

液体シンチレーター中性子検出器の 低バックグラウンド化

2024年2月7日

「第9回極低放射能技術」研究会

早稲田大学 田中雅士

内容

- 新学術最終年度の区切り(地下素核+地下宇宙で10年)ということで、ここまでの液シン中性子測定についてのまとめ
- 歴代(早稲田)学生の紹介
- 地下環境中性子
- 液体シンチレータ検出器
- これまでの測定結果
- 今後の課題

早稻田中性子歴代学生

- 初代 橋場(2011-2013)
- 2代目 川村(2012-2014)
- 3代目 鈴木(2014-2016)
- 4代目 菊池(2015-2017)
- 5代目 平良(2017)
- 6代目 小津(2021-2020)
- 7代目 岩澤(2020-2022)
- 以降 横国南野研 (2022-)



橋場



川村



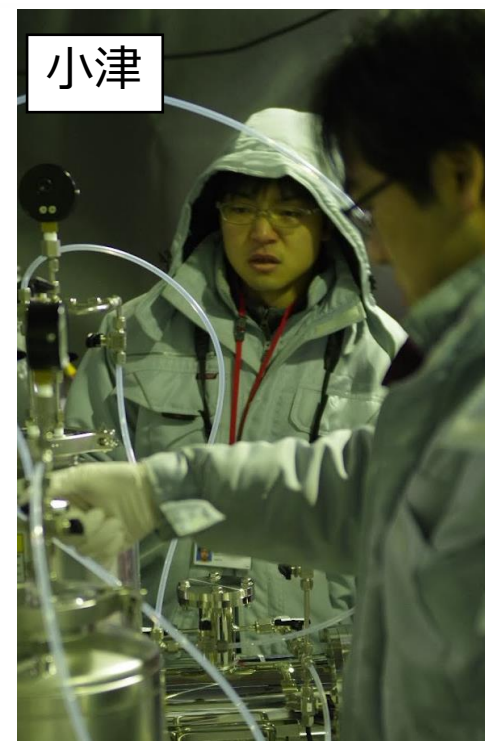
鈴木



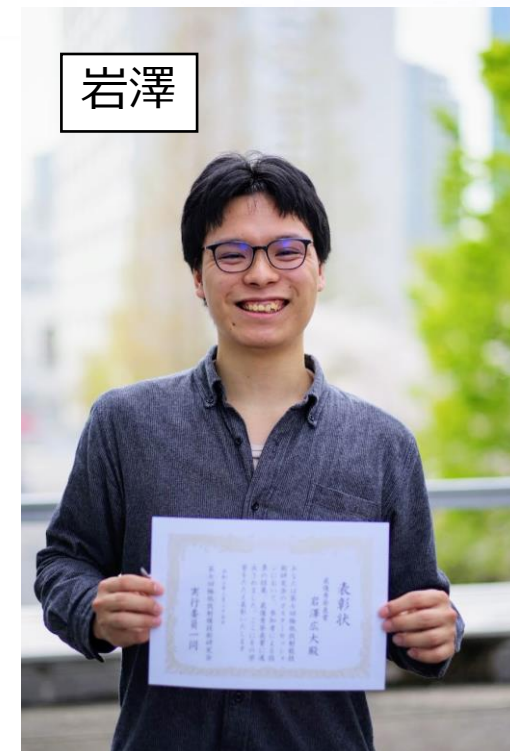
菊池



平良



小津



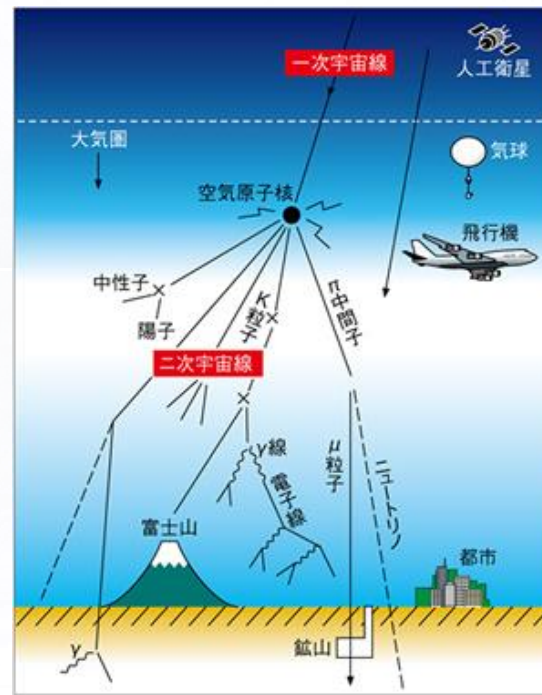
岩澤

学位論文 (修士5本 学士3本)

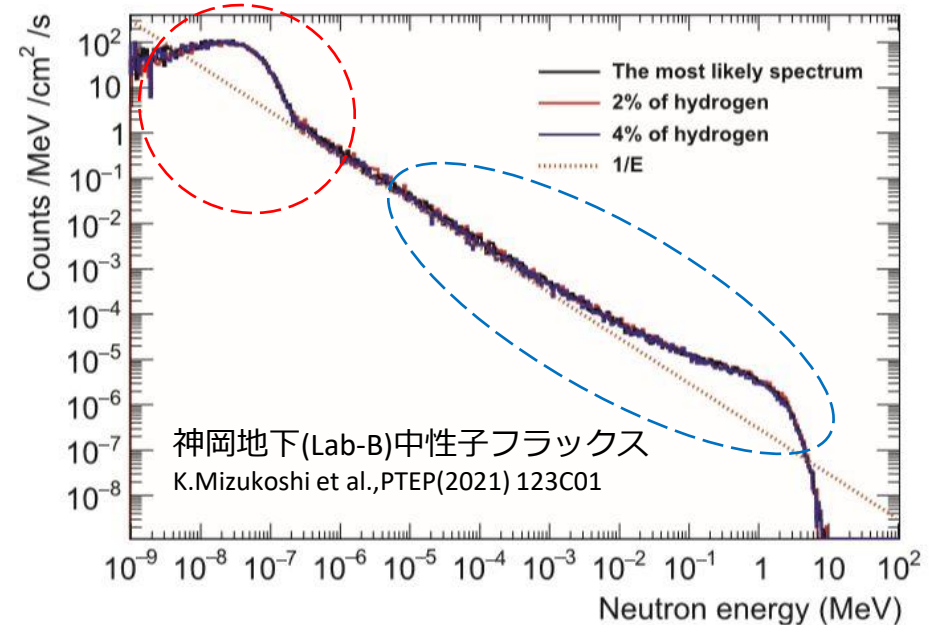
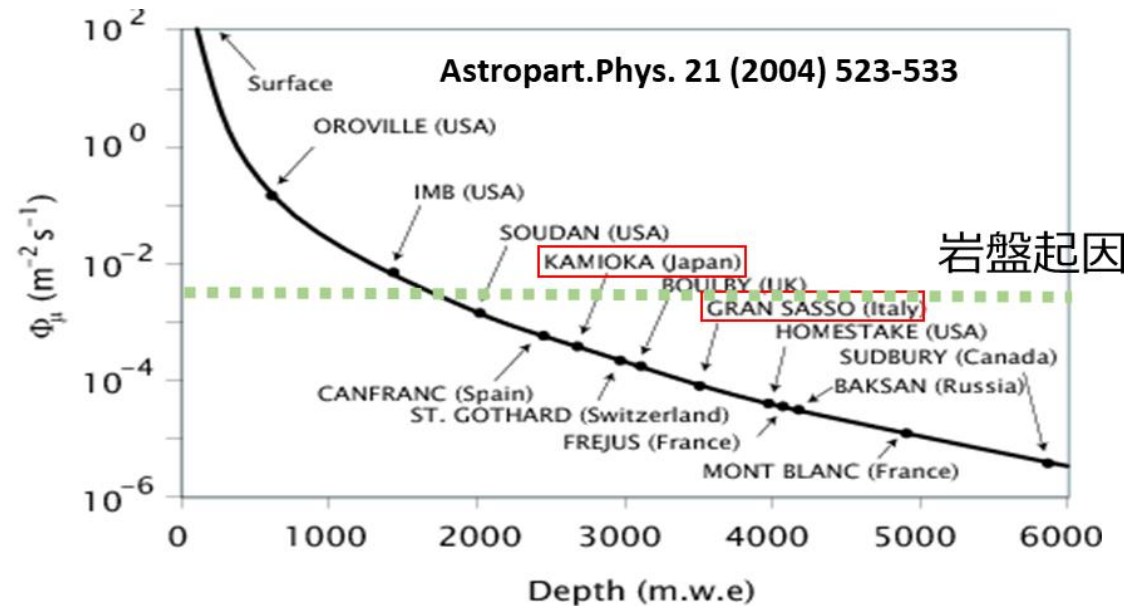
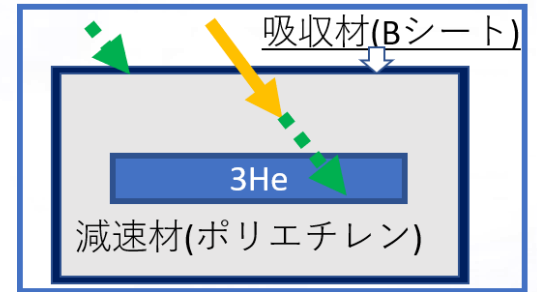
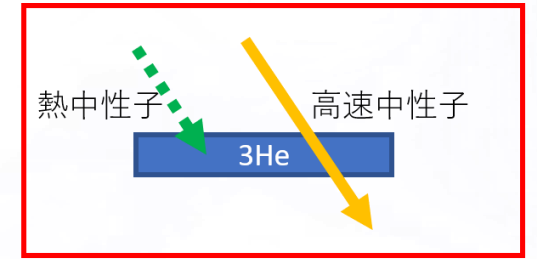
年度	学位	名前	題目	
2013	修論	橋場裕之介	ANKOK 実験における背景事象の理解と分離能力の評価	早稲田地上
2014	修論	川村将城	ANKOK 実験のための地上環境中性子事象の測定と評価	
2015	卒論	菊地崇矩	液体シンチレータを用いた消光因子及び環境中性子の測定	
2016	修論	鈴木 優飛	神岡地下実験室における液体シンチレータを用いた環境中性子測定	神岡地下 (Lab-B)
2017	卒論	平良文香	神岡地下での液体シンチレータ長期間測定データの解析	
2021	卒論	小津 龍吉	液体シンチレータを用いた中性子波形弁別	
2020	修論	小津龍吉	液体シンチレータ検出器の低バックグラウンド化による環境中性子測定感度向上	
2022	修論	岩澤広大	神岡地下環境中性子測定のための液体シンチレータ容器の極低バックグラウンド化	

地下環境中性子

- 宇宙線起因 → 地下で低減
 - 二次宇宙線
 - μ と大気・岩盤との反応
- 岩盤起因 → 地下でも減らない
 - 岩盤内のU/Thの核分裂
 - α 崩壊 $\rightarrow(\alpha,n)$ 反応
- 中性子は地下素核実験において
主要な背景事象になりうる
- 定量的な理解が必要



放射線等に関する副読本



中性子測定コンソーシアム

早稲田大学 理工学術院 理工学研究所
田中 雅士
masashi.tanaka@aoni.waseda.jp
神戸大学 大学院理学研究科物理学専攻
帝釋 稜介
158s113s@stu.kobe-u.ac.jp
早稲田大学 大学院先進理工学研究所
鈴木 優飛
yuto@kylab.sci.waseda.ac.jp
名古屋大学 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 F 研究室
吉本 雅浩
yoshimoto@flab.phys.nagoya-u.ac.jp

2017年(平成29年)3月10日

1 中性子測定コンソーシアムとは

1.1 研究背景と設立経緯

大深度地下実験施設のような極低バックグラウンド環境下での稀事象探索実験(暗黒物質, 2重ベータ崩壊など)において環境中性子は主要な背景事象源のひとつであり, そのフラックス, エネルギー分布, 年変化などの時間依存性, 飛来方向等の詳細な理解が探索感度向上のためには重要となる。中性子はそのエネルギーにより細かく分類されるが, 本稿においては, 運動エネルギーが0.5 eV以下のものを「熱中性子」, それ以上のエネルギー

本コンソーシアムは平成26年度より開始した新学術領域「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」のB02班「低バックグラウンド技術に応用した方向感度をもつ暗黒物質探索の基礎研究」に端を発している[1]。B02班に参画している神戸大, 名古屋大, 早稲田大はそれぞれが小規模の暗黒物質直接探索実験を主導しており, おおよそ20名の学生と4名の若手スタッフ(30~40代前半)が活発に研究を進めている。このような環境において, 学生同士が自発的に集まって研究会を行おうという雰囲気が出てくるのは必然であり, 学生主体の第一回B02班若手研究会が2014年8月に神戸にて行われた(図1[1])。

280



図1: 第一回若手研究会における集合写真(上), および第三回若手研究会における懇親会(下)



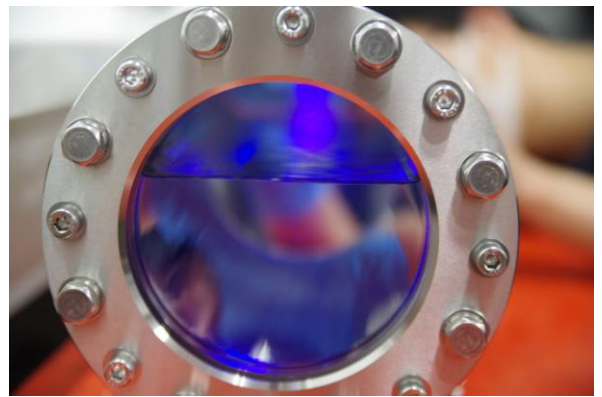
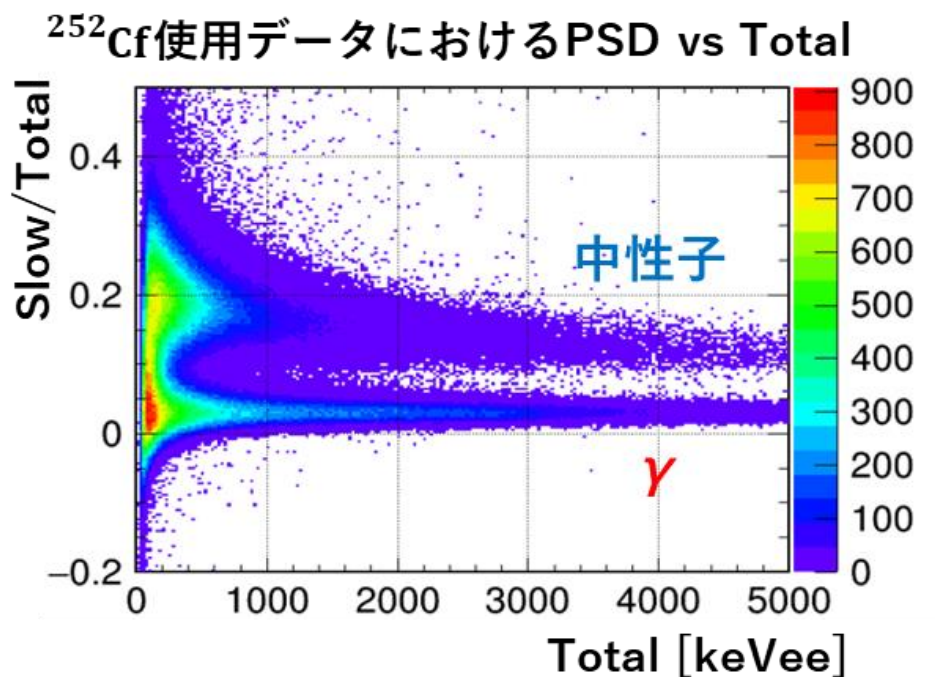
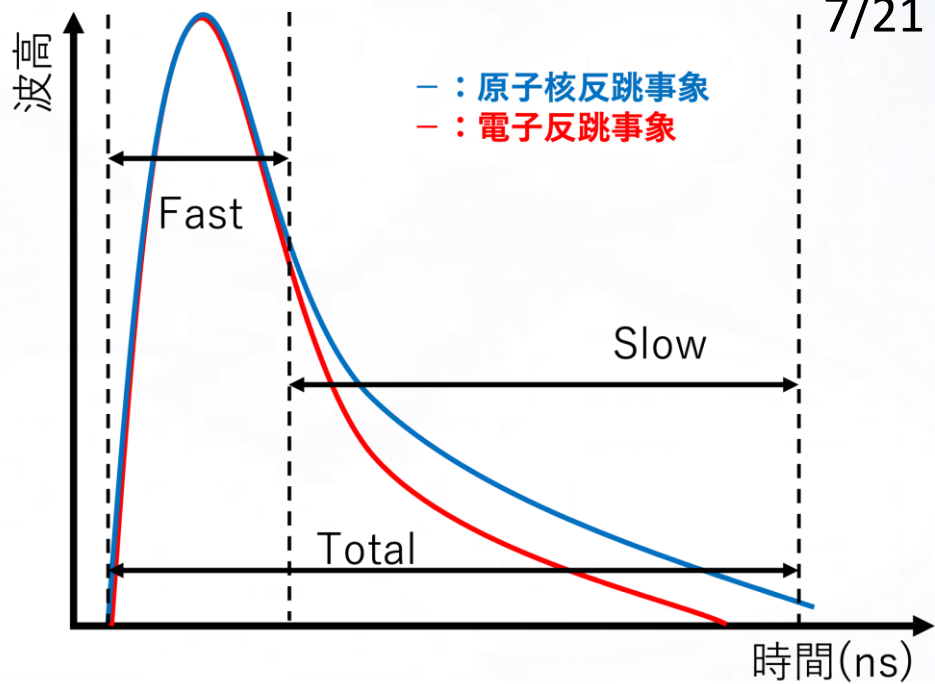
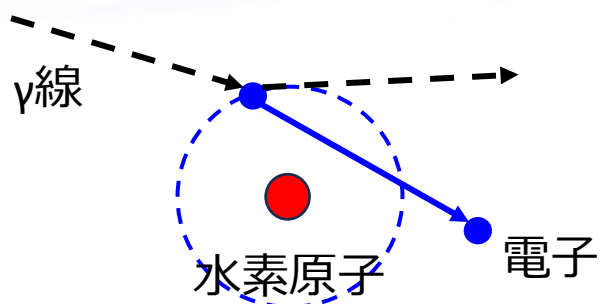
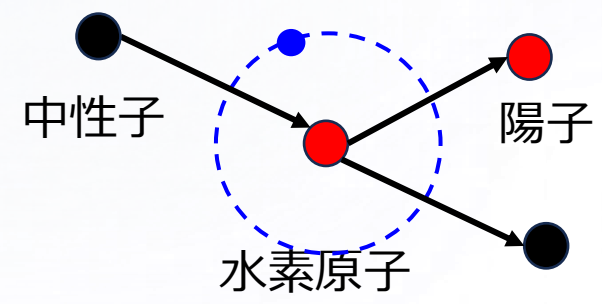
図2: 神岡地下実験施設における中性子測定のまどめ

年に数輪研により行われた液体シンチレータを用いた測定(非公開)の計3測定のみであった。現在, 本コンソーシアムでは神岡実験施設の中でもNEWAGE実験が設置されているLab-B, XMASS実験が設置されているLab-C, CANDLEs実験が設置されているLab-Dの3箇所測定を進めている。また, 名古屋大学では, 長年培った原子核乾板の技術を活かして中性子検出に特化した原子核乾板を新たに開発し, 地上及び地下に於ける

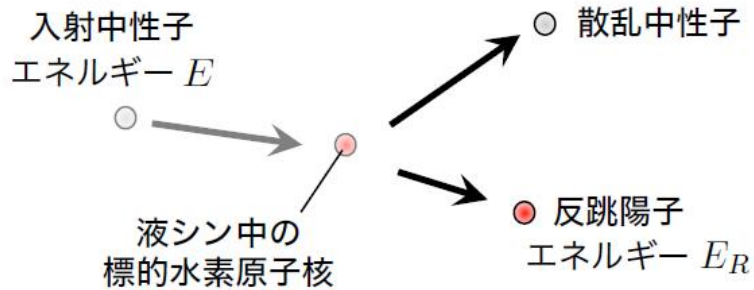
- 地下環境中性子フラックスの理解
- 実験グループをまたぎ測定記述・機材を共有し、測定手法を確立したうえで、多地点・長期間の測定を行いその結果を公表・共有することを目的としている
- ANKOK, CANDLES, KamLAND, NEWAGE, NEWSdm, XMASS, 等が参加
- 液体シンチレータ測定
 - CANDLES (阪大 吉田さん) 低BG検出器技術
 - NEWAGE (神戸大 身内さん) 実験スペース(Lab-B)

液体シンチレータ (BC501A)

- Saint-Gobain BC501A
 - 同等品 : Eljen EJ-301
- キシレン+波長変換剤
- HとCが中性子と散乱
- 波形弁別による粒子識別

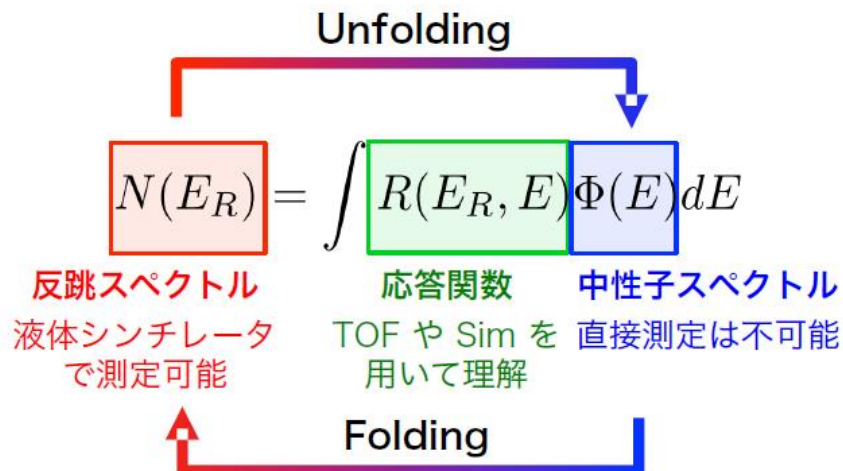


中性子エネルギースペクトラム測定(Unfolding)



暗黒物質探索実験や二重ベータ崩壊探索実験において背景事象を見積もるためには**反跳スペクトル**ではなく、**中性子スペクトル**が必要

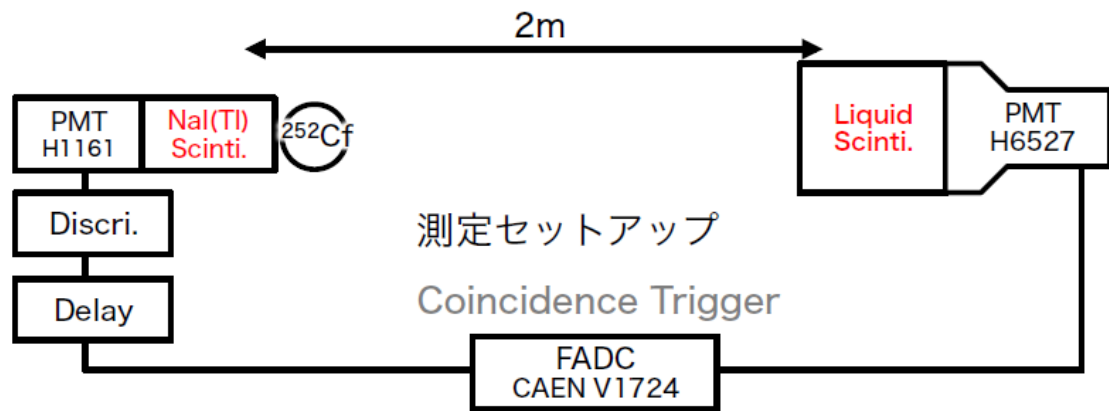
■ 液体シンチレータ検出器はUnfoldingを用いたエネルギースペクトル算出が可能



- **反跳スペクトル**
実際の環境中性子測定で得ることができる
 - **液体シンチレータの応答関数**
別途、測定・理解をする必要がある
- ⇒ まずは応答関数の理解をすることを試みる

応答関数の測定

TOF (Time of Flight)を用いた測定



中性子のTOF = Nal(Tl)信号と液シン信号の時間差

$$E = \frac{1}{2}m_n \left(\frac{L}{T} \right)^2$$

E : 中性子エネルギー

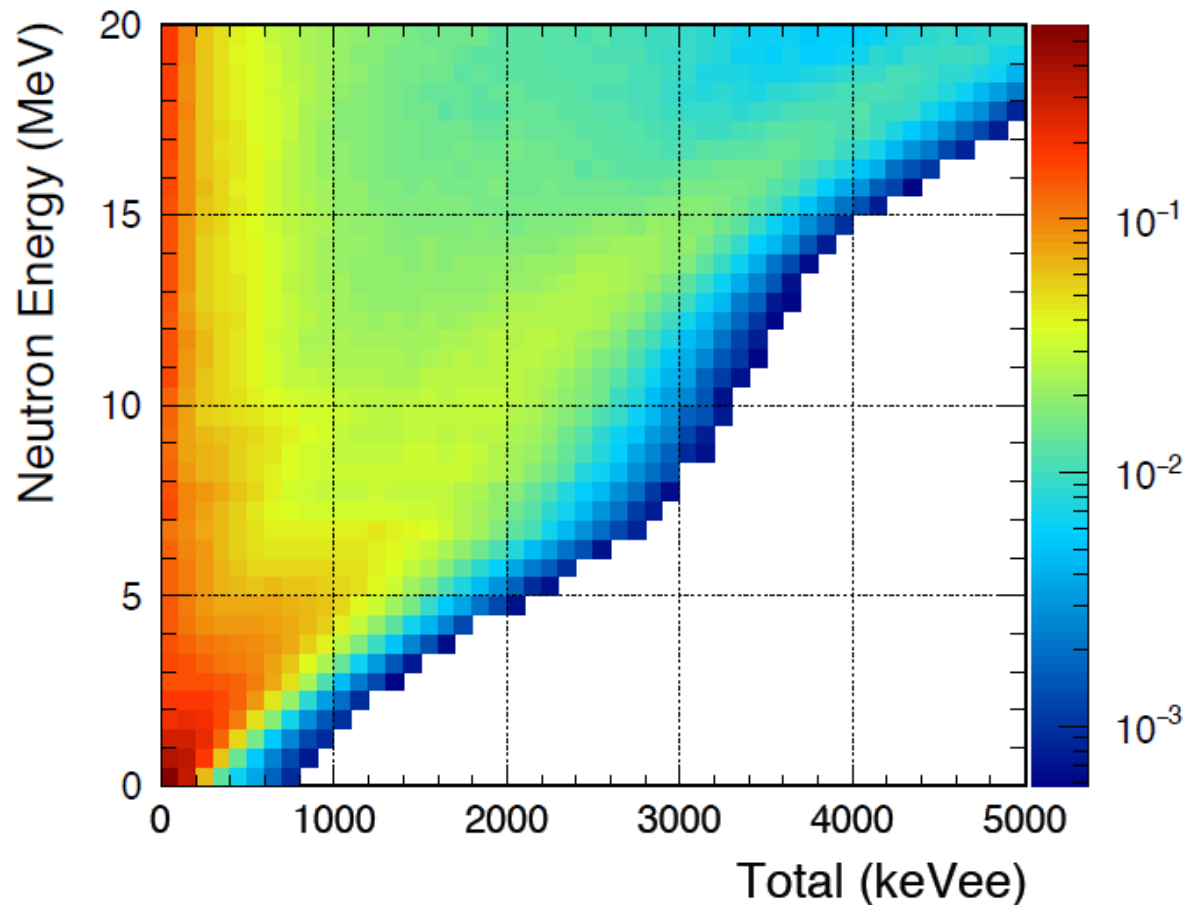
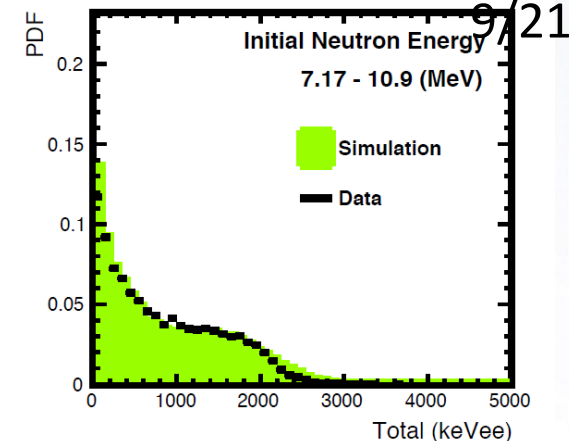
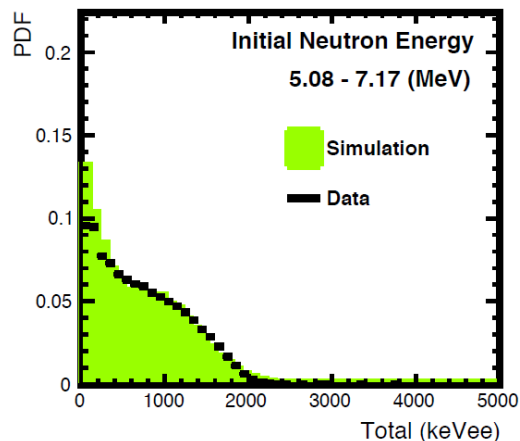
L : 飛行距離

T : 飛行時間

m_n : 中性子質量

TOF [μs]	Energy [MeV]
0.05	8.35
0.1	2.09

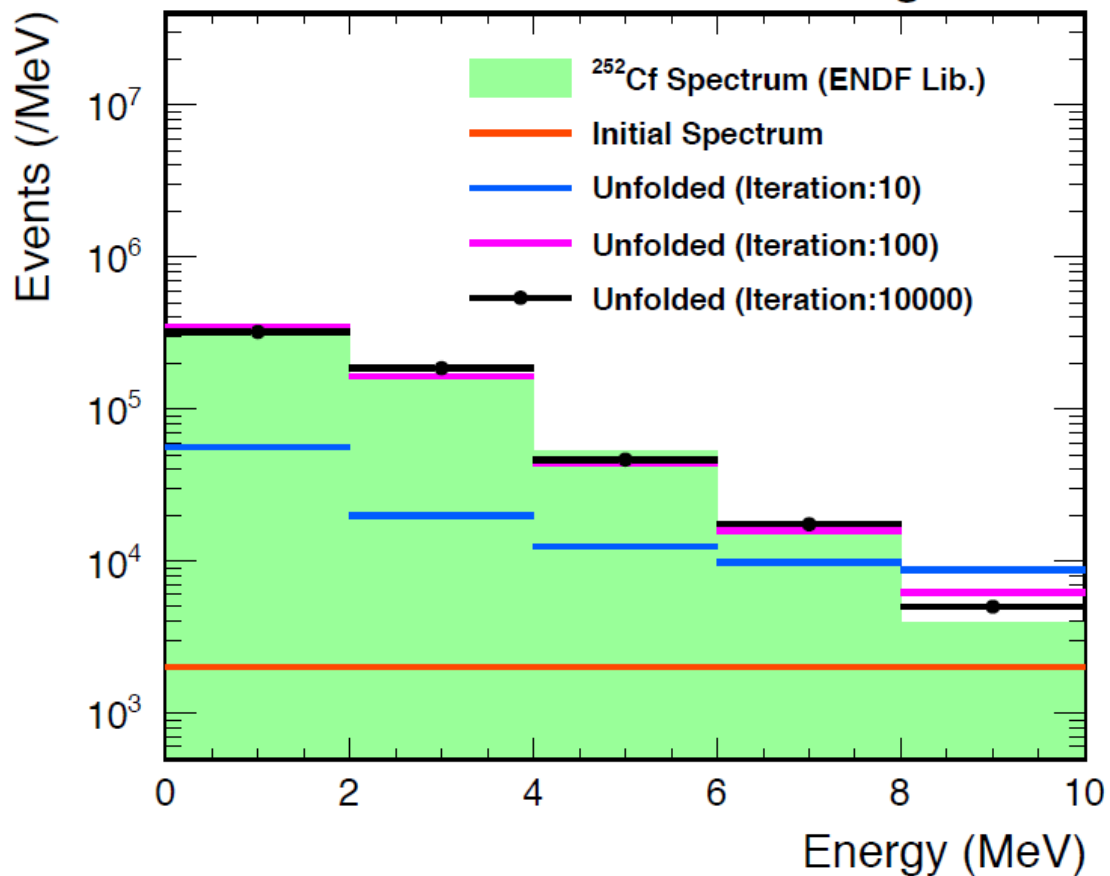
反跳エネルギー (= Total) との関係を見て
応答関数を算出



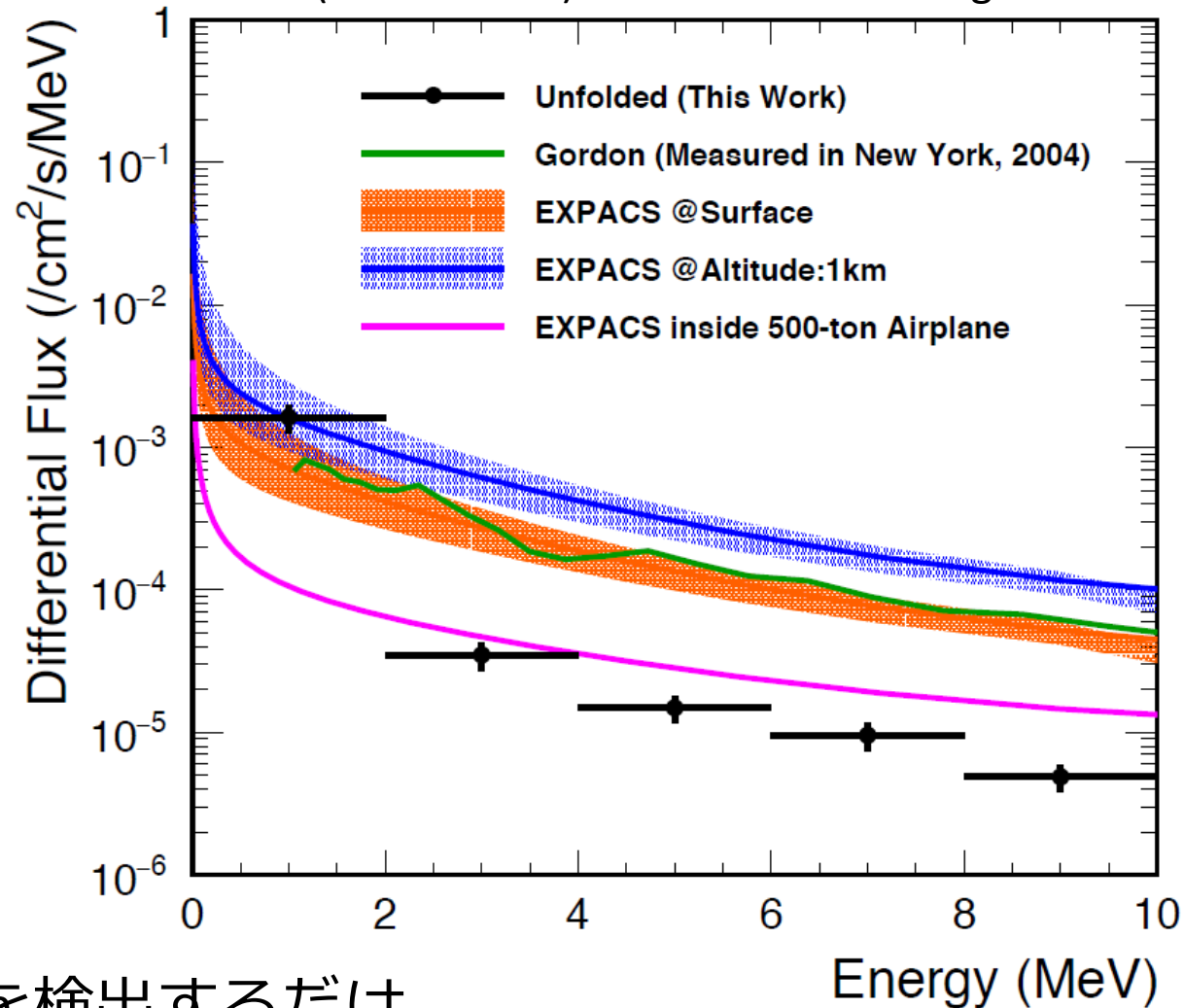
スペクトラム測定結果(Cf線源、地上環境中性子)

2016年度 鈴木優飛 修論

^{252}Cf 測定データのUnfolding



地上(早稲田大学)環境中性子Unfolding

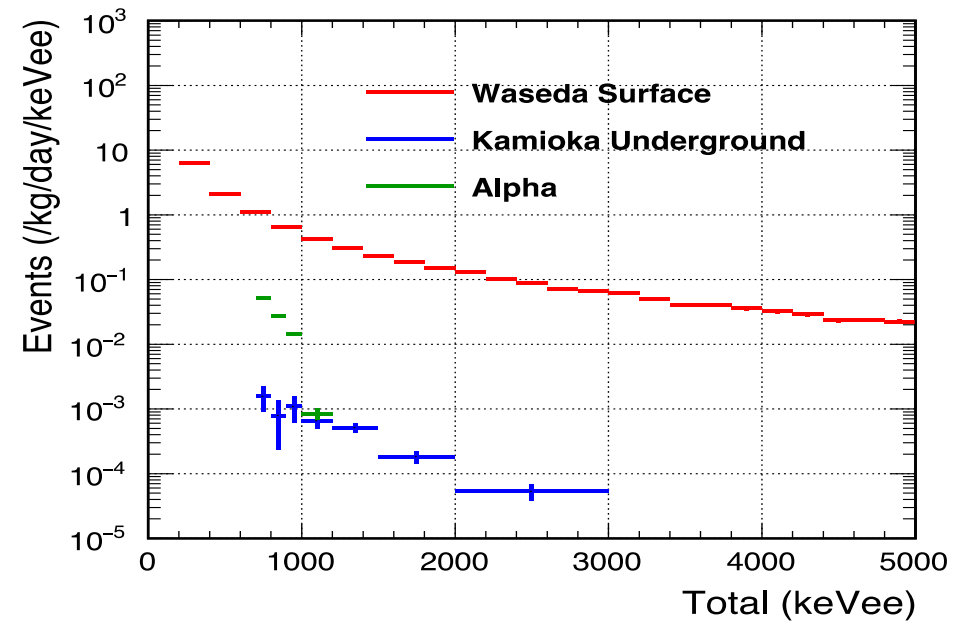
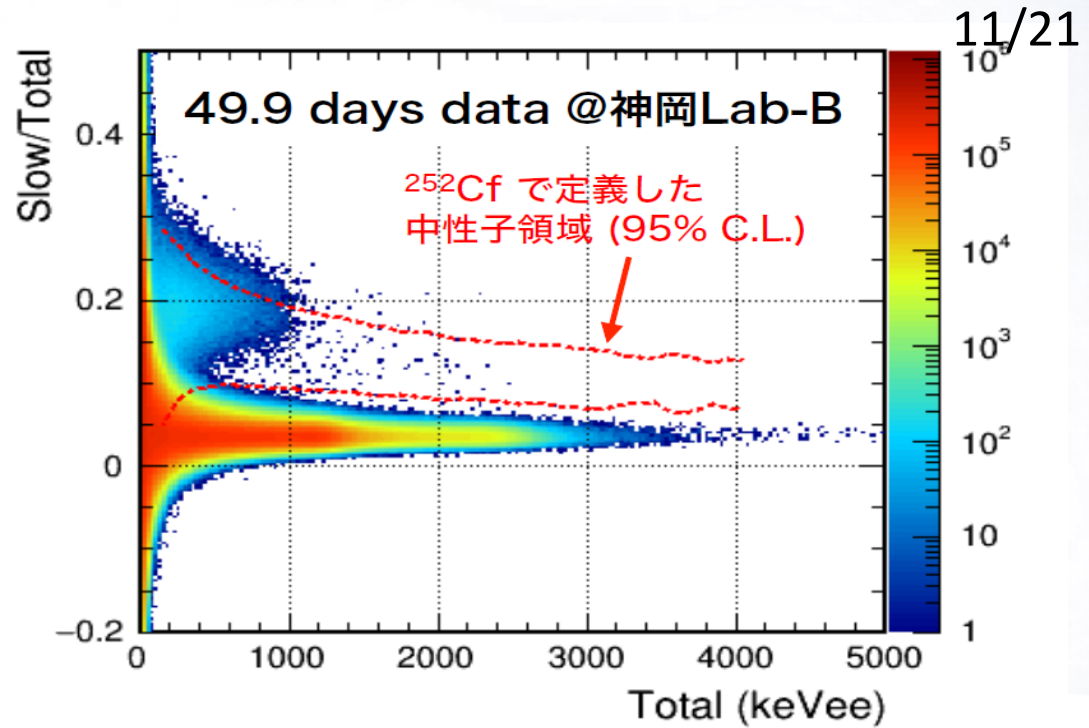
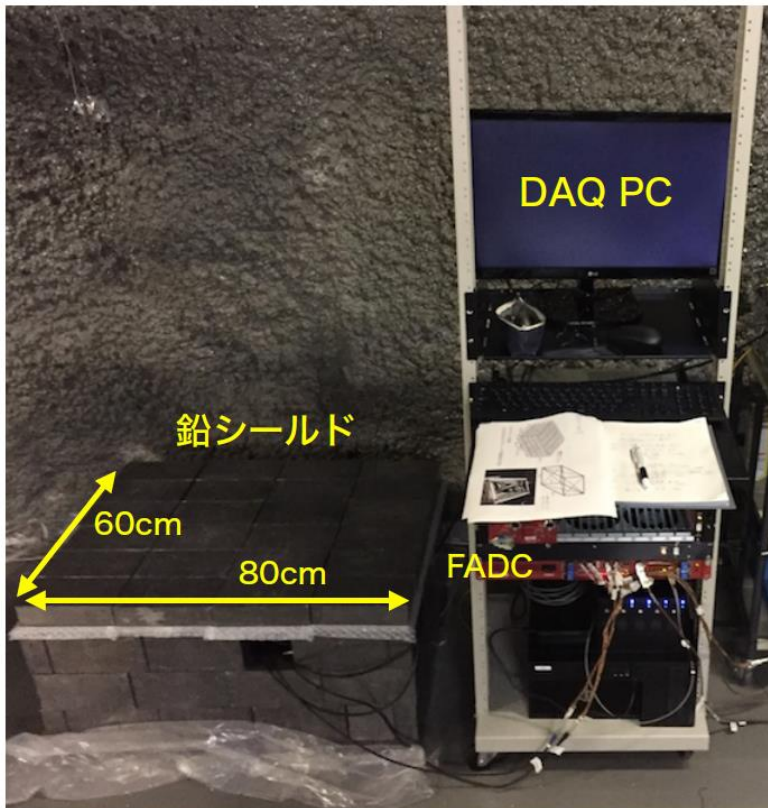
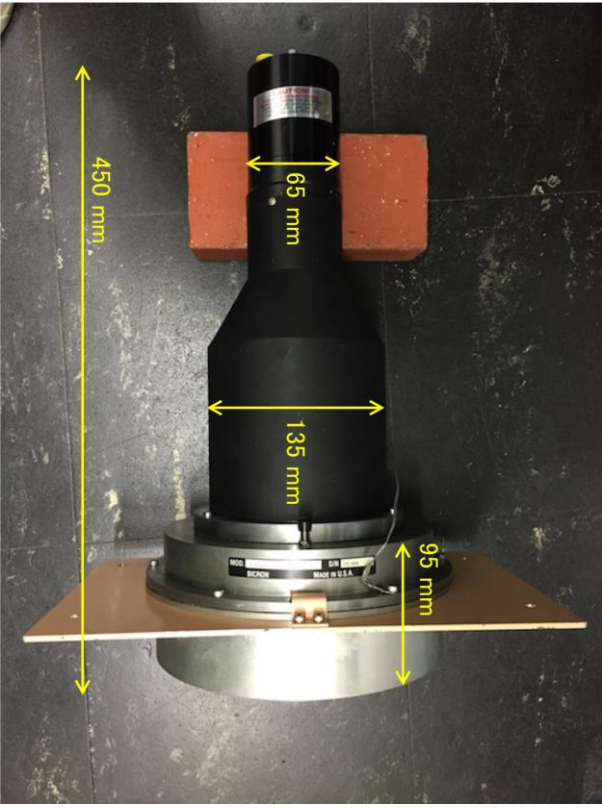


あとは、地下環境中性子を検出するだけ。。

神岡Lab-B測定(2016年)

- 高エネルギーの環境中性子検出
 - 反跳エネルギー > 1MeV
- 低エネルギーはα線に埋もれる

神岡地下Lab-Bにおける測定セットアップ



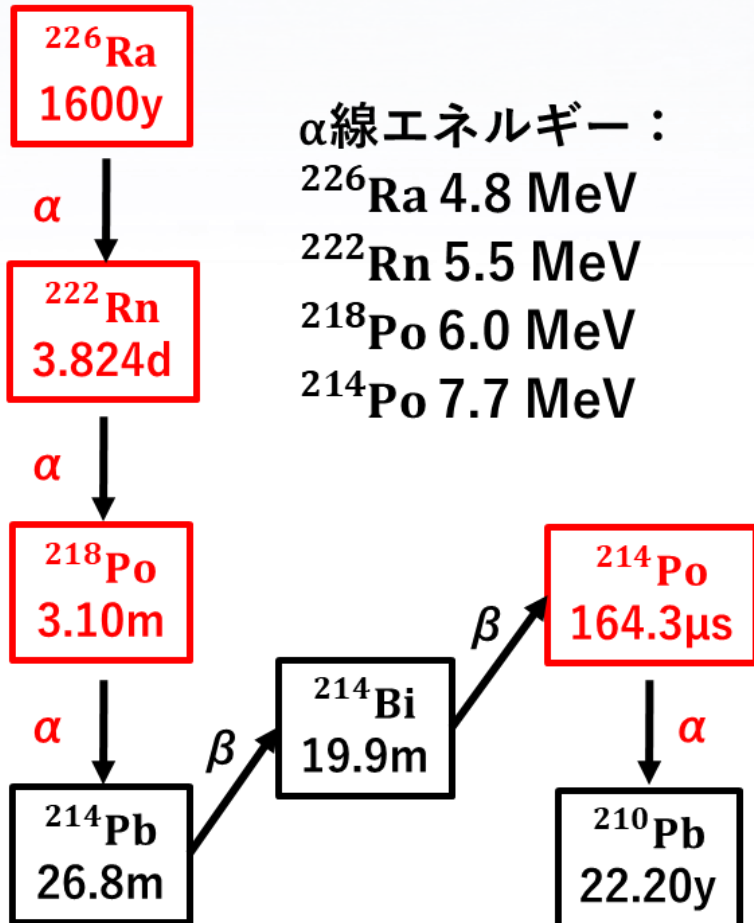
- 検出器内部起因の α 線背景事象

- 液体シンチレータ容器(ステンレス)からの ^{222}Rn (気体)の染み出し

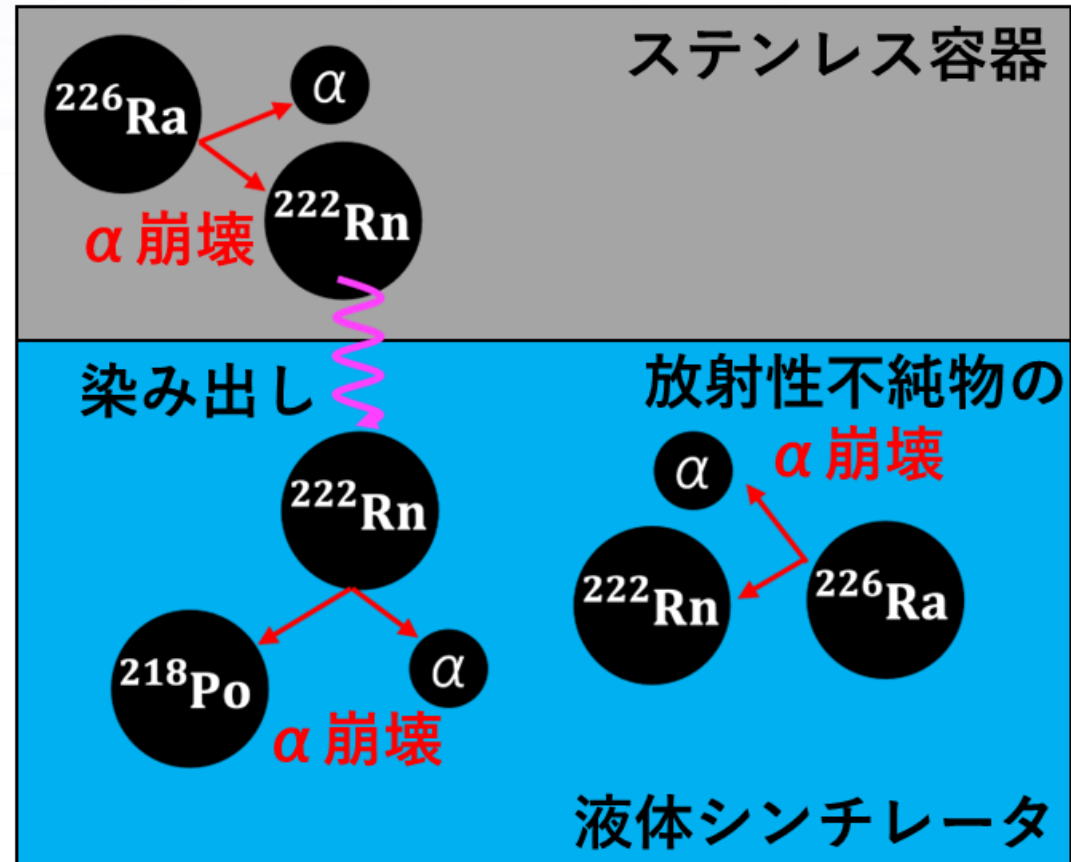
- 液体シンチレータに含まれる放射性不純物の α 崩壊

α 線背景事象

U系列の崩壊過程の一部



検出器内部表面の拡大図

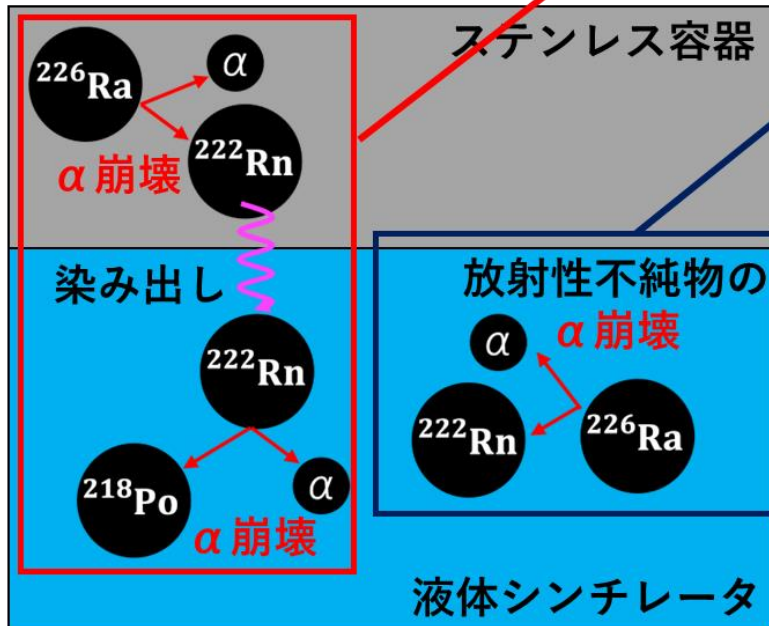


低バックグラウンド化の戦略

・検出器内部起因の α 線背景事象

- 液体シンチレータ容器(ステンレス)からの ^{222}Rn (気体)の染み出し
- 液体シンチレータに含まれる放射性不純物の α 崩壊

検出器内部表面の拡大図



電解複合研磨

電気化学的な研磨と研磨剤による研磨

→容器内部の表面積を減らすことで ^{222}Rn の染み出しを低減

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

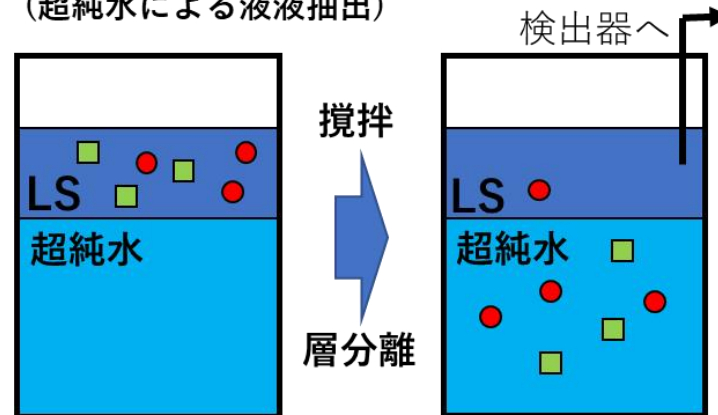
実際の様子



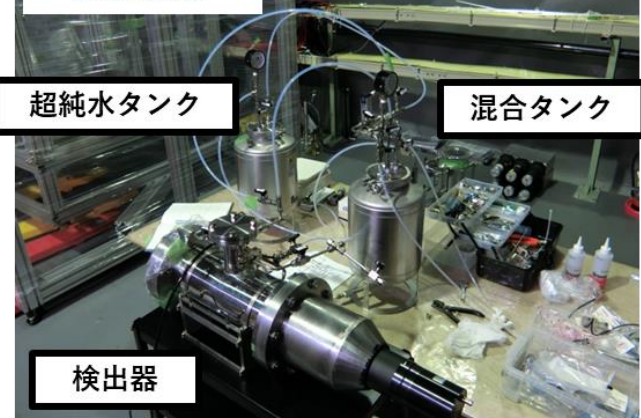
・放射性不純物の除去

液体シンチレータの純化

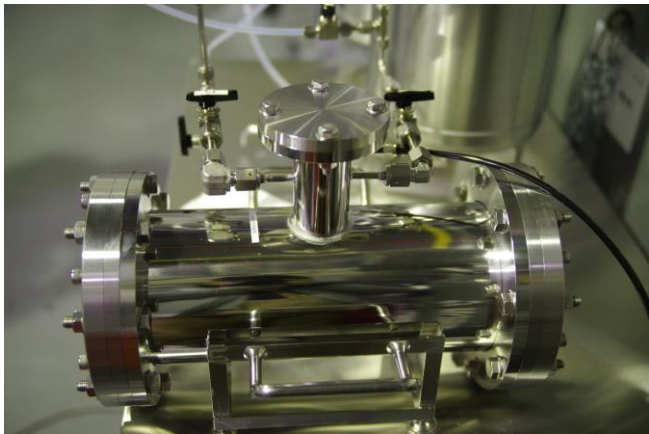
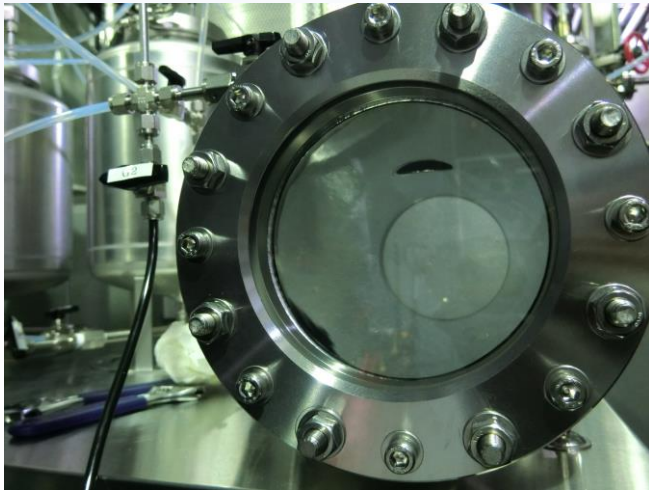
(超純水による液液抽出)



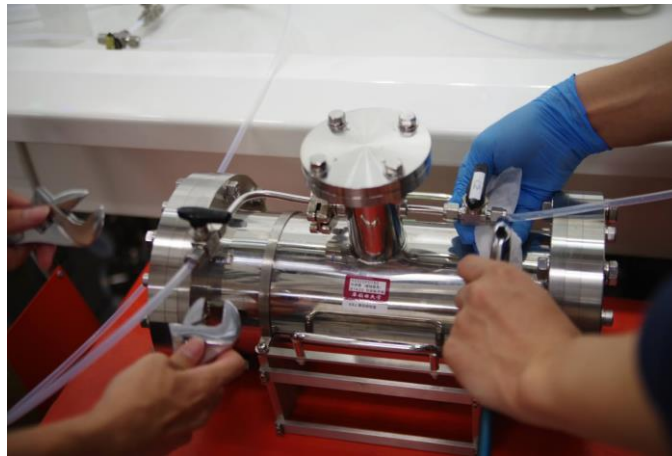
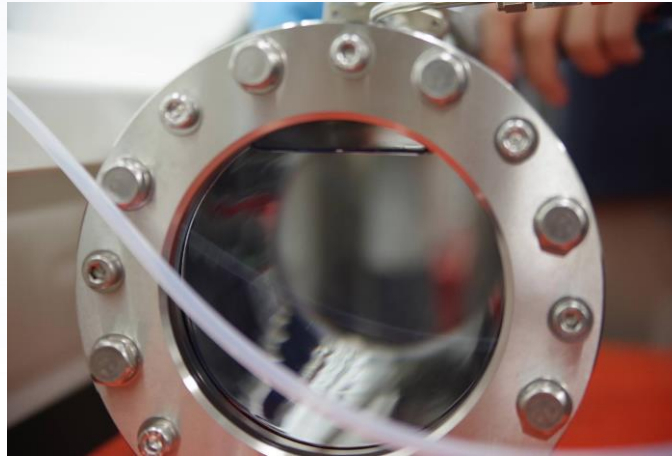
実際の様子



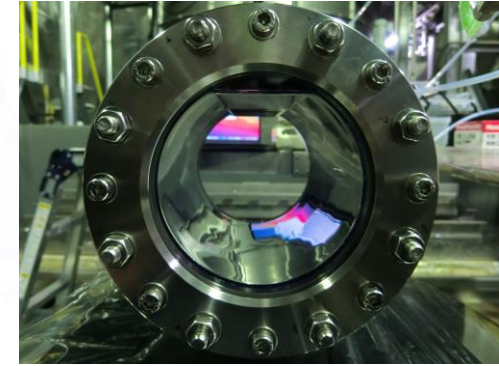
歴代液シン検出器



初代：通常電解研磨
(2021年)

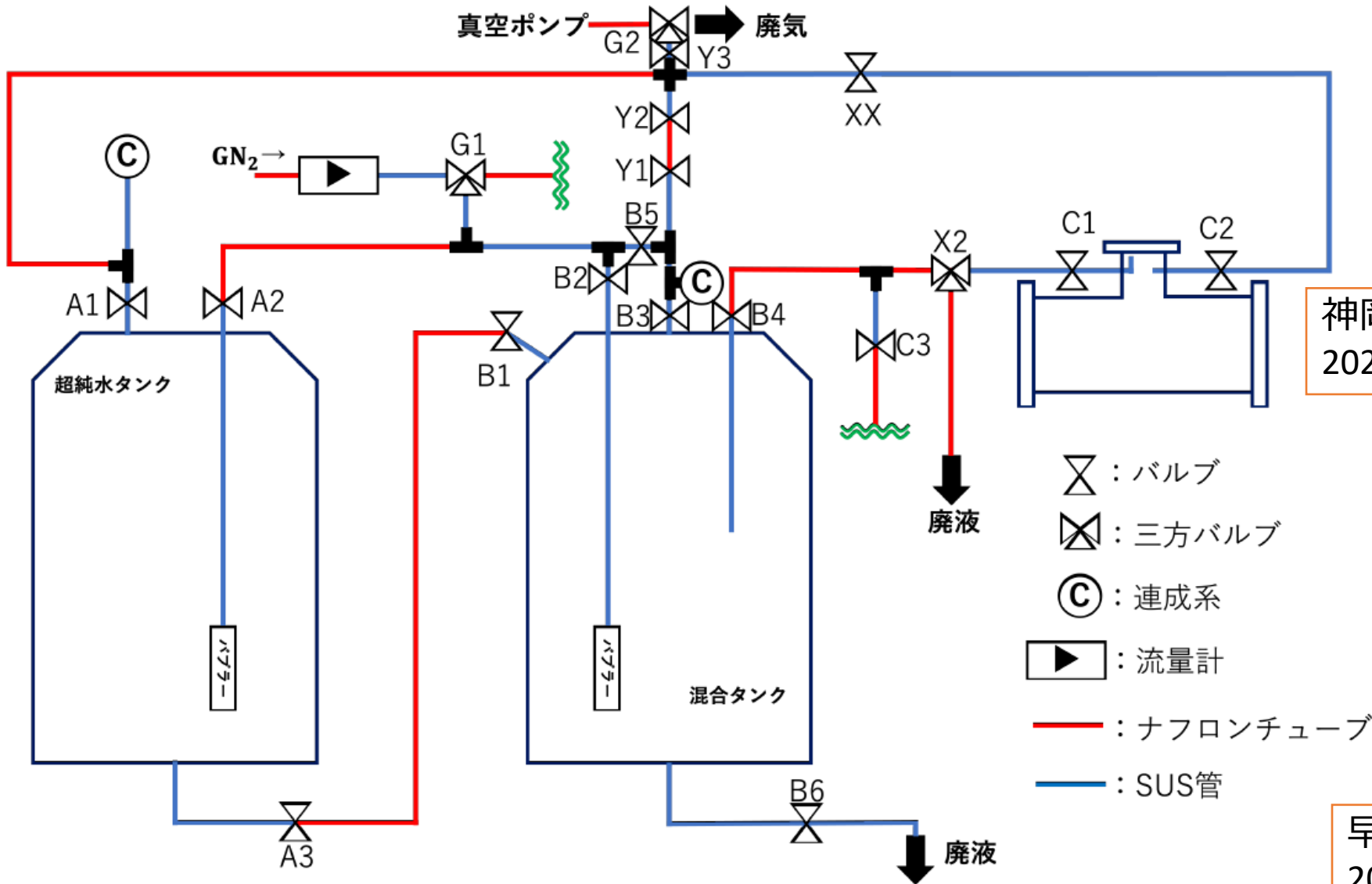


2代目：複合電解研磨
(2021年)



3代目：ポート部分溶接改善
(2022年)

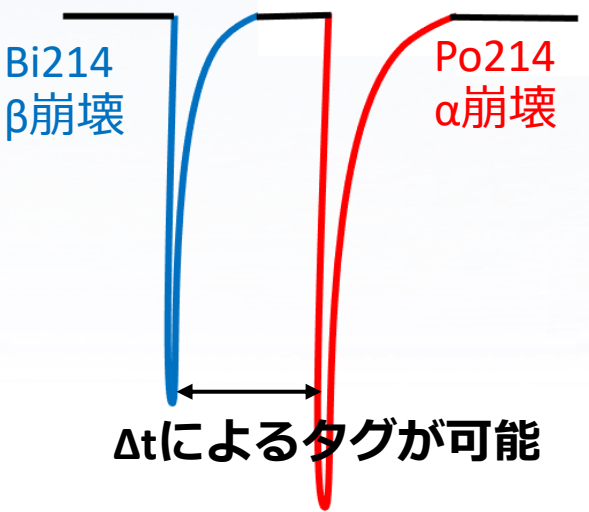
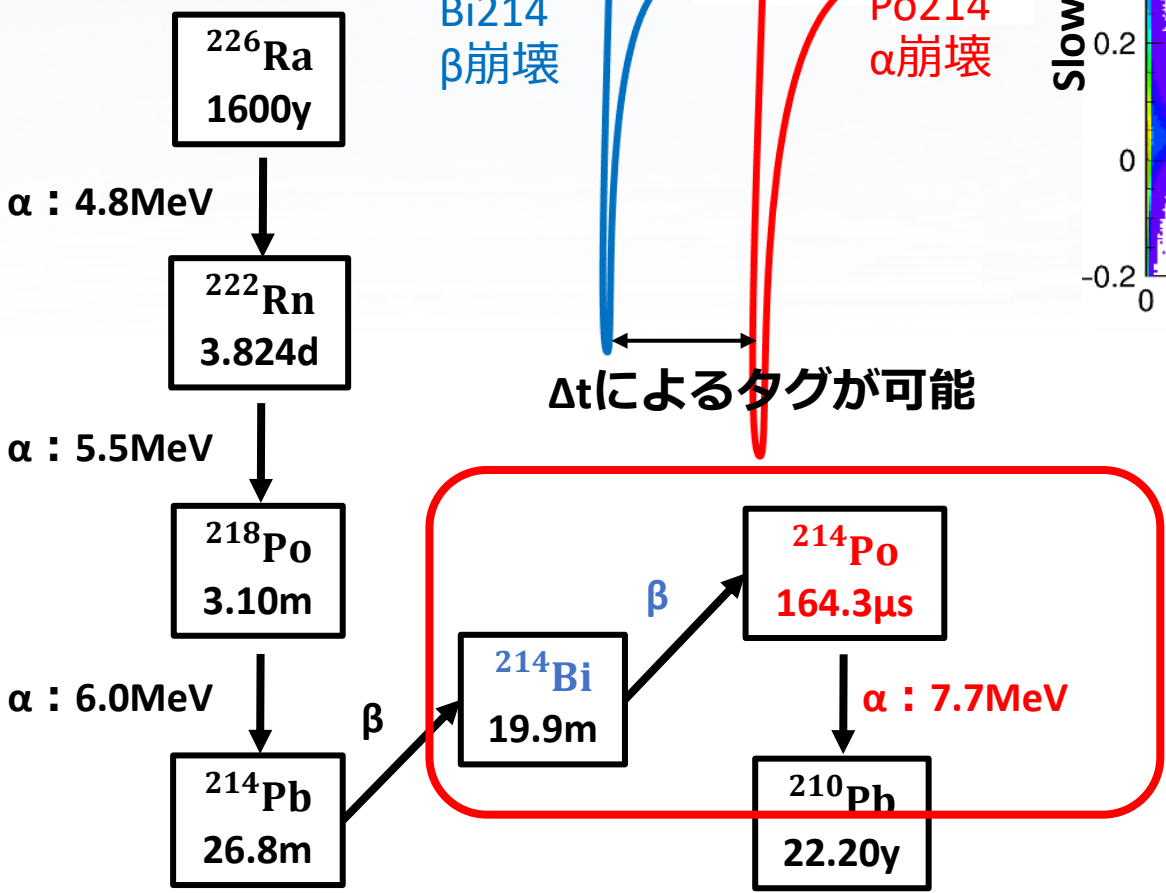
液シン純化装置



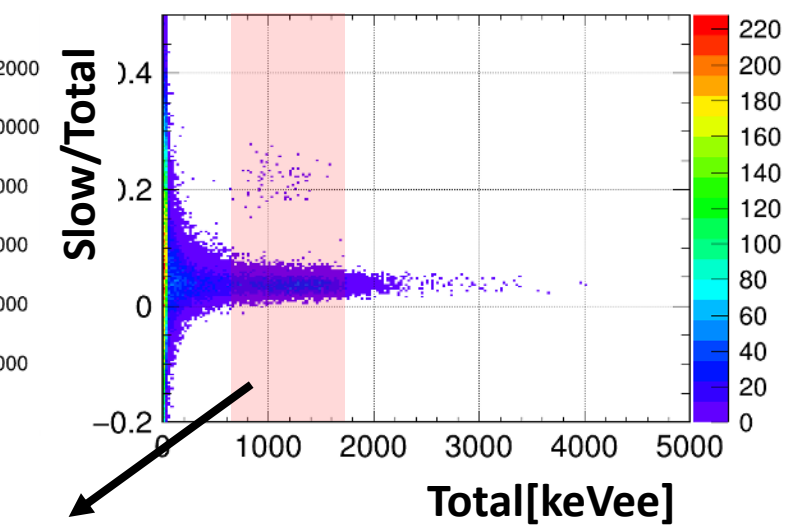
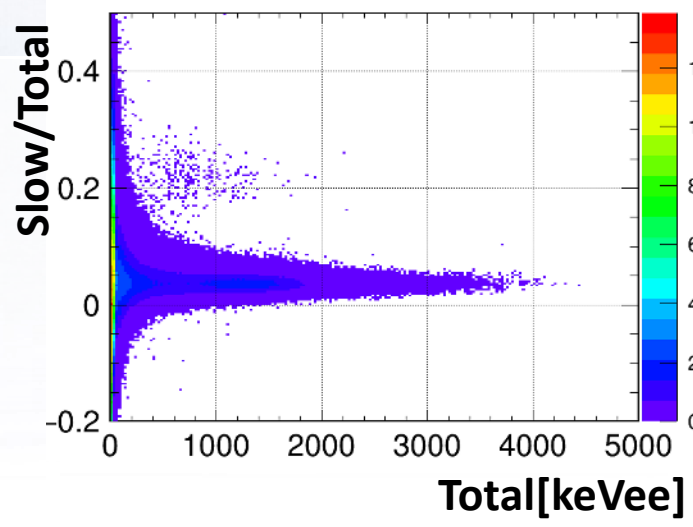
Bi-Poによるα線量の評価

バックグラウンドRunデータ
(Trigger Rate: 50Hz, 約1日分)

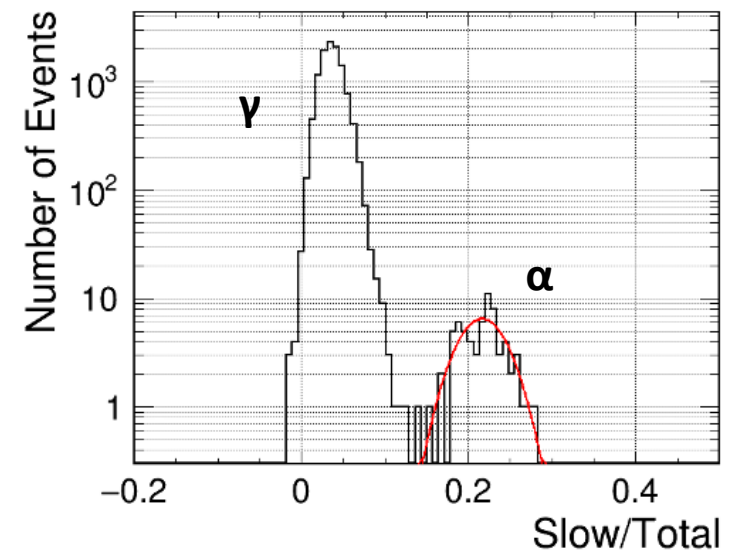
U系列 崩壊過程の一部



→ $\Delta t < 1\text{ms}$ の事象について



赤枠の領域についてSlow/Totalを射影



α線領域についてFit

U系列起因のα線量を算出

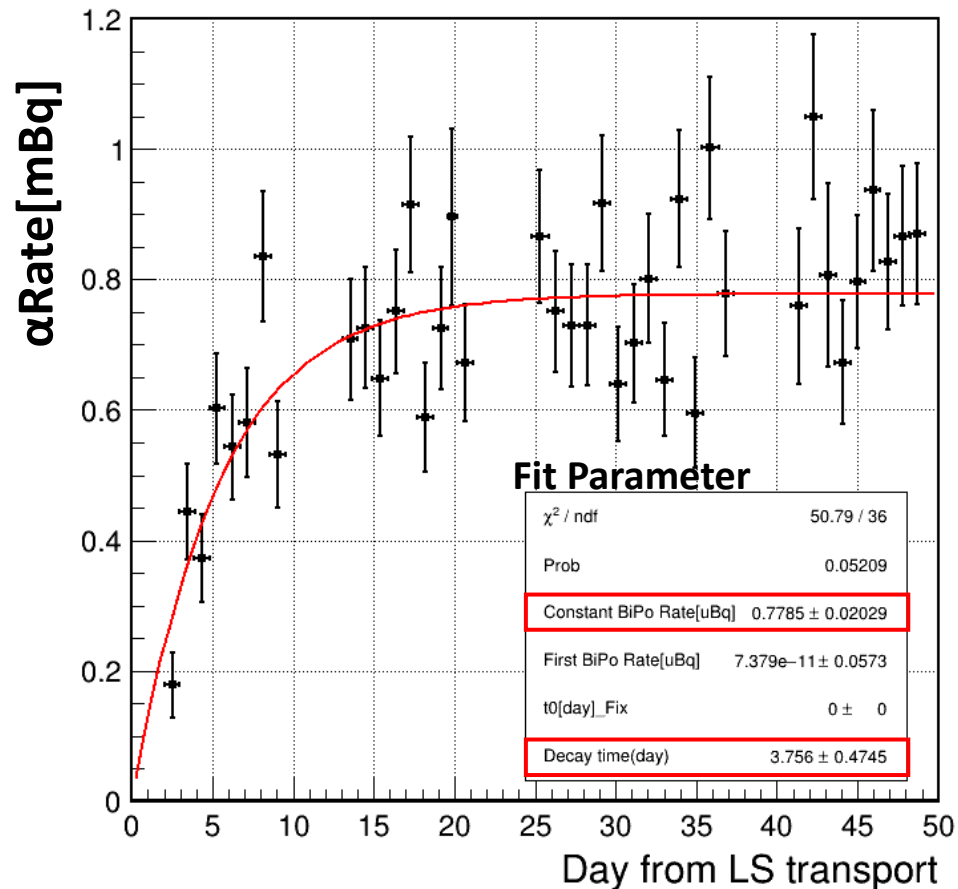
歴代最低バックグラウンド

検出器 : 2代目複合電解研磨

測定場所 : 神岡宇宙素粒子研究施設 Lab-B

測定期間 : 2021/3/9 ~ 2021/12/1

Bi-Po α線レートの時間変動



→定常状態でα線レート0.8mBqを達成

Fit関数

$$A \left(1 - \frac{A - B}{A} \right) \exp \left(- \frac{t - t_0}{\frac{\tau_1}{2} / \ln 2} \right)$$

A: 定常状態におけるαレート

B: 初期純度

t_0 : 純化終了時刻(0日でFix)

$\frac{\tau_1}{2}$: 半減期

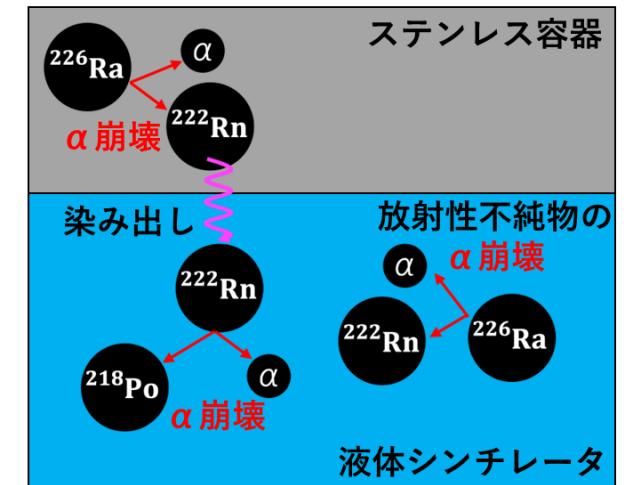
• 初期純度は非常に良い
→純化によって ^{222}Rn が十分に低減されている

• その後αレートは増大
→ $\frac{\tau_1}{2} = 3.76 \pm 0.47$ [日]

^{222}Rn の半減期3.83日



検出器内部表面の拡大図

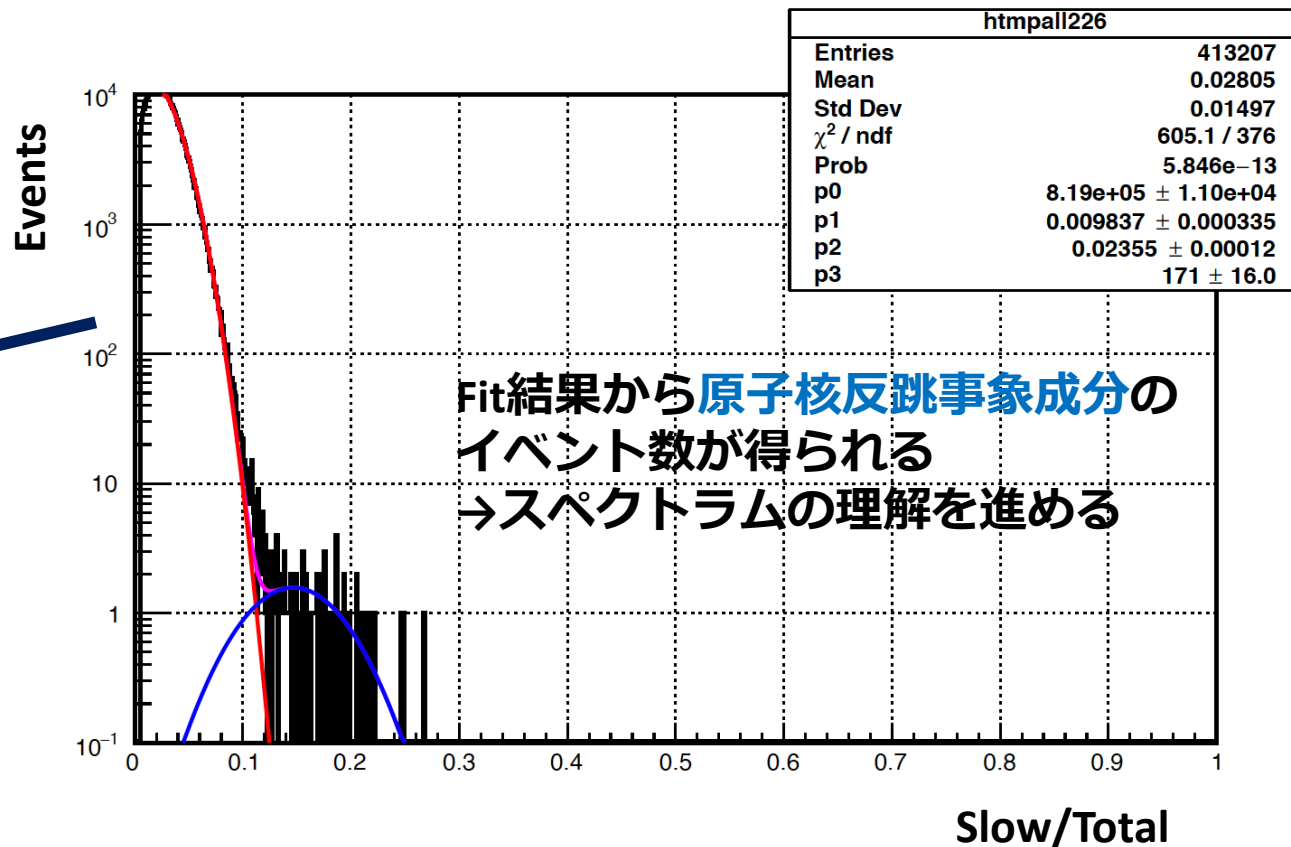
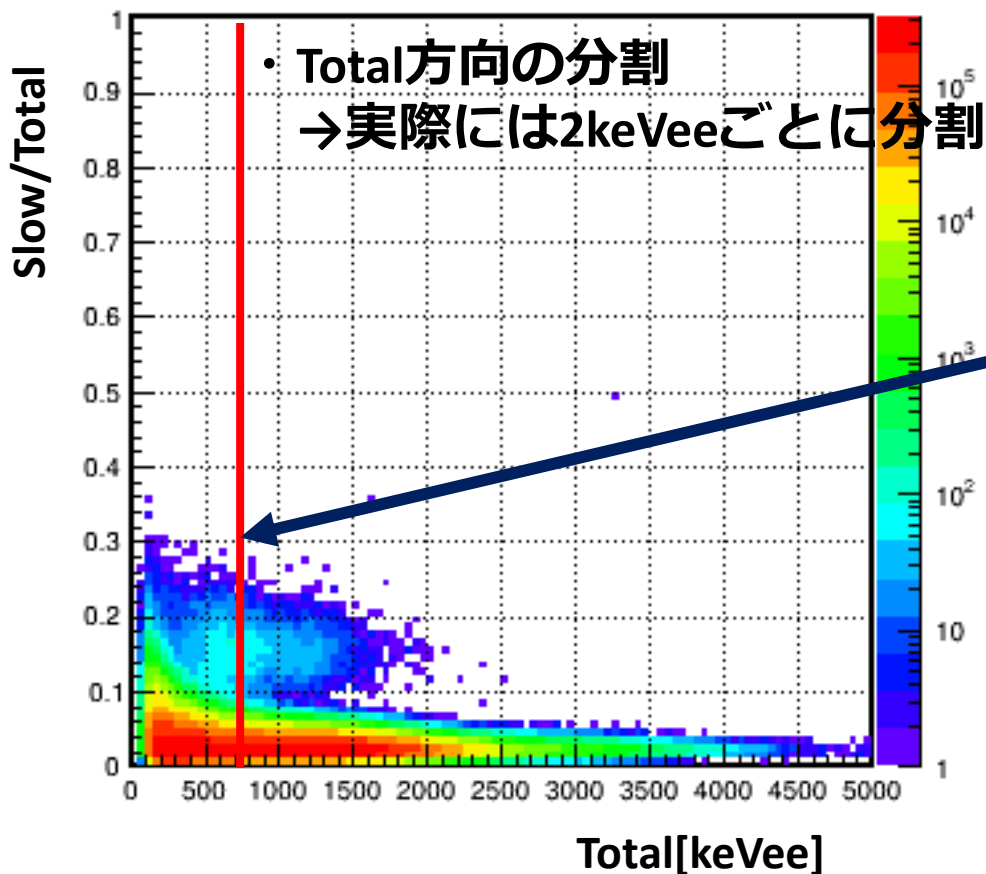


αレートが増大する原因は ^{222}Rn のα崩壊によるものとわかる

α線エネルギー分布算出

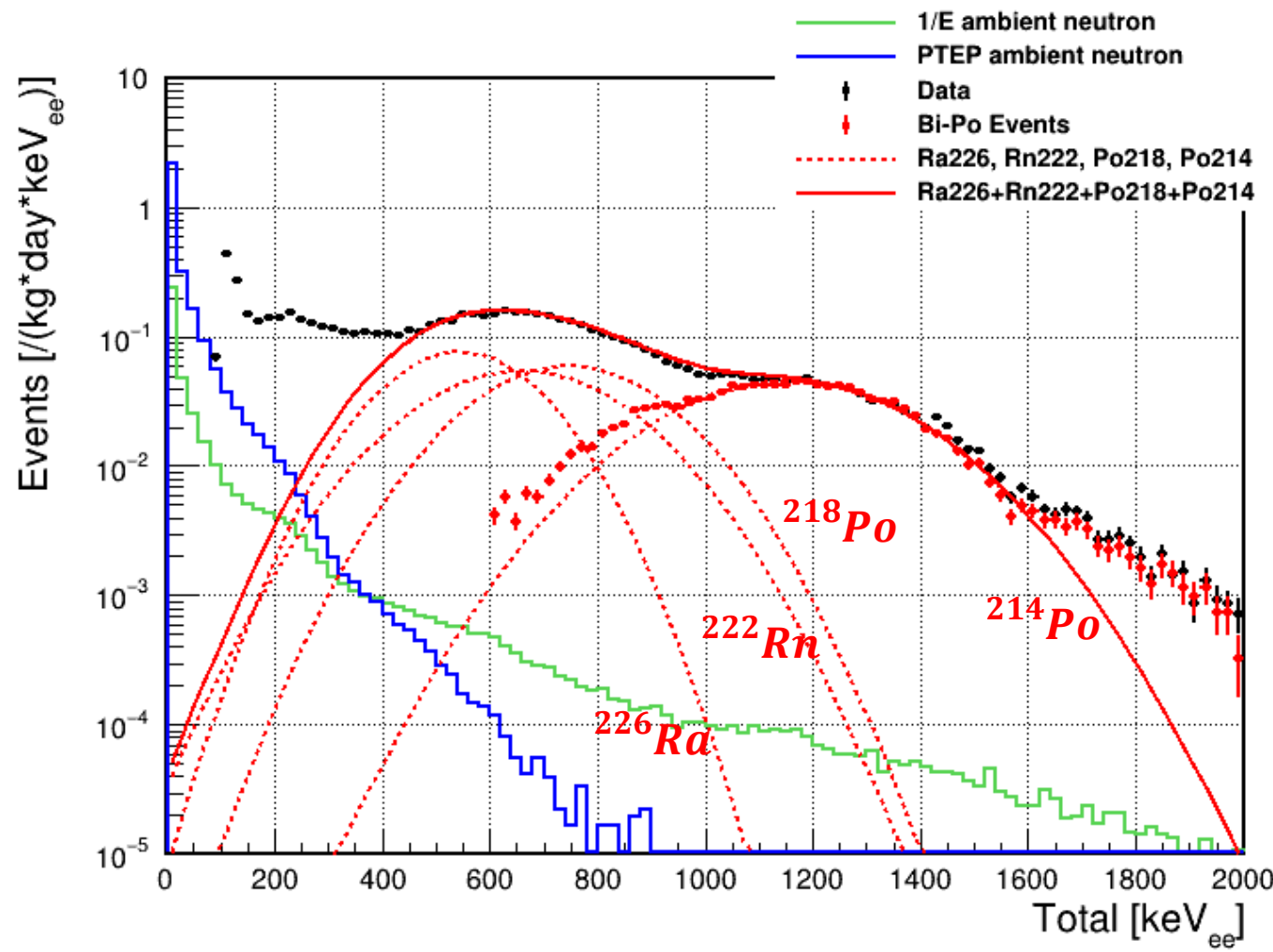
- 分割されたTotal領域それぞれについて
電子反跳事象成分(ガウス分布のテール)
+原子核反跳事象成分(ガウス分布)の関数でFit

PSD vs Total分布

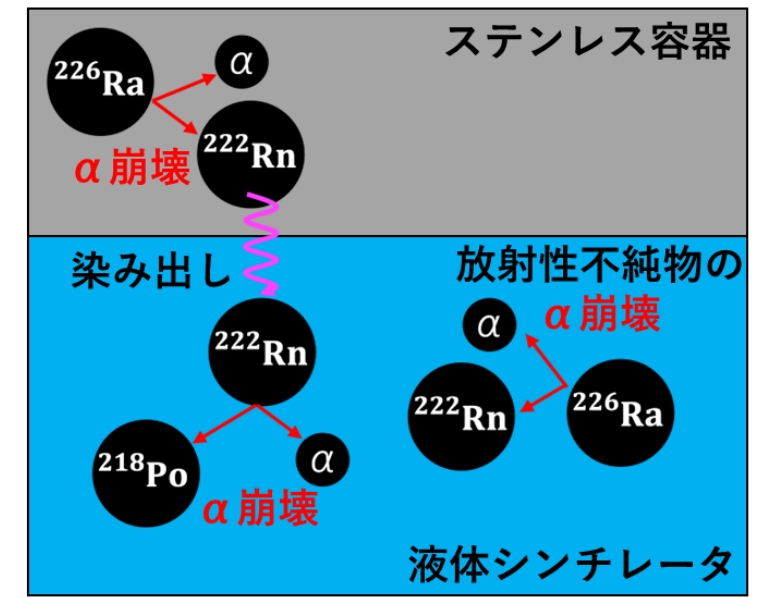


α線エネルギー分布結果

- ^{214}Po のスペクトラムから他のU系列(^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{221}Po)を推測
- U系列のα線背景事象でおおむね説明される
→ ^{226}Ra の存在が示唆
- 液シン内に液液抽出では除ききれない ^{226}Ra が存在する

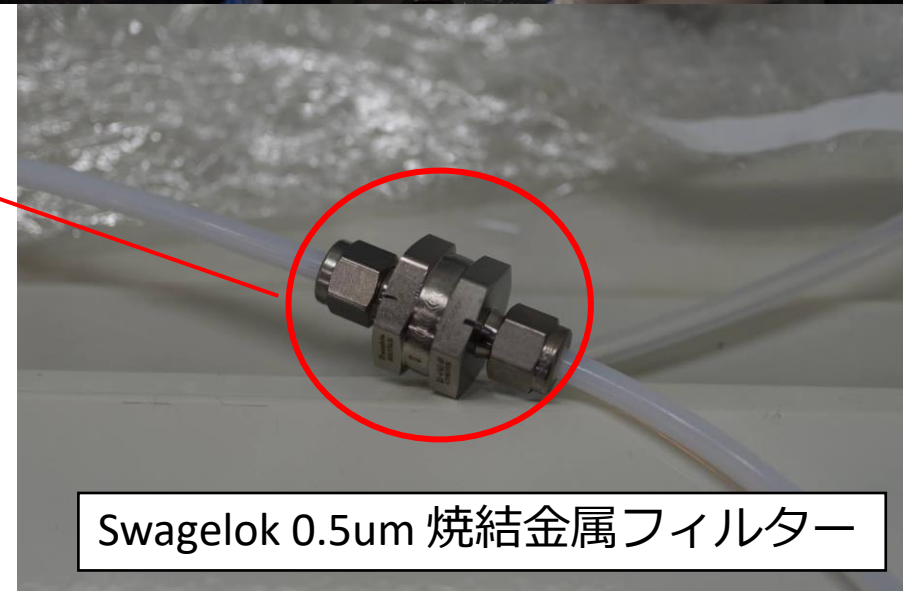
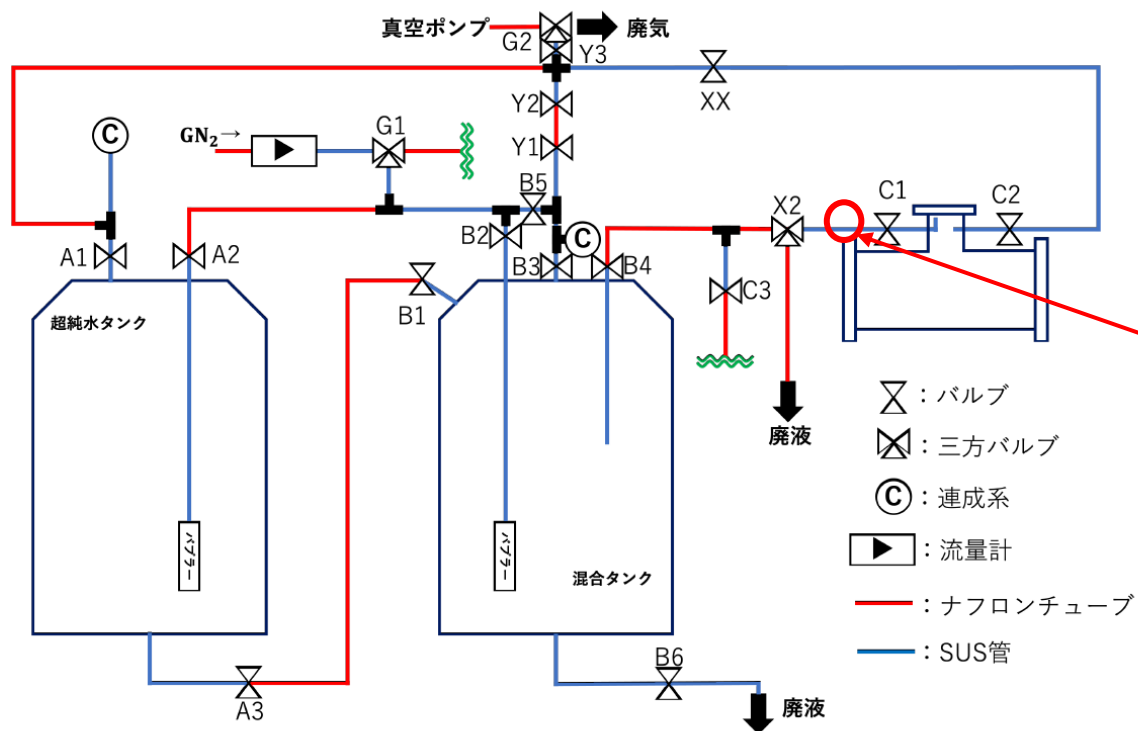


検出器内部表面の拡大図



現在進行中：パーティクルフィルター(濾過)の実装

- 液シンの ^{226}Ra が単原子で溶け込んでいる
 ながらも液液抽出で除去できる
 - 単原子でなく、例えば塊(ダスト)として存在する可能性がある
- ある程度大きなものは濾過により取り除くことが可能



まとめ

- 環境中性子は地下素核実験において主要な背景事象になりうるため定量的な理解が必要
- 5L程度の小型の液体シンチレータ検出器を用いた、神岡Lab-Bにて環境中性子を測定
 - 低 α BG検出器(ステンレス容器+石英窓)を開発
 - 液液抽出によるラジウム除去
- Bi-Poタグで α 線BG量を評価
 - 初期BGほぼゼロを達成(徐々に増加し1 mBq程度)
- 現在の課題
 - 液液抽出で残留するラジウムの理解と除去

Unfolding手法の確立

Gravel Method^[2] を用いたUnfolding
以下の式に従って Iteration を繰り返す

$$\phi_j^{k+1} = \phi_j^k \exp \left(\frac{\sum_i W_{ij}^k \ln \left(\frac{N_i}{\sum_{j'} R_{ij'} \phi_{j'}^k} \right)}{\sum_i W_{ij}^k} \right) \quad W_{ij}^k = \frac{R_{ij} \phi_j^k}{\sum_{j'} R_{ij'} \phi_{j'}^k} \frac{N_i^2}{\sigma_i^2}$$

ϕ_{ij}^k : k回 Iteration後の中性子スペクトル

N_i : 反跳スペクトル

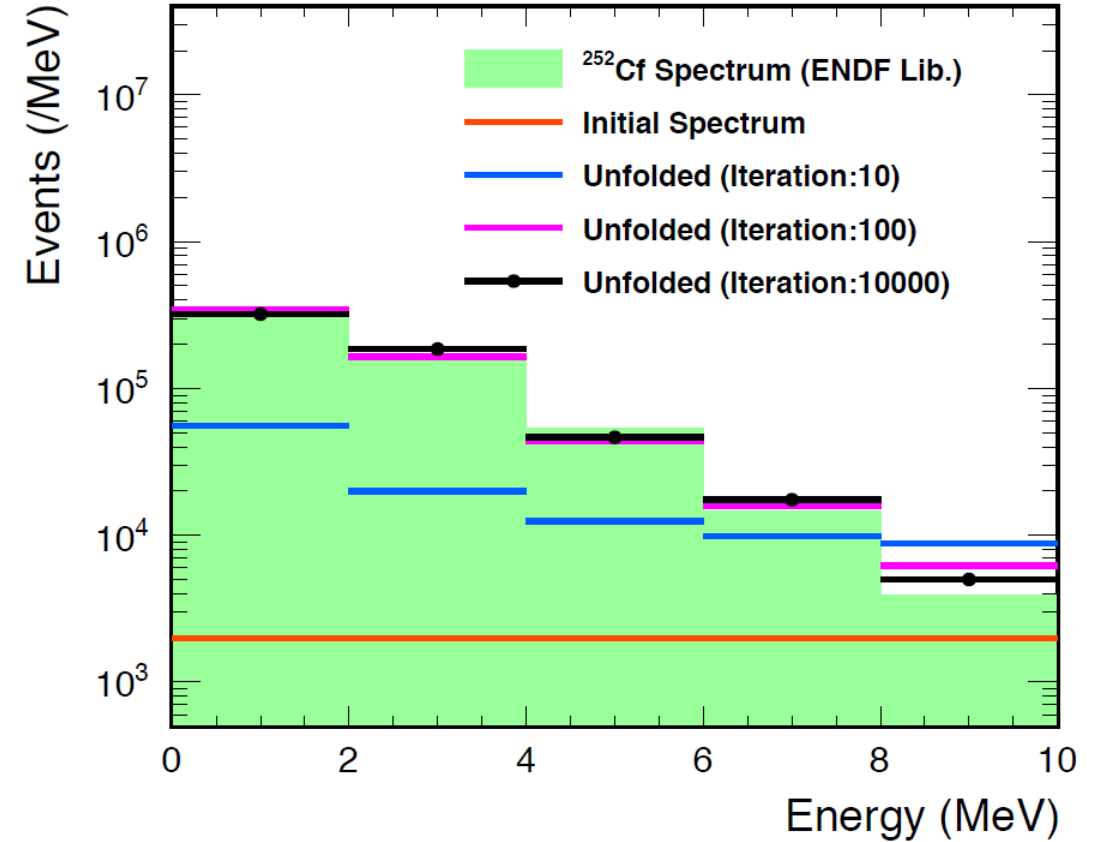
σ_i : 測定誤差

R_{ij} : 応答関数

^{252}Cf の放出する中性子スペクトルが **Unfolding**
によって正しく再現できていることを確認

⇒ **Unfolding手法を確立**

^{252}Cf 測定データのUnfolding



Unfolding 結果の誤差 :

一番差が大きな 8~10 MeV Bin の
22%を誤差とする