

In situ high voltage generation in xenon gas time projection chamber and track pattern recognition for neutrinoless double beta decay search

(ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索のための、
キセノンガスTPCでの高電圧生成とトラックパターン認識)

素粒子実験（加速器）研究室

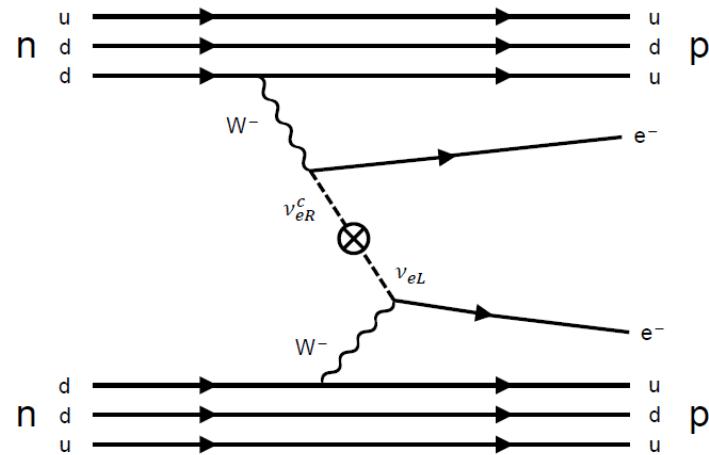
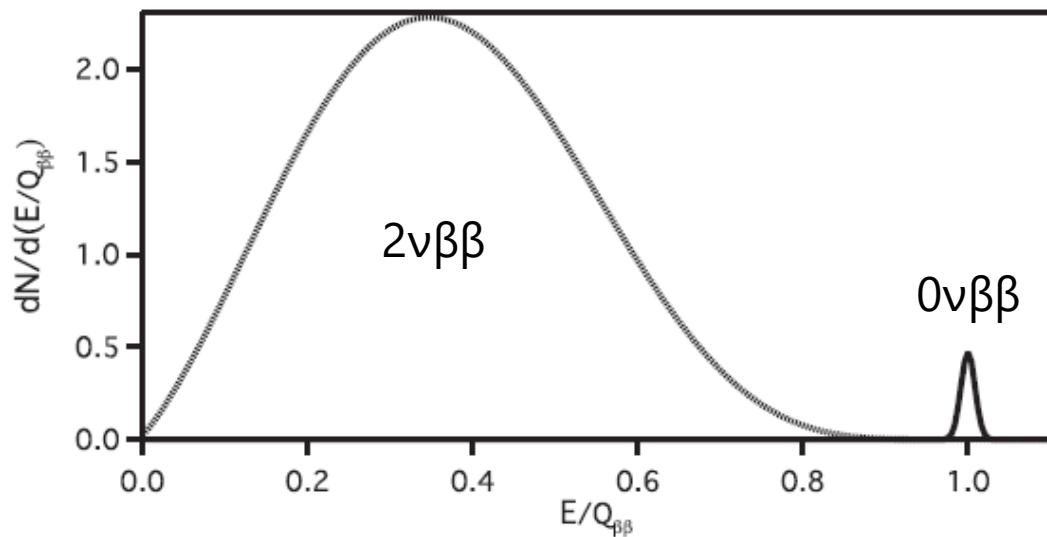
秋山 晋一

2025/07/24 博士論文公聴会

- Introduction
- AXEL experiment
- Cockcroft-Walton multiplier による高電圧生成
- 機械学習を用いた信号-バックグラウンド識別
- Results/Discussion
- まとめ

- Introduction
- AXEL experiment
- Cockcroft-Walton multiplier による高電圧生成
- 機械学習を用いた信号-バックグラウンド識別
- Results/Discussion
- まとめ

- ニュートリノのマヨラナ性
 - 非常に軽いニュートリノ質量
 - 物質優勢宇宙
- ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)
 - 起こるとしても非常に稀な事象 $> 3.8 \times 10^{26}$ years (90% C.L.) [1]
 - 2本の電子の運動エネルギーの和が崩壊のQ値に一致



[1] arXiv:2406.11438 [hep-ex]

- ・バックグラウンドの有無で、exposureに対する感度の伸びが変化

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto (\ln 2) \varepsilon \frac{N_A}{A} Mt \quad \text{BG無の場合 Mtに比例}$$

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto (\ln 2) \varepsilon \frac{N_A}{A} \sqrt{\frac{Mt}{b\Delta E}} \quad \text{BG有の場合 sqrt(Mt)に比例}$$

- ・質量逆階層排除($\langle m_{\beta\beta} \rangle \sim 20\text{meV}$)を超えるために

$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

位相空間因子 有効質量
 ↓ ↓
 核行列要素

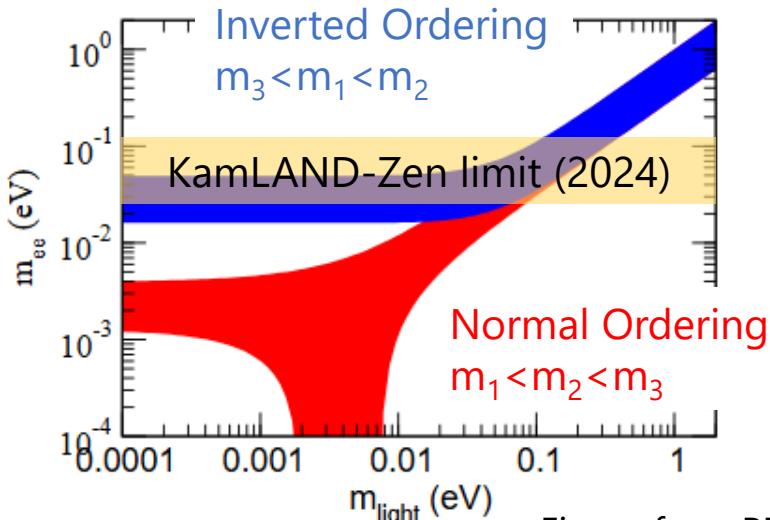
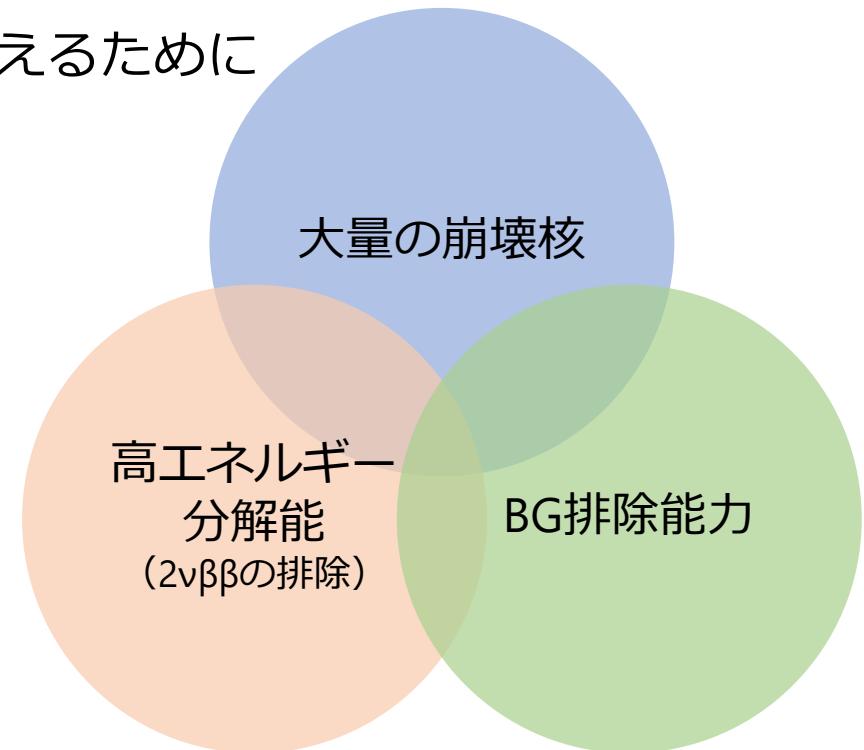


Figure from PDG 2025



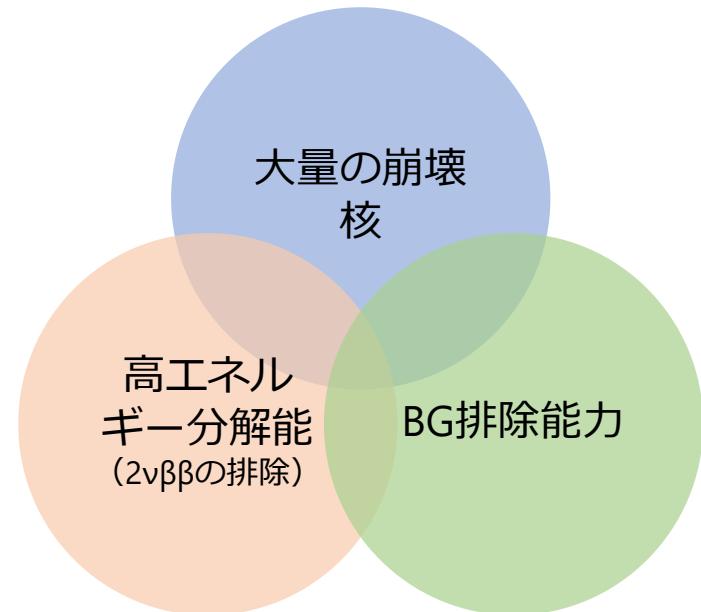
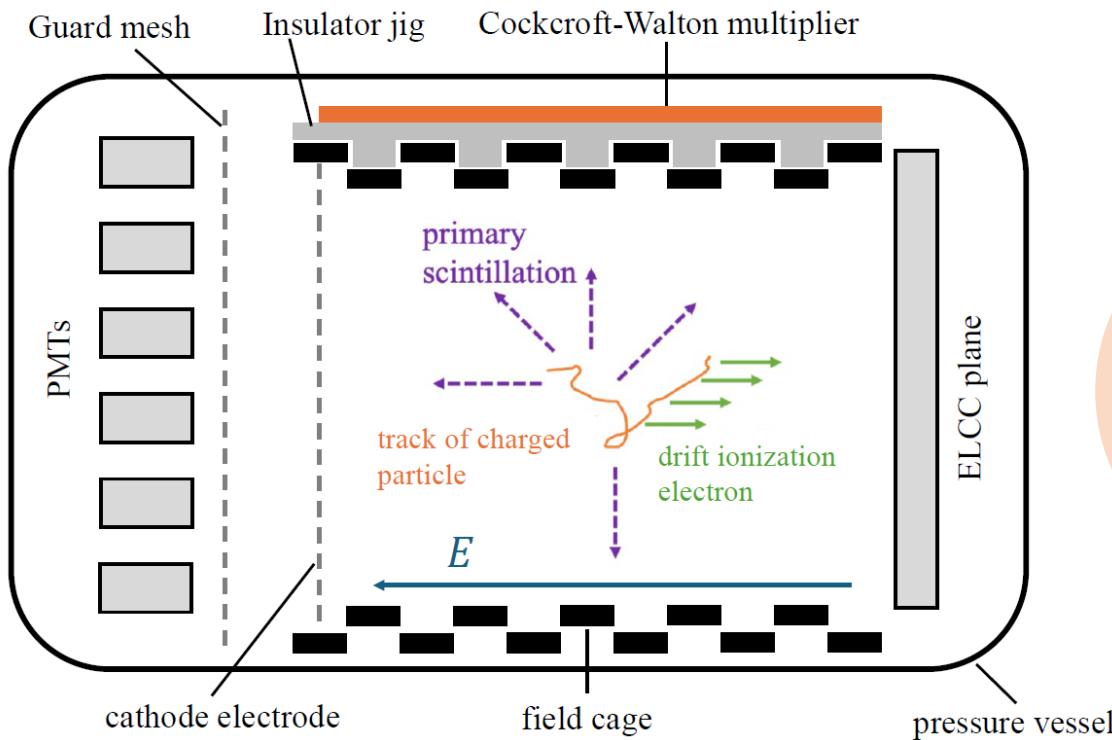
- Introduction
- AXEL experiment
- Cockcroft-Walton multiplier による高電圧生成
- 機械学習を用いた信号-バックグラウンド識別
- Results/Discussion
- まとめ

AXEL experiment

7

- 高圧キセノンガス Time Projection Chamberで ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ を探索
 - キセノンガス → 大型化が容易
 - EL信号を利用 → 高エネルギー分解能
 - TPCによる3D飛跡再構成能力

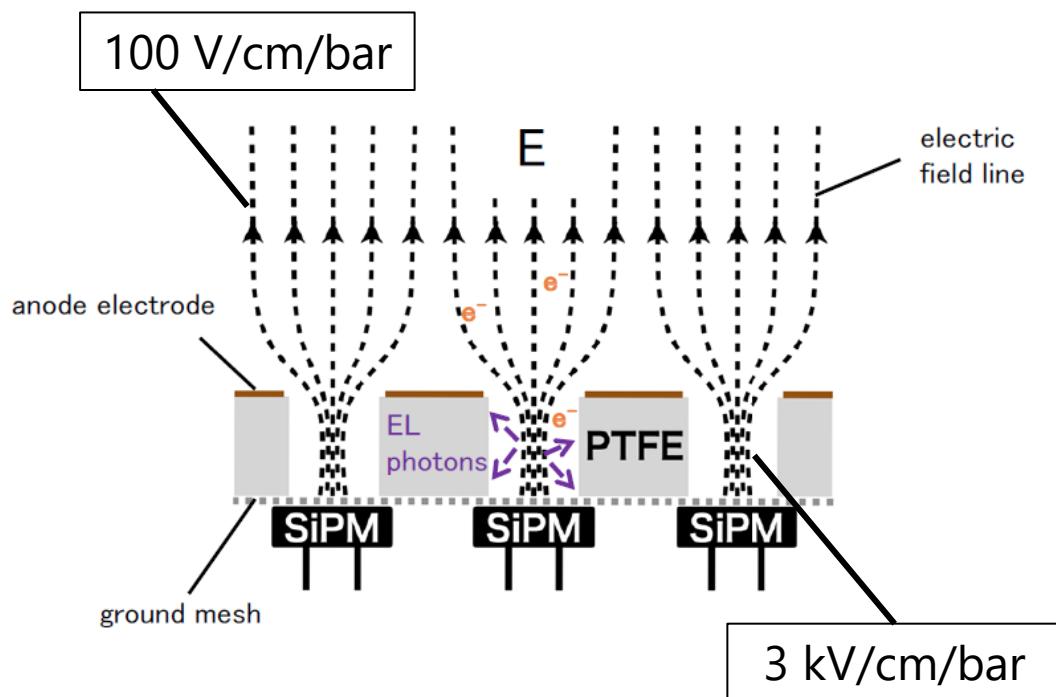
} 背景事象除去



Electroluminescence Light Collection Cell (ELCC)

8

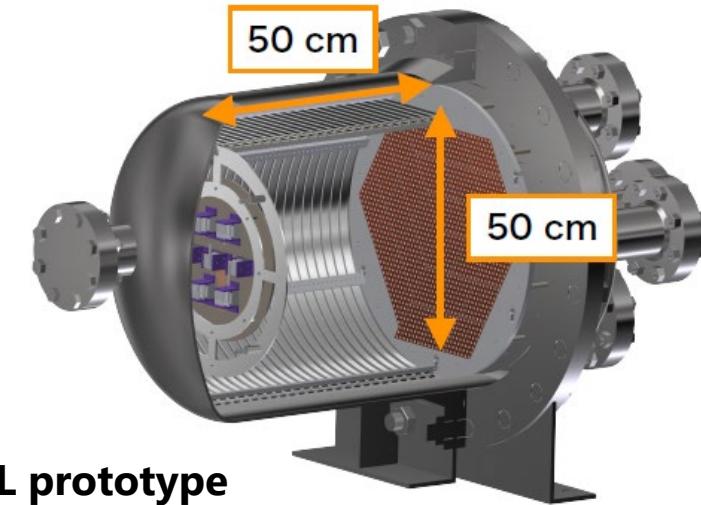
- 電離電子を検出するセル状デバイス
- EL過程を用いて電離電子を光子に変換
 - 線形増幅過程のため、揺らぎが小さい
 - 発光位置依存性が小さい
 - ユニット構造で大型化が容易



ELCCユニット

ロードマップ

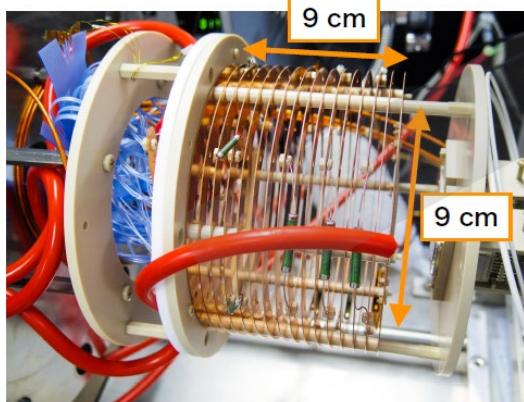
9



10-L prototype

2014 - 2018

- 0.05kg @ 8bar
- ELCC コンセプトの実証

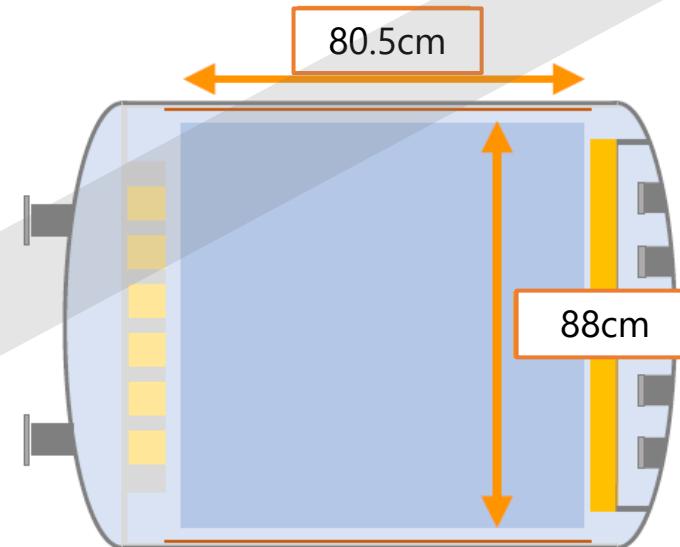


180-L prototype

2018 -

- ~4.5kg @ 8bar
- phase-1 : 168ch
- phase-2 : 672ch
- 大型化技術
- Q値付近での分解能評価

1t scale



140kg scale

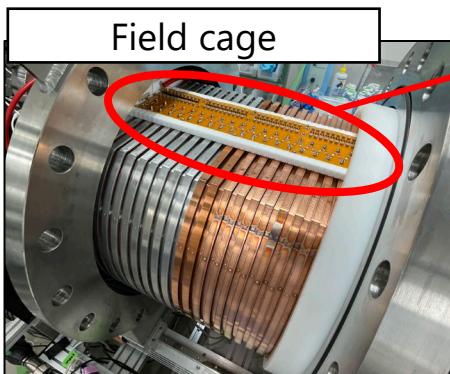
1,000-L detector

2025 -

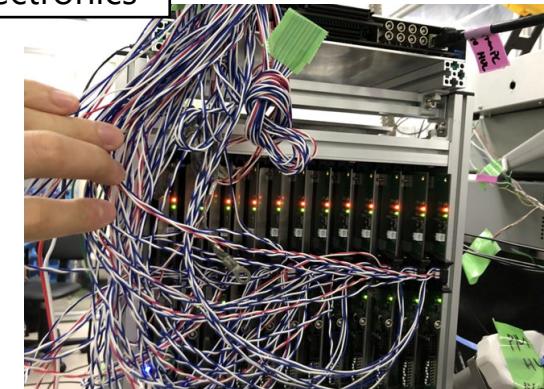
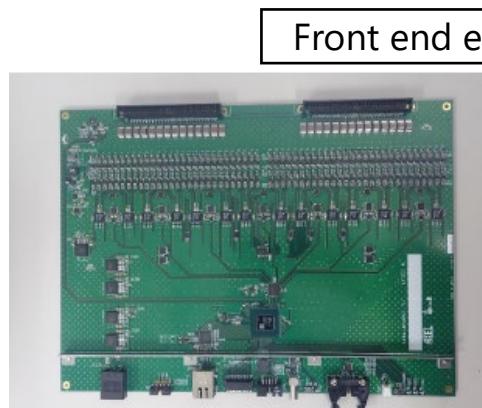
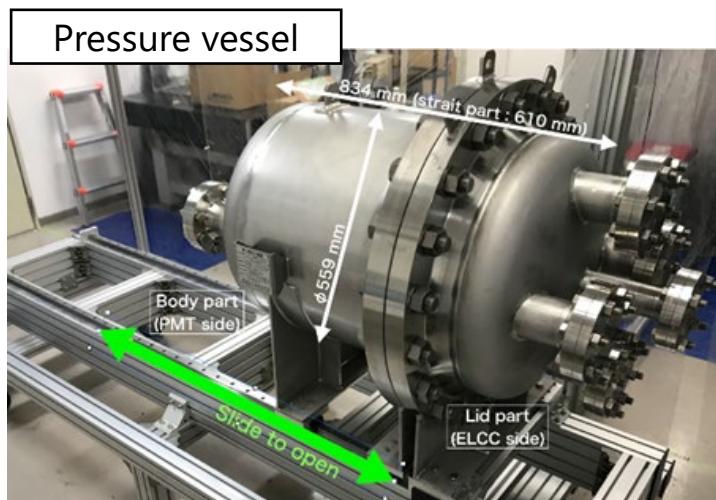
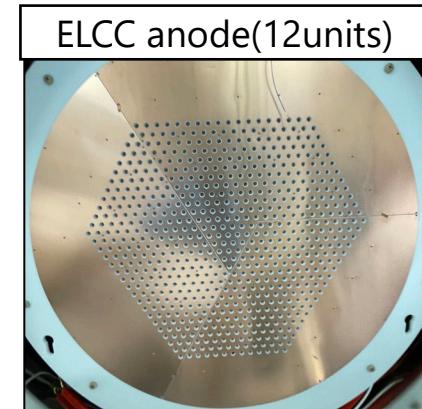
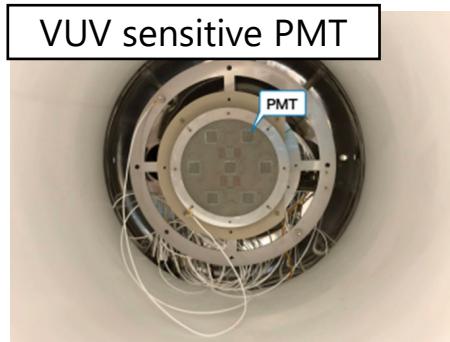
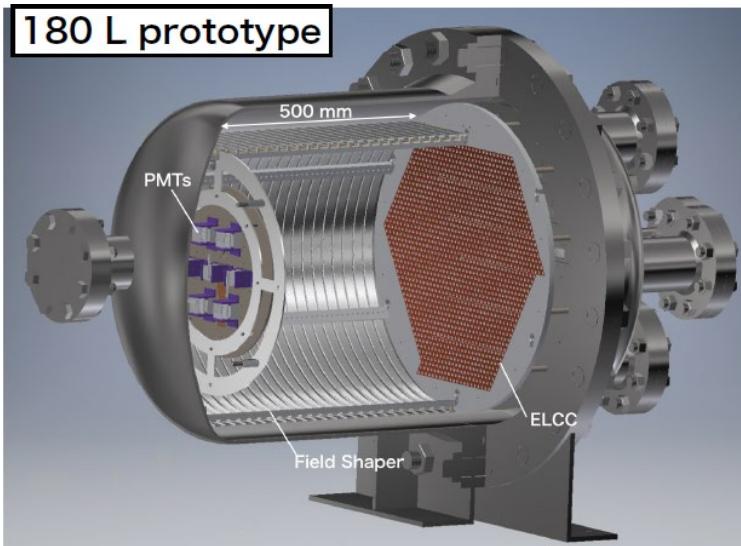
- ~20kg @ 8bar
- 物理ラン
- 地下実験

180L prototype detector

10



Cockcroft-Walton
multiplier

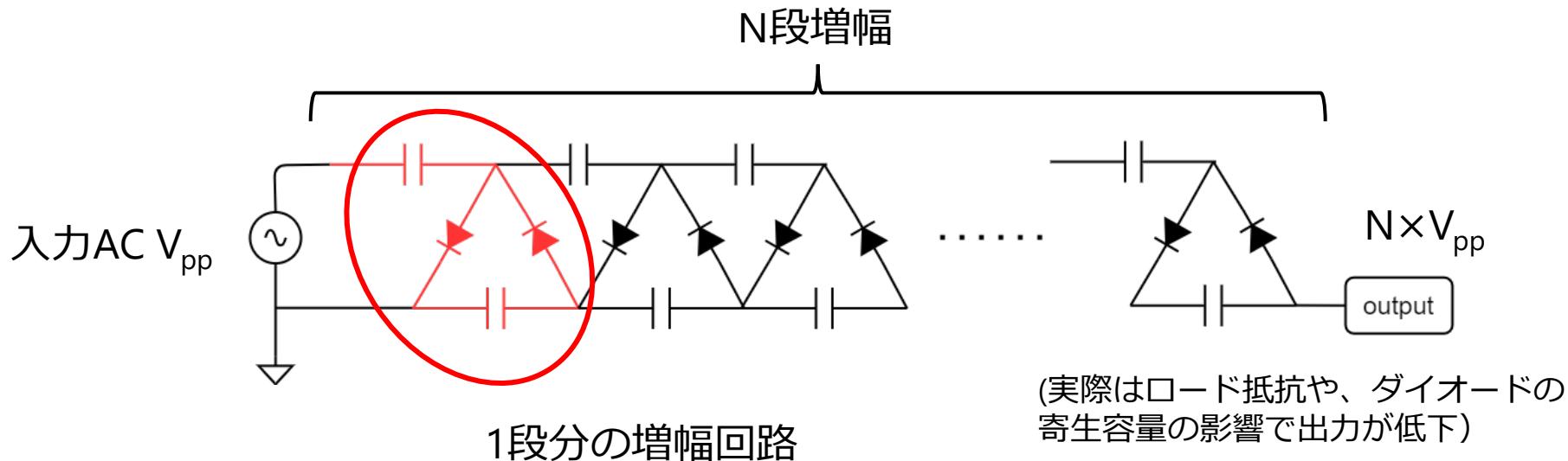


- Introduction
- AXEL experiment
- Cockcroft-Walton multiplier による高電圧生成
- 機械学習を用いた信号-バックグラウンド識別
- Results/Discussion
- まとめ

Cockcroft-Walton (CW) multiplier

12

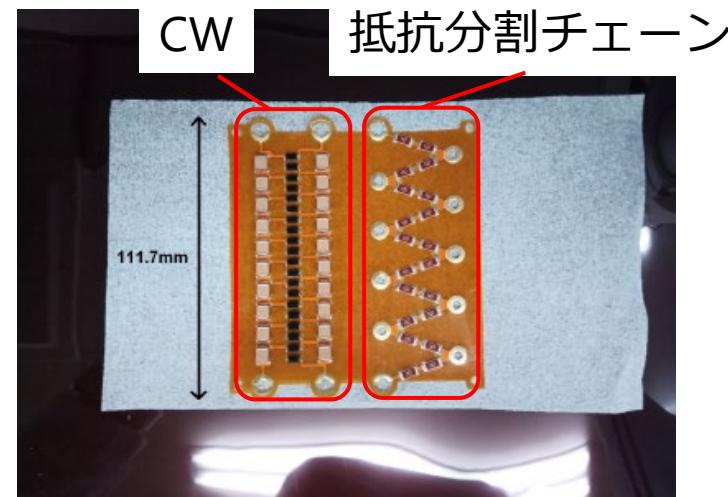
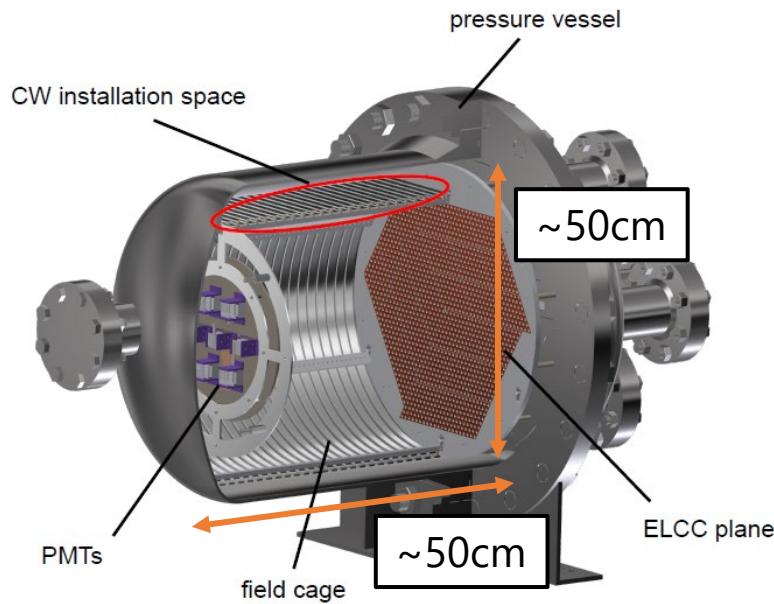
- TPCドリフト電場形成には高電圧 (-45kV for 180L detector) が必要
- 圧力容器外部から導入するには、高耐圧フィードスルーガが必要
→ 圧力容器内部で昇圧すれば、不要
- CW回路
 - 低圧AC入力を高圧DC出力に変換
 - 2個のコンデンサと2個のダイオードを1組として、積み重ねることによって線形に昇圧が可能 → スケールアップに適する
 - 理想的には、peak to peak 入力 V_{pp} に対して、N段増幅で出力 $N \times V_{pp}$ が得られる



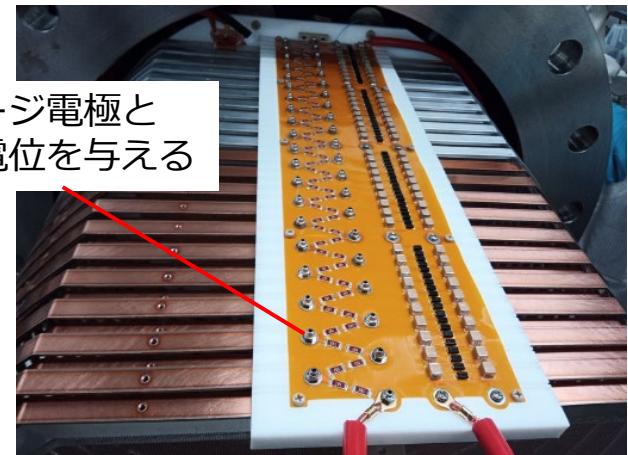
CW回路の実装

13

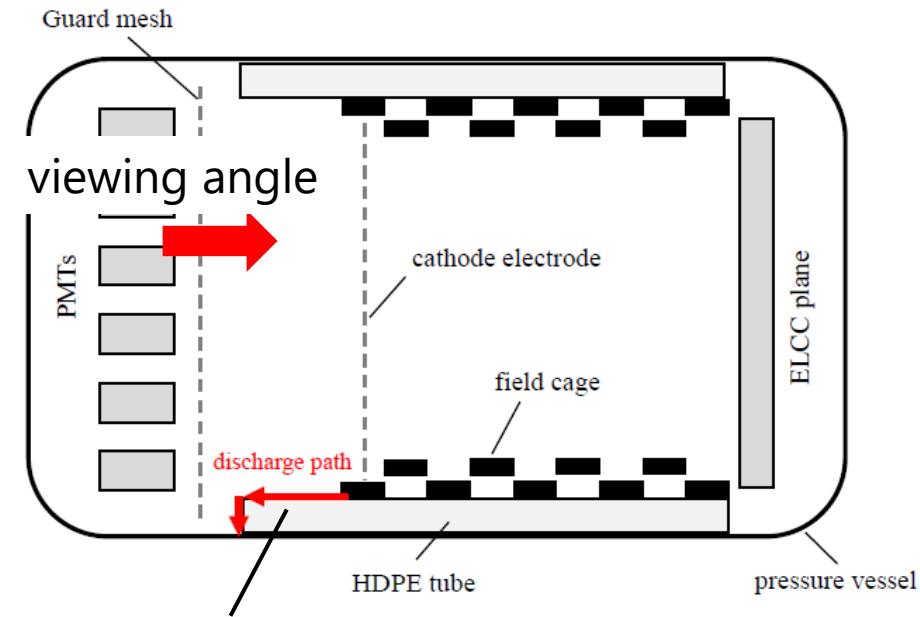
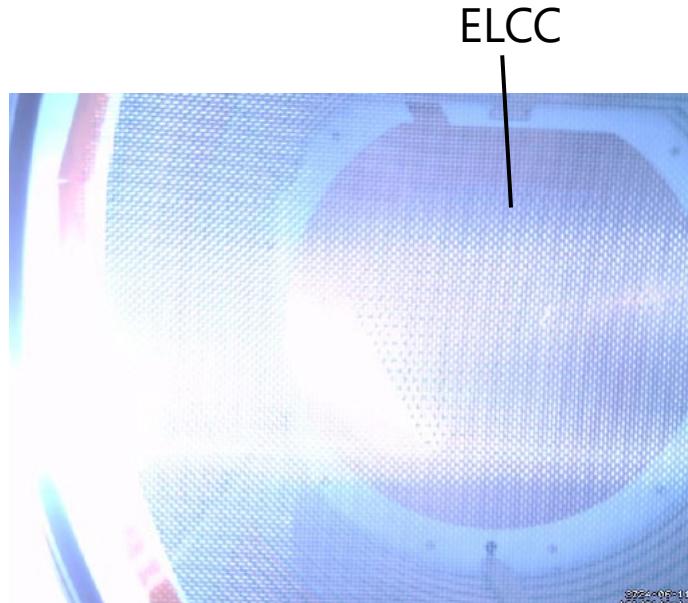
- ・フィールドケージと圧力容器の隙間にインストールできるよう、FPC上にコンパクトに実装
- ・フィールドケージに均等に分割された電位を与えるための抵抗分割チェーンも合わせて実装
- ・10段/枚で、接続により多段化が可能



フィールドケージ電極と
ねじで接続し電位を与える



- FPCの沿面放電対策
 - メチルシリコンレジン KR-251 によるコーティング
 - 素子の定格電圧に近い 1900Vpp 入力で10分間無放電
 - 180L検出器での放電事象
 - PMT側に設置したカメラの動体検知で放電を検出
 - HDPE絶縁筒の表面を伝って圧力容器に放電
→ 絶縁筒(HDPE)の表面に溝加工を施して放電距離を延長
 - CW回路の昇圧をプログラム化し、時間をかけて昇圧
-] 設計電圧の90% (-34.3kV)
の印加に成功

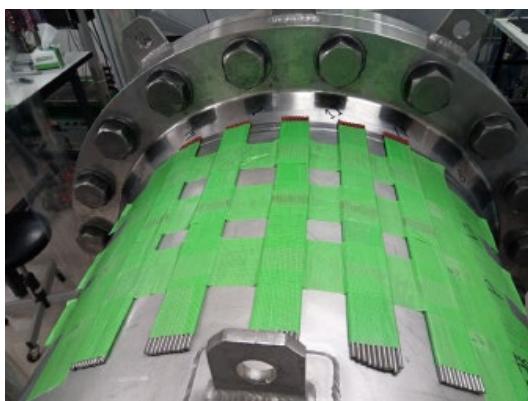
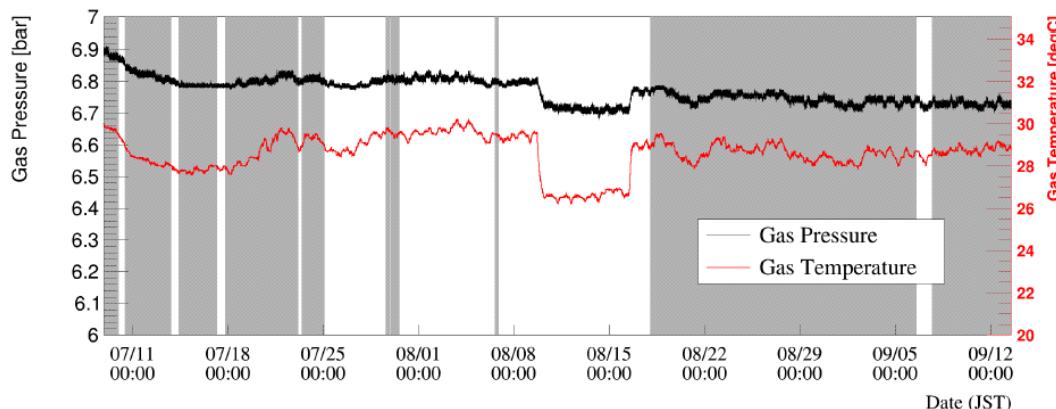
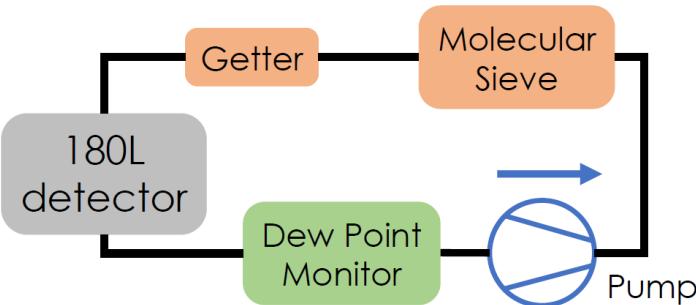


推定放電経路

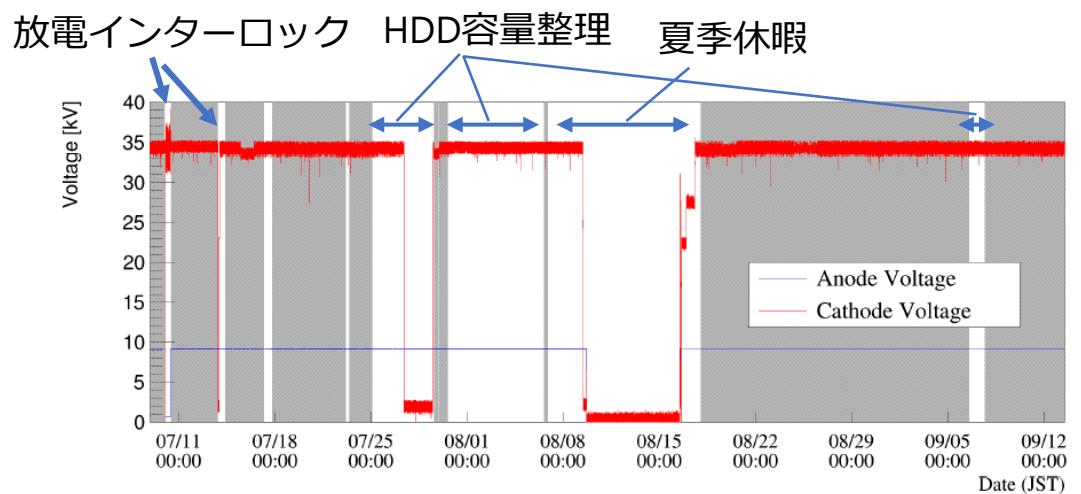
180L検出器でのデータ取得

15

- トリウムタンクスチーン棒（トリウム系列核種）をソースとして、積算で40日間のデータ取得を実施
- キセノン循環、純化
 - モレキュラーシーブ : H_2O , O_2 , CO_2 , etc
 - ゲッター : N_2



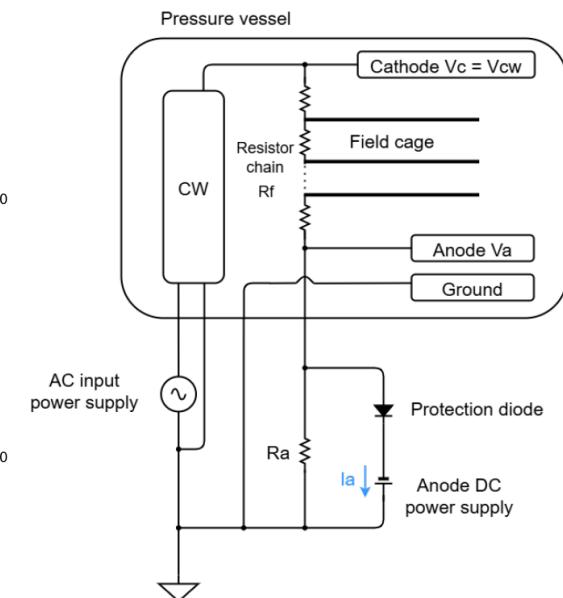
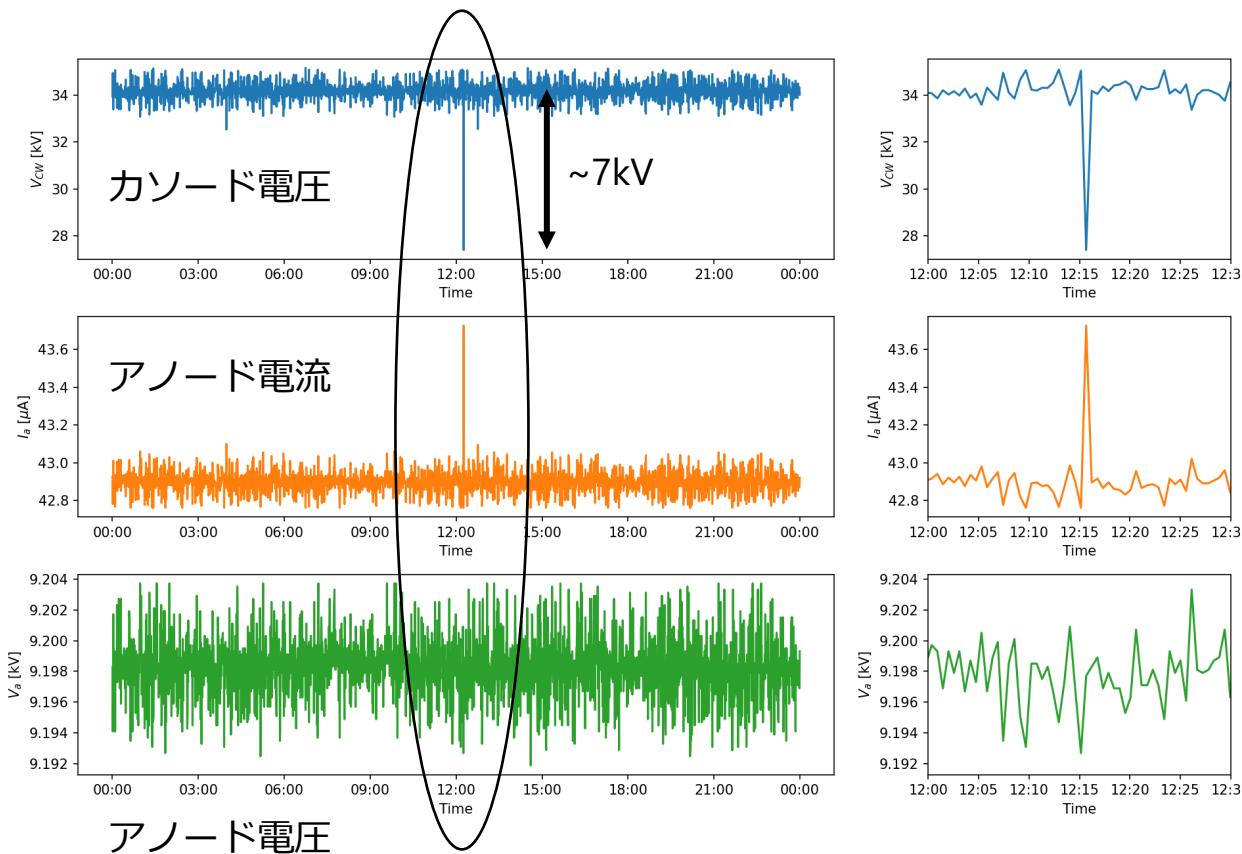
トリウムタンクスチーン棒の設置状況



CW回路の安定性

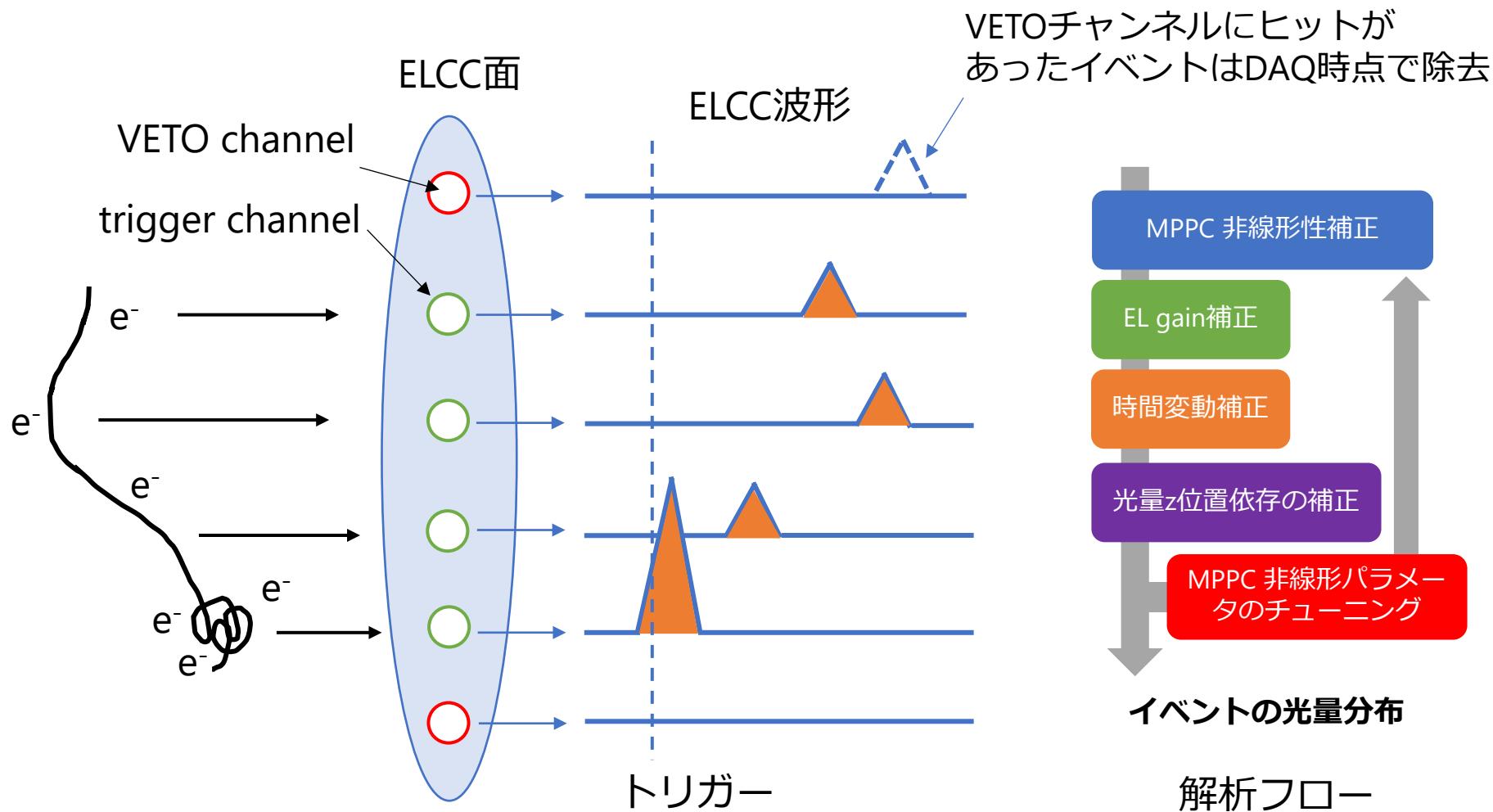
16

- CW出力電圧は、AnodeDC電源の電圧、電流モニター値から算出
- 放電に伴う瞬間的な電圧低下
 - 日に数回程度で、DAQの停止はなし
- CW回路へのAC入力の、MPPC信号ラインへの影響は見られず（1ADC count未満）



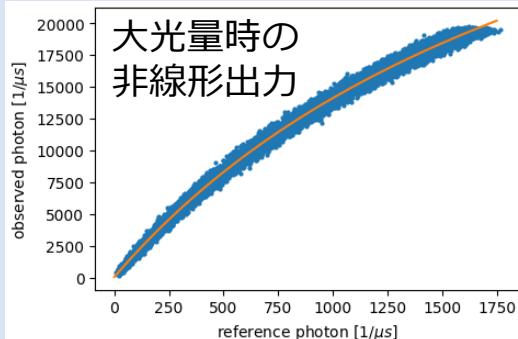
$$V_{CW} = V_c = \left(1 + \frac{R_f}{R_a}\right) V_a + R_f I_a,$$

- ELCC波形の積分値が光量（エネルギー）に対応
- 各種の補正（MPPCの非線形応答等）を適用



データ解析

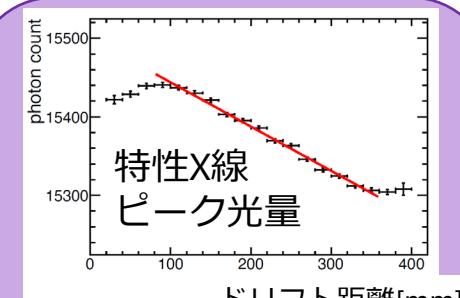
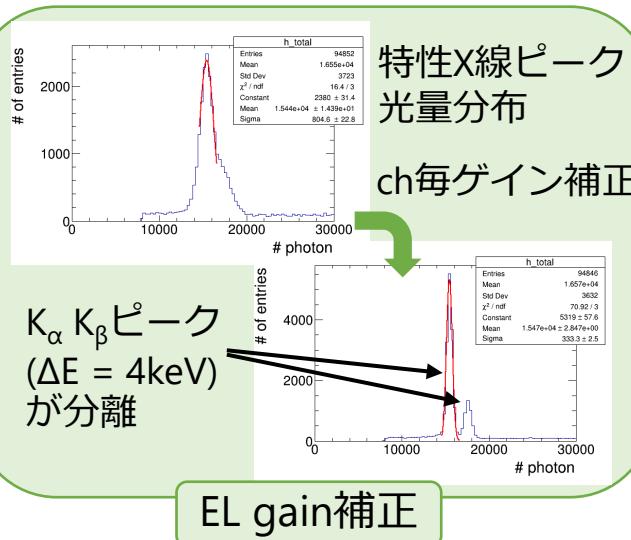
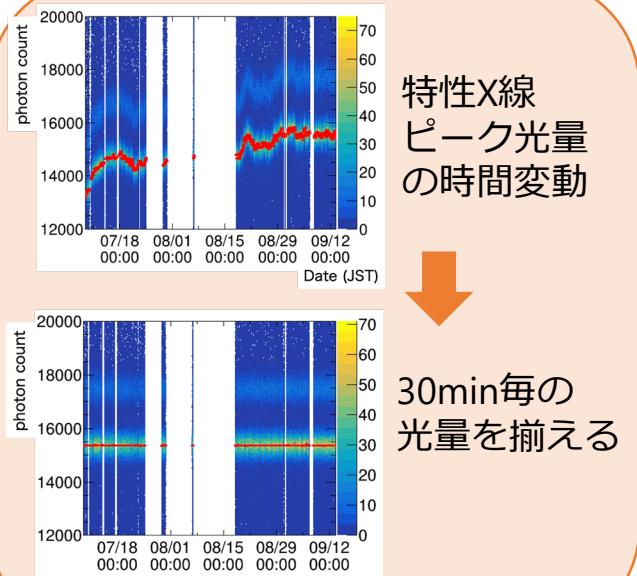
18



$$N_{\text{cor}} = \frac{N_{\text{obs}}}{1 - \frac{\tau}{\Delta t \cdot N_{\text{pixel}}} N_{\text{obs}}}$$

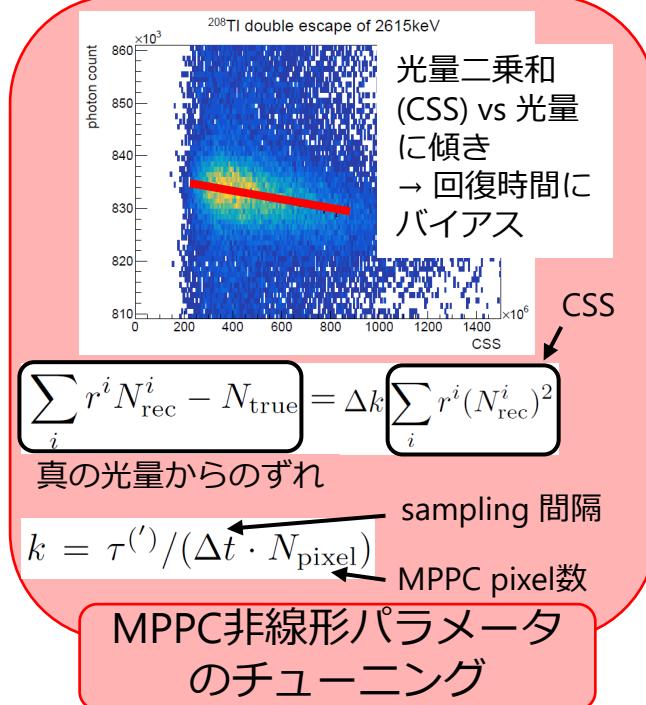
τ : 回復時間 (~70ns)

MPPC非線形性補正



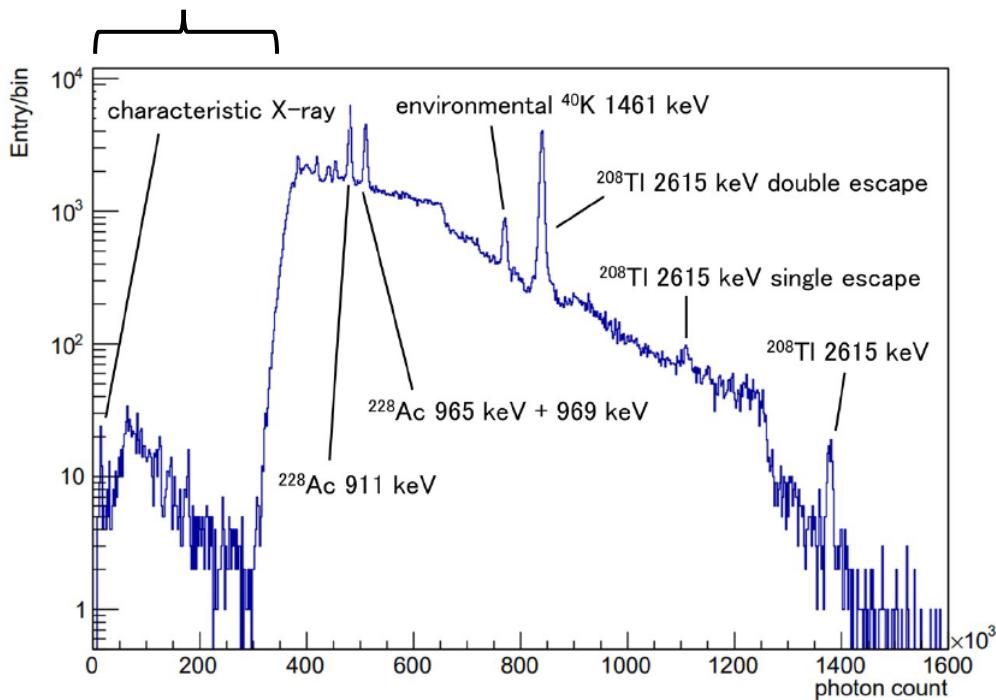
ドリフト距離長
→attachmentによる信号減少

光量z位置依存の補正



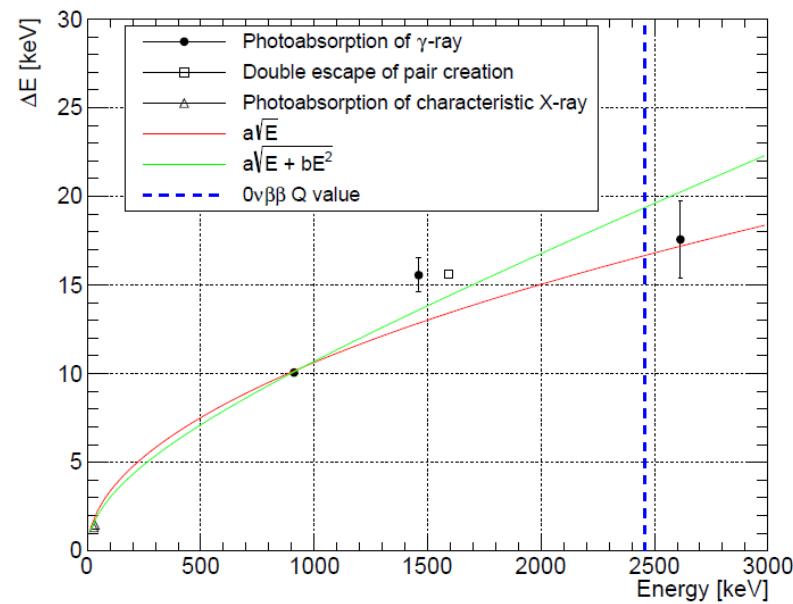
- 光電吸収ピークを線形 + ガウシアンフィット
- Q値での分解能を内挿
 - (0.678 ± 0.010) % FWHM for $a\sqrt{E}$** 統計誤差のみ
 - $(0.788 \pm 0.077) \% \text{ FWHM for } a\sqrt{E} + bE^2$ 統計誤差 + E比例の系統誤差

低エネルギー側はダウンサンプリング



イベント光量のスペクトル

CWを用いながら高エネルギー分解能を達成！[1]



分解能の内挿フィット

2615keVでのエネルギー分解能の内訳

20

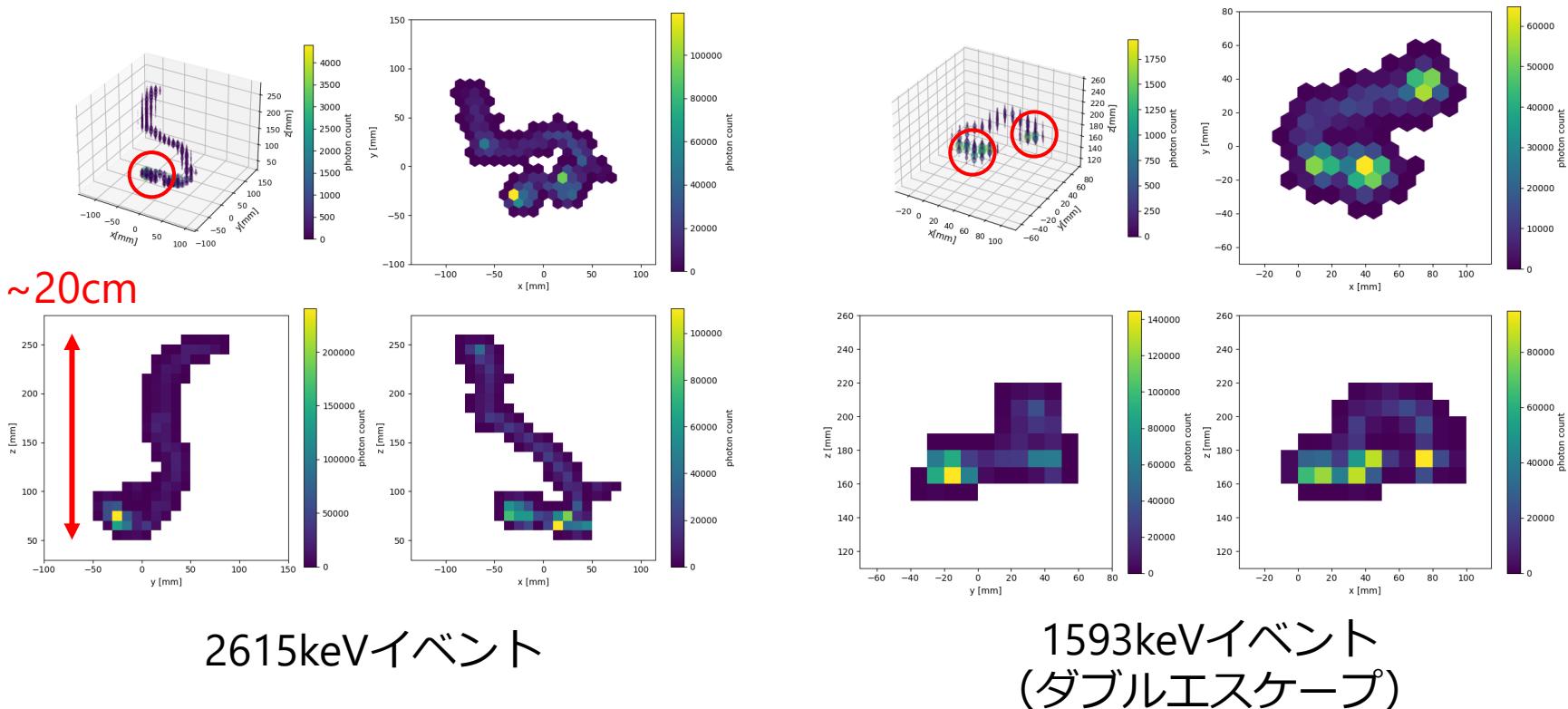
- 設計電圧90%での運用による分解能の悪化(ELgain低下、再結合)は **0.18%**
- Unknownな寄与が 0.25%

	Contribution	設計電圧 100%の場合
Initial ionization	0.25%	0.19 %
Z mis-reconstruction	0.24%	
Fluctuation of the EL generation and detection	0.20%	
Error in EL gain calibration	0.18%	
Error in time dependence correction	0.18%	
Recombination	0.17%	~ 0 %
Variation in time bin of time variation correction	0.12%	
Offset of the baseline	≤ 0.11%	
Error in z dependence correction	≤ 0.06%	
Fluctuation of the attachment	≤ 0.02%	
Accuracy of the MPPC recovery time	≤ 0.03%	
Fluctuation of the MPPC nonlinearity	not yet evaluated	
Estimation total	(0.52-0.54)%	
Data total	(0.67±0.08)%	

3D トラック例

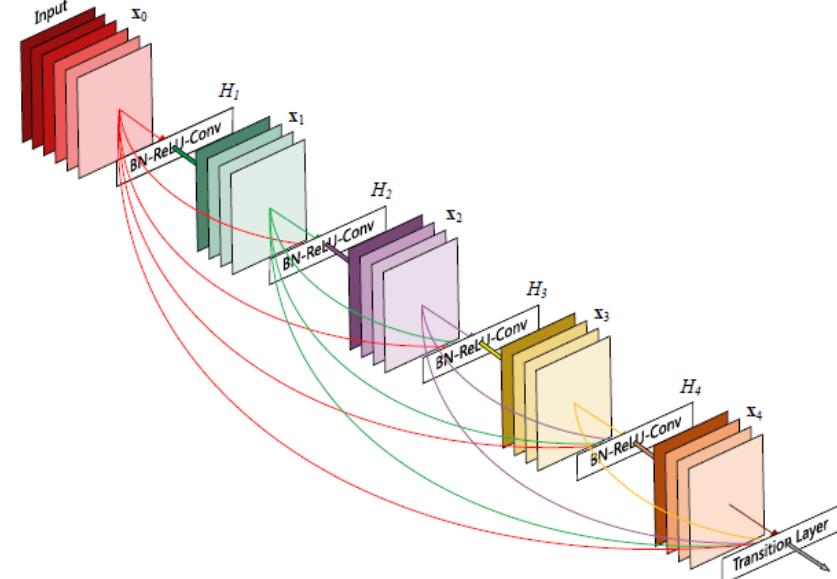
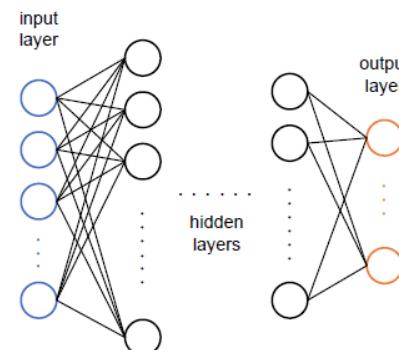
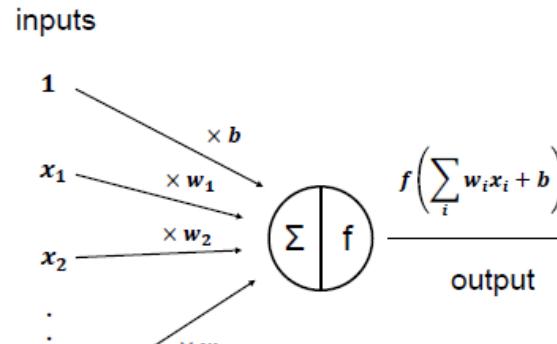
21

- 再構成されたトラック
 - 2.6MeVでは xyz 各辺~20cm程度の広がり (6.8bar Xe に対するCSDA rangeは~50cm)
 - 粒子数によるトラック終端の「プロブ」の違い
 - 光電吸収イベント (1電子) はトラック終端のプロブが**1個**
 - ダブルエスケープイベント (1電子、1陽電子)はプロブが**2個**
- 飛跡情報を用いた $0\nu\beta\beta$ (2blob)とBG(1blob)の識別に利用



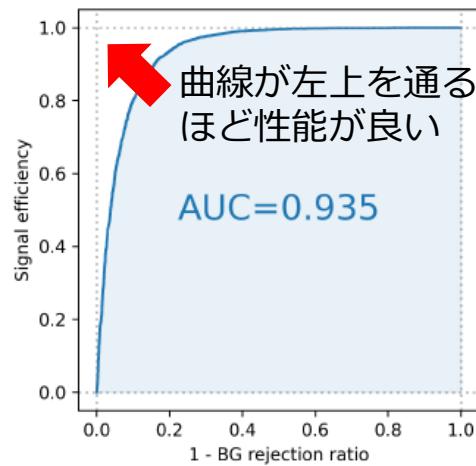
- Introduction
- AXEL experiment
- Cockcroft-Walton multiplier による高電圧生成
- 機械学習を用いた信号-バックグラウンド識別
- Results/Discussion
- まとめ

- 脳の神経細胞を模したネットワーク
- 各層のニューロンの線形結合 + 非線形関数の組み合わせ
- 線形結合の重みを調整することで (入力-出力) 関係を近似
- 本研究ではDenseNet[1] を3D化したものを使用
→ トランクを3次元格子データに変換してモデルへ投入



[1] arXiv:1608.06993 [cs.CV]

- モデルが output する、信号(0vββ)、バックグラウンド確率と、正解ラベルをもとに評価
- Accuracy
 - データを正しく分類できた割合
 - 0vββとバックグラウンドの閾値は、確率0.5
- Receiver operating characteristic (ROC) curve
 - 閾値を変化させながら、True positive rate (Signal efficiency) と False positive rate (1-BG rejection ratio) をプロット
 - 理想的な場合、左上隅に張り付いたカーブになる
 - カーブ下の面積 Area Under the Curve (AUC) で評価



ROC曲線の例

モデルの出力
0vββ BG

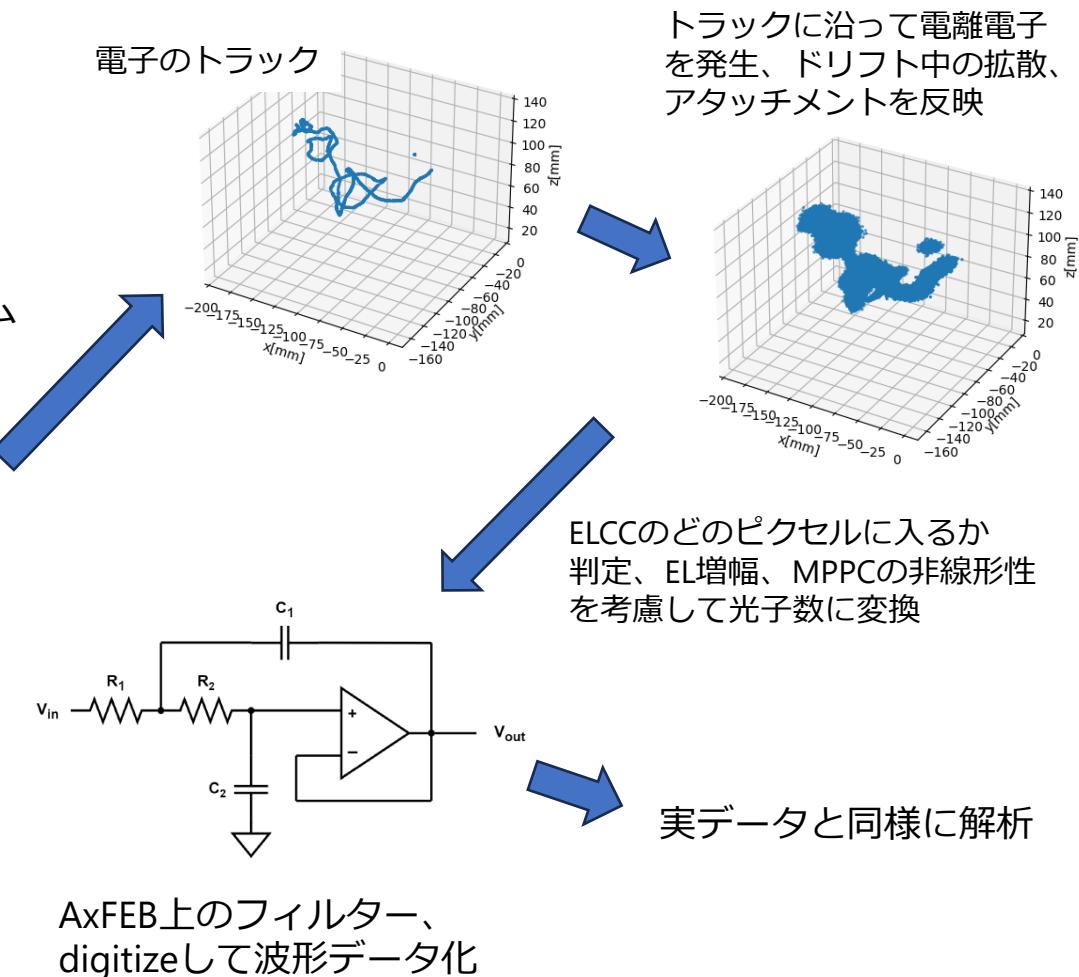
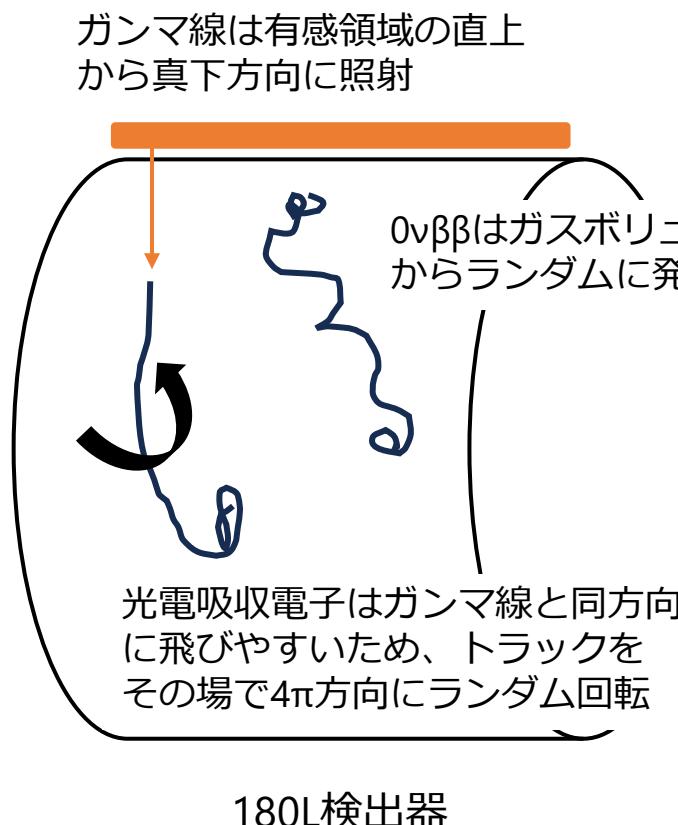
		Prediction	
		Positive	Negative
Label	Positive	TP	FN
	Negative	FP	TN
正解			

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{TN} + \text{FN}}$$

$$\text{FPR} = \frac{\text{FP}}{\text{FP} + \text{TN}} = 1 - \frac{\text{TN}}{\text{FP} + \text{TN}}$$

$$\text{TPR} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}$$

- Geant4で $0\nu\beta\beta$ と γ 線由来のBGをGeant4を用いてシミュレーション
- 実測データと比較するために、 $0\nu\beta\beta$ 、 γ 線とともに、エネルギーは ^{208}TI の2615keVに設定

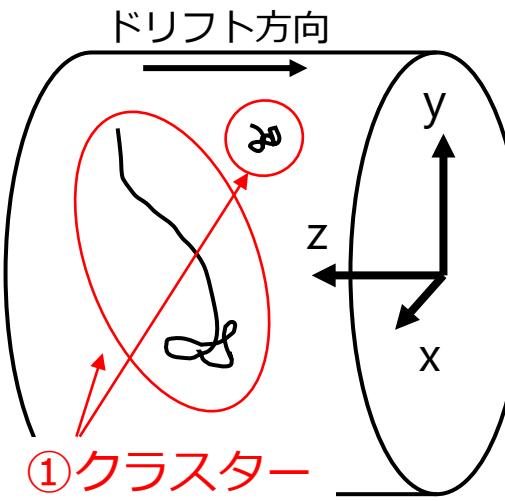
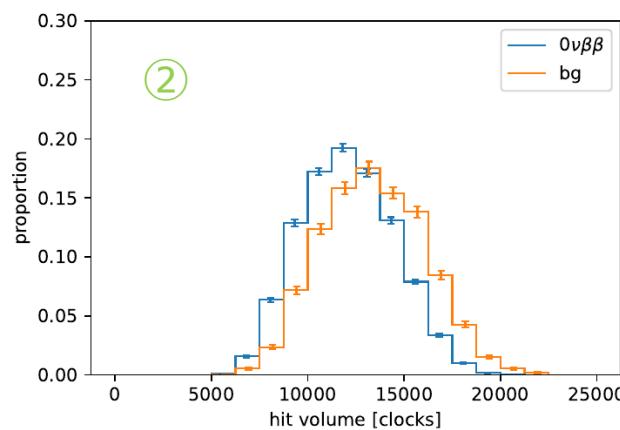
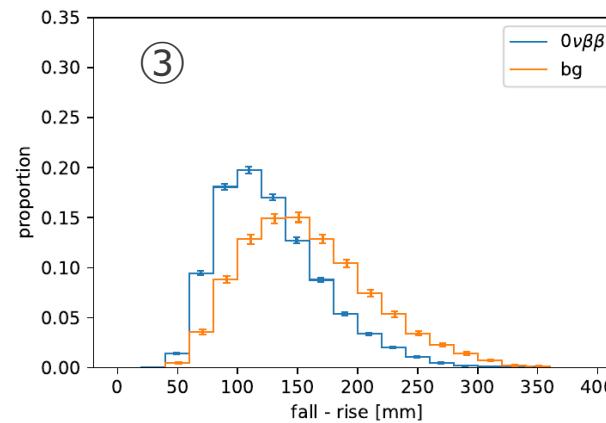
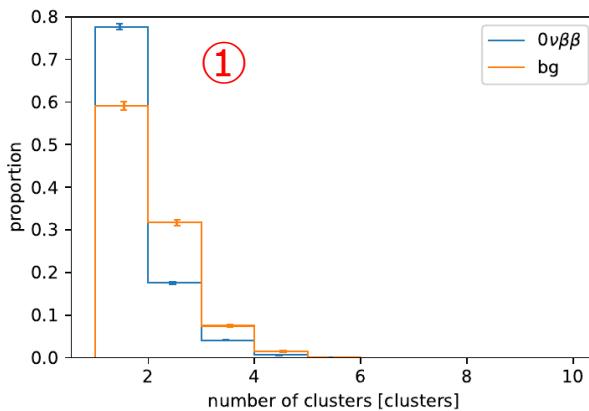


データセットの特徴

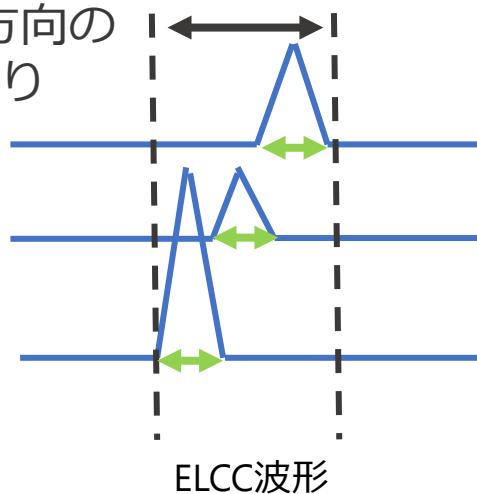
26

・シミュレーションデータの $0\nu\beta\beta$ とBGの比較

- ① クラスター数 : $0\nu\beta\beta < \text{BG}$ (コンプトン効果の有無、制動放射の頻度)
- ② トランク体積 : $0\nu\beta\beta < \text{BG}$ (電子の飛跡の長さ)
- ③ トランクのz方向の広がり : $0\nu\beta\beta < \text{BG}$ (電子の飛跡の長さ)



③z方向の
広がり



②全ヒットの
クロック数の合計
→トランク体積

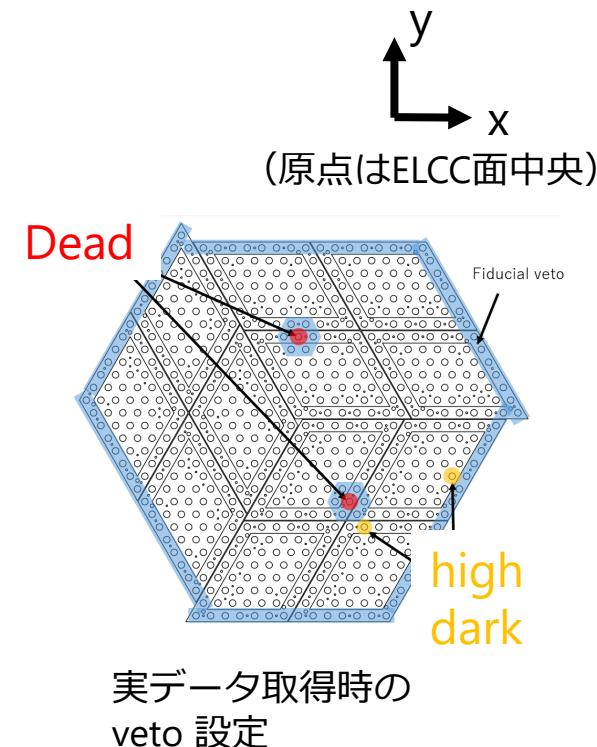
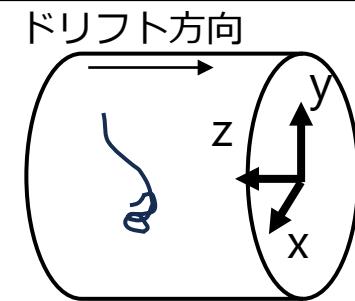
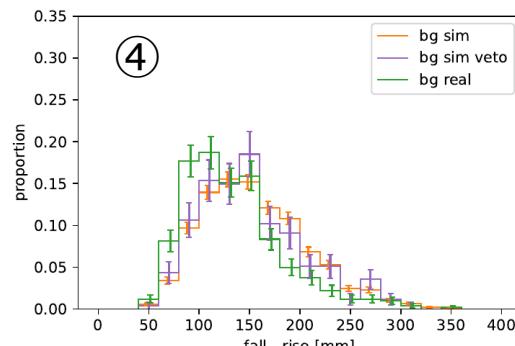
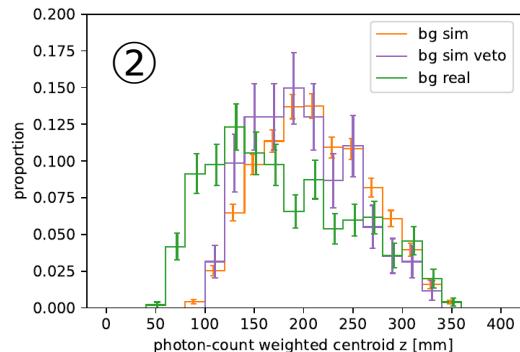
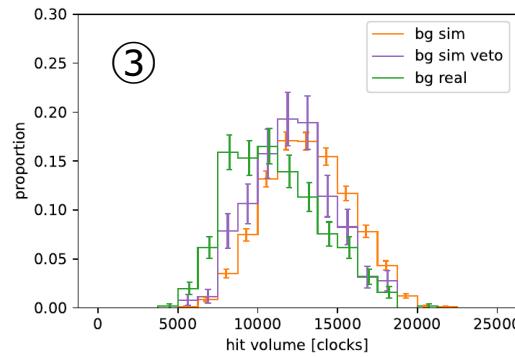
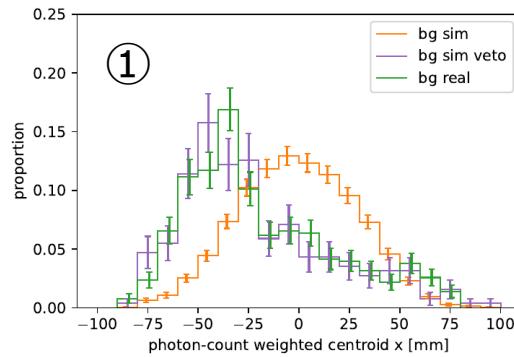
データセットの特徴

27

- シミュレーションのBGと実データのBGの比較

- 光量のx方向重心： 実データ < シミュレーション
- 光量のz方向重心： 実データ < シミュレーション
- トラック体積： 実データ < シミュレーション
- z 方向の広がり： 実データ < シミュレーション

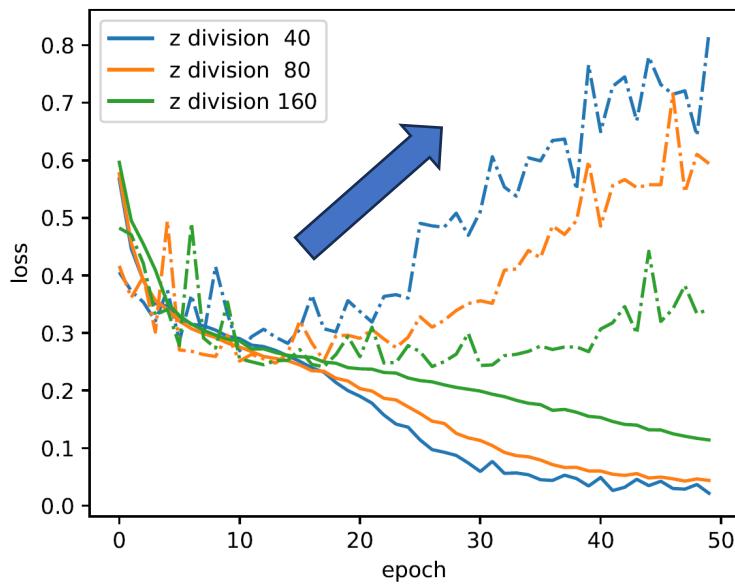
- シミュレーションデータから、dead周囲、high dark の veto にヒットのあるイベントを除去 → x方向重心は実データに漸近、トラック体積、z 位置については一致せず



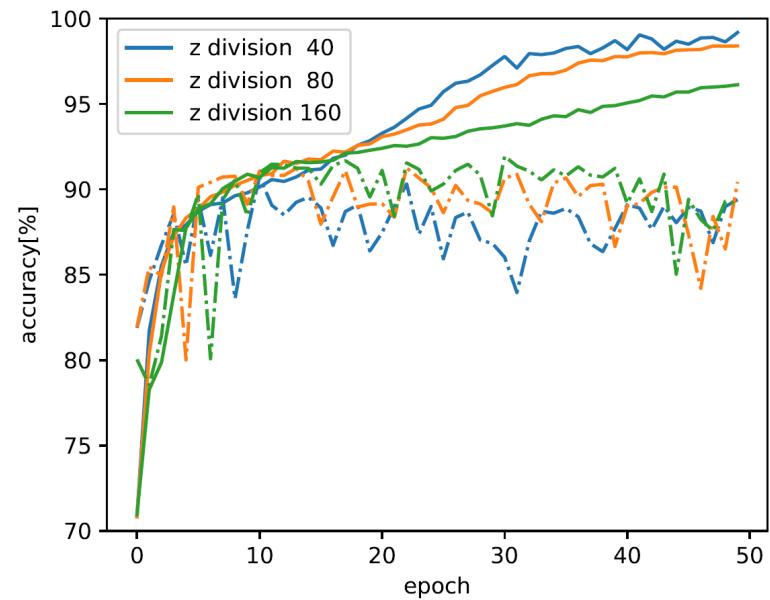
- Introduction
- AXEL experiment
- Cockcroft-Walton multiplier による高電圧生成
- 機械学習を用いた信号-バックグラウンド識別
- Results/Discussion
- まとめ

- トラックの光量の規格化方法、z方向の分割数を変化させながらトレーニングを実施
- バリデーションデータに対して、Accuracy **91.7%** を達成

10~20 epoch以降
で過学習傾向



実線：トレーニングデータ
破線：バリデーションデータ

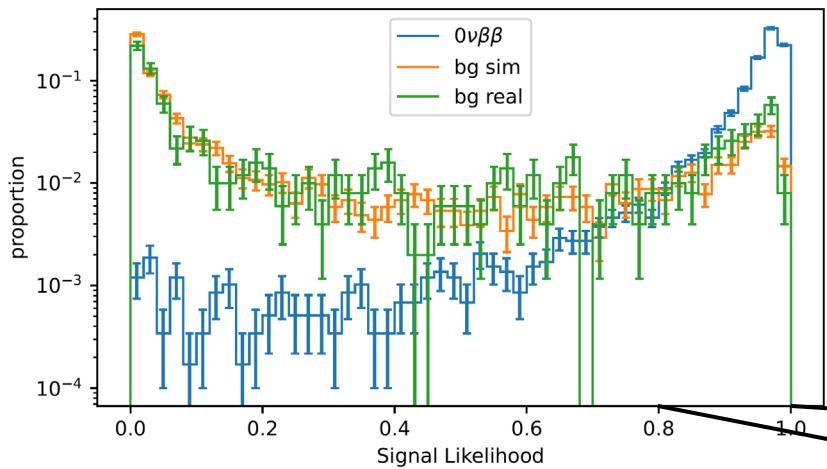


学習曲線（z 方向の分割数）

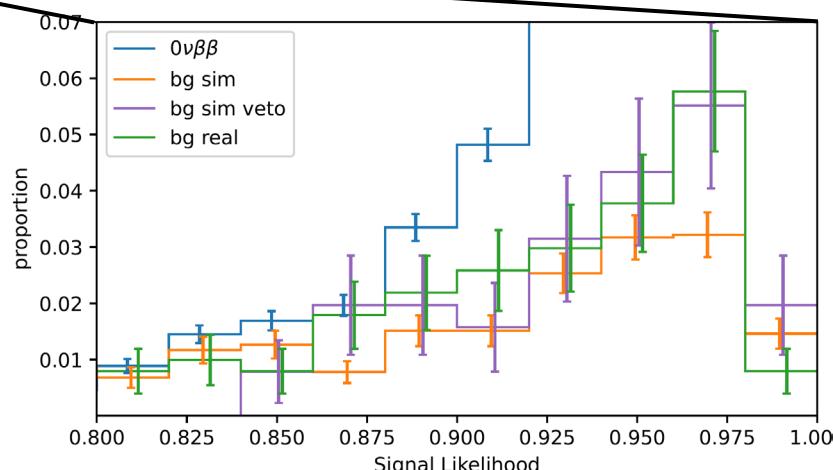
Signal likelihood

30

- モデルが出力する、「トラックがsignal ($0\nu\beta\beta$) である確率」の分布
- $0\nu\beta\beta$ は~1に、バックグラウンドは~0に分布するのが理想
- 実データ（バックグラウンド）の方が、signal likelihood が大きい領域の頻度が多い → validationデータへのveto適用により分布が漸近



シミュレーション（橙）と
実データ（緑）にずれ



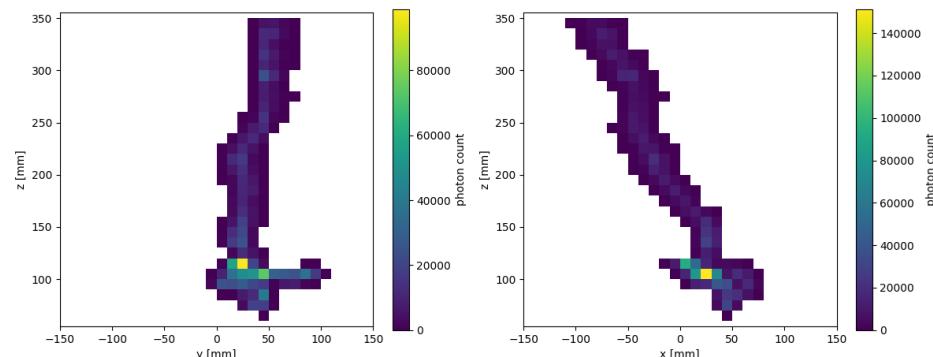
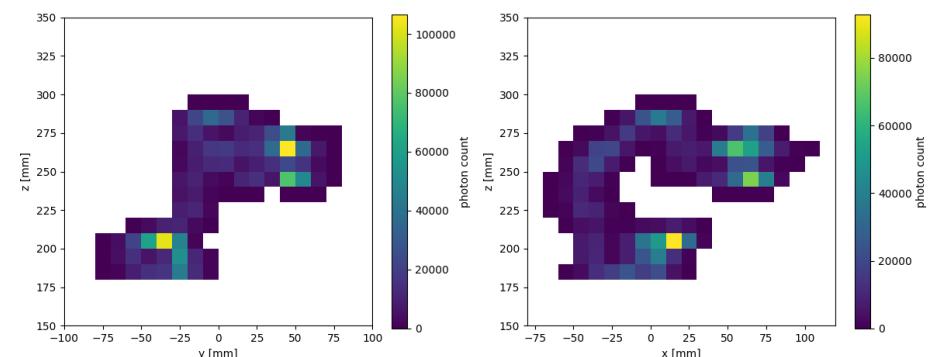
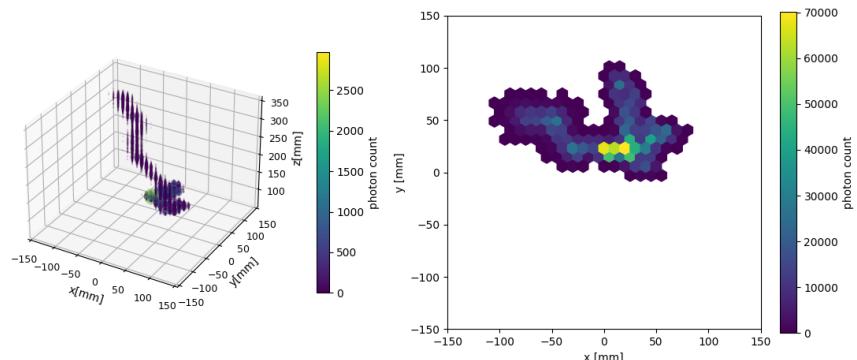
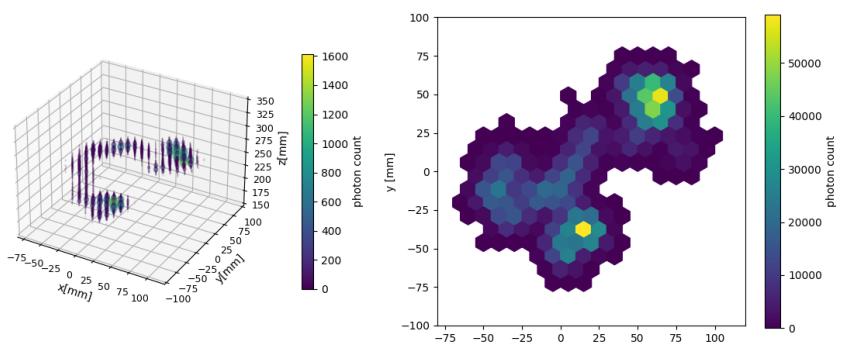
シミュレーション（橙）に
vetoを適用（紫）すると
実データ（緑）に漸近

→ vetoによる有感領域への
バイアスが分布を歪めた主な要因

validationデータの誤識別イベント例

31

- BGイベントだが、2プロブのイベントや、 $0\nu\beta\beta$ だが1プロブに見えるイベントが見られる→自然な間違い方をしている



BGだが $0\nu\beta\beta$ ライクなイベント

$0\nu\beta\beta$ だがBGライクなイベント

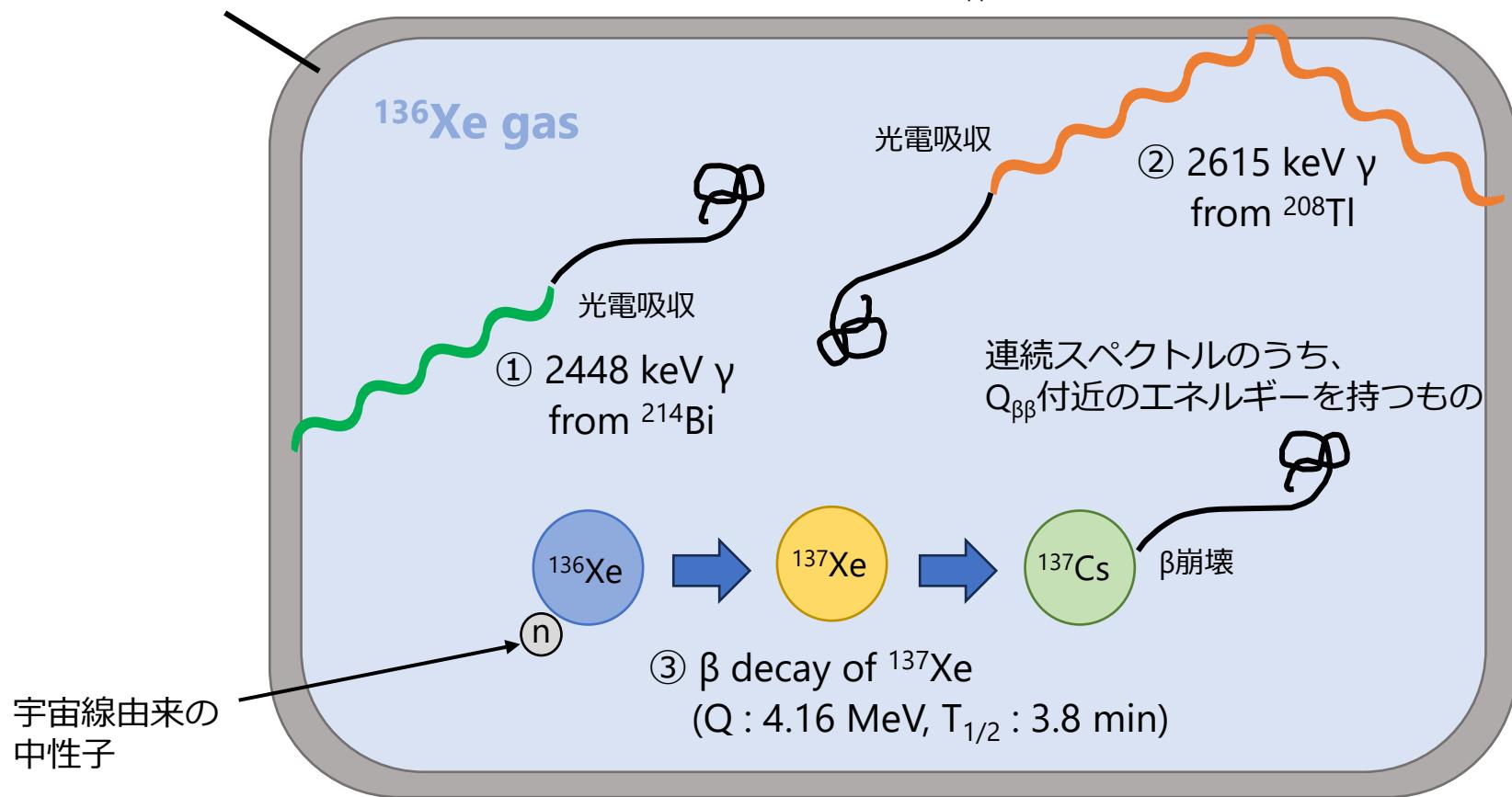
Sensitivityの評価

32

- 将来の1トン検出器での $0\nu\beta\beta$ 探索の感度を評価
- 3種類のバックグラウンド(^{214}Bi , ^{208}TI , ^{137}Xe)を考慮

圧力容器には、ウラン系列 (^{214}Bi)、
トリウム系列 (^{208}TI) の放射性BGが含まれている

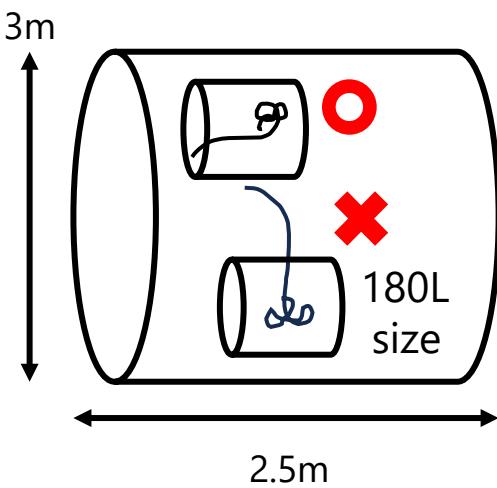
コンプトン散乱によってエネルギーを落とし、
 $Q_{\beta\beta} = 2458 \text{ keV}$ 付近のエネルギーを持つもの



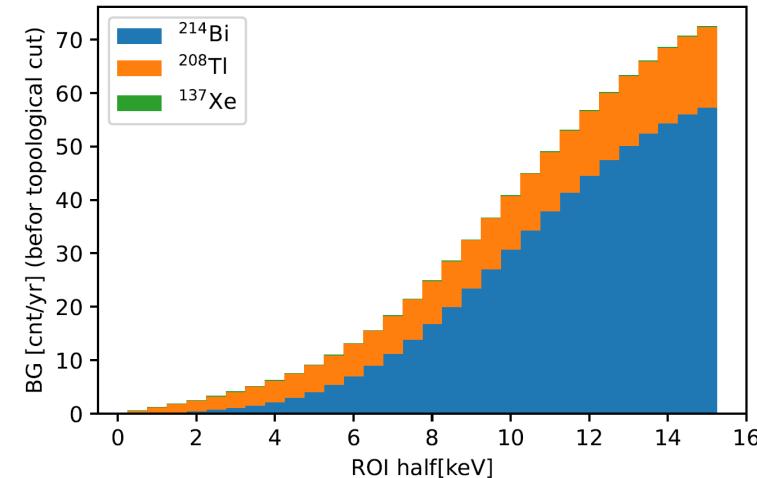
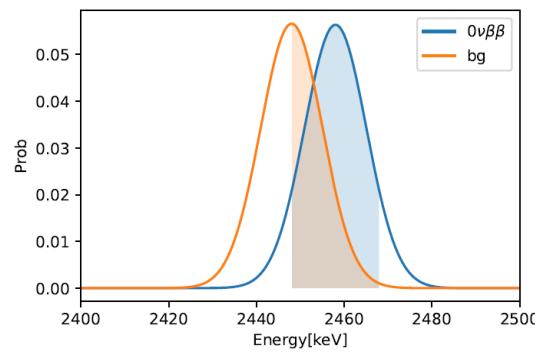
Sensitivityの解析の流れ

33

Volume cut

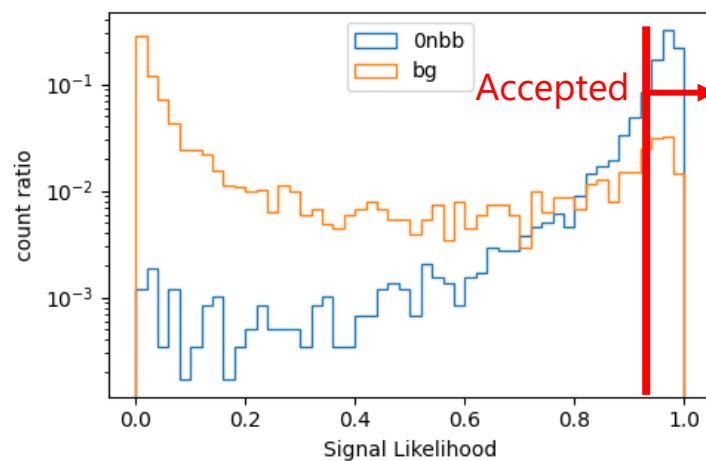


ROI cut



Topological cut (DL)

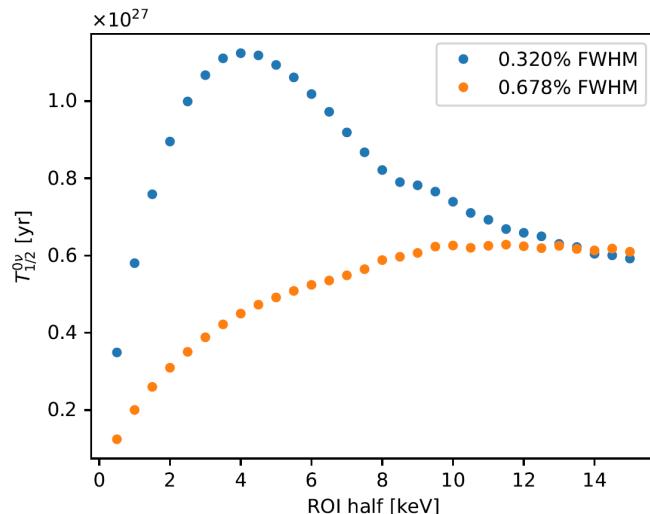
threshold を変えながら
最大感度を評価



Sensitivity解析結果

34

- 2種類の材質の圧力容器 (SUS304, 無酸素銅) を仮定
- 本研究で得られたエネルギー分解能 (0.678%) および、今後の改善を見込んだ分解能 (0.320%) で評価
- 各ROI幅を仮定した場合の10年での探索感度
 - SUS304
 - 9.61×10^{25} year (0.678% FWHM)
 - 3.57×10^{26} year (0.320% FWHM)
 - 無酸素銅
 - 6.28×10^{26} year (0.678% FWHM)
 - **1.12×10^{27} year (0.320% FWHM)**



無酸素銅圧力容器でのROI幅に対する感度変化

	無酸素銅容器 0.320%分解能
片側 ROI 幅	4.0 keV
トポロジーカット threshold	0.931
トポロジーカット効率 $0\nu\beta\beta$	0.757
トポロジーカット効率 BG	0.086
BG数 ^{214}Bi	2.2
BG数 ^{208}Tl	4.0
BG数 ^{137}Xe	0.033
信号上限値	5.3

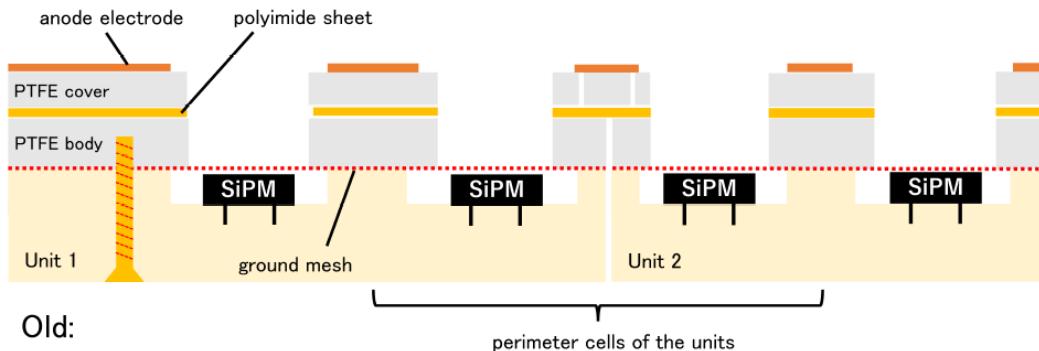
- Introduction
- AXEL experiment
- Cockcroft-Walton multiplier による高電圧生成
- 機械学習を用いた信号-バックグラウンド識別
- Results/Discussion
- まとめ

- ニュートリノのマヨラナ性の検証は、ニュートリノ質量、宇宙の物質・反物質非対称性を理解する鍵
- AXEL実験
 - 高圧キセノンガスTPCを用いた ^{136}Xe の0v $\beta\beta$ 探索
 - 大型化に向けた技術開発
- CW回路
 - 圧力容器内部での高電圧生成 → 高耐圧フィードスルーが不要、大型化に重要
 - 入力AC電源からのMPPC信号へのノイズの影響なし
 - 安定的に40日間のデータ取得を達成 → 出力モニターしながらの運用は世界初[1]
- DeepLearning
 - シミュレーションデータセットでDenseNetベースのモデルをトレーニング
 - 実データとの差異を検証 → Vetoによる分布変化、Z位置や体積は再現性が悪いが likelihoodの分布は漸近
- 将来の1トン検出器での感度予想
 - SUS304、無酸素銅圧力容器、10年の観測期間
 - エネルギー分解能は実測ベース (0.678%) と改善見込み (0.320%) を仮定
 - バックグラウンド源として ^{214}Bi , ^{208}Tl , ^{137}Xe を考慮
 - DeepLearningによるトポロジーカットを用いることで、 1.12×10^{27} year の感度が見込まれる

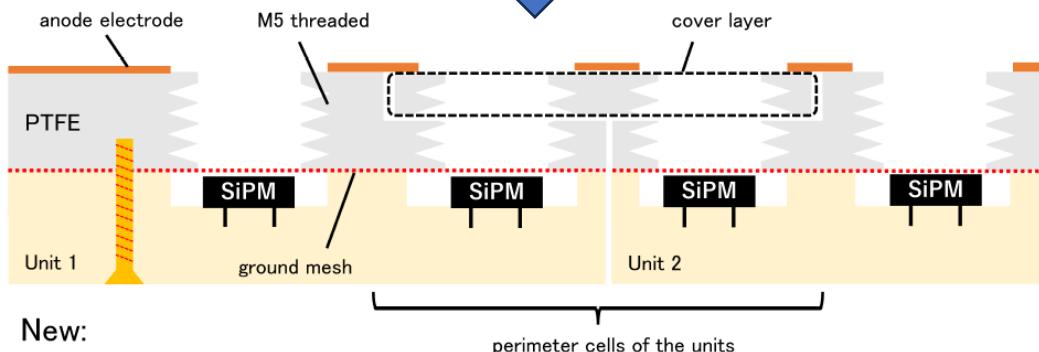
ELCC upgrade

38

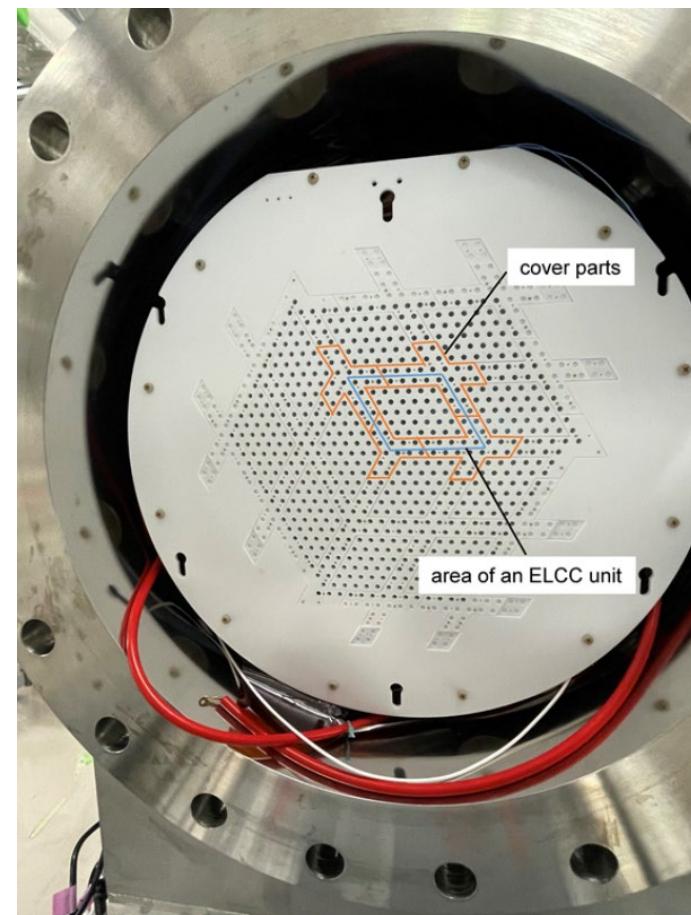
- タップ穴 + ユニット辺縁を別パーツでカバーすることで放電経路を延長



Old:
perimeter cells of the units



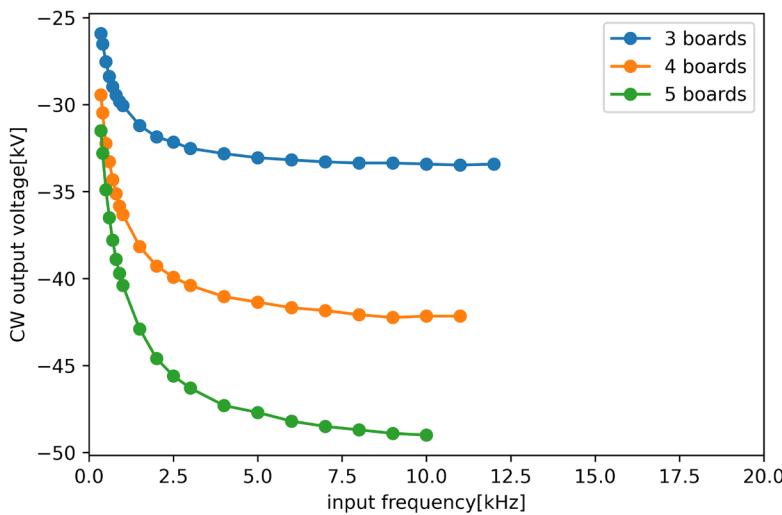
New:
perimeter cells of the units



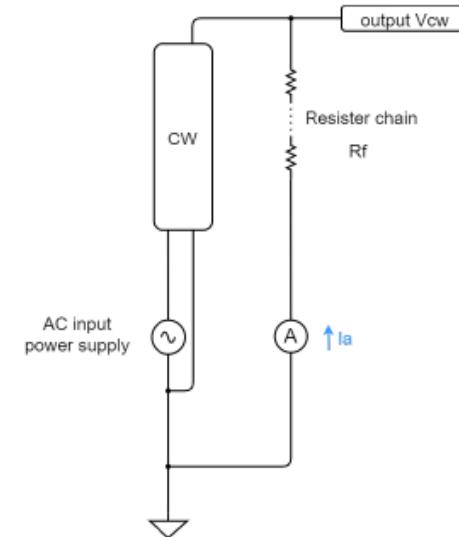
HV generation

39

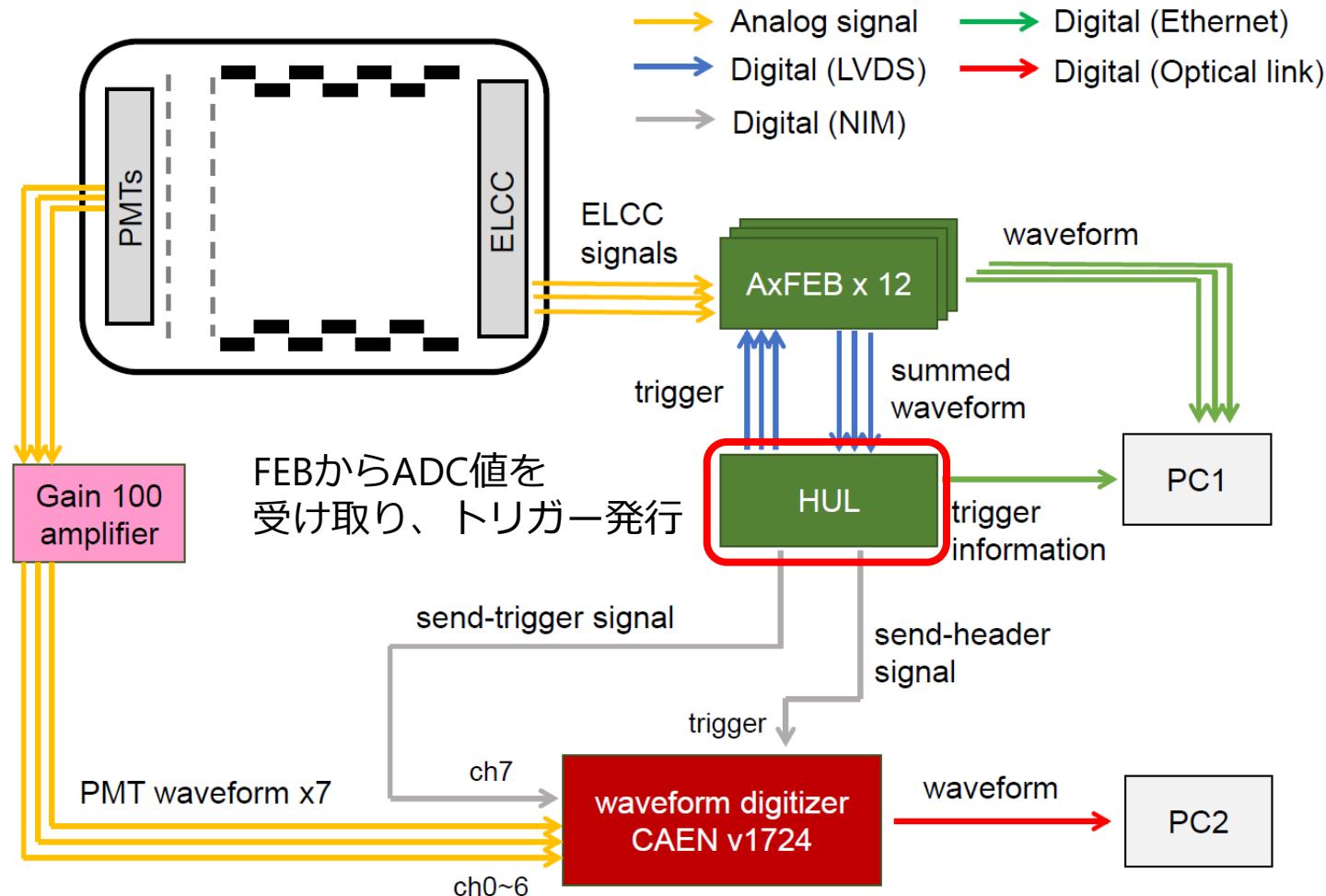
- 空気中で、昇圧試験を実施
- 抵抗チェーンを流れる電流から出力電圧を算出
- 多段化による昇圧を確認
 - 入力周波数増に従って出力電圧増
 - 周波数上昇に伴い、CWの入力に使用しているアンプが不安定化
→ 容量性負荷による電流リミット、180L検出器での運用には問題なし

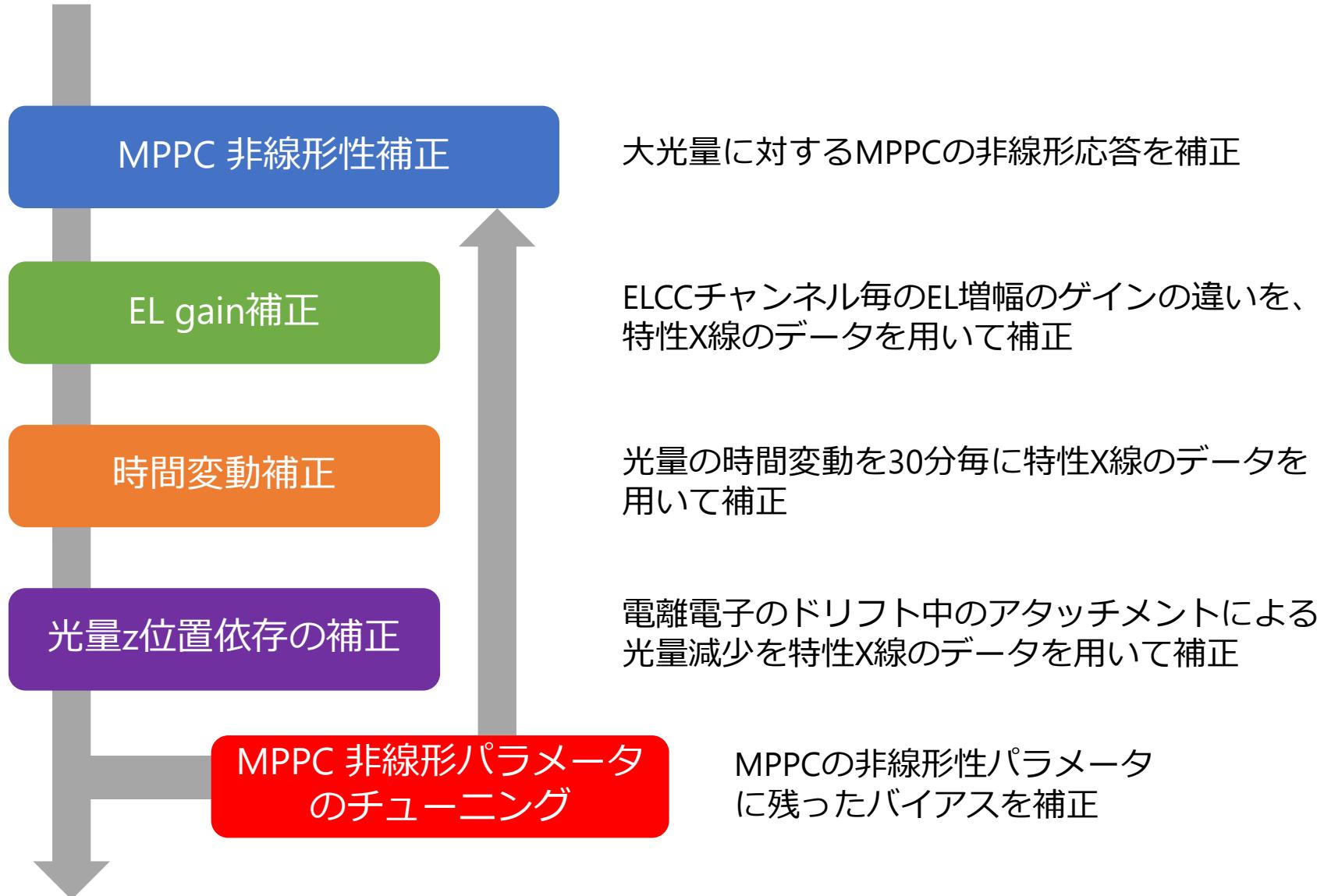


1200Vpp入力時のCW出力電圧

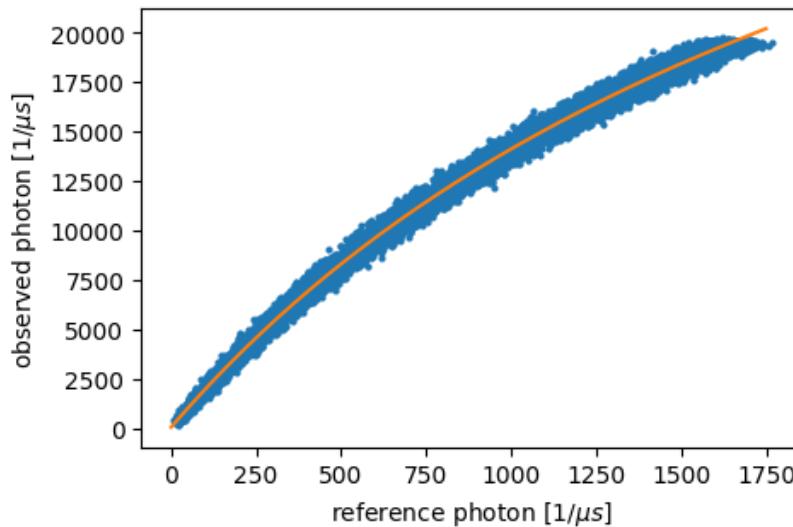


- ELCC波形のADC値合計がthresholdを超えるとトリガーを発行、波形を記録する
- fiducial trigger rate : 平均10.5Hz





- 大光量時のMPPC出力信号の線形からのずれ
- LEDを用いたキャリブレーションで得た回復時間を使用



$$N_{\text{cor}} = \frac{N_{\text{obs}}}{1 - \frac{\tau}{\Delta t \cdot N_{\text{pixel}}} N_{\text{obs}}}$$

τ : MPPC回復時間
典型的な値 (~70ns)

- ELCCチャンネル毎のEL増幅の違いを補正
- 各チャンネルのK α 線のピークが一致するように補正係数をかける

MPPC 非線形性補正

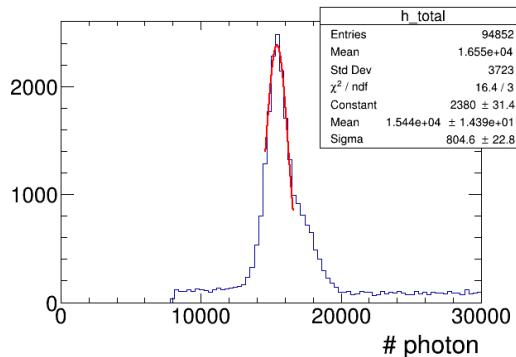
EL gain補正

時間変動補正

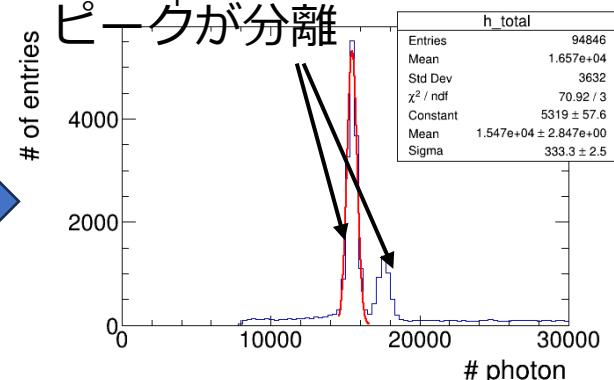
光量z位置依存の補正

MPPC 非線形パラメータのチューニング

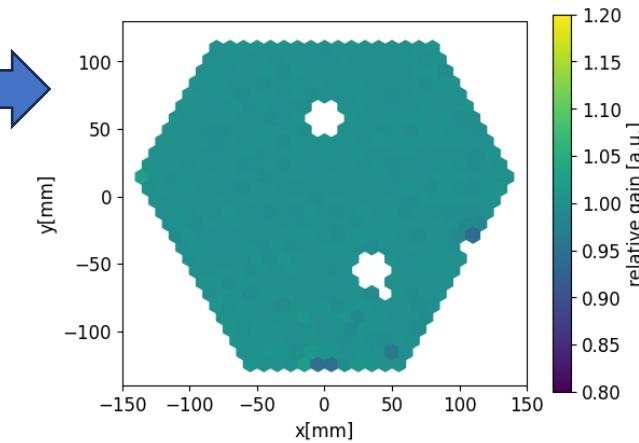
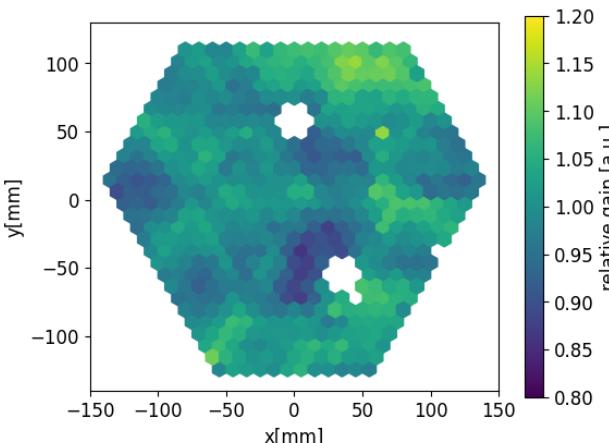
of entries



K α 、K β 特性X線の
ピークが分離



y[mm]



各チャンネルの相対ゲイン

- ガス純度等による光量の時間変動の補正
- attachmentの効果による光量のz位置依存性の補正

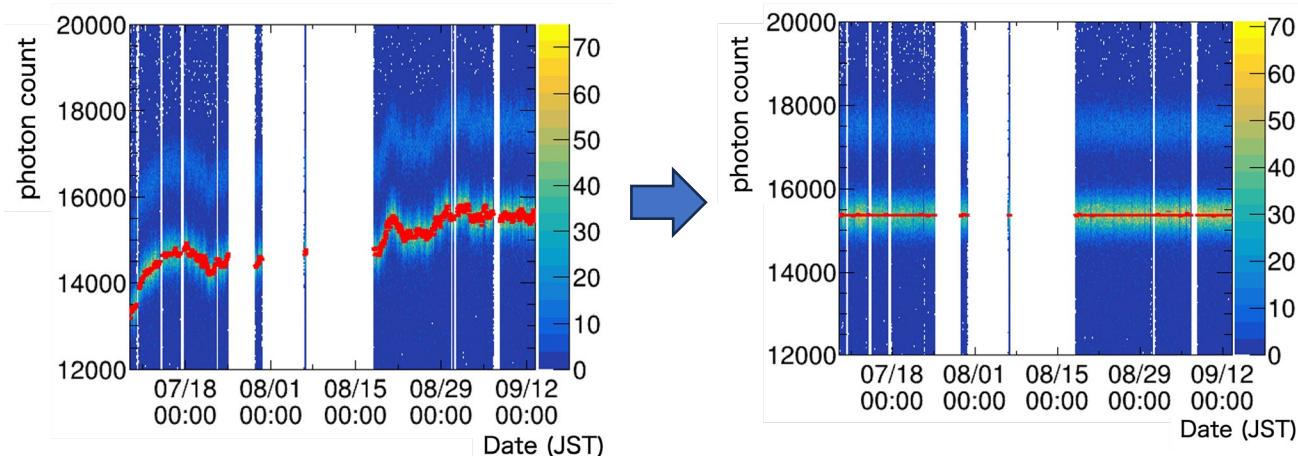
MPPC 非線形性補正

EL gain補正

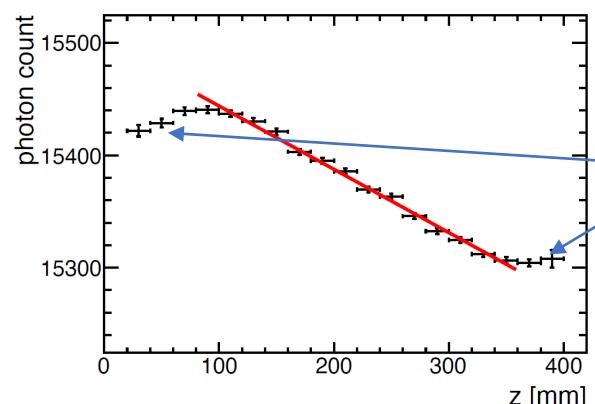
時間変動補正

光量z位置依存の補正

MPPC 非線形パラメータのチューニング



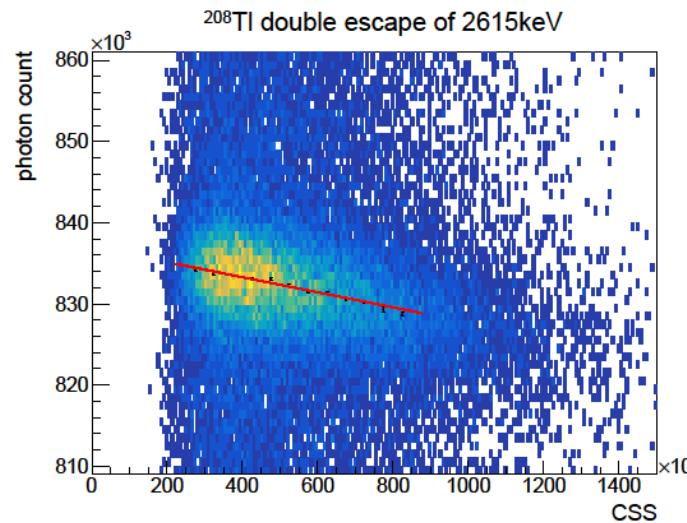
K α 特性X線ピークの時間変化



z 位置再構成のミス
MPPC非線形性補正の不足

K α 特性X線ピークのz位置依存性

- MPPC回復時間にバイアス→光子数 vs 各サンプリングの光子数の二乗和のプロットに傾き
- MPPC回復時間をシフトして再度非線形性補正からやり直す



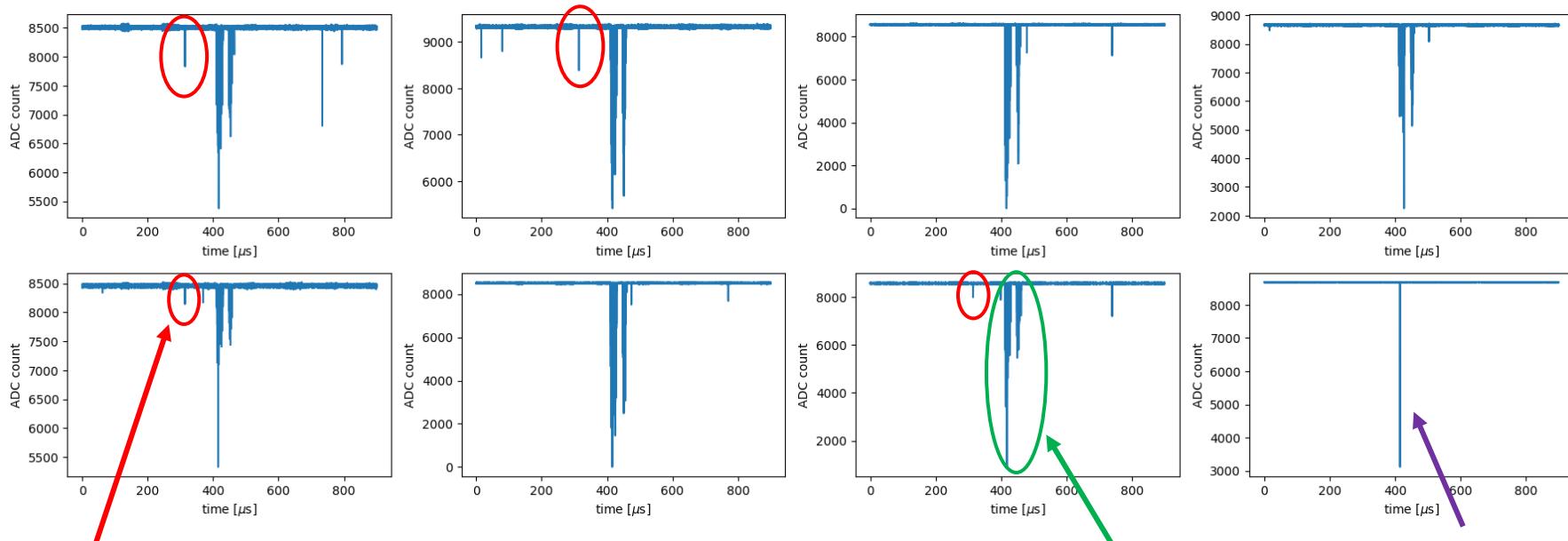
$$\sum_i r^i N_{\text{rec}}^i - N_{\text{true}} = \sum_i \frac{r^i N_{\text{obs}}^i}{1 - k' N_{\text{obs}}^i} - N_{\text{true}} \simeq \Delta k \sum_i r^i (N_{\text{rec}}^i)^2$$

$k = \tau^{(t)} / (\Delta t \cdot N_{\text{pixel}})$
 MPPC回復時間 サンプリング間隔 MPPCピクセル数

PMT analysis

46

- 幅400ns以下、他と1μs以上離れているヒット(scintillation-like hit)
- 100ns範囲で2個以上 coincidence しているクラスターが1個
- 複数トリガーが発行されていない
- シンチレーション光領域で EL-like hit がない



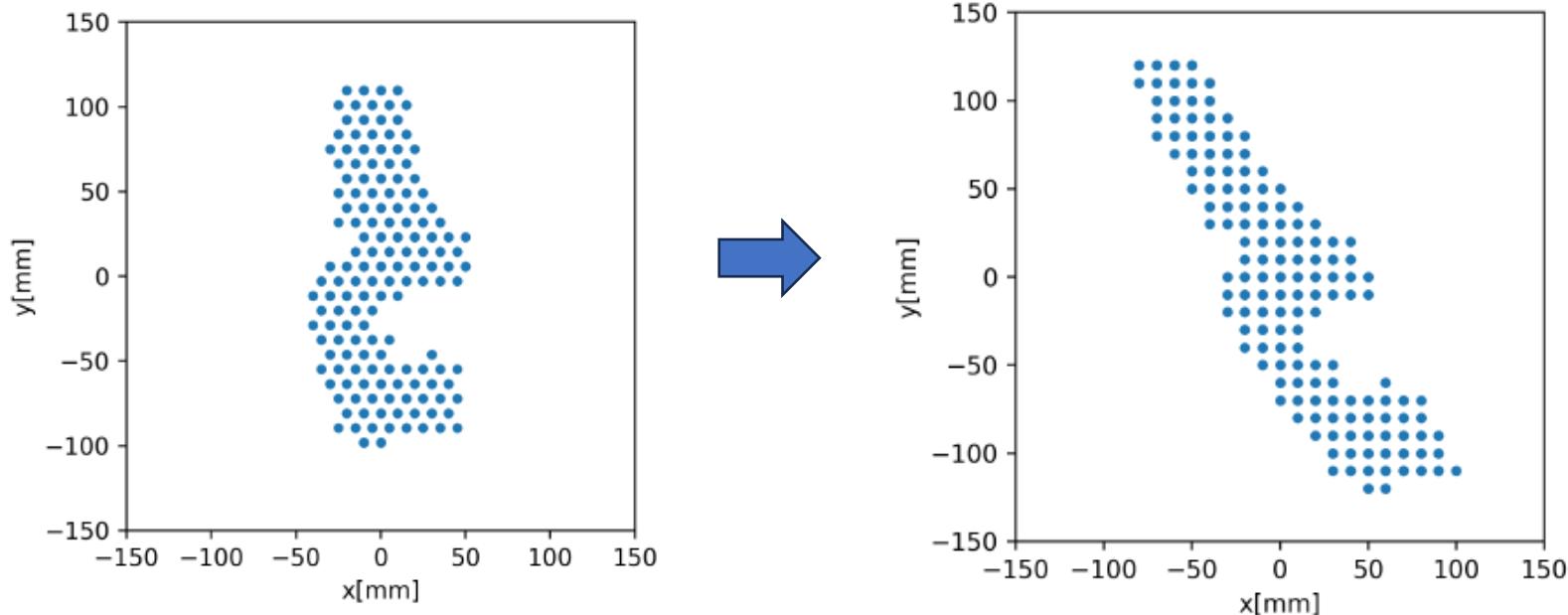
scintillation-like hit
(4 coincidence)

EL-like hit

trigger

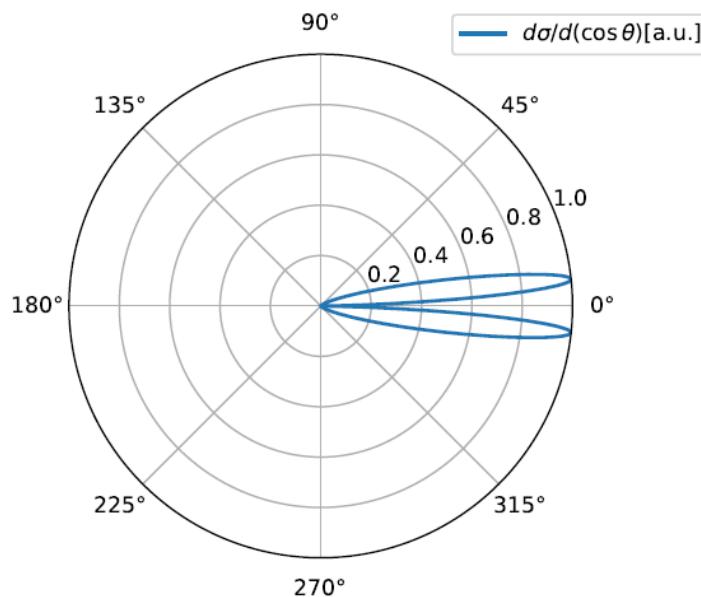
- ELCCの六角格子構造を、正方格子に変換

$$A_{\text{skew}} = \begin{pmatrix} 1 & \tan \frac{\pi}{6} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, A_{y-\text{exp}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2/\sqrt{3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

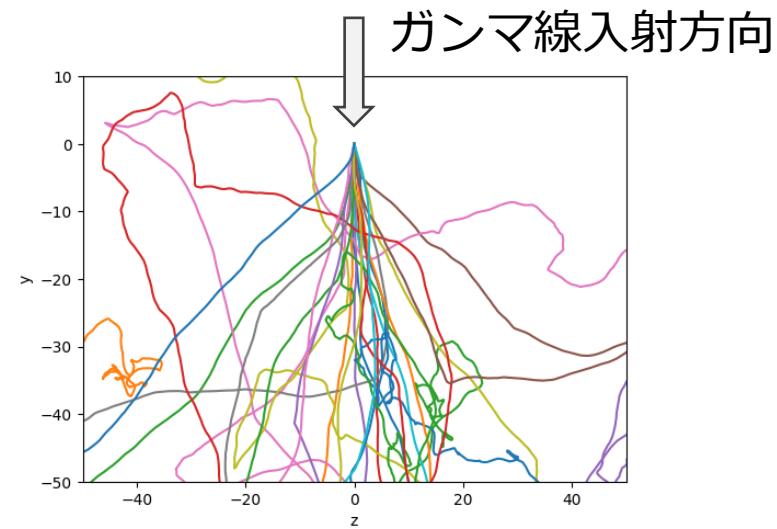


- Sauter-Gabrila distribution

$$\frac{d\sigma}{d(\cos \theta)} \sim \frac{\sin^2 \theta}{(1 - \beta \cos \theta)^4} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \gamma(\gamma - 1)(\gamma - 2)(1 - \beta \cos \theta) \right\}$$



放出角度分布



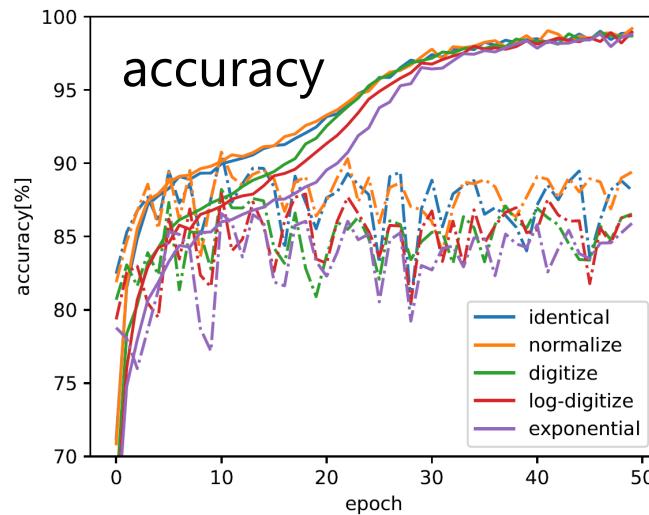
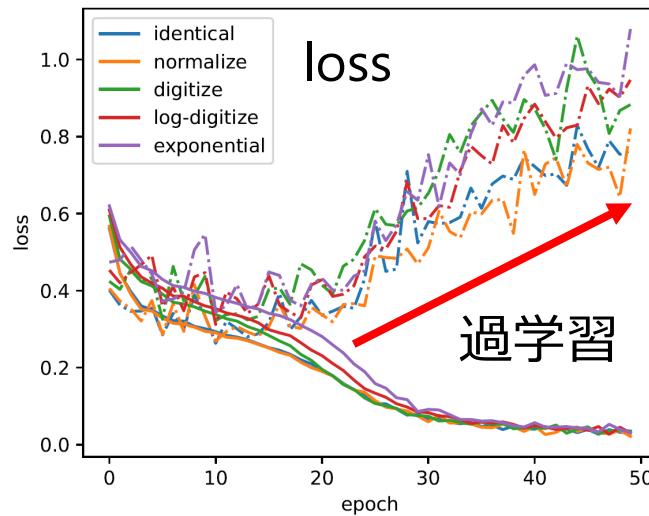
光電吸収電子のトラック例
(シミュレーション)

モデルのトレーニング(規格化手法)

49

- 光量の規格化手法の違いによる性能比較
- identical, normalize がその他に比べて若干良い傾向
- 10epoch以降で過学習傾向

実線：トレーニングデータ
破線：バリデーションデータ



identical : 規格化しない

normalize : ボクセル光量を[0,1]に規格化

digitize : ボクセル光量を[0,1]に11段階で規格化

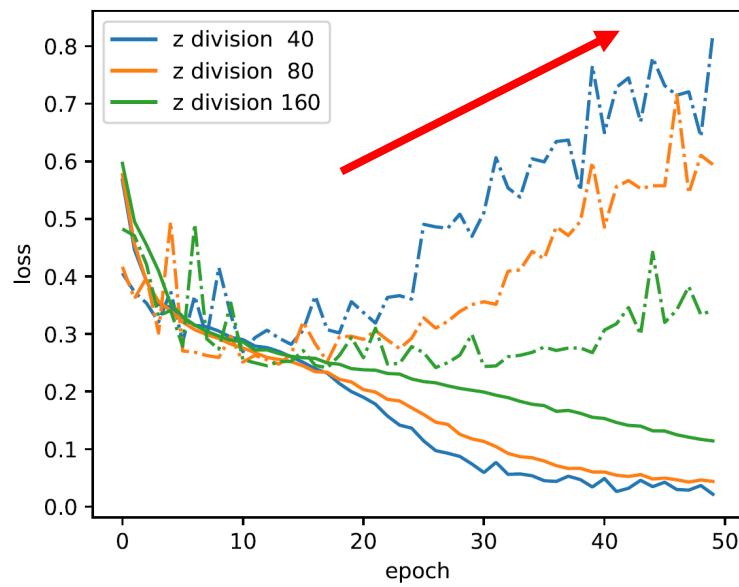
log-digitize : digitizeをログスケールで行う

exponential : ボクセル最大光量をPとして $\exp(P_{ijk}/P)/e$ (for $P_{ijk} > 0$)

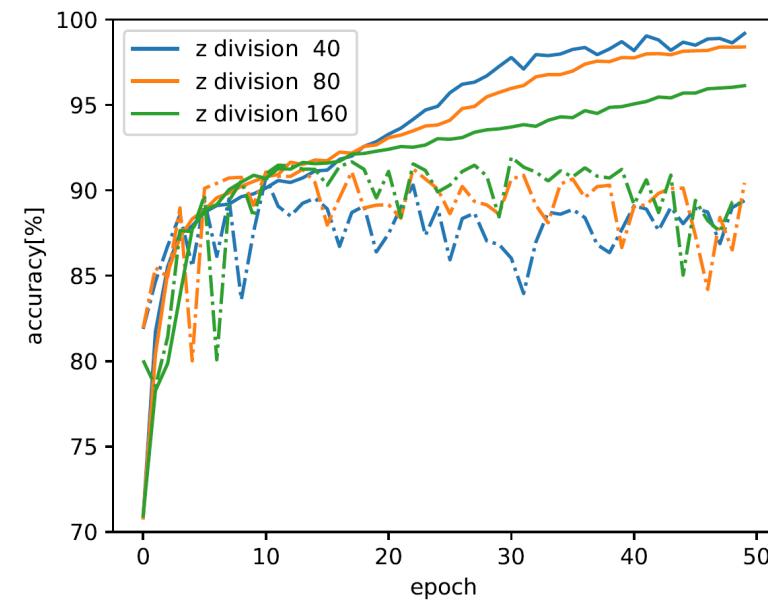
モデルのトレーニング (z分割数)

50

- 規格化手法 normalize、z方向の分割数を増やした場合で性能比較
- 分割数を増やしたほうが性能が良いが、80と160分割は差が小さい
- 10~20epoch以降で過学習傾向、分割が多いほど過学習になりづらい



実線：トレーニングデータ
破線：バリデーションデータ



	Contribution
Initial ionization	0.25%
Z mis-reconstruction	0.24%
Fluctuation of the EL generation and detection	0.20%
Error in EL gain calibration	0.18%
Error in time dependence correction	0.18%
Recombination	0.17%
Variation in time bin of time variation correction	0.12%
Offset of the baseline	$\leq 0.11\%$
Error in z dependence correction	$\leq 0.06\%$
Fluctuation of the attachment	$\leq 0.02\%$
Accuracy of the MPPC recovery time	$\leq 0.03\%$
Fluctuation of the MPPC nonlinearity	not yet evaluated
Estimation total	(0.52-0.54)%
Data total	(0.67±0.08)%

- 電離電子の生成数の揺らぎ
 - エネルギーE : 2615keV
 - W値 : 22.1 eV/ion pair
 - Fano factor : 0.13

$$N = \frac{E}{W}$$

$$\frac{\Delta N_{ini}}{N} = 2.355 \times \frac{\sqrt{FN}}{N} = 2.355 \times \frac{\sqrt{0.13 \times 2615 \times 10^3 / 22.1}}{2615 \times 10^3 / 22.1}$$



0.247%

Z mis-reconstruction

53

- ・ ウィンドウ内のアクシデンタルなシンチレーション光の数の平均: μ_{acc}
- ・ イベント由来のシンチレーション光の検出効率: ε

シンチ候補数が0になる確率:

(シンチ光検出できない(1- ε)かつ accidentalが0 (poisson(0)= $e^{-\mu}$))

$$P(n = 0) = (1 - \varepsilon)e^{-\mu_{\text{acc}}} = 416/2081$$

$$\text{Poisson}(k) = \frac{\mu^k}{k!} e^{-\mu}$$

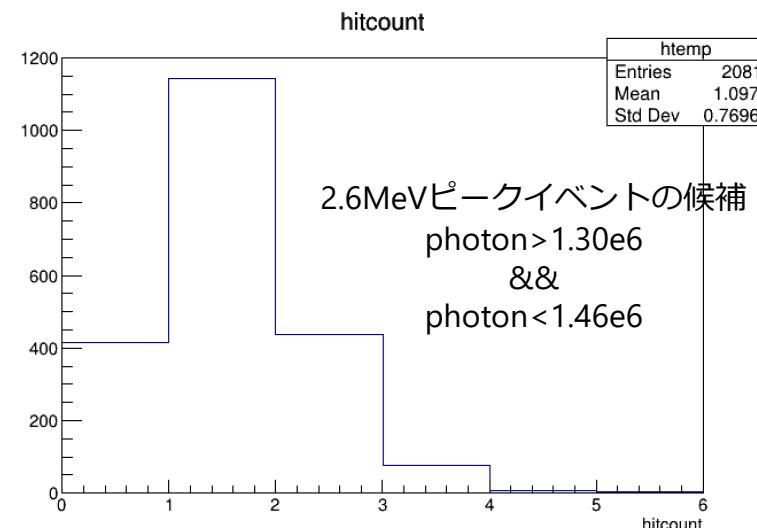
シンチ候補数が1になる確率:

(シンチ光検出できないかつ accidentalが1) or (シンチ光検出かつ accidentalが0)

$$P(n = 1) = (1 - \varepsilon)\mu_{\text{acc}}e^{-\mu_{\text{acc}}} + \varepsilon e^{-\mu_{\text{acc}}} = 1143/2081$$

- ・ 方程式を解くと、 $\mu_{\text{acc}} = 0.4023$ 、 $\varepsilon = 0.701$ より、mis-reconstruction確率は

$$(1 - \varepsilon)\mu_{\text{acc}}e^{-\mu_{\text{acc}}} / P(n = 1) = \mathbf{14.6\%}$$



- z mis-reconstructionは $80 < z < 360$ で一様分布とする; 0~1.02%まで一様に変動
- 2.6MeV(mean: N)ピークの一部(p)が、Ndだけ光量変動とする
- このときのダブルガウシアンの分散は

$$G(X) = (1 - p) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(X - N)^2}{2\sigma^2}\right] + p \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(X - N(1 - d))^2}{2\sigma^2}\right]$$

$$\langle X \rangle = (1 - p)N + pN(1 - d) = N(1 - pd)$$

$$\langle X^2 \rangle = (1 - p)(\sigma^2 + N^2) + p\{\sigma^2 + N^2(1 - d)^2\} = \sigma^2 + N^2(1 - 2pd + pd^2)$$

$$V(X) = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 = \sigma^2 + N^2pd^2(1 - p)$$

- つまり分散の増分が $N^2pd^2(1 - p)$ なので、変動係数は $d\sqrt{p(1 - p)}$
- dmax=1.02%(attachmentによる最大変動)、p=14.6%で、dが0~dmaxで一様分布するとすれば

$$\Delta N_{z\text{mis}}/N = 2.355 \times 1.02\% \times \sqrt{0.146 \times (1 - 0.146)} / \sqrt{12} \sim \mathbf{0.244 \%}$$

- EL増幅を経てMPPCに検出される光子数の揺らぎ
- 平均ELゲイン $g \rightarrow 11.5$
- 電離電子数 $N_e = E / W$

$$\frac{\Delta N_{ELgain}}{N} = 2.355 \times \sqrt{\frac{1}{gN_e}} \sim \mathbf{0.202 \%}$$

本測定では設計電圧の90%印加だったが、
100%が印加できていたとすると、ELゲインは $12.8 \rightarrow \mathbf{0.192 \%}$

- 各チャンネルのELゲインの相対エラーを ε_{ch} 、光量を N_{ch} とすると、
チャンネルの分解能への寄与は $\varepsilon_{\text{ch}} N_{\text{ch}}$
- 各チャンネルからの寄与を独立とすれば、

$$\frac{\Delta N_{\text{ELcalib}}}{N} = 2.355 \times \frac{\sqrt{\sum_{\text{ch}} (\varepsilon_{\text{ch}} N_{\text{ch}})^2}}{N} \sim 2.355 \times \bar{\varepsilon} \frac{\sqrt{\sum_{\text{ch}} (N_{\text{ch}})^2}}{N}$$

$\bar{\varepsilon}$: 各チャンネルでのELゲインの相対エラーの平均

- $\bar{\varepsilon}$: 0.5324 %
- Mean of $\sum_{\text{ch}} (N_{\text{ch}})^2 / N^2$ in 2615keV FWHM: 0.02119
 $\rightarrow \Delta N_{\text{ELcalib}}/N \sim \textcolor{red}{0.183 \%}$

※ $\frac{\Delta N_{\text{ELcalib}}}{N} = 2.355 \times \bar{\varepsilon} \frac{1}{\sqrt{n_{\text{eff}}}}$ なので、

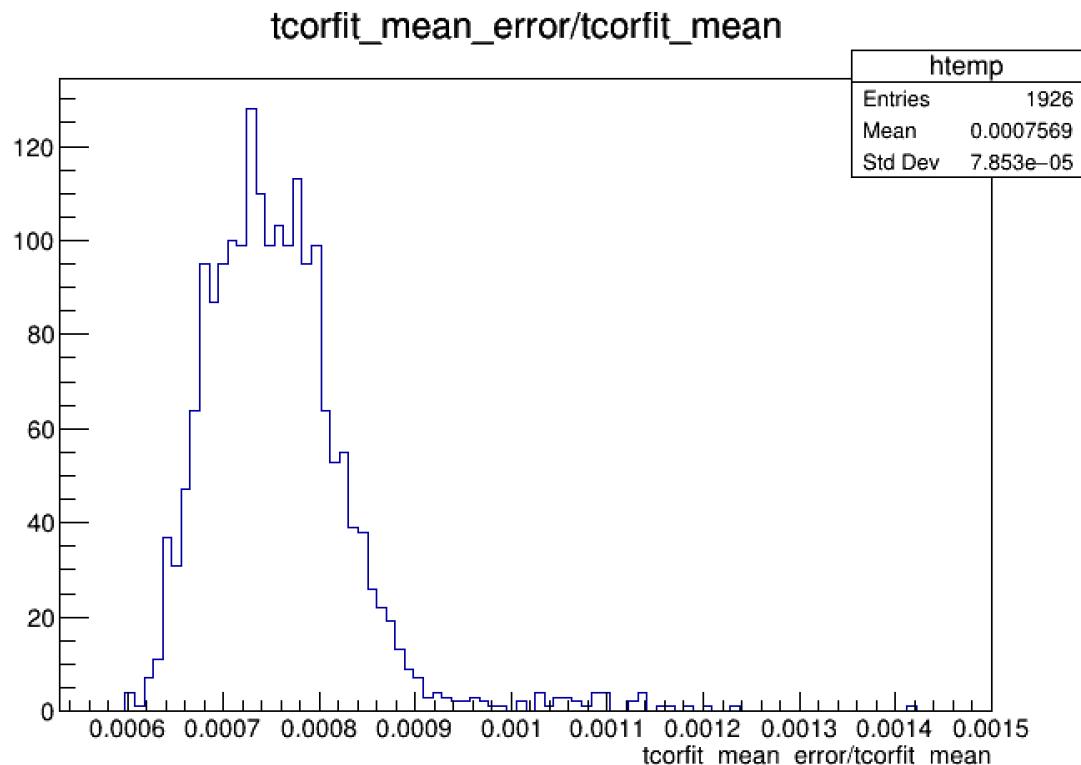
Effective number of hit channel: $n_{\text{eff}} = (\sum_{\text{ch}} (N_{\text{ch}})^2 / N^2)^{-1} \sim \textcolor{red}{47.2}$

Error in time dependence correction

57

- 各time binにおけるK α ピーグフィットのrelative error: 平均0.076 %
→ 誤差伝播より補正係数のerrorも0.076 %

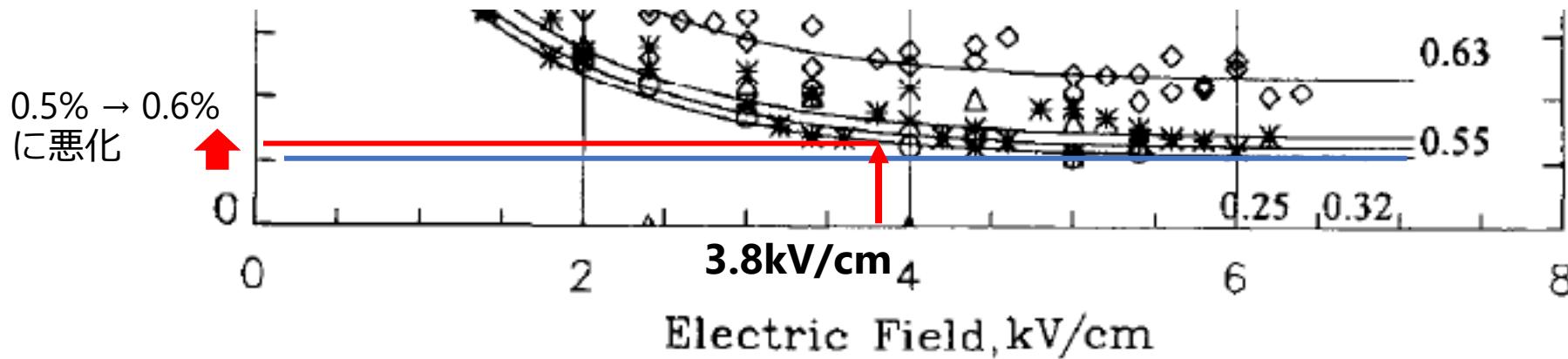
$$\rightarrow \Delta N_{\text{tcor}}/N = 2.355 \times 0.076 = \mathbf{0.179 \%}$$



- Recombinationにより電離電子が失われる効果
- イオンチェンバーの分解能 vs ドリフト電場 @662keVの文献[1]より推定
- 90V/cm/bar→0.25g/cm³(~42bar) で 3.8 kV/cm 相当
- 662keVで分解能が 0.5→ 0.6%に悪化
→ 2615keVに換算すると

$$\sqrt{0.6^2 - 0.5^2} \times \sqrt{662/2615} = 0.167 \%$$

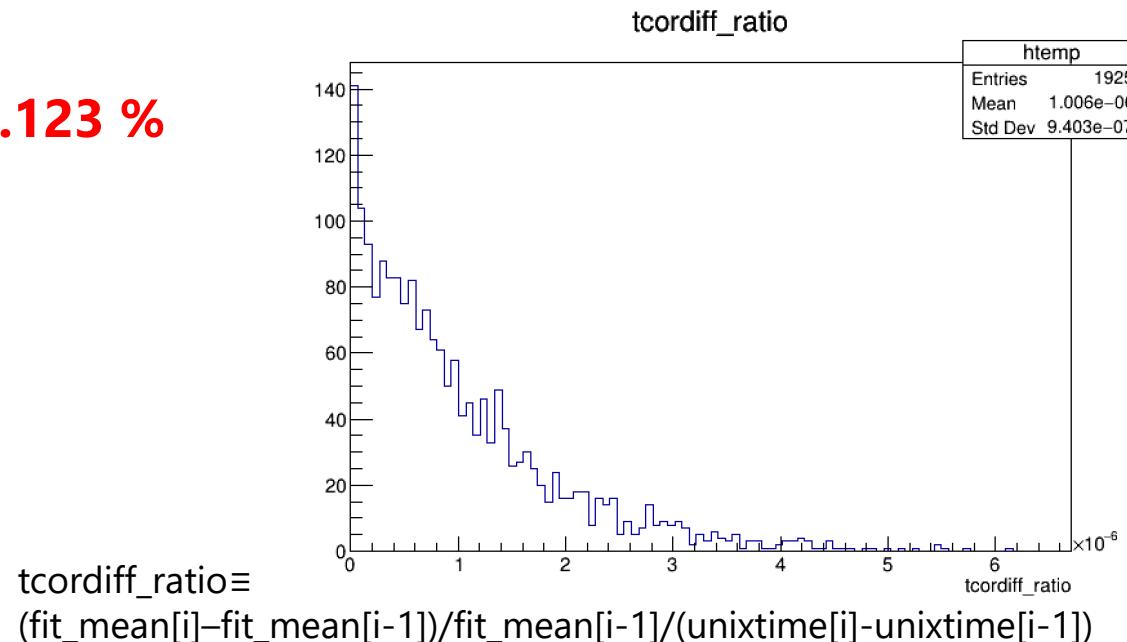
分解能への影響は **0.17%**



- 時間変動補正に使用するtime bin (30min) 内での変動の影響
→ 隣り合うbinのフィット結果から、単位時間あたりの変動割合を計算
- 変動の平均は、 $1.006e-06$ [/sec]
→ 30min(=1800sec)で、 0.18 %
- 変動が一様だとすると分解能への影響は、

$$\Delta N_{\text{tbin}}/N$$

$$\sim 2.355 \times 0.18\% / \sqrt{12} = \mathbf{0.123\%}$$



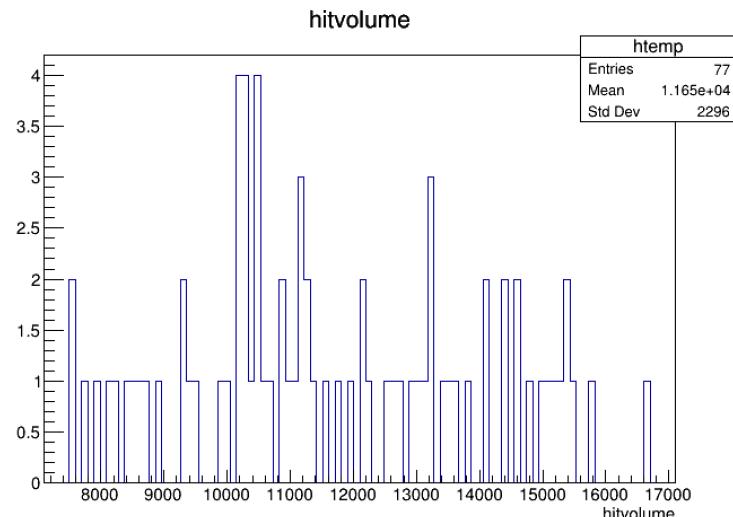
1. トラック体積の違いでオフセットの影響が変動

- ベースラインに1ADC countのoffsetがあると、トラック体積（ヒットの総クロック数）×offset分だけ、積分値がずれる
- 2.6 MeV (FWHM内)のhitvolume分布の標準偏差=2296
- 全チャンネルで同じ方向に1 ADC countのオフセットがあると、
 $2.355 \times (2296/0.9544)/1.379e6 \sim 0.41\%$

※ 1 p.e.ゲインの平均値：0.9544, 2.6MeVピーク光量：1.379e6

- Effectiveなヒットチャンネル数 $n_{\text{eff}} \sim 47.2$ (ELgain補正のエラーより) を用いて

$$\Delta N_{\text{offset}}/N \leq 0.41\%/\sqrt{n_{\text{eff}}} \sim \mathbf{0.06\%}$$



2. 同ヒットボリュームで、オフセットの値が異なることによる変動

- 2.6 MeV (FWHM内)のhitvolume分布の平均値=1.165e4
- オフセットの揺らぎ= $1/\sqrt{12}$ (幅1 ADCで一様分布)
- 全チャンネルで影響をうけると、

$$2.355 \times (1.165\text{e}4 \times 1/\sqrt{12}/0.9544) / 1.379\text{e}6 \sim 0.60 \%$$

※ 1 p.e.ゲインの平均値 : 0.9544, 2.6MeVピーク光量 : 1.379e6

- Effectiveなヒットチャンネル数 $n_{\text{eff}} \sim 47.2$ (ELgain補正のエラーより) を用いて

$$\Delta N_{\text{offset2}}/N = 0.60\%/\sqrt{n_{\text{eff}}} \sim \mathbf{0.09 \%}$$

- 前ページと合わせて、 $\Delta N_{\text{offset}}/N \leq \mathbf{0.108 \%}$

Error in z dependence correction

62

- z補正にずれがあると、z重心×光量 vs 光量 に傾きが生じる

$$\rightarrow (4.24 \pm 0.69) \times 10^{-6} / \text{mm}$$

$$N_{true} = N_{obs}(1 + z/\lambda) \quad (z \ll \lambda)$$

$$N_{cor} = \sum_i r^i N_z^i = \sum_i r^i N_{obs}^i (1 + z^i/\lambda')$$

$$\begin{aligned}\Delta N &= \sum_i r^i N_{obs}^i \{(1 + z^i/\lambda') - (1 + z^i/\lambda)\} \\ &= \left(\frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda}\right) \sum_i r^i N_{obs}^i z^i \simeq \left(\frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda}\right) \langle z \rangle N_{cor}\end{aligned}$$

- cm_z × photon @ 2.6 MeVの標準偏差

$$\rightarrow 6.804 \times 10^7 \text{ mm}$$

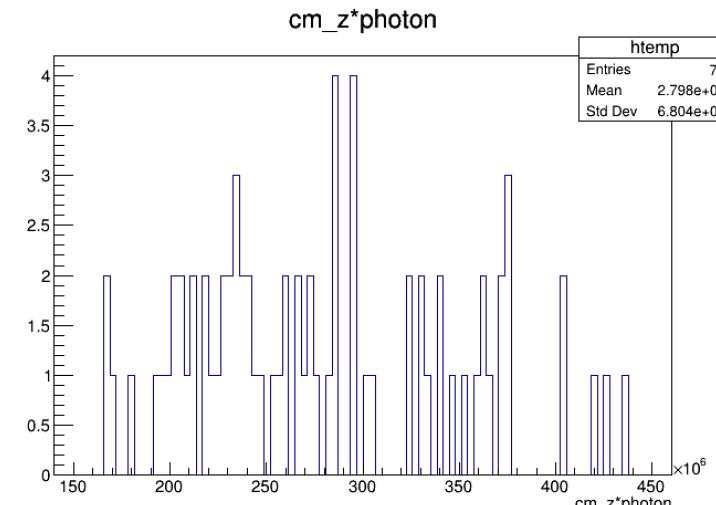
分解能への寄与は最大、

$$\Delta N_{zcorr}/N$$

$$\leq 2.355 \times 4.93 \times 10^{-6} \times 6.804 \times 10^7 / 1.379 \times 10^6 = \mathbf{0.06 \%}$$

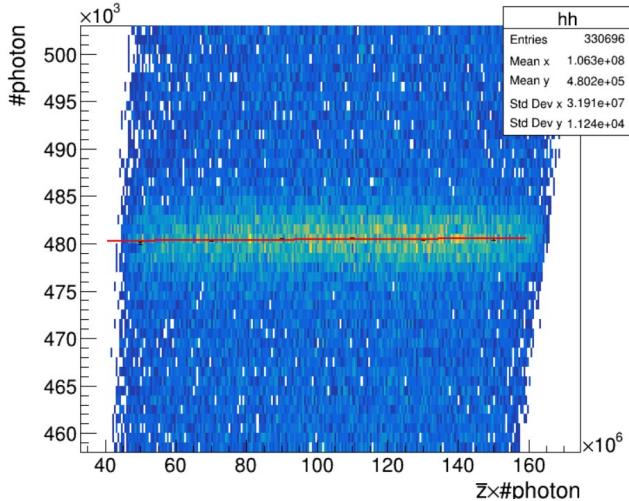
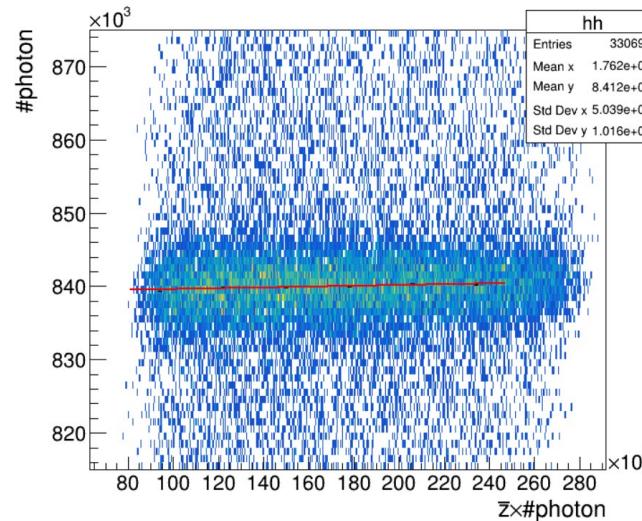
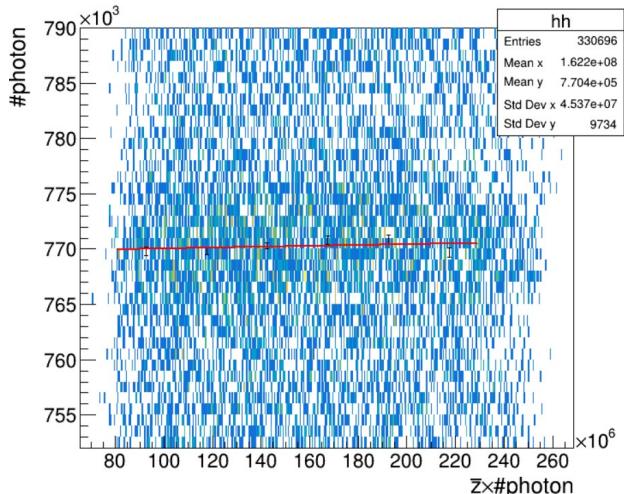
N_{cor}	: 全補正後の全光量
N_{true}	: 真の全光量
N_{obs}^i	: 補正前の各クロック光量
N_z^i	: z 補正のみ適用した各クロック光量
r^i	: z 補正以外の補正係数
λ	: 真の減衰長
λ'	: 補正に使用した減衰長
$\langle z \rangle$: 光量の z 重心

2.6MeV FWHM内
(1.374e6 < photon < 1.384e6)

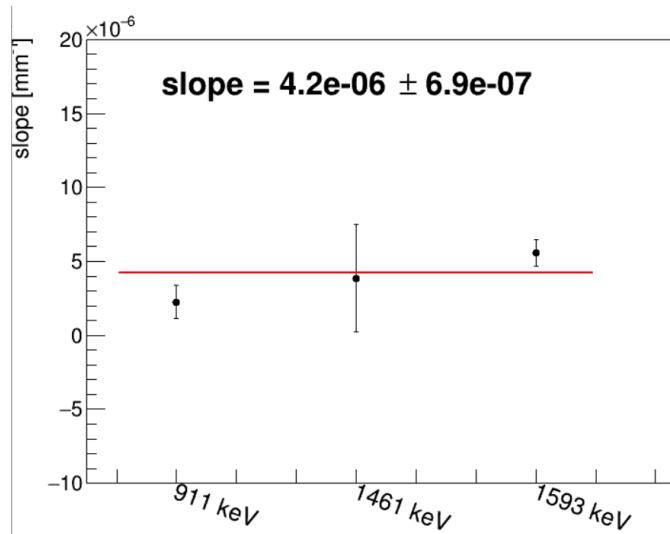


Error in z dependence correction

63

228Ac: $(2.26 \pm 1.11) \times 10^{-6}$ [/mm]double escape: $(5.55 \pm 0.90) \times 10^{-6}$ [/mm]40K: $(3.86 \pm 3.65) \times 10^{-6}$ [/mm]

平均值



Fluctuation of the attachment

64

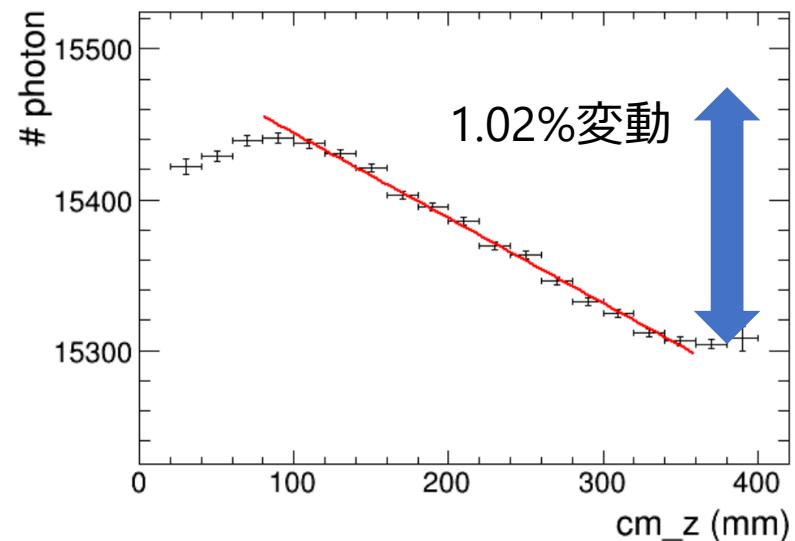
- 減衰長: 27503 mm
→ z cut の範囲($80 < z < 360$)で光量は最大
 $(360-80)/27503 \sim 1.02\%$ 変動

- 2615 keV: 1.379×10^6 photon
→ 影響は最大で、

$$\Delta N_{\text{att}}/N$$

$$= 2.355 \times \sqrt{(1.02\% \times 1.379 \times 10^6) / (1.379 \times 10^6)}$$

$$= \mathbf{0.020\%}$$



- 各MPPCの回復時間の誤差の影響は0.5ns以下であればnegligible
- MPPC回復時間のバイアス補正後でも残った CSS vs 光量 の傾き
 $\Delta\tau_{\text{mean}} = (0.60 \pm 0.15) \text{ ns} \rightarrow \Delta k = \Delta\tau / (200[\text{ns}] \times 3600) \leq 1.04 \times 10^{-6}$
- バイアスによる光量の変動は $\Delta k \times \text{CSS}$ 、2.6 MeV FWHM内のCSSの標準偏差 = 1.959×10^8 、ピーク光量 = 1.379×10^6 なので

$$\Delta N_{\text{mppc-rec}}/N$$

$$\leq 2.355 \times 1.04 \times 10^{-6} \times 1.959 \times 10^8 / 1.379 \times 10^6$$

~ **0.034 %**

- MPPCの非線形性は統計的なプロセス（同一ピクセルに光子が入射するか否か）であることによるゆらぎ

$2\nu\beta\beta$ の混入量

67

- $T_{1/2}^{2\nu} = 2.34 \times 10^{21} \text{ yr}$
- 1トンの ^{136}Xe 原子核数 $N_0 = 1 \times 10^6 / 136 \times 6.02 \times 10^{23} = 4.4 \times 10^{27}$
- 年間 $2\nu\beta\beta$ 崩壊数 $\rightarrow \ln 2 / T_{1/2}^{2\nu} \times N_0 = 1.3 \times 10^6 / \text{yr}$
- ROIへの混入割合 [1]

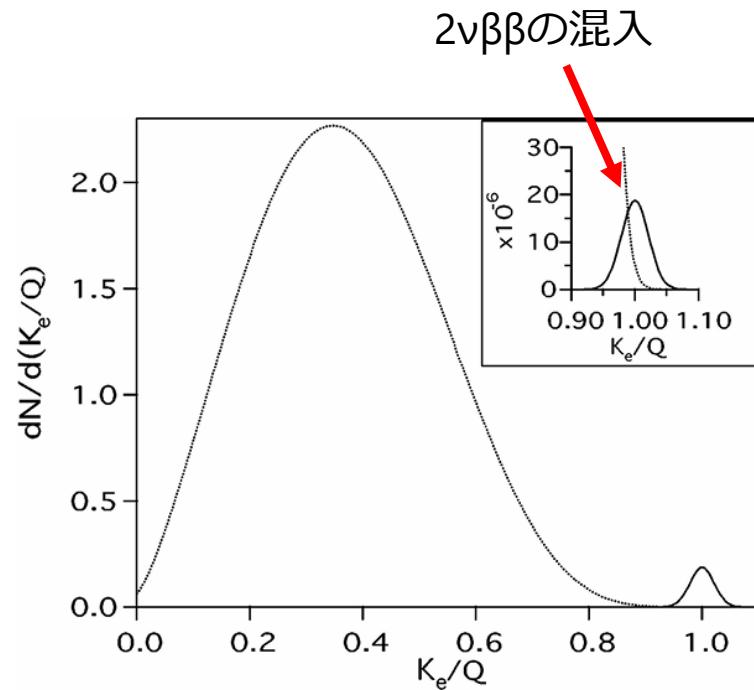
$$F = \frac{7Q\delta^6}{m_e}$$

m_e : 電子質量 511 keV

Q : $0\nu\beta\beta$ の Q 値 2458 keV

δ : $\Delta E/Q$ Q 値からの ROI 幅

- ROIとして $\Delta E = -12 \text{ keV}$ ($\delta = 0.5\%$)
 $\rightarrow F = 5.3 \times 10^{-13}$
- 混入イベント数は検出効率を無視しても
6.9×10⁻⁷ / yr \rightarrow negligible
($\delta = 1\%$ でも $4.4 \times 10^{-5} / \text{yr}$)

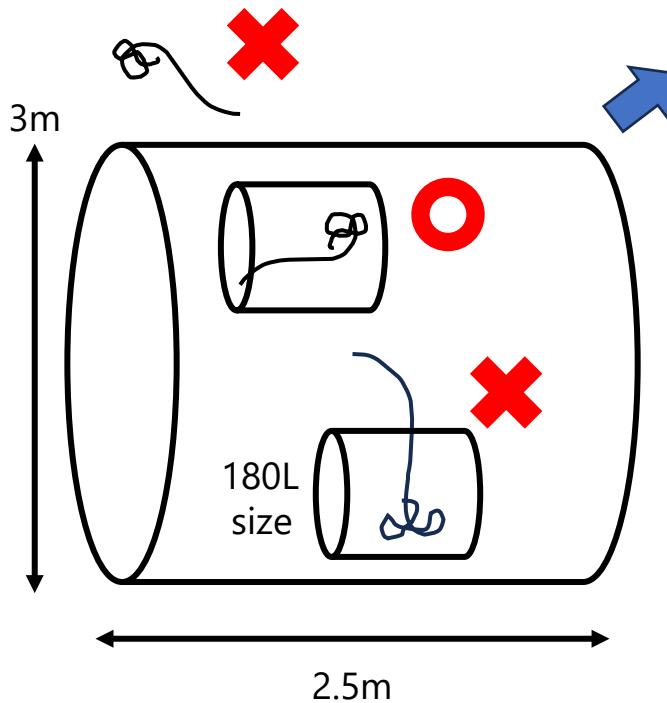


2電子の運動エネルギーの和のスペクトル例
(5%分解能) 点線: $2\nu\beta\beta$ 、実線: $0\nu\beta\beta$ [1]

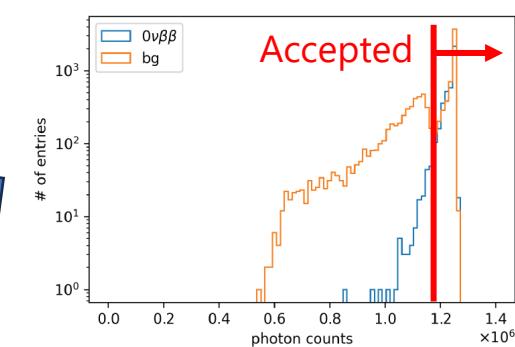
Background model (^{214}Bi)

68

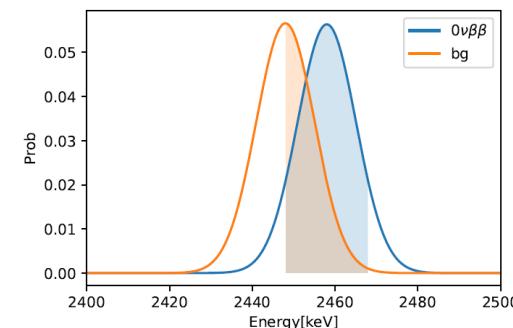
- BG源 : 27.8 トン圧力容器 (for 無酸素銅)
- ^{238}U 混入量 : $2.9 \times 10^{-12} \text{ g/g} \rightarrow$ 圧力容器の放射能は 1.0 Bq
- 2448 keV intensity : 1.545 % $\rightarrow 4.9 \times 10^5 \gamma/\text{yr}$
- 各種カット



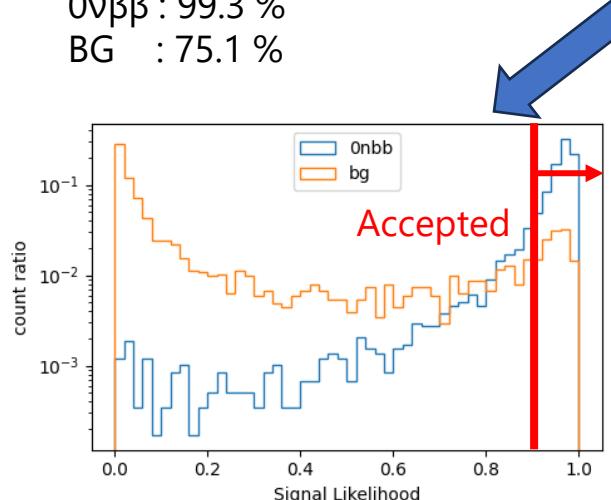
volume cut efficiency (simulation)
 0v $\beta\beta$: 33.33%
 BG : 0.0263%



Multi cluster elimination
 (コンプトンイベントを排除)
 0v $\beta\beta$: 99.3 %
 BG : 75.1 %



Energy cut efficiency
 (ガウス分布のROI範囲の面積)
 ex: 0.678% FWHM, ±10keV ROI
 0v $\beta\beta$: 84.2 %
 BG : 49.8 %

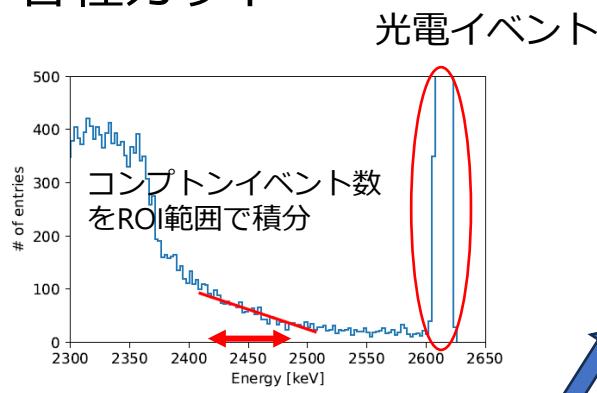


Topology cut efficiency
 (signal likelihood threshold)
 ex: likelihood threshold = 0.931
 0v $\beta\beta$: 75.7 %
 BG : 8.6 %

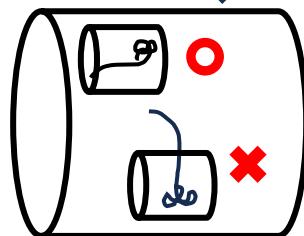
Background model (^{208}TI)

69

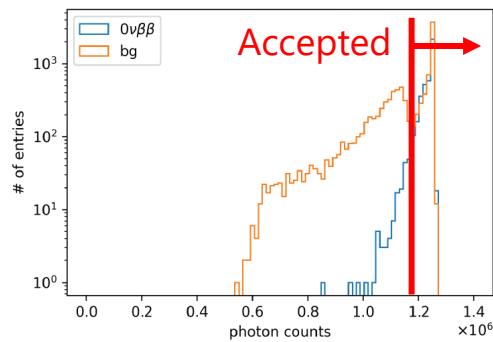
- BG源 : 27.8 トン圧力容器 (for 無酸素銅)
- ^{232}Th 混入量 : $2.4 \times 10^{-12} \text{ g/g} \rightarrow$ 圧力容器の放射能は 0.27 Bq
- 2615 keV intensity : 99.754 % $\rightarrow 8.5 \times 10^6 \gamma/\text{yr}$
- 各種カット



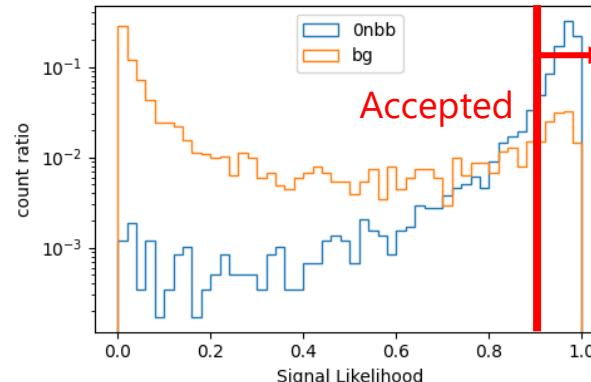
Compton ratio (simulation)
ex: $Q_{\beta\beta} \pm 5 \text{ keV}$ region
BG : $\times 0.47 \%$



volume cut efficiency (simulation)
 $0\nu\beta\beta$: 33.33%
BG : 0.0263%



Multi cluster elimination
(コンプトンイベントを排除)
 $0\nu\beta\beta$: 99.3 %
BG : 75.1 %



Topology cut efficiency
(signal likelihood threshold)
ex: likelihood threshold = 0.931
 $0\nu\beta\beta$: 75.7 %
BG : 8.6 %

Background model (^{137}Xe)

70

- BG源 : 1トン ^{136}Xe gas
- ^{137}Xe rate : $7.91 \times 10^{-8} \text{ keV}^{-1}\text{kg}^{-1}\text{yr}^{-1}$ [1]
- 上記論文での各種カットの割り戻し
 - fiducial cut : 0.829
 - topological cut : 0.548, 0.064
- 宇宙線 μ 強度補正 LNGS → Kamioka $I(X_{\text{kamioka}}) / I(X_{\text{LNGS}}) = 5.01$

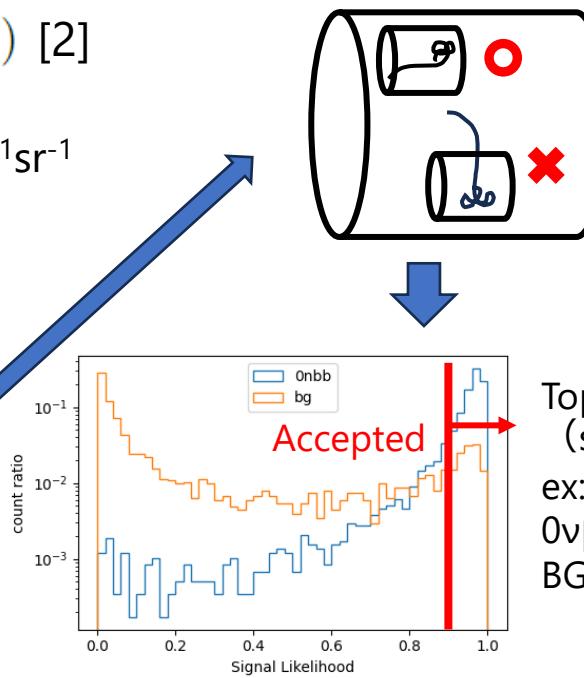
$$I(X) \sim A \left(\frac{X_0}{X} \right)^\eta \exp(-X/X_0) \quad [2]$$

A	: $(2.15 \pm 0.08) \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}$
η	: $1.93^{+0.20}_{-0.12}$
X_0	: 1155^{+60}_{-30} m.w.e
X_{kamioka}	: 2700 m.w.e
X_{LNGS}	: 3800 m.w.e

→ ^{137}Xe rate :

$1.36 \times 10^{-5} \text{ keV}^{-1}\text{kg}^{-1}\text{yr}^{-1}$

$\times \text{ROI} [\text{keV}] \times 1000[\text{kg}]$



volume cut efficiency
(simulation)
0v $\beta\beta$: 33.33%
BG : 29.1%

Topology cut efficiency
(signal likelihood threshold)
ex: likelihood threshold = 0.931
0v $\beta\beta$: 75.7 %
BG : 8.6 %

Attenuation length

71

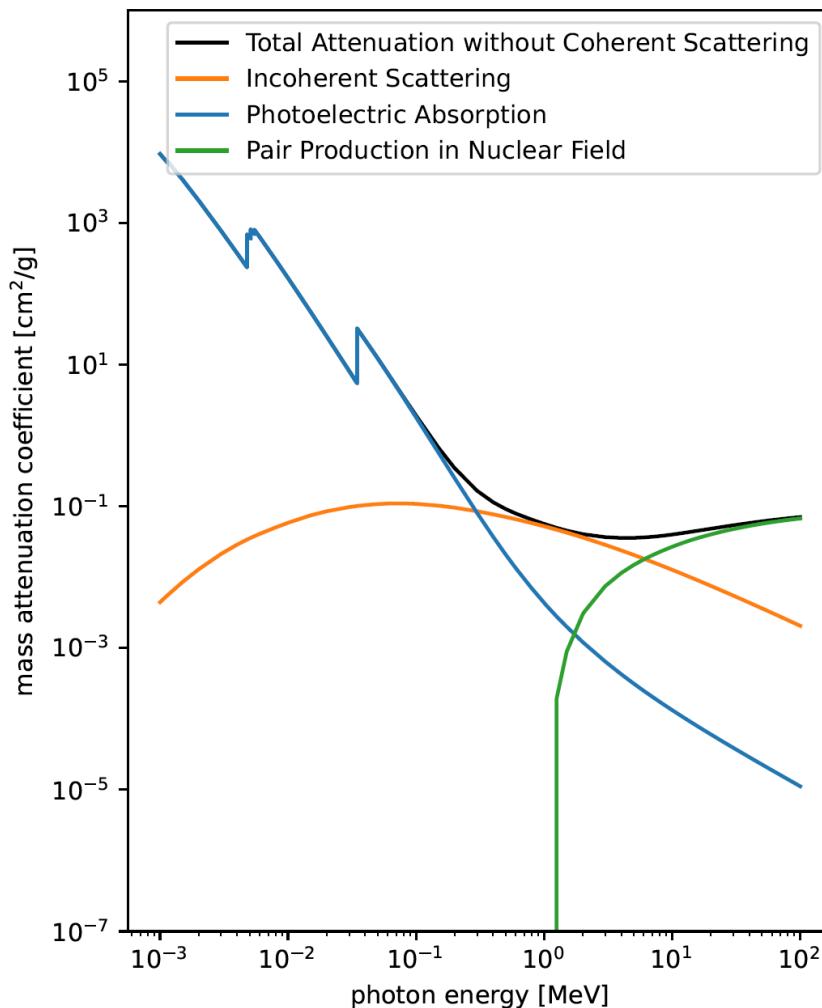
- 質量減衰係数 $3.8 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$ @2.6MeV

- Xenon 密度 (@300K)

- $3.7 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^3$ @ 6.8 bar
- $4.4 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^3$ @ 8 bar
- $5.6 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^3$ @ 10 bar

- 透過長(1/線減衰係数)

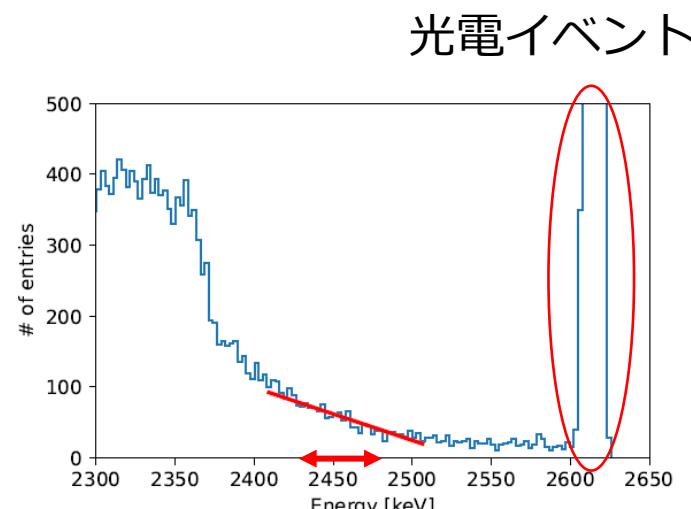
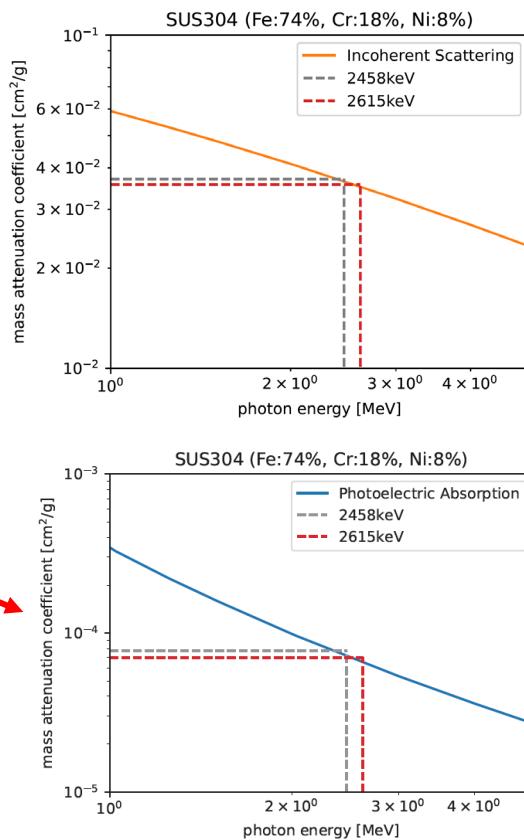
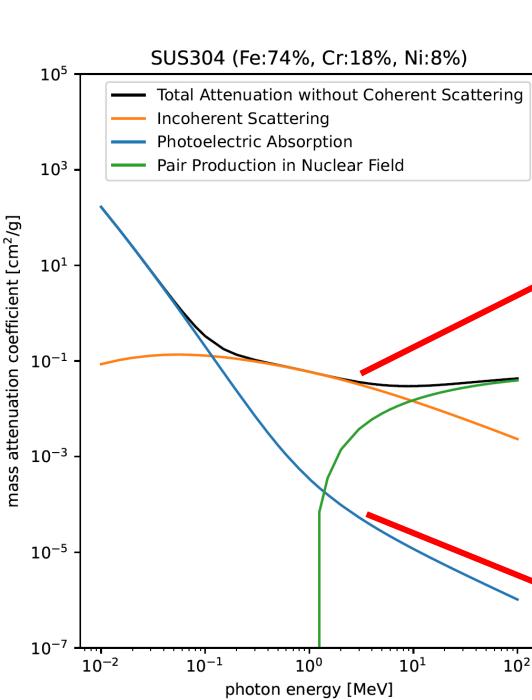
- 710 cm @ 6.8 bar
- 600 cm @ 8 bar
- 470 cm @ 10 bar



^{208}TI Compton ratio

72

- ROI範囲のコンプトンイベント数/光電効果のイベント数を補正係数として使用
- 2448keVシミュレーションの光電ピークを2615keVとみなす（質量減衰係数の差はCompton scatteringで~4%、光電吸収で~10%）



コンプトンイベント数
をROI範囲で積分

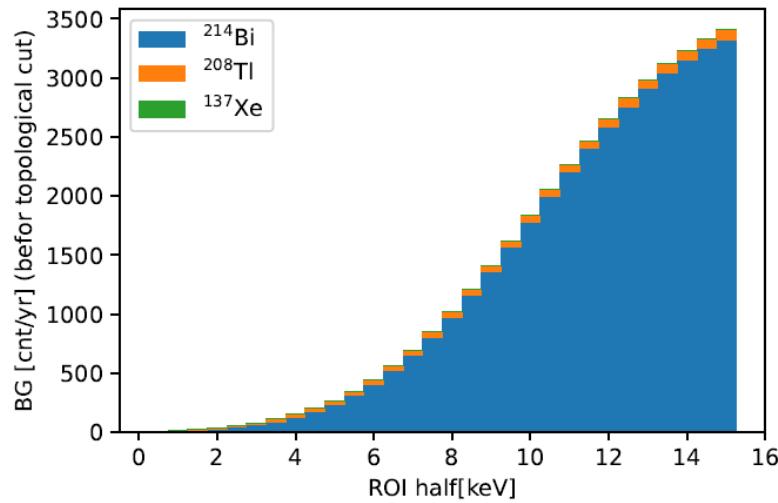
コンプトン/光電 = 0.47% @ $Q_{\beta\beta} \pm 5\text{keV}$

Sensitivity評価におけるBG内訳

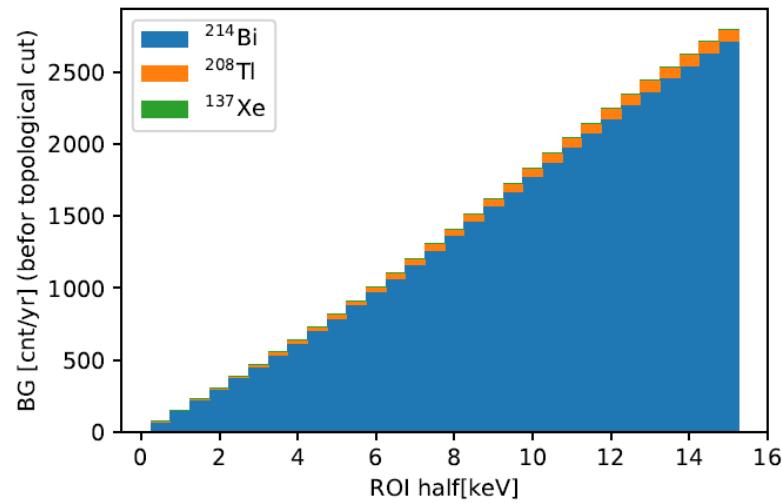
73

SUS

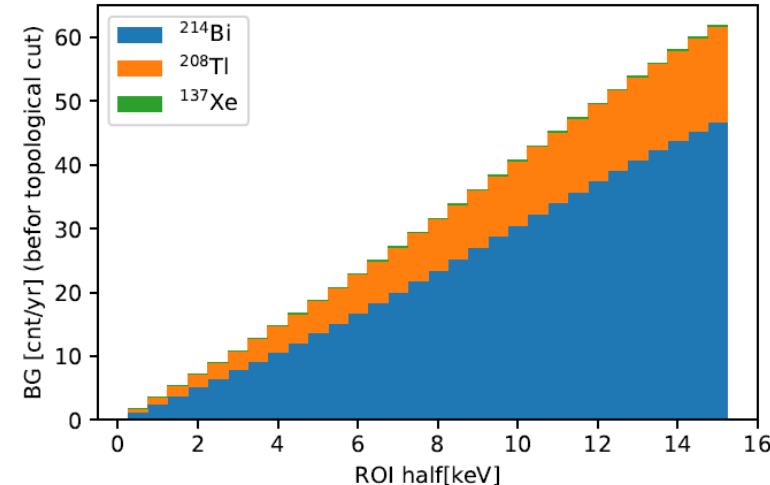
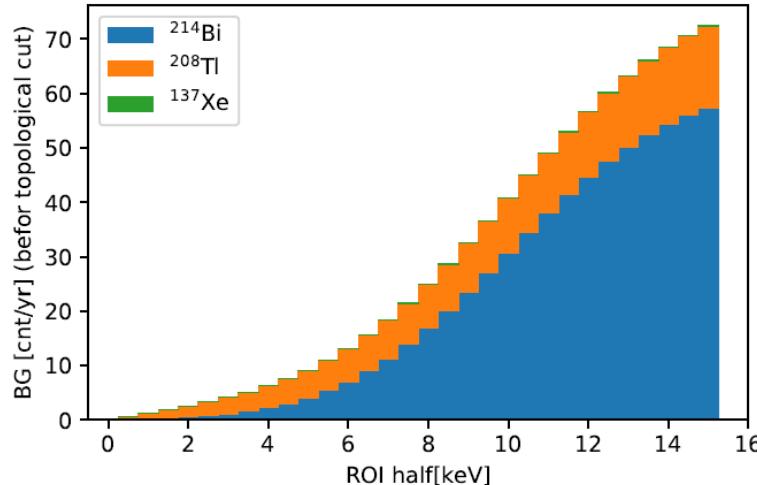
分解能 0.320%



分解能 0.678%



Cu



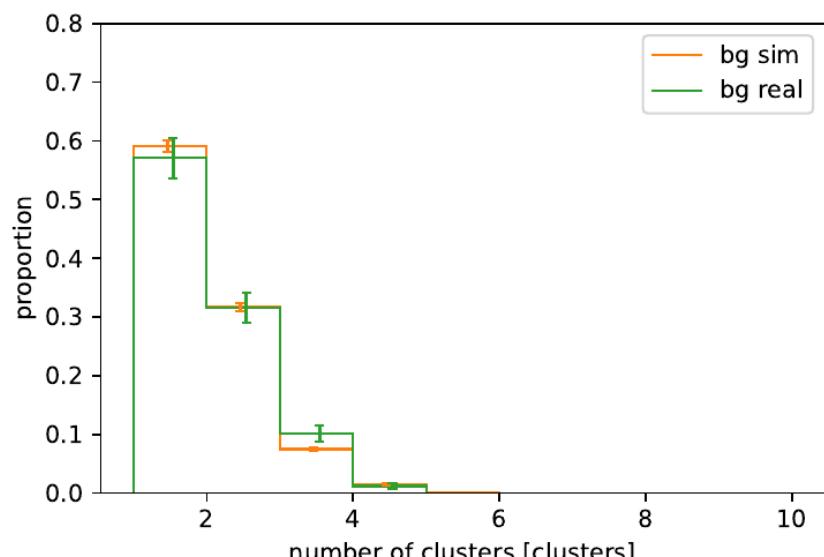
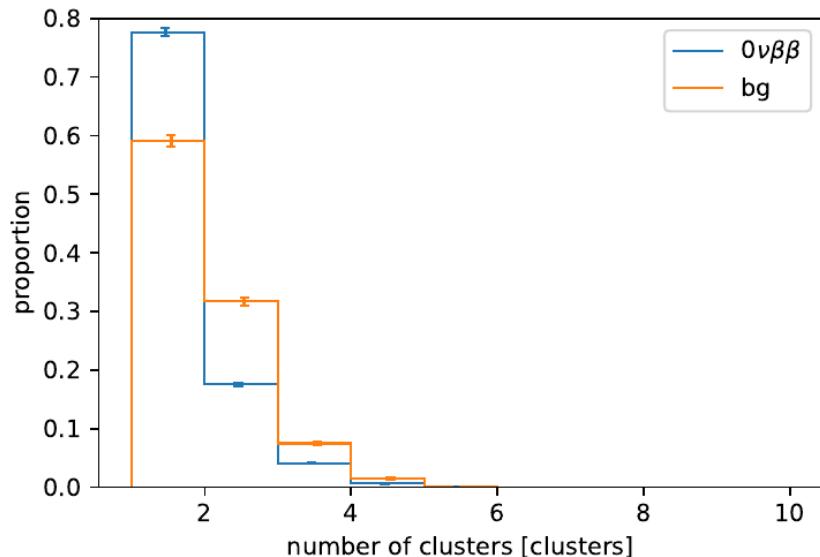
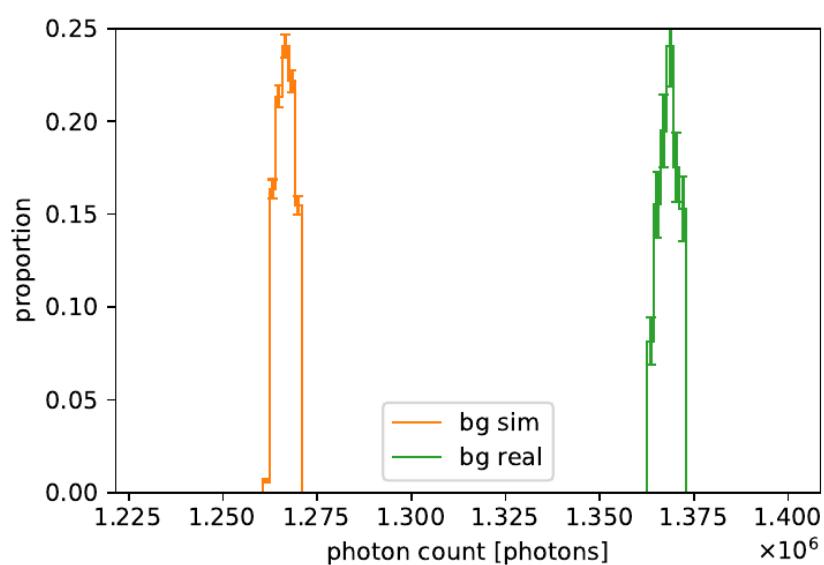
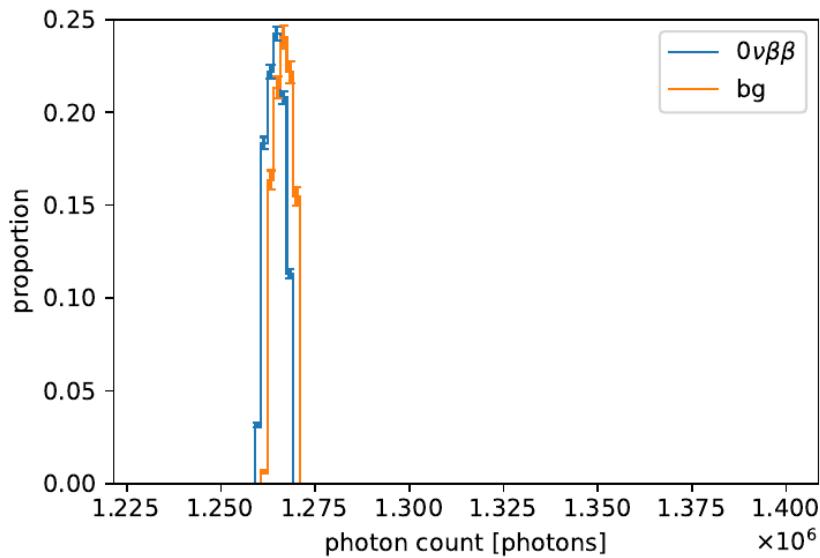
カット効率、BG数、信号上限値

74

	無酸素銅 0.320%分解能	無酸素銅 0.678%分解能	SUS304 0.320%分解能	SUS304 0.678%分解能
片側 ROI 幅	4.0 keV	11.5 keV	2.5 keV	5.5 keV
トポロジーカット threshold	0.931	0.909	0.926	0.956
トポロジーカット 効率 $0\nu\beta\beta$	0.757	0.825	0.778	0.595
トポロジーカット 効率 BG	0.086	0.112	0.094	0.051
BG数 ^{214}Bi	2.2	36	43	882
BG数 ^{208}Tl	4.0	12	15	32
BG数 ^{137}Xe	0.033	0.093	0.020	0.045
信号上限値	5.3	12	12	36
$T^{0\nu}_{1/2}$	1.12×10^{27}	6.28×10^{26}	3.57×10^{26}	9.61×10^{25}

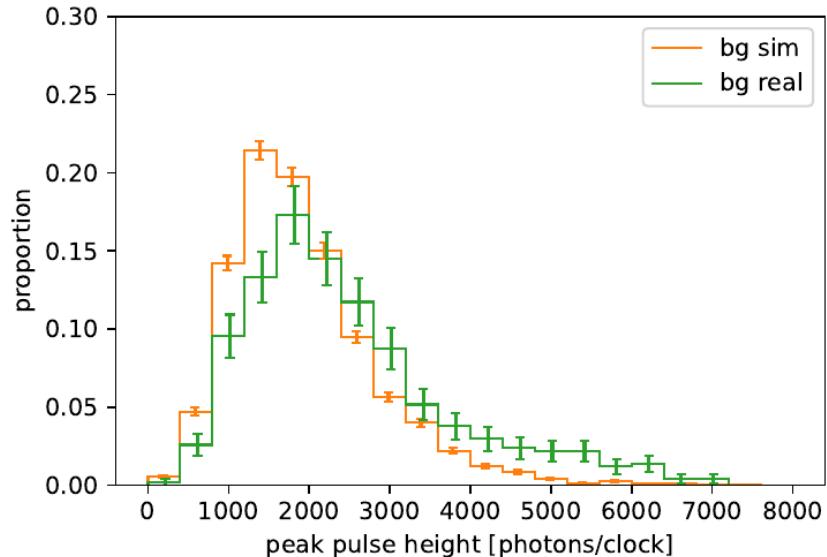
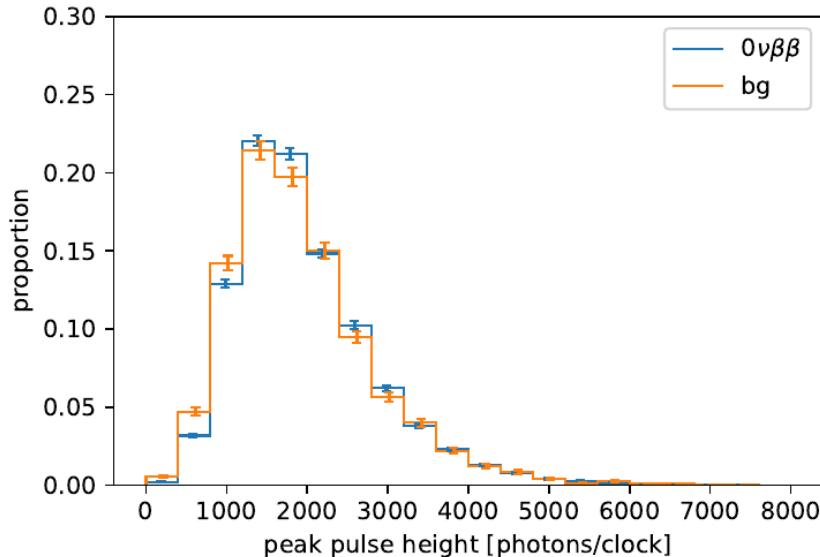
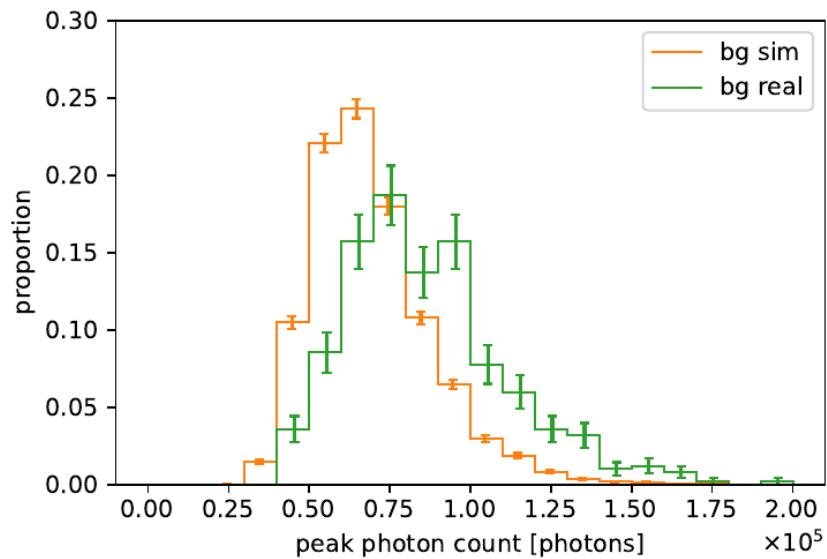
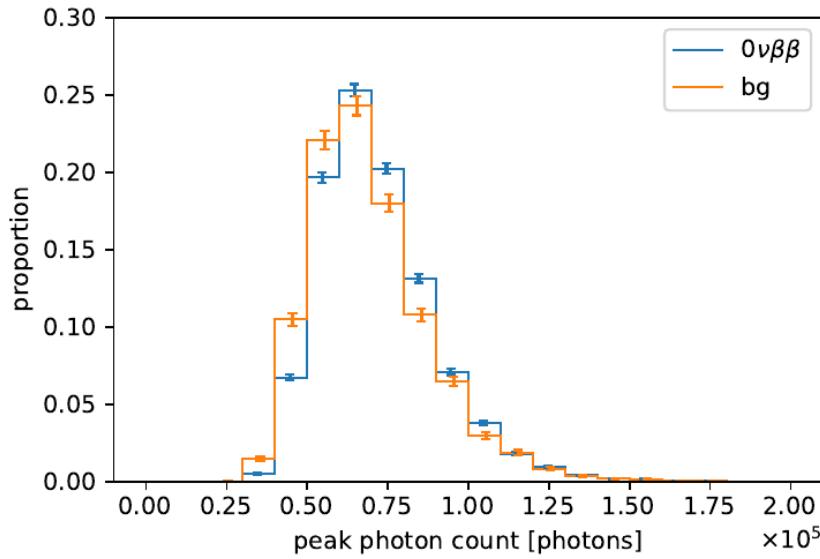
要約量分布

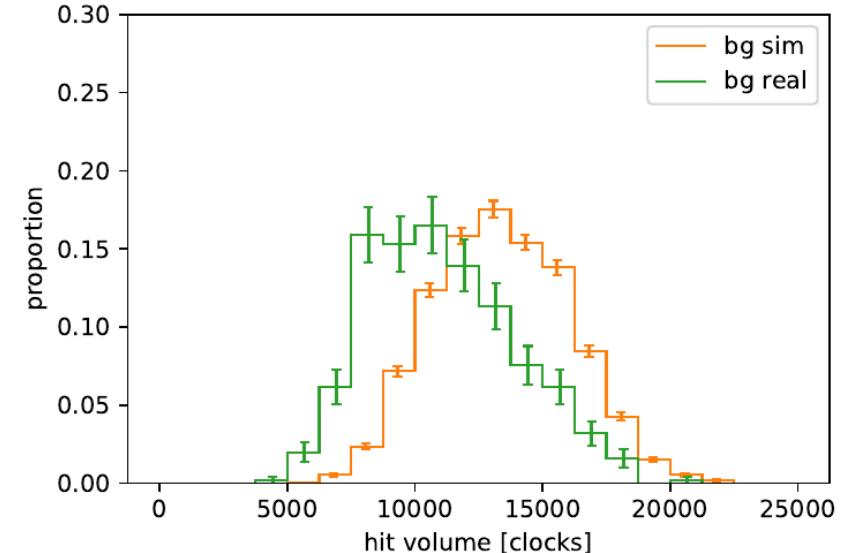
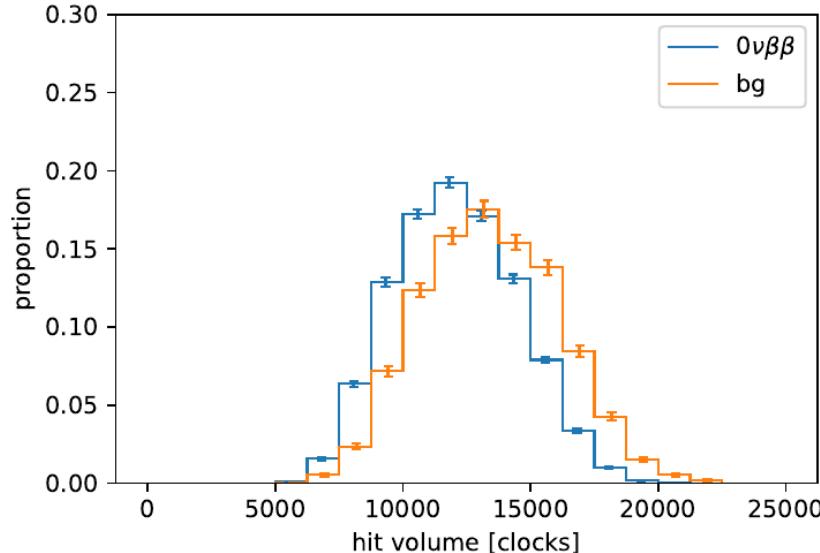
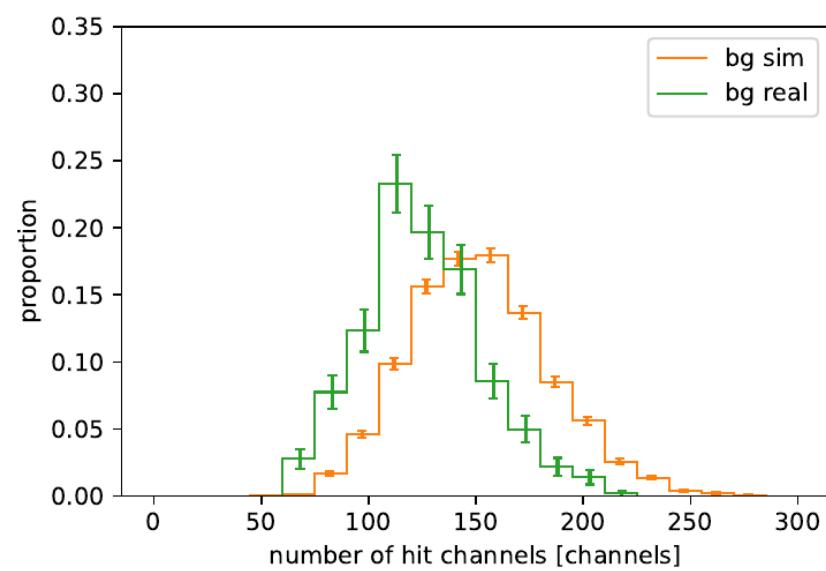
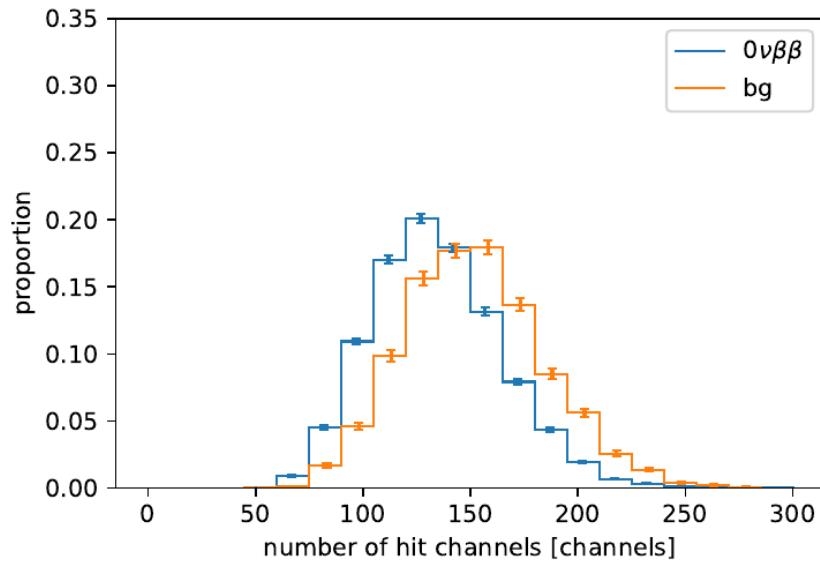
75

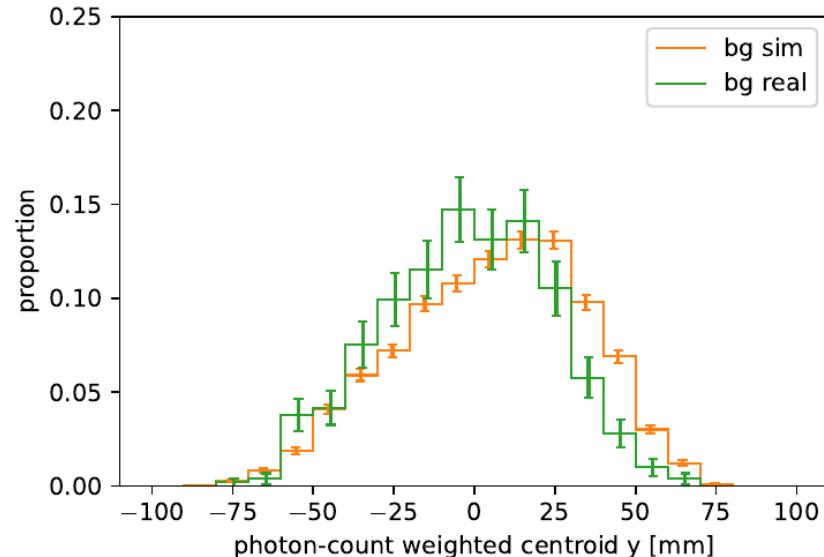
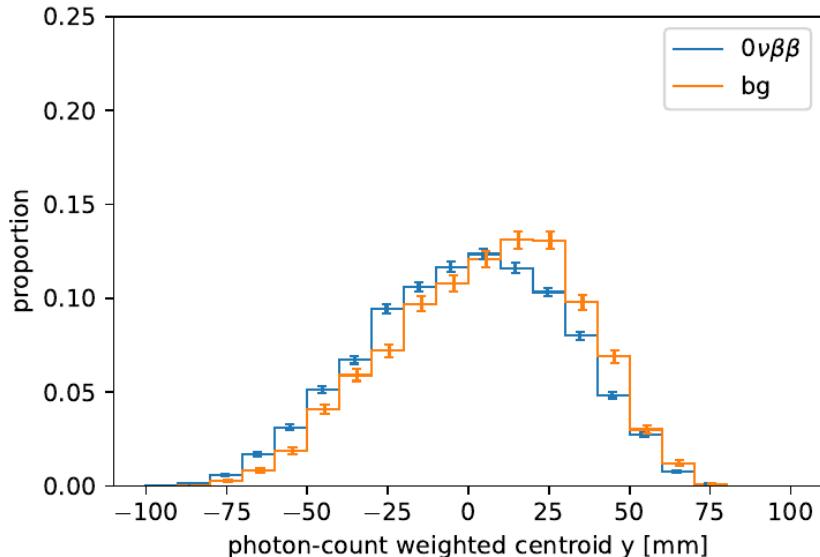
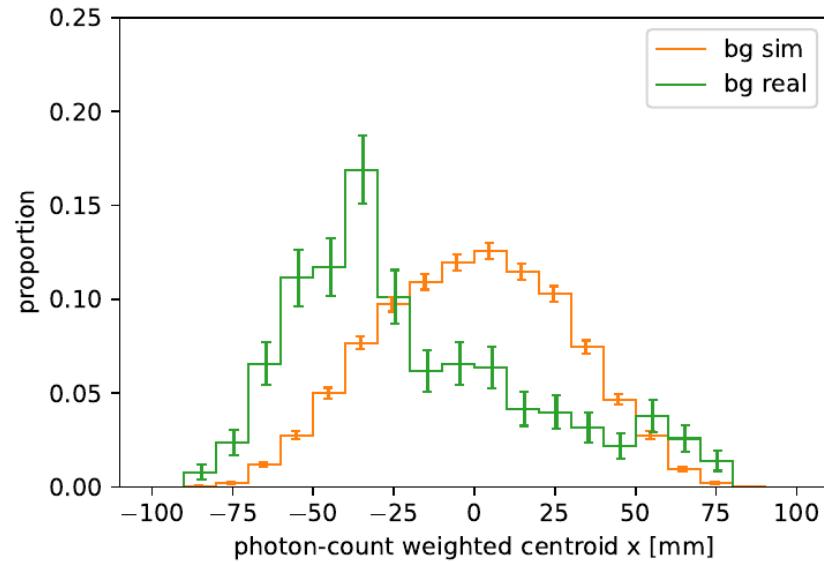
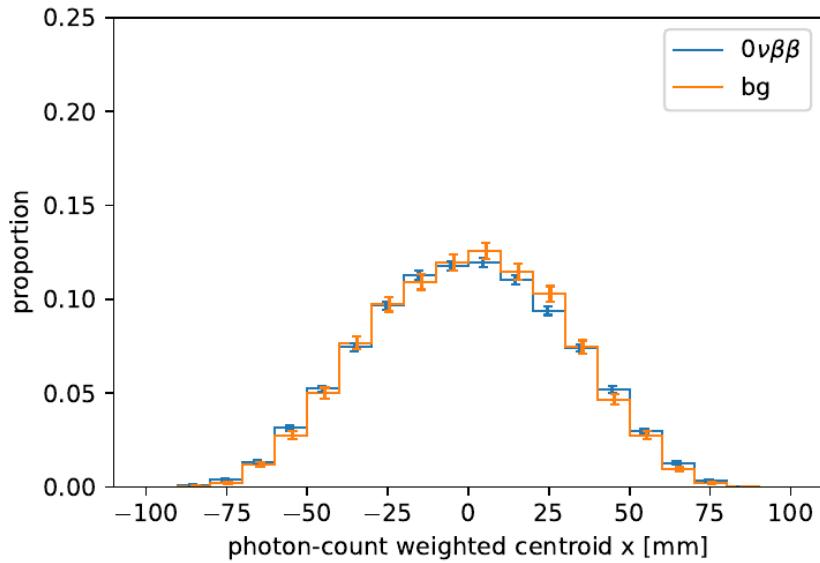


要約量分布

76

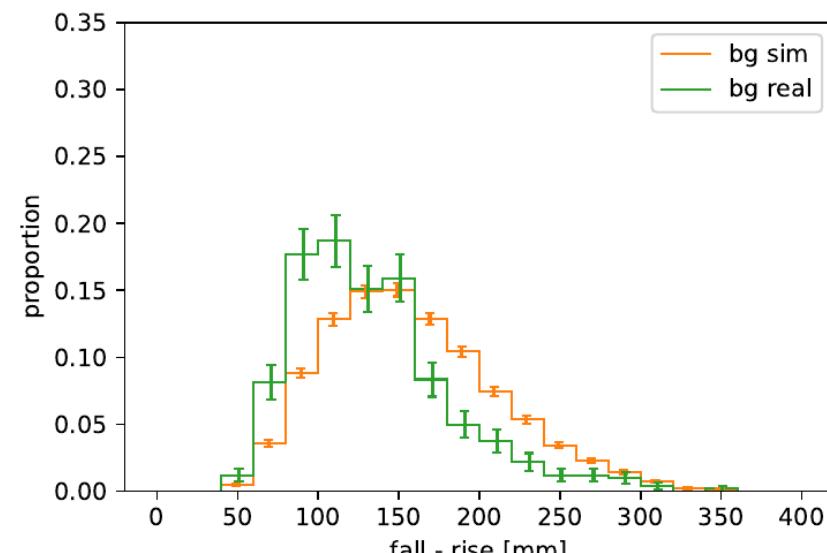
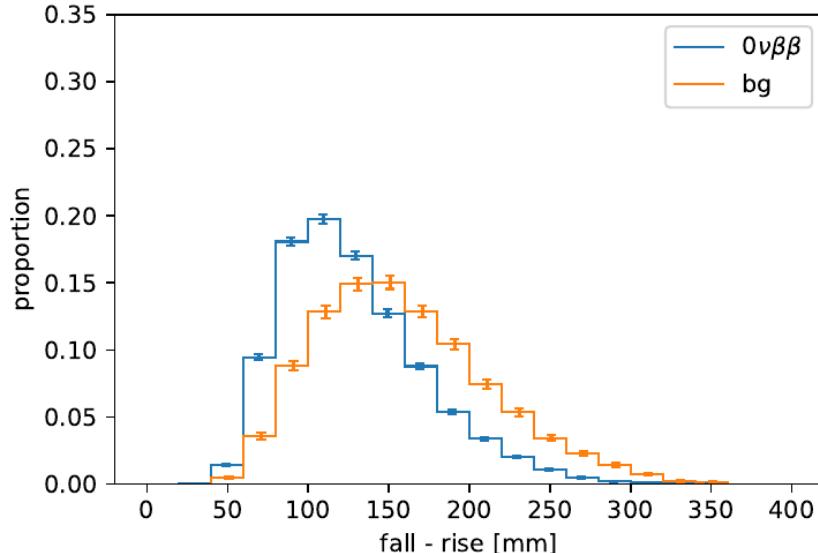
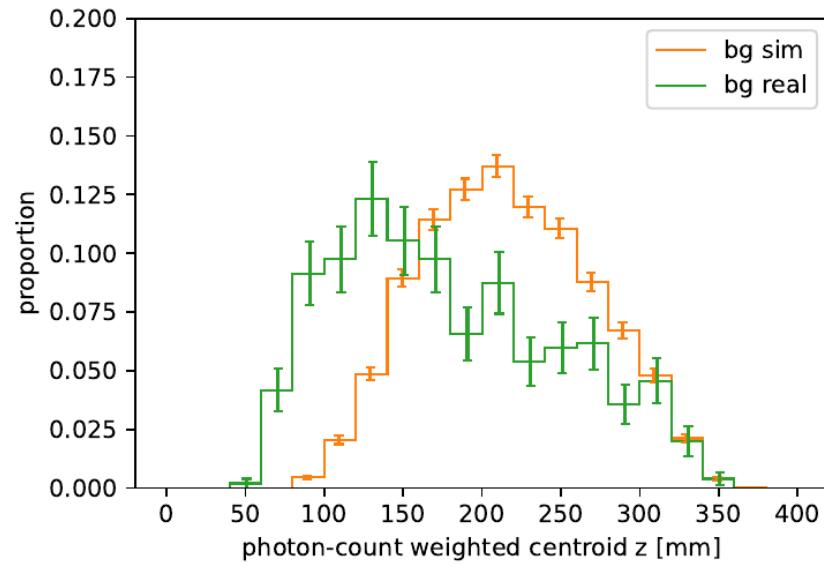
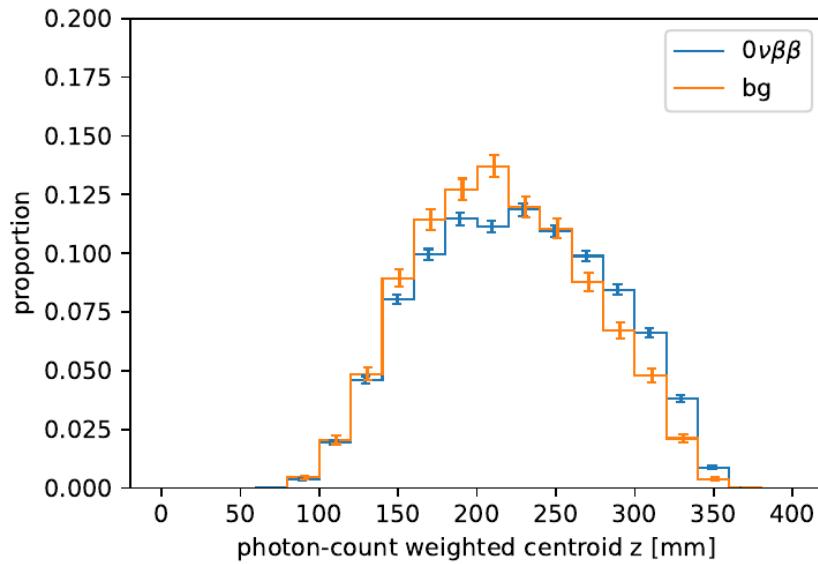






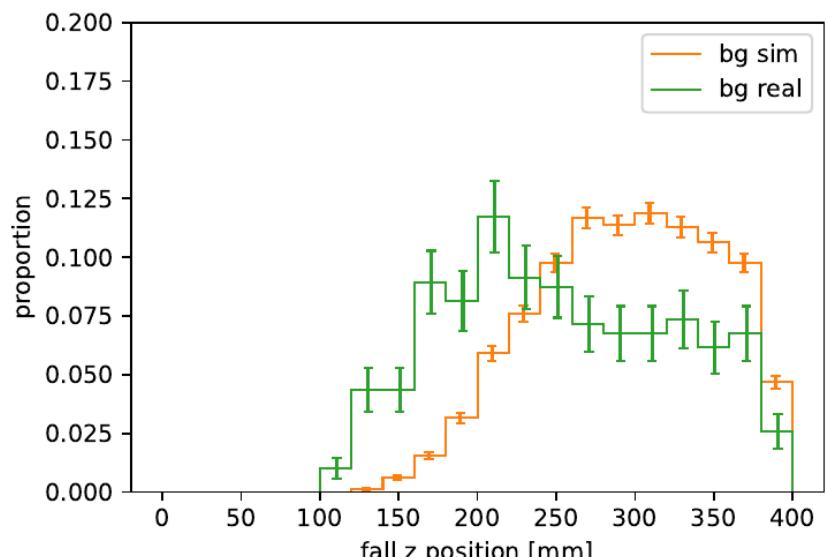
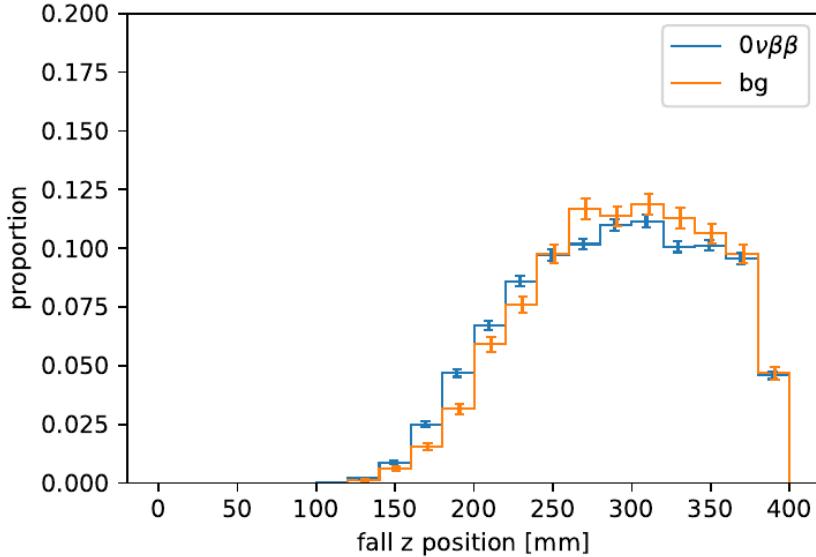
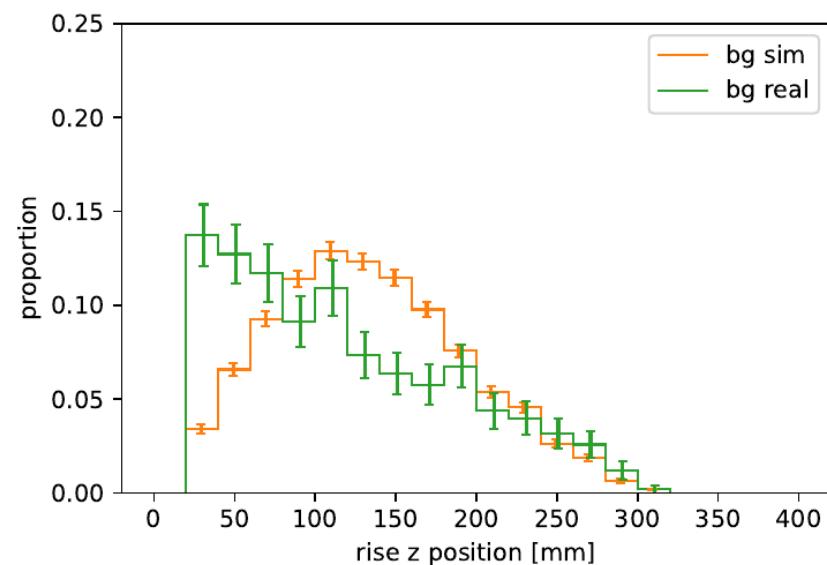
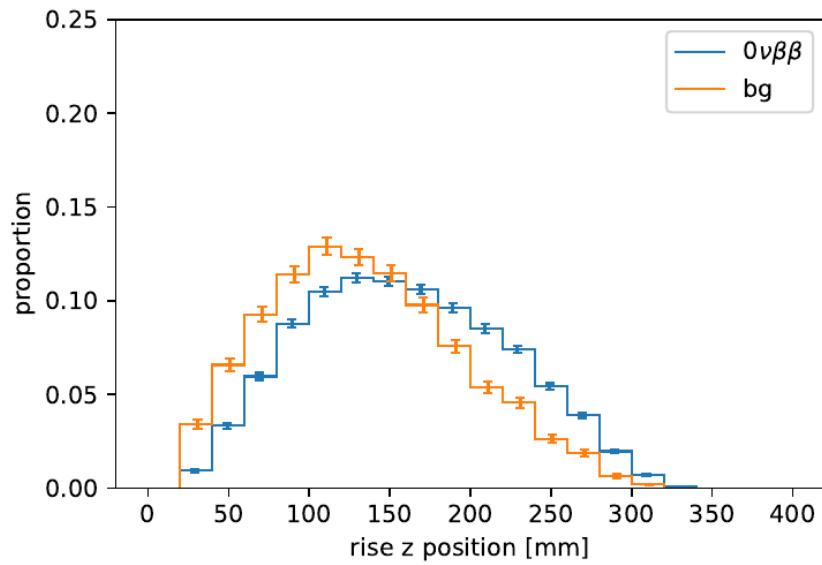
要約量分布

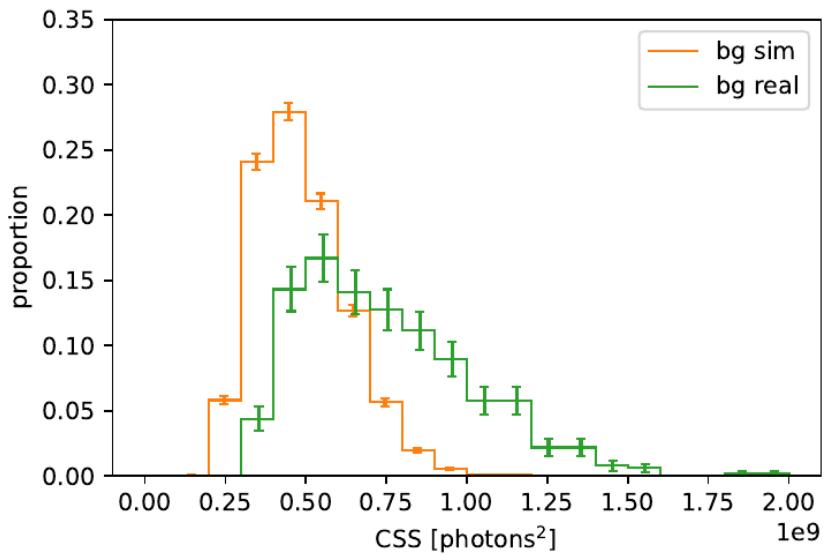
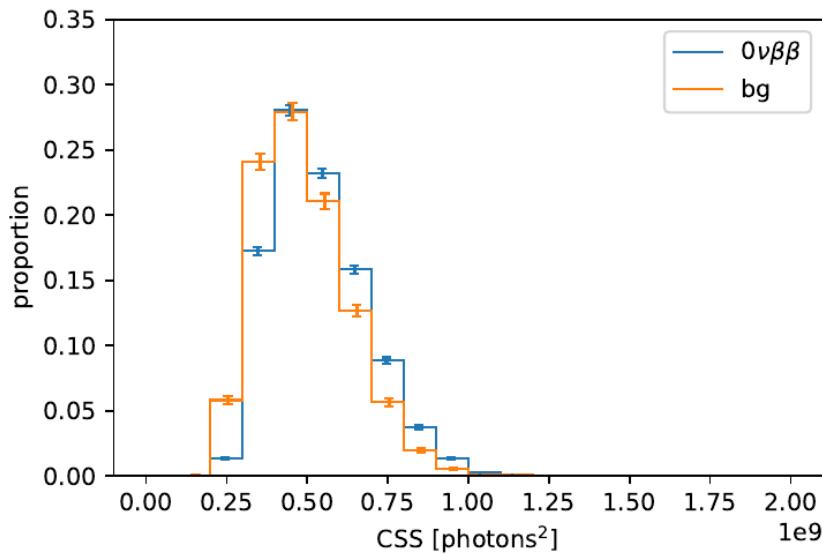
79



要約量分布

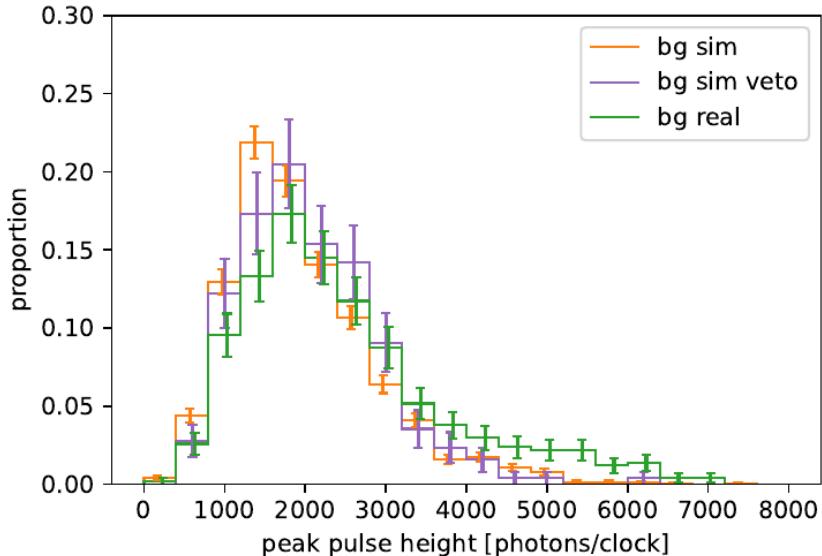
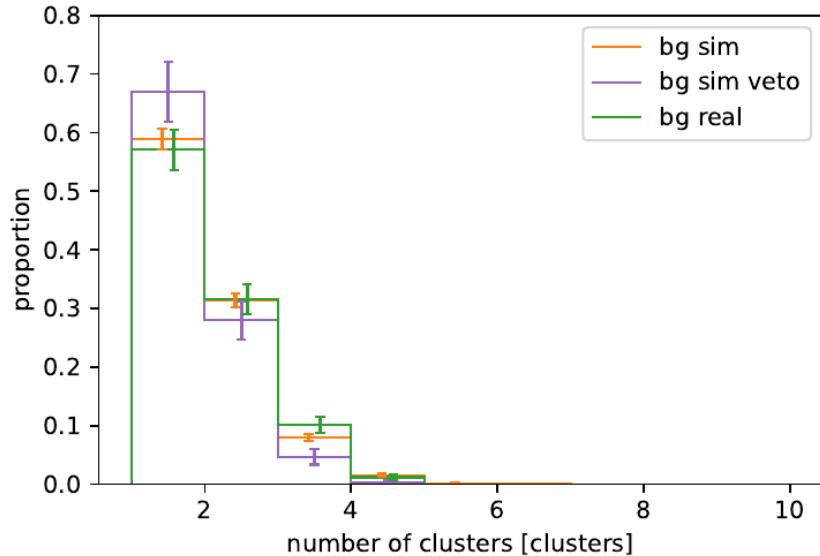
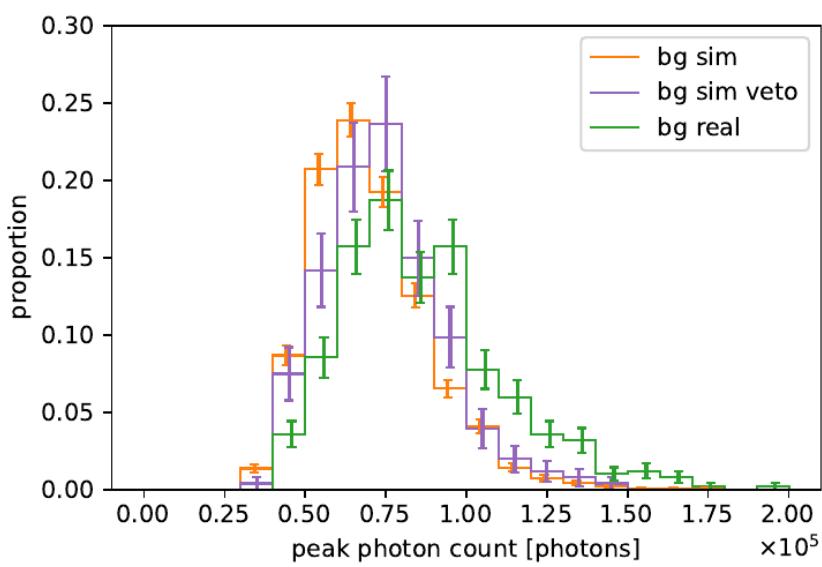
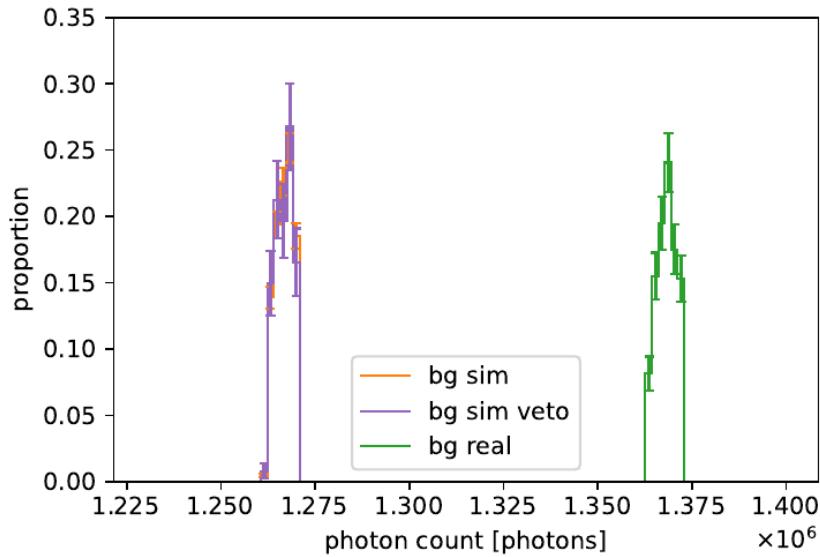
80





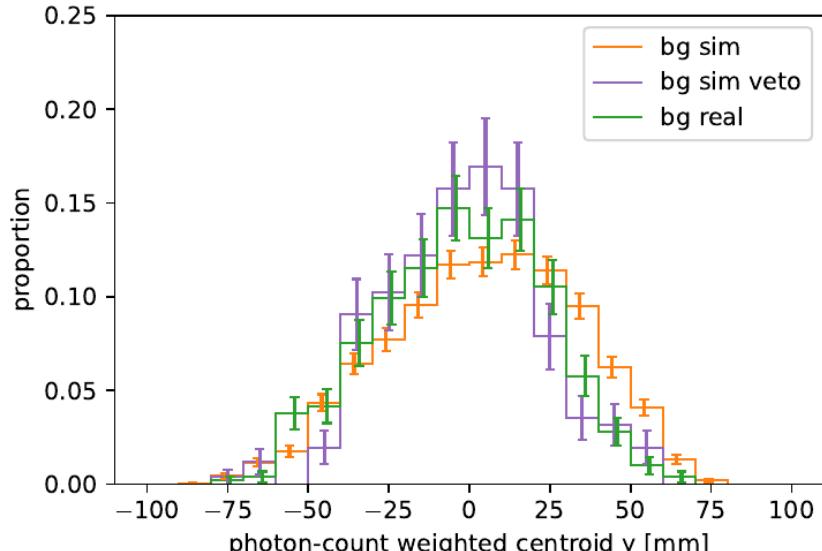
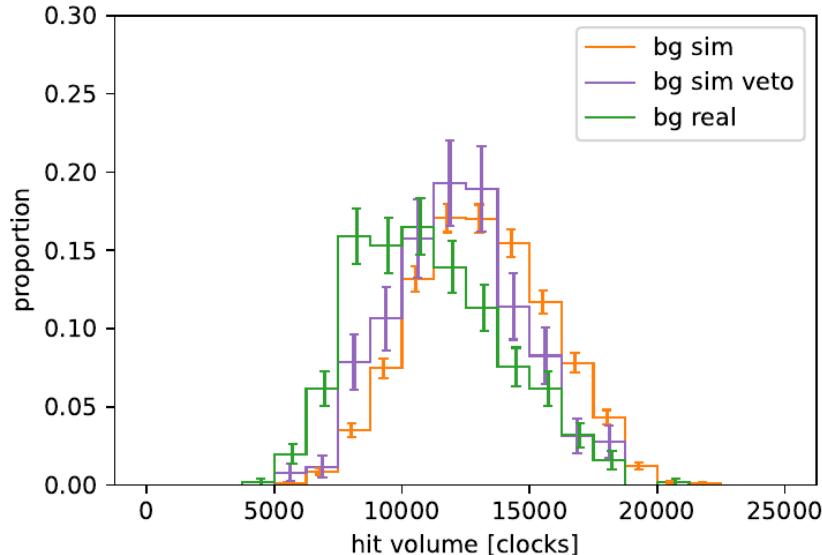
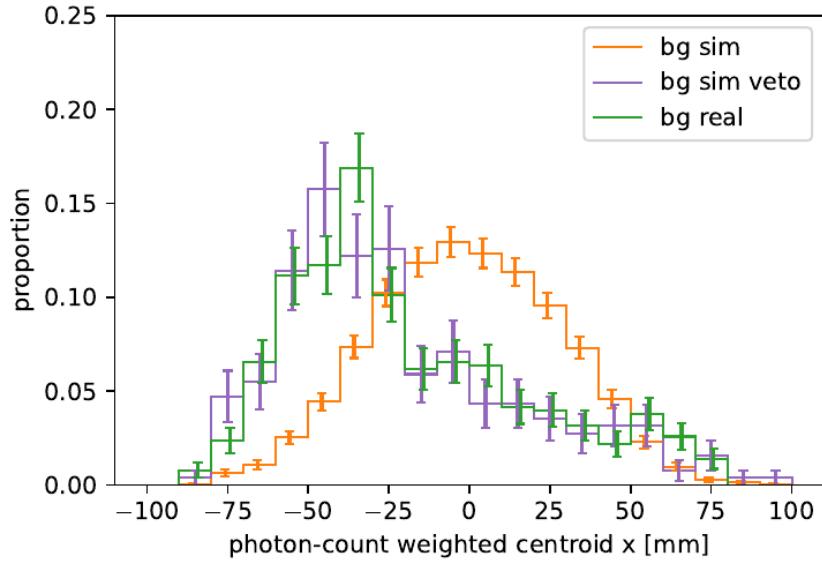
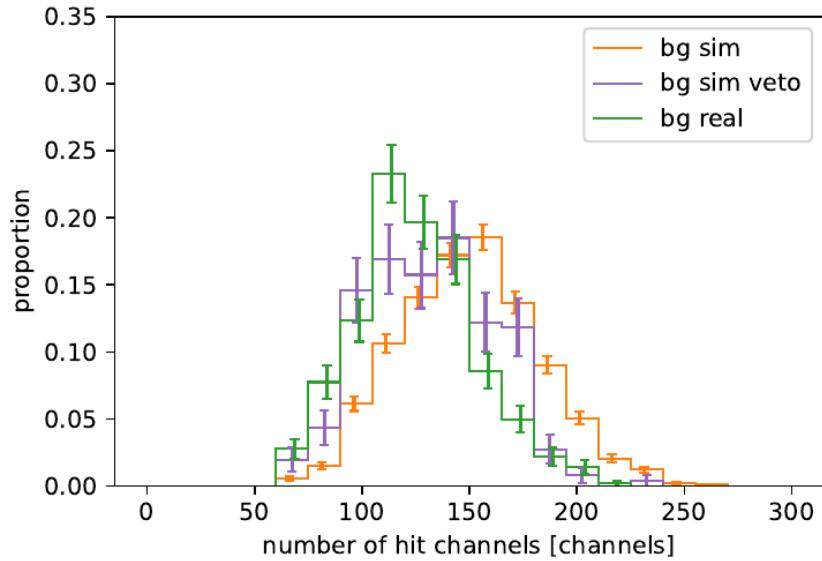
要約量分布(veto適用)

82



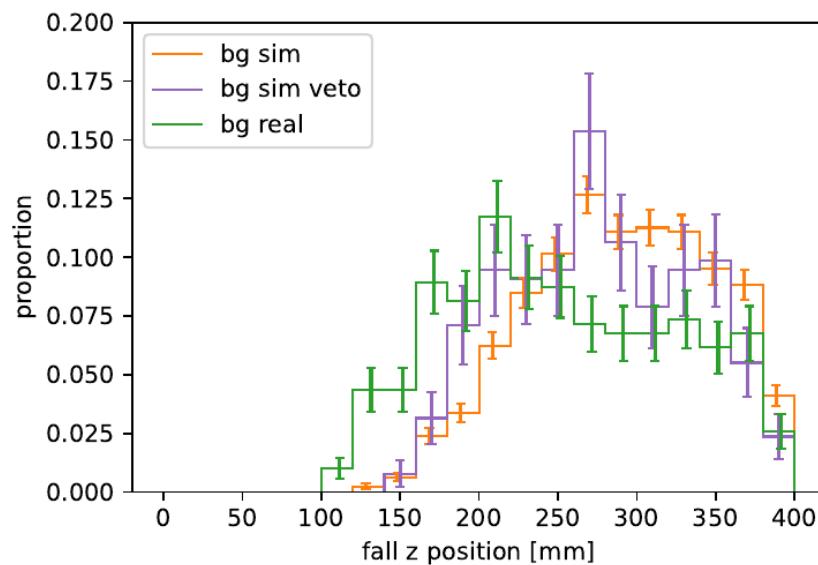
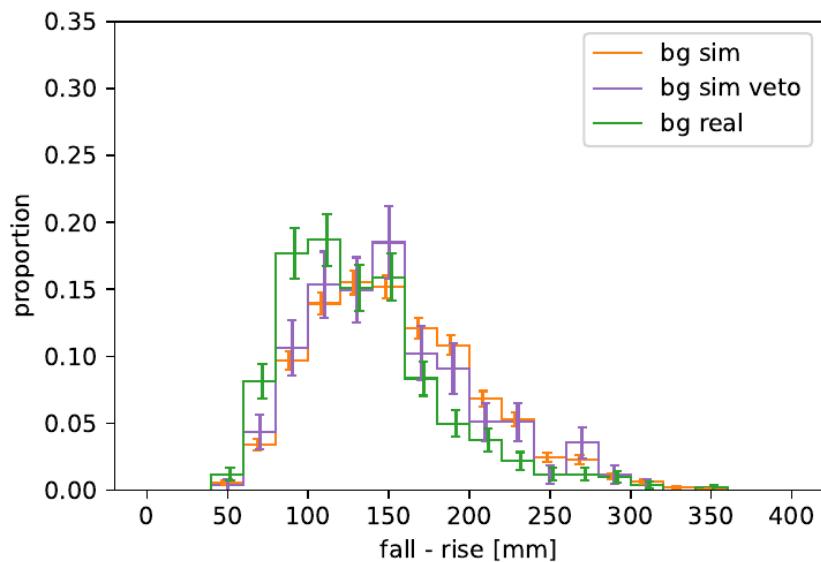
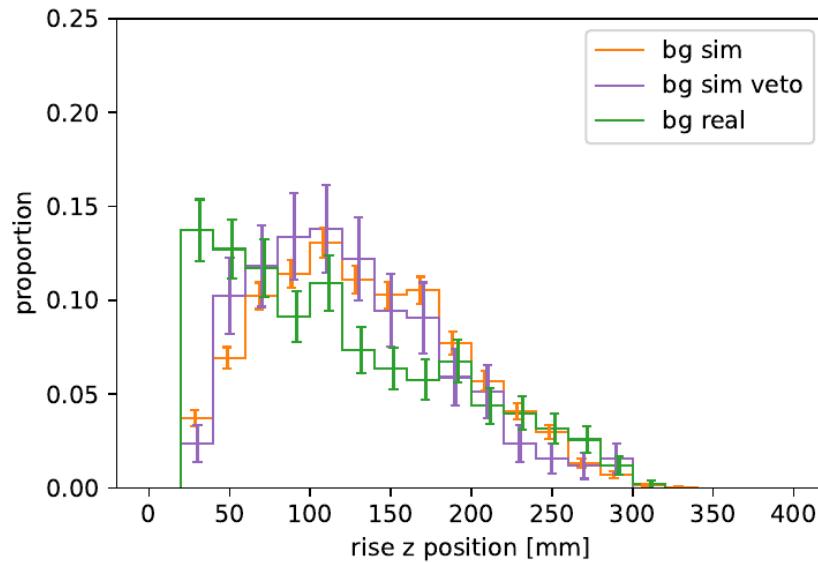
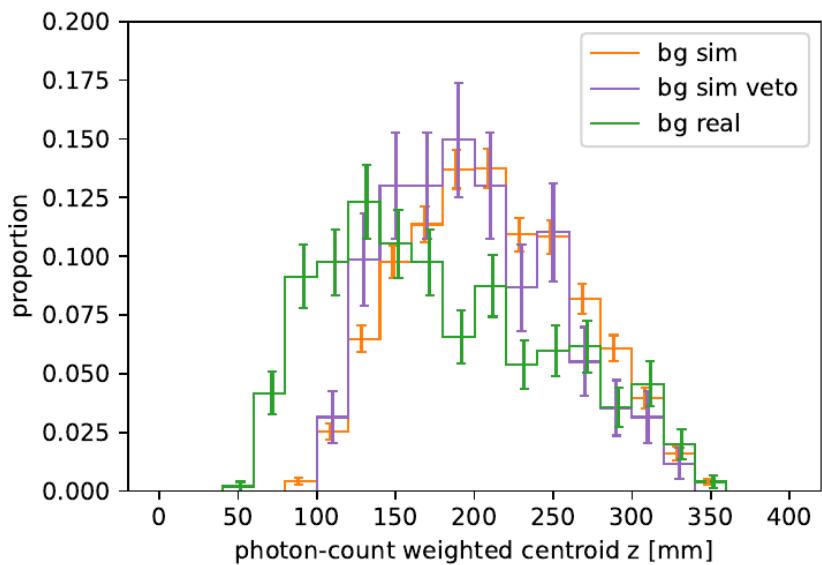
要約量分布(veto適用)

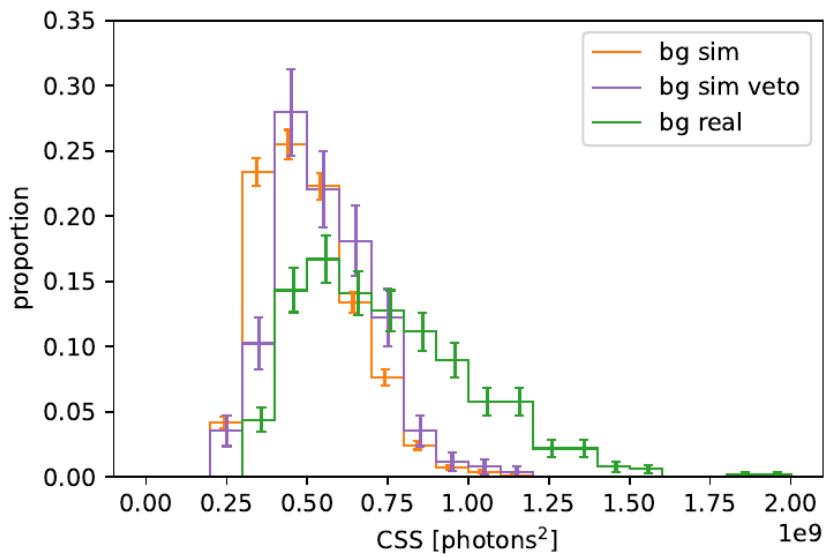
83



要約量分布(veto適用)

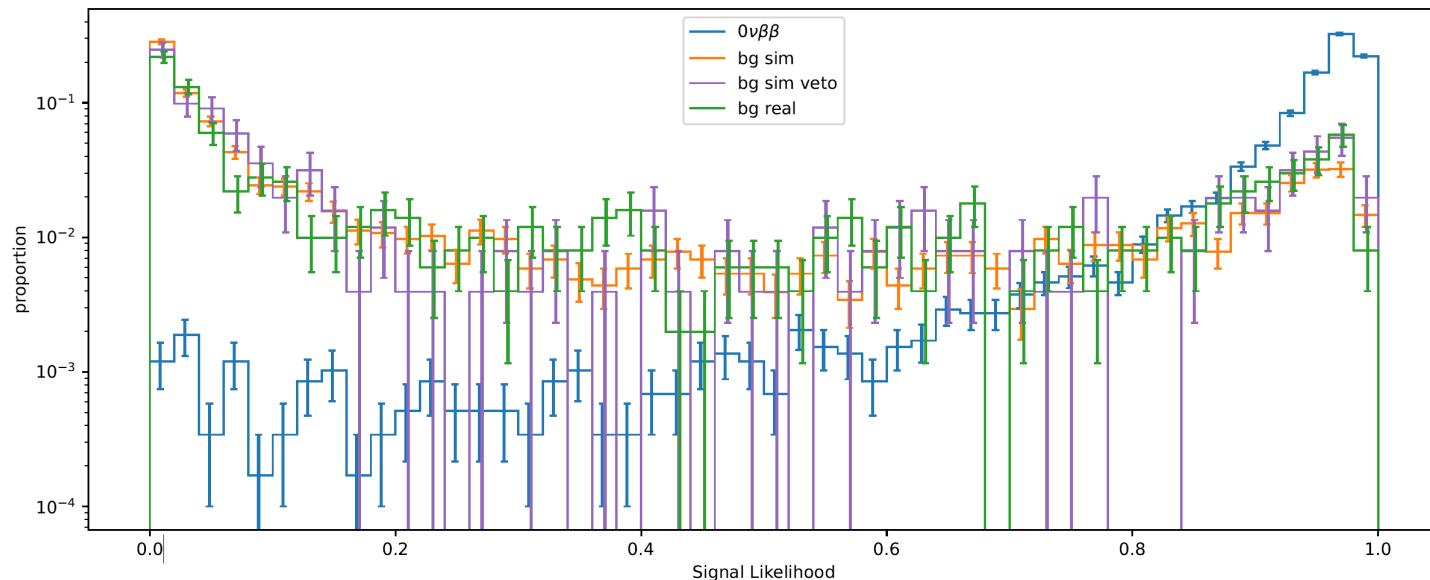
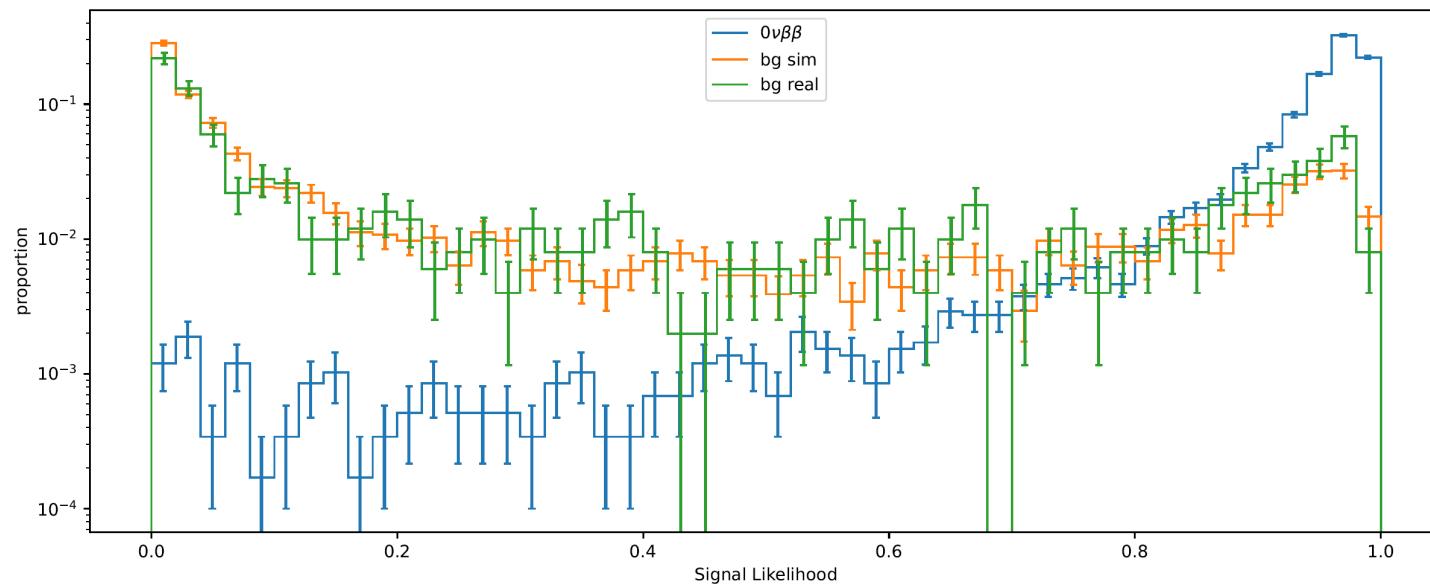
84





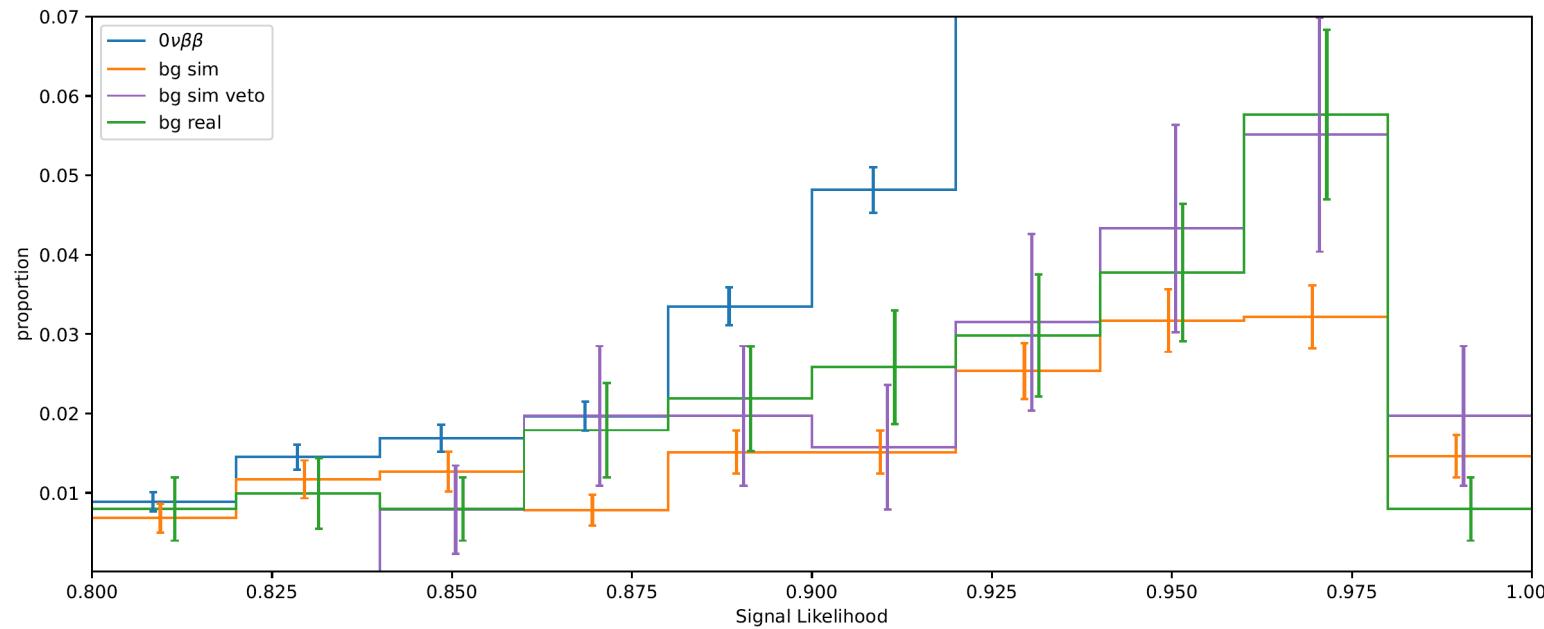
likelihood hist

86



likelihood hist (zoom)

87



バックグラウンドの混入割合

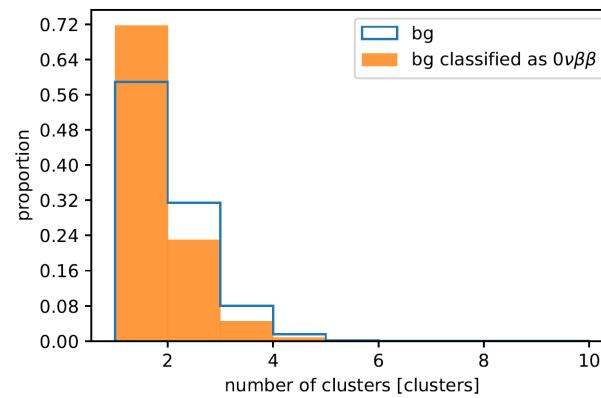
	threshold = 0.90	threshold = 0.93	threshold = 0.95
validation	0.119 ± 0.008	0.089 ± 0.007	0.062 ± 0.005
validation(veto)	0.165 ± 0.026	0.130 ± 0.023	0.094 ± 0.019
実データ	0.159 ± 0.018	0.119 ± 0.015	0.085 ± 0.013

x1.3~1.4倍
程度

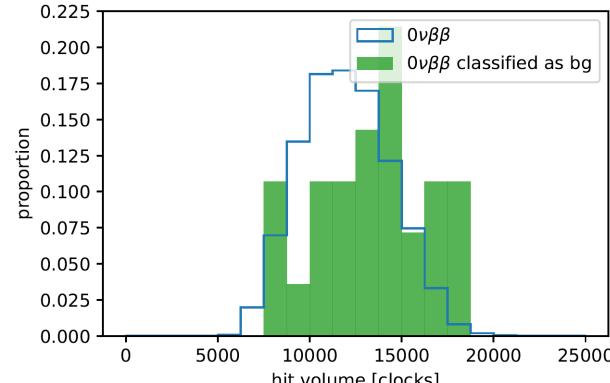
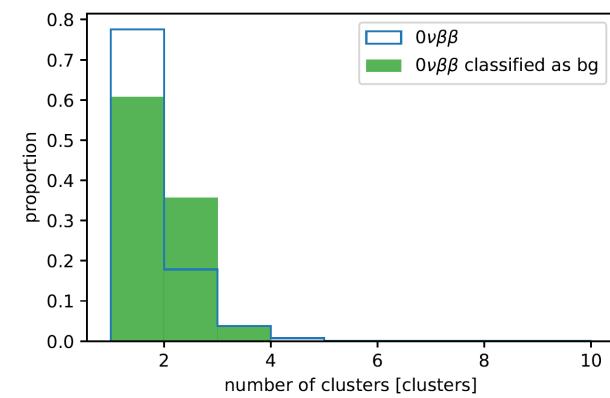
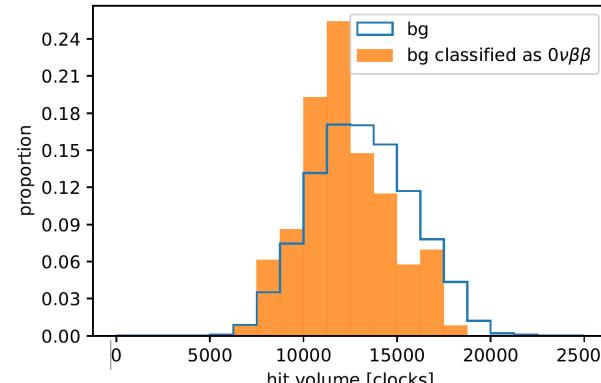


- BGなのに $0\nu\beta\beta$ (mimic)、 $0\nu\beta\beta$ なのにBG(oversight)と判定されたイベント
 - クラスター数が少ない
 - トランクの体積が小さい
- 特に、実データでトランクの体積が小さいことが signal likelihood 分布の違いに影響している可能性

クラスター数



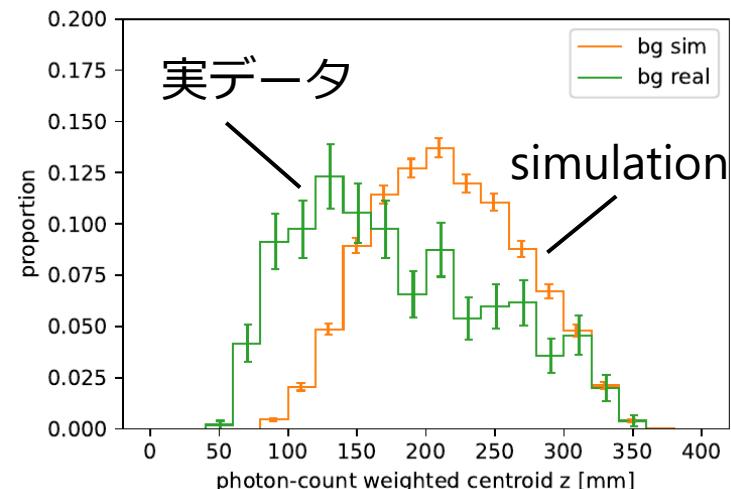
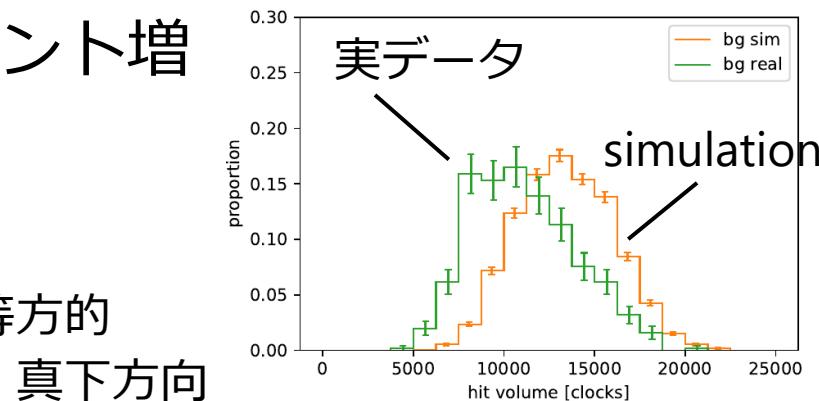
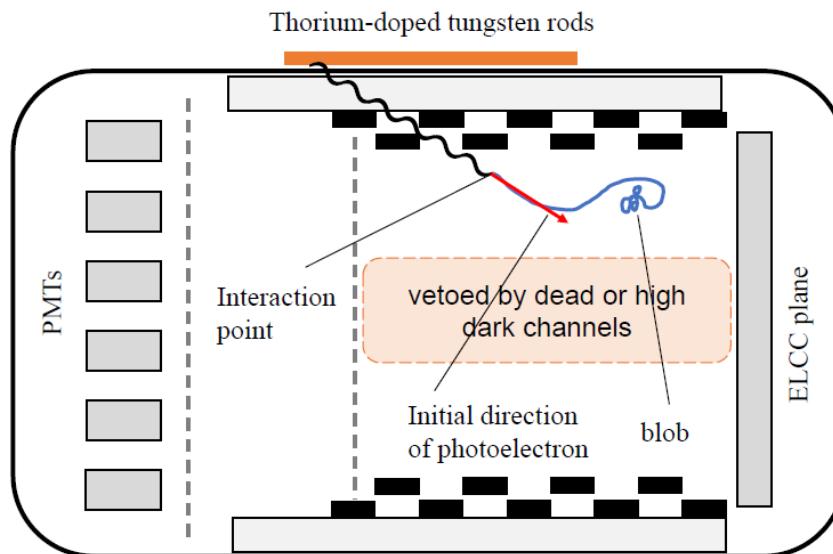
トランク体積



- 実データの方がトラック体積が小さい傾向
→ BGなのに $0\nu\beta\beta$ 判定されるイベント増

- 線源の位置、放出方向の違い

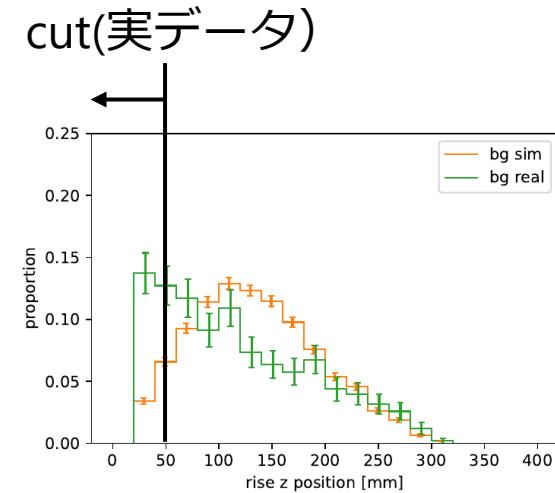
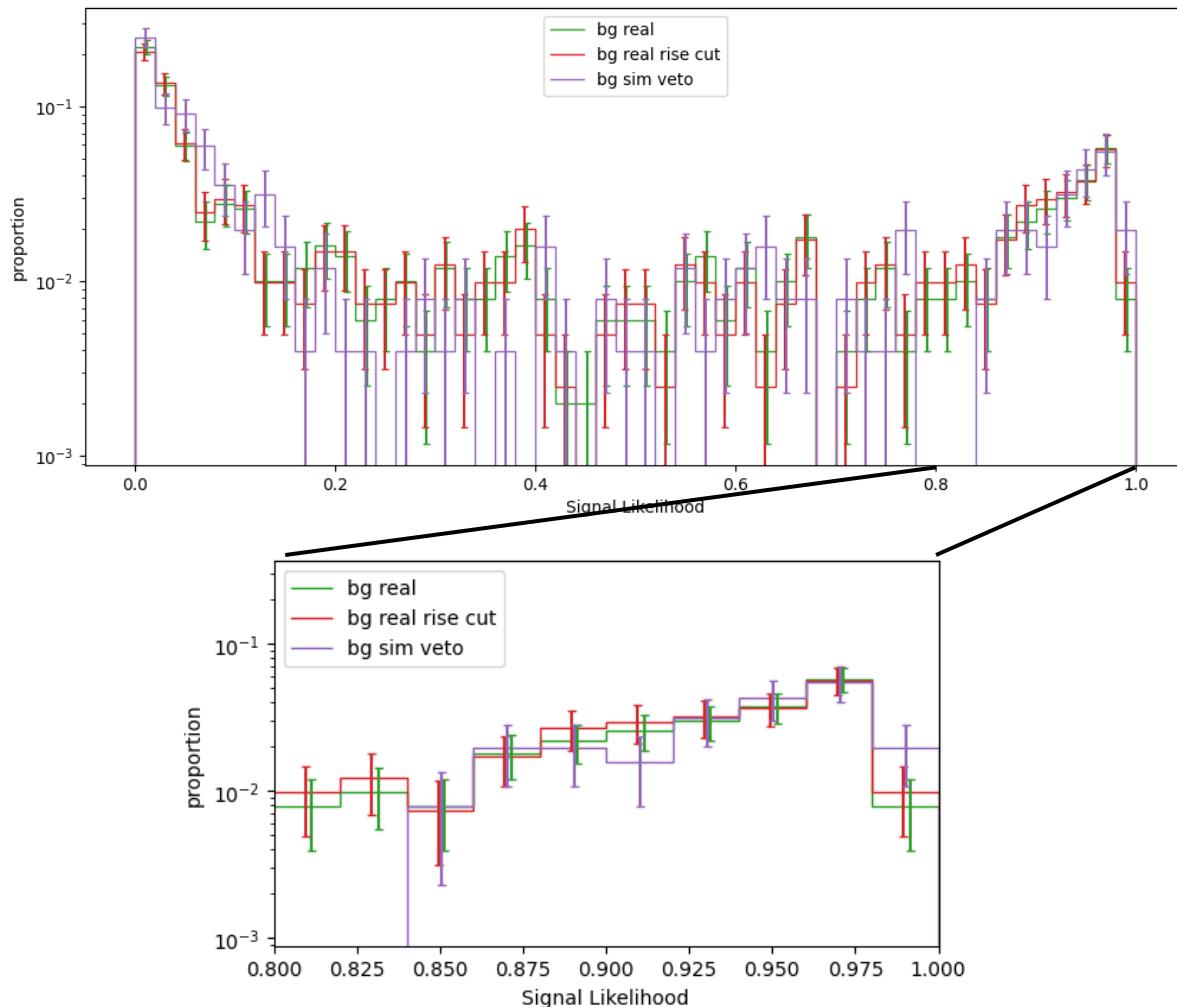
- 実データ → TPC有感領域のやや上方、等方的
 - シミュレーション → TPC有感領域直上、真下方向
- 光電効果の電子放出方向の角度依存性によって、実データではトラックの終端が low z 側にバイアス、ドリフト中の拡散小 → トラック体積小



z方向の分布によるlikelihood histへの影響

90

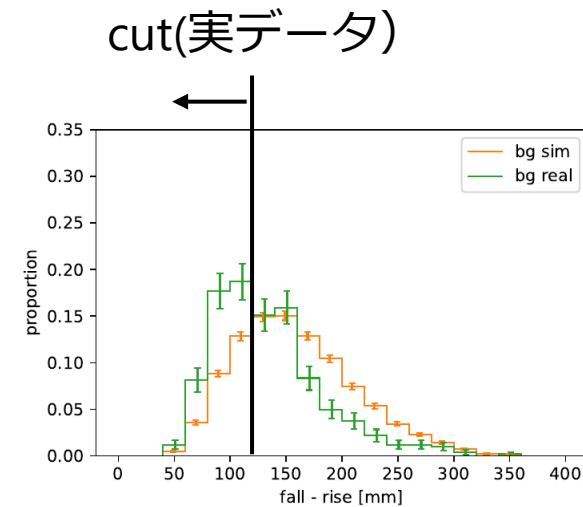
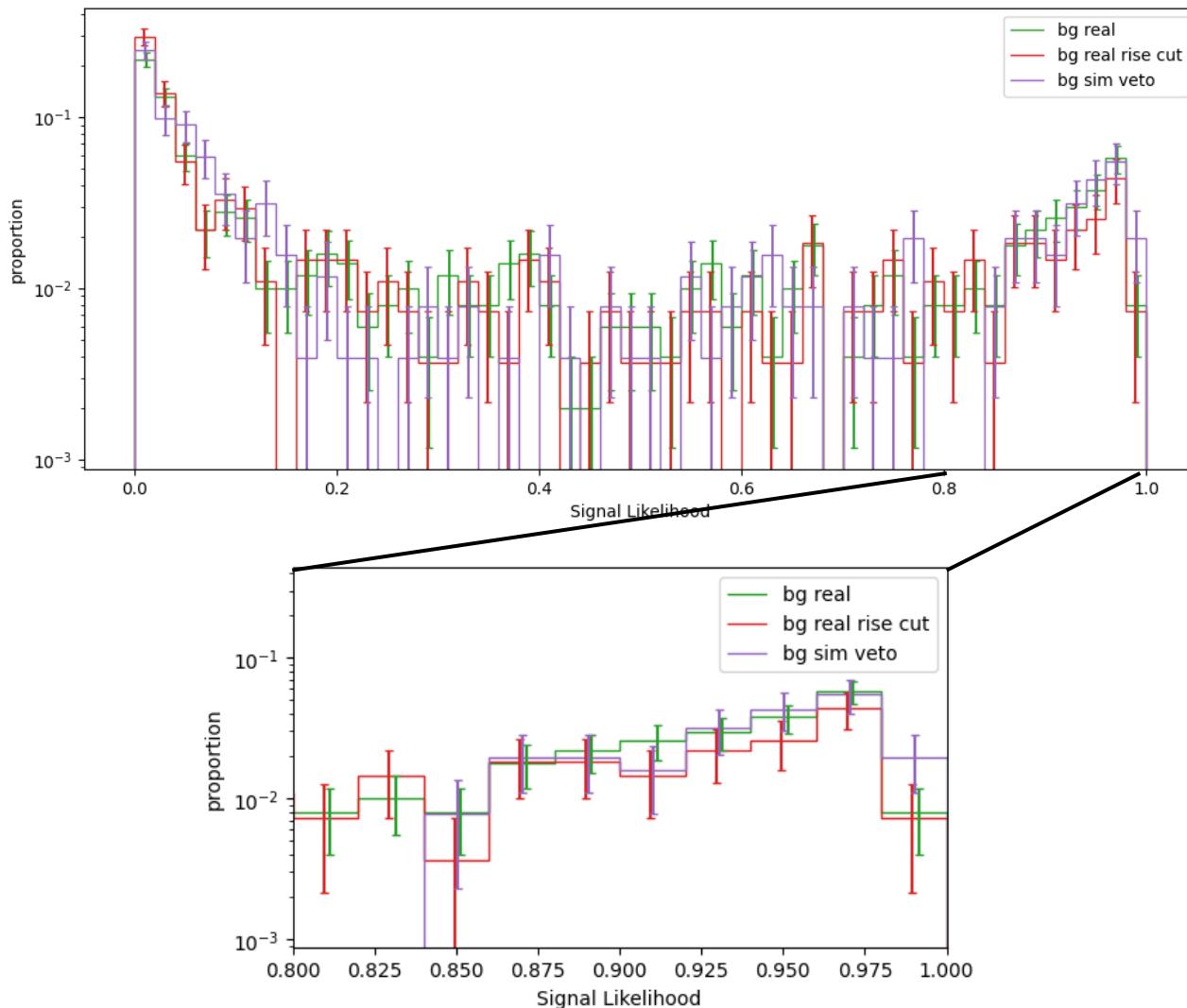
- 実データのz位置の分布がシミュレーションと異なる影響
- 実データのトラックの最小z位置が小さいデータ(<50mm)をカットしたときのlikelihoodのふるまいを比較 → 有意な変動はみられず



z方向の分布によるlikelihood histへの影響

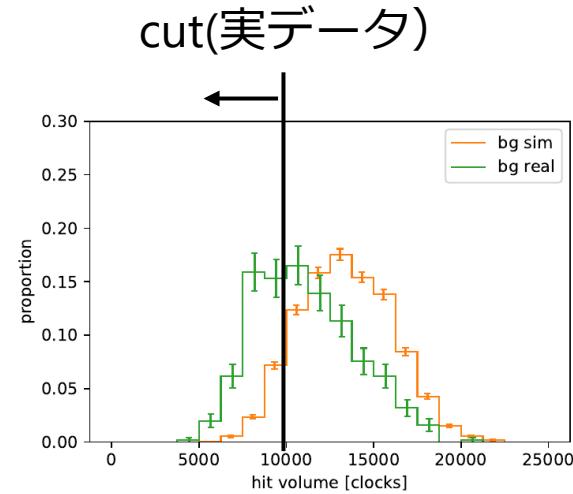
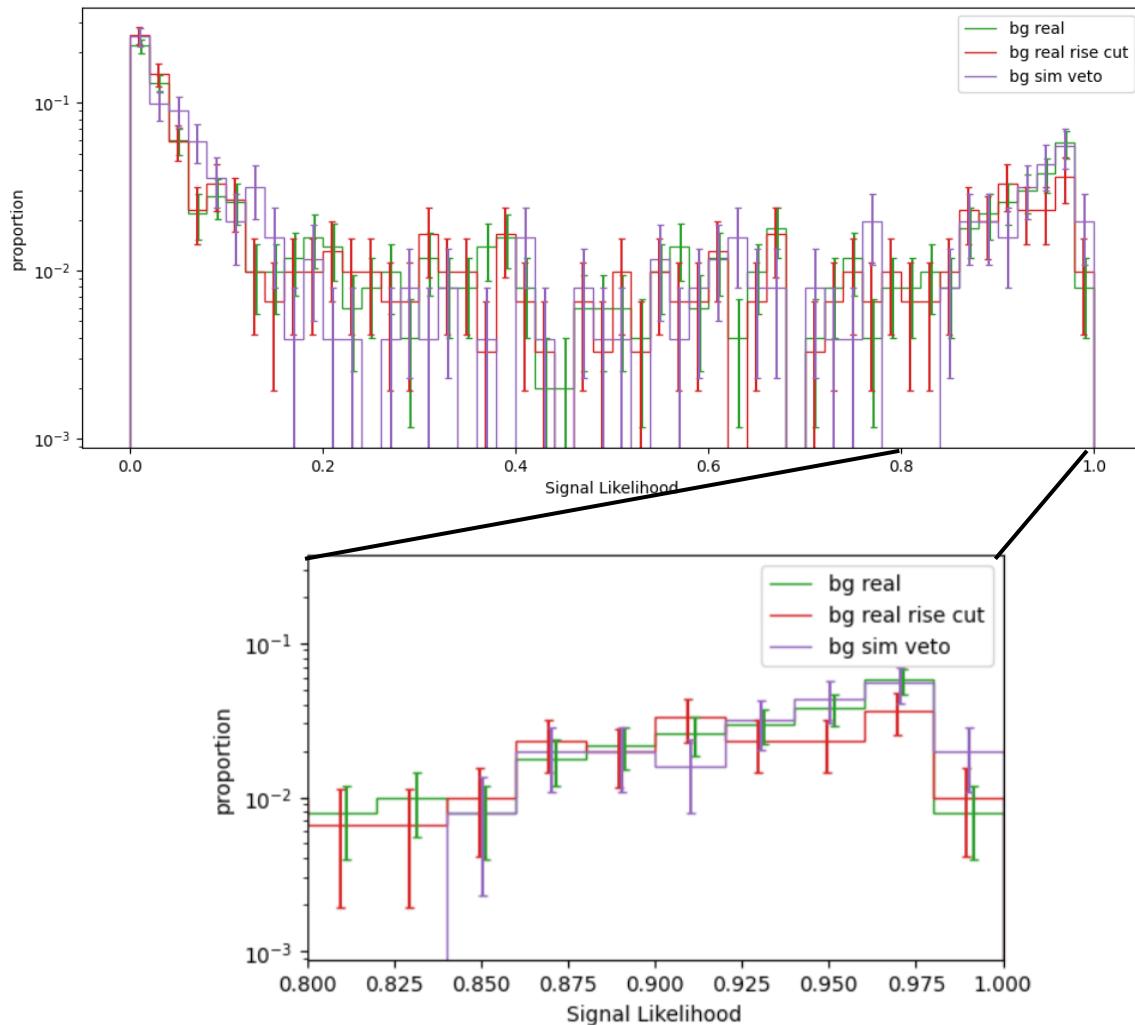
91

- z方向の広がりについても比較 (<120mmをカット)
- 有意な変動はみられず



トラック体積によるlikelihood histへの影響 92

- トラック体積についても比較(<10000をカット)
- 有意な変動はみられず



- 実データの hitvolume が小さいことが、「BGなのに $0\nu\beta\beta$ と判定」イベントを増やす可能性がある
- validation データに対する hit volume と likelihood の分布でも、「BGなのに $0\nu\beta\beta$ と判定」（図右側のオレンジの点）は hit volume が小さい傾向が見られている
- 実データでは、hitvolumeの制限でlikelihood histogramには有意差が見られなかったが、データ量の不足の可能性も考えられる

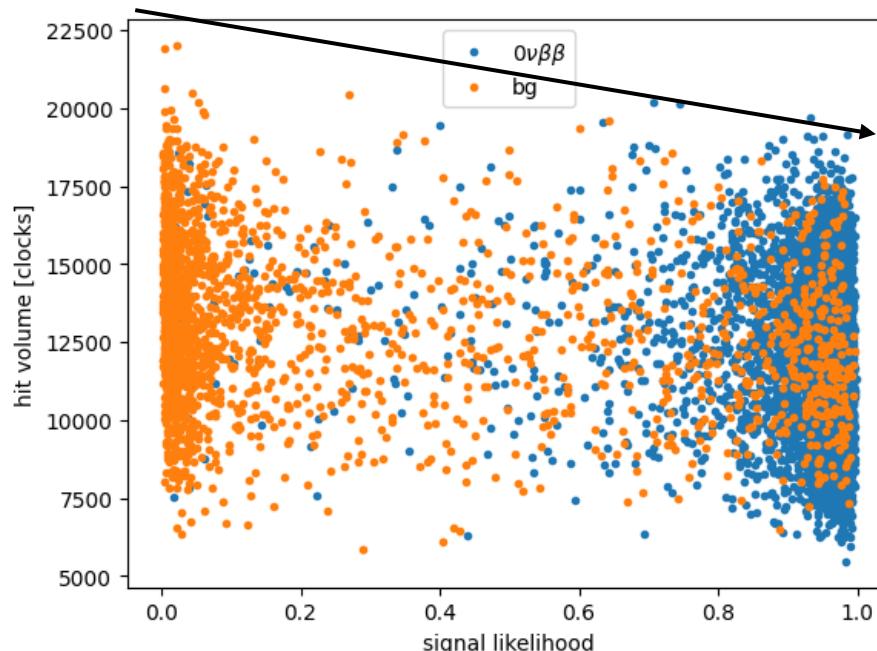


Table 7.1: Breakdown of the energy resolution at 1836 keV listed in descending order.

Error in the time variation correction (Sec. 7.1.2)	0.32 % → 0% (統計増、安定測定)
Fluctuation of the number of initial ionization electrons (Sec. 7.1.1)	0.29 %
Fluctuation of the EL generation and detection (Sec. 7.1.1)	0.24 % → 0.15% (光量2.6倍)
Error in the EL gain correction (Sec. 7.1.2)	0.23 % → 0% (統計増、安定測定)
Recombination (Sec. 7.1.1)	0.22 % → 0% (100% ドリフト電場)
Fluctuation of the MPPC non-linearity (Sec. 7.1.1)	0.18 %
z mis-reconstruction (Sec. 7.1.4)	0.13 % → 0% (シンチ光効率UP)
Variation in time bin of time variation correction (Sec. 7.1.2)	≤ 0.16 %
Error in the z -dependence correction (Sec. 7.1.2)	≤ 0.11 %
Accuracy of the MPPC recovery times (Sec. 7.1.2)	≤ 0.11 %
Offset of the baseline (Sec. 7.1.3)	≤ 0.09 %
Fluctuation of the attachment (Sec. 7.1.1)	≤ 0.02 %
Position dependence of the EL gain (Sec. 7.1.3)	0 %
Waveform filtering in the FEB (Sec. 7.1.3)	0 %
Estimation total	0.63 % to 0.67 % → 0.37 % to 0.44 %
Data total	(0.73 ± 0.11) %

0.32 % @ $Q_{\beta\beta}$

	Contribution	
Initial ionization	0.25%	
Z mis-reconstruction	0.24%	→0%
Fluctuation of the EL generation and detection	0.20%	→0.14%光量2.14倍
Error in EL gain calibration	0.18%	→0%
Error in time dependence correction	0.18%	→0%
Recombination	0.17%	→0%
Variation in time bin of time variation correction	0.12%	
Offset of the baseline	≤ 0.11%	
Error in z dependence correction	≤ 0.06%	
Fluctuation of the attachment	≤ 0.02%	
Accuracy of the MPPC recovery time	≤ 0.03%	
Fluctuation of the MPPC nonlinearity	not yet evaluated	
Estimation total	(0.52-0.54)%	→ 0.31-0.33%
Data total	(0.67±0.08)%	 0.32% @ Q _{ββ}

0.32% @ Q_{ββ}