

令和 7 年度 (2025) 共同利用研究・研究成果報告書

研究課題名 和文：高圧キセノンガス検出器を用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊探索 英文：Search of neutrinoless double beta decay with high-pressure Xenon gas detector
研究代表者 市川温子（東北大学） 参加研究者 東北大学：中村輝石、秋山晋一、浦野壮規、初見聡太、LIM EE HUI、KEK：坂下健、京都大学：中家剛、木河達也、疋田純也、佐々木駿斗、広瀬昌憲、神戸大学：身内賢太朗、東京大学：関谷洋之、池田一得、吉田将、中島康博
研究成果概要 AXEL 実験では、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$) 探索のために、高圧キセノンガス TPC (Time Projection Chamber) 検出器を開発している。電離電子の検出は electroluminescence 光を用いる ELCC (Electroluminescence Collection Cell) という独自に開発した機構でなされ、高いエネルギー分解能と飛跡再構成能力を有する。2025 年度の神岡施設共同利用における AXEL グループの研究は、将来の 1 トンスケール $0\nu\beta\beta$ 探索を見据えた「1000 L 高圧キセノンガス TPC」の実現に向けて、基盤技術を段階的に確立した。1000 L 検出器は、これまでの 10 L・180 L 試作機で得られた知見を統合し、実際に物理データを取得できる規模として位置づけられている。1000L 検出器の設計・製作・運用を通して、大型 TPC の性能評価、トンスケールへ向けた工学的課題の検証、将来の国際共同実験に必要となる運転ノウハウや安全管理体制を確立する。 長いドリフト長にわたって高電圧を印加するために、チェンバー内で使用可能なコッククロフト・ウォルトン (CW) 回路を開発している。チップタイプのコンデンサに RI 不純物が含まれることが分かっており、FPC のシートそのものをコンデンサとして使用する試みを進めている。また、昇圧回路を並列に 2 系統並列に配置し、逆位相で駆動することで、より高い電圧を安定して得ることができる方式についても検討を進め、シミュレーションに基づくパターン設計を完了した。 読み出し面に関しては、ELCC の改良を進め、64 チャンネル化した新型ユニットを製作した (図 1)。EL 光の統計誤差を低減するため MPPC を大面積化し、さらに MPPC 素子を FPC 上に直接実装することで、放射能の高いセラミックパッケージを排除した。この新しい ELCC ユニットの 3 基製作し、現在

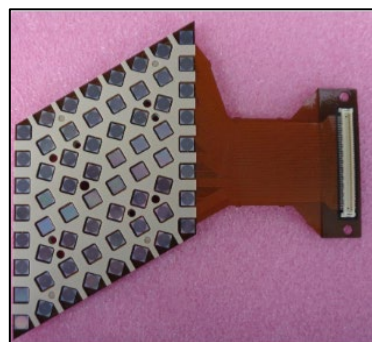


図 1：FPC 上に直接実装された 64 個の大面積 MPPC

180 L 検出器へインストールして性能評価を進めている。また、セル穴周囲に凸構造を設けることで放電耐性を高める工夫も施し、試験を開始した。さらに、将来的にはチャンネル数が増えることで放電等による不具合も増加することが予想される。そこで、1 か所が放電等で不具合を起こしたときに全体が使えなくなることがないように、ユニットごとに個別にアノード電圧を変更できるような機構の開発に着手している。ユニットの HV コネクタと高電圧の調整回路の試作と試験を実施した。

読み出し回路については、集積度を向上させた 64 チャンネル読み出し基板 AXELBOARD64 を 6 枚製作した。ファームウェアを整備し、単体ボードで確認可能な機能についてはすべて正常に動作することを確認した。現在は複数ボードを同期させ、旧世代の読み出し基板とも併用してデータ取得が行えるよう、システム全体のアップデートを進めている。

神岡地下では、HP1000L チェンバーと TPC の間で発生し得る放電を防ぐため、巨大な HDPE 筒をインストールした (図 2)。180 L 検出器での運転経験から想定される放電経路を洗い出し、それらを長くするように形状を最適化したものである。また、HP1000L ではキセノン量を段階的に増やししながら運転を開始する計画であり、初期段階で不要となる空間を HDPE 構造で埋める構造も設計中である。



図 2 : HDPE 筒を 1000L 検出器にインストールする様子

TPC については、FPC を用いた軽量・低放射能のフィールドケージの開発を進めた。FPC を電極として用いることで、従来の金属フレームに比べて大幅な軽量化と放射性不純物の低減が期待できる。今年度は 180 L サイズで試験可能なプロトタイプを製作し、現在その電場均一性や機械的安定性の評価を行っている。

さらに、エネルギー分解能を律即している要因として、 z 方向再構成の誤差と MPPC の非線形性補正の不十分さが明らかになった。これを改善するため、S1 信号の検出効率を向上させる新しいシンチレーション光検出器の開発を進めている。また、波形をデコンボリューションすることで MPPC の非線形性をより正確に補正する解析手法にも着手し、初期的な性能改善が確認されている。これらは将来の 0vββ 探索において不可欠なエネルギー分解能向上に直結する取り組みである。

以上のように、本年度は 1000 L 検出器の実現に向けた要素技術の高度化が大きく進展した。高電圧供給、読み出し面、TPC 構造、S1 光検出、解析手法のいずれにおいても、180 L スケールで得られた知見を基に 1000 L スケールへ展開するための具体的な設計・試作・評価が進み、HP1000L の建設と神岡での試験運転に向けた技術的基盤が着実に整いつつある。