

企画講演
測定器開発優秀修士論文賞

シグマ陽子散乱実験のための
BGO カロリメータシステムの構築

株式会社ニューフレアテクノロジー
(東北大理卒)

池田 迪彦

目次



- ▶ イン트로ダクション
- ▶ BGOカロリメータの読み出しシステム
- ▶ エネルギー較正法
- ▶ 実機システムの構築と評価
- ▶ まとめ

イントロダクション



- ▶ **イントロダクション**
- ▶ BGOカロリメータの読み出しシステム
- ▶ エネルギー較正法
- ▶ 実機システムの構築と評価
- ▶ まとめ

シグマ陽子散乱実験(J-PARC E40実験)

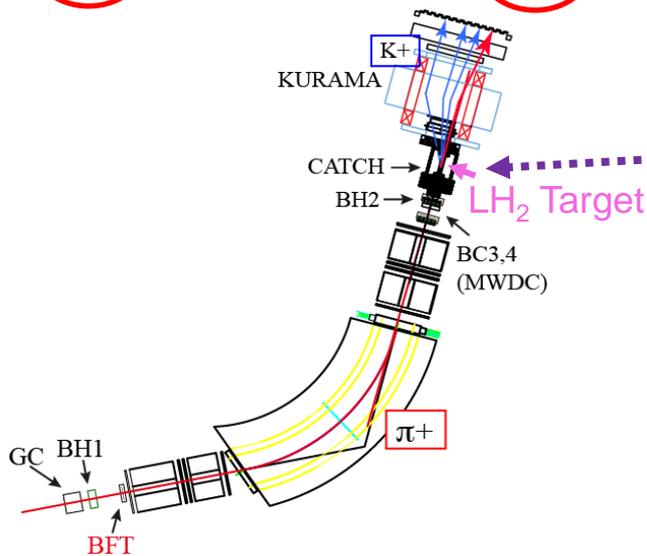
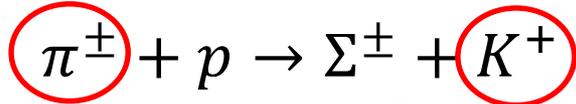
ΣN 相互作用の研究: ハイパー核としては ${}^4_2\text{He}$ 以外観測されていない

散乱実験が不可欠

J-PARC E40: Σp 散乱の微分断面積を高統計で測定

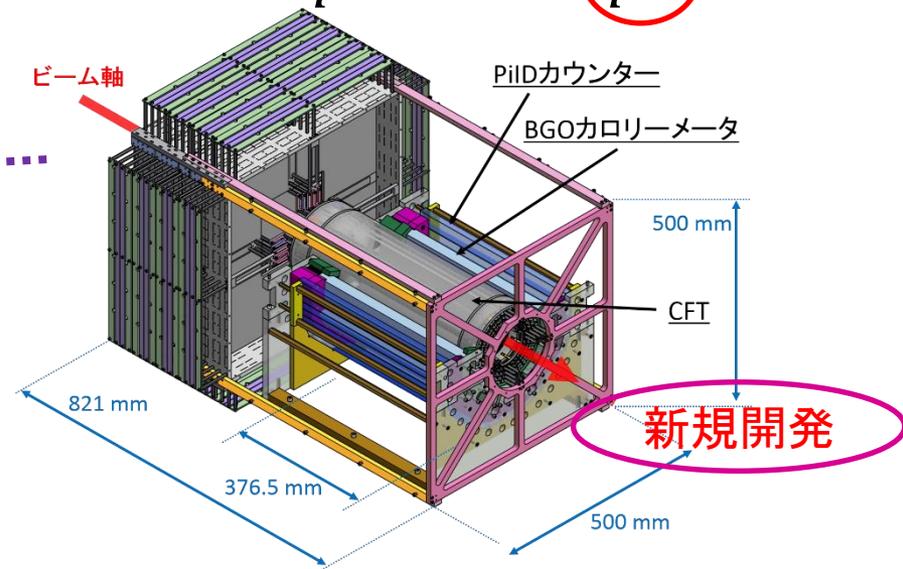
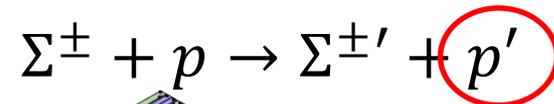
10^7 Hzの π ビームを液体水素標的に入射し、二つの連続した反応事象を測定する。

標的上流・下流のスペクトロメータ



J-PARC K1.8 beam line

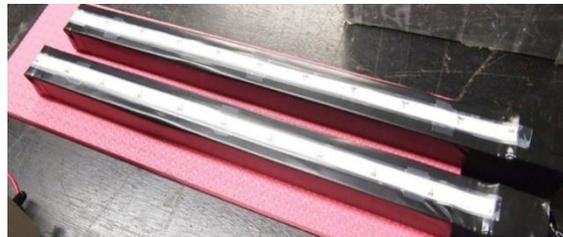
標的を囲う散乱陽子検出器群 (CATCH)



CATCHの断面図

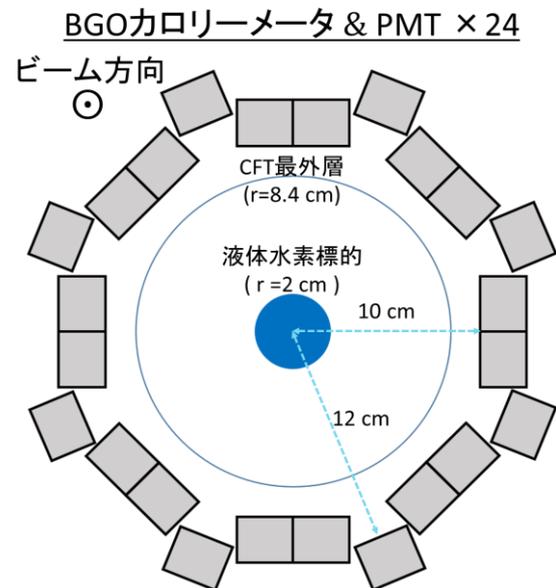
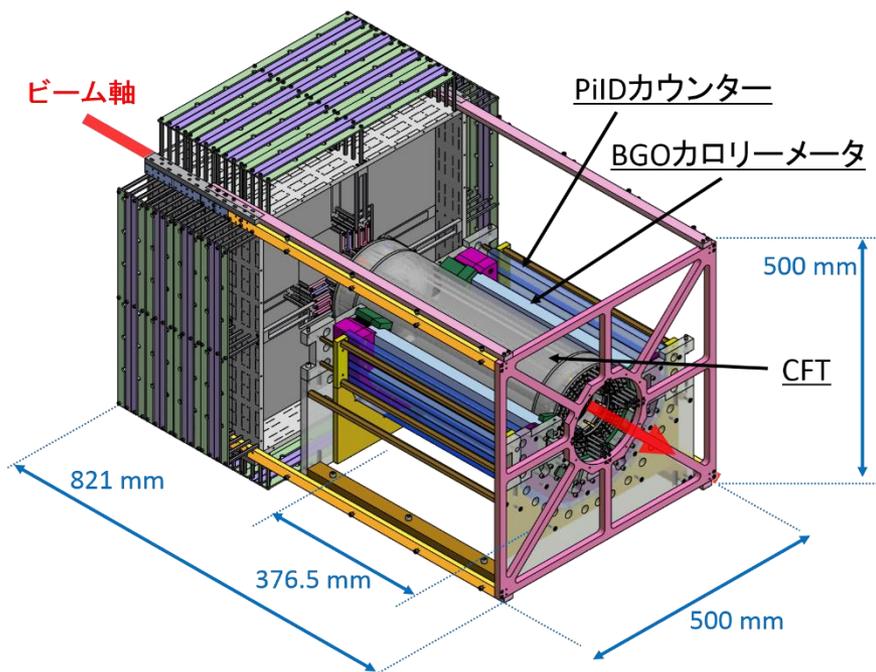
BGOカロリメータの配置

BGOカロリメータ



BGOシンチレーション結晶 ($30 \times 25 \times 400 \text{ mm}^3$)
&
PMT(浜松ホトニクス R11934-100)

標的を囲う飛跡検出器の外側に配置
散乱陽子のエネルギーを測定する



40k ~ 400 kHzの高計数率下に晒される

BGOカロリメータの配置

BGOカロリメータ



BGOシンチレーション結晶 ($30 \times 25 \times 400 \text{ mm}^3$)
&
PMT(浜松ホトニクス R11934-100)

BGOカロリメータへの要求

- ◆ シングルレート
 - ◆ 平均40 kHzの環境。最大で400 kHz。
- ◆ トリガーレート
 - ◆ 想定1 kHz。念のため5倍まで要求。

○高計数率下において、データ量を抑制した上で...

80 MeVの陽子に対して3% (σ)以下のエネルギー分解能

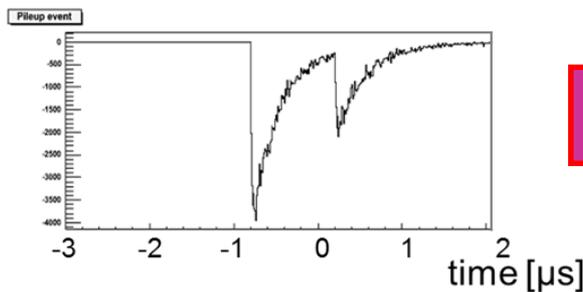
Flash ADCを用いた波形読み出し法と先行研究結果

E40の実験条件

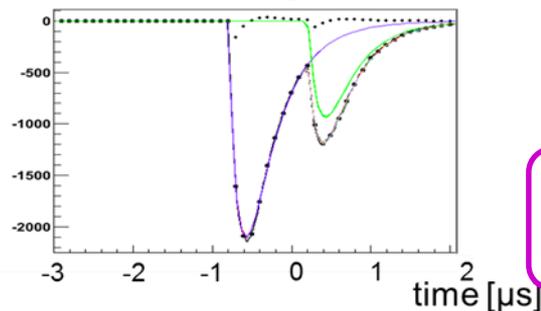
BGOの計数率：平均40 kHz・瞬間最大400 kHz (J-PARCのビーム構造による)

波形のpileアップ (BGOの時定数: 300 ns)

pileアップした生信号



整形後



積分回路で波形をなまらせ
Flash ADCでデータを取得
⇒オフラインで波形を分離

サンプリング間隔: 50 ns以内
(立ち上がり3点以上)

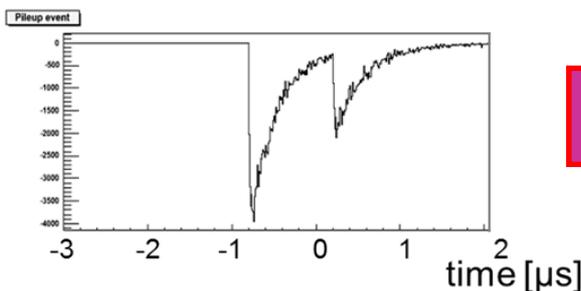
Flash ADCを用いた波形読み出し法と先行研究結果

E40の実験条件

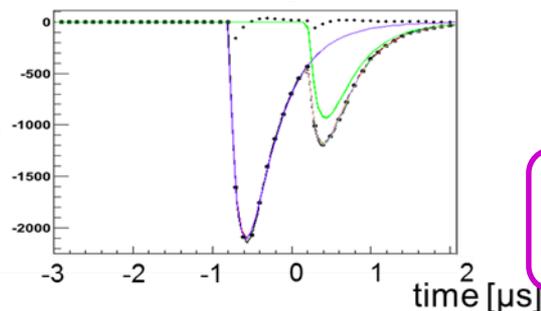
BGOの計数率 : 平均40 kHz・瞬間最大400 kHz (J-PARCのビーム構造による)

波形のpileアップ (BGOの時定数: 300 ns)

pileアップした生信号



整形後



積分回路で波形をなまらせ
Flash ADCでデータを取得
⇒オフラインで波形を分離

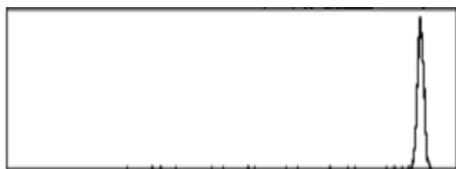
サンプリング間隔: 50 ns以内
(立ち上がり3点以上)

PMT定格駆動時のGain降下

80MeV陽子のスペクトル

ビームレート : 1 kHz

PMT : 900 V (定格)



波高

PMT : 700 V



波高

エネルギー分解能

$\sigma = 1\%$

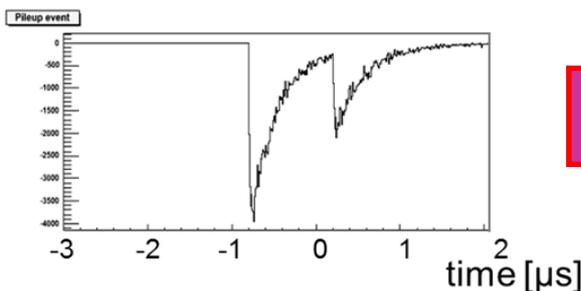
Flash ADCを用いた波形読み出し法と先行研究結果

E40の実験条件

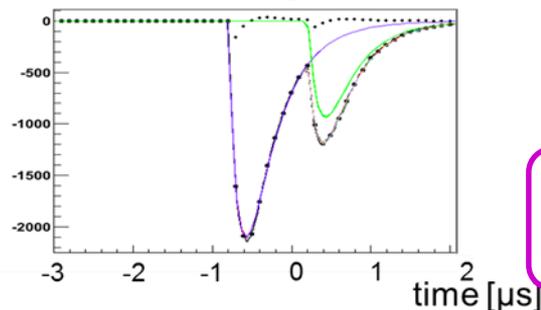
BGOの計数率 : 平均40 kHz・瞬間最大400 kHz (J-PARCのビーム構造による)

波形のpileアップ (BGOの時定数: 300 ns)

pileアップした生信号



整形後



積分回路で波形をなまらせ
Flash ADCでデータを取得
⇒オフラインで波形を分離

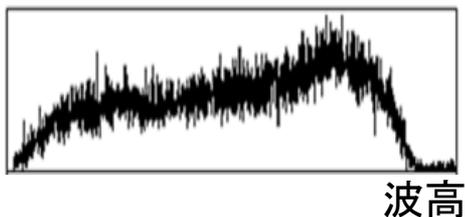
サンプリング間隔:50 ns以内
(立ち上がり3点以上)

PMT定格駆動時のGain降下

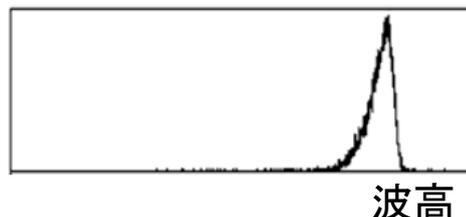
80MeV陽子のスペクトル

ビームレート : 500 kHz

PMT : 900 V (定格)



PMT : 700 V



オペレーション電圧を下げ、
PMTの出力電流を抑制

PMTの電圧:700 V以下
後段増幅でgainを補填

本研究の目的

BGOカロリメータシステムの構築

読み出しシステムの開発

Flash ADCを用いた波形読み出し法

80 MeV陽子に対して、エネルギー分解能3% (σ)以下
エネルギー較正法の確立

高計数率下(~400 kHz)における安定性
トリガーレート5 kHzに耐えるデータ転送速度

実機へ

開発した読み出しシステムを基に実機(総数24)を構築



データ取得系を含めた評価を行い、E40実験での運用を可能とする。

BGOカロリメータの読み出しシステム



- ▶ イントロダクション
- ▶ BGOカロリメータの読み出しシステム
- ▶ エネルギー較正法
- ▶ 実機システムの構築と評価
- ▶ まとめ

Flash ADCに要求される機能

◎ 50 ns以内のサンプリング間隔

◎ Zero Suppression 機能

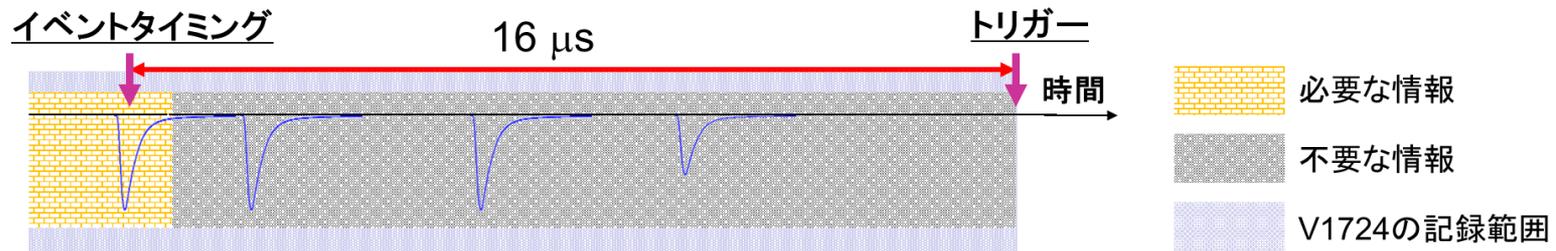
◎ マルチイベントバッファ

✕ トリガー前の任意の時間幅の選択が可

Flash ADC CAEN V1724を採用

10 ~ 30 nsで設定可能 ⇒ 30 ns間隔でサンプリング

トリガータイミングを必ず含む⇒任意の領域を選べる機能を自作



適したアナログ回路の設計・製作

PMT

入力

積分&PZC

非反転増幅

Vetoスイッチ

出力

V1724

アナログ回路の設計思想

PMT

入力

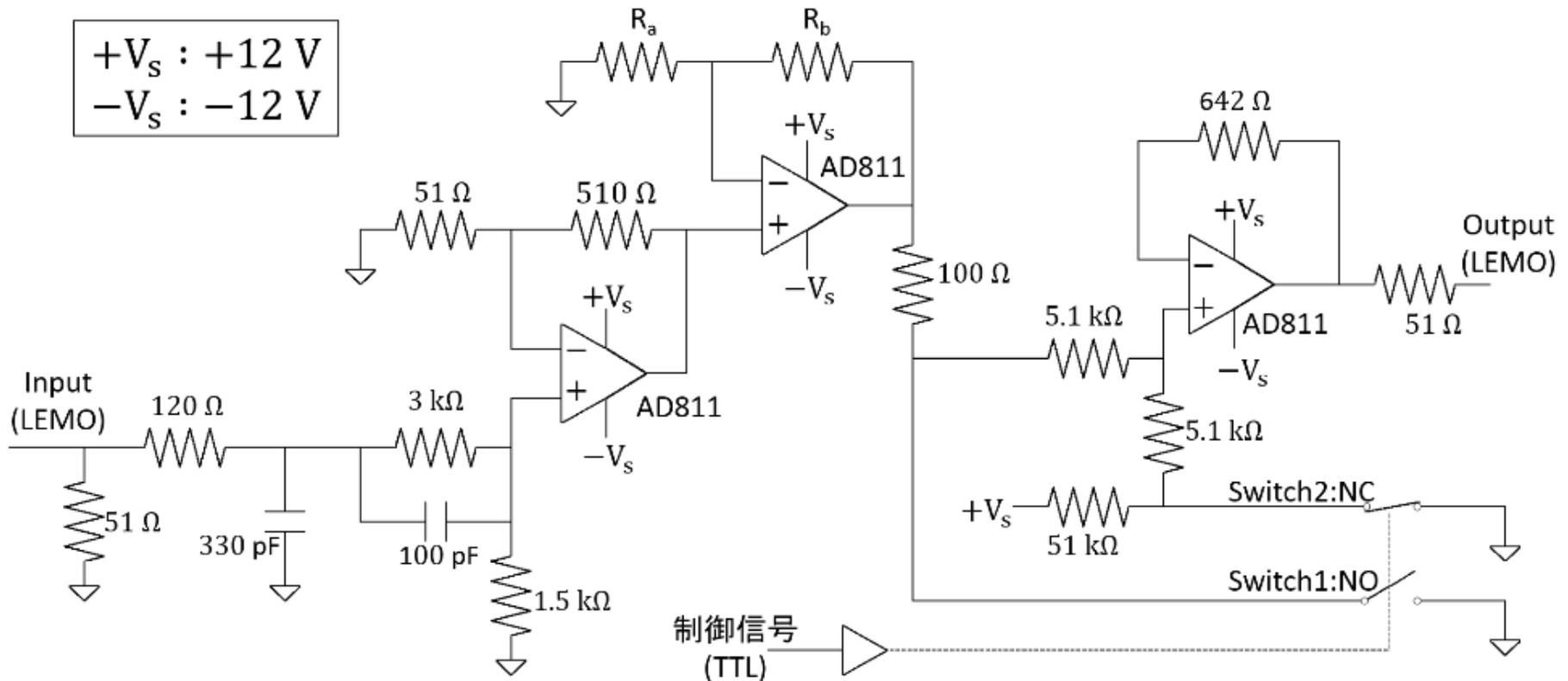
積分&PZC

非反転増幅

Vetoスイッチ

出力

V1724

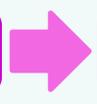


アナログ回路の設計思想

PMT



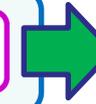
積分&PZC



非反転増幅



Vetoスイッチ

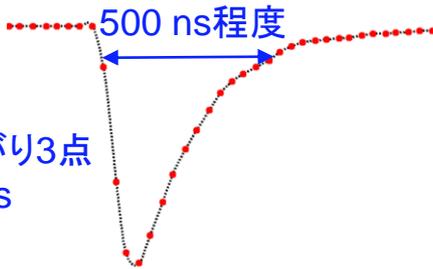


V1724

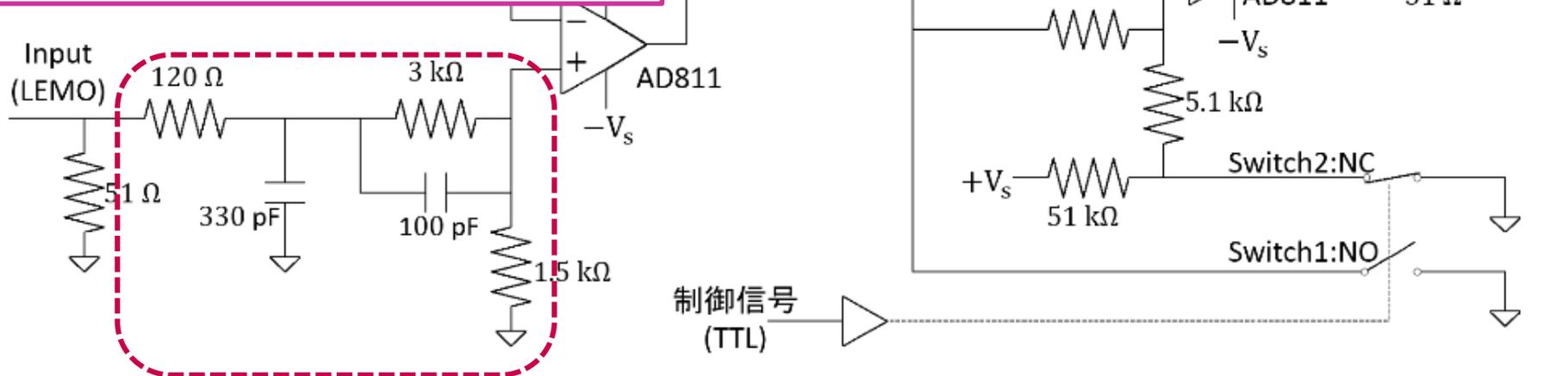
入力

出力

積分とポールゼロキャンセレーション



分解能の維持&十分な波形の分離能力



アナログ回路の設計思想

PMT

入力

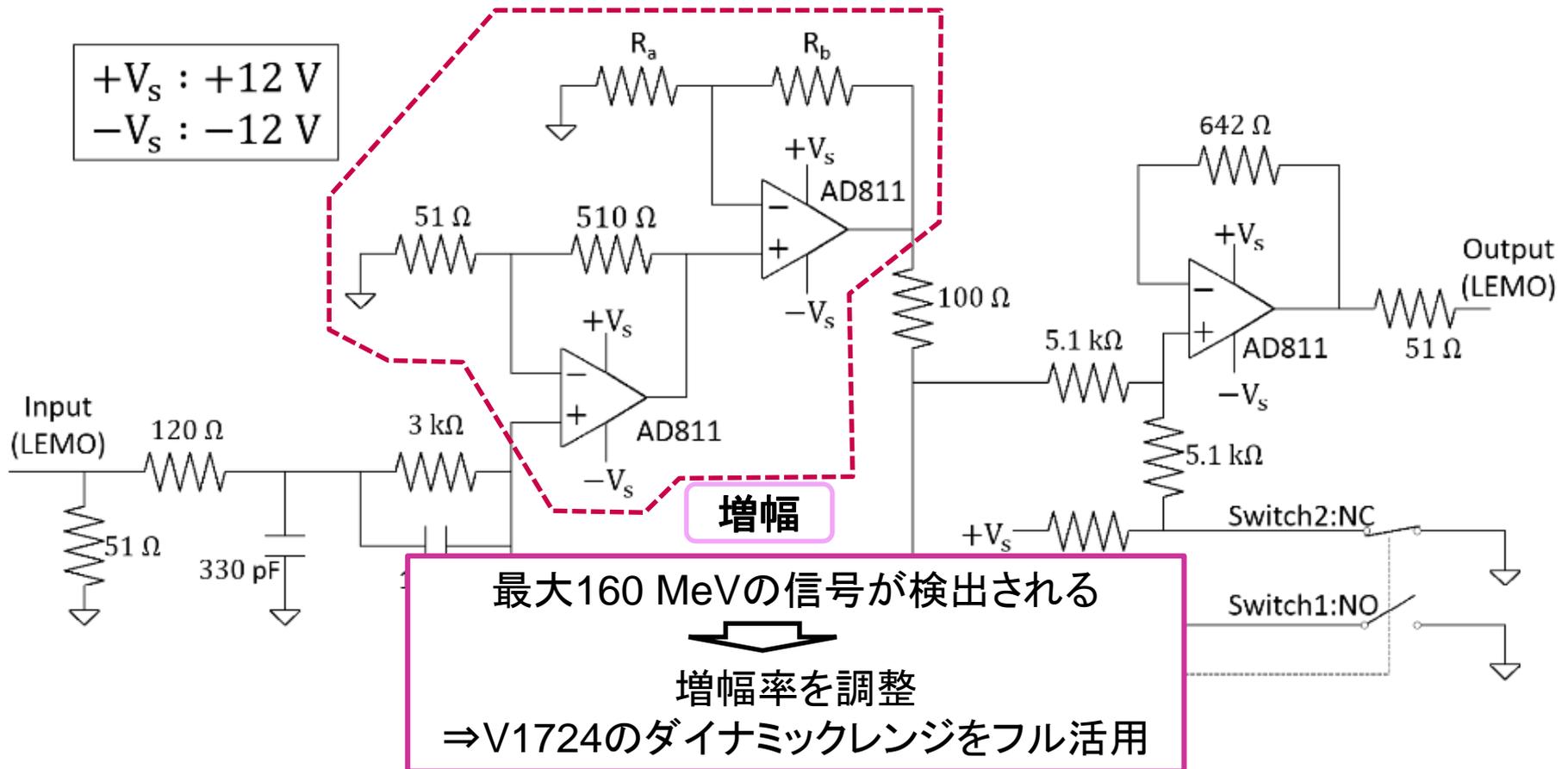
積分&PZC

非反転増幅

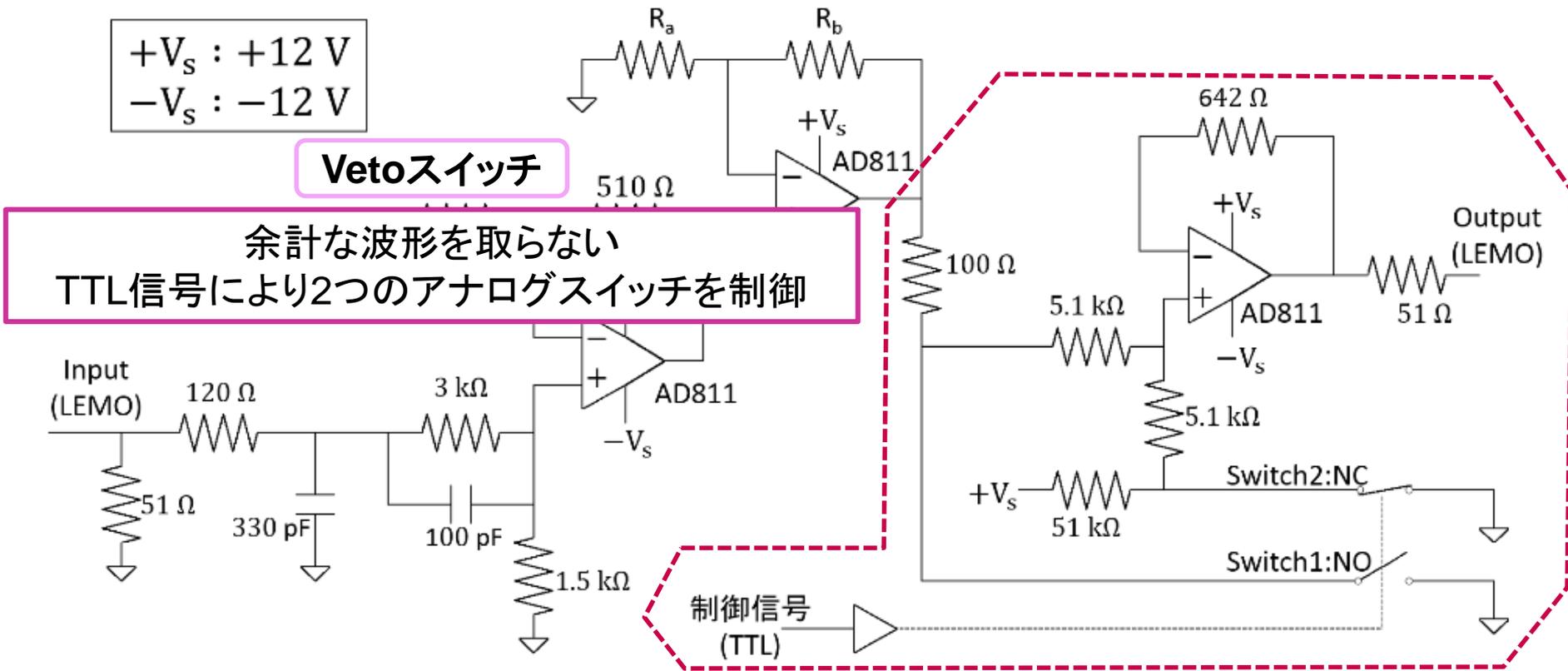
Vetoスイッチ

出力

V1724

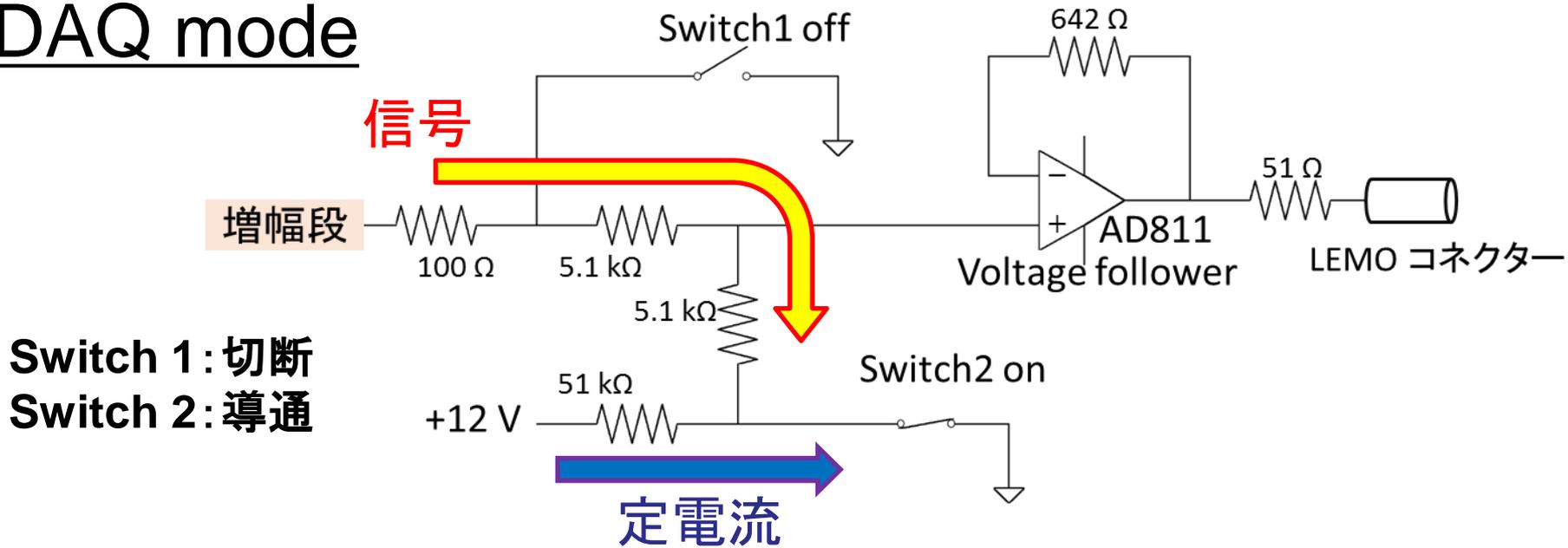


アナログ回路の設計思想



Vetoスイッチの切り替え

DAQ mode



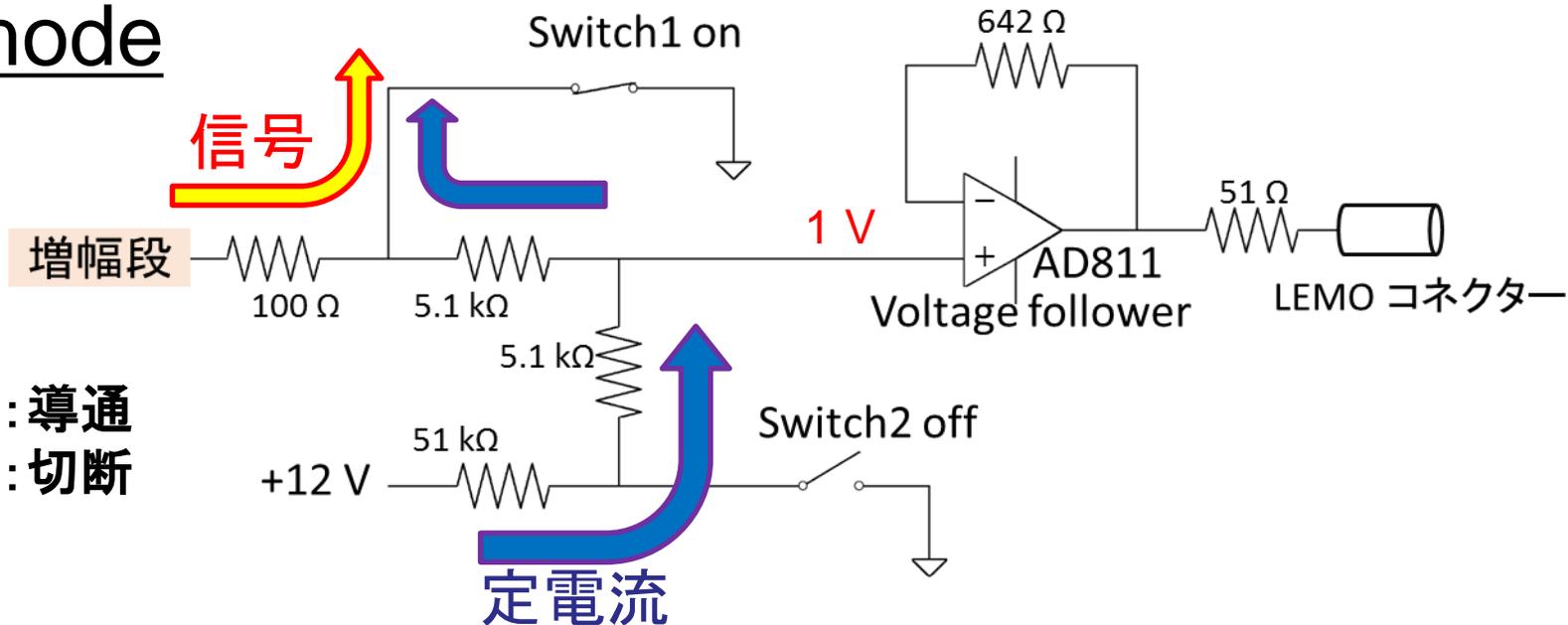
Switch 1: 切断
Switch 2: 導通

DAQ mode
増幅段からの信号が出力

データ取得時のモード

Vetoスイッチの切り替え

rest mode



Switch 1: 導通
Switch 2: 切断

DAQ mode
増幅段からの信号が出力

rest mode
定圧電源から分圧した定電圧が出力

データ取得時のモード

V1724のZero Suppression
と組み合わせてVeto

記録データ量をコントロール

Vetoスイッチの応答

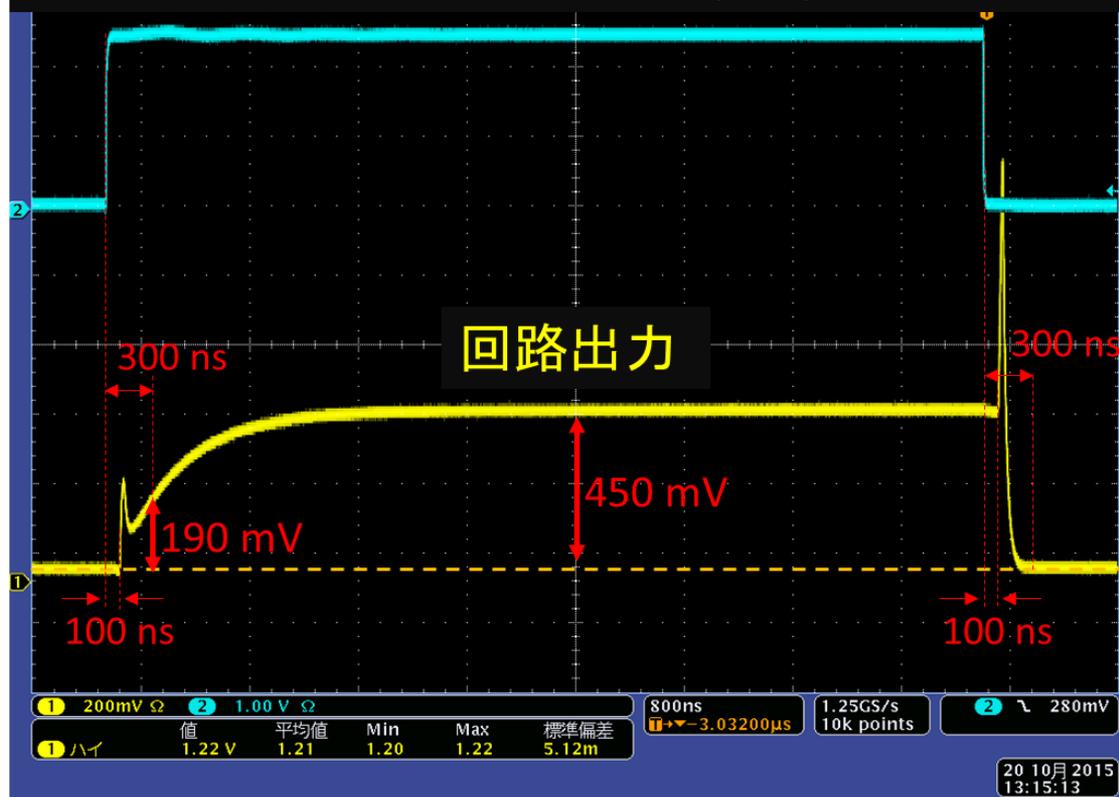
TTL信号によるスイッチの切り替え

DAQ mode

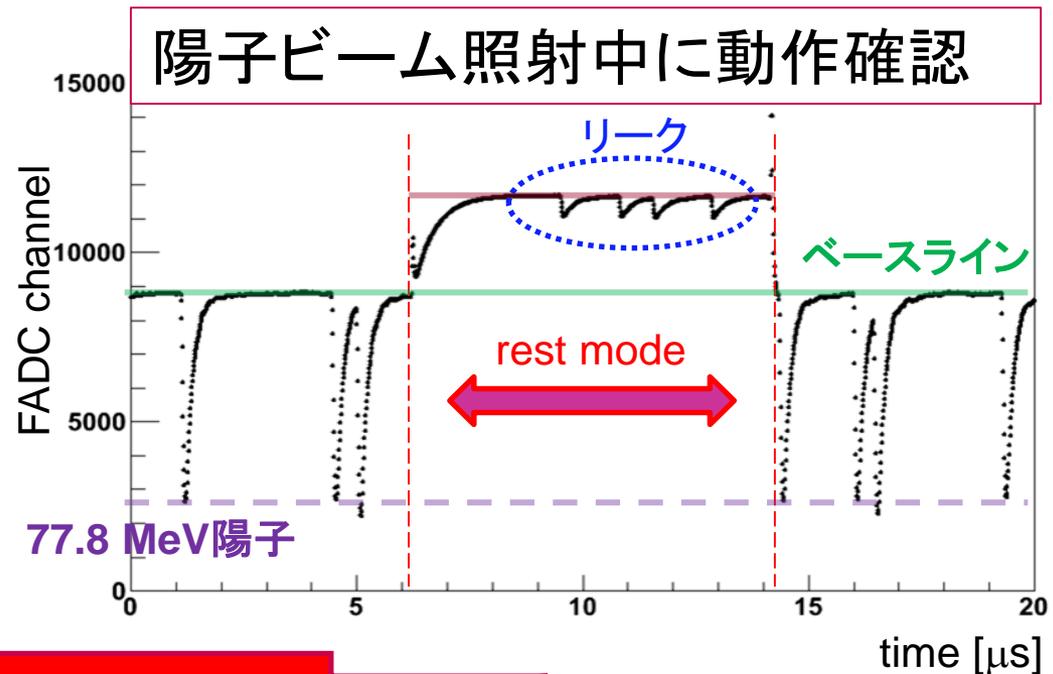
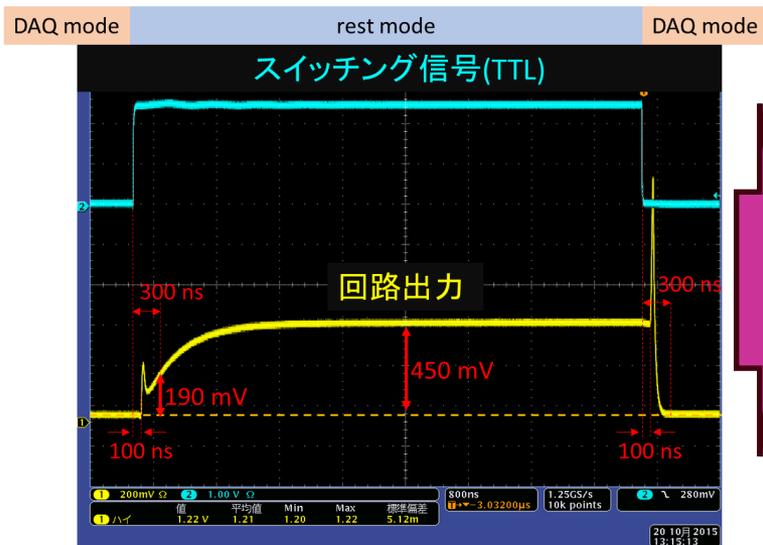
rest mode

DAQ mode

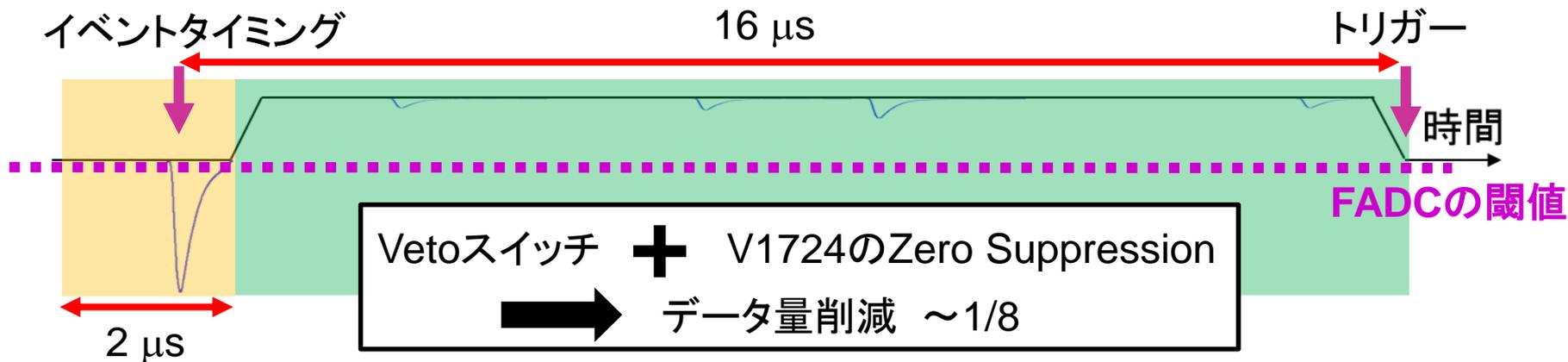
スイッチング信号(TTL)



Vetoスイッチの応答



E40実験におけるデータ収集

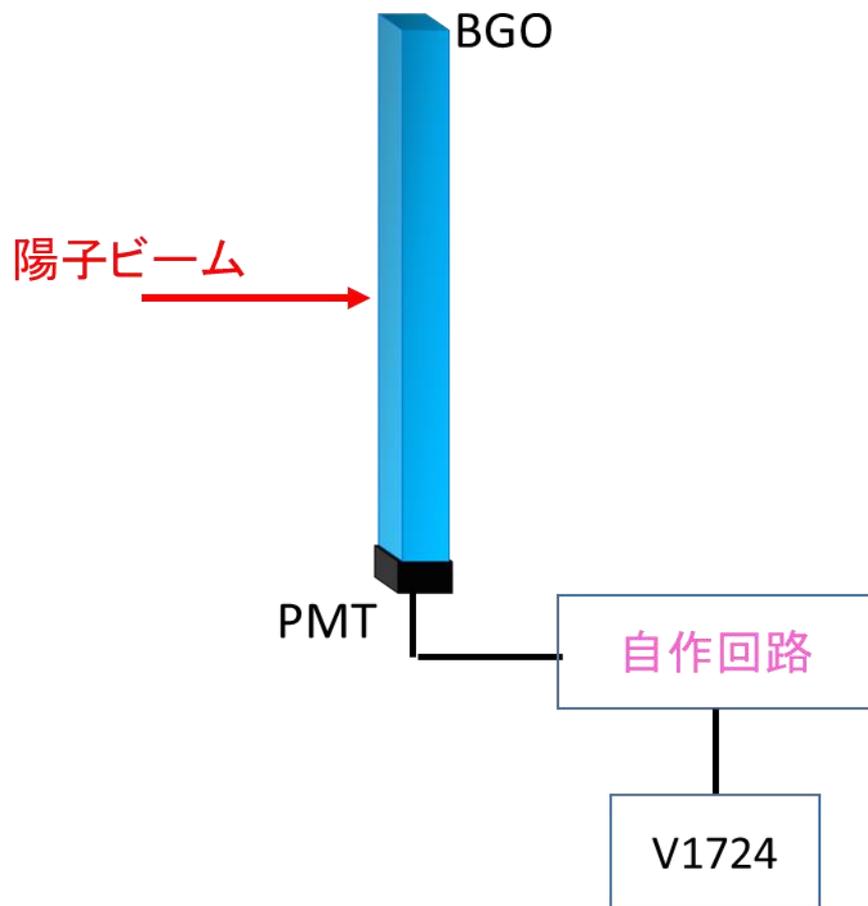


陽子ビームを用いた評価実験

2015/12 CYRIC in Tohoku University

目的

- ・PMTのオペレーション電圧の最適化
- ・読み出し回路の動作確認



77.8 MeVの陽子ビームを
BGOカロリメータに直接照射

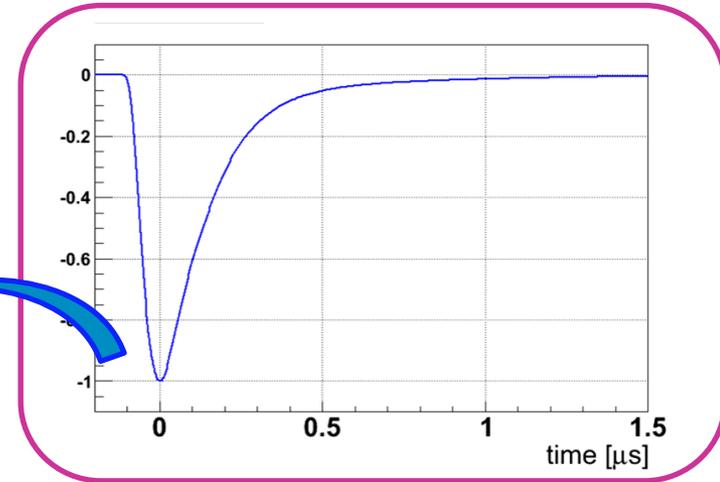
コンディション

- Beam rate
1 ~ 700 kHz
- HV of PMT
600 ~ 700 V

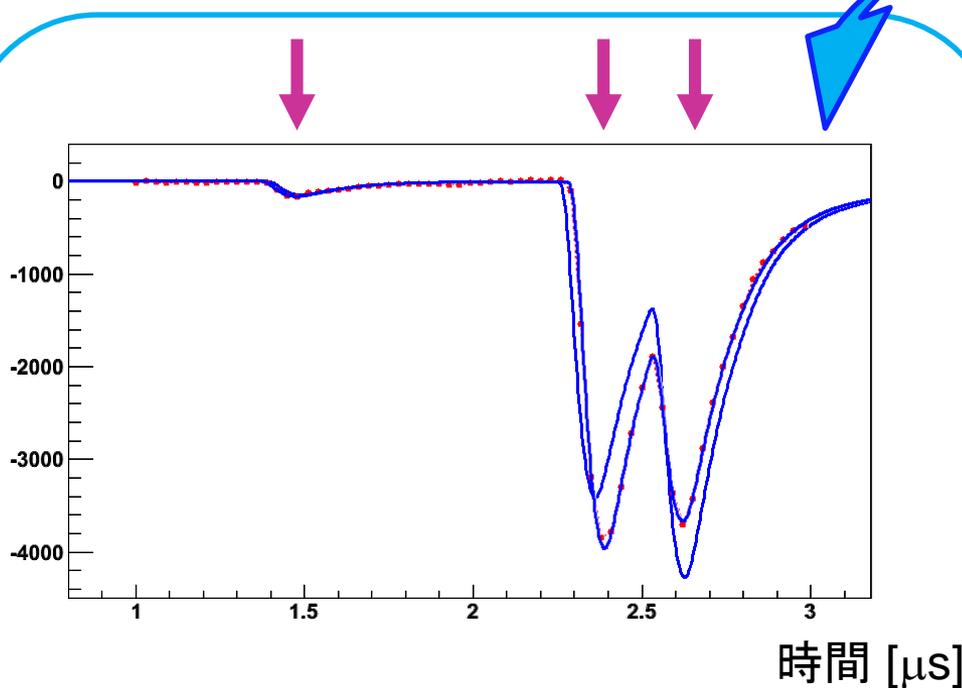
テンプレート波形によるフィッティング

1. 波形データから信号を探す。
2. フィッティング関数を用意する。
3. フィッティングする。

テンプレート波形



Flash ADCで取得した波形データ



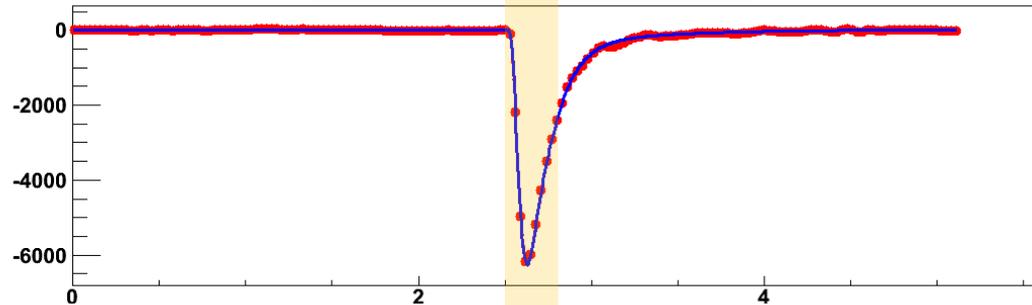
フィッティングパラメータ
横軸方向の平行移動
縦軸方向のスケールファクター

信号分離
&
波高情報の取得

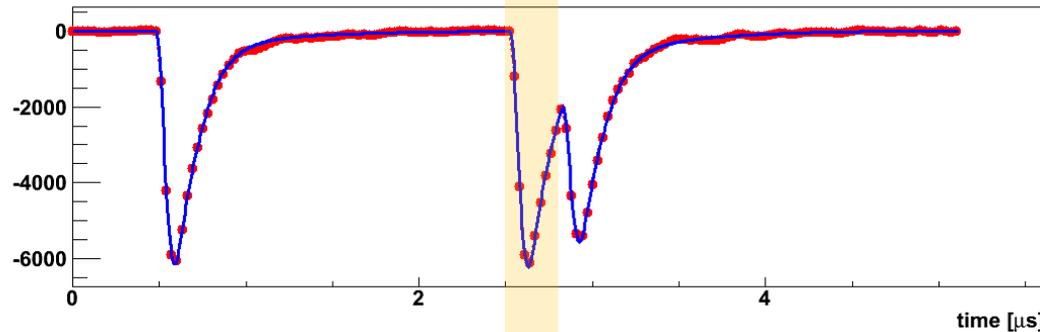
取得した波形データの例

5 μs 間の波形データ

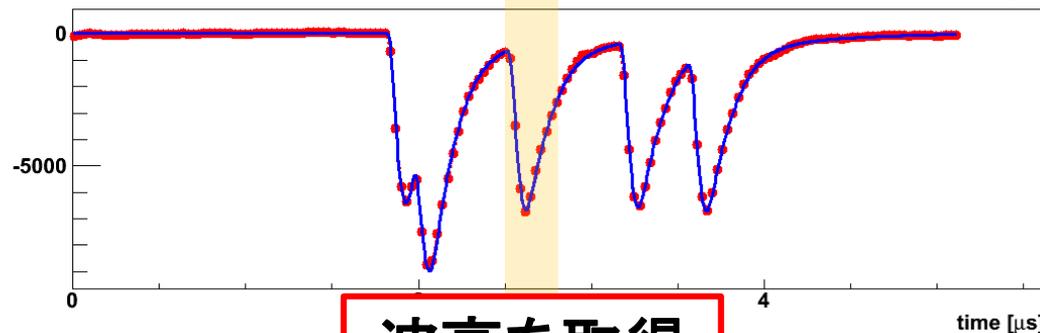
イベントタイミング



ビームレート: 1 kHz



ビームレート: 450 kHz



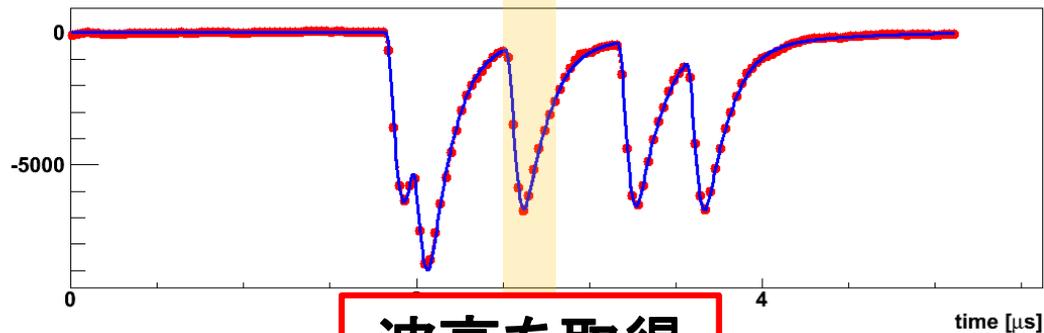
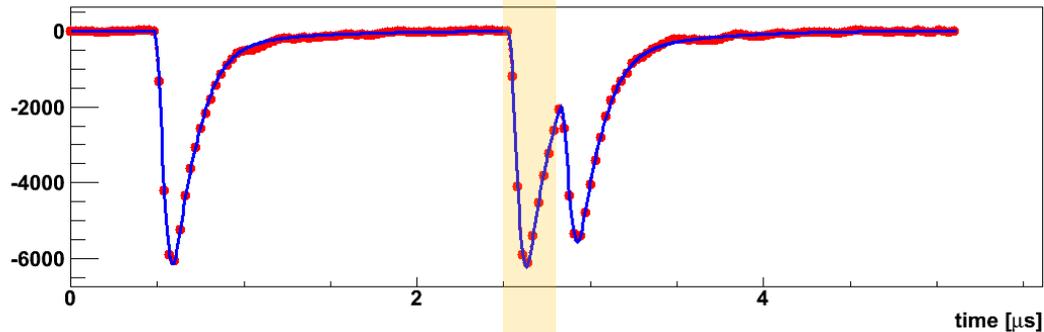
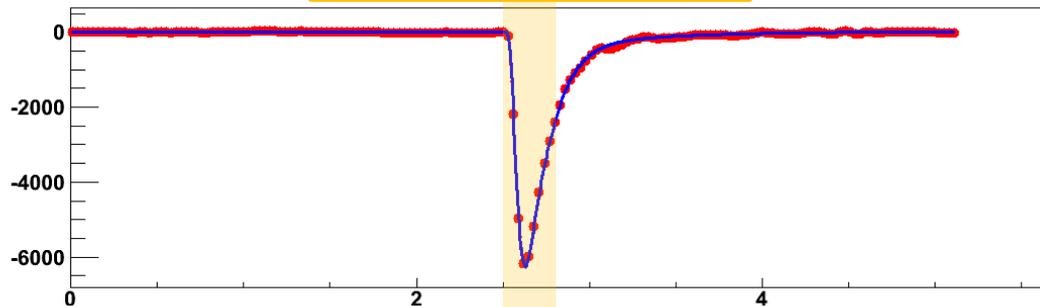
ビームレート: 700 kHz

波高を取得

取得した波形データの例

5 μs 間の波形データ

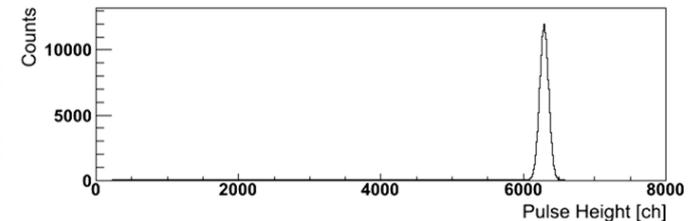
イベントタイミング



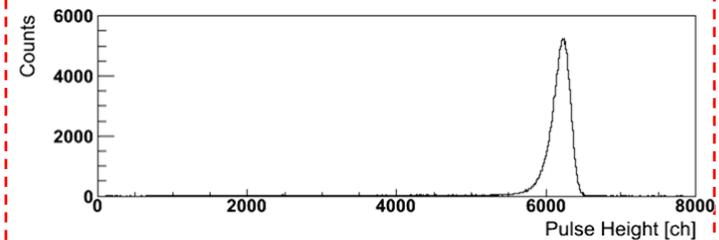
波高を取得

波高分布(PMT: 700V)

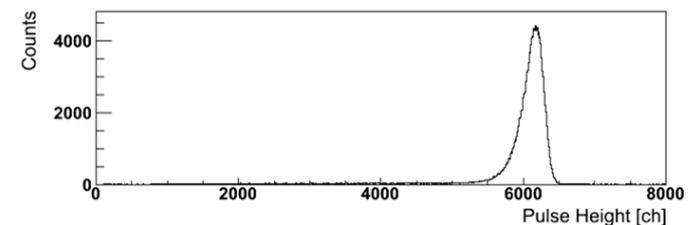
ビームレート: 1 kHz



ビームレート: 450 kHz



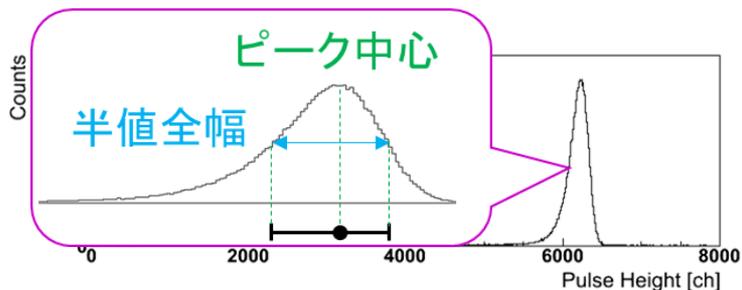
ビームレート: 700 kHz



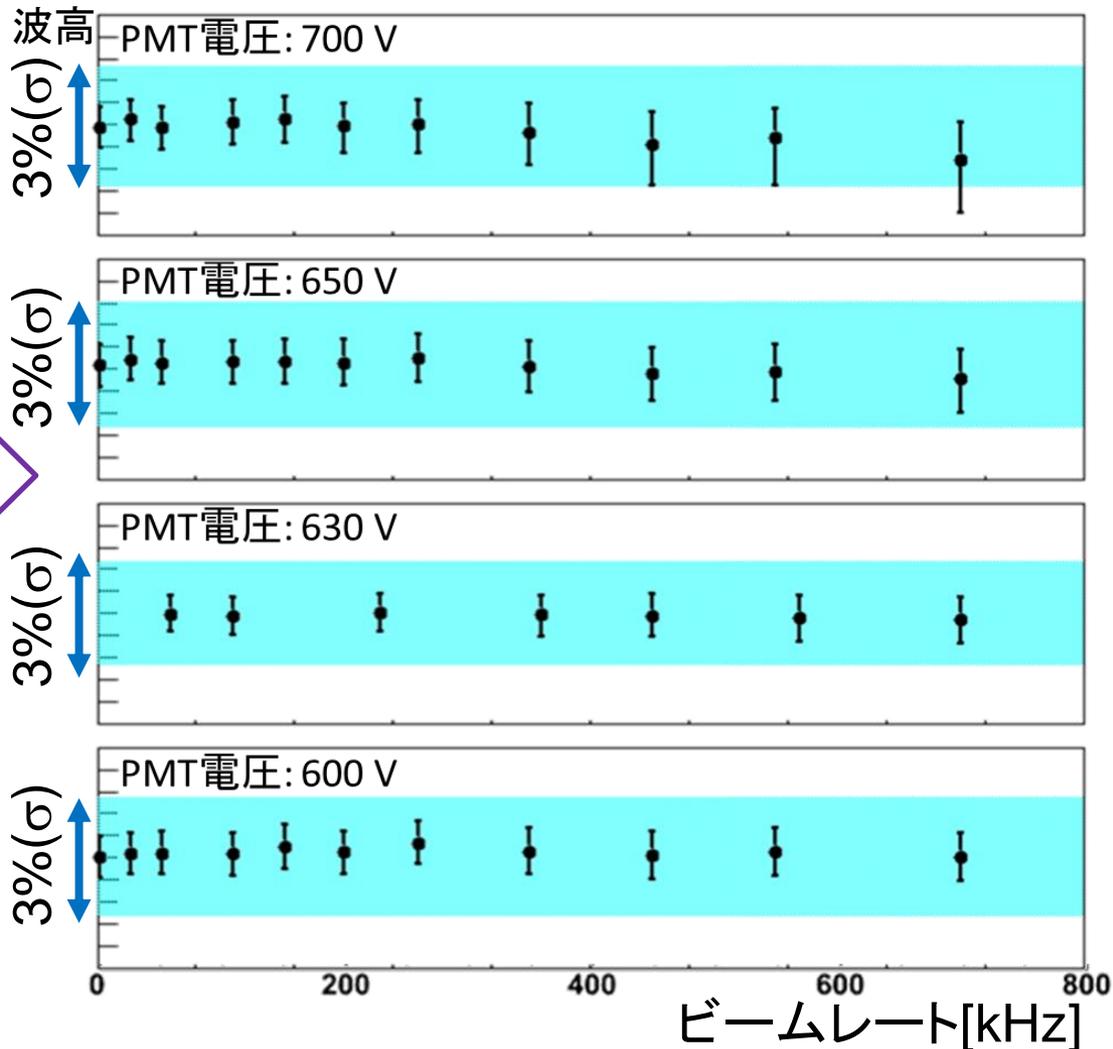
高計数率下における安定性

波高分布

PMT電圧700 V, ビームレート450 kHz



ピークのビームレート依存性



630 V以下で十分安定

エネルギー分解能

50 kHz: 1.0%

450 kHz: 1.3%

高計数率下でも要求を達成

エネルギー較正法



- ▶ イントロダクション
- ▶ BGOカロリメータの読み出しシステム
- ▶ **エネルギー較正法**
- ▶ 実機システムの構築と評価
- ▶ まとめ

現象論的な較正式の検討

BGOの発光量(L)とエネルギー(E)の対応式(陽子入射時)

$$L(E, A, Z) = a \times \left[E - b \ln \left(\frac{E + b}{b} \right) \right]$$

○パラメータ

a [ch/MeV] :シンチレーション効率やエレクトロニクスから決まるgain

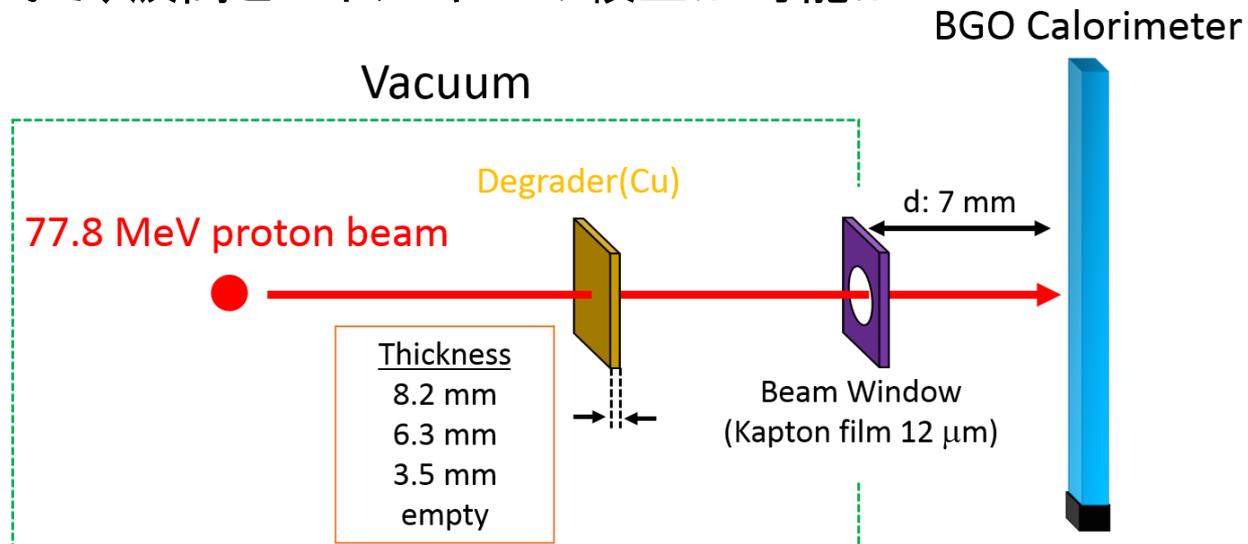
b [MeV] :クエンチング効果によるファクター

この現象論的な式で、波高とエネルギーの較正が可能か

波高とエネルギー
の対応を4点取得



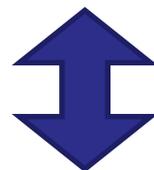
フィッティングを行い
較正式を決定



較正式の評価

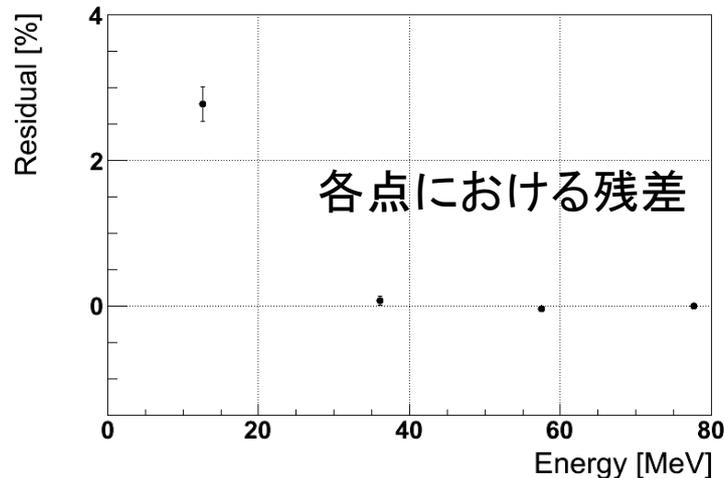
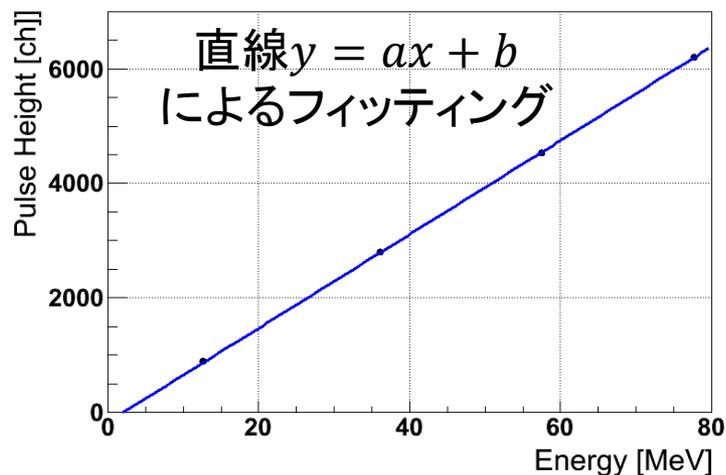
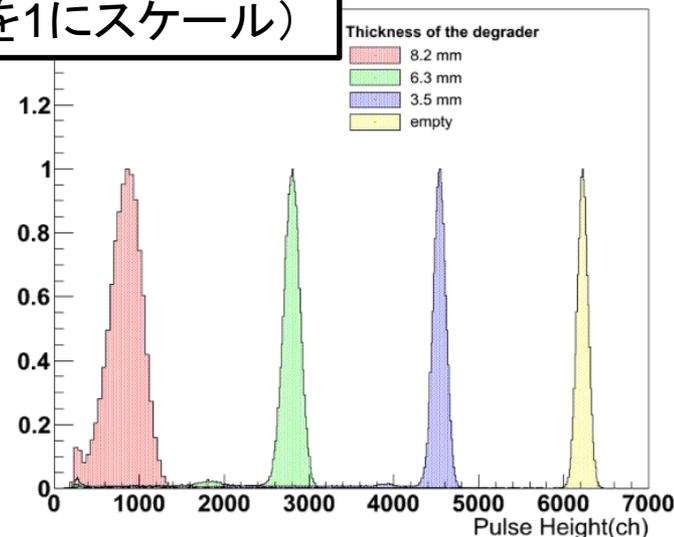
ディグレーダーを用いた測定の波高分布
→ 最頻値を取得

(縦軸を1にスケール)



4点の対応点

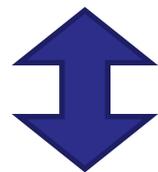
各測定点におけるエネルギーを
シミュレーションで取得



較正式の評価

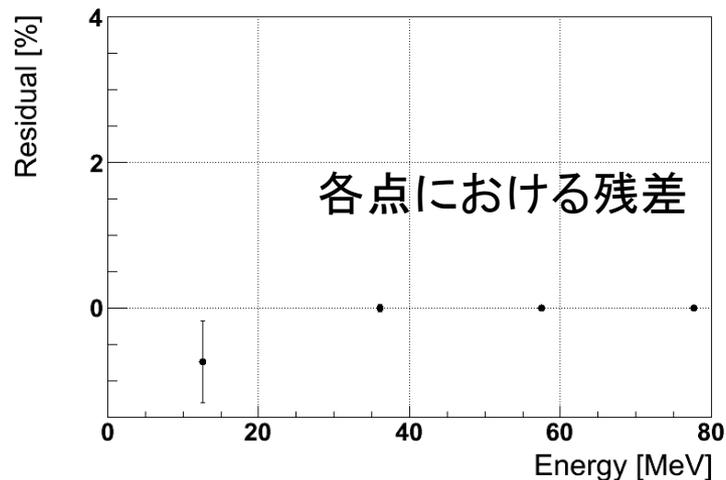
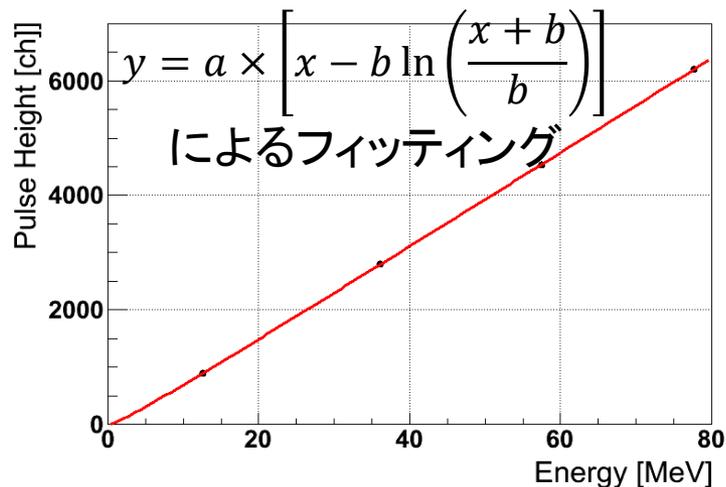
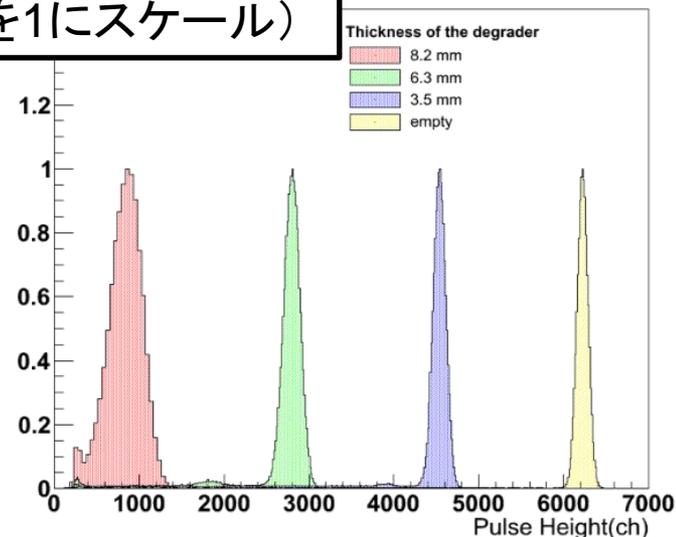
ディグレーダーを用いた測定の波高分布
→ 最頻値を取得

(縦軸を1にスケール)



4点の対応点

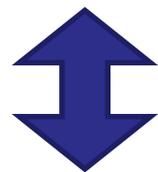
各測定点におけるエネルギーを
シミュレーションで取得



較正式の評価

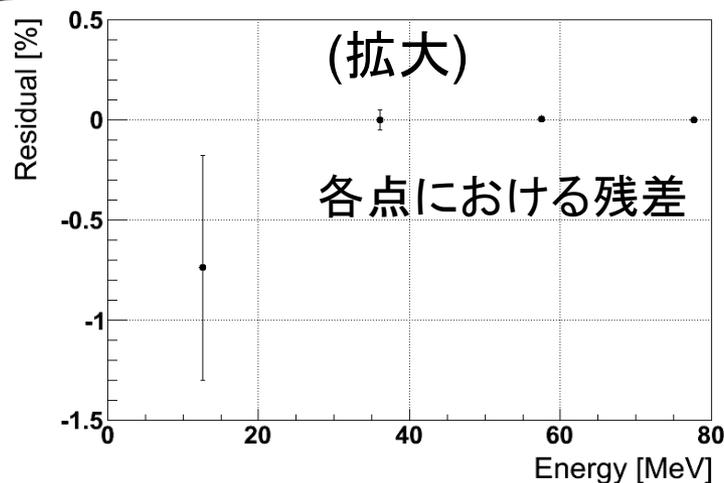
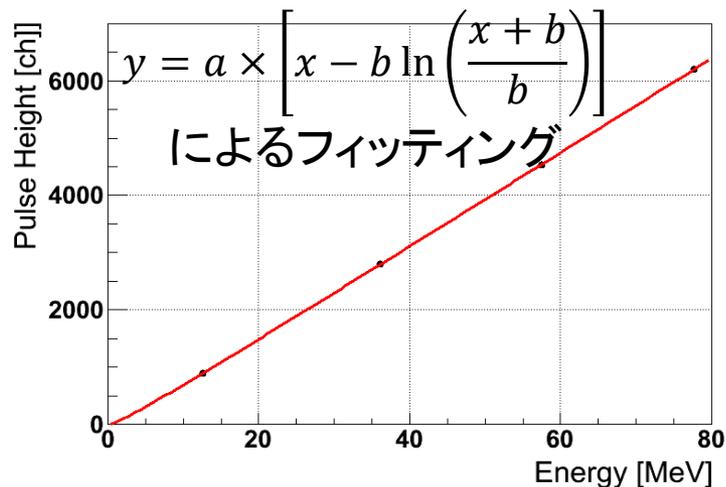
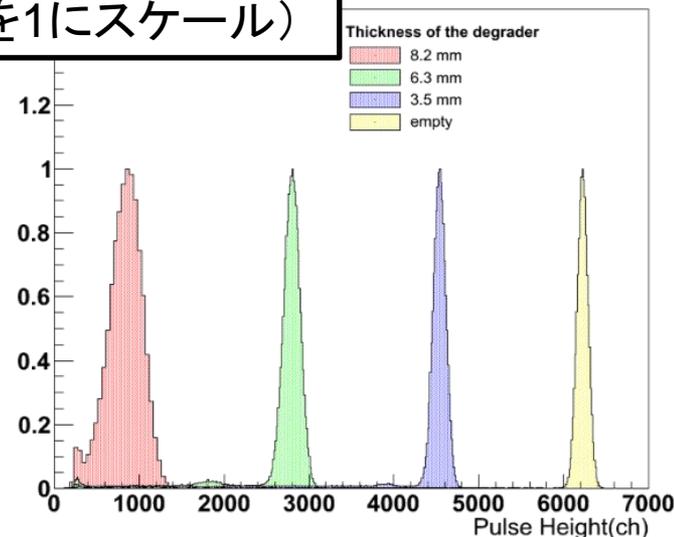
ディグレーダーを用いた測定の波高分布
→ 最頻値を取得

(縦軸を1にスケール)



4点の対応点

各測定点におけるエネルギーを
シミュレーションで取得



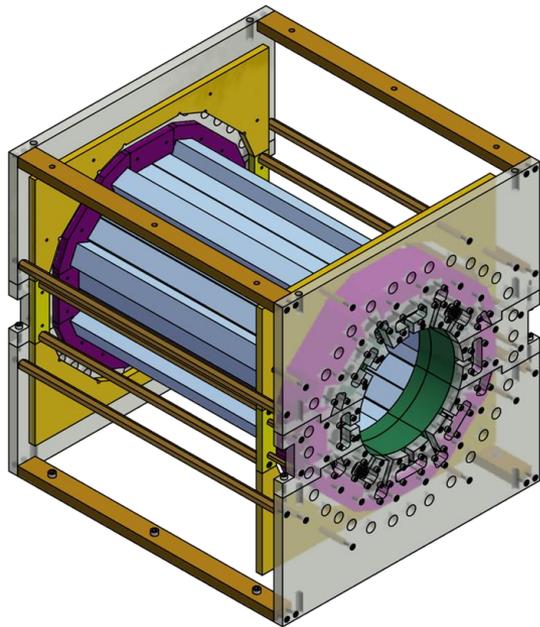
波高とエネルギーの較正式として有効

実機システムの構築と評価

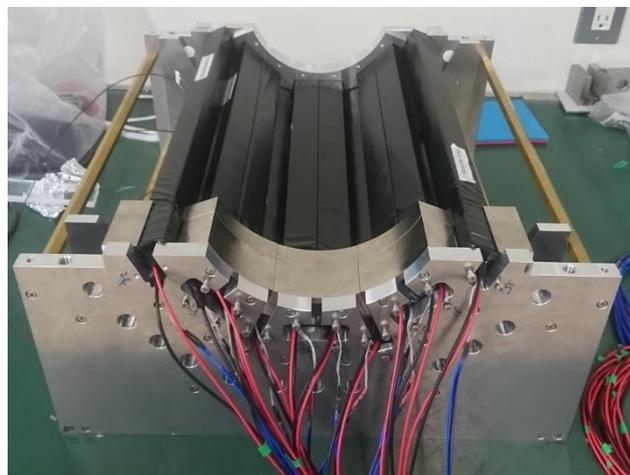
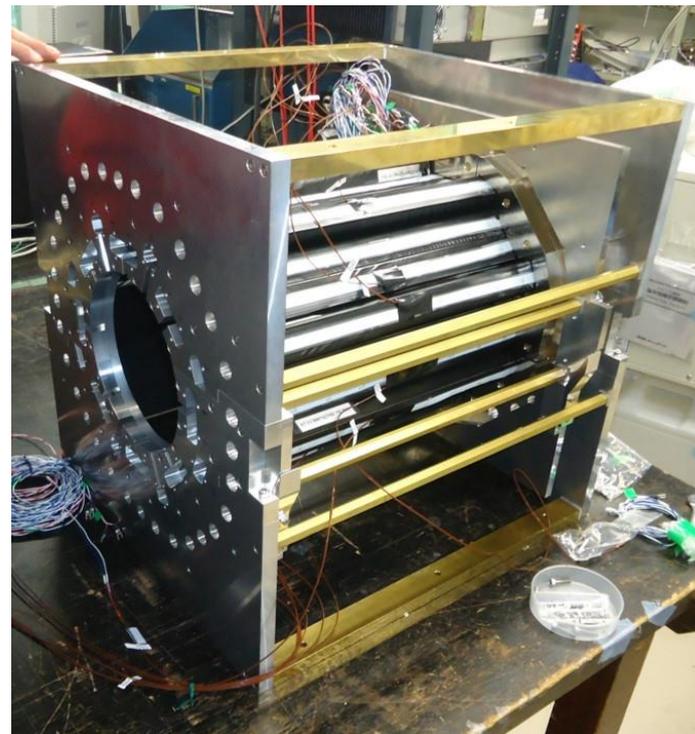
- ▶ イントロダクション
- ▶ BGOカロリメータの読み出しシステム
- ▶ エネルギー較正法
- ▶ **実機システムの構築と評価**
- ▶ まとめ

実機製作の完了

24本のBGOカロリメータの設置

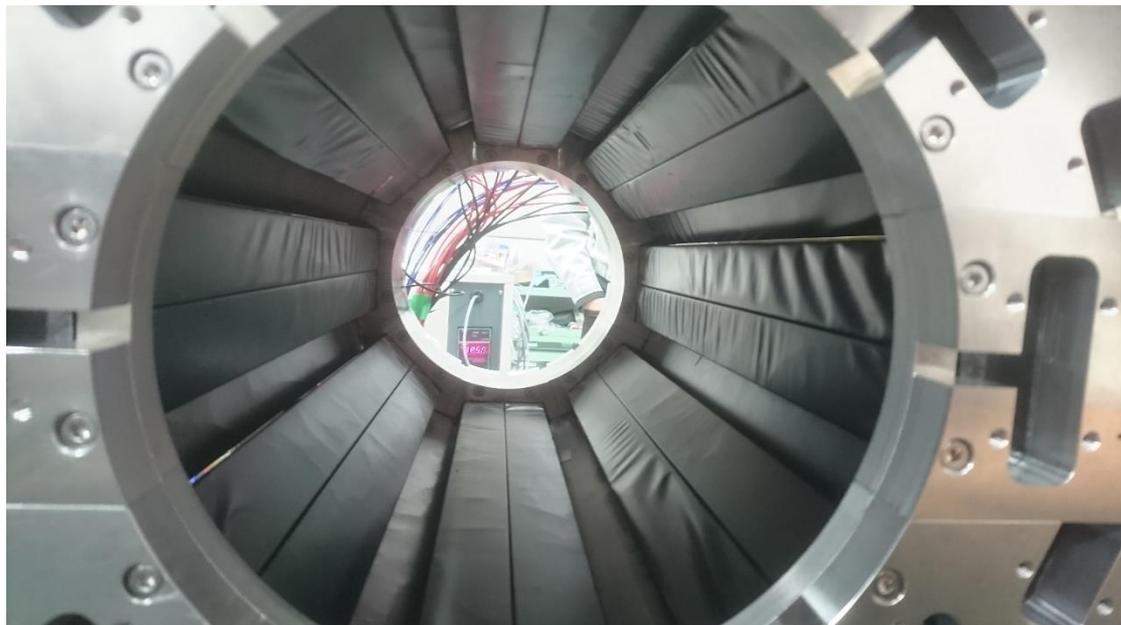


下半分ユニット

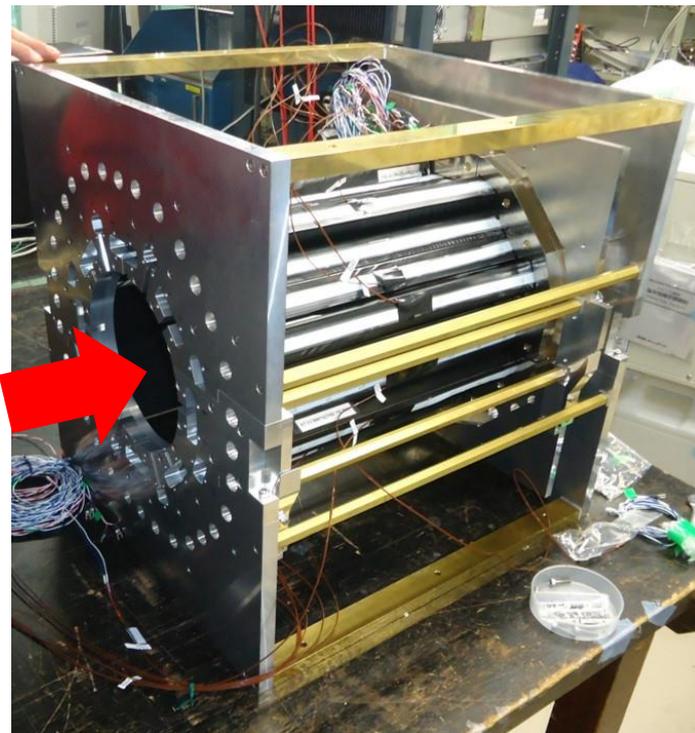


実機製作の完了

24本のBGOカロリメータの設置

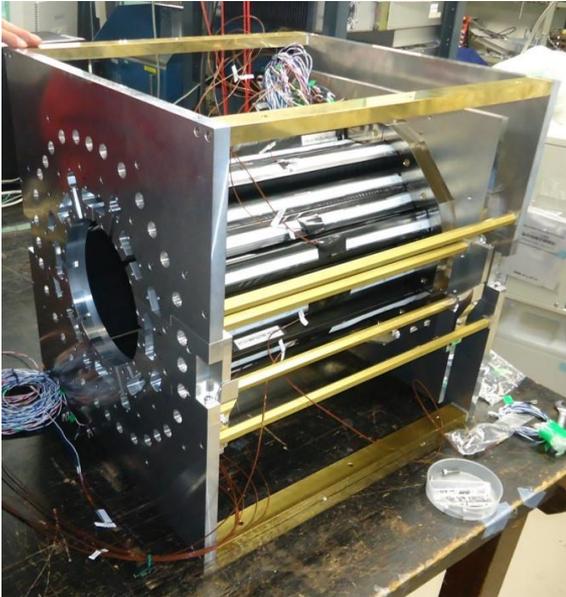


View



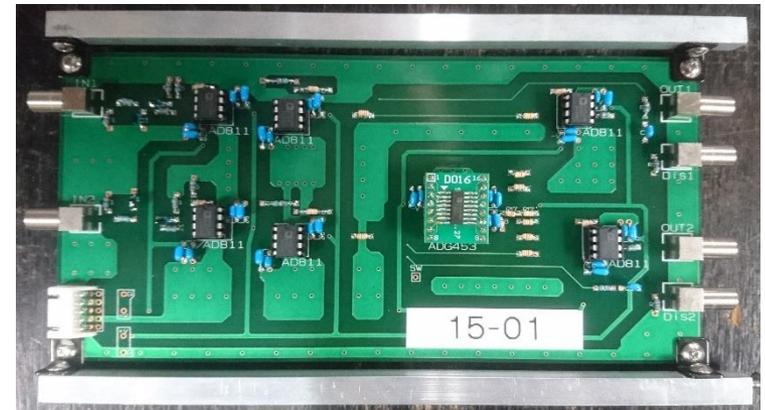
実機製作の完了

24本のBGOカロリメータの設置



実機回路の製作

実機回路 × 24 ch



^{137}Cs 線源を用いたエネルギー分解能測定

全チャンネルで15% (662 keV)を達成



80 MeVに対して1.4%のエネルギー分解能が期待 (要求3%)

DAQ効率測定

E40実験全体のDAQにBGOカロリメータの読み出しを組み込んだ。

DAQへの要求: 5 kHz

チェックソースを用いて
ランダムトリガーを生成

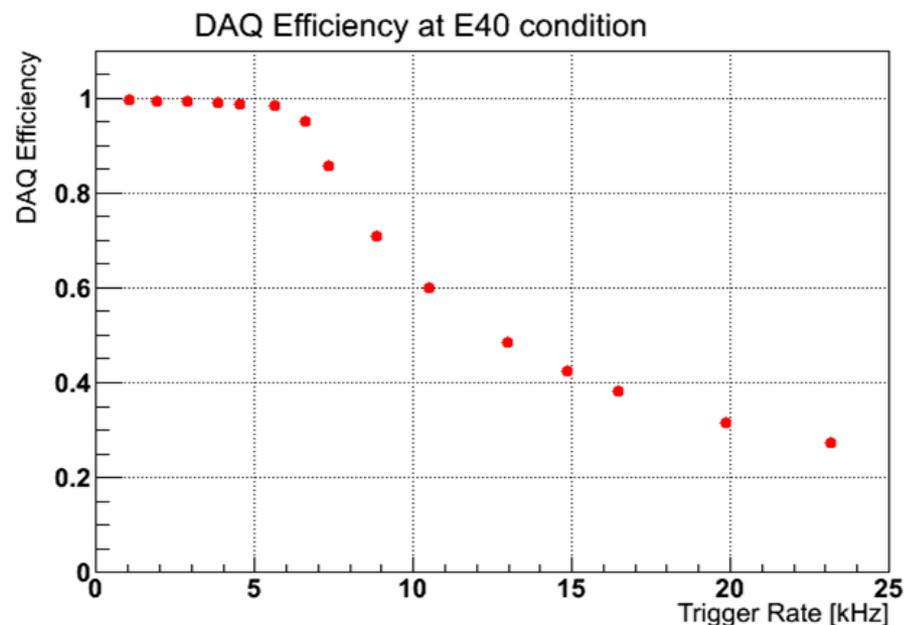
$$\text{DAQ効率} = \frac{\text{転送できたイベント数}}{\text{生成したトリガー数}}$$

1イベントのデータサイズ

VetoスイッチとZero Suppression機能
⇒イベントタイミングの2 μs のみ

最大のword数を想定(全ch取得)
⇒300 word, 転送時間 約130 μs

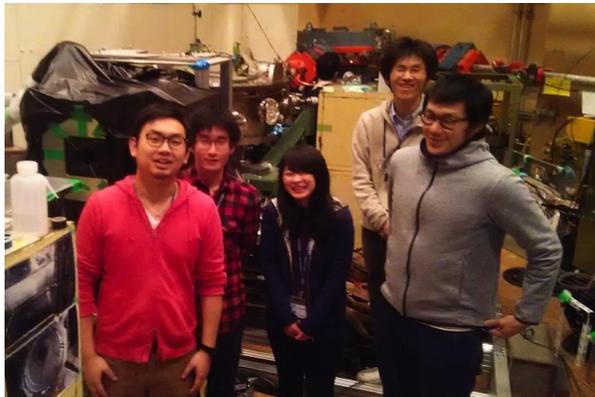
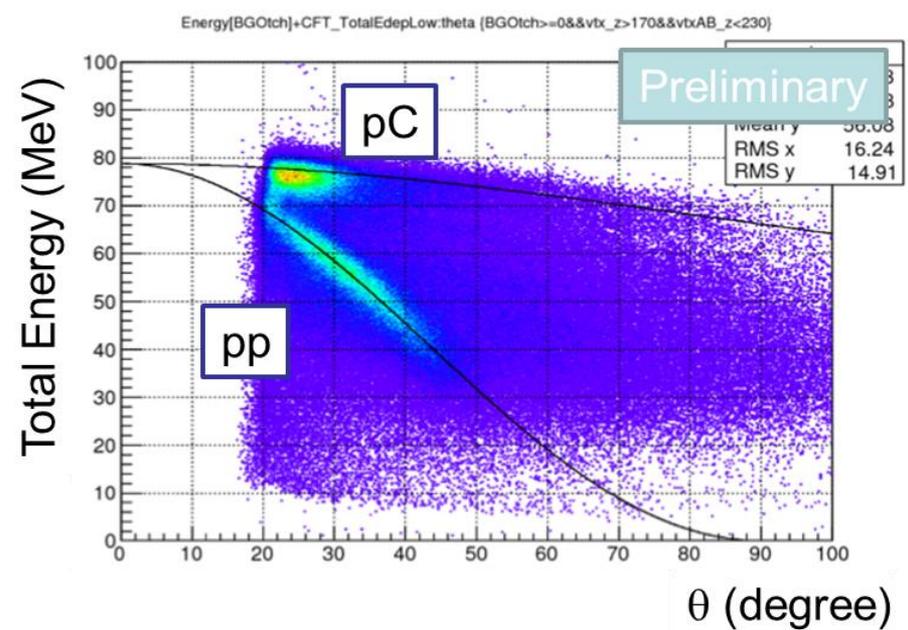
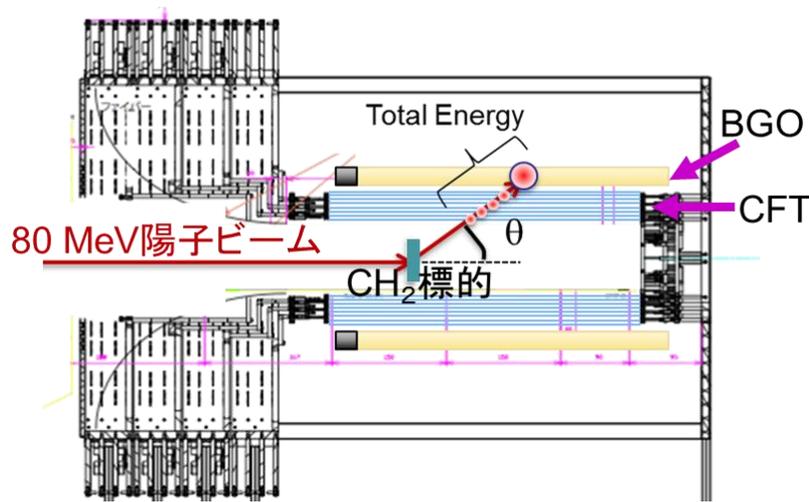
6 kHz以下で98%以上の効率
→十分な性能



その後の状況

- 2017年1月 pp,pC散乱実験 at CYRIC

CATCHシステム初の実験



E40スケジュール

2018年2月 コミッショニングをリクエスト

2018年6月以降 物理実験

まとめ



- ▶ イントロダクション
- ▶ BGOカロリメータの読み出しシステム
- ▶ エネルギー較正法
- ▶ 実機システムの構築と評価
- ▶ **まとめ**

発表のまとめ

- Σp 散乱実験(J-PARC E40実験)のための検出器を開発中
 - BGOカロリメータ
 - Flash ADCを用いた波形読み出し法
 - PMTが高計数率下で不安定
- 高計数率下に対応した読み出しシステムの開発
 - アナログ回路の設計・製作
 - 波形解析プログラムの開発
 - 性能試験
 - PMTの印加電圧: 630 V以下
 - エネルギー分解能 $\sigma=1.0\%$ (50 kHz), 1.3% (450 kHz) at 80 MeV proton
- 現象論的なエネルギー較正式の有効性を確認
- 実機(総数24)のBGOカロリメータシステムの構築を完了
 - エネルギー分解能: $\sigma=15\%$ 以下 at 662 keV γ ray
 - DAQ効率: 98% (6 kHz以下)
- 来年本実験予定