

# 次世代 PET

液体キセノンタイムプロジェクト  
チェンバー (TPC) を用いた TXePET

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所

助教授 田内利明、教授 真木晶弘、教授 春山富義

放射線医学総合研究所・物理工学研究部

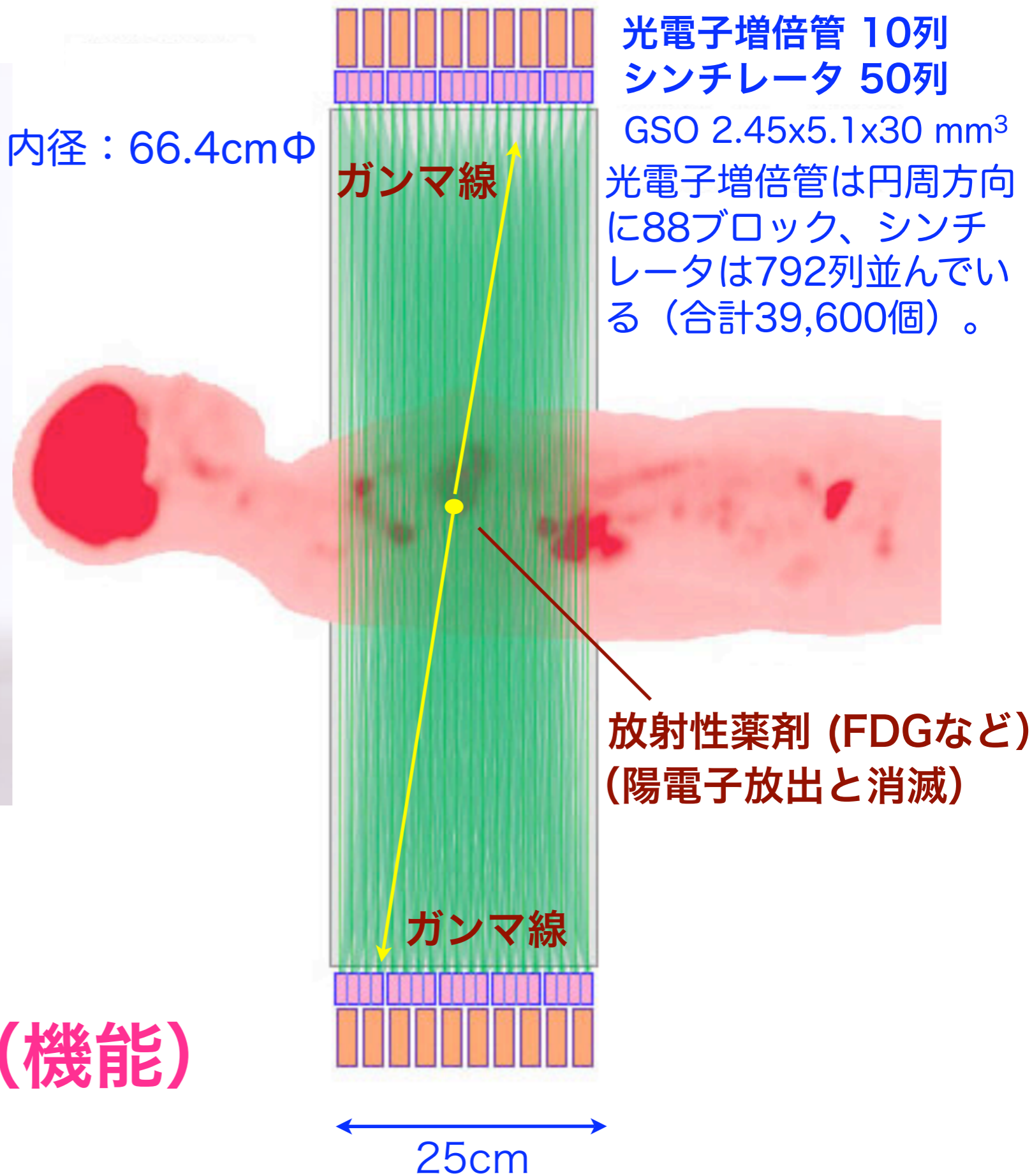
主任研究員 熊田雅之、協力研究員 富谷武浩

# 例：PET (陽電子放出断層撮影)



島津製作所：Eminance-G

内径：66.4cmφ



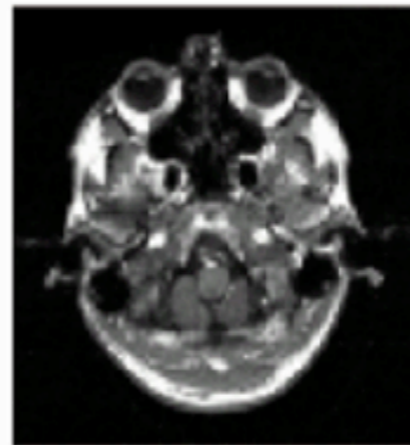
がんの早期発見  
分子イメージング (機能)

# いろいろの医療用断層撮影法

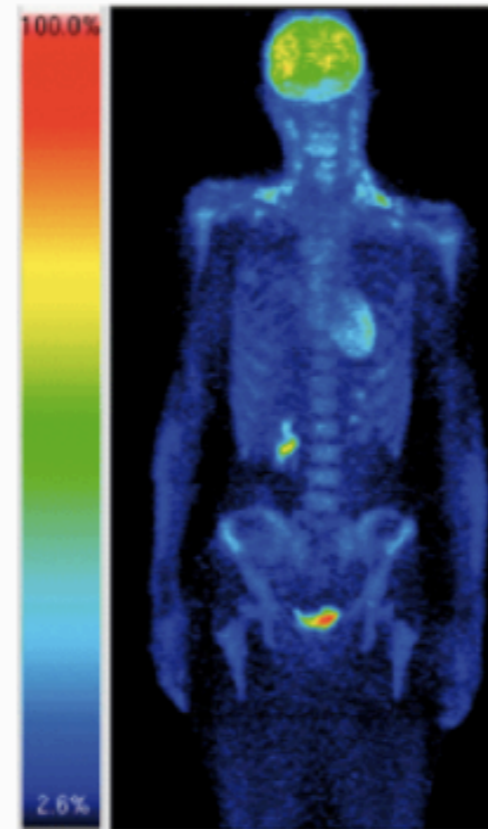
CT  
X線コンピュータ断層撮影  
Computer-Tomography



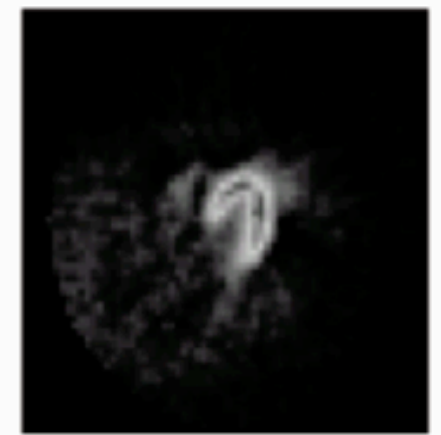
MRT  
磁気共鳴  
Magneto-Resonance-  
Tomography



PET  
陽電子放出  
Positronen-Emissions-  
Tomography



SPECT  
単光子放出  
Single-Photon-Emissions-  
Computed-Tomography

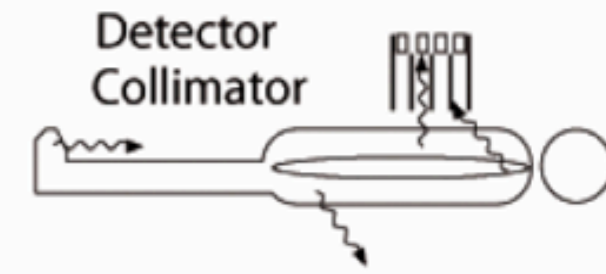
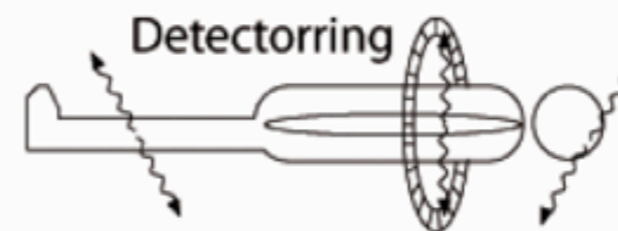
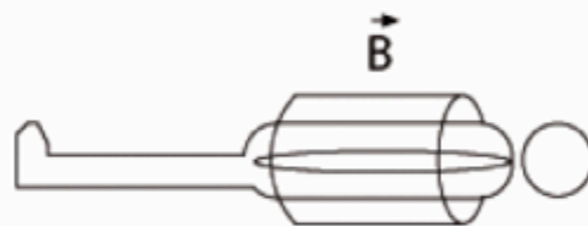
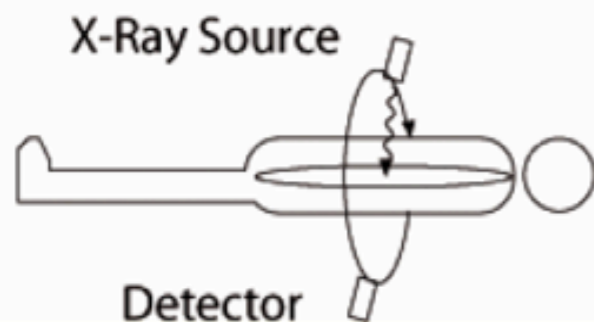


Resolution: 0,5 - 1 mm      1 mm      5 mm      5 mm  
Radiation Dose: ~10 mSv      0 mSv      ~5 mSv      ~3 mSv  
(flight ~0,05)      放射線吸収線量 (5mGy, 5mJ/kg, 50MHz/10分)

Anatomy  
解剖学

均一ソレノイド磁場

Metabolism  
代謝



# PETの開発課題

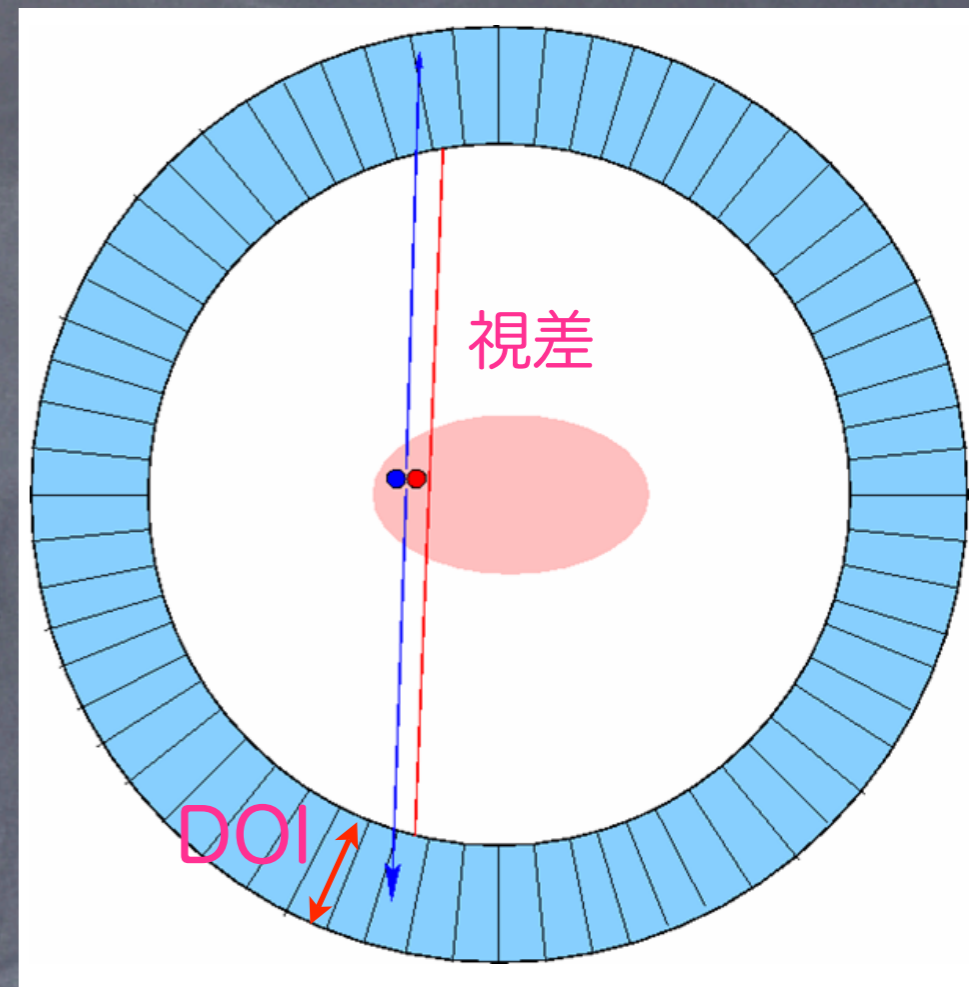
- 解像度の向上
- 感度の向上
- 雑音の除去

# 従来技術のアプローチ

- 多光量、高速、非潮解性結晶の開発
- 結晶サイズの細分化
- 径方向位置情報(DOI)による画像歪みの解消  
：結晶シンチレーターの多層化
- パッキング率の改善
- 2光子間の時間差測定(TOF)による偽信号の排除
- 多チャンネル高速読み出し回路の開発
- 画像処理プログラムの開発

# 従来技術の問題点

- 粗いDOIによる画質の低下
- DOI方向の分割をこまかくすると、結晶数が増え、したがって、煩雑さ・複雑さの増加によるコスト増
- 結晶間の反射材仕切など隙間による、感度の低下やばらつき
- 磁場中での使用の困難さ (PET-MRI応用の困難)

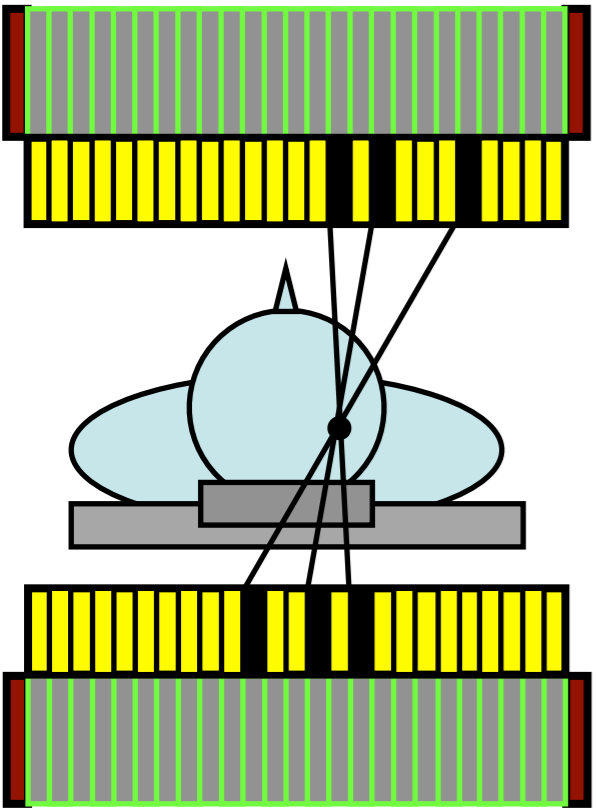


# TXePETの開発戦略

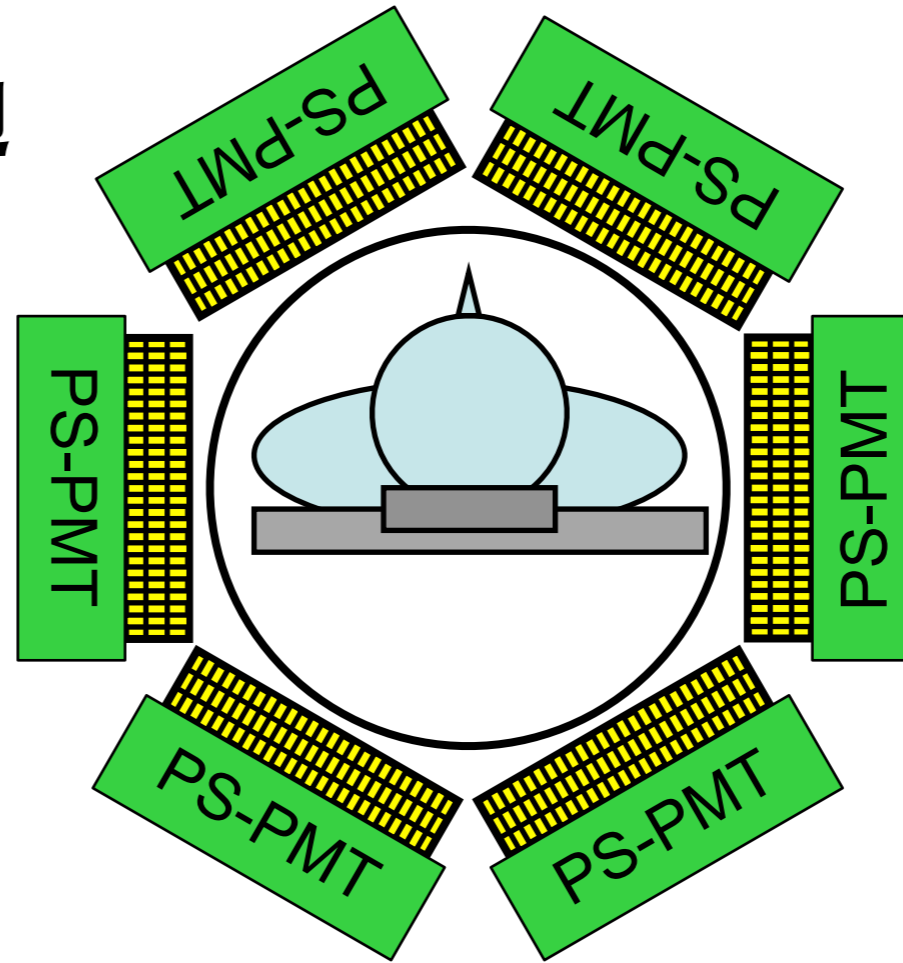
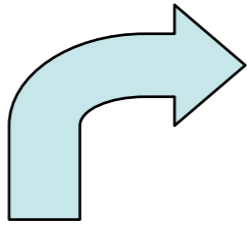
- 高エネルギー実験で培われた検出器技術を基礎とする
- 液体キセノンTPCによる511keV光子の3次元位置測定  
：DOIを含めて1mm (FWHM) 以下の精度 (電離電子)
- シンチレーション 光の分布測定による反応の3次元位置  
推定と事象発生時間の決定 (シンチレーション)
- 体軸方向のドリフト：一様電場、広いFOV、MRIとの併用
- 高速なシグナルとTOFによる偽信号の排除
- 多チャンネルで高速読み出しエレクトロニクスを開発
- 画像処理プログラムの開発

# PETの開発経過

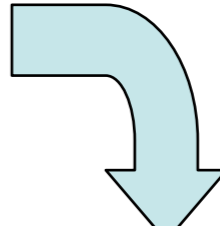
- ・TOF-PET
- ・TPC-PET
- ・Compton Telescope



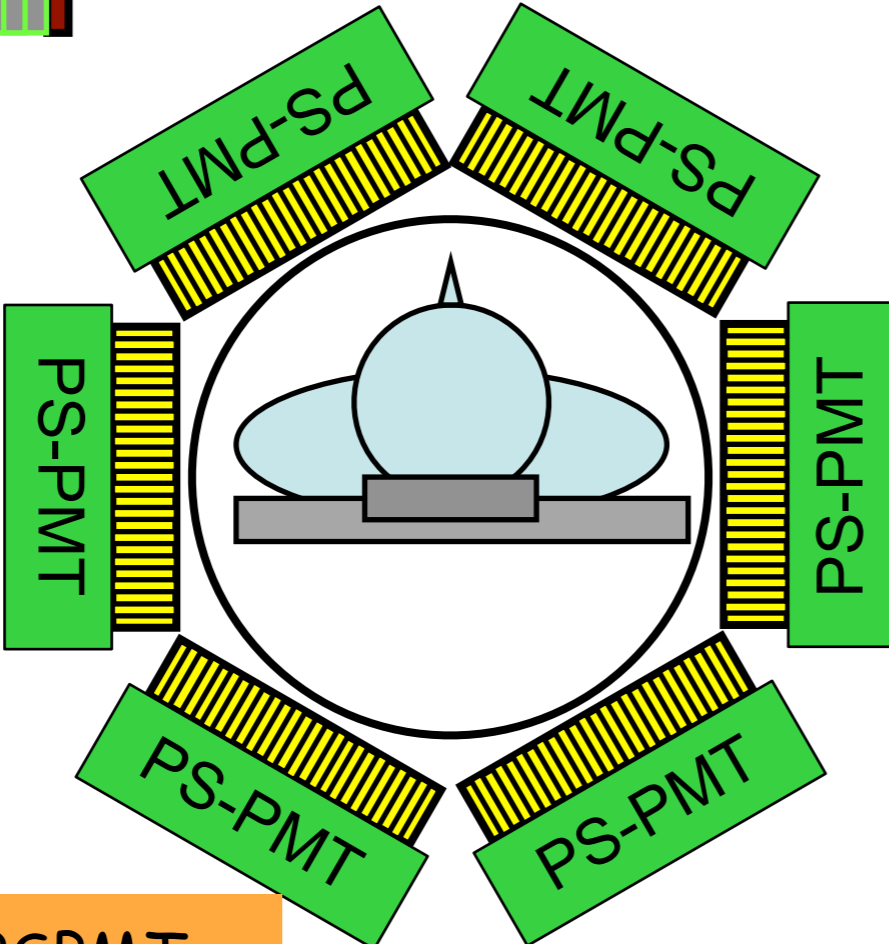
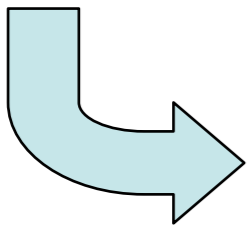
Crystal-PMT



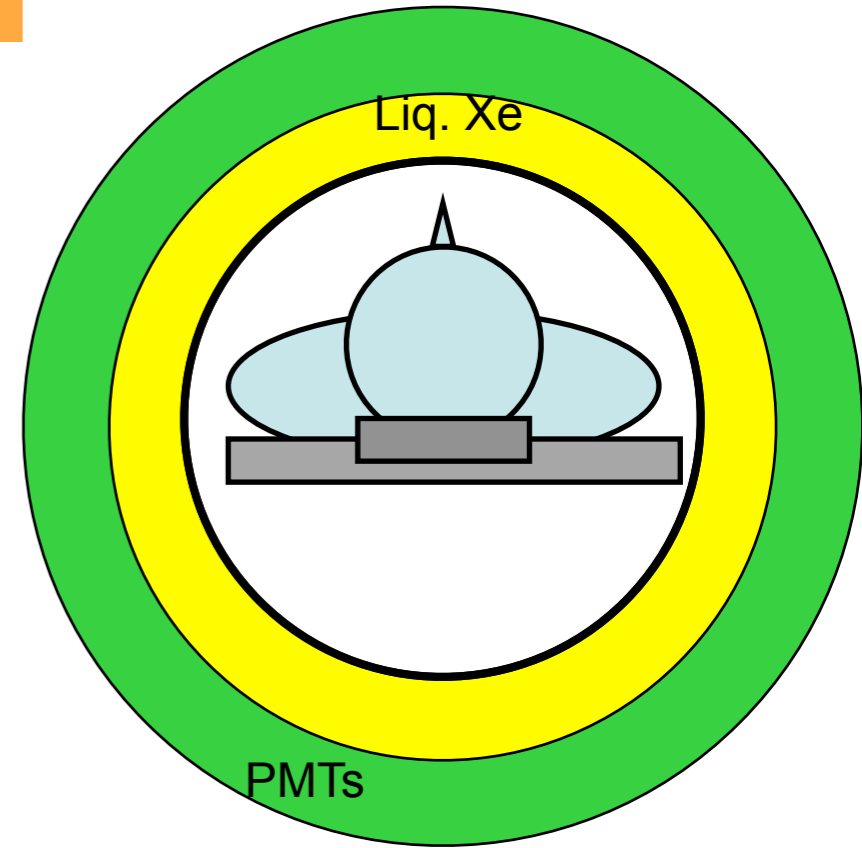
DOI-PET



TXePET

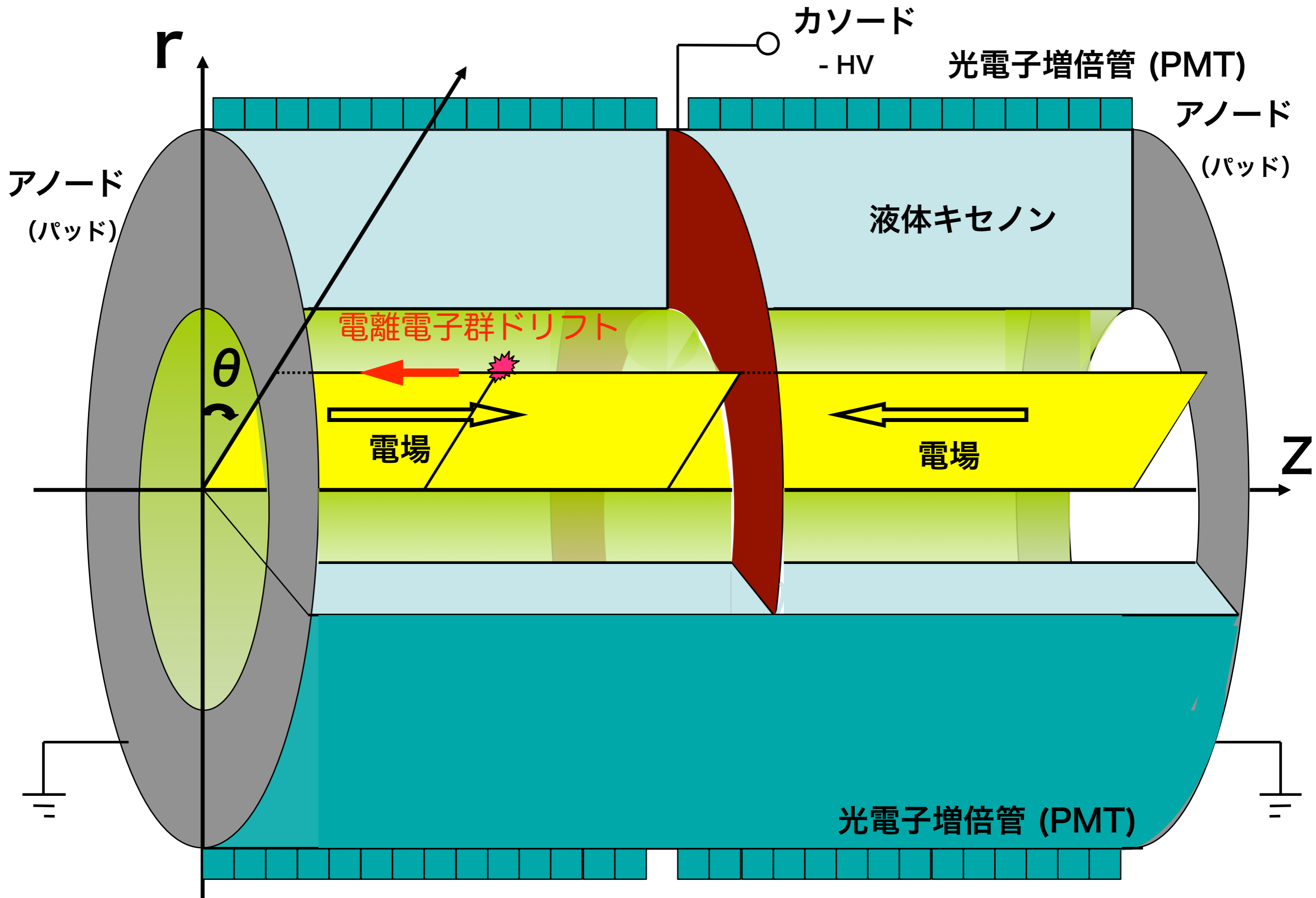


Small crystal-PSPMT





# TXePET:分割の無い液体キセノンTPC



# 液体キセノンの特性

$\gamma$ 線や荷電粒子の通過でシンチレータ光と電離電子が生成される

## シンチレータ光 (蛍光)

正確な時間, エネルギー, 位置  
光電子増倍管

APD  
(Avalanche Photodiodes)

## 電離電子

正確な位置, エネルギー  
イオンチェンバー, 低ノイズ増幅器

GEM : 液体, 2相キセノン  
(Gas Electron Multiplier)

511 keVの $\gamma$ 線の反応 = 22% 光電効果 + 78% コンプトン散乱

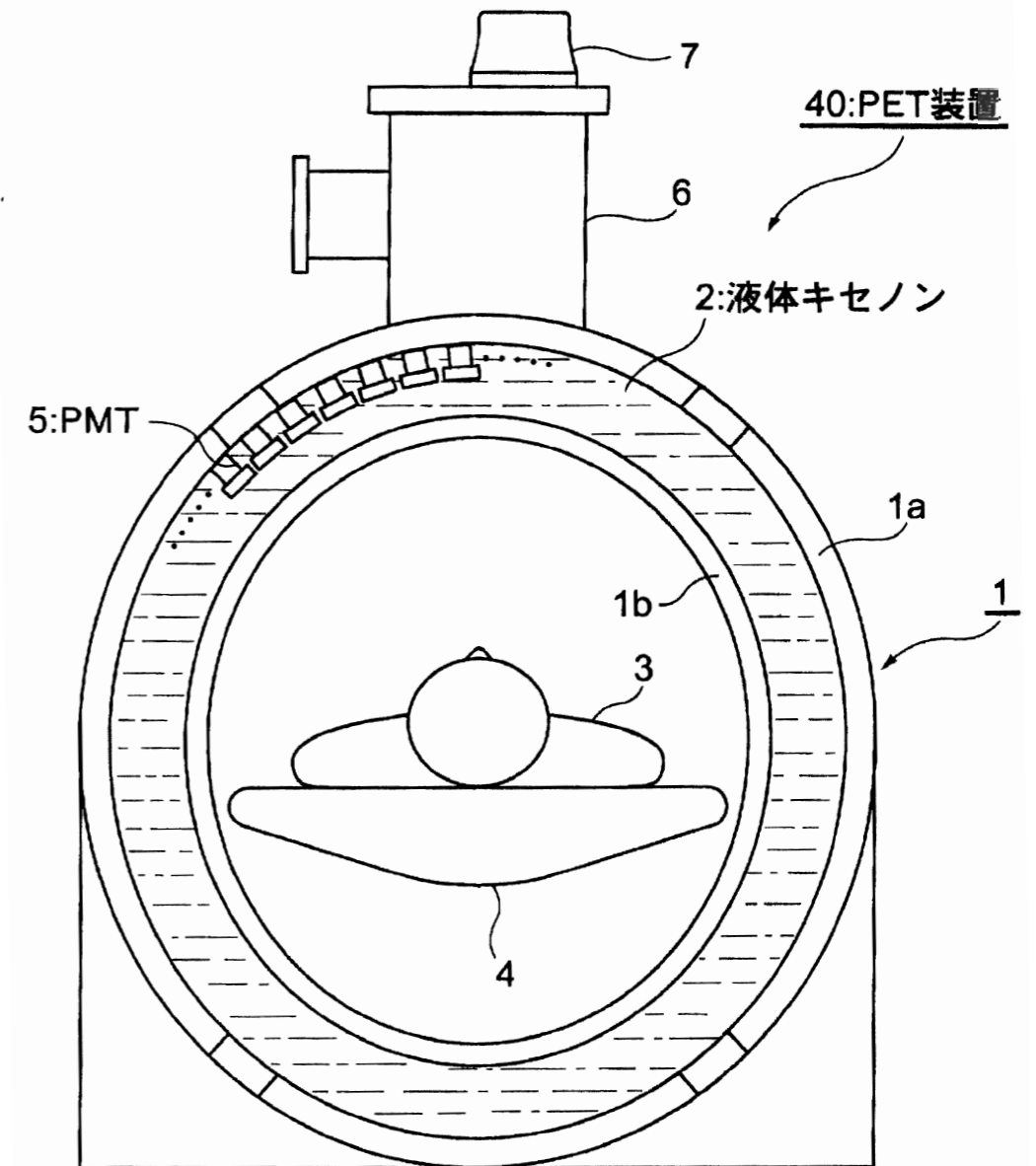
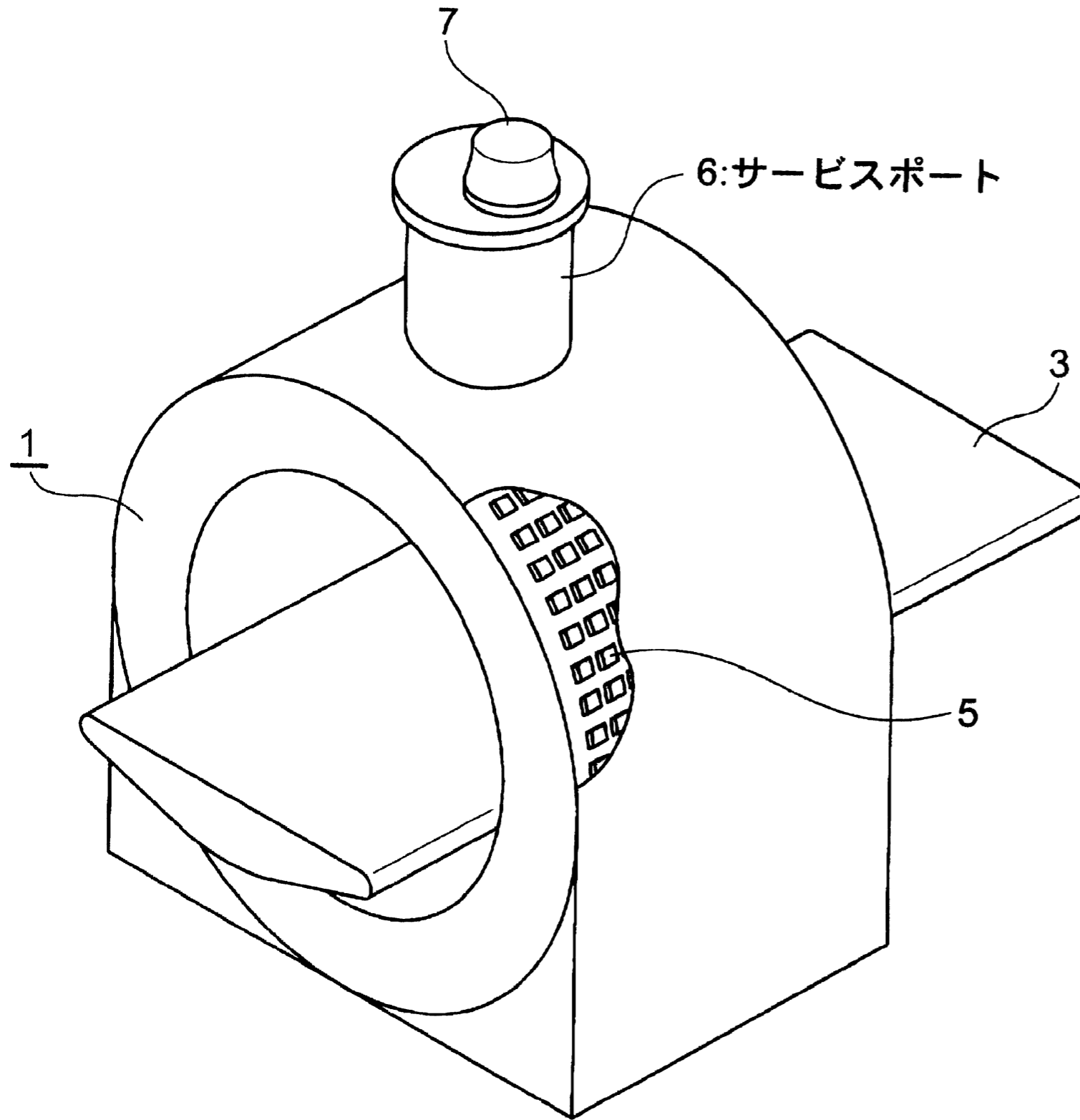
22,000個光子数/511 keV, 減衰時間3nsと27nsの高速な175nmVUV光

30,000 電離電子数/511keV, 0.5mmの平均射程

電子のドリフト速度 2.3mm/ $\mu$ s (一様電場 2kV/cm 中)

| シンチレーター                           | GSO<br>$\text{Gd}_2\text{SiO}_5$ | LSO<br>$\text{Lu}_2\text{SiO}_5(\text{Ce})$ | 液体キセノン  |
|-----------------------------------|----------------------------------|---|---------|
| 密度 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )     | 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 ( $^{\circ}\text{C}$ )         | 1950                             | 2050  | -111.75 |
| PET用結晶<br>( $\text{mm}^3$ )       | 2.45x5.1x30                      | 4x4x20                                      | 自由      |
| ドリフト速度( $\text{mm}/\mu\text{s}$ ) | X                                | X   | 2.2     |

# TXePETイメージ (液体キセノン検出装置のみ)

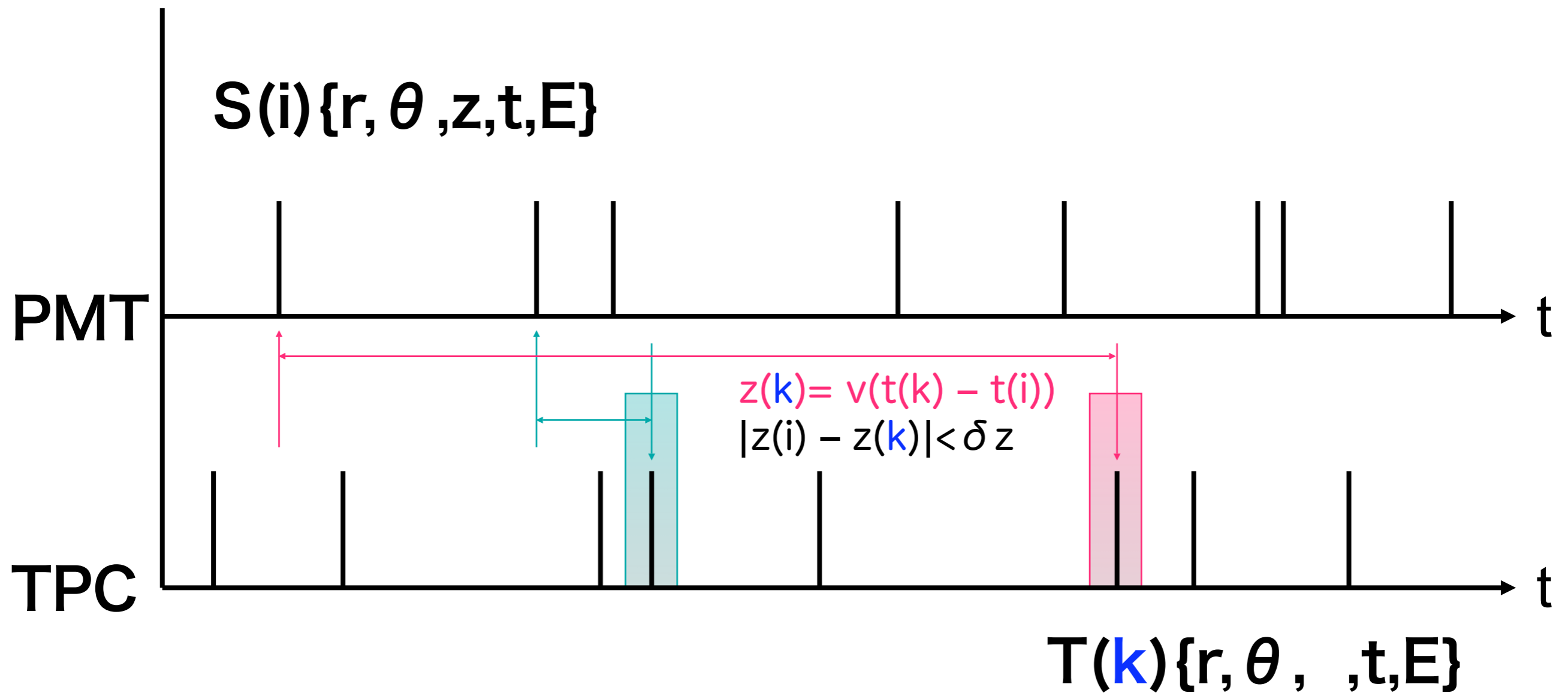


# データ処理・解析 (ASIC/FPGA/PC)

| シンチレーション (PMT)  | 電離電子 (TPC)  | マッチング  |
|---|---|--|
| <p>i. デジタル処理</p> <p>ベースラインノイズ除去</p> $P(ij)\{\theta, z, t, E\}$ <p>ii. クラスタ化</p> $ t(ij) - t(ij\pm)  < \delta t$ $ \theta(ij) - \theta(ij\pm)  < \delta \theta$ $ z(ij) - z(ij\pm)  < \delta y$ <p>iii. エネルギー、位置情報</p> $E(i) = \sum E(ij)$ $\theta(i) = \sum E(ij) \theta(ij) / \sum E(ij)$ $z(i) = \sum E(ij) z(ij) / \sum E(ij)$ $r(i) = f(\theta(ij), z(ij), E(ij))$ $S(i)\{r, \theta, z, t, E\}$ | <p>1. フロントエンド回路 (ASIC)</p> <p>2. デジタル処理</p> <p>ベースラインノイズ除去</p> $I(kl)\{r, z, t, E\}$ <p>3. クラスタ化</p> $ t(kl) - t(kl\pm)  < \delta t$ $ \theta(kl) - \theta(kl\pm)  < \delta \theta$ $ r(kl) - r(kl\pm)  < \delta r$ <p>4. エネルギー、位置情報</p> $E(k) = \sum E(kl)$ $\theta(k) = \sum E(kl) \theta(kl) / \sum E(kl)$ $r(k) = \sum E(kl) r(kl) / \sum E(kl)$ $T(k)\{r, \theta, z, t, E\}$ | <p>5. (3次元+1)マッチング</p> $S(i)\{r, \theta, z, t, E\}$ $ E(i) - E(k)  < \delta E$ $ r(i) - r(k)  < \delta r$ $ \theta(i) - \theta(k)  < \delta \theta$ $z(k) = v(t(k) - t(i))$ $ z(i) - z(k)  < \delta z$ $T(k)\{r, \theta, z, t, E\}$ <p>6. 光子の状態</p> $G(m)\{r(k), \theta(k), z(k), t(i), E(i) \text{ or } E(k)\}$ <p>7. 2光子の同時計数</p> $ t(m) - t(n)  < \delta t$ <p>8. 事象</p> $H(a)\{G(m), G(n)\}$ |

# PMTとTPCのマッチング(3次元+1)

$v=2.2 \text{ mm}/\mu\text{sec}$



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

# TOF法による偽信号の除去

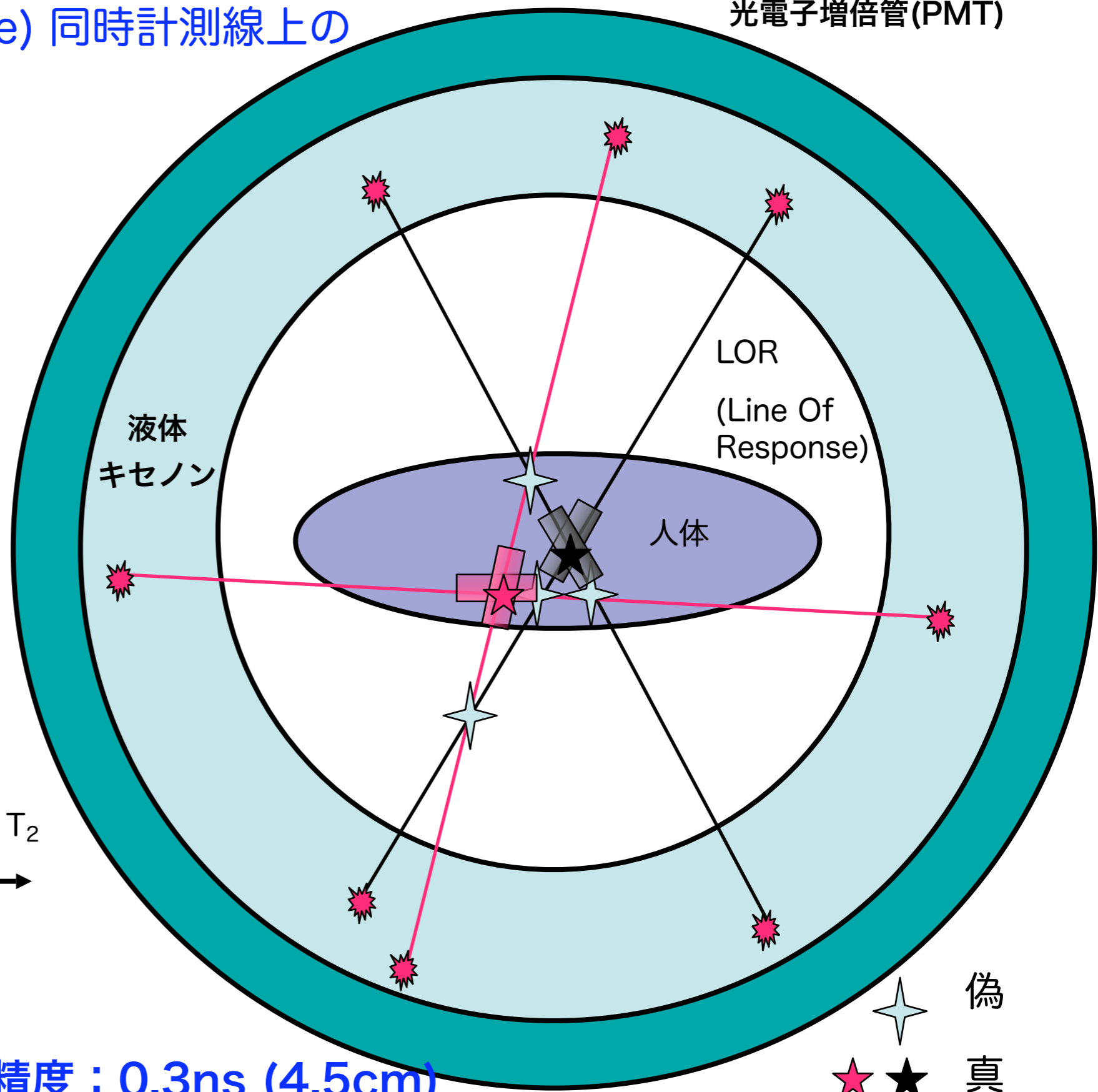
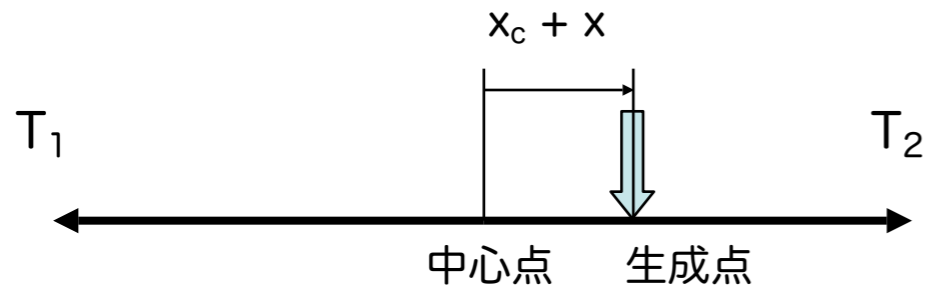
LOR (Line Of Response) 同時計測線上の  
2光子生成場所の限定

光電子増倍管(PMT)

TOF (Time Of Flight) :  
同時計数された2つの  
PMTシグナル間の時間差  
( $= \delta t$ )

光速 = 30cm/nsec

$$x = \frac{c}{2} (T_1 - T_2) \pm \frac{c}{2} (\delta T)$$



高速なシンチレーション光

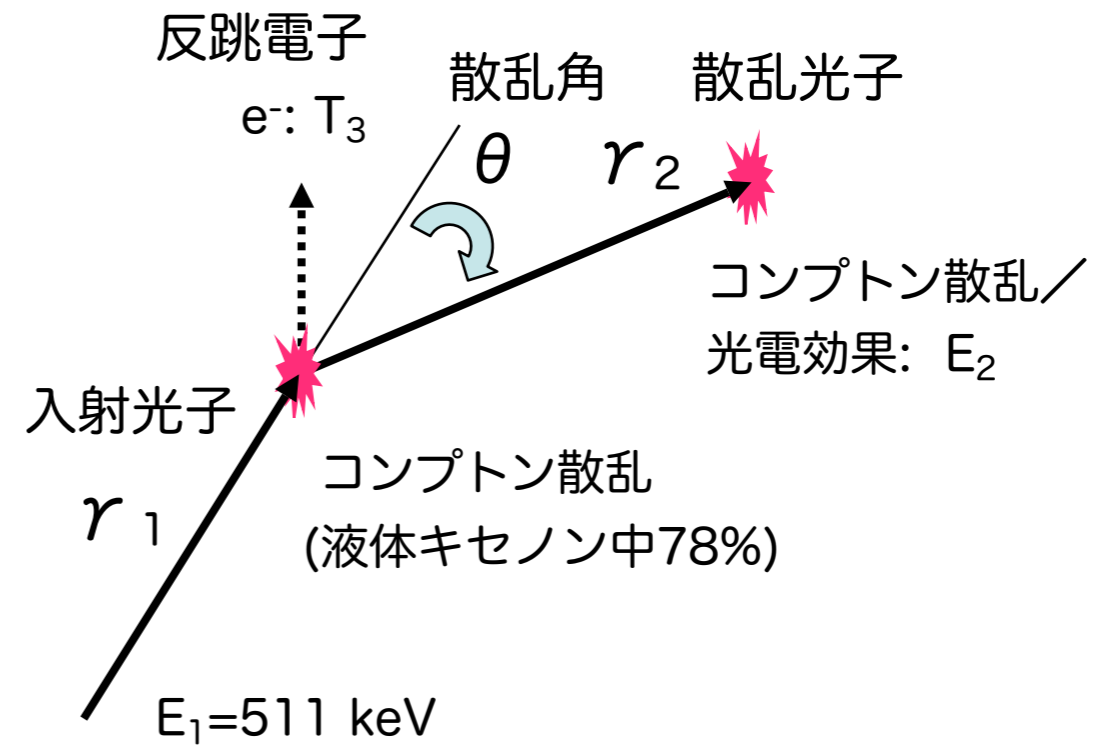
と高速光センサーが必要 → 精度 : 0.3ns (4.5cm)

偽  
真

# コンプトンテレスコープ

## コンプトン散乱事象による 光子の入射角度の測定

$$\cos\theta = 1 - \frac{m}{E_2(1 + E_2/T_3)}$$
$$E_1 = E_2 + T_3$$



入射光子エネルギー:  $E_1 = E_2 + T_3 = 511 \text{ keV}$

散乱光子エネルギー:  $E_2$  (測定値)

散乱角:  $\theta$

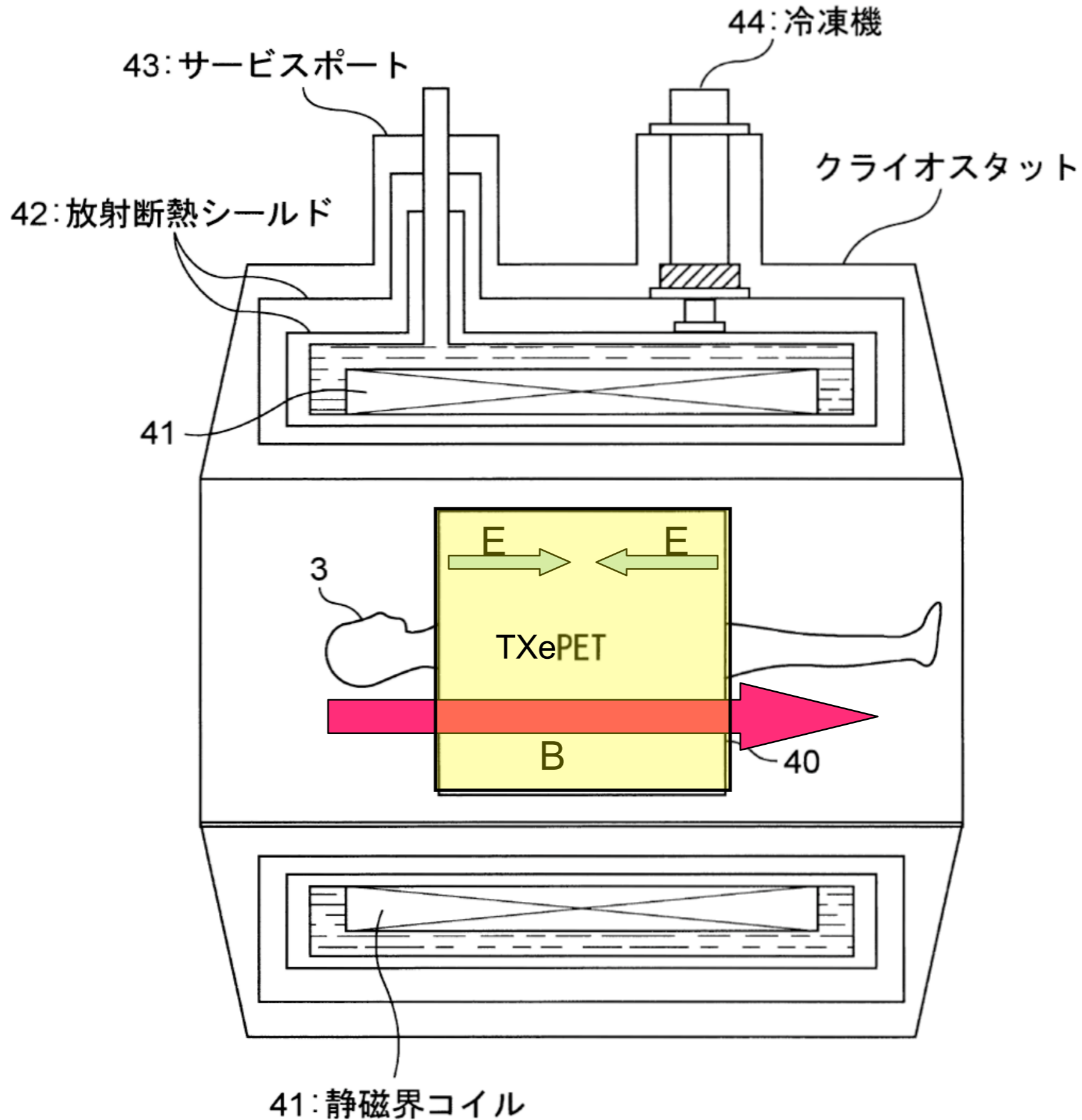
反跳電子エネルギー:  $T_3$  (測定値)

2つの反応点の3次元座標:  $x_1, x_2$  (測定値)

電子質量 :  $m$  (511keV)



# MRIとPETとの併用可能



# TXePETの利点／まとめ

- DOIを含めた精度よい3次元位置測定による解像度向上  
液体キセノンTPCとシンチレーション光検出器
- 不感領域のない大立体角による感度向上  
動態(ダイナミック)測定への展望を大きく開くもの
- コンプトンテレスコープとTOF法による雑音除去可能
- MRIとPETの併用可能

# 想定される業界

- 日本のPET施設； 150施設

(PETサマーセンター調べ、2007年1月15日時点)

- 医療診断装置分野：日本の寄与・マーケットシェアはひじょうに小さい

- 市場規模：シーメンス biograph 6 定価13億7千万円より 販売目標（日本国内） 年間60台 約800億円

biograph 世界約400施設で稼働、全世界の42%のマーケットシェア(2004年売り上げベース)

# 実用化への課題

- シングル計数率10数MHzで稼働するデジタル同時計数エレクトロニクスの開発
- 液体キセノンTPC試作器 (1/56モデル, 2.5ℓ)による実証
- 詳細なシミュレーションによる各構成要素の最適化
- 将来への展望：PET-MRI 175nmのVUV (Very Ultra-Violet) シンチレーション光用のAPDなど高磁場中稼働する光検出器の開発

# 企業への期待

- 高速デジタルエレクトロニクス技術（例：ASIC, FPGAなど）の共同開発研究
- キセノンガス回収、精製を含む供給体制の検討
- VUV光および高磁場対応の光検出器の開発
- イメージングソフトウェアとGUIの充実による製品化
- MRI装置とのハイブリット化の共同開発研究
- 日本発先端テクノロジーの完成と国外への進出

# 本技術に関する知的財産権

発明の名称 : TXePET

出願人 : 高エネルギー加速器研究機構  
放射線医学総合研究所

発明者 : 田内利明、真木晶弘、春山富義  
熊田雅之、富谷武浩

# お問い合わせ先

高エネルギー加速器研究機構、

総務部 研究協力課、研究資金・知財係

重田 彰

TEL 029-864-5125

FAX 029-864-4602

email: [kenkyo2@mail.kek.jp](mailto:kenkyo2@mail.kek.jp)