



# スーパーカミオカンデにおける 238U崩壊系列由来放射線の 検出器シミュレーション

岡山大理，東大宇宙線研<sup>A</sup>，高エネ研<sup>B</sup>，東北大RCNS<sup>C</sup>

大下正太郎，小汐由介，中畑雅行<sup>A</sup>，日野陽太<sup>B</sup>，

関谷洋之<sup>A</sup>，池田一得<sup>A,C</sup>，原田将之<sup>A</sup>，

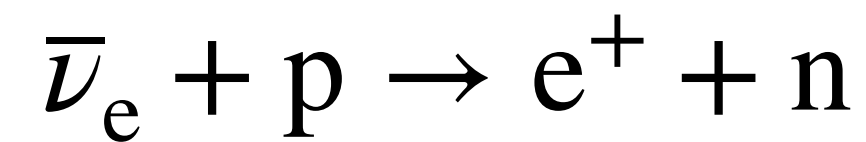
他 Super-Kamiokande Collaboration

2026年9月14日

@東京大学駒場キャンパス

# Super-Kamiokandeにおける $^{238}\text{U}$ の振る舞い

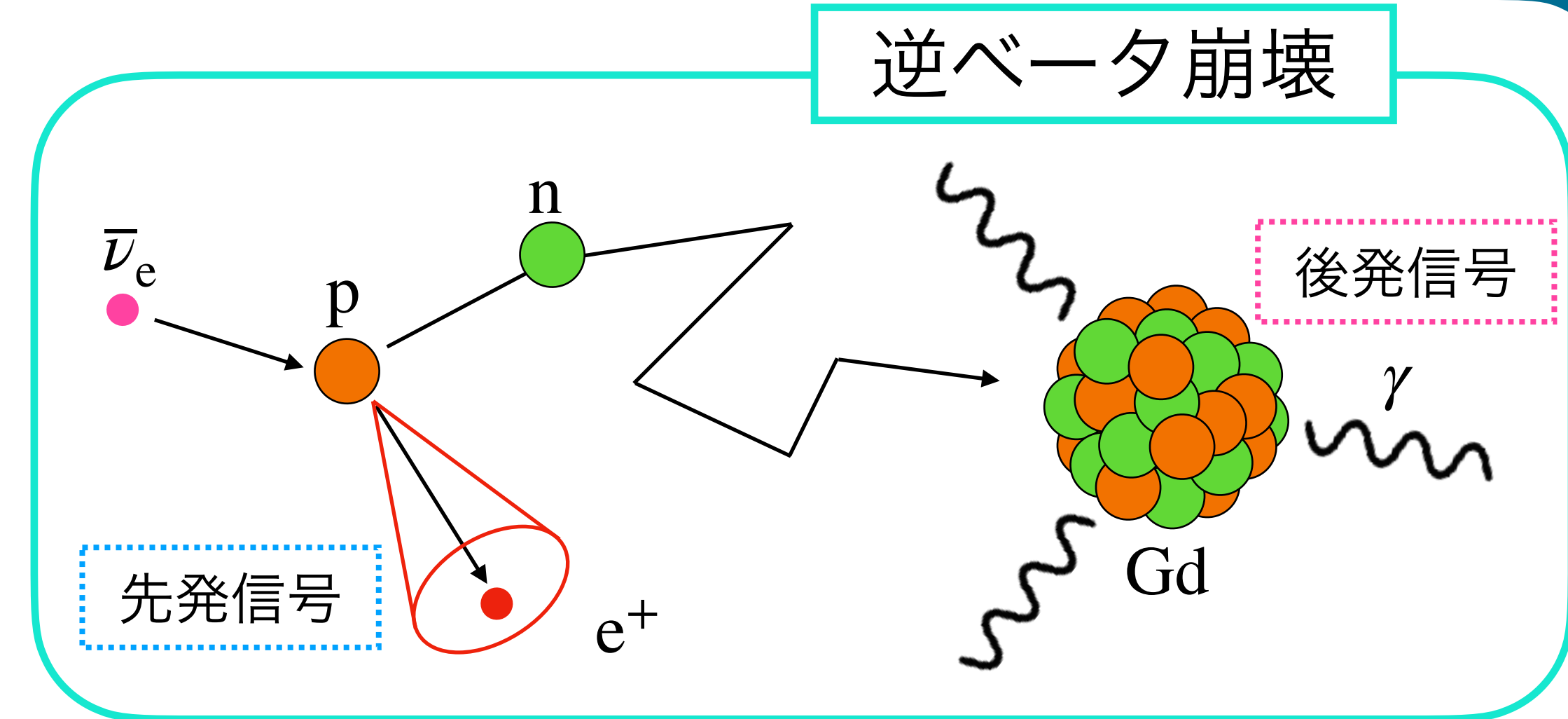
## 逆ベータ崩壊



SKでは主にこの手法で観測する

先発信号は陽電子,

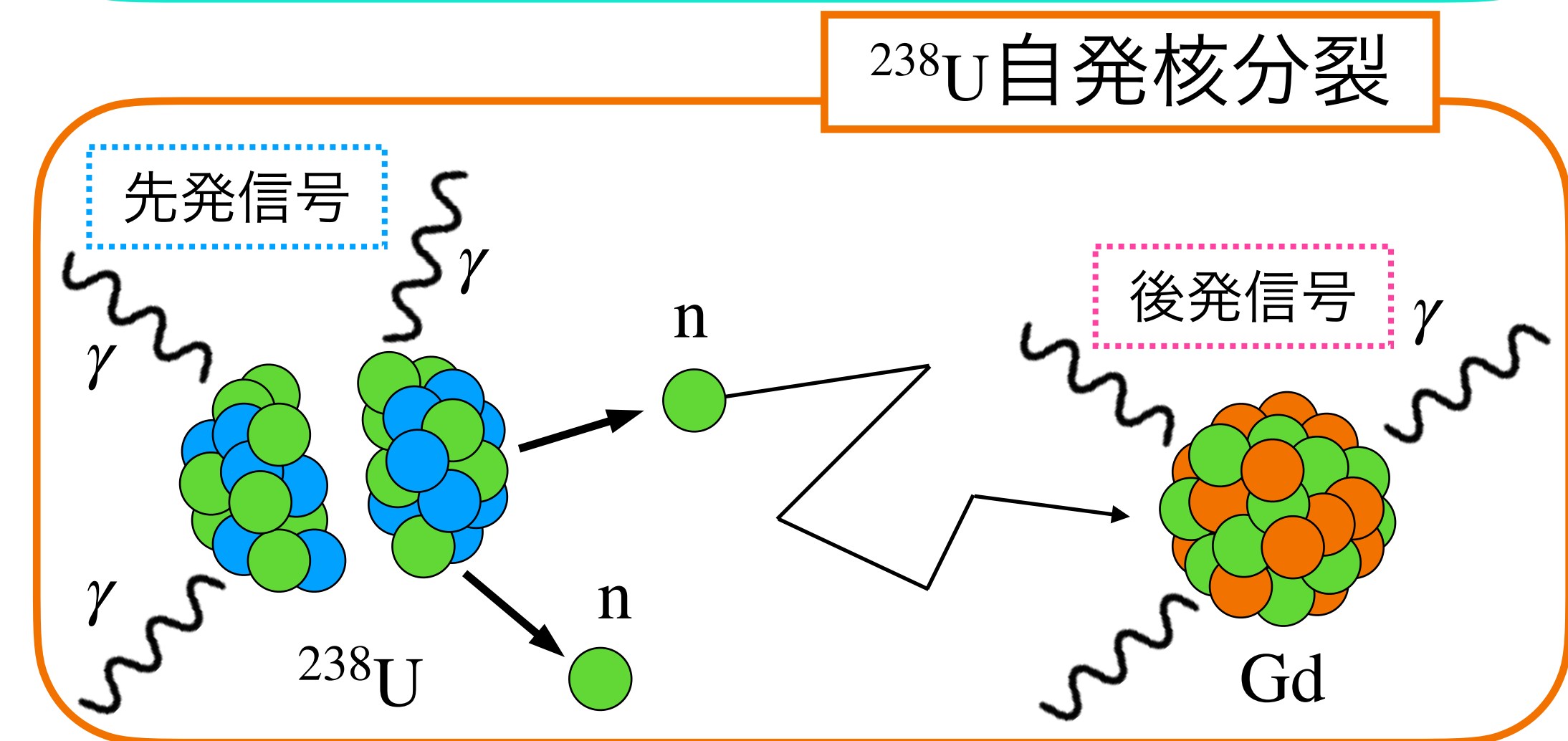
後発信号はGd中性子捕獲による脱励起 $\gamma$ 線



## $^{238}\text{U}$ 自発核分裂

先発信号は自発核分裂による $\gamma$ 線,

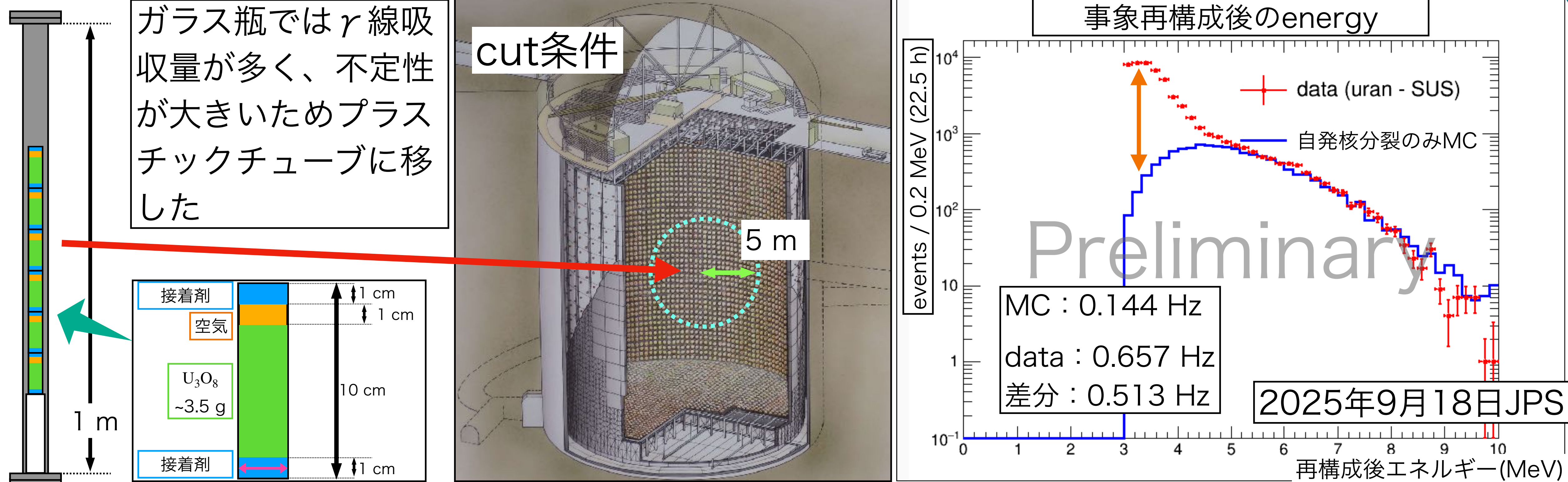
後発信号はGd中性子捕獲による脱励起 $\gamma$ 線



$^{238}\text{U}$ 自発核分裂と原子炉ニュートリノのエネルギー領域 (2~7 MeV) が重なる。

背景事象としての理解、及びSKタンク内での存在量を確認するため、 $^{238}\text{U}$ 線源を用いた測定が行われた。

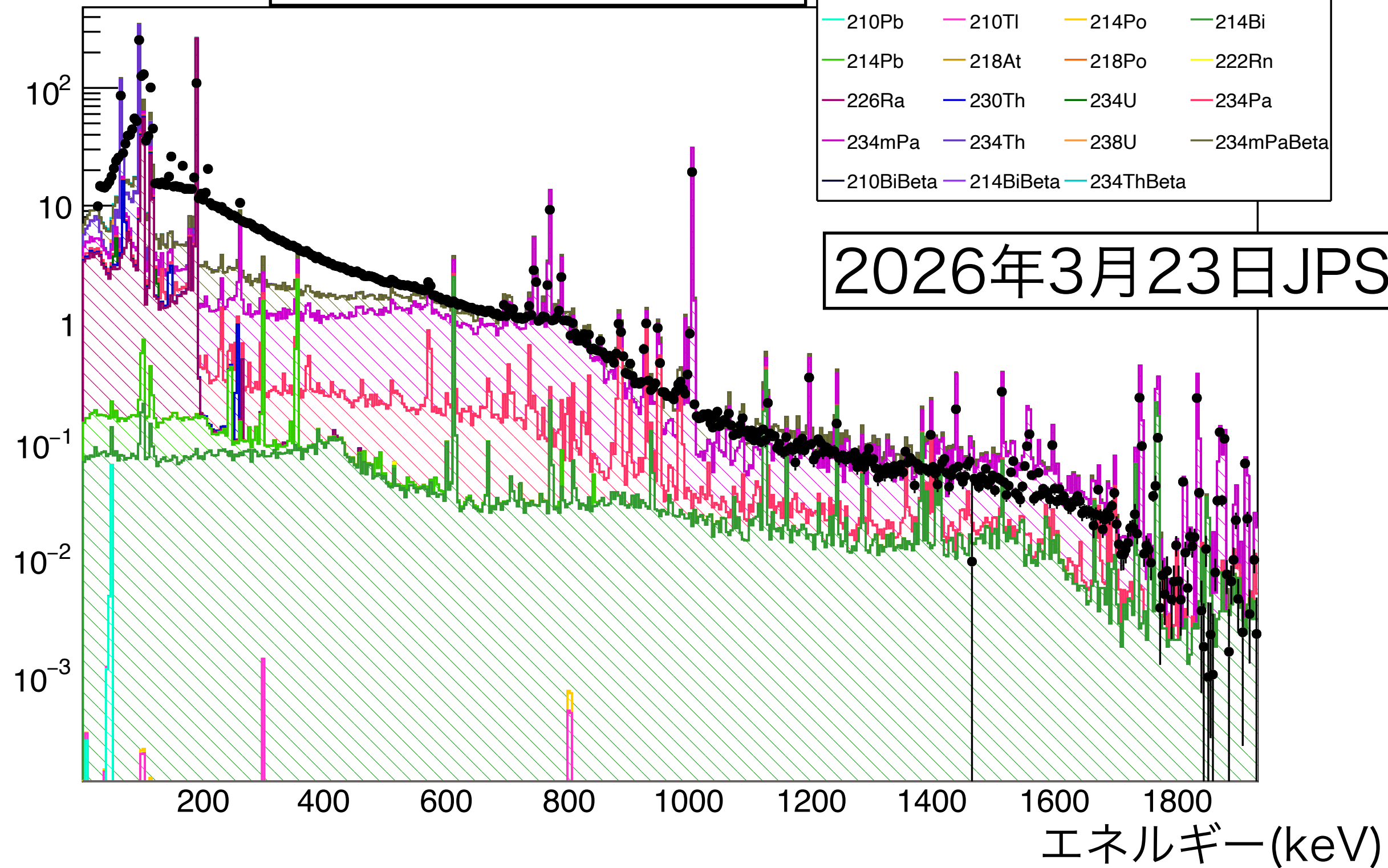
# ウラン線源測定



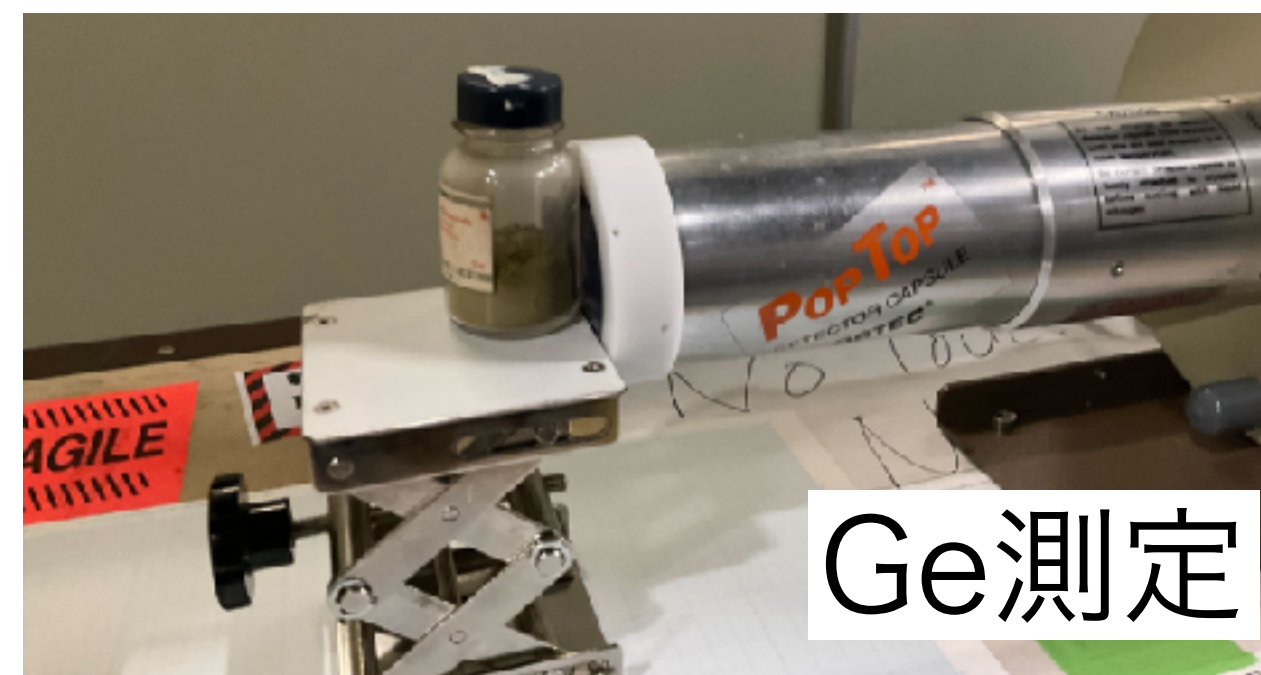
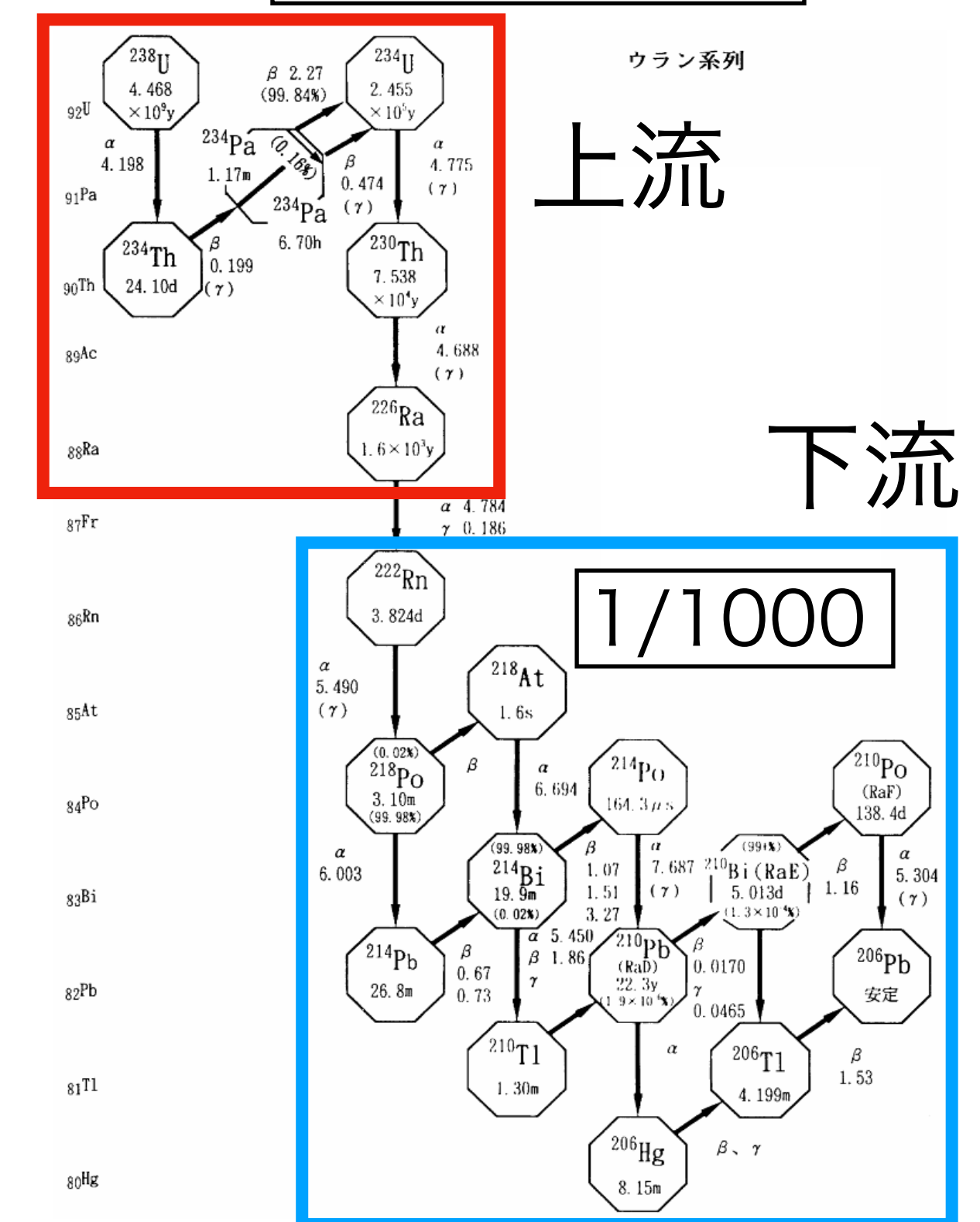
- ・ 4 MeV以上では、自発核分裂MCにより線源データを概ね再現。
- ・ 4 MeV以下の超過事象には、 $^{238}\text{U}$ 崩壊系列由来の $\gamma$ 線などが寄与している可能性があり、本研究では $^{238}\text{U}$ 崩壊系列 $\gamma$ 線をシミュレーションした。

# Ge検出器スペクトル解析

Rn以降1/1000



238U崩壊系列



寿命の違いを考慮し、上流と下流で放射平衡を分け、  
下流（Rn以降）を1/1000にしたMCモデルを作成した。  
600 keV以上の領域ではデータと良い一致が得られた。

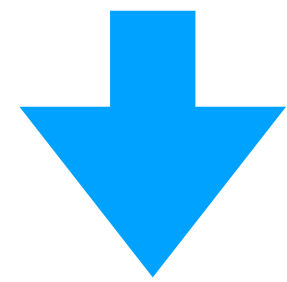
# Rn以降 $1.8 \times 10^{-7}$ モデル

- ・  $^{238}\text{U}$ ・ $^{234}\text{U}$ から長時間（66年）かけて生成される量を考慮し、**Rn以降の相対的な $\gamma$ 線レートを $1.8 \times 10^{-7}$ 倍とした場合も評価**
- ・ 1959年のU線源が生成された時、Th,Raのコンタミが全くなかったと仮定した場合の現在の期待される相対崩壊率
- ・  $^{238}\text{U} \sim ^{234}\text{U}$ の間は放射平衡を仮定
- ・ Ge検出器の測定では 30-40%ずれがあるが、その詳細は今後の課題

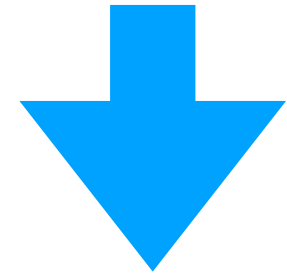
# 238U崩壊系列の検出器シミュレーション

# MC flow

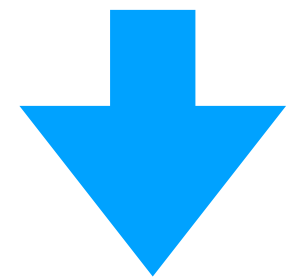
vector



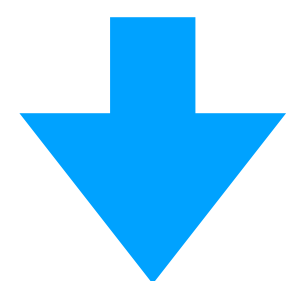
検出器MC



ノイズ付加



事象再構成



event selection

## vector生成

- NNDC NuDat (ENSDF Decay Radiation) に基づき、 $\gamma$  線のエネルギーと発生レートを設定
- Rn以降1/1000モデルとRn以降 $1.8 \times 10^{-7}$ モデルを作成

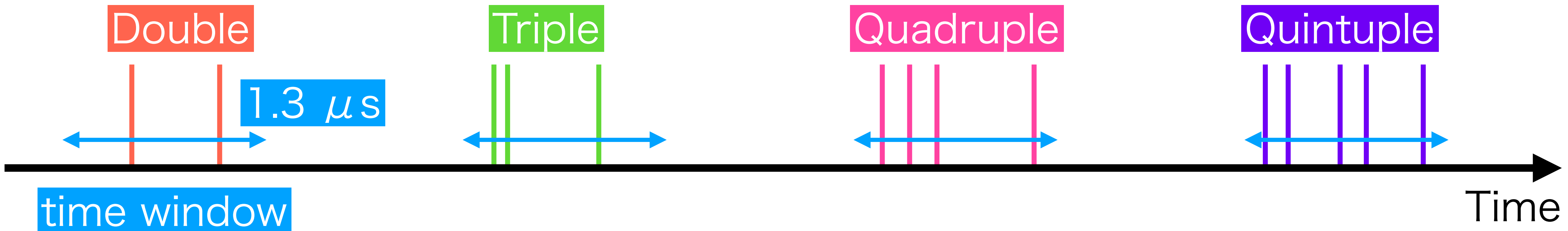
## 検出器MC～事象再構成

- SK内での $\gamma$  線の反応とPMT応答をシミュレーション
- 実データ由来のノイズを付加
- エネルギー・vertexを再構成

## event selection

- 事象再構成後energy : 3~10 MeV
- 事象再構成後vertex : 線源中心から5 m以内

# $\gamma$ 線イベント生成方法

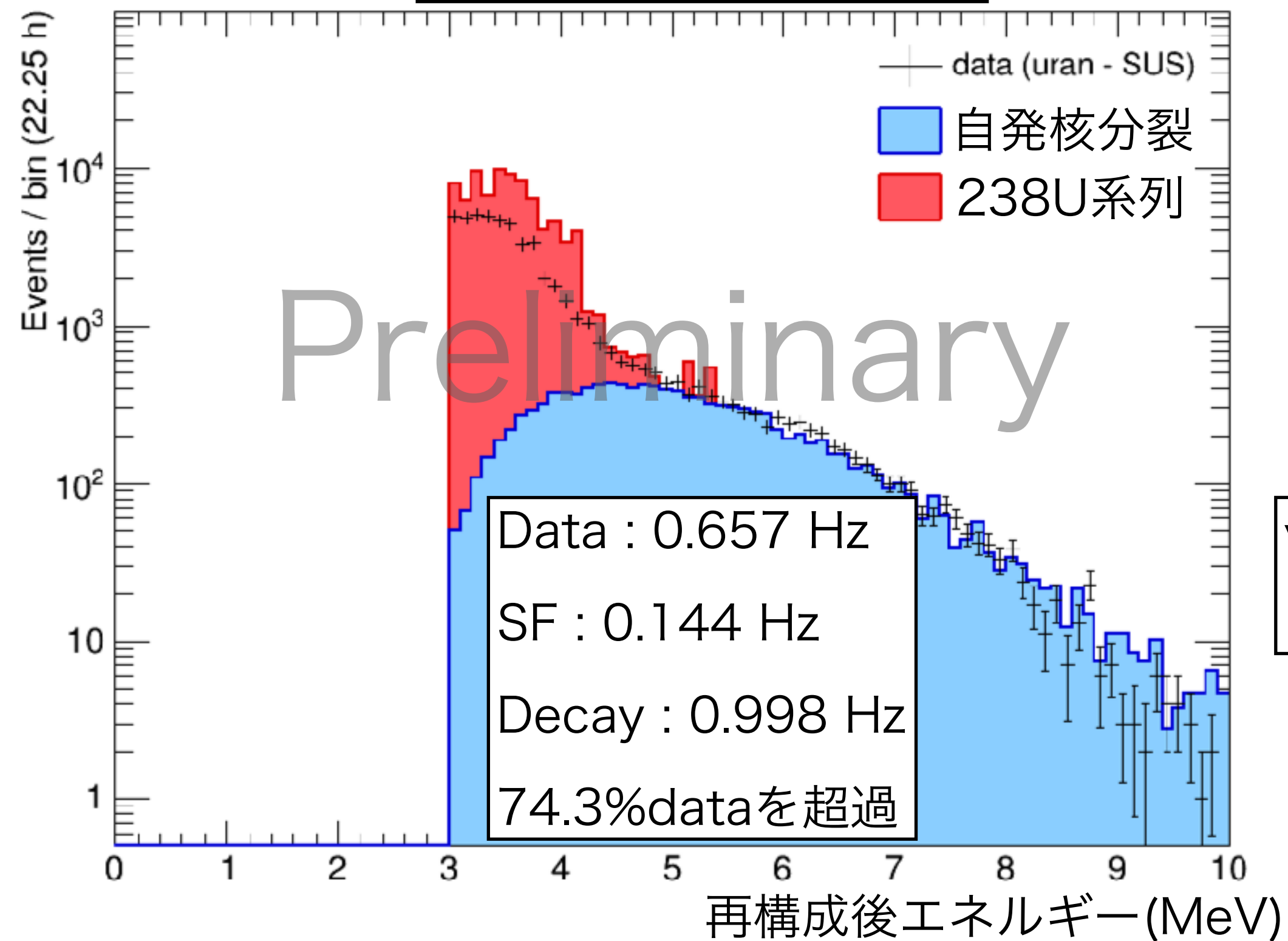


- $1.3 \mu s$ 内に複数の放射線が発生させた
- 単一 $\gamma$ 線はエネルギーが低く、SKの観測感度を下回る事象が多いため、同一時間窓内に複数の $\gamma$ 線が発生する事象を生成
- 高多重度事象はMC統計が少ない
- 多重度ごとに独立生成し、Poisson分布に基づく重みを付与
- 核種の1崩壊単位ではなく、**各 $\gamma$ 線の発生レートを独立に扱う近似**

| 多重度    | 確率(%)                 | 発生レート(Hz)             |
|--------|-----------------------|-----------------------|
| single | 8.48                  | $6.53 \times 10^4$    |
| double | $3.95 \times 10^{-1}$ | $3.04 \times 10^3$    |
| triple | $1.23 \times 10^{-2}$ | $9.43 \times 10^{-1}$ |
| quad   | $2.85 \times 10^{-4}$ | 2.20                  |
| quint  | $5.31 \times 10^{-6}$ | $4.09 \times 10^{-2}$ |

# MC vs Data

Rn以降1/1000



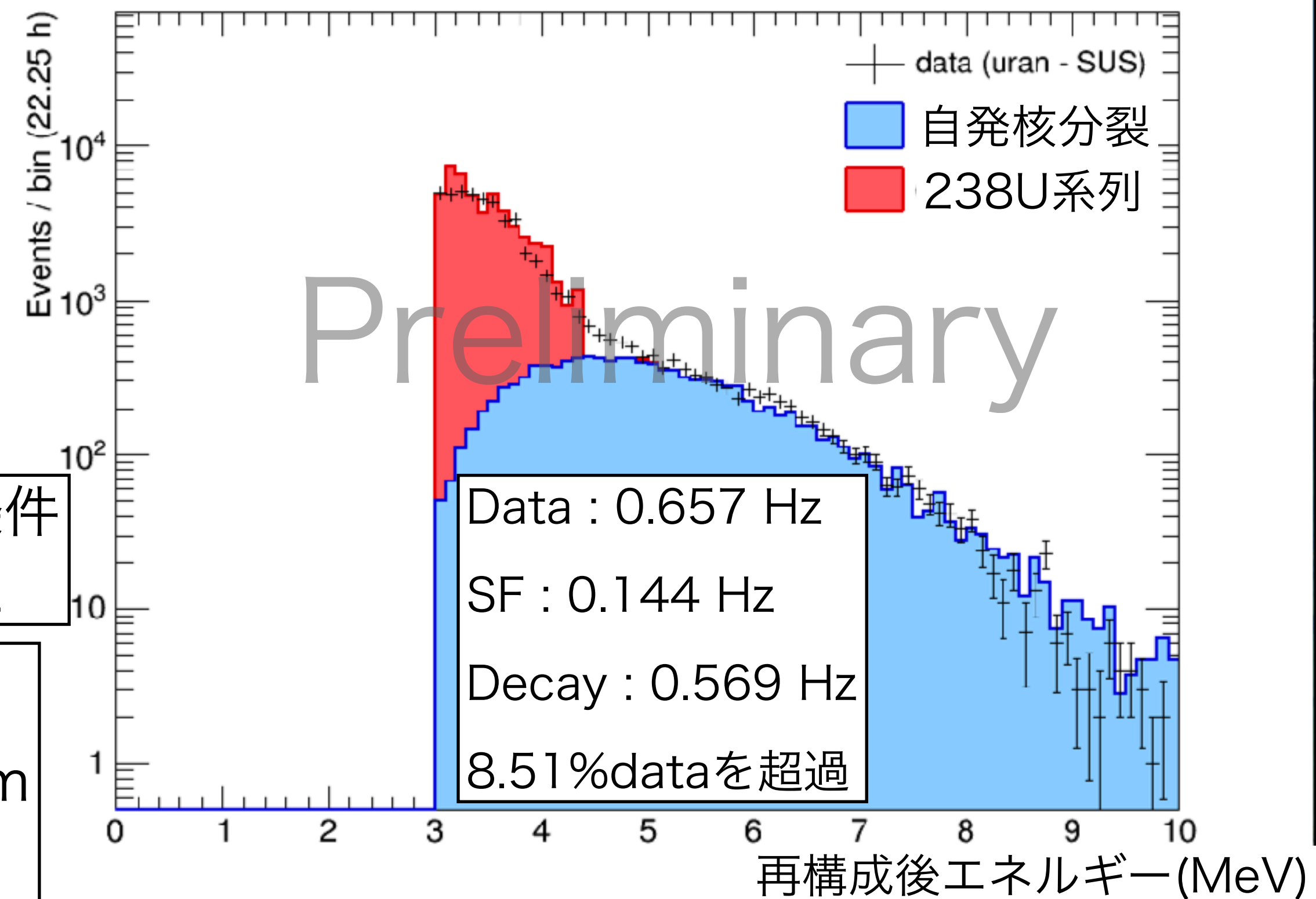
vector生成条件  
1.5 MeV以上

cut条件

・線源中心5m

・goodness

Rn以降 $1.8 \times 10^{-7}$



- ・ 低エネルギー事象の多くは238U系列の $\gamma$ 線であった。
- ・ Rn以降を一律1/1000としたモデルでは、低エネルギー事象を過剰に見積もっている
- ・ Rn以降 $1.8 \times 10^{-7}$ モデルは低エネルギー側をよく再現、高エネルギー側は統計不足

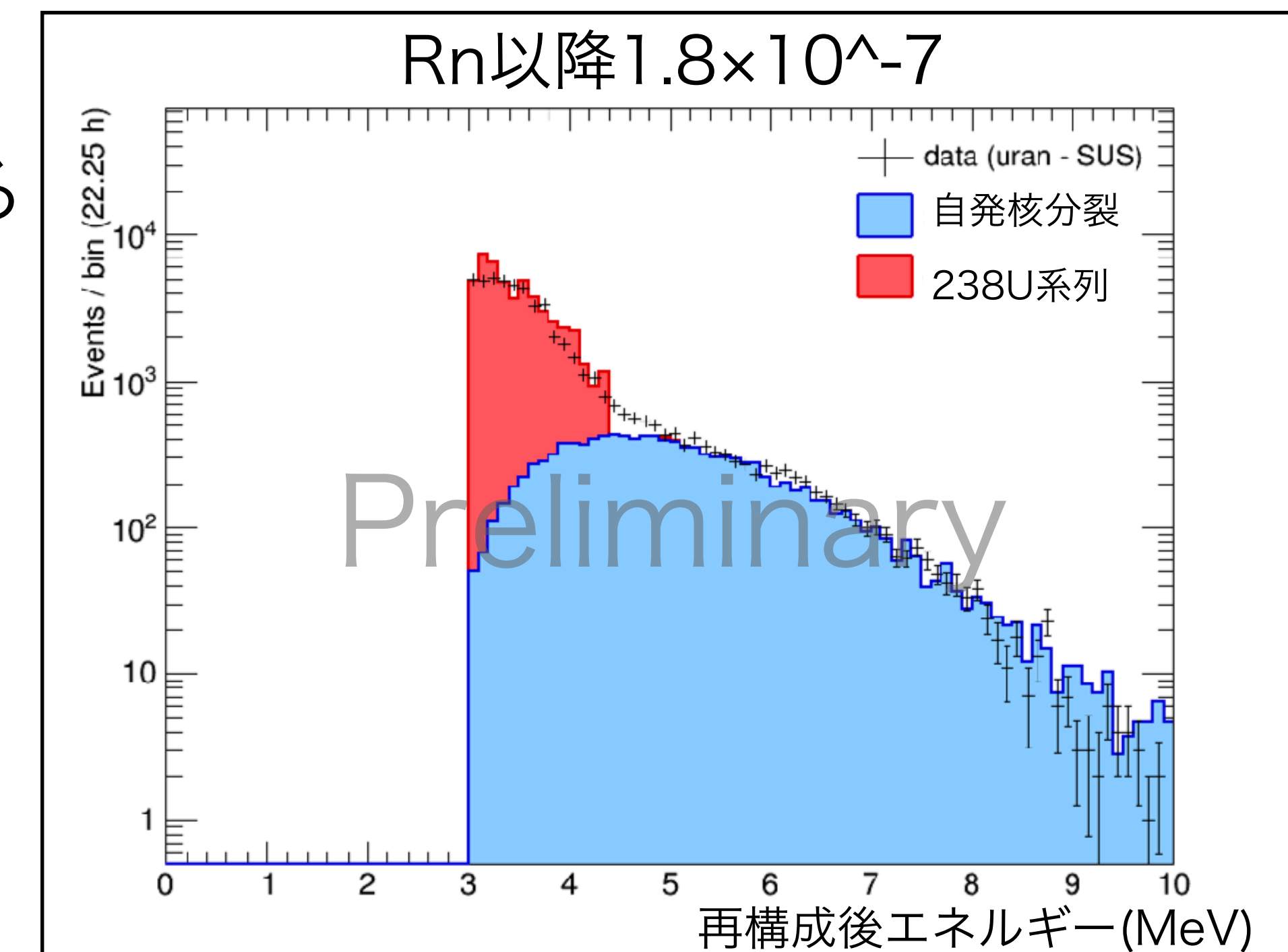
# まとめ・今後の展望

## まとめ

- ・ ウラン線源測定における低エネルギー事象の多くは $^{238}\text{U}$ 系列由来の $\gamma$ 線だと考えられる。

## 今後

- ・ Ge測定から核種ごとの放射能を評価し、MCに用いるactivityを詳細に決定する
- ・ 同位体の崩壊単位でのMCでは、分布が変わるか検証する
- ・ 化学的に測定した $^{238}\text{U}$ のデータを用いて、SKでの存在量を確認する



# Backups