

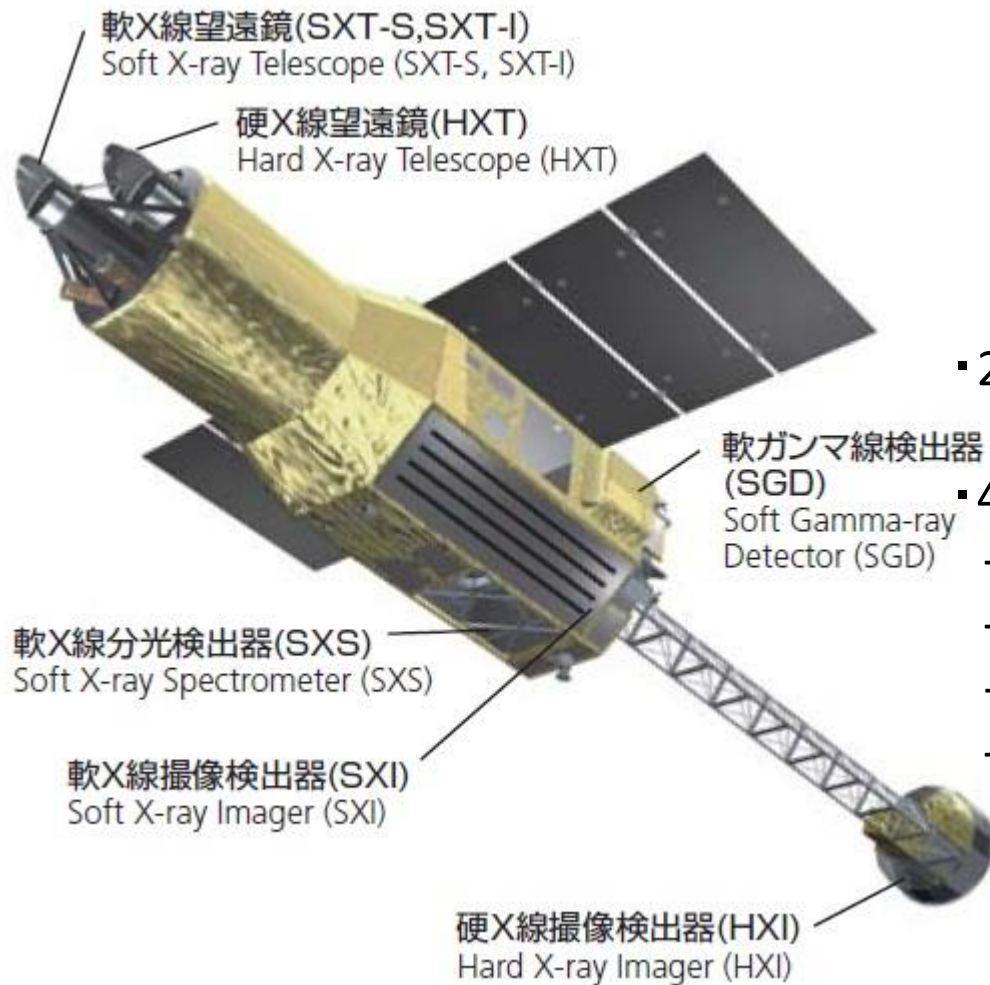
ASTRO-H搭載BGOシールド部の 信号処理ファームウェアの動作検証

2012/01/17 M1 徳田伸矢

目次

- ASTRO-H
 - HXI/SGD
 - BGOアクティブシールド
 - シールド検出器系の全体像
- APMU
 - APMUの機能説明
 - 各機能の説明
- APMU用FPGAロジックの仕様確認
 - FASTBGO出力
 - HITPAT出力
 - UD出力
 - スケーラー値の確認
 - GRB機能
- まとめ

ASTRO-H衛星



・2014年打ち上げ予定の次期X線天文衛星

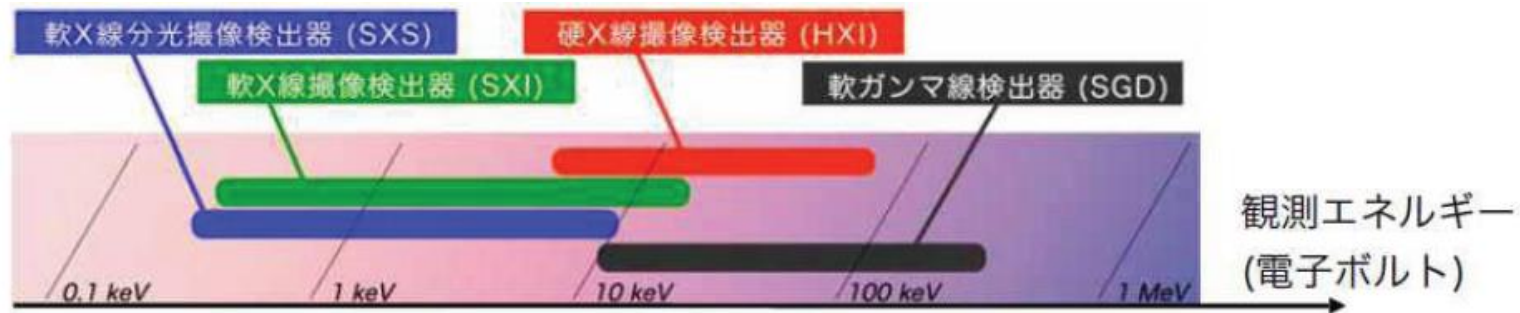
・4種類の検出器を搭載

– 軟X線分光検出器(SXS) :0.3-12keV

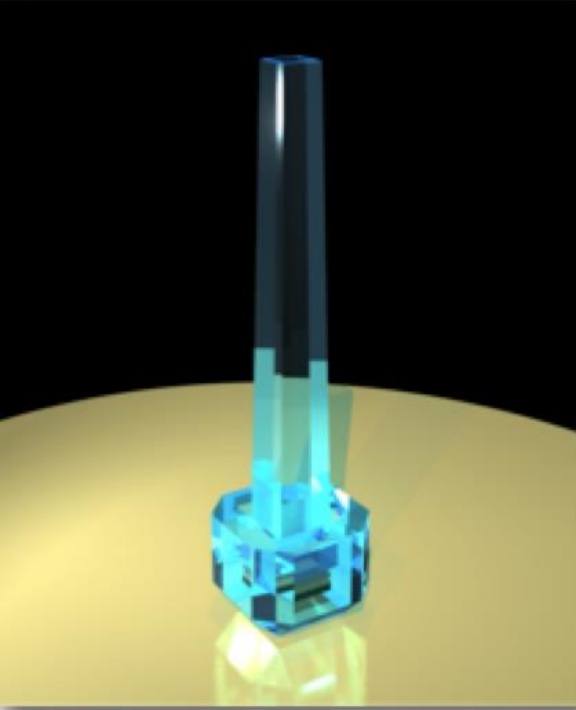
– 軟X線撮像検出器(SXI) :0.4-12keV

– **硬X線撮像検出器(HXI) :5-80keV**

– **軟ガンマ線検出器(SGD) :10-600keV**



HXI/SGD

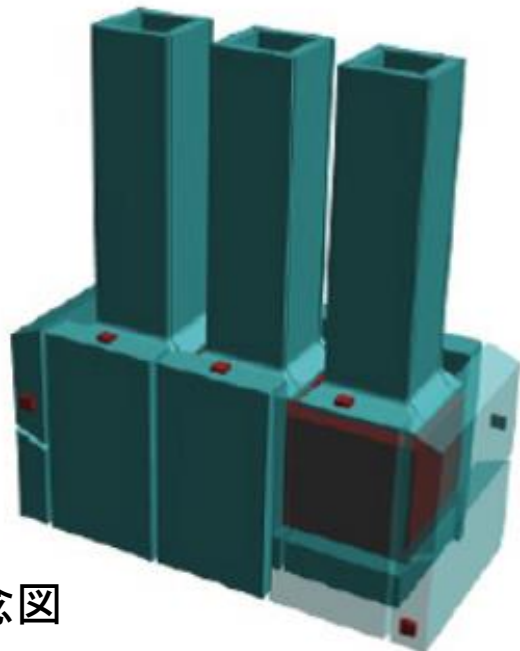


HXI概念図

- HXI
硬X線望遠鏡(HXT)と組み合わせて観測を行う硬X線撮像検出器
- SGD
10–600 keVの帯域をカバーし、望遠鏡による集光系を用いない検出器



BGOアクティブシールド+コンプトン運動学によるバックグラウンド除去



SGD概念図

BGOアクティブシールド

シールド自体を検出器とし、主検出器と組み合わせることでバックグラウンドを低減させる

BGOアクティブシールド

BGO

無機シンチレータの一種、化学的に扱いやすい

有効原子番号や比重が他の無機シンチレータより大きい(原子番号83)

→**阻止能が高い**

低温で発光量が増加する

アクティブシールド

視野外からの γ 線を遮蔽するシールドを検出器化

天体からのガンマ線

宇宙線&ガンマ線

主検出部

BGOアクティブシールド

アバランシェフォトダイオード: APD

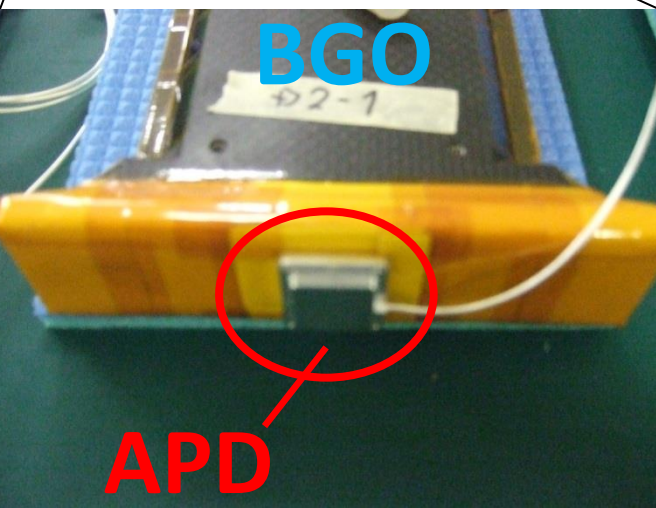
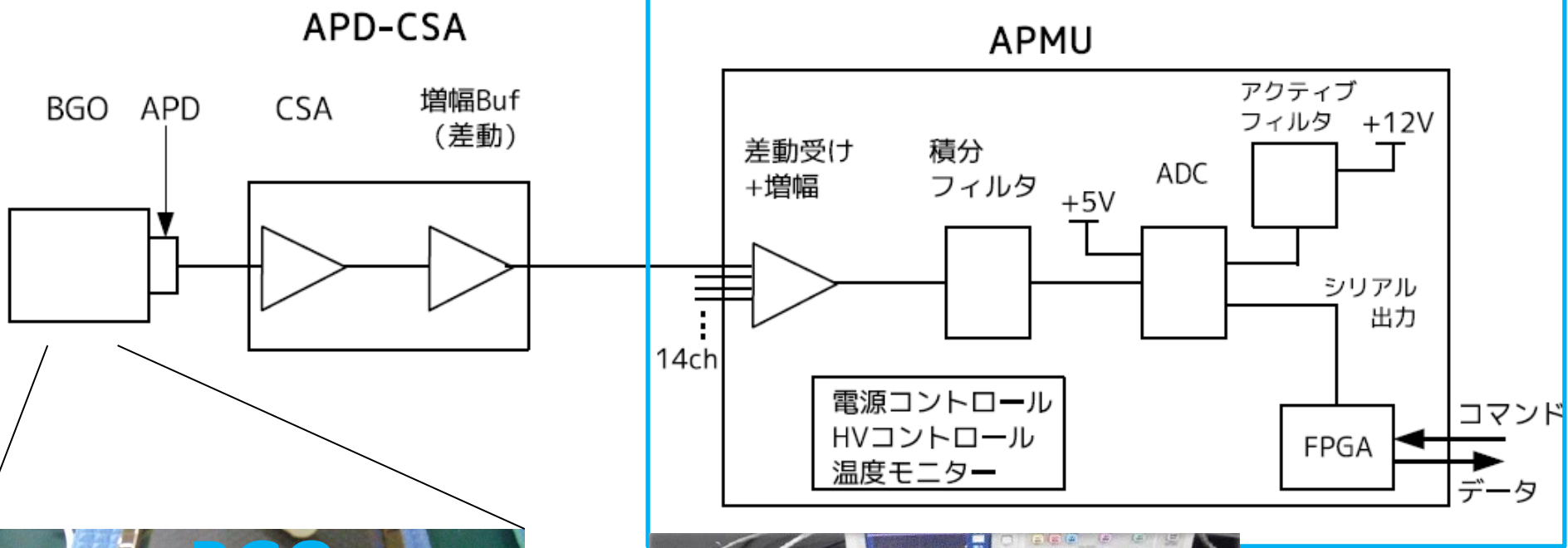
アバランシェ増倍と呼ばれる現象を利用して受光感度を上昇させた
フォトダイオード



図: アクティブシールドの模式図

シールド検出器系の全体像

HXI/SGDのBGOアクティブシールドで用いられる信号処理システム



APMU1台につき
13 ch読み出すこと
ができる

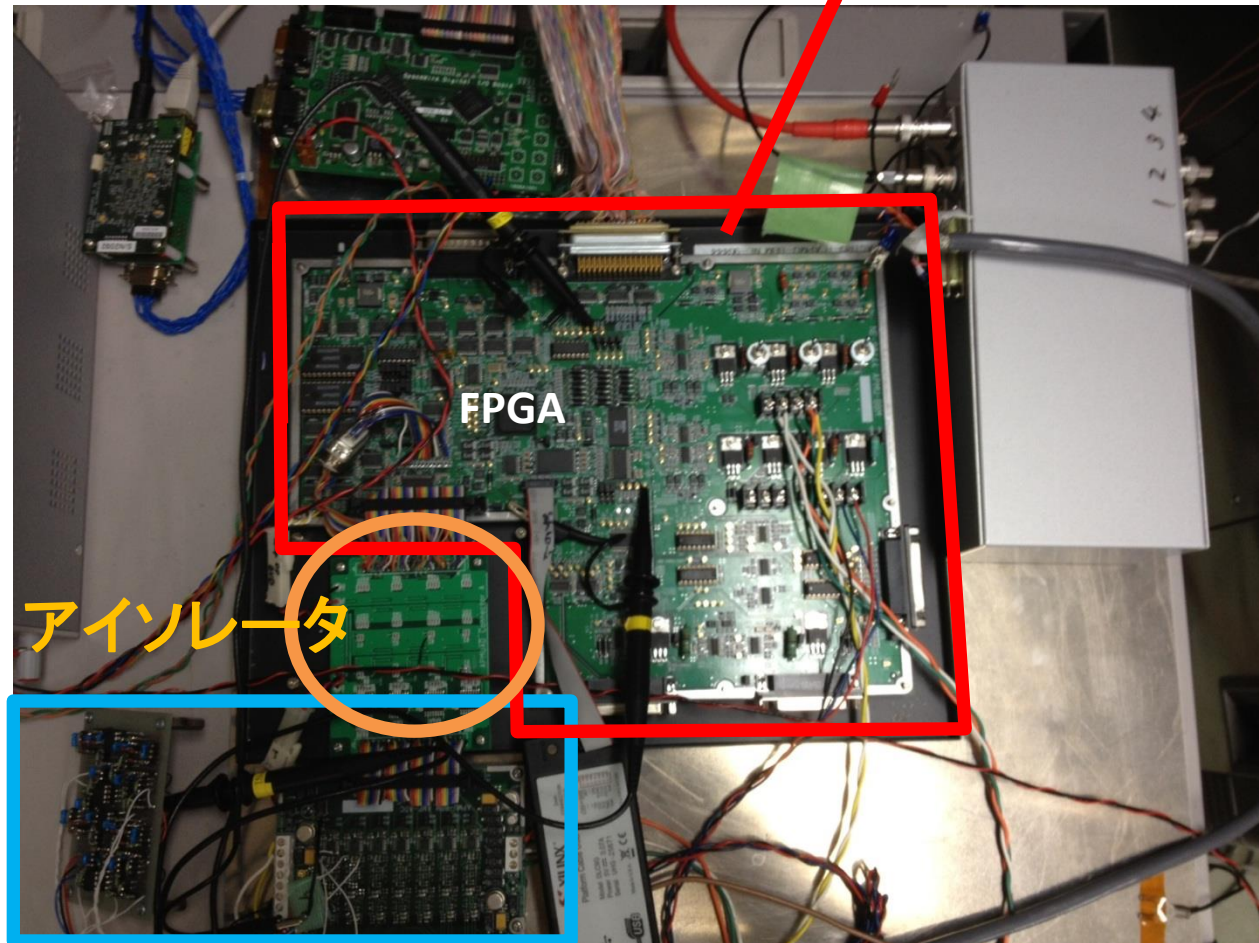
APMU

APMU・・・APD用信号処理回路(APD Processing Module Unit)
= BGOアクティブシールドを機能させるための基板

<主な役割>

- ・検出器の制御
 - －HVコントロール
 - －カレントリミット
 - －温度モニター
 - ・信号処理
 - －アナログ・デジタル変換
 - －信号の増幅、積分処理
 - －デジタルフィルタ処理
 - －ヒストグラム作成
- etc...

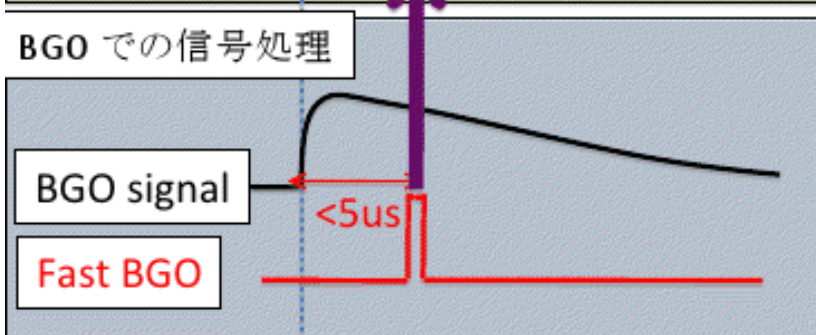
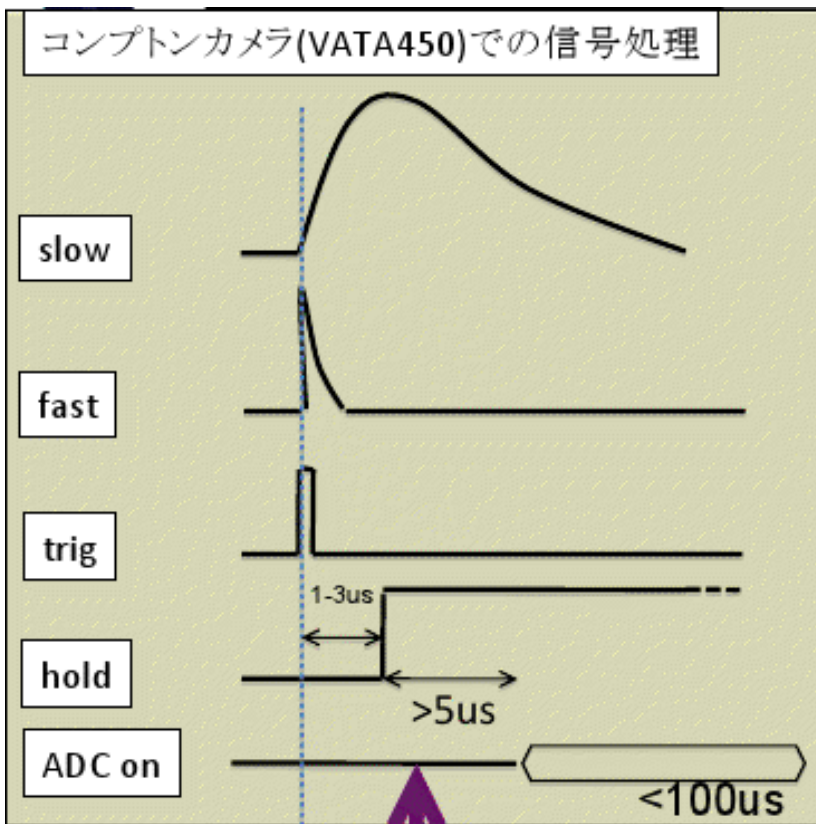
APMU デジタル部



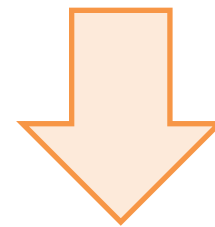
APMU アナログ部

写真: APMU-BBM

要求されるトリガーロジック



- コンプトンカメラではAD変換終了まで最大100 μ sほど時間がかかってしまう
- シールド検出部で同時に検出したイベント(= 視野外からのバックグラウンドイベント)はAD変換を禁止しなければ観測時間を大幅に失うことになる



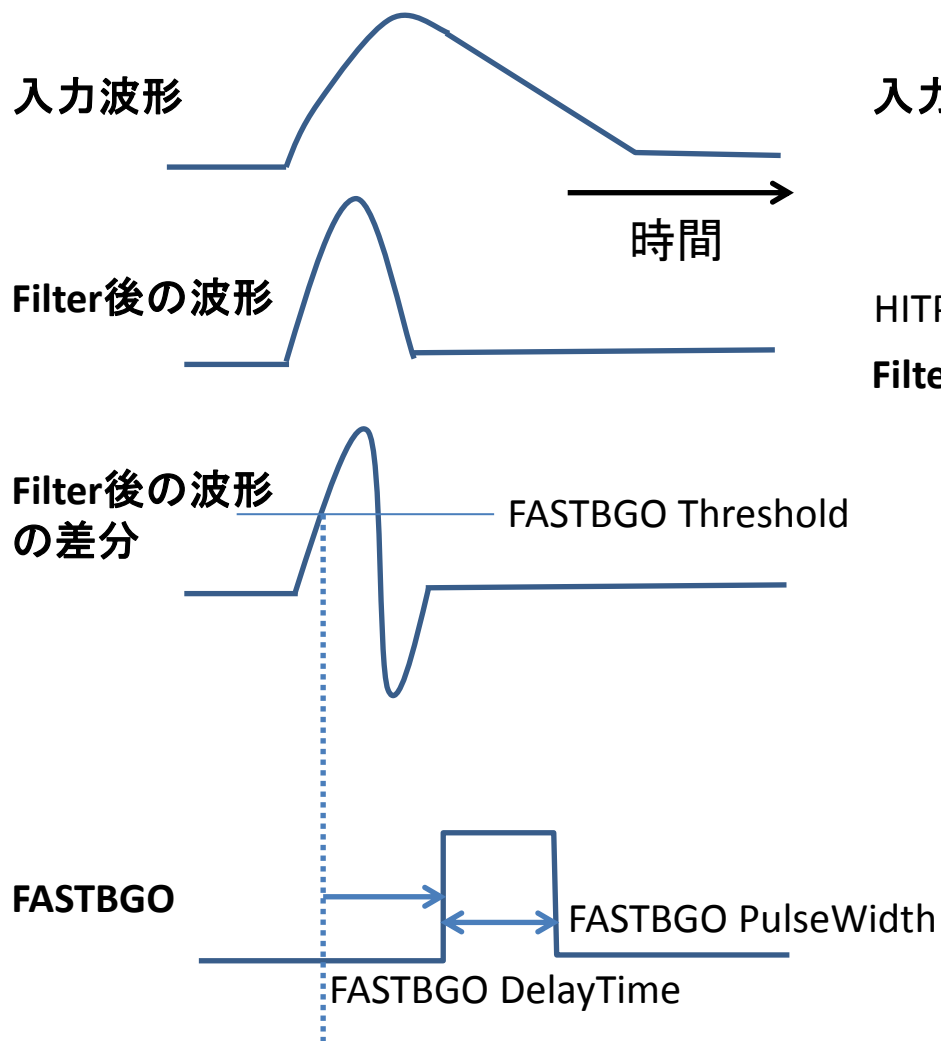
- コンプトンカメラでADC動作開始までに禁止信号(**FASTBGO**)を送らなければならない(< 5 μ s)

APMU機能一覧

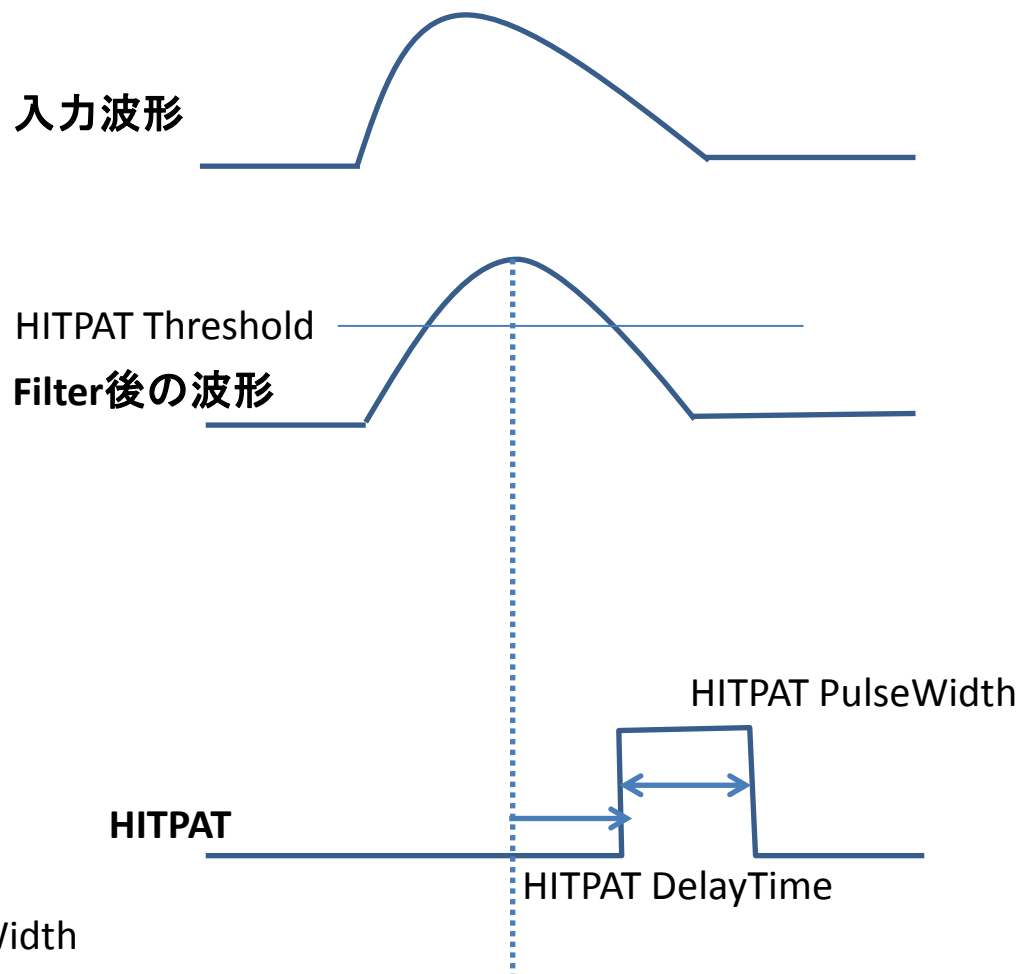
- FASTBGO
 - ガンマ線検出から5 μ s以内に出だし、上空で主検出器の信号処理を禁止する信号
- HITPAT
 - FASTBGOより詳細な処理によりできるだけノイズをカットし、オフラインの解析で反同時計数をとる信号
- UD/SUD
 - 大信号が入ってきたときに立ち、主検出器および自身の処理禁止信号に使われる信号
- スケーラー機能
 - 上記のトリガーをカウントする機能
- ヒストグラム取得機能
 - スレッシュホールドを超えるとピークホールドし、その値をヒストグラムデータとして記録する機能(ノイズチェック、検出器の健康診断に使用)
- GRB機能
 - ガンマ線バースト(GRB)などの突発現象が起きた場合にそれを判定し、そのデータを取得する機能

APMUの機能(要求仕様)

• FASTBGO

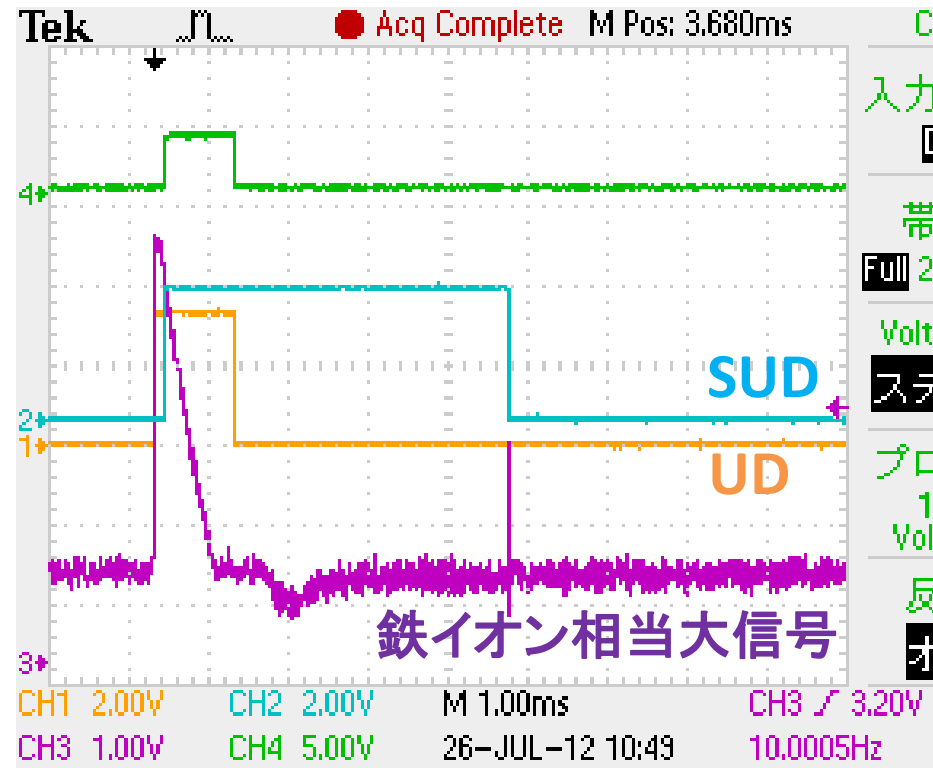
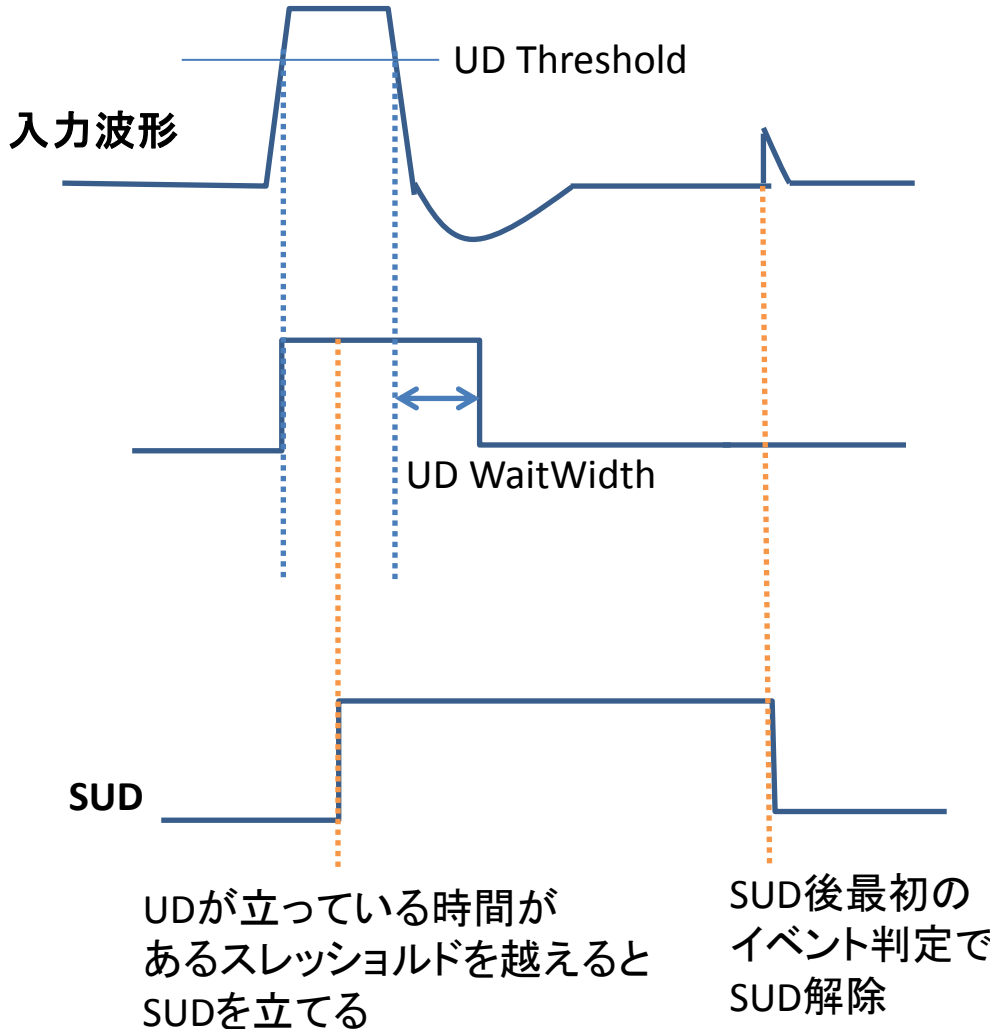


• HITPAT



APMUの機能(要求仕様)

- UD/SUD



自作CSA基板(パラメータはFM相当)で行ったUD/SUDの仕様検討結果

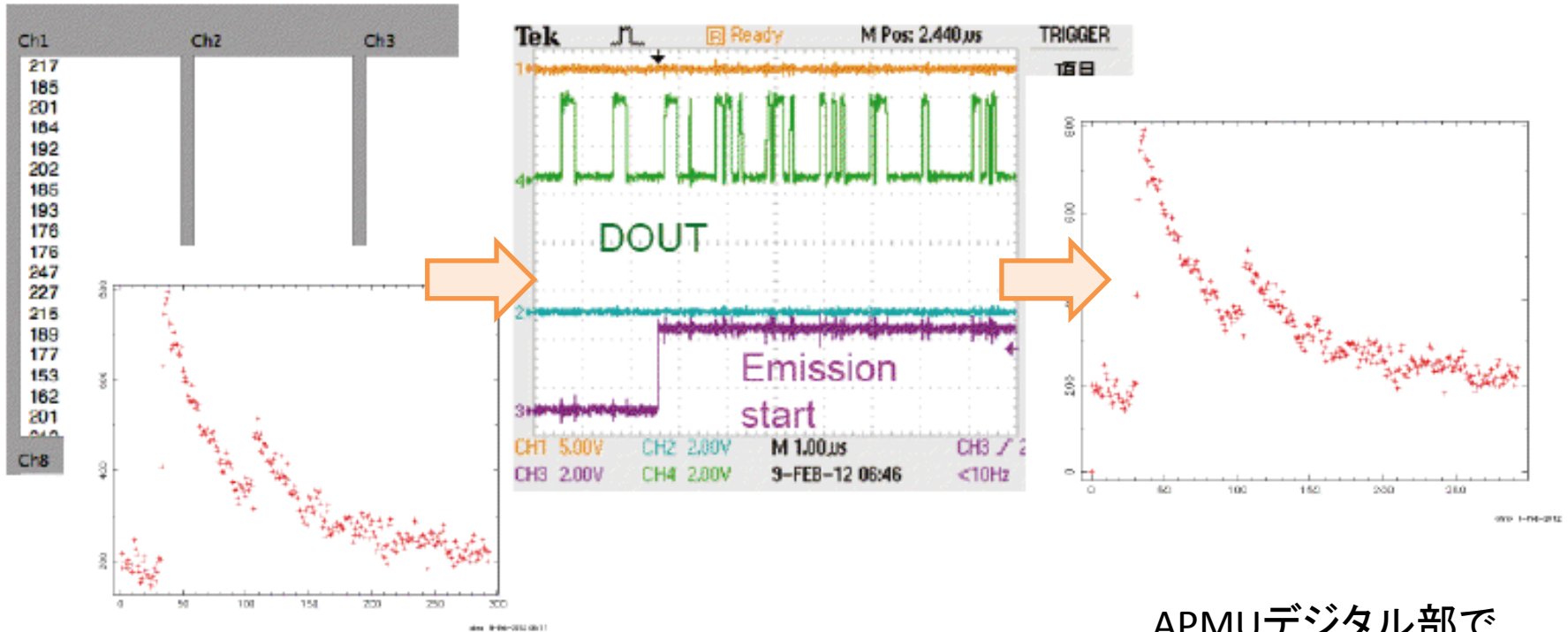
実験目的

- APMU用のFPGAロジックの仕様検討
- MHIさんから届いたFPGAロジックがこちらが要求した仕様通りに動作するか検証
- 試験項目
 - ADC読み出しタイミング可変機能
 - STBY/OBS MODE
 - **FASTBGO, HITPAT出力**
 - **UD出力 (SUDはまだこちらの仕様が反映されていない)**
 - **Scaler値の確認**
 - **GRB判定機能**

一部の試験で動作試験用に入力波形をコントロールできるシミュレータを用いて検証を行っている

APMUアナログ部シミュレーター

任意の波形をAPMUデジタル部に連続入力できるシミュレーター
(入力回数、レートも変更可能)



任意の波形値を入力

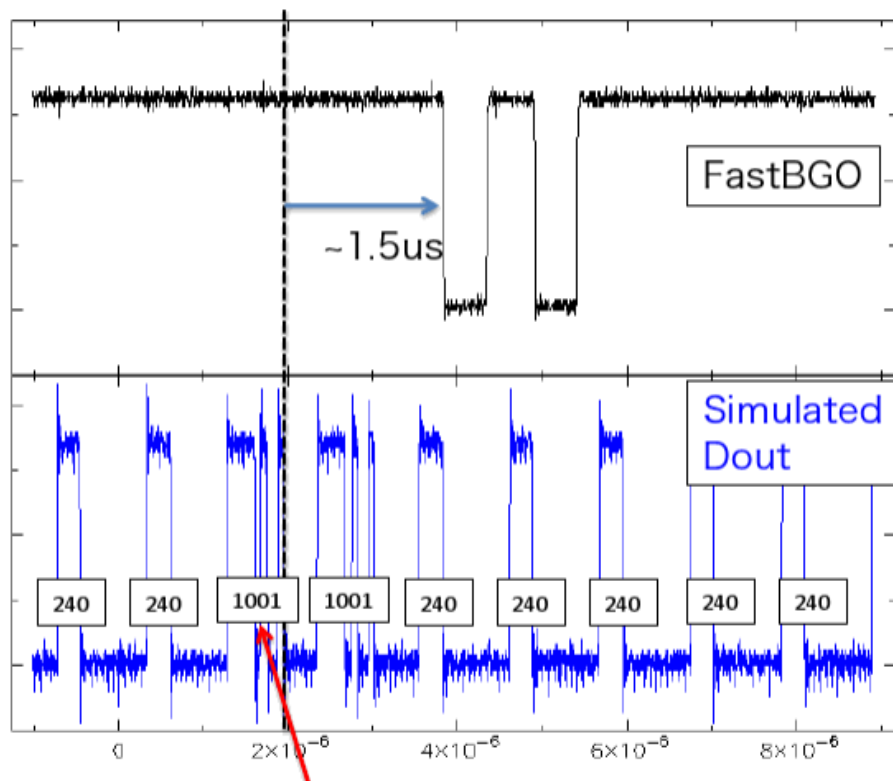
シミュレーターのDOUT出力

APMUデジタル部で
取得した波形

任意の波形を回数、レートも自由に入力できるため、ロジックの中身が分からない今回の仕様確認には必須

FASTBGO出力

- FASTBGO
 - ガンマ線検出から5 μs 以内に出力
 - 上空で主検出器の信号処理を禁止する信号



(1001,1001)の波高
値を入力
240はオフセット

シミュレーターを用いて試験

入力波形(1001, 1001)の $\sim 1.5 \mu\text{s}$ 後にFASTBGO出力が確認できた

仕様書よりFASTBGOの出力タイミングを求めると $0.6 \mu\text{s}$

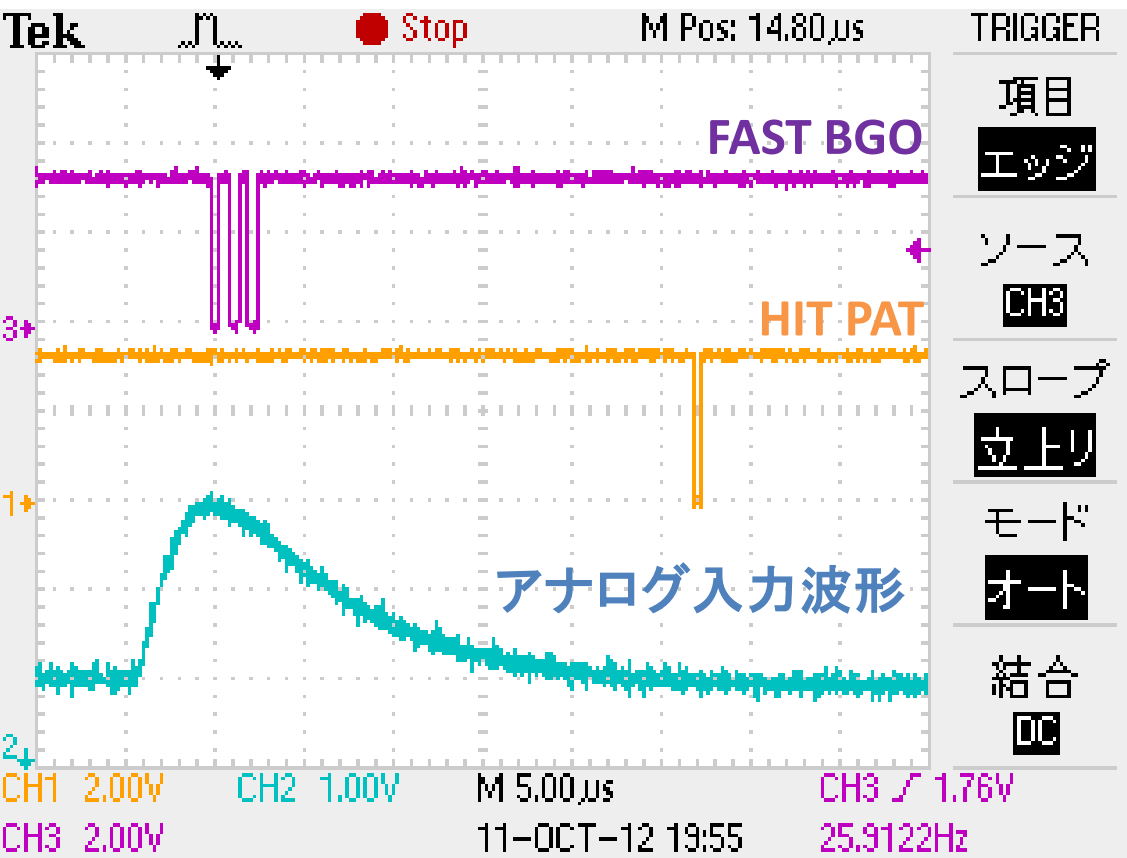
実際の出力は $\sim 1 \mu\text{s}$ ほど余計に時間がかかっている

MHIさんに要確認

HITPAT出力

- HITPAT

- FASTBGOよりも詳細な処理によりできるだけノイズをカットしてから出力

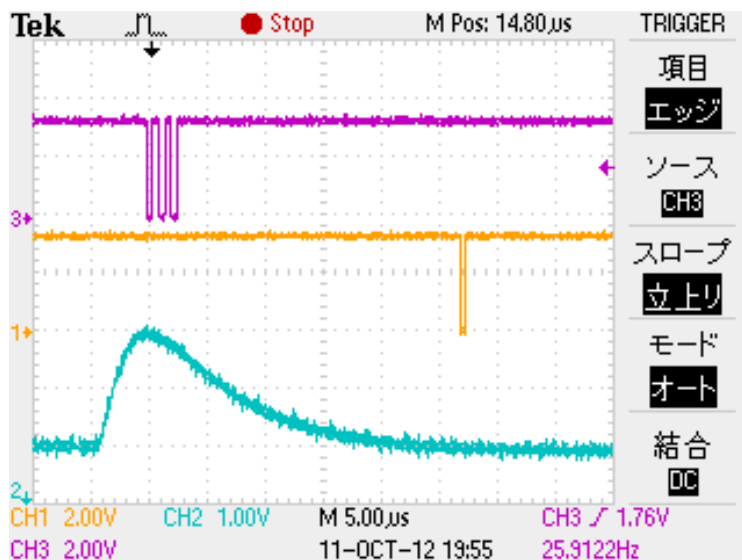


HITPATには以下の問題があることがわかった

- ・出力タイミング
- ・ダブルピーク判定

HITPATの出力タイミング問題

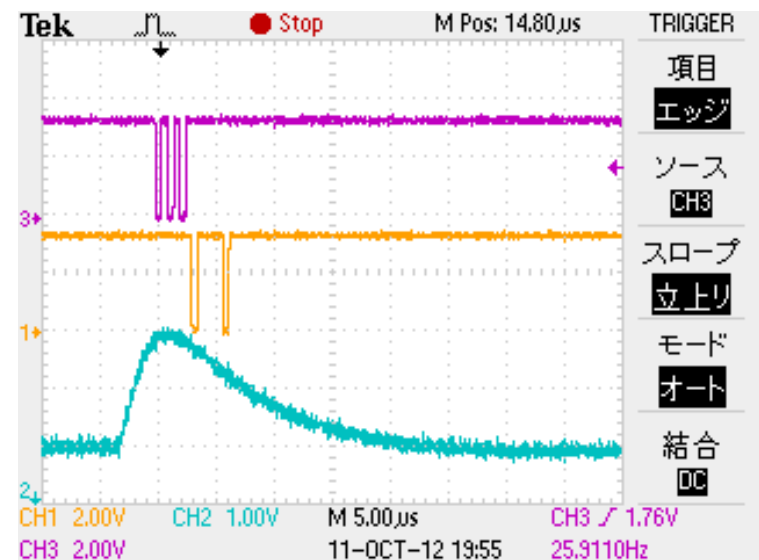
- Clockを出し始めた直後にHITPATの出力タイミングを見ると、右図のように波形ピークの3 μs 後にHITPATが出力される
⇒ Clockずれ？
- HITPATがスレッシュホールド設定を低くすると正常状態(左図)で出力されるが、スレッシュホールドを高くすると早いタイミング(右図)で出力されてしまう
⇒ ロジックを予想してMHIに問い合わせたところ、**問題の箇所が判明**



FAST BGO

HIT PAT

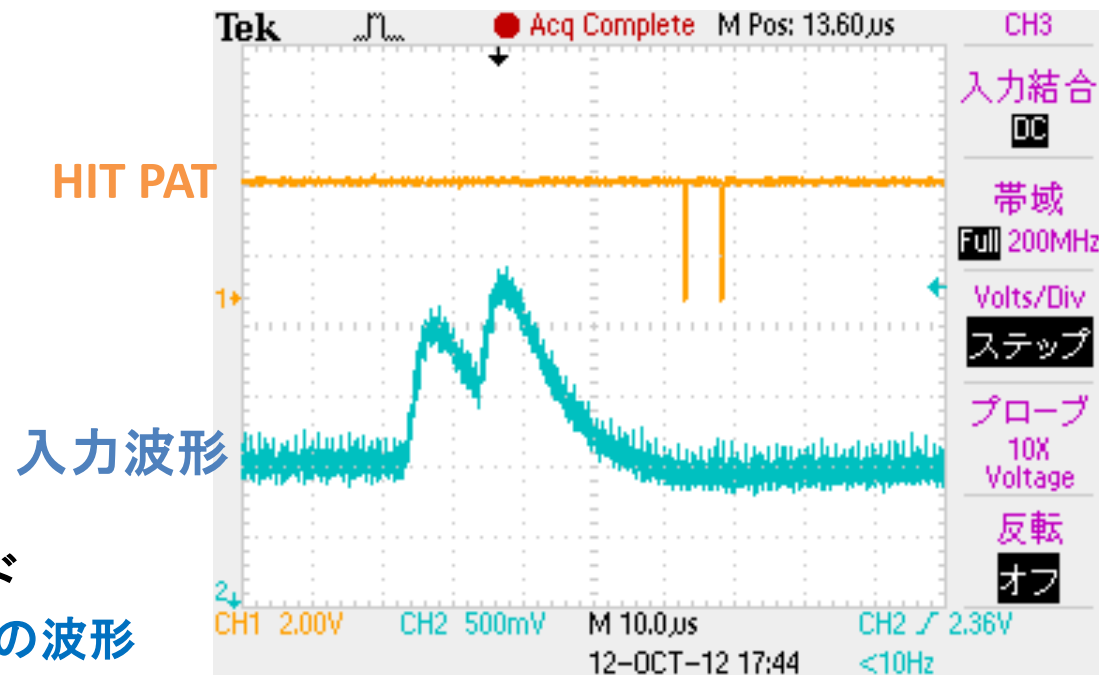
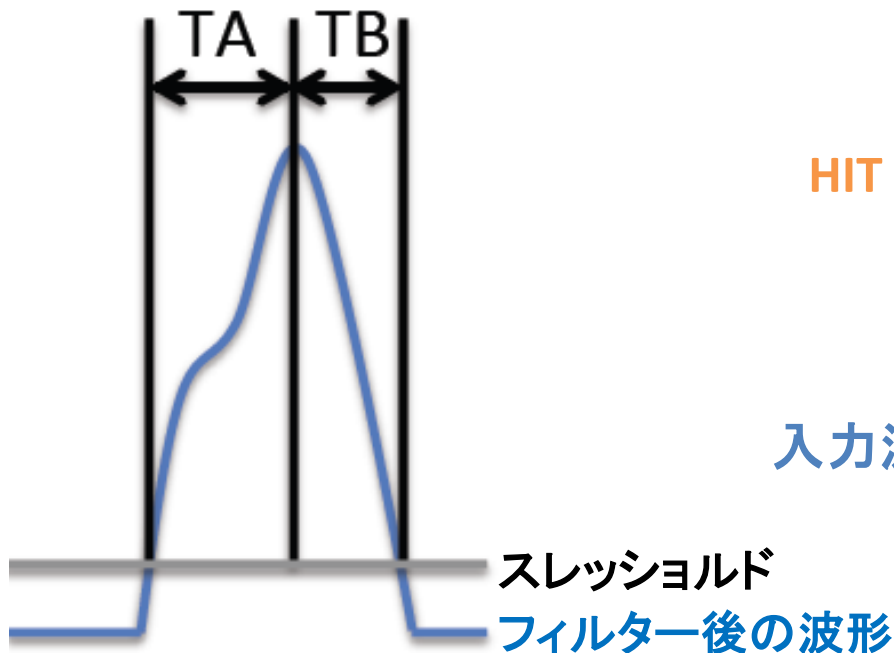
入力波形



HITPATのダブルピーク判定

- 機能説明

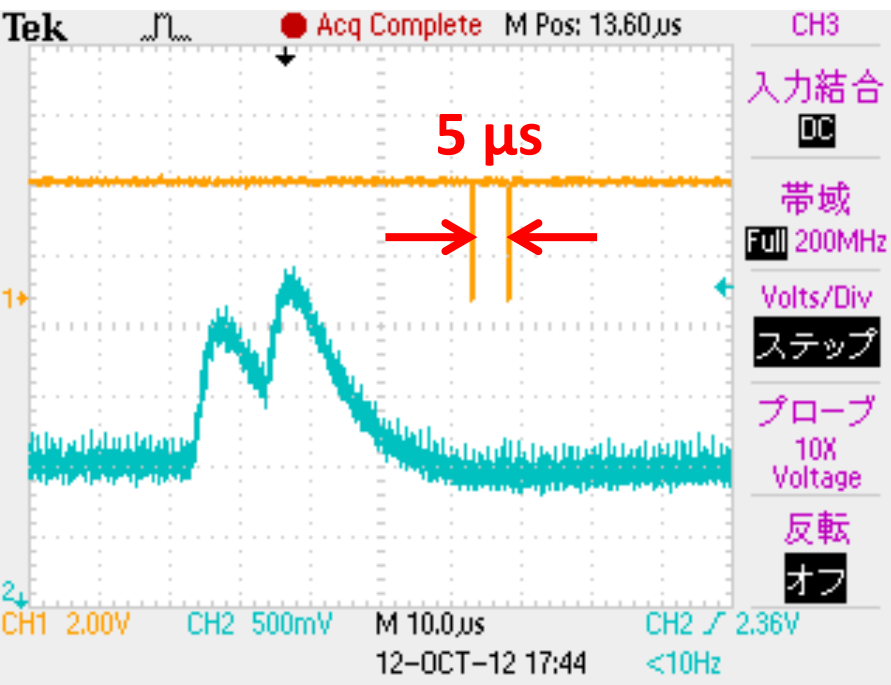
- ピークが1つしか検出されなくても、フィルター後の波形が左右対称でなければ1波形に2つのパルスを含むと判断し、追加のHITPATを出力する



HITPATのダブルピーク判定

- 問題

- 明らかにダブルピークの波形を入力してもHITPATの出力が1回の場合と2回の場合がある
- 2つのHITPAT出力の間隔と、デジタルフィルター後のパルスピークとの間隔が異なっている



HIT PAT出力の間隔

デジタルフィルター後のパルス間隔: ~11 µs

仮にピークが1つとしか検出されなくても、仕様書通りであるなら

$$TB * (64 / 60 \text{ MHz}) / 2 \doteq 7 \text{ µs}$$

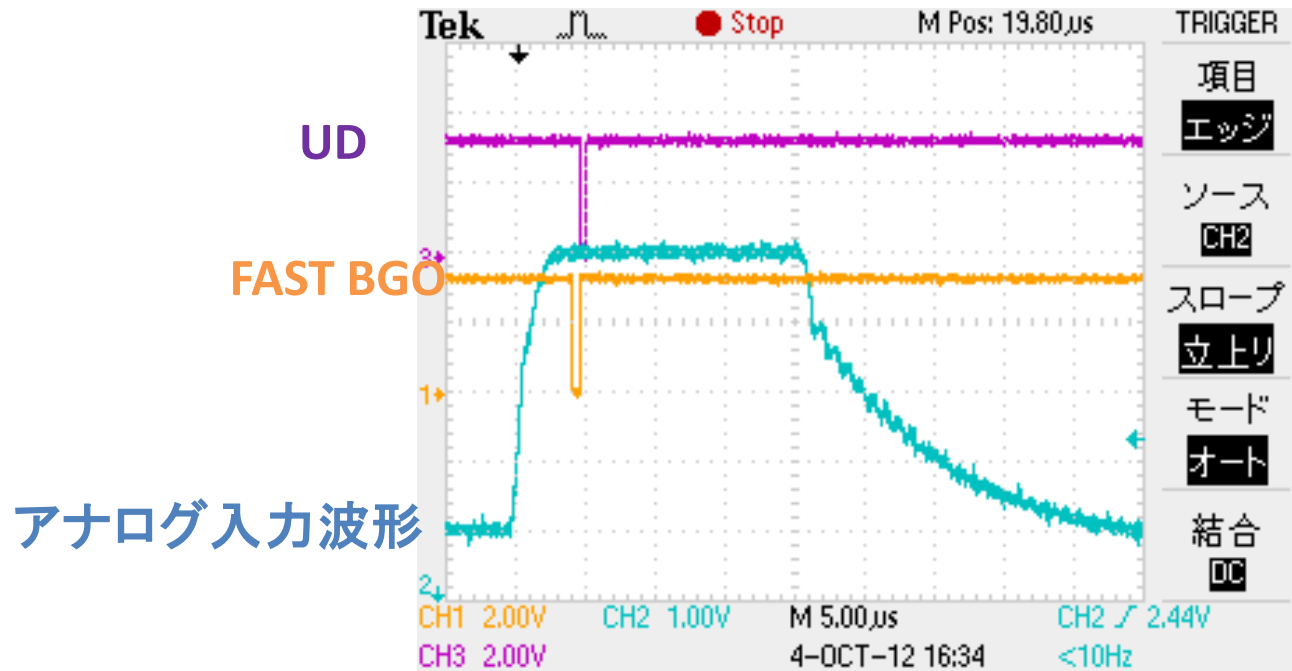
UD出力

- UD出力

- UD Thresholdを超えている間、主検出器および自身の処理禁止信号に使われる信号

- 結果

- 仕様書ではADC値がスレッシュホールドを超えている間UDを出し続けるとなっているが、実際には0.5 μ s程度しか継続して出力されなかった \Rightarrow 問題点が発覚し、MHIさんに問合せ中



Scaler値の確認

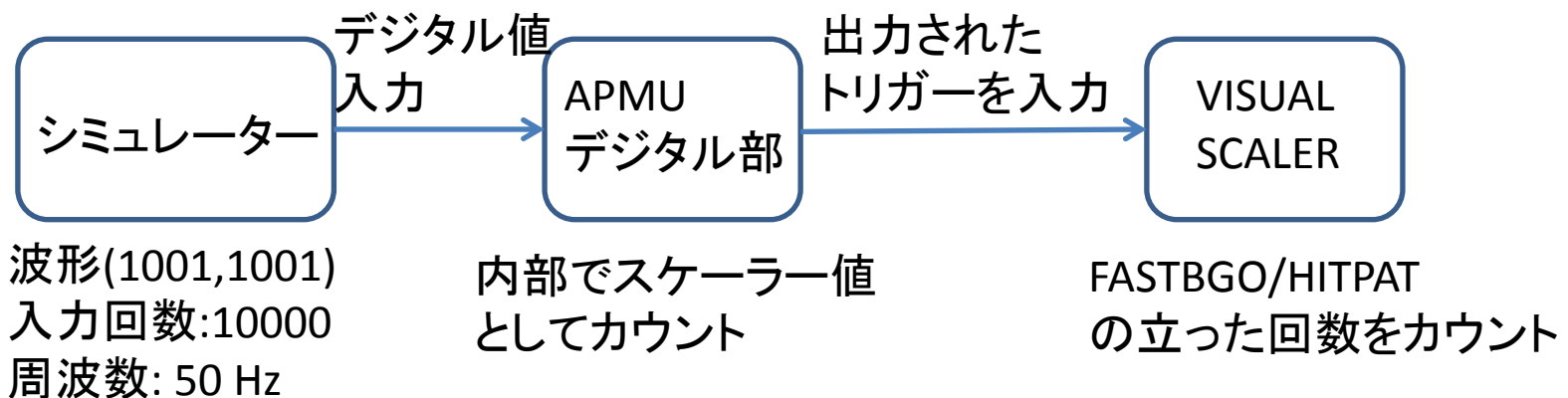
- 機能説明

- トリガーが立った回数をカウントする機能

- 試験方法

- FASTBGO, HITPATが一回だけ立つような波形をシミュレーターを用いて連続して入力し、入力した回数とScaler値が同じか調べる

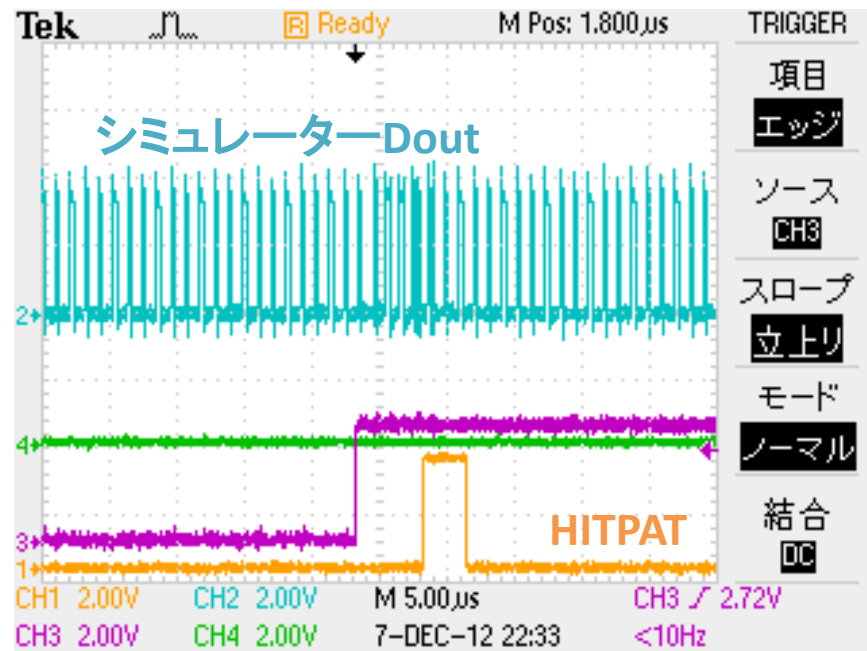
- Scaler値の他にアナログのVISUALSCALERを用いてそちらとも一致するか確認



Scaler値の確認

- 検証事項
 - シミュレーターを用いて(1001, 1001)の波高値を50 Hzで10000回入力した
 - 1 chずつに入力していき、計13 chスケーラー値が正しいか確認
 - 複数ch に同時に波形を入力してスケーラー値を確認
- 結果
 - 1～13 chまで1 chずつ波形を入力した場合はScaler値は正しくカウントされていた
 - 1～13 chに同時に波形を入力するとScaler値とVISUALSCALERの値は概ね一致するが、入力回数とは異なるものとなった

(1001,1001)の波高値を入力



GRB機能

- ガンマ線バースト(GRB)などの突発現象が起きた場合に、通常時に記録しているヒストグラムとは別に、詳細な時間幅でヒストグラムを取得するための機能
- 試験項目
 - **カウントレートの上昇による判定機能**
 - 判定に用いるチャンネルの選択
 - 判定を行うエネルギー範囲の選択
 - **GRBデータの確認**

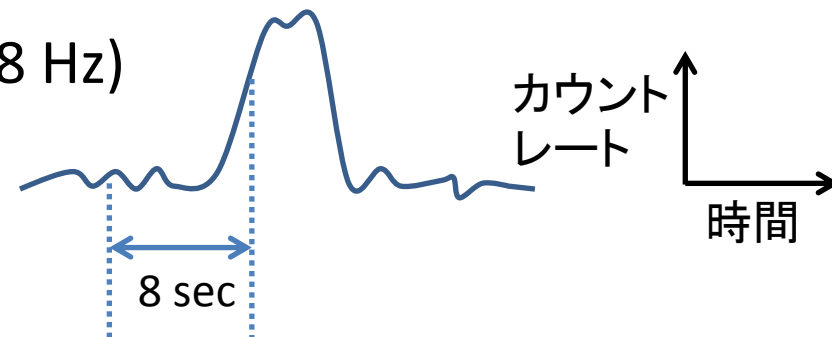
カウントレートの上昇による GRB判定機能

- 機能説明

- GRBによる信号のカウントレート上昇に伴う判定しゅレッシュョルドを決める
- 全4段階で設定可能(5σ , 8σ , 10σ , 16σ)

- 測定方法

- Clock Generatorを用いて入力波形の周波数を制御し、実際に設定された有意度でトリガーが立つか検証を行った。
- 常時1000 Hzで波形を入力
(5σ に設定した場合 $1000 \Rightarrow 1158$ Hz)



8秒前のカウントレートからの
上昇率がある σ を越えていたら
GRBと判定

カウントレートの上昇による GRB判定機能

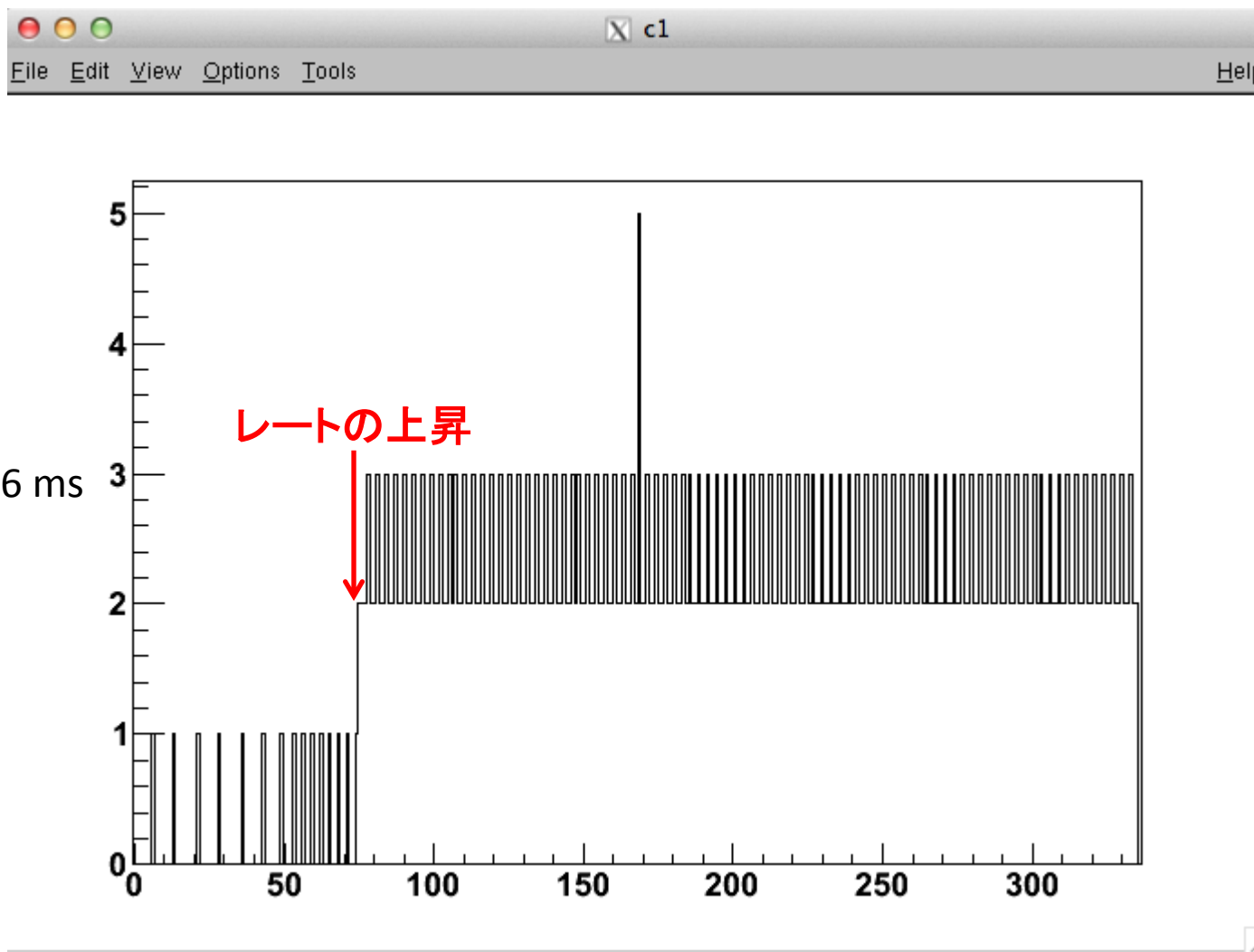
スレッシュホールド設定値	判定予想値(Hz)	実際の判定値(Hz)
5 σ	1158	1170
8 σ	1253	1260
10 σ	1316	1330
16 σ	1506	1520

※1000 Hzからレートを上昇させて測定

予想値とは若干異なっている理由

- BGDとして入力している1000 Hzが揺らいでいるため？
- 標準偏差の計算をロジック内では近似で行っているため？

GRBデータの確認



レートを150 Hz上昇させたときのGRBデータ

まとめ

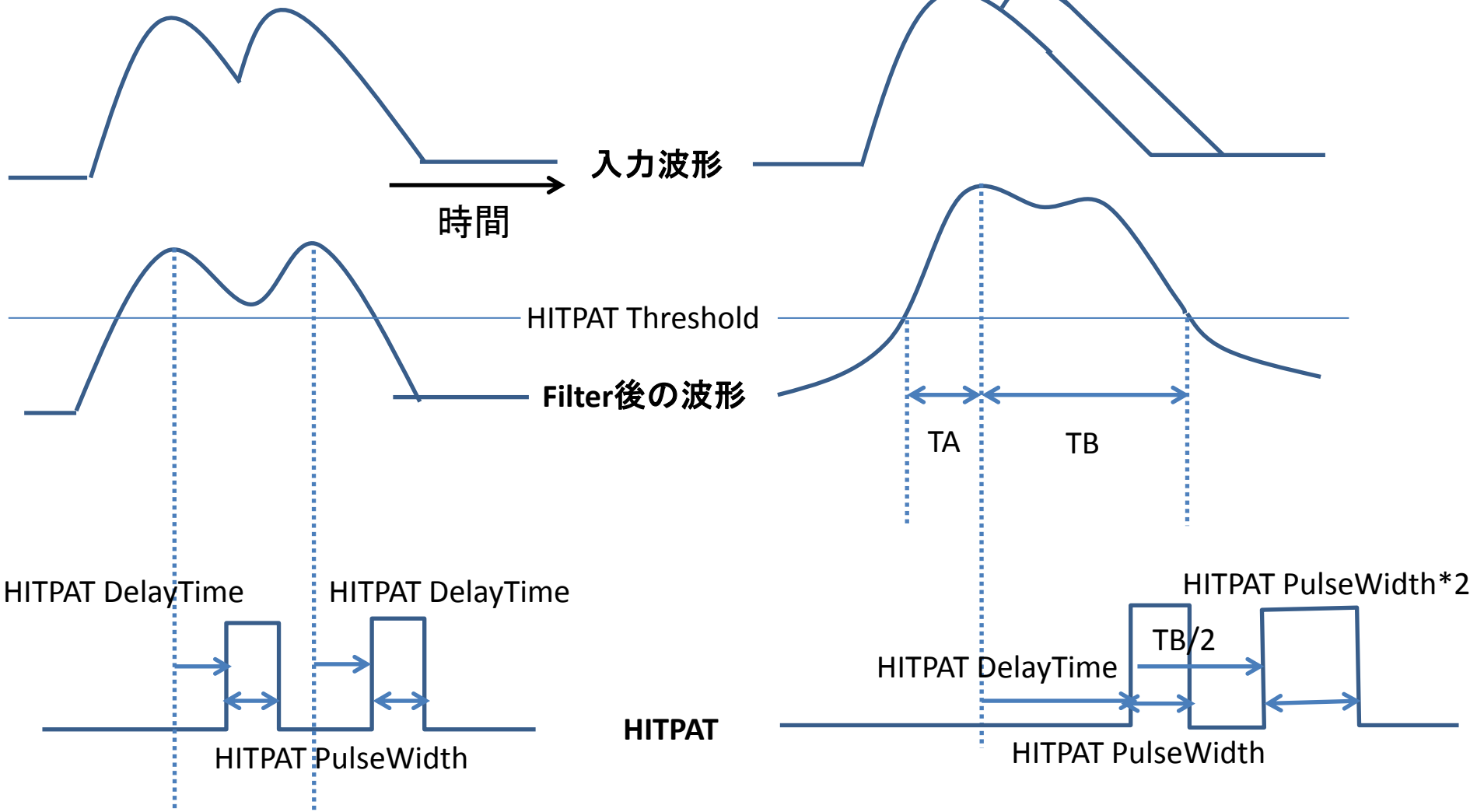
- APMU上のFPGAに書き込むロジックの最新版がMHIより出てきたので、そのロジックが仕様書通りになっているか検証を行っている
- 仕様書通りになっていない箇所はMHIに報告し、ロジックの改訂をお願いします。
- 今後更なる改訂版ができてくるので、変更項目を中心に動作試験を行っていく予定

ADC読み出し遅延	正しく動作した
FASTBGO出力	正しく動作した
HITPAT出力	スレッシュホールドを高くした時の出力タイミングが早い ダブルピーク波形の応答が仕様通りでない
UD出力	出力が継続しない
スケーラー値	複数chに同時入力するとカウント値が正しくない
GRB機能	正しく動作した

おわり

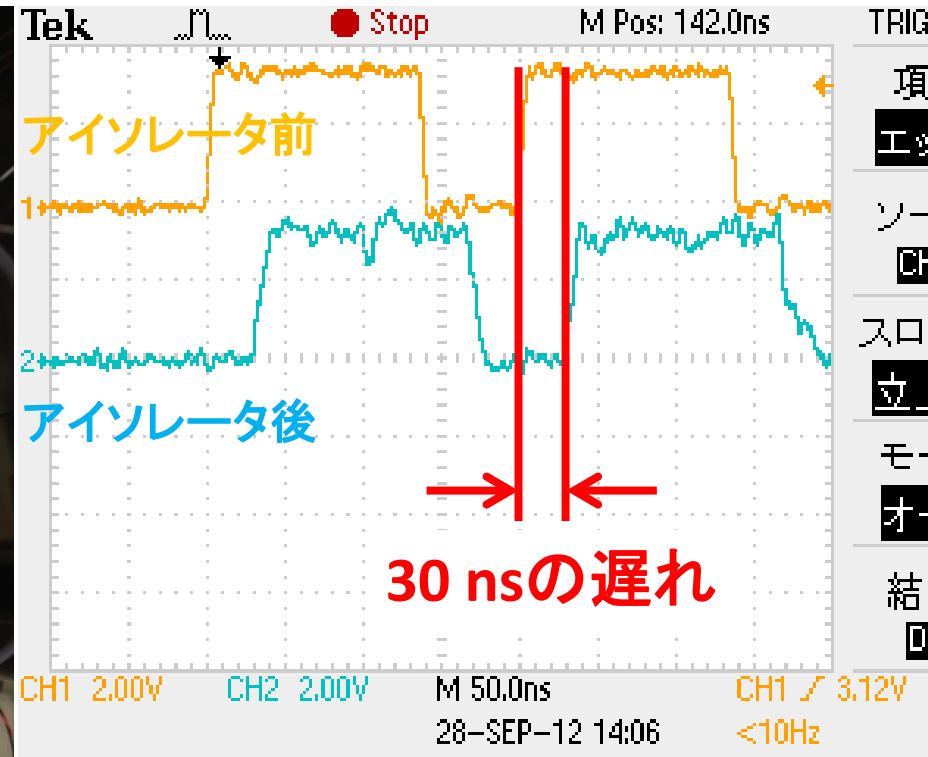
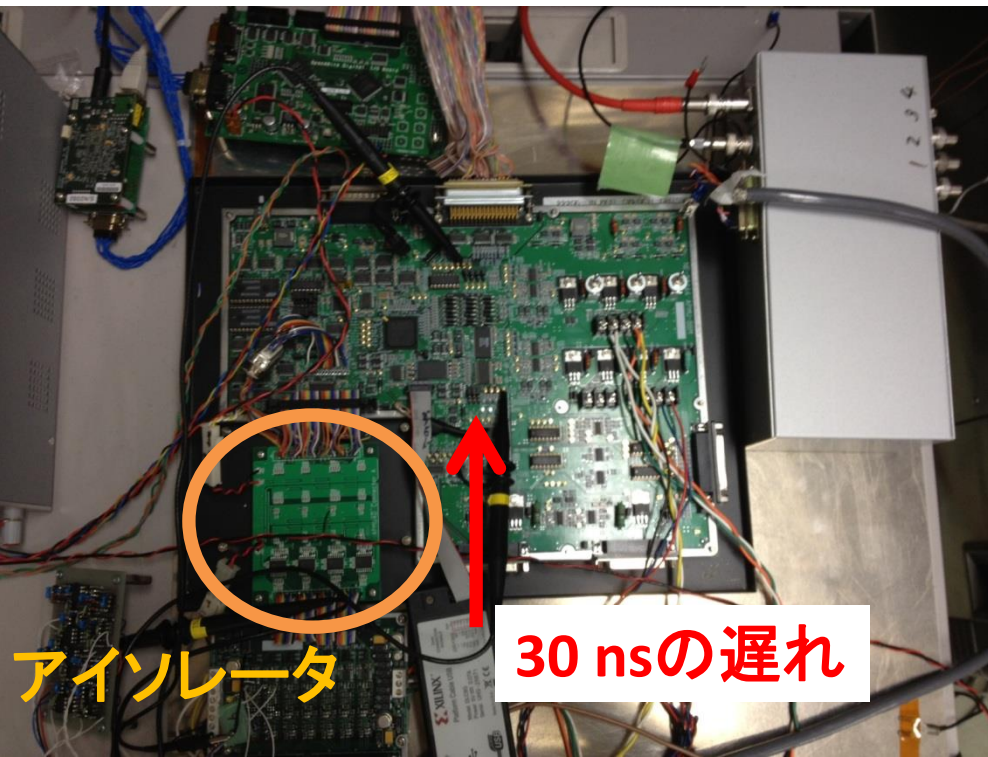
APMUの機能(要求仕様)

- HITPAT



ADC読み出しタイミング可変機能

- 機能説明
 - APMUアナログ/デジタル間にあるアイソレータによって生じるADCデータの遅延に合わせて、FPGAでの読み出しを遅らせる機能
- 設定値
 - ADCReadDelayは15 ns単位で0~15(初期値4)の範囲で可変
- 結果
 - ADCReadDelayを8に設定することにより予想通りのデジタル値が取得できた



STANDBY/OBS MODE

- 機能説明

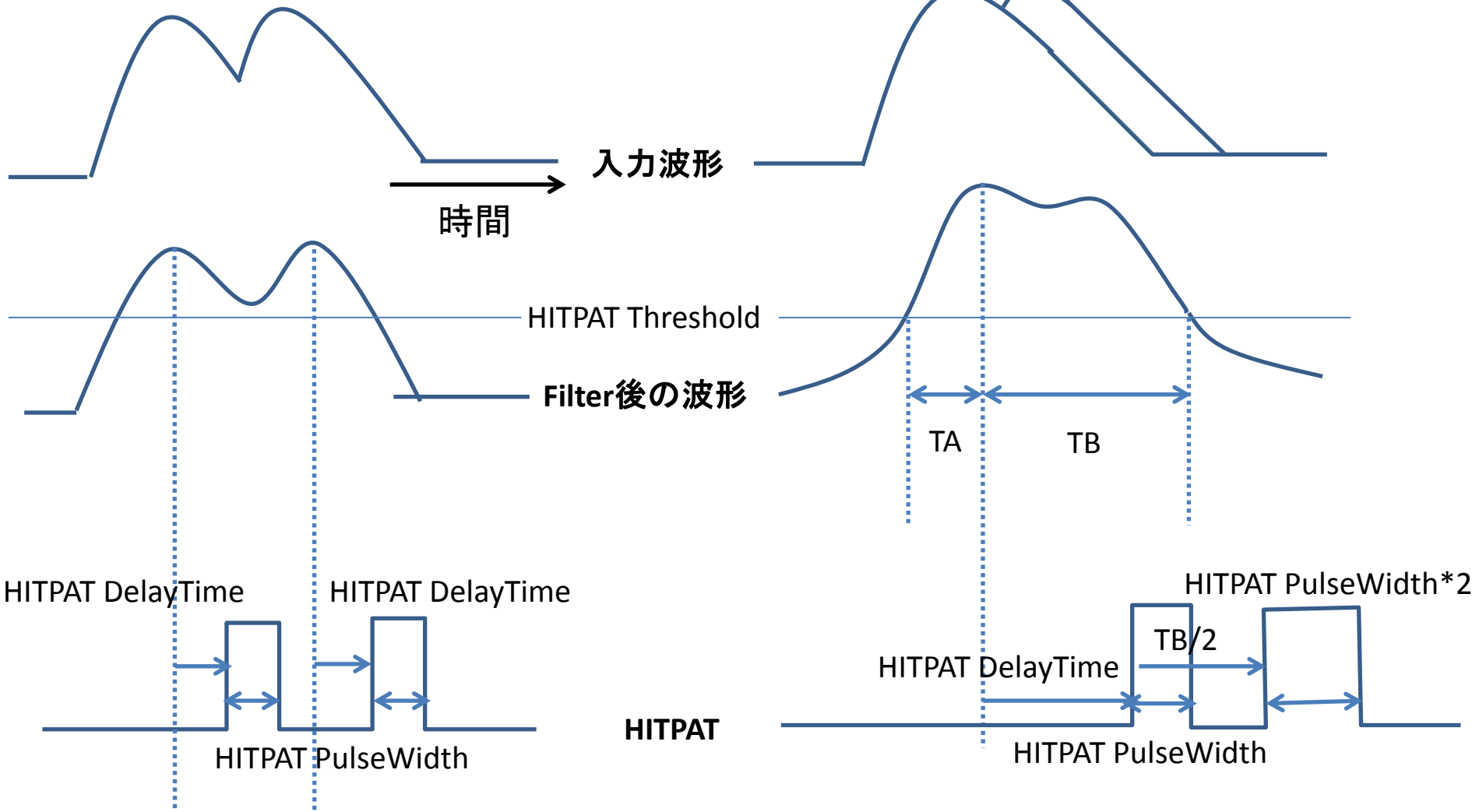
- APMUアナログ部の電源をONにしたままADCをリセットし(STANDBY MODE)、復帰させる(OBS MODE)機能

- 結果

- STANDBY MODEからOBS MODEに変更するときに、一度Clockをstop/startされる必要がある
- STANDBYからOBSへ変更後、FASTBGO, HITPATが正しく出力したため、MODE変更は概ね正常動作することを確認

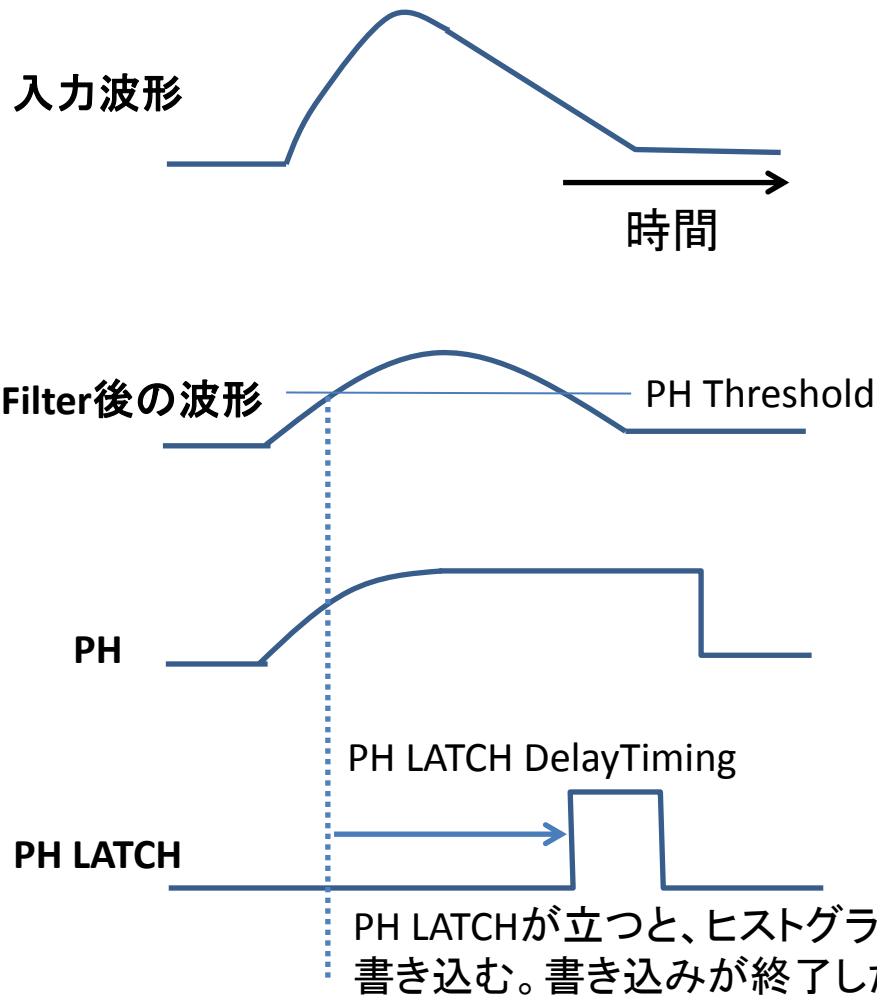
APMUの機能(要求仕様)

- HITPAT

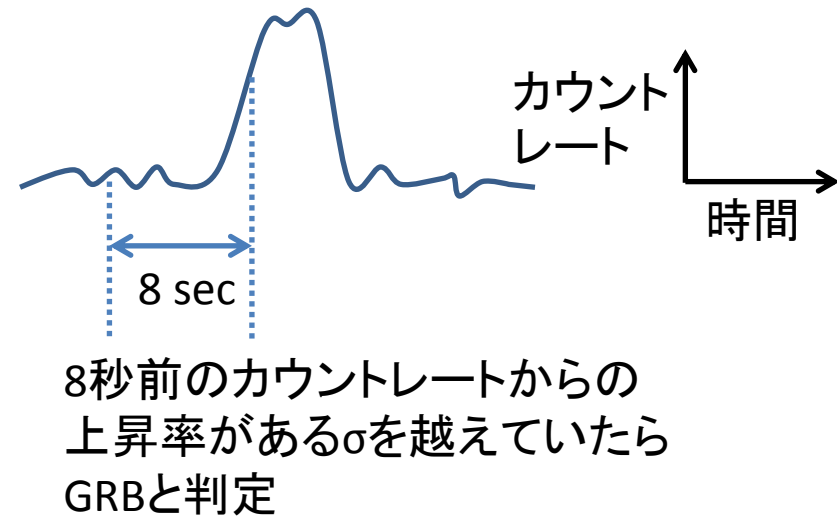


APMUの機能(要求仕様)

- PH



- GRB判定機能



GRB Judge Ene Set Up

- 確認項目
 - GRB判定を行うエネルギー範囲を決める
 - maxとminの値を設定可能
- 測定方法
 - ヒストグラムで入力波形のエネルギー値を確認しながら、min/maxの設定値を変えていきトリガーが立つ/立たないの検証を行った。
- 結果
 - ヒストグラムで660にピークが立っており、maxの値を4095(最大値)、minの値を600から上昇させていくと655にしたときにGRB判定された ⇒ **正しく動作している**

FASTBGO/FASTBGO1 DelayTime

- 各設定値
 - 入力波形(1001, 1001, 1001, 1001, 0, 0,, 0)
 - Filter1(1, 0, 0,, 0), Filter2(1, 0, 0,, 0)
 - ADC ReadDelay : 8
- 確認項目
 - FASTBGO DelayTime : 0 ~ 3(0.0 ~ 0.6 μ s, 0.2 μ sずつ変化)
 - FASTBGO1 DelayTime : 0 ~ 7(0.5 ~ 4.0 μ s, 0.5 μ sずつ変化)
- 結果
 - 各設定値を変化させていき、仕様書通りになっていることを確認
 - FASTBGO, FASTBGO1共に設定値を0にした場合、DealyTimeは0.5 μ sになるはずだが実際には1.8 μ sだった。

HITPAT/HITPAT1 DelayTime

- 確認項目
 - HITPAT DelayTime : 0 ~ 8(24 ~ 27.2 μs , 0.4 μs ずつ変化)
 - HITPAT1 DelayTime : 0 ~ 7(0.5 ~ 4.0 μs , 0.5 μs ずつ変化)
- 結果
 - 各設定値を変化させていき、仕様書通りになっていることを確認
 - HITPAT, HITPAT1共に設定値を0にした場合、DealyTimeは24.5 μs になるはずだが実際には28 μs だった。

FASTBGO/FASTBGO1 PulseWidth

- 確認項目
 - FASTBGO PulseWidth : 0 ~ 3(0.5 ~ 2.0 μ s, 0.5 μ sずつ変化)
 - FASTBGO1 PulseWidth : 0 ~ 3(0.5 ~ 2.0 μ s, 0.5 μ sずつ変化)
- 結果
 - FASTBGO PulseWidthをどの設定値にしても、FASTBGO1 PulseWidthでの設定が上書きされることがわかった。(ただし、複数トリガーが立っているときは異なる)

HITPAT/HITPAT1 PulseWidth

- 確認項目
 - HITPAT PulseWidth : 0 ~ 11(0.4 ~ 7.2 μ s, 0.4 μ sずつ変化)
 - HITPAT1 PulseWidth : 0 ~ 3(0.5 ~ 2.0 μ s, 0.5 μ sずつ変化)
- 結果
 - FASTBGO/FASTBGO1 PulseWidth同様の結果が得られた。

GRB Judge ADC Sel

- 確認項目
 - GRB Judge ADC Sel 1 ~ 6 :

APD

アバランシェフォトダイオード: APD

アバランシェ増倍と呼ばれる現象を利用して受光感度を上昇させたフォトダイオード

従来シンチレーション光の読み出しには光電子増倍管が用いられていた
→大電力が必要で、容積が大きいため設計に制限を与えてしまう...

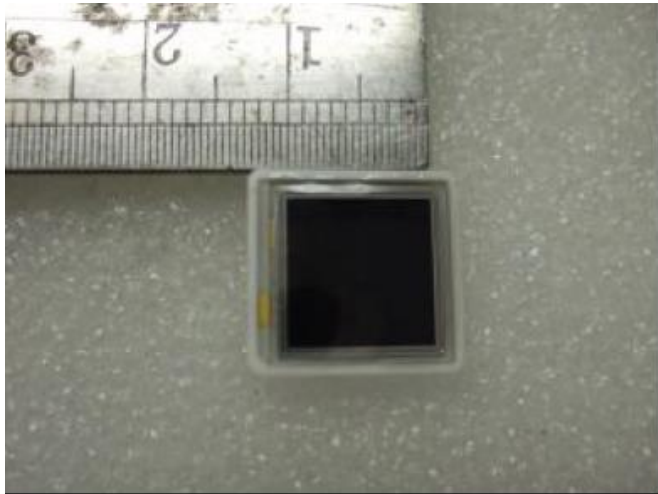


写真: APD (10mm × 10mm)

APDは小型かつ、省電力で動作する
→ASTRO-HではAPDを採用！！

増幅率は大きいがいかにそれに伴い暗電流などに起因する超過ノイズが発生してしまう...

ノイズに対していかに効率よく集光して信号のSN比を良くして読みだすかが鍵！！

APMU 動作検証一覧

- FASTBGO Delay Time
- FASTBGO1 DelayTime
- FASTBGO PulseWidth
- FASTBGO1 PulseWidth
- HITPAT DelayTime
- HITPAT1 DelayTime
- HITPAT PulseWidth
- HITPAT1 PulseWidth
- GRB JudgeThreshold:k
- GRB Judge ADC Sel
- GRB Judge Ene Set