

(14) 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

高エネルギー物理学の世界では、高エネルギー粒子の反応により生成される多数の荷電粒子および中性粒子を、大立体角にわたり、精度良く測定する努力がなされてきた。その結果、多くの優れた粒子測定器が開発された。それら測定器の一つに、TPC (Time Projection Chamber) と称される測定器がある。TPC は 1970 年代に実用化されたガス・チェンバーで、荷電粒子の軌跡を 3 次元的に記録できる粒子測定器として、多くの高エネルギー実験に用いられ、改良が加えられてきた。最近は、気体ガスに代えて、液体希ガスを用いても同様の動作が可能になり、ガンマ線の 3 次元測定器として注目を集めている。

一方、PET の世界では、位置精度の高度化を目指して、あらゆる工夫が試みられている。新しいシンチレータの開発、シンチレータの細分化とその読み出し方法などである。特に、ガンマ線反応点の深さ方向の位置精度が最終イメージの鮮明さを制限している。従来の固体シンチレータを用いてこれらの問題を解決するには、大変な労力と、経費を必要とすると思われる。

我々は、固体シンチレータ PET の抱えるこれらの問題は、液体キセノン TPC を応用することによって解決されるものと信じ、その開発に着手することにした。

2. 液体キセノン TPC-PET

TPC は一様電場の中にガスまたは液体媒体を詰め、荷電粒子により生成される電離電子を、2 次元位置を保ったまま測定器端部の陽極まで移動させる測定器である。電場の軸方向の位置は反応点から陽極までの移動に要した時間を持って知ることができる。この電子の移動速度(V)は、液体キセノンの場合で $V=2.3 \text{ mm}/\mu\text{s}$ と比較的遅く、移動距離が長い場合計数率に難点があるとされていた。しかし、この問題は TPC 以外の測定器により電離発生点の大まかな位置を測定できれば解決される。われわれは電離電子の測定に加えて、電離と同時に発生する蛍光を複数の光電子増倍管で捕らえることにより、ガンマ線の反応点を押さえる。高速信号である蛍光の検出は反応点の位置情報のみではなく、TPC が必要とする反応発生時間情報も提供する。

PET 用 TPC として開発される測定器 (TXePET と称する) は、図 1 に示す構造を持つ。測定器媒体となる液体キセノンは、同心円筒状のクライオスタットに満たされる。クライオスタット内部両端には陽極 (0 電位)、中間に陰極 (高電圧) を備える。陽極はパッド構造になっており、裏面に取り付けられたエレクトロニクスにより個々のパッド信号が読み出される。電極間の空間は電場整形用電極により一様な電場が形成される。従って、入射ガンマ線の反応により生成された電離電子は、クライオスタットの軸と平行な電場に沿って陽極まで移動する。各パッドの信号分布より径方向(r)と方位角方向(θ)の 2 次元位置を知ることができる。残る軸方向(z)の位置情報は電離電子が陽極まで到達するに要した時間でもって知ることが出来る。また、クライオスタット内面外周は光電子増倍管で覆われており、入射ガンマ線の反応時に発せられる蛍光が複数の光電子増倍管で捕らえられる。これら光電子増倍管で捕らえられた蛍光の強度分布

から反応点の3次元位置(r, θ, z)が1センチメートル(FWHM)以下の精度で得られる。同時に、光電子増倍管の信号はイベントのタイム・スタンプであり、電離電子のドリフト時間の測定に用いられる。

TXePET (光電子増倍管で覆われた液体キセノンTPC)

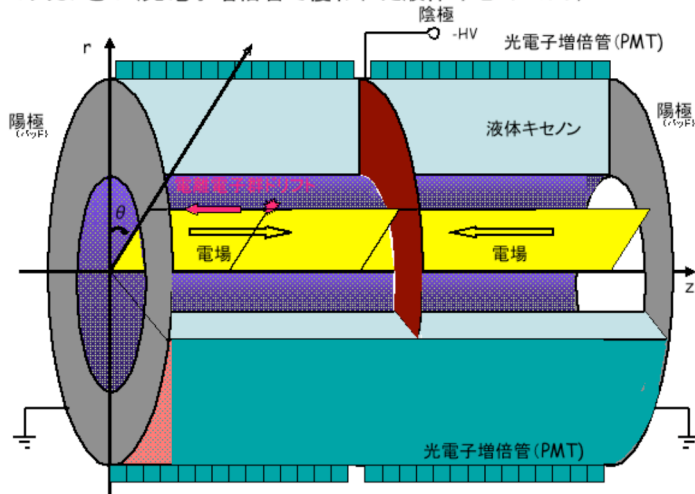
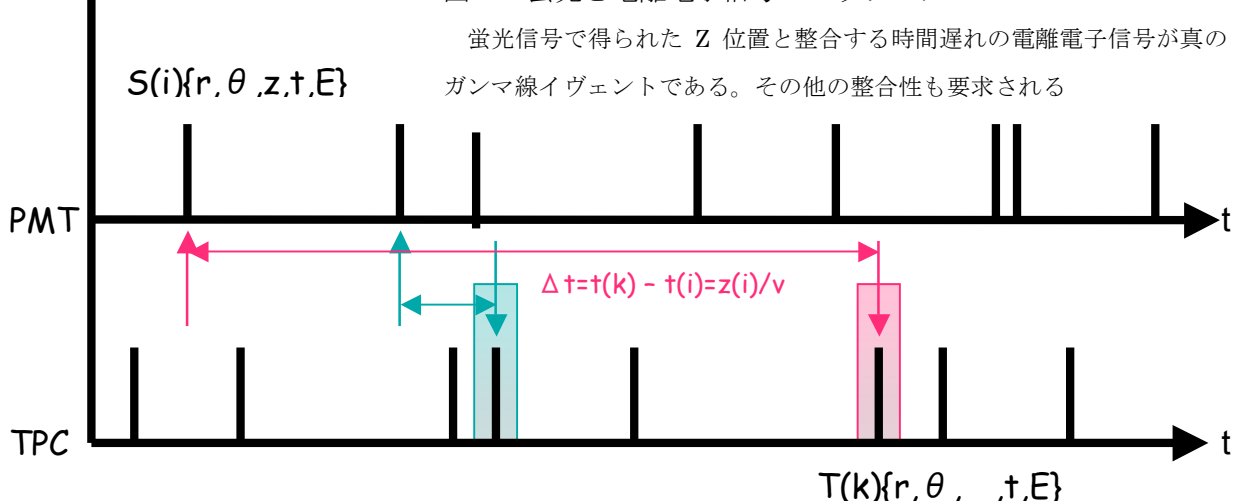


図1 TXePET の概念図

同心円筒クライオスタットに液体キセノンが満たされている。中心に高電圧の陰極、両端に0電位の陽極(パッド構造)。両電極間は補助電極により一様電場が形成されている。液体キセノンの外周は光電子増倍管で覆われている。ガンマ線の反応により発生する蛍光は光電子増倍管で捕らえ、電離電子は陽極で捕らえる

本装置のもう一つの重要な開発要素は、信号処理のためのエレクトロニクスである。これについても、高エネルギー物理学実験で開発されてきた大容量データの高速処理技術を応用する。陽極および光電子増倍管からの信号は不感時間なく読み出され、時間(t)、光量(P_a : 光電子増倍管)、電荷(C_b : パッド陽極)情報として、高密度 ASIC/FADC/FPGA で増幅、デジタル化、ベースライン差引き、分布の加重平均、エネルギー選別などの処理を施した後 SRAM に送られる。この段階では、電離電子情報 $T(k) \{r, \theta, z, t, E = \sum C_b\}$ と蛍光情報 $S(i) \{r, \theta, z, t, E = \sum P_a\}$ は、それぞれ独立のイベントである。次にこれら2種類のイベントの間のマッチングが要求される。即ち、1) $T(k) \{r, \theta, E\} \approx S(i) \{r, \theta, E\}$ 、2) $z(k) = V(t(k) - t(i)) \approx z(i)$ 、を満たすイベントが真のガンマ線イベントとされる。そのエネルギーと位置は精度の良い電離電子情報より与えられ、時間は蛍光情報で与えられる。こうして得られたガンマ線イベント情報 $G(j) \{r=r(k), \theta=\theta(k), z=V(t(k)-t(i)), t=t(i), E=E(k)\}$ は、PC のメモリーに蓄積される。その上で、おなじ時間(t)を持つ2つのガンマ線イベントがペアとして扱われ、イメージ再構成に使われる。

図2 蛍光と電離電子信号のマッチング



蛍光信号で得られた z 位置と整合する時間遅れの電離電子信号が真のガンマ線イベントである。その他の整合性も要求される

Additional requirement: $S(i) \{r, \theta, E\} \approx T(k) \{r, \theta, E\}$

3. 想定される実用機のパラメータ

液体キセノン TPC を主測定器としたホール・ボディ PET として考えられる諸元は以下のようになる。

液体キセノンの体積 140ℓ

内径	88 cm	(クライオスタット内径 80 cm)
外径	106 cm	(DOI 9 cm) (93%ガンマ線検出)
長さ	48 cm	(FOV) (最大ドリフト時間 104 μsec)

ほぼ不感領域無しに複数ユニットの接続が可能

光電子増倍管： 8x112x2 = 1792本

TPC： 印加電圧 48 kV

位置分解能(FWHM)： 1 cm

3次元位置(r, θ, z)精度(FWHM)： 0.5 mm

同時計測時間： 10 nsec

エネルギー分解能(FWHM)： 14% for 511 keV

4. TXePET の特徴

TXePET の特徴は以下のように整理されるであろう。

- ・ 長い開発の歴史を持つ高エネルギー物理学実験で確立された技術を多く応用している。
- ・ 3次元位置精度に優れた液体キセノン TPC を主体とした測定器である。
- ・ 測定器媒体が液体であるため、形状の自由度が大きく、不感領域の極小化が容易である。また媒体の、支持が容易である。
- ・ 電離電子のみでなく同時に発生される蛍光を測定することにより、イベントに時間スタンプを押すと同時に、イベントの大まかな位置を出すことにより、高速計数を可能にしている。
- ・ 電離電子のドリフト方向を体軸方向(z)に取ることにより、ほとんど不感領域無しに大立体角を覆うことが可能となり、感度の向上が望める。また、将来、MRI との共用も可能である。
- ・ 高度なソフトウェアの開発によるコンプトン・スペクトロメータとしての運用、光センサーの改良による TOF-PET としての運用などにより、バックグラウンドの大幅な除去が期待される。

5. 開発プロジェクトの現状

昨年度、高エネルギー加速器研究機構(KEK)、放射線総合医学研究所の有志により、プロジェクト・グループが発足した。今年度に入り、佐賀大学、横浜国立大学が参加しグループは成長しつつある。また、今年度からは、KEK 素粒子原子核研究所の測定器開発室の下のプロジェクトとして認定を受け、小額ではあるが予算も手当てされた。現在は、プロト・プロトタイプ的设计を進めると同時に、低温装置(冷凍機、ガス精製システムなど)の整備、テスト用クライオスタットなどの準備を進めつつ、8月末に予定されている新実験室での実験開始に備えている。

* 本プロジェクトは以下のメンバーによる共同研究です。

高エネルギー加速器研究機構	田内利明、田中秀治、春山富義、幅淳二、真木晶弘
放射線医学総合研究所	熊田雅之、富谷武浩、寅松千枝
佐賀大学	杉山晃、東貴俊
横浜国立大学	中村正吾