

Portenta H7を用いた 大強度ビームライン磁石電圧 インターロックの開発

KEK/J-PARC

ニュートリノG

仲吉一男、坂下 健、藤井芳昭

内 容

- インTRODクシヨソ
– 大強度ビームライン
– インターロツク
– Portenta H7
- 磁石電圧インターロツク開発
– ADC基板の開発
– Portentaの実装
- 今後の予定と課題
- まとめ

イントロダクション

イントロダクションで講演タイトルに使われているキーワードをご説明します

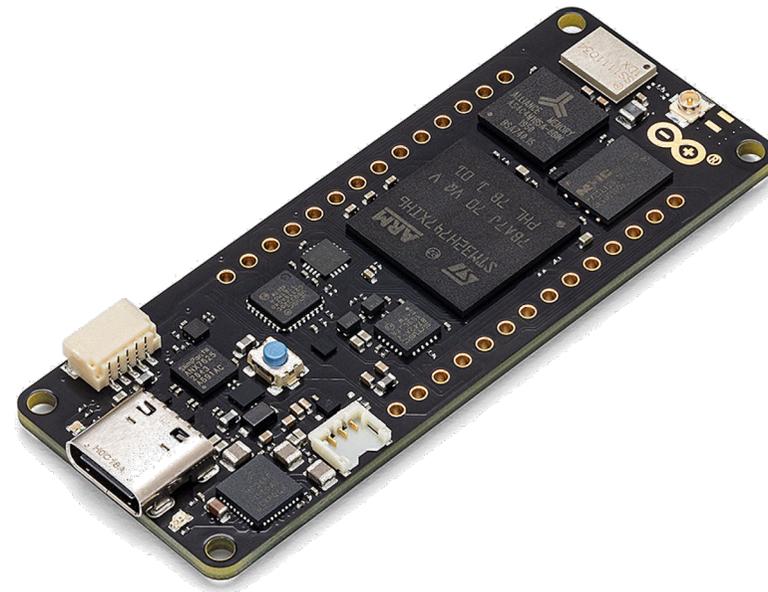
Portenta H7を用いた 大強度ビームライン磁石電圧 インターロックの開発

Arduino Portenta H7

Arduino PortentaはArduinoファミリの中の産業用のラインナップ。
Portentaの詳細は後半のスライドで紹介します。



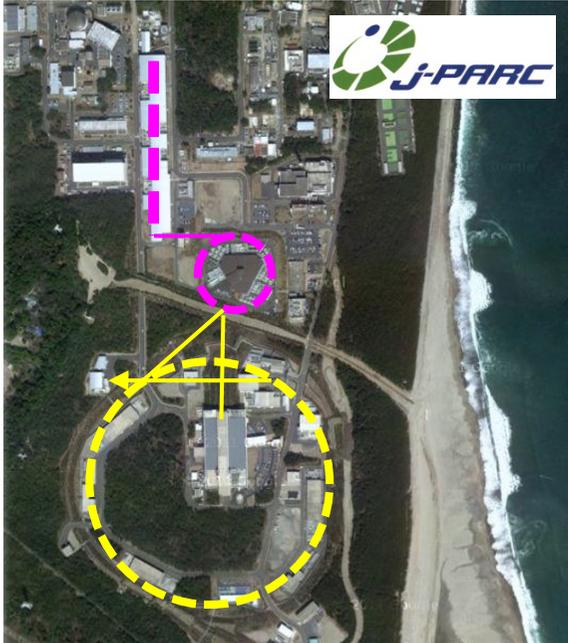
Uno
(~¥4000)



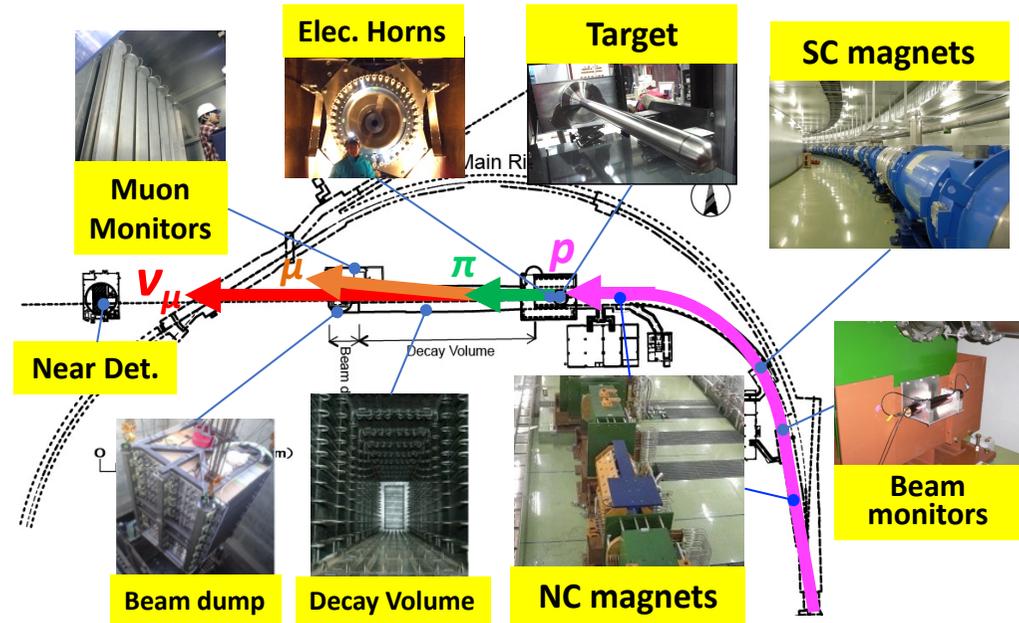
Portenta H7
~¥20000

大強度ビームライン

大強度陽子加速器施設 J-PARC



ニュートリノ実験施設



世界最高レベルの大強度陽子ビームによる物質・生命科学からハドロン、ニュートリノまで多様な研究を展開

ビームパワー：800kW ($\sim 1\text{MJ}/\text{pulse}$)

**1MJのビームの軌道がずれると
機器に当たって機器を壊す**

インターロック

インターロック

システムが誤動作しないように**動作条件の制限**を行い設定された基準や条件に違反した場合、**システムを自動的に停止**させることで**安全性を確保**するための機構

J-PARCのインターロックシステム

- MPS (Machine Protection System): 大強度ビームから機器を守る
- PPS (Personnel Protection System) : 大強度ビームから人を守る

**ニュートリノ実験施設の大強度ビームラインに
新たなインターロック (MPS) を追加したい**

新たなインターロック詳細は以降のスライドで説明

磁石電圧インターロック開発

新規インターロックの必要性

- 一次ビームラインでNC磁石電源の異常を検出する電流インターロックを運用中。しかしこれは磁石本体の層間短絡等の異常を検出できない
- 磁石本体の異常を検出するインターロックが必要

磁石電圧の変動を監視し異常を検出するインターロックを開発する



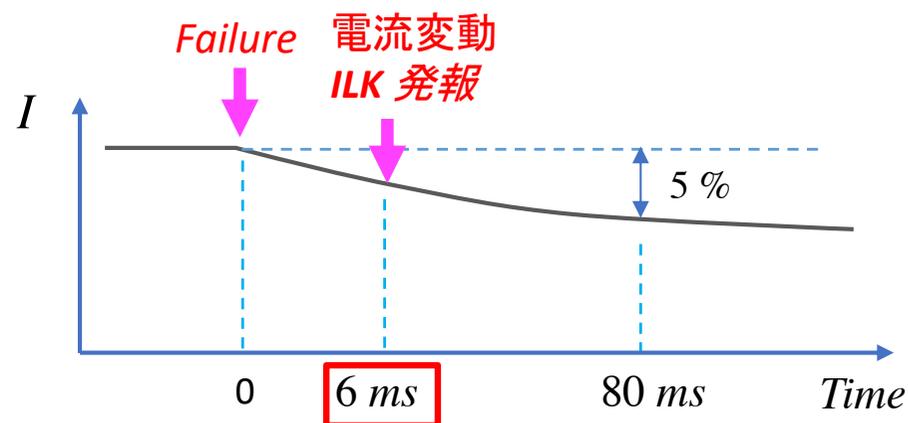
ニュートリノ一次ビームライン
常伝導電磁石

要求性能

- NC磁石の磁場が5%変動するとビームはビームライン機器に当たる。電圧変動インターロックの初期目標値として「電圧変動1%を検出する」インターロックを開発する。
- 既存の電流変動インターロックの発報までの時間は $\sim 6\text{ms}$ 。電圧インターロックも同等かそれより小さいレイテンシーにする。



一次ビームラインの偏向電磁石



実際の磁石を用いての電流減衰の測定した

開発前のケーススタディ

電圧インターロック開発前にケーススタディを行った

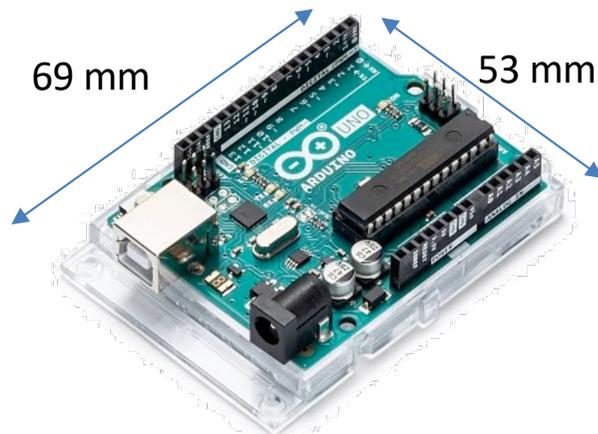
電流インターロック

	ADC 精度	ILK 信号 出力	ILK 遅延 時間	高度 処理	価格	長期 運用	システム 構築の 容易さ
デジタル・マルチ メータ	◎	×	—	△	高	○	×
デジタルパネルメー タ	○	○	~6ms	△	低	○	◎
PLC (ADC + シーケ ンスCPU)	○	○	ms	△	高	○	○
PLC (ADC + e-RT3)	○	○	ms	◎	高	○	△
ラズパイ+ ADC	○	○	?	◎	低	?	△
FPGA (Zynq)	○	○	usec	○	低	○	△
マイコン+ADC	○	○	ms	◎	低	○	◎

ケーススタディの結果「マイコン+ADC」でR&Dをはじめ

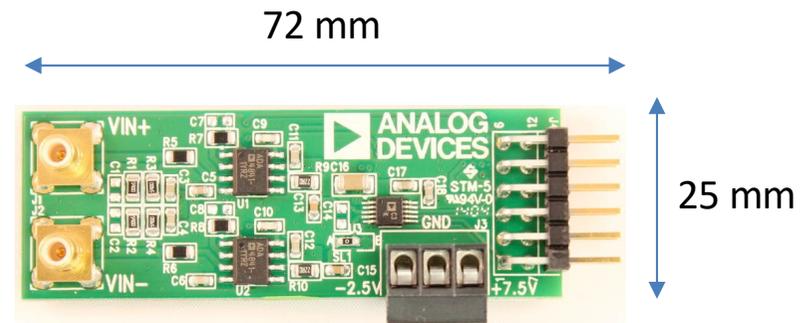
マイコン+ADC

まずはArduino Uno と Pmod型
ADCを使って評価を始めた



Arduino Uno R3

マイコンチップ: ATmega328P
クロックスピード: 16MHz
デジタルI/Oピン: 14本

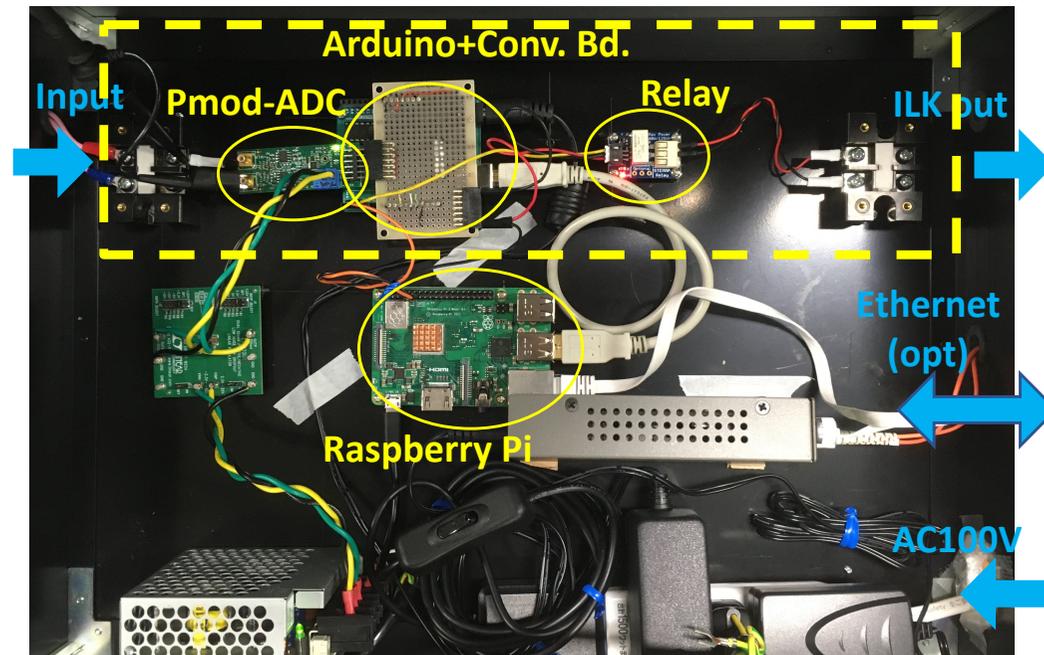


Pmod-ADC 評価ボード

ADC: AD7685
Resolution: 16bit
Sample rate: 250kSPS
Interface: SPI

プロトタイプ開発

Arduino Uno + ADC, ラズパイ、メディコン、リレー、電源他を1つの筐体に入れ性能評価を行った。測定の結果、インターロックレイテンシ時間は平均 2.1 msec だった。

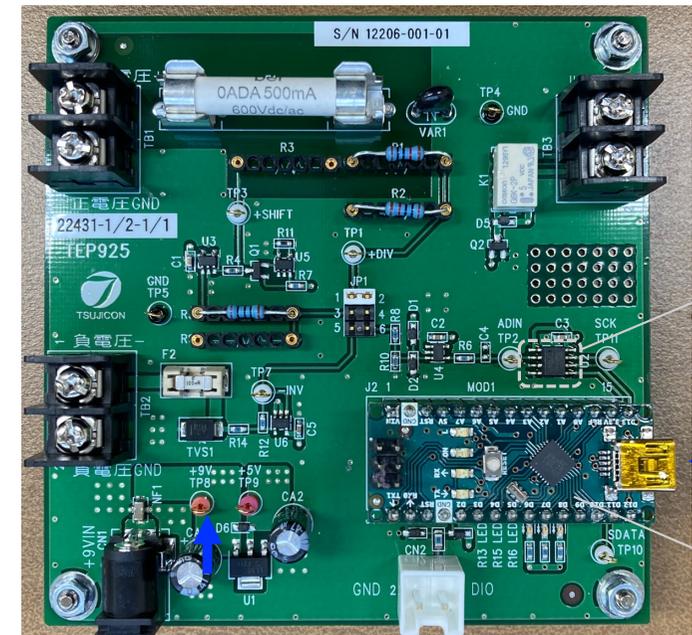
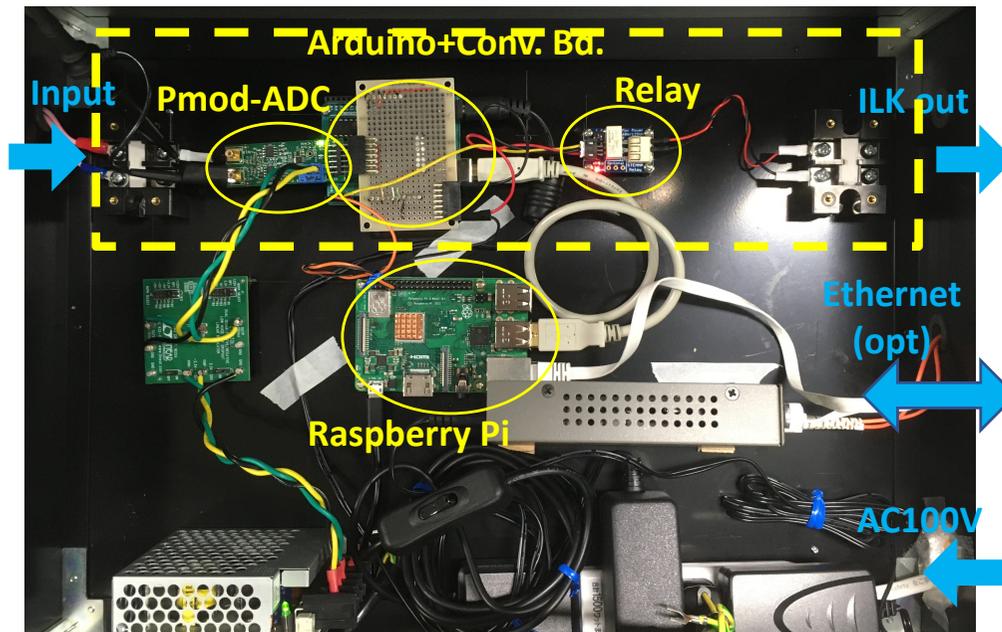


Arduino Uno + ADCで要求性能を満たすことがわかった

ADC基板 Ver.1 開発

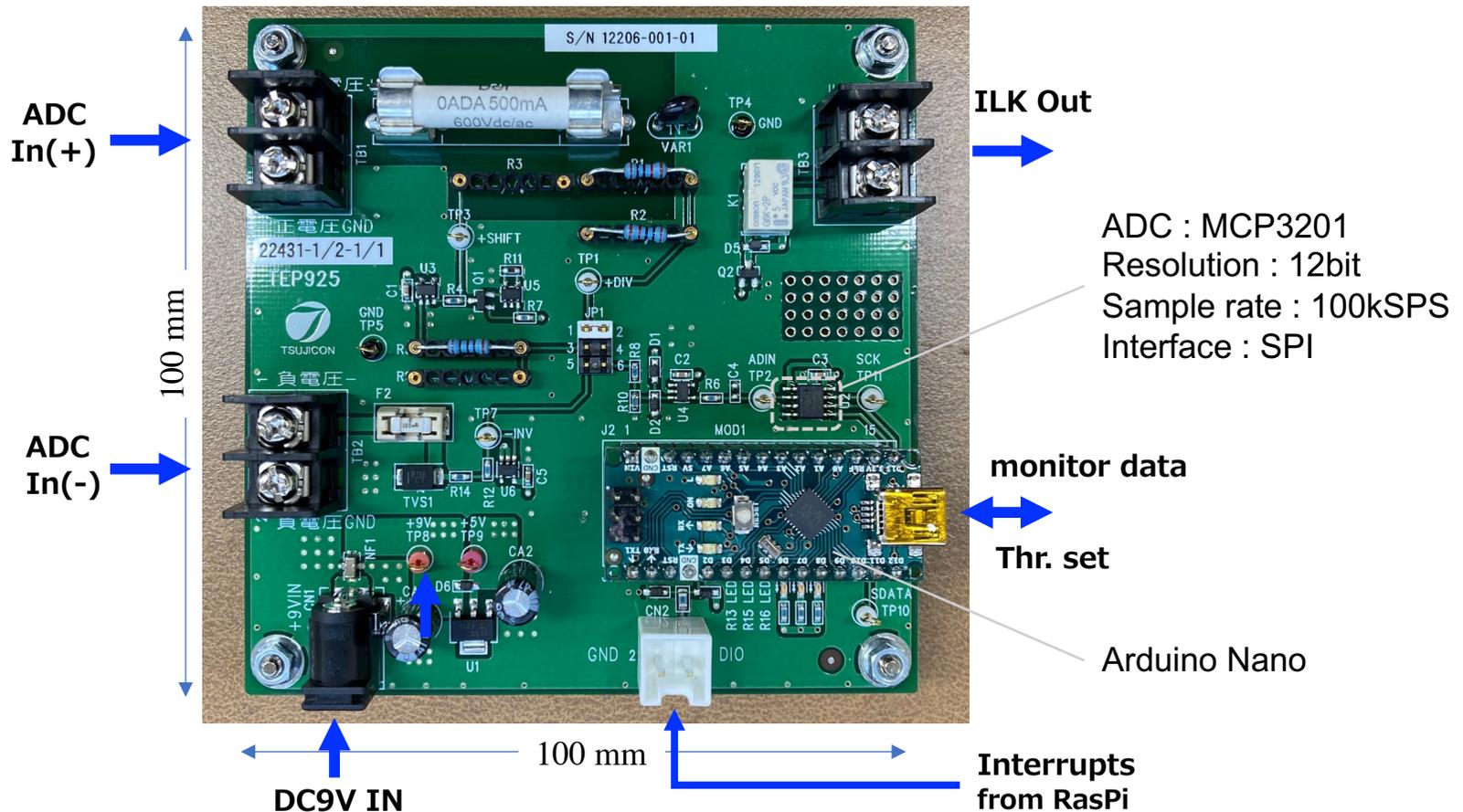
プロトタイプの実験で問題がなかったため、Arduino Unoと互換性のあるArduino Nanoを搭載したADC基板を開発した

電圧ILKシステムのプロトタイプ



次頁でADC基板Ver.1を説明します

ADC基板 Ver.1 開発 (2)



Arduino Nano、ADC、分圧回路、インターロック出力用リレーを実装したADC基板Ver. 1を開発した

計測システム研究会2024@東大

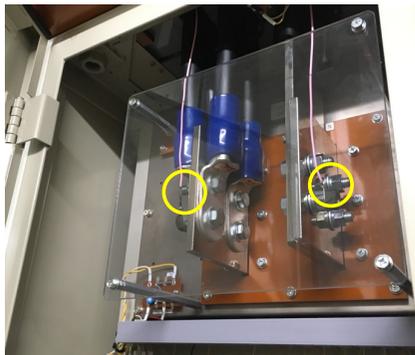
モニタ電圧の入力方式の変更

当初、ADC基板への電圧入力には電源の出力端子間の電圧を基板上で分圧してADCに入力する方式だったが、J-PARC電源火災が相次いだため変更

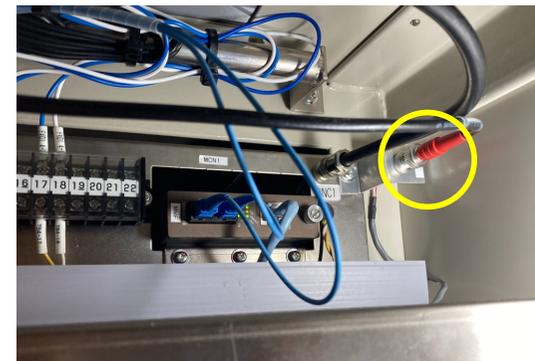


電源の改造を電源製作会社に発注。電源内で分圧して出力する方式に変更した

ADC入力方式変更前



ADC入力方式変更後



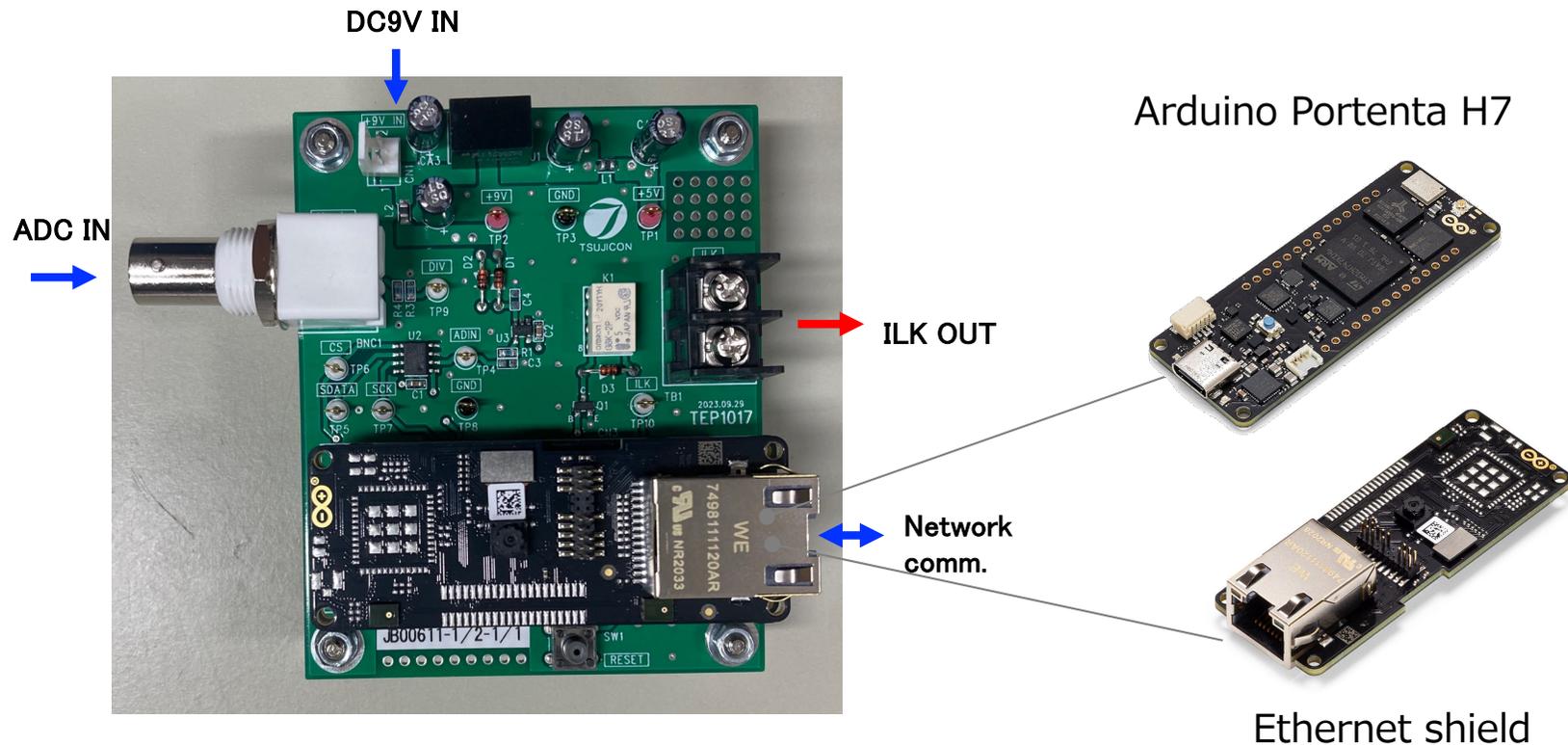
教訓その1

外的な要因によりシステム設計が変更になる場合がある

ADC基板Ver.2開発

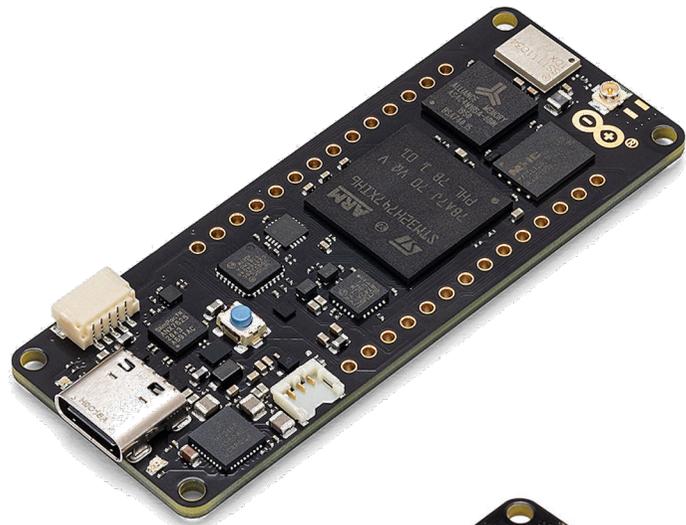
ADC基板の電圧入力方式の変更を契機としてADC基板の設計を変更

Arduino NanoからPortentaに変更しネットワーク通信可能なADC基板Ver. 2を開発した



Arduino Portenta H7, Ethernet moduleについては次頁で紹介

Arduino Portenta H7 Ethernet shield



Arduino Portenta H7

多機能で高性能

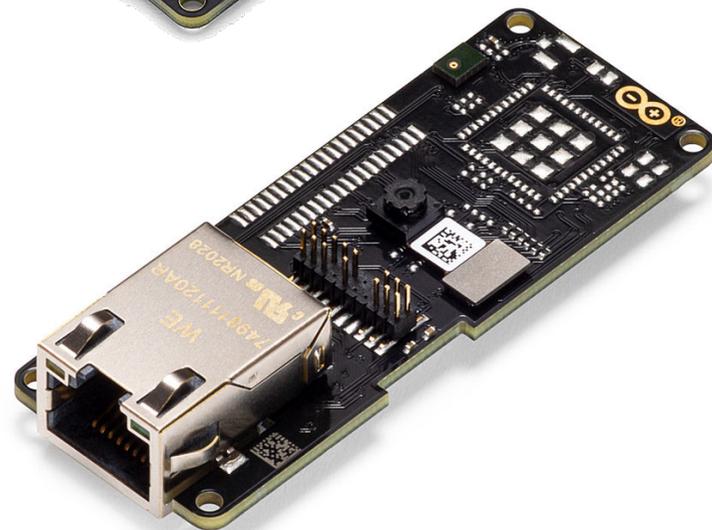
デュアルコアのプロセッサと大容量メモリにより、高度な処理やリアルタイムアプリケーションに適している

AIや機械学習に対応

TensorFlow LiteがサポートされておりエッジAIアプリケーションの構築が可能

産業用アプリケーション向けの設計

産業環境向けの堅牢なデザインで車載システムや工場自動化などの用途が可能



Portenta Vision Shield - Ethernet

安定した有線ネットワーク接続

100 Mbpsの通信速度をサポート

リアルタイムの視覚と音声データの処理

カメラとマイクによるデータの収集と分析が可能

Portenta H7のプログラミング

デュアルコアプロセッサ（Cortex-M7とCortex-M4）を活かしたプログラミングが可能

- ・ **デュアルコアの特徴**

 - Cortex-M7**

 - 高性能コア（最大480MHz）：ネットワーク処理を担当させる

 - Cortex-M4**

 - 省電力コア（最大240MHz）：Uno/Nanoで行っていた単純でリアルタイム性が必要な処理（ADCデータ読み出し、閾値比較、ILK信号出力）を担当させる

- ・ **デュアルコア間通信**

 - RPC (Remote Procedure Call) 関数を使用する

- ・ **実装方法**

 - Arduino IDEでM4, M7のプログラムを記述し、それぞれのコアにアップロードする

次頁でUno/NanoとPortentaのプログラミングの違いとその実装について説明します

UnoとPortentaの実装の違い

Uno/Nano のプログラム構成

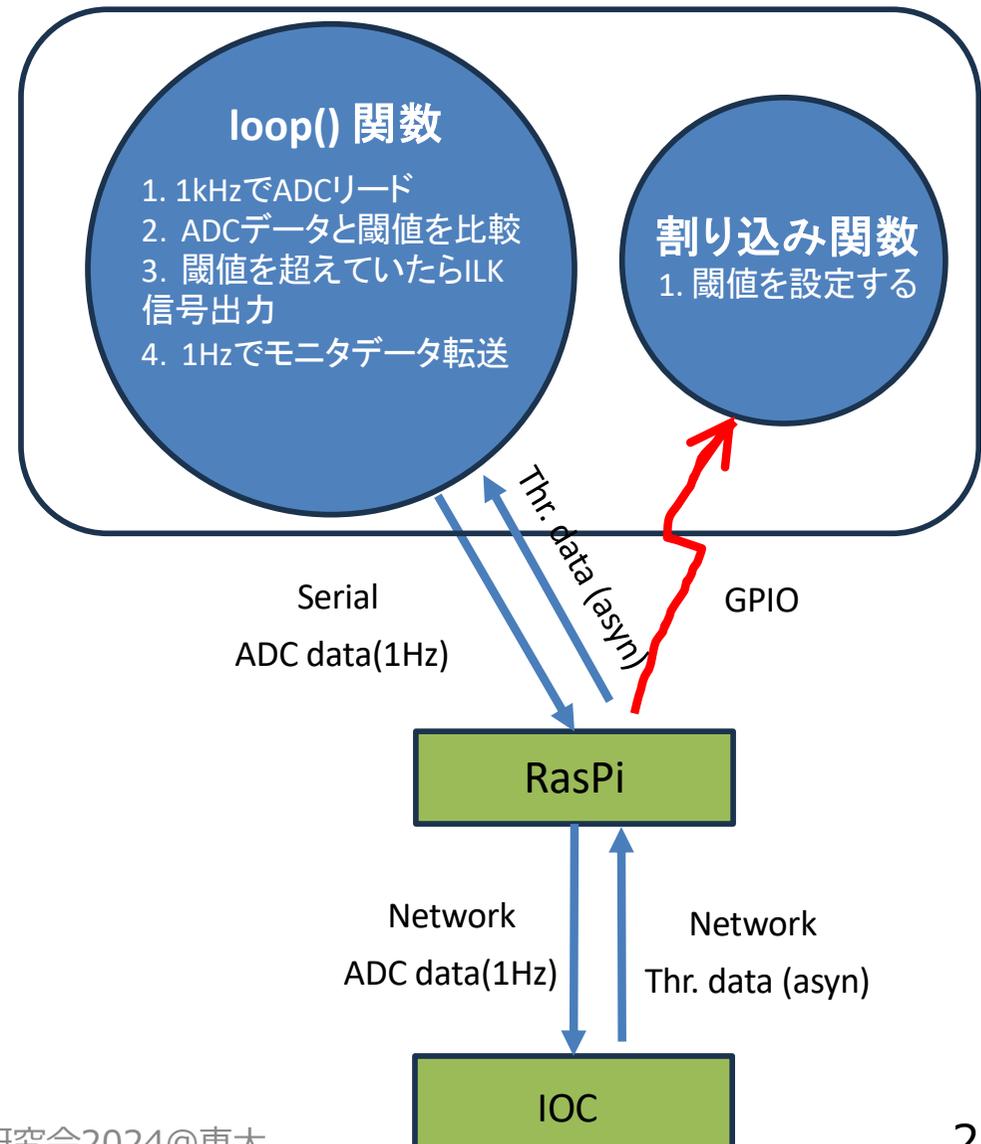
モニタデータ転送

- loop()の中で1秒毎にシリアルでラズパイにADCデータを送る
- ラズパイではネットワーク・サーバが立ち上がっておりEPICS IOCの接続があるとシリアルで取得したADCデータをIOCへ送る。

閾値設定

- ラズパイのGPIOからArduinoへ信号を送る
- Arduinoで外部割り込みが発生し割り込み時に呼ばれる関数が実行され閾値変数の値を更新する

Arduino Uno/Nano



UnoとPortentaの実装の違い

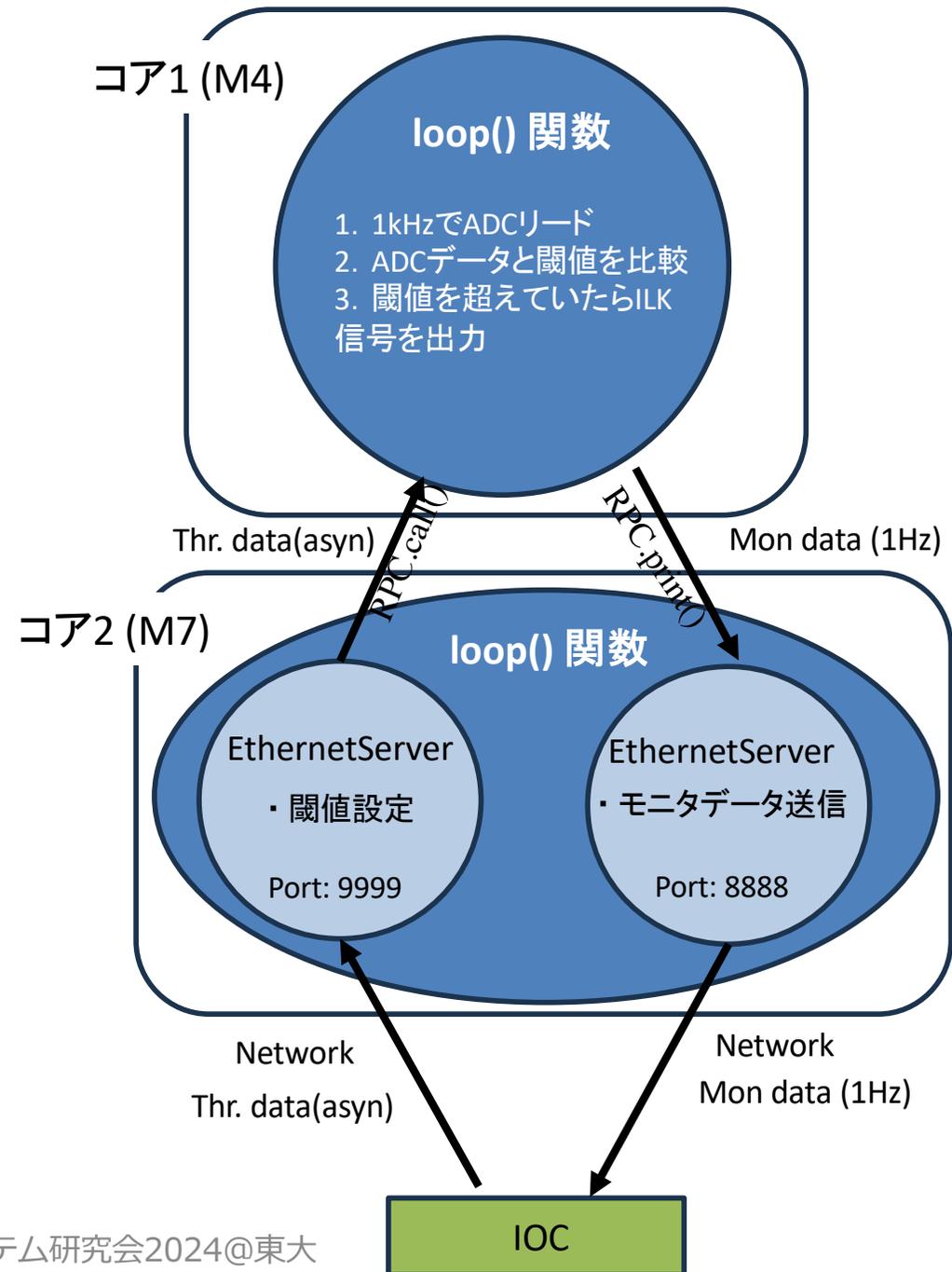
Portenta のプログラム案1

モニタデータ転送

- M4のloop()の中で1秒毎にRPC.print()でM7にADCデータを送る
- M7ではポート番号8888でネットワーク・サーバが立ち上がっていて、IOCの接続があるとRPC.read()で取得したADCデータをIOCへ送る。
- IOCはデータ取得にStreamdeviceを使う

閾値設定

- IOCからM7のポート番号9999のネットワーク・サーバに閾値データを送る
- M7からRPC.call()を使ってM4の閾値変数の値を書き換える



UnoとPortentaの実装の違い

Portenta のプログラム案2

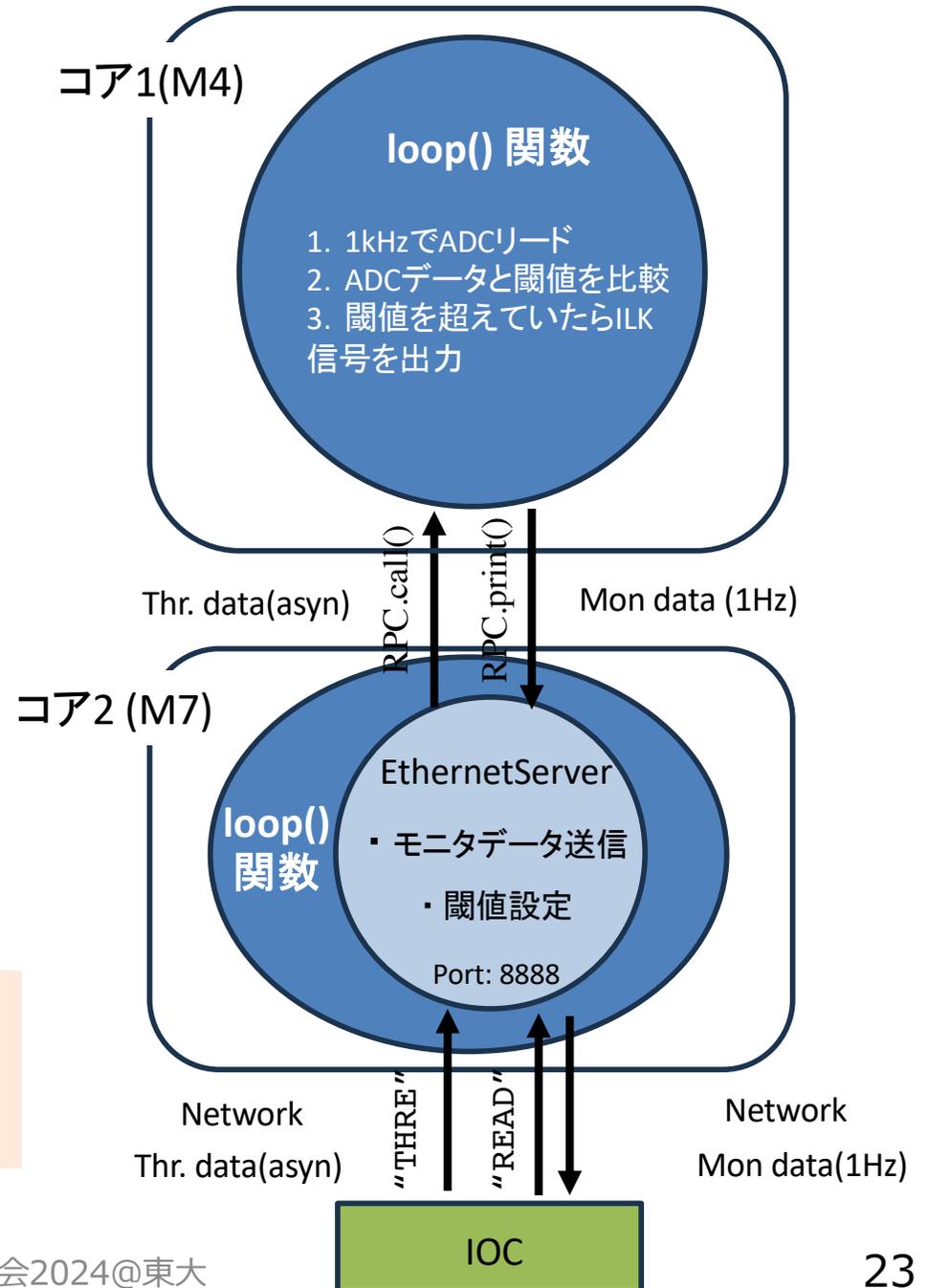
モニタデータ転送

- M4のloop()で1秒に1回M7にRPC.print()でADCの値を送る。
- IOCがM7のポート番号8888番のネットワーク・サーバに接続する
- M7のネットワーク・サーバが"READ"コマンドを受信するとRPC.read()で取得したADCデータの値をIOCに送る

閾値設定

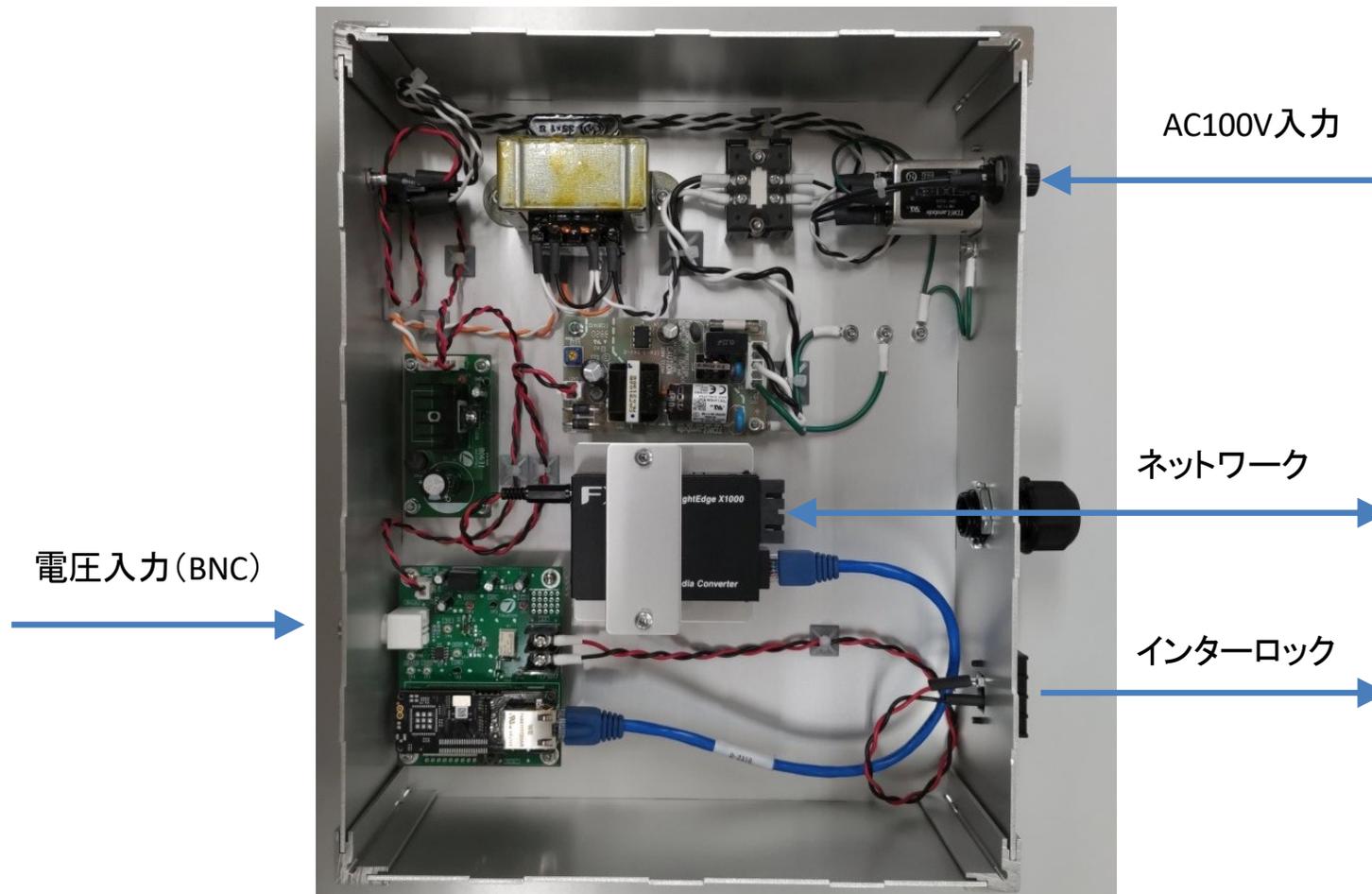
- IOCからM7のポート番号8888のネットワーク・サーバに"THRE"コマンド+閾値データを送る
- M7からRPC.call()を使ってM4の閾値変数の値を書き換える

案1ではIOC(エミュレータ)を強制終了した場合、再接続できないことがあった。プログラムは案2を採用。



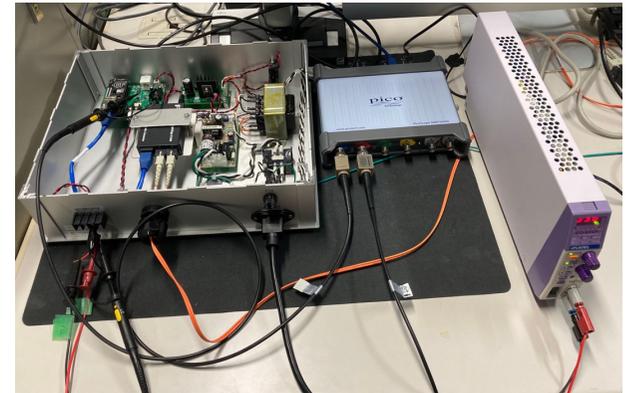
ADC BOX (プロトタイプ)

ADC基板Ver. 2、メディコン、電源他をワンボックス化した。ラズパイを使用したプロトタイプに比べ筐体はコンパクトになった

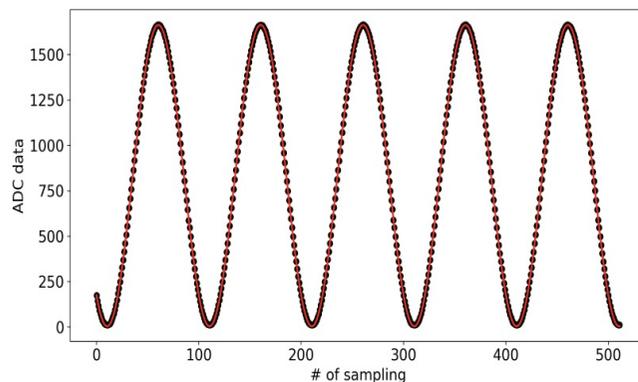


性能評価@テストベンチ

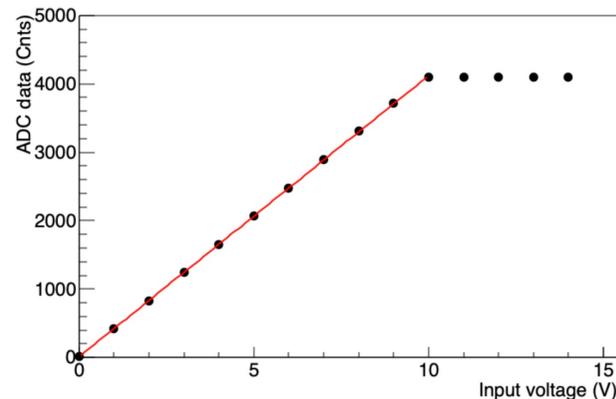
- ☑ ADC の1kSPSの確認
- ☑ ADC リニアリティ
Requirement: slope=4095 / 5V \pm 10%, offset=5mV
Results: slope=824.8 cnts / V, offset=1.6mV
- ☑ インターロック発報レイテンシ時間
Requirement: < 6 ms
mean: 1.14 ms, max: 1.68 ms
- ☑ 長期安定性試験
mean: 3.032 V, σ : 1.05e-3 (5σ < 1% of mean)



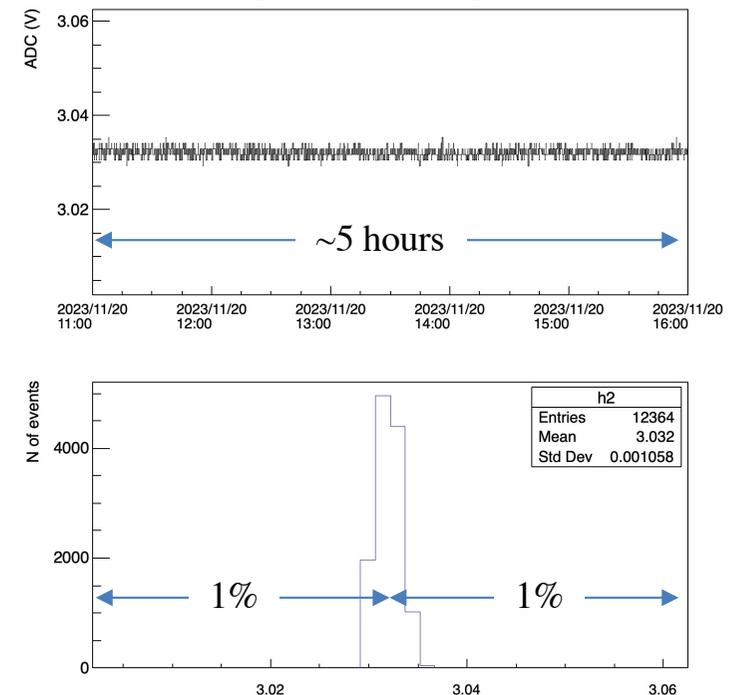
ADC sampling test



ADC Linearity test



Long-term stability test



実機試験

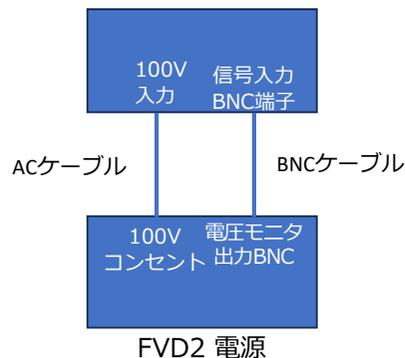
- 今年6月のビームタイムにADC BOXプロトタイプを一次ビームライン最終収束部の電源1台に実装して試験を行った。加速器由来と思われるノイズによる閾値を超えたイベントがあった。
- 11月からのビームタイムにADC BOX実機2台を電源2台に実装して試験予定。MPSには組み込まない。

磁石電源

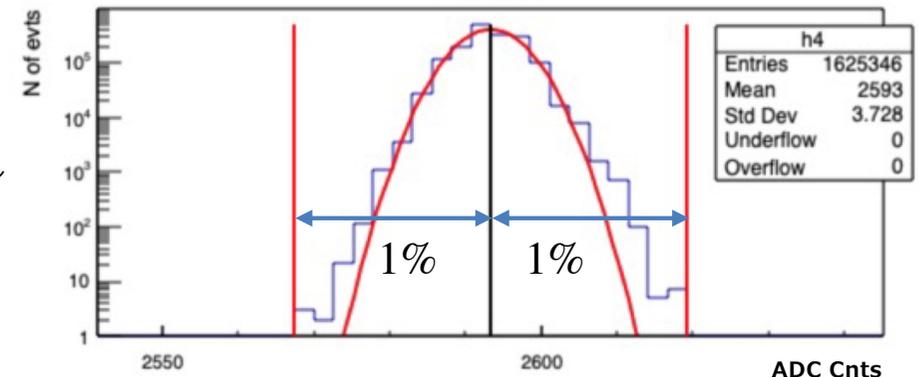
ADC BOX (プロトタイプ)



ADC BOX



電圧モニタデータの分布



教訓その2

テストベッドで要求性能を満たしても実機試験をしないと結果はわからない

今後の予定と課題

- 今年度中に一次ビームライン最終収束部の3台の電源に電圧インターロックを実装予定。
- ビームタイム中の試験では外来ノイズ由来と思われる閾値を超えるイベントがあった。単純な閾値による異常検出ではインターロック誤発報の可能性があるためPortentaでより高度な処理を行い誤発報を防ぐための方策を検討中。
- 磁石電圧は冷却水温度と相関があり磁石通電後は電圧値はドリフトする。インターロックをどのタイミングで有効にするかを検討中。

まとめ

- J-PARCニュートリノ実験施設の大強度ビームラインをより安全に運転するため新たな磁石電圧インターロックを開発している
- Arduino Portanta搭載のADCボードを開発し低コスト・低レイテンシな電圧インターロックを実現できた
- ビームタイム中に試験を行い一次ビームラインのインターロックに組み込む予定