

これまでの研究

1. ^{90}Sr Counter 開発研究
2. J-PARC E36実験
3. 医療用PET開発
4. 表面 α 分析装置開発
5. データベース開発

東京理科大での研究計画

神戸大学
2018. 09. 21
伊藤博士

1. ^{90}Sr Counter 開発研究

1. ^{90}Sr Counter 開発研究

背景

- 福島原発後、福島漁業が未だ再開しない、原因の一つは ^{90}Sr
- ^{90}Sr は骨に蓄積するため ^{137}Cs と比較して摂取は危険
- 新鮮な海産物の短時間での ^{90}Sr 放射能濃度測定が要求

目的

- 1時間で数十Bq/kgの ^{90}Sr を測定するために低BG化
- ^{40}K からの β 線や宇宙線 μ 由来の雑音を抑制
- 大面積の有効面積

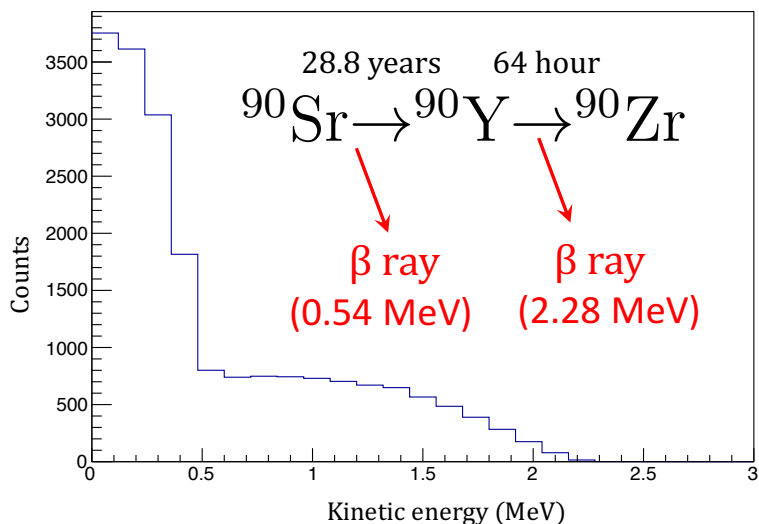


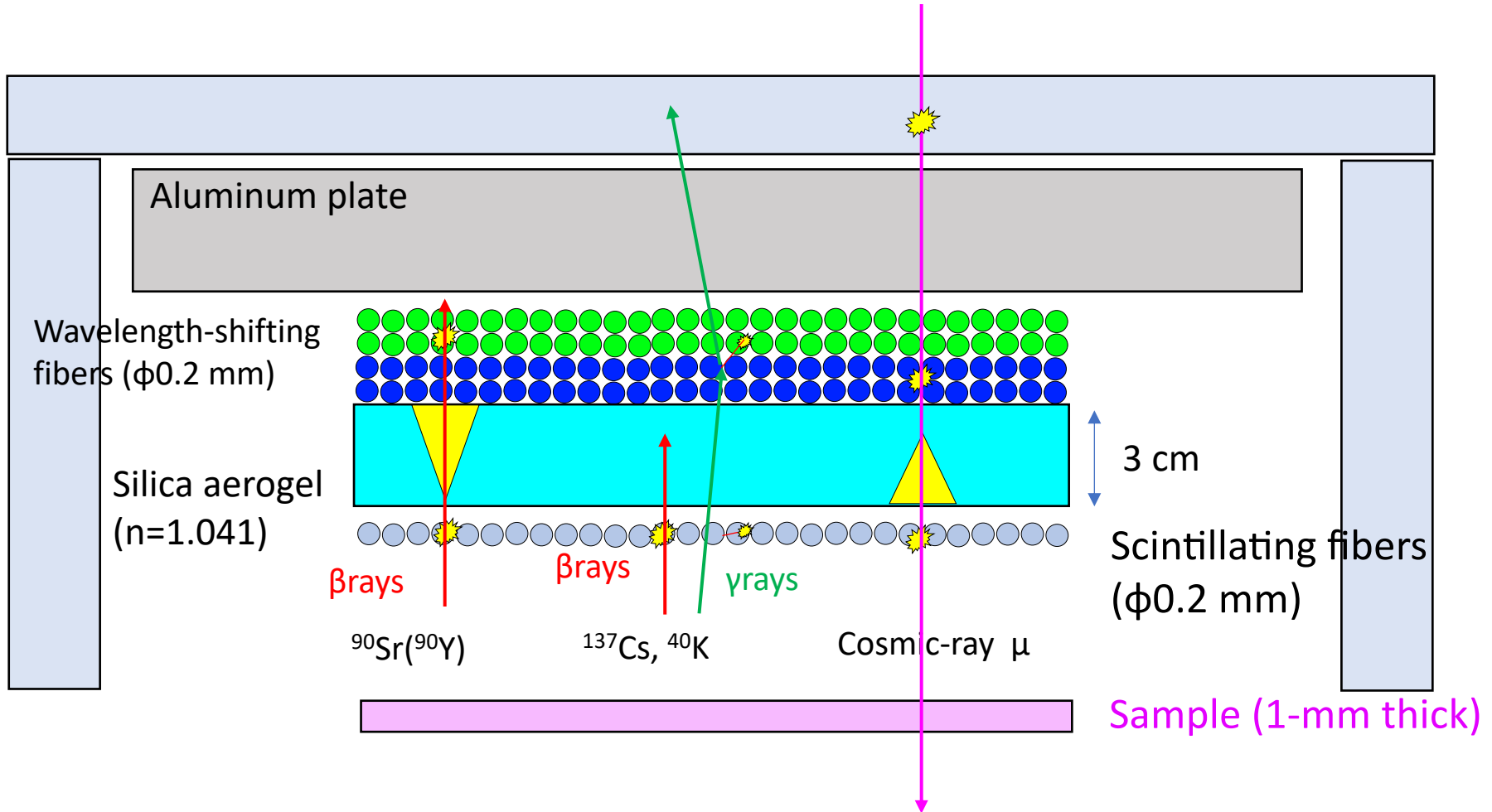
Fig. 1.1: Energy spectrum of β ray from ^{90}Sr and ^{90}Y .

Dose coefficient by ICRP publ.

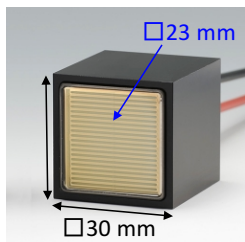
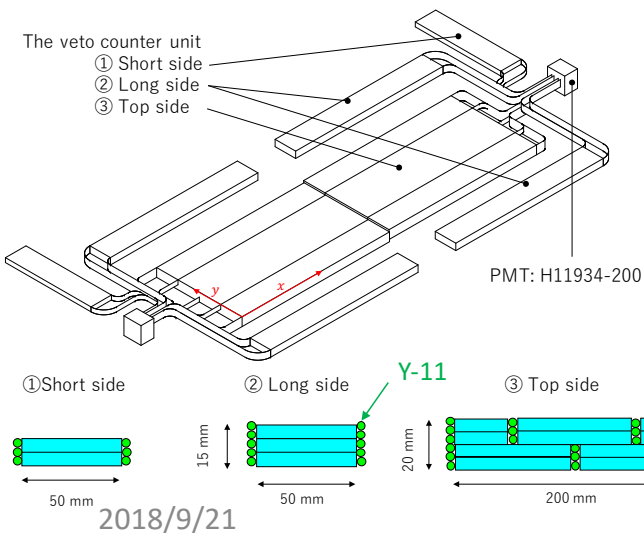
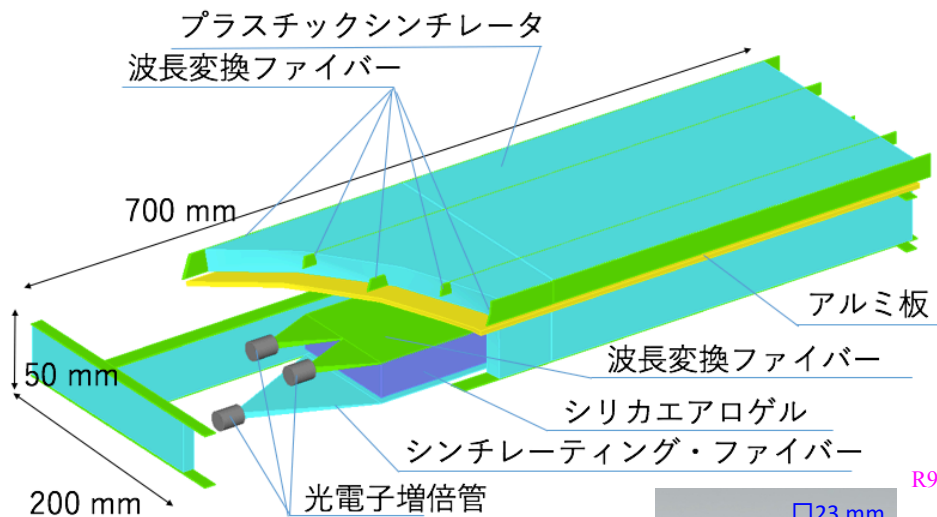
| | ^{90}Sr (^{90}Y) | ^{137}Cs |
|-----------------------------|--------------------------------------|----------------------|
| Eff. Coeff. (Sv/Bq) (Adult) | 2.4×10^{-8} | 4.6×10^{-9} |
| Red Marrow | | |
| Dose Coeff. (Sv/Bq) (Adult) | 1.6×10^{-7} | 4.4×10^{-9} |
| (Infant) | 8.6×10^{-7} | 6.8×10^{-9} |

1. ^{90}Sr Counter 開発研究

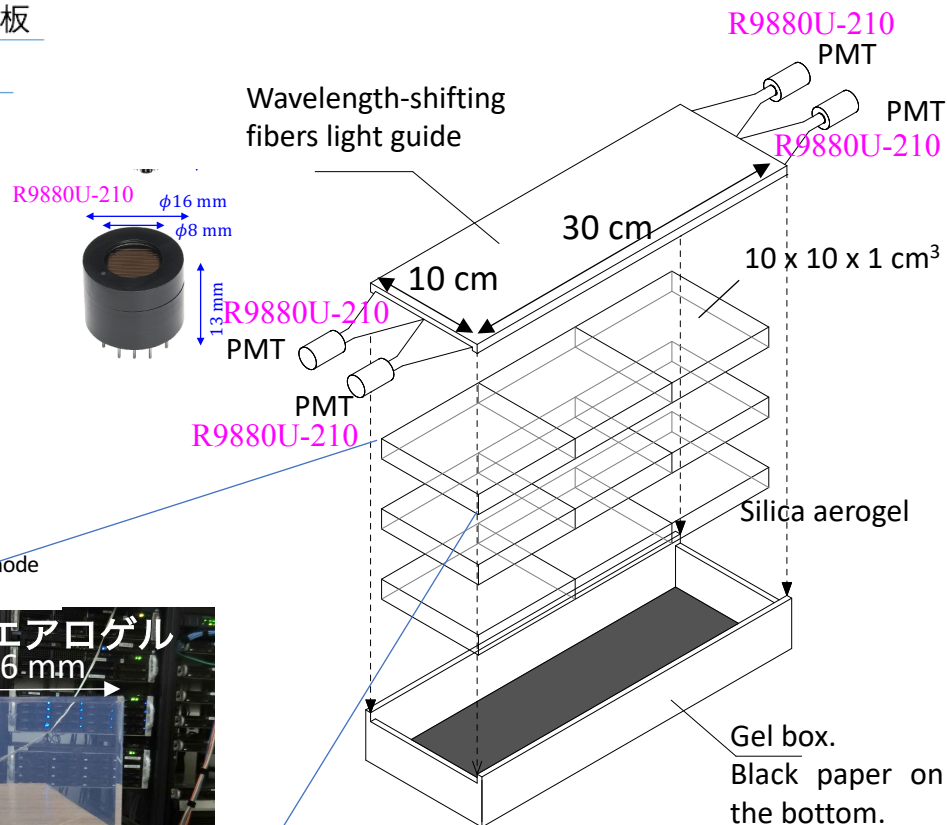
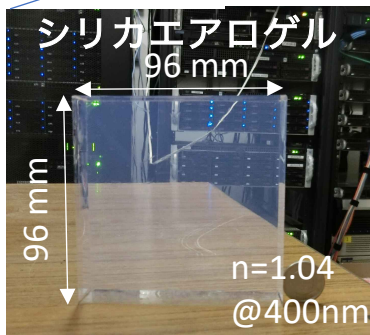
装置設計 概念図



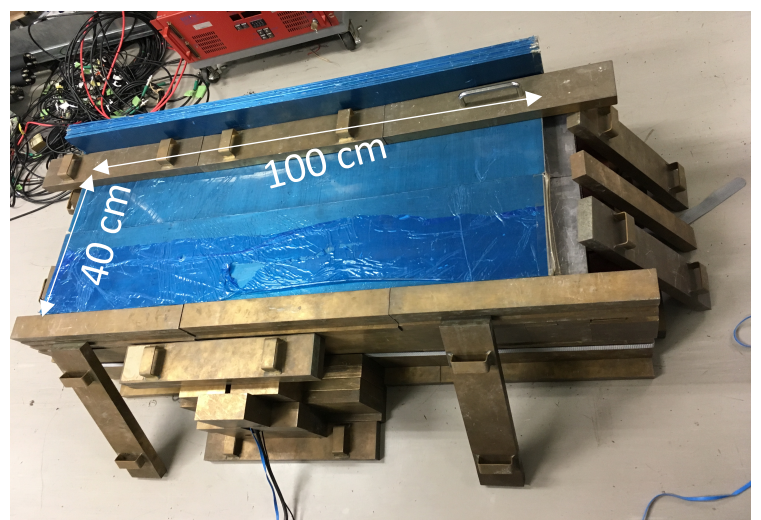
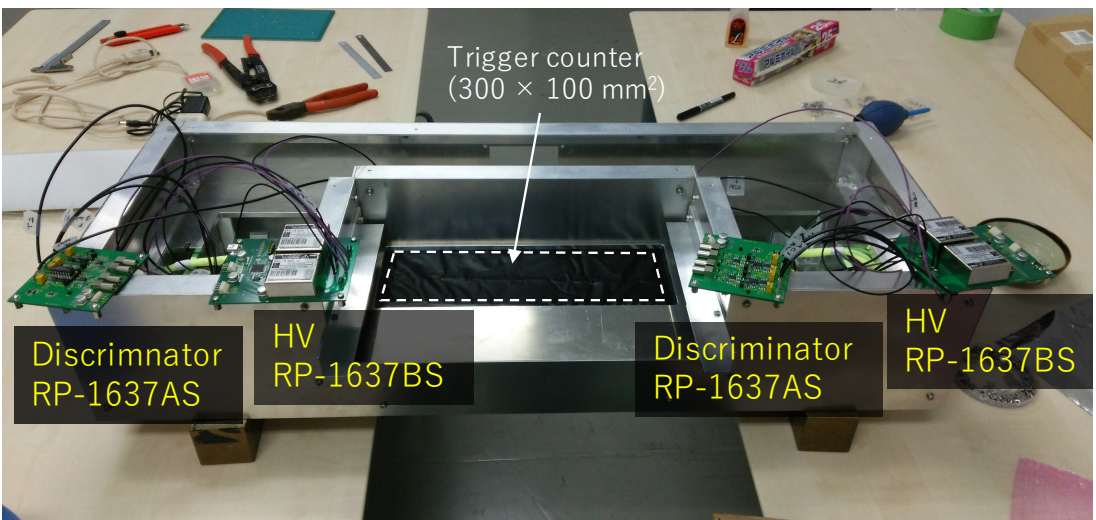
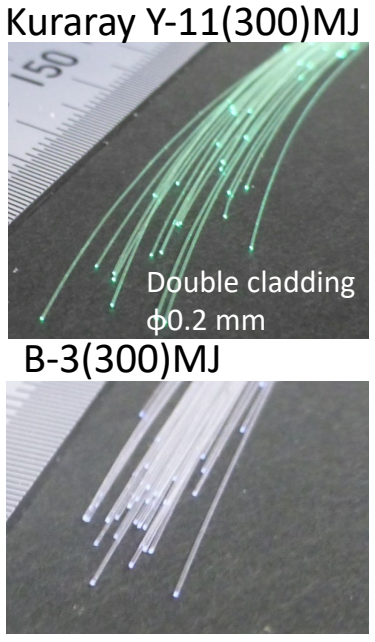
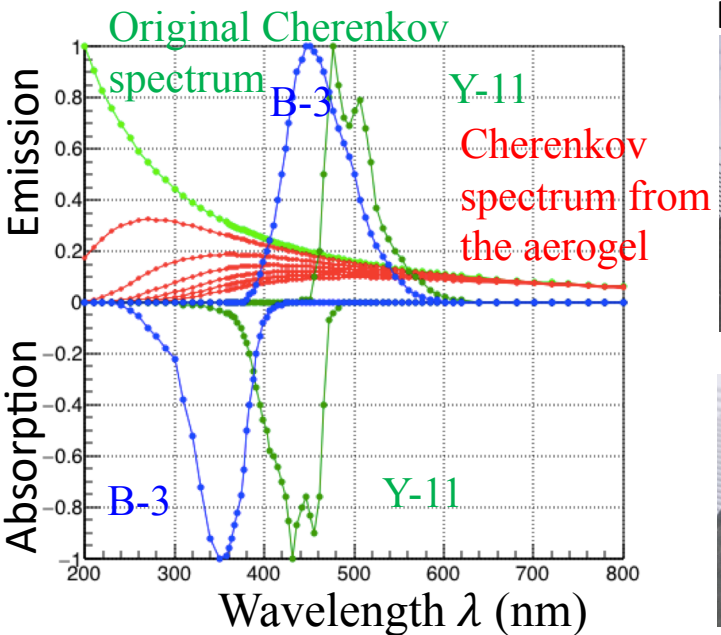
1. ^{90}Sr Counter 開発研究



- Photocathode
 - □23 mm
 - Ultra Bialkali
- Metal Channel Dynode

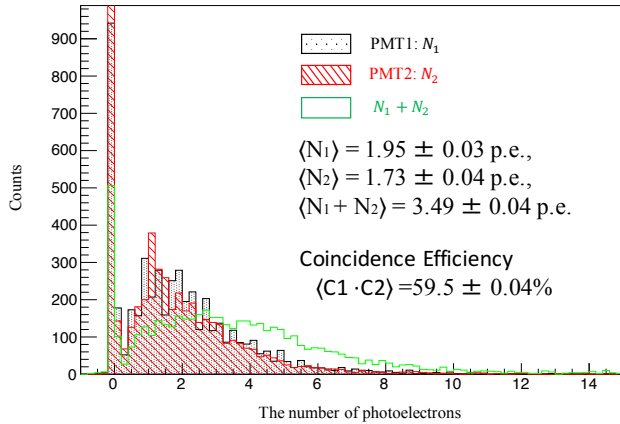


1. ^{90}Sr Counter 開発研究

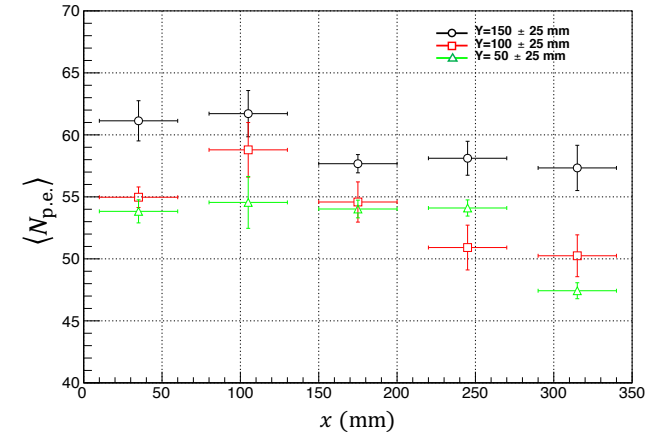
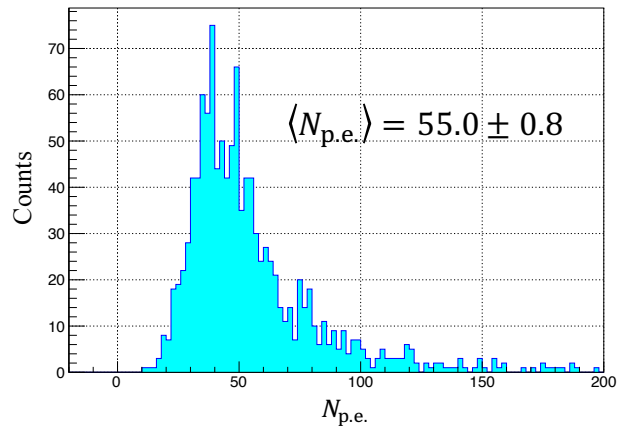


1. ^{90}Sr Counter 開発研究

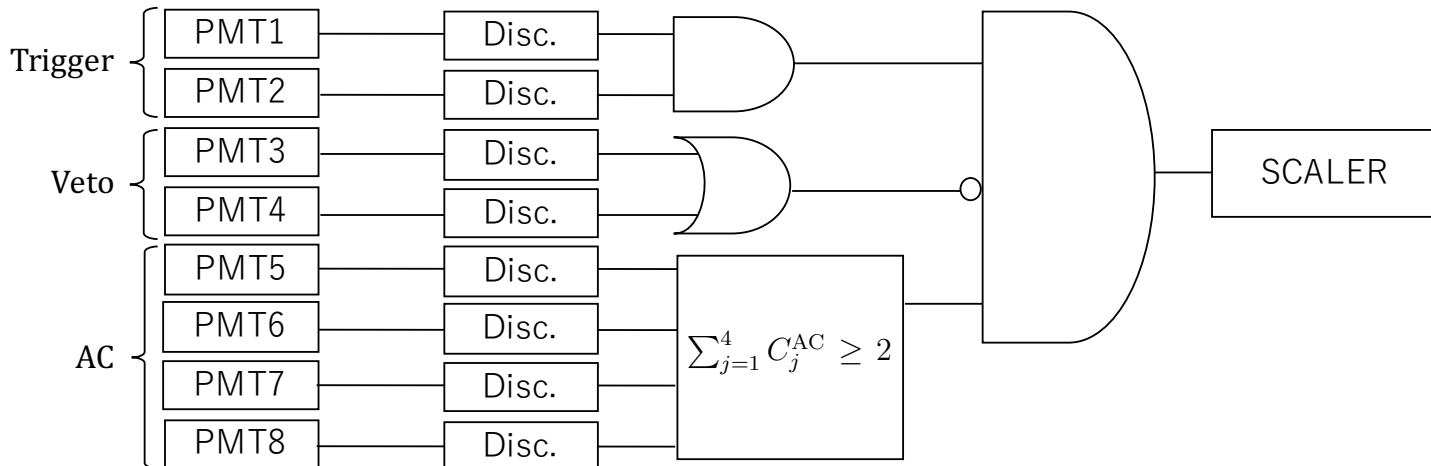
Trigger counter performance



Cosmic-ray veto counter performance



回路設計



1. ^{90}Sr Counter 開発研究

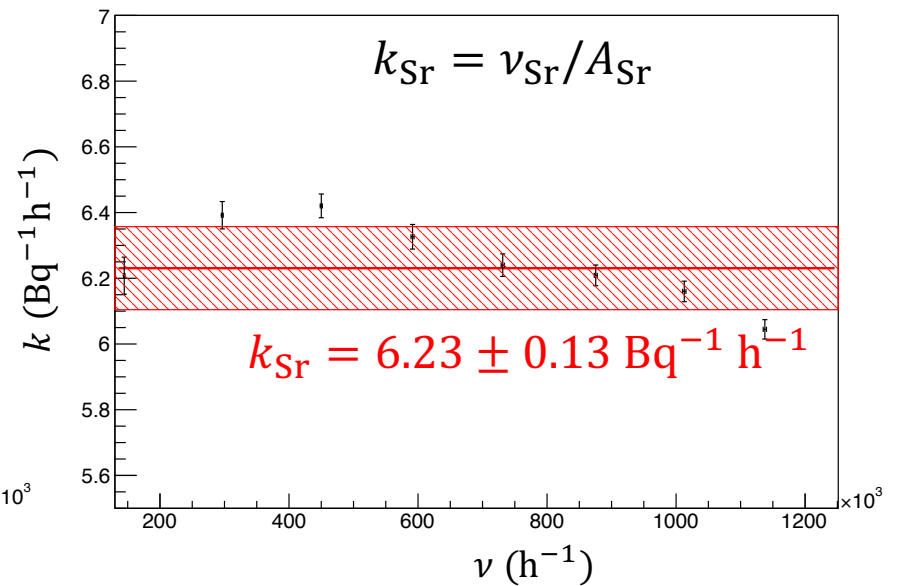
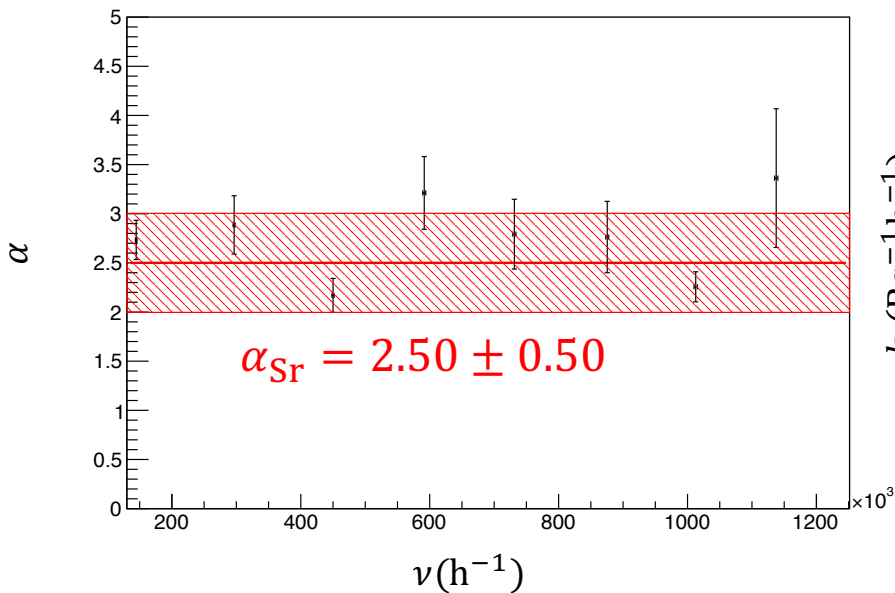
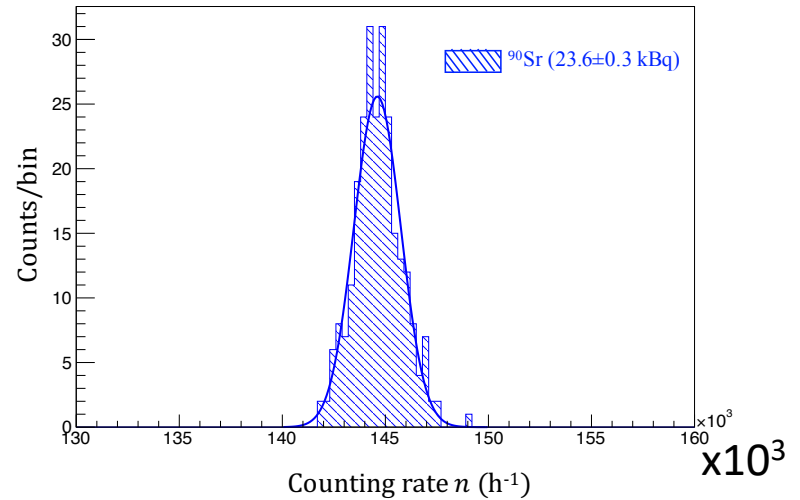
線源を用いた性能評価測定

$$\langle \Gamma_{\text{BG}}(n) \rangle \ll \langle \phi_{\text{Sr}}(n) \rangle \Rightarrow \Gamma_{\text{Sr}}(n) \approx \phi_{\text{Sr}}(n)$$

$$\Gamma_{\text{BG}}(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{\text{BG}}^2}} \exp\left\{-\frac{(n - \nu_{\text{BG}})^2}{2\sigma_{\text{BG}}^2}\right\}, \quad \begin{matrix} \nu_{\text{BG}}=35.1 \text{ h}^{-1} \\ \sigma_{\text{BG}}=6.0 \text{ h}^{-1} \end{matrix}$$

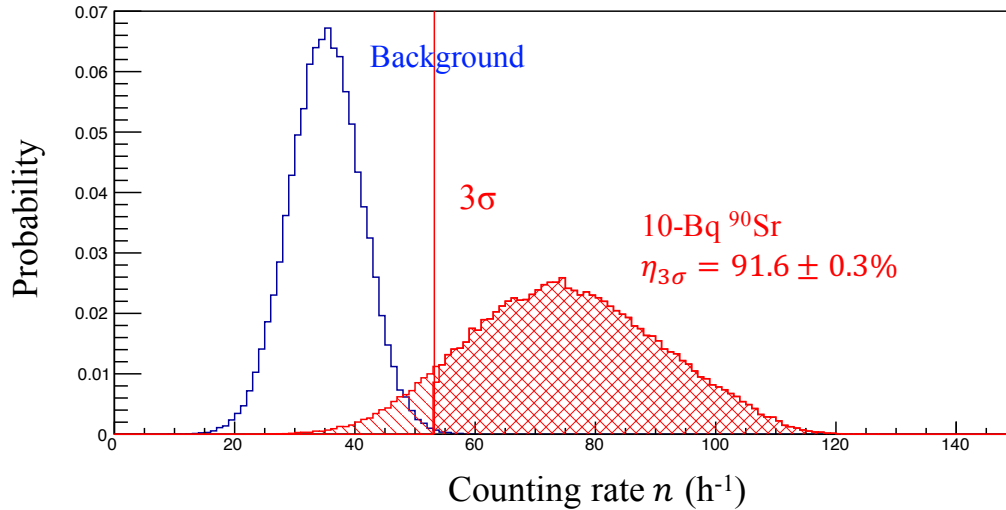
$$\phi_x(n) = \frac{e^{-\nu/\alpha^2} (\nu/\alpha^2)^{n/\alpha^2}}{\Gamma(n/\alpha^2 + 1)}, \quad (x = \text{Sr})$$

| Source | α | k ($\text{Bq}^{-1} \text{ h}^{-1}$) |
|-------------------|-------------------|---|
| ^{90}Sr | 2.50 ± 0.50 | 6.23 ± 0.13 |
| ^{137}Cs | 0.532 ± 0.044 | $(4.77 \pm 0.09) \times 10^{-3}$ |
| ^{40}K | 1.067 ± 0.106 | $(1.95 \pm 0.04) \times 10^{-2}$ |



1. ⁹⁰Sr Counter 開発研究

線源を用いた性能評価測定



- These curves show relations between ⁹⁰Sr radioactivity and the efficiency for 1, 2, 3σ threshold condition.
- Typical detection limit is determined to be $A_{3\sigma}^{50\%}$ satisfying $\langle \Gamma_{Sr}(n) \rangle > \langle \Gamma_{BG}(n) \rangle + 3\sigma$.
- $A_{3\sigma}^{50\%} = 4.6$ Bq at 1-hour measuring.

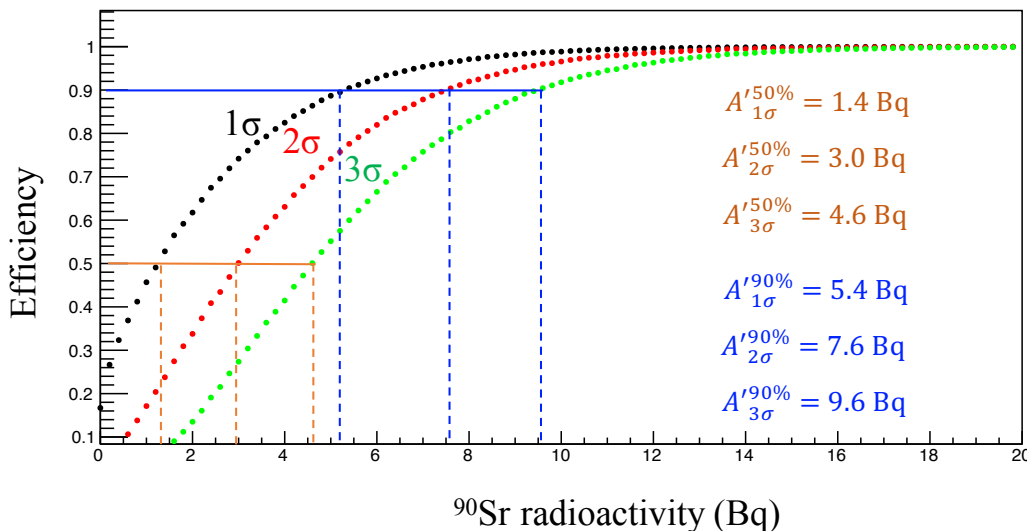
乾燥した海産物サンプルの密度 1 g/cm^3 、体積圧縮率 $\epsilon=0.3$ 、厚さ 1 mm 、質量 $m=30 \text{ g}$ とすると 1 時間測定における検出限界は、

$$A_{3\sigma}^{50\%} m \epsilon^{-1} = 46 \text{ Bq/kg}$$

$A \propto S^{-1}$; it expected to be $8.4 \text{ Bq/kg @S=1 m}^2$

海水における検出限界は

$$A_{3\sigma}^{50\%} m \epsilon^{-1} = 1.5 \text{ Bq/L}$$



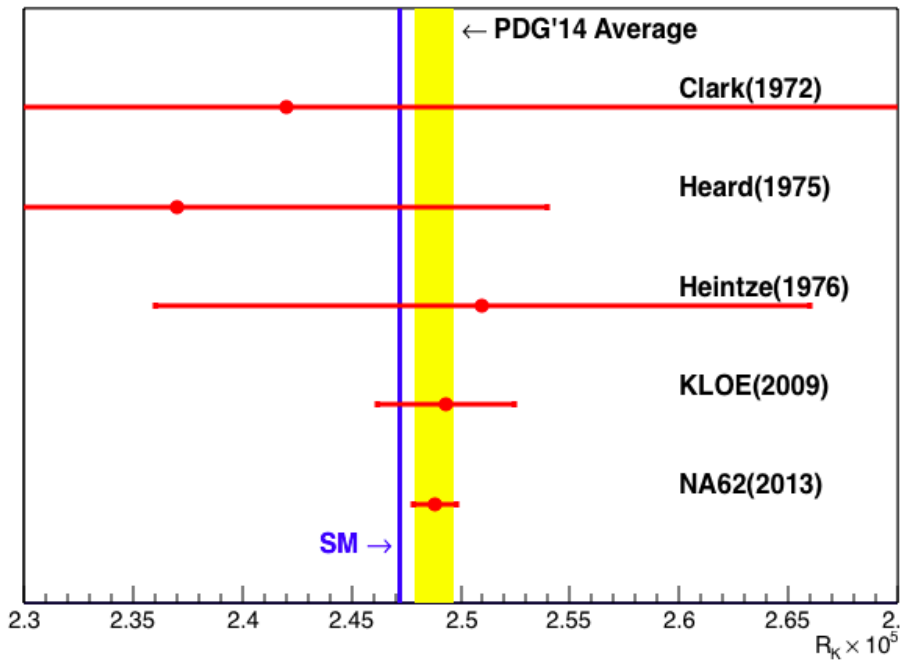
2. J-PARC E36実験

2. J-PARC E36 実験

Ke2

Kμ2

静止 K^+ を用いた $\Gamma(K^+ \rightarrow e^+ \nu_e) / \Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)$ の精密測定実験



| | $R_K \times 10^5$ | $\Delta R_K / R_K$ |
|------------|---|--------------------|
| KLOE(2009) | $2.493 \pm 0.025 \pm 0.019$ (stat) (sys) | 1.26% |
| NA62(2013) | $2.488 \pm 0.007 \pm 0.007$ (stat) (sys) | 0.40% |
| SM | 2.477 ± 0.001 | 0.04% |

Initial goal of
E36

0.25%

$$R_K^{SM} = \frac{\Gamma(K^+ \rightarrow e^+ \nu_e)}{\Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu)}$$

$$= \frac{m_e^2}{m_\mu^2} \left(\frac{m_K^2 - m_e^2}{m_K^2 - m_\mu^2} \right)^2 (1 + \delta_r)$$

radiative correction

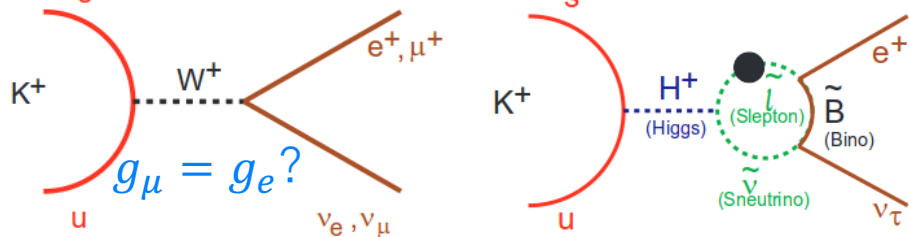
helicity suppression

$K^+ \rightarrow l^+ \nu_l$

$\Gamma(K_{l2}) = g_l^2 (G^2 / 8\pi)$

$f_K^2 m_K m_l^2 \{1 - (m_l^2 / m_K^2)\}^2$

Candidate Model:
MSSM with LFV



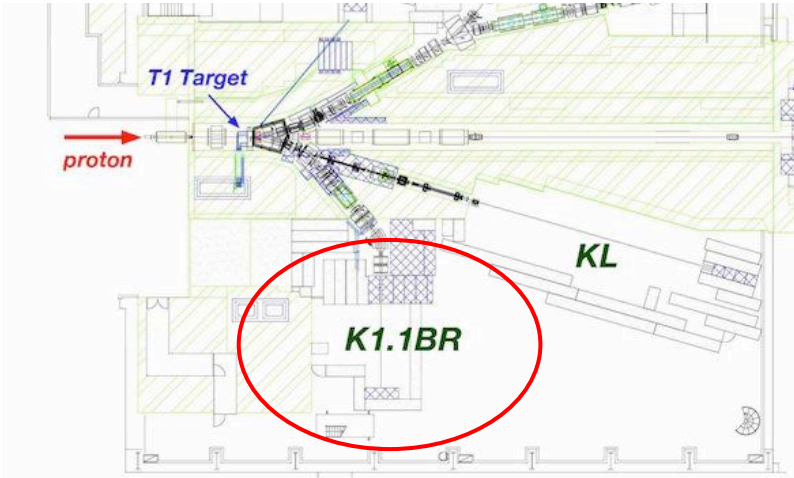
$$R_K^{LFV} = R_K^{SM} \left(1 + \frac{m_K^4}{M_{H^+}^4} \cdot \frac{m_\tau^2}{m_e^2} \Delta_{13}^2 \tan^6 \beta \right)$$

$$\sim R_K^{SM} (1 + 0.013_{\max})$$

Phys. Rev. D 74

2. J-PARC E36 実験

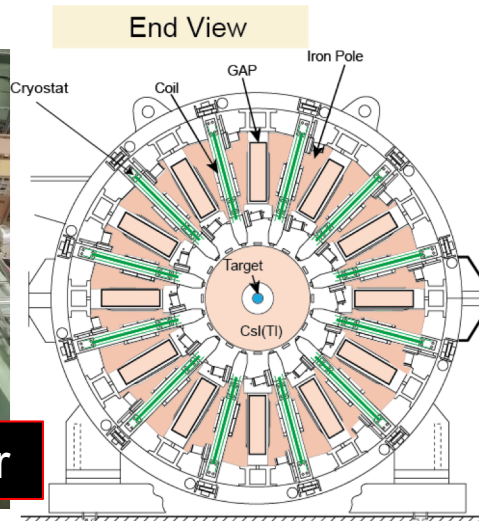
Phys. Run: October, 2015 – December, 2015



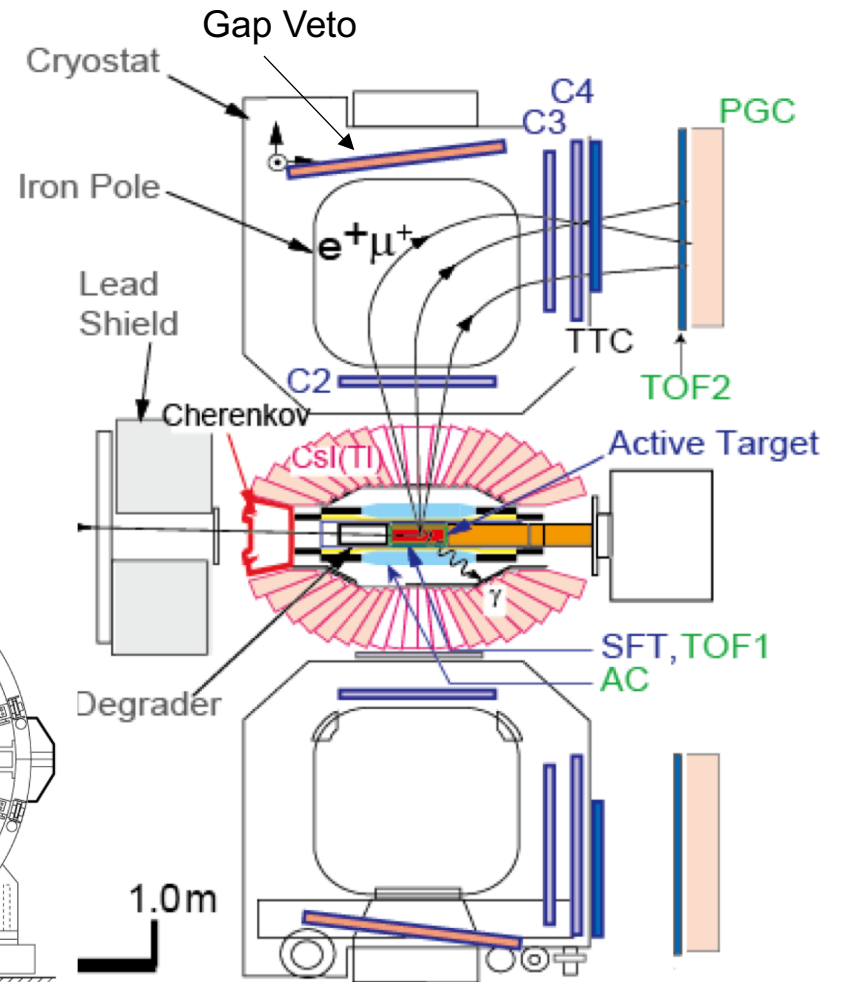
J-PARC Hadron Hall



E36 Detector



Side View



2. J-PARC E36 実験

$$R_K^{SM} = \frac{\Gamma(K_{e2}) + \Gamma(K_{e2\gamma}(IB))}{\Gamma(K_{\mu2}) + \Gamma(K_{\mu2\gamma}(IB))}$$

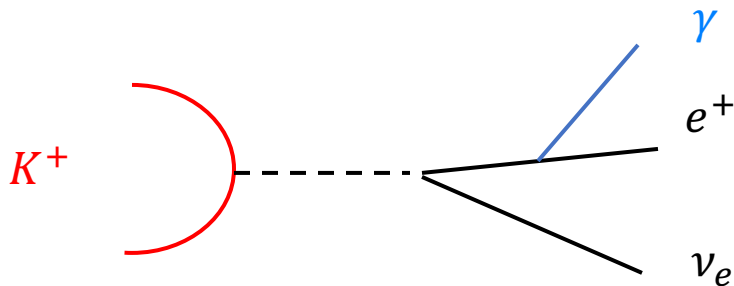
Background: $Ke2\gamma$ (SD)

$Ke2\gamma: K^+ \rightarrow e^+ \nu_e \gamma$

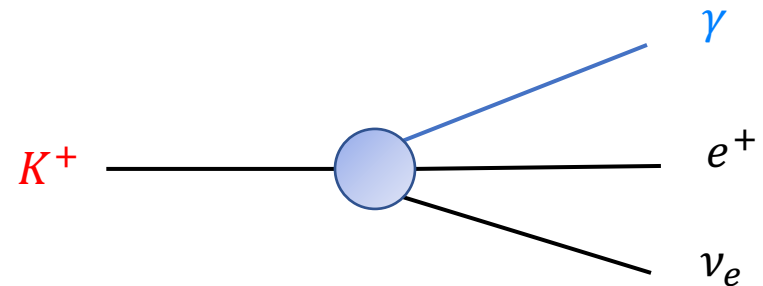
$\Gamma(K_{e2}) \sim 1.58 \times 10^{-5}$

$\Gamma(K_{e2\gamma}(SD)) \sim 9.4 \times 10^{-6}$

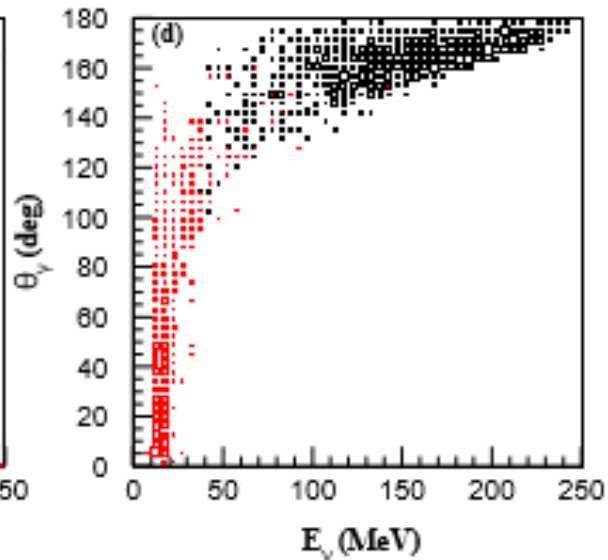
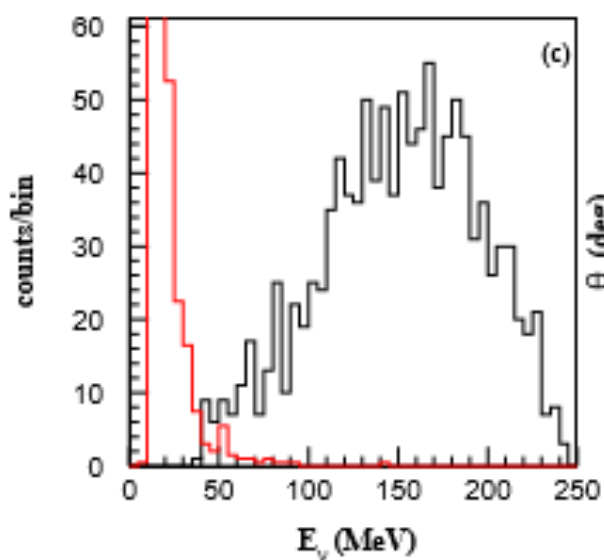
PDG'18/Eur. Phys. J. C 64 (2009) 627.



Internal Bremsstrahlung (IB)

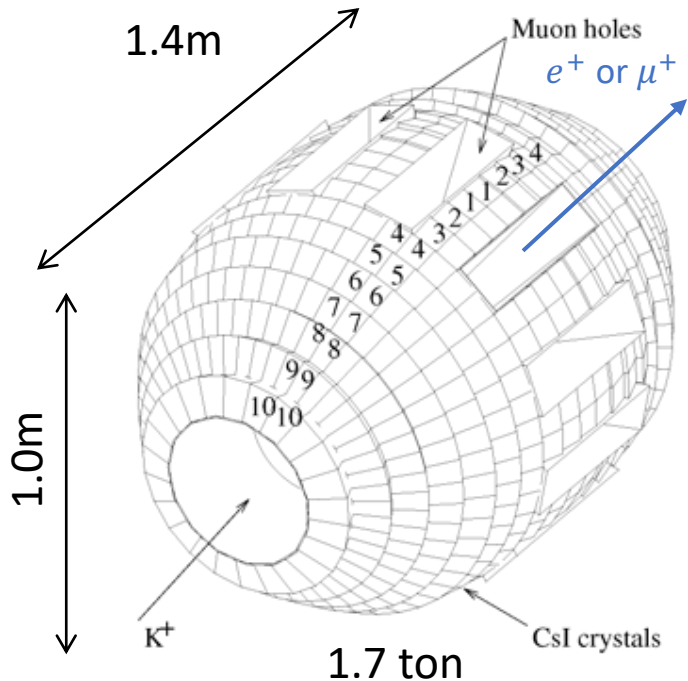


Structure Dependent (SD)

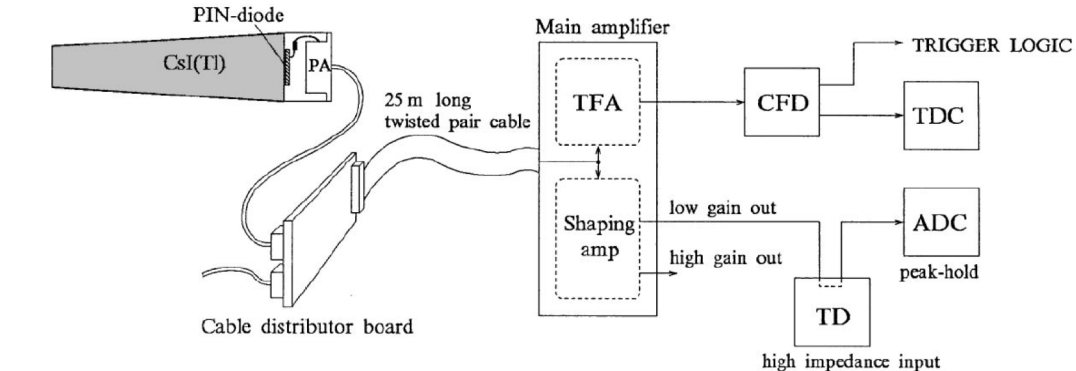


2. J-PARC E36 実験

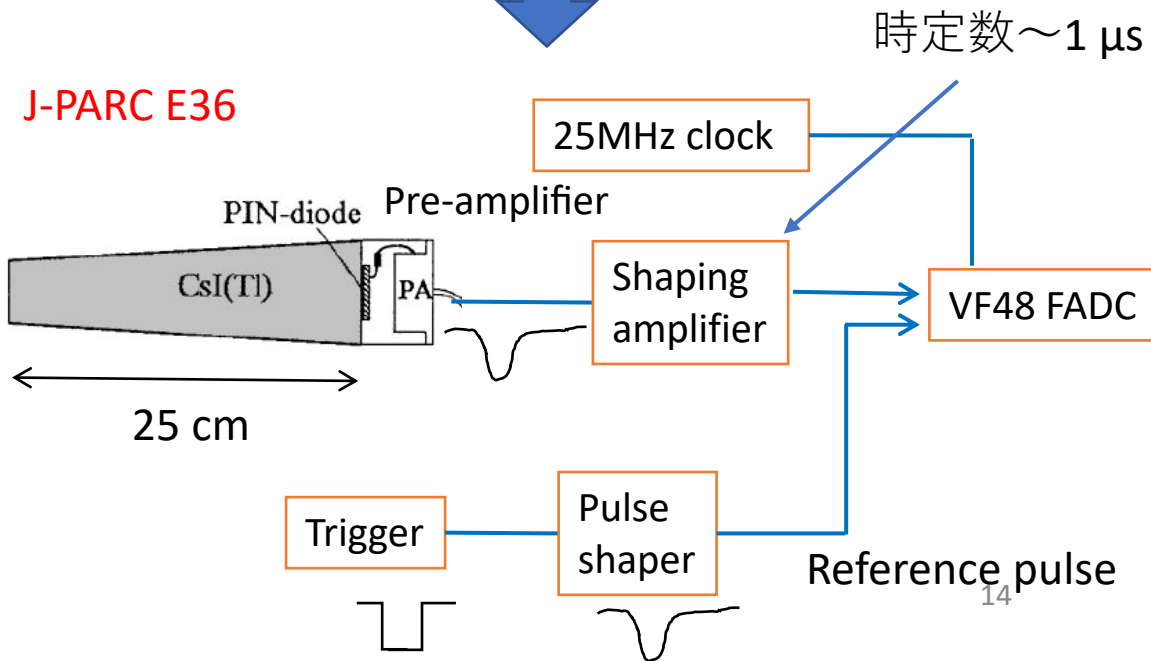
768 CsI(Tl) crystal modules



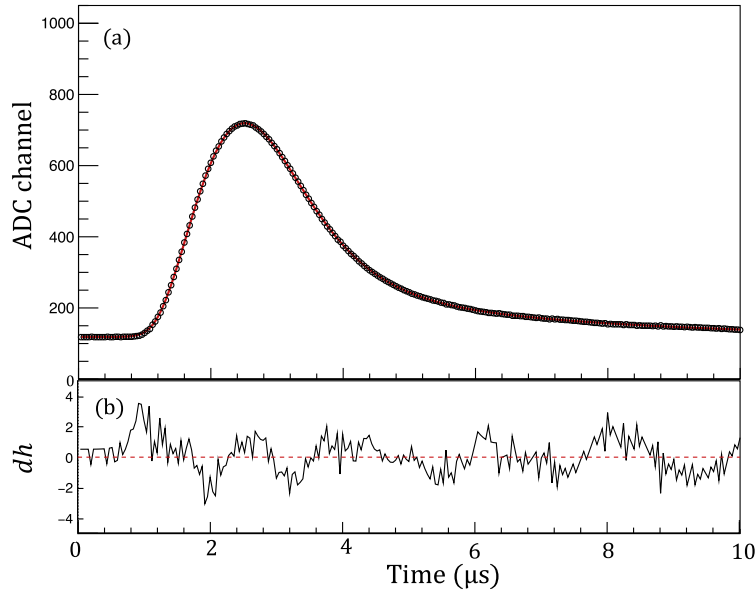
KEK-PS E246



J-PARC E36



2. J-PARC E36 実験

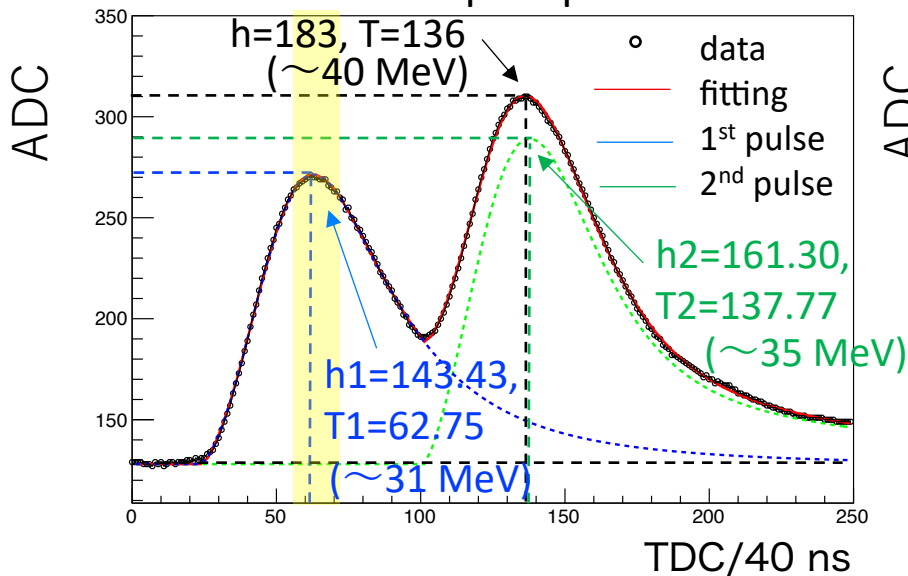


$$f(t) = \frac{A}{1 - \exp\{-(t - \tau_0)/\lambda\}} \cdot \text{Freq} \left(\frac{t - \tau_0 - d}{\mu} \right) \cdot \left\{ \frac{t - \tau_0}{\tau_1} \exp \left(1 - \frac{t - \tau_0}{\tau_1} \right) + \varepsilon \frac{t - \tau_0}{\tau_2} \exp \left(1 - \frac{t - \tau_0}{\tau_2} \right) \right\},$$

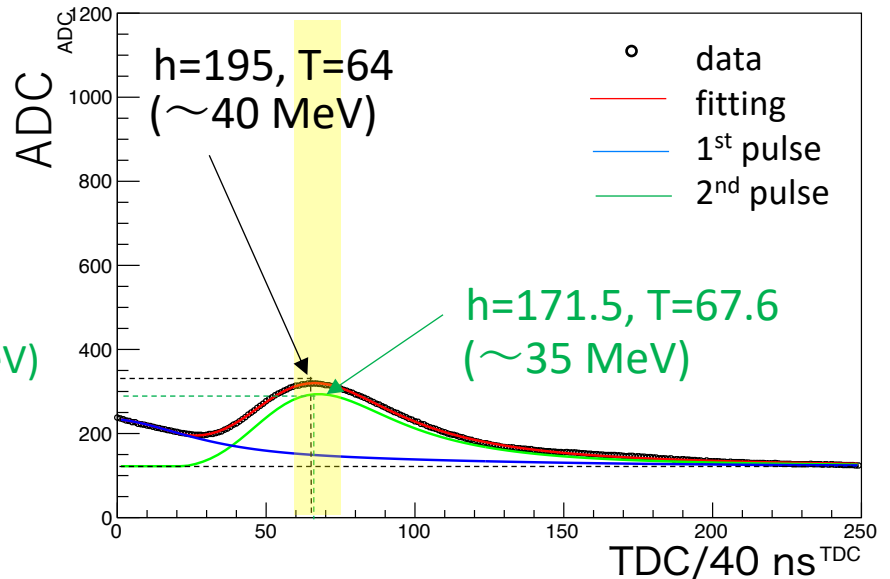
$$\text{Freq}(x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \int_{-\infty}^x \exp(-t^2/2) dt.$$

H. Ito, et al., NIM A 901 (2018) 1-5.

Post-pileup



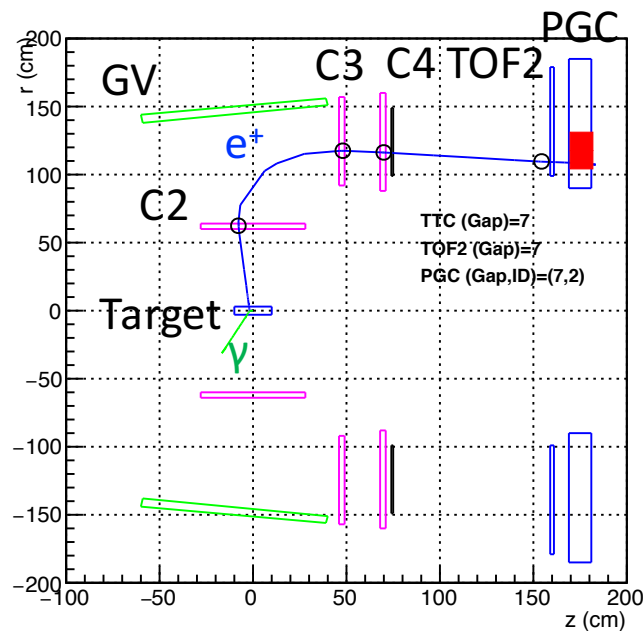
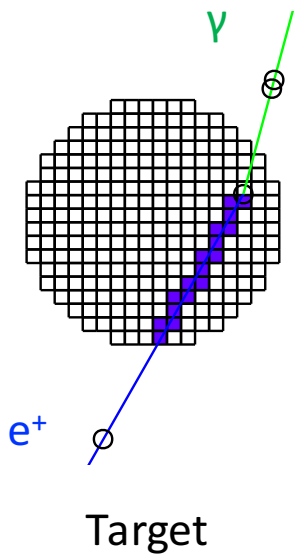
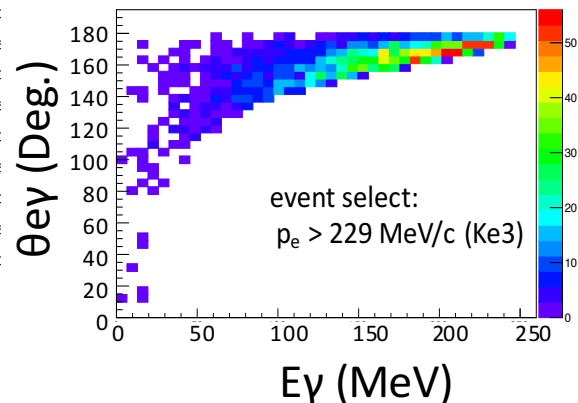
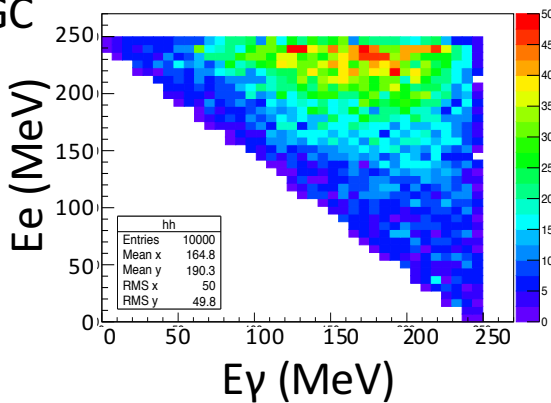
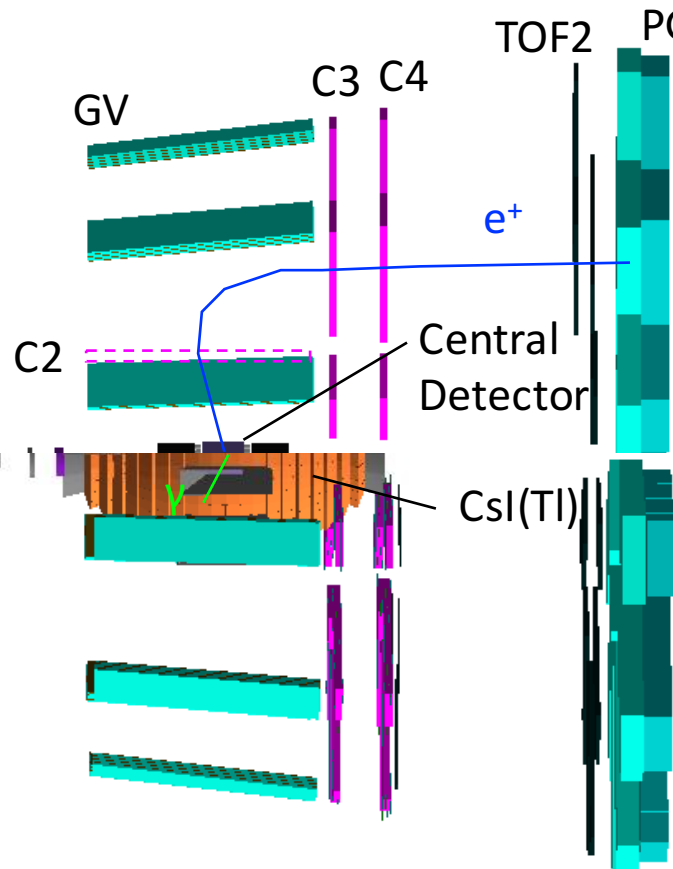
Pre-pileup



2. J-PARC E36 実験

Ke2 γ (SD+)のモンテカルロシミュレーション

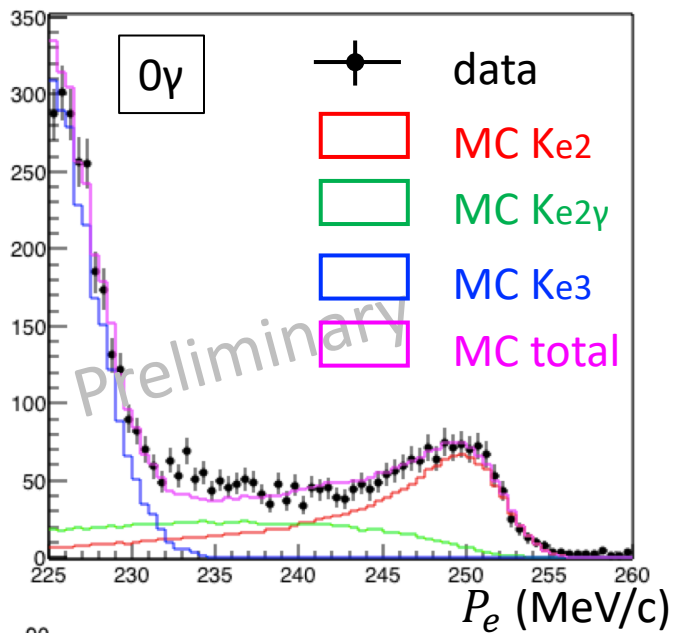
particle energy & momentum vector at birth



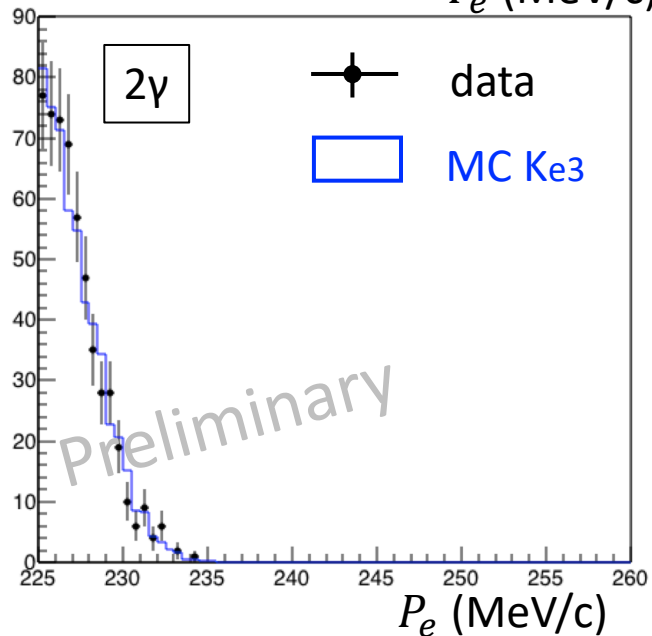
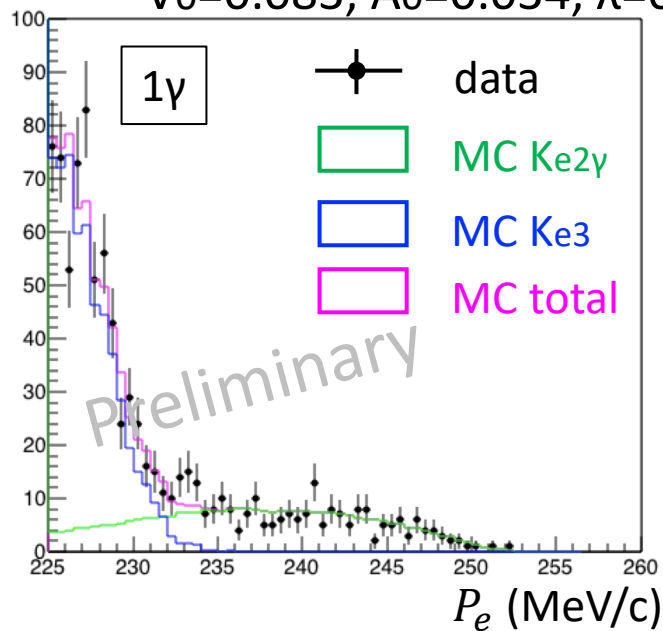
MC Ke2 γ (SD+) model is ChPT(p^6).

$V_0=0.083$, $A_0=0.034$, $\lambda=0.4$

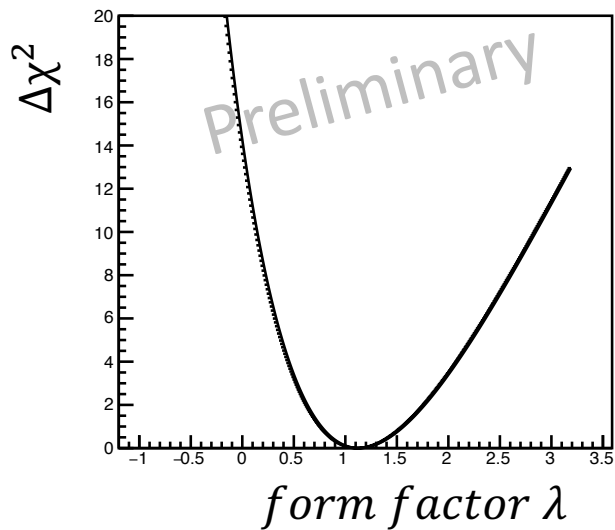
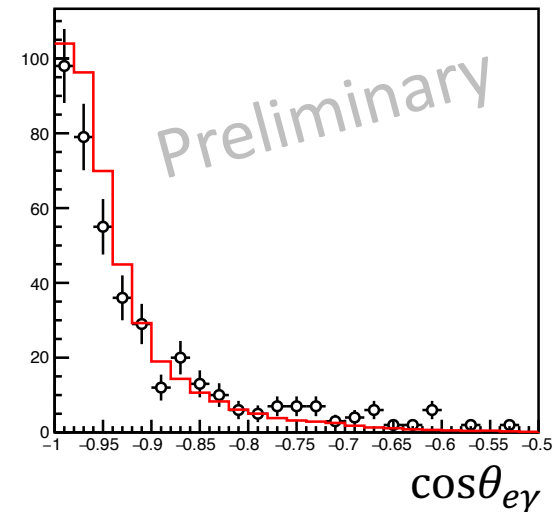
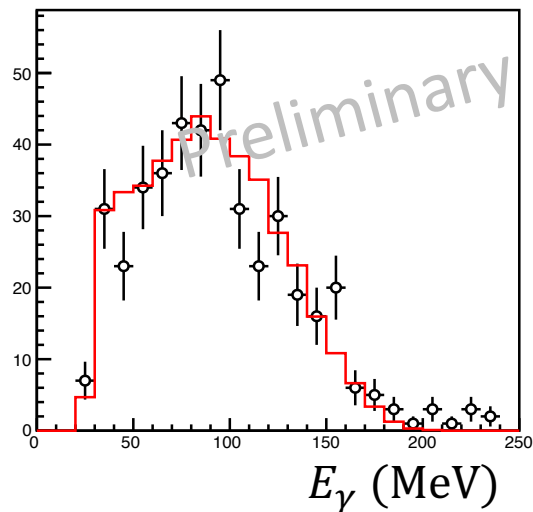
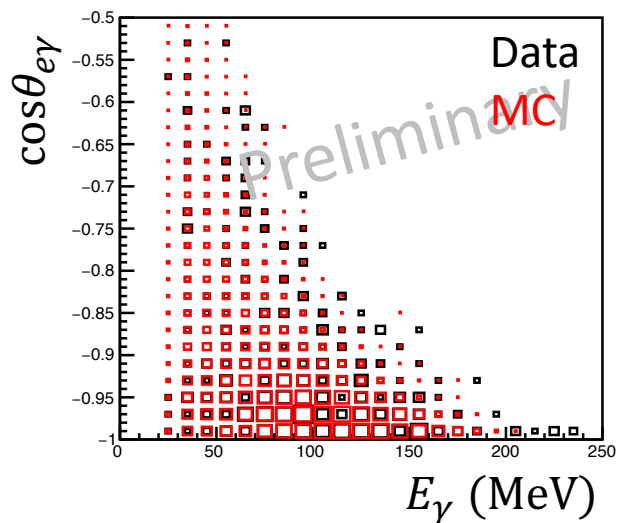
2. J-PARC E36 実験



MC Ke2 γ model is ChPT(p^6).
 $V_0=0.083$, $A_0=0.034$, $\lambda=0.4$



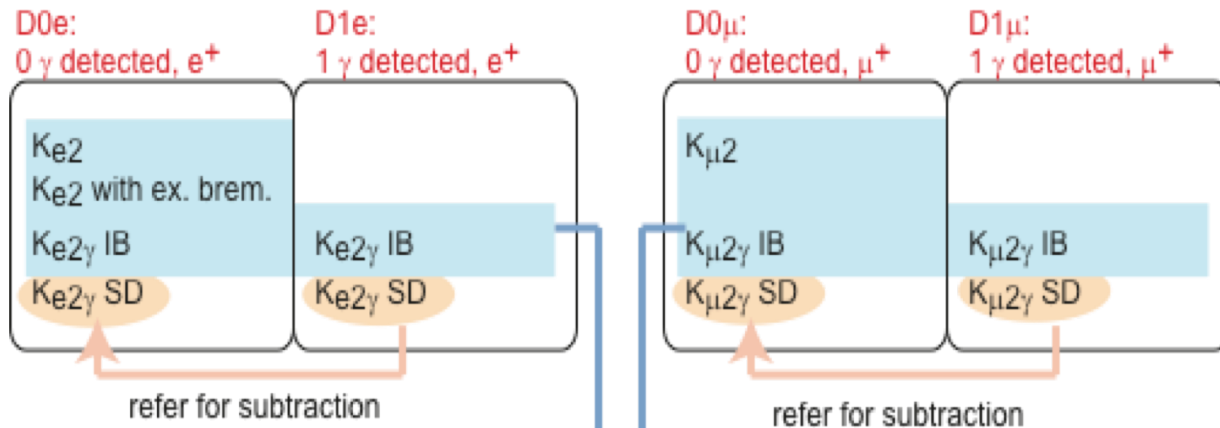
2. J-PARC E36 実験



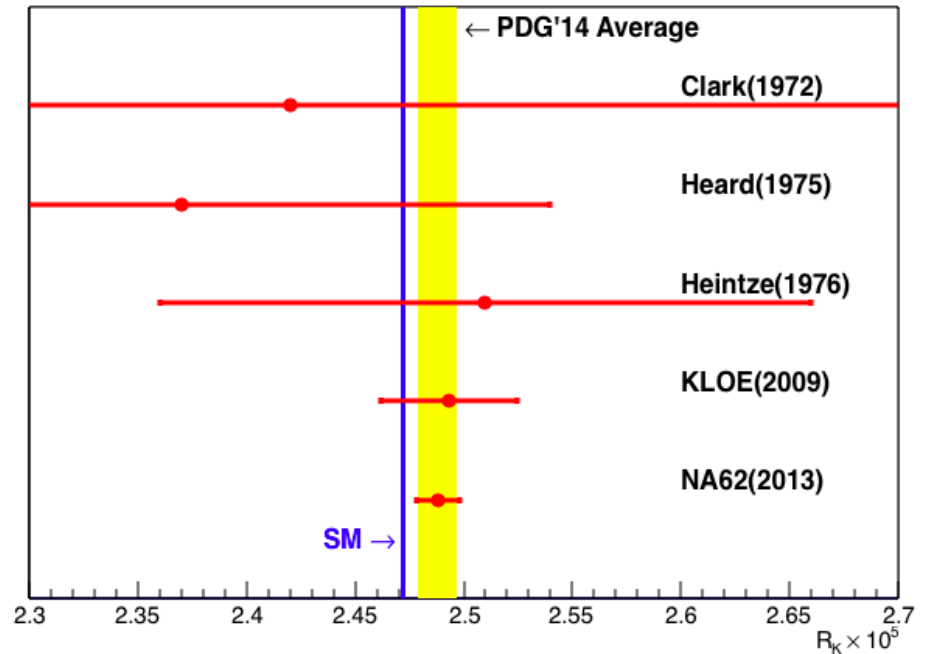
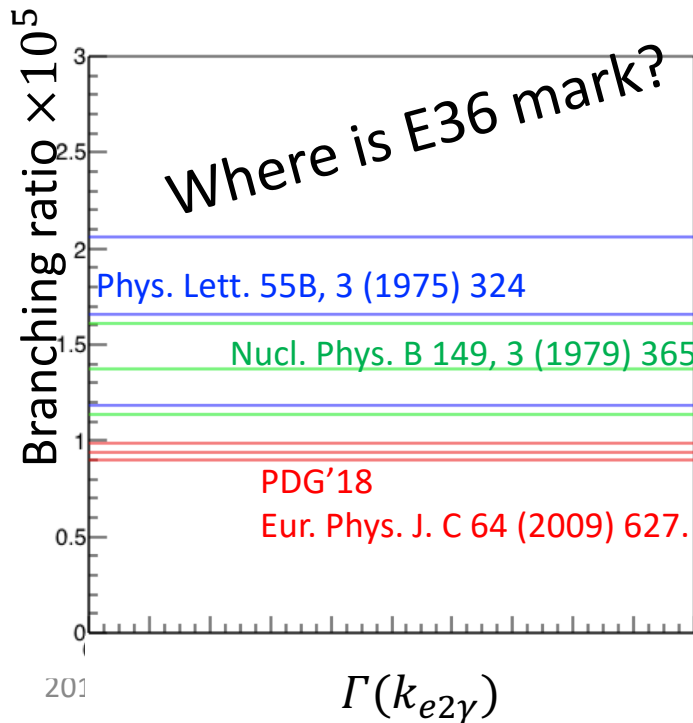
$$\chi^2_{\min}/\text{ndof} = 395/142$$
$$\text{Fitted } \lambda = 1.13^{+0.44}_{-0.37}(\text{stat})$$

2. J-PARC E36 実験

μ -e universality violation search to determine $\Gamma(k_{e2\gamma})$



Use to RK

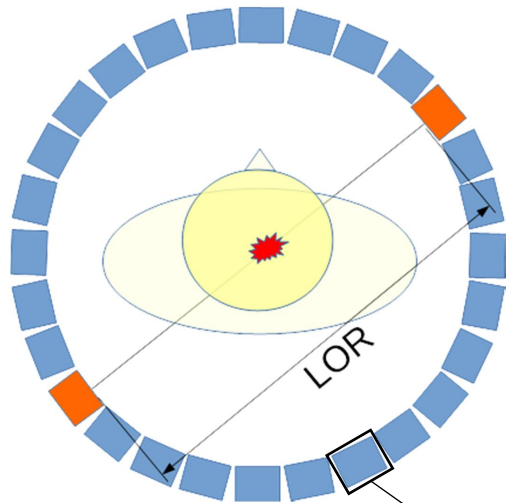


3. 医療用PET開発

3. 医療用PET開発

PET: Positron Emission Tomography
(陽電子放出核断層法)

対生成 2γ を測定して e^+ 放出核の分布を取得
ガン検査、アルツハイマー、
新薬創生、動植物機能解明へ応用



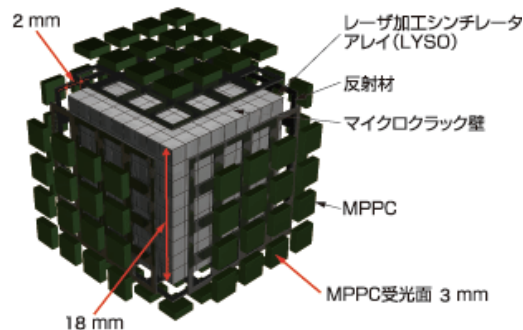
Conventional Trend for Study

- いかに分解能を改善できるか
- 結晶をいかに細かく加工するか

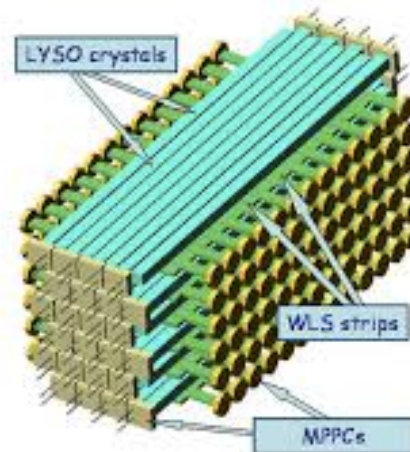
PET module variations



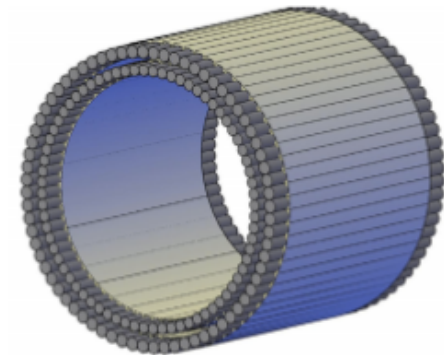
Comital type



Crystal Cube @NIRS

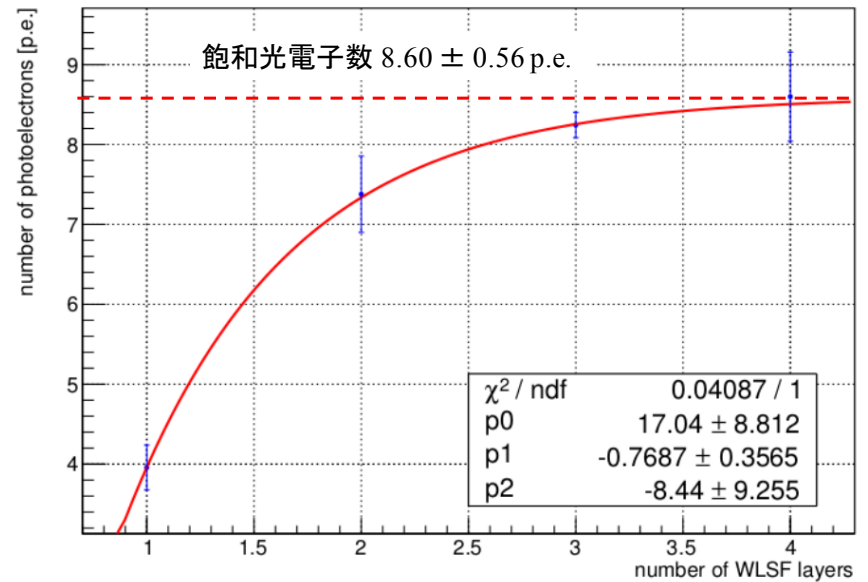
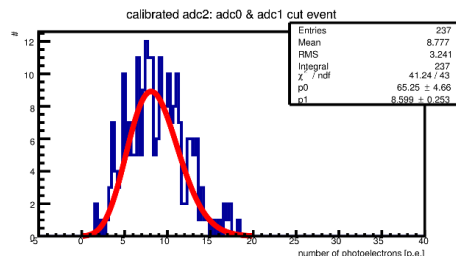
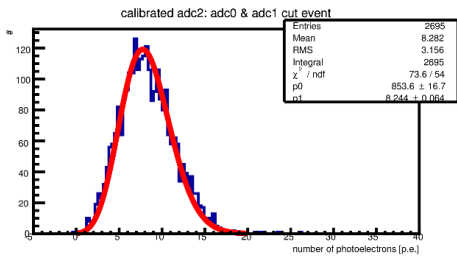
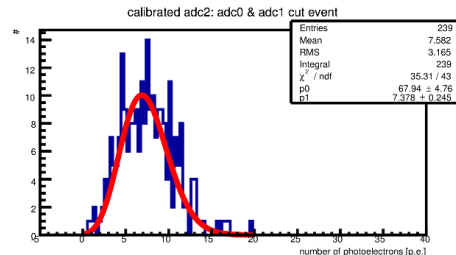
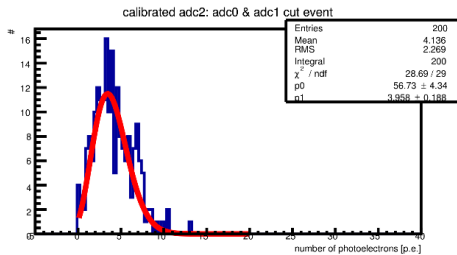
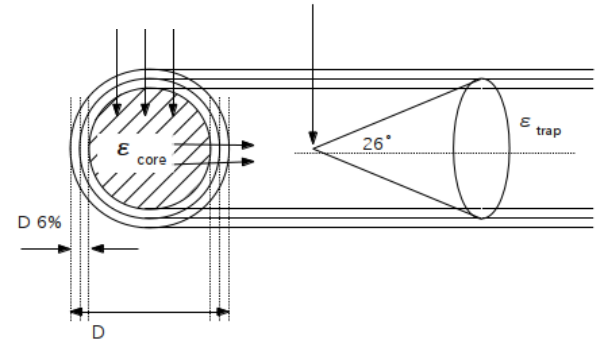
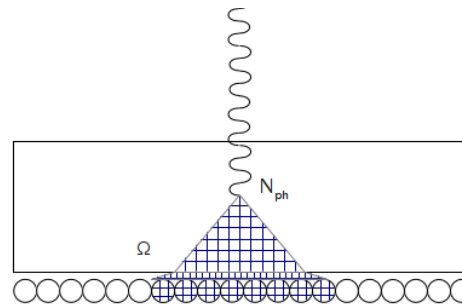
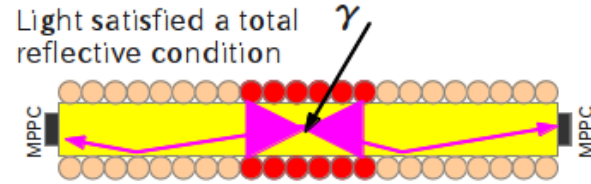
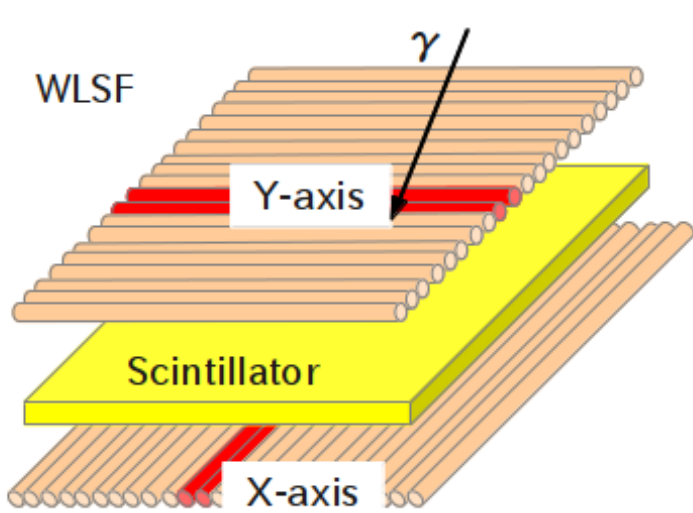


AX-PET @CERN



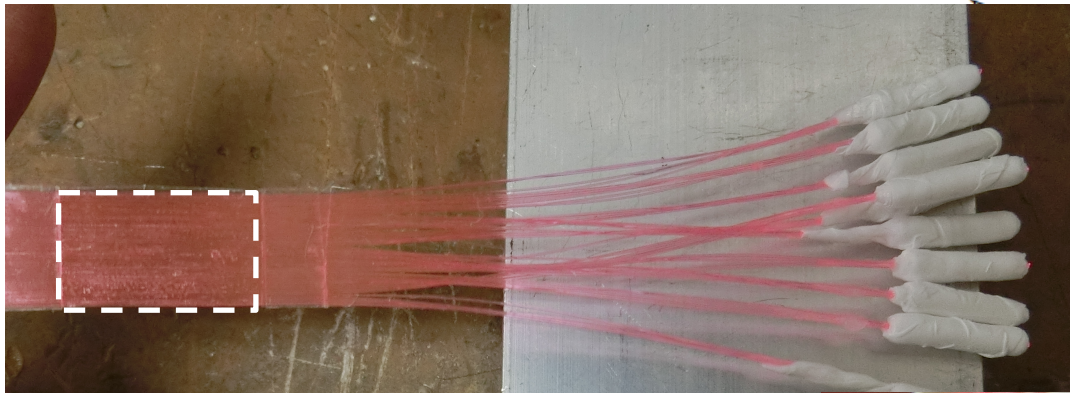
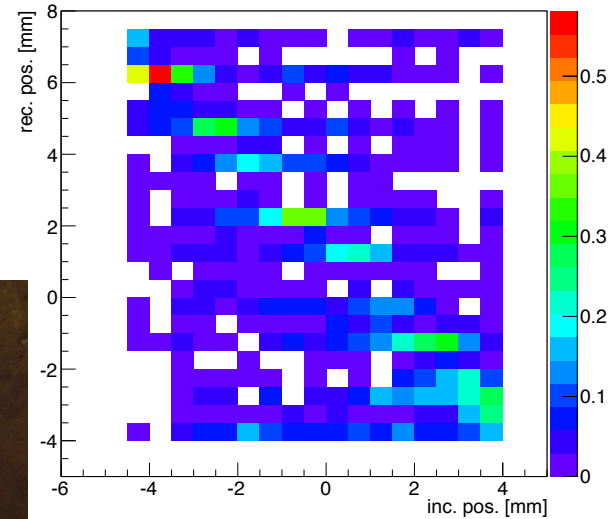
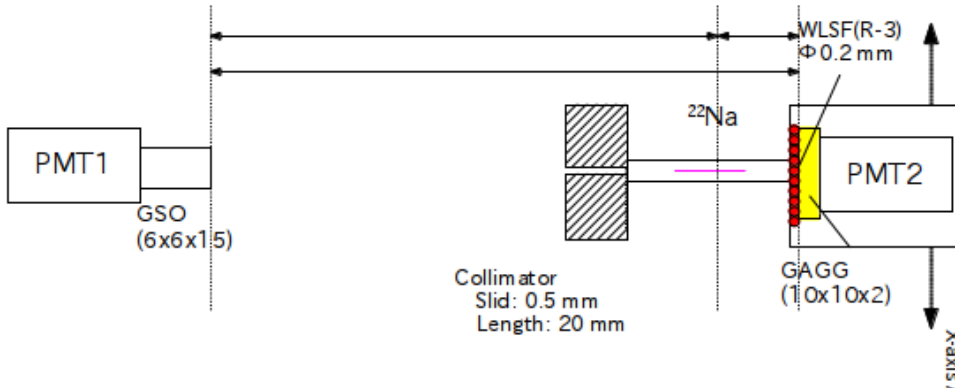
J-PET

3. 医療用PET開発



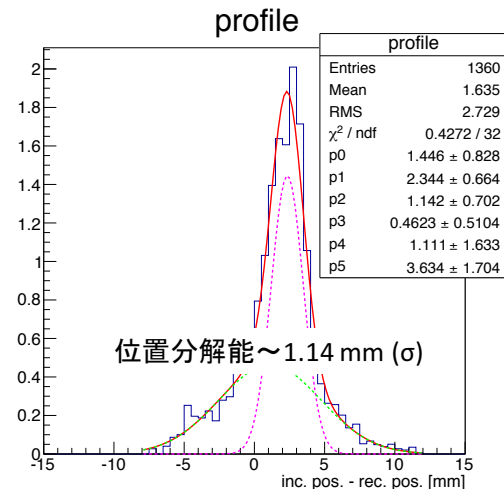
3. 医療用PET開発

setup GAGG (10x10x2mm³)



WLSF (R-3)

effective area ... 10 x 10 mm²
 1 mm width strip (x 10)
 1 strip: 5 fibers



4. 表面 α 分析装置開発

4. 表面 α 分析装置開発

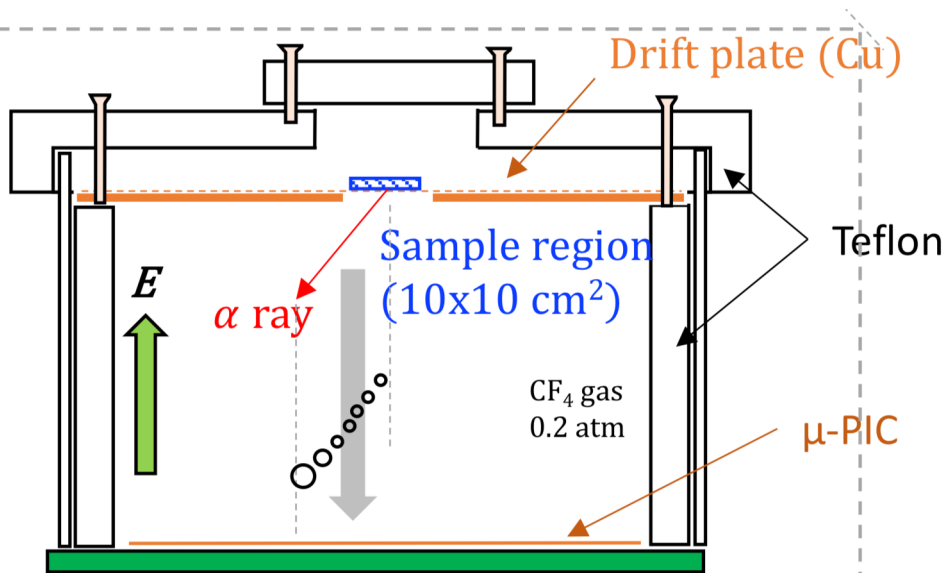
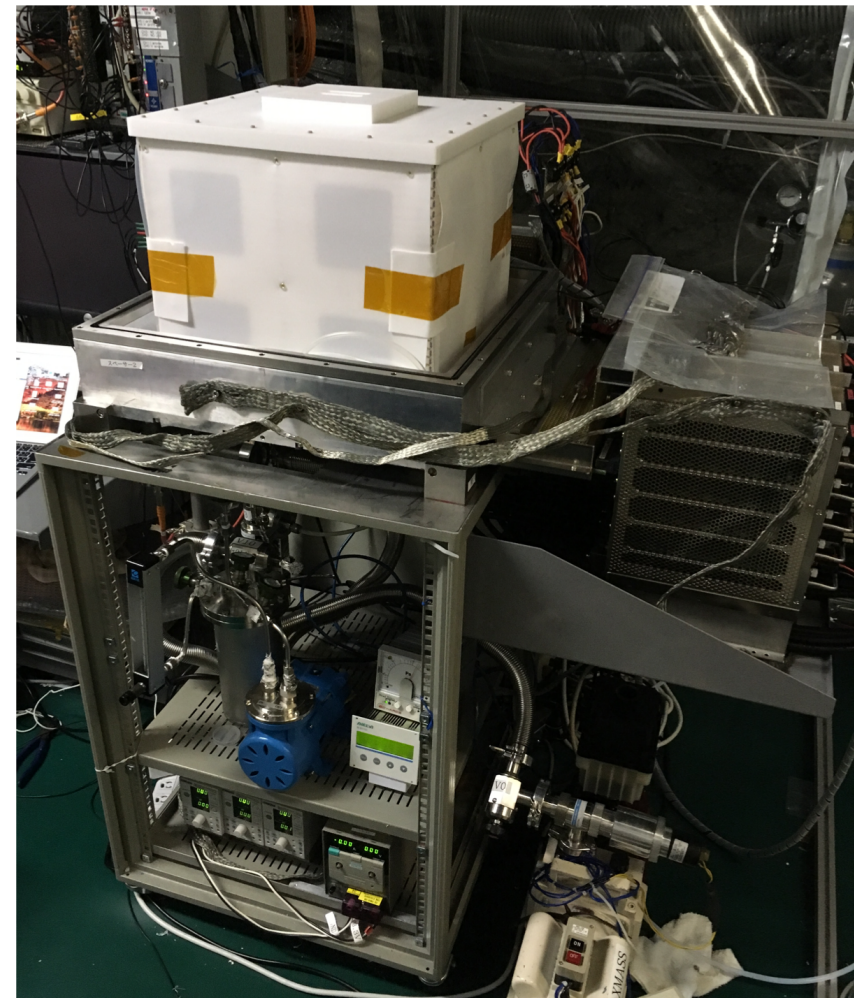
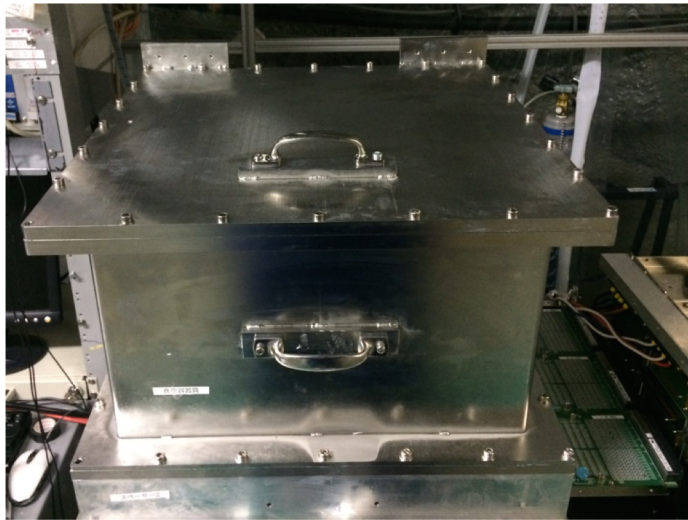
背景

- 神岡地下におけるDark Matter/ $0\nu\beta\beta$ -decay探索研究は大質量・低放射能の検出器によってアプローチしている。
(XMASS, KamLand-Zen, NEWAGE, Candles, ...)
- 検出器部材選定のために、神岡地下実験のグループの枠を超えて放射能分析装置開発を進めている。
(結晶内部不純物、**表面 α 線**、ラドン薄膜透過)
- NEWAGE-0.3a検出器を改造して材質表面から放射される α 線（表面 α 線）を測定し、材質内U/Th放射能濃度を評価する。

4. 表面 α 分析装置開発

2. 表面 α 線分析器

@神岡Lab-A

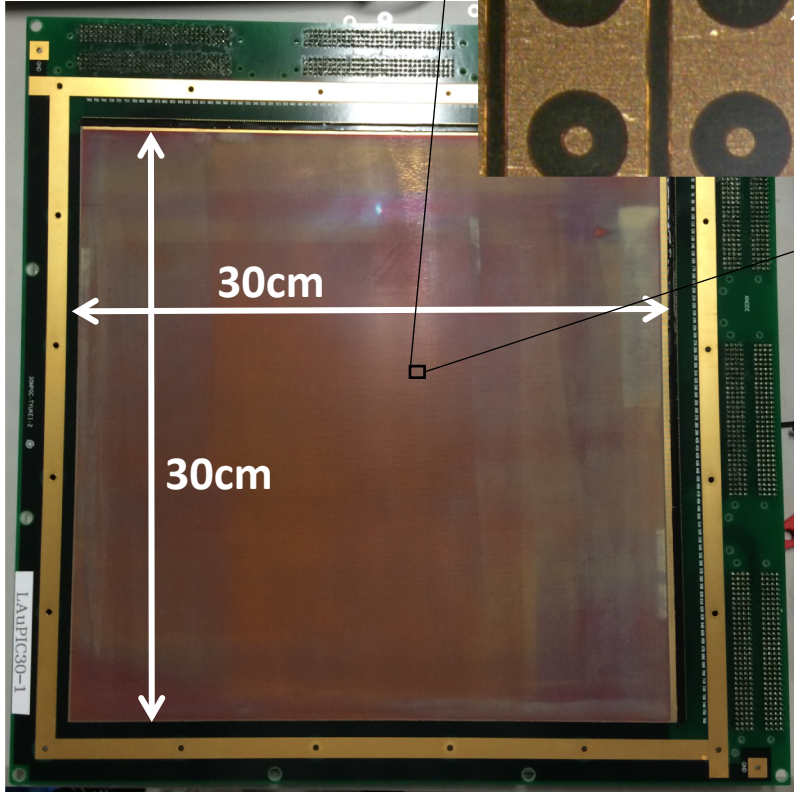
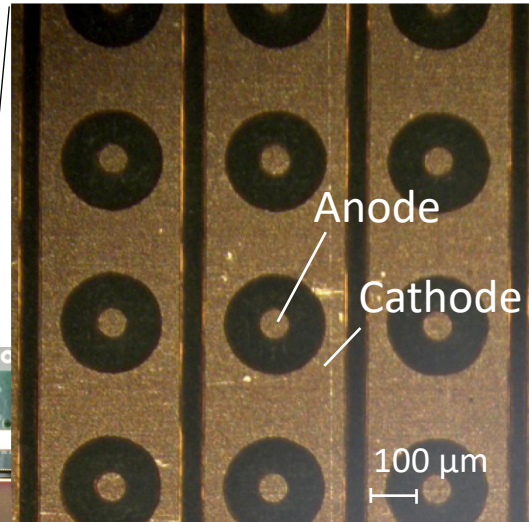
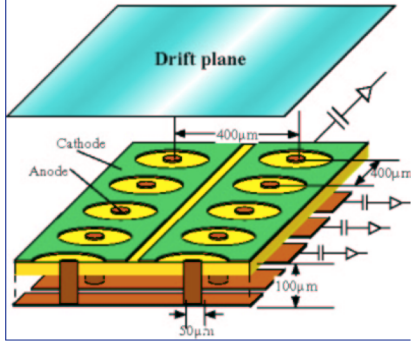


01c10707

4. 表面α分析装置開発

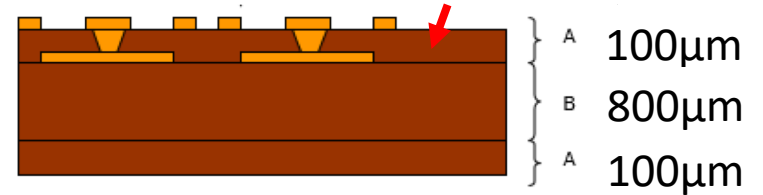
low-alpha μ-PIC

μ-PIC : Micro Pixel Chamber



Replace with low radioactive materials

これがTh・Uを持っている



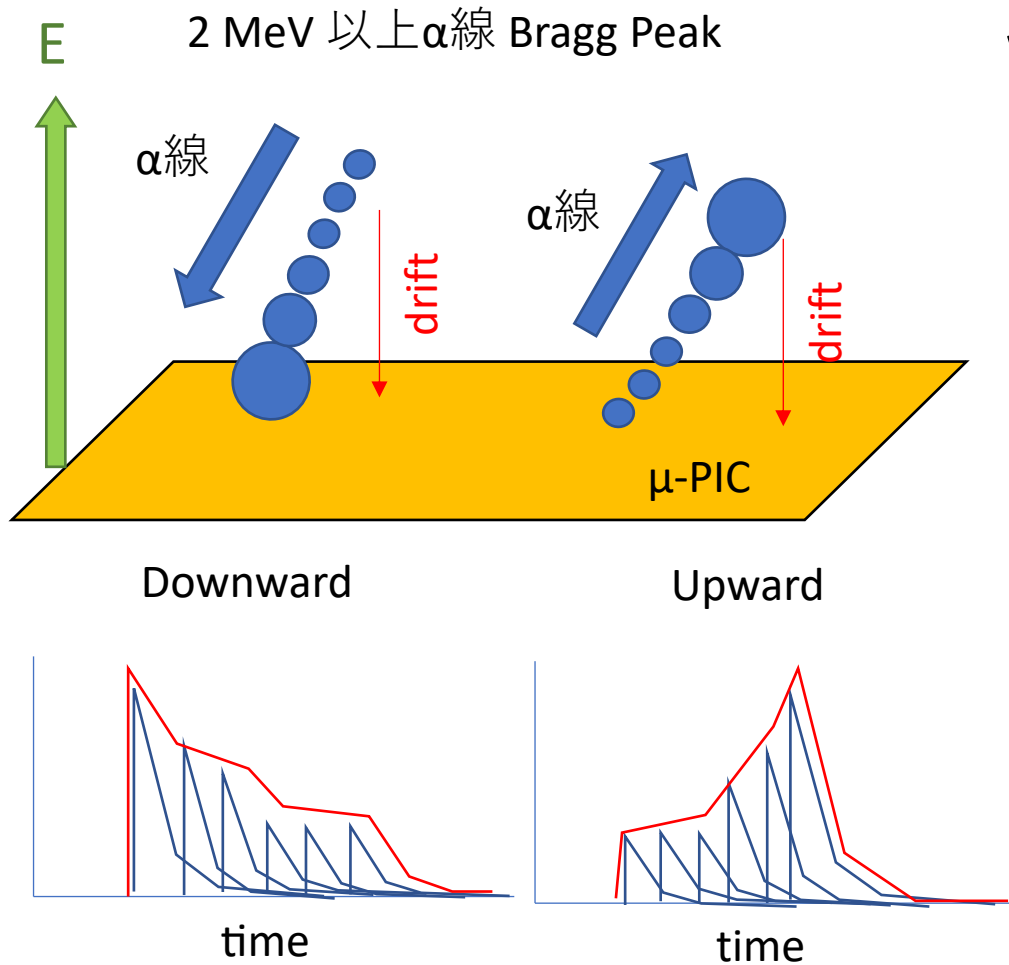
New material



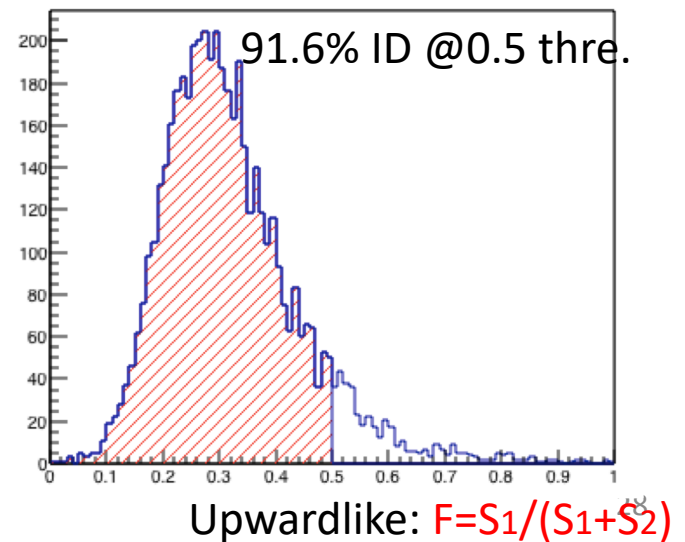
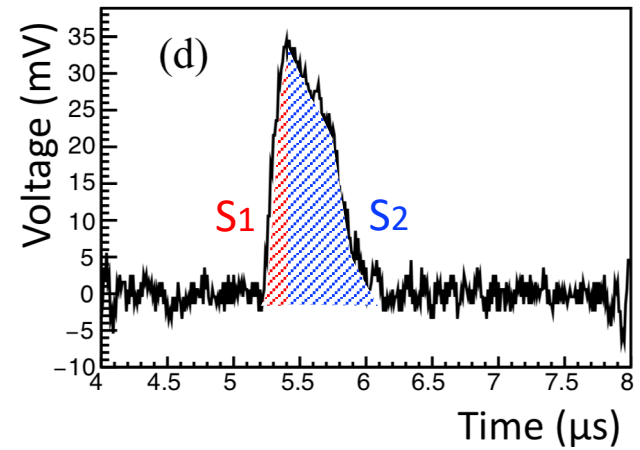
AIP Conf. Proc. 1921, 070001 (2018);

| Sample | ²³⁸ U [ppm] | ²³² Th [ppm] |
|------------------------|-------------------------|-------------------------|
| PI100μm (conventional) | 0.39±0.01 | 1.81±0.04 |
| PI+epoxy (new) | < 2.98×10 ⁻³ | < 6.77×10 ⁻³ |

4. 表面 α 分析装置開発



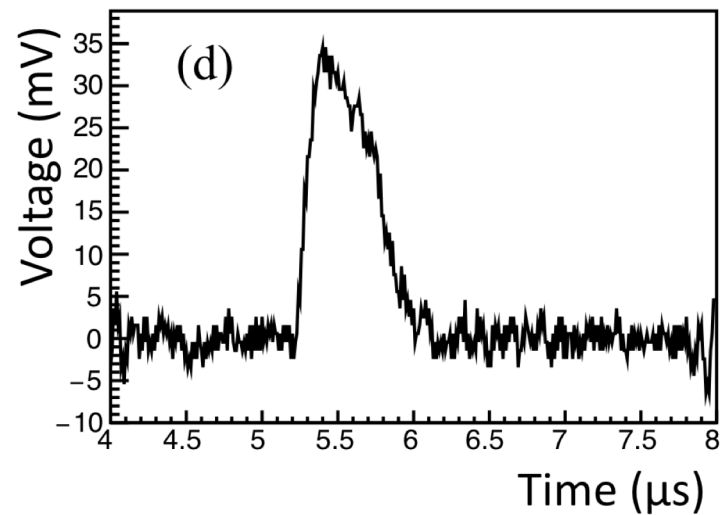
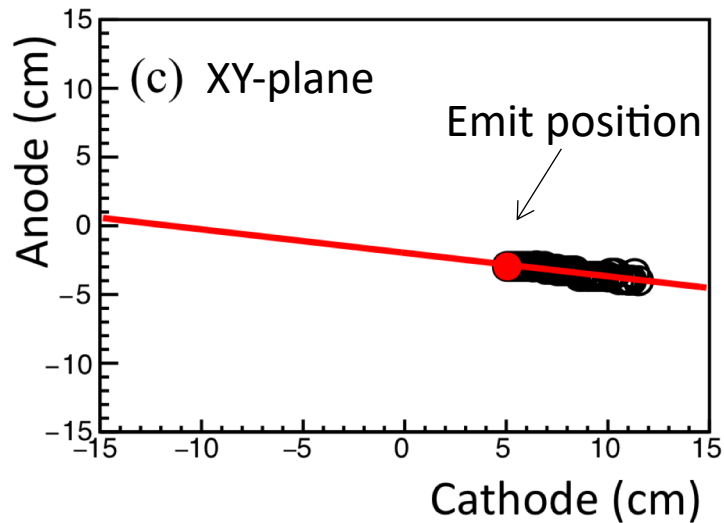
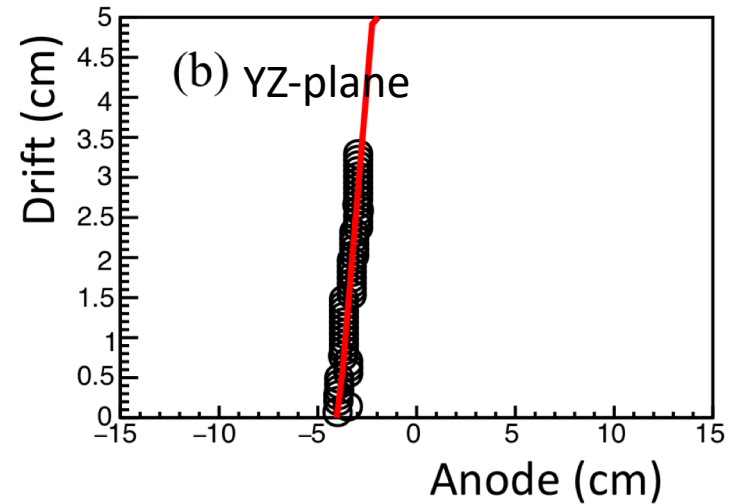
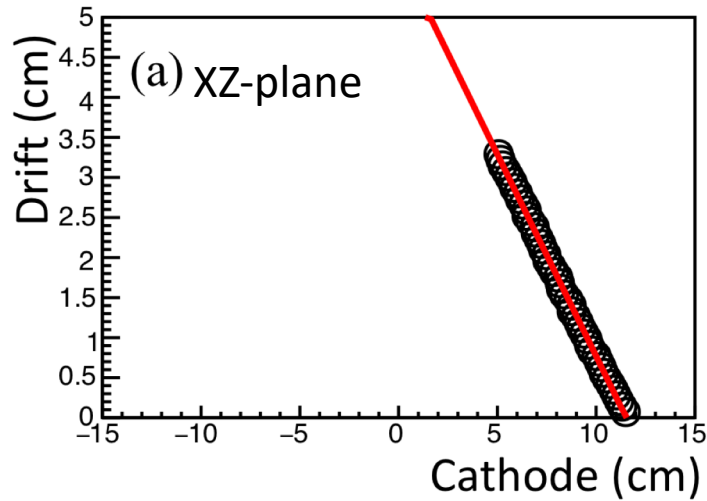
Direction upwardlike with waveform analysis



4. 表面 α 分析装置開発

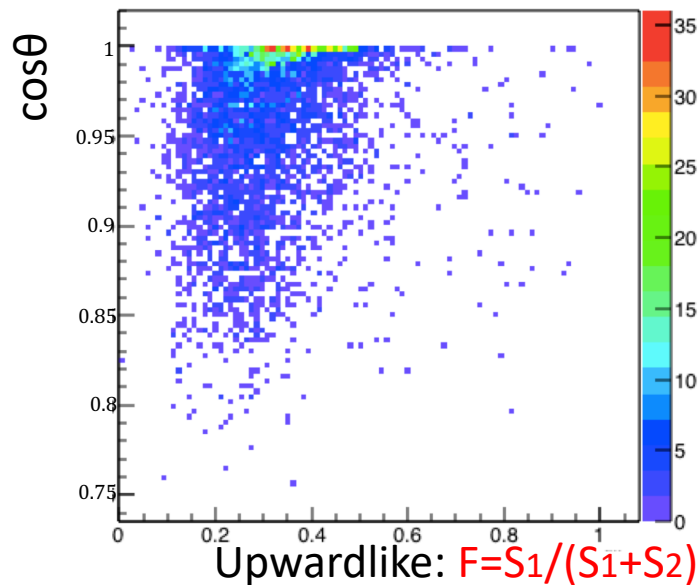
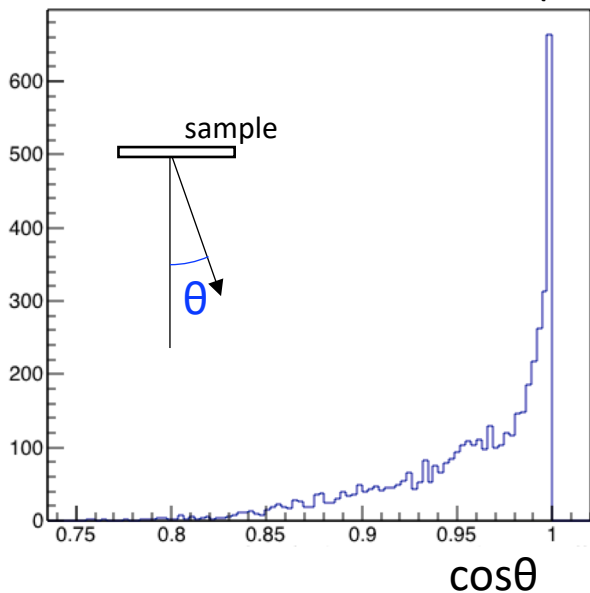
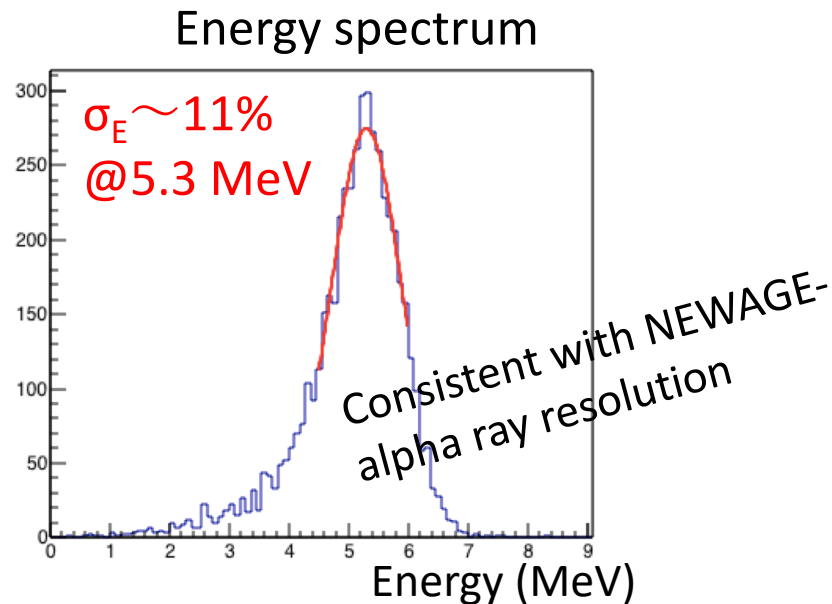
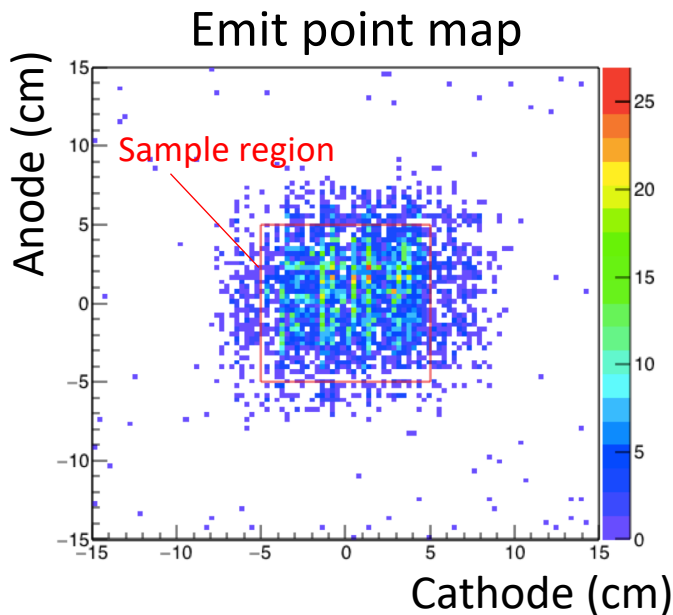
Calibration run

Event reconstruction



4. 表面 α 分析装置開発

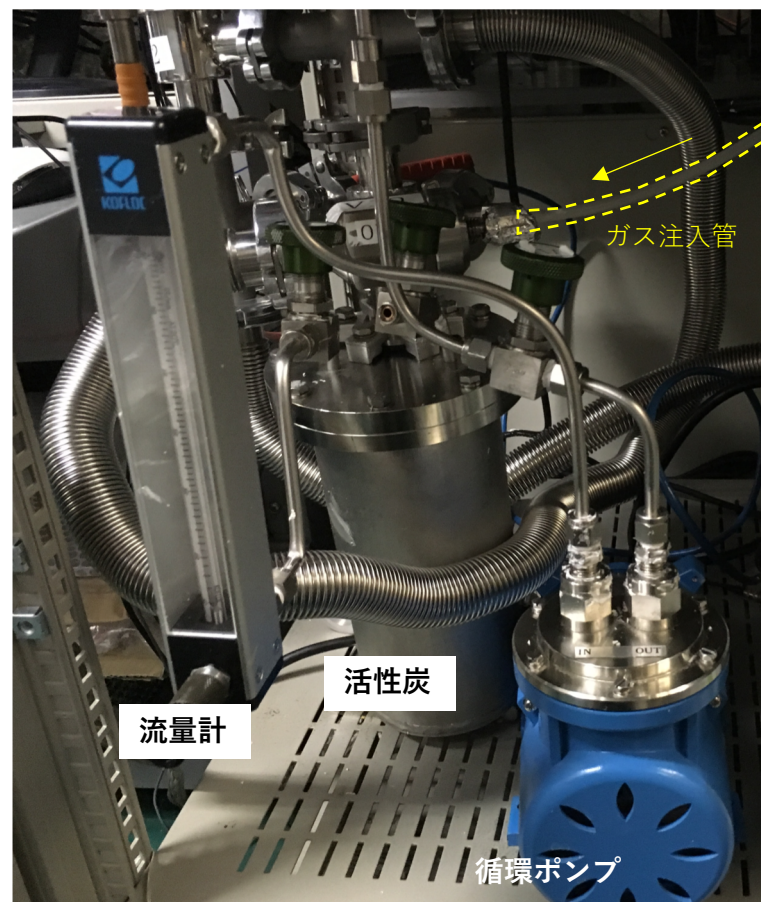
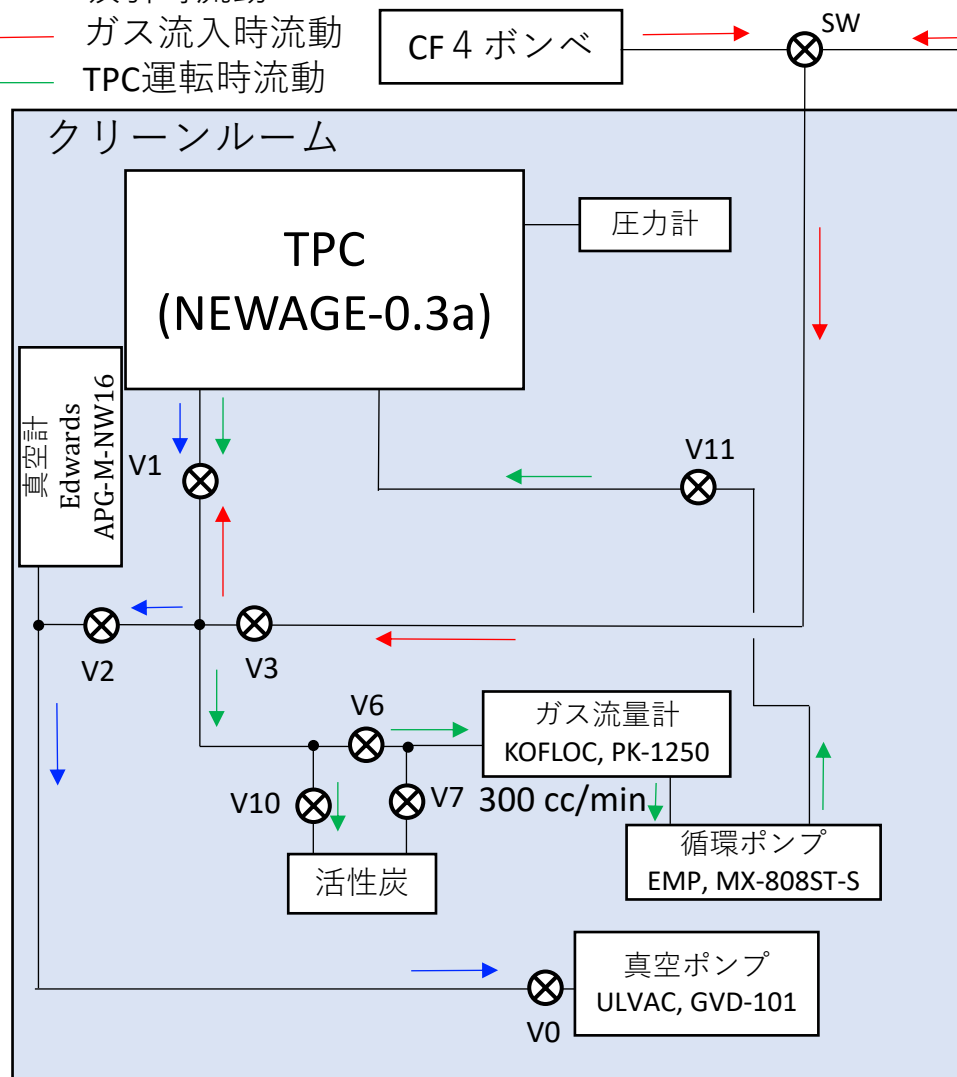
Calibration run



4. 表面 α 分析装置開発

ガス循環システムの改良

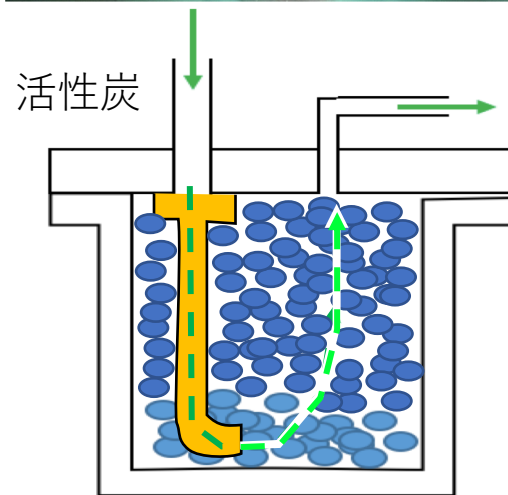
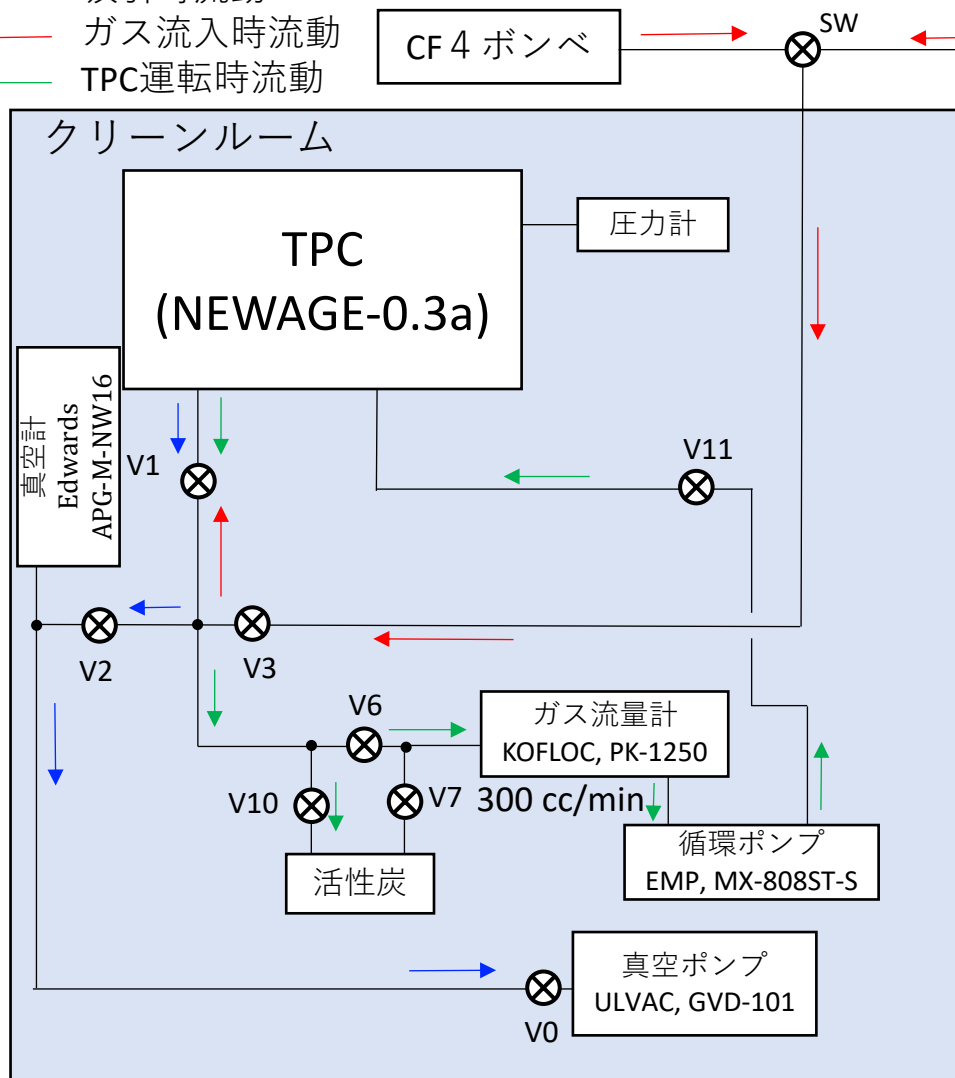
- ← 吸引時流動
- ← ガス流入時流動
- ← TPC運転時流動



4. 表面 α 分析装置開発

ガス循環システムの改良

- ← 吸引時流動
- ← ガス流入時流動
- ← TPC運転時流動



5. データベース開発

5. データベース開発

背景

- 0 $\nu\beta\beta$ 崩壊がみつからない、暗黒物質がみつからない
 - 実験装置を構成する「**部材自身(表面付着物)**」からの放射線が問題
 - 実験装置の低バックグラウンド化が必須
- 各実験が「**それぞれ独自**」に測定、対策、評価を行ってきた
 - 測定結果が外部に公開されることは少なく、**共有されにくい**
 - 特に〇〇はダメだった」という情報は外に出ない
 - 小数名しかいない実験には負担が大きい
 - 測定したいサンプル
 - >>実際に利用できる測定器(Ge,ICP-MS)の数
 - **人材、時間、装置の利用の無駄につながる**
- これらの問題を解消するために**データベースを開発!**



データベースの名称：MARACASに決定

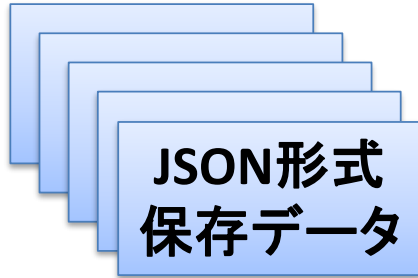
Database of **MA**terial **RA**diopurity for
nu**C**lear and **AS**troparticle physics

5. データベース開発



HTTPサーバー

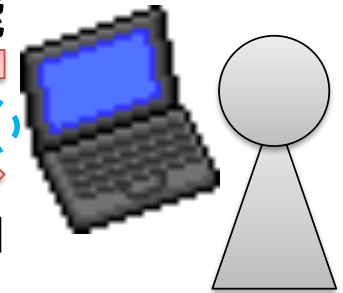
CouchDB



Web デザイン
Persephone(オープンソース)を参考

Upload可能

HTML, JavaScript, JQuery



Download
可能

Upload
Python

Download
Python

JSON形式
保存データ

CSV形式
保存データ

Python

書式の変換/書式のチェック

- これまでのupdate(Python)
- (1) 藤田:
CSV->JSONに変換するようなPythonプログラムを改良
 - (2) 中野:
python2.xとpython3.xの互換性
外部moduleの導入と利用
 - (3) 伊藤:
検索機能追加、データ追加

5. データベース開発

http://133.11.143.254:5984/db_test/design/persephone/index.html (要神岡VPN)

Persephone

Material Assay Database
編集(管理者)

検索ワード入力

検索ボタン

CSVファイル出力

The screenshot shows the Persephone Material Assay Database interface. At the top, there is a search bar with the text 'PTFE OR teflon' and a search button. Below the search bar, there are navigation links for 'KAMLAND, NEWAGE, CANDLES' and a list of materials: 'Material: PMT, BOLT, SUS, Cu'. The search results show 'Total results: 46'. The first result is 'PMT holder spacer' under the 'XMASS' grouping. The result table shows isotopes Th-232 and U-238 with their respective amounts. Below the table, there are buttons for '非表示' (Hide) and '編集(管理者)' (Edit (Admin)).

| Grouping | Name | Isotope | Amount | Isotope | Amount |
|----------|-------------------|---------|--------------|---------|-------------|
| ▼ XMASS | PMT holder spacer | Th-232 | -0.08 mBq/kg | U-238 | 0.34 mBq/kg |

Material: PMT, BOLT, SUS, Cu
検索したワード = PMT
Total results: 46

| Sample | Description | Isotope | Amount |
|--------|-------------------|---------|---------------------|
| | PMT holder spacer | U-238 | 0.34 (0.37) mBq/kg |
| | | Th-232 | -0.08 (0.27) mBq/kg |
| | | Co-60 | -0.17 (0.11) mBq/kg |
| | | K-40 | -5.2 (3.2) mBq/kg |

Institution: ICRR Tokyo Univ.
Technique: HPGe
Date: to #tab-submit
Practitioner: A. Shinozaki Tokyo Univ.
Description: Material: Cu, Unit Mass: 0.99 kg, Measurement time: 1.9 days, Measured Mass: 2.975 kg
Data Reference: A. Shinozaki Tokyo Univ. master thesis(2011)
Data entry: H. Ito ito.hiroshi@crystal.kobe-u.ac.jp on 2017-11-12 spec v3.00

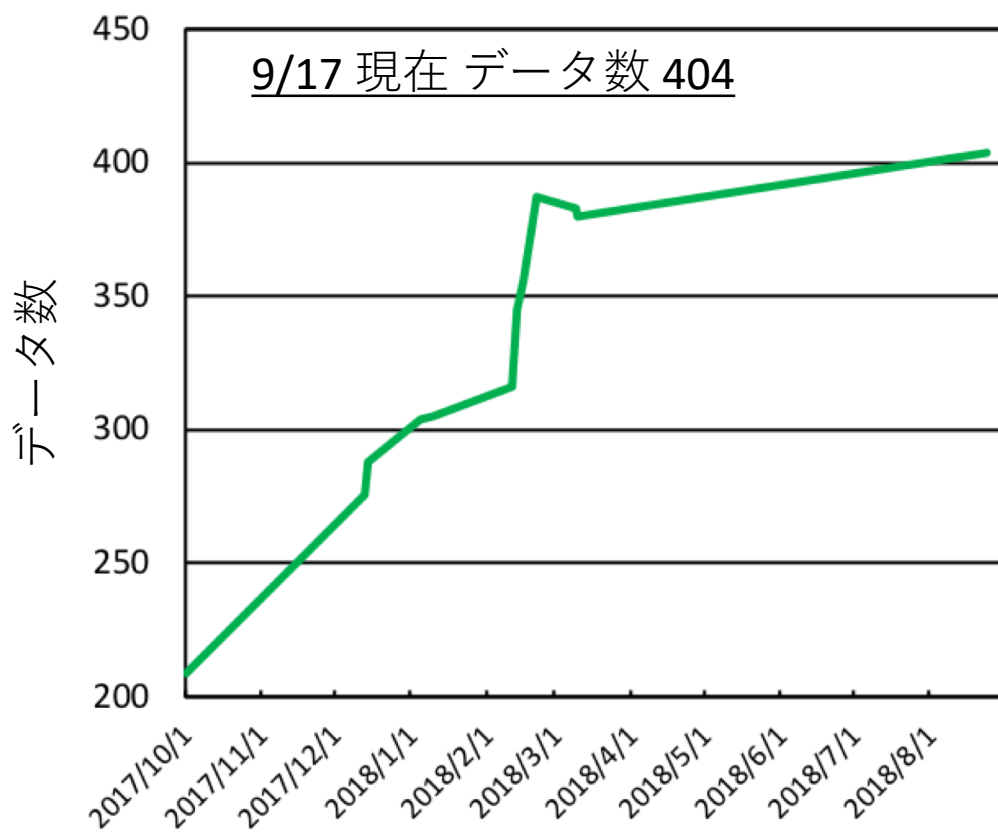
| | | | | | | |
|-----------|---------------------|--------|------------|-------|------------|-----|
| ▶ CANDLES | PMT Glass A(15Inch) | Th-232 | 3.51 Bq/kg | U-238 | 9.32 Bq/kg | ... |
| ▶ KamLAND | PMT glass (SK) | Th | 2.5E-7 g/g | U | 3.5E-7 g/g | ... |

クリックして
結果詳細表示

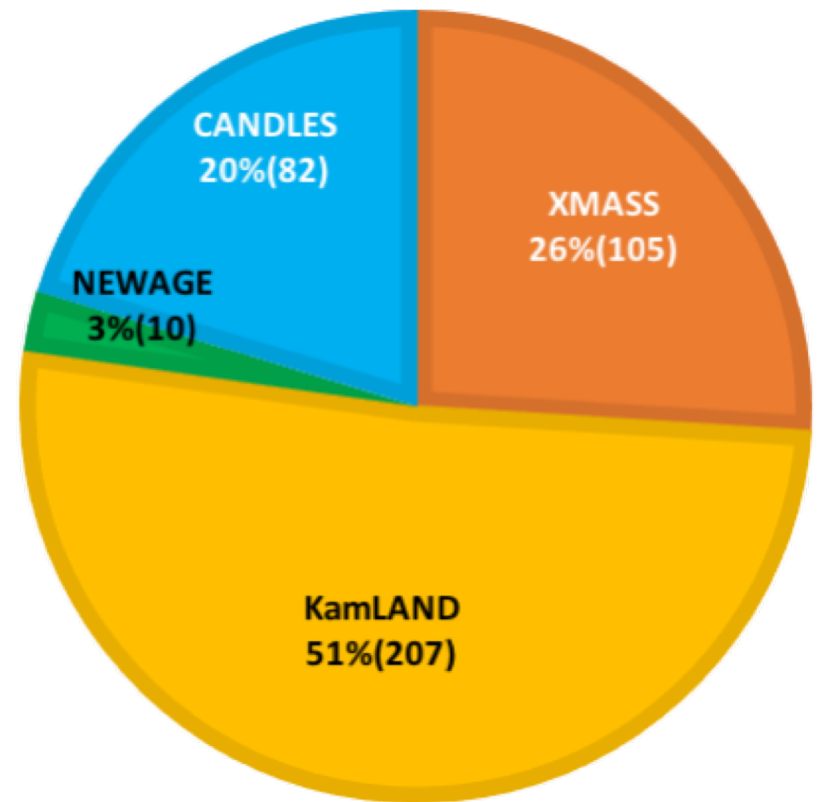
非表示
編集(管理者)

5. データベース開発

データ数推移



公表されたデータの実験グループ内訳



最近入れたデータ ref:

XMASS-I detector: arXiv:1808.03617v1 (2018).

東京理科大での研究計画

1. モチベーション
2. 開発業務
3. 運転業務
4. 物理解析

1. モチベーション

- 素粒子標準模型(SM)を超える新物理の探索
 - 宇宙粒子反粒子問題
 - ニュートリノ質量階層性
 - 暗黒物質

カミオカンデ ... 超新星ニュートリノ初観測
スーパーカミオカンデ... ニュートリノ振動発見
陽子崩壊(e.g., $p \rightarrow e \pi^0$)はみつかってない($\tau > 10^{34}$ yr)
- 今年SK-IVを終え、タンクオープン作業、SK-V, SK-Gdが始まる
 - Gdを最終的に0.2%入れて ν と $\bar{\nu}$ を区別する。
 - 超新星背景ニュートリノの探索
 - CP対称性の検証
- SK後継実験のハイパーカミオカンデ(HK)が計画
 - 超新星ニュートリノ感度向上
 - ニュートリノ振動CP対称性検証
 - ニュートリノ振動の物質効果の精密検証
 - 陽子崩壊 $\tau_{\max} = 10^{35}$ yrへ精度向上

2. 開発業務

HKで使用する光電子増倍管(PMT)の数は約5万本。これらの供給電源と信号読出配線、回路は従来手法では実装が困難。特にPMTと反応率増加のため、1事象あたりのデータ量が膨大になり、**回路による発熱や電波雑音が気になってくる**。HK回路は水中に高電圧を配分するためのハブ回路をいくつか配備する計画が上がっており、主研究としてハブ回路の仕様設計および性能試験を遂行する。

HK回路開発における**試験環境を東京理科大に建設**する。水槽中に防水された回路ユニットを沈め耐圧・発熱・雑音・漏電を試験する。*PMTへの雑音をより抑えた供給回路を設計し試作することを開発の目標とする*。この回路に搭載する機能として数kVの自動印加、過電流安全装置、電波防止などを検討している。

機能とコストを考慮してHK共同研究者会議で回路仕様と製造会社を決定する。5万本の回路を一斉に操作するために、遠隔で回路情報(ID, Alive/Dead, 温度, HV, current など)を**管理・制御するソフトウェアの開発**も進める。

3. 運転業務

- SKシフト：神岡へ出張、またはリモートアクセスして業務を遂行する。
 - SKタンクオープン（注水），SK-V, SK-Gd
- 坑内作業であるため安全第一で行う。

4. 物理解析

太陽ニュートリノ観測(${}^8\text{B}$, hep)におけるSKの閾値を下げる。現在、閾値付近の検出効率がMCと一致していない。検出器応答モデルを改善し、検出効率のエネルギー依存性、カット効率、位置依存性などをデータと一致させる。

SK-V、SK-Gdが開始した直後、SK-IVとデータを比較する必要がある。SKにおける太陽ニュートリノ観測は電子と $\nu_X + e^- \rightarrow \nu_X + e^-$ ($X = e, \mu, \tau$)の弾性散乱を見ている。 ν_X と太陽の角度分布は $\cos \theta = 1$ にピークをもち、エネルギー領域ごとに比較する。また昼と夜で ν_X が観測されるまでに通過する地球の物質量が異なる事象頻度差（昼夜変動）を調べて、ニュートリノ振動の物質効果を検証する。

SK-Gdでは0.02%から徐々に $\text{Gd}_2(\text{SO}_4)_3$ を充填し、0.2%まで充填する予定である。SKにおけるGd中性子捕獲事象同定アルゴリズム開発を主導的に進め、超新星背景ニュートリノを探索する。特に、ニューラルネットワークを基にした $\nu - \bar{\nu}$ likelihoodを実装し分離能力を向上させる。SK-Gdが始動したら実データを使ってアルゴリズムの性能評価を実施する。また、システムを汎用化させて大気ニュートリノ観測、陽子崩壊探索の解析に応用発展させる。