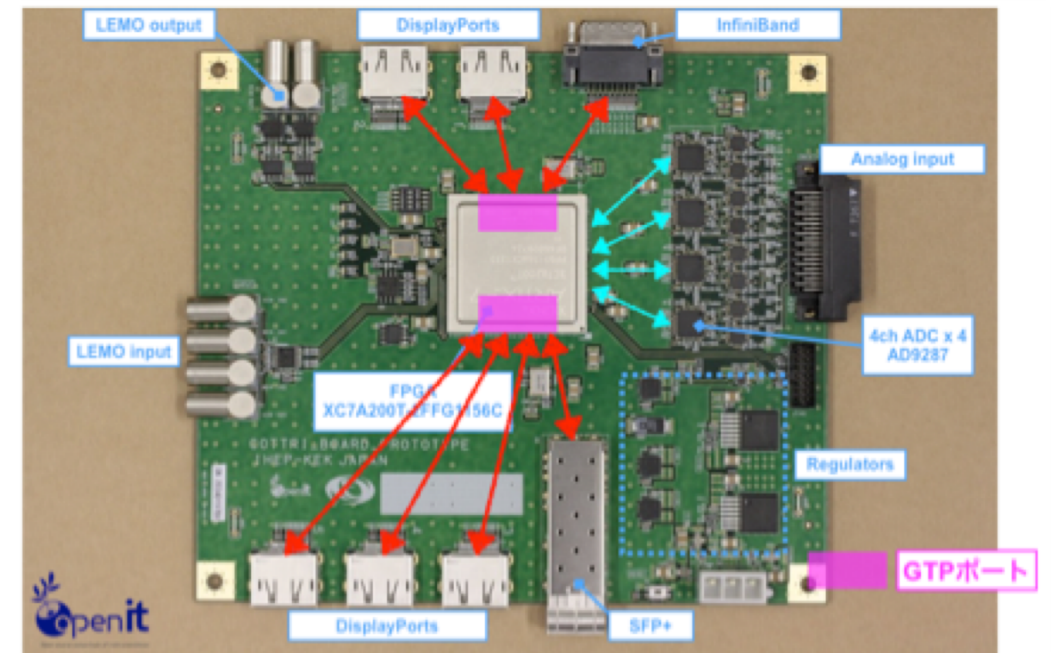
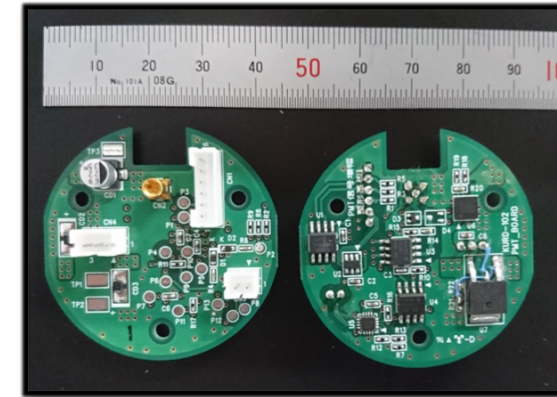
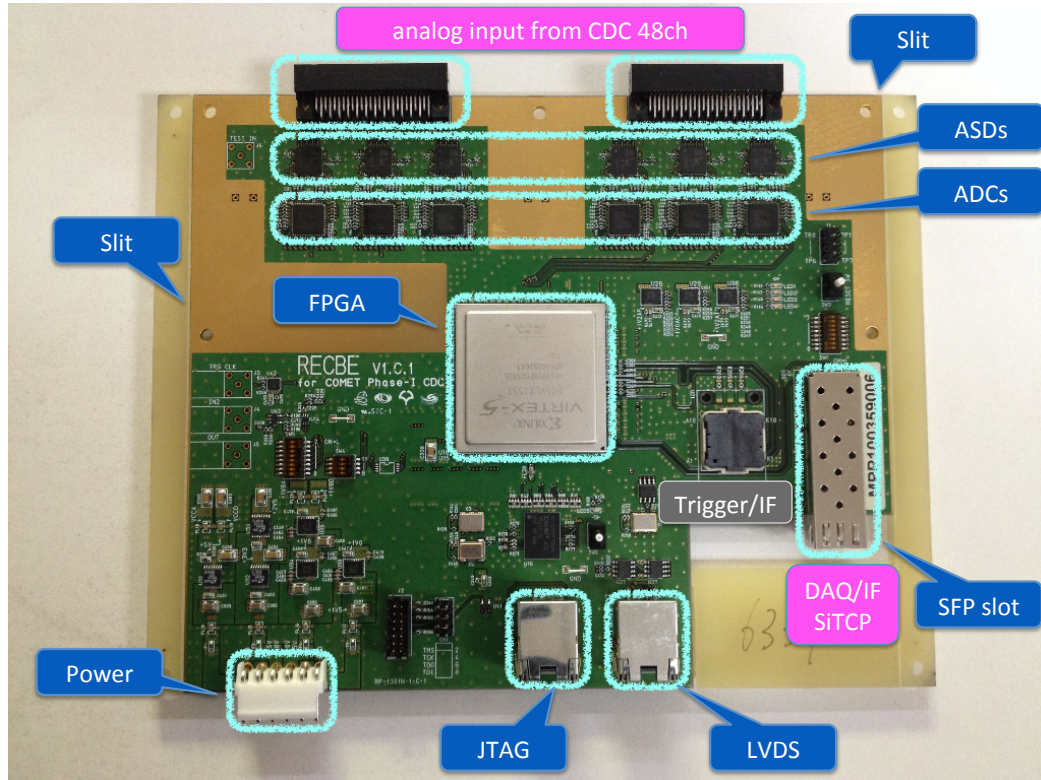


Heの遮蔽が期待できる & 10 mm厚までアクセプタンスが減少しない
 -> **アルミニウム**を第一候補、カーボンファイバーを第二候補とする

Electronics of the CyDet

Front-end board for CTH

Front-end board for CDC

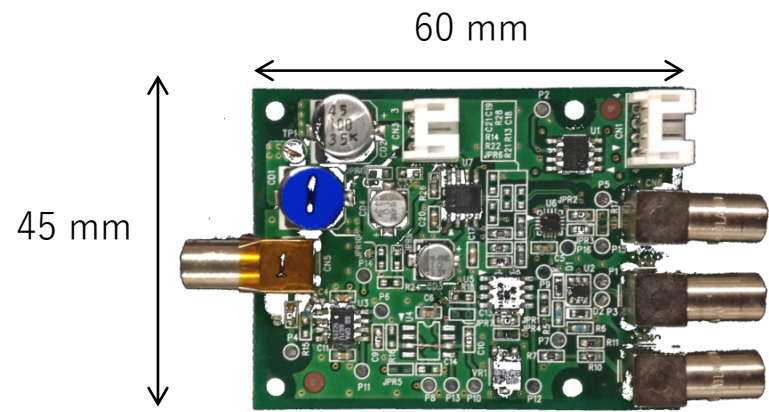


Trigger board (prototype)

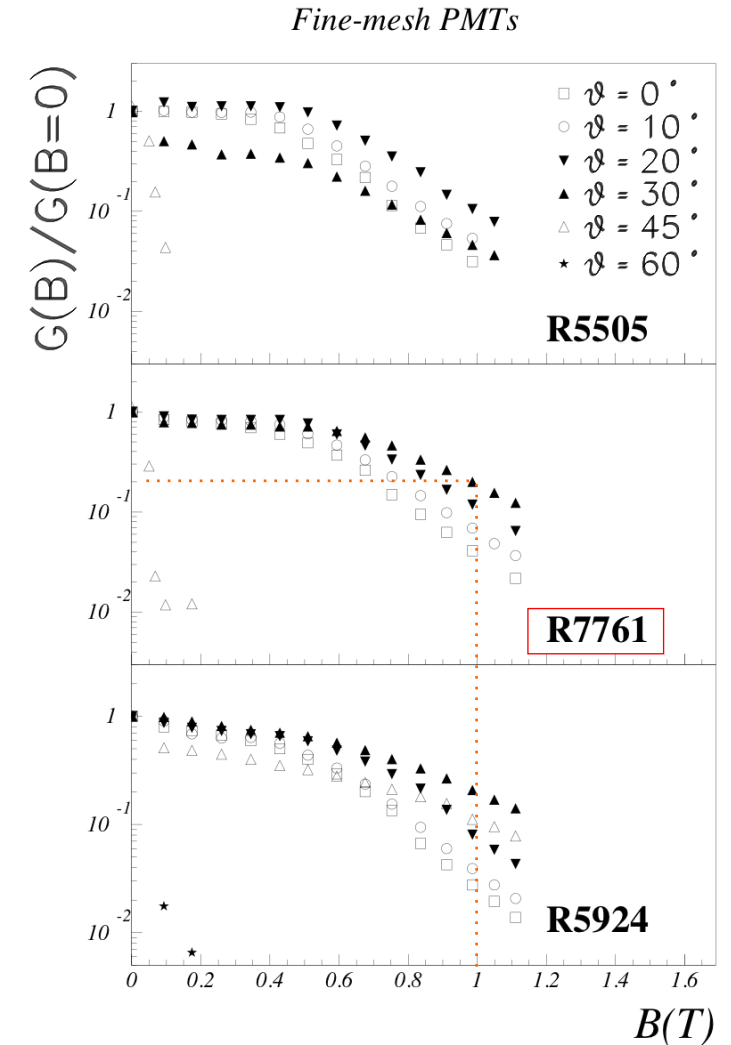
磁場の影響と対策

[1]より引用

- FM PMTは1 Tの磁場中で使用する事ができる
 - ゲインが磁場密度 B とPMTの軸との角度 θ に依存して変化する
 - 磁場 1T, $\theta = 30^\circ$ の条件では、0 Tと比較して約20 %のゲインとなる [1]
- 磁場によるゲインの減少を補うため、前置増幅器を製作した



製作した前置増幅器



[1] Bonesini, M., et al. "A Systematic Study in High Magnetic Fields of Fine-Mesh Photomultipliers for Time-of-Flight Detectors." *Nuclear Science Symposium Conference Record*. 2004.

磁場の影響：前置増幅器を用いた見積もり

- 前置増幅器を用いた場合：波高を16.4倍に増幅できる
 - ノイズはビーム照射試験時よりも小さい
- 最も光量が少ない下流チェレンコフ検出器でも、1 Tの磁場中でも十分な信号強度が得られる

下流側チェレンコフ検出器
(20%のゲイン x 16.4倍を想定)

