

液体キセノンTPC-PET

真木晶弘

高エネルギー加速器研究機構 (KEK)

素粒子原子核研究所

1. はじめに

近年PETの普及が急速に進みつつあり、その性能の向上が社会的な期待となっている。この強い社会的期待に答えるべく種々の開発研究が精力的に進められて居る。PET装置の性能向上の目標としては、より高感度、高分解能の画像を得ることにある。一般に高分解能を達成するためには、ガンマ線の位置測定の精度、特に、ガンマ線の深さ方向の位置精度の改善が求められる。このために、従来の結晶蛍光体を用いる方式では、結晶の細分化がガンマ線の入射方向に対して直交する平面上の細分化に留まらず、深さ方向（ガンマ線の進行方向）についても、細分化が推し進められている。この結晶蛍光体の細分化にはおのずから限界があること（特に深さ方向）、及び、部品点数の増大による製造及び組み立てコストの増加が課題となる。

これとは異なる開発努力としては、ガンマ線測定媒体として、半導体を用いることが試みられているが、位置精度の改善は期待されるものの、読み出しチャンネル数の増大が懸念される。

これらの開発努力に対して我々は、高エネルギー物理学実験で開発され、長年に亘って用いられてきた測定器技術を基盤にして、高感度、高分解能PET装置の開発に着手した。それは、タイムプロジェクションチェンバー（TPC）と呼ばれる荷電粒子の3次元位置測定器と、最近開発された、液体キセノンの蛍光を用いた位置測定可能なガンマ線カロリメータを組み合わせたガンマ線測定器である。これにより、TPCの位置およびエネルギー測定精度の高さと、時間精度（高速計数性）を兼ね備えたPET装置が可能となる。

また、この新しいPET装置は液体を測定器媒体としているため、円周方向にモジュール化する必要はなく、シームレスな測定器であり、感度の改善も期待される。。

2. タイムプロジェクションチェンバー（TPC）

本PET装置の基幹技術となるタイムプロジェクションチェンバーは、図1に示す様に、円筒状容器にガスを満たし、筒の中央には円盤状の高電位陰極を設け、円筒両端面はゼロ電位の陽極とする。陽極は細分化されたパッド構造をなしており、到達電子の2次元位置が決定できる。陰極と陽極の間には一様電場を形成するための電極が円筒周囲に設けられている。TPCに荷電粒子が入射するとその軌跡に沿って、電離電子とイオンの対が形成される。電子は一様電場により陽極に導かれ電気信号を与える。電気信号が発生した陽極パッドの位置により、 $r-\phi$ 2次元平面上での荷電粒子の位置が測定される。一

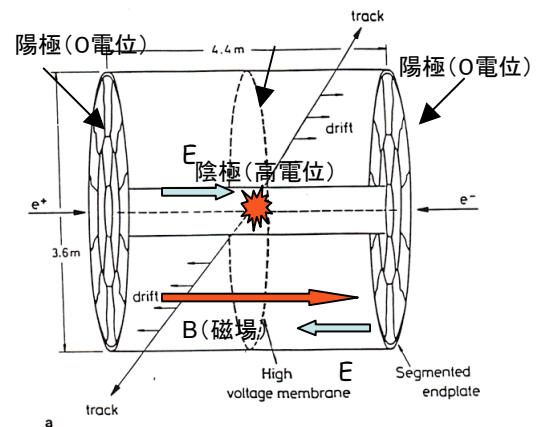


図1 ガス媒体TPCによる荷電粒子の軌跡測定

定電場の下では電子のドリフト速度が一定(気体媒体で $\sim 4 \text{ mm}/\mu \text{ sec}$ 、液体媒体で $\sim 2.2 \text{ mm}/\mu \text{ sec}$)であることが知られているので、容器軸方向 (z 方向) の位置は、粒子が容器に入射した時間を起点にして、電子が陽極に到達するまでに要した時間により測定される。これがタイムプロジェクションチェンバーと呼ばれる所以である。荷電粒子の容器への入射時間はTPC周辺に設置された高速計数装置により与えられなければならない。電子のドリフト速度は蛍光による時間測定に比べると遅く、比較的長いドリフト長を持った大型のTPCでは、荷電粒子の入射位置が全く特定されない場合、電離電子が完全に陽極に達する以前に別の荷電粒子が入射すると混乱が起これ、 z 方向の測定が不可能になる。実際には他の測定器により荷電粒子の位置はある程度特定されるので、その位置分解能の範囲外であれば次の荷電粒子が入射しても判別できるので、TPCは一定の高速測定も可能である[1、2、3]。

TPCは長らくガス媒体を用いて荷電粒子の軌跡測定に用いられてきたが、近年、測定媒体に液体希ガスを用いてガンマ線の位置およびエネルギーを高精度で測定する試みがなされるようになった。特にキセノンはその密度も $3\text{g}/\text{cm}^3$ と大きく、511keV 電子では 0.5mm 以下のレンジであり、ガンマ線の変換点は 0.5mm 以下の精度で測定することも可能である[4]。

液体キセノン中では電子を初めとする荷電粒子は電離電子を発生すると同時に、蛍光を発する。キセノンの蛍光は減衰時間が 2nsec および 30nsec と非常に短く高速計数に適している。参考のため表1にキセノンの蛍光体としての性質を結晶蛍光体のそれと比較してある。液体キセノンの蛍光体としての優れた性質を用いて、高速、高分解能(エネルギーおよび3次元位置)のガンマ線カロリメータが開発された。この蛍光を用いた液体キセノンカロリメータは、多数の光センサー(代表的には光電子増倍管)で捕らえられた蛍光の分布からガンマ線変換点の位置情報が得られ、位置精度こそ数ミリメートルとモデルートであるが、時間分解能は 0.1nsec 以下と非常に優れている[5]。

表1 PET用シンチレータ比較

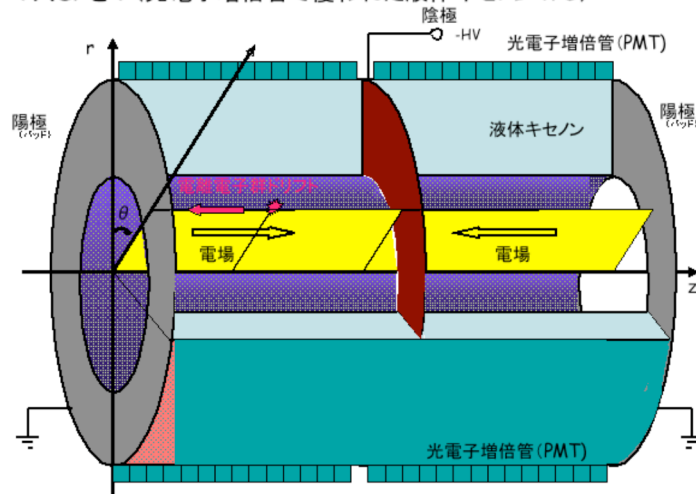
シンチレータ	Liq Xe	NaI:Tl	GSO	BGO	LSO	LGSO	LYSO	LaBr ₃
密度(g/cm ³)	3.06	3.67	6.71	7.13	7.4	6.5-7.3	7.25	5.29
蛍光減衰時間(ns)	2, 30	230	30-60	300	42	40-100	41	16
蛍光出力(相対値)	80	100	20-24	39367	40-80	40-80	80	130
発光波長 λ_{em} (nm)	175	415	430	480	420	420	420	380
屈折率(at λ_{em})	1.6	1.85	1.85	2.15	1.82	1.82	1.81	1.9
放射線強度(gray)		10^3	$>10^6$	10^{2-3}	10^5			
吸収潮解性	なし	強い	なし	なし	なし	なし	なし	あり
放射性	なし	なし	なし	なし	あり	あり	あり	なし
融点(°C)	-111.6	651	1950	1050	2150	2100	2100	783
へキ開	なし	なし	(100)面	なし	なし	(100)面	なし	なし
育成方法	—	BR	CZ	CZ, BR	CZ	CZ	CZ	BR

3. 蛍光読み出しを併用した液体キセノンTPCによるPET装置 (TXePET)

今回開発を目指す新しいPET装置は、電離電子を用いる液体キセノンTPCと、蛍光を用いる液体キセノンカロリメータを合体させたもので、概念図を図2として示したように、液体キセノンTPCの側面に光電子増倍管を敷き詰めた構造となる。信号の読み出しは電離電子信号および蛍光信号がそれぞれ独立にASIC/FPGAを介してパイプライン読み出しがなされ、一定期間それぞれの情報

が保持される。その間にそれらの情報のマッチングが行われ事象が組み立てられる。

図2 TXePET (光電子増倍管で覆われた液体キセノンTPC)



その動作は以下のようなになる。

PET装置の液体キセノンに1個のガンマ線が入射して、光電効果ないしはコンプトン効果により電離電子群が生成されると同時に多数個の蛍光光子が発生する。この蛍光光子は複数の光電子増倍管で捕らえられアナログ信号を発生する。同時にこの信号は事象の発生時刻となる(t_0)。これらの信号は直ちにデジタル化され、最大波高の光電子増倍管の近傍でクラスターが作られる。加重平均などによりクラスターの平均位置、クラスター参加光電子増倍管のエネルギーを足し合わせる事によりクラスターのエネルギーが求められる。これらは蛍光信号のクラスター情報 $S(i) \{r, \phi, z, t, E\}$ としてまとめられる。同時に生成した電離電子群は一樣電場に沿ってドリフトした後複数の陽極パッドに到達し電気信号を発生する。これらは蛍光信号同様デジタル化した上でクラスターを形成し、加重平均などで2次元位置を、また、クラスター参加パッドのエネルギーを足し合わせてクラスターのエネルギーを求める。これらはまとめて $T(k) \{r, \phi, z, t, E\}$ となる。この時点では電離電子群のTPC情報には z 位置情報は無いことに注意。蛍光情報とTPC情報のマッチングは、両情報の r, ϕ, E の値がそれぞれの分解能の範囲内で一致していること。その上で両クラスターの時間差が蛍光クラスターの z 値と分解能以内で一致しているかが問われる。これが一致すれば初めて単一のガンマ線として $G(m) \{r(k), \phi(k), z(k), t(i), E(k)\}$ が記憶される。時間情報以外は全てTPC情報が採用されていることに注意。この後は同様にして求めた、対抗する位置にある単一ガンマ線 $G(n)$ とのマッチング条件 $|t(m)-t(n)| < \delta t$ が試され、満足すれば消滅2ガンマ線の対として認識される。

蛍光情報と電離電子群のTPC情報の一致を要求することにより、蛍光信号の時間分解能以内に、その位置分解能の領域内に2個以上のガンマ線が入射した時以外は、2個の異なるガンマ線として識別され、PET装置全体として的高速計数能力は格段の改善が達成される。即ち、1 cm³ の液体キセノンが1 nsec以下の時間分解能を持った独立のガンマ線検出器として働く訳である。しかも、それぞれの空間分解能はTPCのそれ、即ち1 mm以下の分解能を持つものである。

4. 想定される実用機

蛍光光子の読み出しを併用した液体キセノン TPC を、ホールボディ PET の実用機として応用する場合、考えられるパラメータの一案は以下ようになる。また、図3はそのイメージである。

液体キセノンの体積： 140ℓ

内径 88 cmφ

(クライオスタット内径 80 cmφ)

外形 106 cmφ (DOI 9 cm)

(93%ガンマ線検出)

長さ 48 cm

(最大ドリフト長 104 μsec)

蛍光測定 (35,000 photons for 511keV)

光電子増倍管： 8 × 112 × 2 = 1792本

(1インチ径)

位置分解能 (FWHM)： 1 cm

時間分解能 (FWHM)： 0.5 nsec

同時計測時間 (FWHM)： 10 nsec

電離電子測定 (33,000 ion pairs for 511keV)

TPC： 印加電圧 48 kV

最大ドリフト時間： 110 μsec

位置分解能 (FWHM)： 0.5 mm

エネルギー分解能 (FWHM)： 14 %

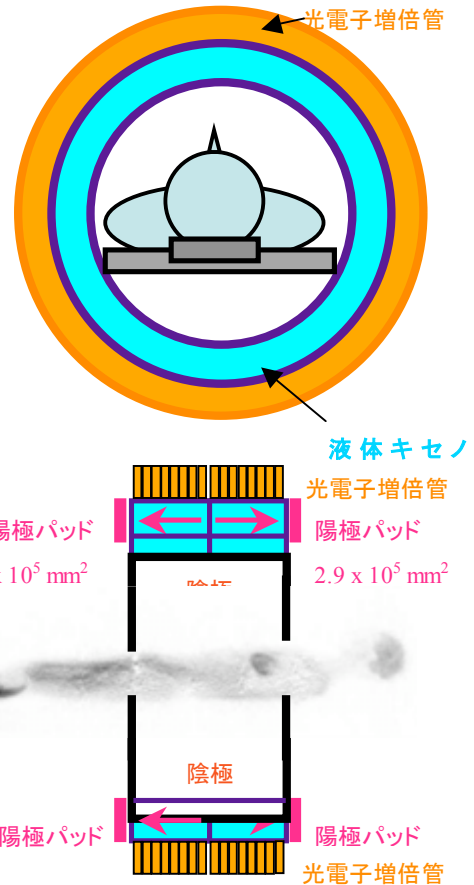


図3 実用機のイメージ

5. TxePET の特徴

液体キセノン TPC を基盤とし、蛍光測定を併用した PET 装置、TxePET の特徴は以下のように纏められる。

(a) TxePET の基盤技術であるタイムプロジェクションチェンバー (TPC) は、高エネルギー物理学実験に於いて長年に亘り使用されてきた、確立された技術である。

(b) 液体キセノン TPC を用いた電離電子の測定により、入射ガンマ線 (511 keV) に対して、DOI も含めた 3次元位置の高精度 (< 1mm) 測定が可能である。

(c) 複数の光センサーを用いて蛍光光子の分布を測ることで、入射ガンマ線 (511 keV) の 3次元位置を特定すると同時に、ガンマ線の入射時間を高精度で知ることが出来る。この入射時間は (b) の TPC に於いて、電離電子のドリフト時間を測るスタート時間となる。また、蛍光光子分布による大まかな位置の特定は、その高い時間精度により、TPC の高速動作を可能にするものである。

- (d) TPCのドリフト方向を体軸方向（z方向）に選ぶ事により、以下のような利点を有する。
- ① ドリフト方向に向って一様な断面形状を有し、一様電場の形成が容易である。
 - ② 円周方向にモジュール化する必要が無く、シームレスな配置が可能であり、感度の向上に貢献する。
 - ③ 体軸方向中央に高電圧陰極を配置することにより、陰極の両サイドにドリフト領域が形成され、比較的低い電圧で体軸方向に広い領域を覆うことが可能である。
 - ④ 将来MRIとの併用によるMRI-PETを考えた場合、体軸方向の磁場は、電離電子群のドリフトと矛盾せず、むしろ、位置測定精度を改善するなど、有利な点が考えられる。
- (e) 測定器媒体が液体であることにより、以下の利点がある。
- ① 形状の自由度が大きく、容器の形状により用意に測定器媒体の形状を設計できる。
 - ② モジュール化の必要が無いため、円周方向に不感領域がなく、また、体軸方向には中央の陰極部以外に不感領域が無いので、不感領域の極小化が容易で、高感度が実現され易い。
 - ③ 液体媒体は容器に流し込むだけで済み、媒体の支持も容易である。
- (f) 一般に、運転に人手が掛かるとして敬遠される低温液化ガスを使用するが、液体キセノンは、超伝導機器に使用される液体ヘリウム（運転温度4 K）とは大きく異なり、運転温度が約165 K（摂氏マイナス100度）と比較的高い温度であること、および、最近信頼性の高い小型パルス管冷凍機が開発され長期自動運転が容易に行える[6]。
- (g) 将来的には、開発研究の進展により以下のようなバックグラウンド除去能力の強化が期待できる。
- ① TPCの高い3次元空間分解能とエネルギー分解能を生かして、コンプトン散乱事象の再構成により、入射511 keVガンマ線の方向を決定する可能性がある。これにより、(i)目的臓器以外の箇所を発生源とするバックグラウンドガンマ線の排除、(ii)ガンマ線対の組み合わせにおいて、方向性の一致を要求することにより、誤ったガンマ線対の排除など、バックグラウンドの改善が期待される。
 - ② 蛍光光子測定の光センサーの時間精度の改善により、TOF-PETの実現も期待される。

6. 開発プロジェクトの経緯と今後の予定

平成18年度に、高エネルギー加速器研究機構（KEK）素粒子原子核研究所の有志と、放射線総合医学研究所（NIRS）の有志により基本コンセプトの構築と、コアグループの結成がなされた。続いて、平成19年度には、素粒子原子核研究所測定器開発室認定プロジェクトに取り上げられ、開発費、実験室などの支援を受ける。但し、実験室は12月より使用可能となる予定。その後、佐賀大学理工学部、横浜国立大学工学部のグループが参加し、グループは拡大中である。現状は、低温設備の整備、KEKエレクトロニクスグループによる読み出し回路の開発整備、プロト・プロトタイプ的设计発注が進められている。今年度中には基本性能の測定を終える予定。その結果に基づき、平成20年度にはプロトタイプ的设计・製作を行い実証試験を行いたい。最短で開発が進めば、平成21年から22年には1号機の完成を見たいと考えている。興味をお持ちの方の参加を歓迎する。

参考文献

- [1] Nygren, D.R. : The Time Projection Chamber: A New 4π Detector for Charged Particles. PEP-0144, (Received Dec 1976). 21pp. In *Berkeley 1974, Proceedings, PEP Summer Study*, Berkeley 1975, 58-78.
- [2] Nygren, D.R., Marx, D.R.: The Time Projection Chamber. Phys.Today 31N10:46-53,1978.
- [3] ALICE TPC Collaboration (P. Glassel for the collaboration): The ALICE TPC: An innovative device for heavy ion collisions at LHC. Nucl.Instrum.Meth.A572:64-66, 2007.
- [4] E. Aprile, A. Curioni, V. Egorov, K.L. Giboni, U. Oberlack, S.Ventura, T. Doke, K. Takizawa, E.L. Chupp, P.P. Dunphy,: A liquid xenon time projection chamber for γ -ray imaging in astrophysics: present status and future directions, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 461 (2001) 256-261.
- [5] Baldini, A., et al.: Absorption of scintillation light in a 100 liter liquid xenon γ -ray detector and expected detector performance. Nucl. Instr. Meth. A 545 (2005) 753 – 764.
- [6] Haruyama, T., et al.: Development of a high-power coaxial pulse tube refrigerator for a liquid xenon calorimeter. Advances in Cryogenic Engineering Vol.49 p1459-1466, 2003.