

高純度NaI(Tl)結晶のバックグラウンド測定結果

小寺 健太

徳島大学 (M1)

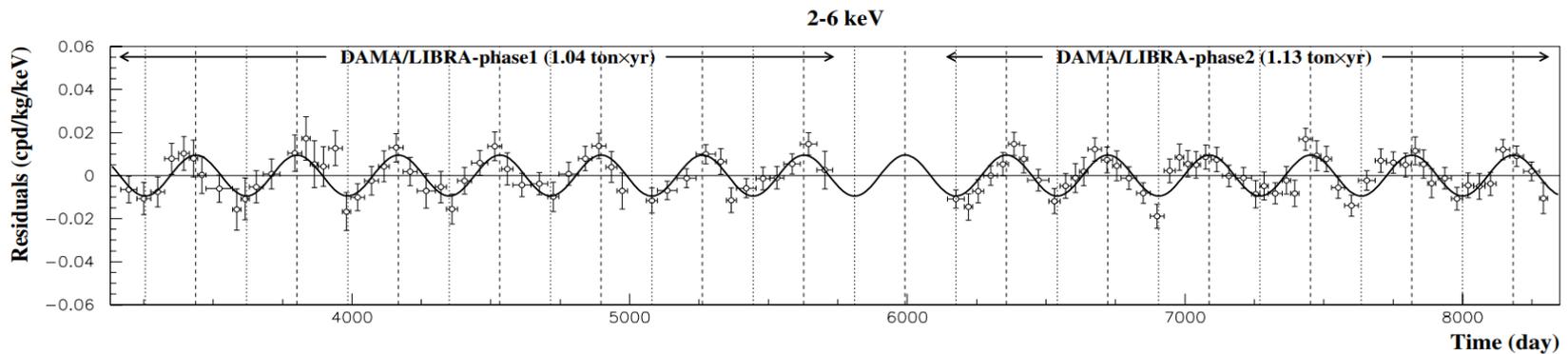
目次

- 高純度NaI(Tl)結晶の必要性
 - DAMA/LIBRA実験
 - 目標とするNaI(Tl)結晶
 - Ingot #85の地上における測定結果
- 神岡地下実験室でのバックグラウンド(BG)測定および解析
 - インストール
 - エネルギー較正
 - データの解析手法: α 線, 低エネルギー域
 - 解析結果: Ingot #85
 - α 線濃度解析
 - 解析結果: Ingot #94
 - α 線濃度解析と低エネルギー域
- まとめと展望

DAMA/LIBRA実験

- DAMA/LIBRA実験:
250 kg NaI(Tl)検出器を使用し暗黒物質由来の季節変動を探索

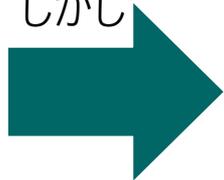
季節変動を主張 (R.Bernabei, CSLNGS, March 26, 2018)



11.9 σ C.L.

- fitting関数: $A \cos[\omega(t - t_0)]$
 - $t_0 = 152.5 \text{ day}$, $T = 1.00 \text{ year}$
 - $A = (0.0095 \pm 0.0008) \text{ cpd/kg/keV}$
 - $\chi^2/\text{dof} = 71.8/101$

しかし



- DAMA/LIBRA実験の結果は**未実証**
⇒同グループと同程度の高感度なNaI(Tl)結晶を用いた実験が必要

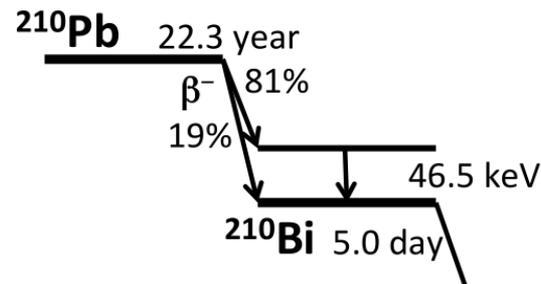
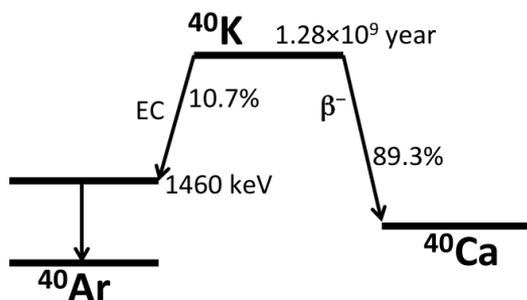
目標とする高純度NaI(Tl)結晶

- 主なバックグラウンド源: ^{40}K , Th系列, U系列

目標とする濃度

Radioactive impurities	Target purities
natK ($^{40}\text{K} = 0.017\%$)	< 20 ppb
Th-series(^{232}Th)	< 16 $\mu\text{Bq/kg}$ (< 10 ppt)
U-series Middle (^{226}Ra)	< 120 $\mu\text{Bq/kg}$ (< 10 ppt)
U-series Bottom(^{210}Pb)	< 50 $\mu\text{Bq/kg}$

- 特に ^{40}K と ^{210}Pb は半減期が長く、長期にわたって β 線及び γ 線を出す



NaI(Tl)結晶の現状

- 他グループのNaI(Tl)結晶の放射性不純物濃度

DAMA: NIM A592 (2008) 297.
ANAIS,SABRE: Talk slides in TAUP2021.
COSIME: Talk slides in TAUP2021

	DAMA	COSINE	ANAIS	SABRE	Our goal
^{nat}K [ppb]	< 20	< 35	18~40	4	20
^{232}Th [$\mu\text{Bq/kg}$]	2~31	2.5~35	~4	0.8	10
^{226}Ra [$\mu\text{Bq/kg}$]	8.7~124	11~451	~10	5	10
^{210}Pb [$\mu\text{Bq/kg}$]	5~30	10~3000	740~3150	360	50

U-chain : 1ppt = 12.3 $\mu\text{Bq/kg}$
Th-chain : 1ppt = 4.0 $\mu\text{Bq/kg}$
 ^{210}Pb : 1ppt = 2.5 kBq/kg

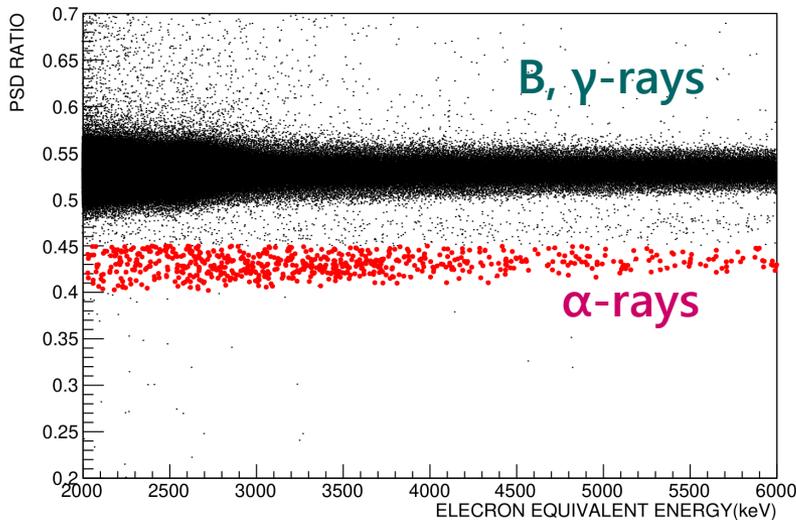
- DAMA/LIBRAグループのNaI(Tl)結晶は他グループと比較して高純度

Ingot #85の結果(PTEP 2021)

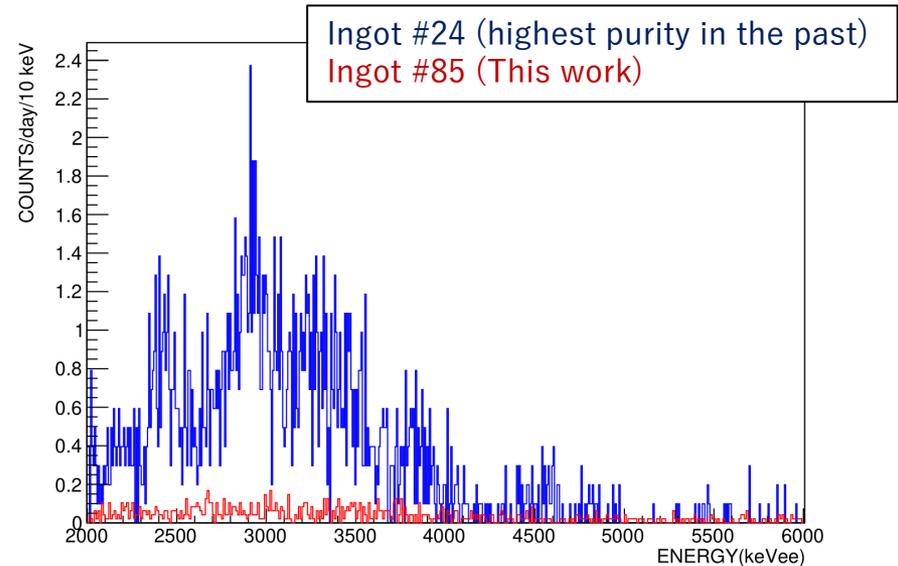
- Ingot #85: 去年作成。地上(徳島)にてバックグラウンド測定

K.Fushimi et al. PTEP 2021 043F01

PSD



Ingot #24(過去最高純度)とIngot #85の比較



過去最高純度であったIngot#24を上回る高純度結晶の精製に成功

- Ingot #94:
 - 純化手順が正しいことを確認するために#85と同じ純化方法で作成し神岡地下実験室で測定した

Ingot#85および#94の測定

- 7月に神岡地下実験室にてインストール作業
 - 各Ingotを別々のシールドにインストール
 - 二つの検出器からOR Triggerを生成しMoGURAにてデータ収集
- エネルギー較正 → バックグラウンド測定
 - 低エネルギー域 (<100 keV) と
 - 高エネルギー域 (≥ 100 keV) に分けて行った



↑ #85 shield

↓ #94 shield

Ingot #94



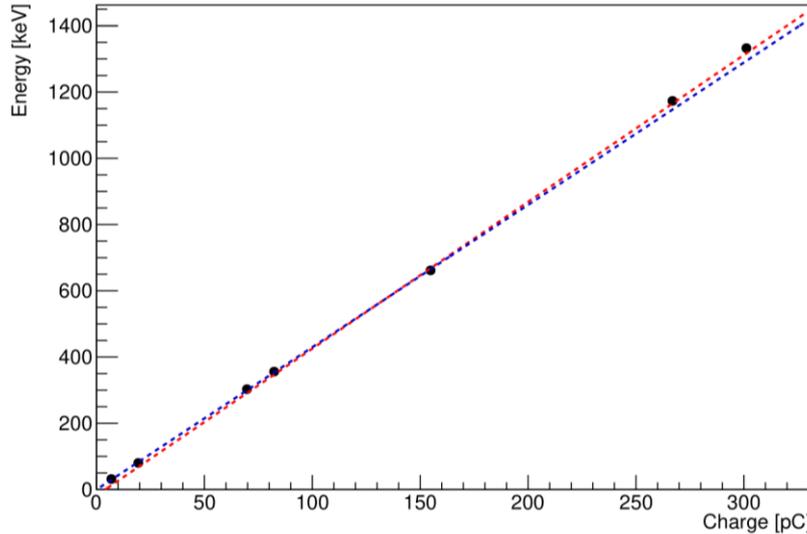
#94 detector



Energy calibration

- Ingot #85

--- : 校正曲線の境界



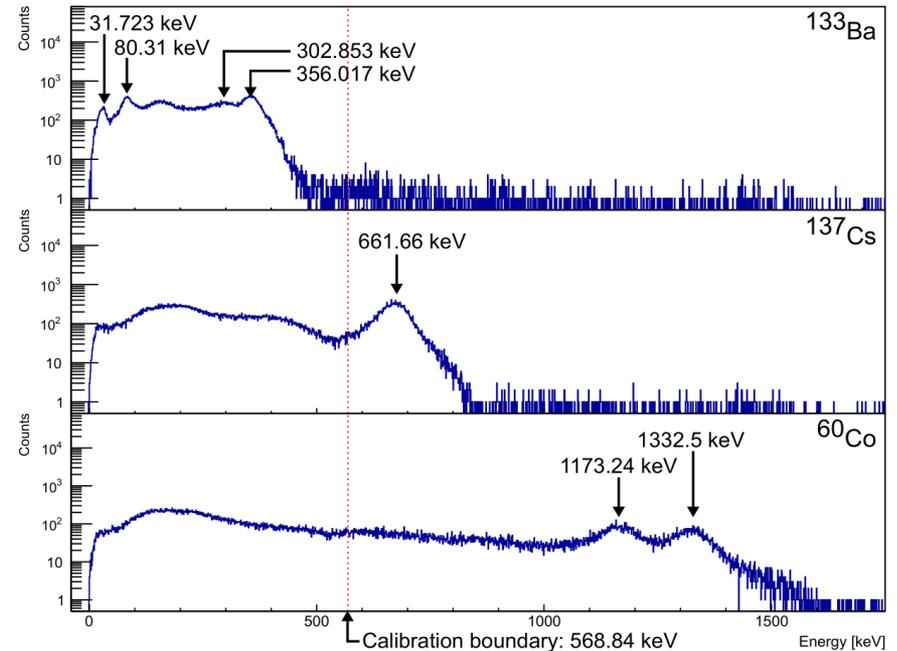
Low Energy (<100 keV):

$$E_{\text{Low}} = p_0 Q = 4.30 Q$$
$$p_0 = 4.30 \pm 0.03 \text{ [keV/pC]}$$

Hi Energy (≥ 100 keV):

$$E_{\text{Hi}} = p_0 Q + p_1 = 4.432 Q - 17.8$$
$$\begin{cases} p_0 = 4.432 \pm 0.004 \text{ [keV/pC]} \\ p_1 = -17.8 \pm 0.6 \text{ [keV]} \end{cases}$$

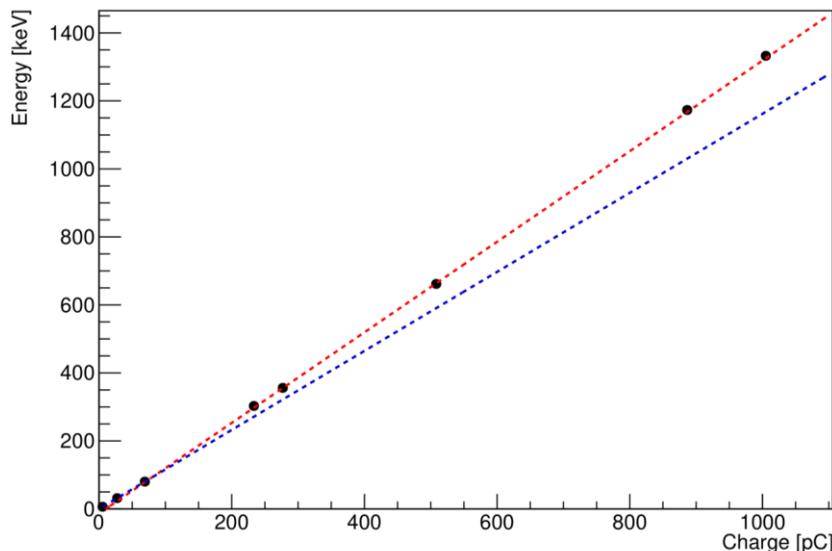
Calibration後のエネルギースペクトル



Energy calibration

• Ingot #94

--- :校正曲線の境界



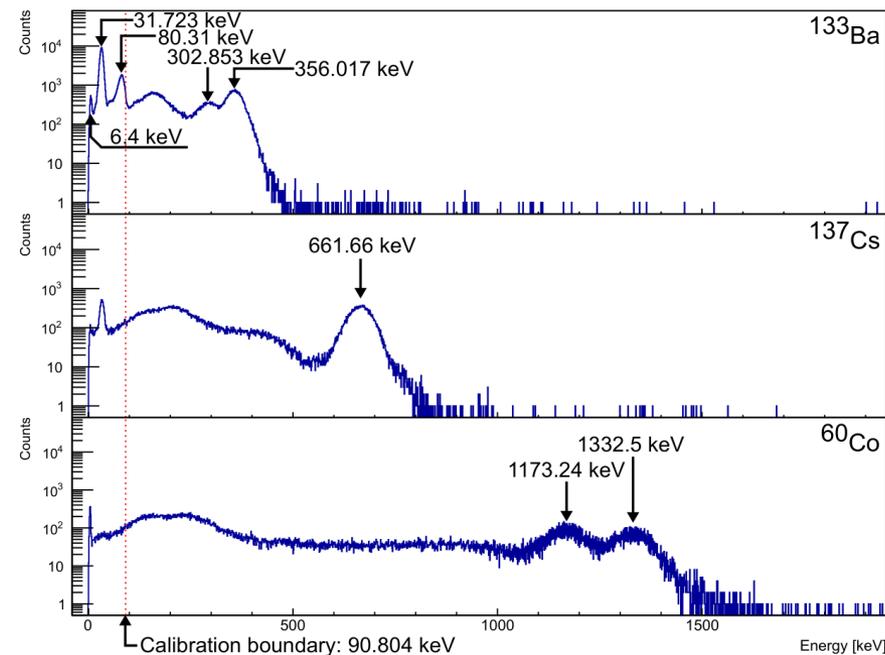
Low Energy (<100 keV):

$$E_{\text{Low}} = p_0 Q = 1.1620Q$$
$$p_0 = 1.1620 \pm 0.0005 \text{ [keV/pC]}$$

Hi Energy (≥ 100 keV):

$$E_{\text{Hi}} = p_0 Q + p_1 = 1.3318Q - 13.3$$
$$\begin{cases} p_0 = 1.3318 \pm 0.0008 \text{ [keV/pC]} \\ p_1 = -13.3 \pm 0.4 \text{ [keV]} \end{cases}$$

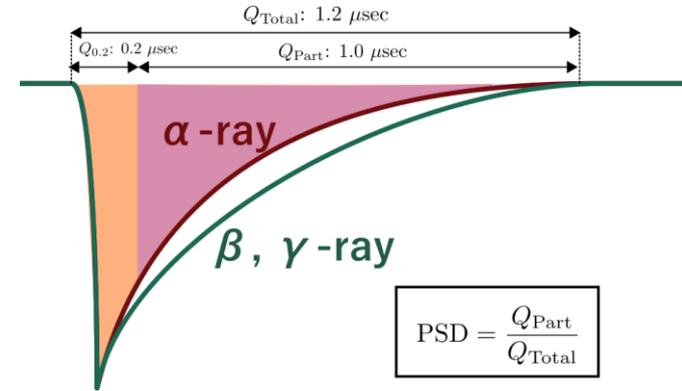
Calibration後のエネルギースペクトル



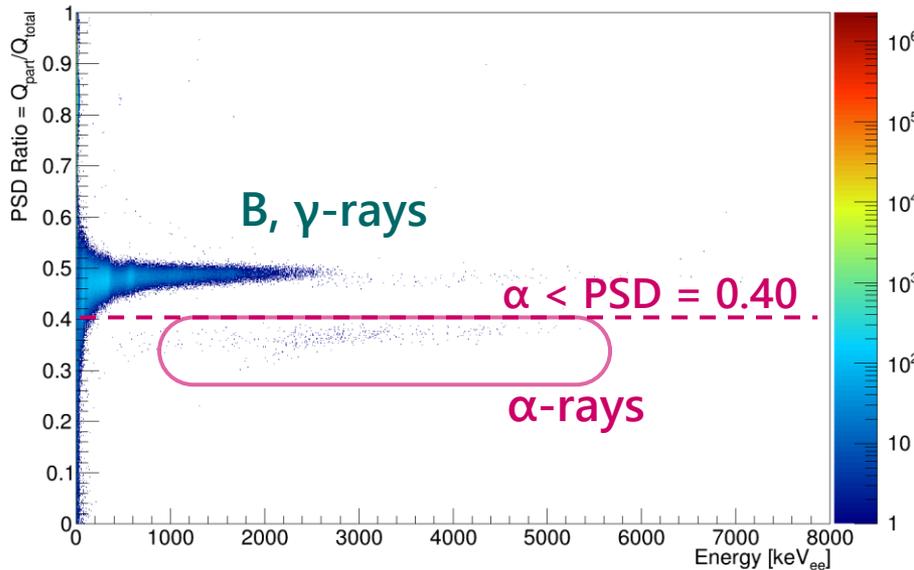
α線濃度(高エネルギー域)の解析

- α線濃度の解析
 - PSD(Pulse Shape Discrimination)よりα線イベントを抽出

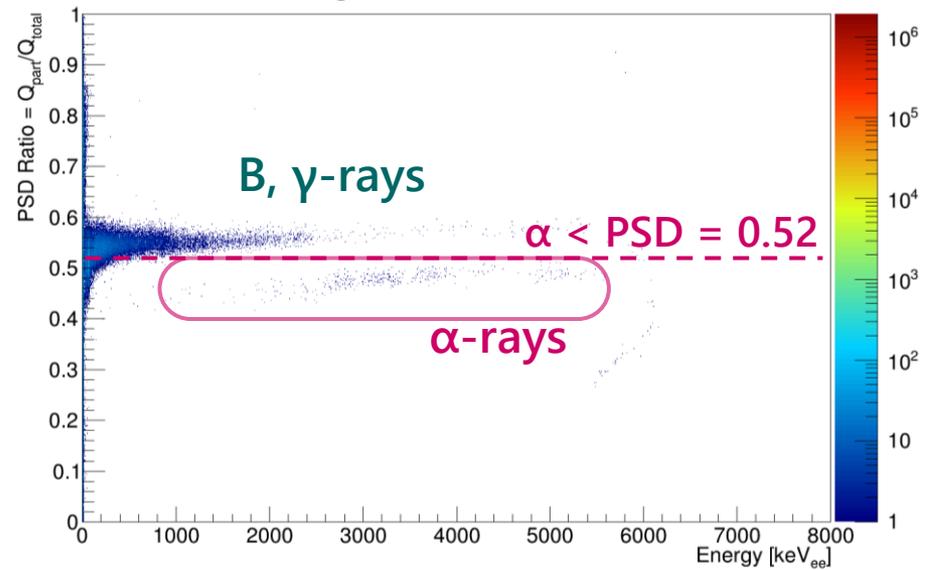
$$\text{PSD Ratio} = \frac{Q_{\text{Part}}}{Q_{\text{Total}}} = \frac{\int_{0.2 \mu\text{s}}^{1.2 \mu\text{s}} V dt}{\int_{0.0 \mu\text{s}}^{1.2 \mu\text{s}} V dt} = \frac{Q_3}{Q_2 + Q_3}$$



Ingot #85 PSD



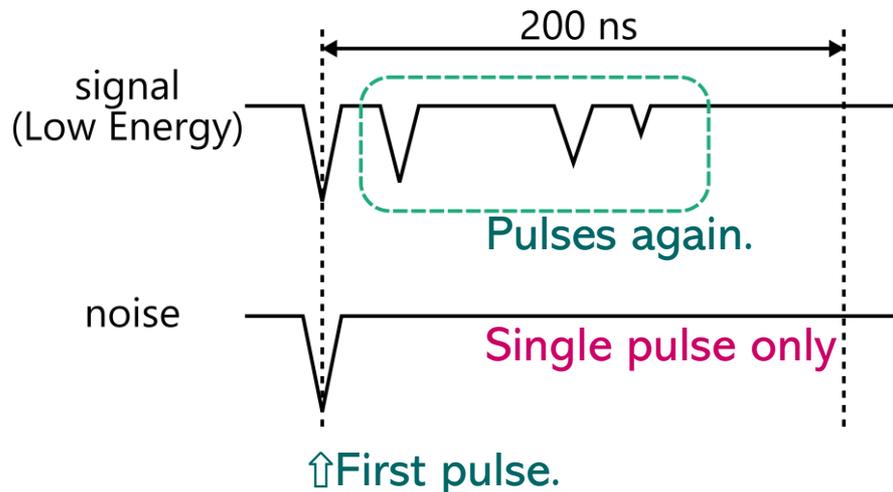
Ingot #94 PSD



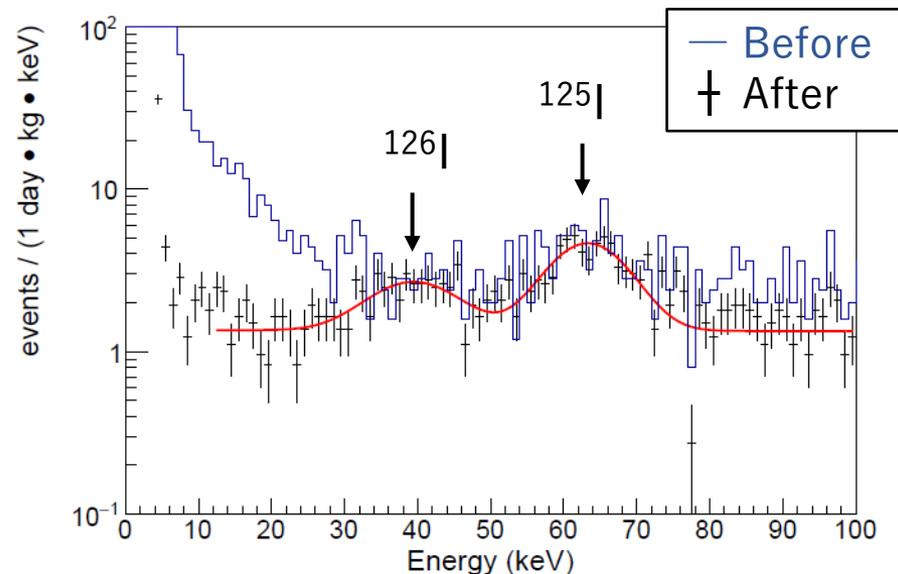
低エネルギー域の解析

- PMTから出力されるノイズ信号の除去
 - ノイズ信号と、低エネルギーのLinear信号は似ている
⇒出力された信号の挙動の違いを利用して除去
 - 最初のパルスが生じてからNaI(Tl)時定数(200ns)以内に再び信号が来るか？
⇒来るなら**信号**、来ないなら**ノイズ**と判定

Linear信号とノイズの違い(模式図)



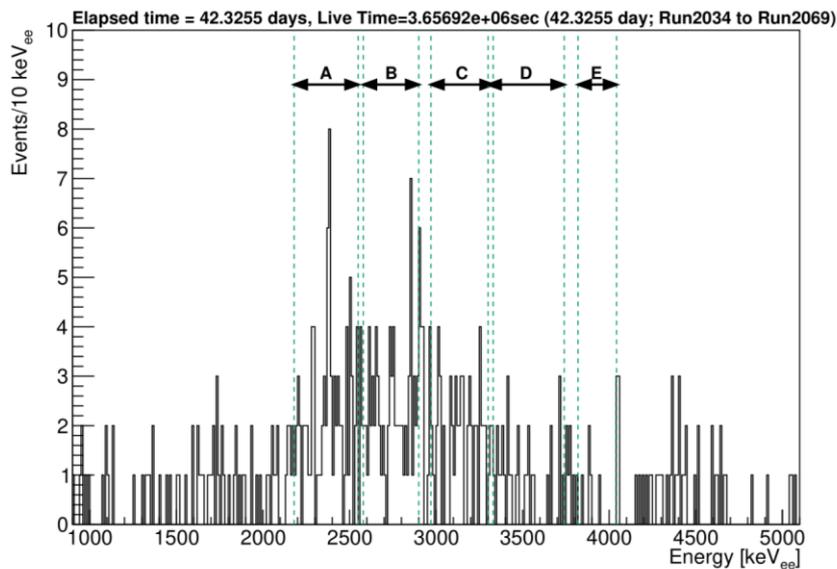
ノイズのカット前後の様子



α 線濃度 (Ingot #85)

- 5つの区間を仮定しイベント数から計算
 - $T_{\text{LiveTime}} \times M_{\#85} = 3.65693 \times 10^6 \text{ sec} \times 1.322 \text{ kg}$
各区間の放射性同位体とその計数

	RI	Energy Range [keV]	Events
A	$^{238}\text{U}(\text{U}), ^{232}\text{Th}(\text{Th})$	2180-2550	84 ± 10
B	$^{234}\text{U}(\text{U}), ^{230}\text{Th}(\text{Th}), ^{226}\text{Ra}(\text{U})$	2580-2900	81 ± 9
C	$^{228}\text{Th}(\text{Th}), ^{224}\text{Rn}^*(\text{U}), ^{210}\text{Po}(\text{U})$	2970-3330	60 ± 8
D	$^{218}\text{Po}(\text{U}), ^{212}\text{Bi}(\text{Th}), ^{224}\text{Rn}^*(\text{U}), ^{220}\text{Rn}(\text{Th})$	3300-3740	34 ± 6
E	$^{216}\text{Po}(\text{Th})$	3820-4043	8 ± 3



計算結果

Ingot #85	concentration
natK [ppb]	< 20
^{232}Th [$\mu\text{Bq/kg}$]	< 3 (90% C.L.)
^{226}Ra [$\mu\text{Bq/kg}$]	8 ± 1
^{210}Pb [$\mu\text{Bq/kg}$]	15 ± 3

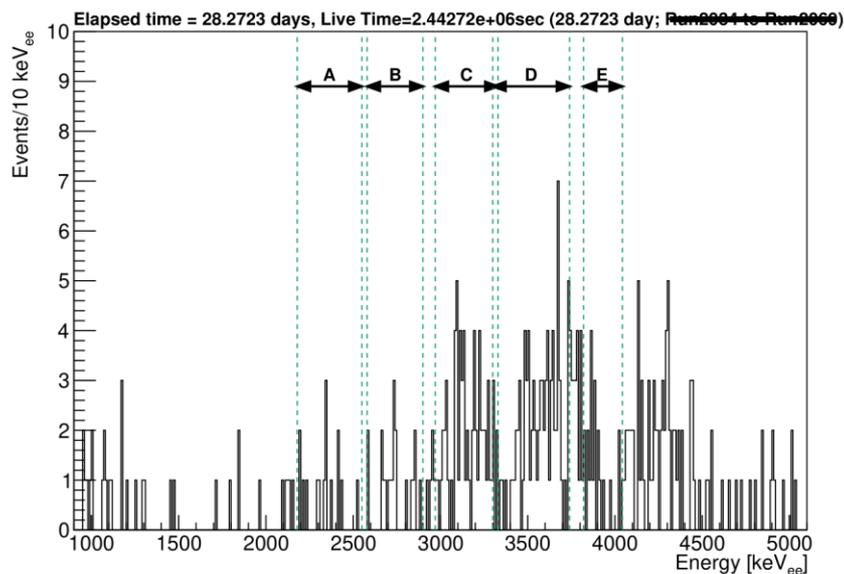
すべて濃度が目標値より小さい

α 線濃度 (Ingot #94)

- $T_{\text{LiveTime}} \times M_{\#94} = 2.44272 \times 10^6 \text{ sec} \times 1.344 \text{ kg}$
 各区間の放射性同位体とその計数

	RI	Energy Range [keV]	Events
A	$^{238}\text{U}(\text{U}), ^{232}\text{Th}(\text{Th})$	2180-2550	15 ± 4
B	$^{234}\text{U}(\text{U}), ^{230}\text{Th}(\text{Th}), ^{226}\text{Ra}(\text{U})$	2580-2900	20 ± 5
C	$^{228}\text{Th}(\text{Th}), ^{224}\text{Rn}^*(\text{U}), ^{210}\text{Po}(\text{U})$	2970-3330	67 ± 9
D	$^{218}\text{Po}(\text{U}), ^{212}\text{Bi}(\text{Th}), ^{224}\text{Rn}^*(\text{U}), ^{220}\text{Rn}(\text{Th})$	3300-3740	89 ± 10
E	$^{216}\text{Po}(\text{Th})$	3820-4043	21 ± 5

※Run2039~Run2050はHV tripより除去



計算結果

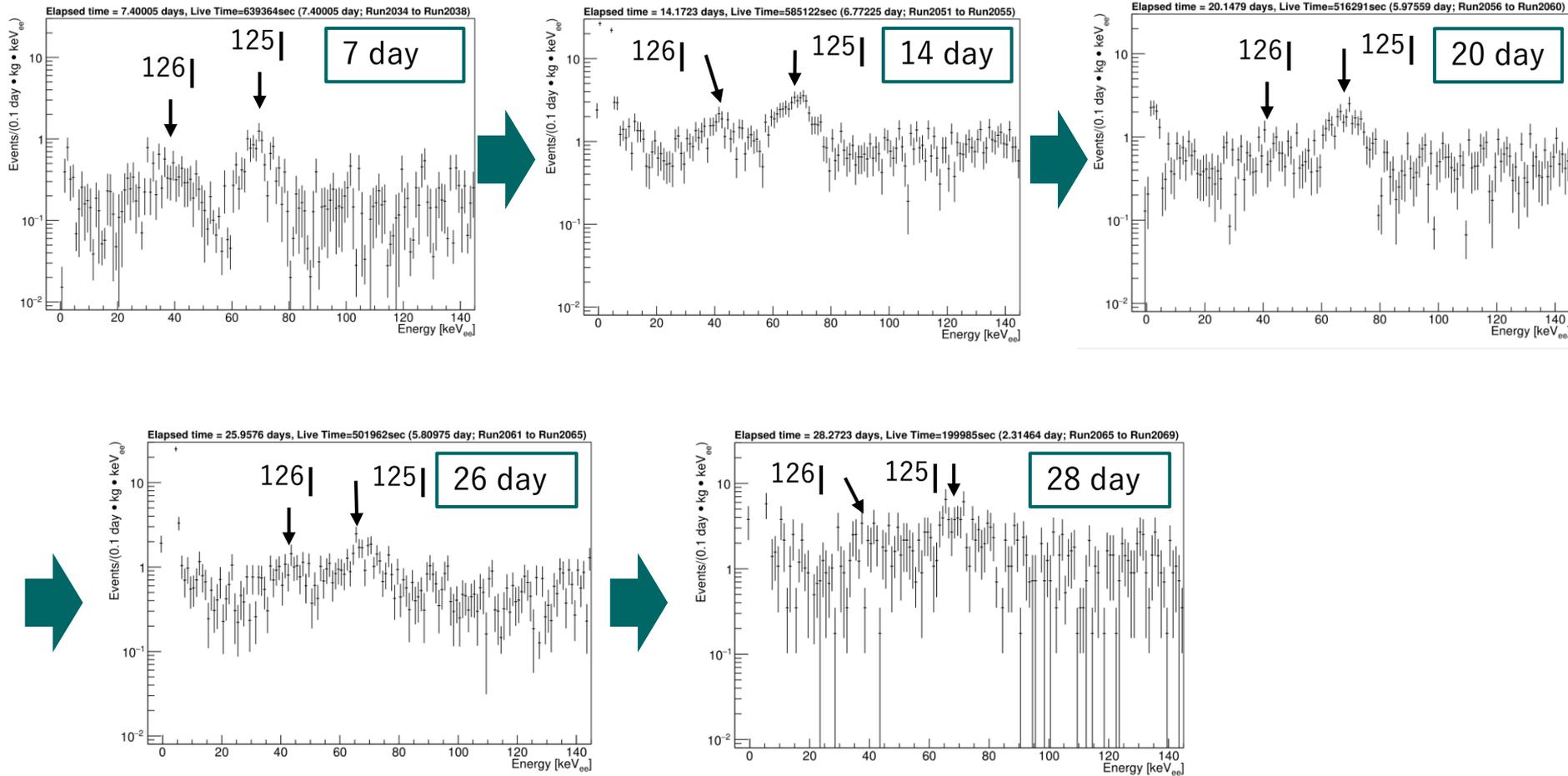
Ingot #94	concentration
natK [ppb]	< 20
^{232}Th [$\mu\text{Bq/kg}$]	6.3 ± 1.5
^{226}Ra [$\mu\text{Bq/kg}$]	< 2 (90% C.L.)
^{210}Pb [$\mu\text{Bq/kg}$]	< 7 (90% C.L.)

Ingot#85と同様すべて濃度が目標値より小さい
 →純化方法が確立した

低エネルギー域解析 (Ingot#94)

- ヨウ素の強度が時間経過で減衰していることを確認できた

緑枠は経過時間



まとめ

- バックグラウンドを目標レベルまで下げること成功(#85,#94)
⇒結晶の純化手法を確立

	Ingot #85	Ingot #94	Goal
Crystal size	3" ϕ × 3"	3" ϕ × 3"	5" ϕ × 5"
natK [ppb]	< 20	< 20	< 20
^{232}Th [$\mu\text{Bq/kg}$]	< 3	6.3 ± 1.5	< 4
^{226}Ra [$\mu\text{Bq/kg}$]	8 ± 1	< 2	< 10
^{210}Pb [$\mu\text{Bq/kg}$]	15 ± 3	< 7	< 10

目標達成!!



- 各検出器単体でも高感度な測定が可能なバックグラウンドレベル(=1.27 dru)
⇒二つの検出器によるAnti-coincidenceトリガーでバックグラウンド除去可能
(1 dru以下を予想)
- 大型NaI結晶を製造中。来年3月あたりのインストールを予定