

CTA報告169: CTA大口径望遠鏡2-4号機 焦点面カメラモジュールの 組立および性能試験(II)

高橋光成^A, 猪目祐介^A, 今川要^B, 岩村由樹^A, 大岡秀行^A, 岡知彦^B, 岡崎奈緒^A, 奥村暁^{C, D}, 折戸玲子^E, 梶原侑貴^B, 片桐秀明^F,
川村孔明^G, 櫛田淳子^H, 窪秀利^B, 郡司修一^I, 小林志鳳^A, 齋藤隆之^A, 櫻井駿介^A, 佐々木寅旭^J, 鈴木萌^F, 砂田裕志^J, 立石大^J,
田中真伸^K, 塚本友祐^G, 手嶋政廣^{A, L}, 寺田幸功^J, 中森健之^I, 生天目康之^H, 西嶋恭司^H, 野上優人^F, 野崎誠也^B, 野田浩司^A,
Daniela Hadasch^A, 古田智也^H, Daniel Mazin^{A, L}, 山本常夏^G, 吉田龍生^F, 他 CTA-Japan Consortium, 池野正弘^{K, M},

Antonios Dettlaff^L

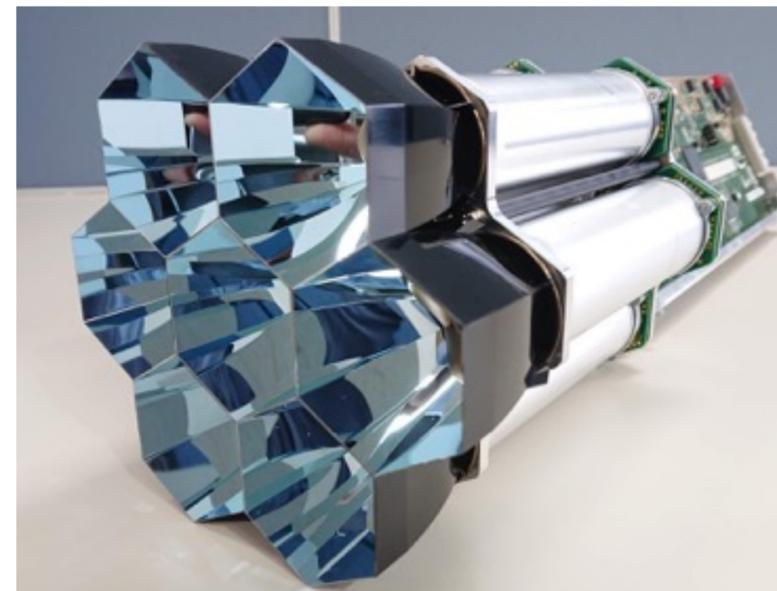
(所属)

東大宇宙線研^A, 京大理^B, 名大ISEE^C, 名大KMIP^D, 徳島大理工^E, 茨城大理^F, 甲南大理工^G, 東海大理^H, 山形大理^I, 埼玉大理^J,

KEK素核研^K, マックスプランク物理^L, Open-It^M

LST2-4号機カメラモジュールのLST1からの主な変更点

- 📍カメラモジュール：7本の光電子増倍管（PMT）とアンプ、集光器、読み出し基板、制御基板などから成る
- 📍望遠鏡あたり265モジュールでカメラが構成される
- 📍PMTの変更点
 - ・段数を8段から7段に
 - ・比較的低ゲインでもパルス幅を短くでき、寿命の改善を見込める
- 📍読み出し基板の変更点
 - ・サンプリング時刻較正のためのサイン波生成回路を搭載
 - ・供給電圧および温湿度のモニタリング回路を搭載
 - ・モジュール間のトリガー時刻のばらつきを抑えるため、トリガー信号にFPGAをバイパスさせる

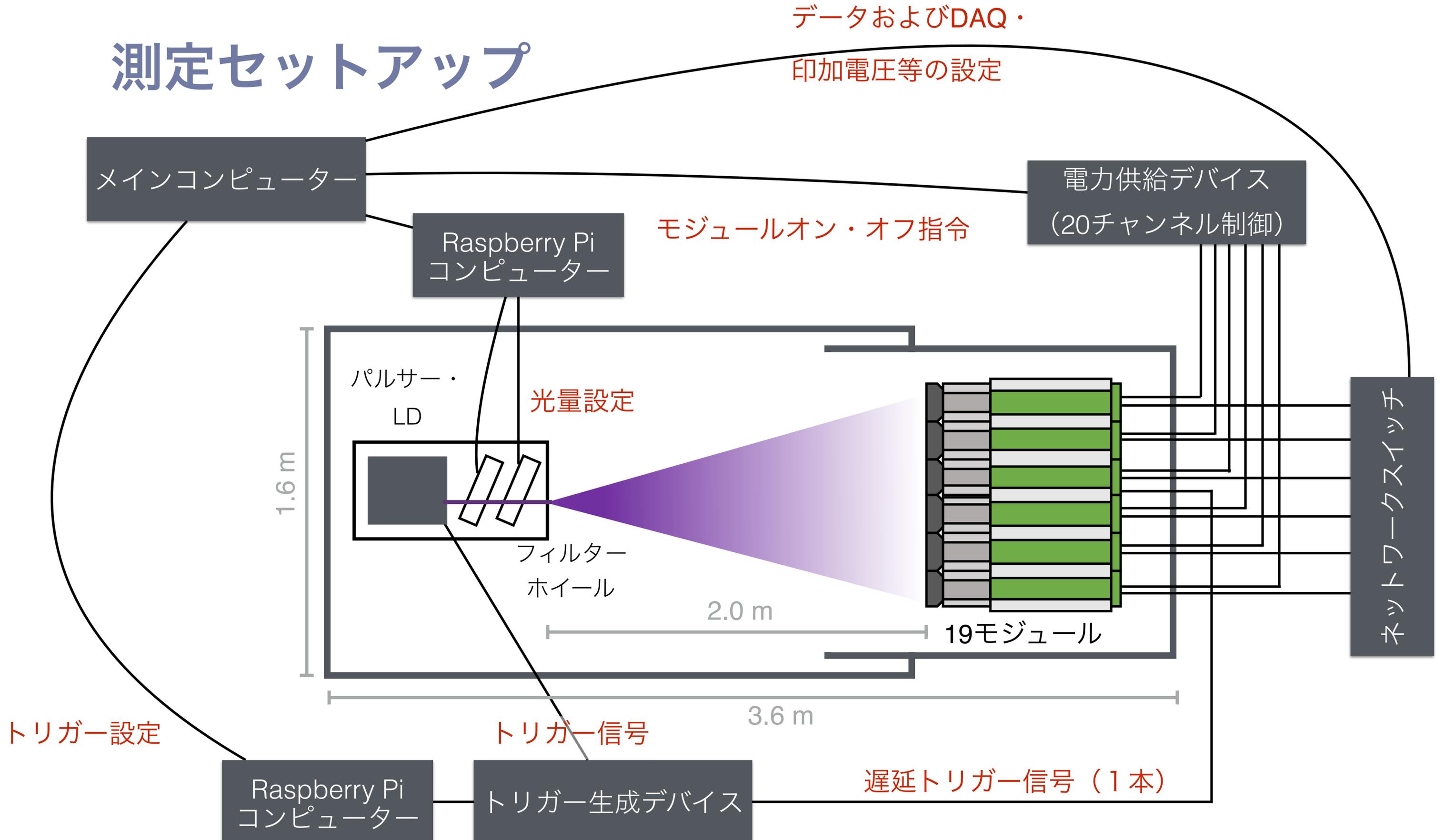


カメラモジュール

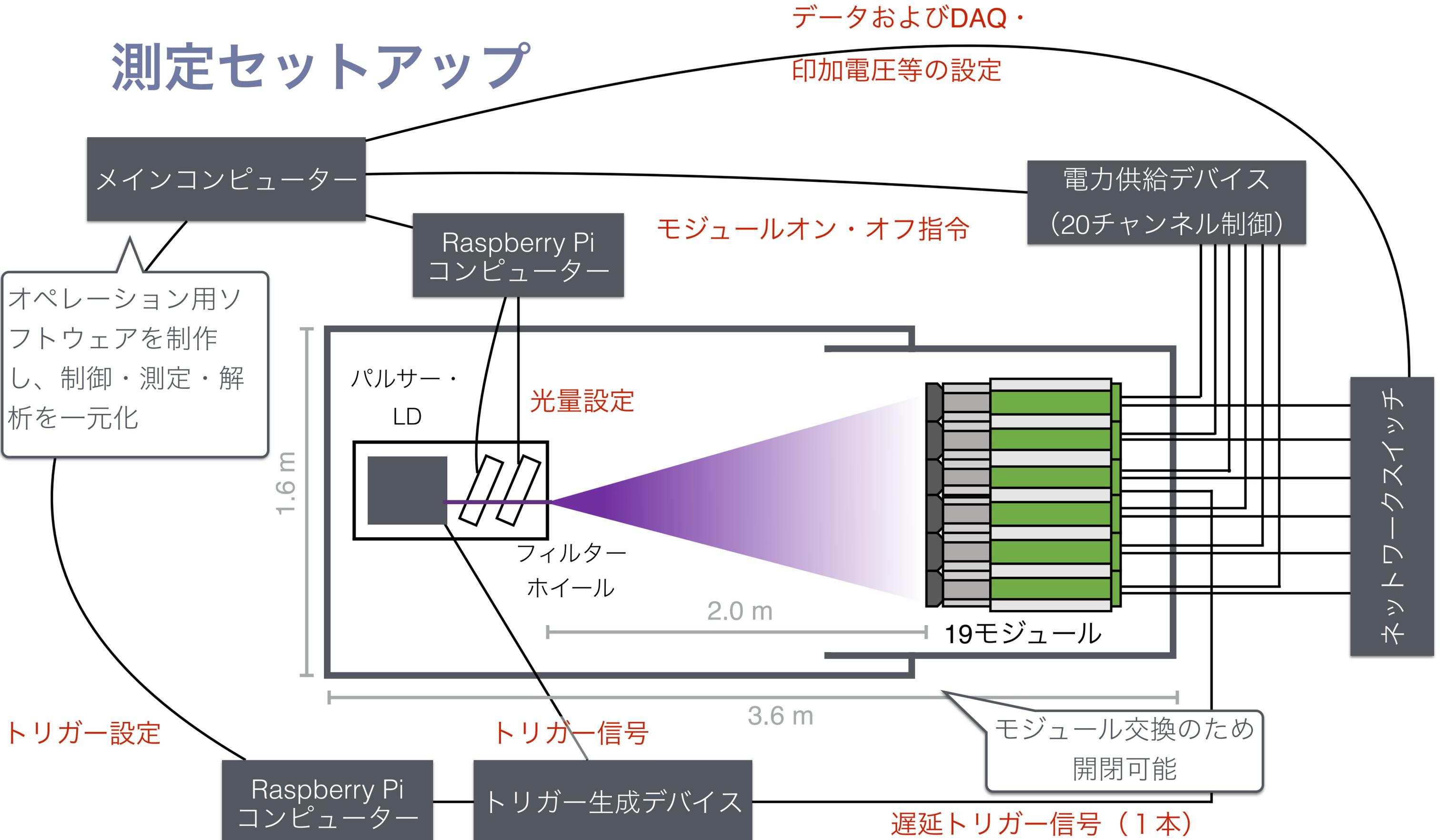
信号読み出し基板



測定セットアップ



測定セットアップ



光源ボックス

データおよびDAQ・
印加電圧等の設定

メインコンピューター

電力供給デバイス

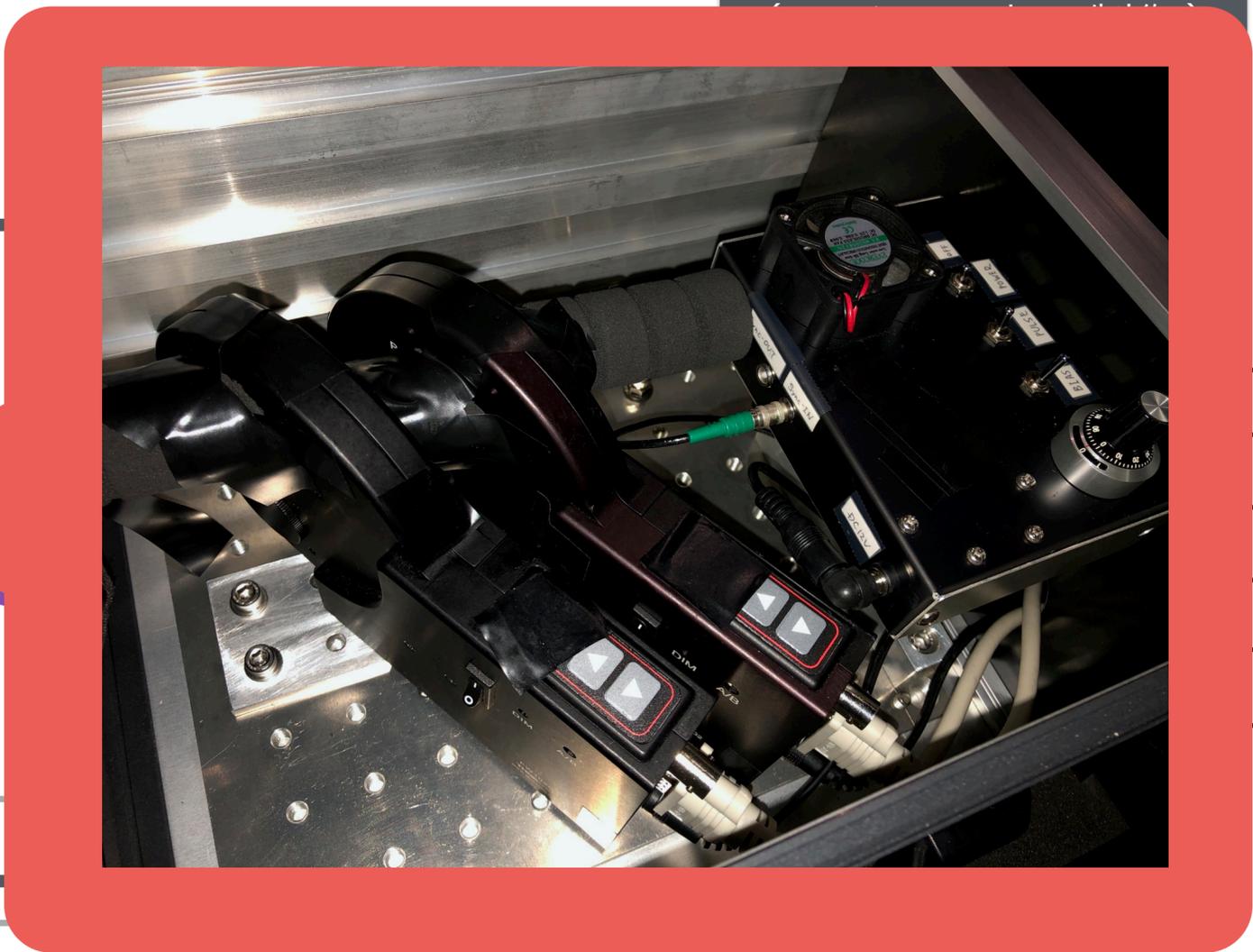
Raspberry Pi
コンピューター

パルサー・
LD

光量設定

1.6 m

フィルター
ホイール



ネットワークスイッチ

トリガー設定

トリガー信号

Raspberry Pi
コンピューター

トリガー生成デバイス

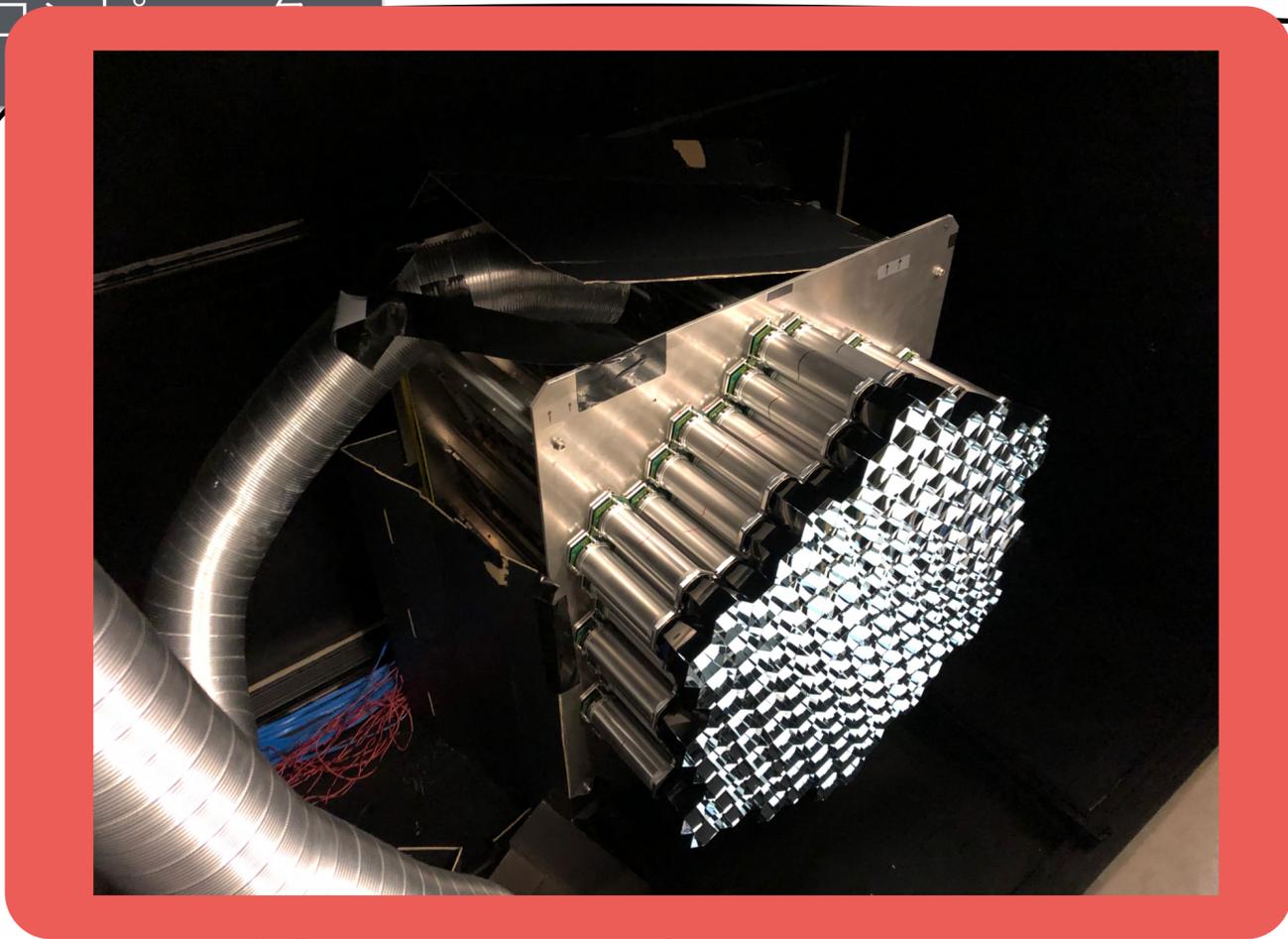
遅延トリガー信号 (1本)

モジュールホルダー (前面)

データおよびDAQ・

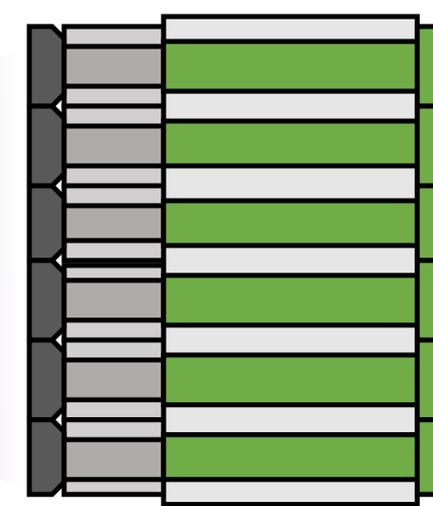
印加電圧等の設定

メインコンピュータ



オン・オフ指令

電力供給デバイス
(20チャンネル制御)



19モジュール

ネットワークスイッチ

トリガー設定

Raspberry Pi
コンピューター

トリガー信号

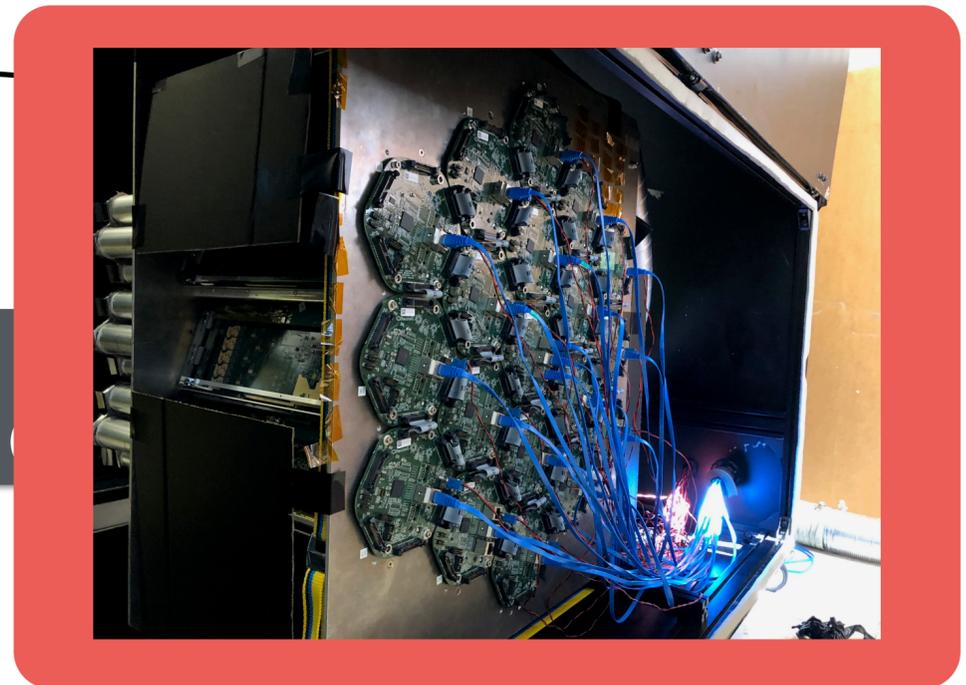
トリガー生成デバイス

3.6 m

遅延トリガー信号 (1本)

モジュールホルダー (背面)

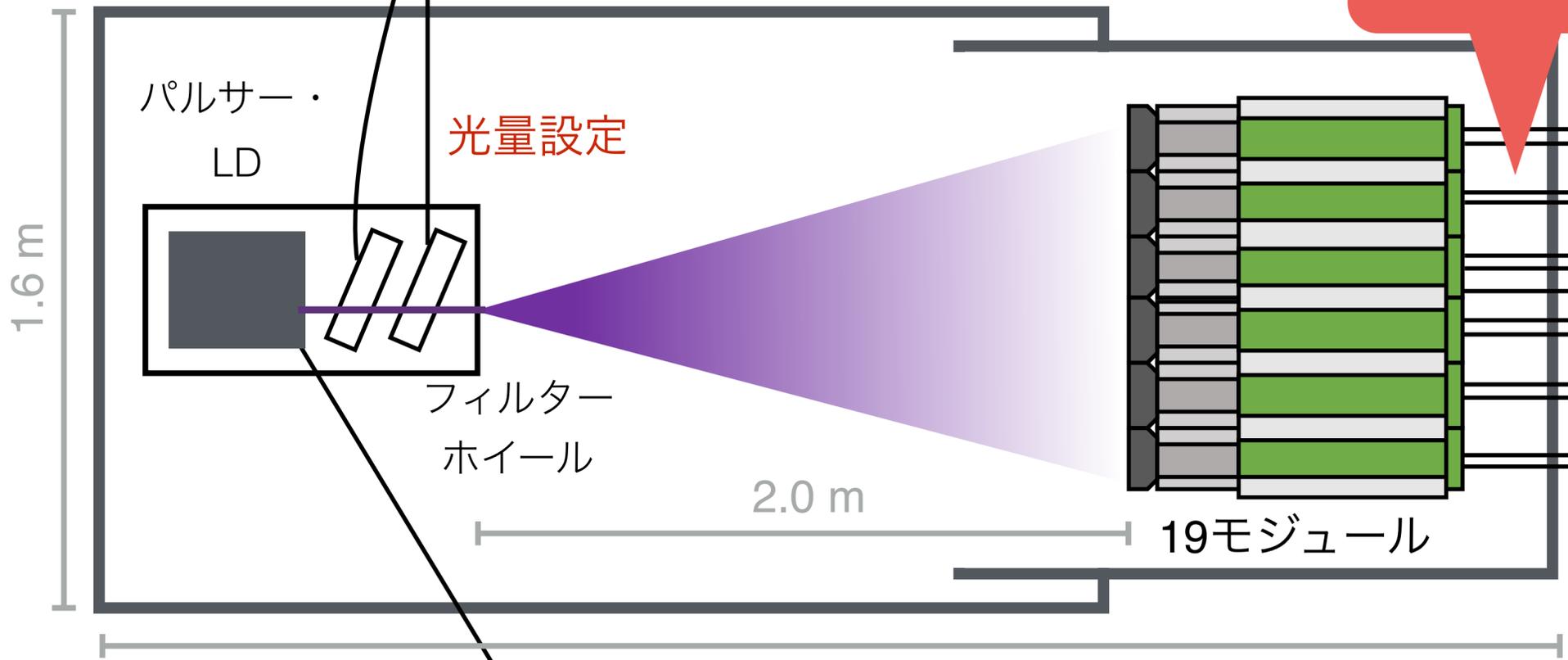
データおよびDAQ・
印加電圧等の設定



メインコンピューター

Raspberry Pi
コンピューター

モジュールオン・オフ指令



パルサー・
LD

光量設定

フィルター
ホイール

2.0 m

19モジュール

ネットワークスイッチ

トリガー設定

Raspberry Pi
コンピューター

トリガー生成デバイス

トリガー信号

3.6 m

遅延トリガー信号 (1本)

試験項目

📍 2つのパートからなる

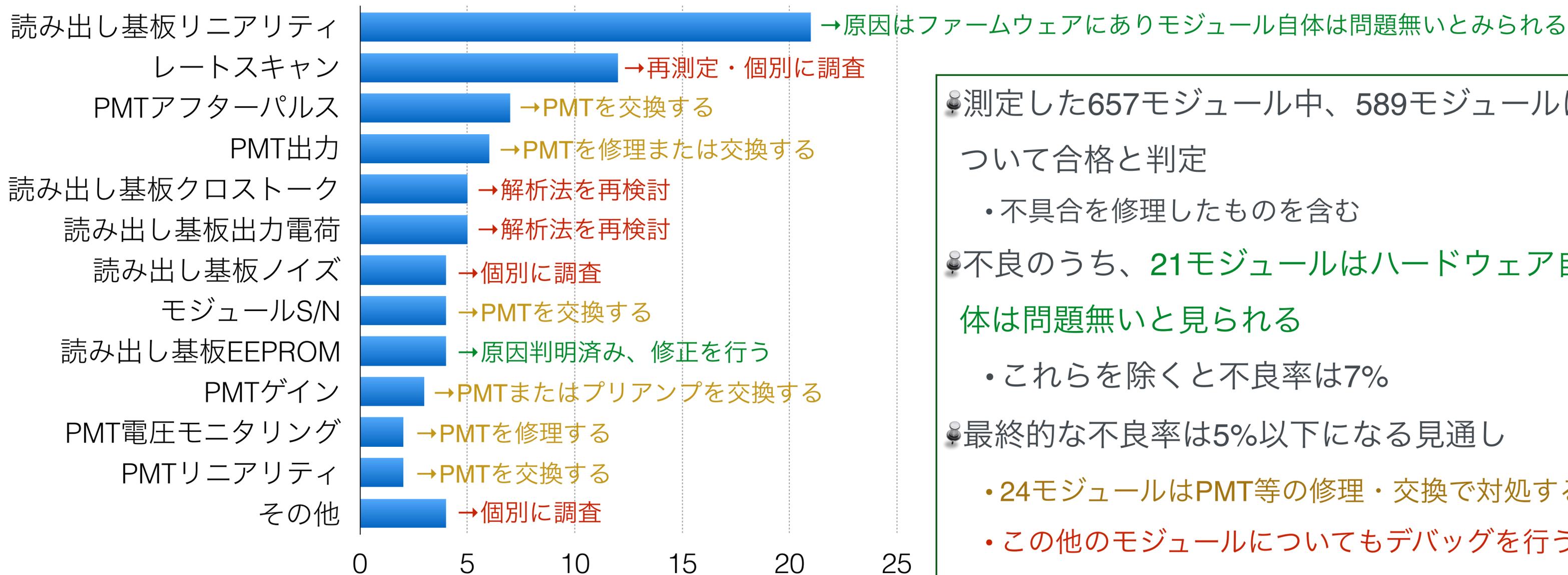
★📍 読み出し基板単体の試験 (PMTオフ、
信号源: テストパルス)

- 📍 接続先の諸基板との通信
- 📍 ドミノサンプリング回路のオフセット値
- 📍 ノイズレベル
- 📍 タイミングジッター
- 📍 リニアリティ
- 📍 パルス幅
- 📍 入力チャンネル間のクロストーク
- 📍 温湿度計
- 📍 サイン波生成回路

★📍 モジュール全体の試験 (PMTオン、
信号源: レーザーダイオード)

- 📍 PMT運用電圧 (ゲイン40,000を与える印加電圧)
- 📍 パルス幅
- 📍 シグナル-ノイズ比
- 📍 リニアリティ
- 📍 レートスキャン
- 📍 アフターパルス発生確率

試験結果とリカバリの見通し



- 測定した657モジュール中、589モジュールについて合格と判定
 - ・不具合を修理したものを含む
- 不良のうち、21モジュールはハードウェア自体は問題無いと見られる
 - ・これらを除くと不良率は7%
- 最終的な不良率は5%以下になる見通し
 - ・24モジュールはPMT等の修理・交換で対処する
 - ・この他のモジュールについてもデバッグを行う
 - ・一部はモジュール外部や解析が原因の可能性はある

信号読み出し基板

📍PMTをオフにした状態で信号読み出し基板単体の試験を行った

結果

📍ノイズレベルは平均±標準偏差: 15.9 ± 2.3 ADC

カウント

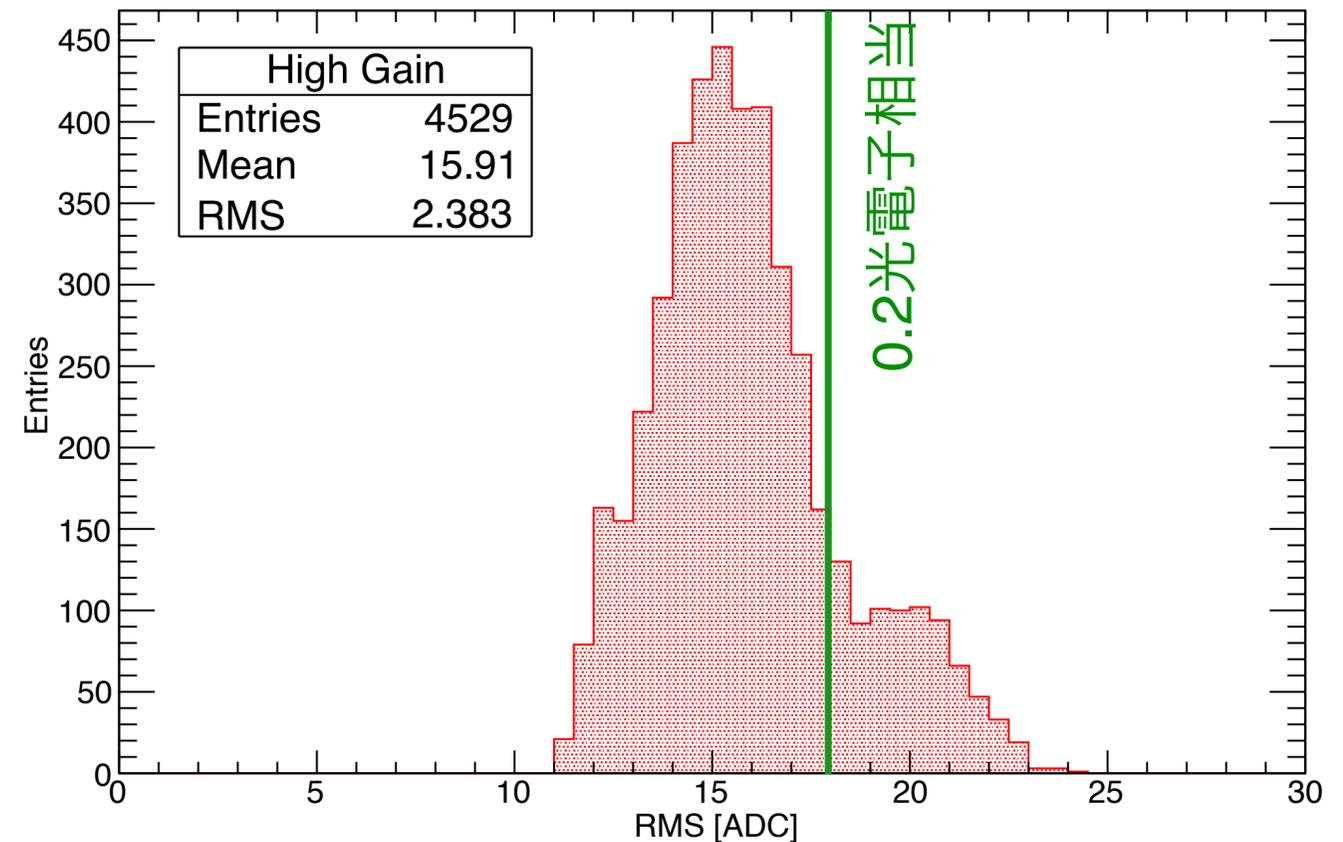
📍要求の18 ADCカウント (0.2光電子相当) を
大まかに達成

📍cf. LST1の 13.8 ± 1.1 ADCカウントとほぼ同
水準

📍新たに搭載したサイン波生成回路・温湿度計
は正常に動作している

読み出し回路ノイズレベルの分布

(647モジュール×7ピクセル)



PMT運用電圧

📍望遠鏡はPMTのゲインがおよそ40,000になるよう運用する➡このゲインを与える印加電圧を測定した

- PMT間で運用電圧の差が大きすぎると信号出力のタイミングがずれ、トリガー信号の足し合わせ（アナログサムトリガー）が出来なくなる

結果

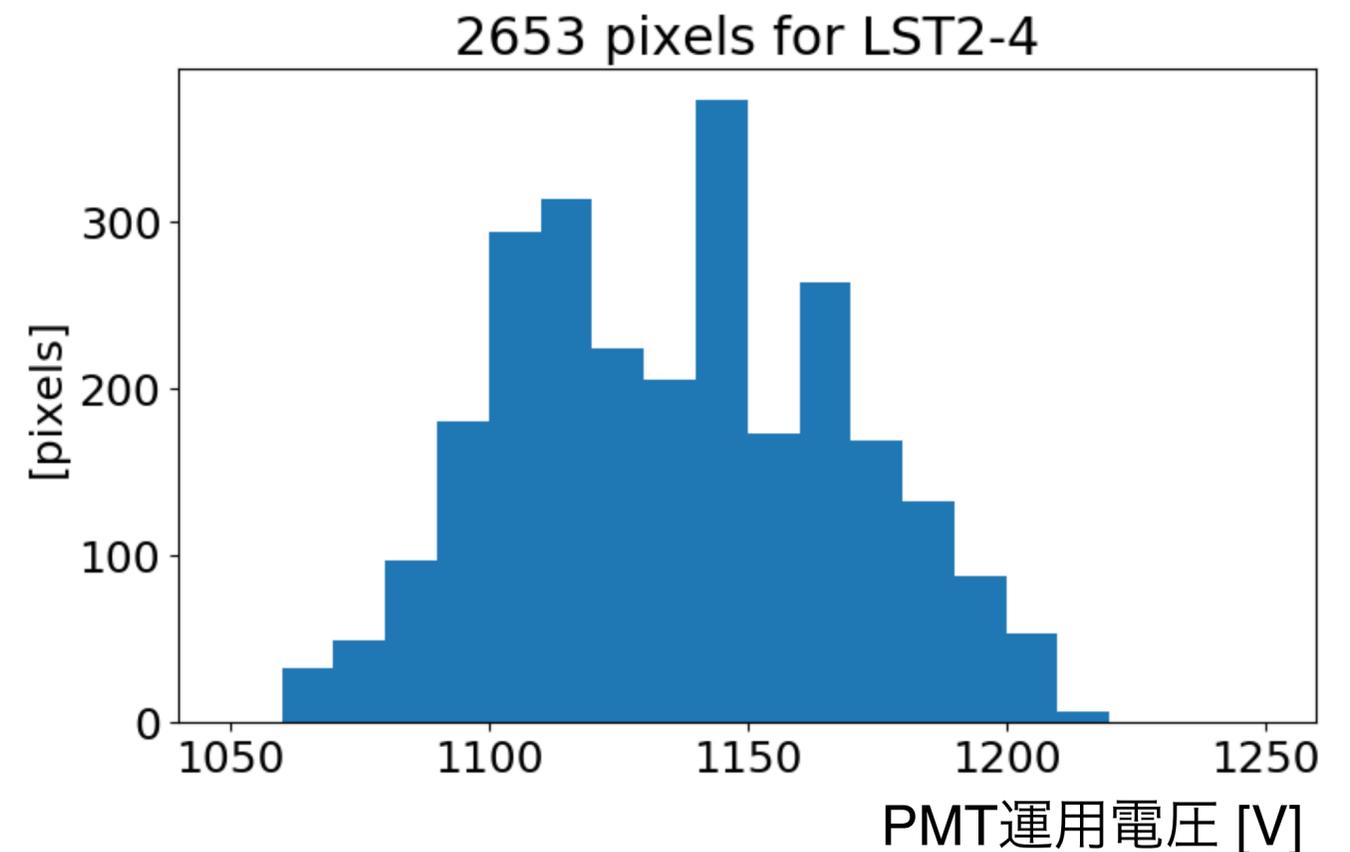
📍1060—1211 Vに分布

- この範囲であれば遅延回路によりトリガー信号のタイミングを揃えられる

📍平均±標準偏差: 1136 ± 33 V

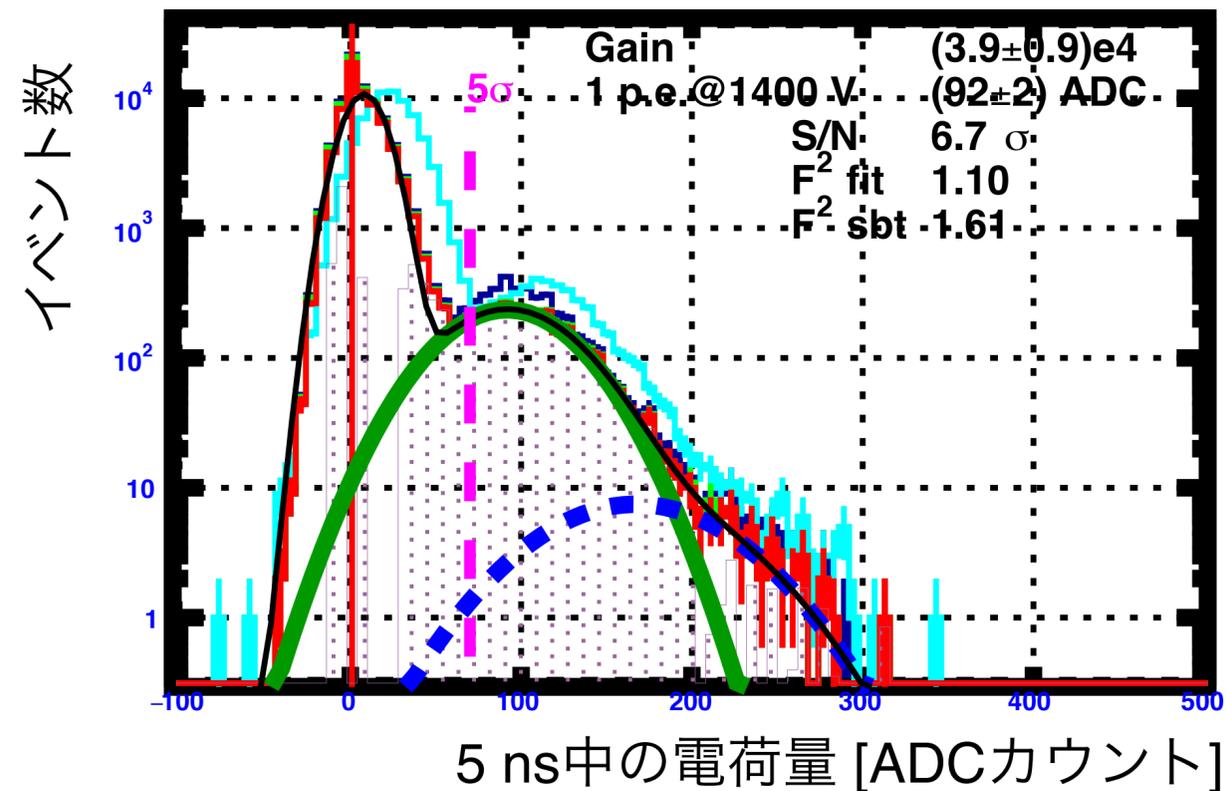
- cf. LST1の 1061 ± 29 Vよりやや高い

📍以降の測定はここで定めた印加電圧で実施



シグナル/ノイズ比

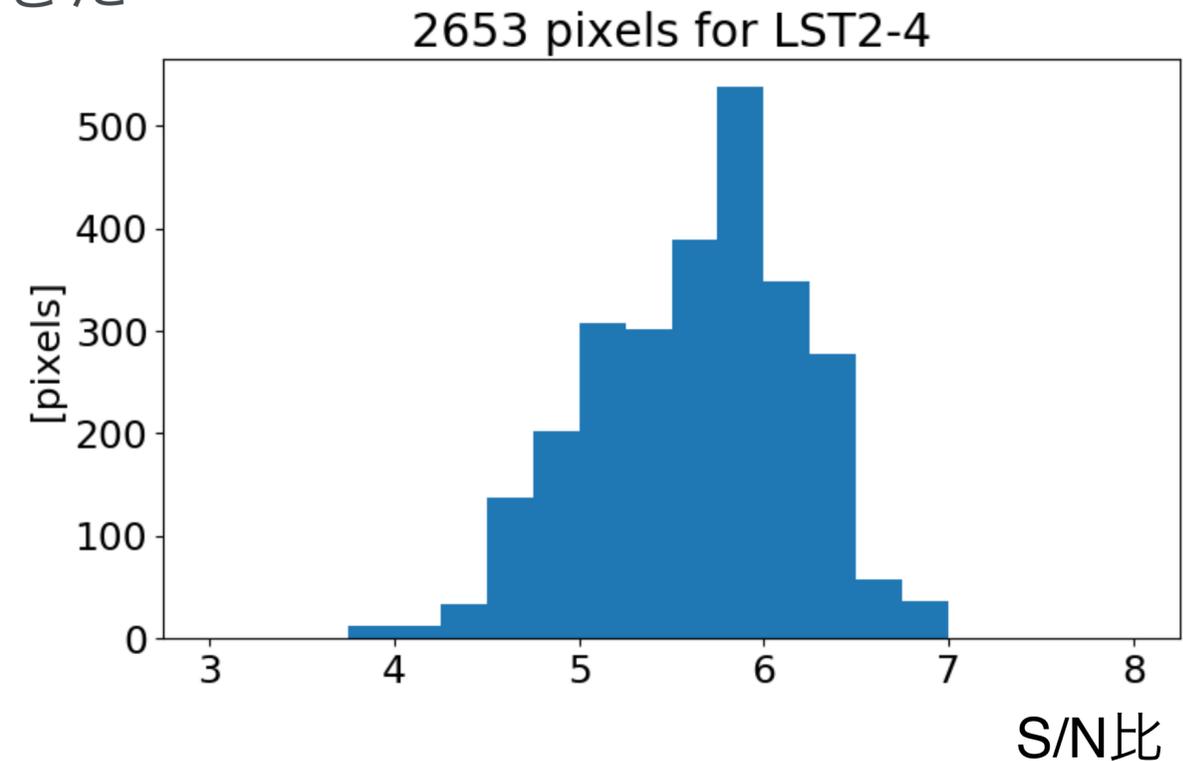
- 光量が1光電子/パルス以下の微弱な光を照射し、1光電子に対するシグナル/ノイズ (S/N) 比を測定



結果

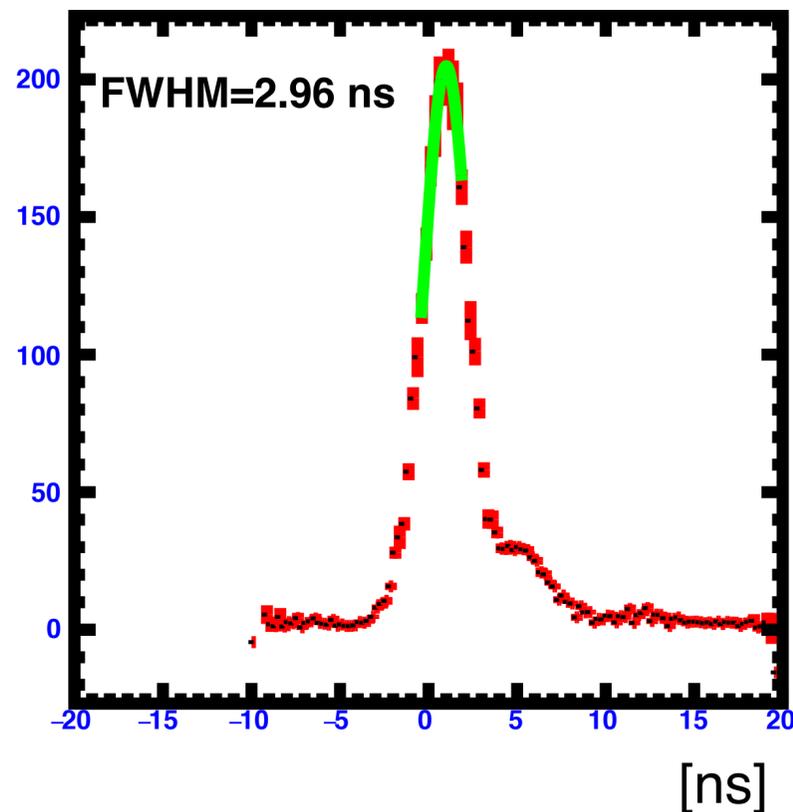
- 概ね $S/N > 4$ を満たす
- 平均 ± 標準偏差: 5.6 ± 0.6
 - cf. LST1では 7.1 ± 0.5
- 読み出し基板とともに低ノイズ性を確認できた

きた



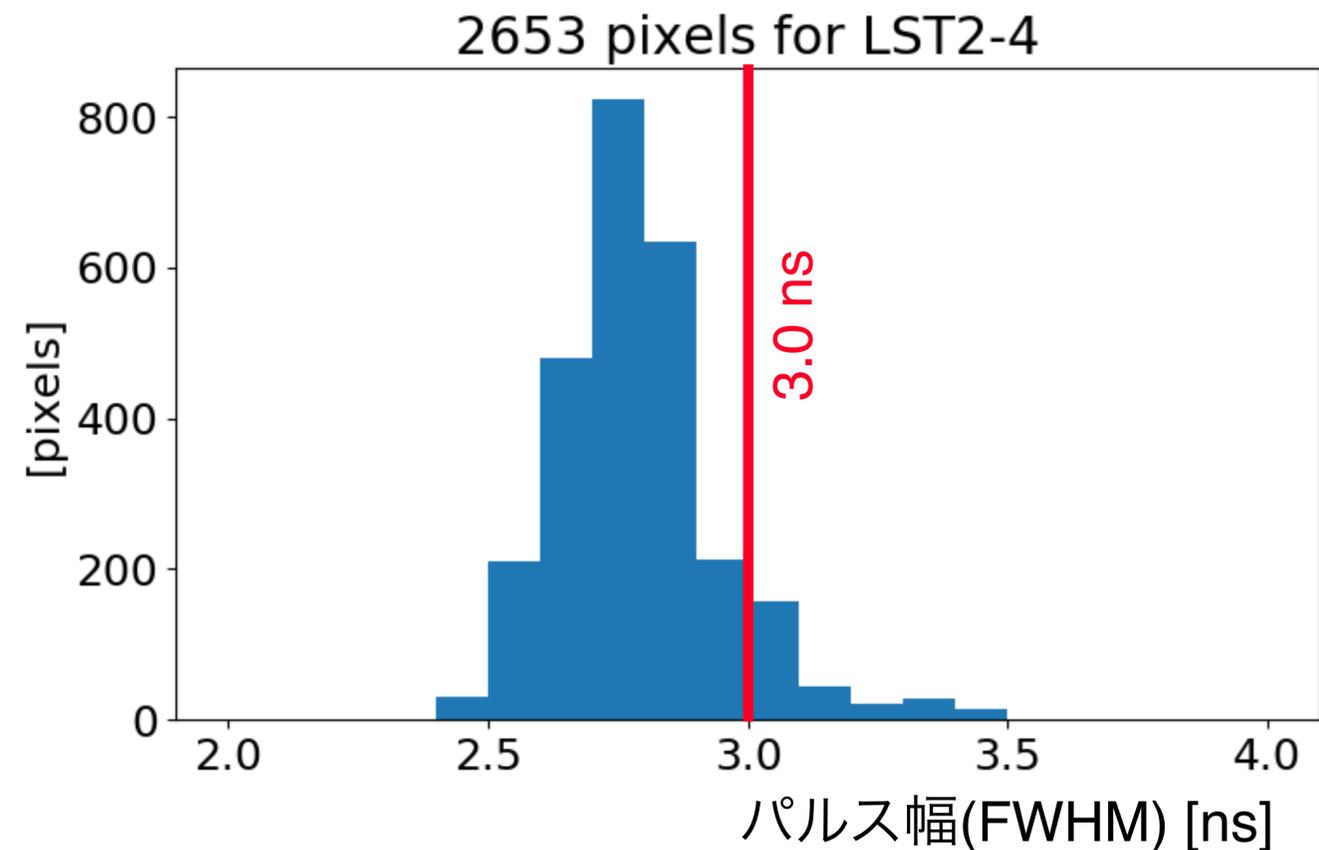
パルス時間幅

- 約300 MHzで1光電子が入射する夜光バックグラウンドの影響を抑えるために重要
- 高速(~80 ps)のパルス光を照射
- 多数のイベントを平均した波形をガウス関数でフィットし、標準偏差を半値全幅に変換



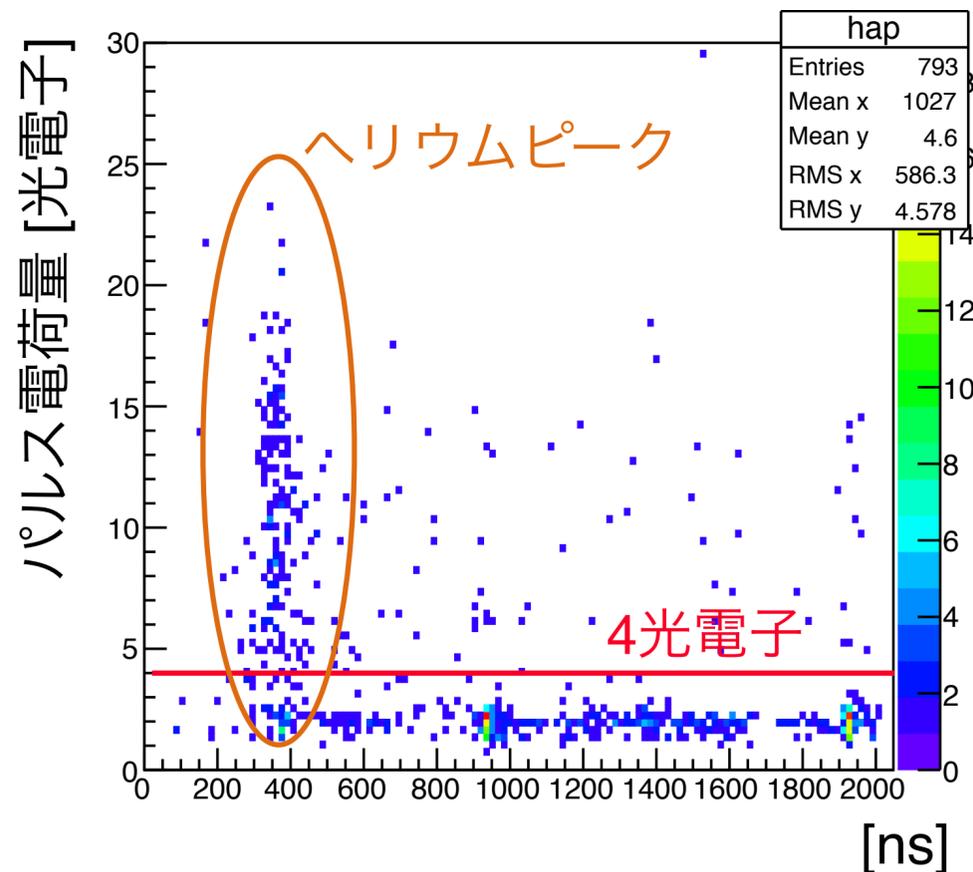
結果

- 2.4 ns—3.4 nsに分布
- 平均3 ns以下という要求を満たしている
- 平均±標準偏差: 2.8 ± 0.2 ns
- cf. LST1では 3.0 ± 0.1 ns



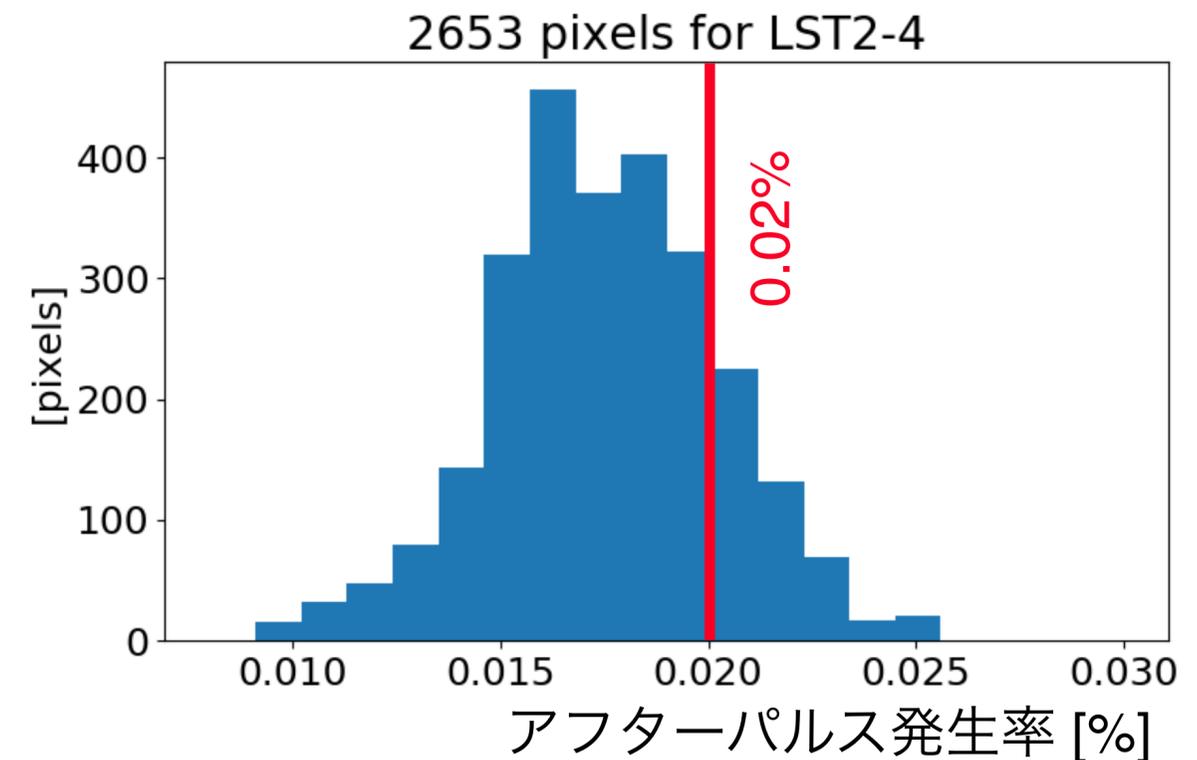
アフターパルス発生確率

- 望遠鏡のエネルギー閾値を決定する要因の一つ
- 経年や増倍過程に伴う増減がある
 - 参照: 櫻井他@18年年会
- 強いパルス光を照射し、2 us後までの電荷が4光電子相当以上のアフターパルスをカウント



結果

- 多くのPMTは要求の0.02%以下を満たす
- 平均±標準偏差: $0.0176 \pm 0.0003\%$
- ヘリウムイオンと思われる成分が最も多い
 - 一部はアルゴン (もしくはCO₂) イオンも目立つ



まとめ

- 📍CTA大口径望遠鏡2, 3, 4号機建造に向け、カメラモジュールの製作・試験を行ってきた
 - 効率化のため、読み出し基板とPMT別々ではなく統合した状態で試験した
 - テネリフェ島のIACオフィスでは、19モジュールを同時に測定できる組み立て・分解可能なシステムを構築
- 📍新たに搭載した機能は想定通り動作している
- 📍これまでにおよそ望遠鏡2基分のモジュールについて合格と判定
 - 不合格率は約7%だが最終的には5%以下にできる見込み
 - このペースであれば望遠鏡3基分は問題無く確保できそう
- 📍低エネルギー閾値実現に必要な良好なノイズ特性・時間特性を示している
- 📍2021年初めから3月ごろにかけて残りのモジュールの試験と、不合格だったモジュールのデバッグを行う予定