

キセノンガスTPCの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 製作と性能評価

秋山 晋一

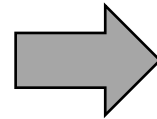
市川温子, 中村輝石, 岩下芳久^A, 中島康博^B, 潘晟^C, 吉田将^D,
菅島文悟^D, 品川響, 他 AXEL collaboration

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

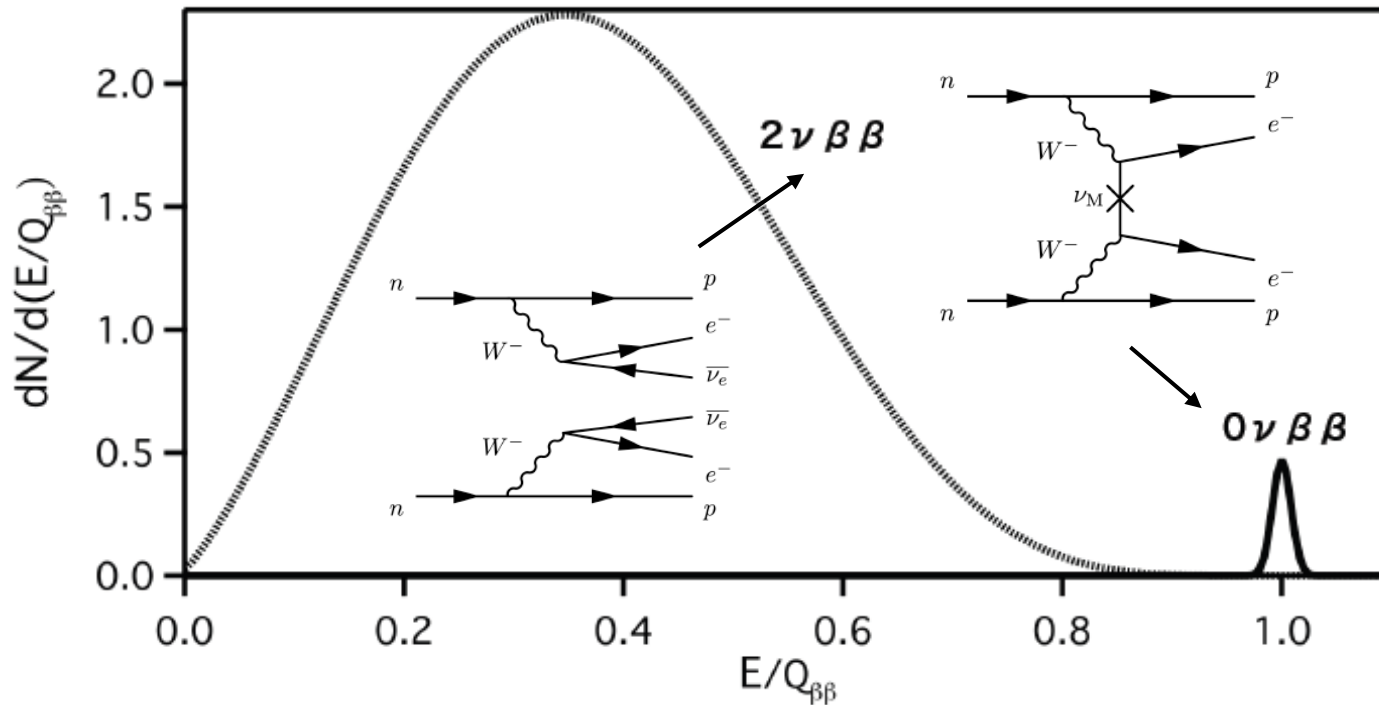
- 物理モチベーション
 - ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊
 - AXEL実験
 - AXEL実験のロードマップ
- コッククロフト・ウォルトン回路
 - コッククロフト・ウォルトン回路
 - 多段化に伴う効率変化の測定
 - 出力電圧測定結果（30段～50段）
 - 1,000L検出器での達成可能電圧の見積もり
- 現状の課題
- 今後の予定

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊

- 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



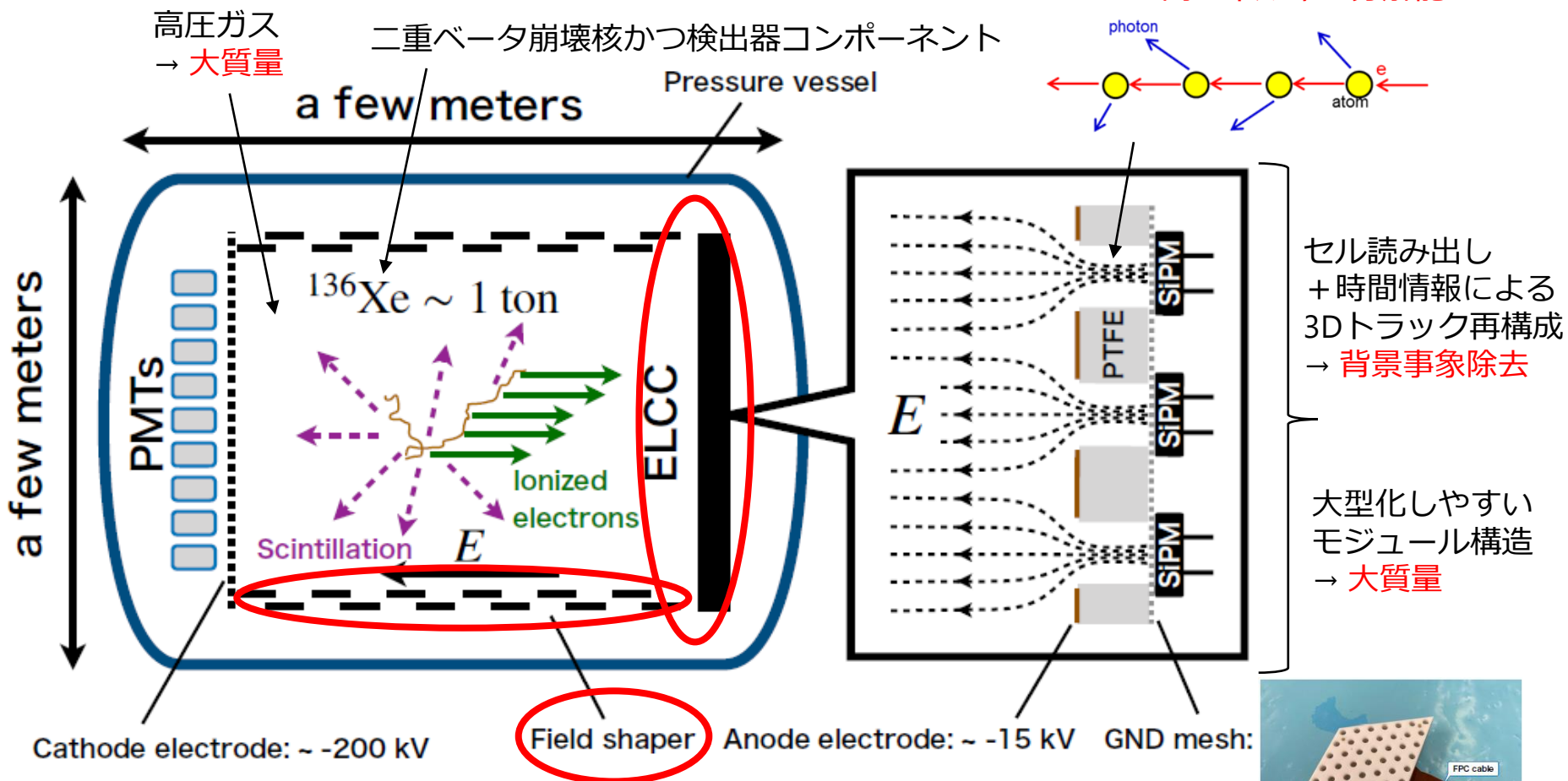
キセノンガスTPC



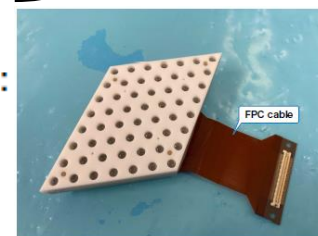
A Xenon ElectroLuminescence detector

- 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



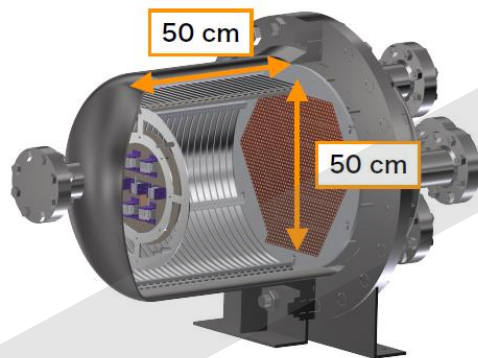
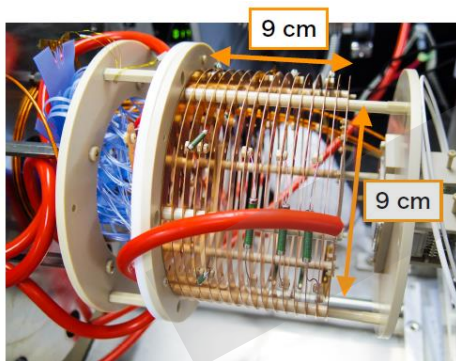
AXEL実験のロードマップ

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

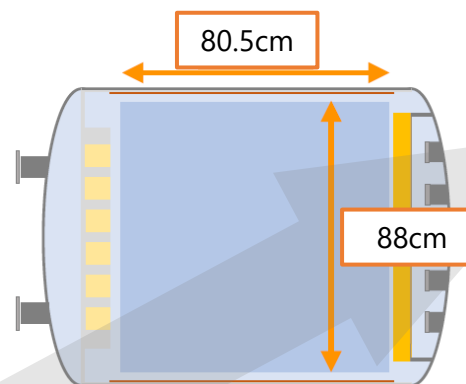
10-L prototype

- 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



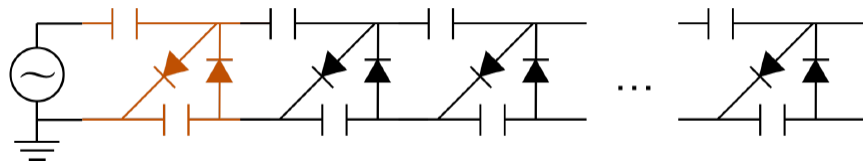
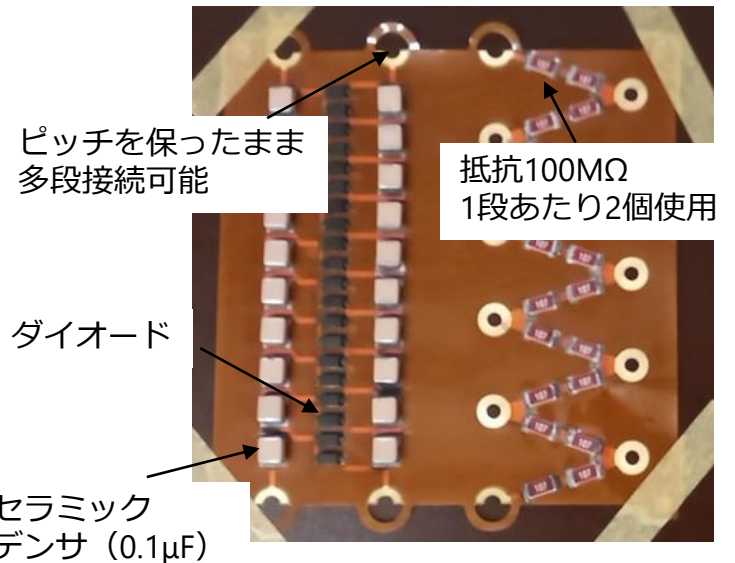
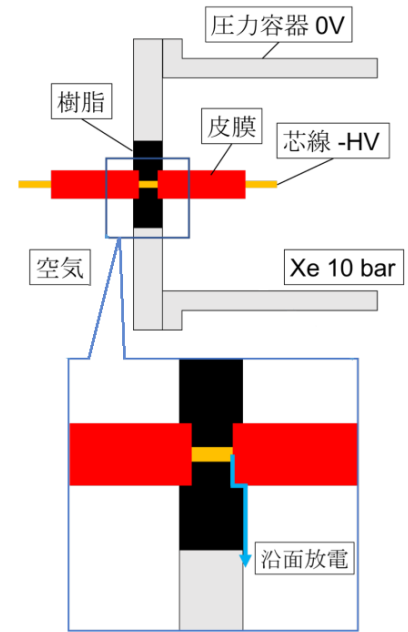
1,000-L detector

- 2024 -
- Physics run
- Underground
- 6kch

ton scale

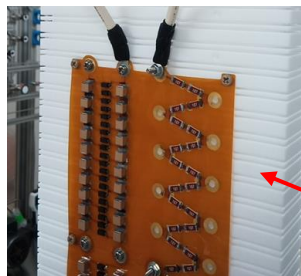
コッククロフト・ウォルトン回路

- 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

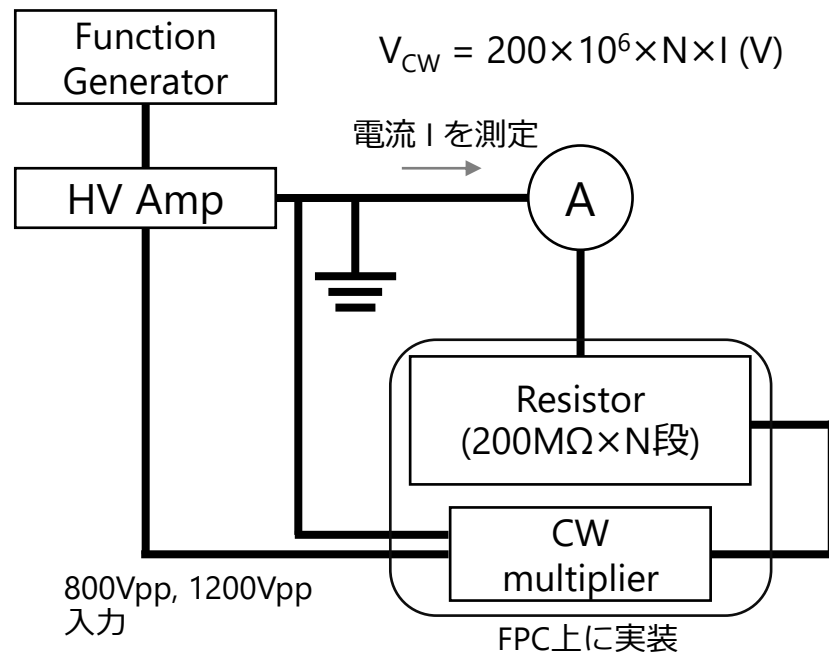


多段化に伴う効率変化の測定

- 実際のCW回路の出力は理想的な値 $2NU$ より小さい
 - ダイオードの寄生容量
 - 負荷抵抗に流れる電流
 - その他ダイオードの逆電流など
- 多段化による効率変化の傾向を調べるため、30段～50段、印加電圧800Vpp, 1200Vppで測定を実施

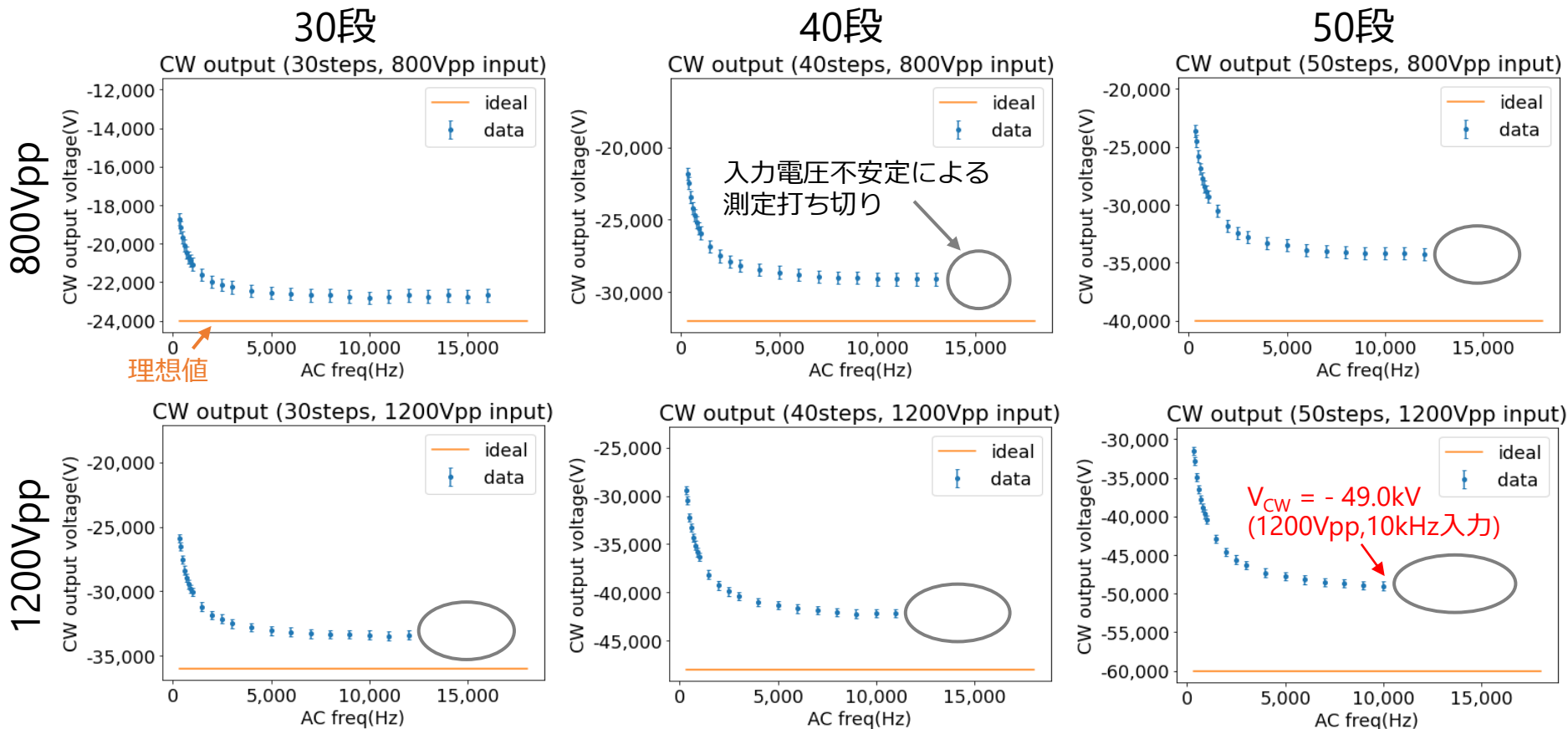


放電対策に多数の溝を掘ったPTFE製治具



出力電圧測定結果 (30段~50段)

- 段数が多いほど、入力電圧が大きいほど効率が悪化
- 枚数を増やすと最大出力に達するまでの入力周波数が増加、50段では約10kHz
- 入力周波数を上げると入力電圧が不安定になり測定を打ち切っている (10k~13kHz付近)
- 最大達成電圧は50段、1200Vpp、10kHz入力時の - 49.0kV (効率81.7%)



- 1,000L検出器での要求電圧は約-77kV。現在の設計（1シート10段、CW段数と抵抗分割チェーンの段数が同じ）を踏襲した場合、ドリフト領域の距離と段数が同じ→80段増幅。
- 30～50段での測定結果から80段増幅での出力電圧を見積もる
 - ダイオードの寄生容量による悪化係数

$$F = \frac{\sqrt{C/C_s}}{2N} \tanh \frac{2N}{\sqrt{C/C_s}}$$

C: コンデンサの容量
 Cs: ダイオードの寄生容量
 N: 段数
 f: 入力周波数
 Ia: 負荷抵抗に流れる平均電流

- 負荷抵抗を流れる電流による電圧降下

$$\Delta U_c = \frac{I_a}{fC} \left[\frac{2}{3} N^3 + \frac{1}{2} N^2 + \frac{1}{3} N \right]$$

原 栄一 “高電圧整流型加速器”,
 実験物理学講座 28 81-117 (1975)

- 両影響を組み合わせた式を出力電圧 V_{CW} について整理した関数でダイオードの寄生容量 C_s をパラメータとしてフィット

$$V_{CW} = F(2NU - \Delta U_c)$$

$$V_{CW} = \frac{2FUfC \times 200 \times 10^6 \times N}{\frac{2}{3} N^2 + \frac{1}{2} N + \frac{1}{3} + fC \times 200 \times 10^6}$$

1,000L検出器での達成可能電圧の見積もり

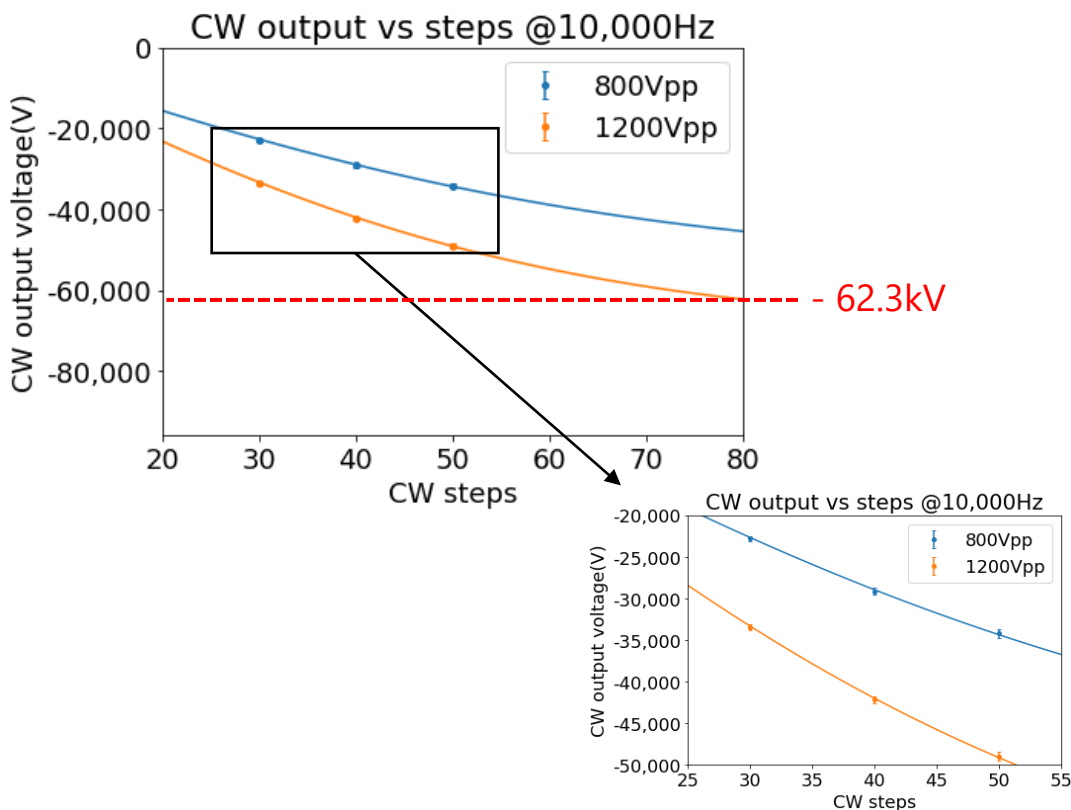
- フィット結果を用いた80段増幅における出力電圧の見積もりは、1200Vpp、10kHz入力で-62.3kV → 要求電圧に届かず、入力電圧を1,600Vpp程度まで上げる必要あり（放電リスク上昇）
- ダイオードの寄生容量はフィットの結果、4.79pF~16.5pF。素子のデータシート記載の接合容量は30pF(1MHz, 4V)。入力電圧を上げると一般に容量は減少するが、その傾向は再現できていない。

フィットで得られたダイオードの寄生容量

Cs(pF)	800Vpp	1200Vpp
500Hz	10.9	16.5
1,000Hz	8.26	12.3
5,000Hz	5.29	7.35
10,000Hz	4.79	6.60

80段増幅での出力電圧

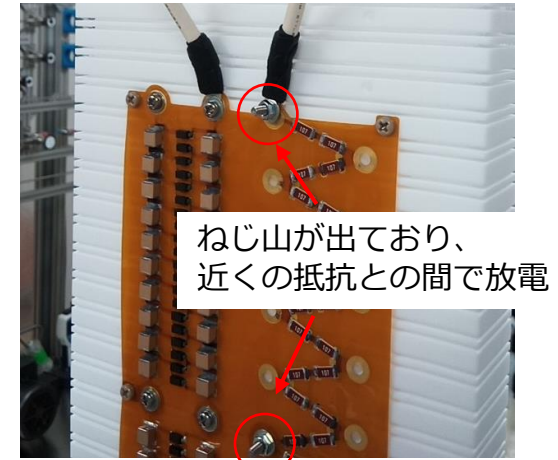
V _{cw} @80steps(kV)	800Vpp	1200Vpp
500Hz	-25.0	-31.6
1,000Hz	-32.5	-42.1
5,000Hz	-43.4	-59.0
10,000Hz	-45.4	-62.3



青：800Vpp入力、オレンジ：1200Vpp入力

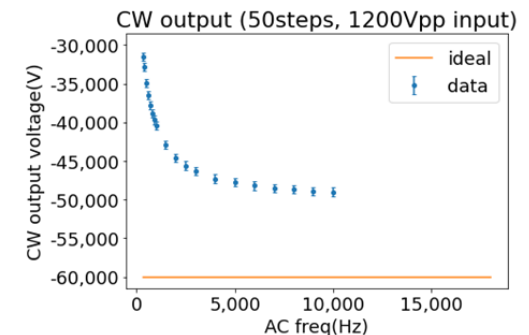
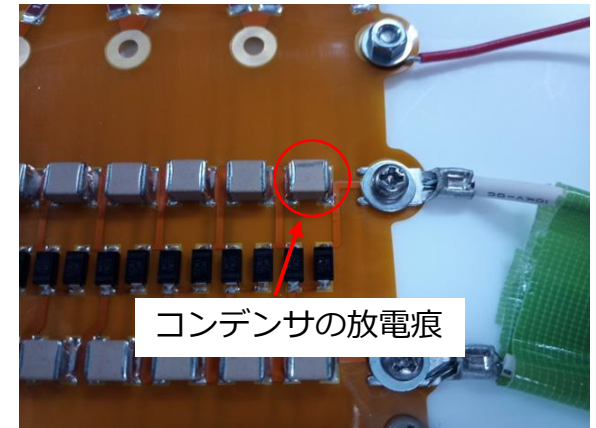
• 放電

- 抵抗分割チェーンの接続部のねじ山と近くの抵抗の間での放電 → ねじ山が出ないように短いねじに交換、検出器インストール時には袋ナットによりねじ山が出ない設計に変更。
- 一部のFPCについて、素子の定格2kVより小さい1,600Vpp印加時に、コンデンサで放電。その後同じ個所で頻繁に放電するようになった。放電箇所には焦げ跡が生じており、放電が起きやすくなっている。（表面が皮脂等で汚れていた可能性あり）



• 入力電圧の不安定性

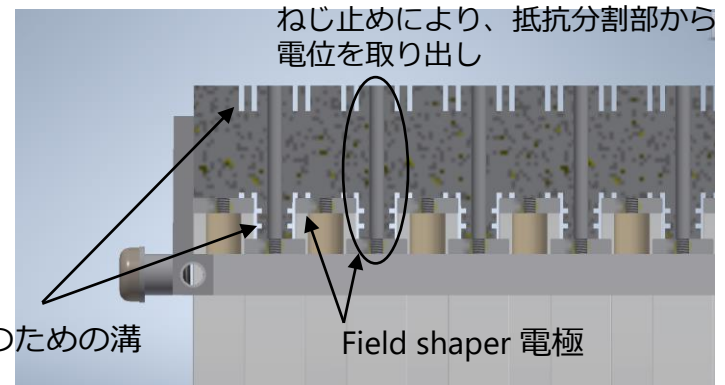
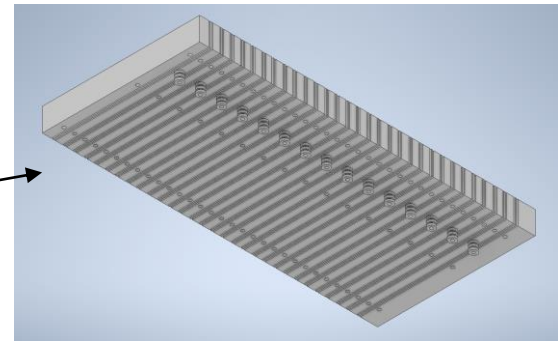
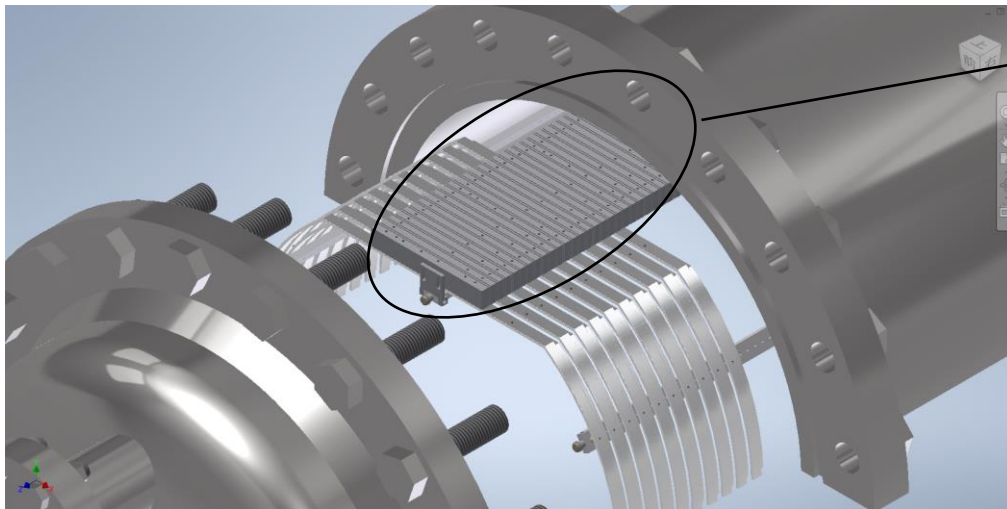
- 入力周波数を上げるとオシロスコープでモニターしている入力電圧波形が不安定になる（しばらくすると放電することもある）
- 段数が大きくなるほど不安定になる周波数が小さくなる傾向（50段で10kHz付近）
- 段数が大きくなると最大出力を得るために必要な周波数が大きくなるため、さらに段数を増やした場合十分な入力周波数をかけることができない可能性がある。



- 放電箇所の把握と頻度の定量化
 - カメラによるモニタリング
- 耐圧を高める試み
 - テフロンコーティング剤
 - 真空試験による溶剤からのアウトガスの評価が必要
- より実運用に近い状況での検証
 - 実運用時は8気圧キセノン→水蒸気は少ないが、乾燥空気より放電しやすい。乾燥空気中やキセノン中での評価が必要



- 180Lプロトタイプ検出器へのインストール
 - PTFE製回路治具は設計、発注済み（9月末納品予定）
 - FPC上の抵抗分割チェーンの各段から、field shaper 電極に電位を取り出す
 - 現在は高圧直流電源による運用→CWへの置き換え
 - ドリフト電場 83.3V/cm/bar、EL電場 2.5kV/cm/bar、Xe 7.6bar
 - ドリフト領域 24cmに対して CW 30段換算の必要電圧は約 28.5kV → 空気1bar、30段増幅で達成済み！
 - 高圧キセノン中での検証



沿面放電防止のための溝

Field shaper 電極

- 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
 - 1,000L検出器での要求電圧は -76.4kV
 - 多段化に伴う効率変化の測定を実施→50段、1200Vpp、10kHz入力で-49.0kVを達成
 - 80段での出力電圧の見積もり→ -62.3kV、放電を避けながら入力電圧を上げる必要
- 現状の課題
 - ねじ山 - 回路間の放電 → ねじ山を見せないように設計（袋ナット）
 - 素子表面での放電 → 表面の汚染防止、コーティングの検討
 - 周波数を上げた際の入力電圧の不安定性
- 今後の予定
 - キセノン中での検証が必要 → 180L検出器への30段回路のインストール