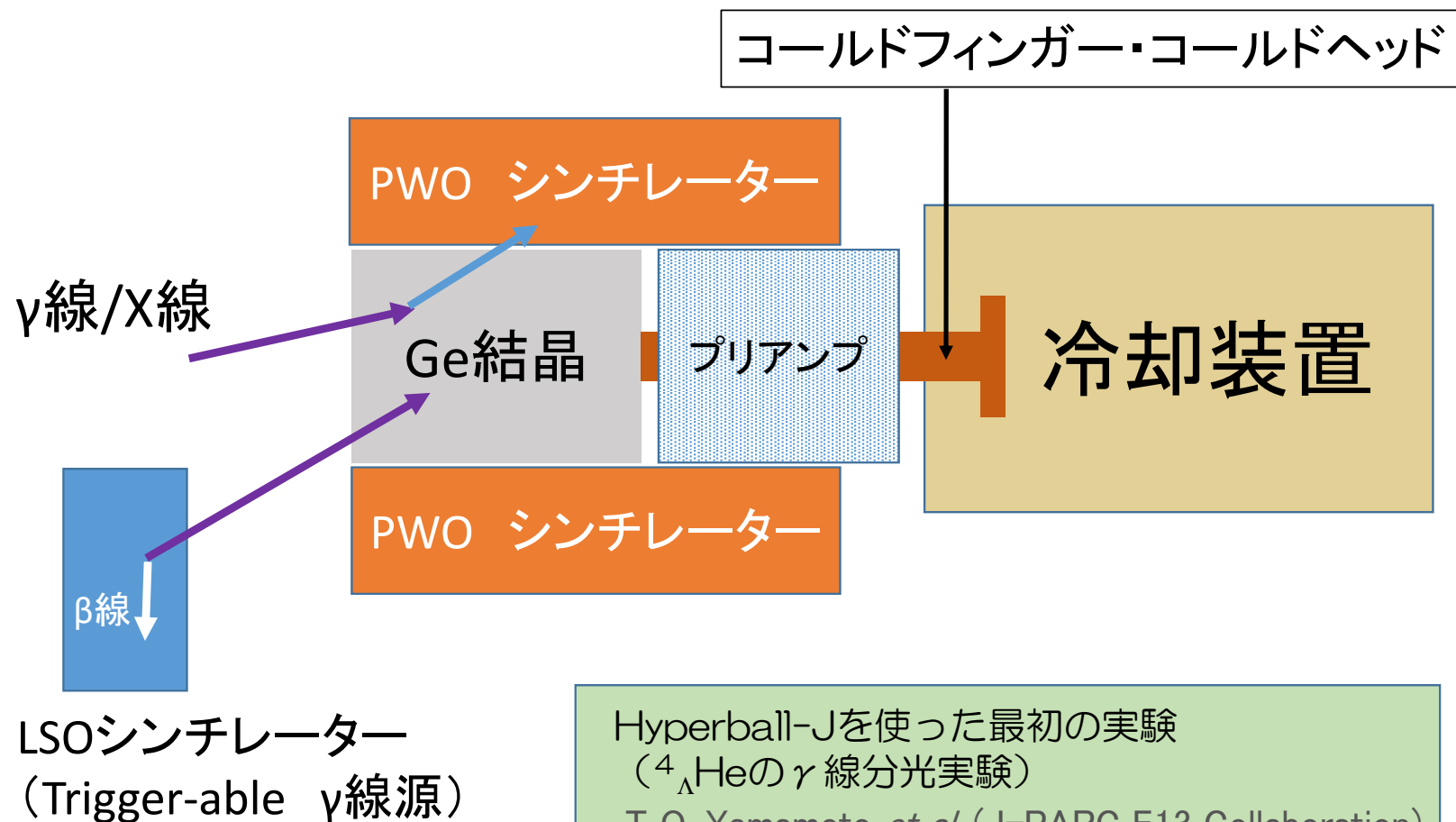


# 検出器交流会 A02班

- ゲルマニウム半導体検出器
- PWOカウンター
- 高精度エネルギー較正

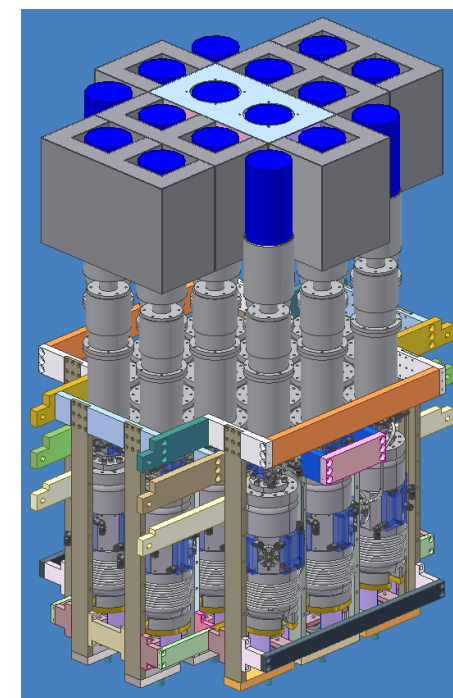
東北大学  
田村裕和  
小池武志

# ハイパー核ガンマ線（X線）測定基本ユニット



Hyperball-Jを使った最初の実験  
( $^4_{\Lambda}\text{He}$ の $\gamma$ 線分光実験)

T.O. Yamamoto *et al.* (J-PARC E13 Collaboration)  
Phys. Rev. Lett. **115**, 222501 (2015)



Ge検出器アレイ  
Hyperball-J (下半分)

- ゲルマニウム半導体検出器
- PWOカウンター
- 高精度エネルギー較正

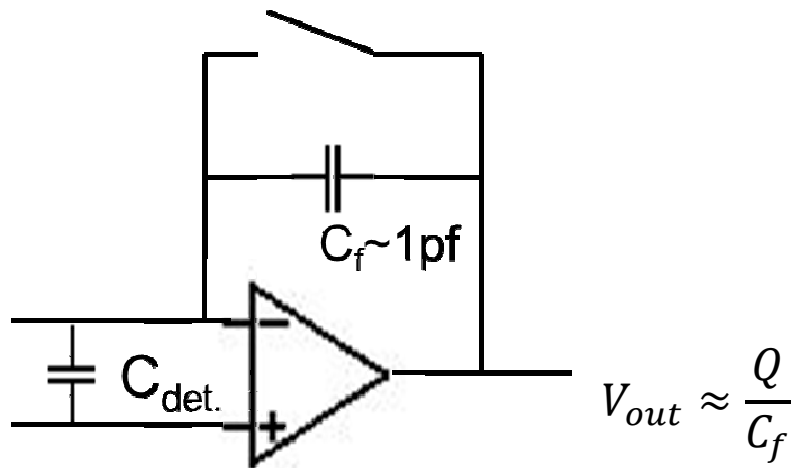
KEK 春山富義、笠見勝祐  
セイコーEG&G 小野浩  
富士電機 竹内孝行

*NIMA 770, 1-7, (2015)*

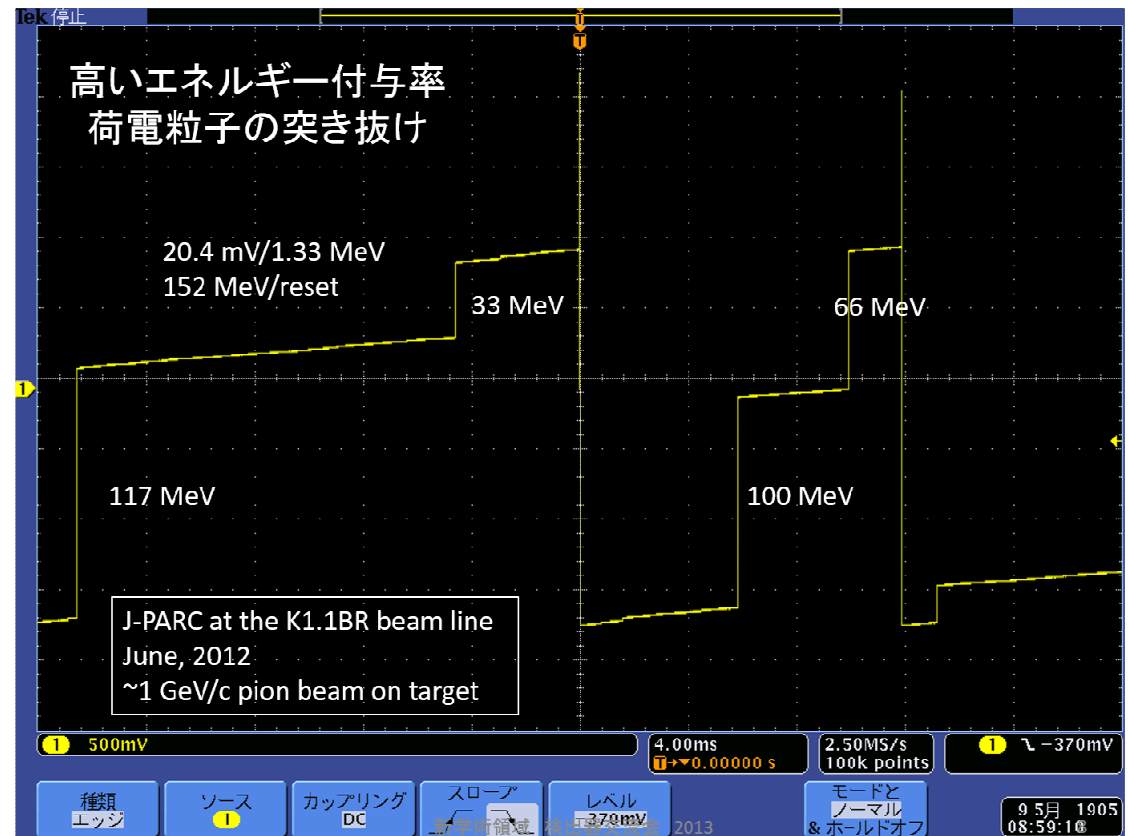
# Ge（半導体）検出器システムの開発

キーワード:耐高係数率/エネルギー付与率と耐放射線損傷

有感電荷型  
トランジスタリセットプリアンプ



リセット閾値:  $\sim 150\text{ MeV}$

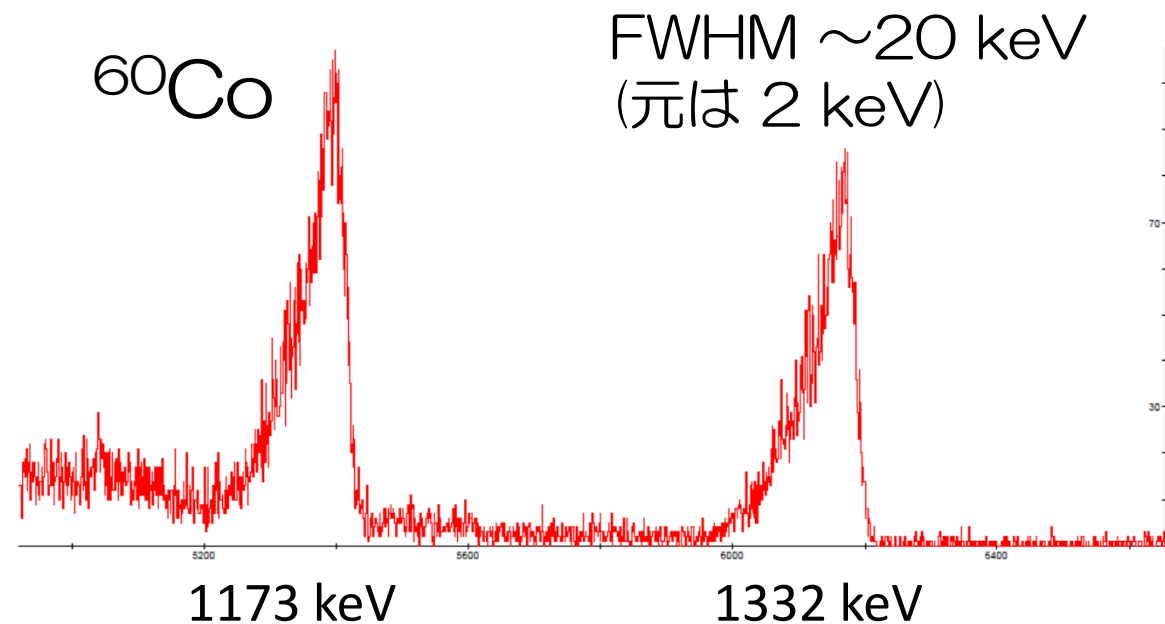


# 半導体検出器の放射線損傷

核反応からの高速中性子と  
Ge結晶中のGe原子核との弾  
性、非弾性散乱

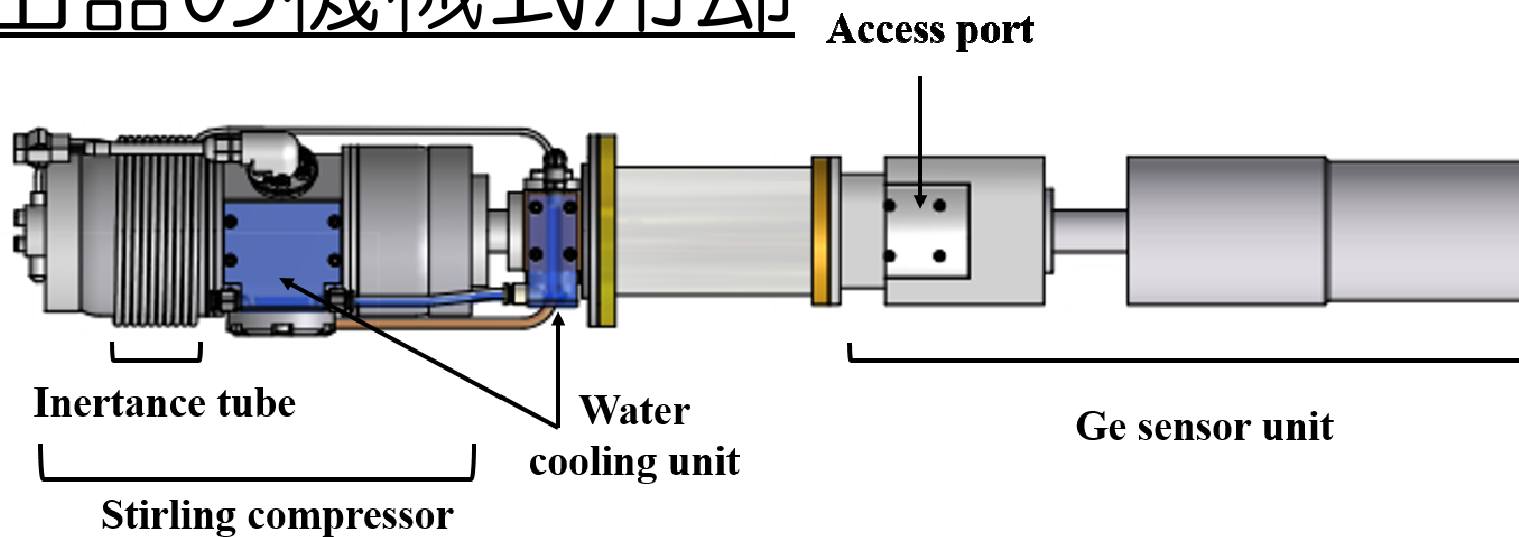
- 格子欠損
- 正孔トラップ
- 不完全電荷収集
- 低エネルギーに裾
- エネルギー分解能の悪化

理研 BigRipsで使用されているGe検出器  
2016年11月にデータ取得

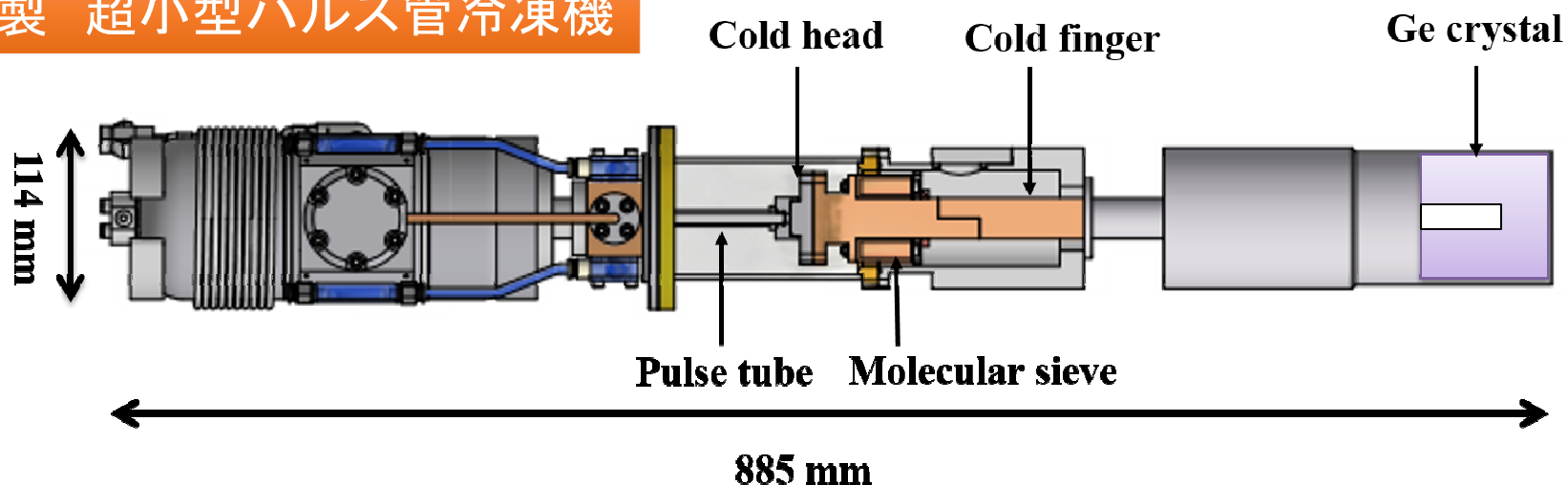


対処方: n型の結晶を低温に冷却

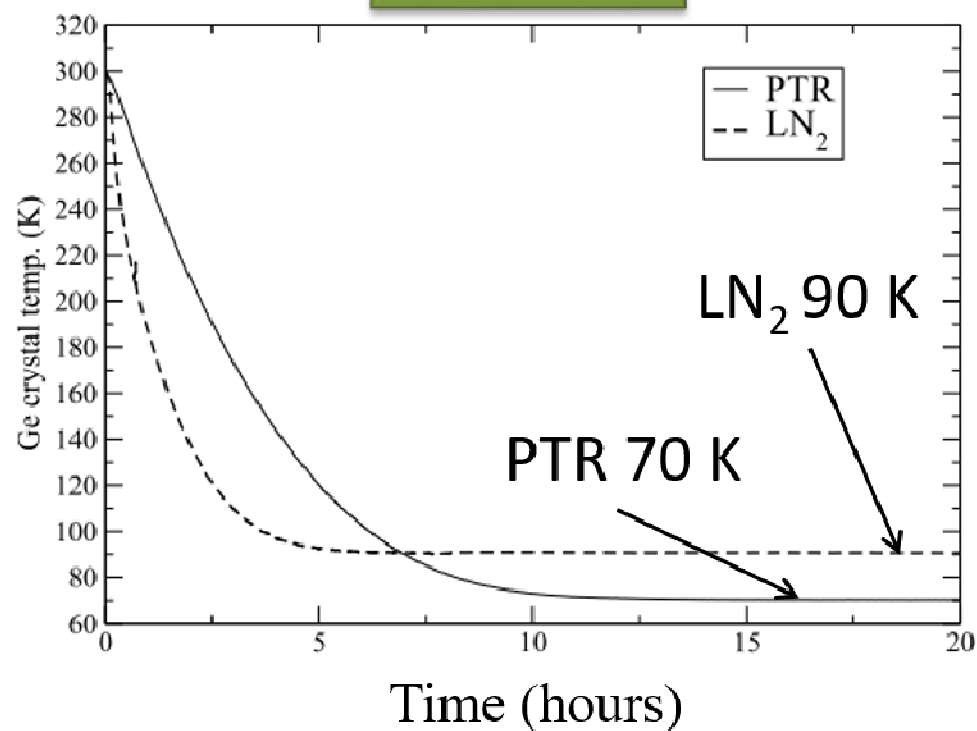
# Ge検出器の機械式冷却



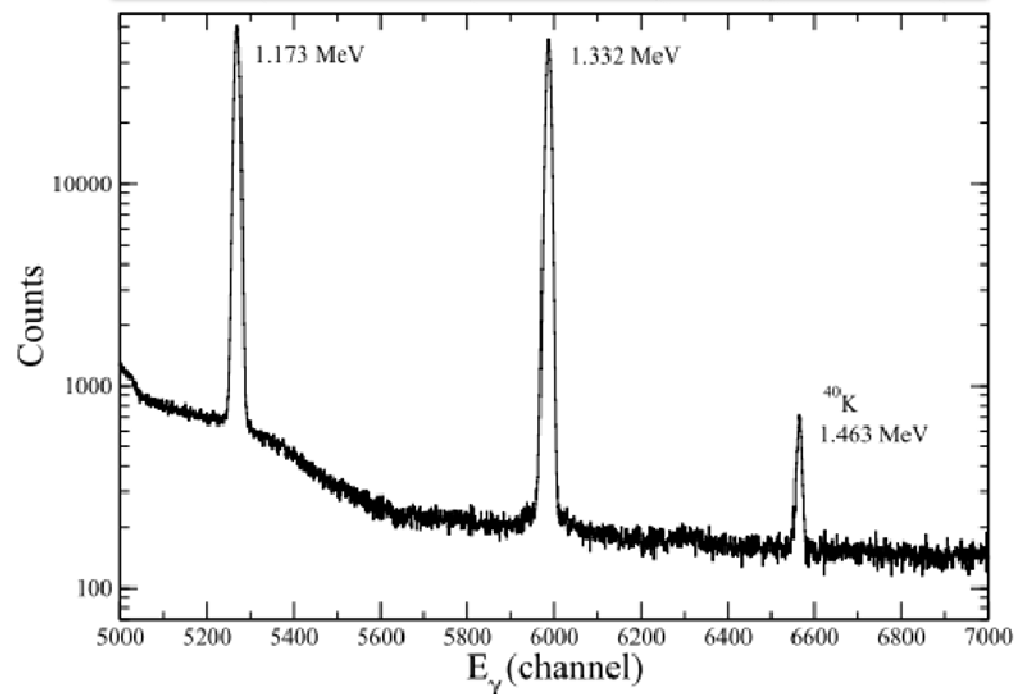
富士電機製 超小型パルス管冷凍機



## 冷却曲線



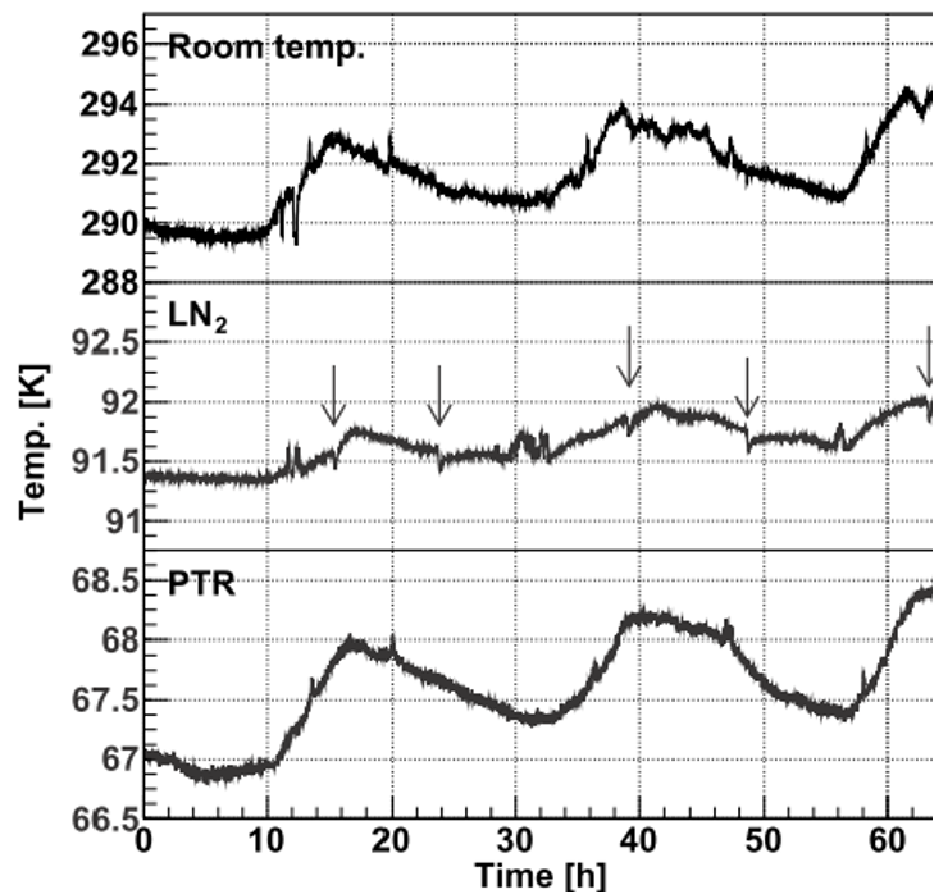
## <sup>60</sup>Co エネルギースペクトラム



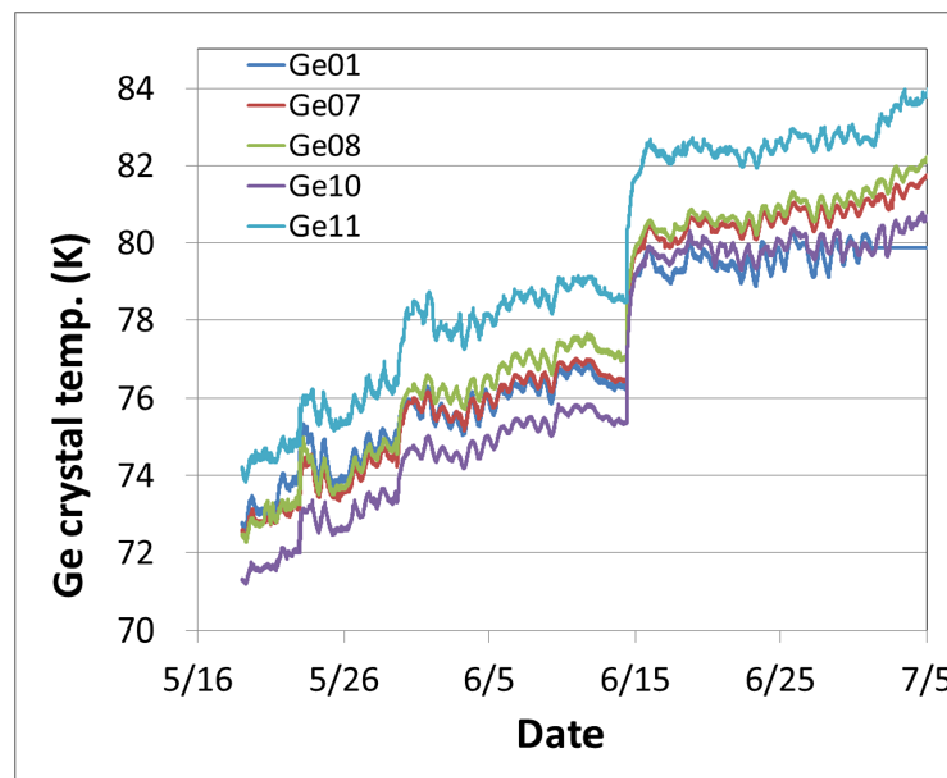
	ORTEC 671 (6μs) FWHM (keV)	ORTEC 973U (3μs) FWHM (keV)
LN <sub>2</sub>	2.1 (1)	3.1 (1)
PTR Off (0 V)	2.2 (1)	3.1 (1)
PTR ON (52 V)	2.7 (1)	3.1 (1)

# 結晶温度と外気温、長期安定性

## 昼夜の温度変化と連動



## J-PARCでの長期運転



外気温の上昇と真空の悪化が原因



# 我々のシステムの利点と応用の可能性

- 窒素が不要。窒素補給のためのインフラ整備の初期費用がかからない。
- 小型でポータブル。遠隔からの操作が可能。
- 耐高効率率・耐放射線損傷を兼ね備える。

## 応用例

- 宇宙でのゲルマニウム検出器のオペレーション
- 福島第一原発原子炉建屋内でのモニタリング
- BigRipsのビーム標識用ゲルマニウム

- ゲルマニウム半導体検出器
- PWOカウンター
- 高精度エネルギー較正

東北大 三森雅弘

JAEA 細見健二

KEK 山本剛史

JINR, Russia, Z. Tsamalaidze, P. Evtukhovitch

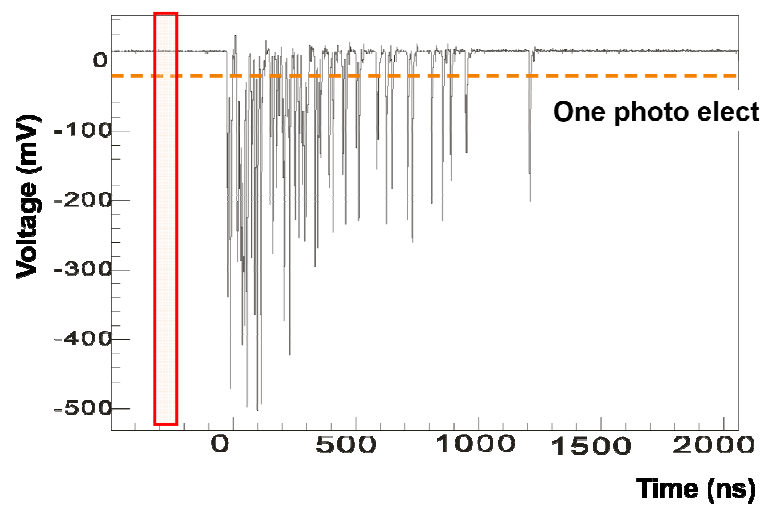
## BGO, CsI, PWO結晶の比較

BGO結晶より高係数率耐性が期待される候補2つ

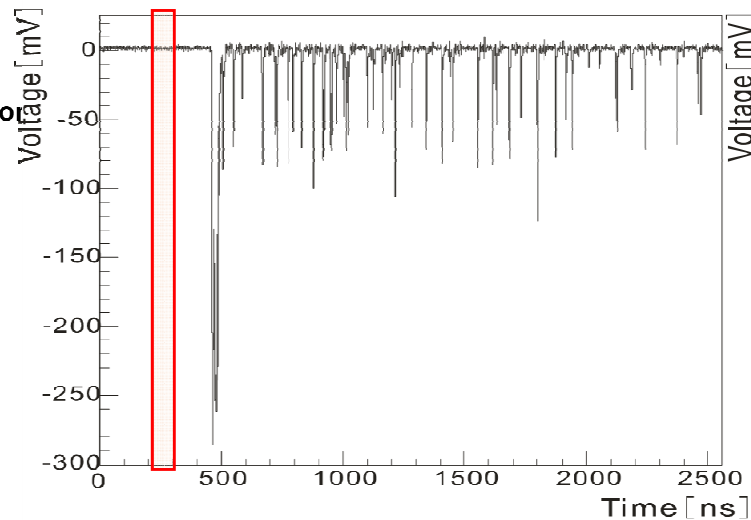
Crystal	BGO ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ )	CsI	PWO ( $\text{PWO}_4$ )
Effective atomic number	75	54	76
Density[g/cm <sup>3</sup> ]	7.23	4.53	8.28
Decay constant [ns]	300	10/1000	~6
Peak emission [nm]	485	305/400	420
Radiation length (cm)	1.12	1.86	0.89
Light yield [NaI=100]	15	4/1	~0.6

# それぞれの結晶からの信号波形

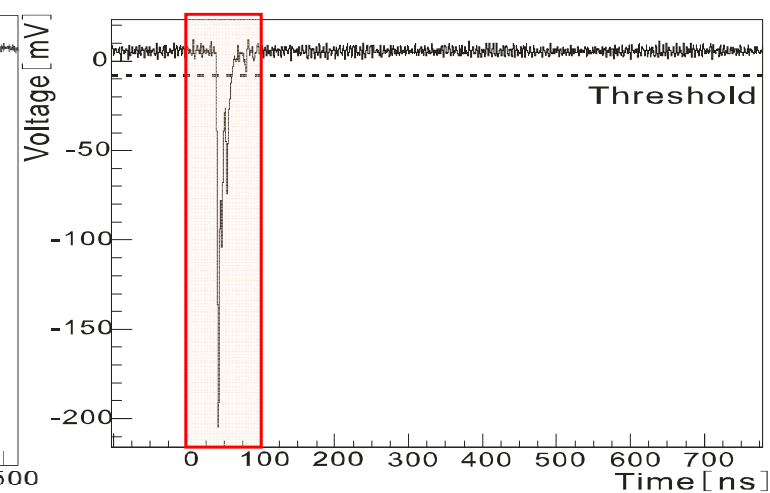
BGO



Pure CsI



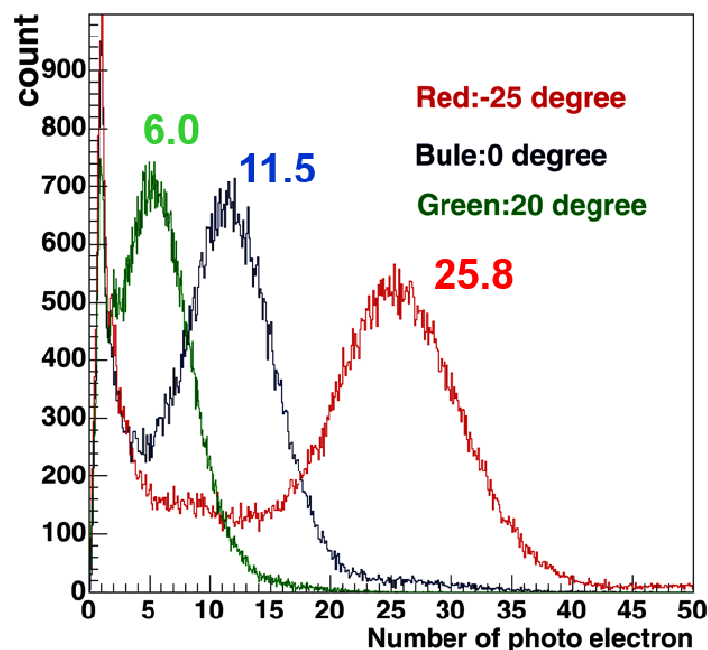
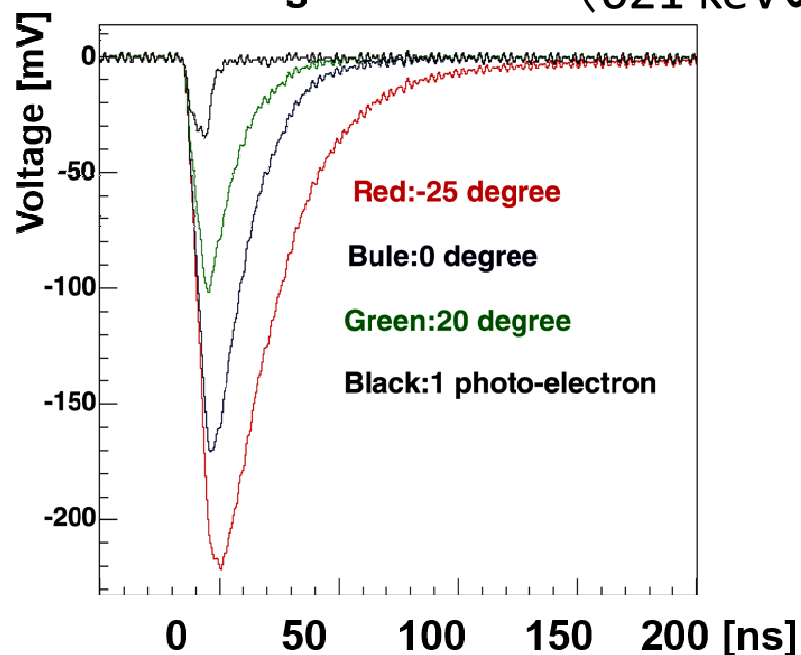
PWO



赤枠のストリップは100 nsを示す。

# どうやってPWOの光量を増やすか？

Average waveform (621 keVの $\gamma$ 線)



Height and width of a signal  
depend on temperature.

Saturation point:

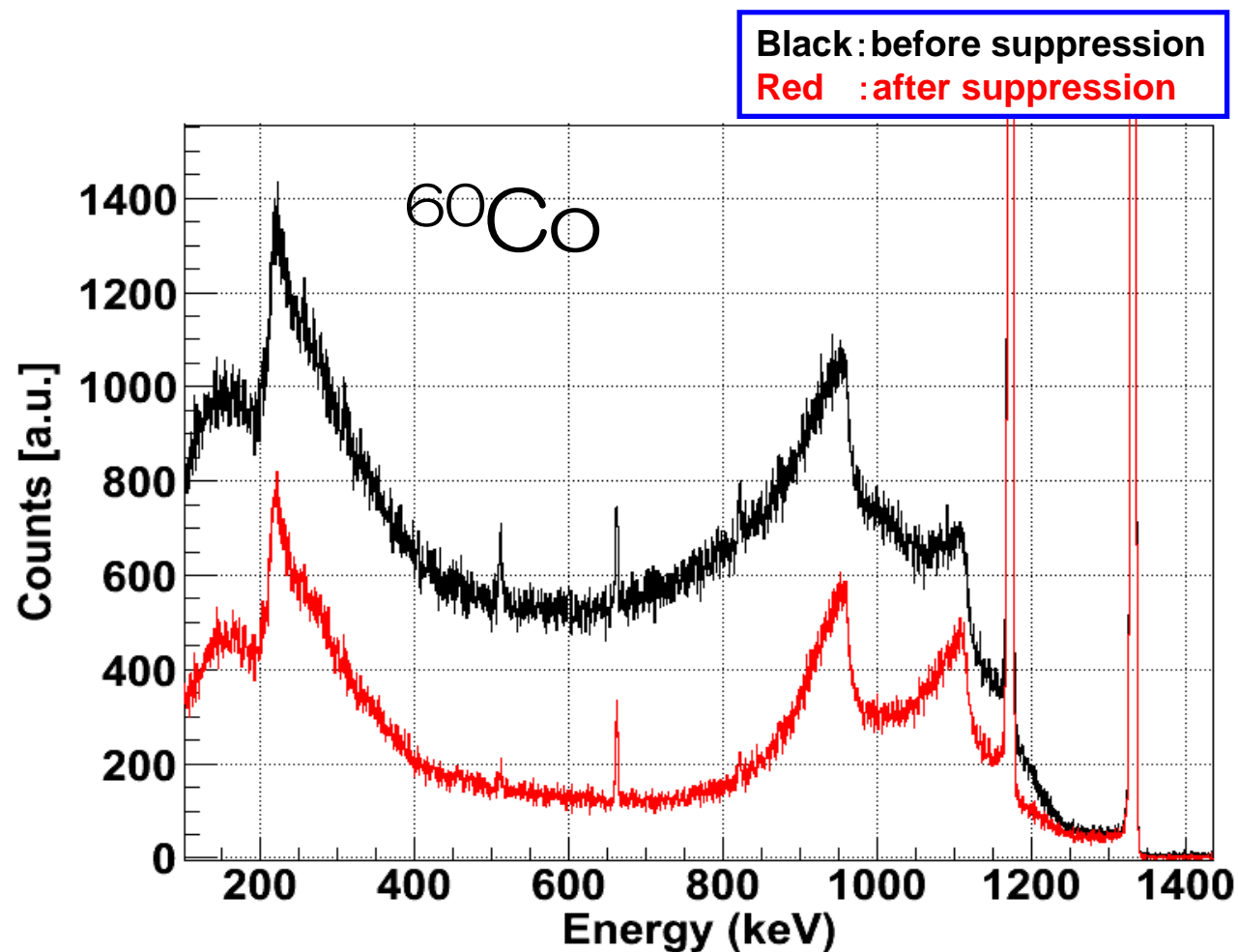
20°C → 50ns

0°C → 70ns

-25°C → 100ns

結晶にドーピング  
+  
結晶を冷却

# PWOカウンターの性能



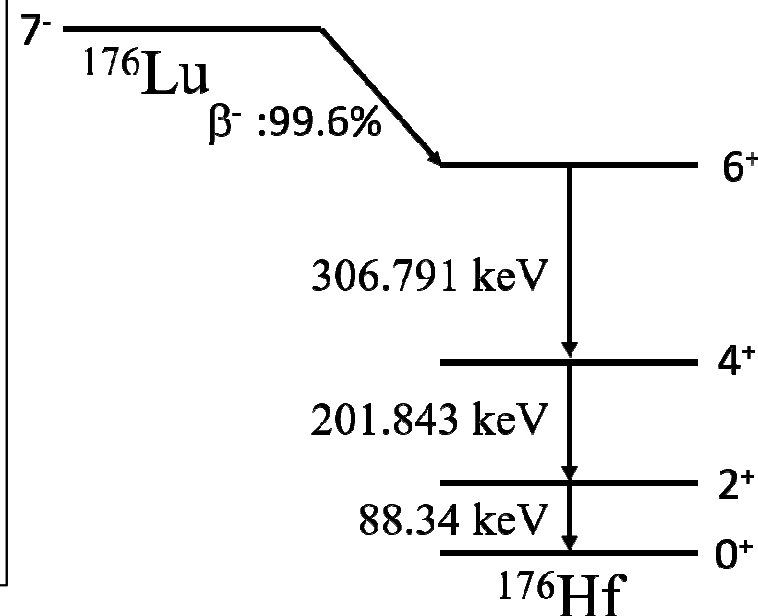
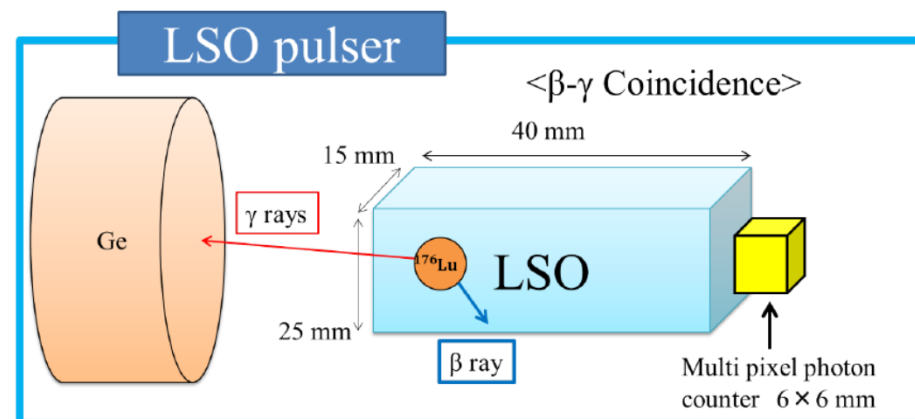
BGOカウンターより5倍速く、かつ、同程度のバックグラウンド除去効果を達成。

- ゲルマニウム半導体検出器
- PWOカウンター
- 高精度エネルギー較正

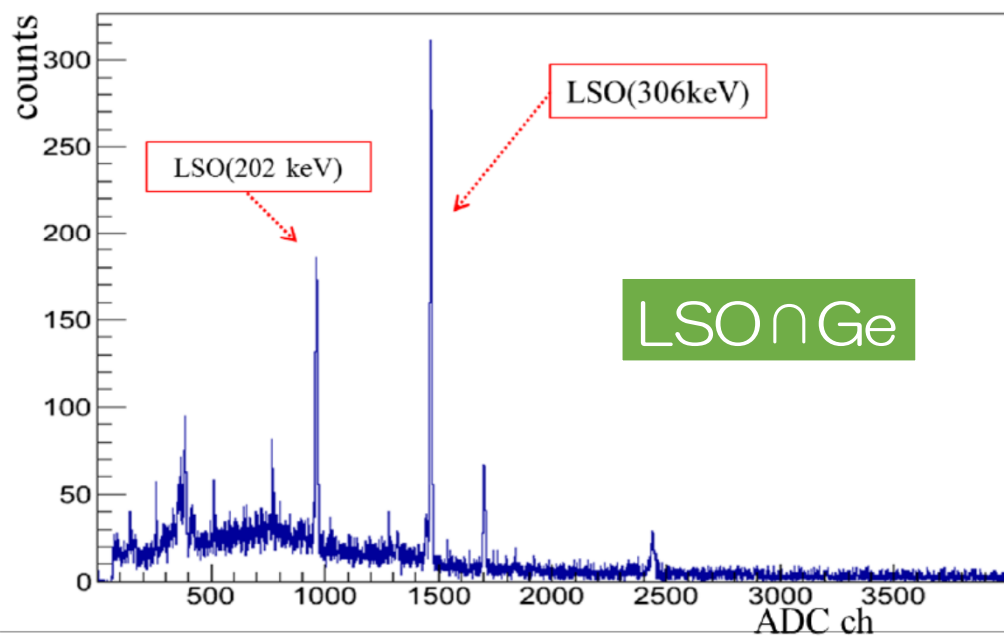
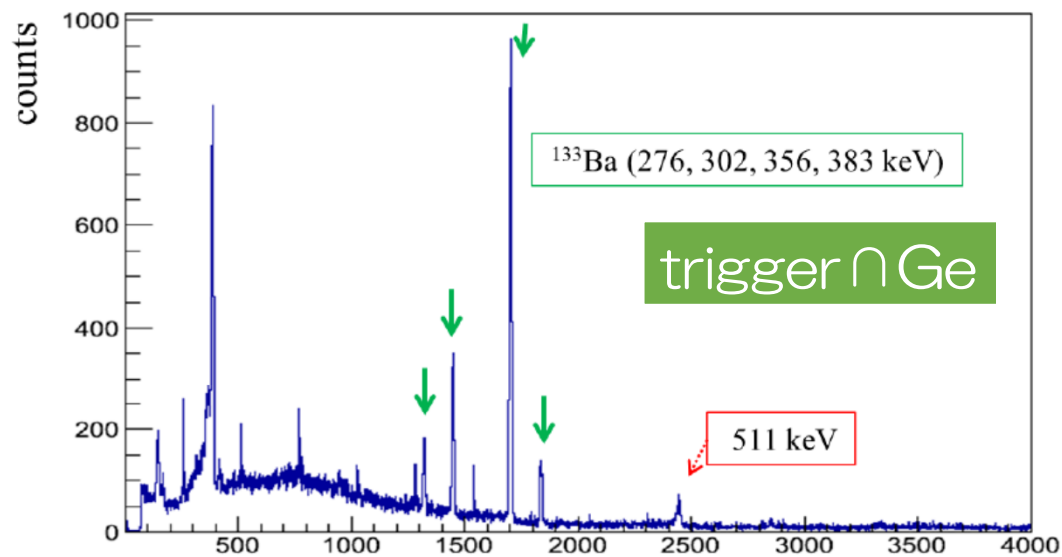
東北大 小椋裕  
JAEA 細見健二  
KEK 山本剛史

# LSOパルサー

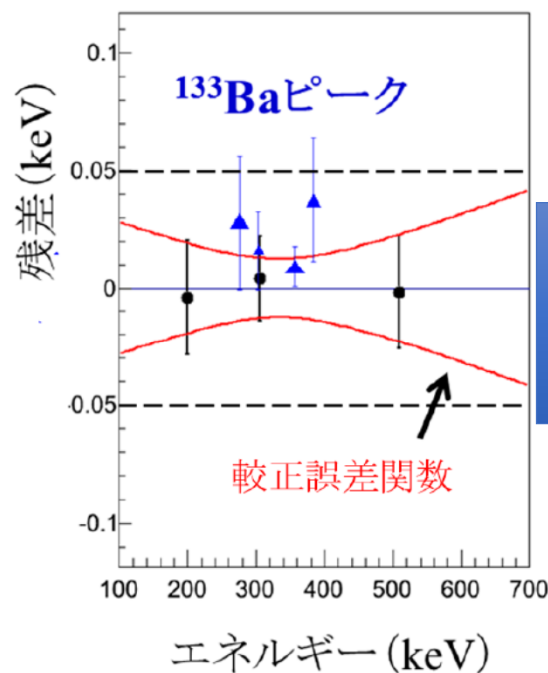
- LSOシンチレーター ( $\text{Lu}_2\text{SiO}_5$ )
  - 放射性同位体  $^{176}\text{Lu}$  を含む。
    - 存在比 2.59%
    - 半減期  $3.78 \times 10^{10}$  年
  - RI線源ではないので取り扱いが非常に楽。
- $\beta$ 線をLSOシンチレーター自身で検出し $\gamma$ 線をGe検出器で同時計測 ( $\beta - \gamma$ 同時計測)
- 物理データ取得最中に効率よく校正用データを同時に取得可能。 (trigger-able線源)







LSOの $\gamma$ 線2本と電子・陽電子対消滅からの $\gamma$ 線 (511 keV) の3本で300–400 keVのエネルギー領域を内挿 → 最小二乗法から較正直線を求め、較正誤差関数求める→任意のエネルギーでの較正誤差

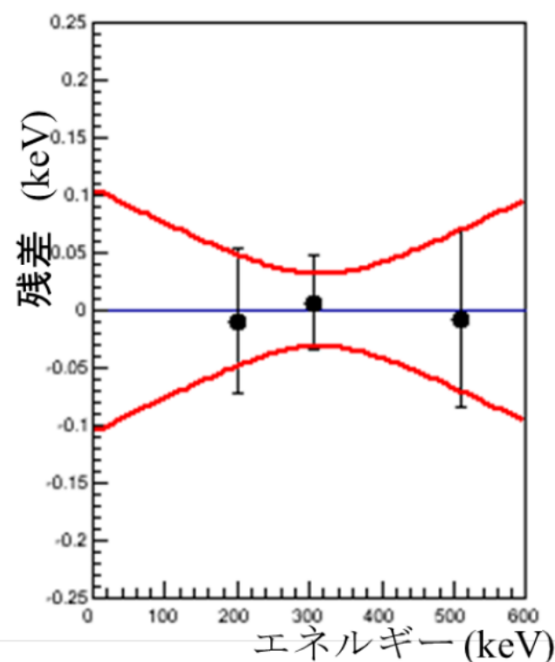


検出器単体での較正精度は60 eV以下を達成。

# 校正精度

$^{133}\text{Ba}$ の既知のエネルギー値と校正値で評価

典型的な検出器の校正誤差曲線と精度



19チャンネル足し合わせた後での校正精度

校正後のエネルギー (keV)	既知のエネルギー (keV)	エネルギー分解能 (keV)	残差 (eV)
$276.346 \pm 0.007$	$276.398 \pm 0.002$	2.3	-52
$302.919 \pm 0.004$	$302.853 \pm 0.001$	2.3	+34
$356.108 \pm 0.003$	$356.0129 \pm 0.002$	2.4	+96
$384.031 \pm 0.007$	$383.8485 \pm 0.002$	2.4	+149

# まとめ

- 耐高係数率/エネルギー付与率 耐放射線損傷を持った(要検証)Ge 検出器ユニットを開発
  - n型結晶、トランジスタリセット型プリアンプ、機械式冷却
- 従来のBGOカウンターより5倍速いバックグラウンド抑止カウンターを開発
  - PWO結晶を採用
  - ドーピングと冷却で発光量を増加
- LSOシンチレーターを用いたインビームでのエネルギー較正データの同時取得方法を確立
  - 検出一台の較正精度を300-400 keV領域において60eV以下を達成