

# ニュートリノを伴わない二重 $\beta$ 崩壊探索に向けた高圧 Xe ガス TPC AXEL のための高電圧ドリフト電場形成の研究

京都大学高エネルギー物理学研究室 吉田 将

2018 年 2 月 19 日

ニュートリノ振動の発見によりニュートリノが微小な質量を持つことが明らかになった [1]。しかしながら各質量固有値  $m_1, m_2, m_3$  は判明しておらず、その大小の順序も未解明である。さらに質量和に付けられている上限値が  $\sum m_i < 0.23$  eV [2] と、他のフェルミオンの質量に比して極めて軽く不自然であるという問題もある。

ニュートリノは電荷が 0 であるため、荷電共役変換に対して不変、すなわち粒子と反粒子を同一視できる可能性がある。このようなフェルミオンをマヨラナ粒子と呼ぶ。マヨラナ粒子である素粒子は未発見で、標準模型粒子の中ではニュートリノだけがマヨラナ粒子の候補であるが、ニュートリノがマヨラナ粒子であると、他のフェルミオンの質量とは起源の異なるマヨラナ質量という質量を持つことができ、質量の極端な軽さを自然に説明できる可能性がある。

ニュートリノのマヨラナ性を検証する方法に、ニュートリノを伴わない二重  $\beta$  崩壊 ( $0\nu\beta\beta$  崩壊) の観測がある。 $0\nu\beta\beta$  崩壊とは、原子核で 2 つの  $\beta$  崩壊が同時に起こる際に、一方の中性子から生じた反電子ニュートリノがマヨラナ性により他方の中性子に電子ニュートリノとして吸収され、原子核からは 2 つの電子しか発生しないという反応で、 $0\nu\beta\beta$  崩壊の発見はニュートリノのマヨラナ性の証明となる。さらに  $0\nu\beta\beta$  崩壊の半減期は、ニュートリノの混合行列  $U$  と質量固有値  $m_i$  を使って  $\langle m_{\beta\beta} \rangle = |\sum_i U_{ei}^2 m_i|$  と表されるニュートリノ有効質量  $\langle m_{\beta\beta} \rangle$  という量の二乗に反比例するため、 $0\nu\beta\beta$  崩壊の探索によってニュートリノ質量についての情報も得られる。

現在までのところ  $0\nu\beta\beta$  崩壊は発見されておらず、たとえば  $^{136}\text{Xe}$  について半減期  $T_{1/2}^{0\nu} > 1.07 \times 10^{26}$  年 [3] という極めて稀な現象である。このため  $0\nu\beta\beta$  崩壊探索実験においては、大量の崩壊核を用意して期待されるイベント数を増やすこと (大質量) と放射性不純物や環境放射線による背景事象を減らすこと (背景事象除去) が重要である。さらに、標準理論の範囲内の現象である  $2\nu\beta\beta$  崩壊 (二重  $\beta$  崩壊において 2 個の反電子ニュートリノが放出される崩壊モード) での 2 電子のエネルギー和が連続に分布するのに対し、 $0\nu\beta\beta$  崩壊では 2 電子のエネルギー和は一定の値 (Q 値) になることから、これらの切り分けには高いエネルギー分解能での測定が必要である。

AXEL (A Xenon ElectroLuminescence detector) 実験は高圧キセノンガス TPC を用いて  $^{136}\text{Xe}$  の  $0\nu\beta\beta$  崩壊の探索を目指す実験である。 $0\nu\beta\beta$  崩壊探索の重要事項である大質量・背景事象除

去・高エネルギー分解能の3点を同時に達成するため、大容量の圧力容器に $^{136}\text{Xe}$ 濃縮キセノンガスを10気圧という高圧で封入し、TPCによる飛跡検出で反応の種類を特定することで背景事象除去を行い、比例増幅過程であるエレクトロルミネッセンス(EL)過程で電離電子を読み出すことで高エネルギー分解能を実現する。AXELグループは容量約10Lの小型試作機により独自の電離電子読み出し機構の原理検証を行った。現在、 $^{136}\text{Xe}$ のQ値付近でのエネルギー分解能を評価するため、容量180Lの大型試作機の製作に向けた要素開発を行っており、さらに $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索・発見を目指す2000L検出器・1トン検出器を見据えている。

飛跡検出と高エネルギー分解能の実現のためには、電離電子の再結合やドリフト中の拡散、不純物分子との結合を抑える必要があり、強いドリフト電場が必要である。さらに電離電子の再結合の割合は電場強度に依存するため、ドリフト領域全体にわたって電場強度が一定でないと電離の発生位置によって検出される電離電子数が変化してエネルギー分解能が悪化する。先行研究[4]とシミュレーションから、AXELで用いるドリフト電場の強度・一様度を $100\text{ V/cm/bar} \pm 5\%$  (10気圧では $1\text{ kV/cm} \pm 5\%$ )と定めた。

一様ドリフト電場は電場形成電極と支持構造体(あわせてフィールドケージ)によって形成する。180L大型試作機のためのフィールドケージでは、構造体が大型化し重くなることと扱う電圧が上昇することから、10L小型試作機で用いているものをそのまま大型化するのでは不十分である。 $\phi 50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ という領域にわたって $1\text{ kV/cm} \pm 5\%$ の電場を維持したうえで、放電に強く、安定な構造で、かつPTFE樹脂によりキセノンのシンチレーション光を反射することで検出効率を向上する機能が必要である。これらの要求を満たすフィールドケージを開発するため、4種類の構造について有限要素法で電場計算を行い比較検討した。検討の結果、PTFE樹脂製のリングを積み重ねた筒に2層の帯状電極を互い違いに埋め込むことで電場を整形する構造(図1)が最適であるとの結論に至った。この構造では、接地されている圧力容器と高電圧の電極との間を十分な厚さを持った樹脂製の筒で絶縁することで放電耐性と構造の安定性を確保している。さらに、2層の帯

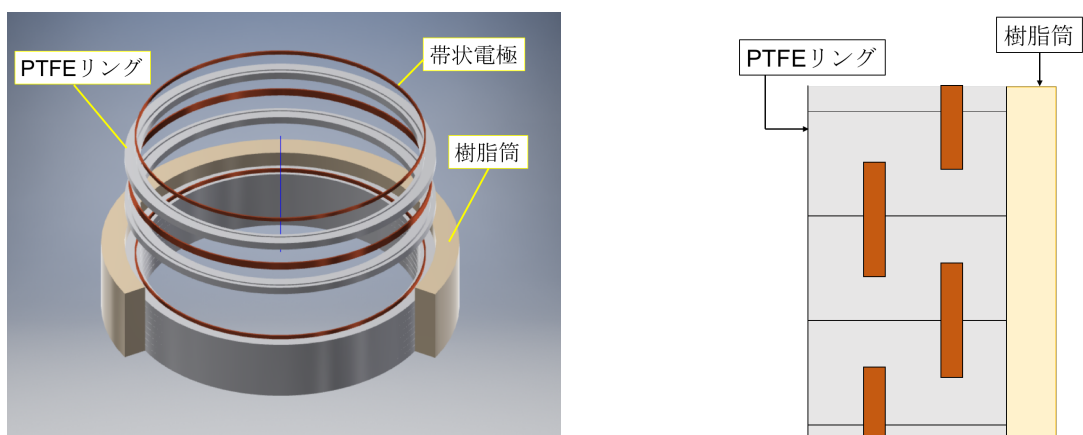


図1 フィールドケージの新構造の概念図(左)と断面の概略(右)。概念図では構造が分かるよう樹脂筒の一部を切り欠いて描いている。

状電極が隙間なくドリフト領域を覆っているため、圧力容器の電位 (0 V) がドリフト領域に影響せず、形成されるドリフト電場の一様性が極めて高くなることにこの構造の特長がある。実際に形成される電場を評価するため、この構造でまず 10 L 小型試作機用のフィールドケージを設計した。

180 L 大型試作機ではドリフト領域は 50 cm ありドリフト領域の電位差は 50 kV、電離電子検出器の電位と合わせるとドリフト領域末端の電位は 65 kV に至る。さらに将来の大型検出器においては 200–300 kV にも及ぶ電圧が必要だが、10 気圧のキセノンガスの気密を保ちつつこのような高電圧を放電しないように圧力容器内に直接導入するのは非常に難しい。そこで容器内への電圧導入は比較的低電圧の交流 (振幅 0.5–1 kV) で行い、整流型電圧増倍回路であるコッククロフト-ウォルトン回路 (CW 回路) により圧力容器内で昇圧する方法を採用した。CW 回路は 2 個のコンデンサと 2 個の整流器で 1 段が構成されており、この段をカスケード状に複数重ねることで、理想的には段数に比例した直流出力電圧が得られる。実際には整流器に並列な寄生抵抗が存在することや負荷抵抗により電流が取り出されることなど、複数の要因により非線形な電圧降下が発生する。180 L 大型試作機で必要な 50 kV を圧力容器内に収まるサイズの CW 回路で生成することが可能であるか検討すべく、CW 回路の電圧降下を調査するために 2 種類の試作回路を製作した。その結果、入力周波数に対する出力電圧降下の振る舞いなど未解明の点は残ったものの、表面実装素子を用いた 1 段 1 cm 程度のコンパクトな CW 回路で 50 kV を生成することが可能であると推定できた。

CW 回路を実際に圧力容器内に配置するにあたっては、キセノンガスの純度を害しないようアウトガスの少ない素材での回路製作が必要である。そのため、通常のはんだやガラスエポキシ基板を用いることが適切でない。アウトガスの少ない素材として、はんだの代わりに真空用導電性

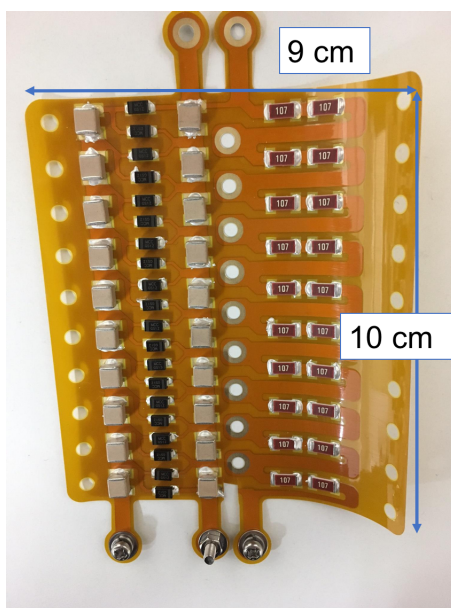


図 2 FPC 製 CW 回路

接着剤を、ガラスエポキシ基板の代わりにポリイミドフィルム製のフレキシブル基板を採用することとし、まず実用可能性を検討すべく 10 L 小型試作機用 CW 回路をこれらの素材で製作した(図 2)。この CW 回路の出力電圧を測定したところ、振幅 540 V・周波数 600 Hz の入力に対して  $10.3 \pm 0.15$  kV の出力が 12 時間にわたって安定して得られた。コンパクトかつ低アウトガスで圧力容器内で使用可能な高圧電源を実現することができたといえる。

本研究により、AXEL 検出器の大型化における障壁であった、一様ドリフト電場の確保・電圧導入部分での放電という 2 つの問題を解決することができ、180 L 大型試作機でのエネルギー分解能評価やさらなる大型検出器での  $0\nu\beta\beta$  崩壊探索への道が開かれた。さらに本研究結果は AXEL 以外にも、暗黒物質探索などのための高圧気体・液体希ガス検出器にも援用することが可能である。

## 参考文献

- [1] Y. Fukuda *et al.* [Super-Kamiokande Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **81** 1562–1567 (1998)
- [2] P.A.R. Ade *et al.* [Planck Collaboration], *Astron. Astrophys.* **594** A13 (2016)
- [3] A. Gando *et al.* [KamLAND-Zen Collaboration], *Phys. Rev. Lett.* **117** 082503 (2016)
- [4] L. Serra *et al.*, "An improved measurement of electron-ion recombination in high-pressure xenon gas", *JINST* **10** P03025 (2015)