

# ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索のための 高圧キセノンガス TPC 検出器 AXEL の開発

京都大学 高エネルギー物理学研究室

市川 温子, 田中 駿祐,

ichikawa@scphys.kyoto-u.ac.jp, syun.tanaka@scphys.kyoto-u.ac.jp

中村 輝石, 潘 晟,

kiseki@scphys.kyoto-u.ac.jp, bansei0526@scphys.kyoto-u.ac.jp,

柳 田 沙 緒 里

yanagita@scphys.kyoto-u.ac.jp

2016 年 (平成 28 年) 2 月 19 日

## 1 前置き

ちまたでは新物理は数 TeV あたりにあると噂されている今日この頃、ニュートリノはなかなかその新物理探索の仲間に入れてもらえない。“稀な”反応を見るには扱いにくいし、質量とフレーバーの混合を調べるにしても、そもそもニュートリノの極端に軽い質量は TeV よりももっと高い(たとえば  $10^{14}$  GeV 程度の)エネルギースケールの物理の結果であると予想されているため、TeV スケールの物理で云々とはならない。しかし見方を変えれば、ニュートリノ振動などニュートリノの質量に関する現象で標準的なニュートリノ振動からのずれが見えれば、TeV よりも高いエネルギースケールの物理を探索しているということになる。ニュートリノの軽い質量が高いエネルギースケールの物理によって実現されているという予想は、重い右巻きニュートリノによってシーソー機構が働いているという考えによる。シーソー機構の(そして物質優勢宇宙をニュートリノの CP の破れで説明しようとするレプトジェネシスの)大前提として、ニュートリノがマヨラナ粒子(反粒子=自分)である必要がある。ニュートリノがマヨラナ粒子であるかどうかを実証するほぼ唯一の方法と考えられているのがニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ ) の探索である。従って、ニュートリノ業界の人間が  $0\nu\beta\beta$  探索に興味を持つのは自然な流れである。

$0\nu\beta\beta$  については、すでに [1] などに優れた解説がある。 $0\nu\beta\beta$  に寄与するニュートリノの質量  $m_{\beta\beta}$  と三種類のニュートリノの質量の和  $m_{total}$  の関係を図 1 に示す。 $0\nu\beta\beta$  の寿命は  $m_{\beta\beta}$  の二乗に反比例する。宇宙の観測から  $m_{total} < 0.23$  eV (95% C.L.) [3] とされており、 $m_{\beta\beta}$

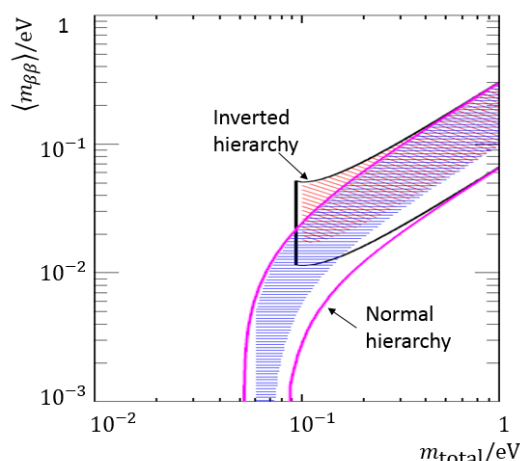


図 1:  $0\nu\beta\beta$  に寄与するニュートリノの質量  $m_{\beta\beta}$  と三種類のニュートリノの質量の和  $m_{total}$  の関係。ハッチはマヨラナ位相による幅。PDG2015 の図より抜き出して転載。

で 0.1 eV 以下の領域であればどこで見つかってもおかしくない。最近では KamLAND-Zen グループが鮮やかに寿命の下限の世界記録を更新した [2] が、得られた質量の上限値はまさにこの領域である。

$0\nu\beta\beta$  探索で必要とされるのは、大量の二重ベータ崩壊核、高いエネルギー分解能、背景事象の低減である。暗黒物質の直接探索でも同じことが要求されるが、その場合信号は原子核の反跳事象なので、粒子識別などでガンマ線事象は背景事象として落とす。 $0\nu\beta\beta$  ではガンマ線事象との区別が難しくエネルギー分解能や遮蔽、低放射化で頑張るしかない。ただし、放出される電子のエネルギーは数 MeV の単色で暗黒物質探索に比べて高い。

われわれは  $0\nu\beta\beta$  を探索するため、高圧キセノンガス TPC AXEL(A Xenon ElectroLuminescence) の開発を 2012 年から始めた。ここまで偉そうな導入をしましたが、 $0\nu\beta\beta$  の業界では新参者でまだまだです。面白いプロジェクトとして興味を持っていただければ幸いです。

## 2 AXEL 検出器

$0\nu\beta\beta$  の探索においてエネルギー分解能に秀でているのは Ge 半導体で、GERDA 実験 [4] で 0.16%(FWHM) を達成している。二重ベータ崩壊核種である  $^{76}\text{Ge}$  として 25 kg 程度を用いている。大質量を実現しているのが KamLAND-zen で  $^{136}\text{Xe}$  350 kg を液体シンチレータに溶かしている。エネルギー分解能は 4%(FWHM に単純換算すると 9.4%) である。われわれは、半導体やボロメータに比べて大質量化が比較的容易な  $^{136}\text{Xe}$  を用いて半導体に近いエネルギー分解能を実現するために、キセノンガスの電離電子をエネルギー測定に用いる。キセノンガスの電離の W 値は 22 eV、ファノ因子は 0.13 程度とされており、電離電子生成の統計的揺らぎは  $0\nu\beta\beta$  の Q 値 2.48 MeV で 0.25%(FWHM) と非常に小さい。しかし、これを数 cm 以上のイオンチェンバーとして読み出すと、キャパシタンスが大きく信号・電気雑音比が悪化してエネルギー分解能を保つことができない。高い電場をかけて比例計数領域で電子雪崩増幅すると信号は大きくなるが、増幅の初期の揺らぎも増幅されやはりエネルギー分解能を保てない。これに対して、電子増幅が起きるよりも低い電場で電子を加速して原子を励起し、脱励起の際の光 (Electroluminescence 光, EL 光) を測定する方法が 1970 年代に提案され、実証されている [5]。この場合、放射線の電離で生じた電子がそのまま何度も原子を励起し光を発生させるという線形な増幅であるので、揺らぎが増幅されることなく高いエネルギー分解能を維持することが可能である。

大質量を実現するためには液体キセノンが望ましいが電離電子-イオンの再結合などによりエネルギー分解能が悪化してしまうため、10 気圧程度の高圧ガスを用いる。直径 2.7 メートル、長さ 3 メートルで 1 トン程度の質量となる。

10 気圧キセノン中での  $0\nu\beta\beta$  の電子 2 個の飛程の和は 32 cm である。飛跡を測定すれば、アルファ線やガンマ線による背景事象を除去することもできる。

そこで、図 2 のような数メートル程度の  $^{136}\text{Xe}$  標的かつドリフトの領域、EL 光を検出してエネルギーと位置を測定するプレーン、ドリフトのスタート信号を決めるためにシンチレーション光を検出する光電子増倍管からなる検出器を作る。

すでにこのような  $0\nu\beta\beta$  探索のための検出器は、スペイ

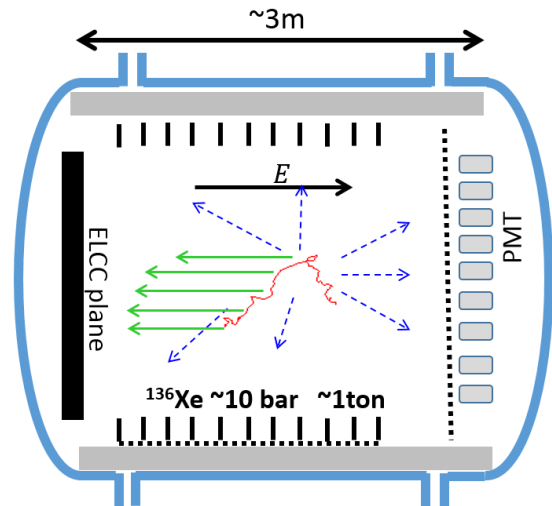


図 2: AXEL 検出器の概念図。10 気圧の  $^{136}\text{Xe}$  ガスのタイムプロジェクションチェンバー。ドリフト電場で図左端まで移送された電離電子が、ELCC 面 (後述) で検出され、エネルギー、飛跡のパターンの測定に用いられる。図右端の光電子増倍管は、一次シンチレーション光を検出して事象のスタート時間を決める。

ンを中心とした NEXT グループによって提案されプロジェクトが進行している。AXEL 検出器の特徴は、EL 光の検出に新しい方法 Electroluminescence Light Collection Cell (ELCC) を導入して、高エネルギー分解能を保ったまま大型化しよう、というものである。詳細は 2.1 節に述べる。

現在、10 L 試作機による原理検証と各構成要素の開発を進めている。まずは、いくつかの構成要素の開発現状について紹介する。

### 2.1 ELCC

EL 光の生成には通常、メッシュなどによる 2 枚の平行電極を用いる。その際に問題となるのは、小さな光センサーが電極の近くに並べてある場合には、光センサーが密でないセンサーと事象の位置関係によって検出される光量が変わってしまうことである。電極から離すと、やはり立体角が縁の方では変わってしまい光量が変化する。そのため大きな検出器で高いエネルギー分解能を維持することが難しい。われわれの考案した ELCC は、数 mm ピッチのセル構造を持ち、ドリフトしてきた電子を 100% の効率で一旦セルに引き込み、その中で EL 光を発生させ、セル固有の光センサーで検出する。そのため、一つの電離電子から検出される光量は、増幅の統計的揺らぎを別にすれば常に一定である。図 3 に概念図を載せる。キーポイントは、ドリフトした電子を本当に 100% の効率でセルに引き込めるのか、またセル内での EL 光を一様に検出できるのか、という点である。キセ

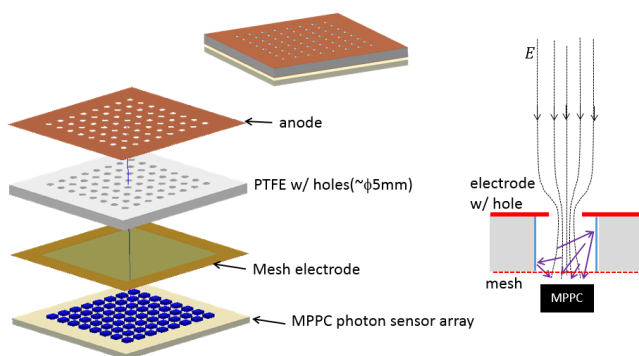


図 3: ELCC の概念図。

ノン中のドリフトで電子はセルサイズ程度に拡散しており、セル内での非一様性がそのままエネルギー測定を悪化させるわけではないが、究極のエネルギー分解能を目指すためにはできるだけ一様であることが望ましい。中村が有限要素法により計算した電気力線の収集効率を図 4 に、EL 発生に寄与する電場の積分値のセル内位置依存性を図 5 に載せる。収集効率は 100% に近く、セル内の EL 光発生の一様性は 0.5% (r.m.s.) 以下が期待されることがわかる。今後、ELCC 近傍での電子の拡散を考慮した評価を進める。

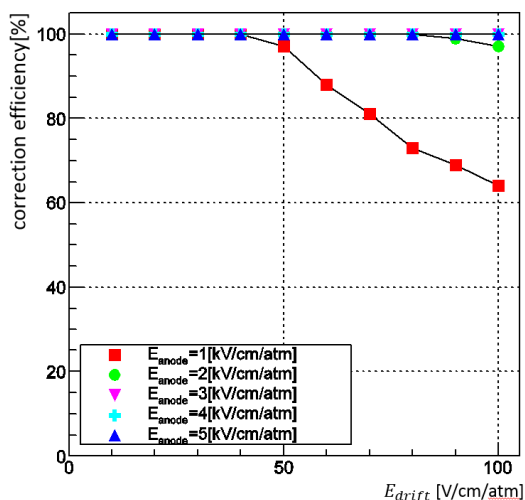


図 4: ELCC (7.5 mm ピッチ) の電気力線の収集効率

## 2.2 MPPC

キセノンの EL 光は波長 178 nm 程度の真空紫外光である。ELCC に用いる光センサーとしては、真空紫外光に感度を持ち、数 mm 程度の小型のものが要求される。APD も候補となりうるが、ゲインが小さいため読み出し回路への要求が厳しくなる。われわれは、MEG 実験と浜松ホトニクスが共同で液体キセノン用に開発した真空紫外光に感度を持つ MPPC を用いる。液体キセノン中とガスキセノン中では、屈折率や温度が異なるため、

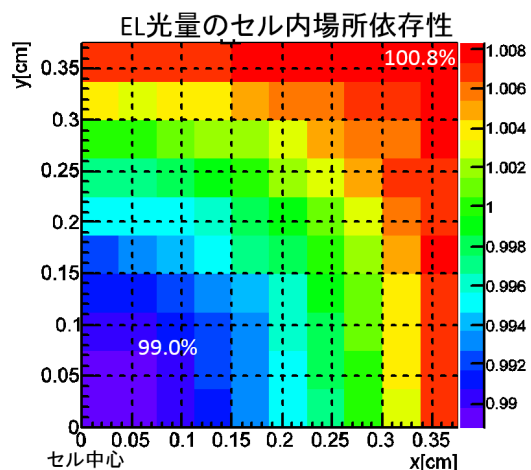


図 5: 電場の強さから計算した EL 光のセル内一様性。左下を中心として 7.5 mm ピッチセルの 1/4 の領域を図示している。

ガスキセノン中での光子検出効率 (PDE) を潘が中心になって新たに評価した。図 6 にプレリミナリーな結果を載せる。10 ~ 14% の PDE が得られており、われわれの要求を満たす。通常の MPPC ではオーバー電圧 (印加電圧とブレークダウン電圧の差) に応じて PDE が上がっていくが、われわれの測定ではそのような特徴が見られず、真空紫外光に対する特徴なのか、測定に問題があるのか調査中である。

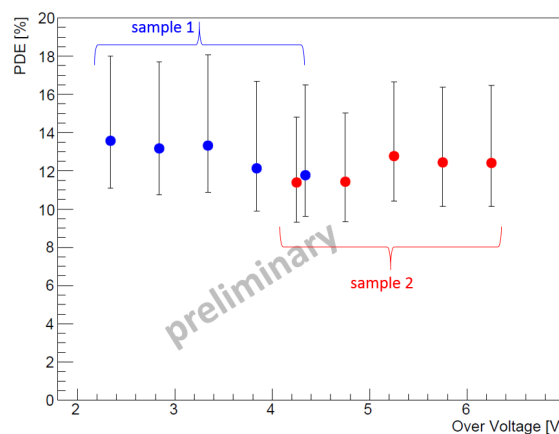


図 6: 真空紫外光用に開発された MPPC (Hamamatsu Photonics 3X3MM-50UM VUV3) のガスキセノンシンチレーション光に対する PDE。

MPPC 内の光子を検出したピクセルは数十 ns 不感になるため、瞬間的な入射光子数がピクセル数に近づくと、出力が入射光子数に比例しなくなっていく。ELCC 内で EL 光は約 5  $\mu$ s にわたって発生する。一つの MPPC に入る光量が多い場合で  $10^5$  個に達する。MPPC の典型的な不感時間の 50 ns あたりに直すと、1,000 個である。パルス幅の短いシンチレーション光などでは、単純に全光量で線形性からのずれを評価すればよいが、5  $\mu$ s と

長いパルス光に対する応答は、実際に確かめる必要がある。われわれの用いている 3 mm 角素子では、ピクセル数は 50  $\mu\text{m}$  ピッチの場合が 3,600、25  $\mu\text{m}$  ピッチの場合 14,400 であり、50  $\mu\text{m}$  ピッチでは若干のずれが予想され、25  $\mu\text{m}$  ピッチではほぼ線形性を保つと予想される。柳田を中心に測定したところ、25  $\mu\text{m}$  ピッチでも  $2 \times 10^4$  光子/5  $\mu\text{s}$  あたりから線形性のずれが見られた。原因は調査中だが、MPPC のオーバー電圧 3 V 程度に対し、信号が 1 V 近く出力されて実質的なオーバー電圧が数十%下がっているのを見えているのではないかと議論されている<sup>1</sup>。いずれにせよきちんと測定して補正すれば、補正後に残る揺らぎは 0.1%程度に抑えられる範囲であり問題ないことがわかった。

## 2.3 光電子増倍管

浜松ホトニクスが低温、低放射能、紫外光用に開発した 25 mm 角メタルパッケージ PMT R8520-406 を高圧力対応にしたものを用いている。178 nm の紫外光に対して 30% という高い量子効率を持つ。電圧供給の基板も極力アウトガスの少ない素材で作っていただいた。

## 2.4 チェンバーとガス系統

キセノンの純度によって、電離電子、シンチレーション光、EL 光の収量、ドリフト速度、拡散計数などが変わってしまうため、漏れやアウトガスを極力抑える必要がある。将来的には、低放射能にする必要もある。現在は、JIS の配管規格を用いてチェンバーを製作している。金属部の材質としては MPPC 以外はステンレスと無酸素銅を、プラスチック素材は PEEK ないしテフロン、ケーブルなどは高真空用の素材を用いている。ガス系統には、モレキュラーシーブおよびゲッターによる純化装置をつけ、純化装置上流は Swagelok 継手を、下流は VCR 規格の継手を用いている。

## 2.5 読み出し回路

現在の試作機には CAEN 社製の 32 チャンネル 65 MHz FADC を用いているが、1,000 チャンネル以上になる次期試作機のために田中を中心に Open-It のサポートで専用フロントエンドボードの開発を行っている。T2K 実験の前置検出器で TPC の Mircomegas からの信号および FGD (押し出し成型シンチレータと波長変換ファイバーによる Fine Grain Detector) の MPPC の信号の読み出し用に開発された ASIC チップ AFTER ないしその後継の AGET を用いる。AFTER/AGET は、プリアンプ、

シェーパーアンプと 511 個の switched capacitor array を 72 チャンネル分内蔵しており、1 MHz から 50 MHz で波形を 511 サンプル保持することができる。一つのフロントエンドボードに低ゲイン用と高ゲイン用の二つの AFTER/AGET を搭載する。MPPC からの信号は、抵抗分割により EL 信号用の低ゲイン、1 光子検出用の高ゲイン、トリガー用の 3 つに分けられる。 $0\nu\beta\beta$  による信号は最長 320  $\mu\text{s}$  程度続くため、低ゲインの分岐は AFTER 内部で 1  $\mu\text{s}$  程度の時定数で信号を整形した後に 1 MHz でサンプリングする。高ゲインは、別の AFTER チップを 50 MHz で駆動し、1 光子の信号を読み出して MPPC のゲインの測定などに用いる。一つのボードで 64 個の MPPC からの信号を読み出す。64  $\times$  511  $\times$  2 (低ゲイン + 高ゲイン) の電荷情報はシリアルに取り出され、同じボード上の FADC でデジタル化される。トリガー用の分岐は 64 チャンネルのサム信号としてボードから出力する。一連の動作は FPGA で制御され SiTCP[6] でイーサネットを介して上位機器へと転送される。MPPC の印加電圧もこのボードから各素子毎に設定される。

T2K の FGD のフロントエンドボードを参考に設計を進めているが、時定数の大きく異なる要素が混ざっており、田中が四苦八苦している。完成したら、1 ~ 50 MHz  $\times$  511 サンプルの波形を安価に大量に取り込むことのできるボードとなるので、興味のある方はぜひご連絡ください。

## 2.6 背景事象について

10 気圧キセノン中での  $0\nu\beta\beta$  の電子 2 個の飛程の和は約 32 cm であり、同じエネルギーのアルファ線の飛程は 1 mm 以下であるため飛跡を測定することができる。ガンマ線による背景事象は完全に除去することができる。ガンマ線の 98% はコンプトン散乱を起こして離れた地点でエネルギーを落とすため、これも除去できる。Q 値の近いガンマ線源としては、ウラン系列で出てくる  $^{214}\text{Bi}$  が 11 keV すなわち Q 値に対して 0.4% 低いエネルギーのガンマ線を放出する。図 7 は、 $0\nu\beta\beta$  事象と同じエネルギーを持つ電子による事象の 30 気圧キセノンガス中での電離電子の空間分布である。 $0\nu\beta\beta$  の電子 2 個のエンドポイントが識別できれば良いが、多重散乱によって飛跡が曲がり、さらにキセノン中でのディフュージョンによる広がりのため、決定打にはできそうにない。中村の開発した識別アルゴリズムで、背景事象を 90% 除去しようとするすると信号の検出効率は 60% くらいとなっている。

$^{241}\text{Bi}$  のもっとも大きなソースは容器で、無酸素銅の非常にクリーンな材質にしたとしても、背景事象は数百個/年になりそうである。エンドポイント識別を導入す

<sup>1</sup>MPPC のゲインは、ほぼオーバー電圧に比例する。

れば数十個/年となるが、信号の検出効率が下がる。そこで容器を、加圧した純水タンクに入れることで薄型化することなどを検討している。

MPPCのパッケージなど、そのほかの構成要素の低バックグラウンド化にも取り組む必要がある。

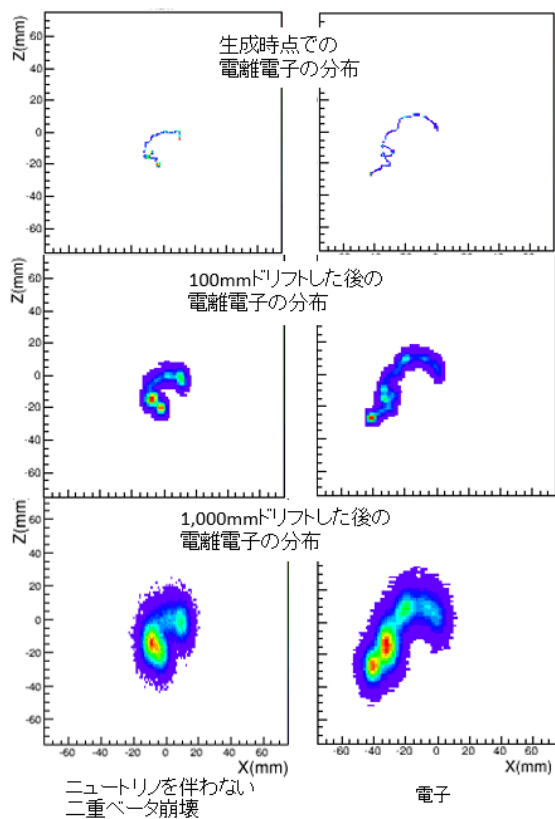


図 7: 30 気圧キセノンガス中での  $0\nu\beta\beta$  事象および同じエネルギー (2.4 MeV) の電子事象の電離電子空間分布の例。最上部が事象発生時、二段目は 100 mm ドリフト後、三段目は 1,000 mm ドリフト後のもの。

### 3 試作機による原理実証の状況

開発を始めて以来、まずは真空チェンバーにキセノンを 1 気圧充填して、

1. ただの平行平板電極と横に光電子増倍管
2. ELCC と光電子増倍管 1 個
3. ELCC と 16 チャンネルマルチアノード PMT

と進め、その後、図 8 の 10 気圧 10 L チェンバーを製作し、

4. ELCC と波長変換シートと可視光用 MPPC32 個
5. ELCC と可視光用 MPPC に波長変換材を刷毛で塗布したもの 64 個

と試作機による開発を進めてきた。現在は、図 9 の紫外光に感度をもつ MPPC 64 個を用いた試作機の製作を進めている。

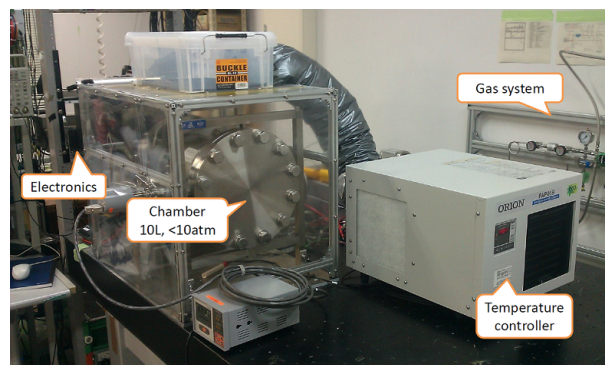


図 8: 10 L チェンバーと周辺機器

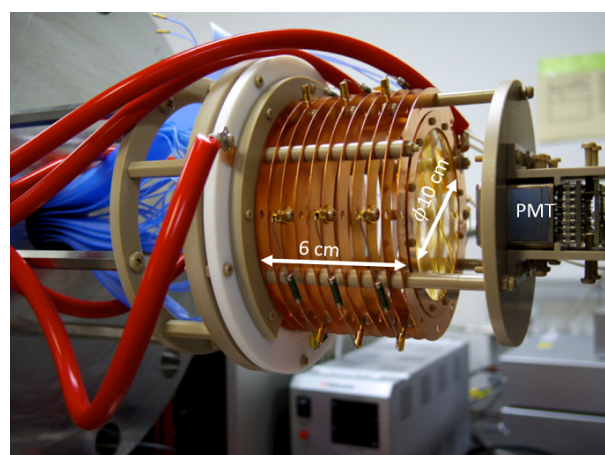


図 9: 64 チャンネル試作機。中央の銅のリングはドリフト電場形成のためのフィールドケージ。左側に ELCC 面、右側に光電子増倍管がある。

図 10 は、64 チャンネル (波長変換材+MPPC) 検出器を用いて 4 気圧キセノンガスで得られた  $^{57}\text{Co}$  からのガンマ線事象の例であり、図 11 は  $^{57}\text{Co}$  線源を照射して得られたエネルギースペクトラムである。122 keV のフルピーク、エスケープピーク、 $K_\alpha$ 、 $K_\beta$  のピークが見えている。各ピークをガウス関数でフィットして得られたエネルギー分解能を、エネルギーの関数として  $\sqrt{E}$  に比例する項と  $E$  に比例する項でフィットして  $0\nu\beta\beta$  の Q 値に外挿すると 2.6%(FWHM) となる。これは目標の 0.5% には及ばずまだまだ改良が必要である。まずは波長変換材を MPPC に刷毛で塗布するのではなく、真空紫外光に感度を持つ MPPC を用いることで大幅に改善すると踏んでいるが、そこから先、ELCC のセル構造、メッシュの選定、MPPC 素子の形状など改善の余地はまだいたるところにあり、原理的な限界ではなくもっと開発をがんばりなさいという状況である。

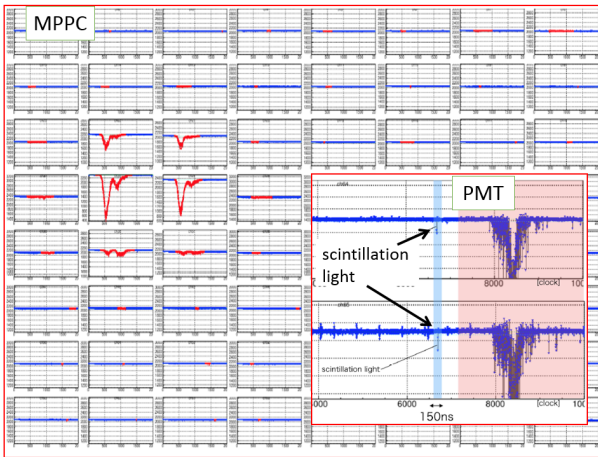


図 10:  $^{57}\text{Co}$  線源からのガンマ線事象の例。MPPC の波形と PMT の波形が並べられている。

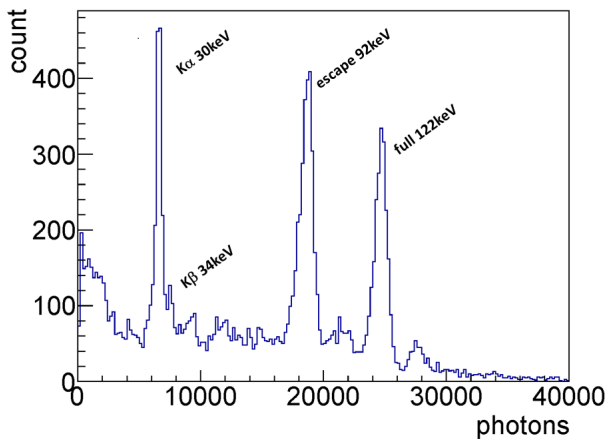


図 11: 64 チャンネル (波長変換材+MPPC) 検出器に  $^{57}\text{Co}$  を照射して得られたエネルギースペクトラム。キセノンガスを 4 気圧充填。各ピークをガウス関数でフィットしている。

## 4 展望

まずは目標のエネルギー分解能 0.5%(FWHM) を達成するための開発を続ける。並行して、容器サイズ約 200 L, ELCC 約 2,000 チャンネルの次期試作機的设计, 製作, 評価を二年程度で進める。これらがうまくいけば, 次の段階で世界記録を狙う検出器を作ることには可能だと思ふ。しかし, その先, 1 トン級の検出器で  $10^{-2}$  eV 質量領域を狙おうと思うと, 背景事象の除去にもう一ひねり必要である。

$0\nu\beta\beta$  以外にも高圧キセノンガス TPC で方向感度を持つ暗黒物質探索用の検出器を作ることにも考えている。TPC の発明者であり, NEXT 実験の提案者の一人でもある D. Nygren が, 電離電子およびシンチレーション光を測定することによって, 暗黒物質によって反跳された原子核のドリフト電場に対する角度 ( $\cos\theta$ ) を測定するという提案をしている [7]。これは, 飛跡がドリフト電場

に沿っていると電離電子・イオンの再結合が増えて, 電離電子の収量は減り, シンチレーション光は増えるだろうという予想にもとづいている。ただしそのままでは, 再結合の割合が少ないため彼らのグループではキセノンガスに TMA を混ぜて電離電子の拡散を抑えることを検討している。われわれのグループでは, ドリフト電場に平行に磁場をかけることによって垂直方向の拡散を抑えられるのではないかと考え, そのような条件での再結合割合の測定を進めている。

いずれにせよ, 開発要素満載, ただし成功が約束されている訳ではない楽しいプロジェクトです。一緒に研究する人, 大歓迎です。

## 謝辞

一緒に研究していただいている京都大学の中家剛氏, 南野彰宏氏, 廣瀬昌憲氏, 東京大学の関谷洋之氏, 東北大学の上島考太氏, 神戸大学の身内賢太郎氏に感謝します。また読み出し回路の製作では Open-It, 特に内田智久氏, 池野正弘氏にサポートしていただいています。

## 参考文献

- [1] 高エネルギーニューズ  
丸藤 祐仁, 井上 邦雄, “KamLAND-Zen 実験”, **30**, No.3  
石原信弘, “二重ベータ崩壊実験 DCBA の現状と将来”, **26**, No.2  
岸本忠史, “二重ベータ崩壊と CANDLES 実験”, **24**, No.3
- [2] A. Gando *et al.* [KamLAND-Zen Collaboration], Phys. Rev. Lett. **110**, no. 6, 062502 (2013) .
- [3] P. A. R. Ade *et al.* [Planck Collaboration], Astron. Astrophys. **571**, A16 (2014) .
- [4] M. Agostini *et al.* [GERDA Collaboration], Phys. Rev. Lett. **111**, no. 12, 122503 (2013) .
- [5] たとえば, G. F. Knoll, “RADIATION DETECTION and MEASUREMENT” Wiley;4 版の 6 章や E. Aprile *et al.*, “Noble Gas Detectors” Wiley-VCH の 6 章.
- [6] <http://research.kek.jp/people/uchida/technologies/SiTCP/>
- [7] D. R. Nygren, J. Phys. Conf. Ser. **460**, 012006 (2013).