

高輝度LHC-ATLAS実験に向けた 新型内層TGC検出器および電源供給回路の評価

第31回ICEPPシンポジウム

名古屋大学 N研 M1

千葉公太郎

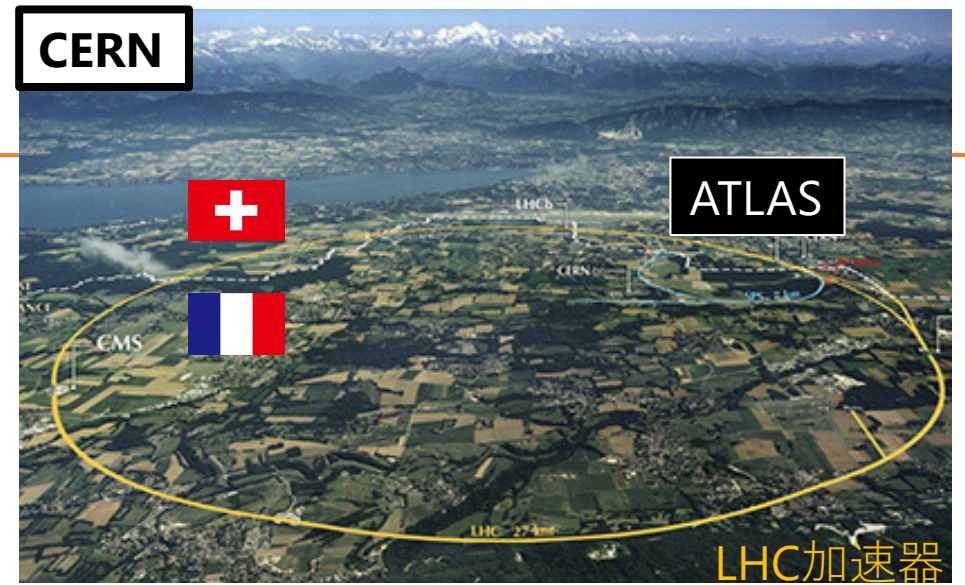
LHC-ATLAS実験

- LHC-ATLAS実験

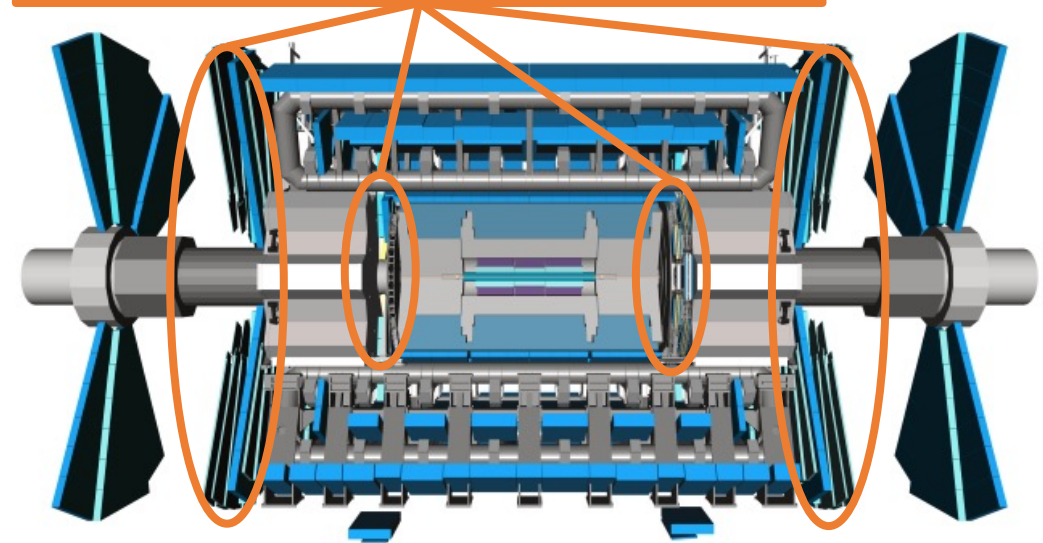
- 陽子陽子衝突型加速器（LHC）での事象をATLAS検出器で観測
- 重心系エネルギー $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$ (Run3)
- 陽子バンチ交差頻度：40 MHz

- 高輝度LHC-ATLAS実験（2030年～）

- 重心系エネルギー $\sqrt{s} = 13.6 - 14 \text{ TeV}$
- 瞬間ルミノシティ： $5 - 7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 - 現行の約3倍
 - イベントレートの増加
 - **検出器のトリガー・読み出し回路の改良が必要**



TGC：トリガー用ミュオン検出器



ATLAS EXPERIMENT

ATLAS検出器

トリガー・読み出しシステムの改良

	現行	高輝度化後
初段トリガーレート	100 kHz	1 MHz
初段トリガーレイテンシー	3 μ s	10 μs



トリガー・読み出し回路の総取替により実現

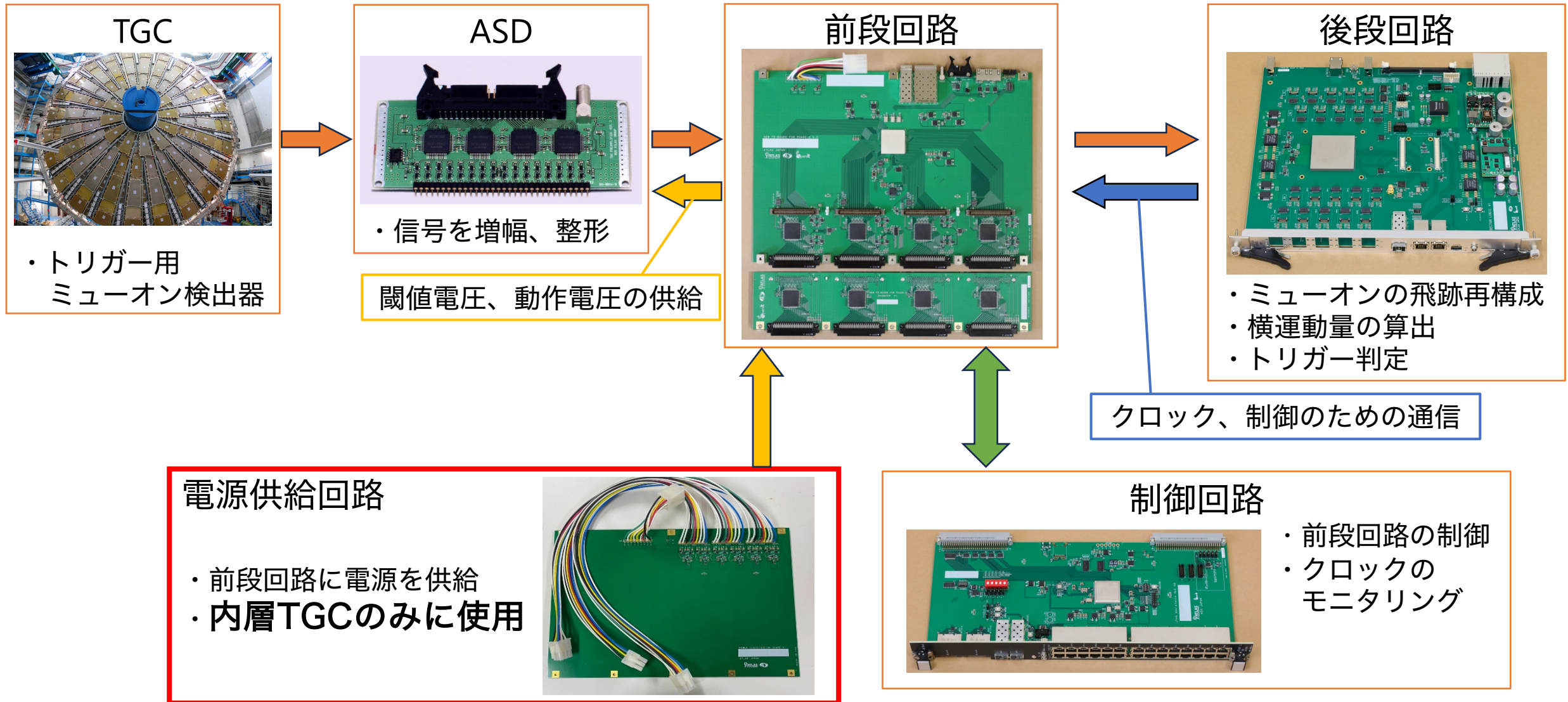


検出器の置き換え（本講演では内層TGC検出器に着目）により、

- ・ **増加する信号事象を逃さず取得**
- ・ **バックグラウンド事象の取得を削減**

新しいトリガーシステム

→ : ヒット信号



内層TGC検出器の概要

- 内層TGC検出器の役割

- 他の検出器とコインシデンスを取り、フェイクミュオンやバックグラウンドを抑制

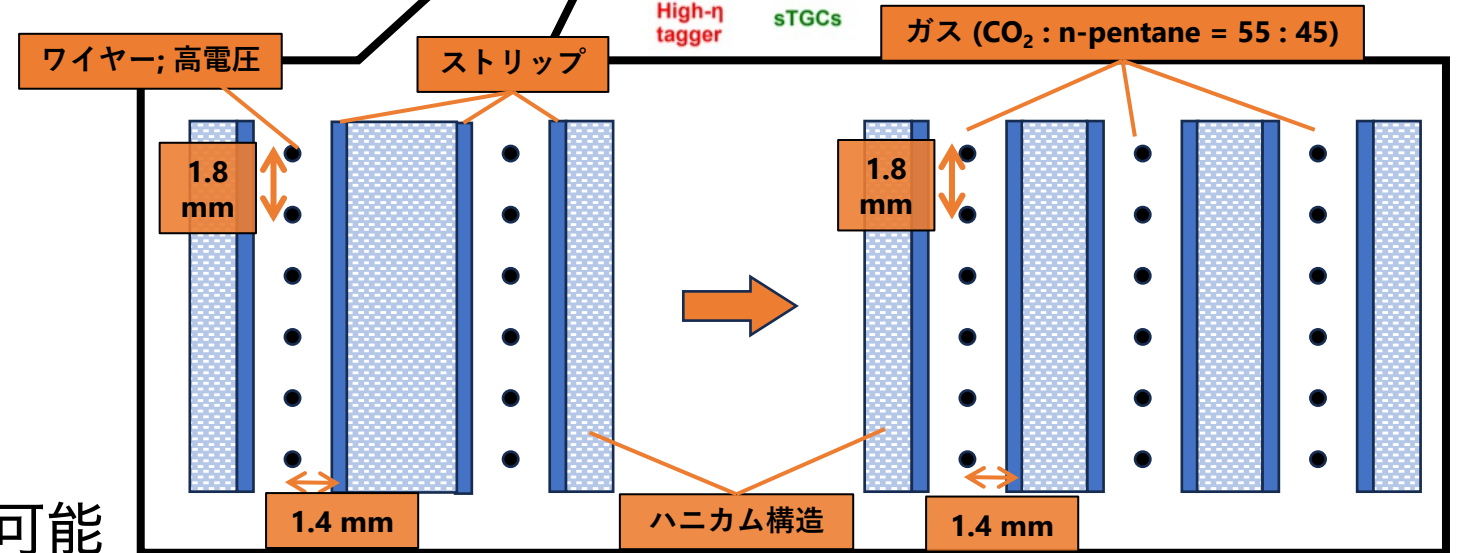
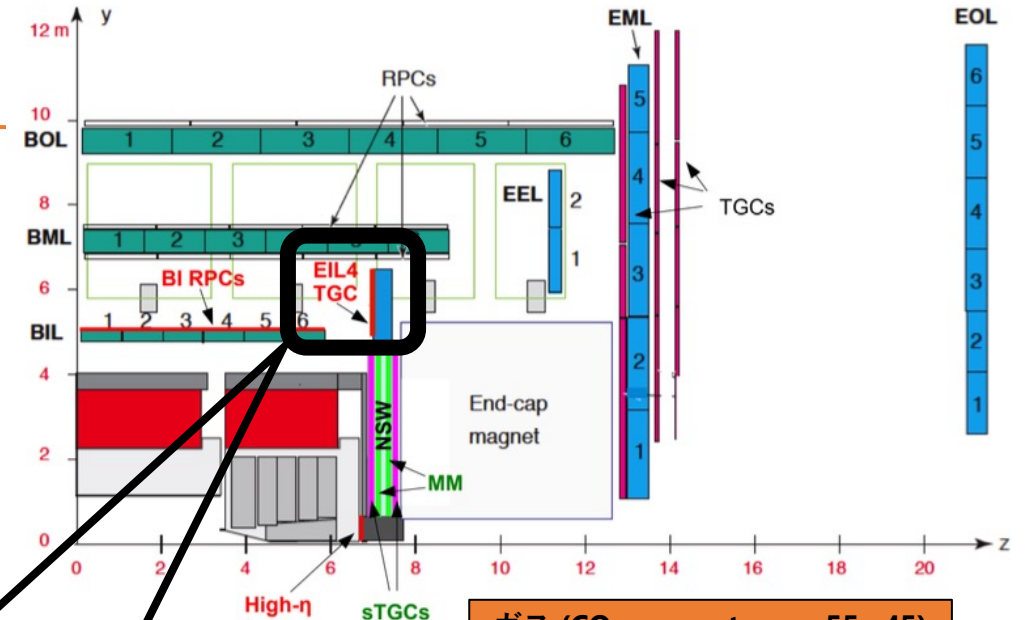
- 現行

- 2層構造
- 2層中1層以上のヒットを要求
- 1層でも故障すると使用不可

- 新型内層TGC検出器：EIL4

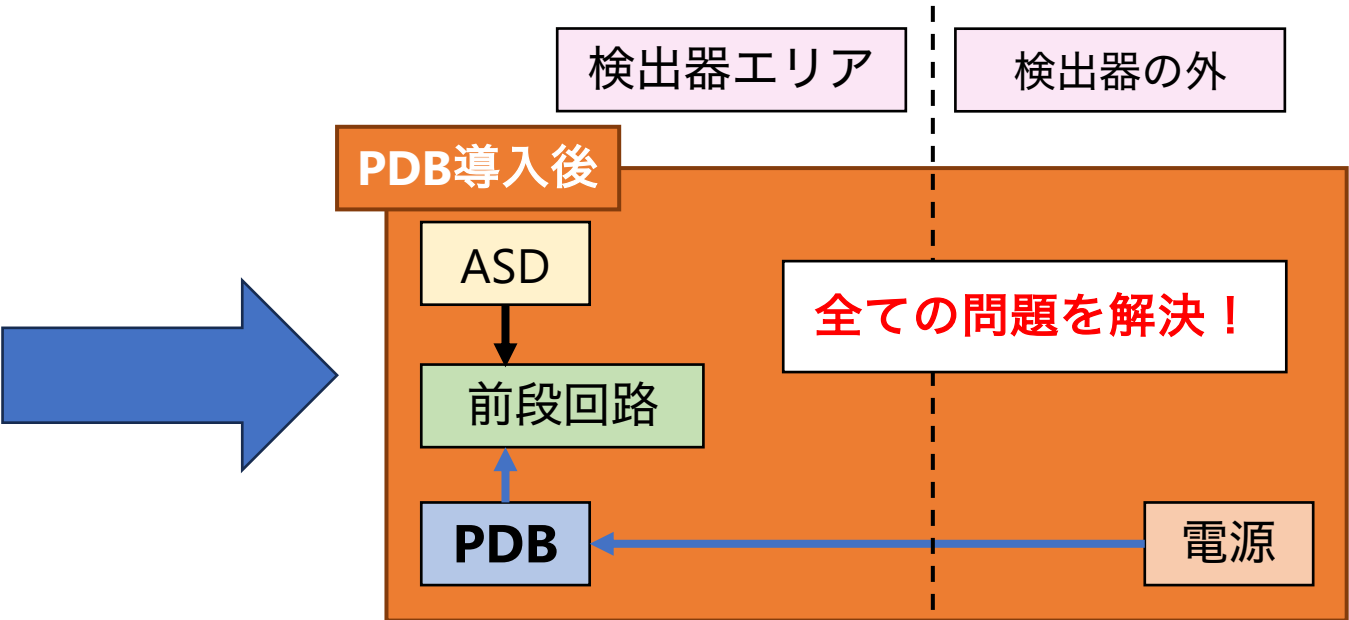
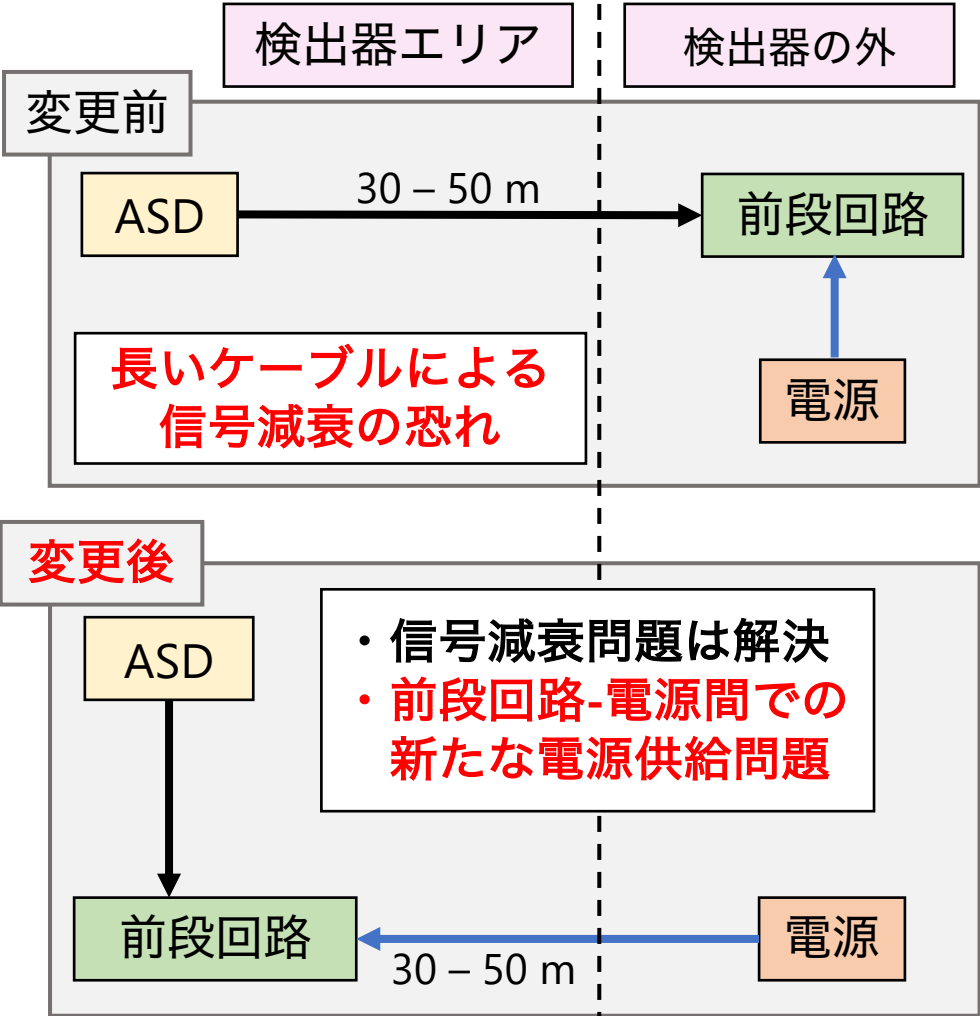
- 検出層：2層→3層
- 2層と同じ厚みで3層にする→挑戦的な構造
- 3層中2層以上のヒットを要求
- 1層に不良が生じてても、2層で運用可能

➡ これまでにない構造の検出器であり、性能評価が必要



電源供給回路の概要

- EIL4の刷新に伴い、前段回路の設置場所を検出器エリアに変更



- 最終量産が終了 → 性能評価が必要

本講演のテーマ

1. 新型内層TGC検出器 (EIL4) の性能評価

- 2024年-2025年の加速器運転休止期間に、全42台のうち3台をインストール
- 検出器を作製したイスラエルにて基本的な性能評価はOK
 - ノイズカウント、efficiency plateau、HV安定性 with NIM module
- インストールのため、以下の要求を満たすことが必要
 - ① 高電圧offで100 mVを超える電氣的ノイズの占有率が 10^{-4} 未満である
 - ② 印加電圧の上昇に伴い、宇宙線ミュオンのヒットが増加する

2. 電源供給回路 (PDB: Power Distribution Board) の品質保証試験

- 22枚の最終量産機が作成済み
- EIL4のインストールに合わせて、PDBもインストールを行う

1. EIL4の性能評価：セットアップ

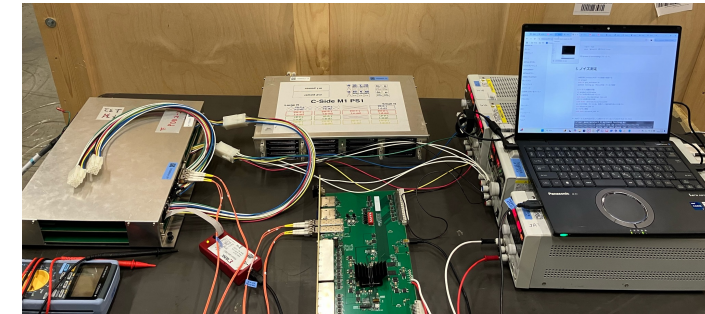
- 本試験で用いるEIL4：1 normal & 2 special

チャンネル数	ワイヤー	ストリップ
Normal	32	32
Special	21	32

- 測定方法

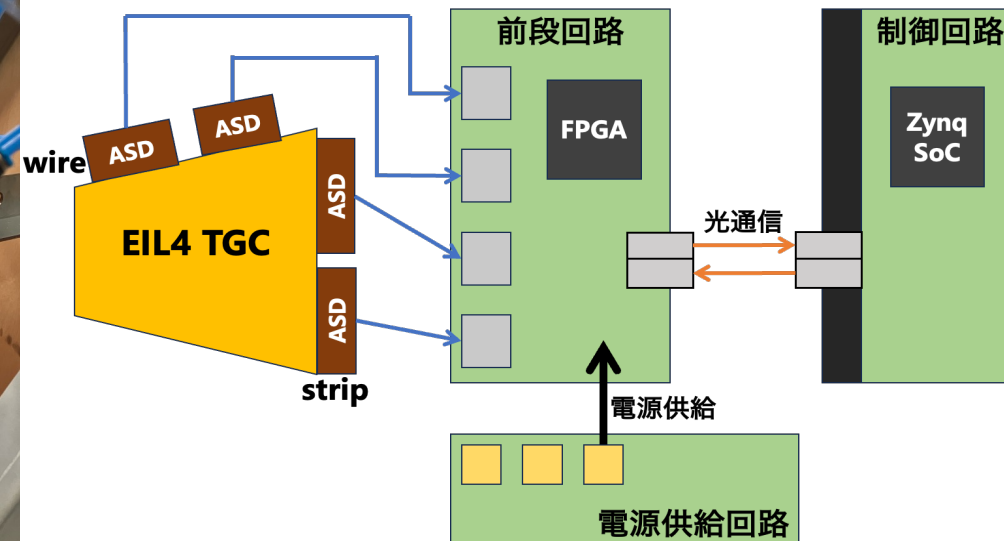
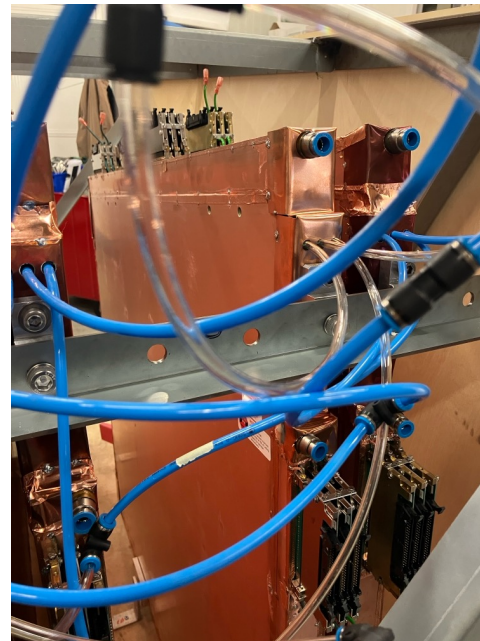
① ノイズ評価

- 高電圧OFF、ガス：CO₂
- 11 kHzのランダムトリガーを利用
- ASDにおける閾値電圧を変化させ、**ノイズの有無を評価**



② 宇宙線ミュオン測定

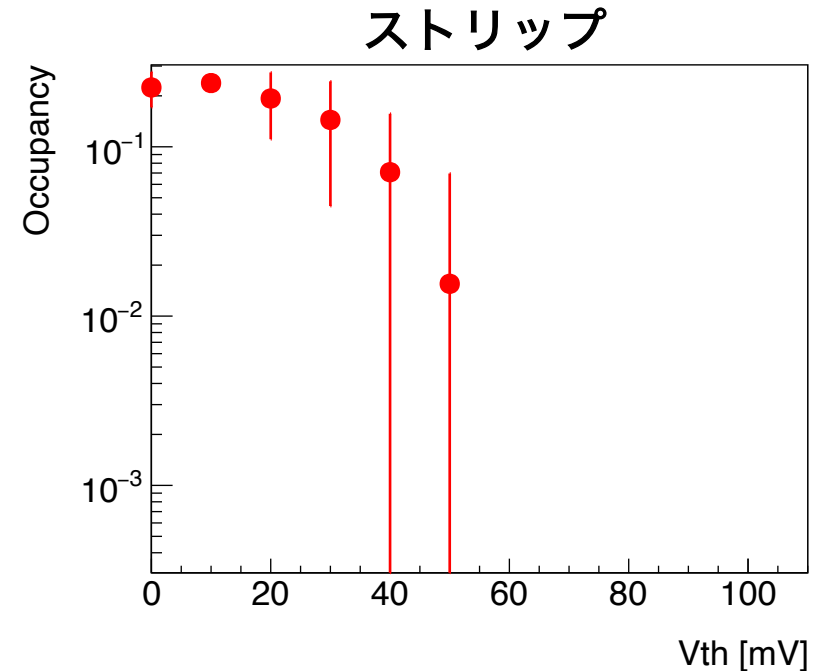
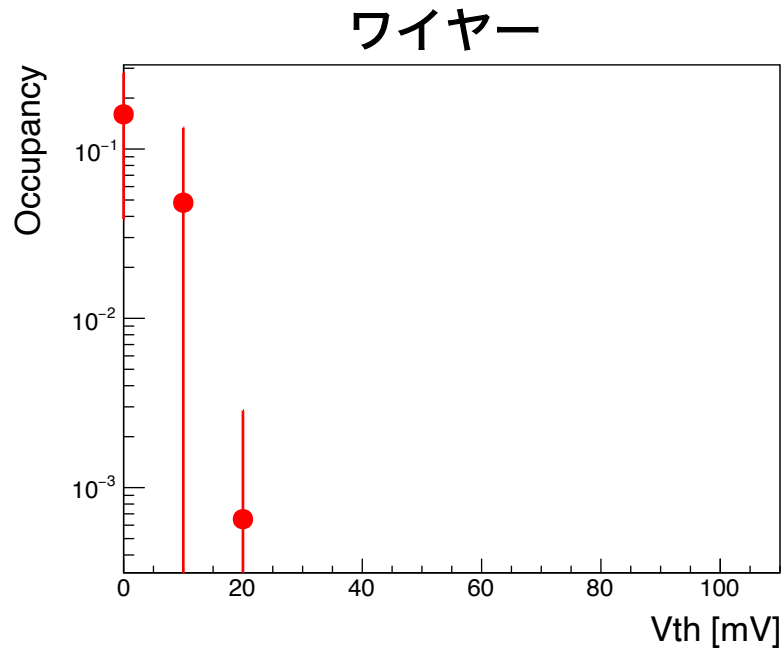
- ガス：CO₂
- 閾値電圧：100 mV
- 3層中2層以上にヒットを要求するトリガーを利用
- 印加電圧を2500-3000 Vまで100 V刻みで増加
- **宇宙線ミュオンのカウント数を評価**



1. EIL4の性能評価：結果①ノイズ評価

- 3台全てのEIL4が要求をクリア ※全測定結果はBackup

	要求値	ワイヤー	ストリップ
閾値電圧	100 mV	30 mV	60 mV

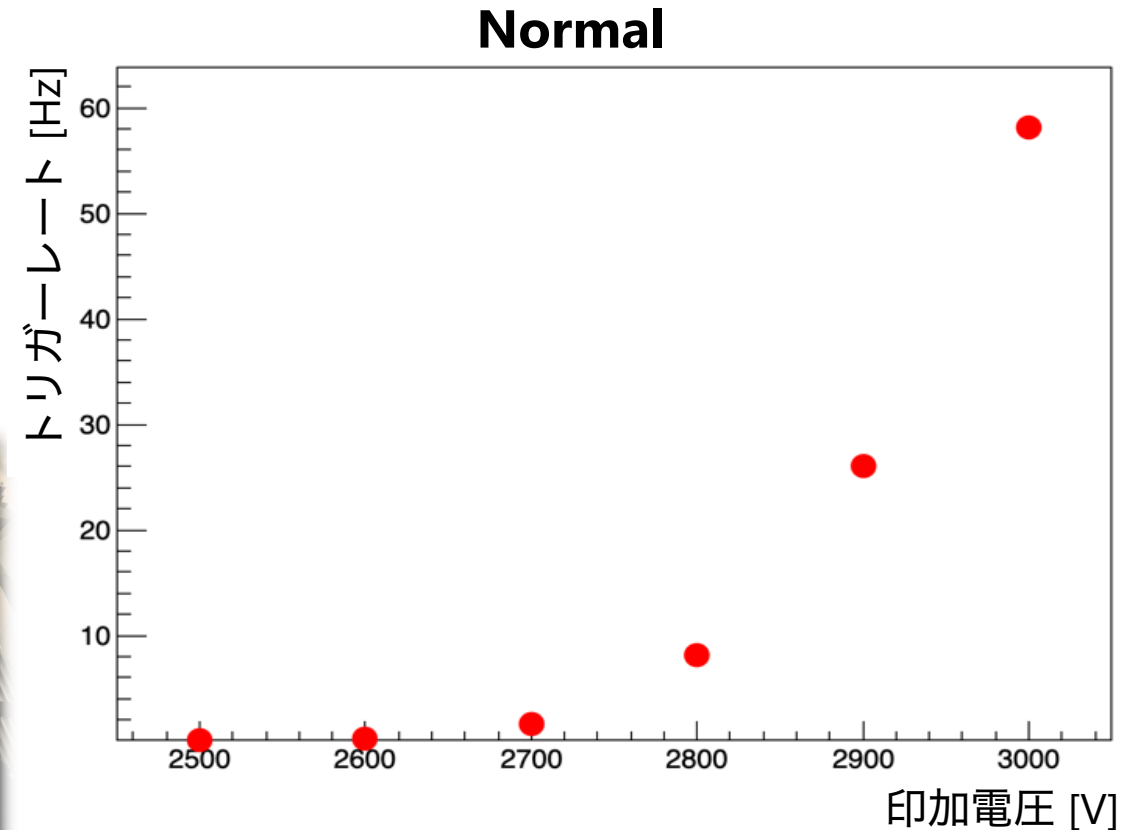


1. EIL4の性能評価：結果②宇宙線ミュオン測定

- 3台全てのEIL4が要求をクリア
 - 印加電圧を大きくするのに伴って、宇宙線ミュオンのカウント数も増加した

※全測定結果はBackup

- 3台全てのEIL4が全ての要求をクリア
 - 昨年12月に実際にインストールが完了



2. PDBの品質保証試験：概要

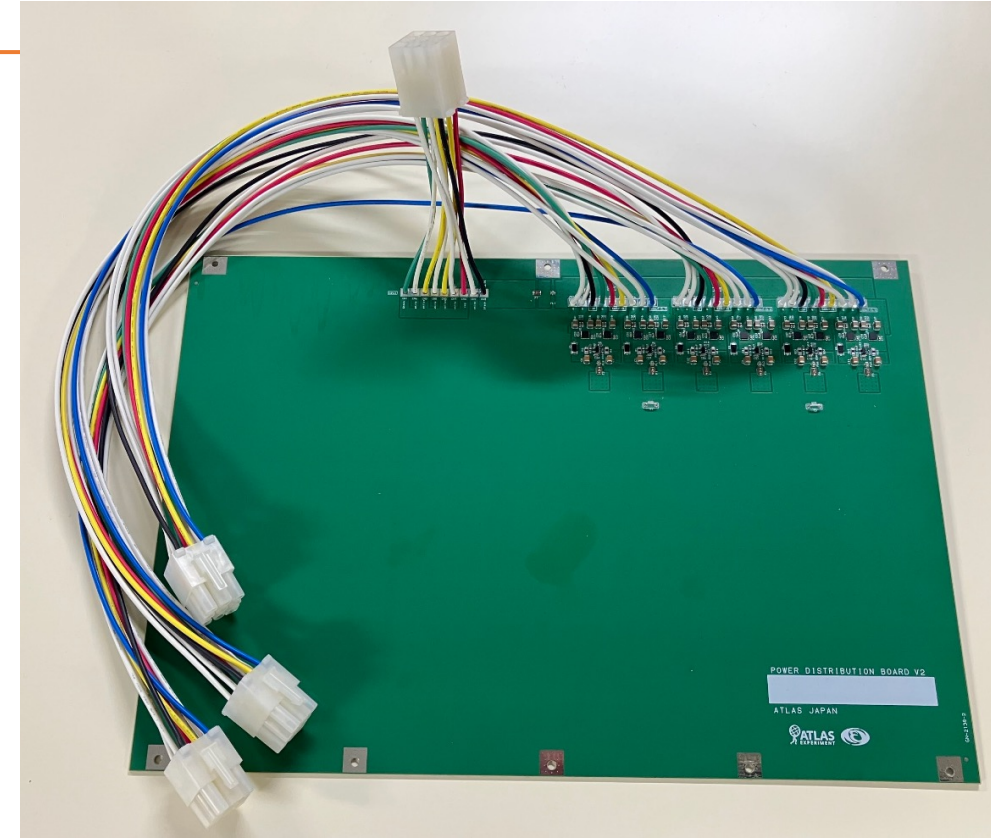
- 1枚のPDBで3枚の前段回路に電源供給が可能

	前段回路の入力		
	+3.3VD	+3VA	-3VA
PDBの出力	入力正電圧を用いて LDOを通して出力		入力負電圧を そのまま出力

- 2022年に試作機を生産
 - 動作検証により、+3VAが出力されないことが判明
→LDOの入出力間にツェナーダイオードを実装^A
- ※A：2023年 橋本大輔 16aPA81-2

- 最終量産が終了
 - ツェナーダイオードを実装した量産機22枚の動作検証が必要
 - 別の試験で使用中にツェナーダイオードから煙が発生

➡ 品質保証試験を行い、運用可能かを示す必要がある



2. PDBの品質保証試験：セットアップ

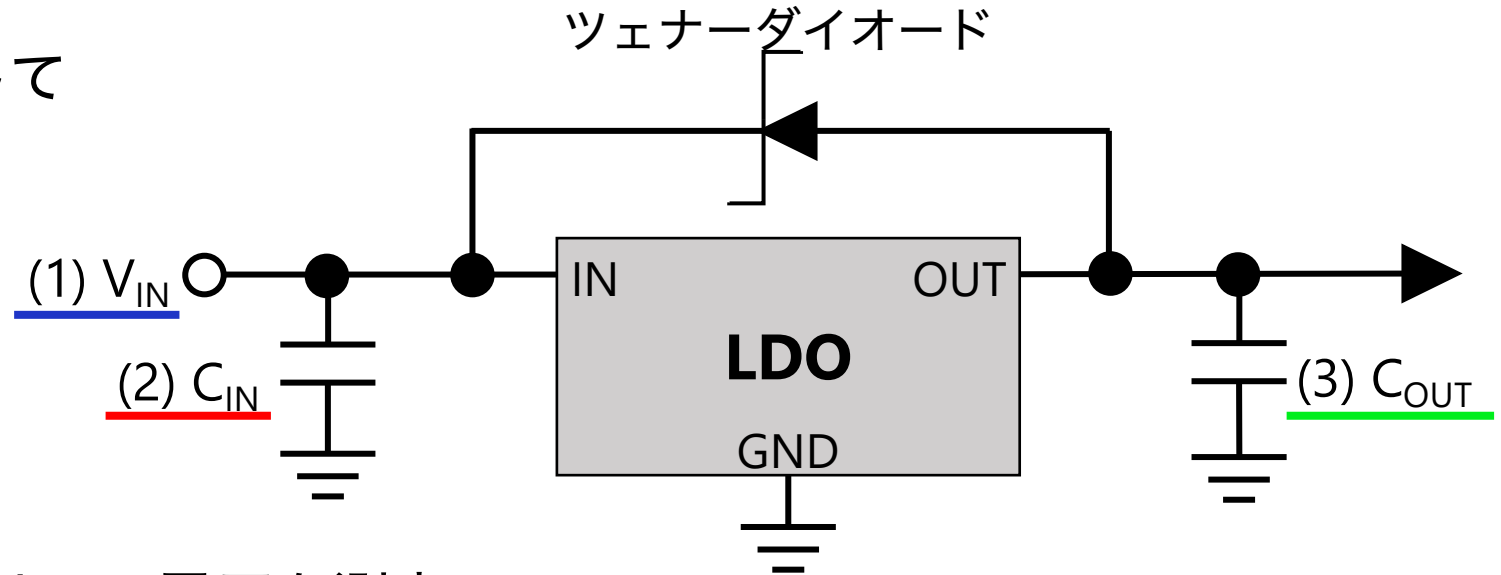
● 測定項目

- 本測定では以下の3点に着目して電圧を測定

(1) PDBへの入力

(2) LDOへの入力

(3) LDOからの出力



① 電圧スキャン

- ・ PDBへの入力電圧を変化させて、電圧を測定
- ・ ツェナーダイオードが正常に動作し、期待通りの電圧が出力されるかを確認

② 100回試験

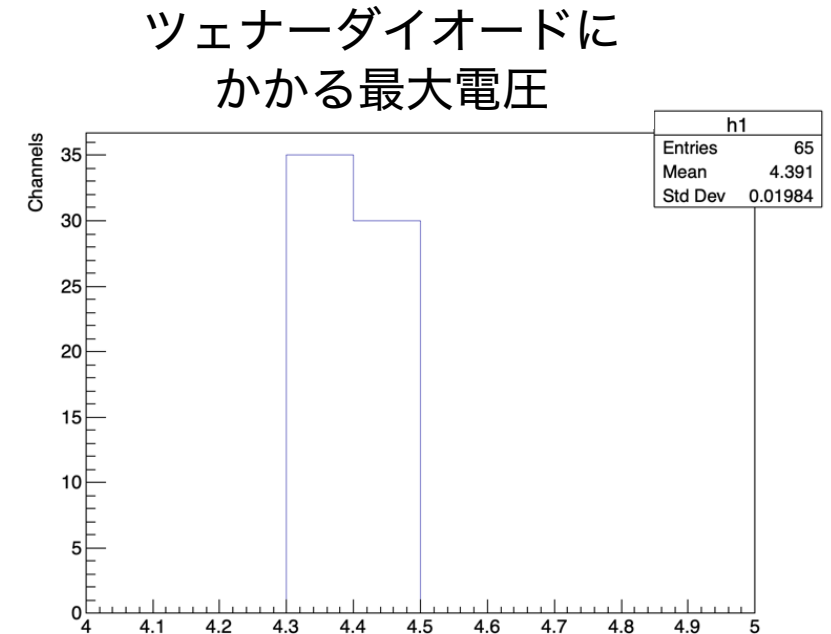
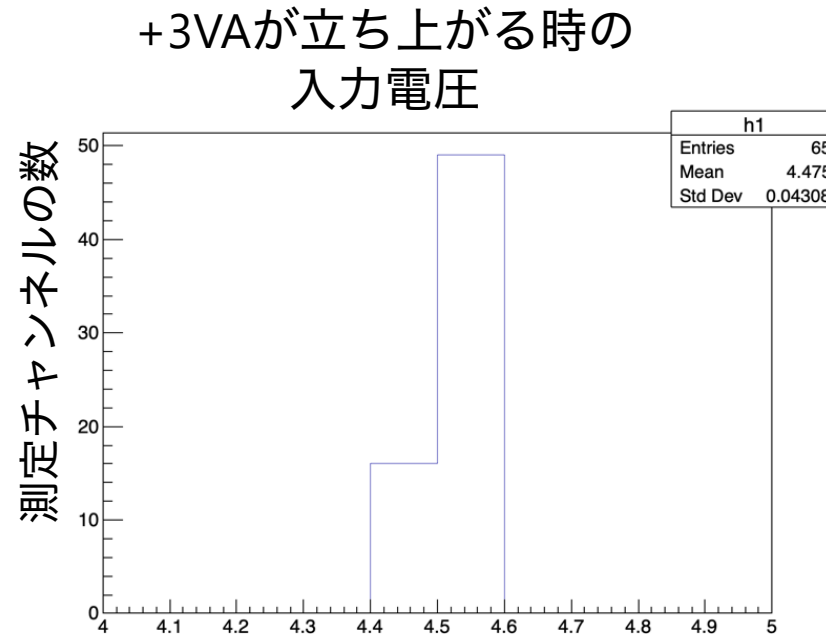
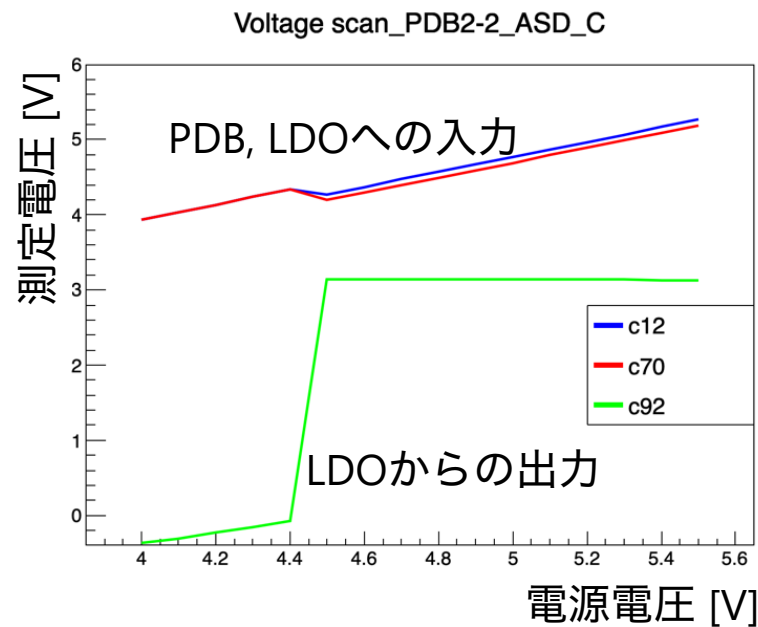
- ・ PDBへの入出力を100回繰り返し、正常動作するかを確認

③ 前段回路3枚を同時接続した試験

- ・ 実際の運用に最も近い環境で、正常動作するかを確認

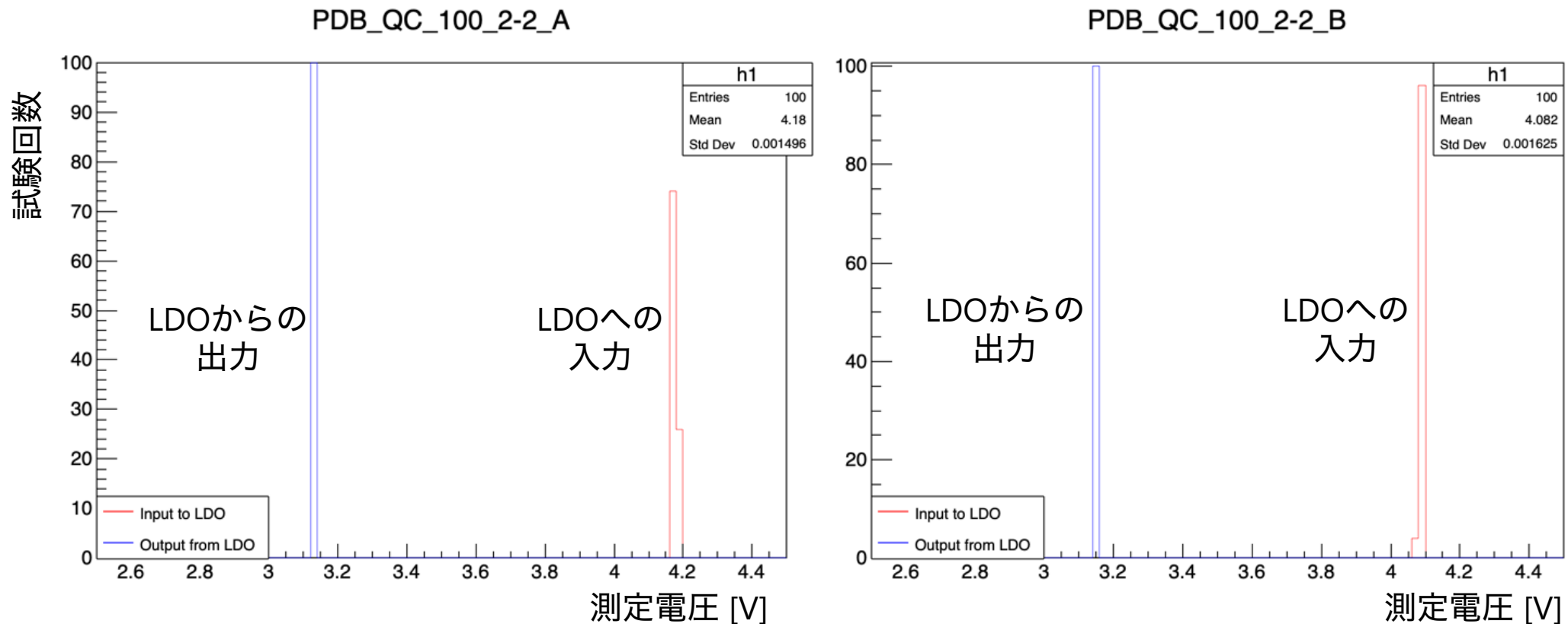
2. PDBの品質保証試験：結果①電圧スキャン

- 全ての回路でツェナーダイオードが燃えることなく正常に動作
 - +3VAが立ち上がる時の入力電圧
 - ツェナーダイオードにかかる最大電圧
- } 個体差 = 0.1 V → 非常に小さい
- ※全測定結果はBackup



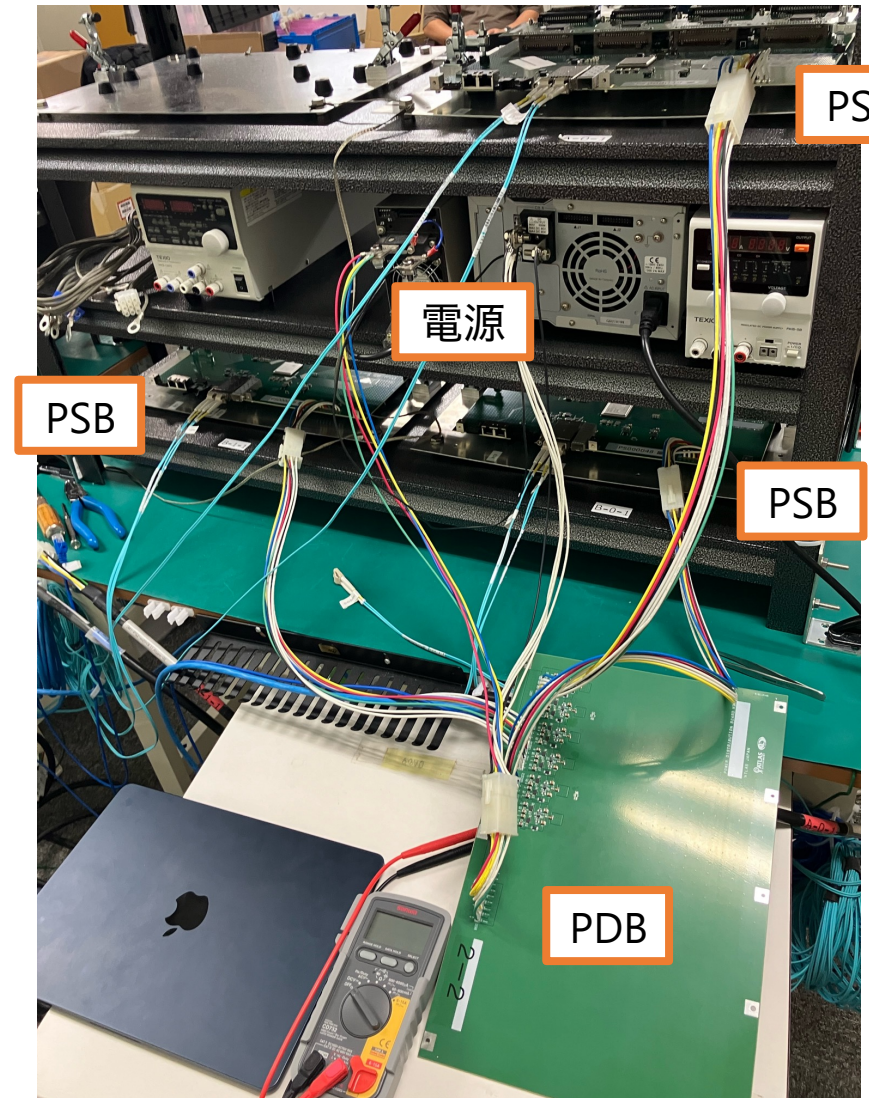
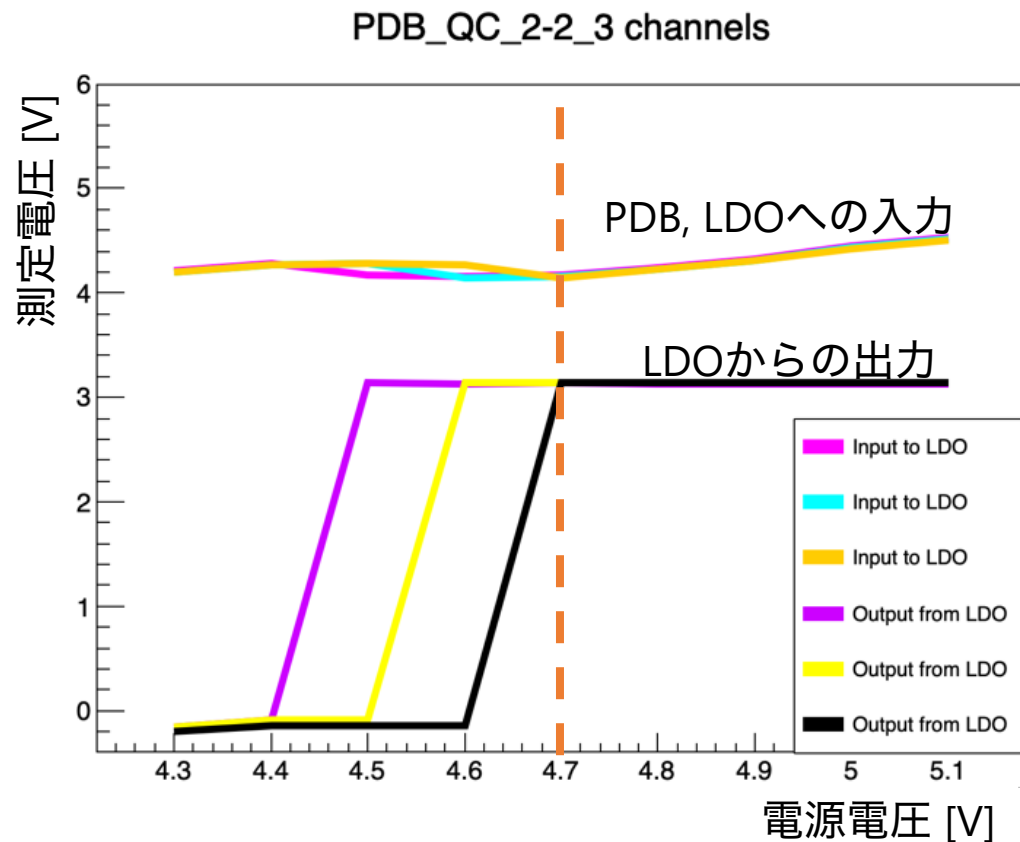
2. PDBの品質保証試験：結果②100回試験

- PDB1枚 (2-2) のA, Bの2チャンネルで実施
- ツェナーダイオードが燃えることなく正常に動作
 - 個体差 $\ll 0.1$ V



2. PDBの品質保証試験：結果③3台同時接続試験

- PDB1枚 (2-2) を用いて実施
- ツェナーダイオードが燃えることなく正常に動作
 - 入力電圧が4.7 Vで+3VAが全て立ち上がった

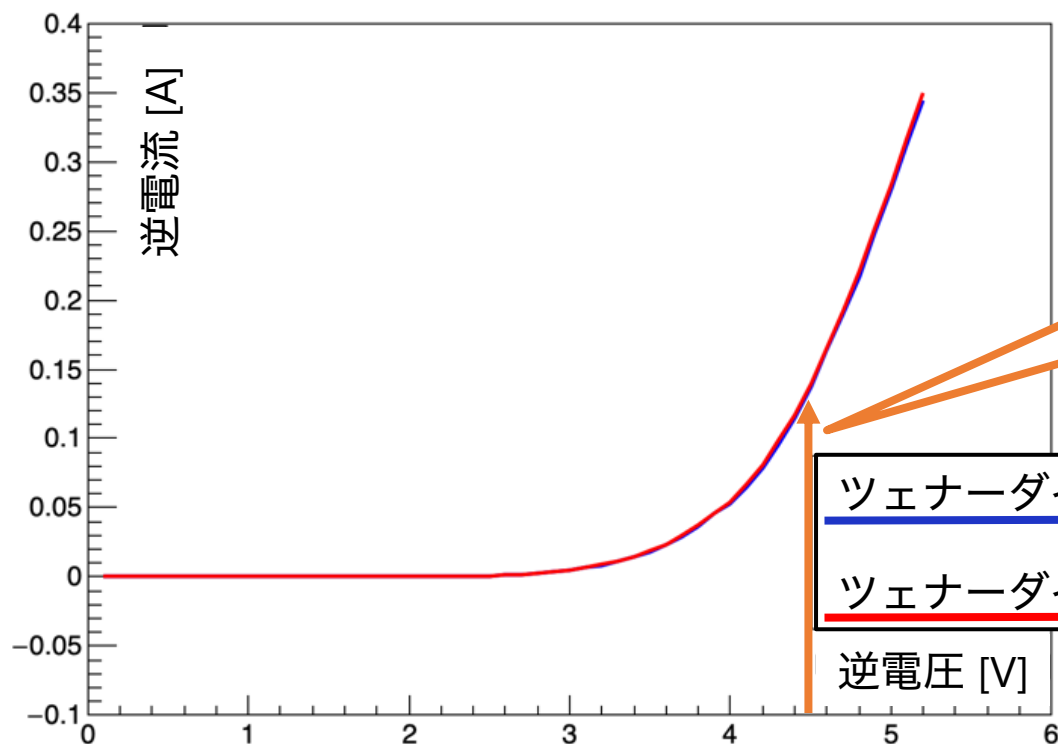


2. PDBの品質保証試験：ツェナーダイオードの発煙調査

- ツェナーダイオードのI-V特性を評価

→発煙のタイミングを調査

zener_hikaku_241017



品質保証試験から、

- ツェナーダイオードにかかる最大電圧：4.5 V
- その時に流れる電流：140 mA
→ 630 mW
- 定格電力：1000 mW

**正しく使用すれば、
発煙の可能性はない**

※実際に電力が1000 mW前後で
発煙することも確認 @Backup

まとめ

- 2030年から始まる高輝度LHC-ATLAS実験に向けて、ミューオントリガーや読み出し回路の改良が必要
- トリガーシステムの中で、以下2つに対して性能評価を実施

1. 新型内層TGC検出器：EIL4

- 3台全てのEIL4が電氣的ノイズ、宇宙線ミューオンに関する要求をクリア
→ 昨年12月に実際にインストールが完了

2. 電源供給回路：PDB

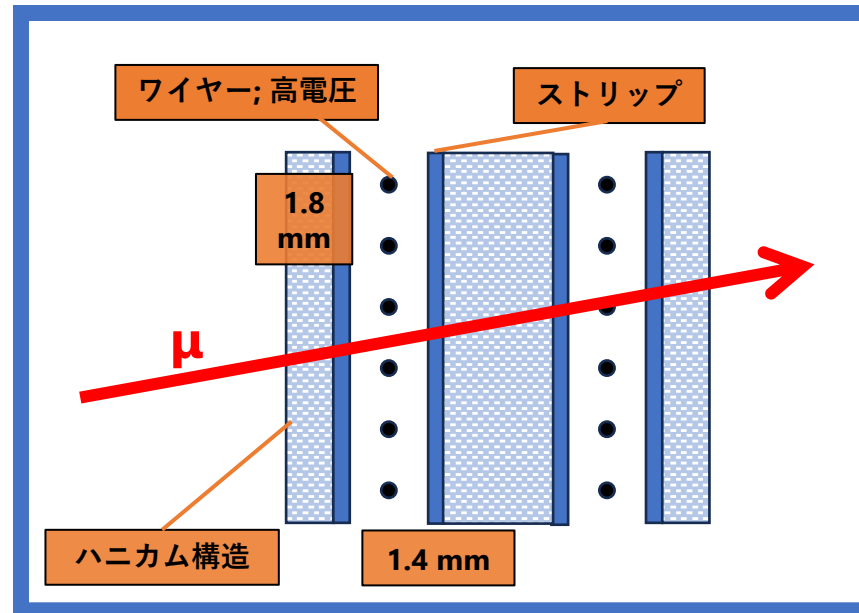
- 量産機22枚の全てが正常に動作することを確認
→ EIL4に合わせて実際に1枚をインストール
- ツェナーダイオードの発煙原因を調査
→ 通常使用の範囲で、発煙しないことを示した

Backup

TGC検出器の概要

• TGC検出器

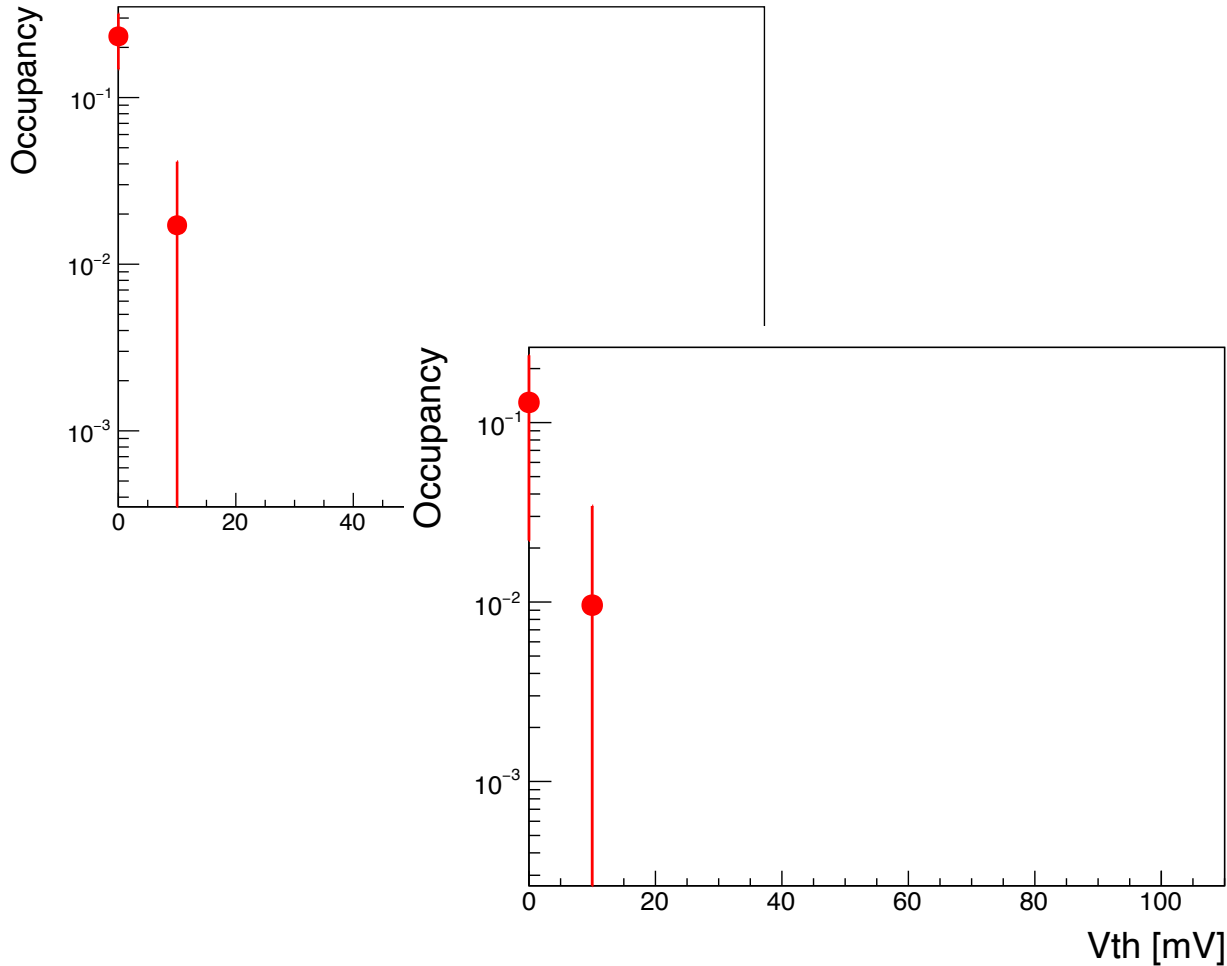
- 比例計数管の一種
- 直行するワイヤーとストリップで二次元読み出し
- ミューオンの飛跡を捉え、運動量を推定
- 運動量に閾値をかけ、高運動量の事象をトリガー
- トリガーの閾値を上げる
 - レート抑制
 - 信号事象の減少



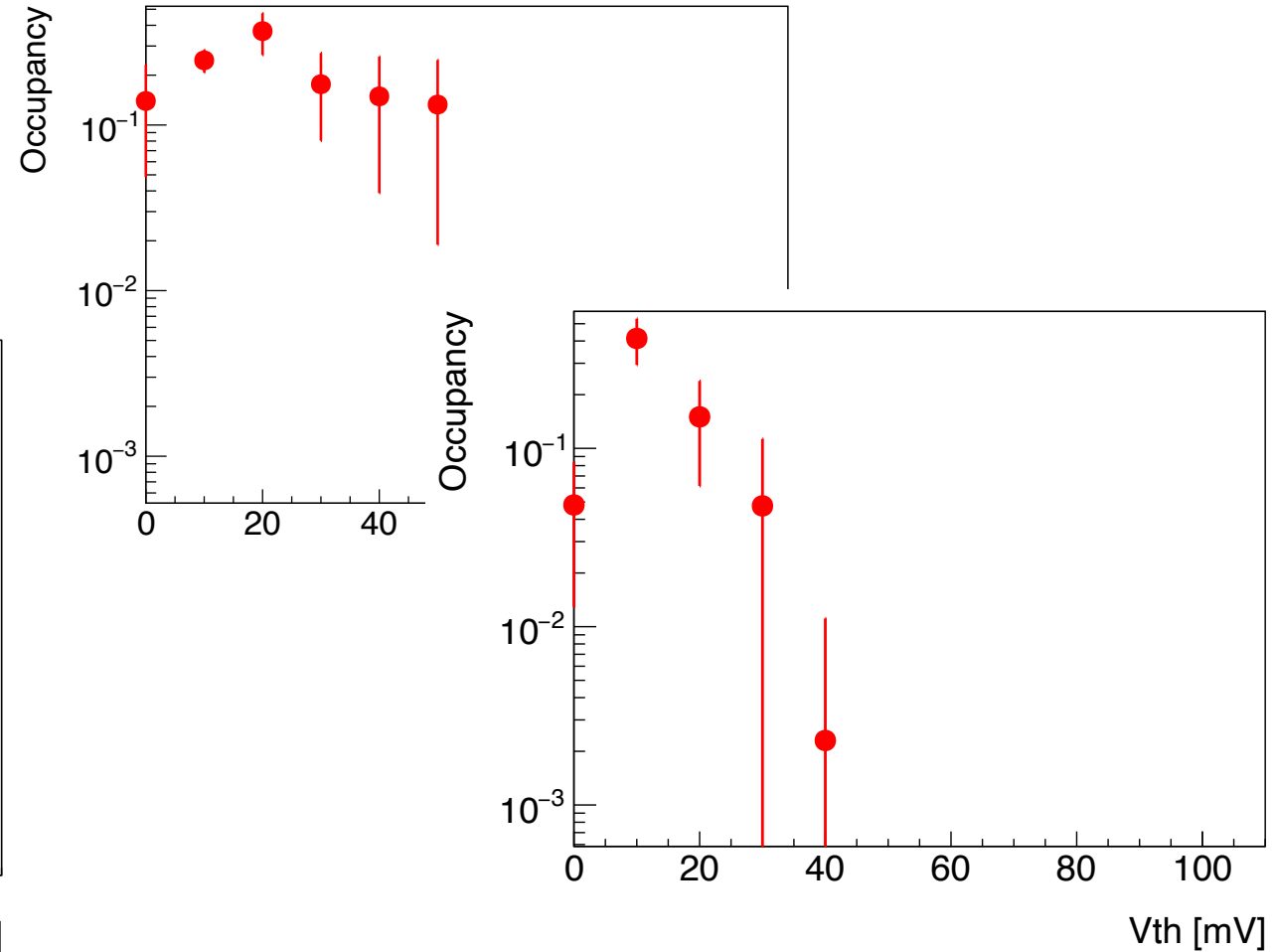
1. EIL4の性能評価：結果①ノイズ評価

● 全測定結果

ワイヤー



ストリップ

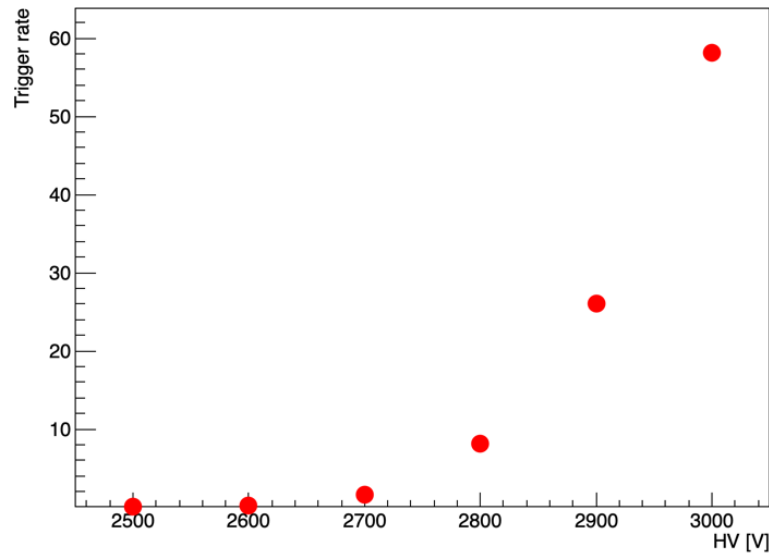


1. EIL4の性能評価：結果②宇宙線ミュオン測定

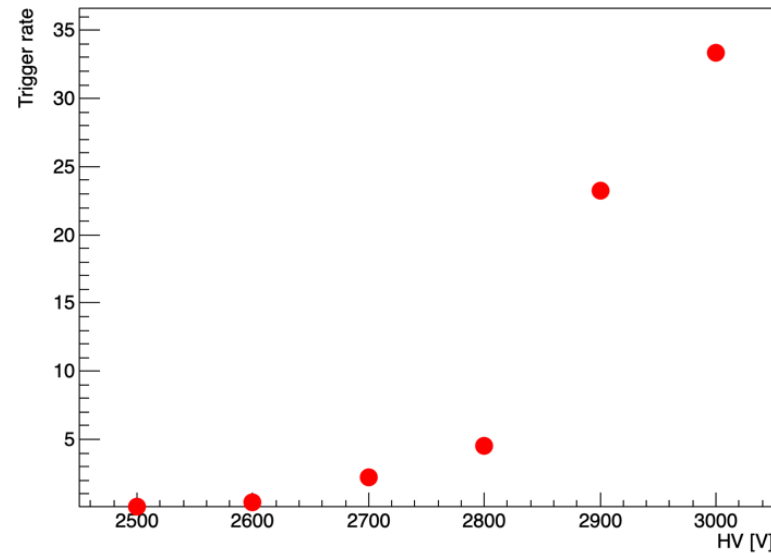
- 3台全てのEIL4が要求をクリア

➤印加電圧を大きくするのに伴って、宇宙線ミュオンのカウント数も増加した

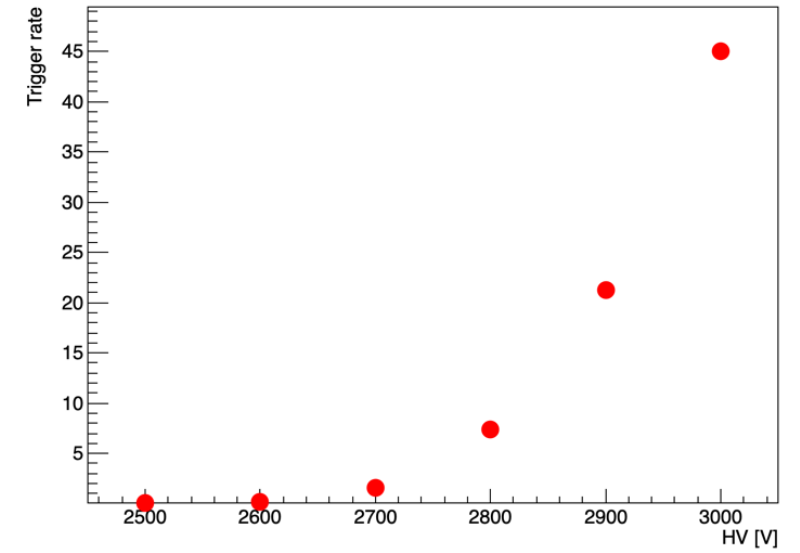
Normal



Special

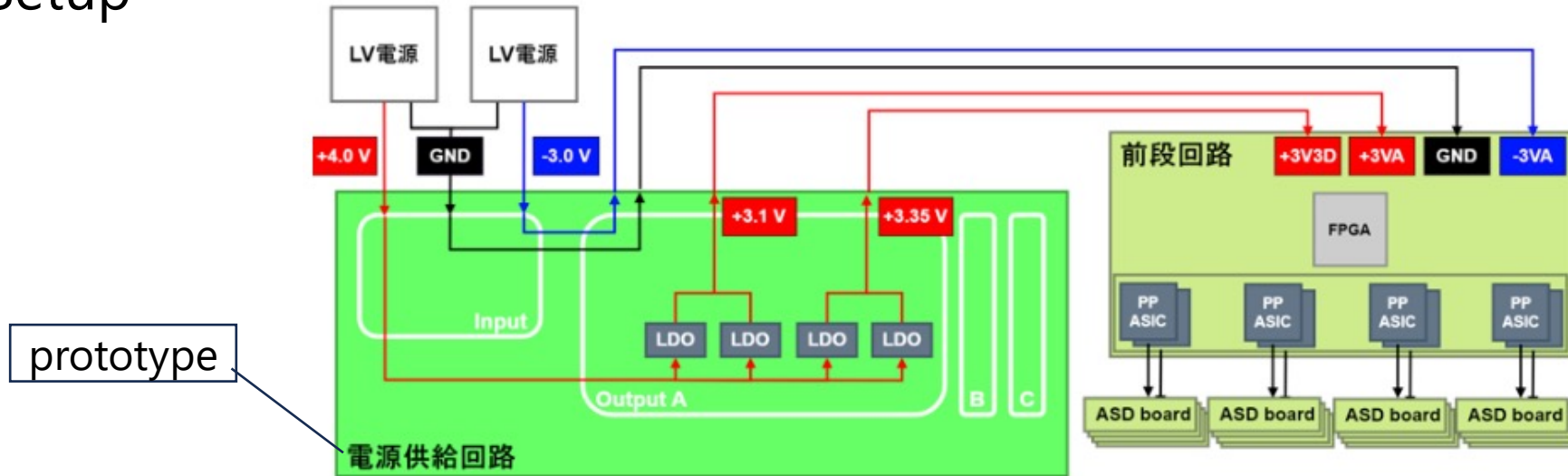


Special



PDB試作機における動作検証

➤ Setup



➤ Results

Startup order	+3.3VD	+3VA	-3VA
+4 V → -3 V	3.36 V	3.09 V	-3.02 V
-3 V → +4 V	3.37 V	-0.60 V	-3.01 V

The +3VA output depends on the startup order !

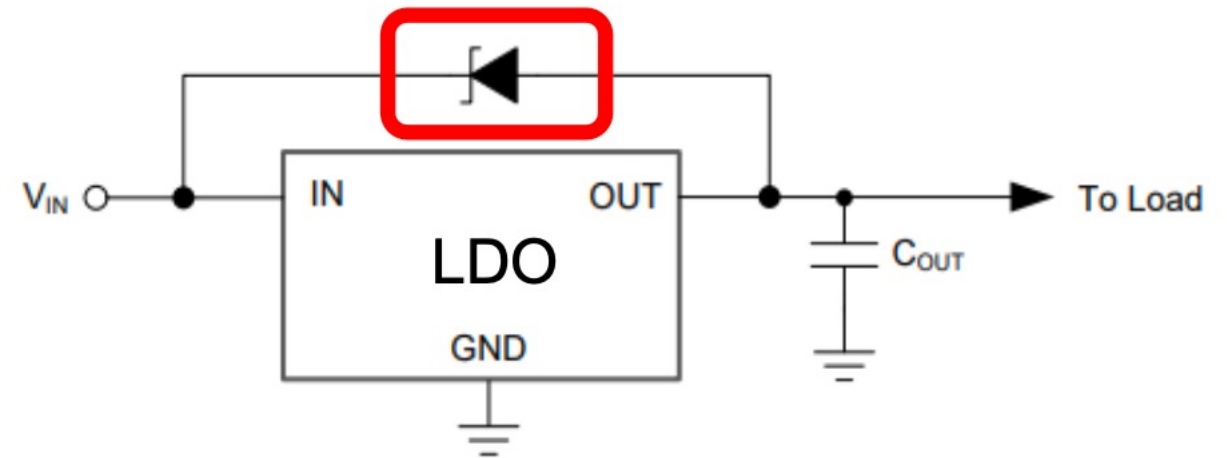
PDB試作機における動作検証

➤ Cause

- A protection circuit is implemented inside the LDO chip.
 - Do not allow output if a negative voltage is applied to the LDO output.
- -3VA is turned on first.
 - -0.6 V is applied to the +3VA voltage line via the PS boards.
 - The LDO protection is triggered and cannot be switched on.

➤ Modification

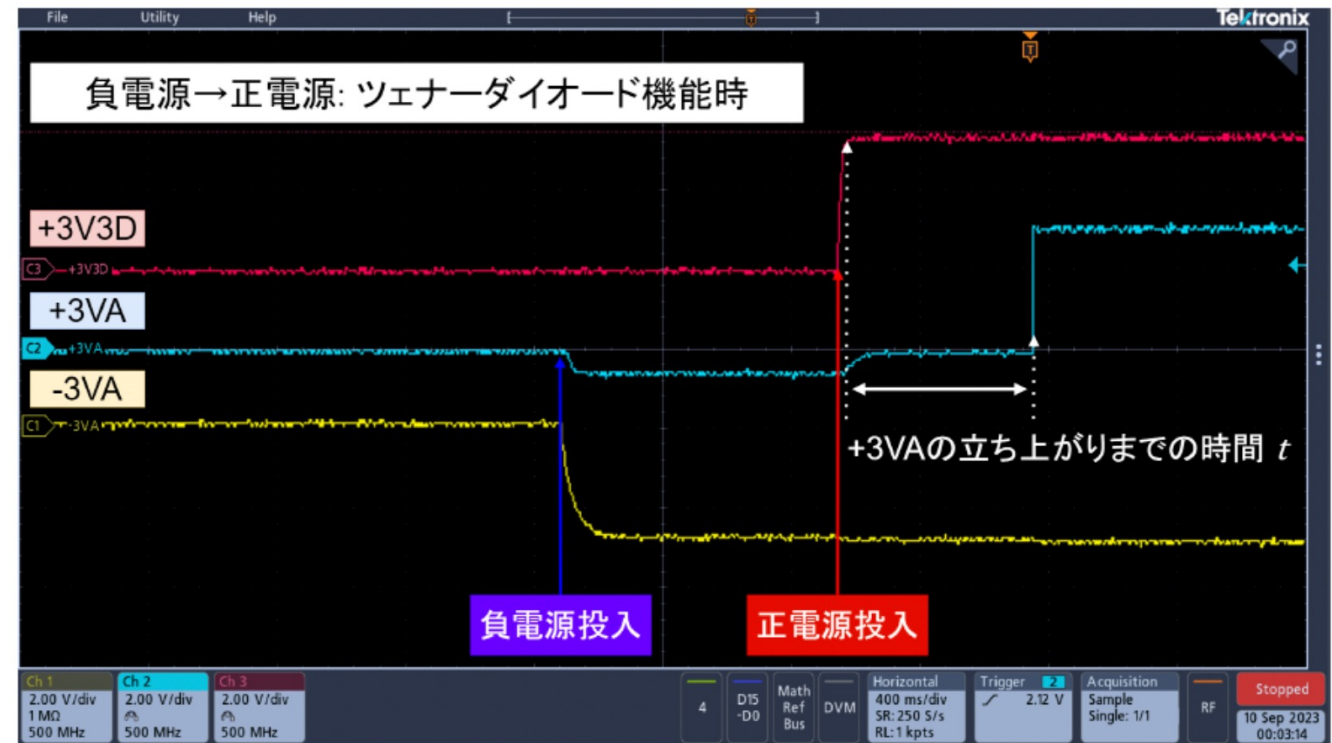
- **Zener diode implementation**
- ✂ Recommended method in the LDO datasheet.



PDB試作機における動作検証

➤ Image of oscilloscope (prototype verification)

- t : The time difference between the 4 V power on and the +3VA ramp up.
- Current flows through the zener diode.
Lift +3VA
→ Over 0 V, LDO work
→ Output 3 V



PDB試作機における動作検証

➤ LDO input voltage and "t"

(t : The time difference between the 4 V power on and the +3VA ramp up.)

- Verified in 0.1 to 2 sec.
- Power-off when the start-up was confirmed.

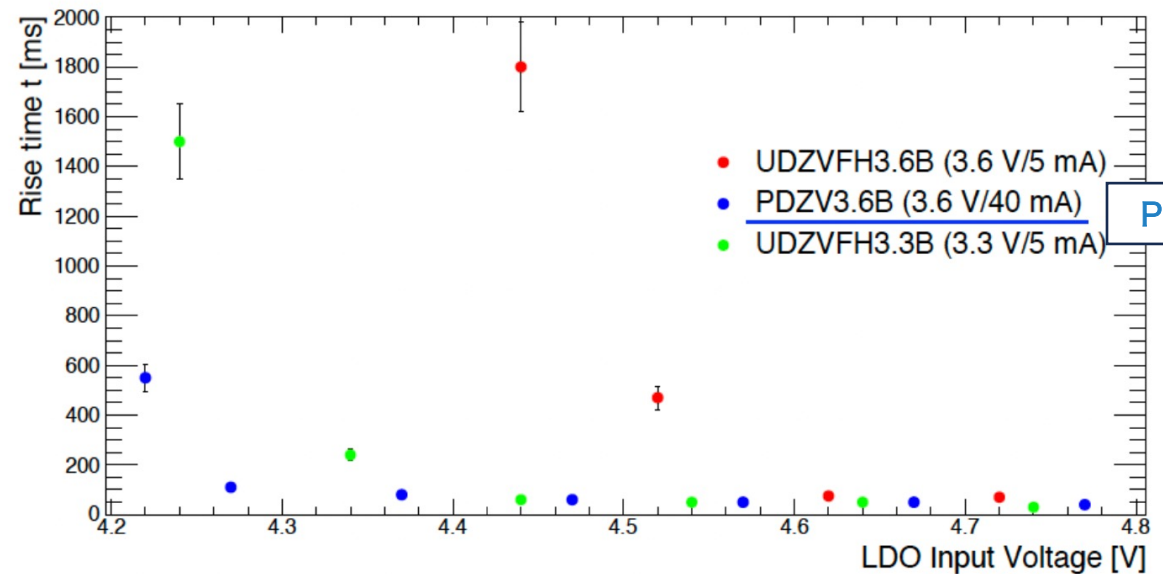
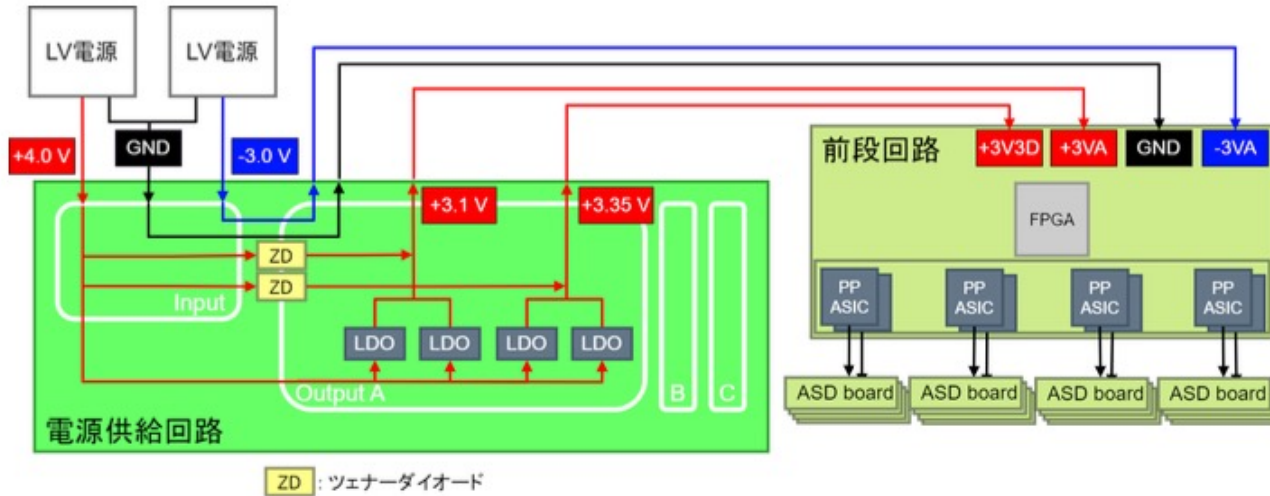


図 6.8: 各ツェナーダイオードにおける LDO の入力電圧と立ち上がり時間の関係 (負電源 → 正電源の投入順)。エラーバーはオシロスコープの測定結果に応じて 10%付けている

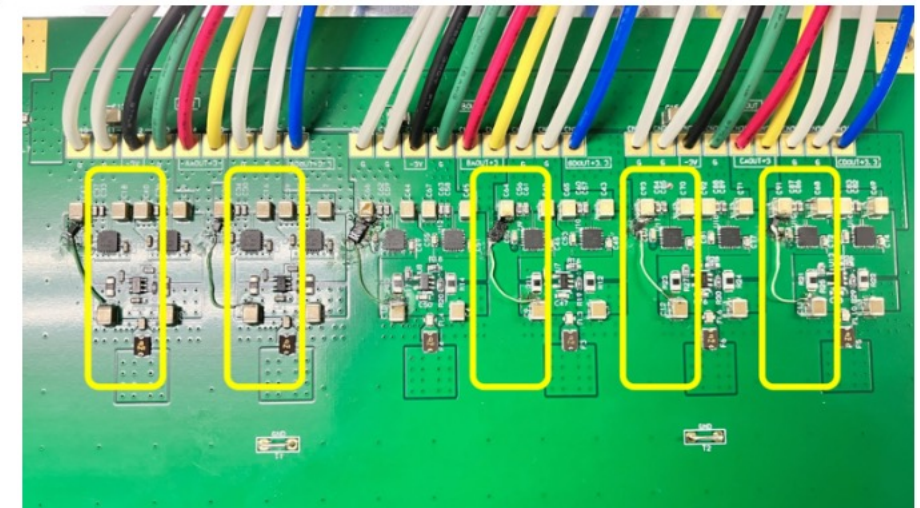
ツェナーダイオードの装着

➤ Setup



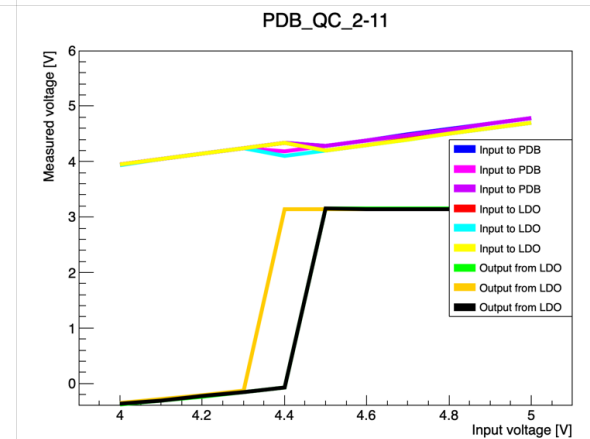
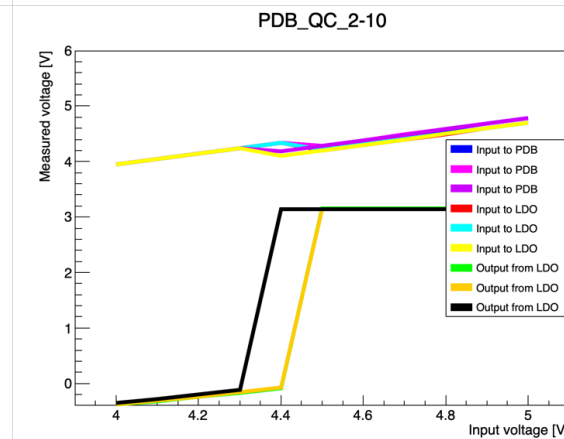
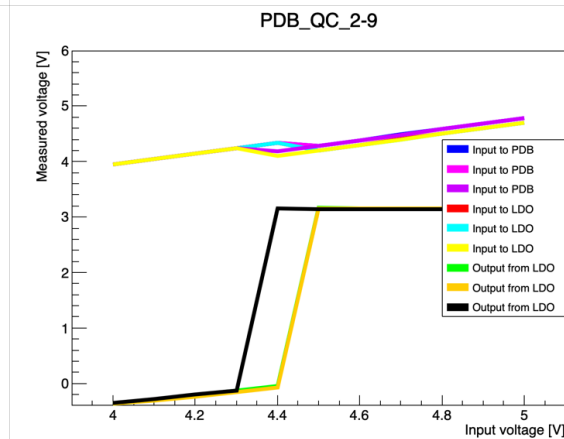
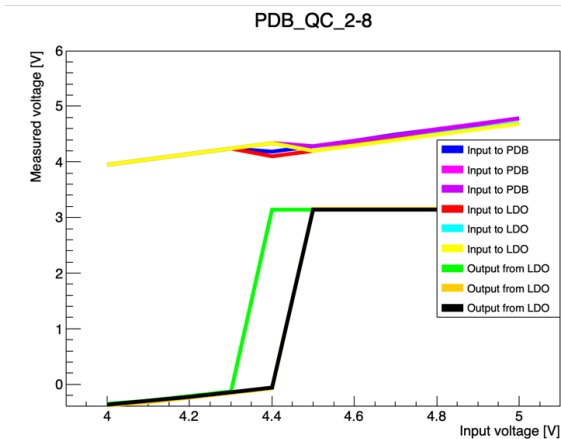
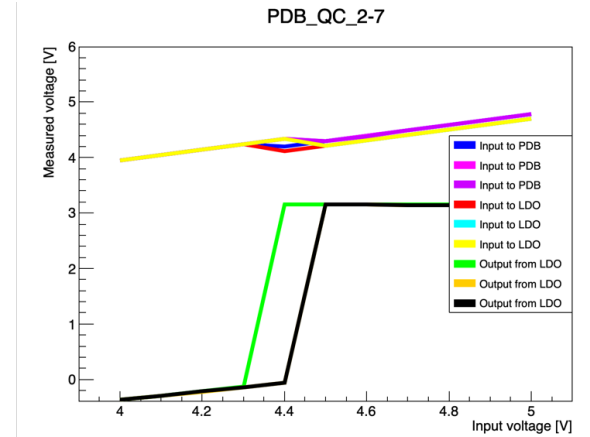
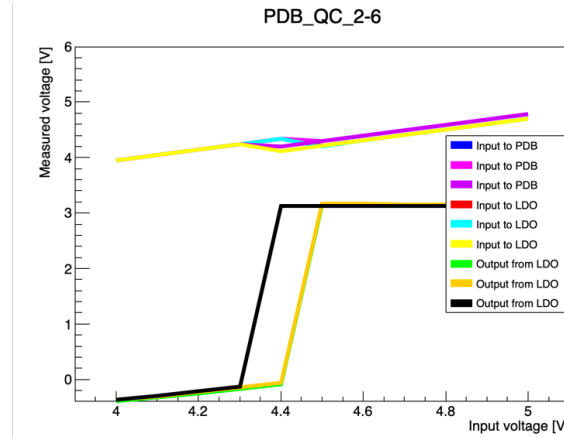
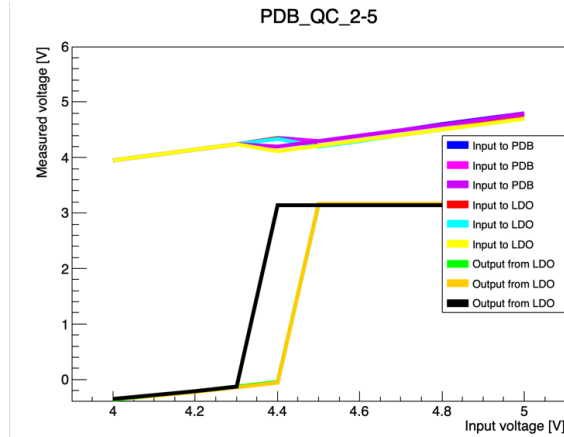
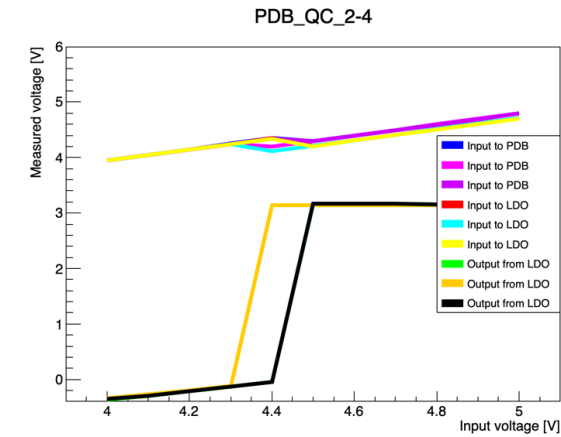
➤ Results

Startup order	+3.3VD	+3VA	-3VA
+4 V → -3 V	3.37 V	3.09 V	-3.01 V
-3 V → +4 V	3.36 V	3.09 V	-3.03 V

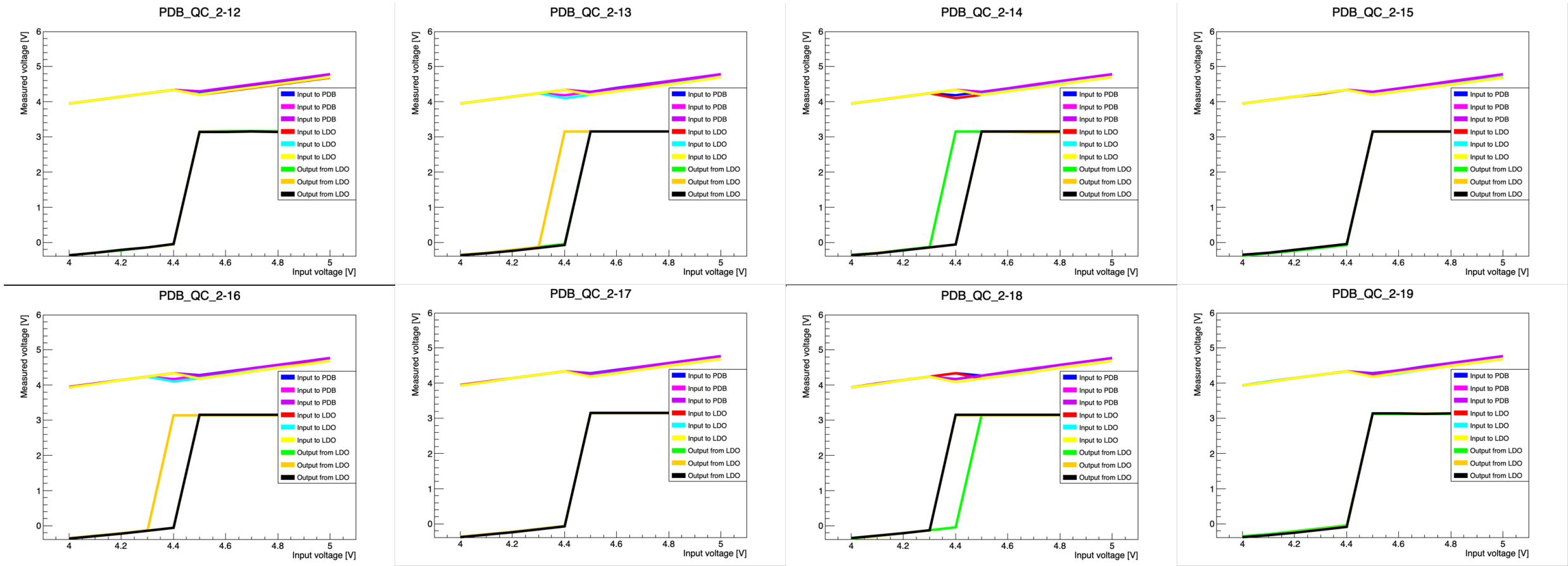


→ **Prototype PDB with zener diode work as expected !**

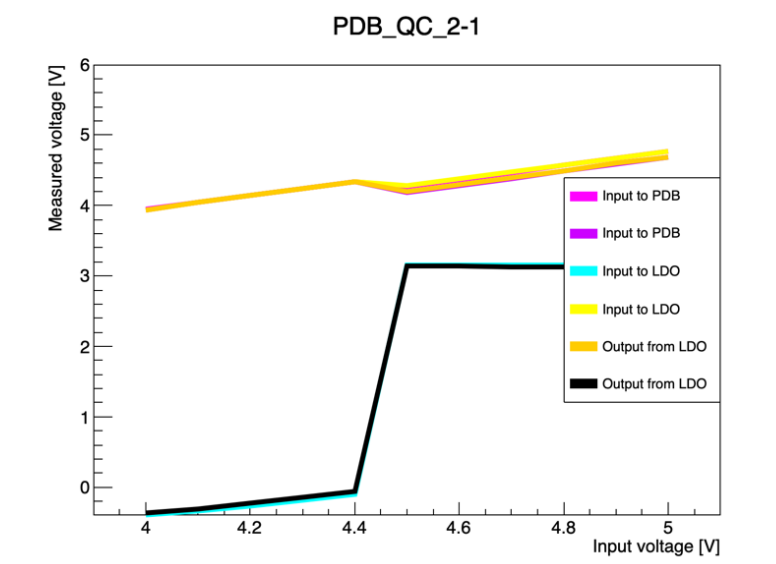
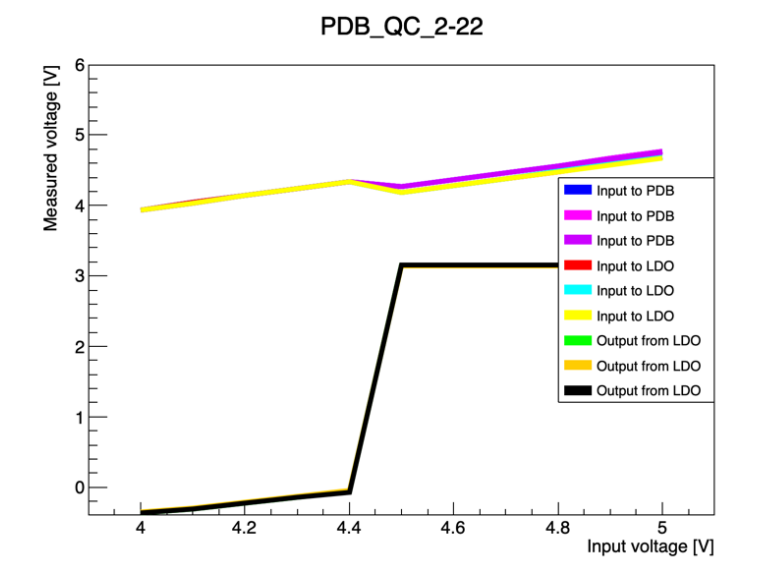
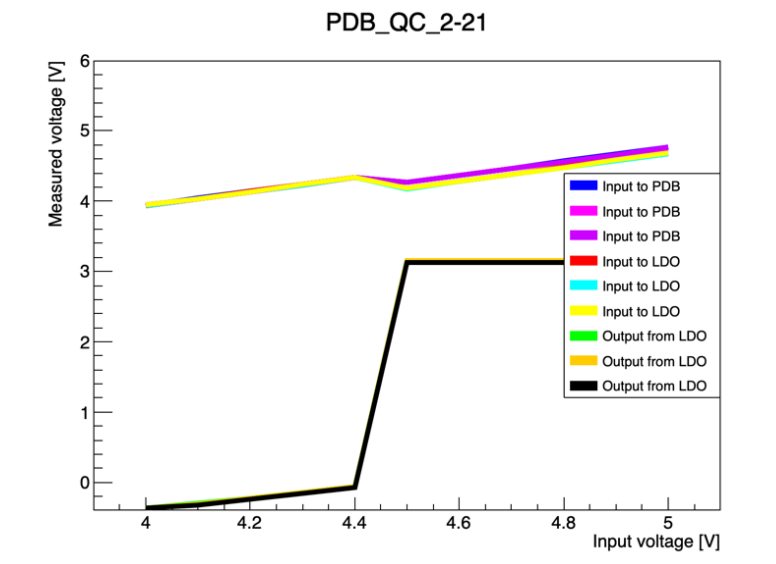
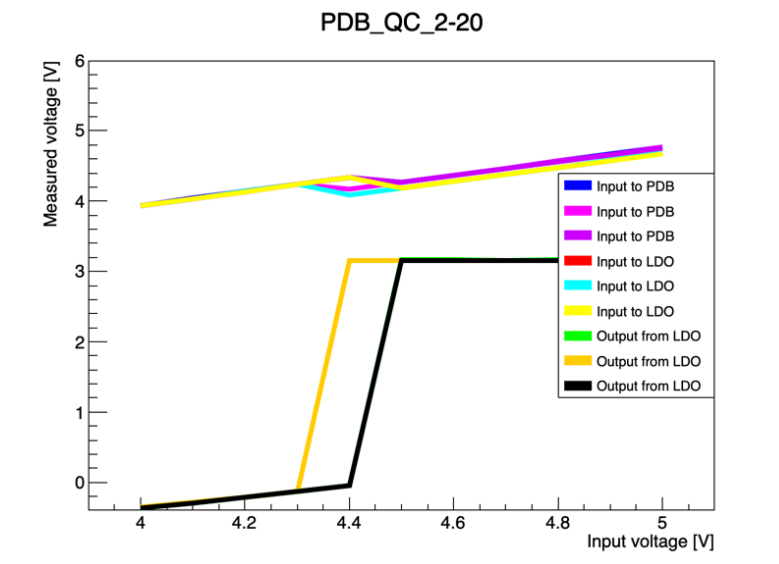
2. PDBの品質保証試験：結果①電圧スキャン



2. PDBの品質保証試験：結果①電圧スキャン



2. PDBの品質保証試験：結果①電圧スキャン



2. PDBの品質保証試験：ツェナーダイオードの発煙調査

- When tested on a mass-production model, **it produced smoke.**
 - **5.1 V** was applied to one side. (4 V at the input of the zener diode)
 - After the smoke, zener diode characteristics changed.
 - Carbonized ? (0.16 Ω)

● Electrical Characteristics ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

V_Z Rank(V)	Symbol						
	Zener Voltage: V_Z (V) ⁽¹⁾			Dynamic Impedance: Z_Z (Ω)		Reverse Current: I_R (μA)	
	MIN.	MAX	I_Z (mA)	MAX	I_Z (mA)	MAX	V_R (V)
2.0	2.000	2.240	40	25	40	200	0.5
2.2	2.200	2.450	40	20	40	200	0.7
2.4	2.400	2.700	40	15	40	200	1.0
2.7	2.700	3.100	40	15	40	200	1.0
3.0	3.000	3.400	40	15	40	100	1.0
3.3	3.300	3.700	40	15	40	80	1.0
3.6	3.600	4.000	40	15	40	60	1.0

2. PDBの品質保証試験：ツェナーダイオードの発煙調査

➤ Rated value of Zener diode

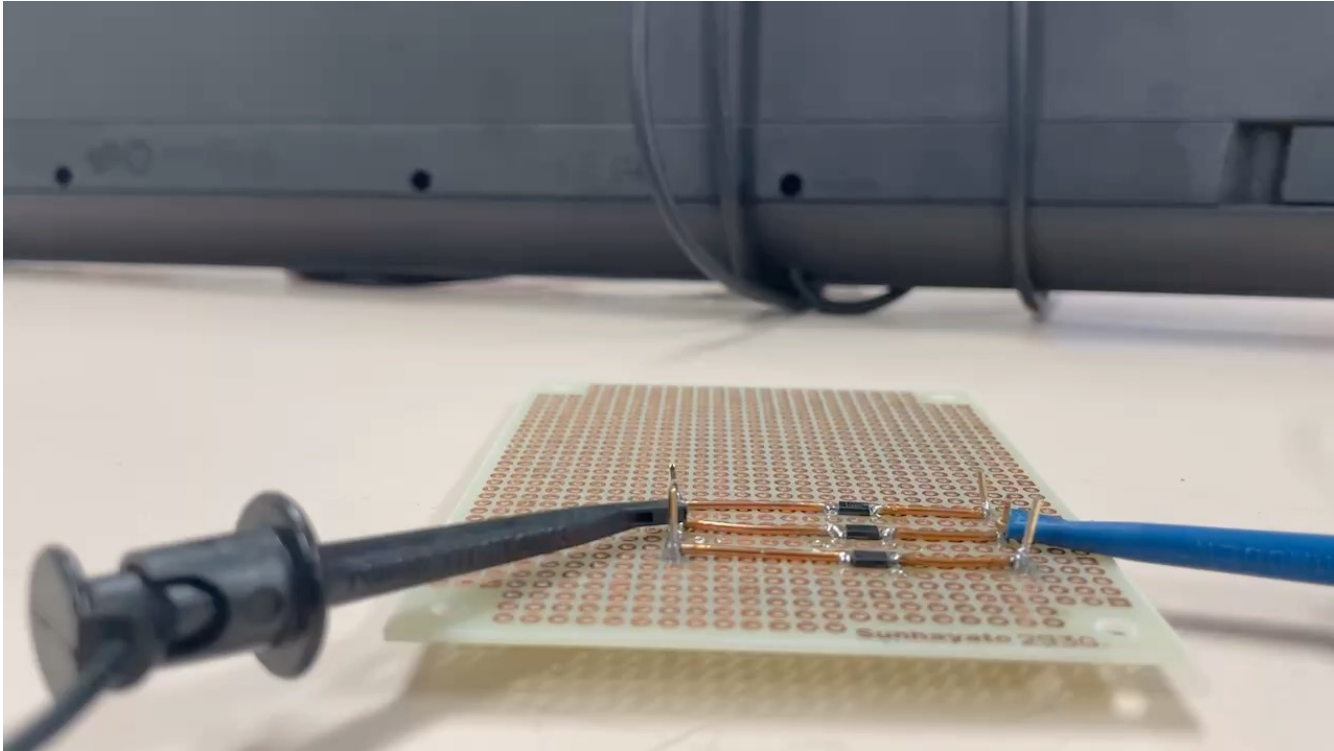
● Absolute Maximum Ratings ($T_a = 25^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Limits	Unit
Power dissipation	P_D	1000	mW
Junction temperature	T_j	150	$^\circ\text{C}$
Storage temperature	T_{stg}	-55 ~ 150	$^\circ\text{C}$

- Rated power is 1000 mW.
→ Operation near zener voltage assuming zener current (40 mA) will not exceed rating.
- How much power was consumed during the test shown on the previous page ?

2. PDBの品質保証試験：ツェナーダイオードの発煙調査

➤ Results



Burning conditions

○zener1 :

- Burning smelled at 4.9 V
- Smoke was immediately observed at 5.2 V

○zener2 :

- Burning smelled at 5 V
- Confirmed smoke at 5.2 V for about 2 min.



Although there were individual differences, there was a high possibility of burning when a voltage of about 5 V was applied to the zener diode

At this time, more than 250 mA was flowing
→Over 1000 mW