

令和 5 年度 (2023) 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 中村輝石（東北大学）、秋山 晋一（東北大学）、坂下健（高エネルギー加速器研究機構）、中家剛（京都大学）、吉田将（京都大学）、菅島文悟（京都大学）、疋田純也（京都大学）、木河達也（京都大学）、身内賢太郎（神戸大学）、関谷洋之（東京大学）、池田一得（東京大学）、中島康博（東京大学）

研究成果概要

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索に向けて、高圧キセノンガスを用いた大型の Time Projection Chamber(TPC)検出器：AXEL を開発している。

目標性能達成のために開発を続けている 180 リットル(L)サイズの試作機においては、1.8 MeV でのエネルギー分解能として、FWHM で 0.73%という優れた性能を達成し、かつ分解能を決めている要因をほぼ理解することに成功した[1]。主な要因のうち、補正精度に由来するものが 0.43%、MPPC のサイズを大きくすることや電場強度を上げることで改善できる要因が 0.29%あることがわかり、これらの要因を取り除き、エネルギー分解能を最高で 0.37%まで改善する可能性が見えてきた。飛跡パターンについては、機械学習の入力に重要な拡散係数の測定に成功した。ただし、電離電子検出面で、ユニット間の隙間での放電により目標電圧での安定な運転ができないという問題があった。これについては、隙間に蓋をする構造を採用することで目標電圧付近にて安定に動作させることに成功した。さらに、将来に向けて開発していたドリフト電場生成用のコッククロフトウオルトン(CW)回路をチェンバー内に組み込み測定を行った。入力 AC 電流の影響によるエネルギー分解能の悪化は見られず、世界で初めて CW 回路によるチェンバー内高電場生成に成功したと言える。

2022 年度末に神岡宇宙素粒子研究施設（以下、神岡施設）SK 倉庫に搬入した 1000L チェンバーと架台は精密なアライメントを行い、図 1 のようにリニアガイドによりチェンバーの開け閉めが可能な状態となっている。

1,000L 検出器の製作に向けては、大口径 MPPC、読み出し用ディジタイザの高密度化、ドリフト電場用 CW 昇圧回路、高効率のシンチレーション光検出、フェイルセーフなガス循環系の開発を進めている。図 2 は、昨年度開発した大口径 MPPC を 64 チャンネル載せた電離電子検出面に用いる MPPC ア



図 1 クリーンルーム内でレール上に設置された 1000 リットルチェンバー

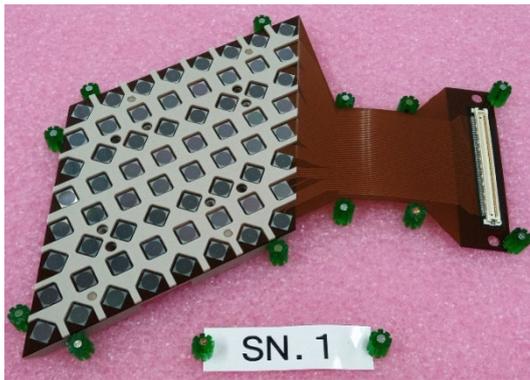


図2 新型大口徑 MPPC を 64 個載せた電離電子検出ユニット

レイである。背景放射線源を多く含むセラミックスを用いずに、裸の素子を直接 FPC に載せている。信号読み出し用ディジタルは、56 チャンネルのボードを開発し使用していたが、検出器の大型化のためにはチャンネル密度を上げなければならないという問題があった。今年度、コネクタの再選定と素子配置の見直しにより、同じ面積で、厚さは薄くした 64 チャンネルボードを製作することができた。1,000L 検出器では、ドリフト電場生成のためにカソードに 76kV をかける必要がある。この電圧をチェンバーの外で生成してチェンバー内に導入するには、気密で高ガス圧に耐えられる巨大なフィードスルーが必要になってしまう。そこで、CW 回路をチェンバー内に置いて昇圧する計画を進めており、図3のように実機サイズの試作機を製作し、72 kV まで昇圧することに成功した。上部で発生したコロナ放電を抑える絶縁板を置くことで目標電圧が達成できると考えている。AXEL 検出器では、TPC に必要とされるイベント発生時間の決定のためシンチレーション光を検出している。キセノンのシンチレーション光は真空紫外光であるため、180L 検出器では真空紫外に感度を持ち、高圧にも対応できる光電子増倍管を7個組み込んでいる。しかし、検出されるシンチレーション光が事象あたり2、3個と少ないため、前後の別の事象によるシンチレーション光と区別がつかず、誤認識してしまうことが問題となっている。そのため、安価に高い効率でシンチレーション光を検出するためにアクリルの板に真空紫外光を青色に変換する波長変換剤を塗布して、板に取り付けられた MPPC で青色光を検出する方式を開発している。高い検出効率を得るためには、表面の鏡面が保たれて全反射が可能で、側面および背面には高い反射材を取り付けることが必要である。今年度、スピコートにより鏡面を保った状態で波長変換剤を塗布することに成功した。反射材としては、ESR フィルムを張り付ける予定である。

[1] “High-pressure xenon gas time projection chamber with scalable design and its performance at around the Q value of ^{136}Xe double-beta decay”, M. Yoshida *et al.*, PTEP, 2024,1, 013H01



図3 コッククロフトウオルトン昇圧回路

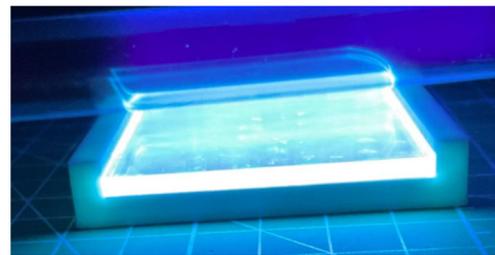


図4 シンチレーション検出用波長変換板