

液体キセノンTPCによる高分解能ガンマ線検出器

提案書（バージョン1.1）

平成19年4月24日

目次

1	研究目的	1
2	メンバーと役割分担	4
3	研究計画	5
3.1	平成 19 年度	7
3.2	平成 20 年度	9
3.3	平成 21 年度	9
4	予算 (概算)	10
4.1	平成 19 年度	10
5	最後に	10

図目次

1	液体キセノン TPC-PET (TXePET) のイメージ図	4
2	液体キセノン TPC 検出器; 図中示された座標系のように電離電子は z 方向にドリフとする。光電子増倍管は $x-z$ 平面に配置されている。	5
3	読み出しエレクトロニクスシステムの概要	6
4	試験冷凍容器	7
5	キセノンの液化・冷凍・純化システム	8
6	試験冷凍容器中のプロトタイプ TPC	9

表目次

1	エネルギー領域と物理・応用	1
2	液体キセノンと結晶シンチレーターの比較	1
3	主な PET の性能比較表	12
4	本検出器の基本性能期待値	13
5	液化・冷凍・純化システム概算	13
6	平成 19 年度概算	13

1 研究目的

本研究の目的は、エネルギー keV~MeV 領域のガンマ線の 3 次元位置、時間及びエネルギーの高分解能検出器の開発である。このエネルギー領域のガンマ線検出器はガンマ線天文学を始めとし [1]、Single Photon Emission Computed Tomography (SPECT)、そして Positron Emission Tomography (PET) などの医療分野で用いられ、開発研究も盛んに行われている。また、表 1 のように、本エネルギー領域は多くの物理実験も含まれる。

表 1: エネルギー領域と物理・応用

エネルギー領域	物理・応用
数 10keV~ 数 10MeV	ガンマ線天文学
1keV	ニュートリノのコヒーレント散乱
10keV	暗黒物質 (ダークマター)
100keV	太陽ニュートリノ
数 10keV~300keV	SPECT
511keV	PET
2.48MeV (キセノン中)	ダブル β 崩壊

ガンマ線検出器として一般に用いられているものは、BGO, GSO, LSO などの結晶シンチレーター検出器である。これらはよい時間とエネルギー分解能を持つが、(反応)位置の分解能は結晶の大きさで制限される。特に、ガンマ線反応点の深さ方向の位置分解能は、センチメートル程度である。SPECT や PET での主要な検出器であるが、上記の位置分解能の制限が PET 画像の視差補正を難しくしている。放医研の村山らが進めている次世代 PET ではこの視差補正の改善が大きな目標となっている [2]。また、SPECT や PET では、高い計数率、例えば 100kHz/cm² に対応できるために、よりよい時間分解能が必要になる。

表 2: 液体キセノンと結晶シンチレーターの比較

シンチレーター	GSO (Gd_2SiO_5)	LSO ($Lu_2SiO_5(Ce)$)	液体キセノン
密度 (g/cm^3)	6.71	7.4	3.06
放射長 (cm)	1.38	1.14	2.77
蛍光波長 (nm)	430	420	175
蛍光減衰時間 (ns)	30-60	40	2, 30
相対発光量	20	40-75	100
屈折率	1.85	1.82	1.60
融点 ()	1950	2050	-111.75
PET 用結晶 (mm^3)	2.45x5.1x30	4x4x20	自由
ドリフト速度 ($mm/\mu s$)	-	-	2.2

ガンマ線の反応位置のよい精度を持つものとしては、シリコンストリップを多層重ねた半導体検出器がある。十分な放射阻止能を得るためには1層の厚さ0.5mmのシリコンストリップを少なくとも100層以上重ねる必要がある。このように、シリコンストリップを用いた検出器はコンプトン散乱の反応位置の測定に使用される。また、散乱されたガンマ線を効率よく検出するため、その周囲がカロリメータ(吸収物質)で覆われることもある。ここではシリコンは反応位置検出器(散乱物質)となっている。この吸収物質として、シンチレータやGe、CdTeなどの重い半導体がいられる。位置とともにエネルギーが結晶シンチレータ検出器より精度よく測定される。この組み合わせの検出器はコンプトンテレスコープと呼ばれ、ガンマ線天文学で主に用いられている[3]。一般に、半導体検出器は位置とエネルギー分解能において最高の性能をもつものである。しかし、装置の大型化に際して、多くの半導体と多くの読み出しチャンネル数が必要となり、高価なものとなる。

本申請課題の液体キセノン検出器は、タイムプロジェクションチェンバー(TPC)読み出しにより3次元位置を精度よく測定する。同時に、電離電子群とシンチレーション光によってエネルギーも精度よく測定できる[4]。また、本検出器は液体キセノン自身が散乱物質と吸収物質を兼ねるような媒質であり、比較的容易に大形化できる。データ読み出しチャンネル数も少なくでき、安価なものとなる。また、速いシンチレーション光を利用した精度よい時間分解能では半導体検出器を凌駕する[5]。

これまで、液体キセノンTPCは米国コロンビア大学、早稲田大学の研究グループによりガンマ線天文学用の検出器(コンプトンテレスコープ)として開発研究が行われている[6, 7]。このTPCは電離電子のドリフト距離として9cmのものである。電離電子群がアノードに到達する直前で互いに直行するwire面を通過するとき、wireに誘起されるシグナルにより、これらwire面での2次元位置が検出される。また、ドリフト時間より3つ目の位置座標が求められる。さらに、早稲田大学のグループはwireをすべてなくし、プリント基板の技術を用いた表裏直行するストリップ型アノード(陽極)によるシグナルの検出を試みている[8]。これらwireやストリップラインによる位置測定は射影座標で行われるため、PETなどの高計数率かつ高バックグラウンドの状況下では、ゴーストヒットの除去が困難になる。

PET用の開発研究としては、LXe-TPC PETがフランス・ナンテ(Nantes)大学の研究グループによって提案されている[9]。一つのTPCの大きさは $24 \times 60 \times 9 \text{ cm}^3$ (モジュール)であり、LXe-TPC PETは8個のモジュールからなっている。さらに、各モジュールはシンチレーション光の発光点の同定のため光反射壁により $1 \times 1 \times 9 \text{ cm}^3$ の直方体セルに分割された構造を持つ。電離電子はこの9cm方向(Z)にドリフトする。 $24 \times 60 \text{ cm}^2$ のアノードは $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ のpadsからなっている。

本研究で開発する液体キセノンTPC検出器はシグナル読み出し用のwireをなくし、アノードとしてpadsを用いる。液体キセノンは光反射壁を持たず分割されない均一で一様な構造を持つことに大きな特徴がある。また、光電子増倍管の高速なシグナルによって入射ガンマ線の反応時間とおおよその反応点の同定を行い、TPCによりその精密な3次元位置を測定するところにその特徴がある。ガンマ線天文学テレスコープでは高いエネルギー分解能とともにこの精密な時間同定が重要である。PETのような高係数率の状況下にも十分な性能を示す。本研究ではエネルギーの確定したPETへの応用を当面の目標に開発を進める。

シンチレーション光の発光点は、多数の光電子増倍管を配置することにより、それらの時間情報と光量から求められる[10, 5]。これまでの類似のTPCと異なり、本TPCでは電離電子群の

ドリフト方向がガンマ線入射方向に直行する方向となっている。これによりフルスケールPETにあってもTPCに要求される一様電場の形成が容易になり、TPCのモジュール化(立方体)に伴う不感領域をなくすることができる。また、電離電子のドリフト中の吸収をなくするためには液体キセノンの純度を0.1ppb以下にする。このような冷凍・純化技術は本グループの所属機関である高エネルギー加速器研究機構(KEK)の基盤技術の一つとなっており他ではこの技術をもたない。これらの詳細は次節で述べる。

3年間の研究期間では、エネルギー、位置、時間分解能など基本的な性能を検証する。少なくとも次世代PETに必要な性能、すなわち511keVガンマ線に対して、エネルギー分解能の16%(FWHM)、3次元位置分解能の1mm(FWHM)を達成する。このように、本研究は液体キセノンTPC検出器が次世代PETとして実用化されるための基礎的データを与える。そのため、本TPCはPETのプロトタイプである。また、エネルギー分解能をさらに向上させれば、ガンマ線天文学用の検出器としても十分な性能をもつものとなる[1]。

我々の提案する液体キセノンTPCを用いたPET(TXePETと呼称する)のイメージを図1に示す。また、主なPETの性能比較を表3に示す。この表中赤字で書かれたものは開発研究中のPETである。TXePETの感度(sensitivity)、雑音等価計数率(NECR)の値は早稲田大(現放医研)の錦戸氏らのグループの液体キセノンTOF-PET(LXeTOF PET)[5]のものを下に評価したものである。この表から、液体キセノンを使用するPETとして開発中のものは、我々のTxepETの他に、フランスのNantes大学のLXeTPC PET(1 TPCユニット=10x10x90mm³, 90mmドリフト)[9]、ポルトガルのCoimbra大学のPETYA(1 TPCユニット=10x50x60mm³, 10mmドリフト)[13]、そして早稲田大学のLXeTOF PET(PMTのみ使用、2光子の時間差、TOFの測定による同時計測線上位置の同定)である。これらの中で、液体キセノンが分割されていないTPC検出器はTXePETのみである。そのため、高感度が期待される。

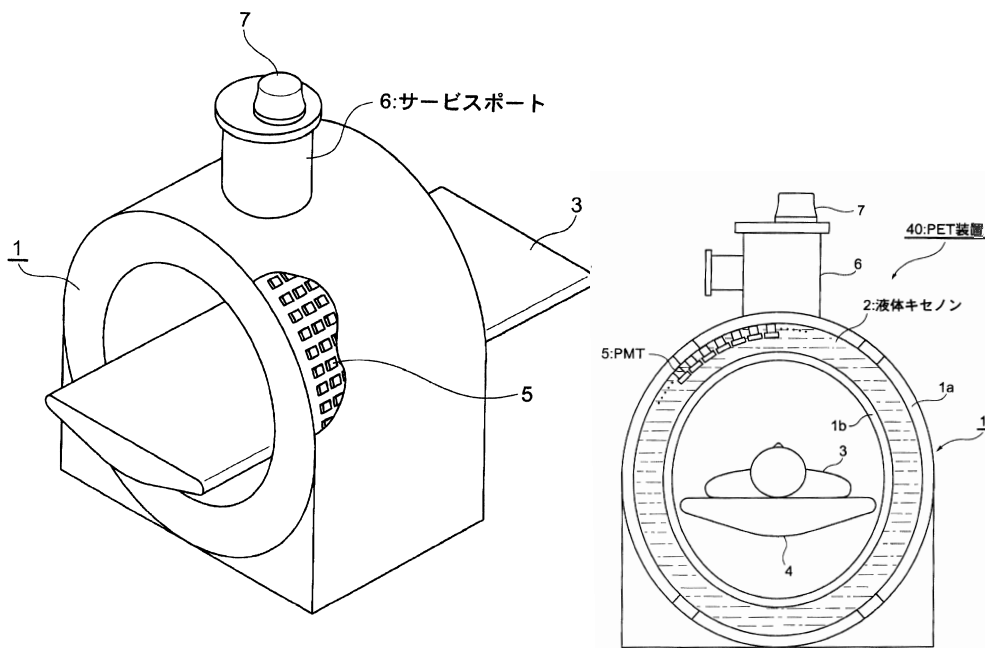


図 1: 液体キセノン TPC-PET (TXePET) のイメージ図

2 メンバーと役割分担

2007年4月現在のメンバーと主な役割を以下に示す。

田内 利明 (KEK) : 研究の総括

真木 晶弘 (KEK) : 光電子増倍管システムおよび液体キセノンでのシンチレーション光検出

春山 富義 (KEK) : 液体キセノン純化及び冷凍システム

田中 秀治 (KEK) : 素材試験およびデータ収集システム

杉山 晃 (佐賀大) : TPC、TPCシミュレーション

熊田 雅之 (放医研) : PETとしての性能仕様とデータ解析

富谷 武浩 (放医研) : PETへの実用化

寅松 千枝 (放医研) : 液体キセノン TPC を用いた PET のシミュレーション

エレクトロニクスシステム設計と製作では、KEK エレクトロニクスシステムグループの協力支援を得る。

本研究課題の一つの重要なエレクトロニクス設計・製作は、上記に示したようにエレクトロニクスシステムグループの ASIC プロジェクトと緊密な関係で行うが、特に、大学院生の参加を積極的に進めて行きたい。

3 研究計画

本研究において基本性能評価(表4)の為に製作される液体キセノン TPC 検出器は図2で示されるように、 $12 \times 24 \times 9 \text{cm}^3$ (2.6 リットル)の容量を持つ。TPC の 24cm 離れた左および右端面にそれぞれ-48kV と 0kV の電圧をかけ、側面に設けられたフィールドケージにより、 2kV/cm の一様な電場が形成される。面積 $12 \times 24 \text{cm}^2$ の上面には断面積 $2.8 \times 2.8 \text{cm}^2$ の光電子増倍管 (浜松ホトニクス製、R5900-06AL12S-ASSY [5]) が $4 \times 8 = 32$ 個設置されている。これらの光電子増倍管は液体キセノン中に置かれている。フィールドケージはこれら光電子増倍管でのシンチレーション光の受光を妨げないように製作する。図に示されているようにガンマ線は底面より入射する。

ガンマ線 (511keV) の液体キセノン中での反応の割合は、78%がコンプトン散乱で残りの22%が光電効果 (photoelectric) である。厚さ 9cm の液体キセ

ノンではガンマ線の93%が反応を起こす。光電効果によって発生した電子はキセノン分子の電離でエネルギーを失い、0.5mm 程度のレンジを持っている。511keV の総電離エネルギーに対して約 30,000 個の電子・イオン対が生成される。また、キセノン分子の励起により、波長 175nm のシンチレーション光が約 22,000 光子数/511keV の割合で放出される。このシンチレーション光の減衰時間は 2ns, 30ns と非常に速い。この高速な反応は PET での陽電子消滅で発生する 2 ガンマ線の同時計数の狭い時間ゲート幅を得る上で重要である。

こうして生成された電離電子は 2kV/cm の一様な電場中をアノードに向かって、すなわち z 方向に、 $2.3 \text{mm}/\mu\text{sec}$ の速度でドリフトする。したがって、最長 24cm のドリフト時間は $103 \mu\text{sec}$ である。液体キセノン中の diffusion は 24cm ドリフト時に $\sigma = 1 \text{mm}$ 程度である (T.Doke et al., NIM 196 (1992), 87)。現在、アノードパッドの大きさは $3 \times 3 \text{mm}^2$ としている。目標の位置分解能を達成するためのパッドサイズの最適化も本研究の課題の一つである。位置情報のほか、アノードシグナルからガンマ線エネルギーを得る上で重要なパラメータは、電離電子の減衰長 (attenuation length) である。液体キセノンの純化 (O_2 , H_2O など不純物 0.1ppb 以下) により、2m 以上の減衰長が得られる [11]。液体キセノンの純化・冷凍技術は KEK で確立したものをを用いる [12]。この技術は液体キセノンの圧力、温度など変動が制御され、シグナルの大きさを安定に保つことが出来る。

本液体キセノン TPC 検出器での光電子増倍管の役割は、シンチレーション光の検出により、液体キセノン中でガンマ線の反応時間と反応位置を同定することである。この時間同定は TPC でドリフト時間より z 位置を求めるときのタイムスタンプとなる。位置分解能は $0.5 \sim 1 \text{cm}$ (FWHM) 程度で、TPC の x - z 面上でのシグナル範囲の制限をする。これは、高いバックグラウンド環境下における PET の高計数率実現に、特に重要な役割を果たす。

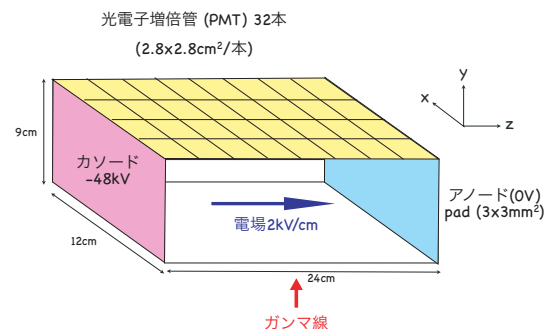


図 2: 液体キセノン TPC 検出器; 図中示された座標系のように電離電子は z 方向にドリフトとする。光電子増倍管は x - z 平面に配置されている。

図3に読み出しエレクトロニクスシステムの概要を示す。読み出しによる不感時間をなくすことを第一の目標としている。

32本の光電子増倍管(PMT)よりのシグナルはそれぞれパラレルにフラッシュADC(FADC, 300MHz, 8bit)を通りフィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ(FPGA, 300MHz)に送られる。FPGAではPMT波形データ(p_i)のベースラインが差し引かれ(BS)、パルス高が計算される。それらの波形データの総和($\sum p_i$)

から全エネルギー(E_{PMT})が計算される。この中で、指定された最小エネルギー(E_{min})以上のものがガンマ線と同定され、その最小時間 t_o がタイムスタンプとなる。 x, z 位置は各PMT信号の波高による加重平均で計算される。 y 座標は波高の分散関数(D)から計算される。こうして計算された位置(x, y, z)、時間(t_o)、エネルギー(E_{PMT})はSRAMに記録される。

1,200チャンネルのアノードパッドよりのシグナルは、CMOSフロントエンド・エレクトロニクスのASIC(Application Specific Integrated Circuit)で増幅とデジタル処理が行われる。前述のように一つのパッドには数1,000個以上の電離電子が収集される。したがって、増幅器のノイズは数100個の電子に押さえられなければならない。ASICチップは $1.2 \times 1.2 \text{ cm}^2$ の大きさを $4 \times 4 = 16$ チャンネル含まれ、 $3 \times 3 \text{ mm}^2$ のパッドサイズと一致している。ASICチップからは、入力パルス高に比例するパルス幅をもつLVDS(low voltage differential signaling)のデジタル信号が各チャンネルごとに出力される。加えて、16チャンネルのパルスの和のアナログ信号(パルス波形)も出力される。アナログ信号はFADCを経由し、デジタル信号は直接FPGAに送られる。そこで、PMTの場合と同様に処理され、全エネルギー(E_{TPC})と x_{TPC}, y_{TPC} の位置が計算される。これらはSRAMに記録される。ASICチップは測定器開発室・ASICプロジェクトとして開発中のものを使う予定である。

コンピュータにより、 z はドリフト時間 t 、そして、ドリフト速度 v より、 $z = v(t - t_o)$, $t > t_o$ で計算される。また、PMTそしてTPCによる位置の一致が確かめられ、より精度の良いTPCの位置情報より、PMTの位置分解能も計算することができる。TPCの位置分解能は、コリメートされたガンマ線などによって求められる。ガンマ線のエネルギーは2つの和の $E_\gamma = E_{PMT} + E_{TPC}$ で計算することができ、従来のPMTとTPCそれぞれのものに比べて分解能の向上が期待出来る。

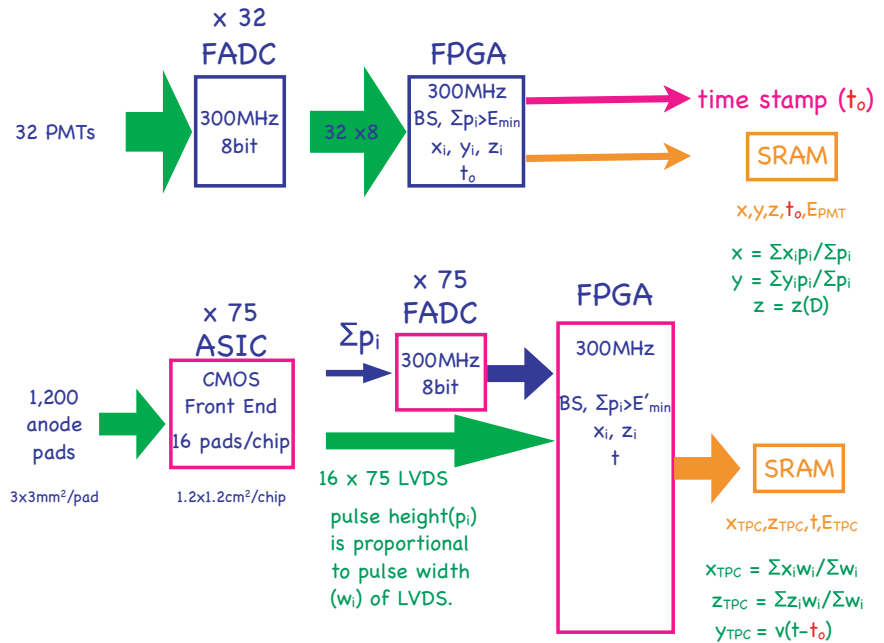


図3: 読み出しエレクトロニクスシステムの概要

3.1 平成 19 年度

初年度は高純度で安定な液体キセノンの冷凍システムなどの研究開発設備の構築を重点的に行う。また、既存の試験冷凍容器（図 4）を利用し、出来る限り簡単な構造の TPC（プロトプロトタイプと呼ぶ）を製作する。このプロトプロトタイプにより、TPC の基本性能を実験的に確認し、問題点や改良点を徹底的に追及する。シミュレーションや実機製作方法（プロトタイプ）の研究も平行して進める。特に、プロトプロトタイプ製作の前に、液体キセノン中での電場計算を行い、アノード・パッドのシグナルの振る舞いから、アノード・パッド直前に電場整形用のグリッド面が必要かどうかを検討する。

キセノンの液化・冷凍・純化システムの概要を図 5 に示す。キセノンの純化はガス状態での循環で行われ、水分、酸素をモレキュラーシーブ (MS) により、さらに酸素を Oxysorb により、そして、全ての残留分の不純物をゲッター (MonoTorr, NuPure) により、ppb 以下に除去する。キセノンガスの供給は図中左から行われる。キセノンは低温回収ボトル装置で回収することができる。循環中の液化は、図 4 のように試験冷凍容器上に取付けられているパルス管冷凍機 (PDC08、冷凍能力= 8W @ 77K) で行われ、液体キセノンは容器に貯められる。容器等の予冷は液体窒素で行われる。

図 6 に試験冷凍容器中に設置されたプロトプロトタイプを示す。最大のドリフト距離は 5cm である。両端に置かれるカソード板とアノード (0 電位) 間、4 枚の電場整形用の電極板により、1 ~ 2kV/cm の一様な電場が形成される。アノードはパッド化し、複数チャンネルの読み出しを行う。上下には 2 つの光電子増倍管を設置する。これら一式は容器の底のフランジに設置され、少なくとも深さ 14cm の液体キセノン (2.2ℓ) に浸される。

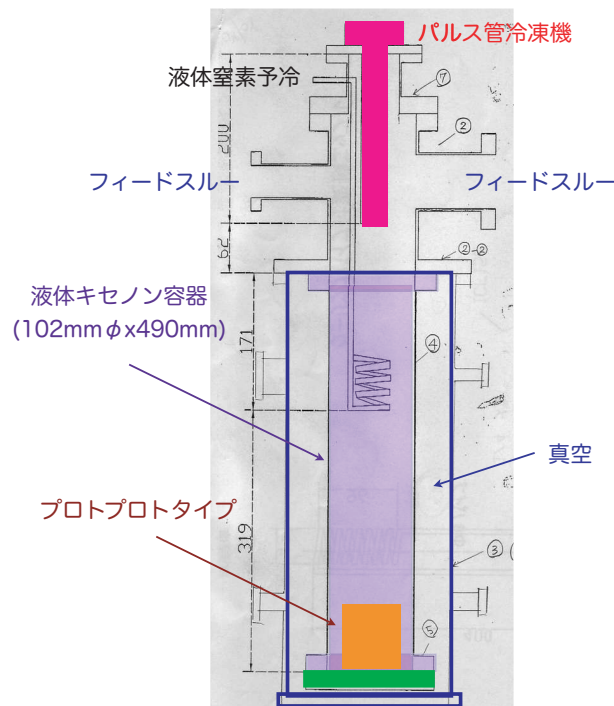


図 4: 試験冷凍容器

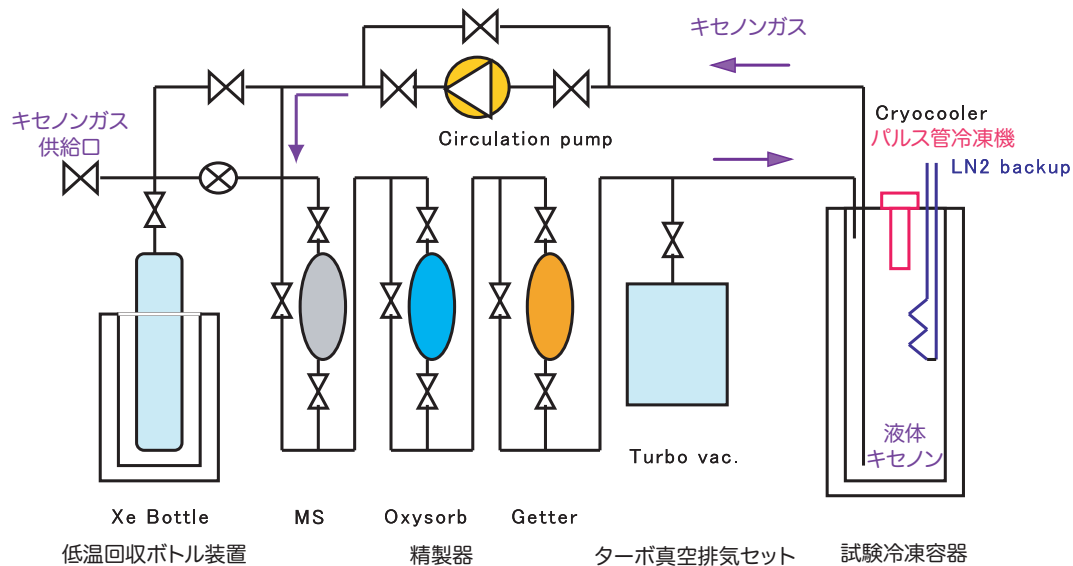


図 5: キセノンの液化・冷凍・純化システム

次に、素材試験などを含めた本年度の計画を列挙する。

1. 液体キセノン純化 (KEK パルス管冷凍機使用)
 - 酸素、水 (シグナル減衰) そして、クリプトン等 (バックグラウンド) の除去
 - ppb 以下
 - 不純物除去と測定方法の確立と TPC などの使用素材の吟味
2. 素材チェック (液体窒素中 -200)
 - HV ケーブル 碍子、(低温中での耐压)
 - ハンダ使用の是非
 - コンデンサ、抵抗 (低温中の高周波特性、耐压、温度特性)
 - フィードスルー
 - ヒートサイクルによる使用素材の劣化
 - ベーキング可能な材料 (必要性?)
3. ドリフト 5cm 程度の TPC (プロトタイプ)
 - 2 個の光電子増倍管 (175nm に対して 20%以上の量子効果) 使用
 - 基本技術の習得 - 試験冷凍容器 (図 4 使用)
 - 4~5 月に TPC 本体の容器への固定も含めた設計
 - 6 月発注、8 月末納入、9 月に組み立て、性能試験は 10 月以降
4. TPC の基本性能測定
 - 拡散 (diffusion)、減衰 (attenuation)、3 次元位置の測定
 - 読みだし (ゲイン 1) : アノードパッド
 - 低電力低ノイズアンプのテスト (開発中の ASIC など)
 - 位置、エネルギー精度の較正方法 (放射線源、宇宙線ミュオンなど)
 - シグナルのシミュレーション (電場、グリッド電圧、ドリフト)

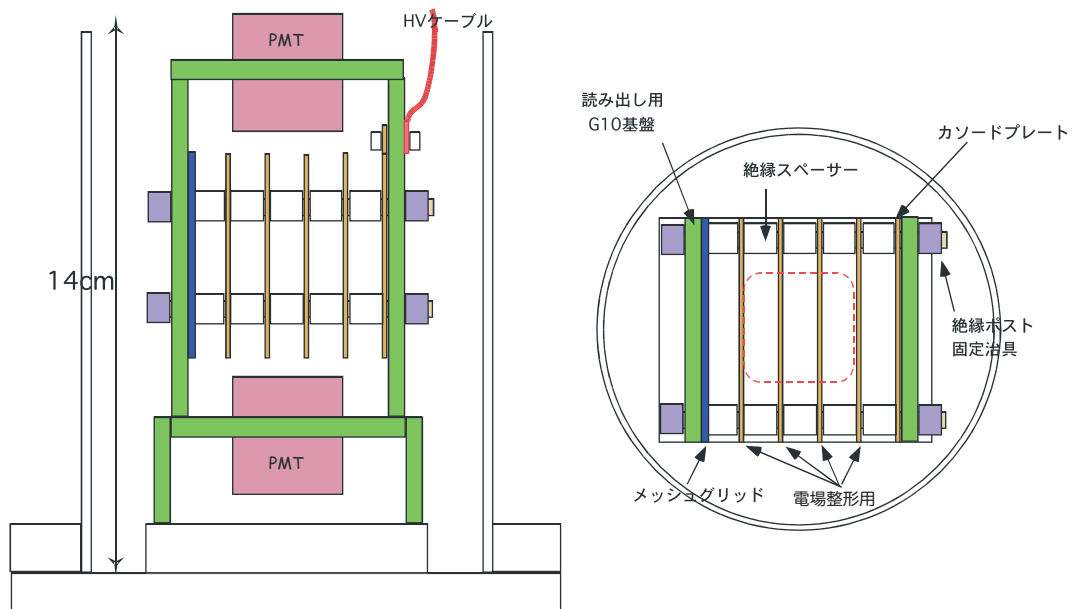


図 6: 試験冷凍容器中のプロトタイプ TPC

3.2 平成 20 年度

液体キセノン TPC (プロトタイプ、図 2) の本体を製作する。また、エレクトロニクスシステム (図 3) の詳細設計を行う。

3.3 平成 21 年度

プロトタイプの性能測定と PET としての実用性の観点からの構造等の最適化を行う。

4 予算（概算）

4.1 平成 19 年度

まず、液化・冷凍・純化システム（図 5）の概算を表 5 に示す。

さらに、TPC プロトタイプ製作、性能評価、素材試験等を含む本年度予算の概算を表 6 に示す。

5 最後に

KEK のパルス管冷凍機等の液体キセノン液化・純化の基盤技術、そして、回路室の ASIC 等のエレクトロニクス技術の下に、液体キセノン TPC の開発の提案をした。

参考文献

- [1] Larger ACT Collaboration (Steven E. Boggs et al.), The Advanced Compton Telescope Mission (NASA Vision Mission Concept Study Report), *New Astron.Rev.*50 (2006) 604-607.
- [2] 放射線医学総合研究所 jPET project team, 次世代 PET 装置開発研究会報告書
- [3] T.Tanaka et.al., Development of a Si/CdTe semiconductor Compton telescope, *Proc. SPIE*, vol. 5501 (2004),229-240
- [4] E.Conti et. al., Correlated fluctuations between luminescence and ionization in liquid xenon, *Physical Review B*68 (2003) 54201
- [5] F.Nishikido et.al., Performance of Prototype Liquid Xenon Scintillation Detector System-for Time-of-Flight Type Positron Emission Tomography with Improved Photomultipliers, *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.44, No.7A (2005) 5193-5198
- [6] E.Aprile et.al., The electronics read out and data acquisition system for a liquid xenon time projection chamber as a ballon-borne Compton telescope, *NIM A*412 (1998) 425-436.
- [7] E.Aprile et. al., The LXeGRIT Compton Telescope Prototype: Current Status and Future Prospects, *SPIE* 4851 (2002) 140, astro-ph/0212005
- [8] 瀧澤京子他、ストリップ型陽極を用いた宇宙ガンマ線用液体 XeTPC の開発 II、日本物理学会 2000 年春の分科会 (近畿大学)
- [9] J.P. Cussonneau et al., Simulation and evaluation of a new PET system based on liquid xenon as detector medium, *Proceedings of the 2nd International Workshop on Applications of Rare Gas Xenon to Science and Technology (XeSAT2005)*, p 35, Waseda University, March 8-10, 2005, Waseda MediaMix Publishing Co.
- [10] S.Mihara et al.,*IEEE Trans. Nucl. Sci.* NS-49 (2002) 588
- [11] M.Ichige et.al. , *NIM A*333 (1993) 355
- [12] KEK ニュース『液体キセノンを冷やす』; <http://www.kek.jp/newskek/2005/janfeb/MEGXePT.html>
- [13] V. Solovov et al., *NIM A*477 (2002) 184-190

表 3: 主な PET の性能比較表

Product	designer	name	Cryscal/Radiation material	size	fiducial volume	position resolution	Slice pitch	energy res.	sensitivity	NECR by NEMA NU 2-2001	Solid angle							
				x, z, y in mm	inner diameter cm	field of view cm	tange n-DOI mm	radially DOI mm	axial (z) mm	z mm	511 keV	NEMA NU2-2001 cps/kBq	%	NECR kcps	at radiation dose (20Φ x70(20)L kBq/ml	scatter fraction %	point source	
PET/CT	GE	ADVANCE	BGO	4, 8.1, 30	67.2	15.2	7	30	7.3, 8.4		33	0	37.6	10	44.8	0.221		
	GE	Discovery ST Elite	BGO	6, 6, 30	55	15.2	4.25	30	4.8	3.27		8.5	0.85	80	12	36	0.266	
	Siemens	ECAT EXACT HR+	BGO	4.39, 4.05, 30	65.3	15.5	4.3	30	4.1			8.98	0.898	27.3(79.2)	6.3(12.5)	37	0.231	
	Siemens	biograph 16 HI-REZ	LSO	4, 4, 20	58.5	16.2	3.5	20	3.12	2	10	4.92	0.492	84.77	28.73	34.1	0.267	
	Philips	Gemini GXL (CTP)	GSO(+Zr)	4, 6, 20 (30)	56	18	4.9-5.4	20	5.0-6.1	4	8.5	8	0.8	70	11	35	0.306	
	Shimadzu	SET-3000GCT	GSO	2.45, 5.1, 30	66.4	25	2.45	30	5.1	2.6		19	1.9	60	9.8	50	0.352	
	Toshiba	Aquiduo PCA-7000B	LSO	4, 4, 20	58.5	16.2	3.5	20	3.12	2	10	4.92	0.492	84.77	28.73	34.1	0.267	
	PET	Hannamatsu	SHR-92000	BGO	2.9, 6.3, 20	60	68.5						9.72	0.972	113.6	10.5	31.4	0.752
		Nantes univ.	LXeTPC PET	Liq-Xe	10, 10, 90 (93%)	60	60	0.25	0.14	0.25		13.8		70	1.5	54.5	0.707	
		Coimbra univ.	PETYA	Liq-Xe	10, 50, 60 (73%)			0.8	2.0-5.0	0.8		15-17						
NIRS		LXeTOF PET	Liq-Xe	segmentation?	80	24	3.7	3.7	3.7		16	35	3.5	150	10	0.287		
KEK-NIRS		TXePET	Liq-Xe	no segmentation	88	48	1.64	1.64	1.2		16	70	7	300	10	0.479		
Brain PET		CERN	brain HPD-PET	LSO	3.2, 3.2, 200(z)	35	10	1.9	1.9	4.5		7.5	4	0.4	130		30.4*	0.275
		NIRS	pPET-D4	GSO	2.9, 2.9, 7.5x4	25.6	26	2.5	7.5	2.5		16	7.1	0.71	154	11	39.7	0.713
CPS		HRRP	LSO-LYSO	2.1, 2.1, 7.6x2	31.2	25	2.4-2.5	2.4-2.9	3.0-4.0		17	4.5	0.45	140	13	40	0.625	
Univ. Pennsylvania		G-PET	Anger-logic GSO	4, 4, 10	30	25.6	4	10	5		18	4.79	0.479	60	7.4	39	0.649	
Hannamatsu		SHR-1200(2400)	BGO	2.8(1.4), 6.55, 3k	33	16.3	2.9	30	2.9									0.443
Hannamatsu	SHR-12000	BGO	2.8, 6.55, 30	50.8	16.3	2.9	30	2.9									0.306	
Small Animal PET	UVP	microPET II	LSO	0.975, 0.975, 12.5	16	4.9	1.17	1.47	1.42			22.6	2.26	235	2.35		0.293	
	BioImaging	SCEITI, Univ. of Ferrara	YAP	2, 2, 30	4	4	1.8	1.8	1.8		14.5	18	1.8	90	16.6MBq		0.707	
	Oxford Positron System	Quad HDDAC	HDDAC		17	28	1	1	1			18	1.8	100	0.2	30-40	0.855	
	raytest	ClearPET	LYSO-LuYAP	2, 2, 10x2	22.5	11	1.25-2.1	2.5-2.4	1.25-2		30	38	3.8					0.439
	LIP	RPC-PET	RPC		6	10	0.5	0.5	0.5			21	2.1	318	2.63			0.857
	Philips	MOSAIC	GSO		12.8	11.9	2.1-2.5					5.7	0.57					0.681
	GE	eXplore Vista	GSO/LYSO	1.55, 1.55,	6.7	4.7	1.56	1.45	1.74			41.4	4.14					0.574
	Siemens	FOCUS 220	LSO	1.5, 1.5, 10	19	7.6	1.3-2.5				18	40	4					0.371
	Advanced MI	LabPET7.2	LYSO/HPD	1, 1, 10	11	7.2	1.1											0.548
	Gamma Medical	X-PET	BGO		10	11.6	2	2	2			83	8.3					0.757
Joseph Fourier univ.		Liq-Xe	2, 2, 50(z)	8	5	1	1	8									0.53	

表 4: 本検出器の基本性能期待値

項目	単位	性能値
3次元位置: $\sigma(x,y,z)$	mm	0.2
エネルギー分解能: σ for $E_\gamma = 511\text{keV}$	%	6
時間分解能 (光電子増倍管): σ	p sec	130

表 5: 液化・冷凍・純化システム概算

項目	単価 (円)	数量	価格 (円)
ターボ真空排気セット (ゲートバルブ付)	1,500,000	1	1,500,000
精製器 (MonoTorr, NuPure)	1,500,000	1	1,500,000
低温回収ボトル装置	200,000	1	200,000
マイクロ (ガス) ポンプ	150,000	1	150,000
パーティクルフィルター	150,000	1	150,000
弁、配管等 (高純度対応)	700,000	1	700,000
消耗品 (ヒーター、温度計等)	500,000	1	500,000
計			4,700,000

表 6: 平成 19 年度概算

項目	概算 (円)
液化・冷凍・純化システム	4,700,000
テスト用素材	500,000
TPC プロトプロトタイプ一式	2,000,000
エレクトロニクス-プレアンプなど	1,000,000
合計	8,200,000