

InP半導体検出器の開発

平成18年度共同利用研究成果発表研究会

2006年12月15日

宮城教育大学 福田善之、佐藤哲也*

東大宇宙線研 森山茂栄、塩澤真人、小汐由介

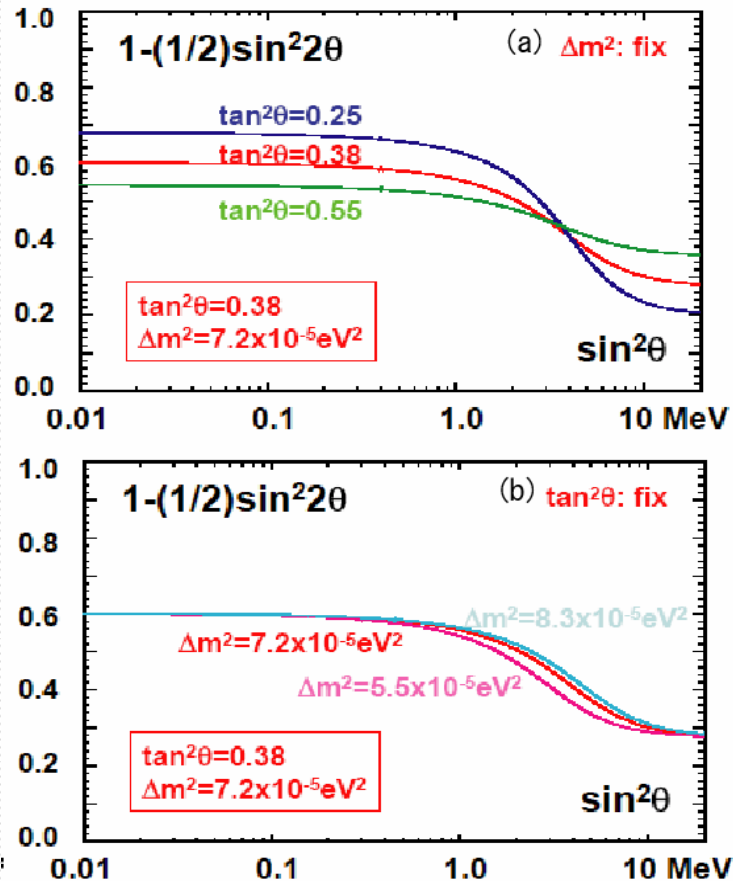
東大素粒子センター 難波俊雄

浜松ホトニクス(株) 固体事業部

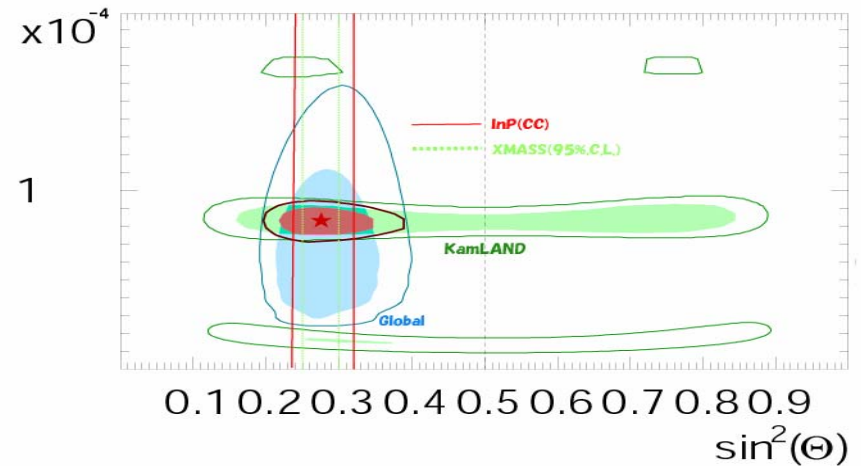
犬塚智也、井澤利之、朝倉雅之

目的

□ 太陽ppニュートリノを用いた θ_{12} の精密観測



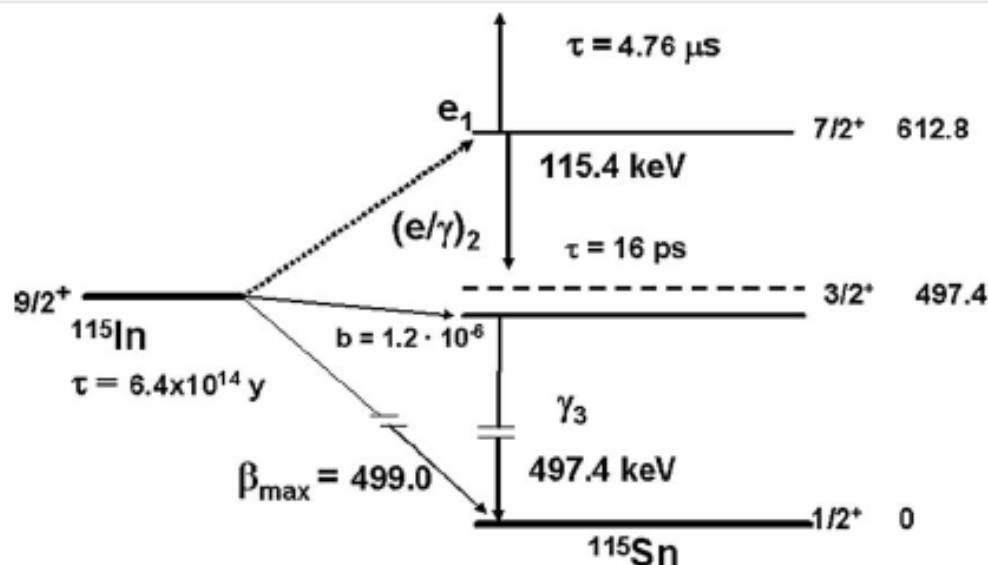
Y.Suzuki@v2004



Sub-MeV以下の太陽 ν の
測定が θ_{12} を制限

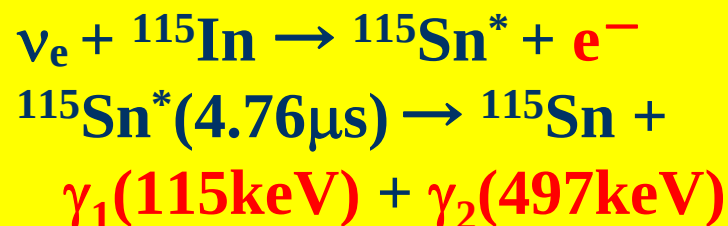
^{115}In による太陽ニュートリノ検出

[R.S.Raghavan Phs.Rev.Lett37\(1976\)259](#)



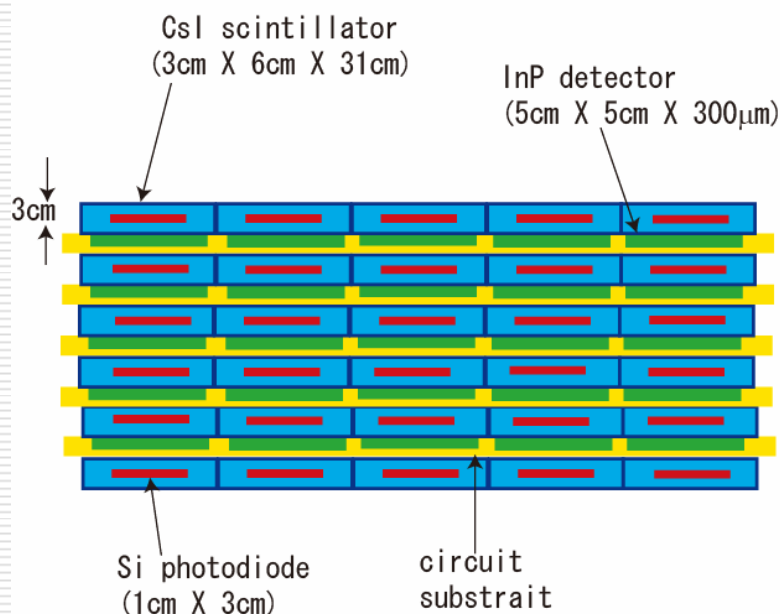
[Nuclear Physics A 748 \(2005\) 333-347](#)

- **Real-time measurement**
- **ν energy measurable**
($E_e = E_\nu - 125\text{keV}$)
- **3 fold coincidence to extract neutrino signal**
- **β -decay from ^{115}In**
($\tau_{1/2} = 6.4 \times 10^{14}\text{yr}$)
- **Correlated chance coincidence-
Bremsstrahlung**
- **Correlated chance coincidence- line γ**

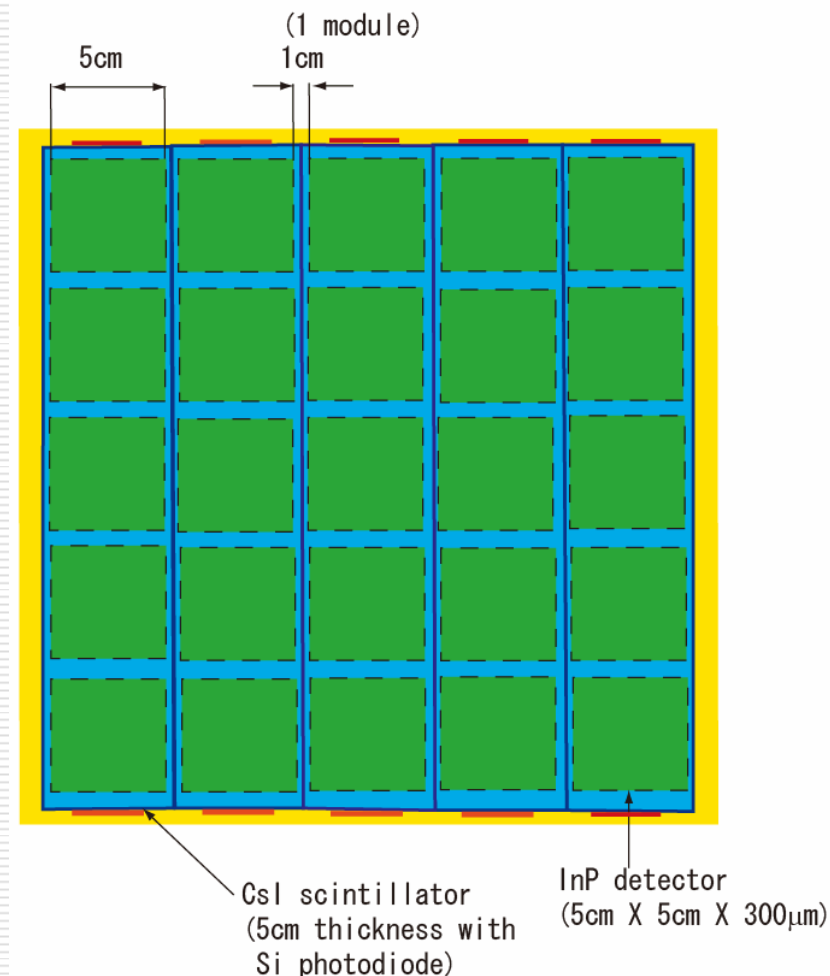


太陽ニュートリノ観測用プロトタイプ検出器案

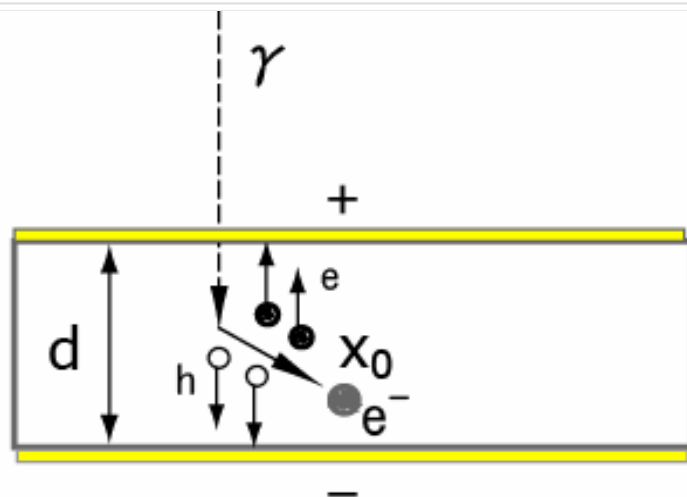
Side view of InP solar neutrino detector



Top view of InP solar neutrino detector



半絶縁性InP半導体を用いた検出器



V_0 [volts]

μ : mobility [$\text{m}^2\text{v}^{-1}\text{s}^{-1}$]
 v : carrier velocity [ms^{-1}]
 E : electric field [vm^{-1}]
 d : thickness of SI InP
 x_0 : range of electron

$$E = V_0/d \quad v = \mu E = \mu V_0/d$$

drift length : $L_d = \tau v = \mu \tau V_0/d$ τ : carrier lifetime [s]

e/h creation energy : ϵ_{eh}

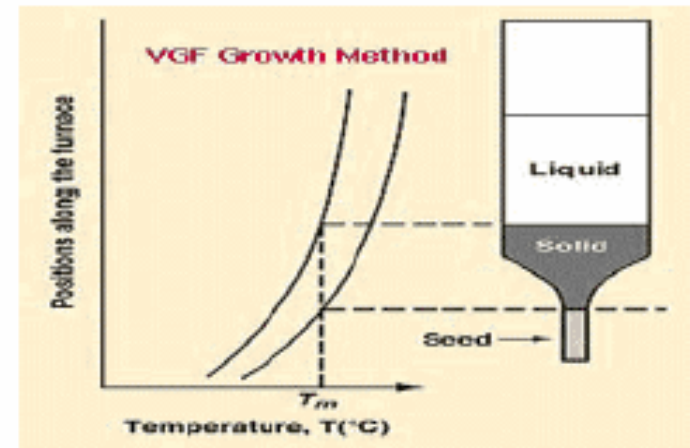
charge $Q_{\text{total}}[\text{C}] = (\text{electron energy}) / \epsilon_{eh} \times e$

$$L_d \neq \infty \quad Q_{\text{obs}}[\text{C}] = \int_0^R (dE/dx) / \epsilon_{eh} e^{-r(x)/L_d} dx \times e$$

Vertical Gradient Freeze (VGF) 基板

Comparison of VGF, LEC and HB growth method

	VGF	LEC	HB
SI Wafers	Yes	Yes	No
SC Wafers	Yes	No	Yes
EPD (Crystal Defects)	V. Low	High	Low
Stress	Low	High	Medium
Uniformity	Good	Fair	Poor
Diameter Scale Up	Good	Good	Poor

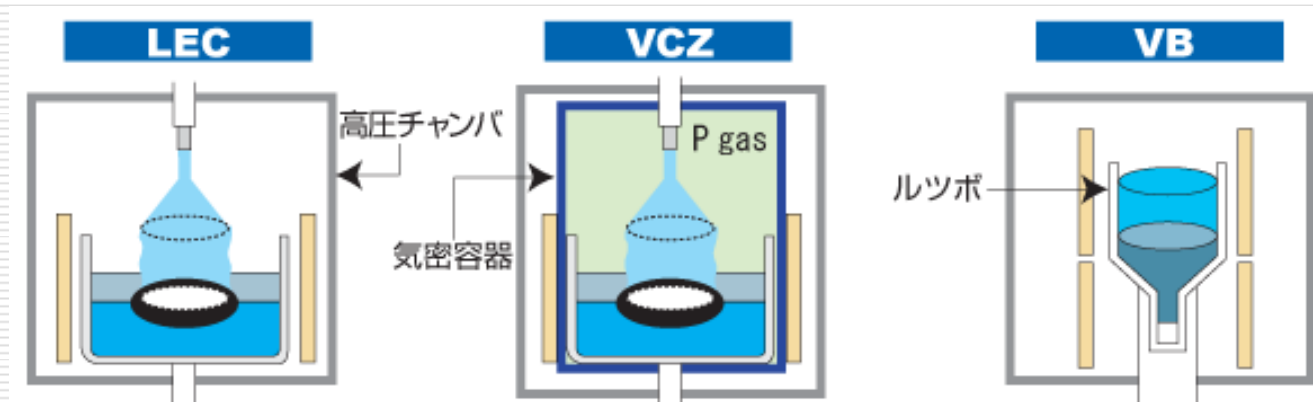


specifications as given by AXT

resistivity	$1.1 - 2.2 \times 10^7 \Omega\text{cm}$
mobility	$2600-2700 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
thickness	$350 \pm 25 \mu\text{m}$
Fe concentration	

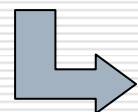
VCZ製法のInP基板による検出器

<http://www.sei.co.jp/sc/technical/inp.html>



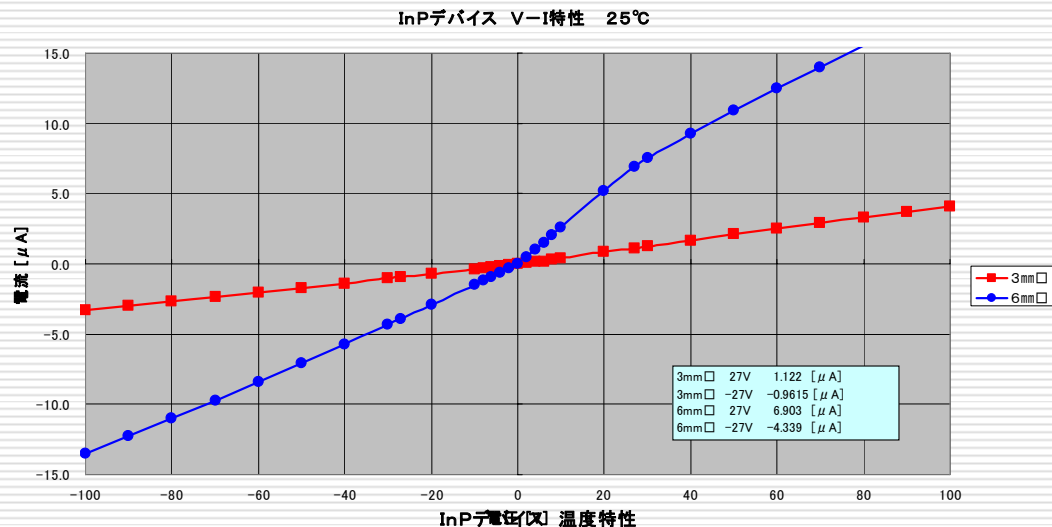
□ InP結晶成長法

	格子欠陥密度 (EPD)	比抵抗
➤ LEC	高 ($\sim 50,000\text{cm}^{-2}$)	$> 10^7 \Omega\text{cm}$ → 一般的
➤ VGF	低 ($\sim 5,000\text{cm}^{-2}$)	$> 10^7 \Omega\text{cm}$ → 従来用いたもの
➤ VCZ	中 ($\sim 5,000\text{cm}^{-2}$)	$> 10^7 \Omega\text{cm}$



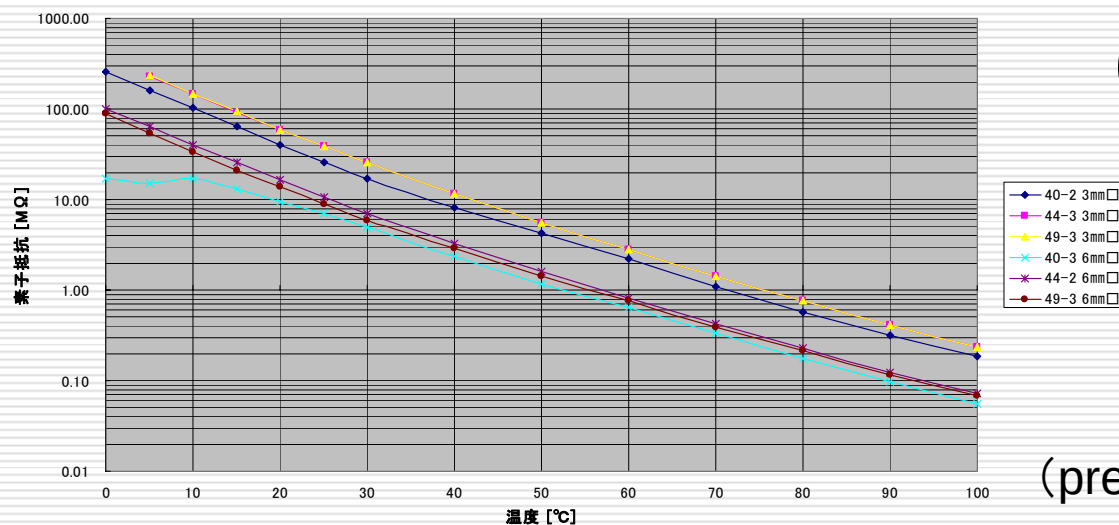
世界初の試み

半導体特性の評価



Dark current can be reduced by lowering the temperature.

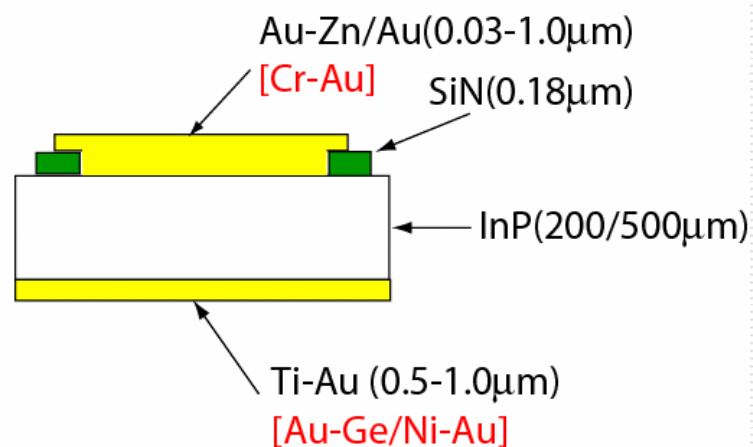
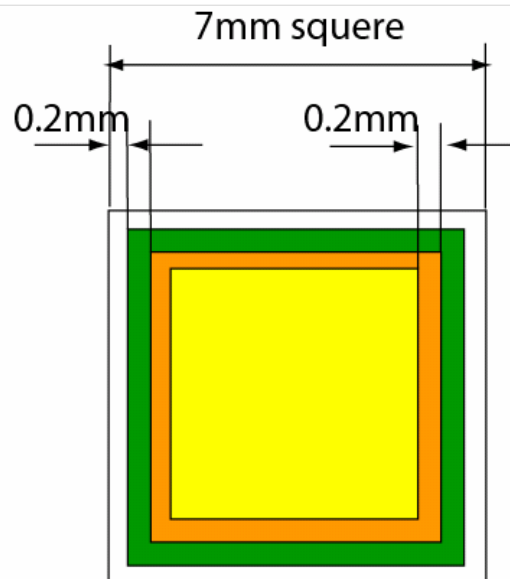
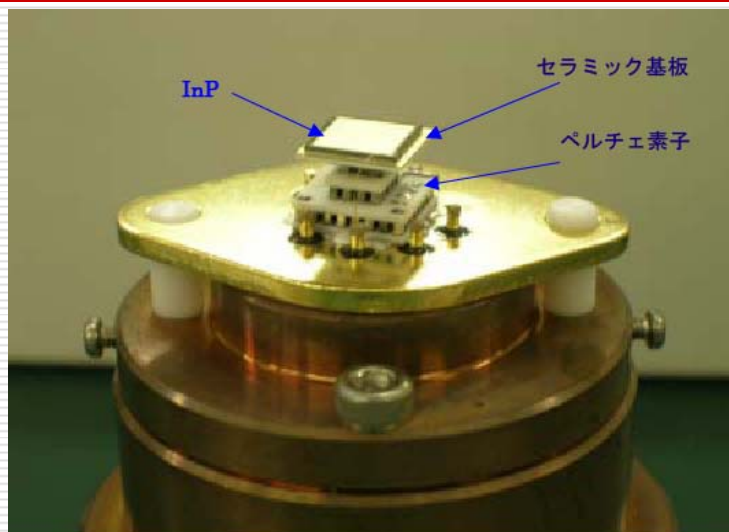
$$I[A] = T^{2/3} \exp(-E_g/2k_B T)$$



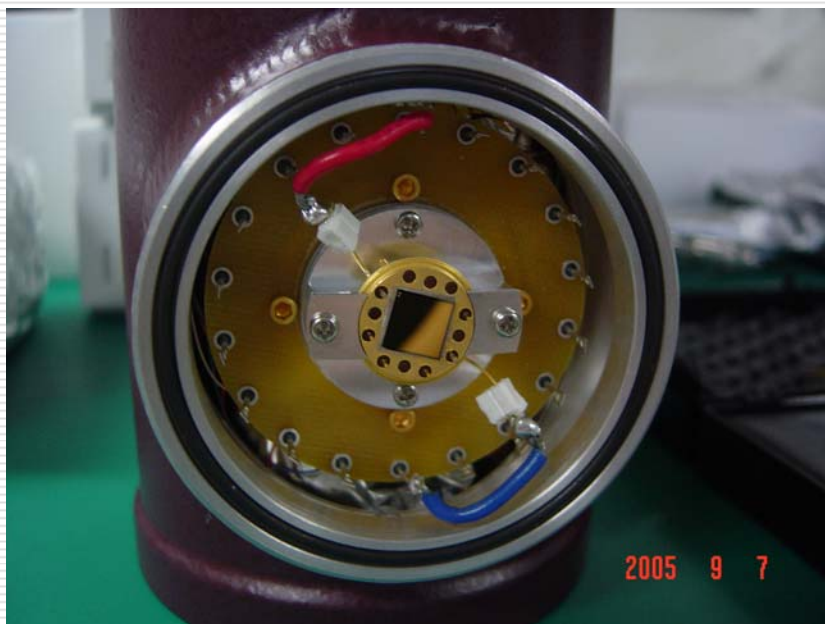
0.02μA for 6mm InP
@100V and -40degree

(presented by Hamamatsu Photonics)

ペルチェ冷却によるInP半導体検出器

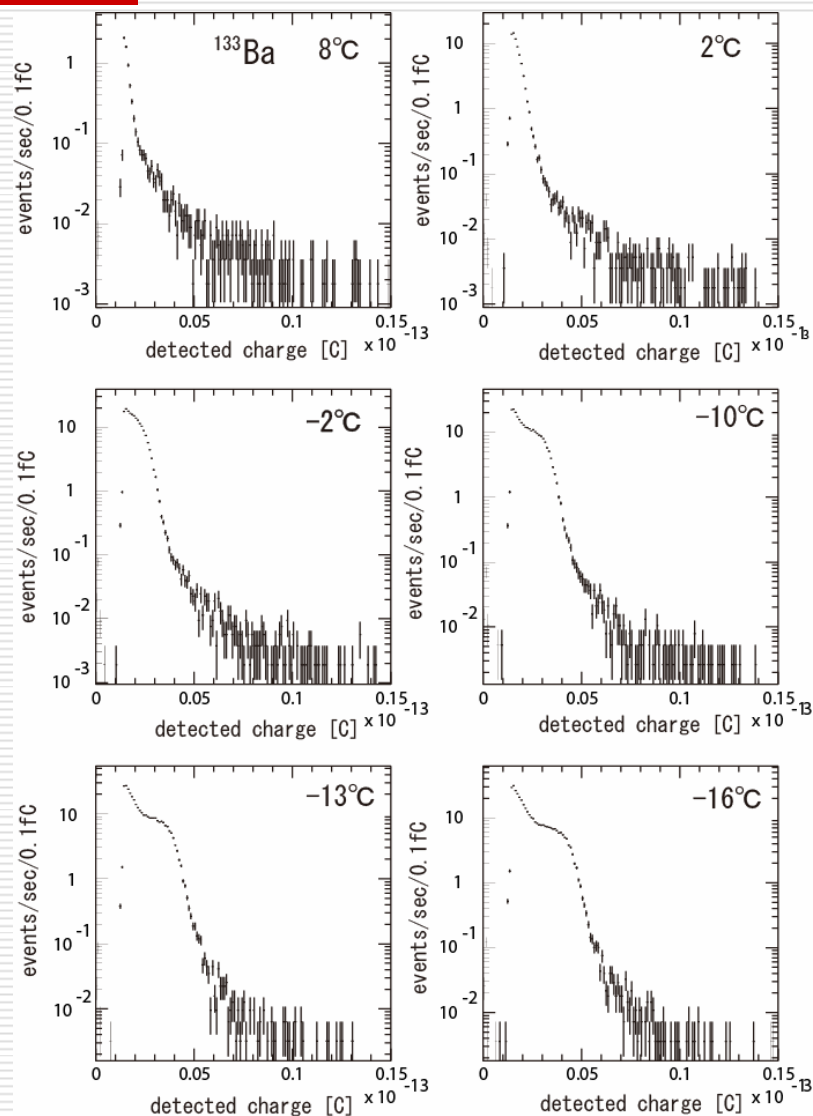


ドライアイス冷却によるInP半導体検出器



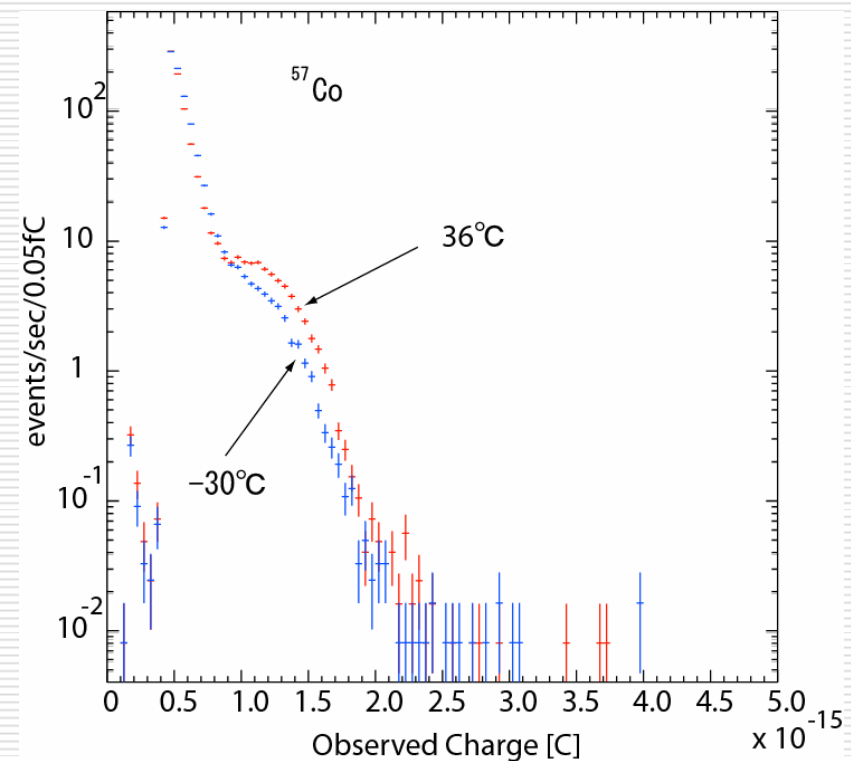
温度依存性

- ❑ -10°C 以下で γ 線を観測可能
 - ❑ 低温とともに電荷量が増大している。つまり、**電荷収集効率(CCE)が増大している**
- ↓
- ❑ ドリフト長が延びていると考えられる



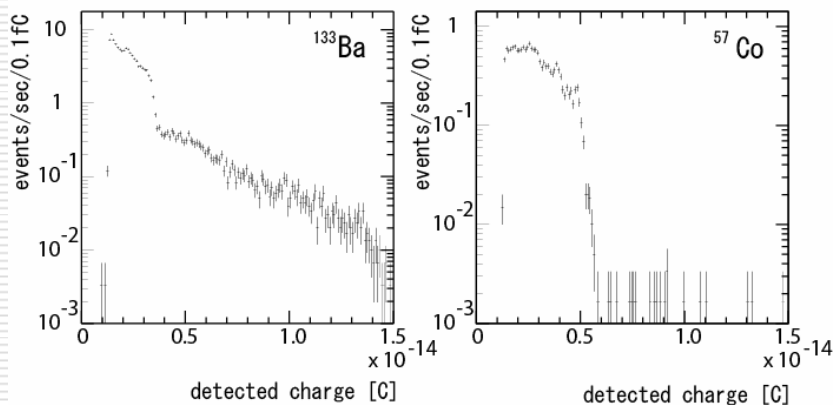
バイアス電圧依存性

- バイアス電圧の増加により電荷収集効率(CCE)が劇的に変化する
- ドリフト長が電圧に比例するためと考えられる
(cf $L_d = \mu\tau V_0/d$)

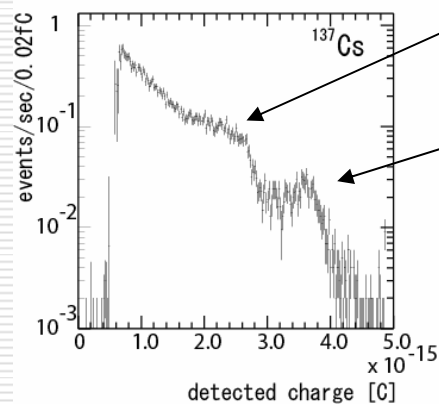
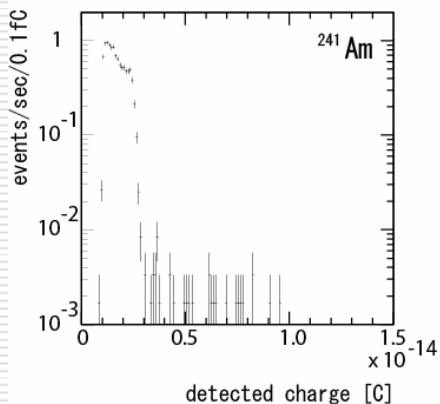
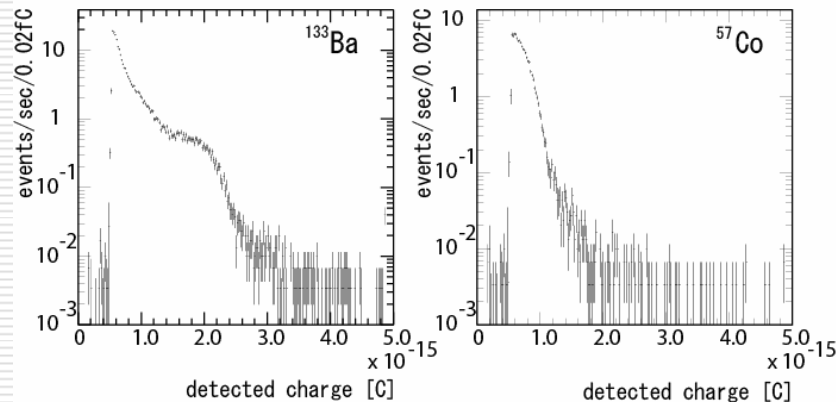


ドライアイス冷却(VGF)による γ 線応答性

⑥ [6mm×6mm×0.2mm -77℃]



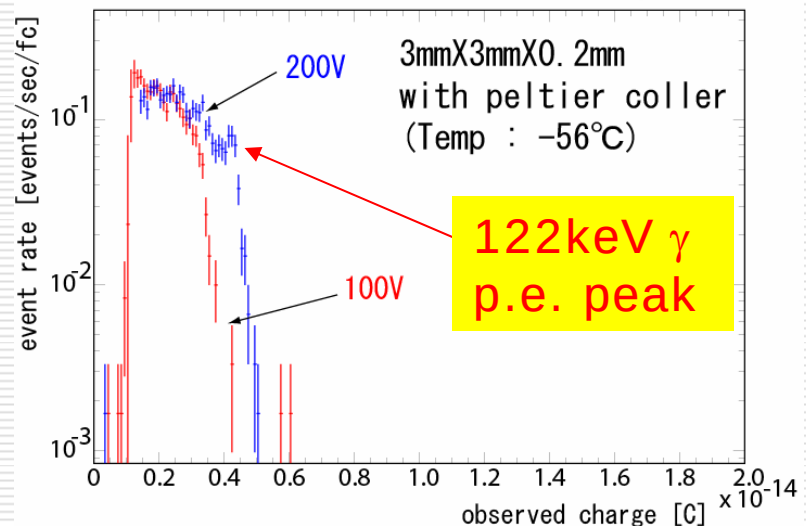
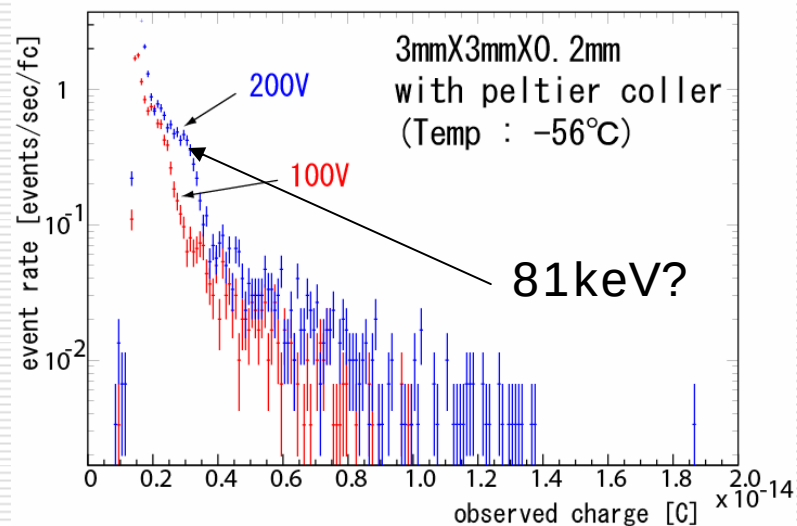
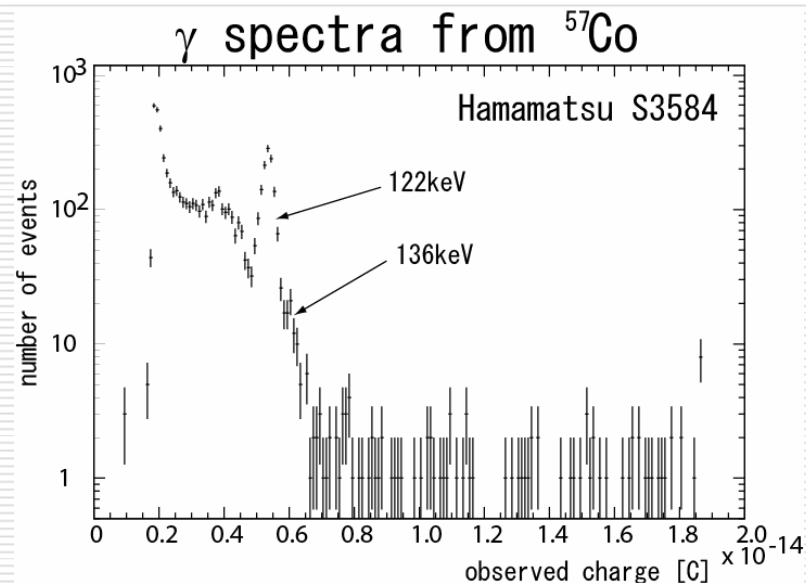
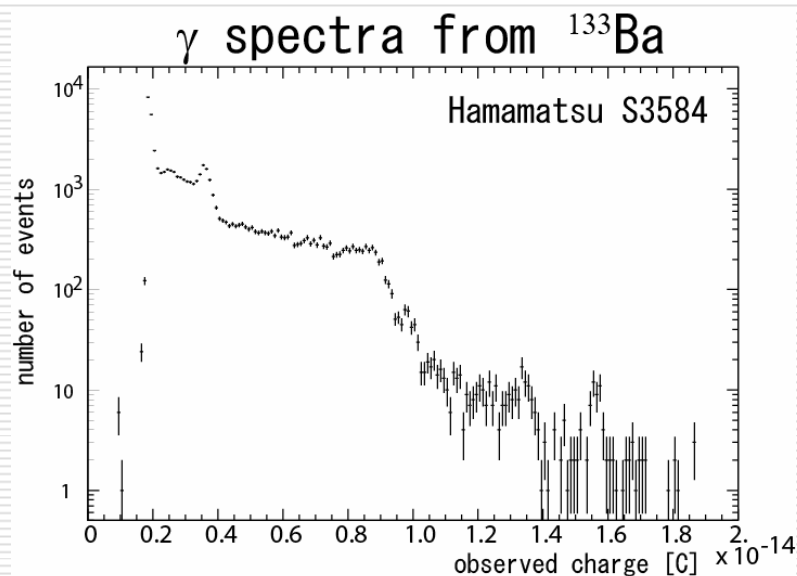
⑧ [6mm×6mm×0.5mm -77℃]



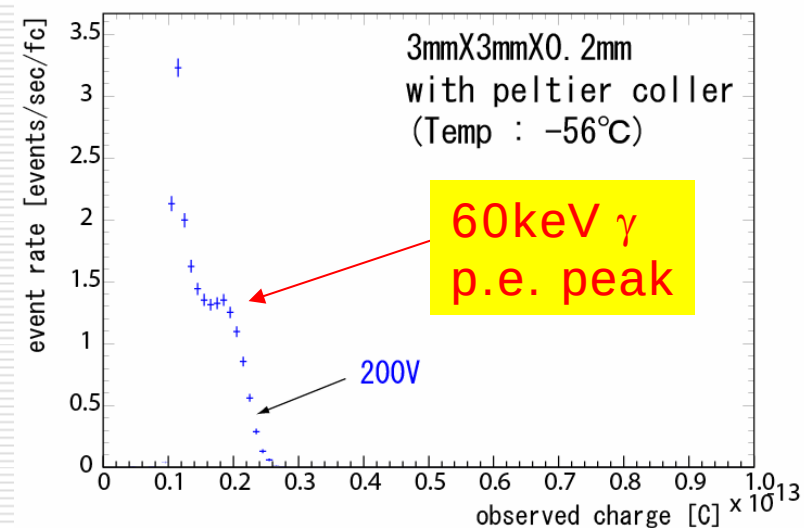
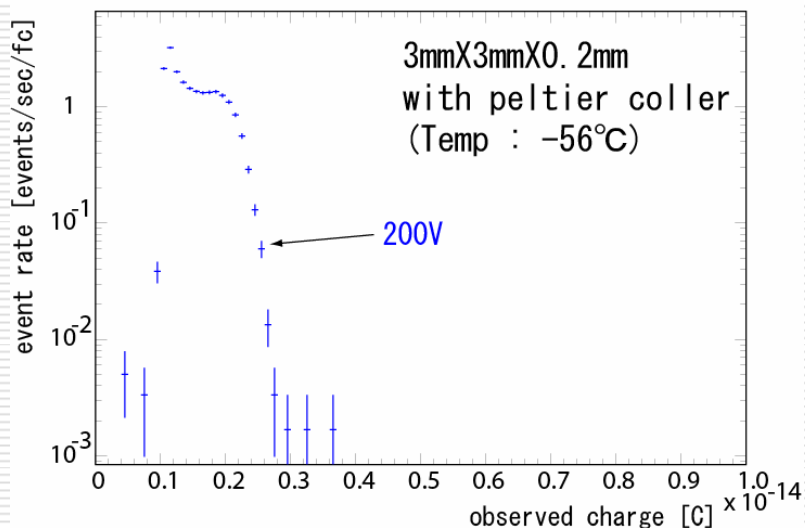
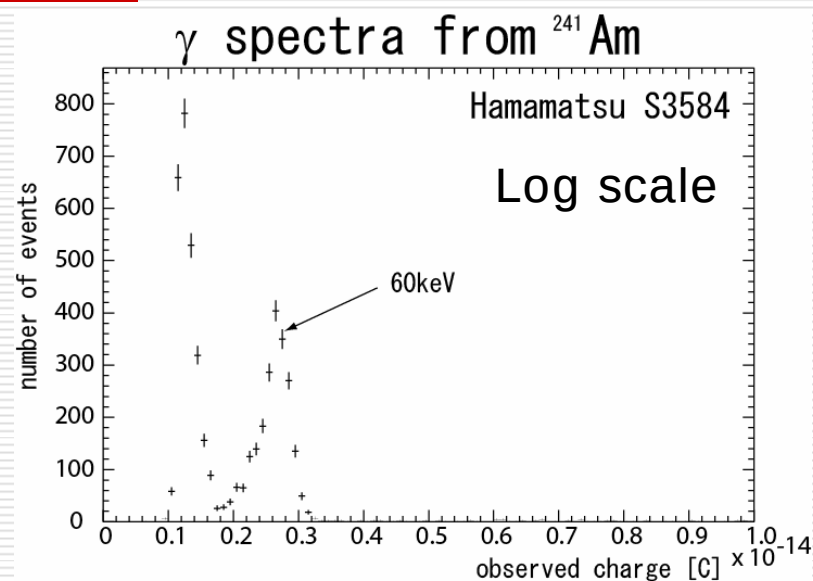
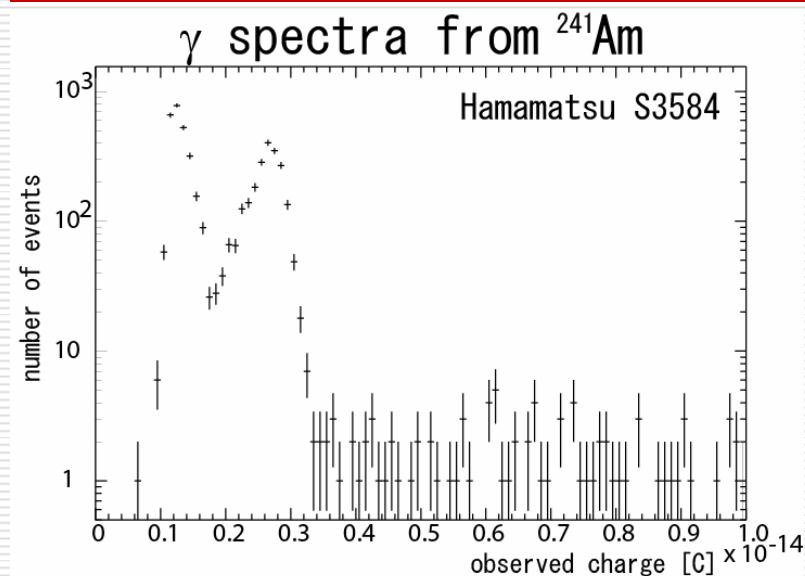
コンプトン端

光電ピーク

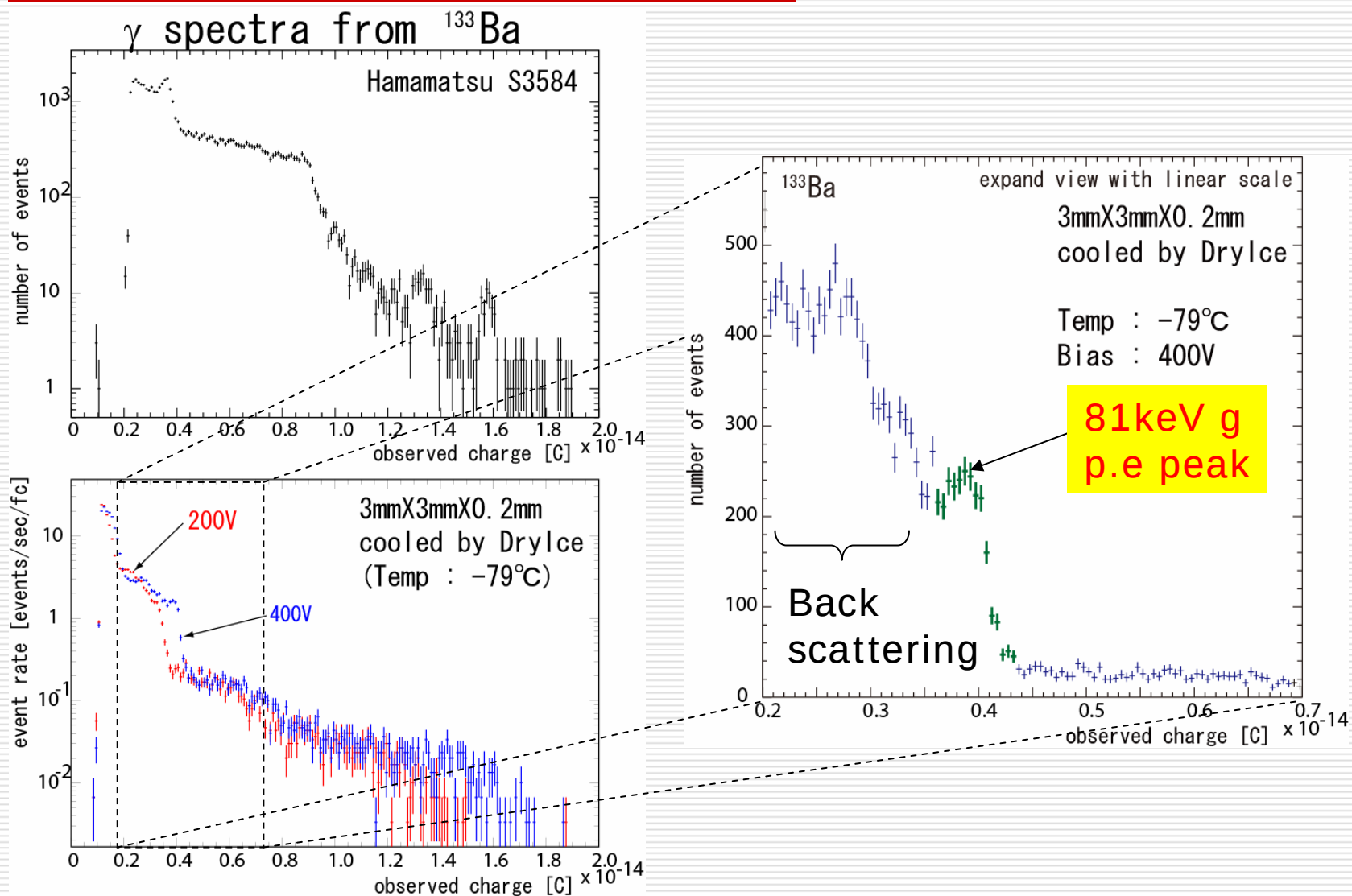
ペルチェ冷却(VCZ)による γ 線応答性(1)



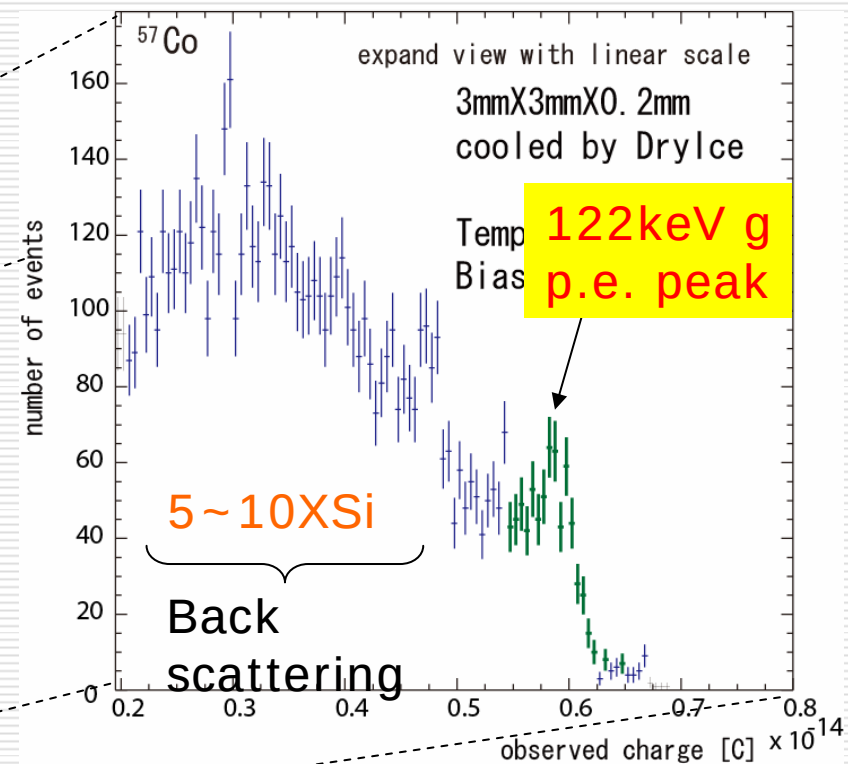
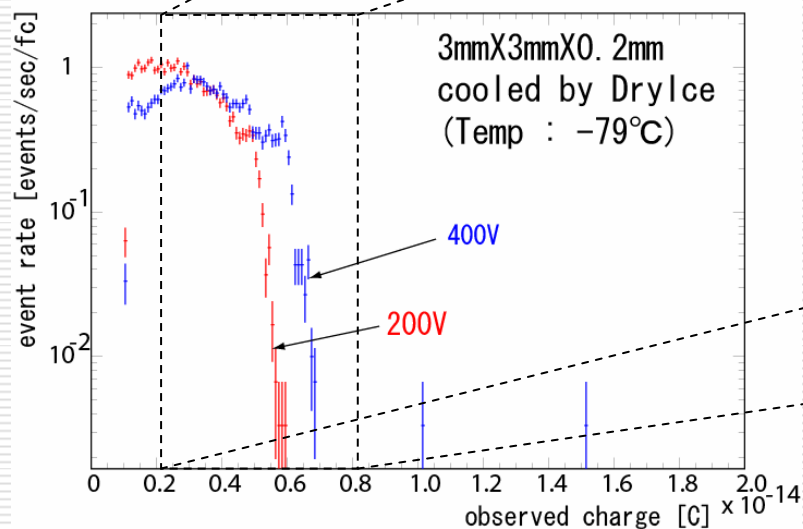
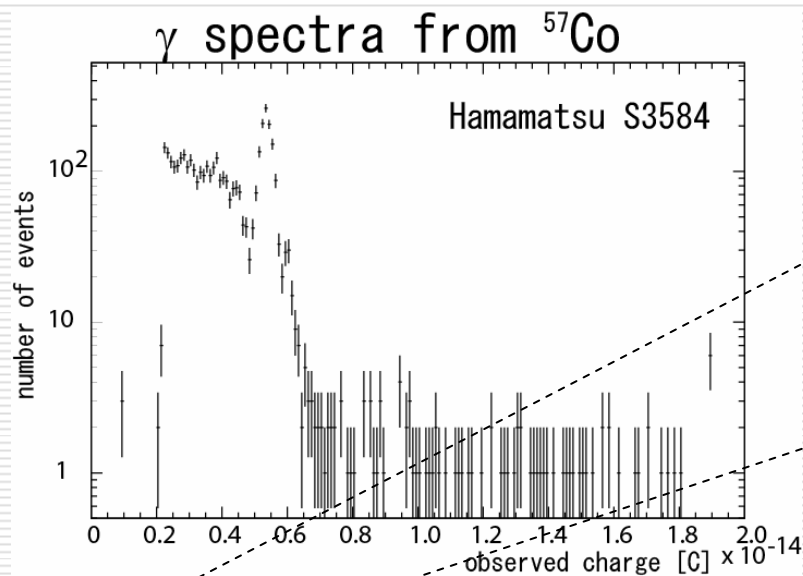
ペルチェ冷却(VCZ)による γ 線応答性(2)



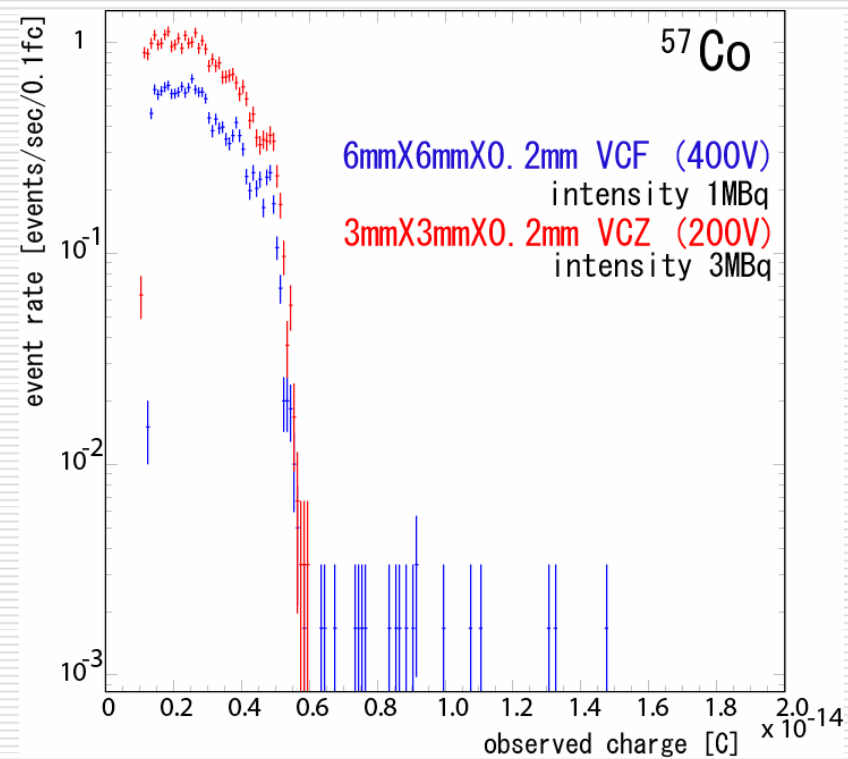
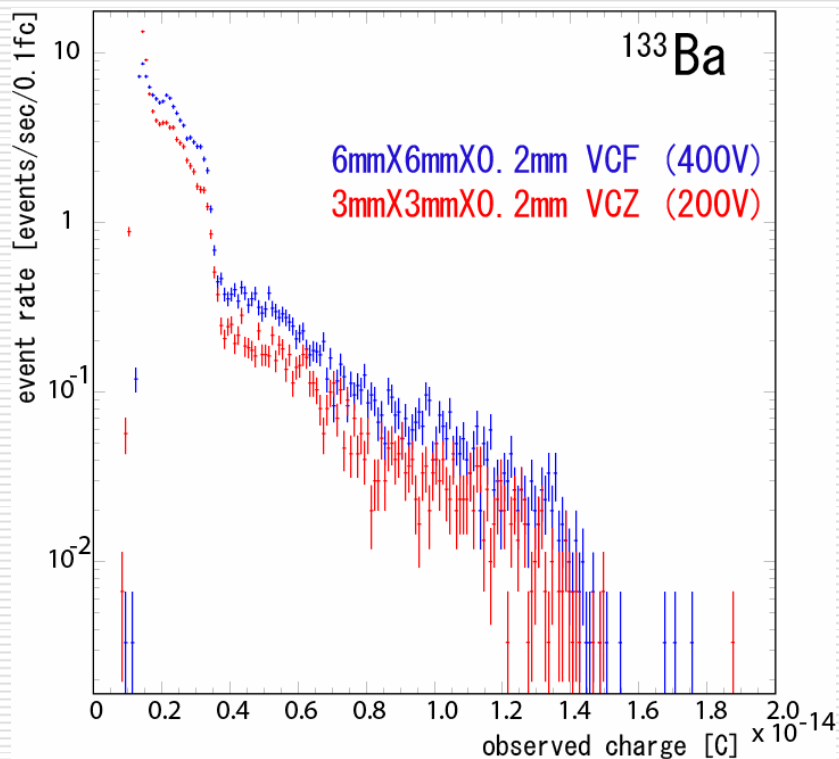
ドライアイス冷却(VCZ)による γ 線応答性(1)



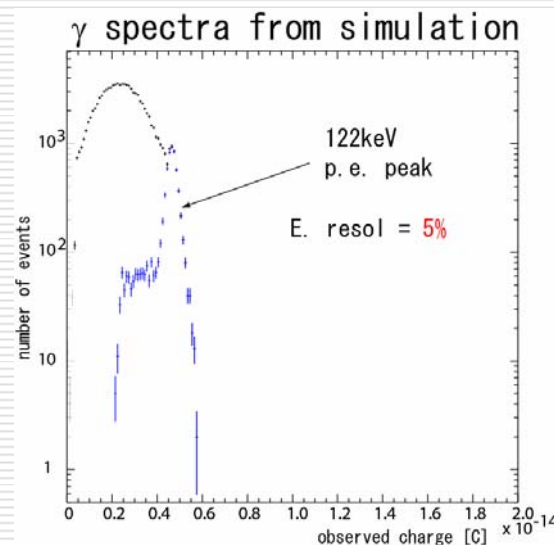
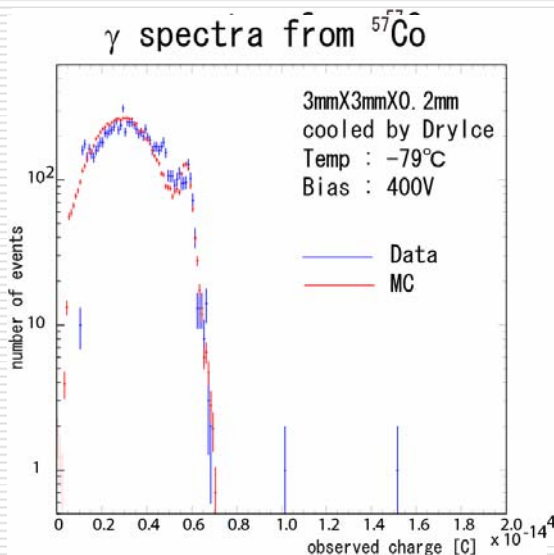
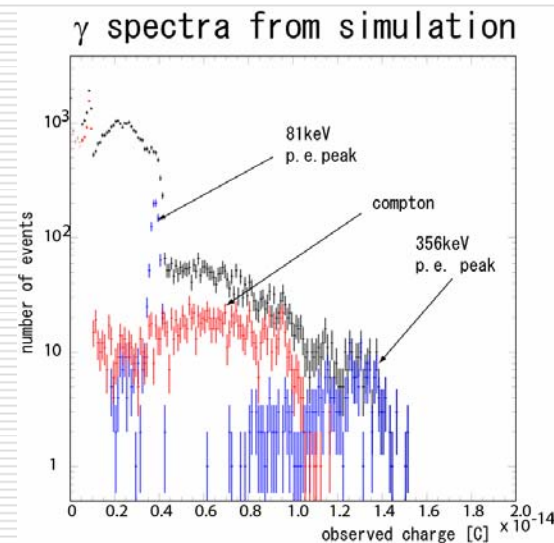
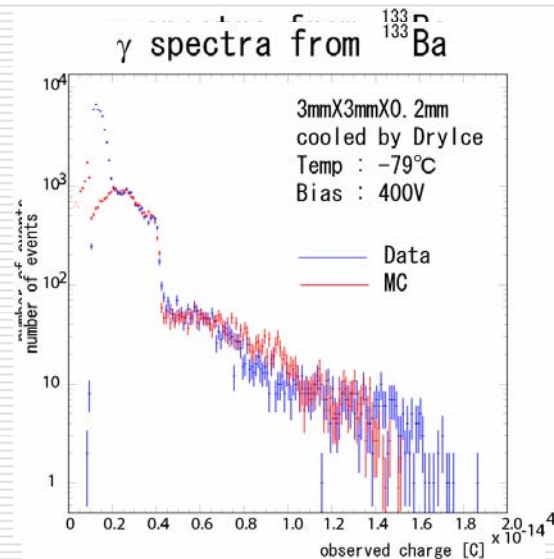
ドライアイス冷却(VCZ)による γ 線応答性(2)



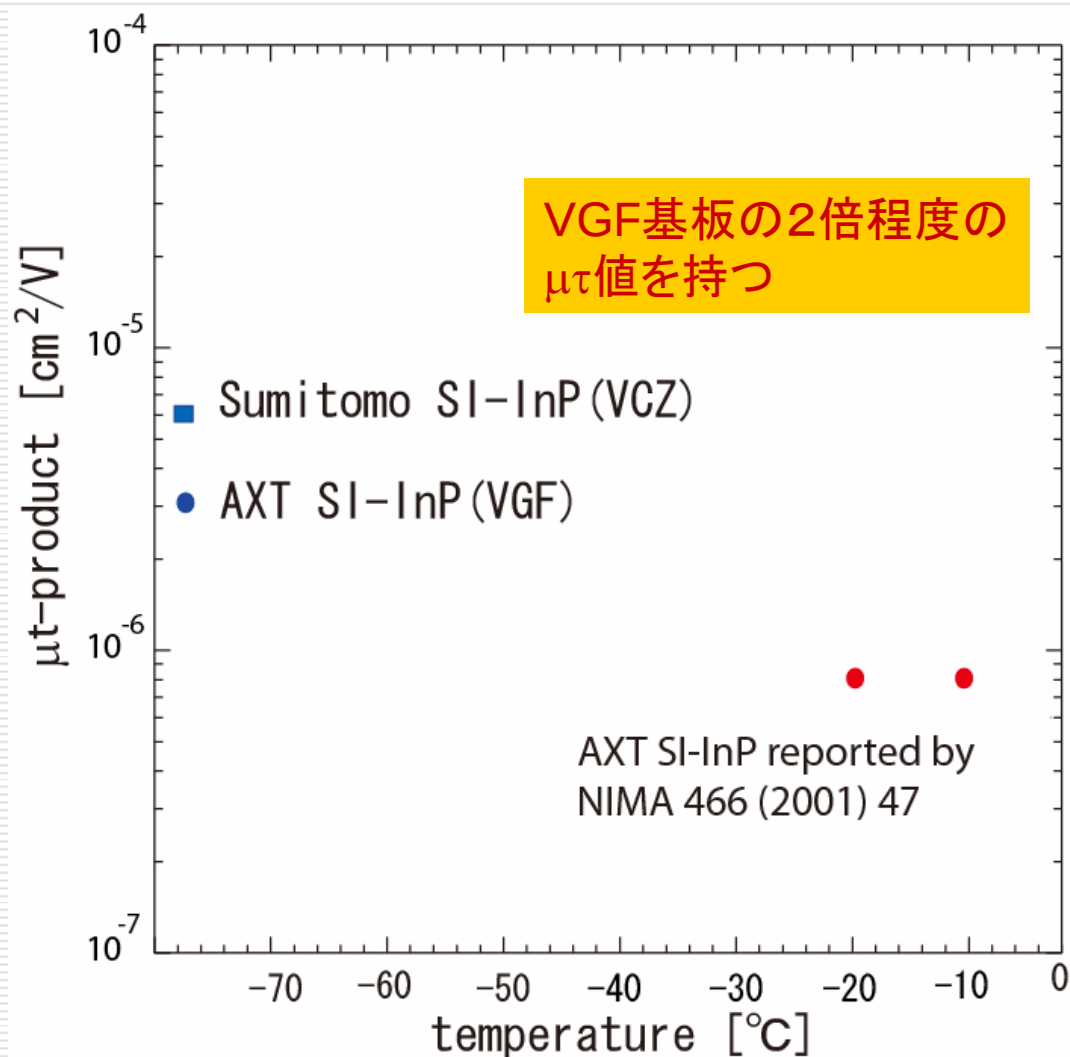
VCZ検出器とVGF検出器との比較



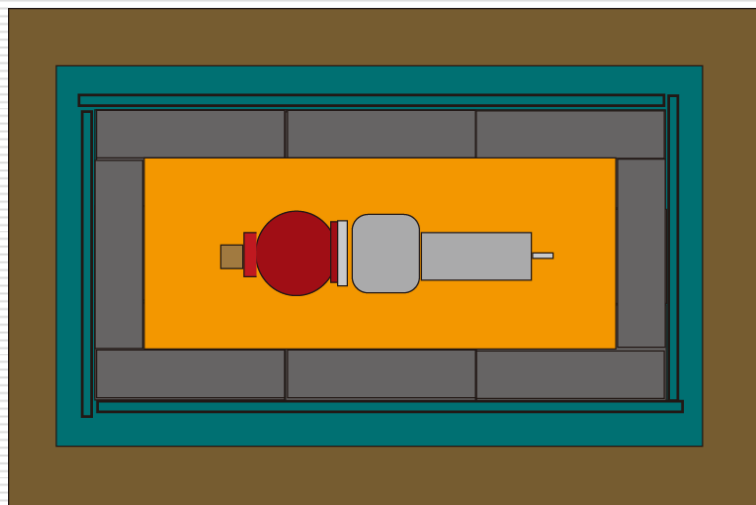
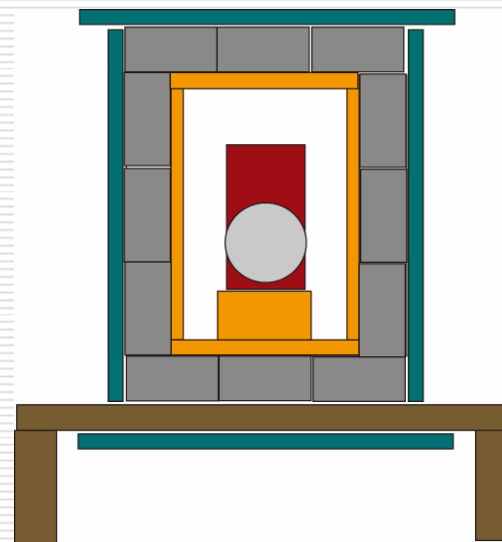
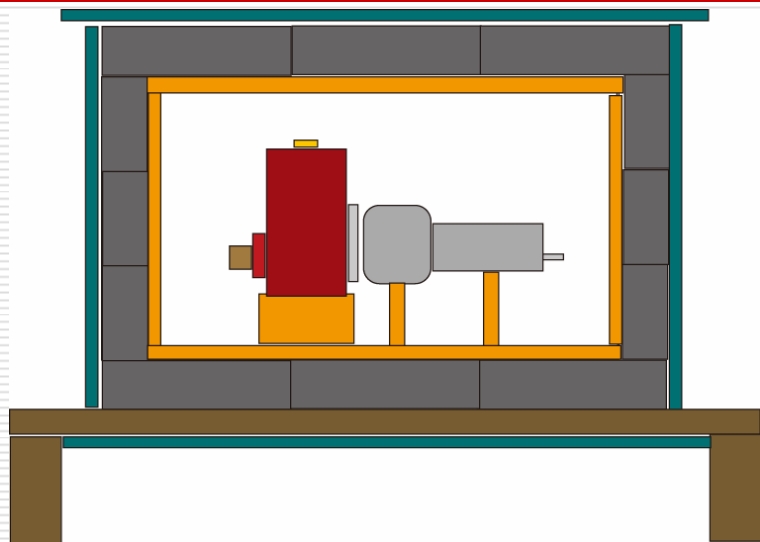
ガンマ線のスペクトル解析



$\mu\tau$ product値の比較



制動輻射BG測定実験

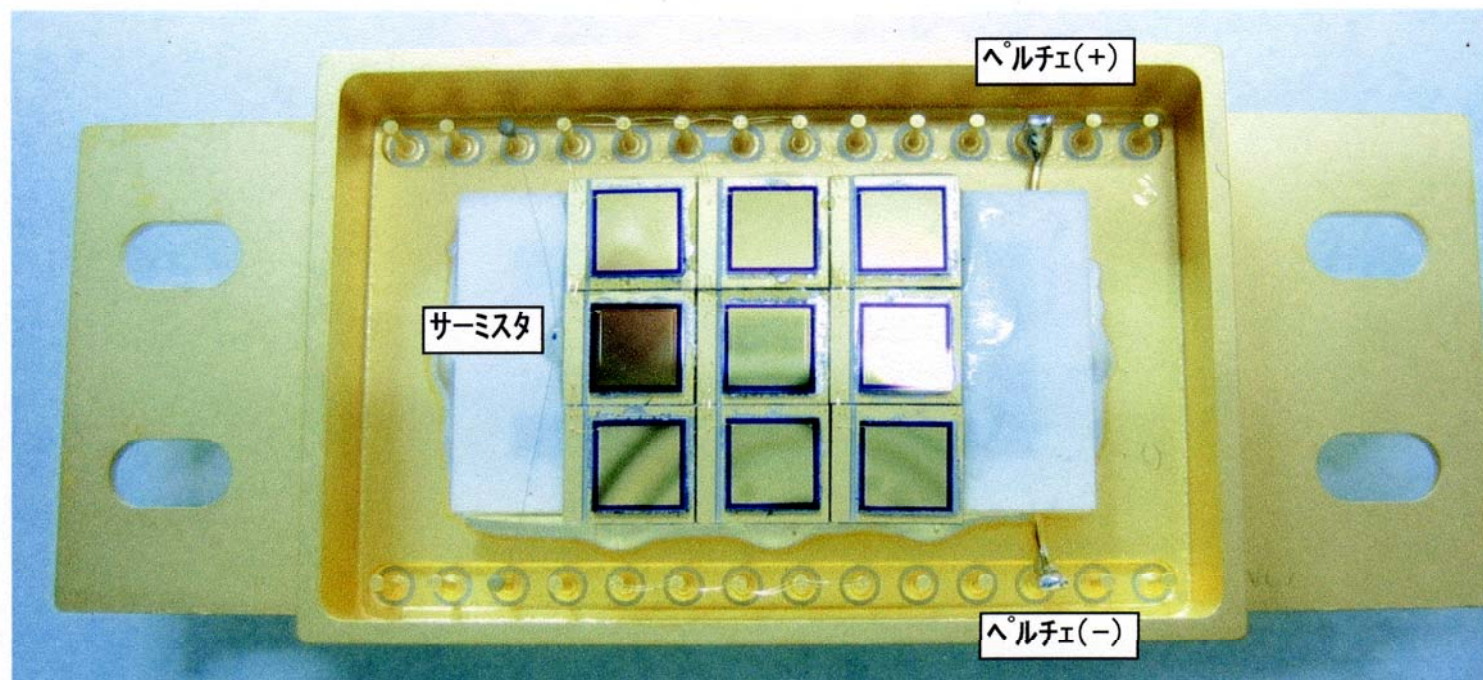


- ❑ 3cmX3cmX0.3mm VCZ InP検出器
- ❑ **ドライアイス冷却**
- ❑ 自己 β 崩壊スペクトル観測
(0.11Bq~10,000事象/日)
- ❑ 制動輻射バックグラウンド測定
(β 線の1%が制動輻射)

平成18年度 検出器試作+セットアップ

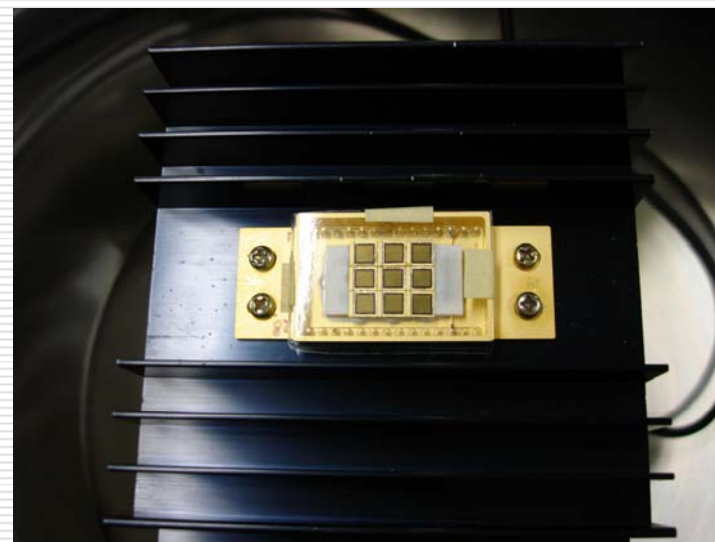
平成19年度 β スペクトル観測@宮教大
→ 神岡坑内にてBG実験

9chピクセル型検出器の開発



- ❑ 3mm × 3mm × 200 μ m × 9chのピクセルInP検出器を開発
- ❑ 性能測定中

9chピクセル型検出器の測定



まとめ

平成18年度

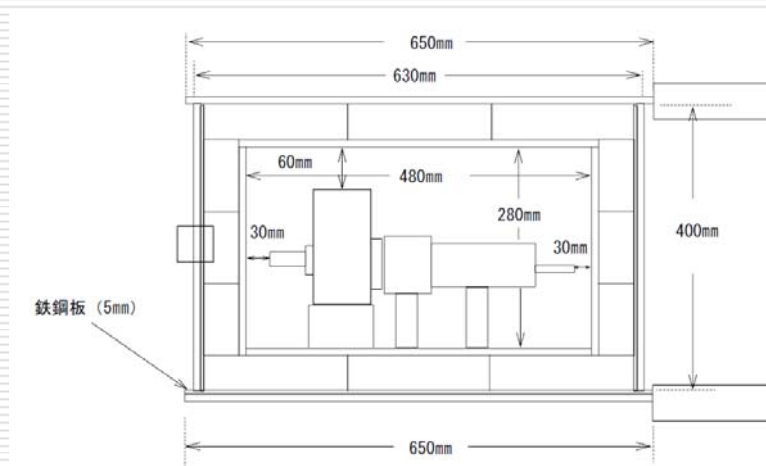
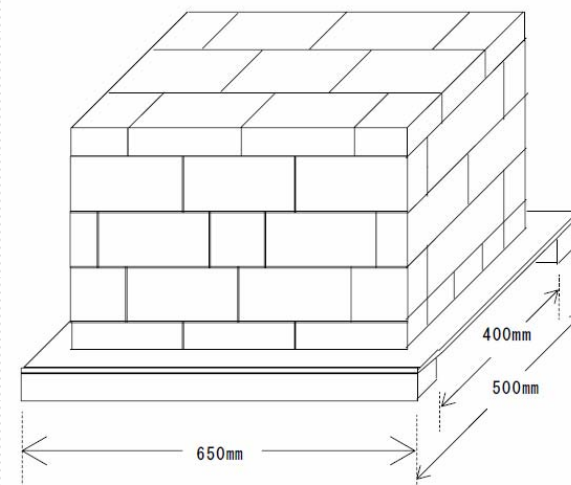
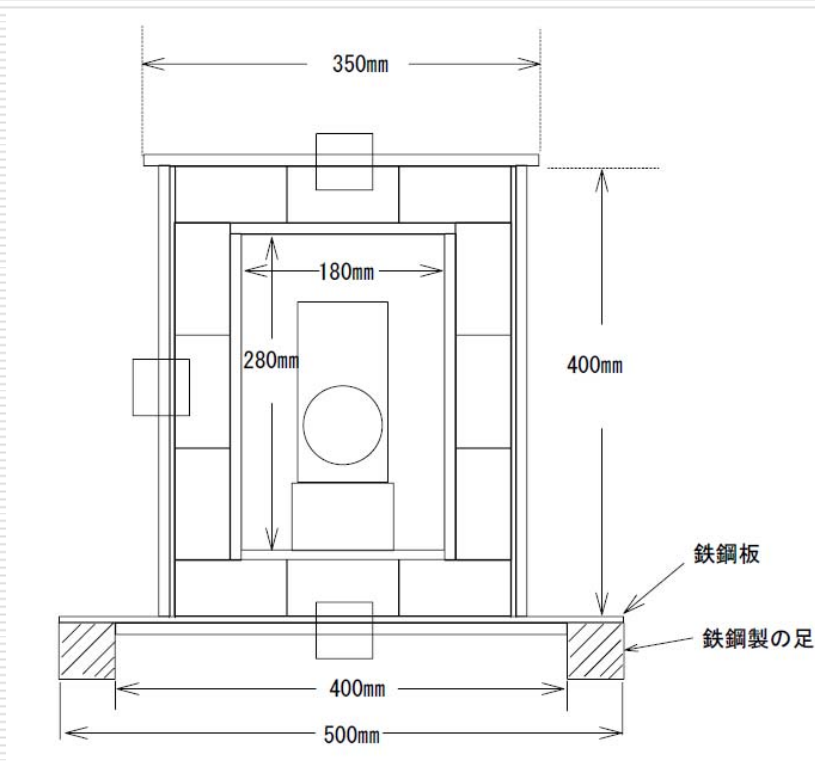
- ❑ VCZ基板による検出器を制作し、ガンマ線のスペクトル解析を行った結果、従来のVGF基板の2倍の電荷収集効率(> 90% @ 400V)
- ❑ 電子・ホール対生成エネルギー $\epsilon \leq 3.0\text{eV}$
- ❑ 81keVと122keVの光電ピークを観測(エネルギー分解能 $\sigma : 5\% @ 122\text{keV}$)

目標の10% @ 100keV(FWHM)にほぼ到達

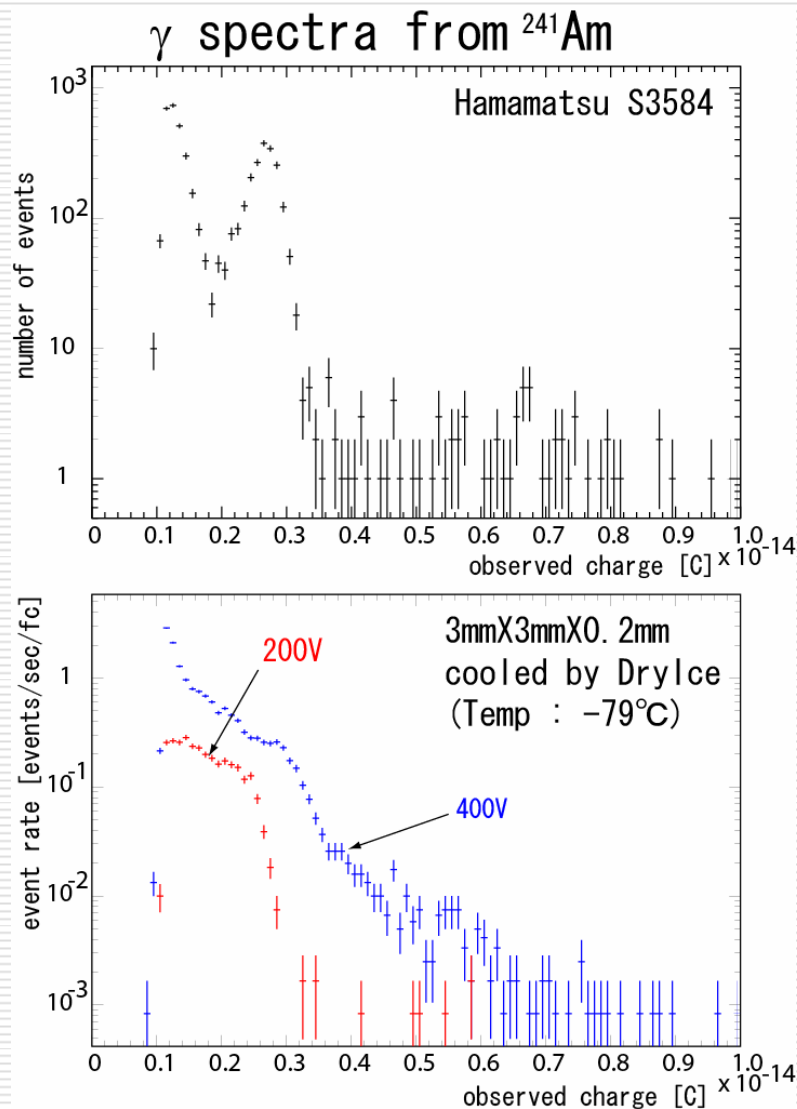
平成19年度

- ❑ 宮教大にて3cmX3cmX300 μm 検出器の性能評価(自己 β 崩壊スペクトル観測を含む)
- ❑ 神岡坑内にて ^{115}In β 崩壊からの制動放射BG測定実験を開始

制動輻射BG実験設計図



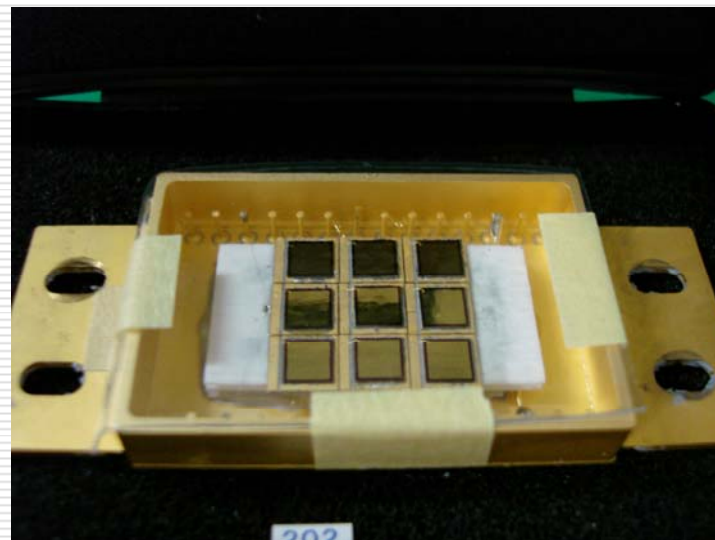
ガンマ線の観測(3)(ドライアイス冷却型)



VCZ検出器の測定結果

- ❑ 同バイアス電圧では、VCF検出器に比べ電荷収集効率が上昇
- ❑ 100keV付近の γ 線の光電ピークを観測 (VCF検出器でも観測していた)
- ❑ e/h生成エネルギーはSiの3.65eVより小さい (従来は4.2eV)

制作したVCZ InP検出器



- ① 3mm × 3mm × 0.2 mm ペルチェ冷却型
- ② 3mm × 3mm × 0.2 mm ドライアイス冷却型
- ③ 3mm × 3mm × 0.2 mm × 9chピクセル
- ④ 3mm × 3mm × 0.2 mm × 9chピクセル(VCF)