



シミュレーションによる

AXEL検出器のエネルギー分解能の 理解

^A京都大学 理学研究科, ^B東大ICRR, ^C東北大FRIS

^A潘 晟

^A市川温子、^A中家剛、^B中村輝石、^C小原脩平、^A吉田将、^A中村和広、^A菅島文悟
他 AXEL collaboration

2021年3月13日 JPS@オンライン

1. AXEL実験
2. AXEL試作機について
3. 検出器シミュレーション
4. まとめ

1. AXEL実験

2. AXEL試作機について

3. 検出器シミュレーション

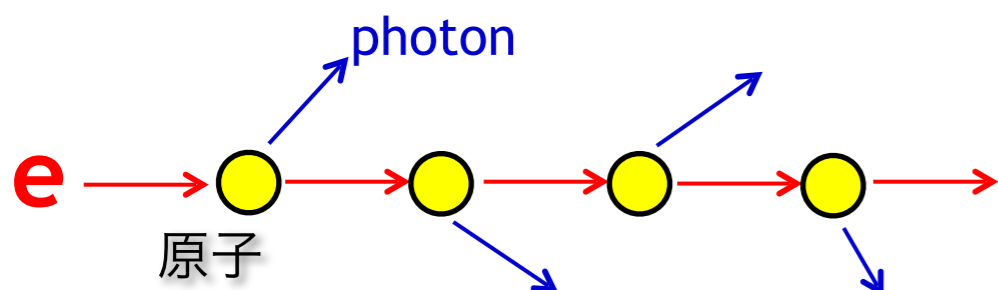
4. まとめ

AXEL -A Xenon ElectroLuminescence-

高圧XeガスTPC for $0\nu\beta\beta$ decay search

電離信号の読み出し

- エレクトロルミネセンス(EL)過程



掛けた電場に比例して増幅率が増加

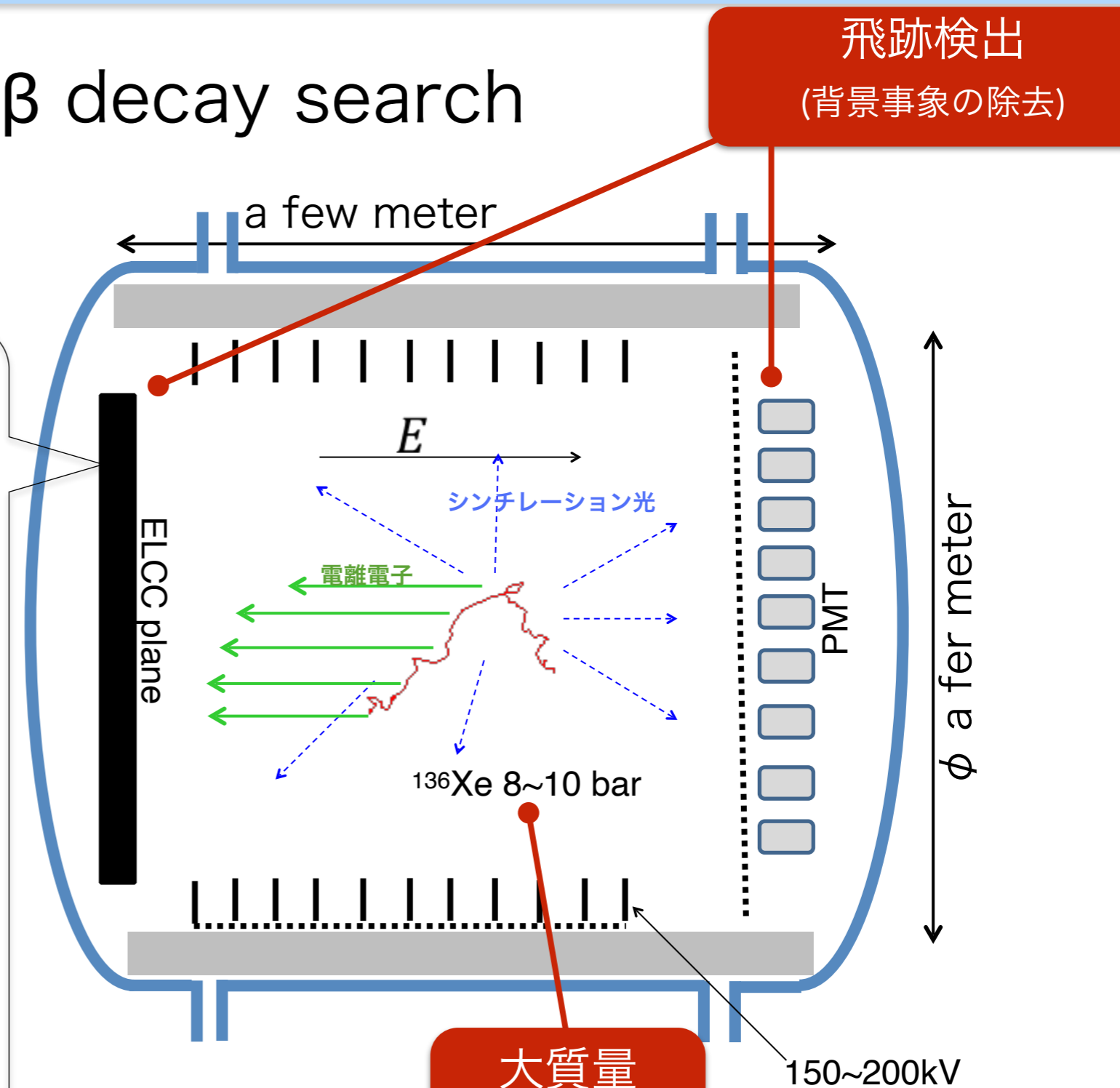
指数関数的増幅過程を伴わない

-> 増幅揺らぎが小さい

読み出し機構の詳細は次頁

高エネルギー分解能

-> 目標 : 0.5%FWHM @ Q値



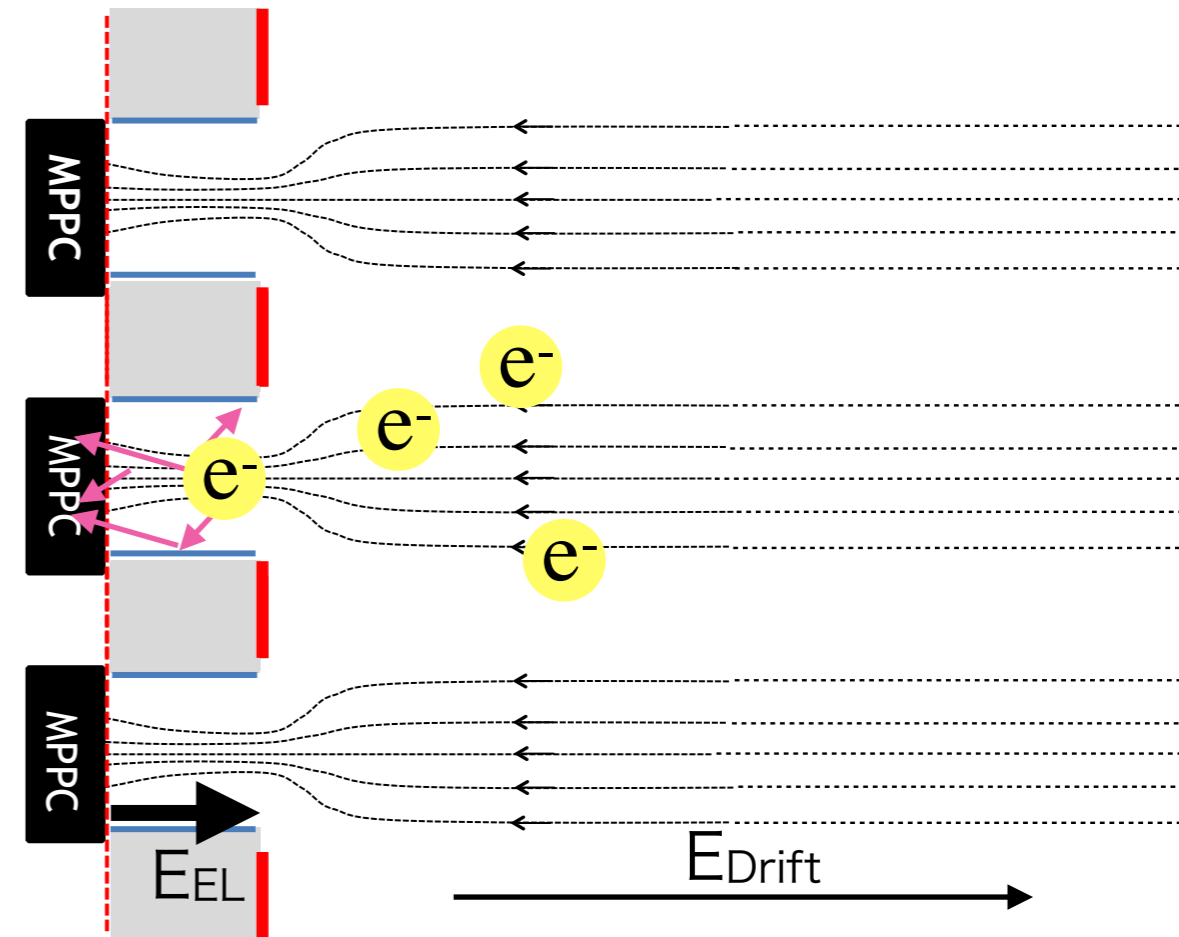
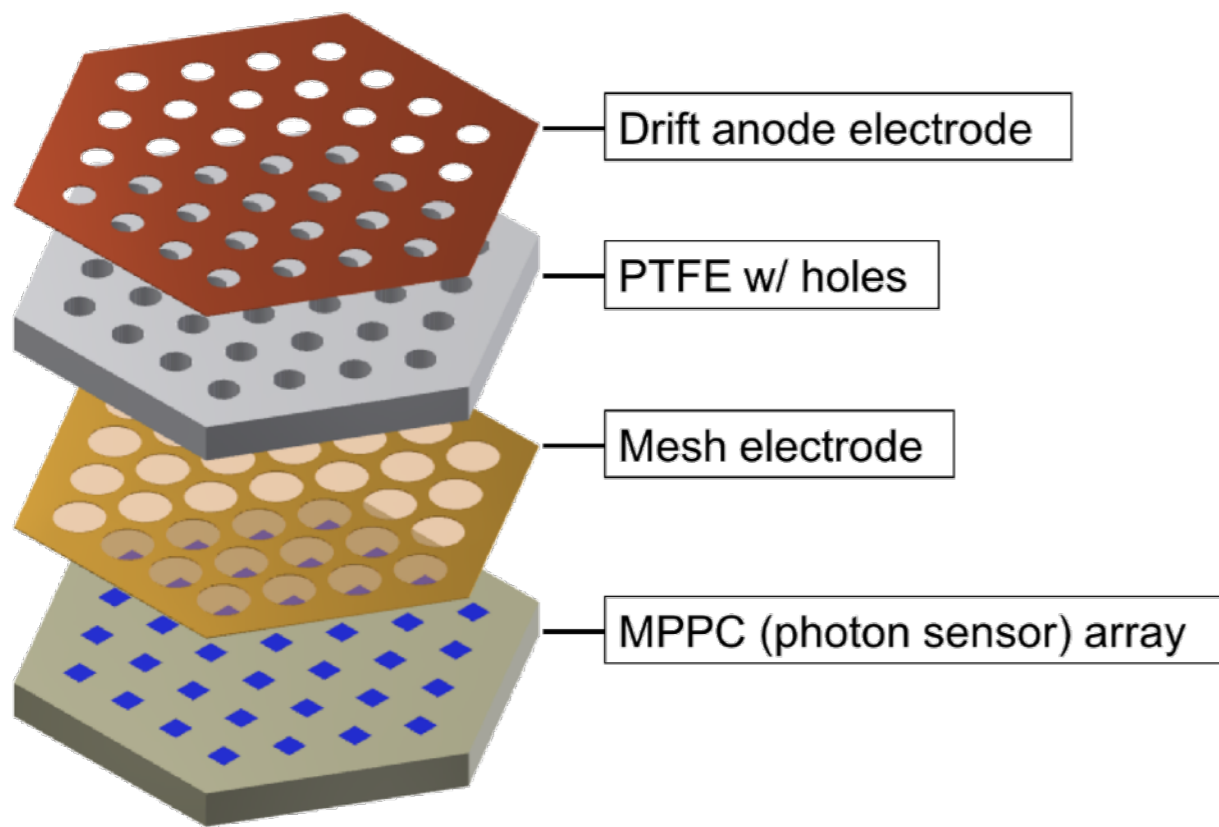
大質量

-> 約1トンの高圧 ^{136}Xe ガス

AXEL -A Xenon ElectroLuminescence-

Electroluminescence Light Collection Cell : ELCC

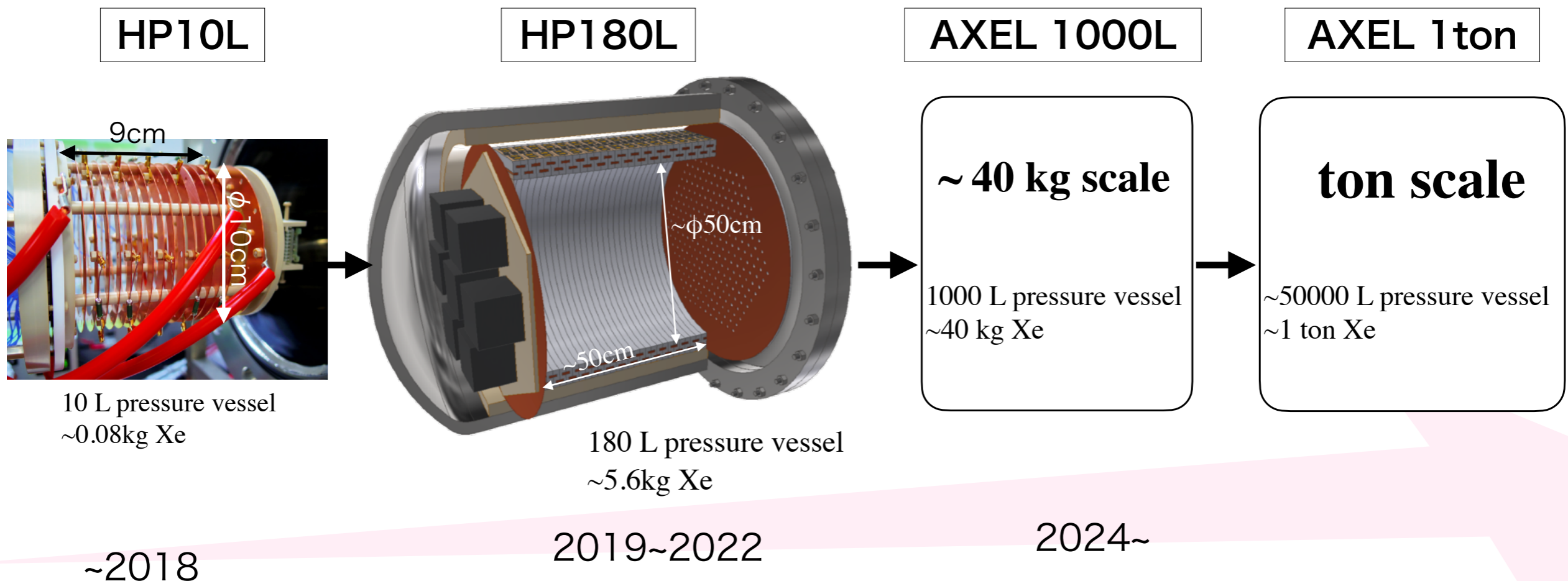
- セル内に電子を引き込んで高電場によってEL光を発生
- 光量を測定してエネルギー情報、ヒットパターンからトラックを再構成
- PTFE bodyを骨格とする強固な造りなので、大型化が容易



Ionization electrons are collected into cells if $E_{EL} > E_{Drift}$, And converted into EL light

AXEL実験の計画

- 10L級 試作機：ELCCの原理実証、検出器コンセプトの証明→ **done (122keV, 356keV)**
- 180L級 試作機：大型化の技術獲得、高いエネルギー(~2.4MeV)での性能評価、BG調査
→ **1st phase : done (511 keV)**, on going: 662 keV, 1.1 MeV, 1.3 MeV
- 1000L級 検出器：物理探索、~40 kg ^{136}Xe enriched Xenon、world record
- ton-scale 検出器：Inverted mass orderingをsweep out + Ba taggingなどでNOも



1. AXEL実験

2. AXEL試作機について

3. 検出器シミュレーション

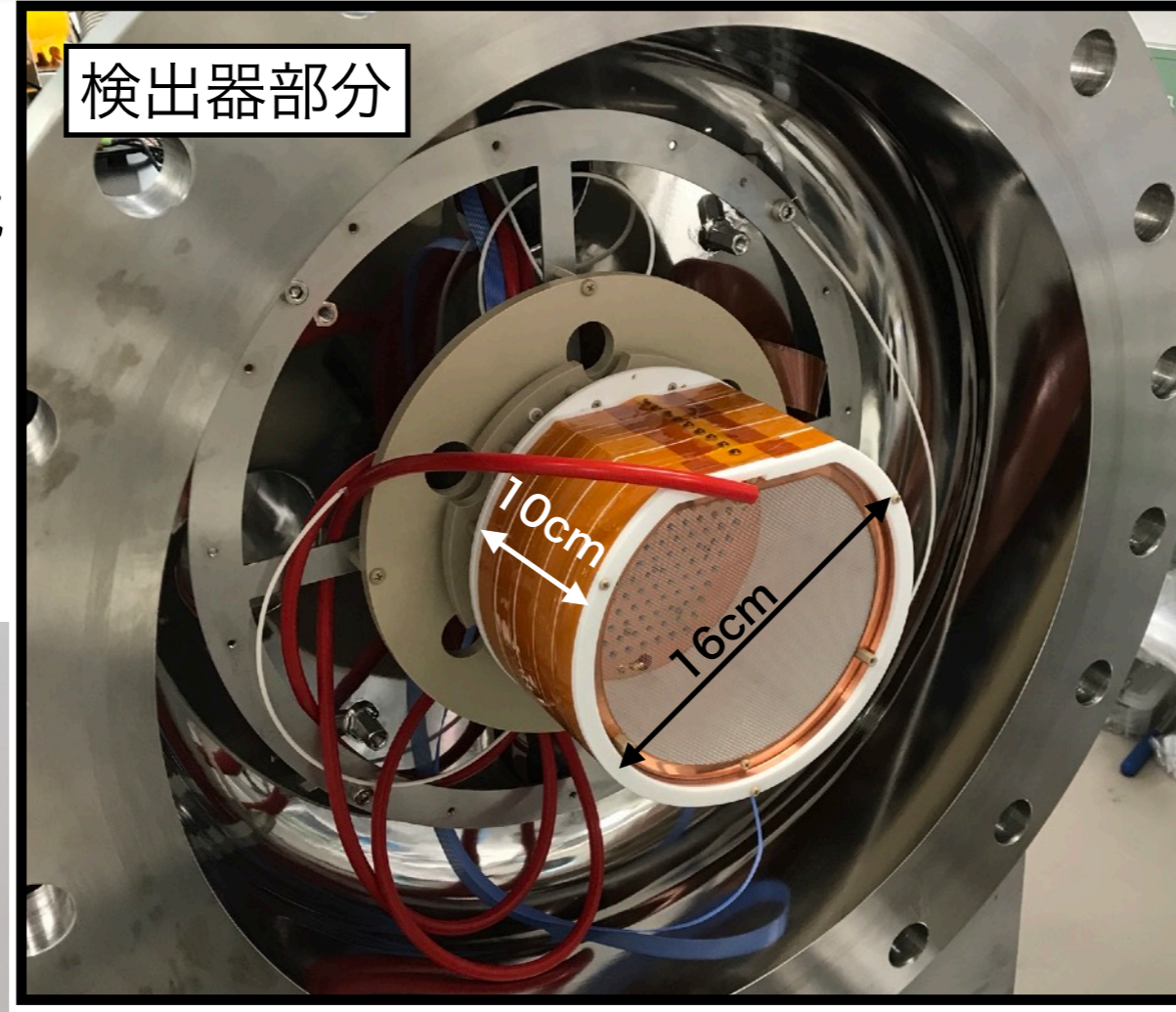
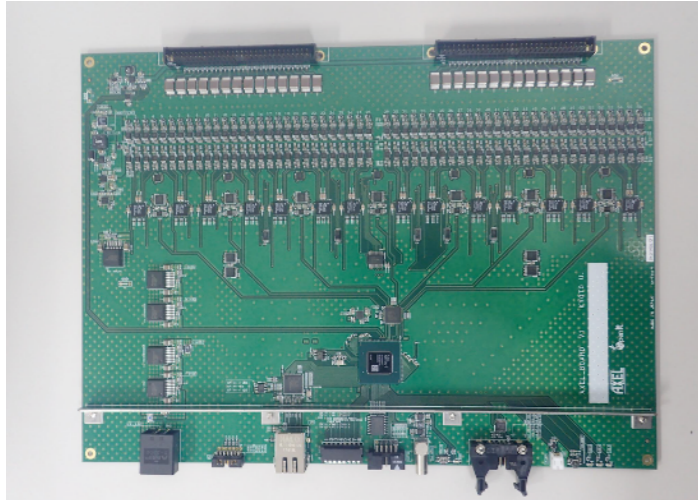
4. まとめ

AXEL試作機：ハイライト

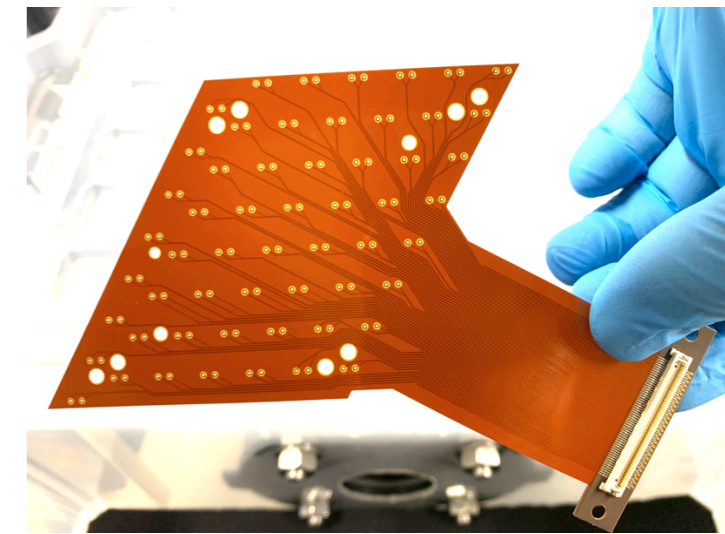
- 180L試作機
- 1st phase
- 現在はより大きい有感領域
(吉田講演：13aV2-3)

データ取得用回路

ref: arXiv:2001.02104

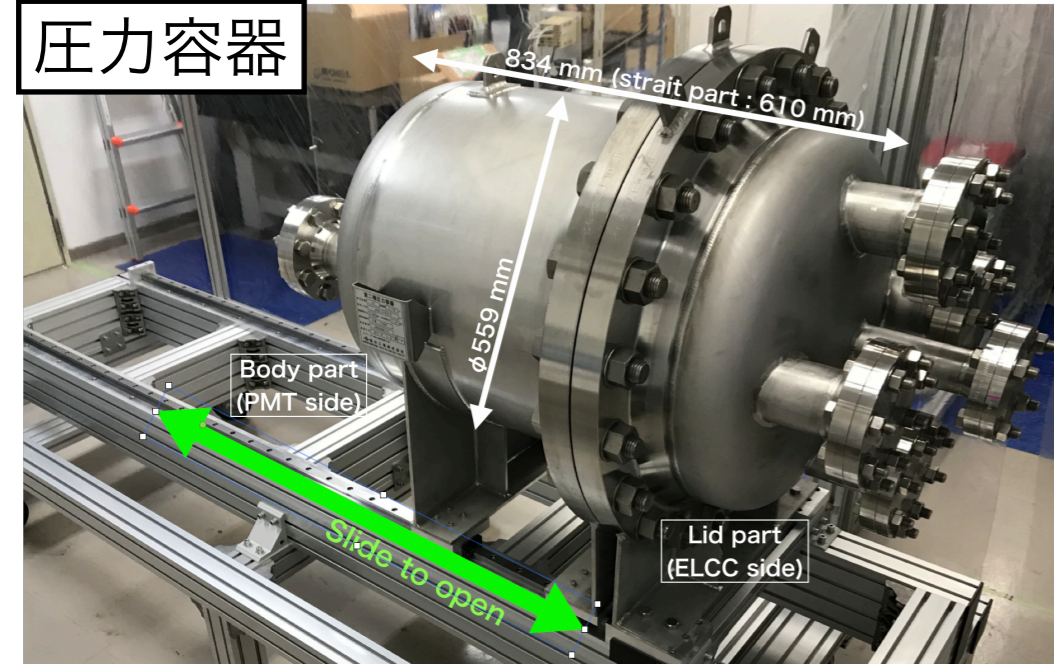


Flexible Printed Circuit

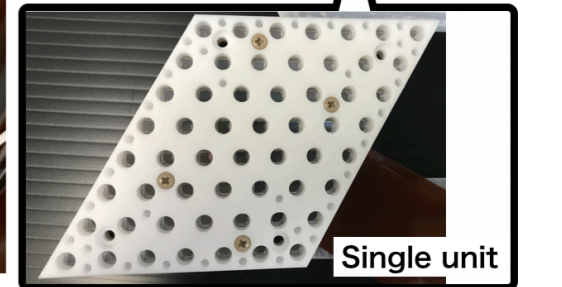
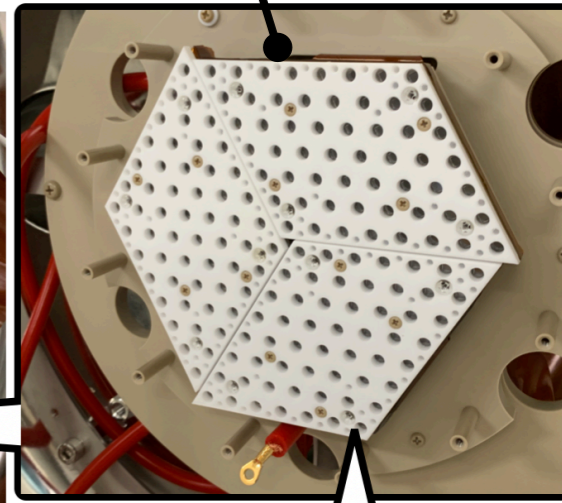
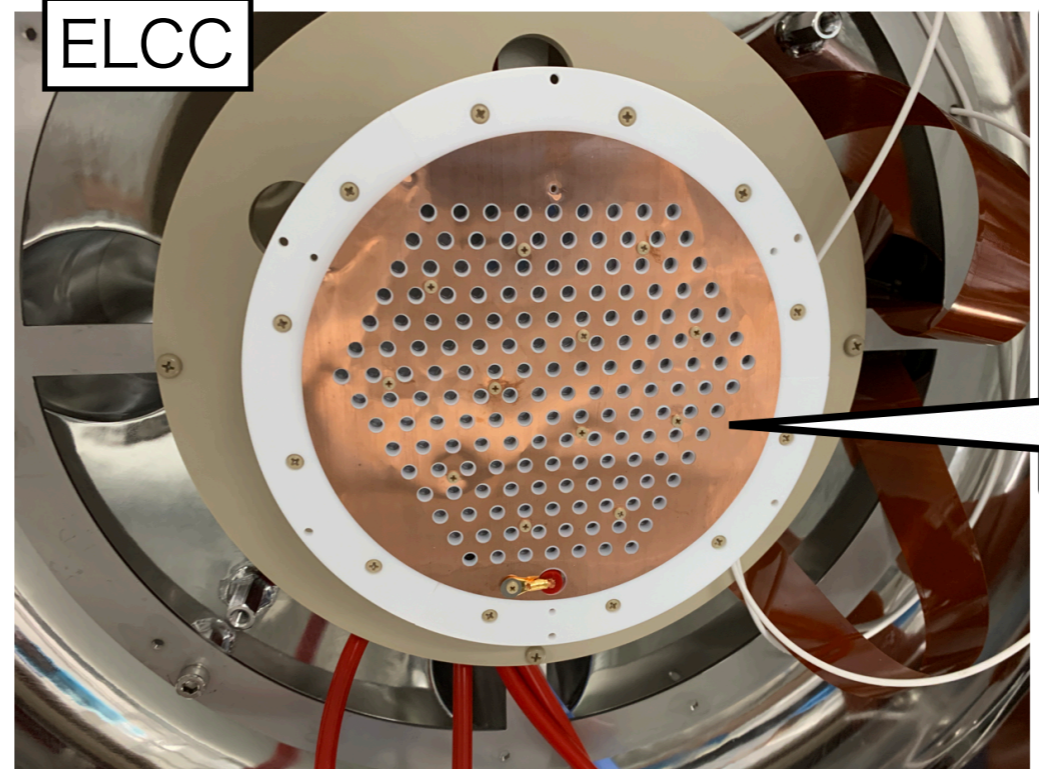


1ユニット: 56chの組み立て式
 → 大型化(多チャンネル化)が容易
 (1st phaseは3ユニット: 168ch)

圧力容器



ELCC



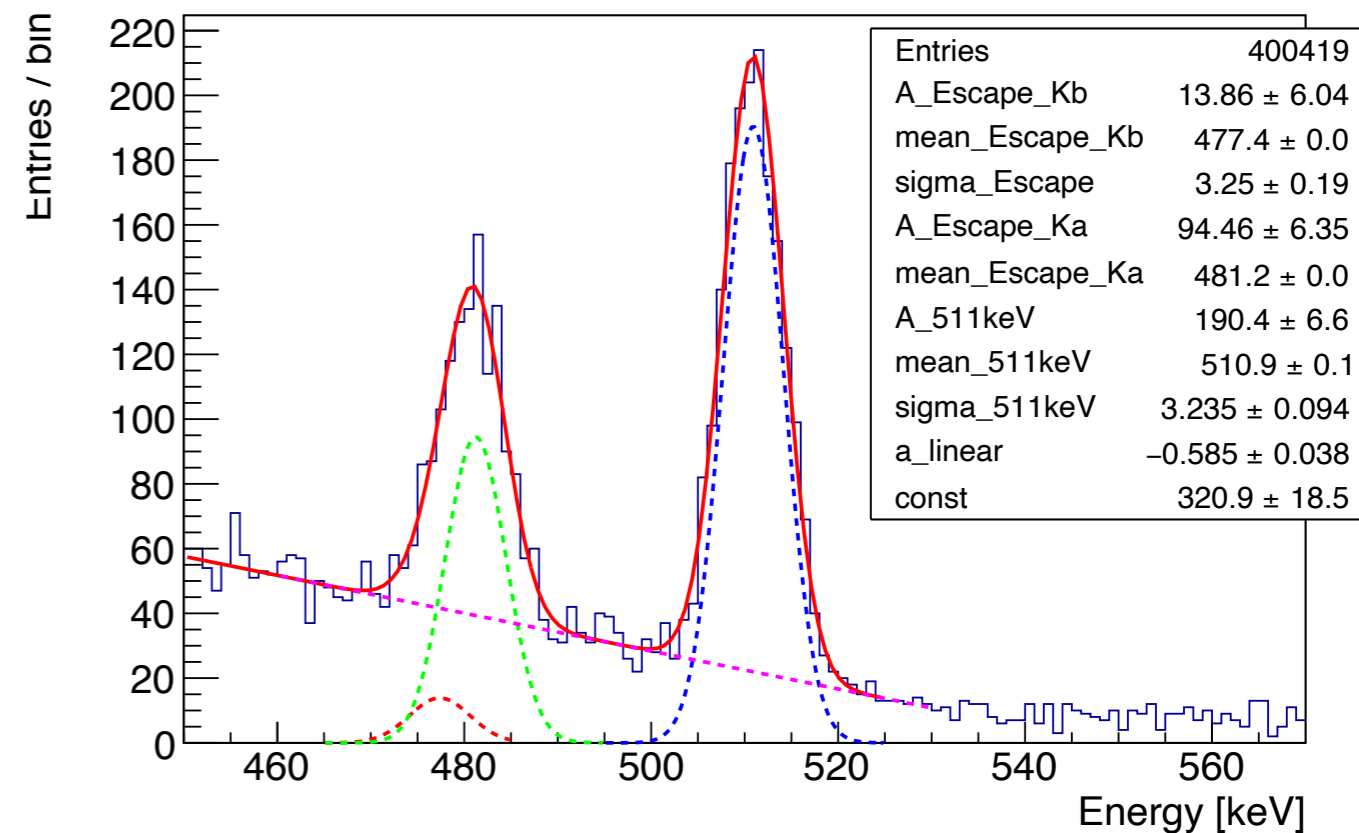
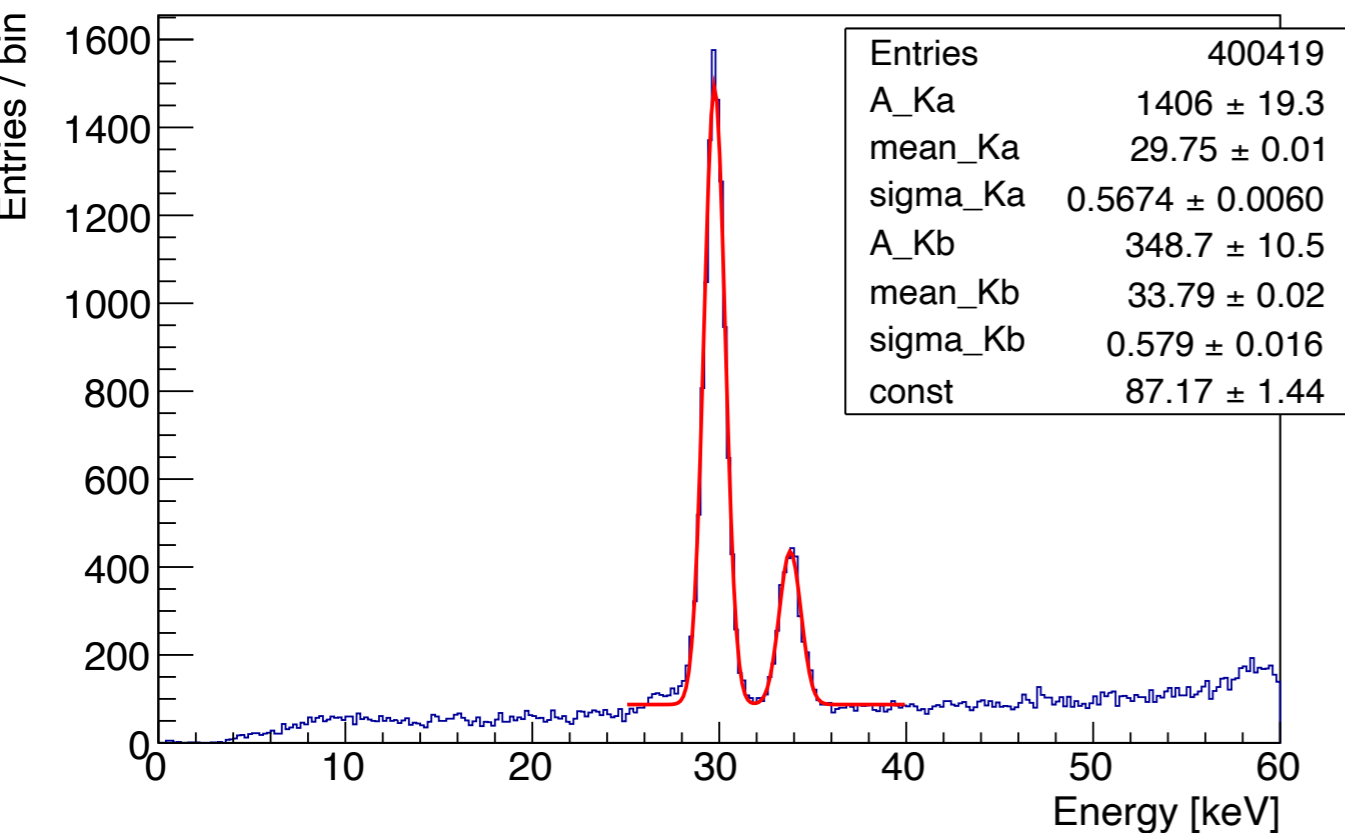
Single unit

AXEL試作機：ハイライト

特性X線 (29.78 keV, 33.62 keV)と511keVピークを評価に用いる

- Gaussians + Linear (const)でfit
- 30 keV : \sqrt{E} で変換するとQ値で < 0.5% (FWHM) : **目標を達成**
- 511keV : このエネルギーでは**世界最高レベルのエネルギー分解能** (in $0\nu\beta\beta$ search experiment)

ただし、両者のQ値での分解能に差があるため、単純に \sqrt{E} ではconversionできない可能性
得られたエネルギー分解能を内訳について考察を行った→ 次頁



Energy [keV]	29.78	33.62	481.2	511.0
FWHM	4.50%	4.03%	1.59%	1.49%
FWHM @Q	0.50%	0.47%	0.70%	0.68%

AXEL試作機：ハイライト

得られたエネルギー分解能の構成要素 @30keV

- 電離電子数のゆらぎによるintrinsicな影響が原理的な性能の限界値
- EL増幅の際のゆらぎおよび各種補正によって生じる分解能への影響を見積もった
- まだunknownなfactorが大きい
 - かなり大雑把に見積もっているので、シミュレーションなどで詳細に評価したい
 - または他の要因を見つけない (候補：再結合, MPPCの非線形性の効果など)

Breakdown	$\propto \sqrt{E}$	$\propto E$	
Intrinsic fluctuation	2.56%	—	
Fluctuation of EL amplification	1.86%	—	
EL gain calibration	1.65%	—	
Position dependence	1.94%	—	
Time correction	—	0.5%	
Unknown	—	—	1.87%
Total	4.06%	0.5%	4.5%

1. AXEL実験

2. AXEL試作機について

3. 検出器シミュレーション

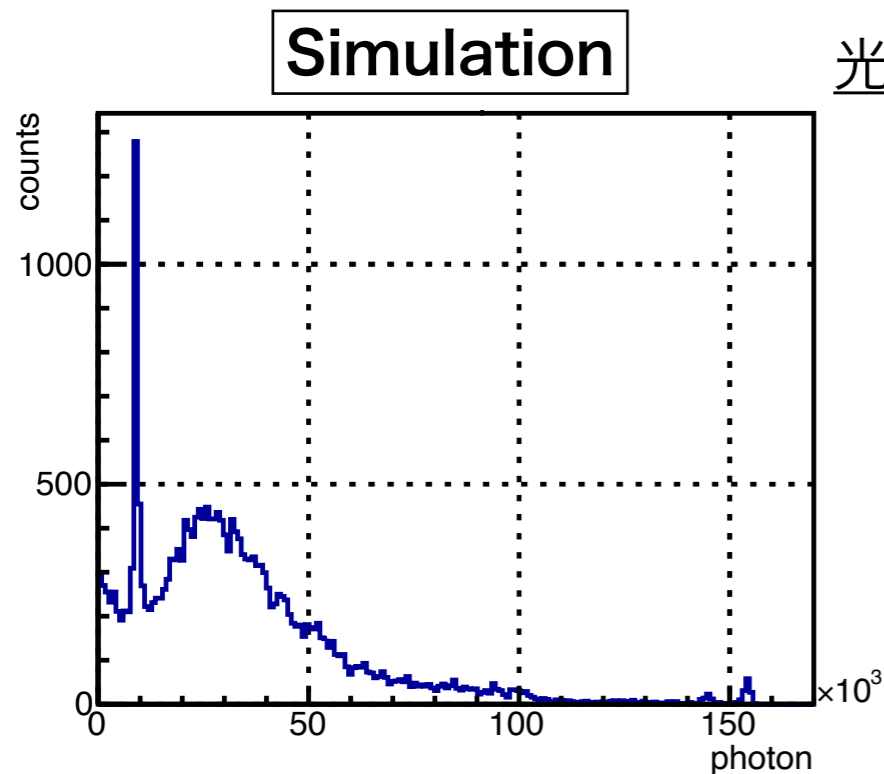
4. まとめ

検出器シミュレーション

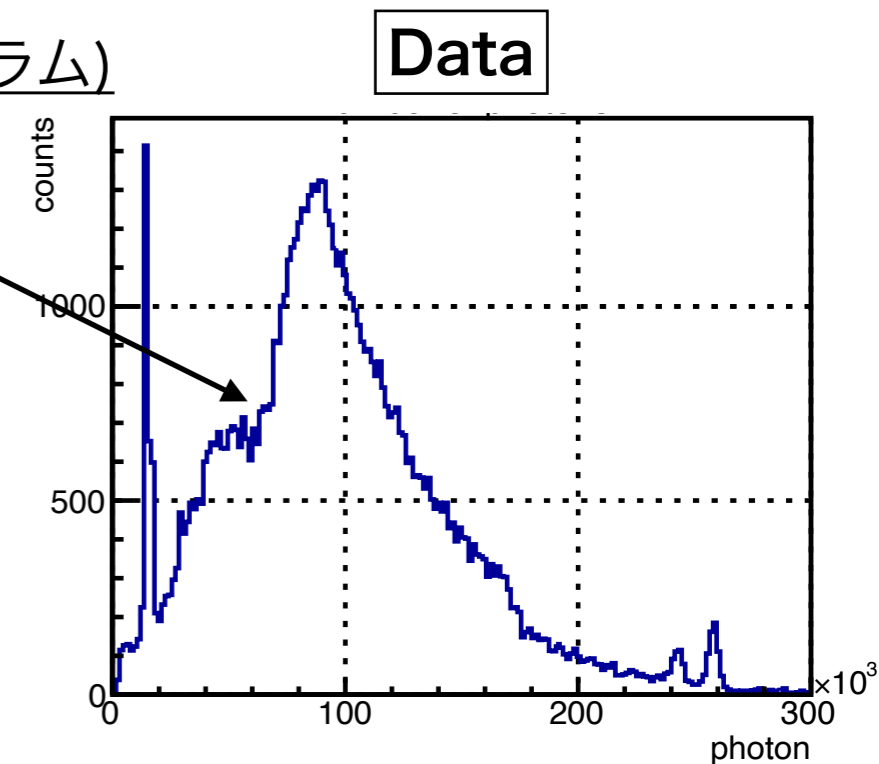
511 keV のガンマ線を生成 → 検出器応答 をシミュレーション (Geant4)

→ セルごとに波形変換

シミュレーションはデータをおおむね再現

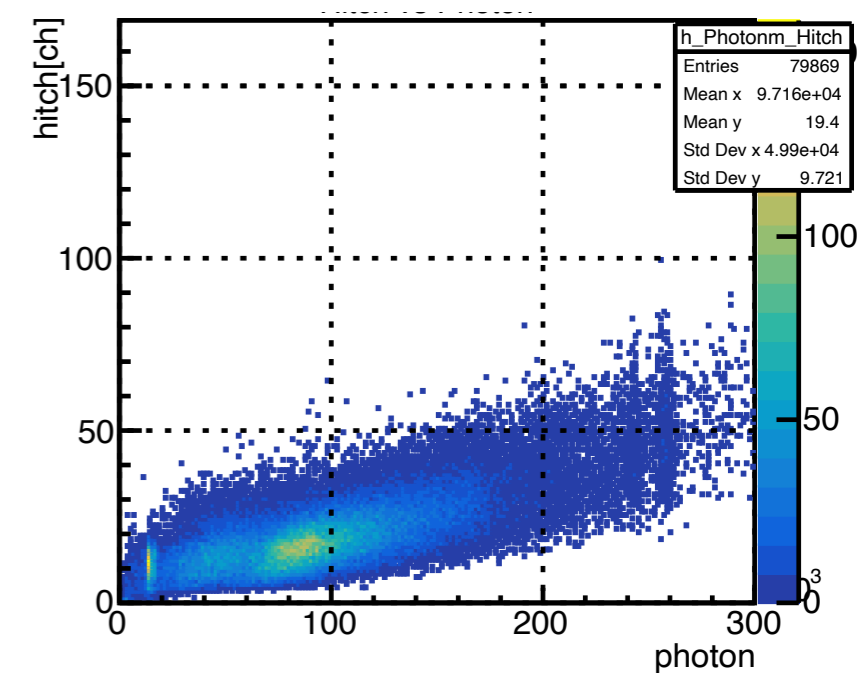
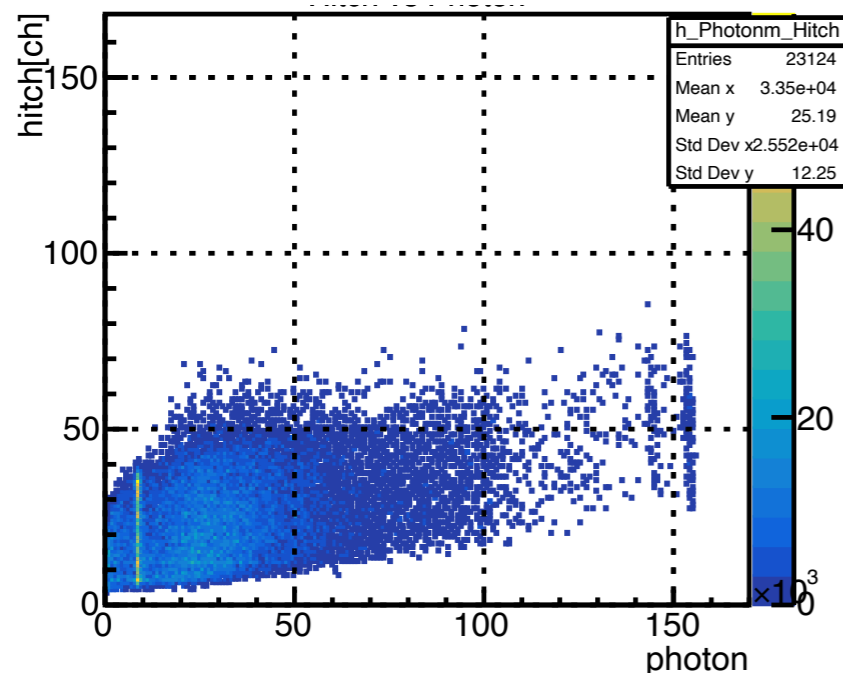


光子数分布 (エネルギースペクトラム)



DAQの際に2つのレベル
の閾値を採用している

ヒットチャンネル数 vs 光子数



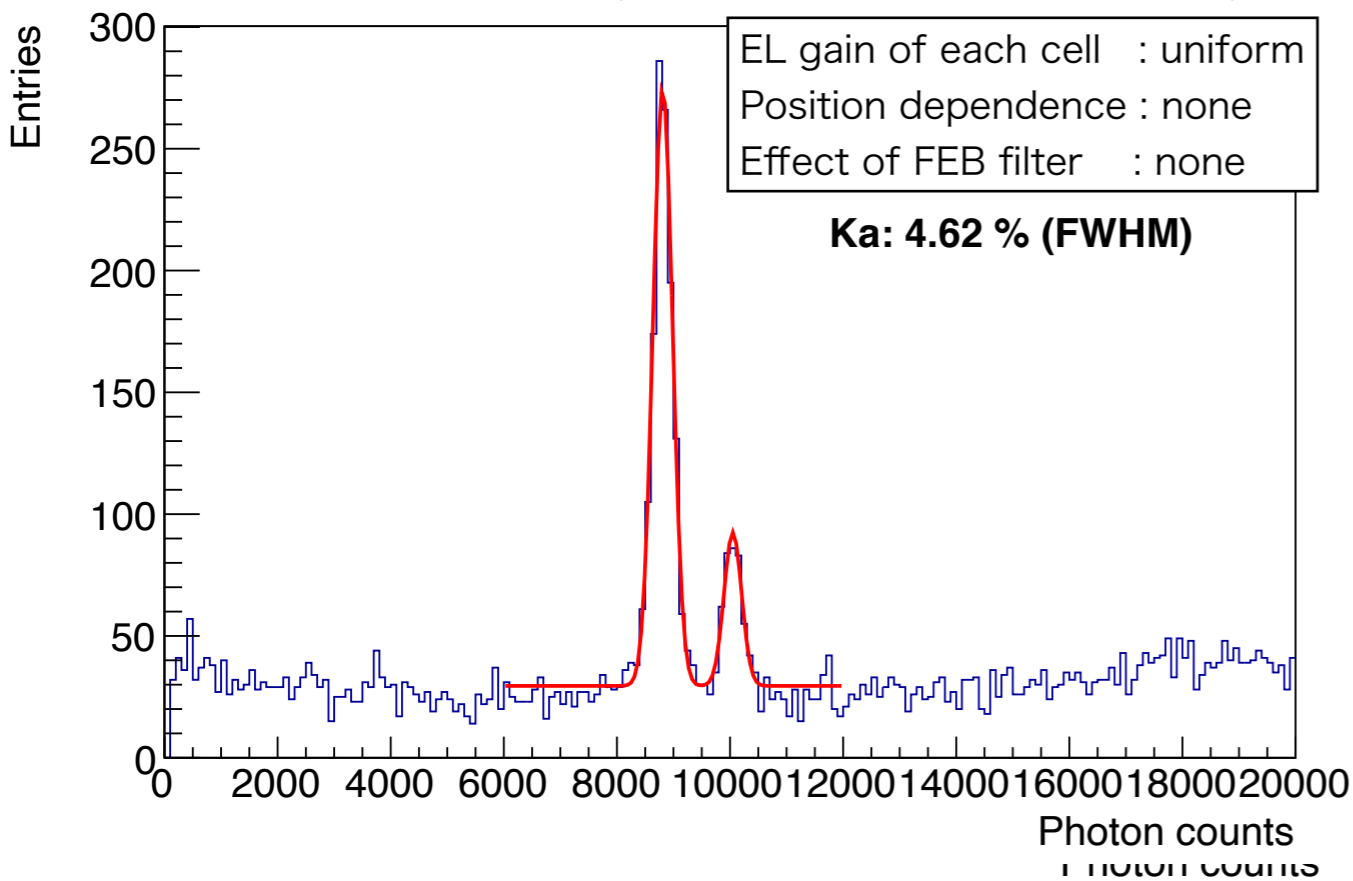
EL gain correction の評価

- セルごとにELゲインをばらつかせてシミュレーション
→ セルごとのELゲインのキャリブレーションを行い、分解能を評価(右下図)
- 元々のシミュレーション結果(セルごとのELゲインは均一)と比較(左下図)

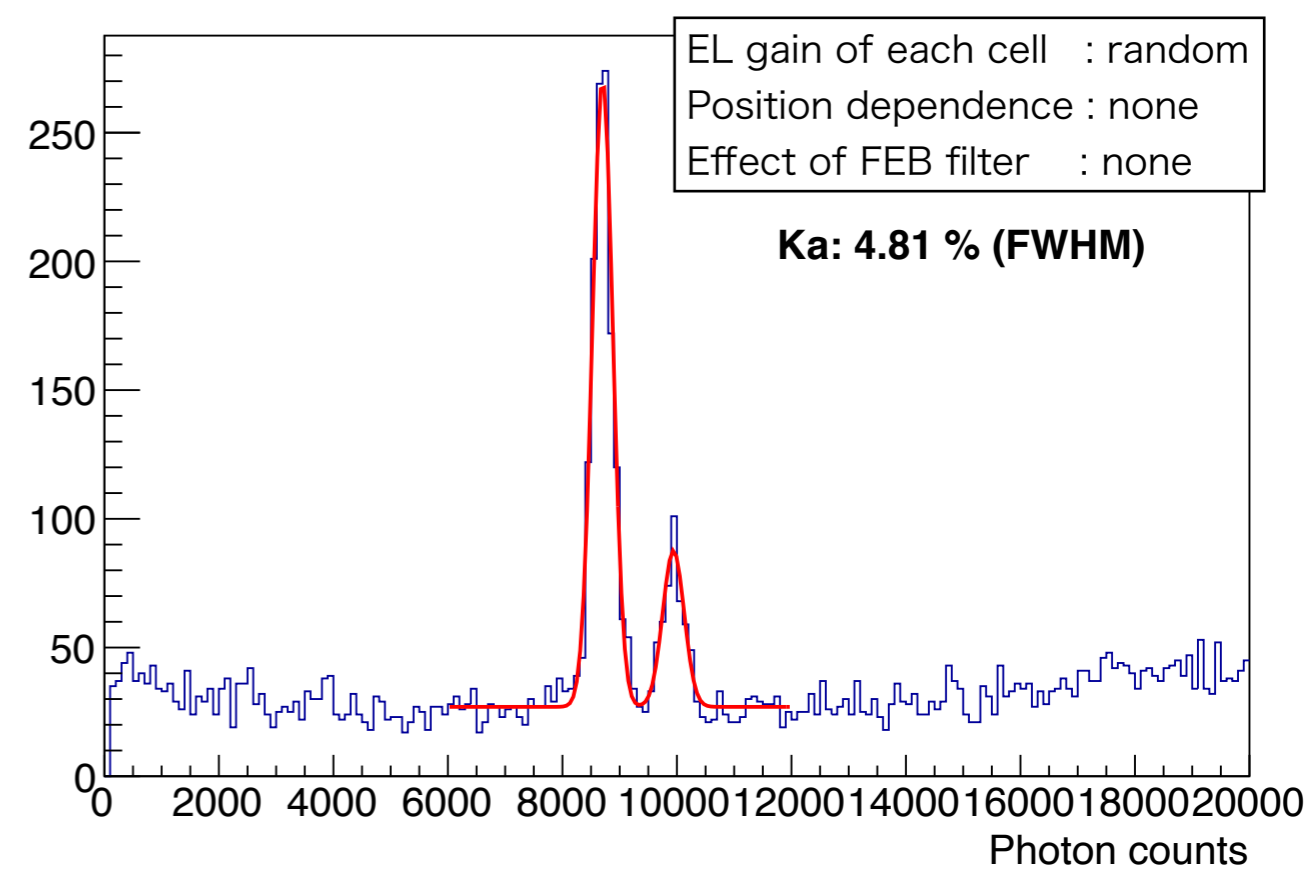
ELゲインキャリブレーションによる分解能の悪化は

$$\sqrt{4.81^2 - 4.62^2} = 1.338\%$$

基準のsimulation(前ページのsimulation結果)



セルごとのELゲインのfluctuationを入れる→補正

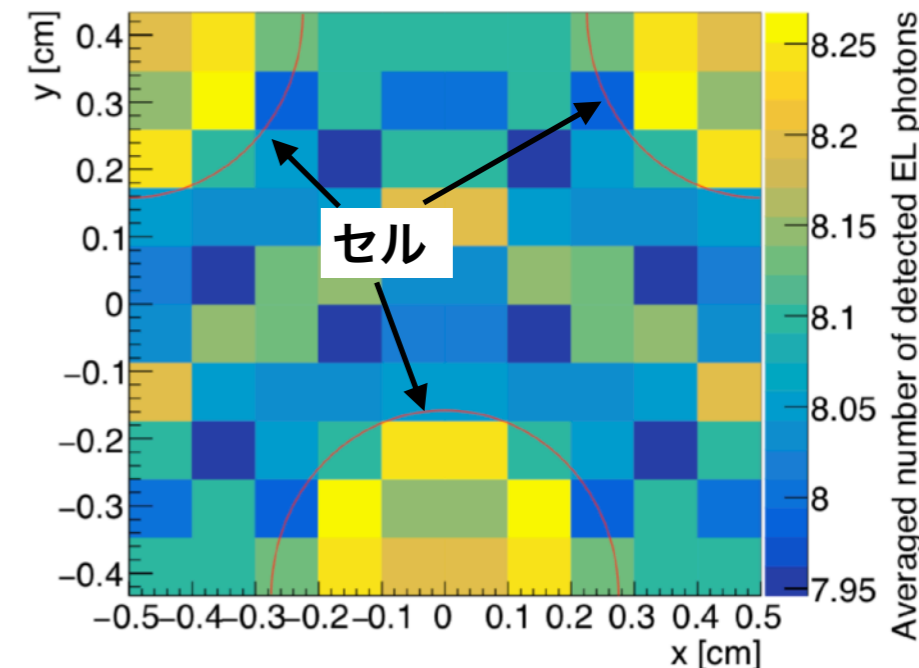


セルに対する電子の位置依存性の影響

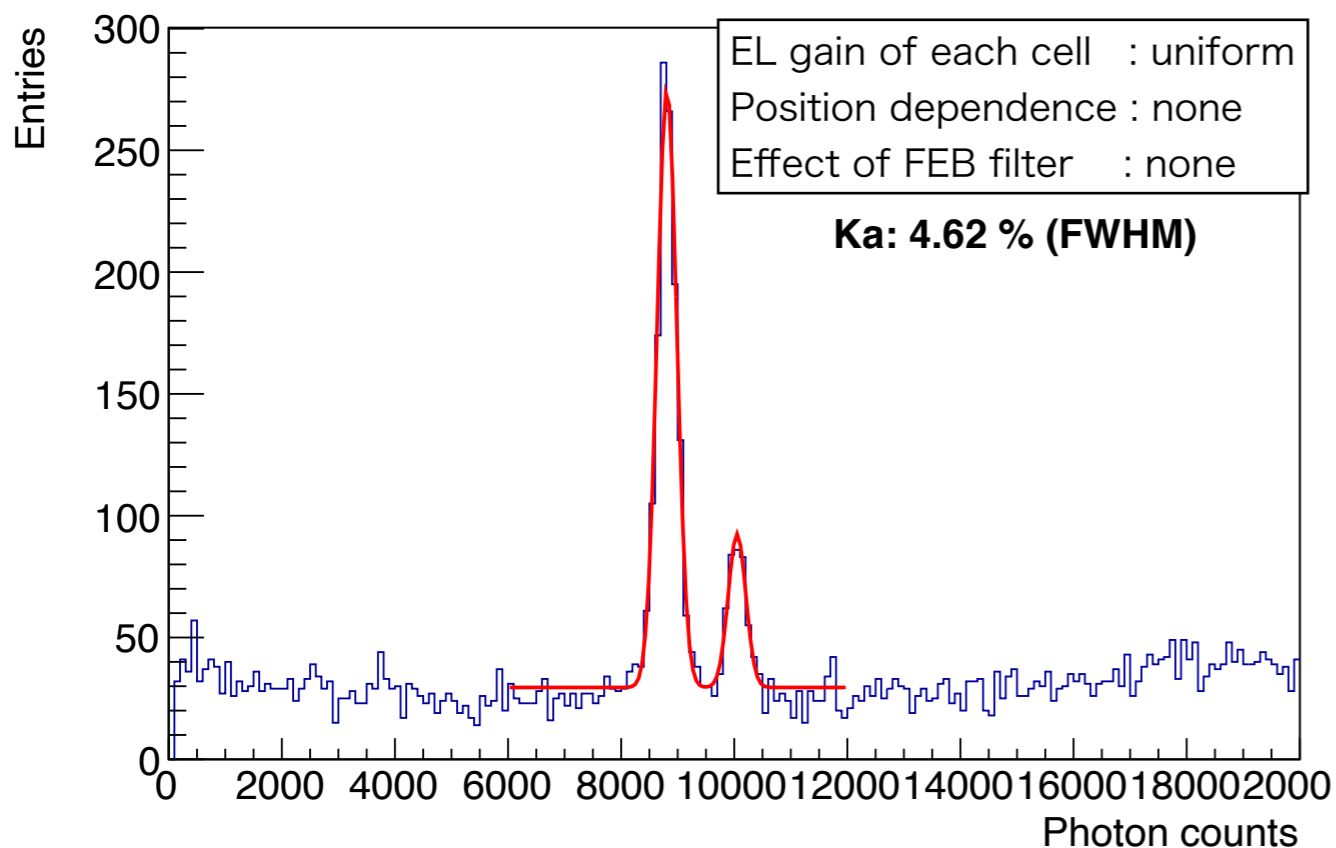
- 電場および電子輸送シミュレーションにより、電子のセル位置に対するゲインの位置依存性を見積もった
→ 検出器シミュレーションに組み込むことで、分解能への影響を見積もった

- セル位置に対するゲイン変動による分解能への影響は

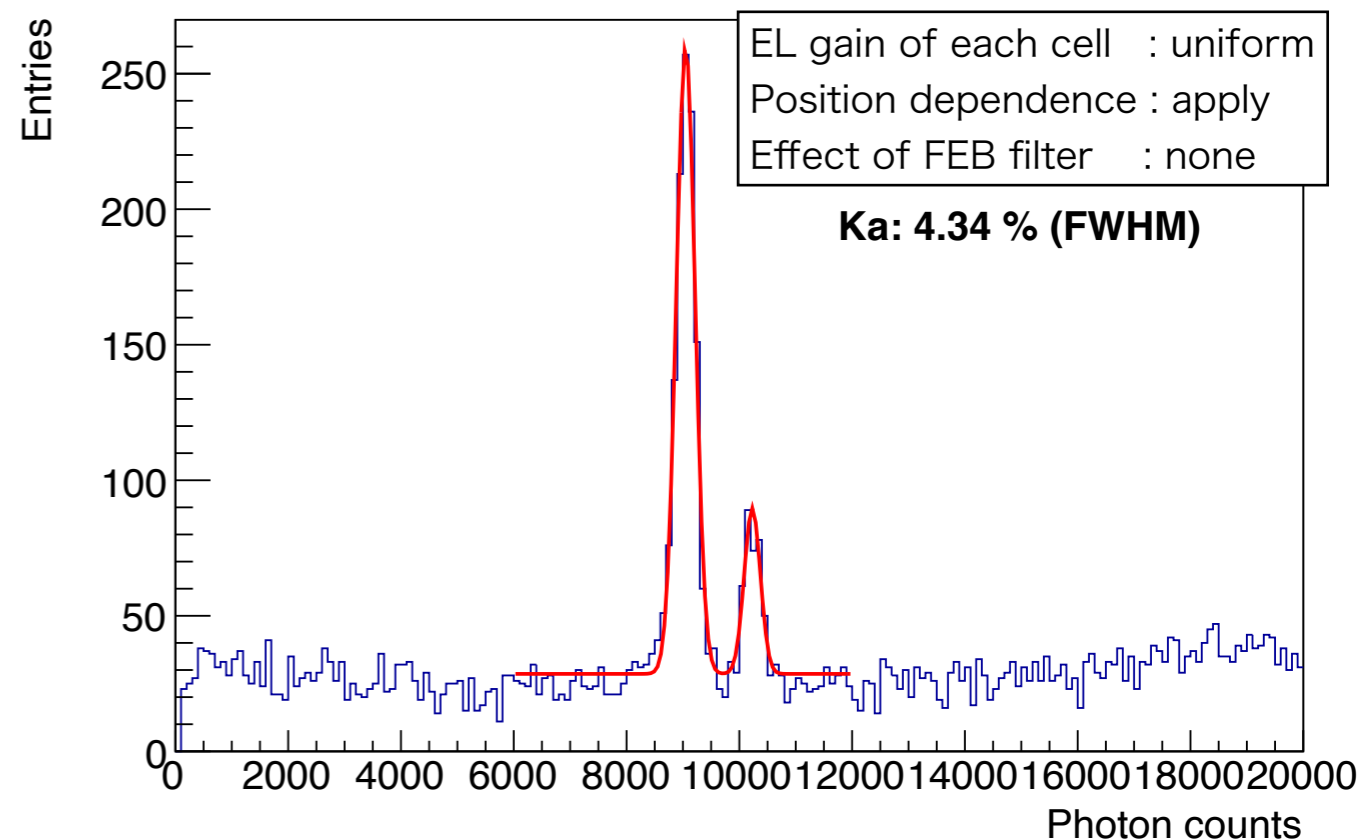
$$\sqrt{4.62^2 - 4.34^2} = 1.58\%$$



基準のsimulation

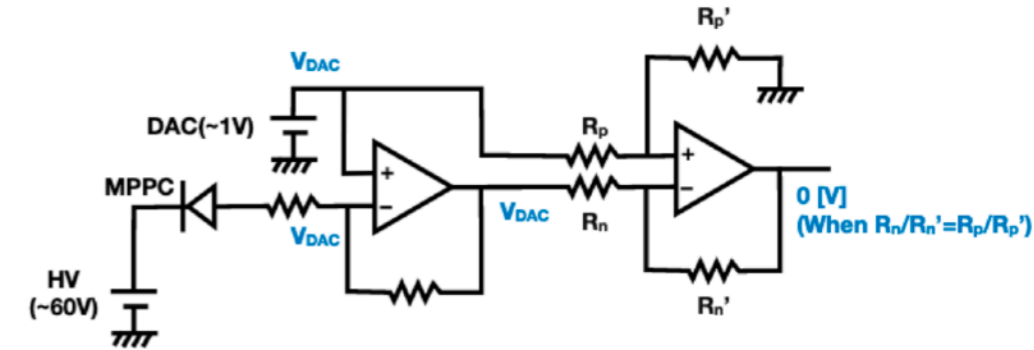


位置依存性を入れないでsimulation



読み出しボードのフィルタの影響

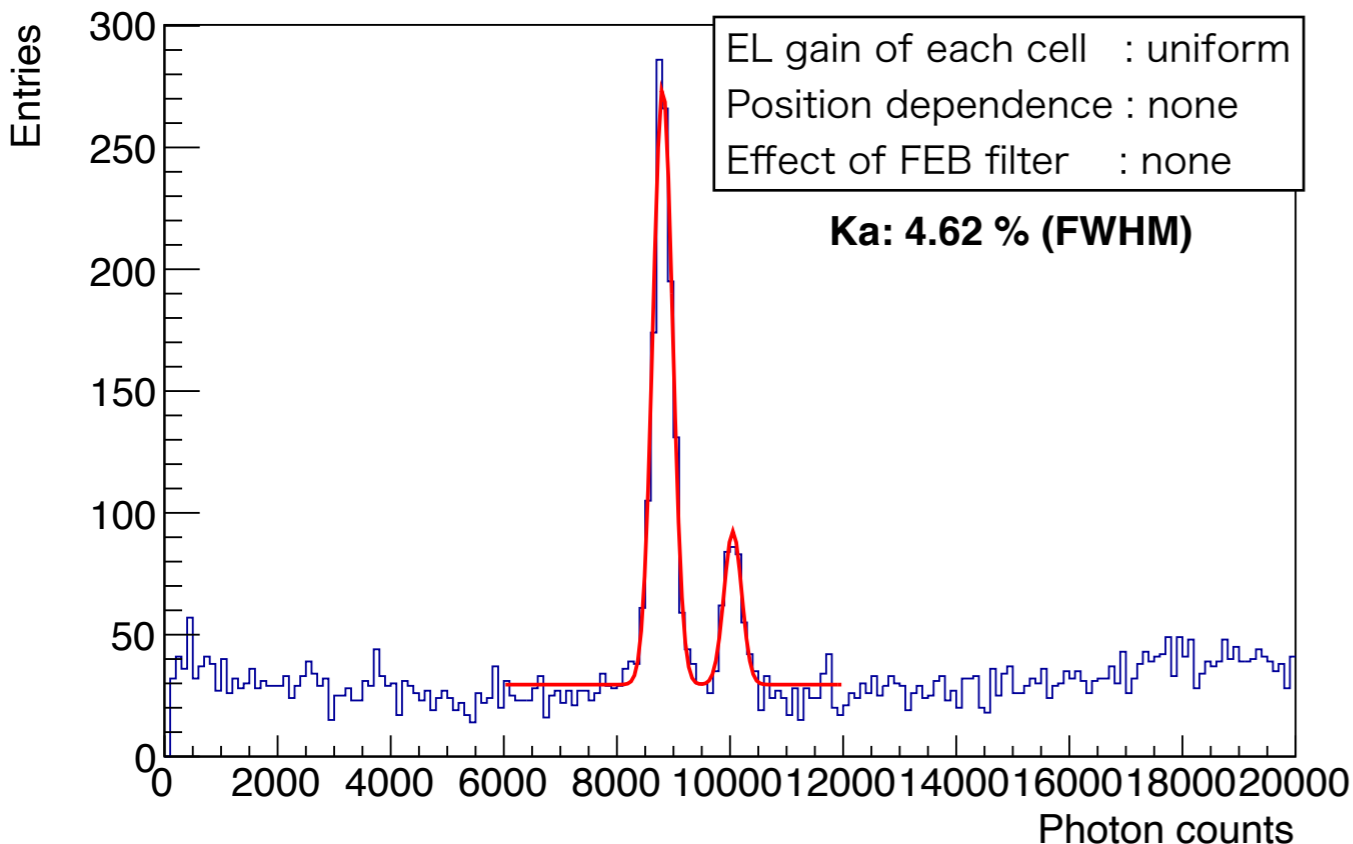
- シミュレーションを構築する際に、読み出しエレクトロニクスフィルタの効果を入れる前後で分解能が大きく変わることが判明



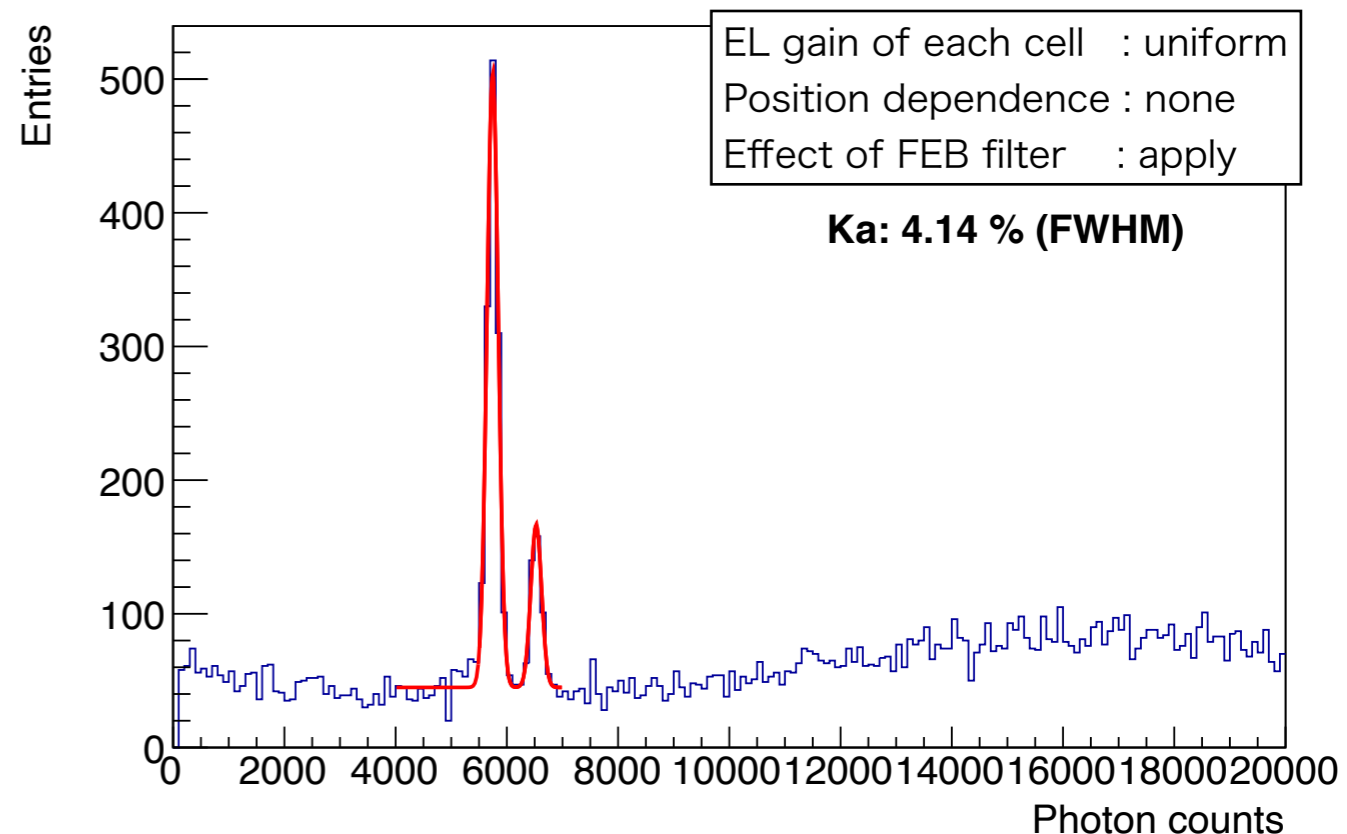
- 読み出しエレクトロニクスによる分解能への影響は

$$\sqrt{4.62^2 - 4.14^2} = 2.05\%$$

基準のsimulation



回路のfilterの応答を入れないでsimulation



エネルギー分解能の内訳：データ vs シミュレーション

データとシミュレーションの分解能の内訳の比較

- シミュレーションは、セル毎のELゲインのばらつき導入→補正を行った後の分解能
- Totalの分解能が異なるのはELゲインの差 (Fluctuation of EL amplificationの差)
- シミュレーションのUnknownは解析の際のhit thresholdやデジタイズの際に生じているものと思われる (詳細なスタディはこれから)

Breakdown	Data	Simulation
Intrinsic fluctuation (※1)	2.56%	2.56%
Fluctuation of EL amplification	1.86%	2.52%
EL gain calibration	1.65%	1.34%
Position dependence	1.94%	1.58%
Time correction	0.5%	—
Front-end electronics board	—	2.05%
Unknown	1.87%	1.32%
Total	4.50%	4.81%

※1 : Noble Gas Detector (Wiley-VCH, 2006) に記載の値(W値 : 22.1 eV, Fano因子 : 0.13)より計算

1. AXEL実験

2. AXEL試作機について

3. 検出器シミュレーション

4. まとめ

$0\nu\beta\beta$ 崩壊の探索は、ニュートリノがマヨラナ性の決定に不可欠

- ニュートリノがマヨラナなら、軽いニュートリノ質量や物質・反物質非対称宇宙の起源の理解につながる

高圧キセノンガスTPC：AXELを開発中

- Electroluminescence過程を用いたcell機構信号読み出しで高エネルギー分解能とトラッキング能力を兼ね備えている
- 180L級の大型試作機を稼働しており、511keVでの性能評価を行った

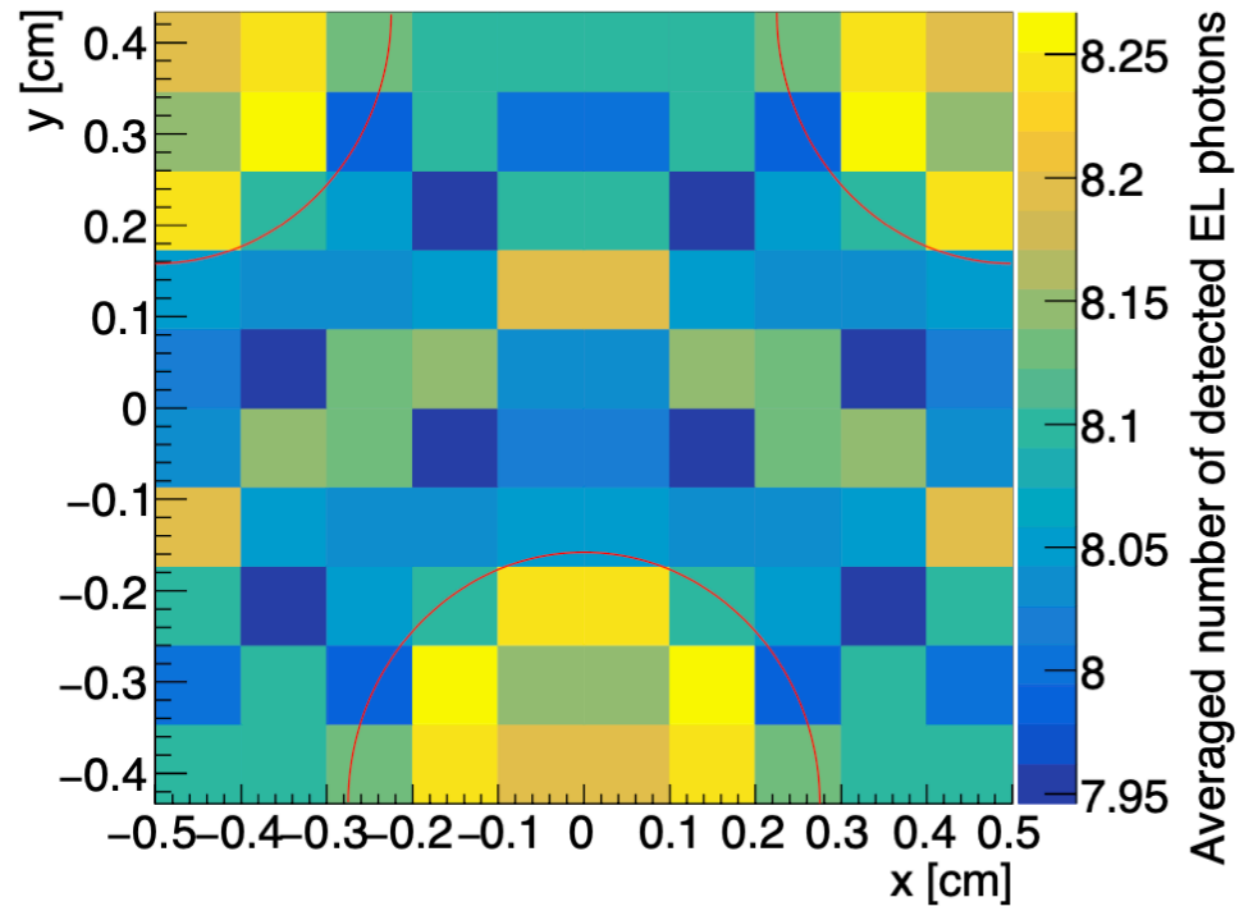
シミュレーションによる検出器の理解

- 試作機で得られた結果を理解するため、シミュレーションを構築した
- 解析thresholdやデジタイズの影響をまだ定量的に評価できていないが、その他の要因について、分解能に与える影響を評価した
- データでの評価の際には考察できなかった、FEBの影響も評価することができた。

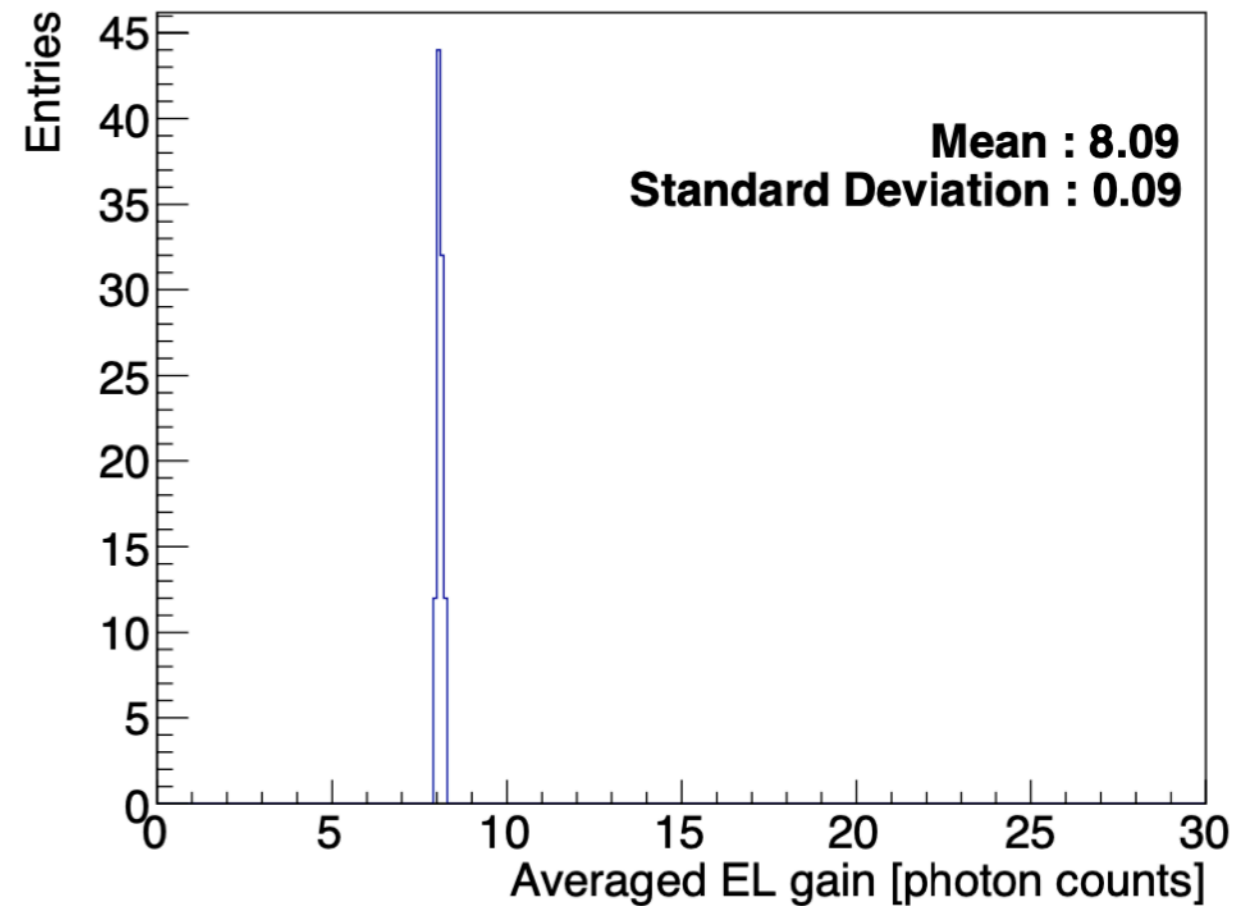
今後について

- データの方はゲインの時間変動やMPPCの非線形応答の影響もあるため、それらの影響もシミュレーションで評価を行う

Back up



(a) EL gain map for each initial electron position

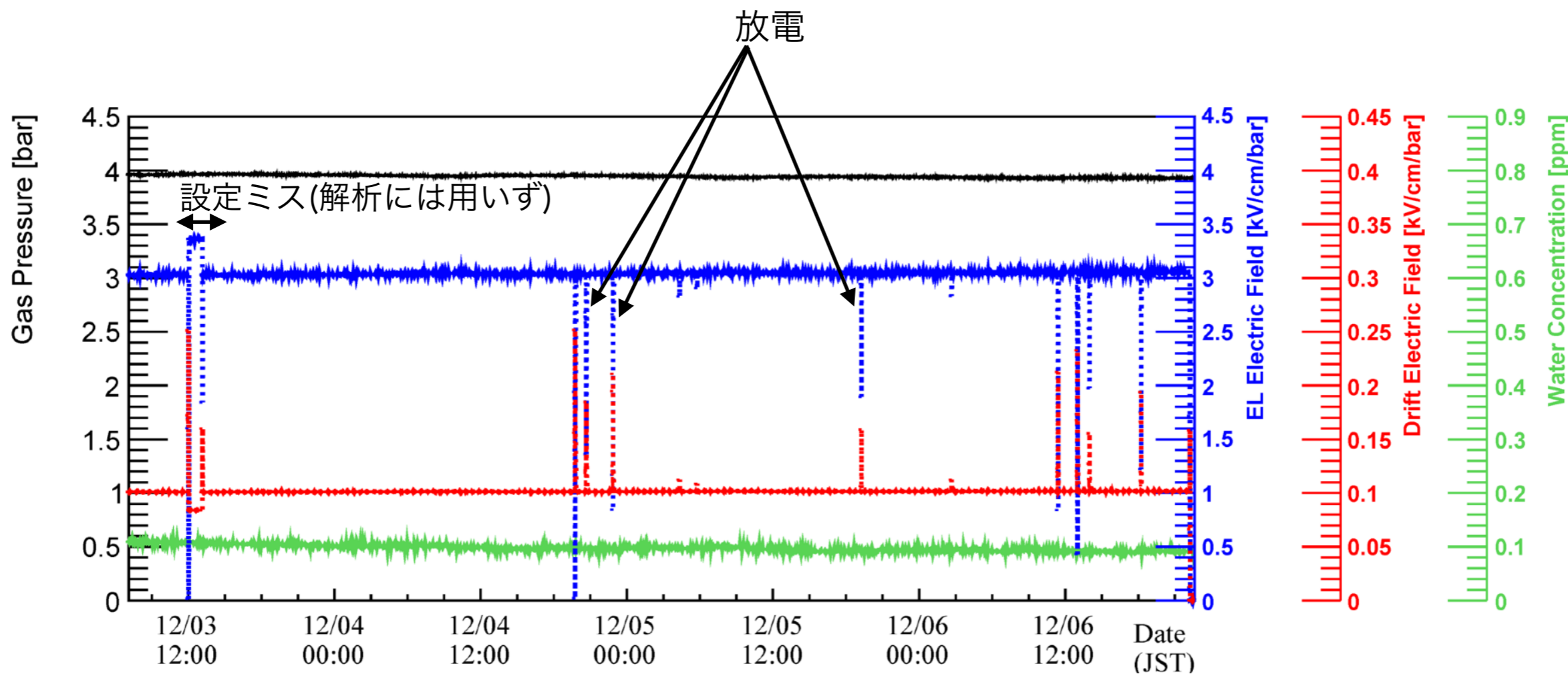
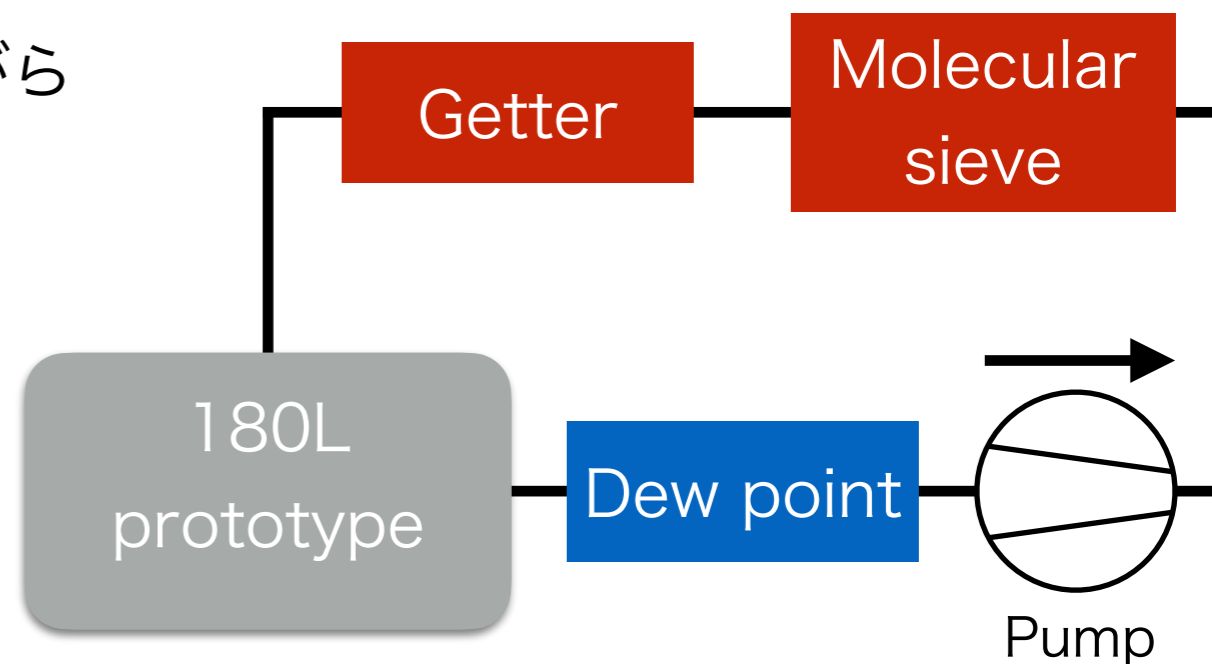


(b) Distribution of EL gain

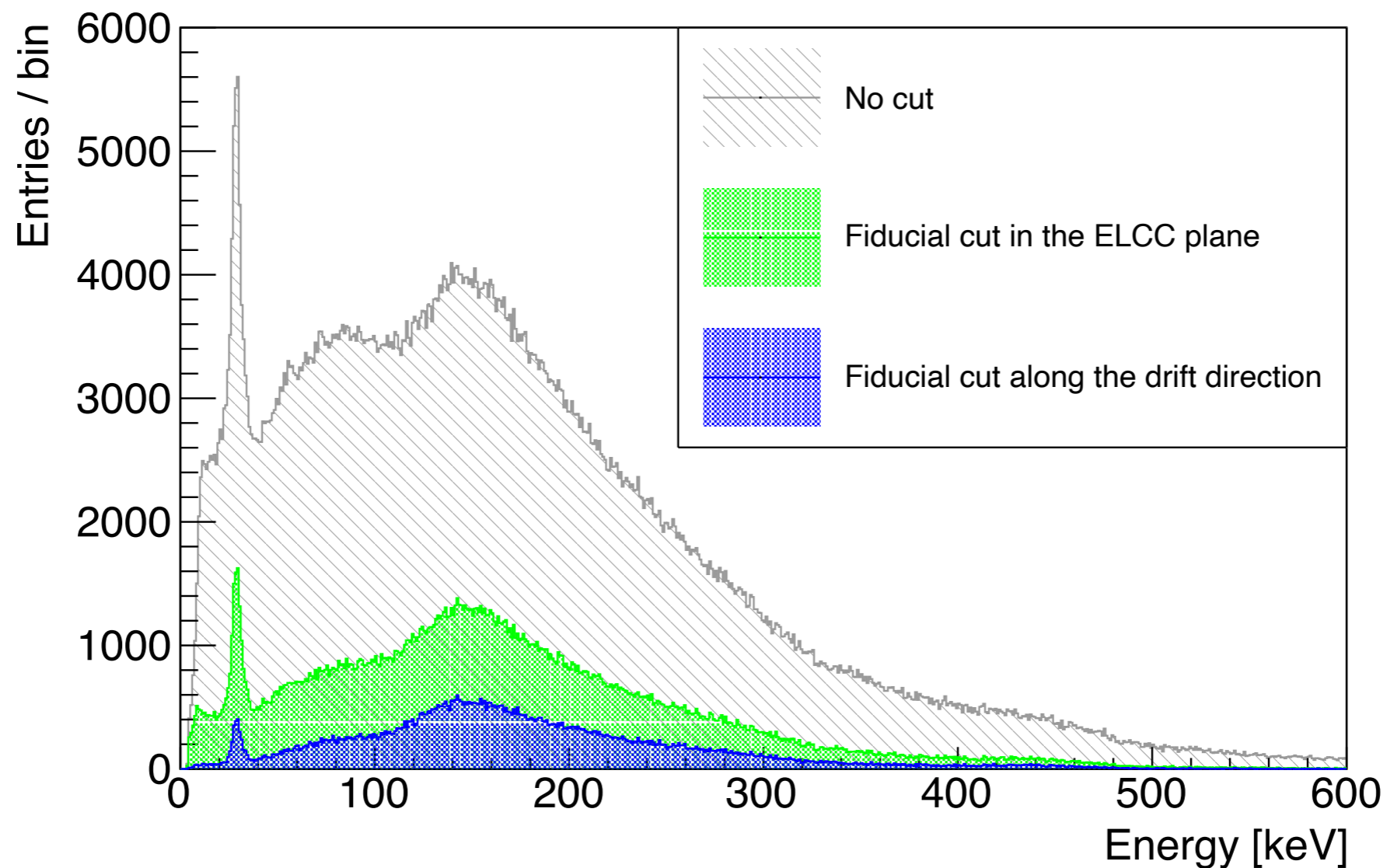
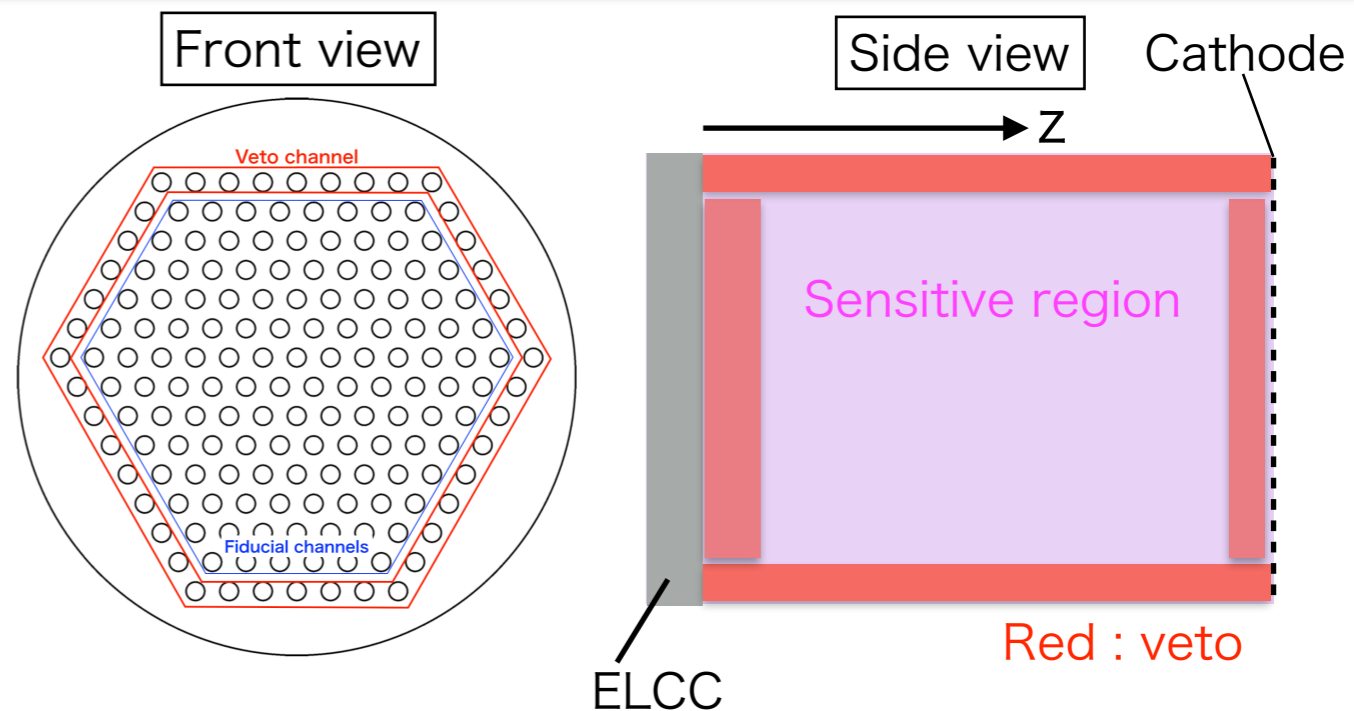
3.46% (FWHM) for 30 keV peak (simulation)

AXEL試作機：データ取得

- 4気圧のxenonを導入、循環・純化を行いながらデータ取得
- ^{22}Na を圧力容器外部に設置 (511keV γ 線)
- 圧力は安定、露点は僅かに下がっている
- 高電圧は数回の放電以外は安定
- データはDec, 2019に4日間取得

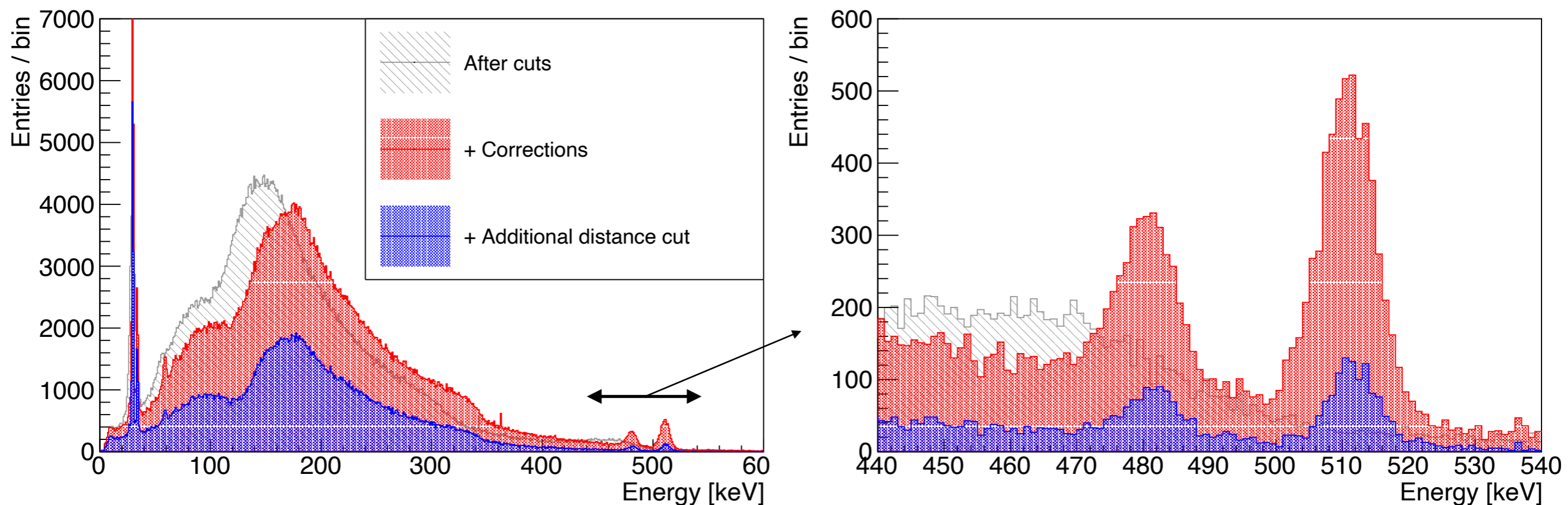


- Fiducial cut : 最外層のchannelをveto
Drift方向もfully contained
を要求



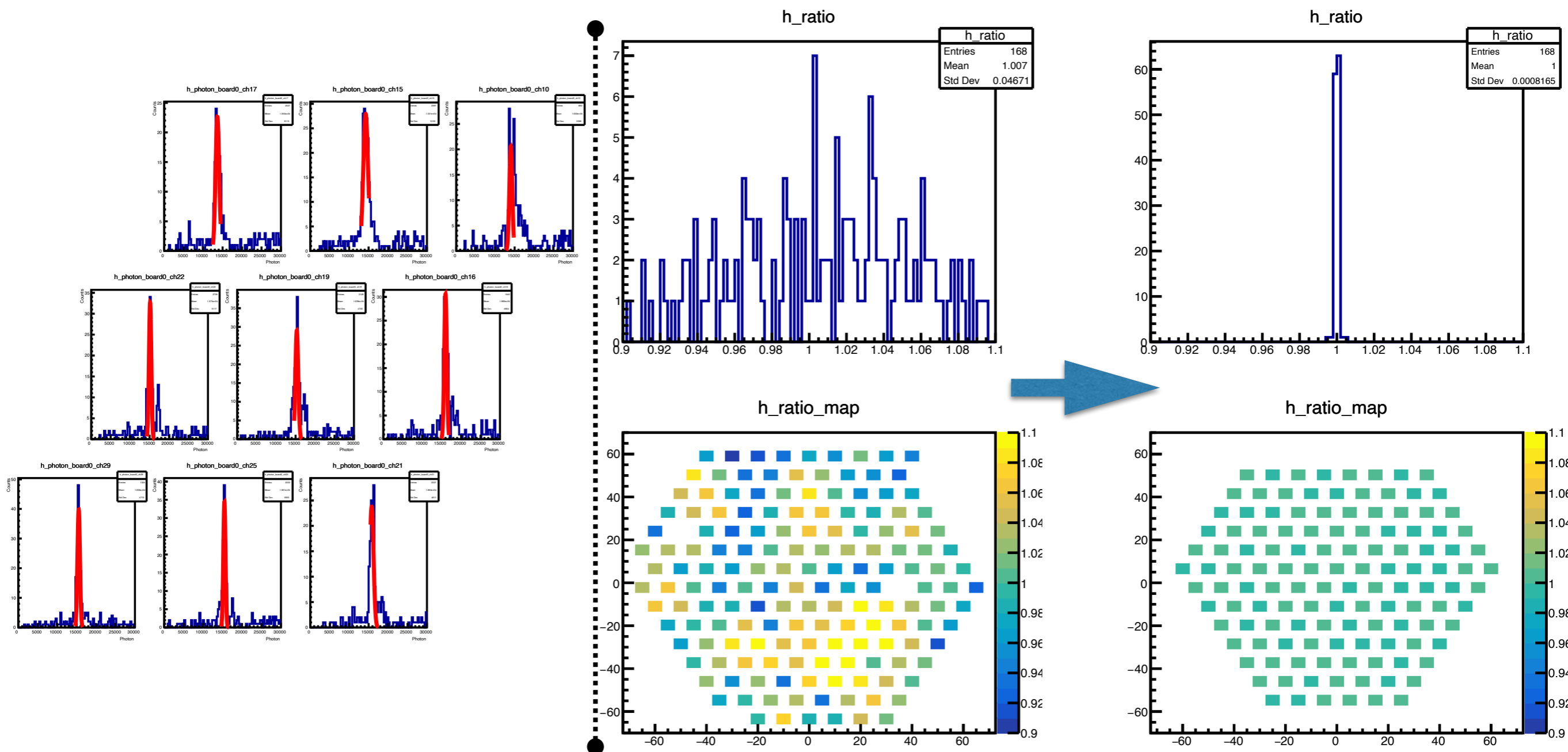
- 補正を適用
 - cell毎のEL gainを30keVピークを用いてキャリブレーション
 - MPPCのnon-linearityを補正
 - 光量の時間依存性を補正
 - 光量のz位置依存性を補正
- 511keVピークとキセノンの特性X線がエスケープしたピーク(~480keV)が見える
- ELCC付近の事象は位置依存性が大きいいため、ELCC直近3.7cmをさらにカット

(Additional distance cut)



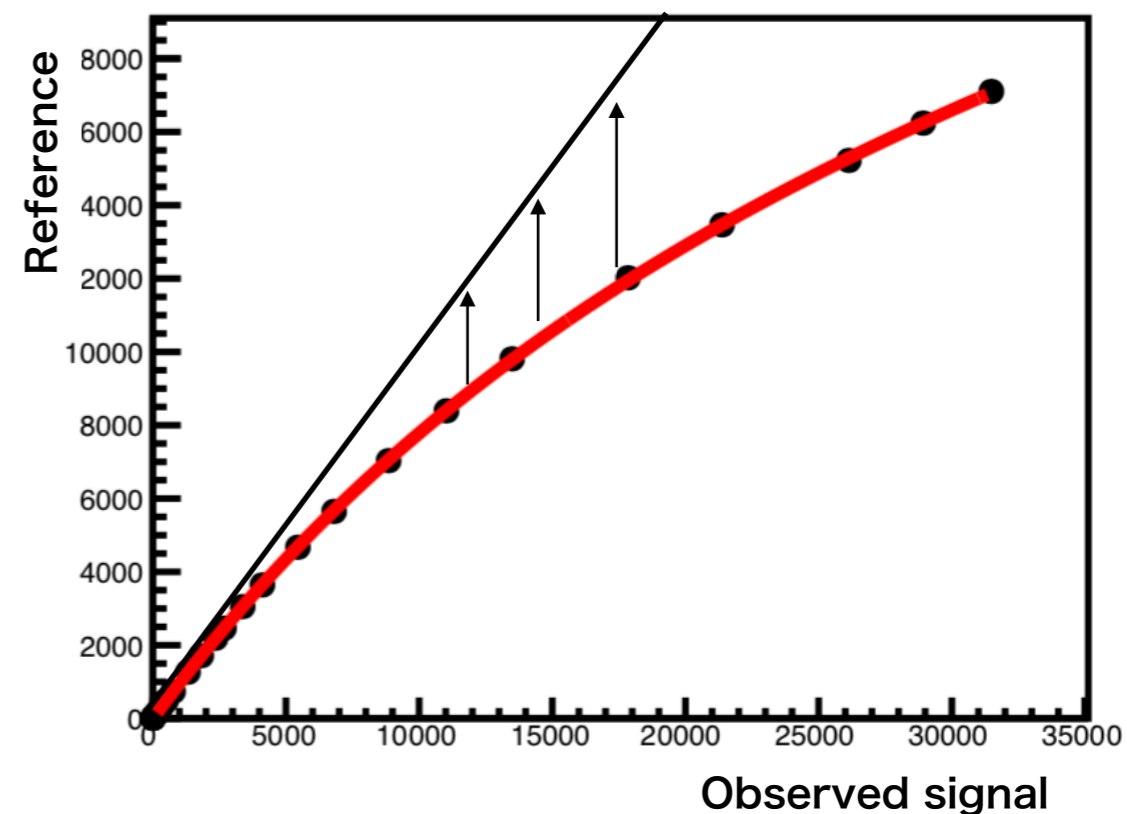
- 補正

- EL gain calibration: 30keVピークを用いてcellごとのゲインを校正
- veto領域も含めて全チャンネルで5回イテレーション→fiducialだけで4回イテレーション



- 補正
 - MPPC Non-linearity correction: MPPCの非線形性を補正
 - MPPCがピクセル化されたガイガーモードAPDから構成されているため、入射光量がピクセル数に近づくにつれ信号は飽和する
(同じガイガーモードピクセルに光子が同時入射する確率があがる)
 - MPPCのピクセル数を超える光子数でも、それが十分に長い時間をかけて入射する場合は補正が可能ながわかっていてる
 - 飽和の度合いは「回復時間」と呼ばれる量でパラメトライズ可能
 - 飽和のモデル式およびその補正には以下の関数を使用： τ が「回復時間」

$$N_{\text{observed}} = \frac{aN_{\text{true}}}{1 + \tau / (N_{\text{pixel}} \cdot \Delta t) N_{\text{true}}}$$

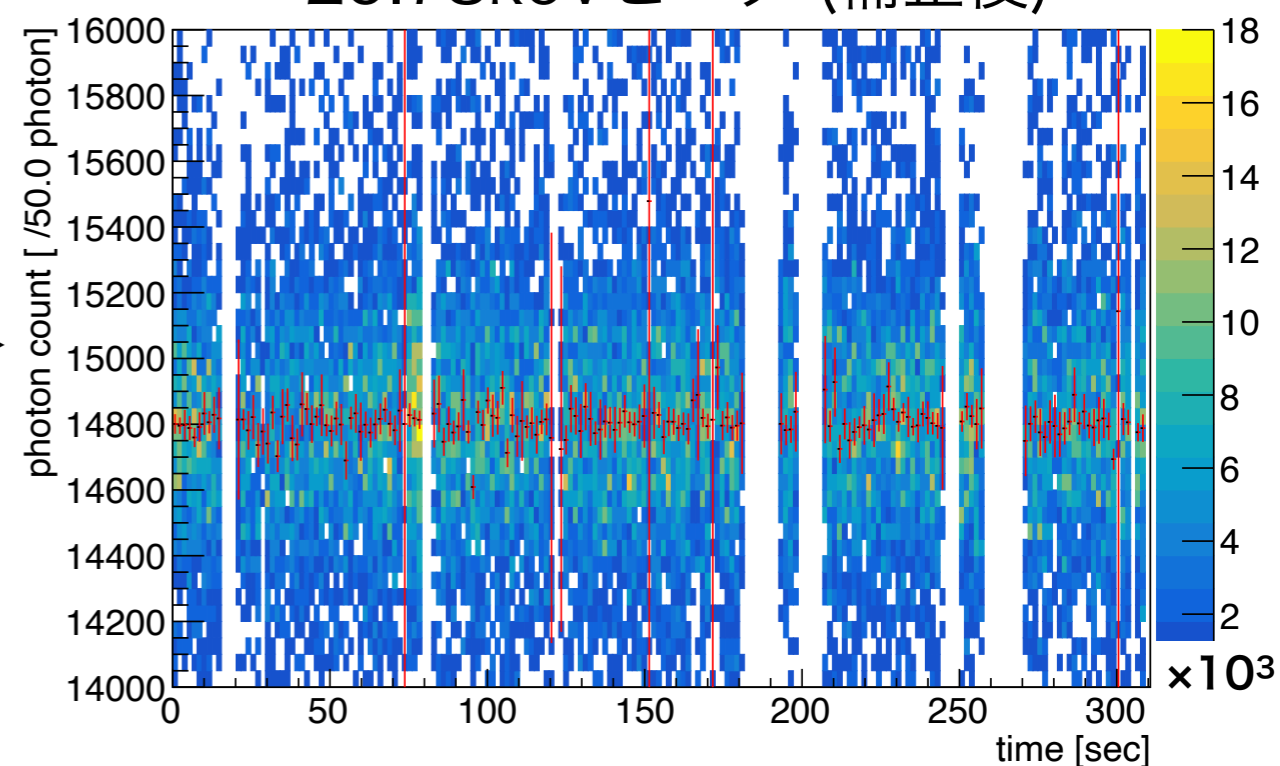
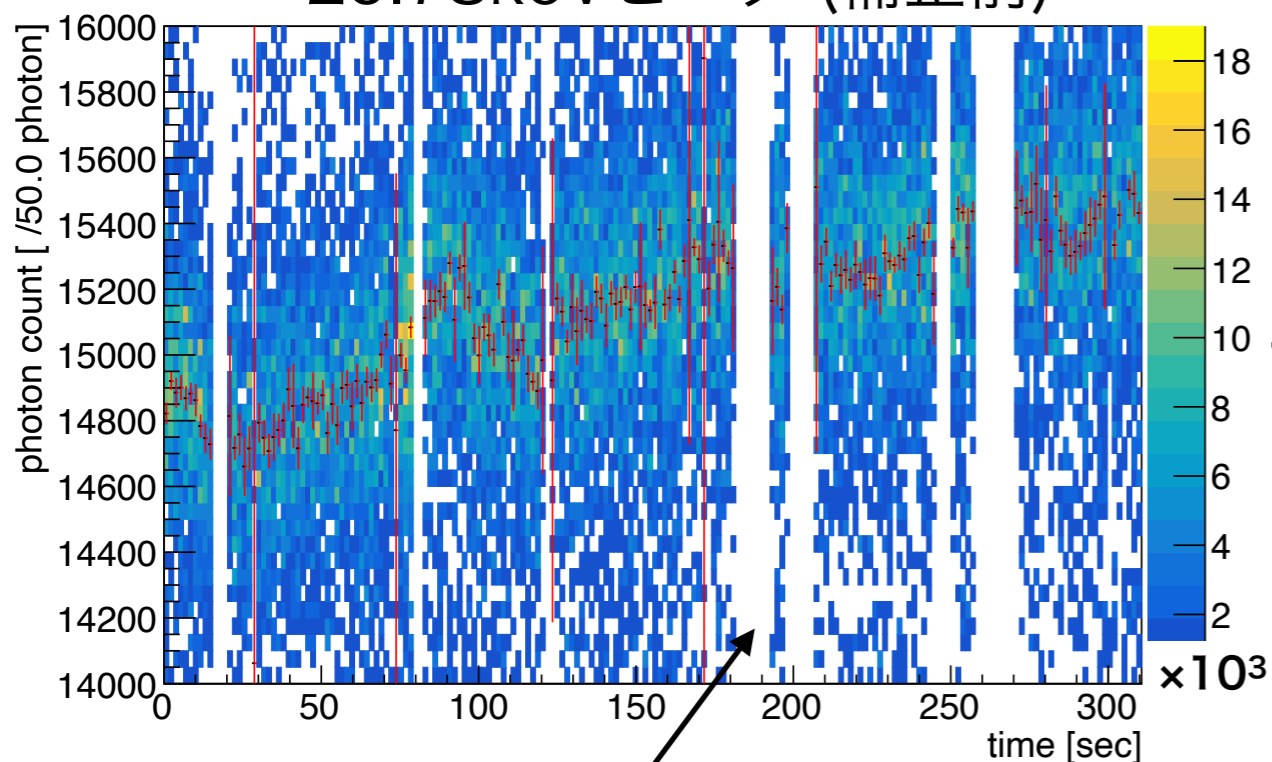


- 補正

- 光量の時間依存を補正
- 時間依存性はガス純度の向上や温度変化によるガス密度変化などが原因と思われる
- データ取得時間を200binに区切って各binでピークサーチ→補正

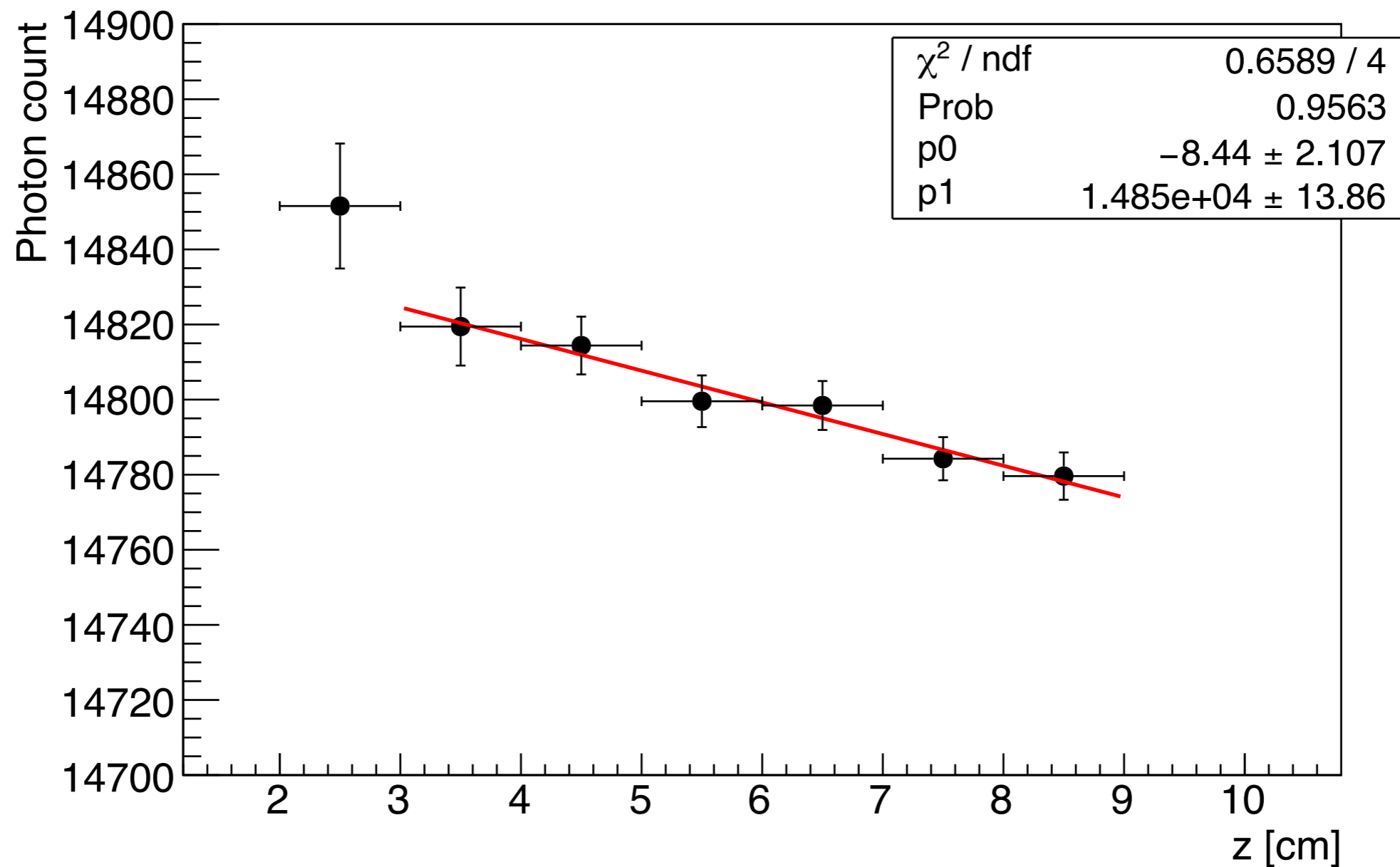
29.78keVピーク (補正前)

29.78keVピーク (補正後)

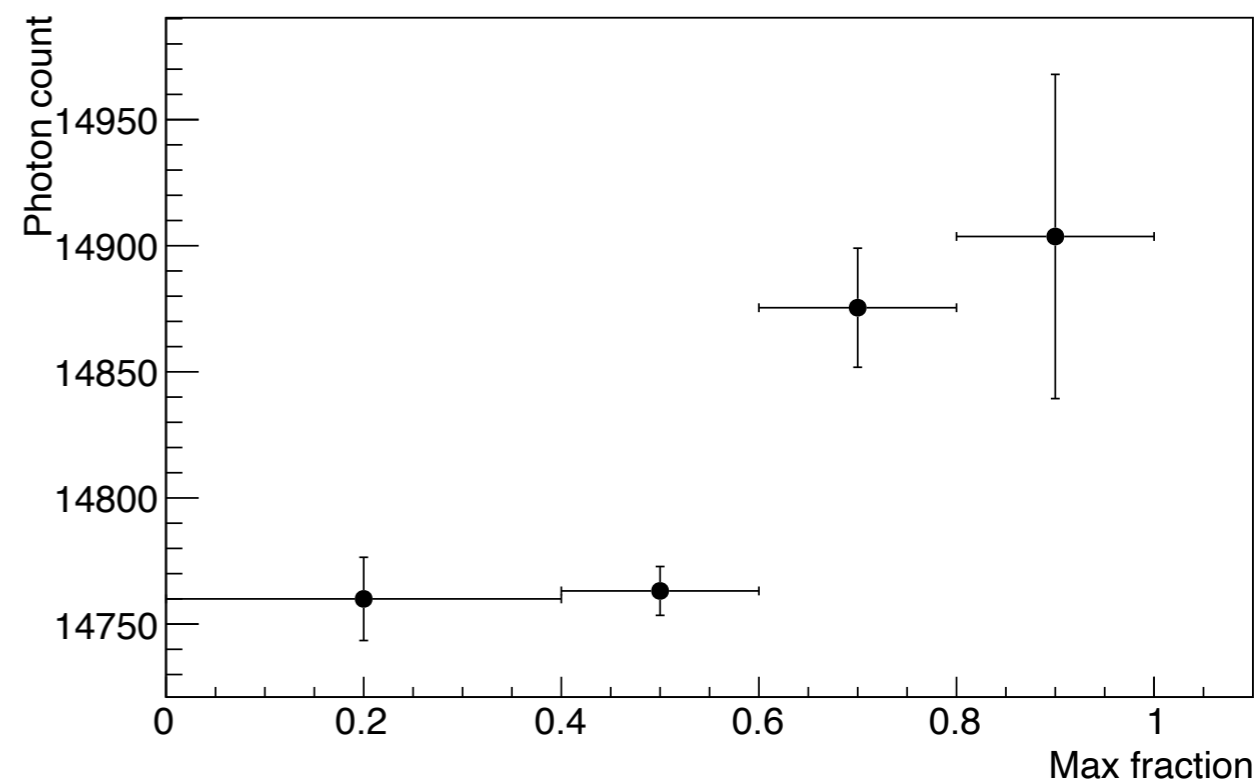
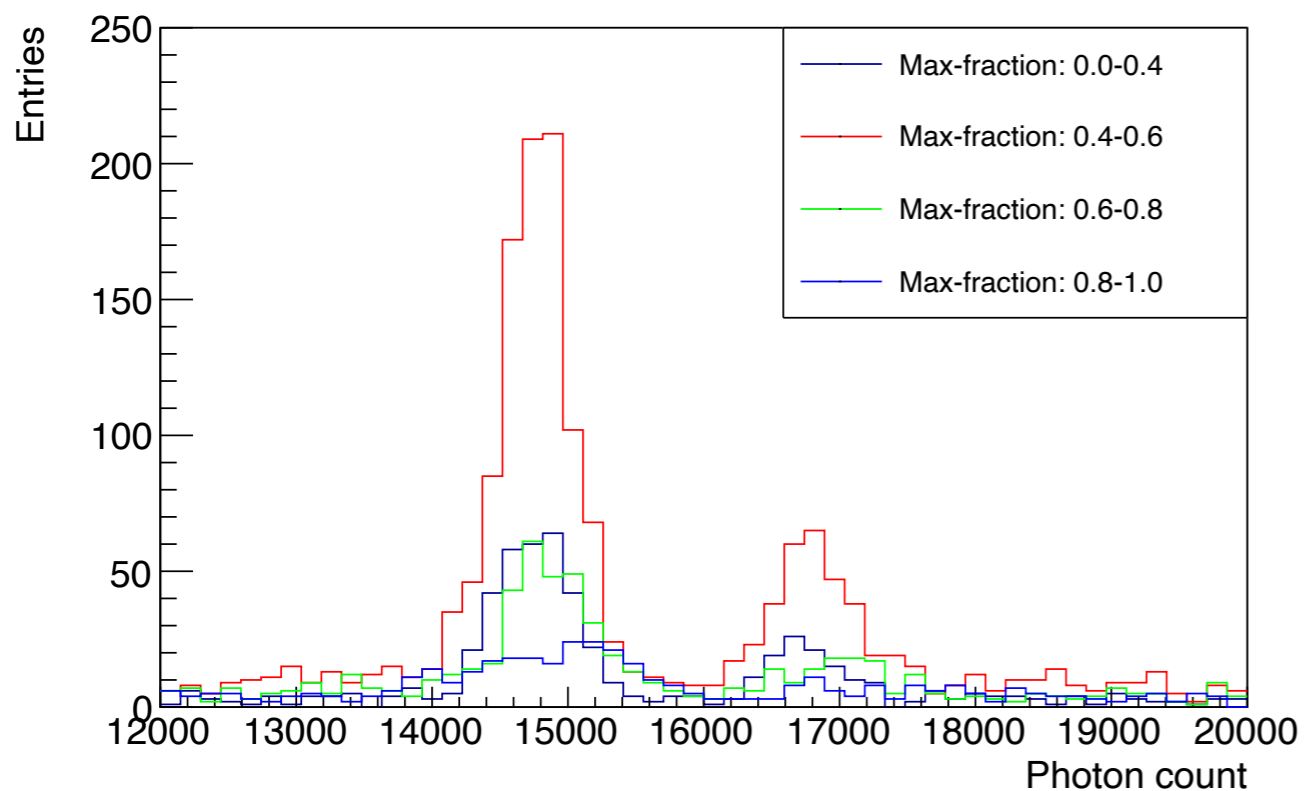
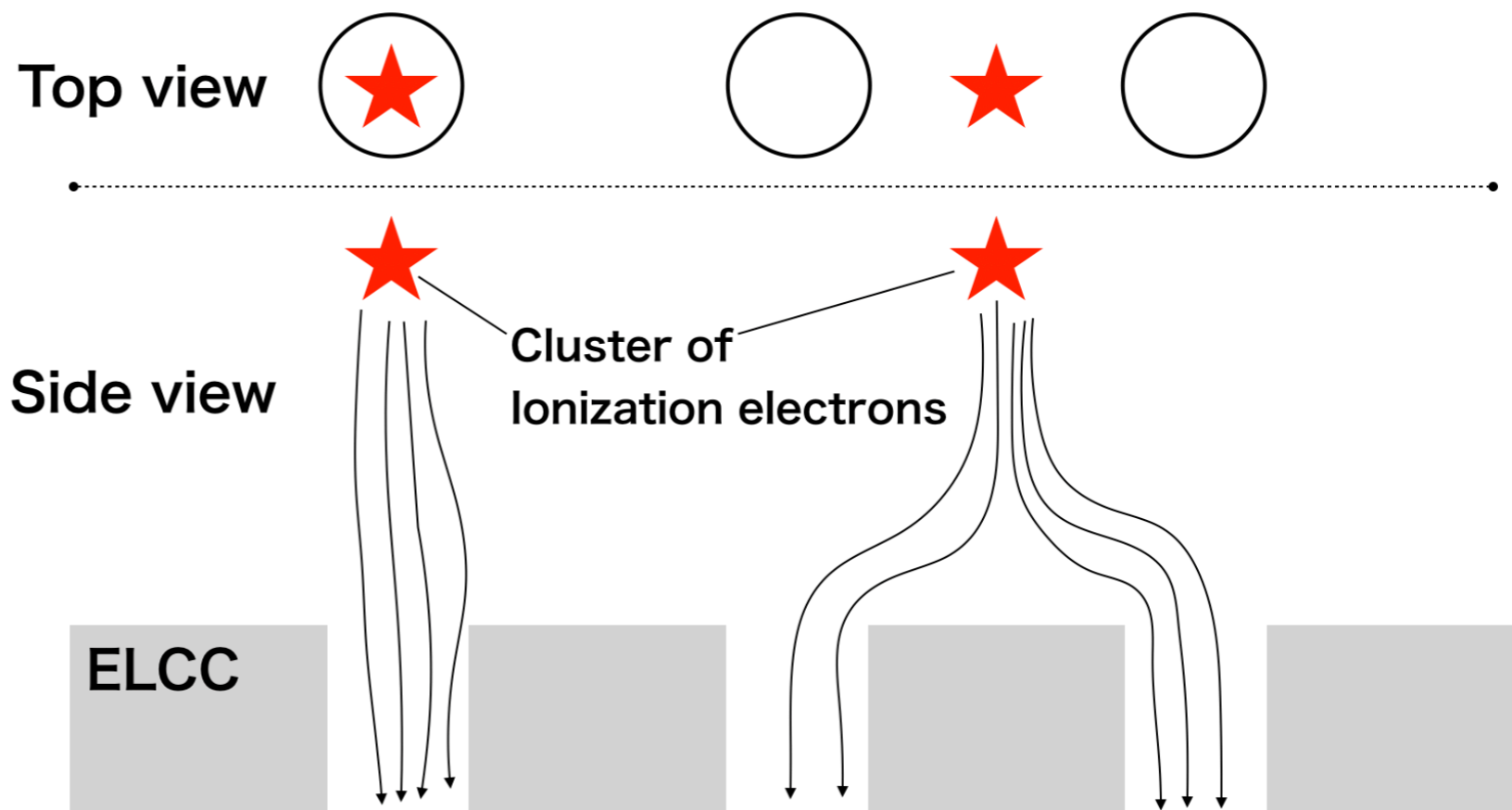


中めけになっているbinはrunの切り替えやDAQトラブル

- 補正
 - 光量のz位置依存を補正
 - ガスの不純物によると思われる



- 位置依存性



AXEL試作機：ハイライト

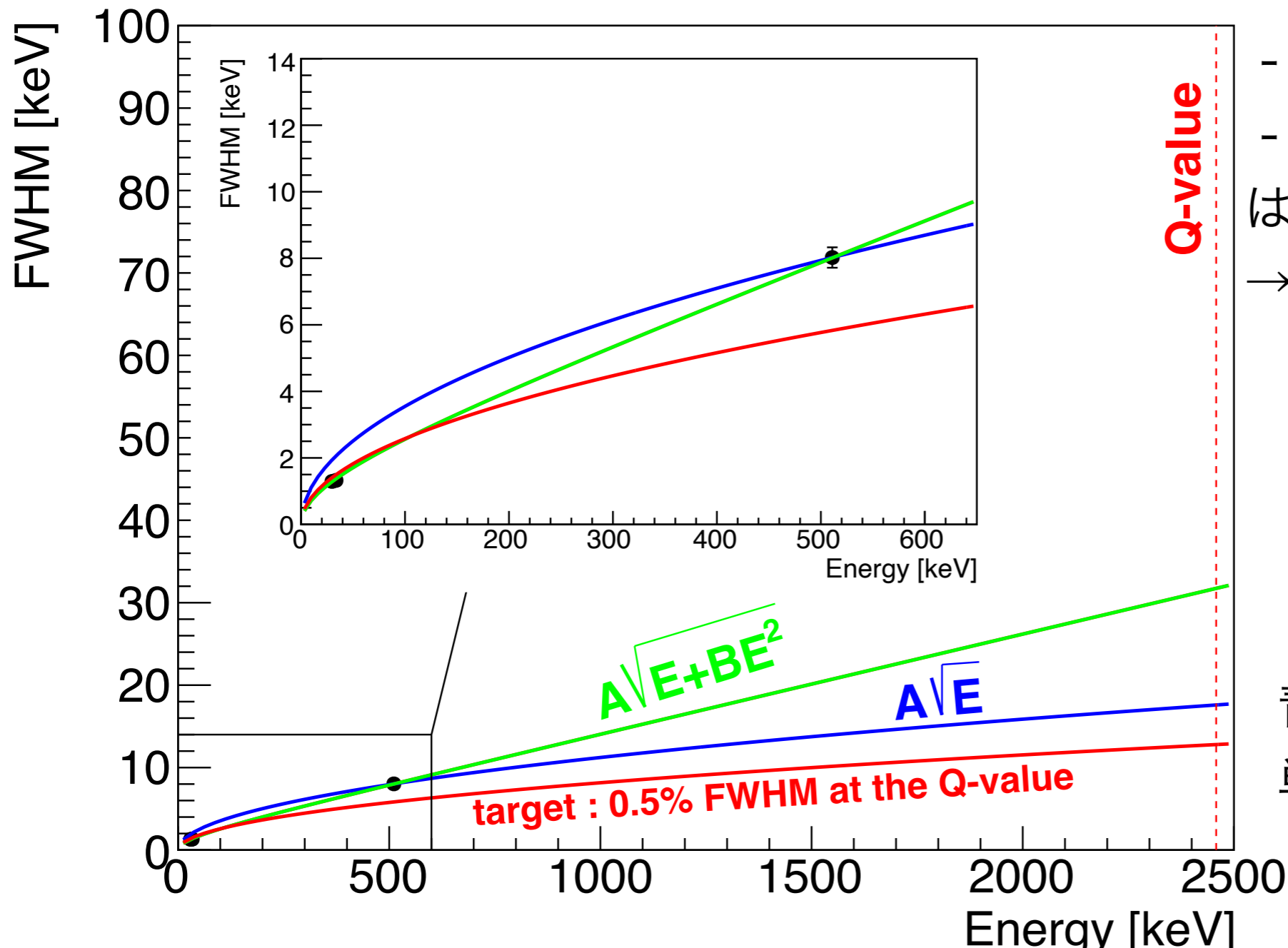
エネルギー分解能に \sqrt{E} に比例する項に加えて E に比例する項の効果も加えて評価を行う

$$A\sqrt{E + BE^2}$$

$A = 0.226 \pm 0.003$
 $B = 0.0029 \pm 0.0004$

-> Extrapolate to Q-value

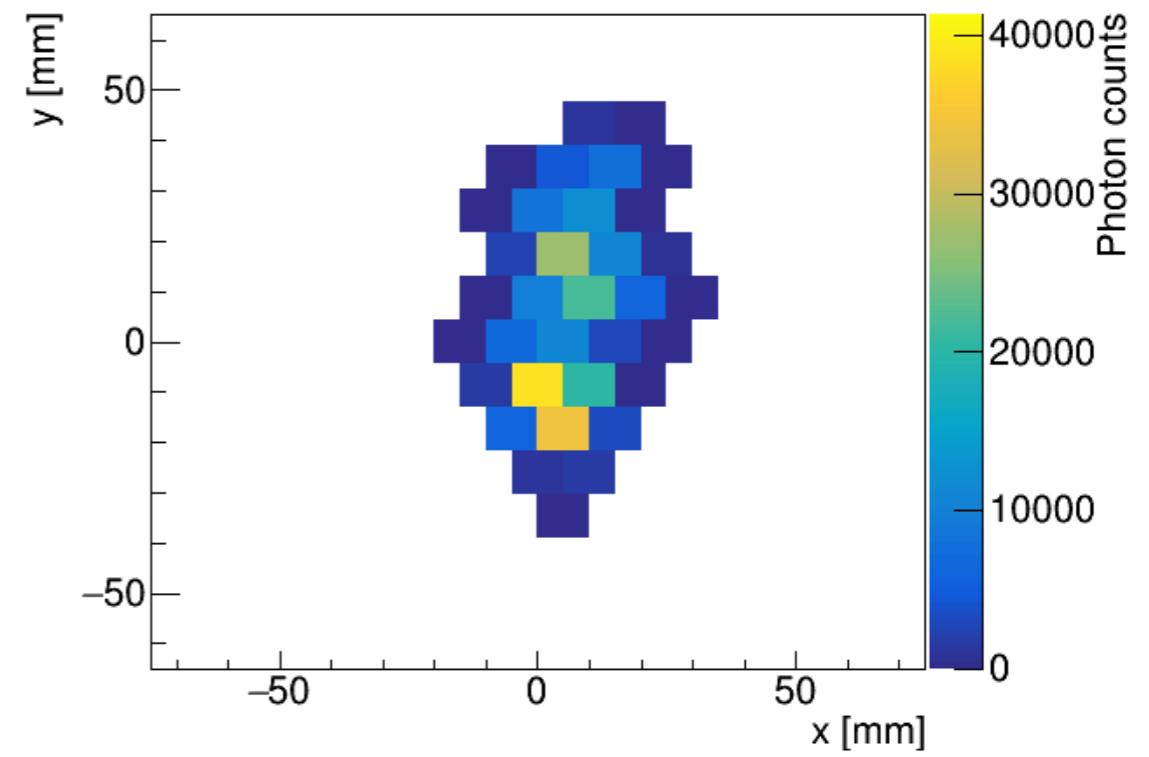
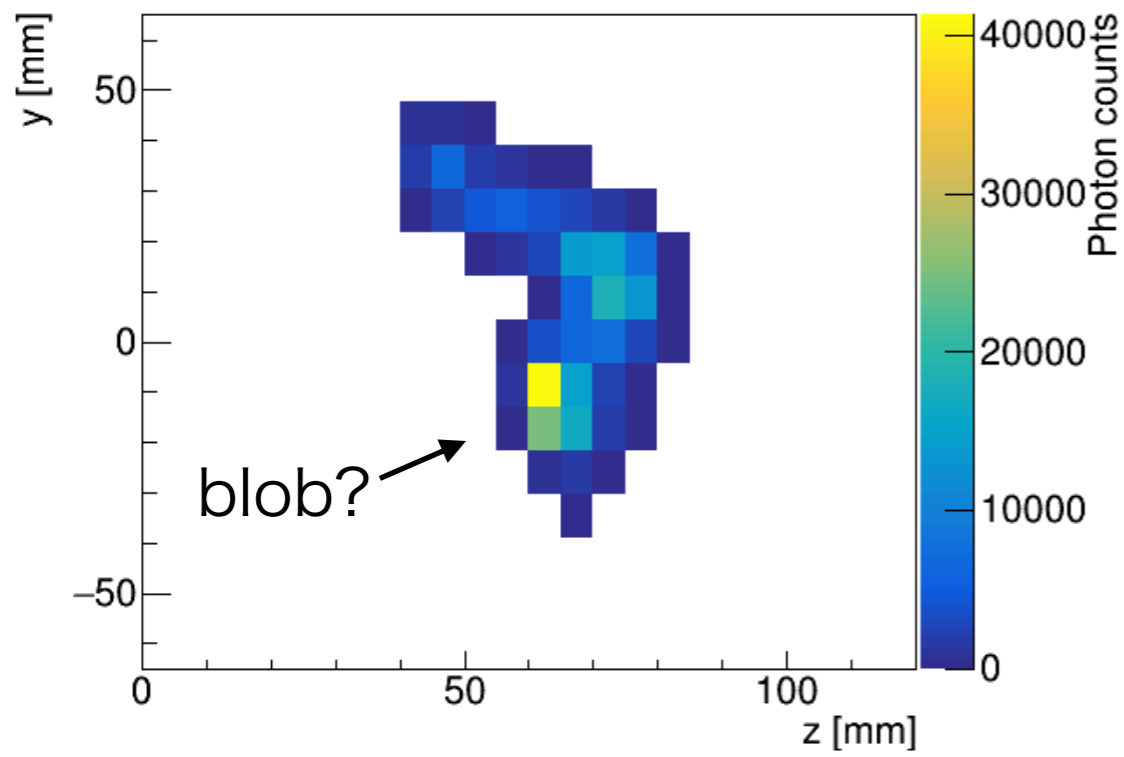
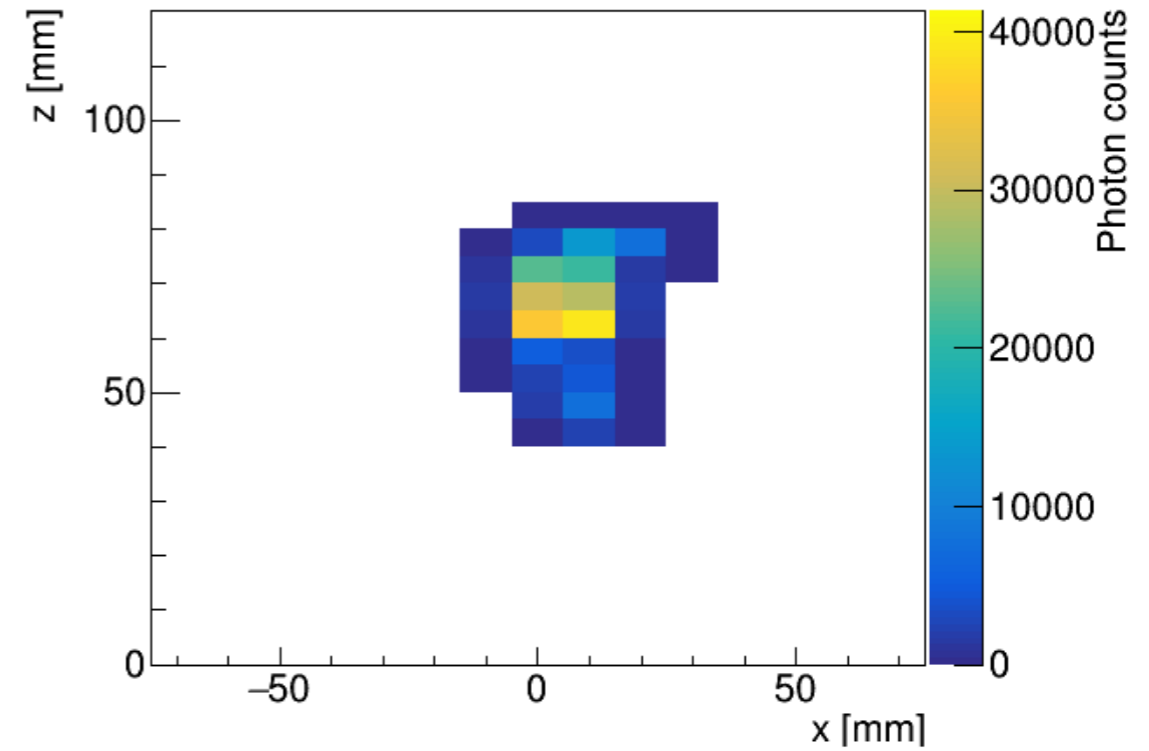
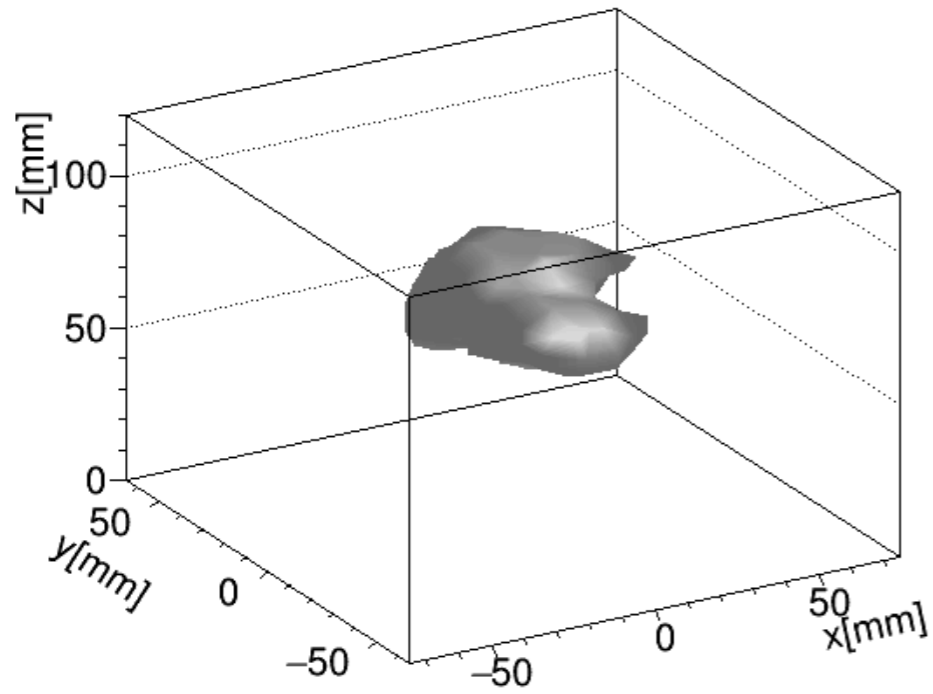
FWHM 1.29% (@2458keV)



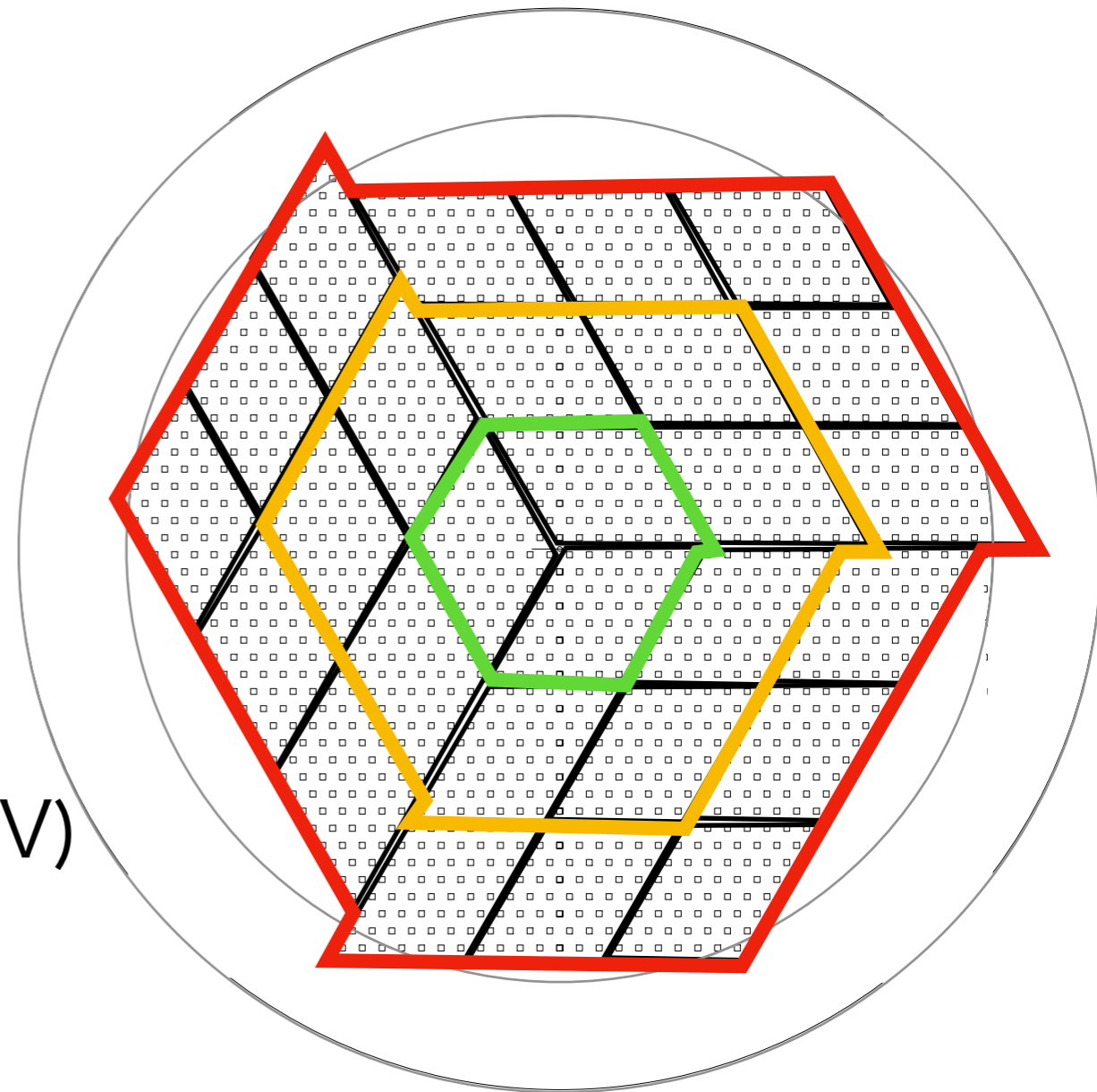
- Eに1次で比例する項の起源
 - 分解能を決めている要因
 はまだはっきりと分かってない
 → **理解のためのstudyが必要**

青いラインは511keVを
 単純に \sqrt{E} で変換した際の外挿

イベント・ディスプレイ@511keV



- Increase ELCC unit : 3 (2019) → 12 (2020) → 27 (2020)
- フィールドケーシングの拡張
 - ϕ 15cm, 10cm-long
 - ϕ 40cm, 50cm-long
- Evaluate the performance using gamma-rays with 511 keV, 622 keV, 1.1 MeV, 1.3 MeV, and near the Q-value (2.4 MeV)



検出器シミュレーション

シミュレーションによって検出器の応答を理解

- 検出器内部でのプロセス
- エネルギー分解能などの検出器応答：現在得られているデータの再現や理解
→ これらを用いていずれは**検出器のefficiencyの評価**や**背景事象の見積もり**
- Sig/BGをトラックパターンで分けるためにも、シミュレーションでパターンを再現することは重要

Simulation Flow

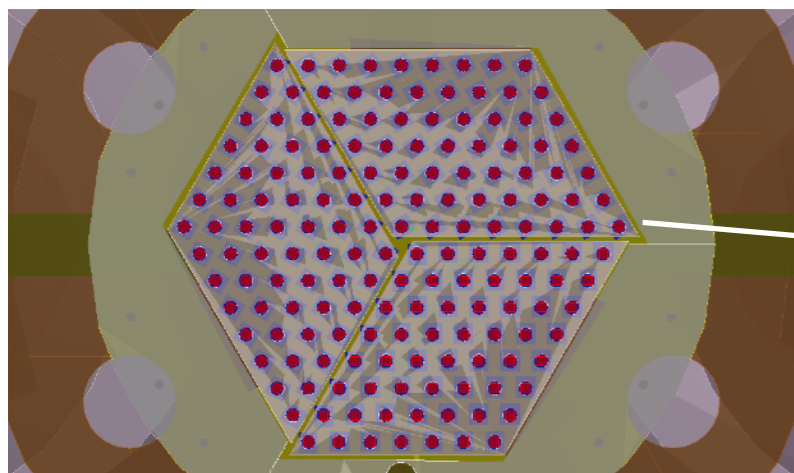
Geant4でガンマ線(511keV)を生成 → 検出器内でキセノンと反応 (電離+シンチ) →
 電離電子をドリフト+拡散 → セルごとにEL光生成 → FADCで取得する波形を再現

拡散係数：MAGBOLZの計算値+ajt

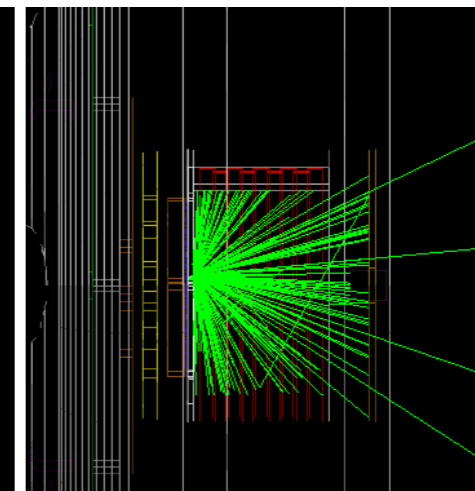
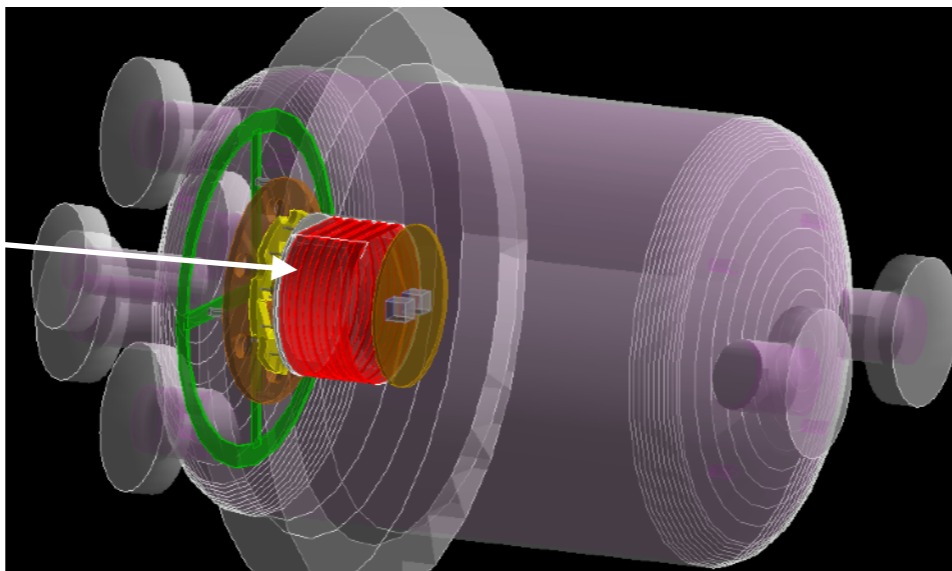
$$D_T = 0.0416 \text{ [cm}/\sqrt{\text{cm}}]$$

$$D_L = 0.30 \text{ [cm}/\sqrt{\text{cm}}]$$

セルに対する電子の相対位置
によるゲインの位置依存性も考慮



ELCC面

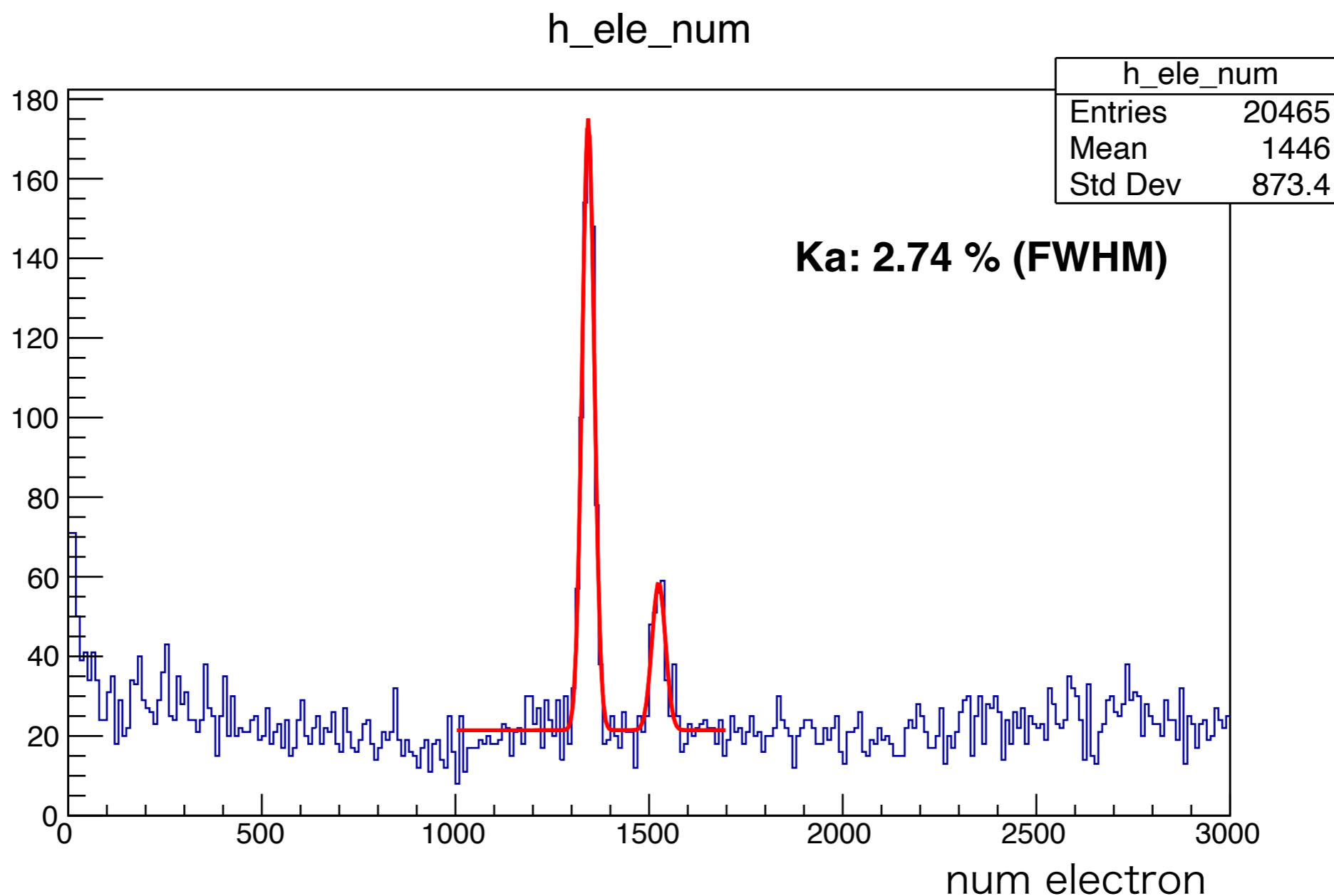


Scintillation

electron数

- W値(22.1 eV)とFano因子(0.13)から計算すると2.56%
- Unknownとして $\sqrt{(2.74^2 - 2.56^2)} = 0.976 \%$

Work in progress



解析thresholdを0とすると4.55%

- thresholdの影響として $\sqrt{(4.62^2 - 4.55^2)} = 0.801\%$

