

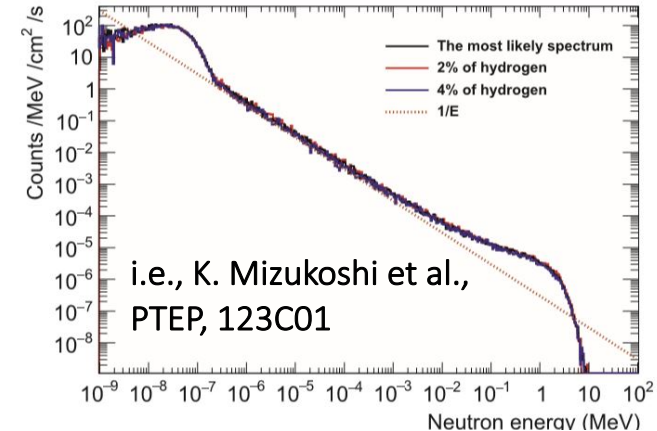
液体シンチレータを用いた 神岡地下環境中性子測定

早大理工 小津龍吉

液体シンチレータによる環境中性子測定

- 極低バックグラウンド環境下での稀事象探索実験において環境中性子は主要なバックグラウンドの一つとなる。
- 一般的に中性子フラックスは $1/E$ に従うと考えられているが、実際は測定場所による依存性が大きく、一概には言えない。
- ^3He 比例計数管による中性子Flux測定結果

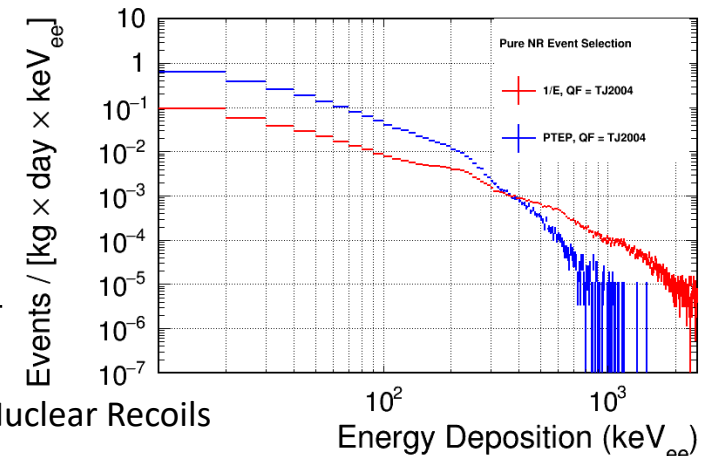
- 神岡地下実験施設 in Lab-B (阪大(当時)水越氏らによる測定)
- MeV領域とeV領域では $1/E$ との差が顕著に表れる。



□ Geant4 Simulation

- 上をReferenceとして液体シンチレータに中性子を入射させたときの反跳エネルギー Spektrum
- 液体シンチレータで高速中性子のスペクトラムを直接測定してやりたい。

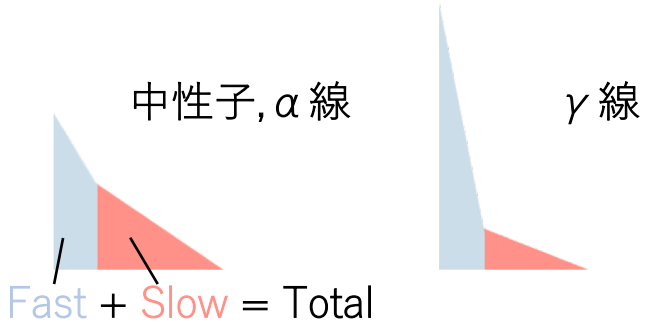
Motivation



液体シンチレータによる中性子検出の背景事象

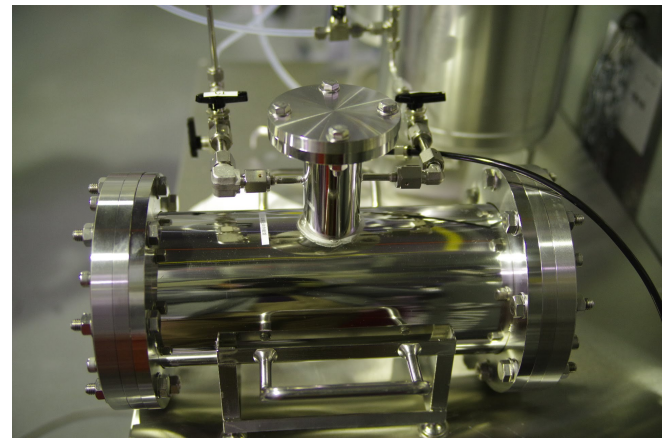
中性子信号の検出

- 中性子が原子核(主に水素)を反跳したときのエネルギーをシンチレーション光として検出
- Slow/Totalで γ 線は強力に分離可能



新たに作成した検出器

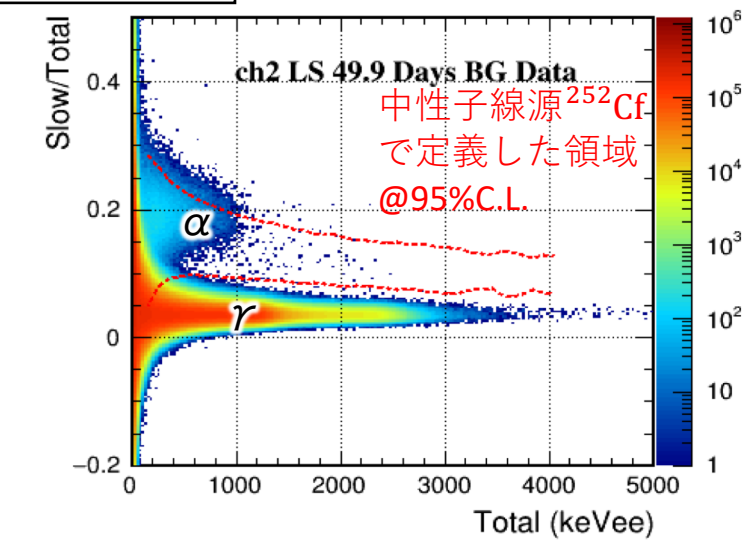
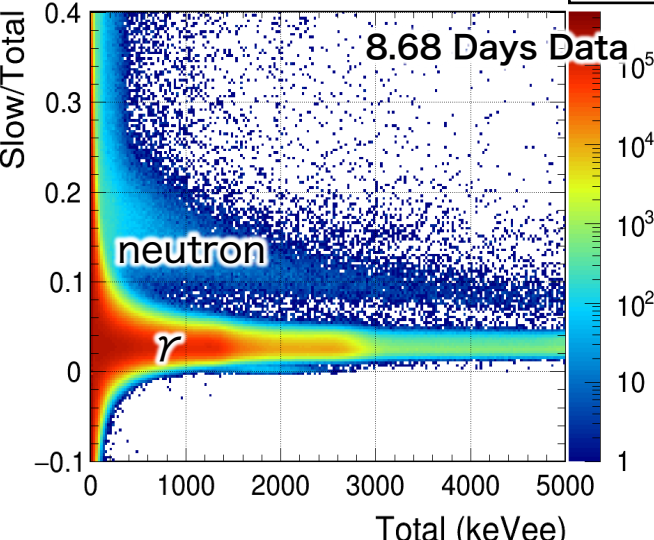
検出器サイズ: ϕ 14cm \times L30cm
 液シン: BC-501A、PMT: 両読み



地上データ(早稲田)

旧検出器データ

地下データ(神岡)



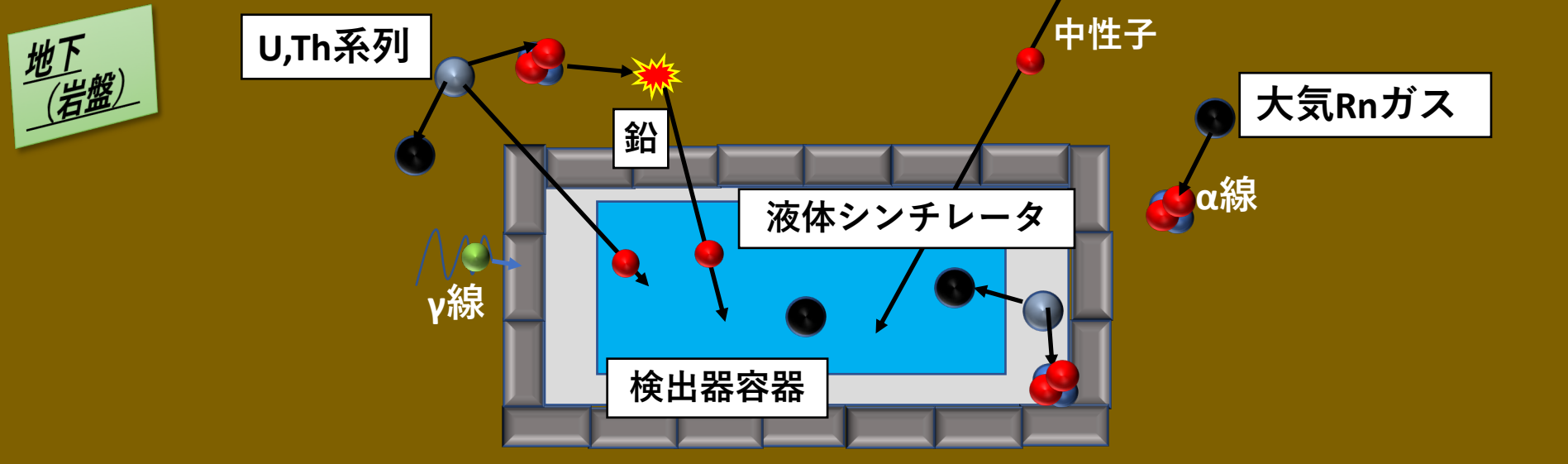
α 線BG

地下では中性子領域で α 線BGが優勢

U/Th系列の放射性不純物が原因であることが分かっており、取り除きたい。

中性子信号と α 線BG源

中性子信号と α 線バックグラウンド

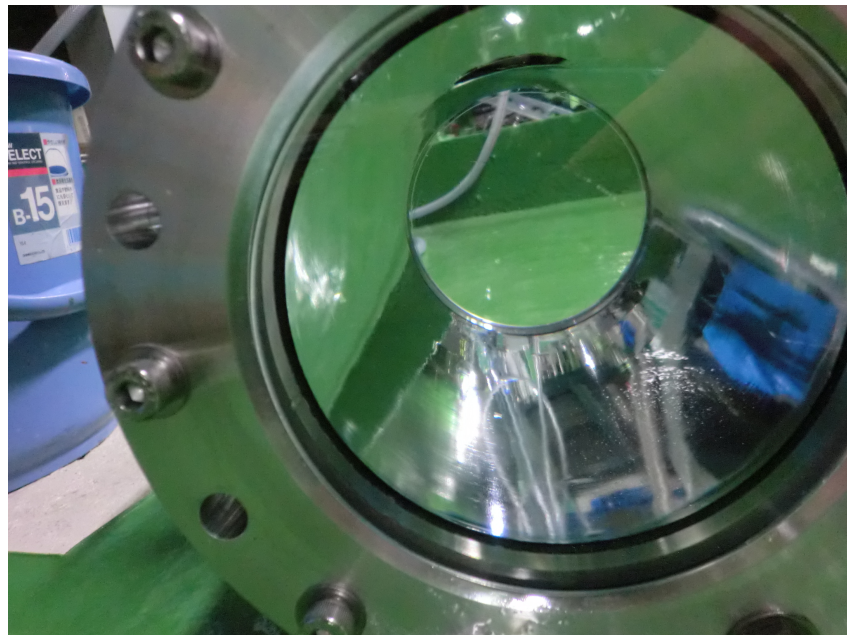


- 液体シンチレータ内に大気Rnガスが溶けこんでいた場合、、、
⇒半減期3.8日で α 崩壊して消えるが、最終的に ^{210}Po が半減期138日で崩壊してBGになる。
 - 検出器部材、及び液体シンチレータにRnより上流の親核種、例えば ^{226}Ra (半減期1600年)が含まれる場合、半永続的に崩壊してBGになる。
- 本トーク: 低放射性不純物容器を用意して、「純化」(Jun.2019)をした1回目の測定結果と、放射能が多い部材を交換して再純化した(Dec.2019)2回目を話します。

検出器改良(1回目)

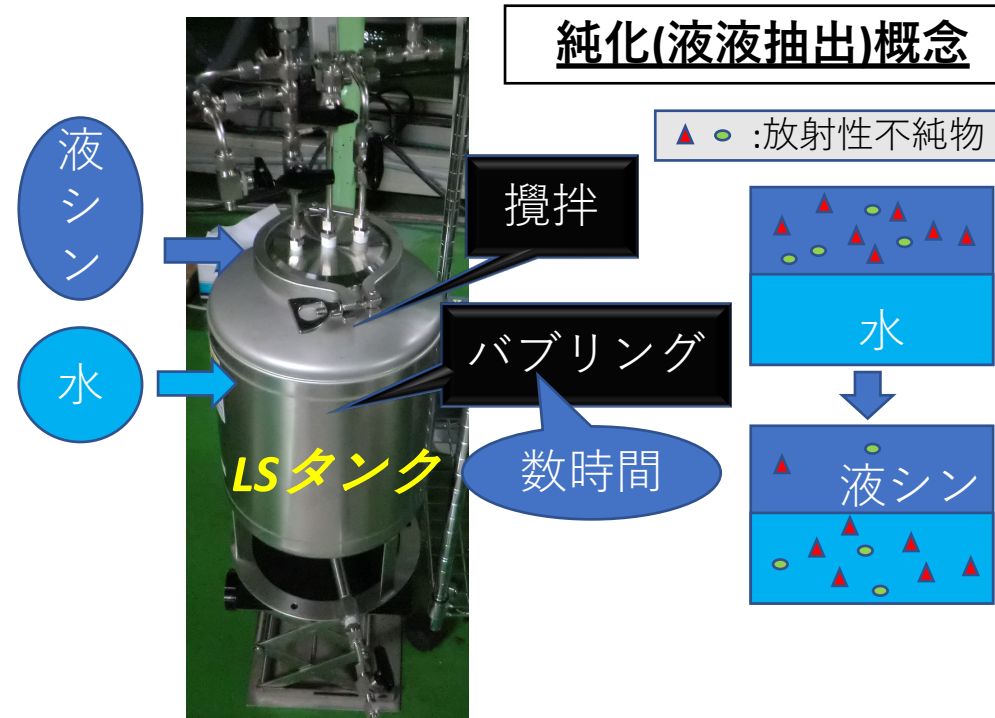
□ 検出器容器

- SUS容器
- $\phi 14\text{cm} \times \text{L}30\text{cm}$
- 容器内面に不純物の多い反射材を使用せず、電解研磨により反射率を得る。かつアウトガスも低減



□ 液体シンチレータ

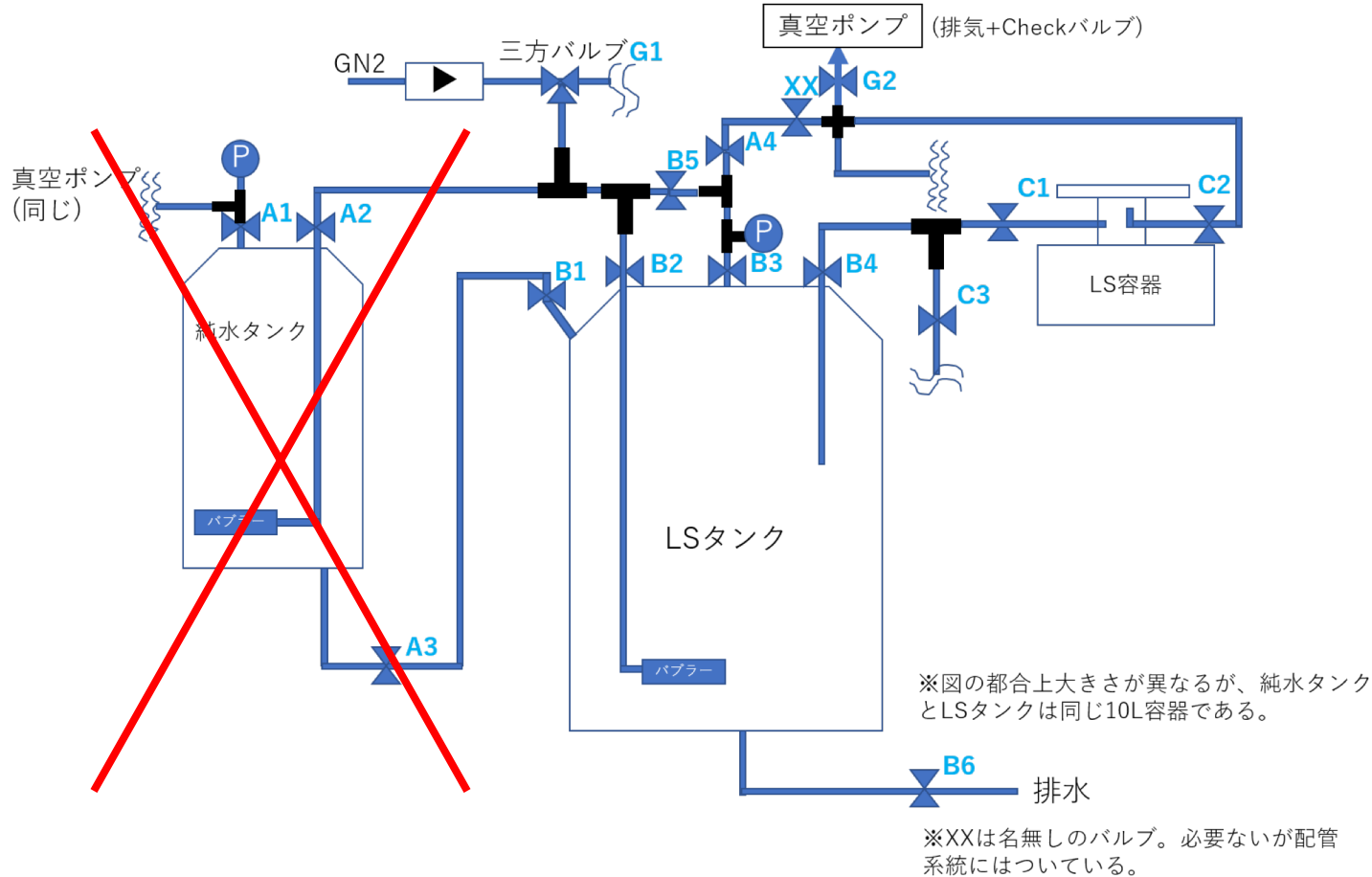
- BC501A：キシレン(溶媒)、蛍光体、波長変換材から成る。



- 純化作業はKamLand部屋で行った。

検出器改良(1回目)

- 純化用の配管系統図。
一回目は純水タンクを用意しなかった。



- LSタンクとLS容器で純化系が成り立っており、超純水を加えるときはLSタンクのふたを開けて入れていたので、純化過程で外気と接触する機会があった。

測定条件

□検出器

- PMT両読み
(Hamamatsu H6527 ϕ 142mm)

□測定地点

- 神岡鉱山@Lab-Bで測定

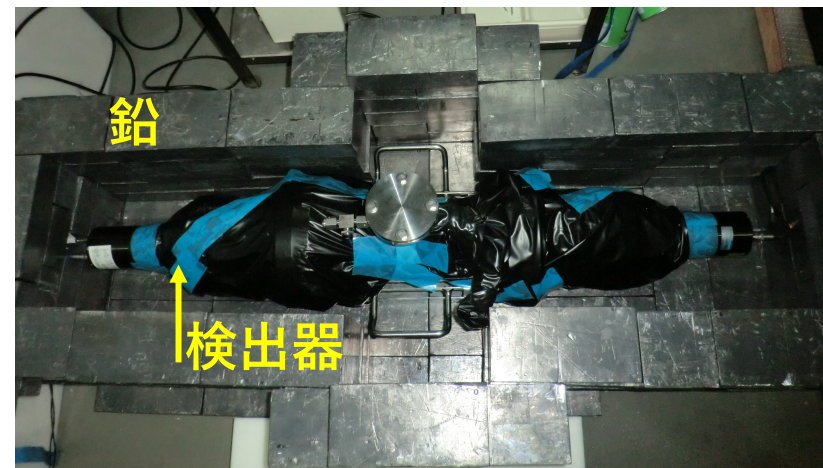
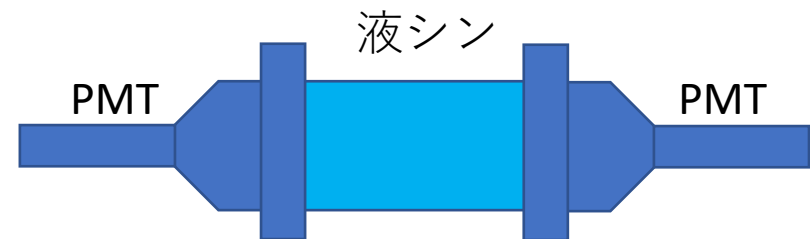
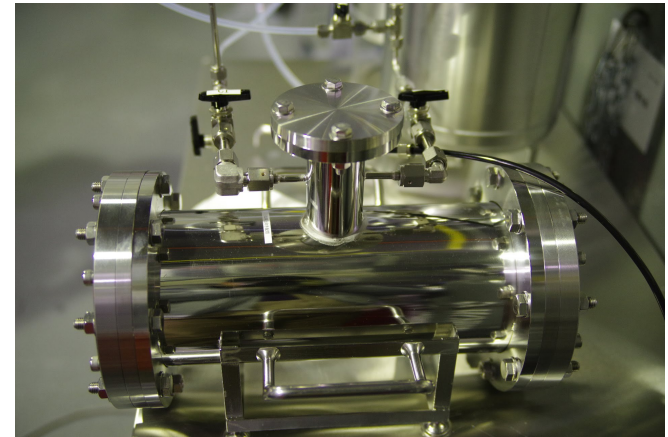
□シールド

- 鉛+銅で環境 γ 線を遮蔽

シールド組み上げの様子

□トリガー

- FADC 2Ch ORのSelf Triggerで測定

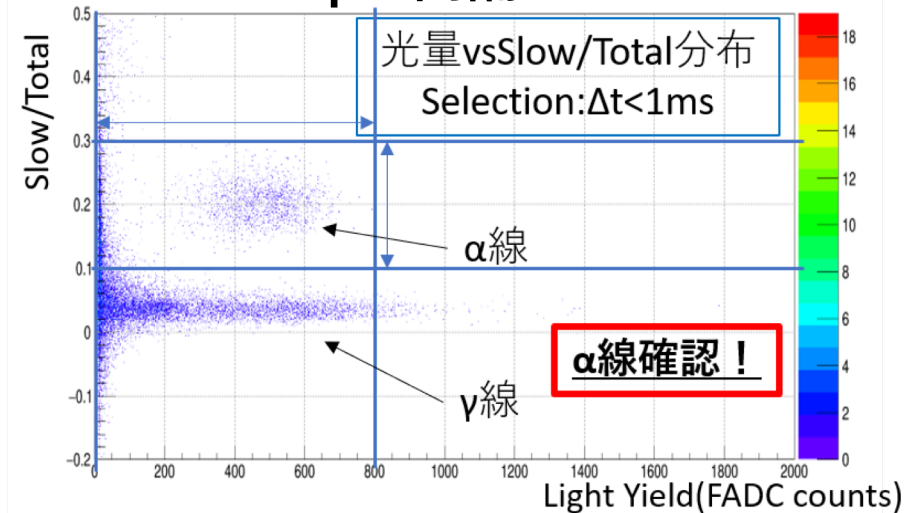


α 線BG タグ

□ U系列: $^{214}\text{Bi} \Rightarrow ^{214}\text{Po} \Rightarrow ^{210}\text{Pb}$

- 半減期164 μs

□ time stampの間隔 $\Delta t < 1\text{ms}$

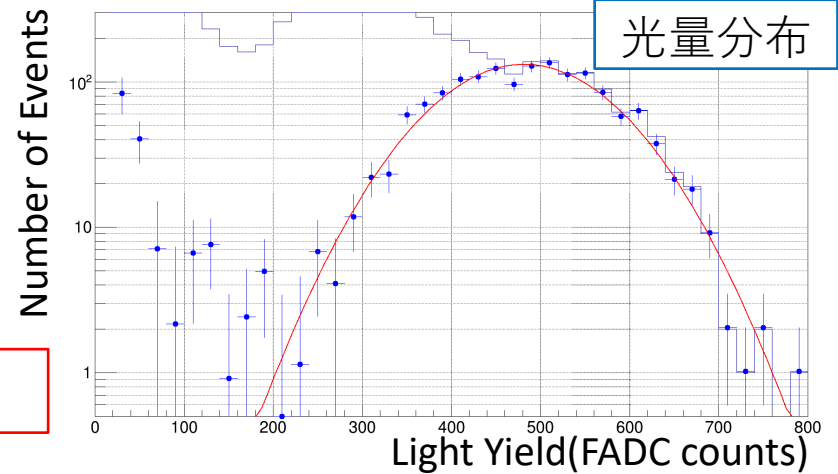
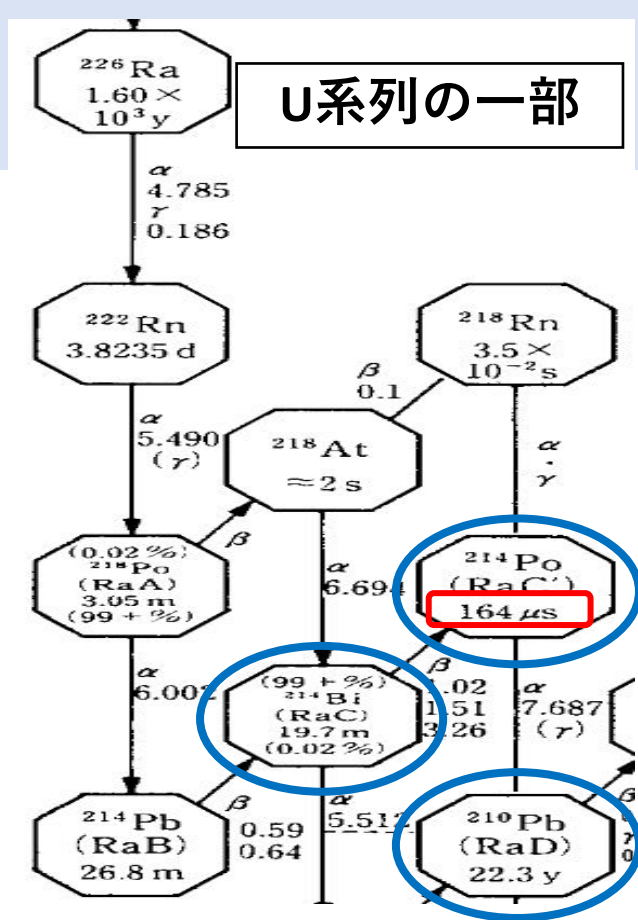


□ Bi-Po光量分布

□ Selection

- $-0.1 < \text{Slow/Total} < 0.3$
- $\Delta t < 1\text{ms}$ (Eff.98.5%)

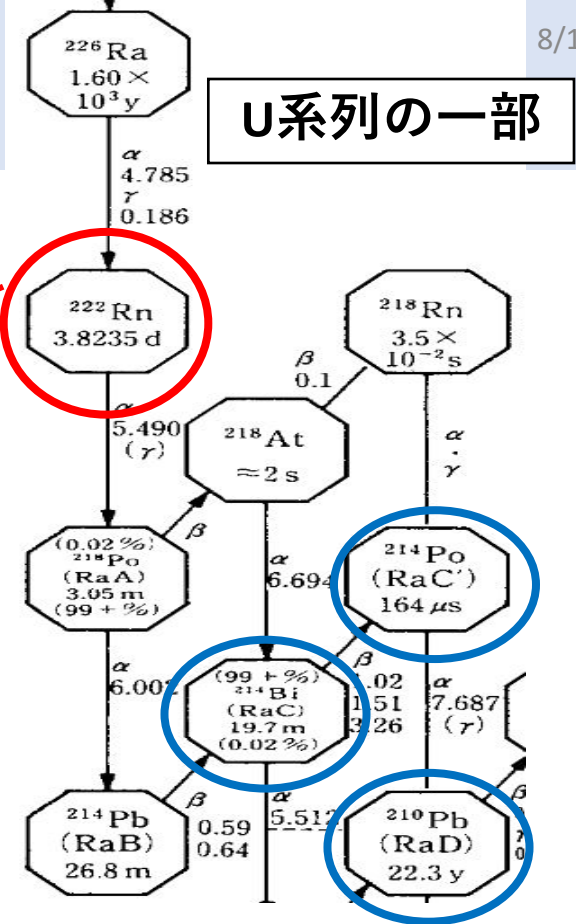
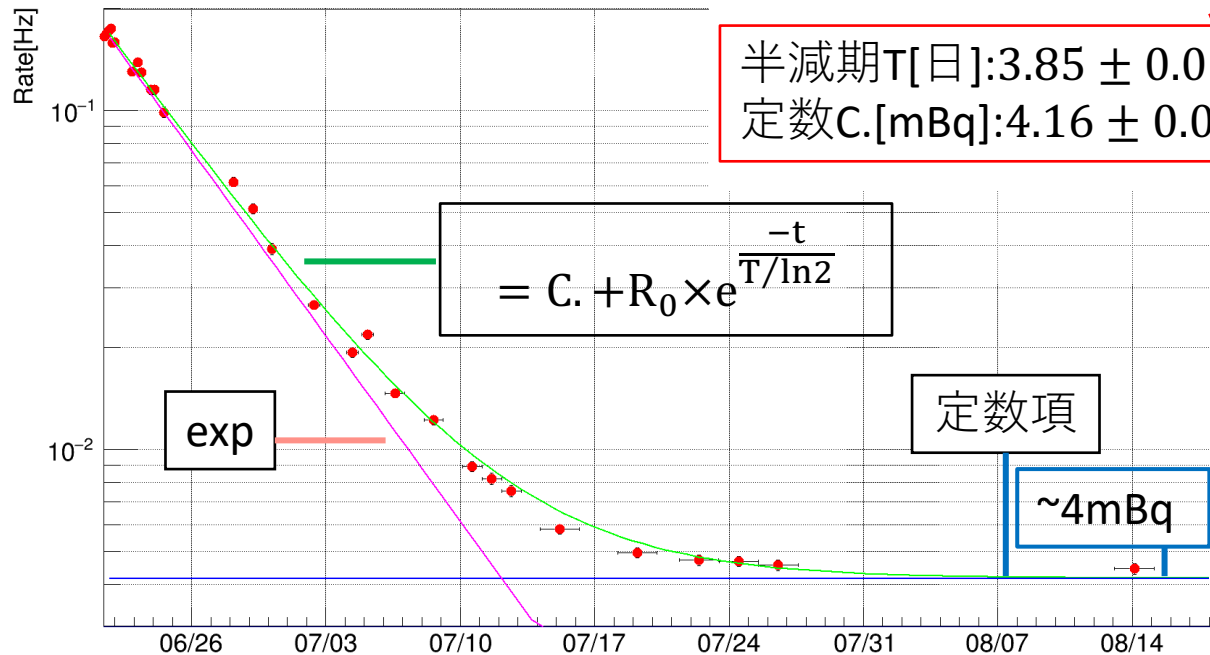
^{214}Po の α 線量を算出



Bi-Poレートの時間変化

□ Bi-Poの時間変化を見る。

^{214}Po α線事象の時間変化



● どんどん減衰していった。

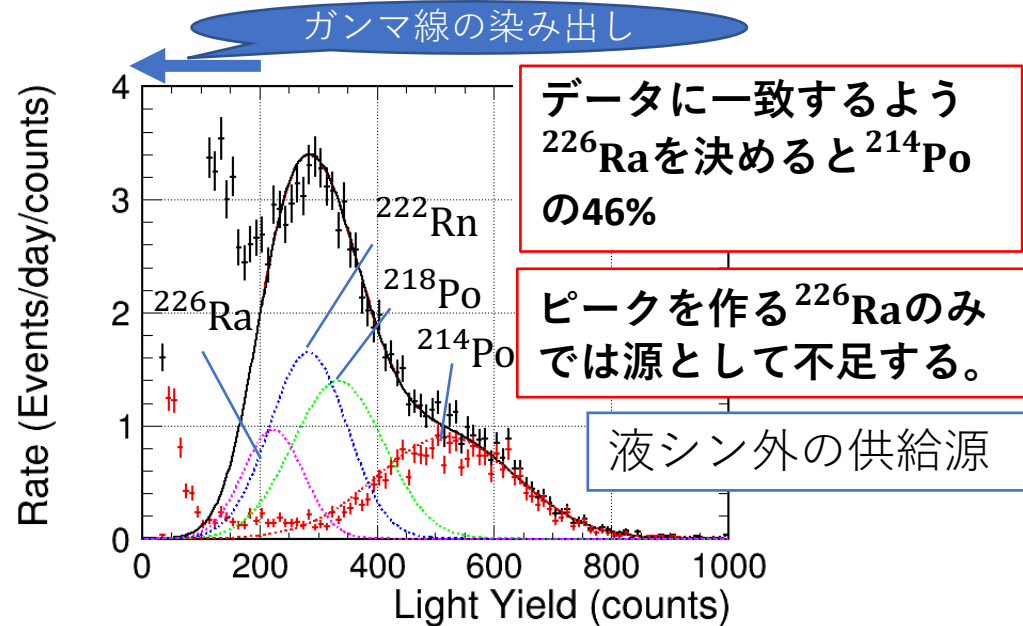
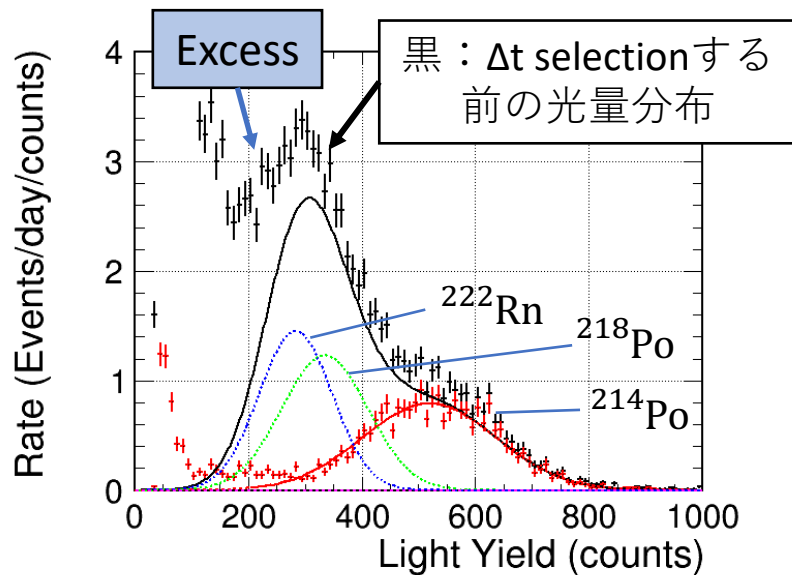
● 初期は半減期3.8日の大気 ^{222}Rn ガスが溶け込んでいた。

● 十分時間が経てば4mBqは残らないのでBi-Po上流に初期Rnガス以外の起因。

BG源を特定して低減しなければならない。

α 線BG源の特定

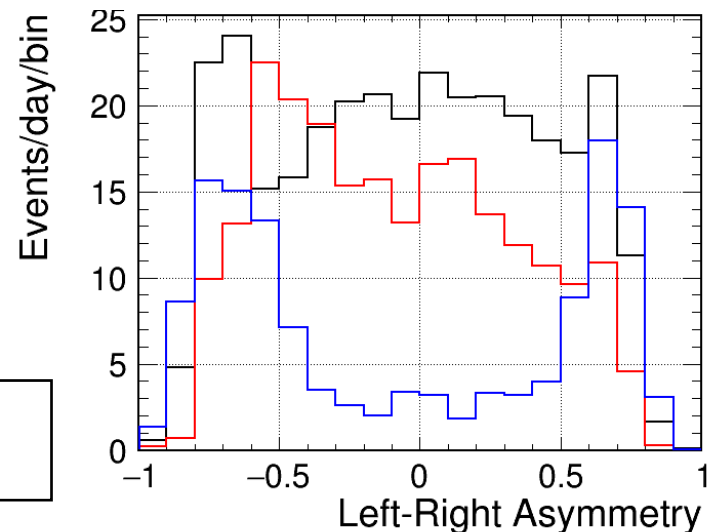
□光量分布を見て、 ^{214}Po の上流に対して放射平衡を仮定する。



□Excessの分布

- LR Asymmetry = (Left-Right)/(Left+Right)を定義して Bi-Poなどと比較。
- ExcessのLR Asymmetryは検出器内一様に存在するBi-Poと異なり、発光位置が左右に寄っている。ガラス窓表面でRaが光っている？

- 赤 Bi-Po tagged event
- 黒 Bi-Po anti-tag & $300 < \text{Light Yield} < 500$
- 青 Bi-Po anti-tag & $150 < \text{Light Yield} < 200$

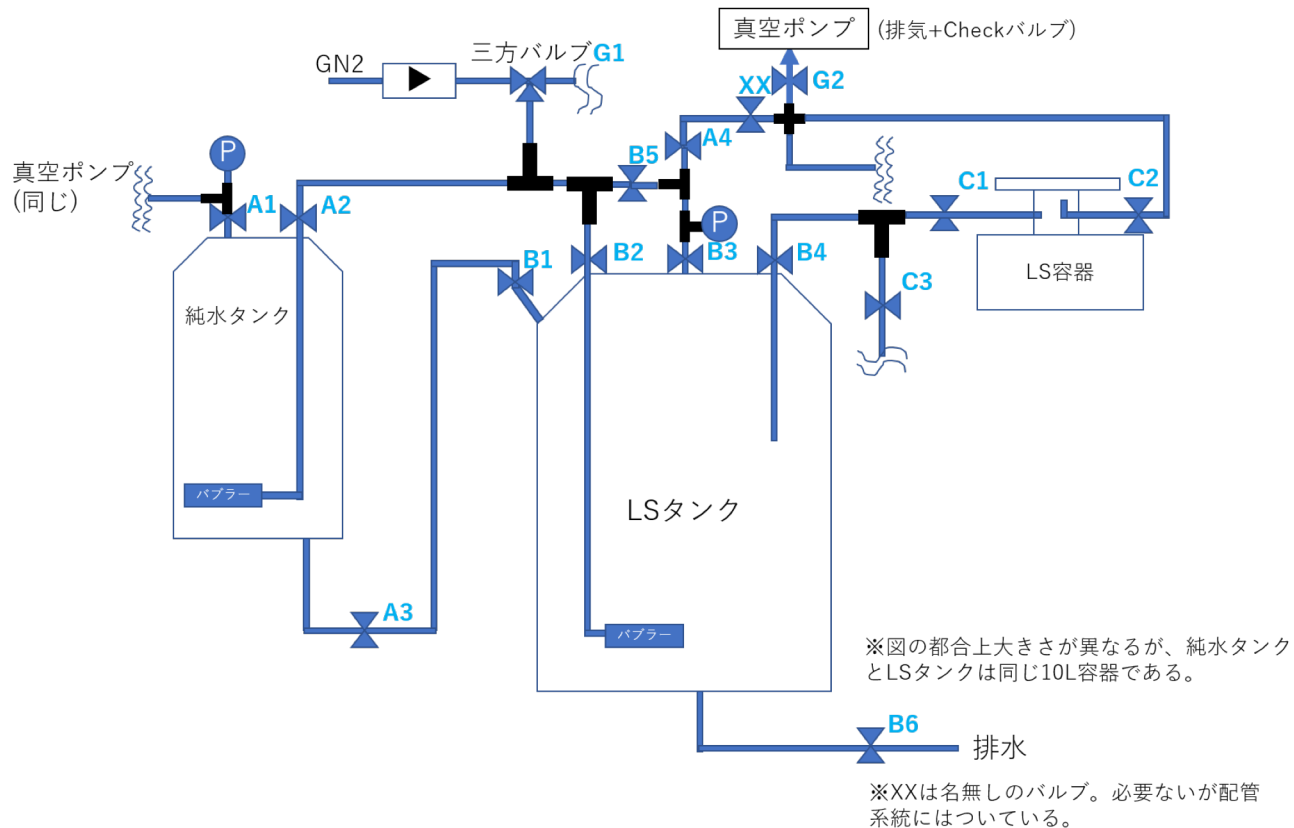


α 線BG源除去(2回目)

□改良2回目[Dec.2019]

□手順：**1.PMT接地面を石英窓へ交換** **2.容器の超音波洗浄** **3.液シンの純化**

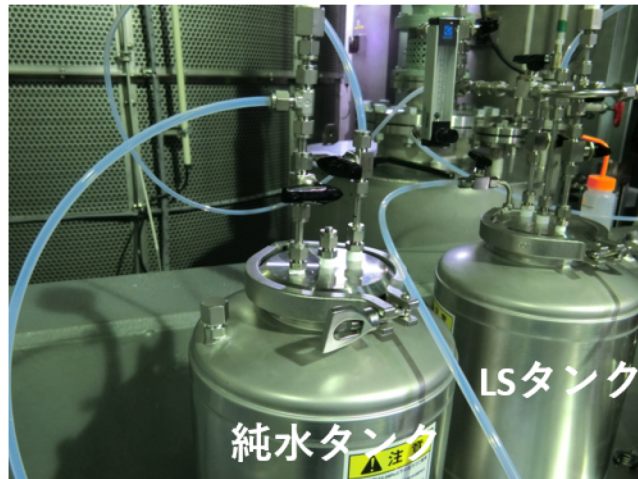
□純化配管系統



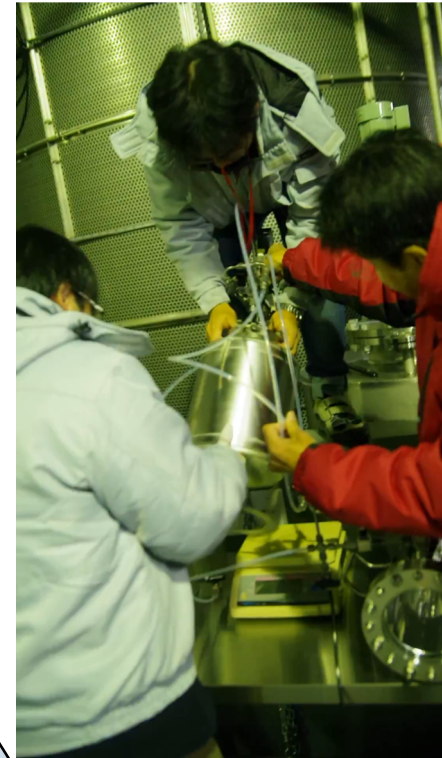
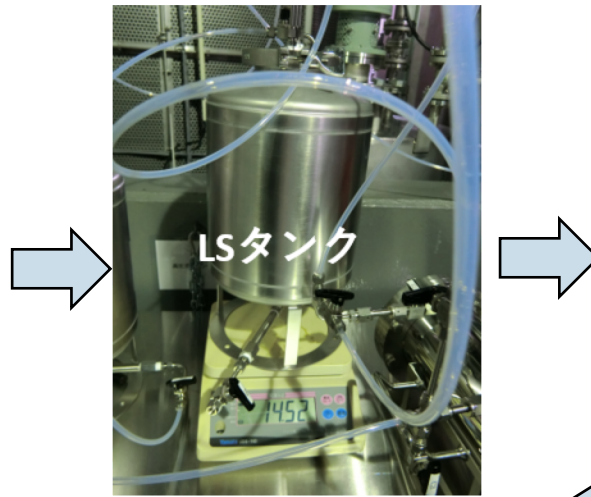
- 検出器容器、LSタンクに加えて、純水タンクがあり、外気に触れさせずにこの内部で純化作業を行う。

純化作業(in Lab-D)

まず純水タンク内の超純水を窒素で一晩バブリング。

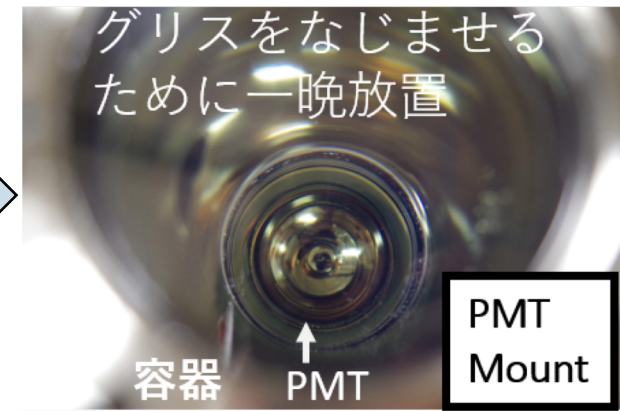
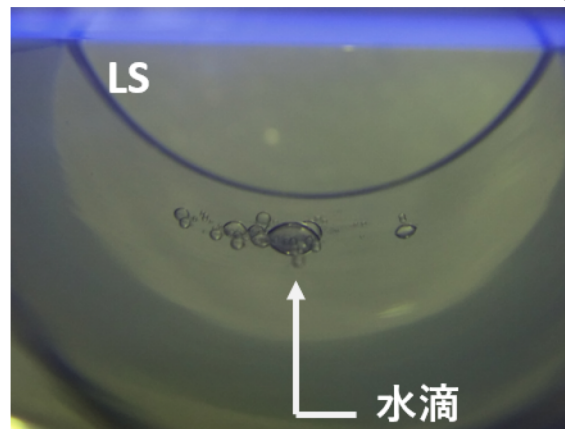


純水タンク→LSタンクに超純水を移送後攪拌。窒素バブリングして分離するまで一晩放置。



攪拌時の動画

検出器容器へのLS移送。
(少量の水滴混入したが、次回での改善点とする)



PMT Mount

初期 α 線レートと定常状態 α 線レート

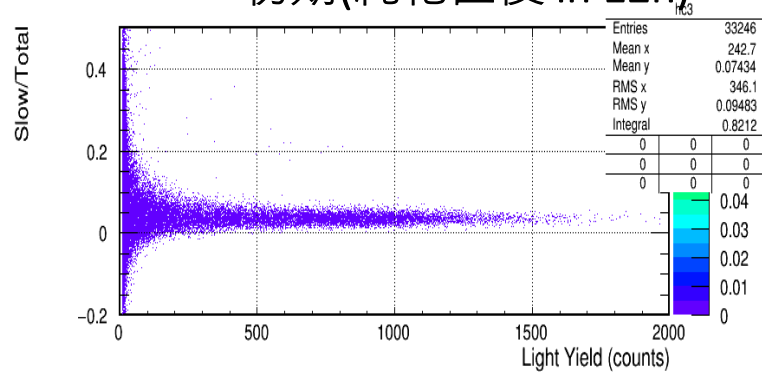
□ 測定環境: Lab-B w/鉛,銅シールド

□ トリガー: FADC 2CH Coincidence

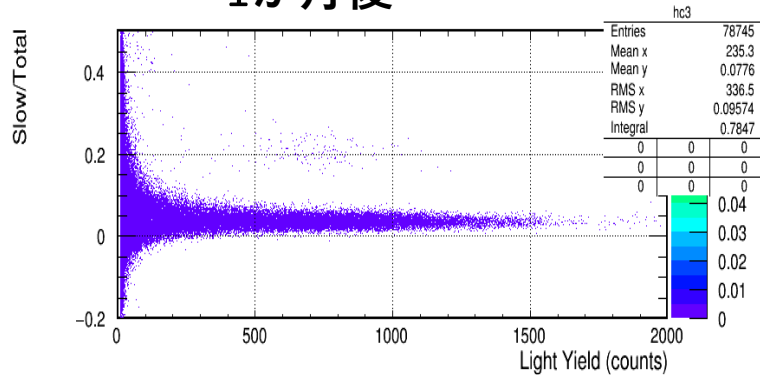
□ PSD分布(Selection: $\Delta t < 1\text{ms}$)

□ Z軸は時間[s]で規格化

初期(純化直後 in 12h)



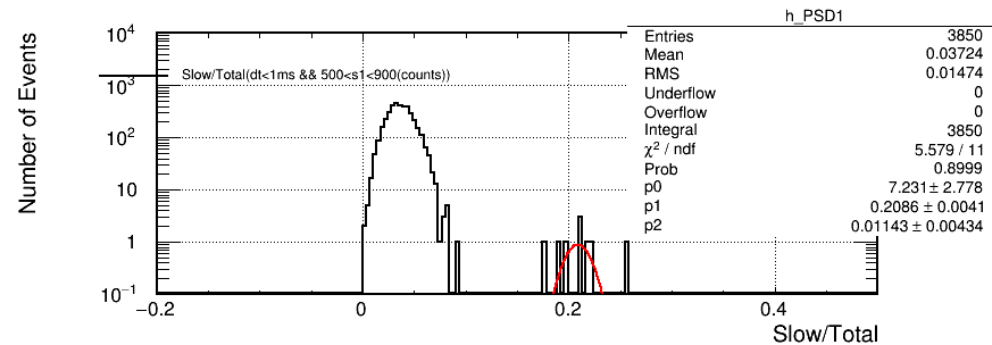
1か月後



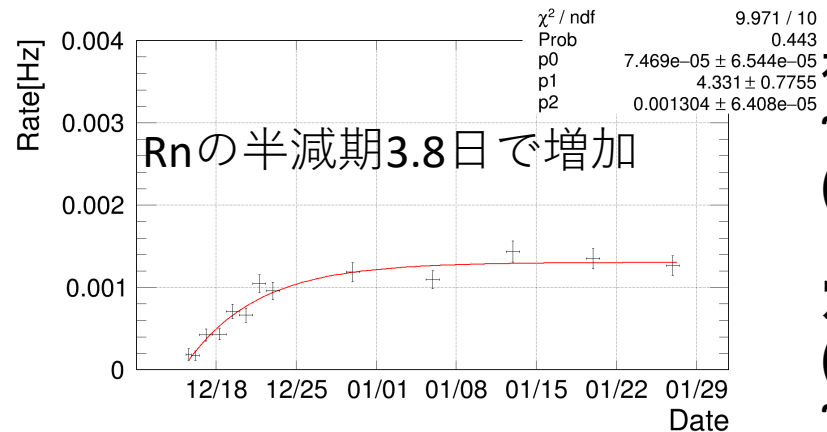
□ Slow/Total分布

(Selection: $\Delta t < 1\text{ms}$ と $500 < \text{L.Y.} < 900$)

□ α 線量をガウシアンFitから算出



□ α 線レートの時間変化



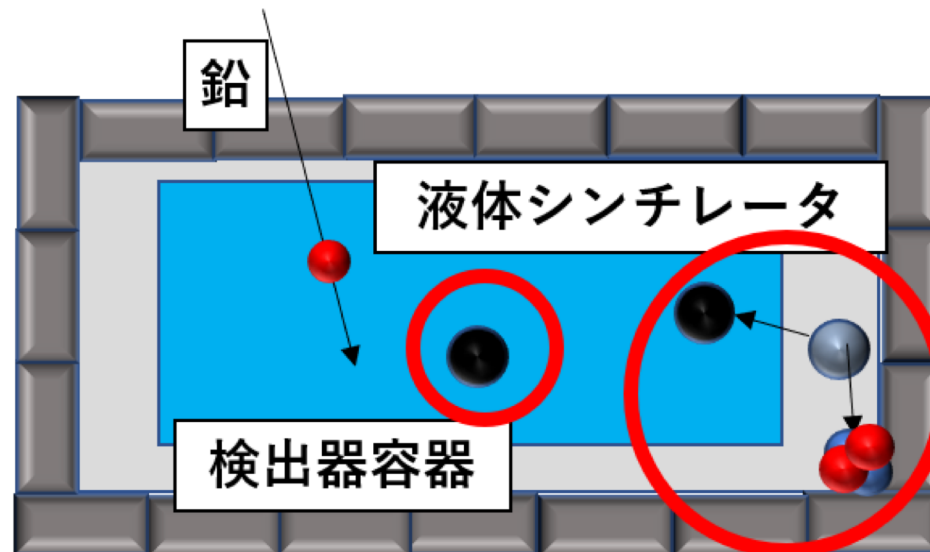
初期
~0.2mBq
(20分の1)

定常状態
(1か月後)
~1.3mBq

Rnの半減期3.8日で増加

増加の理由

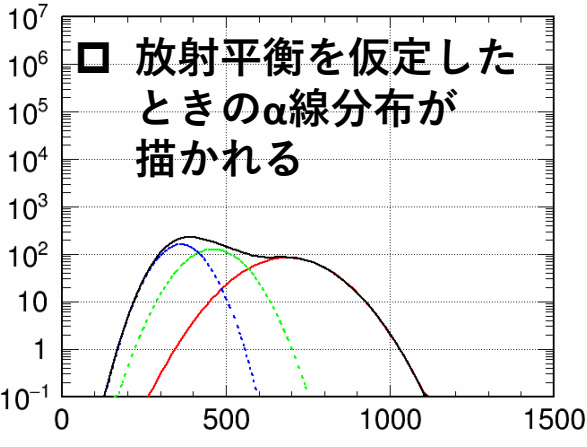
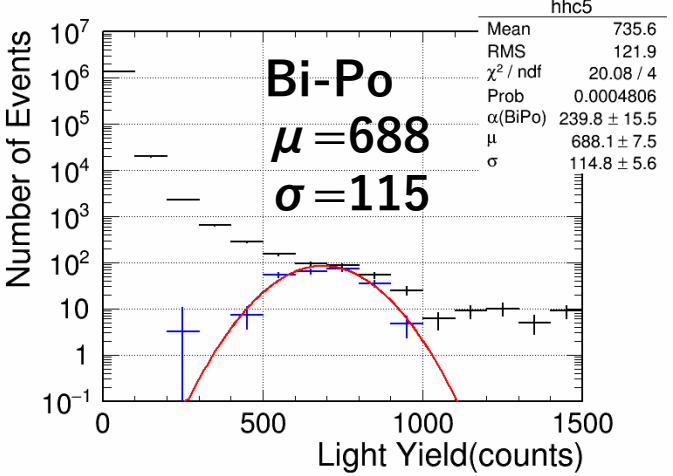
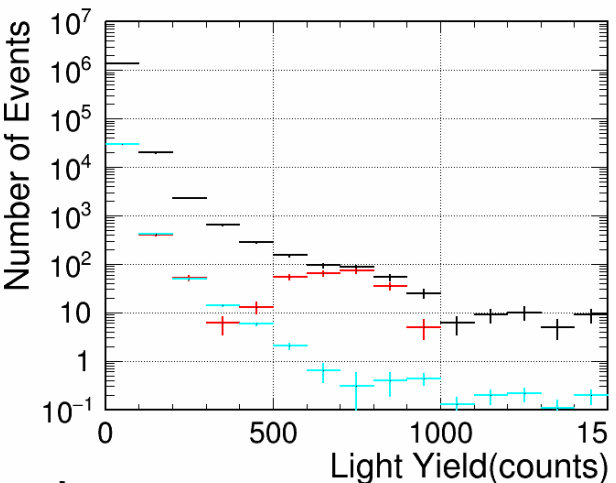
- 初期レートが少ないことから液体シンチレータ中に溶け込んでいるRnガスは低濃度を達成できていると言える。(～0.2mBq/4kg LS Detector)
- 以降の増加は検出器容器の部材に含まれるRnの親核種が崩壊後、時間をかけて液体シンチレータに染み出したことが理由か。
- 今後、低不純物容器を作成すること、もしくは内部にRnを透過しない容器(フィルム)等を導入することを検討している。



期待される中性子量と今回低減したα線量の比較

3) V.V.Verbinski, NIM,1968 [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(68\)90003-7](https://doi.org/10.1016/0029-554X(68)90003-7)

α線光量分布関数の算出 (Selection: 0.1<spt<0.3、 -0.6<L-R Asym.<0.6)



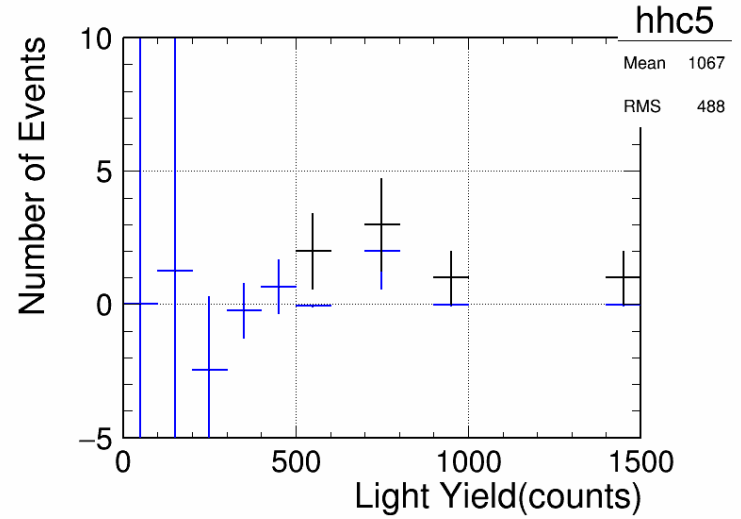
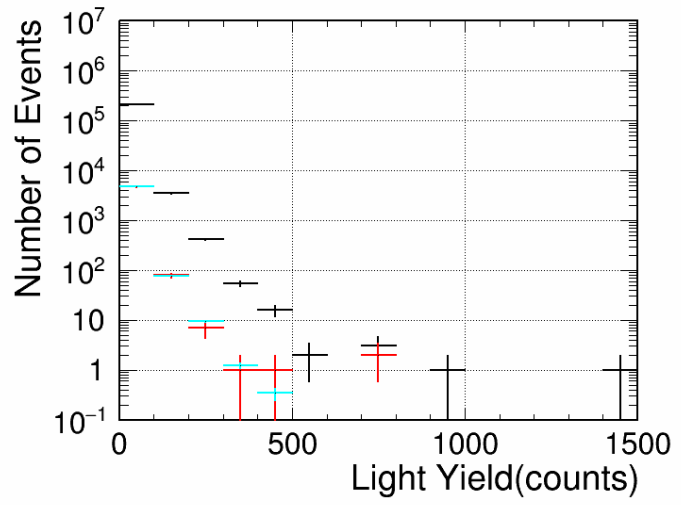
赤 : BiPo(dt<1ms)
水 : Accidental(Scaled dt>1ms)

これをμ/σ=一定にしつつ²²Na
に対する光量比でスケール³⁾

青: ²²²Rn, 緑: ²¹⁸Po, 赤: ²¹⁴Po

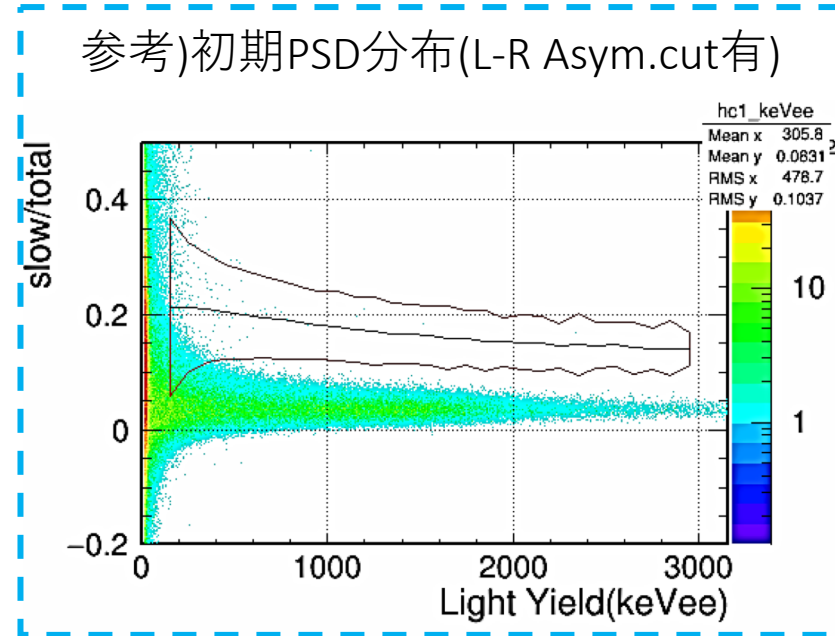
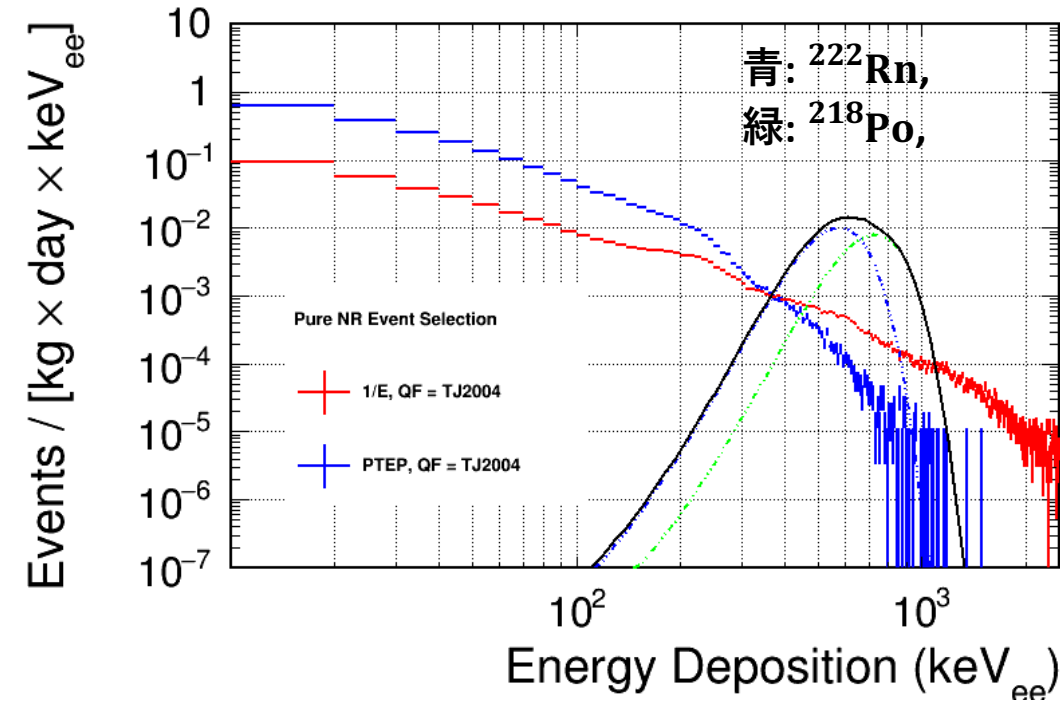
8h以内のデータによる光量分布

右側の青いヒストグラム中、Bi-Po Gaussian (μ-2σ, μ+2σ)に含まれる事象は2.84。



Geant4 Simulation

- 2.84EventsをL-R Asym. CutのEff.(82.9%)で補正、ガウシアン関数を重ねる。
- シンプルにBC501Aを置いたSimulation



- ^{214}Po は $dt > 1\text{ms}$ でveto可能。 ^{218}Po , ^{222}Rn が残る。
- ($^{222}\text{Rn} \Rightarrow ^{218}\text{Po} \Rightarrow ^{214}\text{Pb}$ の3分のDelayed Coincidenceで除去は原理的に可能)
- あと、100分の1程度下げたいと考えている。中性子量出したい。

まとめ

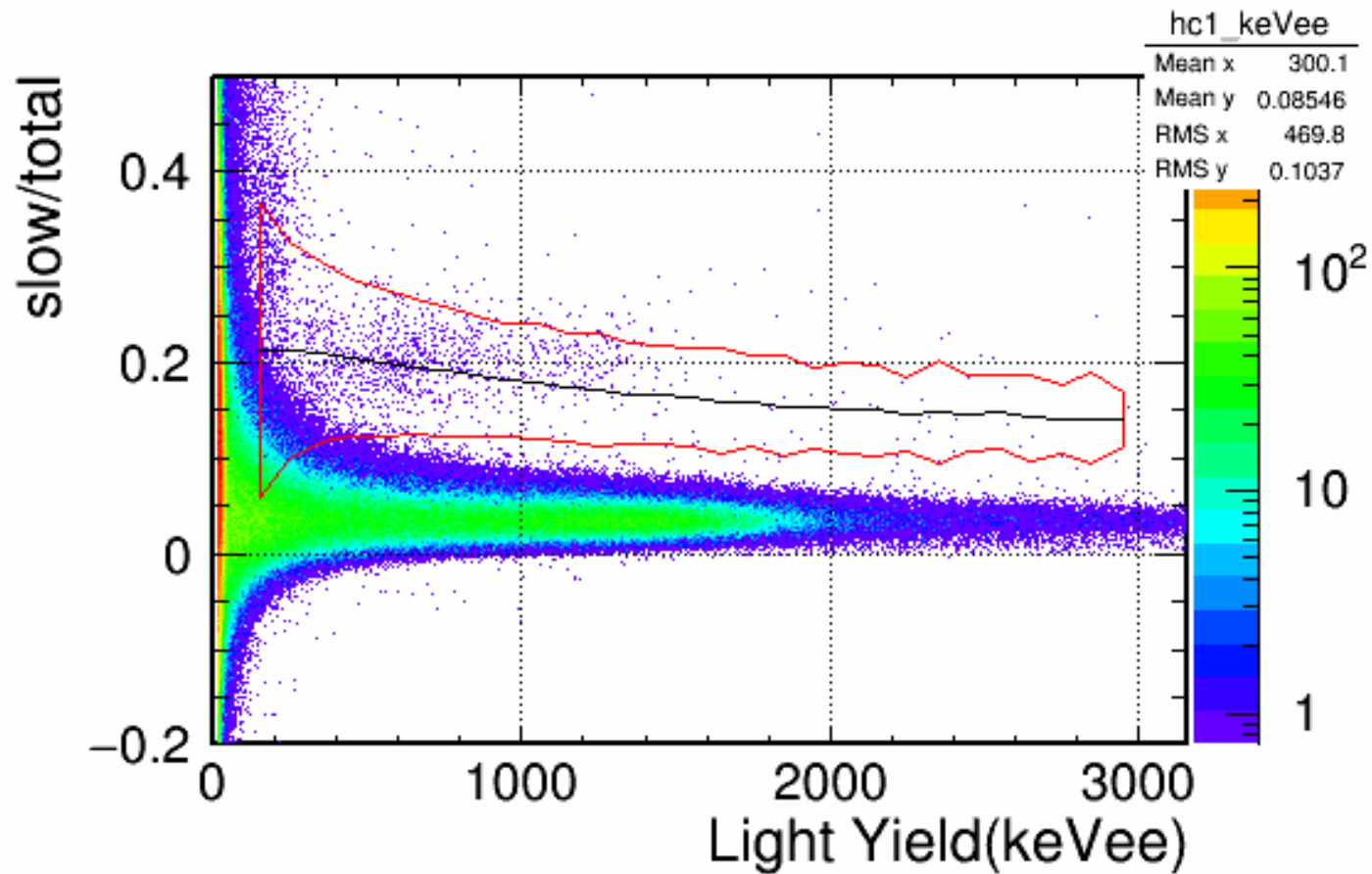
- 液体シンチレータの中性子識別能力向上のためには、U/Th系列由来の放射性不純物(α 線源)を除去することが必須である。
- 上記を達成するために、低放射性不純物容器と液体シンチレータの「純化(液液抽出)」の両方からアプローチを行った。
- 結果として、作業工程に多少の不備はあったが従来の液体シンチレータの20分の1程度のBG量を達成した。
但し、1か月程度で悪化してしまう。(従来の4分の1程度)
- Rnが液体シンチレータに溶け込まないようにする方策が必要である。
例えば、容器自体をより低放射能なもので作成する、または容器内側にRnを通さない容器(フィルムなど)を導入することを検討している。
- 今回低減した α 線量を期待される中性子量と重ね描いてみると、400-1000keVでオーダー2程度の低減が目標となる。
- 中性子量を何とか引き出せないか格闘中。

Backup

- 以降、Backup

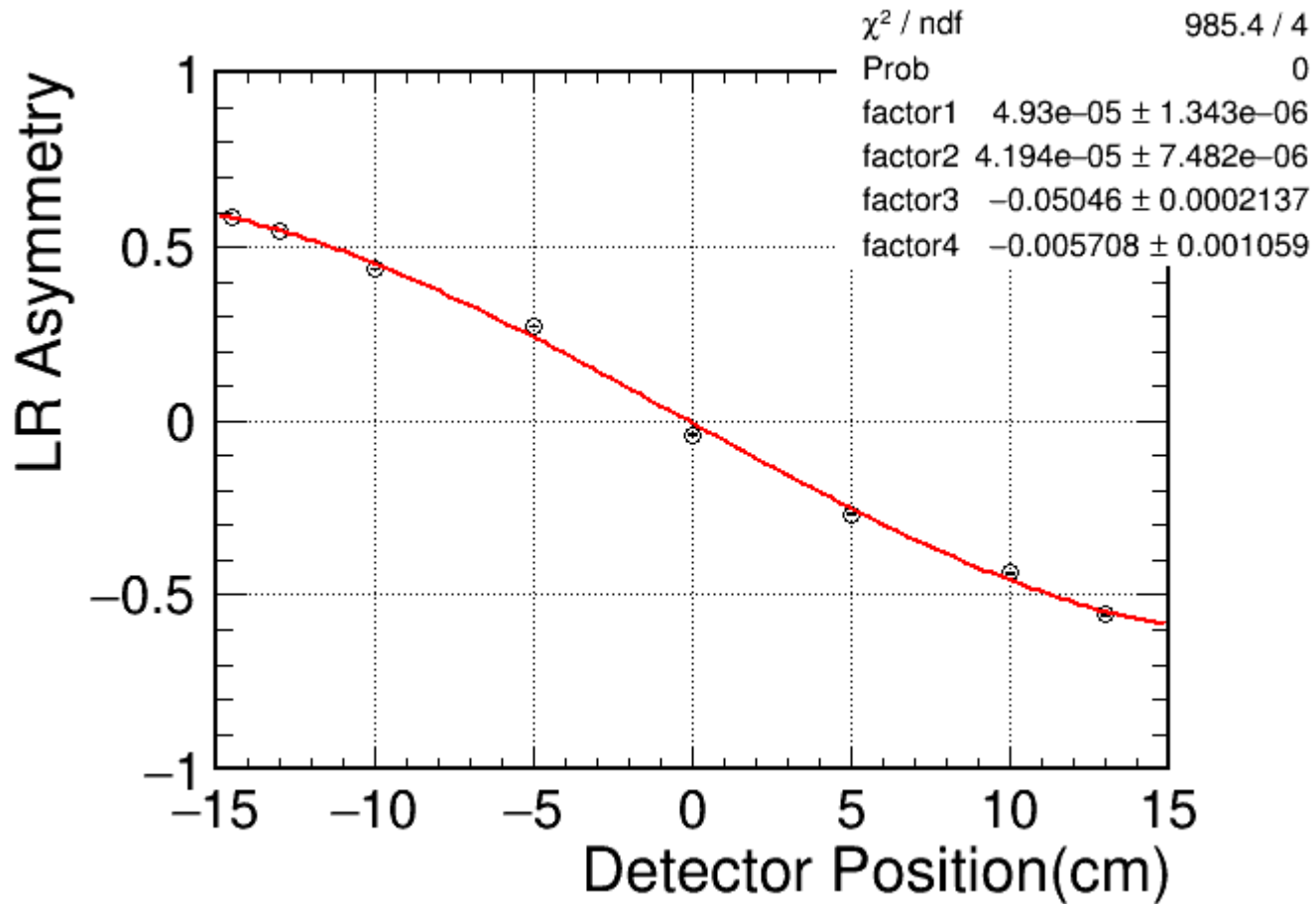
1か月後のPSD分布

- 2日分程度のデータ。Selectionは $-0.6 < \text{L-R Asym.} < 0.6$
- 1.3mBqまで増えると厳しい。

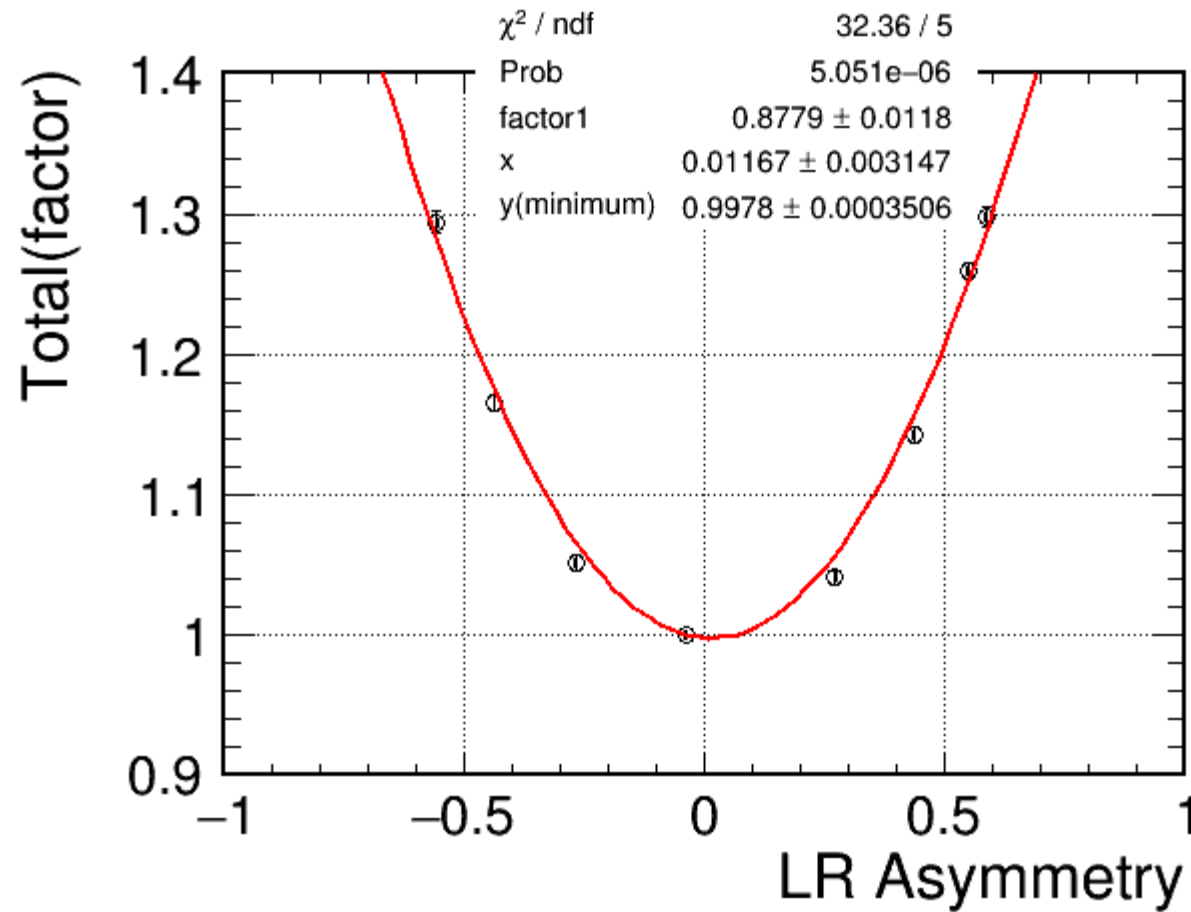


検出器位置とL-R Asymmetry

- Co-60をコリメートして検出器に照射してコンプトンエッジのデータを得た。



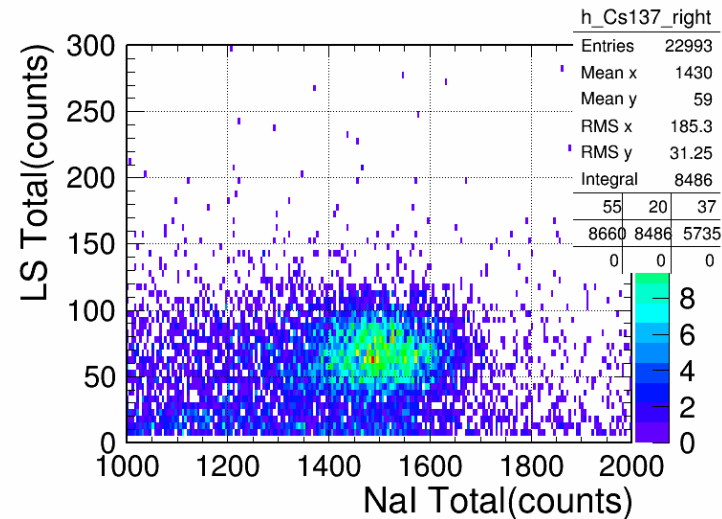
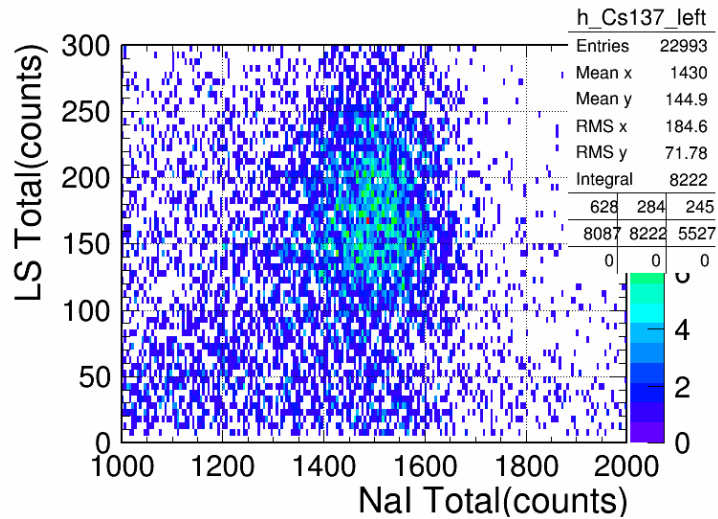
光量のL-R Asymmetry補正



- データに対してはL-R Asymmetry=0の点（極小点）で光量を補正している。

Energy Calibration

- Cs137を用いたBack scatter w/NaIで測定



- $477\text{keV}/302\text{counts}$
 $=1.58\text{keVee/count}$

