

AXEL実験：TPCドリフト電場形成のための コッククロフト・ウォルトン回路の動作試験

秋山 晋一

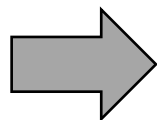
市川温子, 中村輝石, 岩下芳久^A, 中島康博^B, 潘晟^C, 吉田将^D,
菅島文悟^D, 疋田純也^D, 品川響, 浦野壮規, 他 AXEL collaboration

東北大理, 京大複合研^A, 東大理^B, 東大ICEPP^C, 京大理^D

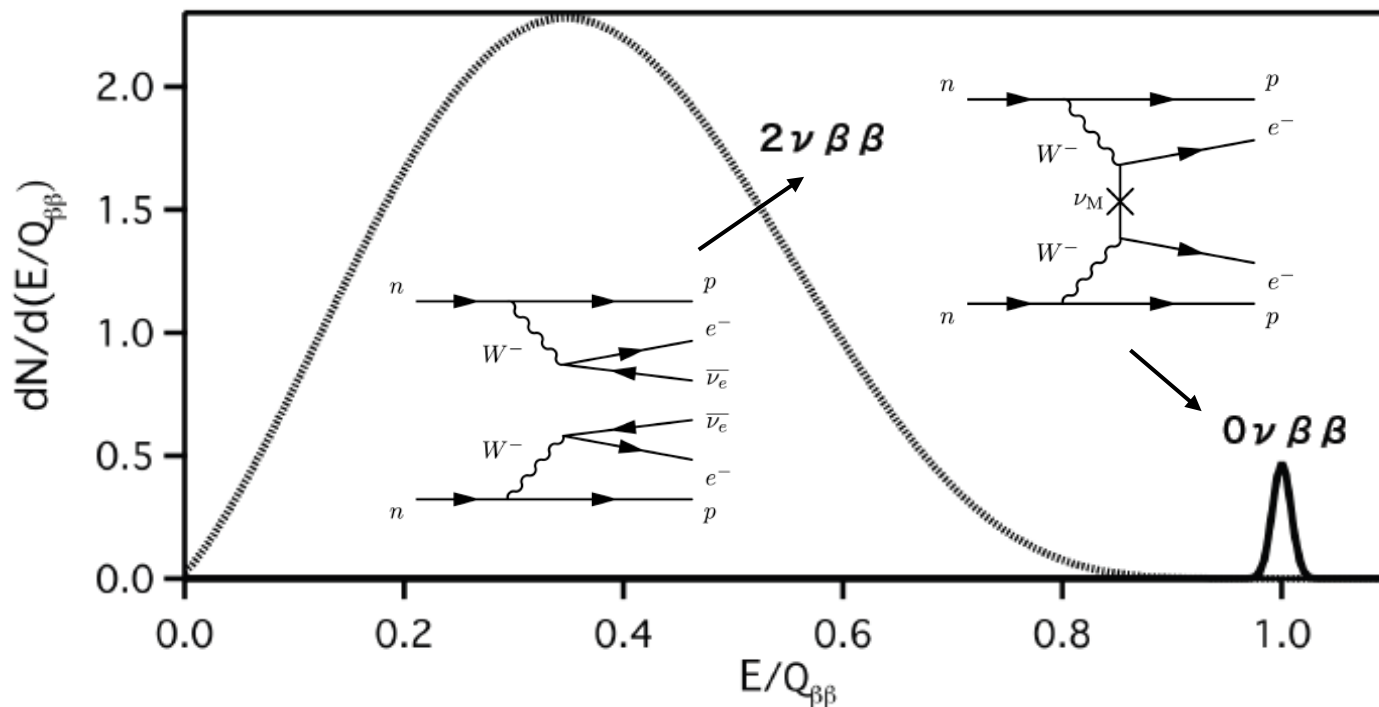
2023年3月23日 オンライン

-
- 物理モチベーション
 - ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊
 - AXEL実験
 - AXEL実験のロードマップ
 - コッククロフト・ウォルトン回路
 - コッククロフト・ウォルトン回路
 - 180Lプロトタイプ検出器での動作試験
 - 放電のモニター手法の検討
 - 入力電圧の不安定化の原因調査状況
 - 今後の予定
 - まとめ

- ニュートリノがマヨラナ質量をもつ場合に起きる
- 軽いニュートリノ質量、物質優勢宇宙の理解
- 非常に稀な事象 ($T_{0\nu} > 10^{26}$ yr) を検出する必要がある
 - 大質量
 - 高エネルギー分解能
 - 背景事象除去



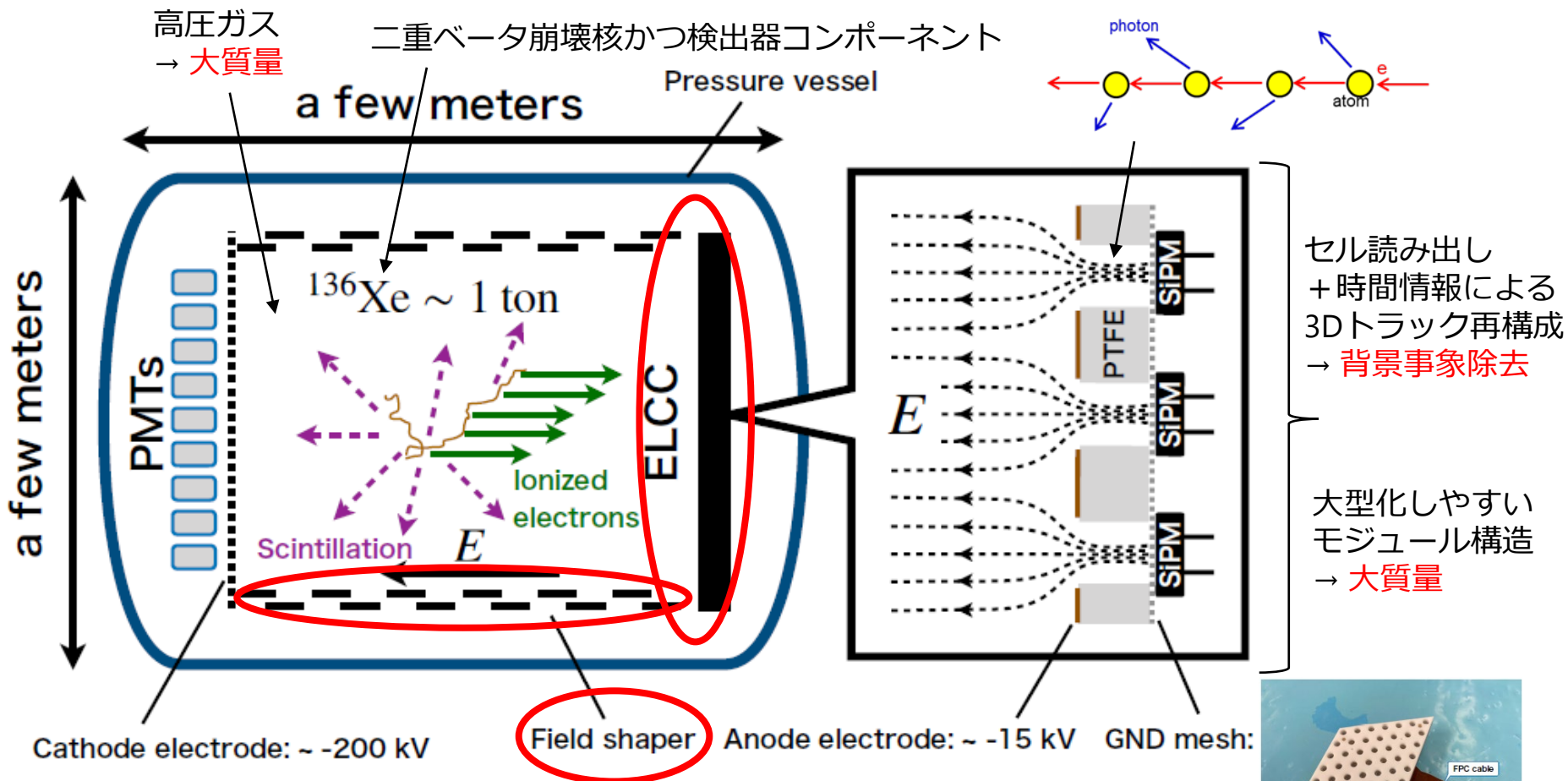
キセノンガスTPC



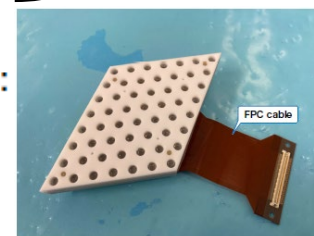
A Xenon ElectroLuminescence detector

- ユニークな読み出し構造を備えた高圧キセノンガスTPC

線形増幅プロセス
→ 増幅による揺らぎ小
→ 高エネルギー分解能



Field shaper, ELCCにHVを供給する必要 → 本講演の対象



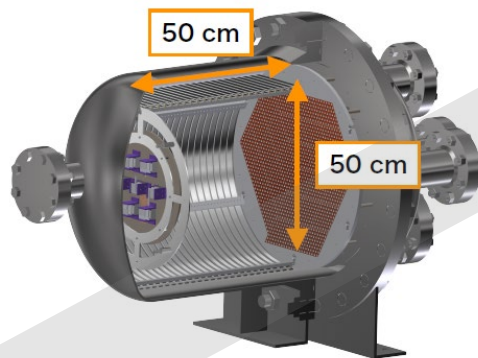
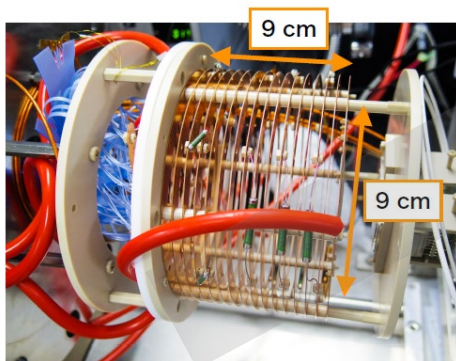
AXEL実験のロードマップ

5

- トンスケール検出器による $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 10\text{meV}$ の感度を目指している
- 10-L, 180-L のプロトタイプ検出器を製作
- 物理ランを見据えた1,000-L検出器の設計開発中

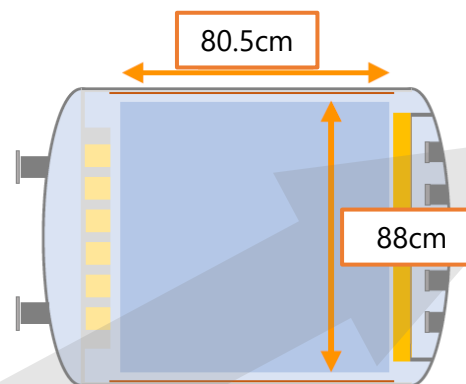
10-L prototype

- 2014 - 2018
- 0.05kg @ 8bar
- ELCC proof of concept



180-L prototype

- 2018 -
- $\sim 4.5\text{kg}$ @ 8bar
- phase-1 : 168ch
- phase-2 : 672ch



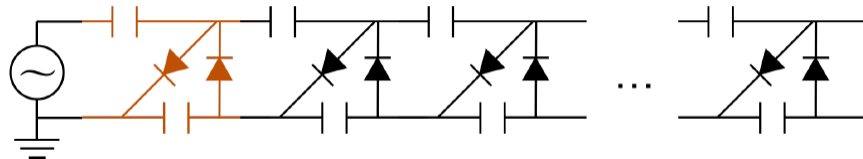
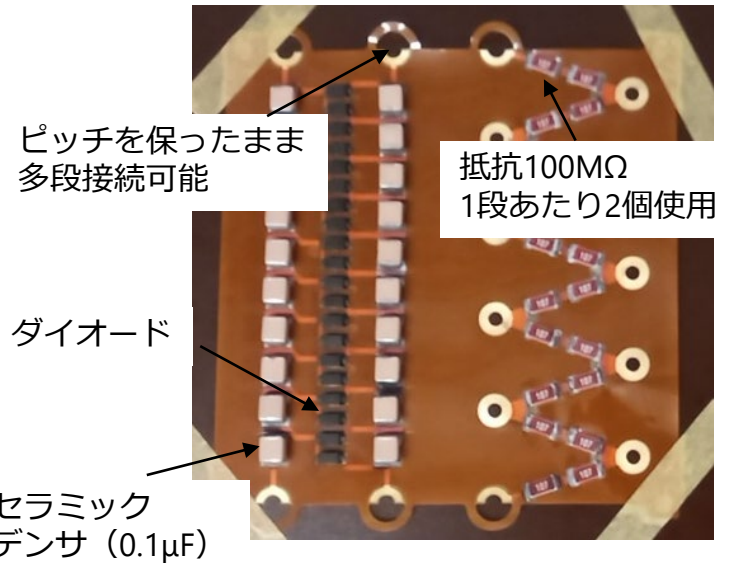
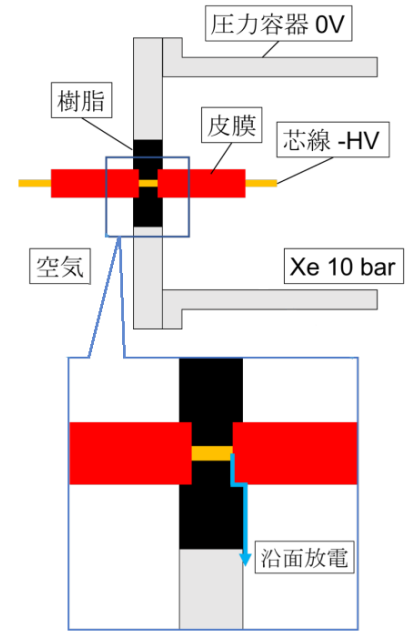
1,000-L detector

- 2024 -
- Physics run
- Underground
- 6kch

ton scale

コッククロフト・ウォルトン回路

- ドリフト電場 $\geq 100\text{V/cm/bar}$
→ 電離電子の再結合を防ぐ
- EL電場 $\sim 3\text{kV/cm/bar}$
→ 十分な増幅
- 1,000L検出器では、ドリフト領域を80.5cmと設計 → 要求電圧は-76.4kV
- フィードスルーを用いた場合、沿面放電が懸念される → コッククロフト・ウォルトン (CW) 回路により、圧力容器内で昇圧
- コンデンサとダイオードの組み合わせにより AC入力を高圧DC出力に変換
 - 理想的には入力振幅Uに対してN段で2NUのDC出力
 - 各素子にかかる電圧は最大2U
- ポリイミドベースのFPC上に、電位取り出し用の抵抗分割チェーンと共に実装
→ 吉田将 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年秋季大会

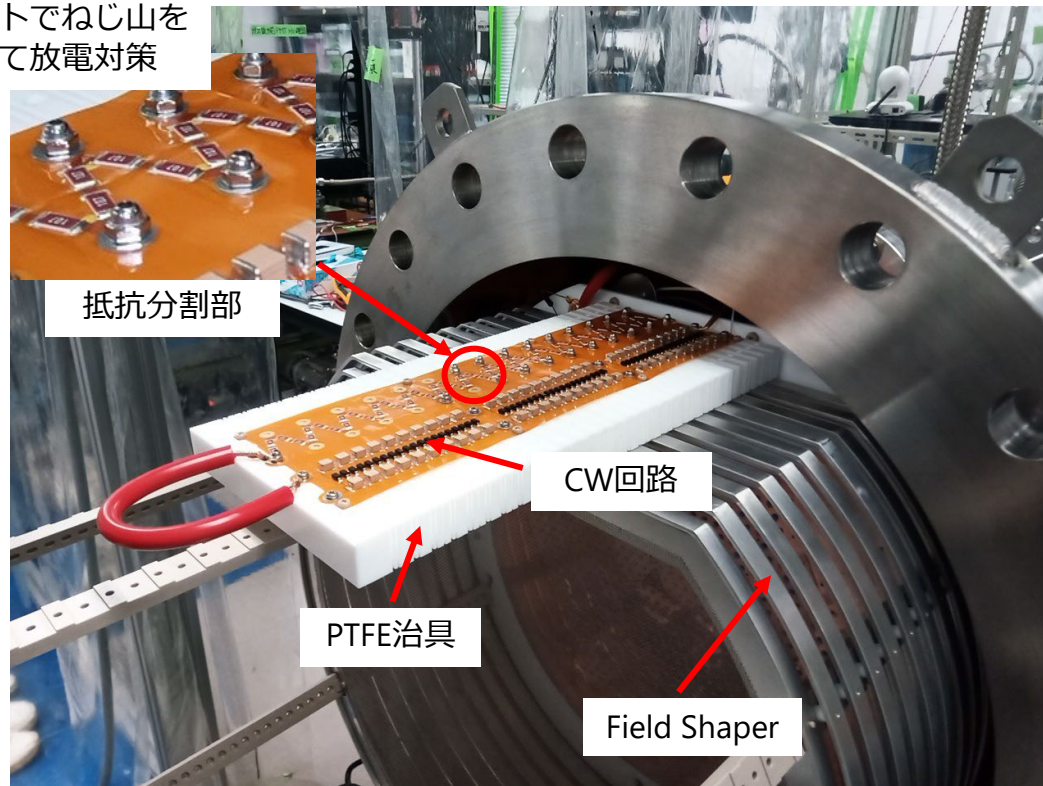


積層セラミック
コンデンサ (0.1 μ F)

180Lプロトタイプ検出器での動作試験

- CW回路30段分を180Lプロトタイプ検出器にインストールして、キセノンガス中での出力電圧の測定を実施
- 抵抗分割部からねじを通してField Shaperの各段に均等に分割された電圧を供給。
- CW出力電圧は直接測定ができないため、回路中の抵抗値、アノード電源の電圧、電流値から出力電圧を算出（次スライド）する。

袋ナットでねじ山を
隠して放電対策



180Lプロトタイプ検出器での動作試験

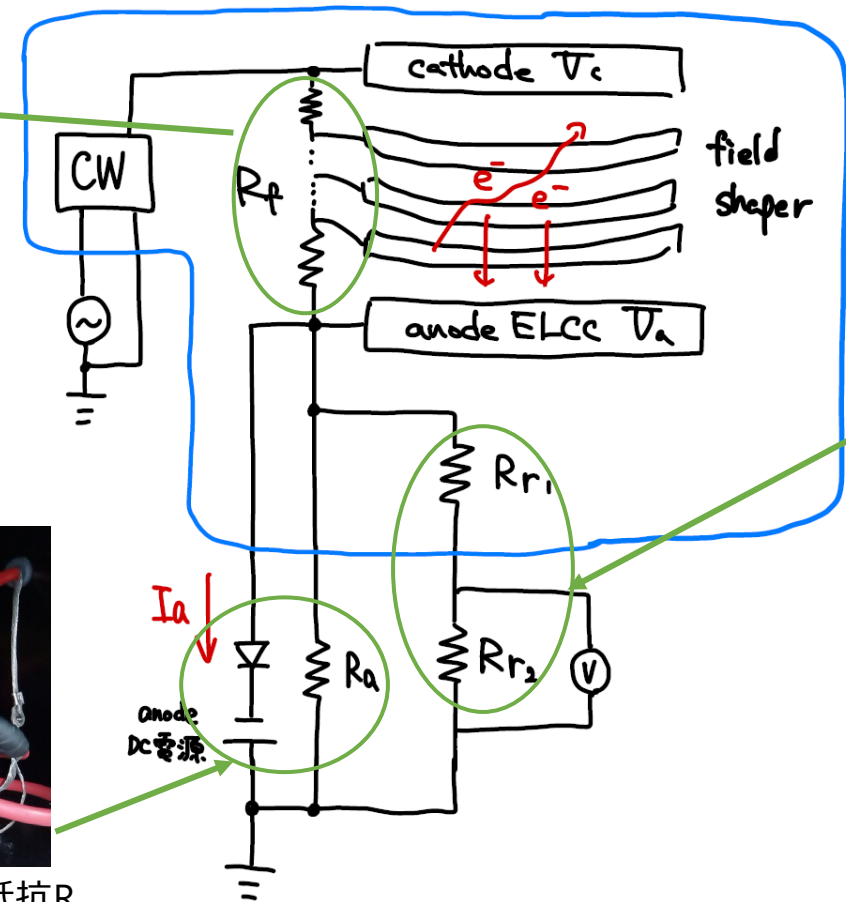
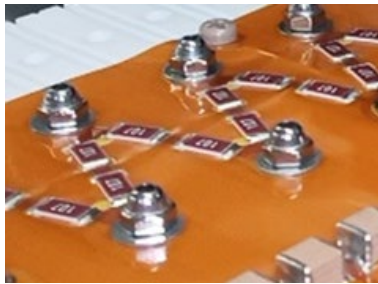
- 回路中の抵抗値、アノード直流電源の電圧と流れる電流から、カソード電圧（CWの出力電圧）を算出

$$V_C = \left(1 + \frac{R_f}{R_{a'}}\right) V_a - R_f I_a$$

($R_{a'}$ は R_a と R_{r1}, R_{r2} の合成抵抗)

抵抗分割部 R_f

chamber 内部



キャリブレーション用読み出し抵抗



高抵抗 $R_{r1}(200M\Omega)$



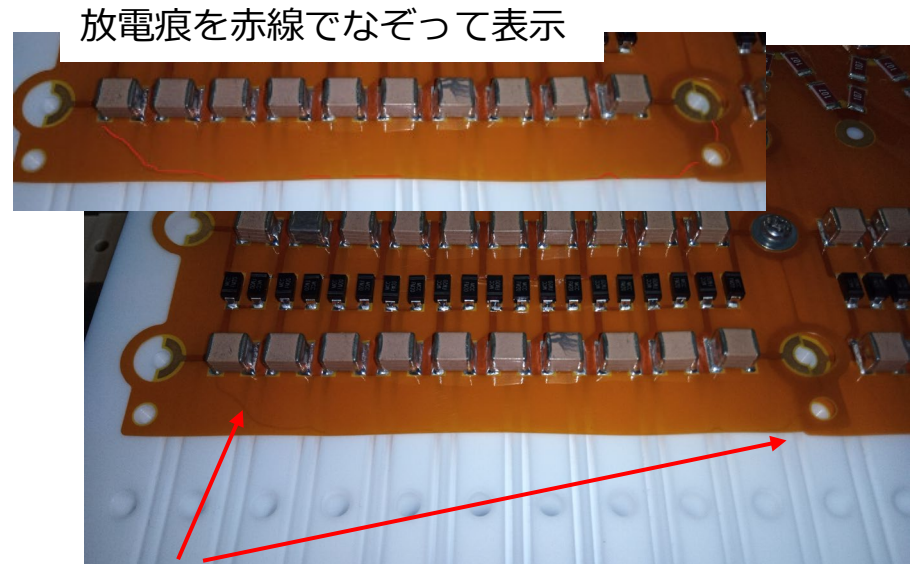
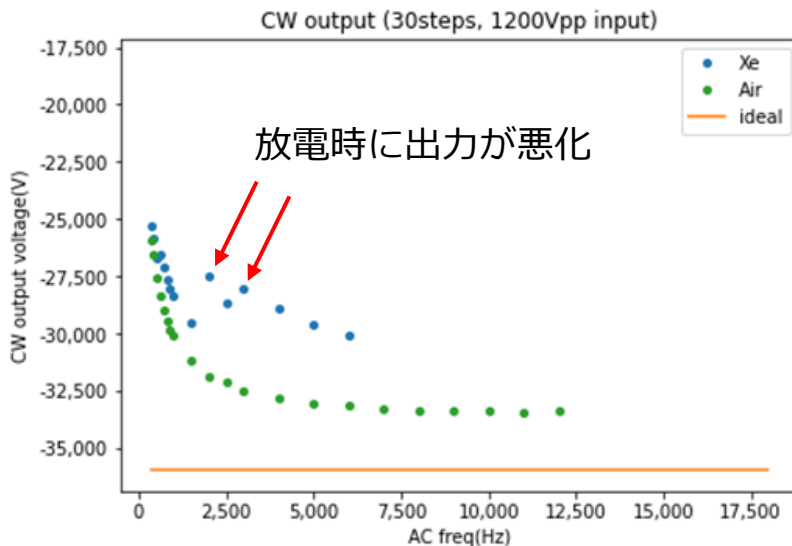
低抵抗 $R_{r2}(2k\Omega)$



アノード直流電源と保護抵抗 R_a

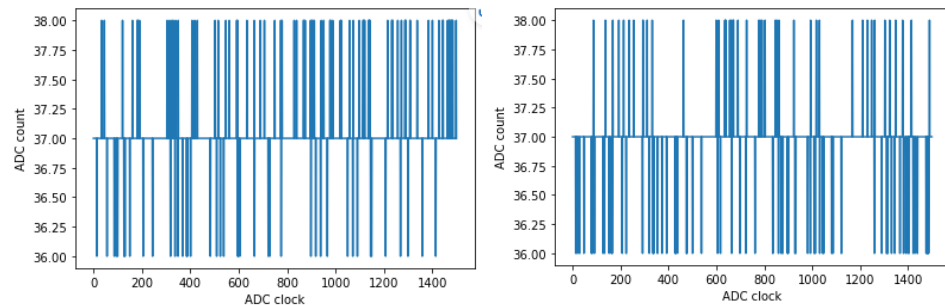
180Lプロトタイプ検出器での動作試験

- Xe 7.2bar中、入力電圧1200Vppでの測定を実施。6kHz入力で-30.1kV出力を達成。
- 1500Hz, 3000Hzでの測定中に放電。放電に伴ってCWの出力が大きく悪化している。
- Xeを回収し大気開放した後、再測定を実施したところ、6kHzで32.1kV（事前に大気中で測定した出力と同程度）に回復。→放電箇所の確認のためパーツのつけ外しを行った際に、放電によって生じていた経路が切れた可能性

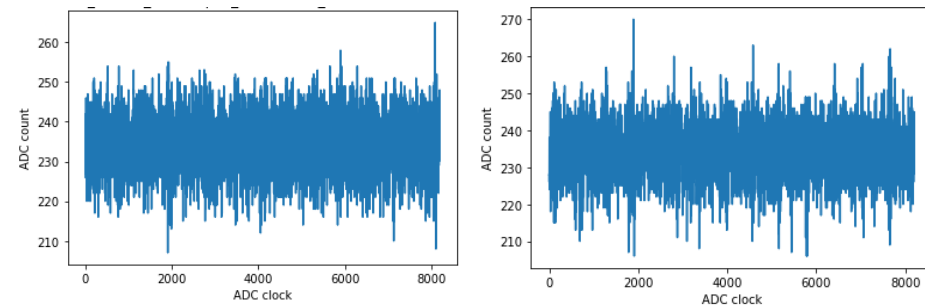


最上段のコンデンサ（左）の電極からFPCの縁を通ってFPCの接続部（右）に向かう、放電痕が見られた。

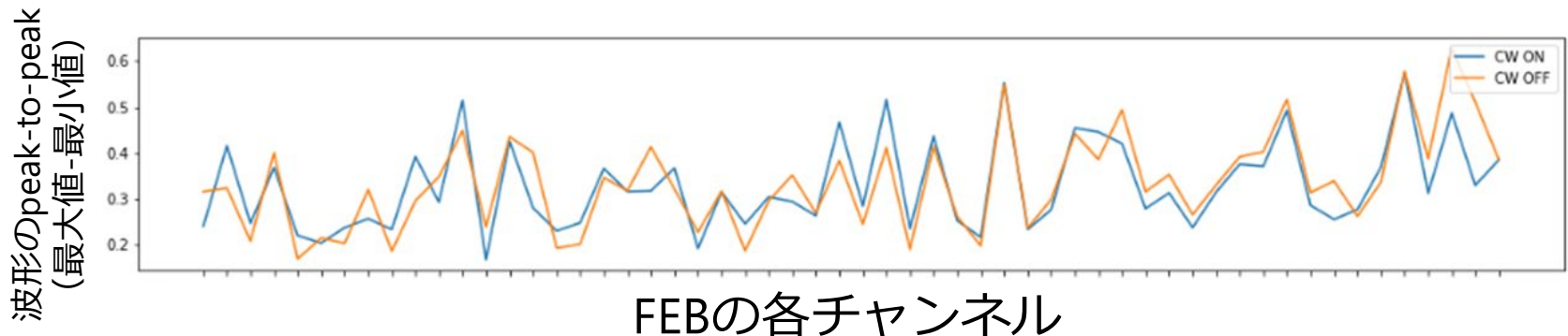
- CW回路への入力のACノイズのフロントエンドボード (FEB)への影響
- MPPCに電圧を印加していない状態で、波形データを取得、CW回路（とアノード電極）への電圧印加有無による影響を確認
- ADCL (EL信号検出用、Low gain)、ADCH (1photoキャリブレーション用、High gain) の波形とも目視レベルでのノイズはみられず。
- 波形データのpeak-to-peak値についても差は見られない。



CW on (左)、off (右) 時のADCLサンプル波形

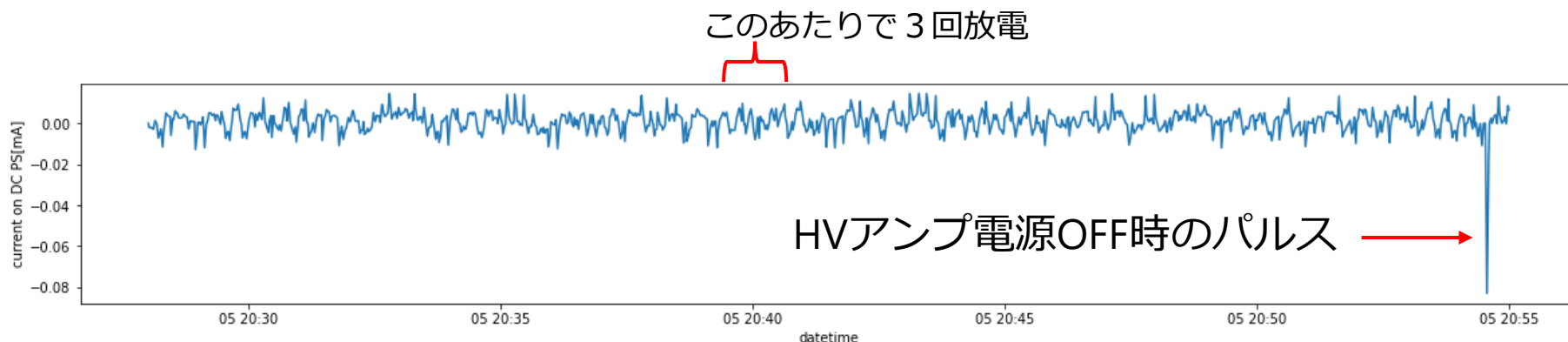


CW on (左)、off (右) 時のADCHサンプル波形

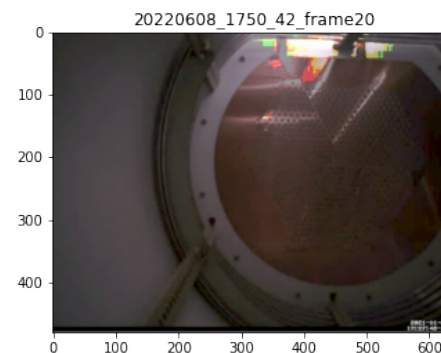


FEBの各チャンネル

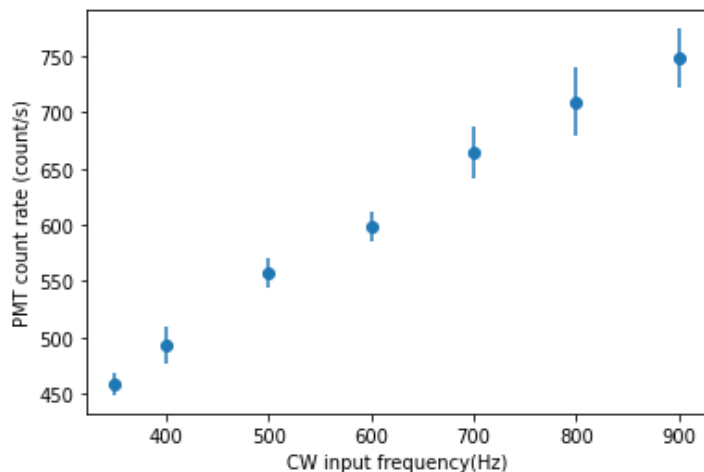
- CW入力に使用しているHVアンプ HJOPS-2B10-L1 の電流モニター (-10~10V/定格出力) を時定数1.5sのローパスフィルタを通してデータロガー (1Hzサンプリング) に入力
 - 放電時にもログデータに変化は見られず



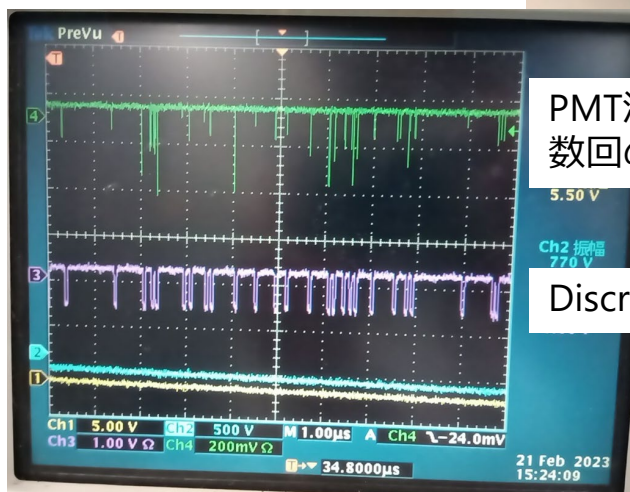
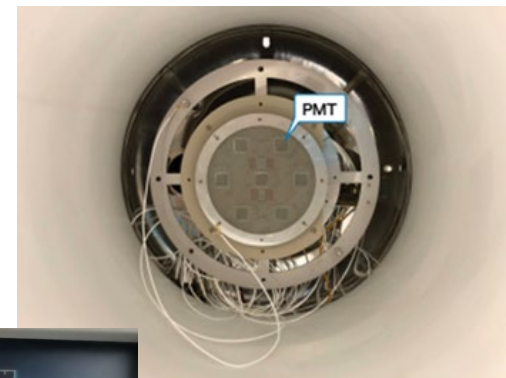
- チェンバー内のwebカメラによる動体検知
 - 音のなるような放電に対してもほとんど検出できず
 - Field Shaperの内側をのぞき込むような画角のため、直接CW回路が見えておらず、光量が不足している可能性
 - フレームレート不足による未検出の可能性



- TPCの t_0 の決定のために、ELCCと逆側に取り付けている、シンチレーション検出用のPMT（100倍アンプ）の信号を、NIMのDiscriminator（threshold-23mV）とScalerによって計測し、レート変化を確認。
- 入力周波数を上げていくとPMTのカウントレートは線形に増加したのち、急上昇しMHzオーダーになる（Scalerでのカウントは不可能）
 - 線形の増加はCWへのAC入力のノイズを拾っている可能性がある
 - レートが急上昇するタイミングでは音のなるような放電はみられず、コロナ放電が生じている可能性がある



入力周波数<1kHzではPMTのカウントレートは入力周波数に対して線形に増加

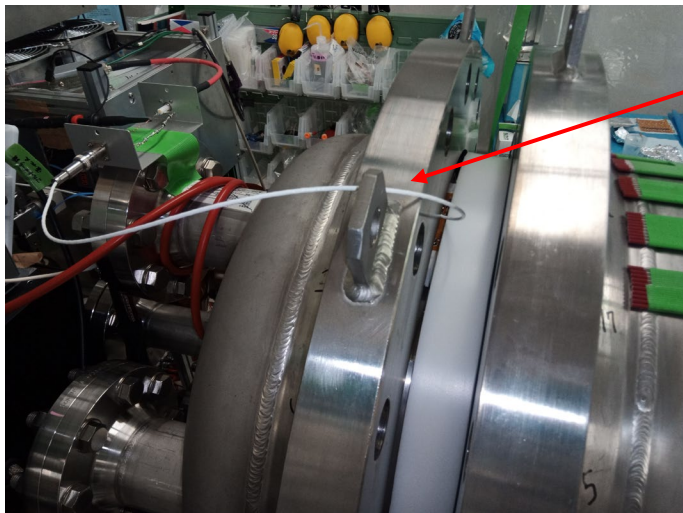


PMT波形、1 μ sあたり数回のパルスがみられる

Discriminator出力

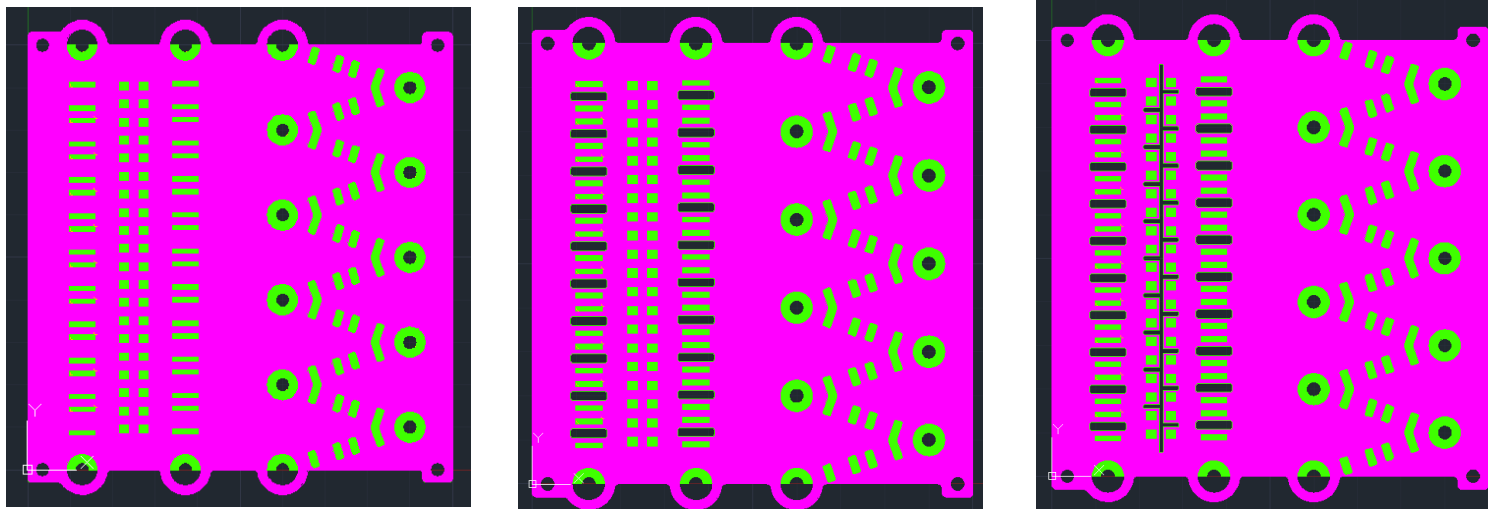
21 Feb 2023
15:24:09

- CWへの入力周波数を上げると、オシロスコープでモニターしているHVアンプの入力電圧、電流モニター波形が脈動して、安定して印加できなくなる現象が起こる。
- CW回路単体で測定していた時よりも悪化（12kHz→6kHz）。180Lプロトタイプでは入力電圧を約2.5mの同軸ケーブルを通じて印加している。→ 約2.5m, 0.7mの2種類の同軸ケーブルを用意してCWに電圧を印加したところ、印加できる周波数が6kHz→9kHzに改善。
- 同軸ケーブルの容量は95pF/m。この容量を通じて流れる電流値が、HVアンプの定格10mAに比べて無視できないことが判明（ケーブル長1m、振幅1000V、10kHzで約6mA）
- 容量性負荷によるHVアンプの発振を疑っている。→HV出力部に抵抗を直列に挿入して確認予定。



CW回路への入力電圧を印加するための同軸ケーブル。長さを変更して印加可能な周波数の限界を確認。
2.5m→6kHz、0.7m→9kHz
まで印加可能。

- 放電対策を改善したCW回路用FPCの作成
 - コンデンサのはんだ付け用パッド間隔の拡張
 - 電極間に穴開け（沿面放電対策）。穴の有無に応じて3パターンを試作中。



- シリコン（ポリイミド）ワニスでのコーティングによる耐電圧向上
- HVアンプの発振対策
- 上記対策による入力可能電圧、周波数の向上により、1000L検出器に必要な-76.4kV/80段増幅の達成を目指す。

- AXEL実験
 - 高圧キセノンガスTPCによる0 $\nu\beta\beta$ 探索実験
 - 電離電子のドリフト、EL増幅のために高電圧が必要
- コッククロフト・ウォルトン回路
 - フィードスルーを介さずに圧力容器内で昇圧
 - 180Lプロトタイプ検出器にインストール、7.2bar Xe中で-30.1kVを達成
 - 放電に伴う出力の悪化が生じたが、大気開放後、回路の取り付け直しにより回復。
 - 放電のモニター手法の検討。HVアンプの電流モニターや、webカメラによるチェンバー内部の動体検知による検出は難しい。シンチレーション検出用のPMTでは無音の放電も検出が可能。
 - 入力電圧の不安定化が生じる周波数は入力用の同軸ケーブルの長さに依存。同軸ケーブルの容量負荷はHVアンプにとって無視できない。
- 今後の予定
 - 放電対策を改善したCW用FPCを作成中
 - シリコン（ポリイミド）ワニスでのコーティングによる耐電圧向上
 - HVアンプの出力に抵抗を入れて発振対策