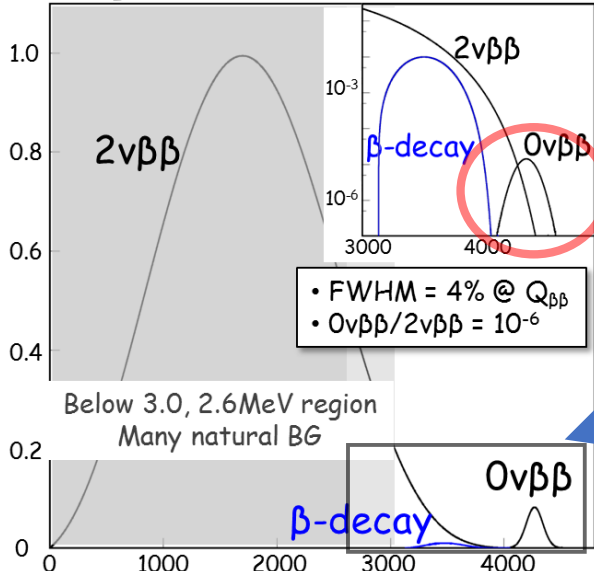


# 48Caのシングル $\beta$ 崩壊の 半減期の測定に向けた実験計画

大阪大学

原田 卓明 山本 朝陽

# 導入 $^{48}\text{Ca}$ について



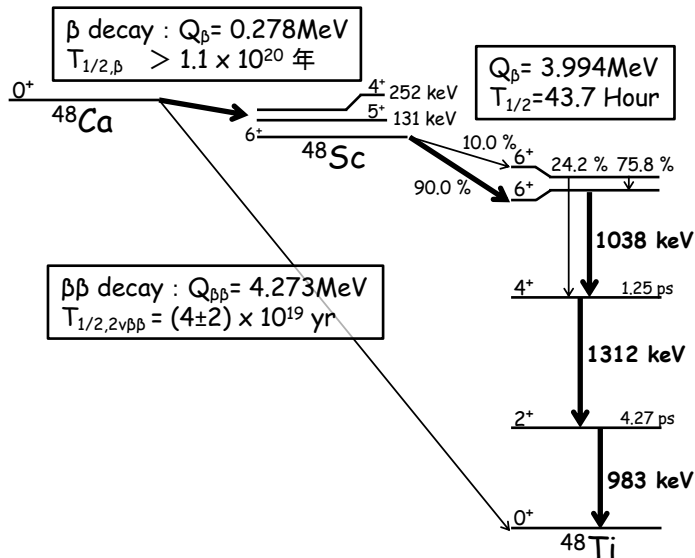
$0\nu\beta\beta$ 崩壊の発見にはQ値(4.271MeV)Background(BG)として $2\nu\beta\beta$ の染み込み量を評価しなければならない。

$2\nu\beta\beta$ 崩壊を精密に測るために、自然放射線の少ない2.6~4.3MeV領域の $2\nu\beta\beta$ 崩壊を使いたい。

->  $^{48}\text{Sc}$ の $\beta$ 崩壊がBGとしてあるので、 $^{48}\text{Sc}$ の事象数を精密に評価できないといけない。

$^{48}\text{Sc}$ の $\beta$ 崩壊は $^{48}\text{Ca}$ の $\beta$ 崩壊に起因するものなのでこの実験では、

「 $^{48}\text{Ca}$ の $\beta$ 崩壊の半減期を測定すること」を目標とした。



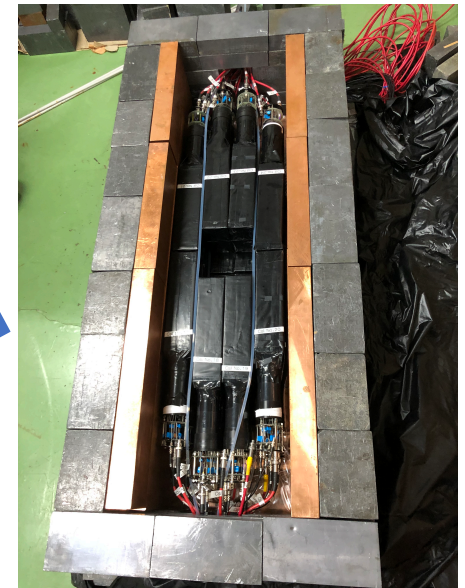
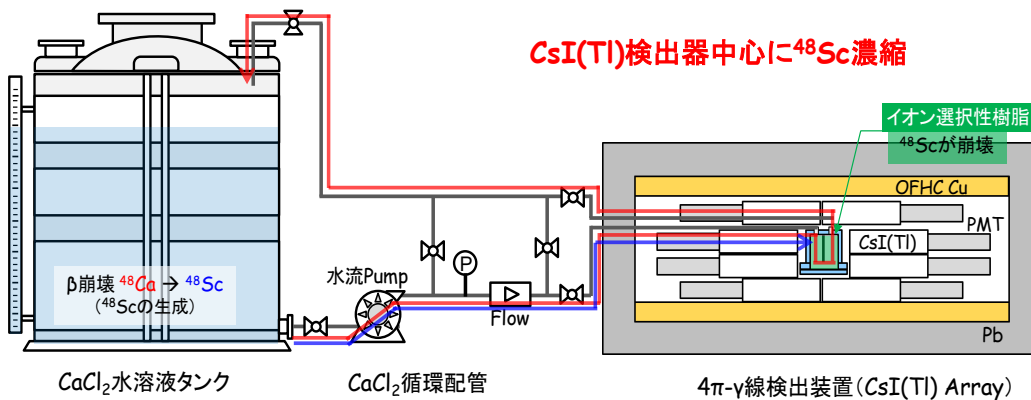
$^{48}\text{Ca}$ の $\beta$ 崩壊の半減期は、 $1.1 \times 10^{20}$ 年以上である。

(参考文献：A. Bakalyarov et. al., Nuclear Physics A700 (2002) 17)

この実験では、半減期の検出限界は $10^{22}$ 年程度を目指している。

# 導入 実験装置の説明

- 放射平衡状態:  $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Sc} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$  を利用
- $^{48}\text{Ti}^*$  から放出される3本の $\gamma$ 線を、CsI(Tl)検出器30本で観測する
- $\text{nat. CaCl}_2$  (~ 255 kg) 水溶液(630 L) を使用;  $^{48}\text{Ca} \sim 170 \text{ g}$
  
- $\text{Sc}^{3+}$  イオンがキレート樹脂に濃縮されて、 $^{48}\text{Sc}$ が $\beta$ 崩壊する。
  - $\text{Ca}^{2+}$  イオン(大量): 樹脂には吸着されず、経路内を循環し続ける
  - $\text{Sc}^{3+}$  イオン:  $^{48}\text{Ca}$ の $\beta$ 崩壊でタンク内で生成され、キレート樹脂内で捕獲される



上から見た検出器部分

## 本実験の特徴

### 1. 崩壊核(<sup>48</sup>Sc)を全方位(4π)覆った検出

→CsI(Tl)を30本用いることで全方位を囲む

### 2. 崩壊核(<sup>48</sup>Sc)の選択的な捕集

→キレート樹脂は<sup>48</sup>Scを化学的に吸着することがきる。一方、<sup>48</sup>Caは吸着されない。その為、キレート樹脂部分に<sup>48</sup>Scを濃縮することができる。

# モンテカルロシミュレーション (MC)

$$T_{1/2} = \frac{T \ln 2}{N_{det}} \varepsilon N_0$$

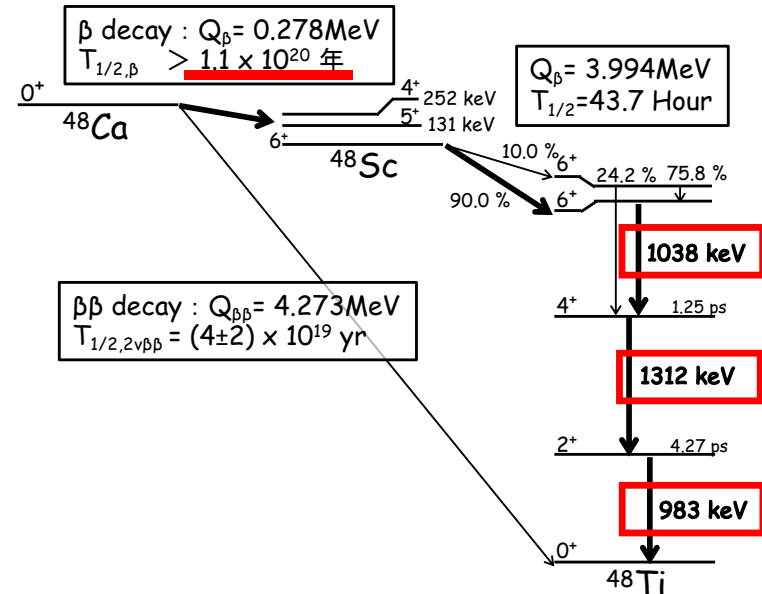
$N_{det}$ : 観測イベント数  $\varepsilon$ : 実験装置の効率  
 $T$ : 測定時間  $N_0$ : サンプルの原子数

実験装置の効率では、

1. 循環に関する効率  $\varepsilon_{circulation}$
2. 樹脂の捕集効率  $\varepsilon_{capture}$
3. 検出器の検出効率  $\varepsilon_{detect}$

がありが今回はその中の  $\varepsilon_{det}$  を求める。

現在理論値では  $2 \times 10^{21}$  年まで予想されているため、観測期間を1年と仮定したときに少なくとも  $\varepsilon_{det} > 10\%$  が求められる。

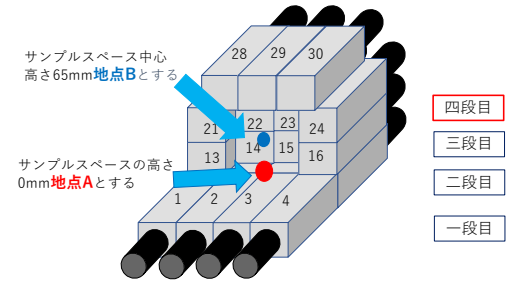


3本の  $\gamma$  線の検出効率が必要であるが、 $^{48}\text{Sc}$  を人工的に作ることはできない。

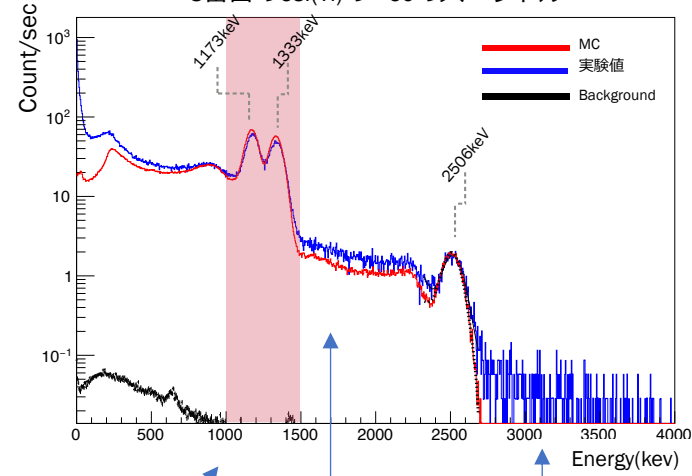
→ MCシミュレーションを用いる。

MCが正しく再現されているかは、 $\gamma$  線のエネルギーが近い  $^{60}\text{Co}$  (1173 keV, 1333 keV) を用いて確認した。

# MCの再現性の評価



3番目のCsI(Tl)の<sup>60</sup>Coのスペクトル



48Scのγ線のエネルギー領域  
偶然同時係数によるずれ

MCと実験値の検出効率を比較することで、MCの精度を確かめる。

<sup>60</sup>Co(高さ0mm)の1173keVと1333keVのγ線の同時検出効率  
実験値 12.80 ± 0.03 %  
MC 13.70 ± 0.01 %  
→MC/実験値 = 1.07  
→7%のずれ

<sup>60</sup>Co(高さ65mm)の1173keVと1333keVのγ線の同時検出効率  
実験値 13.10 ± 0.02 %  
MC 14.60 ± 0.01 %  
→MC/実験値 = 1.11  
→11%のずれ

現時点では最大で11%程度のずれと考えられる。

パッケージ : geant4.10.06  
Physics list : shielding  
2本のγ線の角度相関は考慮されていない。

このMCをもとに、<sup>48</sup>Scの3本のFull energy peak (983keV,1038keV,1312keV)の同時検出効率を算出  
→ 11.2 %

# MCの精度を上げる為の課題

MCではCsI(Tl)を等間隔、同じ検出効率で再現している。  
そのため、MCをより実験値に近づけるために以下のことが考えられる。

## 1. 検出器の配置のズレ

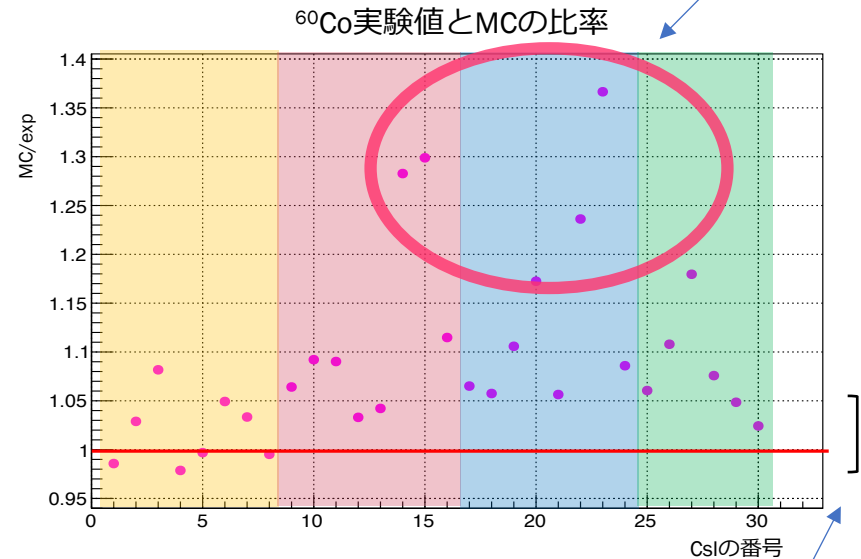
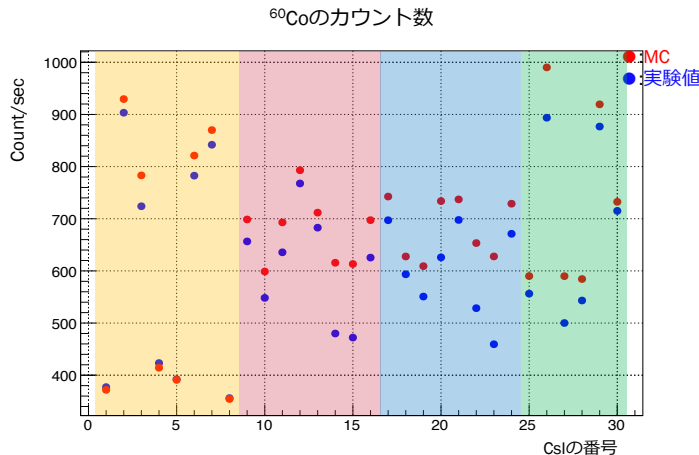
→CsI(Tl)の結晶をブラックシート等で覆っている為、検出部分にズレが生じてしまう。

## 1. 各CsI(Tl)固有の特性の考慮

→CsI(Tl)結晶の発光量の違い、PMTの検出率の違い

→各CsI(Tl)のカウントを見ることで要因を探す。

大きなズレは検出器の個体差が大きいものと考えられる。

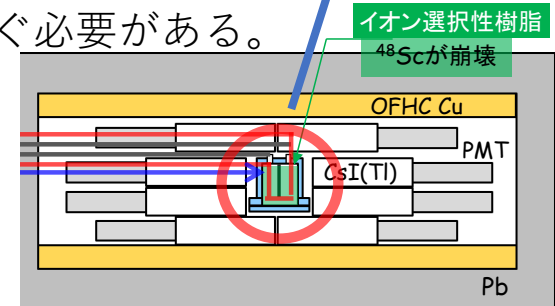
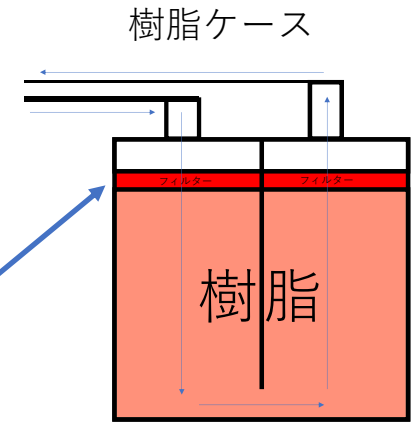


左図は各CsI(Tl)のカウントをプロットしたもので、比率をとること(右図)で実験値からのズレを見ることができる。

配置のズレは、**検出器の位置と検出数の比例関係を求める**ことで修正することができる。

# 今後の展望

- MCの精度向上
- 溶液循環時、樹脂が流れでない様にするフィルターの用意。  
→Ca溶液を循環させているとき、キレート樹脂はケースに入っている。  
そのキレート樹脂がケースから漏れてしまうのを防ぐ必要がある。



- 残りの検出効率( $\epsilon_{\text{circulatoin}}$ ,  $\epsilon_{\text{capture}}$ )を求める。

→ $\epsilon_{\text{capture}}$ は、樹脂が化学的に $^{48}\text{Sc}$ を吸着する性質を利用し、同位体である $^{46}\text{Sc}$ を用いて測定する。 $^{45}\text{Sc}$ (天然存在比100%)に加速器で中性子照射し $^{46}\text{Sc}$ を用意することができるため、 $^{48}\text{Sc}$ よりも容易に実験に用いることができる。

# BGの達成目標

- 目的の事象とBGの統計量を $N_s, N_{BG}$ とすると

$$N = N_s + N_{BG} > N_{BG} + \sqrt{N_{BG}}$$

が必要(BG+BGの統計誤差を上回る)

- 計測時間 $t$ で割って計数率に直すと

$$n = n_s + n_{BG} > n_{BG} + \sqrt{\frac{n_{BG}}{t}}$$

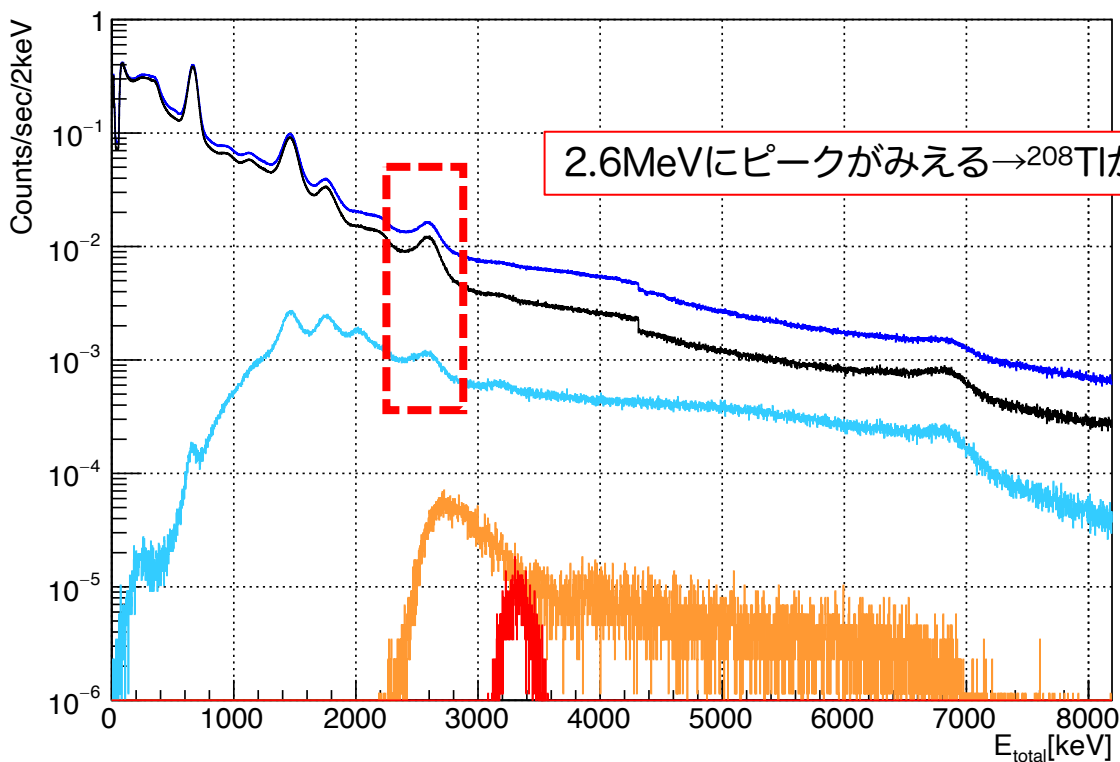
$$\therefore n_{BG} < n_s^2 t$$

- $^{46}\text{Sc}$ の場合… $N_s \sim 10^4$ ,  $t = 1$ 日  $\rightarrow n_{BG} < 10^3$  cps
- $^{48}\text{Sc}$ の場合… $n_s \sim 10^{-5}$ ,  $t = 1$ ヶ月  $\rightarrow n_{BG} < 10^{-4}$  cps

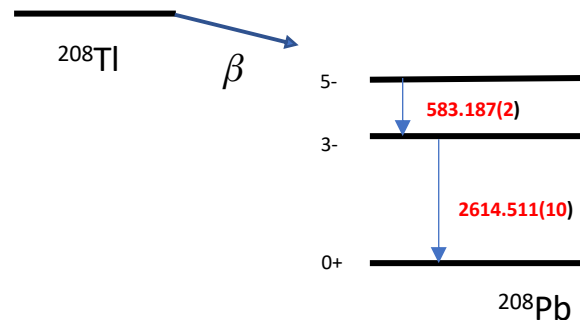


# BGの現状

BGの低減の達成状況

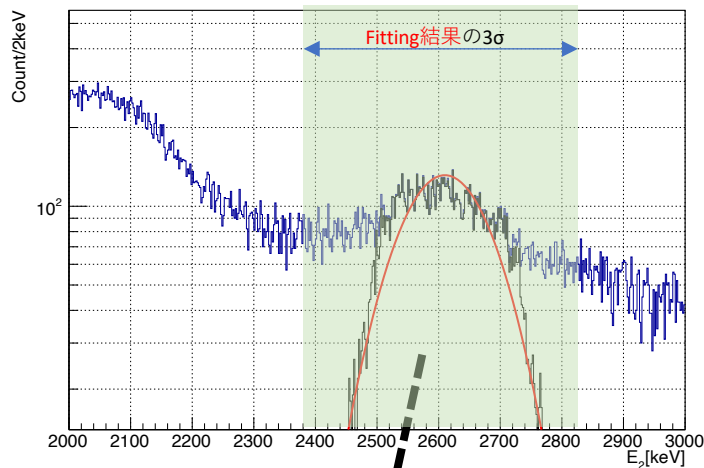


# BG源の特定



583keVと2614keVのコインシデンスで $^{208}\text{Tl}$ によるBGを評価

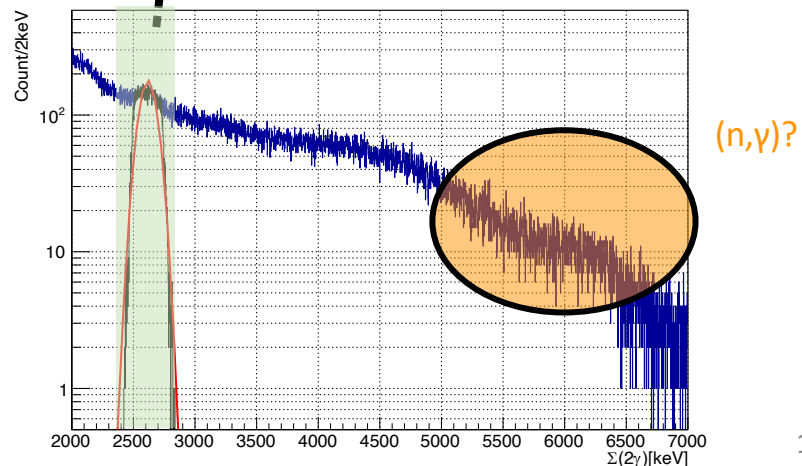
2Hit,  $\mu\text{VETO}$ ,  $E_1=583\text{keV}$   
 $E_2=2614\text{keV}$



19471 event  
 13024 event  
 →2Hitの場合 66.9%がTl由来と思われる

28280 event  
 18033 event  
 →3Hitの場合 63.8%がTl由来と思われる

3Hit,  $\mu\text{VETO}$ ,  $E_1=583\text{keV}$   
 $E_2+E_3=2614\text{keV}$



# さらなるBG低減に向けて

- MCシミュレーション TIを置いてBGスペクトルを再現  
→TI由来であることを確定させる
- 5MeV以上の領域の連続BGは(n,  $\gamma$ )反応?
  - 鉛ブロックを支えるためのステンレスフレームを置いている
  - ステンレス内のFeで(n,  $\gamma$ )?
  - CsやI, またはCuの可能性もある
  - $^{252}\text{Cf}$ (中性子線源)を置いて 5MeV以上の領域を調べる