

神岡地下における 液体シンチレータを用いた 環境中性子測定

第2回新学術「地下宇宙」若手研究会

2021/11/26(金)

早稲田大学 岩澤広大

イントロダクション

- 環境中性子測定モチベーション

暗黒物質探索などの稀事象探索実験において環境中性子は区別できない主要な背景事象とされ、その理解が重要視されてきた。

- 環境中性子**

宇宙線起因 (二次宇宙線やミュオンによる核破砕など)
 岩盤起因 (自発核破砕、 (α, n) 反応)

- 地下環境**

例えば神岡地下環境(地下1000m)では、宇宙線ミュオンフラックスが地上の $\frac{1}{10^5}$ と少なく、岩盤起因の環境中性子が支配的となる。

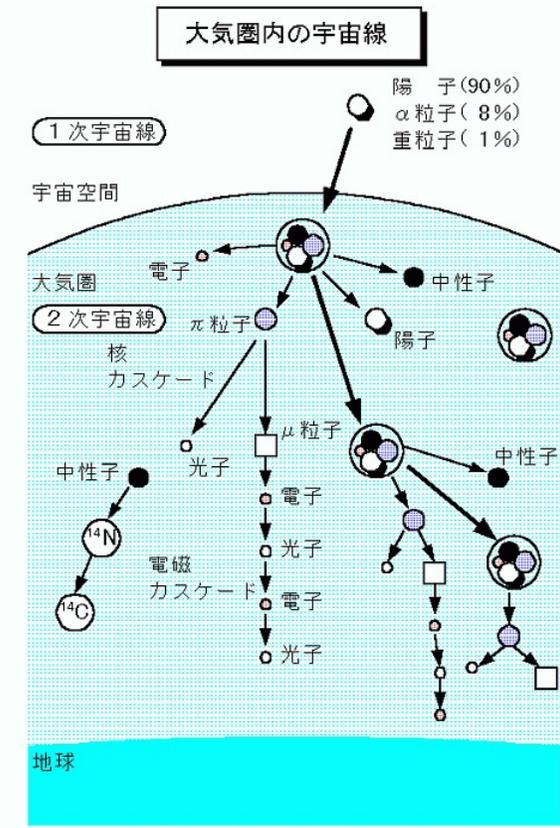
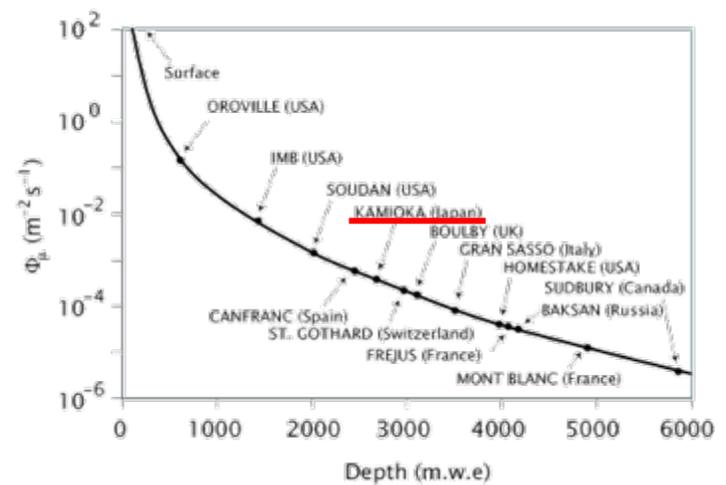


図5 二次宇宙線の発生

[出典] 藤高 和信:宇宙放射線環境のゆくえ、放射線科学、40(4)、125(1997)

J.M.Carmona, Neutron background at the Canfranc underground laboratory and its contribution to the IGEX-DM dark matter experiment, Astroparticle Physics, Volume21, Issue5, 2004

イントロダクション

- ・ **環境中性子測定**：本研究は中性子測定コンソーシアムの一環で行われている

・ 中性子測定コンソーシアム (チソコ)

7つの実験グループで構成

- ・ 大阪大学：CANDLES
- ・ 神戸大学：NEWAGE
- ・ 東京大学：XMASS
- ・ 東北大学：KamLAND
- ・ 名古屋大学：NEWSdm
- ・ 早稲田大学：ANKOK
- ・ 横浜国立大学：SK-Gd

中性子のフラックス，エネルギー分布，時間依存、場所依存、飛来方向等の詳細な理解が暗黒物質直接探索感度向上のためには重要となる

5つの検出器

- ・ 液体シンチレータ
- ・ BF^3 比例計数管
- ・ ^3He 比例計数管
- ・ 原子核乾板
- ・ ^6Li ドーププラスチックシンチレータ

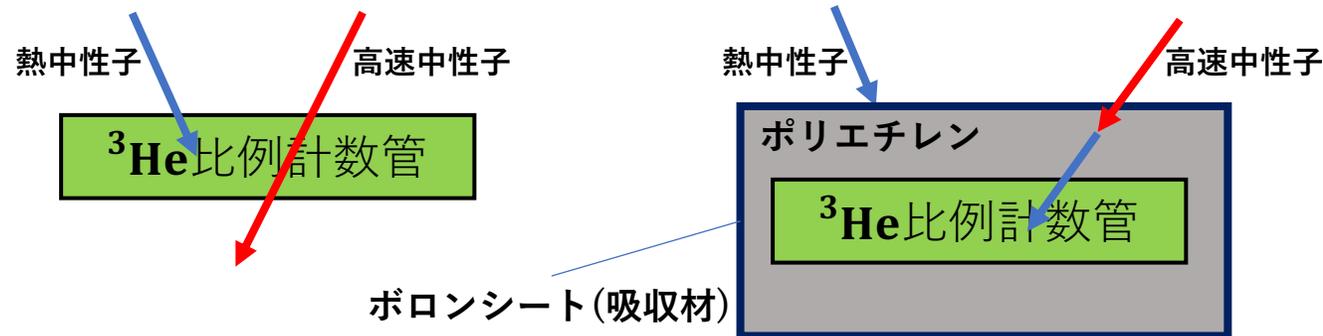
「実験グループを跨ぎ測定技術・機材などを共有し、測定手法を確立したうえで、多地点・長期間の測定を行いその結果を公表・共有することを目的としている」

本研究のモチベーション

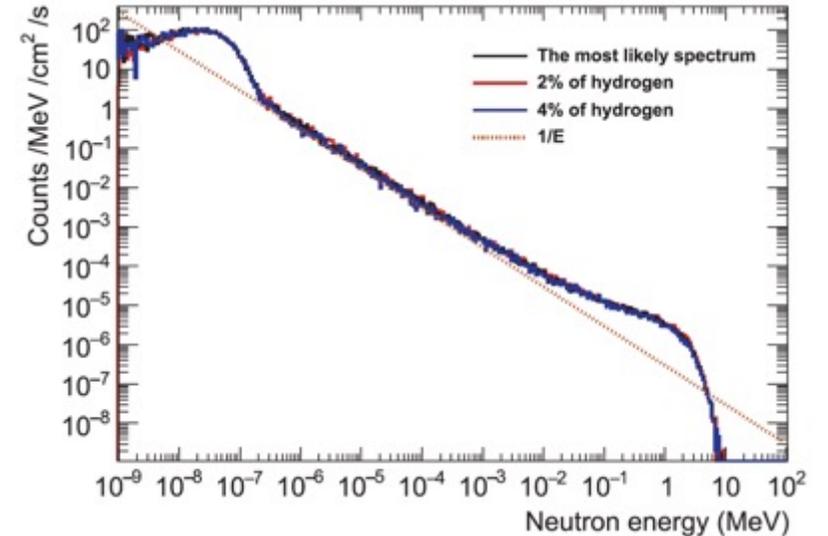
環境中性子測定の実況

地下における環境中性子フラックスはよく理解されているがスペクトラム測定が行われた実験は少ない。

- ^3He 比例計数管の測定とシミュレーションから得られる環境中性子スペクトラム¹

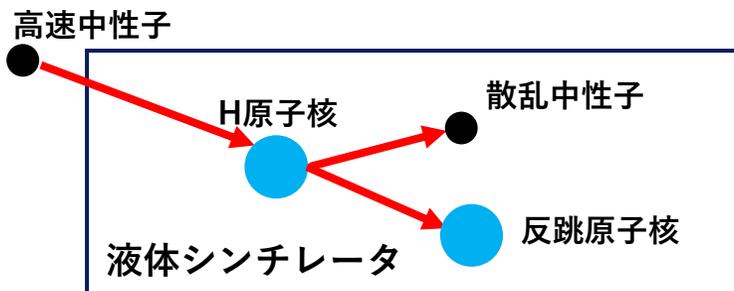


上記2セットアップの検出レート比とGeant4シミュレーションにより環境中性子スペクトラムの予想に成功した。



- 本研究のモチベーション

測定が困難であるMeV領域に直接感度をもつ液体シンチレータ検出器を用いた環境中性子のスペクトラム測定

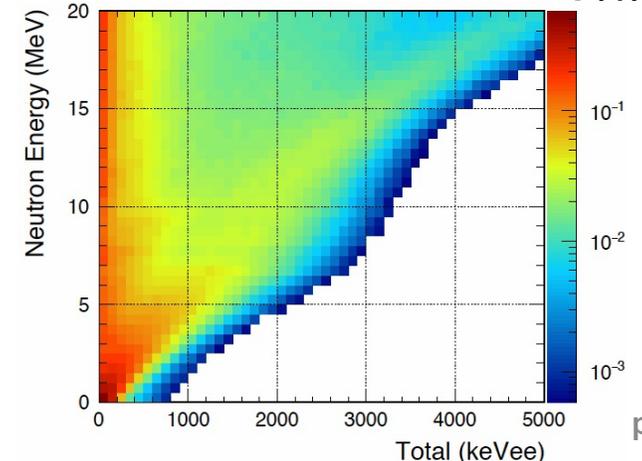


ϕ : 中性子スペクトラム TOF Runとシミュレーションによる応答関数²

$$N(E_R) = \int R(E_R, E)\phi(E)dE$$

N: 反跳スペクトラム R: 液シンの応答関数

実験値より得られるN, Rの2値を用いて中性子スペクトラムを得る



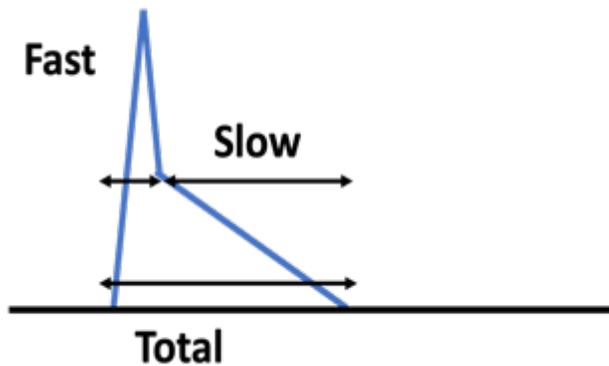
1) K. Mizukoshi et al., PTEP(2018) 123C01

2) 鈴木優飛、早稲田大学修士論文 (2016)

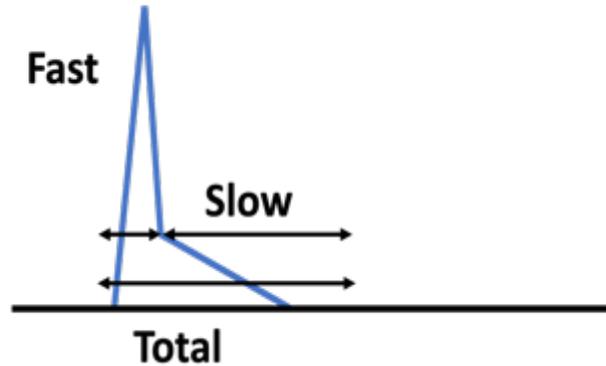
環境中性子測定と背景事象

・ PSD(波形弁別法)による原子核反跳事象と電子反跳事象の分離

原子核反跳事象(α 線や中性子)

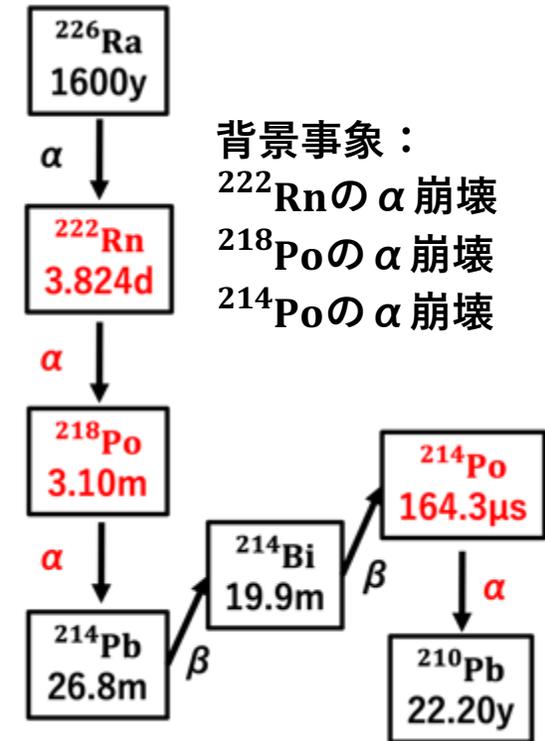
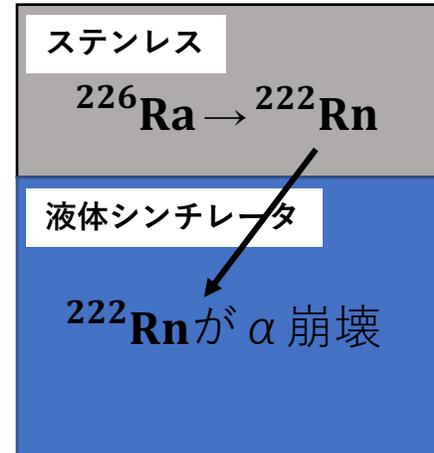


電子反跳事象(γ 線や β 線)



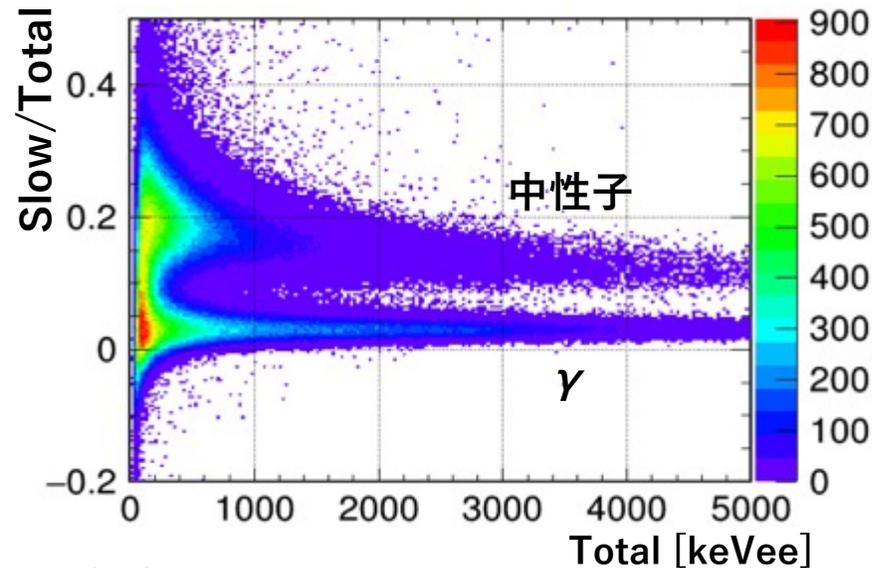
→ Slow/Totalの値で分離が可能

・ 本研究における α 線背景事象

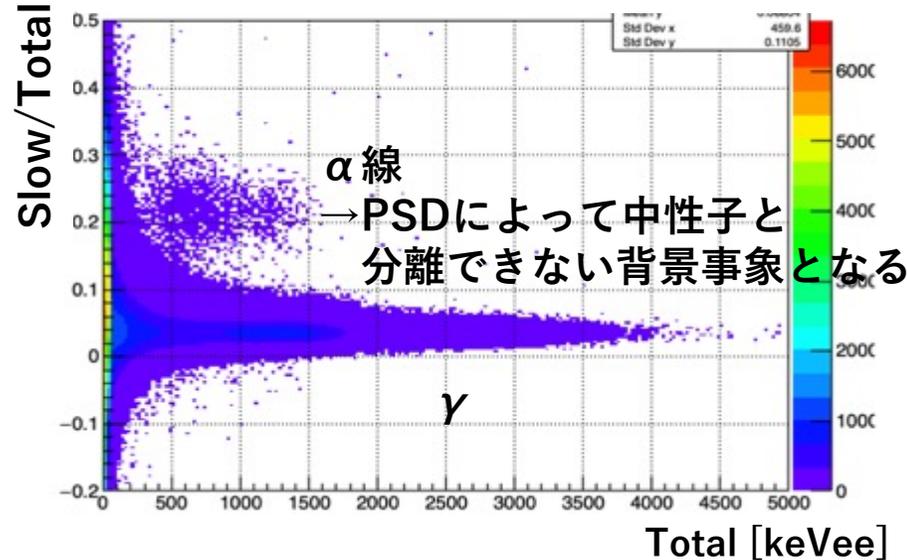


背景事象：
 ^{222}Rn の α 崩壊
 ^{218}Po の α 崩壊
 ^{214}Po の α 崩壊

^{252}Cf 使用データにおけるPSD分布



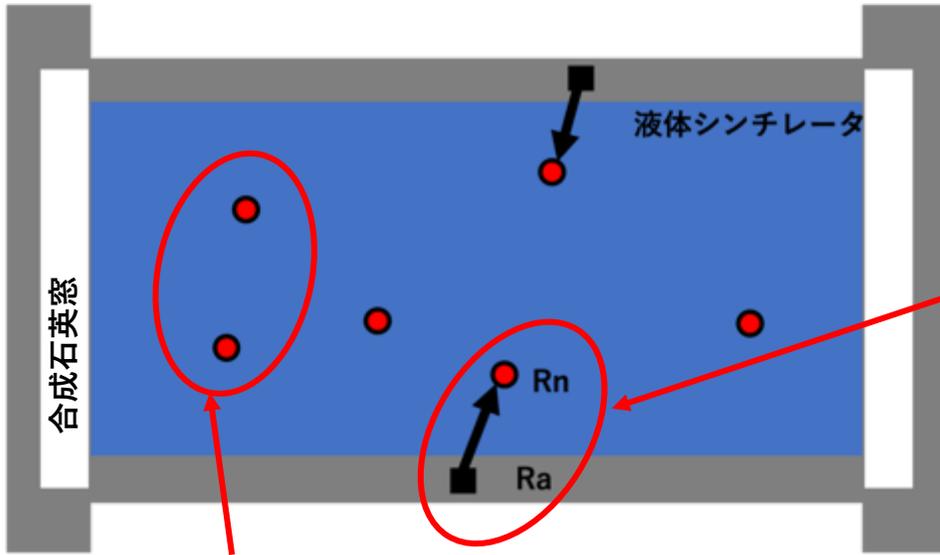
バックグラウンドRunにおけるPSD分布



- ・ 放射線不純物の除去
- ・ ^{222}Rn の染み出し低減化
- 極低バックグラウンド検出器の作成

現行検出器における低バックグラウンド化

・ ^{222}Rn の染み出し低減化



・ 電解研磨 (先行研究)

容器内部の表面積を減らすことで
部材内部からの ^{222}Rn の染み出しを低減



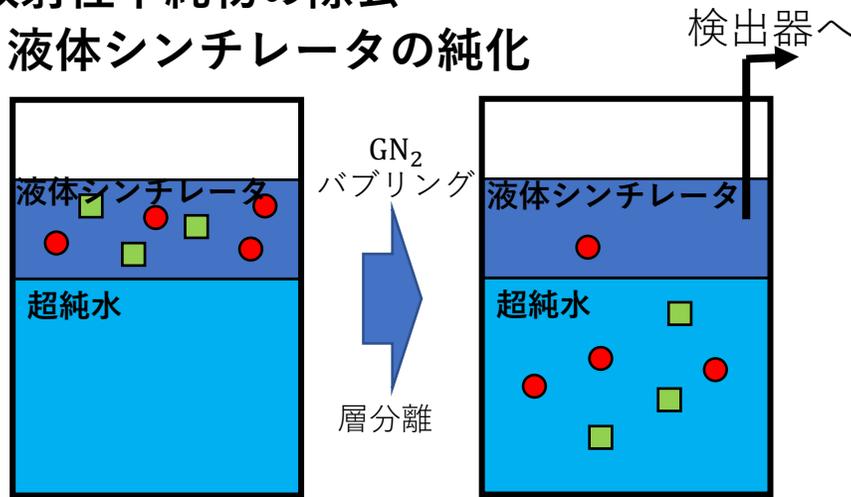
・ 電解複合研磨(EP) (現行検出器)

電気化学的な研磨と研磨剤による研磨
神岡Rn検出器にも用いられている技術

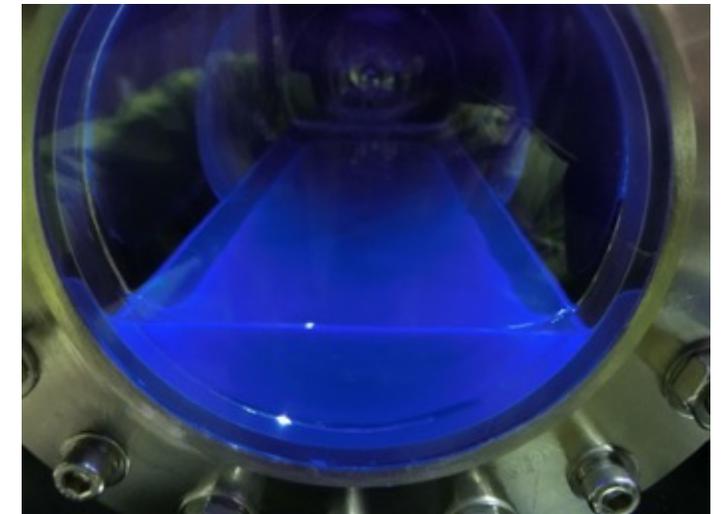
J. of Phys. Conf. Series 469 (2013) 012007, PTEP 2015, 033H01, etc

・ 放射性不純物の除去

・ 液体シンチレータの純化



純化した液体シンチレータの移送途中



現行検出器のセットアップ

測定場所：神岡宇宙素粒子研究施設 Lab-B

PMT：Hamamatsu H6527 2本 両読み

窓部材：合成石英窓

液体シンチレータ：BC501A

液体シンチレータ容器：ステンレス製

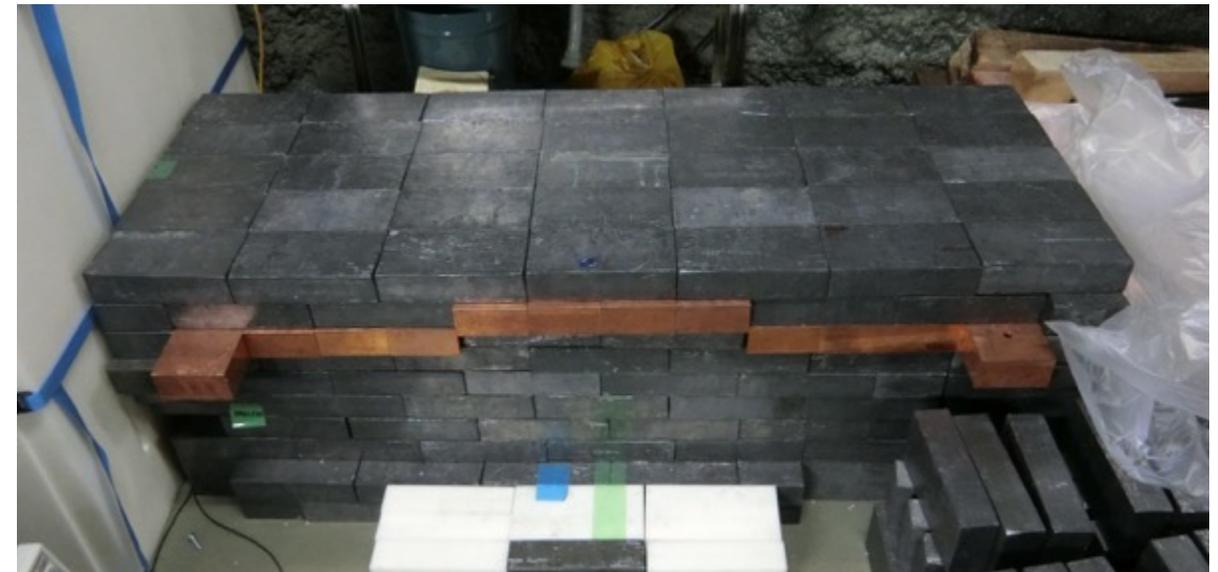
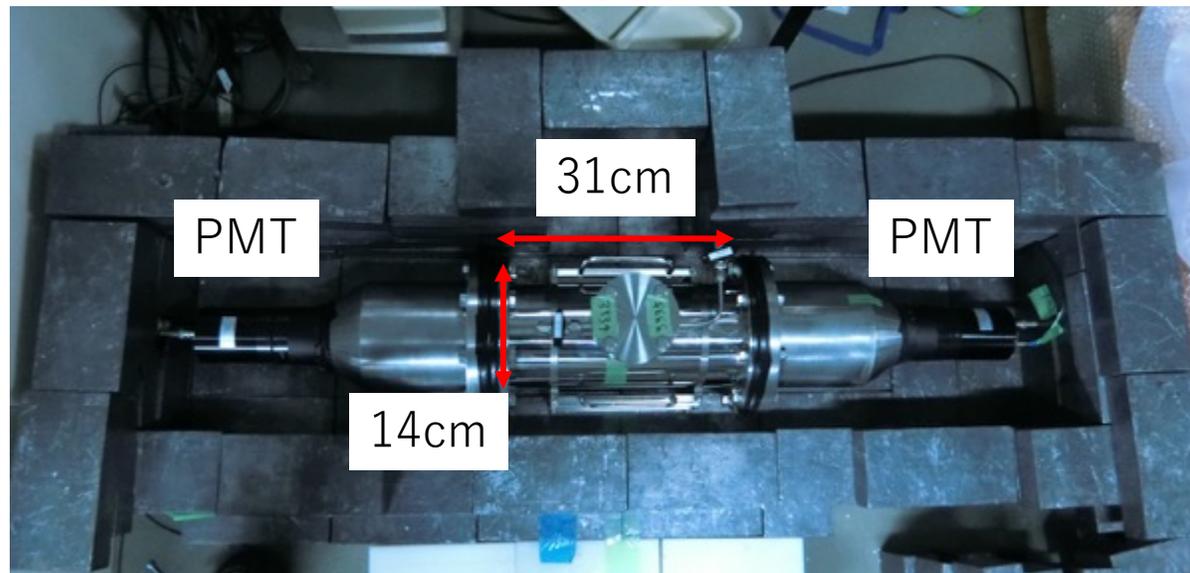
液体シンチレータ容器サイズ： $\phi 14\text{cm} \times \text{L}31\text{cm}$ (約4.7L)

シールド：周囲に鉛10cmと上部に銅5cm

FADC：CAEN V1724D 14bit 100MS/s

トリガー：両読みのPMTのCoincidenceトリガー

データ取得：2021年3月9日より測定開始

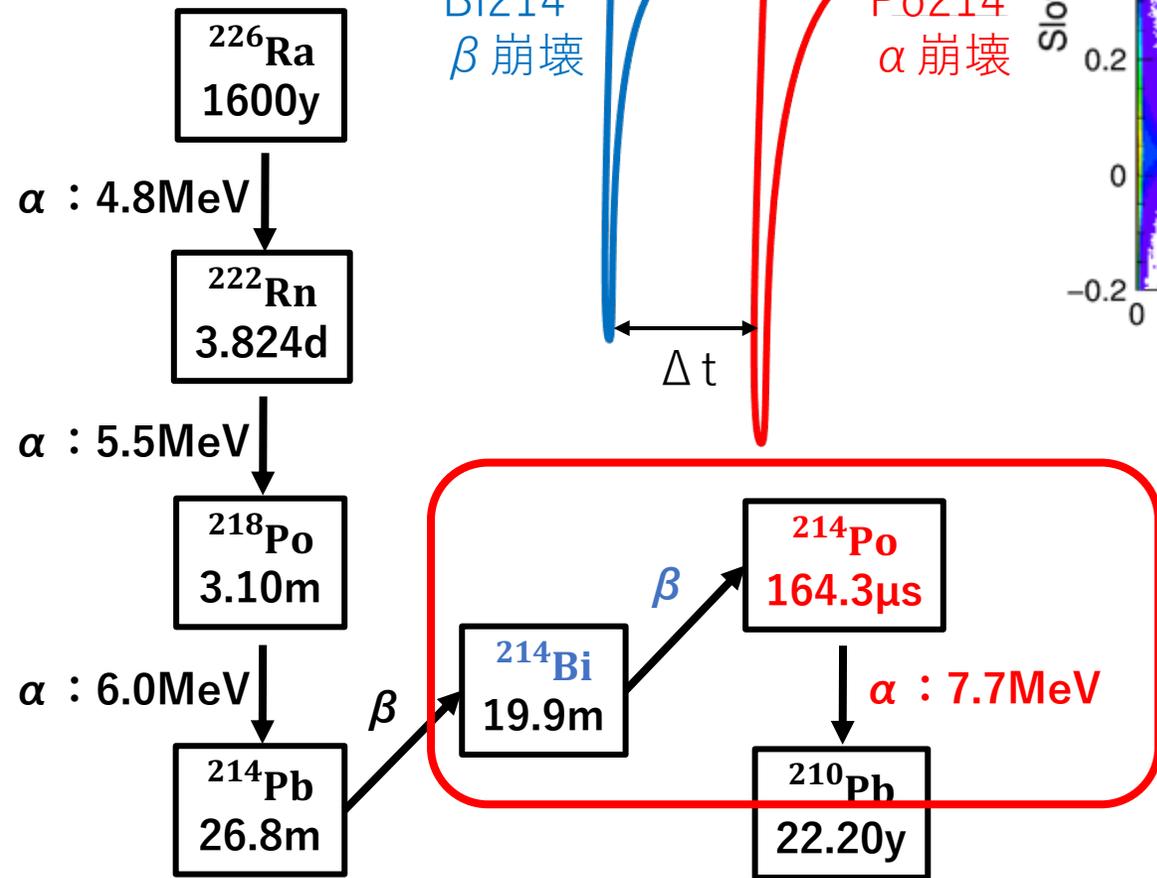


背景事象の評価方法

α線量の評価

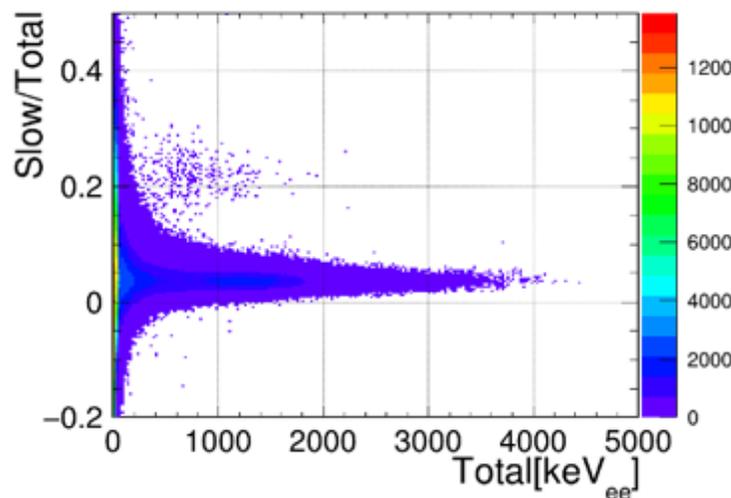
U系列のBi-Poタグを用いる

U系列 崩壊過程の一部

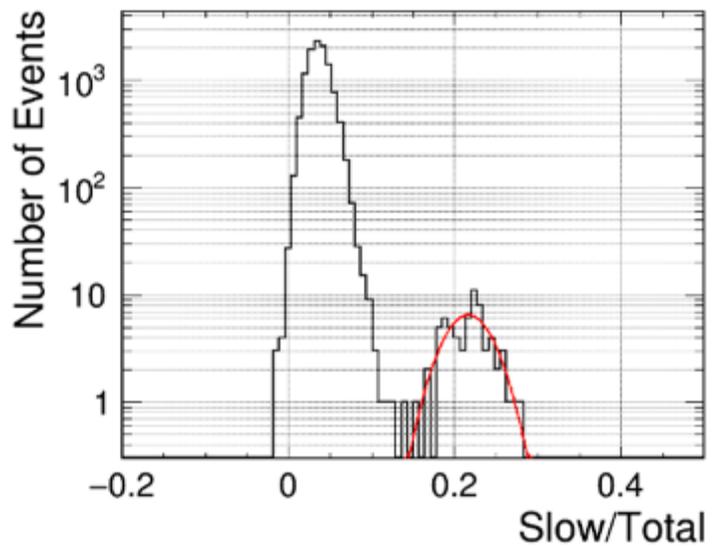
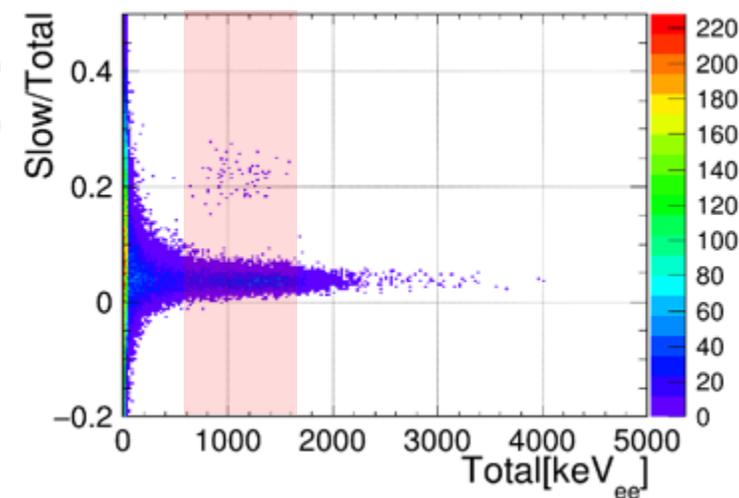


→²¹⁴Poの半減期が164μsと他と比べて非常に短いため
その信号の時間差Δtを用いて強力に事象選択できる

バックグラウンドRunデータ(約1日分)



Δt < 1msの事象について



Raが自発核崩壊して生じるRn起因のα線量を算出

α領域について規格化
ガウシアンでFit

α線量=49.3Events

現行検出器における α 線背景事象レート

・ α 線レートの算出

$$\alpha \text{線レート [Bq]} = \frac{\text{イベント数}}{\text{データ取得時間[s]}}$$

・ Fit関数： $A \left(1 - \frac{A-B}{A}\right) e^{-\frac{t-C}{\tau_{1/2}/\ln 2}}$ を使用
 A：定常状態の α 線レート
 B：純化直後の α 線レート
 C：純化終了時刻

^{214}Po の α 線レート

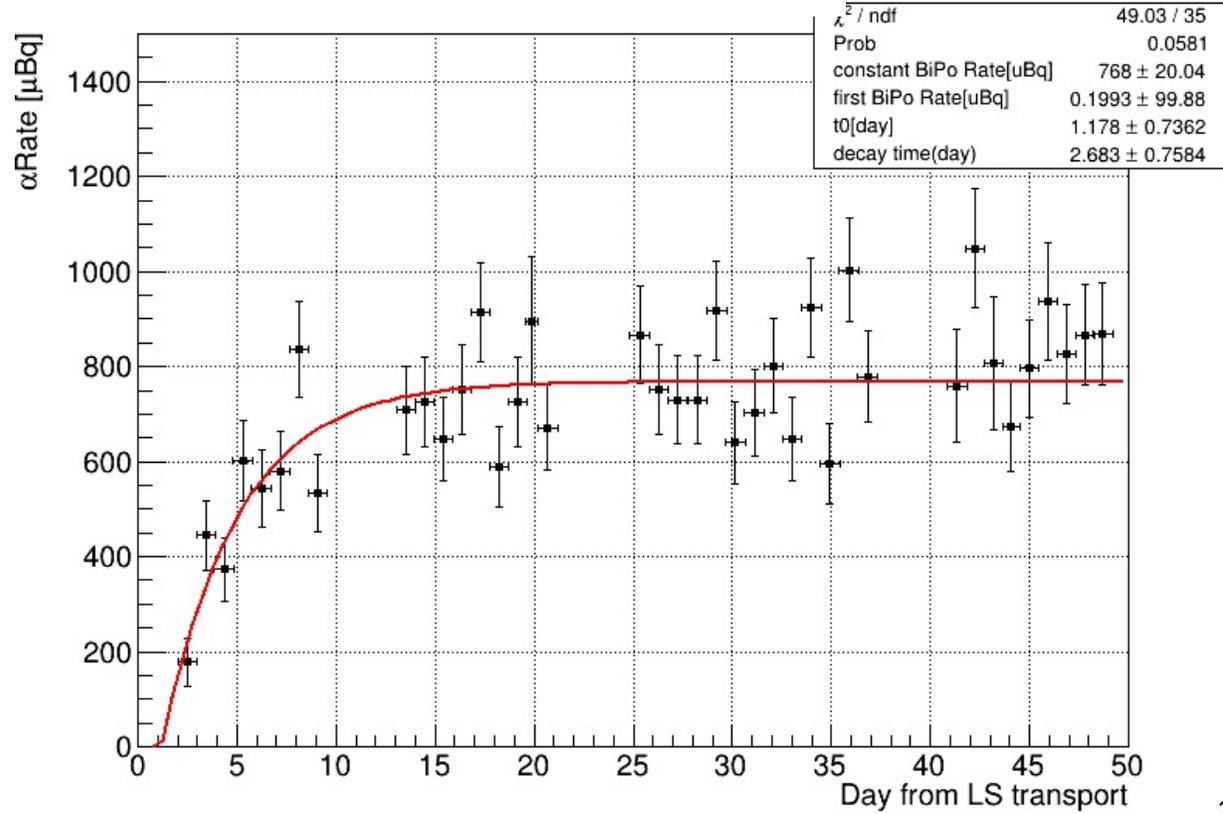
・ 初期状態で0.2uBqを達成



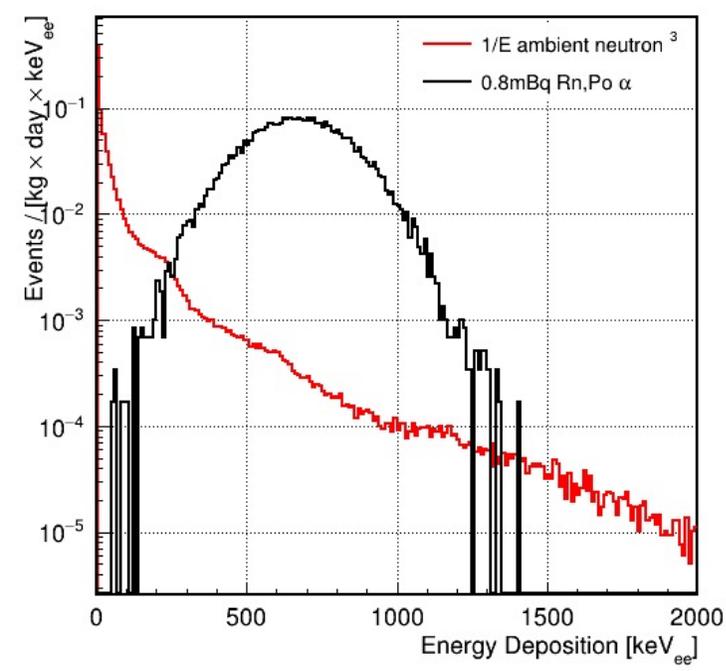
しかし、その後上昇

・ 定常状態で0.8mBq

Bi-Po α 線レート



Energy Deposition



0.8mBqのRn,Po α 線をシミュレーションで見積もる

α 線を2桁落とししたい



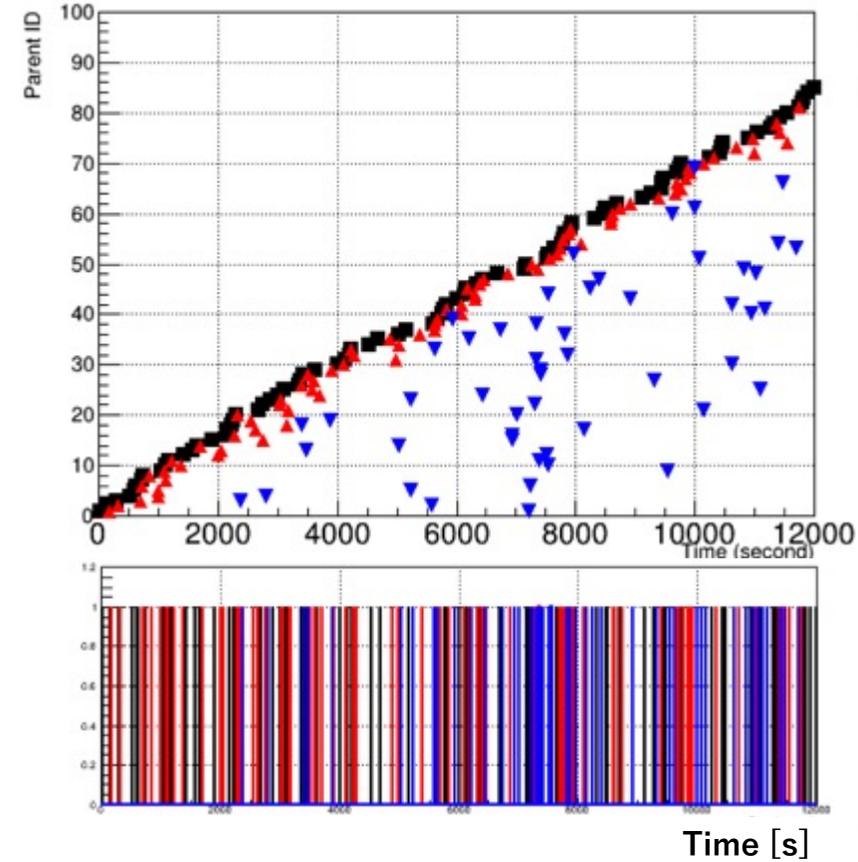
・ 解析的に取り除く

・ よりRnの染み出しを低減化した検出器を作る

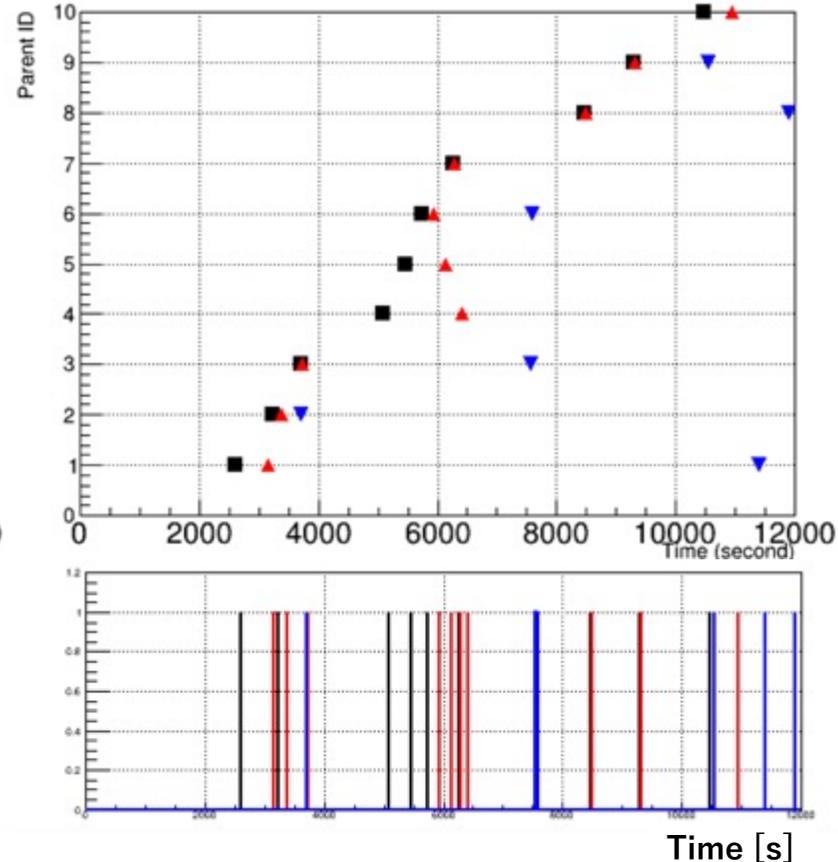
3)小津龍吉、早稲田大学修士論文 (2020) Geant4 シミュレーションによる結果

現行検出器における課題

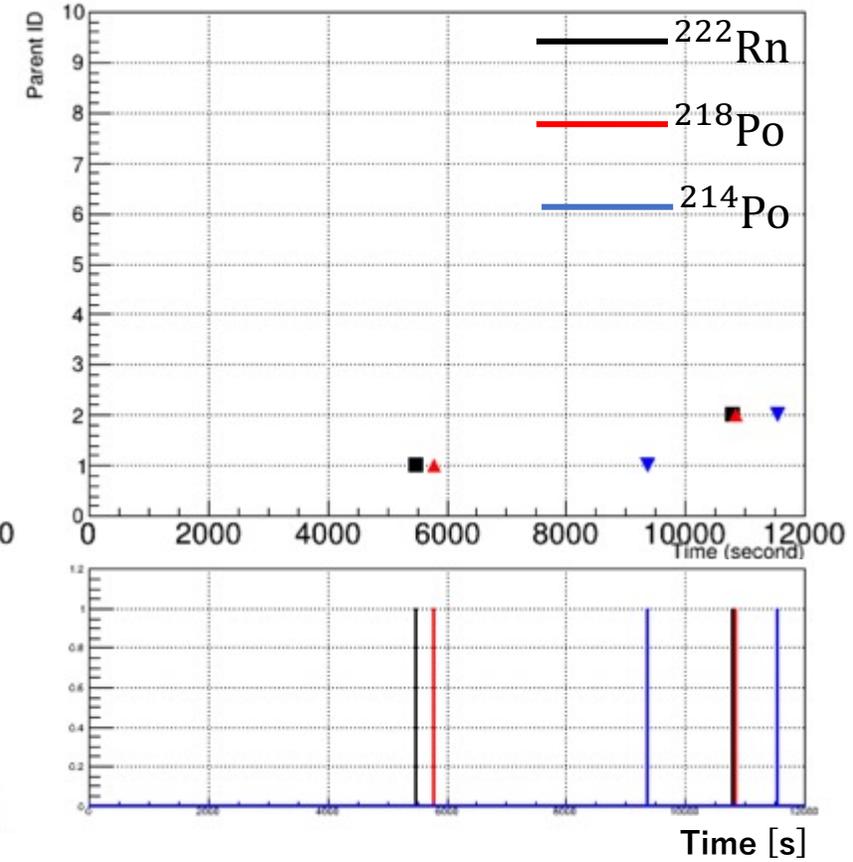
8mBqにおける α 崩壊の時間分布



0.8mBqにおける α 崩壊の時間分布



0.08mBqにおける α 崩壊の時間分布



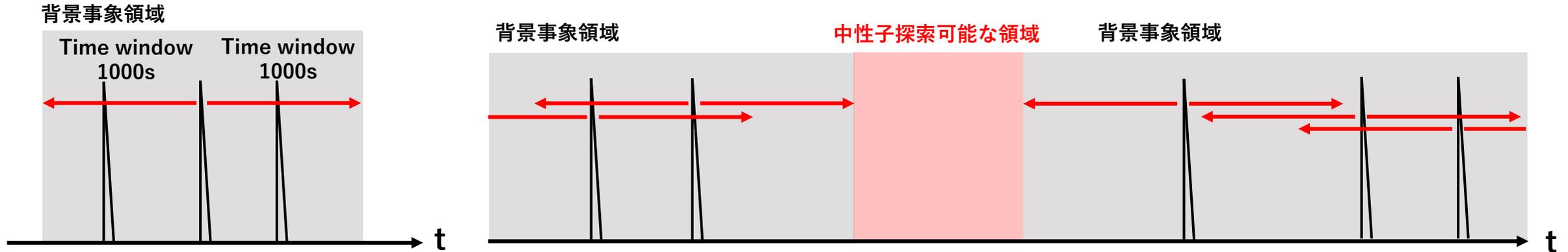
0.08mBqにおいて1つの ^{222}Rn の崩壊に対して他の ^{222}Rn の崩壊過程がほとんど入り込まない
→ Δt Cutによってタグが可能

0.8mBq(実機データ)、8mBqにおいては複数の ^{222}Rn の崩壊過程が重なるために Δt の条件のみでは取り除くことができない

現行検出器における課題

- 背景事象領域の定義

- 中性子探索可能な領域の定義



- 各種定義

$$\text{中性子に対する効率}[\%] = \frac{\text{中性子探索可能な時間}[s]}{\text{全時間}[s]} \times 100$$

$$\alpha \text{ 事象除去率} [\%] = \frac{\text{カットで除けた } \alpha \text{ 事象}[Events]}{\text{全イベント数}[Events]} \times 100$$

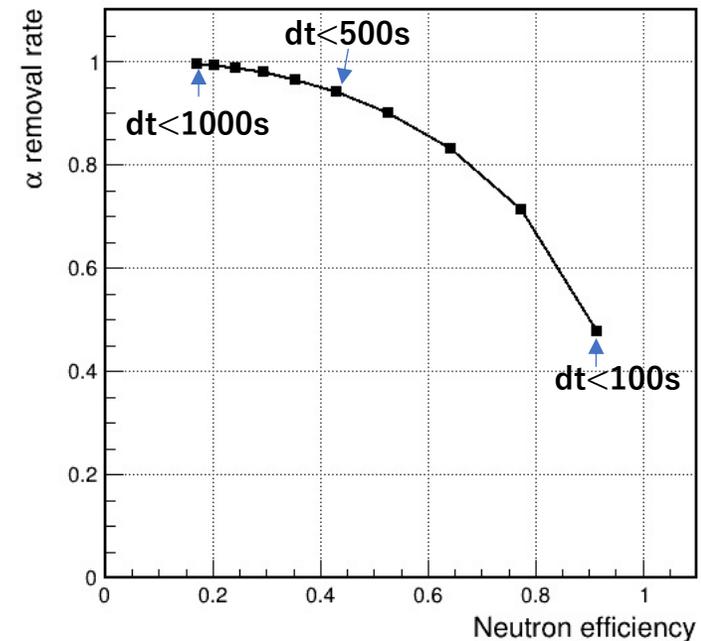
Time Window	1000s	500s
中性子に対する効率[%]	14.9	41.2
α 事象除去率[%]	99.8	94.4

dtの条件のみでは中性子効率を大幅に削ってしまう。

→条件に検出位置、エネルギーの情報を入れることにより改善を期待

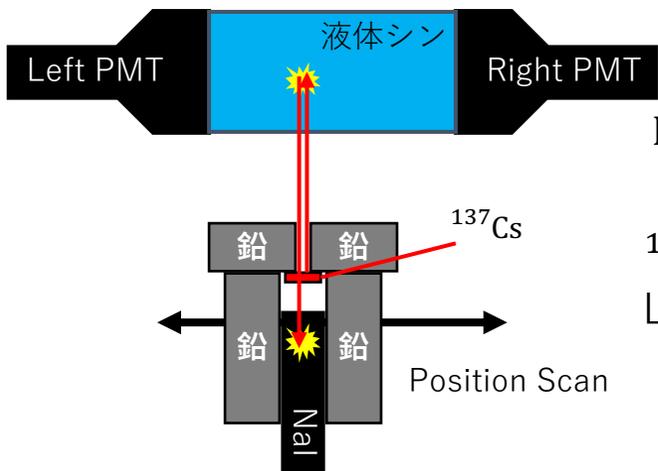
条件を決めるためシミュレーションによる理解が重要となる

Rejection vs Efficiency



α線背景事象0.8mBqのシミュレーションサンプルの作成

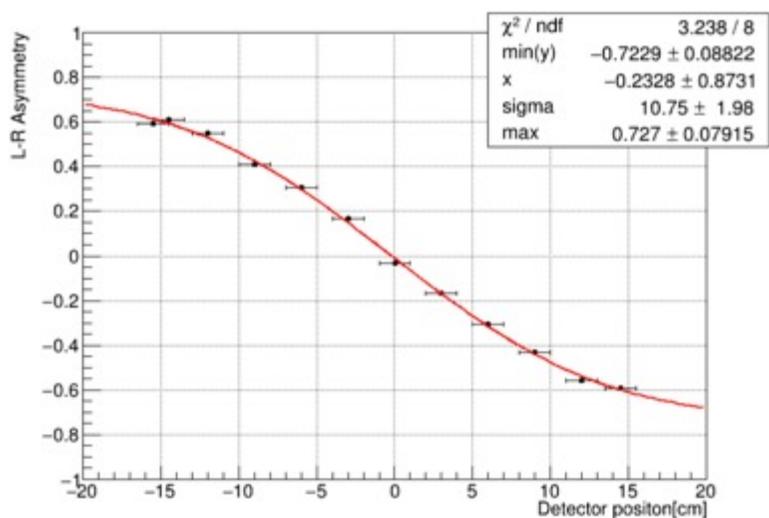
・位置分解能の実装



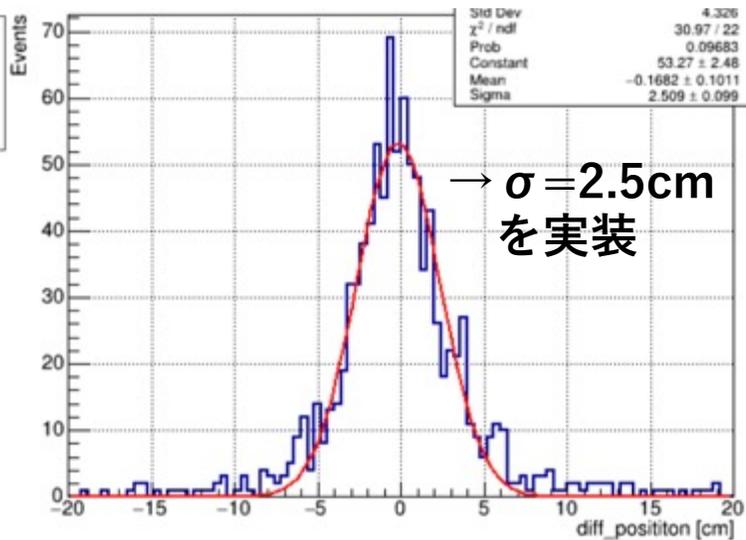
$$\text{LR Asymmetry} = \frac{\text{Left PMT 光量} - \text{Right PMT 光量}}{\text{Left PMT 光量} + \text{Right PMT 光量}}$$

^{137}Cs によるPosition Scanデータにより、LR-Asymmetryと検出位置を対応させる。

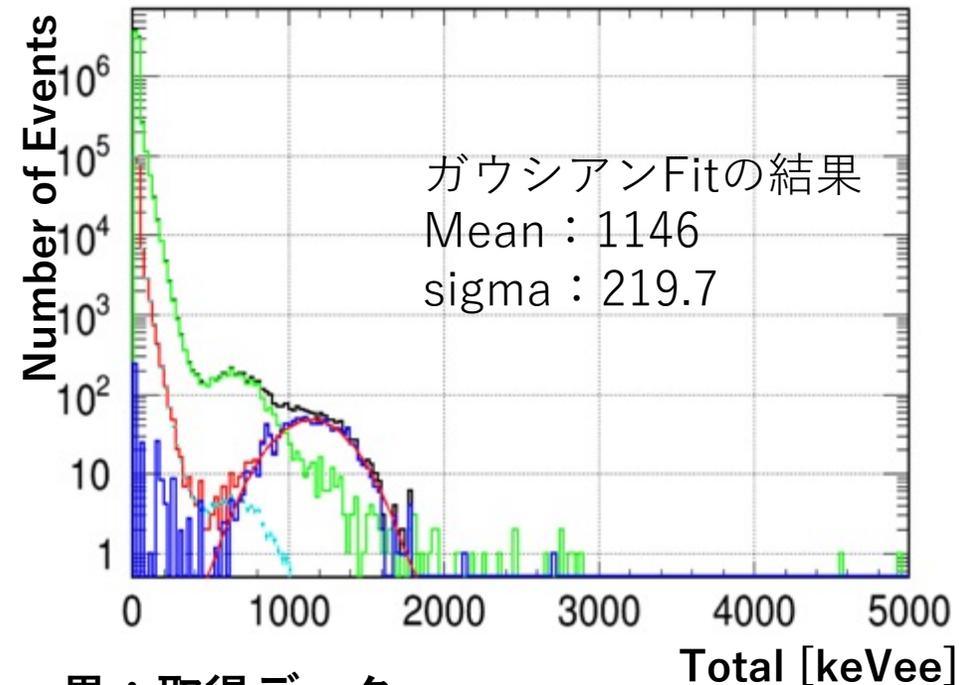
LR-Asymmetryと検出位置の関係



Bi-Poにおける検出位置の差の分布



・エネルギー分解能の実装



黒 : 取得データ

→ 赤 : dt < 1ms データ (^{214}Po のα崩壊信号)

緑 : dt > 1ms データ (背景事象)

→ 水色 : 緑を赤に対して規格化

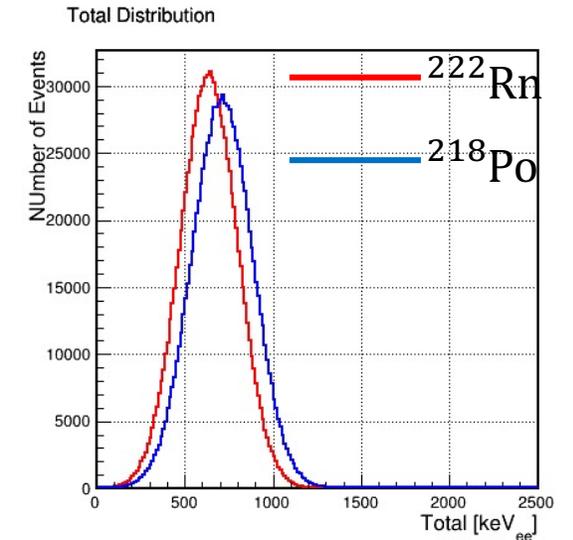
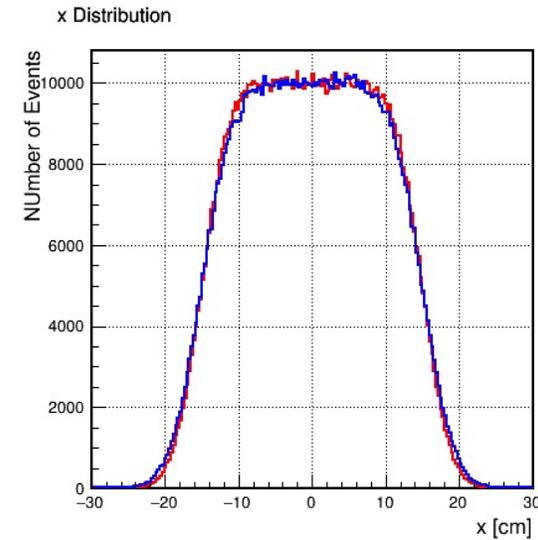
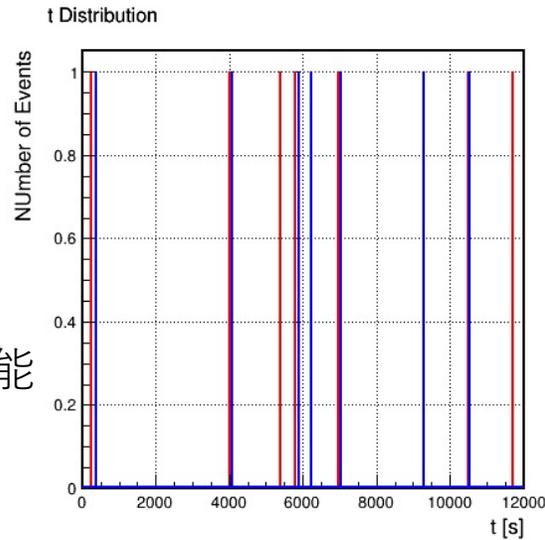
→ 青 : 赤-水色

エネルギー分解能
19.2% at 1146keVee
を実装

Likelihood解析に向けたパラメータの生成

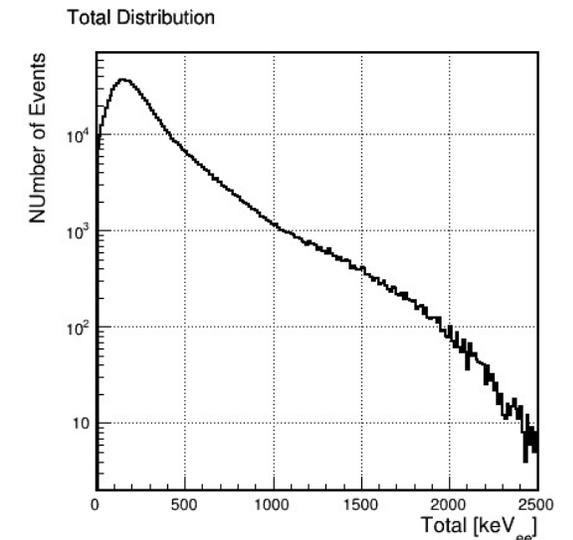
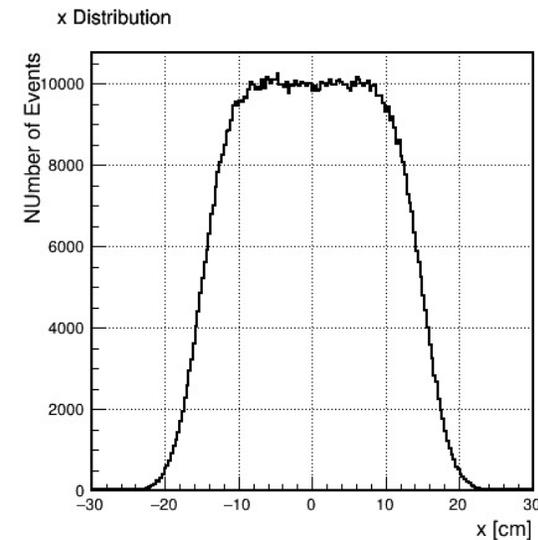
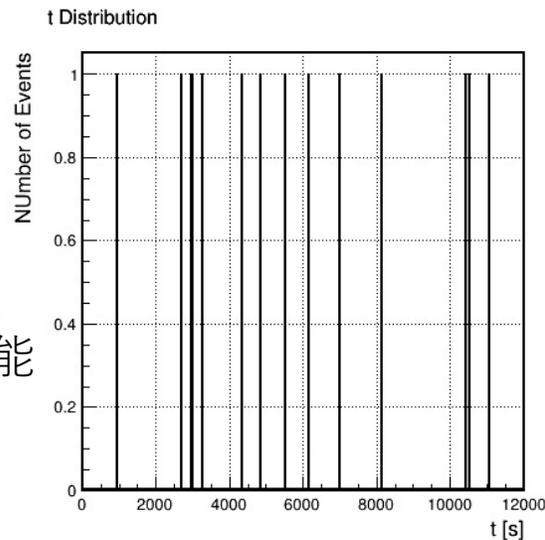
バックグラウンドサンプル

- ^{222}Rn が 0.8mBq で崩壊
- ^{218}Po が半減期 3.1min で崩壊
- 各1000000イベント生成
- 位置は検出器位置 $[-15,15]$ でランダムに生成
- 位置分解能、エネルギー分解能を実装



信号サンプル

- バックグラウンドサンプルにランダムにくる中性子信号を仮定
- 反跳エネルギーについて $100\text{keV}_{ee}\sim 2000\text{keV}_{ee}$ で生成
- 位置分解能、エネルギー分解能を実装

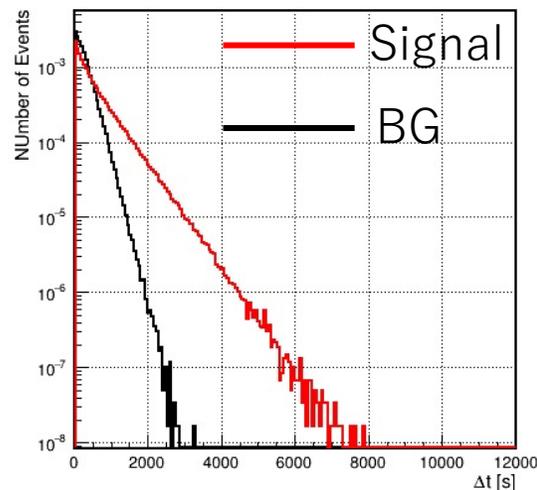


Likelihoodを用いた信号と背景事象の分離(on going)

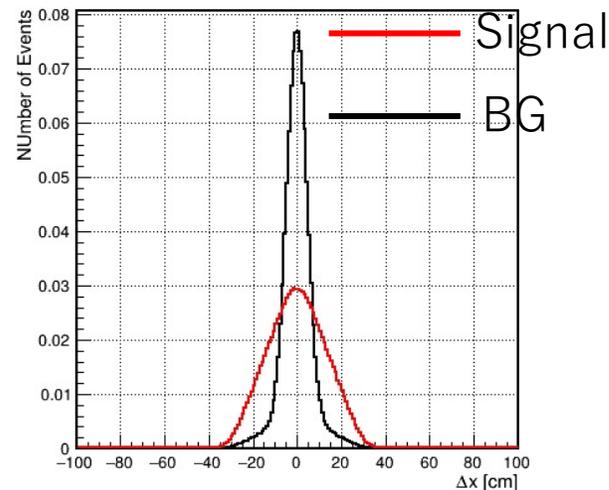
・解析に用いるパラメータ

	BG	Signal
Δt	Rn-Po	中性子-次の信号
Δx	Rn-Po	中性子-次の信号
$\Delta Total$	Rn-Po	中性子-次の信号

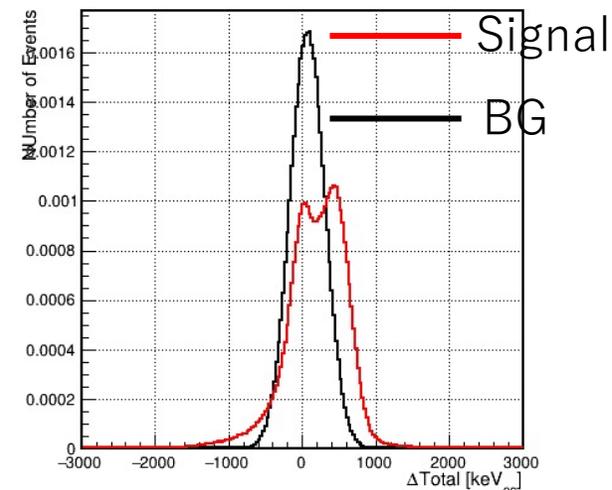
Δt 分布



Δx 分布



$\Delta Total$ 分布



・Likelihood解析

- 定義

$$L = f_i(x_i) \quad (i = 1 \sim 3)$$

$f(x)$: 確率密度関数

$x_1: \Delta t, x_2: \Delta x, x_3: \Delta Total$

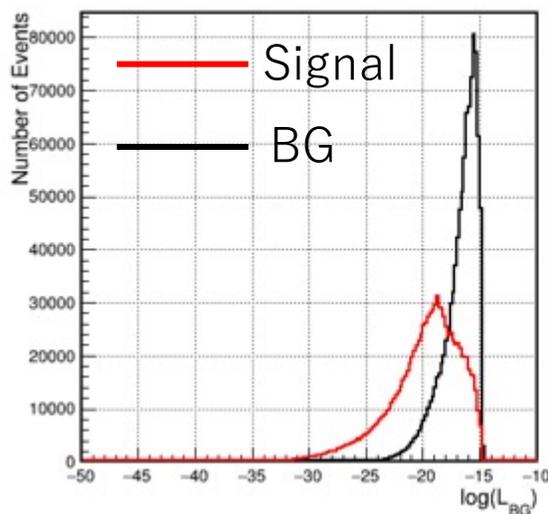
$$\log(L) = \log \prod_1^3 f_i(x_i)$$

L_{BG} : BGらしさ

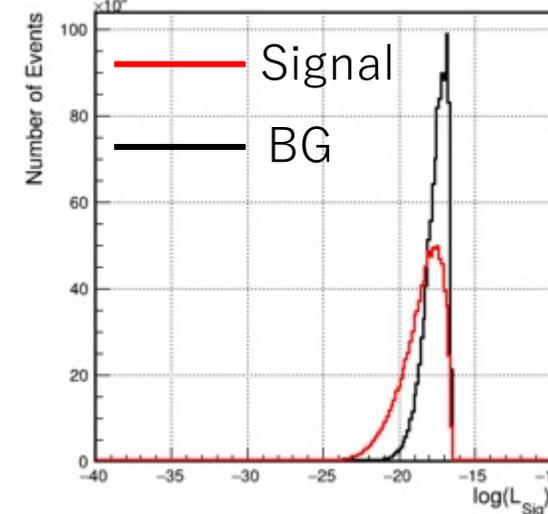
L_{sig} : Signalらしさ

$$L' = \frac{\log(L_{sig})}{\log(L_{sig}) + \log(L_{BG})}$$

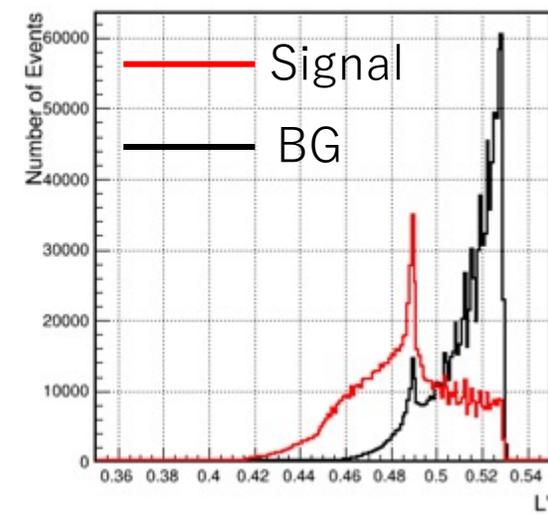
$\log(L_{BG})$ distribution



$\log(L_{Sig})$ distribution



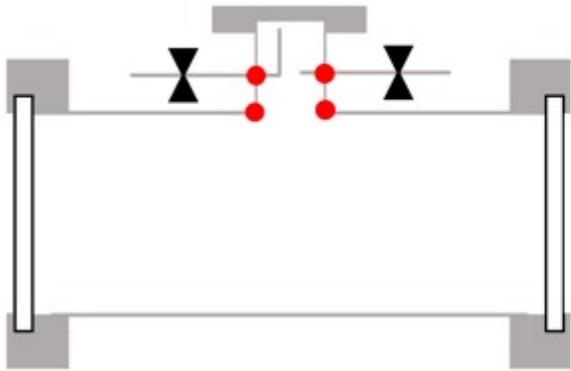
L' distribution



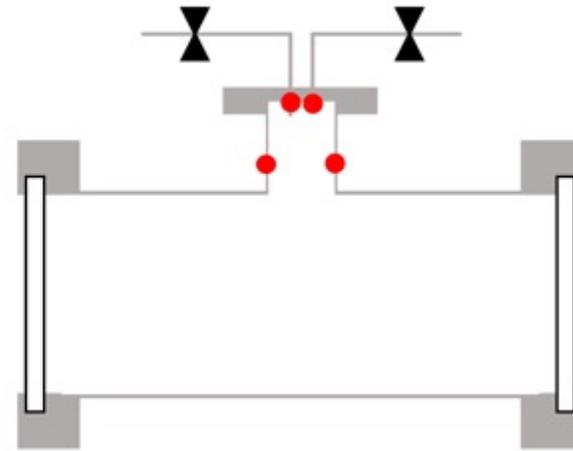
新容器開発の現状

現行検出器

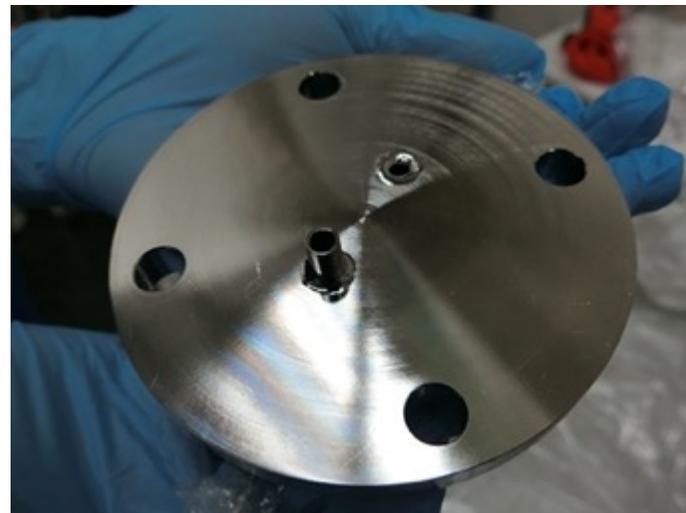
● 溶接箇所



新容器



・ 実際の新容器



・ 測定スケジュール

- 11/26(金) 本日
- 11/27(土) 超音波洗浄 @早稲田
神岡へ発送
- 11/30(火) 超純水準備
- 12/1(水) 液体シンチレータの純化
- 12/2(木) 測定セットアップ
- 12/3(金) キャリブレーションラン
バックグラウンドラン開始

約2週間ほどで定常状態に至る

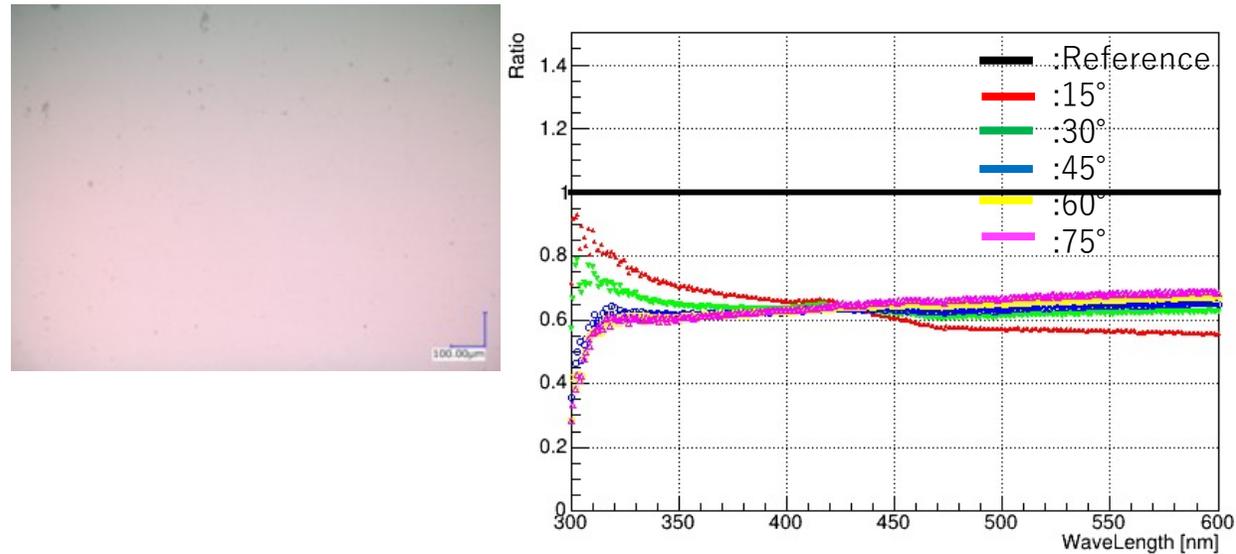
↓
Bi-Po α バックグラウンドレベルを確認する。

測定、解析結果については3月の物理学会で述べる予定です。

新容器開発の現状

- 今後の新容器開発
表面処理方法の変更を検討
資料、サンプルについて日章アステック株式会社様より提供いただきました。⁴

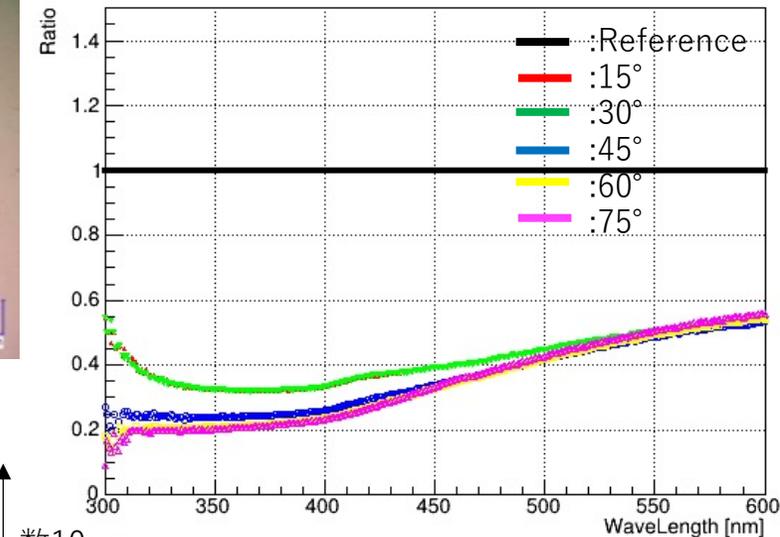
EP処理表面(今回測定する新容器) EP反射率測定データ



GEP処理表面



GEP反射率測定データ



→皮膜が厚くなることでRnの染み出しを低減できることを期待

4) https://www.nissho-astec.co.jp/gep_0705/

まとめ

現行検出器において、初期純度0.2uBq, 定常状態0.8mBqを達成

→ただしさらに2桁ほどバックグラウンドレベルを落とす必要がある。

- 解析的にバックグラウンド取り除く
- より低バックグラウンドな検出器を作る

解析について

0.8mBqにおける課題：Rn-Poの崩壊過程が重なることがタグを困難にしている

→シミュレーションによる理解が重要

Bi-Po事象を用いて位置分解能、エネルギー分解能の見積もりを行った

→シミュレーションサンプルの作成

現在、Likelihoodを用いて信号と背景事象の分離の検証を行っている

検出器開発について

溶接箇所を変えた検出器を用いて測定

Rn起因の α 線レート測定を目的として11/30~12/3に神岡で作業を行う

今後の展望として

上記検出器でRn起因の α 線レート低減が見られない場合、表面処理を変更した検出器での測定を検討