

MPPCとシンチレータを用いた 携帯型放射線検出器の開発

中川崇之、高橋弘充、深澤泰司、大杉節、水野恒史(広島大学)、
高垣徹(TAC)

目次

- 放射線検出器について
- MPPCについて
- 回路の設計
- センサの選定
- 携帯型ガンマ線スペクトロメータの紹介
- まとめ

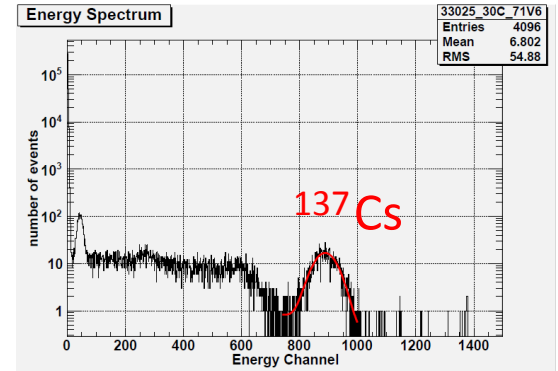
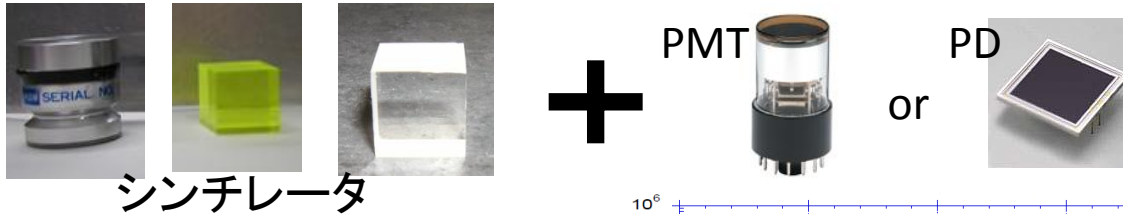
主な放射線検出器

- ガイガーカウンタ
 - ⇒ 放射線到来の有無のみ

- 簡易スペクトロメータ
 - シンチレータ+光センサ

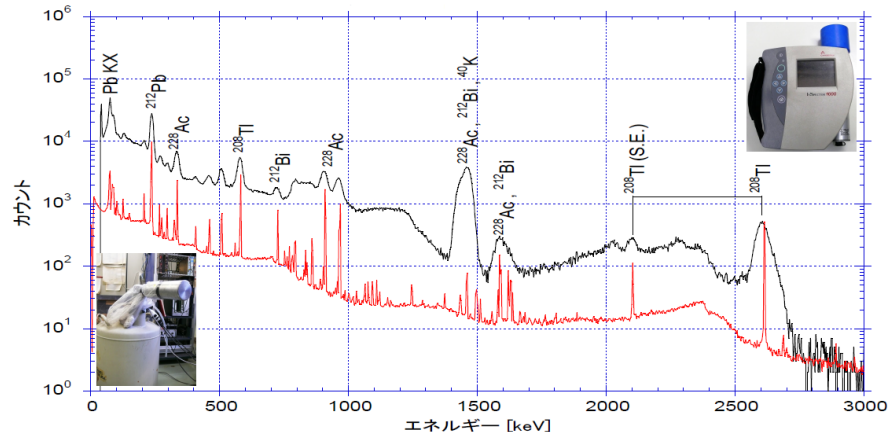
PMT・・・サイズ大きい、高電圧が必要

PD・・・外来ノイズに弱い、エネルギー分解能悪い



Energy
エネルギースペクトル
から、核種同定が可能

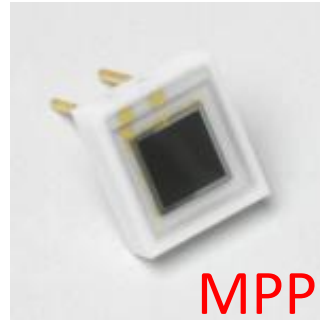
- 精密スペクトロメータ
 - Ge半導体検出器
 - ⇒ 大型、高価



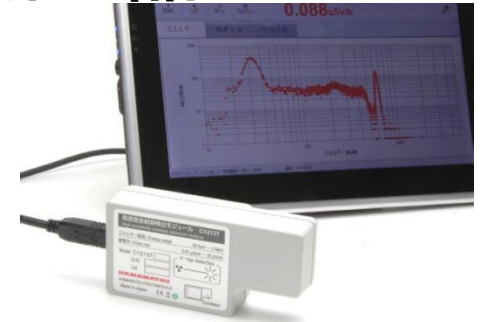
今回開発する放射線検出器



シンチレータ



MPPC



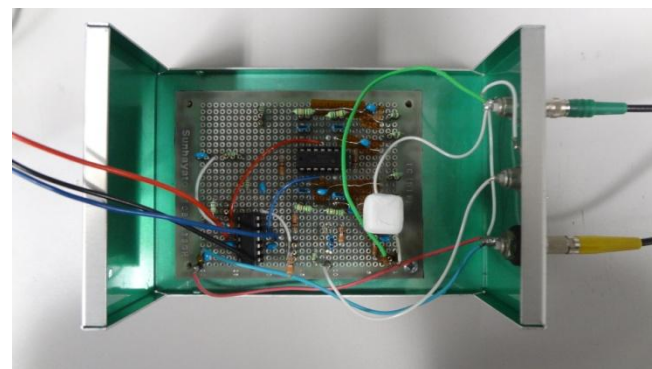
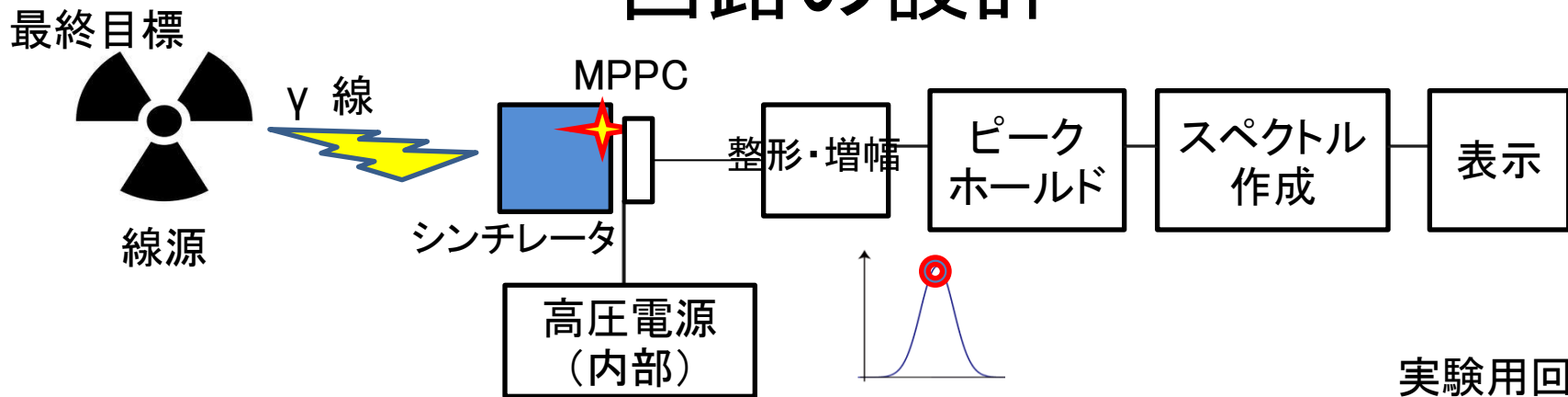
浜松ホトニクス
C12137

	大きさ	動作電圧	増幅率
MPPC	1-12 mm	~70 V	10^5-10^6

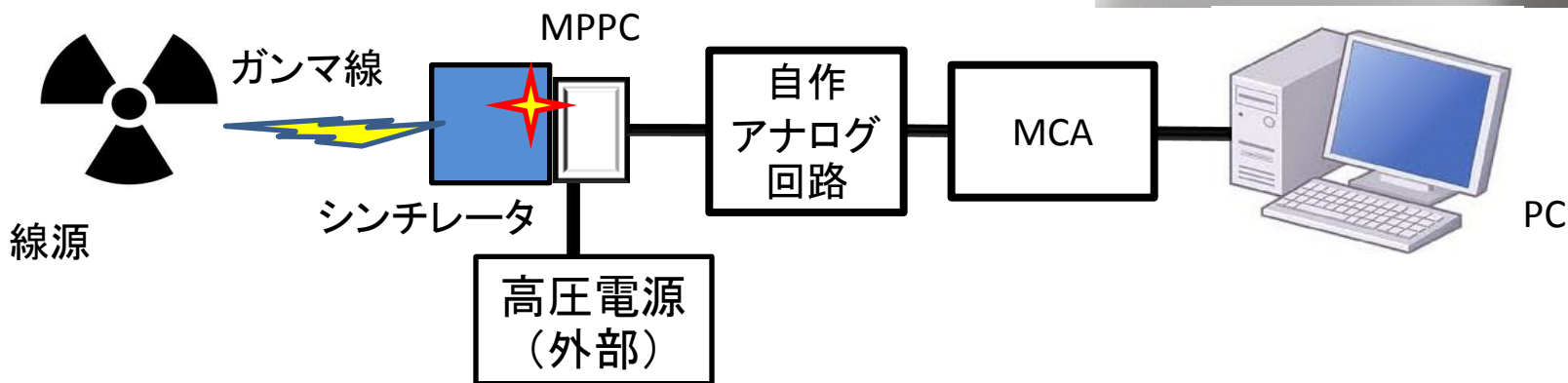
PMTに比べ小型で低電圧で動作
PDに比べ増幅率が高く、エネルギー分解能が良い

- 光センサにMPPCを使うことで、小型で低電圧で動作し、高いエネルギー分解能を持つ検出器を作る可能性。
- 実現できれば家庭用の放射線検出器としてや、学校等での放射線学習に使えるのではないかな。

回路の設計



- シンチレータとMPPCを組み合わせたガンマ線検出器
- 実験段階では高圧電源は外部のもの、デジタル部分はMCA、パソコンを使用



MPPCの選定

- エネルギー分解能を良くするには、光子を多く検出したい

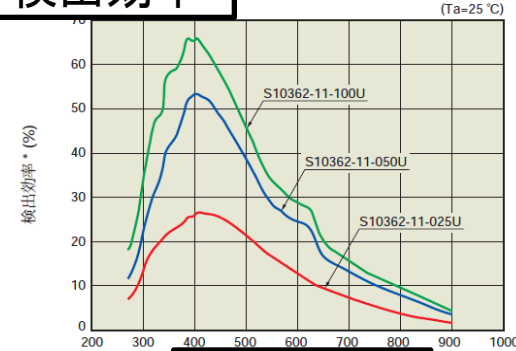
$$\Delta E^2 = \Delta \text{Photon}^2 + \Delta \text{Noise}^2$$

$$\Delta \text{Photon} = 1 / \sqrt{\text{Photon}}$$

そのため、MPPCは開口率が高く、検出効率の高いものを選びたい

- 一方、開口率が大きいものは、ピクセル数が少なくなり、光子数が多くなると飽和しやすい。

検出効率



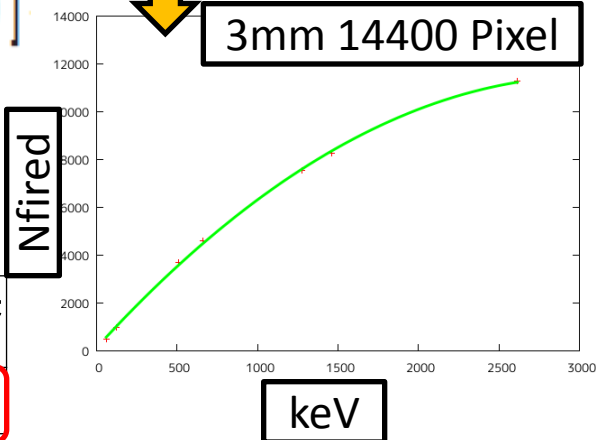
波長

(浜松ホトニクス MPPCデータシート)

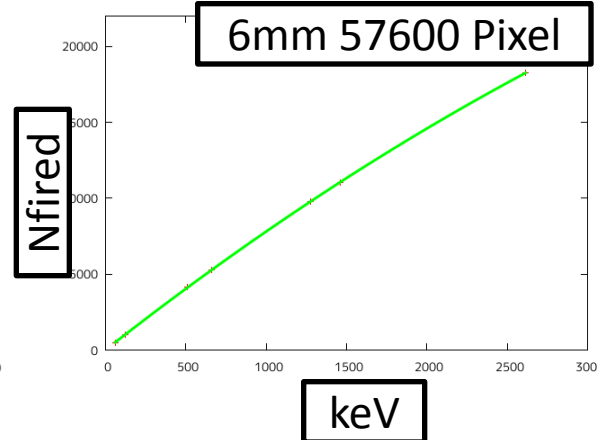
1 MeV以上でリニアリティが悪くなる。



3mm 14400 Pixel



6mm 57600 Pixel



$$N_{\text{fired}} = N_{\text{total}} \times \left[1 - \exp\left(\frac{-N_{\text{photon}} \times \text{PDE}}{N_{\text{total}}}\right) \right]$$

N_{fired} : 励起ピクセル数 PDE : 検出効率
 N_{total} : 全ピクセル数
 N_{photon} : 入射フォトン数

より

CsI(Tl)だと

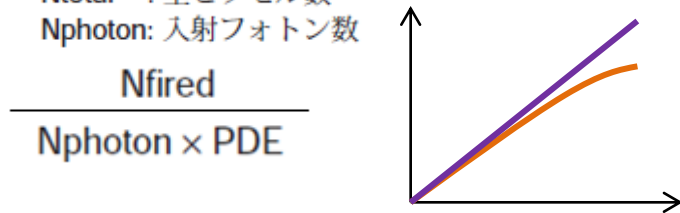
	密度 (g/cm ³)	発光量 (photons/MeV)	発光波長 (nm)
CsI	4.53	56000	550

MPPCの選定

- 検出光子数

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{total}} \times \left[1 - \exp\left(\frac{-N_{\text{photon}} \times \text{PDE}}{N_{\text{total}}}\right) \right]$$

N_{fired} : 励起ピクセル数
 N_{total} : 全ピクセル数
 N_{photon} : 入射光子数
 PDE : 検出効率



- 当初はピクセル数の多い、
受光面6mm:ピクセルサイズ25umで設計。

S10985-025C

- Csl(Tl)の時定数 ~ 1000ns
- APDピクセルの復帰時間 ~ 4ns
- 全ての光子が同時に入射するわけではない。
- ある程度のピクセル数があれば、著しくリニアリティが崩れることはない。

 現在発売されているMPPC

※ピクセルの回復時間は考慮していない。⇒

56000photons		開口率[%](ピクセルサイズ[um])			
		30.8 (25)	61.5 (50)	78.5 (100)	100
ピクセル数[個]	100	0.007247	0.00363	0.002843	0.002232
	400	0.028989	0.014518	0.011374	0.008929
	900	0.065225	0.032666	0.025591	0.020089
	1600	0.115935	0.058072	0.045496	0.035714
	3600	0.255252	0.1306	0.10236	0.080357
	14400	0.643302	0.445512	0.373853	0.307108
	57600	0.88924	0.794811	0.748418	0.695024

10000photons		開口率[%](ピクセルサイズ[um])			
		30.8 (25)	61.5 (50)	78.5 (100)	100
ピクセル数[個]	100	0.040584	0.020325	0.015924	0.0125
	400	0.161995	0.0813	0.063694	0.05
	900	0.341622	0.182154	0.143178	0.112484
	1600	0.510142	0.310182	0.249747	0.198652
	3600	0.724134	0.545155	0.473078	0.401234
	14400	0.919122	0.847068	0.810468	0.767244
	57600	0.978913	0.958482	0.947414	0.933662

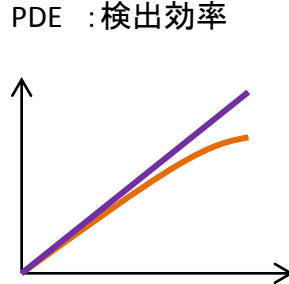
1000photons		開口率[%](ピクセルサイズ[um])			
		30.8 (25)	61.5 (50)	78.5 (100)	100
ピクセル数[個]	100	0.371309	0.201768	0.158937	0.124958
	400	0.74659	0.575372	0.50443	0.432332
	900	0.874793	0.770348	0.719871	0.662499
	1600	0.926805	0.860869	0.827092	0.786939
	3600	0.966545	0.934676	0.917636	0.896682
	14400	0.991493	0.98311	0.978508	0.97273
	57600	0.997864	0.995741	0.994568	0.993088

MPPCの選定

検出光子数

$$N_{\text{fired}} = N_{\text{total}} \times \left[1 - \exp\left(\frac{-N_{\text{photon}} \times \text{PDE}}{N_{\text{total}}}\right) \right]$$

N_{fired} : 励起ピクセル数
 N_{total} : 全ピクセル数
 N_{photon} : 入射光子数



- 当初はピクセル数の多い、
受光面6mm:ピクセルサイズ25umで設計。

S10985-025C

- Csl(Tl)の時定数 ~ 1000ns
- APDピクセルの復帰時間 ~ 4ns
- 全ての光子が同時に入射するわけではない。

- ある程度のピクセル数があれば、著しくリニアリティが崩れることはない。
- 開口率が高く、ピクセル数も多い、
受光面6mm:ピクセルサイズ50umを試す。

S10985-050C

 現在発売されているMPPC

※ピクセルの回復時間は考慮していない。⇒

56000photons		開口率[%](ピクセルサイズ[um])			
		30.8 (25)	61.5 (50)	78.5 (100)	100
ピクセル数[個]	100	0.007247	0.00363	0.002843	0.002232
	400	0.028989	0.014518	0.011374	0.008929
	900	0.065225	0.032666	0.025591	0.020089
	1600	0.115935	0.058072	0.045496	0.035714
	3600	0.255252	0.1306	0.10236	0.080357
	14400	0.643302	0.445512	0.373853	0.307108
	57600	0.88924	0.794811	0.748418	0.695024

10000photons		開口率[%](ピクセルサイズ[um])			
		30.8 (25)	61.5 (50)	78.5 (100)	100
ピクセル数[個]	100	0.040584	0.020325	0.015924	0.0125
	400	0.161995	0.0813	0.063694	0.05
	900	0.341622	0.182154	0.143178	0.112484
	1600	0.510142	0.310182	0.249747	0.198652
	3600	0.724134	0.545155	0.473078	0.401234
	14400	0.919122	0.847068	0.810468	0.767244
	57600	0.978913	0.958482	0.947414	0.933662

1000photons		開口率[%](ピクセルサイズ[um])			
		30.8 (25)	61.5 (50)	78.5 (100)	100
ピクセル数[個]	100	0.371309	0.201768	0.158937	0.124958
	400	0.74659	0.575372	0.50443	0.432332
	900	0.874793	0.770348	0.719871	0.662499
	1600	0.926805	0.860869	0.827092	0.786939
	3600	0.966545	0.934676	0.917636	0.896682
	14400	0.991493	0.98311	0.978508	0.97273
	57600	0.997864	0.995741	0.994568	0.993088

シンチレータの選定

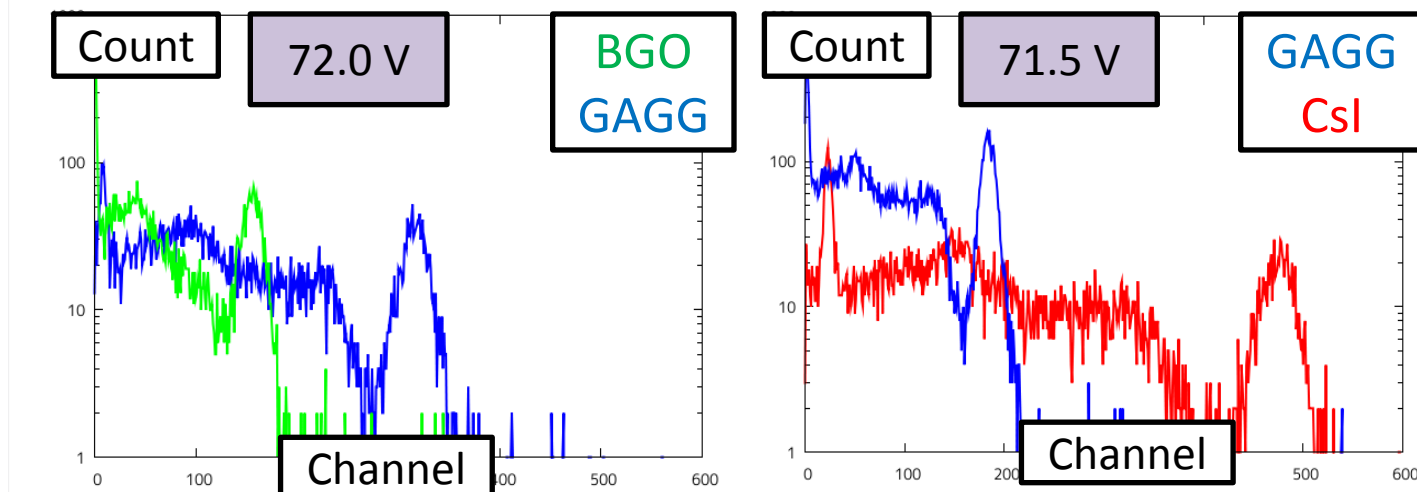


シンチレータ		BGO	GAGG	CsI
密度	g/cm ³	7.13	6.63	4.53
減衰時間	ns	300	88	1050
発光量	photons/MeV	8000	60000	56000
発光波長	nm	480	520	550
潮解性		なし	なし	若干あり

- MPPC(S10985-050C)と各シンチレータを組み合わせて比較
- 光電吸収確率(@1 MeV,1 cm)
 - BGO 8.75 %
 - GAGG 2.69 %
 - CsI 1.97 %

測定条件

- 温度20°C
- ¹³⁷Cs (662 keV)
- 1 cm³ 結晶

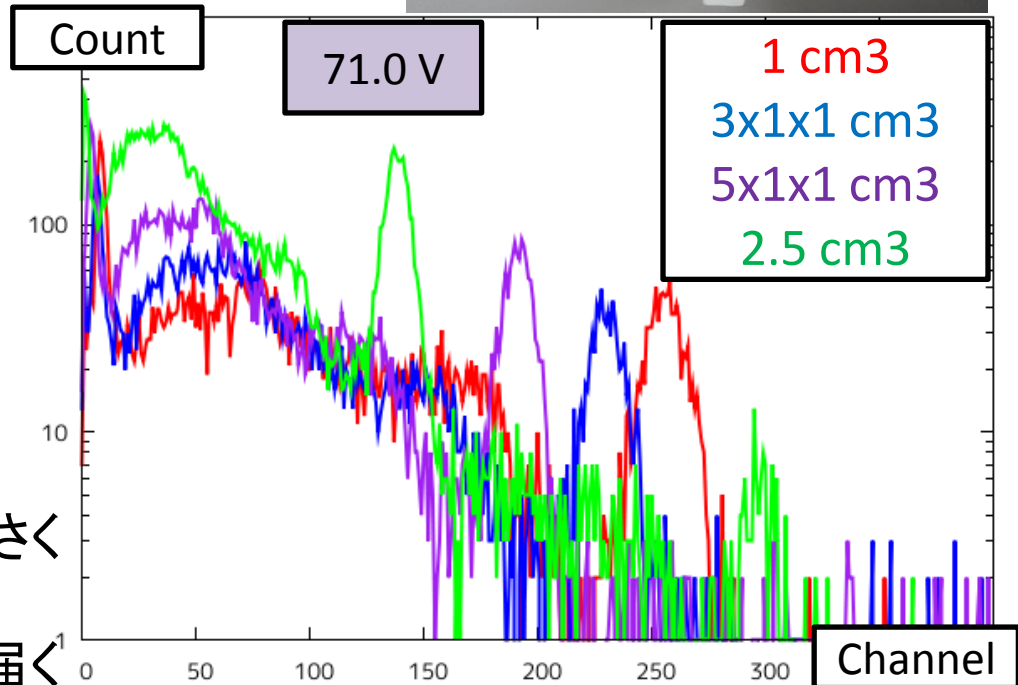


CsIとの組み合わせが最も出力が大きいという結果に

シンチレータの選定



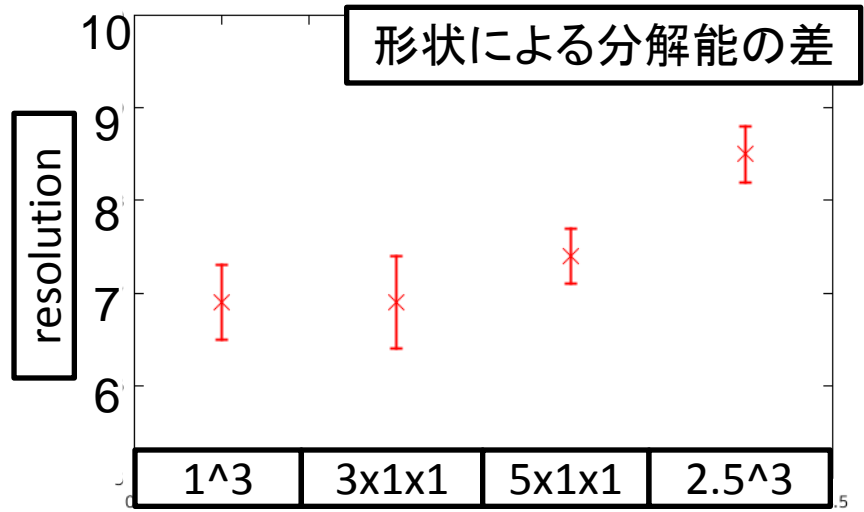
- MPPC(S10985-050C)と形状の異なるCsIとの組み合わせで比較
- 測定条件
 - 温度20 °C
 - 電圧71 V
 - ¹³⁷Cs (662 keV)



体積が大きくなるほど出力が小さくなっている
シンチレーション光が受光面に届く前に減衰されることが原因

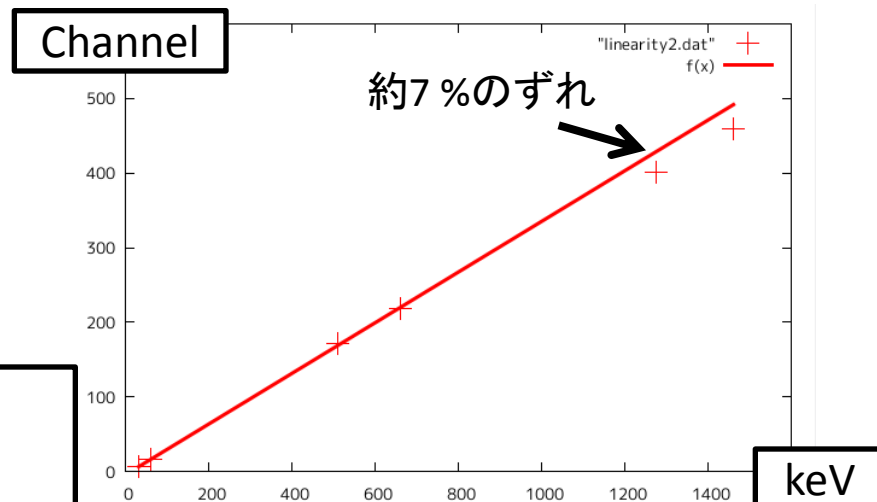
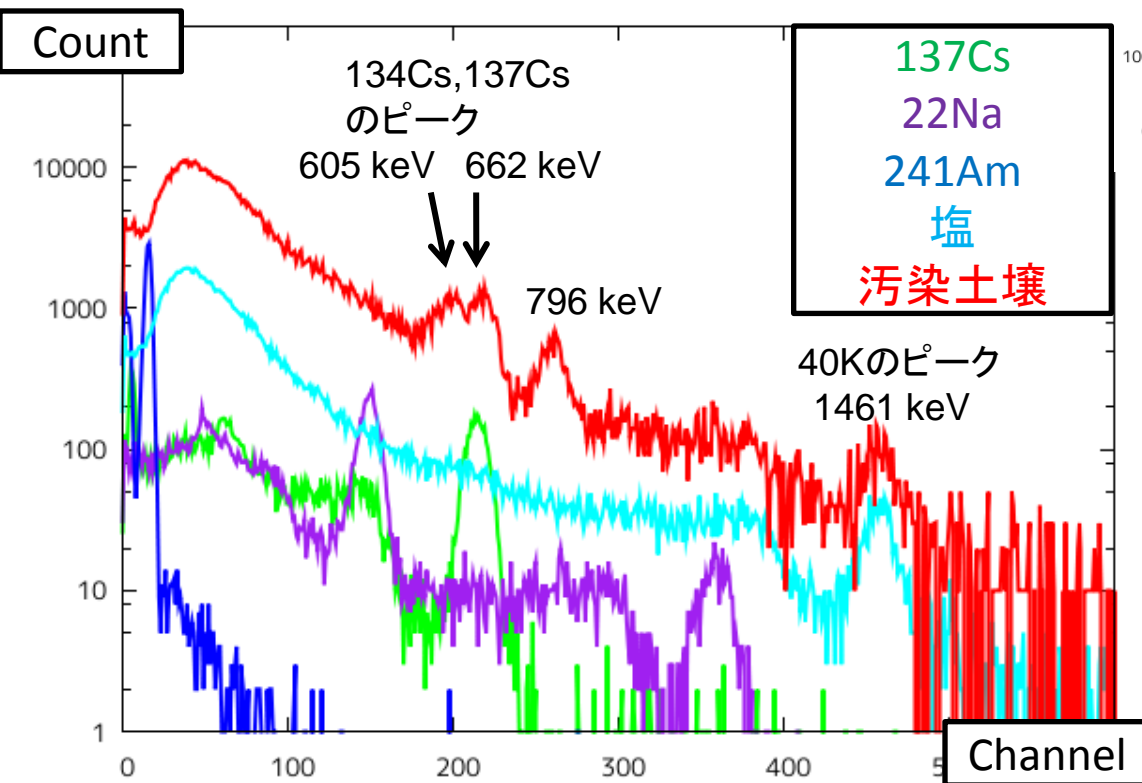
体積が大きくなるほど反応確率は高くなる

反応確率とエネルギー分解能の面から3x1x1が良いと判断



MPPC (S10985-050C)+CsI (3x1x1 cm³) の測定

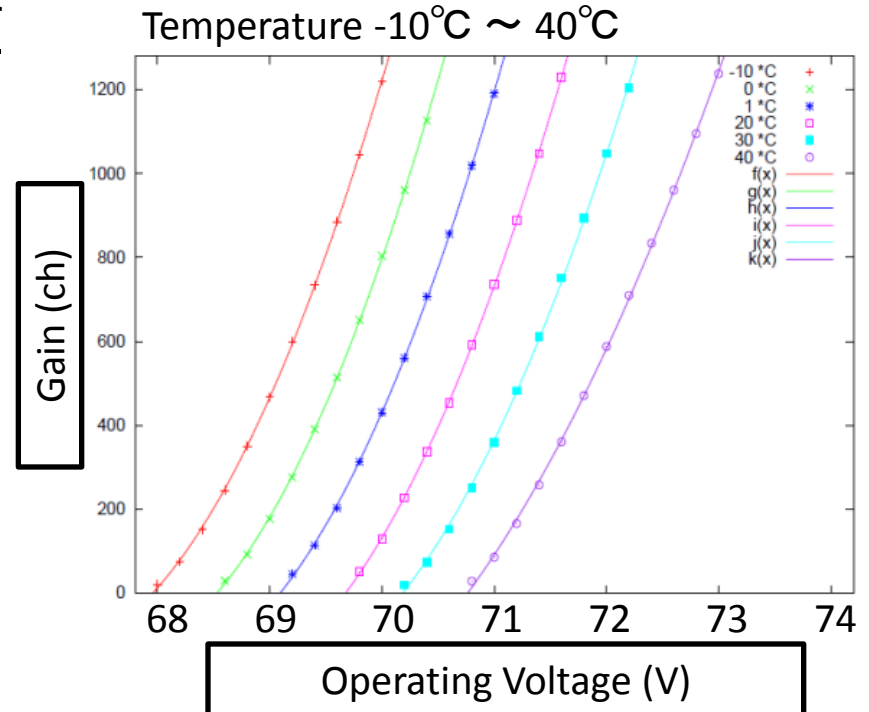
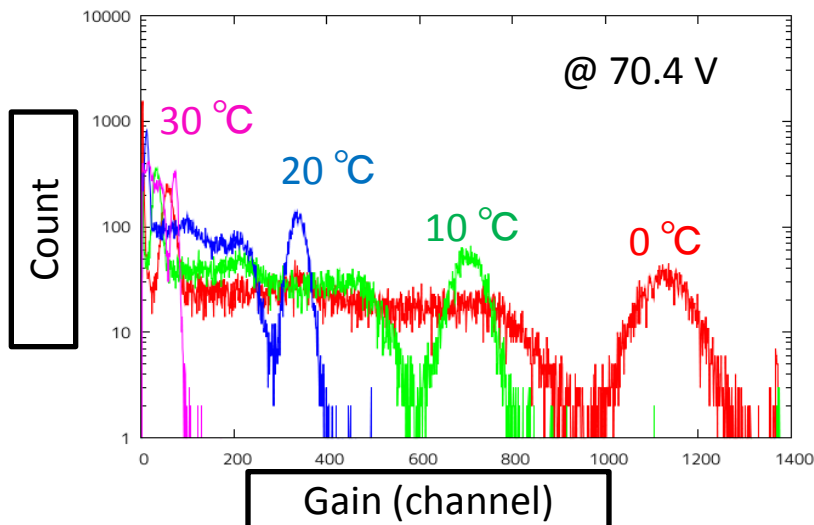
- 各線源や汚染土壌等を測定
 - 温度 20°C
 - 電圧 71 V



- 134Cs (605 keV)と137Cs(662 keV)のピークが分離できている
- MPPC(S10985-050C) + CsI(3x1x1 cm³)の組み合わせでは22Na(1275 keV)で約7%下方にピーク位置が現れる。

温度依存性の測定

- MPPCは温度、印加電圧により、出力が変わるため、その関係性を測定
- 温度変化により、デジタル的に電圧をコントロールすることで、出力を一定にする。



(測定結果はMPPC:S10985-025Cのもの)

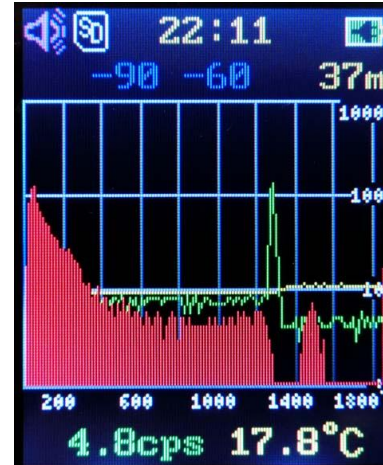
T-GMK2-Sの紹介



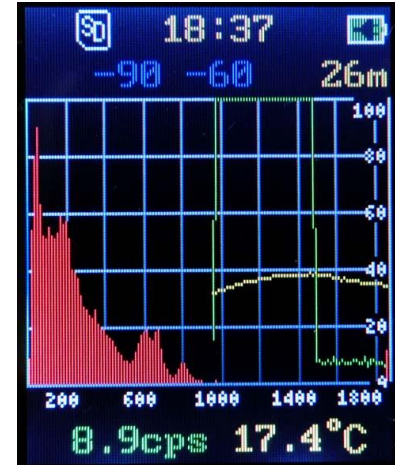
TAC(株)の協力によりパッケージ化

<http://www.tacinc.jp/T-GMK2-S/index.html>

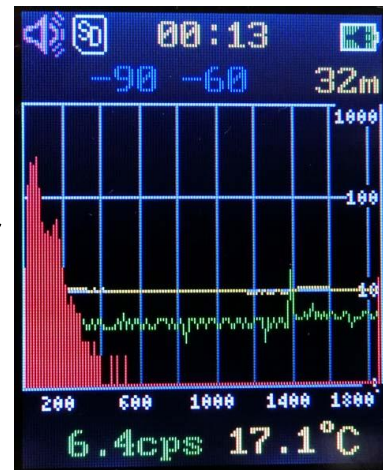
- MPPC+CsI(3x1x1 cm³)を組み合わせたガンマ線検出器
 - 本体サイズ W40 x H130 x D25 mm
 - センサー部サイズ Φ32.4 x 86.5 mm
- 単体でもスペクトル表示可能



塩



土壌



ウランガラス



マントル

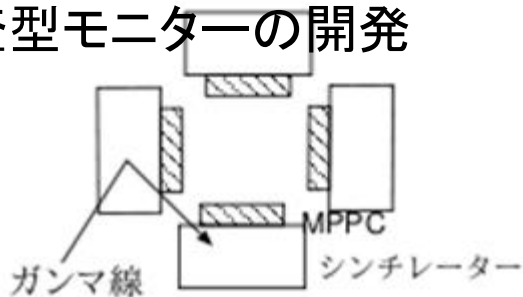
(画像はMPPC:S10985-025Cを使用したもの)

まとめ

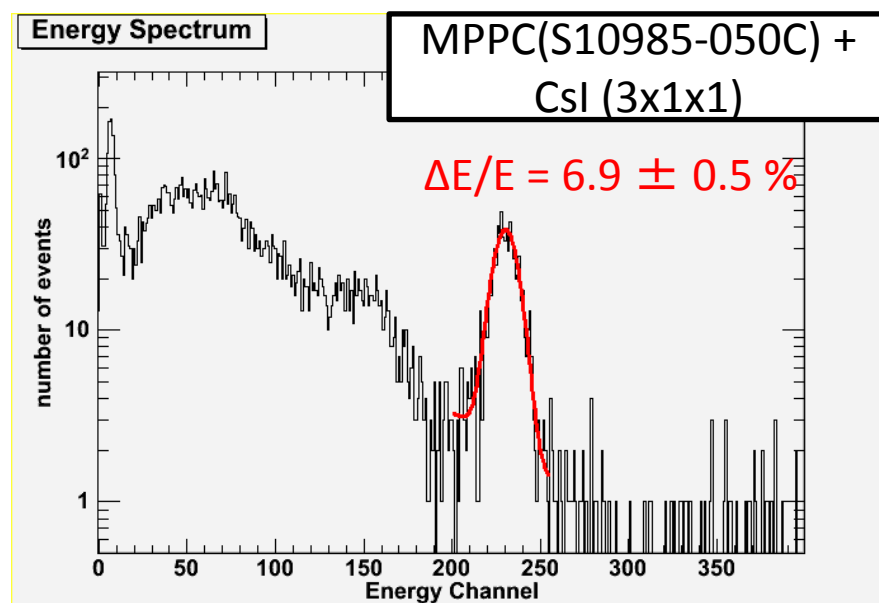
- MPPC(S10985-050C)とCsI(Tl)シンチレータの組み合わせでは、エネルギー分解能 $6.9 \pm 0.5 \%$ (@662 keV)のセンサ回路を構築
- スペクトル表示も含めた携帯型ガンマ線スペクトロメータを製作

今後

- MPPC(S10985-050C)の温度依存性測定
- PCソフトの開発
- 全方位探査型モニターの開発

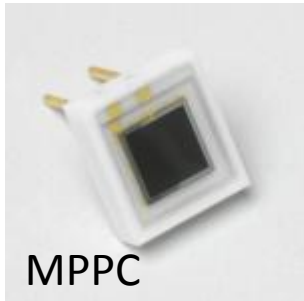
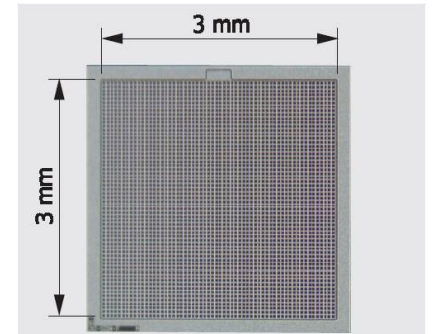
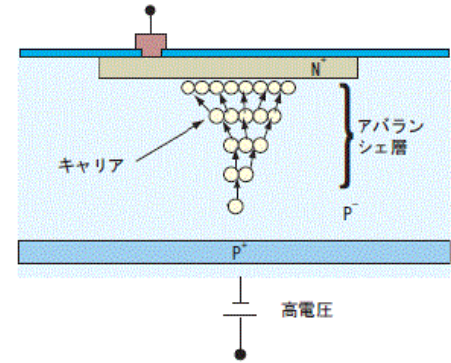


シンチレーターとMPPCの対を4～8個配置する

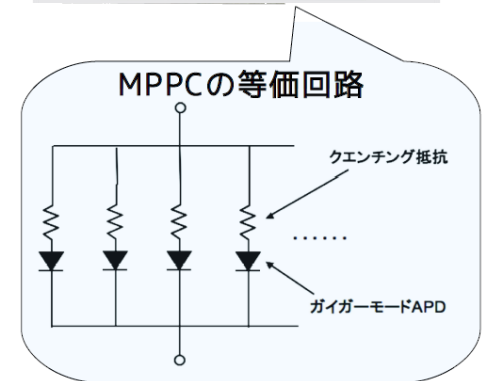
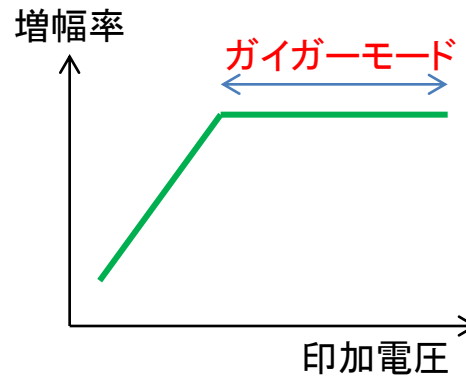


MPPC (・APD)とは

- MPPC (Multi-Pixel Photon Counter)
 - ガイガーモードAPDをマルチピクセル化して、励起したピクセルの数から入射光子数がわかる。
- APD (Avalanche Photo Diode)
 - PDにアバランシェ領域を付随



	大きさ	動作電圧	増幅率
MPPC	1-12 mm	~70 V	10^5-10^6



MPPCの種類

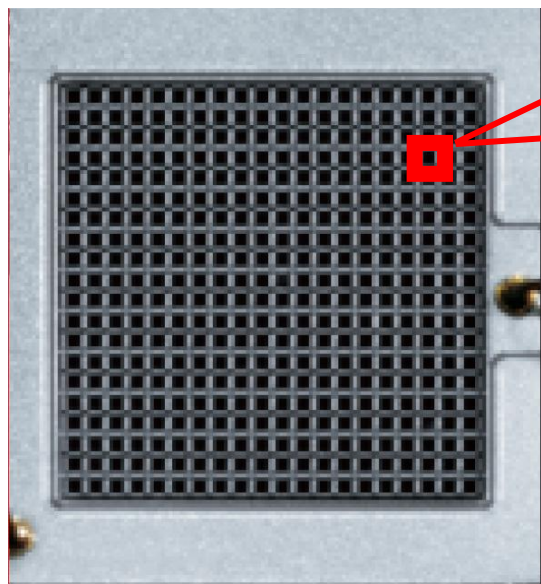
・S10362シリーズ (3x3 mm²)

・S10985シリーズ (6x6 mm²)

項目	S10362-33		
	-025C	-050C	-100C
有効受光面サイズ	3 × 3		
ピクセル数	14400	3600	900
ピクセルサイズ	25 × 25	50 × 50	100 × 100

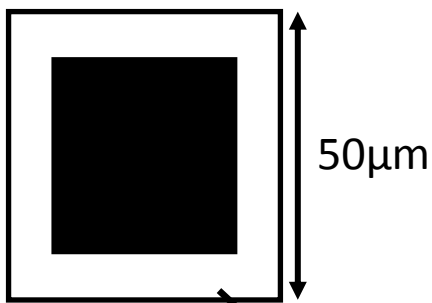
項目	S10985		
	-025C	-050C	-100C
チャンネル数	4 (2 × 2)		
有効受光面サイズ/ch	3 × 3		
ピクセル数/ch	14400	3600	900
ピクセルサイズ	25 × 25	50 × 50	100 × 100

MPPCの受光面

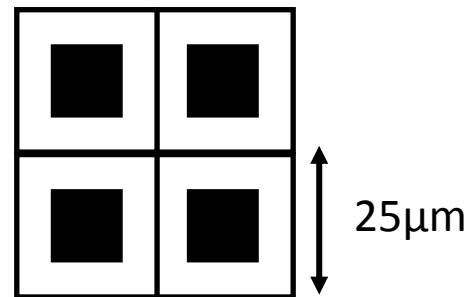


MPPC1ピクセル

050C



025C



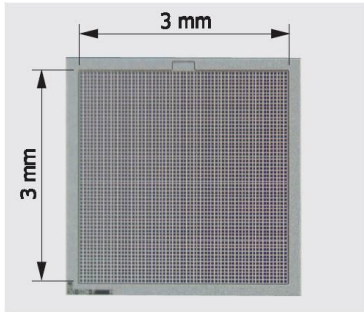
不感領域

開口率

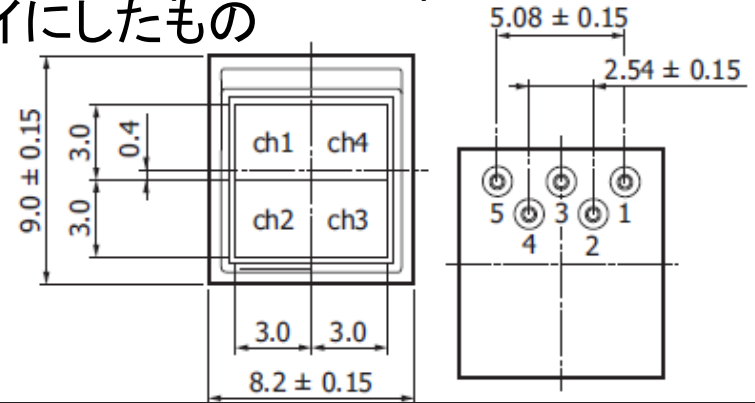
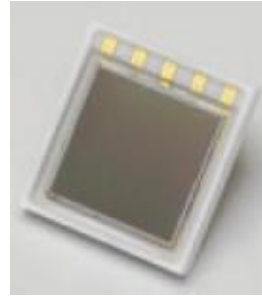
(100C : 78.5%、050C : 61.5%、025C : 30.8%)

MPPCの種類

・S10362シリーズ (3x3 mm²)



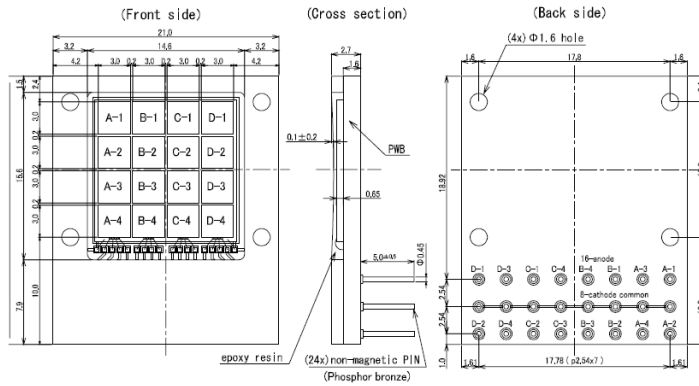
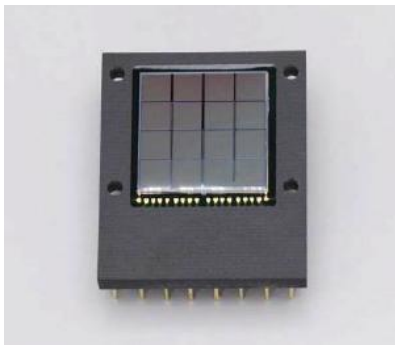
・S10985シリーズ (6x6 mm²)
MPPCをアレイにしたもの



項目	S10362-33		
	-025C	-050C	-100C
有効受光面サイズ	3 × 3		
ピクセル数	14400	3600	900
ピクセルサイズ	25 × 25	50 × 50	100 × 100

項目	S10985		
	-025C	-050C	-100C
チャンネル数	4 (2 × 2)		
有効受光面サイズ/ch	3 × 3		
ピクセル数/ch	14400	3600	900
ピクセルサイズ	25 × 25	50 × 50	100 × 100

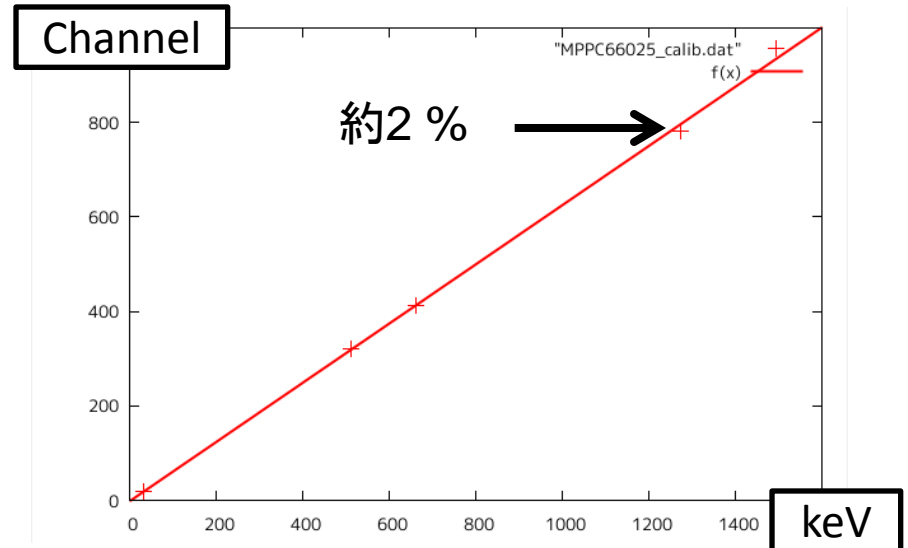
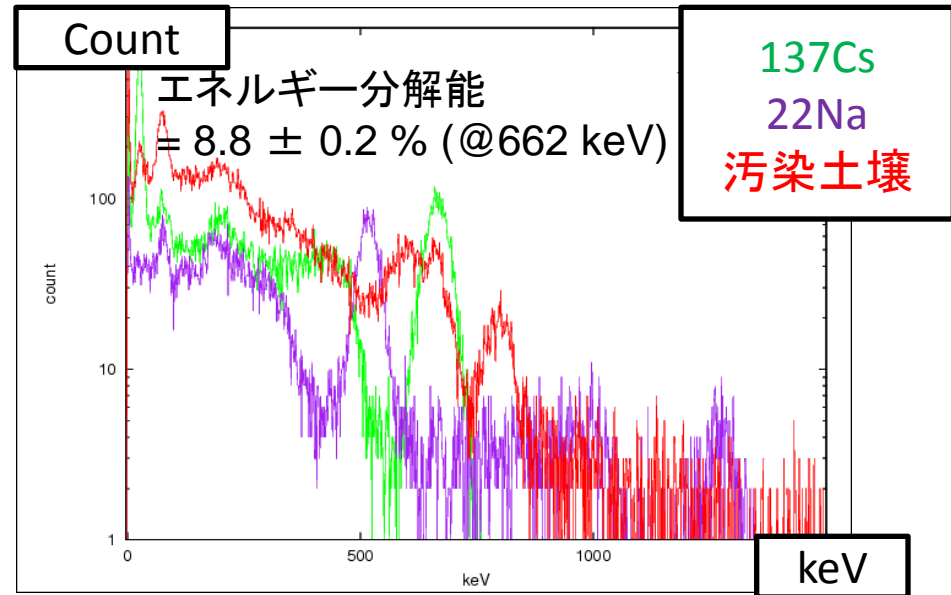
・S11827-3344MG (12x12 mm²)



Tolerance unless otherwise : ±0.2

MPPC(S10985-025C)+CsI (1x1x1 cm³)

- 25 μm のMPPCでも、分解能は悪くなるが、 ^{134}Cs , ^{137}Cs の分離は可能。
- リニアリティは高エネルギー側 (^{22}Na : 1275 keV) でもほとんど目立たない。

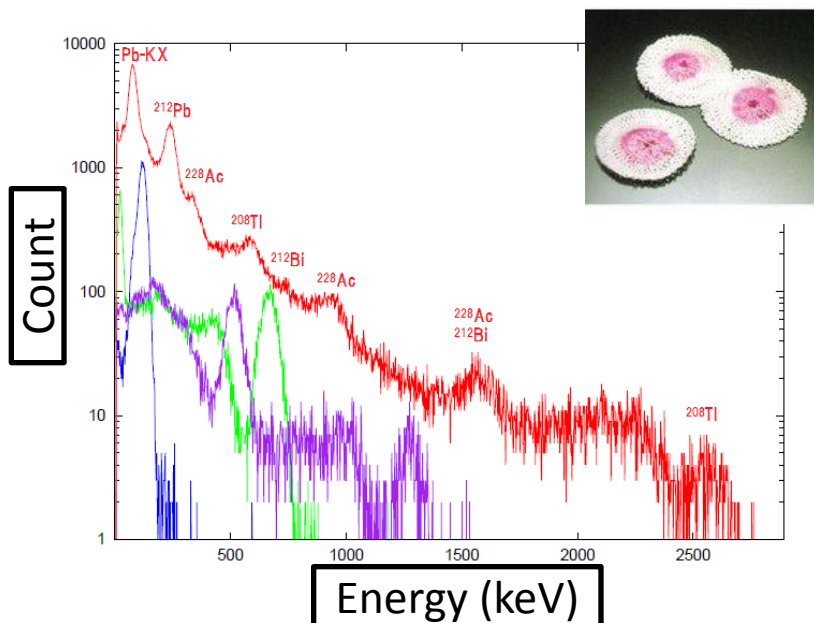


トリウム系列の主なガンマ線

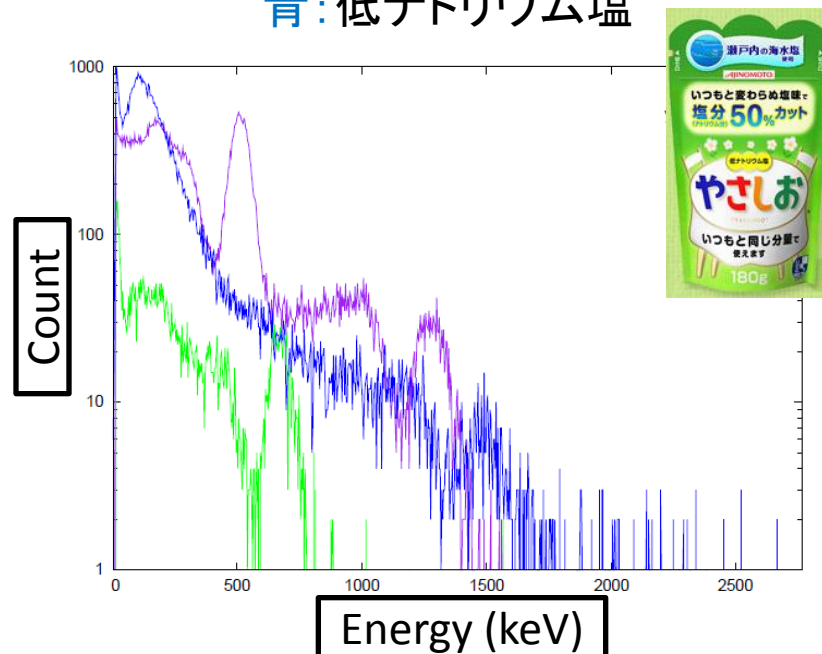
Pb 212	238 keV
Tl 208	583 keV 2614 keV
Bi 212	728 keV 1620 keV
Ac 228	911 keV 964 keV 1588 keV

身近な線源を測定

赤: ランタンのマントル



青: 低ナトリウム塩



- 整形・増幅部までとMCAで身近にある線源を測定。
- マントルからはトリウム系列のガンマ線、やさしおからは⁴⁰Kのガンマ線が確認できる。

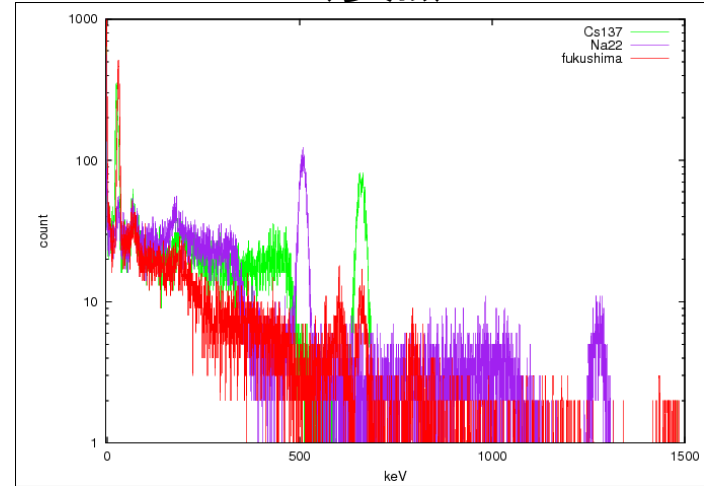
「福島県の土」の測定

- MPPC (3x3、6x6)で比較

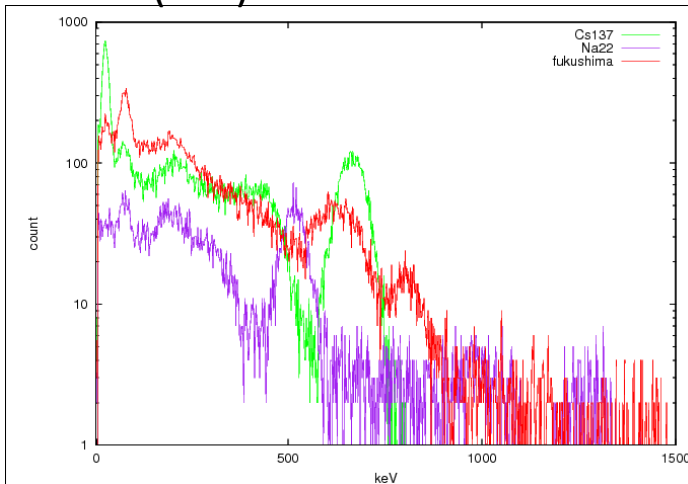


Cs134	605 keV
	796 keV
Cs137	662 keV

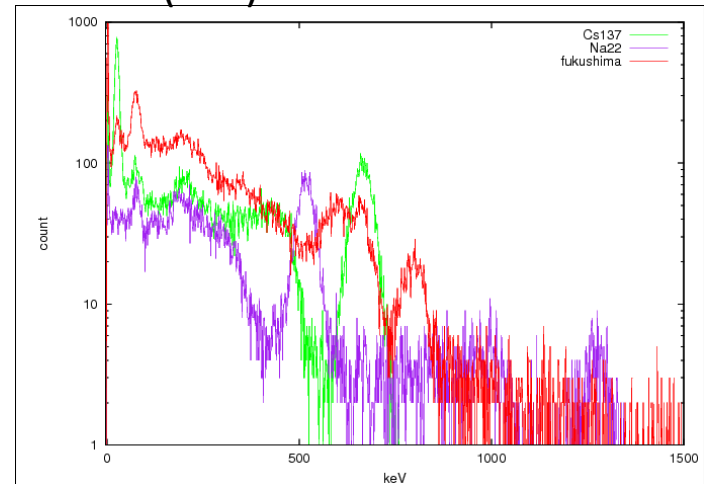
PMT + LaBr3 (参照)



MPPC (3x3) + CsI



MPPC (6x6) + CsI



エネルギー分解能 = $8.8 \pm 0.2 \%$ (@662 keV)

CsI,GAGGの光量

- GAGGの出力が小さい原因

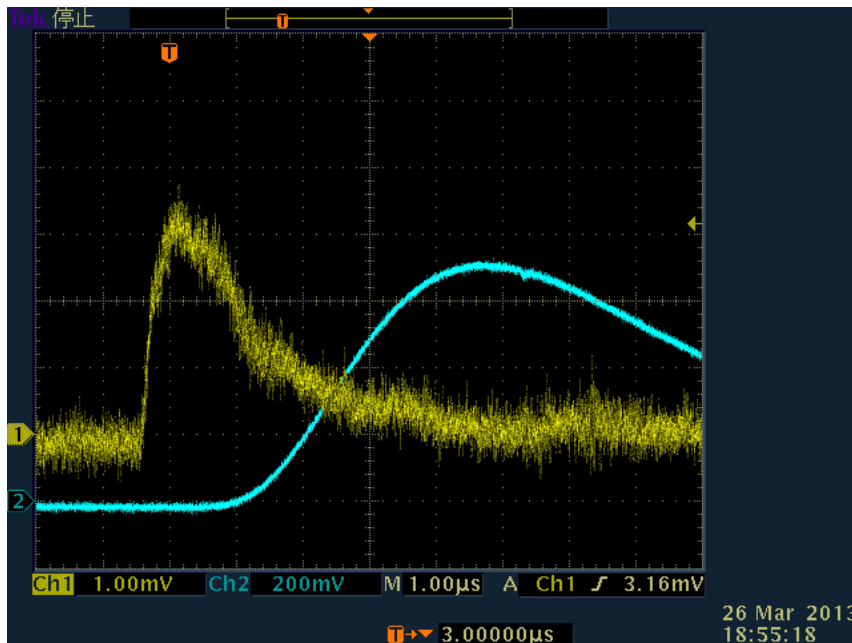
MPPC:S10985-025C

電圧:73 V

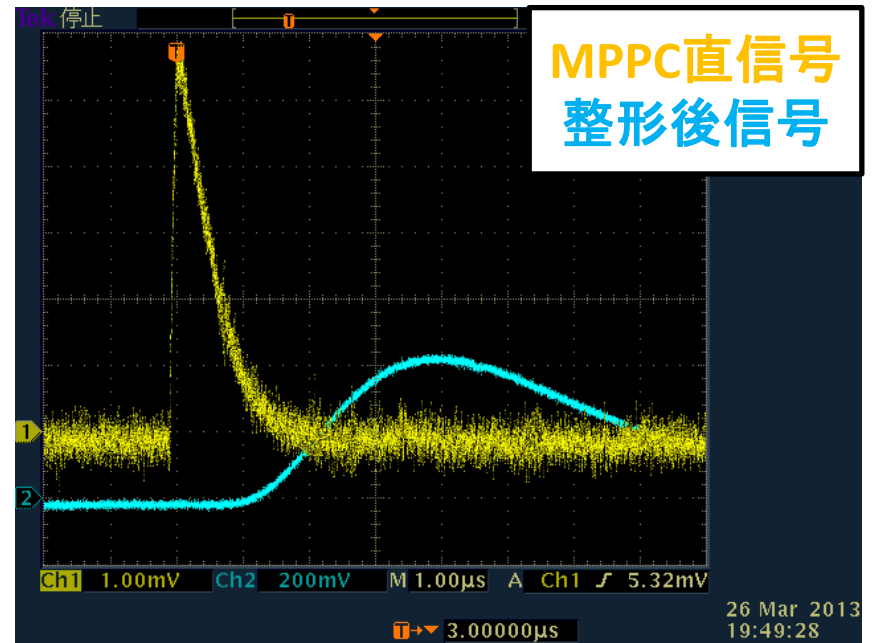
温度:20C

線源: Cs (662 keV)

GAGGはCsIに比べ短時間で、発光するのでMPPCの飽和により出力が制限されているのではないかと



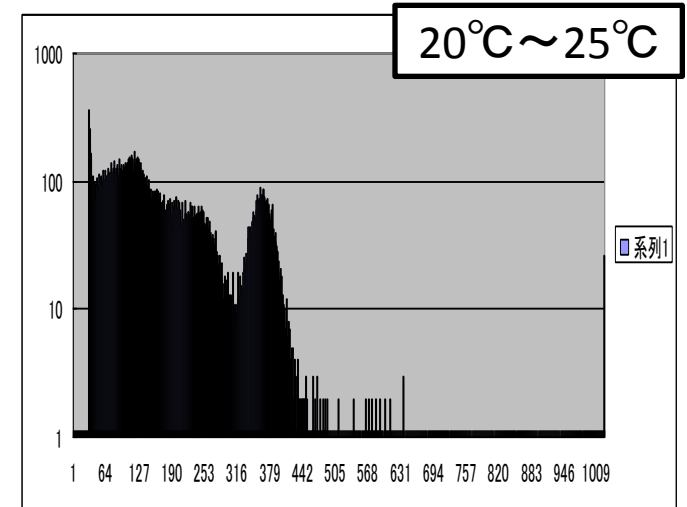
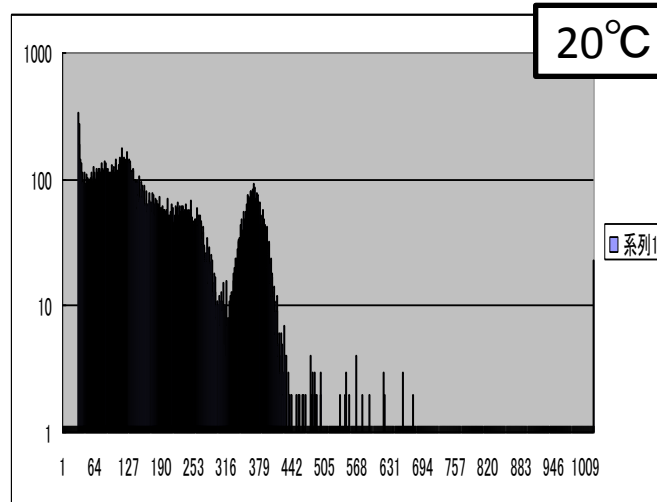
CsI(Tl)



GAGG

温度補正機能

- 実際に温度を変化させてスペクトルを取得

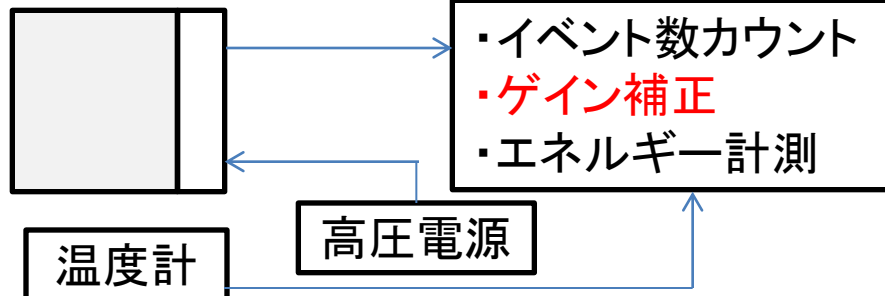


20~25°Cで変化
急激な温度変化が
なければ問題なく動作

- 今後、温度に合わせて電圧を調整する

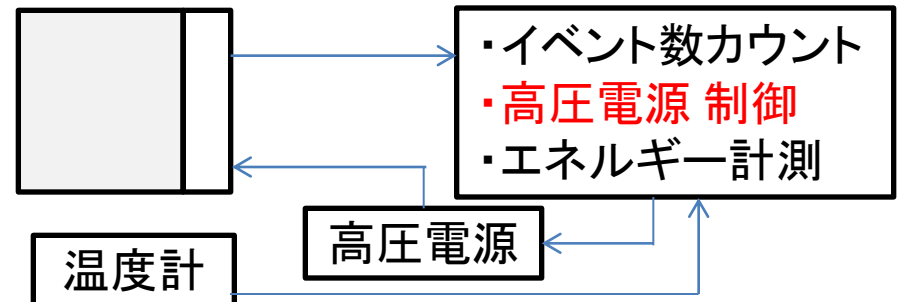
CsI(Tl)+MPPC

(1案)



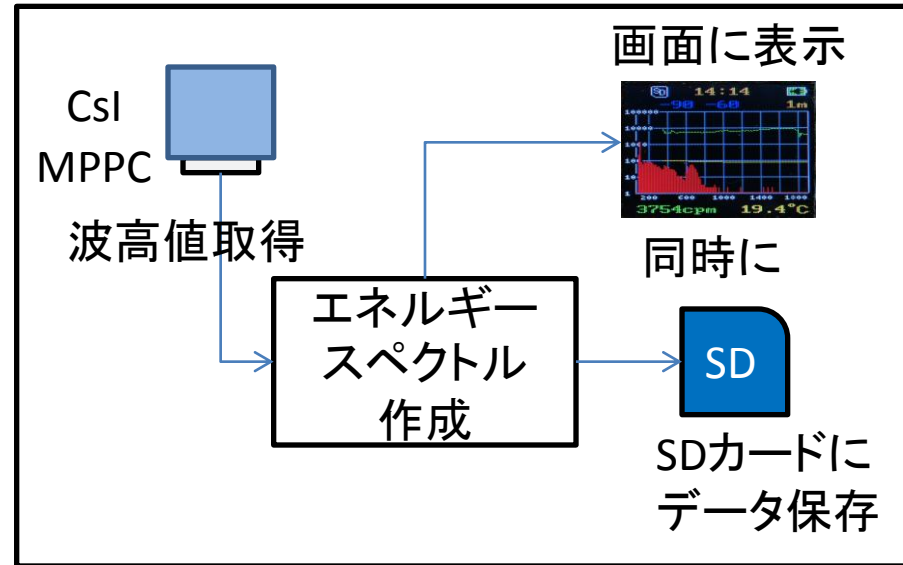
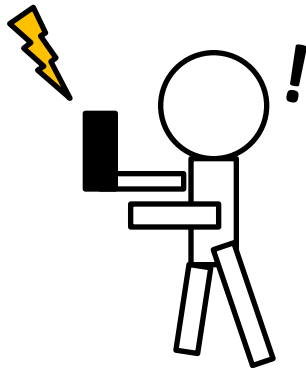
CsI(Tl)+MPPC

(2案)



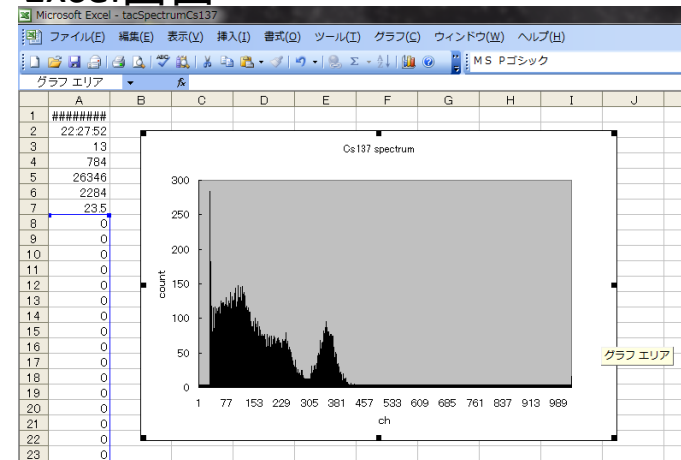
携帯型ガンマ線スペクトロメータの紹介

放射線探索の散歩

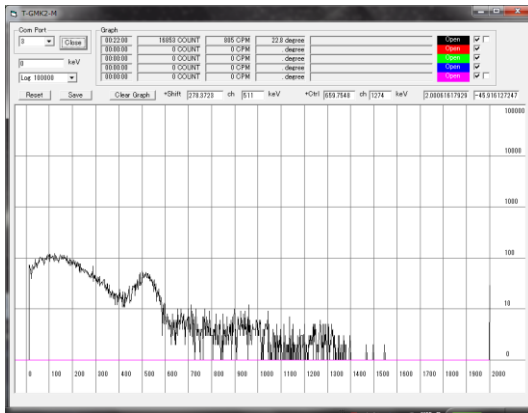


- 放射線を検出するとアラーム音やcpm値から放射線濃度高い場所を特定。
- エネルギースペクトルの取得。128x160画面にスペクトルが表示される(log/lin 切替可能)。
- SDカードに保存したデータをパソコンに取り込んでExcelで表示することも可能。

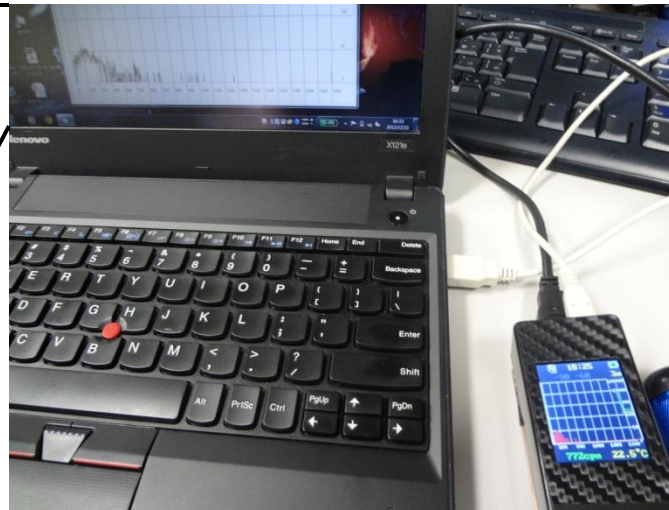
Excel画面



携帯型ガンマ線スペクトロメータの紹介



取得したデータはCSV形式で保存

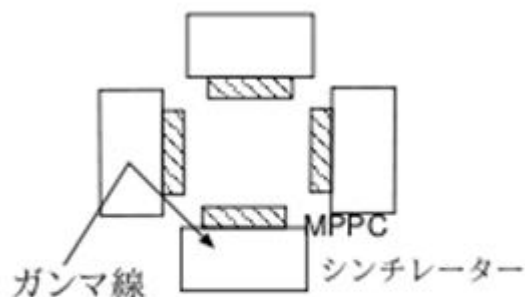


USBケーブルでPCと通信

- USBケーブルでパソコンと接続し、計測と同時にパソコン画面にスペクトル表示をすることも可能。
- Excelでの画像作成もでき放射線学習のツールとしても使いやすい。

今後の展望

- MPPCとシンチレータを利用した低コストの全方位探査型放射線モニターの開発

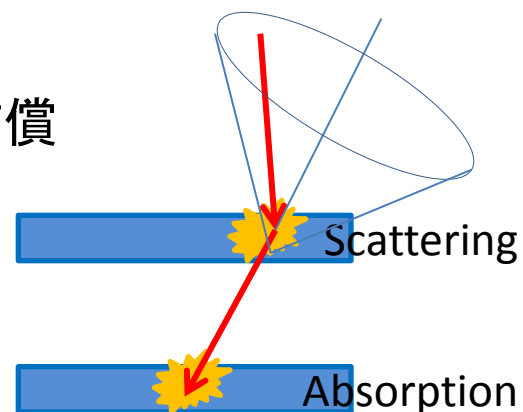


シンチレータとMPPCの
対を4～8個配置する

MPPCとシンチレータを組み合わせた
コンプトンカメラ

入射角度分解能：20~30°
だが、全方位を探査できる。
大きさは10 cm前後を目指す。

- 温度や電圧によってゲインが変動
⇒ スペクトルピークを用いて温度や電圧によるゲイン補償
- コンプトン再構成を利用してガンマ線の入射角を制限
⇒ 多散乱イベントの再構成アルゴリズムの開発



回路の設計

- APDほどのエネルギー分解能は達成できていない。
(回路が良くないかも知れないが。。。)
⇒APDは開口率が100%
- しかし、MPPCは常温で低電圧で動作できる。一般家庭などで使用するには適している。

(五十川 et al. 2003, NIM-A, 515)

