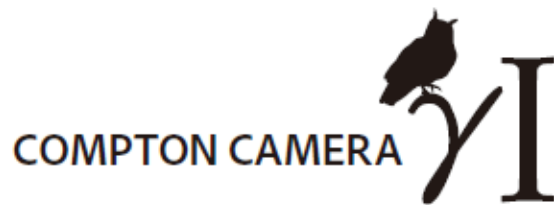


計測システム研究会2024

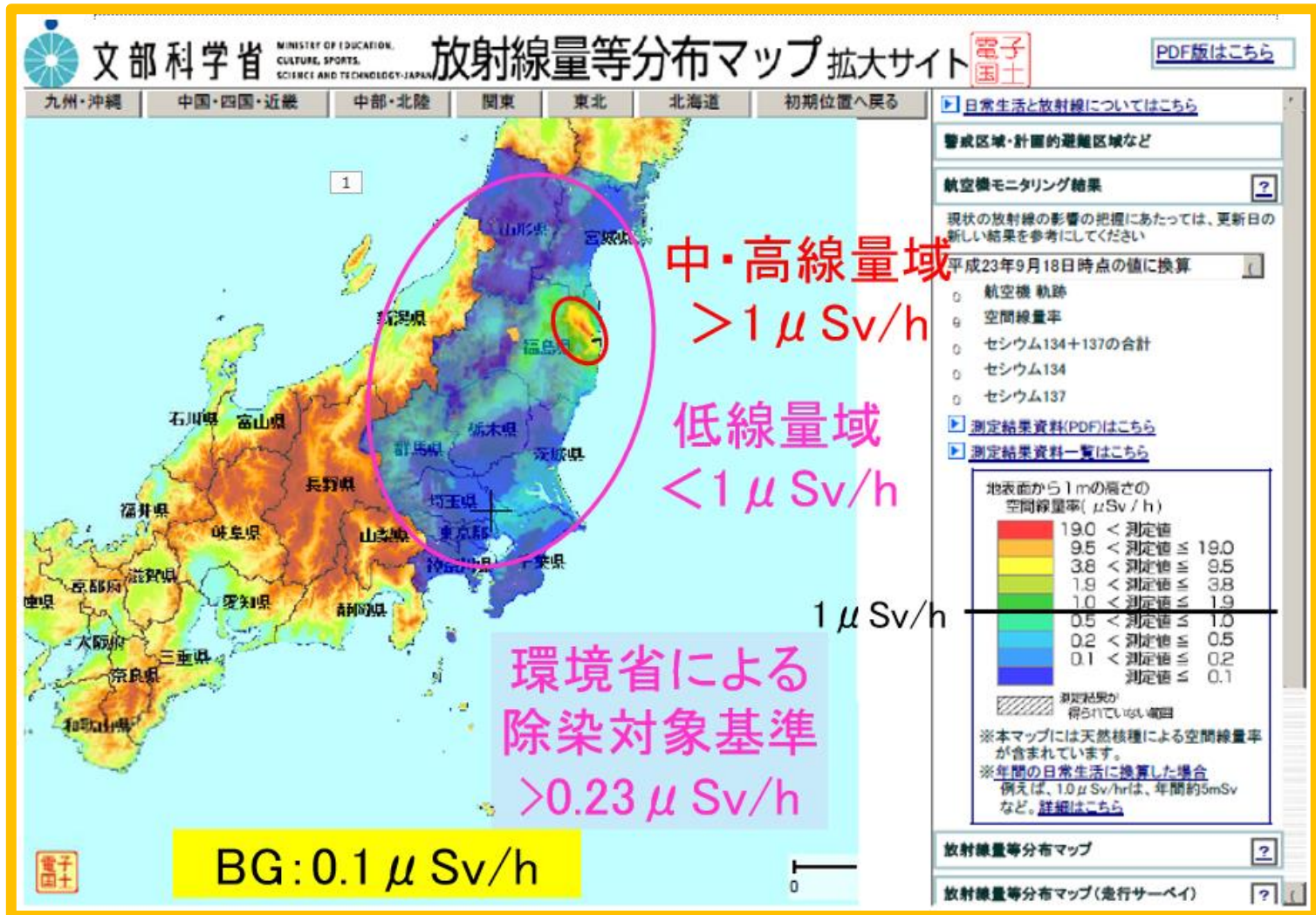
NetWavetizer-40の開発状況

○溝口 孝大¹⁾, 本多 良太郎²⁾, 庄子 正剛²⁾, 田中 真伸²⁾, 村石 浩¹⁾, 榎本 良治¹⁾,
片桐 秀明³⁾, 加賀谷 美佳⁴⁾, 渡辺 宝¹⁾, 塚本 ひかり^{1,5)}, 福本 仁也¹⁾

1)北里大学大学院 医療系研究科, 2)KEK IPNS E-Sys,
3)茨城大 理学部, 4)仙台高専, 5)東海大病院



- 福島原発事故をきっかけに発足(2012年～現在)。
主に**低線量**を対象としたガンマ線イメージング装置の開発。



- 素粒子実験や宇宙線測定の実験者が在籍。
近年は環境モニタリングや医療応用をメインに。

<https://sites.google.com/view/gammaeye-compton/>

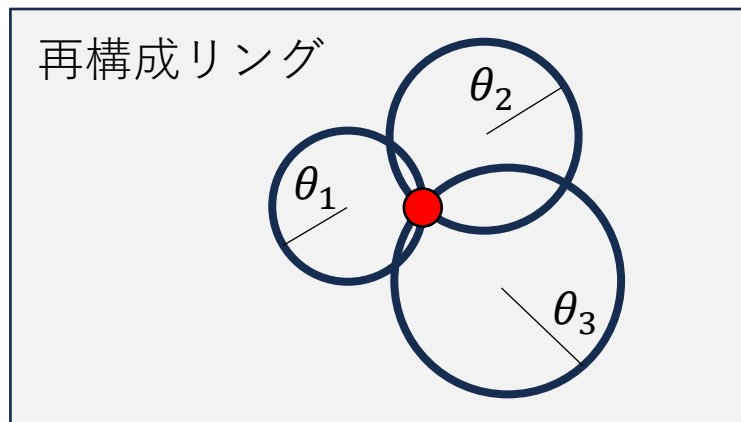
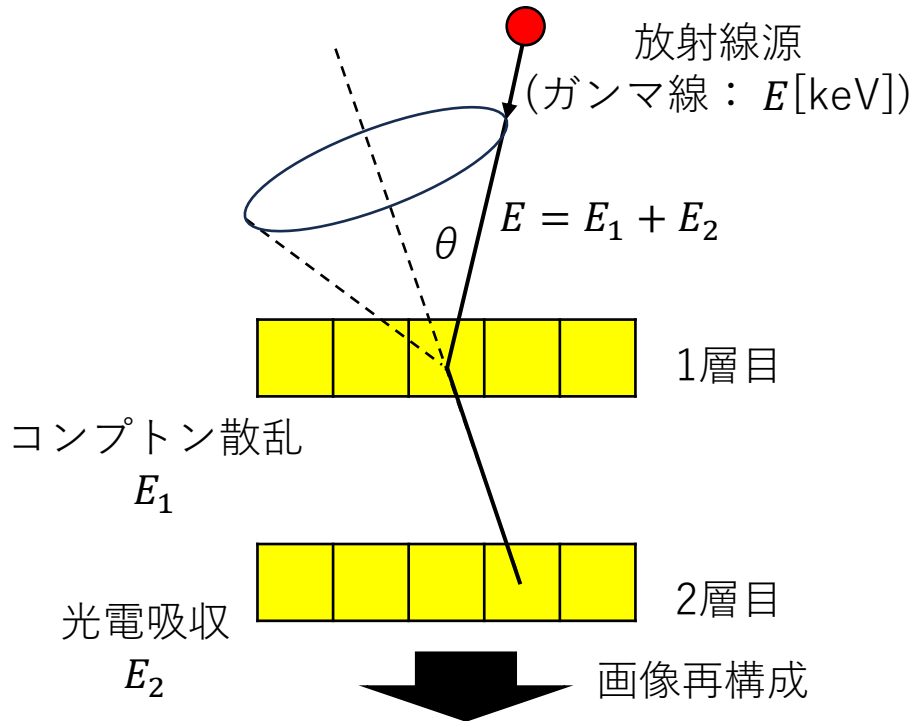
Gamma eye (γI) Group Web page

環境測定、医用応用、宇宙観測など様々な分野において利用可能な検出器の開発を行っている研究グループ
主に、結晶シンチレータを用いた高感度コンプトンカメラ（ガンマ線イメージング装置）を開発

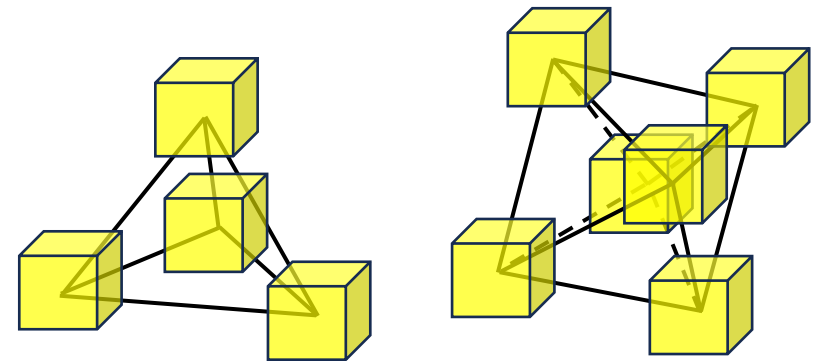
- ・北里大(榎本、村石、渡辺、院生3名)
- ・茨城大(片桐)
- ・仙台高専(加賀谷)

γ コンプトンカメラ

○高感度 & 安価。



-カウンター
結晶シンチレータ
(3.5 cm角CsI(Tl))
+
PMT



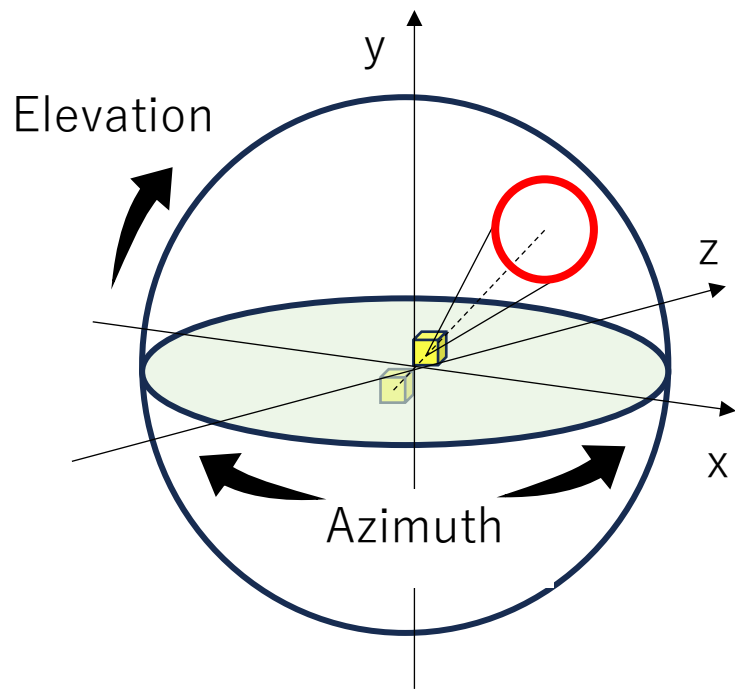
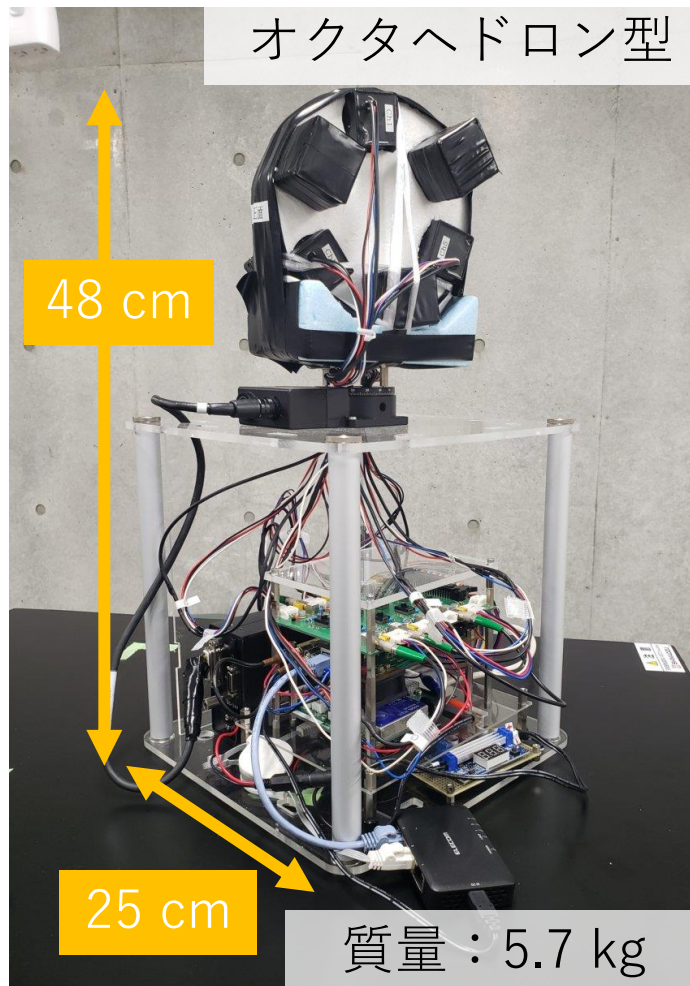
テトラ型

オクタヘドロン型

これまでにプロトタイプを
複数作成。

回転機能付き全方向コンプトンカメラ (Muraishi et al. JJAP 2020)

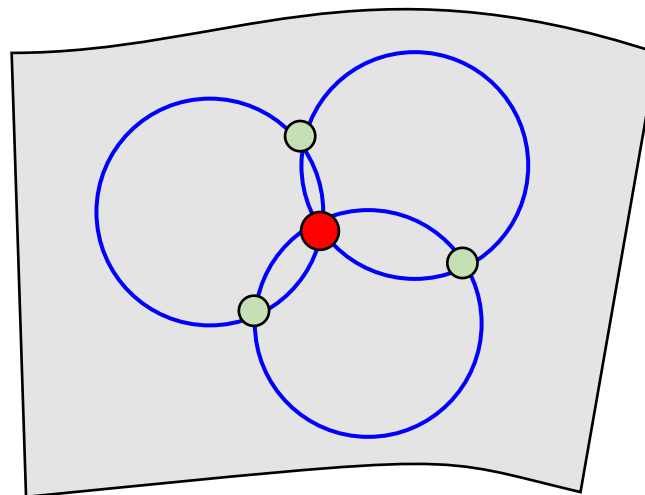
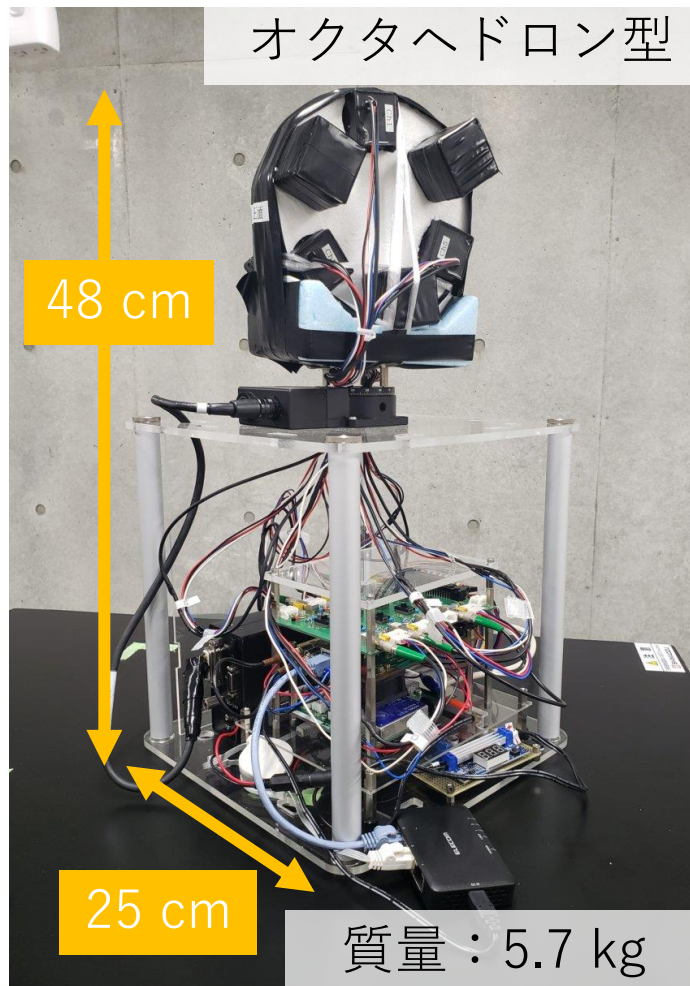
- 工夫①：結晶配置



どのカウンターも1層目、2層目とすることができる。

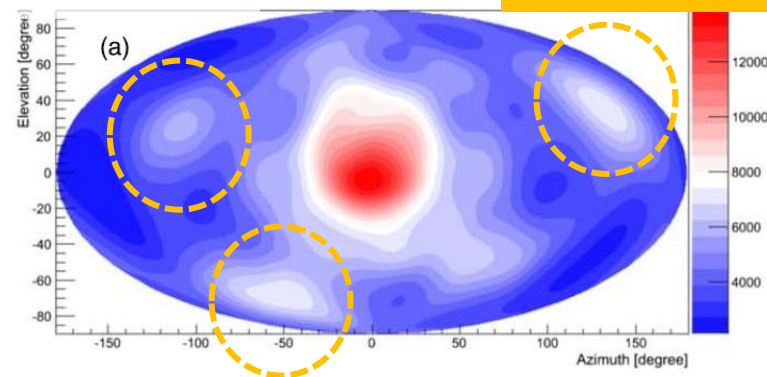
回転機能付き全方向コンプトンカメラ (Muraishi et al. JJAP 2020)

- 工夫①：結晶配置



^{22}Na (511 keV)

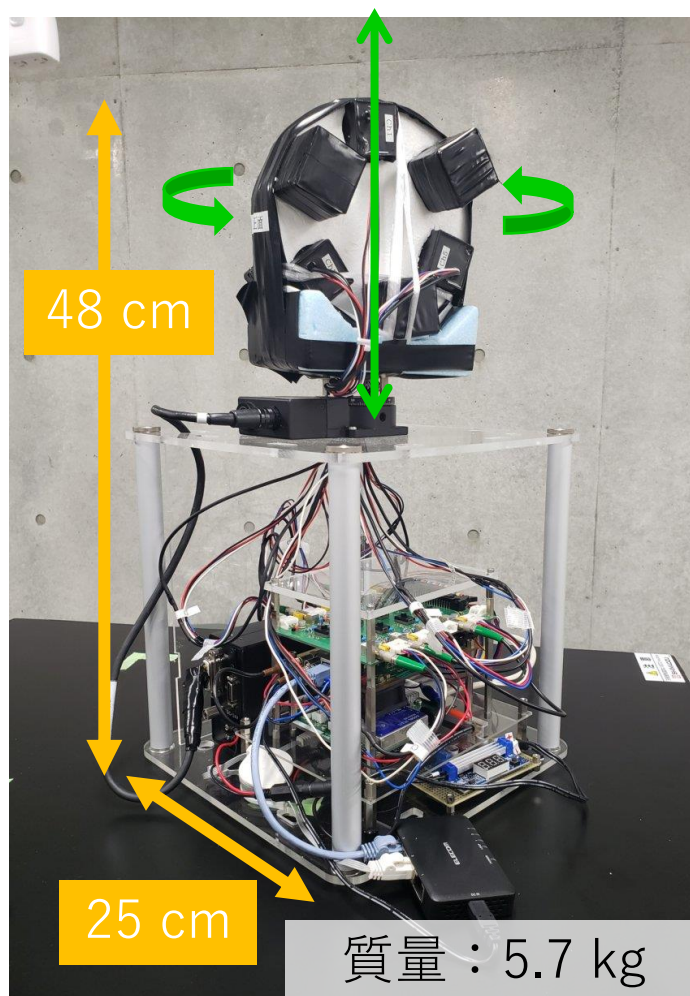
ゴースト (虚像)



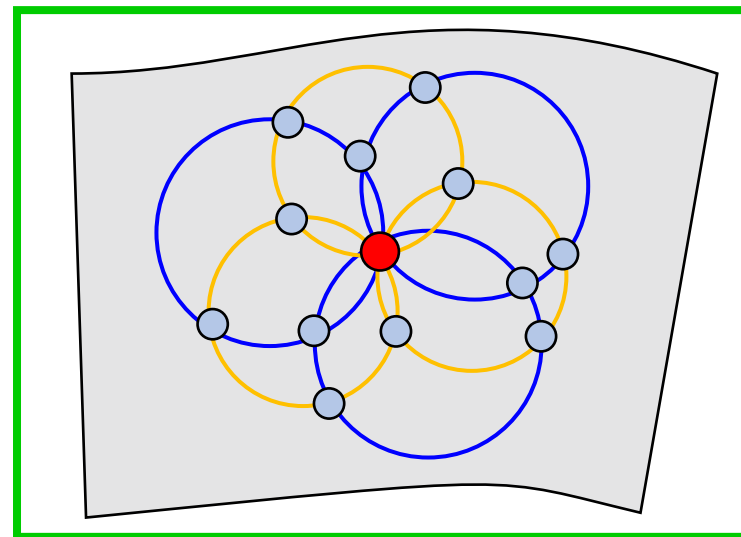
このままではゴーストが発生。

回転機能付き全方向コンプトンカメラ (Muraishi et al. JJAP 2020)

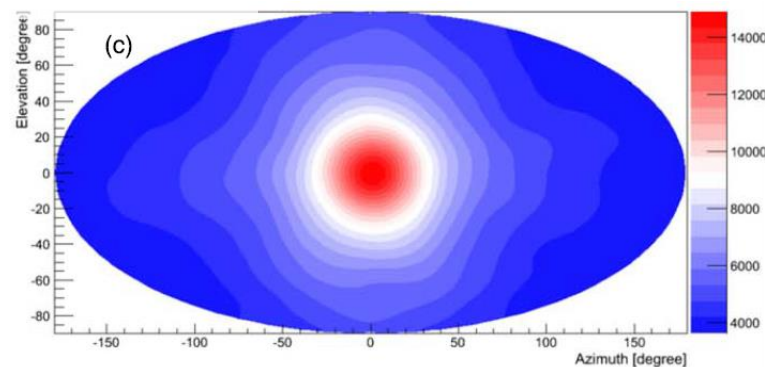
- 工夫②：回転機能



リングパターンの増加



^{22}Na (511 keV)

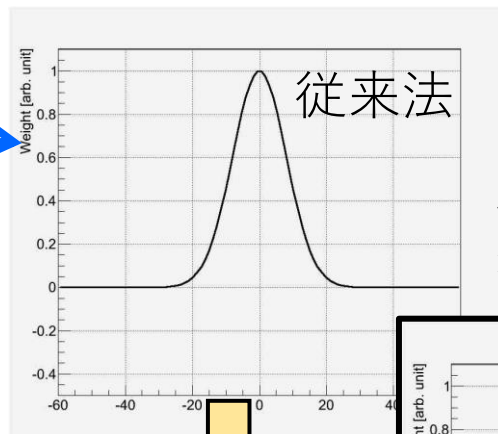
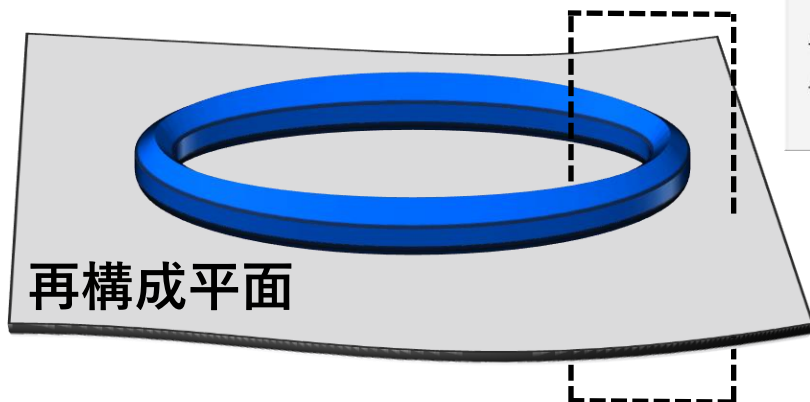


ゴーストの抑制→短時間で線源方向の同定が可能。

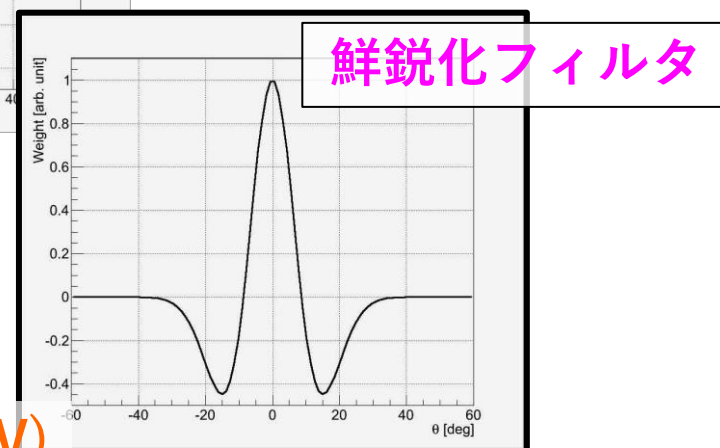
回転機能付き全方向コンプトンカメラ (Muraishi et al. JJAP 2020)

- 工夫③：画像再構成

再構成リングの断面

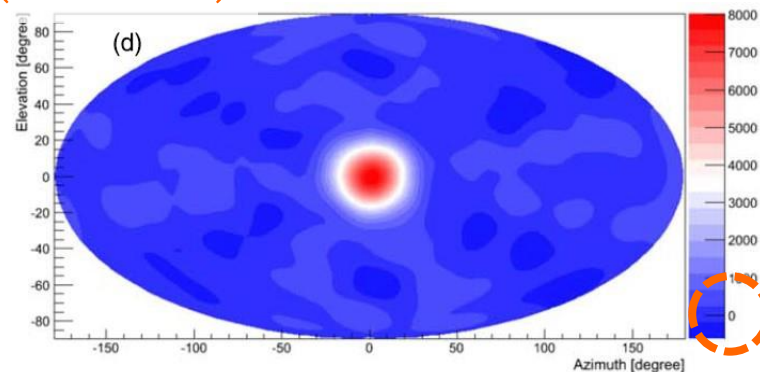


X線CTの画像再構成法を
独自に応用



^{22}Na (511 keV)

角度分解能 $\sim 11^\circ$
CNR ~ 36
感度 5.2 cps/MBq@100cm



BGをゼロレベルに抑制成功(全方向を定量的に評価可能)

γコンプトンカメラのエレクトロニクス

12 V

DC-DCコンバーター

±24 V

ステージコントローラー



- ・ 回転ステージ
OSMS-60YAW(シグマ光機)

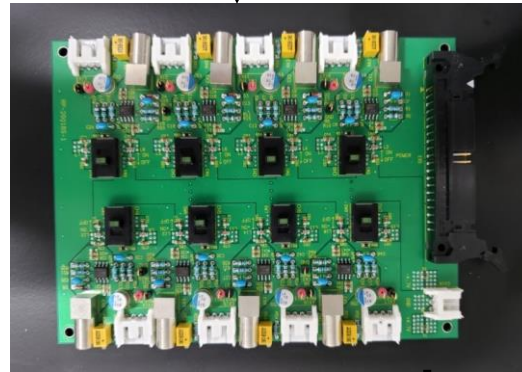


- ・ PMT H13543-100(浜ホト)

電源ボード



±4.7 V 8chプリアンプ



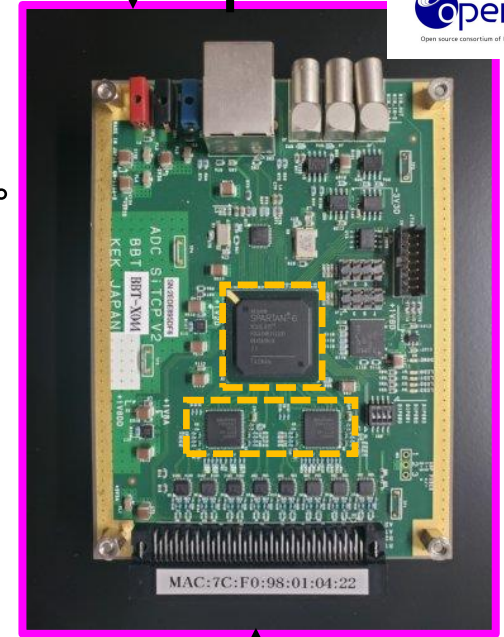
PMT+Csi(TI) × 6

PC

- Visual C++(Microsoft)
- ROOT(CERN)

±3.3 V

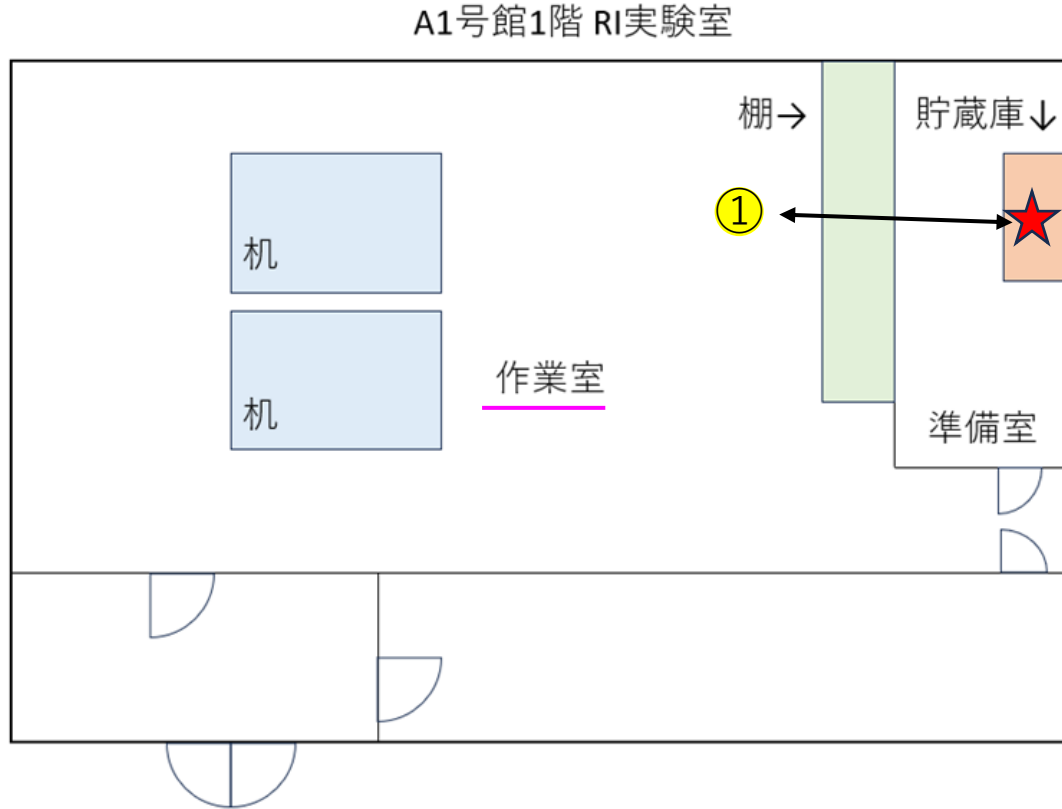
100M Ethernet



ADC-SiTCP v2

- FPGA(Spartan6)
- 12bit ADC(計16ch)₉

測定例：漏洩ガンマ線



- ① 検出器－線源間距離：250 cm
(Azimuth, Elevation)=(0° , -10°)

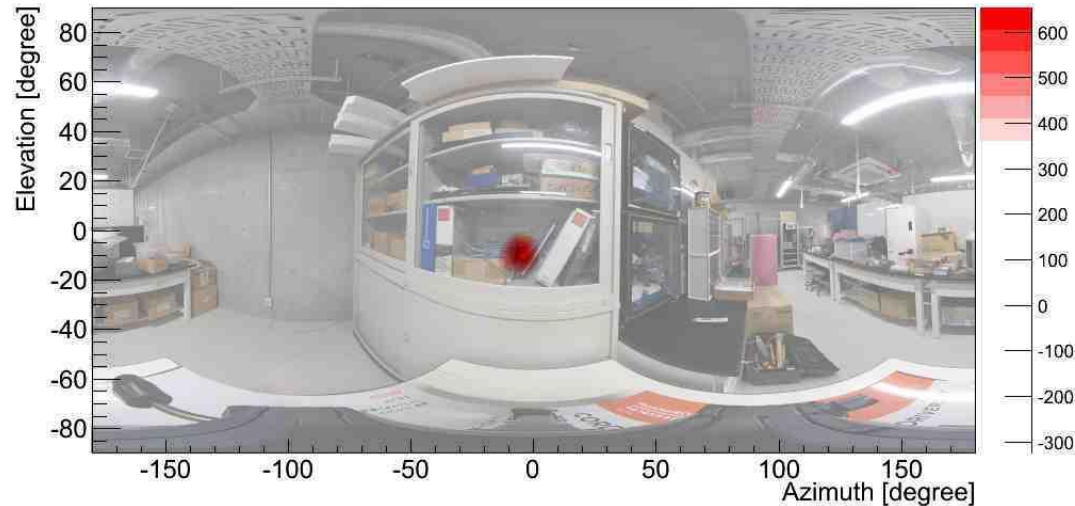
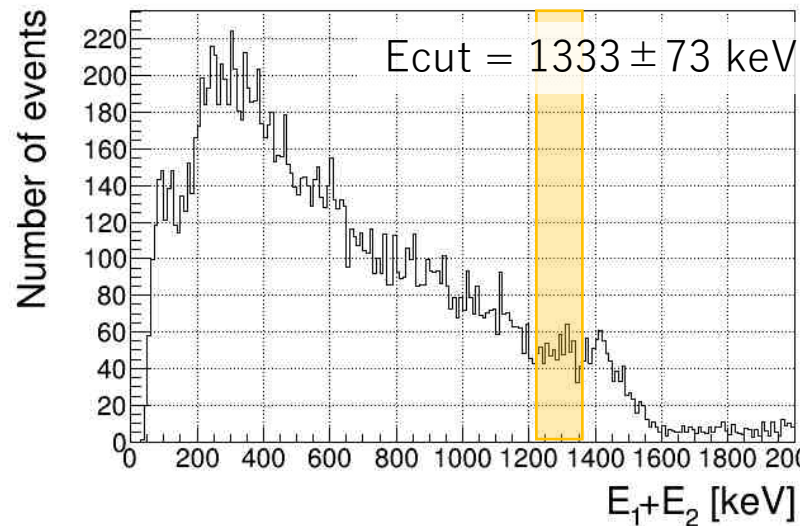
測定例：漏洩ガンマ線

2023年8月撮影

◆ 作業室

- 30 min測定
- Red $\geq 70\%$

検出器位置：0.07 $\mu\text{Sv/h}$



スペクトルからは ^{60}Co の存在は不明

※普段は貯蔵庫に追加の遮蔽を施しているため、 γ 線漏洩はありません。

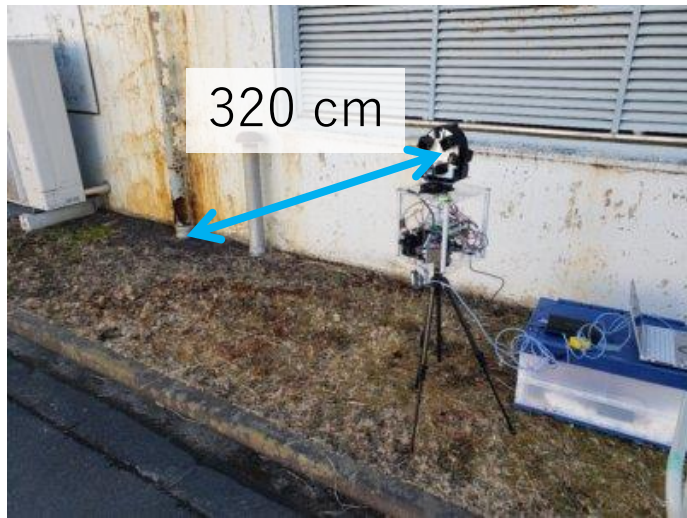
検出器位置でBGレベルでも ^{60}Co 線源の方向を特定可能。

測定例：KEK東海 ドミトリー前

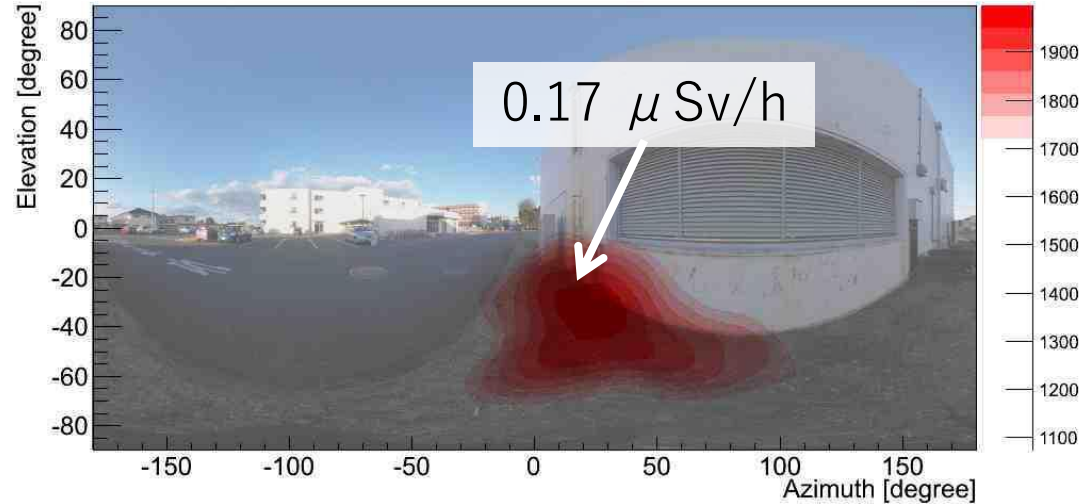
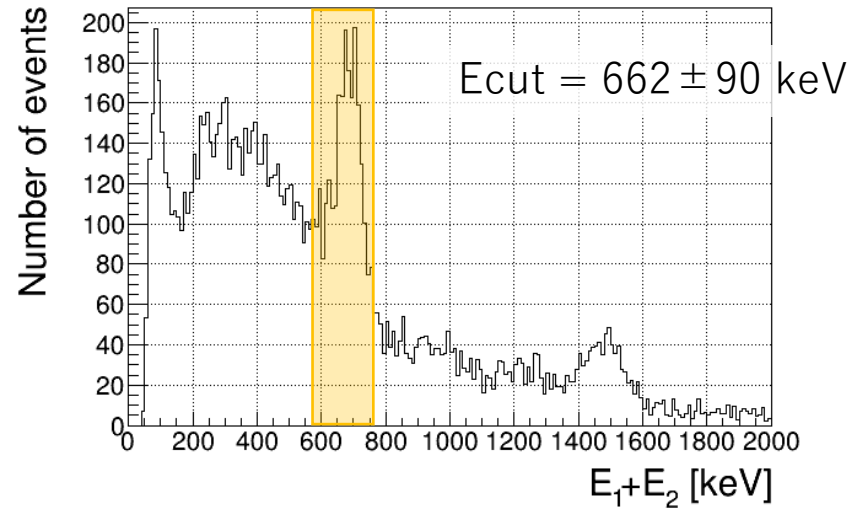
2024年2月撮影

◆ 雨樋と地面の境界

- 30 min測定
- Red $\geq 70\%$



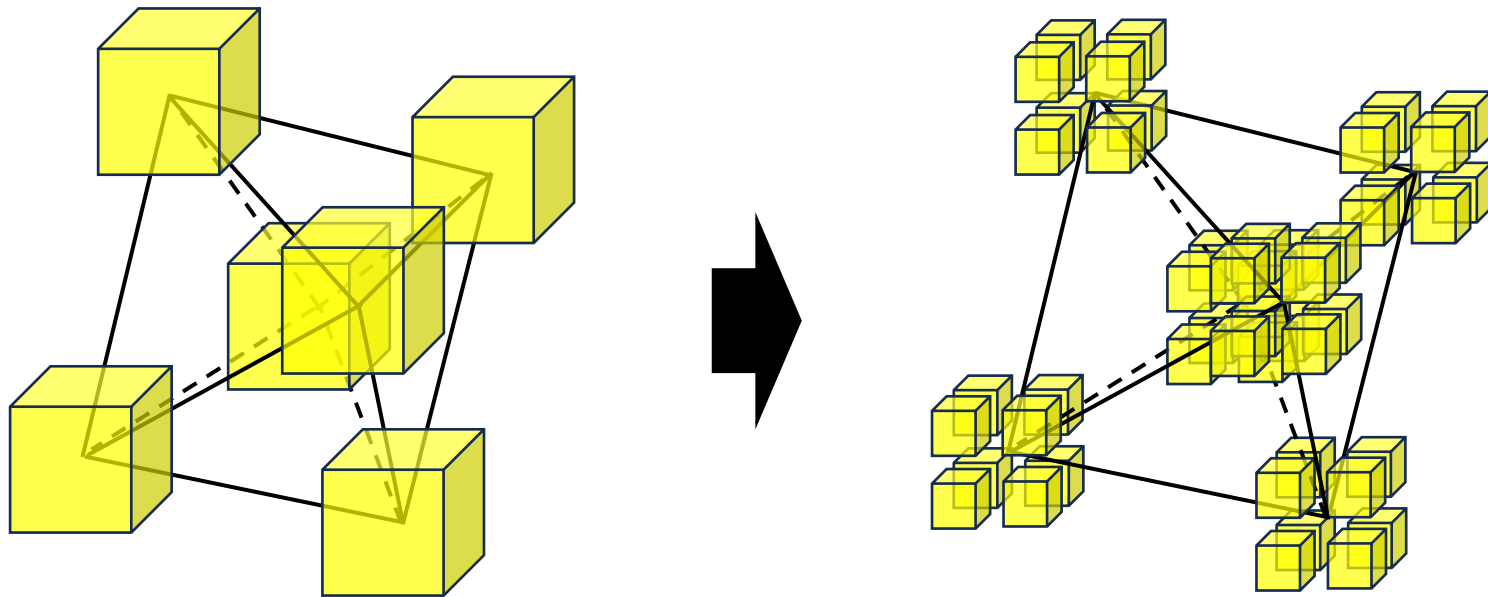
検出器位置：0.036 $\mu\text{Sv/h}$



福島原発事故に由来すると考えられる ^{137}Cs のホットスポット。
→除染対象以下の地域(<0.23 $\mu\text{Sv/h}$)での撮影も可能。

今後の応用例

○コンプトンカメラの多チャンネル化



位置検出機能の追加
→ ch数増加

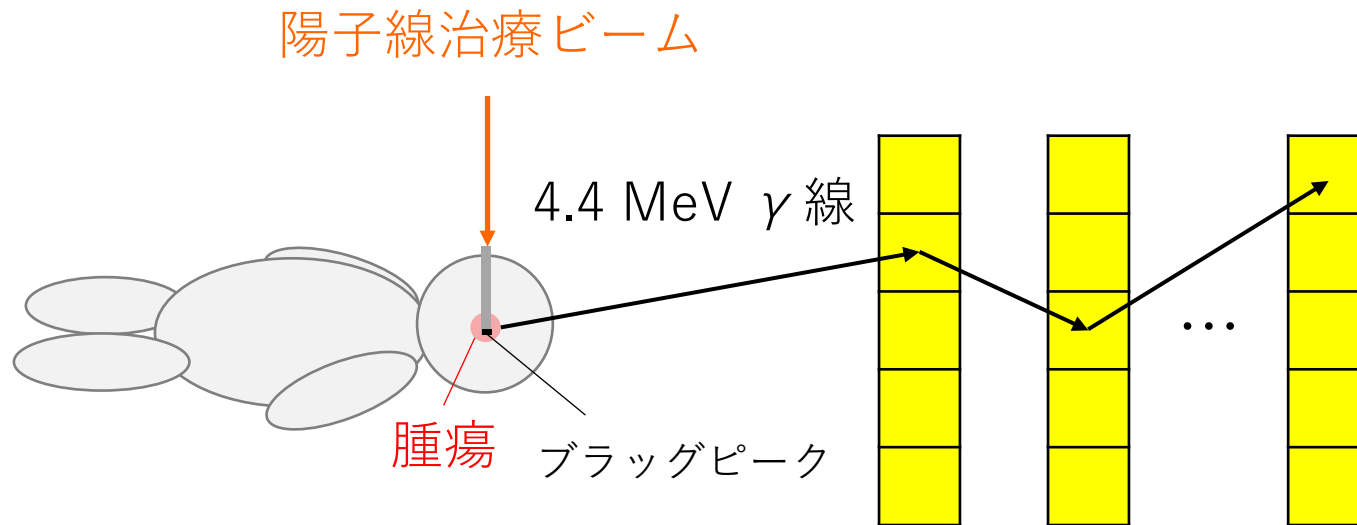
幾何学的分解能の向上。
→ 角度分解能の向上(画像の鮮鋭化)。

今後の応用例

○医療応用：陽子線治療ビームのリアルタイムモニタリング

4.4 MeV即発 γ 線によるイメージング($^{12}\text{C}(p,p)^{12}\text{C}^*$)。

→3 hitコンプトンカメラ(多重コンプトン)

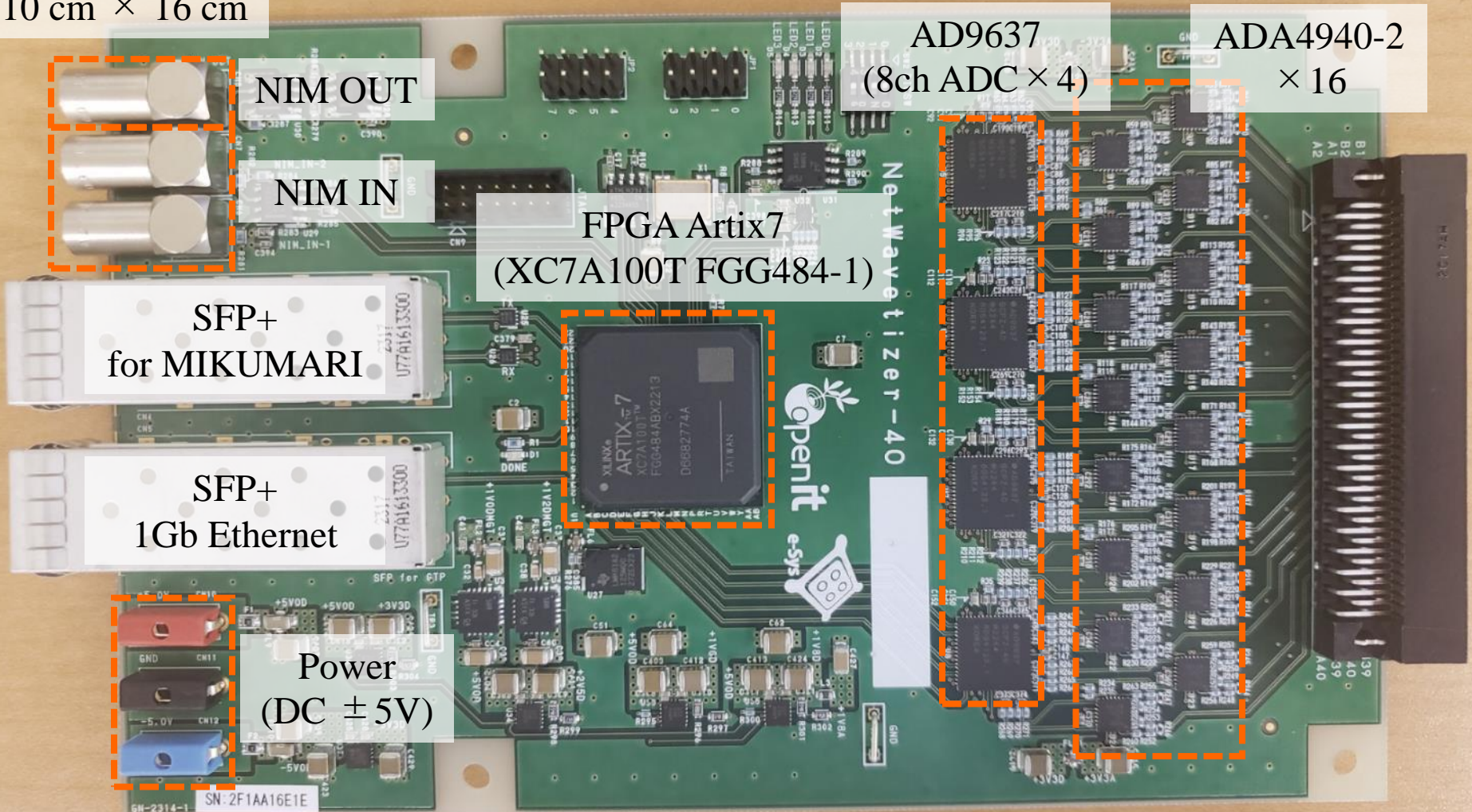


プロトタイプでは1000 ch程度まで扱えるようにしたい。

信号読み出し基板のアップデート

○NetWavetizer-40(Network Waveform Digitizer 40 MHz)

10 cm × 16 cm



ファームウェアを設計する上での課題

- ・長らくファームウェアの中身を触っていなかった。
 - －動作の詳細・改善したい点が不鮮明に…

以前のファームウェア動作の想起も兼ねて、解読からスタート。

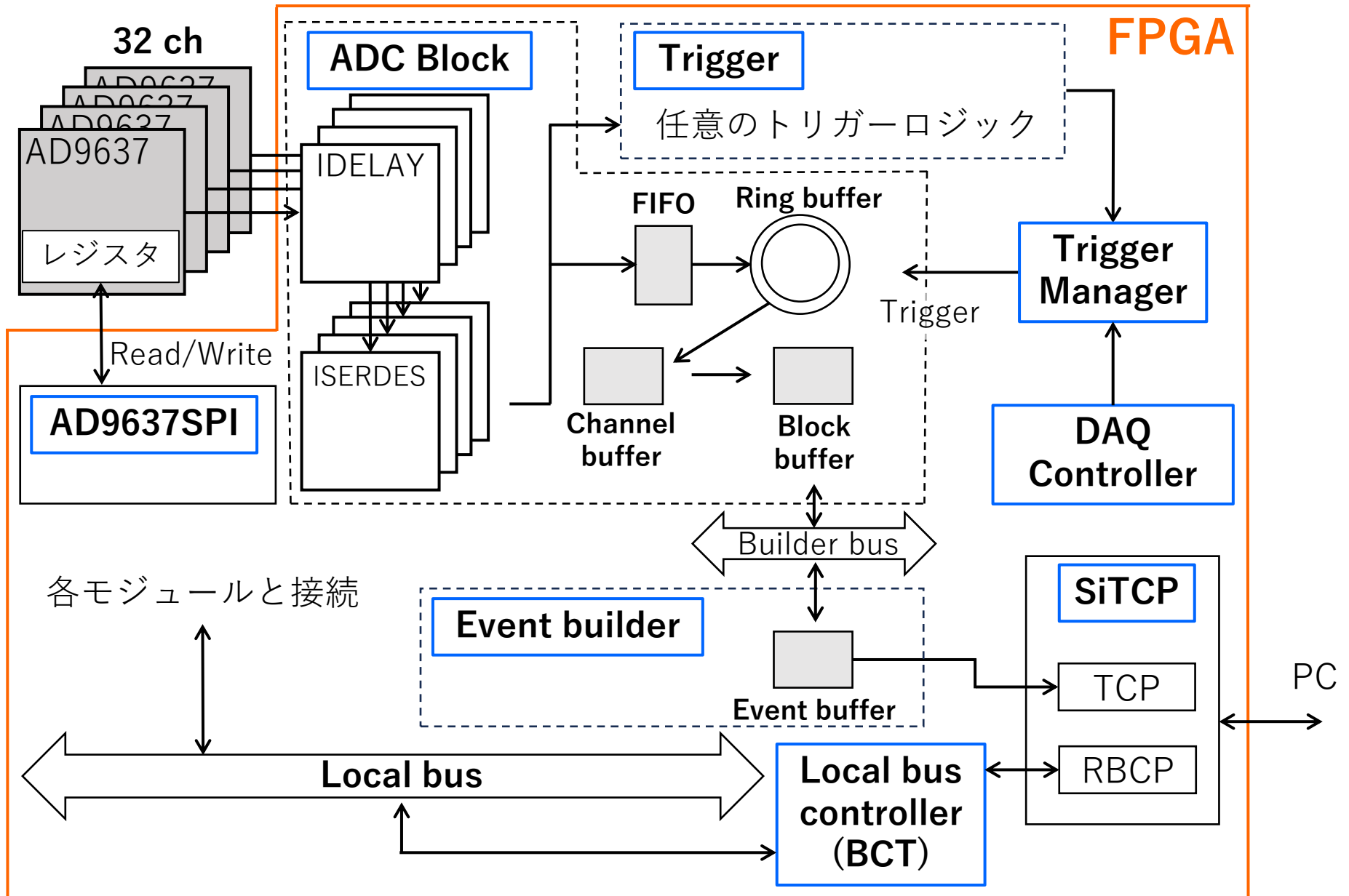
- ・結果として、いくつかマジックナンバーが見つかる。
 - －特に、レジスタは1か所にべた書き。
 - －アドレスとモジュールの関係が明確でなかった。

各モジュールにレジスタを設定。

- ・100Mb Ethernetを使用。
- ・25 MHzのシステムクロックに加えて、2.5 MHzクロックで駆動する部分が存在。
 - －可能ならより速いクロックを使いたい。

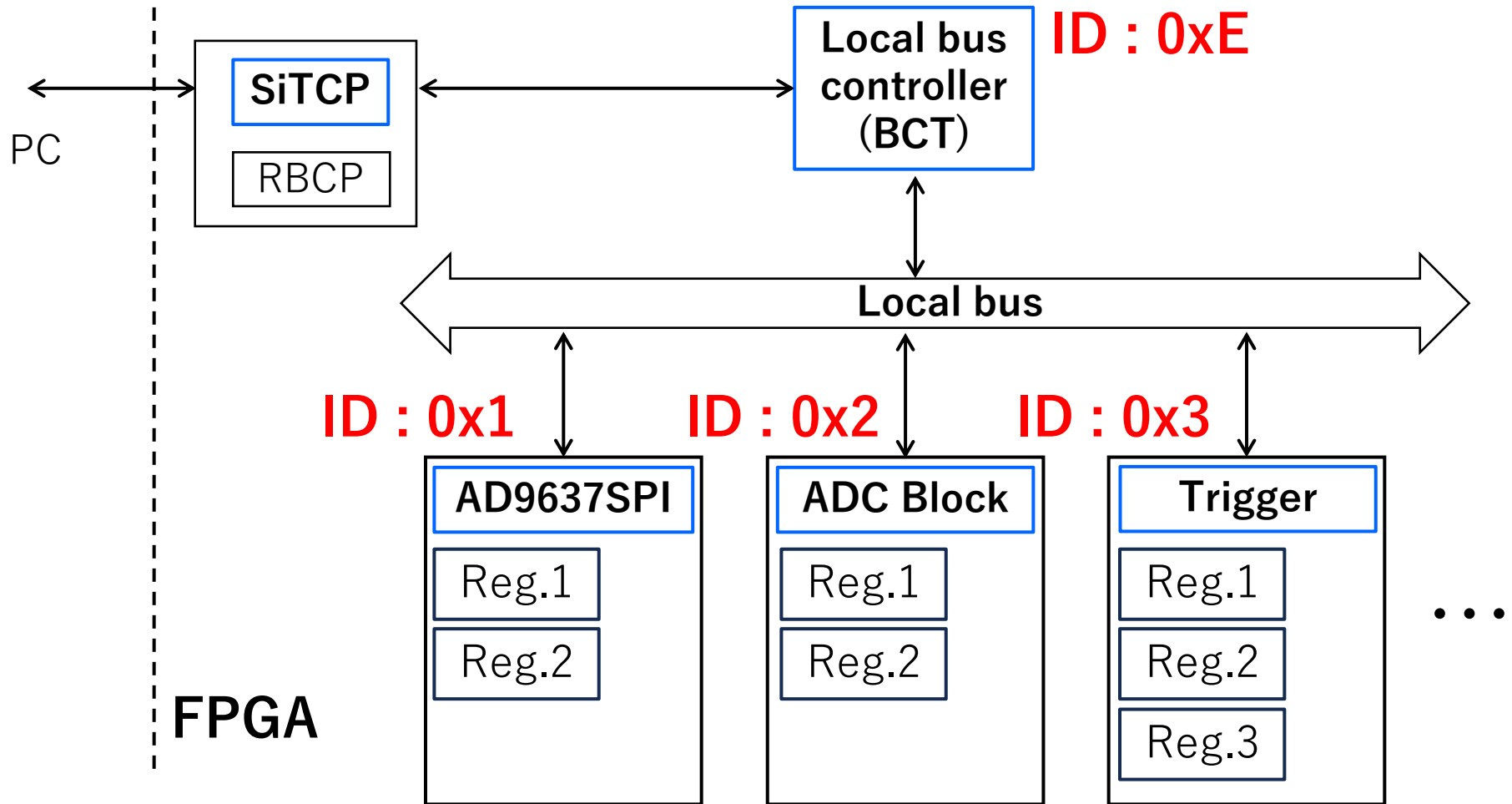
**1Gb Ethernetに更新。
2.5 MHzクロック使わない設計。**

ファームウェアの全体像



ファームウェアの改良点①

○Local Busの導入(レジスタの整理)



モジュールIDを付与
→レジスタ値の所在が明確に。

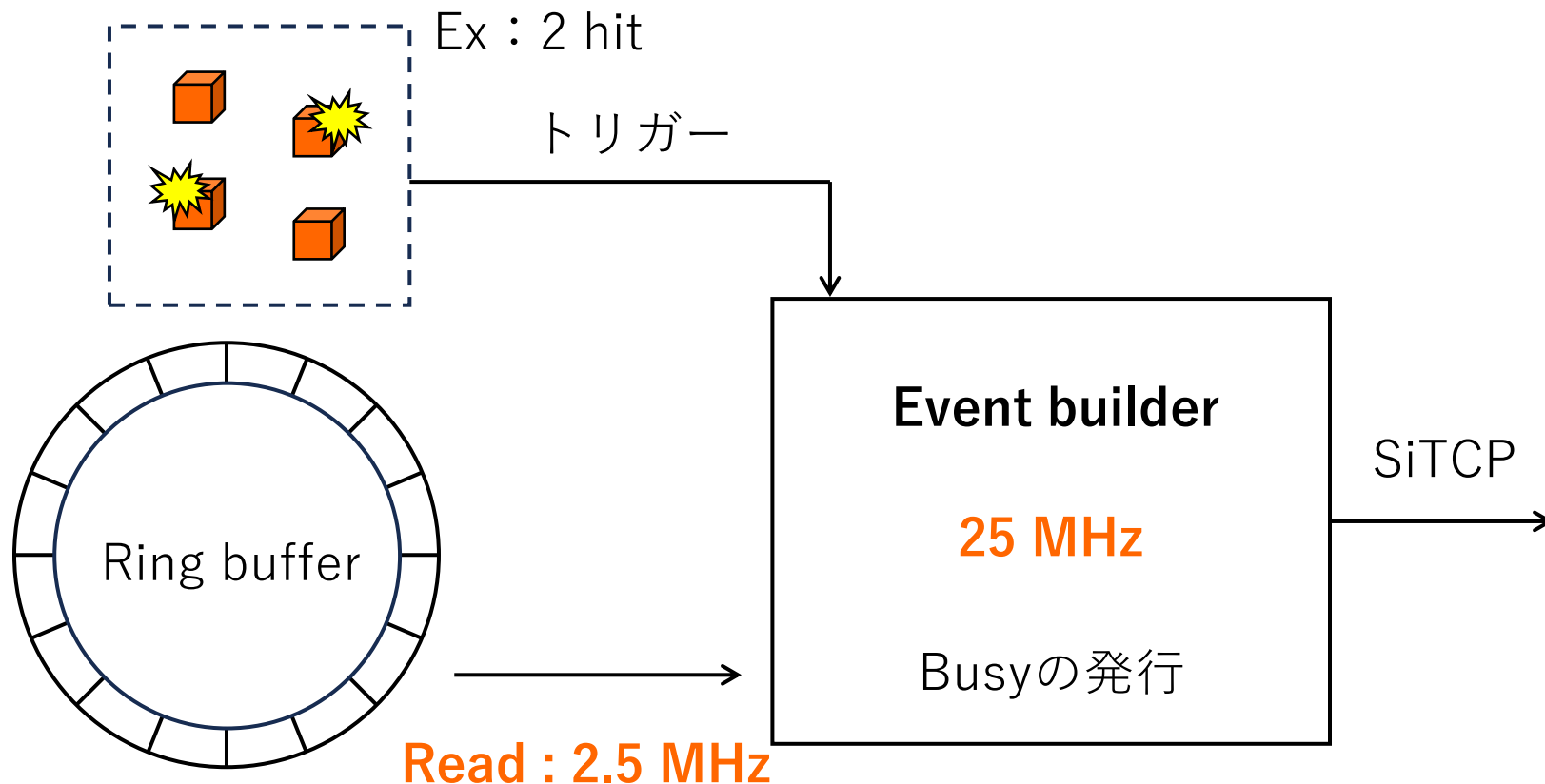
ファームウェアの改良点②

○FIFOを用いてパイプラインステージ化。

・ ADC-SiTCP v2

データ量：

16 sample/ch × 16 ch



データ読み出し、パケット生成が終わるまでBusy($\approx 28 \mu\text{s}$)

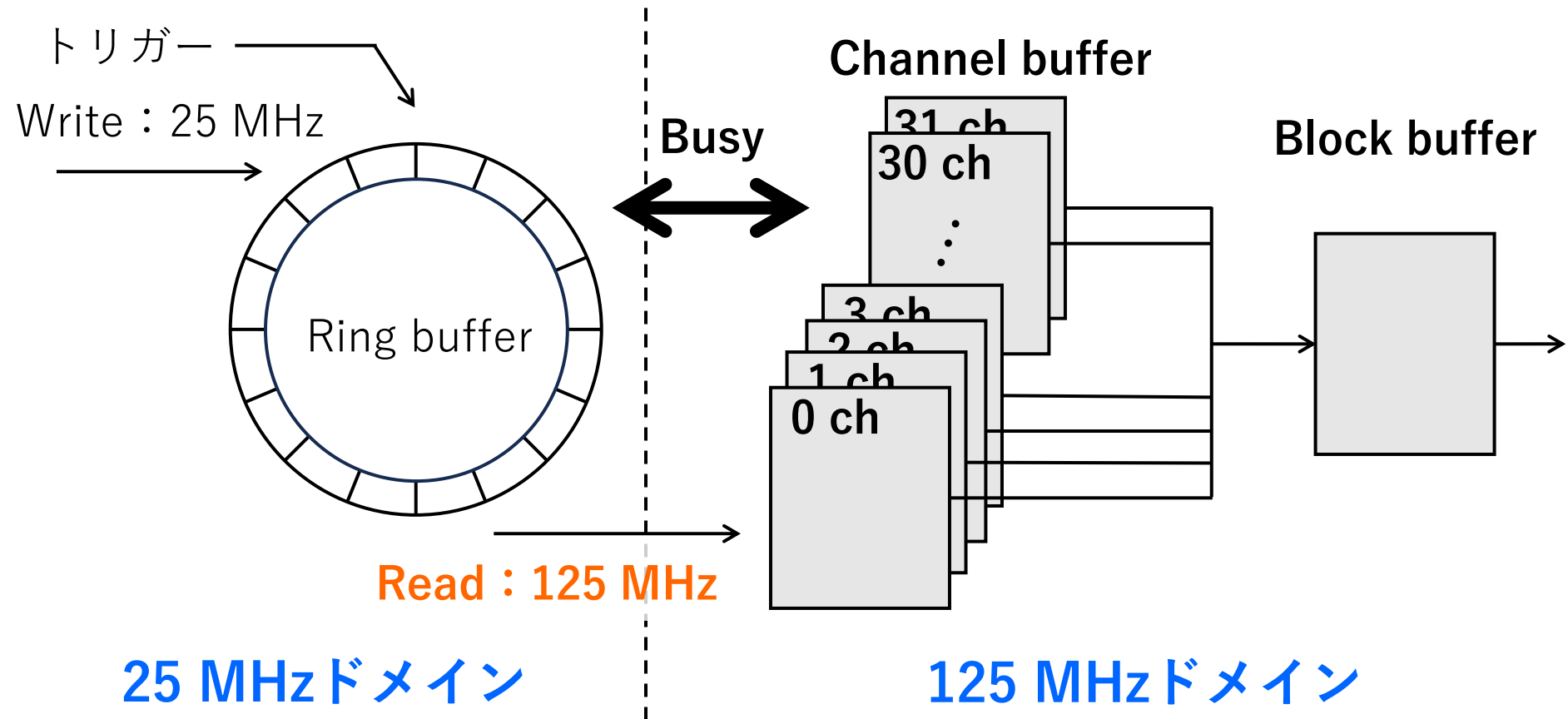
ファームウェアの改良点②

○FIFOを用いてパイプラインステージ化。

• NetWavetizer-40

データ量：

16 sample/ch × 32 ch

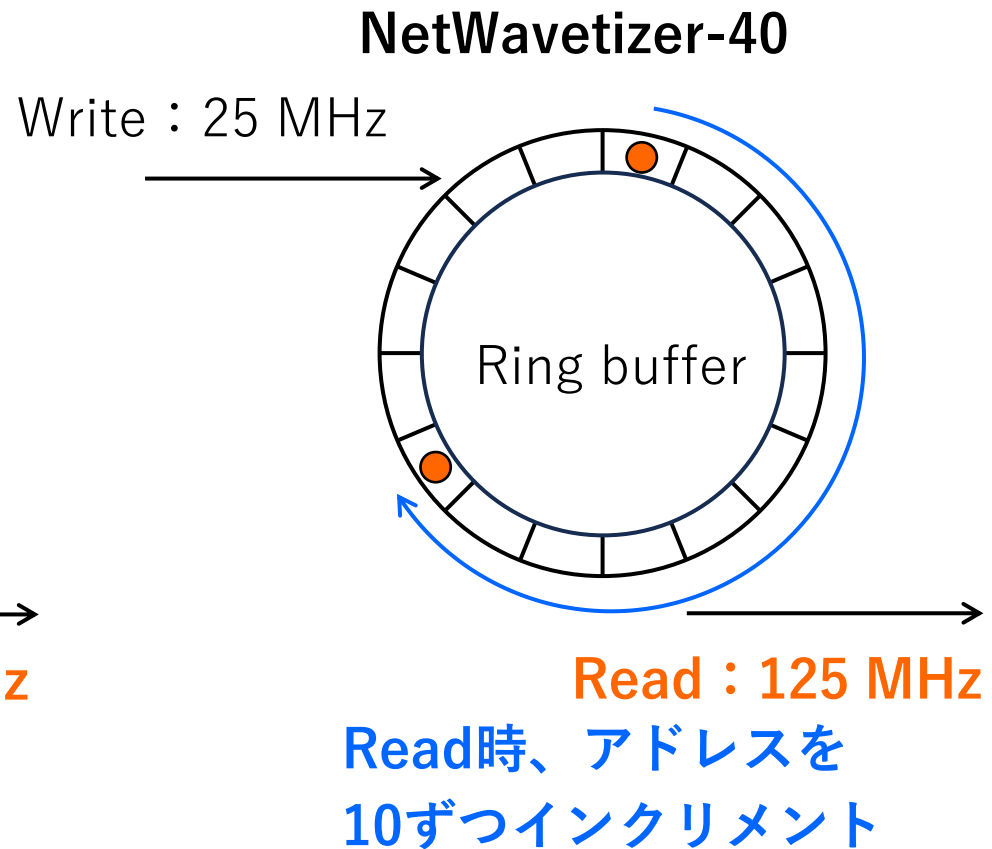
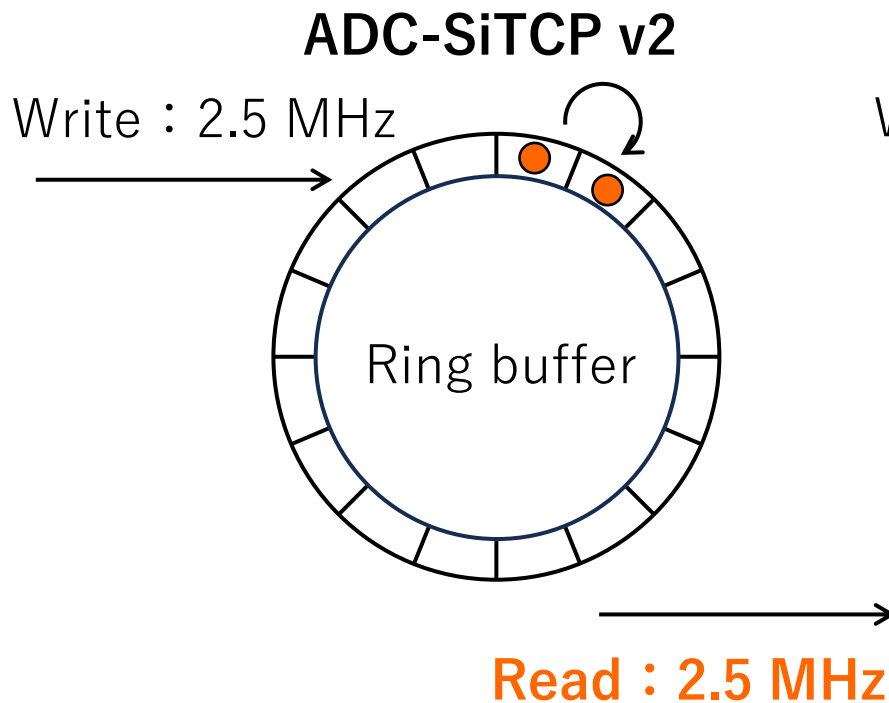


クロック乗り換えができ、125 MHzクロックが使えるように。
→ Busy=224 nsに短縮(読み出し期間のみ)。

ファームウェアの改良点③

○ADCデータを間引く方法

- ・ 25 MHzサンプルしたADCデータを、2.5 MHzクロックにて1/10に間引いた波形で解析。

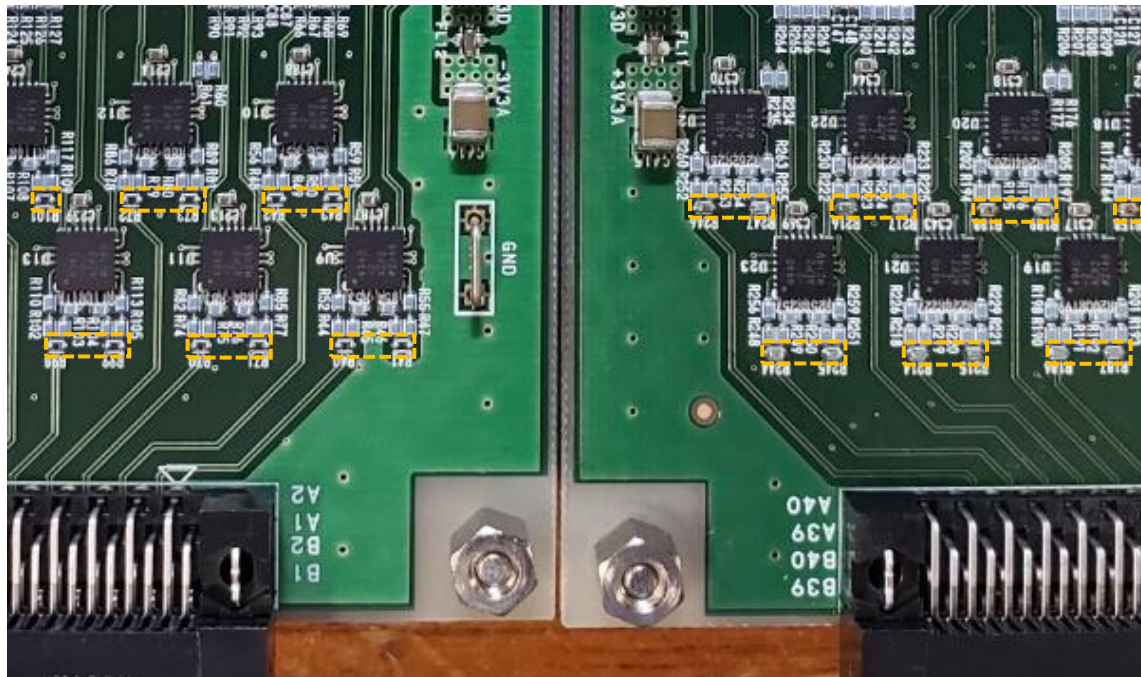


2.5 MHzクロックでドライブする領域を除去。

アナログ信号の入力部分

○納品時、差動線に終端抵抗は未設置。

γ は100 Ω (サイズ: 1005)を設置。



設置前

設置後

実験グループごとに、任意の抵抗を設置可能。

少しつまずいた点

○γIコンプトンカメラのソフトウェア設計

- ・従来通り、Windows PCでの制御を検討。
- ・ソフトウェアも整理・更新
→参考にしたコード(Linux)をWindows用に移植。



DAQを実施

- ・データロスが発生。
ソケットプログラムの記述ミス(Visual Studio 2022を使用)。
→タイムアウトが極端に短く設定され、パケットの一部を待てず。

```
//-- timeout
#ifdef Windows
    unsigned int to = 3000;
#else
    struct timeval to;
    to.tv_sec = 3;
    to.tv_usec = 0;
#endif
setsockopt(sock, SOL_SOCKET, SO_RCVTIMEO, (char*)&to, sizeof(to));
```

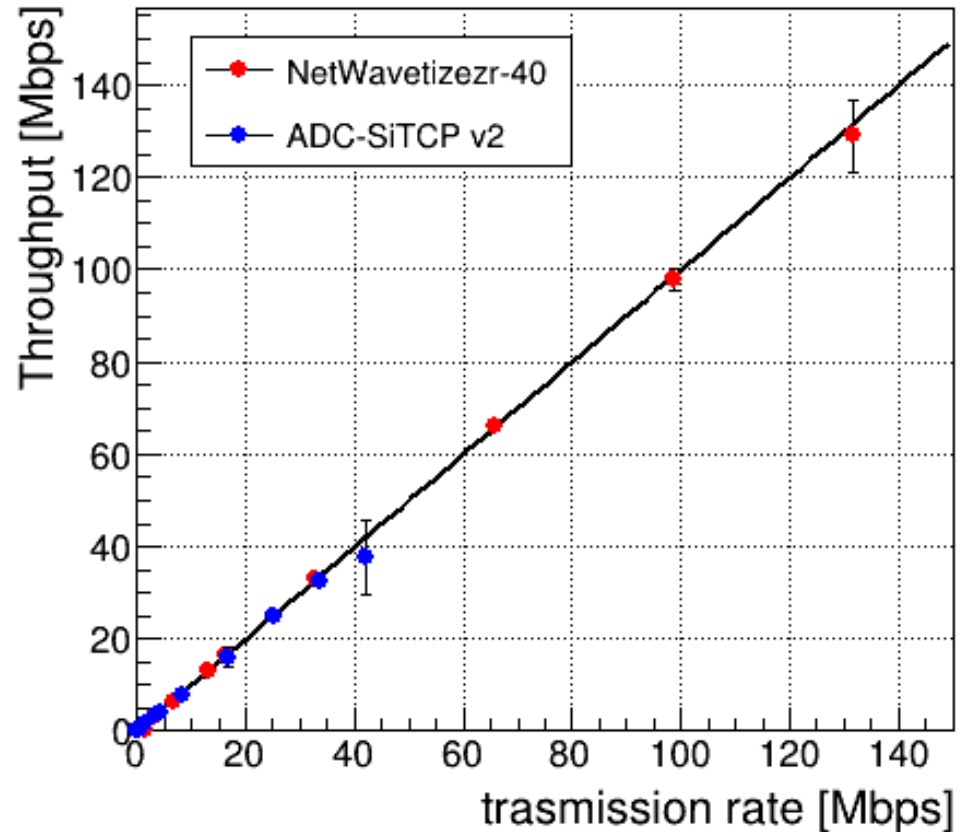
← Windowsでのデータ型 [msec]

} Linuxでのデータ型

ビルドできてしまうので、中々気づけず。

スループット (Preliminary)

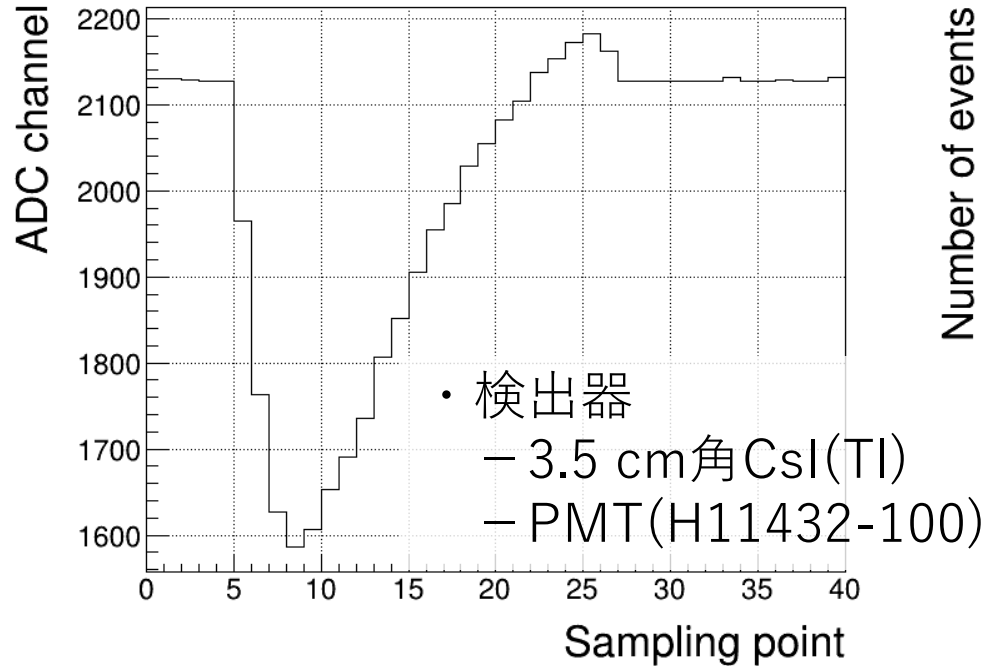
- トリガーレート：25 Hz～10 kHz
(FPGAで生成：25 MHzを分周)
- パケットサイズ [Byte]
NetWavetizer-40：2,060
ADC-SiT TCP v2：524
→ γ I (16 samples/ch) での
使用サイズ
1,000パケット転送
- transmission rate
トリガー数から算出。



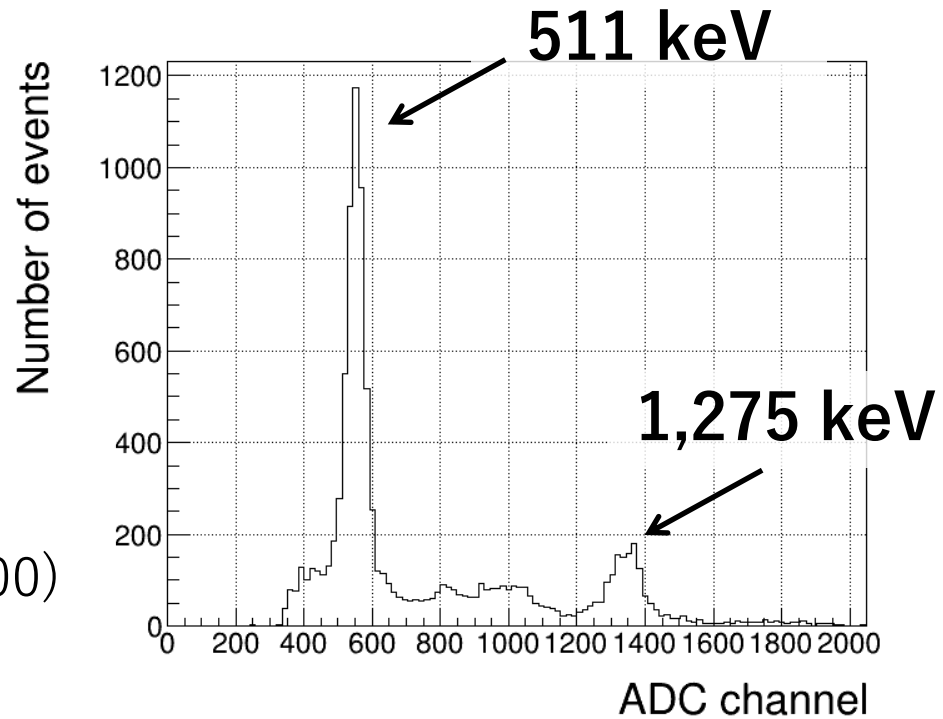
概ねリニアに動作することを確認。
従来よりも大きなデータの転送が可能。

DAQ : ^{22}Na 線源

波形



エネルギースペクトル



検出器からの信号の取得に成功。

まとめ

- NetWavetizer-40の開発状況
 - ・ファームウェアの構築は概ね完了。
 - ・スループットの改善を確認。
 - ・終端抵抗(100 Ω)の取り付け。
→実験グループごとに設置する。

- 今後
 - ・複数枚対応に拡張予定 + AMANEQ(MIKUMARI)。